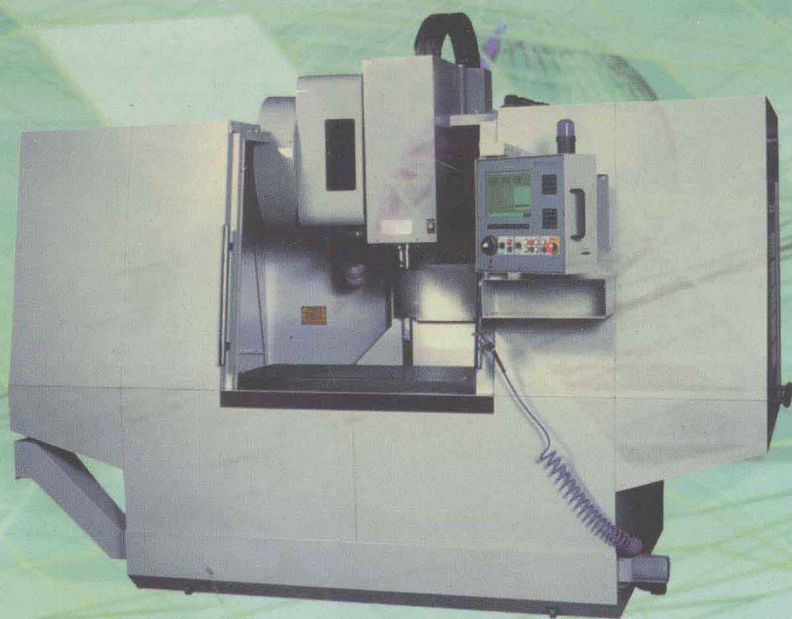


# 数控机床与编程

( 第二版 )

主 编 仲兴国

副主编 刘振江 郑 智 赵显日



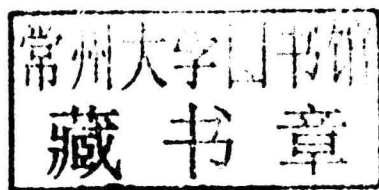
东北大学出版社  
Northeastern University Press

# 数 控 机 床 与 编 程

(第二版)

主 编 仲兴国

副主编 刘振江 郑 智 赵显日



东北大学出版社

• 沈 阳 •

©仲兴国 2011

## 图书在版编目 (CIP) 数据

数控机床与编程 / 仲兴国主编. —2 版. — 沈阳 : 东北大学出版社, 2011.6  
ISBN 978-7-81102-367-1

I. ①数… II. ①仲… 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 (2011) 第 090607 号

## 内 容 简 介

本书以实际应用为主线, 以 FANUC 系统为主, 重点讲述了数控车床、数控铣床和加工中心加工与编程技术, 以及计算机自动编程技术。内容全面, 条理清晰, 实例丰富。

全书共分 6 章。第 1 章数控加工概述; 第 2 章数控加工工艺; 第 3 章数控车床编程; 第 4 章数控铣床编程; 第 5 章加工中心编程; 第 6 章自动编程。

本书可作为高等学校机械类本、专科各专业教材, 也可作为从事数控加工的技术人员和操作人员的培训教材。

---

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph@neupress.com

Web: <http://www.neupress.com>

印 刷 者: 沈阳市第二印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm×260mm

印 张: 13.25

字 数: 347 千字

出版时间: 2011 年 6 月第 2 版

印刷时间: 2011 年 6 月第 2 次印刷

责任编辑: 王兆元

责任校对: 姜 亮

封面设计: 唐敏智

责任出版: 李世鹏

---

ISBN 978-7-81102-367-1

定 价: 28.00 元

# 再 版 前 言

制造业是各种产业的支柱工业。数控技术和数控机床是制造工业现代化的重要基础。数控机床作为一种精密、高效的加工设备，越来越成为机械制造业技术的首选设备。数控机床的广泛应用，给机械制造业的产业结构、产品种类和档次以及生产方式带来了根本性的变革，并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。随着制造设备的大规模数控化，企业急需一大批掌握数控机床应用技术的人员。

为适应数控技术现代化的要求，作为一名合格的数控机床操作者，不但要学习普通机床操作所需的专业理论知识（制图、机械基础、加工工艺等课程），而且要系统学习数控方面的专业理论知识（数控加工工艺、数控编程）的相关知识。结合多年教学与实践经验，我们编写了这本教材。

本书共分 6 章，全面介绍了数控机床的结构组成、加工工艺、FANUC 数控系统的编程技术等。本书以实用为基础，根据企业的实际需求选取相应的教材内容，注重案例教学，突出培养机械类应用型人才的实际问题解决能力，满足“应用为本，学以致用”的理念，目的在于普及与提高数控加工技术，培养数控机床编程人员。

本书由仲兴国担任主编，刘振江、郑智、赵显日任副主编。仲兴国（沈阳理工大学应用技术学院）撰写第 1，5 章；刘振江（沈阳理工大学应用技术学院）撰写第 2，第 4 章，郑智（沈阳理工大学应用技术学院）撰写第 3 章；赵显日（辽宁石化职业技术学院）撰写第 6 章。由于作者水平所限，请广大读者对书中错误之处予以指正。

编 者

2011 年 4 月

# 目 录

|                              |          |
|------------------------------|----------|
| <b>第1章 数控加工概述 .....</b>      | <b>1</b> |
| 1.1 数控加工在机械制造业中的地位和作用 .....  | 1        |
| 1.2 数控技术概论 .....             | 1        |
| 1.2.1 数控技术的产生 .....          | 1        |
| 1.2.2 数控的定义 .....            | 1        |
| 1.2.3 数控机床的应用范围 .....        | 1        |
| 1.3 传统加工和数控加工 .....          | 2        |
| 1.4 数控机床的发展 .....            | 2        |
| 1.5 数控加工过程 .....             | 3        |
| 1.5.1 数控机床的组成 .....          | 3        |
| 1.5.2 数控机床的工作过程 .....        | 4        |
| 1.6 数控机床的分类 .....            | 5        |
| 1.7 插补的基本知识 .....            | 5        |
| 1.7.1 插补的概念 .....            | 5        |
| 1.7.2 插补方法的分类 .....          | 6        |
| 1.8 数控加工人员的要求 .....          | 7        |
| 1.8.1 数控编程人员 .....           | 7        |
| 1.8.2 数控操作人员 .....           | 7        |
| 1.9 学习本课程的方法 .....           | 7        |
| <b>第2章 数控加工工艺 .....</b>      | <b>8</b> |
| 2.1 零件加工工艺规程 .....           | 8        |
| 2.1.1 机械加工工艺总过程 .....        | 8        |
| 2.1.2 加工零件分析 .....           | 8        |
| 2.1.3 确定毛坯 .....             | 9        |
| 2.1.4 加工工艺路线的制定 .....        | 10       |
| 2.2 数控加工工艺设计过程 .....         | 13       |
| 2.2.1 数控加工工艺一般过程 .....       | 13       |
| 2.2.2 数控加工内容的选择 .....        | 14       |
| 2.2.3 数控加工要求分析 .....         | 15       |
| 2.2.4 选用数控机床 .....           | 16       |
| 2.2.5 数控加工方案 .....           | 17       |
| 2.2.6 加工程序编写与校验 .....        | 18       |
| 2.2.7 数控加工技术文件归档 .....       | 19       |
| 2.3 数控切削刀具 .....             | 20       |
| 2.3.1 数控刀具在数控加工中的地位和作用 ..... | 20       |
| 2.3.2 数控加工对刀具的要求 .....       | 21       |
| 2.3.3 数控刀具系统 .....           | 23       |
| 2.4 数控机床切削用量的选择 .....        | 27       |

|       |                            |    |
|-------|----------------------------|----|
| 2.4.1 | 切削用量 .....                 | 27 |
| 2.4.2 | 切削用量对机械加工的影响 .....         | 27 |
| 2.4.3 | 切削用量选择原则 .....             | 28 |
| 2.4.4 | 切削用量的选择方法 .....            | 28 |
| 2.4.5 | 数控车床切削用量的选择 .....          | 29 |
| 2.4.6 | 数控铣床切削用量的选择 .....          | 31 |
| 2.4.7 | 加工中心切削用量的选择 .....          | 33 |
| 2.5   | 工件的装夹与定位 .....             | 33 |
| 2.5.1 | 工件装夹与定位原理 .....            | 33 |
| 2.5.2 | 定位方式和定位组件 .....            | 35 |
| 2.5.3 | 数控机床夹具 .....               | 41 |
| 第3章   | 数控车床编程 .....               | 44 |
| 3.1   | 数控车床概述 .....               | 44 |
| 3.1.1 | 数控车床的工艺范围和特点 .....         | 44 |
| 3.1.2 | 典型的数控车床组成 .....            | 45 |
| 3.1.3 | 数控车床的分类 .....              | 49 |
| 3.2   | 数控车床坐标系及机床各点 .....         | 50 |
| 3.3   | 加工程序基本规定 .....             | 51 |
| 3.3.1 | 加工程序概述 .....               | 51 |
| 3.3.2 | 加工程序指令字格式 .....            | 52 |
| 3.3.3 | 加工程序指令字的功能 .....           | 53 |
| 3.4   | 零点偏置与对刀操作 .....            | 56 |
| 3.5   | 基本编程指令 .....               | 60 |
| 3.5.1 | 公制输入和英制输入 G21、G20 .....    | 60 |
| 3.5.2 | 快速定位指令 G00 .....           | 60 |
| 3.5.3 | 直线插补指令 G01 .....           | 60 |
| 3.5.4 | 圆弧插补指令 G02、G03 .....       | 61 |
| 3.5.5 | 暂停指令 G04 .....             | 64 |
| 3.6   | 单一固定循环指令 .....             | 64 |
| 3.6.1 | 外(内)圆车削循环指令 G90 .....      | 64 |
| 3.6.2 | 端面车削循环指令 G94 .....         | 67 |
| 3.7   | 复合固定循环指令 .....             | 68 |
| 3.7.1 | 外(内)径粗车复合循环指令 G71 .....    | 68 |
| 3.7.2 | 端面粗车复合循环指令 G72 .....       | 71 |
| 3.7.3 | 仿形粗车复合循环指令 G73 .....       | 72 |
| 3.8   | 螺纹加工指令 .....               | 74 |
| 3.8.1 | 单行程螺纹切削 G32 .....          | 74 |
| 3.8.2 | 螺纹切削单一固定循环 G92 .....       | 76 |
| 3.8.3 | 螺纹切削复合循环 G76 .....         | 77 |
| 3.9   | 刀尖半径补偿指令和恒线速度指令 .....      | 78 |
| 3.9.1 | 刀尖半径补偿指令 G40、G41、G42 ..... | 78 |
| 3.9.2 | 恒定切削速度功能指令 G96 和 G97 ..... | 79 |
| 3.10  | 子程序 .....                  | 80 |

|                                           |            |
|-------------------------------------------|------------|
| 3.11 用户宏程序 .....                          | 82         |
| 3.12 数控车床编程综合实例 .....                     | 84         |
| <b>第4章 数控铣床编程 .....</b>                   | <b>90</b>  |
| 4.1 数控铣床概述 .....                          | 90         |
| 4.1.1 数控铣床 .....                          | 90         |
| 4.1.2 数控铣削加工的主要对象 .....                   | 92         |
| 4.2 数控铣削工艺 .....                          | 95         |
| 4.2.1 数控铣削刀具路径拟定 .....                    | 95         |
| 4.2.2 铣削刀具的选择 .....                       | 100        |
| 4.3 数控铣削加工程序的编制 .....                     | 102        |
| 4.3.1 数控铣床的坐标系 .....                      | 102        |
| 4.3.2 数控编程指令概述 .....                      | 104        |
| 4.3.3 刀具半径补偿指令 .....                      | 107        |
| 4.3.4 旋转功能 .....                          | 110        |
| 4.3.5 缩放、镜像和极坐标功能 .....                   | 111        |
| 4.3.6 宏程序 .....                           | 112        |
| 4.4 数控铣削加工工艺典型示例 .....                    | 116        |
| 4.4.1 铣削轮廓类零件的工艺与编程 .....                 | 116        |
| 4.4.2 平面凸轮的数控铣削加工工艺与编程 .....              | 120        |
| 4.4.3 椭圆轮廓的数控铣削加工工艺与编程 .....              | 124        |
| <b>第5章 加工中心编程 .....</b>                   | <b>132</b> |
| 5.1 加工中心概述 .....                          | 132        |
| 5.1.1 加工中心的概念和主要优势 .....                  | 132        |
| 5.1.2 镗铣加工中心的两种类型 .....                   | 133        |
| 5.1.3 加工中心的特点与工艺范围 .....                  | 134        |
| 5.1.4 加工中心编程的特点 .....                     | 135        |
| 5.2 加工中心换刀及长度补偿指令 .....                   | 136        |
| 5.2.1 加工中心换刀指令 .....                      | 136        |
| 5.2.2 G43/G44/G49——FANUC 系统刀具长度补偿指令 ..... | 137        |
| 5.3 钻孔、扩孔、铰孔加工工艺编程 .....                  | 138        |
| 5.3.1 孔加工概述 .....                         | 138        |
| 5.3.2 实体上钻孔加工 .....                       | 139        |
| 5.3.3 扩孔加工 .....                          | 141        |
| 5.3.4 铰孔加工 .....                          | 142        |
| 5.3.5 孔加工固定循环格式 .....                     | 143        |
| 5.3.6 钻孔加工循环及应用 .....                     | 145        |
| 5.3.7 孔加工工艺编程实例 .....                     | 148        |
| 5.4 攻丝工艺编程 .....                          | 151        |
| 5.4.1 螺纹孔的加工方法 .....                      | 151        |
| 5.4.2 攻丝循环 G84、G74 格式 .....               | 152        |
| 5.4.3 攻丝工艺数据的确定 .....                     | 153        |
| 5.5 铰孔工艺、编程 .....                         | 155        |

|       |                     |     |
|-------|---------------------|-----|
| 5.5.1 | 铰孔加工工艺 .....        | 155 |
| 5.5.2 | 铰孔工艺编程实例 .....      | 157 |
| 5.6   | 镗孔工艺、编程 .....       | 160 |
| 5.6.1 | 镗孔加工概述 .....        | 160 |
| 5.6.2 | 镗刀及选用 .....         | 160 |
| 5.6.3 | 镗孔循环 .....          | 161 |
| 5.6.4 | 镗孔工艺和编程实例 .....     | 163 |
| 第6章   | 自动编程 .....          | 167 |
| 6.1   | 概 述 .....           | 167 |
| 6.1.1 | CAM 编程的学习训练要点 ..... | 167 |
| 6.1.2 | CAM 编程基本实现过程 .....  | 168 |
| 6.1.3 | 数控加工刀具 .....        | 170 |
| 6.2   | UG 操作入门 .....       | 171 |
| 6.2.1 | 新建及打开文件 .....       | 171 |
| 6.2.2 | 鼠标的使用方法 .....       | 173 |
| 6.3   | 表面铣实例 .....         | 173 |
| 6.3.1 | CAM 设置 .....        | 175 |
| 6.3.2 | 创建几何体 .....         | 175 |
| 6.3.3 | 创建刀具 .....          | 177 |
| 6.3.4 | 创建操作 .....          | 178 |
| 6.3.5 | 设置几何体 .....         | 179 |
| 6.3.6 | 刀轨设置 .....          | 179 |
| 6.3.7 | 操 作 .....           | 179 |
| 6.4   | 型腔类型加工 .....        | 180 |
| 6.4.1 | 加工工艺分析 .....        | 181 |
| 6.4.2 | CAM 设置 .....        | 182 |
| 6.4.3 | 创建几何体 .....         | 182 |
| 6.4.4 | 创建刀具 .....          | 183 |
| 6.4.5 | 创建开粗操作 .....        | 183 |
| 6.4.6 | 创建精加工操作 .....       | 187 |
| 6.5   | 三维铣削加工 .....        | 189 |
| 6.5.1 | 加工工艺分析 .....        | 190 |
| 6.5.2 | CAM 设置 .....        | 191 |
| 6.5.3 | 创建几何体 .....         | 191 |
| 6.5.4 | 创建刀具 .....          | 192 |
| 6.5.5 | 创建开粗操作 .....        | 193 |
| 6.5.6 | IPW 残料加工 .....      | 195 |
| 6.6   | 点位加工 .....          | 197 |
| 6.6.1 | CAM 设置 .....        | 197 |
| 6.6.2 | 创建几何体 .....         | 197 |
| 6.6.3 | 创建刀具 .....          | 199 |
| 6.6.4 | 创建点钻操作 .....        | 199 |
| 6.6.5 | 创建钻通孔操作 .....       | 201 |

# 第 1 章 数控加工概述

## 1.1 数控加工在机械制造业中的地位和作用

数控机床是一种由计算机组成的计算装置控制的、高效的自动化机床，它综合应用了电子计算机、自动控制技术、伺服驱动、精密测量技术、液压传动和机床结构等方面的最新成就，具有高柔性、高精度与高度自动化的特点，适用于高精度、零件形状复杂的单件、小批量生产。

数控技术是用数字信息对机械运动和工作过程进行控制的技术；是制造业实现自动化、柔性化、集成化生产的基础；是提高产品质量、提高劳动生产率必不可少的手段；是关系到国家战略地位和体现国家综合国力水平的重要基础性技术。

数控机床的出现以及它所带来的巨大效益，引起世界各国科技界和工业界的普遍重视。几十年来，数控机床在品种、数量、加工范围和加工精度等方面有了惊人的发展。随着电子元件的发展，数控装置经历了使用电子管、分立元件、集成电路的过程。特别是使用了小型计算机和微处理机以来，数控机床的性能价格比日趋合理，可靠性日益提高。工业发达的国家中，数控机床在工业、国防等领域的应用已相当普遍，已由开始阶段的解决单件、小批量复杂形状的零件加工，发展到为减轻劳动强度、提高劳动生产率、保证质量、降低成本等，而在中批量生产甚至大批量生产中得到应用。发展数控机床是当前机械制造业技术改造的必由之路，是未来工厂自动化的基础。

## 1.2 数控技术概论

### 1.2.1 数控技术的产生

数字控制技术（简称数控技术）产生于 20 世纪中期。该技术最早可以追溯到 1952 年。它的出现与美国空军、美国麻省理工学院等密不可分。直到 20 世纪 60 年代早期，数控技术才开始应用在产品制造领域。数控技术真正繁荣的时代是在 1972 年前后随着计算机数控技术的产生而到来的。

### 1.2.2 数控的定义

数字控制可以定义为通过机床控制系统用特定的编程代码对机床进行操作。

数控是数字控制（Numerical Control）的简称，日前的数控一般采用通用或专用计算机来实现数字程序控制，因此数控也称为计算机数控（Computer Numerical Control, CNC）。

### 1.2.3 数控机床的应用范围

#### 1. 适宜数控机床加工的范围

(1) 能加工轮廓形状特别复杂或难以控制尺寸的零件。

(2) 能加工超精零件。

(3) 能加工普通机床不能（或不便）加工的多种零件。例如，用数学模型描述的复杂曲线类零件及三维空间曲面类零件。

(4) 能加工经一次装夹定位后，需进行多道工序加工的零件。

(5) 在数控机床上加工零件，能明显缩短加工的准备时间，降低生产费用。

(6) 采用数控机床加工，能有效地减少加工中的辅助时间，较大地提高生产率。

(7) 数控机床加工能修改加工程序，给新品的开发、原产品的改进与改型提供了方便。

## 2. 不适宜数控机床加工的范围

(1) 加工轮廓简单、精度要求低或生产批量又特别大的零件。

(2) 装夹困难或必须依靠人工找正、定位才能保证其加工精度的单件零件。

(3) 加工余量特别大，或材质及余量都不均匀的坯件。

(4) 加工中，刀具的质量（主要是耐用度）特别差时。

## 1.3 传统加工和数控加工

传统加工和数控加工基本加工方式是类似的。

对于传统加工，机床操作员用手操作机床完成零件的加工时，需要依赖各种手柄和刻度。加工的精度和工件的一致性在很大程度上取决于操作者的技术水平、身体状况和工作态度，因而对操作者的操作技能要求较高。

数控加工是一种现代化的自动控制过程，主要依赖各种先进的控制系统和自动检测元件来代替手工操作，加工的精度和工件的一致性在很大程度上取决于机床的精度和程序的正确度。

数控加工技术具有以下特点：加工效率高，加工精度高，劳动强度低，适应能力强，准备时间短，适合复杂零件的加工，易于建立计算机通信网络，有利于生产管理。不足之处就是数控机床价格昂贵，加工成本高，技术复杂，对工艺和编程要求较高，加工中难以调整，维修困难。需要切实解决好加工工艺与程序编制、刀具的供应、编程与操作人员的培训等问题。

## 1.4 数控机床的发展

世界上第一台数控机床由美国帕森斯公司与麻省理工学院合作研制，1952 年公开展示。数控机床的发展先后经历了五代。

第一代：电子管（1952 年）

第二代：晶体管（1959 年）

第三代：小规模集成电路（1965 年）

第四代：大规模集成电路及小型计算机（1970 年）

第五代：微处理机或微型计算机（1974 年）

前三代系统采用专用电子线路实现的硬件式数控系统，一般称为普通数控系统，简称 NC。

第四代和第五代系统是采用微处理器及大规模或超大规模集成电路组成的软件式数控系

统，称为现代数控系统，简称 CNC（第四代）和 MNC（第五代）。由于现代数控系统的控制功能大部分由软件技术来实现，功能更加灵活和完善。日前现代数控系统几乎完全取代了以往的普通数控系统。

具有代表性的数控公司（或厂家）有日本的法那克公司、德国的西门子公司、美国的 A-B 公司、西班牙的法格公司、法国的 NUM 公司等。

从普通数控机床（特别是数控车床）到加工中心机床，现已发展到了较为成熟的柔性制造单元（简称 FMC）和柔性制造系统（简称 FMS），超级数控机床——计算机集成制造系统（简称 CIMS）。

数控系统（计算机）已发展到 64 位机和多 CPU 系统；可控坐标轴数达 20 轴以上，联动坐标轴数在 10 轴以上；分辨率（最小设定单位）已普遍达到  $0.01 \sim 0.001$ ，少数机床已发展到  $0.0001 \text{ mm}$ ；快速行程提高到了  $240 \text{ m/min}$ 。

我国数控机床的研制始于 1958 年，由北京机床研究所和清华大学研制的电子管式开环步进驱动数控机床开始。1966 年我国诞生了第一台用直线-圆弧插补的晶体管数控系统。1972 年，集成数字电路的数控系统在清华大学研制成功，数控技术开始推广应用，其中以数控线切割机床发展最快。1980 年以来，通过研究和引进技术，我国数控机床发展很快，现已掌握了 5~6 轴联动、螺距误差补偿、图形显示和高精度伺服系统等多项关键技术。

我国数控系统比较典型的有华中、航天、蓝天及广数等。

## 1.5 数控加工过程

### 1.5.1 数控机床的组成

数控机床的基本结构如图 1-1 所示。数控机床一般由数控系统、伺服系统、强电控制柜、机床本体和各类辅助装置组成。

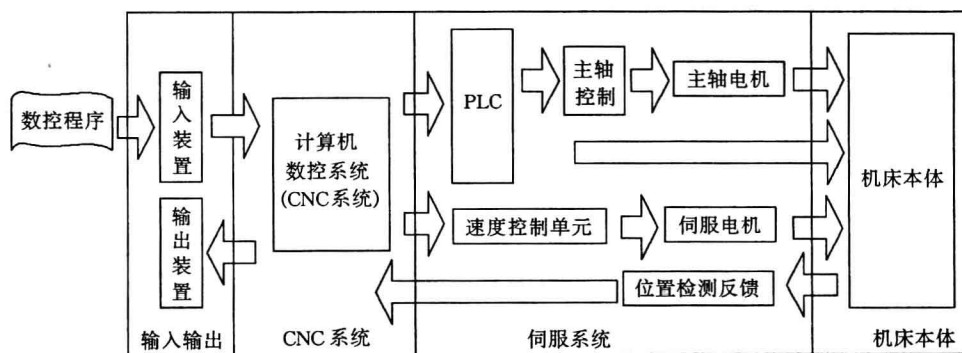


图 1-1 数控机床的基本结构

#### 1. 数控系统

数控系统是机床实现自动加工的核心，是整个数控机床的灵魂所在。主要由输入装置、监视器、计算机数字控制系统、可编程控制器、各类输入/输出接口等组成。

#### 2. 伺服系统

伺服系统是数控系统和机床本体之间的电传动联系环节，主要有两种：一种是进给伺服系统，它控制机床各坐标轴的切削进给运动，以沿导轨的直线运动为主；另一种是主轴伺服

系统，它控制主轴的旋转运动，提供切削动力。

### 3. 辅助装置

辅助装置主要包括自动换刀装置 ATC (Automatic Tool Changer)、自动交换工作台机构 APC (Automatic Pallet changer、工件夹紧放松机构、回转工作台、液压控制系统、润滑装置、切削液装置、排屑装置、过载和保护装置等。现代数控机床采用可编程控制器与数控装置共同完成对数控机床辅助装置的控制。

### 4. 强电控制柜

强电控制柜主要用来安装机床强电控制的各种电气元器件，除了提供数控、伺服等一类弱电控制系统的输入电源，以及各种短路、过载、欠压等电气保护外，主要在 PLC 的输出接口与机床各类辅助装置的电气执行元件之间起桥梁连接作用，控制机床辅助装置的各种交流电动机、液压系统电磁阀或电磁离合器等。此外，它也与机床操作台上有关的手动按钮连接。强电控制柜由各种中间继电器、接触器、变压器、电源开关、接线端子和各类电气保护元器件等构成。

### 4. 机床本体

数控机床的本体指其机械结构实体。它与传统的普通机床相比较，同样由主传动系统、进给传动机构、工作台、床身以及立柱等部分组成，但数控机床的整体布局、外观造型、传动机构、工具系统及操作机构等方面都发生了很大的变化。归纳起来包括以下几个方面的变化。

(1) 主传动及主轴部件。主传动及主轴部件具有传递功率大、刚度高、抗震性好及热变形小等优点。

(2) 进给传动件。进给传动件包括滚珠丝杠、导轨等，具有传动链短、结构简单、传动精度高等特点。

(3) 加工中心具有完善的刀具自动交换和管理系统。

(4) 一些数控机床具有工件自动交换、工件夹紧和放松机构。

(5) 机床本身具有很高的动、静刚度。

(6) 采用全封闭罩壳。由于数控机床是自动完成加工，为了操作安全等，一般采用移动门结构的全封闭罩壳，对机床的加工部件进行全封闭。

## 1.5.2 数控机床的工作过程

如图 1-2 所示为数控设备的一般工作原理图。

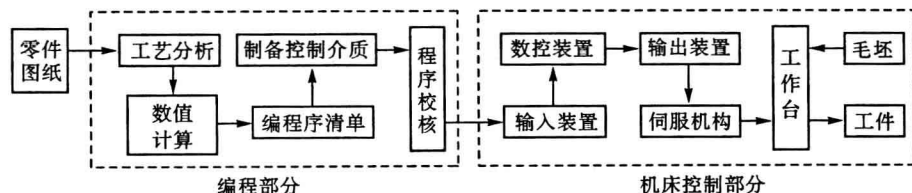


图 1-2 数控设备的一般工作原理

数控设备是按照事先编制好的数控加工程序对零件进行加工的高效自动化设备。因此首先需要对零件图样的技术特征、几何形状、尺寸和工艺等加工要求进行系统分析，确定合理正确的加工方案和加工路线，然后，按照数控机床规定采用的代码和程序格式，根据加工要求编制出数控加工程序。数控加工程序可以记录在信息载体上，也可以通过某种方式输入数

控设备，再由数控设备中的数控系统对数控加工程序进行译码和预处理，接着由插补器进行插补计算，逐点计算并确定各线段的起、终点之间一系列的中间点的坐标及各轴的运动方向、大小和速度，分别向各轴发出运动序列指令，完成零件的加工。

## 1.6 数控机床的分类

数控机床的种类很多，可以根据不同的方法进行分类。按加工原理，数控机床可分为以下三种。

### 1. 普通数控机床

对于普通数控机床，按切削方式不同，可分为数控车床、数控铣床、数控钻床、数控镗床、数控磨床，以车削为主兼顾铣、钻削的车削中心；具有铣、镗、钻削功能，带刀库和自动换刀装置的镗铣加工中心（简称加工中心）等。其加工原理是用切削刀具对零件进行切削加工。

### 2. 特种加工数控机床

对于特种加工数控机床，如数控电火花线切割机床，对硬度很高的工件进行切割加工；如电火花成形加工数控机床，采用电火花原理对工件的形腔进行加工。

### 3. 成形加工数控机床

指具有通过物理方法改变工作形状功能的数控机床，如数控折弯机、数控冲床、数控弯管机等。

数控机床按照对伺服驱动被控量有无检测反馈装置可分为开环控制和闭环控制，而在闭环系统中，根据测量装置安装的部位不同又分为全闭环控制和半闭环控制两种。

(1) 开环控制数控机床：系统没有检测反馈装置。

(2) 闭环控制数控机床：在机床移动部件直接安装直线位移检测装置。

(3) 半闭环控制数控机床：将角位移检测元件安装在伺服电动机轴或滚珠丝杠的端部。

## 1.7 插补的基本知识

### 1.7.1 插补的概念

机床数字控制的核心问题之一，就是如何控制刀具与工件的相对运动，从而加工出合格的产品。加工平面直线或曲线需要两个坐标协调运动，加工空间曲线或曲面则需要3个或3个以上坐标协调运动，才能走出相应轨迹。这里所说的协调运动，是指机床联动过程中各个坐标轴的运动顺序、方向、位移和速度要同时协调地进行控制的运动。一般情况下，在进行数控加工时，加工程序中已给出运动轨迹的起点坐标、终点坐标和轨迹的曲线方程，由数控系统控制执行机构按预定的轨迹运动。这需要数控系统实时地计算出轮廓起点到终点之间的一系列中间点的坐标值，即需要“插入”、“补上”运动轨迹各个中间点的坐标，这个过程称为“插补”。所谓插补，实质是根据零件轮廓尺寸，结合精度和工艺等方面的要求，在已知的特征点之间计算出刀具的一系列加工的中间点的过程，即完成所谓的数据“密化”工作。

组成零件轮廓的基本线型是直线和圆弧，一些复杂的曲线经过处理后，也可以用直线和圆弧去逼近。因此在数控加工时，数控系统根据加工程序中的相关信息（如零件几何要素的

起点坐标、终点坐标、圆心坐标、圆弧半径等), 按一定的方法产生直线、圆弧等基本线型, 用这些基本线型去逼近加工零件的轮廓轨迹。同时, 通过数控系统内规定的运算, 把轮廓轨迹计算出来, 并且一边计算一边根据计算结果向相关坐标轴分配脉冲等指令信号, 伺服机构则将这些指令信号进行放大后驱动执行电机, 使刀具或工作台沿着有关坐标轴运动, 逐步加工出既定的轮廓形状。

如图 1-3 所示, 被加工零件的轮廓形状是直线 OE。数控机床在加工该零件时, 刀具的移动可以是沿图中实折线运动, 也可以是沿虚折线运动, 还可以是其他进给路线。刀具沿什么样的折线进给, 是由数控系统采用的插补方法决定的。

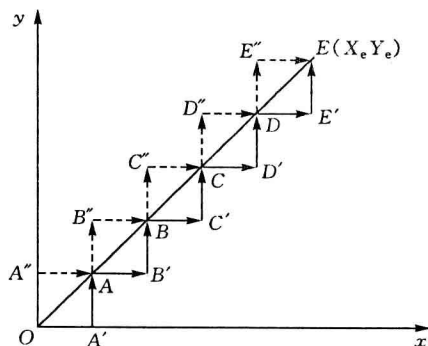


图 1-3 直线插补轨迹

### 1.7.2 插补方法的分类

在计算机数控系统中, 插补功能由软件或软硬件结合来实现, 称为插补器。插补器的形式很多, 由于插补工作可以由硬件电路或软件程序完成, 因而分为硬件插补器和软件插补器。软件插补器结构简单, 比较灵活, 现代数控系统多采用软件插补器。完全是硬件的插补器已经逐渐被淘汰, 只在特殊应用场合或作为软硬件结合插补时的第二级插补使用。按数学模型来分, 有一次(直线)插补器、二次(圆、抛物线等)插补器及高次曲线插补器等。由于组成零件轮廓的基本线型是直线和圆弧, 所以目前大多数数控机床的数控系统都具有直线插补器和圆弧插补器。根据插补所采用的原理和计算方法的不同, 可以有许多插补方法, 目前应用的插补方法分为脉冲增量插补和数字增量插补两大类。

#### 1. 脉冲增量插补

脉冲增量插补又称基准脉冲插补, 适用于用步进电机驱动的开环数控系统中。在控制过程中, 通过向各个运动轴分配脉冲, 控制机床坐标轴做相互协调的运动, 从而加工出特定轮廓形状的零件。因为这类插补算法的输出是脉冲形式, 并且每次仅产生一个单位的行程增量, 故称之为脉冲增量插补。每个单位脉冲对应坐标轴的位移量大小, 称之为脉冲当量。脉冲当量是脉冲分配的基本单位, 也对应于内部数据处理的一个二进制位, 它决定了数控机床的加工精度, 对于普通数控机床, 一般脉冲当量在  $0.01 \sim 0.005 \text{ mm}$  之间, 对于较为精密的数控机床, 脉冲当量可为  $1\mu\text{m}$  或  $0.1\mu\text{m}$ , 甚至更高。

由于脉冲增量插补误差不大于一个脉冲当量, 并且其输出的脉冲速率主要受插补程序所用时间的限制, 所以, 数控系统精度与切削速度之间是相互影响的。例如, 实现某脉冲增量插补算法大约需要  $50\mu\text{s}$  的处理时间, 当系统脉冲当量为  $0.001 \text{ mm}$  时, 则可求得单个运动坐标轴的极限速度约为  $1.2 \text{ m/min}$ 。当要求控制两个或两个以上坐标轴时, 所获得的轮廓速度还将进一步降低。反之, 如果将系统单轴极限速度提高到  $12 \text{ m/min}$ , 则要求将脉冲当量增大到  $0.01 \text{ mm}$ 。可见, 数控系统的这种制约关系限制了其精度和速度的提高。

脉冲增量插补算法很多, 最常用的是逐点比较法、数字积分法及它们的派生算法。

#### 2. 数据采样插补

数字增量插补又称数据插补, 适用于用直流伺服电动机或交流伺服电动机为驱动装置的半闭环或闭环数控系统。数据采样插补又称为时间分割法, 与脉冲增量插补法不同, 数据采

样插补法得出的不是进给脉冲,而是用二进制表示的进给量。这种方法是根据程编进给速度 $F$ ,将给定轮廓曲线按插补周期 $T$ (某一单位时间间隔)分割为插补进给段(轮廓步长),即用一系列首尾相连的微小线段来逼近给定曲线。在这类数控系统中,每调用一次插补程序,就计算出坐标轴在每个插补周期中的位置增量,然后求得坐标轴的相应位置给定值,再与采样所获得的实际位置反馈值相比较,求得相应的位置跟踪误差。数控系统就根据当前的位置误差计算出进给坐标轴的速度给定值,并将其输出给驱动装置,然后通过电动机带动丝杠和工作台朝着减小误差的方向运动,从而保证了整个系统的加工精度。

## 1.8 数控加工人员的要求

在数控领域,技能通常掌握在两类人手中:一是从事编程的人员;二是从事加工的人员。

### 1.8.1 数控编程人员

数控编程人员一般是拥有丰富实践经验的技师,他们知道如何读懂技术图样,也能领会设计背后的工程意图,这种实践经验是在办公室环境下“加工”零件的基础。数控编程人员必须能够收集、分析、处理数据,并把所有收集到的数据按逻辑组成程序整体。除加工技巧外数控编程人员必须理解数学原理,如方程的应用、圆弧和角度的计算、三角函数等相关知识,以及计算机编程、手工编程和计算机输入/输出技术。

### 1.8.2 数控操作人员

数控操作人员要精通机械加工和数控加工工艺知识,熟练掌握数控机床的操作和手工编程,了解自动编程和数控机床的简单维修。

数控操作人员把每个程序的执行结果汇报给数控编程人员,编程人员运用自身的知识、技巧和意图对程序修正后所得到的最终程序加以改善。数控操作人员与实际加工联系最密切,因而可以精确地知道这种改善可以达到何种程度。

数控操作人员同数控编程人员都必须严肃考虑安全问题,在一般的数控机床车间的日常工作中,编程、安装、加工、换刀、检验、运输以及凡是可以想到的任何操作中,安全都是最重要的,在任何情况下,必须将设备安全和人身安全放在首位,严格按照规范操作。

## 1.9 学习本课程的方法

掌握数控编程,要结合机加工工艺。在学习中,只有做到边学理论边练习,勤于思考,不断培养、提高分析和解决问题的能力,才能收到比较满意的效果。具体要求做到:

(1) 及时复习,巩固相关知识。数控加工是以普通加工为基础的,学习这门新技术需要掌握大量专业基础课和专业课中的基本知识,因此,学好数学、机械制图和制造工艺学等若干选修课中的知识,是学好本课程的重要条件。

(2) 提高学习积极性,勤动脑,肯钻研,知难而上。

(3) 抓住实践机会,多动手、勤练习,丰富所学知识。

## 第2章 数控加工工艺

### 2.1 零件加工工艺规程

#### 2.1.1 机械加工工艺总过程

机械加工工艺的整个过程是指用机械加工方法改变毛坯形状、尺寸、相对位置和性质,使其成为零件的全过程。在实施对零件的机械加工前,须对零件机械加工工艺的总过程、方法和加工目标进行规划,即制定机械加工工艺规程,制定它的主要依据是产品图纸、生产纲领、生产类型、现场加工设备及生产条件等。制订机械加工工艺规程一般需要如下过程。

(1) 分析加工零件。要设计零件生产加工工艺,首先要分析加工零件,充分领会产品的使用要求和设计要求,在此基础上,进一步审查零件制造工艺的可行性和加工的经济性。

(2) 选择毛坯。选择毛坯的种类和制造方法时,全面考虑机械加工成本和毛坯制造成本,以达到降低零件生产总成本的目的。

(3) 拟订零件机械加工工艺总过程。包括选择零件的加工方法,划分工艺过程的各工序组成,安排各加工工序的先后顺序和工序间的相互组合等。

(4) 工序设计。对工艺过程中包含的各工序进行详细的工艺设计。

#### 2.1.2 加工零件分析

制定零件加工工艺规程前,准确地对加工零件分析,是制定零件加工工艺规程的前提,零件分析包括:

(1) 分析产品的装配图和零件的工作图,熟悉该产品的用途、性能及工作条件,明确被加工零件在产品中的装配位置和作用,进而了解零件上各项技术要求制订的依据,找出主要技术要求和加工关键,以便在拟订工艺规程时采取适当的工艺措施加以保证,对图纸的完整性、技术要求的合理性以及材料选择是否恰当等提出意见。

(2) 审查零件结构的工艺性,在充分领会产品的使用要求和设计要求的前提下,审查零件制造工艺的可行性和加工的经济性,遇到工艺问题与设计问题有矛盾时,与设计人员共同磋商解决方法。

##### 1. 分析零件要求

在通过分析装配图、产品说明书等,熟悉了零件在产品中的作用、位置、装配关系和工作条件的前提下,还应进一步分析零件图样,搞清楚零件主要和关键的技术要求,理解各项技术要求对零件装配质量和性能的影响。

零件图的分析包括:

(1) 检查零件图的完整性和正确性。在了解零件形状和结构之后,应检查零件视图是否正确、足够,尺寸、公差以及技术要求的标注是否齐全、合理等。

(2) 零件的技术要求分析。零件的技术要求包括下列几个方面:加工表面的尺寸精度,主要加工表面的形状精度,主要加工表面之间的相互位置精度,加工表面的粗糙度要求,热

处理要求,其他要求,如,动平衡、未注圆角或倒角、去毛刺、毛坯要求等。

要注意分析这些要求在保证使用性能的前提下是否经济合理,在现有生产条件下能否实现。特别要分析主要表面的技术要求,因为主要表面的加工确定了零件工艺过程的大致轮廓。

(3) 零件的材料分析。即分析所提供的毛坯材质本身的机械性能和热处理状态,毛坯的铸造品质和被加工部位的材料硬度,是否有白口、夹砂、疏松等。判断工件材料加工的难易程度,为选择刀具材料和切削用量提供依据。所选的零件材料应经济合理,切削性能好,满足使用性能的要求。

(4) 分析尺寸标注。分析零件图上的重要尺寸的设计基准,是否可在加工时用作工艺基准,分析设计尺寸是否便于加工时测量验证;分析零件图上的尺寸是否标注成封闭式,造成对加工要求矛盾的理解等。

## 2. 零件的结构工艺性分析

零件的结构工艺性是指在满足使用性能的前提下,是否能以较高的生产率和最低的成本方便地加工出来的特性。主要考虑如下几方面。

### (1) 分析加工质量要求

① 分析零件的加工精度与表面质量要求是否合理。在零件满足使用性能的前提下,尽可能使零件加工方便,制造成本低。

② 分析零件位置精度的可能性。为保证零件的位置精度,最好使零件能在一次安装中加工出所有相关表面,这样就能依靠机床本身的精度来达到所要求的位置精度。

### (2) 分析零件加工的劳动量

① 分析加工面积和余量的大小,力求减少加工面积和余量,减少劳动量,减少刀具的损耗。

② 分析零件结构的加工难度。零件外表面加工要比内腔加工方便经济,又便于测量。

### (3) 分析零件加工的生产率

零件加工尺寸基准是否一致、零件安装次数、零件结构加工方便性等因素影响加工生产率。

## 2.1.3 确定毛坯

在制订机械加工工艺规程时,正确选择合适的毛坯,对零件的加工质量、材料消耗和加工工时都有很大的影响。显然,毛坯的尺寸和形状越接近成品零件,机械加工的劳动量就越少,但是毛坯的制造成本就越高,应综合考虑毛坯制造和机械加工的费用来确定毛坯,以求得最好的经济效益。

### 1. 毛坯的种类

选择毛坯的种类和制造方法时,应全面考虑机械加工成本和毛坯制造成本。

#### (1) 铸件

铸件适用于形状较复杂的零件毛坯。其铸造方法有砂型铸造、精密铸造、金属型铸造、压力铸造等。较常用的是砂型铸造,当毛坯精度要求低、生产批量较小时,采用木模手工造型法;当毛坯精度要求高、生产批量很大时,采用金属型机器造型法。铸件材料有铸铁、铸钢及铜、铝等有色金属。

#### (2) 锻件