



高等院校机电类工程教育系列规划教材

# 数控技术

## (第2版)

◎ 马宏伟 主编



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

高等院校机电类工程教育系列规划教材

# 数 控 技 术

## （第2版）

主编 马宏伟

副主编 张旭辉 贺辛亥

電子工業出版社  
Publishing House of Electronics Industry

## 内 容 简 介

本书秉承“工程教育”的教学理念,在省级精品课程建设积累的基础上编写而成。在编写过程中紧密结合教学大纲,重视基础理论,侧重工程应用,强化经验总结,丰富经典例题、突出工程例题、融合实验训练,以适应工程教育型的定位。主要内容包括:绪论、数控机床的程序编制、计算机数控系统、插补原理与刀具补偿技术、数控机床的驱动与位置控制、数控机床的机械结构与部件、数控机床的故障诊断、现代数控技术和9个实验。配套电子课件可登录华信教育资源网([www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn))注册免费下载。

本书可作为高等院校机械设计制造及其自动化、机械电子工程、测控技术与仪器等相关专业的高年级本科生及研究生的教材和参考用书,也可作为机械制造领域中从事科学研究、产品开发及工程应用的科研人员和工程技术人员的参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

数控技术/马宏伟主编. —2版. —北京:电子工业出版社,2014.1

高等院校机电类工程教育系列规划教材

ISBN 978-7-121-21801-9

I. ①数… II. ①马… III. ①数控技术—高等学校—教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第261622号

策划编辑:余 义

责任编辑:余 义

印 刷:三河市双峰印刷装订有限公司

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:19.75 字数:506千字

印 次:2014年1月第1次印刷

定 价:39.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线:(010)88258888。

# 序

2008年7月间,电子工业出版社邀请全国20多所高校几十位机电领域的老师,研讨符合“工程教育”要求的教材的编写方案。大家认为,这适应了目前我国高等院校工科教育发展的趋势,特别是对工科本科生实践能力的提高和创新精神的培养,都会起到积极的推动作用。

教育部于2007年1月22日颁布了教高(2007)1号文件《教育部财政部关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见》。同年2月17日,紧接着又颁布了教高(2007)2号文件《教育部关于进一步深化本科教学改革全面提高教学质量的若干意见》。由这两份文件,可以看到国家教育部已经决定并将逐步实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程”(简称质量工程),而质量工程的核心思想就在于培养学生的实践能力和创新精神,提高教师队伍整体素质,以及进一步转变人才培养模式、教学内容和方法。

教学改革和教材建设从来都是相辅相成的。经过近两年的教改实践,不少老师都积累了一定的教学经验,借此机会,编写、出版符合“工程教育”要求的教材,不仅能够满足许多学校对此类教材的需求,而且将进一步促进质量工程的深化。

近一年来,电子工业出版社选派了骨干人员与参加编写的各位教授、专家和老师进行了深入的交流和研究。不仅在教学内容上进行了优化,而且根据不同课程的需要开辟了许多实践性、经验性和工程性较强的栏目,如“经验总结”、“应用点评”、“一般步骤”、“工程实例”、“经典案例”、“工程背景”、“设计者思维”、“学习方法”等,从而将工程中注重的理念与理论教学更有机地结合起来。此外,部分教材还融入了实验指导书和课程设计方案,这样一方面可以满足某些课程对实践教学的需要,另一方面也为教师更深入地开展实践教学提供丰富的素材。

随着我国经济建设的发展,普通高等教育也将随之发展,并培养出适合经济建设需要的人才。“高等院校机电类工程教育系列规划教材”就站在这个发展过程的源头,将最新的教改成果推而广之,并与之共进,协调发展。希望这套教材对更多学校的教学有所裨益,对学生的理论与实践的结合发挥一定的作用。

最后,预祝“高等院校机电类工程教育系列规划教材”项目取得成功。同时,也恳请读者对教材中的不当、不贴切、不足之处提出意见与建议,以便重印和再版时更正。



中国工程院院士、西安交通大学教授

## 教材编写委员会

主任委员 赵升吨(西安交通大学)

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

芮延年(苏州大学)

胡大超(上海应用技术学院)

钱瑞明(东南大学)

袁清珂(广东工业大学)

## 参编院校

(按拼音排序)

※ 安徽工业大学

※ 沈阳工业大学

※ 长安大学

※ 苏州大学

※ 东南大学

※ 苏州科技学院

※ 广东工业大学

※ 同济大学

※ 华南理工大学

※ 五邑大学

※ 华南农业大学

※ 武汉科技学院

※ 淮海工学院

※ 西安电子科技大学

※ 吉林师范大学

※ 西安工程大学

※ 南通大学

※ 西安工业大学

※ 山东建筑大学

※ 西安交通大学

※ 陕西科技大学

※ 西安科技大学

※ 上海应用技术学院

※ 西安理工大学

※ 深圳大学

※ 西安文理学院

## 第 2 版前言

多年来,为适应工程应用型人才培养的迫切需求,编写组借助“数控技术”省级精品课程和相关教学改革项目,加强对“数控技术”课程内涵建设,有效地提升了数控课程的教学水平,第一版问世后,以其鲜明的工程应用背景、完整的知识体系和丰富的教学内容得到了同行专家和使用院校的好评,于 2011 年获得陕西省优秀教材奖。

在本书第一版使用过程中,许多教师和读者提出了进一步完善的意见和建议,编写组表示感谢。根据这些中肯的意见和建议以及国家对工程应用型人才培养的新要求,结合多年数控技术方面的教学经验和近五年数控技术省级精品课程的建设成果,我们对相关内容做了适当的删减与补充。再版教材以数控机床应用为背景,系统地论述了数控系统原理和数控系统设计方法。从数控系统的组成、工作原理、各构成模块使能技术,到典型数控系统和数控机床故障诊断,均进行了深入的分析和研究,使教材的结构更完善,内容更丰富,特色更突出。

本书在修订过程中紧密结合教学大纲,充分吸收国内外最新的数控技术和实际应用成果,融基础理论、工程实例、经典例题、经验总结、实践训练于一体,着力追求实用性、系统性和先进性。再版教材主要介绍了数控技术的基础知识、数控机床的主要组成部分、现代制造系统的发展趋势、数控程序的编制、计算机数控系统和数控机床用可编程控制器、插补原理、进给伺服系统及位置控制、数控机床机械结构及部件、数控机床的故障诊断,以及现代数控技术——开放式数控系统和并联机床。

本书可作为普通高等院校(非研究型大学)机械设计制造及其自动化、机械电子工程、测控技术与仪器等相关专业主干技术基础课程“数控技术”的教科书,也可供从事数控机床设计和研究的工程技术人员参考。

本书由西安科技大学马宏伟担任主编,张旭辉、贺辛亥担任副主编。全书共 9 章,第 1 章由马宏伟编写,第 3、8、9 章由张旭辉编写,第 2、7 章由刘凌编写,第 4 章由魏娟编写,第 5 章由史晓娟编写,第 6 章由贺辛亥编写。

本书编写时参阅了有关高校、企业、科研院所的一些教材、资料和文献,并得到了许多同行专家教授的支持和帮助,在此谨向他们表示衷心的感谢。

限于编者水平有限,加之数控技术发展很快,不断有新的理论和方法产生,书中难免存在错误疏漏和不妥之处,恳请同行专家和读者提出宝贵意见。

作 者

2013 年 10 月于西安

# 第1版前言

制造业是国民经济的支柱产业，数控机床及其先进制造系统是制造业的基础，数控技术是现代制造系统的核心，对制造系统水平和制造能力具有决定性的作用。因此，数控技术水平的高低和数控设备拥有量是体现国家制造能力、综合国力、工业现代化水平的重要标志之一。

当今世界科学技术日新月异，装备制造业突飞猛进，以数控技术为基础的先进制造系统越来越凸显其重要作用，培养和造就掌握数控技术、具有数字化制造能力和创新精神的工程应用型人才，对提升制造能力、打造制造强国具有极其重要的现实意义和战略意义。

为适应工程应用型人才培养的要求，本书在编写过程中紧密结合教学大纲，充分吸收国内外最新的数控技术和国内实际应用成果，融基础理论、工程实例、经典例题、经验总结、实践训练于一体，力求做到实用性、系统性和先进性。主要介绍了数控技术的基础知识、数控机床的主要组成部分、现代制造系统的发展趋势、数控程序的编制、计算机数控系统和数控机床用可编程控制器、插补原理、进给伺服系统及位置控制、数控机床机械结构及部件、数控机床的故障诊断，以及现代数控技术——开放式数控系统和并联机床。

本书可作为普通高等院校（非研究型大学）机械设计制造及其自动化、机械电子工程、测控技术与仪器等相关专业主干技术基础课程“数控技术”的教科书，也可供从事数控机床设计和研究的工程技术人员参考。

本书由西安科技大学马宏伟担任主编，张旭辉、贺辛亥担任副主编。全书共9章，第1章由马宏伟编写，第3、8、9章由张旭辉编写，第2、7章由刘凌编写，第4章由魏娟编写，第5章由史晓娟编写，第6章由贺辛亥编写。

本书编写时参阅了有关院校、工厂、科研院所的一些教材、资料和文献，并得到了许多同行专家教授的支持和帮助，在此谨向他们表示衷心的感谢。

限于编者水平有限，书中难免存在错误疏漏和不妥之处，敬请读者提出宝贵意见。

作 者

2009年10月于西安

# 目 录

|                                 |    |                                     |     |
|---------------------------------|----|-------------------------------------|-----|
| 第 1 章 绪论 .....                  | 1  | 2.5.2 自动编程系统软件的总体结构··               | 55  |
| 1.1 概述 .....                    | 2  | 2.5.3 图形交互式自动编程 .....               | 56  |
| 1.1.1 机床数字控制的基本概念 .....         | 2  | 2.6 数控编程技术的发展 .....                 | 56  |
| 1.1.2 数控加工原理 .....              | 2  | 2.6.1 典型的 CAD/CAM 软件介绍··            | 57  |
| 1.1.3 数控机床的组成 .....             | 3  | 2.6.2 数控编程技术的国内外发展<br>状况 .....      | 58  |
| 1.1.4 数控机床的特点 .....             | 4  | 2.7 习题与思考题 .....                    | 58  |
| 1.1.5 数控机床的适用范围 .....           | 5  |                                     |     |
| 1.2 数控机床的分类 .....               | 6  | 第 3 章 计算机数控系统 .....                 | 61  |
| 1.2.1 按运动轨迹分类 .....             | 6  | 3.1 概述 .....                        | 62  |
| 1.2.2 按伺服驱动系统控制方式分类··           | 7  | 3.1.1 CNC 系统的功能 .....               | 62  |
| 1.2.3 按功能水平分类 .....             | 8  | 3.1.2 CNC 系统的组成及工作流程··              | 63  |
| 1.2.4 按工艺用途分类 .....             | 9  | 3.2 CNC 装置的硬件结构 .....               | 64  |
| 1.3 数控技术的应用与发展 .....            | 9  | 3.3 CNC 装置的软件结构 .....               | 71  |
| 1.3.1 数控技术的发展历程及趋势 .....        | 9  | 3.3.1 CNC 装置的软硬件界面 .....            | 71  |
| 1.3.2 数控技术与现代制造系统 .....         | 12 | 3.3.2 CNC 装置软件结构特点 .....            | 71  |
| 1.4 习题与思考题 .....                | 15 | 3.3.3 常规 CNC 装置的软件结构··              | 74  |
| 第 2 章 数控机床的程序编制 .....           | 17 | 3.4 数控机床用可编程控制器 .....               | 80  |
| 2.1 概述 .....                    | 18 | 3.4.1 PLC 的结构、工作原理及编程<br>系统 .....   | 81  |
| 2.2 数控编程基础知识 .....              | 19 | 3.4.2 数控机床用 PLC .....               | 86  |
| 2.2.1 与数控机床编程有关的标准 .....        | 19 | 3.4.3 PLC 在数控机床中的应用 .....           | 92  |
| 2.2.2 数控机床坐标轴和运动方向<br>的确定 ..... | 19 | 3.5 CNC 装置的 I/O 接口及通信<br>网络 .....   | 93  |
| 2.2.3 数控加工程序格式 .....            | 22 | 3.5.1 数控装置的 I/O 接口 .....            | 93  |
| 2.2.4 数控编程的内容和步骤 .....          | 24 | 3.5.2 CNC 装置的数据通信接口 .....           | 95  |
| 2.2.5 数控加工程序编制方法 .....          | 27 | 3.6 典型的 CNC 装置 .....                | 97  |
| 2.3 数控编程中的数值计算 .....            | 28 | 3.6.1 CNC 装置的主要生产厂家及其<br>典型产品 ..... | 97  |
| 2.3.1 二维轮廓零件的数学处理 .....         | 28 | 3.6.2 国外主要 CNC 装置及其特点 .....         | 99  |
| 2.3.2 空间曲线的数学处理 .....           | 37 | 3.6.3 国内主要 CNC 装置及其特点··             | 101 |
| 2.4 手工编程 .....                  | 38 | 3.7 习题与思考题 .....                    | 103 |
| 2.4.1 工艺规划 .....                | 38 | 第 4 章 插补原理与刀具补偿技术 .....             | 105 |
| 2.4.2 常用基本编程指令及其应用 .....        | 43 | 4.1 概述 .....                        | 106 |
| 2.4.3 编程实例 .....                | 50 |                                     |     |
| 2.5 自动编程 .....                  | 53 |                                     |     |
| 2.5.1 语言式自动编程 .....             | 54 |                                     |     |



|              |                     |            |              |                     |            |
|--------------|---------------------|------------|--------------|---------------------|------------|
| 4.2          | 刀具补偿技术              | 107        | 5.6          | 位置控制                | 198        |
| 4.2.1        | 刀具位置或刀具长度补偿         | 107        | 5.6.1        | 数字脉冲比较伺服系统          | 198        |
| 4.2.2        | 刀具半径补偿              | 108        | 5.6.2        | 相位比较伺服系统            | 199        |
| 4.2.3        | C 功能刀具半径补偿          | 109        | 5.6.3        | 幅值比较伺服系统            | 200        |
| 4.2.4        | 刀补的执行过程             | 117        | 5.7          | 习题与思考题              | 200        |
| 4.3          | 数控机床的插补原理           | 118        | <b>第 6 章</b> | <b>数控机床的机械结构与部件</b> | <b>201</b> |
| 4.3.1        | 逐点比较法               | 119        | 6.1          | 概述                  | 202        |
| 4.3.2        | 数字积分法               | 124        | 6.2          | 数控机床的主传动系统及主轴部件     | 204        |
| 4.3.3        | 数字积分法插补质量的提高        | 130        | 6.2.1        | 主传动系统               | 204        |
| 4.3.4        | 数据采样插补              | 134        | 6.2.2        | 主轴变速方式              | 205        |
| 4.3.5        | 其他插补方法简介            | 140        | 6.2.3        | 数控机床的主轴部件           | 207        |
| 4.4          | 进给速度与加减速控制          | 143        | 6.2.4        | 主轴的准停装置与 C 轴单元      | 211        |
| 4.4.1        | 进给速度控制              | 143        | 6.2.5        | 高速电主轴               | 213        |
| 4.4.2        | 加减速控制               | 145        | 6.3          | 数控机床的进给运动系统         | 214        |
| 4.5          | 习题与思考题              | 149        | 6.3.1        | 对进给系统的性能要求          | 215        |
| <b>第 5 章</b> | <b>数控机床的驱动与位置控制</b> | <b>151</b> | 6.3.2        | 滚珠丝杠螺母副             | 215        |
| 5.1          | 概述                  | 152        | 6.3.3        | 消除间隙的齿轮传动机构         | 221        |
| 5.2          | 伺服系统的驱动元件           | 154        | 6.3.4        | 数控机床的导轨副            | 224        |
| 5.2.1        | 步进电动机               | 154        | 6.3.5        | 直线电动机传动             | 227        |
| 5.2.2        | 直流伺服电动机             | 158        | 6.4          | 数控机床自动换刀系统          | 228        |
| 5.2.3        | 交流伺服电动机             | 161        | 6.4.1        | 数控车床与车削中心刀架系统       | 228        |
| 5.2.4        | 直线电动机               | 163        | 6.4.2        | 加工中心自动换刀系统          | 230        |
| 5.3          | 进给驱动                | 165        | 6.5          | 数控分度工作台和回转工作台       | 235        |
| 5.3.1        | 对进给驱动的要求            | 165        | 6.5.1        | 数控分度工作台             | 235        |
| 5.3.2        | 步进电动机驱动(控制)电路       | 166        | 6.5.2        | 数控回转工作台             | 237        |
| 5.3.3        | 直流电动机的速度控制单元        | 173        | 6.6          | 习题与思考题              | 241        |
| 5.3.4        | 交流电动机的速度控制单元        | 179        | <b>第 7 章</b> | <b>数控机床的故障诊断</b>    | <b>243</b> |
| 5.4          | 主轴驱动                | 184        | 7.1          | 概述                  | 244        |
| 5.4.1        | 对主轴驱动的要求            | 184        | 7.1.1        | 数控机床的可靠性与故障         | 244        |
| 5.4.2        | 直流主轴控制单元            | 185        | 7.1.2        | 数控机床常见故障分类          | 245        |
| 5.4.3        | 交流主轴电动机控制单元         | 186        | 7.1.3        | 数控机床故障诊断的流程         | 245        |
| 5.5          | 数控机床常用的检测装置         | 190        | 7.2          | 数控系统故障自诊断技术         | 248        |
| 5.5.1        | 位置检测装置的要求和分类        | 190        | 7.2.1        | 数控机床自身硬件的自诊断        | 248        |
| 5.5.2        | 旋转变压器               | 191        | 7.2.2        | 数控系统自身软件的自诊断        | 249        |
| 5.5.3        | 感应同步器               | 192        | 7.2.3        | 数控机床外部信号的自诊断        | 250        |
| 5.5.4        | 脉冲编码器               | 193        | 7.3          | 数控机床的故障诊断           | 250        |
| 5.5.5        | 光栅尺                 | 195        | 7.3.1        | 数控机床的机械故障诊断         | 250        |
| 5.5.6        | 磁尺(磁栅)              | 197        |              |                     |            |

|              |                            |            |                  |                                 |            |
|--------------|----------------------------|------------|------------------|---------------------------------|------------|
| 7.3.2        | 数控机床位置检测装置故障<br>诊断·····    | 256        | 8.2.3            | 并联机床的控制技术·····                  | 287        |
| 7.3.3        | 数控机床伺服系统故障诊断···            | 259        | 8.2.4            | 典型并联机床 CNC 系统·····              | 290        |
| 7.3.4        | PLC 检测伺服系统故障及<br>处理·····   | 269        | 8.3              | 习题与思考题·····                     | 292        |
| 7.4          | 习题与思考题·····                | 271        | <b>第 9 章</b>     | <b>实验·····</b>                  | <b>293</b> |
| <b>第 8 章</b> | <b>现代数控技术·····</b>         | <b>273</b> | 9.1              | 数控车床的操作与加工实验···                 | 293        |
| 8.1          | 开放式数控系统·····               | 274        | 9.2              | 数控铣床的操作与加工实验···                 | 294        |
| 8.1.1        | 开放式数控系统的产生背景···            | 274        | 9.3              | 数控系统组成及其外设接口<br>实验·····         | 296        |
| 8.1.2        | 开放式数控系统的基本特征···            | 275        | 9.4              | 机床用可编程控制器 (PLC)<br>编程与调试实验····· | 297        |
| 8.1.3        | 国内外开放式数控系统的<br>研究动向·····   | 276        | 9.5              | 插补原理实验·····                     | 298        |
| 8.1.4        | 开放式数控系统的关键技术<br>和研究方法····· | 282        | 9.6              | 加减速控制及其实现实验·····                | 299        |
| 8.2          | 并联机床·····                  | 283        | 9.7              | 伺服电动机控制实验·····                  | 299        |
| 8.2.1        | 并联机床的产生与发展·····            | 283        | 9.8              | 数控机床位置检测装置实验···                 | 300        |
| 8.2.2        | 并联机床的设计理论与关键<br>技术·····    | 284        | 9.9              | 数控机床典型机械结构拆装<br>实验·····         | 301        |
|              |                            |            | <b>参考文献·····</b> | <b>303</b>                      |            |

### 工程背景

制造业是各种产业的支柱,直接影响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。数控技术是集计算机技术、现代控制技术、传感检测技术、信息处理技术、网络通信技术及机电技术于一体的一门交叉学科,是现代制造技术的基础。数控技术的应用已成为衡量一个国家工业化程度和技术水平的重要标志。发展数控技术是当前制造工业技术改造、技术更新的必由之路。

### 内容提要

课程以制造自动化底层设备——数控机床为主要研究对象,研究数控系统的工作原理、组成、关键技术及应用,使学生掌握本专业所必需的数控技术方面的知识和基本技能,为今后从事数控机床的安装、调试、使用和维护保养及设备改造打下良好的基础。本章介绍数控相关的基本概念、组成及基本原理、分类和发展趋势。

### 学习方法

课程不仅具有较强的理论性,同时具有较强的实用性。建议在学习过程中,紧密结合课程进行上机、实验或者参加实践环节,以加深对数控系统关键技术和功能的认识和理解。

## 1.1 概述

### 1.1.1 机床数字控制的基本概念

数字控制(Numerical Control, NC)是近代发展起来的一种自动控制技术。数字控制相对于模拟控制而言,其控制信息是数字量。数字控制系统有如下特点:

- (1) 可用不同字长表示不同的精度信息,表达信息准确;
- (2) 可进行逻辑运算、数字运算,也可进行复杂的信息处理;
- (3) 具有逻辑处理功能,可根据不同的指令进行不同方式的信息处理,从而可用软件来改变信息处理的方式或过程,而不用改动电路或机械机构,因而具有柔性化。

由于数字控制系统具有上述优点,故被广泛应用于机械运动的轨迹控制。轨迹控制是机床数控系统和工业机器人的主要控制内容。此外,数字控制系统的逻辑处理功能可方便地用于机械系统的开关量控制。

数字控制系统的硬件基础是数字逻辑电路。最初的数控系统是由数字逻辑电路构成的,因而被称为硬件数控系统。随着微型计算机的发展,硬件数控系统已逐渐被淘汰,取而代之的是计算机数字数控(Computer Numerical Control, CNC)。由于计算机可完全由软件来确定数字信息的处理过程,从而具有真正的“柔性”,并可以处理硬件逻辑电路难以处理的复杂信息,使数字控制系统的性能大大提高。

数字控制机床(简称数控机床)是一种将数字计算技术应用于机床的控制技术,是一种典型的机电一体化产品。数控机床较好地解决了复杂、精密、小批量、多品种的零件加工问题,是一种柔性的、高效能的自动化机床,代表了现代机床控制技术的发展方向。

### 1.1.2 数控加工原理

传统金属切削机床加工是操作者根据图纸要求,手动控制机床,不断改变刀具与工件相对运动参数(位置、速度等),从工件上切除多余材料,最终获得符合技术要求的尺寸、形状、位置和表面质量的零件。

数控加工的基本工作原理则是将加工过程所需的各种操作(如主轴变速、工件夹紧、进给、启停、刀具选择、冷却液供给等)步骤及工件的形状尺寸,用程序——数字化代码来表示,再由计算机数控装置对这些输入的信息进行处理和运算。将刀具与工件的运动坐标分割成一些最小位移量,然后由数控系统按照零件程序的要求控制机床伺服驱动系统,使坐标移动若干个最小位移量,从而实现刀具与工件的相对运动,以完成零件的加工。当被加工工件改变时,除了重新装夹工件和更换刀具之外,只需更换程序。

在数控加工中,使数控机床动作的是数控装置给数控机床传递运动命令的脉冲群,每一个脉冲对应于机床的单位位移量。

在进行曲线加工时,可以用一给定的数字函数来模拟线段 $\Delta L$ ,即知道了一个曲线的种类、起点、终点和速度后,根据给定的数字函数,如线性函数、圆函数或高次曲线函数,在理想的轨迹或轮廓上的已知点之间,进行数据点的密化,确定一些中间点,这种方法称为插补。处理这些插补的算法,称为插补运算。

由此可见,要实现数控加工,必须有一台能达到下述要求的数控设备:

- (1) 数控装置能接收零件图样加工要求的信息，并按照一定的数学模型进行插补运算，实时地向各坐标轴发出速度控制指令及切削用量的数字控制计算机；
- (2) 驱动装置可快速响应，并具有足够功率的驱动装置；
- (3) 为实现数控加工，还必须要有能满足上述加工方式要求的机床本体、刀具、辅助设备以及各种加工所需的辅助功能。

综上所述，只要具备了机床本体、数控装置、驱动装置及相应的配套设备，就可以组成一台数控机床，完成各种零件的数控加工了。

### 1.1.3 数控机床的组成

数控机床一般由程序载体、数控装置、伺服驱动系统、机床本体和其他辅助装置组成，如图1-1所示。

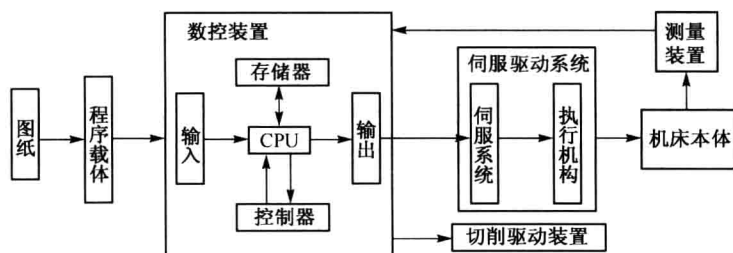


图 1-1 数控机床的加工过程

#### 1. 程序载体

数控机床工作时，不需要人直接操作机床，但若要对数控机床进行控制，则必须编制加工程序。零件加工程序包括机床上刀具和工件的相对运动轨迹、工艺参数（进给量、主轴转速等）和辅助运动等。将零件加工程序用一定的格式和代码存储在一种程序载体上，如穿孔纸带、盒式磁带、软磁盘等，通过数控机床的输入装置，将程序信息输入到 CNC 单元。

#### 2. 数控装置

计算机数控装置是数控机床的核心部分，也是区别于普通机床最重要的特征之一。数控装置完成加工程序的输入、编辑及修改，实现信息存储、数据转换、代码交换、插补运算及各种控制功能。

输入装置将数控指令输入给数控装置。根据程序载体的不同，相应地有不同的输入装置，如纸带输入、键盘输入、磁盘输入、CAD/CAM 系统直接通信方式输入、连接上级计算机的 DNC(直接数控)输入及网络化远程输入等。在柔性制造系统(Flexible Manufacturing System, FMS)或计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System, CIMS)中，生产具有较高的灵活性，要求能够充分利用制造设备资源，因此目前大多数 CNC 装置具有网络通信功能，可以实现加工程序的高速、可靠传输和加工状态的实时反馈，以保证加工资源和加工信息的共享。

信息处理功能将包含输入零件的轮廓（起点、终点、直线、圆弧等）、加工速度及其他辅助加工（如换刀、变速、冷却液开关等）等信息的加工代码编译成计算机能识别的数据，并进行刀具半径补偿、速度计算及辅助功能的处理，然后通过输出单元发出位置和速度指令给伺服系统和主运动控制部分。

输出装置与伺服机构相连,根据控制器的命令接收运算器的输出脉冲,送到各坐标的伺服控制系统,经过功率放大,驱动伺服系统,从而控制机床按规定要求运动。

### 3. 伺服驱动系统

伺服驱动系统是数控机床的必备部件,其接收数控装置发出的指令信息,经功率放大、整形处理后,驱动相应电动机实现数控机床的主轴和进给运动控制。当几个进给轴实现联动时,就可以完成具有点位、直线、平面曲线,甚至空间曲线特征的复杂零件加工。

伺服驱动系统的性能直接影响数控机床的加工精度和生产率,因此,要求伺服驱动系统具有良好的快速响应性能,准确而稳定地跟踪和执行数控装置发出的数字指令信号,提高系统的稳态跟踪精度和瞬态跟随特性。

伺服驱动系统包括驱动装置和执行机构两大部分。驱动装置由主轴驱动单元、进给驱动单元和主轴伺服电动机、进给伺服电动机组成。步进电动机、直流伺服电动机和交流伺服电动机是常用的驱动装置。

测量元件将数控机床各坐标轴的实际位移值检测出来并经反馈系统输入到机床的数控装置中,数控装置对反馈回来的实际位移值与指令值进行比较,并向伺服驱动系统输出达到设定值所需的位移量指令。

### 4. 机床本体

机床本体包括床身、主轴、进给机构、刀架及自动换刀装置等,是在数控机床上自动地完成各种切削加工的机械部分。与传统的机床相比,数控机床在本体设计上已有重大变化,其结构特点如下。

(1) 采用具有高刚度、高抗震性及较小热变形的机床新结构。通常用提高结构系统的静刚度、增加阻尼、调整结构件质量和固有频率等方法来提高机床本体的刚度和抗震性,使机床本体能适应数控机床连续自动地进行切削加工的需要。采取改善机床结构布局、减小发热量、控制温升及采用热位移补偿等措施,可减小热变形对机床本体的影响。

(2) 广泛采用高性能的主轴伺服驱动和进给伺服驱动装置,使数控机床的传动链缩短,简化了机床机械传动系统的结构。

(3) 采用高传动效率、高精度、无间隙的传动装置和运动部件,如滚珠丝杠螺母副、塑料滑动导轨、直线滚动导轨和静压导轨等。

### 5. 数控机床的辅助装置

辅助装置是保证充分发挥数控机床功能所必需的配套装置。常用的辅助装置包括:气动、液压装置,排屑装置,冷却、润滑装置,回转工作台和数控分度头,防护和照明等各种辅助装置。

## 1.1.4 数控机床的特点

数控机床是一种高效能的自动加工机床,与普通机床相比,其具有如下优点。

(1) 能加工普通机床难以完成或不能加工的复杂零件。采用二轴或二轴以上联动的数控机床,可加工母线为曲线的旋转体曲面零件、凸轮零件和各种复杂空间曲面类零件,如整体涡轮、发动机叶片和螺旋桨叶片等复杂零件。

(2) 数控加工可以获得更高的加工精度和质量。数控机床是按照预定的程序自动加工的, 加工质量由机床保证, 无人为干扰, 而且加工精度还可以利用软件来进行校正和补偿, 因此可以获得比机床本身精度更高的加工精度和重复精度。

(3) 具有更高的生产效率。数控机床的主轴转速和进给量范围比普通机床的范围大, 良好的结构刚性允许数控机床采用大的切削用量, 从而有效地节省机动时间; 采用带有自动换刀装置的数控加工中心, 可一次装夹完成多工序的连续加工, 实现一机多用, 大大缩短工件周转时间, 生产率的提高更为明显, 也节省了厂房面积。与普通机床相比, 可以提高生产率 2~3 倍, 尤其对某些复杂零件的加工, 生产率可提高十几倍甚至几十倍。

(4) 具有广泛的适用性和较大的灵活性。可以适应不同尺寸规格的零件, 一般借助通用工夹具, 只需更换程序即可适应不同工件的加工, 从而为单件、小批量新试制产品加工和产品结构频繁更新提供了极大的方便。

(5) 监控功能强, 具有故障诊断的能力。CNC 系统不仅控制机床的运动, 而且可对机床进行全面监控。例如, 可对一些引起故障的因素提前报警, 进行故障诊断等, 从而极大地提高了检修的效率。

(6) 可实现较精确的成本核算和生产进度安排。以数控机床为基础建立起来的 FMC、FMS、CIMS 等综合自动化系统使机械制造的集成化、智能化和自动化得以实现。采用数字信息与标准化代码输入并具有通信接口的数控机床之间可实现网络通信, 构建工业控制网络, 从而实现自动化生产过程的计算、管理和控制。

### 1.1.5 数控机床的适用范围

一般来说, 数控机床特别适合于加工零件较复杂、精度要求高、产品更新频繁、生产周期要求短的场合。实际中, 还要考虑设备投资费用较高, 以及对操作、维护和编程人员素质要求高等问题。图 1-2 可粗略地表示数控机床的适用范围。图 1-2(a) 所示的是当零件复杂度和生产批量不同时三种机床应用范围的变化。通用机床多适用于零件结构不太复杂、生产批量较小的场合; 专用机床适用于生产批量很大的零件; 数控机床对于形状复杂的零件尽管批量小也同样适用。随着数控机床的普及, 数控机床的适用范围也越来越广, 对一些形状不太复杂而重复工作量很大的零件, 如印制电路板的钻孔加工等, 由于数控机床生产率高, 也已大量使用。因而, 数控机床的适用范围已扩展到图 1-2(a) 中阴影所示的范围。

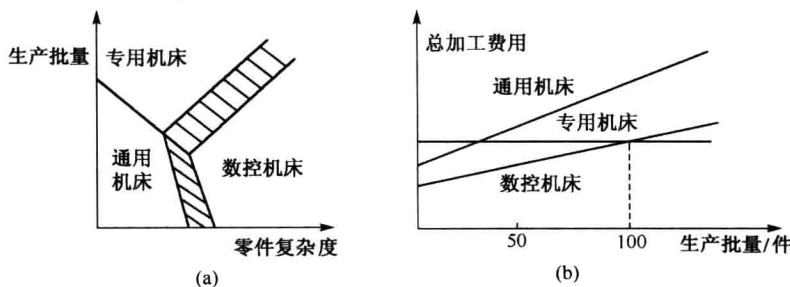


图 1-2 数控机床的适用范围

图 1-2(b) 表示当采用通用机床、专用机床及数控机床加工时, 零件生产批量与总加工费用之间的关系。据有关资料统计, 当生产批量在 100 件以下、加工具有一定复杂度的零件时,



数控机床的加工费用最低,能获得较高的经济效益。由此可见,数控机床最适宜加工以下类型的零件:

- (1) 生产批量小的零件;
- (2) 需要进行多次改型设计的零件;
- (3) 加工精度要求高、结构形状复杂的零件,如箱体类零件,曲线、曲面类零件;
- (4) 需要精确复制和尺寸一致性要求高的零件;
- (5) 价值昂贵的零件,即虽然生产量不大,但若出现加工差错则会产生巨大经济损失的零件。

## 1.2 数控机床的分类

数控技术现已广泛应用于各类机床及非金属切削机床,如绘图仪、弯管机等,品种繁多。根据数控机床的功能和组成的不同,可以从多种角度对数控机床进行分类。

- (1) 按运动轨迹分类,有点位控制、直线控制与轮廓(连续轨迹)控制。
- (2) 按伺服驱动系统控制方式分类,可分为开环、闭环和半闭环伺服驱动系统。
- (3) 按功能水平分类,可分为高、中、低(经济型)三类。
- (4) 按工艺用途分类,有金属切削类、金属成形类、特种加工类等数控机床。

### 1.2.1 按运动轨迹分类

#### 1. 点位控制系统

一些孔加工数控机床只要求获得准确的孔系坐标位置,对刀具相对工件的移动定位过程中的运动轨迹没有严格要求,可以采用点位控制系统。如数控坐标镗床、数控钻床、数控冲床、数控点焊机和数控测量机等都采用此类系统,如图1-3(a)所示。

#### 2. 直线控制系统

除了控制起点与终点之间的准确位置外,加工过程要求刀具由一点到另一点之间的运动轨迹为一条直线,并能控制位移的速度,此时可以采用直线控制系统。直线控制系统的刀具切削路径只沿着平行于某一坐标轴方向运动,或者沿着与坐标轴成一定角度的斜线方向进行直线切削加工,如图1-3(b)所示。采用这类控制系统的机床有数控车床、数控铣床等。

同时具有点位控制和直线控制功能的点位/直线控制系统,主要应用在数控镗铣床、加工中心机床上。

#### 3. 轮廓控制系统

轮廓控制系统能够同时对两个或两个以上的坐标轴进行连续控制,也称为连续控制系统。加工时不仅要控制起点和终点位置,而且要控制两点之间每一点的位置和速度,使机床加工出符合图纸要求的复杂形状(任意形状的曲线或曲面)的零件。CNC装置一般都具有直线插补和圆弧插补功能。如数控车床、数控铣床、数控磨床、数控加工中心、数控电加工机床、数控绘图机等,都采用此类控制系统。

这类数控机床绝大多数具有二坐标或二坐标以上的联动功能,不仅有刀具半径补偿、刀



具长度补偿功能,而且还具有机床轴向运动误差补偿,丝杠、齿轮的间隙补偿等一系列功能,如图1-3(c)所示。

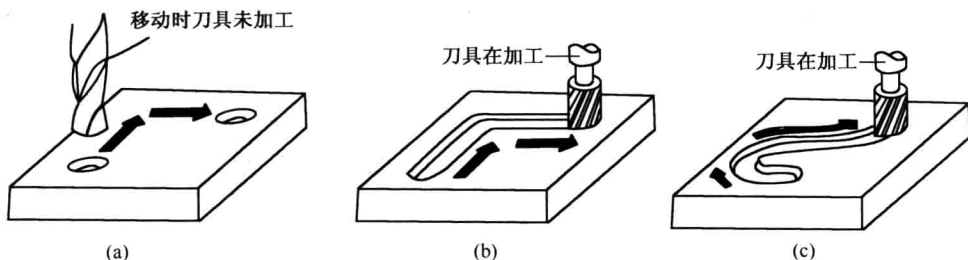


图 1-3 数控系统控制方式

## 1.2.2 按伺服驱动系统控制方式分类

### 1. 开环伺服驱动系统

开环伺服驱动系统是早期及当前一些经济型数控机床采用的伺服驱动系统。其特点是不带位置检测元件,采用的伺服驱动元件为步进电动机或电液脉冲马达。数控系统将零件程序处理后,发出指令脉冲信号,使伺服驱动元件转过一定的角度,并通过传动齿轮、滚珠丝杠螺母副,使执行机构(如工作台)移动或转动。图1-4为开环控制系统的框图。此控制方式没有来自位置测量元件的反馈信号,对执行机构的动作情况不进行检测,指令流向为单向,被称为开环控制系统。

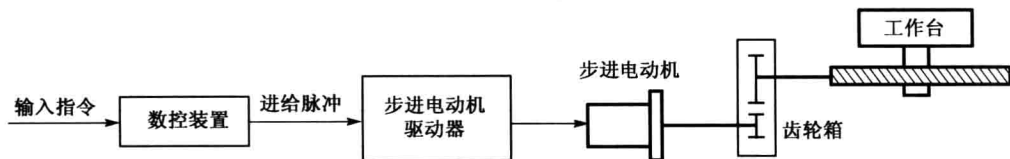


图 1-4 开环控制系统框图

步进电动机伺服系统是最典型的开环控制系统。其优点是结构简单,调试维修方便,成本较低。但是,开环系统的精度主要取决于伺服元件和机床传动元件的精度、刚度和动态特性,因此控制精度较低。目前,该系统多用于经济型数控机床或对旧机床的改造。

### 2. 闭环伺服驱动系统

伺服驱动系统不仅接收数控系统的驱动指令,还同时接收由工作台上检测元件测出的实际位置反馈信息,可进行比较,并根据其差值及时修正。此类伺服控制系统可以消除因传动系统误差而引起的误差,也称为闭环控制系统。

图1-5为闭环控制系统框图。数控装置发出指令脉冲后,若工作台没有移动,即无位置反馈信号时,伺服电机转动,经过齿轮副、滚珠丝杠螺母副等传动元件带动机床工作台移动。装在机床工作台上的位置测量元件将测量所得工作台的实际位移值进行反馈,位置比较环节实现实际位移与指令位移比较,若二者存在差值,经放大器放大后,再控制伺服驱动电动机转动,直至差值为零时,工作台才停止移动。

采用闭环伺服控制系统可以获得很高的加工精度,但是由于系统包含很多机械环节,如