



数控技术基础

● 杨继昌 李金伴 主编



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

数 控 技 术 基 础

杨继昌 李金伴 主编



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

数控技术基础/杨继昌, 李金伴主编. —北京: 化学工业出版社, 2004.3
ISBN 7-5025-5269-3

I. 数… II. ①杨… ②李… III. 数据机床-职业技能鉴定-自学参考资料 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 012589 号

数控技术基础

杨继昌 李金伴 主编
责任编辑: 陈丽 刘俊之
文字编辑: 徐卿华
责任校对: 顾淑云
封面设计: 于兵

*

化学工业出版社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
发行电话: (010) 64982530
<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京市兴顺印刷厂印刷
北京市兴顺印刷厂装订

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 12 $\frac{1}{4}$ 字数 329 千字

2004 年 4 月第 1 版 2004 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5269-3/G · 1395

定 价: 28.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

出版说明

随着科学技术的迅猛发展，数控技术的发展日新月异，尤其是以计算机、信息技术为代表的高新技术的发展，使制造技术的内涵和外延发生了革命性的变化。传统制造技术不断吸收信息、材料、能源及管理等领域现代成果，综合应用于数控技术的产品设计、制造、检测、生产管理和售后服务。在生产技术和生产模式等方面，许多新的思想和概念不断涌现，而且，不同学科之间相互渗透、交叉融合，衍生新的研究领域，迅速改变着传统制造业的面貌。

数控技术是20世纪制造技术的重大成就之一，是一个综合了计算机技术、自动控制技术、检测技术和机械加工技术的交叉和综合技术领域。数控技术的核心是由计算机（主要是软件）实现对加工过程中的信息进行处理和控制，实现加工过程自动化。从20世纪70年代以来，计算机数控技术获得了突飞猛进的发展，数控机床和其他数控装备在实际生产中获得了越来越广泛的应用。同时，计算机数控技术的发展又极大地推动了计算机辅助设计和辅助制造（CAD/CAM）、柔性制造系统（FMS）和计算机集成制造技术（CIMS）的发展，成为先进制造技术的技术基础和重要组成部分。数控技术已被世界各国列为优先发展的关键工业技术，成为当代国际间科技竞争的重点。

中国的机械制造业正面临着前所未有的机遇与挑战——参与国际市场的竞争。用以数控技术为基础的先进制造技术武装机械制造业，是在这场竞争中获胜的重要条件之一。因此，在中国推广应用数控技术有着特别重要的意义。

数控技术是现代制造技术的基础，它的广泛应用使普通机械被数控机械所代替，使全球制造业发生了根本性变化。因此，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。为适应这种形势，需要大量培养数控技

术人才。

在这样的背景下，为了适应机械类专业的主干课程“数控技术”的教学需要，江苏大学组织这一套数控技术系列教材（由数控技术基础、数控加工工艺学、数控编程技术、数控机床故障诊断等组成），它既能反映现代制造技术，又有反映数控技术的基本原理、加工工艺、编程技术以及故障诊断等内容。本系列教材围绕着教学改革，培养数控人才，满足机械制造及其自动化专业的教学需要，尤其是满足理工科大学“学生专业技能培养”教学改革的需要。

当今世界，科学技术发展迅速，知识经济已见端倪，综合国力的竞争日趋激烈。国力的竞争，归根结底是科技与人才的竞争。邓小平同志早已明确指出：科技是现代化的关键，而教育是基础。毫无疑问，高等教育是科技发展的基础，是高级专门人才培养的摇篮。我国高等教育在振兴中华、科教兴国的伟大事业中担负着极其艰巨的任务。

为了适应社会主义现代化建设的需要，在1993年党中央、国务院颁布《中国教育改革和发展纲要》以后，原国家教委全面启动和实施《高等教育面向21世纪教学内容和课程体系改革计划》，有组织、有计划地在全国推进教学改革工程。其主要内容是：改革教育体制、教育思想和教育观念；拓宽专业口径，调整专业目录，制定新的人才培养方案；改革课程体系、教学内容、教学方法和教学手段；实现课程结构和教学内容的整合与优化，编写、出版一批高水平、高质量的教材。

我们在教育理论与教育思想的指导下，将教学改革思想和教学改革成果融入教材的编写之中。根据人才培养计划中对学生知识和能力的要求，对课程体系和教学内容进行整合，体现系列教材每门课程的整体优化。这套教材的编写符合教学改革的精神，遵循教学规律和人才培养规律，具有明显的特色。

高等学校的教学改革和教材建设是一项长期而艰巨的工作，任重而道远。我们希望这套教材能够得到读者的关注和帮助。

编委会

2004.3

前 言

随着科学技术的飞速发展,机械制造技术发生了深刻的变化。传统的普通加工设备已难以适应市场对产品多样化的要求,难以适应市场竞争的高效率、高质量的要求。而以数控技术为核心的现代制造技术,以微电子技术为基础,将传统的机械制造技术与现代控制技术、计算机技术、传感检测技术、信息处理技术以及网络通信技术有机地结合在一起,构成高度信息化、高度柔性化、高度自动化的制造系统。

数控技术是 20 世纪制造技术的重大成就之一。从 20 世纪 70 年代以后,计算机数控技术获得了突飞猛进的发展,数控机床和其他数控装备在实际生产当中获得了越来越广泛的应用。同时,计算机数控技术的发展又极大地推动了计算机辅助设计和辅助制造(CAD/CAM)、柔性制造系统(FMS)和计算机集成制造技术(CIMS)的发展,成为先进制造技术的技术基础和重要组成部分。

数控技术已被世界各国列为优先发展的关键工业技术,成为当代国际间科技竞争的重点。数控技术对现代制造业的影响是多方面的和重大的,制造业是各种产业的支柱工业,数控技术和数控装备是制造工业现代化的重要基础,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。发展数控技术和数控机床是当前制造工业技术改造、技术更新的必由之路。本书介绍了数控技术的基本知识、数控机床的主要组成部分以及数控程序编制、计算机数控装置和可编程序控制器、插补原理、进给伺服系统及位置控制。

为了适应新形势的发展,培养大量的数控技术人才及适应机械类专业的主干课程“数控技术”的教学需要,我们编写了本书。

本书可作为高等院校机械工程及自动化专业本科生和研究生的

教材,也可作为高等职业技术教育学生的专业参考书,也可供从事机电一体化制造工程技术人员参考。

本书第1章、第2章由杨继昌编写,第3章、第4章、第5章由李金伴编写,第7章由陆一心编写,第6章由王伟编写,第8章由李捷辉编写,本书由杨继昌、李金伴担任主编。在编写过程中,参阅了有关教材、资料和文献,在此对有关专家、学者和作者表示衷心的感谢。

在本书的编写中,江苏大学领导和其他教师给予了热情的帮助,并提出了不少宝贵意见,在此谨向他们表示衷心感谢。

由于编者水平所限,书中错误、疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 数控技术的发展概况	2
1.2.1 性能发展方向	4
1.2.2 功能发展方向	5
1.2.3 体系结构的发展方向	6
1.2.4 智能化新一代 PCNC 数控系统	8
1.3 数控机床的适用范围和特点	9
1.3.1 数控机床的适用范围	9
1.3.2 数控机床的特点	10
1.4 数控系统设计开发规范和标准	11
1.4.1 数控系统设计开发规范	11
1.4.2 数控系统的标准	12
1.5 数控系统的技术性能指标	14
1.6 数控技术在先进制造技术中的作用	16
自学指导	18
思考题与习题	18
第 2 章 数控机床的工作原理和基本类型	19
2.1 概述	19
2.2 数控机床的基本工作原理	21
2.2.1 数控机床的加工过程	21
2.2.2 轮廓加工控制	22
2.2.3 数控机床的基本控制要求	24
2.2.4 数控机床常用的调试功能	24
2.3 数控机床的组成	25
2.4 数控机床的基本类型	29
2.4.1 按运动轨迹分类	29

2.4.2 按伺服系统控制方式分类	31
2.4.3 按功能水平分类	34
2.4.4 按工艺用途分类	35
2.5 数控机床的坐标系和自由度	35
2.5.1 数控机床的坐标系和运动方向的决定	35
2.5.2 数控机床的坐标系与工件坐标系	38
2.5.3 数控机床的自由度	42
自学指导	43
思考题与习题	44
第3章 数控编程的基础知识	45
3.1 概述	45
3.1.1 数控编程的作用与目的	45
3.1.2 数控编程的内容和步骤	45
3.1.3 数控编程的方法	47
3.2 数控编程的代码	48
3.3 程序段格式和程序结构	50
3.3.1 程序段格式	50
3.3.2 程序结构	54
3.4 准备功能(G指令)和辅助功能(M指令)	54
3.4.1 准备功能G指令	54
3.4.2 辅助功能M指令	62
3.4.3 进给速度(F)、主轴转速(S)及刀具功能(T)指令	66
3.5 典型数控加工程序编制	68
3.5.1 数控铣削加工程序编制	68
3.5.2 孔加工程序编制	71
3.5.3 数控车削加工程序编制	73
3.5.4 加工中心程序编制	76
3.6 数控语言自动编程	83
3.6.1 自动编程的基本概念	83
3.6.2 数控语言程序编程系统	83
3.6.3 APT自动编程系统	85
3.6.4 APT语言编写数控加工源程序实例	95
3.7 数控加工过程仿真	103

3.7.1 数控加工仿真	103
3.7.2 数控车削加工仿真	104
3.7.3 数控铣削加工仿真	105
3.8 数控编程的数据处理	106
3.8.1 基点和节点的数值计算	106
3.8.2 非圆曲线轮廓零件的数据处理	107
3.8.3 数控列表曲线	112
自学指导	112
思考题与习题	114
第4章 数控系统插补原理	116
4.1 概述	116
4.1.1 数控插补的基本概念	116
4.1.2 数控插补方法的分类	117
4.2 逐点比较法	118
4.2.1 逐点比较法直线插补	118
4.2.2 逐点比较法圆弧插补	125
4.2.3 逐点比较法算法的改进	130
4.3 数字积分插补法	136
4.3.1 DDA 直线插补法	137
4.3.2 DDA 空间直线插补法	140
4.3.3 DDA 圆弧插补法	141
4.4 数据采样插补法	144
4.4.1 数据采样插补法的原理	144
4.4.2 时间分割法直线插补	147
4.4.3 时间分割法圆弧插补	148
4.4.4 扩展 DDA 数据采样插补法	151
4.5 CNC 系统的刀具补偿和加减速控制	154
4.5.1 CNC 系统的刀具补偿	154
4.5.2 CNC 系统的加减速控制	161
自学指导	168
思考题与习题	169
第5章 计算机数字控制系统 (CNC 系统)	170
5.1 计算机数字控制装置 (CNC 装置) 的组成和工作过程	170

5.1.1 组成	170
5.1.2 工作过程	171
5.1.3 功能	174
5.1.4 优点	177
5.2 计算机数字控制系统的数据信息	179
5.2.1 计算机数控系统的控制信息	179
5.2.2 数控机床的接口信息	180
5.2.3 CNC装置的数据信息转换过程	182
5.3 CNC装置的硬件结构	183
5.3.1 单微处理器结构	183
5.3.2 多微处理器结构	188
5.4 CNC装置的软件结构	191
5.4.1 CNC装置的软、硬件界面	191
5.4.2 CNC装置的软件结构特点	192
5.5 数控机床输入/输出和通信接口	197
5.5.1 数控机床输入/输出(I/O)接口	197
5.5.2 异步串行通信接口	201
5.5.3 网络通信接口	204
5.6 可编程序控制器(PLC)在数控机床中的应用	206
5.6.1 PLC的基本组成	206
5.6.2 PLC对继电器控制系统的仿真	210
5.6.3 PLC的工作原理	213
5.6.4 PLC循环扫描的工作方式	213
5.6.5 PLC控制I/O延迟响应	216
5.6.6 数控机床中的PLC数据处理功能	220
5.7 PLC在数控机床上的应用实例	222
5.7.1 数控机床中PLC的程序编制步骤	223
5.7.2 PLC在数控机床上的应用举例	224
自学指导	235
思考题与习题	236
第6章 数控机床的位置检测技术	237
6.1 位置伺服控制	238
6.1.1 开环、闭环、半闭环位置控制系统	238

6.1.2	幅值伺服控制	240
6.1.3	相位伺服控制	240
6.2	检测装置常用类型	241
6.3	光电编码器	242
6.3.1	增量式编码器	242
6.3.2	绝对式编码器	245
6.4	光栅尺和磁栅尺	246
6.4.1	光栅尺	246
6.4.2	直线光栅尺的工作原理	247
6.4.3	光栅尺位移数字变换系统	248
6.4.4	磁栅尺	249
6.4.5	磁栅尺的结构及工作原理	249
6.4.6	磁栅尺的检测电路	251
6.5	旋转变压器	252
6.5.1	旋转变压器的组成及工作原理	252
6.5.2	旋转变压器的工作方式及应用	253
自学指导		254
思考题与习题		255
第7章	数控机床的伺服系统	256
7.1	数控机床的伺服系统分类	256
7.2	步进电机及其驱动系统	259
7.2.1	步进电机	259
7.2.2	步进电机的主要性能指标	265
7.2.3	步进电机的驱动及控制技术	266
7.3	直流伺服电机与速度控制	276
7.3.1	晶闸管调速控制方式	277
7.3.2	晶体管脉宽调速控制方式	279
7.4	交流伺服电机与速度控制	284
7.4.1	交流伺服电机的变频调速	285
7.4.2	交流伺服电机的矢量控制调速	288
自学指导		296
思考题与习题		296
第8章	数控机床的选择、安装、使用与维护	297

8.1 数控机床的选择方法	297
8.1.1 根据典型加工零件来选择	297
8.1.2 数控机床规格的选择	298
8.1.3 数控机床精度的选择	300
8.1.4 数控系统 (CNC 系统) 的选择	302
8.1.5 根据生产能力选择	304
8.1.6 数控机床功能的选择及附件的选择	306
8.1.7 数控机床使用刀具的选择	309
8.1.8 技术服务的选择	314
8.2 数控机床的使用	314
8.2.1 数控机床的使用要点	314
8.2.2 数控机床的生产管理方法	321
8.3 数控机床的安装与调试	322
8.3.1 数控机床的安装要求	322
8.3.2 数控机床的安装、调试步骤	323
8.4 数控机床精度的检测	327
8.4.1 数控机床几何精度的检测	327
8.4.2 数控机床定位精度的检测	328
8.4.3 数控机床切削精度的检测	332
8.5 数控机床的维护、保养及故障排除	333
8.5.1 可靠性和可维护性	333
8.5.2 数控系统的预防性维护	335
8.5.3 数控机床的日常维护与保养	337
8.5.4 数控系统现场维修的基本条件和实施步骤	339
8.5.5 数控机床的故障检测与排除	342
自学指导	353
思考题与习题	354
附录一 机床数字控制术语 (GB 8129—87)	355
附录二 APT 数控语言常用的专用字	372
参考文献	375

第1章 绪 论

1.1 概述

随着计算机技术的高速发展,传统的制造业开始了根本性变革,各工业发达国家投入巨资,对现代制造技术进行研究开发,提出了全新的制造模式。在现代制造系统中,数控技术是关键技术,它集微电子、计算机、信息处理、自动检测、自动控制等高新技术于一体,具有高精度、高效率、柔性自动化等特点,对制造业实现柔性自动化、集成化、智能化起着举足轻重的作用。目前,数控技术正在发生根本性变革,由专用型封闭式开环控制模式向通用型开放式实时动态全闭环控制模式发展。在集成化基础上,数控系统实现了超薄型、超小型化;在智能化基础上,综合了计算机、多媒体、模糊控制、神经网络等多学科技术,数控系统实现了高速、高精、高效控制,加工过程中可以自动修正、调节与补偿各项参数,实现了在线诊断和智能化故障处理;在网络化基础上,CAD/CAM与数控系统集成为一体,数控机床联网,实现了中央集中控制的群控加工。

长期以来,我国的数控系统为传统的封闭式体系结构,CNC只能作为非智能的机床运动控制器。加工过程变量根据经验以固定参数形式事先设定,加工程序在实际加工前过程中用手工方式或通过CAD/CAM及自动编程系统进行编制。CAD/CAM和CNC之间没有反馈控制环节,整个制造过程中CNC只是一个封闭式的开环执行机构。在复杂环境以及多变条件下,加工过程中的刀具组合、工件材料、主轴转速、进给速率、刀具轨迹、切削深度、步长、加工余量等加工参数,无法在现场环境下根据外部干扰和随机因素实时动态调整,更无法通过反馈控制环节随机修正CAD/

CAM 中的设定量，因而影响 CNC 的工作效率和产品加工质量。由此可见，传统 CNC 系统的这种固定程序控制模式和封闭式体系结构，限制了 CNC 向多变量智能化控制发展，已不适应日益复杂的制造过程，因此，对数控技术实行变革势在必行。

数控技术的应用不但给传统制造业带来了革命性的变化，使制造业成为工业化的象征，而且随着数控技术的不断发展和应用领域的扩大，它对国计民生的一些重要行业（IT、汽车、轻工、医疗等）的发展起着越来越重要的作用，因为这些行业所需装备的数字化已是现代发展的大趋势。

从我国基本国情的角度出发，以国家的战略需求和国民经济的市场需求为导向，以提高制造装备业综合竞争能力和产业化水平为目标，用系统的方法，选择能够主导 21 世纪初期我国制造装备业发展升级的关键技术以及支持产业化发展的支撑技术、配套技术作为研究开发的内容，实现制造装备业的跨越式发展。

强调市场需求为导向，即以数控终端产品为主，以整机（如量大面广的数控车床、铣床、高速高精高性能数控机床、典型数字化机械、重点行业关键设备等）带动数控产业的发展。重点解决数控系统和相关功能部件（数字化伺服系统与电机、高速电主轴系统和新型装备的附件等）的可靠性和生产规模问题。没有规模就不会有高可靠性的产品；没有规模就不会有价格低廉而富有竞争力的产品；当然，没有规模我国的数控装备最终难以有出头之日。

在高精尖装备研发方面，要强调研究开发以及最终用户的紧密结合，以“做得出、用得上、卖得掉”为目标，按国家意志实施攻关，以解决国家之急需。

对数控技术方面，强调市场需求为导向，强调创新，强调研究开发具有自主知识产权的技术和产品，为我国数控产业、装备制造业乃至整个制造业的可持续发展奠定基础。

1.2 数控技术的发展概况

20 世纪人类社会最伟大的科技成果是计算机的发明与应用，

计算机及控制在机械制造设备中的应用是世纪内制造业发展的最重大的技术进步。从 1952 年美国第 1 台数控铣床问世至今已经历了 50 余年。数控设备包括车、铣、加工中心、镗、磨、冲压、电加工以及各类专机,形成庞大的数控制造设备家族,每年全世界的产量有 10~20 万台,产值上百亿美元。它经过 50 余年的 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, 1952 年的电子管; 第 2 代, 1959 年晶体管分离元件; 第 3 代, 1965 年的小规模集成电路。

第 2 阶段是软件数控 (CNC): 第 4 代, 1970 年的小型计算机; 第 5 代, 1974 年的微处理器; 第 6 代, 1990 年的基于个人 PC 机。第 6 代的系统优点主要有以下几方面。

① 元器件集成度高, 可靠性好, 性能高, 可靠性已达到 $5 \times 10^4 \text{ h}$ 以上。

② 基于 PC 平台, 技术进步快, 升级换代容易。

③ 提供了开放式基础, 可供利用的软、硬件资源丰富, 使数控功能扩展到很宽的领域 (如 CAD、CAM、CAPP, 连接网卡、声卡、打印机、摄影机等)。

④ 对数控系统生产厂来说, 提供了优良的开发环境, 简化了硬件。

我国数控机床制造业在 20 世纪 80 年代曾有过高速发展的阶段, 许多机床厂从传统产品实现向数控化产品的转型, 并有许多厂家生产经济型数控机床。但总的来说, 技术水平不高, 质量不佳, 所以在 20 世纪 90 年代初期面临国家经济由计划性经济向市场经济转移调整, 经历了几年最困难的萧条时期, 那时生产能力降到 50%。从 1995 年“九五”以后国家从扩大内需启动机床市场, 加强限制进口数控设备的审批, 重点投资和支持关键数控系统、设备、技术攻关, 对数控设备生产起到了很大的促进作用。尤其是在 1999 年以后, 国家向国防工业及关键民用工业部门投入大量技改资金, 使数控设备制造市场一派繁荣。从 2000 年 8 月份的上海数控机床展览会和 2001 年 4 月北京国际机床展览会上, 也可以看到

多品种产品的繁荣景象,但也反映了下列一些问题:

- ① 低技术水平的产品竞争激烈,靠互相压价促销;
- ② 高技术水平、全功能产品主要靠进口;
- ③ 配套的高质量功能部件、数控系统附件主要靠进口;
- ④ 应用技术水平较低,联网技术没有完全推广使用;
- ⑤ 自行开发能力较差,相对有较高技术水平的产品主要靠引进图纸、合资生产或进口件组装。

当今世界工业国家数控机床的拥有量反映了这个国家的经济能力和国防实力。目前,我国是全世界机床拥有量最多的国家(近300万台),但我们的机床数控化率仅达到1.9%左右,这与西方工业国家一般能达到20%的差距太大。日本不到80万台的机床却有近10倍于我国的制造能力。数控化率低,已有数控机床利用率、开动率低,这是发展我国21世纪制造业必须首先解决的最主要问题。

在世界先进制造技术不断兴起,超高速切削、超精密加工等技术的应用,柔性制造系统的迅速发展和计算机集成系统的不断成熟,对数控加工技术提出了更高的要求。当今数控机床正在朝着以下几个方向发展。

1.2.1 性能发展方向

(1) 高速高精高效化

速度、精度和效率是机械制造技术的关键性能指标。由于采用了高速CPU芯片、RISC芯片、多CPU控制系统和带高分辨率绝对式检测元件的交流数字伺服系统,同时采取了改善机床动态、静态特性等有效措施,机床的高速高精高效化已大大提高。

(2) 柔性化

柔性化包含两方面:数控系统本身的柔性,数控系统采用模块化设计,功能覆盖面大,可裁剪性强,便于满足不同用户的需求;群控系统的柔性,同一群控系统能依据不同生产流程的要求,使物料流和信息流自动进行动态调整,从而最大限度地发挥群控系统的效能。

(3) 工艺复合性和多轴化