

面向“十二五”高等教育规划教材

# 现代数控加工 技术与编程

王正军 许军山 主编  
张树仁 主审



西南交通大学出版社  
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

面向“十二五”高等教育规划教材

# 现代数控加工技术与编程

王正军 许军山 主 编  
张树仁 主 审

西南交通大学出版社

· 成都 ·

---

图书在版编目(CIP)数据

现代数控加工技术与编程/王正军,许军山主编.  
—成都:西南交通大学出版社,2012.7

面向“十二五”高等教育规划教材

ISBN 978-7-5643-1856-7

I. ①现… II. ①王…②许… III. ①数控机床—加工—高等学校—教材②数控机床—程序设计—高等学校—教材 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 176380 号

---

面向“十二五”高等教育规划教材

现代数控加工技术与编程

王正军 许军山 主编.

\*

责任编辑 张华敏

特邀编辑 唐建明 鲁世钊 鲁会茹

封面设计 水木时代(北京)图书中心

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码:610031 发行部电话:028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

北京广达印刷有限公司印刷

\*

成品尺寸:185 mm×260 mm 印张:21.5

字数:537 千字

2012 年 7 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷

**ISBN 978-7-5643-1856-7**

定价:38.00 元

版权所有 盗版必究 举报电话:028-87600562

# 内容简介

本书共8章,内容包括现代数控加工技术概述、金属切削技术、数控机床编程基础、数控机床加工工艺分析、数控车床的手工编程、数控铣床的手工编程、加工中心的手工编程、线切割机床的编程与加工等内容。

经审定,本书既可作为高等工科院校机械类和近机类专业工程实践(实训)教材,也可作为高职高专数控技术、计算机辅助设计与制造、模具设计与制造等机电类专业教材和数控加工技能考证培训用书。同时,本书也适合作为各大中专院校相关专业师生参考书和从事华中或其他数控系统技术工作的广大工程技术人员业务参考书。

# 编审说明

制造业是国民经济的重要组成部分,是增强国家竞争力的基础。随着科学技术的发展,社会对人才的需求也发生着深刻的变化,特别是对工科学生的工程实践能力、新技术应用能力以及创新意识等提出了新的、更高的要求。作为工科院校,要培养出高质量、高素质的工程技术人员,必须在工程实践教学中,注重工程实践能力和创新意识的培养,逐步实现由传统的实习向现代工程实践教学的转变,最终实现学生知识、能力和素质的全面发展。

本书是根据教育部制定并实施的“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的精神,以及 2007 年教育部、财政部关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见(即质量工程),结合金工系列课程改革与实践教学基地建设,为加强“现代制造技术训练”和“国家级机械工程训练中心”建设而组织编写的高等教育规划教材。本书具有以下特点:

(1) 将传统金属切削加工基本知识与现代加工技术相融合,充分体现工程实践教学内容的系统性。

(2) 以现代制造领域中应用最为广泛的新技术、新工艺为着力点,力求体现工程技术的先进性。

(3) 注重对学生科技创新思维和意识的引导,并通过大量数控编程和加工实例,激发学生对现代加工技术以及新技术、新工艺的浓厚兴趣,从而培养学生的创新能力和创新思维。

本书可供高等工科院校机械类和近机类专业工程实践(训练)教学使用,总学时为 10~15 周。

本书由兰州理工大学机械工程实践教学中心组织编写。全书由王正军、许军山主编。编写分工如下:第 2、6、7、8 章由王正军编写。第 1、3、4、5 章由许军山编写。其中,刘永平、马俊、葛小霞、马宝荣等老师对本书的编写给予了很多的帮助和支持,在此特表感谢!全书由王正军统稿,由张树仁审稿。

由于编者水平有限,书中难免有缺点和错误之处,恳请广大读者不吝批评指正。

面向“十二五”高等教育规划教材编审指导委员会

2012 年 7 月

# 目 录

|                   |       |
|-------------------|-------|
| 第 1 章 现代数控加工技术概述  | (1)   |
| 1.1 数控技术基础        | (1)   |
| 1.2 数控机床的组成及操作规程  | (15)  |
| 思考与练习             | (18)  |
| 第 2 章 金属切削技术      | (19)  |
| 2.1 切削运动和切削要素     | (19)  |
| 2.2 刀具切削部分的组成     | (23)  |
| 2.3 金属切削过程的基本规律   | (24)  |
| 2.4 常用刀具材料        | (31)  |
| 2.5 切削用量及切削液      | (33)  |
| 2.6 改善工件材料的切削加工性能 | (35)  |
| 2.7 零件的加工质量       | (38)  |
| 2.8 公差及测量         | (40)  |
| 思考与练习             | (50)  |
| 第 3 章 数控机床编程基础    | (51)  |
| 3.1 数控编程概述        | (51)  |
| 3.2 数控机床的坐标系统     | (56)  |
| 3.3 数控编程基础        | (61)  |
| 3.4 插补的基础知识       | (65)  |
| 3.5 程序编制中的数学处理    | (66)  |
| 思考与练习             | (71)  |
| 第 4 章 数控机床加工工艺分析  | (72)  |
| 4.1 数控车床的加工工艺     | (72)  |
| 4.2 数控铣床的加工工艺     | (85)  |
| 4.3 加工中心的加工工艺     | (101) |
| 思考与练习             | (117) |
| 第 5 章 数控车床的手工编程   | (119) |
| 5.1 MFST 指令       | (119) |
| 5.2 常用 G 指令       | (122) |
| 5.3 子程序编程         | (178) |
| 5.4 宏程序编程         | (181) |
| 思考与练习             | (192) |

---

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| <b>第 6 章 数控铣床的手工编程</b> .....   | (194) |
| 6.1 数控铣床编程概述 .....             | (194) |
| 6.2 数控铣床常用的编程指令 .....          | (197) |
| 6.3 数控铣床的简化编程方式 .....          | (209) |
| 6.4 宏程序编程 .....                | (236) |
| 6.5 典型结构的数控铣削加工方法及编程 .....     | (248) |
| 思考与练习 .....                    | (268) |
| <b>第 7 章 加工中心的手工编程</b> .....   | (270) |
| 7.1 加工中心的手工编程基础 .....          | (270) |
| 7.2 加工中心典型零件的加工工艺分析与手工编程 ..... | (278) |
| 思考与练习 .....                    | (294) |
| <b>第 8 章 线切割机床的编程与加工</b> ..... | (296) |
| 8.1 线切割机床概述 .....              | (296) |
| 8.2 数控电火花线切割工艺基础 .....         | (301) |
| 8.3 数控电火花线切割编程 .....           | (314) |
| 思考与练习 .....                    | (332) |
| <b>参考文献</b> .....              | (334) |

.

# 第 1 章 现代数控加工技术概述

## 1.1 数控技术基础

数控机床是采用了数控技术的机床,或者说是装备了数控系统的机床。国际信息处理联盟(International Federation of Information Processing, IFIP)第五技术委员会对数控机床作了如下定义:数控机床是一种装了程序控制系统的机床。该系统能逻辑地处理具有使用号码或其他符号编码指令规定的程序。

### 1.1.1 数控机床的产生与发展过程

#### 1. 数控机床的产生

数控机床的研制最早是从美国开始的。1948 年,美国帕森斯公司(Parsons Co.)在研制加工直升机桨叶轮廓用检查样板的加工机床任务时,提出了研制数控机床的初始设想。1949 年,在美国空军部门的支持下,帕森斯公司正式接受委托,与麻省理工学院伺服机构实验室(Servo Mechanism Laboratory of the Massachusetts Institute of Technology)合作,开始从事数控机床的研制工作。经过三年的研究,于 1952 年试制成功世界上第一台数控机床试验性样机。这是一台采用脉冲乘法器原理的直线插补三坐标连续控制铣床,其数控系统全部采用电子管元件,数控装置体积比机床本体还要大。后又经过三年的改进和对自动编程的研究,于 1955 年进入实用阶段。直到 20 世纪 50 年代末,由于价格和技术上的原因,数控机床局限在航空工业中应用,品种也多为连续控制系统。到了 60 年代,由于晶体管的应用,数控系统提高了可靠性且价格开始下降,一些民用工业开始发展数控机床,其中多数是钻床、冲床等点位控制的机床。数控技术不仅在机床上得到实际应用,而且逐步推广到焊接机、火焰切割机等,数控技术的应用范围得到了不断的扩展。

#### 2. 数控机床的发展过程

自 1952 年美国研制成功第一台数控机床以来,随着电子技术、计算机技术、自动控制和精密测量等相关技术的发展,数控机床也在迅速地发展和不断地更新换代,先后经历了以下几个发展阶段:

- (1)第一代数控。1952~1959 年采用电子管元件构成的专用数控装置(NC)。
- (2)第二代数控。从 1959 年开始采用晶体管电路的 NC 系统。
- (3)第三代数控。从 1965 年开始采用小、中规模集成电路的 NC 系统。
- (4)第四代数控。从 1970 年开始,采用大规模集成电路的小型通用电子计算机控制的系

统(Computer Numerical Control,CNC)。

(5)第五代数控。从1974年开始,采用微型电子计算机控制的系统(Microcomputer Numerical Control,MNC)。

目前,第五代微机数控系统基本上取代了以往的普通数控系统,形成了现代数控系统。它采用微处理器及大规模或超大规模集成电路,具有很强的程序存储能力和控制功能。这些控制功能是由一系列控制程序(即存储在系统内的管理程序)来实现的。这种数控系统的通用性很强,几乎只需改变软件就可以适应不同类型机床的控制要求,具有很强的柔性。随着集成电路的发展以及光缆通信技术应用于数控装置中,其体积日益缩小,价格逐年下降,可靠性显著提高,功能也更加完善,数控装置的故障率也显著下降。

进入20世纪90年代以来,计算机技术的飞速发展推动了数控机床技术更快地更新换代。世界上许多数控系统生产厂家利用PC机丰富的软硬件资源,开发出开放式体系结构的新一代数控系统(也称之为第六代数控)。开放式体系结构使数控系统有更好的通用性、柔性、适应性、扩展性,并向智能化、网络化方向发展。近几年,许多国家纷纷研究开发这种系统,例如,美国科学制造中心(NCMS)与空军共同领导的“下一代工作站/机床控制器体系结构”(NGC),欧共体的“自动化系统中开放式体系结构”(OSACA),日本的OSEC计划等。其开发研究成果已得到应用,如Cincinnati-Milacron公司从1995年开始,在其生产的加工中心、数控铣床、数控车床等产品中,采用了开放式体系结构的A2100系统。开放式体系结构可以大量采用通用微机的先进技术,如多媒体技术,实现声控自动编程、图形扫描自动编程等。数控系统继续向高集成度方向发展,每个芯片上可以集成更多个晶体管,使系统体积更小,更加小型化、微型化,可靠性大大提高。利用多CPU的优势,实现故障自动排除;增强通信功能,提高进线、联网能力。开放式体系结构的新一代数控系统,其硬件、软件和总线规范都是对外开放的。由于有充足的软、硬件资源可供利用,新一代数控系统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,而且也为用户的二次开发带来极大方便,促进了数控系统多档次、多品种的开发和广泛应用,既可通过升挡或剪裁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,开发生产周期大大缩短。这种数控系统可随CPU的升级而升级,结构上不需变动。

近年来,随着微电子和计算机技术的日益成熟,以数控机床为基础,先后出现了计算机直接数控(Direct Numerical Control,DNC)、柔性制造系统(Flexible Manufacturing System,FMS)和计算机集成制造系统(Computer-Integrated Manufacturing System,CIMS),所有这些高级的自动化生产系统均代表着数控机床今后的发展趋势。

(1)计算机直接数控。所谓计算机直接数控(DNC),即使用一台计算机为数台数控机床进行自动编程,编程结果直接通过电缆输送给各台数控机床的数控箱。中央计算机具有足够的内存容量,因此,可统一存储和管理大量的零件程序。利用分时操作系统,中央计算机可以同时完成一群数控机床的管理与控制,因此,也称之为计算机群控系统。

目前DNC系统中的各台数控机床各自都有其独立的数控系统,并与中央计算机联成网络,实现分级控制,而不再考虑让一台计算机去分时完成所有数控装置的功能。

随着DNC技术的发展,中央计算机不仅用于编制零件的程序以控制数控机床的加工过程,而且进一步控制工件与刀具的输送,形成了一条由计算机控制的数控机床自动生产线,它为柔性制造系统(FMS)的发展提供了有利条件。

(2) 柔性制造系统。柔性制造系统(Flexible Manufacturing System, FMS)也称为计算机群控自动线,就是将一群数控机床用自动传送系统连接起来,并置于一台主计算机的统一控制之下,形成一个用于制造的整体。其特点是:由一台主计算机对全系统的软、硬件进行管理,采用 DNC 方式控制两台或两台以上的数控加工中心机床,对各台机床之间的工件有调度和自动传送功能。利用交换工作台或工业机器人等装置,实现零件的自动上料和下料,能使机床每天 24 小时均能在无人或极少人的监督控制下进行生产。例如,日本 FANUC 公司有一条 FMS,它由 60 台数控机床、52 个工业机器人、2 台无人自动搬运车和 1 个自动化仓库组成,这个系统每月能加工出 10 000 台伺服电动机。

(3) 计算机集成制造系统。计算机集成制造系统(CIMS)是指采用先进的计算机技术,控制从订货、设计、工艺、制造到销售的全过程,以实现信息系统一体化的高效率的柔性集成制造系统。它是在生产过程自动化(例如计算机辅助设计、计算机辅助工艺规程设计、计算机辅助制造、柔性制造系统等)发展的基础上,随着其他管理信息系统的发展而逐步完善的。它具有计算机及其软件系统的分析及控制能力,它可以把全厂的生产活动联系起来,最终实现全厂性的综合自动化。

### 1.1.2 数控机床的特点和应用范围

#### 1. 数控机床的特点

数控机床是一种高效、新型的自动化加工机床,是一种典型的机电一体化产品。它与普通机床相比具有以下特点:

(1) 加工精度高,加工质量稳定。数控机床是按照预定的程序进行自动加工的,控制精度可达到  $1.0 \sim 0.1 \mu\text{m}$  以上。另外,按数字形式指令进行加工,可消除操作者的人为误差,且不受零件形状复杂程度的影响,同批零件加工质量的一致性较好;数控机床本身的刚度和热稳定性高、精度保持性较好,而且还可以利用软件进行误差补偿和校正,有利于保证零件的加工精度和加工质量。

(2) 自动化程度高,生产效率高。数控机床能实现自动换刀、自动交换工作台,在一次装夹过程中能完成多表面和多工序的加工,减少工件装夹、对刀等辅助时间;另一方面,数控机床的运动速度快,调速范围大,空行程时间短,可以进行在线检测,因而加工生产率较高,加工一般零件生产效率可以提高 3~4 倍,加工复杂零件时,生产效率可提高十几倍甚至几十倍。

(3) 生产准备周期短,对加工对象的适应性强。数控机床上实现自动加工的控制信息是加工程序。当加工对象改变时,除了更换相应刀具和解决工件装夹方式外,只要重新编写并输入该零件的加工程序,便可实现对新零件的自动化加工,不必对机床进行任何复杂的调整,因而大大缩短了生产准备周期,降低了生产成本。

(4) 易于实现网络通信,便于现代化生产与管理。由于数控机床是使用数字信息,易于与计算机辅助设计/制造(CAD/CAM)系统实现网络连接;另外,采用数控机床加工能方便、精确地计算零件的加工时间以及零件的生产和加工费用,有利于生产过程的科学管理和信息化管理。

虽然数控机床具有以上优点,但初期投资大,维修费用高,对管理及操作人员的素质要求也较高,因此,应合理地选择及使用数控机床,使企业获得最好的经济效益。

## 2. 数控机床的应用范围

作为一种高度自动化的机床,数控机床具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。但数控机床是一种高度机电一体化产品,技术含量高,成本高,使用维修有一定难度。因此,若从经济的角度出发,数控机床适用于加工的应用范围一般包括以下几个方面:

- (1)多品种小批量零件。
- (2)结构较复杂、精度要求较高的零件。
- (3)需要频繁改型的零件。
- (4)价格昂贵、不允许报废的关键零件。
- (5)要求精密复制的零件。
- (6)需要最短生产周期的急需零件。
- (7)要求 100% 检验的零件。

图 1-1 表示了通用机床和数控机床、专用机床的零件加工批量与综合费用的关系。图 1-2 表示了工件复杂程度及批量大小与机床的选用关系。

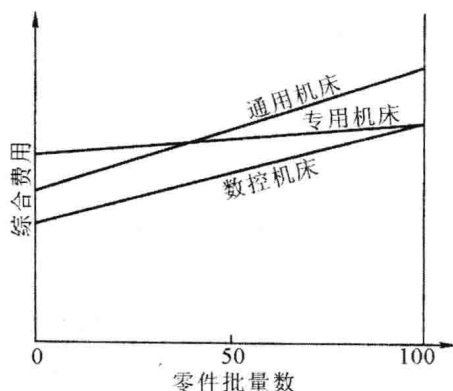


图 1-1 零件加工批量与综合费用的关系

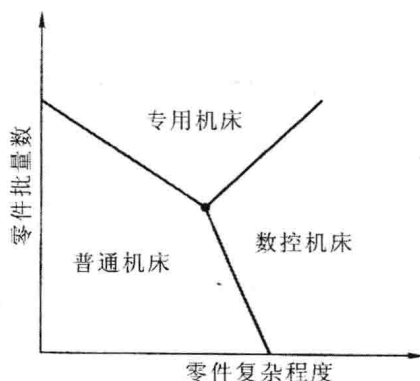


图 1-2 数控机床适用范围示意图

### 1.1.3 数控机床的分类

目前数控机床的品种很多,结构、功能各不相同,通常可以按以下角度进行分类。

#### 1. 按控制系统的特点分类

根据数控机床运动轨迹的不同,可将数控机床分为点位控制、直线控制和轮廓控制三种类型。

(1)点位控制数控机床。其特点是只控制移动部件由一个位置到另一个位置的精确定位,对它们运动过程中的轨迹没有严格要求,在移动和定位过程中不进行任何加工,如图 1-3 所示。为了尽可能地减少移动部件的运动时间和定位时间,两相关点之间的移动先是以快速移动到接近新的位置,然后进行连续降速或分级降速,使之慢速趋近定位点,以保证其定位精度。这类机床主要有数控坐标镗床、数控钻床、数控点焊机、数控折弯机等,其相应的数控装置称为

点位控制装置。

(2)直线控制数控机床。其特点是刀具相对于工件的运动,不仅要控制两相关点之间的准确位置(距离),还要控制两相关点之间移动的速度和轨迹。其路线一般由与各轴线平行的直线段组成。它和点位控制数控机床的区别在于:当机床移动部件移动时,可以沿一个坐标轴的方向进行切削加工,而且其辅助功能比点位控制的数控机床多。如图 1-4 所示为直线控制数控机床加工示意图。

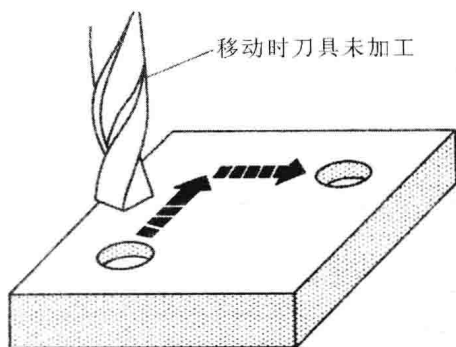


图 1-3 点位控制数控机床加工示意图

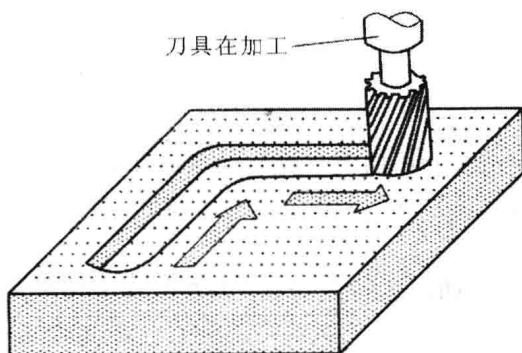


图 1-4 直线控制数控机床加工示意图

这类机床主要包括数控车床、数控磨床和数控镗铣床等,相应的数控装置称为直线控制装置。

(3)轮廓控制数控机床。轮廓控制又称连续控制,大多数数控机床具有轮廓控制功能。其特点是能同时控制两个以上的轴联动,具有插补功能。它不仅要控制起点和终点位置,而且要控制数控机床加工过程中每一点的位置和速度,加工出任意形状的曲线或曲面。图 1-5 所示为轮廓控制加工示意图。

这类机床主要包括数控车床、数控铣床、加工中心等。其相应的数控装置称为轮廓控制装置。轮廓控制装置要比点位控制、直线控制装置结构复杂得多,功能齐全得多。

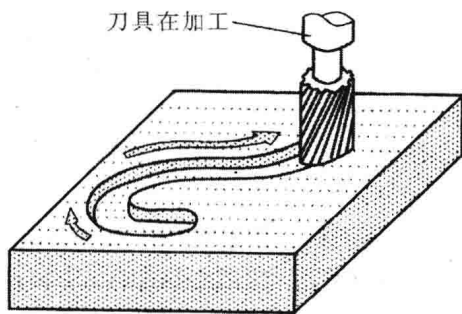


图 1-5 轮廓控制数控机床加工示意图

## 2. 按伺服系统的控制方式分类

根据伺服驱动系统控制方式的不同,可将数控机床分成开环进给伺服系统、闭环进给伺服系统和半闭环进给伺服系统三种类型。

(1)开环进给伺服系统数控机床。开环伺服系统通常不带有位置测量元件,伺服驱动元件多为步进电动机或电液脉冲马达。图 1-6 所示为步进电动机开环进给伺服系统原理图。数控装置发出的指令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,再经过传动系统,带动工作台或刀架移动。移动部件的速度与位移是由输入脉冲的频率和脉冲数决定

的。它的定位精度不高,一般可达 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 。其定位精度主要取决于伺服驱动元件和机床传动机构的精度、刚度和动态特性。

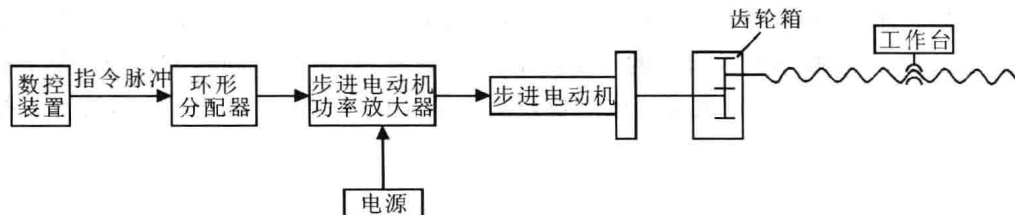


图 1-6 步进电动机开环进给伺服系统原理图

这种开环伺服系统具有结构简单、系统稳定、调试方便、价格低廉等优点。但是由于系统对移动部件的误差没有补偿和校正,所以精度低。一般适用于经济型数控机床和旧机床的数控化改造。

(2) 闭环进给伺服系统数控机床。闭环进给伺服系统是指在机床的运动部件上安装位移测量装置。图 1-7 所示是用进给伺服电动机驱动的闭环进给伺服系统原理图。它主要是由比较环节、伺服驱动放大器、进给伺服电动机、机械传动装置及直线位移测量装置组成。

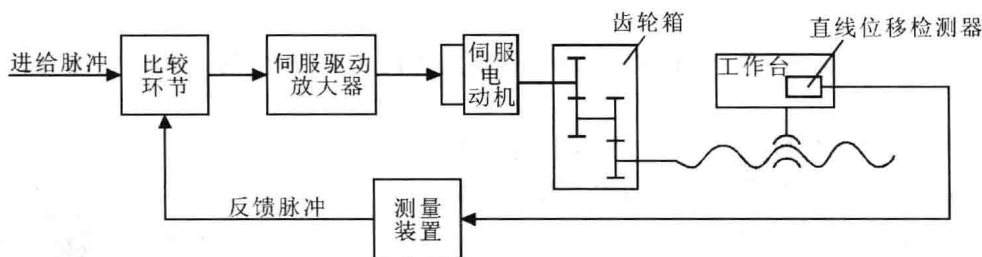


图 1-7 闭环进给伺服系统原理图

闭环进给伺服系统的工作原理是:当数控装置发出位移指令脉冲,经过伺服电动机、机械传动装置驱动移动部件移动时,安装在移动部件上的直线位置的检测装置把检测所得位移量反馈到输入端,与输入信号进行比较,得到的差值再去控制伺服电动机,驱动移动部件向减少差值的方向移动。如果指令脉冲不断地输入,则移动部件就不断地运动,直到差值为零时移动部件才停止移动。此时移动部件的实际位移量与指令的位移量相等。

由闭环进给伺服系统的工作原理可以看出,系统的精度主要取决于位移检测装置的精度。从理论上讲,它可以完全消除由于传动部件制造中存在的误差给工件加工带来的影响,所以这种控制系统可以得到很高的加工精度。闭环进给伺服系统的设计和调整都有较大的难度,直线位移检测元件的价格也比较昂贵,因此它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。

(3) 半闭环进给伺服系统数控机床。图 1-8 所示是半闭环进给伺服系统原理图。它与全闭环的唯一区别是全闭环的检测元件是直线位移检测器,安装在移动部件上,而半闭环的检测元件是角位移检测器,直接安装在电动机轴上,也有个别安装在丝杠上的,但两者的工作原理是完全一样的。

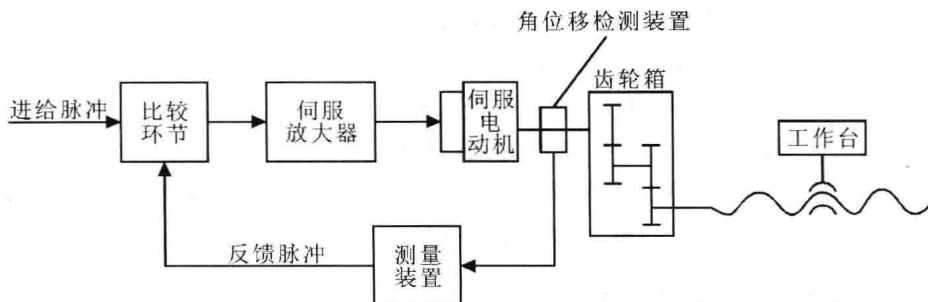


图 1-8 半闭环进给伺服系统原理图

因为半闭环进给伺服系统的反馈信号取自电动机轴的回转，因此进给系统中的机械传动装置处于反馈回路之外，其刚度、间隙等非线性因素对系统稳定性没有影响，调试方便。同样的道理，机床的定位精度主要取决于机械传动装置的精度，但是现在的数控装置均有螺距误差补偿和间隙补偿功能，不需要将传动装置各种零件精度提得很高，通过补偿就能将精度提高到绝大多数用户都能接受的程度。再加上直线位移检测装置比角位移检测装置贵很多，因此除了对定位精度要求特别高或行程特别长，不能采用滚珠丝杠的大型机床外，绝大多数数控机床均可采用半闭环进给伺服系统。

### 3. 按工艺用途分类

按工艺用途不同可将数控机床分为：金属切削类数控机床、金属成形类数控机床、数控特种加工机床和其他类型的数控机床。

(1) 金属切削类数控机床。这类数控机床包括数控车床、数控钻床、数控铣床、数控磨床、数控镗床及加工中心。切削类数控机床发展最早，目前种类繁多，功能差异也较大。这里特别强调的是加工中心，也称为可自动换刀的数控机床。这类数控机床都带有一个刀库，可容纳 10~100 多把刀具。其特点是：工件一次装夹可完成多道工序。为了进一步提高生产率，有的加工中心使用双工作台，一面加工，另一面装卸，工作台可自动交换等。

(2) 金属成形类数控机床。这类机床包括数控折弯机、数控组合冲床、数控弯管机、数控回转头压力机等。这类机床起步晚，但目前发展很快。

(3) 数控特种加工机床。如数控线(电极)切割机床、数控电火花加工、火焰切割机、数控激光切割机床等。

(4) 其他类型的数控机床。如数控三坐标测量机等。

### 4. 按数控机床的性能分类

(1) 低档数控机床，也称经济型机床。其特点是根据实际的使用要求，合理地简化系统，以降低产品价格。目前，我国把由单片机或单板机与步进电动机组成的数控系统和功能简单、价格低廉的系统称为经济型数控系统。该类系统主要用于车床、线切割机床以及旧机床的数控化改造等。在我国，这类数控机床有一定的生产批量。

低档数控机床的技术指标通常为：脉冲当量为 0.01~0.05 mm，快进速度为 4~10 m/min，开环步进电动机驱动，用数码管或简单 CRT 显示，主 CPU 一般为 8 位或 16 位。

(2)中档数控机床。其技术指标通常为:脉冲当量  $0.001 \sim 0.005 \text{ mm}$ ,快进速度  $15 \sim 24 \text{ m/min}$ ,伺服系统为半闭环直流或交流伺服系统,有较齐全的 CRT 显示,可以显示字符和图形,人机对话,自诊断等,主 CPU 一般为 16 位或 32 位。

(3)高档数控机床。其技术指标通常为:脉冲当量  $0.001 \sim 0.0001 \text{ mm}$ ,快进速度  $15 \sim 100 \text{ m/min}$ ,伺服系统为闭环直流或交流伺服系统,CRT 显示除了具备中档的功能外,还具有三维图形显示等功能,主 CPU 一般为 32 位或 64 位。

## 5. 按所用数控装置的构成方式分类

(1)硬线数控系统。此系统使用硬线数控装置,它的输入处理、插补运算和控制功能都由专用的固定组合逻辑电路来实现。不同功能的机床,其组合逻辑电路也不相同。改变或增减控制、运算功能时,需要改变数控装置的硬件电路,因此通用性和灵活性差,制造周期长,成本高。20 世纪 70 年代初期之前的数控机床基本上属于这种类型。

(2)软线数控系统,也称为计算机数控系统。此类系统使用软线数控装置。这种数控装置的硬件电路是由小型或微型计算机,再加上通用或专用的大规模集成电路制成,数控机床的主要功能几乎全部由系统软件来实现,所以不同功能的数控机床其系统软件也就不同,而修改或增减系统功能时,也不需要变动硬件电路,只需要改变系统软件。因此,该系统具有较高的灵活性,同时由于硬件电路基本上是通用的,从而有利于大量生产、提高质量和可靠性、缩短制造周期和降低成本。从 20 世纪 70 年代中期以后,随着微电子的发展和微型计算机的出现以及集成电路的集成度不断提高,计算机数控系统得到不断发展和提高,目前几乎所有的数控机床采用了软线数控系统。

### 1.1.4 典型数控系统

数控系统是数控机床的核心。数控机床可根据功能和性能要求不同而配置不同的数控系统,数控系统不同,其指令代码也有差别。

日本 FANUC、德国 SIEMENS、西班牙 FAGOR、德国 HEIDENHAIN、日本 MITSUBISHI 等公司的数控系统及相关产品在数控机床行业中占据主导地位。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. 日本 FANUC 系列数控系统

(1)高可靠性的 Power Mate 0 系列。用于控制 2 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 CNC 0-D 系列。0-TD 用于车床,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-MB/MA 用于加工中心和铣床,4 轴 4 联动;0i-TB/TA 用于车床,4 轴 2 联动;0i-mate MA 用于铣床,3 轴 3 联动;0i-mate TA 用于车床,2 轴 2 联动。

(5)具有网络功能的超小型、超薄型 CNC 16i/18i/21i 系列。控制单元与 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 最大可控制 8 轴,6 轴联动;18i 最大可控制 6 轴,4 轴联动;21i 最大可控制 4 轴,4 轴联动。

除此之外,还有实现机床个性化的 CNC 16/18/160/180 系列。

## 2. 德国 SIEMENS 系列数控系统

(1) SINUMERIK 802S/C。用于车床、铣床等,可控制 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) SINUMERIK 802D。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,最多可控制 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和传送机,最大可控制 31 个坐标轴。

## 3. FAGOR 数控系统

(1) CNC 8070 数控系统。它是目前 FAGOR 公司最高档的数控系统,代表 FAGOR 的顶级水平,是 CNC 技术与 PC 技术的结晶,是与 PC 兼容的数控系统,采用 Pentium CUP,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 $<1\text{ ms}$ ,PLC 可达 1024 输入点/1024 输出点,具有以太网、CAN、SERCOS 通信接口,可选用 $\pm 10\text{ V}$ 模拟量接口。

(2) 8055 系列数控系统。它是 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。它属于中高档数控系统,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 个手轮,8055-i 可实现 7 轴 7 联动+主轴+2 个手轮。两者的用户内存均可达到 1 MB 字节,且具有 $\pm 10\text{ V}$ 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/8055 TCO/MCO 系列。它是一种开放式的数控系统,可供 OEM 再开发成为专用数控系统,适用于任何机床设备。

(5) 8040/8055-i/8055 TC/MC 系列。它是一种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,俗称傻瓜式数控系统。

(6) 8025/8035 系列。8025 系列是 FAGOR 公司的中档数控系统,适用于铣床、加工中心以及其他数控设备,可控制 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 的更新换代产品。

## 4. 华中数控系统

武汉华中数控以“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 轴;HNC-21/22M 为铣削系统,最大联动轴数为 4 轴,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 系列交流伺服驱动装置,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。

## 5. CASNUC 2100 数控系统

CASNUC 2100 数控系统是北京航天数控的主要产品,是以 PC 机为硬件基础的模块化、开放式的数控系统,可用于数控车床、数控铣床、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。

### 1.1.5 我国数控机床的发展概况

我国的数控机床行业起步于 1958 年,由清华大学和北京第一机床厂合作研制了我国第一台数控铣床,1966 年研制成功晶体管并用于数控系统,1972 年研制成功集成电路数控系统,并出现了线切割机、数控铣床等代表性产品。但由于历史的原因,数控机床一直没有取得实质性成果。数控机床的品质和数量都很少,稳定性和可靠性也比较差,因此只在一些复杂的、特殊的零件加工中使用。

20 世纪 80 年代初,国内先后从日本、德国、美国等国引进了一些 CNC 装置及主轴、伺服系统的生产技术,并陆续投入了批量生产,这些数控系统性能比较完善,稳定性和可靠性都比较好,在数控机床上采用后,得到了用户的认可,从而结束了数控机床发展徘徊不前的局面,推动了数控机床的发展。20 世纪 90 年代初,国内的数控机床和数控系统的生产具有了一定的规模。2003 年开始,我国已成为全球最大的机床消费国,也是世界上最大的数控机床进口国。

从产值上看,机床行业数控化率呈现稳步攀升的态势,2005 年数控化率为 36.3%,但仍远低于同期日本(88%)、韩国(89%)、德国和美国(均为 75%左右),同时,2004 年和 2005 年我国机床的数控化率连续两年保持在 13%左右,远低于同期的日本(75.5%)、德国和美国(均为 60%)的水平。这意味着我国数控机床的发展空间很大。近年来,数控机床无论从产量、消费量还是进口量上都加快了增长速度,但进口量增长率始终大于产量增长率,国外数控产品始终对国产数控机床保持着压力。虽然增长率差额由 3.3%减小到了 0.9%,但简单的经济型数控机床占到近 70%,高中档数控机床几乎全部依赖进口,结构型矛盾依然突出。

### 1. 国产数控机床与国际先进水平差距逐渐缩小

数控机床是当代机械制造业的主流装备,国产数控机床的发展经历了 30 年,目前已经由成长期进入了成熟期,覆盖超重型机床、高精度机床、特种加工机床、锻压设备、前沿高新技术机床等领域,产品种类可与日、德、意、美等国并驾齐驱。特别是在 5 轴联动数控机床、超重型数控机床、立式和卧式加工中心、数控车床、数控齿轮加工机床领域,部分技术已经达到世界先进水平。其中,5 轴(坐标)联动数控机床是数控机床技术的制高点标志之一。它集计算机控