



现代机电一体化技术丛书

# 现代数控机床及控制

林宋 白传栋 马梅 编著



**XIANDAI SHUKONG**

JICHUANG

JI KONGZHI



化学工业出版社

 现代机电一体化技术丛书

# 现代数控机床及控制

林宋 白传栋 马梅 编著



**XIANDAI SHUKONG**

JICHUANG

JI KONGZHI



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是“现代机电一体化技术丛书”之一。现代数控机床是典型的机电一体化加工设备，本书较为详细地阐述和分析了现代数控机床中的光学、电气、机械、控制和信息处理系统，介绍了现代数控机床及控制方面的最新内容和发展，内容涉及数控机床的计算机数字控制系统、进给伺服系统、机械系统、数控刀具及其工具系统、加工信息处理及程序编制，以及基于 VERICUT 的虚拟数控加工仿真和典型数控加工机床等。

本书内容全面新颖、逻辑性强，可供从事机电一体化应用和数控机床的技术人员参考，亦可作为高等工科院校的相关专业学生的课程教材或参考书。



图书在版编目 (CIP) 数据

现代数控机床及控制 / 林宋, 白传栋, 马梅编著. —北京: 化学工业出版社, 2015.8

(现代机电一体化技术丛书)

ISBN 978-7-122-24305-8

I. ①现… II. ①林…②白…③马… III. ①数控机床-电气控制 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 129914 号

责任编辑: 张兴辉 韩亚南  
责任校对: 王素芹

文字编辑: 陈喆  
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 北京云浩印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 16 字数 389 千字 2015 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 69.00 元

版权所有 违者必究

## “现代机电一体化技术丛书” 编委会

主任 林 宋

副主任 王生泽 王侃 方建军

委员 (排名不分先后)

胡于进 王生泽 何 勇 谢少荣 罗 均 莫锦秋 王石刚

张 朴 徐盛林 林 宋 殷际英 方建军 尚国清 郭瑜茹

杨野平 戴 荣 周洪江 刘杰生 黎 放 刘 勇 王 晶

王 侃 白传栋 袁俊杰 胡福文 董信昌 马 梅



## 丛书序

机电一体化是指在机构的主功能、动力功能、信息处理功能和控制功能上引进电子技术，将机械装置与电子化设计及软件结合起来所构成的系统的总称。机电一体化是微电子技术、计算机技术、信息技术与机械技术的相互交叉与融合，是诸多高新技术产业和高新技术装备的基础。机电一体化产品是集机械、微电子、自动控制和通信技术于一体的高科技产品，具有很高的功能和附加值。

目前，国际上产业结构的调整使得各个行业不断融合和协调发展。作为机械与电子相结合的复合产业，机电一体化以其特有的技术带动性、融合性和普适性，受到了国内外科界、企业界和政府部门的特别关注，它将在提升传统产业的过程中，带来高度的创新性、渗透性和增值性，成为未来制造业的支柱。我国已经将发展机电一体化技术列为重点高新技术发展项目，机电一体化技术的广阔发展前景也将越来越光明。

随着机电一体化技术的不断发展，各个行业的技术人员对其兴趣和需求也与日俱增。但到目前为止，国内还鲜有将光机电一体化技术作为一个整体技术门类来介绍和论述的书籍，这与其方兴未艾的发展势头形成了巨大反差。有鉴于此，由北方工业大学、东华大学、上海交通大学和北京联合大学联合编写“现代机电一体化技术丛书”，旨在适时推出一套机电一体化技术基本知识和应用实例的科技丛书，满足科研设计单位、企业及高等院校的科研和教学需求，为有关技术人员在开发机电一体化产品时，提供从产品造型、功能、结构、材料、传感测量到控制等诸方面有价值的参考资料。

本丛书共十二种，包括《机电一体化系统分析、设计与应用》、《机电一体化系统软件设计与应用》、《机电一体化系统接口技术及工程应用》、《机电一体化系统设计及典型案例分析》、《光电电子技术及其应用》、《现代传感器及工程应用》、《微机电系统及工程应用》、《光机电一体化技术产品典型实例：工业》、《光机电一体化技术产品典型实例：民用》、《现代数控机床及控制》、《楼宇设备控制及应用实例》、《服务机器人》。

丛书的基本特点，一是内容新颖，力求及时地反映机电一体化技术在国内外的最新进展和作者的有关研究成果；二是系统全面，分门别类地归纳总结机电一体化技术的基本理论和在国民经济各个领域的应用实例，重点介绍了机电一体化技术的工程应用和实现方法，许多内容，如楼宇自动门的专门论述，尚属国内首次；三是深入浅出，重点突出，理论联系实际，既有一定的深度，又注重实用性，力求满足不同层次读者的需求，适合工程技术人员阅读和高校机械类专业教学的需要。

由于本丛书涉及内容广泛，相关技术发展迅速，加之作者水平有限，时间紧促，书中不妥之处在所难免，恳请专家、学者和读者不吝指教为盼！

“现代机电一体化技术丛书”编委会



# 前言

当今世界上一切制成品无一不是直接或间接由机床所制造的，而机床的先进程度又集中体现在数控机床上。现代数控机床是信息集成和系统自动化的基础设备，是典型的光机电一体化产品，它集高效率、高精度、高柔性于一身，具有加工精度高、生产效率高、自动化程度高、对加工对象的适应性强等优点。实现加工机床及生产过程的数控化，已经成为当今制造业的发展方向。可以说，机械制造竞争的实质就是数控技术的竞争。

本书共分 8 章，第 1 章对现代数控机床的发展历程和变化趋势进行全面的阐述；第 2 章主要介绍了数控机床的计算机数字控制系统，讲述了数控装置的硬件结构和软件结构，以及数控插补原理和刀具补偿原理，并介绍了开放式数控系统；第 3 章阐述了数控机床的进给伺服系统，并介绍了全数字伺服系统；第 4 章着重介绍了现代数控机床的结构，数控机床主传动系统和进给传动系统，以及自动换刀系统；第 5 章就数控工具系统、数控刀具类型和选用进行了较为详细的讨论，并给出了新型刀具材料在精密和超精密高速切削以及难加工材料加工中的应用；第 6 章较为详细地讨论了数控加工的信息处理及程序编制，介绍了图形交互自动编程系统和 STEP-NC 的应用；第 7 章介绍了数控加工仿真的原理及应用，并给出了基于 VERICUT 的虚拟数控加工仿真的实例；第 8 章介绍了典型的数控加工设备，其中包括并联机床以及笔者开发的数控雕铣机。

本书主要由林宋编写和统稿，白传栋参与了第 1 章的编写，马梅参与了第 7 章的编写。本书可作为从事光机电一体化应用和数控机床的技术人员的参考书，亦可用作大专院校机械工程及相关专业学生的教材。

在编写过程中，笔者参阅了相关文献资料，董信昌、马壮在绘图、制表和校对等方面给予了协助，在此一并表示诚挚的谢意。

由于编著者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

编著者



# 目录

## 第 1 章 现代数控机床概述 / 001

- 1.1 数控机床简介 / 001
  - 1.1.1 基本概念 / 001
  - 1.1.2 数控机床的特点 / 002
- 1.2 数控机床的工作原理及组成 / 003
  - 1.2.1 数控机床的工作原理 / 003
  - 1.2.2 数控机床的组成 / 003
- 1.3 数控机床的分类 / 005
  - 1.3.1 按工艺用途分类 / 005
  - 1.3.2 按运动轨迹分类 / 005
  - 1.3.3 按伺服控制系统分类 / 007
  - 1.3.4 按数控系统的功能水平分类 / 008
- 1.4 现代数控机床的发展 / 009
  - 1.4.1 数控技术的产生与发展 / 009
  - 1.4.2 直接数字控制系统 / 010
  - 1.4.3 柔性制造单元及柔性制造系统 / 011
  - 1.4.4 计算机集成制造系统 / 013
- 1.5 现代数控机床的发展趋势 / 014

## 第 2 章 数控机床的计算机数字控制系统 / 019

- 2.1 概述 / 019
  - 2.1.1 CNC 系统的组成 / 019
  - 2.1.2 CNC 装置的功能 / 020
- 2.2 计算机数字控制装置的硬件结构 / 021
  - 2.2.1 单微处理器结构 / 021
  - 2.2.2 多微处理器结构 / 023
  - 2.2.3 专用型结构数控装置和通用型结构数控装置 / 025
  - 2.2.4 开放式数控系统 / 025
- 2.3 计算机数字控制装置的软件结构 / 027
  - 2.3.1 CNC 装置的软件组成 / 028
  - 2.3.2 CNC 系统软件的工作过程 / 028
  - 2.3.3 计算机数字控制系统的软件结构特点 / 028

- 2.4 数控机床的可编程控制器 / 031
  - 2.4.1 概述 / 031
  - 2.4.2 PLC 的原理 / 031
  - 2.4.3 数控机床中 PLC 的功能 / 033
- 2.5 数控插补原理 / 034
  - 2.5.1 逐点比较法 / 034
  - 2.5.2 数字积分法 / 038
  - 2.5.3 数据采样插补法 / 042
- 2.6 刀具补偿原理 / 044
  - 2.6.1 刀具长度补偿 / 044
  - 2.6.2 刀具半径补偿 / 045

## 第 3 章 数控机床的进给伺服系统 / 052

- 3.1 数控机床的进给伺服系统的组成和分类 / 052
  - 3.1.1 进给伺服系统的组成 / 052
  - 3.1.2 数控机床进给伺服系统的分类 / 052
  - 3.1.3 数控机床对进给伺服系统的要求 / 055
- 3.2 数控机床伺服进给系统的伺服驱动装置 / 056
  - 3.2.1 步进电动机 / 056
  - 3.2.2 直流伺服电动机 / 057
  - 3.2.3 交流伺服电动机及其速度控制 / 062
- 3.3 位置检测装置 / 067
  - 3.3.1 概述 / 067
  - 3.3.2 旋转变压器 / 069
  - 3.3.3 感应同步器 / 070
  - 3.3.4 光电编码器 / 073
  - 3.3.5 光栅 / 076
  - 3.3.6 磁尺 / 079
  - 3.3.7 激光在机床位置检测上的应用 / 81
- 3.4 典型进给伺服系统 / 083
  - 3.4.1 步进电动机开环伺服系统 / 083
  - 3.4.2 闭环进给位置伺服系统 / 084
  - 3.4.3 半闭环进给伺服系统 / 087
- 3.5 全数字伺服系统 / 088
  - 3.5.1 全数字伺服系统的特点 / 088
  - 3.5.2 前馈控制简介 / 089
  - 3.5.3 全数字伺服系统举例 / 90

## 第 4 章 数控机床的机械系统 / 093

- 4.1 概述 / 093
  - 4.1.1 数控机床机械结构特点 / 093



- 4.1.2 数控机床的总体布局 / 093
- 4.2 数控机床主传动系统 / 095
  - 4.2.1 数控机床对主传动系统的基本要求 / 095
  - 4.2.2 数控机床主传动的特点 / 096
  - 4.2.3 主传动变速方式 / 096
  - 4.2.4 主轴部件 / 098
- 4.3 数控机床进给传动系统 / 105
  - 4.3.1 概述 / 106
  - 4.3.2 齿轮传动副 / 106
  - 4.3.3 滚珠丝杠螺母副 / 108
  - 4.3.4 静压蜗杆蜗条副和齿轮齿条副 / 111
  - 4.3.5 导轨 / 112
- 4.4 自动换刀机构 / 121
  - 4.4.1 自动换刀装置 / 121
  - 4.4.2 刀库 / 123
  - 4.4.3 刀具交换装置 / 125
- 4.5 数控机床回转工作台 / 126
  - 4.5.1 概述 / 126
  - 4.5.2 数控回转工作台 / 126
  - 4.5.3 分度工作台 / 127

## 第 5 章 数控刀具及其工具系统 / 131

- 5.1 概述 / 131
  - 5.1.1 数控刀具特点 / 132
  - 5.1.2 数控刀具的分类 / 132
- 5.2 数控刀具的工具系统 / 135
  - 5.2.1 数控机床工具系统的组成 / 135
  - 5.2.2 车削类数控工具系统 / 135
  - 5.2.3 镗铣类数控工具系统 / 137
- 5.3 数控刀具材料 / 142
  - 5.3.1 高速钢 / 144
  - 5.3.2 硬质合金 / 144
  - 5.3.3 陶瓷 / 145
  - 5.3.4 立方氮化硼 / 147
  - 5.3.5 金刚石 / 148
- 5.4 刀具涂层技术 / 149
  - 5.4.1 涂层技术的种类 / 150
  - 5.4.2 刀具涂层材料 / 150
- 5.5 数控加工刀具的选择原则 / 153
- 5.6 数控刀具的切削用量选择 / 154
- 5.7 数控刀具的换刀装置 / 154
  - 5.7.1 换刀装置的基本形式 / 154

- 5.7.2 自动换刀装置 / 155
- 5.7.3 刀具尺寸预调 / 156
- 5.7.4 刀具的识别 / 157

## 第 6 章 数控机床的加工信息处理及程序编制 / 160

- 6.1 数控机床的信息处理 / 160
  - 6.1.1 输入方式 / 160
  - 6.1.2 信息处理 / 160
  - 6.1.3 信息输出 / 161
- 6.2 数控编程的内容与步骤 / 161
  - 6.2.1 数控机床程序编制的方法 / 162
  - 6.2.2 数控加工的工艺分析 / 163
- 6.3 数控程序的编制 / 165
  - 6.3.1 数控程序编制的国际标准和国家标准 / 165
  - 6.3.2 数控加工程序段格式和程序结构 / 166
  - 6.3.3 数控机床的坐标系 / 166
  - 6.3.4 数控机床的最小设定单位 / 169
  - 6.3.5 数控加工程序常用的编程指令 / 169
- 6.4 自动数控编程 / 169
  - 6.4.1 自动编程概述 / 169
  - 6.4.2 数控语言编程 / 170
  - 6.4.3 图形交互自动编程 / 171
  - 6.4.4 语音式自动编程 / 172
  - 6.4.5 实物模型式自动编程 / 172
- 6.5 STEP-NC 简介 / 172
  - 6.5.1 STEP-NC 研究现状及展望 / 173
  - 6.5.2 STEP 标准的体系结构及特点 / 175
  - 6.5.3 STEP-NC 对 CNC 系统的影响 / 179
  - 6.5.4 STEP-NC 产品数据模型和编程 / 180
  - 6.5.5 相关的辅助软件介绍 / 184
  - 6.5.6 STEP-NC 的实施 / 185

## 第 7 章 基于 VERICUT 的虚拟数控加工仿真 / 188

- 7.1 概述 / 188
  - 7.1.1 VERICUT 模块功能 / 188
  - 7.1.2 VERICUT 软件工作界面 / 190
  - 7.1.3 VERICUT 机床仿真加工工作过程 / 192
  - 7.1.4 VERICUT 的机床构建 / 193
- 7.2 基于 VERICUT 的数控铣削仿真 / 194
  - 7.2.1 构建一个三轴铣的机床 / 194

- 7.2.2 数控铣削加工仿真 / 201
- 7.3 基于 VERICUT 的数控车削仿真 / 206
  - 7.3.1 构建一个二轴运动的车床模型 / 206
  - 7.3.2 数控车削加工仿真 / 207
- 7.4 基于 VERICUT 的五轴数控加工仿真 / 211
  - 7.4.1 构建一个五轴机床 / 211
  - 7.4.2 五轴数控加工仿真 / 212

## 第 8 章 典型数控加工机床 / 219

- 8.1 CJK6240 数控车床 / 219
- 8.2 XK5025 数控铣床 / 223
- 8.3 XHK716 立式加工中心 / 227
- 8.4 NCUT-ME30 型数控雕铣机 / 234
- 8.5 数控五轴联动激光加工机 / 237

参考文献 / 244

# 第 1 章

## 现代数控机床概述

### 1.1 数控机床简介

#### 1.1.1 基本概念

数字控制 (Numerical Control) 是一种借助数字、字符或其他符号对某一工作过程 (如加工、测量、装配等) 进行可编程控制的自动化方法, 简称数控 (NC)。

数控技术 (Numerical Control Technology) 是指用数字量及字符发出指令并实现自动控制的技术, 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。计算机辅助设计与制造 (CAD/CAM)、柔性制造系统 (FMS)、计算机集成制造系统 (CIMS)、敏捷制造 (AM) 和智能制造 (IM) 等先进制造技术都是建立在数控技术之上。数控技术不仅用于金属切削机床, 同时还用于多种其他的机械设备, 如机器人、坐标测量机、编织机、电火花切割机、剪裁机等。

数控系统 (Numerical Control System) 是指采用数控技术的控制系统。

数控机床 (Numerical Control Machine Tools) 是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, 是一种典型的光机电一体化化的加工设备。它集现代机械制造技术、自动控制技术及计算机信息技术于一体, 采用数控装置或计算机来全部或部分地取代一般通用机床在加工零件时对机床的各种动作——启动、确定加工顺序、改变切削用量、主轴变速、选择刀具、冷却液开停以及停车等人工控制, 高效率、高精度、高柔性和高自动化的光机电一体化化的数控设备。

计算机数控系统 (Computer Numerical Control) 以计算机为核心的数控系统。

数控加工技术是指高效、优质地实现产品零件特别是复杂形状零件加工的技术, 它是自动化、柔性化、敏捷化和数字化制造加工的基础与关键技术。数控加工过程包括由给定的零件加工要求 (零件图纸、CAD 数据或实物模型) 进行加工的全过程, 其主要内容涉及数控机床加工工艺和数控编程技术两大方面。

图 1-1 是数控机床加工过程框图。从框图中可看出在数控机床上加工零件所涉及的范围比较广, 与相关的配套技术有密切的关系。程序编制人员应该熟练地掌握工艺分析、工艺设计和切削用量的选择, 能正确地提出刀辅具和零件的装夹方案, 懂得刀具的测量方法, 了解

数控机床的性能和特点，熟悉程序编制方法和程序的输入方式。

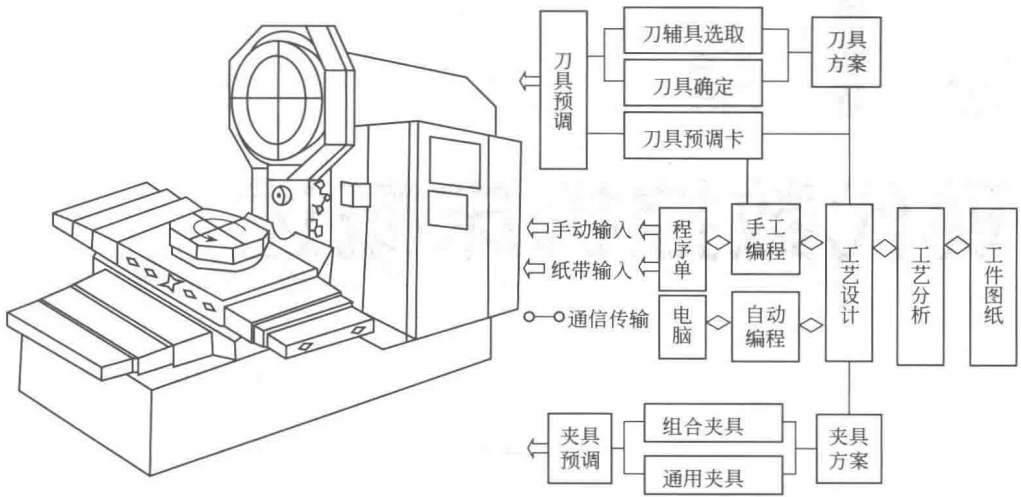


图 1-1 数控机床加工过程框图

## 1.1.2 数控机床的特点

现代数控机床集高效率、高精度、高柔性于一身，具有许多普通机床无法实现的特殊功能，它具有如下特点。

① 加工精度高 数控机床的加工精度，一般可达到  $0.005 \sim 0.1\text{mm}$ ，数控机床是按数字信号形式控制的，数控装置每输出一个脉冲信号，则机床移动部件移动一个脉冲当量（一般为  $0.001\text{mm}$ ），而且机床进给传动链的反向间隙与丝杠螺距平均误差可由数控装置进行补偿，因此可以获得比机床本身精度还要高的加工精度和重复精度。目前，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  $0.002\text{mm}$ 。

② 生产效率高 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，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。所以，数控机床生产效率比一般普通机床高得多。对壳体零件采用加工中心进行加工，利用转台自动换位、自动换刀，可以实现在一次装夹的情况下几乎完成零件的全部加工。减少了装夹误差，节约了工序之间的运输、测量、装夹等辅助时间。

③ 自动化程度高 数控机床的加工，是输入事先编写好的零件加工程序后自动完成，除了装卸零件、安装穿孔带或操作键盘、观察机床运行之外，其他的机床动作直至加工完毕，都是自动连续完成。可大大减轻操作者的劳动强度和紧张程度，改善劳动条件，减少操作人员的人数。同时有利于现代化的生产管理，可向更高级的制造系统发展。

④ 对加工对象的适应性强 数控机床是一种高度自动化和高效率的机床，可适应不同品种和尺寸规格工件的自动加工。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、小批量生产以及试制新产品提供了极大的便利。特别是对那些普通机床很难甚至无法加工的精密复杂表面（例如螺旋表面），数控机床也能实现自动加工。

⑤ 经济效益好 数控机床虽然设备昂贵，加工时分摊到每个工件上的设备折旧费较高，

但在单件、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。数控机床的加工精度稳定，减少了废品率，使生产成本进一步下降。此外，数控机床可实现一机多用，节省厂房面积和建厂投资。因此，使用数控机床仍可获得良好的经济效益。

⑥ 有利于生产管理现代化 数控机床的加工，可预先精确估计加工时间，所使用的刀具、夹具可进行规范化、现代化管理。数控机床使用数字信号与标准代码为控制信息，易于实现加工信息的标准化，目前已与计算机辅助设计与制造（CAD/CAM）有机地结合起来，是现代集成制造技术的基础。

## 1.2 数控机床的工作原理及组成

### 1.2.1 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、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。

数控机床具有很好的柔性，当加工对象变换时，只需重新编制加工程序即可，原来的程序可存储备用，这比存储工装夹具方便得多，也不必像组合机床那样需要针对新加工零件重新设计组合机床，致使生产准备时间过长。

### 1.2.2 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 所示中实线部分为开环系统，虚线部分包含位置反馈构成了闭环系统，各部分简述如下。

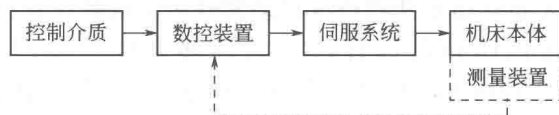


图 1-2 数控机床的组成

#### (1) 控制介质

数控机床工作时，不需人参与直接操作，但人的意图又必须参与，所以人和数控机床之间必须建立某种联系，这种联系的媒介物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工件的移动信息，控制介质按数控装置的类型而异，可以是穿孔纸带、穿孔卡片、磁带或其他可以存储代码的载体。采用哪一种控制介质取决于数控装置的类型。随着微型计算机的广泛应用，磁盘正在成为最主要的控制介质。

零件的加工工艺过程以数字化代码的形式存储在控制介质上，通过安装在数控装置中的纸带阅读机或磁带阅读机，将零件加工的工艺信息输入数控装置中。

#### (2) 数控装置

数控装置是数控机床的中枢，用来接受并处理输入介质的信息，并将代码加以识别、存储、运算，并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。通常由一台通用或专用微型计算机构成，有输入接口、存储器、运算器、输出接口和控制电路等，如图 1-3 所示。

输入接口接受控制介质或操作面板上的信息，并将其信息代码加以识别，经译码后送入相应的存储器，存储器中的代码或数据是控制和运算的原始依据。

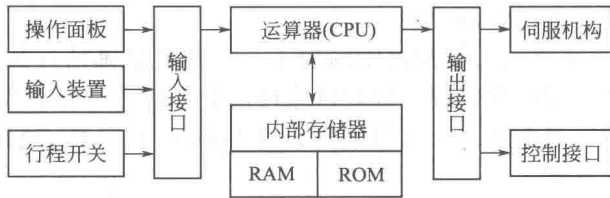


图 1-3 数控装置的组成

控制器根据输入的指令控制运算器和输出接口，以实现机床各种操作的执行，例如控制主轴变速和启动、控制刀架或工作台移动等，同时控制机床的整个工作循环。运算器主要是对输入的数据进行某种运算，按运算结果不断地由输出接口输出脉冲信号，驱动伺服机构按规定要求运动。

数控装置中的译码、处理、计算公式和控制的步骤都是预先安排好的，这种“安排”可以用专用计算机的刚性结构来实现（称为硬件数控或简称 NC），也可用小型通用计算机或微型计算机的系统控制程序来实现（称为软件数控），目前均采用专用的微型计算机来实现控制（CNC）。用微型机构成数控装置，其 CPU 实现控制和运算，内部存储器中只读存储器（ROM）存放系统控制程序，读写存储器（RAM）存放零件的加工程序和系统运行时的工作参数。I/O 接口实现输入输出的功能。数控机床的功能强弱主要由数控装置的功能来决定，所以它是数控机床的核心部分。

### （3）伺服系统

伺服系统包括驱动部分和执行机构两大部分，伺服系统把数控装置输出的脉冲信号通过放大和驱动元件使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。每一脉冲使机床移动部件产生的位移量称为脉冲当量，常用的脉冲当量为 0.01mm/脉冲、0.005mm/脉冲、0.001mm/脉冲等。因此，伺服系统的精度、快速性及动态响应是影响加工精度、表面质量与生产率的主要因素。

目前在数控机床的伺服系统中，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，后两种都带有感应同步器、光电编码器等位置测量元件。所以，伺服机构的性能决定了数控机床的精度与快速性。

### （4）机床本体

机床本体也称主机，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、滑鞍、工作台（刀架）、导轨等。由于数控机床的主运动、各个坐标轴的进给运动都由单独的伺服电动机驱动，因此，它的传动链短、结构比较简单，各个坐标轴之间的运动关系通过计算机来进行协调。为了保证数控机床的快速响应特性，数控机床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应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。同时还有一些良好的配套措施，如冷却、自动排屑、防护、润滑、编程机和对刀仪等，以充分发挥数控机床的功能。

## 1.3 数控机床的分类

数控机床的品种规格繁多，分类方法不一。根据数控机床的功能和结构，一般可以按下面几种原则来进行分类。

### 1.3.1 按工艺用途分类

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、数控铣床、数控钻床，数控镗床、数控磨床、加工中心、数控齿轮加工机床、FMC等，而每一种又有很多品种和规格，例如，在数控磨床中，有数控平面磨床、数控外圆磨床、数控工具磨床等。加工中心是一种带有自动换刀装置，工件经一次装夹后，能进行铣削、钻削、攻螺纹、镗削、铰孔等多道工序的复合型数控机床。加工中心目前主要有两类：一类是在镗、铣床基础上发展起来的，称为铣削加工中心；另一类是在车床的基础上发展起来的，成为车削加工中心。

② 金属成形类数控机床 如数控折弯机、数控弯管机、数控转头压力机、数控旋压机等。

③ 数控特种加工机床 如数控线切割机床、数控电火花成形机床、数控冲床、数控火焰切割机、数控激光切割机床等。

④ 其他类型数控机床 如数控测量机、三坐标测量机、3D打印机、机器人等。

### 1.3.2 按运动轨迹分类

#### (1) 点位控制数控机床

点位控制数控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，它对运动的轨迹没有严格的要求，只要实现从一点坐标到另一点坐标位置的准确移动，几个坐标轴之间的运动没有任何联系。如图1-4所示起点到终点的运动轨迹可以是图中①或②中的任意一种。为了实现既快速又精确的定位，两点间位置的移动一般先以最快速度移动，到即将接近新的位置点时再通过1~3级降速，使之慢速趋近定位点，以保证其定位精度。这一类数控机床包括数控钻床、数控镗床、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。

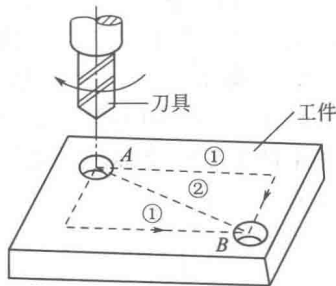


图 1-4 点位控制的切削加工

#### (2) 点位直线控制数控机床

这类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°的斜线，如图1-5所示。一般只能加工矩形、台阶形零件。运动时的速度是可以控制的，对于不同的刀具和工件，可以选择不同的切削用量。这一类数控机床包括数控车床、数控磨床、数控铣床和加工中心，其数控装置的控制功能比点位系统复杂，不仅控制直线运动轨迹，还控制进给速度及自动循环加工等。

#### (3) 轮廓控制数控机床

这类数控机床能够对两个或两个以上的坐标轴进行连续的切削加工控制，它不仅能控制机床移动部件的起点和终点坐标，而且能按需要严格控制刀具移动的轨迹，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 1-6 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。因此要求数控装置具有插补运算的功能，即根据程序输入的基本数据（如直线的终点坐标、圆弧的终点坐标和圆心坐标或半径），通过数控系统内插补运算器的数学处理，把直线或曲线的形状描述出来。并一边运算，一边根据计算结果向各坐标轴控制器分配脉冲，从而控制各坐标轴的联动位移量与所要求轮廓相符。

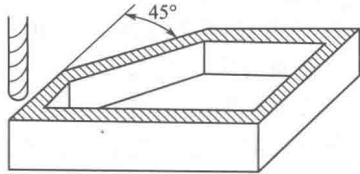


图 1-5 点位直线控制的切削加工

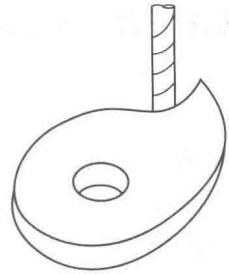


图 1-6 轮廓控制的切削加工

轮廓控制数控机床包括数控车床、数控铣床、数控磨床、数控线切割机、加工中心等。其相应的数控装置的功能比较复杂而齐全，一般都具有直线和圆弧插补功能，进行起点和终点之间“数据密化”，使切削点能完成任意角度斜线和任意半径圆弧的加工轨迹。

数控系统控制几个坐标按需要的函数关系同时协调运动，称为坐标联动。按照联动轴数分，可以分为二轴联动、二轴半联动、三轴联动、四轴联动、五轴联动等数控机床。

① 二轴联动 主要用于数控车床加工曲线旋转面或数控铣床加工曲线柱面 [见图 1-7 (a)]。

② 二轴半联动 主要用于三轴以上控制的机床，其中两个轴互为联动，而另一轴作周期进给，如在数控铣床上用球头铣刀采用行切法加工三维空间曲面 [见图 1-7 (c)]。

③ 三轴联动 一般分为两类，一类就是  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个直线坐标轴联动，比较多地用于数控铣床、加工中心等，如用球头铣刀铣切三维空间曲面。另一类是除了同时控制  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  其中两个直线坐标轴联动外，还同时控制围绕其中某一直线坐标轴旋转的旋转坐标轴 [见图 1-7 (b)]。

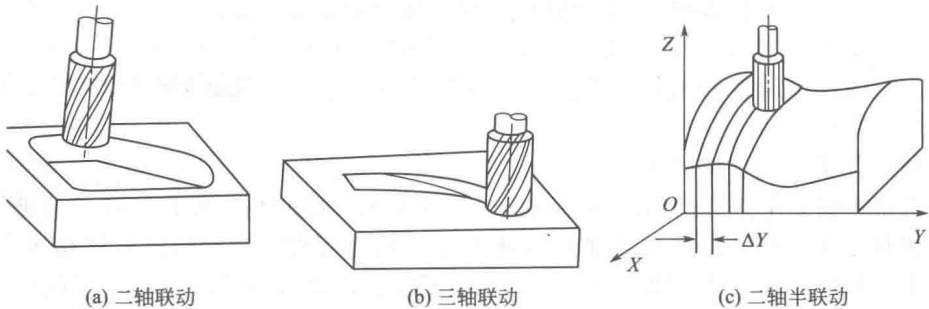


图 1-7 不同形面铣削的联动轴数

④ 四轴联动 即同时控制  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个直线坐标轴与某一个旋转坐标轴联动，在四坐标联动的数控机床加工飞机大梁零件，如图 1-8 所示，除了同时控制  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个移动坐标外，还需要一个绕  $X$  轴回转（也称摆动）坐标，方能保证刀具与工件型面在全长上始终