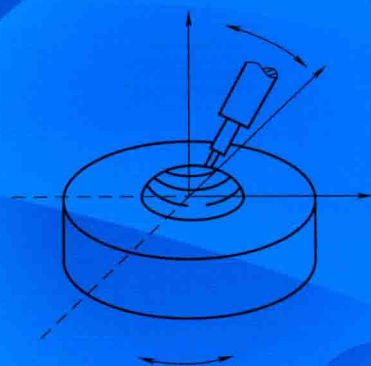


普通高等教育“十三五”规划教材

# 数控技术

SHUKONG JISHU

- 吴明友 主 编
- 保金凤 卢桂萍 副主编



化学工业出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

# 数 控 技 术

吴明友 主编

保金凤 卢桂萍 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

全书共 9 章，主要介绍了数控技术概述、数控系统、数控伺服系统、数控机床机械结构、数控车削（车削中心）加工工艺、数控铣削（镗铣削中心）加工工艺、数控机床编程基础、数控车床（FANUC）编程、数控铣床（FANUC）编程等内容。

本书可作为高等院校机械设计与制造及其自动化、机械工程、机械电子工程、数控技术等专业的教材，也可以作为高职高专、技校职高相关专业的参考教材。

图书在版编目（CIP）数据

数控技术/吴明友主编. —北京：化学工业出版社，  
2016.12  
普通高等教育“十三五”规划教材  
ISBN 978-7-122-28548-5

I. ①数… II. ①吴… 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（2016）第 280861 号

责任编辑：高 钰  
责任校对：边 涛

文字编辑：陈 喆  
装帧设计：刘丽华

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：三河市延风印装有限公司  
787mm×1092mm 1/16 印张 18½ 字数 459 千字 2017 年 2 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：39.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

本书是应用型本科机电类教学用书。在编写时，我们从应用型技术人才的工程教育实际出发，以应用为目的，以必需、够用为度，以讲清概念、强化应用为重点，加强针对性和实用性作为编写本教材的指导思想。

全书共 9 章，主要介绍了数控技术概述、数控系统、数控伺服系统、数控机床机械结构、数控车削（车削中心）加工工艺、数控铣削（镗铣削中心）加工工艺、数控机床编程基础、数控车床（FANUC）编程、数控铣床（FANUC）编程等内容。

本书可作为高等院校机械设计与制造及其自动化、机械工程、机械电子工程、数控技术等专业的教材，也可以作为高职高专、技校职高相关专业的参考教材或参考资料。

本书的内容已制作成用于多媒体教学的 PPT 课件，并将免费提供给采用本书作为教材的院校使用。如有需要，请发电子邮件至 [cipedu@163.com](mailto:cipedu@163.com) 获取，或登录 [www.cipedu.com.cn](http://www.cipedu.com.cn)。免费下载。

本书由吴明友主编，保金凤、卢桂萍任副主编，刘耀、林盛、高绍锦参编，吴明友编写第 1、2、3、6、9 章，保金凤编写第 5、8 章，卢桂萍编写第 7 章，卢桂萍、刘耀编写第 4 章，高绍锦校核了第 8 章例题程序，林盛校核了第 9 章例题程序。

本书在编写过程中，参考了部分文献资料，在此一并表示诚挚的感谢。

本书虽经反复推敲、校对，但因编者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请广大读者和同行原谅，并提出宝贵意见。编者联系方式：[wumy20090101@163.com](mailto:wumy20090101@163.com)。

编 者

2016 年 8 月

# 目 录

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 第 1 章 数控技术概述 .....               | 1  |
| 1.1 数控技术 .....                   | 1  |
| 1.2 数控机床的组成及工作原理 .....           | 2  |
| 1.2.1 数控机床的组成 .....              | 2  |
| 1.2.2 数控机床工作过程 .....             | 5  |
| 1.3 数控机床的特点及分类 .....             | 6  |
| 1.3.1 数控机床的特点 .....              | 6  |
| 1.3.2 数控机床的分类 .....              | 7  |
| 1.4 数控机床的发展 .....                | 11 |
| 1.4.1 数控技术的产生和发展 .....           | 11 |
| 1.4.2 数控机床的发展趋势 .....            | 12 |
| 习题 .....                         | 14 |
| 第 2 章 数控系统 .....                 | 15 |
| 2.1 数控系统的总体结构及各部分功能 .....        | 15 |
| 2.1.1 数控系统的总体结构 .....            | 15 |
| 2.1.2 数控系统各部分的功能 .....           | 15 |
| 2.2 数控系统的硬件简介 .....              | 17 |
| 2.2.1 数控系统中计算机的组成 .....          | 17 |
| 2.2.2 数控系统中计算机的实现 .....          | 20 |
| 2.2.3 数控系统闭环的位置控制实例 .....        | 26 |
| 2.3 数控系统的软件简介 .....              | 28 |
| 2.3.1 数控系统的软件 .....              | 28 |
| 2.3.2 数控系统软件功能的实现 .....          | 29 |
| 2.3.3 数控系统控制软件的结构 .....          | 32 |
| 2.4 数控装置的插补原理 .....              | 34 |
| 2.4.1 插补的基本概念 .....              | 34 |
| 2.4.2 插补方法的分类 .....              | 35 |
| 习题 .....                         | 42 |
| 第 3 章 数控伺服系统 .....               | 43 |
| 3.1 概述 .....                     | 43 |
| 3.1.1 伺服系统的基本要求 .....            | 43 |
| 3.1.2 数控机床伺服驱动系统的分类 .....        | 45 |
| 3.1.3 伺服电动机的种类、特点和选用<br>原则 ..... | 46 |
| 3.2 进给伺服系统的驱动元件 .....            | 47 |
| 3.2.1 步进电动机及其驱动 .....            | 47 |
| 3.2.2 直流伺服电动机及速度控制<br>单元 .....   | 52 |
| 3.2.3 交流伺服电动机及速度控制<br>单元 .....   | 56 |
| 3.3 进给伺服系统的检测元件 .....            | 58 |
| 3.3.1 概述 .....                   | 58 |
| 3.3.2 脉冲编码器 .....                | 58 |
| 3.3.3 光栅 .....                   | 59 |
| 3.3.4 感应同步器 .....                | 62 |
| 3.3.5 旋转变压器 .....                | 64 |
| 3.4 主轴驱动 .....                   | 65 |
| 3.5 位置控制 .....                   | 67 |
| 3.5.1 数字脉冲比较伺服系统 .....           | 67 |
| 3.5.2 相位比较伺服系统 .....             | 68 |
| 3.5.3 幅值比较伺服系统 .....             | 69 |
| 3.6 直线电动机进给系统简介 .....            | 70 |
| 习题 .....                         | 72 |
| 第 4 章 数控机床机械结构 .....             | 73 |
| 4.1 数控机床的结构特点及要求 .....           | 73 |
| 4.1.1 数控机床机械结构的组成 .....          | 73 |
| 4.1.2 数控机床机械结构的主要特点 .....        | 74 |
| 4.1.3 数控机床对机械结构的基本<br>要求 .....   | 76 |
| 4.2 数控机床的进给运动及传动机构 .....         | 83 |
| 4.2.1 数控机床对进给系统机械部分的<br>要求 ..... | 83 |

|                                  |            |                                    |     |
|----------------------------------|------------|------------------------------------|-----|
| 4.2.2 进给传动系统的典型结构 .....          | 83         | 4.3.3 数控机床主传动系统及主轴部件<br>结构实例 ..... | 113 |
| 4.2.3 导轨 .....                   | 83         | 4.4 自动换刀机构 .....                   | 117 |
| 4.2.4 滚珠丝杠螺母副 .....              | 92         | 4.4.1 自动换刀装置的类型 .....              | 117 |
| 4.2.5 齿轮传动装置及齿轮间隙的<br>消除 .....   | 97         | 4.4.2 刀库 .....                     | 124 |
| 4.3 数控机床的主传动及主轴部件 .....          | 101        | 4.4.3 刀具交换装置 .....                 | 130 |
| 4.3.1 数控机床的主传动装置 .....           | 102        | 习题 .....                           | 134 |
| 4.3.2 主轴部件结构 .....               | 107        |                                    |     |
| <b>第5章 数控车削(车削中心)加工工艺 .....</b>  | <b>135</b> |                                    |     |
| 5.1 数控车削加工工艺分析 .....             | 135        | 5.3 数控车削用刀具类型和选用 .....             | 152 |
| 5.1.1 数控车削的主要加工对象 .....          | 135        | 5.3.1 数控车削常用刀具种类 .....             | 152 |
| 5.1.2 数控车削加工的主要内容 .....          | 137        | 5.3.2 刀具的应用 .....                  | 154 |
| 5.1.3 数控车削加工工艺分析 .....           | 138        | 5.4 选择切削用量 .....                   | 158 |
| 5.1.4 数控车削工艺过程的拟定 .....          | 141        | 5.4.1 切削用量的合理选择 .....              | 159 |
| 5.2 数控车床常用的工装夹具 .....            | 150        | 5.4.2 切削用量的确定 .....                | 160 |
| 5.2.1 数控车床工装夹具的概念 .....          | 150        | 5.5 数控车削工艺文件的编制 .....              | 163 |
| 5.2.2 数控车床通用夹具 .....             | 150        | 5.6 典型零件的数控车削加工工艺 .....            | 163 |
| 5.2.3 数控车床的装夹找正 .....            | 151        | 习题 .....                           | 169 |
| <b>第6章 数控铣削(镗铣削中心)加工工艺 .....</b> | <b>171</b> |                                    |     |
| 6.1 数控铣削加工工艺分析 .....             | 171        | 6.3 铣削刀具的类型及选用 .....               | 187 |
| 6.1.1 数控铣削加工工艺 .....             | 171        | 6.3.1 对刀具的基本要求 .....               | 187 |
| 6.1.2 数控加工工艺文件 .....             | 172        | 6.3.2 常用铣刀的种类 .....                | 187 |
| 6.1.3 零件的工艺分析 .....              | 173        | 6.3.3 铣刀的选择 .....                  | 190 |
| 6.1.4 数控铣削加工工艺路线的拟定 .....        | 176        | 6.4 选择切削用量 .....                   | 192 |
| 6.2 数控铣床常用的工装夹具 .....            | 182        | 6.5 典型零件的数控铣削加工工艺分析 .....          | 193 |
| 6.2.1 工件的夹紧 .....                | 182        | 6.5.1 平面槽形凸轮零件 .....               | 193 |
| 6.2.2 数控铣床夹具 .....               | 184        | 6.5.2 箱盖类零件 .....                  | 196 |
| 6.2.3 夹具的选择 .....                | 186        | 习题 .....                           | 198 |
| <b>第7章 数控机床编程基础 .....</b>        | <b>199</b> |                                    |     |
| 7.1 数控机床坐标系 .....                | 199        | 7.2.5 数控车床使用假想刀尖点时偏置<br>计算 .....   | 212 |
| 7.1.1 数控机床坐标系 .....              | 199        | 7.2.6 简单立体型面零件的数值计算 .....          | 212 |
| 7.1.2 机床坐标系与工件坐标系 .....          | 204        | 7.3 数控加工编程方法简介 .....               | 213 |
| 7.2 数值处理 .....                   | 207        | 7.3.1 手工编程 .....                   | 213 |
| 7.2.1 常见的数值计算 .....              | 207        | 7.3.2 自动编程 .....                   | 214 |
| 7.2.2 基点坐标计算 .....               | 209        | 习题 .....                           | 218 |
| 7.2.3 非圆曲线节点坐标的计算 .....          | 210        |                                    |     |
| 7.2.4 列表曲线型值点坐标的计算 .....         | 211        |                                    |     |
| <b>第8章 数控车床(FANUC)编程 .....</b>   | <b>219</b> |                                    |     |
| 8.1 FANUC 数控系统的基本功能 .....        | 219        | 8.1.1 准备功能(G功能或G指令) .....          | 219 |

|                                    |     |                      |     |
|------------------------------------|-----|----------------------|-----|
| 8.1.2 辅助功能 (M 功能或 M 指令) ...        | 220 | 8.2.3 常用准备功能 .....   | 223 |
| 8.1.3 进给功能 (F 功能) .....            | 221 | 8.2.4 刀具补偿指令 .....   | 229 |
| 8.1.4 刀具功能 (T 功能) .....            | 221 | 8.2.5 固定循环指令 .....   | 232 |
| 8.1.5 主轴转速功能 (S 功能) .....          | 221 | 8.2.6 子程序的调用 .....   | 239 |
| 8.2 FANUC 数控系统的基本编程指令 .....        | 221 | 8.3 编程实例 .....       | 240 |
| 8.2.1 坐标相关指令 .....                 | 221 | 习题 .....             | 244 |
| 8.2.2 单位相关指令 .....                 | 223 |                      |     |
| <b>第 9 章 数控铣床 (FANUC) 编程</b> ..... | 246 |                      |     |
| 9.1 FANUC 数控系统的基本功能 .....          | 246 | 9.3.2 编程实例 (二) ..... | 269 |
| 9.2 FANUC 数控系统的基本编程指令 .....        | 248 | 9.3.3 编程实例 (三) ..... | 272 |
| 9.3 编程实例 .....                     | 264 | 习题 .....             | 281 |
| 9.3.1 编程实例 (一) .....               | 264 |                      |     |
| <b>附录 数控车削工艺文件</b> .....           | 284 |                      |     |
| <b>参考文献</b> .....                  | 287 |                      |     |

# 第 1 章 数控技术概述

## 1.1 数控技术

数控技术，即数字控制技术，简称数控（NC），是指用数字、字符或者其他符号组成的数字指令来实现对一台或多台机械设备动作进行编程控制的技术。它所控制的通常是位置、角度、速度等机械量和与机械能量流向有关的开关量。

采用计算机实现数字程序控制，称为计算机数控（CNC）。计算机按事先存储的控制程序来执行对设备的控制功能。由于采用计算机替代原先用硬件逻辑电路组成的数控装置，因此输入数据的存储、处理、运算、逻辑判断等各种控制机能的实现，均可以通过计算机软件来完成。计算机数控的优点有：

① 程序控制易于修改：改变控制规律不需修改硬件，通过修改控制子程序就可以满足不同的控制要求，因此相对于连续控制系统更具有灵活性。

② 精度高：模拟控制器的精度由硬件决定，同一批次的元器件可能具有不同的性能，例如电阻、电容的标称值和实际测量值会有不同，达到高精度很不容易，元器件的价格随精度不同变化很大；而数字控制器的精度与计算机的控制算法和字长有关，在系统设计时就已经决定了。

③ 稳定性好：数控计算机只有“0”“1”状态，抗干扰能力强，不像电阻、电容等受外界环境影响较大。

④ 软件复用：硬件不能复用，子程序却可以，所以具有可重复性。而且计算机系统和软件都可以更新换代。

⑤ 分时控制：可同时控制多系统、多通道。

数控技术的应用领域有：

① 制造行业：机械制造行业是最早应用数控技术的行业，它担负着为国民经济各行业提供先进装备的重任。如图 1-1~图 1-3 所示为常用的几种数控机床。现代化生产中需要的重要设备都是数控设备，如高性能 3 轴和 5 轴高速立式加工中心，5 坐标加工中心，大型 5 坐标龙门铣等；汽车行业发动机、变速箱、曲轴柔性加工生产线上用的数控机床和高速加工中心，以及焊接、装配、喷漆机器人、板件激光焊接机和激光切割机等；航空、船舶、发电行业加工螺旋桨、发动机、发电机和水轮机叶片零件用的高速 5 坐标加工中心、重型车铣复合加工中心等。

② 信息行业：在信息产业中，从计算机到网络、移动通信、遥测、遥控等设备，都需要采用基于超精技术、纳米技术的制造装备，如芯片制造的引线键合机、晶片键合机和光刻机等，这些装备的控制都需要采用数控技术。

③ 医疗设备行业：在医疗行业中，许多现代化的医疗诊断、治疗设备都采用了数控技术，如 CT 诊断仪、全身刀治疗机以及基于视觉引导的微创手术机器人等。

④ 军事装备：现代的许多军事装备，都大量采用伺服运动控制技术，如火炮的自动瞄准控制、雷达的跟踪控制和导弹的自动跟踪控制等。

⑤ 其他行业：在轻工行业，采用多轴伺服控制（最多可达几十个运动轴）的印刷机械、纺织机械、包装机械以及木工机械等；在建材行业，用于石材加工的数控水刀切割机；用于玻璃加工的数控玻璃雕花机；用于床垫加工的数控绗缝机和用于服装加工的数控绣花机等。

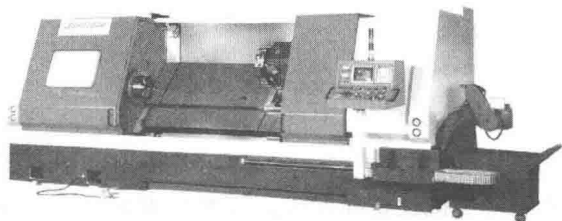


图 1-1 数控车床



图 1-2 数控铣床

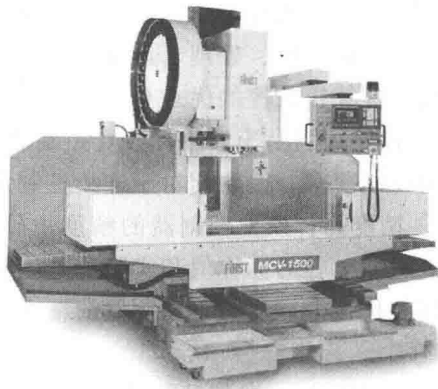


图 1-3 立式加工中心

## 1.2 数控机床的组成及工作原理

### 1.2.1 数控机床的组成

数控机床即是用数控技术实施加工控制的机床，是机电一体化的典型产品，是集机床、计算机、电动机及拖动、运动控制、检测等技术为一体的自动化设备。数控机床一般由输入输出装置、数控装置、伺服系统、测量反馈装置和机床本体等组成，如图 1-4 所示。数控机床的结构框图如图 1-5 所示。

#### (1) 输入输出装置

数控机床工作时，不需要人去直接操作机床，但又要执行人的意图，这就必须在人和数控机床之间建立某种联系，这种联系的中间媒介物即为程序载体，常称之为“控制介质”。在普通机床上加工零件时，由工人按图样和工艺要求进行加工。在数控机床加工时，控制介质是存储数控加工所需要的全部动作和刀具相对于工件位置等信息的信息载体，它记载着零件的加工工序。数控机床中，常用的控制介质有：穿孔纸带、盒式磁带、软盘、磁盘、U 盘及其他可存储代码的载体。

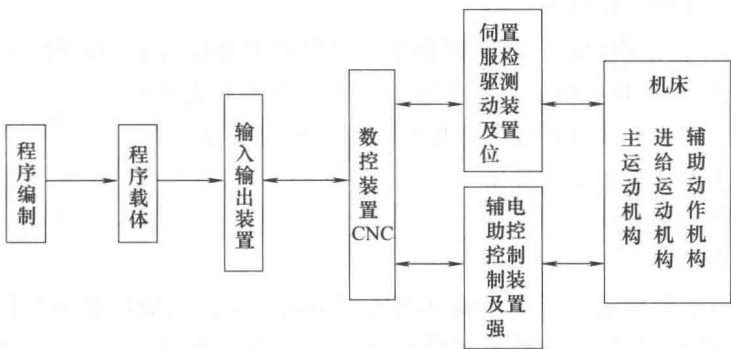


图 1-4 数控机床的组成

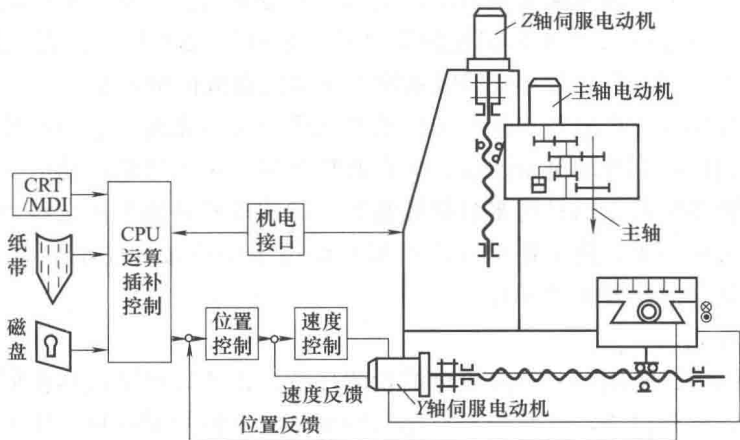


图 1-5 数控机床的结构框图

至于采用哪一种，则取决于数控系统的类型。早期时，使用的是 8 单位（8 孔）穿孔纸带，并规定了标准信息代码 ISO（国际标准化组织制定）和 EIA（美国电子工业协会制定）两种代码。随着技术的不断发展，控制介质也在不断地改进。对于不同的控制介质有相应的输入装置：对于穿孔纸带，配用光电阅读机；对于盒式磁带，配用录放机；对于软磁盘，配用软盘驱动器和驱动卡；现代数控机床还可以通过手动方式（MDI 方式）、DNC 网络通信、RS-232 串口通信等方式输入程序。输出装置包括打印机、存储器和显示器等。

(2) 数控装置

数控装置是数控机床的核心。其接受输入装置输入的数控程序中的加工信息，经过译码、运算和逻辑处理后，发出相应的指令给伺服系统，使伺服系统带动机床的各个运动部件按数控程序预定要求动作。数控装置是由中央处理单元（CPU）、存储器、总线和相应的软件构成的专用计算机。整个数控机床的功能强弱主要由这一部分决定。数控装置作为数控机床“指挥系统”，能完成信息的输入、存储、变换、插补运算以及实现各种控制功能。它具备的主要功能如下：

- ① 多轴联动控制。
- ② 直线、圆弧、抛物线等多种函数的插补。
- ③ 输入、编辑和修改数控程序功能。
- ④ 数控加工信息的转换功能：ISO/EIA 代码转化，米/英制转换，坐标转换，绝对值

和相对值的转换,计数制转换等。

⑤ 刀具半径、长度补偿,传动间隙补偿,螺距误差补偿等补偿功能。

⑥ 实现固定循环、重复加工、镜像加工等多种加工方式选择。

⑦ 在 CRT 上显示字符、轨迹、图形和动态演示等功能。

⑧ 具有故障自诊断功能。

⑨ 通信和联网功能。

### (3) 伺服系统

伺服系统由伺服驱动电动机和伺服驱动装置组成,是接收数控装置的指令驱动机床执行机构运动的驱动部件。它包括主轴驱动单元(主要是速度控制)、进给驱动单元(主要有速度控制和位置控制)、主轴电动机和进给电动机等。一般来说,数控机床的伺服驱动系统要求有好的快速响应性能,以及能灵敏且准确地跟踪指令的功能。数控机床的伺服系统有步进电动机伺服系统、直流伺服系统和交流伺服系统,现在常用的是后两者,都带有感应同步器、编码器等位置检测元件,而交流伺服系统正在取代直流伺服系统。

机床上的执行部件和机械传动部件组成数控机床的进给系统,它根据数控装置发来的速度和位移指令控制执行部件的进给速度、方向和位移量。每个进给运动的执行部件都配有一套伺服系统。伺服系统的作用是把来自数控装置的脉冲信号转换为机床移动部件的运动,它相当于手工操作人员的手,使工作台(或溜板)精确定位或按规定的轨迹作严格的相对运动,最后加工出符合图样要求的零件。

### (4) 反馈装置

反馈装置是闭环(半闭环)数控机床的检测环节,该装置可以包括在伺服系统中,它由检测元件和相应的电路组成,其作用是检测数控机床坐标轴的实际移动速度和位移,并将信息反馈到数控装置或伺服驱动中,构成闭环控制系统。检测装置的安装、检测信号反馈的位置,决定于数控系统的结构形式。无测量反馈装置的系统称为开环系统。由于先进的伺服系统都采用了数字式伺服驱动技术(称为“数字伺服”),伺服驱动和数控装置间一般都采用总线进行连接。反馈信号在大多数场合都是与伺服驱动进行连接,并通过总线传送到数控装置,只有在少数场合或采用模拟量控制的伺服驱动(称为“模拟伺服”)时,反馈装置才需要直接和数控装置进行连接。伺服电动机内装式脉冲编码器、感应同步器、光栅和磁尺等都是数控机床常用的检测器件。

伺服系统及检测反馈装置是数控机床的关键环节。

### (5) 机床本体

机床本体是数控机床的主体,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、滑鞍、导轨等。数控机床的主运动和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。为了保证数控机床的高精度、高效率和高自动化加工要求,机床的机械机构应具有较高的动态特性、动态刚度、耐磨性以及抗热变形的性能。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、排屑、防护、润滑、照明等一系列装置)和辅助装置(如对刀仪、编程机等)。对于加工中心类的数控机床,还有存放刀具的刀库、交换刀具的机械手等部件。数控机床中的机床本体,在开始阶段沿用普通机床,只是在自动变速、刀架或工作台自动转位和手柄等方面作些改变。随着数控技术的发展,对机床结构的技术性能要求更高,在总体布局、外观造型、传动系统结构、刀具系统以及操作性能方面都已经发生很大的变化。因为数控机床除切削用量大、连续

加工发热多等影响工件精度外，还由于在加工中自动控制，不能由人工进行补偿，所以其设计要求比通用机床更完善，制造要求比通用机床更精密。

1.2.2 数控机床工作过程

数控机床加工零件时，首先必须将工件的几何数据和工艺数据等加工信息按规定的代码和格式编制成零件的数控加工程序，这是数控机床的工作指令。将加工程序用适当的方法输入到数控系统，数控系统对输入的加工程序进行数据处理，输出各种信息和指令，控制机床主运动的变速、启停、进给的方向、速度和位移量，以及其他如刀具选择交换、工件的夹紧松开、冷却润滑的开关等动作，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、轨迹和参数进行工作。数控机床的运行处于不断地计算、输出、反馈等控制过程中，以保证刀具和工件之间相对位置的准确性，从而加工出符合要求的零件。数控机床加工工件的过程如图 1-6 所示。

机床依靠各个部件的相对运动实现零件的加工。在普通机床上，加工过程主要由人来控

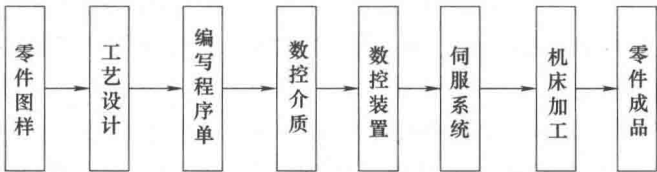


图 1-6 数控机床加工工件的过程

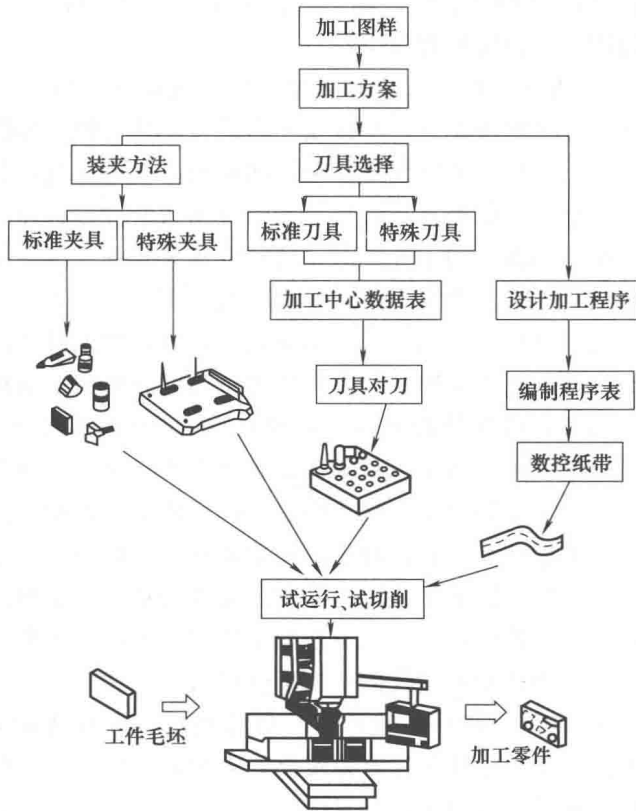


图 1-7 数控加工过程

制,如手摇进刀,主轴或进给电动机的停止也是靠按钮或行程开关来实现。而在数控机床上,机床各部件的相对运动和动作以数字指令方式控制,零件的加工过程自动完成。

数控机床的工作过程如图 1-7 所示,首先要将被加工零件图纸上的几何信息和工艺信息用规定的代码和格式编写成加工程序,然后将加工程序输入数控装置,按照程序的要求,经过数控系统信息处理、分配,使各坐标移动若干个最小位移量,实现刀具与工件的相对运动,完成零件的加工。

## 1.3 数控机床的特点及分类

### 1.3.1 数控机床的特点

数控机床是以电子控制为主的机电一体化机床,充分发挥了微电子、计算机技术特有的优点,易于实现信息化、智能化和网络化,可较容易地组成各种先进制造系统,如柔性制造系统(FMS)和计算机集成制造系统(CIMS)等,能最大限度地提高工业生产效率。利用硬件和软件相组合,能实现信息反馈、补偿、自动加减速等功能,可进一步提高机床的加工精度、效率和自动化程度。

数控机床对零件的加工过程,是严格按照加工程序所规定的参数及动作执行的。它是一种高效能自动或半自动机床。数控机床加工过程可任意编程,主轴及进给速度可按加工工艺需要变化,且能实现多坐标联动,易加工复杂曲面。对于加工对象具有“易变、多变、善变”的特点,换批调整方便,可实现复杂零件的多品种中小批柔性生产,适应社会对产品多样化的需求。

与普通加工设备相比,数控机床有如下特点:

① 数控机床有广泛的适应性和较大的灵活性。数控机床具有多轴联动功能,可按零件的加工要求变换加工程序,可解决单件、小批量生产的自动化问题。数控机床能完成很多普通机床难以胜任的零件加工作,如叶轮等复杂的曲面加工。由于数控机床能实现多个坐标的联动,因此它能完成复杂型面的加工,特别是对于可用数学方程式和坐标点表示的形状复杂的零件,加工非常方便。当改变加工零件时,数控机床只需更换零件加工的 NC 程序,不必用凸轮、靠模、样板或其他模具等专用工艺装备,且可采用成组技术的成套夹具。因此,其生产准备周期短,有利于机械产品的迅速更新换代。所以,数控机床的适应性非常强。

在汽车、轻工业产品等的生产方面,一直采用大量的组合机床自动线、流水线;在标准件等的大量生产中,采用凸轮或靠模控制的专用机床和自动机床。这些生产线适合于批量大、品种少的产品加工,其加工和调试过程很长,且投入资金大,一旦需要更换产品,则整个生产设备都要抛弃,重新建造新的生产线。因此其产品的适应性和灵活性很差。而现今社会的市场需求变化很快,要求产品多样化和快速地更新换代。传统的工艺装备已不能满足现今市场的需求,而数控机床以及以数控机床为基础的柔性制造系统能很好地适应市场需求变化,在数控机床上更换加工零件时,只需要更换加工程序,不需要重新设计凸轮、靠模、样板等工艺装备,是产品更新换代频繁时代的首选柔性设备。

② 数控机床的加工精度高,产品质量稳定。数控机床按照预先编制的程序自动加工,加工过程不需要人工干预,加工零件的重复精度高,零件的一致性好。对于同一批零件,由于使用同一机床和刀具及同一加工程序,刀具的运动轨迹完全相同,并且数控机床是根据数控程序实现计算机控制自动进行加工,可以避免人为的误差,这就保证了零件加工的一致性

好,且质量稳定可靠。

另外数控机床本身的精度高,刚度好,精度的保持性好,能长期保持加工精度。数控机床有硬件和软件的误差补偿能力,因此能获得比机床本身精度还高的零件加工精度。

③ 自动化程度高,生产效率高。数控机床本身的精度高、刚性大,可以采用较大的切削用量,停机检测次数少,加工准备时间短,有效地节省了机动工时。它还有自动换速、自动换刀和其他辅助操作自动化等功能,使辅助时间大为缩短,而且无需工序间的检验与测量,所以比普通机床的生产效率高3~4倍,对某些复杂零件的加工,生产效率可以提高十几倍甚至几十倍。数控机床的主轴转速及进给范围都比普通机床大。

④ 工序集中,一机多用。数控机床在更换加工零件时,可以方便地保存原来的加工程序及相关的工艺参数。不需要更换凸轮、靠模等工艺装备,也就没有这类工艺装备需要保存,因此可缩短生产准备时间,大大节省了占用厂房面积。加工中心等采用多主轴、车铣复合、分度工作台或数控回转工作台等复合工艺,可实现一机多能功能,实现在一次零件定位装夹中完成多工位、多面、多刀加工,省去工序间工件运输、传递的过程,减少了工件装夹和测量次数和时间,既可以提高加工精度,又可以节省厂房面积,提高了生产效率。

⑤ 有利于生产管理的现代化。采用数控机床加工零件,能准确地计算零件的加工工时,并有效地简化了检验、工装和半成品的管理工作;数控机床具有通信接口,可连接计算机,也可以连接到局域网上;这些都有利于使生产向计算机控制与管理生产方面发展,为实现生产过程自动化创造了条件。

数控机床是一种高度自动化机床,整个加工过程采用程序控制,数控加工前需要做好详尽的加工工艺、完成程序编制等,前期准备工作较为复杂。机床加工精度因受切削用量大、连续加工发热多等影响,使其设计要求比普通机床更加严格,制造要求更精密,因此数控机床的制造成本比较高。此外,数控机床属于典型的机电一体化产品,控制系统比较复杂、技术含量高,一些元器件、部件精密度较高,所以对数控机床的调试和维修比较困难。

### 1.3.2 数控机床的分类

如今数控机床已发展成品种齐全、规格繁多的满足现代化生产的主流机床。可以从不同的角度对数控机床进行分类和评价,通常按如下方法分类。

#### (1) 按工艺用途分类

1) 一般数控机床。这类机床和传统的通用机床种类一样,有数控的车、铣、镗、钻、磨床等,而且每一种又有很多品种,例如数控铣床中就有立铣、卧铣、工具铣、龙门铣等。这类机床的工艺性和通用机床相似,所不同的是它能加工复杂形状的零件。

2) 数控加工中心机床。这类机床是在一般数控机床的基础上发展起来的。它是在一般数控铣床上加装一个刀库(可容纳10~100多把刀具)和自动换刀装置而构成的一种带自动换刀装置的数控镗铣床,这使数控机床更进一步地向自动化和高效化方向发展。

数控加工中心机床和一般数控机床的区别是:工件经一次装夹后,数控装置就能控制机床自动地更换刀具,连续地对工件的各加工面自动完成铣、镗、钻、铰及攻螺纹等多工序加工。这类机床大多是以镗铣为主的,主要用来加工箱体零件。它和一般的数控机床相比具有如下优点:

① 减少机床台数,便于管理,对于多工序的零件只要一台机床就能完成全部加工,并可以减少半成品的库存量;

② 由于工件只要一次装夹,因此减少了由于多次安装造成的定位误差,可以依靠机床

精度来保证加工质量；

③ 工序集中，减少了辅助时间，提高了生产效率；

④ 由于零件在一台机床上一次装夹就能完成多道工序加工，因此大大减少了专用工夹具的数量，进一步缩短了生产准备时间。

由于数控加工中心机床的优点很多，因此它在数控机床生产中占有很重要的地位。

另外还有一类加工中心，是在车床基础上发展起来的，以轴类零件为主要加工对象。除可进行车削、镗削外，还可以进行端面和周面上任意部位的钻削、铣削和攻螺纹加工。这类加工中心也设有刀库，可安装 4~12 把刀具，习惯上称此类机床为“车削中心”。

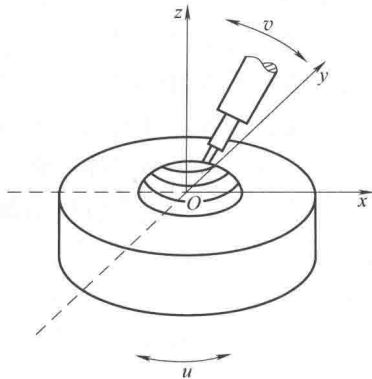


图 1-8 5 轴联动的数控加工

3) 多坐标数控机床。有些复杂形状的零件，用 3 坐标的数控机床还是无法加工，如螺旋桨、飞机曲面零件的加工等，需要 3 个以上坐标的合成运动才能加工出所需形状。于是出现了多坐标的数控机床，其特点是数控装置控制的轴数较多，机床结构也比较复杂，其坐标轴数通常取决于加工零件的工艺要求。现在常用的是 4、5、6 坐标的数控机床。图 1-8 为 5 轴联动的数控加工示意图。这时， $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个坐标与转台的回转、刀具的摆动可以同时联动，以加工机翼等类零件。

(2) 按运动控制的特点分类

按对刀具与工件间相对运动的轨迹的控制，可将数控机床分为点位控制数控机床、直线控制数控机床、轮廓控制数控机床等。

① 点位控制数控机床。机床只需控制刀具从某一位置移到下一个位置，不考虑其运动轨迹，只要求刀具能最终准确到达目标位置，即仅控制行程终点的坐标值，在移动过程中不进行任何切削加工，至于两相关点之间的移动速度及路线则取决于生产效率，如图 1-9 (a) 所示。为了在精确定位的基础上有尽可能高的生产效率，所以两相关点之间的移动先是以快速移动到接近新的位置，然后降速 1~3 级，使之慢速趋近定位点，以保证其定位精度。

点位控制可用于数控坐标镗床、数控钻床、数控冲床和数控测量机等机床的运动控制。用点位控制形式控制的机床称为“点位控制数控机床”。

② 直线控制数控机床。直线控制的数控机床是指能控制机床工作台或刀具以要求的进给速度，沿平行于坐标轴（或与坐标轴成 45° 的斜线）的方向进行直线移动和切削加工的机床，如图 1-9 (b) 所示。这类机床工作时，不仅要控制两相关点之间的位置，还要控制两相关点之间的移动速度和路线（轨迹）。其路线一般都由和各轴线平行的直线段组成。它和点位控制数控机床的区别在于：当机床的移动部件移动时，可以沿一个坐标轴的方向（一般地也可以沿

45°斜线进行切削,但不能沿任意斜率的直线切削)进行切削加工,而且其辅助功能比点位控制的数控机床多,例如,要增加主轴转速控制、循环进给加工、刀具选择等功能。

这类机床主要有简易数控车床、数控镗铣床等。相应的数控装置称为“直线控制装置”。

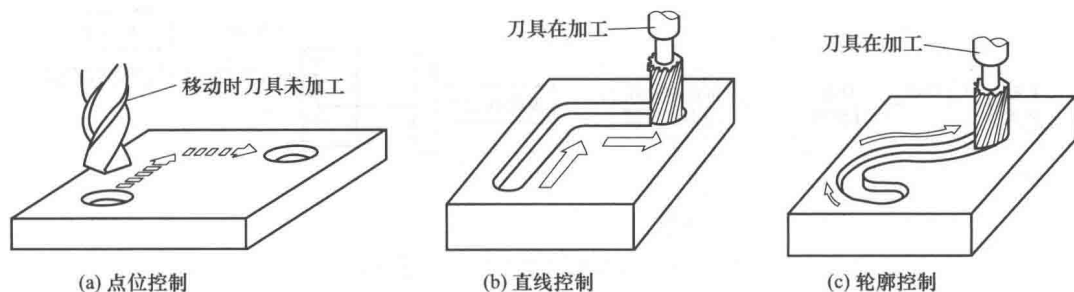


图 1-9 点位、直线、轮廓控制

③ 轮廓控制数控机床。这类机床的控制装置能够同时对两个或两个以上的坐标轴进行连续控制,如图 1-9 (c) 所示。加工时不仅要控制起点和终点,还要控制整个加工过程中每点的速度和位置,使机床加工出符合图纸要求的复杂形状的零件。大部分都具有两坐标或两坐标以上联动、刀具半径补偿、刀具长度补偿、机床轴向运动误差补偿、丝杠螺距误差补偿、齿侧间隙误差补偿等一系列功能。该类机床可加工曲面、叶轮等复杂形状零件。典型的有数控车床、数控铣床、加工中心等。其相应的数控装置称之为轮廓控制装置(或连续控制装置)。

轮廓控制的数控机床按照可联动(同时控制)轴数分为:2 坐标联动控制,2.5 坐标联动控制,3 坐标联动控制,4 坐标联动控制,5 坐标联动控制等。多坐标(3 坐标以上)控制与编程技术是高技术领域开发研究的课题,随着现代制造技术领域产品的复杂程度和加工精度的不断提高,多坐标联动控制技术及其加工编程技术的应用也越来越普遍。

### (3) 按伺服系统的控制方式分类

数控机床按照对被控制量有无检测反馈装置可以分为开环和闭环两种。在闭环系统中,根据测量装置安放的位置又可以将其分为全闭环和半闭环两种。在上述三种控制方式的基础上,还发展了混合控制型数控系统。

1) 开环控制数控机床。在开环控制中,机床没有检测反馈装置,如图 1-10 所示。数控装置发出信号的流程是单向的,所以不存在系统稳定性问题。由于信号的单向流程,它对机床移动部件的实际位置不作检验,因此机床加工精度不高,其精度主要取决于伺服系统的性能。在系统工作时,输入的数据经过数控装置运算分配出指令脉冲,通过伺服机构(伺服元件常为步进电动机)使被控工作台移动。

这类数控机床调试简单,系统也比较容易稳定,精度较低,成本低廉,多见于经济型的中小型数控机床和旧设备的技术改造中。

2) 闭环控制数控机床。因开环控制精度达不到精密机床和大型机床的要求,所以必须检测移动部件的实际工作位置。为此,在数控机床上增加了检测反馈装置,在加工中时刻检测机床移动部件的位置,使之和数控装置所要求的位置相符合,以期达到很高的加工精度。

如图 1-11 所示,伺服系统随时接收在工作台端测得的实际位置反馈信号,将其与数控装置发来的指令位置信号相比较,由其差值控制进给轴运动。这种具有反馈控制的系统,在电气上称为“闭环控制系统”。由于这种位置检测信号取自机床工作台(传动系统最末端执行件),因此可以消除整个传动系统的全部误差,系统精度高。但由于很多机械传动环节包

括在闭环控制的环路内，各部件的摩擦特性、刚性及间隙等非线性因素直接影响系统的稳定性，系统制造调试难度大，成本高。闭环系统主要用于一些精度很高的数控铣床、超精车床、超精磨床、大型数控机床等。

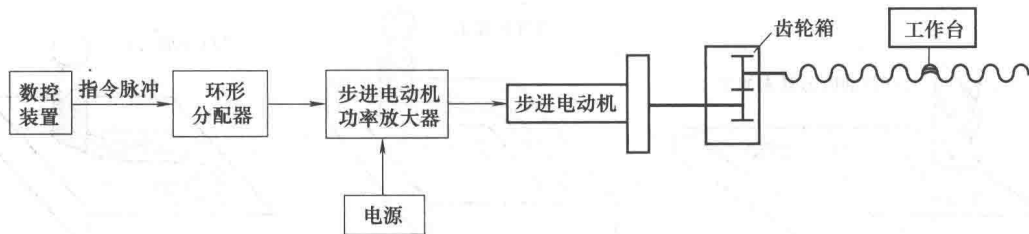


图 1-10 开环控制数控机床系统框图

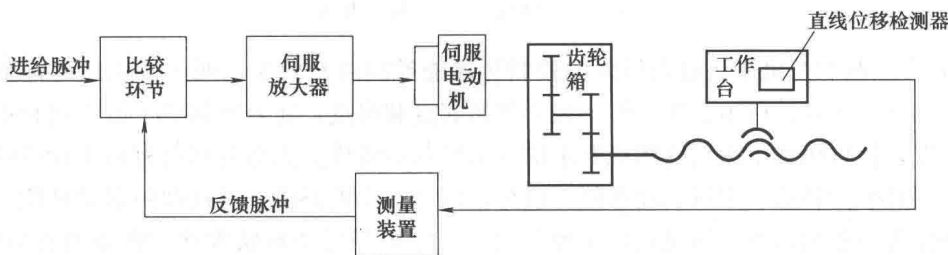


图 1-11 闭环控制数控机床系统框图

3) 半闭环控制的数控机床。这类机床的检测元件不是装在传动系统的末端，而是装在电动机轴或丝杠轴的端部，工作台的实际位置是通过测得的电动机轴的角位移间接计算出来的，因而控制精度没有闭环系统高，如图 1-12 所示。由于工作台没有完全包括在控制回路内，因而称之为“半闭环控制”。这种控制方式介于开环与闭环之间，精度没有闭环高，但可以获得稳定的控制特性，调试比闭环方便，因此目前大多数中、小型数控机床都采用这种控制方式。

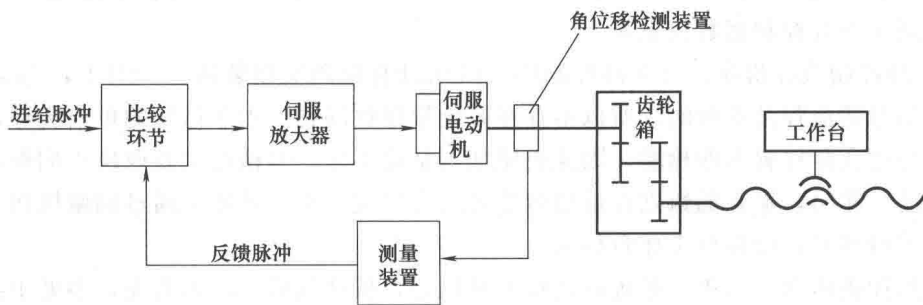


图 1-12 半闭环控制数控机床系统框图

4) 混合控制数控机床。将上述三种控制方式的特点有选择地集中起来，可以组成混合控制的方案。这主要在大型数控机床中应用。因为大型数控机床需要高得多的进给速度和返回速度，又需要相当高的精度。如果只采用全闭环的控制，机床传动链和工作台全部置于控制环节中，稳定性难以保证，因此常采用混合控制方式。在具体方案中它又可分为两种形式：一是开环补偿型；二是半闭环补偿型。

①开环补偿型。图 1-13 为开环补偿型控制方式。它的基本控制选用步进电动机的开环