21 世纪全国应用型本科大机械系列实用规划教材

机床数控技术

主　编　杜国臣　王士军
副主编　苗满香　潘旭红
参　编　王万新　李　杰
主　审　韩建海

中国林业出版社
China Forestry Publishing House
北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书是根据“全国机械类专业应用型本科人才培养目标及基本规格”的要求编写的，内容全面、系统，重点突出，力求体现先进性、实用性。全书共 6 章，包括绪论、数控加工工艺分析与程序编制、计算机数控系统、数控机床伺服系统、数控机床机械机构、数控机床的保养与维修。每章均有一定数量的思考题与习题，书后还有《机床数控技术》缩略语英汉对照及常用刀具的切削参数两个附录。

本书可作为应用型本科院校的机械工程及其自动化、机械设计制造及其自动化、机电一体化等专业教材，也可作为成人高等教育的同类专业教材用书，还可作为广大自学者及工程技术人员的自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机床数控技术/杜国臣，王士军主编. —北京：中国林业出版社；北京大学出版社，2006.8
(21 世纪全国应用型本科大机械系列实用规划教材)

ISBN 7-5038-4434-5

Ⅰ. 机… Ⅱ. ①杜… ②王… Ⅲ. 数控机床—高等学校—教材 Ⅳ. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 076958 号

书　　名：机床数控技术
著作责任者：杜国臣　王士军　主编
策 划 编 辑：李昱涛
责 任 编 辑：郭穗娟　杜　娟
标 准 书 号：ISBN 7-5038-4434-5
出　版　者：中国林业出版社(地址：北京市西城区德内大街刘海胡同 7 号　　邮编：100009)
http://www.cfph.com.cn　　E-mail:cfphz@public.bta.net.cn
电话：编辑部 66170109　　营销中心：66187711
北京大学出版社(地址：北京市海淀区成府路 205 号　　邮编：100871)
http://www.pup.cn　　http://www.pup6.com　　E-mail: pup_6@163.com
电话：邮购部 62752015　发行部 62750672　编辑部 62750667　出版部 62754962
印　刷　者：
发　行　者：北京大学出版社　中国林业出版社
经　销　者：新华书店
787 毫米×1092 毫米　16 开本　22 印张　506 千字
2006 年 8 月第 1 版　　2006 年 8 月第 1 次印刷
定　　价：31.00 元

前　言

近年来，机床数控技术的迅速发展带动了机械加工技术的飞速发展，使传统的制造工艺发生了显著的变化，许多企业逐步用数控机床替代了普通机床。这就要求工程技术人员具有自动控制、计算机等方面的知识，要求编程人员熟悉数控机床的机械结构和维护，熟悉数控机床的加工工艺和加工软件等基础知识，同时也要求机械加工技术人员熟悉数控机床的编程知识。这种形势对机械类专业应用型本科学生在数控机床方面的知识与技能也提出了新的要求，即要求学生具备一定的机床数控技术理论知识及应用方面的基本知识和技能。

本书的编写指导思想是使读者通过学习熟悉数控机床的基本理论和知识；熟悉数控机床的机械结构和控制知识；熟悉数控机床的保养与维修；熟悉数控机床的加工工艺和编程方法，并能把学到的知识应用到生产实践中。

本书通俗易懂，涉及面广，内容丰富，可操作性强，适合机械类专业应用型本科教育使用；可作为应用型本科院校的机械工程及其自动化、机械设计制造及其自动化、机电一体化等专业教材，也可作为成人高等教育的同类专业教材用书，还可作为广大自学者及工程技术人员的自学参考书。

本书第 1 章、第 2 章 2.3 节由九江学院潘旭红编写；第 2 章的其他部分、第 1～6 章的思考题与习题、附录 2 由潍坊学院杜国臣编写；第 3 章、附录 1 由山东理工大学王士军编写；第 4 章由郑州航空工业管理学院苗满香编写；第 5 章由德州学院王万新编写；第 6 章由河北建筑工程学院李杰编写。杜国臣、王士军任主编，河南科技大学韩建海教授主审，他对本书提出了不少宝贵的意见和建议，编者在此表示衷心的感谢。

限于编者的水平有限，加之时间仓促，书中不足之处，恳请专家、同仁和广大读者批评指正。

编　者

2006 年 4 月

目　　录

第 1 章　绪论 1

1.1　概述 1

1.1.1　数控机床的定义 1

1.1.2　数控机床的组成及特点 1

1.1.3　数控机床的主要技术参数 3

1.2　数控机床的分类 4

1.2.1　按机械运动轨迹分类 4

1.2.2　按伺服系统的类型分类 5

1.2.3　按功能水平分类 6

1.2.4　按加工方式分类 7

1.3　数控机床的发展与作用 7

1.3.1　数控机床的产生与发展 7

1.3.2　数控机床的发展趋势 9

1.3.3　数控机床在先进制造技术中的作用 11

小结 12

思考题与习题 12

第 2 章　数控加工工艺分析与程序编制 13

2.1　数控加工工艺分析 13

2.1.1　机床的合理选用 13

2.1.2　数控加工工艺性分析 14

2.1.3　加工方法与加工方案的确定 15

2.1.4　工序与工步的划分 19

2.1.5　零件的定位与安装 20

2.1.6　数控加工刀具与工具系统 21

2.1.7　切削用量的确定 29

2.1.8　数控加工路线的确定 30

2.1.9　工艺文件的制定 36

2.2　图形的数学处理 37

2.2.1　基点计算 38

2.2.2　节点计算 38

2.2.3　辅助计算 42

2.3　数控加工的程序编制 44

2.3.1　数控机床编程基础 44

2.3.2　数控车削加工程序编制 49
2.3.3　数控铣削加工程序编制 74
2.3.4　加工中心程序编制 95
2.3.5　自动编程简介 118
小结 122
思考题与习题 122
第 3 章　计算机数控系统 127
3.1　概述 127
3.1.1　CNC 系统的组成 127
3.1.2　CNC 系统的功能和一般工作过程 128
3.2　CNC 系统的硬件结构 132
3.2.1　单 CPU 结构 CNC 系统的硬件结构 132
3.2.2　多 CPU 结构 CNC 系统的硬件结构 133
3.2.3　开放式 CNC 系统 135
3.3　CNC 系统的软件结构 139
3.3.1　CNC 系统的软件结构特点 140
3.3.2　CNC 系统的软件结构模式 143
3.4　计算机数控中的可编程逻辑控制器 146
3.4.1　PLC 及其工作过程 146
3.4.2　PLC 在数控机床上的应用 152
3.5　CNC 系统的输入/输出与通信 160
3.5.1　CNC 装置的输入/输出和通信要求 160
3.5.2　CNC 系统常用外部设备及接口 161
3.6　CNC 装置的插补原理 169
3.6.1　基准脉冲插补 170
3.6.2　数据采样插补 183
3.6.3　刀具补偿功能 187
3.6.4　进给速度与加/减速控制 191
3.7　典型数控系统分析实例 197
3.7.1　概述 197
3.7.2　FANUC 数控系统 6 198
小结 201
思考题与习题 202
第 4 章　数控机床伺服系统 204
4.1　概述 204
4.2　驱动电动机 206
4.2.1　步进电动机 206

4.2.2　伺服电动机 209
4.2.3　直线电动机 215
4.3　数控机床常用检测装置 216
4.3.1　概述 216
4.3.2　旋转编码器 217
4.3.3　旋转变压器 220
4.3.4　感应同步器 222
4.3.5　光栅尺 225
4.3.6　磁栅 228
4.4　位置控制和速度控制 231
4.4.1　位置控制 232
4.4.2　速度控制 237
小结 259
思考题与习题 259
第 5 章　数控机床机械机构 260
5.1　概述 260
5.2　数控机床的主传动系统 262
5.2.1　数控机床主传动系统要求 262
5.2.2　数控机床主轴的调速方法 262
5.2.3　数控机床的主轴部件 266
5.3　数控机床的进给传动系统 270
5.3.1　数控机床进给传动系统要求 270
5.3.2　滚珠丝杠螺母副 271
5.3.3　直线电动机进给系统 276
5.3.4　数控机床的导轨 278
5.4　自动换刀装置 281
5.4.1　数控车床的回转刀架 281
5.4.2　加工中心的自动换刀装置 283
5.5　数控机床的主要辅助装置 287
5.5.1　数控回转工作台 287
5.5.2　分度工作台 289
5.6　数控机床的其他进给传动设计 290
小结 293
思考题与习题 294
第 6 章　数控机床的保养与维修 295
6.1　概述 295
6.2　数控机床的保养 297

6.3 数控机床的故障诊断与维修 302
6.3.1 数控机床的故障诊断概述 302
6.3.2 数控机床常用的故障诊断方法 305
6.3.3 数控系统的故障诊断与维修 310
6.3.4 伺服系统的故障诊断与维修 314
6.4 数控机床的故障分析与维修实例 318
6.4.1 数控车床的故障分析与维修 318
6.4.2 伺服系统的故障分析与维修 325
小结 328
思考题与习题 329
附录 1 《机床数控技术》缩略语英汉对照 330
附录 2 常用刀具的切削参数 332
参考文献 337

第 1 章　绪　　论

教学提示：数控机床是采用数字控制技术对机床各移动部件相对运动进行控制的机床，它是典型的机电一体化产品，是现代制造业的关键设备。计算机、微电子、信息、自动控制、精密检测及机械制造技术的高速发展，加速了数控机床的发展。目前数控机床正朝着高速度、高精度、高工序集中度、高复合化和高可靠性等方向发展，同时其应用范围也越来越广泛。

教学要求：本章主要讲述数控机床的基本概念和特点、主要技术参数、分类以及技术与发展水平等。本章内容是数控机床的基本知识和内容，要求学生理解并掌握数控机床的基本概念、组成与特点以及分类，了解其发展趋势和在先进制造技术中的作用。

1.1　概　　述

1.1.1　数控机床的定义

数控即数字控制(Numerical Control，NC)。数控技术是指用数字信号形成的控制程序对一台或多台机械设备进行控制的一门技术。

数控机床，简单的说，就是采用了数控技术的机床。即将机床的各种动作、工件的形状、尺寸以及机床的其他功能用一些数字代码表示，把这些数字代码通过信息载体输入给数控系统，数控系统经过译码、运算以及处理，发出相应的动作指令，自动地控制机床的刀具与工件的相对运动，从而加工出所需要的工件。

实际上，数控机床就是一种具有数控系统的自动化机床。所以说数控机床是最典型的机电一体化产品。

1.1.2　数控机床的组成及特点

1. 数控机床的组成

数控机床主要由程序介质、数控装置、伺服系统、机床主体四部分组成，如图 1.1 所示。

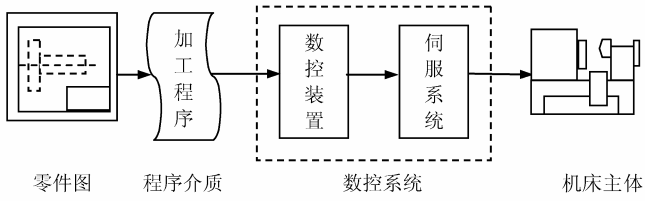


图 1.1　数控机床的组成

其中，程序介质用于记载机床加工零件的全部信息。如零件加工的工艺过程、工艺参数、位移数据、切削速度等。常用的程序介质有磁带、磁盘等。也有一些数控机床采用操作面板上的按钮和键盘将加工程序直接输入或通过串行接口将计算机上编写的加工程序输入到数控系统。在计算机辅助设计与计算机辅助制造(CAD/CAM)集成系统中，加工程序可不需要任何载体而直接输入到数控系统。

数控装置是控制机床运动的中枢系统，它的基本任务是接收程序介质带来的信息，按照规定的控制算法进行插补运算，把它们转换为伺服系统能够接收的指令信号，然后将结果由输出装置送到各坐标控制的伺服系统。

伺服系统由伺服驱动电动机和伺服驱动装置组成，是数控系统的执行部件。它的基本作用是接收数控装置发来的指令脉冲信号，控制机床执行部件的进给速度、方向和位移量，以完成零件的自动加工。

通常数控系统由数控装置和伺服系统两部分组成，各公司的数控产品也是将两者作为一体的。

机床主体也称主机，包括机床的主运动部件、进给运动部件、执行部件和基础部件，如底座、立柱、滑鞍、工作台(刀架)、导轨等。数控机床与普通机床不同，它的主运动和各个坐标轴的进给运动都是由单独的伺服电动机驱动，所以它的传动链短、结构比较简单。为了保证数控机床的快速响应特性，在数控机床上还普遍采用精密滚珠丝杠副和直线滚动导轨副。在加工中心上还配备有刀库和自动换刀装置。同时还有一些良好的配套设施，如冷却、自动排屑、自动润滑、防护和对刀仪等，以利于充分发挥数控机床的功能。此外为了保证数控机床的高精度、高效率和高自动化加工，数控机床的其他机械结构也产生了很大的变化。

2. 数控机床的特点

数控机床与普通机床加工零件的区别，在于数控机床是按照程序自动加工零件，而普通机床由工人手工操作来加工零件。在数控机床上只要改变控制机床动作的程序，就可以达到加工不同零件的目的。由于是一种程序控制过程，数控机床相应形成了以下几个特点。

(1) 采用数控机床可以提高零件的加工精度、稳定产品的质量。因为数控机床按照预定的加工程序进行加工，加工过程中消除了操作者人为的操作误差，所以零件加工的一致性好，而且加工精度还可以利用软件来进行校正补偿，因此可以获得比机床本身所能达到的精度还要高的加工精度及重复定位精度。

(2) 数控机床可以完成普通机床难以完成或根本不能加工的具有复杂曲面的零件的加工。因此它在航空航天、造船、模具等加工业中得到广泛应用。

(3) 采用数控机床比普通机床可以提高生产效率 2～3 倍，尤其是对某些复杂零件的加工，生产效率可以提高十几倍甚至几十倍。

(4) 可以实现一机多用。一些数控机床将几种普通机床功能合一，加上刀库与自动换刀装置构成加工中心，如果能配置数控转台或分度转台，则可以实现一次安装、多面加工。

(5) 采用数控机床有利于向计算机控制与管理生产方面发展，为实现生产过程自动化创造了条件。

1.1.3　数控机床的主要技术参数

1. 主要规格尺寸

数控车床的主要规格尺寸有床身上最大工件回转直径、刀架上最大工件回转直径、加工最大工件长度、最大车削直径等。数控铣床、加工中心的主要规格尺寸有工作台面尺寸、工作台 T 形槽、工作行程等。

2. 主轴系统

数控机床主轴采用直流或交流电动机驱动，具有较宽的调速范围和较高的回转精度，主轴本身的刚度与抗振性比较好。现在数控机床的主轴转速普遍能达到 5000r/min～10000r/min 甚至更高，对提高加工质量和各种小孔加工极为有利；主轴转速可以通过操作面板上的转速倍率开关直接改变。

3. 进给系统

进给系统有进给速度范围、快速(空行程)速度范围、运动分辨率(最小位移增量)、定位精度和螺距范围等主要技术参数。

(1) 进给速度。是影响加工质量、生产效率和刀具寿命的主要因素，直接受到数控装置运算速度、机床动特性和工艺系统刚度的限制。其中，最大进给速度为加工的最大速度，最大快进速度为不加工时移动的最快速度。进给速度可通过操作面板上的进给倍率开关调整。

(2) 脉冲当量(分辨率)。是指两个相邻分散细节之间可以分辨的最小间隔，是重要的精度指标。其有两个方面的内容，一是机床坐标轴可达到的控制精度(可以控制的最小位移增量)，表示数控装置每发出一个脉冲信号时坐标轴移动的距离，称为实际脉冲当量或外部脉冲当量；二是内部运算的最小单位，称之为内部脉冲当量，一般内部脉冲当量比实际脉冲当量设置的要小，目的是在运算过程中不损失精度。数控系统在输出位移量之前，自动将内部脉冲当量转换成外部脉冲当量。

实际脉冲当量决定于丝杠螺距、电动机每转脉冲数及机械传动链的传动比，其计算公式为

$$\text{实际脉冲当量} = \text{传动比} \times \frac{\text{丝杠螺距}}{\text{电动机每转脉冲数}}$$

脉冲当量是设计数控机床的原始数据之一，其数值的大小决定数控机床的加工精度和表面质量。目前数控机床的脉冲当量一般为 0.001mm，精密或超精密数控机床的脉冲当量为 0.1μm。脉冲当量越小，数控机床的加工精度和加工表面质量越高。

(3) 定位精度和重复定位精度。定位精度是指数控机床工作台等移动部件在确定的终点所达到的实际位置的精度。因此移动部件实际位置与理想位置之间的误差称为定位误差。定位误差包括伺服系统误差、检测系统误差、进给系统误差和移动部件导轨的几何误差等。定位误差将直接影响零件加工的位置精度。

重复定位精度是指在同一台数控机床上，应用相同程序、相同代码加工一批零件，所得到的连续结果的一致程度。重复定位精度受伺服系统特性、进给系统的间隙与刚性以及摩擦特性等因素的影响。一般情况下，重复定位精度是成正态分布的偶然性误差，它影响

一批零件加工的一致性，是一项非常重要的性能指标。对于中小型数控机床，定位精度普遍可达±0.01mm，重复定位精度为±0.005mm。

4. 刀具系统

数控车床刀具系统的主要技术参数包括刀架工位数、工具孔直径、刀杆尺寸、换刀时间、重复定位精度等各项内容。加工中心刀库容量与换刀时间直接影响其生产率，通常中小型加工中心的刀库容量为 16～60 把，大型加工中心可达 100 把以上。

换刀时间是指自动换刀系统将主轴上的刀具与刀库中刀具进行交换所需要的时间。

1.2　数控机床的分类

数控机床种类很多，规格不一，人们从不同的角度对其进行了分类。

1.2.1　按机械运动轨迹分类

数控机床按其刀具与工件相对运动的方式，可以分为点位控制、直线控制和轮廓控制。

1. 点位控制数控机床

这类数控机床的特点是要求保证点与点之间的准确定位。它只能控制行程的终点坐标值，对于两点之间的运动轨迹不作严格要求。对于点位控制的孔加工机床只要求获得精确的孔系坐标，在刀具运动过程中，不进行切削加工。如图 1.2 所示为点位控制钻孔加工示意图。

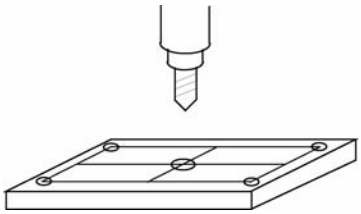


图 1.2　点位控制钻孔加工示意图

此类数控机床有数控钻床、数控镗床、数控冲床、三坐标测量机、印制电路板钻床等。

2. 直线控制数控机床

这类数控机床的特点是不仅要控制行程的终点坐标值，还要保证在两点之间机床的刀具走的是一条直线，而且在走直线的过程中往往要进行切削。如图 1.3 所示为直线控制切削加工示意图。

此类数控机床有数控车床、数控铣床、数控磨床、数控镗床等。

现代组合机床采用数控技术，驱动各种动力头、多轴箱轴向进给钻、镗、铣等加工，也算是一种直线控制数控机床。直线控制也称为单轴数控。

3. 轮廓控制数控机床

这类数控机床的特点是不仅要控制行程的终点坐标值，还要保证两点之间的轨迹要按一定的曲线进行。即这种系统必须能够对两个或两个以上坐标方向的同时运动进行严格的连续控制。如图 1.4 所示为轮廓控制铣削加工示意图。

现代数控机床绝大部分都具有两坐标或两坐标以上联动的功能，除此之外还具有刀具半径补偿、刀具长度补偿、机床轴向运动误差补偿、丝杠螺距误差补偿、齿侧间隙误差补偿等一系列功能。

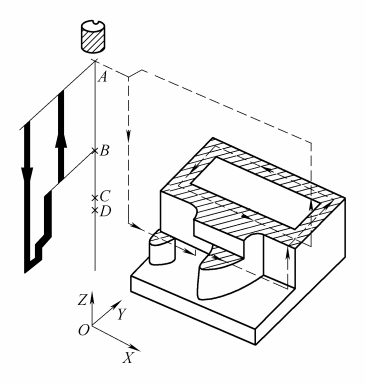


图 1.3　直线控制切削加工示意图

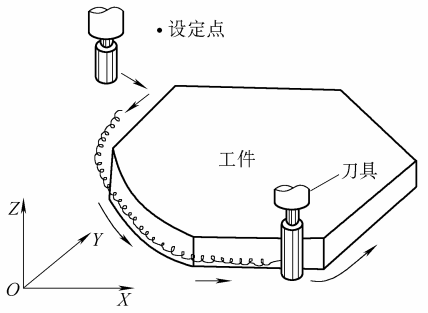


图 1.4　轮廓控制铣削加工示意图

1.2.2　按伺服系统的类型分类

1. 开环伺服系统数控机床

这类机床没有来自位置传感器的反馈信号，数控系统将零件程序处理后，输出数字指令信号给伺服系统，驱动机床运动。例如采用步进电动机的伺服系统就是一个开环伺服系统，如图 1.5 所示。

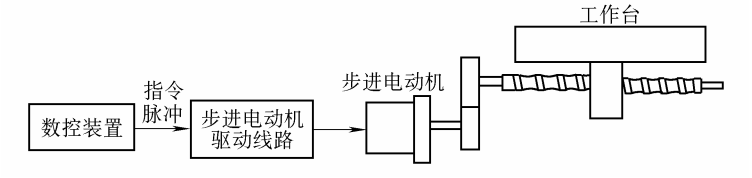


图 1.5　开环伺服系统

这类机床的优点是结构简单、较为经济、维护维修方便，但是速度及精度低，适于精度要求不高的中小型机床，多用于对旧机床的数控化改造。

2. 闭环伺服系统数控机床

这类机床上装有位置检测装置，直接对工作台的位移量进行测量。数控装置发出进给信号后，经伺服驱动使工作台移动；位置检测装置检测出工作台的实际位移，并反馈到输入端，与指令信号进行比较，驱使工作台向其差值减小的方向运动，直到差值等于零为止。图 1.6 所示为闭环伺服系统。

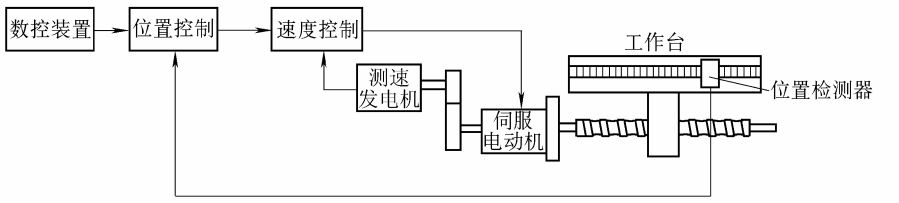


图 1.6　闭环伺服系统

这类数控机床可以消除由于传动部件制造中存在的精度误差给工件加工带来的影响，从而得到很高的精度。但是由于很多机械传动环节包括在闭环控制的环路内，各部件的摩擦特性、刚性以及间隙等都是非线性量，直接影响到伺服系统的调节参数。因此，闭环伺服系统的设计和调整都非常困难。

闭环伺服系统的优点是精度高。但其系统设计和调整困难、结构复杂、成本高，主要用于一些精度要求很高的镗铣床、超精密车床、超精密铣床、加工中心等。

3. 半闭环伺服系统数控机床

这类数控机床采用安装在进给丝杠或电动机端头上的转角测量元件测量丝杠旋转角度，来间接获得位置反馈信息。图 1.7 所示为半闭环伺服系统。

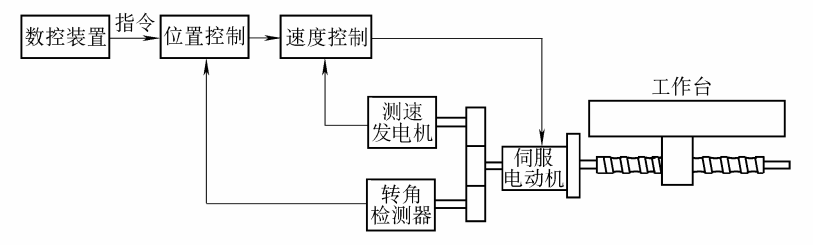


图 1.7　半闭环伺服系统

这种系统的闭环环路内不包括丝杠、螺母副及工作台，因此可以获得稳定的控制特性。而且由于采用了高分辨率的测量元件，可以获得比较满意的精度及速度。大多数数控机床采用半闭环伺服系统，如数控车床、数控铣床、加工中心等。

1.2.3　按功能水平分类

数控机床按功能水平分为高、中、低档三类。数控机床功能水平的高低主要由它们的主要技术参数、功能指标和关键部件的功能水平等决定，主要包括以下内容。

1. 中央处理单元(CPU)

低档数控机床一般采用 8 位 CPU；而中、高档数控机床已经由 16 位 CPU，发展到 32 位或 64 位 CPU，并用具有精简指令集(RISC)的 CPU。

2. 分辨率和进给速度

低档数控机床的分辨率为 10 μm，进给速度为 6m/min～15m/min；中档数控机床的分辨率为 1 μm，进给速度为 12m/min～24m/min；高档数控机床的分辨率为 0.1 μm 或更小，进给速度为 24m/min～100m/min，或更高。

3. 多轴联动功能

低档数控机床多为 2～3 轴联动；中、高档数控机床则都是 3～5 轴联动，或更多。

4. 显示功能

低档数控机床一般只有简单的数码显示或简单的阴极射线管(CRT)字符显示功能；中档数控机床有较齐全的 CRT 显示功能，如字符、图形、人机对话、自诊断等功能显示；高档

数控机床还有三维动态图形显示功能。

5. 通信功能

低档数控机床无通信功能；中档数控机床有 RS232C 或直接数控(DNC，也称群控)等接口。高档数控机床有制造自动化协议(MAP)等高性能通信接口，且具有联网功能。

数控机床按功能水平的另一种分类是将数控机床分为经济(简易)型、普及(全功能)型和高档型。全功能型机床并不追求过多功能，以实用为准，也称为标准型。经济型数控机床是根据实际机床的使用要求制造的，并合理地简化了系统，降低了价格。在我国，经济型数控机床是指装备了功能简单、价格低、使用方便的低档数控系统的机床，主要用于车床、线切割机床及其他普通机床的数控化改造等。

1.2.4　按加工方式分类

1. 金属切削类数控机床

如数控车床、数控钻床、数控磨床、数控铣床、数控齿轮加工机床、加工中心、虚拟轴加工机床等。

2. 金属成型类数控机床

如数控折弯机、数控弯管机、数控冲床、数控回转头压力机等。

3. 数控特种加工机床

如数控线切割机床、数控电火花成型机、数控激光切割机、数控火焰切割机等。

1.3　数控机床的发展与作用

1.3.1　数控机床的产生与发展

科学技术和社会生产的不断发展，对机械产品的质量和生产率提出了越来越高的要求。机械加工工艺过程的自动化是实现上述要求的最重要措施之一。它不仅能够提高产品的质量和生产效率、降低生产成本，还能够大大改善工人的劳动条件。许多生产企业(例如汽车、拖拉机、家用电器等制造厂)已经采用了自动机床、组合机床和专用自动生产线。采用这种高度自动化和高效率的设备，尽管需要很大的初始投资以及较长的生产准备时间，但在大批量的生产条件下，由于分摊在每一个工件上的费用很少，经济效益仍然是非常显著的。

但是，在机械制造工业中并不是所有的产品零件都具有很大的批量，单件与小批生产的零件(批量在 10～100 件)占机械加工总量的 80%以上。尤其是在造船、航空航天、机床、重型机械以及国防部门，其生产特点是加工批量小、改型频繁、零件的形状复杂而且精度要求高，采用专用化程度很高的自动化机床加工这类零件就显得很不合适，因为生产过程中需要经常改装与调整设备，对于专用生产线来说，这种改装与调整甚至是不可能实现的。

为了解决这些问题，满足多品种、小批量的自动化生产，迫切需要一种灵活的、通用的、能够适应产品频繁变化的柔性自动化机床。数控机床就是在这样的背景下产生与发展起来的。它极其有效地解决了上述一系列矛盾，为单件、小批量生产的精密复杂零件提供

了自动化加工手段。

随着电子技术的发展，1946 年世界上第一台电子计算机问世，由此掀开了信息自动化的新篇章。1948 年美国北密支安的一个小型飞机工业承包商帕森斯公司(Parsons Co.)在制造飞机的框架及直升飞机的转动机翼时，提出了采用电子计算机对加工轨迹进行控制和数据处理的设想，后来得到美国空军的支持，并与美国麻省理工学院(MIT)合作，于 1952 年研制出第一台三坐标数控铣床，用于加工直升飞机叶片轮廓检查用样板。这是一台采用专用计算机进行运算与控制的直线插补轮廓控制数控铣床，专用计算机采用电子管器件，逻辑运算与控制采用硬件连接的电路。

1955 年，该类机床进入实用化阶段，在复杂曲面的加工中发挥了重要作用。这时数控机床的控制系统(专用电子计算机)采用了电子管，其体积庞大，功耗高。此种机床仅在一些军事部门中用于加工普通机床难以加工的形状复杂的零件。这是第一代数控系统。

1959 年晶体管出现，电子计算机应用了晶体管器件和印制电路板，从而使机床数控系统跨入了第二代。

1965 年，数控装置开始采用小规模集成电路，使数控装置的体积减小、功耗降低及可靠性提高，但它仍然是硬件逻辑数控系统。数控系统发展到第三代。

以上三代，都属于硬件逻辑数控系统，称为 NC 系统。由于点位控制的数控系统比轮廓控制的数控系统要简单得多，在该阶段，点位控制的数控机床得到大发展。有资料统计，到 1966 年，世界上实际使用的 6000 台数控机床中，85%是点位控制的数控机床。

1970 年，美国芝加哥国际机床展览会首次展出用小型计算机控制的数控机床，这是世界上第一台计算机数字控制(CNC)的数控机床。数控系统进入第四代。

20 世纪 70 年代初，随着微处理机的出现，美、日、德等国都迅速推出了以微处理机为核心的数控系统，这样组成的数控系统，称为第五代数控系统，即 MNC 系统。在近 20 多年内，生产中实际使用的数控系统大多为第五代数控系统，其性能和可靠性随着技术的发展得到了根本性的提高。

从 20 世纪 90 年代开始，微电子技术和计算机技术的发展突飞猛进，个人计算机(PC)的发展尤为突出，无论是其软、硬件还是外围器件，都得到了迅速的发展，计算机采用的芯片集成化程度越来越高，功能越来越强，而成本却越来越低，原来在大、中型机上才能实现的功能现在微型机上就可以实现。美国首先推出了基于个人计算机的数控系统，即 PCNC 系统，它被划入所谓的第六代数控系统。

目前，世界主要工业发达国家的数控机床已进入批量生产阶段，如美国、日本、德国、法国等，其中日本发展最快。1977 年时，日本年产数控机床 5400 多台，到 1985 年，日本产数控机床约为 50000 台，数控化率约为 70%，居世界第一位。

我国 1958 年试制成功第一台电子管数控机床，如图 1.8 所示。

我国从 1965 年开始研制晶体管数控系统，到 20 世纪 70 年代初曾研究出数控劈锥铣床、非圆插齿机、数控立铣床、数控车床、数控镗床、数控磨床和加工中心等。这一时期国产数控系统的稳定性、可靠性问题尚未得到很好地解决，因而也限制了国产数控机床的发展。而数控线切割机床由于其结构简单、价格低廉、使用方便，得到了较快的发展，据资料统计，1973～1979 年期间，我国共生产数控机床 4108 台，而其中数控线切割机床就占了 86%左右。

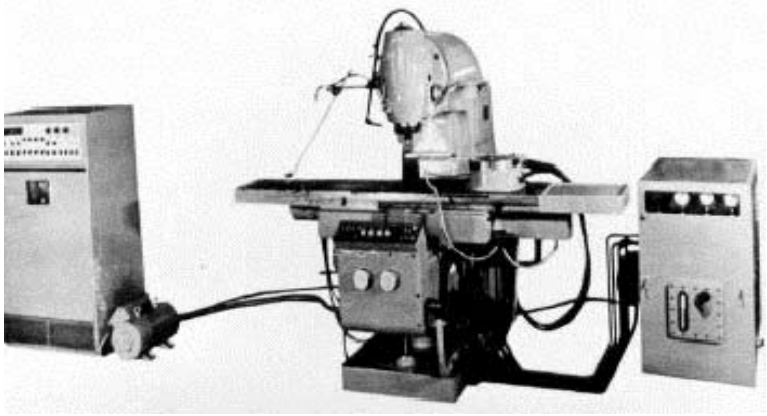


图 1.8　我国第一台电子管数控机床

20 世纪 80 年代初随着改革开放政策的实施，我国从国外引进先进技术，并在消化、吸收国外先进技术的基础上，进行了大量的开发工作，进而推动了我国数控机床新的发展高潮，使我国数控机床在品种上、性能上以及水平上均有了新的飞跃。2002 年，我国机床市场消费额达 59 亿美元，成为世界第一。

目前，在数控领域中，我国和先进的工业国家之间还存在一定的差距。我国数控机床的生产还远远满足不了国内生产的需要，更不能满足出口的要求。在现有数控机床中，还有相当一部分有待于进一步提高其利用率。加入 WTO 后，我国将成为世界制造中心，各行各业对数控机床的需要将会很大，数控机床也必然在国家建设中发挥更大的作用。

1.3.2　数控机床的发展趋势

随着计算机、微电子、信息、自动控制、精密检测及机械制造技术的高速发展，机床数控技术有了长足的进步。近几年一些相关技术的发展，如刀具及新材料的发展，主轴伺服和进给伺服、超高速切削等技术的发展，以及对机械产品质量的要求越来越高等，加速了数控机床的发展。目前数控机床正朝着高速度、高精度、高工序集中度、高复合化和高可靠性等方向发展。世界数控技术及其装备发展趋势主要体现在以下几个方面。

1. 高速高效高精度

高生产率。由于数控装置及伺服系统功能的改进，主轴转速和进给速度大大提高，减少了切削时间和非切削时间。加工中心的进给速度已达到 80m/min～120m/min，进给加速度达 9.8m/s^2～19.6m/s^2，换刀时间小于 1s。

高加工精度。以前汽车零件精度的数量级通常为 10μm，对精密零件要求为 1μm，随着精密产品的出现，对精度要求提高到 0.1μm，有些零件甚至已达到 0.01μm，高精密零件要求提高机床加工精度，包括采用温度补偿等。

微机电加工，其加工零件尺寸大小一般在 1mm 以下，表面粗糙度为纳米数量级，要求数控系统能直接控制纳米机床。

2. 柔性化

柔性化包括两个方面的柔性：一是数控系统本身的柔性，数控系统采用模块化设计，

功能覆盖面大，便于不同用户的需求；二是 DNC 系统的柔性，同一 DNC 系统能够依据不同生产流程的要求，使物料流和信息流自动进行动态调整，从而最大限度地发挥 DNC 系统的效能。

3. 工艺复合化和多轴化

数控机床的工艺复合化，是指工件在一台机床上装夹后，通过自动换刀、旋转主轴头或旋转工作台等各种措施，完成多工序、多表面的复合加工。已经出现了集钻、镗、铣功能于一身的数控机床，可完成钻、镗、铣、扩孔、铰孔、攻螺纹等多工序的复合数控加工中心，以及车削加工中心，钻削、磨削加工中心，电火花加工中心等。此外数控技术的进步也提供了多轴控制和多轴联动控制功能。

4. 实时智能化

早期的实时系统通常针对相对简单的理想环境，其作用是如何调度任务，以确保任务在规定期限内完成。而人工智能，则试图用计算模型实现人类的各种智能行为。科学发展到今天，实时系统与人工智能已实现相互结合，人工智能正向着具有实时响应的更加复杂的应用领域发展，由此产生了实时智能控制这一新的领域。在数控技术领域，实时智能控制的研究和应用正沿着几个主要分支发展，如自适应控制、模糊控制、神经网络控制、专家控制、学习控制、前馈控制等。例如，在数控系统中配置编程专家系统、故障诊断专家系统、参数自动设定和刀具自动管理及补偿等自适应调节系统；在高速加工时的综合运动控制中引入提前预测和预算功能、动态前馈功能；在压力、温度、位置、速度控制等方面采用模糊控制，使数控系统的控制性能大大提高，从而达到最佳控制的目的。

5. 结构新型化

20 世纪 90 年代一种完全不同于原来数控机床结构的新型数控机床被开发成功。这种新型数控机床被称为“6 条腿”的加工中心或称虚拟轴机床(有的还称为并联机床)，它能在没有任何导轨和滑台的情况下，采用能够伸缩的“6 条腿”(伺服轴)支撑并联，并与安装主轴头的上平台和安装工件的下平台相连。它可实现多坐标联动加工，其控制系统结构复杂，加工精度、加工效率较普通加工中心高 2～10 倍。这种数控机床的出现将给数控机床技术带来重大变革和创新。

6. 编程技术自动化

随着数控加工技术的迅速发展，设备类型的增多，零件品种的增加以及零件形状的日益复杂，迫切需要速度快、精度高的编程，以便于对加工过程的直观检查。为弥补手工编程和 NC 语言编程的不足，近年来开发出多种自动编程系统，如图形交互式编程系统、数字化自动编程系统、会话式自动编程系统、语音数控编程系统等，其中图形交互式编程系统的应用越来越广泛。图形交互式编程系统是以计算机辅助设计(CAD)软件为基础，首先形成零件的图形文件，然后再调用数控编程模块，自动编制加工程序，同时可动态显示刀具的加工轨迹。其特点是速度快、精度高、直观性好、使用简便，已成为国内外先进的 CAD/CAM 软件所采用的数控编程方法。目前常用的图形交互式软件有 Master CAM、Cimatron、Pro/E、UG、CAXA、Solid Works、CATIA 等。

7. 集成化

数控系统采用高度集成化芯片，可提高数控系统的集成度和软、硬件运行速度，应用平板显示技术可提高显示器性能。平板显示器(FPD)具有科技含量高、质量小、体积小、功耗低、便于携带等优点，可实现超大规模显示，成为与 CRT 显示器抗衡的新兴显示器，是 21 世纪显示器主流。它应用先进封装和互连技术，将半导体和表面安装技术融于一体,通过提高集成电路密度，减小互连长度和数量来降低产品价格、改进性能、减小组件尺寸、提高系统的可靠性。

8. 开放式闭环控制模式

采用通用计算机组成的总线式、模块化、开放、嵌入式体系结构，便于裁减、扩展和升级，可组成不同档次、不同类型、不同集成程度的数控系统。闭环控制模式是针对传统数控系统仅有的专用型封闭式开环控制模式提出的。由于制造过程是一个有多变量控制和加工工艺综合作用的复杂过程，包括诸如加工尺寸、形状、振动、噪声、温度和热变形等各种变化因素，因此，要实现加工过程的多目标优化，必须采用多变量的闭环控制，在实时加工过程中动态调整加工过程变量。在加工过程中采用开放式通用型实时动态全闭环控制模式，易于将计算机实时智能技术、多媒体技术、网络技术、CAD/CAM、伺服控制、自适应控制、动态数据管理及动态刀具补偿、动态仿真等高新技术融于一体，构成严密的制造过程闭环控制体系，从而实现集成化、智能化、网络化。

1.3.3　数控机床在先进制造技术中的作用

自从 20 世纪中期，人们将计算机技术引用到控制机床加工飞机机翼样板的复杂曲线中以来，数控技术在机床控制方面取得了广泛、深入的发展，开始是数控铣床，接着是数控车床、数控钻床、数控镗床、数控磨床、数控线切割机床，之后是加工中心、车削中心、数控冲床、数控弯管机、数控折弯机、板材加工中心、数控齿轮机床、数控激光加工机床、数控火焰切割机等。这些都成为现代制造业的关键设备，是它们保证了现代制造业向高精度、高速度、高效率、高柔性化的方向发展。

由于数控机床的出现，带动了 CAD/CAM 技术向实用化、工程化发展，特别是计算机技术的迅速发展，推动 CAD/CAM 技术向更高层次和更高水平发展，而且进一步发展了计算机辅助工艺设计(CAPP)数据库、集成制造生产系统相关信息的自动生成、自动处理、自动传输。可以说数控技术既是联系 CAD/CAM 的纽带，也是进一步通向集成化 CAD/CAM 的桥梁。

20 世纪末，由于微电子技术的飞快发展，数控系统的性能有了极大的提高，功能不断丰富，满足了数控机床自动交换刀具、自动交换工件(包括交换工作台，工作台立、卧式转换等)的需要；而且还进一步满足了在数控机床之间，增加自动输送工件的托盘站(APC)或机器人传输工件，构成柔性制造单元(Flexible Manufacturing Cell，FMC)的需要；以及实现了由多台数控机床(含加工中心、车削中心)传送带、自动制导车辆(Automated Guide Vehicles，AGV)、工业机器人(robot)以及专用的起吊运送机等组成的柔性制造系统(FMS)的控制。此外，还有由加工中心、CNC 机床、专用机床或数控专用机床组成的柔性制造线(Flexible Manufacturing Line，FML)；或多条 FMS 配备自动化立体仓库连接起来的柔性制

造工厂(Flexible Manufacturing Factory，FMF)。

随着信息技术、网络技术、自动化技术的发展，在数控技术(机械制造业中则体现在数控机床上)的基础上，人们将以往企业中相互独立的工程设计、生产制造及经营管理等过程，在计算机及其软件的支撑下，构成了一个覆盖整个企业的完整而有机的、以实现全局动态最优化、总体高效益、高柔性，并进而赢得竞争全胜的计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System，CIMS)。

小　　结

数控机床涉及的内容和知识比较多，本章仅对数控机床的基本概念、分类及其发展与作用做了概述。

(1) 数控机床的基本概念。介绍了数控机床的概念、组成及特点、主要技术参数。

(2) 数控机床的分类。按机械运动轨迹、伺服系统的类型、功能水平及加工方式四方面对数控机床进行了分类。

(3) 数控机床的发展与作用。介绍了数控机床的产生与发展、发展趋势、在先进制造技术中的作用。

思考题与习题

1. 什么是数控机床？
2. 数控机床由哪几部分组成？各组成部分的主要作用是什么？
3. 数控机床按运动轨迹的特点可分为几类？它们的特点是什么？
4. 什么是开环、闭环、半闭环伺服系统数控机床？它们之间有什么区别？
5. 数控机床的主要技术参数有哪些？
6. 解释下列名词术语：脉冲当量、定位精度、重复定位精度、FMC、FMS、CIMS。
7. 数控技术的主要发展方向是什么？
8. 请查阅资料了解数控技术最近有哪些新发展。

第 2 章　数控加工工艺分析与程序编制

教学提示：数控机床是严格按照从外部输入的程序来自动地对被加工工件进行加工的。为了与数控系统的内部程序(系统软件)相区别，把从外部输入的直接用于加工的程序称为数控加工程序，简称为数控程序。理想的数控程序不仅应该保证能加工出符合图样要求的合格零件，还应该使数控机床的功能得到合理的应用与充分的发挥，以使数控机床能安全、可靠、高效的工作。数控加工工艺分析和零件图形的数学处理(又称数值计算)是数控编程前的主要准备工作，无论对于手工编程还是自动编程都是必不可少的。

教学要求：了解数控加工工艺分析与图形数学处理的基本概念和基本内容，数控编程方法、内容和步骤。重点让学生了解数控加工工艺分析与图形数学处理的方法，数控加工工艺文件的制定，数控车床、数控铣床和加工中心的手工编程知识。当在生产实际中遇到具体问题时，应根据数控机床的编程知识，合理而又灵活地去解决实际问题。

2.1　数控加工工艺分析

无论是手工编程还是自动编程，在编程以前都要对所加工的零件进行工艺分析。程序编制人员进行工艺分析时，要有机床说明书、编程手册、切削用量表、标准工具、夹具手册等资料，根据被加工工件的材料、轮廓形状、加工精度等选用合适的机床，制定加工方案，确定零件的加工顺序，各工序所用刀具、夹具和切削用量等，以求高效率地加工出合格的零件。

2.1.1　机床的合理选用

根据国内外数控机床技术应用实践，数控机床加工的适用范围可用图 2.1 和图 2.2 定性分析。

图 2.1 表明了随零件的复杂程度和生产批量的不同，三种机床适用范围的变化。当零

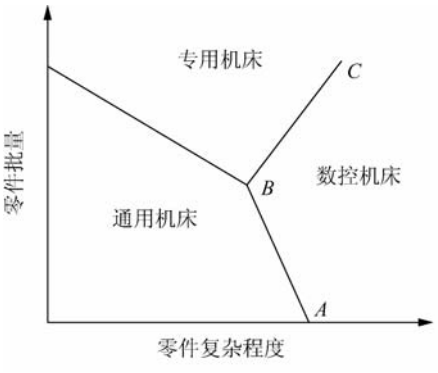


图 2.1　零件复杂程度与零件批量的关系

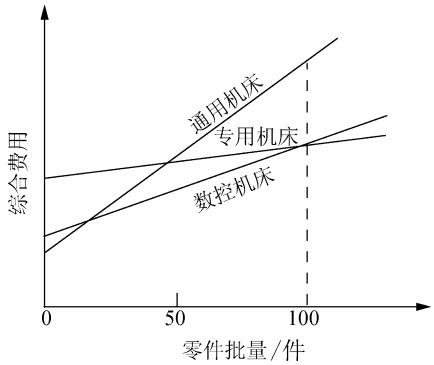


图 2.2　零件批量与综合费用的关系

件不太复杂、生产批量不太大时，宜采用通用机床；当复杂程度增大时，数控机床就显得更为适用了。图 2.2 是随生产批量的不同，采用三种机床加工时，综合费用的比较。由图可知，在多品种、小批量(100 件以下)的生产情况下，使用数控机床可获得较好的经济效益。零件批量的增大，对选用数控机床是不利的。

综上分析说明，数控机床通常最适合加工具有以下特点的零件：

(1) 多品种、小批量生产的零件或新产品试制中的零件。

(2) 轮廓形状复杂，对加工精度要求较高的零件。

(3) 用普通机床加工时，需要有昂贵的工艺装备(工具、夹具和模具)的零件。

(4) 需要多次改型的零件。

(5) 价格昂贵，加工中不允许报废的关键零件。

(6) 需要最短生产周期的急需零件。

数控加工的缺点是设备费用较高。尽管如此，随着高新技术的迅速发展，数控机床的普及和人们对数控机床认识上的提高，其应用范围必将日益扩大。

2.1.2　数控加工工艺性分析

数控加工工艺性分析涉及面很广，在此仅从数控加工的可能性和方便性两方面加以分析。

1. 零件图的尺寸标注应符合编程方便的原则

(1) 零件图上的尺寸标注方法应适应数控加工的特点。在数控加工零件图上，应以同一基准标注尺寸或直接给出坐标尺寸。这种标注方法既便于编程，也便于尺寸之间的相互协调，在保证设计基准、工艺基准、检测基准与编程原点设置的一致性方面带来很大的方便。由于零件设计人员一般在尺寸标注中较多地考虑装配等使用特性方面，而不得不采用局部分散的标注方法，这样就会给工序安排与数控加工带来许多不便。由于数控加工精度和重复定位精度都很高，不会因产生较大的积累误差而破坏使用特性，因此可将局部的分散标注法改为同一基准标注尺寸或直接给出坐标尺寸的标注法。

(2) 构成零件轮廓的几何元素的条件应充分。在手工编程时，要计算每个节点坐标。在自动编程时，要对构成零件轮廓的所有几何元素进行定义。因此在分析零件图时，要分析几何元素的给定条件是否充分。如圆弧与直线、圆弧与圆弧在图样上相切，但根据图上给出的尺寸，在计算相切条件时，变成了相交或相离状态。由于构成零件几何元素条件的不充分，编程便无法下手。遇到这种情况时，应与零件设计者协商解决。

2. 零件的结构工艺性应符合数控加工的特点

(1) 零件的内腔和外形最好采用统一的几何类型和尺寸。这样可以减少刀具规格和换刀次数，使编程方便，生产效率提高。

(2) 内槽圆角的大小决定着刀具直径的大小，因而内槽圆角半径不应过小。如图 2.3 所示，零件工艺性的好坏与被加工轮廓的高低、转接圆弧半径的大小有关，图(b)与图(a)相比，转接圆弧半径大，可以采用较大直径的铣刀来加工。加工平面时，进给次数也相应减少，表面加工质量也会好一些，所以工艺性较好。通常 $R<0.2H$(H 为被加工零件轮廓面的最大高度)时，可以判定零件的该部位工艺性不好。

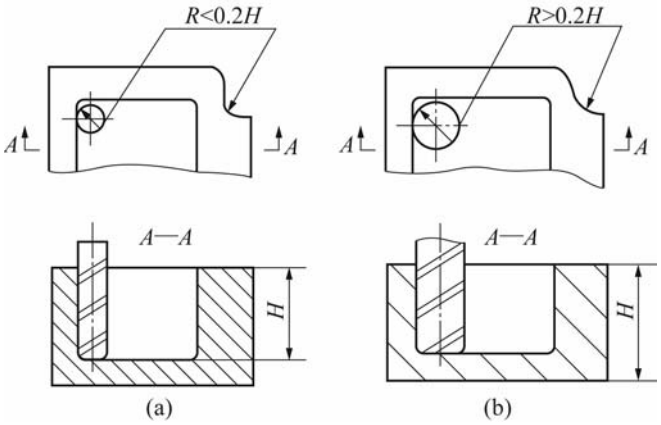


图 2.3　数控加工工艺性对比

(3) 零件铣削底平面时，槽底圆角半径 r 不应过大。如图 2.4 所示，圆角半径 r 越大，铣刀端刃铣削平面的能力越差，效率也越低。当 r 大到一定程度时，甚至必须用球头刀加工，这是应该尽量避免的。因为铣刀与铣削平面接触的最大直径 $d=D-2r$(D 为铣刀直径)。当 D 一定时，r 越大，铣刀端刃铣削平面的面积越小，加工表面的能力越差，工艺性也越差。

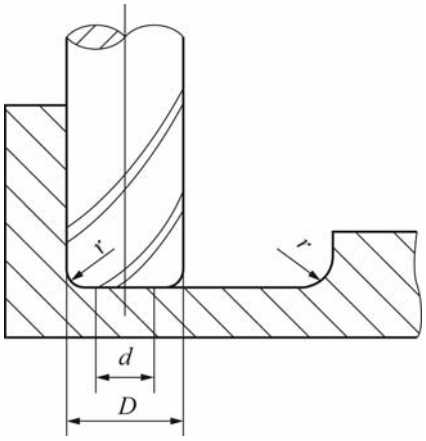


图 2.4　零件底面圆弧对加工工艺的影响

(4) 应采用统一的基准定位。在数控加工中，若没有统一的基准定位，就会因工件的重新安装而导致加工后的两个面上轮廓位置及尺寸不协调。因此要避免上述问题的产生，保证两次装夹加工后其相对位置的准确性，应采用统一的基准定位。

零件上最好有合适的孔作为定位基准孔，若没有，则要设置工艺孔作为定位基准孔(如在毛坯上增加工艺凸耳或在后续工序要铣去的余量上设置工艺孔)。若无法制造出工艺孔时，最起码也要用经过精加工的表面作为统一基准，以减少两次装夹产生的误差。

此外，还应分析零件所要求的加工精度、尺寸公差等是否可以得到保证，有无引起矛盾的多余尺寸或影响工序安排的封闭尺寸等。

2.1.3　加工方法与加工方案的确定

1. 加工方法的选择

加工方法的选择原则是保证加工表面的加工精度和表面粗糙度的要求。由于获得同一级精度及表面粗糙度的加工方法许多，因而在实际选择时，要结合零件的形状、尺寸大小和热处理要求等全面考虑。例如，对于 IT7 级精度的孔采用镗削、铰削、磨削等加工方法均可达到精度要求，但箱体上的孔一般采用镗削或铰削，而不宜采用磨削。一般小尺寸的箱体孔选择铰孔，当孔径较大时则应选择镗孔。此外，还应考虑生产率和经济性的要求，

以及工厂的生产设备等实际情况。常用加工方法的经济加工精度及表面粗糙度可查阅有关工艺手册。

2. 加工方案的确定

零件上比较精确表面的加工，常常是通过粗加工、半精加工和精加工逐步达到的。对这些表面仅仅根据质量要求选择相应的最终加工方法是不够的，还应正确的确定从毛坯到最终成形的加工方案。

确定加工方案时，首先应根据主要表面的精度和表面粗糙度的要求，初步确定为达到这些要求所需要的加工方法。例如，对于孔径不大的 IT7 级精度的孔，若最终加工方法取精铰，则精铰孔前通常要经过钻孔、扩孔和粗铰孔等加工。表 2-1～表 2-3 列出了钻、镗、铰等几种加工方法所能达到的公差等级及其工序加工余量，仅供参考。

表 2-1　H13～H7 孔加工方式(孔长度≤直径的 5 倍)　　(单位：mm)

孔的精度	孔的毛坯性质	
	在实体材料上加工孔	预先铸出或热冲出的孔
H13、H12	一次钻孔	用扩孔钻钻孔或镗刀镗孔
H11	孔径≤10：一次钻孔 孔径>10～30：钻孔及扩孔 孔径>30～80：钻孔、扩孔或钻、扩、镗孔	孔径≤80：粗扩、精扩或单用镗刀粗镗、精镗或根据余量一次镗孔或扩孔
H10 H9	孔径≤10：钻孔及铰孔 孔径>10～30：钻孔、扩孔及铰孔 孔径>30～80：钻孔、扩孔、铰孔或钻、镗、铰(或镗)孔	孔径≤80：用镗刀粗镗(一次或二次，根据余量而定)、铰孔(或精镗)
H8 H7	孔径≤10：钻孔、扩孔、铰孔 孔径>10～30：钻孔、扩孔及一次或两次铰孔 孔径>30～80：钻孔、扩孔(或用镗刀分几次粗镗)一次或两次铰孔(或精镗)	孔径≤80：用镗刀粗镗(一次或二次，根据余量而定)及半精镗、精镗或精铰

表 2-2　H7 与 H8 级精度孔加工方式及余量(在实体材料上加工孔)　　(单位：mm)

加工孔的直径	直径							
	钻		粗加工		半精加工		精加工	
	第一次	第二次	粗镗	扩孔	粗铰	半精镗	精铰	精镗
3	2.9	—	—	—	—	—	3	—
4	3.9	—	—	—	—	—	4	—
5	4.8	—	—	—	—	—	5	—
6	5.0	—	—	5.85	—	—	6	—
8	7.0	—	—	7.85	—	—	8	—
10	9.0	—	—	9.85	—	—	10	—
12	11.0	—	—	11.85	11.95	—	12	—
13	12.0	—	—	12.85	12.95	—	13	—
14	13.0	—	—	13.85	13.95	—	14	—
15	14.0	—	—	14.85	14.95	—	15	—

(续)

加工孔的直径	直径							
	钻		粗加工		半精加工		精加工	
	第一次	第二次	粗镗	扩孔	粗铰	半精镗	精铰	精镗
16	15.0	—	—	15.85	15.95	—	16	—
18	17.0	—	—	17.85	17.95	—	18	—
20	18.0	—	19.8	19.8	19.95	19.90	20	20
22	20.0	—	21.8	21.8	21.95	21.90	22	22
24	22.0	—	23.8	23.8	23.95	23.90	24	24
25	23.0	—	24.8	24.8	24.95	24.90	25	25
26	24.0	—	25.8	25.8	25.95	25.90	26	26
28	26.0	—	27.8	27.8	27.95	27.90	28	28
30	15.0	28.0	29.8	29.8	29.95	29.90	30	30
32	15.0	30.0	31.7	31.75	31.93	31.90	32	32
35	20.0	33.0	34.7	34.75	34.93	34.90	35	35
38	20.0	36.0	37.7	37.75	37.93	37.90	38	38
40	25.0	38.0	39.7	39.75	39.93	39.90	40	40
42	25.0	40.0	41.7	41.75	41.93	41.90	42	42
45	30.0	43.0	44.7	44.75	44.93	44.90	45	45
48	36.0	46.0	47.7	47.75	47.93	47.90	48	48
50	36.0	48.0	49.7	49.75	49.93	49.90	50	50

注：在铸铁上加工直径为 30mm 与 32mm 的孔可用 ϕ 28mm 与 ϕ 30mm 的钻头钻一次。

表 2-3　按 H7 与 H8 级精度加工已预先铸出或热冲出的孔　(单位：mm)

加工孔的直径	直径					加工孔的直径	直径				
	粗镗		半精镗	粗铰或二次半精镗	精铰或精镗成		粗镗		半精镗	粗铰或二次半精镗	精铰或精镗
	第一次	第二次					第一次	第二次			
30	—	28.0	29.8	29.93	30	100	95	98.0	99.3	99.85	100
32	—	30.0	31.7	31.93	32	105	100	103.0	104.3	104.8	105
35	—	33.0	34.7	34.93	35	110	105	108.0	109.3	109.8	110
38	—	36.0	37.7	37.93	38	115	110	113.0	114.3	114.8	115
40	—	38.0	39.7	39.93	40	120	115	118.0	119.3	119.8	120
42	—	40.0	41.7	41.93	42	125	120	123.0	124.3	124.8	125
45	—	43.0	44.7	44.93	45	130	125	128.0	129.3	129.8	130
48	—	46.0	47.7	47.93	48	135	130	133.0	134.3	134.8	135
50	45	48.0	49.7	49.93	50	140	135	138.0	139.3	139.8	140
52	47	50.0	51.5	51.93	52	145	140	143.0	144.3	144.8	145
55	51	53.0	54.5	54.92	55	150	145	148.0	149.3	149.8	150
58	54	56.0	57.5	57.92	58	155	150	163.0	154.3	154.8	155
60	56	58.0	59.5	59.95	60	160	155	158.0	159.3	159.8	160
62	58	60.0	61.5	61.92	62	165	160	163.0	164.3	164.8	165
65	61	63.0	64.5	64.92	65	170	165	168.0	169.3	169.8	170

(续)

加工孔的直径	直径					加工孔的直径	直径				
	粗镗		半精镗	粗铰或二次半精镗	精铰或精镗成		粗镗		半精镗	粗铰或二次半精镗	精铰或精镗
	第一次	第二次					第一次	第二次			
68	64	66.0	67.5	67.90	68	175	170	173.0	174.3	174.8	175
70	66	68.0	69.5	69.90	70	180	175	178.0	179.3	179.8	180
72	68	70.0	71.5	71.90	72	185	180	183.0	184.3	184.8	185
75	71	73.0	74.5	74.90	75	190	185	188.0	189.3	189.8	190
78	74	76.0	77.5	77.90	78	195	190	193.0	194.3	194.8	195
80	75	78.0	79.5	79.90	80	200	194	197.0	199.3	199.8	200
82	77	80.0	81.5	81.85	82	210	204	207.0	209.3	209.8	210
85	80	83.0	84.3	84.85	85	220	214	217.0	219.3	219.8	220
88	83	86.0	87.3	87.85	88	250	244	247.0	249.3	249.8	250
90	85	88.0	89.3	89.85	90	280	274	277.0	279.3	279.8	280
92	87	90.0	91.3	91.85	92	300	294	297.0	299.3	299.8	300
95	90	93.0	94.3	94.85	95	320	314	317.0	319.3	319.8	320
98	93	96.0	97.3	97.85	98	350	372	347.0	349.3	349.8	350

注：① 如果铸出的孔有很大的加工余量时，则第一次粗镗可以分为两次或多次粗镗。

② 也可以将表中“半精镗”和“粗铰或二次半精镗”余量加在一起，只进行一次半精镗加工。

3. 平面类零件斜面轮廓加工方法的选择

在加工过程中，工件按表面轮廓可分为平面类零件和曲面类零件。其中平面类零件的斜面轮廓一般又分为以下两种。

(1) 有固定斜角的外形轮廓面。如图 2.5 所示，加工一个有固定斜角的斜面可以采用不同的刀具，有不同的加工方法。在实际加工中，应根据零件的尺寸精度、倾斜角的大小、刀具的形状、零件的安装方法、编程的难易程度等因素，选择一个较好的加工方案。

(2) 有变斜角的外形轮廓面。如图 2.6 所示，具有变斜角的外形轮廓面，若单纯从技术上考虑，最好的加工方案是采用多坐标联动的数控机床，这样不但生产效率高，而且加工质量好。但是这种机床设备投资大，生产费用高，一般中小企业几乎无力购买，因此应考虑其他可能的加工方案。例如可在两轴半坐标控制铣床上用锥形铣刀或鼓形铣刀，采用多次行切的方法进行加工。为提高零件的表面加工质量，对少量的加工残痕可用手工修磨。

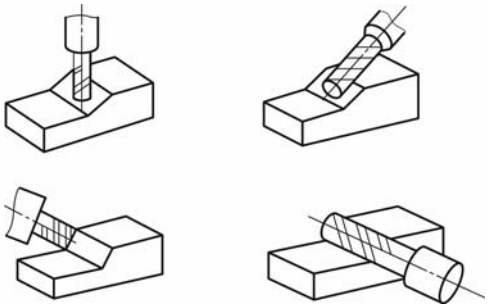


图 2.5　固定斜角斜面加工

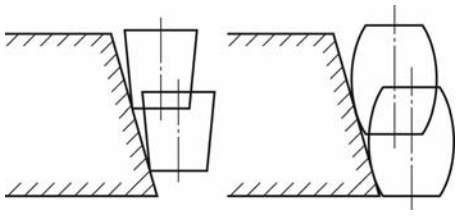


图 2.6　变斜角斜面加工

此外，还要考虑机床选择的合理性。例如，单纯铣轮廓表面或铣槽的简单中小型零件，选择数控铣床进行加工较好；而大型非圆曲线、曲面的加工或者是不仅需要铣削而且有孔加工的零件，选择数控镗铣加工中心进行加工较好。

2.1.4　工序与工步的划分

1. 工序的划分

在数控机床上加工零件，工序可以比较集中，在一次装夹中尽可能完成大部分或全部工序。首先应根据零件图样，考虑被加工零件是否可以在一台数控机床上完成整个零件的加工工作，若不能则应决定其中哪一部分在数控机床上加工，哪一部分在其他机床上加工，即对零件的加工工序进行划分。一般有以下几种方式。

(1) 按零件装卡定位方式划分工序。由于每个零件结构形状不同，各表面的技术要求也有所不同，故加工时，其定位方式则各有差异。一般加工外形时，以内形定位；加工内形时，又以外形定位。因而可根据定位方式的不同来划分工序。

如图 2.7 所示的片状凸轮，按定位方式可分为两道工序，第一道工序可在数控机床上也可在普通机床上进行。以外圆表面的 B 平面定位加工端面 A 和直径 ϕ22H7 的内孔，然后再加工端面 B 和 ϕ4H7 的工艺孔；第二道工序以已加工过的两个孔和一个端面定位，在另一台数控铣床或加工中心上铣削凸轮外表面轮廓。

(2) 按粗、精加工划分工序。根据零件的加工精度、刚度和变形等因素来划分工序时，可按粗、精加工分开的原则来划分工序，即先粗加工再精加工。此时可用不同的机床或不同的刀具进行加工。通常在一次安装中，不允许将零件某一部分表面加工完毕后，再加工零件的其他表面。如图 2.8 所示车削加工的零件，第一道工序在数控车床上进行粗车削时，应切除整个零件的大部分余量；第二道工序在另一台数控车床上进行半、精车削，以保证加工精度和表面粗糙度的要求。

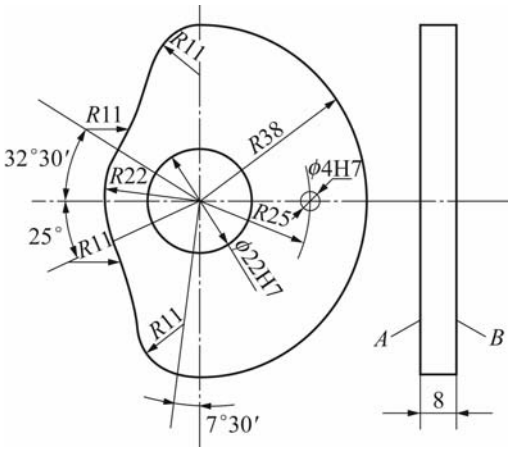


图 2.7　片状凸轮

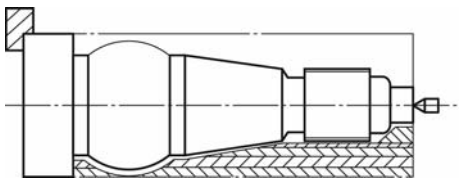


图 2.8　车削加工的零件

(3) 按所用刀具划分工序。为了减少换刀次数，压缩空程时间，减少不必要的定位误差，可按刀具集中工序的方法加工零件，即在一次装夹中，尽可能用同一把刀具加工出可能加工的所有部位，然后再换另一把刀加工其他部位。在专用数控机床和加工中心中常采

用这种方法。

2. 工步的划分

工步的划分主要从加工精度和效率两方面考虑。在一个工序内往往需要采用不同的刀具和切削用量，对不同的表面进行加工。为了便于分析和描述较复杂的工序，在工序内又细分为工步。下面说明工步划分的原则：

(1) 同一表面按粗加工、半精加工、精加工依次完成，或全部加工表面按先粗后精加工分开进行。

(2) 对于既有铣面又有镗孔的零件，可先铣面后镗孔。按此方法划分工步，可以提高孔的加工精度。因为铣削时切削力较大，工件易发生变形。先铣面后镗孔，使刀具有一段时间恢复，可减少由变形引起的对孔的加工精度的影响。

(3) 按刀具划分工步。某些机床工作台回转时间比换刀时间短，可采用按刀具划分工步的方法，以减少换刀次数，提高加工效率。

总之，工序与工步之间的划分要根据零件的结构特点、技术要求等情况综合考虑。

2.1.5　零件的定位与安装

1. 定位安装的基本原则

在数控机床上加工零件时，定位安装的基本原则与普通机床相同，也要合理选择定位基准和夹紧方案。为了提高数控机床的效率，在确定定位基准与夹紧方案时应注意以下三点：

(1) 力求设计、工艺与编程计算的基准统一。

(2) 尽量减少装夹次数，尽可能在一次定位装夹后，加工出全部待加工面。

(3) 避免采用占机人工调试加工方案，以充分发挥数控机床的效能。

2. 选择夹具的基本原则

数控加工的特点对夹具提出了两个基本要求：一是要保证夹具的坐标方向与机床的坐标方向相对固定；二是要协调零件和机床坐标系的尺寸关系。除此之外，还要考虑以下四点：

(1) 当零件加工批量不大时，应尽量采用组合夹具、可调式夹具及其他通用夹具，以缩短生产准备时间、节省生产费用。

(2) 在成批生产时才考虑专用夹具，并力求结构简单。

(3) 零件的装卸要快速、方便、可靠，以缩短机床的停顿时间。

(4) 夹具上各零部件应不妨碍机床对零件各表面的加工，即夹具要开敞，其定位、夹紧机构元件不能影响加工中的走刀(如产生碰撞等)。

此外，为了提高数控加工的效率，在成批生产中还可以采用多位、多件夹具。例如在数控铣床或立式加工中心的工作台上，可安装一块与工作台大小一样的平板，如图 2.9 所示，它既可作为大工件的基础板，也可作为多个中小工件的公共基础板，依次并排加工装夹的多个中小工件。

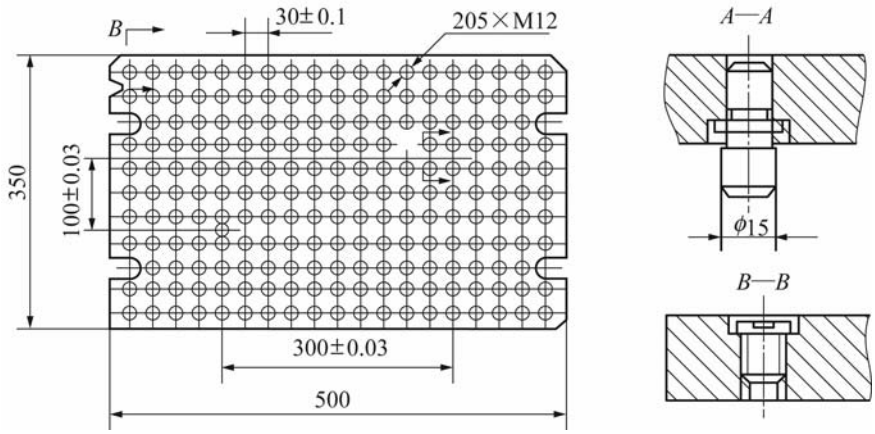


图 2.9　新型数控夹具元件

2.1.6　数控加工刀具与工具系统

刀具与工具的选择是数控加工工艺中重要的内容之一，它不仅影响机床的加工效率，而且直接影响加工质量。与传统的加工方法相比，数控加工对刀具和工具的要求更高。不仅要求精度高、刚度好、耐用度高，而且要求尺寸稳定 、安装调整方便。

1. *数控加工刀具材料*

(1) 高速钢。高速钢又称锋钢、白钢。它是含有钨(W)、钼(Mo)、铬(Cr)、钒(V)、钴(Co)等元素的合金钢，分为钨、钼两大系列，是传统的刀具材料。其常温硬度为 62～65HRC，热硬性可提高到 500℃～600℃。淬火后变形小，易刃磨，可锻制和切削。它不仅可用来制造钻头、铣刀，还可用来制造齿轮刀具、成形铣刀等复杂刀具。但由于其允许的切削速度较低(50m/min)，所以大都用于数控机床的低速加工。普通高速钢是以 W18Cr4V 为代表。

(2) 硬质合金。硬质合金是由硬度和熔点都很高的碳化物(WC，TiC，TaC，NbC 等)，用 Co、Mo、Ni 做黏结剂制成的粉末冶金产品。其常温硬度可达 74～82HRC，能耐 800℃～1000℃的高温。生产成本较低，可在中速(150m/min)、大进给切削中发挥出优良的切削性能，因此成为数控加工中最为广泛使用的刀具材料。但其冲击韧度与抗弯强度远比高速钢低，因此很少做成整体式刀具。在实际使用中，一般将硬质合金刀块用焊接或机械夹固的方式固定在刀体上。常用的硬质合金有钨钴(YG)合金(YG8、YG6、YG3)、钨钛(YT)合金(YT5、YT15、YT30)和钨钛钽(铌)(YW)(YW1，YW2)合金三大类。

(3) 涂层硬质合金。涂层硬质合金刀具是在韧性较好的硬质合金刀具上涂覆一层或多层耐磨性好的 TiN、TiCN、TiAlN 和 Al_2O_3 等，涂层的厚度为 2μm～18μm。涂层通常起到两方面的作用：一方面，它具有比刀具基体和工件材料低得多的热传导系数，减弱了刀具基体的热作用；另一方面，它能够有效地改善切削过程的摩擦和黏附作用，降低切削热的生成。TiN 具有低摩擦特性，可减少涂层组织的损耗。TiCN 可降低后刀面的磨损。TiCN 涂层硬度较高。Al_2O_3 涂层具有优良的隔热效果。涂层硬质合金刀具与硬质合金刀具相比，无论在强度、硬度和耐磨性方面均有了很大的提高。对于硬度为 45～55HRC 的工件的切削，低成本的涂层硬质合金可实现高速切削。我国的株洲硬质合金厂、成都工具研究所均已成

功开发了多涂层硬质合金刀片。近年来，一些厂家依靠改进涂层材料与比例的方法，也使得涂层刀具的性质有极大的提高。如美国、日本一些厂家采用瑞士 TiAlN 涂层材料和新涂层专利技术生产的刀片，硬度高达 4500～4900HV，在切削温度高达 1500℃～1600℃时，硬度仍然不降低，刀片不氧化，其寿命为一般涂层刀片的 4 倍，且附着力好。它可以在 498.56m/min 的速度下加工硬度达 47～52HRC 的模具钢。

(4) 陶瓷材料。陶瓷是近 20 年来发展速度快，应用日趋广泛的刀具材料之一。在不久的将来，陶瓷可能继高速钢、硬质合金以后引起切削加工的第三次革命。陶瓷刀具具有高硬度(91～95HRA)、高强度(抗弯强度为 750MPa ～1000MPa)、耐磨性好、化学稳定性好、良好的抗黏结性能、摩擦因数低且价格低廉等优点。不仅如此，陶瓷刀具还具有很高的高温硬度，1200℃时硬度达到 80HRA。使用正常时，陶瓷刀具寿命极长，切削速度可比硬质合金刀具提高 2～5 倍，特别适合高硬度材料加工、精加工以及高速加工，加工硬度达 60HRC 的各类淬硬钢和硬化铸铁等。常用的有氧化铝基陶瓷、氮化硅基陶瓷和金属陶瓷等。氧化铝基陶瓷刀具比硬质合金有更高的热硬性，高速切削状态下切削刃一般不会产生塑性变形，但它的强度和韧性较低。氮化硅基陶瓷除热硬性高以外，还具有良好的韧性，与氧化硅基陶瓷相比，它的缺点是在加工钢时易产生高温扩散，加剧刀具磨损，氮化硅基陶瓷刀具主要应用于断续车削灰铸铁及铣削灰铸铁。金属陶瓷是一种以碳化物为基体材料，与硬质合金相似的刀具材料，但它具有较低的亲和性、良好的摩擦性及较好的耐磨性，它比常规硬质合金能承受更高的切削温度，但缺乏硬质合金的耐冲击性、重型加工时的韧性和低速大进给时的强度。近年来通过大量的研究、改进和采用新的制作工艺，陶瓷材料的抗弯强度和韧性均有了很大的提高，如日本三菱金属公司开发的新型金属陶瓷 NX2525 及瑞典山德维克公司开发的金属陶瓷刀片新品 CT 系列和涂层金属陶瓷刀片系列，抗弯强度和耐磨性均远高于普通的金属陶瓷，大大拓宽了陶瓷材料的应用范围。

(5) 立方氮化硼(CBN)。CBN 是人工合成的高硬度材料，其硬度可达 7300～9000HV，其硬度和耐磨性仅次于金刚石，有极好的高温硬度，与陶瓷刀具相比，其耐热性和化学稳定性稍差，但冲击韧度和抗破碎性能较好。它广泛适用于淬硬钢(50HRC 以上)、珠光体灰铸铁、冷硬铸铁和高温合金等的切削加工。与硬质合金刀具相比，其切削速度可提高一个数量级。CBN 含量高的 PCBN(聚晶立方氮化硼)刀具硬度高、耐磨性好、抗压强度高及冲击韧性好，其缺点是热稳定性差和化学惰性低，适用于耐热合金、铸铁和铁系烧结金属的切削加工。复合 PCBN 刀具中 CBN 颗粒含量较低，采用陶瓷作黏结剂，其硬度较低，但弥补了 CBN 含量高的 PCBN 热稳定性差、化学惰性低的特点，适用于淬硬钢的切削加工。在切削灰铸铁和淬硬钢的应用领域，陶瓷刀具和 CBN 刀具是可供同时选择的。对淬硬钢进行干式切削加工时，选用 Al_2O_3 陶瓷的成本要低于 PCBN 材料，因为陶瓷刀具具有良好的热化学稳定性，但却不及 PCBN 刀具的韧性和硬度。在切削硬度低于 60HRC 和小进给量情况下的工件时，陶瓷刀具是较好的选择。PCBN 刀具适合于工件硬度高于 60HRC 的情况，尤其是对于自动化加工和高精度加工时更为重要。

(6) 聚晶金刚石(PCD)。PCD 作为最硬的刀具材料，硬度可达 10000HV，具有最好的耐磨性，它能够以高速度(1000m/min)和高精度加工软的有色金属材料，但它对冲击敏感，容易碎裂，而且对黑色金属中铁的亲和力强，易引起化学反应，一般情况下只能用于加工非铁零件，如有色金属及其合金、玻璃纤维、工程陶瓷和硬质合金等极硬的材料。

2. 数控加工刀具

1) 车削加工刀具

数控车床使用的刀具，无论是车刀、镗刀、切断刀还是螺纹加工刀具等均有焊接式和机夹式之分，除经济型数控车床外，目前已广泛地使用机夹式可转位车刀，其结构如图 2.10 所示。它由刀杆 1、刀片 2、刀垫 3 以及夹紧元件 4 组成。刀片每边都有切削刃，当某切削刃磨损钝化后，只需松开夹紧元件，将刀片转一个位置便可继续使用。

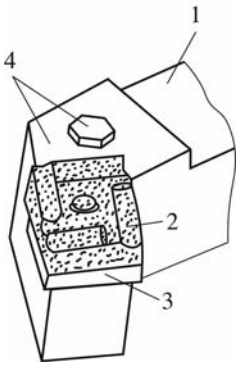
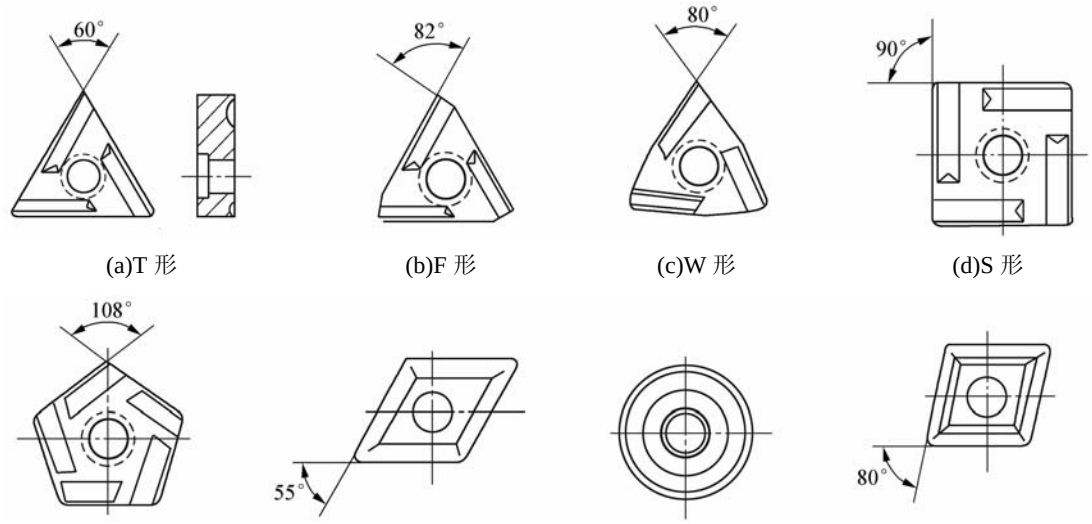


图 2.10　机夹式可转位车刀

1—刀杆　2—刀片

3—刀垫　4—夹紧元件

刀片是机夹可转位车刀的一个最重要组成元件。按照国家标准 GB/T 2076—1987《切削刀具用转位刀片型号表示规则》，大致可分为带圆孔、带沉孔以及无孔三大类。形状有三角形、正方形、五边形、六边形、圆形以及菱形等共 17 种。图 2.11 所示为几种常见的可转位车刀刀片形状及角度。



(a)T 形　(b)F 形　(c)W 形　(d)S 形

(e)P 形　(f)D 形　(g)R 形　(h)C 形

图 2.11　常见可转位车刀刀片的形状及角度

2) 铣削加工刀具

铣刀种类很多，选择铣刀时，要使刀具的尺寸与被加工工件的表面尺寸和形状相适应。生产中，平面零件周边轮廓的加工，常采用立铣刀。铣平面时，应选硬质合金刀片铣刀；加工凸台、凹槽时，选高速钢立铣刀；加工毛坯表面或粗加工孔时，可选镶硬质合金的玉米铣刀。选择立铣刀加工时，对于刀具的有关参数，建议按下述经验数据选取，如图 2.12 所示。

(1) 刀具半径 r 应小于零件内轮廓面的最小曲率半径 ρ，一般取 $r = (0.8\sim0.9)\rho$。

(2) 零件的加工高度 $H \leqslant (1/4\sim1/6)\,r$，以保证刀具有足够的刚度。

(3) 对不通孔(深槽)，选取 $l = [H + (5\sim10)]$ mm (l 为刀具切削部分长度，H 为零件高度)。

(4) 加工外型及通槽时，选取 $l = [H + r_e + (5\sim10)]$ mm (r_e 为刀尖角半径)。

(5) 粗加工内轮廓面时，铣刀最大直径 D 可按下式计算(图 2.13)。

$$D_{粗} = \frac{2(\delta \sin\varphi/2-\delta_1)}{1-\sin\varphi/2}+D$$

式中　D——轮廓的最小凹圆角半径；

δ——圆角邻边夹角等分线上的精加工余量；

δ_1——精加工余量；

φ——圆角两邻边的最小夹角。

(6) 加工肋时，刀具直径为 $D=(5\sim10)\,b$　(b 为肋的厚度)。

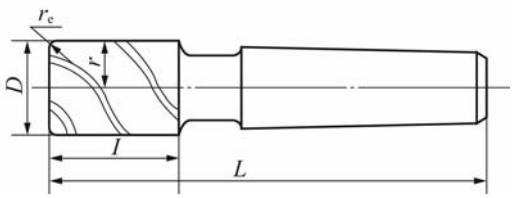


图 2.12　刀具尺寸选择

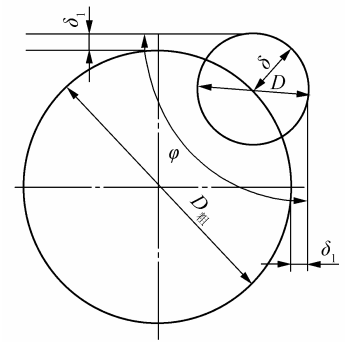
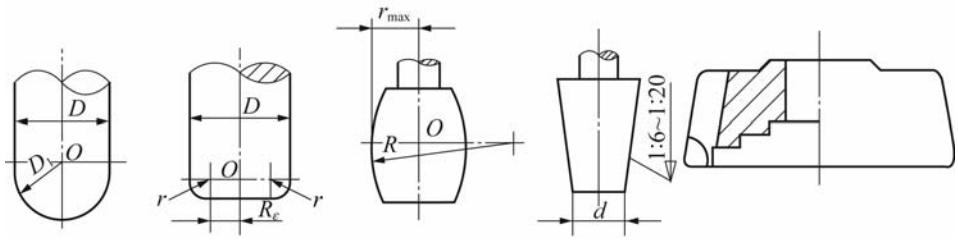


图 2.13　粗加工铣刀直径估算法

对一些立体型面和变斜角轮廓外形的加工，常采用球头铣刀、环形铣刀、鼓形铣刀、锥形铣刀和盘形铣刀等，如图 2.14 所示。



(a)球头铣刀　(b)环形铣刀　(c)鼓形铣刀　(d)锥形铣刀　(e)盘形铣刀

图 2.14　常用铣刀

曲面加工常采用球头铣刀，但加工曲面较平坦部位时，刀具以球头顶端刃切削，切削条件较差，因而应采用环形铣刀。在单件或小批量生产中，为取代多坐标联动机床，常采用鼓形铣刀或锥形铣刀来加工变斜角零件。加镶齿盘铣刀，适用于在五坐标联动的数控机床上加工一些球面，其效率比用球头铣刀高近 10 倍，并可获得好的加工精度。

3) 孔加工刀具

数控孔加工刀具常用的有钻头、镗刀、铰刀和丝锥等。

(1) 钻头。在数控机床上钻孔大多采用普通麻花钻，直径为 8mm～80mm 的麻花钻多为莫氏锥柄，可直接装在带有莫氏锥孔的刀柄内，直径为 0.1mm～20mm 的麻花钻多圆柱形，可装在钻夹头刀柄上，中等尺寸麻花钻两种形式均可选用。由于在数控机床上钻孔都是无钻模直接钻孔，因此，一般钻孔深度约为直径的 5 倍，细长孔的加工易于折断，要注

意冷却和排屑，在钻孔前最好先用中心钻钻中心孔，或用刚性较好的短钻头锪窝。

钻削直径为 20mm～60mm、孔的深径比小于等于 3 的中等浅孔时，可选用图 2.15 所示的可转位浅孔钻，其结构是在带排屑槽及内冷却通道钻体的头部装有一组刀片(多为凸多边形、菱形和四边形)，多采用深孔刀片，通过该中心压紧刀片，靠近钻心的刀片用韧性较好的材料，靠近钻头外径的刀片选用较为耐磨的材料。这种钻头具有切削效率高、加工质量好的特点，最适用于箱体零件的钻孔加工。

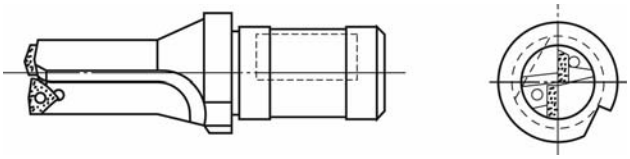
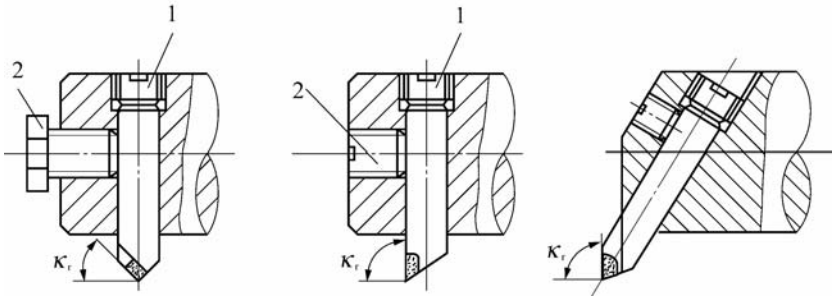


图 2.15　可转位浅孔钻

(2) 镗刀。镗刀按切削刃数量可分为单刃镗刀和双刃镗刀。镗削通孔、阶梯孔和不通孔可分别选用图 2.16(a)、(b)、(c)所示的单刃镗刀。



(a)通孔镗刀　　(b)阶梯孔镗刀　　(c)不通孔镗刀

图 2.16　单刃镗刀

1—调节螺钉　　2—紧固螺钉

单刃镗刀头结构类似车刀，用螺钉装夹在镗杆上。调节螺钉 1 用于调整尺寸，紧固螺钉 2 起锁紧作用。单刃镗刀刚性差，切削时易引起振动，所以镗刀的主偏角选的较大，以减小径向力。镗铸铁孔或精镗时，一般取 κ_r=90°；粗镗钢件孔时，取 κ_r=60°～75°，以延长刀具寿命。所镗孔径的大小要靠调整刀具的悬伸长度来保证，调整麻烦，效率低，只能用于单件小批生产。但单刃镗刀结构简单，适应性较广，粗、精加工都适用。

在孔的精镗中，目前较多地选用精镗微调镗刀。这种镗刀的径向尺寸可以在一定范围内进行微调，调节方便，且精度高，其结构如图 2.17 所示。调整尺寸时，先松开拉紧螺钉 6，然后转动带刻度盘的调整螺母 3，等调至所需尺寸，再拧紧螺钉 6，使用时应保证锥面靠近大端接触(即镗杆 90°锥孔的角度公差为负值)，且与直孔部分同心。键与键槽配合间隙不能太大，否则微调时就不能达到较高的精度。

(3) 铰刀。数控机床上使用的铰刀多是通用标准铰刀。此外，还有机夹硬质合金刀片单刃铰刀和浮动铰刀等。

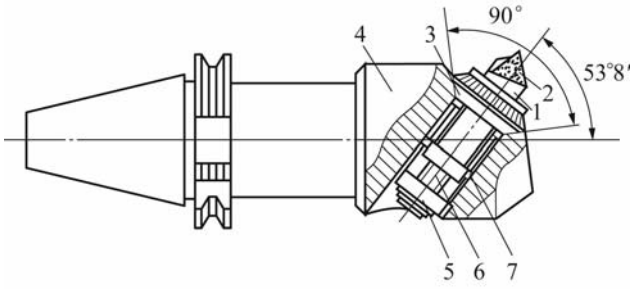


图 2.17　精镗微调镗刀

1—刀体　2—刀片　3—调整螺母　4—刀杆　5—螺母　6—拉紧螺钉　7—导向键

加工公差等级为 IT8～IT9 级、表面粗糙度 R_a 为 0.8 μm～1.6 μm 的孔时，通常采用标准铰刀。加工公差等级为 IT5～IT7 级、表面粗糙度 R_a 为 0.7 μm 的孔时，可采用机夹硬质合金刀片的单刃铰刀。这种铰刀的结构如图 2.18 所示，刀片 3 通过楔套 4 用螺钉 1 固定在刀体上，通过螺钉 7，销子 6 可调节铰刀尺寸。导向块 2 可采用黏结和铜焊的方式固定。机夹单刃铰刀应有很高的刃磨质量。因为精密铰削时，半径上的铰削余量是在 10 μm 以下，所以刀片的切削刃口要磨得异常锋利。

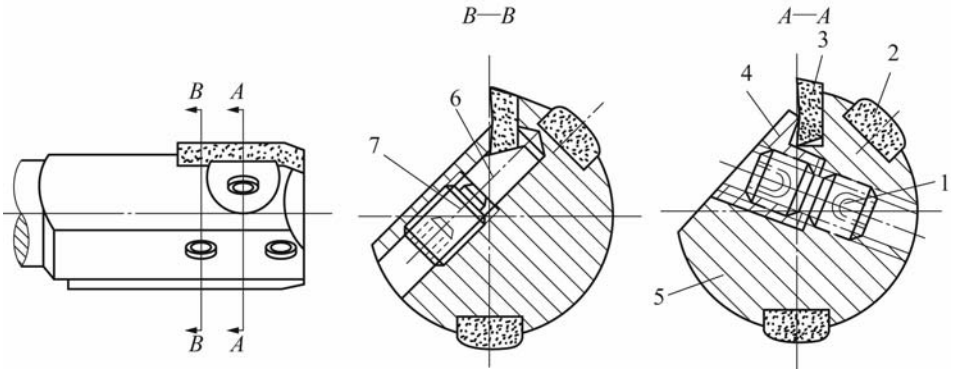


图 2.18　硬质合金单刃铰刀

1、7—螺钉　2—导向块　3—刀片　4—楔套　5—刀体　6—销子

铰削公差等级为 IT6～IT7 级，表面粗糙度 R_a 为 0.8 μm～1.6 μm 的大直径通孔时，可选用专为加工中心设计的浮动铰刀。图 2.19 所示的即为加工中心上使用的浮动铰刀。在装配时，先根据所要加工孔的大小调节好可调式浮动铰刀体 2，在铰刀体 2 插入刀杆体 1 的长方孔后，在对刀仪上找正两切削刃与刀杆轴的对称度在 0.02 mm～0.05 mm 以内，然后移动定位滑块 5，使圆锥端螺钉 3 的锥端对准刀杆体上的定位窝，拧紧螺钉 6 后，调整圆锥端螺钉，使铰刀体有 0.04 mm～0.08 mm 的浮动量(用对刀仪观察)，调整好后，将螺母 4 拧紧。

浮动铰刀既能保证在换刀和进刀过程中刀片不会从刀杆的长方孔中滑出，又能较准确的定心。它有两个对称刃，能自动平衡切削力，在铰削过程中又能自动抵偿因刀具安装误差或刀杆的径向圆跳动而引起的加工误差，因而加工精度稳定。浮动铰刀的寿命比高速钢铰刀高 8～10 倍，且具有直径调整的连续性。

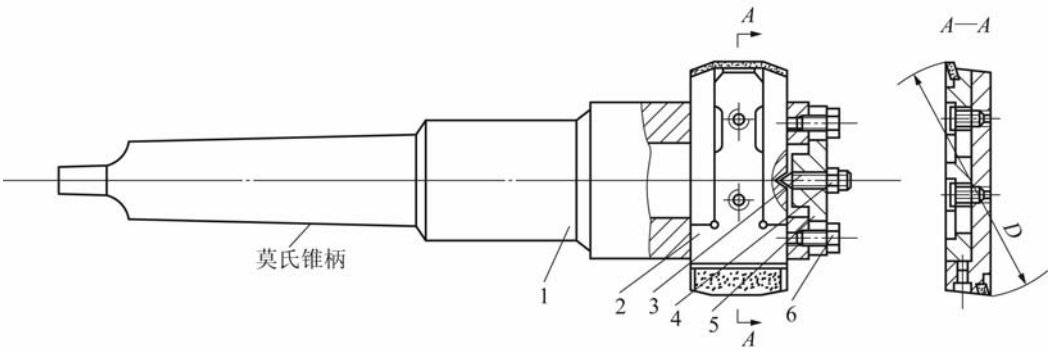


图 2.19　加工中心上使用的浮动铰刀

1—刀杆体　2—可调式浮动铰刀体　3—圆锥端螺钉　4—螺母　5—定位滑块　6—螺钉

3. 数控机床的工具系统

由于在加工中心上要适应多种形式零件不同部位的加工，故刀具装夹部分的结构、形式、尺寸也是多种多样的。把通用性较强的几种装夹工具(例如装夹铣刀、镗刀、扩铰刀、钻头和丝锥等)系列化、标准化就成为通常所说的工具系统。

我国除了已制定的标准刀具系列外，还建立了 TSG82 数控工具系统，如图 2.20 所示。该系统是镗铣类数控工具系统，是一个联系数控机床(含加工中心)的主轴与刀具之间的辅助系统。TSG82 数控工具系统各种辅具和刀具具有结构简单、紧凑、装卸灵活、使用方便、更换迅速等特点。关于工具系统的代号可查阅有关手册。

4. 对刀仪

对刀仪是用来调整或测量刀具尺寸的。对刀仪结构有许多种，其对刀精度为 0.1mm～0.001mm。从结构上来讲，有直接接触式测量和光屏投影放大测量两种。读数方法也各不相同，有的用圆盘刻度或游标读数，有的则用光学读数头或数字显示器等。

图 2.21 是数控铣床和加工中心常用的两种对刀仪的示意图，采用图 2.21(a)时，通过将刀具装在刀座上后用千分表或高度尺测量进行对刀，而图 2.21(b)中则是将刀具安装在刀座上后，调整镜头，就可以在屏幕上见到放大的刀具刃口部分的影像，此时调整屏幕使米字刻线与刃口重合，即完成对刀，同时在数字显示器上可读出相应的直径和轴向尺寸值。

图 2.22 是在数控车床上使用的一种光学对刀仪外形图，使用时把对刀仪固定安装在车床床身的某一位置，然后将基准刀安装在刀架上，调整对刀仪的镜头位置，使显微镜内的十字线交点对准基准刀的对刀点，以此作为其他刀具安装时的基准。这种对刀方法精度不高。

HPA(High Precision Arm)刀具测量系统是数控车床自动对刀最常用的方法之一。采用 HPA 刀具测量系统可在机床内对刀具的 X、Z 向尺寸进行自动测量，并自动修正 CNC 系统刀具补偿单元中的刀具偏置值。目前较常用的数控车床刀具测量系统有英国 RENNISHAW 公司生产的 HPA 刀具自动测量系统，该系统一般由测头、HPA 精密连接臂、安装座、测头座、接口装置、转接头及测量软件组成(图 2.23)，并可根据不同的机床规格选配。其接触式测头一般为一个 10mm×10mm×4mm 的硬质合金方块，测量精度为 0.001mm，测头在 X、

Z 方向的弯曲行程为±6mm。在测量时，测头通过 HPA 精密连接臂和安装座固定在机床主轴旁，其测头的垂直中心线分别和机床的 *X*、*Z* 两轴平行。移动刀架，当刀具的刀尖部分接触到测头时，测头发出触发信号，其信号通过接口装置触发 CNC 系统，记下此时刀具的位置，然后通过相应的测量软件计算出测量所得的刀具 *X*、*Z* 向尺寸，并随即自动修正 CNC 系统中对应刀补单元的固定刀具偏置值。

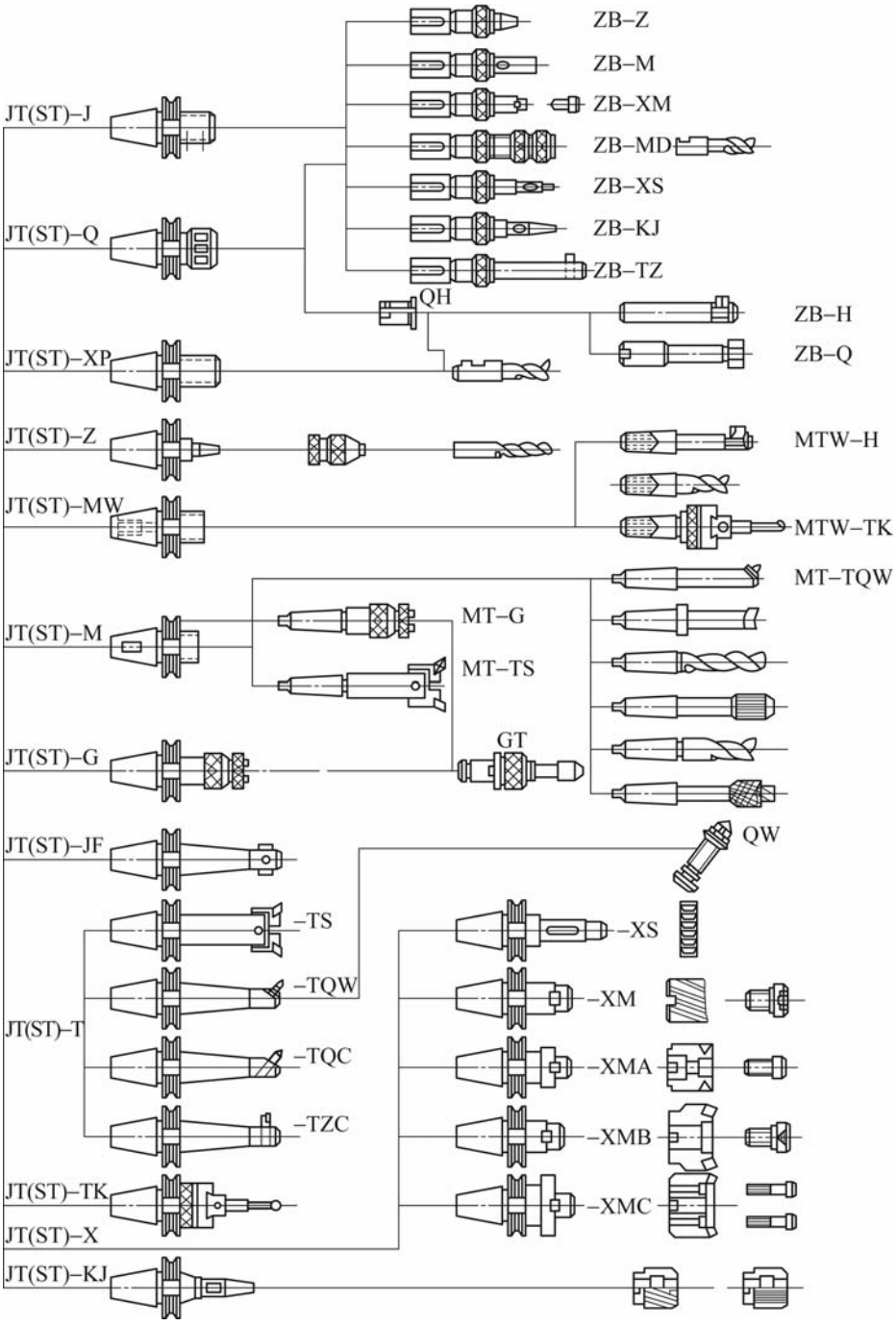


图 2.20　TSG82 数控工具系统

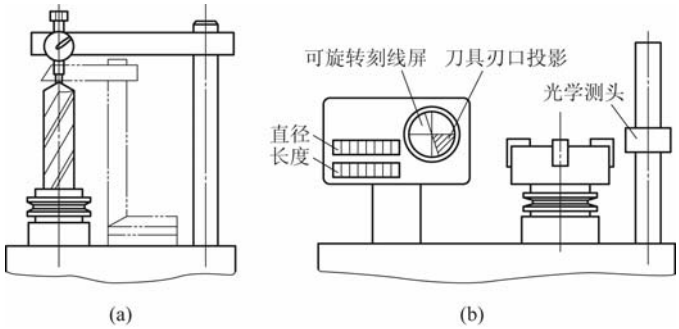


图 2.21　对刀仪

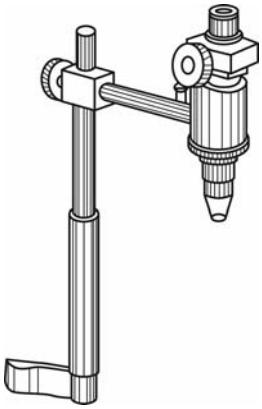


图 2.22　数控车床用光学对刀仪外形图

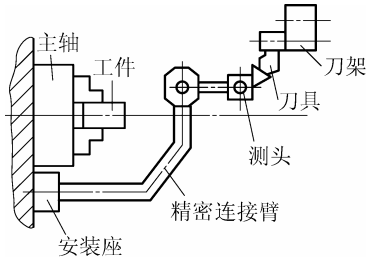


图 2.23　HPA 刀具测量系统

选择对刀仪时必须根据零件加工精度来考虑。另外对刀仪测得的刀具尺寸是在没有承受切削力的静态下测得的，与加工后的实际尺寸不一定相同。加工过程中要经过试切后现场修调刀具，根据工件的测量结果对刀具的偏置值进行动态微小的补偿，以保证零件的加工精度。

2.1.7　切削用量的确定

切削用量包括主轴转速(或切削速度)、背吃刀量、进给量。对于不同的加工方法，需要选择不同的切削用量，并应编入程序单内。

合理选择切削用量的原则是：粗加工时，一般以提高生产率为主，但也应考虑经济性和加工成本；半精加工和精加工时，应在保证加工质量的前提下，兼顾切削效率、经济性和加工成本。具体数值应根据机床说明书、切削用量手册，并结合经验而定。

(1) 背吃刀量 a_p(mm)。背吃刀量 a_p 主要根据机床、夹具、刀具和工件的刚度来决定。在刚度允许的情况下，应以最少的进给次数切除加工余量，最好一次切净余量，以便提高生产效率。在数控机床上，精加工余量可小于普通机床，一般取 0.2mm ～0.5mm。

(2) 主轴转速 n(r/min)。主轴转速 n 主要根据允许的切削速度 v (m/min)选取。

$$n = 1000v/\pi D$$

式中　v——切削速度，由刀具寿命决定，可查有关手册或刀具说明书，常用几种刀具的切

削速度见附表；

D——工件或刀具直径(mm)。

主轴转速 *n* 要根据计算值在机床说明中选取标准值(无级变速除外)，并填入程序单中。

(3) 进给量即进给速度 *f*(mm/min 或 mm/r)。进给量 *f* 是数控机床切削用量中的重要参数，主要根据零件的加工精度和表面粗糙度要求以及刀具、工件的材料性质选取。当加工精度、表面粗糙度要求高时，进给量数值应小些，一般在 20 mm/min～50 mm/min 范围内选取。最大进给量则受机床刚度和进给系统的性能限制，并与脉冲当量有关。

2.1.8 数控加工路线的确定

在数控加工中，刀具的刀位点相对于工件运动的轨迹称为加工路线。所谓“刀位点”是指刀具对刀时的理论刀尖点。如车刀、镗刀的刀尖；钻头的钻尖；立铣刀、端铣刀刀头底面的中心，球头铣刀的球头中心等。

编程时，加工路线的确定原则主要有以下几点：

(1) 加工路线应保证被加工零件的精度和表面粗糙度，且效率较高；

(2) 使数值计算简单，以减少编程工作量；

(3) 应使加工路线最短，这样既可减少程序段，又可减少空刀时间。

此外，确定加工路线时，还要考虑工件的加工余量和机床、刀具的刚度等情况，确定是一次走刀，还是多次走刀来完成加工，以及在铣削加工中是采用顺铣还是逆铣等。

1. 车削加工路线的确定

1) 最短的车削加工路线

车削进给路线为最短，可有效地提高生产效率，降低刀具的损耗等。图 2.24 为粗车几种不同车削进给路线的安排示意图。其中图 2.24(a)表示利用数控系统具有的封闭式复合循环功能控制车刀沿着工件轮廓进行进给的路线；图 2.24(b)为利用其程序循环功能安排的“三角形”进给路线；图 2.24(c)为利用其矩形循环功能而安排的“矩形”进给路线。

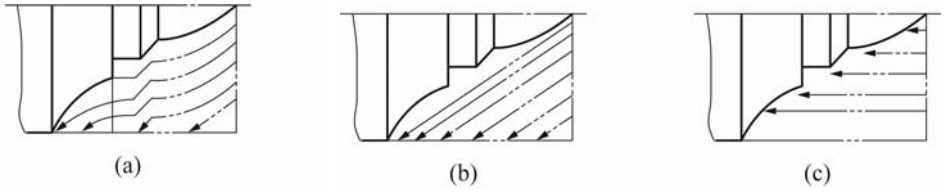


图 2.24　粗车进给路线示例

对以上三种车削进给路线，经分析和判断后可知矩形循环进给路线的进给长度总和最短。因此，在同等条件下，其车削所需时间(不含空行程)最短，刀具的损耗最少。

2) 大余量毛坯的阶梯车削加工路线

图 2.25 所示为车削大余量工件的两种加工路线，图 2.25(a)是错的阶梯车削路线，图 2.25(b)按 1～5 的顺序车削，每次车削所留余量相等，是正确的阶梯车削路线。因为在同样背吃刀量的条件下，按图 2.25(a)的方式加工所剩的余量过多。

3) 完整轮廓的连续车削进给路线

在安排可以一刀或多刀进行的精加工工序时，其零件的完整轮廓应由最后一刀连续加

工而成，这时，加工刀具的进、退刀位置要考虑妥当，尽量不要在连续的轮廓中安排切入和切出或换刀及停顿，以免因切削力突然变化而造成弹性变性，致使光滑连接轮廓上产生表面划伤、形状突变或滞留刀痕等缺陷。

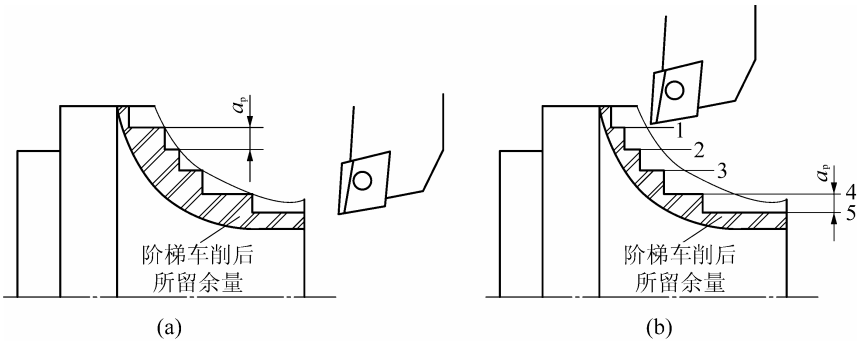


图 2.25　大余量毛坯的阶梯车削路线

4) 特殊的加工路线

在数控车削加工中，一般情况下，Z 坐标轴方向的进给运动都是沿着负方向进行的，但有时按其常规的负方向安排进给路线并不合理，甚至可能车坏工件。

例如，当采用尖形车刀加工大圆弧内表面零件时，安排两种不同的进给方法如图 2.26 所示，其结果也不相同。对于图 2.26(a)所示的第一种进给方法($-Z$ 走向)，因切削时尖形车刀的主偏角为 100°～105°，这时切削力在 X 向的较大分力 F_p 将沿着图 2.26 所示的$+X$ 方向作用，当刀尖运动到圆弧的换象限处，即由$-Z$、$-X$ 向$-Z$、$+X$ 变换时，吃刀抗力 F_p 与传动横拖板的传动力方向相同，若螺旋副间有机械传动间隙，就可能使刀尖嵌入零件表面(即扎刀)，其嵌入量在理论上等于其机械传动间隙量 e，如图 2.27 所示。即使该间隙量很小，由于刀尖在 X 方向换向时，横向拖板进给过程的位移量变化也很小，加上处于动摩擦与静摩擦之间呈过渡状态的拖板惯性的影响，仍会导致横向拖板产生严重的爬行现象，从而大大降低零件的表面质量。

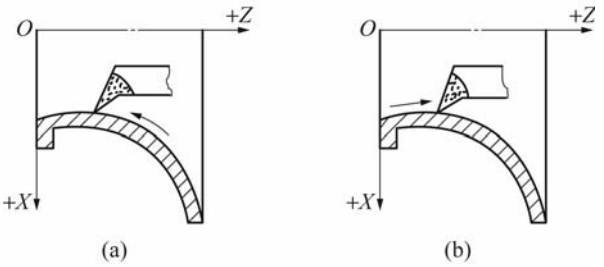


图 2.26　两种不同的进给方法

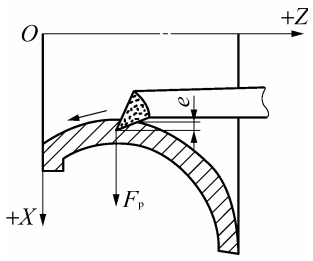


图 2.27　嵌刀现象

对于图 2.26(b)所示的第二种进给方法，因为尖刀运动到圆弧的换象限处，即由$+Z$、$-X$ 向$+Z$、$+X$ 方向变换时，吃刀抗力 F_p 与丝杠传动横向拖板的传动力方向相反，不会受螺旋副机械传动间隙的影响而产生嵌刀现象，所以图 2.28 所示进给方案是较合理的。

5) 车削螺纹加工路线

在数控机床上车螺纹时，沿螺距方向的 Z 向进给应和机床主轴的旋转保持严格的速比关系，因此应避免进给机构加速或减速过程中的车削。为此要有引入距离 δ_1 和超越距 δ_2。

如图 2.29 所示，δ_1 和 δ_2 的数值不仅与机床拖动系统的动态特性有关，还与螺纹的导程和螺纹的精度有关，其数值可由主轴转速和螺纹螺距来确定：

$$\delta_1 = 0.0015nP \qquad \delta_2 = 0.00042\ nP$$

式中　n——主轴转速(r/min)；

P——螺纹的螺距(mm)。

一般 δ_1 为 2 mm～5 mm，对大螺距和高精度的螺纹取大值；δ_2 一般取 δ_1 的 1/4 左右。若螺纹收尾处没有退刀槽时，收尾处的形状与数控系统有关，一般按 45° 退刀收尾。

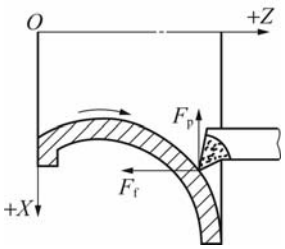


图 2.28　合理的进给方案

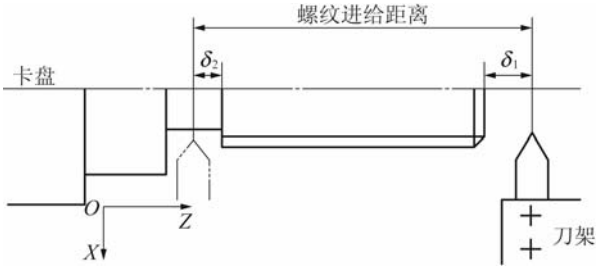


图 2.29　车削螺纹时的引入距离 δ_1 和超越距离 δ_2

2. 铣削加工路线的确定

1) 顺铣和逆铣

铣削有顺铣和逆铣两种方式。当工件表面无硬皮，机床进给机构无间隙时，应选用顺铣，按照顺铣安排加工路线。因为采用顺铣加工后，零件已加工表面质量好，刀齿磨损小。精铣时，尤其是零件材料为铝镁合金、钛合金或耐热合金时，应尽量采用顺铣。当工件表面有硬皮，机床的进给机构有间隙时，应采用逆铣，按照逆铣安排加工路线。因为逆铣时，刀齿是从已加工表面切入，不会崩刃；机床进给机构的间隙不会引起振动和爬行。

2) 铣削外轮廓的加工路线

铣削平面零件外轮廓时，一般是采用立铣刀侧刃切削。刀具切入零件时，应避免沿零件外轮廓的法向切入，以免在切入处产生刀具的刻痕，而应沿切削起始点延伸线[图 2.30(a)]或切线方向[图 2.30(b)]逐渐切入零件，保证零件曲线的平滑过渡。同样，在切离零件时，也应避免在切削终点处直接抬刀，要沿着切削终点延伸线[图 2.30(a)]或切线方向[图 2.30(b)]逐渐切离工件。

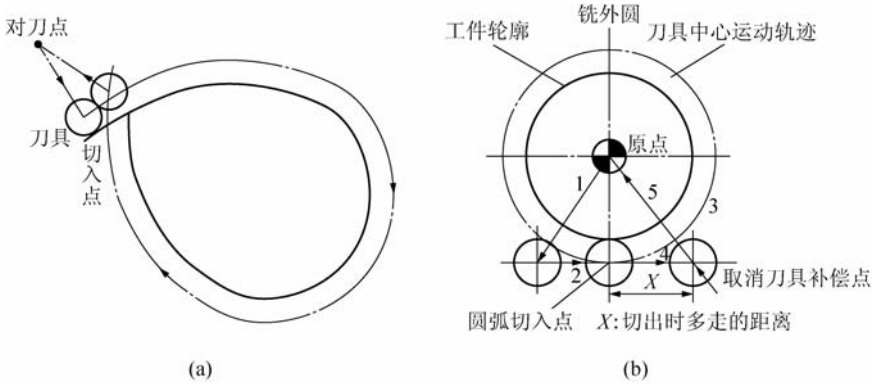


图 2.30　刀具切入和切出外轮廓的加工路线

3) 铣削内轮廓的加工路线

铣削封闭的内轮廓表面时，同铣削外轮廓一样，刀具同样不能沿轮廓曲线的法向切入和切出，此时刀具可以沿一过渡圆弧切入和切出工件轮廓。图 2.31 所示为铣切内圆的加工路线，图中 R_1 为零件圆弧轮廓半径，R_2 为过渡圆弧半径。

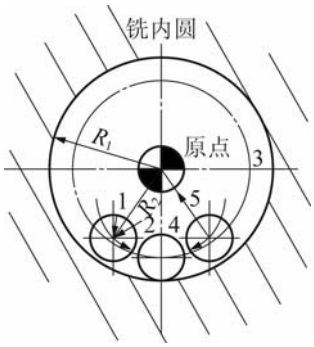


图 2.31　刀具切入和切出内轮廓的加工路线

4) 铣削内槽的加工路线

所谓内槽是指以封闭曲线为边界的平底凹槽。这种内槽在模具零件较常见，都采用平底立铣刀加工，刀具圆角半径应符合内槽的图样要求。图 2.32 所示为加工内槽的三种加工路线。图 2.32(a)和图 2.32(b)分别用行切法和环切法加工内槽。两种加工路线的共同点是都能切净内腔中全部面积，不留死角，不伤轮廓，同时尽量减少重复进给的搭接量。不同点是行切法的加工路线比环切法短，但行切法会在每两次进给的起点与终点间留下残留面积，达不到所要求的表面粗糙度；用环切法获得的表面粗糙度要好于行切法，但环切法需要逐次向外扩展轮廓线，刀位点计算稍微复杂一些。综合行、环切法的优点，采用图 2.32(c)所示的加工路线，即先用行切法切去中间部分余量，最后用环切法切一刀，既能使总的加工路线较短，又能获得较好的表面粗糙度。

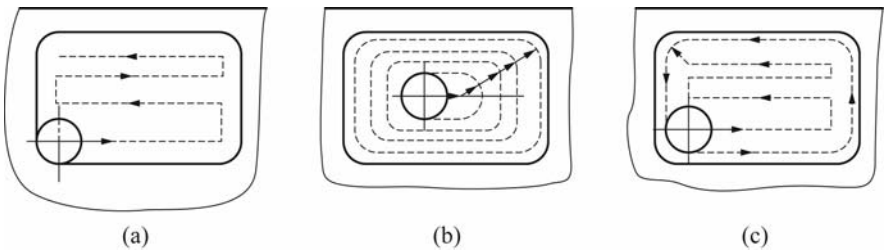


图 2.32　铣削内槽的 3 种加工路线

5) 铣削曲面的加工路线

对于边界敞开的曲面加工，可采用如图 2.33 所示的两种加工路线。对于发动机大叶片，当采用图 2.33(a)所示的加工路线时，每次沿直线加工，刀位点计算简单，程序少，加工过程符合直纹面的形成，可以准确保证母线的直线度。当采用图 2.33(b)所示的加工路线时，符合这类零件数据给出情况，便于加工后检验，叶形的准确度高，但程序较多。由于曲面零件的边界是敞开的，没有其他表面限制，所以曲面边界可以延伸，球头刀应由边界外开始加工。当边界不敞开时，要重新确定加工路线，另行处理。

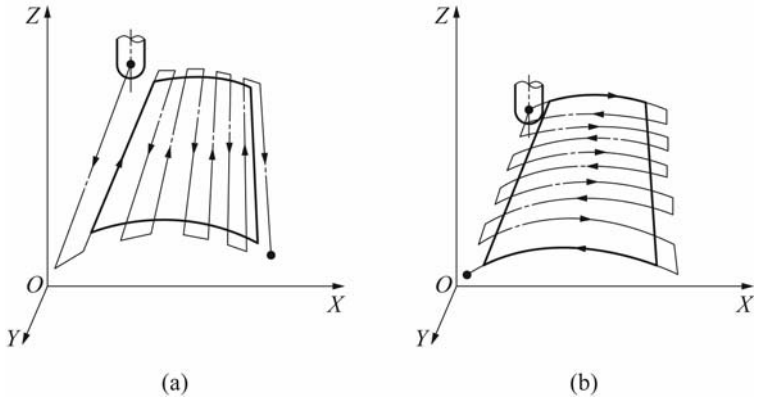


图 2.33　铣削曲面的两种加工路线

3. 孔加工路线的确定

加工孔时，一般是首先将刀具在 *XY* 平面内快速定位运动到孔中心线的位置上，然后刀具再沿 *Z* 向(轴向)运动进行加工。所以孔加工进给路线的确定包括以下内容。

1) 确定 *XY* 平面内的加工路线

孔加工时，刀具在 *XY* 平面内的运动属点位运动，确定加工路线时，主要考虑：

① 定位要迅速。也就是在刀具不与工件、夹具和机床碰撞的前提下空行程时间尽可能短。例如，加工图 2.34(a)所示零件时，按图 2.34(b)所示加工路线进给比按图 2.34(c)所示加工路线节省定位时间近一半。这是因为在定位运动情况下，刀具由一点运动到另一点时，通常是沿 *X*、*Y* 坐标轴方向同时快速移动，当 *X*、*Y* 轴各自移距不同时，短移距方向的运动先停，待长移距方向的运动停止后刀具才达到目标位置。图 2.34(b)方案使沿两轴方向的移距接近，所以定位过程迅速。

② 定位要准确。安排加工路线时，要避免机械进给系统反向间隙对孔位精度的影响。例如，镗削图 2.35(a)所示零件上的四个孔。按图 2.35(b)所示加工路线加工，由于 4 孔与 1、2、3 孔定位方向相反，*Y* 向反向间隙会使定位误差增加，从而影响 4 孔与其他孔的位置精度。按图 2.35(c)所示加工路线，加工完 3 孔后往上多移动一段距离至 *P* 点，然后再折回来在 4 孔处进行定位加工，这样方向一致，就可避免反向间隙的引入，提高了 4 孔的定位精度。

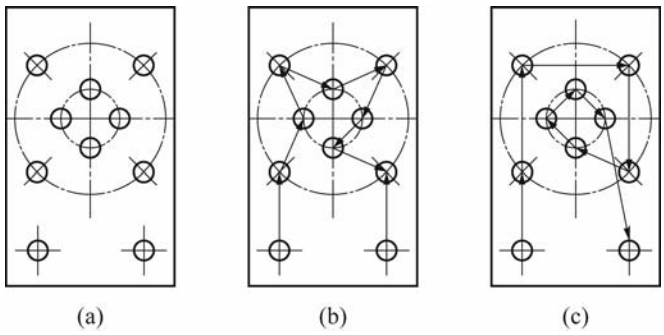


图 2.34　最短加工路线设计示例

有时定位迅速和定位准确两者难以同时满足，在上述两例中，图 2.34(b)是按最短路线加工，但不是从同一方向趋近目标位置，影响了刀具定位精度，图 2.35(c)是从同一方向趋近目标位置，但不是最短路线，增加了刀具的空行程。这时应抓主要矛盾，若按最短路线加工能保证定位精度，则取最短路线，反之，应取能保证定位准确的路线。

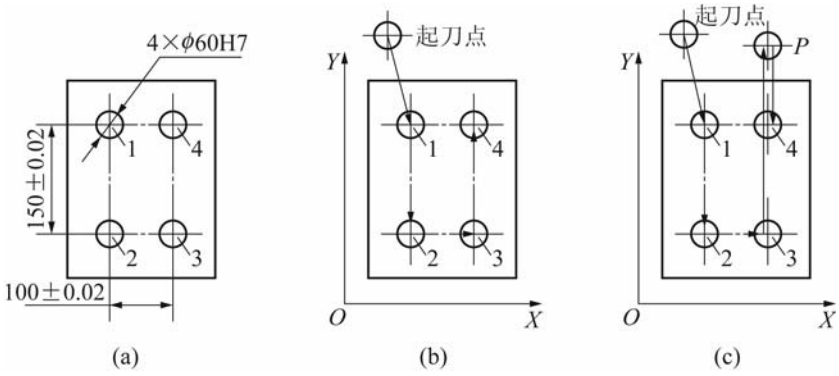


图 2.35　准确定位加工路线设计示例

2) 确定 *Z* 向(轴向)的加工路线

刀具在 *Z* 向的加工路线分为快速移动进给路线和工作进给路线。刀具先从初始平面快速运动到距工件加工表面一定距离的 *R* 平面(距工件加工表面一定切入距离的平面)上，然后按工作进给速度运动进行加工。图 2.36(a)所示为加工单个孔时刀具的加工路线。对多孔加工，为减少刀具空行程进给时间，加工中间孔时，刀具不必退回到初始平面，只要退到 *R* 平面即可，其加工路线如图 2.36(b)所示。

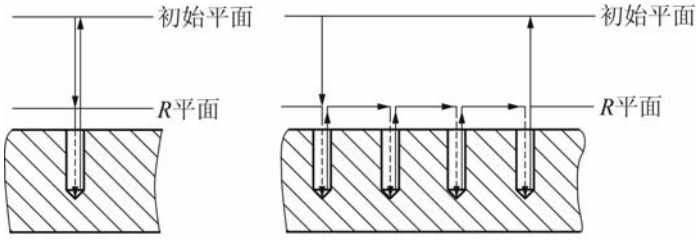


图 2.36　刀具 *z* 向加工路线设计示例

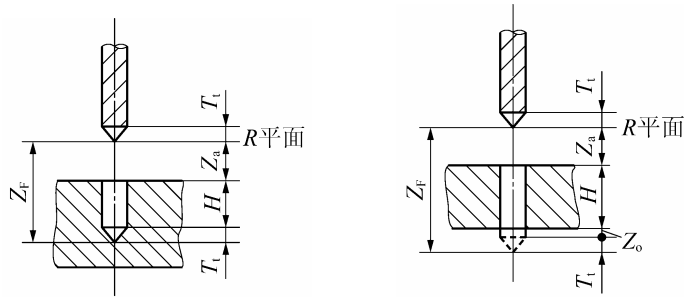
在工作进给路线中，工作进给距离 Z_F 包括加工孔的深度 *H*、刀具的切入距离 Z_a 和切出距离 Z_o(加工通孔)，如图 2.37 所示，图中 T_t 为刀头尖端长度，加工不通孔时，工作进给距离为

$$Z_F = Z_a + H + T_t$$

加工通孔时，工作进给距离为

$$Z_F = Z_a + H + Z_o + T_t$$

式中刀具切入、切出距离的经验数据见表 2−4。



(a)加工不通孔时的工作进给距离　　(b)加工通孔时的工作进给距离

图 2.37　工作进给距离计算图

表 2-4　刀具切入、切出距离的经验数据　　(单位：mm)

表面状态 / 加工方式	已加工表面	毛坯表面	表面状态 / 加工方式	已加工表面	毛坯表面
钻孔	2～3	5～8	车削	2～3	5～8
扩孔	3～5	5～8	铣削	3～5	5～10
镗孔	3～5	5～8	攻螺纹	5～10	5～10
铰孔	3～5	5～8	车削螺纹(切入)	2～5	5～8

2.1.9　工艺文件的制定

零件的加工工艺设计完成后，就应该将有关内容填入各种相应的表格(或卡片)中，以便贯彻执行并将其作为编程和生产前技术准备的依据。这些表格(或卡片)被称为工艺文件。数控加工工艺文件除包括机械加工工艺过程卡、机械加工工艺卡、数控加工工序卡三种以外，还包括数控加工刀具卡。另外为方便编程也可以将各工步的加工路线绘成文件形式的加工路线图。

不同的数控机床，其数控加工工艺文件的内容有所不同，为了加强技术文件管理，数控加工工艺文件也应向标准化、规范化的方向发展。但目前由于种种原因国家尚未制定统一的标准，各企业应根据本单位的特点制定上述必要的工艺文件。下面介绍数控机床常用的数控加工工序卡和数控加工刀具卡，仅供参考。

1. 数控加工工序卡

数控加工工序卡是用来编制程序的依据，以及用来指导操作者进行生产的一种工艺文件。其内容包括工序及各工步的加工内容；本工序完成后工件的形状、尺寸和公差；各工步切削参数；本工序所使用的机床、刀具和工艺工装等。见表 2-5：若在数控机床上只加工零件的一个工步时，也可不填写工序卡。在工序加工内容不十分复杂时，可把零件草图反映在工序卡上，并注明编程原点和对刀点。

表 2-5　数控加工工序卡

(工厂)	数控加工工序卡	产品名称或代号	零件名称	材 料	零件图号

工序号	程序编号	夹具名称	夹具编号	使用设备	车 间

工步号	工 步 内 容	加工面	刀具号	刀具规格/mm	主轴转速/(r/min)	进给速度/(mm/min)或进给量/(mm/r)	背吃刀量/mm	备注
1								
2								
3								
4								
5								

编制		审核		批 准		共　　页	第　　页

2. 数控加工刀具卡

数控加工刀具卡主要包括刀具的详细资料，有刀具号、刀具名称及规格、刀辅具等。不同类型的数控机床刀具卡也不完全一样。数控加工刀具卡同数控加工工序卡一样，是用来编制零件加工程序和指导生产的重要工艺文件。加工中心数据加工刀具卡的格式见表 2-6。

表 2-6　数控加工刀具卡(加工中心用)格式

产品名称		零件名称		零件图号		程序编号	

工 步	刀具号	刀具名称	刀柄型号	刀　具		补偿量/mm	备 注
				直径/mm	长度/mm		
1							
2							
3							
4							
5							

编 制		审核		批 准		共　页	第　页

2.2　图形的数学处理

对零件图形进行数学处理(又称数值计算)是数控编程前的主要准备工作，无论对于手工编程还是自动编程都是必不可少的。图形的数学处理就是根据零件图样的要求，按照已

确定的加工路线和允许的编程误差，计算出数控系统所需输入的数据。图形数学处理的内容主要有 3 个方面，即基点和节点计算、刀位点轨迹计算和辅助计算。

2.2.1　基点计算

一个零件的轮廓曲线常常由不同的几何元素组成，如直线、圆弧、二次曲线等。各几何元素间的连接点称为基点，如两直线的交点，直线与圆弧的交点或切点，圆弧与圆弧的交点或切点，圆弧或直线与二次曲线的切点或交点等。两个相邻基点之间只能有一个几何元素。

平面零件轮廓大多由直线和圆弧组成，而现代数控机床的数控系统都具有直线插补和圆弧插补功能，所以平面零件轮廓曲线的基点计算比较简单。一般基点的计算可根据图样给定条件，用几何法、解析几何法、三角函数法或用 AutoCAD 画图求得。

当用解析几何法求基点时，应首先选定零件坐标系的原点，列出各直线和圆弧的数学方程，再联立相关方程求解。对于所有直线均可化为一般式：

$$Ax + By + C = 0$$

对于所有圆弧，均可化为圆的标准方程式：

$$(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 = R^2$$

式中　ξ、η——圆弧的圆心坐标；

R——圆弧半径。

2.2.2　节点计算

如果零件的轮廓曲线不是由直线或圆弧构成(如可能是椭圆、双曲线、抛物线、一般二次曲线、阿基米德螺旋线等曲线)，而数控装置又不具备其他曲线的插补功能时，要采取用直线或圆弧逼近的数学处理方法。即在满足允许编程误差的条件下，用若干直线段或圆弧段分割逼近给定的曲线。相邻直线段或圆弧段的交点或切点称为节点。对于立体型面零件，应根据允许误差将曲线分割成不同的加工截面，各截面上的轮廓曲线也要进行基点和节点计算。

节点计算方法较多，下面主要介绍几种常用方法。

1. 等间距法直线逼近节点计算

等间距法直线逼近节点计算方法简单，其特点是每个程序段的某一个坐标增量相等。在直角坐标系中可使相邻节点的 x 坐标增量或 y 坐标增量相等；在极坐标系中，可使相邻节点间的转角坐标增量或径向增量相等。根据曲线的表达式求出另一个坐标值，即得节点坐标。如图 2.38 所示，由起点开始沿 x 轴方向取 Δx 为等间距长，由曲线方程 $y = f(x)$求得 y_i，设 $x_{i+1} = x_i + \Delta x$，$y_{i+1} = f(x_i + \Delta x)$，可求出一系列节点坐标值作为编程数据。这种方法的关键是确定间距值，Δx 取决于曲线的曲率和允许误差 $\delta_{允}$，常根据加工精度凭经验选取，一般选取 Δx =0.1mm，再进行误差验算。在图 2.38 中，mn 为一逼近直线段，作 $m'n'$ 平行于 mn 且与曲线的距离为逼近允许误差 $\delta_{允}$，则 mn 的方程为

$$Ax + By + C = 0$$

式中　$A = y_n - y_m$；

$$B = x_n - x_m;$$

$$C = y_m x_n - x_m y_n。$$

$m'n'$ 的方程为

$$Ax + By = C \pm \delta \sqrt{A^2 + B^2}$$

式中　δ——直线 mn 与 $m'n'$ 间的距离。

联立上述二方程得

$$Ax + By = C \pm \delta \sqrt{A^2 + B^2}$$

$$y = f(x)$$

求解时，若方程组无解，则表明逼近误差小于允许误差，Δx 取值合适。若方程有唯一解时，不满足 $\delta \leqslant \delta_{允}$，则减小 Δx 的取值。一般取 $\delta_{允}$ 为零件公差的 1/10～1/5。

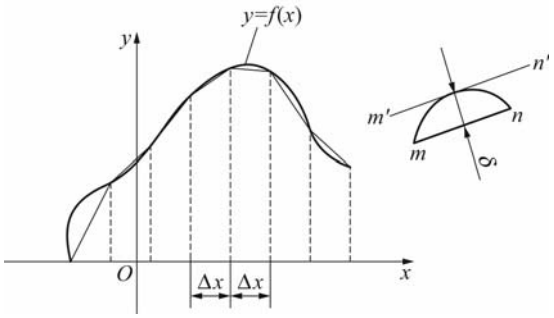


图 2.38　等间距法直线逼近求节点

2. 等步长法直线逼近节点计算

等步长法直线逼近节点计算方法的特点是使所有逼近线段的长度相等，亦即每个程序段的长度相等，如图 2.39 所示。由于轮廓曲线各处的曲率不等，这种方法在各程序段产生的插补误差 δ 也不等，所以编程时必须使最大插补误差小于 $\delta_{允}$。该方法的关键是根据 δ 确定程序段长度。一般认为最大插补误差发生在最小曲率半径处。其计算步骤如下。

(1) 求曲线最小曲率半径 ρ_{min}。曲线 $y = f(x)$ 上任一点的曲率半径为

$$\rho = \frac{\left[1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}}{d^2y/dx^2}$$

令 $d\rho/dx = 0$，得

$$3\left(\frac{d^2y}{dx^2}\right)^2 \cdot \frac{dy}{dx} - \left[1-\left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]\frac{d^3y}{dx^3} = 0$$

$\frac{dy}{dx}$、$\frac{d^2y}{dx^2}$、$\frac{d^3y}{dx^3}$ 可根据 $y=f(x)$ 求得，从而可得到 x 轴坐标，再代入曲率半径公式即可求得 ρ_{min}。

(2) 确定步长。以 ρ_{min} 为半径作曲率圆(图 2.39)。给定的逼近允许误差 $\delta_{允}$ 对应的弦长 l 为

$$l = 2\sqrt{\rho^2_{\min} - (\rho_{\min} - \delta_{允})^2} \approx 2\sqrt{2\rho_{\min}\delta_{允}}$$

(3) 求节点。以曲线起点 a 为圆心，以 l 半径作圆，求出该圆与已知曲线的交点 b，即解方程组：

$$\begin{cases} (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = l^2 \\ y = f(x) \end{cases}$$

其解作为节点 b 的坐标。顺次以 b，c，…为圆心，重复步骤(3)即可求出各节点的坐标值。

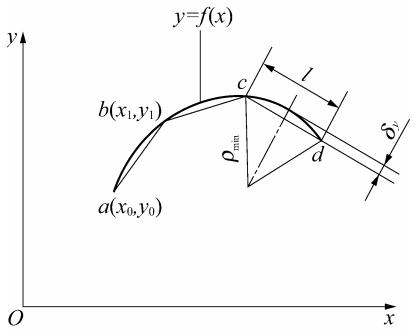


图 2.39　等步长法直线逼近求节点

3. 等误差法(变步长法)直线逼近节点计算

等误差法计算节点的特点是使零件轮廓曲线上各逼近线段的逼近误差相等，且小于或等于 $\delta_{允}$，各逼近线段的长度不相等，如图 2.40 所示。计算节点的过程如下。

(1) 以起点(x_0，y_0)为圆心，$\delta_{允}$ 为半径作圆，方程为

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = \delta_{允}^2$$

(2) 求圆与轮廓曲线公切线的斜率 k。设公切线方程为

$$y = kx + b$$

式中　$k = (Y_1 - Y_0) / (X_1 - X_0)$。

因此求 k 即相当于求出两切点的坐标，即(X_0，Y_0)，(X_1，Y_1)。联立方程得

$$\begin{cases} Y_1 - Y_0 = f'(X_1) \cdot (X_1 - X_0) & \text{(曲线切线方程)} \\ (X_0 - x_0)^2 + (Y_0 - y_0)^2 = \delta_{允}^2 & \text{(圆方程)} \\ Y_1 - Y_0 = F'(X_0) \cdot (X_1 - X_0) & \text{(圆切线方程)} \\ Y_1 = f(X_1) & \text{(曲线方程)} \end{cases}$$

式中，$F'(x_0)$ 表示圆的方程。由此可解得 (X_0，Y_0)，(X_1，Y_1)。

(3) 求节点。过起点(x_0，y_0)作斜率为 k 的直线

$$y - y_0 = k(x - x_0)$$

与曲线方程联立

$$\begin{cases} y - y_0 = k(x - x_0) \\ y = f(x) \end{cases}$$

可求得第一个节点的坐标(x_1，y_1)，再重复上述计算过程可得其余各节点的坐标值。等误差法中的程序段数目少，但其计算过程较复杂，一般要采用计算机程序。

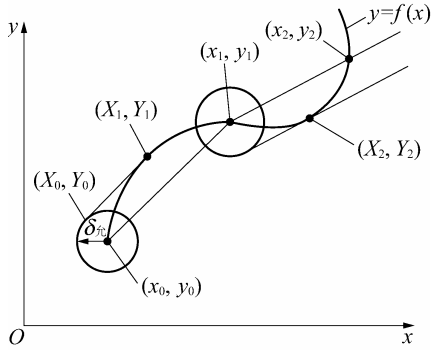


图 2.40　等误差法直线逼近求节点

4. 圆弧逼近轮廓的节点计算

零件轮廓曲线可用一段段的圆弧逼近，常用的有曲率圆法、三点圆法和相切圆法等。这里主要介绍曲率圆法，它是一种等误差圆弧逼近法，应用于曲线 $y=f(x)$为单调的情形。若不是单调曲线则可以在拐点处分段，使每段曲线为单调。其节点计算方法(图 2.41)如下。

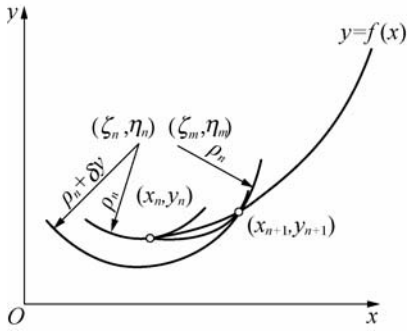


图 2.41　曲率圆法求节点

(1) 从轮廓曲线 $y=f(x)$ 的起点(x_n，y_n)开始作曲率圆。

半径为

$$\rho_n=\frac{\left[1+\left(y_n'\right)^2\right]^{3/2}}{\left|y_n''\right|}$$

圆心坐标为

$$\begin{cases}\zeta_n=x_n-y_n'\cdot[1+(y_n')^2]/\ |\ y_n''\ |\\ \eta_n=y_n+[1+(y_n')^2]/\ y_n''\end{cases}$$

(2) 求偏差圆与曲线的交点，即解联立方程组：

$$\begin{cases}(x-\zeta_n)^2+(y-\eta_n)^2=(\rho_n\pm\delta_{允})^2\\ y=f(x)\end{cases}$$

得交点(x_{n+1}，y_{n+1})。当曲线曲率递减时取($\rho_n+\delta_{允}$)，当曲线曲率递增时，取($\rho_n-\delta_{允}$)。

(3) 求过(x_n，y_n)和(x_{n+1}，y_{n+1})两点，半径为 ρ_n 的圆的圆心，即解联立方程组：

$$\begin{cases}(x-x_n)^2+(y-y_n)^2=\rho_n^2\\(x-x_{n+1})^2+(y-y_{n+1})^2=\rho_n^2\end{cases}$$

得圆心坐标(ζ_m，η_m)。

(4) 重复上述计算可依次求得其他逼近圆弧。上述计算均可用计算机程序完成。

2.2.3 辅助计算

辅助计算包括增量值计算，辅助程序段的计算，螺纹大径、小径计算等。

1. 增量值计算

增量值计算是仅就增量坐标的数控系统或绝对坐标中某些数据仍要求以增量方式输入时，所进行的由绝对坐标数据到增量坐标数据的转换。如在数值计算过程中，已按绝对坐标值计算出某运动段的起点坐标及终点坐标，以增量方式表示时，其换算公式为：

增量坐标值=终点坐标值－起点坐标值

计算应在各坐标轴方向上分别进行。例如，要求以直线插补方式，使刀具从 a 点(起点)运动到 b 点(终点)，已计算出 a 点坐标为(X_a，Y_a)，b 点坐标为(X_b，Y_b)，若以增量方式表示时，其 X、Y 轴方向上的增量分别为 $\Delta X = X_b - X_a$，$\Delta Y = Y_b - Y_a$。

2. 辅助程序段计算

辅助程序段是指开始加工时，刀具从起始点到切入点，或加工完毕时，刀具从切出点返回到起始点而特意安排的程序段。切入点位置的选择应依据零件加工余量的情况，适当离开零件一段距离。切出点位置的选择，应避免刀具在快速返回时发生撞刀，也应留出适当的距离(表 2-4)。使用刀具补偿功能时，建立刀补的程序段应在加工零件之前写入，加工完成后应取消刀补。某些零件的加工，要求刀具“切向”切入和“切向”切出。以上程序段的安排，在绘制进给路线时，应明确的表示出来。数值计算时，按照进给路线的安排，计算出各相关点的坐标，其数值计算一般比较简单。

3. 螺纹大径、小径计算

螺纹牙型高度是指在螺纹牙型上，牙顶到牙底之间垂直于螺纹轴线的距离，如图 2.42 所示。它是车削时车刀的总切入深度。

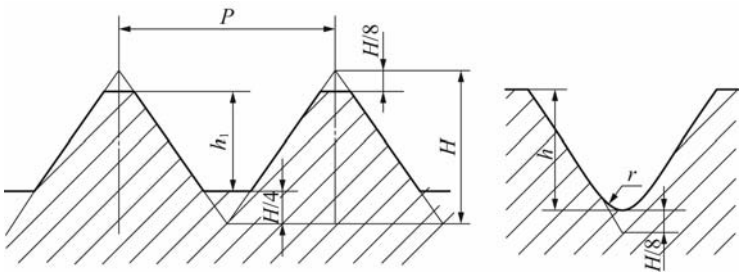


图 2.42　螺纹牙型高度

根据 GB/T 192—2003《普通螺纹》国家标准规定，普通螺纹的牙型理论高度 H=0.866P，实际加工时，由于螺纹车刀刀尖半径的影响，螺纹的实际切深有变化。根据 GB/T 197—2003

《普通螺纹公差》规定，螺纹车刀可在牙底最小削平高度 $H/8$ 处削平或倒圆。则螺纹实际牙型高度可按下式计算：

$$h = H - 2\,(H/8) = 0.6495$$

式中　H——螺纹原始三角形高度，H=0.866P(mm)；

P——螺距(mm)。

所以螺纹大径 d_1 和小径 d_2 可用下式计算：

$$d_1 = d - 0.2165\,P$$

$$d_2 = d_1 - 1.299\,P$$

式中　d——螺纹公称尺寸(mm)；

d_1——螺纹大径(mm)；

d_2——螺纹小径(mm)。

如果螺纹牙型较深、螺距较大，可分几次进给。每次进给的背吃刀量用螺纹深度减去精加工背吃刀量所得的差按递减规律分配，如图 2.43 所示。常用螺纹切削的进给次数与背吃刀量可参考表 2-7 选取。在实际加工中，当用牙型高度控制螺纹直径时，一般通过试切来满足加工要求。

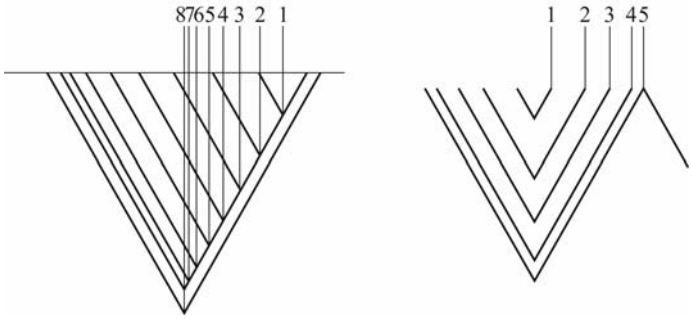


图 2.43　螺纹进刀切削方法

表 2-7　常用螺纹切削的进给次数与背吃刀量　　(单位：mm)

公　制　螺　纹								
螺　距		1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
牙　深		0.649	0.974	1.299	1.624	1.949	2.273	2.598
背吃刀量及进给次数	1 次	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.5	1.5
	2 次	0.4	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8
	3 次	0.2	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
	4 次		0.16	0.4	0.4	0.4	0.6	0.6
	5 次			0.1	0.4	0.4	0.4	0.4
	6 次				0.15	0.4	0.4	0.4
	7 次					0.2	0.2	0.4
	8 次						0.15	0.3
	9 次							0.2

(续)

公 制 螺 纹

牙/in		24 牙	18 牙	16 牙	14 牙	12 牙	10 牙	8 牙
牙 深		0.678	0.904	1.016	1.162	1.355	1.626	2.033
背吃刀量及进给次数	1 次	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	1.2
	2 次	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7
	3 次	0.16	0.3	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6
	4 次		0.11	0.14	0.3	0.4	0.4	0.5
	5 次				0.13	0.21	0.4	0.5
	6 次						0.16	0.4
	7 次							0.17

注：1in=2.54mm。

2.3　数控加工的程序编制

由于数控机床是按照预先编制好的程序自动加工零件，程序编制的好坏将直接影响到数控机床的正确使用和数控加工特点的发挥。因此，编程人员除了要熟悉数控机床、刀夹具以及数控系统的性能以外，还必须熟悉数控机床编程的方法、内容与步骤、编程标准与规范等，并不断地积累编程经验，以提高编程质量和效率。

2.3.1　数控机床编程基础

1. 数控机床编程的内容与步骤

数控机床编程的内容主要包括：分析被加工零件的零件图，确定加工工艺过程，数值计算，编写程序单，输入数控系统，程序校验和首件试切等。

数控机床编程的步骤一般如图 2.44 所示。

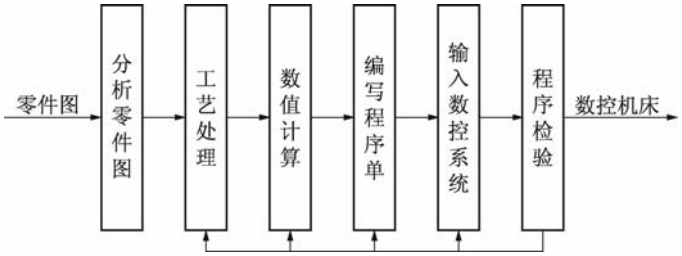


图 2.44　数控机床编程的步骤

1) 分析零件图

通过对工件材料、形状、尺寸精度及毛坯形状和热处理的分析，确定工件在数控机床上进行加工的可行性。

2) 工艺处理

选择适合数控加工的加工工艺，是提高数控加工技术经济效果的首要因素。制定数控加工工艺除需考虑通常的一般工艺原则外，还应考虑充分发挥所有数控机床的指令功能；正确选择对刀点；尽量缩短加工路线，减少空行程时间和换刀次数；尽量使数值计算方便，

程序段要少等。

3) 数值计算

数值计算是指根据加工路线计算刀具中心的运动轨迹。对于带有刀补功能的数控系统，只需计算出零件轮廓相邻几何元素的交点(或切点)的坐标值，得出各几何元素的起点、终点和圆弧的圆心坐标。如果数控系统无刀补功能，还应计算刀具中心运动的轨迹。对于形状比较复杂的零件(如非圆曲线、曲面组成的零件)，需要用直线段或圆弧段逼近，计算出逼近线段的交点坐标值，并限制在允许的误差范围以内。这种情况一般要用计算机来完成数值计算的工作。

4) 编写程序单

在完成工艺处理和数值计算工作后，可以编写零件加工程序，编程人员根据所使用数控系统的指令、程序段格式，逐段编写零件加工程序。编程人员应对数控机床的性能、程序指令代码以及数控机床加工零件的过程等非常熟悉，才能编写出正确的零件加工程序。

5) 输入数控系统

程序编写好之后，可通过键盘等直接将程序输入数控系统，也可通过磁盘驱动器或 RS232 接口输入数控系统。比较老一些的数控系统需要制作穿孔带、磁带等控制介质，再将控制介质上的程序输入数控系统，现在已被淘汰，但是规定的穿孔带代码标准没有变。

6) 程序校验和首件试切

程序送入数控系统后，通常需要经过试运行和试加工两步检查后，才能进行正式加工。通过试运行，校对检查程序，也可利用数控机床的空运行功能进行检验，检查机床的动作和运动轨迹的正确性。对带有刀具轨迹动态模拟显示功能的数控机床可进行数控模拟加工，以检查刀具轨迹是否正确；通过试加工可以检查其加工工艺及有关切削参数设定得是否合理，加工精度能否满足零件图要求，加工工效如何，以便进一步改进，直到加工出满意的零件为止。

2. 数控机床程序编制方法

数控机床程序编制方法可分为手工编程和自动编程两种。

1) 手工编程

手工编程是指各个步骤均由手工编制，即从零件图分析、工艺处理、数据计算、编写程序单、输入程序到程序检验等各步骤主要由人工完成的编程过程。对形状简单的工件，计算比较简单，程序不多，采用手工编程较容易完成，而且经济、及时，因此在简单的点定位加工及由直线与圆弧组成的轮廓加工中，手工编程仍广泛应用。但对于几何形状复杂的零件，特别是具有列表曲线、非圆曲线及曲面的零件(如叶片、复杂模具)，或者表面的几何元素并不复杂而程序量很大的零件(如复杂的箱体)，手工编程就有一定的困难，出错的概率增大，有的甚至无法编出程序，因此必须采用自动编程的方法编制程序。

2) 自动编程

自动编程也称为计算机辅助编程，是利用计算机专用软件编制数控加工程序的过程。它包括数控语言式自动编程和图形交互式自动编程。关于自动编程的有关概念将在 2.3.5 节中进行介绍。

3. 字符与代码

1) 字符与代码的含义

字符(character)是用来组织、控制或表示数据的一些符号，如数字、字母、标点符号、

数学运算符等。它是加工程序的最小组成单位。常规加工程序用的字符分 4 类。第一类是字母，它由 26 个大写字母组成。第二类是数字和小数点，它由 0～9 共 10 个数字及一个小数点组成。第三类是符号，由正号(+)和负号(−)组成。第四类是功能字符，它由程序开始(结束)符“%”、程序段结束符“；”、跳过任选程序段符“/”等组成。

代码由字符组成，数控机床功能代码的标准有美国电子工业协会(EIA)制定的 EIA RS—244 和国际标准化组织(ISO)制定的 ISO—RS 840 两种标准。国际上大都采用 ISO 代码，我国机械工业部根据 ISO 标准制定了 JB/T 3208—1999《数控机床　穿孔带程序段格式中的准备功能 G 和辅助功能 M 的代码》。

2) 数控机床功能代码

数控机床功能代码主要包括准备功能代码和辅助功能代码。

准备功能(G 功能)是使数控机床建立起某种加工方式的指令，如插补、刀具补偿、固定循环等。G 功能代码由地址符 G 和后面的两位数字组成。

辅助功能(M 功能)用于指定主轴的旋转方向、启动、停止、切削液的开关，工件或刀具的夹紧和松开，刀具的更换等功能。从功能代码由地址符 M 和后面的两位数字组成。

不同数控系统的 G 功能代码、M 功能代码及其功能略有不同，详见以后各节内容。

4. 数控机床的坐标系

统一规定数控机床坐标轴及其运动方向，是为了准确地描述机床的运动，简化程序的编制方法，使所编程序具有互换性。目前，ISO 已经统一了标准坐标系。我国已制定了 JB/T 3051—1999《数控机床坐标和运动方向的命名》。

1) 坐标系及运动方向的规定

标准的坐标系采用右手笛卡儿直角坐标系，如图 2.45 所示。这个坐标系的各个坐标轴与机床的主要导轨相平行。直角坐标系 *X*、*Y*、*Z* 三者的关系及其方向用右手定则判定；围绕 *X*、*Y*、*Z* 各轴回转的运动及其正方向+*A*、+*B*、+*C* 分别用右手螺旋定则确定。

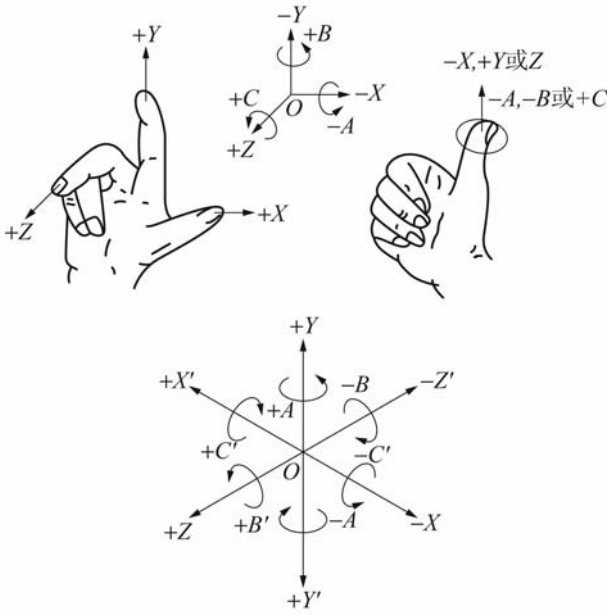


图 2.45　右手笛卡儿直角坐标系

通常在坐标轴命名或编程时，不论机床在加工中是刀具移动，还是被加工工件移动，都一律假定被加工工件相对静止不动，而刀具在移动，即刀具相对运动的原则，并同时规定刀具远离工件的方向为坐标的正方向。

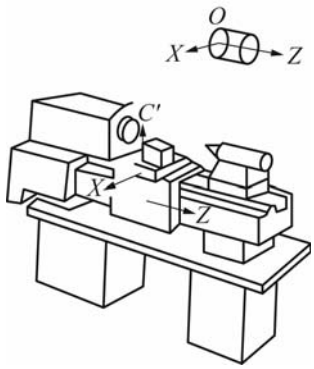


图 2.46　卧式车床

2) 机床坐标轴的确定

确定机床坐标轴时，一般是先确定 *Z* 轴，然后再确定 *X* 轴和 *Y* 轴。

Z 轴的确定。*Z* 轴的方向是由传递切削力的主轴确定的，标准规定：与主轴轴线平行的坐标轴为 *Z* 轴，并且刀具远离工件的方向为 *Z* 轴的正方向，如图 2.46 所示。对于没有主轴的机床，如牛头刨床等，则以与装夹工件的工作台面相垂直的直线作为 *Z* 轴方向。如果机床有几根主轴，则选择其中一个与工作台面相垂直的主轴，并以它来确定 *Z* 轴方向(如龙门铣床)。

X 轴的确定。平行于导轨面，且垂直于 *Z* 轴的坐标轴为 *X* 轴。*X* 坐标是在刀具或工件定位平面内运动的主要坐标。对于工件旋转的机床(如车床、磨床等)，*X* 轴的方向是在工件的径向上，且平行于横滑座导轨面。刀具远离工件旋转中心的方向为 *X* 轴正方向，如图 2.46 所示。对于刀具旋转的机床(如铣床、镗床、钻床等)，如果 *Z* 轴是垂直的，则面对主轴看立柱时，右手所指的水平方向为 *X* 轴的正方向，如图 2.47 所示。如果 *Z* 轴是水平的，则面对主轴看立柱时，左手所指的水平方向为 *X* 轴的正方向，如图 2.48 所示。

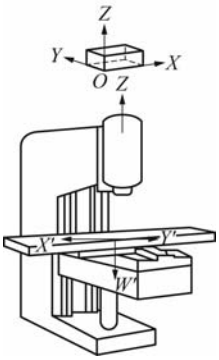


图 2.47　立式铣床

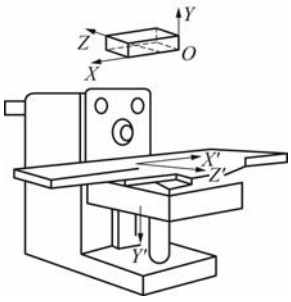


图 2.48　卧式铣床

Y 轴的确定。*Y* 轴垂直于 *X*、*Z* 轴。*Y* 轴的正方向根据 *X* 坐标和 *Z* 坐标的正方向，按照右手笛卡儿直角坐标系来判断。

旋转运动的确定。围绕坐标轴 *X*、*Y*、*Z* 旋转的运动，分别用 *A*、*B*、*C* 表示。它们的正方向用右手螺旋定则判定，如图 2.45 所示。

附加轴。如果在 *X*、*Y*、*Z* 主要坐标以外，还有平行于它们的坐标，可分别指定为 *P*、*Q* 和 *R*。

工件运动时的相反方向。对于工件运动而不是刀具运动的机床，如铣床、镗床、钻床等，必须将前述刀具运动所作的规定，做相反的安排。用带“'”的字母，如“+*Y*'”，表示工件相对于刀具正向运动指令。而不带“'”的字母，如“+*Y*”，则表示刀具相对于工件负

向运动指令。二者表示的运动方向正好相反。对于编程人员只考虑不带“'”的运动方向。

3) 数控机床坐标系的原点与参考点

数控机床坐标系是机床的基本坐标系，机床坐标系的原点也称机械原点或机械零点(*M*)，这个原点是机床固有的点，由生产厂家确定，不能随意改变，它是其他坐标系和机床内部参考点的出发点。不同数控机床坐标系的原点也不同，数控车床的机床原点在主轴前端面的中心上，如图 2.49 所示 *M* 点。数控铣床的机床原点，因生产厂家而异，例如有的数控铣床的机床原点位于机床的左前上方，如图 2.50 所示 *M* 点。立式加工中心的机床原点，一般在机床最大加工范围平面的左前角。如图 2.51 所示 *M* 点。

数控机床参考点 *R* 也称基准点，是大多数具有增量位置测量系统的数控机床所必须具有的。它是数控机床工作区确定的一个点，与机床原点有确定的尺寸联系。参考点在各轴以硬件方式用固定的凸块和限位开关实现。机床每次通电后，移动件(刀架或工作台)都要进行返回参考点的操作，数控装置通过移动件(刀架或工作台)返回参考点后确认出机床原点的位置，从而使数控机床建立机床坐标系。数控车床的参考点 *R* 在 *M* 点的右上方(图 2.49 中未标出)，数控铣床与立式加工中心的参考点 *R* 如图 2.50 和图 2.51 所示。

用机床原点计算被加工零件上各点的坐标并进行编程是很不方便的，在编写零件的加工程序时，常常还要选择一个工件坐标系(又称编程坐标系)。关于工件坐标系将在以后几章内容中进行详细介绍。

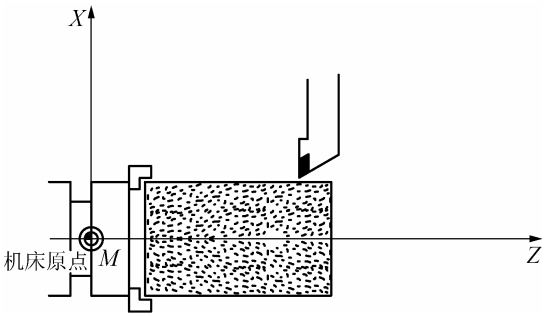


图 2.49　数控车床原点

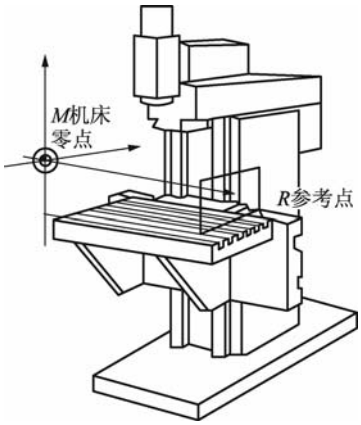


图 2.50　数控铣床原点

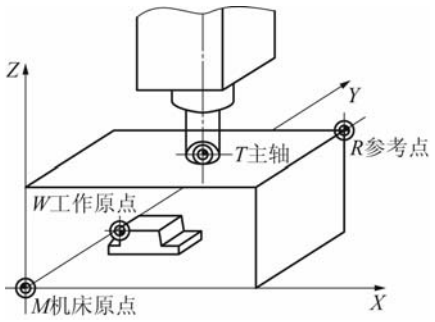


图 2.51　立式加工中心原点

5. 程序段与程序格式

1) 程序段

在数控机床上，把程序中出现的英文字母及其字符称为“地址”，如 X、Y、Z、A、B、C、%等；数字 0～9(包含小数点、“+”、“-”号)称为“数字”。通常来说，每一个不同的地址都代表着一类指令代码，而同类指令则通过后缀的数字加以区别。“地址”和“数字”的组合称为“程序字”(亦称代码指令)，程序字是组成数控加工程序的最基本单位，如 N010、G01、X-100、Z200、F0.1 等。

程序段是可作为一个单位来处理的连续程序字组，它实际上是数控加工程序中的一段程序。数控加工程序的主体由若干个程序段组成，多数程序段用来指令机床完成或执行某一动作。程序段由若干程序字和程序段结束指令构成。如“N010 G01 X-100 Z200 F0.1”；就是一个程序段。在书写和打印程序段时，每个程序段一般占一行，在屏幕显示程序时也是如此。程序段格式是指一个程序段中程序字、字符、数据的书写规则。不同的数控系统，往往有不同或大同小异的程序段格式。

2) 常规加工程序的格式

数控机床的加工程序，以程序字作为最基本的单位，程序字的集合构成了程序段，程序段的集合构成了完整的加工程序。加工零件不同，数控加工程序也不同，但有的程序段是所有程序都必不可少的，有的却是可以根据需要选择使用的。下面是一最简单的加工程序实例。

```
O001;
N01   G00          G90 G54;
N02   S800         M03;
N03   G00 X100     Y100;
N04   Z5;
N05   G01 Z-10     F60;
N06   G00 Z50;
N07   M02;
```

从上面的程序中可以看出；程序以 O001 开头，以 M02 结束。在数控机床上，将 O001 称为程序号，M02 称为程序结束标记。程序中的每一行以“；”作为分行标记，被称为程序段结束符。程序号、程序结束标记、加工程序段是任何加工程序都必须具备的三个要素。

程序号必须位于程序的开头，它一般由字母 O 后缀若干位数字组成。根据采用的标准和数控系统的不同，有时也可以由字符%或字母 P 后缀若干位数字组成，有时还可以直接用多字符程序名(如 TEST1 等)代替程序号。程序号是零件加工程序的代号，它是加工程序的识别标记，不同程序号对应着不同的零件加工程序。

程序结束标记用 M 功能代码(辅助功能代码)表示，它必须写在程序的最后，代表着一个加工程序的结束。程序结束标记代码为 M02 或 M30。

程序段作为程序最主要的组成部分，通常由 N 及后缀的数字(称顺序号或程序段号)开头；以程序段结束标记 CR(或 LF)结束；实际使用时，常用符号“；”结束标记。

2.3.2　数控车削加工程序编制

数控车床主要用来加工轴类零件的内外圆柱面、圆锥面、螺纹表面、成形回转体表面

等。对于盘类零件可进行钻、扩、铰、镗孔等加工。数控车床还可以完成车端面、切槽等加工。

本节以配置 FANUC—0T 系统的 MJ—460 数控车床为例介绍数控车床的编程。图 2.52 为 MJ—460 数控车床的外观图。

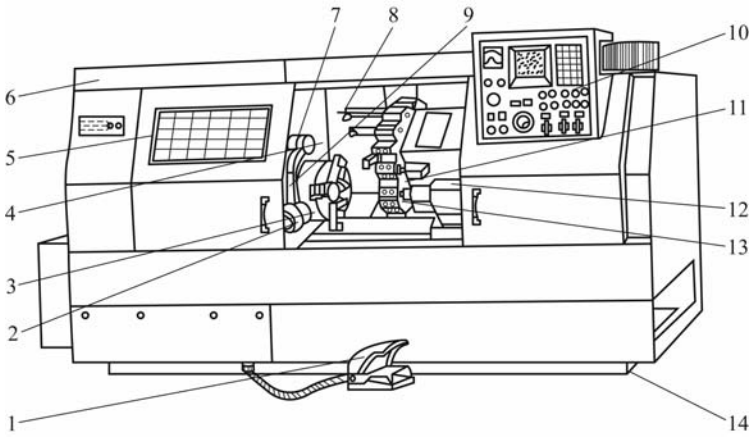


图 2.52　MJ—460 数控车床的外观图

MJ—460 数控车床为两坐标连续控制的卧式车床。如图所示，床身 14 为斜床身，床身导轨面上支承着导轨护板，不仅排屑方便，而且导轨保护性好。床身的左上方安装有主轴箱 4，主轴采用变频调速，免去了变速传动装置，因此使主轴箱的结构变得十分简单。为了快速而又省力地装夹工件，主轴卡盘 3 的夹紧与松开由主轴尾端的液压缸控制。床身右上方安装有尾座 12。顶尖可由液压缸控制伸缩。滑板的倾斜导轨上安装有回转刀架 11，其刀盘上有 16 个工位，最多安装 12 把刀具 8。刀架上有自动切削液喷头 13。滑板上分别安装有 *X* 轴和 *Z* 轴的进给传动装置。主轴箱前端面上可以安装对刀仪 2(其结构见图 2.21)，用于车床的机内对刀。检测刀具时，对刀仪的转臂 9 摆出，其上端的接触式传感器测头对所用刀具进行检测。检测完成后，对刀仪的转臂摆回图中所示的原位，且测头被锁在对刀仪防护罩 7 中。10 是操作面板。5 是机床防护门，可以配置手动防护门，也可以配置气动防护门。数控装置 6 安装在机床的后侧。1 是主轴卡盘夹紧与松开的脚踏开关。

1. 数控车床的编程特点

(1) 在一个程序段中，根据图样上标注的尺寸，可以采用绝对坐标编程、增量坐标编程或二者混合编程。

(2) 由于被加工零件的径向尺寸在图样上和在测量时都以直径值表示，所以直径方向用绝对坐标编程时 X 以直径值表示，用增量坐标编程时以径向实际位移量的 2 倍值表示，并附上方向符号。

(3) 由于车削加工常用棒料或锻料作为毛坯，加工余量较大，所以为简化编程，数控装置常具备不同形式的固定循环，可进行多次重复循环切削。

(4) 编程时一般认为车刀刀尖是一个点，而实际上为了延长刀具寿命和工件表面质量，车刀刀尖常磨成一个半径不大的圆弧。因此为提高工件的加工精度，当编制圆头刀程序时需要对刀具半径进行补偿。大多数数控车床都具有刀具半径自动补偿功能(G41，G42)，这

类数控车床可直接按工件轮廓尺寸编程。对不具有此功能的数控车床，编程时需先计算补偿量。

(5) 不同组 G 功能代码可编写在同一程序段内，且均有效；相同组 G 功能代码若编写在同一程序段内，后面的 G 功能代码有效。G 功能代码的分组及功能见表 2-8，M 功能代码的功能见表 2-9。

表 2-8　G 功能代码的分组及准备功能

序号	代码	组别	功　能	序号	代码	组别	功　能
1	*G00	01	快速定位	17	G50	00	坐标系设定、主轴最大速度设定
2	G01		直线插补	18	G65		调用宏循环
3	G02		圆弧插补(顺时针)	19	G70	00	精车循环
4	G03		圆弧插补(逆时针)	20	G71		外圆粗车循环
5	G04	00	暂停	21	G72		端面粗车循环
6	G10		数据设定	22	G73		固定形状粗车循环
7	G20	06	英制输入	23	G74		端面钻孔循环
8	*G21		公制输入	24	G75		外圆车槽循环
9	*G25	08	主轴速度波动检测断	25	G76		多头螺纹循环
10	G26		主轴速度波动检测通	26	G90	01	外圆切削循环
11	G27	00	参考点返回检查	27	G92		螺纹切削循环
12	G28		参考点返回	28	G94		端面切削循环
13	G32	01	螺纹切削	29	G96	02	主轴恒线速控制
14	*G40	07	取消刀尖半径补偿	30	*G97		取消主轴恒线速控制
15	G41		刀尖半径左补偿	31	G98	05	每分钟进给
16	G42		刀尖半径右补偿	32	*G99		每转进给

注：1. 00 组的 G 功能代码为非模态，其他各组中的 G 功能代码均为模态。

2. 标有*的 G 功能代码为数控系统通电后的状态。

表 2-9　M 功能代码的功能

序 号	代 码	功　能	序 号	代 码	功　能
1	M00	程序停止	9	M23	切削螺纹倒角
2	M01	选择停止	10	M24	切削螺纹不倒角
3	M02	程序结束	11	M25	误差检测
4	M03	主轴正转	12	M26	误差检测取消
5	M04	主轴反转	13	M30	复位并返回程序开始
6	M05	主轴停止	14	M98	调子程序
7	M08	切削液开	15	M99	返回子程序
8	M09	切削液关	—	—	—

2. 数控车床工件坐标系的设定

在编写工件的加工程序时，首先是在建立机床坐标系后设定工件坐标系。

1) 数控车床坐标系的建立

数控车床欲对工件的车削进行程序控制，必须首先建立机床坐标系。在数控车床通电

之后，当完成了返回机床参考点的操作后，CRT 屏幕上立即显示刀架中心在机床坐标系中的坐标值，即建立起了机床坐标系。MJ—460 数控车床的机床坐标系及机床参考点与机床原点的相对位置如图 2.53 所示。

在以下三种情况下，数控系统失去了对机床参考点的记忆，因此必须使刀架重新返回机床参考点。

(1) 数控车床关机以后重新接通电源开关时。

(2) 数控车床解除急停状态后。

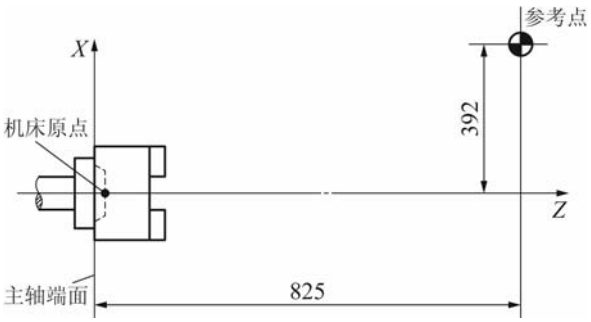


图 2.53　机床坐标系

(3) 数控车床超程报警信号解除之后。

2) 工件坐标系的设定

工件坐标系是用于确定工件几何图形上各几何要素(如点、直线、圆弧等)的位置而建立的坐标系，是编程人员在编程时使用的。工件坐标系的原点就是工件原点，而工件原点是人为设定的。数控车床工件原点一般设在主轴中心线与工件左端面或右端面的交点处。

工件坐标系设定后，CRT 显示屏幕上显示的是基准车刀刀尖相对工件原点的坐标值。编程时，工件各尺寸的坐标值都是相对工件原点而言的。因此，数控车床的工件原点又是程序原点或编程原点。

建立工件坐标系使用 G50 功能指令，设定工件坐标系的指令格式如下。

G50　X__ Z__ ；

说明：

(1) 格式中 G50 表示工件坐标系的设定，X、Z 表示工件原点的位置。

(2) 程序如设该指令，则应设定在刀具运动指令之前。

(3) 当系统执行该指令后，刀具并不运动，系统根据 G50 指令中的 X、Z 值从刀具起始点反向推出工件原点。

(4) 在 G50 程序段中，不允许有其他功能指令，但 S 指令除外，因为 G50 还有另一种功用——设定恒切削速度。

例如，如图 2.54 所示，O 为工件原点，P_0 为刀具起始点，设定工件坐标系指令为

G50　X300　Z480；

车床刀架的换刀点是指刀架转位换刀时所在的位置。换刀点是任意一点，可以和刀具起始点重合，它的设定原则是以刀架转位时不碰撞工件和车床上其他部件为准则。换刀点的坐标值一般用实测的方法来设定。

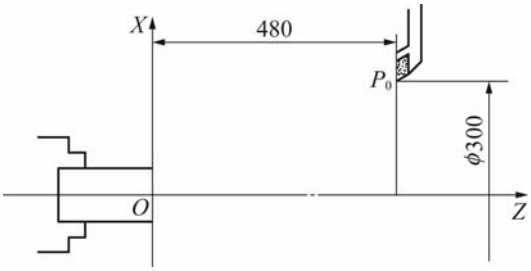


图 2.54　工件坐标系

3. 常用编程指令的使用

1) 快速定位指令 G00

格式：G00　X(U)__ Z(W)__；

说明：

(1) G00 指令使刀具在点位控制方式下从当前点以快移速度向目标点移动，G00 可以简写成 G0。绝对坐标(X、Z)和增量坐标(U、W)可以混编。不运动的坐标可以省略。

(2) X、U 的坐标值均为直径量。

(3) 程序中只有一个坐标值 X 或 Z 时，刀具将沿该坐标方向移动；有两个坐标值 X 和 Z 时，刀具将先以 1∶1 步数两坐标联动，然后单坐标移动，直到终点。

(4) G00 快速移动速度由机床设定(*X* 轴：12m/min；*Z* 轴：16m/min)，可通过操作面板上的速度修调开关进行调节。

例如：如图 2.55 所示，刀尖从 *A* 点快进到 *B* 点，分别用绝对坐标、增量坐标和混合坐标方式写出该程序段(直径编程)。

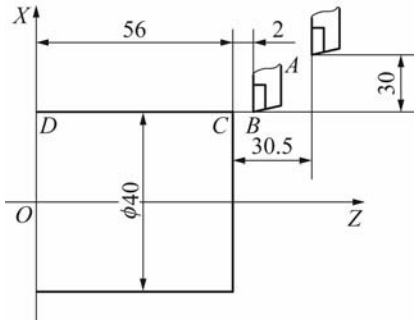


图 2.55　快速定位指令实例

绝对坐标方式：G00　X40　Z58；

增量坐标方式：G00　U-60　W-28.5；

混合坐标方式：G00　X40　W-28.5；或　G00　U-60　Z58；

2) 直线插补指令 G01

格式：G01　X(U)__ Z(W)__ F__；

说明：

(1) G01 指令使刀具以 F 指定的进给速度直线移动到目标点，一般将其作为切削加工运动指令，既可以单坐标移动，又可以两坐标同时插补运动。X(U)、Z(W)为目标点坐标。F

为进给速度(进给率)，在 G98 指令下，F 为每分钟进给(mm/min)；在 G99(默认状态)指令下，F 为每转进给(mm/r)。

(2) 程序中只有一个坐标值 X 或 Z 时，刀具将沿该坐标方向移动；有两个坐标值 X 和 Z 时，刀具将按所给的终点直线插补运动。

例如：如图 2.55 所示，刀具从 B 点以 F0.1(F=0.1 mm/r)进给到 D 点的加工程序如下。

G01　X40　Z0　F0.1；或 G01　U0　W-58　F0.1；

又如图 2.56 所示，刀具沿 $P_0 \rightarrow P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3 \rightarrow P_0$ 运动(图中⋯→为 G00 方式；⋯→为 G01 方式)。加工程序如下。

绝对坐标方式：

```
N030  G00  X50   Z2；(P0→P1)
N040  G01  Z-40  F0.1；(P1→P2)
N050  X80  Z-60；(P2→P3)
N060  G00  X200  Z100；(P3→P0)
```

增量坐标方式：

```
N030  G00  U-150  W-98；(P0→P1)
N040  G01  W-42   F0.1；(P1→P2)
N050  U30  W-20；  (P2→P3)
N060  G00  U120   W160；(P3→P0)
```

3) 圆弧插补指令 G02、G03

格式：G02(G03) X(U)__ Z(W)__ R__ F__；或 G02(G03) X(U)__ Z(W)__ I__ K__ F__；

说明：

(1) 该指令控制刀具按所需圆弧运动。G02 为顺时针圆弧插补指令，G03 为逆时针圆弧插补指令；X、Z 表示圆弧终点绝对坐标，U、W 表示圆弧终点相对于圆弧起点的增量坐标，R 表示圆弧半径，I、K 表示圆心相对圆弧起点的增量坐标，F 表示进给速度。

(2) X、U、I 均采用直径量编程。

例如：如图 2.57 所示工件，加工顺时针圆弧的程序如下。

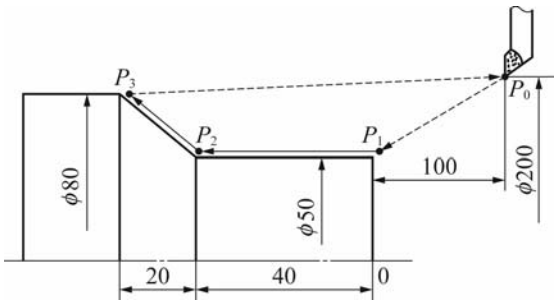


图 2.56　直线插补

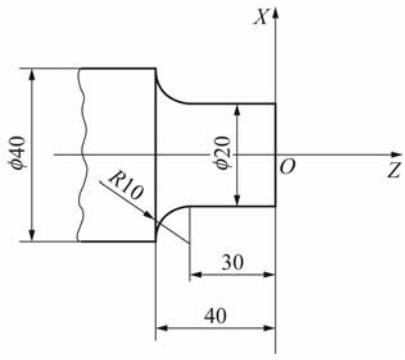


图 2.57　顺时针车圆弧

绝对坐标方式：

```
N050  G01  X20  Z-30  F0.1；
N060  G02  X40  Z-40  R10  F0.08；
```

增量坐标方式：

```
N050  G01  U0  W-32  F0.1;
N060  G02  U20  W-10  I20  K0  F0.08;
```

例如：如图 2.58 所示的工件，加工逆时针圆弧的程序如下。

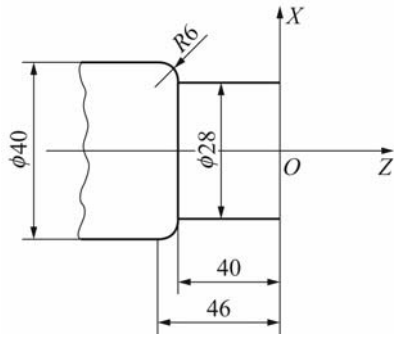


图 2.58　逆时针车圆弧

绝对坐标方式：

```
N050  G01  X28  Z-40  F0.1;
N060  G03  X40  Z-46  R6  F0.08;
```

增量坐标方式：

```
N050  G01  U0  W-42  F0.1;
N060  G03  U12  W-6  R6  F0.08;
```

4) 程序延时(暂停)指令 G04

格式：G04　X__；或 G04　U__；或 G04　P__；

说明：

(1) G04 指令按给定时间延时，不做任何动作，延时结束后再自动执行下一段程序。该指令主要用于车削环槽、不通孔及自动加工螺纹时可使刀具在短时间无进给方式下进行光整加工。

(2) X、U 表示 s(秒)，P 表示 ms(毫秒)。程序延时时间范围为 16ms～9 999.999s。

例如：程序暂停 2.5s 的加工程序如下。

```
G04 X2.5；或 G04 U2.5；或 G04 P2500；
```

5) 英制和公制输入指令 G20、G21

格式：G20(G21)

说明：

(1) G20 表示英制输入，G21 表示公制输入。G20 和 G21 是两个可以相互取代的代码，但不能在一个程序中同时使用 G20 和 G21。

(2) 机床通电后的状态为 G21 状态。

6) 进给速度控制指令 G98、G99

格式：G98(G99)

说明：

(1) G98 为每分进给(mm/min)，G99 为每转进给(mm/r)。G98 通常用于数控铣床、加工中心类进给指令，G99 通常用于数控车床类进给指令。G99 为该数控车床通电后的状态。

(2) 在机床操作面板上有进给速度倍率开关，进给速度可在 0～150%范围内以每级 10%进行调整。在零件试切削时，进给速度的修调可使操作者选取最佳的进给速度。

7) 参考点返回检测指令 G27

格式：G27　X(U)__；(*X* 向参考点检查)；

G27　Z(W)__；(*Z* 向参考点检查)；

G27　X(U)__　Z(W)__；(*X*、*Z* 向参考点检查)。

说明：

(1) G27 指令用于参考点位置检测。执行该指令时刀具以快速运动方式在被指定的位置上定位，到达的位置如果是参考点，则返回参考点灯亮。仅一个轴返回参考点时，对应轴的灯亮。若定位结束后被指定的轴没有返回参考点则出现报警。执行该指令前应取消刀具位置偏置。

(2) X、Z 表示参考点的坐标值，U、W 表示到参考点所移动的距离。

(3) 执行 G27 指令的前提是机床在通电后必须返回过一次参考点。

8) 自动返回参考点指令 G28

格式：G28　X(U)__；*X* 向返回参考点

　　G28　Z(W)__；*Z* 向返回参考点

　　G28　X(U)__　Z(W)__；*X*、*Z* 向同时返回参考点

说明：

(1) G28 指令可使被指令的轴自动地返回参考点。X(U)、Z(W)是返回参考点过程中的中间点位置，用绝对坐标或增量坐标指令。如图 2.59 所示，在执行“G28 X80 Z50；”程序后，刀具以快速移动速度从 *B* 点开始移动，经过中间点 *A*(40，50)，移动到参考点 *R*；或编程“G28 U2 W2；”后，则刀具沿 *X*、*Z* 向快速离开 *B* 点，经过中间点(相对于 *B* 点 U=2，W=2)，移动到参考点 *R*。

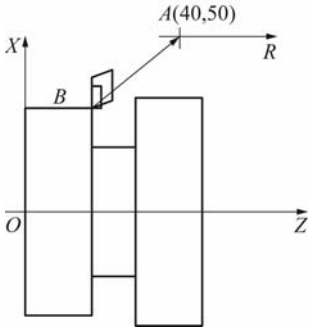


图 2.59　自动返回参考点

(2) X(U)、Z(W)是刀架出发点与参考点之间的任一中间点，但此中间点不能超过参考点。有时为保证返回参考点的安全，应先 *X* 向返回参考点，然后 *Z* 向再返回参考点。

9) 主轴控制指令 G96、G97

格式：G96　S__；　G97　S__；

说明：

(1) G96 指令用于接通机床恒线速控制，此处 S 指定的数值表示切削速度(m/min)。数控装置从刀尖位置处计算出主轴转速，自动而连续的控制主轴转速，使之始终达到由 S 指定的数值。设定恒线速可以使工件各表面获得一致的表面粗糙度。

(2) G97 指令用于取消恒线速控制，并按 S 指定的主轴转速旋转，此处 S 指定的数值表示主轴转速(r/min)，也可以不指定 S。

(3) 在恒线速控制中，由于数控系统是将 X 的坐标值当作工件的直径来计算主轴转速，所以在使用 G96 指令前必须正确的设定工件坐标系。

(4) 当刀具逐渐靠近工件中心时，主轴转速会越来越高，此时工件有可能因卡盘调整压力不足而从卡盘中飞出。为防止这种事故发生，在使用 G96 指令之前，最好设定 G50 指令来限制主轴最高转速。

10) 主轴最高转速设定指令 G50

格式：G50　S__；

说明：

(1) G50 指令有坐标系设定和主轴最高转速设定两种功能，此处指后一种功能，用 S 指定的数值来设定主轴最高转速(r/min)，如“G50—S2000；”是把主轴最高转速设定为 2000r/min。

(2) 在设置恒线速度后，由于主轴的转速在工件不同截面上是变化的，为防止主轴转速过高而发生危险，在设置恒线速度前，可以将主轴最高转速设定在某一个最高值，切削过程中当执行恒线速度时，主轴最高转速将被限制在这个最高值。

11) 螺纹车削指令 G32

格式：G32　X(U)__ Z(W)__ F__；

说明：

(1) 使用 G32 指令可进行等螺距的直螺纹、圆锥螺纹以及端面螺纹的切削。

(2) X(U)、Z(W)为螺纹终点坐标，F 为长轴螺距，如图 2.60 所示，若锥角 $\alpha \leqslant 45°$，F 表示 Z 轴螺距，否则 F 表示 X 轴螺距。F=0.001 mm～500 mm。

(3) δ_1、δ_2 为车削螺纹时的切入量与切出量，如图 2.29 和表 2−4 所示。一般 δ_1=2 mm～5 mm，δ_2=(1/4～1/2)δ_1。

(4) 背吃刀量及进给次数可参考表 2−7，否则难以保证螺纹精度，或会发生崩刀现象。

(5) 车削螺纹时，主轴转速应在保证生产效率和正常切削的情况下，选择较低转速。一般按机床或数控系统说明书中规定的计算式进行确定，可参考公式

$$n_{螺} \leqslant n_{允} / P$$

式中　$n_{允}$——编码器允许的最高工作转速(r/min)；

P——工件螺纹的螺距或导程(mm)。

(6) 在螺纹粗加工和精加工的全过程中，不能使用进给速度倍率开关调节速度，进给速度保持开关也无效。

例如：如图 2.61 所示直螺纹车削。已知直螺纹车削参数：螺纹螺距 P =2 mm，引入量 δ_1=3 mm，超越量 δ_2=1.5 mm，分两次车削，背吃刀量为 a_p=0.5 mm。

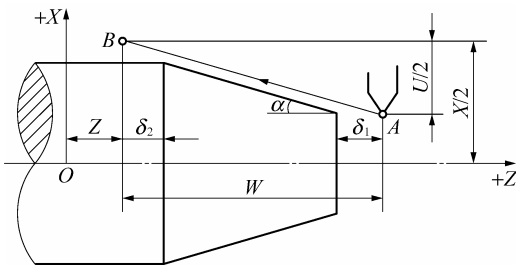


图 2.60　螺纹加工

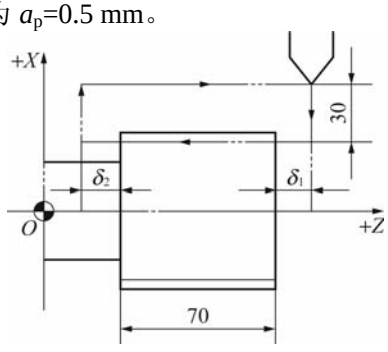


图 2.61　直螺纹车削

程序如下：

```
N100  G00  U-60;
N110  G32  W-74.5  F2;
N120  G00  U60;
N130  W74.5;
N140  U-61;
N150  G32  W-74.5  F2;
N160  G00  U61;
N170  W74.5;
```

例如：如图 2.62 所示圆锥螺纹车削，已知圆锥螺纹切削参数：螺纹螺距 P=3.5 mm，引入量 δ_1=2 mm，超越量 δ_2=1 mm，分两次车削，背吃刀量 a_p=0.5 mm。

程序如下：

```
N100  G00  X13  Z72;
N110  G32  X42  W-43  F3.5;
N120  G00  X50;
N130  Z72;
N140  X12;
N150  G32  X41  W-43  F3.5;
N160  G00  X50;
N170  Z72;
```

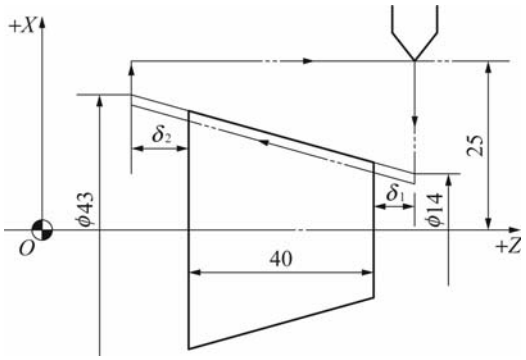


图 2.62　圆锥螺纹车削

4. 车削加工循环

车削加工余量较大的表面时需多次进刀切除，此时采取固定循环程序可以缩短程序段的长度，节省编程时间。

1) 单一外形固定循环指令 G90、G92、G94

(1) 外径、内径车削循环指令 G90。

圆柱面车削循环的编程格式：G90　X(U)__　Z(W)__　F__；

圆锥面车削循环的编程格式：G90　X(U)__　Z(W)__　R__　F__；

说明：

① X、Z 为终点坐标，U、W 为终点相对于起点坐标值的增量。如图 2.63 所示为圆柱面车削循环，图中 R 表示快速进给，F 为按指定速度进给。用增量坐标编程时地址 U、W

的符号由轨迹 1、2 的方向决定，沿负方向移动为负号，否则为正号。单程序段加工时，按一次循环启动键，可进行 1、2、3、4 的轨迹操作。图 2.64 所示为圆锥面车削循环，图中 *R* 表示圆锥体大小端的差值，X(U)、Z(W)的意义同 G90 指令。用增量坐标编程时要注意 *R* 的符号，确定方法是锥面起点坐标大于终点坐标时为正，反之为负。G90 指令可用来车削外径，也可用来车削内径。

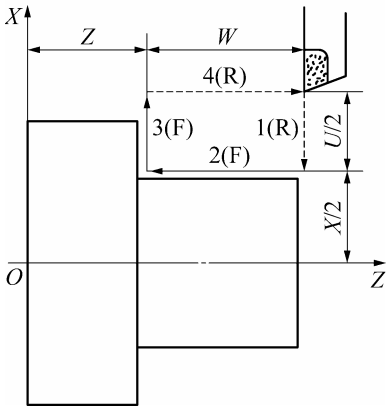


图 2.63　圆柱面车削循环

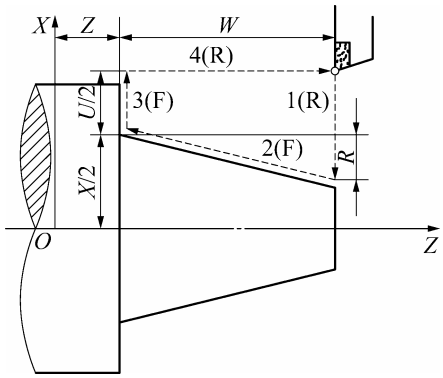


图 2.64　圆锥面车削循环

② G90、G92、G94 都是模态量，当这些代码在没有被同组的其他代码(G00、G01)取代以前，程序中又出现 M 功能代码时，则先将 G90、G92、G94 代码重新执行一遍，然后才执行 M 功能代码，这一点在编程时要特别注意。

例如：N100　G90　U-50　W-20　F0.2；

　　N110　M00；

当执行完 N110 段时，先重复执行 N100 段的动作，然后再执行 N110 段。为避免这种情况，应将程序段改为

```
N100  G90  U-50  W-20  F0.2;
N110  G00  M00;
```

此处仅取消 G90 状态，并不执行任何动作。

(2) 螺纹车削循环指令 G92。

直螺纹车削循环的编程格式(图 2.65(b))：　G92　X(U)__　Z(W)__　F__；

圆锥螺纹车削循环的编程格式(图 2.65(a))：G92　X(U)__　Z(W)__　R__　F__；

说明：

① G92 指令可使螺纹加工用车削循环完成，其中 X(U)、Z(W)为终点坐标，F 为螺纹的导程，R 为圆锥螺纹大小端的差值。地址 U、W 的符号判别同 G90 指令。

② 螺纹的导程范围及主轴速度的限制等与 G32 指令相同。

(3) 端面车削循环指令 G94。

端面车削循环包括直端面车削循环和圆锥端面车削循环。

直端面车削循环编程格式(图 2.66)：　G94 X(U)__　Z(W)__　F__；

圆锥端面车削循环编程格式(图 2.67)：G94 X(U)__　Z(W)__　R__　F__；

各地址代码的用法同 G90 指令。

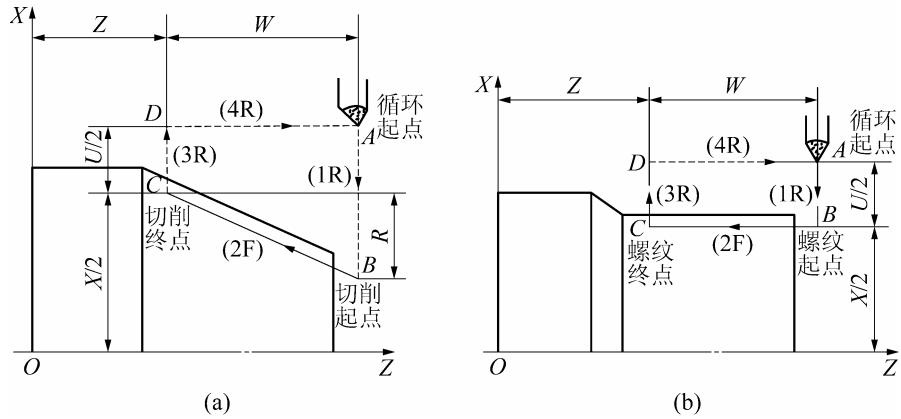


图 2.65　螺纹车削循环

2) 复合固定循环指令

这类循环指令用于无法一次走刀即能加工到规定尺寸的场合，主要在粗车和多次走刀车螺纹的情况下使用。如在一根棒料上车削阶梯相差较大的轴，或车削铸、锻件的毛坯余量时都有一些重复进行的动作，且每次走刀的轨迹相差不大。利用复合固定循环指令，只要编出最终走刀路线，给出每次切除的余量深度或循环的次数，机床即可自动地重复切削，直到工件完成为止。主要有以下几种复合固定循环指令。

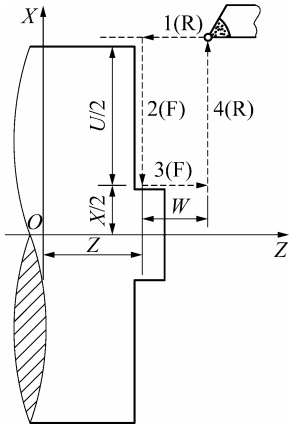


图 2.66　直端面车削循环

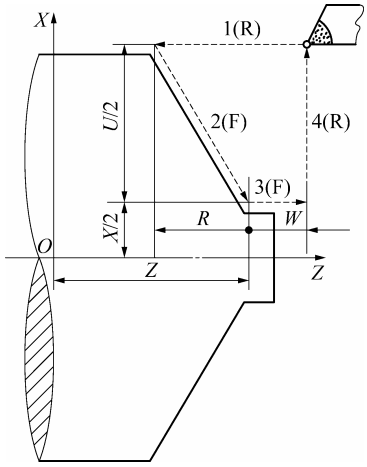


图 2.67　圆锥端面车削循环

(1) 外径、内径粗加工循环指令 G71。

格式：G71　P *ns*　Q *nf*　U Δ*u*　W Δ*w*　D Δ*d*　(F__　S__　T)；

说明：

① G71 指令适用于圆柱毛坯料粗车外径和圆筒毛坯料粗车内径。G71 指令程序段内要指定精加工工件程序段的顺序号、精加工余量、粗加工每次切深、F 功能、S 功能、T 功能等，刀具循环路径如图 2.68 所示。

② *ns* 为精加工第一个程序段的顺序号；*nf* 为精加工最后一个程序段的顺序号；Δ*u* 为 *X* 轴方向的精加工余量(直径值)；Δ*w* 为 *Z* 轴方向的精加工余量；Δ*d* 为粗加工每次切深。

(2) 端面粗加工循环指令 G72。

格式：G72　P *ns*　Q *nf*　U Δ*u*　W Δ*w*　D Δ*d*　(F__　S__　T)；

说明：

G72 指令适用于圆柱毛坯料端面方向的加工，刀具的循环路径如图 2.69 所示。G72 指令与 G71 指令类似，不同之处就是刀具路径是按径向方向循环的。

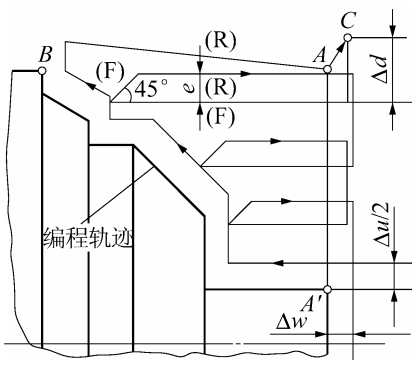


图 2.68　外径粗加工循环

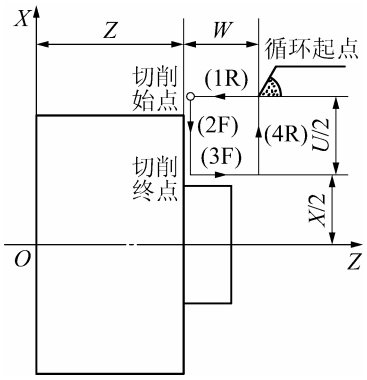


图 2.69　端面粗加工循环

(3) 图形重复车削循环指令 G73。

格式：G73　P *ns*　Q *nf*　I Δ*i*　K Δ*k*　U Δ*u*　W Δ*w*　D Δ*d*　(F__S__T)；

说明：

① G73 指令与 G71、G72 指令功能相同，只是刀具路径是按工件精加工轮廓进行循环的，如图 2.70 所示。如铸件、锻件等毛坯已具备了简单的零件轮廓，这时粗加工使用 G73 指令可以节省时间，提高功效。

② *ns*、*nf*、Δ*u* 、Δ*w* 的含义与 G71 指令相同；Δ*i* 为 *X* 轴方向的退出距离和方向；Δ*k* 为 *Z* 轴方向的退出距离和方向；Δ*d* 为粗车次数。

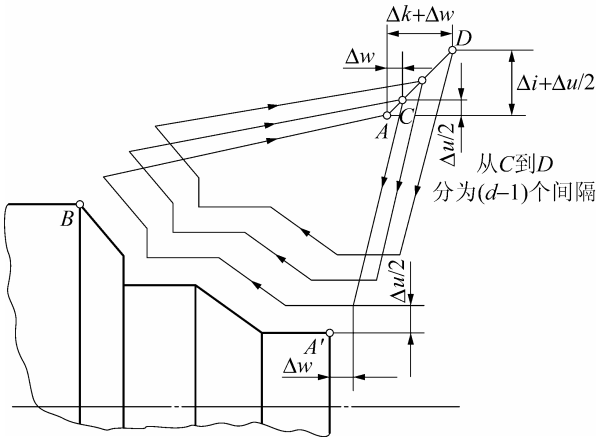


图 2.70　图形重复车削循环

(4) 精加工循环指令 G70。

格式：G70　P *ns*　Q *nf* ；

说明：

G70 为执行 G71、G72、G73 粗加工循环指令以后的精加工循环指令。在 G70 指令程序段内要给出精加工第一个程序段的序号和精加工最后一个程序段的序号。

【例 2.1】 如图 2.71 所示工件，试用 G70、G71 指令编程。

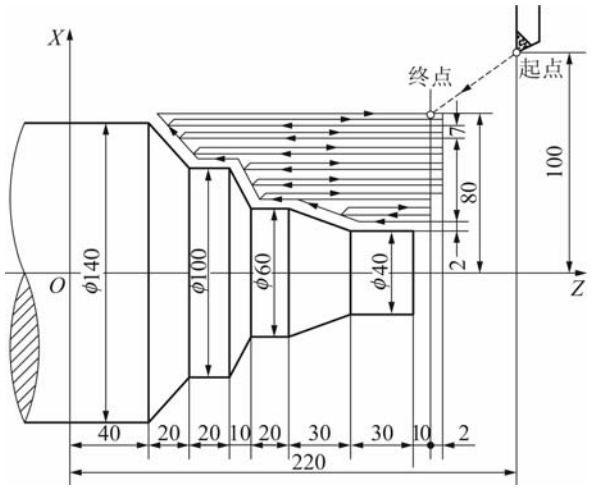


图 2.71　粗、精车削实例

程序如下：

```
O1000;                                          程序名
N010  G50  X200  Z220;                          坐标系设定
N020  M04  S800  T0300;                         主轴旋转
N030  G00  X160  Z180  M08;                     快速到达点(160，180)
N040  G71 P050 Q110 U4 W2 D7 F0.2 S500;         粗车循环，程序段 N050～N110
N050  G00  X40  S800;                           背吃刀量为 7mm
N060  G01  W-40  F0.1;
N070  X60  W-30;
N080  W-20;
N090  X100  W-10;
N100  W-20;
N110  X140  W-20;
N120  G70  P050  Q110;                          精车循环
N130  G00  X200  Z220  M09;
N140  M30;
```

注意： 包含在粗车循环 G71 程序段中的 F、S、T 有效，包含在 *ns* 到 *nf* 中的 F、S、T 对于粗车无效。因此上例中粗车时的进给量为 0.2 mm/r，主轴转速为 500 r/min；精车时进给量为 0.1 mm/r，主轴转速为 800 r/min。

5. 刀具补偿功能

数控车床均有刀具补偿功能，刀架在换刀时前一刀尖位置和更换新刀具的刀尖位置之间会产生差异，以及由于刀具的安装误差、刀具磨损和刀具刀尖圆弧半径的存在等，在数控加工中必须利用刀具补偿功能予以补偿，才能加工出符合图样形状要求的零件。此外合理地利用刀具补偿功能还可以简化编程。

刀具功能又称为 T 功能，它是进行刀具选择和刀具补偿的功能。

格式：T ×× ××

刀具补偿号

刀具号

说明：

(1) 刀具号从 01～12；刀具补偿号从 00～16，其中 00 表示取消某号刀的刀具补偿。

(2) 通常以同一编号指令刀具号和刀具补偿号，以减少编程时的错误，如 T0101 表示 01 号刀调用 01 补偿号设定的补偿值，其补偿值存储在刀具补偿存储器内。又如 T0700 表示调用 07 号刀，并取消 07 号刀的补偿值。

数控车床的刀具补偿功能包括刀具位置补偿和刀尖圆弧半径补偿两个方面。

1) 刀具位置补偿

刀具位置补偿又称为刀具偏置补偿或刀具偏移补偿，亦称为刀具几何位置及磨损补偿。

在下面 3 种情况下，均需进行刀具位置的补偿。

(1) 在实际加工中，通常是用不同尺寸的若干把刀具加工同一轮廓尺寸的零件，而编程时是以其中一把刀为基准设定工件坐标系的，因此必须将所有刀具的刀尖都移到此基准点。利用刀具位置补偿功能，即可完成。

(2) 对同一把刀来说，当刀具重磨后再把它准确地安装到程序所设定的位置是非常困难的，总是存在着位置误差。这种位置误差在实际加工时便成为加工误差。因此在加工前，必须用刀具位置补偿功能来修正安装位置误差。

(3) 每把刀具在其加工过程中，都会有不同程度的磨损，而磨损后刀具的刀尖位置与编程位置存在差值，这势必造成加工误差，这一问题也可以用刀具位置补偿的方法来解决，只要修改每把刀具在相应存储器中的数值即可。例如某工件加工后外圆直径比要求的尺寸大(或小)了 0.1mm，则可以用 U-0.1(或 U0.1)修改相应刀具的补偿值。当几何位置尺寸有偏差时，修改方法类同。

刀具位置补偿一般用机床所配对刀仪自动完成，也可用手动对刀和测量工件加工尺寸的方法，测出每把刀具的位置补偿量并输入到相应的存储器中。当程序执行了刀具位置补偿功能后，刀尖的实际位置就代替了原来的位置。

值得说明的是，刀具位置补偿一般是在换刀指令后第一个含有移动指令的程序段中进行，或者说刀具位置补偿是在上个程序段的执行过程中完成的。例如 N50 程序段为

```
N50  G00  X50  Z78  T0100;
```

该程序段中没有刀具补偿，刀尖运动轨迹如图 2.72(a)中实线所示，即从 P_0 运动到 P_1。

当增加了刀具补偿之后变为

```
N50  G00  X50  Z78  T0101;
```

刀具位置补偿量在 01 号的存储器中，设定 X= +2、Z= −2，其运动结果如图 2.72(a)中虚线所示，刀尖从 P_0 运动到 P_1'。如果下一个程序段是车 ϕ50 外圆，那么刀尖由 P_1' 点开始运动，加工出的零件表面是符合零件图样要求的。

如果采用下面的两程序段，其结果就不同了。

```
N50  G00  X50  Z78  T0100;
N60  G01  Z15  T0101;
```

执行完 N50 程序段后，刀尖从 P_0 运动到 P_1，执行 N60 时再进行刀具补偿，切削出的工件表面必然是圆锥面，如图 2.72(b)中 P_1P_1' 虚线所示，故加工出的是不合格的零件。

取消刀具位置补偿是在加工完该道的工序之后，返回换刀点的程序段中进行的。

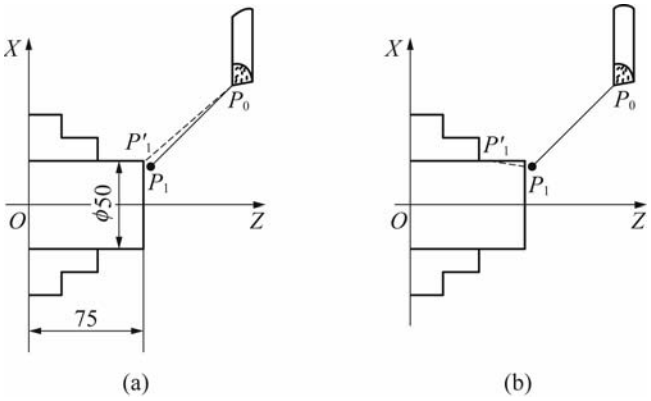


图 2.72　刀具补偿程序执行情况

2) 刀尖圆弧半径补偿

编制数控车床加工程序时，将车刀刀尖看作一个点。但是为了提高刀具寿命和降低加工表面的粗糙度 R_a 的值，通常是将车刀刀尖磨成半径不大的圆弧，一般圆弧半径 R 在 0.4mm～1.6mm 之间。如图 2.73 所示，编程时以理论刀尖点 P(又称刀位点或假想刀尖点：沿刀片圆角切削刃作 X、Z 两方向切线相交于 P 点)来编程，数控系统控制 P 点的运动轨迹。而切削时，实际起作用的切削刃是圆弧的各切点，这势必会产生加工表面的形状误差。而刀尖圆弧半径补偿功能就是用来补偿由于刀尖圆弧半径引起的工件形状误差。

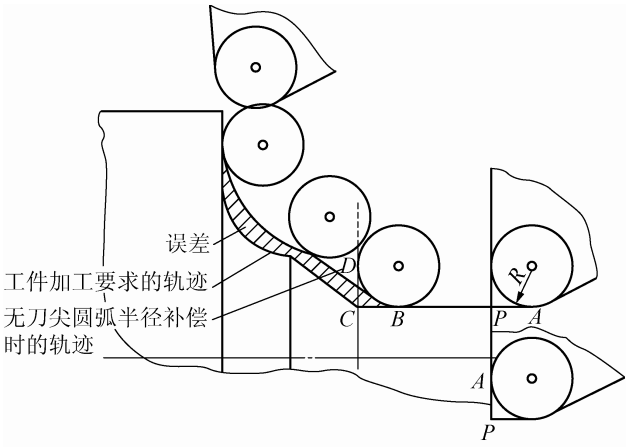


图 2.73　刀尖圆弧半径对加工精度的影响

切削工件的右端面时，车刀圆弧的切点 A 与理论刀尖点 P 的 Z 坐标值相同；车外圆时车刀圆弧的切点 B 与点 P 的 X 坐标值相同。切削出的工件没有形状误差和尺寸误差，因此可以不考虑刀尖圆弧半径补偿。如果车削外圆柱面后继续车削圆锥面，则必存在加工误差

BCD(误差值为刀尖圆弧半径)，这一加工误差必须靠刀尖圆弧半径补偿的方法来修正。

车削圆锥面和圆弧面部分时，仍然以理论刀尖点 *P* 来编程，刀具运动过程中与工件接触的各切点轨迹为图中所示无刀尖圆弧半径补偿时的轨迹。该轨迹与工件加工要求的轨迹之间存在着图中斜线部分的误差，直接影响到工件的加工精度，而且刀尖圆弧半径越大，加工误差越大。可见，对刀尖圆弧半径进行补偿是十分必要的。当采用刀尖圆弧半径补偿时，车削出的工件轮廓就是图中所示工件加工要求的轨迹。

3) 实现刀尖圆弧半径补偿功能的准备工作

在加工工件之前，要把刀尖圆弧半径补偿的有关数据输入到存储器中，以便使数控系统对刀尖的圆弧半径所引起的误差进行自动补偿。

(1) 刀尖半径。工件的形状与刀尖半径的大小有直接关系，必须将刀尖圆弧半径 *R* 输入到存储器中，如图 2.74 所示。

(2) 车刀的形状和位置参数。车刀的形状有很多，它能决定刀尖圆弧所处的位置，因此也要把代表车刀形状和位置的参数输入到存储器中。将车刀的形状和位置参数称为刀尖方位 *T*。车刀的形状和位置如图 2.75 所示，分别用参数 0～9 表示，*P* 点为理论刀尖点。如图 2.75 左下角刀尖方位 *T* 应为 3。

(3) 参数的输入。与每个刀具补偿号相对应有一组 *X* 和 *Z* 的刀具位置补偿值、刀尖圆弧半径 *R* 以及刀尖方位 *T* 值，输入刀尖圆弧半径补偿值时，就是要将参数 *R* 和 *T* 输入到存储器中。例如某程序中编入下面的程序段：

```
N100  G00  G42  X100  Z3  T0101;
```

若此时输入刀具补偿号为 01 的参数，CRT 屏幕上显示图 2.74 的内容。在自动加工工件的过程中，数控系统将按照 01 刀具补偿栏内的 *X*、*Z*、*R*、*T* 的数值，自动修正刀具的位置误差和自动进行刀尖圆弧半径的补偿。

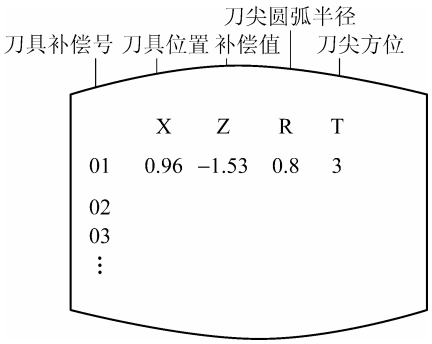


图 2.74　CRT 显示屏幕显示刀具补偿参数

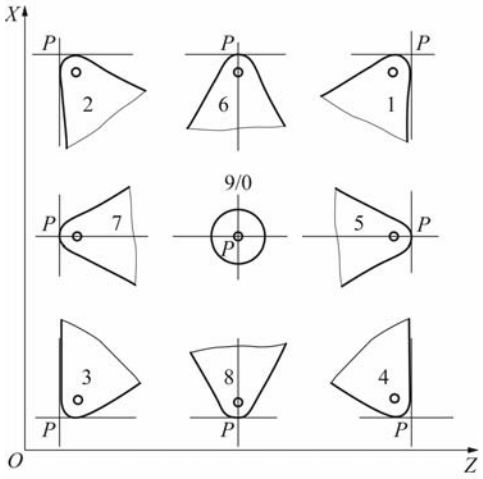
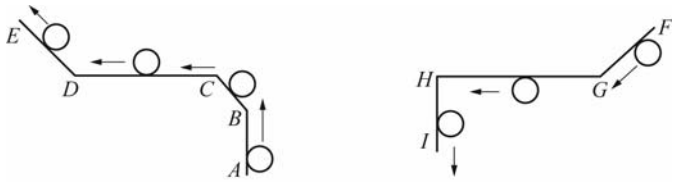


图 2.75　车刀形状和位置

4) 刀尖圆弧半径补偿的方向

在进行刀尖圆弧半径补偿时，刀具和工件的相对位置不同，刀尖圆弧半径补偿的指令也不同。图 2.76 表示了刀尖圆弧半径补偿的两种不同方向。



(a)刀尖圆弧半径右补偿　　(b)刀尖圆弧半径左补偿

图 2.76　刀尖圆弧半径补偿方向

如果刀尖沿 *ABCDE* 运动[图 2.76(a)]，顺着刀尖运动方向看，刀具在工件的右侧，即为刀尖圆弧半径右补偿，用 G42 指令。如果刀尖沿 *FGHI* 运动[图 2.76(b)]，顺着刀尖运动方向看，刀具在工件的左侧，即为刀尖圆弧半径左补偿，用 G41 指令。如果取消刀尖圆弧半径补偿，可用 G40 指令编程，则车刀按理论刀尖点轨迹运动。

5) 刀尖圆弧半径补偿的建立或取消指令格式及说明

格式：

$$\begin{Bmatrix} G41 \\ G42 \\ G40 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} G00 \\ G01 \end{Bmatrix} X(U)\_\_\ Z(W)\_\_\ T\_\_\ F\_\_\ ;$$

说明：

(1) 刀尖圆弧半径补偿的建立或取消必须在位移移动指令(G00、G01)中进行。X(U)、Z(W)为建立或取消刀具补偿程序段中刀具移动的终点坐标；T 代表刀具功能，如 T0707 表示用 07 号刀并调用 07 号补偿值建立刀具补偿；F 表示进给速度，用 G00 编程时，F 值可省略。G41、G42、G40 均为模态指令。

(2) 刀尖圆弧半径补偿和刀具位置补偿一样，其实现过程分为三大步骤，即刀具补偿的建立、刀具补偿的执行和刀具补偿的取消。见【例 2.2】程序。

(3) 如果指令刀具在刀尖半径大于圆弧半径的圆弧内侧移动，程序将出错。

(4) 由于系统内部只有两个程序段的缓冲存储器，因此在刀具补偿的执行过程中，不允许在程序里连续编制两个以上没有移动的指令，以及单独编写的 M、S、T 程序段等。

【例 2.2】 车削如图 2.77 所示零件，采用刀尖圆弧半径补偿指令编程。

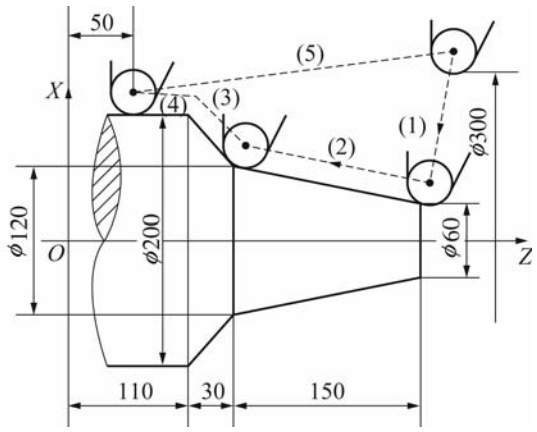


图 2.77　刀尖圆弧半径补偿的应用

程序如下：

```
……
N040  G00  X60  Z292;          快进接近工件
N050  G42  G01  Z290  F0.1;     刀尖圆弧半径右补偿的建立
N060  X120  W-150;             车削圆锥面
N070  X200  W-30;              车削圆锥台阶面
N080  Z50;                     车削φ200 外圆面
N090  G40  G00  X300  Z300;    退刀并取消刀具补偿
……
```

6. 辅助功能

辅助功能又称 M 功能，主要控制机床主轴或其他机电装置的动作，还可用于其他辅助动作，如程序暂停、程序结束等。下面仅介绍常用的几种 M 指令。

1) 程序停止指令 M00

格式：M00；

说明：

(1) 系统执行 M00 指令后，机床的所有动作均停止，机床处于暂停状态，重新按下启动按钮后，系统将继续执行 M00 程序段后面的程序。若此时按下复位键，程序将返回到开始位置，此指令主要用于尺寸检验、排屑或插入必要的手工动作等。

(2) M00 指令必须单独设一程序段。

2) 选择停指令 M01

格式：M01；

说明：

(1) 在机床操作面板上有“选择停”开关，当该开关置 ON 位置时，M01 功能同 M00，当该开关置 OFF 位置时，数控系统不执行 M01 指令。

(2) M01 指令同 M00 一样，必须单独设一程序段。

3) 程序结束指令 M30、M02

格式：M30(M02)；

说明：

(1) M30 表示程序结束，机床停止运行，并且系统复位，程序返回到开始位置；M02 表示程序结束，机床停止运行，程序停在最后一句。

(2) M30 或 M02 应单独设置一个程序段。

4) 主轴旋转指令 M03、M04、M05

格式：M03(M04) S __；

　　M05；

说明：

(1) M03 启动主轴正转，M04 启动主轴反转，M05 使主轴停止转动，S 表示主轴转速，如 M04 S500 表示主轴以 500r/min 转速反转。

(2) M03、M04、M05 可以和 G 功能代码设在一个程序段内。

5) 切削液开关指令 M08、M09

格式：M08(M09)；

说明：

(1) M08 表示打开切削液，M09 表示关闭切削液。

(2) M00、M01、M02、M30 指令均能关闭切削液，如果机床有安全门，则打开安全门时，切削液也会关闭。

6) 调子程序指令 M98，子程序返回指令 M99

调子程序格式：M98　P ×××　×××× ；

子程序名

调子程序次数

子程序返回格式：M99；

说明：

(1) 如果在一个加工程序的执行过程中又调用了另一个加工程序，并且被调用的程序执行完后又返回到原来的程序，则称前一个程序为主程序，后一个程序为子程序。用调用子程序指令可以对同一子程序反复调用，FANUC-OT 系统最多允许连续调用子程序 999 次，当在主程序中调用了一个子程序时，称之为 1 重嵌套。如果在子程序中又调用了另一个子程序，则称为 2 重嵌套(图 2.78)。该系统只允许 2 重嵌套。

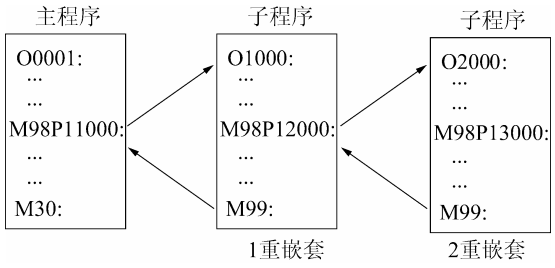


图 2.78　程序结构

(2) M98 指令编写在主程序中，表示调子程序，P×××××××最后面的四位数字表示子程序名，前面其余几位数字为调用子程序的次数(0～999)，如“M98　P1011001”表示连续调用 O1001 子程序 101 次;“M98　P52003”表示连续调用 O2003 子程序 5 次。“M98　P3000”和“M98　P13000”一样，表示只调用 O3000 子程序 1 次。

(3) M99 指令编写在子程序的最后一句，表示子程序返回，并返回到主程序中。子程序为单独编写的一个程序，编写方法同主程序。

(4) 子程序中的内容应视具体情况用增量值编写，见【例 2.3】、【例 2.4】。

(5) 子程序调用主要用在重复加工的场合，如多刀车削的粗加工，形状尺寸相同部位的加工等。

【例 2.3】 多刀粗加工的子程序调用

如图 2.79 所示锥面分三刀粗加工，程序如下：

```
O1000;(主程序)
N010  G50  X280  Z250.8;
N020  M04  S700  T0100;
N030  G00  X85  Z5  M08;
N040  M98  P31001;
N050  G28  U2  W2;
N060  M30;
```

```
O1001;(子程序)
N010  G00  U-35;
N020  G01  U10  W-85  F0.15;
N030  G00  U25;
N040  G00  Z5;
N050  G00  U-5;
N060  M99;
```

【例 2.4】 形状相同部位加工的子程序调用

如图 2.80 所示，已知毛坯直径 ϕ 32mm，长度 L=80mm，材料为 45 号钢，01 号刀(T0101)为外圆车刀，02 号刀(T0202)为刀尖宽 2mm 的切断刀。工件坐标原点设定在零件右端中心，此点与 01 号刀刀位点(基准刀)的位置是 X=280(直径量)，Z=265。

程序如下：

```
O2000;(主程序)
N010  G50  X280  Z265;
N020  M04  S800  T0100;
N030  G00  X35  Z0  M08;
N040  G01  X0  F0.08;
N050  G00  X30  Z2;
N060  G01  Z-53  F0.1;
N070  G28  U2  W2;
N080  M04  S400   T0200;
N090  G00  X32  Z-12  T0202;
N100  M98  P12001;
N110  G00  Z-32;
N120  M98  P12001;
N130  G00  Z-52;
N140  G01  X0  F0.1;
N150  G00  X40  T0200  M09;
N160  G28  U2  W2;
N170  M30;
O2001;(子程序)
N010  G01  X20  F0.1;
N020  G00  X32;
N030  G00  W-8;
N040  G01  X20  F0.1;
N050  G00  X32;
N060  M99;
```

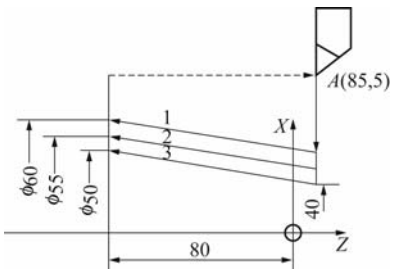


图 2.79　多刀车削零件图

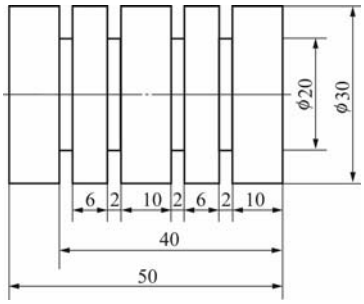


图 2.80　形状相同部位零件的加工

7. 车削加工编程实例

【例 2.5】 分析图 2.81 典型轴类零件的数控车削加工工艺，并编写其精加工程序，工件右端中心点 *O* 为工件坐标原点，02 号刀为基准刀，该刀尖的起始位置为(280，130)。

1) 零件图工艺分析

该零件表面由圆柱、圆锥、顺圆弧、逆圆弧及螺纹等表面组成。其中多个直径尺寸有较严格的尺寸精度和表面粗糙度等要求；球面 $S\phi$50 mm 的尺寸公差还兼有控制该球面形状(线轮廓)误差的作用。图 2.81 的尺寸标注完整，轮廓描述清楚。零件材料为 45 号钢，无热处理和硬度要求。

通过上述分析，采取以下几点工艺措施。

(1) 对图样上给定的几个公差等级(IT7～IT8)要求较高的尺寸，因其公差数值较小，故编程时不必取平均值，而全部取其基本尺寸即可。

(2) 在轮廓曲线上，有 3 处为过象限圆弧，其中两处为既过象限又改变进给方向的轮廓曲线，因此在加工时应进行机械间隙补偿，以保证轮廓曲线的准确性。

(3) 为便于装夹，毛坯件左端应预先车出夹持部分(双点画线部分)，右端面也应先车出并钻好中心孔。毛坯选 ϕ60 mm 棒料。

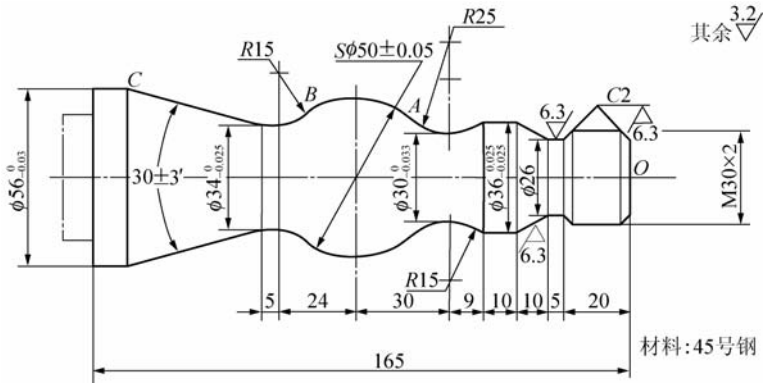


图 2.81　轴类零件

2) 确定装夹方案

确定毛坯件轴线和左端大端面(设计基准)为定位基准。左端采用三爪自定心卡盘定心夹紧，右端采用活动顶尖支承的装夹方式。

3) 确定加工顺序

加工顺序按由粗到精的原则确定。即先从右到左进行粗车(留 0.20mm 精车余量)，然后从右到左进行精车，最后车削螺纹。

MJ460 数控车床具有粗车循环和车螺纹循环功能，只要正确使用编程指令，机床数控系统就会自行确定其加工路线，因此，该零件的粗车循环和车螺纹循环不需要人为确定其加工路线。但精车的加工路线需要人为确定，该零件是从右到左沿零件表面轮廓进给加工。

4) 数值计算

为方便编程，可利用 AutoCAD 画出零件图形，然后取出必要的基点坐标值；利用公式对螺纹大径、小径进行计算。

(1) 基点计算。以图 2.81 上 O 点为工件坐标原点，则 A、B、C 三点坐标分别为：$X_A=\phi$ 40mm、$Z_A=-69$ mm；$X_B=\phi$ 38.76 mm、$Z_B=-99$ mm；$X_C=\phi$ 56 mm、$Z_C=-154.09$ mm。

(2) 螺纹大径 d_1、小径 d_2 计算。$d_1=d-0.2165P=30-0.2165\times2=29.567$ mm；$d_2=d_1-1.299P=29.567-1.299\times2=26.969$ mm。

5) 选择刀具

(1) 粗车、精车均选用 35° 菱形涂层硬质合金外圆车刀，副偏角 48°，刀尖半径 0.4mm，为防止与工件轮廓发生干涉，必要时应用 AutoCAD 作图检验。

(2) 车螺纹选用硬质合金 60° 外螺纹车刀，取刀尖圆弧半径 0.2 mm。

6) 选择切削用量

(1) 背吃刀量。粗车循环时，确定其背吃刀量 a_p=2 mm；精车时，确定其背吃刀量 a_p=0.2 mm。

(2) 主轴转速和进给量。车直线和圆弧轮廓时的主轴转速：查表并取粗车时的切削速度 v=90 m/min，精车时的切削速度 v=120m/min，根据坯件直径(精车时取平均直径)，利用式 $n=1000v/(\pi D)$计算，并结合机床说明书选取。粗车时主轴转速 n=500 r/min，精车时主轴转速 n=1200 r/min。

车螺纹时的主轴转速：按公式 $nP\leqslant1200$(n 为主轴转速，P 为螺距)，取主轴转速 n=320r/min。

进给速度：粗车时选取进给量 f = 0.3 mm/r，精车时选取 f = 0.05 mm / r。车螺纹的进给量等于螺纹导程，即 f = 2 mm/r。

7) 数控加工工艺文件的制定

(1) 按加工顺序将各工步的加工内容、所用刀具及其切削用量等填入表 2-10 数控加工工序卡中。

(2) 将选定的各工步所用刀具的型号、刀片型号、刀片牌号及刀尖圆弧半径等填入表 2-11 数控加工刀具卡中。

表 2-10　数控加工工序卡

(工厂)	数控加工工序卡		产品名称或代号			零件名称	材 料	零件图号	
						轴	45		
工序号	程序编号	夹具名称	夹具编号			使用设备		车 间	
			三爪自定心卡盘			MJ460			
工步号	工 步 内 容		加工面	刀具号	刀具规格	主轴转速 /(r/min)	进给量 /(mm/r)	背吃刀量 /mm	备注
1	粗车轴外表面，留精车余量 0.2mm			T0101	35° 菱形	500	0.3	2	
2	精车轴外表面至尺寸			T0202	35° 菱形	1200	0.05	0.2	
3	车螺纹 M30×2			T0303	60°	320	2	见注	
编 制		审核	批 准				共 1 页	第 1 页	

注：M30 螺纹共分 5 次车削，但每次背吃刀量不同，查表 2-7 确定为(直径量)0.9、0.6、0.6、0.4、0.1(mm)。

表 2-11　数控加工刀具卡

产品名称			零件名称		轴		零件图号		程序编号		
工步	刀具号	刀具名称	刀具型号	刀片		刀具位置补偿值		刀尖半径/mm	刀尖位置	备注
				型号	牌号	*X*/mm	*Z*/mm			
1	T0101	35° 菱形可转位车刀				0	0	0.4	3	
2	T0202	35° 菱形可转位车刀				1.203	0.758	0.4	3	
3	T0303	螺纹车刀				–2.302	–2.819	0.2	8	
编制		审核		批准			共 1 页		第 1 页	

8) 精加工程序

```
O3000;(程序名)
N010  G50  X280  Z130;                  建立工件坐标系
N020  M04  S1200  T0200;                启动主轴，换 02 号刀
N030  G00  X26  Z3  M08;                快速接近工件，并打开切削液
N040  G42  G01  Z0  T0202  F0.05;       建立刀尖圆弧半径右补偿
N050  X29.567  Z-2;                     倒角
N060  Z-18;                             车螺纹外表面φ29.567
N070  X26  Z-20;                        倒角
N080  W-5;                              车φ26 槽
N090  U10  W-10;                        车锥面
N100  W-10;                             车φ36 外圆柱面
N110  G02  U-6  W-9  R15;               车 R15 圆弧
N120  G02  X40  Z-69  R25;              车 R25 圆弧
N130  G03  X38.76  Z-99  R25;           车 Sφ50 球面
N140  G02  X34  W-9  R15;               车 R15 圆弧
N150  G01  W-5;                         车φ34 圆柱面
N160  X56  Z-154.05;                    车锥面
N170  Z-165;                            车φ56 圆柱面
N180  G40  G00  U10  T0200  M05  M09;   取消刀具补偿并关闭切削液
N190  G28  U2  W2;                      返回参考点
N200  M04  S320  T0300;                 主轴换速，换 03 号螺纹刀
N210  G00  X40  Z3  T0303  M08;         刀具定位并建立位置补偿
N220  G92  X28.667  Z-22  F2;           螺纹循环第一刀
N230  X28.067;                          螺纹循环第二刀
N240  X27.467;                          螺纹循环第三刀
N250  X27.067;                          螺纹循环第四刀
N260  X26.969;                          螺纹循环第五刀
N270  G00  X45  T0300  M09;             取消刀具位置补偿并关闭切削液
N280  G28  U2  W2;                      返回参考点
N290  M30;                              程序结束
```

以上程序没有考虑粗加工，请同学们自己写出全部程序。

【例 2.6】 精密轧辊(图 2.82)主要用于轧制冷凝管，淬火硬度为 55～58HRC，材料为 Cr12MoV，其工作面常规的精加工工艺是磨削，现在使用ϕ6 圆形陶瓷刀具在 MJ460 数控车床上进行快速车削加工，实现了以车代磨，加工精度高，加工效率提高了 5 倍以上。已知加工余量为 1 mm(直径量)。下面介绍这种精密轧辊外圆工作面的加工程序。

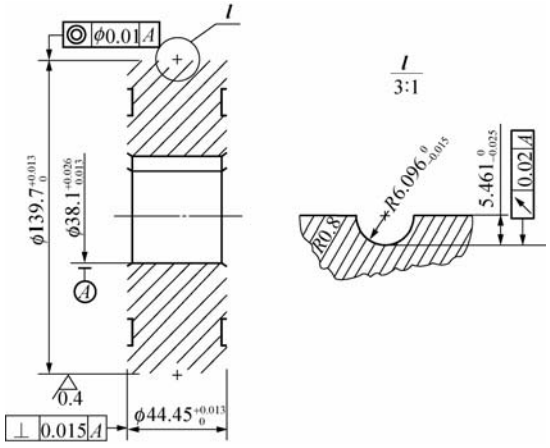


图 2.82　精密轧辊

程序如下：

```
O 4000;(主程序)
N010  G40  G97  M04  S180  T0200;
N020  G50  X217.880  Z196.582;
N030  G00  X140.7  Z12;
N040  M98  P24001;
N050  G00  X139.7;
N060  G50  S1500;
N070  G96  S80;
N080  G42  G00  Z2  T0202;
N090  G01  W-17.48  F0.1;
N100  G03  U-1.267  W-0.783  R0.8  F0.08;
N110  G02  U0  W-11.925  R6.096;
N120  G03  U1.267  W-0.783  R0.8;
N130  G01  Z-55  F0.1;
N140  G97  G40  G00  U5  T0200;
N150  G28  U3  W3;
N160  M30;
O 4001;(子程序)
N010  G00  U-0.4;
N020  G42  G00  Z2  T0202;
N030  G01  W-17.48  F0.2;
N040  G03  U-1.267  W-0.783  R0.8  F0.15;
N050  G02  U0  W-11.925  R6.096;
N060  G03  U1.267  W-0.783  R0.8;
N070  G01  Z-55  F0.2;
N080  G40  G00  U5  T0200;
N090  Z12;
```

```
N100  U-5;
N110  M99;
```

2.3.3　数控铣削加工程序编制

数控铣床是一种用途十分广泛的机床，主要用于各种较复杂的平面、曲面和壳体类零件的加工。如各类凸轮、模具、连杆、叶片、螺旋桨和箱体等零件的铣削加工，同时还可以进行钻、扩、锪、铰、攻螺纹、镗孔等加工。

不同的数控铣床、不同的数控系统，其编程基本上是相同的，但也有不同之处。本节以配置 SIEMENS 802S 数控系统的 XK0816A 数控铣床为例介绍数控铣床的编程。

图 2.83 为 XK0816A 型升降台式数控铣床的布局图。床身 6 固定在底座 1 上，用于安装与支承机床各部件。操作台 10 上有 CT 显示器、机床操作按钮和各种开关及指示灯。纵向工作台 16、横向溜板 12 安装在升降台 15 上，通过纵向进给伺服电动机 13、横向进给伺服电动机 14 和垂直升降进给伺服电动机 4 的驱动，完成 *X*、*Y*、*Z* 坐标进给。强电柜 2 中装有机床电气部分的接触器、继电器等。变压器箱 3 安装在床身立柱的后面。数控柜 7 内装有机床数控系统。保护开关 8、11 为可控制纵向行程的硬限位开关(图中未注出)；挡铁 9 为纵向参考点设定挡铁。主轴变速手柄和按钮板 5 用于手动调整主轴的正反转、停止及切削液开停等。

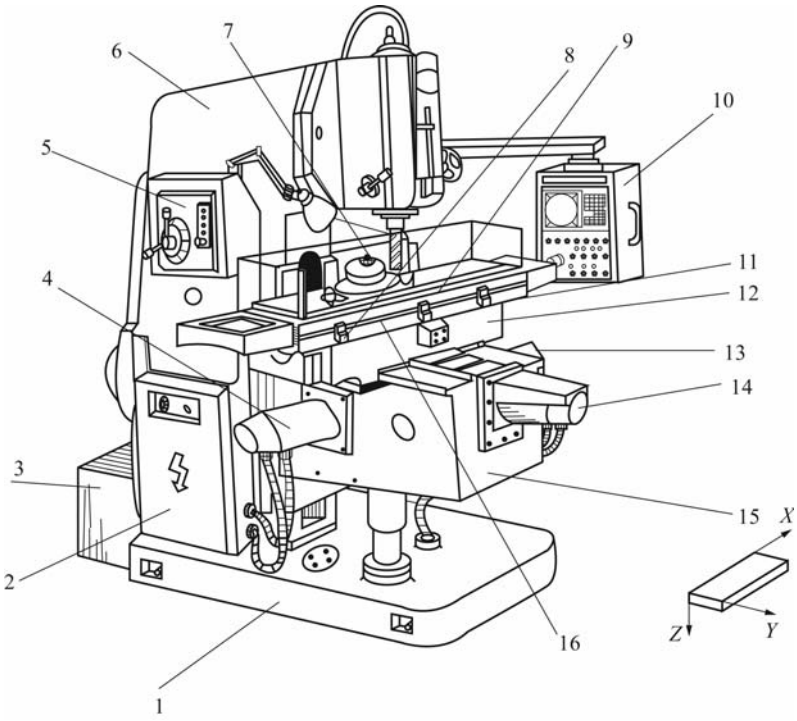


图 2.83　升降台式数控铣床的布局图

1—底座　2—强电柜　3—变压器箱　4—垂直升降进给伺服电动机　5—主轴变速手柄和按钮板　6—床身　7—数控柜　8—保护开关　9—纵向参考点设定挡铁　10—操作台　11—可控纵向行程硬限位开关　12—横向溜板　13—纵向进给伺服电动机　14—横向进给伺服电动机　15—升降台　16—纵向工作台

1. 数控铣床的编程特点

数控铣床的编程特点主要有以下几点。

(1) 铣削是机械加工中最常用的方法之一，它包括平面铣削和轮廓铣削。数控铣床可以加工复杂的和手工难加工的工件，把一些用普通机床加工的工件用数控机床加工，可以提高加工效率。由于数控铣床功能各异，规格繁多，编程时要考虑如何最大限度地发挥数控机床的特点。二坐标联动用于加工平面零件轮廓；三坐标以上的数控铣床用于难度较大的复杂工件的立体轮廓加工。

(2) 数控铣床的数控装置具有多种插补功能。一般都具有直线插补和圆弧插补功能，有的还具有极坐标插补、抛物线插补、螺旋线插补等多种插补功能。编程要充分合理地选择这些功能，提高编程和加工的效率。

(3) 编程时要充分熟悉机床的所有性能和功能。如刀具长度补偿、刀具半径补偿、固定循环、镜像、旋转等功能。

(4) 由直线、圆弧组成的平面轮廓铣削的数学处理比较简单。非圆曲线、空间曲线和曲面的轮廓铣削加工的数学处理比较复杂，一般要采用计算机辅助计算和自动编程。

(5) 数控铣床与数控车床的编程功能相似，数控铣床的编程功能指令也分 G 功能和 M 功能两大类，本节以 SIEMENS 802S 数控系统为例介绍数控铣床的基本编程功能指令。编程指令见表 2-12。

2. 数控铣床编程坐标系的设定

1) 数控铣床的机床原点

通常机床每次通电后，机床的三个坐标轴都要依次走到机床正方向的一个极限位置，这个位置就是机床坐标系的原点，是机床出厂时设定的固定位置。

2) 工件坐标系的原点

工件原点是任意设定的，它在工件装夹完毕后，通过对刀来确定。可设定的零点偏移给出工件零点在机床坐标系中的位移(工件零点以机床零点为基准偏移)。当工件装夹到机床上后求出偏移量，并通过操作面板输入到规定的数据区。程序可以通过选择相应的 G 功能，即 G54～G57 激活此值，如图 2.84 所示。下面以图 2.85 举例说明零点偏移的使用，编程如下。

```
N10  G54…              调用第一可设定零点偏移
N20  L47               加工工件 1，此处作 L47 调用
N30  G55…              调用第二可设定零点偏移
N40  L47               加工工件 2，此处作 L47 调用
N50  G56…              调用第三可设定零点偏移
N60  L47               加工工件 3，此处作 L47 调用
N70  G57…              调用第四可设定零点偏移
N80  L47               加工工件 4，此处作 L47 调用
N90  G500  G0  X…      取消可设定零点偏移
```

表 2-12　SIEMENS 802S 编程指令表

序号	代 码	功　能	序号	代 码	功　能
1	G00	快速移动	37	M30	程序结束返回程序开始
2	G01*	直线插补	38	G451	等距线的交点
3	G02	顺时针圆弧插补	39	R0～R249	计算参数
4	G03	逆时针圆弧插补	40	＋－×÷	四则运算
5	G05	中间点圆弧插补	41	M04	主轴逆时针旋转
6	G33	恒螺距的螺纹切削	42	M05	主轴停
7	G4	暂停时间	43	M00	程序停止
8	G63	补偿夹具切削内螺纹	44	M01	程序有条件停止
9	G74	回参考点	45	M02	程序结束
10	G75	回固定点	46	M03	主轴顺时针旋转
11	G158	可编程的零点偏移	47	SIN()	正弦
12	G258	可编程的零点旋转	48	COS()	余弦
13	G259	附加可编程零点旋转	49	TAN()	正切
14	G25	主轴转速下限	50	SQRT()	平方根
15	G26	主轴转速上限	51	ABS()	绝对值
16	G17*	*XY* 平面	52	TRUNC()	取整
17	G18	*ZX* 平面	53	RET	子程序结束
18	G19	*YZ* 平面	54	S	主轴转速，G4 暂停时间
19	G40*	刀具半径补偿取消	55	T	刀具号
20	G41	刀具半径左补偿	56	AR	圆弧插补张角
21	G42	刀具半径右补偿	57	CHF	倒角
22	G500	取消可设定零点偏移	58	CR	圆弧插补半径
23	G54	第一可设定零点偏移	59	GOTOB	向后跳转指令
24	G55	第二可设定零点偏移	60	GOTOF	向前跳转指令
25	G56	第三可设定零点偏移	61	IF	跳转条件
26	G57	第四可设定零点偏移	62	IX、JY、KZ	中间点坐标
27	G53	取消零点偏移	63	LCYC82	钻削，端面锪孔
28	G70	英制尺寸	64	LCYC83	深孔钻削
29	G71*	公制尺寸	65	LCYC840	带补偿夹具切削内螺纹
30	G90*	绝对尺寸	66	LCYC84	不带补偿夹具切削内螺纹
31	G91	相对尺寸	67	LCYC85	镗孔
32	G94*	进给速度 F，单位 mm/min	68	LCYC60	线性孔排列
33	G95	主轴进给速度 F，单位 mm/r	69	LCYC61	圆弧孔排列
34	G901	在圆弧段进给补偿“开”	70	LCYC75	铣凹槽和键槽
35	G900	进给补偿“关”	71	RND	倒圆
36	G450	圆弧过渡	72	RPL	在执行 G258 和 G259 时的旋转角

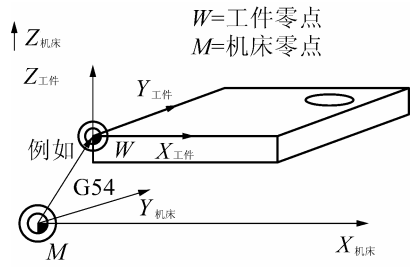


图 2.84　可设定的零点偏移图

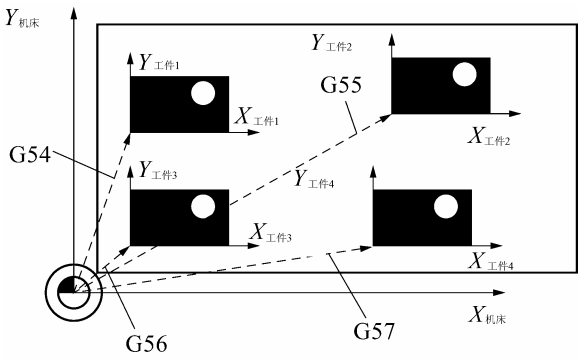


图 2.85　在钻削/铣削时装夹多个工件

3) 可编程零点偏移和坐标轴旋转指令 G158、G258、G259

如果工件上在不同的位置有重复出现的形状或结构，或者选用了一个新的参考点，在这种情况下就需要使用可编程零点偏移。由此就产生一个当前工件坐标系，新输入的尺寸均为该坐标系中的尺寸。可以在所有坐标轴上进行零点偏移，在当前平面 G17、G18 或 G19 中进行坐标轴旋转。G158、G258、G259 指令各自要求一个独立的程序段，举例如图 2.86、图 2.87 所示。

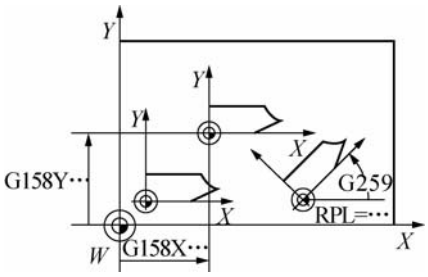


图 2.86　可编程零点偏移和坐标轴旋转

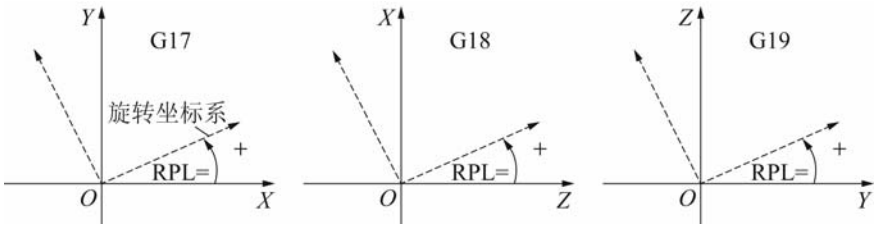


图 2.87　在不同的坐标平面中旋转角正方向的规定

例：G158　X…Y…Z…；可编程偏移，取消以前的偏移和旋转

G258　RPL= …　；可编程旋转，取消以前的偏移和旋转

G259　RPL= …　；附加的可编程旋转

零点偏移指令 G158。用 G158 指令可以对所有的坐标轴编程零点偏移。后面的 G158 指令取代所有以前的可编程零点偏移指令和坐标轴旋转指令，也就是说编程一个新的 G158 指令后，所有旧的指令均被清除。

坐标轴旋转指令 G258。用 G258 指令可以在当前平面(G17～G19)中编程一个坐标轴旋转，新的 G158 指令取代所有以前的可编程零点偏移指令和坐标轴旋转指令，也就是说编程一个新的 G258 指令后，所有旧的指令均被清除。

附加的坐标旋转指令 G259。用 G259 指令可以在当前平面(G17～G19)中编程一个坐标轴旋转。如果已经有一个 G158、G258 或 G259 指令生效，则在 G259 指令下编程的旋转附加到当前编程的偏移或坐标轴旋转上。

取消偏移和坐标轴旋转。程序段 G158 指令后无坐标轴名，或者在 G258 指令下没有写 RPL=…语句，则表示取消当前的可编程零点偏移和坐标轴旋转设定，举例如图 2.88 所示。

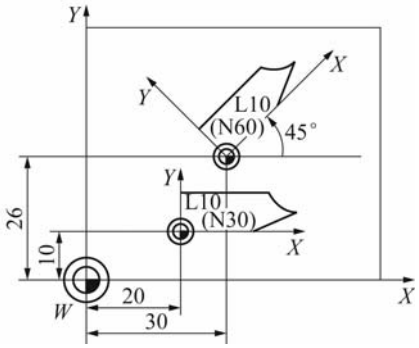


图 2.88　可编程偏移和坐标轴旋转的编程举例

例：N10　G17…　　；*XY* 平面
　　N20　G158　X20　Y10；可编程零点偏移
　　N30　L10　　；子程序调用，其中包含待偏移的几何量
　　N40　G158　X30　Y26；新的零点偏移
　　N50　G259　RPL=45　；附加坐标轴旋转 45°
　　N60　L10　　；子程序调用
　　N70　G158　　；取消偏移和旋转

3. 数控铣床基本编程方法

1) 绝对值方式指令 G90 和增量方式指令 G91

格式：G90 (G91)

说明：

G90 指令表示程序段中的运动坐标数字为绝对坐标值，即从编程零点开始的坐标值。G91 指令表示程序段中的运动坐标数字为相对坐标值，即程序段的终点坐标都是相对于前一坐标点给出的。

2) 插补平面选择指令 G17、G18、G19

格式：G17(G18 /G19)

说明：

(1) G17 指令为选择 *XY* 插补平面；G18 指令为选择 *XZ* 插补平面；G19 指令为选择 *YZ* 插补平面。

(2) 当存在刀具补偿时，不能变换定义平面。系统通电时处于 G17 状态。

(3) 考虑加工方便，*Z* 坐标可单独编程，而不考虑平面的定义。但编入二坐标联动时，必须考虑平面选择问题。

在计算刀具长度补偿和半径补偿时必须首先确定一个平面，在此平面中可以进行刀具半径补偿。另外根据不同的刀具类型进行相应的刀具长度补偿。具体选择见表 2-13 和图 2.89。

表 2-13　平面选择

G 功能	平　　面	垂直坐标轴(在钻削/铣削时的长度补偿轴)
G17	*XY*	*Z*
G18	*ZX*	*Y*
G19	*YZ*	*X*

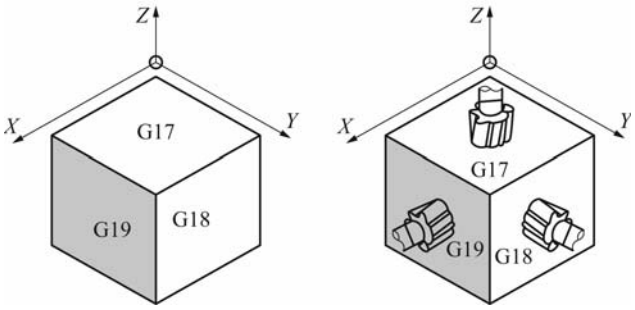


图 2.89　钻削/铣削时的平面和坐标轴布置

3) 快速定位指令 G00 和直线插补指令 G01

(1) 快速定位指令 G00。

格式：G00 X__ Y__ Z__

说明：

① G00 指令刀具从所在点以最快的速度(系统设定的最高速度)移动到目标点。

② 当用绝对指令时，X、Y、Z 为目标点在工件坐标系中的坐标；当用增量坐标时，X、Y、Z 为目标点相对于起点的增量坐标。

③ 不运动的坐标可以不写。

④ 当 *Z* 轴按指令远离工作台时，先 *Z* 轴运动，再 *X*、*Y* 轴运动。当 *Z* 轴按指令接近工作台时，先 *X*、*Y* 轴运动，再 *Z* 轴运动。

例如图 2.90 所示，程序如下：

N10　G00　X90　Y70；刀具由起点 *A* 快速移动到目标点 *B*

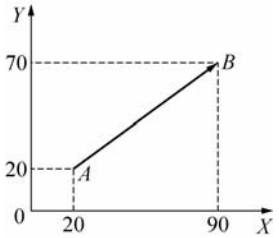


图 2.90　G00 编程举例

(2) 直线插补指令 G01。

格式：G01 X__ Y__ Z__ F__

说明：

① G01 指令刀具从所在点以直线移动到目标点。

② 当用绝对指令时，X、Y、Z 为目标点在工件坐标系中的坐标；当用增量坐标时，X、Y、Z 为目标点相对于起点的增量坐标，F 为刀具进给速度。

③ 不运动的坐标可以不写。

④ 系统通电时，处于 G01 状态。

例如图 2.90 所示，程序如下：

N10 G01 X90 Y70 F100；刀具由起点 *A* 直线运动到目标点 *B*，进给速度 100mm/min。

4) 圆弧插补指令 G02、G03

刀具以圆弧轨迹从起点移动到终点，方向由 G 指令确定。G02 指令表示在指定平面顺时针插补；G03 指令表示在指定平面逆时针插补。平面指定指令与圆弧插补指令的关系，如图 2.91 所示。

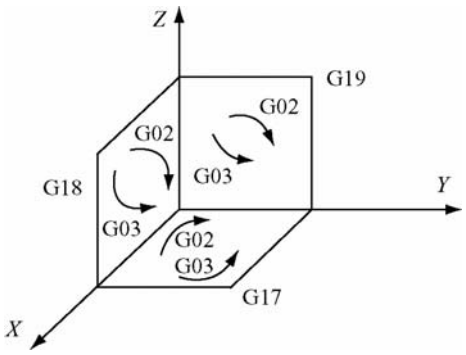


图 2.91　平面指定指令与圆弧插补指令的关系

(1) 圆心坐标和终点坐标。

格式：G17　G02/G03　X__　Y__　I__ J__ F__

　　G18　G02/G03　X__　Z__　I__ K__ F__

　　G19　G02/G03　Y__　Z__　J__ K__ F__

说明：

① X、Y、Z 为圆弧终点坐标值。为 G90 时 X、Y、Z 是圆弧终点的绝对坐标值；为 G91 时 X、Y、Z 是圆弧终点相对于圆弧起点的增量值。

② I、J、K 表示圆心相对于圆弧起点的增量值，F 规定了沿圆弧切向的进给速度。

③ G17、G18、G19 为圆弧插补平面选择指令，以此来确定被加工表面所在平面，G17 可以省略。

例如图 2.92 所示，程序如下：

绝对值方式编程：G90　G02　X58　Y48　I13　J8　F100；

增量方式编程：G91　G02　X26　Y16　I13　J8　F100；

注：只有用圆心坐标和终点坐标才可以编程一个整圆。

(2) 终点和半径尺寸。

格式：G17　G02/G03　X__　Y__　CR=__ F__

　　G18　G02/G03　X__　Z__　CR=__ F__

　　G19　G02/G03　Y__　Z__　CR=__ F__

说明：

CR 表示圆弧半径，因为在相同的起点、终点、半径和相同的方向时可以有两种圆弧。如果圆心角小于 180°，则 CR 为正数；如果圆心角大于 180°，则 CR 为负数。

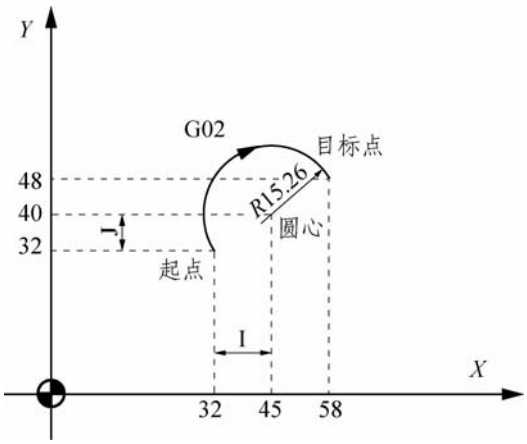


图 2.92　用圆心坐标和终点坐标进行圆弧插补

例如图 2.92 所示，程序如下。

绝对值方式编程：G90　G02　X58　Y48　CR=15.26　F100；

增量方式编程：G91　G02　X26　Y16　I13　J8　F100；

5) 通过中间点进行圆弧插补指令 G05

格式：G17　G05　X__　Y__　IX=__ JY=__ F__

　　G18　G05　X__　Z__　IX=__ KZ=__ F__

　　G19　G05　Y__　Z__　JY=__ KZ=__ F__

说明：

① IX、JY、KZ 表示中间点坐标。

② 如果不知道圆弧的圆心、半径或张角，但已知圆弧轮廓上 3 个点的坐标，则可以使用 G05 指令，通过起点和终点之间的中间点位置确定圆弧的方向。

③ G90 和 G91 指令对终点和中间点有效。

例如图 2.93 所示，程序如下：

```
N05  G90  X30  Y40;                  用于 N10 的圆弧起点
N10  G05  X60  Y50  IX=35  JY=52;    终点和中间点
```

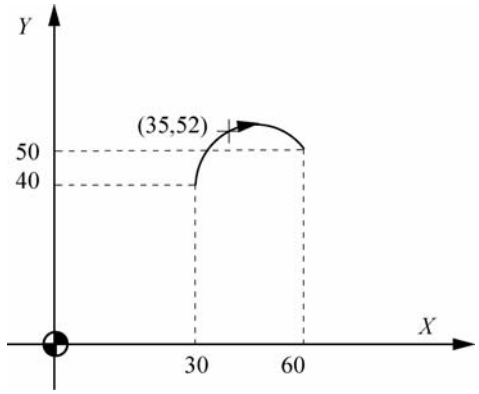


图 2.93　G90 已知终点和中间点的圆弧插补

6) 返回固定点指令 G75

用 G75 可以返回到机床中某个固定点，比如换刀点。固定点位置固定地存储在机床数据中，它不会产生偏移。每个轴的返回速度都是其快速移动速度。G75 需要一独立程序段，并按程序段方式有效。在 G75 之后程序段中原来“插补方式”组中的 G 指令(G00，G01，G02，…)将再次生效。

例如，N10　G75　X0　Y0　Z0；　程序段中 X、Y 和 Z 的编程数值不识别。

7) 回参考点指令 G74

用 G74 指令实现数控程序中回参考点功能，每个轴的方向和速度均存储在机床数据中。G74 需要一独立程序段，并按程序段方式有效。在 G74 之后的程序段中原来“插补方式”组中的 G 指令(G00，G01，G02，…)将再次生效。

例如：N10　G74　X0　Y0　Z0；　程序段中 X、Y 和 Z 的编程数值不识别

8) 倒圆和倒角

在一个轮廓拐角处可以插入倒角或倒圆，指令 CHF=…或者 RND=…与加工拐角的轴运动指令一起写入到程序段中，只在当前平面中执行该功能。

格式：CHF=…；插入倒角，数值：倒角长度

RND=…；插入倒圆，数值：倒圆半径

(1) 倒角 CHF=…，为直线轮廓之间、圆弧轮廓之间以及直线轮廓和圆弧轮廓之间切入一直线并倒去棱角。

例如图 2.94 所示，程序如下：

```
N10  G01  X… CHF=5;   倒角 5mm
N20  X …Y…;
```

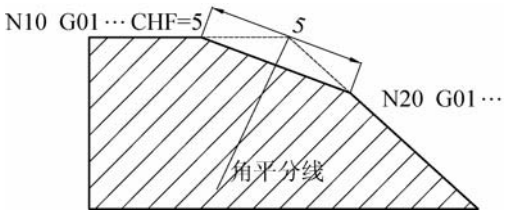


图 2.94　两段直线之间倒角举例

(2) 倒圆 RND=…，直线轮廓之间、圆弧轮廓之间以及直线轮廓和圆弧轮廓之间切入一圆弧，圆弧与轮廓进行切线过渡。

例如图 2.95 所示，程序如下：

```
N10  G01  X… RND=8;倒圆,半径 8mm
N20  X… Y…
…
N50  G01  X… RND=7.3;倒圆,半径 7.3mm
N60  G03  X…Y…;
```

如果其中一个程序段轮廓长度不够，则在倒圆或倒角时会自动削减编程值。若超过 3 个连续编程的程序段中不含平面中移动指令或进行平面转换时不能进行倒角/倒圆。

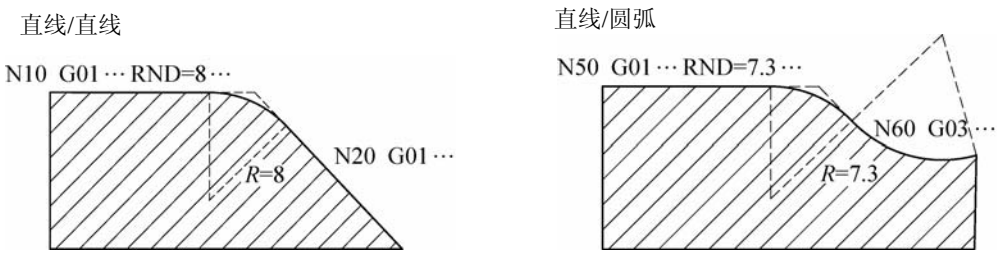


图 2.95　倒圆举例

9) 刀具补偿

当加工曲线轮廓时，对于有刀具半径补偿功能的数控系统，可不必求刀具中心的运动轨迹，只按被加工工件轮廓曲线编程，同时在程序中给出刀具半径的补偿指令，就可加工出具有轮廓曲线的零件，使编程工作大大简化。

本系统具有刀具长度补偿和半径补偿功能，刀具的有关参数被单独输入到一专门的数据区，包括刀具长度及半径的基本尺寸和磨损尺寸，刀具类型、刀尖位置等参数。在程序中只要调用所需的刀具号及其补偿参数，控制器就会利用这些参数执行所要求的轨迹补偿，加工出满足要求的工件。

一个刀具可以匹配 1～9 个不同补偿的数据组。用 D 指令及其相应的序号可以编程一个专门的切削刃。如果没有编写 D 指令，则 D1 自动生效。若编程 D0，则刀具补偿值无效。系统中最多可以同时存储 30 个刀具补偿数据组。

刀具调用后，刀具长度补偿立即生效。编程中的刀具长度补偿先执行，对应的坐标轴也先运行。但刀具半径补偿必须与 G41 或 G42 指令一起执行。G41 为刀具半径左补偿指令；G42 为刀具半径右补偿指令；G40 指令为取消刀具半径补偿，具体如图 2.96 所示。

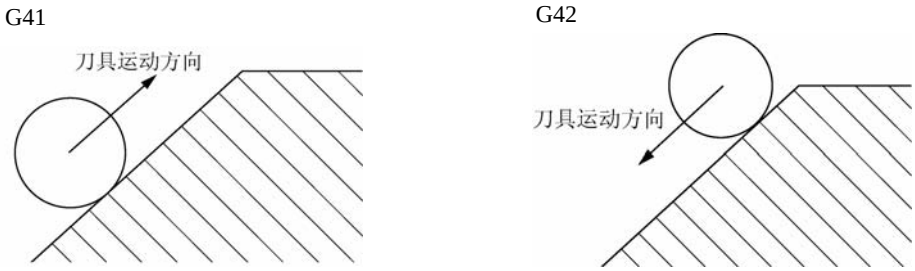


图 2.96　G41/G42 指令

(1) 刀具半径补偿指令 G41、G42。

格式：G17　G41/G42　G00/G01　X__　Y__　D__

　　G18　G41/G42　G00/G01　X__　Z__　D__

　　G19　G41/G42　G00/G01　Y__　Z__　D__

说明：系统在所选择的平面 G17 到 G19 中以刀具半径补偿的方式进行加工。刀具必须有相应的刀具补偿号 D 才有效。只有在线性插补时(G00、G01)才可以进行 G41/G42 的选择。控制器自动计算出当前刀具运行所产生的与编程轮廓等距离的刀具轨迹。

(2) 取消刀具半径补偿指令 G40。

所有的平面上取消刀具半径补偿指令均为 G40。最后一段刀具半径补偿轨迹加工完成后，与建立刀具半径类似，也应有一直线程序段 G00 或 G01 指令取消刀具半径补偿，以保证刀具从刀具半径补偿终点(刀补终点)运动到取消刀具半径补偿点(取消刀补点)。G40、G41、G42 是模态代码，它们可以互相注销。

(3) 刀具半径补偿时的过切现象及防止。

在程序中使用刀具半径补偿功能时，有可能会产生加工过切现象，下面分析产生过切现象的原因及具体防止措施。

① 加工半径小于刀具半径的内圆弧。当程序给定的圆弧半径小于刀具半径时，向圆弧圆心方向的半径补偿将会导致过切，如图 2.97 所示。这时机床的数控系统报警，并且程序停止在将要过切语句的起点上。所以补偿时就应注意，只有在“过渡圆角半径 R≥刀具半径 r + 精加工余量”的情况下，才可正常切削，图 2.98 所示为正常切削情况。

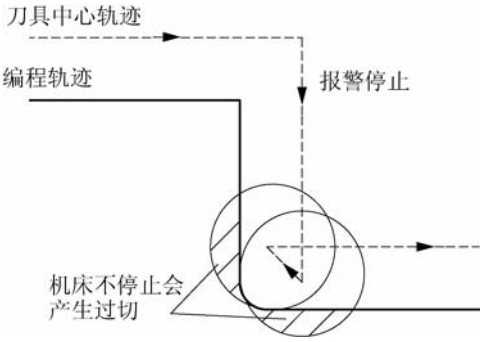


图 2.97　圆弧半径小于刀具半径

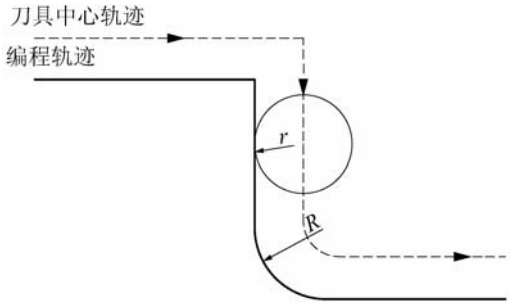


图 2.98　正常切削情况

图 2.99 所示内轮廓，只能选用半径为 10mm 或更小的刀具加工。

② 被铣削槽底宽小于刀具直径。如图 2.100 所示，如果刀具半径补偿使刀具中心向编程路径反方向运动，将会导致过切。在这种情况下，机床的数控系统报警，并且程序停止在该程序段的起点上。

③ 无移动类指令。在两个或两个以上连续程序段内无指定补偿平面内的坐标移动，将会导致过切。

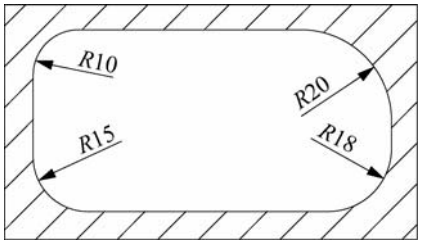


图 2.99　内轮廓图

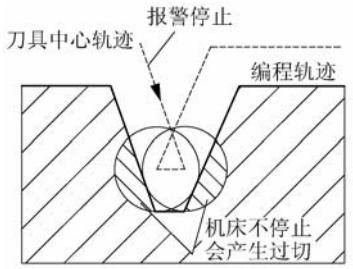


图 2.100　被铣削槽底宽小于刀具直径

(4) 刀具半径补偿举例。

例如图 2.101 所示，程序如下：

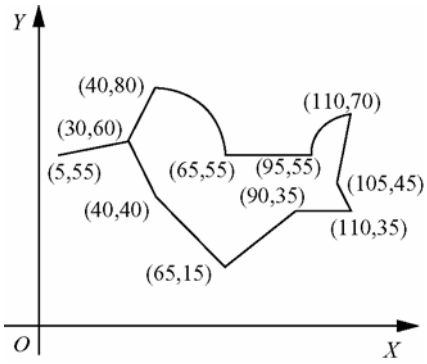


图 2.101　刀具半径补偿举例

```
N01  T1;                              刀具 1，刀具补偿号 D1
N05  G00  G17  G90  X5  Y55 Z50;      回起点
N06  G01  Z0  F200  S800  M03;
N10  G41  X30  Y60  F400;             工件轮廓左边补偿
N20  X40  Y80;
N30  G02  X65  Y55  I0  J-25;
N40  G01  X95;
N50  G02  X110  Y70  I15  J0;
N60  G01  X105  Y45;
N70  X110  Y35;
N80  X90;
N90  X65  Y15;
N100  X40  Y40;
N110  X30  Y60;
N120  G40  X5  Y55;                   回起点，取消刀具补偿
N130  G00  Z50  M02;                  结束刀具补偿运行
```

10) 子程序

用子程序编写经常重复进行的加工，比如某一确定的轮廓形状。子程序应位于主程序中适当的位置，在需要时进行调用、运行。

(1) 子程序结构。子程序的结构与主程序相同，但在子程序中最后一个程序段用 M02 指令结束程序运行。还可以用 RET 指令结束子程序，但 RET 指令要求占用一个独立的程序段。

(2) 子程序名。为方便地选择某一个子程序，必须给子程序取一个程序名。子程序名可以自由选择，其方法与主程序名的选取方法一样，但扩展名不同，主程序的扩展名为.mpf，在输入程序名时系统能自动生成扩展名，而子程序的扩展名.spf 必须与子程序名一起输入。例如：CZQY0110.spf。

另外，在子程序中，还可以使用地址字符 L，其后面的值可以有 7 位(只能为整数)，地址字符 L 之后的 0 均有意义，不能省略。例如：L128、L0128、L00128 分别代表 3 个不同的子程序。

(3) 子程序调用。在一个程序中(主程序或子程序)可以直接利用程序名调用子程序。子程序调用要求占用一个独立的程序段。如果要求多次连续地执行某一子程序，则在编程时必须在所调用子程序的程序名后的地址 P 下写入调用次数，调用次数为 1～9999 次。

例如：

```
N10  L785;          调用 L785 号子程序
N20  LABC;          调用 LABC 号子程序
N30  L785   P3;     调用 L785 号子程序，运行 3 次
```

在子程序中可以改变模态有效的 G 功能，比如 G90 到 G91 的变换。在返回调用程序时应注意检查所有模态有效的功能指令，并按照要求进行调整。

(4) 子程序嵌套。子程序不仅可以从主程序中调用，也可以从其他子程序中调用，这个过程称为子程序的嵌套。子程序的嵌套深度可以为 3 层，也就是四级程序界面(包括主程序界面)。

在使用加工循环程序进行加工时，要注意加工循环程序也同样属于四级程序界面中的一级。

四级程序界面运行过程如图 2.102 所示。

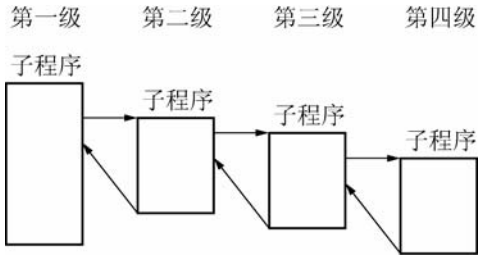


图 2.102　四级程序界面运行过程

11) 计算参数和程序跳转

为使一个数控程序不仅仅适用于特定数值下的一次加工，或者必须计算出数值的情况，均可以使用计算参数。可以在程序运行时由控制器计算或设定所需要的值；也可以通过操作面板设定参数值。如果参数已经赋值，则它们可以在程序中对由变量确定的地址进行赋值。

在加工非圆曲面时，系统没有定义指令，这就需要借助计算参数 R，并应用程序跳转等手段来完成曲面的加工。

(1) 计算参数。在系统中共有 250 个计算参数可供使用，其中 R0～R99 可以自由使用，R100～R249 为加工循环传递参数，如果编程人员在程序中没有使用加工循环，则这部分计算参数也同样可以自由使用。计算参数的赋值范围为±(0.000 0001～9999 9999)。例如：R1=10，表示给 R1 参数赋值为 10，如在程序中出现 G91 G01 X=R1，就表示沿 *X* 轴直线移动 10mm。

(2) 程序跳转。加工程序在运行时是以写入的顺序执行的，但有时程序需要改变执行顺序，这时可用程序跳转指令，以实现程序的分支运行。实现程序跳转需要跳转目标和跳转条件两个要素。

跳转目标只能是有标记符的程序段，此程序段必须位于该程序内，标记符可以自由选取，但必须由两个以上字母或数字组成，其中开始两个符号必须是字母或下画线。跳转目标程序段中标记符后面必须为冒号，标记符位于程序段段首，如果程序段有段号，则标记符应紧跟段号。

程序跳转包括绝对跳转和有条件跳转，应用较多的是有条件跳转。跳转指令要求一个独立的程序段。有条件跳转程序段格式：

IF(条件) GOTOF(标记符)；向下跳转(向程序结束的方向跳转)

IF(条件) GOTOB(标记符)；向上跳转(向程序开始的方向跳转)

(3) 程序跳转举例：圆弧上点的移动，如图 2.103 所示。

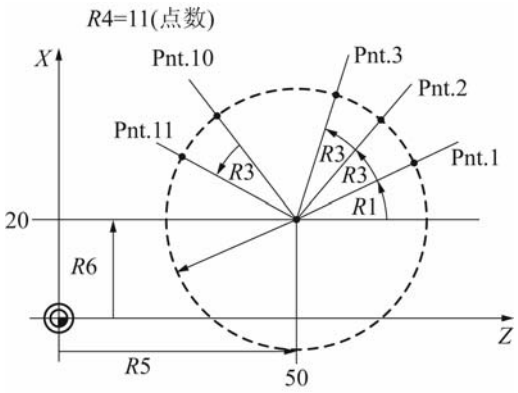


图 2.103　圆弧上点的移动

已知：起始角		30°	R1
	圆弧半径	20mm	R2
	位置间隔	10°	R3
	点数	11	R4
	圆心位置(*Z* 轴方向)	50mm	R5
	圆心位置(*X* 轴方向)	20mm	R6

```
N10 R1=30 R2=20 R3=10 R4=11 R5=50 R6=20;          赋初始值
N20 MA1: G0 Z=R2*COS(R1)+R5 X=R2*SIN(R1)+R6;      坐标轴地址计算及赋值
N30 R1=R1+R3 R4=R4-1;
N40 IF R4>0 GOTOB MA1;
N50 M02;
```

在程序段 N10 中给相应的计算参数赋值，在 N20 中进行坐标轴 X 和 Z 的数值计算并进行赋值。在程序段 N30 中 R1 增加 R3 角度；R4 减小数值 1。如果 R4>0，则重新执行 N20，否则运行 N50，用 M02 结束程序。

12) 固定循环

循环是指用于特定加工过程的工艺子程序，比如用于钻削、坯料切削、凹槽切削或螺纹切削等，只要改变参数就可以使这些循环应用于各种具体加工过程。循环在用于上述加工过程时只要改变相应的参数，进行少量的编程即可。使用加工循环时编程人员必须事先保留参数 R100～R249，保证这些参数只用于加工循环而不被程序中的其他地方使用。调用一个循环之前需要对该循环的传递参数赋值。

编程循环时不考虑坐标轴，在调用循环之前，必须在调用程序中返回钻削位置。如果在钻削循环中没有设定进给速度、主轴转速和方向的参数，则必须在零件程序中编程这些值。循环结束以后 G00、G90、G40 一直有效。

当参数组在调用循环之前并且紧挨循环调用语句时，才可以进行循环的重新编译。这些参数不可以被数控指令或者注释语句隔开。

钻削循环和铣削循环的前提条件就是首先选择平面且有一个具有补偿值的刀具有效，激活编程坐标转换(零点偏移，旋转)从而定义目前加工的实际坐标系。钻削轴始终为系统的第三坐标轴，在循环结束之后该刀具保持有效。表 2-14 为循环指令及其指令功能表。

表 2-14　循环指令及其指令功能表

指令名称	指　令　功　能
LCYC82	刀具以编程的主轴速度和进给速度钻孔，直到给定的最终钻削深度(简称钻深)
LCYC83	深孔钻削加工中心孔，通过分步钻入达到最后的钻深，钻深最大值事先设定
LCYC84	刀具以编程的主轴转速和方向钻削，直至给定的螺纹深度(前提是系统具有主轴位置控制功能)
LCYC85	镗孔
LCYC60	用此循环加工线性排列的钻孔或螺纹孔，钻孔及螺纹孔的类型由一参数确定
LCYC61	用此循环加工圆弧排列的孔和螺纹，钻孔和切内螺纹孔的方式由一参数确定
LCYC75	用此循环加工矩形槽、键槽或圆形凹槽的铣削

(1) 沉孔钻削循环指令 LCYC82。

刀具以编程的主轴速度和进给速度钻孔，直至到达给定的最终钻深。在到达最终钻深时可以编程一个停留时间，退刀以快速移动速度进行。应在调用程序中设定主轴转速及方向和钻削轴进给速度。在调用循环之前刀具回钻孔位置，且选择带补偿值的对应刀具，表 2-15 为 LCYC82 循环参数表。

表 2-15　LCYC82 循环参数表

参　数	含 义 及 其 数 值 范 围
R101	退回平面。确定循环结束之后钻削加工轴的位置，循环以此为出发点
R102	安全距离只对参考平面而言，参考平面被提前一个安全距离量，循环可以自动确定安全距离方向
R103	参考平面图样中所标明的钻削起点
R104	最后钻深以绝对值编程，它取决于工件零点，一般为负值
R105	在钻深处的停留时间(s)

循环开始之前的刀具位置是调用程序最后所返回的钻削位置。

循环的时序过程(图 2.104)：

① 用 G00 回到被提前了一个安全距离量的参考平面处；

② 按照调用程序中编程的进给速度以 G01 进行钻削，直到最终钻深；

③ 在此深度停留规定的时间后；

④ 以 G00 退刀回到退回平面。

例如：如图 2.105 所示，使用 LCYC82 循环，程序在 *XZ* 平面加工深度为 27 mm 的孔，在孔底停留时间 2s，钻孔坐标轴方向安全距离为 4 mm，钻孔结束后，刀具停留在 X24 Z110。

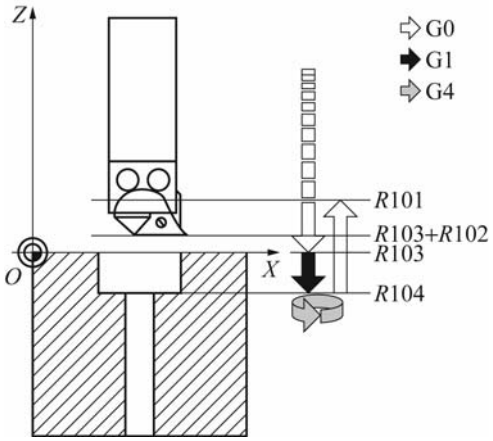


图 2.104　循环时序过程及参数

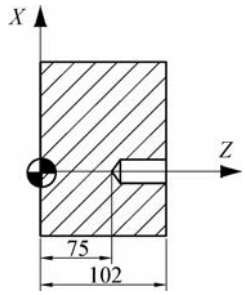


图 2.105　LCYC82 举例

程序如下：

```
N10  G00  G18  G90  F500  T2  D1  S500  M4;
N20  X0  Z110;
N30  G17;
N40  R101=110  R102=4  R103=102  R104=75  R105=2;
N50  LCYC82;
N60  M02;
```

(2) 深孔钻削循环指令 LCYC83。

此循环功能是深孔循环钻削加工孔，通过分步钻入达到最后的钻深，钻深的最大值事先由参数设定。钻削既可以在每步达到钻深后，提出钻头到参考平面达到排屑目的，也可以每次上提 1mm 以便断屑。循环时序过程及参数如图 2.106 所示。具体循环的参数见表 2-16。

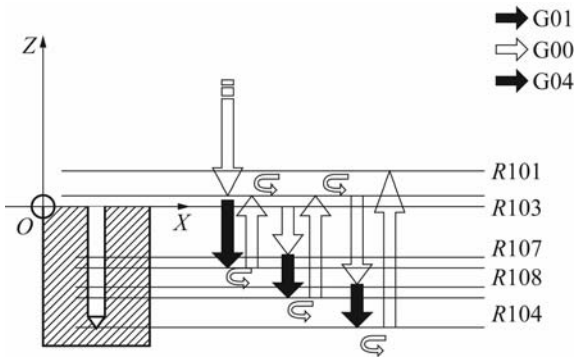


图 2.106　循环时序过程及参数

表 2-16　LCYC83 循环参数表

参　数	含 义 及 其 数 值 范 围
R101～R105	其参数含义同 LCYC82
R107	在第一次钻削之后的钻削进给速度

(续)

参　数	含 义 及 其 数 值 范 围
R108	确定第一次钻削的进给速度
R109	排屑方式下在起点处的停留时间
R110	确定第一次钻削行程的深度
R111	确定递减量的大小，保证以后的钻削量小于当前的钻削量。第二次钻削量若大于所编程的递减量，则第二次钻削量应等于第一次钻削量减去递减量；否则，第二次钻削量就等于递减量。当最后的剩余量大于两倍的递减量时，则在此之前的最后钻削量应等于递减量，所剩下的最后剩余量平分为最终两次钻削行程。如果第一次钻削量大于总的钻深量，则显示报警号：61107“第一次钻深错误定义”，从而不执行循环
R127	值 0：钻头在到达每次钻深后上提 1mm 空转，用于断屑 值 1：每次到达钻深后钻头返回到安全距离之前的参考平面，以便排屑

根据表 2-16 的参数含义，深孔钻削循环的时序过程如下(循环开始之前的刀具位置是调用程序中最后所返回的钻削位置)。

① 用 G00 回到被提前了一个安全距离量的参考平面处。

② G01 执行第一次钻削，钻深进给速度为循环前编程进给速度，执行钻深停留时间，有两种情况。

在断屑时：用 G01 按调用程序中所编程的进给速度从当前钻深上提 1mm，以便断屑。

在排屑时：用 G00 返回到安全距离前的参考平面，以便排屑，执行起点停留时间，然后用 G00 返回上次钻深，但留出一个前置量(由循环内部计算所得)。

③ 用 G01 按所给的进给速度执行下一次钻削，该过程一直执行下去，直至达到最终钻深，用 G00 返回到退回平面。

利用表 2-16 中的参数和循环的时序过程，用条件语句、R 参数和铣床基本指令描述上述时序的过程，就可以编制成循环子程序的格式，输入到 SIEMENS 802S 数控系统中。

(3) 镗孔循环指令 LCYC85。

刀具以给定的主轴速度和进给速度镗削，直至最终镗削深度。如果到达最终深度，可以编写一个停留时间程序。进刀及退刀运行分别按照相应参数下编程的进给速度进行(表 2-17)。

表 2-17　LCYC85 循环参数表

参　数	含义及其数值范围	参　数	含义及其数值范围
R101～R105	其参数含义同 LCYC82	R108	确定退刀时的进给速度大小
R107	确定钻削时的进给速度大小		

其时序过程如下(循环开始之前的刀具位置是调用程序中最后所返回的钻削位置，图 2.107)。

① 用 G00 回到被提前了一个安全距离量的参考平面处。

② 用 G01 以 R107 参数编程的进给速度加工到最终钻削深度。

③ 执行最终钻削深度的停留时间。

④ 用 G01 以 R107 参数编程的退刀进给速度返回到被提前一个安全距离量的参考平面处。

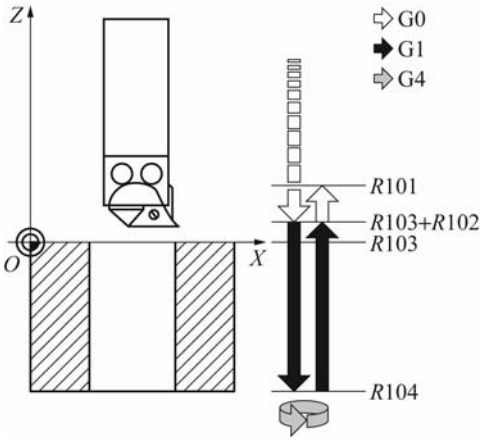


图 2.107　循环时序过程和参数

(4) 钻孔排列循环指令 LCYC60 和 LCYC61。

利用循环指令 LCYC60 和 LCYC61 可以按照一定的几何关系加工出钻孔以及螺纹，在此仍要用到前面已经介绍了的钻孔循环及螺纹切削循环。

线性孔排列循环 LCYC60：用此循环加工线性排列的钻孔或螺纹孔，钻孔及螺纹孔的类型由一个参数确定。在调用程序中必须按照设定了参数的钻孔循环和切内螺纹循环的要求编程主轴转速和方向，以及钻孔轴的进给速度。有关参数见表 2-18。

表 2-18　LCYC60 循环参数表

参　数	含 义 及 其 数 值 范 围
R115	钻孔或攻螺纹循环号数值：82(LCYC82)、83(LCYC83)、84(LCYC84)、85(LCYC85)
R116	在孔排列直线上确定一个点作为参考点，用来确定两个孔之间的距离。从该点出发，定义到第一个钻孔的距离。R116 为横坐标参考点，R117 为纵坐标参考点，R118 确定第一个钻孔到参考点的距离
R117	
R118	
R119	确定孔的个数
R120	确定直线与横坐标之间的角度
R121	确定两个孔之间的距离

此循环的具体时序过程为，出发点位置任意，但需保证钻头从该位置出发后可以无碰撞地回到第一个钻孔位。循环执行时首先回到第一个钻孔位，并按照 R115 参数所确定的循环加工孔，然后快速回到其他的钻孔位，按照所设定的参数进行接下去的加工过程。

矩阵孔排列举例：用此循环可以加工 *XY* 平面上 5 行 5 列排列的孔，孔间距为 10mm。参考点坐标为 X=30，Y=20，使用循环 LCYC85(镗孔)钻削。在调用程序中确定主轴转速和方向，进给速度由参数给定，如图 2.108 所示。程序如下：

```
N10 G00 G17 G90 S500 M3 T2 D1;          确定工艺参数
N20 X10 Y10 Z105;                       回到出发点
```

```
N30 R1=0，R101=105，R102=2，R103=102;        确定钻孔参数，初始化线性孔排列
                                             计数器(R1)
N40 R104=30 R105=2 R107=100 R108=300;        定义钻孔循环参数
N50 R115=85 R116=30 R117=20 R120=0 R119=5;   定义线性孔排列循环参数
N60 R118=10 R121=10;                         定义线性孔排列循环参数
N70 MARKE1：LCYC60;                          调用线性孔排列循环
N80 R1=R1+1 R117=R117+10;                    提高线性孔计数，确定新的参考点
N90 IF R1<5 GOTOB MARKE1;                    当满足条件时返回到 MARKE1
N100 G00 G90 X10 Y10 Z105;                   回到出发点位置
N110 M02;                                    程序结束
```

圆弧孔排列循环 LCYC61：用此循环可以加工圆弧状排列的孔和螺纹。钻孔和切内螺纹的方式由一参数确定。在调用该循环之前同样要对所选择的钻孔循环和切内螺纹循环设定参数。在调用循环之前，必须要选择相应的带刀具补偿的刀具。如图 2.109、表 2-19 所示。具体时序过程同 LCYC60。

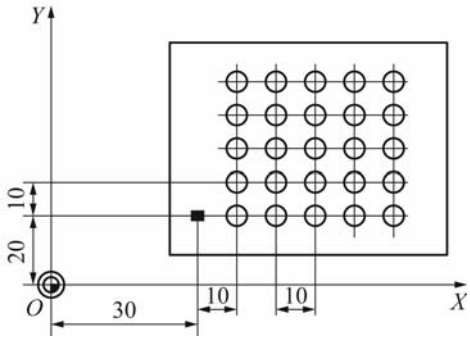


图 2.108　矩阵孔排列加工

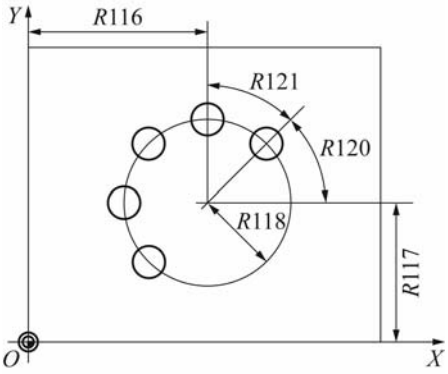


图 2.109　圆弧孔排列加工

表 2-19　LCYC61 循环参数表

参　数	含 义 及 其 数 值 范 围
R115	钻孔或攻螺纹循环号数值：82(LCYC82)、83(LCYC83)、84(LCYC84)、85(LCYC85)
R116	加工平面中圆弧孔位置通过圆心坐标(参数 R116/R117)和半径(R118)定义。在此半径值只能为正。R116 为圆弧圆心横坐标(绝对值)、R117 为圆弧圆心的纵坐标(绝对值)、R118 为圆弧半径
R117	
R118	
R119	确定孔的个数
R120	这些参数确定圆弧上钻孔的排列位置。其中参数 R120 给出横坐标正方向与第一个钻孔之间的夹角，R121 规定孔与孔之间的夹角。如果 R121=0，则在循环内部将这些孔均匀地分布在圆弧上，从而根据钻孔数计算出孔与孔之间的夹角。R120 为起始角，数值范围：-180°<R120<180°；R121 为角增量
R121	

(5) 矩形槽、键槽和圆形凹槽的铣削循环指令 LCYC75。

使用此循环程序可以在选定平面上加工出一个圆形凹槽、矩形槽或键槽。有关的参数设定如下：R101～R103 的含义同 LCYC83 的含义一样，其他参数见表 2-20。

表 2-20　LCYC75 循环参数表

参　数	含 义 及 其 数 值 范 围
R104	在此参数下编程参考面和凹槽槽底之间的距离(深度)
R116/R117	两参数确定凹槽中心点的横坐标和纵坐标
R118/R119	两参数确定平面上凹槽的形状。如果铣刀半径 R120 大于编程的角度半径，则所加工的凹槽圆角半径等于铣刀半径。如果刀具半径超过凹槽长度或宽度的一半，则循环中断，并发出报警“铣刀半径太大”。如果铣削一个圆形槽(R118=R119=2R120)，则拐角半径(R120)值就是圆形槽的直径值
R120	拐角半径。若拐角半径大于编程的角度半径，则所加工的凹槽圆角半径等于拐角半径；若刀具半径超过凹槽长度或宽度的一半，则循环中断，并发出报警“铣刀半径太大”
R121	确定最大的进刀深度。循环运行时以同样的尺寸进刀。利用参数 R121 和 R104 循环计算出一个进刀量。其大小介于 0.5 倍最大进刀深度和最大进刀深度之间。若 R121=0，则以凹槽深度进刀。进刀从提前了一个安全距离的参考平面处开始
R122	进刀时的进给速度，垂直于加工平面
R123	用此参数确定平面上粗加工和精加工的进给速度
R124	在参数R124下编程粗加工时留出的轮廓精加工余量。在精加工时(R127=2)，根据参数R124和R125选择“仅加工轮廓”或“同时加工轮廓和深度”。 仅加工轮廓：R124>0，R125=0 同时加工轮廓和深度：R124>0，R125>0；　R124=0，R125=0；　R124=0，R125>0
R125	给定的精加工余量在深度进给粗加工时起作用。具体条件同 R124
R126	用此参数规定加工方向。值 2：顺时针 G02；值 3：逆时针 G03
R127	确定加工方式。1：粗加工，按照给定的参数加工凹槽至精加工余量。2：精加工，运行精加工前提条件。凹槽粗加工过程已经结束，接下来对精加工余量进行加工。在此要求留出的精加工余量小于刀具直径

利用此循环可以加工一些相对复杂的零件，并简化编程功能。在参数设置中若 R118 和 R119 尺寸相同，R120 大于或等于凹槽长度或宽度的一半，可铣削成圆形凹槽；若 R118 和 R119 尺寸不相同，R120 小于凹槽长度或宽度的一半，可铣削成矩形凹槽；若 R118 和 R119 尺寸不相同，R120 等于凹槽长度或宽度的一半，可铣削成两头半圆形状的键槽。只要改变参数就可以使这些循环应用于各种具体加工过程。

4. 铣削加工编程实例

【例 2.7】 如图 2.110 所示工件，加工在 *XY* 平面的一个圆上的 4 个槽，相互间成 90° 角，起始角为 45° 键槽的尺寸如下：长度为 30mm，宽度为 15mm，深度为 23mm。安全距离 1mm，铣削方向 G2，深度进给最大 6mm。键槽采用粗加工(精加工余量为零)，铣刀带端面齿，可以加工数控中心。程序如下：

```
N10  G00  G90  T1  D1  M03  S2000;
N20  Z50;
N30  X5  Y20;
N40  R101=5 R102=1 R103=0 R104=-23 R116=35 R117=0 R118=30 R119=15 R120=15;
N50  R121=6  R122=200  R123=300  R124=0  R125=0  R126=2  R127=1;
```

```
N60  G158  X40  Y45;
N70  G259  RPL=45;
N80  LCYC75;
N90  G259  RPL=90;
N100  LCYC75;
N110  G259  RPL=90;
N120  LCYC75;
N130  G259 RPL=90;
N140  LCYC75;
N150  G259 RPL=45;
N160  G158  X-40  Y-45;
N170  Z5;
N180  X20 Y50;
N190  M05;
N200  M30;
```

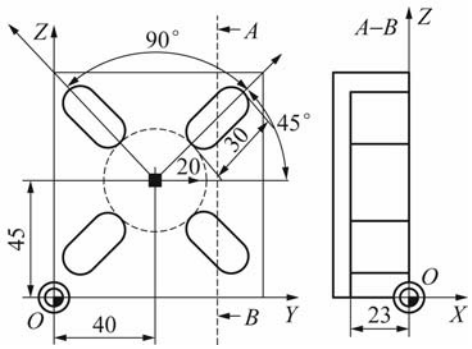


图 2.110　加工工件示意图

【例 2.8】 某连杆零件如图 2.111 所示，要求对该连杆的轮廓进行精铣数控加工，试编写程序。

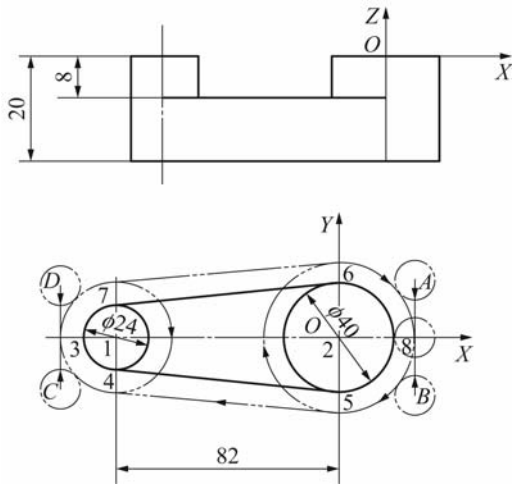


图 2.111　连杆零件

(1) 刀具选择。选择 ϕ16 mm 立铣刀。

(2) 安全面高度。安全面高度为 10mm。

(3) 工艺路线安排。采用刀具半径补偿功能，由 *A* 点进刀，再由 *B* 点退刀加工 ϕ 40mm 的圆；由 *C* 点进刀，再由 *D* 点退刀加工 ϕ 24mm 的圆；然后由 *A* 点进刀，再由 *B* 点退刀加工整个轮廓。

(4) 数值计算。连杆轮廓的特征点计算结果如下。

点 1：*X*=−82，*Y*=0；点 2：*X*=0，*Y*=0；点 3：*X*=−94，*Y*=0；点 4：*X*=−83.165，*Y*=−11.943；点 5：*X*=−1.951，*Y*=−19.905；点 6：*X*=−1.951，*Y*=19.905；点 7：*X*=−83.165，*Y*=11.943；点 8：*X*=20，*Y*=0。

(5) 数控加工程序如下：

```
O0002    程序名
N10  G54  G90  G00  X28  Y20;          建立工件坐标系，快速移动到 A 点
N15  G43  H01  Z10;                    刀具长度补偿，快速移动至安全高度
N20  S1000  M03  M08;                  启动主轴和切削液
N40  G01  Z-8  F200;                   下刀至-8mm 高度处
N50  G41  X20  Y0  H01  F100;          刀具半径左补偿，切向进刀至点 8
N60  G02  Y0  I-20  J0;                圆弧插补铣 φ40mm 的圆
N70  G40  G01  X28  Y-20;              取消刀具补偿，切向退刀至点 B
N80  G00  Z10;                         Z 向退刀至安全高度
N90  X-102  Y-20;                      快速移动到 C 点
N100  G01  Z-8  F200;                  下刀至-8mm 高度处
N110  G41  X-94  Y0  H01  F100;        刀具半径左补偿，切向进刀至点 3
N120  G02  I12  J0;                    圆弧插补铣 φ24mm 的圆
N130  G40  G01  X-94  Y20;             取消刀具补偿，切向退刀至点 D
N140  G00 Z10;                         Z 向退刀至安全高度
N150  G00  X28  Y20;                   快速移动到 A 点
N160  G01  Z-21  F200;                 下刀至-21mm 高度处
N170  G41  X20  Y0  H01  F100;         刀具半径左补偿，切向进刀至点 8
N180  G02  X-1.951  Y-19.905  I-20 J0; 圆弧插补至点 5
N190  G01  X-83.165  Y-11.943;         直线插补至点 4
N200  G02  Y11.943  I1.165  J11.943;  圆弧插补至点 7
N210  G01  X-1.951  Y19.905;           直线插补至点 6
N220  G02  X20  Y0  I1.195   J-19.905; 圆弧插补至点 8
N230  G40  G01  X28  Y-20;             取消刀具补偿，切向退刀至点 B
N240  G00  Z10  M05  M09;              Z 向退刀至安全高度，主轴停止
N250  G91  G49  G28  Z0;               取消长度补偿，Z 轴返回参考点
N260  G28  X0  Y0;                     X、Y 轴返回参考点
N270  M30;                             程序结束
```

2.3.4　加工中心程序编制

加工中心(Machining Center，MC)，是从数控铣床发展而来的。与数控铣床相同的是，加工中心同样是由计算机数控系统、伺服系统、机械本体、液压系统等各部分组成，但它又不等同于数控铣床，二者的最大区别在于加工中心具有自动交换加工刀具的能力，通过在刀库上安装不同用途的刀具，可在一次装夹中通过自动换刀装置改变主轴上的加工刀具，实现钻、铣、镗、扩、铰、攻螺纹、切槽等多种加工功能，故适合于小型板类、盘类、壳体类、模具等零件的多品种小批量加工。

图 2.112 为 TH5632 型立式加工中心外观图。图中所示 10 是床身，其顶面的横向导轨

支承着滑座 9，滑座沿床身导轨的运动方向为 *Y* 轴方向。工作台 8 沿滑座导轨的纵向运动方向为 *X* 轴方向。5 是主轴箱，主轴箱沿立柱导轨的上下移动方向为 *Z* 轴方向。1 为 *X* 轴的伺服电动机。2 是换刀机械手，它位于主轴和刀库之间。4 是盘式刀库，能储存 16 把刀具。3 是数控柜，7 是驱动电源柜，它们分别位于机床立柱的左右两侧，6 是机床的编程与操作面板。

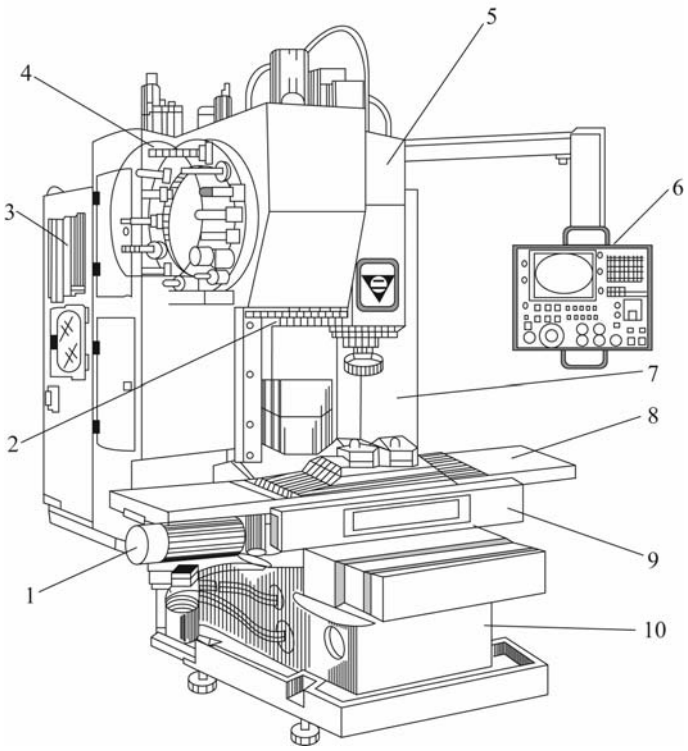


图 2.112　TH5632 型立式加工中心外观图

1. 加工中心编程特点

本节以配置 FANUC21i/210i—MB 系统的加工中心为例介绍其基本编程功能指令，该系统具有以下编程特点。

1) 程序结构

每一个存储在零件存储器中的程序需要指定一个程序号以便相互区别。其格式为：O××××；其中 O 为地址，其后为 4 位数字。在书写时程序号中非 0 的数字前的 0 可以省略不写。例如：O0020；可以写成 O20；所有程序都是从程序号开始，主程序以 M02 或 M30 结束；子程序以 M99 结束。

一个程序段用识别程序段的顺序号开始而以程序段结束代码结束，本系统用“；”表示程序段结束(在 ISO 代码中为 LF，而在 EIA 代码中为 CR)。

2) 小数点编程

小数点编程的意思是，对于某些地址可以使用小数点编程，也可不用小数点编程。对于允许使用小数点的地址，如 X、Y、Z、I、J、K、R、Q、F(注：P 不能用小数点输入)等，由小数点决定该数值的单位，输入时应特别注意。使用小数点编程时，长度单位为 mm，

角度单位为度(°)，时间单位为 s；不使用小数点编程时，长度单位为 μm，时间单位为 ms。

如沿 X 轴正方向位移 15mm，以下写法都是允许的。

G91　G00　X15.0；　G91　G00　X15.；　G91　G00　X15000；

但不能写成“G91 G00 X15；”，否则相当于位移 15 μm。另外在同一个程序段中，允许同时出现带小数点的数字，即带小数点和不带小数点的数字可以混合编程。如“X1000 Z2.；”，相当于“X1. Z2.；”，暂停指令中用 X 时应加小数点，用 P 时不能用小数点。如“G04 X5.；”，相当于“G04 P5000；”。

3) 自动换刀

该加工中心刀库装刀容量为 16 把，可以自动换刀，也可以手动换刀。可根据加工批量等情况，决定采用自动换刀还是手动换刀。一般在加工批量为 10 件以上，而刀具更换又比较频繁时，以采用自动换刀为宜。但当加工批量很小而使用的刀具种类又不多时，把自动换刀安排到程序中，反而会增加机床调整时间。

4) G 功能指令

G 功能代码见表 2-21。

表 2-21　G 功能代码一览表

G 功能代码	组别	功　能	G 功能代码	组别	功　能
G00	01	快速点定位	G45	00	刀具位置偏移增加
*G01		直线插补	G46		刀具位置偏移减少
G02		顺时针圆弧插补	G47		刀具位置偏移两倍增加
G03		逆时针圆弧插补	G48		刀具位置偏移两倍减少
G 功能代码	组别	功　能	G 功能代码	组别	功　能
G04	00	暂停	G50	11	比例缩放取消
G05.1		预读控制超前读多个程序	G51		比例缩放有效
G07.1(G107)		圆柱插补	G50.1	22	可编程镜像取消
G08		预读控制	G51.1		可编程镜像有效
G09		准确停止检验	G52	00	局部坐标系设定
G10		可编程数据输入	G53		选择机床坐标系
G11		可编程数据输入方式取消	G54～G59	14	工件坐标系 1～6 选择
*G15	17	极坐标指令消除	G60	00	单方向定位
G16		极坐标指令	G61	15	准确停止校验方式
*G17	02	*XY* 平面选择	G62		自动拐角倍率
*G18		*ZX* 平面选择	G63		攻螺纹方式
*G19		*YZ* 平面选择	*G64		切削进给方式
G20	06	英制输入	G65	00	宏指令简单调用
G21		米制输入	G66	12	宏指令模态调用
*G22	04	存储行程限位有效	G67		宏指令模态调用取消

(续)

G 功能代码	组别	功　能	G 功能代码	组别	功　能
G23		存储行程限位无效	*G68	16	坐标系旋转方式建立
G27	00	返回参考点检验	G69		坐标系旋转方式取消
G28		自动返回参考点	G73	09	深孔钻循环
G29		由参考点返回	G74		左旋攻螺纹循环
G30		返回第 2、3、4 参考点	G76		精镗循环
G31		跳转功能	G80～G89	09	孔加工固定循环
G33	01	螺纹切削	*G90	03	绝对值编程
G37	00	自动刀具长度测量	G91		增量值编程
G39		拐角偏置圆弧插补	G92	00	坐标系设定或最大主轴速度钳制
*G40	07	取消刀具半径补偿	G92.1		工件坐标系预置
G41		刀具半径补偿(左)	*G94	05	每分钟进给
G42		刀具半径补偿(右)	G95		每转进给
*G40.1(G150)	19	法线方向控制取消方式	G96	13	打开恒切削速度
G41.1(G151)		法线方向控制左侧接通	*G97		取消恒切削速度
G42.1(G152)		法线方向控制右侧接通	*G98	10	固定循环返回到初始点
G43	08	刀具长度补偿(+)	G99		固定循环返回到 R 点
G44		刀具长度补偿(−)	—	—	—
*G49		取消刀具长度补偿	—	—	—

注：1. 除了 G10 和 G11 以外的 00 组 G 功能代码都是非模态 G 功能代码，其他各组代码均为模态 G 功能代码。

2. 同组中，有*标记的 G 功能代码是在电源接通时或按下复位键时就立即生效的 G 功能代码。

3. 不同组 G 功能代码可以在同一个程序段中被规定并有效，但当一个程序段中，指定了两个以上属于同组的 G 功能代码时，则仅最后一个被指定的 G 功能代码有效。

4. 在固定循环方式中，如果规定了 01 组中的任何 G 功能代码，固定循环功能就被自动取消，系统处于 G80 状态，而且 01 组 G 功能代码不受任何固定循环 G 功能代码的影响。

5) M 功能指令

M 功能指令由地址 M 和两位数字组成，在一个程序段中只应规定一个 M 指令，当在一个程序段中出现了两个或两个以上的 M 指令时，则只有最后一个被指令的 M 代码有效。对于不同的机床制造厂来说，各 M 功能指令的含义可能有所不同，表 2−22 所列的是主要的 M 功能，仅供参考。

2. 加工中心基本编程方法

1) 快速点定位 G00

格式：G00　X__ Y__ Z__；

说明：

① 用 G00 指令指定点定位，命令刀具以点位控制方式，从刀具所在点以最快的速度

移动到目标点。X、Y、 Z 为目标点坐标。

② 当用绝对指令时，X、Y、Z 为目标点在工件坐标系中的坐标；当用增量坐标时，X、Y、Z 为目标点相对于起点的增量坐标，即编程时编制刀具移动的距离，不运动的坐标可以不写。

如图 2.113 所示，现命令刀具从 *A* 点快速移动到 *B* 点，其程序如下：

```
G90  G00  X10.0  Y20.0;        (绝对尺寸)
G91  G00  X-80.0  Y-60.0;      (增量尺寸)
```

③ 刀具分别以每轴的快速移动速度定位，刀具轨迹一般不是直线。其移动速度为系统设定的最高速度，不能在地址 F 中指定。

表 2-22　主要的 M 功能一览表

M 功能指令	功 能	简　要　说　明
M00	程序停止	程序停止时，所有模态指令不变，按循环启动(CYCLE　START)按钮可以再启动
M01	选择停止	功能与 M00 相似，不同之处就在于程序是否停止取决于机床操作面板上的选择停止(OPTIONAL STOP)开关所处的状态，“ON”程序停止；“OFF”程序继续执行。当程序停止时，按循环启动按钮可以再启动
M02	程序结束	程序结束后不返回到程序开头的位置
M03	主轴正转	从主轴前端向主轴尾端看时为逆时针
M04	主轴反转	从主轴前端向主轴尾端看时为顺时针
M05	主轴停止	执行该指令后，主轴停止转动
M06	刀具交换	主轴刀具与刀库上位于换刀位置的刀具交换，该指令中同时包含了 M19 指令，执行时先完成主轴准停的动作，然后才执行换刀动作
M08	切削液开	执行该指令时，应先使切削液开关位于 AUTO 的位置
M09	切削液关	—
M30	程序结束	程序结束后自动返回到程序开头的位置
M98	子程序调用	程序段中用 P 表示子程序地址，用 L 表示调用次数
M99	子程序返回	—

2) 单方向定位指令 G60

对于要求精确定位的孔加工，使用 G60 指令取代 G00 指令可以实现单方向定位，从而达到消除因间隙而引起的加工误差，实现精确定位的目的，如图 2.114 所示。

说明：

① 定位时的方向与过冲量均由参数设定，即使指令的定位方向与设定的方向一致，刀具也要在到达终点前停一次。

② G60 为非模态功能代码，只在被指定的程序段中有效。

③ 在钻孔固定循环期间 *Z* 轴不执行单方向定位。

④ 没有用参数设置过冲量的轴不能进行单方向定位。

⑤ 指令移动距离为 0 时不执行单方向定位。

⑥ 镜像不影响参数设定的方向。

⑦ 固定循环指令 G76 和 G87 中的偏移运动不使用单方向定位。

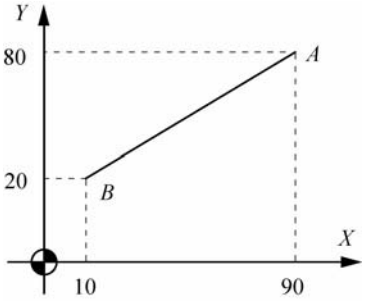


图 2.113　G00、G01 指令编程举例

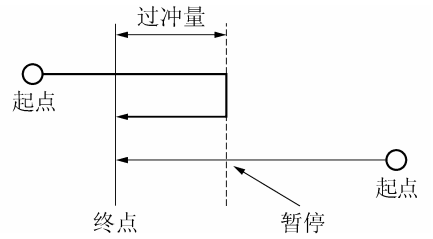


图 2.114　单方向定位指令 G60

3) 直线插补指令 G01

格式：G01　X__ Y__ Z__ F__;

说明：

① G01 指令的作用是使两个(或 3 个坐标)以联动的方式，按指定的进给速度 F 值，插补加工出任意斜率的平面(或空间)直线。X、Y、Z 为目标点坐标，可以用绝对值坐标，也可以用增量坐标。

② F 为刀具移动的速度，用 F 代码指令的进给速度是沿着直线轨迹测量的。如果 F 代码不指令，进给速度被当作零，如图 2.115 所示。

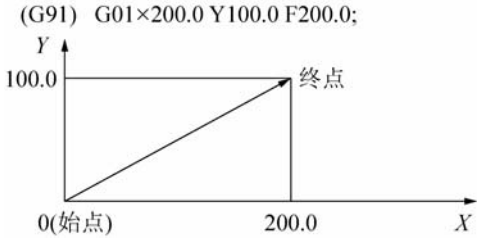


图 2.115　G01 指令编程举例

4) 圆弧插补指令 G02、G03

在 *XY* 平面上插补圆弧的格式：

$$G17\ \begin{Bmatrix}G02\\G03\end{Bmatrix}\ X\_\_\ Y\_\_\begin{Bmatrix}I\_\_\ J\_\_\\R\_\_\end{Bmatrix}\ F\_\_\ ;$$

在 *ZX* 平面上插补圆弧的格式：

$$G18\ \begin{Bmatrix}G02\\G03\end{Bmatrix}\ X\_\_\ Z\_\_\begin{Bmatrix}I\_\_\ K\_\_\\R\_\_\end{Bmatrix}\ F\_\_\ ;$$

在 *YZ* 平面上插补圆弧的格式：

$$G19\ \begin{Bmatrix}G02\\G03\end{Bmatrix}\ Y\_\_\ Z\_\_\begin{Bmatrix}J\_\_\ K\_\_\\R\_\_\end{Bmatrix}\ F\_\_\ ;$$

说明：

① 用 G02、G03 指定圆弧插补。G02 表示顺圆插补，G03 表示逆圆插补。圆弧的顺、

逆时针方向如图 2.91 所示。

② G17、G18、G19 为圆弧插补平面选择指令，以此来确定被加工表面所在平面，G17 可以省略。*X*、*Y*、*Z* 为圆弧终点坐标，可以用绝对值坐标，也可以用增量坐标，由 G90 和 G91 决定。在增量方式下，圆弧终点坐标是相对于圆弧起点的增量值。I、J、K 表示圆弧圆心的坐标，它是圆心相对于圆弧起点在 *X*、*Y*、*Z* 轴方向上的增量值，也可以理解为圆弧起点到圆心的矢量(矢量方向指向圆心)在 *X*、*Y*、*Z* 轴上的投影，与前面定义的 G90 或 G91 无关。I、J、K 为零时可以省略。F 规定了沿圆弧切向的进给速度。

下面以图 2.116 为例，说明 G02、G03 指令的编程方法，设刀具从 *A* 开始沿 *A*、*B*、*C* 切削。

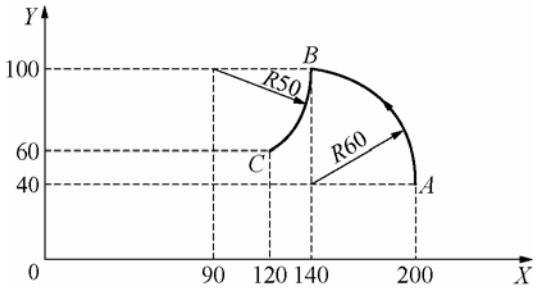


图 2.116　G02、G03 指令编程举例

用绝对值尺寸编程：

```
G92 X200.0 Y40.0 Z0;
G90 G03 X140.0 Y100.0 R60.0 F300.;
G02 X120.0 Y60.0 R50.0;
```

或

```
G92 X200.0 Y40.0 Z0;
G90 G03 X140.0 Y100.0 I-60.0 F300.;
G02 X120.0 Y60.0 I-50.0;
```

用增量值尺寸编程：

```
G91 G03 X-60.0 Y60.0 R60.0 F300.;
G02 X-20.0 Y-40.0 R50.0;
```

或

```
G91 G03 X-60.0 Y60.0 I-60.0 F300.;
G02 X-20.0 Y-40.0 I-50.0;
```

③ 整圆编程时不能使用 R，只能使用 I、J、K。

图 2.117 为一封闭圆，现设起刀点在坐标原点 *O*。加工时刀具从 *O* 快速移动至 *A*，以逆时针加工整圆，用绝对尺寸编程：

```
N10  G92  X0  Y0  Z0.;
N20  G90  G00  X30.  Y0;
N30  G03  I-30.  J0  F100;
N40  G00  X0  Y0;
```

用增量尺寸编程：

```
N20  G91  G00  X30.  Y0;
N30  G03  I-30.  J0  F100;
N40  G00  X-30.  Y0;
```

④ 在使用 R 的圆弧插补中，由于在同一圆弧半径 R 的情况下，从起点 *A* 到终点 *B* 的圆弧可能有两个，如图 2.118 所示，即圆弧段 1 和圆弧段 2。为了区别二者，特规定圆弧所对应的圆心角小于等于 180° 时(圆弧段 1)用＋R；圆心角大于 180° 的圆弧(圆弧段 2)用−R，其程序如下。

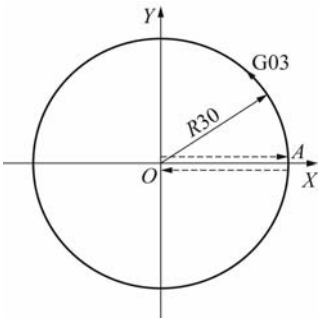


图 2.117　整圆编程

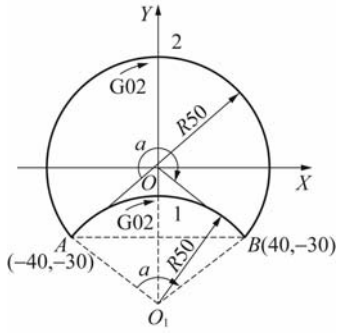


图 2.118　圆弧用 R 编程

圆弧段 1：由图可知 *A*、*B* 两点的坐标为 *A*(−40, −30)，*B*(40, −30)。程序为：

```
G90  G02  X40.  Y-30.  R50.  F100;或G91  G02  X80.  Y0.  R50.  F100;
```

圆弧段 2 程序为

```
G90  G02  X40.  Y-30.  R-50.  F100;或G91  G02  X80.  Y0.  R-50.  F100;
```

⑤ 如果同时指定地址 I、J、K 和 R，则用地址 R 指定的圆弧优先，其他被忽略。

5) 螺旋插补指令 G02、G03

$$G17\ \begin{Bmatrix}G02\\G03\end{Bmatrix}\ X\_\_\ Y\_\_\begin{Bmatrix}I\_\_\ J\_\_\\R\_\_\end{Bmatrix}\alpha(\beta)\_\_\ F\_\_\ ;$$

$$G18\ \begin{Bmatrix}G02\\G03\end{Bmatrix}\ X\_\_\ Z\_\_\begin{Bmatrix}I\_\_\ K\_\_\\R\_\_\end{Bmatrix}\alpha(\beta)\_\_\ F\_\_\ ;$$

$$G19\ \begin{Bmatrix}G02\\G03\end{Bmatrix}\ Y\_\_\ Z\_\_\begin{Bmatrix}J\_\_\ K\_\_\\R\_\_\end{Bmatrix}\alpha(\beta)\_\_\ F\_\_\ ;$$

说明：

① 螺旋移动的螺旋插补可指令两个与圆弧插补轴同步移动的其他轴。指令方法只是简单地加上一个不是圆弧插补轴的移动轴，如图 2.119 所示。

② 只对圆弧进行刀具半径补偿，在指令螺旋插补的程序段中不能指令刀具偏置和刀具长度补偿。

③ α、β 是圆弧插补时不用的任意一个轴，最多能指定两个其他轴。

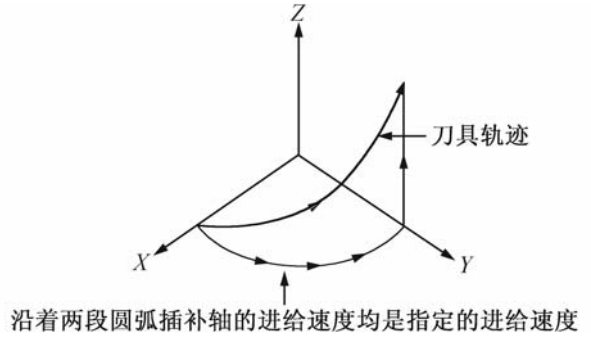


图 2.119　螺旋插补

6) 准确停止校验指令 G09

G09 指令为非模态指令，仅在所出现的程序段有效。在与包含有运动的指令同时被指定时，刀具在到达终点前减速并精确定位后才继续执行下一个程序段，因此 G09 可用于具有尖锐棱角的零件加工。

7) 准确停止校验方式指令 G61

G61 指令规定了精确停止校验方式且为续效指令。在指定了 G61 的程序段之后，当遇到与运动有关的指令，刀具到达该运动段的终点时，减速到零并精确定位之后再执行下一个程序段。该指令工作方式在遇到 G64 时可以自动终止。

G61 与 G09 的区别是 G61 为模态指令。

8) 切削进给方式指令 G64

在这种工作方式时，刀具在运动到指令的终点后，不减速而继续执行下一个程序段。换言之，机床在上一个程序段到达所编程的终点前，就开始执行下一个程序段。但该指令在有定位指令 G00、G60 或精确停止校验指令 G09 的程序段中，仍减速到零并精确定位。

9) 暂停指令 G04

格式：G04　X__；或 G04　P__；

说明：

① G04 指令可使刀具作暂短的无进给光整加工，一般用于镗平面、锪孔等场合。

② X 或 P 为暂停时间，其中 X 后面可用带小数点的数，单位为 s(如“G04　X5.0；”表示在前一程序执行完后，要经过 5s 以后，后一程序段才执行)；地址 P 后面不允许用小数点，单位为 ms(如“G04　P1000；”表示暂停 1000ms，即 1s)。

10) 返回参考点校验指令 G27、自动返回参考点指令 G28、由参考点返回指令 G29

(1) 返回参考点校验指令 G27。

格式：G27　X__ Y__ Z__；

说明：

① G27 指令可以检验刀具是否能够定位到参考点上，指令中 X、Y、Z 分别代表参考点在工件坐标系中的坐标值，执行该指令后，如果刀具可以定位到参考点上，则相应轴的参考点指示灯就点亮。

② 若不要求每次执行程序时，都执行返回参考点的操作，应在该指令前加上“ / ”(程序跳转)，以便在不需要校验时，跳过该程序段。

③ 若希望执行该程序段后让程序停止，应在该程序段后加上 M00 或 M01 指令，否则程序将不停止而继续执行后面的程序段。

④ 在刀具补偿方式中使用该指令，刀具到达的位置将是加上补偿量的位置，此时刀具将不能到达参考点，因而相应轴参考点的指示灯不亮，因此执行该指令前，应先取消刀具补偿。

(2) 自动返回参考点指令 G28。

格式：G28　X__ Y__ Z__；

说明：

① G28 指令可使刀具以点位方式经中间点快速返回到参考点，中间点的位置由该指令后面的 X、Y、Z 坐标值所决定，其坐标值可以用绝对值也可以用增量值，但这要取决于是 G90 方式还是 G91 方式。设置中间点是为了防止刀具返回参考点时与工件或夹具发生干涉。

② 通常 G28 指令用于自动换刀，原则上应在执行该指令前取消各种刀具补偿。

③ 在 G28 程序段中不仅记忆移动指令坐标值，而且记忆了中间点的坐标值。换句话说，对于在使用 G28 程序段中没有被指令的轴，以前 G28 中的坐标值就作为那个轴的中间点坐标值。

例：
```
N010  G90  X100.0  Y200.0  Z300.0;
N020  G28  X400.0  Y500.0;        (中间点是 400.0、500.0)
N030  G28  Z600.0;                (中间点是 400.0、500.0、600.0)
```

(3) 自动从参考点返回指令 G29。

格式：G29　X__ Y__ Z__；

说明：

① G29 指令可以使刀具从参考点出发，经过一个中间点到达由这个指令后面的 X、Y、Z 坐标值所指定的位置。中间点的坐标由前面的 G28 指令所规定，因此 G29 指令应与 G28 指令成对使用，指令中 X、Y、Z 是目标点的坐标，由 G90/G91 状态决定是绝对值还是增量值。若为增量值，则是指到达点相对于 G28 中间点的增量值。

② 在选择 G28 之后，G29 指令不是必需的，使用 G00 定位有时可能更为方便。

例如图 2.120 所示，加工后刀具已定位到 *A* 点，取点 *B* 为中间点，*C* 点为执行 G29 指令时应到达的点，则程序如下：

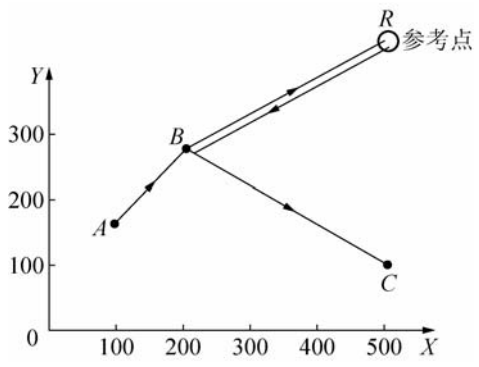


图 2.120　G28 指令与 G29 指令应用举例

```
N040  G91  G28  X100.  Y100.;
N050  M06;
N060  G29  X300.  Y-170.;
```

此程序执行时，刀具首先从 *A* 点出发，以快速点定位的方式由 *B* 点到达参考点，换刀后执行 G29 指令，刀具从参考点先运动到 *B* 点再到达 *C* 点，*B* 点至 *C* 点的增量坐标为“X300. Y-170.”。

11) 选择机床坐标系指令 G53

格式：G53　X__ Y__ Z__；

说明：

① 当指令机床坐标系上的位置时，刀具快速移动到该位置。

② G53 是非模态 G 代码，即它仅在指令机床坐标系的程序段有效。

③ 对 G53 应指定绝对值指令(G90)，当指定增量值指令(G91)时，G53 指令被忽略。

12)设定工件坐标系指令 G92

格式：G92　X__ Y__ Z__；

说明：

① G92 指令是规定工件坐标系坐标原点的指令，工件坐标系原点又称为程序原点，坐标值 X、Y、Z 为刀具刀位点在工件坐标系中(相对于程序原点)的初始位置。执行 G92 指令时，机床不动作，即 X、Y、Z 轴均不移动。

② 坐标值 *X*、*Y*、*Z* 均不得省略，否则对未被设定的坐标轴将按以前的记忆执行，这样刀具在运动时，可能达不到预期的位置，甚至会造成事故。

如图 2.121 所示，建立工件坐标的系程序为

```
G92  X25.2  Z23.0;          建立工件坐标系
```

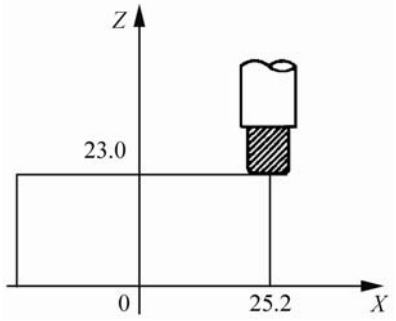


图 2.121　G92 建立工件坐标系

13) 选择工件坐标系指令 G54～G59

格式：G54 / … / G59

说明：

① 若在工作台上同时加工多个零件时，可以设定不同的程序零点，可建立 G54～G59 共六个加工工件坐标系。与 G54～G59 相对应的工件坐标系，分别称为第一工件坐标系至第六工件坐标系，其中 G54 坐标系是机床一开机并返回参考点后就有效的坐标系。

② G54～G59 不像 G92 那样需要在程序段中给出预置寄存的坐标数据。那么机床在加工时，是如何知道所用工件坐标系与机床坐标系之间的关系呢？原来这是由操作者在加工

零件之前，通过“工件零点附加偏置”的操作实现的。操作者在安装工件后，测量工件坐标系原点相对于机床坐标系原点的偏移量，并把工件坐标系在各轴方向上相对于机床坐标系的位置偏移量，写入工件坐标偏置存储器中，其后系统在执行程序时，就可以按照工件坐标系中的坐标值来运动了。

③ 注意 G54～G59 工件坐标系指令与 G92 坐标系设定指令的差别：G92 指令需后续坐标值指定刀具起点在当前工件坐标系中的坐标值，用单独一个程序段指定；在使用 G92 指令前，必须保证刀具回到加工起点。G54～G59 建立工件坐标系时，可单独使用，也可与其他指令同段使用；使用该指令前，先用手动数据输入(MDI)方式输入该坐标系的坐标原点在机床坐标系中的坐标值。

对于完成图 2.122 所示零件的钻孔加工，使用 G54～G59 工件坐标系编程可简化程序，减少坐标换算。

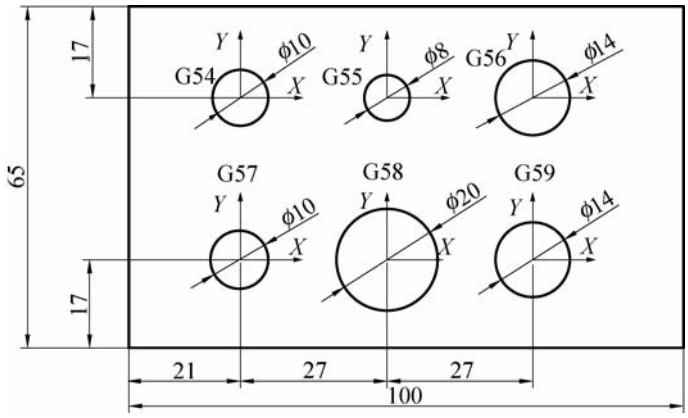


图 2.122　设定不同的程序零点示例

14) 设定局部坐标系指令 G52

当在工件坐标系中编制程序时，为容易编程可以设定工件坐标系的子坐标系。子坐标系称为局部坐标系。

格式：G52　X__ Y__ Z__；

说明：

① 用 G52 指令可以在工件坐标系 G54～G59 中设定局部坐标系。局部坐标系的原点设定在工件坐标系中以 X__ Y__ Z__指定的位置。

② 当设定局部坐标系时，后面以绝对值方式，G90 指令移动的是在局部坐标系中的坐标值。

③ 用“G52　X0 Y0 Z0”可取消局部坐标系。

④ 局部坐标系的设定不改变工件坐标系和机床坐标系。

15) 坐标平面指令 G17、G18、G19

右手直角笛卡儿坐标系的 3 个互相垂直的轴 *X*、*Y*、*Z*，分别构成 3 个平面，即 *XY* 平面、*ZX* 平面和 *YZ* 平面。对于三坐标的加工中心，常用这些指令确定机床在哪个平面内进行插补运动。用 G17 表示在 *XY* 平面内加工；G18 表示在 *ZX* 平面内加工；G19 表示在 *YZ* 平面内加工。

16) 绝对值指令 G90、增量值指令 G91

① 绝对值指令 G90。ISO 代码中绝对值指令用 G90 指定。它表示程序段中的尺寸字为绝对坐标值，即从编程零点开始的坐标值。

② 增量值指令 G91。ISO 代码中增量值指令用 G91 指定。它表示程序段中的尺寸字为增量坐标值，即刀具运动的终点相对于起点坐标值的增量。

17) 极坐标指令 G15、G16

格式：G17/G18/G19　G90/G91　G16；开始极坐标指令

G00　X__ Y__ } 极坐标指令

⋮

G15；取消极坐标指令

说明：

① 坐标值可以用极坐标半径和角度输入，角度的正向是所选平面的第一轴正向的逆时针转向，而负向是顺时针转向。

② 半径和角度两者可以用绝对值指令或增量值指令 G90/ G91。

③ G90 指定工件坐标系的原点作为极坐标系的原点，从该点测量半径；G91 指定当前位置作为极坐标系的原点，从该点测量半径。

④ G00 后第一轴是极坐标半径；第二轴是极角。

如图 2.123 所示，程序如下：

用绝对值指令指定角度和半径。

```
N1 G17 G90 G16; 指定极坐标指令和选择 XY 平面，设定工件坐标系的原点作为极坐标系的原点
N2 G81 X100.0 Y30.0 Z-20.0 R-5.0 F200.0; 指定 100mm 的距离和 30° 的角度
N3 Y150.0;      指定 100mm 的距离和 150° 的角度
N4 Y270.0;        指定 100mm 的距离和 270° 的角度
N5 G15 G80;       取消极坐标指令
```

用增量值指令指定角度，用绝对值指令指定极径。

```
N1 G17 G90 G16; 指定极坐标指令和选择 XY 平面，设定工件坐标系的原点作为极坐标的原点
N2 G81 X100.0 Y30.0 Z-20.0 R-5.0 F200.0; 指定 100mm 的距离和 30° 的角度
N3 G91 Y120.0;  指定 100mm 的距离和+120° 的角度增量
N4 Y120.0;      指定 100mm 的距离和+120° 的角度增量
N5 G15 G80;     取消极坐标指令
```

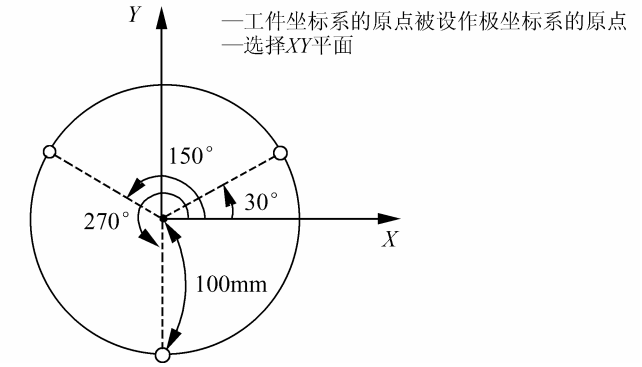


图 2.123　G15、G16 指令编程举例

18) 尺寸单位选择指令 G20、G21

格式：G20；　　英制输入

　　G21；　　公制输入

说明：

① 该 G 指令必须编在程序的开头，在设定坐标系之前，以单独程序段指定。

② 接通电源时为公制单位。

③ G20、G21 不能中途切换。

19) 主轴速度功能指令 G96、G97、G92

格式：G96　S____；　刀具和工件之间的相对速度维持恒定，S 为切削速度(m/min)

　　G97　S____；　取消恒切削速度，S 为主轴转速(r/min)

　　G92　S____；　S 为主轴最高速度(r/min)

20) 刀具补偿指令

(1) 刀具长度补偿指令 G43、G44、G49。

格式：G43　Z__ H__；　　刀具长度补偿(+)

　　G44　Z__ H__；　　刀具长度补偿(−)

　　G49；或 H00；　　取消刀具长度补偿

说明：

① 刀具长度补偿指令一般用于刀具轴向(Z 向)的补偿，它使刀具在 Z 方向上的实际位移量比程序给定值增加或减少一个偏置量。G43 为刀具长度正补偿“+”；G44 为刀具长度负补偿“−”；Z 为目标点坐标；H 为刀具长度补偿代号，补偿量存入由 H 代码指定的存储器中。若输入指令“G00 G43 Z100．H01；”，并于 H01 中存入“−200.”，则执行该指令时，将用 Z 坐标值“100.”与 H01 中所存“−200.”进行“+”运算，即“100. + (−200.)= −100.”，并将所求结果作为 Z 轴移动值。取消刀具长度补偿用 G49 或 H00。若指令中忽略了坐标轴，则默认为 Z 轴且为 Z0。

② 当刀具在长度方向的尺寸发生变化时，可以在不改变程序的情况下，通过改变偏置量，加工出所要求的零件尺寸。

图 2.124 所示的刀具长度补偿示例，程序如下：

```
H1=-4.0 刀具长度偏置值
N1 G91 G00 X120.0 Y80.0; (1)
N2 G43 Z-32.0 H1; (2)
N3 G01 Z-21.0 F1000; (3)
N4 G04 P2000; (4)
N5 G00 Z21.0; (5)
N6 X30.0 Y-50.0; (6)
N7 G01 Z-41.0; (7)
N8 G00 Z41.0; (8)
N9 X50.0 Y30.0; (9)
N10 G01 Z-25.0; (10)
N11 G04 P2000; (11)
N12 G00 Z57.0 H0; (12)
N13 X-200.0 Y-60.0; (13)
N14 M2;
```

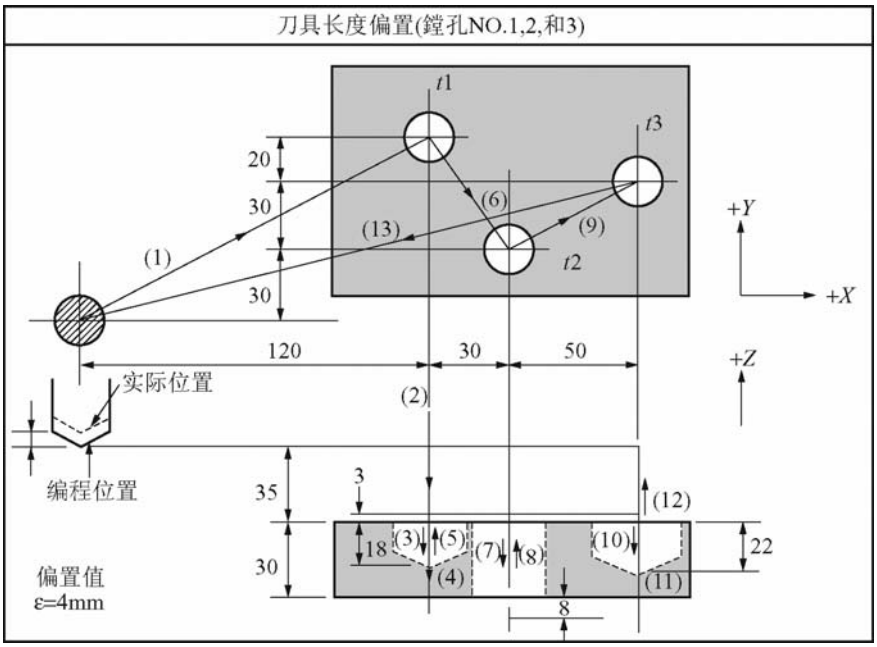


图 2.124　刀具长度补偿示例

(2) 刀具半径补偿指令 G41、G42、G40。

格式：

$$\text{G00(或G01)} \quad \begin{Bmatrix}\text{G41}\\ \text{G42}\end{Bmatrix} \quad \text{D\_\_ X\_\_ Y\_\_(F\_\_)；}$$

G00(或 G01)

G00(或 G01)G40 X__ Y__ (F__)；

说明：

① 前面已较详细地讨论了刀具半径补偿指令，在此仅作一些补充说明。

② 指令 G41 为刀具半径左补偿，G42 为刀具半径右补偿(图 2.96)，G40 为取消刀具半径补偿。由于刀具半径补偿的建立和取消必须在包含运动的程序段中完成，因此以上格式中也写入了 G00(或 G01)。D 为刀具半径补偿代号，刀具半径值预先寄存在 D 指令的存储器中。X、Y 为目标坐标点，F 为进给速度(用 G00 编程时 F 省略)。

③ 在建立与取消刀具半径补偿的过程中，必须注意刀具与工件之间的相互位置，避免撞刀。

【例 2.9】 如图 2.125 所示，现用ϕ30mm 立铣刀铣削该零件的轮廓。刀具半径补偿地址为 D07，在加工前存入 15。

程序如下：

```
G92 X0 Y0 Z0;                          指定绝对坐标值，刀具定位在开始位置
                                       X0 Y0 Z0
N1 G90 G17 G00 G41 D07 X250.0 Y550.0;  开始刀具半径补偿(起刀)，建立刀具半
                                       径左补偿，D07 已预先设定为 15(刀具半
                                       径为 15mm)
N2 G01 Y900.0 F150;                    从 P1 到 P2 加工
```

```
N3 X450.0;                          从 P2 到 P3 加工
N4 G03 X500.0 Y1150.0 R650.0;       从 P3 到 P4 加工
N5 G02 X900.0 R-250.0;              从 P4 到 P5 加工
N6 G03 X950.0 Y900.0 R650.0;        从 P5 到 P6 加工
N7 G01 X1150.0;                     从 P6 到 P7 加工
N8 Y550.0;                          从 P7 到 P8 加工
N9 X700.0 Y650.0;                   从 P8 到 P9 加工
N10 X250.0 Y550.0;                  从 P9 到 P1 加工
N11 G00 G40 X0 Y0;                  取消刀具半径补偿，刀具返回到开始位置
                                    X0 Y0 Z0
```

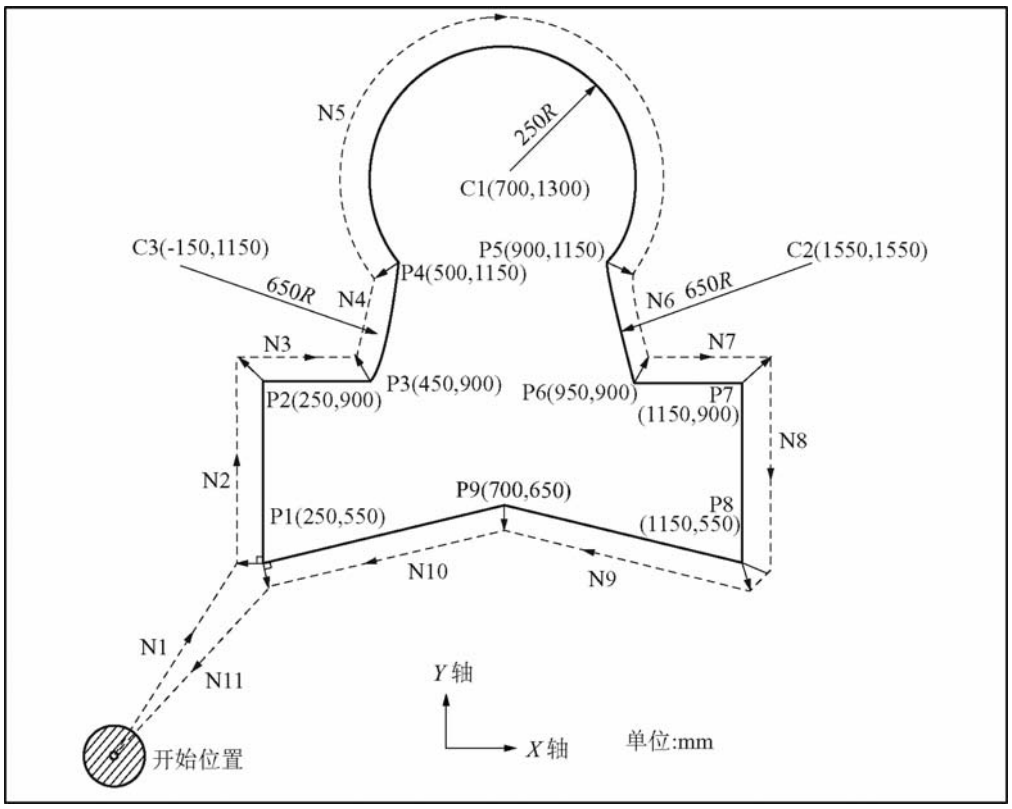


图 2.125　铣削零件轮廓

④ 刀具半径补偿功能给数控加工带来了方便，简化了编程工作。编程人员不但可以直接按零件轮廓编程，而且还可以用同一个加工程序，对零件轮廓进行粗、精加工。

如图 2.126 所示，当按零件轮廓编程以后，在粗加工零件时可以把偏移量设为 D，$D = R + \Delta$，其中 R 为铣刀半径，Δ 为精加工前的加工余量，那么零件被加工完成以后将得到一个比零件轮廓 $ABCDEF$ 各边都大 Δ 的零件轮廓 $A'B'C'D'E'F'$。在精加工零件时，设偏移量 $D = R$，这样零件被加工完后，将得到零件的实际轮廓 $ABCDEF$。

此外，可以利用刀具半径补偿功能，利用同一个程序，加工同一个基本尺寸的内、外两个型面。如图 2.127 所示，粗实线为零件的轮廓线，在编程时，设当偏移量为$+D$ 时，刀具中心将沿轨迹在轮廓外侧切削，如图 2.127(a)；当偏移量为$-D$ 时，刀具中心将沿轨迹在工件轮廓内侧切削，如图 2.127(b)。

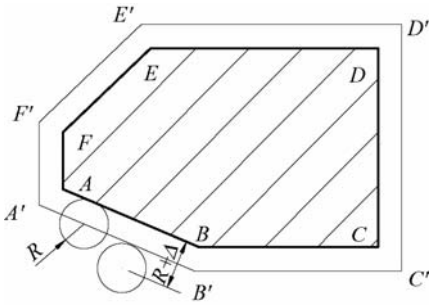
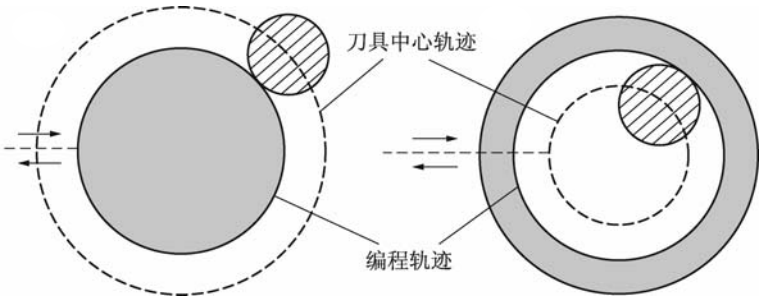


图 2.126　刀具半径补偿功能利用之一



(a)　　(b)

图 2.127　刀具半径补偿功能利用之二

21) 子程序

(1) 子程序的应用。

① 零件上有若干处具有相同的轮廓形状。在这种情况下，只编写一个轮廓形状的子程序，然后用一个主程序来调用该子程序。

② 加工中反复出现具有相同轨迹的走刀路线。被加工的零件从外形上看并无相同的轮廓，但需要刀具在某一区域分层或分行反复走刀，走刀轨迹总是出现某一特定的形状，采用子程序就比较方便，此时通常要以增量方式编程。

③ 程序中的内容具有相对的独立性。加工中心编写的程序往往包含许多独立的工序，有时工序之间的调整也是允许的。为了优化加工顺序，把每一个独立的工序编成一个子程序，主程序中只有换刀和调用子程序等指令，是加工中心编程的一个特点。

④ 满足某种特殊的需要。

(2) 子程序格式。

O××××；　　子程序号

N010 __ __ __ __ __；

N020 __ __ __ __ __；　　子程序内容

……

N200 __ __ __ __ __；

N210 M99；　　子程序结束

说明：

① 在子程序的开头，继“O”之后规定子程序号，(由 4 位数字组成，4 位中前面的 0 可以省略)

② M99 为子程序结束指令，M99 不一定要单独使用一个程序段，如下所示也是允许的：G00 X__ Y__ M99；

(3) 子程序的调用。

格式：M98　P ××× ×××× ；

说明：

① M98 是调用子程序指令，×××为子程序调用次数，系统允许调用的次数为 999 次；××××为子程序的号。如“M98 P51000;”表示调用子程序(O 1000)共 5 次。如 X1000.0 M98 P1200；表示 X 移动后调用子程序(O 1200)。

② 当主程序调用子程序时，它被认为是一重子程序。本系统允许子程序调用可以嵌套 4 重。

③ 当子程序结束时，如果用 P 指定一个顺序号，则控制不返回到调用程序段之后的程序段，而返回到由 P 指定的顺序号的程序段。但是，注意如果主程序运行于存储器方式以外的方式时，P 被忽略。这个方法返回到主程序的时间比正常返回要长。

如“M99 Pn;”表示子程序在返回时将返回到主程序中顺序号为 n(n 为主程序中的顺序号)的那个程序段。

④ 如果在主程序中执行 M99，则控制返回到主程序的开头，然后从主程序的开头重复执行。

下面举例说明子程序调用编程方法。

【例 2.10】如图 2.128 所示，用 ϕ8 键槽铣刀加工，使用刀具半径补偿，每次 Z 轴下刀 2.5mm，试利用子程序编写程序。

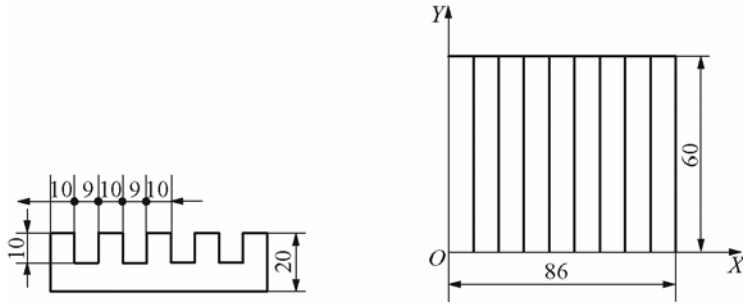


图 2.128　子程序编程

程序如下：

```
O100;(主程序)
N010  G92  X0  Y0  Z20.0;
N020  M03  S800;
N030  G90  X-4.5  Y-10.  M08;
N040  Z0;
N050  M98  P41100;
N060  G90  G00  Z20.0  M05;
N070  X0  Y0  M09;
N080  M30;
O1100;(子程序)
N010  G91  G00  Z-2.5;
```

```
N020  M98  P41200;
N030  G00  X-76.0  M99;
O1200;(子程序)
N010  G91  G00  X19.0;
N020  G41  D21  X4.5;
N030  G01  Y75.0  F100;
N040  X-9.;
N050  Y-75.;
N060  G40  G00  X4.5  M99;
```

22) 比例缩放指令 G50、G51

格式：G51 X_Y_Z_P_; /G51 X_Y_Z_I_J_K_;　缩放开始

…

G50;　　缩放取消

说明：

① X、Y、Z 为比例缩放中心坐标；P 为缩放比例；I、J、K 分别为 X、Y、Z 轴对应的缩放比例。

② 编程的形状被放大和缩小(比例缩放)。

③ 用 X、Y 和 Z 指定的尺寸可以放大和缩小相同或不同的比例。

23) 坐标系旋转指令 G68、G69

格式：G68　X__ Y__ R__；坐标系开始旋转

…

G69;　　坐标系旋转取消指令

说明：

① G68 指令以给定 X、Y 为旋转中心，将坐标系旋转 R 角，如果 X、Y 值省略，则以工件坐标系原点为旋转中心。

例如：“G68 R60；”表示以工件坐标系原点为旋转中心，将坐标系逆时针旋转 60°。“G68 X15. Y15. R60.；”表示以坐标(15，15)为旋转中心将坐标系逆时针旋转 60°。

② G69 为坐标系旋转取消指令，它与 G68 成对出现。

24) 固定循环功能指令

加工中心机床配备的固定循环功能，主要用于孔加工，包括钻孔、镗孔、攻螺纹等。使用一个程序段就可以完成一个孔加工的全部动作。继续加工孔时，如果孔加工的动作无须变更，则程序中所有模态的数据可以不写，因此可以大大简化程序。固定循环功能指令见表 2-23。

表 2-23　固定循环功能指令

G 代码	孔加工动作 (−Z 方向)	在孔底的动作	刀具返回方式 (+Z 方向)	用　途
G73	间歇进给	—	快速	高速深孔往复排屑钻
G74	切削进给	暂停—主轴正转	切削进给	攻左旋螺纹
G76	切削进给	主轴定向停止—刀具移位	快速	精镗孔

(续)

G 代码	孔加工动作 (−*Z* 方向)	在孔底的动作	刀具返回方式 (+*Z* 方向)	用　途
G80	—	—	—	取消固定循环
G81	切削进给	—	快速	钻孔
G82	切削进给	暂停	快速	锪孔、镗阶梯孔
G83	间歇进给	—	快速	深孔往复排屑钻
G84	切削进给	暂停—主轴反转	切削进给	攻右旋螺纹
G85	切削进给	—	切削进给	精镗孔
G86	切削进给	主轴停止	快速	镗孔
G87	切削进给	主轴停止	快速返回	反镗孔
G88	切削进给	暂停—主轴停止	手动操作	镗孔
G89	切削进给	暂停	切削进给	精镗阶梯孔

孔加工固定循环通常由以下 6 个动作组成：

动作 1 —— *X* 轴和 *Y* 轴定位。使刀具快速定位到孔加工的位置。

动作 2 —— 快进到 *R* 点。刀具自起点快速进给到 *R* 点。

动作 3 —— 孔加工。以切削进给的方式执行孔加工的动作。

动作 4 —— 在孔底的动作。包括暂停、主轴准停、刀具移位等动作。

动作 5 —— 返回到 *R* 点。继续孔的加工而又可以安全移动刀具时选择 *R* 点。

动作 6 —— 快速返回到起点。孔加工完后一般应选择起点。

图 2.129 表示出了固定循环功能指令的动作，图中用虚线表示的是快速进给，用实线表示的是切削进给。

① 初始平面：初始平面是为安全下刀而规定的一个平面。初始平面到零件表面的距离可以任意设定在一个安全的高度上，当使用同一把刀具加工若干孔时，只有孔间存在障碍需要跳跃或全部孔加工完毕时，才使用 G98 指令使刀具返回到初始平面上的起点。

② *R* 点平面：*R* 点平面又叫做 *R* 参考平面，这个平面是刀具下刀时自快进转为工进的高度平面，距工件表面的距离(又称刀具切入距离)主要考虑工件表面尺寸的变化，一般可取 2 mm～5 mm。使用 G99 指令时，刀具将返回到该平面上的 *R* 点。

③ 孔底平面：加工不通孔时孔底平面就是孔底的 *Z* 轴高度，加工通孔时一般刀具还要伸出工件底平面一段距离(又称刀具切出距离)，主要是保证全部孔深都加工到尺寸，钻削加工时还应考虑钻头钻尖对孔深的影响。

④ 定位平面：由平面选择指令 G17、G18 或 G19 决定。定位轴是除了钻孔轴以外的轴。

⑤ 数据形式：固定循环指令中 *R* 与 *Z* 的数据指定与 G90 或 G91 的方式选择有关，图 2.130 表示了选择 G90 或 G91 时的坐标计算方法。选择 G90 方式时 *R* 与 *Z* 一律取其终点坐标值，选择 G91 方式时则 *R* 是指自起点到 *R* 点的距离，*Z* 是指自 *R* 点到孔底平面上 *Z* 点的距离。

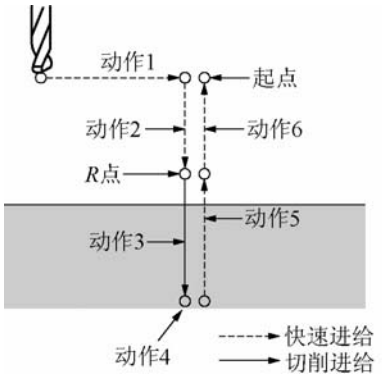
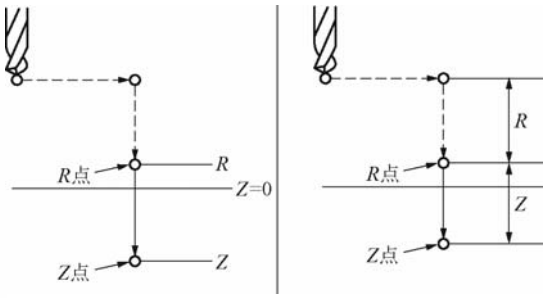


图 2.129　固定循环功能指令的动作



(a)G90 方式　　(b)G91 方式

图 2.130　G90 和 G91 的坐标计算

⑥ 返回点平面指令 G98、G99：由 G98 或 G99 决定刀具在返回时到达的平面。如果指令为 G98 则自该程序段开始，刀具返回时是返回到初始平面，如果指令为 G99 则返回到 *R* 点平面。

(1) 高速深孔往复排屑钻循环指令 G73。

格式：G73　X__ Y__ Z__ R__ Q__ F__K__；

说明：

① G73 指令用于高速深孔钻，它执行间歇切削进给直到孔的底部，同时从孔中排除切屑。

② X、Y 为孔的位置，Z 为孔的深度，F 为进给速度(mm/min)，R 为参考平面的高度，Q 为每次切削进给的背吃刀量，K 为重复次数。G 可以是 G98 和 G99，G98 和 G99 两个模态指令控制孔加工循环结束后刀具是返回初始平面还是参考平面：G98 返回初始平面，为默认方式；G99 返回参考平面。

例如：

```
M3 S2000;                                  主轴开始旋转
G90 G99 G73 X300. Y-250. Z-150. R-100. Q15. F120.;
                                           定位，钻 1 孔，然后返回到 R 点
Y-550.;                                    定位，钻 2 孔，然后返回到 R 点
Y-750.;                                    定位，钻 3 孔，然后返回到 R 点
X1000.;                                    定位，钻 4 孔，然后返回到 R 点
Y-550.;                                    定位，钻 5 孔，然后返回到 R 点
G98 Y-750.;                                定位，钻 6 孔，然后返回初始平面
G80 G28 G91 X0 Y0 Z0 ;                     返回到参考点
M5;                                        主轴停止旋转
```

(2) 攻左旋螺纹循环指令 G74。

格式：G74　X__ Y__ Z__ R__ P__ F__K__；

说明：

① G74 指令用于攻左旋螺纹，当到达孔底时主轴顺时针旋转。

② P 为暂停时间。参数意义同前。

(3) 精镗孔循环指令 G76。

格式：G76　X__ Y__ Z__ R__ Q__ P__ F__K__；

说明：

① G76 指令用于镗削精密孔，当到达孔底时主轴停止切削，刀具离开工件的被加工表面，并返回。

② Q 为在孔底的偏移量，是在固定循环内保存的模态值，必须小心指定。因为它也用作 G73 和 G83 的背吃刀量。参数意义同前。

(4) 钻孔循环指令 G81。

格式：G81　X__ Y__ Z__ R__ F__K__；

说明：

G81 指令用于正常钻孔，切削进给执行到孔底，然后刀具从孔底快速移动退回。参数意义同前。

(5) 锪孔循环指令 G82。

格式：G82　X__ Y__ Z__ R__ P__ F__ K__；

说明：

① G82 指令用于正常钻孔切削，进给执行到孔底，暂停，然后刀具从孔底快速移动退回。

② 该指令除了要在孔底暂停外，其他动作与 G81 指令相同。参数意义同前。

(6) 深孔往复排屑钻指令 G83。

格式：G83　X__ Y__ Z__ R__ Q__ F__K__；

说明：

G83 指令与 G73 指令略有不同的是每次刀具间歇进给后回退至 *R* 点平面。在第二次及以后的切削进给中执行快速移动到上次钻孔结束之前的一点，距离由系统参数来设定。当要加工的孔较深时可采用此方式。参数意义同 G73 指令。

(7) 攻右旋螺纹循环指令 G84。

格式：G84　X__ Y__ Z__ R__ F__K__；

说明：

G84 指令用于攻右旋螺纹，当到达孔底时主轴以反方向旋转。参数意义同 G74 指令。

(8) 精镗孔循环指令 G85。

格式：G85 X__ Y__ Z__ R__ F__K__；

说明：G85 指令主要适用于精镗孔等情况。参数意义同前。

(9) 镗孔循环指令 G86。

格式：G86　X__ Y__ Z__ R__ F__K__；

说明：

G86 指令与 G85 指令的区别是：在到达孔底位置后，主轴停止，并快速退出。参数意义同前。

(10) 反镗孔循环指令 G87。

格式：G87 X__ Y__ Z__ R__ Q__ P__F__K__；

说明：G87 指令用于精密镗孔。参数意义同 G76 指令。

(11) 镗孔循环指令 G88。

格式：G88 X__ Y__ Z__ R__P__F__K__；

说明：

G88 指令用于镗孔，当镗孔完成后，执行暂停；然后主轴停止，刀具从孔底 Z 点手动返回到 R 点，在 R 点主轴正转，并且执行快速移动到初始位置。参数意义同 G76 指令。

(12) 精镗阶梯孔循环指令 G89。

格式：G89　G__ X__ Y__ Z__ R__ P__ F__；

说明：G89 指令与 G85 指令的区别是：在到达孔底位置后，进给暂停。参数意义同前。

(13) 取消孔加工循环指令 G80。

格式：G80；

说明：G80 为取消孔加工循环指令，它与其他孔加工循环指令成对使用。

【例 2.11】 试采用固定循环方式加工图 2.131 所示零件的各孔。工件材料为 HT300，使用刀具 T01 为镗孔刀，T02 为 ϕ13 钻头，T03 为锪钻。

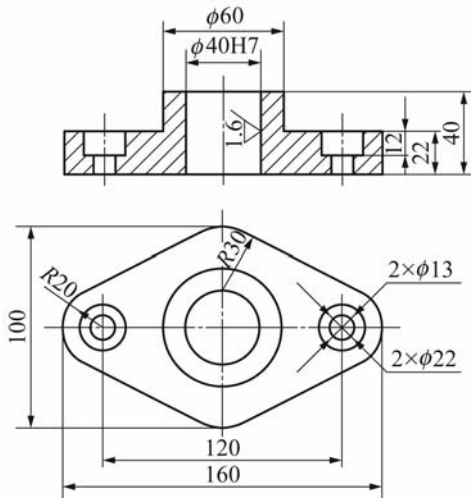


图 2.131　固定循环加工零件图

程序如下：

```
O1001;
N010  T01;
N020  M06;
N030  G90  G00  G54  X0  Y0  T02;
N040  G43  H01  Z20.0  M03  S500  F30;
N050  G98  G85  X0  Y0  R3.0  Z-45.0;
N060  G80  G28  G49  Z0  M06;
N070  G00  X-60.0  Y50.0  T03;
N080  G43  H02  Z10.0  M03  S600;
N090  G98  G73  X-60.0  Y0  R-15.0  Z-48.0  Q4.0  F40;
N100  X60.0;
N110  G80  G28  G49  Z0  M06;
N120  G00  X-60.0  Y00.;
N130  G43  H03  Z10.0  M03  S350;
N140  G98  G82  X-60.0  Y0  R-15.0  Z-32.0  P100  F25;
N150  X60.0;
```

```
N160  G80  G28  G49  Z0  M05;
N170  G91  G28  X0  Y0  M30;
```

2.3.5　自动编程简介

自动编程(Automatic Programming，AP)实际上是指计算机辅助编程(Computer Aided Programming，CAP)。目前，自动编程根据编程信息的输入与计算机对信息的处理方式不同，分为语言式和图形交互式两种自动编程方式。

在语言式自动编程方式中，编程人员编程时是依据所用数控语言的编程手册以及零件图样，以语言的形式表达出加工的全部内容，然后再把这些内容全部输入到计算机中进行处理，制作出可以直接用于数控机床的数控加工程序。而在图形交互式自动编程方式中，编程人员则首先要对零件图样进行工艺分析，确定构图方案，然后利用自动编程软件本身的计算机辅助设计(CAD)功能，在显示器上以人机对话的方式构建出几何图形，最后利用软件的计算机辅助制造(CAM)功能制作出数控加工程序。这种自动编程方式又称为图形交互式自动编程，该系统是一种 CAD 功能与 CAM 功能高度结合的编程系统。

1. 自动编程的工作过程

1) 语言式自动编程系统的工作过程(图 2.132)

自动编程系统必须具备 3 个条件：即数控语言编写的零件源程序、通用计算机及其辅助设备和编译程序(系统软件)。数控语言是一种类似车间用语的工艺语言，它是由一些基本符号、字母以及数字组成并有一定词法和语法的语句。用它来描述零件图的几何形状、尺寸、几何元素间的相互关系(相交、相切、平行等)以及加工时的运动顺序、工艺参数等。按照零件图样用数控语言编写的计算机输入程序称为零件源程序，它与在手工编程时用数控指令代码写出的数控加工程序不同，零件源程序不能直接控制机床，只是计算机进行编程时的依据。

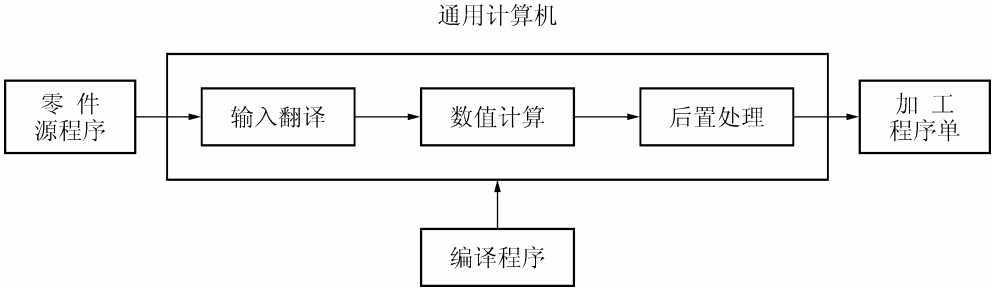


图 2.132　语言式自动编程系统的工作过程

通用计算机及其辅助设备是自动编程所需要的硬件。

编译程序又称为自动编程系统，其作用是使计算机具有处理零件源程序和自动输出加工程序的能力，它是自动编程所必需的软件。因为数控语言编写的零件源程序，计算机是不能直接识别和处理的，必须根据具体的数控语言计算机语言(高级语言或汇编语言)以及具体机床的指令，事先给计算机编好一套能处理零件源程序的编译程序(又称为数控编程软件)，将这种数控编程软件存入计算机中，计算机才能对输入的零件源程序进行翻译、计算，并执行根据具体数控机床的控制系统所编写的后置处理程序。

计算机处理零件源程序一般经过下列 3 个阶段。

(1) 翻译阶段。翻译阶段是按源程序的顺序，依次进行一个符号一个符号的阅读并进行语言处理。首先分析语句的类型，当遇到几何定义语句时，则转入几何定义处理程序。另外，在此阶段还需进行十进制到二进制的转换和语法检查等工作。

(2) 数值计算阶段。该阶段的工作类似于手工编程时的基点和节点坐标数据的计算，其主要任务是处理连续运动语句，通过计算求出刀具位置数据，并以刀具位置文件的形式加以保存。

(3) 后置处理阶段。后置处理阶段是按照计算阶段的信息，通过后置处理生成符合具体数控机床要求的零件数控加工程序。该加工程序可以通过打印机输出加工程序单，也可以通过穿孔机或者磁带机制成相应的数控带或磁带作为数控机床的输入信息，还可以通过计算机的通信接口，将后置处理的信息直接输入数控机床控制机的存储器，予以调用。目前，经计算机处理的加工程序，还可以通过 CRT 屏幕或绘图机自动绘图，自动绘出刀具相对于工件的运动轨迹图形，用以检查程序的正确性，以便编程人员分析错误的性质并加以修改。

2) 图形交互式自动编程系统的工作过程

图形交互式自动编程系统是建立在 CAD 功能和 CAM 功能基础上的，其工作过程如下。

(1) 几何造型。几何造型就是利用图形交互式自动编程软件的 CAD 功能，即构建图形、编辑修改、曲线曲面造型和实体造型等功能，将零件被加工部位的几何图形准确地绘制在计算机屏幕上，同时在计算机内自动生成零件图形的数据文件，作为下一步刀具轨迹计算的依据。自动编程过程中，软件将根据加工要求提取这些数据，进行分析判断和必要的数学处理，以形成加工的刀具位置数据。

(2) 刀具路径的生成。图形交互式自动编程系统的刀具路径的生成是面向屏幕上的图形交互进行的。首先，从几何图形文件库中获取已绘制的零件几何造型后，根据所加工零件的型面特征和加工要求，正确选用刀具路径主菜单下的有关加工方式菜单，再根据屏幕提示，输入刀具路径文件名，用光标选择相应的图形目标，输入所需的各种参数。软件将自动从图形文件中提取编程所需的信息，进行分析判断，计算节点数据，并将其转换为刀具位置数据，存入指定的刀位文件中，同时可进行刀具路径模拟和加工过程动态模拟，在屏幕上显示出刀具轨迹图形。

(3) 后置处理。后置处理的目的是形成数控加工文件。由于各种数控机床使用的控制系统不同，其编程指令代码及格式也有所不同，为此应从后置处理程序文件中选取与所要加工机床的数控系统相适应的后置处理程序，再进行后置处理，才能生成符合数控加工格式要求的数控加工程序。

2. 自动编程系统简介

1952 年，美国麻省理工学院林肯实验室研制成功第一台数控铣床后，为了充分发挥铣床的加工能力，解决复杂零件的加工问题，麻省理工学院伺服机构研究室随即着手研究数控自动编程技术，1955 年公布了该研究成果，即用于机械零件数控加工的自动编程工具(Automatically Programmed Tools，APT)。1958 年，美国航空空间协会组织了 10 多家航空工厂，在麻省理工学院协助下进一步发展 APT 系统，产生了 APTII，可用于平面曲线的自

动编程问题。1962 年，又发展成 APTIII，可用于 3～5 坐标立体曲面的自动编程。其后美国航空空间协会继续对 APT 进行改进，1970 年产生了 APTIV，可处理自由曲面的自动编程。为突出发展空间曲面(也称雕塑曲面)的编程技术，ALRP 与 CAM—I 两家联合开发出以 APTIV 为基础的 SSX1。到了 20 世纪 80 年代，空间曲面编程发展到 APTIV—SSX7，在一些单位得到了应用。

美国除了开发大而全的 APT 系统之外，还开发了 ADAPT、AUTOSPOT 等小型系统。APT 系统配有多种后置处理程序，通用性好，可靠性高(可自动诊错)，是一种应用广泛的数控编程软件，能够适应多坐标数控机床加工曲线曲面的需要。

随后世界上许多先进国家也都开展了自动编程技术的研究工作，并开发出自己的数控编程语言，但大多是参考 APT 语言的设计思想，根据不同需要研究出了许多各具特色的自动编程系统。其中，英国开发了 2C、2CL、2PC，德国开发了 EXAPT1～EXAPT3、MIMIAPT，法国开发了 IFAPT、SURFAPT，此外还有日本的 HAPT、FAPT，意大利的 MODAPT 系统等。

我国对自动编程技术的研究开始于 20 世纪 60 年代中期，起步虽晚，但发展很快。70 年代研制出了 SKC、ZCX、ZBC—l、CKY 等用于平面轮廓铣削加工、车削加工等功能的自动编程系统。80 年代以来，许多高等院校和研究所开发了许多新系统，如南京理工大学开发的 EAPT 自动编程系统，上海机床研究所研制的 MAPL 自动编程系统等。

3. 国外主要的 CAM 软件介绍

1) 美国 CNC software 公司的 Master CAM 软件

Master CAM 软件是在微机档次上开发的，在使用线框造型方面较有代表性，而且，它又是侧重于数控加工方面的软件，这样的软件在数控加工领域内占重要地位。

Master CAM 的主要功能是：二维(2D)、三维(3D)图形设计、编辑；三维复杂曲面设计；自动尺寸标注、修改；各种外设驱动；5 种字体的字符输入；可直接调用 AUTOCAD、CADKEY、SURFCAM 等；设有多种零件库、图形库、刀具库；2～5 轴数控铣削加工；车削数控加工；线切割数控加工；钣金、冲压数控加工；加工时间预估和切削路径显示，过切检测及消除；可直接连接 300 多种数控机床。

2) 美国通用汽车公司 EDS 的 UG

UNIGRAPHICS(简称 UG)起源于麦道飞机公司，以 CAD/CAM 一体化而著称，可以支持不同硬件平台。UG 于 1991 年 11 月并入美国通用汽车公司 EDS，使得 UG 用户可以享受美国工业的心脏和灵魂——航空航天及汽车工业的专业经验。该软件以世界一流的集成化设计、工程及制造系统广泛地应用于通用机械、模具、汽车及航空领域。

UG 的主要特点与功能如下。

(1) UG 具有很强的 2D 画图功能，由模型向工程图的转换十分方便。

(2) 曲面造型采用非均匀有理 B 样条作为数学基础，可用多种方法生成复杂曲面、曲面修剪和拼合、各种倒角过渡以及三角域曲面设计等。其造型能力代表着该技术的发展水平。

(3) UG 的曲面实体造型源于被称为世界模型之祖的英国剑桥大学 Shape Data Ltd。该产品(PARASOLID)已被多家软件公司采用。该项技术使得线架模型、曲面模型、实体模型融为一体。

(4) UG 率先提供了完全特征化的参数及变量几何设计(UG CONCEPT)。

(5) PDA 公司以 PARASOLID 为其内核，使得 UG 与 PATRAN 的连接天衣无缝。与 ICAD、OPTIMATION、VALISYS、MOLDFLOW 等著名软件的内部接口方便可靠。

(6) 由于统一的数据库，UG 实现了 CAD、CAE、CAM 各部分之间无数据交换的自由切换，3～5 坐标联动的复杂曲面加工和镗铣，方便的加工路线模拟，生成了 SIEMENS、FANUC 机床控制系统代码的通用后置处理，使真正意义上的自动加工成为现实。

(7) UG 提供可以独立远行的、面向目标的集成管理数据库系统。

(8) UG 是一个界面设计良好的二次开发工具。通过高级语言接口，UG 的图形功能与高级语言的计算功能很好地结合起来。

3) 美国 PTC 公司的 Pro/Engineer 软件

Pro/Engineer 是唯一的一整套机械设计自动化软件产品，它以参数化和基于特征建模的技术，提供给工程师一个革命性的方法，去实现机械设计自动化。Pro/Engineer 是由一个产品系列组成的。它是专门应用于机械产品从设计到制造全过程的产品系列。

Pro/Engineer 产品系列的参数化和基于特征的建模给工程师提供了空前简便和灵活 的操作环境。另外，Pro/Engineer 唯一的数据结构提供了所有工程项目之间的集成，使整个产品从设计到制造紧密地联系在一起，这样，能使工程人员并行地开发和制造它的产品。可以很容易地评价多个设计的选择，从而使产品达到最好的设计、最快的生产和最低的造价。

Pro/Engineer 的主要特性如下。

(1) 3D 实体模型。3D 实体模型除了可以将用户的设计思想以最真实的模型在计算机上表现出来之外，借助于系统参数，用户还可以随时计算出产品的体积、面积、重心、质量、惯性大小等，以了解产品的真实性，并弥补传统面结构、线结构的不足。用户在产品设计过程中，可以随时掌握以上重点，设计物理参数，并减少许多人为计算时间。

(2) 单一数据库。Pro/Engineer 可随时由 3D 实体模型产生 2D 工程图，而且自动标注工程图尺寸。不论在 3D 还是 2D 图形上做尺寸修正，其相关的 2D 图形或 3D 实体模型均自动修改，同时装配、制造等相关设计也会自动修改，这样可确保数据的正确性，并避免反复修改的耗时性。由于采用单一数据库，提供了所谓双向关联性功能，这也符合了现代产业中所谓的同步工程思想。

(3) 特征作为设计的单位。Pro/Engineer 可使设计人员以最自然的思考方式从事设计工作，如孔、开槽、做成圆角等均被视为零件设计的基本特征，用户除需充分掌握设计思想外，还可在设计过程中导入实际的制造思想。也正因为以特征作为设计的单元，所以可以随时对特征做合理的、不违反几何形状的顺序调整、插入、删除、重新定义等修正动作。

(4) 参数式设计。配合单一数据库，所有设计过程中所使用的尺寸都存储在数据库中，修改 CAD 模型及工程图不再是一件难事。设计者只需修改 3D 零件尺寸，则 2D 工程图、3D 装配、模具等就会依照尺寸的修改做几何形状的变化，以达到设计修改工作的一致性，避免发生人为改图的疏漏情形，且减少许多人为改图时间和精力的消耗。也因为有参数式的设计，用户才可以运用强大的数学运算方式，建立各尺寸参数间的关系式，使得模型可自动计算出应有的外形，避免尺寸一一修改的烦琐，并减少错误的发生。

小　　结

数控程序的编制过程首先是对工件进行工艺分析和图形的数学处理，然后将加工所需的数据和信息编成加工程序，将程序输入到数控装置，由数控装置控制数控机床进行加工。

(1) 数控加工工艺分析。包括机床的合理选用，加工方法与加工方案的确定，工序与工步的划分，零件的定位与安装，刀具与工具的选用，切削用量与数控加工路线的确定等。其主要内容应写入数控加工工艺文件中，作为数控机床编程的依据。

(2) 图形的数学处理。主要是基点和节点计算、刀位点轨迹和辅助计算等。图形的数学处理是数控编程前的主要准备工作，无论对于手工编程还是自动编程都是必不可少的。

(3) 数控加工的程序编制。包括数控机床编程基础，数控车床、数控铣床和加工中心常用 G 指令、M 指令的格式与功能，典型零件的编程方法等。

思考题与习题

1. 简述题

(1) 数控机床最适合加工哪几种类型的零件？

(2) 数控加工工序的划分有几种方式？各适合什么场合？

(3) 数控加工对刀具有何要求？常用数控刀具材料有哪些？各有什么特点？

(4) 数控加工切削用量的选择原则是什么？它们与哪些因素有关？应如何进行确定？

(5) 试说明刀位点的含义？对于各加工表面要求光滑连接或光滑过渡时，加工路线应如何确定，为什么?

(6) 环切法和行切法各有何特点？分别适用于什么场合？

(7) 数控加工工艺文件有哪些？各包括哪些内容？

(8) 试说明基点和节点的含义，利用 AutoCAD 如何确定基点坐标？

(9) 简述数控编程的内容和步骤。

(10) 手工编程和自动编程比较，各有何特点？

(11) 简述机床坐标系及运动方向的规定。

(12) 数控机床坐标系的原点与参考点是如何确定的？

(13) 什么是右手笛卡儿直角坐标系？*Z* 轴、*X* 轴在机床上分布的原则是什么？

(14) 机床坐标系和工件坐标系有什么不同？如何建立？

(15) 在恒线速度控制车削过程中，为什么要限制主轴的最高转速？

(16) 螺纹车削有哪些指令？为什么螺纹车削时要留有引入量和超越量？

(17) 为什么要进行刀具轨迹的补偿？刀具补偿的实现要分哪三大步骤？当某刀具磨损后，如何修改该刀具的补偿值？

(18) 数控铣削是怎样实现循环加工的？写出铣削循环的几种格式并说明各参数的意义。

(19) 加工中心与数控铣床相比在结构和功能上有何不同？

(20) 刀具长度补偿有什么作用？何谓正补偿？何谓负补偿？

2. 编程题

(1) 如图 2.133(a)、(b)所示零件的毛坯为ϕ30mm 棒料，材料为 45 号钢。T0101 为 90° 外圆车刀，材料为硬质合金，T0202 为刀宽 3mm 的切断刀。试编写其加工程序。

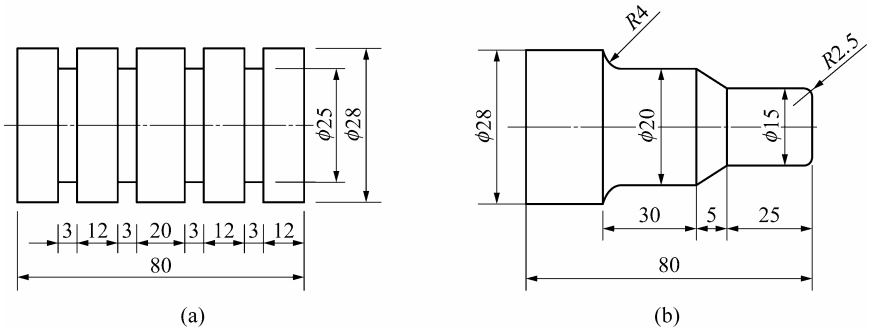


图 2.133　短轴加工件

(2) 试编写图 2.134 所示零件内孔的加工程序。要求：①钻ϕ10mm 孔；②车ϕ14mm 孔，每次背吃刀量 $a_p \leqslant 1$mm。

(3) 编制一个精车外圆、圆弧面并切断的程序，零件尺寸如图 2.135 所示，精加工余量为 0.5mm。T0101 为 35° 菱形涂层硬质合金刀片，T0202 为刀宽 3mm 的涂层硬质合金切断刀。

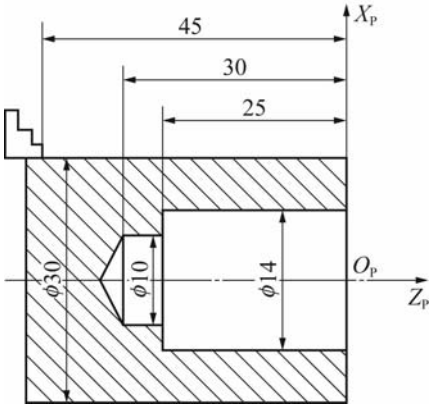


图 2.134　内孔加工件

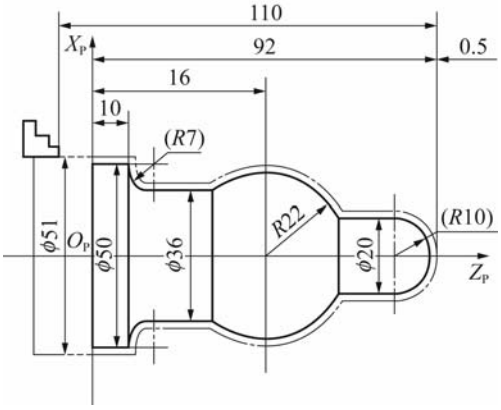


图 2.135　精车外圆件

(4) 试编写图 2.136 所示双锥模芯的加工工艺和数控程序，加工条件如下。①材料：Cr12，毛坯为ϕ24×68，一端已预先车出夹位ϕ10×8；②刀具：T0101 为 35° 菱形涂层硬质合金外圆车刀，T0202 为刀宽 2 mm 的高速钢矩形外沟槽车刀，T0303 为高速钢 60° 外螺纹车刀。

(5) 加工图 2.137(a)、(b)所示模具的内、外表面，刀具直径ϕ10mm，试采用数控铣床的刀具半径补偿指令编程。

(6) 加工图 2.138 所示的平面凸轮，试编写数控铣削加工程序。

(7) 五边形零件的轮廓如图 2.139 所示，毛坯尺寸为 120 mm×120 mm×18 mm，材料为 HT200，试编写其加工工艺和数控加工程序。

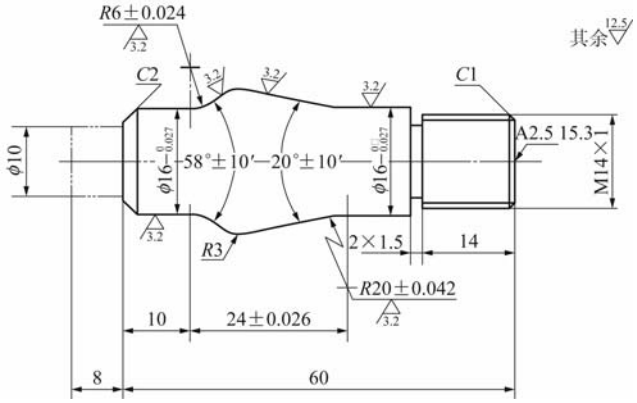


图 2.136　双锥模芯件

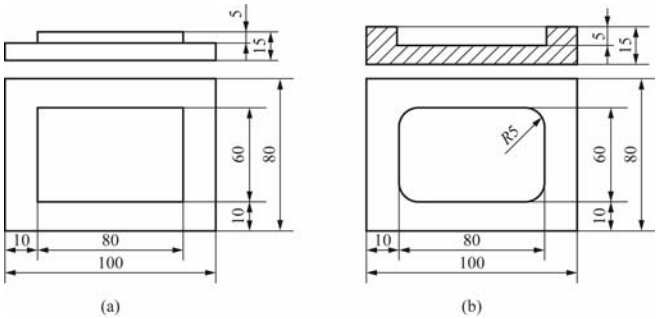


图 2.137　模具件

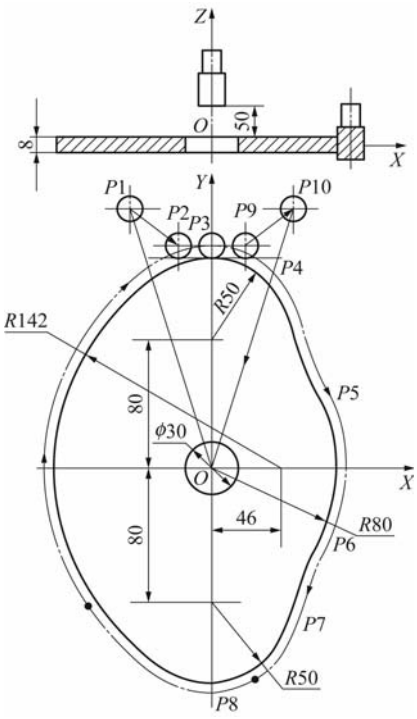


图 2.138　平面凸轮

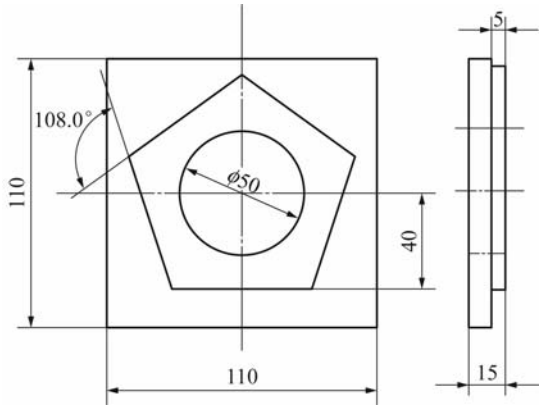


图 2.139　五边形零件

(8) 在立式加工中心上加工图 2.140(a)、(b)所示零件，试编写孔的加工程序。

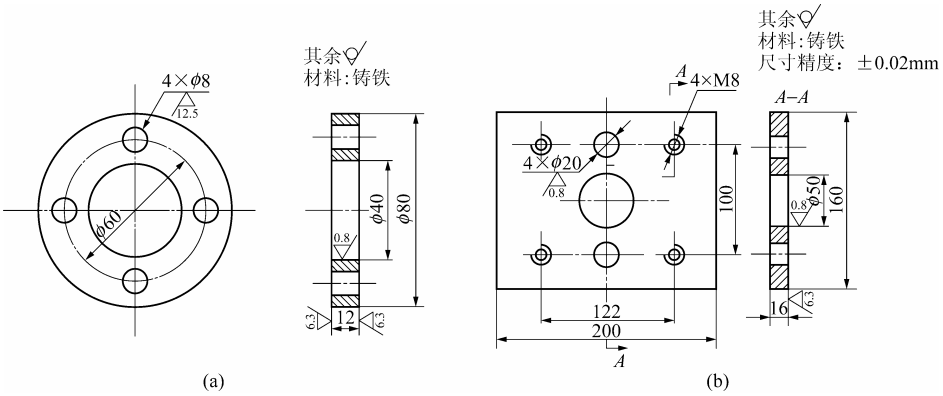


图 2.140　孔加工件

(9) 试分析图 2.141 盖板零件的加工工艺，制定数控加工工序卡和刀具卡，并编写加工程序。

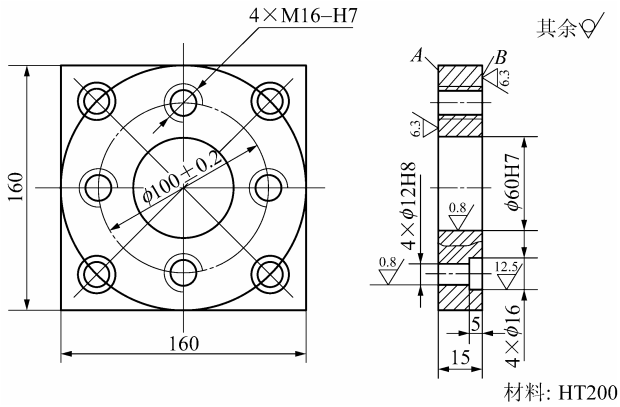


图 2.141　盖板零件

(10) 如图 2.142 所示为零件图及加工要求，加工所用刀具及切削用量见表 2–24，试编

写零件的加工工艺及加工程序。

表 2-24　刀具及其切削用量表

刀具名称	T 功能代码	规　格	主轴转速 S/(r/min)	进给量 F/(mm/min)
端铣刀	T01	ϕ 100	350	50
圆铣刀	T02	ϕ 25	100	40
中心钻	T03	ϕ 6	100	30
钻头	T04	ϕ 8	100	30
丝锥	T05	M10	100	150
钻头	T06	ϕ 18	200	30
铰刀	T07	ϕ 20	100	40

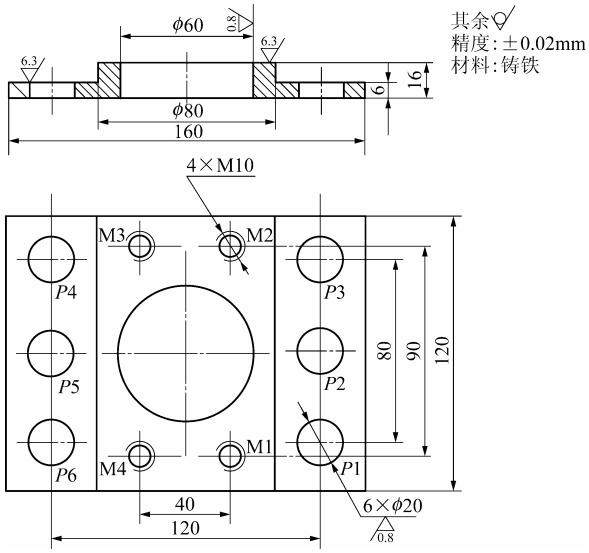


图 2.142　零件尺寸及加工要求

第 3 章　计算机数控系统

教学提示：计算机数控(CNC)系统是一种位置控制系统。它的本质是在对所加工零件进行几何分析和工艺分析的基础上，按照第 2 章所述方式编制零件加工程序；然后，数控系统对输入的零件加工程序数据段进行相应的处理，把数据段插补出理想的刀具运动轨迹并将插补结果输出到执行部件，使刀具加工出所需要的零件。CNC 系统主要由硬件和软件两大部分组成。它通过系统控制软件配合系统硬件，合理地组织管理数控系统的输入、数据处理、插补和输出信息，控制执行部件，使数控机床按照操作者的要求，有条不紊地进行加工。

教学要求：了解计算机数控系统的基本知识，掌握 CNC 系统的软、硬件结构，了解可编程逻辑控制器(PLC)在数控机床上的应用，掌握 CNC 系统的插补原理，了解 CNC 系统的输入/输出与通信要求。

3.1　概　　述

3.1.1　CNC 系统的组成

CNC 系统主要由硬件和软件两大部分组成，其核心是 CNC 装置。它通过系统控制软件配合系统硬件，合理地组织管理数控系统的输入、数据处理、插补和输出信息，控制执行部件，使数控机床按照操作者的要求进行自动加工。CNC 系统采用了计算机作为控制部件，通常由常驻在其内部的数控系统软件实现部分或全部数控功能，从而对机床运动进行实时控制。只要改变 CNC 系统的控制软件就能实现一种全新的控制方式。

各种数控机床的 CNC 系统一般由以下几个部分组成：中央处理单元(CPU)、只读存储器(ROM)、随机存储器(RAM)、输入/输出设备(I/O)、操作面板、PLC、显示器和键盘等。图 3.1 所示为 CNC 系统的一般结构框图。

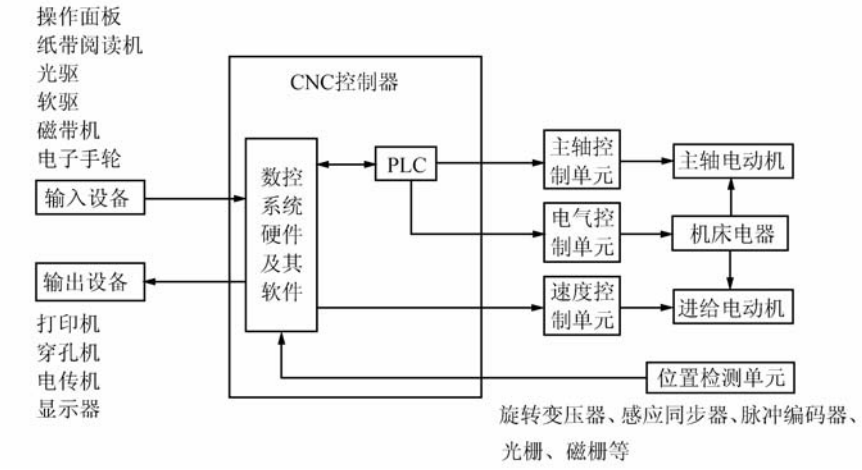


图 3.1　CNC 系统的一般结构框图

在图 3.1 所示的整个 CNC 系统的结构框图中，数控系统主要是指 CNC 控制器。CNC 控制器由数控系统硬件、软件构成的专用计算机与 PLC 组成。前者主要处理机床轨迹运动的数字控制，后者主要处理开关量的逻辑控制。

3.1.2　CNC 系统的功能和一般工作过程

1. CNC 系统的功能

CNC 系统由于现在普遍采用了微处理器，通过软件可以实现很多功能。数控系统有多种系列，功能各异。数控系统的功能通常包括基本功能和选择功能。基本功能是数控系统必备的功能，选择功能是供用户根据机床特点和用途进行选择的功能。CNC 系统的功能主要反映在 G 功能(G 指令代码)和 M 功能(M 指令代码)上。根据数控机床的类型、用途、档次的不同，CNC 系统的功能有很大差别，下面介绍其主要功能。

1) 控制功能

CNC 系统能控制的轴数和能同时控制(联动)的轴数是其主要性能之一。控制轴有移动轴和回转轴。通过轴的联动可以完成轮廓轨迹的加工。一般情况下，数控车床只需二轴控制，二轴联动；数控铣床需要三轴控制、三轴联动或二轴半联动；而加工中心一般为多轴控制，三轴联动。控制轴数越多，特别是同时控制的轴数越多，要求 CNC 系统的功能就越强，同时 CNC 系统就越复杂，编制程序也越困难。

2) G 功能

G 功能也称 G 指令代码，它用来指定机床的运动方式，包括基本移动、平面选择、坐标设定、刀具补偿、固定循环等指令。对于点位式的数控机床，如数控钻床、数控冲床等，需要点位移动控制系统。对于轮廓控制的数控机床，如数控车床、数控铣床、加工中心等，需要控制系统有两个或两个以上的进给坐标具有联动功能。

3) 插补功能

CNC 系统是通过软件插补来实现刀具运动轨迹控制的。由于轮廓控制的实时性很强，软件插补的计算速度难以满足数控机床对进给速度和分辨率的要求，同时由于 CNC 不断扩展其他方面的功能也要求减少插补计算所占用的 CPU 时间。因此，CNC 的插补功能实际上被分为粗插补和精插补，插补软件每次插补一个轮廓步长的数据为粗插补，伺服系统根据粗插补的结果，将轮廓步长分成单个脉冲的输出称为精插补。有的数控机床采用硬件进行精插补。

4) 进给功能

根据加工工艺要求，CNC 系统的进给功能用 F 指令代码直接指定数控机床加工的进给速度。

(1) 切削进给速度。指刀具每分进给的距离(毫米)，如 100mm/min。对于回转轴，以每分钟进给的角度指定刀具的进给速度。

(2) 同步进给速度。指刀具主轴每转进给的距离(毫米)，如 0.02mm/r。只有主轴上装有位置编码器的数控机床才能指定同步进给速度，用于切削螺纹的编程。

(3) 进给倍率。操作面板上设置了进给倍率开关，倍率可以在 0～200%之间变化，每挡间隔 10%。使用倍率开关不用修改程序就可以改变进给速度，并可以在加工工件时随时改变进给速度或在发生意外时随时停止进给。

5) 主轴功能

主轴功能就是指定主轴转速的功能。

(1) 转速的编码方式。一般用 S 指令代码指定。一般用地址符 S 后加两位或四位数字表示，单位分别为 r/min 和 mm/min。

(2) 指定恒线速。该功能可以保证车床和磨床加工工件端面的质量和在加工不同直径外圆时具有相同的切削速度。

(3) 主轴定向准停。该功能使主轴在径向的某一位置准确停止，有自动换刀功能的机床必须选取有这一功能的 CNC 装置。

6) M 功能

M 功能用来指定主轴的启、停和转向；切削液的开和关；刀库的启和停等，属开关量的控制。它用 M 指令代码表示。现代数控机床一般用 PLC 控制。各种型号的数控装置具有的 M 功能差别很大，而且有许多是自定义的。

7) 刀具功能

刀具功能用来选择所需的刀具，刀具功能字以地址符 T 为首，后面跟两位或四位数字，代表刀具的编号。

8) 补偿功能

补偿功能通过输入到 CNC 系统存储器的补偿量，根据编程轨迹重新计算刀具的运动轨迹和坐标尺寸，从而加工出符合要求的工件。补偿功能主要有以下几种。

(1) 刀具的尺寸补偿。如刀具长度补偿、刀具半径补偿和刀尖圆弧半径补偿。这些功能可以补偿刀具磨损量，以便换刀时对准正确位置，简化编程。

(2) 丝杠的螺距误差补偿、反向间隙补偿和热变形补偿。通过事先检测出丝杠螺距误差和反向间隙，并输入到 CNC 系统中，在实际加工中进行补偿，从而提高数控机床的加工精度。

9) 字符、图形显示功能

CNC 控制器可以配置数码管(LED)显示器、单色或彩色阴极射线管(CRT)显示器或液晶(LCD)显示器，通过软件和硬件接口实现字符和图形的显示。通常可以显示程序、参数、各种补偿量、坐标位置、故障信息、人机对话编程菜单、零件图形及刀具实际运动轨迹的坐标等。

10) 自诊断功能

为了防止故障的发生或在发生故障后可以迅速查明故障的类型和部位，以减少停机时间，CNC 系统中设置了各种诊断程序。不同的 CNC 系统设置的诊断程序是不同的，诊断的水平也不同。诊断程序一般可以包含在系统程序中，在系统运行过程中进行检查和诊断；也可以作为服务性程序，在系统运行前或故障停机后进行诊断，查找故障的部位。有的 CNC 系统可以进行远程通信诊断。

11) 通信功能

为了适应柔性制造系统(FMS)和计算机集成制造系统(CIMS)的需求，CNC 装置通常具有 RS232C 通信接口，有的还备有 DNC 接口。也有的 CNC 还可以通过制造自动化协议(MAP)接入工厂的通信网络。

12) 人机交互图形编程功能

为了进一步提高数控机床的编程效率，对于数控程序的编制，特别是较为复杂零件的数控程序都要通过计算机辅助编程，尤其是利用图形进行自动编程，以提高编程效率。因

此，对于现代 CNC 系统一般要求具有人机交互图形编程功能。有这种功能的 CNC 系统可以根据零件图直接编制程序，即编程人员只需输入图样上简单表示的几何尺寸就能自动地计算出全部交点、切点和圆心坐标，生成加工程序。有的 CNC 系统可根据引导图和显示说明进行对话式编程，并具有自动工序选择、刀具和切削条件的自动选择等智能功能。有的 CNC 系统还备有用户宏程序功能(如日本 FANUC 系统)。这些功能有助于那些未受过 CNC 编程专门训练的机械工人能够很快地进行程序编制工作。

2. CNC 系统的一般工作过程

1) 输入

输入 CNC 控制器的通常有零件加工程序、机床参数和刀具补偿参数。机床参数一般在机床出厂时或在用户安装调试时已经设定好，所以输入 CNC 系统的主要是零件加工程序和刀具补偿参数。输入方式有纸带输入、键盘输入、磁盘输入，上级计算机 DNC 通信输入等。CNC 系统输入工作方式有存储方式和数控方式。存储方式是将整个零件程序一次全部输入到 CNC 系统内部存储器中，加工时再从存储器中把一个一个程序调出，该方式应用较多。数控方式是 CNC 系统一边输入一边加工的方式，即在前一程序段加工时，输入后一个程序段的内容。

2) 译码

译码以零件程序的一个程序段为单位进行处理，把其中零件的轮廓信息(起点、终点、直线或圆弧等)，F、S、T、M 等信息按一定的语法规则解释(编译)成计算机能够识别的数据形式，并以一定的数据格式存放在指定的内存专用区域。编译过程中还要进行语法检查，发现错误立即报警。

3) 刀具补偿

刀具补偿包括刀具半径补偿和刀具长度补偿。为了方便编程人员编制零件加工程序，编程时零件程序是以零件轮廓轨迹来编程的，与刀具尺寸无关。程序输入和刀具参数输入分别进行。刀具补偿的作用是把零件轮廓轨迹按系统存储的刀具尺寸数据自动转换成刀具中心(刀位点)相对于工件的移动轨迹。

刀具补偿包括 B 机能和 C 机能刀具补偿功能。在较高档次的 CNC 系统中一般应用 C 机能刀具补偿，C 机能刀具补偿能够实现程序段之间的自动转接和过切削判断等功能。

4) 进给速度处理

数控加工程序给定的刀具相对于工件的移动速度是在各个坐标合成运动方向上的速度，即 F 代码的指令值。速度处理首先要进行的工作是将各坐标合成运动方向上的速度分解成各进给运动坐标方向的分速度，为插补时计算各进给坐标的行程量做准备；另外对于机床允许的最低和最高速度限制也在这里处理。有的数控机床的 CNC 系统软件的自动加速和减速也放在这里。

5) 插补

零件加工程序段中的指令行程信息是有限的。如对于加工直线的程序段仅给定起、终点坐标；对于加工圆弧的程序段除了给定其起、终点坐标外，还给定其圆心坐标或圆弧半径。要进行轨迹加工，CNC 系统必须从一条已知起点和终点的曲线上自动进行“数据点密化”的工作，这就是插补。插补在每个规定的周期(插补周期)内进行一次，即在每个周期内，按指令进给速度计算出一个微小的直线数据段，通常经过若干个插补周期后，插补完一个程序段的加工，也就完成了从程序段起点到终点的“数据点密化”工作。

6) 位置控制

位置控制装置位于伺服系统的位置环上，如图 3.2 所示。它的主要工作是在每个采样周期内，将插补计算出的理论位置值与实际反馈位置值进行比较，用其差值控制进给电动机。位置控制可由软件完成，也可由硬件完成。在位置控制中通常还要完成位置回路的增益调整、坐标方向的螺距误差补偿和反向间隙补偿等，以提高机床的定位精度。

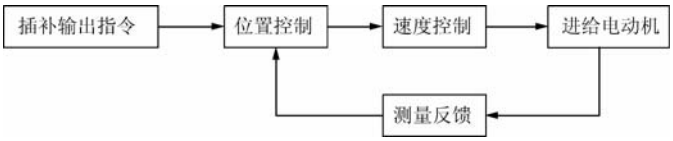


图 3.2　位置控制的原理

7) I/O 处理

CNC 系统的 I/O 处理是 CNC 系统与机床之间的信息传递和变换的通道。其作用一方面是将机床运动过程中的有关参数输入到 CNC 系统中；另一方面是将 CNC 系统的输出命令(如换刀、主轴变速换挡、加切削液等)变为执行机构的控制信号，实现对机床的控制。

8) 显示

CNC 系统的显示主要是为操作者提供方便，显示装置有 LED 显示器、CRT 显示器和 LCD 显示器，一般位于机床的控制面板上。通常有零件程序的显示、参数的显示、刀具位置显示、机床状态显示、报警信息显示等。有的 CNC 装置中还有刀具加工轨迹的静态和动态模拟加工图形显示。

上述 CNC 系统的工作流程如图 3.3 所示。

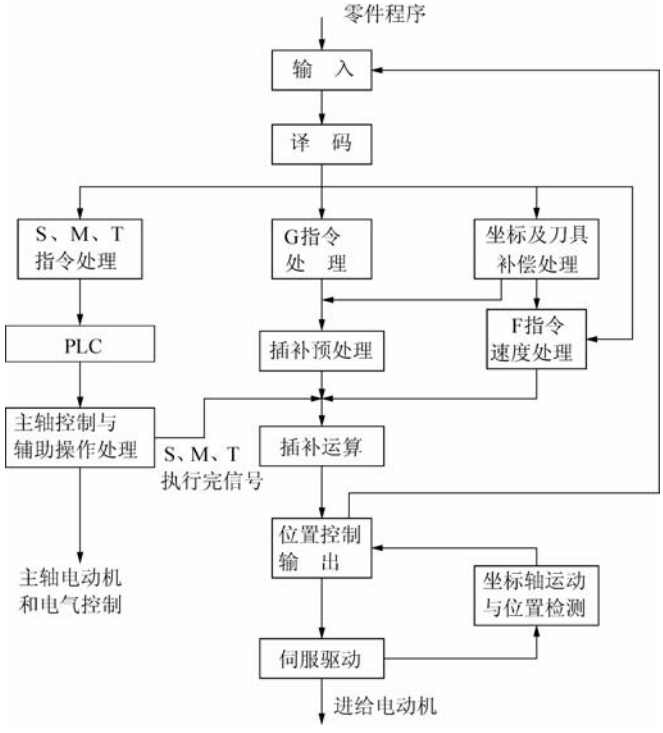


图 3.3　CNC 系统的工作流程

3.2　CNC 系统的硬件结构

随着大规模集成电路技术和表面安装技术的发展，CNC 系统硬件模块及安装方式不断改进。从 CNC 系统的总体安装结构看，有整体式结构和分体式结构两种。

所谓整体式结构是把 CRT 和 MDI 面板、操作面板以及功能模块板组成的电路板等安装在同一个机箱内。这种方式的优点是结构紧凑，便于安装，但有时可能造成某些信号连线过长。分体式结构通常把 CRT 和 MDI 面板、操作面板等做成一个部件，而把功能模块组成的电路板安装在一个机箱内，两者之间用导线或光纤连接。许多 CNC 机床把操作面板也单独作为一个部件，这是由于所控制机床的要求不同，操作面板也应相应地改变，做成分体式有利于更换和安装。

CNC 系统操作面板在机床上的安装形式有吊挂式、床头式、控制柜式、控制台式等多种。

从组成 CNC 系统的电路板的结构特点来看，有两种常见的结构，即大板式结构和模块化结构。大板式结构的特点是, 一个系统一般都有一块大板，称为主板。主板上装有主 CPU 和各轴的位置控制电路等。其他相关的子板(完成一定功能的电路板)，如 ROM 板、零件程序存储器板和 PLC 板都直接插在主板上面，组成 CNC 系统的核心部分。由此可见，大板式结构紧凑，体积小，可靠性高，价格低，有很高的性价比，也便于机床的一体化设计，大板结构虽有上述优点，但它的硬件功能不易变动，不利于组织生产。模块化结构的特点是将 CPU、存储器、输入输出控制分别做成插件板(称为硬件模块)硬、软件模块形成一个特定的功能单元，称为功能模块。功能模块间有明确定义的接口，接口是固定的，成为工厂标准或工业标准，彼此可以进行信息交换。这种模块化结构的 CNC 系统设计简单，有良好的适应性和扩展性，试制周期短，调整维护方便，效率高。

从 CNC 系统使用的 CPU 及结构来分，CNC 系统的硬件结构一般分为单 CPU 和多 CPU 结构两大类。初期的 CNC 系统和现在的一些经济型 CNC 系统一般采用单 CPU 结构，而多 CPU 结构可以满足数控机床高进给速度、高加工精度和许多复杂功能的要求，适应于并入 FMS 和 CIMS 运行的需要，从而得到了迅速的发展，也反映了当今数控系统的新水平。

3.2.1　单 CPU 结构 CNC 系统的硬件结构

单 CPU 结构 CNC 系统的基本结构包括 CPU、总线、I/O 接口、存储器、串行接口和 CRT/MDI 接口等，还包括数控系统控制单元部件和接口电路，如位置控制单元、PLC 接口、主轴控制单元、速度控制单元、穿孔机和纸带阅读机接口以及其他接口等。如图 3.4 所示为一种单 CPU 结构的 CNC 系统框图。

CPU 主要完成控制和运算两方面的任务。控制功能包括：内部控制，对零件加工程序的输入/输出控制，对机床加工现场状态信息的记忆控制等。运算任务是完成一系列的数据处理工作：译码、刀具补偿计算、运动轨迹计算、插补运算和位置控制的给定值与反馈值的比较运算等。在经济型 CNC 系统中，常采用 8 位微处理器芯片或 8 位、16 位的单片机芯片。中高档的 CNC 系统通常采用 16 位、32 位甚至 64 位的微处理器芯片。

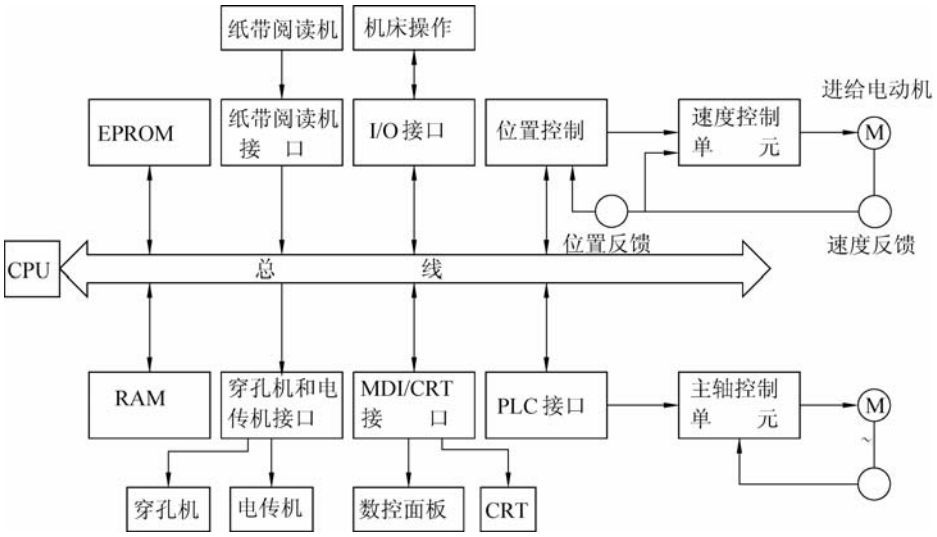


图 3.4　单 CPU 结构 CNC 系统框图

单 CPU 结构的 CNC 系统通常采用总线结构。总线是微处理器赖以工作的物理导线，按其功能可以分为三组总线，即数据总线(DB)、地址总线(AB)和控制总线(CB)。

CNC 装置中的存储器包括只读存储器(ROM)和随机存储器(RAM)两种。系统程序存放在可擦可编程只读存储器(EPROM)中，由生产厂家固化，即使断电，程序也不会丢失。系统程序只能由 CPU 读出，不能写入。运算的中间结果，需要显示的数据，运行中的状态、标志信息等存放在 RAM 中。它可以随时读出和写入，断电后，信息就消失。加工的零件程序、机床参数、刀具参数等存放在有后备电池的 CMOS RAM 中，或者存放在磁泡存储器中，这些信息在这种存储器中能随机读出，还可以根据操作需要写入或修改，断电后，信息仍然保存。

CNC 装置中的位置控制单元主要对机床进给运动的坐标轴位置进行控制。位置控制的硬件一般采用大规模专用集成电路位置控制芯片或控制模板实现。

CNC 系统接受指令信息的输入有多种形式，如光电式纸带阅读机、磁带机、磁盘、计算机通信接口等形式，以及利用数控面板上的键盘操作的手动数据输入(MDI)和机床操作面板上手动按钮、开关量信息的输入。所有这些输入都要有相应的接口来实现。而 CNC 系统的输出也有多种，如程序的穿孔机、电传机输出、字符与图形显示的 CRT 输出、位置伺服控制和机床强电控制指令的输出等，同样要有相应的接口来实现。

单 CPU 结构 CNC 系统的特点是：CNC 系统的所有功能都是通过一个 CPU 进行集中控制、分时处理来实现的；该 CPU 通过总线与存储器、I/O 控制元件等各种接口电路相连，构成 CNC 系统的硬件；结构简单，易于实现；由于只有一个 CPU 的控制，功能受字长、数据宽度、寻址能力和运算速度等因素的限制。

3.2.2　多 CPU 结构 CNC 系统的硬件结构

多 CPU 结构 CNC 系统是指在 CNC 系统中有两个或两个以上的 CPU 能控制系统总线或主存储器进行工作的系统结构。

现代的 CNC 系统大多采用多 CPU 结构。在这种结构中，每个 CPU 完成系统中规定的

一部分功能，独立执行程序，它与单 CPU 结构相比，提高了计算机的处理速度。多 CPU 结构的 CNC 系统采用模块化设计，将软件和硬件模块形成一定的功能模块。模块间有明确的符合工业标准的接口，彼此间可以进行信息交换。这样可以形成模块化结构，缩短了设计制造周期，并且具有良好的适应性和扩展性，结构紧凑。多 CPU 结构的 CNC 系统由于每个 CPU 分管各自的任务，形成若干个模块，如果某个模块出了故障，其他模块仍能照常工作；并且插件模块更换方便，可以使故障对系统的影响减少到最小程度，提高了可靠性；性价比高，适合于多轴控制、高进给速度、高精度的数控机床。

1. 多 CPU 结构 CNC 系统的典型结构

1) 共享总线结构

在这种结构的 CNC 系统中，只有主模块有权控制系统总线，且在某一时刻只能有一个主模块占有总线，如有多个主模块同时请求使用总线会产生竞争总线问题。

共享总线结构的各模块之间的通信，主要依靠存储器实现，采用公共存储器的方式。公共存储器直接插在系统总线上，有总线使用权的主模块都能访问，可供任意两个主模块交换信息，其结构框图如图 3.5 所示。

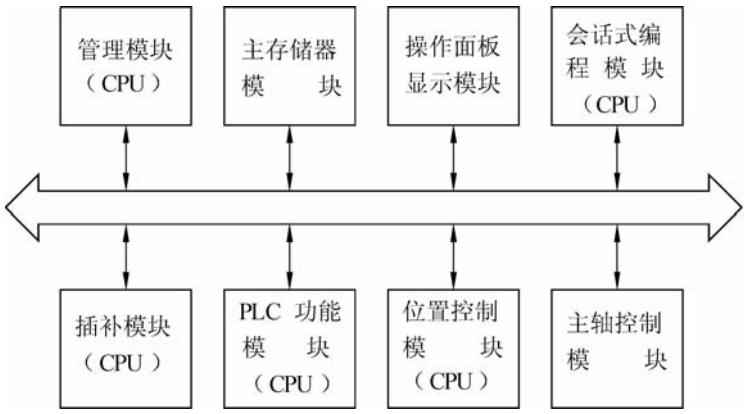


图 3.5　共享总线的多 CPU 结构的 CNC 系统结构框图

2) 共享存储器结构

在该结构中，采用多端口存储器来实现各 CPU 之间的互连和通信，每个端口都配有一套数据、地址、控制线，以供端口访问，由多端控制逻辑电路解决访问冲突，如图 3.6 所示。

当 CNC 系统功能复杂要求 CPU 数量增多时，会因争用共享存储器而造成信息传输的阻塞，降低系统的效率，其扩展功能较为困难。

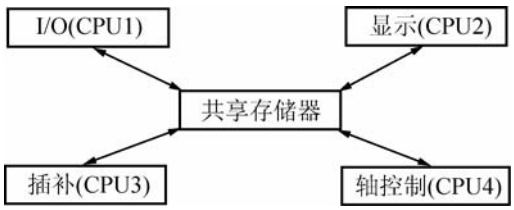


图 3.6　共享存储器的多 CPU 结构框图

2. 多 CPU 结构 CNC 系统基本功能模块

(1) 管理模块。该模块是管理和组织整个 CNC 系统工作的模块，主要功能包括：初始化、中断管理、总线裁决、系统出错识别和处理、系统硬件与软件诊断等。

(2) 插补模块。该模块用于在完成插补前，进行零件程序的译码、刀具补偿、坐标位移量计算、进给速度处理等预处理，然后进行插补计算，并给定各坐标轴的位置值。

(3) 位置控制模块。对坐标位置给定值与由位置检测装置测到的实际位置值进行比较并获得差值，进行自动加减速、回基准点、对伺服系统滞后量进行监视和漂移补偿，最后得到速度控制的模拟电压(或速度的数字量)，去驱动进给电动机。

(4) PLC 模块。零件程序的开关量(S、M、T)和机床面板来的信号在这个模块中进行逻辑处理，实现机床电气设备的启、停控制，刀具交换，转台分度，工件数量和运转时间的计数等。

(5) 命令与数据输入/输出模块。指零件程序、参数和数据，各种操作指令的输入/输出，以及显示所需要的各种接口电路。

(6) 存储器模块。指程序和数据的主存储器，或功能模块数据传送用的共享存储器。

3.2.3　开放式 CNC 系统

1. CNC 系统的发展历程

传统的数控系统采用专用计算机系统，软、硬件对用户都是封闭的，主要存在以下问题。

(1) 由于传统数控系统的封闭性，各数控系统生产厂家的产品软、硬件不兼容，使得用户投资安全性受到威胁，购买成本和产品生命周期内的使用成本高。同时专用控制器的软、硬件的主流技术远远落后于 PC 的技术，系统无法“借用”日新月异的 PC 技术而升级。

(2) 系统功能固定，不能充分反映机床制造厂的生产经验，不具备某些机床或工艺特征需要的功能，用户无法对系统进行重新定义和扩展，也很难满足最终用户的特殊要求。作为机床生产厂希望生产的数控机床有自己的特色以区别于竞争对手的产品，以利于在激烈的市场竞争中占有一席之地，而传统的数控系统是做不到的。

(3) 传统数控系统缺乏统一有效和高速的通道与其他控制设备和网络设备进行互连，信息被锁在“黑匣子”中，每一台设备都成为自动化的“孤岛”，对企业的网络化和信息化发展是一个障碍。

(4) 传统数控系统人机界面不灵活，系统的培训和维护费用昂贵。许多厂家花巨资购买高档数控设备，面对几本甚至十几本沉甸甸的技术资料不知从何下手。由于缺乏使用和维护知识，购买的设备不能充分发挥其作用。一旦出现故障，面对“黑匣子”用户无从下手，维修费用十分昂贵。有的设备由于不能正确使用以致于长期处于瘫痪状态，花巨资购买的设备非但不能发挥作用反而成了企业的沉重包袱。

为克服传统数控系统的缺点，数控系统正朝着开放式 CNC 系统的方向发展。目前其主要形式是基于 PC 的数控，即在 PC 的总线上插上具有数控功能的运动控制卡完成实时性要求高的数控内核功能，或者利用数控与 PC 通信改善 PC 的界面和其他功能。这种开放式 CNC 系统在开放性、功能、购买力和使用总成本以及人机界面等方面较传统数控有很大的

改善，但它还包含有专用硬件，扩展不方便。国内外现阶段开发的开放式 CNC 系统大都是这种结构形式的。这种 PC 化的数控还有专用硬件，还不是严格意义上的开放式 CNC 系统。

开放式 CNC 系统软、硬件和总线规范都是对外开放的，由于有充足的软、硬件资源可被利用，系统软、硬件可随着 PC 技术的发展而升级，不仅使数控系统制造商和用户进行的系统集成得到有力的支持，而且给用户的二次开发带来了方便，促进了数控系统多档次、多品种的开发和广泛应用，既可通过升档或裁剪构成各种档次的数控系统，又可通过扩展构成不同类型数控机床的数控系统，开发周期大大缩短。

要实现数控系统的开放，首先得有一个大家遵循的标准。国际上一些工业化国家都开展了这一方面的研究，旨在建立一种标准规范，使得数控系统软、硬件与供应商无关，并且实现可移植性、可扩展性、互操作性，统一人机界面风格和可维护性以取得产品的柔性，降低产品成本和使用的隐形成本，缩短产品供应时间。这些计划包括：

数控技术诞生后的 50 年间的信息交换都是基于 ISO6983 标准，即采用 G，M 代码描述如何加工，其本质特征是面向加工过程，显然，它已越来越不能满足现代数控技术高速发展的需要。为此，国际上正在研究和制定一种新的 CNC 系统标准 ISO14649（STEP－NC)，其目的是提供一种不依赖于具体系统的中性机制，能够描述产品整个生命周期内的统一数据模型，从而实现整个制造过程，乃至各个工业领域产品信息的标准化。

STEP-NC 的出现可能是数控技术领域的一次革命，对于数控技术的发展乃至整个制造业，将产生深远的影响。首先，STEP-NC 提出一种崭新的制造理念，传统的制造理念中，NC 加工程序都集中在单个计算机上。而在新标准下，NC 程序可以分散在互联网上，这正是数控技术开放式、网络化发展的方向。其次，STEP-NC 数控系统还可大大减少加工图纸(约 75％)、加工程序编制时间(约 35％)和加工时间(约 50％)。

目前，欧美国家非常重视 STEP-NC 的研究，欧洲发起了 STEP-NC 的 IMS 计划(1999.1.1～2001.12.31)。参加这项计划的有来自欧洲和日本的 20 个 CAD/CAM/CAPP/CNC 用户、厂商和学术机构。美国的 STEP Tools 公司是全球范围内制造业数据交换软件的开发者，他已经开发了用作数控机床加工信息交换的超级模型(Super Model)，其目标是用统一的规范描述所有加工过程。目前这种新的数据交换格式已经在配备了 SIEMENS、FIDIA 以及欧洲 OSACA-NC 数控系统的原型样机上进行了验证。

2. 开放式 CNC 系统所具有的主要特点

1) 软件化数控内核扩展了数控系统的柔性和开放性，降低了系统成本

随着计算机性能的提高和实时操作系统的应用，软件化数控内核将被广泛接受。它使得数控系统具有更大的柔性和开放性，可方便系统的重构和扩展，降低系统的成本。数控系统的运动控制内核要求有很高的实时性(伺服更新和插补周期为几十至几百微秒)，其实时性实现有两种方法：硬件实时和软件实时。

在硬件实时实现上，早期 DOS 系统可直接对硬件中断进行编程来实现实时性，通常采用在 PC 上插数控 I/O 卡或运动控制卡的方式。

在软件实时实现上，只需一个 CPU，系统简单，成本低，但必须有一个实时操作系统。现有两种方式：一种是采用单独实时操作系统，如 QNX、Lynx、VxWorks 和 Windows CE 等，这类实时操作系统比较小，对硬件的要求低，但其功能相对 Windows 等较弱。如美国

Clesmen 大学采用 QNX 研究的 Qmotor 系统；另一种是在标准的商用操作系统上加上实时内核，如 Windows NT 加 VenturCOM 公司的 RTX 和 Linux 加 RTLinux 等。Linux 系统具有丰富的应用软件和开发工具，便于与其他系统实现通信和数据共享，可靠性比 Windows 系统高，Linux 系统可以三年不关机，这在工业控制中是至关重要的。

2) 数控系统驱动和数字 I/O(PLC 的 I/O)连接的发展方向是现场总线

现场总线是用一根通信线或光纤将所有的驱动和 I/O 级联起来，传送各种信号，以实现对伺服驱动的智能化控制。这种方式连线少，可靠性高，扩展方便，易维护，易于实现重配置，是数控系统的发展方向。现在数控系统中采用的现场总线标准有 PROFIBUS(传输速率 12Mbit/s)，如 SIEMENS 802D 等；光纤现场总线 SERCOS(最高为 16Mbit/s，但目前大多系统为 4Mbit/s)，如 Indramat System2000 和北京机电院的 CH—2010/S，北京和利时公司也研究了 SERCOS 接口的演示系统；CAN 现场总线，如华中数控和南京四开的系统等，但目前基于 SERCOS 和 PROFIBUS 的数控系统都比较贵。而 CAN 总线传输速率慢，最大传输速率为 1Mbit/s 时，传输距离为 40m。

3) 网络化是基于网络技术的 E-Manufacturing 对数控系统的必然要求

基于标准 PC 的开放式 CNC 系统可利用以太网技术实现强大的网络功能，实现控制网络与数据网络的融合，实现网络化生产信息和管理信息的集成以及加工过程监控，远程制造、系统的远程诊断和升级。在网络协议方面，制造自动化协议(Manufacturing Automation Protocol，MAP)由于其标准包含内容太广泛，应用层未定义，难以开发硬件和软件，每个站需有专门的 MAP 硬件，价格昂贵，缺乏广泛的支持而逐渐淡出市场。现在广为大家接受的是采用 TCP/IP 协议，美国 HAAS 公司的 Creative Control Group 将这一以太网的数控网络称为 DCN(Direct CNC Networking)。在数控系统网络功能方面，日本的 MAZAKA 公司 的 Mazatrol Fusion 640 系统有很强的网络功能，可实现远程数据传输、管理和设备故障诊断等。

3. 基于 Linux 的开放式结构数控系统

1) 系统组成

该系统是一个基于标准 PC 硬件平台和 Linux 与 RTLinux 结合的软件平台之上，设备驱动层采用现场总线互连、与外部网络或 Intranet 采用以太网连接，形成一个可重构配置的纯软件化结合多媒体和网络技术的高档开放式结构数控系统平台。

该平台 CNC 系统运行于没有运动控制卡的标准 PC 硬件平台上，软件平台采用 Linux 和 RTLinux 结合，一些时间性要求严的任务，如运动规划、加减速控制、插补、现场总线通信、PLC 等，由 RTLinux 实现，而其他一些时间性不强的任务在 Linux 中实现，详见图 3.7 软件结构框图。

基于标准 PC 的控制器与驱动设备和外围 I/O 的连接采用磁隔离的高速 RS422 标准现场总线，该总线每通道的通信速率为 12Mbit/s 时，采用普通双绞线通信距离可达 100m。主机端为 PCI 总线卡，有四个通道(实际现只用两个通道，一个通道连接机床操作面板，另一通道连接设备及 I/O)，设备端接口通过 DSP 芯片转换成标准的电动机控制信号。每个通道的控制节点可达 32 个，每个节点可控制 1 根轴(通过通信协议中的广播同步信号使各轴间实现同步联动)或一组模拟接口(测量接口、系统监控传感器接口等)或一组 PLC I/O(最多可

达 256 点)，PLC 的总点数可达 2048 点(可参见图 3.8 现场总线网络拓扑结构)。

2) 系统主要特点

(1) 控制器具有动态自动识别系统接口卡的功能，系统可重新配置以满足不同加工工艺的机床和设备的数控要求，驱动电动机可配数字伺服、模拟伺服和步进电动机。

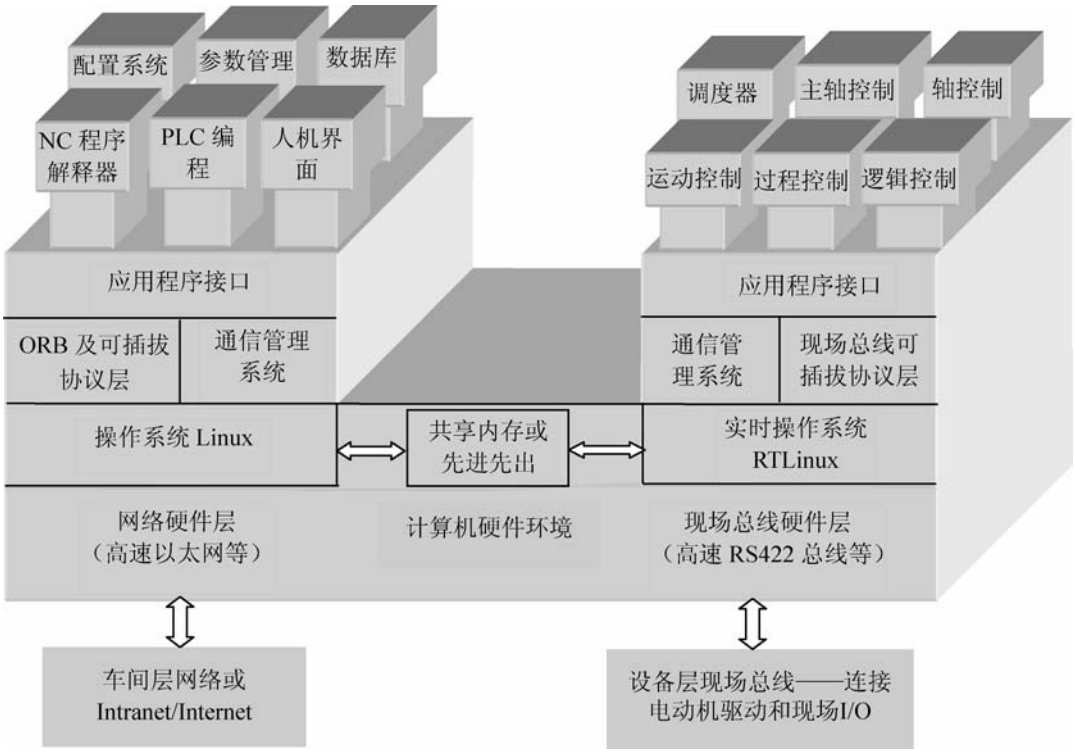


图 3.7　软件化数控系统结构方案

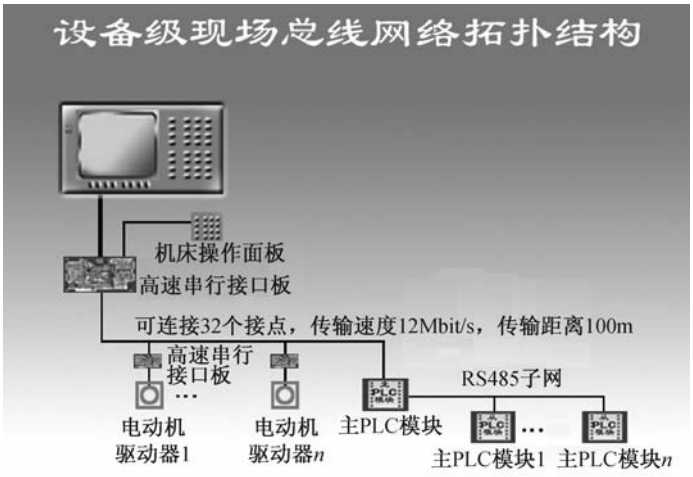


图 3.8　设备级现场总线网络拓扑结构图

(2) 网络功能。通过以太网实现数控系统与车间网络或 Intranet/Internet 的互连，利用 TCP/IP 协议开放 CNC 系统的内部数据，实现与生产管理系统和外部网络的高速双向数据

交流。具有常规 DNC 功能(采用百兆网，其速率比传统速率为 112Kbit/s 的 RS232 接口 DNC 快将近 1000 倍)、生产数据和机床操作数据的管理功能、远程故障诊断和监视功能。

(3) 系统除具有标准的并行接口、串行接口(RS232)、PS2(键盘、鼠标口)、USB 接口、以太网接口外，还配有高速现场总线接口(RS422)、个人计算机互联网通信记忆卡标准接口(PCMCIA-ATA)、红外无线接口(配刀具检测传感器)等。

(4) 显示屏幕采用 12.1in(1in=2.54cm)TFT-LCD。采用统一用户操作界面风格，通过水平和垂直两排共 18 个动态软按键满足不同加工工艺机床的操作要求，用户可通过配置工具对动态软按键进行定义。垂直软按键可根据水平软按键的功能选择而改变，垂直菜单可以多页。

(5) 将多媒体技术应用于机床的操作、使用、培训和故障诊断，可提高机床的易用性和可维性护，降低使用成本。多媒体技术提供使用操作帮助、在线教程、故障和机床维护向导。

(6) 具有 3D 动态加工仿真功能；利用 OpenGL 技术提供 3D 加工仿真功能和加工过程刀具轨迹动态显示。

(7) 具有 Nurbs 插补和自适应 Look ahead 功能，可实现任意曲线、曲面的高速插补。输出电动机控制脉冲频率最高可达 4MHz(采用直接数字合成(DDS)IC 实现)，当分辨率为 0.1 μm 时，快进速度可达 24m/min，适合于高速、高精度加工。

(8) 伺服更新可达 500 μm (控制 6 轴，Pentium III 以上 CPU)，PLC 扫描时间小于 2 ms。

(9) PLC 编程符合国际电工委员会 IEC-61131-3 规范，提供梯形图和语句表编程。

(10) 采用高可靠性的工控单板机(SBC)，加强软、硬件可靠性措施，保证数控系统的平均故障间隔时间(MTBF)达到 20000h。

(11) 符合欧洲电磁兼容标准(Directive 89/336/EEC)4 级要求。

(12) 数控系统本身的价格(不包括伺服驱动和电动机)可为现有同功能的普及型和高档数控系统的 1/2。

3.3　CNC 系统的软件结构

CNC 系统的软件是为完成 CNC 系统的各项功能而专门设计和编制的，是数控加工系统的一种专用软件，又称为系统软件(系统程序)。CNC 系统软件的管理作用类似于计算机的操作系统的功能。不同的 CNC 装置，其功能和控制方案也不同，因而各 CNC 系统软件在结构上和规模上差别较大，各厂家的软件互不兼容。现代数控机床的功能大都采用软件来实现，所以，CNC 系统软件的设计及功能是 CNC 系统的关键。

数控系统是按照事先编制好的控制程序来实现各种控制的，而控制程序是根据用户对数控系统所提出的各种要求进行设计的。在设计 CNC 系统软件之前必须细致地分析被控制对象的特点和对控制功能的要求，决定采用哪一种计算方法。在确定好控制方式、计算方法和控制顺序后，将其处理顺序用框图描述出来，使系统设计者在头脑中对所设计的系统有一个明确而又清晰的轮廓。

在 CNC 系统中，软件和硬件在逻辑上是等价的，即由硬件完成的工作原则上也可以由软件来完成。但是它们各有特点：硬件处理速度快，造价相对较高，适应性差；软件设计

灵活、适应性强，但是处理速度慢。因此，CNC 系统中软、硬件的分配比例是由性价比决定的。这也在很大程度上涉及到软、硬件的发展水平。一般说来，软件结构首先要受到硬件的限制，软件结构也有独立性。对于相同的硬件结构，可以配备不同的软件结构。实际上，现代 CNC 系统中软、硬件功能界面并不是固定不变的，而是随着软、硬件的水平和成本，以及 CNC 系统所具有的性能不同而发生变化。图 3.9 给出了不同时期和不同产品中的 3 种典型的 CNC 系统软、硬件功能界面。

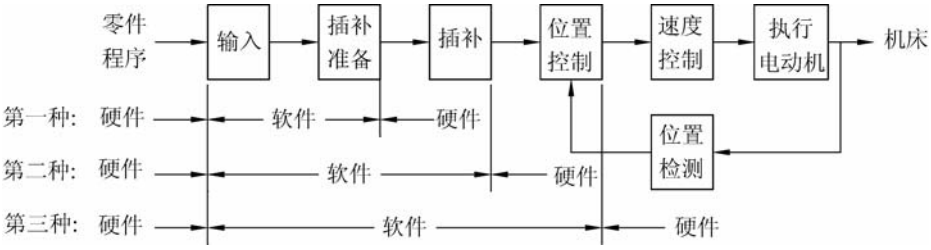


图 3.9　CNC 系统中 3 种典型的软、硬件功能界面

3.3.1　CNC 系统的软件结构特点

1. CNC 系统的多任务性

CNC 系统作为一个独立的数字运算控制器应用于工业自动化生产中，其多任务性表现在它的管理软件必须完成系统管理和系统控制两大任务。其中系统管理包括输入，I/O 处理，通信、显示、诊断以及加工程序的编制管理等程序。系统控制部分包括译码、刀具补偿、速度处理、插补和位置控制等软件，图 3.10 所示为 CNC 系统任务分解图。

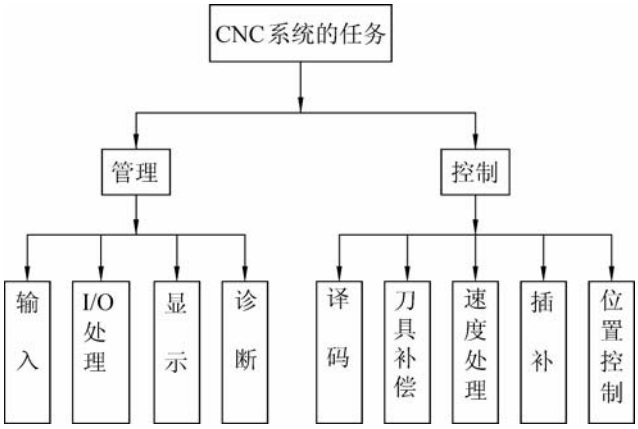


图 3.10　CNC 系统任务分解图

同时，CNC 系统的这些任务必须协调完成。也就是说在许多情况下，管理和控制的某些工作必须同时进行。例如，为了便于操作人员能及时掌握 CNC 系统的工作状态，管理软件中的显示模块必须与控制模块同时运行；当 CNC 系统处于数控工作方式时，管理软件中的零件程序输入模块必须与控制模块同时运行。而控制模块运行时，其中一些处理模块也必须同时运行。如为了保证加工过程的连续性，即刀具在各程序段间不停刀，译码、刀具补偿和速度处理模块必须与插补模块同时运行，而插补又必须要与位置控制同时进行等，

这种任务并行处理关系如图 3.11 所示。

事实上，CNC 系统是一个专用的实时多任务计算机系统，其软件必然会融合现代计算机软件技术中的许多先进技术，其中最突出的是多任务并行处理和多重实时中断技术。

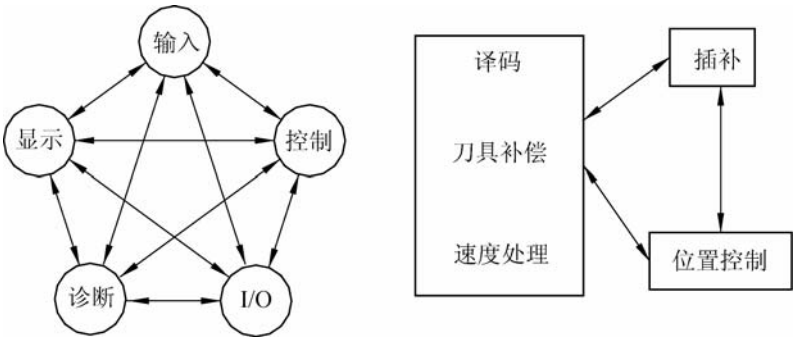


图 3.11　CNC 系统的任务并行处理关系需求

2. 并行处理

并行处理是指计算机在同一时刻或同一时间间隔内完成两种或两种以上性质相同或不相同的工作。并行处理的优点是提高了运行速度。

并行处理分为“资源重复”法、“时间重叠”法和“资源共享”法等方法。

目前 CNC 装置的硬件结构中，广泛使用“资源重复”的并行处理技术。如采用多 CPU 的体系结构来提高系统的速度。而在 CNC 装置的软件中，主要采用“资源分时共享”和“时间重叠的流水处理”方法。

1) 时间重叠流水并行处理方法

在单 CPU 结构的 CNC 装置中，要采用 CPU 分时共享的原则来解决多任务的同时运行问题。各个任务何时占用 CPU 及各个任务占用 CPU 时间的长短，是首先要解决的两个时间分配的问题。在 CNC 装置中，各任务占用 CPU 的问题采用循环轮流和中断优先相结合的办法来解决。图 3.12 所示为一个典型的 CNC 装置各任务分时共享 CPU 的时间分配。

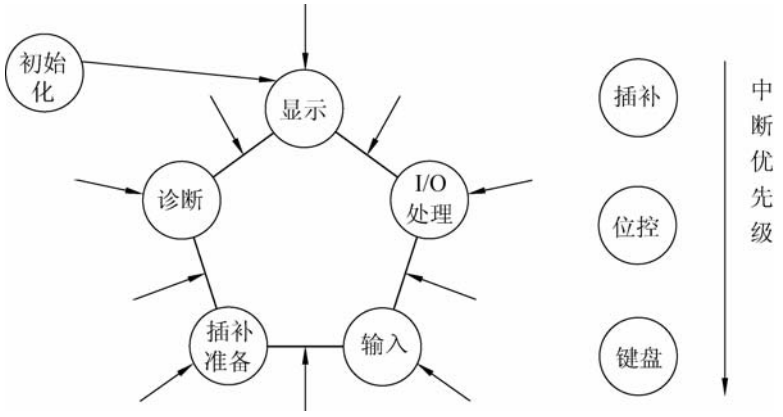


图 3.12　CPU 分时共享的并行处理

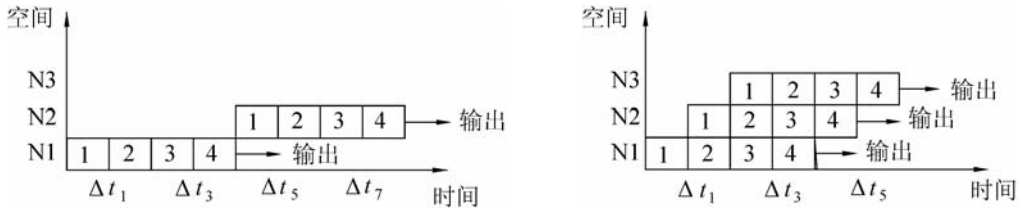
系统在完成初始化任务后自动进入时间分配循环中，在环中依次轮流处理各任务。而对于系统中一些实时性很强的任务则按优先级排队，分别处于不同的中断优先级上作为环

外任务，环外任务可以随时中断环内各任务的执行，每个任务允许占用 CPU 的时间受到一定的限制，对于某些占用 CPU 时间较长的任务，如插补准备(包括译码、刀具半径补偿和速度处理等)，可以在其中的某些地方设置断点，当程序运行到断点处时，自动让出 CPU，等到下一个运行时间内自动跳到断点处继续运行。

2) 资源重叠流水并行处理方法

当 CNC 装置在自动加工工作方式时，其数据的转换过程将由零件程序输入、插补准备、插补、位置控制四个子过程组成。如果每个子过程的处理时间分别为 Δt_1、Δt_2、Δt_3、Δt_4，那么一个零件程序段的数据转换时间将是 $t=\Delta t_1+\Delta t_2+\Delta t_3+\Delta t_4$。如果以顺序方式处理每个零件的程序段，则第一个零件程序段处理完以后再处理第二个程序段，依次类推。图 3.13(a)表示了这种顺序处理时的时间空间关系。从图中可以看出，两个程序段的输出之间将有一个时间为 t 的间隔。这种时间间隔反映在电动机上就是电动机的时停时转，反映在刀具上就是刀具的时走时停，这种情况在加工工艺上是不允许的。

消除这种间隔的方法是用时间重叠流水并行处理技术。采用流水并行处理后的时间空间关系如图 3.13(b)所示。



(a)　　(b)

图 3.13　时间重叠流水并行处理

流水并行处理的关键是时间重叠，即在一段时间间隔内不是处理一个子过程，而是处理两个或更多的子过程。从图 3.13 中可以看出，经过流水并行处理以后，从时间 Δt_4 开始，每个程序段的输出之间不再有间隔，从而保证了刀具移动的连续性。流水并行处理要求处理每个子过程的运算时间相等，然而 CNC 装置中每个子过程所需的处理时间都是不同的，解决的方法是取最长的子过程处理时间为流水并行处理时间间隔。这样在处理时间间隔较短的子过程时，当处理完后系统就进入等待状态。

在单 CPU 结构的 CNC 装置中，流水并行处理的时间重叠只有宏观上的意义。即在一段时间内，CPU 处理多个子过程，但从微观上看，每个子过程是分时占用 CPU 时间。

3. 实时中断处理

CNC 系统软件结构的另一个特点是实时中断处理。CNC 系统程序以零件加工为对象，每个程序段中有许多子程序，它们按照预定的顺序反复执行，各个步骤间关系十分密切，有许多子程序的实时性很强，这就决定了中断成为整个系统不可缺少的重要组成部分。CNC 系统的中断管理主要由硬件完成，而系统的中断结构决定了软件结构。

CNC 系统的中断类型如下。

(1) 外部中断。主要有纸带光电阅读机中断、外部监控中断(如紧急停、量仪到位等)和键盘操作面板输入中断。前两种中断的实时性要求很高，将它们放在较高的中断优先级上，而键盘和操作面板的输入中断则放在较低的中断优先级上，在有些系统中，甚至用查

询的方式来处理它。

(2) 内部定时中断。主要有插补周期定时中断和位置采样定时中断。在有些系统中将两种定时中断合二为一。但是在处理时，总是先处理位置控制，然后处理插补运算。

(3) 硬件故障中断。它是各种硬件故障检测装置发出的中断。如存储器出错、定时器出错、插补运算超时等。

(4) 程序性中断。它是程序中出现异常情况的报警中断。如：各种溢出、除零等。

3.3.2　CNC 系统的软件结构模式

CNC 系统的软件结构决定于系统采用的中断结构。在常规的 CNC 系统中，有中断型和前后台型两种结构模式。

1. 中断型结构模式

中断型结构模式的特点是除了初始化程序之外，整个系统软件的各种功能模块分别安排在不同级别的中断服务程序中，整个软件就是一个大的中断系统。其管理的功能主要通过各级中断服务程序之间的相互通信来实现。

一般在中断型结构模式的 CNC 系统软件体系中，控制 CRT 显示的模块为低级中断(0 级中断)，只要系统中没有其他中断级别请求，总是执行 0 级中断，即系统进行 CRT 显示。其他程序模块，如译码处理、刀具中心轨迹计算、键盘控制、I/O 信号处理、插补运算、终点判别、伺服系统位置控制等处理，分别具有不同的中断优先级别。开机后，系统程序首先进入初始化程序，进行初始化状态的设置、ROM 检查等工作。初始化后，系统转入 0 级中断 CRT 显示处理。此后系统就进入各种中断的处理，整个系统的管理是通过每个中断服务程序之间的通信来实现的。

例如 FANUC—BESK 7CM CNC 系统是一个典型的中断型结构模式。整个系统的各个功能模块被分为八个不同优先级的中断服务程序，见表 3-1。其中伺服系统位置处理被安排成很高的级别，因为机床的刀具运动实时性很强。CRT 显示被安排的级别最低，即 0 级，其中断请求通过硬件接线始终保持存在。只要 0 级以上的中断服务程序均未发生的情况下，就进行 CRT 显示。1 级中断相当于后台程序的功能，进行插补前的准备工作。1 级中断有 13 种功能，对应着口状态字中的 13 个位，每位对应于一个处理任务。在进入 1 级中断服务时，先依次查询口状态字的 0～12 位的状态，再转入相应的中断服务(表 3-2)。其处理过程如图 3.14 所示。口状态字的置位有两种情况：一是由其他中断根据需要置 1 级中断请求的同时置相应的口状态字；二是在执行 1 级中断的某个口子处理时，置口状态字的另一位。当某一口的处理结束后，程序将口状态字的对应位清除。2 级中断服务程序的主要工作是对数控面板上的各种工作方式和 I/O 信号进行处理。3 级中断则是对用户选用的外部操作面板和电传机的处理。4 级中断最主要的功能是完成插补运算。FANUC—BESK 7CM CNC 系统中采用时间分割法(数据采样法)插补。此方法经过 CNC 插补计算输出的是一个插补周期 T(8ms)的 F 指令值，这是一个粗插补进给量，而精插补进给量则是由伺服系统的硬件与软件来完成的。一次插补处理分为速度计算、插补计算、终点判别和进给量变换 4 个阶段。5 级中断服务程序主要对纸带阅读机读入的孔信号进行处理。这种处理基本上可以分为输入代码的有效性判别、代码处理和结束处理 3 个阶段。6 级中断主要完成位置控制，4ms

定时计时和存储器奇偶校验工作。7 级中断实际上是工程师的系统调试工作，非使用机床的正式工作。中断请求的发生，除了 6 级中断是由 4ms 实时时钟设置之外，其余的中断均通过别的中断设置，即依靠各中断程序之间的相互通信来设置。例如 6 级中断程序中每两次设置一次 4 级中断请求(8ms)；每四次设置一次 1、2 级中断请求。插补的 4 级中断在插补完一个程序段后，要从缓冲器中取出一段并作刀具半径补偿，这时就置 1 级中断请求，并把 4 号口置 1。

表 3-1　FANUC—BESK 7CM CNC 系统的各级中断功能

中断级别	主要功能	中断源
0	控制 CRT 显示	硬件
1	译码、刀具中心轨迹计算，显示器控制	软件，16ms 定时
2	键盘监控，I/O 信号处理，穿孔机控制	软件，16ms 定时
3	操作面板和电传机处理	硬件
4	插补运算、终点判别和转段处理	软件，8ms 定时
5	纸带阅读机读纸带处理	硬件
6	伺服系统位置控制处理	4ms 实时时钟
7	系统测试	硬件

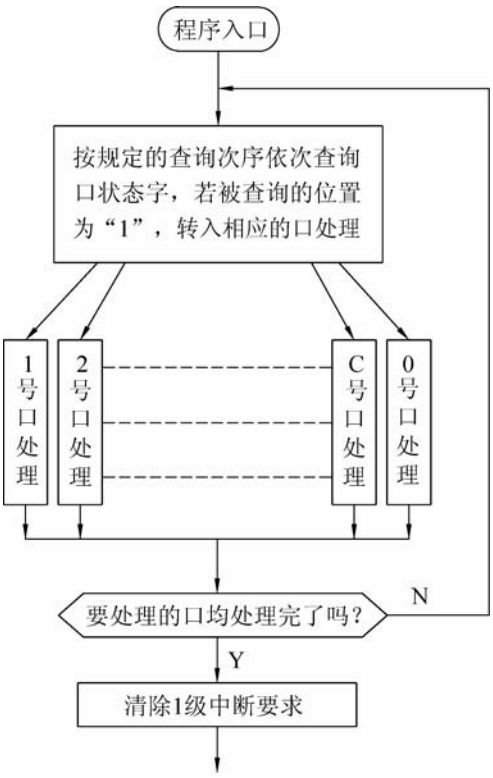


图 3.14　1 级中断各口处理转换框图

表 3-2　FANUC—BESK 7CM CNC 系统 1 级中断的 13 种功能

口状态字	对应口的功能
0	显示处理
1	公制—英制转换
2	部分初始化
3	从存储区(MP、PC 或 SP 区)读一段数控程序到 BS 区
4	轮廓轨迹转换成刀具中心轨迹
5	“再启动”处理
6	“再启动”开关无效时，刀具回到断点“启动”处理
7	按“启动”按钮时，要读一段程序到 BS 区的预处理
8	连续加工时，要读一段程序到 BS 区的预处理
9	纸带阅读机反绕或存储器指针返回首址的处理
A	启动纸带阅读机使纸带正常进给一步
B	置 M、S、T 指令标志及 G96 速度换算
C	置纸带反绕标志

2. 前后台型结构模式

该结构模式的 CNC 系统的软件分为前台程序和后台程序。前台程序是指实时中断服务程序，实现插补、伺服、机床监控等实时功能，这些功能与机床的动作直接相关。后台程序是一个循环运行程序，完成管理功能和输入、译码、数据处理等非实时性任务，也叫背景程序，管理软件和插补准备在这里完成。后台程序运行中，实时中断程序不断插入，与后台程序相配合，共同完成零件加工任务。图 3.15 所示为前后台型软件结构中，实时中断程序与后台程序的关系图。这种前后台型的软件结构一般适合单处理器集中式控制，对 CPU 的性能要求较高。程序启动后先进行初始化，再进入后台程序环，同时开放实时中断程序，每隔一定的时间中断发生一次，执行一次中断服务程序，此时后台程序停止运行，实时中断程序执行后，再返回后台程序。

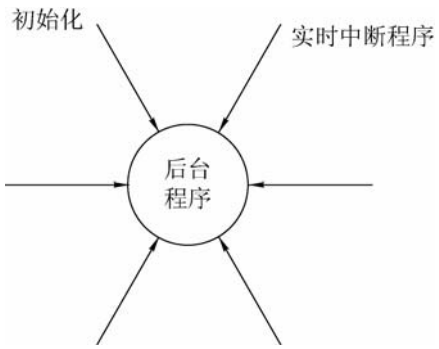


图 3.15　前后台软件结构中实时中断程序与后台程序的关系

美国 A-B7360 CNC 系统软件是一种典型的前后台型软件，其结构框图如图 3.16 所示。该图的右侧是实时中断程序处理的任务，主要的可屏蔽中断有 10.24ms 实时时钟中断、阅

读机中断和键盘中断。其中阅读机中断优先级最高，10.24ms 实时时钟中断优先级次之，键盘中断优先级最低。阅读机中断仅在输入零件程序时启动阅读机后才发生，键盘中断也仅在键盘方式下发生，而 10.24ms 实时时钟中断总是定时发生的。左侧则是后台程序处理的任务。后台程序是一个循环执行的主程序，而实时中断程序按其优先级随时插入后台程序中。

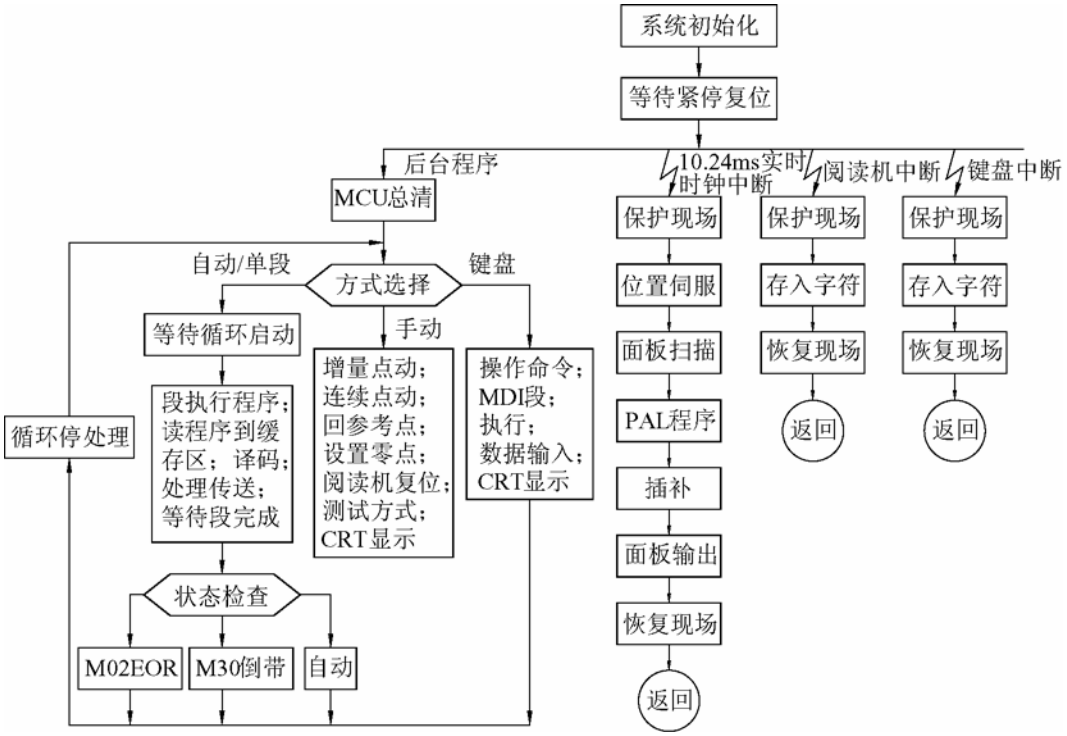


图 3.16　A−B 7360 CNC 系统软件结构框图

关于实时中断程序，除了阅读机中断和键盘中断是在其特定的工作情况下发生外，主要是 10.24ms 的实时时钟中断。该时间是 A−B 7360 CNC 系统的实际位置采样周期，也就是采用数据采样插补方法(时间分割法)的插补周期。该实时时钟中断服务程序是系统的核心，CNC 系统的实时控制任务包括位置伺服、面板扫描、机床逻辑(可编程应用逻辑(PAL)程序)、实时诊断和轮廓插补等都在其中实现。

3.4　计算机数控中的可编程逻辑控制器

3.4.1　PLC 及其工作过程

可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller)简称 PLC，是一类以微处理器为基础的通用型自动控制装置。它一般以顺序控制为主，回路调节为辅，能够完成逻辑、顺序、计时、计数和算术运算等功能，既能控制开关量，也能控制模拟量。

近年来 PLC 技术发展很快，每年都推出不少新产品。据不完全统计，美国、日本、德国等生产 PLC 的厂家已达 150 多家，产品有数百种。PLC 的功能也在不断增长，主要表

现在以下几方面。

(1) 控制规模不断扩大，单台 PLC 可控制成千乃至上万个点，多台 PLC 进行同位链接可控制数万个点。

(2) 指令系统功能增强，能进行逻辑运算、计时、计数、算术运算、PID 运算、数制转换、ASCII 码处理。高档 PLC 还能处理中断、调用子程序等，使得 PLC 能够实现逻辑控制、模拟量控制、数值控制和其他过程监控，以至在某些方面可以取代小型计算机控制。

(3) 处理速度提高，使每个点的平均处理时间从 10 μm 左右减少到 1 μm 以内。

(4) 编程容量增大，从几 KB 增大到几十 KB，甚至上百 KB。

(5) 编程语言多样化，大多数使用梯形图语言和语句表语言，有的还可使用流程图语言或高级语言。

(6) 增加通信与联网功能，多台 PLC 之间能互相通信，互相交换数据，PLC 还可以与上位计算机通信，接受计算机的命令，并将执行结果告诉计算机。通信接口多采用 RS422/RS232C 等标准接口，以实现多级集散控制。

目前，为了适应不同的需要，进一步扩大 PLC 在工业自动化领域的应用范围，PLC 正朝着两个方向发展。其一是低档 PLC 向小型、简易、廉价方向发展，使之能广泛地取代继电器控制；其二是中、高档 PLC 向大型、高速、多功能方向发展，使之能取代工业控制计算机的部分功能，对大规模的复杂系统进行综合性的自动控制。

在数控机床上采用 PLC 代替继电器控制，能使数控机床结构更紧凑，功能更丰富，响应速度和可靠性大大提高。在数控机床、加工中心等自动化程度高的加工设备和生产制造系统中，PLC 是不可缺少的控制装置。

1. PLC 的基本功能

在数控机床出现以前，顺序控制技术在工业生产中已经得到广泛应用。许多机械设备的工作过程都需要遵循一定的步骤或顺序。顺序控制即是以机械设备的运行状态和时间为依据，使其按预先规定好的动作次序顺序进行工作的一种控制方式。

数控机床所用的顺序控制装置(或系统)主要有两种，一种是传统的继电器逻辑电路(Relay Logic Circuit)，简称 RLC，另一种是可编程逻辑控制器即 PLC。

RLC 是将继电器、接触器、按钮、开关等机电式控制器件用导线连接而成的以实现规定的顺序控制功能的电路。在实际应用中，RLC 存在一些难以克服的缺点。如只能解决开关量的简单逻辑运算，以及定时、计数等有限的几种功能控制，难以实现复杂的逻辑运算、算术运算、数据处理，以及数控机床所需要的许多特殊控制功能，修改控制逻辑需要增减控制元器件和重新布线，安装和调整周期长，工作量大；继电器、接触器等器件体积较大，每个器件工作触点有限。当机床受控对象较多，或控制动作顺序较复杂时，需要采用大量的器件，因而整个 RLC 体积庞大，功耗高，可靠性差等。由于 RLC 存在上述缺点，因此只能用于一般的工业设备和数控车床、数控钻床、数控镗床等控制逻辑较为简单的数控机床。

与 RLC 比较，PLC 是一种工作原理完全不同的顺序控制装置，基基本功能如下。

(1) PLC 是由计算机简化而来的。为适应顺序控制的要求，PLC 省去了计算机的一些数字运算功能，而强化了逻辑运算控制功能，是一种功能介于继电器控制和计算机控制之间

的自动控制装置。

PLC 具有与计算机类似的一些功能器件和单元，包括 CPU、用于存储系统控制程序和用户程序的存储器、与外部设备进行数据通信的接口及工作电源等。为与外部机器和过程实现信号传送，PLC 还具有输入/输出信号接口。PLC 有了这些功能器件和单元，即可用于完成各种指定的控制任务。PLC 系统的基本功能结构框图如图 3.17 所示。

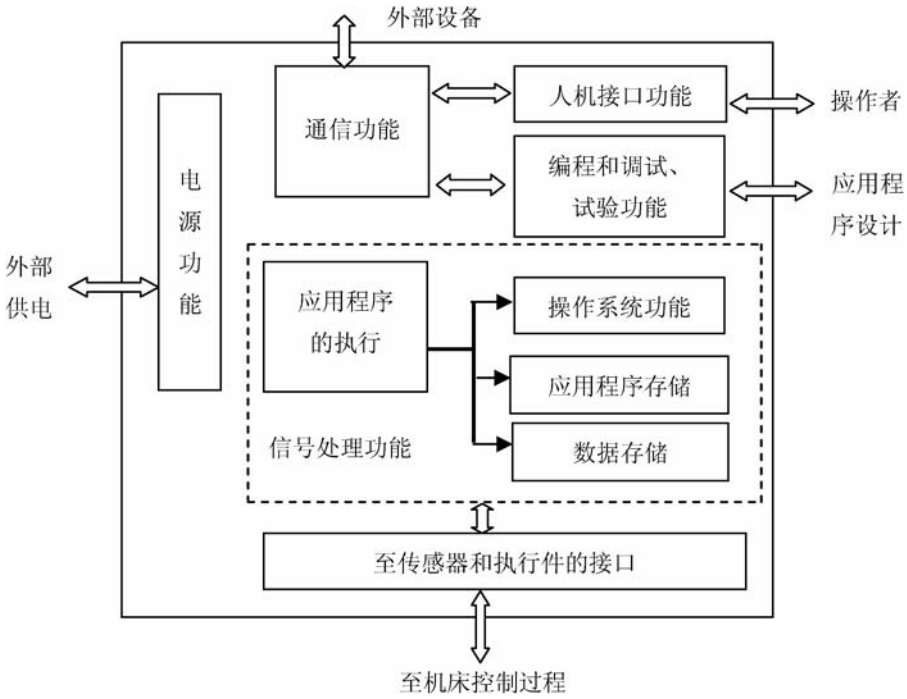


图 3.17　PLC 系统的基本功能结构框图

(2) 具有面向用户的指令和专用于存储用户程序的存储器。用户控制逻辑用软件实现。适用于控制对象动作复杂，控制逻辑需要灵活变更的场合。

(3) 用户程序多采用图形符号和逻辑顺序关系与继电器电路十分近似的梯形图编辑。梯形图形象直观，工作原理易于理解和掌握。

(4) PLC 可与专用编程机、编程器、个人计算机等设备连接，可以很方便地实现程序的显示、编辑、诊断、存储和传送等操作。

(5) PLC 没有继电器的接触不良、触点熔焊、磨损和线圈烧断等故障。运行中无振动、无噪声，且具有较强的抗干扰能力，可以在环境较差(如：粉尘、高温、潮湿等)的条件下稳定、可靠地工作。

(6) PLC 结构紧凑、体积小，容易装入机床内部或电气箱内，便于实现数控机床的机电一体化。

PLC 的开发利用，为数控机床提供了一种新型的顺序控制装置，并很快在实际应用中显示了强大的生命力。现在 PLC 已成为数控机床的一种基本的控制装置。与 RLC 比较，采用 PLC 的数控机床结构更紧凑，功能更丰富，工作更可靠。对于车削中心、加工中心、FMC、FMS 等机械运动复杂，自动化程度高的加工设备和生产制造系统，PLC 则是不可缺

少的控制装置。

2. PLC 的基本结构

PLC 实质上是一种工业控制用的专用计算机，PLC 系统与微型计算机结构基本相同，也是由硬件系统和软件系统两大部分组成。

1) 通用型 PLC 的硬件结构

通用型 PLC 的硬件基本结构如图 3.18 所示，它是一种通用的可编程逻辑控制器，主要由中央处理单元(CPU)、存储器、I/O 模块及电源组成。

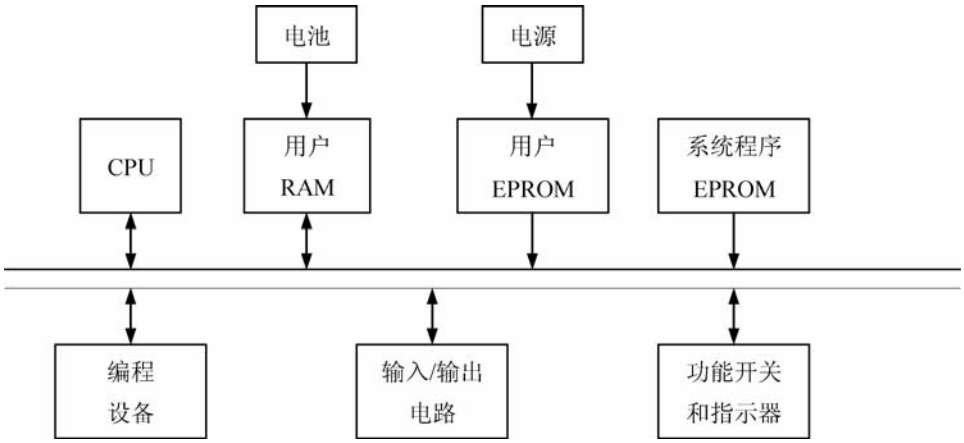


图 3.18　通用型 PLC 的硬件基本结构

主机内各部分之间均通过总线连接。总线分为电源总线、控制总线、地址总线和数据总线。各部件的作用如下。

(1) CPU。PLC 的 CPU 与通用微型计算机的 CPU 一样，是 PLC 的核心部分，它按 PLC 中系统程序赋予的功能，接收并存储从编程器键入的用户程序和数据；用扫描方式查询现场输入装置的各种信号状态或数据，并存入输入过程状态寄存器或数据寄存器中；诊断电源及 PLC 内部电路工作状态和编程过程中的语法错误等；在 PLC 进入运行状态后，从存储器逐条读取用户程序，经过命令解释后，按指令规定的任务产生相应的控制信号，去启闭有关的控制电路；分时、分渠道地去执行数据的存取、传送、组合、比较和变换等动作，完成用户程序中规定的逻辑运算或算术运算等任务；根据运算结果，更新有关标志位的状态和输出状态寄存器的内容，再由输出状态寄存器的位状态或数据寄存器的有关内容实现输出控制、制表打印、数据通信等功能。以上这些都是在 CPU 的控制下完成的。PLC 常用的 CPU 主要采用通用微处理器、单片机或双极型位片式微处理器。

(2) 存储器。存储器(简称内存)，用来存储数据或程序。它包括随机存取存储器(RAM)和只读存储器(ROM)。

PLC 配有系统程序存储器和用户程序存储器，分别用以存储系统程序和用户程序。系统程序存储器用来存储监控程序、模块化应用功能子程序和各种系统参数等，一般使用 EPROM；用户程序存储器用来存放用户编制的梯形图等程序，一般使用 RAM，若程序不经常修改，也可写入到 EPROM 中；存储器的容量以字节为单位。系统程序存储器的内容不能由用户直接存取。因此一般在产品样本中所列的存储器型号和容量，均是指用户程序

存储器。

(3) I/O 模块。I/O 模块是 CPU 与现场 I/O 设备或其他外部设备之间的连接部件。PLC 提供了各种操作电平和输出驱动能力的 I/O 模块供用户选用。I/O 模块要求具有抗干扰性能，并与外界绝缘，因此，多数都采用光电隔离回路、消抖动回路、多级滤波等措施。I/O 模块可以制成各种标准模块，根据 I/O 点数来增减和组合。I/O 模块还配有各种发光二极管来指示各种运行状态。

(4) 电源。PLC 配有开关式稳压电源的电源模块，用来对 PLC 的内部电路供电。

(5) 编程器。编程器用作用户程序的编制、编辑、调试和监视，还可以通过其键盘调用和显示 PLC 的一些内部状态和系统参数。它经过接口与 CPU 联系，完成人机对话。

编程器分简易型和智能型两种。简易型编程器只能在线编程，它通过一个专用接口与 PLC 连接。智能型编程器既可在线编程又可离线编程，还可以不与 PLC 连接而直接插到现场控制站的相应接口的方式进行编程。智能型编程器有许多不同的应用程序软件包，功能齐全，适应的编程语言和方法也较多。

2) PLC 软件系统

PLC 的软件系统是指 PLC 所使用的各种程序的集合。它包括系统程序和用户程序。

(1) 系统程序。系统程序包括监控程序、编译程序及诊断程序等。监控程序又称为管理程序，主要用于管理全机。编译程序用来把程序语言翻译成机器语言。诊断程序用来诊断机器故障。系统程序由 PLC 生产厂家提供，并固化在 EPROM 中，用户不能直接存取，故也不需要用户干预。

(2) 用户程序。用户程序是用户根据现场控制的需要，用 PLC 的程序语言编制的应用程序，用以实现各种控制要求。用户程序由用户用编程器键入到 PLC 内存。小型 PLC 的用户程序比较简单，不需要分段，是顺序编制的。大、中型 PLC 的用户程序很长，也比较复杂，为使用户程序编制简单清晰，可按功能结构或使用目的将用户程序划分成各个程序模块。按模块结构组成的用户程序，每个模块用来实现一个确定的技术功能，能使很长的程序编制得易于理解，还使得程序的调试和修改变得很容易。

对于数控机床来说，其 PLC 中的用户程序由机床制造厂提供，并已固化到用户 EPROM 中，机床用户不需进行写入和修改，只是当机床发生故障时，根据机床厂提供的梯形图和电气原理图，来查找故障点，进行维修。

3. PLC 的工作过程

用户程序通过编程器顺序输入到用户存储器，CPU 对用户程序循环扫描并顺序执行，其工作过程分为输入采样、程序执行、输出刷新 3 个阶段，如图 3.19 所示。

1) 输入采样阶段

在输入采样阶段，PLC 以扫描方式将所有输入端的输入信号状态(ON/OFF 状态)读入到输入映像寄存器中寄存起来，称为对输入信号的采样。接着转入程序执行阶段，在程序执行期间，即使输入状态变化，输入映像寄存器的内容也不会改变。输入状态的变化只能在下一个工作周期的输入采样阶段才被重新读入。

2) 程序执行阶段

在程序执行阶段，PLC 对程序按顺序进行扫描。如程序用梯形图表示，则总是按先上后下、先左后右的顺序扫描。每扫描到一条指令时所需要的输入状态或其他元素的状态，

分别从输入映像寄存器或输出映像寄存器中读入，然后进行相应的逻辑或算术运算，运算结果再存入专用寄存器。若执行程序输出指令时，则将相应的运算结果存入输出映像寄存器。

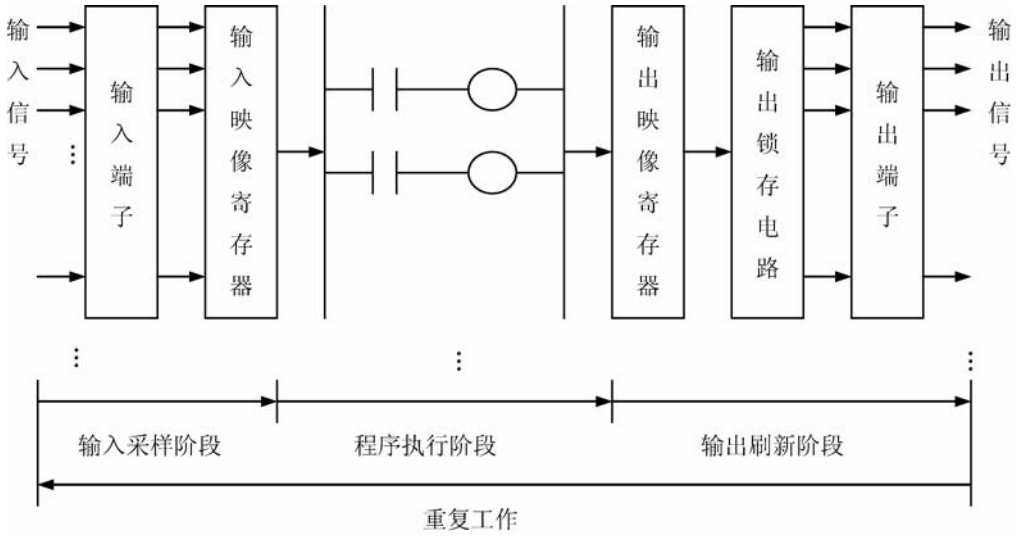


图 3.19　PLC 的工作过程

3) 输出刷新阶段

在所有指令执行完毕后，输出映像寄存器中的状态就是欲输出的状态。在输出刷新阶段将其转存到输出锁存电路，再经输出端子输出信号去驱动用户输出设备，这就是 PLC 的实际输出。PLC 重复进行上述三个阶段的工作，每重复一次就是一个工作周期(或称扫描周期)。工作周期的长短与程序的长短有关。

由于 I/O 模块滤波器的时间常数，输出继电器的机械滞后以及执行程序时按工作周期进行等原因，I/O 响应会出现滞后现象，对一般工业控制设备来说，这种滞后现象是允许的。但一些设备的某些信号要求做出快速响应，因此，有些 PLC 采用高速响应的 I/O 模块，也有的将顺序程序分为快速响应的高级程序和一般响应速度的低级程序两类。如 FANUC—BESK PLC 规定高级程序每 8 ms 扫描一次，而把低级程序自动划分分割段，当开始执行程序时，首先执行高级顺序程序，然后执行低级程序的分割段 1，之后又去执行高级程序，再执行低级程序的分割段 2。这样每执行完低级程序的一个分割段，都要重新扫描执行一次高级程序，以保证高级程序中信号响应的快速性。

4. PLC 的规模和几种常用名称

在实际运用中，当需要对 PLC 的规模作出评价时，较为普遍的做法是将 I/O 点数的多少或者程序存储器容量(字数)的大小作为评价的标准，把 PLC 分为小型、中型和大型(或小规模、中规模和大规模)3 类，见表 3-3。

程序存储器容量的大小决定存储用户程序的步数或语句条数的多少。I/O 点数与程序存储器容量之间有内在的联系。当 I/O 点数增加时，顺序程序处理的信息量增大，程序加长，因而需加大程序存储器的容量。

表 3-3　PLC 的规模分类

评价指标 / PLC 规模	I/O 点数 (二者总点数)	程序存储容量
小型 PLC	128 点以下	1KB 以下
中型 PLC	128～512 点	1～4KB
大型 PLC	512 点以上	4KB 以上

一般来说，数控车床、铣床、加工中心等单机数控设备所需 I/O 点数多在 128 点以下，少数复杂设备在 128 点以上。而大型数控机床，FMC、FMS、FA 则需要采用中型或大型 PLC。

为了突出 PLC 作为工业控制装置的特点，或者为了与个人计算机“PC”或脉冲编码器“PLC”等术语相区别，除通称可编程逻辑控制器为“PLC”外，目前不少厂家，其中有些是世界著名的 PLC 厂家，还采用了与 PLC 不同的其他名称。现将几种常见名称列举如下：

微机可编程控制器(Microprocessor Programmable Controller，MPC)

可编程接口控制器(Programmable Interface Controller，PIC)

可编程机器控制器(Programmable Machine Controller，PMC)

可编程顺序控制器(Programmable Sequence Controller，PSC)

3.4.2　PLC 在数控机床上的应用

1. 数控机床用 PLC

数控机床用 PLC 可分为两类：一类是专为实现数控机床顺序控制而设计制造的内装型(built-in type)PLC，另一类是 I/O 信号接口技术规范、I/O 点数、程序存储容量以及运算和控制功能等均能满足数控机床控制要求的独立型(stand-alone type)PLC。

1) 内装型 PLC

内装型 PLC(或称内含型 PLC、集成式 PLC)从属于 CNC 装置，PLC 与 NC 间的信号传送在 CNC 装置内部即可实现。PLC 与机床(简称 MT)之间则通过 CNC I/O 接口电路实现信号传送。如图 3.20 所示为具有内装型 PLC 的 CNC 机床系统框图。

内装型 PLC 有如下特点。

(1) 内装型 PLC 实际上是 CNC 装置带有的 PLC 功能，一般作为一种基本的或可选择的功能提供给用户。

(2) 内装型 PLC 的性能指标(如：I/O 点数，程序最大步数，每步执行时间、程序扫描周期、功能指令数目等)是根据所从属的 CNC 系统的规格、性能、适用机床的类型等确定的。其硬件和软件部分是被作为 CNC 系统的基本功能或附加功能与 CNC 系统其他功能一起统一设计、制造的。因此，系统硬件和软件整体结构十分紧凑，且 PLC 所具有的功能针对性强，技术指标亦较合理、实用，尤其适用于单机数控设备的应用场合。

(3) 在系统的具体结构上，内装型 PLC 可与 CNC 系统共用 CPU，也可以单独使用一个 CPU；硬件控制电路可与 CNC 系统其他电路制作在同一块印制电路板上，也可以单独

制成一块附加板，当 CNC 装置需要附加 PLC 功能时，再将此附加板插装到 CNC 装置上，内装 PLC 一般不单独配置 I/O 接口电路，而是使用 CNC 系统本身的 I/O 电路。PLC 控制电路及部分 I/O 电路(一般为输入电路)所用电源由 CNC 装置提供，不需另备电源。

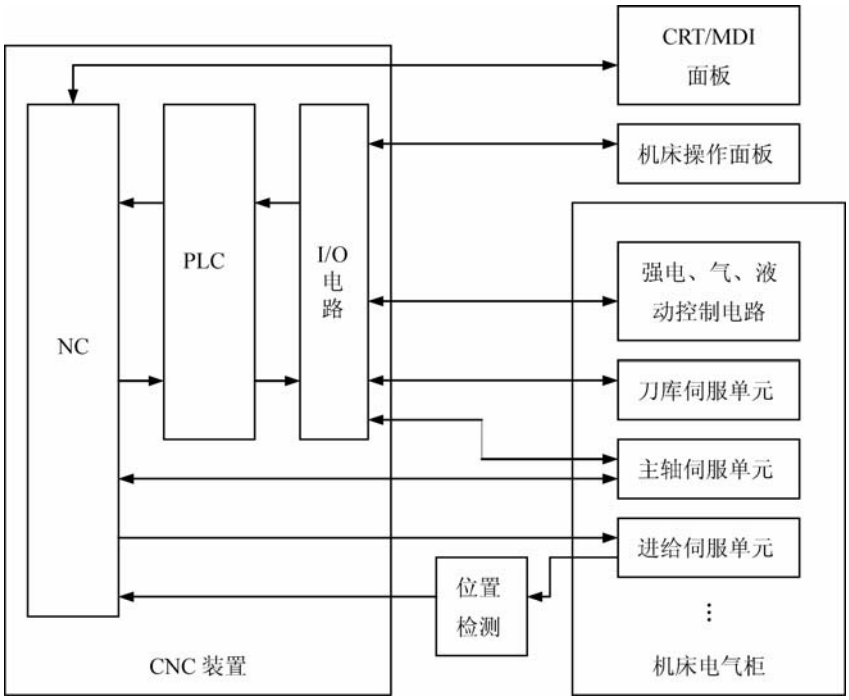


图 3.20　具有内装型 PLC 的 CNC 机床系统框图

(4) 采用内装型 PLC 结构，CNC 系统可以具有某些高级的控制功能。如：梯形图编辑和传送功能，在 CNC 系统内部直接处理 NC 窗口的大量信息等。

国内常见外国公司生产的带有内装型 PLC 的系统有：FANUC 公司的 FS—0(PMC—L/M)、FS—0 Mate(PMC—L/M)、FS—3(PLC—D)、FS—6(PLC—A、PLC—B)、FS—10/11(PMC—1)、FS—15(PMC—N)，SIEMENS 公司的 SINUMERIK 810、SINUMERIK 820，A-B 公司的 8200、8400、8600 等。

2) 独立型 PLC

独立型 PLC 又称通用型 PLC。独立型 PLC 是独立于 CNC 装置，具有完备的硬件和软件功能，能够独立完成规定控制任务的装置。如图 3.21 所示为具有独立型 PLC 的 CNC 机床系统框图。

独立型 PLC 有如下特点。

(1) 独立型 PLC 具有如下基本的功能结构：CPU 及其控制电路、系统程序存储器、用户程序存储器、I/O 接口电路、与编程机等外部设备通信的接口和电源等(参见图 3.21)。

(2) 独立型 PLC 一般采用积木式模块化结构或笼式插板式结构，各功能电路多做成独立的模块或印制电路板，具有安装方便，功能易于扩展和变更等优点。例如，可采用通信模块与外部 I/O 设备、编程设备、上位机、下位机等进行数据交换；采用 D/A 模块可以对外部伺服装置直接进行控制；采用计数模块可以对加工工件数量、刀具使用次数、回转体

回转分度数等进行检测和控制，采用定位模块可以直接对诸如刀库、转台、直线运动轴等机械运动部件或装置进行控制。

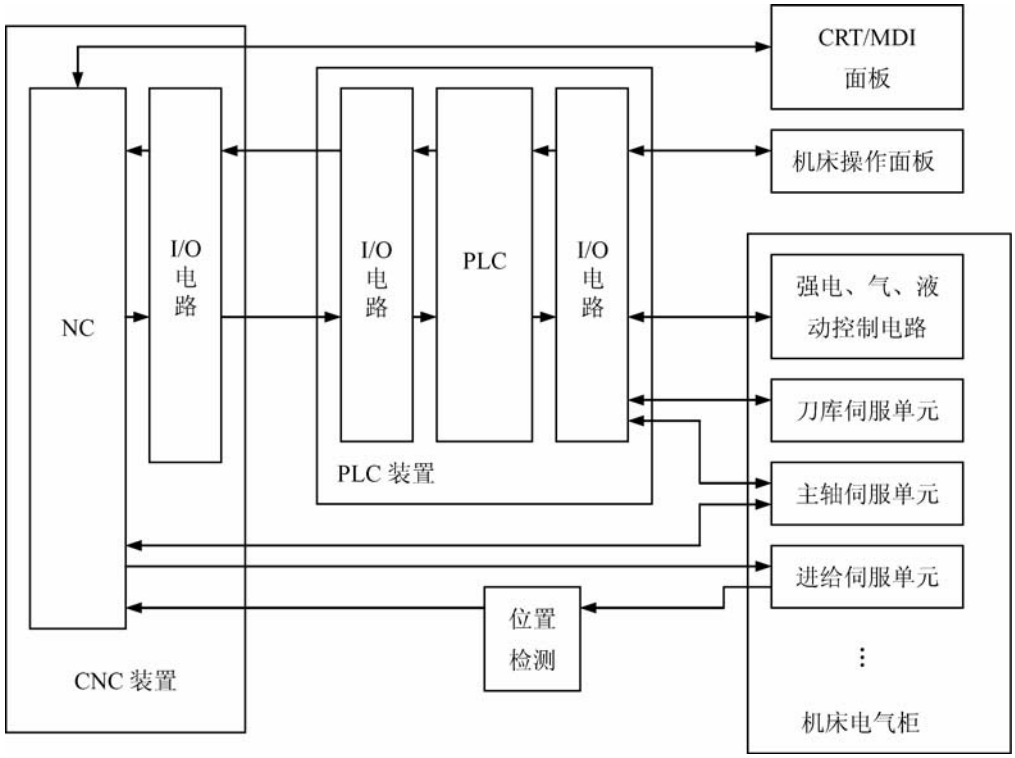


图 3.21　具有独立型 PLC 的 CNC 机床系统框图

(3) 独立型 PLC 的输入/输出点数可以通过 I/O 模块或插板的增减灵活配置。有的独立型 PLC 还可通过多个远程终端连接器构成有大量输入/输出点的网络，以实现大范围的集中控制。

在独立型 PLC 中，那些专为用于 FMS、FA 而开发的独立型 PLC 具有强大的数据处理、通信和诊断功能，主要用作“单元控制器”，是现代自动化生产制造系统重要的控制装置。独立型 PLC 也用于单机控制。国外有些数控机床制造厂家，或是为了展示自己长期形成的技术特色，或是为了对某些技术绝窍进行保密，或纯粹是因管理上的需要，在购进的 CNC 系统中，舍弃了 PLC 功能，而采用外购或自行开发的独立型 PLC 作控制器，这种情况在从日本、欧美引进的数控机床中屡见不鲜。

国内已引进应用的独立型 PLC 有：SIEMENS 公司的 SIMATI　C S5 系列产品，A-B 公司的 PLC 系列产品，FANUC 公司的 PMC—J 等。

2. 典型数控机床用 PLC 的指令系统

PLC 是专为工业自动控制而开发的装置，通常 PLC 采用面向控制过程，面向问题的“自然语言”编程。不同厂家的产品采用的编程语言不同，这些编程语言有梯形图、语句表、控制系统流程图等。为了增强 PLC 的各种运算功能，有的 PLC 还配有 BASIC 语言，并正在探索用其他高级语言来编程。

日本的 FANUC 公司、立石公司、三菱公司、富士公司等所生产的 PLC 产品，都采用梯形图编程。在用编程器向 PLC 输入程序时，一般简易编程器都采用编码表输入，大型编程器也可用梯形图直接输入。在众多的 PLC 产品中，由于制造厂家不同，其指令系统的表示方法和语句表中的助记符也不尽相同，但原理是完全相同的。在本书中以 FANUC—PMC—L 为例，对适用于数控机床控制的 PLC 指令作一介绍。在 FANUC 系列的 PLC 中，规格型号不同只反映在功能指令的数目有所不同，如北京机床研究所与 FANUC 公司合作开发的 FANUC—BESK PLC—B 功能指令有 23 条，除此以外，其指令系统与 FANUC 系列的其他 PLC 是完全一样的。

在 FANUC—PMC—L 中有两种指令：基本指令和功能指令。当设计顺序程序时，使用最多的是基本指令，共 12 条。功能指令便于机床特殊运行控制的编程，共 35 条。

在基本指令和功能指令执行中，用一个堆栈寄存器暂存逻辑操作的中间结果，堆栈寄存器有 9 位，如图 3.22 所示，按先进后出、后进先出的原理工作。当前操作结果压入时，堆栈各原状态全部左移一位；相反的取出操作结果时堆栈全部右移一位，最后压入的信号首先恢复读出。

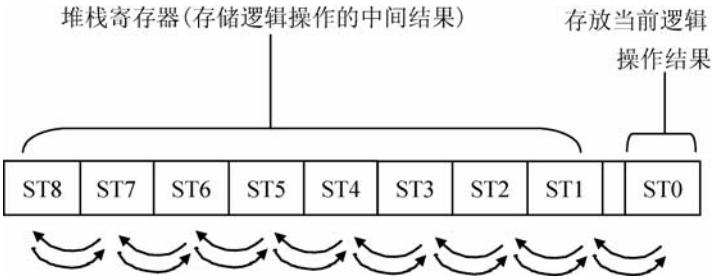


图 3.22　堆栈寄存器操作顺序

1) 基本指令

基本指令共 12 条，指令及处理内容见表 3-4。

基本指令格式如下：

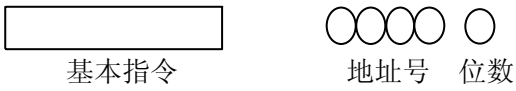


表 3-4　基本指令和处理内容

序号	指令	处理内容
1	RD	读指令信号的状态，并写入 ST0 中。在一个阶梯开始的是常开节点时使用
2	RD.NOT	将信号的“非”状态读出，送入 ST0 中。在一个阶梯开始的是常开节点时使用
3	WRT	输出运算结果(ST0 的状态)到指定地址
4	WRT.NOT	输出运算结果(ST0 的状态)的“非”状态到指定地址
5	AND	将 ST0 的状态与指定地址的信号状态相“与”后，再置于 ST0 中
6	AND.NOT	将 ST0 的状态与指定地址的“非”状态相“与”后，再置于 ST0 中
7	OR	将指定地址的状态与 ST0 相“或”后，再置于 ST0

(续)

序号	指令	处理内容
8	OR.NOT	将指定地址的“非”状态相“或”后，再置于 ST0
9	RD.STK	堆栈寄存器左移一位，并把指定地址的状态置于 ST0
10	RD.NOT.STK	堆栈寄存器左移一位，并把指定地址的状态取“非”后再置于 ST0
11	AND.STK	将 ST0 和 ST1 的内容执行逻辑“与”，结果存于 ST0，堆栈寄存器右移一位
12	OR.STK	将 ST0 和 ST1 的内容执行逻辑“或”，结果存于 ST0，堆栈寄存器右移一位

下面举一个综合运用基本指令的例子，来说明梯形图与指令代码的应用，此例子把 12 条基本指令都用到了。图 3.23 是梯形图的例子，表 3-5 是针对图 3.23 的梯形图用编程器向 PLC 输入的程序编码表和运算结果状态。

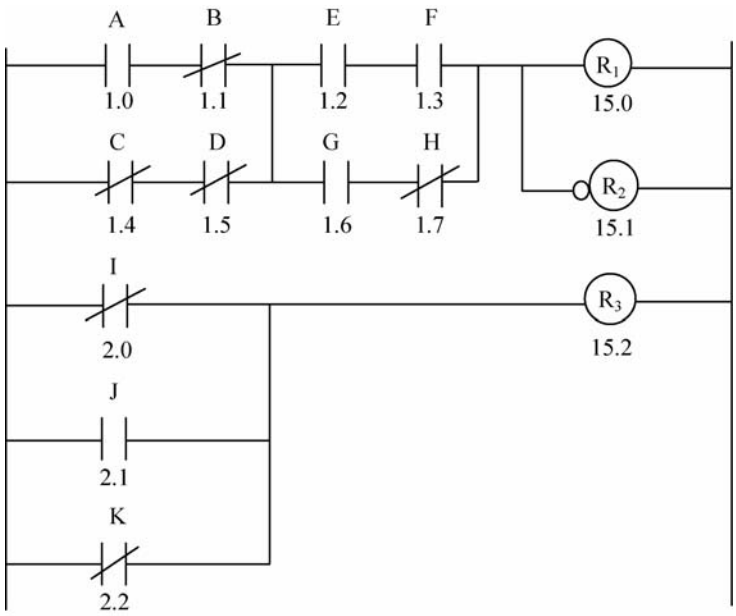


图 3.23　梯形图举例

表 3-5　梯形图 3.23 的程序编码表和运算结果状态

序号	指令	地址号位数	备注	运算结果状态		
				ST2	ST1	ST0
1	RD	1.0	A			A
2	AND.NOT	1.1	B			$A\cdot\overline{B}$
3	RD.NOT.STK	1.4	C		$A\cdot\overline{B}$	$\overline{C}$
4	AND.NOT	1.5	D		$A\cdot\overline{B}$	$\overline{C}\cdot\overline{D}$
5	OR.STK					$A\cdot\overline{B}+\overline{C}\cdot\overline{D}$
6	RD.STK	1.2	E		$A\cdot\overline{B}+\overline{C}\cdot\overline{D}$	E
7	AND	1.3	F		$A\cdot\overline{B}+\overline{C}\cdot\overline{D}$	$E\cdot F$
8	RD.STK	1.6	G	$A\cdot\overline{B}+\overline{C}\cdot\overline{D}$	$E\cdot F$	G

(续)

序号	指令	地址号位数	备注	运算结果状态		
				ST2	ST1	ST0
9	AND.NOT	1.7	H	$A\cdot\overline{B}+\overline{C}\cdot\overline{D}$	$E\cdot F$	$G\cdot\overline{H}$
10	OR.STK				$A\cdot\overline{B}+\overline{C}\cdot\overline{D}$	$E\cdot F+G\cdot\overline{H}$
11	AND.STK					$(A\cdot\overline{B}+\overline{C}\cdot\overline{D})$ $(E\cdot F+G\cdot\overline{H})$
12	WRT	15.0	R_1			$(A\cdot\overline{B}+\overline{C}\cdot\overline{D})$ $(E\cdot F+G\cdot\overline{H})$
13	WRT.NOT	15.1	R_2			$(A\cdot\overline{B}+\overline{C}\cdot\overline{D})$ $(E\cdot F+G\cdot\overline{H})$
14	RD.NOT	2.0	I			$\overline{I}$
15	OR	2.1	J			$\overline{I}+J$
16	OR.NOT	2.2	K			$\overline{I}+J+\overline{K}$
17	WRT	15.2	R_3			$\overline{I}+J+\overline{K}$

2) 功能指令

数控机床所用 PLC 的指令必须满足数控机床信息处理和动作控制的特殊要求。例如由数控系统输出的 M、S、T 二进制代码信号的译码(DEC)，机械运动状态或液压系统动作状态的延时(TMR)确认，加工零件的计数(CTR)，刀库、分度工作台沿最短路径旋转和现在位置至目标位置步数的计算(ROT)，换刀时数据检索(DSCH)等。对于上述的译码、定时、计数、最短路径选择，以及比较、检索、转移、代码转换、四则运算、信息显示等控制功能，仅用一位操作的基本指令编程，实现起来将会十分困难。因此要增加一些具有专门控制功能的指令，这些专门指令就是功能指令。功能指令都是一些子程序，应用功能指令就是调用相应的子程序。

表 3-6 列出了 35 种功能指令和处理内容。

表 3-6　功能指令和处理内容

序号	指　令			处 理 内 容
	格式 1 (梯形图)	格式 2 (纸带穿孔与程序显示)	格式 3 (程序输入)	
1	END1	SUB1	S1	1 级(高级)程序结束
2	END2	SUB2	S2	2 级程序结束
3	END3	SUB48	S48	3 级程序结束
4	TMR	TMR	T	定时器处理
5	TMRB	SUB24	S24	固定定时器处理
6	DEC	DEC	D	译码
7	CTR	SUB5	S5	计数处理
8	ROT	SUB6	S6	旋转控制

(续)

序号	指令			处理内容
	格式 1 (梯形图)	格式 2 (纸带穿孔与程序显示)	格式 3 (程序输入)	
9	COD	SUB7	S7	代码转换
10	MOVE	SUB8	S8	数据“与”后传输
11	COM	SUB9	S9	公共线控制
12	COME	SUB29	S29	公共线控制结束
13	JMP	SUB10	S10	跳转
14	JMPE	SUB30	S30	跳转结束
15	PARI	SUB11	S11	奇偶检查
16	DCNV	SUB14	S14	数据转换(二进制−BCD 码)
17	COMP	SUB15	S15	比较
18	COIN	SUB16	S16	符合检查
19	DSCH	SUB17	S17	数据检索
20	XMOV	SUB18	S18	变址数据传输
21	ADD	SUB19	S19	加法运算
22	SUB	SUB20	S20	减法运算
23	MUL	SUB21	S21	乘法运算
24	DIV	SUB22	S22	除法运算
25	NUME	SUB23	S23	定义常数
26	PACTL	SUB25	S25	位置 Mate-A
27	CODE	SUB27	S27	二进制代码转换
28	DCNVE	SUB31	S31	扩散数据转换
29	COMPB	SUB32	S32	二进制数比较
30	ADDB	SUB36	S36	二进制数加
31	SUBB	SUB37	S37	二进制数减
32	MULB	SUB38	S38	二进制数乘
33	DIVB	SUB39	S39	二进制数除
34	NUMEB	SUB48	S40	定义二进制常数
35	DISP	SUB49	S49	在数控系统的 CTR 显示器上显示信息

功能指令不能使用继电器的符号，必须使用图 3.24 所示的格式符号。这种格式包括：控制条件、指令、参数和输出几个部分。

表 3−7 为图 3.24 所示功能指令的程序编码表和运算结果状态。

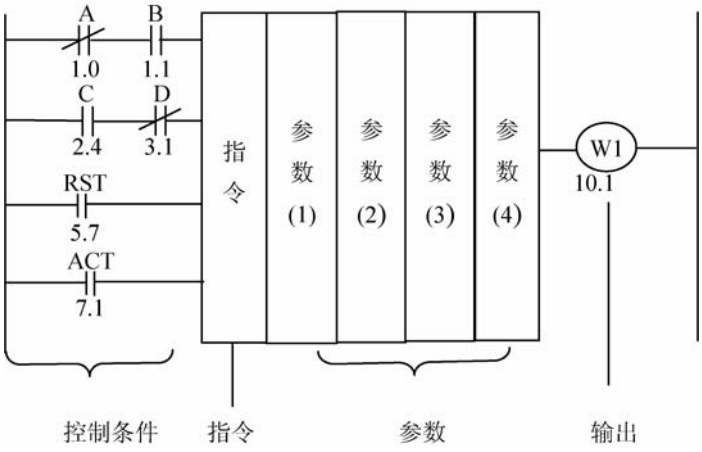


图 3.24　功能指令格式

表 3-7　图 3.24 的程序编码表和运算结果状态

序号	指令	地址号位数	备注	运算结果状态			
				ST3	ST2	ST1	ST0
1	RD.NOT	1.0	A				$\bar{A}$
2	AND	1.1	B				$\bar{A}\cdot B$
3	RD.STK	2.4	C			$\bar{A}\cdot B$	C
4	AND.NOT	3.1	D			$\bar{A}\cdot B$	$C\cdot\bar{D}$
5	RD.STK	5.7	RST		$\bar{A}\cdot B$	$C\cdot\bar{D}$	RST
6	RD.STK	7.1	ACT	$\bar{A}\cdot B$	$C\cdot\bar{D}$	RST	ACT
7	SUB	○○	指令	$\bar{A}\cdot B$	$C\cdot\bar{D}$	RST	ACT
8	(PRM)	○○○○	参数 1	$\bar{A}\cdot B$	$C\cdot\bar{D}$	RST	ACT
9	(PRM)	○○○○	参数 2	$\bar{A}\cdot B$	$C\cdot\bar{D}$	RST	ACT
10	(PRM)	○○○○	参数 3	$\bar{A}\cdot B$	$C\cdot\bar{D}$	RST	ACT
11	(PRM)	○○○○	参数 4	$\bar{A}\cdot B$	$C\cdot\bar{D}$	RST	ACT
12	WRT	10.1	W1 输出	$\bar{A}\cdot B$	$C\cdot\bar{D}$	RST	ACT

指令格式中各部分内容说明如下。

(1) 控制条件。控制条件的数量和意义随功能指令的不同而变化。控制条件存入堆栈寄存器中，其顺序是固定不变的。

(2) 指令。功能指令的种类见表 3-6。指令的三种格式，格式 1 用于梯形图，格式 2 用于纸带穿孔和程序显示，格式 3 是用编程器输入程序时的简化指令。对 TMR 和 DEC 指令在编程器上有其专用指令键，其他功能指令则用 SUB 键和其后的数字键输入。

(3) 参数。功能指令不同于基本指令，可以处理各种数据，也就是说数据或存有数据的地址可作为功能指令的参数，参数的数目和含义随指令的不同而不同。

(4) 输出。功能指令的执行情况可用一位“1”和“0”表示时，把它输出到 Wl 继电器，Wl 继电器的地址可随意确定。但有些功能指令不用 Wl，如 MOVE、COM、JMP 等。

(5) 需要处理的数据。由功能指令管理的数据通常是 BCD 码或二进制数。如四位数的 BCD 码数据是按一定顺序放在两个连续地址的存储单元中，分低两位和高两位存放。例如 BCD 码 1234 被存放在地址 200 和 201 中，则 200 中存低两位(34)，201 中存高两位(12)。在功能指令中只用参数指定低字节的 200 地址。二进制代码数据可以由 lB、2B、4B 数据组成，同样是低字节存在最小地址，在功能指令中也是用参数指定最小地址。

3.5 CNC 系统的输入/输出与通信

3.5.1 CNC 装置的输入/输出和通信要求

CNC 装置作为控制独立的单台机床设备时，通常需要与下列设备相接并进行数据的输入/输出，并与其他装置设备进行信息交换和传递，具体要求如下。

(1) 数据输入/输出设备。如光电纸带阅读机(PTR)，纸带穿孔机(PP)，零件的编程机和 PLC 的编程机等。

(2) 外部机床控制面板，包括键盘和终端显示器。特别是大型数控机床，为了操作方便，往往在机床一侧设置一个外部的机床控制面板。其结构可以是固定的，或者是悬挂式的。它往往远离 CNC 装置。早期 CNC 装置采用专用的远距离输入/输出接口，近来采用标准的 RS232C/20mA 电流环接口。

(3) 具有通用的手摇脉冲发生器。

(4) 进给驱动线路和主轴驱动线路。一般情况下，主轴驱动和进给驱动线路与 CNC 装置装在同一机柜或相邻机柜内，通过内部连线相连，它们之间不设置通用输入/输出接口。

例如，SIEMENS 公司 SINUMERIK3/8 系统设有 V24(RS232C)/20mA 接口供程序输入/输出之用。SINUMERIK810/820 设有两个通用 V24/20mA 接口，可用以连接数据输入/输出设备。而外部机床控制面板通过 I/O 模块相连。规定 V24 接口传输距离不大于 50m，20mA 电流环接口传输距离可达 1000m。

随着工厂自动化(FA)和计算机集成制造系统(CIMS)的发展，CNC 装置作为 FA 或 CIMS 结构中的一个基础层次，用作设备层或工作站层的控制器时，可以是分布式数控系统(DNC 或称群控系统)，柔性制造系统(FMS)的有机组成部分。一般通过工业局部网络相连接。

CNC 装置除了要与数据输入/输出设备等外部设备相连接外，还要与上级主计算机或 DNC 计算机直接通信或通过工厂局部网络相连，具有网络通信功能。CNC 装置与上级计算机或单元控制器间交换的数据要比单机运行时多得多。例如，机床启停信号、操作指令、机床状态信息、零件程序的传输，其他 CNC 数据的传输等。为此，传输速率也要高些，一般通过 RS232C/20mA 接口的传输速率不超过 9600B/s。

美国 A-B 公司 8600 系统为满足 CIMS 通信要求，配置如下 3 种接口：小型 DNC 接口；远距离输入/输出接口；数据高速通道(data highway)，相当于工业局部网络的通信接口。

FANUCl5 系统也有类似接口功能。CNC 装置通过专用通信处理机、远程缓冲存储器、RS422 接口，采用通信协议 Protocol A/B，传输速率可达 86.4KB/s，若采用 HDLC 协议，传输速率可达 920KB/s。为了满足 FA 和 CIMS 的需要还可配置 MAP3.0 接口板，以便接入

工业局部网络。

SINUMERIK850/880 系统除配置有标准的 RS232C 接口外，还设置有 SINEC H1 网络接口和制造自动化协议(Manufacturing Automation Protocol，MAP)网络接口(或称 SINEC H2 接口)。通过网络接口可将 CNC 连至 SIEMENS 公司的 SINEC H1 网络和 MAP 工业局部网络中。SINEC H1 网络类似以太网，遵循带有检测冲突的载波侦听多路存取(CSMA/CD)控制方式的 IEEE802.3。SIEMENS 公司的 SINEC H2 工业局部网络(LAN)遵循 MAP3.0 协议，以令牌通行(token passing)方式的 IEEE802.4 对分布式总线结构的 LAN 进行控制。

3.5.2　CNC 系统常用外部设备及接口

CNC 系统的外部设备(简称外设)是指为了实现机床控制任务而设置的输入与输出装置。不同的数控设备配备外部设备的类型和数量都不一样。大体来说，外部设备包括输入设备和输出设备两种。输入设备常见的有自动输入的纸带阅读机、磁带机、磁盘驱动器、光盘驱动器，手动输入的有键盘、手动操作的各种控制开关等。零件的加工程序、各种补偿的数据、开关状态等都要通过输入设备送入数控系统。输出设备常见的有通用显示器(如指示灯)、外部位置显示器(如 CRT 显示器、LED 显示器等)、纸带穿孔机、电传打字机、行式打印机等。

下面介绍一些常见的外部设备和相应接口。

1. 纸带阅读机输入及工作原理

读入纸带信息的设备称为纸带阅读机或读带机，早期的数控机床多配有这种装置。它把纸带上有孔和无孔的信息逐行地转换为数控装置可以识别和处理的逻辑信号。读带机通常有机械式和光电式两种。机械式阅读机利用接触转换原理来识别出两种信号，纸带在行进的过程中，有孔触点接合，无孔触点不接合。由于机械式阅读机纸带传送速度较低，易产生接触不良，影响阅读信息的可靠性，纸带在行进过程中一直与触点接触，容易磨损，影响纸带使用寿命，纸带还容易变形，不易保存，因此后来的发展是多采用光电式阅读机。光电式阅读机有多种型号，但其原理和结构大致相同，都是采用光敏元件来识别程序纸带上有孔和无孔的信息，所以，反应速度快，具有较强的抗干扰能力和较高的阅读速度，一般约为 300 行/秒。

不论是哪种形式的纸带阅读机，目前已经基本上被淘汰，取而代之的是计算机用磁盘或光盘驱动器等。

2. 键盘输入及接口

键盘是数控机床最常用的输入设备，是实现人机对话的一种重要手段，通过键盘可以向计算机输入程序、数据及控制命令。键盘有两种基本类型：全编码键盘和非编码键盘。

全编码键盘每按下一键，键的识别由键盘的硬件逻辑自动提供被按键的 ASCII 代码或其他编码，并能产生一个选通脉冲向 CPU 申请中断，CPU 响应后将键的代码输入内存，通过译码执行该键的功能。此外还有消除抖动、多键和串键的保护电路。这种键盘的优点是使用方便，不占用 CPU 的资源，但价格昂贵。非编码键盘，其硬件上仅提供键盘的行和列的矩阵，其他识别、译码等全部工作都由软件来完成。所以非编码键盘结构简单，是较便宜的输入设备。这里主要介绍非编码键盘的接口技术和控制原理。

非编码键盘在软件设计过程中必须解决的问题是：识别键盘矩阵中被按下的键，产生与被按键对应的编码，消除按键时产生的抖动干扰，防止键盘操作中串键的错误(同时按下一个以上的键)。图 3.25 是一般微机系统常用的键盘结构线路。它由 8×8 的矩阵组成，有 64 个键可供使用。行线和列线的交点是单键按钮的触点，键按下，行线和列线接通。CPU 的 8 条低位地址线通过反相驱动器接至矩阵的列线，矩阵的行线经反相三态缓冲器接至 CPU 的数据总线上。CPU 的高位地址通过译码接至三态缓冲器的控制端，所以 CPU 访问键盘是通过地址线，与访问其他内存单元相同。键盘也占用内存空间，若高位地址译码的信号是 38H，则 3800H～38FFH 的存储空间为键盘所占用。

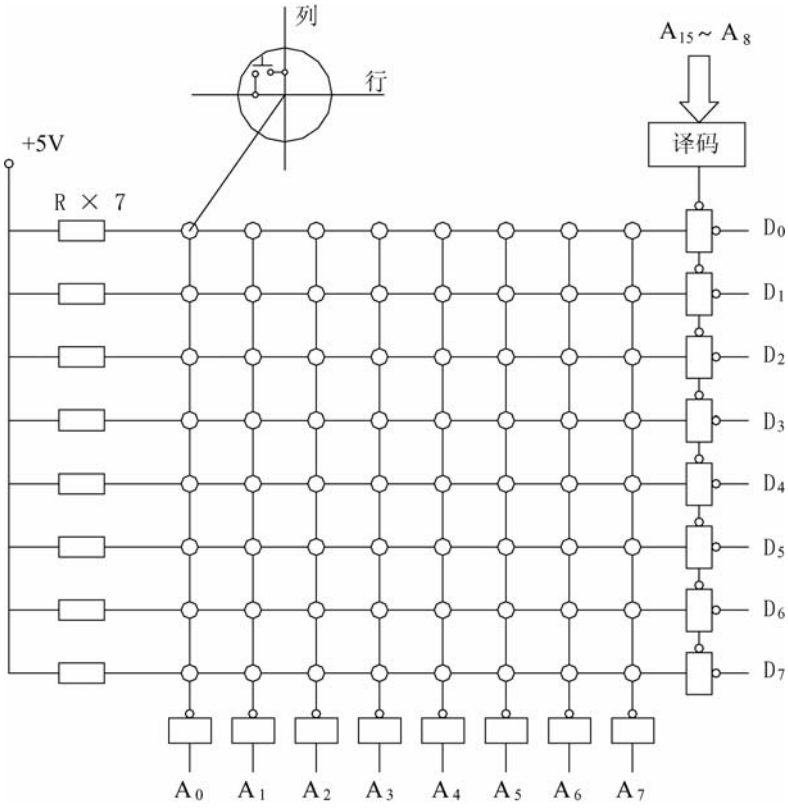


图 3.25　8×8 键盘矩阵

键盘输入信息的过程如下。

(1) 操作者按下一个键。

(2) 查出按下的是哪一个键，称为键扫描。

(3) 给出该键的编码，即键译码。在这种方式中，键的识别和译码是由软件来实现的，采用程序查询的方法来扫描键盘，其扫描的步骤如下。

平时三态缓冲器的输入端是高电平。扫描键盘是否有键按下时，首先访问键盘所占用的空间地址，高位地址选通，经译码器打开三态缓冲器的控制端，低位地址 A_0～A_7 全为高电平，然后检查行线，用读入数据的方法判断 D_0～D_7 是否全为零，若全为零，则表示没有键按下。程序再反复扫描，直到查出输入的信息不是零，某一根数据线为高电平，表示键盘中有一个键按下，根据数据的值知道按键是在哪一行。查到有键按下后，必须找出键在

哪一列上，接着 CPU 再逐列扫描地址线，其方法是使第 1 列地址线为高电平，其他 7 列为低电平，然后再读入数据检查行线，是否有一根数据线为高电平，若不为高电平，则使第 2 列为高电平，其余列为低电平，再读入数据，看是否不全是零，以此类推一直到读入数据不全是零，即可找出所按下的键在哪一列。

找到按下的键所属的行列，就知道按下的是什么键，通过程序处理即可执行按键的功能。

3. 显示

CNC 系统接收到操作者输入的信息以后，往往还要把接收到的信息告知操作者，以便进行下一步的操作。例如，操作者用按键选择了 CNC 系统的某种工作方式，CNC 系统就要用文字把当前的状态显示出来，告知操作者是否已经接收到了正确的信息；在零件程序的输入过程中，每输入一个字符，CNC 系统也都要将其显示出来，操作者可以很方便地知道正在输入的当前位置；已经在内存的零件程序如果需要修改，也可以显示出来，以便操作者找到修改的位置。所有这些，都要求 CNC 系统具有显示数据和其他信息的功能。因此，显示器是数控机床最常用的输出设备，也是实现人机对话的一个重要手段。尤其是现代 CNC 系统采用的 CRT 显示器，大大扩展了显示功能，它不仅能显示字符，还能显示图形。所以，在 CNC 系统中，常采用各种显示方式以简化操作和丰富操作内容，用来显示编制的零件加工程序、输入的数据、参数和加工过程的状态(动态坐标值等)以及加工过程的动态模拟等，使操作既直观又方便。早期的 CNC 系统多采用 LED 显示器，现代 CNC 系统都配有 CRT 显示器，最新的还采用液晶显示器。

4. 异步串行接口

数据在设备间的传输可以采用串行方式或并行方式。所谓并行方式(或并行接口)是指输入/输出数据都按字节传输，一位数据有一根传输线。所谓串行方式(或串行接口)是指与设备进行数据传输时只有一根传输线，数据按通信规程所约定的编码格式沿一根传输线逐位依次传输。相距较远的设备间的数据传输采用串行方式比较经济。

但串行接口需要有一定的逻辑，将机内的并行数据转换成串行信息后再传输出去，接收时也要将收到的串行信号经过缓冲转换成并行数据，再送至机内处理。现已有集成电路的专用接口器件来实现这些功能，如 Intel 公司的 8251A，Motolora 公司的 MC6850，6852 等，价格都比较便宜。

为了能保证数据传输的正确和一致，接收和发送双方对数据的传输应确定一致的并相互遵守的约定，它包括定时、控制、格式化和数据表示方法等。这种约定称为通信规程(procedure)或通信协议(protocol)，通常应遵循标准化的通信协议。串行传输一般分异步协议和同步协议两大类。

异步协议将 8 位的字符看作一个独立信息，字符在传输的数据流中出现的相对时间是任意的。然而每一字符中的各位却以预定的时钟频率传输，即字符内部是同步的，字符间是异步的。异步协议的特征是字符间的异步定时。

异步传输时，在字符前加一个起始位，其作用是使接收端将其本地时钟与新传来的字符同步，以便正确采样，接收到信号。在字符的结尾要加 1、1 1/2 或 2 位终止位以标志一个字符传输的结束。接收端每接收一个字符同步一次。这样异步串行传输每一个字符要增

加约 20%的额外费用。

同步协议以固定的时钟产生数据流，将要传输的字符组成字符块发送，在字符块的开始和末尾增加控制信息组。这样同步协议比异步协议的额外费用低得多，可充分利用传输的带宽，采用较快的传输速率。传送大量数据时同步协议节省时间，但其接口的结构要复杂得多，成本也较高。通常网络接口采用同步协议。此外，异步协议的检错主要是利用字符中的奇偶校验位，而同步协议可利用较复杂的方法，如循环冗余码校验(CRC)，其检错能力很强。但也使同步协议发送和接收机构复杂化。

异步协议通用的定时规定只有一种起止式异步串行传输格式，如图 3.26 所示。其电气连接标准常用的有 RS232C(V24)/20mA 电流环或 RS422/RS449。

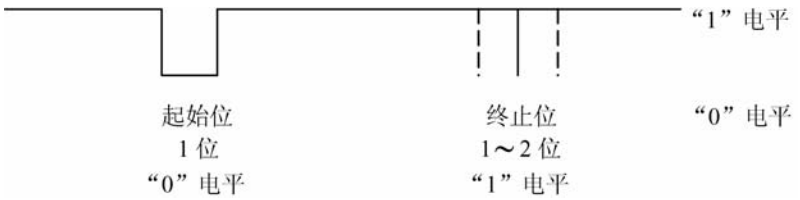


图 3.26　起止式异步串行传输格式

RS232C(V24)标准串行接口采用 25 芯双排针式插座，连接比较可靠。在数控机床上，主要用于以下几方面。

(1) 与光电纸带阅读机、纸带穿孔机，电话打字机终端设备(TTY)等相连接，将数控机床的各种参数、加工程序等信息通过该接口穿成纸带，保存起来，以备以后使用，或将纸带信息通过 PTR 送往机床。

(2) 与磁泡盒或磁带相连接，将零件加工程序送入数控机床。

(3) 与通用计算机相连，进行通信，实现编程控制一体化。通过计算机中的自动编程软件得出的数控加工程序指令不需要穿成纸带，而通过直接通信，将加工指令送入数控系统进行加工，省掉了制备穿孔纸带、输送纸带的环节，提高了系统的可靠性和信息的传输效率。

(4) 与上一级计算机相连接，实现 CAD/CAM 一体化。

下面主要介绍使用 RS232C 接口时应注意的问题。

(1) 在数据通信领域中，将相互通信的设备分成数据终端设备(DTE)和数据通信设备(DCE)。计算机或终端设备是 DTE；自动呼叫设备、调制解调器(modem)、中间设备等是 DCE。RS232C 规定了 DTE 与 DCE 间连接的信号关系，信号的详细情况可参看有关资料。因此在连接设备时一定要区分设备是 DTE 还是 DCE。将计算机与计算机或终端设备连接时，即 DTE 和 DTE 相连时，要注意接线的信号关系以免出现差错。

(2) RS232C 规定的电平与 TTL 和 MOS 电路的电平不同。RS232C 规定逻辑“0”至少为 3V，逻辑“1”为−3V 或更低。电源通常采用±12V 或±15V。输出驱动器通常采用 74188 或 MCl488，输入接收器采用 74189 或 MCl489。传输频率不超过 20kHz，最大距离为 30m (图 3.27)。

(3) RS232C 有两个地。一个是机壳地(插头座脚 1)，它直接连到系统屏蔽罩上，只有在把机壳连在一起是安全的情况下，两个相连设备的机壳地才能连接在一起。另一个是信号

地(插头座脚 7)，这个地必须连接在一起，它是对所有信号提供一个公共参考点的信号地。但信号地不一定与机壳绝缘，因此它有一个潜在的接地问题未解决好，造成对长距离传输的不可靠。公布的 RS232C 标准协议规定，一对器件间电缆总长不得超过 30m。

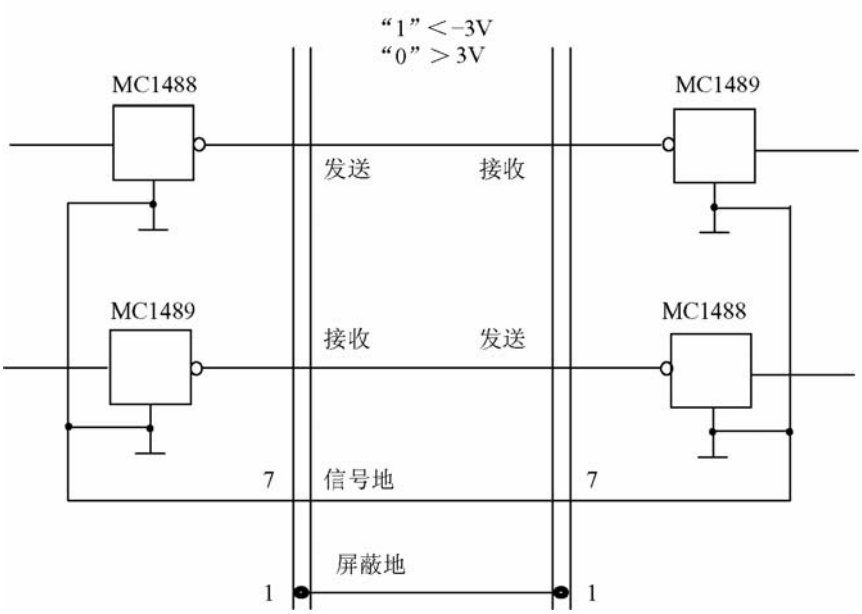


图 3.27　RS232C 接口的输入/输出门的连接

在 CNC 装置中，RS232C 接口用以连接输入/输出设备(PTR，PP 或 TTY)、外部机床控制面板或手摇脉冲发生器。传输速率不超过 9600bit/s。SIEMENS 公司规定，CNC 的连接距离不超过 50m。在 CNC 装置中标准的 RS232C/20mA 接口结构如图 3.28 所示。

在 CNC 装置中，20mA 电流环通常与 RS232C 一起配置，过去 20mA 电流环主要用于连接电传打印机和纸带穿复校设备，其特点是电流控制。以 20mA 电流作为逻辑“1”，零电流为逻辑“0”，在环路中只能有一个电流源。

电流环的内在双端传输特性对共模干扰有抑制作用，并可采用隔离技术消除接地回路引起的干扰，传输距离比 RS232C 远得多，可达 1000m。

为了弥补 RS232C 的不足，人们提出了新的接口标准 RS422/RS449。RS422 标准规定了双端平衡电气接口模块。RS449 规定了这种接口的机械连接标准，即采用 37 脚的连接器，与 RS232C 的 25 脚插座不同。这种平衡发送能保证更可靠、更快速的数据传输。它采用双端驱动器发送信号，用差分接收器接收信号，能抗传输过程的共模干扰，还允许线路有较大信号衰减，这样可使传输频率高得多，传输距离也比 RS232C 远得多。

RS422 平衡传输如图 3.29 所示。常用的器件有驱动器 75175 或 MC3487，接收器 75174 或 MC3486。最近出现一种新的集成电路——双 RS422/423 收发器 MC34050、MC34051。每一器件上有两个独立的驱动器和两个独立的接收器。MC34050 具有 DRIVEENABLE 及 RECEIVERENABLE 的非信号，而 MC34051 的每一驱动器都有单独的 DRIVEENABLE 信号。

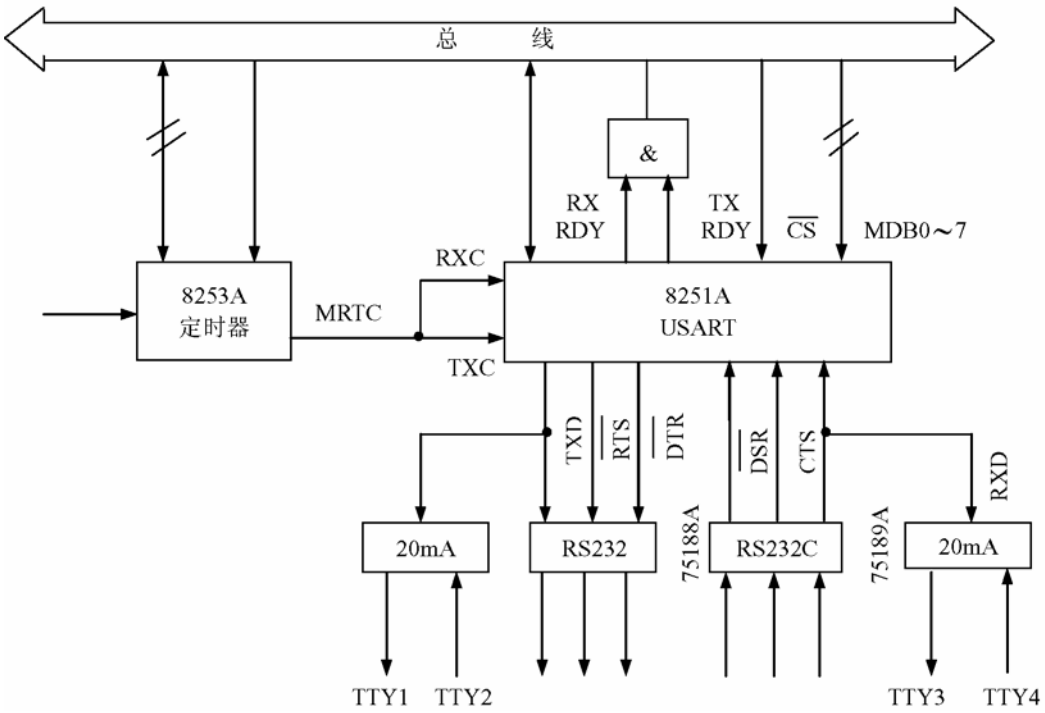


图 3.28　CNC 装置中标准的 RS232C/20mA 接口结构示意图

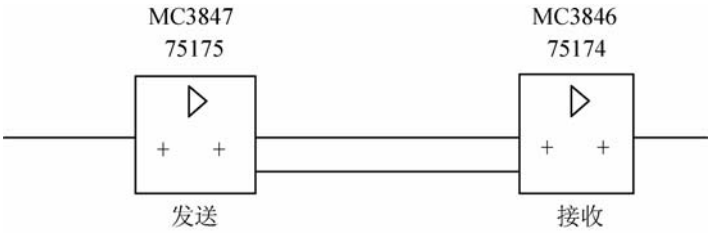


图 3.29　RS422 平衡传输示意图

5. 近代 CNC 系统的网络通信接口

当前对生产自动化提出了很高的要求，即生产要有很高的灵活性并能充分利用制造设备资源，为此将 CNC 装置和各种系统中的设备、计算机通过工业 LAN 联网以构成 FMS 或 CIMS。联网时应能保证高速和可靠地传输数据和程序。在这种情况下，一般采用同步串行传输方式，在 CNC 装置中设有专用的通信微处理机的通信接口，担负网络通信任务。其通信协议都采用以 ISO 开放式系统互连参考模型(OSI/RM)的 7 层结构为基础的有关协议，或 IEEE802 局部网络有关协议。近年来 MAP 已迅速成为应用于工厂自动化标准工业 LAN 的协议。FANUC、SIEMENS、A-B 等公司表示支持 MAP，在它们生产的 CNC 装置中可以配置 MAP2.1 或 MAP3.0 的网络通信接口。

从计算机网络技术看，计算机网络是通过通信线路并根据一定的通信协议互连起来的独立自主的计算机的集合。CNC 装置可以看作是一台具有特殊功能的专用计算机。计算机的互连是为了交换信息，共享资源。工厂范围内应用的主要是 LAN，通常它有距离限制(几

千米)，较高的传输速率，较低的误码率和可以采用各种传输介质(如电话线、双绞线同轴电缆和光纤)。OSI/RM 是 ISO 提出的分层结构的计算机通信协议模型。提出这一模型是为了使世界各国不同厂家生产的设备能够兼容，它是网络的基础。OSI/RM 在系统结构上具有 7 个层次，如图 3.30 所示。

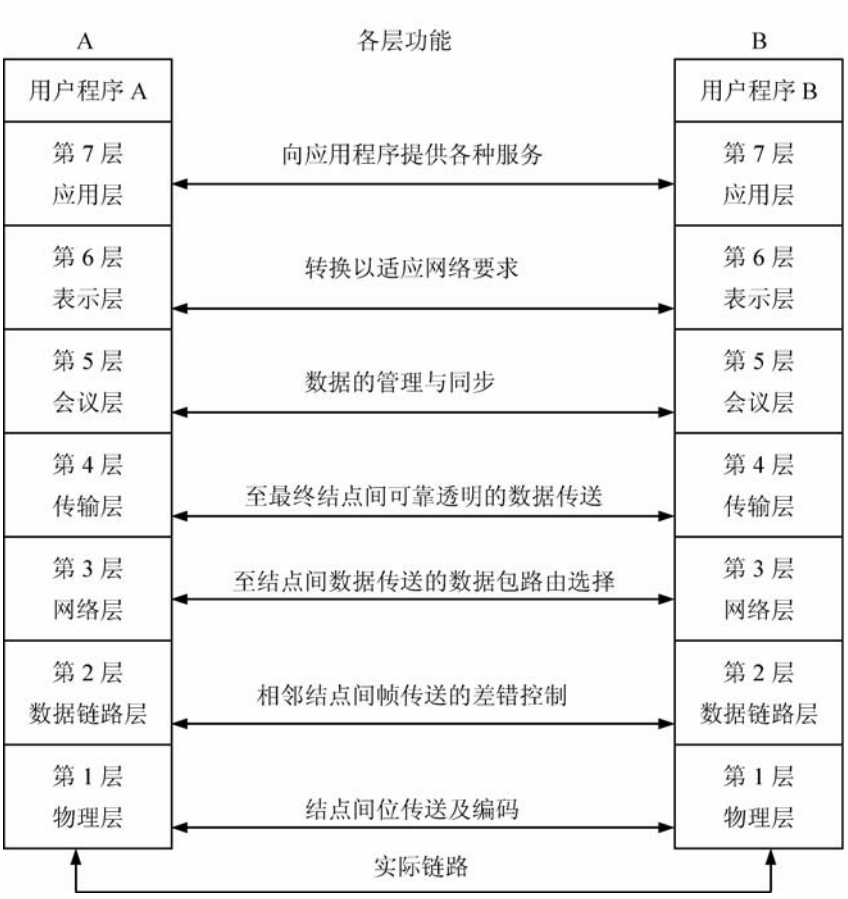


图 3.30　OSI/RM 的 7 层结构

通信一定是在两个系统之间进行的，而且两个系统都必须具有相同的层次功能，因此可以认为通信是在两个系统的对应层次(同等层)内进行。同等层次间通信必须遵循一系列规则或约定，这些规则和约定称为协议。OSI/RM 的最大优点在于有效地解决了不同计算机之间的通信问题。不管两个系统之间的差异有多大，只要具有下述特点就可以相互有效地通信。

(1) 它们完成一组同样的通信功能。

(2) 这些功能分成相同的层次，对等层提供相同的功能。

(3) 对等层必须共享共同的协议。

局部网络标准由 IEEE802 委员会提出建议，并已被 ISO 采用。它只规定了数据链路层和物理层的协议。它将数据链路层分成逻辑链路控制(LLC)和介质存取控制(MAC)两个子层。MAC 中根据采用的 LAN 技术分成：CSMA/CD(IEEE 802.3)、令牌总线(token bus 802.4)和

令牌环(token ring 802.5)。物理层也分成两个子层次，介质存取单元(MAU)和传输载体(carrier)。MAU 分基带、载带和宽带传输。传输载体有双绞线、同轴电缆，光纤(图 3.31)。

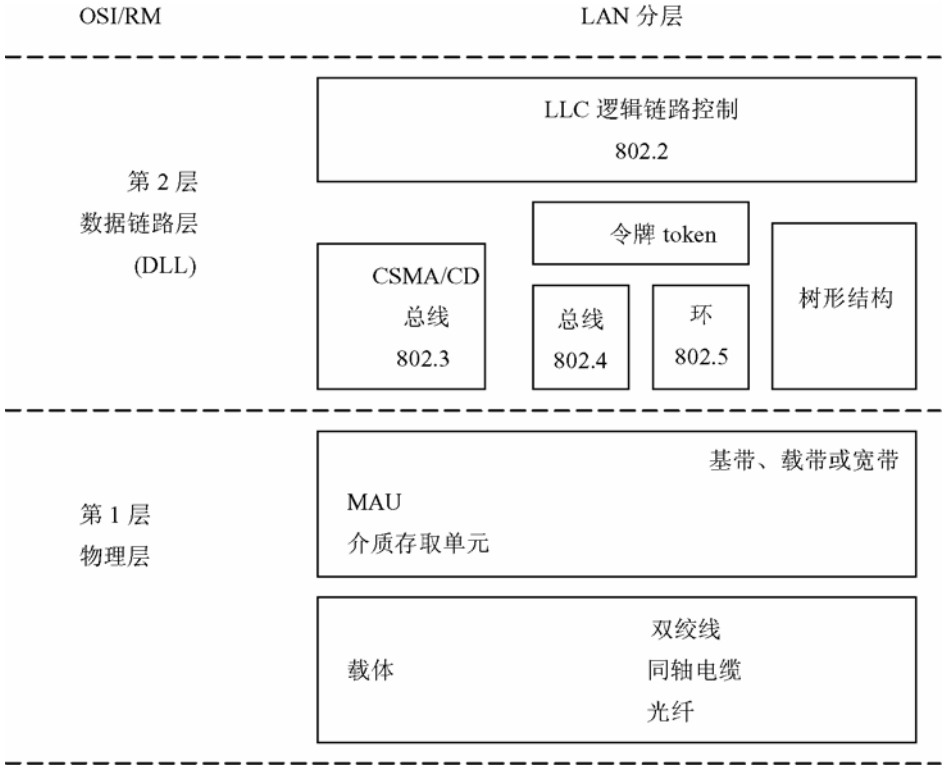


图 3.31　LAN 的分层结构

SIEMENS 公司开发了总线结构的 SINEC HI 工业 LAN，可用以连接成 FMC 和 FMS。SIN-EC H1 基于以太网技术，其 MAC 子层采用 CSMA/CD(802.3)，协议采用自行研制的自动化协议 SINEC Apl.0(Automation Protocol)。

为了将 SINUMERIK 850 CNC 系统连接至 SINEC Hl 网络，在 850 CNC 系统中插入专用的工厂总线接口板 CP535，通过 SINE CHl 网络，850 CNC 系统可以与主控计算机交换信息，传输零件程序，接收指令，传输各种状态信息等。主计算机通过网络向 850 CNC 系统传输零件程序的过程如图 3.32 所示。SIEMENS 公司的 850 CNC 系统是一个多微处理机的高档 CNC 系统。从结构上看 850 CNC 系统可以分成 3 个区域：NC 区、PLC 区和 COM 区。NC 区负责传统的数控功能，采用通道概念，可同时处理加工程序达 16 通道，其位置控制可达 24 轴和 6 个主轴。PLC 区是内装的 PLC。

信息帧长度是标识段、差错编码、有效数据长度之和，最短为 10B，最长为 234B。通过标识段可以确定所传信息的含义和内容。差错编码是说明出现信息负应答的原因，以编码方式出现。

此外 SINUMERIK 850 CNC 系统还可通过插入 AS512 接口板，采用 3964R 规程接入星形网络实现点-点通信。信息帧格式中有效数据最大为 128B。

MAP 是美国 GM 公司发起研究和开发的应用于工厂车间环境的通用网络通信标准，目

前已成为工厂自动化的通信标准，其特点如下。

(1) 采用适于工业环境的令牌通信网络访问方式，网络采用总线结构。

(2) 采用适应工业环境的技术措施，提高了工业环境应用的可靠性，如在物理层采用宽带技术及同轴电缆以抗电磁干扰，传输层采用高度可靠的传输服务。

(3) 具有较完善的明确而针对性强的高层协议以支持工业应用。

(4) 具有较完善的体系和互连技术，使网络易于配置和扩展。低层次应用可配 Mini MAP(只配置 DLL、物理层以及应用层)，高层次应用可配置完整的带 7 层协议的全 MAP。此外还规定了网络段、子网和各类网络互连技术。

(5) 针对 CIMS 的需要而开发。

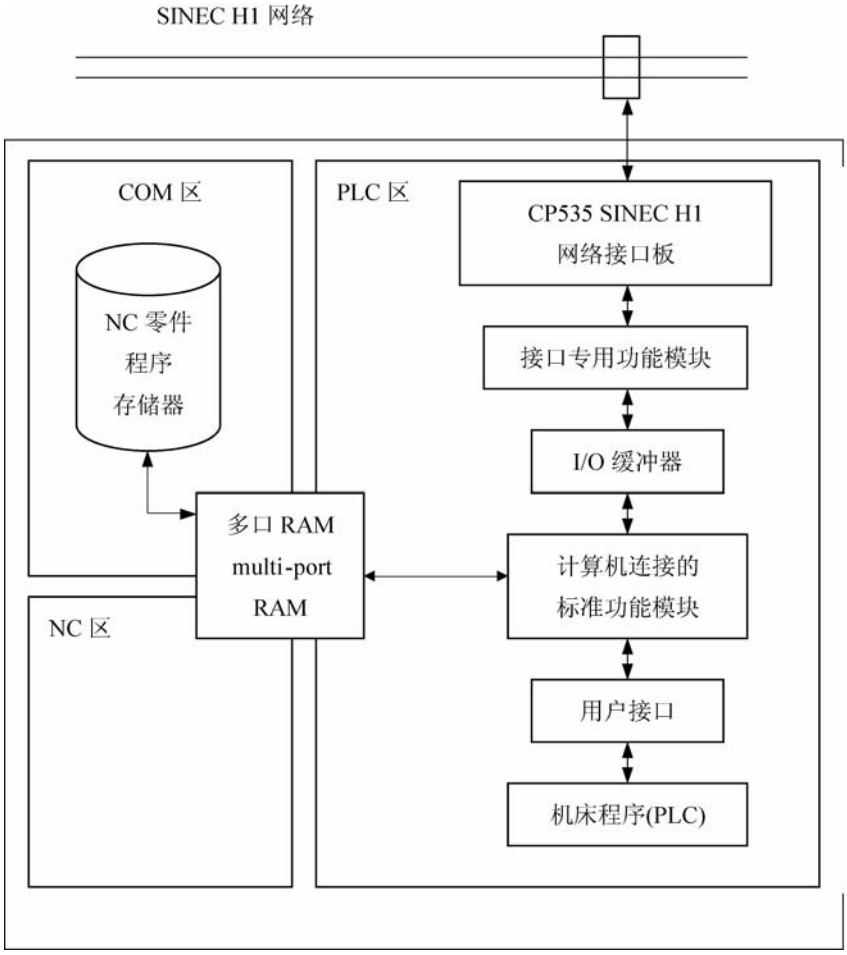


图 3.32　SINUMERIK 850 CNC 系统与 SINEC H1 网络的连接

3.6　CNC 装置的插补原理

所谓插补是指数据点密化的过程。在对数控系统输入有限坐标点(例如起点、终点)的情况下，计算机根据线段的特征(直线、圆弧、椭圆等)，运用一定的算法，自动地在有限

坐标点之间生成一系列的坐标数据，从而自动地对各坐标轴进行脉冲分配，完成整个线段的轨迹运行，使机床加工出所要求的轮廓曲线。大多数 CNC 系统一般都具有直线和圆弧插补功能。对于非直线或圆弧组成的轨迹，可以用小段的直线或圆弧来拟合。只有在某些要求较高的系统中，才具有抛物线、螺旋线插补功能。对于轮廓控制系统来说，插补是最重要的计算任务，插补程序的运行时间和计算精度影响着整个 CNC 系统的性能指标，可以说插补是整个 CNC 系统控制软件的核心。目前普遍应用的插补算法可分为两大类：一类是基准脉冲插补，另一类是数据采样插补。

3.6.1　基准脉冲插补

基准脉冲插补又称脉冲增量插补或行程标量插补。该插补算法主要为各坐标轴进行脉冲分配计算。其特点是每次插补的结束仅产生一个行程增量，以一个个脉冲的方式输出给步进电动机。基准脉冲插补在插补计算过程中不断向各个坐标发出相互协调的进给脉冲，驱动各坐标轴的电动机运动。在数控系统中，一个脉冲所产生的坐标轴位移量叫做脉冲当量，通常用 δ 表示。脉冲当量 δ 是脉冲分配的基本单位，按机床设计的加工精度选定。普通精度的机床取 $\delta = 0.01\text{mm}$，较精密的机床取 $\delta = 0.001\text{mm}$ 或 0.005mm。基准脉冲插补通常有以下几种方法：逐点比较法、数字积分法、比较积分法、矢量判断法、最小偏差法、数字脉冲乘法器法等。

基准脉冲插补适用于以步进电动机为驱动装置的开环数控系统。

1. 逐点比较法插补

逐点比较法的基本原理是被控对象在按要求的轨迹运动时，每走一步都要与规定的轨迹进行比较，由此结果决定下一步移动的方向。逐点比较法既可以作直线插补又可以作圆弧插补。这种算法的特点是，运算直观，插补误差小于一个脉冲当量，输出脉冲均匀，而且输出脉冲的速度变化小，调节方便，因此在两坐标数控机床中应用较为普遍。

1) 逐点比较法直线插补

(1) 逐点比较法的直线插补原理。

在图 3.33 所示 xy 平面第一象限内有直线段 OE 以原点为起点，以 $E(x_e, y_e)$ 为终点，直线方程为

$$\frac{y}{x} = \frac{y_e}{x_e}$$

改写为　$yx_e - xy_e = 0$

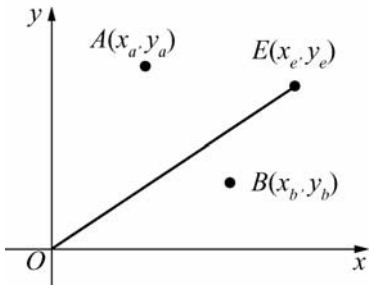


图 3.33　第一象限直线插补

如果加工轨迹脱离直线，则轨迹点的 x、y 坐标不满足上述直线方程。在第一象限中，对位于直线上方的点 A，则有

$$y_a x_e - x_a y_e > 0$$

对位于直线下方的点 B，则有

$$y_b x_e - x_b y_e < 0$$

因此可以取判别函数 F 来判断点与直线的相对位置，F 为

$$F = yx_e - xy_e$$

当加工点落在直线上时，$F=0$；

当加工点落在直线上方时，$F>0$；

当加工点落在直线下方时，$F<0$。

称 $F=yx_e-xy_e$ 为“直线插补偏差判别式”或“偏差判别函数”，F 的数值称为“偏差”。

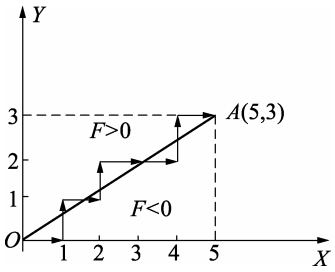


图 3.34　直线插补轨迹

例如图 3.34 待加工直线 OA，运用下述法则，根据偏差判别式，求得图中近似直线(由折线组成)。若刀具加工点的位置 $P(x_i,y_j)$ 处在直线上方(包括在直线上)，即满足 $F_{i,j}\geqslant 0$ 时向 x 轴方向发出一个正向运动的进给脉冲($+\Delta x$)，使刀具沿 x 轴坐标动一步(一个脉冲当量 δ)，逼近直线；若刀具加工点的位置 $P(x_i,y_j)$ 处在直线下方，即满足 $F_{i,j}<0$ 时，向 y 轴发出一个正向运动的进给脉冲($+\Delta y$)，使刀具沿 y 轴移动一步逼近直线。

但是按照上述法则进行运算判别，要求每次进行判别式 $F_{i,j}$ 运算——乘法与减法运算，这在具体电路或程序中实现不是最方便的。一个简便的方法是：每走一步到新加工点，加工偏差用前一点的加工偏差递推出来，这种方法称为“递推法”。

若 $F_{i,j}\geqslant 0$ 时，则向 x 轴发出一进给脉冲，刀具从这点向 x 方向迈进一步，新加工点 $P(x_{i+1},y_j)$ 的偏差值为

$$F_{i+1,j}=x_ey_j-(x_i+1)y_e=x_ey_j-x_iy_e-y_e=F_{i,j}-y_e$$

即
$$F_{i+1,j}=F_{i,j}-y_e \tag{3-1}$$

如果某一时刻加工点 $P(x_i,y_j)$ 的 $F_{i,j}<0$ 时，则向 y 轴发出一进给脉冲，刀具从这点向 y 方向迈进一步，新加工点 $P(x_i,y_{j+1})$ 的偏差值为

$$F_{i,j+1}=x_e(y_j+1)-x_iy_e=x_ey_j-x_iy_e+x_e=F_{i,j}+x_e$$

即
$$F_{i,j+1}=F_{i,j}+x_e \tag{3-2}$$

根据式(3-1)及式(3-2)可以看出，新加工点的偏差值完全可以用前一点的偏差递推出来。

(2) 节拍控制和运算程序流程图。

直线插补的节拍控制：综上所述，逐点比较法直线插补的全过程，每走一步要进行以下四个节拍。

第一节拍——偏差判别：判别刀具当前位置相对于给定轮廓的偏离情况，以此决定刀具移动方向；

第二节拍——进给：根据偏差判别结果，控制刀具相对于工件轮廓进给一步，即向给定的轮廓靠拢，减小偏差；

第三节拍——偏差计算：由于刀具进给已改变了位置，因此应计算出刀具当前位置的新偏差，为下一次判别作准备；

第四节拍——终点判别：判别刀具是否已到达被加工轮廓线段的终点。若已到达终点，则停止插补；若未到达终点，则继续插补。如此不断重复上述四个节拍就可以加工出所要求的轮廓。

(3) 不同象限的直线插补。

对第二象限，只要用$|x|$取代x，就可以变换到第一象限，至于输出驱动，应使x轴向步进电动机反向旋转,而y轴步进电动机仍为正向旋转。

同理，第三、四象限的直线也可以变换到第一象限。插补运算时，用$|x|$和$|y|$代替x、y。输出驱动则是：在第三象限，点在直线上方，向$-y$方向进给，点在直线下方，向$-x$方向进给；在第四象限，点在直线上方，向$-y$方向进给，点在直线下方，向$+x$方向进给。四个象限的进给方向如图 3.35 所示。

现将直线四种情况的偏差计算及进给方向列于表 3-8 中，其中用 L 表示直线，四个象限分别用数字 1、2、3、4 标注。

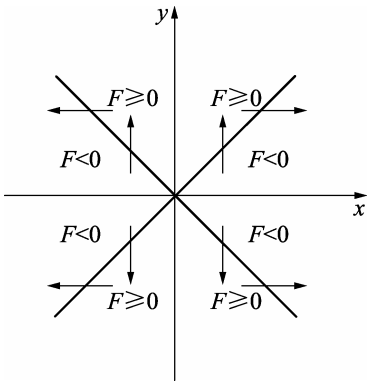


图 3.35　直线插补在四个象限中的进给方向

表 3-8　xy 平面内直线插补的进给与偏差计算

线　型	偏　差	偏 差 计 算	进给方向与坐标
L1，L4	$F\geqslant 0$	$F\leftarrow F-\lvert y_e\rvert$	$+\Delta x$
L2，L3	$F\geqslant 0$		$-\Delta x$
L1，L2	$F<0$	$F\leftarrow F-\lvert x_e\rvert$	$+\Delta y$
L3，L4	$F<0$		$-\Delta y$

(4) 直线插补举例。

【例 3.1】 设欲加工第一象限直线OE，终点坐标为$x_e=5$，$y_e=3$，试用逐点比较法插补该直线。

解： 总步数$n=5+3=8$

开始时刀具在直线起点，即在直线上，故$F_0=0$。表 3-9 列出了直线插补运算过程，插补轨迹如图 3.34 所示。

表 3-9　直线插补运算过程

序　号	偏差判别	进　给	偏差计算	终点判别
0	—	—	$F_0=0$	$n=5+3=8$
1	$F_0=0$	$+\Delta x$	$F_1=F_0-y_e=0-3=-3$	$n=8-1=7$
2	$F_1<0$	$+\Delta y$	$F_2=F_1+x_e=-3+5=2$	$n=7-1=6$
3	$F_2>0$	$+\Delta x$	$F_3=F_2-y_e=2-3=-1$	$n=6-1=5$
4	$F_3<0$	$+\Delta y$	$F_4=F_3+x_e=-1+5=4$	$n=5-1=4$
5	$F_4>0$	$+\Delta x$	$F_5=F_4-y_e=4-3=1$	$n=4-1=3$
6	$F_5>0$	$+\Delta x$	$F_6=F_5-y_e=1-3=-2$	$n=3-1=2$
7	$F_6<0$	$+\Delta y$	$F_7=F_6+x_e=-2+5=3$	$n=2-1=1$
8	$F_7>0$	$+\Delta x$	$F_8=F_7-y_e=3-3=0$	$n=1-1=0$

2) 逐点比较法圆弧插补

(1) 逐点比较法的圆弧插补原理。

加工一个圆弧，很容易令人想到用加工点到圆心的距离与该圆弧的名义半径相比较来反映加工偏差。设要加工图 3.36 所示的第一象限逆时针走向的圆弧 AB，半径为 R，以原点为圆心，起点坐标为 $A(x_0,y_0)$，在 xy 坐标平面第一象限中，点 $P(x_i,y_j)$ 的加工偏差有以下 3 种情况。

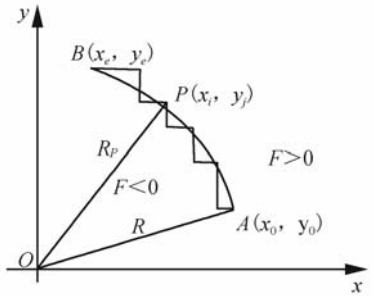


图 3.36　逐点比较法圆弧插补

若加工点 $P(x_i,y_j)$ 正好落在圆弧上，则下式成立，即

$$x_i^2+y_j^2=x_0^2+y_0^2=R^2$$

若加工点 $P(x_i,y_j)$ 落在圆弧外侧，则 $R_P>R$，即

$$x_i^2+y_j^2>x_0^2+y_0^2$$

若加工点 $P(x_i,y_j)$ 落在圆弧内侧，则 $R_P<R$，即

$$x_i^2+y_j^2<x_0^2+y_0^2$$

将上面各式分别改写为下列形式，即

$$(x_i^2-x_0^2)+(y_j^2-y_0^2)=0 \qquad \text{(在圆弧上)}$$

$$(x_i^2-x_0^2)+(y_j^2-y_0^2)>0 \qquad \text{(在圆弧外侧)}$$

$$(x_i^2-x_0^2)+(y_j^2-y_0^2)<0 \qquad \text{(在圆弧内侧)}$$

取加工偏差判别式为

$$F_{i,j}=(x_i^2-x_0^2)+(y_j^2-y_0^2)$$

若点 $P(x_i,y_j)$ 在圆弧外侧或圆弧上，即满足 $F_{i,j}\geqslant 0$ 的条件时，向 x 轴发出一负向运动的进给脉冲$(-\Delta x)$；若点 $P(x_i,y_j)$ 在圆弧内侧，即满足 $F_{i,j}<0$ 的条件时，则向 y 轴发出一正向运动的进给脉冲$(+\Delta y)$。为了简化偏差判别式的运算，仍用递推法来推算下一步新的加工偏差。

设加工点 $P(x_i,y_j)$ 在圆弧外侧或在圆弧上，则加工偏差为

$$F_{i,j}=(x_i^2-x_0^2)+(y_j^2-y_0^2)\geqslant 0$$

故 x 轴必须向负向进给一步$(-\Delta x)$，移到新的加工点 $P(x_{i+1},y_j)$，其加工偏差为

$$\begin{aligned}F_{i+1,j}&=(x_i-1)^2-x_0^2+y_j^2-y_0^2=x_i^2-2x_i+1+y_j^2-y_0^2-x_0^2\\&=F_{i,j}-2x_i+1\end{aligned}\tag{3-3}$$

设加工点 $P(x_i,y_j)$ 在圆弧的内侧，则 $F_{i,j}<0$。那么 y 轴须向正向进给一步$(+\Delta y)$，移到新的加工点 $P(x_i,y_{j+1})$，其加工偏差为

$$\begin{aligned}F_{i,j+1}&=x_i^2-x_0^2+(y_j+1)^2-y_0^2=x_i^2-x_0^2+y_j^2+2y_j+1-y_0^2\\&=F_{i,j}+2y_i+1\end{aligned}\tag{3-4}$$

根据式(3-3)及式(3-4)可以看出，新加工点的偏差值可以用前一点的偏差值递推出来。递推法把圆弧偏差运算式由平方运算化为加法和乘 2 运算，而对二进制来说，乘 2 运算是容易实现的。

(2) 圆弧插补的运算过程。

圆弧插补的运算过程与直线插补的过程基本一样，不同的是，圆弧插补时，动点坐标的绝对值总是一个增大，另一个减小。如对于第一象限逆圆来说，动点坐标的增量公式为

$$x_{i+1}=x_i-1 \qquad y_{j+1}=y_j+1$$

圆弧插补运算每进给一步也需要进行偏差判别、进给、偏差计算、终点判断四个工作节拍。运算中 F 寄存偏差值为 $F_{i,j}$；x 和 y 分别寄存 x 和 y 动点的坐标值，开始分别存放 x_0 和 y_0；n 寄存终点判别值：$n=|x_e-x_0|+|y_e-y_0|$

(3) 圆弧插补举例。

【例 3.2】 设有第一象限逆圆弧 AB，起点为 $A(5，0)$，终点为 $B(0，5)$，用逐点比较法插补 AB。

解： $n=|5-0|+|0-5|=10$

开始加工时刀具在起点，即在圆弧上，$F_0=0$。圆弧插补运算过程见表 3-10，插补轨迹如图 3.37 所示。

表 3-10　圆弧插补运算过程

序号	偏差判别	进给	偏差计算		终点判别
0			$F_0=0$	$x_0=5, y_0=0$	$n=10$
1	$F_0=0$	$-\Delta x$	$F_1=F_0-2x+1=0-2\times5+1=-9$	$x_1=4, y_1=0$	$n=10-1=9$
2	$F_1<0$	$+\Delta y$	$F_2=F_1+2y+1=-9+2\times0+1=-8$	$x_2=4, y_2=1$	$n=8$
3	$F_2<0$	$+\Delta y$	$F_3=-8+2\times1+1=-5$	$x_3=4, y_3=2$	$n=7$
4	$F_3<0$	$+\Delta y$	$F_4=-5+2\times2+1=0$	$x_4=4, y_4=3$	$n=6$
5	$F_4=0$	$-\Delta x$	$F_5=0-2\times4+1=-7$	$x_5=3, y_5=3$	$n=5$
6	$F_5<0$	$+\Delta y$	$F_6=-7+2\times3+1=0$	$x_6=3, y_6=4$	$n=4$
7	$F_6=0$	$-\Delta x$	$F_7=0-2\times3+1=-5$	$x_7=2, y_7=4$	$n=3$
8	$F_7<0$	$+\Delta y$	$F_8=-5+2\times4+1=4$	$x_8=2, y_8=5$	$n=2$
9	$F_8>0$	$-\Delta x$	$F_9=4-2\times2+1=1$	$x_9=1, y_9=5$	$n=1$
10	$F_9>0$	$-\Delta x$	$F_{10}=1-2\times1+1=0$	$x_{10}=0, y_{10}=5$	$n=0$

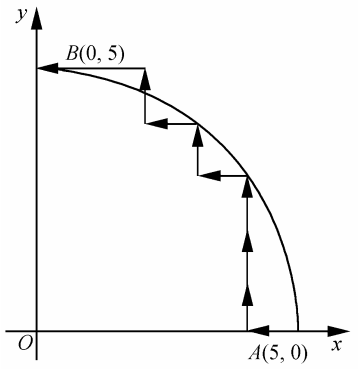


图 3.37　圆弧插补轨迹

(4) 圆弧插补的象限处理与坐标变换。

① 圆弧插补的象限处理。上面仅讨论了第一象限的逆圆弧插补，实际上圆弧所在的象限不同，顺逆不同，则插补公式和进给方向均不同。圆弧插补有八种情况，如图 3.38 所示。

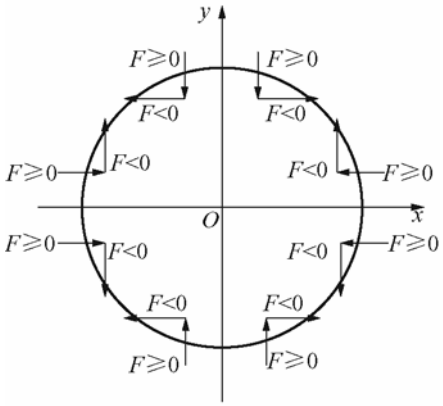


图 3.38　圆弧插补在四个象限中的进给方向

现将圆弧插补八种情况的偏差计算及进给方向列于表 3-11 中，其中用 R 表示圆弧，S 表示顺时针，N 表示逆时针，四个象限分别用数字 1、2、3、4 标注，例如 SR1 表示第一象限顺圆，NR3 表示第三象限逆圆。

表 3-11　*xy* 平面内圆弧插补的进给方向与偏差计算

线　型	偏　差	偏 差 计 算	进给方向与坐标
SR2，NR3	$F\geqslant 0$	$F\leftarrow F+2x+1$	$+\Delta x$
SR1，NR4	$F<0$	$x\leftarrow x+1$	
NR1，SR4	$F\geqslant 0$	$F\leftarrow F-2x+1$	$-\Delta x$
NR2，SR3	$F<0$	$x\leftarrow x-1$	
NR4，SR3	$F\geqslant 0$	$F\leftarrow F+2y+1$	$+\Delta y$
NR1，SR2	$F<0$	$y\leftarrow y+1$	
SR1，NR2	$F\geqslant 0$	$F\leftarrow F-2y+1$	$-\Delta y$
NR3，SR4	$F<0$	$y\leftarrow y-1$	

② 圆弧自动过象限。所谓圆弧自动过象限，是指圆弧的起点和终点不在同一象限内，如图 3.39 所示。为实现一个程序段的完整功能，需设置圆弧自动过象限功能。

要完成过象限功能，首先应判别何时过象限。过象限有一显著特点，就是过象限时刻正好是圆弧与坐标轴相交的时刻，因此在两个坐标值中必有一个为零，判断是否过象限只要检查是否有坐标值为零即可。

过象限后，圆弧线型也改变了，以图 3.39 为例，由 SR2 变为 SR1。但过象限时象限的转换是有一定规律的。当圆弧起点在第一象限时，逆时针圆弧过象限后转换顺序是 NR1→NR2→NR3→NR4→NR1，每过一次象限，象限顺序号加 1，当从第四象限向第一象限过象限时，象限顺序号从 4 变为 1；顺时针圆弧过象限的转换顺序是 SR1→SR4→SR3→SR2→

SR1，即每过一次象限，象限顺序号减 1，当从第一象限向第四象限过象限时，象限顺序号从 1 变为 4。

3) 坐标变换

前面所述的逐点比较法插补是在 *xy* 平面中讨论的。对于其他平面的插补可采用坐标变换方法实现。用 *y* 代替 *x*，*z* 代替 *y*，即可实现 *yz* 平面内的直线和圆弧插补；用 *z* 代替 *y* 而 *x* 坐标不变，就可以实现 *xz* 平面内的直线与圆弧插补。

2. 数字积分法插补

1) 数字积分法的基本原理

数字积分法又称数字微分分析法(Digital Differential Analyzer，DDA)。这种插补方法可以实现一次、二次、甚至高次曲线的插补，也可以实现多坐标联动控制。只要输入不多的几个数据，就能加工出圆弧等形状较为复杂的轮廓曲线。作直线插补时，脉冲分配也较均匀。

从几何概念上来说，函数 $y = f(t)$ 的积分运算就是求函数曲线所包围的面积 *S*(图 3.40)。

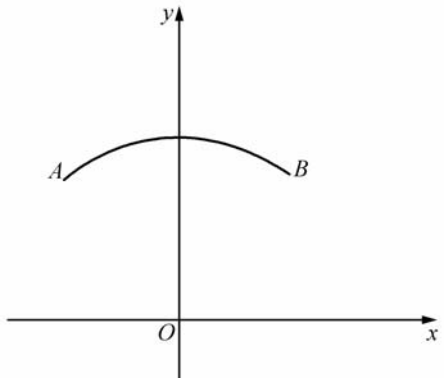


图 3.39　圆弧过象限

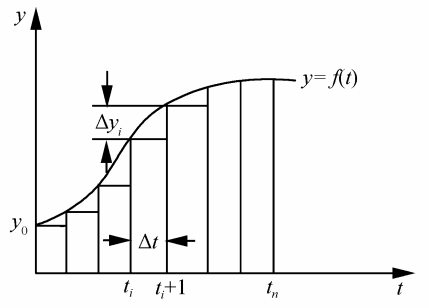


图 3.40　函数 $y = f(t)$ 的积分

$$S=\int_0^t y\mathrm{d}t \tag{3-5}$$

此面积可以看作是许多长方形小面积之和，长方形的宽为自变量 Δt，高为纵坐标 y_i，则

$$S=\int_0^t y\mathrm{d}t=\sum_{i=0}^{n} y_i\Delta t \tag{3-6}$$

这种近似积分法称为矩形积分法，该公式又称为矩形公式。数学运算时，如果取 Δt =1，即一个脉冲当量，式(3-6)可以简化为

$$S=\sum_{i=0}^{n} y_i \tag{3-7}$$

由此，函数的积分运算变成了变量求和运算。如果所选取的脉冲当量足够小，则用求和运算来代替积分运算所引起的误差一般不会超过允许的数值。

2) DDA 直线插补

(1) DDA 直线插补原理。

设 *xy* 平面内直线 *OA*，起点(0，0)，终点为(x_e，y_e)，如图 3.41 所示。若以匀速 *V* 沿 *OA* 位移，则 *V* 可分为动点在 *x* 轴和 *y* 轴方向的两个速度 V_x、V_y，根据前述积分原理计算公式，

在 x 轴和 y 轴方向上微小位移增量 Δx 、 Δy 应为

$$\begin{cases}\Delta x = V_x \Delta t \\ \Delta y = V_y \Delta t\end{cases} \tag{3-8}$$

对于直线函数来说， V_x 、 V_y ， V 和 L 满足下式

$$\begin{cases}\dfrac{V_x}{V} = \dfrac{x_e}{L} \\ \dfrac{V_y}{V} = \dfrac{y_e}{L}\end{cases}$$

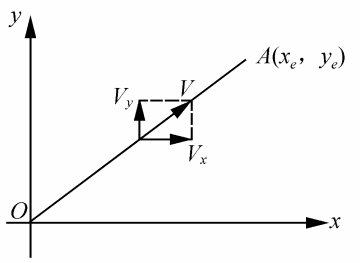


图 3.41　直线插补

从而有

$$\begin{cases}V_x = kx_e \\ V_y = ky_e\end{cases} \tag{3-9}$$

式中　$k = \dfrac{V}{L}$

因此坐标轴的位移增量为

$$\begin{cases}\Delta x = kx_e \Delta t \\ \Delta y = ky_e \Delta t\end{cases} \tag{3-10}$$

各坐标轴的位移量为

$$\begin{cases}x = \int_0^t kx_e \mathrm{d}t = k\sum_{i=1}^{n} x_e \Delta t \\ y = \int_0^t ky_e \mathrm{d}t = k\sum_{i=1}^{n} y_e \Delta t\end{cases} \tag{3-11}$$

所以，动点从原点走向终点的过程，可以看作是各坐标轴每经过一个单位时间间隔 Δt ，分别以增量 kx_e 、 ky_e 同时累加的过程。据此可以作出直线插补原理图，如图 3.42 所示。

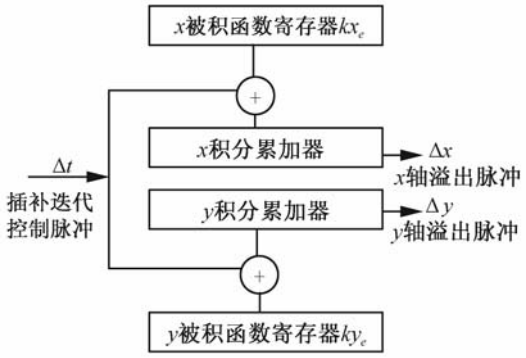


图 3.42　xy 平面直线插补原理图

平面直线插补器由两个数字积分器组成，每个坐标的积分器由累加器和被积函数寄存器组成。终点坐标值存在被积函数寄存器中， Δt 相当于插补控制脉冲源发出的控制信号。每发生一个插补迭代脉冲(即来一个 Δt)，被积函数 kx_e 和 ky_e 向各自的累加器里累加一次，累加的结果有无溢出脉冲 Δx (或 Δy)，取决于累加器的容量和 kx_e 或 ky_e 的大小。

假设经过 n 次累加后(取 Δt =1)， x 和 y 分别(或同时)到达终点(x_e ， y_e)，则式(3-12)成

立，即

$$\begin{cases} x=\sum_{i=1}^{n} kx_e\Delta t = kx_e n = x_e \\ y=\sum_{i=1}^{n} ky_e\Delta t = ky_e n = y_e \end{cases} \tag{3-12}$$

由此得到 $nk=1$，即 $n=1/k$。

式(3-12)表明比例常数 k 和累加(迭代)次数 n 的关系，由于 n 必须是整数，所以 k 一定是小数。

k 的选择主要考虑每次增量 Δx 或 Δy 不大于 1，以保证坐标轴上每次分配进给脉冲不超过一个，也就是说，要使式(3-13)成立，即

$$\begin{cases} \Delta x = kx_e < 1 \\ \Delta y = ky_e < 1 \end{cases} \tag{3-13}$$

若取寄存器位数为 N 位，则 x_e 及 y_e 的最大寄存器容量为 2^N-1，故有

$$\begin{cases} \Delta x = kx_e = k(2^N-1) < 1 \\ \Delta y = ky_e = k(2^N-1) < 1 \end{cases} \tag{3-14}$$

所以　　$k < \dfrac{1}{2^N-1}$

一般取　　$k < \dfrac{1}{2^N}$

可满足

$$\begin{cases} \Delta x = kx_e = \dfrac{2^N-1}{2^N} < 1 \\ \Delta y = ky_e = \dfrac{2^N-1}{2^N} < 1 \end{cases} \tag{3-15}$$

因此，累加次数 n 为

$$n=\frac{1}{k}=2^N$$

因为 $k=1/2^N$，对于一个二进制数来说，使 kx_e (或 ky_e)等于 x_e (或 y_e)乘以 $1/2^N$ 是很容易实现的，即 x_e (或 y_e)数字本身不变，只要把小数点左移 N 位即可。所以一个 N 位的寄存器存放 x_e (或 y_e)和存放 kx_e (或 ky_e)的数字是相同的，只是后者的小数点出现在最高位数 N 前面，其他没有差异。

DDA 直线插补的终点判别较简单，因为直线程序段需要进行 2^N 次累加运算，进行 2^N 次累加后就一定到达终点，故可由一个与积分器中寄存器容量相同的终点计数器 J_E 实现，其初值为零。每累加一次，J_E 加 1，当累加 2^N 次后，产生溢出，使 $J_E=0$，完成插补。

(2) DDA 直线插补软件流程。

用 DDA 进行插补时，x 和 y 两坐标可同时进给，即可同时送出 Δx、Δy 脉冲，同时每累加一次，要进行一次终点判断。软件流程如图 3.43 所示，其中 J_{Vx}、J_{Vy} 为积分函数寄存器，J_{Rx}、J_{Ry} 为余数寄存器，J_E 为终点计数器。

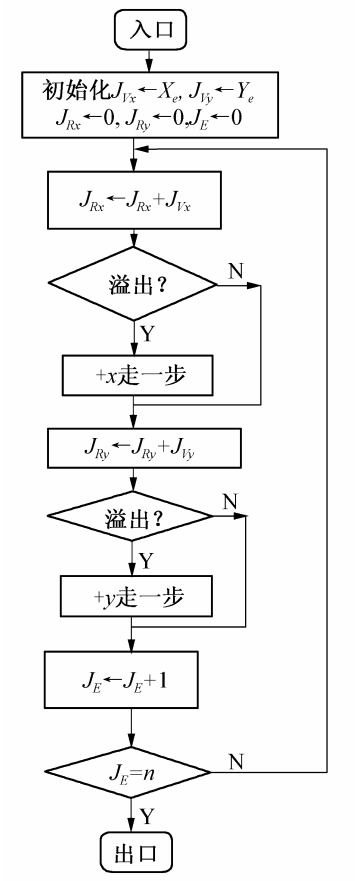


图 3.43　DDA 直线插补软件流程

(3) DDA 直线插补举例。

【例 3.3】 设有一直线 OA，起点在坐标原点，终点的坐标为(4，6)。试用 DDA 直线插补此直线。

解： J_{Vx} =4， J_{Vy} =6，选寄存器位数 N=3，则累加次数 $n=2^3=8$，运算过程见表 3−12，插补轨迹如图 3.44 所示。

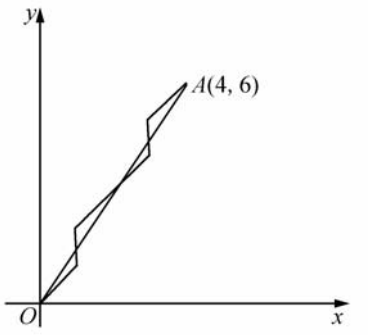


图 3.44　DDA 直线插补轨迹

表 3-12　DDA 直线插补运算过程

累加次数 n	x 积分器 $J_{Rx}+J_{Vx}$	溢 出 Δx	y 积分器 $J_{Ry}+J_{Vy}$	溢　出 Δy	终点判断 J_E
0	0	0	0	0	0
1	0+4=4	0	0+6=6	0	1
2	4+4=8+0	1	6+6=8+4	1	2
3	0+4=4	0	4+6=8+2	1	3
4	4+4=8+0	1	2+6=8+0	1	4
5	0+4=4	0	0+6=6	0	5
6	4+4=8+0	1	6+6=8+4	1	6
7	0+4=4	0	4+6=8+2	1	7
8	4+4=8+0	1	2+6=8+0	1	8

3) DDA 圆弧插补

(1) DDA 圆弧插补原理。

从上面的叙述可知，DDA 直线插补的物理意义是使动点沿速度矢量的方向前进，这同样适合于圆弧插补。

以第一象限为例，设圆弧 AE，半径为 R，起点 $A(x_0,\ y_0)$，终点 $E(x_e, y_e)$，$N(x_i, y_i)$ 为圆弧上的任意动点，动点移动速度为 v，分速度为 v_x 和 v_y，如图 3.45 所示。

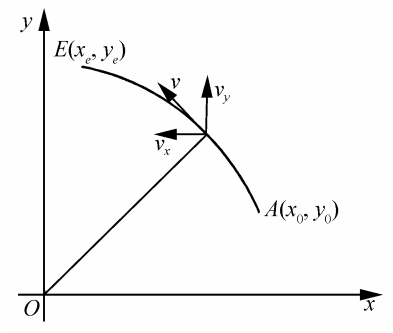


图 3.45　第一象限逆圆 DDA 插补

圆弧方程为

$$\begin{cases} x_i = R\cos\alpha \\ y_i = R\sin\alpha \end{cases} \tag{3-16}$$

动点 N 的分速度为

$$\begin{cases} v_x = \dfrac{\mathrm{d}x_i}{\mathrm{d}t} = -v\sin\alpha = -v\dfrac{y_i}{R} = -\left(\dfrac{v}{R}\right)y_i \\ v_y = \dfrac{\mathrm{d}y_i}{\mathrm{d}t} = v\cos\alpha = v\dfrac{x_i}{R} = \left(\dfrac{v}{R}\right)x_i \end{cases} \tag{3-17}$$

在单位时间 Δt 内，x、y 位移增量方程为

$$\begin{cases} \Delta x_i = v_x \Delta t = -\left(\dfrac{v}{R}\right) y_i \Delta t \\ \Delta y_i = v_y \Delta t = \left(\dfrac{v}{R}\right) x_i \Delta t \end{cases} \tag{3-18}$$

当 v 恒定不变时，则有

$$\frac{v}{R} = k$$

式中　k——比例常数。式(3-18)可写为

$$\begin{cases} \Delta x_i = -k y_i \Delta t \\ \Delta y_i = k x_i \Delta t \end{cases} \tag{3-19}$$

与 DDA 直线插补一样，取累加器容量为 2^N，$k = 1/2^N$，N 为累加器、寄存器的位数，则各坐标的位移量为

$$\begin{cases} x = \int_0^t -k y \mathrm{d}t = -\dfrac{1}{2^N} \sum_{i=1}^{n} y_i \Delta t \\ y = \int_0^t k x \mathrm{d}t = \dfrac{1}{2^N} \sum_{i=1}^{n} x_i \Delta t \end{cases} \tag{3-20}$$

由此可构成图 3.46 所示的 DDA 圆弧插补原理框图。

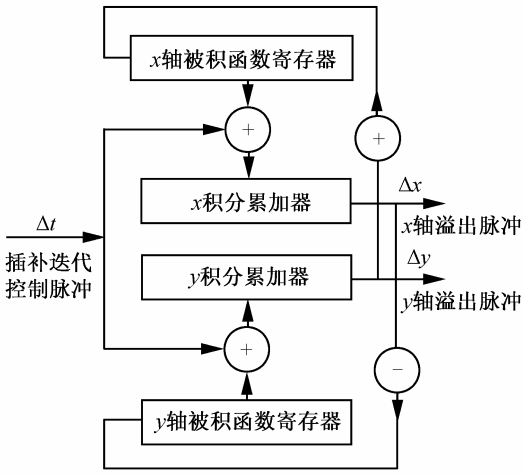


图 3.46　DDA 圆弧插补原理框图

DDA 圆弧插补与直线插补的主要区别有两点。一是坐标值 x、y 存入被积函数器 J_{Vx}、J_{Vy} 的对应关系与直线不同，即 x 不是存入 J_{Vx} 而是存入 J_{Vy}，y 不是存入 J_{Vy} 而是存入 J_{Vx}；二是 J_{Vx}、J_{Vy} 寄存器中寄存的数值与 DDA 直线插补有本质的区别：直线插补时，J_{Vx} (或 J_{Vy}) 寄存的是终点坐标 x_e (或 y_e)，是常数，而在 DDA 圆弧插补时寄存的是动点坐标，是变量。因此在插补过程中，必须根据动点位置的变化来改变 J_{Vx} 和 J_{Vy} 中的内容。在起点时，J_{Vx} 和 J_{Vy} 分别寄存起点坐标 y_0、x_0。对于第一象限逆圆来说，在插补过程中，J_{Ry} 每溢出一个 Δy 脉冲，J_{Vx} 应该加 1；J_{Rx} 每溢出一个 Δx 脉冲，J_{Vy} 应该减 1。对于其他各种情况的 DDA 圆

弧插补，J_{Vx} 和 J_{Vy} 是加 1 还是减 1，取决于动点坐标所在象限及圆弧走向。

DDA 圆弧插补时，由于 x、y 方向到达终点的时间不同，需对 x、y 两个坐标分别进行终点判断。实现这一点可利用两个终点计数器 J_{Ex} 和 J_{Ey}，把 x、y 坐标所需输出的脉冲数$|x_0-x_e|$、$|y_0-y_e|$分别存入这两个计数器中，x 或 y 积分累加器每输出一个脉冲，相应的减法计数器减 1，当某一个坐标的计数器为零时，说明该坐标已到达终点，停止该坐标的累加运算。当两个计数器均为零时，圆弧插补结束。

(2) DDA 圆弧插补举例。

【例 3.4】 设有第一象限逆圆弧 AB，起点 $A(5，0)$，终点 $E(0，5)$，设寄存器位数 N 为 3，试用 DDA 插补此圆弧。

解： $J_{Vx}=0$，$J_{Vy}=5$，寄存器容量为：$2^N=2^3=8$。运算过程见表 3-13，插补轨迹如图 3.47 所示。

表 3-13　DDA 圆弧插补运算过程

累加器 n	x 积分器				y 积分器			
	J_{Vx}	J_{Rx}	Δx	J_{Ex}	J_{Vy}	J_{Ry}	Δy	J_{Ey}
0	0	0	0	5	5	0	0	5
1	0	0	0	5	5	5	0	5
2	0	0	0	5	5	8+2	1	4
3	1	1	0	5	5	7	0	4
4	1	2	0	5	5	8+4	1	3
5	2	4	0	5	5	8+1	1	2
6	3	7	0	5	5	6	0	2
7	3	8+2	1	4	5	8+3	1	1
8	4	6	0	4	4	7	0	1
9	4	8+2	1	3	4	8+3	1	0
10	5	7	0	3	3	停	0	0
11	5	8+4	1	2	3	—	—	—
12	5	8+1	1	1	2	—	—	—
13	5	6	0	1	1	—	—	—
14	5	8+3	1	0	1	—	—	—
15	5	停	0	0	0	—	—	—

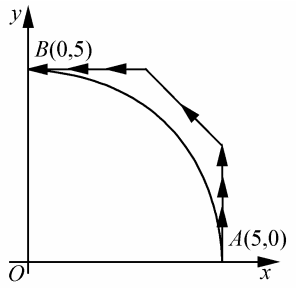


图 3.47　DDA 圆弧插补轨迹

(3) 不同象限的脉冲分配。

不同象限的顺圆、逆圆的 DDA 插补运算过程和原理框图与第一象限逆圆基本一致。其不同点在于，控制各坐标轴的 Δx 和 Δy 的进给脉冲分配方向不同，以及修改 J_{Vx} 和 J_{Vy} 内容时，是“+1”还是“−1”要由 y 和 x 坐标的增减而定。各种情况下的脉冲分配方向及 ±1 修正方式见表 3−14。

表 3−14　DDA 圆弧插补时不同象限的脉冲分配及坐标修正

	SR1	SR2	SR3	SR4	NR1	NR2	NR3	NR4
J_{Vx}	−1	+1	−1	+1	+1	−1	+1	−1
J_{Vy}	+1	−1	+1	−1	−1	+1	−1	+1
Δx	+	+	−	−	−	−	+	+
Δy	−	+	+	−	+	−	−	+

3.6.2　数据采样插补

随着数控系统中计算机的引入，插补实时性和计算复杂性之间的矛盾已不再那么突出了。因此，现代数控系统中就采用了结合计算机采样思想的数据采样插补法。

数据采样插补法实际上是一种粗插补过程，它所产生的微小线段仍然比较大，必须进一步对其密化(即精插补)。粗插补算法较复杂，大多用高级语言编制；精插补算法较简单，多用汇编语言或硬件插补器实现。

粗插补产生微小线段的周期称为插补周期 T_s，精插补的周期称为位置控制周期 T_c，它是伺服位置环的采样控制周期。对于特定的系统，T_s、T_c 是两个固定不变的时间参数，且 $T_s=nT_c$，n 为自然数。

T_s 对系统稳定性没有影响，但对被加工轮廓的轨迹精度有影响，T_s 越大，则产生的微小线段越长($\Delta L=FT_s$，F 为程编速度)，插补计算误差就愈大。而 T_c 对系统稳定性和被加工轮廓的轨迹精度都有影响。

可见，为减小插补误差，应尽量减小 T_s，但 T_s 若太小，则 CPU 可能来不及进行位置计算、显示、监控、I/O 处理等 CNC 任务，T_s 必须大于插补运行时间和完成其他相关任务所需时间之和。目前，T_s 一般在 10ms 左右，如美国 A−B 公司的 7360CNC 系统，T_s=10.24ms；德国 SIEMENS 公司的 System—7CNC 系统，T_s=8ms。

随着计算机速度的提高，T_s 有减小的趋势。

T_c 选择一般有两种情况：$T_c=T_s$ (7360CNC 系统)，$T_c=0.5T_s$ (System—7CNC 系统)。

以上是数据采样法的基本原理，下面讨论插补具体轮廓线时的情形。

1. 直线插补

图 3.48 为第一象限直线，现分析其插补规律。

刀尖从点 N_{i-1} 移动到点 N_i，沿轮廓直线方向的增量为 $dL=F\times T_s$，沿 X 向的增量为 dX，沿 Y 向的增量为 dY，它们之间的关系是

$dX=dL\times X_e/L$，$dY=dL\times Y_e/L$

式中　L——轮廓直线的长度，它满足等式：$L^2=X_e^2+Y_e^2$。

N_i 点的动态坐标可以用前一个点的坐标动态表示：$X=X+\mathrm{d}X$，$Y=Y+\mathrm{d}Y$。

由此，可设计第一象限数据采样直线插补软件流程图，如图 3.49 所示。

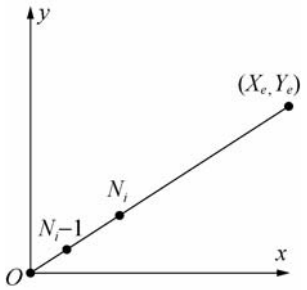


图 3.48　第一象限直线

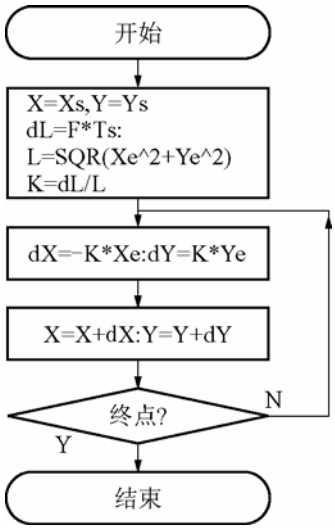


图 3.49　第一象限数据采样直线插补软件流程图

2. 圆弧插补

数据采样插补法圆弧插补的基本思路是在满足加工精度的前提下，用切线、弦线或割线来代替圆弧实现进给，即用直线逼近圆弧。

1) 切线法(一阶 DDA 算法)

图 3.50 为第一象限逆圆，现分析其切线法插补规律。

设当前点在 N_{i-1}，按切线方向前进一个粗插补周期后到达 N_i 点，走过的粗插补单位长度为 $\mathrm{d}L=F\times T_s$，其中：F 为进给速度，粗插补周期为 T_s。

显然，$X_{i-1}=R\cos\psi_{i-1}$　　(R 为圆弧半径)

$$Y_{i-1}=R\sin\psi_{i-1}$$

$$X_i=R\cos(\psi_{i-1}+\theta)$$

$$Y_i=R\sin(\psi_{i-1}+\theta)$$

从而

$$X_i=X_{i-1}\cos\theta-Y_{i-1}\sin\theta$$

$$Y_i=Y_{i-1}\cos\theta+X_{i-1}\sin\theta$$

因 θ 很小，所以

$$\sin\theta=\theta-\theta_3/3!+\theta_5/5!-\cdots$$

$$\cos\theta=1-\theta_2/2!+\theta_4/4!-\cdots$$

取一阶近似(一阶 DDA 名称的由来)，得

$$\sin\theta=\theta=R\times T_s/R=K$$

$$\cos\theta=1$$

因此

$$X_i=X_{i-1}-KY_{i-1}$$

$$Y_i=Y_{i-1}+KX_{i-1}$$
$$X_i=X_i-X_{i-1}=-KY_{i-1}$$
$$Y_i=Y_i-Y_{i-1}=KX_{i-1}$$

由此，可设计第一象限切线法数据采样圆弧插补软件流程图，如图 3.51 所示。

本法与脉冲增量方式 DDA 插补在本质上是相同的，前者是后者的推广。由于误差太大，在实际的 CNC 系统中并不使用。

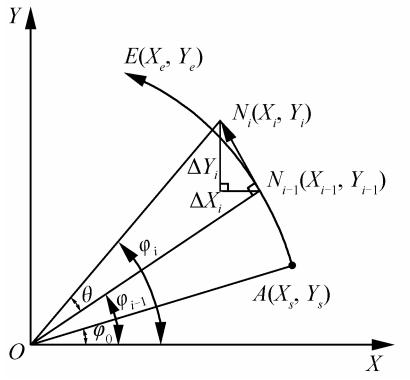


图 3.50　切线法逆圆插补示意图

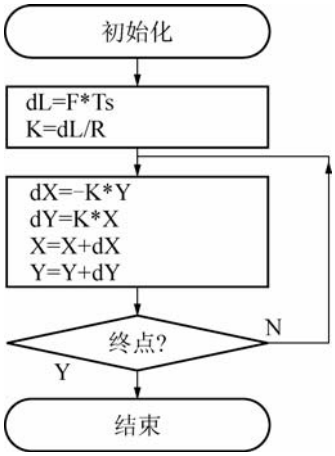


图 3.51　切线法圆弧插补软件流程图

2) 弦线法(直接函数算法)

图 3.52 为第一象限顺圆，弦线法插补规律(请参考有关书籍自行分析)如下。分区情况如图 3.53 所示。由此，不难得到其软件流程图 3.54。弦线法的精度比切线法高。

I 区：

$$\Delta X_i=(Y_{i-1}+\Delta Y_{i-1}\times 0.5)\times FT_s/R$$
$$\Delta Y_i=-Y_{i-1}+(R^2-(X_{i-1}+\Delta X_i)^2)^{1/2}$$
$$X_i=X_{i-1}+\Delta X_i$$
$$Y_i=Y_{i-1}+\Delta Y_i$$

II 区：

$$\Delta Y_i=(X_{i-1}+\Delta X_{i-1}\times 0.5)\times FT_s/R$$
$$\Delta X_i=-X_{i-1}+(R^2-(Y_{i-1}+\Delta Y_i)^2)^{1/2}$$
$$X_i=X_{i-1}+\Delta X_i$$
$$Y_i=Y_{i-1}+\Delta Y_i$$

III 区：

$$\Delta X_i=(Y_{i-1}+Y_{i-1}\times 0.5)\times FT_s/R$$
$$\Delta Y_i=-Y_{i-1}-(R^2-(X_{i-1}+X_i)^2)^{1/2}$$
$$X_i=X_{i-1}+X_i$$
$$Y_i=Y_{i-1}+Y_i$$

IV 区：

$$\Delta Y_i=(X_{i-1}+\Delta X_{i-1}\times 0.5)\times FT_s/R$$

$$\Delta X_i=-X_{i-1}-(R^2-(Y_{i-1}+Y_i)^2)^{1/2}$$

$$X_i=X_{i-1}+X_i$$

$$Y_i=Y_{i-1}+Y_i$$

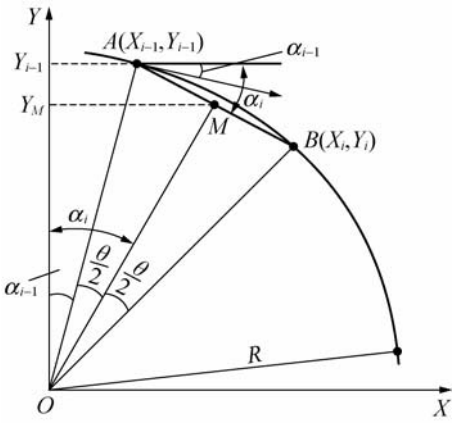


图 3.52　弦线法顺圆插补示意图

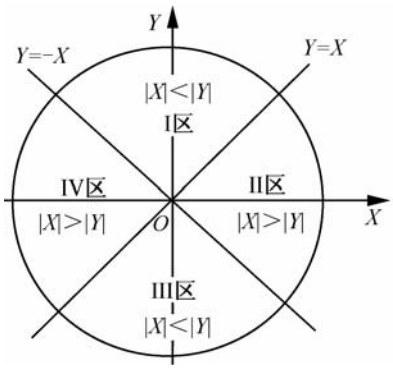


图 3.53　分区图

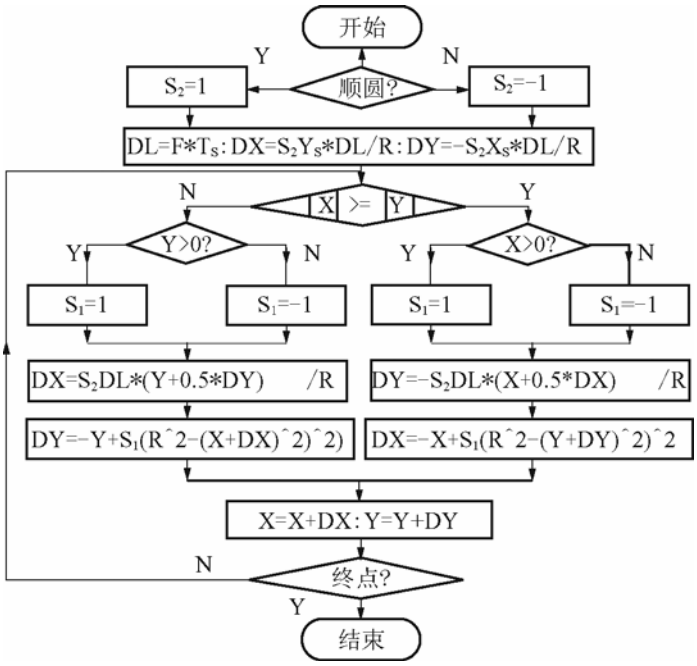


图 3.54　弦线法圆弧插补软件流程图

3) 割线法(二阶 DDA 算法)

一阶算法时曾得到　$\sin\theta=\theta-\theta_3/3!+\theta_5/5!-\cdots$

$$\cos\theta=1-\theta_2/2!+\theta_4/4!-\cdots$$

现在取二阶近似，即为二阶 DDA 算法：

$$\sin\theta=\theta-\theta_3/3!\approx\theta$$

$$\cos\theta=1-\theta_2/2!\approx1-0.5\times\theta_2$$

图 3.55 逆圆第一象限插补时，可计算得到

$$\Delta X_i = K \times Y_{i-1} - 0.5 \times X_{i-1} K^2$$

$$\Delta Y_i = -K \times X_{i-1} - 0.5 \times Y_{i-1} K^2$$

$$X_i = X_{i-1} + X_i$$

$$Y_i = Y_{i-1} + Y_i$$

按此编制软件流程图 3.56。割线法的精度比弦线法高。

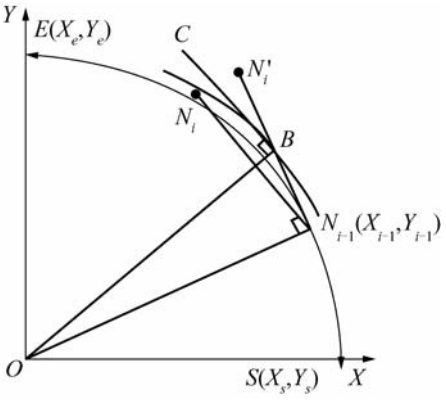


图 3.55　割线法逆圆插补示意图

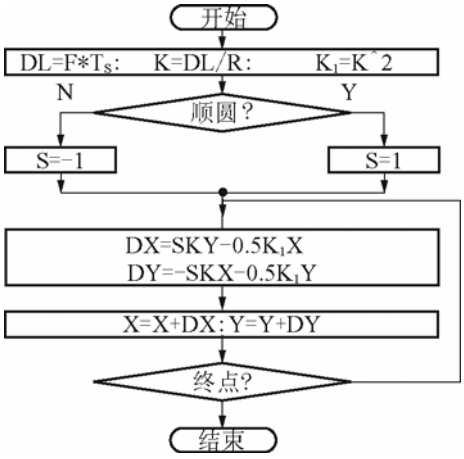


图 3.56　割线法圆弧插补软件流程图

3.6.3　刀具补偿功能

1. 刀具补偿的基本原理

在轮廓加工中，由于刀具总有一定的半径(如铣刀半径或线切割机的钼丝半径)，刀具中心的运动轨迹并不等于所要加工零件的实际轮廓。也就是说，数控机床进行轮廓加工时，必须考虑刀具半径。如图 3.57 所示，在进行外轮廓加工时，刀具中心需要偏移零件的外轮廓面一个半径值。这种偏移习惯上称为刀具半径补偿。

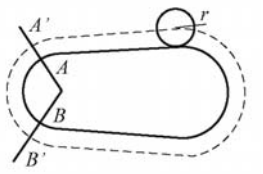


图 3.57　刀具中心的偏移

需要指出的是，刀具半径的补偿通常不是由程序编制人员来完成的，程序编制人员只是按零件的加工轮廓编制程序，同时用指令 G41、G42、G40 告诉 CNC 系统刀具是沿零件内轮廓还是外轮廓运动。实际的刀具半径补偿是在 CNC 系统内部由计算机自动完成的。CNC 系统根据零件轮廓尺寸(直线或圆弧以及其起点和终点)和刀具运动的方向指令(G41、G42、G40)，以及实际加工中所用的刀具半径值自动地完成刀具半径补偿计算。

根据 ISO 标准，当刀具中心轨迹在编程轨迹(零件轮廓)前进方向右边时称为右刀具补偿，简称右刀补，用 G42 表示；反之，则称为左刀补，用 G41 表示；当不需要进行刀具补偿时用 G40 表示。

加工中心和数控车床在换刀后还需考虑刀具长度补偿。因此刀具补偿有刀具半径补偿和刀具长度补偿两部分计算。刀具长度的补偿计算较简单，本节着重讨论刀具半径补偿。

在零件轮廓加工过程中，刀具半径补偿的执行过程分为以下三步。

(1) 刀具补偿建立。指刀具从起点出发沿直线接近加工零件，依据 G41 或 G42 使刀具中心在原来的编程轨迹的基础上伸长或缩短一个刀具半径值，即刀具中心从与编程轨迹重合过渡到与编程轨迹偏离一个刀具半径值，如图 3.58 所示。

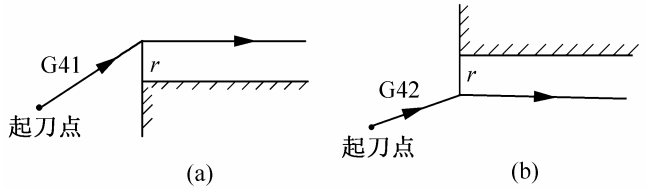


图 3.58　建立刀具补偿

(2) 刀具补偿进行。刀具补偿指令是模态指令，一旦刀具补偿建立后一直有效，直至刀具补偿撤销。在刀具补偿进行期间，刀具中心轨迹始终偏离编程轨迹一个刀具半径值的距离。在轨迹转接处，采用圆弧过渡或直线过渡。

(3) 刀具补偿撤销。指刀具撤离工件，回到起刀点。与刀具补偿建立时相似，刀具中心轨迹从与编程轨迹相距一个刀具半径值过渡到与编程轨迹重合。刀具补偿撤销用 G40 指令。

刀具半径补偿仅在指定的 2D 坐标平面内进行。而平面由 G 指令代码 G17(*xy* 平面)、G18(*zx* 平面)、G19(*yz* 平面)确定。刀具半径值则由刀具号 H(D)确定。

2. 刀具半径补偿计算

刀具半径补偿计算就是要根据零件尺寸和刀具半径计算出刀具中心的运动轨迹。对于一般的 CNC 系统，其所能实现的轮廓控制仅限于直线和圆弧。对直线而言，刀具半径补偿后的刀具中心运动轨迹是一与原直线相平行的直线，因此直线轨迹的刀具半径补偿计算只需计算出刀具中心轨迹的起点和终点坐标。对于圆弧而言，刀具半径补偿后的刀具中心运动轨迹是一与原圆弧同心的圆弧。因此圆弧的刀具半径补偿计算只需计算出刀具补偿后圆弧起点和终点的坐标值以及刀具补偿后的圆弧半径值。有了这些数据，轨迹控制(直线或圆弧插补)就能够实施。

3. C 功能刀具半径补偿计算

1) C 功能刀具半径补偿的基本概念

极坐标法、r^2 法、矢量判断法等一般刀具半径补偿方法(也称 B 刀具补偿)，只能计算出直线或圆弧终点的刀具中心值，而对于两个程序段之间在刀具补偿后可能出现的一些特殊情况没有给予考虑。

实际上，当程序编制人员按零件的轮廓编制程序时，各程序段之间是连续过渡的，没有间断点，也没有重合段。但是，当进行了刀具半径补偿(B 刀具补偿)后，在两个程序段之间的刀具中心轨迹就可能会出现间断点和交叉点。如图 3.59 所示，粗线为编程轮廓，当加工外轮廓时，会出现间断 $A' \sim B'$；当加工内轮廓时，会出现交叉点 C''。

对于只有 B 刀具补偿的 CNC 系统，编程人员必须事先估计出在进行刀具补偿后可能出现的间断点和交叉点的情况，并进行人为的处理。如遇到间断点时，可以在两个间断点之间增加一个半径为刀具半径的过渡圆弧段 $A'B'$。遇到交叉点时，事先在两个程序段之间

增加一个过渡圆弧段 *AB*，圆弧的半径必须大于所使用的刀具的半径。显然，这种仅有 B 刀具补偿功能的 CNC 系统对编程人员是很不方便的。

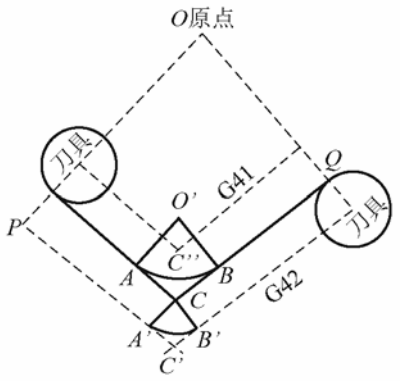


图 3.59　B 刀具补偿的交叉点和间断点

但是，最早也是最容易为人们所想到的刀具半径补偿方法，就是由数控系统根据和实际轮廓完全一样的编程轨迹，直接算出刀具中心轨迹的转接交点 *C′* 和 *C″*，然后再对原来的程序轨迹作伸长或缩短的修正。

以前，*C′* 和 *C″* 点不易求得，主要是由于 NC 装置的运算速度和硬件结构的限制。随着 CNC 技术的发展，系统工作方式、运算速度及存储容量都有了很大的改进和增加，采用直线或圆弧过渡，直接求出刀具中心轨迹交点的刀具半径补偿方法已经能够实现了，这种方法被称为 C 功能刀具半径补偿(简称 C 刀具补偿)。

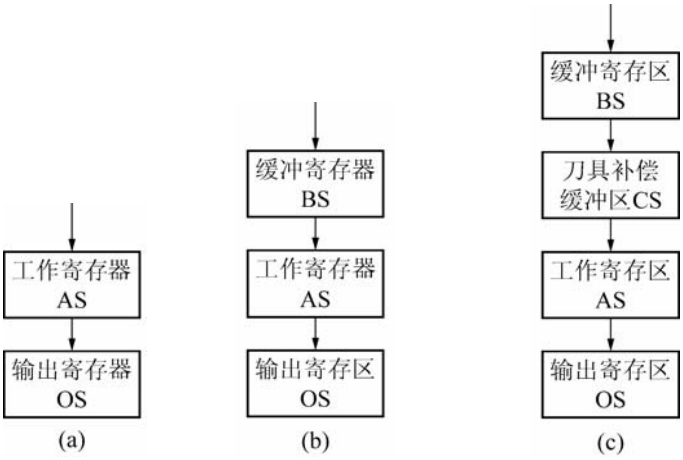
2) C 刀具补偿的基本设计思想

B 刀具补偿对编程限制的主要原因是在确定刀具中心轨迹时，都采用了读一段、算一段、再走一段的控制方法。这样，就无法预计到由于刀具半径所造成的下一段加工轨迹对本段加工轨迹的影响。于是，对于给定的加工轮廓轨迹来说，当加工内轮廓时，为了避免刀具干涉，合理地选择刀具的半径以及在相邻加工轨迹转接处选用恰当的过渡圆弧等问题，就不得不靠程序员自己来处理。

为了解决下一段加工轨迹对本段加工轨迹的影响，需要在计算完本段轨迹后，提前将下一段程序读入，然后根据它们之间转接的具体情况，再对本段的轨迹作适当的修正，得到正确的本段加工轨迹。

图 3.60(a)是普通 NC 系统的工作方法，程序轨迹作为输入数据送到工作寄存器 AS 后，由运算器进行刀具补偿运算，运算结果送输出寄存器 OS，直接作为伺服系统的控制信号。图 3.60(b)是改进后的 NC 系统的工作方法。与图 3.60(a)相比，增加了一组数据输入的缓冲器 BS，节省了数据读入时间。往往是 AS 中存放着正在加工的程序段信息，而 BS 中已经存放了下一段所要加工的信息。图 3.60(c)是在 CNC 系统中采用 C 刀具补偿方法的原理框图。与从前方法不同的是，CNC 装置内部又设置了一个刀具补偿缓冲区 CS。零件程序的输入参数在 BS、CS、AS 中的存放格式是完全一样的。当某一程序在 BS、CS 和 AS 中被传送时，它的具体参数是不变的。这主要是为了输出显示的需要。实际上，BS、CS 和 AS 各自包括一个计算区域，编程轨迹的计算及刀具补偿修正计算都是在这些计算区域中进行

的。当固定不变的程序输入参数在 BS、CS 和 AS 间传送时，对应的计算区域的内容也就跟着一起传送。因此，也可以认为这些计算区域对应的是 BS、CS 和 AS 区域的一部分。



(a)一般方法　　(b)改进后的方法　　(c)采取 C 刀具补偿的方法

图 3.60　几种数控系统的工作流程

这样，在系统启动后，第一段程序先被读入 BS，在 BS 中算得的第一段编程轨迹被送到 CS 暂存后，又将第二段程序读入 BS，算出第二段的编程轨迹。接着，对第一、第二两段编程轨迹的连接方式进行判别，根据判别结果，再对 CS 中的第一段编程轨迹作相应的修正。修正结束后，顺序地将修正后的第一段编程轨迹由 CS 送到 AS，第二段编程轨迹由 BS 送入 CS。随后，由 CPU 将 AS 中的内容送到 OS 进行插补运算，运算结果送伺服驱动装置予以执行。当修正了的第一段编程轨迹开始被执行后，利用插补间隙，CPU 又命令第三段程序读入 BS，随后，又根据 BS、CS 中的第三、第二段编程轨迹的连接方式，对 CS 中的第二段编程轨迹进行修正。依此进行，可见在刀具补偿工作状态，CNC 装置内部总是同时存有三个程序段的信息。

在具体实现时，为了便于交点的计算以及对各种编程情况进行综合分析，从中找出规律，必须将 C 刀具补偿方法所有的编程输入轨迹都当作矢量来看待。

显然，直线段本身就是一个矢量。而圆弧在这里意味着要将起点、终点的半径及起点到终点的弦长都看作矢量，零件刀具半径也作为矢量看待。所谓刀具半径矢量，是指在加工过程中，始终垂直于编程轨迹，大小等于刀具半径值，方向指向刀具中心的一个矢量。在直线加工时，刀具半径矢量始终垂直于刀具移动方向。在圆弧加工时，刀具半径矢量始终垂直于编程圆弧的瞬时切点的切线，它的方向是一直在改变的。

3) 刀具长度补偿的计算

所谓刀具长度补偿，就是把工件轮廓按刀具长度在坐标轴(车床为 x 、z 轴)上的补偿分量平移。对于每一把刀具来说，其长度是一定的，它们在某种刀具夹座上的安装位置也是一定的。因此在加工前可预先分别测得装在刀架上的刀具长度在 x 和 z 方向的分量，即 Δx 刀偏和 Δz 刀偏。通过数控装置的手动数据输入工作方式将 Δx 和 Δz 输入到 CNC 装置，从 CNC 装置的刀具补偿表中调出刀偏值进行计算。数控车床需对 x 轴、 z 轴进行刀具长度补偿计算，数控铣床只需对 z 轴进行刀具长度补偿计算。

3.6.4　进给速度与加/减速控制

在高速运动阶段，为了保证机床在启动或停止时不产生冲击、失步、超程或振荡，数控系统需要对机床的进给速度进行加减速控制；在加工过程中，为了保证加工质量，在进给速度发生突变时必须对送到进给电动机的脉冲频率或电压进行加减速控制。在启动或速度突然升高时，应保证加在伺服电动机上的进给脉冲频率或电压逐渐增大；当速度突然降低时，应保证加在伺服电动机上的进给脉冲频率或电压逐渐减小。

1. 进给速度控制

脉冲增量插补和数据采样插补由于计算方法不同，其进给速度控制方法也有所不同。

1) 脉冲增量插补算法的进给速度控制

脉冲增量插补的输出形式是脉冲，其频率与进给速度成正比。因此可通过控制插补运算的频率来控制进给速度。常用的方法有：软件延时法和中断控制法。

(1) 软件延时法。根据编程进给速度，可以求出要求的进给脉冲频率，从而得到两次插补运算之间的时间间隔 t，它必须大于 CPU 执行插补程序的时间 $t_{程}$，t 与 $t_{程}$ 之差即为应调节的时间 $t_{延}$，可以编写一个延时子程序来改变进给速度。

【例 3.5】 设某数控装置的脉冲当量 $\delta = 0.01\text{mm}$，插补程序运行时间 $t_{程} = 0.1\text{ms}$，若编程进给速度 $F = 300\text{mm/min}$，求调节时间 $t_{延}$。

解： 由 $v = 60\delta f$ 得

$$f = \frac{v}{60\delta} = \left(\frac{300}{60\times 0.01}\right)\text{Hz} = 500\text{Hz}$$

则插补时间间隔

$$t = \frac{1}{f} = 0.002\text{s} = 2\text{ms}$$

调节时间　　$t_{延} = t - t_{程}$ =(2−0.1)ms=1.9ms

用软件编一程序实现上述延时，即可达到进给速度控制的目的。

(2) 中断控制法。由进给速度计算出定时器/计数器(CTC)的定时时间常数，以控制 CPU 中断。定时器每申请一次中断，CPU 执行一次中断服务程序，并在中断服务程序中完成一次插补运算并发出进给脉冲。如此连续进行，直至插补完毕。

这种方法使得 CPU 可以在两个进给脉冲时间间隔内做其他工作，如输入、译码、显示等。进给脉冲频率由定时器时间常数决定。时间常数的大小决定了插补运算的频率，也决定了进给脉冲的输出频率。该方法速度控制比较精确，控制速度不会因为不同计算机主频的不同而改变，所以在很多数控系统中被广泛应用。

2) 数据采样插补算法的进给速度控制

数据采样插补根据编程进给速度计算出一个插补周期内合成速度方向上的进给量。

$$f_s = \frac{FTK}{60\times 1000} \tag{3-21}$$

式中　f_s ——系统在稳定进给状态下的插补进给量，称为稳定速度(mm/min)；

F ——编程进给速度(mm/min)；

T ——插补周期(ms)；

K ——速度系数，包括快速倍率、切削进给倍率等。

为了调速方便，设置了速度系数 K 来反映速度倍率的调节范围，通常 K 取 0～200%，当中断服务程序扫描到面板上倍率开关的状态时，给 K 设置相应参数，从而对数控装置面板手动速度调节作出正确响应。

2. 加/减速控制

在 CNC 装置中，加/减速控制多数都采用软件来实现，这给系统带来了较大的灵活性。这种用软件实现的加/减速控制可以放在插补前进行，也可以放在插补后进行，放在插补前的加/减速控制称为前加/减速控制，放在插补后的加减速控制称为后加/减速控制。

前加/减速控制，仅对编程进给速度 F 指令进行控制，其优点是不会影响实际插补输出的位置精度，其缺点是需要预测减速点，而这个减速点要根据实际刀具位置与程序段终点之间的距离来确定，预测工作需要完成的计算量较大。

后加/减速控制与前加/减速相反，它是对各运动轴分别进行加/减速控制，这种加/减速控制不需要专门预测减速点，而是在插补输出为零时才开始减速，经过一定的延时逐渐靠近程序段终点。该方法的缺点是，由于它是对各运动轴分别进行控制，所以在加/减速控制以后，实际的各坐标轴的合成位置就可能不准确。但这种影响仅在加/减速过程中才会有，当系统进入匀速状态时，这种影响就不存在了。

1) 前加/减速控制

(1) 稳定速度和瞬时速度。所谓稳定速度，就是系统处于稳定进给状态时，一个插补周期内的进给量 f_s，可用式(3-21)表示。通过该计算公式将编程速度指令或快速进给速度 F 转换成了每个插补周期的进给量，并包括了速率倍率调整的因素在内。如果计算出的稳定速度超过系统允许的最大速度(由参数设定)，取最大速度为稳定速度。

所谓瞬时速度，指系统在每个插补周期内的进给量。当系统处于稳定进给状态时，瞬时速度 f_i 等于稳定速度 f_s，当系统处于加速(或减速)状态时，$f_i < f_s$ (或 $f_i > f_s$)。

(2) 线性加/减速处理。当机床启动、停止或在切削加工过程中改变进给速度时，数控系统自动进行线性加、减速处理。加、减速速率分为进给和切削进给两种，它们必须作为机床的参数预先设置好。设进给速度为 F (mm/min)，加速到 F 所需的时间为 t (ms)，则加速度 a 按式(3-22)计算，即

$$a = \frac{1}{60\times1000}\times\frac{F}{t} = 1.67\times10^{-5}\frac{F}{t}(\text{mm/ms}^2) \tag{3-22}$$

① 加速处理：系统每插补一次，都应进行稳定速度、瞬时速度的计算和加/减速处理。当计算出的稳定速度 f_s' 大于原来的稳定速度 f_s 时，需进行加速处理。每加速一次，瞬时速度为

$$f_{i+1} = f_i + aT \tag{3-23}$$

式中　T ——插补周期。

新的瞬时速度 f_{i+1} 作为插补进给量参与插补运算，对各坐标轴进行分配，使坐标轴运动直至新的稳定速度为止。

② 减速处理：每进行一次插补计算，系统都要进行终点判别，计算出刀具距终点的瞬时距离 s_i，并判别是否已到达减速区域 s。若 $s_i \leqslant s$，表示已到达减速点，则要开始减速。在稳定速度 f_s 和设定的加速度 a 确定后，可由式(3-24)决定减速区域，即

$$s = \frac{f_s^2}{2a} + \Delta s \tag{3-24}$$

式中　Δs ——提前量，可作为参数预先设置好。若不需要提前一段距离开始减速，则可取 Δs =0，每减速一次后，新的瞬时速度为

$$f_{i+1} = f_i - aT \tag{3-25}$$

新的瞬时速度 f_{i+1} 作为插补进给量参与插补运算，控制各坐标轴移动，直至减速到新的稳定速度或减速到零。

(3) 终点判别处理。每进行一次插补计算，系统都要计算 s_i，然后进行终点判别。若即将到达终点，就设置相应标志；若本程序段要减速，则要在到达减速区域时设减速标志，并开始减速处理。终点判别计算分为直线和圆弧插补两个方面。

① 直线插补：如图 3.61 所示，设刀具沿直线 OE 运动，E 为直线程序段终点，N 为某一瞬时点。在插补计算时，已计算出 x 轴和 y 轴插补进给量 Δx 和 Δy，所以 N 点的瞬时坐标可由上一插补点的坐标 x_{i-1} 和 y_{i-1} 求得

$$\begin{cases} x_i = x_{i-1} + \Delta x \\ y_i = y_{i-1} + \Delta y \end{cases} \tag{3-26}$$

瞬时点离终点 E 的距离 s_i 为

$$s_i = NE = \sqrt{(x_e - x_i)^2 + (y_e - y_i)^2} \tag{3-27}$$

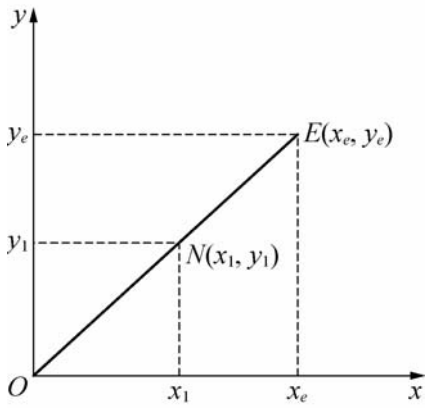


图 3.61　直线插补终点判别

② 圆弧插补：如图 3.62 所示，设刀具沿圆弧 AE 作顺时针运动，N 为某一瞬间插补点，其坐标值 x_i 和 y_i 已在插补计算中求出。N 离开终点 E 的距离 s_i 为

$$s_i = \sqrt{(x_e - x_i)^2 + (y_e - y_i)^2} \tag{3-28}$$

终点判别的原理框图如图 3.63 所示。

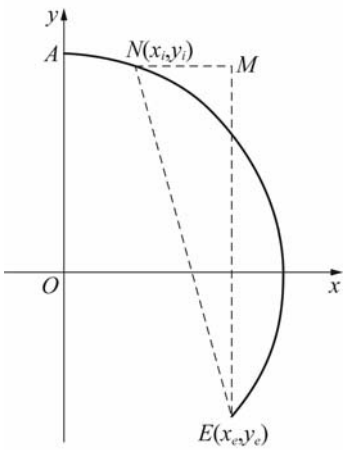


图 3.62　圆弧插补终点判别

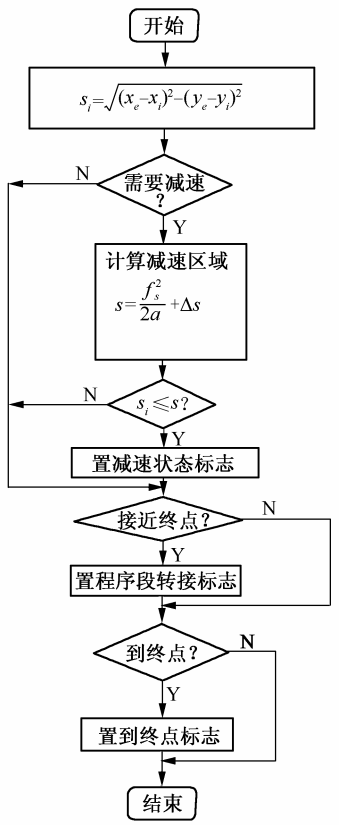


图 3.63　终点判别原理框图

2) 后加/减速控制

后加/减速控制主要有指数加/减速控制算法和直线加/减速控制算法。

(1) 指数加/减速控制算法　在切削进给或手动进给时，跟踪响应要求较高，一般采用指数加/减速控制，将速度突变处理成速度随时间指数规律上升或下降，如图 3.64 所示。

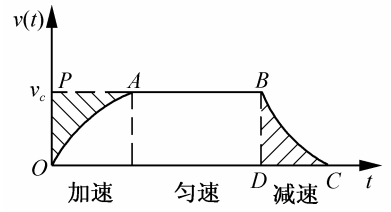


图 3.64　指数加/减速

指数加/减速控制时速度与时间的关系如下。

加速时为　$v(t)=v_c(1-\mathrm{e}^{-\frac{t}{T}})$　(3-29)

匀速时为　$v(t)=v_c$　(3-30)

减速时为　$v(t)=v_c\mathrm{e}^{-\frac{t}{T}}$　(3-31)

式中　T ——时间常数；

v_c ——稳定速度。

上述过程可以用累加公式来实现，即

$$E_i = \sum_{k=0}^{i-1}(v_c - v_k)\Delta t \tag{3-32}$$

$$v_i = E_i \frac{1}{T} \tag{3-33}$$

下面结合指数加/减速控制算法的原理图 3.65 来说明公式的含义。Δt 为采样周期，它在算法中的作用是对加/减速运算进行控制，即每个采样周期进行一次加/减速运算。误差寄存器 E 的作用是对每个采样周期的输入速度 v_c 与输出速度 v 之差 $E = v_c - v$ 进行累加。累加结果，一方面保存在误差寄存器 E 中，另一方面与 $1/T$ 相乘，乘积作为当前采样周期加/减速控制的输出 v 。同时 v 又反馈到输入端，准备在下一个采样周期中重复以上过程。公式中的 E_i 和 v_i 分别为第 i 个采样周期误差寄存器 E 中的值和输出速度值，迭代初值分别为 $E_0 = 0$ 和 v_0 。

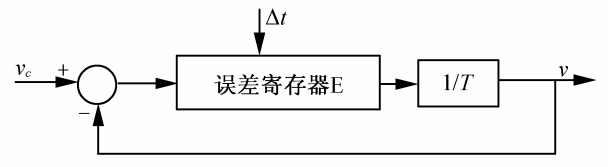


图 3.65　指数加/减速控制算法的原理图

下面来证明式(3-32)和式(3-33)实现的指数加/减速控制算法。

当 Δt 足够小时，式(3-32)和式(3-33)可写成

$$E(t) = \int_0^t [(v_c - v(t))]\mathrm{d}t \tag{3-34}$$

$$v(t) = \frac{1}{T}E(t) \tag{3-35}$$

对式(3-34)和式(3-35)分别求导得

$$\frac{\mathrm{d}E(t)}{\mathrm{d}t} = v_c - v(t) \tag{3-36}$$

$$\frac{\mathrm{dv(t)}}{\mathrm{dt}} = \frac{1}{T}\frac{\mathrm{d}E(t)}{\mathrm{d}t} \tag{3-37}$$

将式(3-36)和式(3-37)合并得

$$T\frac{\mathrm{d}v(t)}{\mathrm{d}t} = v_c - v(t)$$

或

$$\frac{\mathrm{d}v(t)}{v_c - v(t)} = \frac{\mathrm{d}t}{T} \tag{3-38}$$

式(3-38)两端积分后得

$$\frac{v_c - v(t)}{v_c - v(0)} = \mathrm{e}^{-\frac{1}{T}} \tag{3-39}$$

加速时 $v(0) = 0$ ，故

$$v(t) = v_c(1 - \mathrm{e}^{-\frac{t}{T}}) \tag{3-40}$$

匀速时 $t\to\infty$，故　　$v(t)=v_c$　　(3-41)

减速时 $v(0)=0$，且输入为零，由式(3-36)得

$$\frac{\mathrm{d}E(t)}{\mathrm{d}t}=v_c-v(t)=-v(t)\tag{3-42}$$

代入式(3-37)得

$$\frac{\mathrm{d}v(t)}{\mathrm{d}t}=-\frac{v(t)}{T}\tag{3-43}$$

即

$$\frac{\mathrm{d}v(t)}{v(t)}=-\frac{\mathrm{d}t}{T}\tag{3-44}$$

两端积分后　　$v(t)=v_0\mathrm{e}^{-\frac{t}{T}}=v_c\mathrm{e}^{-\frac{t}{T}}$　　(3-45)

上面的推导过程证明了用式(3-32)和式(3-33)可以实现指数加/减速控制。下面进一步导出其实用的指数加/减速算法公式。

参照式(3-32)和式(3-33)，令

$$\Delta S_i=v_i\Delta t$$

$$\Delta S_c=v_c\Delta t$$

则 ΔS_c 为每个采样周期加/减速的输入位置增量，即每个插补周期内粗插补计算出的坐标位置增量值。S_i 为第 i 个插补周期加/减速输出的位置增量值。

将以上两式代入式(3-32)和式(3-33)得

$$E_i=\sum_{k=0}^{i-1}(\Delta S_c-\Delta S_i)=E_{i-1}+(\Delta S_c-\Delta S_{i-1})\tag{3-46}$$

$$\Delta S_i=E_i\frac{1}{T}\qquad(\text{取 }\Delta t=1)\tag{3-47}$$

以上两组公式就是数字增量式指数加/减速实用迭代公式。

(2) 直线加/减速控制算法。快速进给时速度变化范围大，要求平稳性好，一般采用直线加/减速控制，使速度突然升高时，沿一定斜率的直线上升，速度突然降低时，沿一定斜率的直线下降，如图 3.66 所示的速度变化曲线 $OABC$ 。

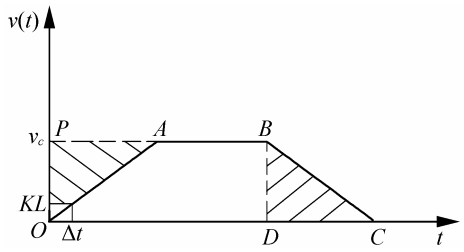


图 3.66　直线加/减速

直线加/减速控制分以下五个过程。

① 加速过程：若输入速度 v_c 与上一个采样周期的输出速度 v_{i-1} 之差大于一个常值 KL，即 $v_c-v_{i-1}>KL$，则必须进行加速控制，使本次采样周期的输出速度增加 KL 值，即

$$v_i=v_{i-1}+KL\tag{3-48}$$

式中　KL ——加/减速的速度阶跃因子。

显然在加速过程中，输出速度 v_i 沿斜率为 $K'=\dfrac{KL}{\Delta t}$ 的直线上升。这里 Δt 为采样周期。

② 加速过渡过程：当输入速度 v_c 与上次采样周期的输出速度 v_{i-1} 之差满足式(3-49)时

$$0 < v_c - v_{i-1} < KL \tag{3-49}$$

说明速度已上升至接近匀速。这时可改变本次采样周期的输出速度 v_i，使之与输入速度相等，即

$$v_i = v_c \tag{3-50}$$

经过这个过程后，系统进入稳定速度状态。

③ 匀速过程：在这个过程中，输出速度保持不变，即

$$v_i = v_{i-1} \tag{3-51}$$

④ 减速过渡过程：当输入速度 v_c 与上一个采样周期的输出速度 v_{i-1} 之差满足式(3-52)时

$$0 < v_{i-1} - v_c < KL \tag{3-52}$$

说明应开始减速处理。改变本次采样周期的输出速度 v_i，使之减小到与输入速度 v_c 相等，即

$$v_i = v_c \tag{3-53}$$

⑤ 减速过程：若输入速度 v_c 小于一个采样周期的输出速度 v_{i-1}，但其差值大于 KL 值时，即

$$v_{i-1} - v_c > KL \tag{3-54}$$

则要进行减速控制，使本次采样周期的输出速度 v_i 减小一个 KL 值，即

$$v_i = v_{i-1} - KL \tag{3-55}$$

显然在减速过程中，输出速度沿斜率为 $K'=-\dfrac{KL}{\Delta t}$ 的直线下降。

后加/减速控制的关键是加速过程和减速过程的对称性，即在加速过程中输入到加减速控制器的总进给量必须等于该加/减速控制器减速过程中实际输出的进给量之和，以保证系统不产生失步和超程。因此，对于指数加/减速和直线加/减速，必须使图 3.64 和图 3.66 中区域 OPA 的面积等于区域 DBC 的面积。为此，用位置误差累加寄存器 E 来记录由于加速延时而失去的进给量之和。当发现剩下的总进给量小于 E 误差中的值时，即开始减速，在减速过程中，又将误差寄存器 E 中保存的值按一定规律(指数或直线)逐渐放出，以保证在加/减速过程全程结束时，机床到达指定的位置。由此可见，后加/减速控制不需要预测减速点，而是通过误差寄存器的进给量来保证加/减速过程的对称性，使加/减速过程中的两块阴影面积相等。

3.7　典型数控系统分析实例

3.7.1　概述

在国外数控机床上配置的数控系统较多的是日本 FANUC、德国 SIEMENS、美国 A-B 等公司的产品。

FANUC 公司 1972 年由富士通机械制造株式会社独立出来，1976 年研制成功数控系统

5，1979 年推出数控系统 6，1980 年在数控系统 6 的基础上向低档和高档扩展，研制成数控系统 3 和数控系统 9；1984 年又推出新型产品数控系统 10、11、12，该产品在硬件方面作了较大的改进，采用了大规模集成电路，32 位高速处理器，光导传输，磁泡存储器等技术，提高了抗干扰性和可靠性。该系统在工厂自动化 DNC 方面能够实现主计算机与机床、工作台、机械手、自动导引小车等之间各种数据的双向传递，充实了专用宏功能、自动计划功能、自动刀具补偿功能、刀具寿命管理、彩色图形显示等，PC 的编程不仅可以使用梯形图语言，还可以使用 Pascal 语言，便于用户厂家自己开发软件；1985 年推出数控系统 0，它的主要特点是体积小、价格低，适用于机电一体化的小型机床，主要特点有：彩色图形显示、会话菜单式编程、专用宏功能、多种语言(汉、英、德、法)显示、录返(play back)功能等；1987 年研制成功数控系统 15，称之为划时代的智能型 AI-CNC 系统，它应用于 MMC(Man Machine Control)、CNC、MPC(Programmable Machine Control)的新概念，采用了高速度、高精度、高效率加工的数字伺服单元和数字主轴单元及纯电子式绝对位置检测器，还增加了 MAP、窗口功能等。

SIEMENS 公司是生产数控系统的著名厂家，SINUMERIK 数控装置，从最简单到最复杂的都具有如下优点：一切为操作者着想的通道结构；可按图样直接编程，操作方便。20 世纪 70 年代，SIEMENS 公司生产了 SINUMERIK−6T、6M、7T、7M 系统；80 年代初期推出了 8T、8M、8MC 系统；80 年代后期又推出 850T、850M、850/880 系统；以后相继推出了 810T、810M、810D、840C、840D 等系统。SINUMERIK 数控系统技术构思一致，其区别在于它们的应用对象不同。

我国的数控系统在“八五”攻关后，基本上形成了两种平台，开发出了四个基本系统，其中华中 I 型和中华 I 型是将数控专用集成电路嵌入通用 PC 而构成的单机数控系统，而航天 I 型和蓝天 I 型是将 PC 嵌入到数控系统之中构成的多机数控系统，形成典型的前后台结构。

3.7.2 FANUC 数控系统 6

FANUC 数控系统 6，是具备一般功能和部分高级功能的中级型 CNC 系统，分成 6M 与 6T 两个品种，它们的硬件部分是通用的，只变更其部分软件来获得不同功能，6T 适用于车床、6M 适用于铣床和加工中心。

1. FANUC 数控系统 6 的特点

(1) 可靠性高。由于使用了大容量磁泡存储器、大规模专用集成电路和高速微处理器，而且在制造过程中采用严格筛选，使用自动检测器进行自动检测以及环境试验等措施，大大提高了电路的可靠性。为了提高动作的可靠性，该系统还备有数据奇偶校验、程序对比校验和时序校验等校验功能。

(2) 适用于高精度、高效率加工，最小脉冲当量为 1μm 或 0.001in，具有提高加工精度的间隙补偿和丝杠螺距误差补偿功能；还有自动监视和自动补偿伺服系统漂移的功能；有自动监视误差寄存器的静态误差与动态误差的功能；备有高效率的随机选择自动换刀机构和纯电气式的主轴快速定向控制系统；有控制主轴电动机转速、确保切削速度不变的恒速切削控制；还有为缩短加工时间的许多固定循环。

(3) 容易编程。备有由用户自己制作特有变量型子程序的用户宏功能；有不必预先计算就能够直接指定刀尖设定点的刀尖半径补偿功能；能用图样标记半径值直接指令的圆弧补偿；还有便于某些交换工作台机械编程的返回第 2 参考点功能，只需指定精加工尺寸就可以自动进行粗切削、精切削的复合型固定循环。

(4) 容易维护保养，现场调试方便。能够使用微处理器进行 CNC 系统内部监视，能判断 160 种(6M)或 130 种(6T)停车故障；确认 CNC 系统的所有输入/输出开关信号的显示值或输出值，能发现数控柜和机床强电柜的故障；间隙补偿量、螺距误差补偿量、伺服系统时间常数等参数可简单地用 MDI 输入设定。

(5) 操作性好，使用安全。大容量磁泡存储器，具有最大 320m 控制带的存储、编辑功能，用程序号检索可以调出所需程序进行加工，具有相当于 DNC 的功能；使用 CRT 显示器能确认程序内容、偏移量的设定与变更和各种动作的状态，加上手动操作，大大提高了操作性能；使用带小数点的数字表示尺寸或位置可以防止眼误；具备便于工程管理、刀具寿命管理的累计使用时间显示功能等；为了保护所存入的程序，使用带“锁”的键输入；为防止刀具与工件冲撞，使用了存储式限位开关，设置刀具禁入区域。

2. FANUC 数控系统 6 的控制功能

(1) 控制轴。6M 的控制轴是 *X*、*Y*、*Z* 三轴，还可以增加选用功能控制第四轴(*A*、*B*、*C* 中的任何一个)；6T 的控制轴是 *X*、*Z* 两轴。

(2) 联动轴数。6M 可进行 *X*、*Y* 或 *Z*、*X* 或 *Y*、*Z* 两轴联动(快速进给、切削进给和手动进给)，还可增加选用功能作 *X*、*Y*、*Z* 三轴联动；6T 能进行 *X*、*Z* 两轴联动。

(3) 定位(G00、G60)。用 G00 指令能够进行快速定位，同时进行精度校验；6M 用 G60 指令能保证机床单方向定位，提高定位精度。

(4) 插补(G01、G02、G03)。直线插补用 G01 指令，圆弧插补用 G02、G03 指令。

(5) 螺旋面切削(G02、G03)。6M 能同时进行任意两轴圆弧插补与另一轴直线插补的三轴联动，刀具作螺旋切削运动。6T 无此功能。

3. FANUC 数控系统 6 的硬件

FANUC 数控系统 6 使用高速微处理器 8086 作为 CPU，主时钟频率为 5MHz，硬件结构如图 3.67 所示。系统中有容量为 28KB 的 RAM，用来存放中间结果和数据。全部零件加工程序和系统的工作参数存放在磁泡存储器中，磁泡存储器最多可存储 320m 长的控制带。磁泡存储器和 RAM 之间的数据交换采用 DMA 方式，系统 6 使用一块专用集成电路 MB14231 作为 DMA 控制器。

为了提高系统的可靠性，28KB 的 RAM 读写时要进行奇偶校验，相应地有一套奇偶校验电路。系统有 208KB 的 EPROM，用来存放控制软件。系统 6 使用了非屏蔽中断和 8 级可屏蔽中断，8 级可屏蔽中断用中断控制器 8259 进行管理。8259 对多级中断进行优先排队，并产生中断矢量。系统 6 使用了一个定时器 8253，8253 有 3 个通道，分别产生 2 ms、8 ms 的时钟和利用 RS232C 接口进行串行通信的时钟。因为 CNC 系统有许多位操作，需要读取指定单元的某一位时，不致影响各单元的其他位，这类位操作如果用程序实现的话，要占用 CPU 较多的时间，而且速度也比较慢。为了提高位操作的速度，FANUC 公司开发了专用的位操作芯片 MB14233。

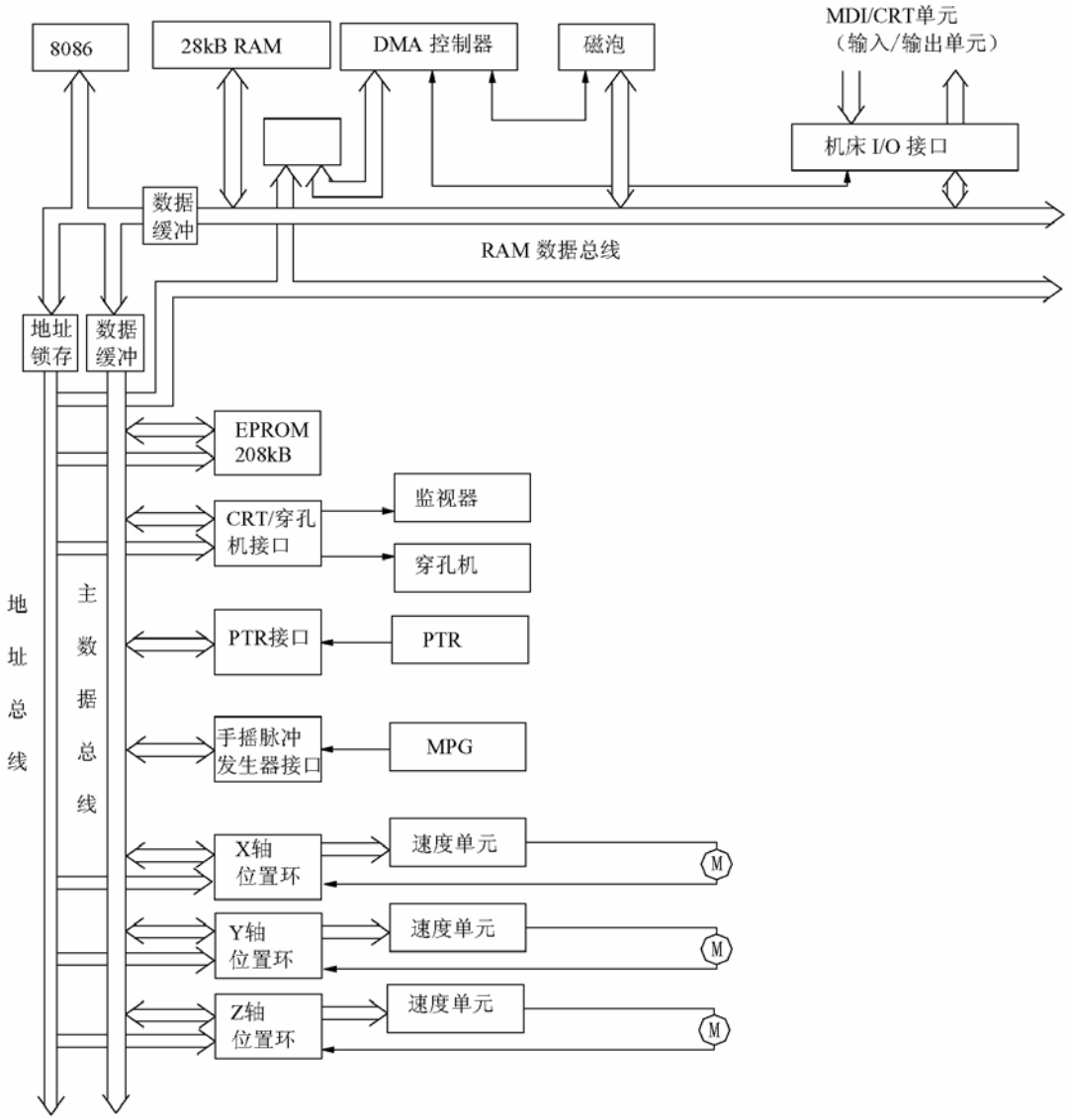


图 3.67　FANUC 数控系统 6 的硬件结构

控制软件正常执行时，插补程序的执行时间小于 8ms，由于某种原因当程序执行发生故障时，插补程序的时间将大于 8ms，通过系统 6 专门设计的看门狗电路产生非屏蔽中断，当 CPU 接到非屏蔽中断请求时，作紧急处理。

4. FANUC 数控系统 6 的控制软件

与多数 CNC 系统的工作流程相同，系统 6 也经历输入零件程序、译码、数据处理、进给速度控制、插补运算、伺服输出等工作阶段。为了提高刀具运动的线速度，节省 CPU 的时间，系统 6 也采用粗插补和精插补相结合的方法，粗插补由软件完成，周期为 8ms，硬件完成精插补。

系统 6 是一个大的多重中断系统，共有 10 级中断优先级，其中 0 级为最低优先级，9

级为最高优先级，除了 2 级、3 级为软件中断外，其余为硬件中断。各级的功能见表 3-15。其中 0 级为初始化程序，此时还没有开中断，当 0 级结束时进入 1 级，同时开中断。1 级是主程序，只要没有其他中断优先级的请求，就总是执行 1 级程序，即总是执行 CRT 显示和 ROM 校验。中断优先级关系示意图如图 3.68 所示。其中 1 级为主程序，2～9 级为中断服务程序。

表 3-15　中断优先级功能表

优先级	主要功能	中断源
0	初始化	开机后进入
1	CRT 显示，ROM 校验，图形显示	主程序
2	数控程序段译码，刀具补偿计算及进给速度控制	16ms
3	数控键盘输入，I/O 信号处理	16ms
4	磁泡存储器传送数据结束处理	硬件
5	插补运算	8ms
6	定时中断，为 2、3 级中断定时	2ms
7	RS232C 串行通信管理	硬件
8	纸带阅读(并行输入)	硬件
9	串行 I/O 传送报警处理	硬件

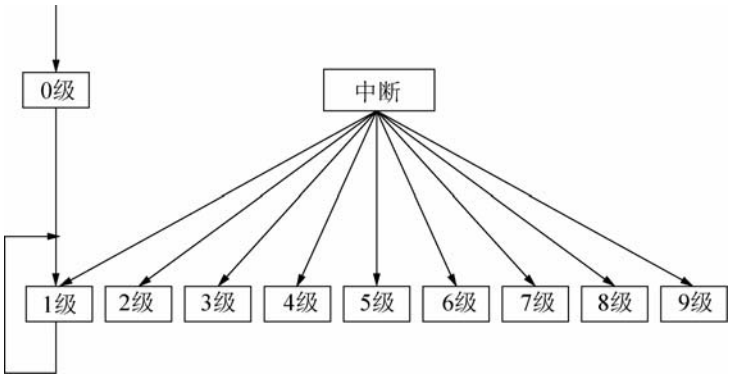


图 3.68　中断优先级关系示意图

小　　结

本章关于 CNC 系统软、硬件结构，主要介绍了其分类、结构组成及常见模式，同时介绍了较有前瞻性的内容——开放式数控系统；可编程逻辑控制器(PLC)是现代数控系统中不可缺少的重要组成部分，本章主要介绍其在数控机床上的应用；又从实践的角度介绍了 CNC 系统的输入/输出及通信中常用的外部设备及接口；在 CNC 装置的插补原理中，仅介绍了常见的插补算法及刀具补偿的基本概念和加减速控制的基本理论；最后，以 FANUC 数控系统 6 为例，介绍了该数控系统的硬、软件结构特点及控制要求。学生学习时，应始

终贯穿这样的主线：系统控制软件配合系统硬件，合理地组织、管理数控系统的输入、数据处理、插补和输出信息(主要是 G 指令和 M 指令)，由数控系统的位置 I/O 接口和 PLC 控制执行部件，使数控机床按照操作者的要求，有条不紊地进行加工。

思考题与习题

1. CNC 控制系统的主要特点是什么？它的主要控制任务是哪些？
2. CNC 装置的主要功能有哪些？
3. 单 CPU 结构和多 CPU 结构各有何特点？
4. 常规的 CNC 系统软件有哪几种结构模式？
5. 数控机床常用的输入方法有几种？各有何特点？
6. 试述采用串行和并行方式进行外部设备与数控机床间的数据通信的工作原理与特点。
7. 开放式结构数控系统的主要特点是什么？
8. 可编程逻辑控制器(PLC)与传统的继电器逻辑控制器(RLC)相比有什么区别？它的主要功能有哪些？
9. PL 的硬件系统主要由哪几部分组成？各部分的作用是什么？
10. 通常情况下 PLC 的规模是怎样划分的？
11. 试简述 PLC 的程序执行过程。程序的扫描周期与哪些因素有关？
12. 何谓插补？有哪两类插补算法？
13. 试述逐点比较法的四个节拍。
14. 利用逐点比较法插补直线 $\overline{OE}$，起点为 O (0，0)，终点为 E (6，10)，试写出插补计算过程并绘出轨迹。
15. 用所熟悉的计算机语言编写第一象限逐点比较法直线插补程序。
16. 利用逐点比较法插补圆弧 $\overline{PQ}$，起点为 P (4，0)，终点为 Q (0，4)，试写出插补计算过程并绘出轨迹。
17. 试推导出逐点比较法插补第一象限顺圆弧的偏差函数递推公式，并写出插补圆弧 AB 的计算过程，绘出其轨迹。设轨迹的起点为 A (0，6)，终点为 B (6，0)。
18. 圆弧终点判别有哪些方法？
19. 圆弧自动过象限如何实现？
20. 逐点比较法如何实现 xy 平面所有象限的直线和圆弧插补？
21. 试述 DDA 插补的原理。
22. 设有一直线 $\overline{OA}$，起点在坐标原点，终点 A 的坐标为(3，5)，试用 DDA 法插补此直线。
23. 设欲加工第一象限逆圆 AE，起点 A (7，0)，终点 E (0，7)，设寄存器位数为 4，用 DDA 法插补。
24. 简述 DDA 稳速控制的方法及其原理。
25. 数据采样插补是如何实现的？

26. 何为刀具半径补偿？其执行过程如何？

27. B 刀具补偿与 C 刀具补偿有何区别？

28. 设某一 CNC 系统的插补周期 $T=8\text{ms}$，进给速度 $F=300\text{mm/min}$，试计算插补步长 L。

29. 圆孤插补的径向误差 $e_r<1\mu\text{m}$，插补周期 $T=8\text{ms}$，插补圆弧半径为 100mm，问允许最大进给速度 v(mm/min) 为多少？

30. 脉冲增量插补的进给速度控制常用哪些方法？

31. 加减速控制有何作用？有哪些实现方法？

第 4 章　数控机床伺服系统

教学提示：数控机床伺服系统是数控机床的重要组成部分，它的高性能在很大程度上决定了数控机床的高效率、高精度。为此，数控机床对进给伺服系统的伺服电动机、检测装置、位置控制、速度控制等方面都有很高的要求。学习和研究高性能的数控机床伺服系统一直是掌握现代数控机床技术的关键之一。

教学要求：了解数控机床伺服系统在按控制理论进行分类时，不同类型的伺服系统的组成及特点。重点让学生掌握伺服系统各组成部分的工作原理及性能特点，以便将来更好地应用。

4.1　概　　述

伺服系统是指以机械位置或角度作为控制对象的自动控制系统。数控机床的伺服系统通常是指各坐标轴的进给伺服系统。它是数控系统和机床机械传动部件间的连接环节，它把数控系统插补运算生成的位置指令，精确地变换为机床移动部件的位移，直接反映了机床坐标轴跟踪运动指令和实际定位的性能。伺服系统的高性能在很大程度上决定了数控机床的高效率、高精度，是数控机床的重要组成部分。它包含了机械传动、电气驱动、检测、自动控制等方面的内容，涉及强电与弱电控制。主轴驱动控制一般只要满足主轴调速及正、反转功能即可，但当要求机床有螺纹加工、准停和恒线速加工等功能时，就对主轴提出了相应的位置控制要求。此时，主轴驱动控制系统可称为主轴伺服系统。

从控制的角度看，伺服系统有开环、半闭环和闭环之分。分别介绍如下。

1. 开环伺服系统

开环伺服系统不需要位置检测与反馈，其驱动电动机主要是步进电动机，如图 4.1 所示。电动机转过的角度正比于指令脉冲的个数，运动的速度由进给脉冲的频率决定。

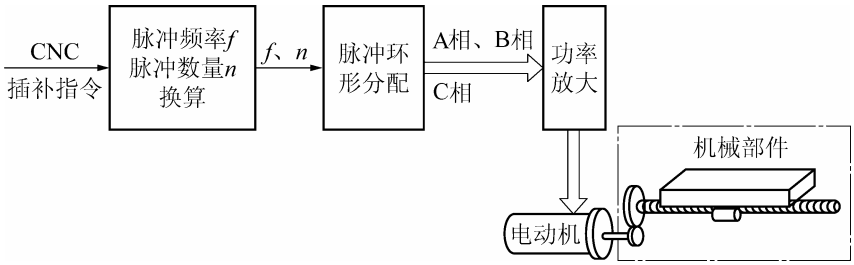


图 4.1　开环伺服系统

开环伺服系统的结构简单、运行平稳、易于控制、价格低廉，使用和维修简单。但精度不高，低速不稳定，高速扭矩小。它一般应用于经济型数控机床及普通的机床改造中。

2. 半闭环伺服系统

半闭环伺服系统的位置检测装置一般安装在电动机的轴上，或滚珠丝杠轴端，通过测量角位移间接地测量出移动部件的直线位移，然后反馈到数控系统中，与系统中的位置指令值进行比较，用比较后的差值控制移动部件移动，直到差值消除时才停止移动，其组成如图 4.2 所示。

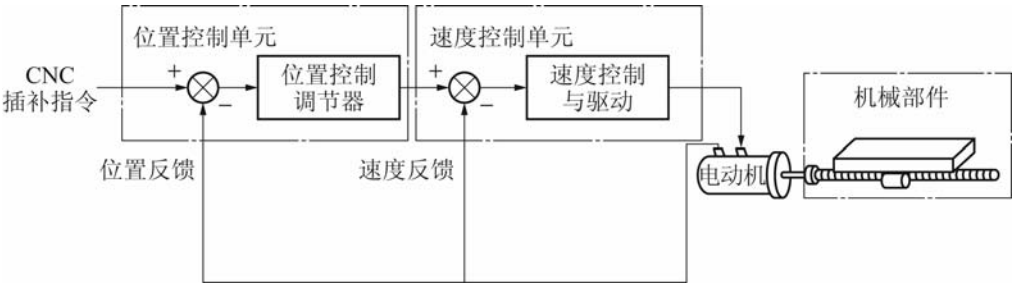


图 4.2　半闭环伺服系统

由于半闭环伺服系统中，进给传动链的滚珠丝杠螺母副、导轨副的误差不全包括在位置反馈中，所以传动机构的误差仍然会影响到移动部件的位置精度。但由于反馈过程中不稳定因素的减少，系统容易达到较高的位置增益，不发生振荡现象，它的快速性好，动态精度高，目前应用比较广泛。至于传动链误差，如反向间隙、丝杠螺距累积误差可通过数控系统的参数设置来进行补偿，以提高机床的定位精度。

3. 闭环伺服系统

闭环伺服系统的位置检测装置直接安装在机床移动部件上，如工作台上装直线位置检测装置，将检测到的实际位置反馈到数控系统中，如图 4.3 所示。

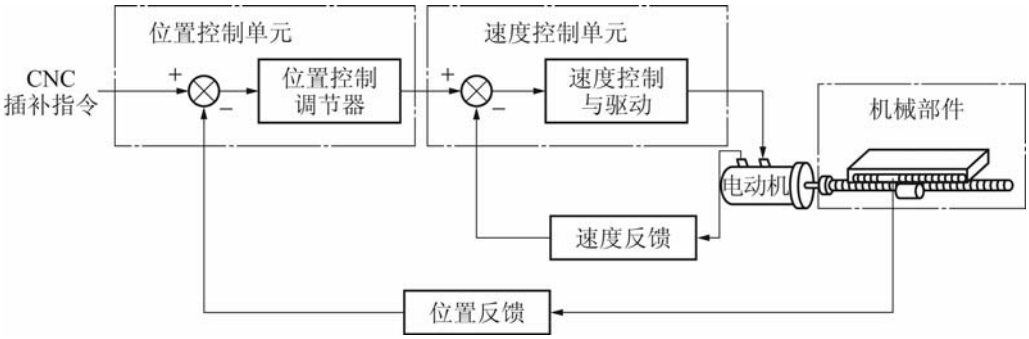


图 4.3　闭环伺服系统

闭环伺服系统的位置检测由于包含了传动链的全部误差，因此可以达到很高的控制精度。但不能认为闭环伺服系统可以降低对传动机构的要求，它的许多因素会影响系统的动态特性，给调试和稳定带来困难，导致调整闭环环路时必须要降低位置增益，这又会对跟随误差与轮廓加工误差产生不利影响。所以采用闭环方式时必须增大机床的刚性，改善滑动面的摩擦特性，减少传动间隙，这样才有可能提高位置增益。闭环伺服系统主要应用于精度要求高的大型数控机床上。

4.2 驱动电动机

驱动电动机是数控机床伺服系统的执行元件。用于驱动数控机床各坐标轴进给运动的称为进给电动机；用于驱动机床主运动的称为主轴电动机。开环伺服系统主要采用步进电动机。伺服电动机通常用于闭环或半闭环伺服系统中。伺服电动机又分直流伺服电动机和交流伺服电动机，直流伺服电动机在 20 世纪 70～80 年代中期在数控机床上的应用占绝对统治地位，至今许多数控机床上仍使用这种电动机的直流伺服系统。由于直流电动机存在一些固有缺点，如电刷和换向器易磨损，需经常维护；换向器换向时会产生火花，使电动机的最高转速受到限制，也使应用环境受到限制；而且直流电动机结构复杂，制造困难，所用钢铁材料消耗大，制造成本高。而交流电动机没有上述缺点，且转子惯量较直流电动机小，使得动态响应更好。在同样体积下，交流电动机可比直流电动机输出功率提高 10%～70%。此外，交流电动机的容量可比直流电动机大，以达到更高的电压和转速。因此，从 80 年代后期开始，人们大量使用交流伺服系统，到今天，有些国家的厂家，已全部使用交流伺服系统。随着直线电动机技术的成熟，采用直线电动机作为进给驱动将成为未来发展的趋势，目前已有产品供应用户。

4.2.1 步进电动机

步进电动机是一种将电脉冲信号转换成机械角位移的电磁机械装置。对步进电动机施加一个电脉冲信号时，它就旋转一个固定的角度，通常把它称为一步，每一步所转过的角度叫做步距角。步距角的计算公式为

$$\alpha = \frac{360^\circ}{mzk}$$

式中 α——步距角；

z_2——转子齿数；

m——定子的相数；

k——拍数与相数的比例系数。

每个步距角对应工作台一个位移值，这个位移值称为脉冲当量，因此，只要控制指令脉冲的数量即可控制工作台移动的位移量。

步距角越小，它所达到的位置精度越高，因此实际使用的步进电动机一般都有较小的步距角。步进电动机的转速公式为

$$n = \frac{\theta}{360^\circ} \times 60 f = \frac{\theta f}{6}$$

式中 n——转速(r/min)；

f——控制脉冲频率，即每秒输入步进电动机的脉冲数；

θ——用度数表示的步距角。

由上式可知：工作台移动的速度由指令脉冲的频率所控制。

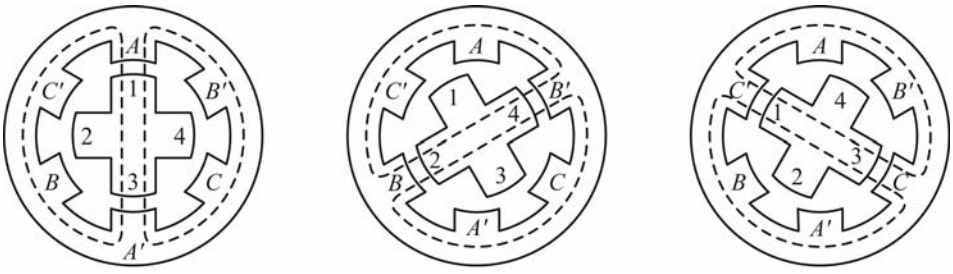
数控机床通常采用反应式和永磁反应式(也称混合式)步进电动机。反应式步进电动机的转子无绕组，由被励磁的定子绕组产生反应力矩实现步进运行；混合式步进电动机的转

子用永久磁钢，由励磁和永磁产生的电磁力矩实现步进运行，按输出力矩大小分为伺服式和功率式步进电动机。伺服式只能驱动较小的负载，功率式可以直接驱动较大的负载。

1. 步进电动机工作原理

下面以一台三相反应式步进电动机为例说明步进电动机的工作原理。

步进电动机的定子上有六个极，每极上都装有控制绕组，每两个相对的极组成一相。转子是四个均匀分布的齿，上面没有绕组。当 A 相绕组通电时，因磁通总是沿着磁组最小的路径闭合，将使转子齿 1、3 和定子极 *A*、*A′* 对齐，如图 4.4(a)所示。*A* 相断电，*B* 相绕组通电时，转子将在空间转过 θ 角，θ=30°，使转子齿 2、4 和定子极 *B*、*B′* 对齐，如图 4.4(b)所示。如果再使 B 相断电，C 相绕组通电时，转子又将在空间转过 30°角，使转子齿 1、3 和定子极 *C*、*C′* 对齐，如图 4.4(c)所示。如此循环往复，并按 *A*—*B*—*C*—*A* 的顺序通电，电动机便按一定的方向转动。电动机的转速直接取决于绕组与电源接通或断开的变化频率。若按 *A*—*C*—*B*—*A* 的顺序通电，则电动机反向转动。电动机绕组与电源的接通或断开，通常是由电子逻辑电路来控制的。



(a)A 相通电　　(b)B 相通电　　(c)C 相通电

图 4.4　三相反应式步进电动机的工作原理图

电动机定子绕组每改变一次通电方式，称为一拍。上述通电方式称为三相单三拍。“单”是指每次通电时，只有一相绕组通电；“三拍”是指经过三次切换绕组的通电状态为一个循环，第四拍通电时就重复第一拍通电的情况。显然，在这种通电方式时，三相步进电动机的步距角 θ 应为 30°。

三相步进电动机除了单三拍通电方式外，还经常工作在三相六拍通电方式和双三拍通电方式。三相六拍的通电顺序为 *A*—*AB*—*B*—*BC*—*C*—*CA*—*A* 或 *A*—*AC*—*C*—*CB*—*B*—*BA*—*A*。双三拍通电顺序为 *AB*—*BC*—*CA*—*AB*。实际使用中，单三拍通电方式由于在切换时一相绕组断电，而另一相绕组开始通电，容易造成失步。此外，由单一绕组通电吸引转子也容易使转子在平衡位置附近产生振荡，运行的稳定性较差，所以很少使用，通常使用双三拍通电方式。另外，上述结构的反应式步进电动机的步距角较大，如在数控机床中应用就会影响到加工精度。实际中采用的是小步距角的步进电动机。

2. 步进电动机特点

(1) 步进电动机受脉冲的控制，其转子的角位移量和转速严格地与输入脉冲的数量和脉冲频率成正比，没有累积误差。控制输入步进电动机的脉冲数就能控制位移量；改变通电频率可改变电动机的转速。

(2) 当停止送入脉冲，只要维持控制绕组的电流不变，电动机便停在某一位置上不动，不需要机械制动。

(3) 改变通电顺序可改变步进电动机的旋转方向。

(4) 步进电动机的缺点是效率低，拖动负载的能力不大，脉冲当量(步距角)不能太大，调速范围不大，最高输入脉冲频率一般不超过 18kHz。

3. 步进电动机的主要特性

(1) 步矩误差。一转内各实际步距角与理论值之间误差的最大值称为步距误差。影响步距误差的主要因素有：转子齿的分度精度、定子磁极与齿的分度精度，铁心叠压及装配精度，气隙的不均匀程度，各相励磁电流的不对称程度等。

(2) 静态矩角特性。当步进电动机不改变通电状态时，转子处于不动状态。若在电动机轴上外加一个负载转矩，步进电动机转子会按一定方向转过一个角度θ，并重新稳定，此时转子所受的电磁转矩 T 称为静态转矩，角度θ称为失调角。描述步进电动机稳定时，电磁转矩 T 与失调角θ之间关系的曲线称为静态矩角特性或静转矩特性。图 4.5 所示为步进电动机的静态矩角特性。

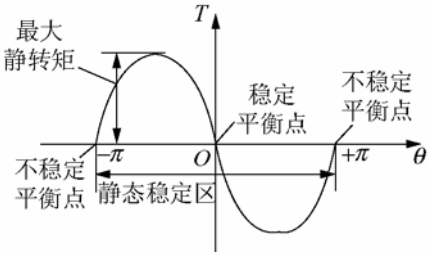


图 4.5　步进电动机的静态矩角特性

(3) 启动频率。空载时，步进电动机由静止突然启动不丢步地进入正常运行状态所允许的最高启动频率称为启动频率或突跳频率。启动频率与机械系统的转动惯量有关，随着负载转动惯量的增加，启动频率下降。若同时存在负载转矩则启动频率会进一步降低。在实际应用中，由于负载转矩的存在可采用的启动频率要比启动惯频特性中标出的数据低。

(4) 连续运行频率。步进电动机启动以后其运行速度能跟踪指令脉冲频率连续上升而不丢步的最高工作频率，称为连续运行频率，在实际运用中，运行频率比启动频率高得多。通常用自动升降频的方式，即先在低频下使步进电动机启动，然后逐渐升至运行频率。当需要步进电动机停转时，则先将脉冲信号的频率逐渐降低至启动频率以下，再停止输入脉冲，步进电动机才能不失步地准确停止。影响连续运行频率的有负载性质和大小，步进电动机的绕组电感以及驱动电源。

(5) 矩频特性。矩频特性是描述步进电动机连续稳定运行时输出的最大转矩与连续运行频率之间的关系曲线。步进电动机的最大输出转矩随连续运行频率的升高而下降。这是因为步进电动机的绕组是感性的，在绕组中通电时，电流上升缓慢，使有效转矩变小；绕组断电时，电流逐渐下降，产生与转向相反的转矩，输出转矩变小。随着连续运行频率的升高，电流波形的前后沿占通电时间的比例越来越大，输出转矩也就越来越小。步进电动机的绕组电感以及驱动电源对矩频特性影响很大。

(6) 加减速特性。步进电动机的加减速特性用于描述步进电动机由静止到工作频率或由工作频率到静止的加减速过程中，定子绕组通电状态的频率变化与时间的关系，如图 4.6 所示。为了保证运动部件的平稳和准确定位，根据步进电动机的加减速特性，在启动和停止时应进行加减速控制。如果没有加减速过程或者加、减速不当，步进电动机都会出现失步现象。

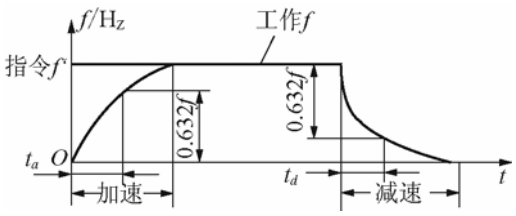


图 4.6　加减速特性

4.2.2　伺服电动机

伺服电动机亦称执行电动机，它具有一种服从控制信号的要求而动作的性能，在信号来到之前，转子静止不动；信号来到之后，转子立即转动；当信号消失，转子能及时自行停转。伺服电动机由于这种“伺服”的性能而得名。

根据自动控制系统中伺服电动机的功用要求，伺服电动机必须具备可控性好、稳定性高和适应性强等基本性能。可控性好是指信号消失以后，伺服电动机转子能立即自行停转；稳定性高是指转速随转矩的增加而匀速下降；适应性强是指反应快、灵敏。

数控机床要求伺服系统在调速范围内都能平滑运转，无爬行现象；具有较长时间的过载能力；有较小的转动惯量和大的堵转转矩，并具有尽可能小的时间常数和启动电压；具有承受频繁启动、制动和正反转的能力。为满足数控机床对伺服系统的要求，有效的办法就是提高直流伺服电动机的力矩/惯量比，由此产生了小惯量直流伺服电动机和大惯量宽调速直流伺服电动机。交流伺服电动机有交流异步伺服电动机(一般用于主轴驱动)和交流同步伺服电动机(一般用于进给驱动)之分。

1. 永磁直流伺服电动机

目前在数控机床进给驱动中采用的直流电动机主要是 20 世纪 70 年代研制成功的大惯量宽调速直流伺服电动机。这种电动机分为电励磁和永久磁铁励磁两种，但占主导地位的是永久磁铁励磁(永磁)直流伺服电动机，本节将主要介绍这种电动机。

1) 永磁直流伺服电动机的基本结构

永磁直流伺服电动机的结构与普通直流电动机基本相同。它主要包括三大部分：定子、转子、电刷与换向片，如图 4.7 所示。其定子磁极是永久磁铁，转子亦称电枢，由硅钢片叠压而成，表面镶有线圈。电刷与电动机外加直流电源相连，换向片与电枢导体相接。

永磁直流伺服电动机，是通过提高输出力矩来提高力矩/惯量比。具体措施：一是增加定子磁极对数并采用高性能的磁性材料，如稀土钴、铁氧体等以产生强磁场，该磁性材料性能稳定且不易退磁；二是在同样的转子外径和电枢电流的情况下，增加转子上的槽数和槽的截面积。由此，电动机的机械时间常数和电气时间常数都有所减小，这样就提高了快速响应性。

2) 永磁直流伺服电动机的特点

(1) 能承受高的峰值电流以满足数控机床快的加减速要求。

(2) 大惯量的结构使其在长期过载工作时具有大的热容量，电动机的过载能力高。

(3) 具有大的力矩/惯量比，快速性好。由于电动机自身惯量大，外部负载惯量相对较小，提高了机械抗干扰能力。因此伺服系统的调速与负载几乎无关，大大方便了机床的安装调试工作。

(4) 低速高转矩和大惯量结构可以与机床进给丝杠直接连接，省去了齿轮等传动机构，提高了机床进给传动精度。

(5) 一般没有换向极和补偿绕组，通过仔细选择电刷材料和磁场的结构，电动机在较大的加速度状态下有良好的换向性能。

(6) 绝缘等级高，从而保证电动机在反复过载的情况下仍有较长的寿命。

(7) 在电动机轴上装有精密的测速发电机、旋转变压器或脉冲编码器，从而可以得到精密的速度和位置检测信号，以反馈到速度控制单元和位置控制单元。当伺服电动机用于垂直轴驱动时，电动机内部可安装电磁制动器，以克服滚珠丝杠垂直安装时的非自锁现象。

3) 永磁直流伺服电动机的工作原理

如图 4.7 所示，当电枢绕组通以直流电时，在定子磁场作用下产生电动机的电磁转矩，电刷与换向片保证电动机所产生的电磁转矩方向恒定，从而使转子沿固定方向均匀地带动负载连续旋转。只要电枢绕组断电，电动机立即停转，不会出现“自转”现象。

按图 4.8 规定好各量的正方向，电动机在稳态运行下的基本方程式为式(4-1)。

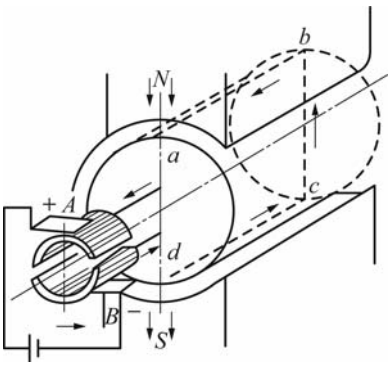


图 4.7　直流伺服电动机

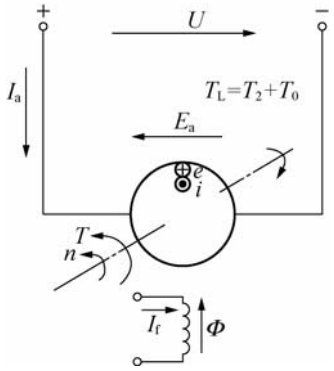


图 4.8　电动机惯例

$$E_a = C_e n \Phi$$

$$U_a = E_a + I_a R_a$$

$$T = C_t \Phi I_a$$

$$T = T_L = T_2 + T_0$$

$$\Phi = \text{常数}$$

式中　U_a——电枢电压；

I_a——电枢电流；

R_a——电枢回路总电阻；

n——电动机转速；

E_a——电枢感应电动势；

T——电磁转矩；

T_L——负载转矩；

T_2——电动机输出转矩；

T_0——电动机本身的各种损耗引起的阻转矩；

C_t——转矩常数；

C_e——电动势常数；

Φ——励磁磁通。

电磁转矩平衡方程式 $T = T_L = T_2 + T_0$ 表示在稳态运行时，电动机的电磁转矩和电动机轴上的负载转矩互相平衡。在实际中，有些电动机经常运行在转速变化的情况下，例如电动机的启动、停止，因此必须考虑转速变化时的转矩平衡关系。根据力学中刚体的转动定律，则有

$$T - T_L = J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}$$

式中　J——负载和电动机转动部分的转动惯量；

ω——电动机的角速度。

根据电动机的电压平衡方程式 $U_a = E_a + I_aR_a$，并考虑电枢感应电动势 $E_a=C_en\Phi$和电动机电磁转矩 $T=C_t\Phi I_a$，得

$$n = \frac{U_a}{C_e\Phi} - \frac{R_a}{C_e\Phi}I_a \tag{4-1}$$

或

$$n = \frac{U_a}{C_e\Phi} - \frac{R_a}{C_eC_t\Phi^2} \tag{4-2}$$

这两个方程式即为用电流和转矩表示的电动机机械特性。

由式(4-1)、式(4-2)可知，当电动机加上一定电源电压 U_a 和磁通 Φ保持不变时，转速 n 与电动机电磁转矩 T 的关系，即 $n=f(T)$曲线是一条向下倾斜的直线，如图 4.9 所示。转速变化的大小用转速调整率 Δn 来表示，为

$$\Delta n = \frac{n_0 n_N}{n_N} \times 100\%$$

式中　n_0——电动机空载转速；

n_N——电动机额定转速。

图 4.9 中的机械特性与纵轴坐标的交点是理想空载转速 n_0'。实际运行时电动机的空载转速 n_0 要比 n_0' 小些。图中上翘虚线是当电动机电枢电流较大时，考虑了电枢反应的去磁效应减少气隙主磁通的机械特性。具有这种特性的电动机，运行时会产生不稳定，应设法避免。

永磁直流伺服电动机通过改变电枢电源电压即可得到一族彼此平行的曲线，如图 4.10 所示。由于电动机的工作电压一般以额定电压为上限，故只能在额定电压以下改变电源电压。当电动机负载转矩 T_L 不变，励磁磁通 Φ不变时，升高电枢电压 U_a，电动机的转速就升高；反之，降低电枢电压 U_a，转速就下降；在 U_a＝0 时，电动机则不转。当电枢电压的

极性改变时，电动机的转向就随着改变。因此，永磁直流伺服电动机可以把电枢电压作为控制信号，实现电动机的转速控制。

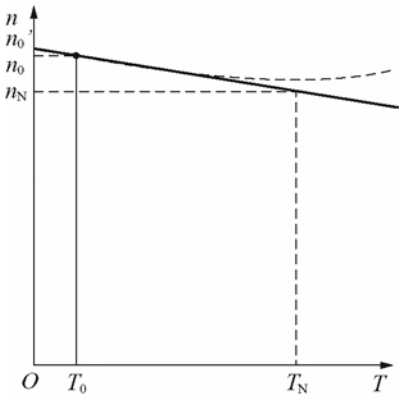


图 4.9　直流伺服电动机的机械特性

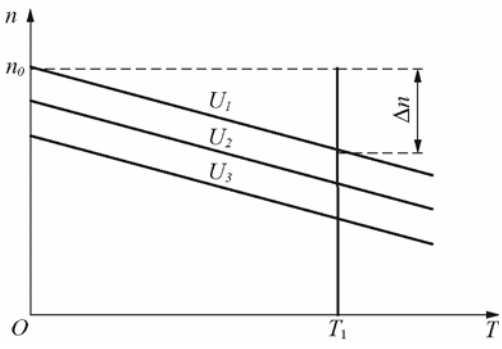


图 4.10　永磁直流伺服电动机的变压特性曲线

2. 永磁交流伺服电动机

永磁交流伺服电动机属于同步型交流伺服电动机，具有响应快、控制简单的特点，因而被广泛应用于数控机床。它是一台机组，由永磁同步电动机、转子位置传感器、速度传感器等组成。

1) 结构

如图 4.11 和图 4.12 所示，永磁交流伺服电动机主要由三部分组成：定子、转子和检测元件(转子位置传感器和测速发电机)。其中定子有齿槽，内装三相对称绕组，形状与普通异步电动机的定子相同。但其外圆多呈多边形，且无外壳，以利于散热，避免电动机发热对机床精度的影响。

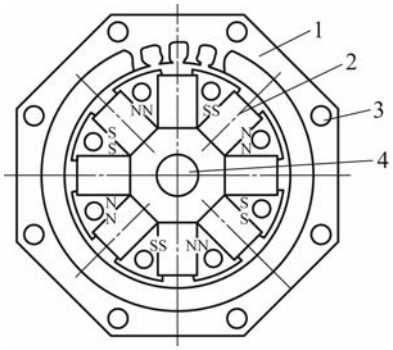


图 4.11　永磁交流伺服电动机横剖面

1—定子　2—永久磁铁
3—轴向通风孔　4—转轴

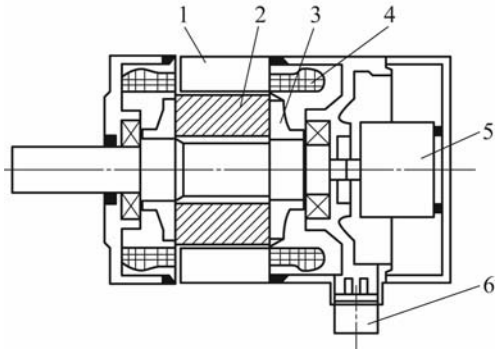
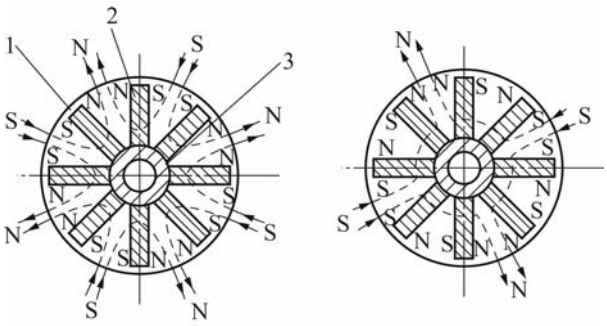


图 4.12　永磁交流伺服电动机纵剖面

1—定子　2—转子　3—压板
4—定子三相绕组　5—脉冲编码器　6—出线盒

转子由多块永久磁铁和转子铁心组成。此结构气隙磁密度较高，极数较多，同一种铁心和相同的磁铁块数可以装成不同的极数，如图 4.13 所示。

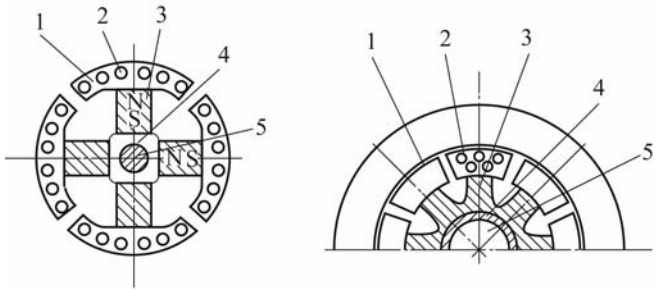


(a) $2p=8$　　(b) $2p=4$

图 4.13　永磁转子(切向式)

1—铁心　2—永久磁铁　3—非磁性套筒

转子结构上，还有一类称有极靴星形转子，如图 4.14 所示，这种转子可采用矩形磁铁或整体星形磁铁构成。



(a)矩形磁铁式　　(b)整体星形磁铁式

图 4.14　有极靴星形转子

1—极靴　2—笼条　3—永久磁铁　4—转子轭　5—转轴

无论何种永磁交流伺服电动机，所用永磁材料的性能对电动机外形尺寸、磁路尺寸和性能指标都有很大影响。随着高磁性永磁材料的应用，永久磁铁长度大大缩短，且对传统的磁路尺寸比例带来大的变革。永久磁铁结构也有着重大的改革，通常结构是永久磁铁装在转子的表面，称为外装永磁电动机，还可将永久磁铁嵌在转子里面，称为内装永磁电动机。后者结构更加牢固，允许在更高转速下运行；有效气隙小，电枢反应容易控制；电动机采用凸极转子结构。

磁性不同，制成的结构也不同。如星形转子只适合用铝镍钴等剩磁感应较高的永磁材料，而切向式永磁转子适宜用铁氧体或稀土钴合金制造。

2) 工作原理

如图 4.15 所示，以一个二极永磁转子为例，电枢绕组为 Y 接法三相绕组，当通以三相对称电流时，定子的合成磁场为一旋转磁场，图中用一对旋转磁极表示，该旋转磁极以同步转速 n_s 旋转。由于磁极同性相斥，异性相吸，定子旋转磁极与转子的永磁磁极互相吸引，带动转子一起旋转，因此转子也将以同步转速 n_s 与旋转磁场一起旋转。

当转子加上负载转矩之后，转子磁极轴线将落后定子磁场轴线一个 θ 角，随着负载增加，θ 角也随之增大，负载减小时，θ 角也减小，只要负载不超过一定限度，转子始终跟着定子的旋转磁场以恒定的同步转速 n_s 旋转。

转子速度 $n = n_s = 60f/p$，即由电源频率 f 和磁极对数 p 所决定。

当负载超过一定限度后，转子不再按同步转速 n_s 旋转，甚至可能不转，这就是同步电动机的失步现象，此时负载的极限转矩称为最大同步转矩。

永磁交流伺服电动机通常在轴端装有位置检测器，通过检测转子角度来进行变频控制，转子位置检测器一般由光电编码器或霍尔开关组成。和直流伺服电动机相比，永磁交流伺服电动机没有机械换向和电刷，避免了换向火花的产生和机械磨损等，同时又可获得和直流伺服电动机相同的调速性能。

和异步电动机相比，由于永磁同步电动机转子有磁极，在很低的频率下也能运行，因此，在相同的条件下，永磁同步电动机的调速范围比异步电动机更宽。同时，永磁同步电动机比异步电动机对转矩扰动具有更强的承受能力，能作出更快的响应。

交流伺服电动机的机械特性曲线如图 4.16 所示。

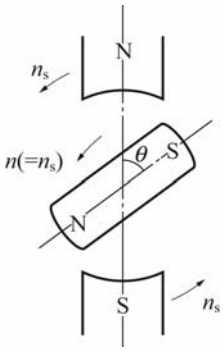


图 4.15　交流伺服电动机的原理图

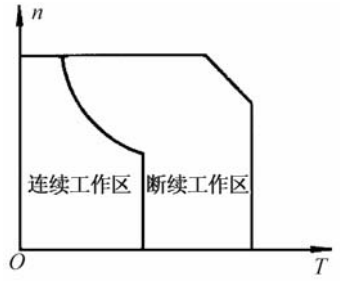


图 4.16　交流伺服电动机机械特性

在连续工作区，转速和转矩的任何组合都可连续工作；在断续工作区，电动机可间断运行。连续工作区的划分受供给电动机的电流是否为正弦波及工作温度的影响。断续工作区的极限，一般受到电动机的供给电压的限制。交流伺服电动机的机械特性比直流伺服电动机更硬，断续工作范围更大，尤其在高速区，这有利于提高电动机的加减速性能。

永磁同步电动机启动困难，不能自启动的原因有两点。一是由于本身存在惯性。虽然当三相电源供给定子绕组时已产生旋转磁场，但转子仍处于静止状态，由于惯性作用跟不上旋转磁场的转动，在定子和转子两对磁极间存在相对运动时转子受到的平均转矩为零。二是定子、转子磁场之间转速相差过大。为此，在转子上装有笼式的启动绕组，使永磁同步电动机先同异步电动机那样产生启动转矩，当转子速度上升到接近同步转速时，定子磁场与转子永久磁极相吸引，将其拉入同步转速，使转子以同步转速旋转，即所谓的异步启动，同步运行。而永磁交流同步电动机多无启动绕组，而是采用设计时减低转子惯量或采用多极，使定子旋转磁场的同步转速不很大。另外，也可在速度控制单元中采取措施，让电动机先在低速下启动，然后再提高到所要求的速度。

4.2.3　直线电动机

直线电动机是近年来国内外积极研究发展的新型电动机之一。它是一种不需要中间转换装置，而能直接作直线运动的电动机械。科学技术的发展推动了直线电动机的研究和生产，直线电动机的应用日益广泛。直线电动机的形式很多，原则上对于每一种旋转电动机都有其相应的直线电动机。

1. 直线电动机的结构和原理

由于直线电机与旋转电机在原理上基本相同，所以这里只介绍一种平板型直线感应电机。它的结构如图 4.17 所示，在一个有槽的矩形初级部件中镶嵌三相绕组(相当于异步电动机的定子)，在板状次级部件中镶嵌短路棒(相当于异步电动机的笼型转子)。它的工作原理是将旋转异步电动机的转子和定子之间的电磁作用力从圆周展开为平面。即在三相绕组中通以三相交流电流时，根据电磁感应原理，次级部件中镶嵌短路棒形成的短路绕组中就会产生感应电动势及感应电流。根据电磁力定律知道，作为载流导体的短路棒和矩形初级部件中镶嵌的三相绕组之间会受到电磁力的作用，使直线电动机沿着直线导轨移动。

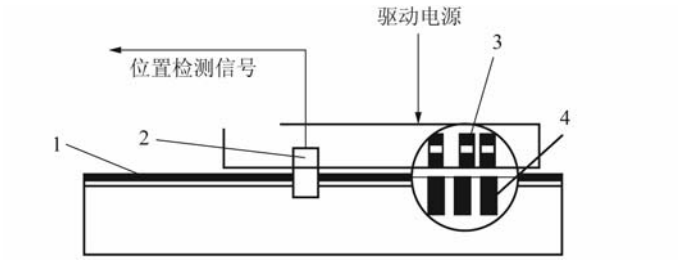


图 4.17　直线电动机的结构

1—直线位移检测装置　2—测量部件　3—初级绕组　4—次级绕组

直线电动机的驱动力与初级有效面积有关。面积越大，驱动力也越大。因此，在驱动力不够的情况下，可以将两个直线电动机并联或串联工作，或者在移动部件的两侧安装直线电动机。此外直线电动机的最大运动速度在额定驱动力时较高，而在最大驱动力时较低。

2. 直线电动机的特性

(1) 直线电动机所产生的力直接作用于移动部件，因此省去了滚珠丝杠和螺母等机械传动环节，可以减小传动系统的惯性，提高系统的运动速度、加速度和精度，避免振动的产生。

(2) 由于动态性能好，可以获得较高的运动精度。

(3) 如果采用拼装的次级部件，还可以实现很长的直线运动距离。

(4) 运动功率的传递是非接触的，没有机械磨损。

以上是直线电动机的优点。但是由于直线电动机常在大电流和低速下运行，必然导致大量发热和效率低下。因此，直线电动机通常必须采用循环强制冷却及隔热措施，才不会导致机床热变形。

4.3　数控机床常用检测装置

4.3.1　概述

在闭环和半闭环伺服系统中，位置控制是指将计算机数控系统插补计算的理论值与实际值的检测值相比较，用二者的差值去控制进给电动机，使工作台或刀架运动到指令位置。实际值的采集，则需要位置检测装置来完成。位置检测元件可以检测机床工作台的位移、伺服电动机转子的角位移和速度。实际应用中，位置检测和速度检测可以采用各自独立的检测元件，例如速度检测采用测速发电机，位置检测采用光电编码器，也可以共用一个检测元件，例如都用光电编码器。根据位置检测装置安装形式和测量方式的不同，位置检测有直接测量和间接测量、增量式测量和绝对式测量、数字式测量和模拟式测量等方式。

1. 直接测量和间接测量

在数控机床中，位置检测的对象有工作台的直线位移及旋转工作台的角位移，检测装置有直线式和旋转式。典型的直线式测量装置有光栅、磁栅、感应同步器等。旋转式测量装置有光电编码器和旋转变压器等。

若位置检测装置测量的对象就是被测量本身，即直线式测量直线位移，旋转式测量角位移，该测量方式称为直接测量。直接测量组成位置闭环伺服系统，其测量精度由测量元件和安装精度决定，不受传动精度的直接影响。但检测装置要和行程等长，这对大型机床是一个限制。

若位置检测装置测量出的数值通过转换才能得到被测量，如用旋转式检测装置测量工作台的直线位移，要通过角位移与直线位移之间的线性转换求出工作台的直线位移。这种测量方式称为间接测量。间接测量组成位置半闭环伺服系统，其测量精度取决于测量元件和机床传动链二者的精度。因此，为了提高定位精度，常常需要对机床的传动误差进行补偿。间接测量的优点是测量方便可靠，且无长度限制。

2. 增量式测量和绝对式测量

增量式测量装置只测量位移增量，即工作台每移动一个基本长度单位，检测装置便发出一个检测信号，此信号通常是脉冲形式。增量式检测装置均有零点标志，作为基准起点。数控机床采用增量式检测装置时，在每次接通电源后要回参考点操作，以保证测量位置的正确。

绝对式测量是指被测的任一点位置都从一个固定的零点算起，每一个测点都有一个对应的编码，常以二进制数据形式表示。

3. 数字式测量和模拟式测量

数字式测量是以量化后的数字形式表示被测量。得到的测量信号为脉冲形式，以计数后得到的脉冲个数表示位移量。其特点是便于显示、处理；测量精度取决于测量单位，与量程基本无关；抗干扰能力强。

模拟式测量是将被测量用连续的变量来表示，模拟式测量的信号处理电路较复杂，易

受干扰，数控机床中常用于小量程测量。

4.3.2　旋转编码器

旋转编码器通常有增量式和绝对式两种类型。它通常安装在被测轴上，随被测轴一起转动，将被测轴的位移转换成增量脉冲形式或绝对式的代码形式。

1. 增量式旋转编码器

常用的增量式旋转编码器为增量式光电编码器，如图 4.18 所示。光电编码器由带聚光镜的发光二极管(LED)、光栏板、光电码盘、光敏元件及信号处理电路组成。其中，光电码盘是在一块玻璃圆盘上镀上一层不透光的金属薄膜，然后在上面制成圆周等距的透光和不透光相间的条纹构成的，光栏板上具有和光电码盘相同的透光条纹。光电码盘也可由不锈钢薄片制成。当光电码盘旋转时，光线通过光栏板和光电码盘产生明暗相间的变化，由光敏元件接收。光敏元件将光电信号转换成电脉冲信号。光电编码器的测量精度取决于它所能分辨的最小角度，而这与光电码盘圆周的条纹数有关，即分辨角为

$$\alpha = \frac{360^\circ}{\text{条纹数}}$$

如条纹数为 1024，则分辨角 $\alpha = \dfrac{360^\circ}{1024} = 0.352^\circ$

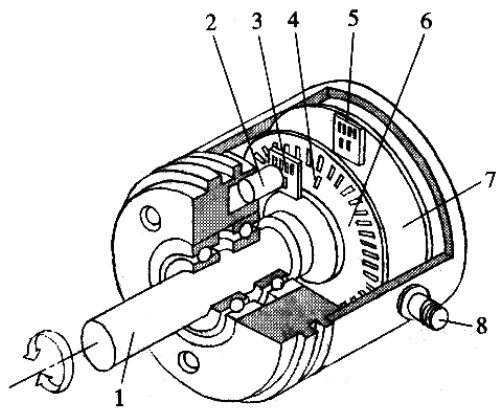


图 4.18　增量式光电编码器结构示意图

1—转轴　2—发光二极管　3—光栏板　4—零标志　5—光敏元件
6—光电码盘　7—印制电路板　8—电源及信号连接座

数控机床通常需要驱动电动机正反转来满足运动需要，为判断电动机转向，光电编码器的光栏板上有 3 组条纹 A 和 $\overline{A}$、B 和 $\overline{B}$ 及 C 和 $\overline{C}$，如图 4.19 所示。A 组和 B 组的条纹彼此错开 1/4 节距，两组条纹相对应的光敏元件所产生的信号彼此相差 90°，当光电码盘正转时，A 信号超前 B 信号 90°，当光电码盘反转时 B 信号超前 A 信号 90°。利用这一相位关系即可判断电动机转向。另外，在光电码盘里圈还有一条透光条纹 C，用以产生每转信号，即光电码盘每转一圈产生一个脉冲，该脉冲称为一转信号或零标志脉冲，作为测量基准。

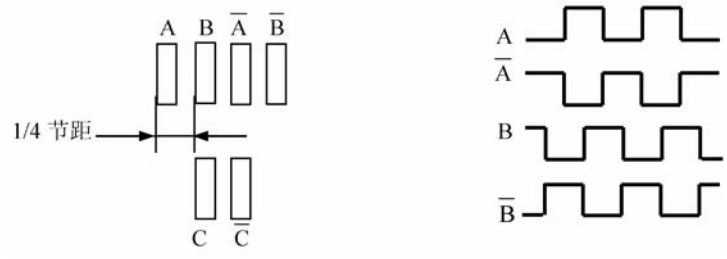


图 4.19　A、B 条纹位置及信号

光电编码器的输出信号 A、$\bar{A}$ 和 B、$\bar{B}$ 及 C、$\bar{C}$ 为差动信号。差动信号大大提高了传输的抗干扰能力。在数控系统中，分辨力是指一个脉冲所代表的基本长度单位。为进一步提高分辨力，常对上述 A、B 信号进行倍频处理。例如，配置 2000 脉冲/转光电编码器的伺服电动机直接驱动 8mm 螺距的滚珠丝杠，经 4 倍频处理后，相当于 8000 脉冲/转的角度分辨力，对应工作台的直线分辨力由倍频前的 0.004mm 提高到 0.001mm。

2. 绝对式旋转编码器

绝对式旋转编码器可直接将被测角度用数字代码表示出来，且每一个角度位置均有对应的测量代码，因此这种测量方式即使断电，只要再通电就能读出被测轴的角度位置，即具有断电记忆力功能。

下面以接触式码盘和绝对式光电码盘为例分别介绍绝对式旋转编码器测量原理。

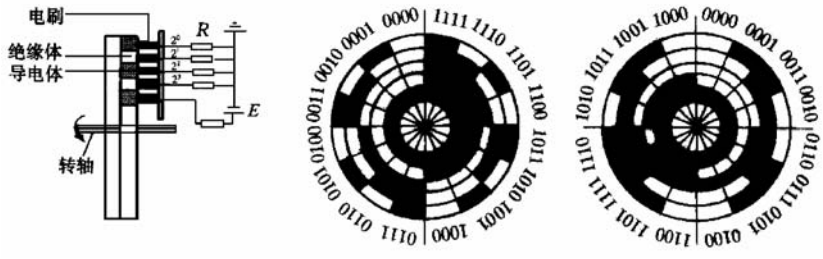
(1) 接触式码盘。图 4.20 所示为接触式码盘示意图。图 4.20(b)为 4 位 BCD 码盘。它是在一个不导电基体上做出许多金属区使其导电，其中涂黑部分为导电区，用“1”表示，其他部分为绝缘区，用“0”表示。这样，在每一个径向上，都有由“1”、“0”组成的二进制代码。最里一圈是公用的，它和各码道所有导电部分连在一起，经电刷和电阻接电源正极。除公用圈以外，4 位 BCD 码盘的 4 圈码道上也都装有电刷，电刷经电阻接地，电刷布置如图 4.20(a)所示。由于码盘与被测轴连在一起，而电刷位置是固定的，当码盘随被测轴一起转动时，电刷和码盘的位置发生相对变化，若电刷接触的是导电区域，则经电刷、码盘、电阻和电源形成回路，该回路中的电阻上有电流流过，为“1”；反之，若电刷接触的是绝缘区域，则形不成回路，电阻上无电流流过，为“0”。由此可根据电刷的位置得到由“1”和“0”组成的 4 位 BCD 码。通过图 4.20(b)可看到电刷位置与输出代码的对应关系。码盘码道的圈数就是二进制的位数，且高位在内，低位在外。由此可以推断出，若是 n 位二进制码盘，就有 n 圈码道，且圆周均为 2^n 等分，即共有 2^n 个数来表示码盘的不同位置，所能分辨的角度为

$$\alpha = \frac{360^\circ}{2n}$$

$$\text{分辨力} = \frac{1}{2n}$$

显然，位数 n 越大，所能分辨的角度越小，测量精度就越大。

图 4.20(c)为 4 位格雷码盘，其特点是任意两个相邻数码间只有一位是变化的，可消除非单值性误差。



(a)结构简图　　(b)4 位 BCD 码盘　　(c)位格雷码盘

图 4.20　接触式码盘

(2) 绝对式光电码盘。绝对式光电码盘与接触式码盘结构相似，只是其中的黑白区域不表示导电区和绝缘区，而是表示透光区和不透光区。其中黑的区域指不透光区，用“0”；白的区域指透光区，用“1”表示。如此，在任意角度都有“1”和“0”组成的二进制代码。另外，在每一码道上都有一组光敏元件，这样，不论码盘转到哪一角度位置，与之对应的各光敏元件受光的输出为“1”，不受光的输出为“0”，由此组成 *n* 位二进制编码。图 4.21 为 8 码道光电码盘示意图。



图 4.21　8 码道光电码盘(1/4)

3. 编码器在数控机床中的应用

(1) 位移测量。在数控机床中编码器和伺服电动机同轴连接或连接在滚珠丝杠末端用于工作台和刀架的直线位移测量。在数控回转工作台中，通过在回转轴末端安装编码器，可直接测量回转工作台的角位移。

由于增量式光电编码器每转过一个分辨角就发出一个脉冲信号，因此，根据脉冲的数量、传动比及滚珠丝杠螺距即可得出移动部件的直线位移量。如某带光电编码器的伺服电动机与滚珠丝杠直连(传动比 1∶1)，光电编码器 1024 脉冲/r，丝杠螺距 8mm，在一转时间内计数 1024 脉冲，则在该时间段里，工作台移动的距离为 8(mm/r)÷1024(脉冲/r)×1024(脉冲)＝8mm。

(2) 主轴控制。当数控车床主轴安装有编码器后，则该主轴具有 *C* 轴插补功能，可实现主轴旋转与 *z* 坐标轴进给的同步控制；恒线速切削控制，即随着刀具的径向进给及切削直径的逐渐减小或增大，通过提高或降低主轴转速，保持切削线速度不变；主轴定向控制等。

(3) 测速。光电编码器输出脉冲的频率与其转速成正比，因此，光电编码器可代替测速发电机的模拟测速而成为数字测速装置。

(4) 编码器应用于交流伺服电动机控制中，用于转子位置检测；提供速度反馈信号；

提供位置反馈信号。

(5) 零标志脉冲用于回参考点控制。数控机床采用增量式的位置检测装置时，数控机床在接通电源后要作回参考点的操作。这是因为机床断电后，系统就失去了对各坐标轴位置的记忆，所以在接通电源后，必须让各坐标轴回到机床某一固定点上，这一固定点就是机床坐标系的原点或零点，也称机床参考点。使机床回到这一固定点的操作称为回参考点或回零操作。参考点位置是否正确与检测装置中的零标志脉冲有很大的关系。

4.3.3　旋转变压器

旋转变压器是利用当变压器的一次侧外施机交流电压励磁时，其二次侧的输出电压将与转子转角严格保持某种函数关系的一种模拟式角度测量元件，一般用于精度要求不高的机床。旋转变压器可单独和滚珠丝杠相连，也可与伺服电动机组成一体。其特点是坚固、耐热和耐冲击，抗振性好。它在结构上与绕线转子异步电动机相似，由定子和转子组成，励磁电压接到定子绕组上，励磁频率通常为 400Hz、500Hz、1000Hz 及 5000Hz。

1. 工作原理

实际应用的旋转变压器为正、余弦旋转变压器，其定子和转子各有相互垂直的两个绕组，如图 4.22 所示为正、余弦旋转变压器原理图。

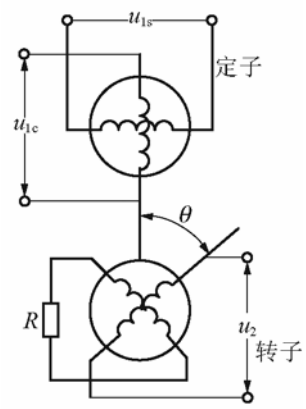


图 4.22　正、余弦旋转变压器原理图

其中，定子上的两个绕组分别为正弦绕组和余弦绕组，励磁电压用 u_{1s} 和 u_{1c} 表示，转子绕组中一个绕组为输出电压 u_2，另一个绕组接高阻抗作为补偿；θ 为转子偏转角。定子绕组通入不同的励磁电压，可得到两种工作方式。

(1) 相位工作方式。给定子的正、余弦绕组分别通入同幅、同频，但相位差 $\pi/2$ 的交流励磁电压，即

$$u_{1s}=U_m \sin\omega t$$

$$u_{1c}=U_m \sin(\omega t+\pi/2)=U_m \cos\omega t$$

当转子正转时这两个励磁电压在转子绕组中产生了感应电压，经叠加，在转子中的感应电压 u_2 为

$$u_2=k\,U_m \cos(\omega t-\theta) \tag{4-3}$$

式中　U_m——励磁电压幅值；

k——电磁耦合系数，$k<1$；

θ——相位角(转子偏转角)。

同理，当转子反转时，可得

$$u_2 = k\,U_m\cos(\omega t + \theta) \tag{4-4}$$

由式(4-3)、式(4-4)可以看出，转子输出电压的相位角和转子的偏转角之间有严格的对应关系，只要检测出转子输出电压的相位角，就可知道转子的偏转角。由于旋转变压器的转子是和被测轴连接在一起的，故被测轴的角位移也就得到了。

(2) 幅值工作方式。给定子的正、余弦绕组分别通以同频率、同相位，但幅值不同的交流励磁电压，即

$$u_{1s} = U_{sm}\sin\omega t$$

$$u_{1c} = U_{cm}\sin\omega t$$

u_{sm}、u_{cm} 分别为励磁电压的幅值，其数值为

$$u_{sm} = U_m\sin\alpha$$

$$u_{cm} = U_m\cos\alpha$$

式中　α——给定电气转角。

当转子正转时，u_{1s}、u_{1c} 经叠加，在转子上的感应电压 u_2 为

$$u_2 = k\,U_m\cos(\alpha-\theta)\sin\omega t \tag{4-5}$$

同理，转子反转时，可得

$$u_2 = k\,U_m\cos(\alpha+\theta)\sin\omega t \tag{4-6}$$

式(4-5)、式(4-6)中，$kU_m\cos(\alpha-\theta))$、$kU_m\cos(\alpha+\theta)$为感应电压的幅值。

由式(4-5)、式(4-6)可以看出，转子感应电压的幅值随转子的偏转角 θ 而变化，测量出幅值即可求得偏转角 θ，从而获得被测轴的角位移。

2. 旋转变压器结构

从转子感应电压的输出方式来看，旋转变压器分为有刷和无刷两种类型。在有刷结构中，转子绕组的端点通过电刷和滑环引出。目前数控机床常用的是无刷旋转变压器，其结构如图 4.23 所示。

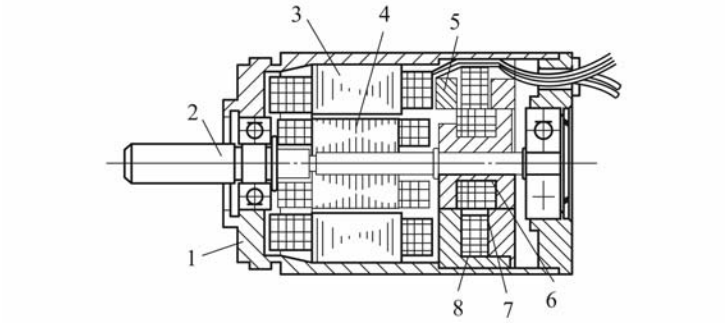


图 4.23　无刷旋转变压器结构

1—壳体　2—转子轴　3—旋转变压器定子　4—旋转变压器转子

5—变压器定子　6—变压器转子　7—变压器一次绕组　8—变压器二次绕组

无刷旋转变压器由两部分组成：一部分称为分解器，由旋转变压器的定子和转子组成；另一部分称为变压器，用它取代电刷和滑环，其一次绕组与分解器的转子轴固定在一起，与转子轴一起旋转。分解器中的转子输出信号接在变压器的一次绕组上，变压器的二次绕组与分解器中的定子一样固定在旋转变压器的壳体上。工作时，分解器的定子绕组外加励磁电压，转子绕组即耦合出与偏转角相关的感应电压，此信号接在变压器的一次绕组上，经耦合由变压器的二次绕组输出。

无刷旋转变压器一般为多级旋转变压器。所谓多级旋转变压器就是增加定子或转子的磁极对数，使电气转角为机械转角的倍数，用来代替单级旋转变压器，不需要升速齿轮，从而提高了定位精度。另外还可用三个旋转变压器按 1∶1、10∶1 和 100∶1 的比例相互配合串联，组成精、中、粗三级旋转变压器测量装置。若精测的丝杠位移为 10mm，则中测范围为 100mm，粗测为 1000mm。为了使机床工作台按指令值到达规定位置，须用电气转换电路在实际值不断接近指令值的过程中，使旋转变压器从“粗”到“中”再到“精”，最后的位置精度由精旋转变压器来决定。

4.3.4　感应同步器

1. 感应同步器的结构和原理

感应同步器也是一种电磁式的位置检测传感器，主要部件由定尺和滑尺组成，它广泛应用于数控机床中。感应同步器由几伏的电压励磁，励磁电压的频率为 10kHz，输出电压较小，一般为励磁电压的 1/10 到几百分之一。感应同步器的结构形式有圆盘式和直线式两种，圆盘式用来测量转角位移，而直线式用来测量直线位移。图 4.24 所示为直线式感应同步器结构示意图。

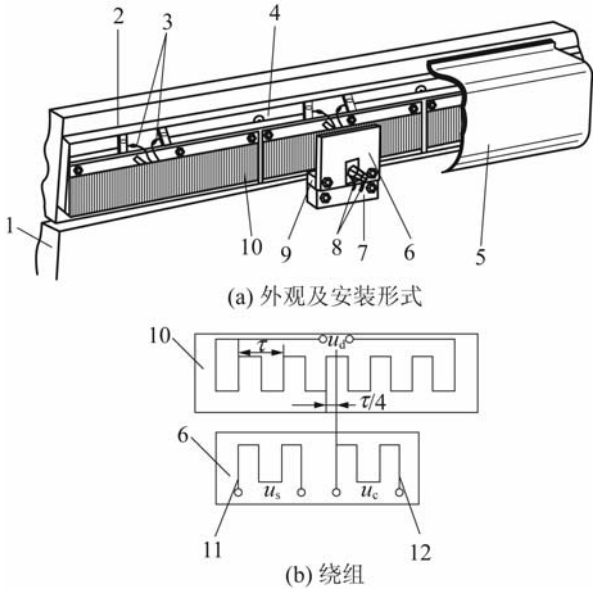


图 4.24　直线式感应同步器结构示意图

1—定部件(床身)　2—运动部件(工作台或刀架)　3—定尺绕组引线　4—定尺座　5—防护罩　6—滑尺　7—滑尺座　8—滑尺绕组引线　9—调整垫　10—定尺　11—正弦励磁绕组　12—余弦励磁绕组

标准的直线式感应同步器定尺长度为 250mm，宽度为 40mm，尺上是单向、均匀、连续的感应绕组；滑尺长 100mm，尺上有两组励磁绕组，一组为正弦励磁绕组，其电压的 u_s，另一组为余弦励磁绕组，其电压为 u_c。感应绕组和励磁绕组节距相同，均为 2mm，用 τ 表示。当正弦励磁绕组与感应绕组对齐时，余弦励磁绕组与感应绕组相差 $1/4\,\tau$。也就是滑尺上的两个绕组在空间位置上相差 $1/4\,\tau$。在数控机床实际检测中，感应同步器常采用多块定尺连接，相邻定尺间隔通过调整，以使总长度上的累积误差不大于单块定尺的最大偏差。定尺和滑尺分别装在机床床身和移动部件上，两者平行放置，保持 0.2mm～0.3mm 间隙，以保证定尺和滑尺的正常工作。

感应同步器的工作原理与旋转变压器相似。当励磁绕组和感应绕组间发生相对位移时，由于电磁耦合的变化，感应绕组中的感应电压随位移的变化而变化。感应同步器和旋转变压器就是利用这个特点进行测量的。所不同的是，旋转变压器变化的是定子和转子的角位移，而直线式感应同步器变化的是滑尺和定子的直线位移。

根据励磁绕组中励磁方式的不同，感应同步器也有相位工作方式和幅值工作方式两种。

(1) 相位工作方式。给滑尺的正弦励磁绕组和余弦励磁绕组分别通以频率相同、幅值相同，但相位差 $\pi/2$ 的励磁电压，即

$$u_s = U_m \sin\omega t$$
$$u_c = U_m \sin(\omega t + \pi/2) = U_m \cos\omega t$$

当滑尺移动 X 距离时，定尺绕组中的感应电压为

$$u_d = k\ U_m \sin(\omega t - \theta) = k\ U_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi X}{\tau}\right) \tag{4-7}$$

式中　k——电磁耦合系数；

U_m——励磁电压幅值；

τ——节距；

X——滑尺移动距离；

θ——电气相位角。

从式(4-7)可以看出，定尺的感应电压与滑尺的位移量有严格对应关系。通过测量定尺感应电压的相位，即可测得滑尺的位移量。

(2) 幅值工作方式。给滑尺的正弦励磁绕组和余弦励磁绕组分别通以相位相同、频率相同，但幅值不同的励磁电压，即

$$u_s = U_{sm} \sin\omega t$$
$$u_c = U_{cm} \sin\omega t$$

其中，U_{sm}、U_{cm} 幅值分别为

$$U_{sm} = U_m \sin\theta_1$$
$$U_{sm} = U_m \cos\theta_1$$

式中　θ_1——电气给定角。

当滑尺移动时，定尺绕组中的感应电压为

$$u_d = k\,U_m \sin\omega t \sin(\theta_1 - \theta) = k\,U_m \sin\omega t\ \sin\Delta\theta$$

当 $\Delta\theta$ 很小时，定尺绕组中的感应电压可近似表示为

$$u_d = k\,U_m \sin\omega t\ \Delta\theta$$

又因为

$$\Delta\theta = \frac{2\pi\Delta X}{\tau}$$

则

$$u_d = k\,U_m \frac{2\pi\Delta X}{\tau}\sin\omega t \tag{4-8}$$

式中　ΔX ——滑尺位移增量。

从式(4-8)可以看出，当位移增量 ΔX 很小时，感应电压的幅值和 ΔX 成正比，因此，可通过测量 u_d 的幅值来测定位移 ΔX 的大小。

2. 感应同步器的特点

(1) 精度高。因为定尺的节距误差有平均补偿作用，所以尺子本身的精度能做得较高。直线式感应同步器对机床位移的测量是直接测量，不经过任何机械传动装置，测量精度取决于尺子的精度。

感应同步器的灵敏度或称分辨力，取决于一个周期进行电气细分的程度，灵敏度的提高受到电子细分电路中信噪比的限制，但是通过线路的精心设计和采取严密的抗干扰措施，可以把电噪声减到很低，并获得很高的稳定性。

(2) 测量长度不受限制。当测量长度大于 250mm 时，可以采用多块定尺接长的方法进行测量。行程为几米到几十米的中型或大型机床中，工作台位移的直线测量大多数采用直线式感应同步器来实现。

(3) 对环境的适应性较强。因为感应同步器定尺和滑尺的绕组是在基板上用光学腐蚀方法制成的铜箔锯齿形的印制电路绕组，铜箔与基板之间有一层极薄的绝缘层。可在定尺的铜绕组上面涂一层耐腐蚀的绝缘层，以保护尺面；在滑尺的绕组上面用绝缘粘接剂粘贴一层铝箔，以防静电感应。定尺和滑尺的基板采用与机床床身热胀系数相近的材料，当温度变化时，仍能获得较高的重复精度。

(4) 维修简单、寿命长。感应同步器的定尺和滑尺互不接触，因此无任何摩擦、磨损，使用寿命长，不怕灰尘、油污及冲击振动。同时由于它是电磁耦合器件，所以不需要光源、光敏元件，不存在元件老化及光学系统故障等问题。

(5) 工艺性好，成本较低，便于成批生产。

3. 感应同步器安装和使用应注意的事项

(1) 感应同步器在安装时必须保持两尺平行、两平面的间隙约为 0.25mm，倾斜度小于 0.5°，装配面波纹度在 0.01mm/250mm 以内。滑尺移动时，晃动的间隙及平行度误差的变化小于 0.1mm。

(2) 感应同步器大多装在容易被切屑及切屑液浸入的地方，所以必须加以防护，否则切屑夹在间隙内，会使定尺和滑尺绕组刮伤或短路，使装置发生无动作及损坏。

(3) 电路中的阻抗和励磁电压不对称以及励磁电流失真度超过 2%，将对检测精度产生很大的影响，因此在调整系统时，应加以注意。

(4) 由于感应同步器感应电势低，阻抗低，所以应加强屏蔽以防止干扰。

4.3.5　光栅尺

光栅尺(又称光栅)是一种高精度的直线位移传感器，是数控机床闭环控制系统中用得较多的测量装置。由光源、聚光镜、标尺光栅(长光栅)、指示光栅(短光栅)和硅光电池等光敏元件组成。光栅尺外观示意图如 4.25 所示。

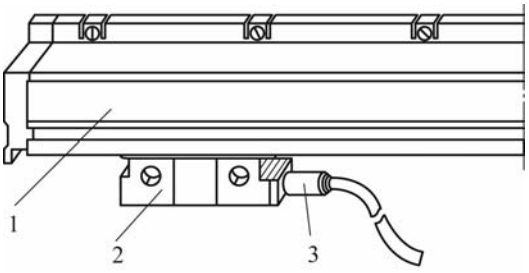
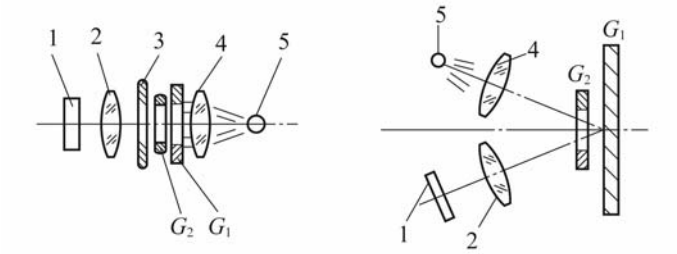


图 4.25　光栅尺外观示意图

1—光栅尺　2—扫描头　3—电缆

光栅尺通常为一长一短两块光栅尺配套使用。其中长的一块称为主光栅或标尺光栅，安装在机床移动部件上，要求与行程等长，短的一块称为指示光栅，指示光栅和光源、透镜、光敏元件装在扫描头中，安装在机床固定部件上。

数控机床中用于直线位移检测的光栅尺有透射光栅和反射光栅两大类，如图 4.26 所示。在玻璃表面上制成透明与不透明间隔相等的线纹，称透射光栅；在金属的镜面上制成全反射与漫反射间隔相等的线纹，称为反射光栅。透射光栅的特点是：光源可以采用垂直入射，光敏元件可直接接收光信号，因此信号幅度大，扫描头结构简单；光栅的线密度可以做得很高，即每毫米上的线纹数多。常见的透射光栅线密度为 50 条/mm、100 条/mm、200 条/mm。其缺点是：玻璃易破裂，热胀系数与机床金属部件不一致，影响测量精度。反射光栅的特点：标尺光栅的膨胀系数易做到与机床材料一致；安装在机床上所需要的面积小，调整也很方便；易于接长或制成整根标尺光栅；不易碰碎；适应于大位移测量的场所。其缺点是：为了使反射后的莫尔条纹反差较大，每毫米内线纹不宜过多。目前常用的反射光栅线密度为 4 条/mm、10 条/mm、25 条/mm、40 条/mm、50 条/mm。



(a)透射光栅　　(b)反射光栅

图 4.26　光栅尺种类

1—光敏元件　2、4—透镜　3—狭缝
5—光源　G_1—标尺光栅　G_2—指示光栅

以下以透射光栅为例介绍光栅尺工作特点和原理。

光栅尺上相邻两条光栅线纹间的距离称为栅距或节距 ω，线密度是指每毫米长度上的线纹数，用 k 表示，栅距与线密度互为倒数，即 $\omega=1/k$。安装时，要求标尺光栅和指示光栅相互平行，它们之间有 0.05mm～0.1mm 的间隙，并且其线纹相互偏斜一个很小的角度 θ，两光栅线纹相交，形成透光和不透光的菱形条纹。在相交处出现的黑色条纹，称为莫尔条纹。莫尔条纹的传播方向与光栅线纹大致垂直。两条莫尔条纹间的距离称为纹距 W，因偏斜角度 θ 很小，所以有近似公式 $W=\omega/\theta$。当工作台正向或反向移动一个栅距 ω 时，莫尔条纹向上或向下移动一个纹距，如图 4.27 所示。莫尔条纹经狭缝和透镜由光敏元件接收，产生电信号。

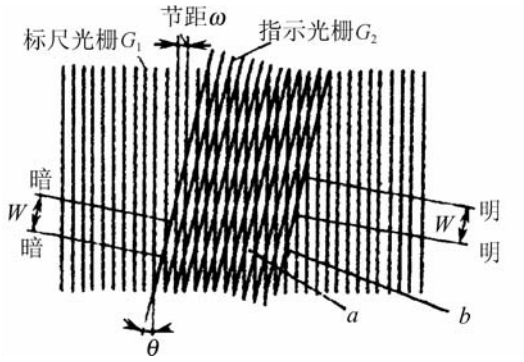


图 4.27　光栅尺工作原理

光栅尺的莫尔条纹具有以下特点。

(1) 起放大作用。因为 θ 角度非常小，因此莫尔条纹的纹距 W 要比栅距大得多，如 k=100 条/mm，则 ω=0.01mm。如果调整 θ=0.001rad，则 W=10mm。这样，虽然光栅尺栅距很小，但莫尔条纹却清晰可见，便于测量。

(2) 莫尔条纹的移动与栅距成比例。当标尺光栅移动时，莫尔条纹就沿着垂直于光栅尺运动的方向移动，并且光栅尺每移动一个栅距 ω，莫尔条纹就准确地移动一个纹距 W，只要测量出莫尔条纹的数目，就可以知道光栅尺移动了多少个栅距，而栅距是制造光栅尺时确定的，因此工作台的移动距离就可以计算出来。如一光栅尺 k=100 条/mm，测得由莫尔条纹产生的脉冲为 1000 个，则安装有该光栅尺的工作台移动了 0.01mm/条×1000 个=10mm。

另外，当标尺光栅随工作台运动方向改变时，莫尔条纹的移动方向也发生改变。标尺光栅右移时，莫尔条纹向上移动；标尺光栅左移时，莫尔条纹向下移动。由此可见，为了判别光栅尺移动的方向，必须沿着莫尔条纹移动的方向安装两组彼此相距 $W/4$ 的光敏元件 A 和 B，使莫尔条纹经光敏元件转换的电信号相位差 90°，光敏元件输出信号采用 A、$\overline{\text{A}}$ 和 B、$\overline{\text{B}}$ 差动输出，便于传输的抗干扰。差动输出信号经处理后，获得 P_A 和 P_B 信号，P_A、P_B 的超前和滞后经方向判别电路处理得到以高、低电平表示的方向信号，高、低电平信号分别表示光栅尺移动的两个方向，如图 4.28 所示。光栅尺中的光敏元件安排如图 4.29 所示。

光栅尺与光电编码器相同，有增量式和绝对式之分。增量式光栅也设有零标志脉冲，它可以设置在光栅尺的中点，也可以设置一个或多个零标志脉冲。绝对式光栅尺输出二进制 BCD 码或格雷码。另外，光栅除了光栅尺外还有圆光栅，用于角位移的测量。圆光栅的组成和原理与光栅尺相同。

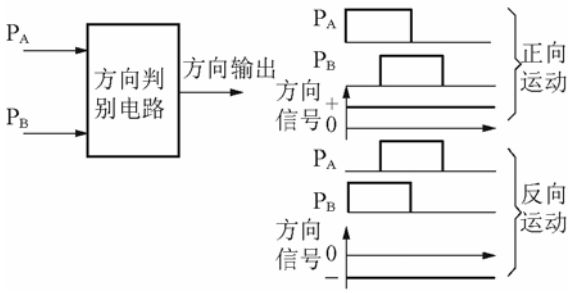


图 4.28　移动方向判别

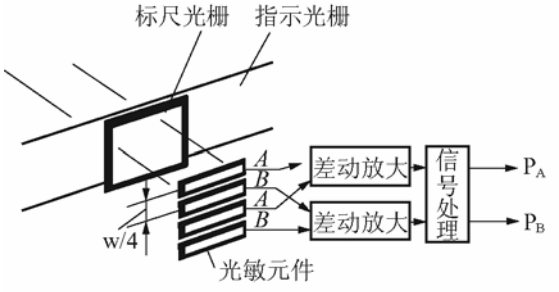
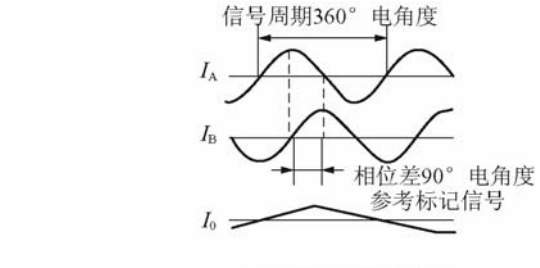
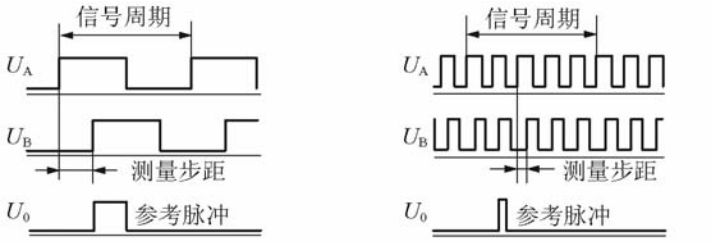


图 4.29　测量电路

光栅尺输出有两种：一种是正弦波信号，一种是方波信号。正弦波输出有电流型和电压型，对正弦波输出信号需经差动放大、整形后得到脉冲信号。为了提高光栅尺检测装置的精度，可以提高刻线精度和增加刻线密度。但刻线密度达到 200 条/mm 以上的细光栅尺刻线制造较困难，成本也高。因此通常采用倍频处理来提高光栅尺的分辨精度，如原光栅线密度为 50 条/mm，经 5 倍频处理后，相当于线密度提高到 250 条/mm。图 4.30 所示为 HEIDENHAIN 光栅尺电流型输出信号经 5 倍频处理后的信号波形。



(a) 正弦测量信号波形



(b) 整形后的测量信号波形　　(c) 5倍频处理后的测量信号波形

图 4.30　信号处理波形

4.3.6　磁栅

磁栅是一种计算磁波数目的位置检测元件。它由磁性标尺、磁头和检测电路组成。按其结构分为直线形和圆形磁栅，分别用于直线位移和角位移的检测。其优点是精度高，复制简单和安装方便，对使用环境的条件要求较低，对周围电磁场的抗干扰能力较强，在油污、粉尘较多的场合下使用有好的稳定性。

1. *磁性标尺*

磁性标尺通常采用热胀系数与普通钢相同的不导磁材料做基体，在基体上镀上一层10 μm～30 μm厚的高导磁性材料，形成均匀磁膜。再用录磁磁头在尺上记录相等节距的周期性磁化信号，作为测量基准，信号可为正弦波、方波等。节距通常有0.05mm、0.1mm、0.2mm，最后在磁尺表面还要涂上一层1 μm～2 μm厚的保护层，以防止磁头与磁尺频繁接触而引起磁膜磨损。磁性标尺按基本形状可分为带状磁尺、线状磁尺和圆形磁尺，如图4.31所示。

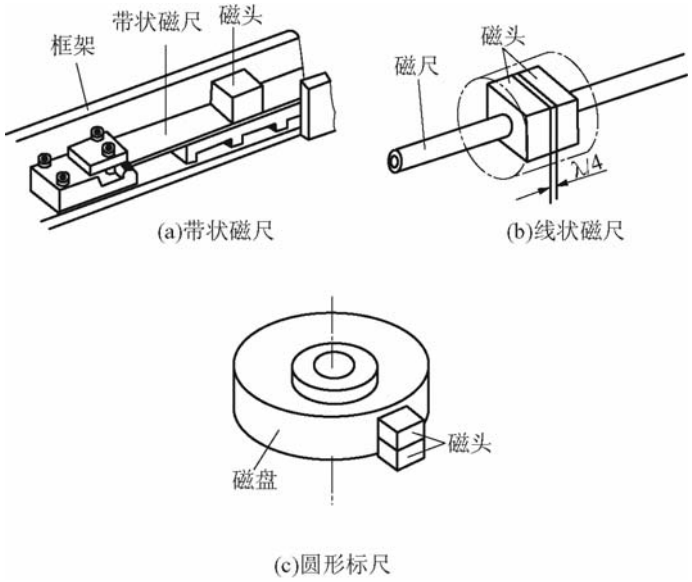


图 4.31　磁性标尺

带状磁尺的特点是磁尺固定在用低碳钢做成的屏蔽壳体内，并以一定的预紧力绷紧在框架或支架中，框架固定在机床上，使带状磁尺与机床一起胀缩，从而减小温度对测量精度的影响。线状磁尺的特点是磁尺套在磁头中间，与磁头同轴，两者之间保持很小的间隙，由于磁尺包围在磁头中间，对周围电磁起到了屏蔽作用，所以抗干扰能力强，输出信号大。圆形磁尺的特点是磁尺做成圆形磁盘或磁鼓形状，磁头和带状磁尺的磁头相同，圆形磁尺主要用来检测角位移。

2. *拾磁磁头*

拾磁磁头是一种磁电转换器，用来把磁性标尺上的磁化信号检测出来变成电信号送给

检测电路。根据数控机床的要求，为了在低速运动和静止时也能进行位置检测，必须采用磁通响应型磁头。磁通响应型磁头是一个带有可饱和铁心的磁性调制器。它由铁心、两个串联的励磁绕组和两个串联的拾磁绕组组成，如图 4.32 所示。

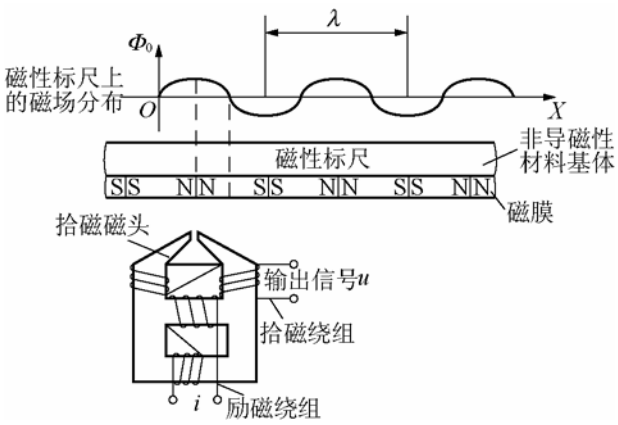


图 4.32　磁通响应型磁头

其工作原理是将高频励磁电流通以励磁绕组时，在磁头产生上磁通，当磁头靠近磁性标尺时，磁性标尺上的磁信号产生的磁通通过磁头铁心，并被高频励磁电流产生的磁通调制，从而在拾磁绕组中感应出电压信号输出。其输出电压为

$$U = U_0 \sin 2\omega t \sin\frac{2\pi X}{\lambda}$$

式中　U_0——感应电压系数；

λ——磁性标尺上磁化信号节距；

X——磁头在磁性标尺上的位移量；

ω——励磁电流角频率。

为了辨别磁头在磁尺上的移动方向，通常采用了间距为$(m \pm 1/4)\lambda$的两组磁头(其中 m 为任意正整数)，如图 4.33 所示。其输出电压为

$$u_1 = U_0 \sin 2\omega t \sin\frac{2\pi X}{\lambda}$$

$$u_2 = U_0 \sin 2\omega t \cos\frac{2\pi X}{\lambda}$$

u_1 和 u_2 为相位相差 90° 的两列信号。根据两个磁头输出信号的超前或滞后，可判别磁头的移动方向。

使用单个磁头的输出信号很小，为了提高输出信号的幅值，同时降低对录制的磁化信号正弦波形和节距误差的要求，在实际使用时常将几个到几十个磁头以一定的方式连接起来，组成多间隙磁头，如图 4.34 所示。多间隙磁头都以相同的间距 λm/2 配置，相邻两磁头的输出绕组反向串联。因此，输出信号为各磁头输出信号的叠加。多间隙磁头具有高精度、高分辨率、输出电压大等优点。输出电压与磁头数 n 成正比，例如当 n=30，ω=5kHz 时，输出信号的峰−峰值达数毫伏，而 ω=25kHz 时，峰−峰值高达 1V 左右。

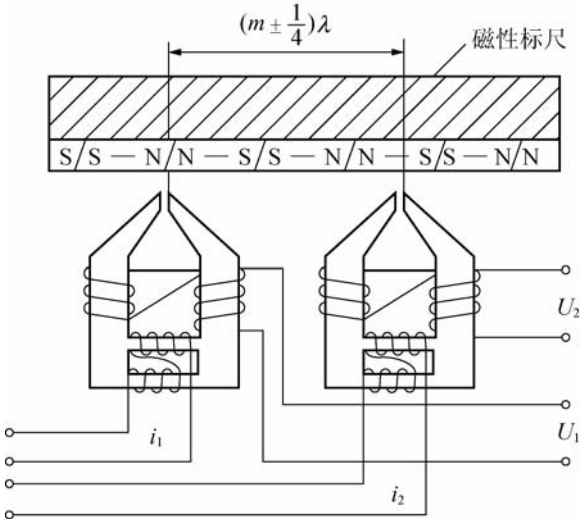


图 4.33　移动方向检测原理图

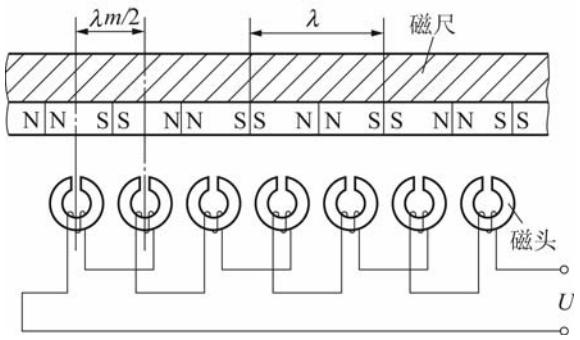


图 4.34　多间隙磁头

3. 检测电路

磁栅检测电路包括：磁头励磁电路，读取信号的放大、滤波、整形及辨向电路，细分内插电路，显示及控制电路等部分。根据检测方法不同，检测电路分为鉴幅检测和鉴相检测。鉴幅检测比较简单，但分辨率受到录磁节距的限制，若要提高分辨率就必须采用较复杂的倍频电路，所以不常采用。鉴相检测的精度可以大大高于录磁节距，并可以通过内插脉冲频率以提高系统的分辨率，所以鉴相检测应用较多。以双磁头相位检测为例，给两磁头分别通以频率、幅值相同，相位差 $\pi/2$ 的励磁电流，则在两个磁头的拾磁绕组中分别输出电压 u_1 和 u_2，即

$$u_1 = U_0\cos\omega t\sin\frac{2\pi X}{\lambda}$$

$$u_2 = U_0\sin 2\omega t\cos\frac{2\pi X}{\lambda}$$

在求和电路中相加，则磁头总输出电压为

$$u = U_0\sin(2\omega t+\frac{2\pi X}{\lambda}) \tag{4-9}$$

从式(4-9)可以看出，磁性标尺输出电压随磁头相对于磁性标尺的相对位移量 X 的变化而变化，根据输出电压的相位变化，可以测量磁栅的位移量。鉴相检测系统如图 4.35 所示。从图 4.35 看出，振荡器送出的信号经分频器、低通滤波器得到较好的正弦波信号，一路经 $\pi/2$ 移相后功率放大至磁头 II 的励磁绕组，另一路经功率放大至磁头 I 的励磁绕组，将两磁头的输出信号送入求和电路中相加，并经带通滤波、限幅、放大整形得到与位置量有关的信号，送入鉴相内插电路中进行内插细分，得到分辨率为预先设定单位的计数信号。计数信号送入可逆计数器，进行系统控制和数字显示。

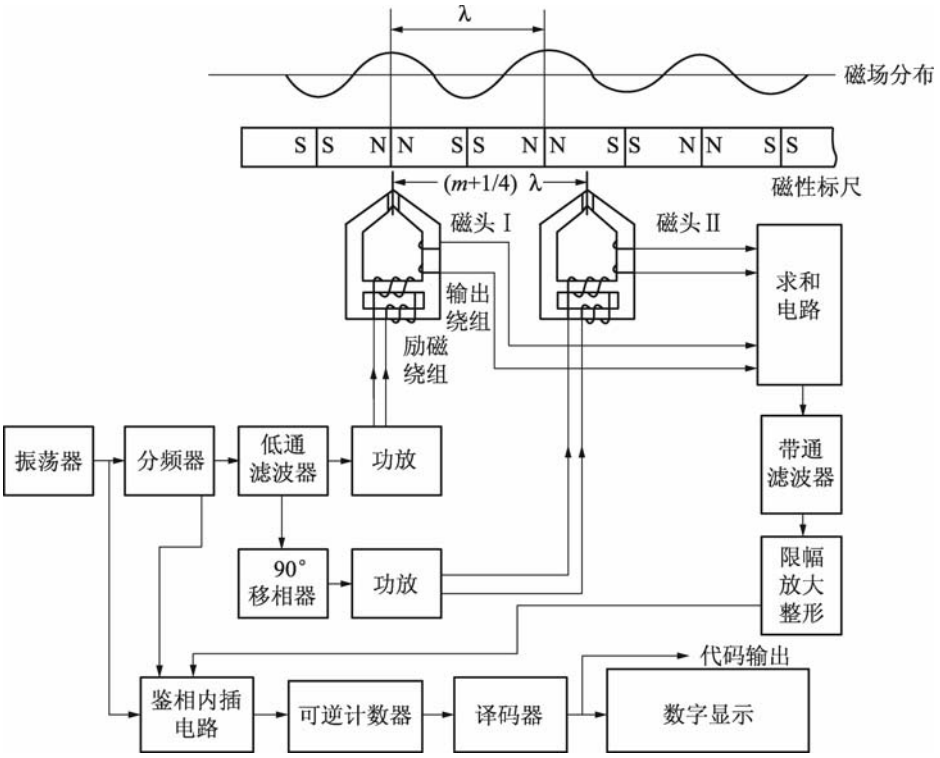


图 4.35　鉴相检测系统

磁性标尺制造工艺比较简单，录磁、去磁都比较方便。采用激光录磁，可得到很高的精度。直接在机床上录制磁性标尺，不需要安装、调整工作，避免了安装误差，从而可得到更高的精度。磁性标尺还可以制作得较长，用于大型机床。

4.4　位置控制和速度控制

位置控制和速度控制是数控机床进给伺服系统的重要环节。位置控制根据计算机插补运算得到的位置指令，与位置检测装置反馈来的机床坐标轴的实际位置相比较，形成位置偏差，经变换得到速度给定电压。速度控制单元根据位置控制输出的速度电压信号和速度检测装置反馈的实际转速对伺服电动机进行控制，以驱动机床传动部件。因为速度控制单元是伺服系统中的功率放大部分，所以也称速度控制单元为驱动装置或伺服放大器。

4.4.1　位置控制

从理论上来说，位置控制的类型可以有很多，但目前在 CNC 系统中实际使用的主要只有两种类型：“比例型”和“比例加前馈型”。这主要是由数控机床位置控制的特殊要求所决定的。在数控机床位置进给控制中，为了加工出光滑的零件表面，不允许出现位置超调，采用“比例型”和“比例加前馈型”的位置控制器，可以较容易地达到上述要求。就闭环和半闭环伺服系统而言，位置控制的实质是位置随动控制，其控制原理如图 4.36 所示。

图 4.36 中，位置比较器的作用是实现位置的比较，即 $P_e=P_c-P_f$。位置/速度变换是将位置偏差转换为速度控制信号。

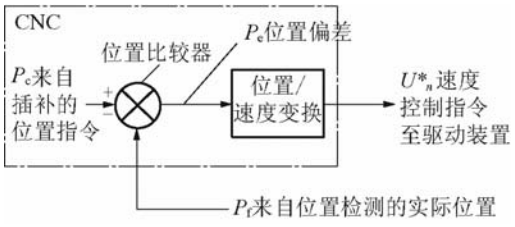


图 4.36　位置控制原理

实现位置比较的方法有：脉冲比较法、相位比较法和幅值比较法。

1. 脉冲比较法

1) 组成脉冲比较器

脉冲比较器由可加减的可逆计数器和脉冲分离器组成，如图 4.37 所示。它用于将脉冲信号 P_C 与反馈的脉冲信号 P_f 相比较，得到脉冲偏差信号 P_e。能产生脉冲信号的位置检测装置有光栅尺、光电编码器等。P_{c+}、P_{c-}、P_{f+}、P_{f-}的加减定义见表 4-1。

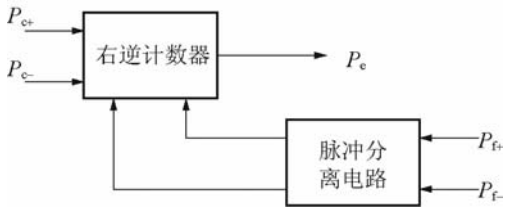


图 4.37　脉冲比较器

表 4-1　P_{c+}、P_{c-}、P_{f+}、P_{f-}的加减定义

位置指令	含义	可逆计算器运算	位置反馈	含义	可逆计数器运算
P_{c+}	正向运动指令	+	P_{f+}	正向位置反馈	–
P_{c-}	反向运动指令	–	P_{f-}	反向位置反馈	+

2) 原理

当数控系统要求工作台向一个方向进给时，经插补运算得到一系列进给脉冲作为指令脉冲，其数量代表了工作台的指令进给量，频率代表了工作台的进给速度，方向代表了工作台的进给方向。以增量式光电编码器为例，当光电编码器与伺服电动机及滚珠丝杆直连

时，随着伺服电动机的转动，光电编码器产生序列脉冲输出，脉冲的频率将随着电动机转速的快慢而升降。

现设工作台的初始状态静止，若指令脉冲 P_c =0，这时反馈信号 P_f =0，偏差信号 P_e=0，则伺服电动机的速度给定值为零，工作台继续保持静止状态。若给定一正向指令脉冲 P_{c+}=2，可逆计数器加 2，在工作台尚未移动之前，反馈信号 P_{f+}=0，可逆计数器输出 P_e= P_c–P_f= 2，经位置/速度变换，得到正的速度指令，伺服电动机正转，工作台正向进给。工作台正向运动，即有反馈信号 P_{f+}产生，当 P_{f+}=1，可逆计数器减 1，此时 P_e= P_c–P_f=1＞0，伺服电动机仍正转，工作台继续正向进给。当 P_{f+}=2 时，P_e= P_c —P_f=0，则速度指令为零，伺服电动机停转，工作台停止在位置指令所要求的位置。

当指令脉冲为反向 P_{c-}时，控制过程与正向时相同，只是 P_e＜0，工作台反向运动。

脉冲比较过程中值得注意的问题是：指令脉冲和反馈脉冲分别来自插补器和光电编码器。虽然经过一定的整形和同步处理，但两种脉冲源有一定的独立性，脉冲的频率随运转速度的不同而不断变化，脉冲到来的时刻两脉冲源互相可能错开或重叠。在进给控制的过程中，可逆计数器要随时接受加法或减法两路计数脉冲。当这两路计数脉冲先后到来并有一定的时间间隔，则该计数器无论先加后减，或先减后加，都能可靠地工作。但是，如果两路脉冲同时进入计数脉冲输入端，则计数器的内部操作可能会因脉冲的“竞争”而产生误操作，影响脉冲比较的可靠性。为此，必须在指令脉冲与反馈脉冲进入可逆计数器之前，进行脉冲分离处理。

脉冲分离电路的作用是：当加减脉冲先后分别到来时，各自按预定的要求经加法计数或减法计数的脉冲输出端进入可逆计数器；若加减脉冲同时到来，则由硬件逻辑电路保证，先作加法计数，然后经过几个时钟的延时再作减法计数，这样可保证两路计数脉冲信号均不丢失。

当采用绝对式光电编码器时，通常情况下，先将位置检测的代码反馈信号经数码-数字转换，变成数字脉冲信号，再进行比较。

2. 相位比较法

1) 组成

相位比较法实质是脉冲相位的比较，而不是脉冲数量上的比较。相位比较的位置检测装置可采用旋转变压器、感应同步器或磁栅，使这些装置工作在相位工作状态。如图 4.38 所示为感应同步器相位比较控制原理框图。

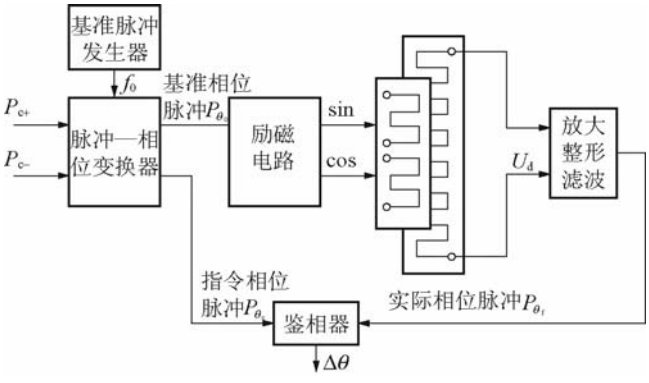


图 4.38　感应同步器相位比较控制原理框图

2) 原理

图中基准脉冲发生器通过脉冲-相位变换器进行分频，产生基准相位脉冲 P_{θ_0}，该脉冲经过励磁电路，形成与基准相位脉冲 P_{θ_0} 同频率的正、余弦励磁电压加在感应同步器的正、余弦励磁绕组上。根据感应同步器的工作原理，当其工作在相位方式时，感应电压 $U_d = kU_m \sin(\omega t - \theta)$。其中 $\theta = \dfrac{2\pi X}{\tau}$。可知感应同步器的感应电压 U_d 的相位 θ 随着工作台的移动而发生变化，相对于基准相位 θ_0 有超前或滞后。感应电压 U_d 经放大、整形、滤波产生实际相位脉冲 P_{θ_f}。进给指令脉冲 P_c 经过脉冲–相位变换器的加、减，再通过分频产生超前或滞后于 P_{θ_0} 的指令相位脉冲 P_{θ_c}。由于指令相位脉冲 P_{θ_c} 的相位 θ_c 和实际相位脉冲 P_{θ_f} 的相位 θ_f 均以基准相位脉冲 P_{θ_0} 的相位 θ_0 为基准，因此，θ_c 和 θ_f 通过相位比较器即鉴相器可获得信号。鉴相器的输出信号经低通滤波，变换成为平滑的电压信号，作为速度控制信号，同时，鉴相器还必须对超前或滞后作出判别，使得控制信号 U_n^* 在正向指令时为正，反向指令时为负。

下面以 $P_{c+}=2$ 为例进行相位比较，设工作台的初始状态静止。

初始无进给指令时，即 $P_{c+}=0$，工作台静止，指令脉冲相位 θ_c 与基准脉冲相位 θ_0 同相位，同时速度控制信号为零，伺服电动机不转，工作台仍静止，如图 4.39(a)所示。当有正向进给指令时，即 $P_{c+}=2$，在指令获得瞬间，工作台仍静止，此时指令脉冲相位 θ_c 超前基准脉冲相位 θ_0，但实际脉冲相位 θ_f 保持不变，经鉴相器 $\Delta\theta > 0$，速度控制信号大于零，伺服电动机正转，工作台正向移动，如图 4.39(b)所示。随着工作台正向移动，有反馈信号产生，若 $P_{f+}=1$，此时产生的实际脉冲相位 θ_f 超前基准脉冲相位 θ_0，但 θ_c 仍超前 θ_f，速度控制信号仍然大于零，工作台正向移动，如图 4.39(c)所示。随着工作台的继续正向移动，实际脉冲相位 θ_f 超前基准脉冲相位 θ_0 的数值增加，反馈信号 $P_{f+}=2$ 时，$\theta_c = \theta_f$，经鉴相器 $\Delta\theta = 0$，速度控制信号等于零，伺服电动机停转，工作台停止在指令所要求的位置上，如图 4.39(d)所示。

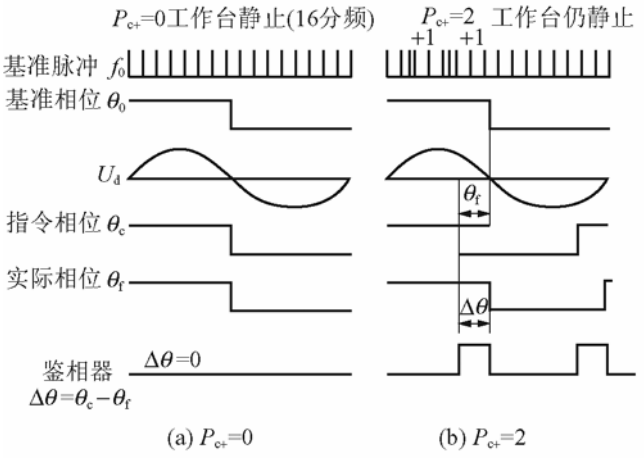
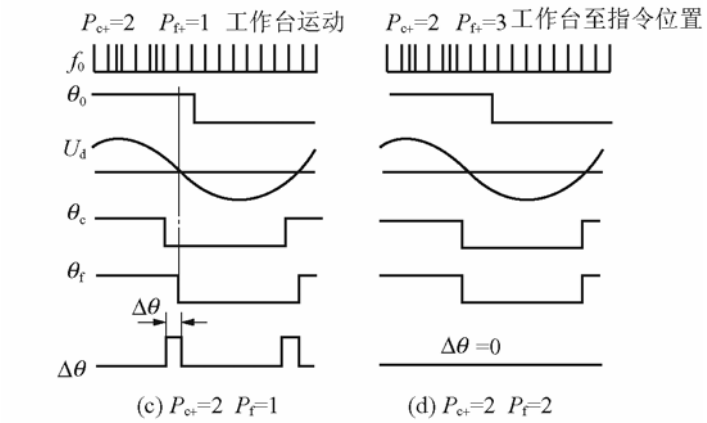


图 4.39　相位比较波形



续图 4.39　相位比较波形

当进给为反向指令时，相位比较同正向进给类似。不同的是指令脉冲相位 θ_c 相对于基准脉冲相位 θ_0 负脉冲，故指令脉冲相位 θ_c 相对于基准脉冲相位 θ_0 为滞后，同时，实际脉冲相位 θ_f 对基准脉冲相位 θ_0 也为滞后，经鉴相器比较后所得的速度控制信号为负，伺服电动机反向转动，工作台反向移动到指令位置。

至于一个脉冲相当于多少相位增量，取决于脉冲−相位变换器中的分频系数 N 和脉冲当量。如感应同步器一个节距 τ=2mm(相当于 360°)，分频系数 N=2000，则脉冲当量 $\delta=\tau/N$=2/2000=0.001 mm/脉冲，相位增量为 $\delta/\tau\times360°$=0.001/2×360°=0.18°/脉冲，即一个脉冲有 0.18° 的相位移。

当采用旋转变压器时，相位角就是角位移本身。

3. 幅值比较法

1) 组成

幅值比较是以位置检测信号的幅值大小来反映机械位移的数值，并以此为位置反馈信号，与指令信号进行比较得到位置偏差信号。位置检测装置可采用旋转变压器或感应同步器的幅值工作状态。图 4.40 所示为感应同步器幅值比较控制原理图。

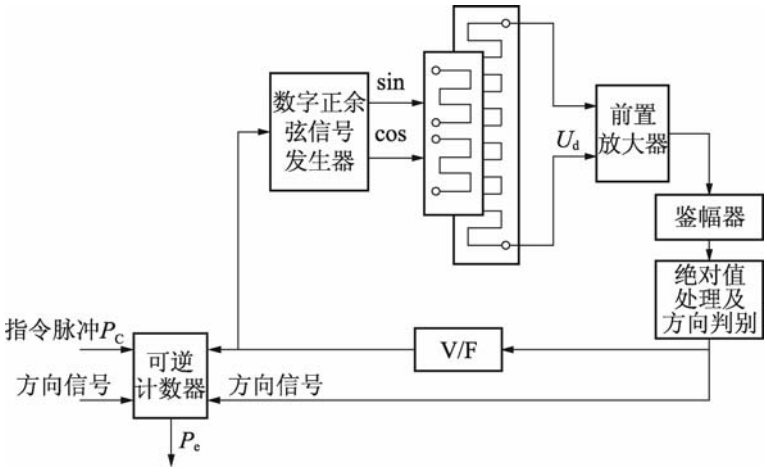


图 4.40　感应同步器幅值比较控制原理图

2) 原理

感应同步器工作在幅值工作状态时，即给滑尺的正、余弦绕组分别通以相位相同、频率相同，但幅值不同的励磁电压。当滑尺移动时，定尺上的感应电压 $U_d=kU_m\sin\omega t\sin(\theta_1-\theta)=kU_m\sin\omega t\sin\Delta\theta$，当 $\Delta\theta$ 很小时，$U_d\approx kU_m\frac{2\pi}{\tau}\Delta X\sin\omega t$。每当移动一个位移增量，就有感应电压 U_d 产生，当 U_d 值超过某一预先整定的门槛电平时，就产生脉冲，该脉冲作为反馈脉冲 P_f 与指令脉冲比较得到偏差脉冲 P_e，经转换变为速度控制信号。同时为了使电气设定角 θ_1 跟随位移角 θ 的变化，脉冲信号 P_f 用来修正励磁信号 u_s、u_c，使感应电压重新降低到门槛电平以下，这样，通过不断的修正、比较，实现对位置的控制。由此，幅值比较的实质仍然是脉冲比较。

至于 P_c 和 P_f 什么时候加、什么时侯减，则根据指令脉冲的方向信号和反馈脉冲的方向信号，方法同前述的脉冲比较法。反馈信号由感应同步器定尺绕组输出的感应电压 U_d 经前置放大器整形放大后，送鉴相器，产生正比于幅值的门槛电平信号，该电平信号同时又反映了工作台移动的方向，正向移动为正，反向移动为负。鉴幅器输出的电平信号经绝对值及方向判别电路处理后，将正、反方向移动的信号统一为正信号，正、反移动方向用高、低电平来表示。电压-频率(V/F)变换器的任务是把门槛电平变换成相应的脉冲序列，该脉冲序列的重复频率与门槛电平的高、低成正比。幅值比较控制的信号变换如图 4.41 所示。

必须指出：由于转子的转动使角 θ 发生了变化，若角 θ_1 不跟随作相应变化，虽然工作台在向指令位置靠近，但 $\theta_1-\theta$ 的差值反而进一步扩大了，这不符合系统设计要求。为了使 θ_1 跟随 θ 变化，通过数字正、余弦信号发生器产生正、余弦励磁电压。所谓数字正、余弦信号发生器是指提供给滑尺的正、余弦励磁信号不是正弦电压，而是脉宽可调的方波脉冲，如图 4.42 所示。它将电气设定角 θ_1 与励磁脉冲的宽度联系起来。对于这样一组方波信号，根据傅里叶级数可以由一组波形组成，其中基波信号 $u_s=4U/\pi\sin\theta_1\sin\omega t$，$u_c=4U/\pi\cos\theta_1\sin\omega t$。如果设定 $U_m=4U/\pi$，则 u_s、u_c 等同于幅值工作时的励磁电压。

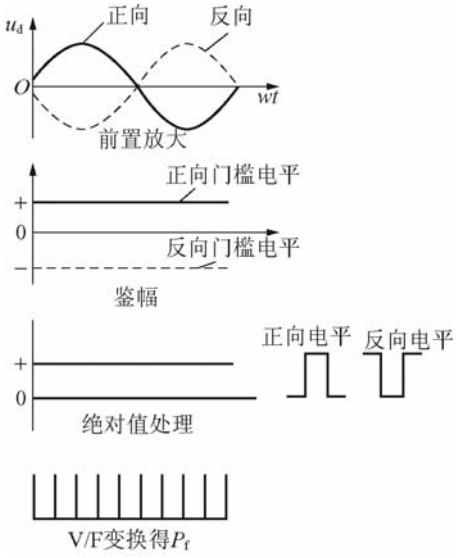


图 4.41　幅值比较控制的信号变换

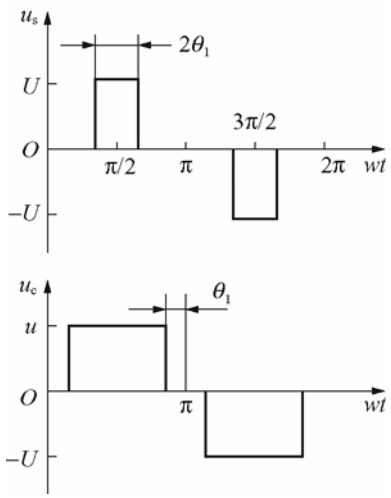


图 4.42　数字正、余弦励磁信号

总之，对感应同步器而言，在幅值比较时，每移动一个位移增量 ΔX，通过变换即产生一定的反馈脉冲 P_f，工作台不断移动，P_f 不断产生，经脉冲比较得到偏差脉冲 P_e，直至指令脉冲 P_c 等于反馈脉冲 P_f，P_e 等于零，工作台停止在指令要求的位置上。

对旋转变压器而言，在幅值比较时，每转过一个角位移增量 $\Delta\theta$，即产生一定的反馈脉冲。

其他同感应同步器。经位置控制的脉冲比较、相位比较或幅值比较获得的位置偏差均以脉冲的形式存在，该位置偏差经一定的转换后，形成速度信号，数控系统一般输出的控制信号为模拟电压–10V～＋10V，作为伺服驱动装置的控制信号。该信号通过伺服驱动装置驱动伺服电动机。速度控制信号的大小与伺服电动机的转速成正比；速度控制信号的正、负决定了伺服电动机的正、反转。图 4.43 所示为从位置偏差到速度控制信号的形成过程。其中速度指令 V_c=位置偏差 P_e×位置增益 K_v。位置增益 K_v 决定了速度对位置偏差的响应程度，它反映了伺服系统的灵敏度。

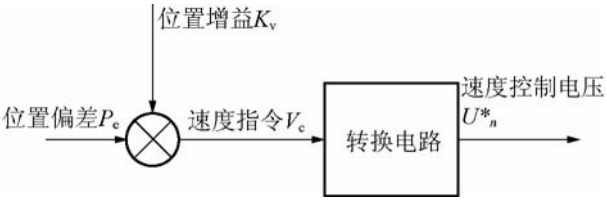


图 4.43　速度控制信号的形成

4.4.2　速度控制

速度控制装置也称驱动装置。数控机床中的驱动装置又因驱动电动机的不同而不同。步进电动机的驱动装置有高低压切换、恒流斩波等。直流伺服电动机的驱动装置有脉宽调制(PWM)、晶闸管(SCR)控制。交流伺服电动机的驱动装置有他控变频控制和自控变频控制。直流主轴电动机的驱动装置有交流晶闸管(SCR)控制，交流主轴电动机的驱动装置有通用变频控制和矢量控制。驱动装置中常用的功率器件有大功率晶体管、功率场效应晶体管、绝缘门级晶体管、普通晶闸管和可关断晶闸管等。这些功率器件在驱动装置中的作用就是将控制信号进行功率放大。

1. 步进电动机驱动装置

由前述可知，步进电动机采用的是脉冲控制方式。要求驱动装置按一定规律对各相绕组轮流通电，才能使步进电动机实现转动。且通电循环拍数和每拍通电相数对步进电动机的矩频特性、稳定性都有很大的影响。循环拍数越多，步距角越小，定位精度越高。步进电动机的相数 m 也对其自身的运行性能有很大影响。因此，可采用多相步进电动机，并以 $2m$ 拍方式工作。但双 m 和 $2m$ 拍工作方式功耗都比单 m 拍的大。

只要控制步进电动机指令脉冲的数量即可控制工作台移动的位移量，控制其指令脉冲的频率即可实现工作台移动速度的控制。所以步进电动机驱动装置解决的第一个问题是环形分配；第二个问题是功率放大，因为数控机床所用的功率步进电动机要求驱动系统必须有足够的驱动功率。

1) 环形分配

环形分配用于控制步进电动机的通电方式，其作用就是将数控装置送来的一串指令脉冲按一定的顺序和分配方式控制各相绕组的通、断电。图 4.44 所示为三相三拍制步进电动机的环形分配。

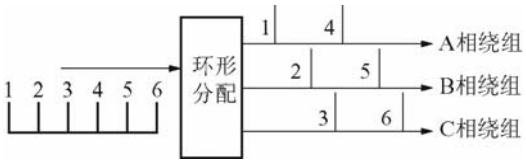


图 4.44　三相三拍制步进电动机的环形分配

实现环形分配的方法有两种：一种是由包括在驱动装置内部的环形分配器实现，称为硬件环形分配，简称硬环分。另一种称为软件环形分配，简称软环分，即环形分配由数控装置中的计算机软件来完成，驱动装置没有环形分配器。硬件环形分配驱动与数控装置的连接如图 4.45 所示，软件环形分配驱动与数控装置的连接如图 4.46 所示。

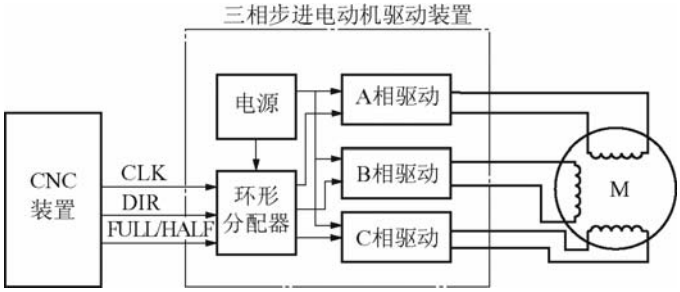


图 4.45　硬件环形分配驱动与数控装置的连接

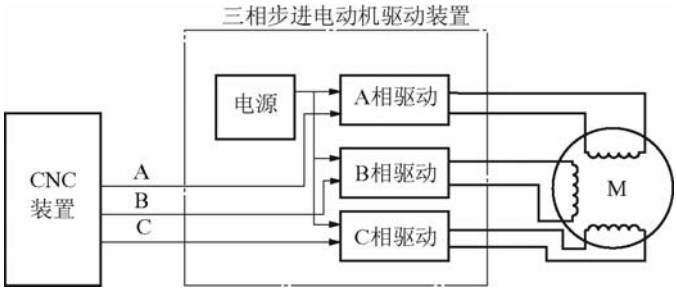


图 4.46　软件环形分配驱动与数控装置的连接

图 4.45 中，数控装置只需根据加工对象的运行轨迹，按插补运算结果发出脉冲 CLK，每个脉冲的上升沿或下降沿到来时，输出则改变一次绕组的通电状态，对应电动机转过一个固定的角度。环形分配器的输入、输出信号一般为 TTL 电平，输出 A、B、C 信号变为高电平则表示相应的绕组通电，低电平则表示相应的绕组失电。DIR 为数控装置所发出的方向信号，其电平的高低对应电动机绕组通电顺序的改变，即控制步进电动机的正、反转。FULL/HALF 用于控制电动机的通电方式，其电平的高低用来控制电动机的整步(对三相步进电动机即为三拍运行)或半步(对三相步进电动机即为六拍运行)，一般情况下，根据需要将其设定为固定的电平即可。

2) 驱动电路

驱动电路的主要作用是对控制脉冲进行功率放大，以使步进电动机获得足够大的功率驱动负载运行。设计步进电动机驱动电路时应考虑步进电动机的运行特点。特别是要注意在通电脉冲内应使励磁绕组的电流能快速地建立，而在断电时，电流又能快速地消失。由于步进电动机绕组对驱动电路来说是感性负载，存在反电动势，其电流的建立和消失总是落后于电压。一般情况下可以认为，当经过 3 τ～4 τ 时间，绕组的电流近似达到稳定，$\tau=L/(R_S+R)$，L 和 R 分别为电动机绕组的电感和电阻，R_S 为串联在电动机电枢绕组中的电阻。由此可见，要保证电流快速建立和消失，应尽量减小时间常数 τ。对用户来讲，可采用在电动机绕组串联电阻 R_S 的方式来减小时间常数。要注意，太大的 R_S 会使电流减小，故需提高励磁电压，但励磁电压的提高又要受到开关元件耐压程度的限制，故步进电动机常采用高、低压双电压驱动。

(1) 单电压驱动电源。图 4.47 所示为晶体管单电压驱动电源电路。U_{cp} 是步进电动机的脉冲控制信号，当控制信号 U_{cp} 为高电平时，功率晶体管 V 饱和导通，集电极电流流过电动机的一相绕组 W。当控制信号 U_{cp} 为低电平时，功率晶体管 V 截止关断，此时电枢绕组会产生很大的反电动势，这个反电动势经续流二极管 VD 续流，电动机的电枢绕组仍有电流流过。续流二极管 VD 的另一个作用是防止功率晶体管 V 在截止时被高压击穿。因为若没有设置续流二极管，功率晶体管 V 截止时电枢绕组产生的很大反电动势会与电源电压 U 一起作用于功率晶体管 V，使其击穿。R_d 用来减小泄放回路的时间常数 τ，$\tau=L/(R_S+R_d+R)$，提高电流的泄放速度，从而改善电动机的高频特性。但 R_d 太大，会使步进电动机的低频性能明显变坏，电磁阻尼作用减弱，共振加剧。R_S 的一个作用是限制电枢绕组电流；另一个作用是减小绕组回路的时间常数，使绕组中的电流能够迅速地建立起来，提高电动机的工作频率。但 R_S 太大，会因消耗太多功率而发热，且会减小绕组中的电压，所以单电压驱动电源一般用于小功率步进电动机的驱动。该电路只供步进电动机的一相绕组工作，若为三相步进电动机则需三组电路供电。

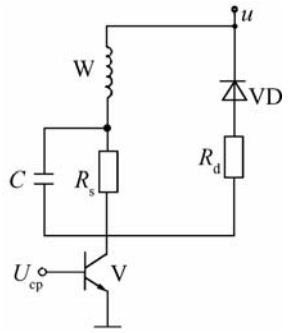


图 4.47　晶体管单电压驱动电源电路

电容 C 用来提高绕组脉冲电流的前沿。当功率晶体管导通瞬间，电容相当于短路，使瞬间的冲击电流流过绕组，因此，绕组中脉冲电流的前沿明显变陡，从而提高了步进电动机的高频特性。

(2) 双电压驱动电源。这种电路的特点是：它采用两套电源给电动机绕组供电，一套是高压电源，另一套是低压电源。步进电动机的绕组每次通电时，首先接通高压，维持一

段时间，以保证电流以较快的速度上升，然后变为低压供电，维持绕组中的电流为额定值。这种驱动电路由于采用高压驱动，电流增长加快，绕组上脉冲电流的前沿变陡，使电动机的转矩、启动及运行频率都得到提高。又由于额定电流由低压维持，故只需较小的限流电阻，功耗较小。根据高压脉冲的控制方式不同，产生了如高压定时控制、恒流斩波控制、电流前沿控制、平滑斩波控制等各种派生电路。

下面以恒流斩波控制为例说明双电压驱动电源的工作原理。

恒流斩波驱动电源也称电流驱动电源，或称波顶补偿控制驱动电源。图 4.48 所示为恒流斩波驱动电源电路及波形图。图中高压功率晶体管 V_g 的通断同时受到步进脉冲信号 U_{cp} 和运算放大器 N 的控制。在步进脉冲信号 U_{cp} 为高电平时，一路经驱动电路驱动低压晶体管 V_d 导通，另一路通过晶体管 V_1 和反相器 D_1 及驱动电路驱动 V_g 导通，这时绕组由高压电源 U_g 供电。随着绕组电流的增大，反馈电阻 R_f 上的电压不断升高，当升高到比同相输入电压 U_s 高时，运算放大器 N 输出低电平，V_1 的基极为低电平，V_1 截止，这样，V_g 关断高压，绕组继续由低压 U_d 供电。当绕组电流下降时，U_f 下降，当 $U_f < U_s$ 时，运算放大器 N 又输出高电平使二极管 VD_1 截止，V_1 又导通，再次导通 V_g。这个过程在步进脉冲有效期内不断重复，使电动机绕组中电流波顶的波动呈锯齿形变化，并限制在一定范围内。

调节电位器 RP，可改变运算放大器 N 的翻转电压，即改变绕组中电流的限定值。运算放大器的增益越大，绕组的电流波动越小，电动机运转越平稳，电噪声也越小。

这种驱动电源根据随时检测绕组电流值，导通或关断高压功率晶体管，实现高、低压切换。当绕组电流值上升到上限设定值时，高压功率晶体管关断，由低压电源供电，绕组电流值开始下降；当绕组电流值下降到下限设定值时，使高压功率晶体管导通，绕组电流值上升。这样，在一个步进信号周期内，高压功率晶体管多次通断，使绕组电流在上、下限之间波动，接近恒定值，提高了绕组电流的平均值，有效地抑制了电动机输出转矩的降低。但这种驱动电源的运行频率不能太高。因为运行频率太高，电动机绕组的通电周期会缩短，高压功率晶体管开通时绕组电流来不及升到整定值，导致波顶补偿作用不明显。通过提高高压电源的电压 U_g，可以使补偿频段提高。

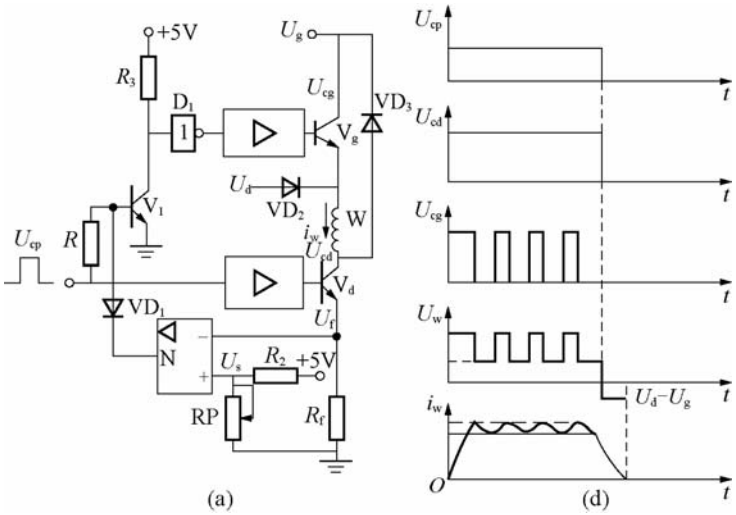


图 4.48　恒流斩波电源电路及波形

(3) 调频调压驱动电源。在电源电压一定时，步进电动机绕组电流的上冲值是随工作频率的升高而降低的，输出转矩随电动机转速的提高而降低。要保证步进电动机高频运行时的输出转矩不降低，需要提高供电电压。前述的各种驱动电源都是为保证绕组电流有较好的上升沿和幅值而设计的，从而有效地提高了步进电动机的工作频率。但在低频运行时，绕组中会被注入过多的能量而引起电动机的低频振荡和噪声。为解决此问题，便产生了调频调压驱动电源。调频调压驱动电源能够使步进电动机在低频运行时，供电电压降低，运行在高频时，供电电压升高。即供电电压随着步进电动机转速的增加而升高。这样，既解决了低频的振荡问题，也保证了高频运行时的输出转矩。

在数控系统中，调频调压驱动电源可由软件配合适当的硬件电路实现，如图 4.49 所示。U_{cp} 是步进控制信号，U_{cT} 是开关调压信号。

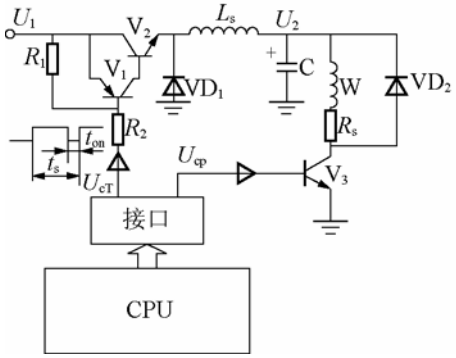


图 4.49　调频调压驱动电源

当 U_{cT} 输出一个负脉冲信号，晶体管 V_1 和 V_2 导通，电源电压通过电感 L_s 向电容 C 充电，充电时间由 U_{cT} 负脉冲宽度 t_{on} 决定。在 U_{cT} 负脉冲过后，V_1 和 V_2 截止，此时，若由 U_{cp} 步进控制信号控制晶体管 V_3 导通，则由电感 L_s 产生的反电动势和电容 C 共同向电动机绕组放电。由此可见，向步进电动机供电电压 U_2 的大小取决于 V_1 和 V_2 的导通时间，即取决于 U_{cT} 负脉冲的宽度。负脉冲的宽度越大，电压 U_2 越高。因此，根据 U_{cp} 步进控制信号 U_{cp} 的频率，调整 U_{cT} 负脉冲的宽度，便可实现调频调压。

步进电动机除了上述的驱动电源外，还有细分驱动电源。细分驱动电源是在一拍中，通电相的电流不是一次达到最大值，而是分成多次，每次使绕组电流增加一些。每次增加电流时，使转子转过一小步。同样，绕组电流的下降也是分多次完成。这样步进电动机原来的一个步距，便分成许多微步运动来完成，即实现了步距的细分。这样使步进电动机的分辨力得以提高，运动更加平稳，振动减小，噪声降低，且不易失步。要实现细分，需将绕组中的矩形电流波变成阶梯形电流波。阶梯波控制信号可由很多方法产生，这里不再叙述。

2. 直流伺服电动机驱动装置

直流伺服电动机具有良好的启动、制动和调速性能，可很方便地在较宽范围内实现平滑无级调速，所以在调速性能要求较高的生产设备中常采用直流伺服驱动。

伺服系统要求调速系统能够快速、正确及平稳地驱动伺服电动机，即对调速系统的技术性能提出了较高的要求。具体技术性能指标有如下几个方面。

1) 调速系统的技术指标

(1) 调速范围。调速范围是指系统在额定负载时电动机的最高转速与最低转速之比 D，即

$$D=\frac{n_{\max}}{n_{\min}}$$

在调压调速系统中，通常认为 $n_{\max}$ 为电动机的额定转速 n_e。

(2) 静差率。静差率用额定负载时的转速降 Δn_e 与理想空载转速 n_0 之比来表示，即

$$S=\frac{n_0-n_e}{n_0}=\frac{\Delta n_e}{n_0}$$

或

$$S\%=\frac{\Delta n_e}{n_0}\times 100\%$$

静差率是用来衡量调速系统在负载变化时转速的稳定度的。系统静差率大，当负载增加时，电动机转速会下降很多，就会降低设备的生产能力，也会影响产品质量，这对数控加工而言，就会使产品表面质量下降。系统要求的静差率是根据生产机械工艺要求确定的，因为对一个调速系统而言，静差率要求越高，系统的调速范围 D 越窄，即静差率的要求限制了调速范围。

在调压调速中，不同的电枢电压，对应不同的理想空载转速 n_0，而转速降 Δn_e 却是常数。可见高速时，静差率 S 小；低速时，静差率 S 大。所以，一般提到的静差率 S，均以系统最低转速 $n_{0\min}$ 时为准。低速达到了要求，高速时就不成问题了。

(3) 跟随性能。跟随性能是控制系统的一个动态指标，它是在给定信号作用下，系统输出量变化的反映。当给定信号的变化方式不同时，输出响应不同。对一个闭环控制系统，通常用输入单位阶跃信号，然后观察它的响应过程，从而来评价其动态性能的好坏。图 4.50 所示为动态跟随过程曲线。

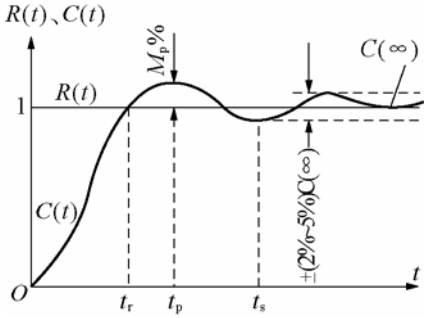


图 4.50　动态跟随过程曲线

① 上升时间 t_r：输出响应曲线第一次上升到稳态 $C(\infty)$所需要的时间。

② 超调量 $M_p\%$：系统输出量超出稳态值的最大偏差与稳态值之比的百分值，即

$$M_p\%=\frac{C(tp)-C(\infty)}{C(\infty)}\times 100\%$$

③ 调节时间 t_s：输出响应 $C(t)$与 $C(\infty)$的差值小于等于稳态值的±(2%～5%)，且不再超出所需要的时间。

④ 振荡次数 N：响应曲线在 t_s 时刻之前发生振荡的次数。

以上指标中，调节时间 t_s 越小，表明系统快速跟随性能越好；调节量 M_p%越小，表明系统在跟随过程中比较平稳，但往往也比较迟钝。显然，作为数控机床的伺服系统，上述几种性能指标做得越小越好，然而，在实际控制中，快速性要求经常与平稳性要求相矛盾，要作出合理选择。

(4) 抗干扰性能。控制系统在稳态运行中，由于电动机负载的变化，电网电压的波动等干扰因素的影响，都会引起输出量的变化，经历一段动态过程后，系统总能达到新的稳态。所以抗干扰性能也是一个扰动性能，它反映的是系统受到干扰后，克服扰动的影响而自行恢复的能力。常用最大动态降落和恢复时间指标来衡量系统的扰干扰能力。图 4.51 所示为一个调速系统在突加负载时转速的扰动响应曲线。

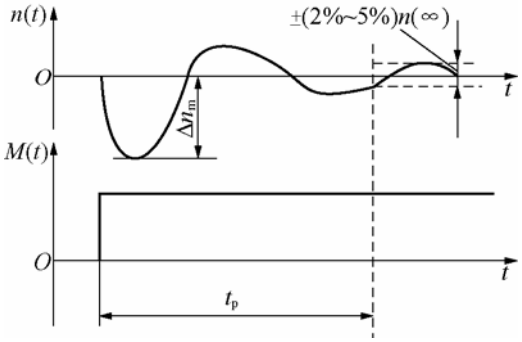


图 4.51　突加负载时转速的扰动响应曲线

① 最大动态速度 Δn_m：表明系统在突加负载后及时作出反映的能力，常以原稳态值的百分数表示，即

$$\Delta n_m = \frac{\Delta nm}{n(\infty)} \times 100\%$$

② 恢复时间 t_p：由扰动作用瞬间至输出量恢复到允许范围内[一般取稳态值的±(2%～5%)]所经历的时间。

根据伺服系统对动态性能的要求，抗干扰性能应使各种扰动输入对系统跟踪精度的影响减至最小。当扰动负载输入后，同时要做到动态降落与恢复时间两项指标最小有时存在矛盾，一方面，当系统的时间常数越大，则输出响应的最大动态降落越小，而恢复时间越长，反之，时间常数越小，动态降落越大，但恢复时间短；另一方面，伺服系统在给定输入作用下输出响应的超调量越大，上升时间越短，则它的抗干扰性能就越好，而超调量较小、上升时间较长的系统，恢复时间就长。这就是闭环控制系统的局限性。

3. 晶闸管直流调速系统

步进电动机一般用在开环伺服系统中，没有位置检测反馈环节，所以其伺服系统结构和控制简单。直流伺服电动机通常用于闭环或半闭环伺服系统中，它是将位置环输出的 –10～+10V 作为速度控制信号 U_n^*，通过一个控制电路，使主电路在交流电源不变的情况下，由速度控制信号 U_n^*改变主电路输出电压的大小，该输出电压作为直流伺服电动机的电枢电压，即可实现直流伺服电动机的调速。

数控机床的直流调速系统中，主电路常为晶闸管可控整流电路或晶体管直流脉宽调制 PWM。晶闸管可控整流电路是利用晶闸管的单向导电性和可控性将交流电整流为可变的直

流电。其大小受晶闸管在一个周期内导通的电角度 θ 控制，电角度 θ 称为导通角。在整流电路中，把晶闸管承受正电压起到触发导通之间的电角度称为控制角 α。晶体管直流脉宽调制 PWM 是利用对大功率晶体管开关时间的控制，将直流电压转换成一定频率的方波电压，加在直流电动机的电枢两端，通过对方波脉冲宽度的控制，从而改变电枢的平均电压 U，达到调压调速的目的。图 4.52 为晶闸管直流调速原理框图。

图中，改变速度控制电压 U_n^*即可改变电枢电压 U，从而得到速度控制电压所要求的电动机转速。由测速发电机获得的电动机实际转速电压 U_n 作为速度反馈与速度控制电压 U_n^* 进行比较形成速度环，目的是改善电动机运行的机械特性。

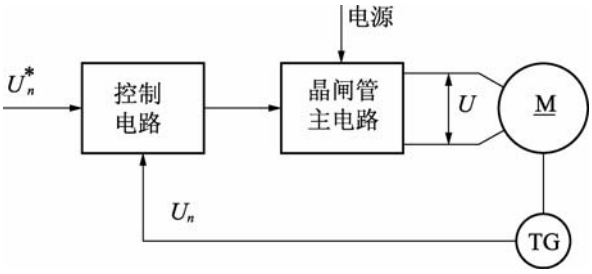


图 4.52　晶闸管直流调速原理框图

1) 晶闸管可控整流电路

数控机床中的直流主轴电动机或进给直流伺服电动机都要求能够正、反转，即要求晶闸管可逆驱动。实现直流可逆驱动的晶闸管电路采用两组变流桥的可逆电路，其中一组工作在电动机正转，另一组工作在电动机反转，俗称四象限运行。为了更好地理解可逆电路的工作过程，下面首先通过单相全控桥式整流电路，掌握可控整流电路的一些概念及基本参数。

如图 4.53 所示，在 ωt_1 时刻，VT_1、VT_4 承受 u_2 正电压，同时，VT_1、VT_4 门极加触发脉冲 u_g，VT_1、VT_4 导通，此时控制角为 α，电源 u_2 加于负载上，形成电枢电压 u 及电枢电流 i_a。当 u_2 过零变负时，由于电枢绕组上电感反电动势的作用，通过 VT_1、V_{T4} 的维持电流继续流通，VT_1、VT_4 的导通角为 θ。直到下半周同一控制角α所对应的 ωt_2，触发 VT_2、VT_3 导通，VT_1、VT_4 因承受反压而关断，电枢电流 i_a 改由 u_2 通过 VT_2、VT_3 形成。 ωt_2 时刻称为自然换流点，如图 4.53(b)所示。

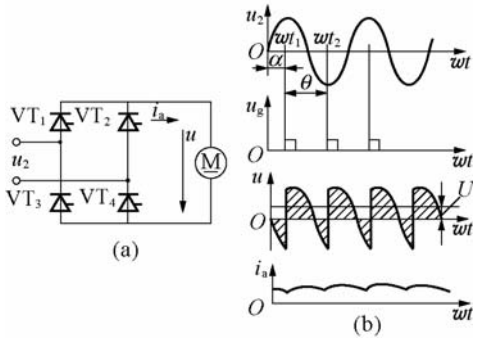


图 4.53　单相全控桥式整流电路及电压、电流波形

通过不同控制角 α，分析整流电路的电压、电流波形，可以得出以下结论：控制角 α 在 0°～90°内，随着 α 的增大，电枢电压 u 的平均值下降，电枢电流 i_a 连续；当 α =90°时，u 的平均值为零，电枢电流 i_a 接近断续；当 α ＞90°时，电枢电流 i_a 很小且断续。所以，作为整流电路，其触发脉冲的控制角 α 范围为 0°～90°，每个晶闸管轮流导通 180°。

而晶闸管电路在一定条件下，既可作整流又可作逆变，这时的晶闸管电路称为变流装置或变流器。所谓有源逆变是指将直流电变为交流电回馈至交流电网。在电动机运行状态时，变流器为整流状态，将电网的交流电变为电机的电枢电压；当电动机处于制动状态时，变流器为逆变状态，此时电动机变为发电机，将直流电通过逆变器变为交流电回馈至电网。对电动机控制来说，实现逆变的条件有两个：一是电动机必须处于制动状态，电枢电动势 E 大于电枢电压 U；二是变流器控制角 α ＞90°，使 U＜0。习惯上，用逆变角 β 的大小来表示逆变，取 β = 180° － α，所以 β ＜90°时即表示变流器为逆变状态。

图 4.54 所示为三相桥式反并联逻辑无环流可逆调速系统主电路。

反并联是指两组变流桥反极性并联，由一个交流电源供电。环流是在两组变流桥同时工作在整流状态时，产生的不经过电动机只流过两组变流桥之间的电流。环流只占用变流装置的容量而不作有用功，产生损耗使元件发热，严重时会造成短路，损坏元件。逻辑无环流就是通过逻辑控制的方法，保证在任何时间内只允许一组变流桥工作，另一组变流桥阻断，这样才不会产生环流。

三相桥式反并联逻辑无环流可逆调速系统运行原理如下。

电动机正转。驱动电路工作状态如图 4.55(a)所示。I 组桥获得脉冲触发，且 α_1＜90°，I 组桥处于整流状态，II 组桥阻断，电动机正向运转。

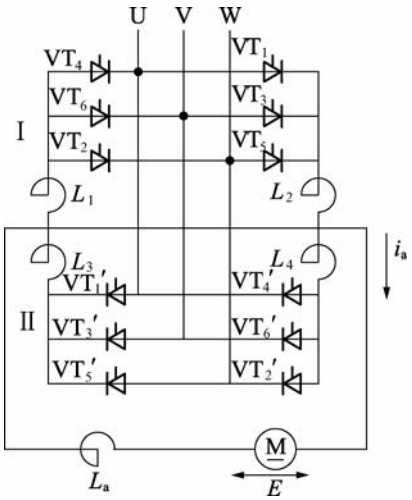


图 4.54　三相桥式反并联逻辑无环流可逆调速系统主电路

电动机由正转到反转。首先电动机要从正转降速至零，再反转至规定转速。改变控制角 α_1 的大小，使 α_1＞90°，将 I 组桥脉冲触发后移，由于机械惯性，电动机的转速 n 与电枢电动势 E 暂时未变，I 组桥进入有源逆变状态，电动机将能量回馈至电网，电流 I_a 下降。此时的逆变称为“本桥逆变”。

当 I_a 下降到零时，将 I 组桥封锁，II 组桥进入有源逆变状态，如图 4.55(b)所示。由于

惯性作用，电动机运行在发电制动状态，将惯性能量逆变回馈至电网，电动机进一步快速减速。由于此时逆变发生在原来封锁的桥路，因而称为“他桥逆变”。

当转速下降到零时，将 II 组桥的触发脉冲继续移至α_2＜90°时，II 组桥进入整流状态，电动机反向运转，如图 4.55(c)所示。

同理，电动机从反转到正转是由图 4.55(c)经图 4.55(d)变到图 4.55(a)。

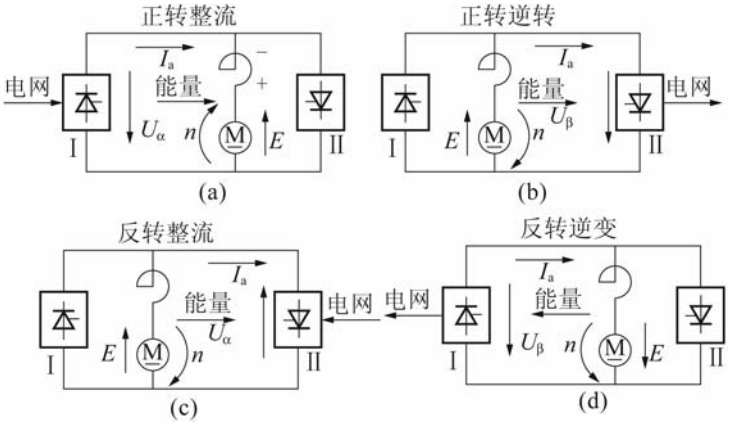


图 4.55　三相桥式反并联逻辑无环流可逆调速系统运行原理图

在 I 组桥和 II 组桥切换过程中，逻辑电路要保证以下几点。

① 只允许向一组晶闸管提供触发脉冲。

② 只有当工作的那一组晶闸管断流后才能撤销其触发脉冲，以防止晶闸管处于逆变状态时，未断流就撤销触发脉冲，以致出现逆变颠覆现象，造成故障。

③ 只有当原来工作的那一组晶闸管完全关断后，才能向另一组晶闸管提供触发脉冲，以防止出现过大的电流。

④ 任何一组晶闸管导通时，要防止晶闸管输出电压与电动机电动势方向一致，导致电压相加，使瞬时电流过大。

三相桥式反并联逻辑无环流可逆调速系统中，由于零电流检测，I 组桥和 II 组桥的切换有一控制死区时间，一般为 10ms 左右，这样使调速的动态性能变坏。因此，该调速系统在数控机床上多用于直流主轴电动机的驱动。由于没有环流，故有些数控机床的直流伺服电动机驱动也采用该调速系统。

2) 控制电路

控制电路的作用是通过对速度给定电压 U_n^*的调节，获得控制角α和速度给定电压 U_n^*成比例的触发脉冲，用来触发晶体管主电路，以获得和速度给定电压 U_n^*成比例的电枢电压 U。为了满足数控机床高性能的调速要求，其控制系统通常采用转速和电流双闭环系统，其控制电路框图如图 4.56 所示。

系统中设置了速度调节器 ASR 和电流调节器 ACR，两个调节器一般都采用带输出限幅的 PI 调节器。速度调节器 ASR 的输出限幅值 U_{im}^*决定了电流调节器 ACR 的给定电压最大值，也就决定了系统的允许电流最大值 I_{am}，这个值由电动机允许过载倍数和拖动系统允许加速度决定。电流调节器 ACR 输出限幅值为 U_{ctm}，它限制了晶闸管可控整流装置输出电压的最大值。TG 为测速发电机，其测得的转速信号 U_n 作为速度反馈信号，与转速给定信

号 U_n^*比较，经速度调节器 ASR 输出信号 U_i^*。来自主电路的电流检测环节 TA 测得的电流信号 U_i 作为电流调节器的反馈信号，与速度调节器 ASR 的输出信号 U^*_i 进行比较，经电流调节器 ACR 输出晶闸管触发装置 GT 的控制电压 Uct。

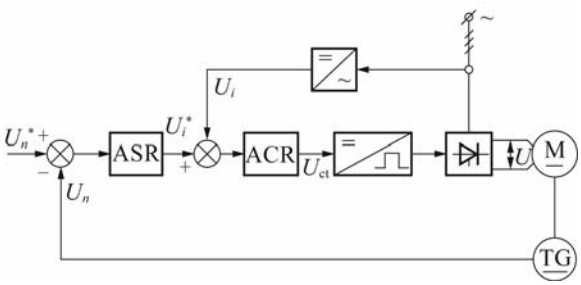


图 4.56　转速、电流双闭环系统控制电路框图

下面通过分析系统的大给定启动过程来理解控制系统的工作原理。

双闭环调速系统在大给定阶跃信号电压 U_n^*作用下，电动机由静止开始启动时，整个启动过程可以分成 3 个阶段。

第 I 阶段是电流上升阶段。系统加上速度指令电压 U_n^*以后，由于电动机的机电惯性较大，转速增长较慢，即反馈电压 U_n 很小，速度调节器 ASR 输入偏差 $\Delta U_n = U_n^* - U_n$ 数值很大，很快到达饱和限幅值 U_{im}^*，这个电压加在电流调节器的输入端，使 U_{ct} 上升，因而晶闸管整流电压 U、电枢电流 I_a 都很快上升，直到电流上升到设计时所选的最大值 I_{am} 为止。

第 II 阶段是恒流升速阶段。从电流上升到最大值 I_{am} 开始一直到转速升到指令值为止，属于这一阶段，它是启动的主要阶段。在这个阶段中速度调节器 ASR 一直处于饱和状态，速度环相当于开环状态，系统表现为在恒值电流给定 U_{im}^*作用下的电流调节系统，基本上保持电流 $I_a = I_{am}$ 恒定，电流超调或不超调取决于电流环的结构和参数。电动机在恒定最大允许电流 I_{am} 作用下，以最大恒定加速度使转速线性上升。同时，电动机的反电动势 E_a 也线性上升。对电流调节系统而言，这个反电动势是一个线性增长的斜坡输入扰动量。为了克服这个扰动，U_{ct} 和 U 也必须基本上按线性增长，才能保持 I_{am} 恒定。这也就要求电流调节器 ACR 的输入电压 $\Delta U_n = U_n^* - U_n$ 为恒值。同时，实际电枢电流 I_a 略小于 I_{am}。这样要求在整个启动过程中，电流调节器 ACR 不应该饱和。

第 III 阶段是转速调节阶段。当转速上升到指令值后，转速输入偏差 ΔU_n 为零，但速度调节器 ASR 的输出却由于积分作用仍维持在限幅值 U_{im}^*，因此，电动机仍在最大电流作用下加速，使电动机转速出现“超调”。超调后，速度调节器 ASR 的输入信号 $\Delta U_n = U_n^* - U_n < 0$ 出现负偏差电压，使速度调节器 ASR 退出饱和状态，其输出电压也从最大限幅值 U_{im}^* 开始下降。主电路电流也会从最大值开始下降。但由于 I_a 仍大于负载电流 I_L，在一段时间内，转速仍会继续上升，只是上升的加速度逐渐减小。当电枢电流 I_a 下降到与负载电流 I_L 相平衡时，加速度为零，转速达到最大峰值，此后电动机才开始在负载作用下减速。与此相应，电流 I_a 也出现一小段小于 I_L 的过程，直到稳定。在这个阶段中，速度调节器 ASR 和电流调节器 ACR 同时起调节作用。速度环处于主导地位最终实现转速无静差，电流环的作用是力图尽快地跟随速度调节器 ASR 的输出量，即电流环是一个电流随动子系统。

具体启动过程的波形如图 4.57 所示。

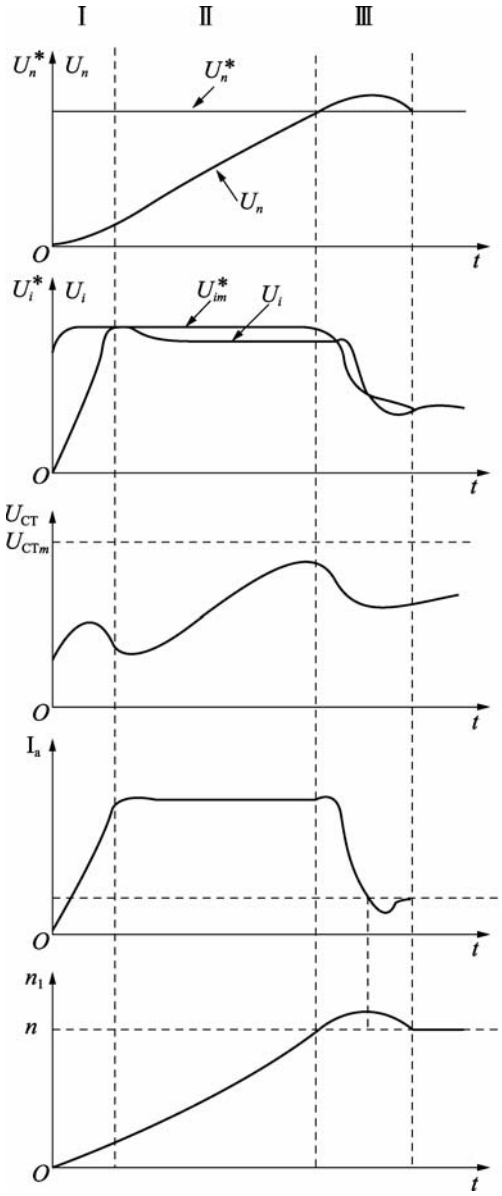


图 4.57　转速、电流双闭环调速系统的动态响应曲线

上述启动过程如果指令信号只是在小范围内变化，则速度调节器 ASR 来不及饱和，整个过渡过程只有第 I、III 阶段，没有第 II 阶段。对于转速电流双闭环调速系统，在其运行过程，整个系统表现为两个调节器的线性串级调节。如果干扰作用在电流环以内，如电网电压的波动引起电枢电流 I_a 变化时，这个变化立即可以通过电流反馈环节使电流环产生对电网电压波动的抑制作用，以减小转速的变化。如果干扰作用在电流环之外，如负载突然增加，转速要下降，形成动态速降。ΔU_n 的产生，使系统处于自动调节状态，只要不是太大的负载干扰，速度调节器 ASR 和电流调节器 ACR 均不会饱和，由于它们的调节作用，转速下降到一定值后即开始回升，形成抗扰动的恢复过程，最终使转速回升到干扰发生前

的指令值，仍然实现稳态无静差的抗扰过程。

综上所述，速度调节器 ASR 和电流调节器 ACR 在双闭环调速系统中的作用可归纳如下。

(1) 速度调节器 ASR 的作用。

① 使转速 n 跟随给定电压 U_n^*变化，保证转速稳态无静差。

② 对负载变化起抗干扰作用。

③ 其输出限幅值决定了电枢主回路的最大允许电流值 I_{am}。

(2) 电流调节器 ACR 的作用。

① 对电网电压波动起及时抗干扰作用。

② 启动时保证获得允许的最大电枢电流 I_{am}。

③ 在转速调节过程中，使电枢电流跟随其给定电压值变化。

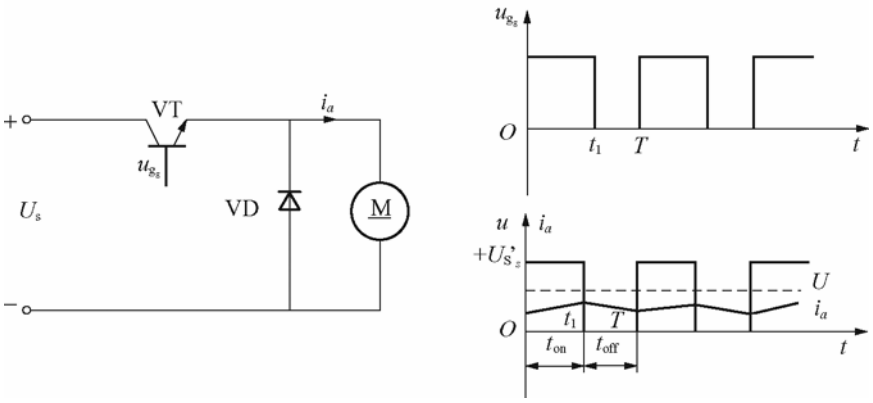
④ 当电动机过载甚至堵转时，即有很大的负载干扰时，可以限制电枢电流的最大值，从而快速起到过流安全保护作用。如果故障消失，系统能自动恢复正常工作。

4. 晶体管直流脉宽调制驱动装置

1) 直流脉宽调制的原理和特点

晶体管直流脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)利用大功率晶体管开关特性，将直流电压转换成一定频率的方波电压，加在直流电动机的电枢两端，并通过控制晶体管在一个周期内的“接通”与“关断”时间来改变方波脉冲宽度，从而改变电枢的平均电压 U，进而达到调压调速的目的。

图 4.58(a)为最简单的 PWM 控制示意图，在晶体管 VT 的基极加以图 4.58(b)所示的方波信号时，在 $0 \leqslant t < t_1$ 期间，晶体管 VT 导通，供电电源 U_s 通过晶体管 VT 施加到电动机电枢两端，电源 U_s 向电动机提供能量。而在 $t_1 \leqslant t < T$ 期间，晶体管 VT 关断，中断了供电电源 U_s 向电动机提供能量，此时，电枢电感在晶体管 VT 导通期间所储存的能量通过续流二极管 VD 使电动机电流继续流通。电枢电压和电流波形如图 4.58(b)所示。



(a)　　(b)

图 4.58　PWM 控制示意图

从图 4.58(b)电动机电枢电压波形可以得知，电枢两端平均电压 U_{av} 可用下式表示：

$$U_{av} = \frac{t_{on}}{T} U_s = \rho U_s$$

式中　t_{on}——晶体管的导通时间；

T——晶体管的通断周期；

ρ——占空比，　$\rho=\dfrac{t_{on}}{T}$ 。

由上式可知，改变晶体管的导通时间 t_{on} 而通断周期 T 不变，即改变占空比 ρ，电动机电枢两端平均电压 U_{av} 也随之改变，从而实现电动机的调速。与晶体管直流调速相比，晶体管直流 PWM 调速有以下优点。

(1) 晶体管直流 PWM 电路中作为功率输出级的大功率晶体管仅工作在两种状态，即饱和导通和截止状态。饱和导通时压降很小，截止时漏电流很小，因此晶体管上的功率损耗主要发生在饱和与截止的过渡过程中，而这些过渡过程的时间很短，因此，可使功率输出级的功率损耗很小，并且这个损耗在输出电压最高和最低时都是一样的，这就大大改善了输出级的晶体管在低速情况下的工作条件。

(2) 由于晶体管具有开关频率高的特性，只要让晶体管工作在高频，仅依靠电枢的滤波作用就可以获得脉动很小的直流电流，电枢电流容易连续，使低速平滑、稳定，因此调速范围可以做得很大。由于输出波形比晶闸管调速系统好，在相同的平均电流即相同的输出转矩下，电动机的损耗和发热量较小。

(3) 因为晶体管的调制频率高，失控时间小，若与快速响应的电动机相配合，可减小系统的时间常数，获得很宽的频带，因此系统的快速响应好，动态抗负载干扰能力强。由于晶体管直流 PWM 响应快，无滞后和惯性，特别适用于可逆运行，以满足频繁启、制动的高速定位控制和连续控制系统的要求。

(4) 需要的大功率可控器件少，从而简化了系统的功率转换电路及其驱动电路，使得晶体管 PWM 驱动装置的线路较为简单。

总之，晶体管 PWM 驱动装置具有许多优点，但也存在一些不足之处，如功率晶体管工作在开关状态，它是系统的干扰源；功率晶体管的基极驱动电路比晶闸管的触发电路要复杂；功率晶体管不能承受高峰电流，过载能力低，正因如此，晶体管直流 PWM 调速适用于数控机床的进给直流伺服电动机的驱动。

2) PWM 主回路

晶体管直流 PWM 调速原理框图与晶闸管直流调速原理框图相似，都是由作为功率放大的主电路和控制电路所组成。PWM 主回路有 T 型可逆与不可逆电路及 H 型可逆电路。在数控机床进给直流伺服电动机驱动中常采用 H 型可逆电路。如图 4.59 所示为 H 型倍频 PWM 主回路。所谓倍频是指功率放大器输出电压的频率比开关频率提高 1 倍。

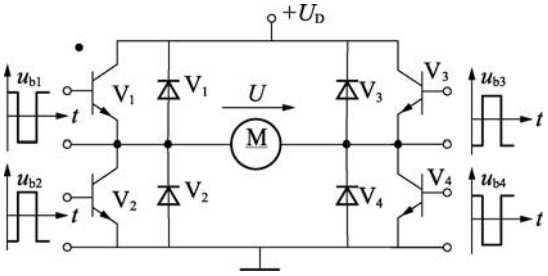


图 4.59　H 型倍频 PWM 主回路

晶体管 VT_1、VT_2、VT_3、VT_4 驱动信号 u_{b1}、u_{b2}、u_{b3}、u_{b4} 的波形如图 4.60 所示。

当速度控制电压 U_n*为正，电枢电压 U 大于电枢感应电动势 E，电动机处于正向电动状态。图 4.60 中，在 $t_1 \leqslant t < t_2$ 期间，驱动信号 u_{b1}、u_{b4} 为正，晶体管 VT_1 和 VT_4 饱和导通；驱动信号 u_{b2}、u_{b3} 为负，晶体管 VT_2 和 VT_3 截止，PWM 主电路的等效电路图为图 4.61(a)，电源 U_D 经 VT_1 和 VT_4 向电动机提供能量 $U=U_D$，电枢电流为 I_a。在 $t_2 \leqslant t < t_3$ 期间，驱动信号 u_{b1}、u_{b3} 为正，但 VT_3 并不能导通，因为电枢电感的作用，电枢电流 I_a 经 VT_1 和 VD_3 继续流通，等效电路图为图 4.61(b)。在 $t_3 \leqslant t < t_4$ 期间，驱动信号 u_{b1}、u_{b4} 为正，同 $t_1 \leqslant t < t_2$。在 $t_4 \leqslant t < t_5$ 期间，驱动信号 u_{b2}、u_{b4} 为正，电枢电流 I_a 经 VT_4 和 VD_2 继续流通，等效电路图为图 4.61(c)。

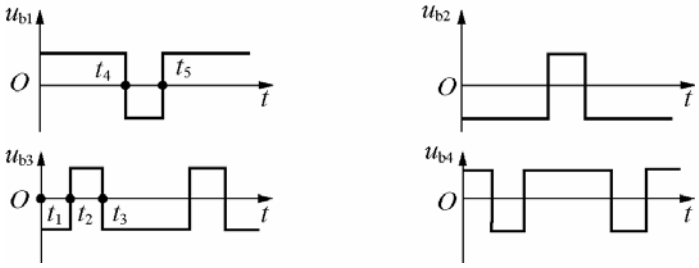
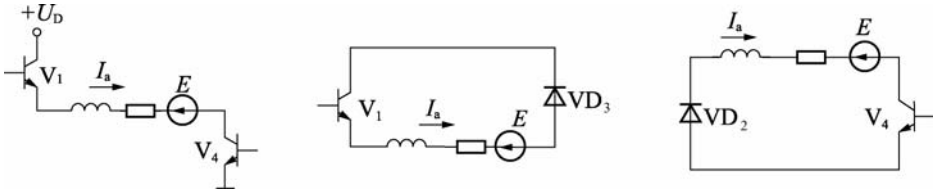


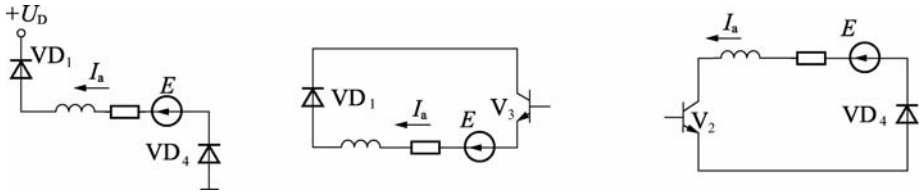
图 4.60　晶体管驱动信号波形图



(a)　　(b)　　(c)

图 4.61　正向电动状态 PWM 主电路的等效电路图

当速度控制电压 U_n*减少，电枢电压 U 小于电枢感应电动势 E，电枢电流为 I_a，流向与电动状态相反，电动机处于正向制动状态。图 4.57 中，在 $t_1 \leqslant t < t_2$ 期间，驱动信号 u_{b1}、u_{b4} 为正，电枢电流为 I_a，经 VD_4 和 VD_1 向电源回馈能量，PWM 主电路的等效电路图为图 4.62(a)。在 $t_2 \leqslant t < t_3$ 期间，驱动信号 u_{b1}、u_{b3} 为正，反向制动电流 I_a 经 VT_3 和 VD_1 产生能耗制动，等效电路图为图 4.62(b)。在 $t_3 \leqslant t < t_4$ 期间，PWM 主电路工作状况同 $t_1 \leqslant t < t_2$。在 $t_4 \leqslant t < t_5$ 期间，驱动信号 u_{b2}、u_{b4} 为正，反向制动电流 I_a 经 VD_4 和 VT_2 继续能耗制动，等效电路图为图 4.62(c)。



(a)　　(b)　　(c)

图 4.62　正向制动状态 PWM 主电路的等效电路图

根据上述分析，电动机电枢电压波形为方波，电枢电压 U 由速度控制电压 U_n*控制。

改变速度控制电压 U_n*的大小，即可改变电枢电压方波的宽度，从而改变电枢电压的平均值 U，达到调速的目的。电动机的正、反转由速度控制电压 U_n*的正、负所决定。

3) PWM 控制电路

PWM 控制电路的作用是把速度信号 U_n*变成方波信号，方波的脉宽与速度信号 U_n*的大小成比例。不同的脉宽可获得不同的电枢电压，从而实现转速的调节。图 4.63 所示为转速、电流双闭环 PWM 控制电路。

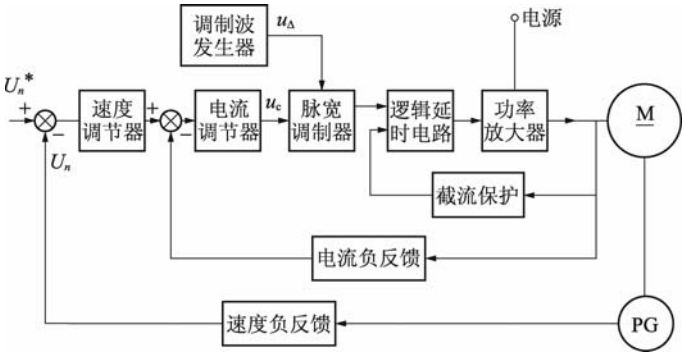


图 4.63　转速、电流双闭环 PWM 控制电路

电路中，速度调节器 ASR 和电流调节器 ACR 的作用与晶闸管控制电路中 ASR 和 ACR 相同，速度反馈信号和电流反馈信号分别将电动机的实际转速与主电路电流反馈给速度调节器 ASR 和电流调节器 ACR，实现系统转速稳态的无静差。

(1) 调制波发生器。它的作用是产生恒定频率的振荡源以作为比较的基准。它可以是三角波。也可以是锯齿波。

(2) 脉宽调制器。它实际上是一种电压-脉宽转换电路。它为功率晶体管的基极提供一个宽度可由速度控制信号调节且与之成比例的脉冲电压。图 4.64 所示为脉宽调制波形。

从图示波形可知，当控制信号 u_c=0 时，经脉宽调制器调制后，正、负脉冲宽度相同，如图 4.64(a)所示，电枢电压为零，电动机静止不动。

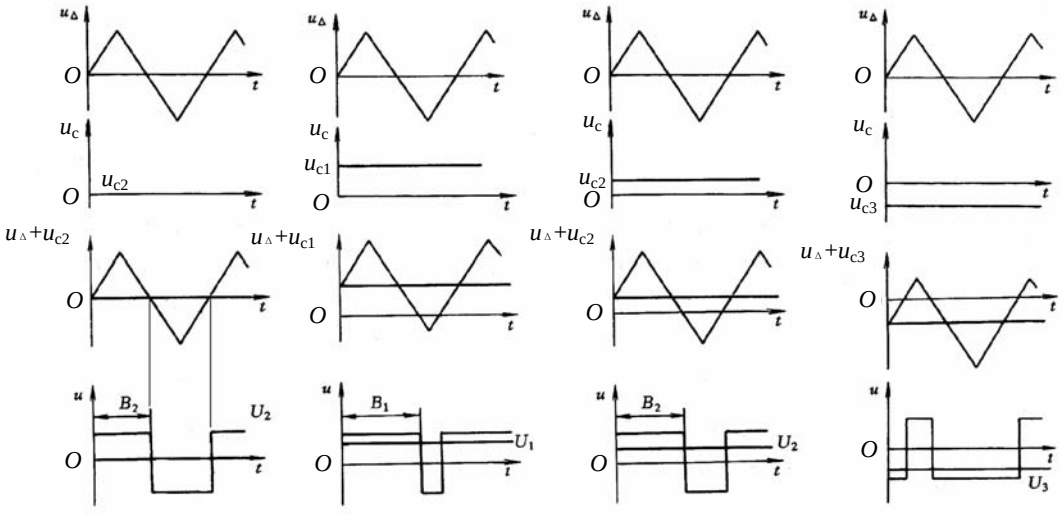
当控制信号 u_c＞0 时，经脉宽调制器调制后，脉冲是正向宽度大于负向宽度，电枢电压为正，电动机正转。将图 4.64(b)、(c)两图比较可以看出当控制信号 u_{c1}＞u_{c2} 时，脉冲的宽度 B_1＞B_2，电枢电压 U_1＞U_2，对应的电动机转速 n_1＞n_2。

当控制信号 u_c＜0 时，脉冲是负向宽度大于正向宽度，如图 4.64(d)所示，电枢电压为负，电动机反转。

上述控制信号 u_c 是由速度给定信号 U_n^*经速度调节器 ASR 和电流调节器 ACR 得到的，其大小与速度给定信号 U_n^*成比例，其正、负随速度给定信号 U_n^*的正、负而变化。最终实现电动机的转速 n 与速度给定信号 U_n^*成线性关系，电动机的转向由速度给定信号 U_n^*的正负所控制。

(3) 逻辑延时电路。逻辑延时电路是保证在向一个晶体管发出关断脉冲后，延时一段时间，再向另一个晶体管发出开通脉冲。其目的是防止晶体管处在交替工作状态时，关断的晶体管并未完全关断，另一个晶体管又导通，造成两个晶体管直通而使电源正负极短路。

(4) 截流保护。截流保护的作用是防止电动机过载时流过功率晶体管或电枢的电流过大。



(a)U_n^*为零时的波形　(b) U_n^*为正时的波形　(c) $U_{n1}^*>U_{n2}^*$时的波形　(d) U_n^*为负时的波形

图 4.64　脉宽调制波形

5. 交流伺服电动机驱动装置

数控机床交流主轴电动机采用专门设计的三相交流异步电动机或主轴伺服电动机。进给用交流伺服电动机多采用三相交流永磁同步电动机。调速方法常采用变频调速，变频调速系统可以分为他控变频和自控变频两大类。他控变频调速系统是用独立的变频装置给电动机提供变压变频电源。自控变频调速系统是用电动机轴上所带的转子位置检测器来控制变频的装置。

1) 变频器工作原理

对交流电动机实现变频的装置叫变频器。变频器有很多种分类，大的分类有交-交变频器、交-直-交变频器。数控机床采用的是后者，其组成有整流电路、滤波电路、逆变电路和控制电路。如图 4.65 所示，图中整流器可以是二极管整流，也可以是可控整流。滤波元件是电容的称为电压型变频器，滤波元件是电感的称为电流型变频器。逆变电路可以采用电力晶体管(GTR)，可关断(GTO)晶闸管，功率场效应晶体管(MOSFET)，绝缘栅双极半导体管(IGBT)等。

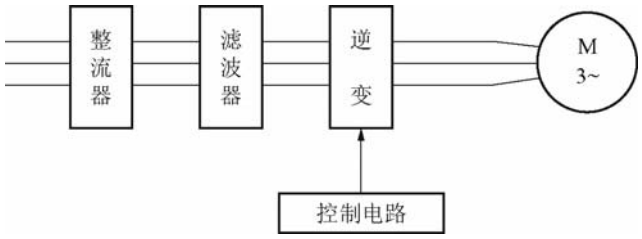


图 4.65　交-直-交变频器组成

SPWM 变频器属于交-直-交静止变频装置，它先将 50Hz 交流市电经整流变压器变到所需电压后，经二极管不可控整流和电容滤波，形成恒定直流电压，再送入常用六个大功率晶体管构成的逆变器主电路，输出三相频率和电压均可调整的等效于正弦波的脉宽调制

波(SPWM 波)，即可拖动三相异步电动机运转。这种变频器结构简单，电网功率因数接近于 1，且不受逆变器负载大小的影响，系统动态响应快，输出波形好，使电动机可在近似正弦波的交变电压下运行，脉动转矩小，扩展了调速范围，提高了调速性能，因此在数控机床的交流驱动中得到了广泛应用。

图 4.66 为 SPWM 变频器控制电路图。正弦波发生器接收经过电压、电流反馈调节的信号，输出一个具有与输入信号相对应频率与幅值的正弦波信号，此信号为调制信号。三角波发生器输出的三角波信号称为载波信号。调制信号与载波信号相比较，输出的信号作为逆变器功率管的输入信号。

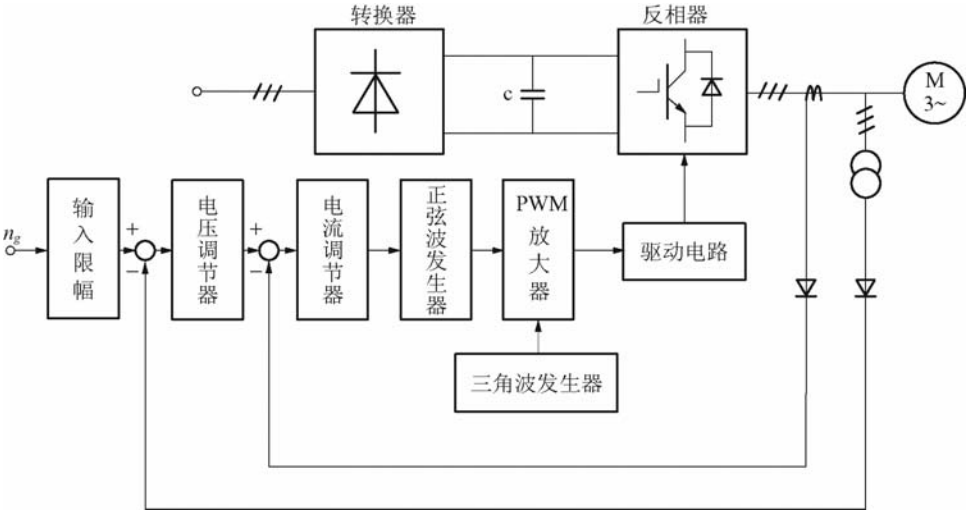


图 4.66　SPWM 变频器控制电路图

下面通过图 4.67 所示最简单的单相桥式逆变电路分析 SPWM 变频器的工作原理。

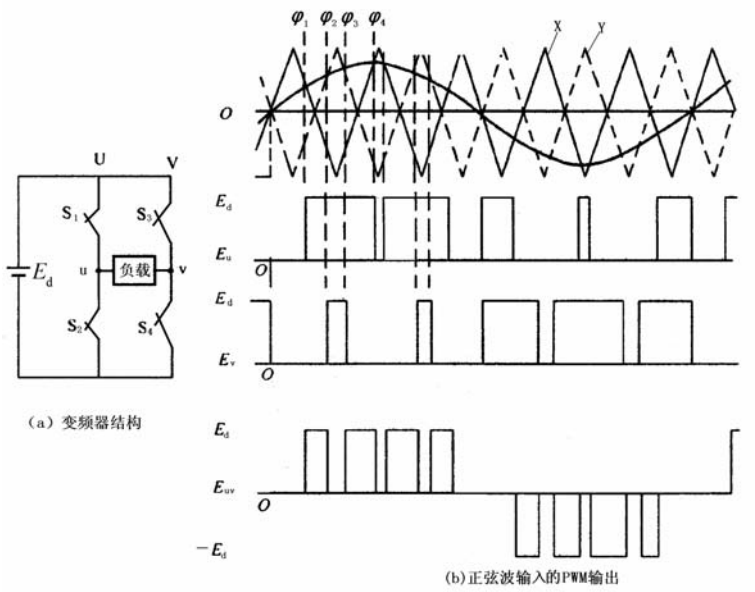


图 4.67　单相桥式逆变电路

设输入信号(调制信号)为 $e_s=E_s\sin(\omega_s t+\theta)$

X、Y 为两个互为相反的三角波(载波信号)，其频率为 ω_b、幅值为 E_b。U 桥在 e_s 与 X 相相交时导通或关断，V 桥在 e_s 与 Y 相交时导通或关断。如相位在 ϕ_1 时 S_1 导通(S_2 关断)，ϕ_2 时 S_3 导通(S_4 关断)，ϕ_3 时 S_4 导通(S_3 关断)，ϕ_4 时 S_2 导通(S_1 关断)。这样，输出电压 E_{uv} 为三角波和调制信号的函数。输出电压的基波部分可用下式表示：

$$E_{uv}(\omega_s t,\ \omega_b t)=\frac{E_d}{E_b}e_s$$

上式表明：输出电压的基波幅值随调制波的幅值变化而变化，且放大倍数与直流侧电压 E_d 成正比，与三角波振幅 E_b 成反比，输出电压的频率和相位与调制信号的频率和相位相同。所以说当 SPWM 的控制信号为幅值和频率均可调的正弦波，载波信号为三角波，输出的信号是幅值与频率均可调的等幅不等宽的脉冲序列，其等效于正弦波的脉宽调制波。

2) 通用变频器

所谓“通用”是指它具有多种可供选择的功能，可与各种不同性质负载的异步电动机配套使用。

通用变频器控制正弦波的产生是以恒电压频率比(U/f)保持磁通不变为基础的，再经 SPWM 驱动主电路，产生 U、V、W 三相交流电驱动三相交流异步电动机。图 4.68 所示为通用变频器的组成框图。

为了保证驱动装置能安全可靠的工作，驱动装置具有多种自动保护。在图 4.68 中，R_0 的作用是限制启动时的大电流。合上电源后，R_0 接入，以限制启动电流。经延时，触点 KA 闭合或晶闸管 VT 导通(图中虚线部分)，将 R_0 短路，避免造成附加损耗。R_b 为能耗制动电阻，制动时，异步电动机进入发电状态，通过逆变器的续流二极管向电容 C 反向充电，当中间直流回路电压(P、N 点之间电压，通称泵升电压)升高到一定限制值时，通过泵升限制电路使开关器件 VT_b 导通，电容 C 向 R_b 放电，这样将电动机释放的动能消耗在制动电阻 R_b 上。为便于散热，制动电阻常作为附件单独装在变频器外。变频器中的定子电流和直流回路电流检测一方面用于补偿在不同频率下的定子电压，另一方面用于过载保护。

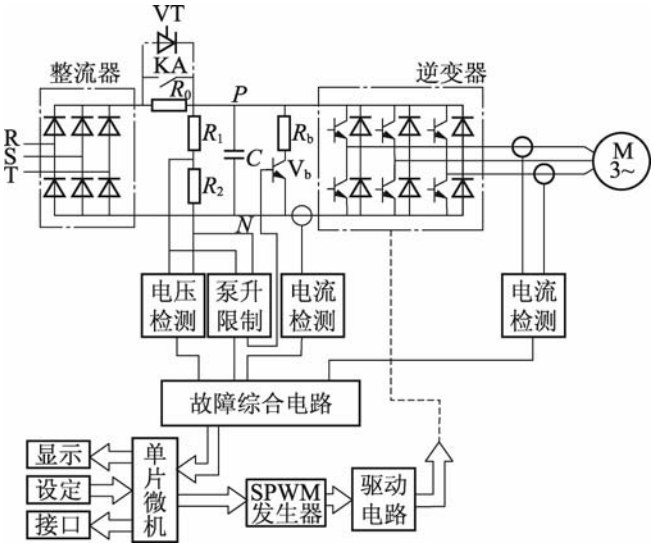


图 4.68　通用变频器的组成框图

控制电路中的单片机一方面根据设定的数据，经运算输出控制正弦波信号，经 SPWM 后，由驱动电路驱动 6 个大功率晶体管的基极，产生三相交流电压 U、V、W 驱动三相交流电动机运转，SPWM 的调制和驱动电路可采用前述的 PWM 大规模集成电路和集成化驱动模块；另一方面，单片机通过对各种信号进行处理，在显示器中显示变频器的运行状态，必要时可通过接口将信号取出作进一步处理。在数控机床主轴交流电动机驱动中，广泛采用通用变频器进行驱动，它属于他控变频调速。

3) 永磁同步电动机的自控变频控制

图 4.69 为自控变频同步电动机控制框图。它通过电动机轴端上的转子位置检测器 BQ(如霍尔元件、接近开关等)发出的信号来控制逆变器的换流，从而改变同步电动机的供电频率，调速时由外部控制逆变器的直流输入电压。

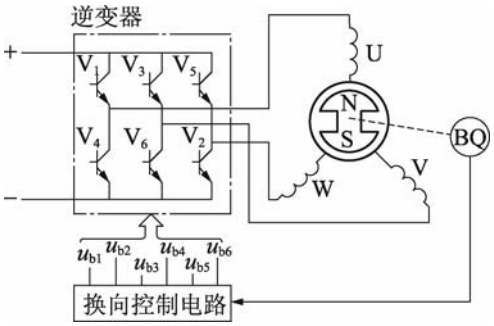


图 4.69　自控变频同步电动机控制框图

自控变频同步电动机在原理上和直流电动机相似，其励磁环节采用永磁转子，三相电枢绕组与 V_1、V_2、V_3、V_4、V_5、V_6 六个大功率晶体管组成的逆变器相连，逆变电源为直流电压。当三相电枢绕组通有平衡的电流时，将在定子空间产生以同步转速 n_1 旋转的磁场，并带动转子以 n_1 的转速同步旋转。其电枢绕组电流的换向由转子位置控制，取代了直流电动机通过换向器和电刷使电枢绕组电流的机械换向，避免了电刷和换向器因接触产生火花的问题，同时可用交流电动机的控制方式，获得直流电动机优良的调速性能。与直流电动机不同的是这里磁极在转子上是旋转的，电枢绕组却是静止的，这显然并没有本质的区别，只是处于不同位置的相对运动而已。

图 4.70 为一个四极的位置检测器安装位置和逻辑图。

在金属圆板上，每隔 180° 空间电角度就有凸部和凹部与 N 极和 S 极对应，如图 4.70(a)所示。间隔 120° 空间电角度设置 3 个检测元件 A、B、C，转子旋转时，检测元件 A、B、C 的输出为图 4.70(b)上的 a、b、c 方波。利用 a、b、c 及其反向信号等六个信号，经逻辑运算得到晶体管 V_1、V_2、V_3、V_4、V_5、V_6 基极的控制脉冲。

转子每转过 60° 空间电角度，通过控制电路，顺序地使大功率晶体管导通。如按图 4.70 所示的编号，则 6 个大功率晶体管按 V_6—V_1—V_2—V_3—V_4—V_5—V_6—V_1 顺序循环导通，每个功率晶体管导通 120° 空间电角度，给电枢绕组提供三相平衡电流，产生电磁转矩使电动机转子连续旋转。

数控机床进给用三相永磁同步电动机，可采用自控变频的控制方式进行控制。永磁同步电动机利用电动机轴上所带的转子位置检测器检测转子位置也可以进行矢量变频控制。

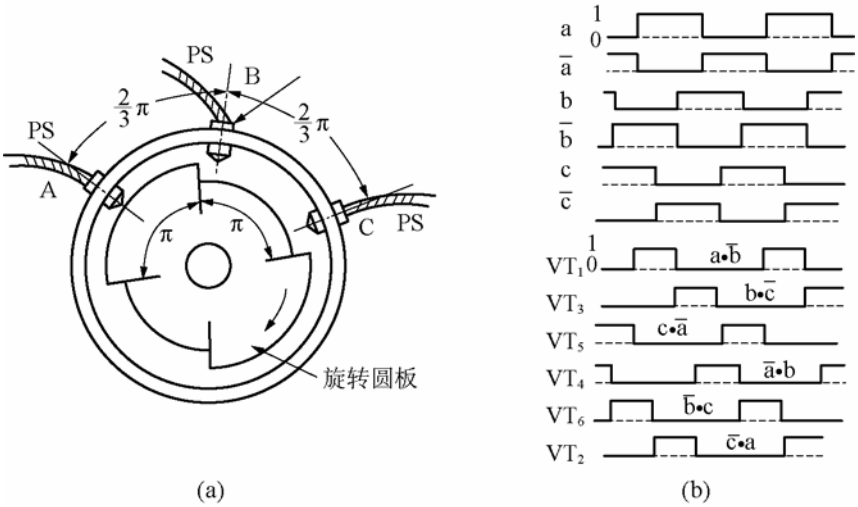


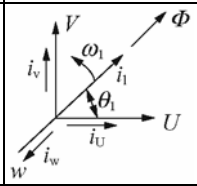
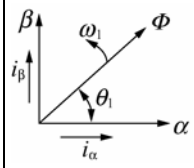
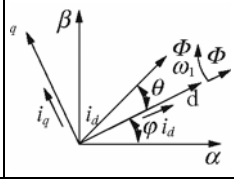
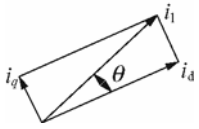
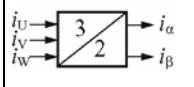
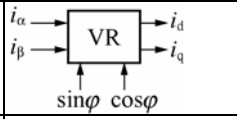
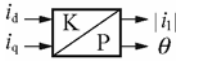
图 4.70　位置检测器安装位置和逻辑图

矢量控制调速系统具有动态特性好、调速范围宽、控制精度高、过载能力强且可承受冲击负载和转速突变等特点。

正是由于具有这些优良特性，近年来矢量控制随着变频技术的发展而得到了广泛的采用。

直流电动机之所以具有优良的调速性能，是因为其输出转矩只与电动机的磁场 $\boldsymbol{\Phi}$ 和电枢电流 I_a 相关，而且这两个量是相互独立的。在利用频率、电压可调的变频器来实现交流电动机的调速过程中，通过“等效”的方法获得与直流电动机相同的转矩特性的控制方式，就叫矢量控制。即把交流电动机的三相输入电流等效为直流电动机中彼此独立的电枢电流和励磁电流，然后像直流电动机一样，通过对这两个量的控制，实现对电动机的转矩控制，再通过反变换，将控制的等效直流电动机还原成三相交流电动机。这样，三相交流电动机的调速特性就完全体现了直流电动机的调速特性。三相交流电动机的矢量变换过程见表 4-2。

表 4-2　三相交流电动机的矢量变换过程

序号	1	2	3	4
等效矢量图				
符号	—			
表达式	—	$i_\alpha = i_U - \frac{1}{2}i_V - \frac{1}{2}i_W$ $i_\beta = \frac{\sqrt{2}}{2}i_V - \frac{\sqrt{3}}{2}i_W$	$i_d = i_a\cos\varphi + i_\beta\sin\varphi$ $i_a = -i_a\sin\varphi + i_\beta\cos\varphi$	$\lvert i_1\rvert = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$ $\tan\theta = \frac{i_q}{i_d}$

(续)

序号	1	2	3	4
说明	U、V、W、——三相绕组 $\boldsymbol{\Phi}$——定子磁通 ω_1——定子旋转磁通角频率 θ_1——相位角	α、β——等效后二相绕组	i_d——励磁电流 i_q——电枢电流 $\boldsymbol{\Phi}_2$——转子磁通 φ——转子磁通相位角 θ——负载角	

(1) 三/二相变换(U、V、W→α、β)见表中 1 和 2，在三相定子绕组 U、V、W 中通过正弦电流 i_U、i_V、i_W，形成定子旋转磁通 $\boldsymbol{\Phi}$，它的旋转方向和角频率 ω_1 分别取决于电流的相序和频率。通过等效变换，就可以用固定的、对称的二相绕组 α、β 的异步电动机来代替，即同样产生角频率 ω_1 的定子旋转磁通 $\boldsymbol{\Phi}$。

(2) 矢量旋转(VR)变换见表中 2 和 3，将二相绕组 α、β 中的交流电流 i_α、i_β 变换成以转子磁通 $\boldsymbol{\Phi}_2$ 定向的直流电动机的励磁绕组 d 和电枢绕组 q，分别通以励磁电流 i_d 和电枢电流 i_q。在确保旋转磁通 $\boldsymbol{\Phi}$ 恒定的前提下，实现了二相交流电动机与直流电动机的等效变换。由于励磁电流 i_d 与转矩成正比，电枢电流 i_q 与转子磁通 $\boldsymbol{\Phi}_2$ 成正比，所以在实际的调速控制系统中，i_d 和 i_q 可通过转矩指令和磁通来确定。

在 VR 变换中，转子磁通相位角 φ 和磁通 $\boldsymbol{\Phi}_2$ 的幅值检测有直接测量法和间接测量法两种。从理论上讲，直接测量应该较为准确，但实际上却会遇到不少工艺和技术方面的困难。而且由于磁槽的影响，测量信号中含有较大成分的脉动分量，转速越低越严重。因此，现在实用的系统中，多采用间接计算的方法，即利用容易测量的电压、电流、转速等信号，来实时计算转子磁通相位角 φ 和磁通 $\boldsymbol{\Phi}_2$ 的幅值。计算方法如下式所示：

$$|\Phi_2| = K_1 i_d$$

$$w_1 = K_2 i_q / K_1 i_d + w = w_s + w$$

式中　K_1、K_2——与电动机相关的常数；

w_s——转差角频率，$w_s = K_2 i_q / K_1 i_d$；

w——转子实际旋转角频率。

等效后转子旋转磁场的角频率与原定子旋转磁场的角频率是相同的，因此对 ω_1 进行积分就可以获得转子磁场的相位角 φ。

(3) 直角坐标/极坐标变换(K/P)把直角坐标系中的 i_q、i_d 通过极坐标变换，即可求得定子电流 i_1 和负载角 θ。而负载角 θ 与转子磁通相位角 φ 的和即为三相交流电动机的旋转磁通 Φ 的相位角 θ_1，它的大小决定了三相定子电流的角频率。

矢量控制调速系统就是通过上述的矢量变换获得幅值和频率可调的正弦波，经过 SPWM，驱动主电路中的三组共 6 个开关元件，输出电压到三相交流电动机，使电动机的输出转速和转矩随之改变，从而适应系统的要求。

小　　结

数控机床的伺服系统通常是指各坐标轴的进给伺服系统，它是数控系统和机床机械传动部件间的连接环节。伺服系统的高性能在很大程度上决定了数控机床的高效率、高精度，所以说伺服系统是数控机床的重要组成部分。

数控机床伺服系统有开环系统、闭环系统和半闭环系统。开环系统无位置检测，闭环系统和半闭环系统，都是基于反馈控制原理工作的，是一个双闭环系统。常用于反馈检测的装置有光栅、脉冲编码器、感应同步器、旋转变压器及磁栅等。直流调速有脉宽调制(PWM)和晶闸管(SCR)调速，进给用直流伺服电动机通常采用 PWM 控制方式，主轴直流电动机采用 SCR 控制方式。变频调速是交流调速的重要发展方向之一，正弦波脉宽调制(SPWM)是对逆变器的开关元件按一定规律控制其通断，从而获得等幅不等宽的矩形脉冲的方式，其基波近似正弦波。在矢量控制中，通过对三相交流异步电动机的等效变换，获得对定子电流或电压及相位的控制，从而实现对三相交流异步电动机的变频调速。

思考题与习题

1. 试述开环系统、闭环系统、半闭环系统的组成及特点。

2. 何为步距角？步距角的大小与哪些参数有关？

3. 步进电动机的转向和转速是如何控制的？

4. 步进电动机的硬环分和软环分各有什么特点？

5. 直流伺服电动机在结构上有何特点？宽调速直流伺服电动机能与滚珠丝杠直接相连的意义何在？

6. 什么是绝对式测量和增量式测量，间接测量和直接测量？

7. 光电编码器安装在滚珠丝杠驱动前端和末端有何区别？

8. 增量式光电编码器或光栅尺输出的“六脉冲”信号的作用是什么？怎样进行方向判别？

9. 旋转变压器和感应同步器各由哪些部件组成？有哪些工作方式？

10. 磁栅由哪些部件组成？方向如何判别？

11. 高低电压切换驱动电源对提高步进电动机的运行性能有何作用？

12. 何谓整流和逆变？晶闸管三相反并联逻辑无环流可逆调速是什么含义？

13. 比较直流电动机晶闸管(SCR)调速和脉宽调制(PWM)的异同点。

14. SPWM 指的是什么？调制信号正弦波与载波信号三角波经 SPWM 后，输出的信号波形是何种形式？

15. 交流伺服电动机(三相交流永磁同步电动机)有哪些变频控制方式？变频控制方式是怎样定义的？

第 5 章　数控机床机械机构

教学提示：典型数控机床的机械结构主要由基础件、主传动系统、进给传动系统、回转工作台、自动换刀装置及其他机械功能部件等几部分组成。数控机床的基础件通常是指床身、立柱、横梁、工作台、底座等结构件，构成了机床的基本框架；数控机床的主传动系统将切削所需要的运动和动力传递给主轴；数控机床的进给传动系统是进给伺服系统的重要组成部分，是实现加工运动所需的运动及动力的执行机构；回转工作台分成数控回转工作台和分度工作台两种类型，数控回转工作台在加工过程中参与切削，相当于进给运动坐标轴，分度工作台只完成分度运动。为了尽可能减少辅助时间，数控机床通常还具有回转刀架、刀库、机械手等自动换刀装置。数控机床的控制方式和使用特点，使它与普通机床在机械传动和结构上有十分显著的不同。

教学要求：了解数控机床对主传动系统、进给传动系统的要求；了解主轴的调速方法；熟悉主轴部件、滚珠丝杠螺母副、直线电动机、数控机床的导轨、自动换刀装置；认识数控回转工作台、分度工作台等主要辅助装置；通过本章的介绍，为学生初步具有设计机床传动系统的能力打下基础。

5.1　概　　述

数控机床本体结构是数控机床的主体部分，虽然也有普通机床所具有的床身、立柱、导轨、工作台、刀架等部件，但为了与数控加工的高加工精度、高速切削性能相匹配，数控机床在机械结构性能方面形成了独特的风格：

数控机床的主体结构具有以下特点：

(1) 为了简化机械传动结构、缩短传动链，数控机床多数采用了高性能的无级变速主轴及伺服传动系统。

(2) 为了适应连续的自动化加工和提高生产效率，数控机床机械结构具有较高的静、动刚度和阻尼精度，以及较高的耐磨性，而且热变形小。

(3) 为减小摩擦、消除传动间隙和获得高加工精度，数控机床更多地采用了高效传动部件，如：滚珠丝杠螺母副、静压蜗杆副、塑料导轨、滚动导轨、静压导轨等。

(4) 为了改善劳动条件、改善操作性能、提高劳动生产率，数控机床采用了多主轴、多刀架结构以及刀具与工件的自动夹紧装置、自动换刀装置、自动排屑装置及自动润滑冷却装置等。

(5) 为了保证机床精度的稳定性、获得可靠的加工质量，数控机床多采取减小热变性的措施。

根据数控机床的使用场合和结构特点，数控机床的机械结构设计应满足以下要求。

1. 提高机床的静、动刚度

机床刚度是机床结构抵抗变形的能力。机床在加工过程中承受多种外力的作用，根据所受载荷的不同，机床的刚度可分为动刚度和静刚度。静刚度是机床在稳定载荷(主轴箱、拖板的自重、工件质量等)作用下抵抗结构变形的能力，它与系统构件的几何参数及材料弹性模量有关；动刚度是机床在交变载荷(如周期变化的切削力、旋转运动的不平衡力、间歇进给不稳定力等)作用下阻止振动的能力，它与系统构件阻尼系数有关。

静刚度的提高是动刚度提高的前提，为提高机械结构的刚度首先要提高结构的静刚度。为了提高机床大件的刚度，宜采用合理的截面形状、封闭结构的床身，并采用液力平衡以减少移动部件因位置变动造成的机床变形。为了提高机床各部件的接触刚度，增加机床的承载能力，采用刮研的方法来增加单位面积上的接触点，并在结合面之间施加足够大的预加载荷，以增加接触面积。这些措施都能有效地提高接触刚度。为了提高数控机床主轴的刚度，数控机床不但经常采用三支承结构，而且选用刚性很好的双列短圆柱滚子轴承和角接触向心推力轴承，以减小主轴的径向和轴向变形。

在保证静刚度的前提下，还必须提高动刚度，常用的措施主要有提高系统的刚度、增加阻尼以及调整构件的自振频率等。试验表明，提高阻尼系数是改善抗振性的有效方法。钢板焊接结构既可以增加静刚度、减小结构质量，又可以增加构件本身的阻尼。因此，近年来在数控机床上采用钢板焊接结构的床身、立柱、横梁和工作台。封砂铸件也有利于振动衰减，对提高抗振性也有较好的效果。

2. 减少机床的热变形

机床的主轴、工作台、刀架等运动部件，在运动中常易产生热量，而工艺过程的自动化和精密加工的发展，对机床的加工精度和精度稳定性提出了越来越高的要求。为保证部件的运动精度，要求各运动部件的发热量尽量少，以防产生热变形。为此，机床的结构根据热对称的原则设计，并改善了主轴轴承、丝杠螺母副、高速运动导轨副的摩擦特性。如 MJ—50CNC 数控车床主轴箱壳体即按热对称原则设计，并在壳体外缘上铸有密集的散热片，主轴轴承采用高性能油脂润滑，并严格控制注入量，使主轴温升很低。对于产生大量切屑的数控机床，一般都带有良好的自动排屑装置等。

3. 减少运动间的摩擦和消除传动间隙

数控机床的运动精度和定位精度不仅受机床零部件的加工精度、装配精度、刚度及热变形的影响，而且与运动件的摩擦特性有关。执行件的摩擦阻力主要来自导轨。数控机床通常采用塑料滑动导轨、滚动导轨或静压导轨来减少摩擦副之间的摩擦力，避免低速爬行。在进给系统中用滚珠丝杠代替滑动丝杠也可以明显减少摩擦阻力。

数控机床(尤其是开环系统的数控机床)的加工精度在很大程度上取决于进给传动链的精度。除了减小传动齿轮和滚珠丝杠的加工误差之外，另一个提高数控机床传动精度的重要措施是采用无间隙滚珠丝杠传动和无间隙齿轮传动。

4. 延长机床的使用寿命和提高精度保持性

为了延长机床的使用寿命和提高精度保持性，在设计时应充分考虑数控机床零部件的耐磨性，尤其是机床导轨、进给传动丝杠以及主轴部件等影响加工精度的主要零件的耐磨

性。在使用过程中，应保证数控机床各运动部件间的润滑良好。

5. 减少辅助时间和改善操作性能

在数控机床的单件加工中，辅助时间(非切屑时间)占有较大的比重。要进一步提高机床的生产率，就必须采取措施最大限度地压缩辅助时间。目前已经有很多数控机床采用了多主轴、多刀架以及带刀库的自动换刀装置等，以减少换刀时间。对于产生切屑量较多的数控机床，床身机构必须有利于排屑。

6. 安全防护和宜人的造型

数控机床切削速度高，一般都有大流量与高压力的切削液用于冷却和冲屑；机床的运动部件也采用自动润滑装置，为了防止切屑与切削液飞溅，将机床设计成全封闭结构，只在工作区留有可以自动开闭的安全门窗，用于观察和装卸工件。

数控机床是一种机电一体化的自动化加工设备，其造型要体现机电一体化的特点；内部布局要合理、紧凑、便于维修，外观造型要美观宜人。

5.2 数控机床的主传动系统

数控机床主传动系统是指驱动主轴运动的系统；主轴是数控机床上带动刀具和工件旋转，产生切削运动的运动轴，它往往是数控机床上单轴功率消耗最大的运动轴。与普通机床一样，数控机床也必须通过变速，才能使主轴获得不同的转速，以适应不同的加工要求；在变速的同时，还要求传递一定的功率和足够的转矩，来满足切削的需要。

5.2.1 数控机床主传动系统要求

作为高度自动化的设备，数控机床对主传动系统的基本要求如下。

(1) 为了能达到最佳的切削效果，数控机床一般都应在最佳的切削条件下工作，因此，主轴一般都要求能实现无级变速。

(2) 要求机床主轴系统必须具有足够高的转速和足够大的功率，以适应高速、高效的加工需求。

(3) 为了降低噪声、减轻发热、减少振动，主传动系统应简化结构，减少传动件。

(4) 在加工中心上，还必须具有安装刀具和刀具交换所需的自动夹紧装置，以及主轴定向准停装置，以保证刀具和主轴、刀库、机械手的正确啮合。

(5) 为了扩展机床的功能，实现对 *C* 轴位置(主轴回转角度)的控制，主轴还需要安装位置检测装置，以便实现对主轴位置的控制。

5.2.2 数控机床主轴的调速方法

数控机床主传动系统的调速方法主要有：有级变速(机械变速)、无级变速、分段无级变速、内置电动机主轴变速(电主轴)等几种形式。

1. 有级变速(机械变速)

有级变速仅用于经济型数控机床，大多数数控机床均采用无级变速或分段无级变速，如图 5.1 所示。图中的电动机不具备变速功能，而是通过拨叉控制滑移齿轮啮合位置来实

现主轴变速。

2. 无级变速

主传动采用无级变速后，不仅能在一定的速度范围内选择到合理的切削速度，而且还能在运动中自动换速。无级变速有机械、液压、电气等多种形式，数控机床一般采用直流或交流伺服电动机作为驱动的电气无级变速形式。

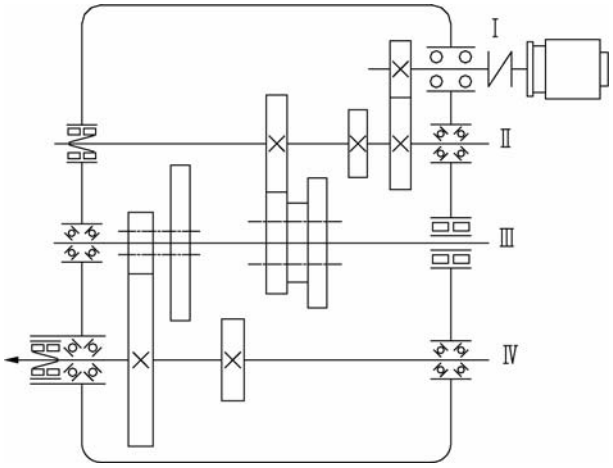


图 5.1　有级变速系统

如图 5.2 所示，电动机经同步齿形带传动主轴，是性能较好的交、直流主轴电动机。其优点是变速范围宽，最高转速可达 8000r/min，在传动上基本能满足目前大多数数控机床的要求，易于实现丰富的控制功能，其结构简单，安装调试方便，可满足现在中高档数控机床的控制要求。但对于越来越高的速度需求，该配置方式已难以满足。

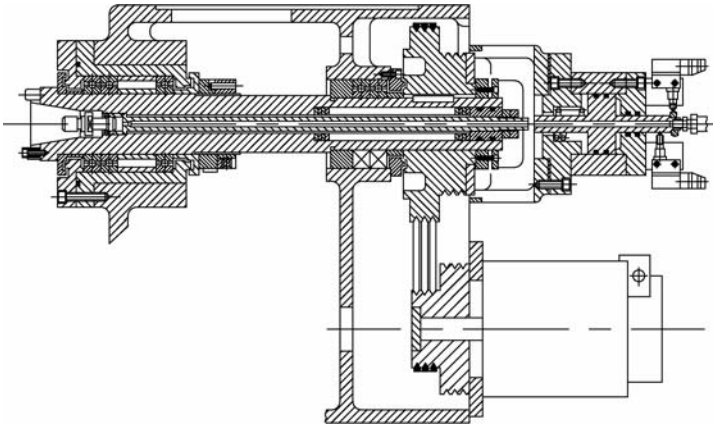


图 5.2　无级变速传动结构

3. 分段无级变速

数控机床在实际生产中，并不需要在整个变速范围内均为恒功率，一般要求在中、高速段为恒功率传动，在低速段为恒转矩传动。为了保证数控机床主轴低速时有较大的转矩和主轴的变速范围尽可能大，有的数控系统在交流或直流电动机无级变速的基础上配以齿

轮变速，成为分段无级变速，如图 5.3 所示。小型数控机床，或主传动系统要求振动小、噪声低的数控机床，也可采用平带、V 带、同步齿形带以及多楔带等带传动形式的分段无级变速系统。

在带有齿轮变速的分段无级变速系统中，主轴的正、反启动与停止、制动是通过直接控制电动机来实现的，主轴的变速则由电动机转速的无级变速与齿轮的有级变速相配合来实现。齿轮有级变速机构通常采用液压拨叉和电磁离合器两种变速形式。

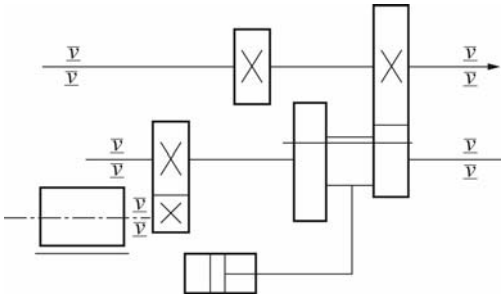


图 5.3　分段无级变速

1) 液压拨叉变速机构

液压拨叉变速机构的原理和形式可以用图 5.4 来说明。滑移齿轮的拨叉与变速液压缸的活塞连杆连接，通过改变不同的通油方式可以使三联齿轮获得三个不同的变速位置。当液压缸 1 通压力油，液压缸 5 卸压时[图 5.4(a)]，活塞杆 2 带动拨叉 3 向左移动到极限位置，同时拨叉带动三联齿轮移动到左端啮合位置，行程开关发出信号。当液压缸 5 通压力油而液压缸 1 卸压时[图 5.4(b)]，活塞杆 2 和套筒 4 一起向右移动，套筒 4 碰到液压缸 5 的端部之后，活塞杆 2 继续右移到极限位置，此时三联齿轮被拨叉 3 移到右端啮合位置，行程开关发出信号。当压力油同时进入左右两个液压缸时[图 5.4(c)]，由于活塞杆 2 两端直径不同活塞杆向左移动。当活塞杆靠到套筒 4 的右端时，活塞杆左端受力大于右端，活塞杆不再移动，拨叉和三联齿轮被限制在中间位置，行程开关发出信号。

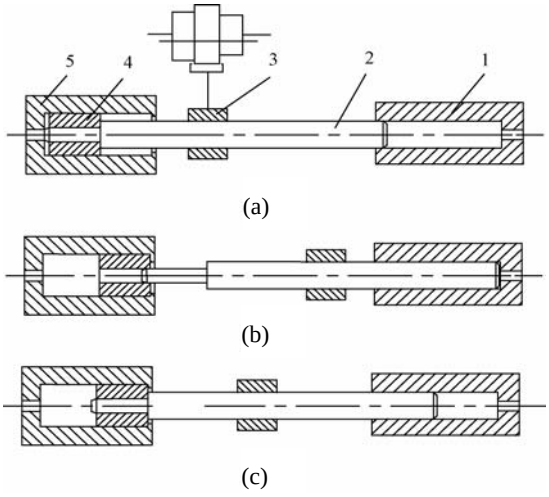


图 5.4　三位液压拨叉变速机构的原理和形式

1、5—液压缸　2—活塞杆　3—拨叉　4—套筒

注意，在自动变速时，为了使齿轮能顺利移入啮合位置而不发生顶齿现象，可在低速下进行；或者在主传动系统中增设一台微型电动机，它在拨叉移动齿轮块的同时(主轴伺服电动机停止运动)启动并带动各传动齿轮作低速回转，以防止发生顶齿现象。

2) 电磁离合器变速

电磁离合器能简化变速机构，便于实现自动化操作，它是通过安装在传动轴上的离合器的吸合和分离的不同组合来改变齿轮的传动路线，实现主轴变速的。

图 5.5 是啮合式电磁离合器(也称牙嵌式电磁离合器)的结构图。当线圈 1 通电后，带有端面齿的衔铁 2 被吸引，与磁轭 8 的端面齿相啮合。衔铁 2 又通过花键与定位环 5 相连接，再通过螺钉 7 传递给齿轮。隔离环 6 用于防止磁力线从传动轴构成回路而削弱电磁吸力。为了保证传动精度，衔铁 2 和定位环 5 采用渐开线花键连接，保证了衔铁与传动轴的同轴度，使端面间齿轮更可靠地啮合。采用螺钉 3 和压力弹簧 4 的结构能使离合器的安装方式不受限制，不管衔铁是水平还是垂直、向上还是向下安装，当线圈 1 断电时都能保证合理的齿端间隙。

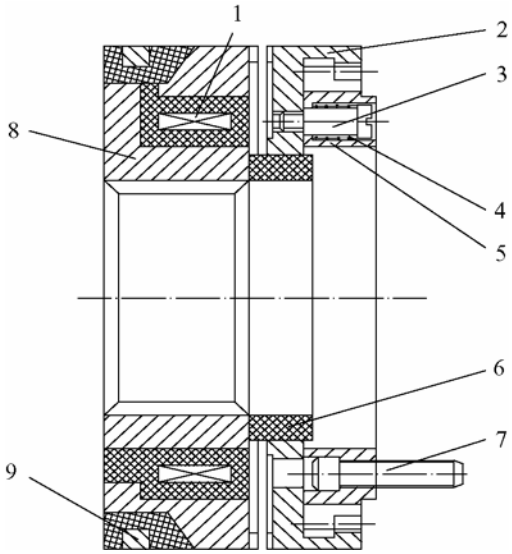


图 5.5　啮合式电磁离合器结构图

1—线圈　2—衔铁　3、7—螺钉　4—压力弹簧　5—定位环
6—隔离环　8—磁轭　9—旋转环

4. 内置电动机主轴变速(电主轴)

电主轴是最近几年在数控机床领域出现的将机床主轴与主轴电动机融为一体的新技术，这种变速方式大大简化了主轴箱体与主轴本身的结构，有效地提高了主轴的转速。

电主轴电动机由 3 个基本部分组成：空心轴转子、带绕组的定子、速度检测元件，其结构示意图如图 5.6 所示。空心轴转子既是电动机的转子，也是主轴转子，中间的空心用于装夹刀具或工件；带绕组的定子和其他电动机相似。若在其内应用较先进的轴承(如陶瓷轴承、磁悬浮轴承等)，则不仅可使主轴部件结构紧凑、质量小、惯性小，而且可提高启动、停止的响应特性，有利于控制振动和噪声。

电主轴的出现大大简化了主运动系统结构，实现了所谓的“零传动”，并可改善机床

的动平衡，在超高速切削机床上得到了广泛的应用。由于电主轴的工作转速极高，对其结构设计、制造和控制提出了严格的要求，并带来了一系列技术难题，如主轴的散热、动平衡、支承、润滑及其控制等。

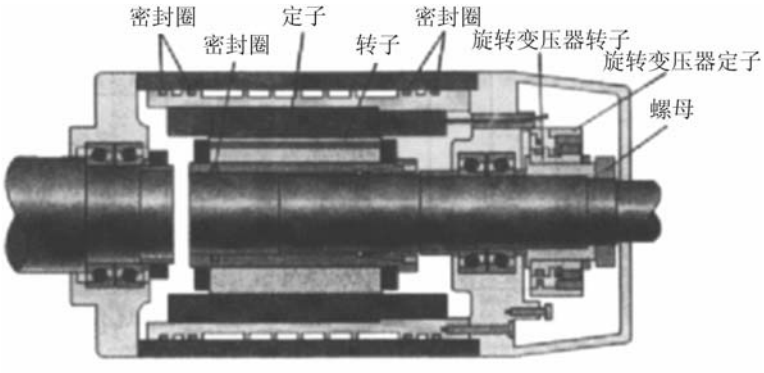


图 5.6　电主轴结构示意图

5.2.3　数控机床的主轴部件

数控机床的主轴部件是数控机床的重要组成部分之一，包括主轴的支承和安装在主轴上的传动零件等。它的回转精度可影响工件的加工精度，它的功率大小与回转速度可影响加工效率，它的自动变速、准停和换刀可影响机床的自动化程度。因此，要求主轴部件具有良好的回转精度、结构刚度、抗振性、热稳定性及部件的耐磨性和精度的保持性。对于自动换刀的数控机床，为了实现刀具的自动装卸和夹持，还必须有刀具的自动夹紧装置、主轴准停装置和切屑清除装置等结构。

1. 主轴部件的支承与润滑

机床主轴带动刀具或夹具在支承中作回转运动，应能传递切削转矩承受切削抗力，并保证必要的旋转精度。目前，数控机床主轴的支承配置形式主要有 3 种，如图 5.7 所示。

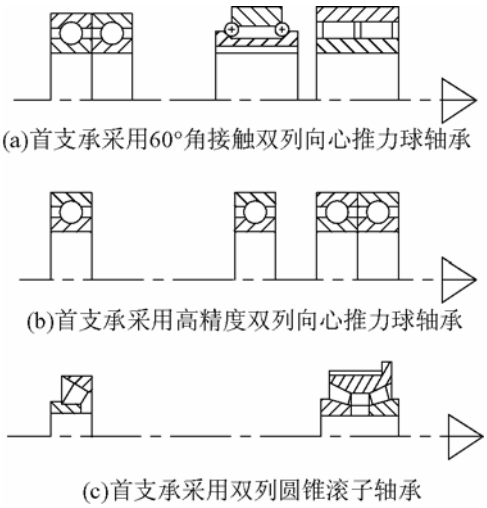


图 5.7　主轴的常见支承配置形式

(1) 前支承采用双列圆柱滚子轴承和 60° 角接触双列向心推力球轴承组合，后支承采用成对安装的角接触球轴承。这种配置形式使主轴的综合刚度大幅度提高，可以满足强力切削的要求，因此普遍应用于各类数控机床主轴中。

(2) 前轴承采用高精度的双列角接触球轴承，后轴承采用单列(或双列)角接触球轴承。这种配置具有良好的高速性能，主轴最高转速可达 4000r/min，但它承载能力小，因而适用于高速、轻载和精密的数控机床主轴。在加工中心的主轴中，为了提高承载能力，有时应用 3～4 个角接触球轴承组合的前支承，并用隔套实现预紧。

(3) 前后轴承采用双列和单列圆锥轴承。这种轴承径向和轴向刚度高，能承受重载荷，尤其能承受较强的动载荷，安装与调整性能好。但这种配置限制了主轴的最高转速和精度，因此适用于中等精度，低速与重载的数控机床主轴。

为了尽可能减少主轴部件温升热变形对机床工作精度的影响，通常利用润滑油的循环系统把主轴部件的热量带走，使主轴部件与箱体保持恒定的温度。在某些数控镗、铣床上采用专用的制冷装置，比较理想的实现了温度控制。近年来，某些数控机床的主轴轴承采用高级油脂，用封入方式进行润滑，每加一次油脂可以使用 7～10 年，简化了结构，降低了成本且维护保养简单。为了防止润滑油和油脂混合，通常采用迷宫密封方式。

2. 常用卡盘结构

数控车床工件夹紧装置可采用三爪自定心卡盘、四爪单动卡盘或弹簧夹头等。为了减少数控车床装夹工件的辅助时间，广泛采用液压或气压驱动动力自定心卡盘。图 5.8 为某数控车床上采用的一种液压驱动动力自定心卡盘，它主要由固定在主轴后端的液压缸 5 和固定在主轴前端的卡盘 3 两部分组成，改变液压缸左、右腔的通油状态，活塞杆 4 带动卡盘内的驱动爪 1 驱动卡爪 2 夹紧或松开工件，并通过行程开关 6 和 7 发出相应信号，其夹紧力的大小通过调整液压系统的压力进行控制。具有结构紧凑、动作灵敏、能够实现较大夹紧力的特点。

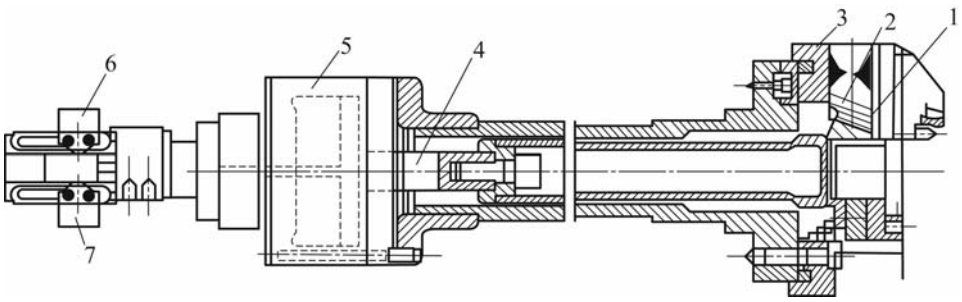


图 5.8　液压驱动动力自定心卡盘

1—驱动爪　2—卡爪　3—卡盘　4—活塞杆　5—液压缸　6、7—行程开关

3. 主轴准停装置

在数控镗床、数控铣床和以镗铣为主的加工中心上，为了实现自动换刀，使机械手准确地将刀具装入主轴孔中，刀具的键槽必须与主轴的键位在周向对准；在镗削加工退刀时，要求刀具向刀尖反方向径向移动一段距离后才能退出，以免划伤工件，这都需要主轴具有周向定位功能；另外，一些特殊工艺要求情况下，如在通过前壁小孔镗内壁的同轴大孔，

或进行反倒角等加工时，也要求主轴实现准停，使刀尖停在一个固定的方位上，以便主轴偏移一定尺寸后，使大切削刃能通过前壁小孔进入箱体内对大孔进行镗削，所以在主轴上必须设有准停装置。

目前，主轴准停装置很多，主要分为机械式和电气式两种。

传统的做法是采用机械挡块等来定向。图 5.9 为 V 形槽轮定位盘准停装置原理图，在主轴上固定一个 V 形槽轮定位盘，使 V 形槽与主轴上的端面键保持所需要的相对位置关系。当主轴需要停车换刀时，发出降速信号，主轴转换到最低速运转，延时继电器开始动作，并延时 4s～6s 后，无触点开关 1 接通电源，当主轴转到图示位置即 V 形槽轮定位盘 3 上的感应块 2 与无触点开关 1 相接触后发出信号，使主轴电动机停转。另一延时继电器延时 0.2s～0.4s 后，压力油进入定位液压缸 4 下腔，使定向活塞向左移动，当定向活塞上的定向滚轮 5 顶入定位盘的 V 形槽内时，行程开关 LS2 发出信号，主轴准停完成。若延时继电器延时 1s 后行程开关 LS2 仍不发信号，说明准停没完成，需使定向活塞 6 后退，重新准停。当活塞杆向右移到位时，行程开关 LS1 发出定向滚轮 5 退出凸轮定位盘凹槽的信号，此时主轴可启动工作。

机械式主轴准停装置准确可靠，但结构较复杂。现代数控机床一般采用电气式主轴准停装置，只要数控系统发出指令信号，主轴就可以准确的定向。图 5.10 为 JCS—018 加工中心主轴电气准停装置原理图，在带动主轴旋转的多楔带轮 1 的端面上装有一个厚垫片 4，垫片 4 上装有一个体积很小的永久磁铁 3，在主轴箱体对应主轴准停的位置上，装有磁传感器 2。当机床需要停车换刀时，数控装置发出主轴停转指令，主轴电动机立即降速，在主轴以最低转速慢转几圈、永久磁铁 3 对准磁传感器 2 时，磁传感器 2 发出准停信号，该信号经放大后，由定向电路控制主轴电动机停在规定的周向位置上，同时限位开关发出信号，表示准停已完成。

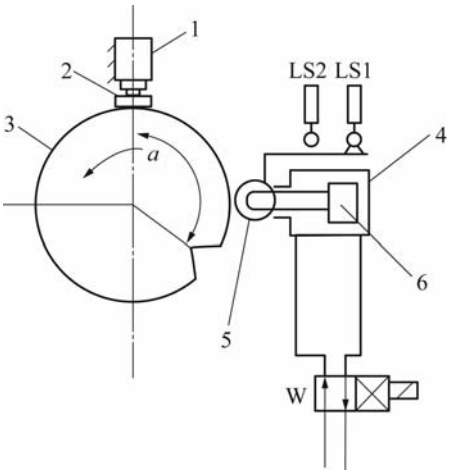


图 5.9　V 形槽轮定位盘准停装置原理图

1—无触点开关　2—感应块　3—V 形槽轮定位盘
4—定位液压缸　5—定向滚轮　6—定向活塞

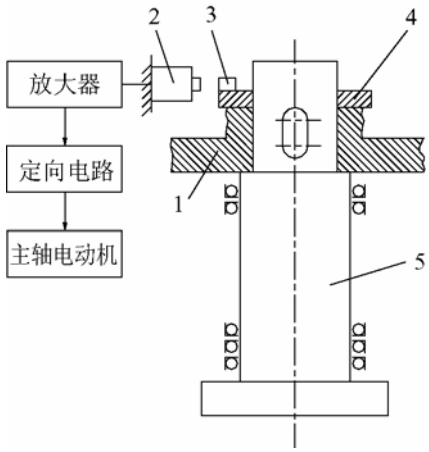


图 5.10　JCS—018 加工中心主轴电气准停装置

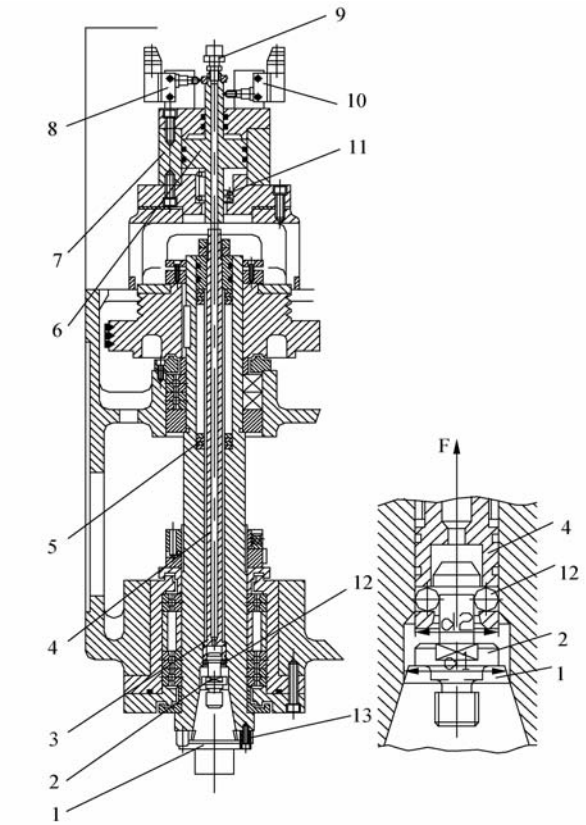
1—多楔带轮　2—磁传感器
3—永久磁铁　4—垫片　5—主轴

电气式主轴准停的特点是：不需要机械部件，定向时间短，可靠性高，只需要简单的强电顺序控制，精度和刚度高。

4. 主轴内刀具自动装卸及吹屑装置

在加工中心上，为了实现刀具在主轴上的自动装卸，除了要保证刀具在主轴上正确定位之外，还必须设计自动夹紧装置。

图 5.11 为自动换刀数控立式镗铣床(JCS—018)的主轴部件结构图：刀杆采用 7:24 的大锥度锥柄，既有利于定心，也为松夹带来了方便。在锥柄的尾端轴颈被拉紧的同时，通过锥柄的定心和摩擦作用将刀杆夹紧于主轴的端部。在碟形弹簧 5 的作用下，拉杆 4 始终保持约 10000N 的拉力，并通过拉杆右端的钢球 12 将刀杆的尾部轴颈拉紧。换刀时首先将压力油通入主轴尾部的液压缸 7 左腔，液压缸活塞 6 推动拉杆 4 向右移动。将刀柄松开，同时使碟形弹簧 5 压紧。拉杆 4 的右移使右端的钢球 12 位于套筒的喇叭口处，消除了刀杆上的拉力。当拉杆继续右移时，喷气嘴的端部把刀具顶松，使机械手可方便地取出刀杆。机械手将应换刀具装入后，电磁换向阀动作使压力油通入液压缸右腔，液压缸活塞 6 向左退回原位，碟形弹簧复原又将刀杆拉紧。螺旋弹簧 11 使液压缸活塞 6 在液压缸右腔无压力时也始终退在最左端，当活塞处于左右两个极限位置时，相应限位行程开关 8、10 发出松开和夹紧的信号。



(a)　　(b)

图 5.11　JCS—018 加工中心的主轴部件结构图

1—刀架　2—拉钉　3—主轴　4—拉杆　5—碟形弹簧　6—液压缸活塞　7—液压缸
8、10—限位行程开关　9—压缩空气管接头　11—螺旋弹簧　12—钢球　13—端面键

自动清除主轴孔内的灰尘和切屑也是换刀过程中的一个重要问题。如果主轴锥孔中落入切屑、灰尘或其他污物，在拉紧刀杆时，主轴锥孔表面和刀杆的锥柄就会被划伤，甚至会使刀杆发生偏斜，破坏刀杆的正确定位，影响零件的加工精度。为了保持主轴锥孔的清洁，常采用的方法是使用压缩空气吹屑。在图 5.11 中，当主轴部件处于松刀状态时，主轴顶端的液压缸与拉杆是紧密接触的，此时，压缩空气通过液压缸活塞 6 和拉杆 4 中间的通孔，由压缩空气管接头 9 喷出，以吹掉主轴锥孔上的灰尘、切屑等污物，保证主轴孔的清洁。

5.3　数控机床的进给传动系统

进给系统机械传动结构是伺服进给系统的主要组成部分，主要由传动机构、运动变换机构、导向机构、执行件组成，它是实现成形加工运动所需的运动及动力的执行机构。由于数控机床的进给运动是数字控制的直接对象，被加工工件的最终位置精度和轮廓精度都与进给运动的传动精度、灵敏度和稳定性有关。

5.3.1　数控机床进给传动系统要求

为了确保数控机床进给传动系统的传动精度和工作平稳性，在设计机械传动装置时，应注意以下要求。

(1) 提高传动精度和刚度。数控机床本身的精度，尤其是进给传动装置的传动精度和定位精度对零件的加工精度起着关键性的作用，是数控机床的特征指标。为此，首先要保证各个传动件的加工精度，尤其是提高滚珠丝杠螺母副(直线进给系统)、蜗杆副(圆周进给系统)的传动精度。另外，在进给传动链中加入减速齿轮以减小脉冲当量(即伺服系统接收一个指令脉冲驱动工作台移动的距离)，从系统设计的角度分析，也可以提高传动精度；通过预紧传动滚珠丝杠，消除齿轮、蜗轮等传动件的间隙等办法，来提高传动精度和刚度。

(2) 减少各运动零件的惯量。传动件的惯量对进给传动系统的启动和制动特性都有影响，尤其是高速运转的零件，其惯量的影响更大。在满足传动强度和刚度的前提下，尽可能减小执行部件的质量，减小旋转零件的直径和质量，以减少运动部件的惯量。

(3) 减少运动件的摩擦阻力。机械传动结构的摩擦阻力，主要来自丝杠螺母副和导轨。在数控机床进给传动系统中，为了减小摩擦阻力，消除低速进给爬行现象，提高整个伺服进给系统稳定性，广泛采用滚珠丝杠和滚动导轨以及塑料导轨和静压导轨等。

(4) 响应速度快。所谓快速响应特性是指进给传动系统对输入指令信号的响应速度及瞬态过程结束的迅速程度。快速响应是伺服进给系统的动态性能，反映了系统的跟踪精度。工件加工过程中，工作台应能在规定的速度范围内灵敏而精确地跟踪指令，在运行时不出现丢步和多步现象。进给传动系统响应速度的大小不仅影响到机床的加工效率，而且影响加工精度。设计中应使机床工作台及传动机构的刚度、间隙、摩擦以及转动惯量尽可能达到最佳值，以提高伺服进给系统的快速响应性。

(5) 较强的过载能力。由于电动机频繁换向，且加减速度很快，电动机可能在过载条件下工作，这就要求电动机有较强的过载能力，一般要求在数分钟内过载 4～6 倍而不

损坏。

(6) 稳定性好，寿命长。稳定性是伺服进给系统能够正常工作的最基本条件，特别是在低速进给情况下不产生爬行，并能适应外加负载的变化而不发生共振。稳定性与系统的惯性、刚度、阻尼及增益等都有关系，适当选择的各项参数，并能达到最佳的工作性能，是伺服进给系统设计的目标。

所谓伺服进给传动系统的寿命，主要指其保持数控机床传动精度和定位精度的时间长短，即各传动部件保持其原来制造精度的能力。为此，应合理选择各传动部件的材料、热处理方法及加工工艺，并采用适当的润滑方式和防护措施，以延长其寿命。

(7) 使用维护方便。数控机床属于高精度自动控制机床，主要用于单件、中小批量、高精度及复杂的生产加工，机床的开机率相应就高，因而进给传动系统的结构设计应便于维护和保养，最大限度地减少维修工作量，以提高机床的利用率。

5.3.2　滚珠丝杠螺母副

丝杠螺母副是机床上常用的运动变换机构，其功用是将旋转运动变换成直线运动。按丝杠与螺母的摩擦性质不同，可将数控机床上常用的丝杠螺母副分为以下几类：

(1) 滑动丝杠螺母副，主要用于旧机床的数控化改造、经济型数控机床等；

(2) 滚珠丝杠螺母副，广泛用于中、高档数控机床；

(3) 静压丝杠螺母副，主要用于高精度数控机床、重型机床。

这里主要介绍一下滚珠丝杠螺母副的结构、特点、设计要求和应用。

1. 滚珠丝杠的结构组成

滚珠丝杠由丝杠、螺母、滚珠和滚珠返回装置 4 部分组成。在丝杠和螺母上加工有弧形螺旋槽，当它们套装在一起时便形成了螺旋滚道，滚道内装满滚珠。丝杠回转时，为保持丝杠螺母的连续工作，滚珠通过螺母上的返回装置完成循环。按照滚珠的循环方式，滚珠丝杠螺母副分成内循环方式和外循环方式两大类如图 5.12 所示。

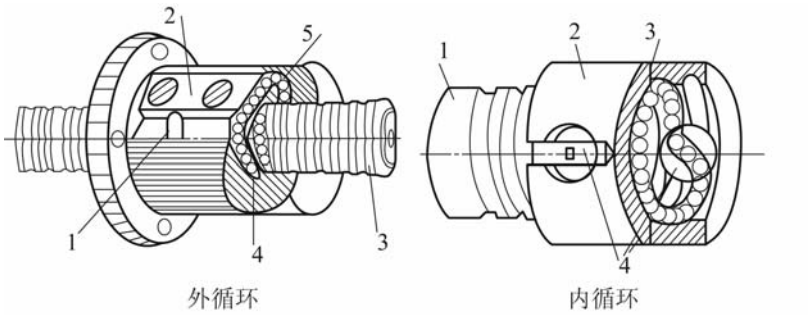


图 5.12　滚珠丝杠螺母副的循环方式

内循环方式是指在循环过程中滚珠始终保持和丝杠接触的方式。这种方式螺母结构紧凑，定位可靠，刚性好，不易磨损，返回滚道短，不易产生滚珠堵塞，摩擦损失小。缺点是结构复杂、制造较困难。

外循环方式是指在循环过程中滚珠与丝杠脱离接触的方式。外循环方式制造工艺简单，应用广泛；螺母径向尺寸较大；但因用弯管端部作挡珠器，故刚性差、易磨损，且噪声较大。

2. 滚珠丝杠螺母副的特点

(1) 传动效率高、摩擦损失小。滚珠丝杠螺母副传动的效率 η 高达 85%～98%，是普通滑动丝杠的 2～4 倍。因此，功率消耗只相当于常规丝杠的 1/4～1/2。

(2) 运动灵敏，低速时无爬行。由于滚珠与丝杠和螺母之间的摩擦是滚动摩擦，运动件的摩擦阻力及动、静摩擦阻力之差都很小，采用滚珠丝杠螺母副是提高进给系统灵敏度、定位精度和防止爬行的有效措施之一。

(3) 传动精度高，刚性好。通过适当的预紧，可消除传动间隙，实现无间隙传动。

(4) 滚珠丝杠螺母副的磨损很小，使用寿命长。

(5) 无自锁能力，具有传动的可逆性，故对于垂直使用的丝杠，由于重力的作用，当传动切断时不能立即停止运动，应增加自锁装置。

(6) 滚珠丝杠螺母副制造工艺复杂，滚珠丝杠和螺母的材料、热处理和加工要求与滚动轴承相同，且螺旋滚道必须磨削，因而制造成本高。

3. 滚珠丝杠螺母副的选择

滚珠丝杠螺母副的选择包括其精度选择、尺寸规格(包括导程与公称直径)、支承方式等几个方面的内容。应该根据机床的精度要求来选用滚珠丝杠螺母副的精度，根据机床的载荷来选定滚珠丝杠的直径，在加工中心的设计中一般按额定动载荷来确定滚珠丝杠螺母副的尺寸规格，对细长而又承受压缩载荷的滚珠丝杠作压杆稳定性核算；对转速高，支承距离大的滚珠丝杠螺母副作临界转速校核；对精度要求高的滚珠丝杠作刚度校核；对数控机床，需核算其转动惯量；对全闭环系统，需核算其谐振频率。

1) 精度等级的选择

滚珠丝杠螺母副的精度将直接影响数控机床各坐标轴的定位精度。滚珠丝杠螺母副按精度分为四种类型，见表 5-1。普通精度的数控机床，一般可选用 P 级精度的滚珠丝杠螺母副，精密级数控机床选用 C 级精度的滚珠丝杠螺母副。丝杠精度中的导程误差对机床定位精度影响最明显。而丝杠在运转中由于温升引起的丝杠伸长，将直接影响机床的定位精度。通常需要计算出丝杠由于温升产生的伸长量，该伸长量称为丝杠的方向目标。用户在定购滚珠丝杠时，必须给出滚珠丝杠的方向目标值。

表 5-1　滚珠丝杠螺母副的精度等级和应用范围

精度等级		应用范围
代号	名称	
P	普通级	普通机床
B	标准级	一般数控机床
J	精密级	精密机床、精密数控机床、加工中心、仪表机床
C	超精密级	精密机床、精密数控机床、仪表机床、高精度加工中心

2) 结构尺寸的选择

滚珠丝杠螺母副的结构尺寸主要有：丝杠的名义直径 D_0、螺距 t、长度 L、滚珠直径 d_0 等，尤其是名义直径与刚度直接相关，直径越大，承载能力和刚度越大，但直径大转动惯量也会随之增加，使系统的灵敏度降低。所以，一般是在兼顾二者的情况下选取最佳

直径。

(1) 名义直径 D_0。滚珠与螺纹轨道在理论接触角状态时包络滚珠球心的圆柱直径，是滚珠丝杠的特征尺寸。对于小型加工中心采用 32、40(mm)，中型加工中心选用 40、50(mm)，大型加工中心采用 50、63(mm)的滚珠丝杠，但通常为 $L/30$～$L/35$。

(2) 螺距 t。t 越小，螺纹升角小，摩擦力矩小，分辨率高，但传动效率低，承载能力低，应折中考虑。

(3) 丝杠长度 L。一般为工作行程＋螺母长度＋(5～10)。

(4) 滚珠直径 d_0。滚珠直径 d_0 越大，承载能力越高，尽量取大值。一般取 $d_0=0.6t$。

(5) 滚珠的工作圈数、列数和工作滚珠总数对丝杠工作特性影响较大；当(1)～(3)项确定后，后两项也确定了，一般不用用户考虑。

3) 验算

当有关结构参数选定后，还应根据有关规范进行扭转刚度、临界转速和寿命的验算。

(1) 扭转刚度验算。数控机床的滚珠丝杠是精密传动元件，它在轴向力的作用下伸长或缩短，受扭矩作用会引起扭转变形，这将引起丝杠的导程发生变化，从而影响其传动精度及定位精度，因此滚珠丝杠应验算满载时的变形量。

滚珠丝杠受工作负载 F_{p} 的作用而引起导程 L_0 的变化量 ΔL_1 (cm)，其值可按下式计算：

$$\Delta L_1=\pm\frac{F_{\mathrm{p}}L_0}{EF}$$

式中　E——弹性模量，对钢，E=206(GPa)；

F——滚珠丝杠截面积(按内径确定)(cm)；

“+”号用于拉伸时，“−”号用于压缩时。

滚珠丝杠因受扭矩作用而引起的导程变化量 ΔL_2 (cm)，可按下式计算：

$$\Delta L_2=\pm\frac{L_0\varphi}{2\pi\pm\varphi}\approx\frac{L_0\varphi}{2\pi}$$

式中　φ——在扭矩 T 的作用下，滚珠丝杠每一导程长度两截面上的相对扭转角。

$$\varphi=\pm\frac{TL_0}{GJ_{\mathrm{c}}}$$

式中　G——扭转弹性模量，对钢，G=82.4(GPa)；

J_{c}——滚珠丝杠截面积的惯性矩(cm)，$J_{\mathrm{c}}=\dfrac{\pi}{32}d_1^{\,4}$，其中 d_1 为丝杠小径(cm)。

综合上述结果，滚珠丝杠在工作负载 F_{p} 和扭矩 T 的共同作用下，所引起的每一导程变形量 ΔL (cm)为

$$\Delta L=\Delta L_1+\Delta L_2=\pm\frac{F_{\mathrm{p}}L_0}{EF}\pm\frac{L_0\varphi}{2\pi}=\pm\frac{F_{\mathrm{p}}L_0}{EF}\pm\frac{TL_0^{\,2}}{2\pi GJ_{\mathrm{c}}}$$

如果滚珠丝杠长度为 1m，则其上共有 $100/L_0$ 个导程，它的导程变形总误差 Δ (cm/m)为

$$\Delta=\frac{100}{L_0}\Delta L$$

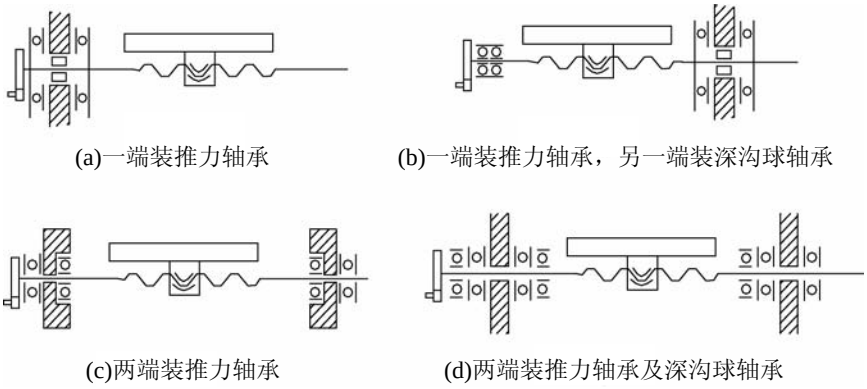
(2) 临界转速验算。对于数控机床来说，滚珠丝杠的最高转速是指快速移动时的转速。因此，只要此时的转速不超过临界转速就可以了。应校核丝杠轴的最高转速与丝杠产生自

激振的转速是否接近，如果很接近，会导致强迫共振，影响机床正常工作。应根据有关计算公式进行校核。

(3) 寿命验算。滚珠丝杠螺母副的寿命，主要是指疲劳寿命。在工程计算中，采用“额定疲劳寿命”这一概念，它指一批尺寸、规格、精度相同的滚珠丝杠，在相同条件下回转时，其中 90%不发生疲劳剥落的情况下运转的总转数。也可用总回转时间或总走行距离来表示。滚珠丝杠螺母副的寿命可根据有关经验公式校核，应保证总时间寿命 $Lt \geqslant 20000$h。如果不能满足这一条件，而且轴向载荷已由工作要求所决定不能减小，则只有选取直径较大，即选用额定动载荷更大的丝杠，以保证 $Lt \geqslant 20000$h。

4. 滚珠丝杠的支承结构

数控机床的进给传动系统要获得较高传动刚度，除了加强滚珠丝杠螺母副本身的刚度外，滚珠丝杠的正确安装及支承结构的刚度也是不可忽视的因素。常用的滚珠丝杠支承形式有以下四种，如图 5.13 所示。



(a)一端装推力轴承　(b)一端装推力轴承，另一端装深沟球轴承

(c)两端装推力轴承　(d)两端装推力轴承及深沟球轴承

图 5.13　滚珠丝杠在机床上的支承形式

(1) 一端装推力轴承。这种安装方式适用于短丝杠，它的承载能力小，轴向刚度低。一般用于数控机床的调节环节或升降台式数控铣床的垂直方向。

(2) 一端装推力轴承，另一端装深沟球轴承。此种方式用于丝杠较长的情况，当热变形造成丝杠伸长时，其一端固定，另一端能作微量的轴向浮动。安装时应注意使推力轴承端远离热源及丝杠的常用段，以减少丝杠热变形的影响。

(3) 两端装推力轴承。把推力轴承装在滚珠丝杠的两端，并施加预紧拉力，可以提高轴向刚度，但这种安装方式对丝杠的热变形较为敏感。

(4) 两端装推力轴承及深沟球轴承　它的两端均采用双重支承并施加预紧，使丝杠具有较大的刚度，这种方式还可使丝杠的温度变形转化为推力轴承的预紧力。但设计时要求提高推力轴承的承载能力和支承刚度。

5. 滚珠丝杠的制动

滚珠丝杠螺母副的传动效率高但不能自锁，需要设置制动装置(特别是用在垂直传动或高速大惯量场合时)。

最常见的制动方式是电气电磁方式，即采用电磁制动器，且这种制动器就做在电动机内部。图 5.14 为 FANUC 公司伺服电动机电磁制动器的示意图。机床工作时，在电磁线圈 7

电磁力的作用下，外齿轮 8 与内齿轮 9 脱开，弹簧受压缩，当停机或停电时，永久磁铁 5 失电，在弹簧恢复力作用下，齿轮 8、9 啮合，内齿轮 9 与电动机端盖合为一体，故与电动机轴连接的丝杠得到制动，这种电磁制动器装在电动机壳内，与电动机形成一体化的结构。

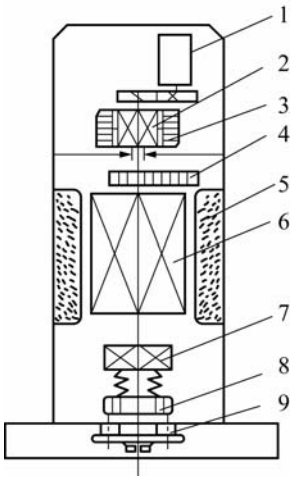


图 5.14　电磁制动器示意图

1—旋转变压器　2—测速发电机转子　3—测速发电机定子　4—电刷
5—永久磁铁　6—伺服电动机转子　7—电磁线圈　8—外齿轮　9—内齿轮

6. 滚珠丝杠螺母副的轴向间隙消除和预紧

滚珠丝杠螺母副对轴向间隙有严格的要求，以保证反向时的运动精度。所谓轴向间隙是指丝杠和螺母无相对转动时，丝杠和螺母之间的最大轴向窜动。它除了结构本身的游隙之外，还包括在施加轴向载荷之后弹性变形所造成的窜动。因此要把轴向间隙完全消除比较困难，通常采用双螺母预紧的方法，把弹性变形控制在最小的限度内。

目前常用的双螺母预紧结构形式有以下 3 种。

1) 用锁紧螺母预紧

图 5.15 所示为螺纹调间隙式滚珠丝杠螺母副，滚珠丝杠左右两螺母以平键与外套相联，其中右边一个螺母的外伸端没有凸缘并制有螺纹。用两个圆螺母 1、2 可使右端螺母相对于丝杠作轴向移动，在消除间隙后将其锁紧。这种调整方法具有结构紧凑、调整方便等优点，故应用广泛，但调整位移量不易精确控制。

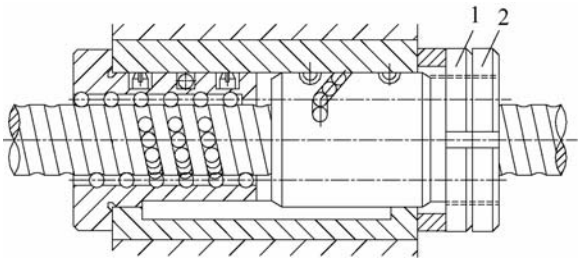


图 5.15　螺纹调间隙式滚珠丝杠螺母副

1—圆螺母　2—锁紧螺母

2) 修磨垫片调间隙

如图 5.16 所示，通过修磨调整垫片的厚度，使滚珠丝杠的左右螺母产生轴向位移，实现预紧。这种方式结构简单、刚性好，调整间隙时需卸下调整垫片修磨，为了装卸方便，最好将调整垫片做成半环结构。

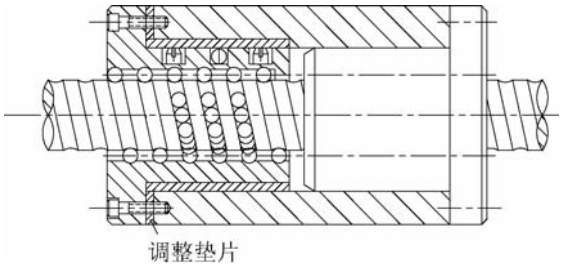


图 5.16　垫片调隙式滚珠丝杠螺母副

3) 齿差式调整

图 5.17 为齿差调隙式滚珠丝杠螺母副。在左右螺母的端部做外齿轮，齿数分别为 z_1、z_2，而且 z_1 和 z_2 相差一个齿。两个齿轮分别与两端相应的内齿圈相啮合。内齿圈紧固在螺母座上，预紧时脱开两个内齿圈，使两个螺母同向转动相同的齿数，然后再合上内齿圈，两螺母的轴向相对位置发生变化从而实现间隙的调整和施加预紧力。当两齿轮沿同一方向各转过一个齿时其轴向位移量为 $s=(\frac{1}{z_1}-\frac{1}{z_2})t$。

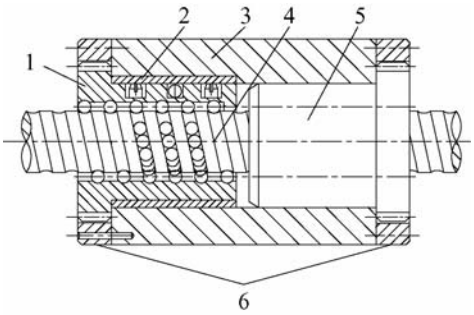


图 5.17　齿差调隙式滚珠丝杠螺母副

1、5—螺母　2—滚珠　3—套筒　4—丝杠　6—内齿圈

如当 z_1=99，z_2=100，t=10mm，则 s=10/(99×100)≈1μm。

这种方法使两个螺母相对轴向位移最小可达 1mm，其调整精度高，调整准确可靠，但结构复杂。

5.3.3　直线电动机进给系统

随着高速机床的出现，传统的旋转电动机经过机械转换装置将旋转运动变为直线运动的方式已不能满足对直线运动高性能的要求，虽然高速滚珠丝杠传动系统可在一定程度上满足高速机床的要求，但存在制造困难，速度和加速度的增加限制较大，进给行程短(一般不能超过 4m～6m)，全封闭时系统稳定性不容易保证等困难。研究表明：滚珠丝杠技术在

1g 加速度下，在卧式机床上可以可靠地工作，若加速度再提高 0.5 倍就有问题了。自 1993 年起，在机床进给上开始应用直线电动机直接驱动，它是高速高精加工机床，特别是其中的大型机床较理想的驱动方式。与滚珠丝杠传动相比，直线电动机进给系统具有以下特点。

(1) 速度快、加减速过程短。直线电动机直接驱动进给部件，取消了中间机械传动元件，无旋转运动和离心力的作用，更容易实现高速直线运动，目前，其最大进给速度可达 80 m/min～200m/min。同时“零传动”的高速响应性使其加减速过程大大缩短，从而实现启动时瞬间达到高速，高速运行时又能瞬间准停，其加速度可达 19.6m/s^2～98 m/s^2。

(2) 精度高。由于取消了丝杠等机械传动机构，可减少插补时因传动系统滞后带来的跟踪误差。利用光栅作为工作台的位置测量元件，并采用闭环控制，通过反馈对工作台的位移进行精度控制，定位精度达到 0.01～0.1 μm 。

(3) 传动刚度高、推力平稳。“零传动”提高了其传动刚度。同时直线电动机的布局，可以根据机床导轨的形面结构及其工作台运动时的受力情况来进行。

(4) 高速响应性。在系统中取消了一些响应时间常数较大的机械传动件(如丝杠等)，使整个闭环控制系统动态响应性能大大提高。

(5) 行程长度不受限制。在导轨上通过串联直线电机，可以无限延长动件的行程长度，行程长度理论上不受限制，而且性能不会因为行程的变化而受到影响。

(6) 运行时效率高、噪声小。由于无中间传动环节，消除了传动丝杠等部件的机械摩擦所导致的能量损耗，导轨副采用滚动导轨或磁垫悬浮导轨，无机械接触，使运动噪声大大减小。

(7) 宽的速度范围。现代电机技术很容易实现宽调速，速度变化范围可达 1∶10000 以上。例如，美国科尔摩根公司 DDL 永磁直线电动机高速大于 5m/s，低速 1 μm /s。

直线电动机的基本结构与普通旋转电动机相似如图 5.18 所示。设想把一台旋转电动机沿半径方向剖开，并且展平，就形成了一台直线电动机。在直线电动机中，相对于旋转变压器转子的，叫初级；相对于旋转变压器定子的，叫次级。初级通以交流电，次级就在电磁力的作用下沿初级做直线运动。

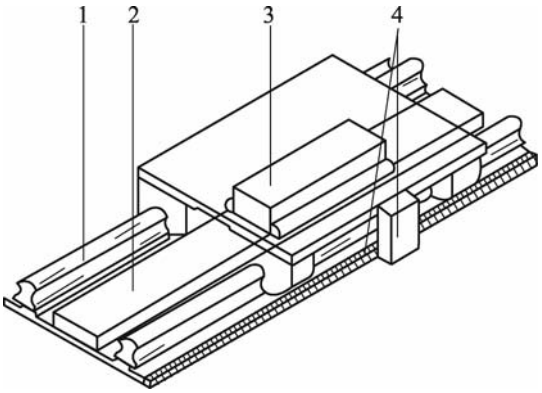


图 5.18　直线电动机进给系统

1—导轨系统　2—笼型绕组二次侧　3—三相绕组一次侧　4—直线行程测量系统

当然，直线电动机直接驱动也存在一些缺点和问题，除控制难度大(中间没有缓冲环节和存在端部效应)外，还存在强磁场对周边产生磁干扰，影响滚动导轨副的寿命，排屑、装配、维修困难，以及发热大、散热条件差等缺点，同时成本较高也影响其推广应用。目前这些问题都已得到不同程度的解决，采用者愈来愈多。

5.3.4　数控机床的导轨

导轨质量对机床的刚度、加工精度和使用寿命都有很大的影响，作为机床进给系统的重要环节，数控机床的导轨比普通机床的导轨要求更高。现代数控机床采用的导轨主要有塑料滑动导轨、滚动导轨和静压导轨。

1. 对导轨的基本要求

(1) 导向精度高。导向精度主要是指运动部件沿导轨运动时的直线度或圆度。影响导向精度的主要因素有导轨的几何精度、导轨的接触精度、导轨的结构形式、动导轨及支承导轨的刚度和热变形、装配质量及动压导轨和静压导轨之间油膜的刚度。

(2) 足够的刚度。导轨刚度是指导轨在动静载荷下抵抗变形的能力。导轨要有足够的刚度，保证在静载荷作用下不产生过大的变形，从而保证各部件间的相对位置和导向精度。

(3) 良好的摩擦特性。动导轨沿支承导轨面长期运行会引起导轨的不均匀磨损，破坏导轨的导向精度，从而影响机床的加工精度。导轨的磨损形式可归结为：硬粒磨损、咬合和热焊、疲劳和压溃等几种形式。

(4) 低速运动的平稳性。在低速运动时，作为运动部件的动导轨易产生爬行现象。进给运动的爬行，会降低工件精度，故要求导轨低速运动平稳，不产生爬行，这对高精度机床尤其重要。

(5) 阻尼特性好(高速时不振动)。

(6) 结构工艺性好。

2. 塑料滑动导轨

塑料滑动导轨具有摩擦因数低，且动、静摩擦因数差值小；减振性好，具有良好的阻尼性；耐磨性好，有自润滑作用；结构简单、维修方便、成本低等特点。目前，数控机床所采用的塑料滑动导轨有铸铁对塑料滑动导轨和镶钢对塑料滑动导轨。塑料滑动导轨常安装在导轨副的运动导轨上，与之相配的金属导轨采用铸铁或钢质材料。塑料滑动导轨分为注塑导轨和贴塑导轨，导轨上的塑料常采用聚四氟乙烯导轨软带和环氧树脂耐磨涂料。

(1) 贴塑导轨。在导轨滑动面上贴一层抗磨的塑料软带，与之相配的导轨滑动面经淬火和磨削加工。软带以聚四氟乙烯为材料，添加合金粉和氧化物制成。塑料软带可切成任意大小和形状，用胶粘剂粘接在导轨基面上。由于这类导轨用粘接方法，故称为贴塑导轨。

导轨软带使用工艺简单。首先将导轨粘贴面加工至表面粗糙度 R_a 为 1.6 μm ～3.2 μm，为了对软带起定位作用，导轨粘贴面应加工成 0.5mm～1.0mm 深的凹槽，再用汽油或丙酮清洗粘接面后，用胶粘结剂粘贴。加压初固化 1h～2h 后，再合拢到配对的固定导轨或专用夹具上，施加一定压力，并在室温固化 24h，取下清除余胶，即可开油槽和精加工。

(2) 注塑导轨。导轨注塑或抗氧化涂层的材料是以环氧树脂和二硫化钼为基体，加入

增塑剂，混合成液状或膏状为一组分，固化剂为另一组分的塑料涂层。这种涂料附着力强，具有良好的可加工性，可经过车、铣、刨、磨削加工；也有良好的摩擦特性和耐磨性，而且固化时体积不收缩，尺寸稳定。特别是可以在调整好固定导轨和运动导轨间的相关位置精度后注入涂料,可以节省许多加工工时，特别适用于重型机床和不能用导轨软带的复杂配合型面。

3. 滚动导轨

滚动导轨的摩擦因数小，动、静摩擦因数差别小。其启动阻力小，能微量准确移动，低速运动平稳，无爬行，因而运动灵活，定位精度高。通过预紧可以提高刚度和抗振性，承受较大的冲击和振动，寿命长，是适合数控机床进给系统应用的比较理想的导轨元件。常用的滚动导轨有滚动导轨块和直线滚动导轨两种。

(1) 滚动导轨块。是一种圆柱滚动体作循环运动的标准结构导轨元件，其结构如图 5.19 所示。在使用时，滚动导轨块安装在运动部件的导轨面上，每一导轨至少用两块，导轨块的数目与导轨的长度和负载的大小有关，与之相配的导轨多用镶钢淬火导轨。当运动部件移动时，滚柱在支承部件的导轨面与本体之间滚动，同时又绕本体循环滚动，滚柱与运动部件的导轨面不接触，因而该导轨面不需淬硬磨光。滚动导轨块的特点是刚度高，承载能力大，便于拆装，它的行程取决于支承件导轨平面的长度。缺点是导轨制造成本高，抗振性能欠佳。

(2) 直线滚动导轨。直线滚动导轨结构如图 5.20 所示，主要由导轨块、滑块、滚珠、保持架、端盖等组成。由于它将支承导轨和运动导轨组合在一起，作为独立的标准导轨副部件由专门生产厂家制造，故又称单元式滚动导轨。在使用时导轨固定在不运动的部件上，滑块固定在运动的部件上。当滑块沿导轨体运动时，滚珠在导轨体和滑块之间的圆弧直槽内滚动，并通过端盖内的暗道从工作负载区到非工作负载区，然后再滚动回工作负载区，不断循环，从而把导轨体和滑块之间的滑动，变为滚珠的滚动。

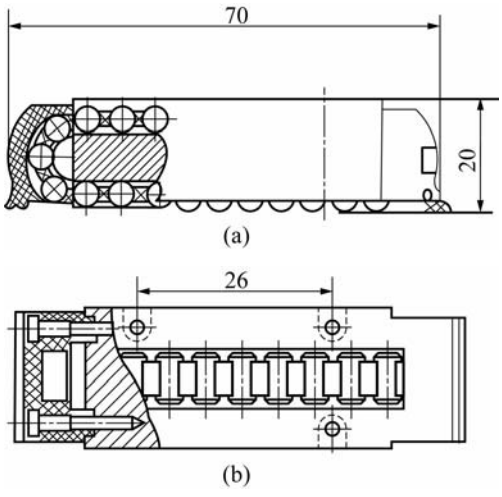


图 5.19　滚动导轨块的结构

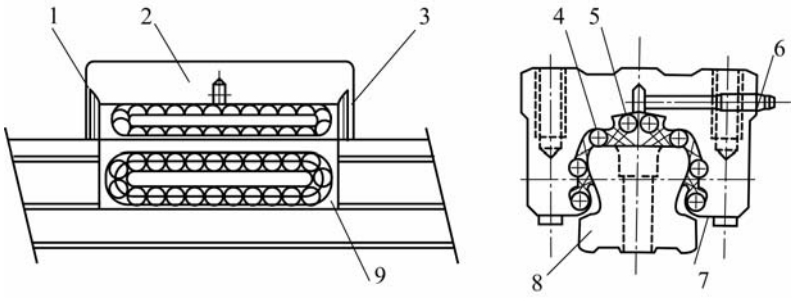


图 5.20　直线滚动导轨的结构

1—压紧圈　2—支承块　3—密封板　4—承载钢珠列
5—反向钢珠列　6—加油嘴　7—侧板　8—导轨　9—保持器

4. 液体静压导轨

液体静压导轨是将具有一定压力的油液，经节流器输送到导轨面上的油腔中，形成承载油膜，将相互接触的导轨表面隔开，实现液体摩擦。这种导轨的摩擦因数小(一般为0.001～0.005)，机械效率高，能长期保持导轨的导向精度；承载油膜有良好的吸振性，低速时不易产生爬行，所以在机床上得到日益广泛的应用。这种导轨的缺点是结构复杂，且需备置一套专门的供油系统，制造成本较高。

按承载方式的不同，液体静压导轨可分为开式和闭式两种。图 5.21(a)为开式液体静压导轨工作原理图：液压泵 2 启动后，油的压力 p_s 经节流器调节至 p_r (油腔压力)，油进入导轨油腔，并通过导轨间隙向外流出回油箱 8。油腔压力形成浮力将运动部件 6 浮起，形成一定的导轨间隙 h_o。当载荷增大时，运动部件下沉，导轨间隙减小，液阻增加，流量减小，从而油经过节流器时的压力损失减小，油腔压力 p_r 增大，直至与载荷 W 平衡。开式液体静压导轨只能承受垂直方向的负载，不能承受颠覆力矩。

图 5.21(b)为闭式液体静压导轨工作原理图，闭式液体静压导轨各方向导轨面上都开有油腔，所以它能承受较大的颠覆力矩，导轨刚度也较大。

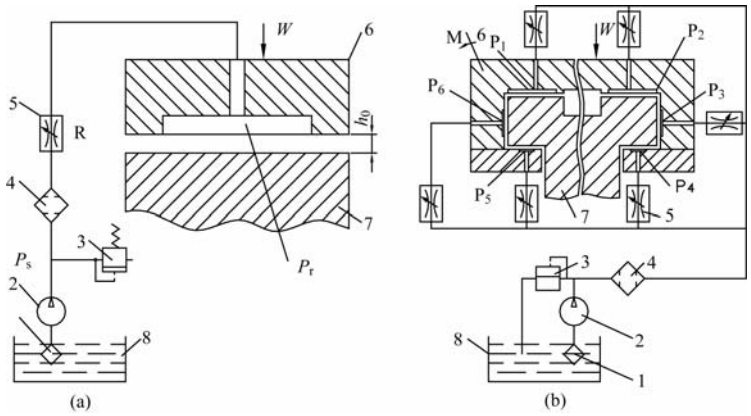


图 5.21　液压静压导轨工作原理图

1、4—滤油器　2—油泵　3—溢流阀　5—节流器　6—运动部件
7—固定部件　8—油箱　P_1～P_6—油腔内各处压强

另外，还有以空气为介质的空气静压导轨。它不仅内摩擦阻力低，而且还有很好的冷却作用，可减小热变形。

5.4　自动换刀装置

为了进一步提高生产效率、改进产品质量及改善劳动条件，数控机床正朝着一台机床在一次装夹中完成多道工序加工的方向发展。为此，在数控机床上必须具备自动换刀装置。

自动换刀装置应该满足换刀时间短，刀具重复定位精度高，刀具储存数量足够，结构紧凑，便于制造、维修、调整，应有防屑、防尘装置，布局应合理等要求。同时也应具有较好的刚性，冲击、振动及噪声小，运转安全可靠等特点。

各类数控机床自动换刀装置的具体结构取决于机床的形式、工艺范围以及刀具的种类和数量等因素。常见的自动换刀装置主要有回转刀架换刀、更换主轴头换刀、更换主轴箱换刀和带刀库的自动换刀系统等几种形式见表 5-2。

表 5-2　自动换刀装置的主要类型、特点及适用范围

类　型		特　点	适用范围
转塔刀架	回转刀架	多为顺序换刀，换刀时间短，结构简单、紧凑，容纳刀具少	各种数控车床，车削中心机床
	转塔头	顺序换刀，换刀时间短，刀具主轴都集中在转塔头上，结构紧凑，但刚性较差，刀具主轴数受限	数控钻床、镗床、铣床
刀库式	刀库与主轴之间直接换刀	换刀运动集中，运动部件少，但刀库运动多，布局不灵活，适应性差	各种自动换刀数控机床，尤其是对使用回转类刀具的数控镗铣，钻镗类立式、卧式加工中心机床，要根据工艺范围和机床特点，确定刀库容量和自动换刀装置类型，用于加工工艺范围广的立、卧式车削中心机床
	用机械手配合刀库进行换刀	刀库只有选刀运动，机械手进行换刀运动要比刀库作换刀运动的惯性小，速度快	
	用机械手、运输装置配合刀库换刀	换刀运动分散，由多个部件实现，运动部件多，但布局灵活，适应性好	
有刀库的转塔头换刀装置		弥补转塔换头刀数量不足的缺点，换刀时间短	扩大工艺范围的各类转塔式数控机床

5.4.1　数控车床的回转刀架

数控车床的回转刀架是一种最简单的自动换刀装置。根据加工对象的不同，它可设计成四方刀架、六方刀架或圆盘式轴向装刀刀架等多种形式，相应地安装四把、六把或更多的刀具，并按数控装置的指令回转、换刀。

回转刀架在结构上必须具有良好的强度和刚性，以承受粗加工时的切削抗力。由于车削精度在很大程度上取决于刀尖位置，对数控车床来说，加工过程中刀尖位置不能人工调

整，因此，更有必要选择可靠的定位方案和合理的定位结构，以保证回转刀架在每次转位后，具有尽可能高的重复定位精度(一般为 0.005mm～0.01mm)。

一般情况下，回转刀架的换刀动作包括刀架抬起、刀架转位及刀架压紧等。回转刀架按其工作原理分为若干类型，如图 5.22 所示。

图 5.22(a)为螺母升降转位刀架，电动机经弹簧安全离合器到蜗杆副带动螺母旋转，螺母举起刀架使上齿盘与下齿盘分离，随即带动刀架旋转到位，然后给系统发信号，螺母反转锁紧。

图 5.22(b)为利用十字槽轮来转位及锁紧刀架(还要加定位销)，销钉每转 1 周，刀架便转 1/4 转(也可设计成六工位等)。

图 5.22(c)所示为凸台棘爪式刀架，棘轮带动下凸轮台相对上凸轮台转动，使其上、下端齿盘分离，继续旋转，则棘轮机构推动刀架转 90°，然后利用一个接触开关或霍尔元件发出电动机反转信号，重新锁紧刀架。

图 5.22(d)所示为电磁式刀架，它利用了一个有 10kN 左右拉紧力的线圈使刀架定位锁定。

图 5.22(e)所示为液压式刀架，它利用摆动液压缸来控制刀架转位，图中有摆动阀心、拨爪、小液压缸；拨爪带动刀架转位，小液压缸向下拉紧，产生 10kN 以上的拉紧力。这种刀架的特点是转位可靠，拉紧力可以再加大；其缺点是液压件难制造，还需多一套液压系统，有液压油泄漏及发热问题。

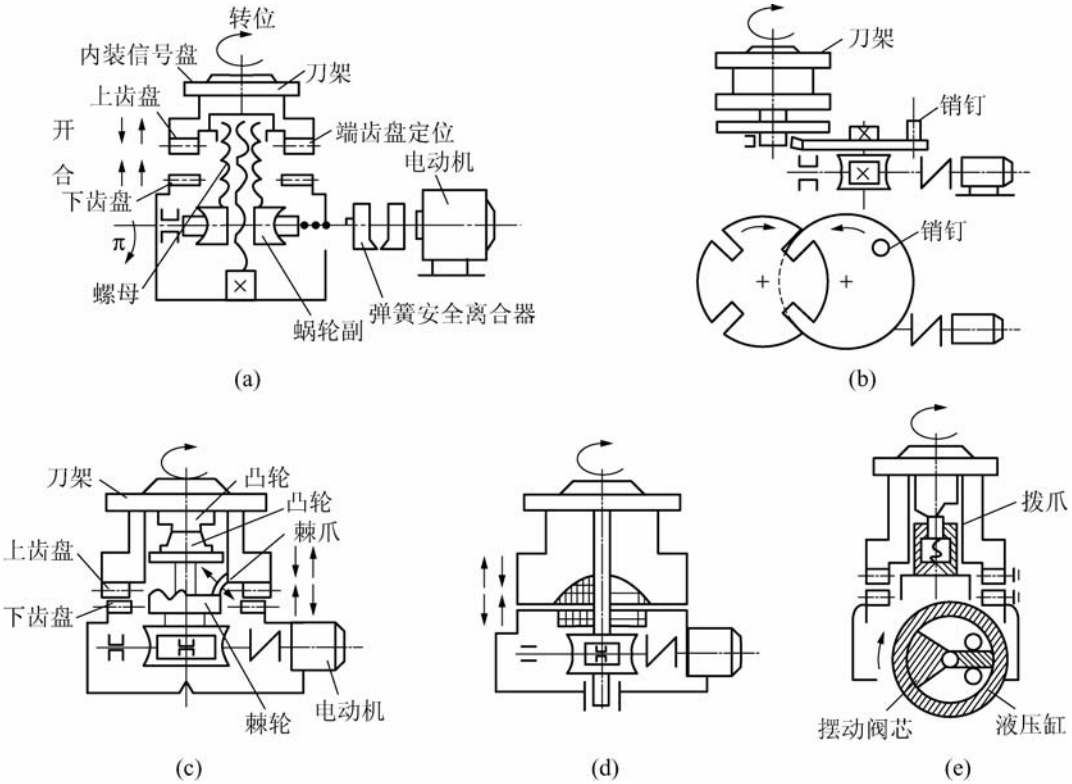


图 5.22　回转刀架

5.4.2　加工中心的自动换刀装置

加工中心是在普通数控机床的基础上增加了自动换刀装置及刀库，并带有自动分度回转工作台或主轴箱(可自动改变角度)及其他辅助功能，从而使工件在一次装夹后，可以连续、自动完成多个平面或多个角度位置的钻、扩、铰、镗、攻螺纹、铣削等工序的加工，工序高度集中的设备。

加工中心自动换刀装置的功能是通过机械手完成刀具的自动更换，它应当满足换刀时间短、刀具重复定位精度高、结构紧凑、安全可靠等要求。

1. *刀库的种类*

刀库的作用是储备一定数量的刀具，通过机械手实现与主轴上刀具的交换。根据刀库存放刀具的数目和取刀方式，刀库可设计成不同的形式。

1) 直线刀库

刀具在刀库中直线排列、结构简单，存放刀具的数量有限(一般 8 把～12 把)，较少使用。

2) 圆盘刀库

存刀量少则 6 把～8 把，多则 50 把～60 把，其有多种形式。图 2.112 为 TH5632 型立式加工中心，其刀库容量为 16 把，采用任意选刀方式。

3) 链式刀库

链式刀库是较常使用的形式之一，这种刀库刀座固定在链节上，常用的有单排链式刀库，如图 5.23(a)所示，一般存刀量小于 30 把，个别达 60 把。若进一步增加存刀量，可采用多排链式刀库，如图 5.23(b)所示，或采用加长链条的链式刀库，如图 5.23(c)所示。

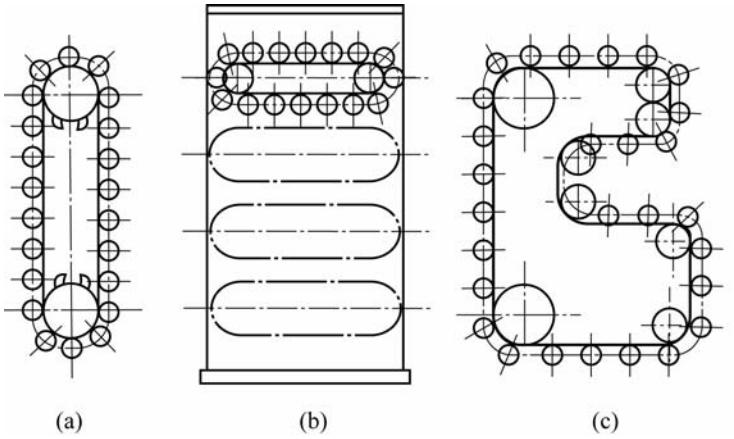


图 5.23　链式刀库

4) 其他刀库

刀库的形式还有很多，值得一提的是格子箱式刀库。此种刀库容量较大，可以使整箱刀库与机外进行交换。

2. *换刀方式*

数控机床的自动换刀装置中，实现刀库与机床主轴之间传递和装卸刀具的装置称为刀

具交换装置。刀具的交换方式和它们的具体结构对机床的生产效率和工作可靠性有着直接的影响。刀具的交换方式很多，一般可分为两大类。

1) 无机械手换刀

无机械手的换刀系统一般是采用把刀库放在机床主轴可以运动到的位置，或整个刀库(或某一刀位)能移动到主轴箱可以到达的位置，同时，刀库中刀具的存放方向一般与主轴上的装刀方向一致。换刀时，由主轴运动到刀库上的换刀位置，利用主轴直接取走或放回刀具。图 5.24 为某立式数控镗铣床无机械手换刀结构示意图，其换刀顺序如下。

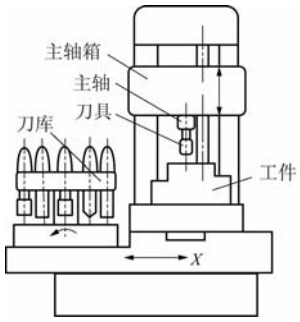


图 5.24　无机械手换刀结构示意图

(1) 按换刀指令，机床工作台快速向右移动，工件从主轴下面移开，刀库移到主轴下面，使刀库的某个空刀座对准主轴。

(2) 主轴箱下降，将主轴上用过的刀具放回刀库的空刀座中。

(3) 主轴箱上升，刀库回转，将下一工步所需用的刀具对准主轴。

(4) 主轴箱下降，刀具插入机床主轴。

(5) 主轴箱及主轴带着刀具上升。

(6) 机床工作台快速向左返回，刀库从主轴下面移开，工件移至主轴下面，使刀具对准工件的加工面。

(7) 主轴箱下降，主轴上的刀具对工件进行加工。

(8) 加工完毕后，主轴箱上升，刀具从工件上退出。

无机械手换刀结构相对简单，但换刀动作麻烦，时间长，并且刀库的容量相对少。

2) 机械手换刀

在加工中心中采用机械手进行刀具交换的方式应用最为广泛，这是因为机械手换刀装置所需的换刀时间短，换刀动作灵活。图 5.25 为 TH5632 自动换刀过程。

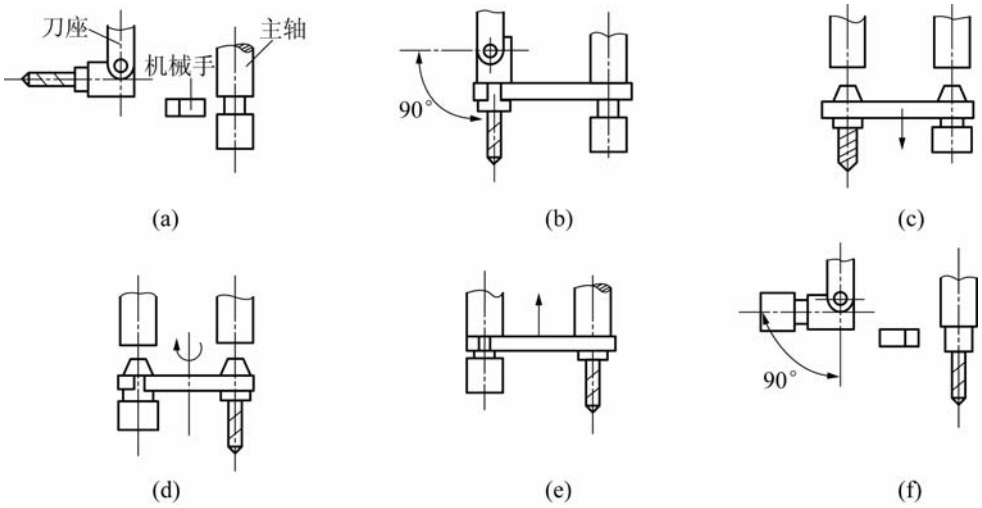


图 5.25　TH5632 自动换刀过程

(1) 首先，刀库将准备更换的刀具转到固定的换刀位置，该位置处在刀库的最下方。

(2) 上一工步结束后，刀库将换刀位置上的刀座逆时针转 90°，主轴箱上升到换刀位置后，机械手旋转 75°，分别抓住主轴和刀库刀座上的刀柄。

(3) 待主轴自动放松刀柄后，机械手下降，同时把主轴孔内和刀座内的刀柄拔出。

(4) 机械手回转 180°。

(5) 机械手上升，将交换位置后的两刀柄同时插入主轴孔和刀座中，并夹紧。

(6) 机械手反方向回转 75°，回到初始位置，刀座带动刀具向上(顺时针)转动 90°，回到初始水平位置，换刀过程结束。

采用机械手进行刀具交换时，由于刀库及刀具交换方式的不同，换刀机械手也有单臂、双臂等多种形式。图 5.26 为双臂机械手中最常见的几种结构：图(a)为钩手，图(b)为抱手，图(c)为伸缩手，图(d)为杈手。这几种机械手能够完成抓刀、拔刀、回转、插刀以及返回等全部动作。为了防止刀具掉落，各机械手的活动爪都必须带有自锁机构。

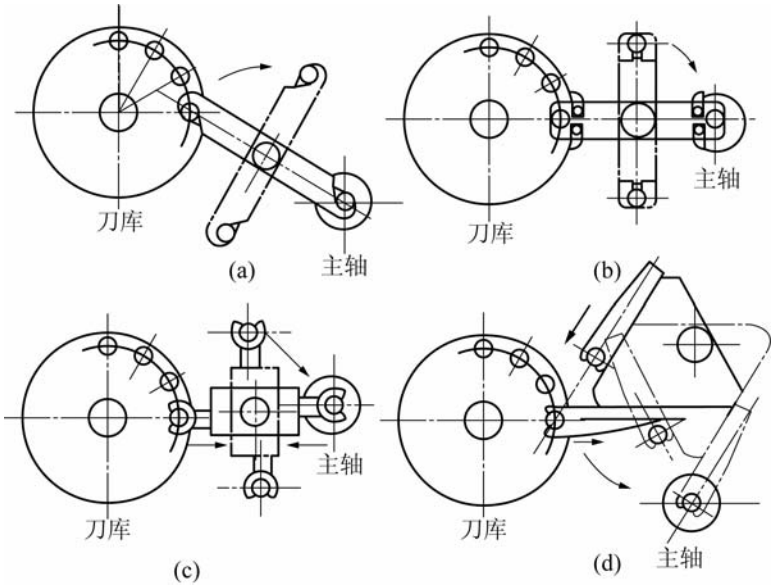


图 5.26　双臂机械手的常见结构形式

3. 刀具的选择方式

根据换刀指令，刀具交换装置从刀库中挑选各工序所需刀具的操作称为自动选刀。常用的选刀方式主要有顺序选刀和任意选刀两种，任意选刀又分为刀具编码选刀、刀座编码选刀和记忆式选刀三种。

1) 顺序选刀方式

顺序选刀是在加工之前，将刀具按预定的加工工艺先后顺序依次插入刀库的刀座中，加工时按顺序选刀。用过的刀具放回原来的刀座内，也可以按加工顺序放入下一个刀座内。但加工不同的工件时必须重新调整刀具顺序，因而操作十分烦琐；而且同一工件、不同工序加工时，刀具也不能重复使用，这样就增加了刀具的数量和刀库的容量，降低了刀具和刀库的利用率；此外，装刀时必须十分谨慎，如果不按顺序装刀，将会产生严重的后果。由于该方式不需要刀具识别装置，驱动控制简单，工作可靠。因此，此种方式适合加工批

量较大、工件品种数量较少的中、小型自动换刀数控机床。

2) 刀具编码选刀方式

这种方式是采用一种特殊的刀柄结构，对每把刀具按照二进制原理进行编码。换刀时通过编码识别装置在刀库中识别所需的刀具。这样就可以将刀具存放于刀库的任意刀座中，并且刀具可以在不同的工序中重复使用，刀库的容量减小；用过的刀具也不一定放回原刀座中，从而避免了因刀具存放顺序的差错而造成事故，同时也缩短了刀库的运转时间，简化了自动换刀控制线路。但由于要求每把刀具上都带有专用编码系统，刀具长度增加，制造困难，刚度降低，同时机械手和刀库结构也变得复杂。

刀具编码的识别方式主要有以下两种。

(1) 接触式刀具识别。图 5.27 为接触式刀具识别装置示意图。图中刀柄上有 5 个直径大小不同的编码环，可有 32 种刀具编码。刀库中刀具越多，编码环的数目也相应增多。识别装置 2 中触针 3 的数量与刀柄上的编码环 4 个数相等，每个触针与一个继电器相连。当刀库中的带编码环的刀具依次通过编码识别装置时，若编码环是大直径时与触针接触，继电器通电，其数码为“1”。若编码环是小直径时不与触针接触，继电器不通电，其数码为“0”。当各继电器读出的数码与所需刀具的编码一致时，由控制装置发出信号，刀库停止运动，等待换刀。

接触式刀具识别装置结构简单，但由于触针有磨损，寿命较短，可靠性较差，且难于快速选刀。

(2) 非接触式刀具识别。常用的有磁性识别和光电识别法。如图 5.28 所示为一种磁性识别装置示意图。编码环的直径相等，分别由导磁材料(如软钢)和非导磁材料(如黄铜、塑料等)制成，规定前者编码为“1”，后者编码为“0”。与编码环相对应的有一组检测绕组 6 组成非接触式识别装置 3。在检测绕组 6 的一次绕组 5 中输入交流电压时，如编码环为导磁材料，则磁感应较强，在二次绕组 7 中产生较大的感应电压。如编码环为非导磁材料，则磁感应较弱，在二次绕组中感应的电压较弱。利用感应电压的强弱，就能识别刀具的编码。

由于非接触式刀具识别装置与编码环不直接接触，因而无磨损，寿命长，反应速度快，适应于高速、换刀频繁的工作场合。

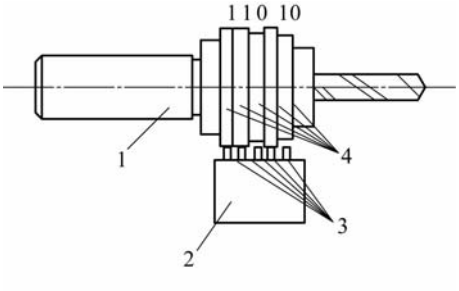


图 5.27　接触式刀具识别装置示意图

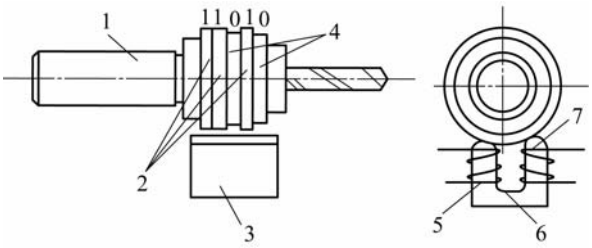


图 5.28　非接触式刀具识别装置示意图

3) 刀座编码选刀方式

刀座编码选刀方式是对刀库中的刀座进行编码，并将与刀座编码对应的刀具放入刀座中，换刀时根据刀座的编码进行选刀。由于这种编码方式取消了刀柄中的编码环，刀柄结构大为简化。刀座编码的识别原理与刀柄编码的识别原理相同，但由于取消了刀柄编码环，

识别装置的结构不再受刀柄尺寸的限制，而且可以放在较适当的位置。缺点是当操作者把刀具放入与刀座编码不符的刀座中时仍然会造成事故；同时，在自动换刀过程中必须将用过的刀具放回原来的刀座中，增加了换刀动作的复杂性。与顺序选刀方式相比，刀座编码选刀方式最突出的优点也是刀具在加工过程中可以重复使用。

刀座编码选刀方式分为永久性编码选刀方式和临时性编码选刀方式。永久性编码选刀方式是将一种与刀座编号相对应的刀座编码板安装在每个刀具座的侧面，它的编码是固定不变的。

临时性编码方式也称钥匙编码选刀方式。它采用一种专用的代码钥匙，编码时先按加工程序的规定给每一把刀具系上一把表示该刀具号的编码钥匙，当把各刀具存放到刀库的刀座中时，将编码钥匙插进刀座旁边的钥匙孔中，这样就把钥匙的号码转记到刀座中，给刀座编上了号码。识别装置可以通过识别钥匙上的号码来选取该钥匙旁边刀座中的刀具。

这种方式是较早期采用的编码方式，现在已经很少采用。

4) 记忆式选刀方式

目前，绝大多数采用加工中心记忆式选刀方式。它取消了传统的编码环和识别装置，利用软件构制一个模拟刀库数据表，其长度和表内设置的数据与刀库的刀座数及刀具号对应，选刀时数控装置根据数据表中记录的目标刀具位置，控制刀库旋转，将选中的刀具送到取刀位置，用过的刀具可以任意存放，由软件记住其存放的位置，因此具有方便灵活的特点。这种方式主要由软件完成选刀，从而消除了由于识别装置的稳定性、可靠性所带来的选刀失误。

5.5　数控机床的主要辅助装置

为了扩大机床的工艺范围，数控机床除了具有直线进给功能外，还应具有绕 X、Y、Z 轴圆周进给或分度的功能。通常数控机床的圆周进给运动由回转工作台来完成。

常用的回转工作台有分度工作台和数控回转工作台两种。分度工作台的功能是将工件转位换面，完成分度运动，和自动换刀装置配合使用，实现工件一次安装能完成几个面的多种工序。为了保证加工精度，分度工作台的定位精度要求高(普通级±10"、精密级±5"、高精密级±3")。数控回转工作台除了用来进行各种圆弧加工或与直线进给联动进行曲面加工外，还可实现精确的自动分度工作。

5.5.1　数控回转工作台

数控回转工作台是数控铣床、数控镗床、加工中心等数控机床不可缺少的重要部件，其作用时按照控制装置的信号或指令作回转分度或连续回转进给运动，以使数控机床能完成指定的加工工序。其外形和分度工作台十分相似，但其内部结构却具有数控进给驱动机构的许多特点。数控分为开环和闭环两种。

1) 开环数控

开环数控由步进电动机驱动，其结构如图 5.29 所示。步进电动机 3 经过齿轮 2、齿轮 6、蜗杆 4 和蜗轮 15 实现圆周进给运动。齿轮 2 和齿轮 6 的啮合间隙是靠调整偏心环 1 来消除的。齿轮 6 与蜗杆 4 用花键联接，其间隙应尽量小，以减小对分度定位精度的影响。

蜗杆 4 为双导程蜗杆，用以消除蜗杆、蜗轮啮合间隙。蜗轮 15 下部的内、外两面装有夹紧瓦 18 和 19，数控回转工作台的底座 21 上固定的支座 24 内均布有 6 个液压缸 14，当液压缸的上腔进压力油时，柱塞 16 下移，并通过钢球 17 推动夹紧瓦 18 和 19，将蜗轮夹紧，从而将数控回转工作台夹紧。当不需要夹紧时，只要卸掉液压缸 14 上腔的压力油，弹簧 20 即可将钢球 17 抬起，蜗轮被放松。作为数控回转工作台时，不需要夹紧，功率步进电动机将按指令脉冲的要求来确定数控回转工作台的回转方向、回转速度、回转角度。

2) 闭环数控回转工作台

闭环数控回转工作台的结构与开环数控回转工作台大致相同，其区别在于：闭环数控回转工作台有转动角度的测量元件(圆光栅或感应同步器)。所测量的结果经反馈与指令值进行比较，按闭环原理进行工作，使回转工作台分度精度更高。

图 5.30 所示为闭环数控回转工作台结构图。直流伺服电动机 15 通过减速齿轮 14、16 及蜗杆蜗轮副 12、13 带动工作台 1 回转，工作台的转角位置用圆光栅 9 测量。测量结果发出反馈信号与数控系统发出的指令信号进行比较，若有偏差经放大后控制伺服电动机向消除偏差方向转动，使工作台精确定位。

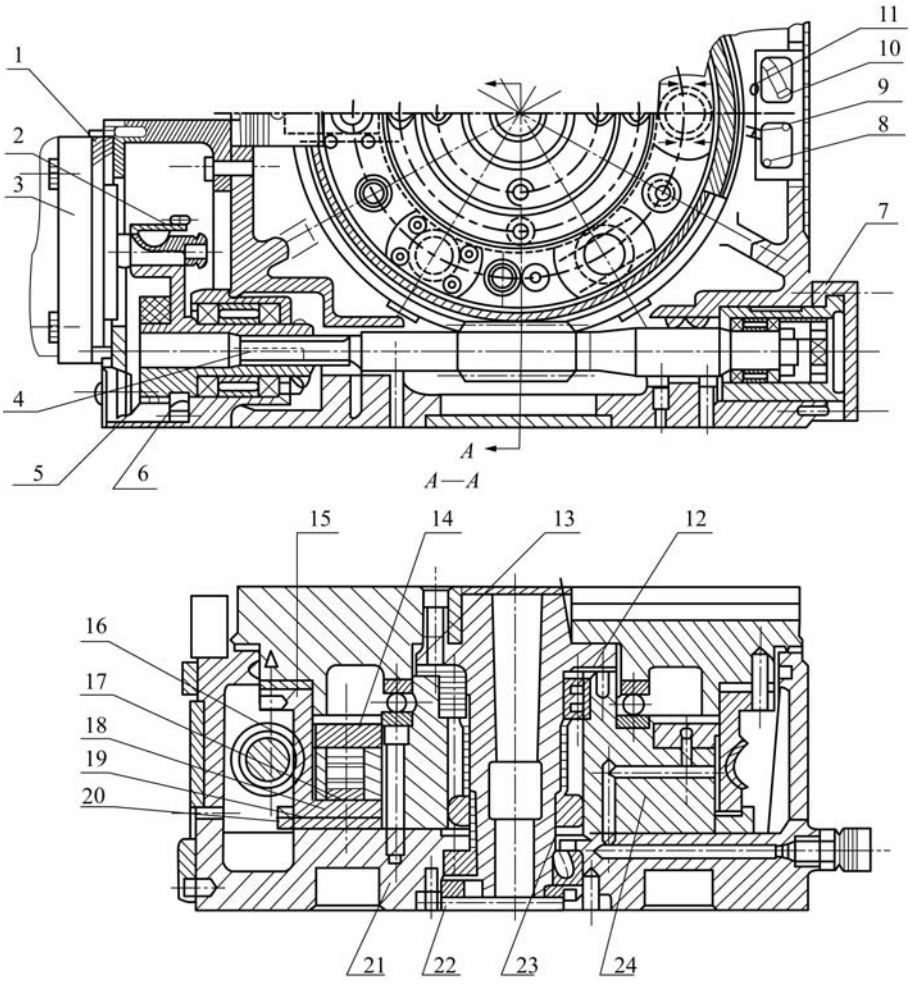


图 5.29　开环数控回转工作台结构图

数控回转工作台的中心回转轴采用圆锥滚子轴承 11 及双列向心短圆柱滚子轴承 10，并预紧消除其径向和轴向间隙，以提高工作台的刚度和回转精度。工作台支承在镶钢滚柱导轨 2 上，运动平稳而且耐磨。

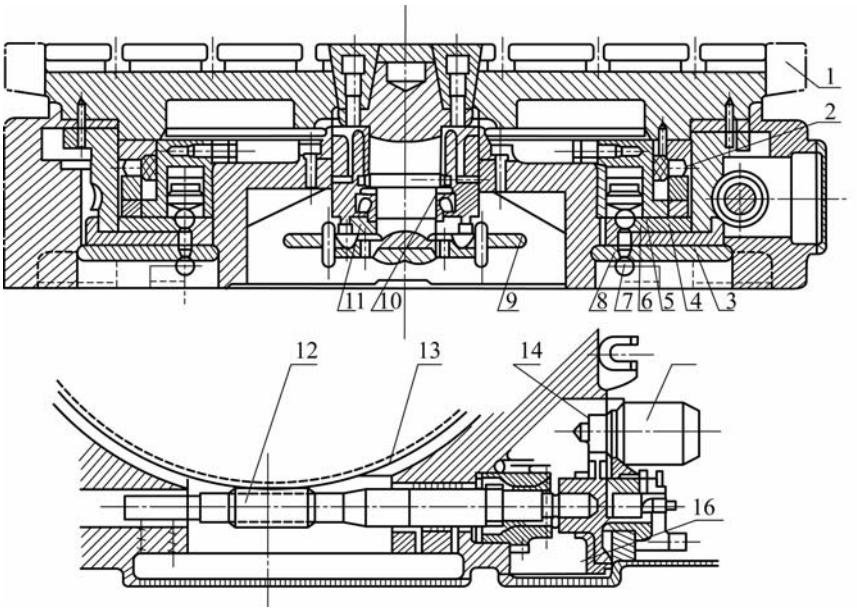


图 5.30　闭环数控回转工作台结构图

5.5.2　分度工作台

分度工作台的分度、转位和定位工作，按照控制系统的指令自动地进行，通常分度运动只限于某些规定的角度(45°、60°、90°、180°等)，但实现工作台转位的机构都很难达到分度精度的要求，所以要有专门的定位元件来保证。常用的定位元件有插销定位、反靠定位、齿盘定位和钢球定位等几种。

图 5.31 为某自动换刀数控卧式镗铣床分度工作台的结构图，是采用齿盘(也称为端面多齿盘、多齿盘、鼠齿盘)定位的分度工作台。齿盘定位的分度工作台能达到很高的分度定位精度，一般为±3"，最高可达±0.4"；能承受很大的外载，定位刚度高，精度保持性好。实际上，由于齿盘啮合脱开相当于两齿盘对研过程，随着齿盘使用时间的延续，其定位精度还有不断提高的趋势。

分度转位动作包括：

① 工作台抬起，齿盘脱离啮合，完成分度前的准备工作；

② 回转分度；

③ 工作台下降，齿盘重新啮合，完成定位夹紧。

工作台 9 的抬起：当需要分度时，液压油进入分度工作台 9 中央的升降、夹紧液压缸 12 的下腔，上腔回油，活塞 8 上移，通过推力球轴承 10 和 11 带动工作台 9 也向上抬起，使上、下齿盘 13、14 相互脱开啮合，完成分度准备工作。

回转分度：当分度工作台 9 向上抬起时，通过推杆和微动开关发出信号，ZM16 液压马达旋转，通过蜗杆副 3、4 和齿轮副 5、6 带动工作台 9 回转分度。工作台分度回转角度

的大小由指令给出，共有 8 个等分，即 45° 的倍数。当工作台的回转角度接近所要分度的角度时，减速挡块使微动开关动作，发出减速信号，工作台转动减速，当回转角度达到所要求的角度时，准停挡块压合微动开关，发出信号，液压马达停止转动，工作台完成准停。

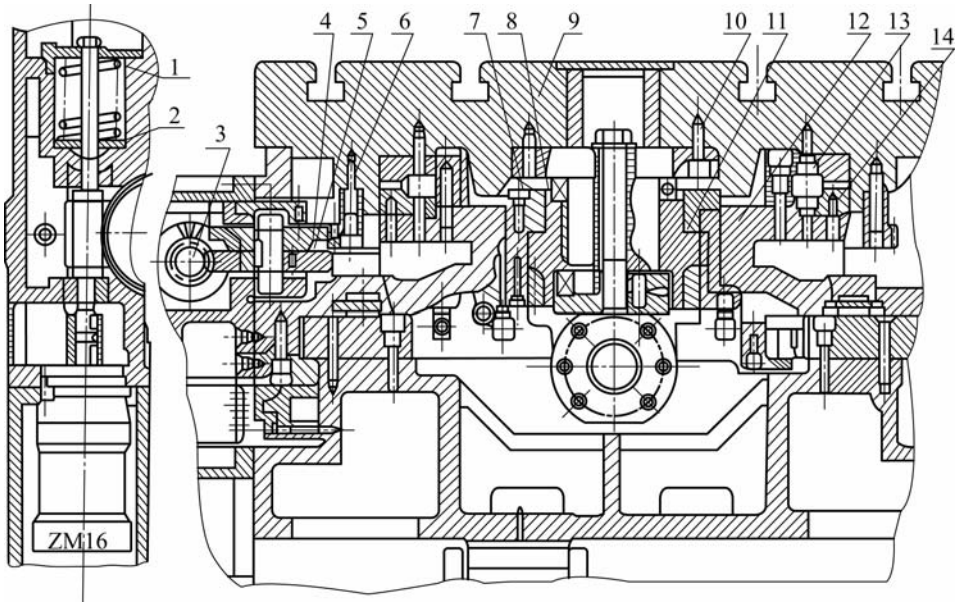


图 5.31　齿盘定位分度工作台

工作台下降定位夹紧：工作台完成准停动作的同时，压力油进入升降、夹紧液压缸 12 的上腔，推动活塞 8 带动工作台下降，上下齿盘重新啮合，完成定位夹紧，同时推杆使另一微动开关动作，发出分度完成信号。由于上下齿盘重新啮合时，齿盘会带动蜗轮产生微小的转动，而传动蜗杆副具有自锁性，如果蜗轮蜗杆锁住不动，则上下齿盘下降时就难以啮合并准确定位，为此将蜗轮轴 3 设计成浮动结构，即其轴向用两个推力球轴承 2 抵在一个螺旋弹簧 1 上面。这样，齿盘下降时，蜗轮可带动蜗杆作微量的轴向移动。

5.6　数控机床的其他进给传动设计

数控机床中，无论是开环还是闭环伺服进给系统，为了达到前述提出的要求，机械传动装置的设计中应尽量采用低摩擦的传动副，如滚珠丝杠等，以减小摩擦力；通过选用最佳降速比来减小惯量；采用预紧的办法来提高传动刚度；采用消隙的办法来减小反向死区误差等。

下面从机械传动的角度对数控机床伺服系统的主要传动装置进行扼要介绍。

1. 齿轮传动装置

齿轮传动是应用非常广泛的一种机械传动，各种机床的传动装置几乎都离不开齿轮传动。在数控机床伺服进给系统中采用齿轮传动装置的目的有两个：一是将高转速低转矩的伺服电动机(如步进电动机、直流或交流伺服电动机等)的输出，改变为低转速大转矩的执行件的输出；另一个是使滚珠丝杠和工作台的转动惯量在系统中占有较小的比重。此外，

对开环系统还可以保证所要求的精度。

1) 速比的确定

(1) 开环系统。在步进电动机驱动的开环系统中(图 5.32)，步进电动机至丝杠间设有齿轮传动装置，其速比决定于系统的脉冲当量、步进电动机步矩角及滚珠丝杠导程，其运动平衡方程式为

$$\frac{1}{m}iL=\delta$$

所以其速比可计算如下：

$$i=\frac{m\delta}{L}=\frac{360^{\circ}\delta}{\alpha L}$$

式中　m——步进电动机每转所需脉冲数($m=\dfrac{360^{\circ}}{\alpha}$)；

α——步进电动机步距角(°/脉冲)；

δ——脉冲当量(mm/脉冲)；

L——滚珠丝杠的导程(mm)。

因为开环系统执行件的运动位移决定于脉冲数目，故算出的速比不能随意更改。

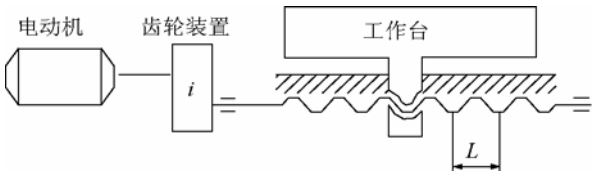


图 5.32　开环系统丝杠传动

(2) 闭环系统。对于闭环系统，执行件的位置决定于反馈检测装置，与运动速度无直接关系，其速比主要是由驱动电动机的额定转速或转矩与机床要求的进给速度或负载转矩决定的，所以可对它进行适当的调整。电动机至丝杠间的速比运动平衡方程式如下：

$$niL=v\ i=\frac{v}{nL}$$

式中　n——伺服电动机的转速，$n=\dfrac{60f}{m}(\mathrm{r/min})$；

f——脉冲频率(Hz)；

v——工作台在电动机转速为 n 时的移动速度，$v=60f\delta$(mm/min)。

其余符号意义同前。

当负载和丝杠转动惯量在总转动惯量中所占比重不大时，齿轮速比可取上面算出的数值，即降速不必过多，这样不仅可以简化伺服传动链，且可降低伺服放大器的增益。当主要考虑静态精度或低平滑跟踪时，可降速多一些，这样，可以减小电动机轴上的负载转动惯量，并且减少负载惯量对稳态差异的影响。

2) 啮合对数及各级降速比的确定

在驱动电动机至丝杠的总降速比一定的情况下，若啮合对数及各级速比选择不当，将会增加折算到电动机轴上的总惯量，从而增大电动机的时间常数，并增大要求的驱动扭矩。因此应按最小惯量的要求来选择齿轮啮合对数及各级降速比，使其具有良好的动态性能。

图 5.33 所示为机械传动装置中的两对齿轮降速后，将运动传到丝杠的示意图。第一对齿轮的降速比为 i_1，第二对齿轮的降速比为 i_2，　i_1 和 i_2 均大于 1。假定小齿轮 A、C 直径相同，大齿轮 B、D 为实心齿轮。这两对齿轮折算到电动机轴的总惯量为

$$\begin{aligned} J &= J_{\mathrm{A}} + \frac{J_{\mathrm{B}}}{i_1^{\,2}} + \frac{J_{\mathrm{C}}}{i_1^{\,2}} + \frac{J_{\mathrm{D}}}{i_1^{\,2} i_2^{\,2}} \\ &= J_{\mathrm{A}} + \frac{J_{\mathrm{A}} i_1^{\,4}}{i_1^{\,2}} + \frac{J_{\mathrm{A}}}{i_1^{\,2}} + \frac{J_{\mathrm{A}} i_2^{\,4}}{i_1^{\,2} i_2^{\,2}} \\ &= J_{\mathrm{A}}\left(1 + i_1^{\,2} + \frac{1}{i_1^{\,2}} + \frac{i_2^{\,2}}{i_1^{\,2}}\right) \\ &= J_{\mathrm{A}}\left(1 + i_1^{\,2} + \frac{1}{i_1^{\,2}} + \frac{i^2}{i_1^{\,4}}\right) \end{aligned}$$

式中　i ——总降速比，$i = i_1\, i_2$。(注意：此处总降速比 i 是前述速比 i 的倒数)

令 $\dfrac{\partial J}{\partial i_1} = 0$，可得最小惯量的条件：

$$i_1^{\,6} - i_1^{\,2} - 2i^2 = 0$$

将 $i = i_1 i_2$ 代入，得两对齿轮间满足最小惯量要求的降速比关系式：

$$i_2 = \sqrt{\frac{i_1^{\,4} - 1}{2}} \approx \frac{i_1^{\,2}}{\sqrt{2}} \qquad (i_1^{\,4} \geqslant 1)$$

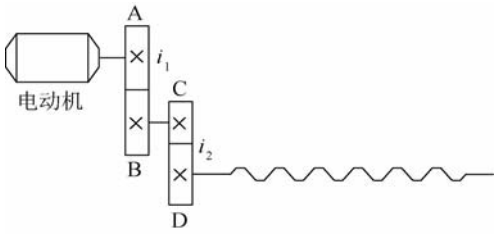


图 5.33　两对齿轮降速传动

不同啮合对数时，亦可相应的得到各级满足最小惯量要求的降速比关系式，如若为三级传动，则可按上述方法求得三级传动比为

$$i_2 = i_1^{\,2} / \sqrt{2} \qquad i_3 = i_2^{\,2} / \sqrt{2} \qquad i = i_1 i_2 i_3$$

计算出各级齿轮降速比后，还应进行机械进给装置的惯量验算。对开环系统，机械传动装置折算到电动机轴上的负载转动惯量应小于电动机加速要求的允许值。对闭环系统，除满足加速要求外，机械传动装置折算到电动机轴上的负载转动惯量应与伺服电动机转子惯量合理匹配，如果电动机转子惯量远小于机械进给装置的转动惯量(折算到电动机转子轴上)，则机床进给系统的动态特性主要决定于负载特性，此时运动部件(包括工件)不同质量的各坐标的动态特性将有所不同，使系统不易调整。根据实践经验推荐伺服电动机转子转动惯量 J_{M} 与机械进给装置折算到电动机轴上的转动惯量 J_{L} 相匹配的合理关系为

$$\frac{1}{4} \leqslant \frac{J_{\mathrm{L}}}{J_{\mathrm{M}}} \leqslant 1$$

设电动机经一对齿轮传动丝杠时，若 J_1 为小齿轮的转动惯量，J_2 为大齿轮的转动惯量，

J_S 为丝杠的转动惯量，W 为工作台重力，齿轮副降速比 $i(i>1)$，L 为丝杠螺距，则

$$J_L = J_1 + \frac{J_2}{i^2} + \frac{J_s}{i^2} + \frac{W}{gi^2}\left(\frac{L}{2\pi}\right)^2$$

即

$$J_L = J_1 + J_1 i^2 + \frac{J_s}{i^2} + \frac{W}{gi^2}\left(\frac{L}{2\pi}\right)^2$$

机械伺服进给系统选用的伺服电动机，当工作台为最大进给速度时，其最大转矩 T_{max} 应满足机床工作台的加速度要求。若 a_{max} 为伺服电动机能达到的最大加速度，常取

$$a \leqslant \frac{a_{max}}{2}$$

一般要求 a=2～5m/s^2,则 $a_{max} \geqslant$4～10 m/s^2。

当伺服电动机主要用于惯量加速，忽略切削力及摩擦力作用(其值一般仅占 10%)，则

$$a_{max} = \frac{T_{max}}{J}\frac{iL}{2\pi}$$

式中　J——伺服进给系统折算到丝杠上的总转动惯量，当一对降速齿轮传动时，有

$$J = J_M i^2 + J_1 i^2 + J_1 i^4 + J_s + \frac{W}{g}\left(\frac{L}{2\pi}\right)^2$$

2. 同步齿形带传动

同步齿形带传动，是一种新型的带传动，如图 5.34 所示。它利用同步齿形带的齿形与带轮的轮齿依次相啮合传动运动和动力，因而兼有带传动、齿轮传动及链传动的优点，即无相对滑动，平均传动比准确，传动精度高，而且同步齿形带的强度高，厚度小，质量小，故可用于高速传动；同步齿形带无须特别张紧，故作用在轴和轴承等上的载荷小，传动效率高，在数控机床上亦有应用。

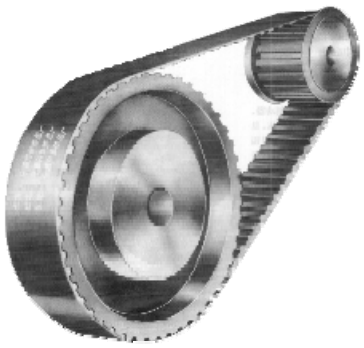


图 5.34　同步齿形带传动

小　　结

机械机构是数控机床的主体部分，相对普通机床，数控机床不仅在信息处理和电气控制方面发生了很大变化，而且在机械性能方面也形成了自身独特的风格。

(1) 主传动系统。为了保证数控机床主传动的精度，减小噪声，数控机床主传动链要尽可能地缩短。为保证数控机床能满足不同的工艺要求并且能够获得最佳的切削速度，主传动系统的变速范围要求宽，并能实现无级调速。

(2) 进给传动系统。传动部件的刚度、精度、惯性和传动间隙及摩擦阻力直接影响了数控机床的定位精度和轮廓加工的精度。采用滚珠丝杠螺母副并进行预拉紧，采用静压丝杠螺母副、直线导轨副、静压导轨和塑料导轨等高效执行部件，可有效的提高运动精度，避免爬行现象。直线电动机进给系统是一种具有代表性的先进技术之一。

(3) 自动换刀装置。自动换刀装置应满足换刀时间短，刀具重复定位精度高，刀具存储量大，刀库占地面积小及安全可靠等要求。典型的自动换刀装置主要有回转刀架换刀、无机械手自动换刀、机械手自动换刀装置等。

(4) 数控机床的辅助装置。采用数控回转工作台、分度工作台、排屑装置等可使机械加工的效率大为提高。

思考题与习题

1. 数控机床主体结构具有哪些特点？
2. 数控机床对主传动系统有哪些要求？
3. 主传动系统有哪几种变速方式?
4. 加工中心主轴为何需要“准停”？如何实现“准停”？
5. 数控机床主轴的支承形式主要有哪几种？各自适用于何种场所？
6. 加工中心主轴内孔吹屑装置的作用是什么？
7. 数控机床对进给系统有哪些要求？
8. 内、外循环方式滚珠丝杠螺母副在结构上有何不同？
9. 试述滚珠丝杠轴向间隙调整及预紧的基本原理。双螺母预紧常用哪几种结构形式？
10. 滚珠丝杠螺母副有哪些特点？
11. 数控机床对导轨的基本要求有哪些？
12. 塑料导轨、滚动导轨、静压导轨各有何特点?
13. 与滚珠丝杠传动相比，直线电动机进给驱动系统具有哪些特点？
14. 常见的自动换刀装置主要有哪几种形式？
15. 数控车床回转刀架换刀一般需要哪几个动作？
16. 对照图 2.112，说明 TH5632 型立式加工中心换刀需要的动作。
17. 加工中心中常见的换刀方式分为哪两大类？各有什么特点？
18. 常用的选刀方法主要有哪几种？
19. 数控机床的数控回转工作台和分度工作台有何区别？
20. 对照图 5.31，说明齿盘定位分度工作台完成分度动作的运动过程。

第 6 章　数控机床的保养与维修

教学提示：数控机床是一种典型的机电一体化产品，涉及范围比较广，在故障诊断和维护方面与传统机床有很大的区别。因此，学习和掌握数控机床故障诊断及维护技术，已越来越受到相关企业和人员的重视，数控机床故障诊断及维护已成为正确使用数控机床的关键因素之一。

教学要求：了解关于数控机床保养、维护与故障修理的基本内容，以及数控机床使用中的注意事项。重点掌握数控车床与加工中心的维护保养与故障诊断方法，熟悉机床数控系统与伺服系统常见故障的处理方法，并通过对实际例子的学习掌握数控机床常见故障的诊断步骤与基本思路。

6.1　概　　述

一般来说，数控机床的维护工作应该包括设备管理、维护保养及故障修理，并且这三者是紧密相关、互相制约的，也就是说做好日常维护保养和设备管理工作，不仅可大大减少其设备故障的发生，并且也为发生故障时及时诊断、修复提供了应有的方便和必要的条件。

1. 数控机床的设备管理

设备管理是一项系统工程，它根据企业的生产发展及经营目标，通过一系列技术、经济、组织措施及科学方法来进行。其主要包括设备选购、安装、调试、验收、使用、维修以及改造更新，直至设备报废等一系列管理工作。

具体说来，设备管理为正确使用数控机床建立了必要的各项规章制度。如建立定人、定机、定岗制度，进行岗位培训，禁止无证操作。并根据数控机床的设备特点，制定各项操作、维修安全规程。在设备保养上要求严格进行记录工作，即对每次的维护保养都要做好保养内容、方法、时间、保养部件状况、参加人员等有关记录；对故障修复要认真做好有关故障记录与说明，如故障现象、原因分析、排除方法、隐含问题和所用备件情况等，并做好有关设备技术资料的出借、保管、登记工作。做好为设备保养和维修用的各类备品配件的采购、管理工作，各类常用的备品配件主要有各种印制电路板、电气元器件(如各类熔断器、直流电动机电刷、开关按钮、继电器、接触器等)和各类机械易损件(如传动带、轴承、液压密封圈、过滤网等)。对电气备用板要定期通电检验，为维修添置必要的技术手册、工作器具及测试仪器，常用的电气故障测试仪器有：数字万用表、转速表、存储示波器、逻辑分析仪、在线测试仪等。

2. 数控机床的维护保养

数控机床具有高精度、高效率和高适应性的特点。其运行效率的高低，各附件的故障率、使用寿命的长短等，不仅取决于机床本身的精度和性能，很大程度上也取决于它的正

确使用和维护。正确使用能防止设备非正常磨损，避免突发故障，延长无故障工作时间。精心维护可使设备始终保持良好状态，延缓劣化进程，并及时发现和消灭隐患于未然，从而确保系统安全运行，保证企业的经济效益。因此，机床的正确使用与维护，是贯彻设备管理以防为主的重要环节。

3. 数控机床的故障修理

数控机床是一种自动化程度较高、结构较复杂的先进加工设备，大多用来加工重要工件。同时，由于数控机床价格昂贵，为提高其利用率，充分发挥它的效益，应合理安排加工工序，充分做好准备工作，尽量减少机床的等待时间；凡是能在数控机床上加工的，尽量利用，而不能以保护贵重设备为由，使其长期闲置。如果一台数控机床的任何部分在生产中出现故障或失效，都会使机床停机，造成生产停顿，若不能及时维修，不仅影响其设备利用率，贻误产品生产周期，甚至会影响企业的信誉，造成无法弥补的经济损失。因此，做好数控机床的故障修理工作，使其发挥应有的效率，不仅创造了实际价值，而且具有广泛的社会效益。

数控机床采用计算机控制，伺服系统技术复杂，机床精度要求很高。因此，数控机床的使用不同于简单的设备，而是一项高技术应用工程。这就要求数控机床的操作、维修和管理人员具有较高的文化水平和业务素质。为此均应进行不同技术内容的培训，因为初次使用数控机床时，多是由于操作技术不熟练而引起故障造成机床停机。

维修是一门综合性技术。维修工作开展得好坏，首先取决于维修人员的素质。维修人员在设备出现故障后，要能迅速找出故障并排除，其难度是相当大的。此能力并非一日之功就能达到的，需要维修人员做长期的技术储备。因此，维修人员要刻苦学习，勇于探索，勤于实践，不断归纳和总结经验，以提高自己的维修技术水平。

4. 数控机床维修安全规程

1) 维修前的准备工作

(1) 维修人员亲自到故障现场检查需维修的内容；

(2) 根据检查情况制定维修计划；

(3) 准备好维修用消耗备件；

(4) 所需仪器和工具状态良好。

2) 维修工作中的注意事项

(1) 维修期间应在醒目的地方树立“机床正在维修”的标志，必须使电源开关处于“OFF”位置，并在电源开关上方树立“不许通电”的标志；

(2) 工作场地空间足够，光线良好；

(3) 装卸重物时，若重物超过 20kg，应两人以上搬抬或用吊车装卸，铲车或吊车必须由具有操作合格证的人员操作，起吊工作必须由专门人员指挥；

(4) 不得将工具或工件放在机床的滑动面上；

(5) 不得用湿手操作电气线路及开关等；

(6) 不得随意更改电路或其他调整用电位器；

(7) 通电测试时，注意防止高压危险；

(8) 一定要使用规定的液压油、润滑脂、润滑油或其他性能相同的产品；

(9) 一定要使用规定的熔断器和电缆。

3) 维修工作结束后的注意事项

(1) 再次检查已经维修的各部分，确保机床能正常工作；

(2) 清理维修场地，整理机床外观；

(3) 将机床移交给操作者予以验收；

(4) 记录好维修工作的各环节和处理结果。

6.2　数控机床的保养

为了使数控机床各部件保持良好状态，除了发生故障应及时修理外，坚持经常的保养是十分重要的。坚持定期检查，经常维护保养，可以把许多故障隐患消灭在萌芽之中，防止或减少恶性事故的发生。不同型号的数控机床日常保养的内容和要求不完全一样，对于具体的数控机床，说明书中都有明确的规定，但总的说来主要包括以下几个方面。

(1) 使机床保持良好的润滑状态。定期检查、清洗自动润滑系统，添加或更换油脂油液，使丝杠、导轨等各运动部位始终保持良好的润滑状态，降低机械磨损速度。

(2) 定期检查液压、气压系统。对液压系统定期进行油质化验检查和更换液压油，并定期对各润滑、液压、气压系统的过滤器或过滤网进行清洗或更换，对气压系统还要注意及时对分水滤气器放水。

(3) 对直流电动机定期进行电刷和换向器检查、清洗和更换。若换向器表面脏，应用白布蘸酒精予以清洗；若表面粗糙，应用细金相砂纸予以修整；若电刷长度在 10mm 以下，应予以更换。

(4) 适时对各坐标轴进行超程限位试验。尤其是对于硬件限位开关，由于切削液等原因容易产生锈蚀，平时又主要依靠软件限位起保护作用，但关键时刻如因锈蚀不起保护作用将产生碰撞，甚至损坏滚珠丝杠，严重影响其机械精度。试验时只要用手按一下限位开关看是否出现超程警报，或检查相应的 I/O 接口输入信号是否变化。

(5) 定期检查电气部件。检查各插头、插座、电缆、各继电器的触点是否接触良好，检查各印制电路板是否干净。检查主电源变压器、各电动机的绝缘电阻应在 1MΩ 以上。平时尽量少开电气柜门，以保持电气柜内清洁；夏天用开门散热法是不可取的。定期对电气柜和有关电器的冷却风扇进行卫生清扫，更换其空气过滤网等。另外纸带光电阅读机的受光部件太脏时，可能发生读数错误，应及时清洗。印制电路板太脏或受潮，可能发生短路现象，因此，必要时应对各个印制电路板、电气元器件采用吸尘法进行卫生清扫等。

(6) 数控机床长期不用时的维护。数控机床不宜长期封存不用，购买数控机床以后要充分利用起来，尽量提高机床的利用率，尤其是投入使用的第一年，更要充分的使用，使其容易出故障的薄弱环节尽早暴露出来，使故障的隐患尽可能在保修期内得以排除。有了数控机床舍不得用，这不是对设备的爱护，反而会由于受潮等原因加快电子元件的变质或损坏，如数控机床长期不用时要定期通电，并进行机床功能试验程序的完整运行。要求每 1～3 周能通电试运行一次，尤其是在环境湿度较大的梅雨季节，应增加通电次数，每次空运行 1h 左右，以利用机床本身的发热来降低机内湿度，使电子元件不致受潮。同时，也能及时发现有无电池报警发生，以防系统软件、参数的丢失等。

(7) 定期更换存储器用电池。一般数控系统内对 CMOS RAM 存储器器件设有可充电电池维持电路，以保证系统不通电期间能保持其存储器的内容。在一般的情况下，即使电池

尚未失效，也应每年更换一次，以确保系统能正常工作。电池的更换应在 CNC 装置通电状态下进行，以防更换时 RAM 内信息丢失。

(8) 备用印制电路板的维护。印制电路板长期不用是很容易出故障的。因此，对于已购置的备用印制电路板应定期装到 CNC 装置上通电运行一段时间，以防损坏。

(9) 经常监视 CNC 装置用的电网电压。CNC 装置通常允许电网电压在额定值的 85%～110%的范围内波动，如果超出此范围就会造成系统不能正常工作，甚至会引起 CNC 系统内的电子元器件损坏。为此，需要经常监视 CNC 装置用的电网电压。

(10) 定期进行机床水平和机械精度检查并校正。机械精度的校正方法有软硬两种，其软方法主要是通过系统参数补偿，如丝杠反向间隙补偿、各坐标定位精度定点补偿、机床回参考点位置校正等；其硬方法一般要在机床大修时进行，如进行导轨修刮、滚珠丝杠螺母预紧调整反向间隙等。

1. 数控车床的维护保养

数控车床的维护保养见表 6-1。

表 6-1　数控车床日常维护一览表

序号	检查周期	检查部位	检查要求(内容)
1	每天	切削液、液压油、润滑油	检查切削液、液压油、润滑油的油量是否充足
2	每天	切屑槽	切屑槽内的切屑是否已处理干净
3	每天	操作盘	检查操作盘上的各指示灯是否正常，各按钮、开关是否处于正确位置
4	每天	CRT 显示屏	CRT 显示屏上是否有任何报警显示，若有问题应及时予以处理
5	每天	液压装置的压力表	液压装置的压力表是否指示在所要求的范围内
6	每天	冷却风扇	各控制箱的冷却风扇是否正常运转
7	每天	刀具	刀具是否正确夹紧在刀夹上，刀夹与回转刀架是否可靠夹紧，刀具是否有损伤
8	每天	主轴、滑板等	运转中，主轴、滑板处是否有异常噪声；有无与平常不同的异常现象
9	每月	主轴的运转情况	轴以最高转速一半左右的转速旋转 30min，用手触摸壳体部分，若感觉温和即为正常，以此了解主轴轴承的工作情况
10	每月	滚珠丝杠	检查 X、Z 轴的滚珠丝杠，若有污垢，应清理干净，若表面干燥，应涂润滑脂
11	每月	超程限位开关	检查 X、Z 轴超程限位开关、各急停开关是否动作正常，可用手按压行程开关的滑动轮，若 CRT 显示屏上有超程报警显示，说明限位开关正常。顺便将各接近开关擦拭干净
12	每月	刀架	检查刀架的回转头、中心锥齿轮的润滑状态是否良好，齿面是否有伤痕；换刀时其换位动作是否平顺，以刀架夹紧、松开时无冲击为好

(续)

序号	检查周期	检查部位	检查要求(内容)
13	每月	导套内孔	检查导套内孔状况，看是否有裂纹、毛刺，导套前面盖帽内是否积存切屑
14	每月	切削液槽	检查切削液槽内是否积存切屑
15	每月	液压装置	检查液压装置，如压力表的动作状态，液压管路是否有损坏，各管接头是否有松动或漏油现象等
16	每月	润滑油装置	检查润滑泵的排油量是否合乎要求，润滑油管路是否损坏，管接头是否松动、漏油等
17	半年	主轴	主轴孔的振摆，主轴传动用 V 带的张力及磨损情况，编码盘用同步带的张力及磨损情况
18	半年	导套装置	主轴以最高转速的一半运转 30min 后，用手触摸壳体部分无异常发热及噪声为好。此外用手沿轴向拉导套，检查其间隙是否过大
19	半年	加工装置	①检查主轴分度用齿轮系的间隙，以规定的分度位置沿回转方向摇动主轴，以检查其间隙，若间隙过大应进行调整； ②检查刀具主轴驱动电动机侧的齿轮润滑状态，若表面干燥应涂敷润滑脂
20	半年	润滑泵装置浮子开关	可从润滑泵装置中抽出润滑油；看浮子落至警戒线以下时，是否有报警指示以判断浮子开关的好坏
21	半年	直流电动机	若换向器表面脏，应用白布蘸酒精予以清洗；若表面粗糙，用细金相砂纸予以修整；若电刷长度为 10mm 以下时，予以更换
22	半年	其他	①检查各插头、插座、电缆、各继电器的触点是否接触良好； ②检查各印制电路板是否干净； ③检查主电源变压器、各电动机的绝缘电阻应在 1MΩ 以上； ④检查断电后保存机床参数、工作程序用的后备电池的电压值，视情况予以更换

2. 加工中心的维护保养

加工中心的维护保养见表 6-2。

表 6-2　加工中心日常维护一览表

序号	检查周期	检查部位	检查要求(内容)
1	每天	工作台、机床表面	从工作台、基座等处清除污物和灰尘；擦去机床表面上的润滑油、切削液和切屑；清除没有罩盖的滑动表面上的一切物品；擦净丝杠的暴露部位
2	每天	开关	清理并检查所有限位开关、接近开关及其周围表面
3	每天	导轨润滑油箱	检查油量，及时添加润滑油，润滑油泵是否定时启动打油及停止

(续)

序号	检查周期	检查部位	检查要求(内容)
4	每天	主轴润滑恒温油箱	工作是否正常，油量是否充足，温度范围是否合适
5	每天	刀具	确认各刀具在其应有的位置上更换
6	每天	机床液压系统	油箱液压泵有无异常噪声，液压泵的压力是否符合要求，工作油面高度是否合适，管路及各接头有无泄漏
7	每天	压缩空气气源压力	气动控制系统压力是否在正常范围之内
8	每天	气源自动分水滤气器，自动空气干燥器	确保空气滤杯内的水完全排出，保证自动空气干燥器工作正常
9	每天	气液转换器和增压器油面	油量不够时要及时补充
10	每天	导轨面	清除切屑液脏物，检查导轨面有无划伤损坏，润滑油是否充足
11	每天	切削液	检查切削液软管及液面，清理管内及切削液槽内的切屑等脏物
12	每天	CNC 输入/输出单元	如光电阅读机的清洁情况，机械润滑是否良好
13	每天	各防护装置	导轨、机床防护罩等是否齐全有效
14	每天	电气柜各散热通风装置	各电气柜中冷却风扇是否工作正常，风道过滤网有无堵塞；及时清洗过滤器
15	每天	其他	①确保操作面板上所有指示灯为正常显示； ②检查各坐标轴是否处在原点上； ③检查主轴端面、刀夹及其他配件是否有毛刺、破裂或损坏现象
16	不定期	冷却油箱、水箱	随时检查液面高度，及时添加油(或水)，太脏时要更换。清洗油箱(或水箱)和过滤器
17	不定期	废油池	及时取走积存在废油池中的废油，以免溢出
18	不定期	排屑器	经常清洗切屑，检查有无卡住等现象
19	每月	电气控制箱	清理电气控制箱内部，使其保持干净
20	每月	工作台及床身基准	校准工作台及床身基准的水平，必要时调整垫铁，拧紧螺母
21	每月	空气滤网	清洗空气滤网，必要时予以更换
22	每月	液压装置、管路及接头	检查液压装置、管路及接头，确保无松动、无磨损
23	每月	各电磁阀及开关	检查各电磁阀、行程开关、接近开关，确保它们能正确工作
24	每月	过滤器	检查液压箱内的过滤器，必要时予以清洗
25	每月	电缆及接线端子	检查各电缆及接线端子是否接触良好
26	每月	连锁装置、时间继电器、继电器	确保各连锁装置、时间继电器、继电器能正确工作。必要时予以修理或更换
27	每月	数控装置	确保数控装置能正确工作
28	半年	各电动机轴承	检查各电动机轴承是否有噪声，必要时予以更换
29	半年	各进给轴	测量各进给轴的反向间隙，必要时予以调整或进行补偿
30	半年	所有电气部件及继电器	外观检查所有各电气部件及继电器等是否可靠工作

(续)

序号	检查周期	检查部位	检查要求(内容)
31	半年	各伺服电动机	检查各伺服电动机的电刷及换向器的表面，必要时予以修整或更换
32	半年	主轴驱动皮带	按机床说明书要求调整皮带的松紧程度
33	半年	各轴导轨上的镶条、压紧滚轮	按机床说明书要求调整松紧状态
34	一年	检查或更换电动机电刷	检查换向器表面，去除毛刺，吹净炭粉，磨损过短的电刷及时更换
35	一年	液压油路	清洗溢流阀、减压阀、过滤器、油箱，过滤液压油或更换
36	一年	主轴润滑恒温油箱	清洗过滤器、油箱，更换润滑油
37	一年	润滑油泵、过滤器	清洗润滑油池，更换过滤器
38	一年	滚珠丝杠	清洗丝杠上旧的润滑脂，涂上新润滑脂

3. 数控系统的使用与维护

1) 数控系统的正确使用

每种数控系统在组成与结构上都有各自的特点，操作人员在使用数控系统之前，应仔细阅读说明书中的有关内容，熟悉数控系统的基本组成与结构，了解所用数控系统的性能，熟练地掌握数控系统和操作面板上各个开关的作用，从而可避免一些因操作不当引起的故障。

(1) 数控系统通电前的检查。

① 数控装置内的各个印制电路板安装是否紧固，各个插头有无松动。

② 数控装置与外界之间的连接电缆是否按随机所带说明书的规定正确而可靠地连接。

③ 交流输入电源的连接是否符合 CNC 装置规定的要求。

④ 数控装置中各种硬件的设定是否符合要求。

(2) 数控系统通电后的检查。

① 数控装置中各个风扇是否正常运转。

② 各个印制电路板或模块上的直流电源是否正常、是否在允许的波动范围之内。

③ 数控装置的各种参数(包括系统参数、PLC 参数等)，应根据随机所带的说明书一一予以确认。

④ 当数控装置与机床联机通电时，应在接通电源的同时，做好按压紧急停止按钮的准备，以备出现紧急情况时随时切断电源。如伺服电动机的速度反馈信号线接反，出现机床“飞车”现象，就需要立即切断电源，以免造成对人身和设备的危害。

⑤ 用手动以低速移动各个轴，观察机床移动方向的显示是否正确。然后让各轴碰到各个方向的超程开关，用以检查超程限位是否有效，数控装置是否在超程时发出报警。

⑥ 进行几次返回机床基准点的动作，用来检查数控机床是否有返回基准点功能，以及每次返回基准点的位置是否完全一致。

⑦ 按照数控机床所用的数控装置使用说明书，用手动或编制程序的方法来检查数控系统所具备的主要功能。如定位、各种插补、自动加/减速、M、R、T 辅助功能、各种补偿、固定循环等功能。

2) 数控系统的日常维护

为了在系统出现故障时能及时排除，应在平时做好维修前的一系列准备工作，主要包括如下几个方面。

(1) 技术文件的准备。维护用的文件资料很多，主要指有关数控系统的操作和维修说明书、有关系统参数资料及机床电气方面的资料。要充分了解被维护的数控系统的性能、系统框图、结构布置及系统内需要经常维护的部分。甚至应掌握系统内所用印制电路板上有哪些可供维修用的检测点及其正常状态时的电平和波形。保存好数控系统和 PLC 的参数文件。每台数控机床出厂时都随机附有参数表或参数纸带，在机床现场安装调整之后，参数可能有所变动，应将变动的参数记录下来或存入磁盘，以备维修时用。另外，用户宏程序参数和刀具文件参数等也都直接影响到机床的性能和使用，需要妥善保管。随机提供的 PLC 用户程序、报警文本以及典型的工件程序也是需要保存的文件。如有条件，维修人员还应备有一套数控系统所用的各种元器件手册，以备随时查阅。

(2) 制定有关的规章制度防止无关人员操作数控系统，以避免造成事故。数控机床的操作人员、编程人员和维修人员也应明确各自的职责范围，上述的文件资料也都应有专人保管。

(3) 准备好维修用器具。维修器具如下：

① 交流电压表，用于测量交流电源电压，表的测量误差应在±2%以内；

② 直流电压表，用于测量直流电源电压，电压表的最大量程分别为 10V 和 30V，其误差应在±2%以内，如有数字式电压表则更好；

③ 万用表，有机械式和数字式两种，机械式万用表是必备的，用来测量晶体管的性能；

④ 相序表，用于检查三相输入电源的相序，这只在维修晶闸管伺服系统时才是必需的；

⑤ 示波器，示波器的频带宽度应在 5MHz 以上，两个通道；

⑥ 逻辑分析仪，利用逻辑分析仪查找故障时，可以将故障范围缩小到某个元器件；

⑦ 各种规格的螺钉旋具。

(4) 必要的备件。当数控机床发生故障时，为能及时排除故障，需要更换部件或元器件，以便机床尽快恢复正常，因此用户应准备一些必要的备件，备件的品种和数量要视本厂的具体情况来定。如电气系统故障，大多发生在微动开关、指示灯、风扇等外部器件、数控系统中的输入/输出接口模块及干簧继电器，以及伺服驱动单元和电动机的电刷等部位。因此，应配备一定数量的各种熔断器、电刷、晶体管模块及易出故障的印制电路板，而对不易损坏的印制电路板，如中央处理器(CPU)模块、存储器模块及显示系统等部分，由于其价格昂贵，故障率也低，就不一定要配备。

6.3　数控机床的故障诊断与维修

6.3.1　数控机床的故障诊断概述

数控机床是个复杂的系统，由于种种原因，不可避免地会发生不同程度、不同类型的故障，导致数控机床不能正常工作。一般这些原因大致包括机械锈蚀、磨损和失效；元器件老化、损坏和失效；电气元件、接插件接触不良；环境变化，如电流或电压波动、温度变化、液压压力和流量的波动以及油污等；随机干扰和噪声；软件程序丢失或被破坏等。此外，错误的操作也会引起数控机床不能正常工作。数控机床一旦发生故障，必须及时予

以维修，将故障排除。数控机床维修的关键是故障的诊断，即故障源的查找和故障定位。一般来说，随着故障类型的不同，采用的故障诊断的方法也就不同。

1. 数控机床维修的基本概念

1) 系统可靠性和故障的概念

系统可靠性是指系统在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力，而故障则意味着系统在规定条件下和规定时间内丧失了规定的功能。

2) 平均故障间隔时间 *MTBF*

它是指数控机床在使用中两次故障间隔的平均时间，即数控机床在寿命范围内总工作时间和总故障次数之比，即

$$MTBF = \frac{\text{总工作时间}}{\text{总故障次数}}$$

日常维护(或称预防性维修)的目的是为了延长平均故障间隔时间 *MTBF*。

3) 平均修复时间 *MTTR*

它是指数控机床从出现故障开始直至能正常使用所用的平均修复时间。显然，要求这段时间越短越好，故障维护的目的是要尽量缩短 *MTTR*。

4) 有效度 *A*

这是从可靠度和可维修度方面对数控机床的正常工作概率进行综合评价的尺度，是一台可维修的机床，在某一段时间内，维持其性能的概率。

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

有此可见，有效度 *A* 是一个小于 1 的数，但越接近 1 越好。

2. 数控机床的故障规律

与一般设备相同，数控机床的故障率随时间变化的规律可用图 6.1 所示的故障曲线表示。根据数控机床的故障度，整个使用寿命期大致可以分为 3 个阶段，即初始运行期、有效寿命期和衰老期。

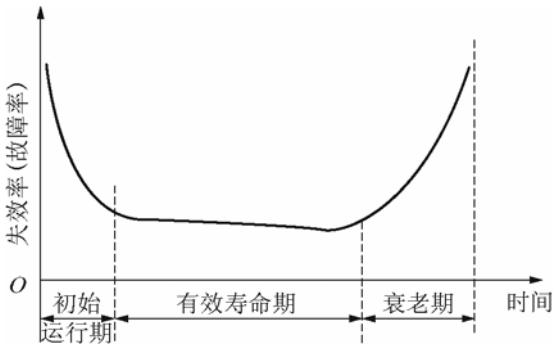


图 6.1　数控机床的故障曲线

1) 初始运行期

初始运行期的特点是故障发生的频率高，系统的故障率为负指数曲线函数。使用初期之所以故障频繁，原因大致如下。

(1) 机械部分。机床虽然在出厂前进行过运行磨合，但时间较短，而且主要是对主轴和导轨进行磨合。由于零件的加工表面存在着微观的和宏观的几何形状偏差，在完全磨合前，零件的加工表面还比较粗糙，部件的装配可能存在误差，因而，在机床使用初期会产生较大的磨合磨损，使设备相对运动部件之间产生较大的间隙，导致故障的发生。

(2) 电气部分。数控机床的控制系统使用了大量的电子元器件，这些元器件虽然在制造厂经过了相当长时间的老化试验和其他方式的筛选，但实际运行时，由于电路的发热、交变负荷、浪涌电流及反电势的冲击，性能较差的某些元器件经不住考验，因电流冲击或电压击穿而失效，或特性曲线发生变化，从而导致整个系统不能正常工作。

(3) 液压部分。由于出厂后运输及安装阶段时间较长，液压系统中某些部位长时间无油，气缸中润滑油干涸，而油雾润滑又不可能立即起作用，造成液压缸或气缸可能产生锈蚀。此外，新安装的空气管道若清洗不干净，一些杂物和水分也可能进入系统，造成液压、气动部分的初期故障。

2) 有效寿命期

数控机床在经历了初期的各种老化、磨合和调整后，开始进入相对稳定的正常运行期。在这个阶段，故障率低而且相对稳定，近似常数。偶发故障是由于偶然因素引起的。一般说来，数控系统要经过 9～14 个月的运行才能进入有效寿命期。因此，用户在安装数控机床后最好能使其长期连续运行，以便让初始运行期在一年的保修期内结束。

3) 衰老期

衰老期出现在数控机床使用的后期，其特点是故障率随着运行时间的增加而升高。出现这种现象的基本原因是由于数控机床的零部件及电子元器件经过长时间的运行，出现疲劳、磨损、老化等问题，已接近衰竭，从而处于频发故障状态。

3. 数控机床故障诊断的一般步骤

故障诊断是指在系统运行或基本不拆卸的情况下，即可掌握系统当前运行状态的信息，查明产生故障的部位和原因，或预知系统的异常和劣化的动向并采取必要对策的一门技术。

当数控机床发生故障时，除非出现危及数控机床或人身安全的紧急情况，一般不要关断电源，要尽可能地保持机床原来的状态不变，并对出现的一些信号和现象做好记录。这主要包括：故障现象的详细记录；故障发生时的操作方式及内容；报警号及故障指示灯的显示内容；故障发生时机床各部分的状态与位置；有无其他偶然因素，如突然停电、外线电压波动较大、雷电、局部进水等。

无论是处于哪一个故障期，数控机床故障诊断的一般步骤都是相同的。数控机床一旦发生故障，首先要沉着冷静，根据故障情况进行全面的分析，确定查找故障源的方法和手段，然后有计划、有目的地一步步仔细检查，切不可急于动手，凭着看到的部分现象和主观臆断乱查一通。这样做具有很大的盲目性，很可能越查越乱，走很多弯路，甚至造成严重的后果。

故障诊断一般按下列步骤进行。

(1) 详细了解故障情况。例如，当数控机床发生颤振、振动或超调现象时，要弄清楚是发生在全部轴还是某一轴；如果是某一轴，是全程还是某一位置；是一运动就发生还是仅在快速、进给状态某速度、加速或减速的某个状态下发生。为了进一步了解故障情况，

要对数控机床进行初步检查，并着重检查荧光屏上的显示内容，控制柜中的故障指示灯、状态指示灯等。当故障情况允许时，最好开机试验，详细观察故障情况。

(2) 根据故障情况进行分析，缩小范围，确定故障源查找的方向和手段。对故障现象进行全面了解后，下一步可根据故障现象分析故障可能存在的位置。有些故障与其他部分联系较少，容易确定查找的方向，而有些故障原因很多，难以用简单的方法确定出故障源的查找方向，这就要仔细查阅数控机床的相关资料，弄清与故障有关的各种因素，确定若干个查找方向，并逐一进行查找。

(3) 由表及里进行故障源查找。故障查找一般是从易到难、从外围到内部逐步进行。所谓难易，包括技术上的复杂程度和拆卸装配方面的难易程度。技术上的复杂程度是指判断其是否有故障存在的难易程度。在故障诊断的过程中，首先应该检查可直接接近或经过简单的拆卸即可进行检查的那些部位，然后检查需要进行大量的拆卸工作之后才能接近和进行检查的那些部位。

4. 维修中的注意事项

(1) 从整机上取出某块电路板时，应注意记录其相对应的位置，连接的电缆号。对于固定安装的电路板，还应按先后取下的顺序，将相应的连接部件及螺钉做记录，并妥善保管。装配时，拆下的东西应全部用上，否则装配不完整。

(2) 电烙铁应放在顺手位的前方，并远离维修电路板。电烙铁头应适应集成电路的焊接，避免焊接时碰伤别的元器件。

(3) 测量电路间的阻值时，应切断电源。

(4) 电路板上大多刷有阻焊膜，因此测量时应找相应的焊点作为测试点，不要铲除阻焊膜。有的电路板整个覆有绝缘层，则只能在焊点处用刀片刮开绝缘层。

(5) 数控设备上的电路板大多是双面金属孔化板或多层孔化板，印制电路细而密，不应随意切断。因为一旦切断，不易焊接，且切线时易切断相邻的线。确实需要切线时，应先查清线的方向，定好切断的线数及位置。测试后切记要恢复原样。

(6) 在没有确定故障元器件的情况下，不应随意拆换元器件。

(7) 拆卸元器件时应使用吸锡器，切忌硬取。同一焊盘不应长时间加热及重复拆卸，以免损坏焊盘。

(8) 更换新的器件，其引脚应作适当的处理。焊接中不应使用酸性焊油。

(9) 记录电路上的开关、跳线位置，不应随意改变。互换元器件时要注意标记各电路板上的元器件，以免错乱。

(10) 查清电路板的电源配置及种类，根据检查的需要，可分别供电或全部供电。有的电路板直接接入了高压，或板内有高压发生器，操作时应注意安全。

(11) 检查中遵循由粗到细的原则，逐渐缩小维修范围，并做好维修记录。

6.3.2　数控机床常用的故障诊断方法

数控机床是综合应用微电子、计算机、自动控制、自动检测、液压传动和精密机械等技术的最新成果而发展起来的新型机械加工设备。它的发展趋势是工序集中、高速、高效、

高精度以及使用方便、可靠性高。要达到这些要求，就需要对机床的维护保养、日常检查、故障诊断等做复杂、有效的工作。在生产过程中，数控机床频繁地发生故障，必然影响产品的加工质量和生产效率，影响数控机床效益的发挥。因此，必须对出现的故障进行广泛深入的研究，找出其原因和规律，不断积累经验，采取有效措施，对故障进行预防、预测，建立一套排除故障的有效方法。

1. 数控机床常见故障分类

所谓故障，是指设备或系统由于自身的原因丧失了规定的功能，不能再进行正常工作的现象。数控机床的故障包括机械部分的故障、数控系统的故障、伺服与主轴驱动系统的故障以及辅助装置的故障等。故障按其表现形式、性质、起因等可作多种分类。常见的故障类型有以下几种。

(1) 按与故障的相互关系可分为关联性故障和非关联性故障两类。其中非关联性故障是由与系统本身无关的因素(如安装、运输等)引起的，而关联性故障又可分系统性故障和随机性故障。系统性故障是指机床和系统一旦满足某种条件必然出现的故障。这是一种可重演性的故障。而随机性故障则不然，即使在完全相同的条件下，故障也只是偶然发生。一般来说，随机性故障往往是由于机械结构局部松动、错位，控制系统中软件不完善、硬件工作特性曲线漂移，机床电气元件工作可靠性下降等原因所致。这类故障排除比系统性故障要难得多，需经过反复试验和综合判断才能确诊。

(2) 按诊断方式可分为有诊断显示故障和无诊断显示故障两类。现代的数控系统大多都有较丰富的自诊断功能，如日本的 FANUC 数控系统、德国的 SIEMENS 数控系统等，报警号有数百条，所配置可编程控制装置报警参数也有数十条乃至上百条，当出现故障时自动显示出报警号。维修人员利用这些诊断显示的报警号，较易找到故障所在。而在无诊断显示时，机床停在某一个位置不动，循环进行不下去，甚至用手动强行操作也无济于事。由于没有报警显示，维修人员只能根据故障出现前后的现象来判断。因此故障排除难度较大。

(3) 按故障破坏性可分为破坏性故障和非破坏性故障两类。破坏性故障一般来说应避免再发生，维修时不允许使故障重现来进行分析、判断。如对因伺服系统失控造成的机床飞车、短路后熔丝熔断等破坏性故障，只能根据现场目击者提供的情况来做分析判断，所以维修难度较大，且具有一定的危险性。对于非破坏性故障，由于其危险性小，可以由操作者使其反复再现，因此排除较容易。

(4) 按故障起因可分为硬故障和软故障两类。硬故障主要是由于控制系统中的元器件损坏而造成的，必须更换元器件才能排除故障。而软故障大都由于编程错误、操作错误或电磁干扰等偶然因素造成，只要修改程序或作适当调整，故障即可排除。

2. 数控机床常用故障诊断方法

1) 现场故障处理

数控机床或系统出现故障时，操作人员应采取急停措施停止系统运行。如果操作人员不能将故障排除，应及时通知维修人员，并保护好现场，同时对故障做以下记录。

(1) 故障的种类。

① 数控机床处于何种工作方式(纸带方式、手动数据输入方式、存储器方式、点动方

式等)?

② 数控系统状态显示的内容是什么?

③ 定位误差超差情况如何?

④ 刀具运动轨迹误差状况以及出现误差时的速度是否正常?

⑤ 显示器上有无报警?报警号是什么?

(2) 故障出现情况。

① 故障何时发生，一共发生了几次?此时旁边其他数控机床工作是否正常?

② 加工同类工件时，故障出现的概率如何?

③ 故障是否与进给速度、换刀方式或螺纹切削有关?

④ 故障出现在哪段程序上?

⑤ 如果故障为非破坏性的,则将引起故障的程序段重复执行多次,观察故障的重复性;

⑥ 将该程序段的编程值与系统内的实际数值进行比较，看两者是否有差异，是否是程序输入错误。

⑦ 重复出现的故障是否与外界因素有关?

(3) 数控机床操作及运转情况。

① 经过什么操作之后才发生此故障?操作是否有误?

② 数控机床的操作方式是否正确?

③ 数控机床调整状况如何?间隙补偿是否合适?

④ 数控机床在运转过程中是否发生振动?

⑤ 所用刀具的切削刃是否正常?

⑥ 换刀时是否设置了偏移量?

(4) 环境状况。

① 周围环境温度如何?是否有强烈的振源?系统是否受到阳光的直射?

② 切削液、润滑油是否飞溅到系统柜里?

③ 电源电压是否有波动?电压值为多少?

④ 近处是否存在干扰源?

⑤ 系统是否处于报警状态?

⑥ 机床操作面板上的倍率开关是否设定为“0”?

⑦ 数控机床是否处于锁住状态?

⑧ 系统是否处于急停状态?

⑨ 熔丝是否熔断?

⑩ 方式选择开关设定是否正确?进给保持按钮是否被按下?

(5) 数控机床和系统之间的接线情况。

① 电缆是否完整无损?特别是在拐弯处是否有破裂、损伤?

② 交流电源线和系统内部电缆是否分开安装?

③ 电源线和信号线是否分开走线?

④ 信号屏蔽线接地是否正确?

⑤ 继电器、电磁铁以及电动机等电磁部件是否装有噪声抑制器?

(6) 有关穿孔纸带的检查。

① 纸带阅读机开关设定是否正确？

② 有关纸带操作的设定是否正确？纸带安装是否正确？

③ 纸带是否折、皱和存有污物？孔有无破损？

④ 纸带的连接处是否完好？

(7) 程序检查。

① 是否是新编程序？检查程序的正误。

② 故障是否发生在某一特定的程序段？

③ 程序内是否包含有增量指令？刀具补偿量是否设定得正确？

④ 程序是否提前终止或中断？

2) 故障诊断的原则

数控机床或数控系统的故障是多种多样的。但无论对何种故障，在进行诊断时，都应遵循以下原则。

(1) 仔细调查故障现场，掌握第一手材料。维修人员到达故障现场后，先不要急于动手处理，而应首先详细向操作者询问故障发生的全过程，并查看故障记录单，了解故障发生前后曾出现过什么现象，采取过什么措施等。同时还要亲自仔细勘察现场。无论是系统的外观、CRT 显示的内容，还是系统内部的各电路板上有无相应的报警显示、有无烧灼的痕迹，不管多么细微的变化都应查清。在确认系统通电无危险的情况下，方可通电，并按下数控系统的复位(RESET)按钮，观察系统有何异常，报警是否消失等。如果消失，则该故障属于软故障，否则属于硬故障。

(2) 认真查找各种故障因素。目前的数控系统在出现故障时，除少数自诊断显示故障原因外，如存储器报警、电源电压过高报警等，大部分尚不能自动诊断出故障的确切原因。往往是同一现象、同一报警号可以由多种故障所致，不可能将故障缩小到具体的某一部件。所以在查找故障起因时，一定要思路开阔，不能被某种假象所迷惑。如系统的某一部分自诊断出现故障，但查其根源在数控机床机械部分，而并不在数控系统。所以，无论是数控系统、数控机床电气，还是机械和液压系统，只要有可能引起该故障的迹象，都要尽可能全部列出来。

(3) 综合分析，查清故障。利用数控机床的维修档案进行综合分析和筛选，找出可能性最大的原因。经过必要的试验，查清确切原因。然后“对症下药”，采取相应措施排除故障。例如某厂购置了一台北京机床研究所生产的 JCS—018 立式加工中心，使用中发现 *X*、*Y* 两坐标轴快速回零时，*X* 轴出现抖动。经询问，该加工中心已使用了七年。对 *X* 轴进行多次单独运行试验，均无抖动现象，从而排除了 *X* 轴机械传动链和伺服电动机本身的因素。数控系统控制 *X* 轴脉冲也很均匀，这又排除了控制系统的影响。*X* 轴的伺服电动机装在 *Y* 轴的床鞍上，*X* 轴的控制电缆在 *Y* 轴运动时被来回拖动，当 *X* 轴单轴往复运动时，用手拖动 *X* 轴电动机的控制电缆，出现了抖动现象，这就可以确认抖动现象是由于 *X* 轴控制电缆接触不良造成的。由于电缆的插头长期被油腐蚀，绝缘丧失，插头松动，需要更换电缆排除故障。

3) 故障诊断的一般方法

要排除故障，首先必须找到故障所在。下面介绍几种常用的故障检查方法。

(1) 直观检查法。即维修人员充分利用自身的眼、耳、鼻、手等感觉器官查找故障的

方法。通过目测故障电路板，仔细检查有无熔丝熔断、元器件烧坏、烟熏、开裂现象，从而可判断板内有无过流、过压、短路发生。用手摸并轻摇元器件(如电阻、电容、晶体管等)看有无松动之感，以此检查一些断脚、虚焊等问题。针对故障的有关部分，用一些简单工具，如万用表、蜂鸣器等，检查各电源之间的连接线有无断路现象。若无，即可接入相应的电源，并注意有无烟、尘、噪声、焦糊味、异常发热的现象，以此发现一些较为明显的故障，进一步缩小检查范围。

(2) 自诊断功能法。现代的数控机床虽然尚未达到智能化很高的程度，但已经具备了较强的自诊断功能。所谓自诊断是指依靠数控系统内部计算机的快速处理数据的能力，对出错系统进行多路、快速的信号采集和处理，然后由诊断程序进行逻辑分析判断，以确定系统是否存在故障，并对故障进行定位。自诊断功能能随时监视数控系统硬件和软件的工作状态。一旦发现异常，立即在 CRT 显示器上显示报警信息或用发光二极管指示出故障的大致起因。利用自诊断功能，显示设备也能显示出系统与主机之间接口信号的状态，从而判断出故障发生在机械部分还是数控系统部分，并指示出故障的大致部位。这个方法是当前维修方法中最为有效的一种。

(3) 功能程序测试法。所谓功能程序测试法就是将数控系统的常用功能和特殊功能如直线定位、圆弧插补、螺纹切削、固定循环、用户宏程序等用编程法，编制成一个功能测试程序，并存储于相应的介质上，如纸带和磁带等，需要时通过纸带阅读机等送入数控系统内，然后启动数控系统使之运行，藉以检查数控机床执行这些功能的准确性和可靠性，进而判断出故障发生的可能起因。本方法适用于长期闲置的数控机床第一次开机时的检查；对于数控机床加工中造成废品，但又无报警的情况下，一时难以确定是编程错误或是操作错误，还是数控机床本身故障时，是一有效的故障分析判断法。

(4) 故障现象分析法。对于非破坏性故障，必要时维修人员可让操作人员再现故障现象，最好会同机械、电气、液压等技术人员一起会诊，共同分析出现故障时的异常现象，有助于尽快而准确地找到故障规律和线索。

(5) 报警显示分析法。数控机床上多配有面板显示器和指示灯。面板显示器可把大部分被监控的故障识别结果以报警的方式给出。对于各个具体的故障，系统有固定的报警号和文字显示给予提示。出现故障后，系统会根据故障情况、类型给以故障提示或者同时中断运行而停机等待处理。指示灯可粗略地提示故障部位及类型等。程序运行中出现故障时程序显示能指出故障出现时程序的中断部位；坐标值显示能提示故障出现时运动部件的坐标位置；状态显示能提示功能执行结果。维修人员应利用故障信号及有关信息分析故障原因。

(6) 换件诊断法。当系统出现故障后，维修人员把怀疑部分从大缩至小，逐步缩小故障范围，直至把故障定位于电路板级或部分电路、甚至元器件级。此时，可利用备用的印制电路板、集成电路芯片或元器件替换有疑点的部分，或将系统中具有相同功能的两块印制电路板、集成电路芯片或元器件进行交换，即可迅速找出故障所在。这是一种简便易行的方法。但换件时应该注意备件的型号、规格、各种标记、电位器调整位置、开关状态、电路更改是否与怀疑部分的相同，此外，还要考虑到可能要重调新替换件的某些电位器，以保证新、旧两部分性能相近。任何细微的差异都可能导致失败或造成损失。

(7) 测量比较法。数控系统生产厂在设计印制电路板时，为了调整、维修的便利，在

印制电路板上设计了多个检测用端子。用户也可利用这些端子比较、测量正常的印制电路板和有故障的印制电路板之间的差异。可以检测这些测量端子的电压或波形，分析故障的起因及故障的所在位置。甚至有时还可对正常的印制电路板人为地制造“故障”，如断开连接或短路，拔去组件等，以判断真实故障的起因。

(8) 参数检查法。众所周知，数控参数能直接影响数控机床的性能。参数通常存放在磁泡存储器或存放在需由电池保持的 CMOS RAM 中，一旦电池不足或由于外界的某种干扰等因素，会使个别参数丢失或变化，发生混乱，使数控机床无法正常工作。此时，通过核对、修正参数，就能将故障排除。当数控机床长期闲置后，工作时会无缘无故地出现不正常现象，此时应根据现象特征，检查和校对有关参数。

另外，经过长期运行的数控机床，由于其机械传动部件磨损、电气元件性能变化等原因，也需对其有关参数进行调整。有些数控机床的故障往往就是由于未及时修改某些不适应的参数所致。当然这些故障都属于软故障的范畴。

(9) 敲击法。当数控系统出现的故障表现为时有时无时，往往可用敲击法检查出故障的部位所在。这是由于数控系统是由多块印制电路板组成，每块板上又有许多焊点，板间或模块间又通过接插件及电缆相连。因此，任何虚焊或接触不良，都可能引起故障。当用绝缘物轻轻敲打有虚焊或接触不良的疑点时，故障会重复再现。

(10) 局部升温法。数控系统经过长期运行后元器件均会逐步老化，性能变坏。当它们尚未完全损坏时，相应的故障时有时无。这时可用热吹风机或电烙铁等来局部升温被怀疑的元器件，加速其老化，以便彻底暴露故障部件。当然，采用此法时，一定要注意元器件的温度参数等，不要将原来好的元器件烤坏。

(11) 原理分析法。根据数控系统的工作原理，维修人员可从逻辑上分析可疑元器件各点的电平和波形，然后用万用表、逻辑笔、示波器或逻辑分析仪进行测量、分析和对比，从而找出故障。这种方法对维修人员的要求最高，维修人员必须对整个系统乃至每个电路的原理有清楚的了解。但这也是检查疑难故障的最终方法。

(12) 接口信号法。由于数控机床的各个控制部分大都采用 I/O 接口来互为控制，利用数控机床各接口部分的 I/O 接口信号来分析，则可以找出故障出现的部位。

利用接口信号法进行故障诊断的全过程可归纳为：故障报警—故障现象分析—确定故障范围(大范围)—采用接口信号法—逻辑分析—确定故障点—排除故障。

此方法符合系统的设计与调试原则，使用简单，容易掌握，能起到迅速准确排除故障的作用。因此，这种方法对数控系统的维修工作具有很重要的作用。

6.3.3　数控系统的故障诊断与维修

1. 数控系统的故障诊断技术

由于数控系统是高技术密集型产品，要想迅速而正确的查明原因并确定其故障的部位，不借助于诊断技术将是很困难的，有时甚至是不可能的。随着微处理器的不断发展，诊断技术也由简单的诊断朝着多功能的高能诊断或智能化方向发展。诊断能力的强弱也是评价当今 CNC 系统性能的一项重要指标。目前所使用的各种 CNC 系统的诊断方法归纳起来大致可分为以下三大类。

1) 启动诊断 (start up diagnostics)

启动诊断是指 CNC 系统每次从通电开始至进入正常的运行准备状态为止，系统内部诊断程序自动执行的诊断。诊断的内容为系统中最关键的硬件和系统控制软件，如 CPU、存储器、I/O 等单元模块，以及 MDI/CRT 单元、纸带阅读机、软盘单元等装置或外部设备。有的 CNC 系统启动诊断程序还能对配置进行检查，用以确定所有指定的设备模块是否都已正常的连接，甚至还能对某些重要的芯片，如 RAM、ROM、LSI(大规模集成电路)是否插装到位，选择的规格型号是否正确进行诊断。只有当全部项目都确认正确无误之后，整个系统才能进入正常运行的准备状态。否则，CNC 系统将通过 CRT 显示器画面或用硬件(如发光二极管)报警方式指出故障的信息。此时，启动诊断过程不能结束，系统不能投入运行。上述启动诊断程序正常时需数秒结束，一般不会超过 1min。

2) 在线诊断 (on-1ine diagnostics)

在线诊断是指通过 CNC 系统的内装程序，在系统处于正常运行状态时对 CNC 系统本身及与 CNC 装置相连的各个伺服单元、伺服电动机、主轴伺服单元和主轴电动机以及外部设备等进行自动诊断、检查，只要系统不停电，在线诊断就不会停。

在线诊断的内容很丰富，一般来说，包括自诊断功能的状态显示和故障信息显示两部分。其中自诊断功能状态显示有上千条，常以二进制的 0、1 来显示其状态。对正逻辑来讲，0 表示断开状态，1 表示接通状态，借助状态显示可以判断出故障发生的部位。如区分出故障在数控系统内部，还是发生在 PLC 或机床侧。常用的有 I/O 接口状态显示和内部状态显示，如利用 I/O 接口状态显示，再结合 PLC 梯形图和强电控制电路图，用推理法和排除法即可判断出故障点所在的真正位置。故障信息显示的内容一般有上百条，最多可达 600 条。这些信息大都以报警号和适当注释的形式出现，一般可分为下述几大类：

① 过热报警类。

② 系统报警类。

③ 存储器报警类。

④ 编程/设定类，这类故障均为操作、编程错误引起的软故障。

⑤ 伺服类，即与伺服单元和伺服电动机有关的故障报警。

⑥ 行程开关报警类。

⑦ 印制电路板间的连接故障类。

所有上述在线诊断功能，对 CNC 系统的操作者和维修人员来说，对于分析系统故障原因、确定部位大有帮助。

3) 离线诊断 (off-line diagnostics)

这主要是指 CNC 系统制造厂家或专业维修中心，利用专用的诊断软件和测试装置在 CNC 系统出现故障后，进行停机(或脱机)检查，力求把故障定位到尽可能小的范围内。如缩小到某个功能模块、某个印制电路板或板上某部分电路，甚至某个芯片或元件，以便更换元件进行修复。随着电信技术的发展，一种新的通信诊断技术也正在进入应用阶段即海外诊断，它利用电话通信线，把带故障的 CNC 系统和专业维修中心的专用通信诊断计算机通过连接进行测试、诊断。如德国 SIEMENS 公司在 CNC 系统诊断中采用了这种诊断功能，用户只需把 CNC 系统中专用“通信接口”连接到普通电话线上，而在 SIEMENS 公司维修中心的专用通信诊断计算机的“数据电话”也连接到电话线路上，然后由计算机向 CNC 系

统发送诊断程序，并将测试数据输回到计算机进行分析并得出结论，随后又将诊断结论和处理办法通知用户。通信诊断系统除用于故障发生后的诊断外，还可为用户作定期的预防性诊断，维修人员不必亲临现场，只需按预定的时间对数控床作一个系统性试运行检查，在维修中心分析诊断数据，以发现可能存在的故障隐患。这类 CNC 系统，必须具备远距离诊断接口及联网功能。

2. 数控系统常见故障和处理

(1) 键盘故障。用键盘输入程序，发现有关字符不能输入和消除、程序不能复位或显示屏不能变换页面等故障。先检查有关按键是否接触不好，予以修复或更换。若不见成效或所有按键都不起作用，可进一步检查该部分的接口电路、系统控制软件及电缆连接状况等。

(2) 数控系统电源接通后 CRT 无辉度或无任何画面。造成此类故障的原因如下。

① 与 CRT 单元有关的电缆连接不良引起的。应对电缆重新检查，连接一次。

② 检查 CRT 单元的输入电压是否正常。但在检查前应先搞清楚 CRT 单元所用的电压是直流还是交流，电压有多高。因为生产厂家不同，它们之间有较大差异，一般来说，9in 单色 CRT 多用+24V 直流电源，而 14in 彩色 CRT 却为 200V 交流电压。在确认输入电压过低的情况下，还应确认电网电压是否正常。如果是电源电路不良或接触不良，造成输入电压过低时，还会出现某些印制电路板上的硬件或软件报警，如主轴低压报警等，因此可通过几个方面的相互印证来确认故障所在。

③ CRT 单元本身的故障造成。CRT 单元由显示单元、调节器单元等部分组成，它们中的任一部分不良都会造成 CRT 无辉度或无图像等故障。

④ 可以用示波器检查是否有视频(video)信号输入。如无，则故障出在 CRT 接口印制电路板上或主控制电路板上。

⑤ 数控系统的主控制印制电路板上如有报警显示，也可影响 CRT 的显示。此时，故障的起因，多不是 CRT 本身，而在主控制印制电路板上，可以按报警指示的信息来分析处理。

(3) CRT 无显示。造成此类故障的原因如下。

① 电源接通后 CRT 无显示，但输入单元有硬件报警显示。这时，故障可能出在输入单元处。先检查单元的熔断器是否熔断，然后再检查单元上的有关电容是否烧坏、击穿等。

② CRT 显示器无显示，数控机床也不能动作，但主控制印制电路板有硬件报警。可根据硬件报警指示的提示来判断故障的根源。多数是主控制印制电路板或 ROM 板不良造成的。

③ CRT 无显示，数控机床不能动作，而主控制印制电路板也无报警。这时，故障一般发生在 CRT 控制板上。更换 CRT 控制板，系统即可恢复运行。

④ CRT 无显示，但数控机床能正常地执行手动或自动操作。这种现象表明，系统的控制部分正常，仍能完成插补运算等功能，而仅是显示部分或 CRT 显示器控制板出了故障。

(4) CRT 显示器显示无规律的亮斑、线条或不正确的符号。这时 CNC 系统往往也不能正常工作，造成此类故障的原因。

① CRT 控制板故障。

② 主控制板故障。

(5) 数控系统一接通电源，CRT 显示器就出现“NOT　READY”显示，过几秒自动切断电源，有时数控系统接通电源后显示正常，但在运行程序的中途突然在 CRT 显示器上显示“NOT　READY”，随之电源被切断。造成这类故障的一个原因是 PC 有故障，可以通过检查 PC 的参数及梯形图来发现。其次应检查伺服系统电源装置是否有熔丝熔断、断路器跳闸等问题。若合闸或更换熔丝后断路器再次跳闸，应检查电源部分是否有问题，检查是否有电动机过热，大功率晶体管组件过电流等故障而使计算机的监控电路起作用；检查计算机各板是否有故障灯显示。另外还应检查计算机所需各交流电源、直流电源的电压值是否正常。若电压不正常也可造成逻辑混乱而产生“NOT READY”故障。

(6) 当数控系统进入用户宏程序时出现超程报警或显示“PROGRAM　STOP”，但数控系统一旦退出用户宏程序运行就恢复正常，这类故障多出在用户宏程序。如操作人员错按“RESET”按钮，就会造成宏程序的混乱。此时可采取全部清除数控系统的内存，重新输入 NC 和 PC 的参数、宏程序变量、刀具补偿号及设定值等方法来恢复。

(7) 数控系统的 MDI 方式、MEMORY 方式无效，但在 CRT 画面上却无报警发生这类故障多数不是由数控系统引起的，因为上述的 MDI 方式、MEMORY 方式的操作开关都在机床操作面板上，在操作面板和数控柜之间的连接发生故障如断线等的可能性最大。在上述故障中几种工作方式均无效，说明是共性的问题，如机床侧的继电器损坏，造成数控机床侧的+24V 不能进入 NC 侧的连接单元就会引起上述故障。

(8) 数控机床不能正常地返回基准点，且有报警产生。此类故障一般是由脉冲编码器的一转信号没有输入到主控制印制电路板造成的。如脉冲编码器断线，或脉冲编码器的连接电缆和插头断线等均可引起此类故障。另外，返回基准点时的数控机床位置距基准点太近也会产生此报警。

(9) 手摇脉冲发生器(电手轮)不能工作。这可分为两种情况：一是转动手摇脉冲发生器时 CRT 画面的位置显示发生变化但数控机床不动。此时可先通过诊断功能检查系统是否处于数控机床锁住状态。如未锁住，则再由诊断功能确认伺服断开信号是否已被输入到数控系统中。如果两种情况都不存在，则故障多是出在伺服系统。二是转动手摇脉冲发生器时 CRT 显示器画面的位置显示无变化，数控机床也不运动。此时可从以下几个方面进行检查。首先应确认数控系统是否带有手摇脉冲发生器这个功能。这可以通过核查参数来确认。然后确认数控机床锁住信号是否已被输入(通过诊断功能来检查)。确认手摇脉冲发生器的方式选择(它在数控机床操作面板上)信号是否已输入(也可用诊断功能来确认)，并检查主板是否有报警。若以上几个方面均无问题，则可能是手摇脉冲发生器不良或脉冲发生器接口板不良。

(10) 一台加工中心在攻螺纹或主轴电动机作高低速切换时，引起附近另一台加工中心自动断电的原因主要是控制回路中 MCC 接触器失电，从而造成整个控制回路断电。检查 MCC 接触器的线圈、连接导线、操作面板上的停止按钮、浪涌吸收器等元件，检查 MCC 的自锁触点以及交流和稳压直流电源发现均正常。进一步细查机床控制回路，发现当一台加工中心主轴变速时，引起地基振动，结果导致另一台加工中心的机床控制回路中的一根导线接地，从而引起机床自动断电保护。

(11)加工中心的存储器方式、手动数据输入方式均无效，但 CRT 显示器却无报警发生。经过检查，是由于机床侧的继电器损坏，使机床侧的＋24V 电源不能送入 CNC 系统的连接

单元。

(12) SIEMENS 公司 SINUMERIK810 系统常见故障如下：

① CPU 监控报警。如果系统不能被启动，则原因有：CPU 模块硬件故障；模块中的跨接桥接错；EPROM 故障；总线板损坏；数控机床参数错误；启动芯片损坏，如果 CPU 监控报警发生在运行过程中，则多数是模块硬件故障或是 CPU 循环工作出错。

② EPROM 的自诊断报警。多是由于存储器模块或 EPROM 芯片接插不良或插错位置引起的。

③ 数据存储器子模块电池用尽报警。此时，子模块必须更换，但子模块更换必须在系统断电的情况下进行，且在子模块更换后，要重新加载其存储内容。

④ 轮廓监控报警。说明坐标轴的实际移动速度高于规定的轮廓监控门槛速度的允许值，或是在高速或制动时，相应坐标轴不能在规定时间内达到要求的速度。这多数是由于 K_v 系数设定不当造成。

⑤ 位置反馈回路硬件故障。表示检测到的位置反馈信号相位错误、接地短路或完全没有。可以通过检查测量回路电缆是否断路、脱落；检测判断位置控制模块是否有故障；用示波器测量位置反馈信号的相位，判断电缆与位置传感器是否出问题等确定故障之所在。

6.3.4 伺服系统的故障诊断与维修

1. 进给伺服系统的故障诊断与维修

根据经验，进给伺服系统的故障约占整个数控系统故障的 1/3。故障报警现象有三种：一是利用软件诊断程序在 CRT 上显示报警信息，二是利用伺服系统上的硬件(如发光二极管、熔丝熔断等)显示报警，三是没有任何报警指示。

1) 软件报警形式

现代数控系统都具有对进给驱动进行监视、报警的能力。在 CRT 上显示进给驱动的报警信号大致可分为以下三类。

(1) 伺服进给系统出错报警。这类报警的起因，大多是速度控制单元方面的故障引起的，或是主控制印制电路板内与位置控制或伺服信号有关部分的故障。

(2) 检测出错报警。它是指检测元件(测速发电机、旋转变压器或脉冲编码器)或检测信号方面引起的故障。

(3) 过热报警。这里所说的过热是指伺服单元、变压器及伺服电动机过热。

总之，可根据 CRT 显示器上显示的报警信号，参阅该数控机床维修说明书中“各种报警信息产生的原因”的提示进行分析判断，找出故障，将其排除。

2) 硬件报警形式

硬件报警形式包括速度单元上的报警指示灯和熔丝熔断以及各种保护用的开关跳开等报警。报警指示灯的含义随速度控制单元设计上的差异也有所不同，一般有下述几种。

(1) 大电流报警。此时多为速度控制单元上的功率驱动元件(晶闸管模块或晶体管模块)损坏。检查方法是在切断电源的情况下，用万用表测量模块集电极和发射极之间的阻值。如阻值小于 10Ω，表明该模块已损坏。当然速度控制单元的印制电路板故障或电动机绕组内部短路也可引起大电流报警，但后一种故障较少发生。

(2) 高电压报警。产生这类报警的原因是输入的交流电源电压达到了额定值的 110%，甚

至更高或电动机绝缘能力下降，或速度控制单元的印制电路板不良。

(3) 电压过低报警。大多是由于输入电压低于额定值的 85%或是伺服变压器二次绕组与速度单元之间的连接不良引起的。

(4) 速度反馈断线报警。此类报警多是由伺服电动机的速度或位置反馈线接触不良或连接器接触不良引起的。如果此类报警是在更换印制电路板之后出现，则应先检查印制电路板上的设定是否有误，例如误将脉冲编码设定为测速发电机。

(5) 保护开关动作。此时应首先分清是何种保护开关动作，然后再采取相应措施解决。如伺服单元上热继电器动作时，应先检查热继电器的设定是否有误，然后再检查数控机床工作时的切削条件是否太苛刻或数控机床的摩擦力矩是否太大。如变压器热动开关动作，但此时变压器并不热，则是热动开关失灵；如果变压器很热，用手只能接触几秒，则要检查电动机负载是否过大。这可以在减轻切削负载条件下，再检查热动开关是否动作。如仍发生动作，应在空载低速进给的条件下测量电动机电流，如已接近电流额定值，则需要重新调整数控机床。产生上述故障的另一原因是变压器内部短路。

(6) 过载报警。造成过载报警的原因有机械负载不正常，速度控制单元上电动机电流的上限值设定得太低。永磁电动机上的永久磁体脱落也会引起过载报警，如果不带制动器的电动机空载时用手转不动或转动轴时很费劲，即说明永久磁体脱落。

(7) 速度控制单元上的熔丝熔断或断路器跳闸。发生此类故障的原因很多，除机械负荷过大和接线错误外(仅发生在重新接线之后)，主要原因如下：

① 速度控制单元的环路增益设定过高。

② 位置控制或速度控制部分的电压过高或过低引起振荡(如速度或位置检测元件故障，也可能引起振荡)。

③ 电动机故障(如电动机去磁，将会引起过大的励磁电流)。

④ 相间短路(当速度控制单元的加速或减速频率太高时，由于流经扼流圈的电流延迟，可能造成相间短路，从而熔断熔丝，此时需适当降低工作频率)。

3) 无报警显示的故障

这类故障多以数控机床处于不正常运动状态的形式出现，但故障的根源却在进给驱动系统。常见故障如下。

(1) 直流伺服电动机不转。这类故障的可能原因如下：

① 电动机永久磁铁脱落，此时用手很难转动电动机转子。

② 对于带制动器的电动机，可能由于通电后电磁制动片未能脱开或是制动器用的整流器损坏，使制动器失灵。

(2) 数控机床失控(飞车现象)。其原因如下：

① 位置传感器或速度传感器的信号反相，或者是电枢线反接，使整个系统变成正反馈；

② 速度指令不正确。

③ 位置传感器或速度传感器没有反馈信号。

④ 计算机或伺服控制板有故障。

⑤ 电源板有故障而引起的逻辑混乱。

(3) 数控机床振动。此时应首先确认振动周期与进给速度是否成比例变化，如果成比例变化，则故障的起因是数控机床、电动机、检测器不良，或是系统插补精度差，检测增

益太高；如果不成比例变化，且数值大致固定时，则故障的起因是与位置控制有关的系统参数设定错误，速度控制单元上短路棒设定错误或增益电位器调整不好，以及速度控制单元的印制电路不良。

(4) 伺服超差。故障影响因素如下。

① 计算机与驱动放大模块之间或计算机与位置检测器之间或驱动放大器与伺服电动机之间的连线是否正确、可靠。

② 位置检测器的信号及相关的 D/A 转换电路是否有问题。

③ 驱动放大器输出电压是否有问题。

④ 电动机轴与数控机床间的传动机构是否有问题。

⑤ 位置环增益是否符合要求。

(5) 数控机床停止时，有关进给轴振动。可检查以下部位。

① 高频脉动信号是否符合要求。

② 伺服放大器速度环的补偿是否合适。

③ 位置检测用编码盘的轴、联轴器、齿轮系是否啮合良好，有无松动现象。

(6) 数控机床过冲。数控系统的参数(快速移动时间常数)设定的大小或速度控制单元上的速度环增益设定太低都会引起数控机床过冲。另外，如果电动机和进给丝杠间的刚性太差，如间隙太大或传动带的张力调整不好也会造成此故障。

(7) 数控机床移动时噪声过大。如果噪声源来自电动机，可能的原因是电动机换向器表面的粗糙度高或有损伤，油、液、灰尘等侵入电刷槽或换向器和电动机有轴向窜动。

(8) 快速移动坐标轴时数控时机床出现振动，有时还伴有大的冲击。这种现象多是由于伺服电动机尾部测速发电机的电刷接触不良引起的。

(9) 圆柱度超差。两轴联动加工外圆时圆柱度超差，且加工时象限稍一变化精度就不一样，则多是由于进给轴的定位精度太差所致，需要调整机床精度差的轴。如果是在坐标轴的 45° 方向超差，则多是由于位置增益或检测增益调整不好造成的。

2. 主轴伺服系统常见故障的处理

主轴伺服系统可分为直流主轴伺服系统和交流主轴伺服系统，下面分别说明。

1) 直流主轴伺服系统

(1) 主轴电动机振动或噪声太大。这类故障的起因如下：

① 系统电源缺相或相序不对。

② 主轴控制单元上的电源频率开关(50/60Hz 切换)设定错误。

③ 控制单元上的增益电路调整不好。

④ 电流反馈回路调整不好。

⑤ 电动机轴承故障。

⑥ 主轴电动机和主轴之间连接的离合器故障。

⑦ 主轴齿轮啮合不好及主轴负荷太大等。

(2) 主轴不转。引起这一故障的原因如下：

① 印制电路板太脏。

② 触发脉冲电路故障。

③ 系统未给出主轴旋转信号。

④ 电动机动力线或主轴控制单元与电动机间连接不良。

(3) 主轴速度不正常。造成此故障的原因有如下。

① 装在主轴电动机尾部的测速发电机故障。

② 速度指令给定错误或 D/A 转换器故障。

(4) 发生过流报警。发生过流的可能原因如下。

① 电流极限设定错误。

② 同步脉冲紊乱和主轴电动机电枢线圈层间短路。

(5) 速度偏差过大。这种故障是由于负荷过大、电流零信号没有输出和主轴被制动所致。

(6) 主轴定位时抖动。其主要原因如下。

① 定位检测用的传感器位置安装不正。

② 主轴速度控制单元的参数不合适。

(7) 主轴停位不准，换刀时甚至有掉刀现象。发生这种现象多数是主轴停止回路没有调整好。因此只要调整有关电位器，即可排除故障。

2) 交流主轴伺服系统

(1) 电动机过热。造成过热的可能原因如下。

① 负载过大。

② 电动机冷却系统太脏。

③ 电动机的冷却风扇损坏。

④ 电动机与控制单元之间连接不良。

(2) 主轴电动机不转或达不到正常转速。其原因如下。

① 系统侧输出或 D/A 转换器不良引起。

② 印制电路板设定错误、调整不当或控制回路有问题。

③ 因停位用传感器安装不良而使传感器不能发出检测信号也会使主轴不能启动。

④ 连接电缆的接触不良。

(3) 输入电路的熔断器熔断。引起这类故障的原因多是以下几种。

① 交流电源侧的阻抗大高(例如在电源侧用自耦变压器代替隔离变压器)。

② 交流电源输入处的浪涌吸收器损坏。

③ 电源整流桥损坏。

④ 逆变器用的晶体管模块损坏或控制单元的印制电路板故障。

(4) 再生回路用的熔断器熔断。这大多是由于主轴电动机的加速或减速频率太高引起的。

(5) 主轴电动机有异常噪声和振动。对这类故障应先检查确认是在何种情况下产生的。若在减速过程中产生，则故障发生在再生回路，此时应检查回路处的熔丝是否熔断及晶体管是否损坏。若在恒速下产生，则应先检查反馈电压是否正常，然后突然切断指令，观察电动机停转过程中是否有噪声。若有噪声，则故障出现在机械部分，否则，多在印制电路板上。若反馈电压不正常，则需检查振动周期是否与速度有关。若有关，应检查主轴与主轴电动机连接是否合适，主轴以及装在交流主轴电动机尾部的脉冲发生器是否不良；若无关，则可能是印制电路板调整不好或不良，或是机械故障。

(6) 主轴电动机转速偏离指令值。其原因如下。

① 电动机过载。

② 如发生在减速时，则可能是再生回路不良或晶体管模块损坏。

③ 如果发生在电动机正常旋转时，则可能是脉冲发生器故障或速度反馈信号断线，或是印制电路板不良所引起。

6.4　数控机床的故障分析与维修实例

6.4.1　数控车床的故障分析与维修

【例 6.1】 一台由德国引进的专用数控磨床，采用 SINUMERIK　3G4 数控系统。该机床出厂前已调试好。在设备到位安装后进行二次调试，发现电源板无法工作。经改用诊断电源板后，机床仍无法工作。电压波形检测后证实是电压波动过大，波形幅值变化剧烈引起故障。尽管在维修工作中，改善接地状况，增添稳压器装置等，皆不能奏效，故障仍不能排除。直到使用动力线路限压器才使电压稳定，启动机床。

【例 6.2】 数控系统有显示，有背光，无报警，主轴高低速、正反转、刀库(刀架)功能无输出。

系统为 GSK928TA 或 GSK928M。液晶显示器上菜单正常，常规检查操作没有异常，由此可以否定 CPU 系统发生故障的可能性，应重点分析 I/O 接口电路。S、M、T 功能输出电路，如图 6.2 所示。由 8155A 接口和 8155B 接口输出信号后经 2803 和 2003 功率放大后输出。没有输出的原因有：8155 内部异常；2803 和 2003 短路烧坏；无+24V 工作电压。

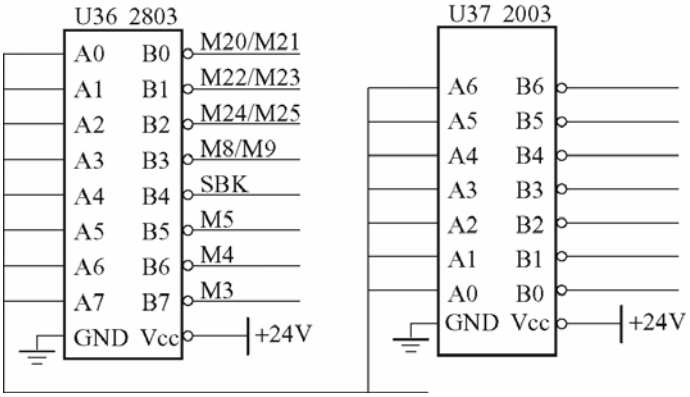


图 6.2　S、M、T 功能输出电路

拆开系统主板，用万用表直流电压挡测量液晶显示器+24V 和 2803、2003 工作电压+24V 后，发现果然没有电压。又测量开关电源+24V 输出正常，由此可以肯定系统内部+24V 供电电路有问题。为了防止通电瞬间 S、M、T 功能误输出，设计了一个保护电路，如图 6.3 所示。

系统上电瞬间 MAX809 输出低电平使系统处于复位状态，经反相器和与门整形后使 VD_1 导通，从而使 VD_2 截止，晶闸管截止，使系统内部无+24V 输入。复位后经 R_1、C_1 产生延迟后晶闸管导通，+24V 输入。检查发现，晶闸管失效。更换后，系统恢复正常。

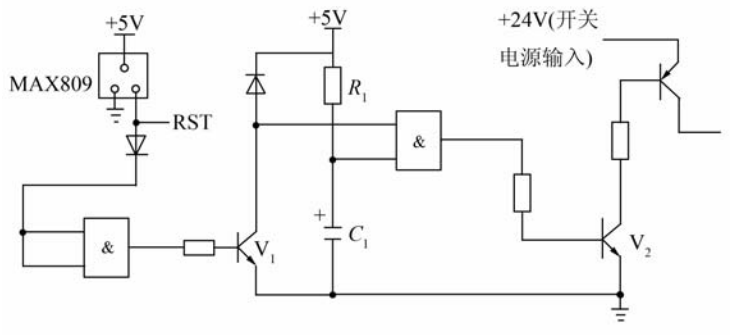


图 6.3　保护电路

【例 6.3】 某厂引进一台数控滚齿机，初始故障经检查，为一检测元件的供电变压器断线。更换变压器后，一通电，嘭的一声，伺服系统的供电模块损坏。供电模块的印制电路板中，有的元器件已损坏、烧焦，无法辨认也无法测试，印制电路板的线路也熔断不少。根据测绘的结果，分析电路，补齐烧损的部位，计算元器件的参数值，重新制作印制电路板，恢复了供电模块；再检查测试元件供电变压器的接线，发现接线出错，重新连接。装入供电模块后通电，供电模块正常。作手动操作，有的轴向不能运行。检查位置模块，无输入。再进一步检查发现两个轴向光电编码器已损坏。更换后全部手动正常。再自动运行，全部正常。本例说明，维修人员除能够依照原印制电路板作测绘外，还要具有较广泛的线路知识，能够推导电路中元器件的参数值。

【例 6.4】 某加工中心在自动或手动状态下，换 04 号刀具时刀库(刀架)旋转不停，系统出现 E37 报警。

查说明书，系统 E37 报警解释为：执行 T 功能时无相应的刀位信号返回。查找系统资料，得知换刀是收发式控制，软件处理换刀流程如图 6.4 所示。通过分析，重点查找系统有无接收到刀具到位的反馈信号。该机床配置的是常州宏达数控设备厂的 4 工位刀库(刀架)，主要通过霍尔元件和磁钢进行反馈。当磁钢和霍尔元件靠近时，霍尔元件发出低电平反馈至系统，供查询。磁钢和霍尔元件布置如图 6.5 所示。由此，可初步判断应该是以下原因造成该故障：霍尔元件失效，无到位信号输出；反馈线断路；系统接收电路有问题。

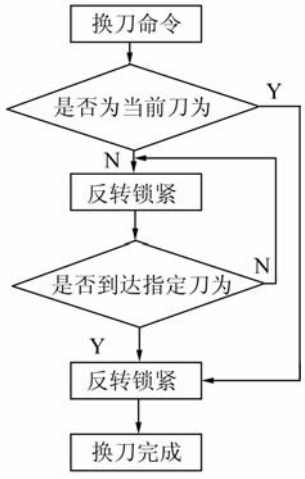


图 6.4　换刀流程图

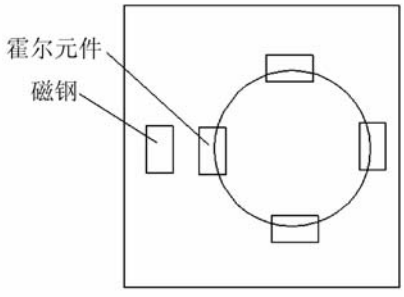


图 6.5　磁钢和霍尔元件布置图

由于系统 DISP 显示功能可以显示系统输入接口的状态。手动方式下，按显示 DISP> 键显示，手动转动刀库(刀架)，使 04 号刀霍尔元件与磁钢对应，发现 04 号刀输入显示位置无变化，可以判定系统没有接收到反馈信号。用万用表电阻挡测量反馈线无断路现象，测量 04 号刀霍尔元件与磁钢对应时有低电平输出。由此可以肯定，是系统内部接收电路异常。系统刀位反馈电路如图 6.6 所示。测量光耦合器 521 发现 1、2 脚正反相无穷大，由此可判定 521 失效，更换后工作正常。

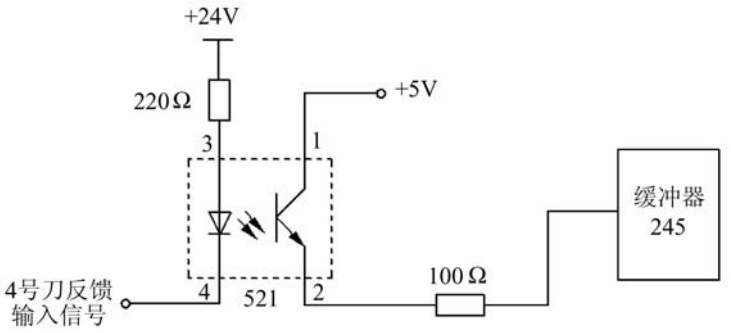


图 6.6　系统刀位反馈电路

【例 6.5】 某厂引进德国一台数控转子铣床。在调试中，机床 *X* 轴无指令而高速运转。经分析后，认为是正反馈造成此种故障。因为系统零点漂移，在反馈情况下，就会迅速累加，使电动机在最高转速下运转。但按标签检查，接线皆正确无误。经充分分析与检测后，将反馈线反接，证明机床 *X* 轴运行恢复正常。说明外方标签有误。

【例 6.6】 机床在自动加工时，突然主轴停，进给停止，系统出现 E74 报警。

该机床配备的是 GSK928TA 或 GSK928M 系统，查说明书，系统出现 E74 报警，解释为：系统检测正向或负向限位输入信号断开。系统内部超程接收电路和外部输入电路如图 6.7 所示。据原理图分析，造成以上故障有以下几点原因：行程超，撞块压住行程开关；线断；系统内部接收电路有问题；行程开关常闭触点断开。

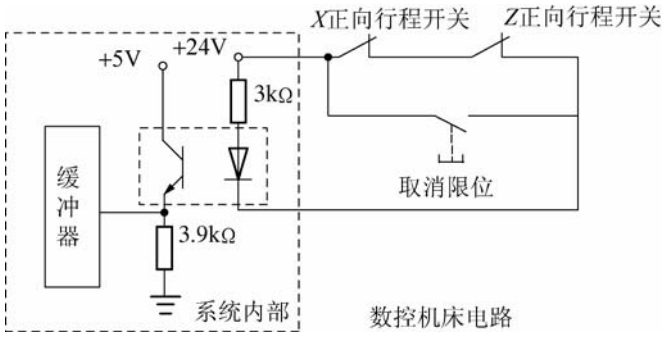


图 6.7　系统内部超程接收电路和外部输入电路

拆开数控机床护罩，查看 *X* 轴和 *Z* 轴并未超出数控机床行程之外，撞块并未压住行程开关。压住取消限位按钮，系统复位后报警消除。由此可断定，系统内部接收电路正常，应该是外部异常。用万用表测量 *X* 正向行程开关触点时，发现电阻无穷大，且开关常开，更换后，报警消除。

【例 6.7】 一台波兰生产的数控镗铣床，发现机床 X 轴有时不到位，一般需要几分钟，甚至长达几小时才能到达给定位置，然后继续执行下一个程度段。发生故障时，观察机床移动情况、显示值、各轴和电动机，确实都未出现变化，而伺服系统也无指令输入，但检查数控系统后却发现有信号输出。故障显然发生在数控系统与伺服系统之间的连接线上。结果发现是连接不良造成上述故障现象。

【例 6.8】 系统无显示，无背光，但机床强电通电正常。

本机床配备的系统是 GSK980T 或 GSK990M，系统输入电源是通过外部输入 380V 经隔离变压器降为 220V，供电电路如图 6.8 所示。引起系统无显示、无背光的很大可能是开关电源没有电压输出。开关电源盒是机床生产厂自行设计生产的，当开关电源盒输出短路时，自身保护功能将使机床停止工作。

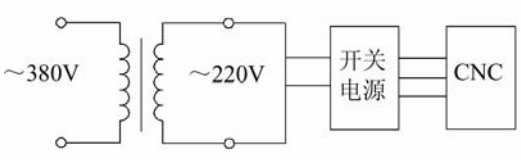


图 6.8　供电电路

用万用表交流电压挡测量隔离变压器次级，发现有交流 220V 输出，开关电源盒也有交流 220V 输入，但没有直流电压输出，所以可以断定故障原因有以下两个方面：一是开关电源盒内开关电路停止工作；二是开关电源盒的负载，即系统内部电路有短路。于是，断开开关电源盒的负载后上电，开关电源盒即时有直流电压输出，开关电路正常工作。打开系统的机箱，闻到里面有烧焦气味，发现功率输出器件 2803 明显有击穿的痕迹。2803 的工作电压为+24V，测量+24V 对地的电阻为零。更换 2803 以后，重新开机，则系统显示背光恢复，工作正常。

【例 6.9】一台上海仪表机床厂生产的 CK6430 数控机床配置 GSK980T 或 GSK990M 系统，运行过程中突然停止工作，并且液晶显示只有背光，没有字符，而画面没有抖动现象。

GSK980T 或 GSK990M 系统液晶显示器的背光电路如图 6.9 所示，它是由+24V 输入后经逆变器产生直流高压供给灯管，使灯管工作。由此可见，开关电源有直流电源输出，证明开关电源盒没有故障，机床输入电压正常。如果有+5V 输入系统主板及显示板，而没有字符显示，并且没有抖动，则故障原因有以下两方面：一是复位电路出问题，使系统处于复位状态；二是时钟电路停止工作，使系统处于休息状态。复位电路如图 6.10 所示，时钟电路如图 6.11 所示。

拆开系统外壳，测量系统主板和显示板，发现+5V 直流电压确实正常。用示波器观察 CPU16 脚上时钟信号，发现频率为 12 MHz，幅度为 4.99，属正常；观察 D_9 的 1 脚时钟信

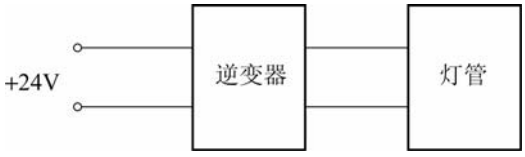


图 6.9　背光电路

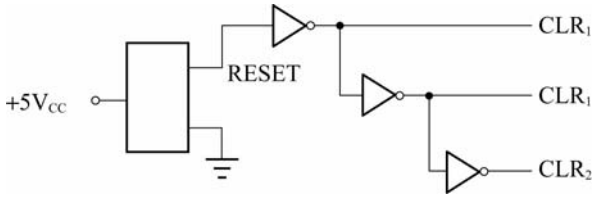


图 6.10　复位电路

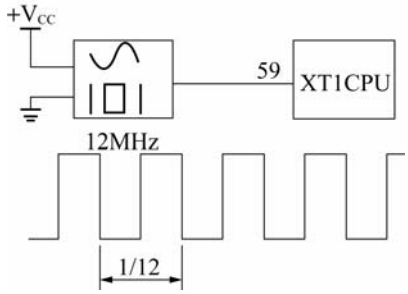


图 6.11　时钟电路

号为 32.768 MHz 也正常；D_{14} 的 54 脚输入时钟信号为 10 MHz，正常。通过检测，证明时钟电路没有故障。

用示波器测量上电复位集成电路和 CC0958T 的第 3 脚发现为低电平，正常应该为高电平，说明系统处于复位状态。更换 CC0958T 后，工作正常，故障排除。

【例 6.10】 某数控机床配置 GSK980T 或 GSK990M＋DA98 系统，*Z* 轴回机床原点时，行程到减速位置后系统并未减速，并超出行程 CNC，出现准备未绪报警。

机床原点是机床上的固定位置，通常机稀薄原点安装在 *X* 轴和 *Z* 轴正方向的最大行程处。减速信号由安装在床身上的接近开关提供，原点信号由 DA98 驱动器反馈回的回转信号提供。当接收到回机床原点信号时，*Z* 轴向正方向进给，当移动的撞块接近固定的接近开关时，*Z* 轴进给开始检测驱动器反馈回转的信号，接收到以后进给停止，回机床原点完成，波形图如图 6.12 所示，电路图如图 6.13 所示。由以上故障现象可见，系统并未接收到原点减速信号，以至于超出行程限位引起准备未绪报警。

将系统输出 XS40 减速输入信号 DECZ 焊接线脱开，使之与外部分离，重新上电，手动使系统 *Z* 轴回机床原点，用短接线将 DECZ 与 COM 短接，进给立即减速，并回原点正常。由此可说明，CNC 系统内部没有故障，故障是接近开关失效或线路断路所致，将机床护罩拆开，观察撞块接近开关时，接近开关工作灯并未亮。而且，发现接近开关表面有一层油污，擦干净后，重新回原点，工作正常。由此可证明，故障原因是接近开关表面脏使感应效果减弱。

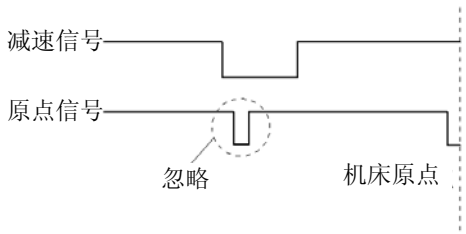


图 6.12　回机床原点波形图

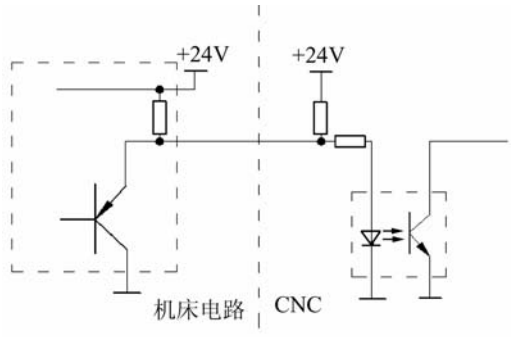


图 6.13　回机床原点电路图

【例 6.11】 某机床配置 GSK928TA 或 GSK928M，自动运行时常出现 E34 报警。该数控

机床配备的是常州宏达的 4 工位自动刀库(刀架)。经观察，当系统执行加工程序时，出现 E34 报警，程序不能运行。

查说明书，系统出现 E34 报警解释为刀库(刀架)不到位。说明此故障与刀库(刀架)的刀位信号有关，可判定是计算机收不到工位信号。此类故障的原因有：刀库(刀架)故障，一般是发信盘的霍尔元件烧坏；刀库(刀架)控制器内部故障或其接口损坏； CNC 系统内部故障，接口电路部分的光耦合器较易损坏。

直接检测刀库(刀架)控制器的信号接口，如图 6.14 所示。用万用表检测 Jl 的 1、2、3、4、10、11 脚，11 脚电压为+24V，10 脚电压为 0V，刀库(刀架)控制器供电正常。同时不管刀库(刀架)转到何处，1、2、3、4 脚一直为高电平(刀位信号为低电平有效)。再检测 J2，情况一样。这说明问题极可能出在刀库(刀架)上。复位后拆开刀库(刀架)端盖，检查发信盘和磁钢，各霍尔元件良好。磁钢离霍尔元件较远，怀疑霍尔元件因此感应不到信号，将磁钢位置调整，使之靠近霍尔元件到合理位置。暂不装上端盖，试运行，手动换刀正常，故障排除。但是，在试加工工件时，发现当刀库(刀架)抬起换刀时，系统又出现 E34 报警，程序不能运行。多运行几次加工程序，发现刀库(刀架)抬起时磁钢的位置太高，明显高出霍尔元件。如图 6.15 所示，刀库(刀架)反转和刀具补偿同时进行，而执行刀具补偿时系统会检测刀位信号。

于是，将磁钢位置往下移动，调整好。试运行，情况正常。另外，处理此类故障还有另一种方法：修改软件，使执行刀具补偿时不检测刀位信号。

【例 6.12】 一台采用 FANU CIIM 系统的数控插齿机，在自动循环工作中突然停止工作，CRT 显示器无显示，主板上的七段显示器显示报警 A。报警 A，表明 MDI/CRT 单元的连接异常。一般处理办法是检查 MDI/CRT 的光纤电缆或连接器，否则问题出在主板上。但经上述检查，发现都不存在问题。再从 CRT 显示器无显示的角度来分析，认为问题出在 MDI/CRT 的电源上。对 MDI/CRT 的电源板进行检查，发现+24V 电源有短路现象。经进一步检查，发现有一个电容 1000 μF/35V 短路，两个晶体管 Q15 击穿，熔丝 F21、F22 熔断。更换上述三项之后，系统恢复正常。本例说明，尽管数控系统的报警提示对分析故障原因有很大好处，但是，这种提示毕竟不可能将所有故障根源都指示出来。所以在排除故障时应以提示作参考，再结合实际故障现象来分析，切不可受到提示的限制。

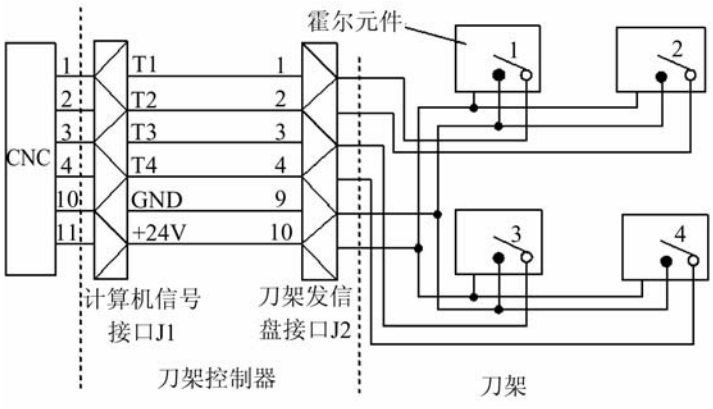


图 6.14　刀库(刀架)控制器信号接口

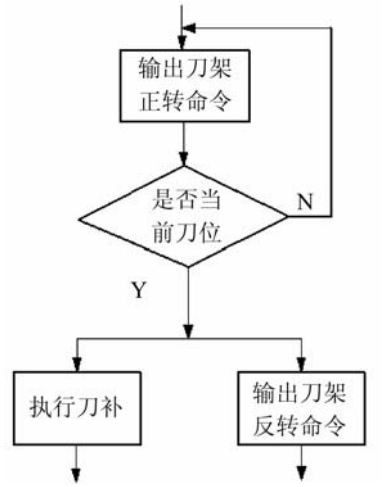


图 6.15　系统检测刀位信号

【例 6.13】某台日本生产的数控铣床有爬行现象。首先从机床着手查找故障原因，结果发现机床进给传动链没有问题。再检查程序，发现工件曲线加工是采用细微分段圆弧逼近来进行的。编程时采用了 G61 指令，即每加工一段就要进行一次到位停止检查，结果使机床出现爬行现象。用 G64(连续切削方式)指令代替 G61 之后，上述故障现象消失。本例说明一旦遇到故障，一定要全面分析问题，将与本故障有关的所有因素都列出来，然后综合分析，从中筛选出故障的最终原因。

【例 6.14】 某数控机床，配置 GSK928TA 或 GSK928M＋DF3A 系统，在加工工件时 X 轴有失步现象。

用户主要用其加工外圆、内孔和螺纹。在现场边加工边测量工件，发现工件外径尺寸有时累积加大，有时累积减小，有时又变化不定，没有规律。用户有两台相同配置的机床，更换另一台 CNC 系统以后，故障排除，由此可以判定是 CNC 系统故障。

CNC 系统引起加工尺寸变化，失步问题无非是脉冲有丢失或参数设置不当，甚至有可能是有外部干扰，从而引起输出脉冲波形失真。GSK928 系统脉冲输出方式是：脉冲+符号，它是标准的矩形波，占空比是 1∶1，如图 6.16 所示。当有干扰输入或有脉冲丢失时，波形呈现不规则失真，如图 6.17 所示。

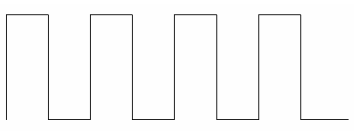


图 6.16　矩形波

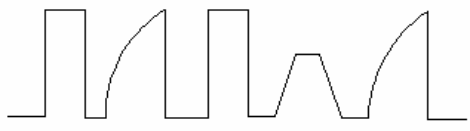


图 6.17　不规则波

当 CNC 系统输出波形失真时，达不到 DF3A 接收回路的技术要求，就会造成脉冲的丢失，DF3A 驱动器上有三个相序指示灯，如图 6.18 所示。通常看上面的相序指示灯，可以判断有没有脉冲丢失。

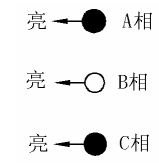


图 6.18　相序指示灯

程序自动运行前，记下驱动器上的相序指示灯的状态，如图 6.18 所示。程序运行结束后，相序指示灯的状态和运行前不同，证

明确实有脉冲丢失。用示波器测量 DF3A 脉冲输入回路，测试波形，发现波形确实如图 6.17 所示有失真。用示彼器测量 CNC 脉冲输出回路，测试波形如图 6.16 所示，发现波形正常，为标准矩形波，这时可以确定是信号线或接插件不良或存在干扰。检查 CNC 系统输出脉冲插座，发现有氧化现象，更换插座后，再测量 DF3A 脉冲输出回路，波形正常。重新开机试切工件，尺寸很稳定，故障排除。

【例 6.15】 美国一家公司生产的数控磨床不能运行，但 CRT 显示器无任何报警显示。这类故障产生的原因是多方面的。从大的方面来说，首先应该区分故障是发生在机床侧还是在数控系统侧。利用自诊断功能检查 PLC 和 CNC 系统之间的接口信号，结果发现诊断号 No4.7 (MLK)=1，说明机床锁住信号已经送入 CNC 系统内，从而造成机床不能运动。但实际上没有机床锁住信号送入。于是再查 CNC 装置内的连接单元，也未发现问题。最后查出是由于外界干扰引起磁泡存储器内的参数丢失或混乱而造成的。因此，将磁泡存储器内容全部清除，重新输入数控系统参数后，数控机床即恢复正常运行。从本例可看出系统参数的重要性，用户一定要把有关数控机床的各种文件包括数控参数、PLC 参数、用户宏程序等妥善保存。

6.4.2　伺服系统的故障分析与维修

【例 6.16】 一台配置有 FANU C7CM 系统的数控铣床，*Y* 轴移动时机床发生振动，在快速移动时甚至伴有大的冲击。用示波器测量故障轴 *Y* 轴和正常轴 *X* 轴的测速发电机的输出电压波形，进行比较，两轴波形不一致，*Y* 轴有明显的波动。拆开 *Y* 轴测速发电机，发现其电枢被电刷粉末污染。将其清理后，波形正常，故障排除。

【例 6.17】 某数控机床配有 GSK980T 或 GSK990M＋DF3A 驱动器，系统经常出现 21 号报警，有时候又正常。

经查系统报警表，21 号报警解释为：*X* 轴驱动器报警。系统与驱动连接是通过 *X* 轴和 *Z* 轴驱动器驱动 *X* 轴和 *Z* 轴步进电动机进给实现的。驱动器上有五个状态指示灯，3 个相序指示灯，一个功放指示灯，一个报警指示灯。当驱动器报警时，报警指示灯亮，功放灯熄灭，CNC 系统立即停止信号输出，提示报警信息。引起驱动器报警的原因如图 6.19 所示。

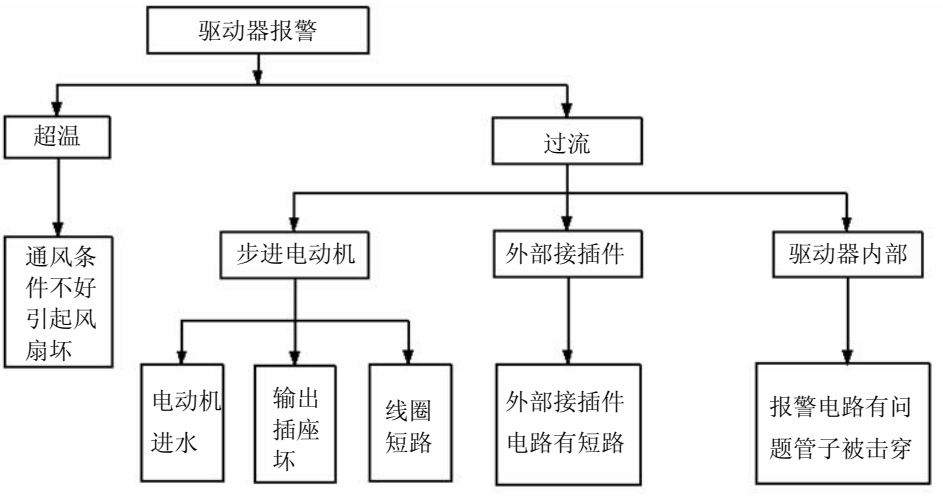


图 6.19　引起驱动器报警原因框图

打开电气箱门，发现 *X* 轴驱动器报警灯亮。虽然 *X* 轴驱动器和 Z 轴驱动器的驱动电流不同，但是两驱动器可以互换，这样可以判断是否是电动机或驱动器故障。断电后，将两个驱动器上的电动机插头互换，通电后手动按 *Z* 轴进给，一段时间后，CNC 系统显示 *Z* 轴驱动器报警。而手动按 *X* 轴进给，长时间工作都正常。因为这时 *Z* 轴驱动器驱动 *X* 轴步进电动机，由此可判断是 *X* 轴步进电动机异常。拆开电动机护罩，将电动机从减速箱上拆下来，发现减速箱里切削液很多。由此可以断定，切削液引起电动机绝缘度降低，从而过电流引起驱动器报警。用绝缘电阻表测量，电动机 A、B、C 三线圈对地电阻为零，正常阻值应大于 50MΩ。

将电动机的转子和定子分离，在烘箱中烘干后重新装配，测量绝缘度正常。为避免以后电动机由于减速箱内积水过多，再度引起电动机进水，可将减速箱底部钻一个小孔，将切削液漏掉。处理后，系统一直比较稳定，正常工作。

【例 6.18】 一台 CJK0630 机床，配有 GSK980T 或 GSK990M＋DF3A 系统，当 *Z* 轴进给时，低速振动非常大，高速时按 *Z* 正方向进给，有时向负方向运行。

就步进电动机来说，在低速时应该与机械传动系统有一个共振点，及低频共振，所以，有些振动，在某一个速度上或许声音大一点。*Z* 轴低速进给时，每挡速度振动都很大，即不属于共振问题。造成低速振动一般是由以下两个原因造成：一是驱动器缺相；二是机械传动阻力大。

根据故障现象分析，*Z* 轴高速进给时，有时向负方向运行，从这一点可以说明步进电动机相序乱，极有可能是缺相。

将 *X* 轴驱动器与 *Z* 轴驱动器互换。上电后，试机，发现 *Z* 轴进给时正常，按 *X* 轴进给时出现上述故障现象，证明是 *Z* 轴驱动器有故障。

驱动器伴有报警现象，证明很有可能有功放管短路，引起驱动器过流报警。断电后，用万用表的电阻挡(大于 100k 挡)，测量驱动器电动机接口的插头上的 A+与 A－、B+与 B－、C+与 C－之间的电阻值，测量时，先用万用表正极对被测点的正极，万用表负极对被测点的负极进行测量。然后，用万用表正极对被测点的负极，万用表负极对被测点的正极测量，发现 A 相阻值比 B 相、C 相电阻小，证明 A 相功放管有损坏。

将驱动器外壳拆开，拆去电源板和控制板，直接在功放电路板测量判断。用数字万用表的电阻挡(20k 挡)测量，发现 A 相其中一个功放管的栅(G)、源(S)极间电阻为零，证明该管已被击穿。将损坏的功放管更换后，运行正常。

【例 6.19】 某机床配置交流伺服 DA98 驱动，运行中，*X* 轴驱动器偶尔出现 Err9 报警。全数字式交流伺服驱动器是一个半闭环控制系统，原理框图如图 6.19 所示。它内部有一个位置控制环，通过安装在伺服电动机上的编码器反映位置信号，内部通过比较，进行误差跟随和调整。查询 DA98 说明书，Err9 报警解释为：编码器故障。根据原理分析，造成 Err9 报警是由于以下几个原因：编码器接线错误；编码器损坏；编码器电缆不良；编码器电缆过长，造成编码器供电电压偏低。

用万用表电阻挡检查编码器连线，没有错误。反馈线长 3m 也属于正常范围。将伺服电动机上的电动机插头和编码器线插头拔去。在电动机编码器插头上加直流 5V，用示波器测量 A 相、B 相、C 相、U 相、V 相、W 相，波形均正常，说明电动机无故障。用万用表电阻挡检查反馈线，发现抖动线时，其中有一根线有时通有时断。于是更换编码器反馈线，上电后正常运行。

【例 6.20】 数控龙门铣床，当 *X* 轴正常运行时，因液压泵突然关闭，使台面运行中断，并显示报警。按复位键之后可清除该故障，但重新启动液压泵，*X* 轴仍不运行，且持续十几秒后液压泵又自动关闭，荧光屏上再次显示同样的报警信息。从报警信息可见，是 *X* 轴的驱动调节器输出的最大模拟量超过 10V 极限值。通过对 *X* 轴的有关接点的信号检测，发现故障发生在晶闸管伺服系统部分。因为晶闸管控制部分有输入信号，但无输出信号，从而判断输出接线端子松动引起上述故障。拧紧输出端子后，启动机床，*X* 轴恢复正常运行。

【例 6.21】 某数控机床配置 DA98 伺服系统，运行中 *X* 轴驱动器出现 Err12 报警，偶尔出现 *X* 轴驱动器无现象。

查询 DA98 说明书，Err12 报警解释为：过电流。根据图 6.20 所示原理框图可知，经功放模块输出的 U、V、W 三相电动机线有两个电流传感器，检测输出电流，通过比较器比较后反馈至 DSP 处理，以保护驱动器无损坏。由此可知，Err12 报警由以下原因造成：驱动器 U、V、W 相线之间短路，接地不良，电动机绝缘损坏，驱动器内部电路损坏。

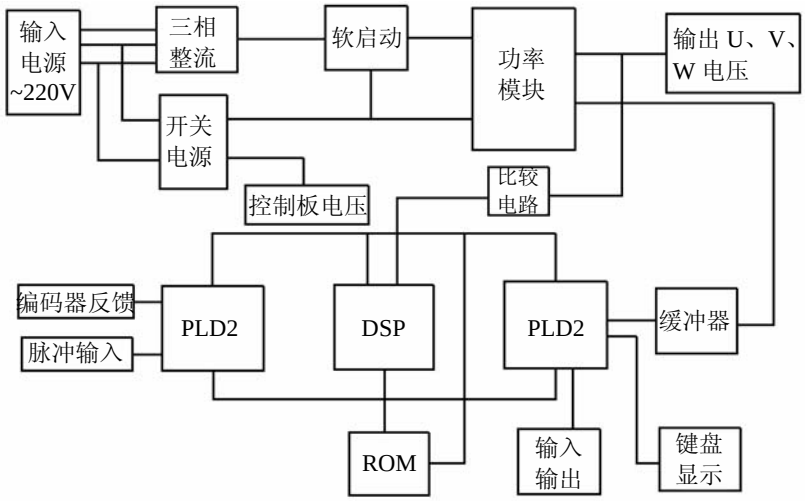


图 6.20　DA98 原理框图

将 *X* 轴伺服电动机从驱动器上拆下来，检查插头和插座均没有打火现象，但发现电动机上有切削液，故怀疑切削液进入电动机，使电动机绝缘度降低。用绝缘电阻表测量，如图 6.21 所示，发现 U、V、W 相线与地线之间的电阻为零，正常阻值应大于 50MΩ。

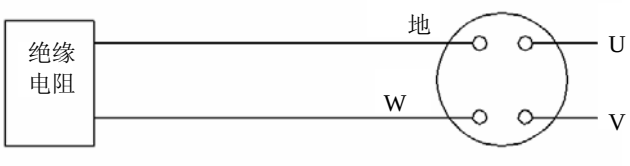


图 6.21　绝缘电阻表测量故障示意图

将电动机在烘箱中烘干，重新装配好上电，发现驱动器还是偶尔出现 12 号报警，并伴有无显示现象。在无显示时测量电压三相 220V 正常，由此证明供电电压正常。用万用表电阻挡测量电动机线，发现相线 U 有接触不良现象。打开与电动机相连的插头盖，发现相

线 U 焊脚虚焊，严重打火，焊脚烧焦，更换插头后，故障排除。由此可见，造成驱动器出现 12 号报警的原因是电动机绝缘度降低和相线 U 虚焊，无显示是因为电动机插头打火形成的火花电磁干扰，及其相线虚焊引起相线电流突变形成的电磁干扰，从而引起主板内 DSP 工作异常。

【例 6.22】 某数控机床配置交流伺服 DA98 驱动，车螺纹时，前面几个螺距偏小，中间和后面正常。

根据现象可知，螺纹的螺距并没有乱，只是前面几个偏小。由此可见，从编码器反馈回系统的主轴每转信号和转速信号正常。加工螺纹时，*Z* 轴启动也有一个加速时间常数。一般是由以下原因造成：*Z* 轴加速时间过长，驱动器响应慢。

现场检查，发现刀具离螺纹起点(*Z* 轴方向)比较近，主轴转速比较高，因客户工艺需要，无法做出调整。将 GSK980T 或 GSK990M 参数 29 号(切削进给和受动进给指数加减速时间常数)减小，30 号(切削进给时的指数加减速的低速下限值)、28 号(在螺纹切削中各轴的指数加减速的下限值)加大以后，情况有所改善。于是，调 DA98 参数，提高驱动器的响应能力。将 5 号(速度比例增益)、8 号(速度检测低通)、9 号(位置比例增益)调大，6 号(速度积分常数)数值调小以后加工正常，故障排除。

【例 6.23】 一台数控铣床，空载运行 2h 之后，主轴偶然发生停机，显示 AL-12 或 AL-2 报警。从报警号来看，引起本故障的原因可能是电动机速度偏离指令值和直流回路电流过大。但经检查上述原因都不存在。分析偶发停车现象，说明有些器件工作点处于临界状态，时而正常时而不正常，而这与器件的电源电压有关。所以着重检查直流电源电压。发现+5V，+15V 均正常，而+24V 在+18V～+20V 之间偏低。进一步检查发现，交流输入电压为 190V～200V，而电压设定开关却设定在 220V。因此将电压设定开关设定在 200V 之后系统即恢复正常。造成报警号与实际故障不一样的原因是该主轴伺服单元的报警号还不全面，没有+24V 电压太低的报警，而只有+24V 电压太高的报警。所以只好用其他报警号来显示伺服单元处于不正常的状态。

小　　结

数控机床是一种典型的机电一体化产品，坚持做好数控机床的日常保养和维修工作，可以有效地提高元器件的使用寿命，避免产生或及时消除事故隐患，使机床保持良好的运行状态。

(1) 数控机床的保养。主要包括数控机床日常保养的内容和要求、数控车床的维护保养、加工中心的维护保养、数控系统的使用与维护等。为了使数控机床各部件保持良好状态，除了发生故障应及时修理外，坚持经常的保养是十分重要的。

(2) 数控机床故障诊断与维修。主要包括数控机床维修的基本概念、故障规律、数控机床故障诊断的一般步骤、维修中的注意事项、数控机床常见故障分类、数控机床常用故障诊断方法、数控系统的故障诊断技术、数控系统常见故障的处理、进给伺服系统故障诊断与维修和主轴伺服系统常见故障的处理等，并通过大量典型实例说明了数控机床故障诊断与维修方法。

思考题与习题

1. 数控机床在维修过程中应注意哪些事项？
2. 数控机床日常保养总的说来主要包括哪几个方面？
3. 试述在数控系统日常维护保养中的注意事项。
4. 使用数控机床应注意哪些问题？
5. 根据故障率度，数控机床的整个使用寿命期大致可以分为哪几个阶段？
6. 对数控机床维修工作人员的基本要求是什么？
7. 试述数控机床故障诊断的一般步骤。
8. 数控机床常见故障的分类方法有哪些？
9. 数控机床故障诊断的原则是什么？
10. 数控机床常见的故障检测方法有哪些？
11. 机床进给伺服系统故障报警现象有哪几种？

附录 1　《机床数控技术》缩略语英汉对照

A/D	Analog-to-Digital	模拟/数字
AB	Address Bus	地址总线
AGV	Automated Guided Vehicles	自动制导车辆
APT	Automatically Programmed Tools	自动编程工具
CAD	Computer Aided Design	计算机辅助设计
CAE	Computer Aided Engineering	计算机辅助工程
CAM	Computer Aided Manufacturing	计算机辅助制造
CAPP	Computer Aided Process Planning	计算机辅助工艺规划
CB	Control Bus	控制总线
CIMS	Computer Integrated Manufacturing System	计算机集成制造系统
CLD	Cutter Location Data	刀具位置数据
CNC	Computer Numerical Control	计算机数字控制
CPU	Central Processing Unit	中央处理单元
CRT	Cathode-Ray Tube	阴极射线管
D/A	Digital-to-Analog	数字/模拟
DB	Data Bus	数据总线
DCN	Direct CNC Networking	直接计算机数字控制网络
DDA	Digital Differential Analyzer	数字积分法
DNC	Distributed Numerical Control	分布式数字控制
DTE	Data Terminal Equipment	数据终端设备
EIA	Electronic Industries Association	电子工业联合会
EPROM	Erasable Programmable Read-Only Memory	可擦编程只读存储器
FA	Factory Automatization	工厂自动化
FMC	Flexible Manufacturing Cell	柔性制造单元
FMF	Flexible Manufacturing Factory	柔性制造工厂
FML	Flexible Manufacturing Line	柔性制造线
FMM	Flexible Manufacturing Module	柔性制造模块
FMS	Flexible Manufacturing System	柔性制造系统
GT	Group Technology	成组技术
GTO	Gate Turn-off Thyristors	可关断晶闸管
GTR	Giant Transistors	巨型功率晶体管

(续)

I/O	Input/Output	输入/输出
ISO	International Organization for Standardization	国际标准化组织
LAN	LocalArea Network	工业局部网络
LCD	Liquid Crystal Display	液晶显示器
LED	Low Emitting Diode	发光二极管
LLC	Logical Link Control	逻辑链路控制
MAC	Medium Accessing Control	介质存取控制
MAP	Manufacturing Automation Protocol	制造自动化协议
MC	Machining Centre	加工中心
MCU	Micro programmed Control Unit	微程序控制器
MDI	Manual DATA Input	手动数据输入
MP	Main Programme	主程序
MPC	Microprocessor Programmable Controller	微机可编程控制器
MT	Machine Tools	机床
MTBF	Mean-Time Between Failures	平均故障间隔时间
NCI	NC Intermediary	通用的刀具轨迹文件
PFM	Pulse Frequency Modulation	脉冲频率调制
PIC	Programmable Interface Controller	可编程接口控制器
PID	Proportional-Integral-Differential (Controller)	比例积分微分(控制器)
PLC	Programmable Logic Controller	可编程逻辑控制器
PMC	Programmable Machine Controller	可编程机器控制器
PP	Punched Tape Card Punch	纸带穿孔机
PSC	Programmable Sequence Controller	可编程顺序控制器
PTR	Photoelectricity Punched Tape Reader	光电纸带阅读机
PWM	Pulse Width Modulation	脉冲宽度调制
RAM	Random Access Memory	随机存储器
RLC	Relay Logic Circuit	继电器逻辑电路
ROM	Read Only Memory	只读存储器
SPWM	Sine wave Pulse Width Modulation	正弦波脉冲宽度调制

附录 2　常用刀具的切削参数

附录 2-1　硬质合金车刀粗车外圆及端面的进给量

工件材料	车刀刀杆尺寸 $B\times H$ /mm	工件直径 d /mm	背吃刀量 a_p /mm				
			≤3	>3～5	>5～8	>8～12	>12
			进给量 f /mm·r^{-1}				
碳素钢、合金钢、耐热钢	16×25	20	0.3～0.4	—	—	—	—
		40	0.4～0.5	0.3～0.4	—	—	—
		60	0.5～0.7	0.4～0.6	0.3～0.5	—	—
		100	0.6～0.9	0.5～0.6	0.5～0.6	0.4～0.5	—
		400	0.8～1.2	0.7～1.0	0.6～0.8	0.5～0.6	—
	20×30 25×25	20	0.3～0.4	—	—	—	—
		40	0.4～0.5	0.3～0.4	—	—	—
		60	0.5～0.7	0.5～0.7	0.4～0.6	—	—
		100	0.8～1.0	0.7～0.9	0.5～0.7	0.4～0.7	—
		400	1.2～1.4	1.0～1.2	0.8～1.0	0.6～0.9	0.4～0.6
铸铁 铜合金	16×25	40	0.4～0.5	—	—	—	—
		60	0.5～0.8	0.5～0.8	0.4～0.6	—	—
		100	0.8～1.2	0.7～1.0	0.6～0.8	0.5～0.7	—
		400	1.0～1.4	1.0～1.2	0.8～1.0	0.6～0.8	—
	20×30 25×25	40	0.4～0.5	—	—	—	—
		60	0.5～0.9	0.5～0.8	0.4～0.7	—	—
		100	0.9～1.3	0.8～1.2	0.7～1.0	0.5～0.8	—
		400	1.2～1.8	1.2～1.6	1.0～1.3	0.9～1.1	0.7～0.9

注：1. 加工断续表面及有冲击的工件时，表内进给量应乘系数 k=0.75～0.85。

2. 在无外皮加工时，表内进给量应乘系数 k=1.1。

3. 加工耐热钢及其合金时，进给量不大于 1mm/r。

4. 加工淬硬钢时，进给量应减小。当钢的硬度为 44～56HRC 时，应乘系数 k=0.8；当钢的硬度为 57～62HRC 时，应乘系数 k=0.5。

附录 2-2　按表面粗糙度选择进给量的参考值

工件材料	表面粗糙度 R_a / μm	切削速度范围 v /m·min^{-1}	刀尖圆弧半径 r_ε /mm		
			0.5	1.0	2.0
			进给量 f /mm·r^{-1}		
铸铁、青铜铝合金	>5～10	不限	0.25～0.40	0.40～0.50	0.50～0.60
	>2.5～5		0.15～0.25	0.25～0.40	0.40～0.60
	>1.25～2.5		0.10～0.15	0.15～0.20	0.20～0.35

(续)

工件材料	表面粗糙度 R_a/μm	切削速度范围 v/m·min^{-1}	刀尖圆弧半径 r_ε /mm		
			0.5	1.0	2.0
			进给量 f/mm·r^{-1}		
碳钢及合金钢	>5～10	<50	0.30～0.50	0.45～0.60	0.55～0.70
		>50	0.40～0.55	0.55～0.65	0.60～0.70
	>2.5～5	<50	0.18～0.25	0.25～0.30	0.30～0.40
		>50	0.25～0.30	0.30～0.35	0.30～0.50
	>1.25～2.5	<50	0.10	0.11～0.15	0.15～0.22
		50～100	0.11～0.16	0.16～0.25	0.25～0.35
		>100	>100	0.16～0.20	0.25～0.35

注：r_ε=0.5mm，用于 12mm×12mm 以下刀杆；r_ε=1mm，用于 30mm×30mm 以下刀杆；r_ε=2mm，用于 30mm×45mm 以下刀杆。

附录 2-3　攻螺纹切削用量

加工材料	铸　铁	钢及其合金	铝及其合金
v/m·min^{-1}	2.5～5	1.5～5	5～15

附录 2-4　高速钢钻头加工铸铁的切削用量

材料硬度 / 切削用量 / 钻头直径/mm	160～200HBS		200～400HBS		300～400HBS	
	v m·min^{-1}	f mm·r^{-1}	v m·min^{-1}	f mm·r^{-1}	v m·min^{-1}	f mm·r^{-1}
1～6	16～24	0.07～0.12	10～18	0.05～0.1	5～12	0.03～0.08
6～12	16～24	0.12～0.2	10～18	0.1～0.18	5～12	0.08～0.15
12～22	16～24	0.2～0.4	10～18	0.18～0.25	5～12	0.15～0.2
22～50	16～24	0.4～0.8	10～18	0.25～0.4	5～12	0.2～0.3

注：采用硬质合金钻头加工铸铁时取 v=20 m/min ～30m/min。

附录 2-5　高速钢钻头加工钢件的切削用量

工件材料 / 切削用量 / 钻头直径/mm	σ_b=520 MPa ～700MPa (35、45 钢)		σ_b=700 MPa ～900MPa (15Cr、20Cr)		σ_b=1000 MPa ～1100MPa (合金钢)	
	v /m·min^{-1}	f /mm·r^{-1}	v /m·min^{-1}	f /mm·r^{-1}	v /m·min^{-1}	f /mm·r^{-1}
1～6	8～25	0.05～0.1	12～30	0.05～0.1	8～15	0.03～0.08
6～12	8～25	0.1～0.2	12～30	0.1～0.2	8～15	0.08～0.15
12～22	8～25	0.2～0.3	12～30	0.2～0.3	8～15	0.15～0.25
22～50	8～25	0.3～0.45	12～30	0.3～0.45	8～15	0.25～0.35

附录 2-6　高速钢铰刀铰孔的切削用量

工件材料 / 切削用量 / 钻头直径/mm	铸　铁		钢及其合金		铝铜及其合金	
	v /m•min^{-1}	f /mm•r^{-1}	v /m•min^{-1}	f /mm•r^{-1}	v /m•min^{-1}	f /mm•r^{-1}
6～10	2～6	0.3～0.5	1.2～5	0.3～0.4	8～12	0.3～0.5
10～15	2～6	0.5～1	1.2～5	0.4～0.5	8～12	0.5～1
15～25	2～6	0.8～1.5	1.2～5	0.5～0.6	8～12	0.8～1.5
25～40	2～6	0.8～1.5	1.2～5	0.4～0.6	8～12	0.8～1.5
40～60	2～6	1.2～1.8	1.2～5	0.5～0.6	8～12	1.5～2

注：采用硬质合金铰刀铰铸铁时取 v=8 m/min ～10m/min，铰铝时取 v=12 m/min ～15m/min。

附录 2-7　高速钢硬质合金镗刀镗孔切削用量

工件材料 / 切削用量 / 工 序	铸　铁		钢及其合金		铝铜及其合金	
	v /m•min^{-1}	f /mm•r^{-1}	v /m•min^{-1}	f /mm•r^{-1}	v /m•min^{-1}	f /mm•r^{-1}
粗 镗	20～25 35～50	0.4～1.5	15～30 50～70	0.35～0.7	100～150 100～250	0.5～1.5
半精镗	20～35 50～70	0.15～0.45	15～50 95～135	0.15～0.45	100～200	0.2～0.5
精 镗	70～90	D1 级<0.08 D 级 0.12～0.15	100～135	0.12～0.15	150～400	0.06～0.1

注：当采用高精度的镗头镗孔时，由于余量较小，直径余量不大于 0.2mm，切削速度可提高一些，铸铁件为 100 m/min ～150m/min，钢件为 150 m/min ～250m/min，铝合金为 200 m/min ～400m/min，巴氏合金为 250 m/min ～500m/min。进给量可在 0.03mm/r ～0.1mm/r 范围内。

附录 2-8　铣刀每齿进给量 f_z

工件材料	每齿进给量 f_z /mm•z^{-1}			
	粗　铣		精　铣	
	高速钢铣刀	硬质合金铣刀	高速钢铣刀	硬质合金铣刀
钢	0.10～0.15	0.10～0.25	0.02～0.05	0.10～0.15
铸　铁	0.12～0.20	0.15～0.30		

附录 2-9　硬质合金外圆车刀切削速度的参考数值

工件材料	热处理状态	a_p= 0.3 mm ～2mm f=0.08mm/r ～0.3mm/r v /m•min^{-1}	a_p = 2 mm ～6mm f = 0.3 mm/r ～0.6mm/r v /m•min^{-1}	a_p = 6 mm ～10mm f = 0.6 mm/r ～1mm/r v /m•min^{-1}
低碳钢易切钢	热 轧	140～180	100～120	70～90
中碳钢	热 轧	130～160	90～110	60～80
	调 质	100～130	70～90	50～70
合金结构钢	热 轧	100～130	70～90	50～70
	调 质	80～110	50～70	40～60
工具钢	退 火	90～120	60～80	50～70
灰铸铁	190<HBS	90～120	60～80	50～70
	190～225HBS	80～110	50～70	40～60
高锰钢 w_{Mn} 13%	—	—	10～20	—
铜及铜合金	—	200～250	120～180	90～120
铝及铝合金	—	300～600	200～400	150～200
铸铝合金 w_{si}13%	—	100～180	80～150	60～100

注：切削钢及铸铁时刀具寿命约为 60min。

附录 2-10　陶瓷刀具常用切削用量推荐值

工件材料与工序		刀片牌号	切削速度 v /m·min^{-1}	进给量 f /mm·r^{-1}	背吃刀量 a_p /mm
冷硬铸铁(80≤HS)	粗车	FD01	20～55	0.5～1	0.5～5
	精车	FD04	35～75	0.1～0.5	0.1～0.5
冷硬铸铁(80～90 HS)	半精车	FD01、FD04	10～25	0.2～0.1	0.2～3
调质钢(30～40 HRC)	粗车	FD04	130～150	0.1～0.45	≤3
	精车	FD22	140～200	0.05～0.2	≤0.8
淬硬钢(HRC60～65)	粗车	FD04	20～40	0.1～0.25	≤2
	精车	FD22	35～80	0.05～0.2	≤0.8
各类铸铁(≤300 HBS)	粗车	FD05	150～250	≤3	≤6.5
	精车	FD05	35～80	0.05～1.2	0.1～1
镍基合金(硬镍喷涂层)	车削	FD04、FD01	50～100	0.1～0.45	0.2～2
灰铁 HT20～40(≤300 HBS)	精铣	FD05	1000	0.12～0.15	0.8～1.0

附录 2-11　BN600(住友 CBN)切削用量推荐值

工件材料	切削速度 v_c /m·min^{-1}	进给量 f /mm·r^{-1}	背吃刀量 a_p /mm
冷硬铸铁(60≥HS)	40～120	0.1～0.5	0.2～3.0
高合金铸铁(60≥HS)	40～120	0.1～0.5	0.2～3.0
高速钢(70≥HS)	50～100	0.1～0.4	0.1～2.0
耐热合金	120～180	0.05～0.2	0.1～1.0

附录 2-12　FLD、FJR 刀具切削用量推荐值

刀具材质	适用范围	切削速度 v /m·min^{-1}	进给量 f /mm·r^{-1}	背吃刀量 a_p /mm
FLD (PCBN)	各种淬硬钢(50～67 HRC)	50～150	0.05～0.12	0.2
	普通灰铸铁(200 HBS 左右)	500	0.1～0.5	0.5
	高硬度铸铁(50～64 HRC)	50～100	0.1～0.3	0.5
	粉末冶金零件	80～150	0.03～0.2	1.0
	热喷涂焊零件	50～120	0.1～0.3	0.5
	其他零件(如硬质合金 80～88HRA)	5～40	0.05～0.2	0.3
FJR (PCD)	各种铝合金	100～1000	0.1～0.3	0.3
	各种铜合金	200～500	0.08～0.2	0.3
	木工材料	3000	0.04	12.0
	硬质非金属材料(如陶瓷、玻璃钢等)	10～90	0.1～0.3	0.5

参 考 文 献

[1] 王永章. 数控技术. 北京：高等教育出版社，2001.

[2] 王春海. 数字化加工技术. 北京：化学工业出版社，2003.

[3] 全国数控培训网络天津分中心. 数控编程. 北京：机械工业出版社，1997.

[4] 全国数控培训网络天津分中心. 数控机床. 北京：机械工业出版社，1997.

[5] 于春生. 数控机床编程及应用. 北京：高等教育出版社，2001.

[6] 华茂发. 数控机床加工工艺. 北京：机械工业出版社，2000.

[7] 杜国臣. 数控机床编程. 北京：机械工业出版社，2004.

[8] 彭晓南. 数控技术. 北京：机械工业出版社，2001.

[9] 毕毓杰. 机床数控技术. 北京：机械工业出版社，1995.

[10] 北京第一机床厂. 数控机床及加工中心的编程与操作. 北京：机械工业出版社，1999.

[11] 李佳. 数控机床及应用. 北京：清华大学出版社，2001.

[12] 顾京. 数控机床加工程序编制. 北京：机械工业出版社，1997.

[13] 晏初宏. 数控机床. 北京：机械工业出版社，2002.

[14] 李善术. 数控机床及其应用. 北京：机械工业出版社，1998.

[15] FANUC SYSTEM 操作说明书. 北京：北京发那科公司，1999.

[16] 许祥泰. 数控加工编程实用技术. 北京：机械工业出版社，2002.

[17] 杨伟群. 数控工艺员培训教程. 北京：清华大学出版社，2002.

[18] 罗学科. 数控机床编程与操作实训. 北京：化学工业出版社，2001.

[19] 陶瓷刀具使用手册. 北京：北京方大高技术陶瓷有限公司，2003.

[20] 李宏胜. 机床数控技术及应用. 北京：机械工业出版社，2003.

[21] 张超英. 数控机床加工工艺. 北京：机械工业出版社，2003.

[22] 龚仲华. 数控技术. 北京：机械工业出版社，2004.

[23] 李郝林. 机床数控技术. 北京：机械工业出版社，2004.

[24] 陈志雄. 数控机床与数控编程技术. 北京：电子工业出版社，2003.

[25] 王洪. 数控加工程序编制. 北京：机械工业出版社，2003.

[26] 张超英. 数控加工综合实训. 北京：化学工业出版社，2003.

[27] 张导成. 三维 CAD/CAM——Master CAM 应用. 北京：机械工业出版社，2003.

[28] 廖卫献. 数控铣床及加工中心自动编程. 北京：国防工业出版社，2002.

[29] 王隆太. 先进制造技术. 北京：机械工业出版社，2003.

[30] 关美华. 数控技术——原理及现代控制系统. 成都：西南交通大学出版社，2003.

[31] 董玉红. 数控技术. 北京：高等教育出版社，2004.

[32] 张俊生. 金属切削机床与数控机床. 北京：机械工业出版社，2001.

[33] 林宋. 现代数控机床. 北京：化学工业出版社，2003.

[34] 刘启中. 现代数控技术及应用. 北京：机械工业出版社，2000.

[35] 严爱珍. 机床数控原理与系统. 北京：机械工业出版社，1999.