



云南省普通高等学校“十二五”规划教材

# 数控加工与编程

主编◎马志诚 曾谢华



HUKONG JIAGONG YU BIANCHENG



西南交通大学出版社

云南省普通高等学校“十二五”规划教材

# 数控加工与编程

主 编    马 志 诚    曾 谢 华  
副主编    李 映 辉    向 丽 萍    朱 慧 军  
参 编    司 兴 登    张 正 祺

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

## 内 容 简 介

本书较全面、深入浅出地阐述了数控机床的编程技术,内容包括数控机床的工作原理、数控车床、数控铣床、加工中心等机床的手工编程方法;并介绍了常用数控车床、数控铣床、加工中心等机床的编程和操作;同时介绍了 SIEMENS 802S/C 数控机床的结构、编程实例和操作;另外,对 CAD/CAM 交互式图形编程技术也作了简单介绍。

本书操作实例丰富,深入浅出,各章既有连贯性,又有一定的独立性,内容丰富,实用性强,并在每章后附有习题。本书可作为高等职业技术学院学生的专业教材和教学参考书,还可作为从事数控技术工作的工程技术人员的参考书。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

数控加工与编程 / 马志诚, 曾谢华主编. —成都:  
西南交通大学出版社, 2015.6  
云南省普通高等学校“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-5643-3950-0

I. ①数… II. ①马… ②曾… III. ①数控机床—程  
序设计—高等学校—教材 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 124778 号

---

云南省普通高等学校“十二五”规划教材

## 数控加工与编程

主编 马志诚 曾谢华



|       |                                                             |
|-------|-------------------------------------------------------------|
| 责任编辑  | 李 伟                                                         |
| 封面设计  | 墨创文化                                                        |
| 出版发行  | 西南交通大学出版社<br>(四川省成都市金牛区交大路 146 号)                           |
| 发行部电话 | 028-87600564 028-87600533                                   |
| 邮政编码  | 610031                                                      |
| 网 址   | <a href="http://www.xnjdcbs.com">http://www.xnjdcbs.com</a> |
| 印 刷   | 四川嘉乐印务有限公司                                                  |
| 成品尺寸  | 185 mm × 260 mm                                             |
| 印 张   | 15.25                                                       |
| 字 数   | 381 千                                                       |
| 版 次   | 2015 年 6 月第 1 版                                             |
| 印 次   | 2015 年 6 月第 1 次                                             |
| 书 号   | ISBN 978-7-5643-3950-0                                      |
| 定 价   | 36.00 元                                                     |

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

# 前 言

随着科学技术的飞速发展,机械制造技术发生了革命性的变化。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及辅助制造(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,直接影响着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。

为了适应培养数控技术人才需求短缺的形势,适应高职高专机电专业课程“数控技术”的教学需要,特编写了本书。

本书可作为高等职业技术学院学生的教材,也可供从事机电一体化技术、数控技术的相关人员参考。

本书第 1 章、第 2 章由马志诚、向丽萍、朱慧军编写,第 3 章由马志诚、朱慧军、司兴登编写、第 4 章由曾谢华、张正祺编写,第 5 章由曾谢华、李映辉编写,第 6 章由曾谢华、向丽萍编写,第 7 章由马志诚、李映辉编写。本书由马志诚、曾谢华担任主编,并对全书进行了统稿。在本书编写过程中,编者参阅了有关教材、资料和文献,在此对相关作者表示衷心的感谢。

在本书编写过程中,得到了学校领导和教师的热情帮助,他们提出了不少宝贵意见,在此谨向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中难免会有不足、疏漏之处,诚恳希望读者批评指正。

编 者

2015 年 3 月

# 目 录

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 1 绪 论 .....                            | 1   |
| 1.1 概 述 .....                          | 1   |
| 1.2 数控机床的发展概况和分类 .....                 | 2   |
| 1.3 数控机床的基本工作原理和坐标系 .....              | 10  |
| 1.4 数控机床的自由度 .....                     | 20  |
| 1.5 数控机床的应用范围和特点 .....                 | 21  |
| 2 数控编程的基础知识 .....                      | 24  |
| 2.1 数控编程的内容和方法 .....                   | 24  |
| 2.2 程序段格式和程序结构 .....                   | 30  |
| 2.3 准备功能 ( G 指令 ) 和辅助功能 ( M 指令 ) ..... | 33  |
| 2.4 典型数控加工程序编制 .....                   | 46  |
| 2.5 数控加工过程仿真 .....                     | 57  |
| 3 数控车床加工程序设计典型实例 .....                 | 60  |
| 3.1 FANUC 0-TD/0-MD 数控系统操作 .....       | 60  |
| 3.2 机床操作面板介绍 .....                     | 66  |
| 3.3 轴类零件加工程序设计 .....                   | 69  |
| 3.4 盘类零件加工程序设计 .....                   | 74  |
| 3.5 数控车床加工综合实例 .....                   | 79  |
| 4 数控铣床加工程序设计典型实例 .....                 | 84  |
| 4.1 数控铣床坐标系统 .....                     | 84  |
| 4.2 西门子系统数控铣床的常用指令 .....               | 88  |
| 4.3 数控铣床加工综合实例 .....                   | 103 |
| 5 加工中心程序设计 .....                       | 115 |
| 5.1 加工中心的特点与分类 .....                   | 115 |
| 5.2 加工中心的程序编制 .....                    | 117 |
| 5.3 加工中心的操作 .....                      | 131 |
| 5.4 加工中心程序设计典型实例 .....                 | 139 |
| 6 典型计算机数控系统 .....                      | 156 |
| 6.1 概 述 .....                          | 156 |
| 6.2 SIEMENS 802S/C base line 简介 .....  | 160 |

|     |                                        |     |
|-----|----------------------------------------|-----|
| 6.3 | SIEMENS 802S/C base line 数控系统的组成 ..... | 161 |
| 6.4 | SIEMENS 802S/C base line 编程实例 .....    | 166 |
| 6.5 | SIEMENS 802S/C base line 机床操作 .....    | 175 |
| 7   | 基于 CAD/CAM 交互式图形编程的应用 .....            | 181 |
| 7.1 | CAD/CAM 技术介绍 .....                     | 181 |
| 7.2 | CAD/CAM 建模技术 .....                     | 191 |
| 7.3 | 刀具轨迹生成和后置处理 .....                      | 194 |
| 7.4 | 典型零件 CAD/CAM 应用实例 .....                | 205 |
| 7.5 | FUNAC 0I 车床仿真操作 .....                  | 215 |
|     | 参考文献 .....                             | 238 |



# 1 绪 论

## 1.1 概 述

随着计算机技术和控制技术的高速发展,传统的制造业发生了根本性变革,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,数控机床是关键技术,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,数控机床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,数控机床实现了高速、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(数控机床)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的工作效率和产品的加工质量。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。

数控机床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(如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工业发展的大趋势。

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,没有规模中国的数控装备也难以有效发展。

在高精尖装备研发方面,要强调研究开发与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。

在数控技术方面,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 数控机床的发展概况和分类

### 1.2.1 数控机床的发展概况

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制造业发展的最重大的技术进步。1952 年,美国第 1 台数控铣床问世,至今已经历了 60 余年。数控机床包括车、铣、加工中心、镗、磨、冲压、电加工以及各类专机,形成了庞大的数控制造设备家族,每年全世界的产量有 100 万台,产值上千亿美元。数控机床经过 60 余年 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 年的晶体管分离元件;

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:个人 PC 机。

第 6 代系统的优点主要有:

- (1) 元器件集成度高、可靠性好、性能高,可靠性已达到 5 万小时以上;
- (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) 对数控机床生产厂来说,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%。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,同时,国家向国防工业及关键民用工业部门投入大量技术改造资金,使数控设备制造市场一派繁荣,但也存在下列问题:

- (1) 低技术水平的产品竞争激烈,靠相互压价促销;



- (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。

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. 性能的发展方向

### (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：一方面是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；另一方面是群控系统的柔性，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。

多轴化是减少工序、辅助时间为主要目的的复合加工，正朝着多轴、多系列控制功能方向发展。数控机床的工艺复合化是指工件在一台机床上一次装夹后，通过自动换刀、旋转主轴头或转台等各种措施，完成多工序、多表面的复合加工。采用数控技术轴，西门子 880 系统控制的轴数可达 24 轴。

### (4) 实时智能化。

早期的实时系统通常是针对相对简单的理想环境，其作用是如何调度任务，以确保任务在规定期限内完成。而人工智能则试图用计算模型实现人类的各种智能行为。科学技术发展到今天，实时系统和人工智能相互结合，人工智能正向着具有实时响应的、更现实的领域发展，而实时系统也朝着具有智能行为的、更加复杂的领域发展，由此产生了实时智能控制这一新的领域。在数控技术领域，实时智能控制的研究和应用正沿着几个主要分支发展：自适应控制、模糊控制、神经网络控制、专家控制、学习控制、前馈控制等。例如，在数控系统中配备编程专家系统、故障诊断专家系统、参数自动设定和刀具自动管理及补偿等自适应调节系统，在高速加工时的综合运动控制中引入提前预测和预算功能、动态前馈功能，在压力、温度、位置、速度控制等方面采用模糊控制，使数控系统的控制性能大大提高，从而达到最佳控制的目的。

## 2. 功能的发展方向

### (1) 用户界面图形化。

用户界面是 CNC 系统与使用者之间的对话接口。由于不同用户对界面的要求不同，因而开发用户界面的工作量极大，用户界面成为计算机软件研制中最困难的部分之一。当前，

Internet、虚拟现实、科学计算可视化及多媒体等技术也对用户界面提出了更高要求。图形用户界面极大地方便了非专业用户的使用，人们可以通过窗口和菜单进行操作，便于蓝图编程和快速编程、三维彩色立体动态图形显示、图形模拟、图形动态跟踪和仿真、不同方向的视图和局部显示比例缩放功能的实现。

### （2）科学计算可视化。

科学计算可视化可用于高效处理数据和解释数据，使信息交流不再局限于用文字和语言表达，而可以直接使用图形、图像、动画等可视信息。可视化技术与虚拟环境技术相结合，进一步拓宽了应用领域，如无图纸设计、虚拟样机技术等，这对缩短产品设计周期、提高产品质量、降低产品成本具有重要意义。在数控技术领域，可视化技术可用于 CAD/CAM，如自动编程设计、参数自动设定、刀具补偿、刀具管理数据的动态处理和显示以及加工过程的可视化仿真演示等。

### （3）插补和补偿方式多样化。

插补方式多种多样，如直线插补、圆弧插补、圆柱插补、空间椭圆曲面插补、螺纹插补、极坐标插补、螺旋插补、NANO 插补、NURBS 插补（非均匀有理 B 样条插补）、样条插补（A、B、C 样条）、多项式插补等。采用多种补偿功能，如间隙补偿、垂直度补偿、象限误差补偿、螺距和测量系统误差补偿、与速度相关的前馈补偿、温度补偿、带平滑接近和退出以及相反点计算的刀具半径补偿等。

### （4）内装高性能 PLC。

在 CNC 系统中内装高性能 PLC 控制模块，可直接用梯形图或高级语言编程，具有直观的在线调试和在线帮助功能。编程工具中包含用于车床、铣床的标准 PLC 用户程序实例，用户可在标准 PLC 用户程序基础上进行编辑修改，从而便于建立自己的应用程序。

### （5）多媒体技术应用。

多媒体技术是集计算机、声像和通信技术于一体，使计算机具有综合处理声音、文字、图像和视频信息的能力。在数控技术领域，应用多媒体技术可以做到信息处理综合化、智能化，在实时监控系统和生产现场设备的故障诊断、生产过程参数监测等方面有着重大的应用价值。

## 3. 体系结构的发展方向

### （1）集成化。

采用高度集成化的 CPU、RISC 芯片和大规模可编程集成电路 FPGA、EPLD、CPLD 以及专用集成电路 ASIC 芯片，可提高数控系统的集成度和软硬件的运行速度。应用 FPD 平板显示技术，可提高显示器性能。平板显示器具有科技含量高、质量轻、体积小、功耗低、便于携带等优点，可实现超大尺寸显示，成为和 CRT 抗衡的新兴显示技术，是 21 世纪显示技术的主流。应用先进封装和互联技术，将半导体和表面安装技术融为一体。通过提高集成电路密度、减少互连长度和数量来降低产品价格，改进性能，减小组件尺寸，提高系统的可靠性。

### （2）模块化。

硬件模块化易于实现数控系统的集成化和标准化。根据不同的功能需求，将基本模块，如 CPU、存储器、位置伺服、PLC、输入/输出接口、通信等模块，制作成标准的系列化产品，通过“积木方式”进行功能裁剪和模块数量的增减，构成不同档次的数控系统。

### (3) 网络化。

数控机床联网可进行远程控制和无人化操作。通过机床联网,可在任何一台机床上对其他机床进行编程、设定、操作、运行,不同机床的画面可同时显示在每一台机床的屏幕上。

### (4) 通用型开放式闭环控制模式。

采用通用计算机组成总线式、模块化、开放式、嵌入式体系结构,便于裁剪、扩展和升级,可组成不同档次、不同类型、不同集成程度的数控系统。闭环控制模式是针对传统的数控系统仅有的专用型单机封闭式开环控制模式提出的。由于制造过程是一个具有多变量控制和加工工艺综合作用的复杂过程,包含诸如加工尺寸、形状、振动、噪声、温度和热变形等各种变化因素,因此,要实现加工过程的多目标优化,必须采用多变量的闭环控制,在实时加工过程中动态调整加工过程变量。加工过程中采用开放式通用型实时动态全闭环控制模式,易于将计算机实时智能技术、网络技术、多媒体技术、CAD/CAM、伺服控制、自适应控制、动态数据管理及动态刀具补偿、动态仿真等高新技术融为一体,构成严密的制造过程闭环控制体系,从而实现集成化、智能化、网络化。

## 4. 智能化新一代 PCNC 数控系统

当前开发研究适应于复杂制造过程、具有闭环控制体系结构、智能化新一代 PCNC 数控系统已成为可能。

21 世纪的数控装备将是具有一定智能化的系统,智能化的内容包括在数控系统中的各个方面:①为追求加工效率和加工质量方面的智能化,如加工过程的自适应控制、工艺参数自动生成;②为提高驱动性能及使用连接方便的智能化,如前馈控制、电机参数的自适应运算、自动识别负载、自动选定模型、自整定等;③简化编程、简化操作方面的智能化,如智能化的自动编程、智能化的人机界面等;④智能诊断、智能监控方面的内容,方便系统的诊断及维修等。

为解决传统的数控系统封闭性和数控应用软件的产业化生产存在的问题,目前许多国家对开放式数控系统进行研究,如美国的 NGC (The Next Generation Work-Station/Machine Control)、欧盟的 OSACA (Open System Architecture for Control within Automation Systems)、日本的 OSEC (Open System Environment for Controller)、中国的 ONCS (Open Numerical Control System) 等。数控系统开放式已经成为数控系统的未来之路。所谓开放式数控系统,就是数控系统的开发可以在统一的运行平台上,面向机床厂家和最终用户,通过改变、增加或裁剪结构对象(数控功能),形成系列化,并可方便地将用户的特殊应用和技术诀窍集成到控制系统中,快速实现不同品种、不同档次的开放式数控系统,形成具有鲜明个性的名牌产品。目前,开放式数控系统的体系结构规范、通信规范、配置规范、运行平台、数控系统功能库以及数控系统功能软件开发工具等是当前研究的核心。

网络化数控装备是近两年国际著名机床博览会的一个新亮点。数控装备的网络化将极大地满足生产线、制造系统、制造企业对信息集成的需求,也是实现新的制造模式如敏捷制造、虚拟企业、全球制造的基础单元。国内外一些著名数控机床和数控系统制造公司都在近两年推出了相关的新概念和样机,如在 EMO2001 展会中,日本山崎马扎克(MAZAK)公司展出的“Cyber Production Center”(智能生产控制中心,简称 CPC);日本大阪(Okuma)机床公司展出的“IT Plaza”(信息技术广场,简称 IT 广场);德国西门子(SIEMENS)公司展出的“Open Manufacturing Environment”(开放制造环境,简称 OME)等,反映了数控机床加工向网络化方向发展的趋势。

### 1.2.2 数控机床的分类

数控机床的种类繁多，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

##### (1) 点位控制系统。

这类控制系统的特点是只控制刀具相对于工件定位点的位置精度，不控制点与点之间的运动轨迹，在移动过程中刀具不进行切削。为了既提高生产效率又保证定位精度，机床工作台（或刀架）移动时采用机床设定的最高进给速度快速移动，在接近终点前进行分级或连续减速，达到低速趋近定位点，减少因运动部件惯性引起的定位误差。例如，数控钻床、数控坐标镗床、数控冲床、数控点焊机及数控测量机等，就可采用简单而价格低廉的点位控制系统，如图 1-1 所示。

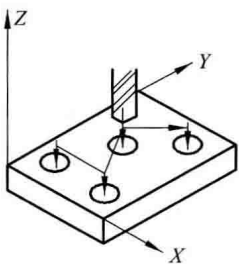


图 1-1 点位控制数控加工

##### (2) 直线控制系统。

这类控制系统的特点是除了控制起点与终点之间的准确位置外，还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。因为这类数控机床的刀具在移动过程中要进行切削加工，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。采用这类控制系统的机床有数控车床、数控铣床等。

同时具有点位控制功能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。

为了在刀具磨损后在调整重磨后的刀具或更换刀具时能比较方便地得到合格的零件，这类机床的数控系统常具有刀具半径补偿功能、刀具长度补偿功能和主轴转速控制功能等，如图 1-2 所示。

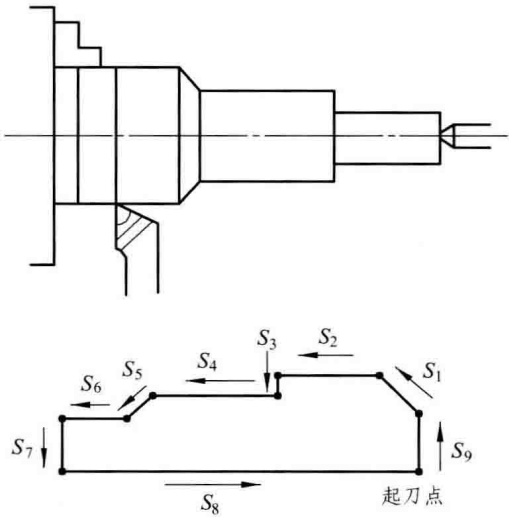


图 1-2 直线控制数控加工

### (3) 轮廓控制系统。

轮廓控制又称连续控制。它的特点是能够对两个或两个以上的坐标轴方向同时进行连续控制，并能对位移和速度进行严格的不间断控制；这类数控机床需要控制刀尖的整个运动轨迹，使它严格地按加工表面的轮廓形状连续地运动，并在移动时进行切削加工，可以加工任意斜率的直线、圆弧和其他函数关系曲线。采用这类控制系统的机床有数控铣床、数控车床、数控磨床、加工中心及数控绘图机等。

这类数控机床绝大多数具有两坐标或两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 所示。

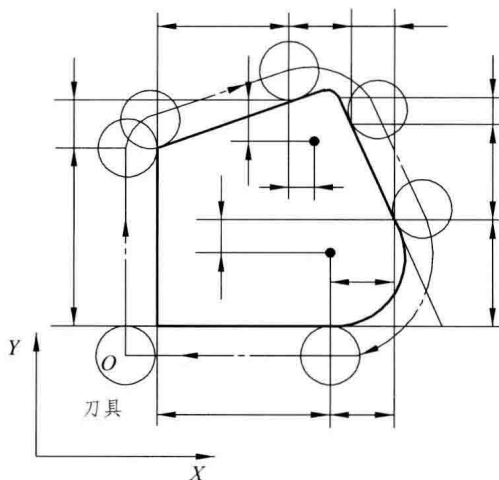


图 1-3 两坐标轮廓控制加工

按照可联动轴数，即同时控制的轴数，可以有 2 轴控制、2.5 轴控制、3~5 轴控制等。

2 轴控制即两坐标数控机床，能实现两个坐标轴的连续控制，如数控车床的  $X$ 、 $Z$  方向可同时控制，为二维控制。

2.5 轴控制是指两个轴能连续控制，第三轴为点位或直线控制。它能实现 3 个方向 ( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ ) 的二维控制。

3 轴控制是 3 个坐标方向 ( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ ) 都能同时控制，为三维控制。

5 轴控制为 3 个坐标方向 ( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ ) 与转台的转动  $B$  和刀具的摆动  $A$  同时联动。这种 5 轴同时控制的数控系统，可实现使刀具垂直于任何双曲线平面，特别适用于加工汽轮机叶片、机翼等形状复杂的曲面零件。

## 2. 按伺服系统控制方式分类

### (1) 开环伺服系统。

这种控制方式不带位置测量元件。数控装置根据控制介质上的指令信号，经控制运算发出指令脉冲，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，这种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查，指令流向为单向，因此被称为开环控制系统。

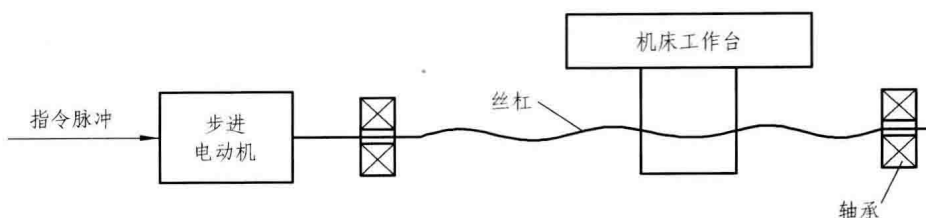


图 1-4 开环控制系统

采用步进电机伺服系统是最典型的开环控制系统。这种控制系统的特点是系统简单，调试维修方便，工作稳定，成本较低。由于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，在国内开环控制系统多用于经济型数控机床，以及对旧机床的改造。

### （2）闭环伺服系统。

这是一种自动控制系统，其中包含功率放大和反馈，使输出变量的值响应输入变量的值。数控装置发出指令脉冲后，当指令值送到位置比较电路时，此时若工作台没有移动，即没有位置反馈量信号时，指令值使伺服驱动电机转动，经过齿轮、滚珠丝杠螺母副等传动元件带动机床工作台移动。装在机床直线运动部件工作台上的位置测量元件，测出工作台的实际移动量后，反馈到数控装置的比较器中与指令脉冲信号进行比较，并用比较后的差值进行控制。若两者存在差值，经放大器放大后，再控制伺服驱动电机转动，直至差值为零时，工作台才停止移动。这种系统被称为闭环控制系统。图 1-5 为闭环控制系统框图。

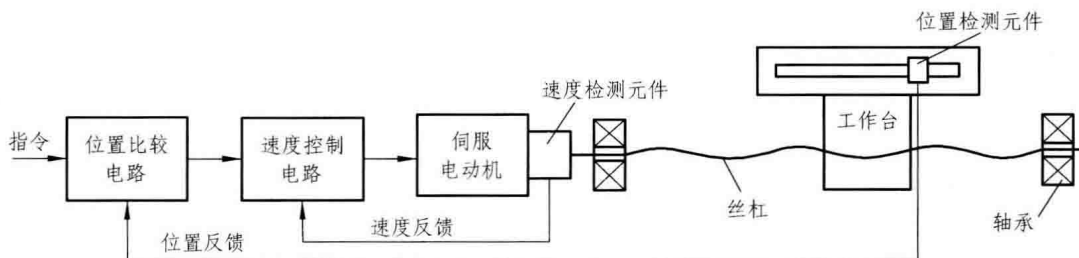


图 1-5 闭环控制系统

从理论上讲，闭环控制系统中机床工作精度主要取决于测量元件的精度，并不取决于传动系统的精度。因此，采用高精度测量元件可以使闭环控制系统达到很高的工作精度。但是由于许多机械传动环节都包含在反馈环路内，而各种反馈环节具有丝杠与螺母、工作台与导轨的摩擦，且各部件的刚性、传动链的间隙等都是可变的，因此机床的谐振频率、爬行、运动死区等造成的运动失步，可能会引起振荡，系统不易稳定，调试和维修比较复杂。闭环系统的运动精度主要取决于检测装置的精度，与传动链的误差无关。

闭环伺服系统的优点是精度高、速度快，主要用在精度要求较高的数控镗铣床、数控超精车床、数控超精镗床等机床上。

### （3）半闭环伺服系统。

目前，大多数数控机床采用半闭环伺服控制系统。这种控制系统不是直接测量工作台的位置量，而是通过旋转变压器、光电编码盘或分解器等角位移测量元件，间接测量伺服机构中执行元件的转角，如把测量元件安装在伺服电机端部或丝杠端部上，通过计算换算出工作



台的实际位移量，再将计算值与指令值进行比较，用比较后的差值进行控制，使机床作补充位移，直到差值消除为止。这种系统中滚珠丝杠螺母副和工作台部件均在反馈环路之外，其传动误差等仍然会影响工作台的位置精度，故称为半闭环伺服控制系统。图 1-6 为半闭环伺服系统框图。

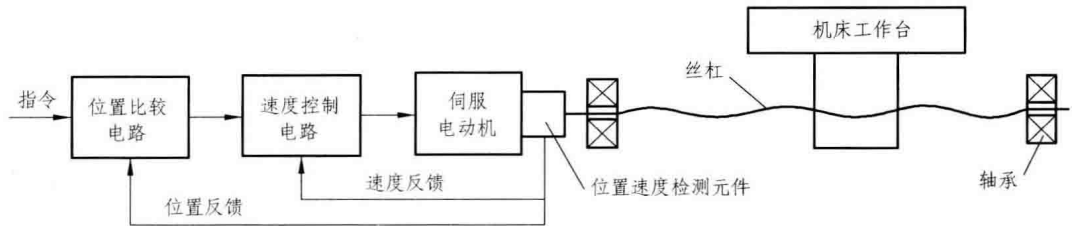


图 1-6 半闭环伺服系统

半闭环伺服系统介于开环和闭环伺服系统之间，由于角位移测量元件比直线位移测量元件结构简单，因此装有精密滚珠丝杠螺母副和精密齿轮的半闭环系统被广泛地采用。目前，已经把角位移测量元件与伺服电机设计成一个部件，使用起来更为方便。半闭环伺服系统的加工精度显然没有闭环系统高，但是由于采用了高分辨率的测量元件，这种控制方式仍可获得比较满意的精度和速度。半闭环伺服系统调试比闭环系统方便，稳定性好，成本也比闭环系统低，是一般数控机床常用的伺服控制系统。

### 3. 按功能水平分类

按功能水平不同可以把数控机床分为经济型、普及型和高级型 3 类。

#### （1）经济型数控机床。

经济型数控机床的控制系统比较简单，通常采用以步进电机作为伺服驱动元件的开环控制系统，分辨率为 0.01 m，进给速度为 8 ~ 15 m/min，最多能控制 3 个轴，可实现 3 轴三联动以下的控制，一般只有简单的 CRT 字符显示或简单数码管显示。数控系统多采用 8 位 CPU 控制。该机床程序编制方便，操作人员通过控制台上的键盘手动输入指令与数据，或直接进行操作。经济型数控机床通常采用单板机或单片机数控系统，功能较简单，价格低廉，主要用于车床、线切割机床及旧机床的改造。

#### （2）普及型数控机床。

普及型数控机床采用全功能数控系统，控制功能比较齐全，属于中档数控系统。通常采用半闭环的直流伺服系统或交流伺服系统，也采用闭环伺服系统。

普及型数控机床采用 16 位或 32 位微处理机的数控系统，机床进给系统中采用半闭环的交流伺服或直流伺服驱动，能实现 4 轴四联动以下的控制，分辨率为 1 μm，进给速度为 15 ~ 20 m/min，有齐全的 CRT 显示，能显示字符、图形和具有人机对话功能，具有 DNC（Direct Numerical Control，直接数字控制）通信接口。

#### （3）高级型数控机床。

高级型数控机床在数控系统中采用 32 位或 16 位微处理机，进给系统中采用高响应特性的伺服驱动，可控制 5 个轴，能实现 5 轴五联动以上的控制，分辨率可达到 0.1 μm，进给速度为 15 ~ 100 m/min，能显示三维图形，具有 MAP（Manufacturing Automation Protocol，制造自动化）通信接口和联网功能。

#### 4. 按工艺用途分类

数控机床按不同工艺用途分类,有数控车床、铣床、磨床与齿轮加工机床等;在数控金属成型机床中,有数控冲压机、弯管机、裁剪机等;在特种加工机床中,有数控电火花切割机、火焰切割机、点焊机、激光加工机等。近年来在非加工设备中也大量采用数控技术,如数控测量机、自动绘图机、装配机、工业机器人等。

加工中心是一种带有自动换刀装置的数控机床,它的出现突破了一台机床只能进行一种工艺加工的传统模式。它是以工件为中心,能实现工件在一次装夹后自动地完成多种工序的加工,常见的有加工箱体类零件为主的镗铣类加工中心和几乎能够完成各种回转体类零件所有工序加工的车削中心。

近年来一些复合加工的数控机床也开始出现,其基本特点是集中多工序、多刀刃、复合工艺加工在一台设备中完成。

### 1.3 数控机床的基本工作原理和坐标系

#### 1.3.1 数控机床的基本工作原理

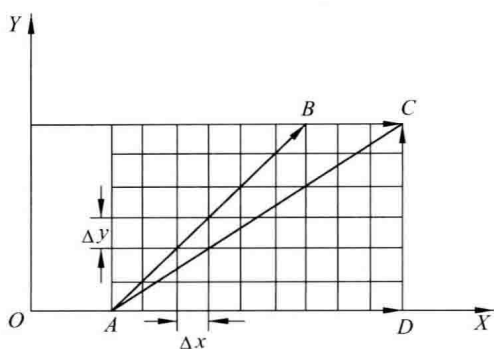
##### 1. 数控机床的加工过程

数控机床的加工过程,就是将加工零件的几何信息和工艺信息编制成程序,由输入部分送入计算机,经过计算机的处理、运算,按各坐标轴的分量送到各轴的驱动电路,经过转换、放大去驱动伺服电机,带动各轴运动,并进行反馈控制,使各轴精确走到要求的位置。如此继续下去,各个运动协调进行,实现刀具与工件的相对运动,一直加工完零件的全部轮廓。

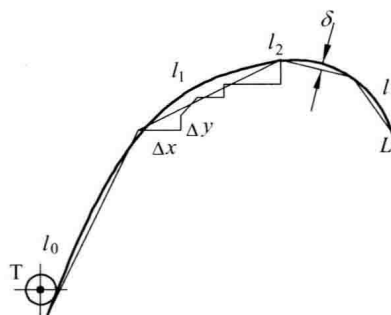
数控机床在钻削、镗削或攻螺纹等加工(常称为点位控制)中,是在一定时间内,使刀具中心从 $A$ 点移动到 $C$ 点,即刀具在 $X$ 、 $Y$ 轴移动以最小单位量计算的程序给定距离,它们的合成量为 $A$ 点和 $C$ 点间的距离。但是,对刀具轨迹没有严格的限制,可先使刀具在 $X$ 轴上由 $A$ 点移动到 $D$ 点,然后再沿 $Y$ 轴从 $D$ 点移动到 $C$ 点;也可以两个坐标以相同的速度,使刀具移动到 $B$ 点,再沿 $X$ 轴移动到 $C$ 点,这样的点位控制,是要严格控制点到点之间的距离,而与所走的路径无关。因为这种距离通常都用最小的位移( $0.001\text{ mm}$ )表示,而且要准确地停在到达点处(其误差以 $0.001\text{ mm}$ 来计算),所以这种要求实际上是很高的。

##### 2. 轮廓加工控制

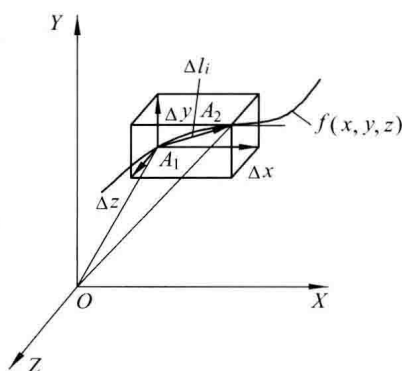
数控机床对轮廓加工的控制过程包括加工平面曲线和空间曲线两种情况。对于平面(二维)的任意曲线 $L$ ,要求刀具 $T$ 沿曲线轨迹运动,进行切削加工,将曲线 $L$ 分割成: $l_0$ 、 $l_1$ 、 $l_2\cdots l_i$ 等线段。用直线(或圆弧)代替(逼近)这些线段,当逼近误差 $\delta$ 相当小时,这些折线段之和就接近了曲线。由数控机床的数控装置进行计算、分配,通过两个坐标轴最小单位量的单位运动( $\Delta x$ 、 $\Delta y$ )的合成,不断连续地控制刀具运动,不偏离地走出直线(或圆弧),从而非常逼真地加工出平面曲线。对于空间(三维)曲线,如图1-7(c)中的 $f(x, y, z)$ ,同样可用一段一段的折线( $\Delta l_i$ )去逼近它,只不过这时的 $\Delta l_i$ 的单位运动分量不仅是 $\Delta x$ 和 $\Delta y$ ,还有一个 $\Delta z$ 。



(a) 直线



(b) 平面曲线



(c) 空间曲线

图 1-7 数控机床加工直线、曲线原理

这种在允许的误差范围内，运用沿曲线（精确地说，是沿逼近函数）的最小单位移动量合成的分段运动代替任意曲线运动，以得出所需要的运动，是数字控制的基本构思之一。轮廓控制也称连续轨迹控制，它的特点是不仅对坐标的移动量进行控制，而且对各坐标的速度及它们之间的比率都要进行严格控制，以便加工出给定的轨迹。

通常把数控机床上刀具运动轨迹是直线的加工，称为直线插补；刀具运动轨迹是圆弧的加工，称为圆弧插补。插补是指在被加工轨迹的起点和终点之间，插进许多中间点，进行数据点的密化工作，然后用已知线型（如直线、圆弧等）逼近。一般的数控系统都具有直线、圆弧插补。随着科学技术的迅速发展，许多生产数控系统的厂家，逐渐推出了具有抛物线插补、螺旋线插补、极坐标插补、样条曲线插补、曲面直接插补等功能丰富的数控系统，以满足用户的不同需要。

机床的数字控制是由数控系统完成的。数控系统包括 CNC 装置、伺服驱动装置、可编程控制器和检测装置等。数控装置能接收零件图纸加工要求的信息，进行插补运算，实时地向各坐标轴发出速度控制指令。伺服驱动装置能快速响应数控装置发出的指令，驱动机床各坐标轴的运动，同时能提供足够的功率和扭矩。伺服控制按其工作原理可分两种控制方式：关断控制和调节控制。关断控制是将指令值与实测值在关断电路的比较器中进行比较，相等后发出信号，控制结束。这种方式用于点位控制。调节控制是数控装置发出运动的指令信号，伺服驱动装置快速响应跟踪指令信号。检测装置将坐标位移的实际值检测出来，反馈给数控