





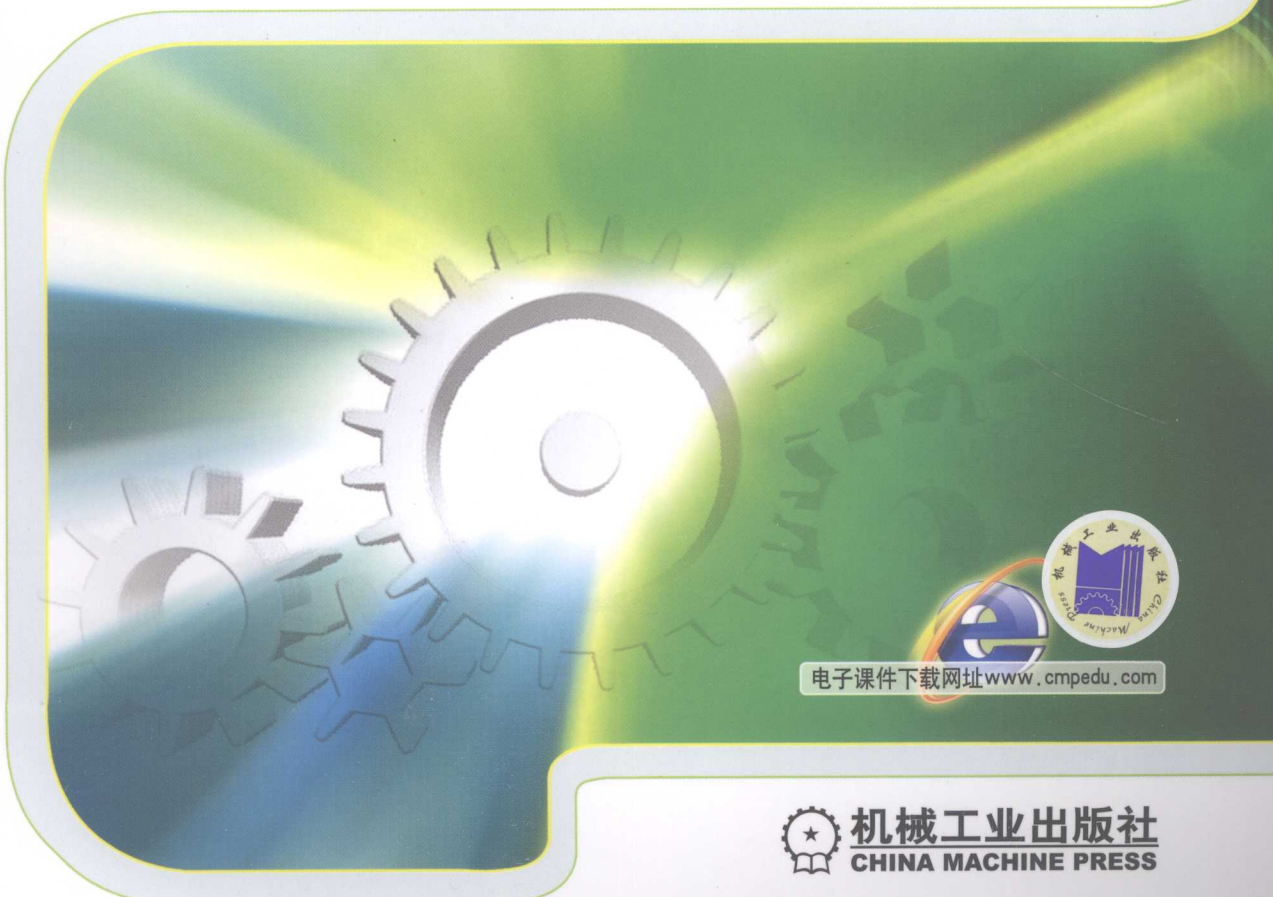
全国高等职业教育规划教材

数控编程与操作

主 编 王 骏 郑贞平

副主编 胡俊平

主 审 季业益



电子课件下载网址 www.cmpedu.com



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

全国高等职业教育规划教材

数控编程与操作

主 编 王 骏 郑贞平
副主编 胡俊平
参 编 刘良瑞 伊伟明 周春华 陈 平
 张春宝 周小模
主 审 季业益



机械工业出版社

本书按数控加工国家职业技能鉴定标准要求,结合编者多年从事数控加工教学、实训及生产积累的经验,突出数控实训特点,讲解了数控机床加工基础及数控车床、数控铣床和加工中心的编程与操作,并辅以大量的数控编程与操作实训。

本书既可作为高职高专院校数控专业、模具专业、机电一体化专业、机械设计制造及自动化专业的数控加工编程教材,也可作为广大数控加工从业人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

数控编程与操作/王骏,郑贞平主编. —北京:机械工业出版社, 2009.7

全国高等职业教育规划教材
ISBN 978-7-111-27513-8

I. 数… II. ①王…②郑… III. ①数控机床—程序设计—高等学校:技术学校—教材②数控机床—操作—高等学校:技术学校—教材 IV. TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第114397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:祝伟 章承林 版式设计:张世琴

责任校对:李秋荣 责任印制:邓博

北京机工印刷厂印刷(兴文装订厂装订)

2009年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·13印张·320千字

0 001—4 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-27513-8

定价:24.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379753 88379739

封面无防伪标均为盗版

前 言

数控技术是目前制造业广泛使用的技术手段。数控技术的快速发展和广泛应用极大地推动了制造业水平的提高，促进了经济的快速发展，因而社会急需大量掌握数控加工技术的技能型人才。为适应数控技术技能型人才培养的要求，本书力求紧跟现代数控加工技术的步伐，以介绍数控加工编程和操作为主，阐述了数控车床、数控铣床和加工中心的编程和操作。

为了适应我国高等职业技术教育发展和应用型技术人才培养的需要，编者经过多年的教学实践，结合学生需要掌握的知识和技能，确定了本教材的编写内容。本书技术内容先进，适应经济社会发展和科技进步的需要，体现了以职业能力为本位，以应用为核心，以“必需、够用”为度的编写原则，紧密联系生产实际，与职业资格标准相互衔接，针对性强。本书体系设计合理，循序渐进，条理清楚，图文并茂，可读性强。

本书共5章，内容按学习数控加工技术的顺序编排。

第1章 数控技术简介。简单介绍了数控机床的发展、数控机床的工作原理及基本组成、数控机床的分类、数控机床和数控加工的特点，并简单介绍了几种典型的数控系统。

第2章 数控机床加工程序编制基础。介绍了数控机床加工程序编制的基础和数控加工工艺的编制。

第3章 数控车床编程与操作。介绍了数控车床的基本编程和基本操作。

第4章 数控铣床和加工中心编程与操作。介绍了数控铣床和加工中心的基本编程和基本操作。

第5章 数控加工综合实训。通过几个典型实例讲解了数控车床、数控铣床和加工中心加工程序的编制过程和基本方法。

本书由无锡职业技术学院王骏、郑贞平主编，胡俊平为副主编，由苏州工业职业技术学院季业益主审。参与编写的人员还有刘良瑞、伊伟明、周春华、陈平、张春宝、周小模。

本书既可以作为高职高专院校数控专业、模具专业、机电一体化专业、机械设计制造及自动化专业的数控加工编程教材、上机实训教材和教师的教学参考书，也可供广大数控加工爱好者和数控加工编程人员参考。

尽管本书是编者多年工作经验的总结，但由于水平有限，书中不足和错误之处在所难免，恳请广大读者批评指正。读者的建议和问题可发邮件至 Refreh@163.com。

编 者

目 录

前言	
第1章 数控技术简介	1
1.1 数控机床的发展	1
1.1.1 数控机床的产生与发展	1
1.1.2 数控机床的发展趋势	2
1.1.3 我国数控技术的现状	3
1.2 数控机床的工作原理及基本组成	3
1.2.1 数控机床的工作原理	3
1.2.2 数控机床的组成	4
1.2.3 数控机床的工作过程	5
1.3 数控机床的分类	5
1.3.1 按机床运动的控制轨迹分类	5
1.3.2 按伺服控制的方式分类	7
1.3.3 按工艺用途分类	9
1.3.4 按加工方式分类	10
1.3.5 按控制坐标轴数分类	11
1.4 数控机床和数控加工的特点	11
1.4.1 数控机床的特点	11
1.4.2 数控加工的特点	11
1.5 典型数控系统简介	12
1.5.1 FANUC 数控系统	12
1.5.2 SIEMENS 数控系统	13
1.6 练习题	15
第2章 数控机床加工程序编制基础	16
2.1 数控机床坐标系	16
2.1.1 机床坐标系及运动方向	16
2.1.2 机床坐标系原点与机床参考点	19
2.1.3 工件坐标系	20
2.1.4 绝对坐标系与相对坐标系	21
2.2 数控加工工艺设计	22
2.2.1 数控加工工艺主要内容	23
2.2.2 加工工序的编排原则	25
2.2.3 零件的结构工艺性分析	27
2.2.4 加工路线的确定	29
2.2.5 对刀点和换刀点位置的确定	32
2.2.6 数值处理	34
2.2.7 数控加工工艺文件	36
2.3 数控机床刀具的选择	40
2.3.1 刀具的材料及其选用	40
2.3.2 数控刀具的种类及特点	43
2.3.3 机夹式可转位刀具	45
2.3.4 数控刀具的选择	49
2.4 数控程序编制的概念	52
2.4.1 数控程序编制的方法	52
2.4.2 程序编制的格式	53
2.4.3 基本代码	55
2.5 常用编程指令	60
2.5.1 绝对尺寸与增量尺寸指令	60
2.5.2 坐标轴运动指令	61
2.5.3 其他常用指令	65
2.6 练习题	66
第3章 数控车床编程与操作	68
3.1 数控车床加工概述	68
3.1.1 数控车床加工对象	68
3.1.2 数控车床编程特点	69
3.1.3 数控车床的主要类型和技术参数	70
3.2 数控车床加工工艺简介	73
3.2.1 数控车削加工切削用量选择	73
3.2.2 数控车削加工的装夹与定位	76
3.2.3 数控车床的刀具补偿	80
3.3 数控车床程序编制	83
3.3.1 FANUC 系统数控车床加工基本指令	83
3.3.2 单一循环指令	86
3.3.3 复合循环指令	90
3.3.4 螺纹切削指令	96
3.3.5 数控车床加工程序综合实例	101
3.4 数控车床操作及实训	103
3.4.1 数控车床操作规程	103
3.4.2 FANUC Oi 系统数控车床的	

操作	104	4.6.2 加工中心的结构特点	162
3.4.3 华中数控系统数控车床的操作	117	4.6.3 加工中心的种类	163
3.5 练习题	126	4.6.4 加工中心的刀库及自动换刀装置	165
第4章 数控铣床和加工中心的编程与操作	128	4.6.5 加工中心主要加工对象	167
4.1 数控铣床加工的特点	128	4.6.6 加工中心的换刀程序	168
4.1.1 数控铣床加工的主要对象	128	4.6.7 加工中心编程典型实例	169
4.1.2 数控铣床特点	130	4.7 FANUC 系统的数控铣床操作	173
4.1.3 数控铣床加工的特点	130	4.7.1 机床操作面板	173
4.1.4 数控铣床编程时应注意的问题	131	4.7.2 手动操作	177
4.2 数控铣床程序编制的基本指令和方法	131	4.7.3 自动操作	177
4.2.1 FANUC Oi 数控系统程序编制的基本指令	131	4.7.4 加工程序的输入和编辑	178
4.2.2 基本指令的应用	134	4.7.5 刀具偏置	178
4.2.3 刀具半径补偿	136	4.7.6 设置工件坐标系零点	180
4.2.4 刀具长度补偿指令	139	4.8 加工中心的基本操作	181
4.2.5 子程序	140	4.8.1 加工中心刀具的装入	181
4.3 固定循环功能	143	4.8.2 加工中心加工坐标系的设定	182
4.3.1 FANUC 数控系统的固定循环功能	143	4.8.3 刀具补偿的设置	182
4.3.2 华中数控系统的固定循环功能	148	4.9 练习题	185
4.4 数控铣床高级编程方法	149	第5章 数控加工实训	186
4.4.1 比例及镜像功能	149	5.1 数控车床综合实训	186
4.4.2 旋转功能	151	5.1.1 数控车削实训一	186
4.4.3 B类宏程序	152	5.1.2 数控车削实训二	192
4.5 典型零件的程序编制	158	5.2 数控铣床综合实训	193
4.5.1 实例1——平面型腔加工	158	5.2.1 数控铣削实训一	193
4.5.2 实例2——B类宏程序的应用	160	5.2.2 数控铣削实训二	195
4.6 加工中心的编程	161	5.3 加工中心综合实训	196
4.6.1 加工中心特点	162	5.3.1 加工中心综合实训一	196
		5.3.2 加工中心综合实训二	200
		参考文献	202

第 1 章 数控技术简介

1.1 数控机床的发展

1.1.1 数控机床的产生与发展

数控机床具有广泛的适应性，加工对象改变时只需要改变输入的程序指令。其加工性能比一般自动机床高，可以精确加工复杂曲面，因而适合于加工中小批量、改型频繁、精度要求高、形状又较复杂的工件。

随着数控技术的发展，采用数控系统的机床品种日益增多，有车床、铣床、镗床、钻床、磨床、齿轮加工机床和电火花加工机床等；此外，还有能自动换刀、一次装夹进行多工序加工的加工中心、车削中心等。

1948 年，美国帕森斯公司接受美国空军委托，研制飞机螺旋桨叶片轮廓样板的加工设备。由于样板形状复杂多样，精度要求高，一般加工设备难以适应，于是提出计算机控制机床的设想。1949 年，该公司在美国麻省理工学院伺服机构研究室的协助下，开始数控机床研究，并于 1952 年试制成功第一台由大型立式仿形铣床改装而成的三坐标数控铣床，不久即开始正式生产。

当时的数控装置采用电子管元件，体积庞大，价格昂贵，只在航空工业等少数有特殊需要的部门用来加工复杂曲面零件；1959 年，制成了晶体管元件和印制电路板，使数控装置进入了第二代，体积缩小，成本有所下降；1960 年以后，较为简单和经济的点位控制数控钻床和直线控制数控铣床得到较快发展，使数控机床在机械制造业各部门逐步获得推广。

1965 年，出现了第三代的集成电路数控装置，不仅体积小，功率消耗少，且可靠性也有所提高，价格进一步下降，促进了数控机床品种和产量的发展。20 世纪 60 年代末，先后出现了由一台计算机直接控制多台机床的直接数控系统（简称 DNC），又称群控系统；采用小型计算机控制的计算机数控系统（简称 CNC），使数控装置进入了以小型计算机化为特征的第四代。

1974 年，研制成功使用微处理器和半导体存储器的微型计算机数控装置（简称 MNC），这是第五代数控系统。第五代与第三代相比，数控装置的功能扩大了一倍，而体积则缩小为原来的 1/20，价格降低了 3/4，可靠性也得到了极大的提高。

20 世纪 80 年代初，随着计算机软、硬件技术的发展，出现了能进行人机对话的自动编制程序的数控装置；数控装置愈趋小型化，可以直接安装在机床上；数控机床的自动化程度进一步提高，具有自动监控刀具破损和自动检测工件等功能。

随着微电子技术、计算机技术和软件技术的迅速发展，数控机床的控制系统日益趋向于小型化和多功能化，具备完善的自诊断功能，可靠性也大大提高。数控系统本身将普遍实现自动编程。

1.1.2 数控机床的发展趋势

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 $0.012\text{mm}/300\text{mm}$ ，提高到 $0.002 \sim 0.005\text{mm}/\text{全程}$ ；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 $2000 \sim 3000\text{r}/\text{min}$ 提高到 $10000\text{r}/\text{min}$ 以上。日本新泻铁工所生产的 UHSIO 型超高速数控立式铣床主轴的最高转速高达 $100000\text{r}/\text{min}$ 。中等规格加工中心的快速进给速度从过去的 $8 \sim 12\text{m}/\text{min}$ 提高到 $60\text{m}/\text{min}$ 。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，是提高加工精度和生产率、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的方向发展。如出现了可程序控制器（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，它包括物料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应进一步提高其自动编程、上下料、加工等自动化程度外，还应在自动检索、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形机床上的“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，又相继出现了许多跨度更大，功能更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，也可进行车削加工；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 6 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可伸缩的 6 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，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，数控机床技术又将进入一个有重大变革和创新的新时代。

1.1.3 我国数控技术的现状

我国数控技术的发展起步于 20 世纪 50 年代，通过“六五”期间引进数控技术，“七五”期间组织消化吸收“科技攻关”，我国数控技术和数控产业取得了相当大的成绩。特别是最近几年，我国数控产业发展迅速，1998~2004 年国产数控机床产量和消费量的年平均增长率分别为 39.3% 和 34.9%。尽管如此，进口机床的发展势头依然强劲，从 2002 年开始，中国连续三年成为世界机床消费第一大国、机床进口第一大国，2004 年中国机床主机消费高达 94.6 亿美元。国内数控机床制造企业在中高档与大型数控机床的研究开发方面与国外的差距更加明显，70% 以上的此类设备和绝大多数的功能部件均依赖进口。由此可以看出国产数控机床特别是中高档数控机床仍然缺乏市场竞争力，其原因主要在于国产数控机床的研究开发深度不够、制造水平依然落后、服务意识与能力欠缺、数控系统生产应用推广不力及数控人才缺乏等。我们应看清形势，充分认识国产数控机床的不足，努力发展先进技术，加大技术创新与培训服务力度，以缩短与发达国家之间的差距。

1.2 数控机床的工作原理及基本组成

1.2.1 数控机床的工作原理

按照零件加工的技术要求和工艺要求，编写零件的加工程序，然后将加工程序输入到数控装置，通过数控装置控制机床的主轴运动、进给运动、更换刀具，以及工件的夹紧与松开，冷却、润滑泵的开与关，使刀具、工件和其他辅助装置严格按照加工程序规定的顺序、轨迹和参数进行工作，从而加工出符合图样要求的零件。

1.2.2 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、数控系统、伺服系统、检测系统、辅助装置和机床本体等几部分组成。

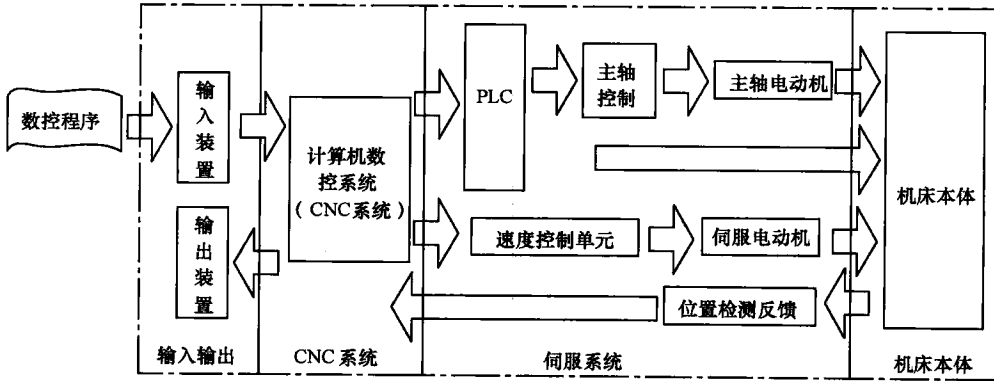


图 1-1 数控机床基本结构框图

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和 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，发出相应的信号和指令给伺服系统，通过伺服系统控制机床的各个运动部件按规定要求动作。

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，以加工出符合图样要求的零件。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。

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。常用的伺服电动机是步进电动机、直流和交流伺服电动机。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. 检测装置

检测装置将数控机床各坐标轴的实际位移量检测出来，经反馈系统输入到机床的数控装置，数控装置将反馈回来的实际位移量值与设定值进行比较，控制驱动装置按照指令设定值运动。

5. 机床本体

机床本体是数控机床的主体，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。

6. 辅助控制装置

辅助控制装置的主要作用是接收数控装置输出的开关量指令信号，经过编译、逻辑判别和运动，再经功率放大器放大后驱动相应的电器，带动机床的机械、液压、气动等辅助装置完成指令规定的开关量动作。这些控制包括主轴运动部件的变速、换向和起停指令，刀具的选择和交换指令，冷却、润滑装置的起动、停止，工件和机床部件的松开、夹紧，分度工作台转位分度等开关辅助动作。

由于可编程序逻辑控制器（PLC）具有响应快、性能可靠、易于使用、编程和修改程序并可直接起动机床开关等特点，现已广泛用作数控机床的辅助控制装置。

1.2.3 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

根据加工零件的图样，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其他有关辅助信息。

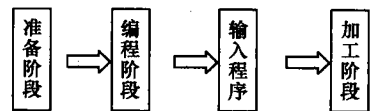


图 1-2 数控加工过程

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. 输入程序

据已编好的程序单，通过输入装置将程序输入到数控系统中。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。

1.3 数控机床的分类

数控机床的品种规格很多，分类方法也各不相同。一般可根据功能和结构，按下面 5 种原则进行分类。

1.3.1 按机床运动的控制轨迹分类

1. 点位控制数控机床

点位控制只要求控制机床的移动部件从一点移动到另一点的准确定位，对于点与点之间的运动轨迹的要求并不严格，在移动过程中不进行加工，各坐标轴之间的运动是不相关的。为了实现既快又精确的定位，两点间的移动一般先快速移动，然后慢速趋近定位点，以保证

定位精度。图 1-3 所示为点位控制的运动轨迹。

具有点位控制功能的机床主要有数控钻床、数控镗床、数控冲床等。随着数控技术的发展和数控系统价格的降低，单纯用于点位控制的数控系统已不多见。

2. 直线控制数控机床

直线控制数控机床也称为平行控制数控机床，其特点是除了控制点与点之间的准确定位外，还要控制两相关点之间的移动速度和路线（轨迹），但其运动路线只是与机床坐标轴平行移动，也就是说同时控制的坐标轴只有一个（即数控系统内不必有插补运算功能），在移位的过程中刀具能以指定的进给速度进行切削，一般只能加工矩形、台阶形零件。

直线控制数控机床主要有比较简单的数控车床、数控铣床、数控磨床等。这种机床的数控系统也称为直线控制数控系统。同样，单纯用于直线控制的数控机床也不多见。

3. 轮廓控制数控机床

轮廓控制数控机床也称连续控制数控机床，其控制特点是能够对两个或两个以上的运动坐标的位移和速度同时进行控制。为了满足刀具沿工件轮廓的相对运动轨迹符合工件加工轮廓的要求，必须将各坐标运动的位移控制和速度控制按照规定的比例关系精确地协调起来。

因此这类控制要求数控装置具有插补运算功能。所谓插补就是根据程序输入的基本数据（如直线的终点坐标、圆弧的终点坐标和圆心坐标或半径），通过数控系统内插补运算器的数学处理，把直线或圆弧的形状描述出来，也就是一边计算，一边根据计算结果向各坐标轴控制器分配脉冲，从而控制各坐标轴的联动位移量与要求的轮廓相符合。在运动过程中，刀具对工件表面进行连续切削，可以进行各种直线、圆弧、曲线的加工。轮廓控制的运动轨迹如图 1-4 所示。

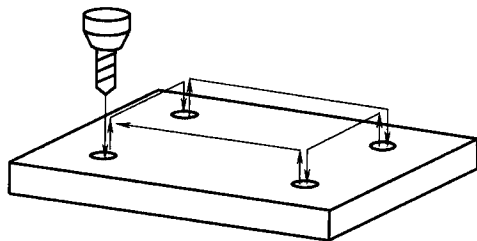


图 1-3 点位控制的运动轨迹

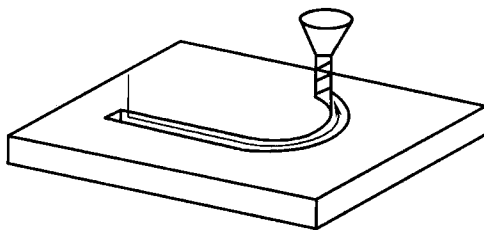


图 1-4 轮廓控制的运动轨迹

这类机床主要有数控车床、数控铣床、数控线切割机、加工中心等，其相应的数控装置称为轮廓控制数控系统。根据它所控制的联动坐标轴数不同，又可以分为下面几种形式：

(1) 两轴联动 主要用于数控车床加工回转曲面或数控铣床加工曲线柱面，如图 1-4 所示。

(2) 两轴半联动 主要用于三轴以上机床的控制，其中两根轴可以联动，而另外一根轴可以作周期性进给。图 1-5 所示为采用这种方式用行切法加工三维空间曲面。

(3) 三轴联动 一般分为两类：一类就是 X 、 Y 、 Z 三个直线坐标轴联动，较多用于数控铣床、加工中心等，如图 1-6 所示为用球头铣刀铣切三维空间曲面；另一类是除了同时控制 X 、 Y 、 Z 中两个直线坐标外，还同时控制围绕其中某一直线坐标轴旋转的旋转坐标轴，如车削加工中心，它除了纵向（ Z 轴）、横向（ X 轴）两个直线坐标轴联动外，还需同时控制围绕 Z 轴旋转的主轴（ C 轴）联动。

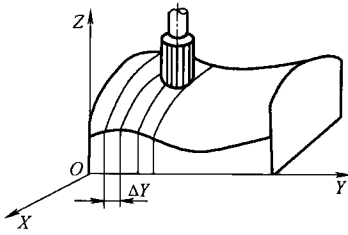


图 1-5 两轴半联动加工三维空间曲面

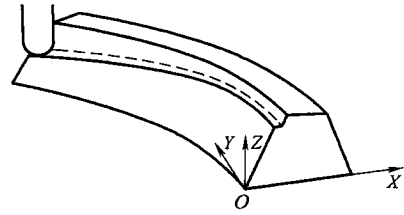


图 1-6 三轴联动加工三维空间曲面

(4) 四轴联动 同时控制 X 、 Y 、 Z 三个直线坐标轴与某一旋转坐标轴联动，图 1-7 所示为同时控制 X 、 Y 、 Z 三个直线坐标轴与一个工作台回转轴联动的数控机床。

(5) 五轴联动 除同时控制 X 、 Y 、 Z 三个直线坐标轴联动外，还同时控制围绕这些直线坐标轴旋转的 A 、 B 、 C 坐标轴中的两个坐标轴，形成同时控制五个轴联动。这时刀具可以被定在空间的任意方向，如图 1-8 所示。比如控制刀具同时绕 X 轴和 Y 轴两个方向摆动，使得刀具在其切削点上始终保持与被加工的轮廓曲面成法线方向，以保证被加工曲面的光滑性，提高其加工精度和加工效率，减小被加工表面的表面粗糙度值。

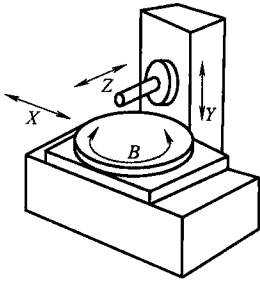


图 1-7 四轴联动的数控机床

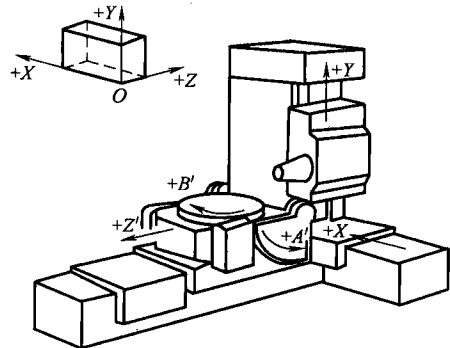


图 1-8 五轴联动的数控机床

1.3.2 按伺服控制的方式分类

1. 开环控制数控机床

这类机床的进给伺服驱动是开环的，即没有检测反馈装置。一般它的驱动电动机为步进电动机，步进电动机的主要特征是控制电路每变换一次指令脉冲信号，电动机就转动一个步距角，并且电动机本身就有自锁能力。其控制系统框图如图 1-9 所示。数控系统输出的进给指令信号通过脉冲分配器来控制驱动电路，它以变换脉冲的个数来控制坐标位移量，以变换脉冲的频率来控制位移速度，以变换脉冲的分配顺序来控制位移的方向。因此这种控制方式的最大特点是控制方便、结构简单、价格便宜。数控系统发出的指令信号流是单向的，所以不存在控制系统的稳定性问题，但由于机械传动的误差没有经过反馈校正，故位移精度不高。早期的数控机床均采用这种控制方式，只是故障率比较高。目前由于驱动电路的改进，其应用仍较多。尤其是在我国，一般经济型数控系统和旧设备的数控改造多采用这种控制方式。另外，这种控制方式可以配置单片机或单板机作为数控装置，使得整个系统的价格降

低。

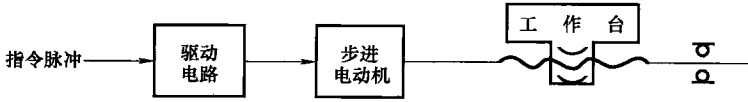


图 1-9 开环控制系统框图

2. 闭环控制机床

这类数控机床的进给伺服驱动是按闭环反馈控制方式工作的，其驱动电动机可采用直流或交流两种伺服电动机，并需要配置位置反馈和速度反馈，在加工中随时检测移动部件的实际位移量，并及时反馈给数控系统中的比较器，它与插补运算所得到的指令信号进行比较，其差值又作为伺服驱动的控制信号，进而带动位移部件以消除位移误差。

按位置反馈检测元件的安装部位和所使用的反馈装置的不同，闭环控制又分为全闭环和半闭环两种控制方式。

(1) 全闭环控制 如图 1-10 所示，其位置反馈装置采用直线位移检测元件（目前一般采用光栅尺），安装在机床的床鞍部位，即直接检测机床坐标的直线位移量，通过反馈可以消除从电动机到机床床鞍的整个机械传动链中的传动误差，从而得到很高的机床静态定位精度。但是，由于在整个控制环内，许多机械传动环节的摩擦特性、刚性和间隙均为非线性，并且整个机械传动链的动态响应时间与电气响应时间相比又非常大。这为整个闭环系统的稳定性校正带来很大困难，系统的设计和调整也都相当复杂，因此，这种全闭环控制方式主要用于精度要求很高的数控坐标镗床、数控精密磨床等。

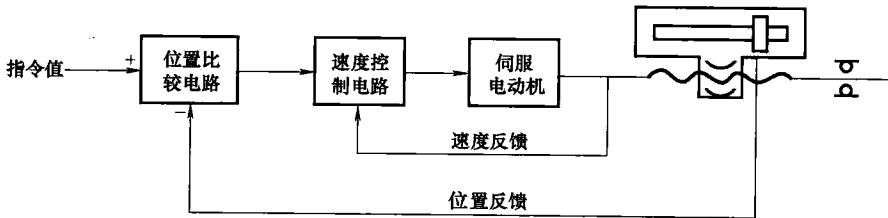


图 1-10 闭环控制系统框图

(2) 半闭环控制 如图 1-11 所示，其位置反馈采用转角检测元件（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，因此可以获得较稳定的控制特性。丝杠等机械传动误差不能通过反馈来随时校正，但是可采用软件定值补偿方法来适当提高其精度。目前，大部分数控机床采用半闭环控制方式。

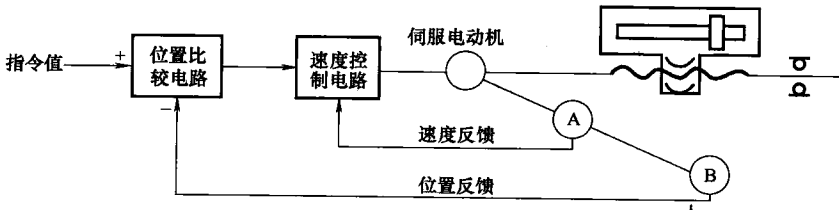


图 1-11 半闭环控制系统框图

3. 混合控制数控机床

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，所以为了互为弥补，以满足某些机床的控制要求，宜采用混合控制方式。采用较多的有开环补偿型和半闭环补偿型两种方式。

1.3.3 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、金属成形类数控机床、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（见图 1-12）、数控铣床（见图 1-13）、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。

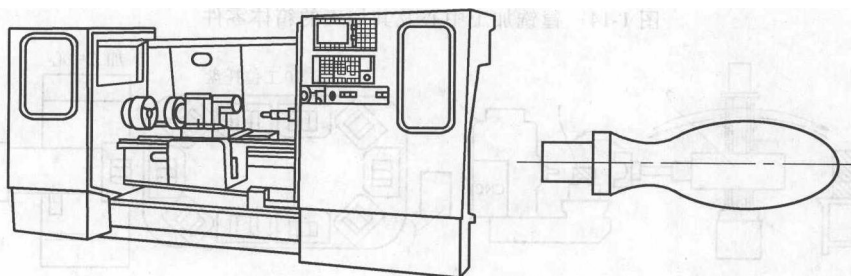


图 1-12 数控车床及其加工的手柄零件

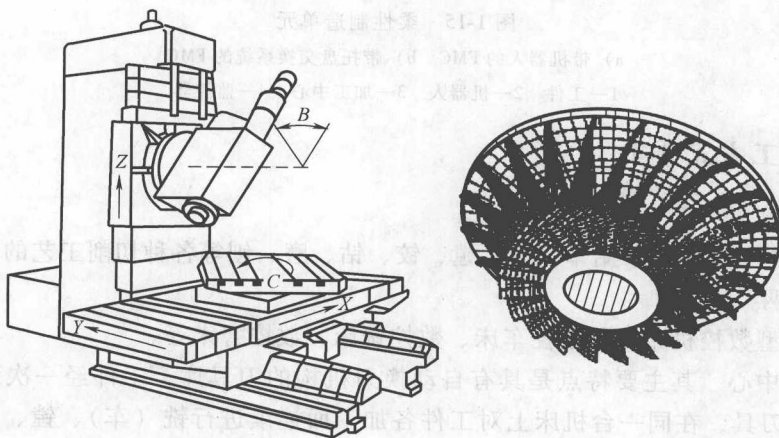


图 1-13 五轴数控铣床及其加工的叶轮零件

加工中心机床常见的是镗铣类加工中心（见图 1-14）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的。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更换刀具，连续地自动对工件各加工面进行铣（车）、镗、钻等多工序加工。

柔性制造单元（见图 1-15）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 24h 无人加工。

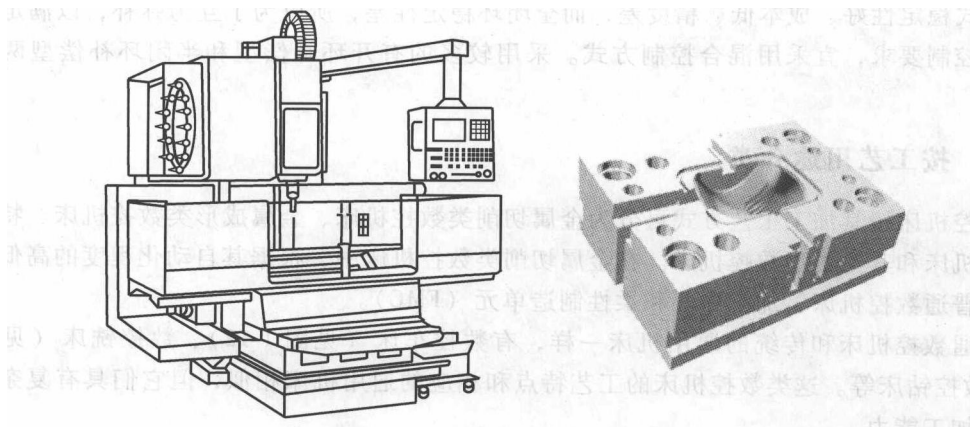


图 1-14 镗铣加工中心及其加工的箱体零件

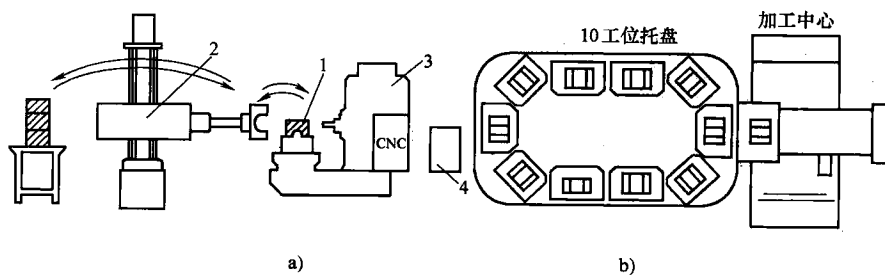


图 1-15 柔性制造单元

a) 带机器人的 FMC b) 带托盘交换系统的 FMC

1—工件 2—机器人 3—加工中心 4—监控器

1.3.4 按加工方式分类

1. 金属切削类机床

金属切削类机床是指采用车、铣、镗、铰、钻、磨、刨等各种切削工艺的数控机床。它又可分为以下两类：

(1) 普通型数控机床 如数控车床、数控铣床、数控磨床等。

(2) 加工中心 其主要特点是具有自动换刀机构的刀具库，工件经一次装夹后，通过自动更换各种刀具，在同一台机床上对工件各加工面连续进行铣（车）、镗、铰、钻、攻螺纹等多种工序的加工，如镗铣类加工中心、车削中心、钻削中心等。

2. 金属成形类机床

金属成形类机床是指采用挤、冲、压、拉等成形工艺的数控机床，常用的有数控压力机、数控折弯机、数控弯管机、数控旋压机等。

3. 特种加工类机床

特种加工类机床主要有数控电火花线切割机、数控电火花成形机、数控火焰切割机、数控激光加工机等。

4. 测量、绘图类机床

测量、绘图类机床主要有三坐标测量仪、数控对刀仪、数控绘图仪等。

1.3.5 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。

1.4 数控机床和数控加工的特点

1.4.1 数控机床的特点

数控机床已越来越多地应用于现代制造业，并具有普通机床无法比拟的优势。数控机床主要有以下特点：

1. 传动链短

与普通机床相比主轴驱动不再是电动机-传动带-齿轮副机构变速，而是采用横向和纵向进给分别由两台伺服电动机驱动运动完成；不再使用交换齿轮、离合器等传统部件，从而使传动链大大缩短。

2. 刚性高

为了与数控系统的高精度相匹配，数控机床的刚性高，以便适应高精度的加工要求。

3. 轻拖动

刀架（工作台）移动采用滚珠丝杠副，摩擦小，移动轻便。丝杠两端的支承为专用轴承，其压力角比普通轴承大，在出厂时便已选配好。数控机床的润滑部分采用油雾自动润滑，这些措施都使得数控机床移动轻便。

1.4.2 数控加工的特点

数控加工就是数控机床在加工程序的驱动下将毛坯加工成合格零件的加工过程。数控机床控制系统具有普通机床所没有的计算机数据处理功能、智能识别功能以及自动控制功能。数控加工与常规加工相比有着明显的区别，其特点如下：

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型面加工。

2. 高质量

数控机床是按数字形式给出指令进行加工的，一般情况下，工作过程不需要人工干预，这就消除了操作者人为产生的误差。在设计制造数控机床时，采取了许多措施，使数控机床的机械部分达到了较高的精度和刚度。数控机床工作台的移动当量普遍达到了 $0.01 \sim 0.0001\text{mm}$ ，而且进给传动链的反向间隙与丝杠螺距误差等均可由数控装置进行补偿，高档数控机床采用光栅尺进行工作台移动的闭环控制。数控机床的加工精度由过去的 $\pm 0.01\text{mm}$ 提高到 $\pm 0.005\text{mm}$ ，甚至更高。定位精度在 20 世纪 90 年代初中期已达到 $\pm 0.002 \sim$