



普通高等教育规划教材

数控技术及其应用

第2版

何玉安 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育规划教材

数控技术及其应用

第2版

主 编	何玉安		
副主编	赵莉萍	冯淑敏	
参 编	沈希忠	梅纪先	许翊鸣
	吴 雁		
主 审	谈 理		



机械工业出版社

普通高等教育应用型人才培养规划教材 编审委员会名单

主 任：刘国荣 湖南工程学院
副主任：左健民 南京工程学院
陈力华 上海工程技术大学
鲍 泓 北京联合大学
王文斌 机械工业出版社

委 员：（按姓氏笔画排序）

刘向东 华北航天工业学院
任淑淳 上海应用技术学院
何一鸣 常州工学院
陈文哲 福建工程学院
陈 峻 扬州大学
苏 群 黑龙江工程学院
娄炳林 湖南工程学院
梁景凯 哈尔滨工业大学（威海）
童幸生 江汉大学

数控技术应用专业分委员会名单

主 任：朱晓春 南京工程学院
副主任：赵先仲 华北航天工业学院
 龚仲华 常州工学院

委 员：（按姓氏笔画排序）

卜云峰 淮阴工学院
汤以范 上海工程技术大学
朱志宏 福建工程学院
李洪智 黑龙江工程学院
吴 祥 盐城工学院
宋德玉 浙江科技学院
钱 平 上海应用技术学院
谢 骐 湖南工程学院

序

工程科学技术在推动人类文明的进步中一直起着发动机的作用。随着知识经济时代的到来,科学技术突飞猛进,国际竞争日趋激烈。特别是随着经济全球化发展和我国加入 WTO,世界制造业将逐步向我国转移。有人认为,我国将成为世界的“制造中心”。有鉴于此,工程教育的发展也因此面临着新的机遇和挑战。

迄今为止,我国高等工程教育已为经济战线培养了数百万专门人才,为经济的发展作出了巨大的贡献。但据 IMD1998 年的调查,我国“人才市场上是否有充足的合格工程师”指标排名世界第 36 位,与我国科技人员总数排名世界第一形成很大的反差。这说明符合企业需要的工程技术人员特别是工程应用型技术人才市场供给不足。在此形势下,国家教育部近年来批准组建了一批以培养工程应用型本科人才为主的高等院校,并于 2001、2002 年两次举办了“应用型本科人才培养模式研讨会”,对工程应用型本科教育的办学思想和发展定位作了初步探讨。本系列教材就是在这种形势下组织编写的,以适应经济、社会发展对工程教育的新要求,满足高素质、强能力的工程应用型本科人才培养的需要。

航天工程的先驱、美国加州理工学院的冯·卡门教授有句名言:“科学家研究已有的世界,工程师创造未有的世界。”科学在于探索客观世界中存在的客观规律,所以科学强调分析,强调结论的唯一性。工程是人们综合应用科学(包括自然科学、技术科学和社会科学)理论和技术手段去改造客观世界的实践活动,所以它强调综合,强调方案优缺点的比较并作出论证和判断。这就是科学与工程的主要不同之处。这也就要求我们对工程应用型人才的培养和对科学研究型人才的培养应实施不同的培养方案,采用不同的培养模式,采用具有不同特点的教材。然而,我国目前的工程教育没有注意到这一点,而是:①过分侧重工程科学(分析)方面,轻视了工程实际训练方面,重理论,轻实践,没有足够的工程实践训练,工程教育的“学术化”倾向形成了“课题训练”的偏软现象,导致学生动手能力差。②人才培养模式、规格比较单一,课程结构不合理,知识面过窄,导致知识结构单一,所学知识中有一些内容已陈旧,交叉学科、信息学科的内容知之甚少,人文社会科学知识薄弱,学生创新能力不强。③教材单一,注重工程的科学分析,轻视工程实践能力的培养;注重理论知识的传授,轻视学生个性特别是创新精神的培养;注重教材的系统性和完整性,造成课程方面的相互重复、脱节等现象;缺乏工程应用背景,存在内容陈旧的现象。④老师缺乏工程实践经验,自身缺乏“工程训练”。⑤工程教育在实践中与经济、产业的联系不密切。因此要使我国工程教育适应经济、社会的发展,培养更多优秀的工程技术人员,我们必须努力改革。

组织编写本套系列教材,目的在于改革传统的高等工程教育教材,建设一套富有特色、有利于应用型人才培养的本科教材,满足工程应用型人才培养的要求。

本套系列教材的建设原则是:

1. 保证基础,确保后劲

科技的发展,要求工程技术人员必须具备终生学习的能力。为此,从内容安排上,保证学生有较厚实的基础,满足本科教学的基本要求,使学生日后具有较强的发展后劲。

2. 突出特色, 强化应用

围绕培养目标, 以工程应用为背景, 通过理论与工程实际相结合, 构建工程应用型本科教育系列教材特色。本套系列教材的内容、结构遵循如下9字方针: 知识新、结构新、重应用。教材内容的要求概括为: “精”、“新”、“广”、“用”。“精”指在融会贯通教学内容的基础上, 挑选出最基本的内容、方法及典型应用; “新”指将本学科前沿的新进展和有关的技术进步新成果、新应用等纳入教学内容, 以适应科学技术发展的需要。妥善处理好传统内容的继承与现代内容的引进。用现代的思想、观点和方法重新认识基础内容和引入现代科技的新内容, 并将这些按新的教学系统重新组织; “广”指在保持本学科基本体系下, 处理好与相邻以及交叉学科的关系; “用”指注重理论与实际融会贯通, 特别是注入工程意识, 包括经济、质量、环境等诸多因素对工程的影响。

3. 抓住重点, 合理配套

工程应用型本科教育系列教材的重点是专业课(专业基础课、专业课)教材的建设, 并做好与理论课教材建设同步的实践教材的建设, 力争做好与之配套的电子教材的建设。

4. 精选编者, 确保质量

遴选一批既具有丰富的工程实践经验, 又具有丰富的教学实践经验的教师担任编写任务, 以确保教材质量。

我们相信, 本套系列教材的出版, 对我国工程应用型人才培养质量的提高, 必将产生积极作用, 会为我国经济建设和社会发展作出一定的贡献。

机械工业出版社颇具魄力和眼光, 高瞻远瞩, 及时提出并组织编写这套系列教材, 他们为编好这套系列教材做了认真细致的工作, 并为该套系列教材的出版提供了许多有利的条件, 在此深表衷心感谢!

编委会主任 刘国荣教授
湖南工程学院院长

第2版前言

数控技术是现代制造技术的基础，它综合了计算机技术、自动控制技术、自动检测技术和精密机械等高新技术。它的广泛应用，使普通机械被数控机械所代替，特别是数控机床的出现及所带来的巨大效益，引起了世界各国科技界和工业界的普遍重视。数控技术的水准、拥有和普及程度，已经成为衡量一个国家综合国力和工业现代化水平的重要标志。因此，为适应这种形势，需要培养大批熟练掌握数控技术的工程技术人才。

数控技术对现代制造业的影响是多方面和重大的。首先，表现在使机械制造业的整体面貌发生了根本性的变化。数控技术的应用将机械制造与微电子、计算机、信息处理、现代控制理论、检测技术以及光电磁等多种学科技术融为一体，使制造业成为知识密集、技术密集的大科学范畴的现代制造业，成为国民经济的基础工业。其次，表现在使机械制造业的生产方式发生了深刻的变化。数控技术是柔性自动化和智能化的技术基础之一，它适应科技进步，满足了多品种、变批量市场需求的生产方式。同时，数控技术使传统的制造工艺发生了显著和本质的变化，工艺方法和制造系统不断更新，形成 CAD、CAM、CAPP、CAT、FMS、CIMS、FA 等一系列具有划时代意义的新技术、新工艺的制造系统。再次，表现在使产品结构发生了重大变化。现代机械产品向着高精度、高自动化和高可靠性方向发展，具有机电结合和多学科技术结合的特点，纯机械的产品越来越少，而且更新换代速度快。机械产品在国内外市场上是否具有竞争力，在很大程度上取决于数控技术的发展、推广和应用。

为了适应数控人才培养的需要，普通高等教育应用型人才培养规划教材编审委员会组织了普通高等教育应用型本科数控技术应用专业规划教材的编写工作，本书是该套教材之一。

本书由何玉安任主编，赵莉萍、冯淑敏任副主编。上海应用技术学院何玉安编写了第三章、第四章和第二章第八节，赵莉萍和梅纪先编写了第二章第一~七节，冯淑敏编写了第六章、第一章和部分第七章，沈希忠和许翊鸣编写了第五章，吴雁编写了部分第七章。全书由何玉安负责统稿。

上海应用技术学院陈启铨和谈理分别为本书第1版和第2版的主审。

由于编者水平有限，经验不足，书中难免有不少缺点或错误，恳请广大读者批评指正。

编者

目 录

序	
第2版前言	
第一章 概论	1
第一节 数控机床的产生及特点	1
第二节 数控机床的组成及分类	2
第三节 数控机床和数控技术的发展	6
习题与思考题	10
第二章 数控加工程序编制	11
第一节 概述	11
第二节 数控编程中有关标准及代码	12
第三节 常用编程指令	21
第四节 数控机床的程序编制	26
第五节 用户宏程序编制	44
第六节 程序编制中的工艺分析	52
第七节 程序编制中的数学处理	60
第八节 数控加工自动编程	66
习题与思考题	71
第三章 插补原理及数据处理	73
第一节 概述	73
第二节 基准脉冲插补	74
第三节 数据采样插补	89
第四节 输入数据处理	95
习题与思考题	103
第四章 计算机数控 (CNC) 装置	104
第一节 概述	104
第二节 CNC 装置的硬件结构	109
第三节 CNC 装置的软件结构	117
第四节 CNC 装置的接口与通信	122
第五节 开放式数控体系结构	127
习题与思考题	131
第五章 数控机床的位置检测装置	132
第一节 概述	132
第二节 感应同步器	133
第三节 旋转变压器	139
第四节 编码器	142
第五节 光栅	143
第六节 磁尺	150
第七节 激光干涉仪	154
习题与思考题	156
第六章 数控伺服系统	158
第一节 概述	158
第二节 步进电动机伺服系统	159
第三节 直流伺服电动机调速系统	165
第四节 交流伺服电动机调速系统	171
第五节 主轴驱动	177
第六节 位置控制原理	180
第七节 直线电动机及其在机床进给驱动中的应用	183
第八节 电主轴及其在数控机床中的应用	188
习题与思考题	192
第七章 数控技术的应用	193
第一节 五轴数控机床和加工中心实例	193
第二节 高速切削加工和高速切削数控机床	199
第三节 柔性制造系统 (FMS) 简介	204
第四节 数控技术应用于工业机器人	207
第五节 其他数控设备简介	211
习题与思考题	213
参考文献	215

第一章 概 论

第一节 数控机床的产生及特点

一、数控机床的产生

劳动创造了人类，而劳动是从制造工具开始的，正可谓：人猿相揖别，只几个石头磨过。可见，制造业是人类古老的工业，它走过了从手工制造、机械制造、自动化制造，直到今天的智能制造的漫长历程。而在它漫长的历程中最短暂的、以运用数控技术为基本特色的智能制造，却是制造业中最辉煌的阶段，它融合了计算机技术、自动控制技术、精密检测技术、伺服驱动技术、人工智能技术，以及信息和网络技术等高新技术，以从前无法想象的方式（无人加工、远程制造等）高效地制造出了从前无法进行机械加工的产品（具有空间复杂曲面等的零件）。

制造业长时间以作坊式机械制造业为主，加工设备采用通用机床，生产组织相当分散，产量极低，成本很高，小工厂没有能力开发新技术、新产品。所以最初的制造业受当时社会发展的制约，没有能力发展自动加工，而且“单件生产”方式对自动加工也没有需求。随着科学技术和人类社会的不断发展，人们对机械产品的质量要求不断提高，同时，效率是赢得当时市场竞争的关键，因而，制造业需要专用自动化机床及专用自动生产线，将“单件生产”方式转为“大批量生产”方式，美国福特汽车厂就是一个典型的例子，他们利用刚性生产流水线追求大量生产方式，从而大大提高了生产力，降低成本，赢得市场。但社会在不断进步，市场对产品多样化的要求，对刚性生产线不断提出挑战。刚性生产线采用专用设备，生产准备周期长，产品改型不易，因而缺少产品的多样性和人类的创造性，而柔性生产线却能满足社会对产品改型、创新的需求，“大批量生产”方式须向“中小批量生产”转化，只能加工一定零件，甚至某一工序的专用机床，须由能方便而高效地改变加工范围的新机床来取代。为了迎合这一转化，为了解决单件、小批量，特别是复杂型面零件的自动加工，并保证产品的质量，制造业呼吁研制新型的加工机械。但当时计算机还未出现，虽然制造业有对数控机床的需求，却无此可能。所以只能由仿型机床、组合机床替代专用机床，以满足产品改型、创新的需求。直到计算机产生、发展，才使制造业对数控机床的需求得以实现。1952年美国 PARSONS 公司与麻省理工学院（MIT）合作研制了世界第一台数控机床——三坐标数控铣床，它综合应用了计算机、自动控制、伺服驱动、精密测量与新型机械机构等多方面的技术成果。它的制成是机械制造行业中的一次技术革命——把数控技术与机床控制密切地结合起来。

二、数控技术的概念和数控机床的特点

数字控制（Numerical Control, NC）技术，简称数控技术，是使用数字化信息，按给定的工作程序、运动轨迹和速度，对被控对象进行自动控制的一种技术。数字控制是相对于模拟控制而言的，数字控制系统中的控制信息是数字量。它所控制的一般是位移、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得的，而且可经 A/D 转换，用数字信号表示。

采用了数控技术的设备，称之为数控设备。数控机床就是一种典型的数控设备，它装备了运用数字技术的控制系统——数控系统。因而，相对于通用机床及自动化专用机床，数控机床有其自己的特点。

1. 数控机床在适应不同零件的自动加工方面胜于自动化专用机床

数控机床是按照不同的零件编制不同的加工程序进行自动加工的，因而在产品改型和创新时只须变换加工程序即可，而不必像自动化专用机床那样在产品变更时须变更生产设备，花费很长的生产准备周期。

2. 数控机床在生产效率、加工精度和加工质量稳定性方面胜于通用机床

由于数控机床机构简单、刚性好，故可以采用较大的切削用量，减少机加工工时；还由于数控机床具有自动换刀等辅助操作功能，大大减少了辅助加工时间，从而提高了生产效率。此外，数控机床本身的精度较高，还可以运用软件进行传动部件的误差补偿和返程侧隙补偿，因而加工精度较高。数控机床采用自动化加工，避免了人为操作失误，因而加工质量稳定性高于通用机床。

3. 在数控机床上能完成复杂型面的加工

如图 1-1 所示，手柄柄部旋转曲面的加工可以在数控车床上实现。数控机床运用插补计算以确定各进给运动轴相应的方向和步长，从而与主轴一起产生正确的成形运动，加工出复杂型面的零件。若在通用机床上加工，则很难加工出光滑的，且尺寸、形状满足要求的手柄。

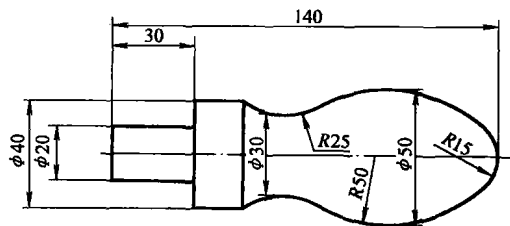


图 1-1 手柄简图

4. 一次装夹可以完成多道工序

数控机床，特别是具有刀库的加工中心，因为具有自动换刀功能，所以使得工件在一次装夹中可以完成多道工序，以减小装夹误差，减少辅助时间，减少工序间的运输。另外，一台数控机床代替多台普通机床，可以带来较高的经济效益。

5. 数控机床的其他特点

数控机床价格高，且对操作、维修人员的技术水平有较高的要求。

综上所述，使用数控机床可以高效、高质地制造出新的产品，以满足社会不断变化的需求，使制造业得到较高的经济效益。尽管数控机床价格较高，但若采用成组技术，变单个零件的小批生产为一组零件的大批生产，则可降低制造成本，提高经济效益。

第二节 数控机床的组成及分类

一、数控机床的组成

使用数控机床进行自动加工，应针对所加工的零件编制加工程序，并将其输入至数控装置，数控装置就以零件的加工程序作为工作指令，控制机床主运动的启动、变速和停止；控制机床进给运动的方向、移动距离和速度；控制机床的辅助装置（如换刀装置、工件夹紧和松开装置以及冷却润滑装置等）的动作。从而使刀具和工件以及其他辅助装置严格地按

数控加工程序所规定的顺序、路径和参数进行工作，以加工出形状、尺寸和精度均符合要求的零件。因此，如图 1-2 所示，数控机床由以下五部分组成：

1. 数控加工程序

数控加工程序是数控机床进行自动加工的指令序列。它须用符合标准的文字、数字和符号来表示，按规定的方法和格式编制而成。这些加工指令包括：工件坐标系与机床坐标系的相对关系——表征工件在数控机床上的安装位置，刀具与工件相对运动的尺寸参数，本次加工的工艺路线或加工顺序，与主运动和进给运动相关的切削参数，换刀、工件装夹及冷却润滑等辅助动作等。

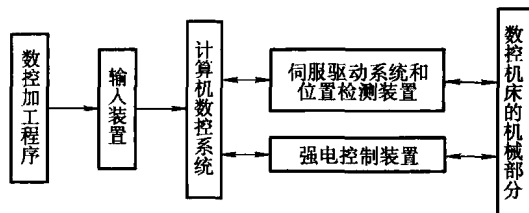


图 1-2 数控机床的组成

2. 输入装置

编制好的数控加工程序可以通过键盘或手持编程器直接输入数控装置；也可以将其保存在某种信息载体中，然后通过相应的输入装置将指令信息输入至数控装置。常用的信息载体有穿孔带、穿孔卡、磁带和磁盘等，相应的输入装置有光电阅读机、录音机和软盘驱动器等。现在有些高级的数控机床还包含了一套自动编程装置或 CAD/CAM 系统，可以根据所需加工工件的零件图的信息，自动生成数控加工程序。甚至还可通过远程通信接口从上位机或其他计算机上获取数控加工程序。

虽然有多种输入装置，但它们的功能都是将加工程序中的数控代码转化成相应的电脉冲信号，传送并保存在数控装置中。

3. 计算机数控系统和强电控制装置

计算机数控系统是数控机床的核心。它从输入装置中得到电脉冲信号（加工指令），经译码、运算、逻辑判断以及有关处理后，去控制数控机床各执行机构进行有序的规定动作。计算机数控系统由硬件和软件组成：硬件包括微型计算机、外部设备、输入/输出通道和操作面板等；软件包括输入、数据处理、插补计算、速度控制、输出、管理及诊断等部分。

强电控制装置是介于计算机数控系统和机床机械机构、液压装置及其他机构之间的控制系统。目前，多数数控机床的强电控制由可程序控制器（Programmable Logic Controller, PLC）来实现。强电控制装置按计算机数控系统输出的指令信号，对主轴、换刀装置及其他辅助装置进行控制，使它们严格按加工程序所规定的动作和顺序工作。

4. 伺服驱动系统和位置检测装置

数控机床的进给系统由伺服驱动系统和机床上的执行机构及机械传动机构组成，而伺服驱动系统由伺服驱动电路和伺服驱动装置组成。伺服驱动电路包含了伺服控制线路和功率放大线路。伺服驱动装置主要采用步进电动机或交（直）流伺服电动机。计算机数控系统发出的进给位移和速度指令，经过转换和功率放大后，作为伺服驱动装置的输入信号，使上述伺服驱动装置按规定的速度和角位移作机械转动，从而通过机械传动机构驱动数控机床的执行部件实现给定的速度和位移量。

位置检测装置主要用于闭环和半闭环的伺服驱动系统中，它们将直接或间接测得的数控机床执行部件的实际进给位移反馈给计算机数控系统，从而与指令位移进行比较，以确定和控制数控机床执行部件的下一步动作。

5. 数控机床的机械部分

数控机床的机械部分直接承担了切削加工的任务,它是在普通机床的基础上发展而来的。因而,数控机床的机械部分与普通机床一样具有主运动、进给运动执行部件及传动部件,具有床身、导轨以及立柱等支承部件。但数控机床的机械部件与普通机床相比,传动结构要求更为简单,在精度、刚度和抗振性等方面的要求更高,更多地采用高效传动部件(如滚珠丝杠副、直线滚动导轨等),而且其传动和变速机构应更便于实现自动化控制。此外,数控机床的机械部分还包括了自动换刀装置等辅助机构,对于加工中心甚至还包括了刀库和换刀机械手等。

二、数控机床的分类

1. 按数控机床的运动轨迹分类

(1) 点位控制数控机床 点位控制数控机床只须在加工平面内控制机床移动部件的终点位置,由于在移动的过程中不必进行切削,因而对移动的轨迹并无要求。这类数控机床主要有数控镗床、数控钻床和数控冲床等。它们一般有三个坐标轴,控制工件在加工平面内精确移动至终点位置的有两个坐标轴,移动时可以仅一个坐标移动,也可以两个坐标同时移动,另一个坐标轴控制钻、镗切削或冲压运动。在工件移动时一般以数控系统设定的最高进给速度运动,以提高数控机床的生产效率。在定位移动将近结束时,为了保证定位精度,需进行分级或连续降速,实现低速趋近终点,从而减小运动部件因惯性前冲而造成的越程定位误差。

(2) 直线控制数控机床 直线控制数控机床能控制刀具或工作台按加工程序规定的进给速度,沿平行于坐标轴的方向进行直线移动或进行直线切削加工。由于这类数控机床移动时同样可以是一个坐标移动或两个坐标按同样速率同时移动,因而它们还可以沿 45° 斜线进行切削加工。直线控制的数控车床可用于阶梯轴的车削,也可以用于斜角为 45° 的圆锥的车削。有的数控镗床兼有点位控制和直线控制的功能,即除了精确定位外还可以进行直线切削加工,故又被称为点位/直线控制数控机床。

(3) 轮廓控制数控机床 轮廓控制数控机床又称连续控制数控机床或多坐标联动数控机床。这类数控机床的计算机数控系统能对若干个坐标轴同时控制,因而能对工具与工件相对移动的轨迹进行连续的控制,从而使刀具和工件按平面直线、平面曲线或空间曲面轮廓的规律进行相对运动,完成正确的成形运动,加工出复杂形状的零件。由于要多坐标联动,所以轮廓控制数控机床必然要进行插补运算,即按给定的尺寸和进给速度通过一定方法的运算按序给各坐标轴发出进给信号,使刀具或工件走任意的斜线或圆弧,高级的轮廓控制数控机床还具有抛物线等插补功能。这是与点位控制和直线控制数控机床的主要区别之处。此外,轮廓控制数控机床还具有刀具长度补偿和刀具半径补偿功能。能进行多坐标联动的数控机床往往也能进行点位/直线控制。当前,除了少数专用的数控机床,如数控钻床和数控冲床等以外,现代数控机床都具有轮廓控制数控机床的功能。

2. 按伺服驱动系统的控制方式分类

(1) 开环数控机床 开环数控机床采用无位置检测反馈的伺服系统,如图1-3所示为典型的开环伺服系统,它一般采用步进电动机作为驱动电动机。计算机数控系统按加工程序规定的进给速度和位移量,输出一定频率和数量的进给脉冲,经驱动电路放大后,驱动步进电动机按一定的方向和一定的转速转动一定数量的步距角,再经机械传动装置带动数控机床的执行部件按一定的方向和一定的进给速度移动一定的进给量。由于没有位置检测反馈修正,

所以开环数控机床的位置精度由数控系统和机床机械机构本身的精度所决定。这类数控机床的机构简单, 调试容易, 造价低, 现在应用仍较广泛。

(2) 半闭环数控机床 半闭环数控机床采用间接测量执行机构实际位置或位移并构成反馈的伺服系统, 如图 1-4 所示为典型的半闭环伺服系统。图中可见位置检测装置安装在驱动电动机的端部, 或安装在传动丝杠端部, 而另一部分传动机构(丝杠、螺母和工作台)没有包含在反馈环节之内, 故称其为半闭环。半闭环数控机床由于具有位置检测反馈修正, 所以它的位置精度比开环数控机床高。虽然因为有一部分传动机构没被包含在反馈环节之内, 从理论上讲, 半闭环的精度低于闭环, 但半闭环调试方便, 稳定性好, 角位移的测量元件简单而价廉, 故半闭环伺服系统得到广泛的应用。

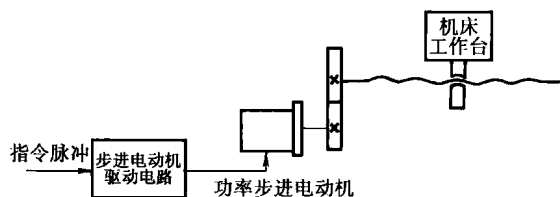


图 1-3 开环伺服系统

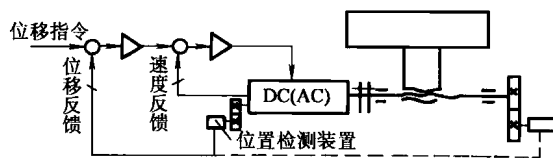


图 1-4 半闭环伺服系统

(3) 闭环数控机床 闭环数控机床采用直接测量执行机构实际位置或位移并构成反馈的伺服系统, 如图 1-5 所示为典型的闭环伺服系统。在闭环伺服系统中, 位置检测装置直接安装在数控机床执行机构上, 它是将执行机构实际位置或位移与计算机数控系统的位移指令信号进行比较, 进而用得到的误差信号对执行机构的位置随时进行修正。从理论上讲, 闭环数控机床位置精度既比开环数控机床高, 也比半闭环数控机床高。但实际上机床的机构、传动装置以及传动间隙等非线性因素都会增加调试的难度, 严重的还会使闭环伺服系统的品质下降, 甚至使伺服系统产生振荡。

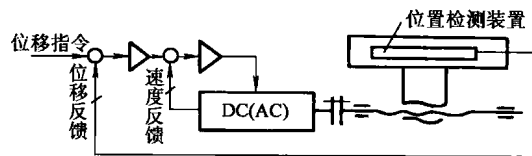


图 1-5 闭环伺服系统

3. 按所用数控装置的构成分类

(1) 硬线数控 (Hard-Wired NC, NC) 机床 在数控机床诞生之初, 计算机在处理速度和结构上满足不了机床加工的需要, 因此, 数控机床装备了采用专门的固定组合逻辑电路的数控装置, 故称之为硬线数控机床。显然, 不同功能的数控机床, 其数控装置是不同的; 若要增加或减少控制、运算功能, 则必须改变数控装置的硬件电路。由于其通用性、灵活性差, 制造周期长, 成本高, 所以当小型计算机走向成熟并被引进数控机床后, 硬线数控机床就逐步让位于新型的数控机床。

(2) 计算机数控 (Computer Numerical Control, CNC) 机床 由于微电子技术的发展, NC 机床发展为 CNC 机床。计算机数控机床数控装置的硬件电路由小型或微型计算机外加大规模集成电路组成, 数控机床的主要功能几乎全部由软件来实现。若要修改或增减系统功能, 只需改变系统软件, 而不必改动数控装置的硬件电路。显然, 它的灵活性高于硬线数控机床。20 世纪 70 年代起, CNC 机床逐步取代了 NC 机床。目前, 几乎所有的数控机床都采用了计算机数控装置。

第三节 数控机床和数控技术的发展

一、数控机床的发展历程

自1952年诞生了由美国PARSONS公司与麻省理工学院(MIT)合作研制的世界第一台基于电子管和继电器的数控机床后,随着计算机技术的不断发展,从电子管、晶体管电路,中、小型集成电路,大规模集成电路发展到小型通用电子计算机以及微型电子计算机和微处理器,数控机床也得到了不断的发展。

1954年11月,第一台工业数控机床产生。1959年,开始采用晶体管器件和印制电路板,出现了带自动换刀装置的数控机床,称为“加工中心”。1960年起,德、日等其他国家也陆续开发和生产数控机床。1965年,开始采用体积小、功耗小、可靠性高的小规模集成电路,但仍是NC机床。1970年,在美国芝加哥国际机床展览会上展出第一台CNC机床。1974年,微处理器直接用于数控系统,促进了数控机床的普及应用和数控技术的发展。

1967年,英国首先把几台数控机床连成柔性制造系统(Flexible Manufacturing System, FMS)。1975年,日本研制出实用化FMS。20世纪80年代初期,国际上出现了以加工中心为主体,再配上自动装载和监控检测装置的FMC(Flexible Manufacturing Cell)、FMS、FML(Flexible Manufacturing Line)。1982年美国芝加哥国际机床展览会和日本大阪第11届国际机床展览会充分说明FMS已从实验阶段进入了实用阶段,而且已经开始了FMS的商业化进程。

1974年,美国年轻学者哈灵顿博士首先提出了计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System, CIMS)的概念。

CIMS是一种先进的制造业系统技术,是在自动化技术、信息技术及制造技术的基础上,通过计算机及其软件,将制造工厂中与生产活动有关的各种分散的自动化系统有机地联系起来,并适合于多品种、中小批量生产的高效率、高柔性的系统。它能够及时、准确、完整地掌握企业全部资源,进而实现企业的资源优化配置。它从加快产品上市时间、降低产品成本、保证产品质量和提供优质服务四个方面提高了企业的竞争力。

CIMS的核心是集成,工具是计算机。CIMS三要素是:经营过程——CIMS控制的对象;人——在CIMS中起主导作用;技术——运行CIMS所需的手段(包括设备、通信、运输、控制等)。CIMS的特点是:

- 1) CIMS是一个人、经营、技术统一协调的系统,而不是单纯的技术系统。
- 2) CIMS是以集成为基础,追求全面优化的系统。
- 3) CIMS是以计算机为工具、物流集成和信息集成为主要特征的系统。
- 4) CIMS是具有柔性的系统,即信息集成为生产经营者灵活组织生产提供了有效的帮助,使之提高应变能力和竞争能力。
- 5) CIMS是具有现代化生产模式的制造系统。

20世纪80年代中期以来,以CIMS为标志的综合生产自动化日渐成为制造业的热点,它把制造业推到了一个新的发展阶段。目前,CIMS作为一种有希望的生产模式,不少发达国家都以此作为本国制造业的发展战略。欧美各国和日本的各项高新技术发展计划中,CIMS已成为关键项目之一。CIMS在机械制造业中必将获得更为广泛的发展。

二、我国数控技术的研究和应用

我国从 1958 年开始研究数控技术,到 20 世纪 60 年代中期,一直处于研制、开发阶段。1965 年,我国开始研制晶体管数控系统。20 世纪 60 年代末至 70 年代初,我国研制成功了 X53K-1G 数控铣床,CJK-18 数控系统和数控非圆齿轮插齿机。并从那时起,数控技术在车、铣、镗、钻、磨、冲、齿轮加工、电加工等领域全面展开,线切割机得到了推广,数控加工中心在上海、北京研制成功。20 世纪 80 年代,我国先后从日、美等国引进了部分数控装置和伺服系统技术,并于 1981 年开始批量生产数控机床。

在引进、消化、吸收的基础上,我国跟踪国外先进技术的发展,开发了一些高档的数控系统,如多轴联动数控系统,分辨率为 $0.02\mu\text{m}$ 的高精度数控系统、数字仿真系统,为柔性加工单元配套的数控系统等。至 1995 年,上海两大柔性制造系统(板材 FMS、箱体 FMS)攻关项目全面完成。FMS 在保证产品质量、增强企业的应变竞争能力、提高设备利用率、提高劳动生产率等方面,已经显示出极大的优越性,具有良好的经济和社会效益。

使用柔性制造系统虽然有较高的经济效益,但它的高效和自动化只局限在制造加工的范围内,随着制造行业的发展,柔性制造系统越来越体现出“自动化孤岛”的特点。当今制造业的竞争关键在于:T(Time to Market)——加快新产品的开发和产品的上市时间;Q(Quality)——改善质量;C(Cost)——降低成本;S(Service)——完善售前售后服务。而柔性制造系统的“自动化孤岛”特点阻碍了 T、Q、C 和 S 的完善,因而也降低了市场的竞争力。

例如,北京第一机床厂的五坐标数控铣床性能价格比比国外同类产品高,但交货比别人晚 6 个月;沈阳鼓风机厂为单件生产的企业,报价便要 6 周,国外企业只要 2 周;一般产品的设计制造周期为 18 个月,而国外企业只要 10~12 个月。因此,应提倡用集成的观点、信息的观点来对待制造业的市场竞争。

我国从 20 世纪 80 年代中期开始研究 CIMS,经过多年努力后取得很大成就。1988 年原国家科学技术委员会批准 CIMS 实验工程(CIMS-ERC)可行性论证报告。1987 年 6 月开始,清华大学等单位总共用了五年半的时间,建成我国第一套 CIMS-ERC,它于 1993 年 3 月正式通过国家鉴定和验收。它不仅填补国内在 CIMS 方面的空白,而且进入了世界先进行列,达到了美国和欧共体 CIMS 研究中心的水平。该 CIMS-ERC 不仅已建设成为一个集成技术的研究中心,它还是一个单元技术集成测试中心,一个人才培训中心,一个国内外先进技术转让中心。

CIMS-ERC 所取得的成就逐步地步入工业现场,起到了牵引、导向作用。在我国,CIMS 不仅在离散型生产企业中得到了推广应用(如成都飞机工业(集团)有限公司、沈阳鼓风机厂、北京第一机床厂等),而且有连续型生产流程的企业也已起步(如宝山集团有限公司)。

由于采用了计算机集成制造系统,北京第一机床厂的超重型数控龙门铣的交货期,已从原来的 36 个月缩短到 18 个月,库存占用资金减少 10%,生产计划编制效率提高 40~60 倍。1995 年,北京第一机床厂的 CIMS 工程相继获得美国制造工程师学会的“工业领先奖”和联合国工业发展组织的“可持续工业发展奖”。

沈阳鼓风机厂的计算机报价系统现在可以在 2 周内提供符合国际 API 标准的技术报价、财务报价和商务报价。产品的设计制造周期也从 18 个月缩短到 10~12 个月。

成都飞机工业(集团)有限公司制造的飞机复杂框体结构件,原来由76个零件组成,加工工时为360h,相应的工装工时为15600h。20世纪90年代以后开发了CIMS工程,采用CAD/CAPP/CAM,通过网络到车间的直接数字控制系统(DNC),使得一个整体框的加工(标志当时飞机数控加工高新技术的飞机整体框加工)工时只需80h,CAD/CAPP/CAM的设计工时为80h,合计为160h。由于采用整体加工,省去了工装,减少了工时,并使飞机部件质量大幅度提高。对成都飞机公司CIMS工程的技术进步,波音专家考察后给予高度评价,并获得了上亿元的订单。

随着市场全球化的发展,市场竞争空前激烈,产品的个性化要求也越来越强烈,因而,制造业对数控技术的要求不断提高。可以展望,随着计算机网络技术和自动控制技术的进一步发展,我国数控技术也必将得到进一步发展,我国制造业必将会取得更加辉煌的成果。

三、数控技术的发展趋势

在21世纪的今天,科学技术得到了突飞猛进的发展,制造技术、微电子技术、计算机技术以及信息技术的发展,有力地促进了数控技术朝着高精度、高速度、高可靠性、多功能和小型化、智能化、数控网络化和开放性方向发展。

1. 高精度和高速度化

提高精度和速度一直是数控技术发展所追求的两个重要目标,因为数控系统的精度和速度直接关系到数控机床的加工精度和加工效率。而精度和速度又是一对矛盾体:提高精度的一个重要途径是减小机床的最小移动单位(即脉冲当量 δ ,单位为mm/脉冲),但最高脉冲频率 $f_{\max}$ (脉冲/s)受到限定,所以进给速度 $F(=\delta f_{\max}$,单位为mm/s)将下降。可见,为追求高精度和高速度化,在减小脉冲当量的同时还得设法提高脉冲频率 $f_{\max}$ 。这就需要提高数控系统数据处理的速度,缩短每段程序的处理时间;提高伺服电动机的响应速度,以提高其允许的最高工作频率。FANUC公司通过提高微处理器的位数和速度来提高CNC的速度,例如,采用32位机的FS15数控系统实现了最小移动单位为 $0.1\mu\text{m}$ 的高精度,且此时的进给速度最高可达 $100\text{m}/\text{min}$ 。再如,FS16和FS18数控系统还采用了简化和减少控制基本指令的精减指令计算机(Reduced Instruction Set Computer, RISC),它能进行高速度的数据处理,其执行指令的速度可达100万条/s,一个程序段的处理时间可缩至 0.5ms ,在连续 1mm 的移动指令下能实现的最大进给速度为 $120\text{m}/\text{min}$ 。

提高数控技术的精度还可采用补偿技术,而且随着计算机运算速度的提高,完全可以用软件实现误差补偿。装备了具有软件补偿功能的数控系统的数控机床,通过间隙补偿、丝杠螺距补偿和刀具补偿等技术,可以在不增加硬件成本的情况下,提高机床的加工精度。此外,还可采用热变形补偿技术,对由电动机、回转主轴和传动丝杠副发热变形所产生的加工误差进行补偿。

由此可见,计算机技术的发展为数控技术的高精度和高速度化提供了有力的支持。

2. 高可靠性

数控机床的高可靠性是数控机床产品质量的一项重要指标,作为数控机床的核心——数控系统,它的可靠性更是数控机床产品质量的关键所在。

衡量可靠性的重要量化指标是平均无故障工作时间(MTBF)。据有关资料统计,数控系统的MTBF值已由20世纪70年代的大于3000h、20世纪80年代的大于10000h,提高到

20 世纪 90 年代的大于 30000h。现代数控系统的 MTBF 值可达到 10000 ~ 36000h。

3. 多功能、小型化

多功能的数控系统可以最大限度地提高数控设备的利用率,提高数控设备的效率。例如数控加工中心,可以实现单个零件的多工序加工,既减少了装夹、定位的时间及定位误差,又减少了加工设备的台数。又如数控系统配备了较强的功能,可以对机械手等辅助装置进行控制,以实现自动换刀等操作,提高效率,降低辅助加工时间。这类数控系统往往内装可编程程序控制器 (PLC),将 CNC 与 PLC 有机地结合起来,在有限的 CPU 资源的情况下,解决多功能和实时性的矛盾。现代数控系统多功能化还体现在增加控制轴数,以提高数控设备所具有的能力。

现代数控系统有朝小型化方向发展的趋势,FANUC 公司的 FS16 和 FS18 数控系统都采用了三维安装方法,使电子元器件得以高密度地安装,从而使其体积得到了很大程度的缩小。小型化的数控系统可以很方便地安装到机电一体化设备上。

4. 智能化

现代数控系统由于计算机技术和超大规模集成电路等技术的发展而有能力朝着智能化方向发展。现代数控系统的智能化表现在运用自适应控制技术、装备专家系统和具有系统自学习及示教功能。装备采用自适应控制技术的数控系统的数控机床,可以对机床主轴转矩、切削力、切削温度、刀具磨损等参数进行自动测量,并自动加以调整,确保切削过程处于最佳状态,以满足加工零件的精度和表面粗糙度的要求。在数控机床的数控系统中,可以建立切削工艺专家系统、故障诊断专家系统等,也可以具有系统自学习及示教功能,从而提高编程效率,降低对编程人员技术水平要求,达到对故障进行自诊断并自动采取排除故障措施的目的。

5. 数控网络化

随着信息技术的蓬勃发展,数控网络化是数控技术一个必然的发展趋势。在制造业中,数控网络化即将制造单元和控制装置通过网络连接起来,实现对加工过程和加工设备的远程控制 and 无人化操作;对制造过程所需资源(如加工程序、机床、工具和检测监控仪器等)实行共享,实现满足 CAD/CAM 系统与数控系统在高速局域网上进行大量信息交换的要求。另外,当数控系统发生故障时,数控系统生产商可以通过 Internet 对用户的数控系统进行快速诊断,提高设备的完好率,满足用户对数控设备的远程故障监控、故障诊断和故障修复的要求。在制造业中若实现数控网络化,就可以将数控机床、各级管理机构以及企业外部信息联系在一起,以便进一步提高制造、管理、经营、销售和服务等各方面的集成化和智能化程度,朝计算机集成制造系统的方向发展。

6. 开放式

现在常见的数控系统是一种专用封闭式的系统,由于不兼容、内部结构复杂、不易升级及不易进一步开发等缺点,而越来越不能满足当今市场的需要。用户往往处于被动的地位,不能根据生产的实际添加或改变系统功能。因而,由美国率先提出了开放式数控系统的研究计划,以促使数控系统朝通用化、柔性化、智能化和网络化方面发展,推动数控技术得到更广泛的应用。开放式数控系统的本质是面向用户:数控系统的开发可以在统一的运行平台上进行,系列化的系统元器件完全对用户开放,用户可以在世界范围内选购自己所需的系统组件,将用户所需求的特殊要求融合到数控系统中,灵活自主地构成自己的数控系统;或由数