



江苏联合职业技术学院院本教材  
经学院教材审定委员会审定通过

# 数控机床技术基础

◆ 主编 王晓忠 王 骅

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

百年大计 教育为本

# 数控机床技术基础

主 编 王晓忠 王 骅  
副主编 王雪娇 陈震乾  
参 编 沈加敏 崔益银  
沈丁琦 蒋佳健

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

本书是为了适应现代职业教育体系建设，中、高等职业教育衔接和中、高等职业技术教育改革发展的需要而编写的数控技术、机电一体化技术、数控设备应用与维护等专业的规划教材之一。本书主要内容包括：机床数控技术概述、数控编程技术基础、数控车削加工技术基础、数控系统的插补原理与刀具补偿原理、数控机床的计算机数控系统、数控机床的结构与维护、数控机床伺服系统和位置检测装置、智能制造概述等。

本书采用国家最新标准，突出实践性、实用性和先进性，是加工制造类专业通用教材，也可作为相关技术人员的参考书。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目（CIP）数据

数控机床技术基础 / 王晓忠, 王骥主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2019.12 (2020.1 重印)  
ISBN 978-7-5682-8025-9

I. ①数… II. ①王… ②王… III. ①数控机床-高等学校-教材 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 001556 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市天利华印刷装订有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 13.25

字 数 / 306 千字

版 次 / 2019 年 12 月第 1 版 2020 年 1 月第 2 次印刷

定 价 / 35.00 元

责任编辑 / 多海鹏

文案编辑 / 多海鹏

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

---

图书出现印装质量问题，请拨打售后服务热线，本社负责调换

# 江苏联合职业技术学院院本教材出版说明

江苏联合职业技术学院自成立以来，坚持以服务经济社会发展为宗旨、以促进就业为导向的职业教育办学方针，紧紧围绕江苏经济社会发展对高素质技术技能型人才的迫切需要，充分发挥“小学院、大学校”办学管理体制创新优势，依托学院教学指导委员会和专业协作委员会，积极推进校企合作、产教融合，积极探索五年制高职教育教学规律和高素质技术技能型人才成长规律，培养了一大批能够适应地方经济社会发展需要的高素质技术技能型人才，形成了颇具江苏特色的五年制高职教育人才培养模式，实现了五年制高职教育规模、结构、质量和效益的协调发展，为构建江苏现代职业教育体系、推进职业教育现代化做出了重要贡献。

我国社会的主要矛盾已经转化为人们日益增长的美好生活需要与发展不平衡不充分之间的矛盾，因此我们只有实现更高水平、更高质量、更高效益、更加平衡、更加充分的发展，才能全面实现新时代中国特色社会主义建设的宏伟蓝图。五年制高职教育的发展必须服从服务于国家发展战略，以不断满足人们对美好生活需要为追求目标，全面贯彻党的教育方针，全面深化教育改革，全面实施素质教育，全面落实立德树人根本任务，充分发挥五年制高职贯通培养的学制优势，建立和完善五年制高职教育课程体系，健全德能并修、工学结合的育人机制，着力培养学生的工匠精神、职业道德、职业技能和就业创业能力，创新教育教学方法和人才培养模式，完善人才培养质量监控评价制度，不断提升人才培养质量和水平，努力办好人民满意的五年制高职教育，为决胜全面建成小康社会、实现中华民族伟大复兴的中国梦贡献力量。

教材建设是人才培养工作的重要载体，也是深化教育教学改革、提高教学质量的重要基础。目前，五年制高职教育教材建设规划性不足、系统性不强、特色不明显等问题一直制约着内涵发展、创新发展和特色发展的空间。为切实加强学院教材建设与规范管理，不断提高学院教材建设与使用的专业化、规范化和科学化水平，学院成立了教材建设与管理工作领导小组和教材审定委员会，统筹领导、科学规划学院教材建设与管理工作，制定了《江苏联合职业技术学院教材建设与使用管理办法》和《关于院本教材开发若干问题的意见》，完善了教材建设与管理的规章制度；每年滚动修订《五年制高等职业教育教材征订目录》，统一组织五年制高职教育教材的征订、采购和配送；编制了学院“十三五”院本教材建设规划，组织18个专业和公共基础课程协作委员会推进了院本教材开发，建立了一支院本教材开发、编写、



审定队伍；创建了江苏五年制高职教育教材研发基地，与江苏凤凰职业教育图书有限公司、苏州大学出版社、北京理工大学出版社、南京大学出版社、上海交通大学出版社等签订了战略合作协议，协同开发独具五年制高职教育特色的院本教材。

今后一个时期，学院将在推动教材建设和规范管理工作的基础上，紧密结合五年制高职教育发展新形势，主动适应江苏地方社会经济发展和五年制高职教育改革创新的需要，以学院 18 个专业协作委员会和公共基础课程协作委员会为开发团队，以江苏五年制高职教育教材研发基地为开发平台，组织具有先进教学思想和学术造诣较高的骨干教师，依照学院院本教材建设规划，重点编写和出版约 600 本有特色、能体现五年制高职教育教学改革成果的院本教材，努力形成具有江苏五年制高职教育特色的院本教材体系。同时，加强教材建设质量管理，树立精品意识，制订五年制高职教育教材评价标准，建立教材质量评价指标体系，开展教材评价评估工作，设立教材质量档案，加强教材质量跟踪，确保院本教材的先进性、科学性、人文性、适用性和特色性建设。学院教材审定委员会将组织各专业协作委员会做好对各专业课程（含技能课程、实训课程、专业选修课程等）教材出版前的审定工作。

本套院本教材较好地吸收了江苏五年制高职教育最新理论和实践研究成果，符合五年制高职教育人才培养目标定位要求。教材内容深入浅出，难易适中，突出“五年贯通培养、系统设计”专业实践技能经验的积累，重视启发学生思维和培养学生运用知识的能力。教材条理清楚、层次分明、结构严谨、图表美观、文字规范，是一套专门针对五年制高职教育人才培养的教材。

学院教材建设与管理工作领导小组

学院教材审定委员会

2017 年 11 月

# 序 言

2015年5月，国务院印发关于《中国制造2025》的通知，通知重点强调提高国家制造业创新能力，推进信息化与工业化深度融合，强化工业基础能力，加强质量品牌建设，全面推行绿色制造及大力推动重点领域突破发展等，而高质量的技能型人才是实现这一发展战略的重要途径。

为全面贯彻国家对于高技能人才的培养精神，提升五年制高等职业教育机电类专业教学质量，深化江苏联合职业技术学院机电类专业教学改革成果，并最大限度地共享这一优秀成果，学院机电专业协作委员会特组织优秀教师及相关专家，全面、优质、高效地修订及新开发了本系列规划教材，并配备了数字化教学资源，以适应当前的信息化教学需求。

本系列教材所具特色如下：

- 教材培养目标、内容结构符合教育部及学院专业标准中制定的各课程人才培养目标及相关标准规范。
- 教材力求简洁、实用，编写上兼顾现代职业教育的创新发展及传统理论体系，并使之完美结合。
- 教材内容反映了工业发展的最新成果，所涉及的标准规范均为最新国家标准或行业规范。
- 教材编写形式新颖，教材栏目设计合理，版式美观，图文并茂，体现了职业教育工学结合的教学改革精神。
- 教材配备相关的数字化教学资源，体现了学院信息化教学的最新成果。

本系列教材在组织编写过程中得到了江苏联合职业技术学院各位领导的大力支持与帮助，并在学院机电专业协作委员会全体成员的共同努力下顺利完成了出版任务。由于各参与编写者及编审委员会专家时间相对仓促，加之行业技术更新较快，教材中难免有不当之处，敬请广大读者予以批评指正，在此一并表示感谢！我们将不断完善与提升本系列教材的整体质量，使其更好地服务于学院机电专业及全国其他高等职业院校相关专业的教育教学，为培养新时期下的高技能人才做出应有的贡献。

江苏联合职业技术学院机电协作委员会

2017年12月

# 前 言

本书中借鉴了德国“双元制”职业教育相关教材的先进理念，是针对高职数控技术、机电一体化技术、数控设备应用与维护等专业教学对象的实际情况而编写的。本书将《中国制造 2025》和智能制造相关内容纳入教学，概括性地介绍了当前增材制造、工业机器人、人机交互系统、工业软件与大数据、工业互联网等相关技术的发展，为学生进一步了解和学习相关知识奠定基础。

本书是根据教育部制定的数控技术专业技能型紧缺人才培养培训工程教改方案，并结合作者多年的工程实践和教学经验而编写的，力求通俗易懂、删繁就简，同时注重实用性和先进性。

本书共分 8 章，主要介绍了机床数控技术概述、数控编程技术基础、数控车削加工技术基础、数控系统的插补原理与刀具补偿原理、数控机床的计算机数控系统、数控机床的结构与维护、数控机床伺服系统和位置检测装置、智能制造概述等相关内容，可作为数控技术、机电一体化技术、数控设备应用与维护等专业通用教材，也可作为职业培训教材或相关技术人员的参考书。

本书由江苏联合职业技术学院无锡机电分院王晓忠、王骅担任主编，江苏联合职业技术学院无锡机电分院王雪娇、无锡立信分院陈震乾担任副主编，江苏联合职业技术学院盐城机电分院崔益银及无锡机电分院沈加敏、沈丁琦、蒋佳健参与编写。全书由王晓忠统稿，由江苏联合职业技术学院苏州工业园区分院李友节教授审阅。

本书的编写得到了江苏省教育厅和江苏联合职业技术学院相关领导的关心和大力支持，同时在编写时参阅了国内外同行的书籍，编者在此一并致谢！

本书编写时虽力求严谨完善，但疏漏和不当之处在所难免，在此恳请广大读者给予批评和指正。

编 者

# 目 录

<b>第 1 章 机床数控技术概述</b> .....	1
1.1 数控机床的产生与发展 .....	1
1.2 数控机床的概念及组成 .....	7
1.3 数控机床的种类与应用 .....	10
1.4 数控机床加工的特点及应用 .....	14
1.5 先进制造技术 .....	15
1.6 思考与练习 .....	20
<b>第 2 章 数控编程技术基础</b> .....	21
2.1 数控编程的基本概念 .....	21
2.2 常用功能指令及编程方法 .....	26
2.3 数控加工工艺基础 .....	33
2.4 数控编程中的数值计算 .....	38
2.5 思考与练习 .....	40
<b>第 3 章 数控车削加工技术基础</b> .....	42
3.1 数控车床概述 .....	42
3.2 数控车加工常用的刀具 .....	48
3.3 固定循环指令及其应用 .....	52
3.4 思考与练习 .....	60
<b>第 4 章 数控系统的插补原理与刀具补偿原理</b> .....	61
4.1 概述 .....	61
4.2 逐点比较插补法 .....	62
4.3 刀具补偿原理与加减速控制 .....	75
4.4 思考与练习 .....	87
<b>第 5 章 数控机床的计算机数控系统</b> .....	88
5.1 典型数控系统介绍 .....	88
5.2 常见数控系统的组成 .....	94
5.3 数控系统中的通信接口 .....	99
5.4 思考与练习 .....	108
<b>第 6 章 数控机床的结构与维护</b> .....	109
6.1 数控机床的主传动系统和主轴部件、进给传动系统 .....	109



6.2	数控机床的自动换刀装置	125
6.3	数控机床的其他辅助装置	134
6.4	数控机床开机调试	139
6.5	数控机床常见的维护知识	141
6.6	思考与练习	145
<b>第 7 章</b>	<b>数控机床伺服系统和位置检测装置</b>	<b>146</b>
7.1	数控机床伺服系统的概念	146
7.2	数控机床的进给驱动系统、主轴驱动系统	152
7.3	位置检测装置	169
7.4	思考与练习	182
<b>第 8 章</b>	<b>智能制造概述</b>	<b>183</b>
8.1	FMS 基础知识应用实例	184
8.2	增材制造	194
8.3	工业机器人	196
8.4	思考与练习	199
	<b>参考文献</b>	<b>200</b>

# 机床数控技术概述

## ▶ 学习目标

1. 了解数控机床的产生与发展。
2. 掌握数控机床的概念、组成及工作原理。
3. 了解数控机床的加工和应用特点。
4. 了解数控机床的分类方法及种类。
5. 了解先进制造技术的概念、组成、特点和发展方向。

## 1.1 数控机床的产生与发展

随着社会生产和科学技术的不断进步，各类工业新产品层出不穷。机械制造产业作为国民工业的基础，其产品更是日趋精密复杂，特别是宇航、航海、军事等领域所需的机械零件，精度要求更高、形状更为复杂且往往批量较小，加工这类产品需要经常改装或调整设备，普通机床或专业化程度高的自动化机床显然无法适应这些要求。同时，随着市场竞争的日益加剧，生产企业也迫切需要进一步提高生产效率，提高产品质量及降低生产成本。在这种背景下，一种新型的生产设备——数控机床应运而生，它综合应用了电子计算机、自动控制、伺服驱动、精密测量及新型机械结构等多方面的技术成果，形成了今后机械工业的基础并指明了机械制造工业设备的发展方向。

### 1.1.1 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.）在完成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步设想。1949年，在美国空军后勤部的支持下，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，开始数控机床的研制工作。经过3年的研究，世界上第一台数控机床试验样机于1952年试制成功。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系统铣床，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。后来经过3年的改进和自动编程研究，该机床于1955年进入试用阶段。此后，其他一些国家（如德国、英国、日本、苏联和瑞典等）也相继开展数控机床的研制开发和生产工作。1959年，美国克耐·杜列克公司（Keaney & Trecker）首次成功开发了加工中心（Machining Center），这是一种有自动换刀装置和回转工作台的数



控机床，可以在一次装夹中对工件的多个平面进行多工序的加工。但是，直到 20 世纪 50 年代末，由于价格和其他因素的影响，数控机床仅限于航空、军事工业应用，品种也多为连续控制系统。直到 20 世纪 60 年代，由于晶体管的应用，数控系统进一步提高了可靠性且价格下降，一些民用工业开始发展数控机床，其中多数为钻床、冲床等点定位控制的机床。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，使数控技术应用范围不断地得到扩展。

### 1.1.2 数控机床的发展概况

数控机床的核心就是 CNC 系统（简称数控系统），从自动控制的角度看，数控系统就是一种轨迹控制系统，即其本质上是以多执行部件（各运动轴）的位移量为控制对象并使其协调运动的自动控制系统，是一种配有专用操作系统的计算机控制系统。

### 1.1.3 数控系统的发展史

自从 20 世纪 50 年代世界上第一台数控机床问世至今已经历 60 多年。数控机床经过了 2 个阶段和 6 代的发展历程。

第 1 阶段是硬件数控（NC）：第 1 代为 1952 年的电子管；第 2 代为 1959 年的晶体管（分离元件）；第 3 代为 1965 年的小规模集成电路。

第 2 阶段是软件数控（CNC）：第 4 代为 1970 年的小型计算机，中小规模集成电路；第 5 代为 1974 年的微处理器，大规模集成电路；第 6 代为 1990 年的基于个人的 PC 机。

#### 1. 数控（Numerical Control, NC）阶段（1952—1970 年）

早期计算机的运算速度低，虽然对当时的科学计算和数据处理影响还不大，但不能适应机床实时控制的要求。人们不得不采用数字逻辑电路“搭”成一台机床专用计算机作为数控系统，被称为硬件连接数控（HARD-WIRED NC），简称为数控（NC）。随着元器件的发展，这个阶段历经了 3 代，即 1952 年的第一代——电子管、1959 年的第二代——晶体管、1965 年的第三代——小规模集成电路。



图 1-1 电子管实物图

（1）常见的电子管（见图 1-1）是真空式电子管，不管是二极、三极还是更多电极的真空式电子管，它们都是由抽成接近真空的玻璃（或金属、陶瓷）外壳、封装在壳里的灯丝及阴极和阳极组成。直热式电子管的灯丝就是阴极，三极以上的多极管还有各种栅极。以电子管收音机为例，这种收音机普遍使用 5~6 个电子管，输出功率只有 1 W 左右，而耗电却要 40~50 W，功能也很有限。打开电源开关，要等 1 min 以后才会慢慢地响起来。如果用于数控机床可想而知其耗电量和控制速度都难以

匹配。

（2）晶体管是用来控制电路中电流的重要元件。1956 年，晶体管是由贝尔实验室发明的，并荣获了诺贝尔物理学奖，创造了企业研发机构因技术发明而获诺贝尔奖的先例，晶体管的发明对今后的技术革命和创新具有重要的启示意义。晶体管的发明，终于使由



玻璃封装的、易碎的真空管有了替代物。同真空管相同的是，晶体管能放大微弱的电子信号；不同的是，它具有廉价、耐久、耗能小，并且几乎能够被制成无限小的特点。

晶体管是现代科技史上最重要的发明之一，究其原因有三个方面。第一，它取代了电子管，成为电子技术的基本元件，原因是其性能好、体积小、可靠性大和寿命长；第二，它是微电子技术革命的发动者，而信息时代发展至今就是由微电子技术、光子技术和网络技术三次技术革命组成的，所以它的出现成为报晓信息时代的使者；第三，晶体管是集成电路和芯片的组成单元，也是光电器件和集成光路的基本组成单元，更是网络技术的基础，只不过光电晶体管是微电子晶体管的演变或发展罢了。由于这三方面的原因，晶体管的发明在信息科技的迅速发展起了决定性的作用，它的意义远远超出了一种元器件的发明范围，而成为揭开现代技术新领域和变革的各种技术基础的关键。所以晶体管发明过程中的突出特点，对于其他科技的产生和发展有重要的参考和启示意义。

(3) 小规模集成电路：晶体管诞生后，首先是在电话设备和助听器中使用。逐渐地，它在任何有插座或电池的东西中都能发挥作用了。将微型晶体管蚀刻在硅片上制成的集成电路，在 20 世纪 50 年代发展起来后，以芯片为主的电脑很快就进入了人们的办公室和家庭。晶体管实物如图 1-2 所示。

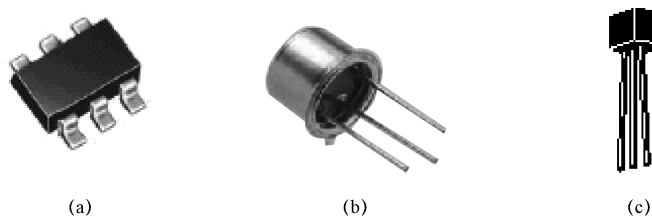


图 1-2 晶体管实物

(a) SOT26; (b) TD5; (c) TD92

## 2. 计算机数控 (Computer Numerical Control, CNC) 阶段 (1970 年以后)

到 1970 年，通用小型计算机业已出现并成批生产，于是它被移植过来作为数控系统的核心部件，从此数控机床进入了计算机数控 (CNC) 阶段 (把计算机前面应有的“通用”两个字省略了)。

到 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，称为微处理器 (MICROPROCESSOR)，又可称为中央处理单元 (简称 CPU)。

到 1974 年，微处理器被应用于数控系统。这是因为小型计算机功能太强，控制一台机床能力有富余 (故当时曾用于控制多台机床，称为群控)，不如采用微处理器经济合理，而且当时的小型机可靠性也不理想。早期的微处理器速度和功能虽还不够高，但可以通过多处理器结构来解决。由于微处理器是通用计算机的核心部件，故仍称为计算机数控。

到了 1990 年，PC 机 (个人计算机，国内习惯称微机) 的性能已发展到很高的阶段，可以满足作为数控系统核心部件的要求，数控系统从此进入了基于 PC 的阶段。最常用的形式是：CNC 嵌入 PC 机，在 PC 机内部插入专用的 CNC 控制卡。

将计算机用于数控机床是数控机床史上的一个重要里程碑，因为它综合了现代计算机技



术、自动控制技术、传感器技术及测量技术、机械制造技术等领域的最新成就，使机械加工技术达到了一个崭新的水平。随着科技的发展晶体管的体积越来越小，已达到纳米级（1 nm 为 1 m 的十亿分之一），纳米晶体的出现将导致未来可以制造出更强劲的计算机芯片。（把 20 nm 的晶体管放进一片普通集成电路，形同一根头发放在足球场的中央。现代微处理器包含上亿的晶体管。）

CNC 与 NC 相比有许多优点，最重要的是：CNC 的许多功能是由软件实现的，可以通过软件的变化来满足被控机械设备的不同要求，从而实现数控功能的更改或扩展，为机床制造厂和数控用户带来了极大的方便。

总之，计算机数控阶段也经历了三代，即 1970 年的第四代——小型计算机、1974 年的第五代——微处理器和 1990 年的第六代——基于个人 PC 机（国外称为 PC-BASED）。

基于 PC 的运动控制器，目前最流行的是 PMAC，如图 1-3 所示。

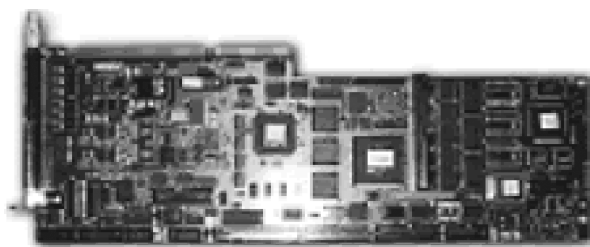


图 1-3 DeltaTau PMAC I 型多轴运动控制器

PMAC I 型多轴运动控制器简介如下。

- \* 总线为：ISA、VME、PC104、PCI。
- \* 电动机类型为：交流伺服、直流电动机（有刷、无刷、直线）/交流异步电动机/步进电动机。
- \* 控制码为：PMAC（类似 BASIC ASCII 命令）/G 代码（机床）/AutoCAD 转换。
- \* 反馈为：增量编码器（直线、旋转）、绝对编码器、旋转变压器等。

PMAC（Program Multiple Axes Controller）是美国 DELTA TAU 公司生产制造的多轴运动控制器，PMAC 运动控制器和数控系统如图 1-4 和图 1-5 所示。

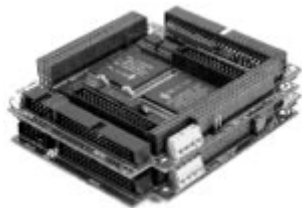


图 1-4 PMAC 运动控制器

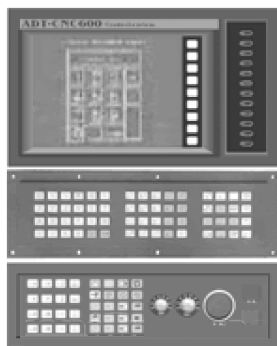


图 1-5 数控系统



### 1.1.4 数控机床的发展趋势

从数控机床的技术水平看,高精度、高速度、高柔性、多功能和高自动化是数控机床的重要发展趋势。对单台主机不仅要求提高其柔性和自动化程度,还要求具有更高层次的柔性制造系统和计算机集成系统的适应能力。我国国产数控设备的主轴转速已达  $10\,000\sim 40\,000\text{ r/min}$ ,进给速度达到  $30\sim 60\text{ m/min}$ ,换刀时间  $t < 2.0\text{ s}$ ,表面粗糙度  $Ra < 0.008\ \mu\text{m}$ 。

在数控系统方面,目前世界上几个著名的数控装置生产厂家,诸如日本的 FANUC 公司、德国的 SIEMENS 公司和美国的 A-B 公司,其产品都在向系列化、模块化、高性能和成套性方向发展。它们的数控系统都采用了 16 位和 32 位微处理器,标准总线及软件模块和硬件模块结构,内存容量扩大到了 1 MB 以上,机床分辨率可达  $0.1\ \mu\text{m}$ ,高速进给速度可达  $100\text{ m/min}$ ,控制轴数可达 16 个,并采用先进的电装工艺。

在驱动系统方面,交流驱动系统发展迅速。交流驱动已由模拟式向数字式方向发展,以运算放大器等模拟器件为主的控制器正被以微处理器为主的数字集成元件所取代,从而克服了零点漂移、温度漂移等弱点。

### 1.1.5 数控机床应用特点和主要技术指标

不同类型的数控机床有着不同的用途,在选用数控机床之前应对其类型、规格、性能、特点、用途和应用范围有所了解,才能选择最适合加工零件的数控机床。用于数控机床加工的零件如下。

(1) 多品种、小批量生产的零件或新产品试制中的零件。随着数控机床制造成本的逐步下降,现在不管是国内还是国外,加工大批量零件的情况也已经出现。加工很小批量和单件生产时,如能缩短程序的调试时间和工装的准备时间也是可以选用的。

(2) 形状复杂、加工精度要求高、制造精度要求高、对刀精确要求高、通用机床无法加工或很难保证加工质量的零件。

(3) 要求表面粗糙度小的零件。在工件和刀具的材料、精加工余量及刀具角度一定的情况下,表面粗糙度取决于切削速度和进给速度。普通机床是恒定转速,直径不同切削速度就不同,像数控车床具有恒线速切削功能,车端面、不同直径外圆时可以用相同的线速度,保证表面粗糙度值既小且一致。在加工表面粗糙度不同的表面时,粗糙度小的表面选用较小的进给速度,粗糙度大的表面选用较大的进给速度,可变性很好,这点在普通机床中很难做到。

(4) 轮廓形状复杂的零件。任意平面曲线都可以用直线或圆弧来逼近,数控机床具有圆弧插补功能,可以加工各种复杂轮廓的零件。

(5) 具有难测量、难控制进给、难控制尺寸的不开敞内腔的壳体或盒型零件。

(6) 必须在一次装夹中完成铣、镗、铩、铰或攻丝等多工序的零件。

(7) 价格昂贵、加工中不允许报废的关键零件。

(8) 需要最短生产周期的急需零件。

(9) 在通用机床加工时极易受人为因素(如:情绪波动、体力强弱、技术水平高低等)干扰,零件价值又高,一旦质量失控会造成重大经济损失的零件。

数控机床的技术指标包括规格指标、精度指标、性能指标和可靠性指标。



### 1. 规格指标

规格指标是指数控机床的基本能力指标，主要有以下几方面。

(1) 行程范围：坐标轴可控的运动区间，它反映该机床允许的加工空间，通常情况下工件的轮廓尺寸应在加工空间的范围之内，个别情况下工件轮廓也可大于机床的加工范围，但其加工范围必须在加工空间范围之内。

(2) 工作台面尺寸：它反映该机床安装工件大小的最大范围，通常应选择比最大加工工件稍大一点的面积，这是因为要预留夹具所需的空间。

(3) 承载能力：它反映该机床能加工零件的最大质量。

(4) 主轴功率和进给轴扭矩：它反映该机床的加工能力，同时也可间接反映机床刚度和强度。

(5) 控制轴数和联动轴数：数控机床控制轴数通常是指机床数控装置能够控制的进给轴数目。现在，有的数控机床生产厂家也认为控制轴数包括所有的运动轴，即进给轴、主轴、刀库轴等。数控机床控制轴数和数控装置的运算处理能力、运算速度及内存容量等有关。联动轴数是指数控机床控制多个进给轴，使它们按零件轮廓规定的规律运动的进给轴数目。它反映数控机床实现曲面加工的能力。

### 2. 精度指标

数控机床精度通常指机床定位至程序目标点的精确程度，通常是机床空载情况下在数控轴上对多目标点进行多回合测量后通过数学统计计算出来的。数控机床的精度指标主要包括加工精度、定位精度、重复定位精度、移动精度和分度精度。

(1) 加工精度。数控机床的加工精度受到机床结构、装配精度、伺服系统性能、工艺参数以及外界环境等因素的影响。

(2) 定位精度与重复定位精度。定位精度是指车床等移动部件的实际运动位置与指令位置的一致程度，其不一致的差值即为定位误差。引起定位误差的因素包括伺服系统、检测系统、进给传动及导轨误差等。定位误差会直接影响加工零件的尺寸精度。

重复定位精度是指在相同的操作方式和条件下，多次完成规定操作后得到结果的一致程度，一般是呈正态分布的偶然性误差；它会影响批量加工零件的一致性，是一项非常重要的性能指标。一般数控机床的定位精度为 0.018 mm，重复定位精度为 0.008 mm。

(3) 移动精度。

移动精度主要是指分辨率和脉冲当量，分辨率是指可以分辨的最小位移间隙。对测量系统而言，分辨率是可以测量的最小位移；对控制系统而言，分辨率是可以控制的最小位移增量。

脉冲当量是指数控装置每发出一个脉冲信号，机床位移部件所产生的位移量。

(4) 分度精度。

分度精度是指分度工作台在分度时，实际回转角度与指令回转角度的差值。分度精度既会影响零件加工部位在空间的角度位置，也会影响孔系加工的同轴度等。

### 3. 性能指标

(1) 最高主轴转速和最大加速度。最高主轴转速是指主轴所能达到的最高转速，它是影响零件表面加工质量、生产效率以及刀具寿命的主要因素之一，尤其是有色金属的精加工。最大加速度是反映主轴速度提速能力的性能指标，也是加工效率的重要指标。



(2) 最高快移速度和最高进给速度。最高快移速度是指进给轴在非加工状态下的最高移动速度；最高进给速度是指进给轴在加工状态下的最高移动速度。它们是影响零件加工质量、生产效率以及刀具寿命的主要因素。它们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。

(3) 分辨率与脉冲当量。分辨率是指两个相邻的分散细节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，即数控装置每发出一个脉冲信号，反映到机床移动部件上的移动量，通常称为脉冲当量。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。脉冲当量越小，数控机床的加工精度和表面加工质量越高。

另外，还有换刀速度和工作台交换速度，它们同样也是影响生产效率以及刀具寿命的主要因素。

#### 4. 可靠性指标

(1) 平均无故障工作时间 ( $MTBF$ ) 为

$$MTBF = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^n t_i = \sum_{i=1}^n t_i / \sum_{i=1}^n r_i$$

式中， $N_0$  为在评定周期内机床累计故障频数； $N$  为机床抽样台数； $t_i$  为在评定周期内第  $i$  台机床实际工作时间，单位为  $h$ ； $r_i$  为在评定周期内第  $i$  台机床出现故障的频数。

(2) 平均修复时间 ( $MTTR$ ) 为

$$MTTR = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^n t_{mi}$$

式中， $N_0$  为评定周期内的故障总次数； $t_{mi}$  为在评定周期内第  $i$  台机床的实际修复时间。

(3) 固有可用度 ( $A$ )。固有可用度又称有效度 (Availability)，是在规定的使用条件下，机械设备及零部件保持其规定功能的概率，简称  $A$ 。有效度是评价设备利用率的一项重要指标，也是直接制约设备生产能力的重要因素。其表达式为

$$A = \frac{\text{可工作时间}}{\text{可工作时间} + \text{不可工作时间}} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

(4) 精度保持时间 ( $T_k$ )。精度保持时间是数控机床在两班工作制和遵守使用规则的条件下，其精度保持在机床精度标准规定的范围内的时间。其观测值以抽取的样机中精度保持时间最短的一台机床的精度保持时间为准。

以上 4 个评定指标中， $MTBF$  侧重于数控机床的无故障性，是最常用的评定指标； $MTTR$  反映了数控机床的维修性，即进行维修的难易程度；固有可用度  $A$  综合了反映无故障性和维修性，即有效性；精度保持时间  $T_k$  反映了数控机床的耐久性和可靠寿命。

## 1.2 数控机床的概念及组成

### 1.2.1 数控机床的概念

数控技术是 20 世纪中期发展起来的机床控制技术。数字控制 (Numerical Control, NC)



是一种自动控制技术，是用数字化信号对机床的运动及其加工过程进行控制的一种方法。

数控机床（NC Machine）就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。它是一种综合应用计算机技术、自动控制技术、精密测量技术、通信技术和精密机械技术等先进技术的典型的机电一体化产品。

国家信息处理联盟（International Federation of Information Processing, IFIP）第五技术委员会对数控机床作了如下定义：数控机床是一种装有程序控制系统的机床，该系统能逻辑地处理具有特定代码和其他符号编码指令规定的程序。

### 1.2.2 数控机床的组成

数控机床的种类很多，但任何一种数控机床都是由控制介质、数控系统、伺服系统、辅助控制系统和机床本体若干基本部分组成的，如图 1-6 所示。

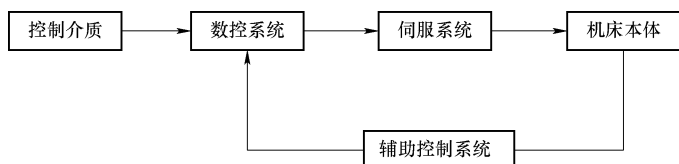


图 1-6 数控机床的组成

#### 1. 控制介质

数控系统工作时，不需要操作人员直接操纵机床，但机床又必须执行人的意图，这就需要在人与机床之间建立某种联系，这种联系的中间媒介物即称为控制介质。在控制介质上存储着加工零件所需要的全部操作信息和刀具相对工件的位移信息，因此，控制介质就是将零件加工信息传送到数控装置去的信息载体。控制介质有多种形式，它随着数控装置类型的不同而不同，常用的有穿孔纸带、穿孔卡、磁带、磁盘和 USB 接口介质等。控制介质上记载的加工信息要经过输入装置传送给数控装置，常用的输入装置有光电纸带输入机、磁带录音机、磁盘驱动器和 USB 接口等。

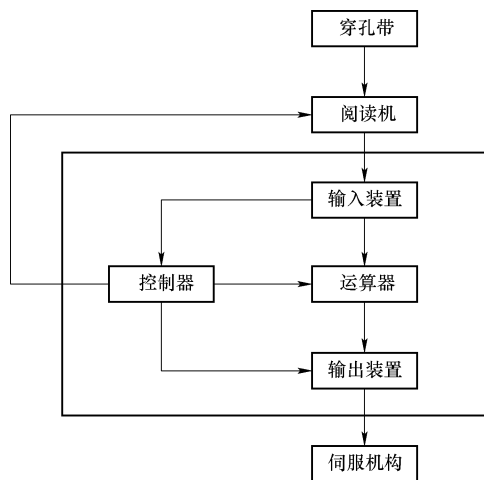


图 1-7 数控系统结构

除了上述几种控制介质外，还有一部分数控机床采用数码拨盘、数码插销或利用键盘直接输入程序和数据。另外，随着 CAD/CAM 技术的发展，有些数控设备利用 CAD/CAM 软件在其他计算机上编程，然后通过计算机与数控系统通信（如局域网），将程序和数据直接传送给数控装置。

#### 2. 数控系统

数控系统是一种控制系统，是数控机床的中心环节，它能自动阅读输入载体上事先给定的数字，并将其译码，从而使机床进给并加工零件。数控系统通常由输入装置、控制器、运算器和输出装置 4 部分组成，如图 1-7 所示。

输入装置接收由穿孔带阅读机输出的代码，经