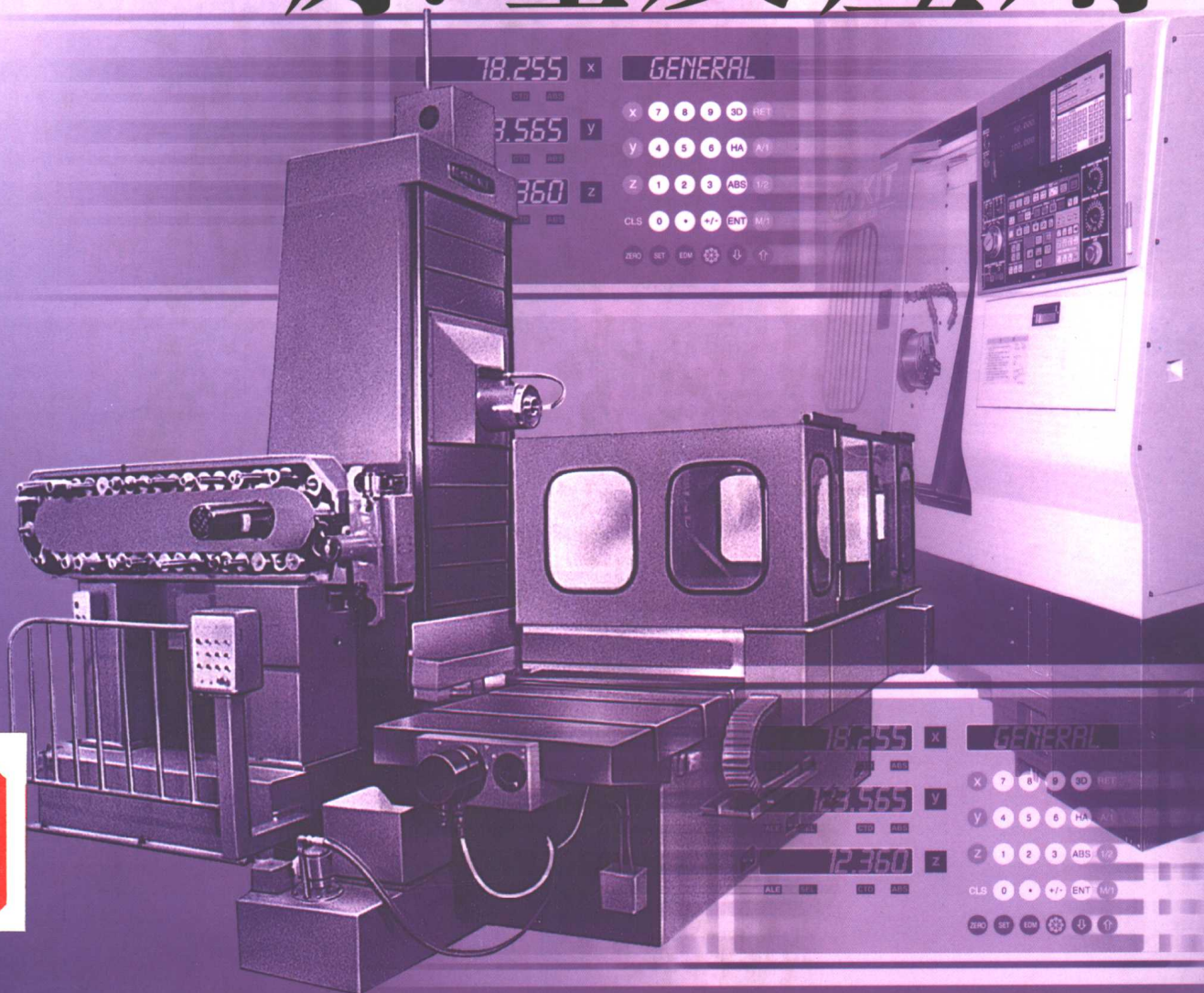


职业技术教育教材

机电一体化——数控机床加工技术专业

# 数控机床 原理及应用



机械工业出版社  
China Machine Press

职业技术教育教材

机电一体化——数控机床加工技术专业

# 数控机床原理及应用

上海市职业技术教育课程改革与教材建设委员会 组编

---



机械工业出版社

本教材根据“以能力为本位，培养智能型操作人员”的课改方针，介绍了数控机床的概况、发展趋势及主要部件的结构特征，并重点介绍了日本 FANUC 系统、美国 A—B 系统的编程特点及操作过程。其中，数控车床、数控铣床、加工中心等章节后都有一个综合实例，并分别介绍了这些机床的操作过程及注意事项，适用于职业技术学校数控加工专业及机械制造类各专业，也适用于数控机床操作人员的培训。

#### 图书在版编目 (CIP) 数据

数控机床原理及应用 / 上海市职业技术教育课程改革  
与教材建设委员会组编. —北京: 机械工业出版社,  
2001.9

职业技术教育教材. 机电一体化——数控机床加工技  
术专业

ISBN 7-111-09243-0

I. 数… II. 上… III. 数控机床—专业学校—教  
材 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 058139 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:王英杰 版式设计:张世琴 责任校对:孙志筠

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

中国建筑工业出版社密云印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·13.25 印张·326 千字

0 001-4000 册

定价:20.00 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

# 上海市职业技术教育机械专业 教材编审委员会名单

主 任 夏毓灼  
副 主 任 徐韵发 吴志清  
委 员 (按姓氏笔画排列)  
吉广镜 刘际远 金瑞樑  
徐孝远 高奇玲 谢卫华

秘 书 相雅蓉  
本 书 主 编 李文忠  
本 书 副 主 编 严建红  
本 书 参 编 余建亮 黄 忠 顾德仁  
本 书 主 审 裴仁清

# 序

我国的现代化建设不但需要高级科学技术专家，而且迫切需要职业技术人才、管理人员和技术工人，而这类人才的培养主要是通过职业技术教育来实现的，所以党和国家非常重视职业技术教育的改革和发展。努力培养出各行各业所需的职业人才，是社会、经济发展对职业技术教育提出的迫切要求。我国的职业技术教育长期实行的是“学科本位”的教学模式，这种模式重理论轻实践，重知识轻技能，培养出的学生不适应社会、经济发展的要求。因此，职业技术教育要深化改革，办出特色，为社会培养出既有理论又有技能，德、智、体全面发展的一代新人。

职业技术教育要办出自己的特色，关键在于课程改革与教材建设。为此，1996年上海市教委启动了职业技术教育课程改革与教材建设工程（简称“10181”工程），即用5年左右的时间，完成10门普通文化课程的改革及示范教材的编写工作；完成18个典型专业（工种）的课程改革以及同步编写出部分典型示范性教材；经过10年左右的改革实践，基本形成一个具有职教特色的课程结构和教材体系。

这次课程改革与教材建设是以社会和经济发展的需要为出发点，以职业（岗位）需求为直接依据，以现行职业技术教育课程、教材的弊端为突破口，积极学习并借鉴国外职业技术教育课程、教材改革的有益经验，以实现办出职教特色的根本目的。在充分研究和广泛征求意见的基础上，确立了“能力为本位”的改革指导思想。目的是为了克服职教长期存在的重理论轻实践、重知识轻技能的倾向，真正培养出经济和社会发展所需要的职业技术人才。

在各方面的共同努力下，新的教材终于与广大师生见面了。这些新的教材并不是职业技术教育课程改革与教材建设的全部，它只是典型的示范性教材，因为职业技术教育的专业门类繁多，不可能在较短的时间内，依靠少数编写人员解决职教中全部的课程、教材问题。职业技术教育的课程改革和教材建设是一项系统的长期的工作，只有充分发挥广大教师的改革积极性，在教学过程中不断用“能力本位”的教育思想，主动进行课程与教材的改革，我们的课程、教材改革才能全面、持续而深入，才可能真正全面提高教学质量和效益，以不断适应社会、经济发展的需要。

新的教材代表新的思想、新的教法和学法。希望通过这些教材给大家一些启迪，同时也希望大家对新教材提出宝贵的意见。

在课程改革与教材建设过程中，得到了各方面的大力支持，特别是广大编审人员为此付出了辛勤的劳动。在此，向他们表示衷心的感谢！

上海市教育委员会副主任

上海市职业技术教育课程改革与教材建设委员会主任

**薛喜民**

## 前 言

“机电一体化——数控机床加工技术专业”教材，全套共14本，经过5年的努力，终于付梓出版了。这套教材是上海市教委组织的“10181”课程改革的教材建设工程的重要组成部分，也是机械专业课程改革的教材建设的可喜成果。

随着科学技术的高速发展，传统的机械工业呈现出了新的技术发展趋势，进入了智能化领域。机电一体化的迅猛发展和数控机床加工技术在企业的普遍应用，对生产一线操作人员的知识和能力要求越来越高，客观上要求一线操作人员应由经验型向智能型转变。这套新教材正是为顺应这一发展趋势而组织编写的。

近5年来，我们机械专业教材编审委员会为此付出了辛勤的劳动。首先组织了长达半年的调查研究，并且参照加拿大CBE经验，制作了DACOM表，就数控机床加工技术专业职业技术人员的知识、能力要求，在五大行业、72个企业中问卷调查了780人次，从而明确了该专业的知识和能力结构。其次，认真进行了课程改革方案的讨论和研究，确定了机电结合，“以机为主，以电为辅”；在课程安排中“以机为主，突出工艺”、“以电为辅，够用为度”的原则，然后对传统的课程体系进行重组优化，如对陈旧老化的知识予以删除，对繁琐的内容予以简化，对某些课程进行重新组合，针对新知识，特别是新的能力需求，设置了新课程。最后，我们按照教材的编写要求，组织了14个编写组，实施主编负责制。所聘的编写人员都是具有改革创新精神、有丰富教学经验、熟悉专业技术的专业人才；同时聘请了有较高造诣的高校教授任主审。为了确保教材质量，对每本教材的编写提纲都组织有关专家进行了逐一论证，从而保证了这套教材的科学性、针对性、实用性。

在这里，我觉得有必要对本专业的设计作一概要介绍。

专业学习期限：学制4年。

培养目标是德、智、体、美全面发展，具有相当于高中的文化基础知识，掌握数控机床加工技术的理论和职业技能，面向生产第一线的工艺实施和智能型操作人员。

本专业强调实务能力，学生通过本专业的学习后，可具有中级水平的数控机床操作能力；具有编制中等复杂程度零件数控加工程序的能力；具有数控机床的刀具选用、调整、工件装夹等技能；具有数控机床维护、保养，并能排除简单故障的能力；具有正确解决零件在数控机床加工过程中质量问题的能力。

这套教材能得以顺利出版，无疑是集体智慧的结晶，是团队合作的成果。在此，我要感谢上海市职业技术教育课程改革与教材建设委员会的正确领导和指导；要感谢上海工业系统各行业、企业的支持和通力合作；要感谢为此呕心沥血、伏案疾书的近百名编审人员；最后还要感谢机械工业出版社的同志们。

当今，我们正处在改革的年代，正是这个年代催生了这套具有改革精神、时代特色和专业个性的新教材。愿随着这套教材的教学实施，能造就一批又一批新的职业技术人才，以服务于国家、造福于企业。

## 编者的话

本教材是根据上海市职业技术教育和机械专业教材编审委员会审定的《数控机床原理及应用（含编程）课程标准》编写的，适用于职业技术学校数控加工专业及机械制造类各专业。

由于数控机床的通用、灵活、高效率、高精度、高质量等特点，使其应用日益广泛。随着数控机床的发展与普及，人才市场需要既懂数控机床原理又熟悉数控机床编程与实际操作的专业人才。本教材作为（10181）工程，数控加工专业的主要专业教材，编写中依据“以能力为本位，培养智能型操作人员”的教改方针，注重实践性环节，操作性强，同时兼顾理论知识。旨在培养既能编程和实际操作数控机床，又掌握一定理论知识的实用性人才。本教材中有关数控机床结构和原理部分，只介绍一般的原理，以了解、知道为度，而编程部分结合实例，由浅入深；操作技能部分叙述详尽，便于读者较好地掌握数控机床的编程方法和典型数控机床的基本操作方法。

本教材重点介绍了日本 FANUC 系统、美国 AB8400MP 系统的编程特点及操作过程。其中，在第五章（数控车床）、在第六章（数控铣床）、在第七章（加工中心）的最后都有一个综合实例，并分别介绍了它们的操作过程及注意事项，对学生实际操作数控机床起到指导作用。

本教材由上海市机电工业学校编写，并经过一定范围的试用，经详细修改后定稿。参加编写的有严建红（第一、二、三章），黄忠（第四、五章），余建亮（第六章），顾德仁（第七、八章）。全书由严建红统稿，李文忠主编。承蒙上海工业大学裴仁清教授主审，提出许多宝贵的修改和补充意见，特此表示感谢。

在编写过程中得到上海市经委、上海市教委领导的大力支持，特此表示感谢。编写过程中，难免有错，恳请使用本教材的老师和各位同行批评指正。

编者

# 目 录

序	
前言	
编者的话	
<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 数控机床的产生 .....	1
第二节 数控机床的组成、工作原理和特点 .....	2
第三节 数控机床的分类 .....	4
第四节 数控机床的发展趋势 .....	8
复习思考题 .....	14
<b>第二章 数控机床的机械部件与结构</b> .....	15
第一节 数控机床的机械结构特点 .....	15
第二节 数控机床的主传动系统及主轴部件 .....	16
第三节 数控机床进给系统机械部分元件 .....	21
第四节 自动换刀装置 .....	31
第五节 回转工作台 .....	40
复习思考题 .....	45
<b>第三章 数控插补原理简介</b> .....	46
第一节 逐点比较插补法 .....	46
第二节 数字积分插补法 .....	51
第三节 数据采样插补法 .....	54
复习思考题 .....	57
<b>第四章 数控编程基础</b> .....	58
第一节 数控编程概述 .....	58
第二节 数控机床的坐标系 .....	60
第三节 编程格式 .....	65
第四节 程序编制中的工艺分析 .....	74
第五节 程序编制中的数值计算 .....	78
第六节 常用指令的编程方法 .....	79
复习思考题 .....	85
<b>第五章 数控车床的编程和操作要领</b> .....	87
第一节 数控车床的编程基础 .....	87
第二节 数控车床的程序编制 .....	89
第三节 数控车床的操作要领 .....	108
复习思考题 .....	115
<b>第六章 数控铣床的编程和操作要领</b> .....	117
第一节 数控铣床的编程基础 .....	117
第二节 数控铣床的程序编制 .....	119
第三节 数控铣床的操作要领 .....	153
复习思考题 .....	161
<b>第七章 加工中心的编程和操作要领</b> .....	163
第一节 加工中心的基本概念 .....	163
第二节 加工中心的程序编制 .....	167
第三节 加工中心的操作要领 .....	176
复习思考题 .....	181
<b>第八章 数控机床常见故障的诊断与排除</b> .....	182
第一节 数控机床维修的基本概念 .....	182
第二节 数控机床常用的维修方法 .....	183
第三节 数控机床常见机械故障 .....	184
第四节 数控机床常见电气故障 .....	186
复习思考题 .....	189
<b>附录</b> .....	190
<b>参考文献</b> .....	204



# 第一章 绪 论

## 第一节 数控机床的产生

科学技术和社会生产的不断发展,对机械产品的质量和生产效率提出了越来越高的要求,机械加工过程的自动化是实现上述要求的最重要措施之一。不仅能够提高产品的质量,提高生产率,降低成本,还能够大大改善工人的劳动条件。

目前在汽车、拖拉机、家电行业中采用的自动机床、组合机床和专用自动生产线适合大批量的生产条件,并需要很大的资金以及较长的生产准备时间。但是,在机械制造业中,单件与小批量生产的零件(批量在10~100件)约占机械加工总量的80%以上,其生产特点是加工批量小,改型频繁,零件形状复杂而且精度要求高,采用专用的自动化机床显然不合理。因为经常改装、调整专用自动化机床是不现实的,特别是市场竞争日趋激烈,为满足市场不断变化的需要,必须具备快速提供高质量的新产品的能力。这就使得专用自动机床和普通机床显得无能为力,而数控机床则能适应这种变化的要求,为加工出精度高、形状复杂的多品种、小批量零件提供了自动加工的手段。

数控机床是以数字化信息实现机床控制的,它把刀具与工件之间的相对位置、机床电动机的起停和停止、主轴变速、工件的松开夹紧、刀具的选择、冷却泵的起停和停止等各种操作和顺序动作等信息,用代码化的数字信息通过控制介质送入数控装置或计算机,经译码处理与运算,发出各种指令控制机床伺服系统和其他执行元件,使机床自动加工出所需的工件。

数控机床的突出特点是当加工工件改变时,除了重新装夹工件和更换刀具外,只需改变该零件加工的控制信息(程序),而不需要对机床作任何调整。这种灵活、通用、能迅速适应工件变更的特性,称为柔性。传统的自动加工机械不具备柔性特点,数控机床因为使用了计算机,因而增强了机床的柔性。

第一台数控机床是为了适应航空工业制造复杂工件的需要生产的。1952年美国麻省理工学院和帕森斯公司合作研制成功了世界上第一台具有信息存储和处理功能的数控机床。随着电子技术,特别是计算机技术的不断发展,数控机床也不断地更新换代。

我国从1958年开始研制数控机床,1975年又研制出第一台加工中心。改革开放以来,由于引进国外的数控系统与伺服系统,使我国的数控机床在品种、数量、质量等方面都得到了迅速发展。

数控技术不仅用于机床控制,还用于其他控制设备,例如:数控线切割机、数控测量仪、工业机器人等。

目前,在数控技术领域,我国同先进国家之间还存在不小的差距,但这种差距正在缩小。随着我国国民经济的迅速发展、企业设备改造和技术更新的深入开展,各行业对数控机床的需求量将大幅度增加,这将有力地促进数控机床的发展。

## 第二节 数控机床的组成、工作原理和特点

数控机床是一种利用数控技术，准确按照事先安排好的工艺流程，实现规定加工动作的自动化金属切削机床。

### 一、数控机床的组成及工作原理

数控机床由控制介质、计算机数控装置、伺服驱动系统、辅助装置、机床等部分组成，如图 1-1 所示。各部分的工作原理简述如下：

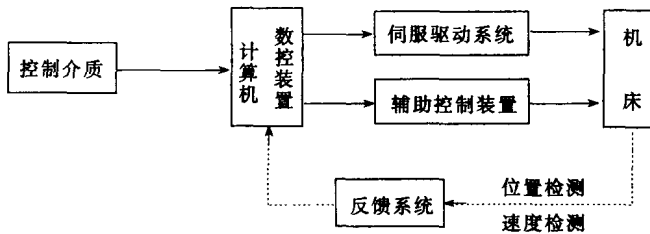


图 1-1 数控机床的组成框图

1. 控制介质 要对数控机床进行控制，就必须在人与数控机床之间建立某种联系，这种联系的中间媒介物质就是控制介质，又称信息载体。在使用数控机床之前，先要根据零件图上规定的形状、尺寸和技术条件，编写出工件的加工程序。将加工时刀具相对工件的位置和机床的全部动作顺序，按照规定的格式和代码记录在信息载体上。需要加工该工件时，把信息即加工程序输入计算机数控装置。常用的控制介质有键盘、穿孔带、穿孔卡、磁带、磁盘等。

另外，由于计算机编程能力强大，可通过数控机床上的通信接口将计算机内的程序送入数控装置进行加工，也可将数控装置上的加工程序送回计算机保存起来。

2. 计算机数控装置 数控装置是数控机床的中枢。目前，绝大部分的数控机床采用微机控制，所以也称为 CNC 机床。图 1-2 点画线框中所包含部分就是数控装置，它由输入装置、输出装置、运算器、控制器、存储器等组成。

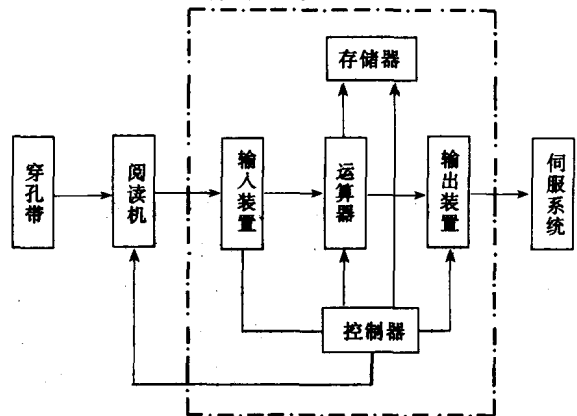


图 1-2 数控装置结构框图

输入装置接受控制介质送入的加工信息

代码（加工程序），经识别、译码之后送到

相应的存储区，作为控制和运算的原始数

据；再经过数据运算处理，由输出装置发

出相应的控制指令和运动指令，指令以脉

冲形式输出。

3. 伺服驱动系统 伺服驱动系统的作用是把来自数控装置的运动指令进行放大，驱动

机床的移动部件运动，使工作台按规定轨

迹移动或准确定位，加工出符合图样要

求的工件。每个脉冲信号使机床移动部件的位移量称为脉冲当量，用  $\delta$  表示。常用的脉冲当量有

0.01mm/脉冲、0.005mm/脉冲、0.001mm/脉冲等。

伺服系统由伺服驱动电路、功率放大电路、伺服电动机、传动机构和检测反馈装置组成。常用的伺服电动机有步进电动机、直流伺服电动机和交流伺服电动机。伺服系统的性能是决定数控机床加工精度和生产效率的主要因素之一。闭环控制的数控机床带有检测反馈系统，如图 1-1 虚线所示，其作用是将机床移动的实际位置、速度参数检测出来，转换成电信号，并反馈到计算机数控装置中，使数控装置能随时判断机床的实际位置、速度是否与指令一致，并发出相应指令，修正所产生的偏差，提高加工精度。

4. 辅助控制装置 辅助控制装置是把计算机送来的辅助控制指令经机床接口转换成强电信号，用来控制主轴电动机起、停、转速调整、冷却泵起停及工作台的转位和换刀等动作。

5. 机床 数控机床是高精度和高生产率的自动化加工机床，与普通机床相比，应具有更好的抗振性和刚度，要求运动部件的摩擦因数要小，进给传动部件之间间隙要小。所以其设计要求比普通机床更严格，加工制造要求更精密，并采用加强刚性、减小热变形、提高精度的设计措施。

## 二、数控机床的特点

1. 适应性强 适合单件、小批量复杂工件的加工。在数控机床上加工工件，因为采用简单的组合夹具，所以改变加工工件后，不需制作专用的夹具，更不需要重新调整机床，只需要重新编制新工件的加工程序，就能实现新工件的加工了。因此数控机床特别适合单件、小批量及新产品试制等工件的加工。

2. 加工精度高 数控机床的脉冲当量普遍可达 0.001mm/脉冲，传动系统和机床都具有很高的刚度和热稳定性，进给系统采用了间隙消除措施，并且可以通过计算机数控装置对反向间隙与丝杠螺距误差等实现自动补偿，所以加工精度高，同时由于数控机床的加工完全是自动的，这就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，加工质量稳定。

3. 生产效率高 数控机床主轴转速和进给速度的调速范围比普通机床大，机床刚性好，快速移动和停止采用了加、减速措施，因而能提高运动速度，而且能保证定位精度，有效地缩短了加工时间。另外，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，无需停机检验，大大缩短了辅助工作时间，可以在一台机床上实现多工序连续加工，大大提高了生产效率。

4. 劳动强度低 数控机床加工是自动进行的，工件加工过程不需要人工干预，特别是在柔性制造系统（FMS）中，由于工业机器人、机械手自动搬运车、自动化仓库的加入，自动化程度大大提高，这就使工人的劳动条件大为改善。

5. 良好的经济效益 虽然机床价格昂贵，一次性投入的设备费用较大。但是使用数控机床可节省许多其他费用，如工件的安装、调试、加工和检验所花用的时间和费用少，特别是不要设计制造专用的工装夹具，加工精度稳定，废品率低，减少调度环节等。另外数控机床具有很高的稳定性，故障率低，寿命长，更由于能快速响应市场要求，容易接受定单，使用效率高，所以总体成本下降，可获得良好的经济效益。

6. 有利于生产管理的现代化 数控机床使用数字信息与标准代码处理、传递信息，使用了计算机控制方法，为计算机辅助设计、制造及管理一体化奠定了基础。

### 第三节 数控机床的分类

数控机床的种类很多，常按以下四种方法进行分类。

#### 一、按工艺用途分

1. 一般数控机床 同普通机床一样，数控机床也有数控车床、铣床、磨床、镗床等。图 1-3 是 CK7815 数控车床，图 1-4 是 XK5040A 数控铣床。它们和传统的普通车床工艺用途相似，但是它们的生产率和自动化程度比普通车床高，都适合加工单件、中小批量和形状复杂的工件。

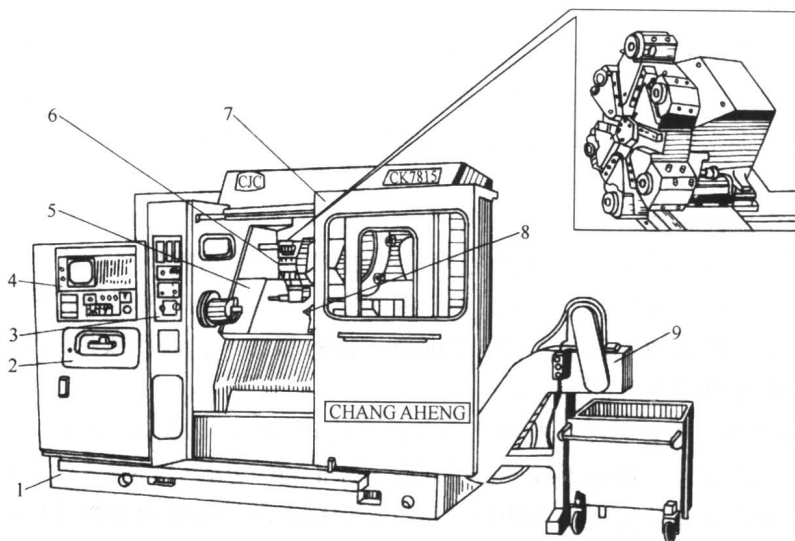


图 1-3 CK7815 数控车床

1—床体 2—光电读带机 3—机床操作台 4—数控系统操作面板 5—倾斜 60°导轨  
6—刀盘 7—防护门 8—尾座 9—排屑装置

2. 数控加工中心 这是在一般数控机床上加装一个刀库和自动换刀装置，构成一种可以自动换刀的数控机床。图 1-5 是 XH754 型卧式加工中心，图 1-6 是 TH5632 型立式加工中心。这类数控机床的出现打破了一台机床只能进行单工种加工的传统概念，实现了一次安装定位，完成多工序的加工方式。如 TH5632 型立式加工中心，其刀库容量为 16 把刀，在刀库和主轴之间有一换刀机械手，工件一次夹装后，可自动地连续进行铣、钻、镗、铰、扩、攻螺纹等多工序加工，由此避免了因多次安装造成的误差，减少了机床的数量，提高了生产效率和加工自动化程度。

3. 多坐标轴数控机床 有些复杂的工件，例如螺旋桨、飞机发动机叶片曲面等用三坐标数控机床无法加工，于是出现了多坐标的数控机床。其特点是控制轴数较多，机床结构比较复杂，坐标的轴数取决于加工工件的工艺要求。

#### 二、按控制的运动轨迹分类

1. 点位控制 点位控制数控机床只要求准确控制加工坐标点的位置。这类数控机床只是在刀具或工件到达指定位置后才开始加工，在运动过程中并不进行加工，所以从一个位置移动到另一个位置的轨迹不需要严格控制。数控钻床、数控坐标镗床、数控冲床都采用这种

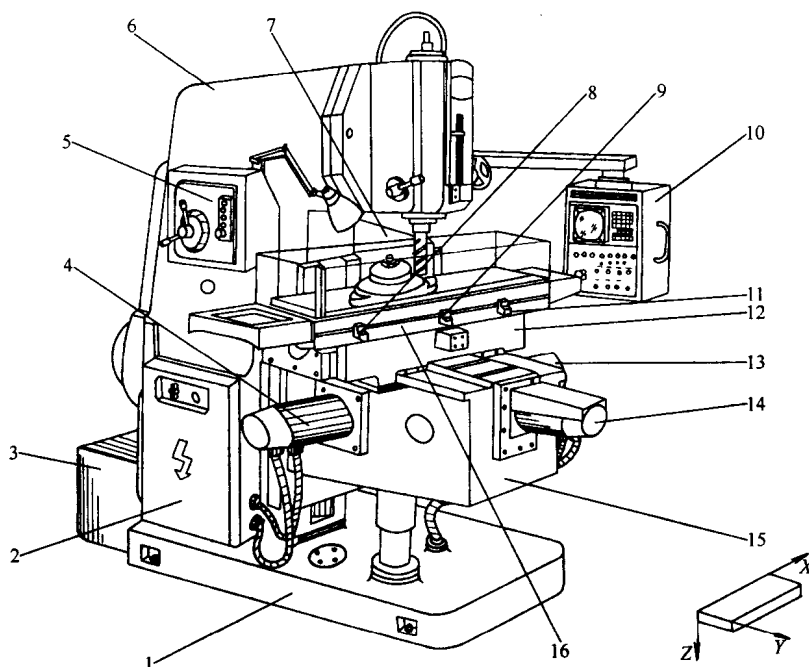


图 1-4 XK5040A 型数控铣床

- 1—底座 2—强电箱 3—变压器箱 4—升降进给伺服电动机 5—主轴变速手柄和按钮板  
6—床身立柱 7—数控柜 8、11—纵向行程限位保护开关 9—纵向参考点设定挡铁  
10—操纵台 12—滑鞍 13—纵向进给伺服电动机 14—横向进给电动机  
15—升降台 16—纵向工作台

控制方式。图 1-7 是点位控制加工示意图。这类数控机床最重要的性能指标是保证各孔之间的相对位置，并要求快速点定位，以便减少空行程时间，其控制过程是当刀具和工件接近定位点时，首先降低移动速度，然后准确定位。

2. 点位直线控制 点位直线控制数控机床，除了要求控制位移的终点位置外，还能实现平行于坐标轴的直线切削加工，并可设定直线切削加工的进给速度。直线精度由相应的系统保证。例如在车床上车削阶梯轴，铣床上铣削台阶面等。图 1-8 是直线控制切削加工示意图。

3. 轮廓控制 轮廓控制数控机床能够对两个或两个以上的坐标轴同时进行控制，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进程中每一点的速度与位移量。

工件的轮廓无论是什么曲线，都可以用简单的线段，如直线、圆弧等逼近。图 1-9 是采

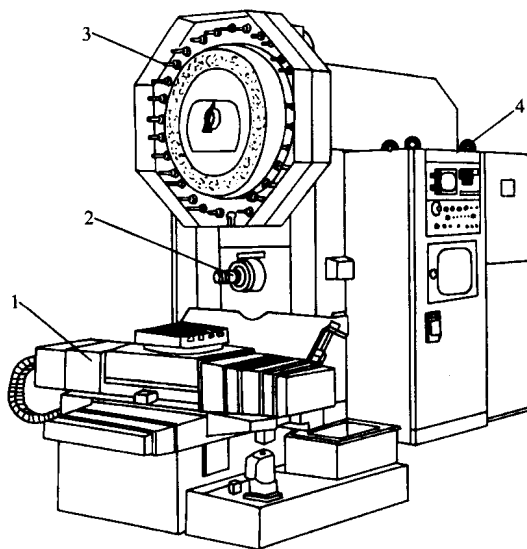


图 1-5 XH754 型卧式加工中心

- 1—工作台 2—主轴 3—刀库 4—数控柜

用折线逼近直线和曲线的情况，折线的最小单位是脉冲当量。显然，用折线逼近实际曲线，存在一定的误差，但由于数控机床脉冲当量通常是  $0.001 \sim 0.01\text{mm}/\text{脉冲}$ ，误差一般在允许的范围內。

为了实现折线逼近，要求数控机床在加工过程中进行插补运算。因此轮廓控制数控机床的数控装置中装有插补器，如图 1-10 所示。该图是两坐标轮廓控制的工作原理图。根据输入的关于工件轮廓形状信息，插补器进行插补运算，根据运算结果，对各坐标进行脉冲分配，通过伺服电动机使机床工作台沿坐标轴作相应运动，实现折线逼近。在计算机数控系统中，还可用软件实现插补过程。点位控制、点位直线控制和轮廓控制的根本区别是前两者没有插补器，所以最多只能加工沿坐标轴的直线。插补运算原理详见第三章。

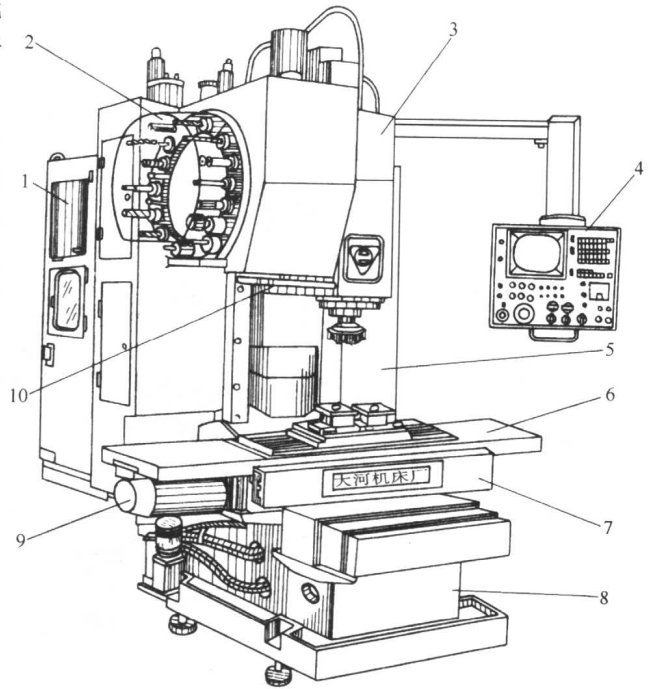


图 1-6 TH5632 型立式加工中心

1—数控柜 2—刀库 3—主轴箱 4—操纵台 5—驱动电源柜  
6—纵向工作台 7—滑鞍 8—床身 9—X 轴进给伺服电动机  
10—换刀机械手

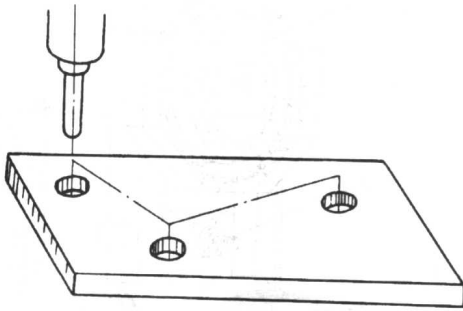


图 1-7 点位控制加工示意图

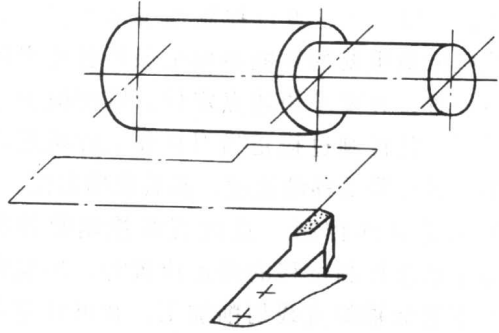


图 1-8 直线控制切削加工示意图

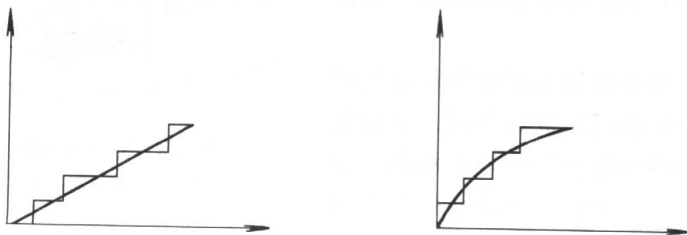


图 1-9 直线与曲线用折线逼近

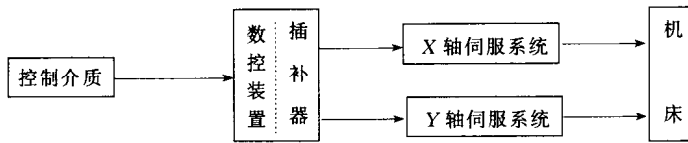


图 1-10 两坐标轮廓控制的工作原理图

### 三、按控制方式分类

数控机床按对被控制量有无检测反馈装置可分为开环和闭环控制两种。在闭环系统中，根据测量装置安放的位置可分为闭环和半闭环两种。

1. 开环控制数控机床 图 1-11 是典型的开环数控系统。开环控制系统中没有检测装置，指令信号发出后，没有反馈，故称开环系统。开环控制的伺服系统主要使用步进电动机。插补器进行插补运算后，发出进给脉冲，经驱动放大后，驱动步进电动机转动。一个进给脉冲使步进电动机转动一个角度，通过丝杠传动使工作台移动一个位移量。因此工作台的位移量与步进电动机的转角位移成正比，即与进给脉冲的数量成正比。进给脉冲以某一频率输出时，则步进电动机以相应的转速运转。所以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。

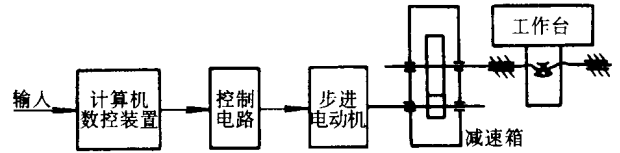


图 1-11 开环控制系统框图

开环控制的特点是结构简单，调试方便，易于维护，成本较低，但速度和控制精度不高。目前国内的经济型数控机床，普遍采用开环数控系统。

2. 闭环控制数控机床 开环控制系统的控制精度不高，主要是因为检测工作台的实际位置，也没有反馈功能，即没有纠正偏差的能力。图 1-12 是闭环控制系统框图，安装在工作台上的检测元件将工作台实际位移量反馈到计算机数控装置中，与所要求的位置指令进行比较，用比较的差值进行控制，直到差值消除为止，从而使加工精度大大提高。速度控制元件的作用是将伺服电动机的实际转速转换成电信号送到速度控制电路中去，进行反馈校正，保证电动机转速保持恒定不变。常用的速度检测元件是测速电动机。

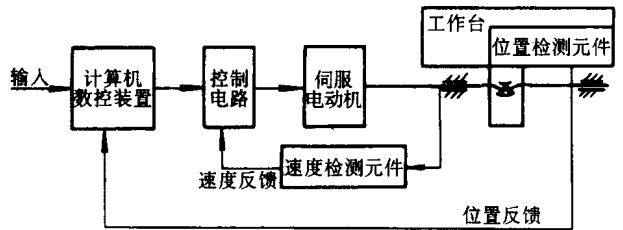


图 1-12 闭环控制系统框图

闭环控制的特点是加工精度高，移动速度快。这类数控机床采用直流伺服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，因而调试和维修比较复杂，成本高。

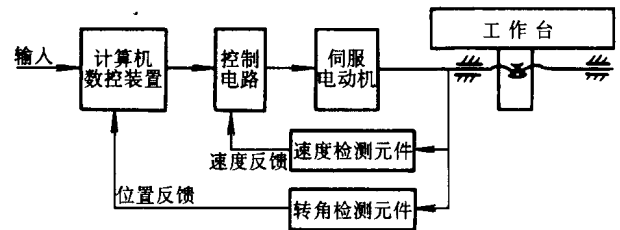


图 1-13 半闭环控制系统框图

3. 半闭环控制数控机床 半闭环控制系统框图如图 1-13 所示，它不是直接检测工作台

的位移量，而是通过与伺服电动机有联系的转角检测元件，如光电编码器，测出伺服电动机的转角，推算出工作台的实际位移量，反馈到计算机数控装置中进行位置比较，用比较的差值进行控制。由于反馈系统内不包含工作台，故称半闭环控制。

半闭环控制精度较闭环控制精度差，但稳定性好，成本较低，调试维修也比较容易，兼顾了开环和闭环两者的优点。

#### 四、按功能分类

1. 经济型数控机床 这类数控机床的数控装置通常采用一个微处理器作为主控单元，伺服系统大多使用步进电动机驱动，采用开环控制方式，脉冲当量为  $0.01 \sim 0.005\text{mm}/\text{脉冲}$ ，机床快移速度为  $5 \sim 8\text{m}/\text{min}$ ，精度较低，功能较简单。

2. 全功能型数控机床 在计算机中采用  $2 \sim 4$  个微处理器进行控制，其中一个为主控微处理器，它完成用户程序的数据处理、插补运算、文本和图形显示等，其余微处理器在主控微处理器的管理下，完成对外围设备，主要是伺服控制系统的控制和管理，从而实现对各坐标轴的连续控制。

全功能型数控机床允许最大速度一般为  $8 \sim 24\text{m}/\text{min}$ ，脉冲当量为  $0.01 \sim 0.001\text{mm}/\text{脉冲}$ ，广泛用于加工形状复杂或精度要求较高的工件。

3. 精密型数控机床 精密型数控机床采用闭环控制，它不仅具有全功能型数控机床的全部功能，而且机械系统的动态响应较快，其脉冲当量一般小于  $0.001\text{mm}/\text{脉冲}$ 。适用于精密和超精密加工。

### 第四节 数控机床的发展趋势

数控机床是综合采用了当代最新科技成果发展起来的新型机械加工机床。40 多年来，数控机床在品种、数量、加工范围和加工精度等方面取得了惊人的发展，大规模集成电路和微型计算机的发展和完善，使数控系统的价格逐年下降，而精度和可靠性则大大提高。

数控机床不仅表现在数量的迅速增长上，而且在质量、性能和控制方式上也有明显改善。目前，数控机床在以下几个方面有较大的发展空间。

#### 一、数控机床结构的发展

数控机床加工工件时，是根据计算机数控装置发出的指令进行自动加工的，加工过程中不允许人工进行测量和补偿，这就要求机床结构具有高的刚度、高的耐磨性和高的可靠性，同时提高结构的热稳定性。提高进给系统的刚度并消除间隙，消除爬行，这样就可以有效地避免因振动、热变形、爬行和间隙对工件加工精度的影响。

同时，普通数控机床向加工中心 (MC) 的方向发展；刀库、机械手、组合夹具等结构使加工工序集中在一台机床上完成，减少了机床的数量，压缩了半成品库存量，减少了工序间的辅助时间，提高了生产效率和加工质量，它是一种工艺集成和功能集成的柔性化机床，近年来人们一直将它作为中小批量机械加工的主力设备。目前，MC 技术的发展呈现“四化”特征引起人们广泛兴趣，即切削高速化（主轴转速  $1000 \sim 2000\text{r}/\text{min}$ ，进给速度  $20 \sim 40\text{m}/\text{min}$ ，加速度大于等于  $9.81\text{m}/\text{s}^2$ ）；加工高精度化（全行程定位精度  $\leq \pm 0.005\text{mm}$ ，重复定位精度达到  $0.01\text{mm}$ ）；部件组合模块化（由 MC 向 FMC 发展）；信息处理系统化（由 CNC 系统的通信接口与 INTERNET 网联接，进行网络测控）。



如果在加工中心上配置可交换工作台、工业机器人、自动输送车等结构,就可以实现工件的自动装卸和运送,这种形式的加工中心称为柔性制造单元(FMC),如图1-14所示。

## 二、计算机数控系统的发展

目前数控系统正朝着开放体系发展,由微机PC和以PMAC为典型的运动控制器组成的数控系统正在各个领域应用。

PMAC运动控制器具有最强的功能和最大的灵活性,同时又能很方便地使用。借助于Motorola的DSP 56001数字信号处理器,PMAC运动控制器可以同时操纵1~8个轴。

由于每个轴都是完全独立的,一个PMAC运动控制器,可以操纵8台不同机器的8个单轴,或者同一台机器的8个轴,或者两者之间的任意组合。PMAC运动控制器正在为高精度、高速度生产建立一个新的标准。在PC的协同下,这种开放体系的数控系统不仅可以实现现有各种数控机床的控制要求,也能实现各种特定要求的数字控制,因此被称为新一代数控系统。

## 三、伺服驱动系统的发展

晶闸管放大器和大惯量直流伺服电动机组成的伺服系统,其伺服电动机是具有过载能力和调速比为1:10000的大惯量直流电动机,与伺服电动机匹配的功率放大器控制简单,具有很大的放大倍数,但它的频带不宽,三相全波可达30Hz,可满足绝大多数数控机床的要求,是早期广泛应用的一种伺服系统。

脉宽调制(PWM)开关型功率放大器和中惯量直流伺服电动机组成的伺服系统,PWM开关型功率放大器一般以2~5kHz可变宽功率脉冲向伺服电动机供电,频带宽度最高可达1000Hz,所以反应极其灵敏。其有效输出、调节误差和位置回路增益也比放大器好,从而使得机床工作平稳,可提高定位精度。由于电力半导体管电流、电压值的限制,PWM开关型放大器的功率不能很大,目前最大功率为几千瓦。

由于直流伺服系统使用电刷和换向器换向,因而会出现电刷磨损和换向火花,维修和保养比较复杂。而交流电动机的驱动系统则可采用大功率晶体管逆变器电桥进行脉冲调制,以实现低速平滑驱动和高精度定位,检测元件可用多极旋转变压器。

此外,微处理器在伺服系统中得到应用,这种伺服系统称数字式伺服系统,它排除了通常模拟电路的非线性误差以及防偏移电压和强度影响,脉冲当量从0.001mm/脉冲提高到0.0001mm/脉冲,最大进给速度可以达15m/min。

## 四、自适应控制

闭环控制的数控机床,可自行监控机床和刀具的相对位置或移动轨迹的精度。数控机床严格按照加工前编制好的程序自动进行加工,切削用量是事先选定的。当工件加工余量不一致、材料硬度不一致、刀具变钝、工件变形,以及热传导、化学亲合力、润滑和冷却液等切削条件变化时,普通数控机床控制系统不能及时作出反应。因此,为了避免废品或事故,往往只能采取比较保守的切削条件,从而使数控机床不能充分发挥其技术性能。当刀具磨损时,也只

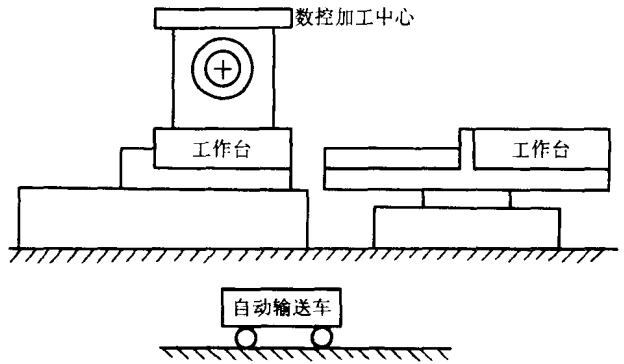


图 1-14 柔性制造单元 (FMC) 示意图