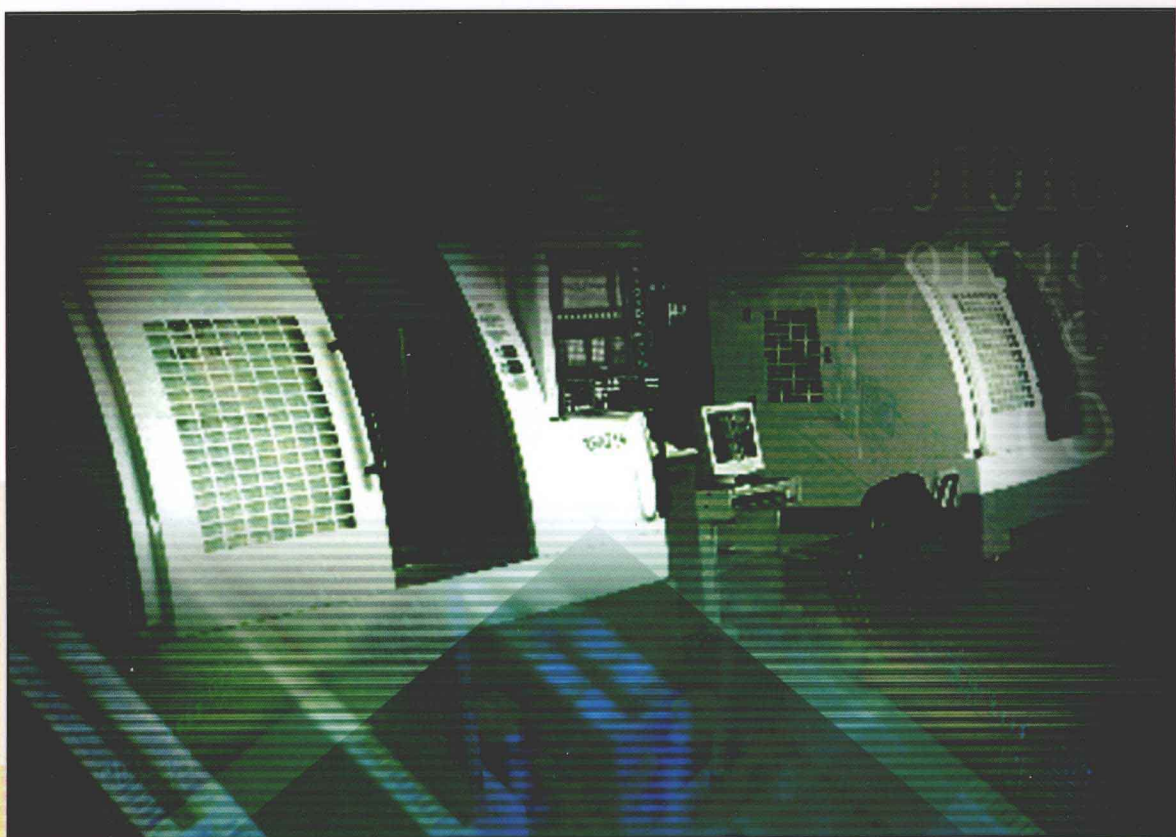


普通高等教育“十二五”规划教材

# 数控技术

樊军庆 主编

SHUKONG JISHU



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



本书从理论和实践两方面全面系统地讲述了数控机床的编程技术、基本结构及其控制技术。全书共分6章,分别介绍数控机床的分类及其发展、数控加工工艺设计、数控加工程序编制、数控机床的操作与加工、数控机床的机械结构及数控系统。

本书内容清晰,结构紧凑,实用性强,可作为高等院校机电工程类专业的教材,也可作为培训教材供各数控培训机构使用。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师发邮件到 jinacmp@163.com 索取,或登录 www.cmpedu.com 注册下载。

### 图书在版编目(CIP)数据

数控技术/樊军庆主编. —北京:机械工业出版社,2012.7

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-38158-7

I. ①数… II. ①樊… 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(2012)第162871号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:吉玲 责任编辑:吉玲 章承林

版式设计:石冉 责任校对:姜艳丽

责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2012年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·17印张·417千字

标准书号:ISBN 978-7-111-38158-7

定价:35.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

· 网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

# 前 言

本书是高等学校机械工程及其自动化、机电一体化专业的专业课教材。数控技术是现代制造技术的基础，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，对现代制造业有着极为重大的影响。数控技术是综合运用了计算机、自动控制、电气传动、精密测量、机械制造等多门技术而发展起来的，它是机械自动化系统、机器人、柔性制造系统（FMS）、计算机集成制造系统（CIMS）等高新技术的基础，同时也是21世纪机械制造业进行技术更新与改造，向机电一体化方向发展的主要途径和重要手段。

全书结构严谨，内容取材新颖，注重系统性与实用性相结合。在编写中力求反映目前大中型企业中普遍应用的数控技术，注重工程实践能力的培养，并对数控机床的基础知识、核心技术和最新成果给予全面的阐述。全书共分6章，第1章绪论，介绍了数控机床的组成、特点、分类及其产生和发展过程；第2章数控加工工艺基础，对数控车削、数控铣削及加工中心的加工工艺进行了介绍；第3章数控加工程序编制，结合实例介绍了数控编程的基础知识；第4章数控机床的操作与加工，重点介绍了数控车、数控铣及加工中心的实际操作；第5章数控机床的机械结构，对数控机床机械结构的各组成部分——主传动系统、进给传动系统、基础支撑件（导轨）、辅助装置（自动换刀装置、回转工作台）等结构原理进行介绍；第6章数控系统，主要介绍了数控装置、检测装置及数控机床的伺服系统。

本书由海南大学樊军庆教授统稿并任主编，宜宾职业技术学院张信禹副教授和海南大学张宝珍副教授任副主编。参加本书编写老师的分工如下：海南大学张宝珍（第1章、第2章），樊军庆（第3章部分内容、第4章），河北科技师范学院孙磊（第3章部分内容），宜宾职业技术学院张信禹、蒋世应（第5章、第6章）。本书由华南理工大学汪娟娟博士主审，对本书提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不少缺点和错误，恳请广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 数控机床 .....	1
1.2 数控机床的分类 .....	4
1.3 数控机床的产生和发展 .....	8
复习题 .....	11
<b>第 2 章 数控加工工艺基础</b> .....	12
2.1 数控车削加工工艺 .....	12
2.2 数控铣削加工工艺 .....	18
复习题 .....	29
<b>第 3 章 数控加工程序编制</b> .....	30
3.1 数控编程基础 .....	30
3.2 数控加工程序与指令代码 .....	33
3.3 数控自动编程概述 .....	116
复习题 .....	117
<b>第 4 章 数控机床的操作与零件加工</b> .....	119
4.1 数控车床的操作与零件加工 .....	119
4.2 数控铣床的操作与零件加工 .....	131
4.3 加工中心的操作与零件加工 .....	149
复习题 .....	165
<b>第 5 章 数控机床的机械结构</b> .....	166
5.1 概述 .....	166
5.2 数控机床的主传动系统 .....	169
5.3 数控机床的进给传动系统 .....	177
5.4 数控机床的导轨 .....	186
5.5 数控机床的自动换刀装置 .....	191
5.6 数控机床的双工作台 .....	204
复习题 .....	204
<b>第 6 章 数控系统</b> .....	206
6.1 数控装置 .....	206
6.2 数控检测装置 .....	235
6.3 数控伺服系统 .....	242
复习题 .....	264
<b>参考文献</b> .....	265

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 数控机床

### 1.1.1 数控技术与数控机床

数控是数字控制（Numerical Control）的简称，是近代发展起来的用数字化信息进行控制的自动控制技术。在机床领域是指用数字信号对机床运动及其加工过程进行控制的一种方法。定义中的“机床”不仅指金属切削机床，还包括其他各类机床，如线切割机床、三坐标测量机等。为了说明方便，本书仍以金属切削机床为例来介绍数控技术，所有内容均适用于其他机床。

采用数字控制技术的控制系统称为数控系统，装备了数控系统的机床称为数控机床或 NC 机床。以前数控机床的数控功能是用专用计算机的硬件结构来实现的，所以称为硬件数控，简称 NC，现在主要以计算机的系统控制程序来实现部分或全部数控功能，所以称为软件数控或计算机数控，简称 CNC。

### 1.1.2 数控机床的组成

数控机床在加工零件时，首先由编程人员按照零件的几何形状和加工艺要求将加工过程编成加工程序，然后将数控程序输入到数控系统，数控系统读入加工程序后，将其翻译成机器能够理解的控制指令，再由伺服系统将其变换和放大后控制机床上的主轴电动机和进给伺服电动机转动，并带动机床的工作台移动，从而加工出形状、尺寸与精度符合要求的零件，实现加工过程，如图 1-1 所示。

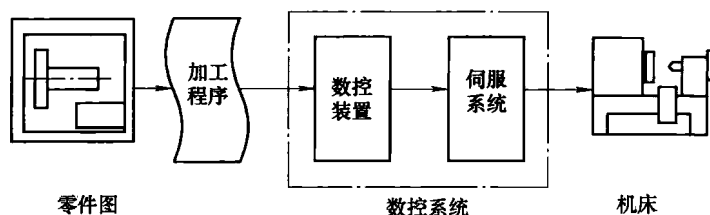


图 1-1 数控机床加工过程

图 1-2 所示是数控机床的组成框图。数控机床一般由输入/输出设备、数控装置、主轴和进给轴伺服单元、位置检测装置、可编程序控制器（PLC）及其接口电路和机床本体等几部分组成。图中除机床本体以外的部分构成了数控系统，其中数控装置是其核心部分。

#### 1. 输入/输出装置

数控机床在进行加工前，必须接受由操作人员输入的零件加工程序，然后才能根据输入的程序进行加工。在加工过程中，操作人员要向机床数控装置输入操作命令，数控装置要为操作人员显示必要的信息，如坐标值、报警信号等。此外，输入的程序并非全部正确，有时

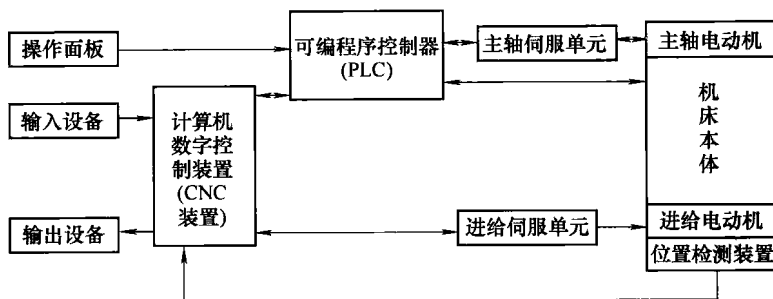


图 1-2 数控机床的组成框图

需要编辑、修改和调试。以上工作都是机床数控系统和操作人员进行信息交流的过程，要进行信息交流必须具备输入/输出装置。

操作者利用机床上的显示器及键盘输入加工程序指令，控制机床的运动。输入加工程序指令有两种方式。一种是手动数据输入（MDI），它适用于一些比较短的程序，只能使用一次，机床动作后程序就消失。一般手动进行简单加工时的自动换刀等场合常使用这种方式。另一种是在控制装置的编辑（EDIT）状态下，用键盘输入加工程序，存入控制装置的内存中。用这种方式可以对程序进行编辑，程序可重复使用。一般手工编制的程序采用这种方法。

此外，在具有会话编辑功能的数控装置上，可以按照显示屏上提出的问题，选择不同的菜单，只需将图样上指定的有关尺寸数字等输入，就可自动生成加工程序。这种输入方式虽然是手动输入，但应属于自动编程方法。

输出设备主要的功能为显示、打印、输出加工程序、控制参数、补偿参数等。

现代的数控系统除采用输入/输出设备进行信息交换外，一般都具有用通信技术进行信息交换的能力，它们是实现 CAD/CAM 的集成、FMS 和 CIMS 的基本技术。采用的方式有：串行通信（RS—232 等串口）、自动控制专用接口和规范（DNC 方式、MAP 协议等）、网络技术（Internet、LAN 等）。

## 2. 数控装置

数控装置是由 CPU、存储器、总线、功能部件和相应软件组成的专用计算机。其基本功能是根据输入的零件加工程序进行相应的处理（如运动轨迹处理、机床输入/输出处理等），然后输出控制命令到相应的执行部件（伺服单元、驱动装置和 PLC 等），所有这些工作都是通过 CNC 装置内硬件和软件的协调配合，使整个系统有条不紊地进行工作的。CNC 装置是 CNC 系统的核心。

## 3. 伺服系统

伺服系统包括主轴伺服单元和进给伺服系统两部分，伺服系统由伺服放大器和伺服电动机组成。主轴伺服单元主要接收来自 PLC 的转向和转速指令，驱动主轴电动机转动。进给伺服系统的作用，是把来自数控装置的位置控制移动指令转变成机床工作部件的运动，使工作台按规定轨迹移动或精确定位，加工出符合图样要求的工件，即把数控装置送来的微弱指令信号放大成能驱动伺服电动机的大功率信号。

在数控机床的进给伺服驱动机构中，常用的驱动元件有步进电动机、直流伺服电动机和交流伺服电动机，后两者都带有感应同步器、编码器等位置检测元件。

#### 4. 位置检测装置

位置检测装置将机床移动的实际位置、速度参数检测出来，转换成电信号，并反馈到 CNC 装置中，使 CNC 能随时判断机床的实际位置、速度是否与指令一致，并发出相应指令，纠正所产生的误差。对于一个设计完善的闭环数控系统，其定位精度和加工精度主要由位置检测装置的精度决定。

#### 5. 可编程序控制器（PLC）

PLC 控制辅助装置完成机床的相应开关动作，如工件的装夹、刀具的更换、切削液按钮的开关等，实现数控设备的辅助功能、主轴转速功能、刀具功能的译码和控制。

#### 6. 机床本体

数控机床的机械部件包括：主运动部件（如主轴部件、变速箱等）、进给运动执行部件（如工作台、滑板等）和支承部件（如床身、立柱等），此外，还有冷却、润滑、排屑、转位和夹紧等辅助装置。对于加工中心类的数控机床，还有自动换刀装置、自动交换工作台装置等部件。

### 1.1.3 数控机床的加工特点

#### 1. 柔性好

所谓的柔性即适应性，是指数控机床随生产对象变化而变化的适应能力。数控系统取代了通用机床的手工操作，具有充分的柔性，只要重新编制零件程序，更换相应工装，就能加工出新的零件。用数控机床生产，准备周期短，灵活性强，特别适合小批量、单件零件的加工，有利于产品的升级和新产品的试制。

#### 2. 零件加工精度高，加工质量稳定

数控机床有较高的加工精度，而且数控机床的加工精度不受零件形状复杂程度的影响。另外，数控机床是按预先编制好的加工程序进行工作的，加工过程中无须人的参与与调整，消除了操作者的人为误差，提高了同批零件加工的一致性，使产品加工质量稳定。数控机床可以通过在线自动补偿（实时补偿）技术消除或减少热变形、力变形和刀具磨损的影响，使加工精度的一致性得到了保证。

#### 3. 可加工复杂形状的零件

数控机床可加工复杂形状的零件，如二维轮廓或三维轮廓加工，可以完成普通机床难以完成或根本不能加工的复杂零件的加工。

#### 4. 生产效率高

数控机床的加工效率一般比普通机床高 2~3 倍，尤其在加工复杂零件时，生产效率可提高到普通机床的十几倍甚至几十倍。一方面是其自动化程度高，具有自动换刀和其他辅助操作自动化功能，而且工序集中，在一次安装中能完成较多表面的加工；另一方面数控加工可以采用较大的切削用量，有效地减少了加工切削时间。

#### 5. 易于建立计算机通信网络

由于数控机床是使用数字信息，易于与计算机辅助设计和制造系统连接，形成计算机辅助设计和制造紧密结合的一体化系统；数控机床还可以与远程网络连接，通过远程网络进行调度和控制，进行异地管理。

当然数控机床在某些方面也有不足之处：

- 1) 数控机床价格较贵, 设备初期投资大, 加工成本高。
- 2) 技术复杂, 增加了电子设备的维护, 维修困难。
- 3) 对工艺和编程要求较高, 加工中难以调整, 对操作人员的技术水平要求较高。

由于系统本身的复杂性, 增加了维修的技术难度和维修费用。

由于数控机床的上述特点, 数控机床最适合加工以下零件:

- 1) 几何形状复杂的零件。特别是形状复杂、加工精度要求高或用数学方法定义的复杂曲线、曲面轮廓。
- 2) 多品种、小批量生产的零件。用通用机床加工时, 要求设计制造复杂的专用工装或需很长的调整时间。
- 3) 必须严格控制公差的零件。
- 4) 贵重的、不允许报废的关键零件。

当对以上零件采用数控加工时, 才能最大限度地发挥出数控加工的优势。

#### 1.1.4 数控机床的主要性能指标

数控装置的性能指标反映了数控系统的基本性能, 是选择数控系统的主要依据, 概括起来如下:

##### 1. 精度指标

(1) 分辨率(脉冲当量) 表示数控装置每发出一个控制脉冲, 机床的移动部件所移动的距离。反映了数控装置的运动控制精度。

(2) 定位精度 指实际位置与指令位置的一致程度。

(3) 重复定位精度 指在相同的条件下, 操作方法不变, 进行规定次数的操作所得到的实际位置的一致程度。

##### 2. 可控轴数与联动轴数

可控轴数说明数控装置最多可以控制多少个坐标轴, 包括移动坐标轴和回转坐标轴。联动轴数表示数控装置可按一定规律同时控制其运动的坐标轴数。联动轴数越多, 说明数控装置加工复杂空间曲面的能力越强。

##### 3. 运动性能指标

(1) 行程 表示数控装置的控制范围和加工范围, 反映了机床的加工能力。

(2) 主轴转速 以每分钟的转数的形式给定, 是影响零件表面加工质量、生产率、刀具寿命的主要因素。

(3) 进给速度 刀具的进给速度以每分钟或每转进给距离的形式给定。进给速度可以用机床控制面板上倍率旋钮在一定范围内调节。进给速度也是影响零件表面加工质量、生产率、刀具寿命的主要因素。

## 1.2 数控机床的分类

目前, 数控机床的品种齐全, 规格繁多。为了研究方便起见, 可以从不同的角度对数控机床进行分类, 常见的有以下几种分类方法:



### 1.2.1 按工艺用途分类

按工艺用途的不同,数控机床可分为以下几类:

#### 1. 金属切削类机床

包括数控车床、数控钻床、数控铣床、数控磨床、数控镗床及加工中心。

#### 2. 金属成形类机床

包括数控折弯机、数控组合压力机、数控弯管机、数控回转头压力机等。

#### 3. 特种加工机床

包括数控线切割机床、数控电火花加工机床、数控火焰切割机、数控激光切割机床、专用组合机床等。

#### 4. 其他类型的数控设备

非加工设备采用数控技术,如自动装配机、三坐标测量机、自动绘图机和工业机器人等。

### 1.2.2 按功能水平分类

根据以下功能指标,将各种类型的数控系统分为低、中、高档三类。

#### 1. 分辨率和进给速度

分辨率为 $10\mu\text{m}$ ,进给速度在 $8\sim 15\text{m}/\text{min}$ 为低档;分辨率为 $1\mu\text{m}$ ,进给速度在 $15\sim 24\text{m}/\text{min}$ 为中档;分辨率为 $0.1\mu\text{m}$ ,进给速度在 $15\sim 100\text{m}/\text{min}$ 为高档。

#### 2. 伺服进给类型

采用开环、步进电动机进给系统的为低档数控机床;中、高档则采用半闭环或闭环的直流伺服系统或交流伺服系统。

#### 3. 联动轴数

低档数控机床最多联动轴数为 $2\sim 3$ 轴,而中、高档则为 $3\sim 5$ 轴以上。

#### 4. 通信功能

低档数控机床一般无通信功能,中档的可以有RS—232或DNC接口,高档的还可以有MAP通信接口,具有联网功能。

#### 5. 显示功能

低档的数控机床一般只有简单的数码管显示或简单的CRT字符显示;而中档数控机床则具有较齐全的CRT显示,不仅有字符显示,而且有图形显示、人机对话、自诊断功能等;高档数控机床还有三维图形显示。

#### 6. 内置PLC

低档数控机床一般无内置PLC,中高档都有内置PLC,高档数控机床具有功能强大的内置PLC,并具有轴控制的扩展功能。

#### 7. 主CPU

低档数控机床一般采用8位或16位CPU,中档及高档的已经逐步由32位CPU向64位CPU过渡。

### 1.2.3 按机床控制的运动轨迹分类

#### 1. 点位控制数控机床

机床的运动部件只能够实现从一个位置到另一个位置的精确运动，在运动和定位过程中不进行任何加工工序，如数控钻床（见图 1-3）、数控冲剪床等。

## 2. 直线控制数控机床

除控制点到点的准确位置之外，还要保证两点之间移动的轨迹是直线，而且对移动的速度也要进行控制，以便适应随工艺因素变化的不同需要。

这类机床有简易数控车床、数控镗铣床，一般有 2~3 个可控坐标轴，但同时控制的坐标轴只有一个。

## 3. 轮廓控制数控机床

这类数控机床的特点是能够对两个或两个以上运动坐标的位移及速度进行连续相关的控制，因而可进行曲线或曲面的加工，如图 1-4 所示。

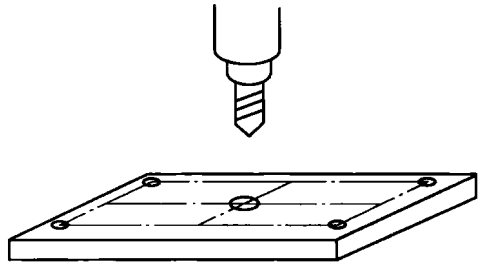


图 1-3 点位控制数控钻床示意图

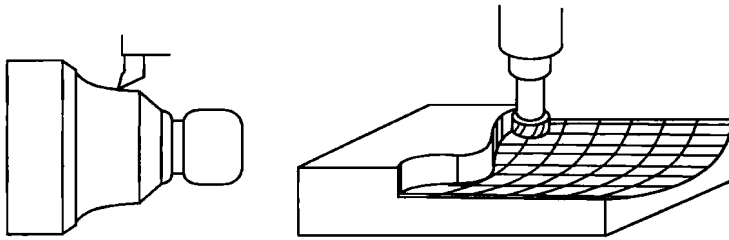


图 1-4 轮廓控制数控机床示意图

轮廓控制数控机床主要有数控车床、数控铣床、数控磨床、加工中心等。

### 1.2.4 按伺服系统的控制方式分类

#### 1. 开环控制数控机床

这类数控机床不带位置检测反馈装置。CNC 装置输出的指令脉冲经驱动电路的功率放大，驱动步进电动机转动，再经传动机构带动工作台移动，如图 1-5 所示。

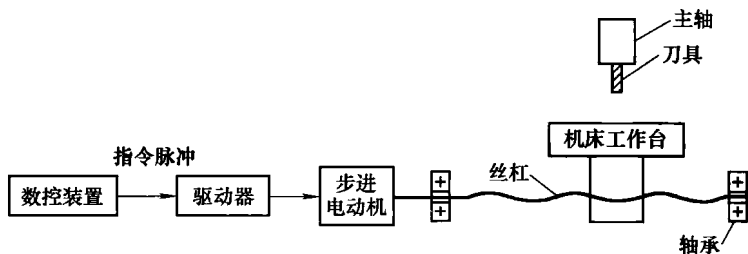


图 1-5 数控机床开环控制示意图

开环控制的数控机床调试方便，维修简单，但控制精度低，这类数控机床多为经济型。

#### 2. 闭环控制数控机床

闭环控制数控机床的进给伺服驱动是按闭环反馈控制方式工作的，其驱动电动机可采用

直流或交流两种伺服电动机，并需要配置位置反馈和速度反馈，在加工中随时检测移动部件的实际位移量，并及时反馈给数控系统中的比较器进行比较，其差值又作为伺服驱动的控制信号，进而带动位移部件以消除位移误差。按位置反馈检测元件的安装部位和反馈装置的不同，它又分为全闭环和半闭环两种控制方式。

(1) 全闭环控制 其位置反馈装置采用直线位移检测元件（目前一般采用光栅尺），其安装在机床的床鞍部位，即直接检测机床坐标的直线位移量。

该类机床数控装置中插补器发出的位置指令信号与工作台上检测到的实际位置反馈信号进行比较，根据其差值不断控制运动，进行误差修正，直至差值为零时停止运动。其控制示意图如图 1-6 所示。

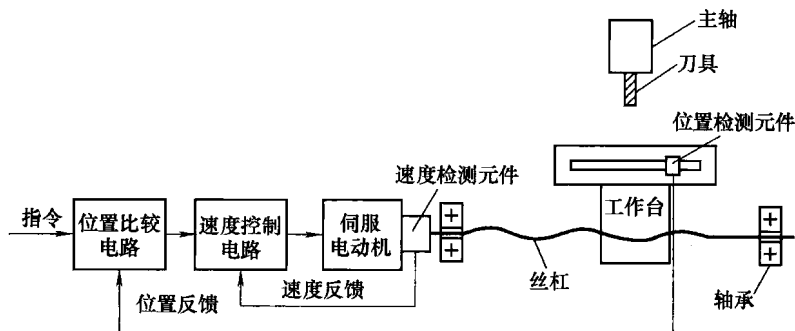


图 1-6 数控机床全闭环控制示意图

通过反馈可以消除从电动机到机床床鞍的整个机械传动链中的传动误差，得到很高的机床静态定位精度。由于在整个控制环内包含了很多机械传动环节，而许多机械传动环节的摩擦特性、刚性和间隙均为非线性，并且整个机械传动链的动态响应时间与电气响应时间相差又非常大，直接影响系统的调节参数。这为整个闭环系统的稳定性校正带来很大困难，系统的设计和调整也都相当复杂。

全闭环控制方式主要用于精度要求很高的数控坐标镗床、数控精密磨床和大型数控机床等。

(2) 半闭环控制 其位置反馈采用转角检测元件（目前主要采用编码器等），直接安装在伺服电动机或丝杠端部，检测转角位移。其控制示意图如图 1-7 所示。

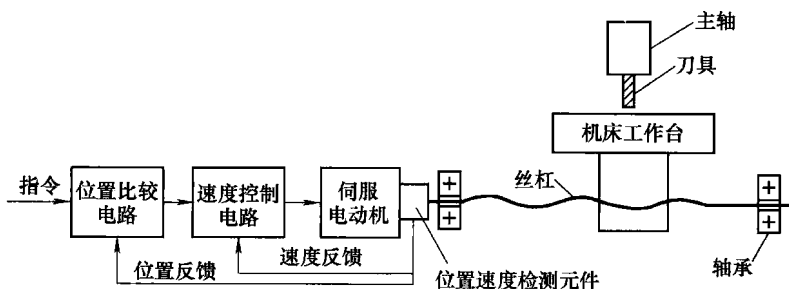


图 1-7 数控机床半闭环控制示意图

由于大部分机械传动环节没有包括在系统闭环环路内，因此可获得较稳定的控制特性。丝杠等的机械传动误差不能通过反馈来随时校正，但是可采用软件定值补偿方法来适当提高

其精度。目前，大部分数控机床采用半闭环控制方式。

## 1.3 数控机床的产生和发展

### 1.3.1 数控机床的产生和发展

数控机床是在普通机床的基础上发展起来的，军事工业需求是数控机床发展的原始动力，军事工业的发展不断促进数控机床升级，而民用工业对高精度、高效率、柔性化及批量生产的要求，随着市场竞争的加剧，对数控机床的产业化要求更加迫切。这是数控机床产生和发展的内在动力。电子技术和计算机技术的飞速发展则为数控机床的技术进步提供了坚实的技术基础，数控技术正是在这种背景下诞生和发展起来的。

促进数控技术发展的动力是第二次世界大战后的军备竞赛。1948年，美国帕森（Parsons）公司在研制加工直升机螺旋桨叶片轮廓用检查样板的机床时，由于样板形状复杂多样，精度要求高，一般加工设备难以适应，于是首先提出计算机控制机床的设想。1949年在麻省理工学院（MIT）伺服机构研究室的协助下开始数控机床的研究，于1952年研制成功了世界上第一台三坐标直线插补且连续控制的立式数控铣床。这是第一代数控系统，即电子管时代，它的控制装置由大约2000个电子管组成，体积约有一间普通实验室那么大。尽管现在看来这套控制系统体积庞大、功能简单，但它在制造技术的发展史上却有着划时代的意义。

1959年，晶体管器件的出现使电子设备的体积大大减小，数控系统中广泛采用晶体管和印制电路板，数控技术的发展进入第二代——晶体管时代。1959年，美国克耐·杜列克公司（Keaney & Trecker）首次成功开发了带有自动换刀装置的数控机床，称为“加工中心”（Machining Center）。从1960年开始，数控技术进入实用阶段，工业发达的国家如美国、德国、日本等开始开发、生产和使用数控机床。

1965年，出现了小规模集成电路。由于其体积小、功耗低，使数控系统的可靠性得到进一步提高，数控系统从而发展到第三代——集成电路时代。

以上三代数控机床的控制系统，所有功能都是靠硬件实现的，是数控系统发展的第一阶段，称之为普通数控系统（NC）。

1970年，小型计算机开始用于数控系统，人们称之为第四代，数控系统的发展进入第二阶段，即计算机数字控制（CNC）阶段，数控系统主要由计算机硬件和软件组成，其突出特点是许多数控功能可以由软件来实现，系统变得灵活、通用性好。

从1974年微处理器开始用于数控系统，数控系统发展到第五代，即微型机数控（MNC）系统。

自20世纪70年代末到20世纪80年代，数控技术在全世界得到了大规模的发展和应用。从20世纪90年代开始，个人计算机（PC）的发展日新月异，基于PC平台的数控系统（称为PC数控系统）应运而生，数控系统的发展进入第六代。现在市场上流行和企业普遍使用的仍然是第五代数控系统，其典型代表是日本的FANUC-0系列和德国的SINUMERIK810系列数控系统。

### 1.3.2 我国数控机床的发展概况

我国的数控机床行业起步于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。1966年研制成功晶体管并用于数控系统,1972年研制成功集成电路数控系统,并出现了线切割机、数控铣床等代表性产品。但由于历史的原因,一直没有取得实质性成果。数控机床的品质和数量都很少,稳定性和可靠性也比较差,只在一些复杂的、特殊的零件加工中使用。

20世纪80年代初,国内先后从日本、德国、美国等国引进了一些CNC装置及主轴、伺服系统的生产技术,并陆续投入了批量生产,这些数控系统性能比较完善,稳定性和可靠性都比较好,在数控机床上采用后,得到了用户的认可,从而结束了数控机床发展徘徊不前的局面,推动了数控机床的发展。到20世纪90年代初,国内的数控机床及数控系统的生产有了一定的规模。2003年开始,中国已成为全球最大的机床消费国,也是世界上最大的数控机床进口国。

#### 1. 国产数控机床与国际先进水平差距逐渐缩小

国产数控机床的发展经历了30年的发展,已经由成长期进入了成熟期,覆盖了超重型机床、高精度机床、特种加工机床、锻压设备、前沿高技术机床等领域,产品种类可与日、德、意、美等国并驾齐驱。特别是在五轴联动数控机床、超重型数控机床、立式和卧式加工中心、数控车床、数控齿轮加工机床领域,部分技术已经达到世界先进水平。

#### 2. 国产数控机床存在的问题

由于国内技术水平和工业基础还比较落后,数控机床的性能、水平和可靠性与工业发达国家相比,差距还很大,尤其是数控系统的控制可靠性还较差,数控产业尚未真正形成,核心技术严重缺乏。统计数据表明,数控机床的核心技术——数控系统,包括显示器、伺服控制器、伺服电动机和各种开关、传感器,90%需要从国外进口。国内能生产的中、高端数控机床,更多处于组装和制造环节,普遍未掌握核心技术。国产数控机床的关键零部件和关键技术主要依赖进口,国内真正大而强的企业并不多。目前世界最大的3家厂商是:日本法那克公司、德国西门子和日本三菱公司。其余还有法国扭姆公司、西班牙凡高公司等。国内有华中数控、航天数控、广州数控等。国内的数控系统刚刚开始产业化,水平、质量一般,高档次的系统全都依赖进口。

数控功能部件是另外一个薄弱环节。国产数控机床的主要故障大多出在功能部件上,它是影响国产数控机床使用的主要根源。特别是数控刀具滞后现象反映相当强烈。国产数控刀具在寿命、可靠性等方面差距明显,无论在品种、性能和质量上都远远不能满足用户要求。

### 1.3.3 数控机床的发展趋势及研究方向

#### 1. 高速高精加工技术

高速、高精度控制是数控技术发展的永恒主题。速度和精度是数控机床的两个重要指标,直接关系到加工效率和产品的质量,特别是在超高速切削、超精密加工技术的实施中,对速度和精度提出了更高的要求。进给速度和快速进给速度已达 $100 \sim 240\text{m}/\text{min}$ 。数控金切机床的加工精度已从原来的丝级( $0.01\text{mm}$ )提升到目前的微米级( $0.001\text{mm}$ ),有些品种已达到 $0.05\mu\text{m}$ 左右。超精密数控机床的微细切削和磨削加工,精度可稳定达到 $0.05\mu\text{m}$ 左

右,形状精度可达 $0.01\mu\text{m}$ 左右。采用光、电、化学等能源的特种加工精度可达到纳米级( $0.001\mu\text{m}$ )。通过机床结构设计优化,机床零部件的超精加工和精密装配,采用高精度的全闭环控制及温度、振动等动态误差补偿技术,提高了机床加工的几何精度,降低了几何误差、表面粗糙度值等,从而进入亚微米、纳米级超精加工时代。

## 2. 复合加工

随着数控机床技术的进步,复合加工技术日趋成熟,复合加工的精度和效率大大提高。“一台机床就是一个加工厂”、“一次装卡,完全加工”等理念正在被更多人接受,复合加工机床的发展正呈现多样化的态势。

多功能复合加工数控机床简称复合机床,或称为多功能加工或完全加工机床。复合机床的含义是在一台机床上实现或尽可能完成从毛坯至成品的全部加工。从20世纪70年代以来,出现了以旋转刀具作主切削运动的主要用于镗铣加工的加工中心和以工件旋转作主运动的主要用于车加工的车削中心,这两类多功能的数控机床在推进数控机床的工序集中的工艺方法上发挥了重要的作用。

## 3. 可靠性

数控机床的故障率一直是影响数控机床品质的一个重要问题。尤其是用于批量生产的自动生产线上,对数控机床的可靠性更为重视,通常用平均无故障时间(以MTBF表示)的长短来衡量它的可靠性。

数控机床与传统机床相比,由于增加了数控系统、伺服控制单元以及自动化功能部件和相应的监控装置等,所以应用了大量的电气、液压、气动元件和机电装置。由于元器件和装置数量的增多导致出现失效概率的增大。

因此,为了保证数控机床有高的可靠性,设计时不仅要考虑其功能和力学特性,还要进行可靠性设计。

## 4. 智能化、开放式、网络化成为当代数控系统发展的主要趋势

(1) 智能化 智能化的内容主要包括以下几个方面:

1) 应用自适应控制技术。数控系统能检测过程中一些重要信息,并自动调整系统的有关参数,达到改进系统运行状态的目的。

2) 引入专家系统指导加工。将熟练工人和专家的经验、加工的一般规律和特殊规律存入系统中,以工艺参数数据库为支撑,建立具有人工智能的专家系统。由于有了小型工艺数据库,使得在线程序编制过程中可以自动选择最佳切削用量和适合的刀具。

3) 引入故障诊断专家系统。

(2) 开放式。虽然传统的数控系统已经实现了非常复杂的功能并达到了相当的精度,但由于传统的数控系统采用专用计算机系统,其实现过程对用户来讲是封闭的,并且它的各个模块功能固定,各厂商的软硬件互不兼容,用户无法对系统进行重新定义和扩展,系统与外部缺乏有效的通信功能,这增加了用户的投资风险和成本。为改变这种状况,迫切需要能开发一种可以方便扩展、功能柔性并且对用户开放的数控系统。开放式数控系统便应运而生。

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,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品牌产品。

(3) 网络化 机床联网便于远距离操作和监控,也便于远程诊断故障和进行调整,不仅利于数控系统生产厂对其产品的监控和维修,也适于大规模现代化生产的无人化车间;实行网络管理,还适于在操作人员不宜到现场的环境(如对环境要求很高的超精密加工和对人体有害的环境)中工作。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。

(4) 并联机床 并联机床(Parallel Machine Tools)是世界上近年来逐渐兴起的一种新型制造设备,又称并联结构机床(Parallel Structured Machine Tools)、虚拟轴机床(Virtual Axis Machine Tools),也称为六条腿机床、六足虫(Hexapods)机床。国际上一般称为 Parallel Kinematic Machine(PKM)。

并联机床是基于空间并联机构 Stewart 平台原理开发的,是并联机器人机构与机床结合的产物,是空间机构学、机械制造、数控技术、计算机软硬件技术和 CAD/CAM 技术高度结合的高科技产品。传统的串联机构机床,是属于数学简单而机构复杂的机床,并联机构机床则是机构简单而数学复杂,整个平台的运动牵涉相当庞大的数学运算,可实现多坐标联动数控加工、装配和测量多种功能,更能满足复杂特种零件的加工。这种新型机床完全打破了传统机床结构的概念,抛弃了固定导轨的刀具导向方式,采用了多杆并联机构驱动,大大提高了机床的刚度,使加工精度和加工质量都有较大的改进。由于这种机床具有高刚度、高承载能力、高速度、高精度以及质量轻、机械结构简单、制造成本低、标准化程度高等优点,在许多领域都得到了成功的应用,因此受到学术界的广泛关注。并联机床有着巨大的市场潜力,但目前其加工精度还不能与传统高精度机床相比拟,还有许多问题需要深入研究,这为机床行业带来了新的机遇和挑战。

## 复 习 题

- 1.1 什么叫数控?什么叫计算机数控?什么叫数控机床?
- 1.2 数控机床由哪几部分组成?各组成部分的功能是什么?
- 1.3 和普通机床相比,数控机床有哪些特点?
- 1.4 说明点位控制与轮廓控制数控机床的区别。
- 1.5 简述闭环数控系统与开环数控系统的区别。
- 1.6 数控技术的发展趋势主要体现在哪几个方面?

## 第 2 章 数控加工工艺基础

### 2.1 数控车削加工工艺

#### 2.1.1 概述

数控车床是数控机床中应用最广泛的一种机床，是一种高精度、高效率的自动化机床。数控车床具有广泛的加工性能，可自动完成内外圆柱面、圆锥面、成形表面、螺纹和端面等工序的切削加工，并能进行车槽、钻孔、扩孔、铰孔等加工。车削加工中心则可在一次装夹中完成更多的加工工序。数控车床主要用于加工轴类和盘类等回转体零件，特别适合于复杂形状回转类零件的加工。

##### 1. 数控车床的类型

###### (1) 按主轴的配置形式分类

1) 立式数控车床。立式数控车床简称数控立车，其车床主轴垂直于水平面，用一个直径很大的圆形工作台来装夹工件。这类机床主要用于加工径向尺寸大、轴向尺寸相对较小的大型复杂零件。

2) 卧式数控车床。卧式数控车床又分为数控水平导轨卧式车床和数控倾斜导轨卧式车床。档次较高的数控卧式车床一般都采用倾斜导轨，其倾斜导轨结构可以使车床具有更大的刚性，并易于排除切屑。

###### (2) 按数控系统功能分类

1) 经济型数控车床。采用步进电动机和单片机对普通车床的进给系统进行改造后形成的简易型数控车床。成本较低，自动化程度和功能都比较差，车削加工精度也不高，适用于要求不高的回转类零件的车削加工。

2) 普通数控车床。根据车削加工要求在结构上进行专门设计并配备通用数控系统而形成的数控车床。数控系统功能强，自动化程度和加工精度也比较高，适用于一般回转类零件的车削加工。

3) 车削加工中心。在普通数控车床的基础上，增加了 C 轴和动力头，更高级的数控车床带有刀库，可控制 X、Z 和 C 三个坐标轴，实现 3 轴 2 联动。由于增加了 C 轴和铣削动力头，这种数控车床的加工功能大大增强，除可以进行一般车削外，还可以进行径向和轴向铣削、曲面铣削以及中心线不在零件回转中心的孔和径向孔的钻削等加工。

###### (3) 按刀架数量分类

1) 单刀架数控车床。数控车床一般都配置有各种形式的单刀架，如四工位卧式转位刀架或多工位转塔式自动转位刀架。

2) 双刀架数控车床。这类车床的双刀架配置为平行分布，也可以是相互垂直分布。

按数控系统的不同控制方式，数控车床可以分很多种类，如直线控制数控车床、两主轴控制数控车床等；按特殊或专门工艺性能，数控车床可分为螺纹数控车床、活塞数控车床、



曲轴数控车床等多种。

## 2. 数控车床的加工对象

与普通车床相比, 全功能数控车床的加工对象有其突出的特点。

(1) 加工精度要求高的零件 数控车床的传动系统和机床结构具有很高的精度、刚度、动刚度和热稳定性, 机床本身的零部件具有很高的制造精度, 特别是在数控车床上能精确对刀, 刀具磨损以后可以进行补偿, 因此能够加工形状和尺寸精度要求较高的零件。数控车床的加工精度一般可达  $0.001\text{mm}$ 。

(2) 表面粗糙度值要求小的零件 对于车削加工, 在工件材料、精车余量和刀具几何参数一定的条件下, 被加工表面的粗糙度值取决于切削速度和进给量。在卧式车床上车削圆锥面或端面时, 由于主轴转速在切削过程中是恒定的, 使得切削速度随切削直径的变化而变化, 因此加工出的表面粗糙度值不一致。而在数控车床上利用系统的恒线速控制功能, 可以使切削过程保持最佳的切削速度, 加工出的整个表面粗糙度值既小又一致。

(3) 轮廓形状复杂的零件 数控车床具有直线和圆弧插补功能, 部分车床还有某些非圆曲线插补功能, 所以可加工由任意平面曲线所组成的轮廓回转零件, 既能加工可用方程描述的曲线, 也能加工列表曲线。对于由直线和圆弧组成的轮廓, 直接利用直线和圆弧插补功能; 对于由非圆曲线组成的轮廓, 可以用非圆曲线插补功能。若数控系统没有非圆曲线插补功能, 可通过拟合计算处理后再用直线和圆弧插补功能进行插补切削。

(4) 带一些特殊类型螺纹的零件 由于数控车床进给传动系统是由伺服驱动系统来控制的, 可以任意调节进给速度, 因此数控车床不仅能车削任何等导程直、锥螺纹和端面螺纹, 还能加工变导程螺纹以及要求等导程与变导程之间平滑过渡的螺纹。

## 3. 数控车削刀具

数控车床一般使用标准的机夹可转位刀具。机夹可转位刀具的刀片和刀体都有标准, 刀片材料采用硬质合金、涂层硬质合金以及高速钢。

数控车床机夹可转位刀具类型有外圆刀具、外螺纹刀具、内圆刀具、内螺纹刀具、切断刀具、孔加工刀具 (包括中心孔钻头、镗刀、丝锥等)。图 2-1 所示为数控车床及车削中心常用刀具。

### 2.1.2 数控车削加工工艺

数控车削工艺制订得合理与否, 对程序编制、数控车床的加工效率和零件的加工精度都有直接影响。

#### 1. 对零件图样进行工艺分析

在制订车削工艺之前, 必须首先对被加工零件的图样进行分析, 分析零件图样的结果将直接影响到加工程序的编制及加工效果, 主要包括以下内容:

1) 仔细阅读图样, 明确加工内容。分析组成零件轮廓的几何元素的特征, 确定是否存在直线或圆弧之外的其他曲线, 如果存在, 可以考虑自动编程。

2) 分析图样上的几何条件是否充分, 保证编程时的数值计算能顺利进行。

3) 分析图样上尺寸的标注方法是否适应数控加工的特点。被加工零件的图样应以同一基准标注尺寸。这种标注方法既便于编程, 又有利于设计基准、工艺基准、测量基准和编程原点的统一, 保证工件的加工精度, 同时也方便了编程。