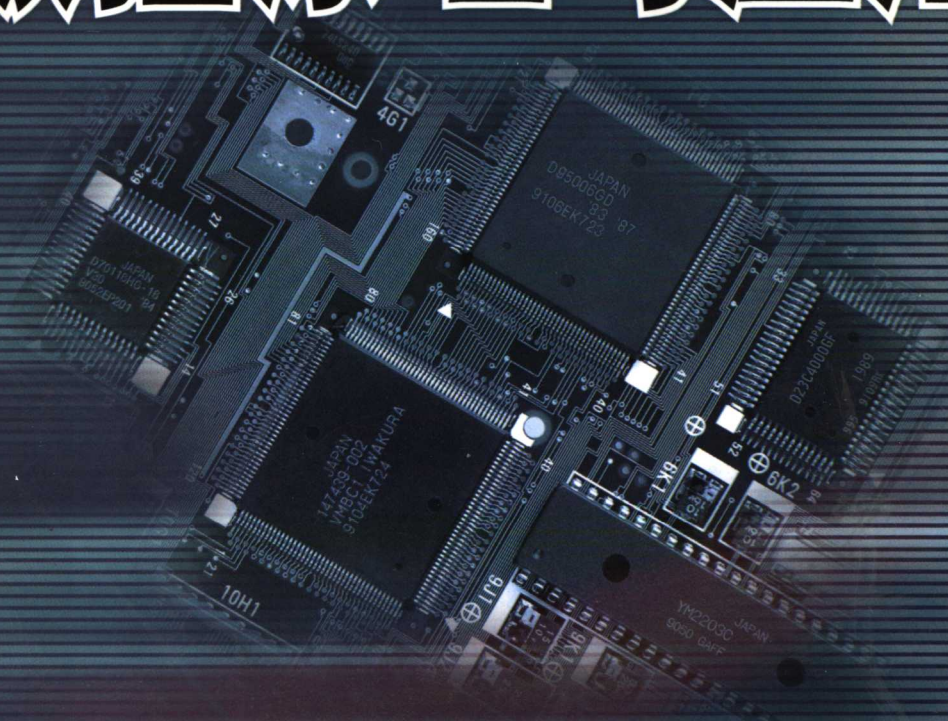




高职高专“十一五”规划教材

机电类

# 数控原理与应用



○ 姬清华 主编



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

高职高专“十一五”规划教材·机电类

# 数控原理与应用

主 编 姬清华

副主编 梁 炜 连黎明

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

本书是根据高职高专机电类人才培养目标和教学特色,结合参编老师多年教学改革的成功经验编写而成,从实用观点出发,以全面学习掌握原理与应用为目的,全面阐述了数控加工相关的数控机床机械结构、数控装置及控制原理、数控机床伺服系统、数控编程基础、数控车床编程与实训、加工中心编程与实训以及数控机床的故障诊断与维修等内容。本书内容力求系统、全面、新颖,注重理论联系实际,兼顾先进性与实用性。

本书可作为高职高专机电一体化专业、机械设计与制造专业、数控专业、自动化专业和计算机辅助设计等专业教学用书,也可供从事相关专业的工程技术人员和高级技术工作人员参考。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

数控原理与应用/姬清华主编. —北京:北京理工大学出版社, 2007.8  
高职高专“十一五”规划教材.机电类  
ISBN 978-7-5640-1217-5

I.数… II.姬… III.数控系统-高等学校:技术学校-教材 IV.TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 134636 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京市业和印务有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 17.75

字 数 / 399 千字

版 次 / 2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

责任校对 / 张 宏

定 价 / 32.00 元

责任印制 / 母长新

图书出现印装质量问题,本社负责调换

# 前 言

随着计算机技术、微电子技术、现代控制技术、传感检测技术、信息处理技术、网络通信技术和机械制造技术等各相关领域的发展,数控技术已成为现代先进制造系统中不可缺少的基础技术。近年来,各种数控机床的柔性、精确性、可靠性和集成性等各方面功能越来越完善,它在自动化加工领域中的占有率和需求率也越来越高。如何使学生与读者掌握其关键技术和内容,是本书在内容取舍和编写纲目拟定上的突破点。本书的编写既注重了内容的系统性、理论性、应用性和新颖性,又力求叙述简练、层次分明、结构合理、通俗易懂。

本书着重介绍了机床数控技术的基本概念及发展、数控机床的结构及工作原理、数控编程基础及方法、数控机床的应用及故障诊断等内容。全书共分8章,第1章介绍了数控机床的基本概念、工作原理、组成、分类、发展、特点及应用。第2章介绍了数控机床机械本体的组成、特点和要求以及主传动和进给传动系统、刀具交换装置等知识。第3章介绍了数控装置的组成、功能特点、CNC装置的硬件和软件结构、数控插补原理、刀具补偿控制及进给速度控制。第4章介绍了数控机床对伺服系统的要求与分类、数控机床伺服驱动装置和检测装置。第5章介绍了数控编程基础及计算机辅助数控编程。第6、7章分别介绍了数控车床和加工中心刀具系统、夹具系统、数控加工工艺基础、数控编程指令及大量编程实例,突出实训特色。第8章介绍了数控机床的可靠性与维修、故障诊断的常用方法和一般步骤、故障诊断的一些新技术及故障维修。

本书由姬清华担任主编,由梁炜、连黎明担任副主编。杜玉雪、史卫朝、马超、杜鑫参与编写。在编写过程中,作者参阅和引用了有关院校、工厂、科研院所的一些教材、资料和文献,有些文献已在参考文献中列出,对未能列出的文献和资料,编者向其作者表示诚挚的感谢。

由于编者的水平有限,经验不足,文中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。如果读者在使用本书的过程中有任何建议,请与编者(bjzhangxf@126.com)联系。

编 者

# 目 录

## 第1章 绪论.....1

- 1.1 数控机床技术的基本概念 .....1
- 1.2 数控机床的特点及适用范围 .....1
  - 1.2.1 数控机床的特点 .....1
  - 1.2.2 数控机床的适用范围 .....2
- 1.3 数控机床的工作原理及组成 .....3
  - 1.3.1 数控机床的工作原理 .....3
  - 1.3.2 数控机床的组成 .....4
- 1.4 数控机床的分类 .....5
  - 1.4.1 按功能用途分类 .....5
  - 1.4.2 按运动轨迹分类 .....6
  - 1.4.3 按伺服系统的控制原理分类 .....7
  - 1.4.4 按数控系统的功能水平分类 .....8
- 1.5 数控机床的发展 .....9
  - 1.5.1 数控机床的发展概况 .....9
  - 1.5.2 数控机床上几种先进的  
自动化生产系统 .....10
  - 1.5.3 数控机床的发展趋势 .....13
- 1.6 习题 .....16

## 第2章 数控机床的机械结构.....17

- 2.1 数控机床对结构的要求 .....17
  - 2.1.1 数控机床的结构组成 .....17
  - 2.1.2 数控机床对机械结构的  
主要要求 .....17
- 2.2 数控机床的主传动系统 .....21
  - 2.2.1 数控机床对主传动的要求 .....21
  - 2.2.2 主传动形式 .....22
  - 2.2.3 主传动机械结构 .....23
- 2.3 数控机床进给传动系统 .....30
  - 2.3.1 数控机床对进给传动机构  
的要求 .....30
  - 2.3.2 各类进给传动机构 .....30
  - 2.3.3 机床导轨 .....38

- 2.4 自动换刀装置 .....42
  - 2.4.1 数控车床的换刀 .....42
  - 2.4.2 加工中心自动换刀系统 .....44
- 2.5 习题 .....50

## 第3章 数控装置及控制原理.....51

- 3.1 概述 .....51
  - 3.1.1 CNC 系统的组成 .....51
  - 3.1.2 CNC 装置的功能特点 .....51
- 3.2 CNC 装置硬件结构 .....53
  - 3.2.1 单微处理器结构的 CNC  
装置 .....53
  - 3.2.2 多微处理器结构的 CNC  
装置 .....55
- 3.3 CNC 装置软件结构 .....57
  - 3.3.1 CNC 软件的组成 .....57
  - 3.3.2 CNC 软件与硬件的关系 .....58
  - 3.3.3 CNC 软件的结构特点 .....59
- 3.4 数控插补原理 .....61
  - 3.4.1 插补的基本概念 .....61
  - 3.4.2 逐点比较插补法 .....62
  - 3.4.3 数字积分插补法 .....68
  - 3.4.4 数据采样插补法 .....73
- 3.5 数控刀具补偿控制 .....74
  - 3.5.1 刀具补偿的基本原理 .....74
  - 3.5.2 B 刀具半径补偿 .....75
  - 3.5.3 C 刀具半径补偿 .....77
- 3.6 数控装置的进给速度控制 .....82
  - 3.6.1 进给速度控制 .....83
  - 3.6.2 加减速速度控制 .....83
- 3.7 习题 .....85

## 第4章 数控机床的伺服系统.....86

- 4.1 概述 .....86

|                                        |            |                              |            |
|----------------------------------------|------------|------------------------------|------------|
| 4.1.1 数控机床对伺服系统的要求 .....               | 86         | 6.1 数控车削加工工装与设备 .....        | 147        |
| 4.1.2 数控机床伺服系统的分类 .....                | 87         | 6.1.1 数控车床刀具系统 .....         | 147        |
| 4.2 数控机床伺服驱动装置 .....                   | 91         | 6.1.2 数控车床夹具系统 .....         | 149        |
| 4.2.1 步进电动机 .....                      | 91         | 6.2 数控车床加工工艺基础 .....         | 151        |
| 4.2.2 直流伺服电动机 .....                    | 95         | 6.2.1 数控车削的加工特点 .....        | 151        |
| 4.2.3 交流伺服电动机 .....                    | 100        | 6.2.2 数控车床加工的主要对象 .....      | 152        |
| 4.3 数控机床检测装置 .....                     | 102        | 6.2.3 数控车床加工工艺分析 .....       | 153        |
| 4.3.1 旋转变压器 .....                      | 103        | 6.2.4 数控车床加工工艺文件的拟定 .....    | 155        |
| 4.3.2 感应同步器 .....                      | 106        | 6.3 数控车床编程概述 .....           | 160        |
| 4.3.3 光电脉冲编码器 .....                    | 110        | 6.3.1 数控车床坐标系 .....          | 160        |
| 4.3.4 光栅 .....                         | 112        | 6.3.2 数控车床编程特点 .....         | 162        |
| 4.3.5 磁尺 .....                         | 114        | 6.3.3 刀具补偿 .....             | 162        |
| 4.3.6 激光检测装置 .....                     | 116        | 6.4 数控车床编程指令 .....           | 167        |
| 4.4 习题 .....                           | 117        | 6.4.1 模式设置 .....             | 168        |
| <b>第 5 章 数控编程基础 .....</b>              | <b>119</b> | 6.4.2 倒角加工 .....             | 169        |
| 5.1 数控编程概述 .....                       | 119        | 6.4.3 螺纹加工 .....             | 172        |
| 5.1.1 数控程序的编制方法与步骤 .....               | 119        | 6.4.4 简单切削循环 .....           | 177        |
| 5.1.2 数控程序的结构与格式 .....                 | 122        | 6.4.5 复合切削循环 .....           | 178        |
| 5.1.3 地址符及其含义 .....                    | 124        | 6.5 数控车床编程实训 .....           | 184        |
| 5.1.4 数控机床的坐标系 .....                   | 125        | 6.5.1 实训 1 .....             | 184        |
| 5.2 数控编程常用指令 .....                     | 127        | 6.5.2 实训 2 .....             | 187        |
| 5.2.1 模态指令与非模态指令 .....                 | 127        | 6.5.3 实训 3 .....             | 189        |
| 5.2.2 辅助功能 M 指令 .....                  | 127        | 6.6 习题 .....                 | 191        |
| 5.2.3 S、F、T 指令 .....                   | 130        | <b>第 7 章 加工中心编程与实训 .....</b> | <b>193</b> |
| 5.2.4 准备功能 G 指令 .....                  | 131        | 7.1 加工中心的工装设备 .....          | 193        |
| 5.3 自动编程简介 .....                       | 138        | 7.1.1 加工中心刀具系统 .....         | 193        |
| 5.3.1 自动编程的基本概念 .....                  | 138        | 7.1.2 加工中心用夹具系统 .....        | 201        |
| 5.3.2 自动编程的基本工作原理 .....                | 139        | 7.1.3 常用辅具 .....             | 208        |
| 5.3.3 国内外典型 CAM 软件介绍 .....             | 140        | 7.2 加工中心加工工艺基础 .....         | 210        |
| 5.3.4 CAD/CAM 数控编程系统的功能使用方法及应用过程 ..... | 142        | 7.2.1 加工中心工艺特点 .....         | 210        |
| 5.3.5 CAD/CAM 系统数控自动编程后置处理 .....       | 144        | 7.2.2 加工中心加工工艺分析 .....       | 210        |
| 5.4 习题 .....                           | 146        | 7.2.3 加工中心加工工序的设计 .....      | 212        |
| <b>第 6 章 数控车床编程 .....</b>              | <b>147</b> | 7.3 加工中心编程概述 .....           | 215        |
|                                        |            | 7.3.1 加工中心编程的特点 .....        | 215        |
|                                        |            | 7.3.2 加工中心机床坐标系 .....        | 215        |
|                                        |            | 7.3.3 刀具补偿功能 .....           | 217        |
|                                        |            | 7.3.4 加工中心的对刀 .....          | 220        |

|                                |            |                                  |     |
|--------------------------------|------------|----------------------------------|-----|
| 7.4 加工中心编程指令 .....             | 223        | 一般步骤 .....                       | 260 |
| 7.4.1 加工中心的 G 功能指令 .....       | 223        | 8.1.1 数控机床的故障规律 .....            | 260 |
| 7.4.2 简化编程指令 .....             | 228        | 8.1.2 数控机床的故障诊断的<br>一般步骤 .....   | 261 |
| 7.4.3 固定循环 .....               | 233        | 8.2 常用的故障诊断方法 .....              | 262 |
| 7.5 宏指令编程简介 .....              | 241        | 8.3 新技术在数控机床故障诊断中<br>的应用 .....   | 266 |
| 7.5.1 概述 .....                 | 241        | 8.4 数控机床的维修 .....                | 267 |
| 7.5.2 宏变量及常量 .....             | 243        | 8.4.1 数控机床维护维修的一些<br>基本概念 .....  | 267 |
| 7.5.3 运算符与表达式 .....            | 245        | 8.4.2 数控机床机械故障诊断<br>与维修 .....    | 270 |
| 7.5.4 结构语句 .....               | 245        | 8.4.3 数控机床控制系统的故障<br>诊断与维修 ..... | 272 |
| 7.5.5 宏程序编制 .....              | 246        | 8.4.4 伺服系统的故障诊断与<br>维修 .....     | 273 |
| 7.6 加工中心实训 .....               | 248        | 8.5 习题 .....                     | 275 |
| 7.6.1 实训 1 .....               | 248        |                                  |     |
| 7.6.2 实训 2 .....               | 251        |                                  |     |
| 7.6.3 实训 3 .....               | 255        |                                  |     |
| 7.7 习题 .....                   | 257        |                                  |     |
| <b>第 8 章 数控机床的故障诊断及维修 ....</b> | <b>260</b> |                                  |     |
| 8.1 数控机床的故障规律与诊断的              |            |                                  |     |

# 第 1 章 绪 论

伴随着中国制造业的迅速崛起，数控机床迅速在中国生根发芽、发展壮大。不仅数控机床的进口数量大增，而且中国生产数控机床的能力也大为提高。数控机床已然成为中国机床消费的主流。不仅越来越多的大型企业使用数控机床，而且越来越多的民营企业也不惜重金进口或购买国产数控机床，其主要原因是市场对机械加工的产品在精度和质量上的要求越来越高，数控加工技术已成为主流需求。

数控技术是制造业实现自动化、柔性化、集成化生产的基础；数控技术的应用是提高制造业的产品质量和劳动生产率必不可少的重要手段；数控机床更是国防工业现代化的重要战略装备，是关系到国家战略地位和体现国家综合国力水平的重要标志。专家们预言：21 世纪机械制造业的竞争，其实质是数控技术的竞争。加入世贸组织后，中国正在逐步变成“世界制造中心”。为了增强竞争能力，中国制造业开始广泛使用先进的数控技术，同时也在不断加强数控技术应用型人才的培养。

## 1.1 数控机床技术的基本概念

### 1. 数控技术

数控技术(Numerical Control Technology)是指用数字化信号及字符发出指令实现对机床运动及其加工过程自动控制的技术。目前数控一般是采用通用或专用计算机实现数字程序控制，因此数控也称为计算机数控(Computer Numerical Control, CNC)。它已成为制造业实现自动化、柔性化、集成化生产的基础技术。

### 2. 数字控制机床

数字控制机床(Numerical Control Machine Tools)简称数控机床，指采用数字控制技术对机床的加工过程进行自动控制的一类机床。它把机械加工过程中的各种控制信息用代码化的数字表示，通过信息载体输入数控装置，经运算处理由数控装置发出各种控制信号，控制机床的动作，按图样要求的形状和尺寸，自动地将零件加工出来。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。数控机床是高效率、高精度、高柔性和高自动化的光、机、电一体化的数控设备。

## 1.2 数控机床的特点及适用范围

### 1.2.1 数控机床的特点

现代数控机床具有许多普通机床无法实现的特殊功能，主要有以下特点。

### 1. 加工工件适应性强, 灵活性好

数控机床是一种高度自动化和高效率的机床, 可适应不同品种和不同尺寸规格工件的自动加工, 能完成很多普通机床难以胜任、或者根本不可能加工出来的复杂型面的工件。当加工对象改变时, 只要改变数控加工程序, 就可改变加工工件的品种, 为复杂结构的单件、小批量生产及试制新产品提供了极大的便利。数控机床首先在航空航天等领域应用, 如复杂曲面的模具加工和螺旋桨及涡轮叶片加工等。

### 2. 加工精度高, 产品质量稳定

数控机床按照预定的程序自动加工, 不受人为因素的影响, 加工同批零件尺寸的一致性好, 其加工精度由机床保证, 还可利用软件来校正和补偿误差, 加工精度高、质量稳定, 产品合格率高。因此, 能获得比机床本身精度还要高的加工精度及重复精度(中、小型数控机床的定位精度可达  $0.005\text{ mm}$ , 重复定位精度可达  $0.002\text{ mm}$ )。

### 3. 综合功能强, 生产效率高

数控机床的生产效率比普通机床高  $2\sim 3$  倍。尤其某些复杂零件的加工, 生产效率可提高十几倍甚至几十倍。这是因为数控机床具有良好的结构刚性, 可进行大切削用量的强力切削, 能有效地节省机动时间, 还具有自动变速、自动换刀、自动交换工件和其他辅助操作自动化等功能, 使辅助时间缩短, 而且无需工序间的检测和测量。

### 4. 自动化程度高, 工人劳动强度减少

数控机床主要是自动加工, 能自动换刀、启停切削液、自动变速等, 其大部分操作不需人工干预, 可大大减轻操作者的劳动强度和紧张程度, 改善劳动条件。

### 5. 生产成本降低, 经济效益好

数控机床自动化程度高, 减少了操作人员的人数, 同时加工精度稳定, 降低了废品和次品率, 使生产成本下降。在单件、小批量生产情况下, 使用数控机床加工, 可节省划线工时, 减少调整、加工和检验时间, 节省直接生产费用和工艺装备费用。此外, 数控机床可实现一机多用, 节省厂房面积和建厂投资。

### 6. 数字化生产, 管理水平提高

在数控机床上加工中, 能准确地计算零件加工时间, 加强了零件的计时性, 便于实现生产计划调度, 简化和减少了检验、工具与夹具准备、半成品调度等管理工作。数控机床具有的通信接口, 可实现计算机之间的连接, 组成工业局部网络(LAN), 采用制造自动化协议 (MAP)规范, 实现生产过程的计算机管理与控制。

## 1.2.2 数控机床的适用范围

在机械加工业中, 大批量零件的生产宜采用专用机床或自动生产线。对于小批量产品的生产, 由于产品品种变换频繁、批量小、加工方法的区别大, 宜采用数控机床。数控机床的适用范围如图 1-1 所示, 随零件复杂程序和零件批量的变化通用机床和专用机床的运

用也相应变化。当零件不太复杂,生产批量较小时,宜采用通用机床;当生产批量较大时,宜采用专用机床;而当零件复杂程度较高时,宜采用数控机床。

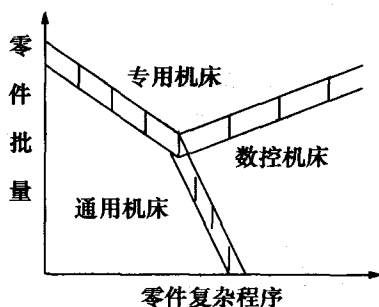


图 1-1 数控机床的适用范围

## 1.3 数控机床的工作原理及组成

### 1.3.1 数控机床的工作原理

用数控机床加工零件时,首先应将加工零件的几何信息和工艺信息编制成加工程序,由输入部分送入数控装置,经过数控装置的处理和运算,按各坐标轴的分量送到各轴的驱动电路,经过转换和放大去驱动伺服电动机,带动各轴运动,并进行反馈控制,使刀具与工件及其他辅助装置严格地按照加工程序规定的顺序、轨迹和参数有条不紊地工作,从而加工出零件的全部轮廓。其工作流程如下。

#### 1. 数控加工程序的编制

在零件加工前,首先根据被加工零件图样所规定的零件形状、尺寸、材料及技术要求等,确定零件的工艺过程、工艺参数、几何参数以及切削用量等,然后根据数控机床编程手册规定的代码和程序格式编写零件加工程序单。对于较简单的零件,通常采用手工编程;对于形状复杂的零件,则在编程机上进行自动编程,或者在计算机上用 CAD / CAM 软件自动生成零件加工程序。

#### 2. 输入

输入的任务是把零件程序、控制参数和补偿数据输入到数控装置中去。输入的方法有纸带阅读机输入、键盘输入、磁带和磁盘输入以及通信方式输入等。输入工作方式通常有两种:一种是边输入边加工,即在前一个程序段加工时,输入后一个程序段的内容;另一种是一次性地将整个零件加工程序输入到数控装置的内部存储器中,加工时再把一个个程序段从存储器中调出来进行处理。

#### 3. 译码

数控装置接受的程序是由程序段组成的,程序段中包含零件轮廓信息、加工进给速度等加工工艺信息和其他辅助信息。计算机不能直接识别它们,译码程序就像一个翻译,按

照一定的语法规则将上述信息解释成计算机能够识别的数据形式,并按一定的数据格式存放在指定的内存专用区域。在译码过程中对程序段还要进行语法检查,有错则立即报警。

#### 4. 刀具补偿

零件加工程序通常是按零件轮廓轨迹编制的。刀具补偿的作用是把零件轮廓轨迹转换成刀具中心轨迹运动,而加工出所需要的零件轮廓。刀具补偿包括刀具半径补偿和刀具长度补偿。

#### 5. 插补

插补的目的是控制加工运动,使刀具相对于工件做出符合零件轮廓轨迹的相对运动。具体地说,插补就是数控装置根据输入的零件轮廓数据,通过计算把零件轮廓描述出来,边计算边根据计算结果向各坐标轴发出运动指令,使机床在相应的坐标方向上移动,将工件加工成所需的轮廓形状。插补只有在辅助功能(换刀、换挡、冷却液等)完成之后才能进行。

#### 6. 位置控制和机床加工

插补的结果是产生一个周期内的位置增量。位置控制的任务是在每个采样周期内,将插补计算出的指令位置与实际反馈位置相比较,用其差值去控制伺服电动机,电动机使机床的运动部件带动刀具按规定的轨迹和速度进行加工。

在位置控制中通常还应完成位置回路的增量调整、各坐标方向的螺距误差补偿和方向间隙补偿,以提高机床的定位精度。

### 1.3.2 数控机床的组成

数控机床一般由控制介质、数控装置、伺服系统和机床本体所组成,如图 1-2 所示。图中实线部分为开环系统,虚线部分包含检测装置构成闭环系统,各部分简述如下。

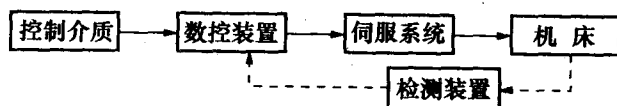


图 1-2 数控机床的组成

##### 1. 控制介质

数控机床工作时,不需人参与直接操作,但人的意图又必须体现出来,所以人和数控机床之间必须建立某种联系,这种联系的介质称为控制介质或输入介质。

控制介质上存储着加工零件所需要的全部操作信息和刀具相对于工件的位移信息。常用的信息载体有标准穿孔带、磁带和磁盘等。信息载体上记载的加工信息由按一定规则排列的文字、数字和代码所组成。目前国际上通常使用 EIA(Electronic Industries Association)代码以及 ISO(International Organization for Standardization)代码,这些代码经输入装置送给数控装置。常用的输入装置有光电纸带输入机、磁带录音机和磁盘驱动器等。

## 2. 数控装置

数控装置是数控机床的核心，也是区别于普通机床最重要的特征之一。用来接受并处理控制介质的信息，并将代码加以识别、存储、运算，输出相应的命令脉冲，经过功率放大驱动伺服系统，使机床按规定要求动作。它能完成加工程序的输入、编辑及修改，实现信息存储、数据交换、代码转换、插补运算以及各种控制功能。通常由一台通用或专用微型计算机构成，包括输入接口、存储器、中央处理器、输出接口和控制电路等部分，如图 1-3 所示。

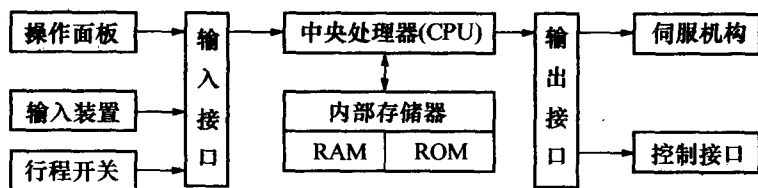


图 1-3 数控装置的组成

## 3. 伺服系统

伺服系统包括驱动部分和执行机构两大部分。常用的位移执行机构有功率步进电动机、直流伺服电动机和交流伺服电动机等。伺服系统将数控装置输出的脉冲信号放大，驱动机床移动部件运动或使执行机构动作，以加工出符合要求的零件。

伺服驱动系统性能的好坏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，能准确而迅速地跟踪数控装置的数字指令信号。

## 4. 机床本体

机床本体是用于完成各种切削加工的机械部分。机床是被控制的对象，其运动的位移和速度以及各种开关量是被控制的。它包括机床的主运动部件、进给运动部件、执行部件和基础部件，如底座、立柱、工作台(刀架)、滑鞍、导轨等。为了保证数控机床的快速响应特性，数控机床上普遍采用精密滚珠丝杠和直线运动导轨副。为了保证数控机床的高精度、高效率和高自动化加工，数控机床的机械结构具有较高的动态特性、动态刚度、阻尼精度、耐磨性和抗热变形等性能。在加工中心上，还具备有刀库和自动交换刀具的机械手。为了保证数控机床功能的充分发挥，还有一些配套部件如冷却、润滑、防护、排屑、照明、储运等，另外还有一些特殊应用装置，如检测装置、监控装置、编程机、对刀仪等。

# 1.4 数控机床的分类

## 1.4.1 按功能用途分类

### 1. 金属切削类数控机床

这类机床的品种与传统的通用机床一样，有数控车床、数控钻床、数控铣床、数控镗

床、数控磨床和加工中心等。根据其自动化程度的高低,又可将金属切削类数控机床分为普通数控机床、加工中心机床和柔性制造单元(FMC)。

普通数控机床和传统的通用机床一样,有车、铣、钻床等,这类数控机床的工艺特点和相应的通用机床相似,但它们具有加工复杂形状零件的能力。

常见的加工中心机床有镗铣类加工中心和车削加工中心,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。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地更换刀具,连续自动地对工件各加工面进行铣(车)、镗、钻等多工序加工。

柔性制造单元是具有更高自动化程度的数控机床。它可以由加工中心和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。

## 2. 金属成型类数控机床

这类机床有数控折弯机、数控弯管机和数控压力机等。

## 3. 数控特种加工机床

这类机床有数控线切割机、数控电火花成形机和数控激光切割机等。

## 4. 其他类型数控机床

这类机床有火烟切割数控机、数控三坐标测量机等。

# 1.4.2 按运动轨迹分类

## 1. 点位控制数控机床

这种机床的特点是在刀具相对于工件移动过程中,不进行切削加工,对运动的轨迹没有严格的要求,控制上只要求获得准确的孔系坐标位置,实现从一点坐标到另一点坐标位置的准确移动。这一类数控机床包括数控镗床、数控钻床、数控冲床及数控测量机等,其数控装置中对位移功能控制比较简单。

## 2. 直线控制数控机床

这种机床不仅要求具有准确的定位功能,还要求从一点到另一点按直线运动进行切削加工,刀具相对于工件移动的轨迹是平行机床各坐标轴的直线,或两轴同时移动构成 $45^\circ$ 的斜线,并能控制位移速度、选择不同的切削用量,以适应不同刀具及材料的加工。这一类数控机床包括数控铣床、数控车床、数控磨床和加工中心,其数控装置的控制功能比点位数控机床复杂。这些机床有两个到三个可控轴,但受控制的轴只有一个。

## 3. 轮廓控制数控机床

这种机床能对两个或两个以上的坐标轴进行联动切削加工控制,以加工出任意斜率的直线、圆弧、抛物线及其他函数关系的曲线或曲面,如图 1-4 所示。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表面要求,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。因此要求其数控装置应有很好的补偿功能,如刀具补偿、丝杠螺距误差补偿、传动反向间隙补偿、直线和圆弧插补等。轮廓控制数控机床包括数控车床、数控磨床、数控铣床、数控线切割机、加工中心等。

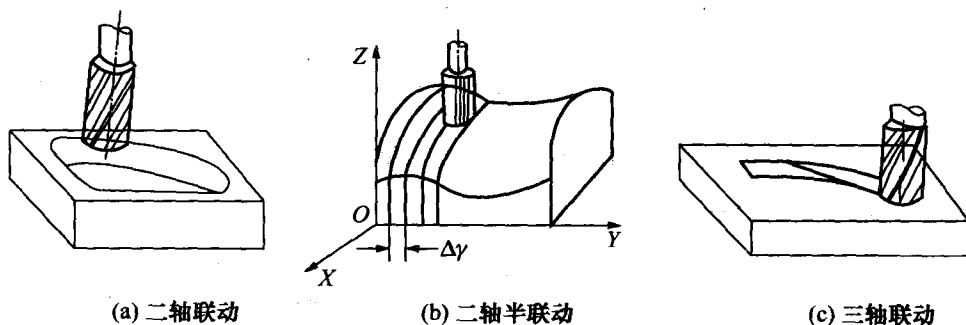


图 1-4 联动轴的轮廓控制切削加工

### 1.4.3 按伺服系统的控制原理分类

#### 1. 开环控制数控机床

这种机床运动部件的位移没有检测反馈装置(见图 1-5),数控装置发出信号而没有反馈信息,因此称为开环控制。开环控制数控机床容易掌握,调试方便,维修简便,但控制精度和速度受到限制。目前,国内经济型数控系统多采用这种方式,旧机床改造也广泛采用这种系统。

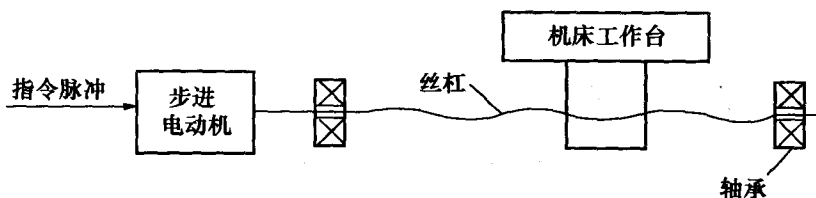


图 1-5 开环控制系统

#### 2. 全闭环控制数控机床

与开环控制数控机床不同,这类机床带有检测反馈装置(见图 1-6)。它可将测量出的实际位移值反馈到数控装置中与输入的指令位移值相比较,用差值进行控制;直至差值为零,以实现运动部件的精确定位,此即闭环控制系统。从理论上讲,闭环控制系统的运动精度主要决定于检测装置精度,而与传动链中误差无关。但闭环控制系统对机床结构的刚性、传动部件的间隙及导轨移动的灵敏性等都有严格的要求。其特点是位移精度高,但调试、维修都较复杂,成本较高,一般适用于精度很高的数控机床,如超精车床、超精磨床、镗铣床、大型数控机床等。

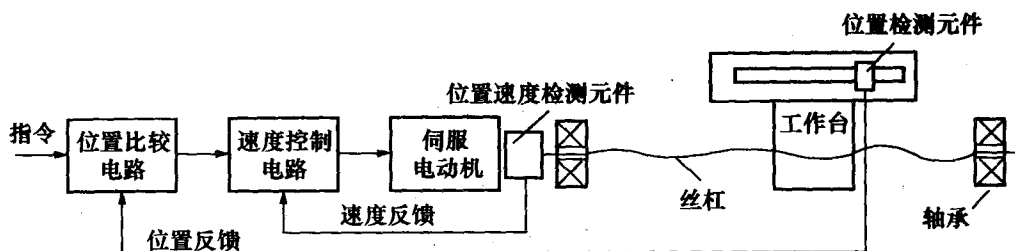


图 1-6 全闭环控制系统

### 3. 半闭环控制数控机床

这类机床不是直接测量工作台位移量，而是通过检测丝杠转角，间接地测量工作台位移量，然后再反馈给数控装置(见图 1-7)。由于工作台位移没有完全包括在控制回路中，故称半闭环控制系统。这种控制系统结构简单，安装、调试较方便，控制特性比较稳定，但系统的精度没有闭环系统高。通过采用精密的滚珠丝杠或采用丝杠螺距误差的补偿措施，丝杠等机械传动误差虽然不能通过反馈来随时校正，但可采用软件定值补偿的方法来适当提高其精度。目前，大多数中小型数控机床广泛采用半闭环控制系统。

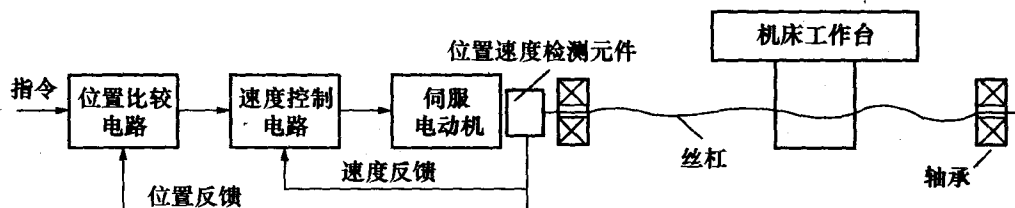


图 1-7 半闭环控制系统

## 1.4.4 按数控系统的功能水平分类

按数控系统的功能水平，通常把数控系统相对的分为低、中、高三类，其功能及指标见表 1-1。

表 1-1 数控系统不同档次的功能和指标

| 功 能                                      | 低 档          | 中 档           | 高 档            |
|------------------------------------------|--------------|---------------|----------------|
| 系统分辨率/ $\mu\text{m}$                     | 10           | 1             | 0.1            |
| G00 速度/ $(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$ | 3~8          | 10~24         | 24~100         |
| 伺服类型                                     | 开环及步进电动机     | 半闭环及直、交流伺服    | 闭环及直、交流伺服      |
| 联动轴数                                     | 2~3 轴        | 2~4 轴         | 5 轴或 5 轴以上     |
| 通信功能                                     | 无            | RS232C 或 DNC  | RS232C、DNC、MAP |
| 显示功能                                     | 数码管显示        | CRT: 图形、人机对话  | CRT: 三维图形、自诊断  |
| 内装 PLC                                   | 无            | 有             | 强功能内装 PLC      |
| 主 CPU                                    | 8 位、16 位 CPU | 16 位、32 位 CPU | 32 位、64 位 CPU  |
| 结构                                       | 单片机或单板机      | 单微处理器或多微处理器   | 分布式多微处理器       |

### 1. 低档经济型数控系统

这一档次的数控机床仅能满足一般精度要求的加工,能加工形状较简单的直线、斜线、圆弧及带螺纹的零件,采用的微机系统为 8 位、16 位 CPU 的单板机或单片机系统,具有数码显示、CRT 字符显示功能,机床进给由步进电动机实现开环驱动,控制的轴数和联动轴数在 2~3 轴。

### 2. 中档普及型数控系统

这类数控系统功能较多,除了具有一般数控系统的功能以外,还具有一定的图形显示功能及面向用户的宏程序功能等,采用的微机系统为 16 位、32 位 CPU 系统,具有 RS232C 通信接口,机床的进给多用交流或直流伺服驱动,一般系统能实现 2~4 轴的联动控制。

### 3. 高档数控系统

采用的微机系统为 32 位、64 位 CPU 以上的系统,机床的进给大多采用交流伺服驱动,除了具有一般数控系统的功能以外,应该至少能实现 5 轴或 5 轴以上的联动控制。具有三维动画图形功能和友好的图形用户界面,同时还具有丰富的刀具管理功能、宽调速主轴系统、多功能智能化监控系统和面向用户的宏程序功能,还有很强的智能诊断和智能工艺数据库,能实现加工条件的自动设定,且能实现与计算机的联网和通信。

## 1.5 数控机床的发展

### 1.5.1 数控机床的发展概况

1952 年美国研制出世界上第一台数控铣床,开创了世界数控机床发展的先河。随后,德、日、前苏联等国于 1956 年分别研制出本国第一台数控机床。我国于 1958 年由清华大学和北京第一机床厂合作研制了我国第一台数控铣床。

20 世纪 50 年代末期,美国 K&T 公司开发了世界上第一台加工中心,从而揭开了加工中心的序幕。1967 年,英国首先把几台数控机床连接成具有柔性的加工系统,这就是最初的柔性制造系统(FMS)。20 世纪 70 年代,由于计算机数控(CNC)系统和微处理器数控系统的研制成功,使数控机床进入了一个较快的发展时期。

20 世纪 80 年代,随着数控系统和其他相关技术的发展,数控机床的效率、精度、灵活性和可靠性进一步提高,品种规格系列化,门类扩展齐全,FMS 也进入了实用化。20 世纪 80 年代初出现了投资较少、见效快的柔性制造单元(FMC)。

20 世纪 90 年代以来,随着微电子技术、计算机技术的发展,以 PC(Personal Computer)技术为基础的 CNC 逐步发展成为世界的主流,它是自有数控技术以来最有深远意义的一次飞跃。以 PC 为基础的 CNC 通常是指运动控制板或整个 CNC 单元(包括集成的 PLC)插入到 PC 标准插槽中,使用标准的硬件平台和操作系统。20 世纪 90 年代初开发的下一代数控系统,都是基于 PC 或 VME(Versa Modul Eurocard)总线构成开放式体系结构

的新一代数控系统。

近年来,随着微电子和计算机技术的日益成熟,先后开发出了计算机直接数字控制(DNC)系统、柔性制造系统(FMS)和计算机集成制造系统(CIMS)。数控加工设备的应用范围也迅速延伸和扩展,除金属切削机床外,还扩展到铸造机械、锻压设备等各种机械加工设备,并延伸到非金属加工行业中的玻璃、陶瓷制造等各类设备。数控机床已成为国家工业现代化和国民经济建设中的基础与关键设备,其发展的历程见表 1-2。

表 1-2 数控系统发展的历程

| 发展阶段 | 数控系统的发展               | 世界产生年代 | 中国产生年代 |
|------|-----------------------|--------|--------|
| 硬件数控 | 第一代电子管数控系统            | 1952 年 | 1958 年 |
|      | 第二代晶体管数控系统            | 1961 年 | 1964 年 |
|      | 第三代集成电路数控系统           | 1965 年 | 1972 年 |
| 软件数控 | 第四代小型计算机数控系统          | 1968 年 | 1978 年 |
|      | 第五代微处理器数控系统           | 1974 年 | 1981 年 |
|      | 第六代基于工控 PC 的通用 CNC 系统 | 1990 年 | 1992 年 |

## 1.5.2 数控机床上几种先进的自动化生产系统

### 1. 直接数字控制系统

直接数字控制(DNC)系统是用一台计算机直接控制和管理一群数控机床进行零件加工或装配的系统。它将一群数控机床与存储有零件加工程序和机床控制程序的公共存储器相连接,根据加工要求向机床分配数据和指令,具有编程与控制相结合及零件程序存储容量大等特点。在 DNC 系统中,基本保留原来各数控机床的计算机数控(CNC)系统,中央计算机并不取代各数控装置的常规工作,CNC 系统与 DNC 系统的中央计算机组成计算机网络,实现分级管理。它具有计算机集中处理和分时控制、现场自动编程、对零件程序进行编辑和修改、以及生产管理、作业调度、工况显示监控、刀具寿命管理等功能。

### 2. 柔性制造单元及柔性制造系统

#### 1) 柔性制造单元

柔性制造单元(FMC)既可作为独立运行的生产设备进行自动加工,也可作为柔性制造系统的加工模块,具有占地面积小、便于扩充、成本低、功能完善和加工适应范围广等特点,非常适用于中小企业。它由加工中心(MC)与自动交换工件(AWC, APC)装置组成,同时数控系统还增加了自动检测与工况自动监控等功能。其结构形式根据不同的加工对象、CNC 机床的类型与数量以及工件更换与存储的方式不同,可以有多种形式。但主要有托盘搬运式和机器人搬运式两大类型,如图 1-8 和图 1-9 所示。