



21st CENTURY  
规划教材

全国高职高专数控模具规划教材

# 数控编程技术

陈志雄 余小燕 主编

熊裕文 周金元 陈向东 明平贵 副主编

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书主要介绍数控车床、数控铣床、加工中心的操作及数控系统的功能,结合实例详细阐述了数控机床的手工编程方法,重点讲述了FANUC、SIEMENS、华中数控系统的编程方法。

全书共7章,内容包括数控技术的发展,数控机床的工作原理、组成及分类,常用的数控系统,数控加工程序编制的基本知识,机床的操作方法,常用指令,数控车床、数控铣床、加工中心程序的编制方法等。

本书可以作为高等职业院校数控应用专业、模具设计与制造专业、机电一体化专业教材,也可作为广大自学者及工程技术人员自学用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

数控编程技术/陈志雄,余小燕主编. —北京:科学出版社,2005  
(全国高职高专数控模具规划教材)

ISBN 7-03-016117-3

I. 数… II. ①陈… ②余… III. 数控机床-程序设计-高等学校:技术学校-教材 IV. TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第090734号

---

责任编辑:李昱颀 潘新文/责任校对:柏连海

责任印制:吕春珉/封面设计:万千广告公司

**科学出版社** 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

http://www.sciencep.com

**双青印刷厂** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2005年8月第一版 开本:787×1092 1/16

2006年6月第三次印刷 印张:10 1/4

印数:6 001—10 000 字数:222 000

**定价:14.00元**

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62138978-8208 (VT03)

# 全国高职高专数控模具规划教材

## 编 委 会

主 编 李振格

副主任 (按姓氏笔画排序)

王贤涛 余小燕 张红英 陈志雄 柳舟通

委 员 (按姓氏笔画排序)

丁晚景 王利荣 王希华 邓德清 刘美玲  
李年芬 李昱颀 李雪早 何 伟 余冬蓉  
陆全龙 周金元 徐江林 黄卫红 龚洪浪  
程燕军 雷才洪 廖建刚 熊南峰

## 本书编写人员

主 编 陈志雄 余小燕

副主编 熊裕文 周金元 陈向东 明平贵

撰稿人 (按姓氏笔画排序)

刘 然 肖 仁 余小燕 陈向东 陈志雄  
明平贵 周金元 范锦峰 熊裕文

# 前 言

数控技术是制造业实现自动化、柔性化、集成化生产的基础，数控技术的应用是提高制造业产品质量和劳动生产率必不可少的重要手段，数控机床是国防工业现代化的重要战略装备，是关系到国家战略地位和体现国家综合国力水平的重要标志。因此有专家说：21世纪机械制造业的竞争，实质上是数控技术和数控人才的竞争。目前，我国数控机床的操作技术工人缺口达60多万，数控编程、数控机床操作和维护人员更是严重不足。尤其是专业理论知识层次较高和具备一定动手能力的高级复合型技能人才更加紧缺，在企业中所占比例不足5%。因此，急需培养一大批能够熟练掌握现代数控机床编程、操作和维护的应用型高级技术人才。在此基础上，同时也为了适应我国高等职业技术教育发展及应用型技术人才培养的需要，编写了这本教材。

在编写过程中，我们从高等职业教育的实际出发，以培养技术应用型人才为目的，在理论上不作过多的阐述，而加强了职业的针对性和技术的实用性。

本书主要介绍了数控加工程序的编制方法。在编写过程中，结合实际情况，同时也为了适应市场的需要，在数控系统选型上，考虑了市场占有率，选用华中数控系统、FANUC、SIEMENS等公司的数控系统，并以华中数控系统为主线编写。

全书共7章，大约需72学时，读者可根据自己的实际情况决定内容的取舍。

在本书的编写过程中，得到了湖北职业技术学院国家数控培训中心、华中数控股份有限公司的大力支持。另外，乔福机械工业股份有限公司（国内）副总经理杨子仪先生为作者编写教材提出了许多宝贵的意见和建议，并提供了丰富的资料，在此一并致谢。

由于数控技术发展迅速，编者水平有限，所以本书难免有不足之处，望广大读者提出宝贵意见。

# 目 录

<b>第 1 章 数控技术概论</b> .....	1
1.1 数控技术的发展 .....	1
1.1.1 数控机床的出现 .....	1
1.1.2 数控技术发展的几个主要阶段 .....	2
1.1.3 我国数控技术发展概况 .....	2
1.1.4 数控技术发展趋势 .....	3
1.2 数控机床的工作原理及基本组成 .....	4
1.2.1 数控机床的工作原理 .....	5
1.2.2 数控机床的组成 .....	5
1.3 数控机床的分类 .....	6
1.3.1 按加工方式分类 .....	7
1.3.2 按控制系统功能分类 .....	7
1.3.3 按伺服控制方式分类 .....	8
1.3.4 按数控系统的功能水平分类 .....	10
1.4 数控机床的特点和应用范围 .....	11
1.4.1 数控机床的加工特点 .....	11
1.4.2 数控机床的使用特点 .....	12
1.4.3 数控机床的应用范围 .....	12
1.5 典型数控系统简介 .....	13
1.5.1 FANUC 公司的主要数控系统 .....	13
1.5.2 SIEMENS 公司的主要数控系统 .....	14
1.5.3 FAGOR 公司的数控系统 .....	14
1.5.4 华中数控系统 .....	15
1.5.5 北京航天数控 .....	15
本章小结 .....	15
思考与练习 .....	16
<b>第 2 章 数控加工编程基础</b> .....	17
2.1 插补的基本知识 .....	17
2.1.1 插补的基本概念 .....	17
2.1.2 常用的插补方法 .....	17
2.2 数控机床坐标系 .....	18
2.2.1 机床坐标系及运动方向 .....	18
2.2.2 绝对坐标与增量坐标 .....	20
2.2.3 机床原点与机床参考点 .....	20

2.2.4	工件坐标系 .....	22
2.3	刀具补偿的概念 .....	23
2.3.1	刀位点 .....	23
2.3.2	位置补偿 .....	23
2.4	数控加工工艺分析 .....	25
2.4.1	加工方法的选择 .....	25
2.4.2	加工工序的编排原则 .....	25
2.4.3	工件的装夹 .....	26
2.4.4	对刀点和换刀点位置的确定 .....	27
2.4.5	加工路线的确定 .....	28
2.4.6	刀具及切削用量的选择 .....	30
2.5	数控加工程序的格式及编程方法 .....	34
2.5.1	程序的结构 .....	35
2.5.2	程序的格式 .....	35
2.5.3	主程序和子程序 .....	36
2.5.4	常用地址符及其含义 .....	37
2.5.5	数控程序的编制方法及步骤 .....	37
	本章小结 .....	40
	思考与练习 .....	41
<b>第3章</b>	<b>数控机床的操作 .....</b>	<b>42</b>
3.1	数控车床的操作 .....	42
3.1.1	数控车床控制面板及操作面板 .....	42
3.1.2	回参考点及手动操作 .....	45
3.1.3	对刀及刀具补偿的设置 .....	46
3.2	数控铣床的操作 .....	49
3.2.1	数控铣床控制面板及操作面板 .....	49
3.2.2	手动操作 .....	51
3.2.3	MDI 操作 .....	53
3.2.4	坐标系数据设置 .....	54
3.2.5	刀具库及刀具参数的输入 .....	55
3.3	加工中心的操作 .....	56
3.3.1	加工中心控制面板及操作面板 .....	56
3.3.2	参数设定 .....	61
3.3.3	操作要点 .....	61
	本章小结 .....	62
	思考与练习 .....	63
<b>第4章</b>	<b>数控编程常用指令 .....</b>	<b>64</b>
4.1	概述 .....	64
4.2	与坐标和坐标系有关的指令 .....	68

4.3 运动路径控制指令	71
4.3.1 单位设定指令	71
4.3.2 快速定位指令	71
4.3.3 方向定位指令	73
4.3.4 线性进给指令	73
4.3.5 圆弧进给及螺旋线进给指令	74
4.3.6 暂停指令	78
4.4 辅助功能及其他功能指令	79
4.4.1 辅助功能指令	79
4.4.2 刀具功能指令	80
4.4.3 进给功能指令	80
4.4.4 主轴转速功能指令	81
4.5 不同数控系统功能的比较	81
本章小结	85
思考与练习	85
<b>第5章 数控车床编程</b>	<b>87</b>
5.1 概述	87
5.1.1 数控车削加工的对象	87
5.1.2 数控车床编程要点	87
5.2 数控车床的刀具补偿	88
5.2.1 刀具位置补偿	88
5.2.2 刀尖半径补偿	88
5.2.3 刀尖圆弧半径补偿的实现	89
5.3 固定循环	92
5.3.1 简单固定循环	92
5.3.2 复合固定循环	94
5.3.3 螺纹切削循环	99
5.4 数控车床加工编程实例	104
本章小结	109
思考与练习	110
<b>第6章 数控铣床编程</b>	<b>115</b>
6.1 数控铣加工的特点	115
6.1.1 数控铣床加工的对象	115
6.1.2 数控铣床加工的特点	115
6.1.3 数控铣床编程时应注意的问题	116
6.2 数控铣加工的刀具补偿及其他功能指令	116
6.2.1 刀具半径补偿 G40, G41, G42	116
6.2.2 刀具长度补偿 G43、G44、G49	118
6.2.3 其他功能指令	120

---

6.3 固定循环 .....	123
6.3.1 概述 .....	123
6.3.2 钻孔循环 .....	124
6.3.3 镗孔循环 .....	126
6.3.4 攻螺纹 .....	127
6.3.5 取消固定循环 .....	127
6.4 数控铣加工编程实例 .....	128
本章小结 .....	131
思考与练习 .....	131
<b>第7章 加工中心编程</b> .....	<b>135</b>
7.1 加工中心的特点 .....	135
7.1.1 加工中心的加工特点 .....	135
7.1.2 加工中心程序的编制特点 .....	135
7.1.3 加工中心的主要加工对象 .....	136
7.1.4 加工中心的换刀形式 .....	136
7.2 加工中心的换刀程序 .....	139
7.2.1 加工中心主轴的准停 .....	139
7.2.2 换刀程序 .....	139
7.3 加工中心编程实例 .....	140
本章小结 .....	149
思考与练习 .....	149
<b>主要参考文献</b> .....	<b>151</b>

# 第 1 章 数控技术概论

**内容提要：**本章主要讲述数控技术的发展过程及其发展趋势；数控机床的组成、工作原理、分类及特点；数控机床的适用范围；常用数控系统的介绍。

## 1.1 数控技术的发展

数控技术和数控机床的诞生，实现了多品种、小批量产品零件的自动化生产。数控机床是一种用计算机以数字指令方式控制的机床，数控机床也简称为 NC 机床。

### 1.1.1 数控机床的出现

数控是数字控制（numerical control）的简称，在机床领域是指用数字化信号对机床运动及其加工过程进行控制，其含义是用以数值和符号构成的数字信息自动控制机床的运转。

促进数控技术发展的动力是第二次世界大战以后的军备竞赛。1946 年世界上第一台计算机的问世为数控机床的研制提供了技术基础。1948 年，美国一个小型飞机工业承包商帕森兹公司（Parsons Corporation）在制造飞机时，利用全数字电子计算机对叶片轮廓的加工路径进行了数据处理，并考虑了刀具半径对加工路径的影响，其加工精度达到 $\pm 0.0381\text{mm}$ 。

1952 年，美国帕森兹公司与麻省理工学院伺服机构实验室（Serve Mechanisms Laboratory of the Massachusetts Institute of Technology）合作，成功研制出一套三坐标联动、利用脉冲乘法器原理的试验性数字控制系统，并将它装在一台立式铣床上，这就是世界上第一台数控机床。

1953 年，美国空军与麻省理工学院协作，开始从事计算机自动编程的研究，这就是研制 APT（automatically programming tool）自动编程系统的开始。

1959 年 3 月，美国克耐·杜列克公司（Keane Y & Trecker Corp）开发了带有自动换刀装置的数控机床，称为“加工中心”。

由于当时控制计算机的价格十分昂贵，1967 年，英国首先把几台数控机床联接成具有柔性的加工系统，这就是最初的 FMS（flexible manufacturing system）柔性制造系统。随着计算机技术的发展，小型计算机的价格急剧下降，小型计算机开始取代专用控制的硬件逻辑数控系统（NC），数字控制的许多功能由软件程序实现。出现了由计算机作控制单元的数控系统（CNC）。

1970 年前后，美国英特尔（Intel）公司首先开发和使用了微处理器。1974 年，美国、日本等首先研制出以微处理器为核心的数控系统的数控机床。由于中、大规模集成电路的集成度和可靠性高、价格低廉，因此，20 多年来，微处理器数控系统的数控机床得到飞速发展和广泛应用。这就是微机数控（micro-computer numerical control）系

统，即 MNC 系统。

20 世纪 80 年代初，国际上又出现了柔性制造单元 FMC (flexible manufacturing cell)。柔性制造单元 (FMC) 和柔性制造系统 (FMS) 被认为是实现计算机集成制造系统 CIMS (computer integrated manufacturing system) 的必经阶段和基础。

### 1. 1. 2 数控技术发展的几个主要阶段

数控机床产生以后，随着电子技术和计算机技术的发展，经历了如下几个主要阶段。

1952 年，数控装置的电子元件由电子管组成。

1959 年，数控装置由电子管过渡到晶体管和印刷电路板元件。

1965 年，数控装置使用了小规模集成电路，并商品化，不仅缩小了体积，减少了功耗，而且使系统的可靠性进一步提高。

1970 年，在美国芝加哥国际机床展览会上，出现了计算机数控装置 (CNC) 以及由计算机直接进行多机床控制的系统，称为直接控制系统 DNC (direct numerical control)。

1974 年，出现了微处理品和半导体存储器的微计算机数控装置。

1990 年开始，基于工业 PC 的通用 CNC 系统出现，数控装置的各项功能被分配到各个微处理器，在主微处理器的统一控制和管理下，并行、协调地工作，使数控机床向高精度、高速化发展。

数控技术发展的 6 个主要阶段见表 1. 1。

表 1. 1 数控技术发展的 6 个主要阶段

数控系统发展的历史	出现年份	数控系统发展的历史	出现年份
第一代电子管数控系统	1952	第四代小型计算机数控系统	1970
第二代晶体管数控系统	1959	第五代微处理器数控系统	1974
第三代集成电路数控系统	1965	第六代基于工业 PC 的通用 CNC 系统	1990

### 1. 1. 3 我国数控技术发展概况

我国从 1958 年开始研制数控机床，由清华大学研制出了最早的样机。1966 年我国诞生了第一台用于直线-圆弧插补的晶体管数控系统，即第二代数控系统。1970 年，集成电路数控系统制造成功，标志着我国进入了第三代数控系统制造阶段。但是由于历史的原因，数控机床的发展很慢，品种和数量都很少，稳定性和可靠性也比较差，只是一些复杂的、特殊的零件加工中使用。

从 20 世纪 70 年代开始，数控技术在车、铣、钻、镗、磨、齿轮加工、电加工等领域全面展开，数控加工中心在上海、北京研制成功。但由于电子元器件的质量和制造工艺水平差，致使数控系统的可靠性、稳定性未得到解决，因此不能广泛推广。

直到 20 世纪 80 年代，我国先后从日本、美国等国家引进一些先进的数控系统和直流伺服电机、直流主轴电机技术，并进行了商品化生产，这些系统可靠性高，稳定性

好,功能齐全,推动了我国数控机床的发展,使我国数控机床在质量、性能及水平上有了一个飞跃。到1985年,我国数控机床的品种累计达80多种,进入了实用阶段。

1986年至1990年期间是我国数控机床大发展的时期。在此期间,通过实施国家重点科技攻关项目“柔性制造系统技术及设备开发研究”及重点科技开发项目“数控机床引进技术消化吸收(数控机床一条龙)”,推动了我国数控机床的发展。

从20世纪90年代以来,我国主要发展高档数控机床。

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,还有待于进一步提高其利用率。随着我国加入WTO,并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。

#### 1.1.4 数控技术发展趋势

从发明第一台数控机床到现在的几十年中,数控技术迅猛发展。当前,数控技术的发展呈现以下的发展趋势。

##### 1. 数控控制器发展趋势

###### (1) 高性能的控制器

当前控制器在性能上将向如下方向发展:多坐标多通道控制;高速、高精加工功能;复合机床功能,也就是在同一机床上可以进行多种工艺的加工,如在一台机床上可以进行车加工、铣加工、镗加工等;高可靠性和安全性功能;方便使用。

###### (2) 伺服驱动器向数字化、交流化和智能化方向发展

伺服由模拟伺服向数字伺服发展,数字伺服有如下优点:无温漂,稳定性好;基于数值计算,精度高;通过参数对系统设定,调整减少,方便智能控制;容易做成ASIC电路。对交流电机采用矢量控制可使交流伺服电机的控制性能与直流电机媲美。采用软件与高速数字信号处理器控制,可提高运算能力,实现参数自动识别,加上高精度的传感器,使伺服系统智能化程度大大提高。

###### (3) 控制器的开放性

当NC机床出现以后,制造厂家就希望能部分或全部地使用NC系统代替机床设计师和操作者的大脑,具有一定的智能,能把特殊的加工工艺、管理经验和操作技能放进NC系统中,同时也希望它具有图形交互、诊断等功能。这就需要数控系统有友好的人机界面和提供给用户的开发平台,要求NC控制器透明以使机床制造商和最终用户可以自由地实现自己的思想。于是产生了开放结构的数控系统。

###### (4) 智能化的控制器

这一特点主要表现在控制对象为数学模型复杂,或具有高度非线性,难于建模的系统;任务复杂,要求具有规划、决策的能力;具有故障自动诊断功能。

###### (5) 网络化控制

随着现代技术的发展,可以通过计算机或数控系统本身对多台机床进行集中监控和管理,系统可以通过网络进行通信以传递程序,监控加工状态。还可以传送维修数据,对系统进行远程控制、操作和诊断,传送CAD/CAM数据等。目前主要采用以太网以

及现场总线，随着技术的发展，应用无线技术也已经出现，无线技术几乎可以使信息到达任何地方。

## 2 数控机床发展趋势

为了满足市场和科学技术发展的需要，为了达到现代制造技术对数控技术提出的更高的要求，当前，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、高可靠性

**高速、高效：**机床向高速化方向发展，可充分发挥现代刀具材料的性能，不但可大幅度提高加工效率、降低加工成本，而且还可提高零件的表面加工质量和精度。超高速加工技术对制造业实现高效、优质、低成本生产有广泛的适用性。

**高精度：**从精密加工发展到超精密加工（特高精度加工），是各工业强国发展的方向。其精度从微米级到亚微米级，乃至纳米级，其应用范围日趋广泛。

**高可靠性：**是指数控系统的可靠性要高于被控设备的可靠性在一个数量级以上，但也不是可靠性越高越好，仍然是适度可靠，受性能价格比的约束。

### (2) 模块化、智能化、柔性化和集成化

**模块化、专门化与个性化：**机床结构模块化，数控功能专门化，机床性能价格比显著提高并加快优化。个性化是近几年来特别明显的发展趋势。

**智能化：**智能化的内容包括在数控系统中的各个方面，一是为追求加工效率和加工质量方面的智能化；二是为提高驱动性能及使用连接方便方面的智能化；三是简化编程、简化操作方面的智能化；四是智能诊断、智能监控方面的内容，方便系统的诊断及维修等。

**柔性化和集成化：**柔性自动化技术是制造业适应动态市场需求及产品迅速更新的主要手段，是各国制造业发展的主流趋势，是先进制造领域的基础技术。

### (3) 开放性

为适应数控进线、联网、普及型个性化、多品种、小批量、柔性化及数控迅速发展的要求，最重要的发展趋势是体系结构的开放性，设计生产开放式的数控系统，例如美国、欧盟及日本发展开放式数控的计划等。

### (4) 出现新一代数控加工工艺与装备

为适应制造自动化的发展，向 FMC、FMS 和 CIMS 提供基础设备，要求数字控制制造系统不仅能完成通常的加工功能，而且还要具备自动测量、自动上下料、自动换刀、自动更换主轴头（有时带坐标变换）、自动误差补偿、自动诊断、进线和联网等功能；FMC，FMS 制造及无图纸制造技术；围绕数控技术、制造过程技术在快速成型、并联机构机床、机器人化机床、多功能机床等整机方面和高速电主轴、直线电机、软件补偿精度等单元技术方面先后有所突破；以计算机辅助管理和工程数据库、因特网等为主体的制造信息支持技术和智能化决策系统。

## 1.2 数控机床的工作原理及基本组成

数控机床是一种利用信息处理技术进行自动加工的机床。熟悉数控机床的组成，不

仅要掌握数控机床的工作原理，同时还要掌握数控技术在其他行业的应用。

### 1.2.1 数控机床的工作原理

数控机床与普通机床相比，其工作原理的不同之处在于数控机床是按数字形式给出的指令进行加工的。

数控机床加工零件，首先要将被加工零件的图样及工艺信息数字化，用规定的代码和程序格式编写加工程序；然后将所编程序指令输入到机床的数控装置中；再后数控装置将程序（代码）进行译码、运算后，向机床各个坐标的伺服机构和辅助控制装置发出信号，驱动机床各运动部件，控制所需要的辅助运动；最后加工出合格零件。

### 1.2.2 数控机床的组成

数控机床主要由加工程序、输入装置、数控系统、伺服系统、辅助控制装置、反馈系统及机床等几个部分组成，如图 1.1 所示。

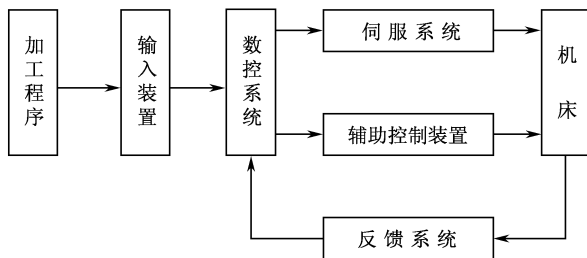


图 1.1 数控机床的基本组成

#### 1. 加工程序

数控机床与普通机床的最大区别是数控机床不需要工作人员直接去操作机床，它是按输入的工件加工程序运行的。工件加工程序中，包括机床上刀具和工件的相对运动轨迹、工艺参数（进给量、主轴转速等）和辅助运动等加工所需的全部信息。加工程序可存储在控制介质（也称信息载体、程序载体）上。数控机床中，常用的控制介质有穿孔带、磁带和磁盘等。

#### 2. 输入装置

输入装置的作用是将控制介质（信息载体、程序载体）上的有关加工信息传递并存入控制系统内。根据控制介质的不同，相应有不同的输入装置，如对穿孔带，有光电阅读机；对磁带，有录放机；对磁盘，有磁盘驱动器等。

现代数控机床，可以通过键盘，用手动方式（MDI 方式）直接输入数控系统。也可以由计算机编程后，用通信方式传送到数控系统中。

#### 3. 数控系统

数控系统是数控机床的核心，它主要包括微型计算机、通用输入输出外围设备及相

关软件。

数控系统的主要功能是接受输入装置送来的脉冲信号，经过数控系统的逻辑电路或系统软件进行编译、运算和逻辑处理后，输出各种信息和指令，控制机床各部分进行规定的动作。所输出的控制信息中最基本的信息是：经插补运算确定各坐标轴（即作进给运动的各执行部件）的进给速度、进给方向和进给位移量指令。还有主运动部件的变速、换向和启停指令；刀具的选择和交换指令；冷却、润滑装置的启停，工件和机床部件的松开、夹紧，分度工作台转位等辅助指令等。

#### 4. 伺服系统

伺服系统是数控系统的执行部分。它接受数控装置的指令信息，经功率放大后，严格按照指令信息的要求驱动机床的运动部件，完成指令规定的运动，加工出合格的零件。一般来说数控机床的伺服系统，要有好的快速响应性能和高的伺服精度。

伺服系统包括驱动装置和执行机构两大部分。目前大都采用直流或交流伺服电动机作为执行机构。

#### 5. 测量反馈装置

测量反馈装置的作用是将数控机床各坐标轴的位移指令检测值反馈到机床的数控装置中，数控装置对反馈回来的实际位移值与设定值进行比较后，向伺服系统发出指令，纠正所产生的误差。

#### 6. 辅助控制装置

辅助控制装置的主要作用是接收数控装置输出的主运动换向、变速、启停、刀具的选择和交换，以及其他辅助装置等指令信号，经过必要的编译、逻辑判别和运算，经功率放大后直接驱动相应的电器，带动机床机械部件、液压气动等辅助装置完成指令规定的动作。

现在由于可编程逻辑控制器（PLC）具有响应快，性能可靠，易于使用、编程和修改，并可直接驱动机床电器的特点，已被广泛作为数控机床的辅助控制装置。

#### 7. 机床

与普通机床相比，数控机床主体结构虽然仍然由主传动装置、进给传动装置、床身及工作台和辅助装置组成，但其传动系统更为简单。并且数控机床的静态和动态刚度要求更高，传动装置的间隙要求尽可能小，滑动面的摩擦因数要小，并有恰当的阻尼，以适应数控机床高定位精度和良好的控制性能的要求。

## 1.3 数控机床的分类

数控机床五花八门，种类繁多，据不完全统计，已有 400 多个品种。当前数控机床究竟如何分类，国内外尚无统一的规定。为了便于了解和研究，通常按下面四种方法来分类。

### 1.3.1 按加工方式分类

按加工的工艺方式，数控机床可以分为如下几类：

- ① 切削机床类，如数控车床、铣床、镗床、钻床和加工中心等。
- ② 成型机床类，如数控冲压机、弯管机、折弯机等。
- ③ 特种加工机床类，如数控电火花、线切割、激光加工机床等。
- ④ 其他机床类，如数控等离子切割、火焰切割、点焊机、三坐标测量机等。

本书主要介绍数控车、数控铣、加工中心等机床加工程序的编制。

### 1.3.2 按控制系统功能分类

按控制系统的功能特点可以将数控机床分为点位控制、点位直线控制、轮廓控制数控机床。

#### (1) 点位控制数控机床

点位控制数控机床的特点是刀具相对工件的移动过程中，不进行切削加工，对定位过程中的运动轨迹没有严格要求，仅要求实现从一坐标点到另一坐标点的精确定位。为了尽可能地减少刀具的运动时间并提高定位精度，刀具先是快速移动到接近终点的位置，然后降低移动速度，使之慢速趋近定位点，以确保定位精度。这类数控机床主要有数控坐标镗床、数控钻床、数控冲床、数控测量机、数控点焊机、数控弯管机等。图 1.2 是点位控制钻孔加工示意图，从图中可以看出，从第一个孔到第二个孔，刀具的三种不同的运动轨迹，都能满足钻孔的要求。

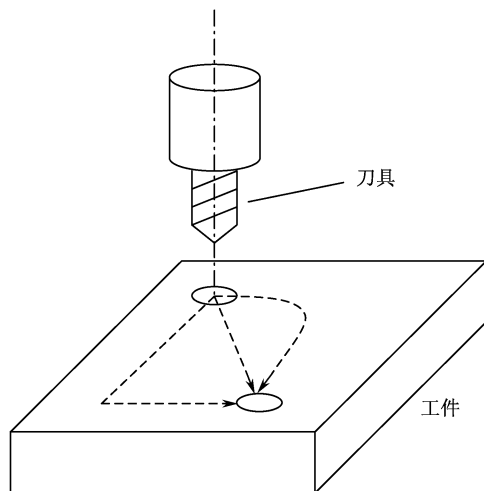


图 1.2 点位控制钻孔加工示意图

#### (2) 点位直线控制数控机床

点位直线控制数控机床的特点是不仅要控制从一坐标点到另一坐标点的精确定位，还要控制两相关点之间的移动速度和轨迹，其轨迹是平行机床各坐标轴的直线，或两轴同时移动形成的  $45^\circ$  的斜线。点位直线控制数控机床虽然比点位控制数控机床的工艺范

围广，但在实用中仍受到很大的限制。这类数控机床主要有经济型数控车床、数控镗铣床、数控加工中心等。图 1.3 是点位直线控制切削加工示意图。

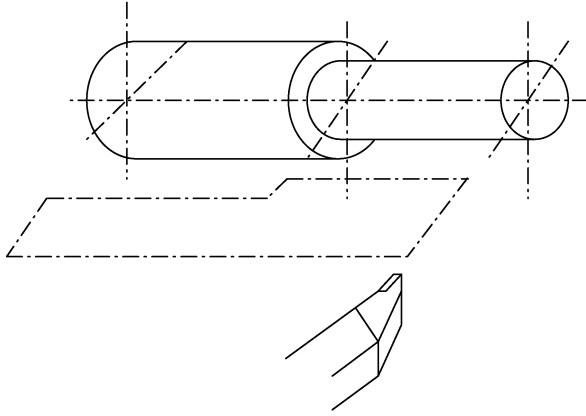


图 1.3 点位直线控制切削加工

### (3) 轮廓控制数控机床

轮廓控制数控机床的特点是能够同时对两个或两个以上的坐标轴进行加工控制。加工时不仅能控制起点和终点坐标，而且要控制整个加工过程中每一个点的坐标和速度，即控制刀具运动轨迹，将工件加工成一定的轮廓形状。图 1.4 是轮廓控制铣削加工示意图。

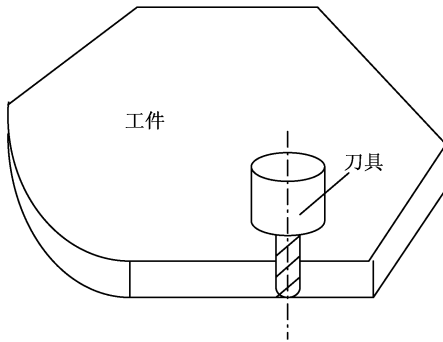


图 1.4 轮廓控制数控机床的加工示意图

### 1.3.3 按伺服控制方式分类

数控机床按照伺服控制方式可分为开环控制和闭环控制两种。在闭环系统中，根据检测反馈装置安放的部位可分为全闭环控制和半闭环控制两种。

#### (1) 开环控制数控机床

开环控制数控机床的特点是不带检测反馈装置，这类数控机床主要使用步进电机。图 1.5 所示是典型的开环数控系统，数控装置将工件加工程序处理后，输出数字指令脉

冲信号，通过驱动电路控制功率步进电机转动，再经减速器带动丝杠转动，从而使工作台移动。改变进给脉冲的数目和频率，就可以控制工作台的位移量和速度。由图 1.5 可见，指令信息单方向传送，并且指令发出后，不再反馈回来，故称开环控制。

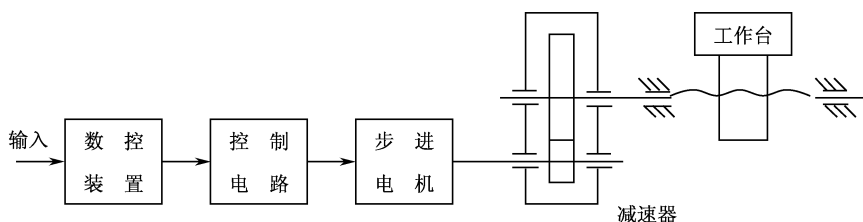


图 1.5 开环控制系统框图

开环控制系统由于没有检测装置，也就没有纠正偏差的能力，因此它的控制精度较低。但由于其结构简单，调试方便，维修容易，造价低廉等优点，现仍被广泛应用于经济型数控机床及旧机床的数控化改造上。

### (2) 闭环控制数控机床

闭环控制数控机床的特点是装有位置测量反馈装置。加工过程中，安装在工作台上的检测元件将工作台的实际位移量反馈到计算机中，与所要求的位置指令进行比较，用比较的差值进行控制，直到差值消除。可见，闭环控制系统可以消除机械传动的各种误差及工件加工过程中产生干扰的影响，使加工精度大大提高。图 1.6 所示为闭环控制系统框图。

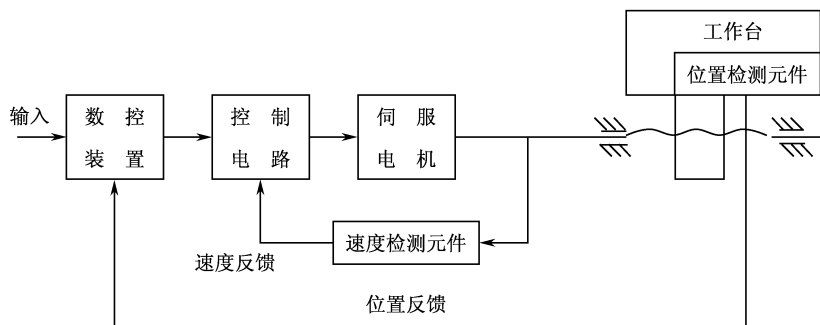


图 1.6 闭环控制系统框图

闭环控制系统的加工精度高，速度快。这类数控机床常采用直流伺服电动机或交流伺服电动机作为驱动元件，电动机的控制电路比较复杂，检测元件价格昂贵，调试维修复杂，成本高。闭环控制数控机床主要用于一些精度要求很高的镗铣床、超精车床、超精铣床和大型的精密加工中心等。

### (3) 半闭环控制数控机床

半闭环控制系统与闭环控制系统的控制方式相类似。它们之间的主要区别在于半闭环控制系统不是直接检测工作台的位移量，而是检测角位移，如圆光栅、旋转变压器、

圆感应同步器、编码器等，并将检测装置从工作台改装在伺服电动机轴或丝杠端头上。由于反馈环内没有包含工作台，故称为半闭环控制。如图 1.7 所示，由转角检测元件检测出伺服电动机或丝杠的转角，推算出工作台的实际位移量，反馈到计算机中与指令值进行比较，用比较的差值进行控制。

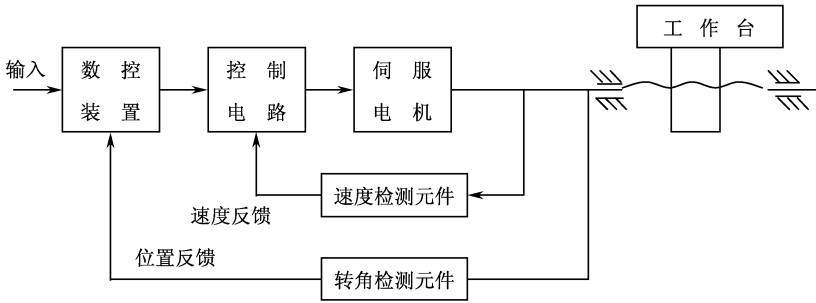


图 1.7 半闭环控制系统框图

目前，已将角位移检测装置与伺服电机设计成一个部件，使系统的结构简单，安装调试都比较方便。

半闭环控制精度较闭环控制差，但稳定性好，成本较低，调试维修也比较容易，兼顾了开环控制和闭环控制两者的特点，因此应用比较普遍。

### 1.3.4 按数控系统的功能水平分类

按数控系统的功能水平来分，有两种分法，一种是把数控机床分为高、中、低档（经济型）数控机床。这种分类方法，在我国应用较普遍。目前高、中、低三档的界限还没有一个统一的界定标准，加之不同时期划分的标准也不同，故按照功能水平分类的指标限定仅供参考。高、中、低档数控系统功能水平界定指标见表 1.2。

表 1.2 低、中、高档数控系统功能水平

功能	低 档	中 档	高 档
分辨率/ $\mu\text{m}$	10	1	0.1
进给速度/ $(\text{m}/\text{min})$	8~15	15~24	15~100
驱动进给类型	开环	半闭环或闭环的直流或交流伺服系统	
联动轴数/轴	2~3	2~4	3~5 以上
通信功能	一般无	RS-232 或 DNC 接口	可有 MAP 通信接口 <sup>①</sup> ，有联网能力
显示功能	LED 或简单的 CRT	较齐全的 CRT 显示 <sup>②</sup>	还有三维图形显示
内装 PLC	无	有	有强功能的 PLC
主 CPU	8 位、16 位	32 位以上或 32 位以上的多个 CPU	

① MAP-manufacturing automation protocol，制造自动化协议。

② 较齐全的 CRT 显示是指具有字符、图形、人机对话、自诊断等功能的显示。

按数控系统功能分类的另一种分法是将数控机床分为经济型（简易）、普及型（全功能）、和高档型数控机床。全功能型并不追求过多功能，以实用为准，也称为标准型。经济型数控机床的目的是根据实际机床的使用要求，合理地简化系统，降低价格。在我国，经济型数控机床是指装备了功能简单、价格低、使用操作方便的低档数控系统的机床，主要用于车床、线切割机及原有的数控化改造等。

## 1.4 数控机床的特点和应用范围

数控机床是实现柔性自动化的重要设备，与其他加工设备相比，数控机床具有如下特点。

### 1.4.1 数控机床的加工特点

#### (1) 可以加工有复杂型面的工件

无论多么复杂的型面，只要能编制出加工程序就能加工出来。

#### (2) 加工精度高，产品质量稳定

数控机床是按程序指令进行加工的，而且数控机床本身的精度都比较高，定位精度一般达到了 $\pm 0.01\text{mm}$ ，重复定位精度为 $\pm 0.005\text{mm}$ 。特别是数控机床加工完全是自动进行的，消除了操作者人为产生的误差，使同一批工件的尺寸一致性好，加工质量十分稳定。

#### (3) 自动化程度高，劳动强度低

数控机床对工件的加工是按事先编好的程序自动完成的，工件加工过程中不需要人的干预，加工完毕后自动停车，使操作者的劳动强度与紧张程度大为减轻。加上数控机床一般都具有较好的安全防护、自动排屑、自动冷却和自动润滑装置，操作者的劳动条件也大为改善。

#### (4) 生产效率高

工件加工所需的时间主要包括机动时间和辅助时间两部分。数控机床能有效地减少这两部分的时间。数控机床主轴的转速和进给量的变化范围比普通机床大，使它能选用最有利的切削用量；由于数控机床的结构刚性好，能使用大切削用量的强力切削，提高了数控机床的切削效率，节省了机动时间。数控机床的移动部件空行程运动速度快，工件装夹时间短，辅助时间比一般机床少。

数控机床更换工件时，不需要调整机床。同一批工件加工质量稳定，不需停机检验，使辅助时间大大缩短。在加工中心上加工时，一台机床实现了多道工序的连续加工，生产效率的提高更加明显。

#### (5) 良好的经济效益

数控机床虽然设备昂贵，分摊到每个工件上的设备费用较高，但用数控机床加工工件可以节省许多其他费用，如用数控机床加工工件可以节省划线工时，减少调整、加工和检验时间，节省了直接生产的生产费用；数控机床加工不需设计制造专门工装夹具，节省了工艺装备费用；数控机床加工精度稳定，废品率低，使生产成本下降。另外，数控机床可以一机多用，节省厂房面积，减少建厂投资。因此，使用数控机床加工可以获

得良好的经济效益。

(6) 有利于生产管理的现代化

数控机床加工工件，能准确地计算零件加工工件和费用，有效地简化检验工装夹具、半成品的管理工作，有利于生产管理现代化。

### 1.4.2 数控机床的使用特点

(1) 对操作维修人员的技术水平要求较高

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，要求操作、维修及管理人员具有较高的文化水平和技术素质。

数控机床是根据程序进行加工的。程序的编制既有一定的技术理论又有一定的技巧。程序可由操作人员手工编写，也可以使用计算机辅助编制。加工程序的编制直接关系到数控机床功能的开发和使用，并直接影响数控机床的加工精度。因此，数控机床的操作人员除了要一定的工艺基础知识外，还应对数控机床的结构特点、工作原理以及程序编制进行专门的技术理论培训和操作训练。

正确的维护和有效的维修是提高数控机床效率的基本保证。数控机床的维修人员应有较高的、较全面的数控理论知识和维修技术，如机修人员要懂得一些数控机床的电气维护知识，电修人员要了解数控机床的结构和程序编制。维修人员应有比较宽的机、电、液专业知识，才能综合分析，判断故障根源，实现高效维修，以便尽可能地缩短故障停机时间。因此，数控机床维修人员也必须经过专门的培训才能上岗。

(2) 对夹具和刀具的要求较高

数控机床对夹具的要求是：单件生产时，一般采用通用夹具；批量生产时，为节省加工工时，应使用专用夹具，而且夹具应该定位可靠，能自动夹紧或松开工件，具有良好的排屑、冷却结构。

数控机床对刀具的要求是：

- ① 较高的精度、寿命、和尺寸稳定性、变化小。
- ② 刀具能实现机外预调、快速换刀。
- ③ 刀柄应为标准系列。
- ④ 能很好地控制切屑的折断、卷曲和排出。
- ⑤ 具有良好的可冷却性能。

### 1.4.3 数控机床的应用范围

数控机床的性能特点决定了它的应用范围。

(1) 最适合于数控加工的零件

- ① 批量小而又多次生产的零件。
- ② 几何形状复杂的零件。
- ③ 加工过程中必须进行多种加工的零件。
- ④ 必须严格控制公差的零件。
- ⑤ 工艺设计会变化的零件。
- ⑥ 需全部检验的零件。

(2) 比较适合数控加工的零件

- ① 价格昂贵, 毛坯获得困难, 不允许报废的零件。
- ② 切削余量大的零件。
- ③ 在通用机床上加工生产率低, 劳动强度大, 质量难控制的零件。
- ④ 用于改型比较、供性能或功能测试的零件。
- ⑤ 多品种、多规格、单件小批量生产的零件。

(3) 不适合于数控加工的零件

- ① 利用毛坯作为粗基准定位进行加工的零件。
- ② 定位完全需人工找正的零件。
- ③ 必须用特点的工艺装备, 依据样板、样件加工的零件。
- ④ 大批量生产的零件。

## 1.5 典型数控系统简介

数控系统是数控机床的核心。系统不同, 其指令代码也有差别, 因此, 编程时应按所使用数控系统代码的编程规则进行编程。

目前, FANUC (日本)、SIEMENS (德国)、FAGOR (西班牙)、HEIDENHAIN (德国)、MITSUBISHI (日本) 等公司的数控系统及相关产品, 在数控机床行业占据主导地位; 我国数控产品以华中数控、航天数控为代表, 也已将高性能数控系统产业化。

### 1.5.1 FANUC 公司的主要数控系统

(1) 高可靠性的 power mate 0 系列

用于控制两轴的小型车床, 取代步进电动机的伺服系统; 可配画面清晰、操作方便、中文显示的 CRT/MDI, 也可配性/价比高的 DPL/MDI。

(2) 普及型 CNC0-D 系列

0-TC 用于通用车床、自动车床, 0-MD 用于铣床及小型加工中心, 0-GCD 用于圆柱磨床, 0-GSD 用于平面磨床, 0-PD 用于冲床。

(3) 全功能型的 0-C 系列

0-TC 用于通用车床、自动车床, 0-MC 用于铣床、钻床、加工中心, 0-GCC 用于内、外圆磨床, 0-GSC 用于平面磨床, 0-TTC 用于双刀架 4 轴车床。

(4) 高性/价比的 0i 系列

整体软件功能包, 高速、高精度加工, 并具有网络功能。0i-NB/MA 用于加工中心和铣床, 4 轴 4 联动; 0i-TB/TA, 4 轴 2 联动; 0i-mateMA 用于铣床, 3 轴 3 联动; 0i-mateTA 用于车床, 2 轴 2 联动。

(5) 具有网络功能的超小型、超薄型 CNC16i/18i/21i 系列

控制单元 LCD 集成于一体, 具有网络功能, 超高速串行数据通信, 其中 FS16i-MB 的插补、位置检测和伺服控制以纳米为单位。16i 最大可控 8 轴, 6 轴联动; 18i 最大可控 6 轴, 4 联动; 21i 最大可控 4 轴, 4 轴联动。

除此之外, 还有实现机床个性化 CNC16/18/160/180 系列。

### 1.5.2 SIEMENS 公司的主要数控系统

#### (1) SINUMERIK 802S/C

用于车床、铣床等，可控 3 个进给轴和 1 个主轴，802S 适于步进电动机驱动，802C 适于伺服电动机驱动，具有数字 I/O 接口。

#### (2) SINUMERIK802D

控制 4 个数字进给轴和 1 个主轴，PLC I/O 模块，具有图形式循环编程，车削、铣削/钻削工艺循环，FRAME（包括移动、旋转和缩放）等功能，为复杂加工任务提供智能控制。

#### (3) SINUMERIK 810D

用于数字闭环驱动控制，最多可控 6 轴（包括 1 个主轴和 1 个辅助主轴），紧凑型可编程输入/输出。

#### (4) SINUMERIK 840D

全数字模块化数控设计，用于复杂机床、模块化旋转加工机床，最大可控 31 个坐标轴。

### 1.5.3 FAGOR 公司的数控系统

#### (1) CNC8070

目前是 FAGOR 的最高档数控系统，代表 FAGOR 顶级水平，是 CNC 技术与 PC 技术的结晶，是与 PC 兼容的数控系统，采用 Pentium CPU，可运行 WINDOWS 和 MS-DOS。可控制“16 轴 + 3 电子手轮 + 2 主轴”，可运行 VISUAL BASIC，VISUAL C++，程序段处理时间小于 1ms，PLC 可达 1024 输入点/输出点，具有以太网、CAN、SER-COS 通讯接口，可选用  $\pm 10V$  模拟量接口。

#### (2) 8055 系列数控系统

FAGOR 高档数控系统，可实现“7 轴 7 联动 + 主轴 + 手轮控制”。按其处理速度不同分为 8055/A、8055/B、8055/C 三种档次，适用于车床、车削中心、铣床、加工中心及其他数控设备，具有连续数字化仿形、RTCP 补偿、内部逻辑分析仪、SERCOS 接口、远程诊断等许多高级功能。

#### (3) 8040/8055-i 标准系列

属中高档数控系统，采用中央单元与显示单元合为一体的结构，8040 可控制“4 轴 4 联动 + 主轴 + 2 手轮”。8055-i 可实现“7 轴 7 联动 + 主轴 + 2 手轮”，两者用户内存均可达到 1MB 字节，且具有  $\pm 10V$  模拟量接口及数字化 SERCOS 光缆接口，可配置带 CAN 接口的分布式 PLC。

#### (4) 8040/8055-i/8055TCO/MCO 系列

开放式的数控系统，可供 OEM 再开发成为专用数控系统，适用于所有机床设备。

#### (5) 8040/8055-i/8055TC/MC 系列

人机对话式数控系统，其主要特点是无须采用 ISO 代码编程，可将零件图中的数据通过人机交互图形界面直接输入系统，从而实现编程，所以也叫傻瓜式数控系统。

#### (6) 8025/8035 系列

8025 系列是 FAGOR 公司的中档数控系统，适用于铣床、加工中心、车床及其他数控设备，可控 2~5 轴不等。该数控系统是操作面板、显示器、中央单元合一的紧凑结构。8035 是 8040/8055-i/8055 的简化型，采用 32 位 CPU，同时也是 8025 的更上一层楼更新换代产品。

#### 1.5.4 华中数控系统

华中数控以“世纪星”系列数控单元为典型产品，HNC-21T 为车削系统，最大联动轴数为 4；HNC-21/22M 为铣削系统，最大联动轴数为 4，采用开放式体系结构，内置嵌入式工业 PC。

伺服系统的主要产品包括：HSV-11 系列伺服驱动装置，HSV-16 系列全数字交流伺服驱动装置，步进电动机驱动装置，交流伺服主轴驱动装置与电动机，永磁同步交流伺服电动机等。

#### 1.5.5 北京航天数控

北京航天数控的主要产品为 CASMUC2100 数控系统，是以 PC 机为硬件基础模块化、开放式的数控系统，可用于车床、铣床、加工中心等 8 轴以下机械设备的控制，具有 2 轴、3 轴、4 轴联动功能。

## 本章小结

本章主要对数控技术进行了总体概述。

(1) 数控技术发展的几十年间，主要经过了 6 个主要阶段：电子管数控系统、晶体管数控系统、集成电路数控系统、小型计算机数控系统、微处理器数控系统、基于工业 PC 的通用 CNC 系统。

(2) 数控机床加工的原理是：首先要将被加工零件的图样及工艺信息数字化，用规定的代码和程序格式编写加工程序；然后将所编程序指令输入到机床的数控装置中；而后数控装置将程序（代码）进行译码、运算后，向机床各个坐标的伺服机构和辅助控制装置发出信号，驱动机床各运动部件，控制所需要的辅助运动，最后加工出合格零件。

(3) 数控机床主要由加工程序、输入装置、数控系统、伺服系统、测量反馈装置、辅助控制装置及机床等 7 个部分组成。

(4) 数控机床按加工工艺方式可分为切削机床类、成型机床类、特种加工机床类、其他机床类；按控制系统功能可分为点位控制、点位直线控制、轮廓控制数控机床；按伺服控制方式可分为开环、闭环和半闭环控制数控机床。按数控系统的功能水平可分为高、中、低三档数控机床。

(5) 数控机床对操作维修人员有较高的技术要求，对刀具夹具也有较高的要求。数控机床主要适用于批量小而又多次生产的零件、几何形状复杂的零件、加工过程中必须进行多种加工的零件、必须严格控制公差零件、工艺设计会变化的零件、需全部检验的零件。

(6) 市场上使用的数控系统很多, 编程时应按所使用数控系统代码的编程规则进行编程。

### 思考与练习

1. 什么是数控? 数控机床的加工原理是什么?
2. 数控机床是由哪几个部分组成的? 各有什么作用?
3. 什么是开环、闭环、半闭环数控机床? 它们之间有什么区别?
4. 数控机床按工艺用途有哪些类型?
5. 加工中心与一般数控机床相比有什么特点?
6. 数控技术目前大致向哪几个方向发展?
7. 数控机床适合加工什么样的零件?
8. 数控机床对刀具和夹具有什么样的要求?
9. FANUC 公司和 SIEMENS 公司有哪些产品系列? 各有哪些功能?

## 第 2 章 数控加工编程基础

**内容提要：**本章主要讲述数控加工编程的基础知识，主要包括插补的基本知识、机床坐标系及工件坐标系、刀具补偿的概念、数控加工工艺分析、数控加工程序的格式及编程方法等。

### 2.1 插补的基本知识

数控系统的根本作用是对机床运动部件的轨迹进行控制，主要应用于复杂形状零件的加工。那么轮廓千差万别、形状各不相同的零件又为什么能在数控机床上加工出来呢？是因为数控机床具有插补功能。

#### 2.1.1 插补的基本概念

数控机床在加工时，刀具的运动轨迹是折线，而不是光滑的曲线，不能严格地沿着要求的曲线运动，只能沿折线轨迹逼近所要加工的曲线运动。一般情况下，机床数控系统是根据进给速度的要求按照已知的运动轨迹的起点坐标、终点坐标和轨迹的曲线方程，由数控系统实时的计算出各中间点坐标，这就是插补。

插补工作可以用硬件或软件来实现。在数控系统中，采用硬件的数字逻辑电路完成插补工作的插补器称为硬件插补器。在以硬件为基础的 NC 系统中，数控装置采用了电压脉冲作为插补点坐标的增量输出，每个脉冲都在相应的坐标轴上产生一个基本长度单位，这就是脉冲当量。它表示每发送一个脉冲工作台相对于刀具移动的距离。脉冲当量的大小决定了加工精度。硬件插补的特点是运算速度快，但灵活性差、不易更改、结构复杂、成本高。在 CNC 中，由软件完成插补工作的装置称为软件插补器。也可以由软硬件配合完成插补工作，如用软件进行粗插补、用硬件进行细插补。

#### 2.1.2 常用的插补方法

常用的插补方法按插补曲线形状的不同，可分为直线插补法、圆弧插补法、抛物线插补法和高次曲线插补法等。除高级的计算机数控系统外，大多数数控系统只有直线和圆弧插补功能。当实际轮廓既不是直线也不是圆弧时，必须对零件轮廓形状进行直线-圆弧拟合，用多段直线和圆弧近似地替代零件轮廓，然后进行加工。图 2.1 为直线插补和圆弧插补示意图。

按输出驱动信号方式的不同，可分为脉冲增量插补法和数字增量插补法。由于整个插补过程是数控系统自动处理的，因此在这里我们只作简单介绍。

脉冲增量插补法适用于以步进电动机为驱动装置的开环数控系统。脉冲增量插补法每进行一次插补运算，在各坐标轴上最多产生一个控制脉冲，使各坐标轴最多只移动一个脉冲当量，脉冲增量插补法最常用的是逐点比较插补法和数字积分插补法。逐点比较

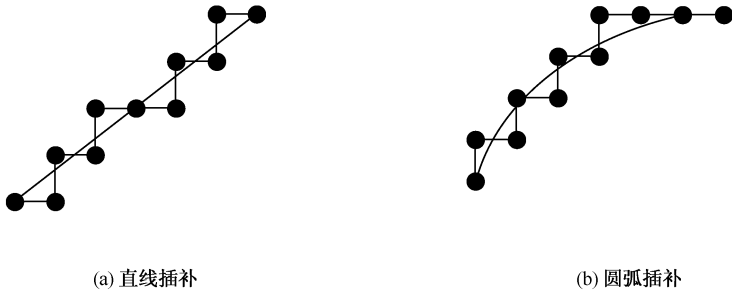


图 2.1 直线插补和圆弧插补

插补法通过比较刀具与所加工曲线的相对位置来确定刀具的运动。数字积分插补法是在数字积分器的基础上建立起来的插补法，具有运算快、脉冲分配均匀、易实现多坐标轴联动等优点。

数字增量插补法按照一固定的时间间隔进行一次插补运算，它输出的不是一个脉冲，而是一个二进制数。它是一个以微型计算机为核心的闭环系统。计算机通过反馈回路定时对各个坐标轴的位移进行采样，再和插补运算的数据结果相比，以产生的误差信号作为各坐标轴的输出控制。所以数字增量插补法也称为数控采样插补法，每一采样时间称为采样周期，插补周期可以与采样周期相同，也可以是采样周期的整数倍。

比较脉冲增量插法和数字增量插补法可知，前者每进行插补运算一次，各坐标轴最多只能移动一个脉冲当量，输出脉冲的速率受插补运算的时间限制，若插补运算时间较长则加工的进给速度受到限制。而后者则在插补运算的时间里，加工系统按上一插补周期的运算控制量进行加工，其加工的进给速度不受插补运算时间的限制，但插补运算复杂。

## 2.2 数控机床坐标系

规定数控机床坐标轴及运动方向，是为了准确地描述机床运动，简化编程，并使所编程序具有互换性。

### 2.2.1 机床坐标系及运动方向

数控机床的坐标系按国际标准化组织标准（international organization for standardization-ISO）规定为右手直角笛卡尔坐标系，如图 2.2 所示。

在使用坐标系时，对数控机床的坐标和运动方向作了如下规定。

#### 1. 刀具相对于静止工件运动的原则

有的数控机床是刀具运动，工件固定，有的是工件运动，刀具固定。为编程方便，一律规定：永远假定工件是静止的，而刀具是相对于静止工件而运动的。那么根据这一原则使编程人员在编制加工程序时只需要按工件图样编制，而不需要考虑数控机床的实际运动形式。

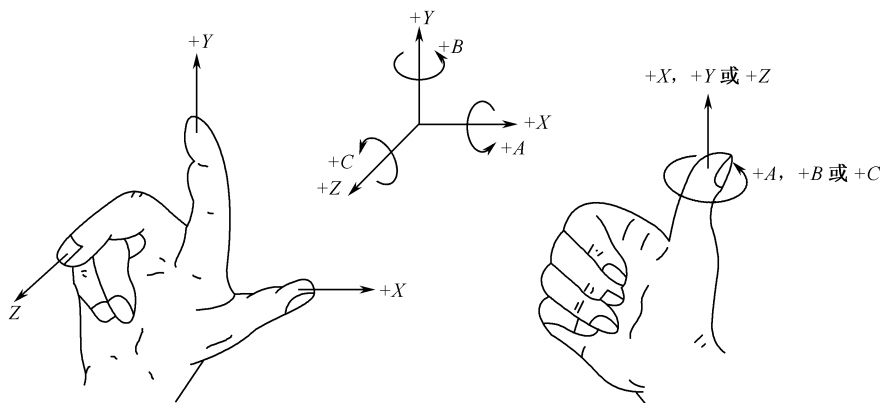


图 2.2 右手笛卡尔坐标系

## 2. 标准坐标系

为确定机床的运动方向、移动的距离，需要在机床上建立一个坐标系，这就是标准坐标系，标准坐标系也称机床坐标系。坐标系中各坐标轴的关系由右手直角笛卡尔原则确定，如图 2.2 所示。图 2.2 中大拇指的指向为  $X$  轴的正方向，食指的指向为  $Y$  轴的正方向，中指的指向为  $Z$  轴的正方向。围绕  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴旋转的圆周进给坐标轴  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的方向用右手螺旋法则确定。同时规定了分别平行于  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴的第一组附加轴为  $U$ 、 $V$ 、 $W$ ；第二组附加轴为  $P$ 、 $Q$ 、 $R$ 。

## 3. 运动方向的确定

JB3015—1982 中规定：机床某一部件运动的正方向，是增大工件和刀具之间距离的方向。

### (1) $Z$ 坐标

由传递切削力的主轴决定，与主轴轴线平行的坐标轴即为  $Z$  坐标。对于车床、磨床等主轴带动零件旋转，对于铣床、钻床、镗床等主轴带动刀具旋转，它们都以与主轴平行的坐标轴为  $Z$  坐标，如果没有主轴（如牛头刨床）， $Z$  轴垂直于工件装夹面。

$Z$  坐标的正方向为增大工件与刀具之间距离的方向，如在钻床加工中，钻入工件的方向为  $Z$  坐标的负方向，退出方向为正方向。

### (2) $X$ 坐标

$X$  坐标为水平且平行于工件的装夹面，这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） $X$  坐标的方向是在工件的径向上，且平行于横滑座。刀具离开工件旋转中心的方向为  $X$  轴正方向。对于刀具旋转的机床（如铣床、镗床、钻床等）， $X$  运动的正方向指向右。

### (3) $Y$ 坐标

$Y$  坐标轴垂直于  $X$ 、 $Z$  坐标轴， $Y$  运动的正方向根据  $X$  和  $Z$  坐标的正方向，按右手直角坐标系来判断。

(4) 旋转运动 A、B 和 C

A、B 和 C 相应地表示其轴线平行 X、Y 和 Z 坐标的旋转运动。A、B 和 C 的正方向，相应地表示在 X、Y 和 X 坐标正方向上按照右旋螺旋前进时的方向。

2.2.2 绝对坐标与增量坐标

所有坐标值均以机床或工件原点计量的坐标系称为绝对坐标系。在这个坐标系中移动的尺寸称为绝对坐标，也叫绝对尺寸，所用的编程指令称为绝对坐标指令。如图 2.3 所示，从 A 点运动到 B 点，B 点的绝对坐标是 X30 Y30。

运动轨迹的终点坐标是相对于起点计量的坐标系称为增量坐标系，也叫相对坐标系。在这个坐标系中移动的尺寸称为增量坐标，也叫增量尺寸，所用的编程指令称为增量坐标指令。如图 2.3 所示，从 A 点运动到 B 点，B 点的增量坐标是：X15 Y10，如果是从 D 点运动到 C 点，则 C 点的增量坐标为：X-20 Y15，其中负号表示 C 点在 D 点的负方向。

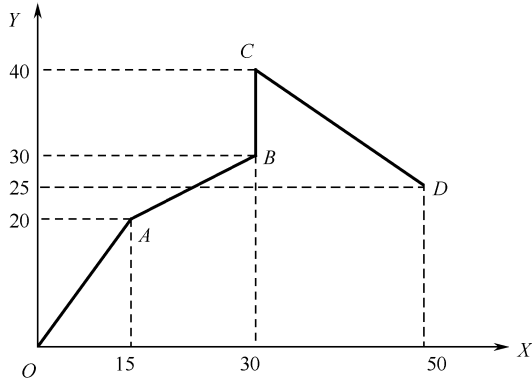


图 2.3 绝对坐标与增量坐标

在编程时，根据需要，主要是从计算和编程的方便来考虑，可以选用不同的坐标系，但必须给定相应的指令。对于这一点我们将在第 4 章中进行描述。

2.2.3 机床原点与机床参考点

1. 机床原点

机床原点又称为机械原点，它是机床坐标的原点。该点是机床上的一个固定的点，其位置是由机床设计和制造单位确定的，通常不允许用户改变。机床原点是工件坐标系、编程坐标系、机床参考的基准点，这个点不是一个硬件点，而是一个定义点，数控车床的机床原点一般设在卡盘前端面或后端面的中心，如图 2.4 所示，图 2.4 (a) 为刀架在里环的简易数控车床的机床坐标系，图 2.4 (b) 为常见的刀架在外环的数控车床的机床坐标系。数控铣床的机床原点，各生产厂不一致，有的设在机床工作台的中心，有的设在进给行程终点。

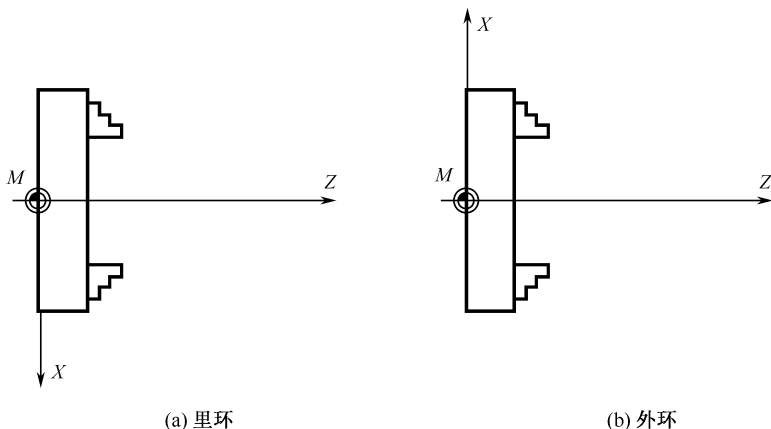


图 2.4 数控车床机床原点

## 2. 机床参考点

机床参考点是采用增量式测量的数控机床所特有的，机床原点是由机床参考点体现出来的。机床参考点是一个硬件点。一般数控车床、数控铣床的机床原点、机床参考点位置如图 2.5 所示。

机床参考点是机床坐标系中一个固定不变的位置点，是用于对机床工作台、滑板与刀具相对运动的测量系统进行标定和控制的点。机床参考点通常设置在机床各轴靠近正向极限的位置，通过减速行程开关粗定位而由零位点脉冲精确定位。机床参考点对机床

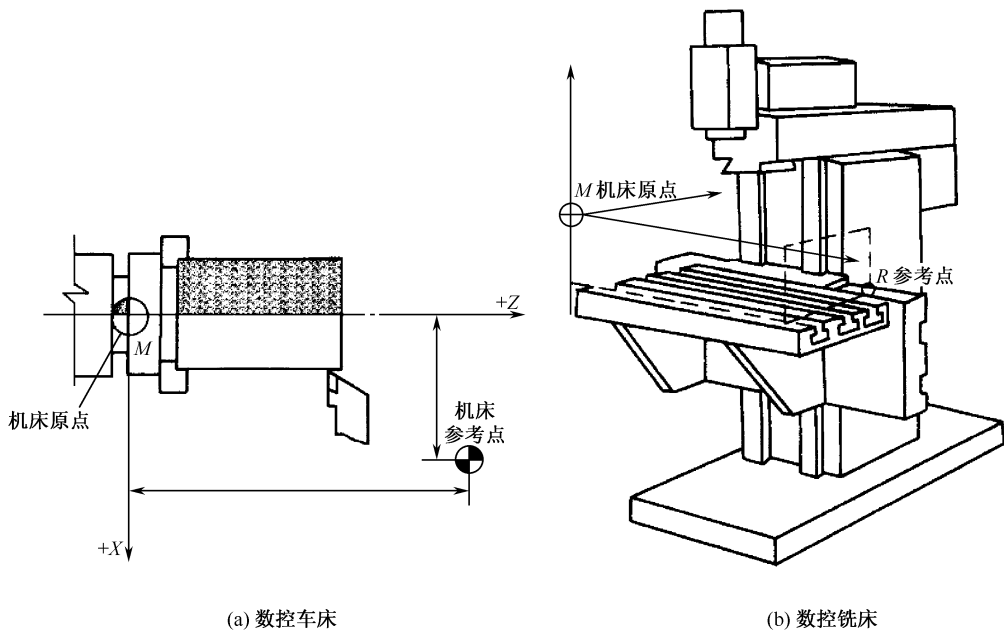


图 2.5 数控机床的机床原点与机床参考点

原点的坐标是一个已知定值。增量式测量的数控机床开机后，都必须做回零操作，即利用 CRT/MDI 控制面板上的功能键和机床操作面板上的有关按钮，使刀具或工作台退回到机床参考点中。回零操作又称为返回参考点操作。当返回参考点的工作完成后，显示器即显示出机床参考点在机床坐标系中的坐标值，表明机床坐标系已自动建立。回零操作后，测量系统进行标定，置零或置一个定值。可以说回零操作是对基准的重新核定，可消除由于种种原因产生的基准偏差。对增量式测量的数控机床，没有参考点而空谈机床原点是没有意义的。

机床参考点由机床制造厂家在机床出厂前准确调试后输入数控系统。并记录在机床说明书中，用户不得改变。

实际上，许多数控机床将机床参考点坐标值设置为零，此时机床坐标系的原点也就在机床参考点，机床坐标系中的绝对坐标值均显示为负值。

要说明的是，不同的数控系统返回参考点的动作、细节不完全相同，操作机床前必须仔细阅读有关操作说明书。

#### 2.2.4 工件坐标系

数控车床加工时，工件可以通过卡盘夹持于机床坐标系下的任意位置，这样一来用机床坐标系描述刀具轨迹就显得不大方便，为此编程人员在编写零件加工程序时通常要选择一个工件坐标系（也称编程坐标系），这样刀具轨迹就变成为工件轮廓在工件坐标系下的坐标了，编程人员也就不再考虑工件上各点在机床坐标系下的位置了，从而使问题大大简化。

工件坐标系的原点就是工件原点，也叫做工件零点。与机床坐标系不同，工件坐标系是人为设定的，选择工件坐标系的原点的一般原则是：

- ① 尽量选在工件图样的基准上，便于计算，减少错误，以利于编程。
- ② 尽量选在尺寸精度高，粗糙度值低的工件表面上，以提高被加工件的加工精度。
- ③ 要便于测量和检验。
- ④ 对于对称的工件，最好选在工件的对称中心上。
- ⑤ 对于一般零件，选在工件外轮廓的某一角上。
- ⑥ Z 轴方向的原点，一般设在工件表面。

根据数控车床的特点，工件原点通常设工件左、右端面的中心或卡盘前端面的中心，图 2.6 所示是以工件右端面为工件原点的工件坐标系。实际加工时考虑加工余量和加工精度，更准确地讲工件原点应选择在精加工后的端面上或精加工后的夹紧定位面上，如图 2.7 (a)、(b) 所示。端面余量一般为 0.2mm 左右。

工件原点一般也是程序原点（或称为编程零点）。对形状复杂的工件，若整个工件编制一个程序，则整个程序复杂，编程很不方便，或往往由于程序过长，数控系统内存不够。因此常需要将工件拆分成几个加工部分编制程序，此时编程零点就不一定设在工件零点上，而设在便于各程序编制的位置。