



21世纪全国高职高专机电类规划教材

# 数控机床原理与系统

SHUKONG JICHUANG YUANLI YU XITONG

主 编 张 俊 张俊勇  
副主编 张志军 辛 梅



北京大学出版社

PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国高职高专机电类规划教材

# 数控机床原理与系统

主 编 张 俊 张俊勇  
副主编 张志军 辛 梅  
参 编 王秋鹏 谢贺年



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 内 容 简 介

本书根据“以能力为本位,培养高技能型操作人员”的教学方针,本着理论知识“必需、够用”的原则紧紧围绕数控机床的核心技术——数控系统,全面、系统地讲述了数控系统的基本组成、各部分的主要功能和特点、工作原理等;着重介绍了发那科(FANUC)公司、西门子(SIEMENS)公司、华中数控集团等数控系统的功能、特点及典型应用;此外,还介绍了开放式数控系统的概念与研究状况。

本书可作为高职高专、成人高校及本科举办的二级职业技术学院机电类专业教材,也可供从事数控技术应用的技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

数控机床原理与系统/张俊,张俊勇主编.—北京:北京大学出版社,2009.2  
(21世纪全国高职高专机电类规划教材)  
ISBN 978-7-301-12281-5

I. 数… II. ①张… ②张… III. 数控机床 IV. TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第080642号

书 名:数控机床原理与系统

著作责任者:张俊 张俊勇 主编

责任编辑:郭芳 胡林

标准书号:ISBN 978-7-301-12281-5/TH·0014

出版发行:北京大学出版社

地 址:北京市海淀区成府路205号 100871

电 话:邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62765126 出版部 62754962

网 址:<http://www.pup.cn>

电子信箱:xxjs@pup.pku.edu.cn

印 刷 者:世界知识印刷厂

经 销 者:新华书店

787毫米×980毫米 16开本 12.25印张 268千字

2009年2月第1版 2009年2月第1次印刷

定 价:22.00元

---

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

# 前 言

制造自动化技术是先进制造技术中的重要组成部分，其核心技术是数控技术。数控技术是综合应用计算机、自动控制、自动检测及精密机械等高新技术的产物。它的出现及其所带来的巨大效益，已引起了世界各国科技与工业界的普遍重视。目前，随着国内数控机床用量的剧增，急需培养一大批高级应用型数控技术人才。为了适应我国高等职业技术教育发展及数控应用型技术人才培养的需要，我们编写了本书。

本书的教学内容在深度和广度上均体现出实用性、灵活性和先进性，主要有以下特点。

(1) 突出理论知识的实用性。考虑到高职教育的特点是以“必需、够用”为度，本书删掉了部分难以理解以及复杂的理论推导，如时间分割法插补和全功能刀补等。

(2) 图文并茂，简洁明了。为更好地帮助学生理解，本书在内容编排上遵循认知规律；同时本书配有大量图片，直观性较强。

(3) 内容选取注重先进性。本书在部分资料中选取了目前较先进的数控技术成果，同时考虑到数控技术的发展方向和趋势，本书还介绍了开放式数控系统和柔性制造系统的相关内容。

本书由张俊、张俊勇担任主编，并由张俊负责全书的统稿和最后定稿工作；由张志军、辛梅担任副主编。具体编写分工为：第1、3章由张俊（西安航空职业技术学院）编写；第2章由王秋鹏（西安铁路职业技术学院）、张俊编写；第4章由辛梅（西安航空职业技术学院）编写；第5章由张俊勇（陕西国防职业技术学院）编写；第6章由张志军（陕西国防职业技术学院）编写，第7章由谢贺年（西安航空职业技术学院）编写。

本书由西安工程大学杨承涛教授负责审稿并提出了许多宝贵的意见和建议，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，加之数控技术发展迅速，本书难免有不足之处，望读者和各位同人提出宝贵意见。

编 者  
2008年5月

# 目 录

第 1 章 机床数控技术基础 .....	1
1.1 数控技术概述 .....	1
1.1.1 数控技术的概念 .....	1
1.1.2 机床数控技术的产生 .....	1
1.1.3 机床数控技术的发展 .....	2
1.2 数控机床的组成与分类 .....	3
1.2.1 数控机床的组成 .....	3
1.2.2 数控机床的分类 .....	4
1.3 数控机床的主要性能指标和发展趋势 .....	8
1.3.1 数控机床的主要性能指标 .....	8
1.3.2 数控机床的发展趋势 .....	9
第 2 章 计算机数控系统 (CNC) .....	14
2.1 概述 .....	14
2.1.1 CNC 系统的组成 .....	14
2.1.2 CNC 装置工作流程 .....	15
2.1.3 CNC 装置的主要功能 .....	16
2.1.4 CNC 装置的特点 .....	17
2.2 CNC 装置的硬件组成与结构 .....	18
2.2.1 CNC 装置的硬件组成 .....	18
2.2.2 CNC 装置的硬件结构 .....	19
2.3 CNC 装置的软件组成、结构及特点 .....	24
2.3.1 CNC 装置软件的组成 .....	24
2.3.2 CNC 软件的结构 .....	24
2.3.3 CNC 软件的特点 .....	26
2.4 CNC 装置的接口 .....	27
2.4.1 概述 .....	27
2.4.2 CNC 装置的常用接口 .....	28
2.5 开放式数控系统简介 .....	33

<b>第3章 数控机床的插补与刀补</b> .....	38
3.1 概述 .....	38
3.2 逐点比较法插补 .....	40
3.2.1 第一象限的逐点比较法插补 .....	40
3.2.2 其他象限的直线和圆弧插补 .....	46
3.2.3 逐点比较法的终点判别 .....	48
3.3 数字积分法插补 .....	48
3.3.1 数字积分法的基本原理 .....	48
3.3.2 数字积分法直线插补 .....	49
3.3.3 数字积分法圆弧插补 .....	53
3.3.4 数字积分法的终点判别计算 .....	54
3.4 数据采样法插补 .....	55
3.4.1 数据采样法插补的基本原理 .....	55
3.4.2 数据采样法在直线插补中的应用 .....	56
3.4.3 数据采样法在圆弧插补中的应用 .....	56
3.4.4 数据采样法的终点判别 .....	57
3.5 数控加工刀具补偿 .....	57
3.5.1 刀具半径补偿 .....	57
3.5.2 刀具位置补偿 .....	63
<b>第4章 数控机床常用的检测装置</b> .....	65
4.1 概述 .....	65
4.1.1 数控机床对检测装置的性能要求 .....	65
4.1.2 数控机床检测装置的分类 .....	65
4.2 旋转变压器 .....	67
4.2.1 旋转变压器的结构和工作原理 .....	67
4.2.2 旋转变压器的工作方式和应用 .....	69
4.3 旋转编码器 .....	70
4.3.1 旋转编码器的原理 .....	70
4.3.2 旋转编码器的应用 .....	72
4.4 光栅 .....	73
4.4.1 光栅测量装置的组成 .....	73
4.4.2 光栅工作原理 .....	74
4.4.3 光栅的后置处理电路 .....	75
4.5 其他常用检测传感器 .....	77

4.5.1	电涡流传感器 .....	77
4.5.2	霍尔传感器 .....	79
4.5.3	接近开关 .....	81
第5章	数控机床伺服系统 .....	83
5.1	概述 .....	83
5.1.1	伺服系统的概念与组成 .....	83
5.1.2	数控机床对伺服系统的要求 .....	84
5.2	步进电机伺服系统 .....	85
5.2.1	步进电机的结构及工作原理 .....	86
5.2.2	步进电机的特点及分类 .....	88
5.2.3	步进电机的性能指标和选用 .....	90
5.2.4	步进式伺服系统的控制原理及驱动控制 .....	93
5.3	直流伺服电机伺服系统 .....	97
5.3.1	直流伺服电机的原理与分类 .....	98
5.3.2	直流伺服电机的速度控制 .....	100
5.4	交流伺服电机伺服系统 .....	104
5.4.1	交流伺服电机的原理与特点 .....	104
5.4.2	交流伺服电机的调速 .....	106
5.5	主轴驱动伺服系统 .....	109
5.5.1	数控机床主轴驱动的控制 .....	109
5.5.2	主轴通用变频器 .....	111
5.5.3	电主轴简介 .....	116
第6章	典型数控系统 .....	120
6.1	FANUC 数控系统 .....	120
6.1.1	概述 .....	120
6.1.2	FANUC 0 系列数控系统 .....	122
6.1.3	FANUC 0i 系列数控系统 .....	127
6.2	SIEMENS 数控系统 .....	140
6.2.1	SINUMERIK 802 系列数控系统 .....	142
6.2.2	SINUMERIK 840D 数控系统 .....	150
6.3	国产数控系统 .....	155
6.3.1	华中世纪星数控系统 .....	155
6.3.2	广州数控 GSK980TD 系统 .....	157

---

---

第7章 柔性制造系统(FMS)和计算机集成制造系统(CIMS)	160
7.1 FMS	160
7.1.1 FMS的产生与发展	160
7.1.2 FMS的定义、组成与工作原理	161
7.1.3 FMS的分类、特点与作用	164
7.1.4 FMS自动加工系统	165
7.1.5 FMS的物流系统	168
7.2 CIMS	174
7.2.1 CIMS的产生	174
7.2.2 CIMS的基本概念与组成	175
7.2.3 CIMS的体系结构	180
参考文献	187



# 第 1 章 机床数控技术基础

## 1.1 数控技术概述

### 1.1.1 数控技术的概念

广义上的数控技术 (Numerical Control) 是指用数字、文字和符号组成的数字化指令来实现一台或多台设备动作控制的技术。它的控制对象通常是位置、角度、速度等机械量和与机械能量流向有关的开关量。现在, 数控技术也叫计算机数控技术 (Computer Numerical Control, CNC), 是指利用计算机实现数字程序控制的技术。这种技术用计算机按事先存储的控制程序来执行对设备的控制功能。由于采用计算机替代原先用硬件逻辑电路组成的数控装置, 使输入数据的存储、处理、运算、逻辑判断等各种控制机能的实现, 均可通过计算机软件来完成。数字控制技术系统应具有以下特点。

- (1) 采用专用或通用的数字信息表达方式准确地表达信息或数据。
- (2) 既可进行简单的逻辑或算术运算, 又能完成复杂或较复杂的信息处理。
- (3) 不需要或者很少需要改动硬件装置, 而只需通过改变软件即可完成相应信息或数据处理的过程, 具有一定的柔性控制能力。

由于数控技术具有上述特点, 故被广泛用于机械运动的轨迹控制中。本书所讲的数控技术主要是指通过计算机, 用数字化的信息对机床等机械设备的运动完成控制的技术。

### 1.1.2 机床数控技术的产生

数控技术的产生依赖于数据载体的更新和二进制形式数据运算的出现。19 世纪末, 以纸为数据载体并具有辅助功能的控制系统被发明; 1908 年, 穿孔的金属薄片互换式数据载体问世; 1938 年, 香农在美国麻省理工学院进行了数据快速运算和传输, 奠定了现代计算机 (包括计算机数字控制系统) 的基础。随着科学技术和社会生产的发展, 机械产品的形状和结构也不断改进, 对零件的加工质量要求越来越高。由于产品改型频繁, 机械加工中单件小批生产仍占较大比重。为了保证产品质量, 提高生产效率和降低成本, 就要求机床不仅具有较好的通用性和灵活性, 而且加工过程实现自动化。而在改型频繁、精度要求高、零件形状要求复杂的航空、航天等国防工业上, 早期的自动机床、组合机床已不能满足要求。机床数控技术正是在这样的情况下发展起来的技术。第二次世界大战以后, 美

国为了加速飞机工业的发展,要求制造能够灵活适应产品改型要求、高精度的机床;1952年,美国帕森斯公司(Parsons Co.)和麻省理工学院伺服机构实验室(Serve Mechanisms Laboratory of The Massachusetts Institute of Technology)受美国空军委托合作研制出世界上第一台三坐标数控立式铣床,用它来加工直升机叶片轮廓检查用样板。这是一台采用电子管元件且逻辑运算与控制均采用硬件连接电路的数控机床。1955年,该类机床进入生产使用阶段,在复杂曲面的加工中发挥了重要作用,这就是第一代数控系统和数控机床。

### 1.1.3 机床数控技术的发展

从第一台数控机床问世至今的五十多年里,随着微电子技术、计算机技术、精密测量技术、自动控制技术及机械制造技术的快速发展,机床数控技术也得到了长足的进步,不断地更新换代。

1959年,晶体管元件问世,数控系统中开始广泛采用晶体管和印刷电路板,数控系统从此跨入第二代。1959年3月,美国克耐·杜列克公司(Keaney & Trecher Corp)发明了带有自动换刀装置的数控机床,称为“加工中心”。

从1965年,出现了小规模集成电路。由于它体积小,功耗低,使得数控系统的可靠性得以进一步提高,数控系统发展到第三代。

以上三代,都是采用专用控制器件的硬件逻辑数控系统(NC)。

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器件的硬件逻辑数控系统(NC),称为第四代数控系统。1970年,在美国芝加哥国际展览会上,首次展出了这种系统。

1970年后,通用小型计算机业已出现并成批生产。1971年,美国Intel公司在世界上第一次将计算机的两个最核心的部件——运算器和控制器,采用大规模集成电路技术集成在一块芯片上,称之为微处理器(Microprocessor),又可称为中央处理单元(简称CPU)。1974年,美、日等国首先研制出以微处理器为核心的数控系统的数控机床。二十多年来,采用微处理器数控系统的数控机床得到飞速发展和广泛的应用,这就是第五代数控(MNC)。后来,人们将MNC称为CNC。

20世纪80年代初,国际上又出现了柔性制造单元(Flexible Manufacturing Cell, FMC)和柔性制造系统(FMS)。它们被认为是实现计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System, CIMS)的必经阶段和基础。

我国从1958年开始研究数控技术,一直到20世纪60年代中期处于研制、开发时期。一些高等院校、科研单位研制出试验性样机,开始也是从电子管器件系统着手的。

1965年,国内开始研制晶体管数控系统。20世纪60年代末至70年代初研制成功X53X—1G立式数控铣床、CJK—18数控系统和数控非圆齿轮插齿机。

从20世纪70年代开始,我国的数控技术在车、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,因此未能广泛推广。在这一时期,数控线切割机床由于结构简单、使用方便、价格低廉,在模具加工中得到了推广。20世纪80年代,我国从日本FANUC公司引进了5、7、3等系列的数控系统和直流伺服电机、直流主轴电机技术,以及从美国、德国等国外企业引进了一些新技术,并进行了商品化生产。这些系统可靠性高,功能齐全,推动了我国数控机床稳定的发展,使我国的数控机床在性能和质量上产生了一个质的飞跃。

现在,我国已建立了以低、中档数控机床为主的产业体系。20世纪90年代后主要发展高档数控机床。1995年,我国数控机床的品种有了新的发展。数控机床品种不断增多,规格齐全。许多技术复杂的大型数控机床、重型数控机床都相继研制出来。为了跟踪国外技术的发展,北京机床研究所研制出了JCS-FM-1.2型的柔性制造单元和柔性制造系统。这个时期,我国在引进、消化国外技术的基础,进行了大量开发工作。一些较高档次的数控系统(五轴联动)、分辨率为 $0.000\ 02\text{ mm}$ 的高精度数控系统、数字仿型数控系统,为柔性单元配套的数控系统都开发出来了,并已造出样机。

## 1.2 数控机床的组成与分类

### 1.2.1 数控机床的组成

简单讲,数控机床就是指采用数字控制技术控制的机床,或者说装备了数控系统的机床,其组成如图1-1所示。

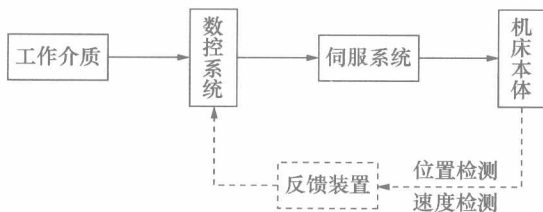


图 1-1 数控机床组成示意框图

#### 1. 工作介质

数控机床是按照提前编制好的加工程序来运行的。工件加工程序中包括机床上刀具和工件的相对运动轨迹、工艺参数和辅助运动等加工所需的全部信息,而工作介质就是承载这些信息的载体。早期的工作介质是穿孔纸带、穿孔卡片、磁带;现在,随着计算机技术

的发展，工作介质已比较隐性化，数控加工程序往往采用在线编程，此时工作介质已经变为磁盘甚至网络。

## 2. 数控系统

数控系统是数控机床的核心部分。它包括微型计算机（CPU、存储器、各种 I/O 接口）、通用输入输出设备（如 CRT/LED 显示器、键盘、操作面板等）以及相应的软件平台。CNC 部分具备的主要功能有：程序的输入、编辑、修改功能；信息转换的功能；多种函数的插补及补偿功能；多坐标轴的控制功能；显示功能；中、高档数控机床的 CNC 还应具备自诊断功能、通信和联网功能。

## 3. 伺服系统

伺服系统是数控系统与机床本体的机械部分连接单元。它能够接受来自数控系统的指令信息，并将其进行相应放大和转换后，严格按照指令信息的要求驱动机床的机械运动部件，完成规定的运动。伺服系统的性能是决定数控机床的加工精度、表面质量和生产率的主要因素之一。一般伺服系统包括伺服电动机、驱动控制单元以及检测装置三个部分。

## 4. 机床本体

早期数控机床中的本体部分使用通用机床，只是在自动变速、刀架或工作台自动转位和手柄等方面做了些改变。但实践证明：数控机床除由于切削用量大、连续加工发热多等因素影响工件精度外，由于属于自动控制，在加工中不能像通用机床那样可以随时由人工进行干预，所以其设计要求比通用机床更严格，制造更精密，因而在后来的数控机床设计时采用了许多新的加强刚性、减小热变形、提高精度等方面的措施，使得数控机床在外部造型、整体布局、传动系统以及刀具系统等方面发生了很大的变化。与普通机床相比，数控机床的传动系统更为简单，但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，从而适应数控机床高定位精度和良好的控制性能要求。

### 1.2.2 数控机床的分类

目前，数控机床品种已经基本齐全，规格繁多，为了研究和学习方便，可按以下几种方法来进行分类。

#### 1. 按工艺用途分类

(1) 金属切削类数控机床。这类机床和传统的通用切削机床种类一样，有数控的车、

铣、镗、钻、磨床等等，而且每一种又有很多规格和品种，例如数控铣床就有立铣、卧铣、工具铣、龙门铣等。另外，装有刀库和自动换刀机械手，可以进行多工序加工的数控机床称为数控加工中心。数控加工中心目前主要有两类：一类是在数控车床上发展起来的称为车削中心，一类是在镗铣床基础上发展起来的称为铣削加工中心。

(2) 金属成型类数控机床。如数控冲床、数控折弯机、数控弯管机、数控转头压力机等。

(3) 数控特种加工及其他类型机床。如数控线切割机床、数控火焰切割机、数控三坐标测量机、数控电火花加工机床等。

## 2. 按数控机床的运动轨迹分类

按照能够控制的刀具与工件间相对运动的轨迹，可将数控机床分为点位控制、点位直线控制、轮廓控制三类。

### (1) 点位控制的数控机床

这类机床只能通过数控装置控制移动部件从一个位置点精确地移到另一个位置点，即仅控制行程终点的坐标值，在移动过程中不能进行切削加工，一般为了既保证定位的精度又兼顾生产效率，两相关点之间的移动先是以快速移动到目标位置附近，然后降速1~3级，使之慢速趋近定位点，其加工示意如图1-2所示。属于这类控制方式的机床主要有数控坐标镗床、数控钻床、数控冲床和数控测量机等。

### (2) 点位直线控制的数控机床

点位直线控制的数控机床，除了要求控制位移这种终点位置外，还能实现平行坐标轴的直线切削加工或沿45°斜线进行直线切削加工，并且可以设定直线切削加工的进给速度，但不能沿任意斜率的直线进行加工。例如在车床上车削阶梯轴，铣床上铣削台阶面等。图1-3所示为点位直线控制示意图。

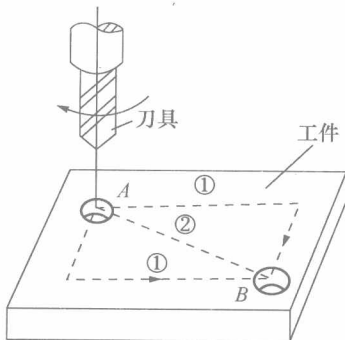


图 1-2 点位控制机床加工

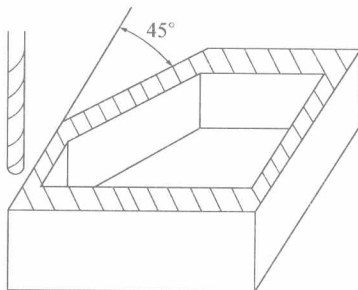


图 1-3 点位直线控制机床加工

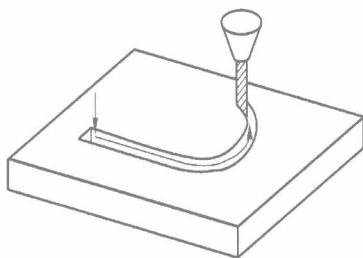


图 1-4 轮廓控制示意图

### (3) 轮廓控制的数控机床

轮廓控制系统也称连续控制系统，其特点是数控系统能够同时对两个或两个以上的坐标轴实现连续控制，不仅能够控制机床移动部件的起点与终点坐标值，而且能控制整个加工过程中每一点的速度和位移量。在加工过程中，数控系统不断进行插补运算，然后进行相应的速度和位移控制，将零件加工成一定的轮廓形状。目前数控机床中广泛采用这种控制方式。图 1-4 所示为轮廓控制示意图。

### 3. 按照数控系统的控制方式分类

数控机床按照对被控量有无检测反馈装置可分为开环控制和闭环控制两种。在闭环系统中，又可以根据测量装置安放的部分分为全闭环控制和半闭环控制两种。

#### (1) 开环控制系统的数控机床

开环控制系统中没有检测反馈装置。数控装置将工件加工程序处理后，输出数字指令信号给伺服驱动系统，驱动机床运动，但不检测运动的实际位移量。开环控制系统通常采用步进电动机作为执行元件，由于没有位置反馈，进给传动链的误差不能进行校正补偿，所以控制精度较低，位置精度一般为  $\pm 0.01 \sim \pm 0.02 \text{ mm}$ 。但开环控制系统结构简单、运行平稳、成本低、使用维修方便，故在经济型数控系统和普通机床的数控化改造中广泛应用。图 1-5 是典型的开环控制系统的数控机床。



图 1-5 开环控制系统的数控机床

#### (2) 闭环控制系统的数控机床

闭环控制系统是在机床移动部件（如工作台）上装有直线位置检测装置，然后将检测到的实际位置反馈到数控系统中，与系统中的位置指令值进行比较，并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。可见，闭环控制系统可以消除机械传动部件的各种误差和工件加工过程中产生的干扰影响，从而使加工精度大大提高，定位精度可在  $\pm 0.001 \text{ mm}$  以内；但是，由于位置检测反馈过程中包含了各种不稳定因素，因此调试工作较困难，若各种参数匹配不适当，则会引起系统振动，造成机床工作不稳定。闭环系统主要用于精度要求很高的数控镗铣床、数控车床、数控磨床等设备中。图 1-6 是典型的闭环控制系统的数控机床。

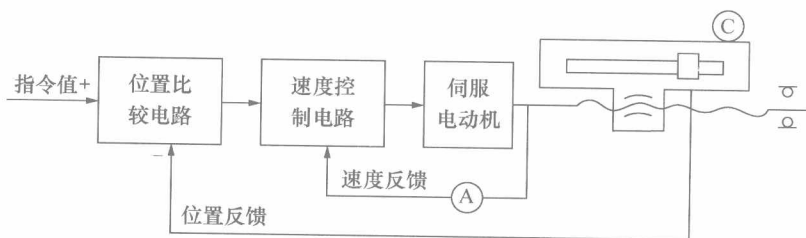


图 1-6 闭环控制系统的数控机床

### (3) 半闭环控制系统的数控机床

半闭环控制系统对工作台的位移量不进行直接控制，其位置反馈采用角位移检测元件（目前主要采用编码器等），直接安装在伺服电动机或丝杠端部。由于大部分机械传动环节未包括在系统闭环环路内，因此可获得较稳定的控制特性；虽然丝杠等机械传动误差不能通过反馈来实时校正，但是可采用软件定值补偿方法来适当提高其精度。目前大部分数控机床均采用半闭环控制系统。图 1-7 是半闭环控制系统的数控机床。

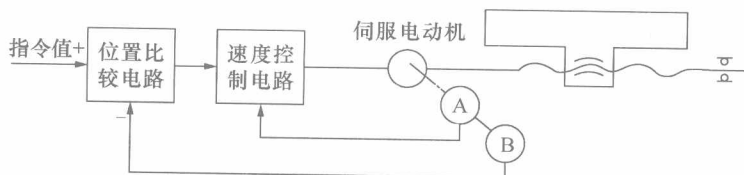


图 1-7 半闭环控制系统的数控机床

此外，将上述控制方式的特点有选择地集中，可以组成混合控制的方案。如前所述，由于开环控制方式稳定性好、成本低、精度差；而全闭环稳定性差，为了互为弥补，以满足某些机床的控制要求，可采用混合控制方式。目前采用较多的有开环补偿型和半闭环补偿型两种方式，如图 1-8 和图 1-9 所示。

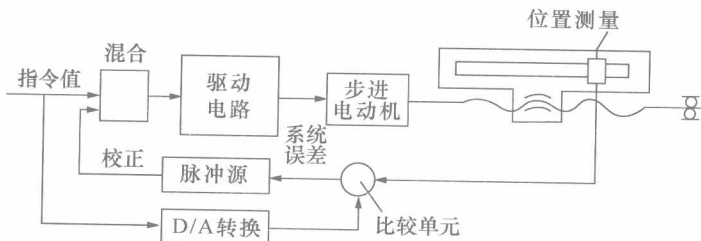


图 1-8 开环补偿型系统的数控机床

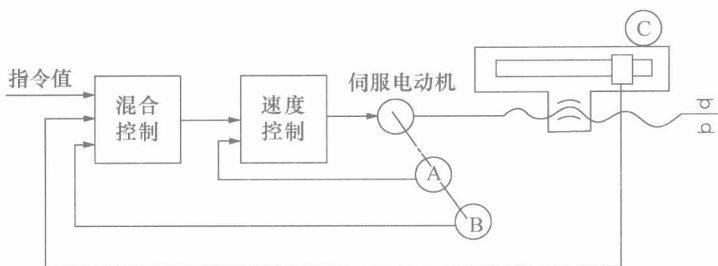


图 1-9 半闭环补偿型系统的数控机床

## 1.3 数控机床的主要性能指标和发展趋势

### 1.3.1 数控机床的主要性能指标

#### 1. 数控机床的精度指标

##### (1) 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，即实际位置与指令位置的一致程度。不一致量表现为误差，因此移动部件实际位置与指令位置之间的误差称为定位误差。被控制的机床坐标的误差（即定位误差），包括驱动此坐标的控制系统（伺服系统、检测系统、进给系统）等的误差，同时也包括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。

##### (2) 重复定位精度

重复定位精度是指在同一条件下，用相同的方法，重复进行同一动作时控制对象位置的一致程度，即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，也称为精密度。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，是机床一项非常重要的性能指标。

##### (3) 分辨率与脉冲当量

分辨率是指两个相邻的离散量之间可以分辨的最小间隔。对测量系统而言，分辨率是可以测量的最小增量；对控制系统而言，分辨率是可以控制的最小位移增量。数控装置发出的每个脉冲信号，机床移动部件相应产生的位移量叫做脉冲当量。坐标计算单位是一个脉冲当量，它标志着数控机床的分辨精度。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。目前普通精度等级数控机床的脉冲当量



一般采用 $0.001\text{ mm/p}$ ，经济型数控机床的脉冲当量一般采用 $0.01\text{ mm/p}$ 。脉冲当量越小，数控机床的加工精度和加工表面质量越高。

## 2. 数控机床的运动性能指标

数控机床的运动性能指标主要包括以下几个方面。

### (1) 主轴转速

数控机床的主轴一般均采用直流或交流调速主轴电动机驱动，选用高速精密轴承支撑，保证主轴具有较宽的调速范围和足够高的回转精度、刚度及抗震性。目前，数控机床主轴转速已普遍达到 $5\,000\sim 10\,000\text{ r/min}$ ，甚至更高，这样对各种小孔加工以及提高零件加工质量和表面质量都极为有利。

### (2) 进给速度

数控机床的进给速度是影响零件加工质量、生产效率以及刀具寿命的主要因素。它受数控装置的运算速度、机床动特性及工艺系统刚度等因素的限制。目前国内数控机床的进给速度可达 $10\sim 15\text{ m/min}$ ，国外数控机床的进给速度一般可达 $15\sim 30\text{ m/min}$ 。

### (3) 坐标行程

数控机床坐标轴X、Y、Z的行程大小，构成数控机床的空间加工范围，即加工零件的大小。坐标行程是直接体现机床加工能力的指标参数。

### (4) 刀库容量和换刀时间

对于加工中心来说，刀库容量和换刀时间对数控机床的生产率有直接影响。刀库容量是指刀库能存放加工所需要的刀具数量，目前常见的中小型数控加工中心多为 $16\sim 60$ 把刀具，大型数控加工中心可达 $100$ 把刀具。换刀时间是指带有自动交换刀具系统的数控机床，将主轴上使用的刀具与装在刀库上的下一工序需用的刀具进行交换所需要的时间。目前国内数控机床均在 $10\sim 20\text{ s}$ 内完成换刀，国外不少数控机床的换刀时间仅为 $4\sim 5\text{ s}$ 。

## 1.3.2 数控机床的发展趋势

随着科学技术的发展，世界先进制造技术的兴起和不断成熟，对数控加工技术提出了更高的要求；超高速切削、超精密加工等技术的应用，对数控机床的各个组成部分提出了更高的性能指标要求。当今的数控机床正在不断采用最新技术成果，朝着高速度、高精度化、多功能化、智能化、系统化、高可靠性、网络化与开放式等方向发展。

### 1. 高速度与高精度化

如前所述，速度和精度是数控机床的两个重要指标，它直接关系到加工效率和产品的质量，特别是在超高速切削、超精密加工技术的实施中，对机床各坐标轴位移速度和定位精度提出了更高的要求。另外，这两项技术指标又是相互制约的，也就是说要求位移速度