



中等职业学校机电类专业规划教材
根据教育部最新教学指导方案编写

数控设备与编程

SHUKONG SHEBEI YU BIANCHENG

主 编 潘玉松

主 审 邱士安



电子科技大学出版社

中等职业学校机电类专业规划教材

数控设备与编程

主 编 潘玉松

主 审 邱士安

电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

数控设备与编程/潘玉松主编. —成都: 电子科技大学出版社, 2007.6

ISBN 978-7-81114-539-7

I. 数… II. 潘… III. 数控机床—程序设计—专业学校—教材 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 094936 号

内 容 提 要

本书是根据机械类中等职业技术学校《数控设备与编程》课程的教学大纲编写的。全书共八章, 内容包括数控编程基本知识、数控机床典型机械结构、数控编程的内容及方法、数控车床及程序编制、数控铣床及加工中心程序编制、特种加工数控设备及程序编制、计算机辅助数控加工编程、数控机床的应用与维护。每章均附有习题。

本书可作为中等职业技术学校数控加工专业、模具加工技术专业, 机电一体化专业, 机械制造专业等专业的教材, 亦可作为从事数控编程、数控机床应用与维护的工程技术人员参考书。

数控设备与编程

主 编 潘玉松

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)

责任编辑: 张鹏

发 行: 新华书店经销

印 刷: 四川墨池印务有限公司

成品尺寸: 185mm×260mm 1/16 印张 9.5 字数 225 千字

版 次: 2007 年 6 月第一版

印 次: 2007 年 6 月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-81114-539-7

定 价: 16.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

◆ 邮购本书请与本社发行部联系。电话: (028) 83202323, 83256027

◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

◆ 课件下载在我社主页 www.uestcp.com.cn “下载专区” 电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

前 言

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神，落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设计划，我们组织本专业领域的骨干教师精心编写了本教材。

本书是根据机械类中等职业技术学校“数控设备与编程”课程教学大纲编写的。全书共八章，包括数控编程基本知识、数控机床的典型机械结构、数控编程的内容与方法、数控车床及其程序编制、数控铣床及加工中心程序编制、特种加工数控设备及程序编制、计算机辅助数控加工编程、数控机床的应用与维护。

本书贯彻了中等职业技术学校“以技能为目的，突出动手能力”的培养思想，参考了高职高专的能力教育模式，取材适当，内容丰富，理论联系实际。书中配有大量编程实例及习题，图文并茂，直观易懂，便于学生自主学习。同时，该教材吸取了该专业应用的最新成果，兼顾了数控设备的知识和编程方法的先进性和实用性。

为了方便教师教学，我们免费为使用本套教材的师生提供电子教学参考资料包：

- ◆ PowerPoint 多媒体课件
- ◆ 习题参考答案
- ◆ 教材中的程序源代码
- ◆ 教材中涉及的实例制作的各类素材

有需要的教师可以登录教学支持网站免费下载。在教材使用中有什么意见或建议也可以直接和我们联系，电子邮件地址：scqcmh@163.com。

由于编者水平有限，加上时间仓促，错误与不足之处在所难免，敬请批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 数控编程基本知识	1
1.1 数控技术的基本概念	1
1.1.1 数控技术	1
1.1.2 数控加工	1
1.1.3 数控机床	2
1.1.4 数控编程	2
1.2 数控机床概述	2
1.2.1 数控机床的组成与工作过程	2
1.2.2 数控机床的分类	4
1.2.3 数控加工的特点和应用范围	7
1.3 数控技术的现状和发展趋势	9
【习题】	10
第 2 章 数控机床的典型机械结构	11
2.1 电机与丝杠之间的连接	11
2.1.1 带有齿轮传动的进给运动	11
2.1.2 经同步带轮传动的进给运动	12
2.1.3 电机通过联轴器直接与丝杠连接	12
2.2 滚珠丝杠螺母副	12
2.2.1 滚珠丝杠螺母副的工作原理	12
2.2.2 滚珠丝杠螺母副结构	13
2.2.3 滚珠的循环方式	13
2.2.4 滚珠丝杠螺母副轴向间隙的调整	14
2.2.5 滚珠丝杠的支承方式	15
2.2.6 制动装置	16
2.2.7 滚珠丝杠的保护	17
2.3 进给系统传动间隙的补偿机构	17
2.3.1 齿隙补偿机构	17
2.3.2 键连接间隙补偿机构	19
【习题】	19
第 3 章 数控编程的内容与方法	20
3.1 数控编程的内容与步骤	20



3.2	数控编程的方法	21
3.3	常用的数控标准	22
3.3.1	数控加工程序的格式	23
3.3.2	数控编程的代码	25
3.3.3	程序编制中的坐标系	31
3.4	常用数控指令及用法	34
3.4.1	常用准备功能指令及用法	34
3.4.2	常用辅助功能指令及用法	45
3.4.3	其他常用编程指令及应用	46
	【习题】	49
第4章	数控车床及其程序编制	51
4.1	数控车床加工编程	51
4.1.1	数控车床的加工特点	51
4.1.2	数控车床的坐标系统与编程特点	52
4.1.3	数控车床的编程指令及用法	53
4.2	数控车床编程实例	60
	【习题】	62
第5章	数控铣床、加工中心及其程序编制	63
5.1	数控铣床程序编制	63
5.1.1	数控铣床的铣削加工对象分析	64
5.1.2	数控铣削的主要功能	66
5.1.3	数控铣床的编程方法	67
5.1.4	数控铣床编程举例	73
5.2	数控加工中心加工编程及实例	75
5.2.1	概述	75
5.2.2	加工中心编程实例	76
	【习题】	78
第6章	特种加工数控设备及其程序编制	80
6.1	数控线切割机床的基本原理和加工特点	80
6.1.1	切割机床加工的基本原理	80
6.1.2	切割机床加工的特点	82
6.2	数控线切割机床的编程特点与常用指令	82
6.2.1	3B 格式程序编制	83
6.2.2	ISO 代码程序编制	84
6.3	线切割编程实例	86
	【习题】	89

第 7 章 计算机辅助编程	90
7.1 计算机辅助数控加工编程技术概述	90
7.1.1 计算机辅助数控加工编程的基本原理	90
7.1.2 计算机辅助数控编程技术的发展历程	91
7.1.3 计算机辅助数控编程技术的现状与发展趋势	91
7.2 CAD/CAM 集成化软件系统简介	93
7.2.1 CAD/CAM 软件系统的组成	93
7.2.2 CAD/CAM 系统的基本功能	94
7.2.3 CAD/CAM 软件系统编程的基本步骤	94
7.2.4 常用的集成化 CAD/CAM 软件简介	96
7.3 Mastercam 软件	100
7.3.1 Mastercam 软件的基本操作	100
7.3.2 Mastercam 软件的基本编程方法	102
7.3.3 编程实例	104
【习题】	120
第 8 章 数控机床的应用与维护	121
8.1 数控机床的选用	121
8.1.1 选用的方法	121
8.1.2 选用的一般原则	122
8.1.3 选用要素	123
8.2 数控机床的安装与调试	125
8.2.1 数控机床的安装	125
8.2.2 数控机床的调试	126
8.3 数控机床的验收	127
8.3.1 机床外观的检查	127
8.3.2 机床几何精度的检查	128
8.3.3 机床性能及数控功能的试验	128
8.4 数控机床的使用与维修	130
8.4.1 数控机床的使用	130
8.4.2 数控机床的维修	132
参考文献	143

第 1 章 数控编程基本知识

随着社会经济发展对制造业的要求不断提高，以及科学技术特别是计算机技术的高速发展，传统的制造业已发生了根本性的变革。以数控技术为主的现代制造技术占据了重要地位，数控技术集微电子、计算机、信息处理、自动检测、自动控制等高新技术于一体，是制造业实现柔性化、自动化、集成化、智能化的重要基础。这个基础是否牢固直接影响到一个国家的经济发展和综合国力，关系到一个国家的战略地位。因此，世界上各工业发达国家均采取重大措施来发展自己的数控技术及其产业。在我国，数控技术与装备的发展亦得到了高度重视，近年来取得了相当大的进步，特别是在通用微机数控领域，基于 PC 平台的国产数控系统，已经走在了世界前列。

1.1 数控技术的基本概念

1.1.1 数控技术

数控（Numerical Control）技术是指用数字化的信息对某一对象进行控制的技术，控制对象可以是位移、角度、速度等机械量，也可以是温度、压力、流量、颜色等物理量，这些量的大小不仅是可测量的，而且可以经 A/D 或 D/A 转换，用数字信号来表示。数控技术是近代发展起来的一种自动控制技术，是机械加工现代化的重要基础与关键技术。

1.1.2 数控加工

数控加工是指采用数字信息对零件加工过程进行定义，并控制机床进行自动运行的一种自动化加工方法。数控加工技术是 20 世纪 40 年代后期为适应加工复杂外形零件而发展起来的一种自动化技术。1947 年，美国帕森斯公司为了精确地制作直升机机翼、桨叶和飞机框架，提出了用数字信息来控制机床自动加工外形复杂零件的设想，他们利用电子计算机对机翼加工路径进行数据处理，并考虑到刀具直径对加工路径的影响，使得加工精度达到 ± 0.0015 英寸（约 0.0381mm），这在当时的水平来看是相当高的。1949 年美国空军为了能在短时间内制造出经常变更设计的火箭零件，与帕森斯公司和麻省理工学院（MIT）伺服机构研究所合作，于 1952 年研制成功世界上第一台数控机床——三坐标立式铣床，可控制铣刀进行连续空间曲面的加工，揭开了数控加工技术的序幕。

数控加工是一种高效率、高精度与高柔性特点的自动化加工方法，可有效解决复杂、精密、小批多变零件的加工问题，充分适应现代化生产的需要。数控加工必须由控制机床来实现。



1.1.3 数控机床

数控机床就是采用了数控技术的机床。数控机床将零件加工过程所需的各种操作（如主轴变速、主轴启动和停止、松夹工件、进刀退刀、冷却液开或关等）和步骤以及刀具与工件之间的相对位移量都用数字化的代码来表示，由编程人员编制成规定的加工程序，通过输入介质（磁盘等）送入计算机控制系统，由计算机对输入的信息进行处理与运算，发出各种指令来控制机床的运动，使机床自动地加工出所需要的零件。

现代数控机床综合应用了微电子技术、计算机技术、精密检测技术、伺服驱动技术以及精密机械技术等多方面的最新成果，是典型的机电一体化产品。

1.1.4 数控编程

数控编程（NC Programming）就是生成用数控机床进行零件加工的数控程序的过程。数控程序是由一系列程序段组成，把零件的加工过程、切削用量、位移数据以及各种辅助操作，按机床的操作和运动顺序，用机床规定的指令及程序格式排列而成的一个有序指令集。例如：

N01 G00 X200 Y-39 M03

该程序段表示一个操作：命令机床以设定的快速运动速度，以直线方式移动到 $x=200\text{mm}$ ， $y=-39\text{mm}$ 处后，主轴正转。其中 N01 是程序段的行号；G00 字表示机床快速定位；X200 和 Y-39 表示沿 X 轴和 Y 轴的位移坐标值；M03 表示主轴正转。

零件加工程序的编制（数控编程）是实现数控加工的重要环节，特别是对于复杂零件的加工，其编程工作的重要性甚至超过数控机床本身。此外，在现代生产中，产品形状及质量信息往往需通过坐标测量机或直接在数控机床上测量来得到，测量运动指令也有赖于数控编程来产生。因此，数控编程对于产品质量控制也有着重要的作用。数控编程技术涉及制造工艺、计算机技术、数学、计算机几何、微分几何、人工智能等众多学科领域知识，它所追求的目标是如何更有效地获得满足各种零件加工要求的高质量数控加工程序，以便充分地发挥数控机床的性能，获得更高的加工效率与加工质量。

1.2 数控机床概述

1.2.1 数控机床的组成与工作过程

1. 数控机床的组成

如图 1-1 所示，数控机床主要由输入输出设备、计算机数控系统、伺服系统和机床本体四部分组成。

（1）输入输出设备

输入输出设备主要实现编制程序、输入程序、输入数据以及显示、存储和打印等功能。常用的输入输出设备有：键盘、纸带阅读机、磁带或磁盘输入机、CRT 显示器等，高级的数

控机床还配有一套自动编程机或 CAD/CAM 系统。

(2) 数控系统

数控系统是数控机床的“大脑”和“核心”，通常由一台通用或专用计算机构成。它的功能是接受输入装置输入的加工信息，经过数控系统中的系统软件或逻辑电路进行译码、运算和逻辑处理后，发出相应的各种信号和指令给伺服系统，通过伺服系统控制机床的各个运用部件按规定要求动作。

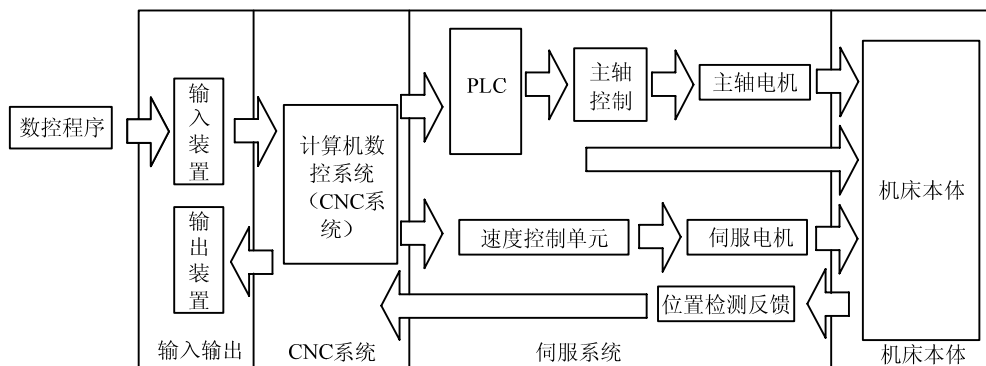


图 1-1 数控机床基本结构框图

(3) 伺服系统

伺服系统接收来自数控系统的指令信息，严格按指令信息的要求驱动机床的运动部件动作，以加工出符合图纸要求的零件。伺服系统的伺服精度和动态响应是影响数控机床的加工精度、表面质量和生产率的重要因素之一。

伺服系统包括伺服控制线路、功率放大线路、伺服电动机、机械传动机构和执行机构。常用的伺服电机是步进电机、直流和交流伺服电机。伺服系统有开环、半闭环和闭环之分。在半闭环和闭环伺服系统中，还需配有位置检测装置，直接或间接测量执行部件的实际位移量，并与指令位移量进行比较，按闭环原理，用其差值来控制执行部件的进给运动。

(4) 机床本体

机床本体是数控机床的主体，主要包括：床身、立柱等支承部件；主轴等运动部件；工作台、刀架以及进给运动执行部件、传动部件；此外还有冷却、润滑、转位和夹紧等辅助装置，对加工中心类数控机床，还有存放刀具的刀库、交换刀具的机械手等部件。与传统机床相比，数控机床的外部造型、整体布局、传动系统与刀具系统的部件结构以及操作机构等都发生了很大的变化，这种变化的目的是为了满足不同数控技术的要求和充分发挥数控机床的特点。

2. 数控机床的工作过程

在数控机床上加工零件的过程如图 1-2 所示。

(1) 准备阶段

根据加工零件的图纸，确定有关加工数据（刀具轨迹坐标点、加工的切削用量、刀具尺寸信息等），根据工艺方案、夹具选用、刀具类型选择等确定有关其他辅助信息。

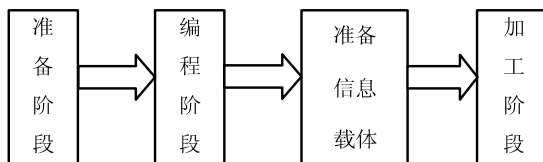


图 1-2 数控加工过程



(2) 编程阶段

根据加工工艺信息，用机床数控系统能识别的语言编写数控加工程序。程序就是对加工工艺过程的描述，并填写程序单。

(3) 准备信息载体

根据已编好的程序单，将程序存放在信息载体（穿孔带、磁带、磁盘等）上，信息载体上存储着加工零件所需要的全部信息。目前，随着计算机网络技术的发展，可直接由计算机通过网络与机床数控系统通信。

(4) 加工阶段

当执行程序时，机床 NC 系统将程序译码、寄存和运算，向机床伺服机构发出运动指令，以驱动机床的各运动部件，自动完成对工件的加工。

1.2.2 数控机床的分类

数控机床的种类、型号繁多，其分类方法主要有以下几种：

1. 按工艺用途分类

数控机床按其加工工艺方式可分为金属切削类数控机床、金属成型类数控机床、特种加工数控机床和其他类型数控机床。在金属切削类数控机床中，根据其自动化程度的高低，又可分为普通数控机床、加工中心和柔性制造单元（FMC）。

普通数控机床和传统的通用机床一样，有数控车床（如图 1-3 所示）、数控铣床（如图 1-4 所示）、数控钻床等，这类数控机床的工艺特点和相应的通用机床相似，但它们具有复杂形状零件的加工能力。

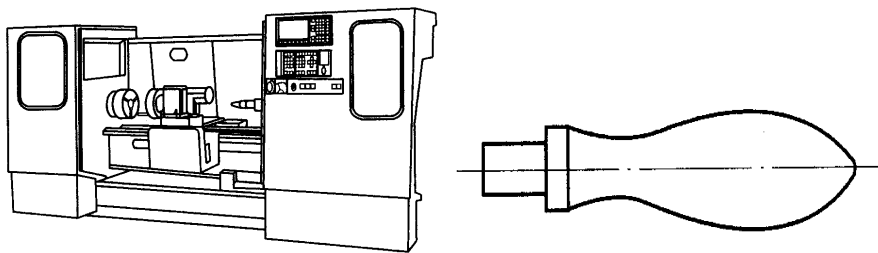


图 1-3 数控车床及其加工的手柄零件

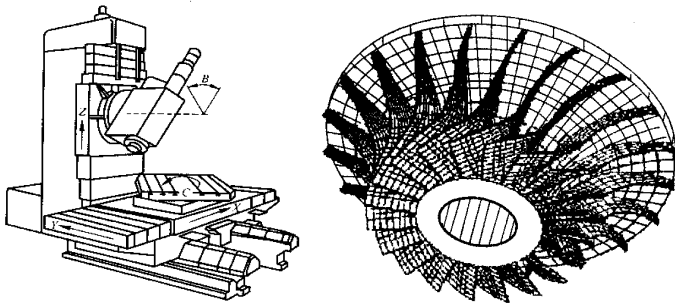


图 1-4 五轴数控铣床及其加工的叶轮零件

加工中心机床常见的是镗铣类加工中心（如图 1-5 所示）和车削中心，它们是在相应的普通数控机床的基础上加装刀库和自动换刀装置而构成。其工艺特点是：工件经一次装夹后，数控系统能控制机床自动地更换刀具，连续地自动地对工件各加工面进行铣（车）、镗、钻等多工序加工。

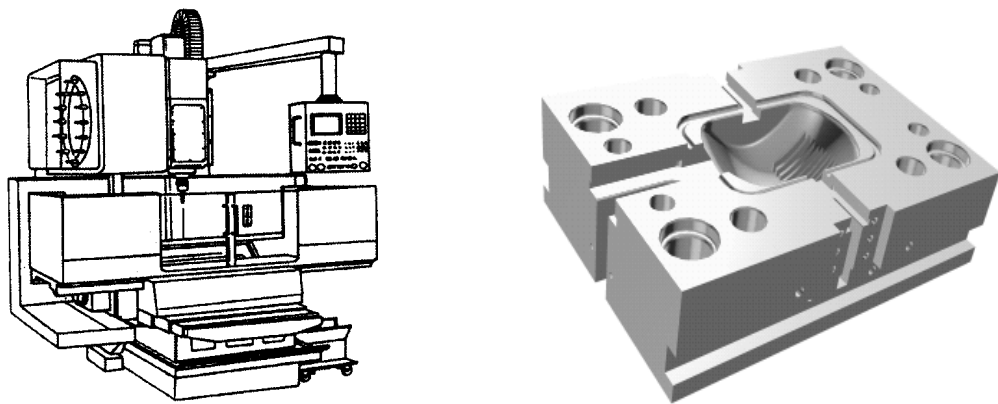


图 1-5 镗铣加工中心及其加工的箱体零件

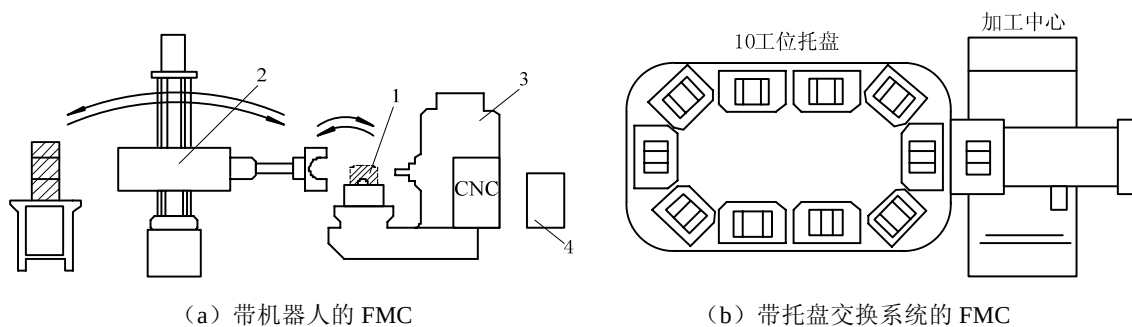
柔性制造单元（如图 1-6 所示）是具有更高自动化程度的数控机床。它可以由加工中心加上搬运机器人等自动物料存储运输系统组成，有的还具有加工精度、切削状态和加工过程的自动监控功能，可实现 24 小时无人加工。

2. 按控制运动轨迹分类

（1）点位控制数控机床

这类数控机床只控制运动部件从一点移动到另一点的准确定位，即只保证行程终点的坐标值。而对点到点之间的移动速度和运动轨迹没有严格要求，可以沿多个坐标同时移动，也可以沿各个坐标先后移动。在移动过程中，刀具也不进行切削加工。

采用点位控制的机床有数控钻床、数控冲床、数控坐标镗床和数控测量机等。用于加工带有坐标孔系的零件或测量坐标位置。为提高生产效率和保证定位精度，机床工作时一般先快速运动，当接近终点位置时，再减速缓慢趋近终点，从而减少运动部件因惯性过冲所引起的定位误差。



1-工件；2-机器人；3-加工中心；4-监控器

图 1-6 柔性制造单元



（2）直线控制数控机床

这类数控机床不仅要控制点到点的准确定位，而且要控制两点之间移动的轨迹是一条直线，且在运动过程中，刀具按规定的进给速度进行切削。采用这类控制的机床有简易数控车床、数控镗铣床和数控磨床等。

（3）轮廓控制数控机床

这类机床又叫连续控制或多坐标联动数控机床。它能够对两个或两个以上的运动坐标轴的位移及速度进行连续相关的控制，使刀具和工件按规定的平面或空间轮廓轨迹进行相对运动，从而加工出合格的产品。这类机床的数控装置一般要求有直线和圆弧插补功能，有较高速度的数字运算和信息处理功能，以便加工出形状复杂的零件。目前，大多数数控机床，如数控车床、铣床、磨床、加工中心机床以及其他数控设备（如数控绘图机、测量机等）均具有轮廓控制功能。

3. 按伺服控制方式分类

（1）开环控制数控机床

如图 1-7 所示，开环控制数控机床没有位置检测元件，伺服驱动元件通常有功率步进电机或混合式步进电机。数控系统每发出一个指令脉冲，经驱动电路放大后，驱动电机旋转一个角度，再经传动机构带动工作台移动。这类机床控制的信息流是单向的，脉冲信号发出后，实际位移值不再返回，所以称开环控制，其精度主要取决于驱动元器件和步进电机的性能。



图 1-7 开环控制系统框图

开环控制的优点是结构简单，调试和维修方便，成本较低；缺点是精度较低；进给速度也受步进电机工作频率的限制。一般适用于中、小型经济型数控机床，以及普通机床的数控化改造。近年来，随着高精度步进电机特别是混合式步进电机的应用，以及恒流斩波、PWM 等技术及微步驱动、超微步驱动技术的发展，步进伺服的高频出力与低频振荡得到极大的改善，开环控制数控机床的精度和性能也大为提高。

（2）闭环控制数控机床

如图 1-8 所示，这类机床带有直线位置检测装置，可直接对工作台的实际位移量进行检测。加工过程中，将速度反馈信号送到速度控制电路，将工作台实际位移量反馈回位置比较电路，与数控装置发出的位移指令值进行比较，用比较后的误差信号作为控制量去控制工作台的运动，直到误差为零为止。常用的伺服驱动元件为直流或交流伺服电动机。

这种机床因为把工作台纳入了控制环，故称为闭环控制。闭环控制可以消除包括工作台传动链在内的传动误差，因而定位精度高、调节速度快。但由于机床工作台惯量大，对系统的稳定性会带来不利影响，使调试、维修困难，且控制系统复杂成本高，故一般对要求很高的数控机床才采用这种控制方式，如数控精密镗铣床等。

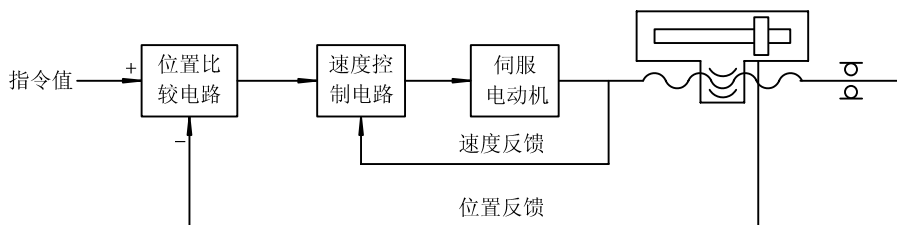


图 1-8 闭环控制系统框图

（3）半闭环控制数控机床

如图 1-9 所示，这类机床与闭环控制机床的区别在于检测反馈信号不是来自安装在工作台上的直线位移测量元件，而是来自安装在电机轴或丝杆轴上的角位移测量元件。通过测量电机转角或丝杆转角推算出工作台的位移量，并将此值与指令值进行比较，用差值来进行控制。从图 1-9 中可以看出，由于工作台未包括在控制回路中，因而称为半闭环控制。这种控制方式由于排除了惯量很大的机床工作台部分，使整个系统的稳定性得以保证。目前已普遍将角位移检测元件与伺服电机做成一个部件，使系统结构简单，调试和维护也方便。

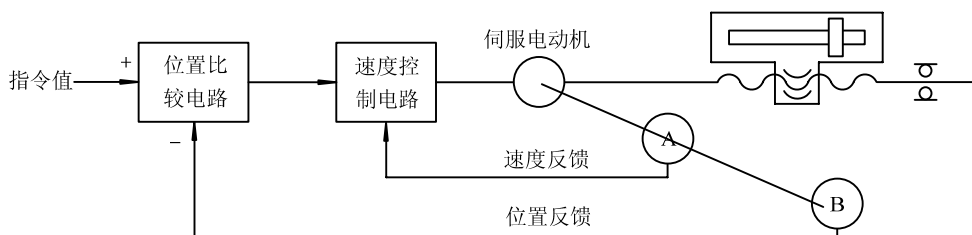


图 1-9 半闭环控制系统框图

半闭环控制数控机床的性能介于开环和闭环控制数控机床之间。精度虽比闭环低，但调试和维护维修却比闭环方便得多，因而得到了广泛的应用。

4. 按控制坐标轴数分类

根据控制系统所能控制的坐标轴数，数控机床可分为：两坐标（轴）数控机床、2.5 坐标（轴）数控机床、三坐标（轴）数控机床以及多坐标（轴）数控机床。根据控制系统所能同时控制的坐标轴数，数控机床可分为：两坐标（轴）联动数控机床、三坐标（轴）联动数控机床以及多坐标（轴）联动数控机床。一般数控机床的联动轴数少于控制轴数。

1.2.3 数控加工的特点和应用范围

1. 数控加工的特点

（1）具有复杂形状加工能力

复杂形状零件在飞机、汽车、造船、模具、动力设备和国防军工等制造部门具有重要地位，其加工质量直接影响整机产品的性能。数控加工运动的任意可控性使其能完成普通加工方法难以完成或者无法进行的复杂形状零件的加工。



（2）高质量

数控加工是用数字程序控制实现自动加工，排除了人为误差因素，且加工误差还可以由数控系统通过软件技术进行补偿校正。因此，采用数控加工可以提高零件加工精度和产品质量。

（3）高效率

与采用普通机床加工相比，采用数控加工一般可提高生产率 2~3 倍，在加工复杂零件时生产率可提高十几倍甚至几十倍。特别是五面体加工中心和柔性制造单元等设备，零件一次装夹后能完成几乎所有表面的加工，不仅可以消除多次装夹引起的定位误差，还可以大大减少加工辅助操作，使加工效率进一步提高。

（4）高柔性

只需改变零件程序即可适应不同品种的零件加工，且几乎不需要制造专用工装夹具，因而加工柔性好，有利于缩短产品的研制与生产周期，适应多品种、中小批量的现代生产需要。

（5）减轻劳动强度，改善劳动条件

数控加工是按事先编好的程序自动完成的，操作者不需要进行繁重的重复手工操作，劳动强度和紧张程度大为改善，劳动条件也相应得到改善。

（6）有利于生产管理

数控加工可大大提高生产率、稳定加工质量、缩短加工周期、易于在工厂或车间实行计算机管理。数控加工技术的应用，使机械加工的大量前期准备工作与机械加工过程联为一体，使零件的计算机辅助设计（CAD）、计算机辅助工艺规划（CAPP）和计算机辅助制造（CAM）的一体化成为现实，宜于实现现代化的生产管理。

2. 数控加工的主要应用范围

数控加工是一种可编程的柔性加工方法，但其设备费用相对较高，故目前数控加工多应用于加工零件形状比较复杂、精度要求较高，以及产品更换频繁、生产周期要求短的场合。具体地说，下面这些类型的零件最适宜于数控加工：

- （1）形状复杂（如用数学方法定义的复杂曲线、曲面轮廓）、加工精度要求高的零件；
- （2）公差带小、互换性高、要求精确复制的零件；
- （3）用普通机床加工时，要求设计制造复杂的专用工装夹具或需要很长调整时间的零件；
- （4）价值高的零件；
- （5）小批量生产的零件；
- （6）需一次装夹加工多部位（如钻镗铰攻螺纹及铣削加工联合进行）的零件。

可见，目前的数控加工主要应用于以下两个方面：

一方面的应用是常规零件加工，如二维车削、箱体类镗铣等。其目的在于：提高加工效率，避免人为误差，保证产品质量；以柔性加工方式取代高成本的工装设备，缩短产品制造周期，适应市场需求。这类零件一般形状较简单，实现上述目的的关键在于提高机床的柔性自动化程度、高速高精加工能力、加工过程的可靠性与设备的操作性能。同时合理的生产组织、计划调度和工艺过程安排也非常重要。

另一方面的应用是复杂形状零件加工，如模具型腔、涡轮叶片等。这类零件型面复杂，用常规加工方法难以实现，它不仅促使了数控加工技术的产生，而且也一直是数控加工技术主要研究及应用的对象。由于零件型面复杂，在加工技术方面，除要求数控机床具有较强的

运动控制能力（如多轴联动）外，更重要的是如何有效地获得高效优质的数控加工程序，并从加工过程整体上提高生产效率。

1.3 数控技术的现状和发展趋势

数控机床技术可从精度、速度、柔韧性和自动化程度等方面来衡量，目前的技术现状与发展趋势如下：

1. 高精度化

精度包括机床制造的几何精度和机床使用的加工精度，两个方面均已取得明显进展。例如，普通级中等规格加工中心的定位精度已从 20 世纪 80 年代中期的 $0.012 / 300\text{mm}$ ，提高到 $(0.002-0.005) / \text{全程}$ 。精密级数控机床的加工精度已由原来的 0.005mm 提高到 0.0015mm 。

2. 高速度化

提高生产率是机床技术追求的基本目标之一，实现该目标的关键是提高切削速度、进给速度和减少辅助时间。中等规格加工中心的主轴转速已从过去的 $2000 \sim 3000\text{r/min}$ 提高到 $10\,000\text{r/min}$ 以上。日本新潟铁工所生产的 UHSIO 型超高速数控立式铣床主轴最高转速达 $100\,000\text{r/min}$ 。中等规格加工中心的快速进给速度从过去的 $8 \sim 12\text{m/min}$ 提高到 60m/min 。加工中心换刀时间从 $5 \sim 10\text{s}$ 减少到小于 1s 。而工作台交换时间也由过去的 $12 \sim 20\text{s}$ 减少到 2.5s 以内。

3. 高柔性化

采用柔性自动化设备，是提高加工精度和效率、缩短生产周期、适应市场变化需求和提高竞争能力的有效手段。数控机床在提高单机柔性化的同时，朝着单元柔性化和系统柔性化方向发展。如出现了可编程控制器（PLC）控制的可调组合机床、数控多轴加工中心，换刀换箱式加工中心、数控三坐标动力单元等具有高柔性、高效率的柔性加工单元（FMC）。柔性制造系统（FMS）、介于传统自动线与 FMS 之间的柔性制造线（FTL）、计算机集成制造系统（CIMS）以及自动化工厂（FA）也有较大发展。有的厂家则走组合柔性化之路，这类柔性加工系统由若干加工单元合成，自动上下料机械手兼负工件传输的作用。

4. 高自动化

高自动化是指在全部加工过程中尽量减少“人”的介入而自动完成规定的任务，它包括物流和信息流的自动化。自 20 世纪 80 年代中期以来，以数控机床为主体的加工自动化已从“点”的自动化（单台数控机床）发展到“线”的自动化（FMS、FTL）和“面”的自动化（柔性制造车间），结合信息管理系统的自动化，逐步形成整个工厂“体”的自动化。在国外已出现 FA（自动化工厂）和 CIMS（计算机集成制造）工厂的雏形实体。尽管由于这种高自动化的技术还不够完备，投资过大，回收期长，但数控机床的高自动化并向 FMS、CIMS 集成方向发展的总趋势仍然是机械制造业发展的主流。数控机床的自动化除进一步提高其自动编程、上下料、加工等自动化程度外，还在自动检索、监控、诊断等方面进一步发展。



5. 智能化

随着人工智能在计算机领域的不断渗透与发展，同时为适应制造业生产柔性化、自动化发展需要，数控设备智能化程度也在不断提高。如 Mitsubishi Electric 公司的数控电火花成型机床上的“Miracle Fuzzy”自适应控制器利用基于模糊逻辑的自适应控制技术，能自动控制和优化加工参数，使操作者不需具备专门的知识就能很好地操作机床；日本大隈公司的 7000 系列数控系统带有人工智能式自动编程功能；日本牧野公司在电火花数控系统 MAKINO-MCE20 中，用带自学习功能的神经网络专家系统代替操作人员进行加工监视。

6. 复合化

复合化包含工序复合化和功能复合化。数控机床的发展已模糊了粗精加工工序的概念。加工中心的出现，又把车、铣、镗等工序集中到一台机床来完成，打破了传统工序界限和分开加工的工艺规程。近年来，相继出现了许多跨度更大、功能集中的超复合化数控机床，如日本池贝铁工所的 TV4L 立式加工中心，由于采用 U 轴，亦可进行车加工；美国辛辛那提公司的车、铣、镗型多用途制造中心；意大利 SAFOP 的车、镗、铣、磨复合机床；瑞士 RASKIN 公司的冲孔、成形与激光切割复合机床等。

除上述几个基本趋势外，值得一提的是数控机床的结构技术正取得重大突破。近年来已出现了所谓六条腿结构的并联加工中心，如美国 GIDDINGS & LEWIS 公司的 VARIAX（“变异型”）加工中心、INGERSOLL 公司的 OCTAHEDRALHEXAPOD（“八面体的六足动物”）加工中心等。这种新颖的加工中心是采用以可伸缩的六条腿（伺服轴）支撑并连接上平台（装有主轴头）与下平台（装有工作台）的构架结构形式，取代传统的床身、立柱等支撑结构。而没有任何导轨与滑板的所谓“虚轴机床”（VIRTUAL AXIS MACHINE）。其最显著的优点是机床基本性能高，精度、刚度和加工效率均可比传统加工中心高出许多倍。随着这种结构技术的成熟和发展，数控机床技术将进入一个有重大变革和创新的新时代。

【习题】

1. 简述数控技术、数控加工、数控机床和数控编程的含义。
2. 数控机床是由哪几部分组成？各部分的作用是什么？
3. 数控机床有哪几种分类方法？各有什么特点？
4. 什么是点位控制、直线控制、轮廓控制？三者有何区别？
5. 数控机床按伺服系统控制方式分为哪三类？各用在什么场合？
6. 数控加工的特点是什么？数控加工的主要应用范围有哪些？
7. 数控机床的发展趋势主要有哪些？