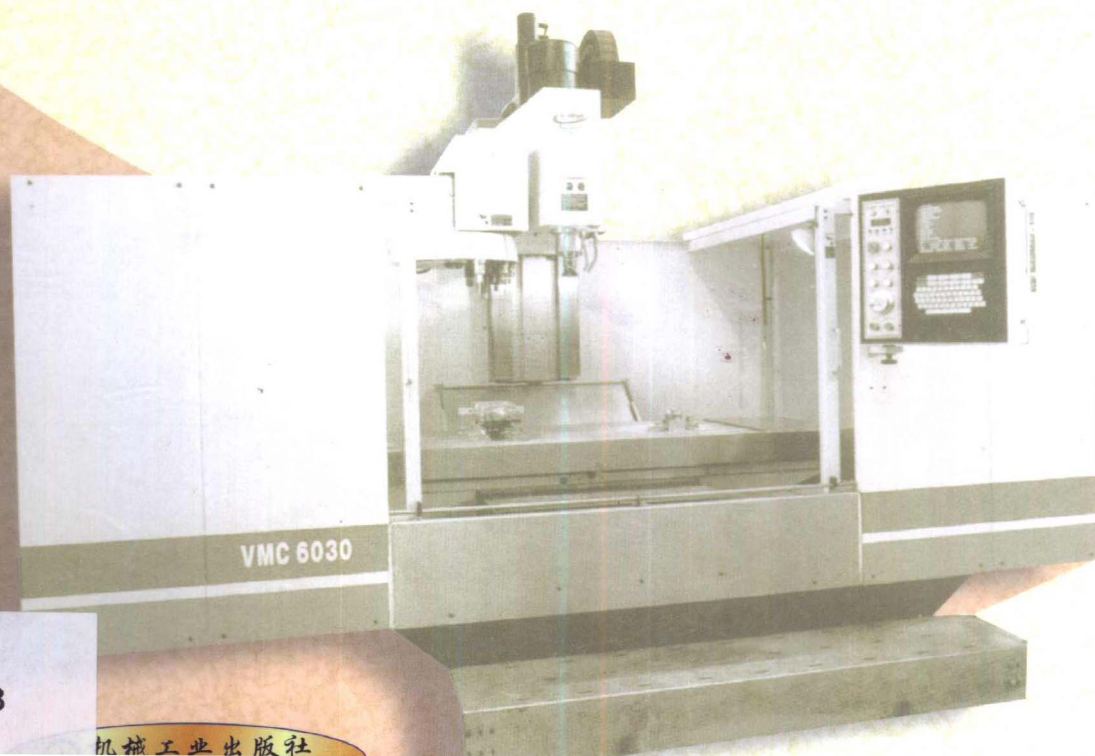


普通高等教育机电类规划教材

# 数控机床 编程技术

逯晓勤 李海梅 申长雨 编著



本书全面、系统地介绍了数控机床编程技术,包括数控机床的基本工作原理,数控编程中的数值计算,数控铣床、数控钻镗床、加工中心、数控车床、数控线切割等机床的手工编程方法,及利用APT数控语言进行数控加工的辅助编程技术和利用最新的CAD/CAM软件进行数控加工自动编程处理技术。本书实例丰富,深入浅出,易于理解和掌握。宜作为大专院校高年级本科生、研究生专业课教材,也可作为机械加工制造及电气自动化行业广大科研、技术人员的自学用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

数控机床编程技术/逯晓勤等编著. —北京:机械工业出版社, 2002.2

普通高等教育机电类规划教材

ISBN 7-111-09866-8

I. 数... II. 逯... III. 数控机床—程序设计—高等学校—教材 IV. TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第006625号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:季顺利、刘小慧 版式设计:张世琴 责任校对:李秋荣

封面设计:鞠杨 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002年4月第1版·第1次印刷

1000mm×1400mm B5·6.75印张·260千字

0 001—5 000册

定价:16.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
本社购书热线电话(010) 68993821、68326677-2527

# 前 言

近几年来,机械制造领域正随着数控技术及计算机辅助设计、分析、制造(CAD/CAE/CAM)技术的普及与提高发生着根本性的变化,数控技术已经成为衡量一个加工制造企业技术水平乃至一个国家工业化水平的重要标志之一。其中,数控机床是加工制造行业体现数控技术的重要组成部分,而数控编程则是数控机床实现数控加工的必要前提。因此,数控加工编程人员则成为当前各制造行业急需之人才。编者从近年来要求选修该专业课的学生人数急增的现象中深刻感受到了这一点。

编者多年来从事计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)的研究开发及数控加工编程技术的教学工作,每年在为本科高年级学生挑选教材时总感到不尽人意,虽然数控编程类的书籍琳琅满目,却很难选出适合工科院校高年级学生用的教材来。有的对机床硬件、线路论述过多,偏重于数控原理;有的则偏重于数值计算原理,论述推导过多;有的仅介绍一两种数控机床的编程方法,内容过窄;有的则是面向中等专科学校的学生及企业技术人员,内容过浅;而大部分教材无习题供学生思考和练习。所以在授课过程中总要补充大量的内容和习题。现应广大学生要求,决定将多年不断积累更新的教案整理成册。

本书内容涉及面广,不仅包括数控铣、数控钻镗、加工中心、数控车、线切割等数控机床手工编程的数值计算原理和编程的方法步骤,还介绍了利用APT数控语言进行数控加工的辅助编程技术,以及使用CAD/CAM软件进行数控加工自动编程的操作处理。其特点:有深度,有广度,实例丰富,习题充足,便于理解和掌握。宜作为工科院校高年级学生教材及企业广大技术人员的自学用书。

本书在编写过程中得到了国家橡塑模具工程研究中心及模具教研室领导和同事们的大力支持和帮助;书中部分内容得到了河南自然科学基金项目(豫科004060400)的大力支持;关绍康教授审阅了书稿,并提出了宝贵意见;本书还借鉴了同类书刊的长处和精华。谨在此一并表示真诚地感谢!

参加本书编写的有:逯晓勤、李海梅、申长雨、刘保臣、翟震、杨广军、郝向丽、易文、王亚明、应进等同志。全书由逯晓勤、李海梅、申长雨统稿。

限于编者水平,书中难免出现疏漏和错误,敬请专家、读者批评指正。

编者

2001年10月

# 目 录

## 前言

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| <b>第一章 数控机床概述</b> .....     | 1  |
| 第一节 数控机床的基本工作原理 .....       | 1  |
| 第二节 数控机床分类 .....            | 4  |
| 第三节 数控机床发展概况 .....          | 8  |
| 思考与练习 .....                 | 11 |
| <b>第二章 数控编程中的数值计算</b> ..... | 12 |
| 第一节 平面轮廓切削点的计算 .....        | 13 |
| 第二节 平面轮廓加工中刀具中心位置的计算 .....  | 17 |
| 第三节 空间曲线曲面加工的数值计算 .....     | 19 |
| 思考与练习 .....                 | 23 |
| <b>第三章 数控编程基础</b> .....     | 25 |
| 第一节 程序编制步骤 .....            | 25 |
| 第二节 程序格式 .....              | 28 |
| 第三节 主要功能指令 .....            | 30 |
| 第四节 编程中的几个重要概念 .....        | 33 |
| 思考与练习 .....                 | 37 |
| <b>第四章 数控铣床编程</b> .....     | 39 |
| 第一节 数控铣床常用指令 .....          | 39 |
| 第二节 数控铣床编程实例 .....          | 50 |
| 思考与练习 .....                 | 53 |
| <b>第五章 数控钻镗床编程</b> .....    | 56 |
| 第一节 孔加工固定循环指令 .....         | 56 |
| 第二节 数控钻镗床编程实例 .....         | 63 |
| 思考与练习 .....                 | 66 |
| <b>第六章 加工中心编程</b> .....     | 68 |
| 第一节 加工中心编程特点 .....          | 70 |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 第二节 加工中心编程实例 .....            | 73         |
| 思考与练习 .....                   | 78         |
| <b>第七章 数控车床编程 .....</b>       | <b>81</b>  |
| 第一节 数控车床编程基础 .....            | 81         |
| 第二节 数控车床编程实例 .....            | 95         |
| 思考与练习 .....                   | 98         |
| <b>第八章 数控线切割编程 .....</b>      | <b>101</b> |
| 第一节 数控线切割加工概述 .....           | 101        |
| 第二节 数控线切割编程特点 .....           | 107        |
| 第三节 数控线切割编程实例 .....           | 115        |
| 思考与练习 .....                   | 118        |
| <b>第九章 APT 数控语言辅助编程 .....</b> | <b>120</b> |
| 第一节 APT 语言的基本组成 .....         | 120        |
| 第二节 几何定义语句 .....              | 127        |
| 第三节 刀具运动语句 .....              | 137        |
| 第四节 后置处理语句及其他语句 .....         | 151        |
| 第五节 编程实例 .....                | 154        |
| 思考与练习 .....                   | 158        |
| <b>第十章 数控自动编程应用简介 .....</b>   | <b>162</b> |
| 第一节 CAD/CAM 技术概述 .....        | 162        |
| 第二节 MasterCAM 造型基本方法 .....    | 165        |
| 第三节 刀具轨迹生成和后置处理 .....         | 178        |
| 第四节 MasterCAM 综合应用实例 .....    | 195        |
| 思考与练习 .....                   | 207        |
| 参考文献 .....                    | 209        |

# 第一章 数控机床概述

## 第一节 数控机床的基本工作原理

**数控：**数字控制 (Numerical Control——NC)，在机床领域指用数字化信号对机床运动及其加工过程进行控制的一种自动化技术。它所控制的一般是位置、角度、速度等机械量，但也有温度、流量、压力等物理量。

**计算机数控：**(Computerized Numerical Control——CNC，又称 Micro Computerized Numerical Control——MNC)是用一个存储程序的专用计算机由控制程序来实现部分或全部基本控制功能，并通过接口与各种输入输出设备建立联系。更换不同的控制程序，可以实现不同的控制功能。

**数控机床：**采用了数控技术的机床或者说装备了数控系统的机床。

### 一、数控机床的组成

数控机床主要由机床本体、数控系统、驱动装置、辅助装置等几个部分组成。

**机床本体** 是数控机床加工运动的机械部分，主要包括支承部件（床身、立柱等）、主运动部件（主轴箱）、进给运动部件（工作台滑板、刀架）等。

**数控系统**（CNC 装置）是数控机床的控制核心，一般是一台专用的计算机。

**驱动装置** 是数控机床执行机构的驱动部分，包括主轴电动机、进给伺服电动机等。

**辅助装置** 指数控机床的一些配套部件，包括刀库、液压装置、气动装置、冷却系统、排屑装置、夹具、换刀机械手等。

机床数控系统的基本工作流程如图 1-1 所示。机床数控系统是由加工指令程序、计算机控制装置、可编程逻辑控制器、主轴进给驱动装置、速度控制单元及位置检测装置等组成。其核心部分是计算机控制装置。

计算机控制装置由硬件和软件两部分组成。硬件的主体是计算机，包括中央处理器、输入输出部分和位置控制部分。软件有管理软件和控制软件。管理软件包括输入输出、显示和诊断程序等。控制软件包括译码、刀具补偿、速度控制、插补运算和位置控制等程序。

#### 1. 数控系统的基本功能

数控系统即位置控制系统，具有三个基本功能：

(1) 输入功能 指零件加工程序和各种参数的输入。

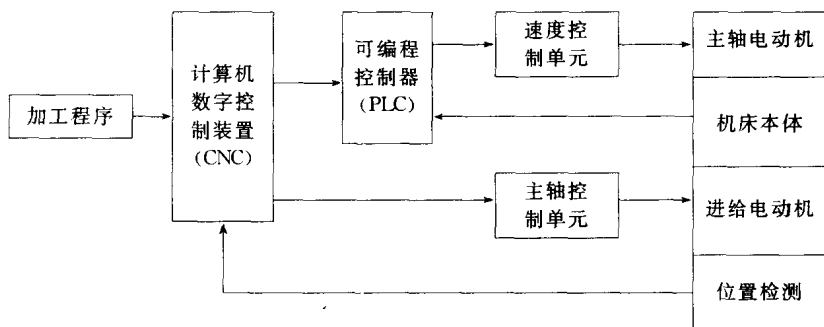


图 1-1 机床数控系统基本工作流程

(2) 插补功能 在加工零件的实际轮廓或轨迹的已知点之间确定一些中间点的方法。通常在给定直线或圆弧的起点和终点之间插补中间点。插补方法主要有两种：

1) 脉冲增量法。其特点是：每次插补运算产生一个进给脉冲，输出脉冲的最大速率取决于执行一次插补运算所需要的时间，这种方法适用于步进电动机驱动的开环数控系统，进给速率比较低。

2) 数字增量法。其特点是：整个控制系统通过计算机形成闭环，计算机定时采样反馈的实际位置，将采样结果与插补生成的指令数据进行比较，求得误差信号，进而给出主轴进给速度指令。这种方法适用于直、交流伺服电动机驱动的位置采样控制系统。

(3) 伺服控制 将计算机送出的位置进给脉冲或进给速度指令，经变换和放大后化为伺服电动机（步进或直、交流电动机）的转动，从而带动机床工作台移动。

## 2. 数控系统的工作过程

对输入的零件加工程序、控制参数、补偿数据等进行识别和译码，并执行所需要的逻辑运算，发出相应的指令脉冲，控制机床的驱动装置，操作机床实现预期的加工功能。

### 3. 主轴控制单元

主要控制机床主轴的旋转运动。

### 4. 速度控制单元

进给驱动装置是由交、直流电动机、速度检测元件和速度控制元件组成。速度控制单元主要控制机床各坐标轴的切削进给运动。

### 5. 可编程逻辑控制器 (Programmable Logical Controller——PLC)

这是一种专为在工业环境下应用而设计的数字运算操作电子系统。PLC 处于计算机控制装置与机床之间，对计算机控制装置和机床的输入输出信号进行处理，

实现辅助功能 M、主轴转速 S 及刀具功能 T 的控制和译码。即按照预先规定的逻辑顺序对诸如主轴的起动、停止、转向、转速、刀具的更换、工件的夹紧松开、液压、冷却、润滑、气动等进行控制。

## 二、数控机床加工的基本工作原理

数控机床加工时，是根据工件图样要求及加工工艺过程，将所用刀具及机床各部件的移动量、速度及动作先后顺序、主轴转速、主轴旋转方向及冷却等要求，以规定的数控代码形式，编制成程序单，并输入到机床专用计算机中。然后，数控系统根据输入的指令，进行编译、运算和逻辑处理，输出各种信号指令，控制机床各部分进行规定的位移和有顺序的动作，加工出各种不同形状的工件。

## 三、数控机床加工特点

### 1. 适应性强

数控机床灵活、通用、万能，可加工不同形状的工件，能完成钻、镗、铰、铣削、车削、攻螺纹等加工。

### 2. 精度高

目前数控装置的脉冲当量(每输出一个脉冲后滑板的移动量称为脉冲当量)一般为 0.001mm，高精度的数控系统可达 0.0001mm。而切削进给传动链的反向间隙与丝杠螺距误差等均可由数控装置进行补偿，因此，数控机床能达到比较高的加工精度，一般可达 0.005~0.1mm。对于中、小型数控机床，定位精度普遍可达到 0.03mm，重复定位精度为 0.01mm。数控机床的自动加工方式不但可避免人工操作误差，使工件加工的质量稳定，更重要的是可进行复杂曲面的加工。

### 3. 效率高

与普通机床相比可提高生产效率 3~5 倍。对于复杂成形面的加工，生产效率可提高十倍，甚至几十倍。

### 4. 减轻劳动强度、改善劳动条件

利用数控机床进行加工，只需按图样要求编制加工程序，然后输入并调试程序，安装坯件进行加工，观察监视加工过程并装卸零件。除此之外，不需要进行繁重的重复性手工操作，劳动强度与紧张程度可大为减轻，劳动条件也相应得到改善。

## 四、数控机床的应用范围

数控机床是一种高度自动化的机床，有一般机床所不具备的许多优点，所以数控机床的应用范围在不断扩大，但数控机床的技术含量高，成本高，使用维修都有一定难度，若从最经济的方面考虑，数控机床适用于加工：

- 1) 多品种小批量零件（合理生产批量为 10~100 件之间）；
- 2) 结构较复杂，精度要求较高或必须用数学方法确定的复杂曲线、曲面等零件；

- 3) 需要频繁改型的零件;
- 4) 钻、镗、铰、铤、攻螺纹及铣削工序联合进行的零件, 如箱体、壳体等;
- 5) 价格昂贵, 不允许报废的零件;
- 6) 要求百分之百检验的零件;
- 7) 需要最小生产周期的急需零件。

## 第二节 数控机床分类

数控机床种类很多, 如铣削类、钻铰类、车削类、磨削类、线切割、加工中心等 (图 1-2)。其分类方法也很多, 大致有以下几种:

### 一、按控制刀具与工件相对运动轨迹分类

1. 点位控制 (Point to Point Control) 或位置控制 (Positioning) 数控机床  
这类机床只能控制工作台或刀具从一个位置精确地移动到另一位置, 在移动过程中不进行加工, 各个运动轴可以同时移动, 也可以依次移动, 见图 1-3a。如数控镗、钻、冲, 数控点焊机及数控折弯机等均属此类机床。

### 2. 轮廓控制 (Contouring Control) 数控机床

这类机床能够同时对两个或两个以上坐标轴进行连续控制, 具有插补功能, 工作台或刀具边移动边加工, 见图 1-3b、c。如数控铣、车、磨及加工中心等是典型的轮廓控制数控机床, 数控火焰切割机、数控线切割及数控绘图机等也都采用轮廓控制系统。

### 二、按加工方式分类

- 1) 金属切削类: 如数控车、钻、镗、铣、磨、加工中心等。
- 2) 金属成形类: 如数控折弯机、弯管机、四转头压力机等。
- 3) 特殊加工类: 如数控线切割、电火花、激光切割机等。
- 4) 其他类: 如数控火焰切割机、三坐标测量机等。

### 三、按控制坐标轴数分类

- 1) 两坐标数控机床: 两轴联动, 用于加工各种曲线轮廓的回转体, 如数控车床。
- 2) 三坐标数控机床: 三轴联动, 多用于加工曲面零件, 如数控铣床、数控磨床。
- 3) 多坐标数控机床: 四轴或五轴联动, 多用于加工形状复杂的零件。图 1-4 为两种不同类型的四轴联动数控机床。

### 四、按驱动系统的控制方式分类

1. 开环控制 (Opened Loop Control) 数控机床  
开环控制数控机床的工作原理如图 1-5 所示:

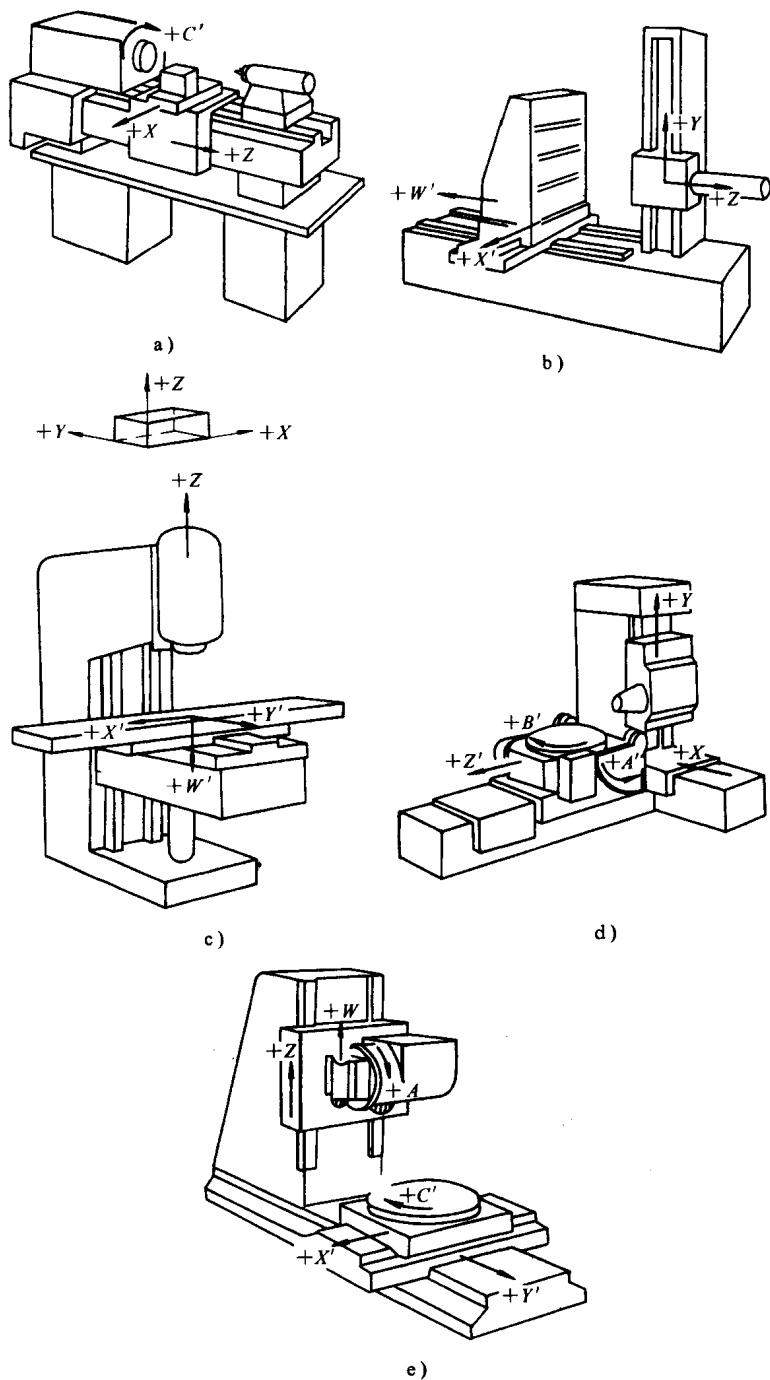


图 1-2 常用数控机床

- a) 数控车床 b) 数控卧式镗床 c) 数控立式升降台铣床  
d) 五坐标摆动工作台铣床 e) 五坐标摆头铣床

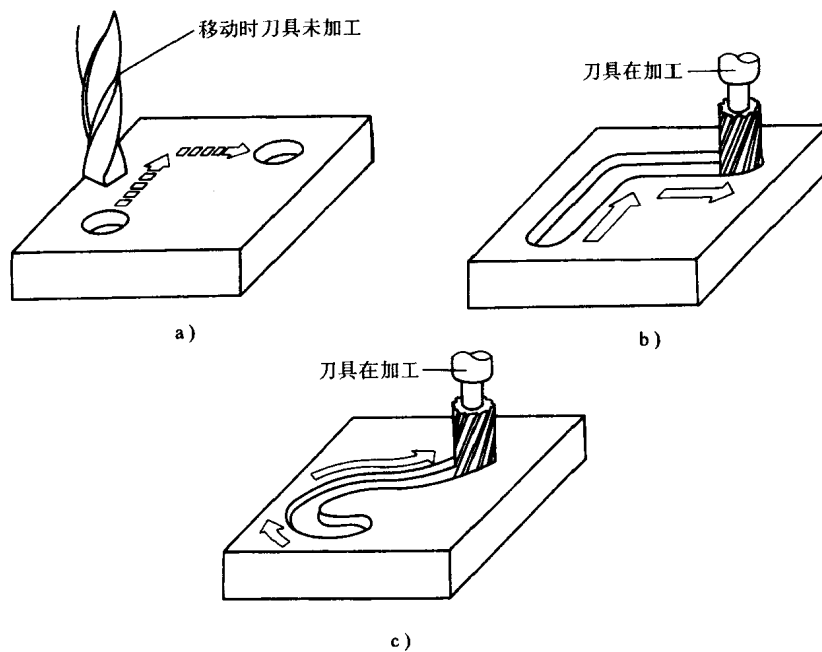


图 1-3 运动轨迹控制  
a) 点位控制 b) 直线控制 c) 轮廓控制

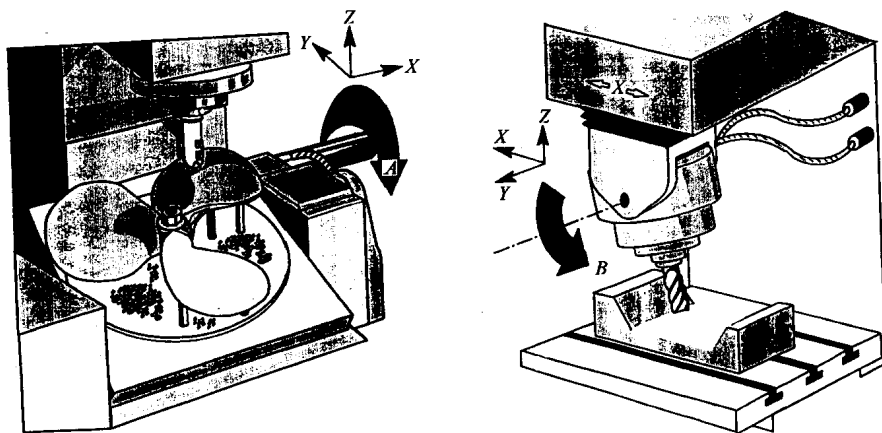


图 1-4 四轴联动数控机床



图 1-5 开环驱动控制系统

这类机床不带位置检测反馈装置，通常使用功率步进电动机或电液脉冲马达作为执行机构，数控装置输出的脉冲通过环形分配器和驱动电路，使步进电动机转过相应的步距角，再经过减速齿轮带动丝杠旋转，最后转换为移动部件的直线位移。其反应快，调试方便，比较稳定，维修简单。但系统对移动部件的误差没有补偿和校正，步进电动机的步距误差、齿轮与丝杠等的传动链误差都将反映到被加工零件的精度中去，所以精度比较低。此类数控机床多为经济类机床。

### 2. 闭环控制（Closed Loop Control）数控机床

这类机床带有检测反馈装置，位置检测器安装在机床运动部件上，加工中将监测到的实际运行位置值反馈到数控装置中，与输入的指令位置相比较，用差值对移动部件进行控制，其精度高。从理论上说，闭环系统的控制精度主要取决于检测装置的精度，但这并不意味着可以降低机床的结构与传动链的要求，传动系统的刚性不足及间隙、导轨的爬行等各种因素将增加调试的困难，严重时会使闭环控制系统的品质下降甚至引起振荡。故闭环系统的设计和调整都有较大的难度，此类机床主要用于一些精度要求较高的镗铣床、超精车床和加工中心等。闭环控制数控机床的工作原理如图 1-6 所示。

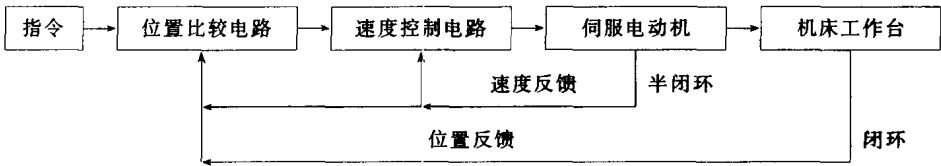


图 1-6 闭环与半闭环驱动控制系统

### 3. 半闭环控制（Semi-closed Loop Control）数控机床

半闭环控制数控机床与闭环控制不同的是，检测元件安装在电动机的端头或丝杠的端头。该系统不是直接测量工作台的位移量，而是通过检测丝杠或电动机轴上的转角间接地测量工作台的位移量，然后反馈给数控装置。显然，半闭环控制系统的实际控制量是丝杠的转动，而由丝杠转动变换为工作台的移动，不受闭环的控制，这一部分的精度由丝杠—螺母（齿轮）副的传动精度来保证。其特点是比较稳定，调试方便，精度介于开闭环之间，被广泛采用。

### 第三节 数控机床发展概况

#### 一、工业化国家数控机床的发展概况

数控机床的研制最早是从美国开始的。1952年帕森斯公司和麻省理工学院合作研制成功了世界第一台三坐标数控铣床,它用来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 and 直线插补与轮廓控制的数控铣床,专用计算机使用电子管元件,经过三年的改进与自动编程研究,1955年进入实用阶段,在复杂曲面的加工中发挥了重要作用。但由于技术上和价格上的原因,只局限在航空工业中应用。

随着电子技术的不断发展,数控系统也不断地更新换代。由使用电子管过渡到晶体管、印制电路及小规模集成电路,数控系统的可靠性得到了进一步提高。但上述专用计算机都是采用硬接线数控系统,使用局限性大,属一般数控系统,即所谓的 NC。

20世纪70年代初,计算机技术的发展使得用小型计算机代替专用计算机在经济上成为可能。数控的许多功能可以用编制的专用程序来实现,而这些专用程序可以存储在小型计算机的存储器中,这就是所谓的软接线数控,即计算机控制系统 CNC。微处理器的诞生使得 CNC 系统的控制功能大部分由软件技术来实现,其可靠性进一步提高,功能更加完善,性能价格比大为提高,使数控机床产生了一个大的飞跃。

进入20世纪80年代,数控机床进一步发展。近年来具有代表性的数控系统如下:

#### 1. 计算机直接控制系统 (Direct Numerical Control——DNC)

计算机直接控制系统又称群控。其特点是:使用计算机对生产过程加强管理,使程序的编制、生产的准备与计划安排等工作和机床工作协调一致,以提高各个数控机床的使用效率。

#### 2. 自适应控制机床 (Adaptive Control——AC)

一般数控机床,是按预先编好的程序进行加工的。但在编程时,实际上有许多参数只能参照过去的经验数据来决定,不可能准确地考虑到它们的一切变化,如毛坯的不均匀,刀具与工件材质的变化,刀具的磨损,工件的变形,热传导性的差别等等,这些变化直接或间接地影响着加工质量,使加工不能在最佳状态下进行。如果控制系统能对实际加工中的各种加工状态的参数及时地测量并反馈给机床进行修正,则可使切削过程随时都处在最佳状态。所谓最佳状态,指的是最高生产率、最低加工成本、最好的加工质量等。由于 CNC 系统自身带有计算机,只要加上相应的检测元件、控制线路和有关软件就可以制造出这种自适应控制机床。

### 3. 柔性制造系统 (Flexible Manufacturing System——FMS)

柔性制造系统是在柔性制造单元 (FMC——Flexible Manufacturing Cell) 基础上研制和发展起来的。柔性制造单元是一种在人的参与减到最少时, 能连续地对同一组零件内不同的工件进行自动化加工 (包括工件在单元内部的运输和交换) 的最小单元。它既可以作为独立使用的加工设备, 又可以作为更大更复杂的柔性制造系统或柔性自动线的基本组成模块。柔性制造系统是由加工系统 (由一组数控机床和其他自动化工艺设备, 如清洗机、成品试验机、喷漆机等组成)、智能机器人、全自动输送系统及自动化仓库组成 (见图 1-7)。这种系统可按任意顺序加工一组不同工序与不同加工节拍的工件, 工艺流程可随工件不同而调整, 全部生产过程由一台中央计算机进行生产程序的调度, 若干台计算机进行工位控制。其中各个制造单元相对独立, 能适时地平衡资源的利用。

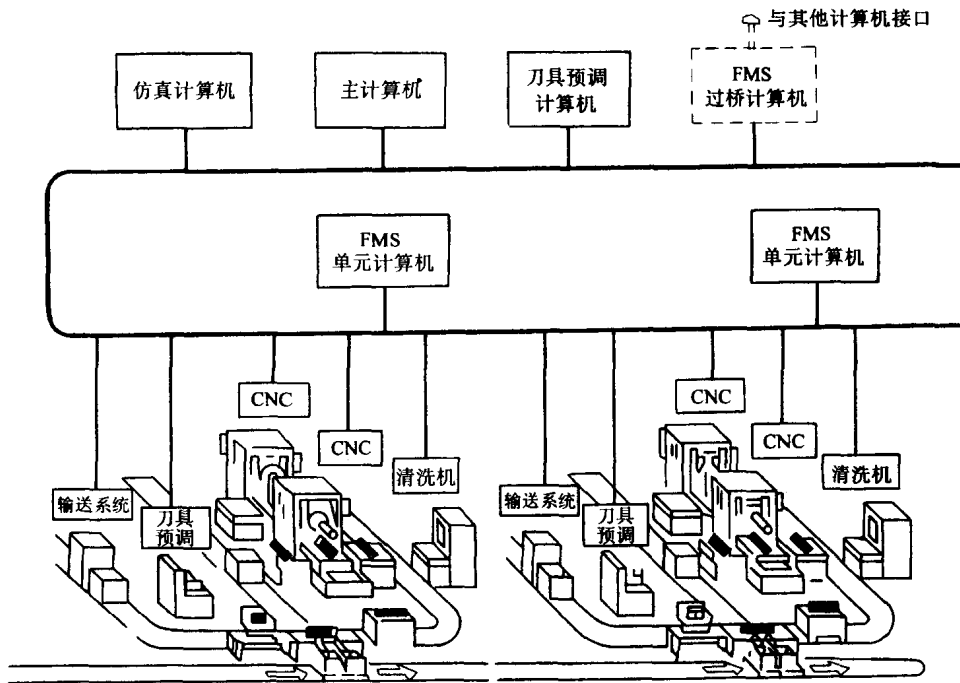


图 1-7 柔性制造系统

### 4. 计算机集成生产系统 (Computer Integrated Manufacturing System——CIMS)

为实现整个生产过程自动化, 人们正着手研制包括计划设计、工艺、加工、装配、检验、销售等全过程都由计算机控制的集成生产系统。它具有计算机控制的自动化信息流和物质流, 对产品的构思和设计直到最终装配、检验这一全过程进

行控制，以实现工厂自动化这一伟大的目标。

## 二、我国数控机床的发展概况

我国数控机床的研制始于1958年，由清华大学研制出了最早的样机。1966年诞生了第一台用于直线—圆弧插补的晶体管数控系统。1970年北京第一机床厂的XK5040型数控升降台铣床作为商品，小批量生产并推向市场。但由于相关工业基础差，尤其是数控系统的支撑工业——电子工业薄弱，致使在1970~1976年间开发出的加工中心、数控镗床、数控磨床及数控钻床因系统不过关，多数机床没有在生产中发挥作用。

20世纪80年代前期，在引入了日本FANUC数控技术后，我国的数控机床才真正进入小批量生产的商品化时代。

目前我国已经有自主知识产权的数控系统，但绝大多数全功能数控机床还是采用国外的CNC系统。从机床的整体来看，无论是可靠性、精度、生产效率和自动化程度，与国外相比，还存在着不小的差距。

## 三、数控机床的发展趋势

未来数控机床的发展趋势主要表现在以下三个方面：

### 1. 数控技术水平

高精度 定位精度微米级、纳米级；

高速度 主轴转速10000r/min、快速进给100m/min、换刀时间2~3s；

高柔性 多主轴、多工位、多刀库；

多功能 立卧并用、复合加工；

高自动化 自动上下料、自动监控、自动测量、自动通信。

对单台主机不仅要求提高其柔性和自动化程度，还要求其具有进入更高层次的柔性制造系统和计算机集成制造系统的适应能力。

### 2. 数控系统方面

目前世界上几个著名的数控装置生产厂家，如日本的FANUC、德国的SIEMENS和美国的AB公司产品都在向系列化、模块化、高性能和成套性方向发展。它们的数控系统都采用了16位、32位甚至64位微处理器、标准总线及软件模块和硬件模块结构，内存容量扩大到了数十兆字节以上，机床分辨率可达 $0.1\mu\text{m}$ ，高速进给可达100m/min以上，一般控制轴数在3~15轴，最多可达24轴，并采用先进的电装工艺。

### 3. 驱动系统方面

交流驱动系统发展迅速，交流传动系统已由模拟式向数字式方向发展，以运算放大器等模拟器件为主的控制器正在被以微处理器为主的数字集成元件所取代，从而克服了零点漂移、温度漂移等弱点。

## 思考与练习

1. 数控机床有哪几部分组成？
2. 数控机床有哪些类型？
3. 数控机床加工有哪些特点？
4. 何谓点位控制及轮廓控制，所用的数控机床有何不同？
5. 何谓开环控制系统、闭环控制系统和半闭环控制系统，它们各有何特点？
6. 试述数控机床加工的基本工作原理。

## 第二章 数控编程中的数值计算

数控机床的控制系统主要进行的是位置控制，即控制刀具的切削位置。数控编程的主要工作就是把加工过程中刀具移动的位置按一定的顺序和方式编写成程序单，输入机床的控制系统，操纵加工过程。刀具移动位置是根据零件图样，按照已经确定的加工路线和允许的加工误差（即容差：用插补线段逼近实际轮廓曲线时允许存在的误差）计算出来的。这一工作称为数控加工编程中的数值计算。数值计算主要用于手工编程时的轮廓加工。

数控加工编程中的数值计算主要包括：零件轮廓中几何元素的基点、插补线段的节点、刀具中心位置及一些辅助计算等内容。

### 1. 基点

基点就是构成零件轮廓的各相邻几何元素之间的交点或切点。如两直线的交点、直线与圆弧的交点或切点、圆弧与二次曲线的交点或切点等等，均属基点。一般来说，基点的坐标根据图样给定的尺寸，利用一般的解析几何或三角函数关系不难求得。

### 2. 节点

节点是在满足容差要求条件下用若干插补线段（如直线段或圆弧段等）去逼近实际轮廓曲线时，相邻两插补线段的交点。节点的计算比较复杂，方法也很多，是手工编程的难点。有条件时，应尽可能借助于计算机来完成，以减少计算误差并减轻编程人员的工作量。

一般称基点和节点为切削点，即刀具切削部位必须切到的点。

### 3. 刀具中心位置

刀具中心位置是刀具相对于每个切削点刀具中心所处的位置。因为刀具都有一定的半径，要使刀具的切削部位切过轮廓的基点和节点，必须对刀具进行一定的偏置。对于没有刀具偏置功能的数控系统，应计算出相对于基点和节点的刀具中心位置轨迹。对于具有刀具偏置功能的数控系统，加工某些内腔型面时，往往也要求计算出刀具中心轨迹的坐标数据。

### 4. 辅助计算

辅助计算包括以下内容：

(1) 增量计算 对于增量坐标的数控系统，应计算出后一节点相对前一节点的增量值。

(2) 脉冲数计算 数值计算是以毫米为单位进行的，而数控系统若要求输入