

# 数控技术



臧照良 主编



上海浦江教育出版社

## 臧照良 主编

上海浦江教育出版社

## 内 容 提 要

本书以现代数控机床为基础,详细地分析和阐述最新的数控原理和技术,从理论和实践两方面介绍现代较常用的数控技术。全书共7章,主要包括绪论,数控机床加工程序的编制,插补计算原理、刀具半径补偿与速度控制,计算机数控(CNC)系统,数控机床用PLC,数控机床的伺服驱动系统,数控机床的机械结构。本书最后以附件形式介绍了宇龙数控加工仿真软件的使用说明。

本书内容丰富、翔实,系统性强,各章既有联系,又有一定的独立性,特别适合用作高等学校机械工程及自动化(机械设计制造及其自动化)专业本科生教材,还可作为研究单位和工厂相关人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

数控技术/臧照良主编. —上海:上海浦江教育出版社有限公司,2014.5  
ISBN 978-7-81121-337-9

I. ①数… II. ①臧… III. ①数控机床 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 088014 号

上海浦江教育出版社出版

社址:上海海港大道 1550 号上海海事大学校内 邮政编码:201306  
电话:(021)38284910(12)(发行) 38284923(总编室) 38284916(传真)  
E-mail: cbs@shmtu.edu.cn URL: <http://www.pujiangpress.cn>

上海双宁印刷有限公司印装 上海浦江教育出版社发行

幅面尺寸:185 mm×260 mm 印张:17.5 字数:415 千字

2014 年 5 月第 1 版 2014 年 5 月第 1 次印刷

责任编辑:黄丽芬 贾裙平 赵 勉 封面设计:赵宏义

定价:50.00 元

# 前言 Preface

---

在现代机械制造业中,数控机床是提高劳动生产率和产品质量的重要手段。机械制造业的生产方式、产业结构、管理方式等因数控机床的广泛应用而发生深刻的变化,它的关联效益和辐射能力更是难以估计的。

众所周知,数控技术的迅速发展带动了制造业技术的飞速发展,使传统的制造工艺发生了显著的变化。机械制造业实现自动化、柔性化、集成化生产的基础是数控机床,现代制造业的潮流——CAD/CAM,FMS,CIMS等,都是建立在数控机床之上的。因此,数控机床是体现国家综合国力水平及衡量一个国家制造业现代化程度的重要标志,实现加工机床及生产过程数控化,是制造业的发展方向。从某种意义上说,今后机械制造业的竞争就是数控的竞争。

数控技术已被各国列为优先发展的关键工业技术,数控技术对现代制造业的影响是多方面的,其主要表现如下:

(1) 使产品结构发生重大变化。现代机械产品正向着高精度、高自动化和高可靠性方向发展,具有机电结合和多学科技术结合的特点,纯机械的产品越来越少,而且更新换代的速度很快。

(2) 使机械制造业生产方式发生深刻变化。制造业生产规模沿着小批量向少品种大批量、多品种多批量的方向发展。数控技术使传统的制造工艺发生显著和本质的变化。由经验性变为定量化,由分散单一工艺变成集成和科学化的工艺。伴随数控技术的不断发展和应用,工艺方法和制造系统不断更新,形成CAD,CAM,CAPP,FMS,CIMS等一系列具有划时代意义的新技术新工艺的制造系统。

(3) 使制造业整体面貌发生根本性变化。数控技术的应用将传统的机械制造与微电子、计算机、信息处理、现代控制理论、检测技术等多学科技术融为一体,使制造业成为知识密集、技术密集的大科学范畴的现代化行业。

本书通俗易懂、涉及面广、内容丰富、可操作性强,适用于机械设计制造及其自动化专业应用型本科教育,可作为应用性本科院校的机械设计及制造自动化、机电一体化等专业教材。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中不足之处敬请专家、同仁及读者斧正。

编者  
2014年1月

# 目录 Contents

|                              |         |
|------------------------------|---------|
| 第一章 绪论 .....                 | ( 1 )   |
| 第一节 概述 .....                 | ( 1 )   |
| 第二节 数控机床的特点和分类 .....         | ( 4 )   |
| 第三节 数控技术的应用与发展 .....         | ( 8 )   |
| 思考与练习题 .....                 | ( 16 )  |
| 第二章 数控机床加工程序的编制 .....        | ( 17 )  |
| 第一节 数控编程基础 .....             | ( 17 )  |
| 第二节 数控编程中的数值计算 .....         | ( 30 )  |
| 第三节 数控加工手工编程 .....           | ( 36 )  |
| 第四节 数控加工自动编程简介 .....         | ( 54 )  |
| 思考与练习题 .....                 | ( 59 )  |
| 第三章 插补计算原理、刀具半径补偿与速度控制 ..... | ( 62 )  |
| 第一节 概述 .....                 | ( 62 )  |
| 第二节 逐点比较法插补 .....            | ( 63 )  |
| 第三节 数字积分法插补 .....            | ( 70 )  |
| 第四节 比较积分法 .....              | ( 81 )  |
| 第五节 数据采集插补 .....             | ( 87 )  |
| 第六节 刀具半径补偿 .....             | ( 91 )  |
| 第七节 进给速度与加减速控制 .....         | ( 104 ) |
| 思考与练习题 .....                 | ( 111 ) |
| 第四章 计算机数控(CNC)系统 .....       | ( 113 ) |
| 第一节 概述 .....                 | ( 113 ) |
| 第二节 CNC 系统的硬件结构 .....        | ( 118 ) |
| 第三节 CNC 系统的软件结构 .....        | ( 121 ) |
| 第四节 CNC 系统的 I/O 与通信功能 .....  | ( 131 ) |
| 第五节 开放式数控系统的结构及其特点 .....     | ( 146 ) |
| 思考与练习题 .....                 | ( 151 ) |



|                                        |              |
|----------------------------------------|--------------|
| <b>第五章 数控机床用 PLC .....</b>             | <b>(152)</b> |
| 第一节 概述 .....                           | (152)        |
| 第二节 数控机床用 PLC 工作原理 .....               | (156)        |
| 思考与练习题 .....                           | (160)        |
| <b>第六章 数控机床的伺服驱动系统.....</b>            | <b>(161)</b> |
| 第一节 概述 .....                           | (161)        |
| 第二节 步进电动机伺服系统 .....                    | (165)        |
| 第三节 数控机床的位置检测装置 .....                  | (178)        |
| 第四节 直流电动机伺服系统 .....                    | (192)        |
| 第五节 交流电动机伺服系统 .....                    | (204)        |
| 思考与练习题 .....                           | (209)        |
| <b>第七章 数控机床的机械结构 .....</b>             | <b>(210)</b> |
| 第一节 概述 .....                           | (210)        |
| 第二节 数控机床的主传动系统 .....                   | (211)        |
| 第三节 数控机床的进给传动系统 .....                  | (219)        |
| 第四节 数控机床的自动换刀系统 .....                  | (233)        |
| 第五节 数控机床的辅助装置 .....                    | (243)        |
| 思考与练习题 .....                           | (248)        |
| <b>附录 .....</b>                        | <b>(250)</b> |
| 附录 I 宇龙数控加工仿真软件 FANUC-0 系统面板操作简介 ..... | (250)        |
| 附录 II 车削、铣削实验仿真加工零件图样 .....            | (271)        |
| <b>参考文献 .....</b>                      | <b>(274)</b> |

# 第一章 绪论

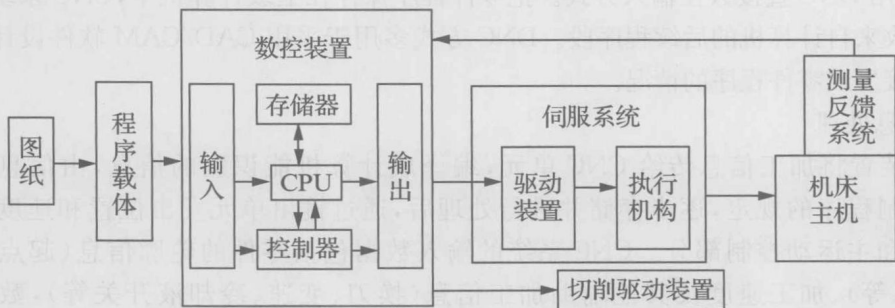
## 第一节 概述

### 一、数控机床的定义

数字控制机床(Numerical Control Machine Tools)简称数控机床,是一种将数字计算技术应用于机床的控制技术。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,按图纸要求的形状和尺寸,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,是一种典型的机电一体化产品。

### 二、数控机床的加工原理

数控机床加工工件的过程:①根据加工零件的图样与工艺方案,用规定的格式编写程序单,并且记录在程序载体上;②把程序载体上的程序通过输入装置输入到数控装置中;③数控装置将输入的程序经过运算处理后,向数控机床各个坐标的伺服系统发出信号;④伺服系统根据数控装置发出的信号,通过执行机构(如步进电动机、直流伺服电动机、交流伺服电动机),经传动装置(如滚珠丝杠副等)驱动机床各运动部件,使数控机床按规定的动作顺序、速度和位移量进行工作,从而制造出符合图样要求的零件(图 1-1)。



注: CPU为中央处理单元。

图 1-1 数控机床加工工件的过程

由上述数控机床的工作过程可知,数控机床的基本组成包括程序载体、数控装置、伺服系统、测量反馈系统、机床主机及数控机床的辅助装置。下面分别对各组成部分的基本工作

原理进行概要说明。

## 1. 程序载体

数控机床在工作时,不需要工人直接去操作机床。要对数控机床进行控制,必须编制加工程序。零件加工程序中,包括机床上刀具和工件的相对运动轨迹、工艺参数(进给量、主轴转速等)以及辅助运动等。将零件加工程序用一定的格式和代码,存储在一种程序载体上,如穿孔纸带、盒式磁带、软磁盘等,通过数控机床的输入装置,将程序信息输入到计算机数字控制(Computer Numerical Control, CNC)单元。

## 2. 数控装置

数控装置是数控机床的核心。现代数控装置均采用 CNC 形式,这种 CNC 装置一般使用多个微处理器,以程序化的软件形式实现数控功能,因此又称软件数控(Software NC)。CNC 系统是一种位置控制系统,它是根据输入数据插补出理想的运动轨迹,然后输出到执行部件加工出所需要的零件。因此,数控装置主要由输入、处理和输出等三个基本部分构成。而所有这些工作都由计算机的系统程序进行合理组织,使整个系统协调地工作。

### 1) 输入装置

将数控指令输入给数控装置,根据程序载体的不同,相应有不同的输入装置。目前主要有键盘输入、磁盘输入和 CAD<sup>①</sup>/CAM<sup>②</sup> 系统直接通信方式输入和连接上级计算机的直接数字控制或分布数字控制(Direct Numerical Control 或 Distributed Numerical Control, DNC)输入,现仍有不少系统还保留有光电阅读机的纸带输入形式。

(1)纸带输入方式。可用纸带光电阅读机读入零件程序,直接控制机床运动;也可以将纸带内容读入存储器,用存储器中储存的零件程序控制机床运动。

(2)手动数据输入(MDI)方式。操作者可利用操作面板上的键盘输入加工程序的指令,它适用于比较短的程序。在控制装置编辑状态(EDIT)下,用软件输入加工程序,并存入控制装置的存储器中,这种输入方法可重复使用程序。一般手工编程均采用这种方法。在具有会话编程功能的数控装置上,可按照显示器上提示的问题,选择不同的菜单,用人机对话的方法输入有关的尺寸数字,就可自动生成加工程序。

(3)采用 DNC 直接数控输入方式。把零件程序保存在上级计算机中,CNC 系统一边加工一边接收来自计算机的后续程序段。DNC 方式多用于采用 CAD/CAM 软件设计的复杂工件并直接生成零件程序的情况。

### 2) 信息处理

输入装置将加工信息传给 CNC 单元,编译成计算机能识别的信息,由信息处理部分按照控制程序的规定,逐步存储并进行处理后,通过输出单元发出位置和速度指令给伺服系统和主运动控制部分。CNC 系统的输入数据包括零件的轮廓信息(起点、终点、直线、圆弧等)、加工速度及其他辅助加工信息(换刀、变速、冷却液开关等),数据处理的目的是完成插补运算前的准备工作。数据处理程序还包括刀具半径补偿、速度计算及辅助功能的处理等。

① CAD 为计算机辅助设计。

② CAM 为计算机辅助制造。



### 3) 输出装置

输出装置与伺服机构相连。输出装置根据控制器的命令接收运算器的输出脉冲,并把它送到各坐标的伺服控制系统,经过功率放大,驱动伺服系统,从而控制机床按规定要求运动。

### 3. 伺服系统和测量反馈系统

伺服系统是数控机床的重要组成部分,用于实现数控机床的进给伺服控制和主轴伺服控制。伺服系统的作用是把接收的来自数控装置的指令信息,经功率放大、整形处理后,转换成机床执行部件的直线位移或角位移运动。由于伺服系统是数控机床的最后环节,其性能直接影响数控机床的精度和速度等技术指标,因此,对数控机床的伺服驱动装置,要求具有良好的快速反应性能,能准确而灵敏地跟踪数控装置发出的数字指令信号,并能忠实地执行来自数控装置的指令,提高系统的动态跟随特性和静态跟踪精度。

伺服系统包括驱动装置和执行机构两大部分。驱动装置由主轴驱动单元、进给驱动单元和主轴伺服电动机、进给伺服电动机组成。步进电动机、直流伺服电动机和交流伺服电动机是常用的驱动装置。

测量元件将数控机床各坐标轴的实际位移值检测出来并经反馈系统输入到机床的数控装置中,数控装置对反馈回来的实际位移值与指令值进行比较,并向伺服系统输出达到设定值所需的位移量指令。

### 4. 机床主机

机床主机是数控机床的主体,包括床身、底座、立柱、横梁、滑座、工作台、主轴箱、进给机构、刀架及自动换刀装置等机械部件。它是在数控机床上自动地完成各种切削加工的机械部分。与传统的机床相比,数控机床主体具有如下结构特点:

(1)采用具有高刚度、高抗震性及较小热变形的机床新结构。通常用提高结构系统的静刚度、增加阻尼、调整结构件质量和固有频率等方法来提高机床主机的刚度和抗震性,使数控机床主体能适应数控机床连续自动地进行切削加工的需要。采取改善机床结构布局、减少发热、控制温升及采用热位移补偿等措施,可减少热变形对数控机床主机的影响。

(2)广泛采用高性能的主轴伺服驱动和进给伺服驱动装置,使数控机床的传动链缩短,简化机床机械传动系统的结构。

(3)采用高传动效率、高精度、无间隙的传动装置和运动部件,如滚珠丝杠副、塑料滑动导轨、直线滚动导轨、静压导轨等。

### 5. 数控机床的辅助装置

辅助装置是保证充分发挥数控机床功能所必需的配套装置,常用的辅助装置包括气动、液压装置,排屑装置,冷却、润滑装置,回转工作台和数控分度头,防护、照明等各种辅助装置。

## 三、数控机床的适用范围

数控机床是一种可编程的通用加工设备,但是因设备投资费用较高,还不能用数控机床完全替代其他类型的设备,因此,数控机床有其一定的适用范围。图 1-2 可粗略地表示数控机床的适用范围。从图 1-2(a)可看出,通用机床多适用于零件结构不太复

杂、生产批量较小的场合；专用机床适用于生产批量很大的零件；数控机床对于形状复杂的零件尽管批量小也同样适用。随着数控机床的普及，数控机床的适用范围也愈来愈广，对一些形状不太复杂而重复工作量很大的零件，如印制电路板的钻孔加工等，由于数控机床生产率高，也已大量使用。因而，数控机床的适用范围已扩展到图 1-2(a) 中阴影所示的范围。

图 1-2(b) 表示当采用通用机床、专用机床及数控机床加工时，零件生产批量与零件总加工费用之间的关系。据有关资料统计，当生产批量在 100 件以下，用数控机床加工具有一定复杂程度的零件时，加工费用最低，且能获得较高的经济效益。

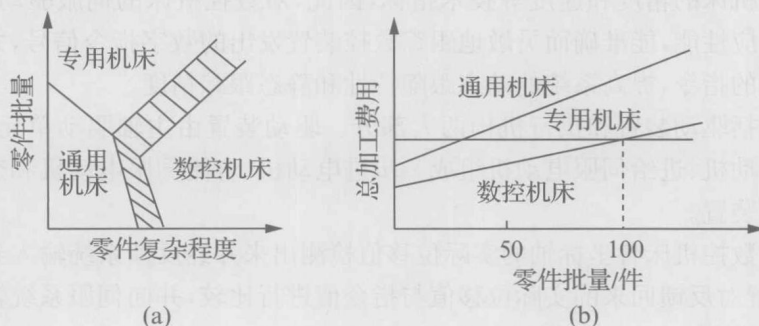


图 1-2 数控机床的适用范围

由此可见，数控机床最适宜加工以下类型的零件：①生产批量小的零件(100 件以下)；②需要进行多次改型设计的零件；③加工精度要求高、结构形状复杂的零件，如箱体类，曲线、曲面类零件；④需要精确复制和尺寸一致性要求高的零件；⑤价值昂贵的零件(虽然这种零件生产量不大，但是如果加工中因出现差错而报废，将产生巨大的经济损失)。

## 第二节 数控机床的特点和分类

### 一、数控机床的特点

与通用机床和专用机床相比，数控机床具有以下主要特点：

(1)加工精度高，质量稳定。数控系统每输出一个脉冲，机床移动部件的位移量称为脉冲当量，数控机床的脉冲当量一般为 0.001 mm，高精度的数控机床可达 0.000 1 mm，其运动分辨率远高于普通机床。另外，数控机床具有位置检测装置，可将移动部件实际位移量或丝杠、伺服电动机的转角反馈到数控系统，并进行补偿。因此，可获得比机床本身精度还高的加工精度。数控机床加工零件的质量由机床保证，无人操作误差的影响，所以同一批零件的尺寸一致性好，质量稳定。

(2)能完成普通机床难以完成或根本不能加工的复杂零件加工。例如，采用二轴联动或二轴以上联动的数控机床，可加工母线为曲线的旋转体曲面零件、凸轮零件和各种复杂空间曲面类零件。

(3)生产效率高。数控机床的主轴转速和进给量范围比普通机床的范围大,良好的结构刚性允许数控机床采用大的切削用量,从而有效地节省机动时间。对某些复杂零件的加工,如果采用带有自动换刀装置的数控加工中心(MC),可实现在一次装夹下进行多工序的连续加工,减少半成品的周转时间,生产率的提高更为明显。

(4)对产品改型设计的适应性强。当被加工零件改型设计后,在数控机床上只需变换零件的加工程序,调整刀具参数等,就能实现对改型设计后零件的加工,生产准备周期大大缩短。因此,数控机床可以很快地从加工一种零件转换为加工另一种改型设计后的零件,这就为单件、小批量新试制产品的加工和产品结构的频繁更新提供了极大的方便。

(5)有利于制造技术向综合自动化方向发展。数控机床是机械加工自动化的基本设备,以数控机床为基础建立起来的柔性制造单元(Flexible Manufacturing Cell, FMC)、柔性制造系统(Flexible Manufacturing System, FMS)、计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System, CIMS)等综合自动化系统使机械制造的集成化、智能化和自动化得以实现。这是由于数控机床控制系统采用数字信息与标准化代码输入并具有通信接口,容易实现数控机床之间的数据通信,最适宜计算机之间的连接,组成工业控制网络,实现自动化生产过程的计算、管理和控制。

(6)监控功能强,具有故障诊断的能力。CNC系统不仅控制机床的运动,而且可对机床进行全面监控。例如,可对一些引起故障的因素提前报警,进行故障诊断等,极大地提高检修效率。

(7)减轻工人劳动强度,改善劳动条件。

## 二、数控机床的分类

数控机床的种类繁多,根据数控机床的功能和组成的不同,可以从多种角度对数控机床进行分类。

### 1. 按运动轨迹分类

(1)点位控制系统。它的特点是刀具相对工件的移动过程中不进行切削加工,对定位过程中的运动轨迹没有严格要求,只要求从一坐标点到另一坐标点的精确定位,如图1-3(a)所示。如数控坐标镗床、数控钻床、数控冲床、数控点焊机和数控测量机等都采用此类系统。

(2)直线控制系统。这类控制系统的特点是除了控制起点与终点之间的准确位置外,还要求刀具由一点到另一点之间的运动轨迹为一条直线,并能控制位移的速度,因为这类数控机床的刀具在移动过程中要进行切削加工。直线控制系统的刀具切削只沿着平行于某一坐标轴方向运动,或者沿着与坐标轴成一定角度的斜线方向进行直线切削加工,如图1-3(b)所示。采用这类控制系统的机床有数控车床、数控铣床等。

具有点位控制功能和直线控制功能的点位/直线控制系统,主要应用在数控镗铣床、加工中心机床上。

(3)轮廓控制系统(也称连续控制系统)。其特点是能够同时对两个或两个以上的坐标轴进行连续控制。加工时不仅要控制起点和终点位置,而且要控制两点之间每一点的位置和速度,使机床加工出符合图纸要求的复杂形状(任意形状的曲线或曲面)的零件。它要求数控机床的辅助功能比较齐全。CNC装置一般都具有直线插补和圆弧插补功能,如数控车

床、数控铣床、数控磨床、数控加工中心、数控电加工机床、数控绘图机等都采用此类控制系统。

这类数控机床绝大多数具有两坐标或两坐标以上的联动功能,不仅有刀具半径补偿、刀具长度补偿功能,而且还具有机床轴向运动误差补偿,丝杠、齿轮的间隙补偿等一系列功能,如图 1-3(c)所示。



图 1-3 数控系统控制方式

2. 按伺服系统控制方式分类

(1)开环伺服系统。这种控制方式不带位置测量元件。数控装置根据信息载体上的指令信号,经控制运算发出指令脉冲,使伺服驱动元件转过一定的角度,并通过传动齿轮、滚珠丝杠副,使执行机构(如工作台)移动或转动。如图 1-4 所示为开环控制系统框图。这种控制方式没有来自位置测量元件的反馈信号,对执行机构的动作情况不进行检查,指令流向为单向,因此被称为开环控制系统。

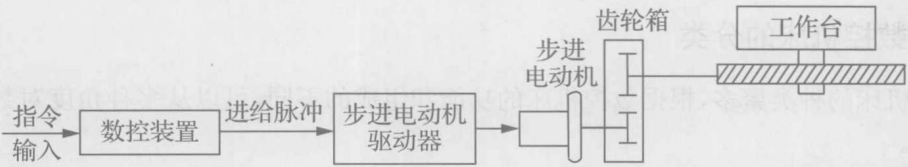


图 1-4 开环控制系统框图

步进电动机伺服系统是最典型的开环控制系统。这种控制系统的特点是简单、调试维修方便、工作稳定、成本较低。开环系统的精度主要取决于伺服元件和机床传动元件的精度、刚度和动态特性,因此控制精度较低。目前国内多用于经济型数控机床,以及对旧机床的改造。

(2)闭环伺服系统。这是一种自动控制系统,其中包含功率放大和反馈,使输出变量的值响应输入变量的值。数控装置发出指令脉冲后,当指令值送到位置比较电路时,若工作台没有移动(即没有位置反馈信号),指令值使伺服驱动电动机转动,经过齿轮、滚珠丝杠副等传动元件带动机床工作台移动。装在机床工作台上的位置测量元件测出工作台的实际位移量后,反馈到数控装置的比较器中与指令信号进行比较,并用比较后的差值进行控制。若两者存在差值,经放大器放大后再控制伺服驱动电动机转动,直至差值为零时工作台才停止移动。这种系统称为闭环伺服系统。如图 1-5 所示为闭环控制系统框图。闭环伺服系统的优点是精度高、速度快,主要用在精度要求较高的数控镗铣床、数控超精车床、数控超精镗床等机床上。



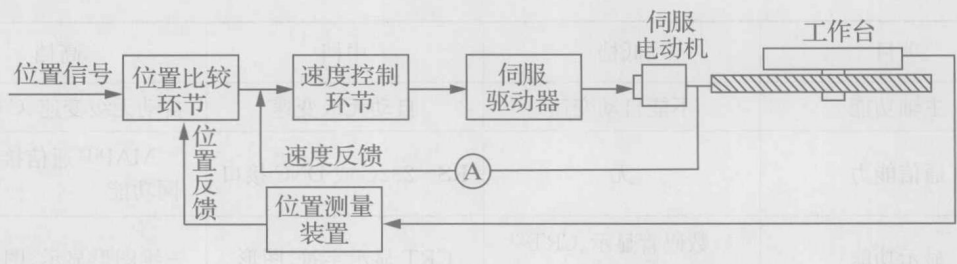


图 1-5 闭环控制系统框图

(3)半闭环伺服系统。这种控制系统不是直接测量工作台的位移量，而是通过旋转变压器、光电编码盘或分解器等角位移测量元件，测量伺服机构中电动机或丝杠的转角来间接测量工作台的位移。这种系统中滚珠丝杠副和工作台均在反馈环路之外，其传动误差等仍会影响工作台的位置精度，故称为半闭环控制系统。如图 1-6 所示为半闭环控制系统框图。

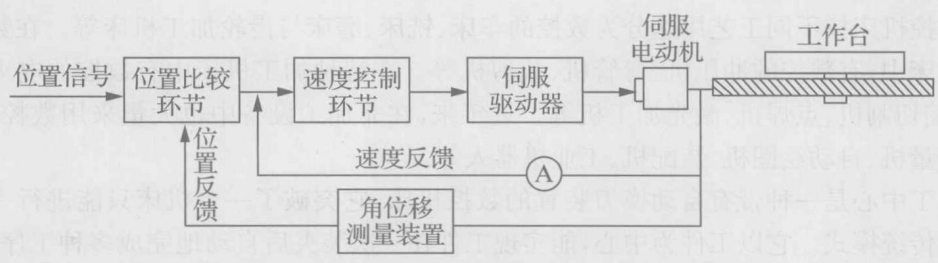


图 1-6 半闭环控制系统框图

半闭环伺服系统介于开环伺服系统与闭环伺服系统之间。角位移测量元件比直线位移测量元件结构简单，因此装有精密滚珠丝杠副和精密齿轮的半闭环系统被广泛应用。目前，已经把角位移测量元件与伺服电动机设计成一个部件，使用起来十分方便。半闭环伺服系统的加工精度虽然没有闭环系统高，但是由于采用了高分辨率的测量元件，这种控制方式仍可获得比较满意的精度和速度。系统调试比闭环系统方便、稳定性好，成本也比闭环系统低，目前大多数数控机床采用半闭环伺服系统。

3. 按功能水平分类

数控机床按数控系统的功能水平可分为低、中、高三档。低、中、高档的界限是相对的，不同时期的划分标准有所不同，就目前的发展水平来看，大体可以从以下几个方面区分(表 1-1)。

表 1-1 数控机床按数控系统的功能水平分类情况

| 项目       | 低档                            | 中档                            | 高档                               |
|----------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| 分辨率和进给速度 | 10 $\mu\text{m}$ , 8~15 m/min | 1 $\mu\text{m}$ , 15~24 m/min | 0.1 $\mu\text{m}$ , 15~100 m/min |
| 伺服进给类型   | 开环、步进电动机系统                    | 半闭环直流或交流伺服系统                  | 闭环直流或交流伺服系统                      |
| 联动轴数     | 2 轴                           | 3~5 轴                         | 3~5 轴                            |



(续表)

| 项目                                             | 低档                          | 中档               | 高档                         |
|------------------------------------------------|-----------------------------|------------------|----------------------------|
| 主轴功能                                           | 不能自动变速                      | 自动无级变速           | 自动无级变速、C 轴功能               |
| 通信能力                                           | 无                           | RS-232C 或 DNC 接口 | MAP <sup>①</sup> 通信接口、联网功能 |
| 显示功能                                           | 数码管显示、CRT <sup>②</sup> 显示字符 | CRT 显示字符、图形      | 三维图形显示、图形编程                |
| 内装可编程序控制器 (Programmable Logic Controller, PLC) | 无                           | 有                | 有                          |
| 主 CPU                                          | 8 bit CPU                   | 16 或 32 bit CPU  | 64 bit CPU                 |

4. 按工艺用途分类

数控机床按不同工艺用途分为数控的车床、铣床、磨床与齿轮加工机床等。在数控金属成型机床中,有数控的冲压机、弯管机、裁剪机等。在特种加工机床中有数控的电火花切割机、火焰切割机、点焊机、激光加工机等。近年来,在非加工设备中也大量采用数控技术,如数控测量机、自动绘图机、装配机、工业机器人等。

加工中心是一种带有自动换刀装置的数控机床,它突破了一台机床只能进行一种工艺加工的传统模式。它以工件为中心,能实现工件在一次装夹后自动地完成多种工序的加工。常见的有以加工箱体类零件为主的镗铣类加工中心和几乎能够完成各种回转体类零件所有工序加工的车削中心(TC)。

近年来,一些复合加工的数控机床也开始出现,其基本特点是集中多工序、多刀刀、复合工艺加工在一台设备中完成。

第三节 数控技术的应用与发展

随着电子、信息等高新技术的不断发展,随着市场需求个性化与多样化,未来先进制造技术发展的总趋势是向精密化、柔性化、网络化、虚拟化、智能化、清洁化、集成化、全球化的方向发展。数控技术是制造业实现这些先进制造技术的基础,而数控技术水平高低和数控设备拥有量是体现国家综合国力水平、衡量国家工业现代化的重要标志之一。

一、现代制造技术的发展趋势

21 世纪是知识经济新时代,制造业作为我国新世纪的战略产业将面临着严峻挑战,经历一场深刻的技术变革。在传统制造技术基础之上发展起来的先进制造技术代表了制造技

① MAP 为制造自动化协议,其英文全称为 Manufacturing Automation Protocol。  
② CRT 为阴极射线管。

术发展的前沿,对制造业的发展将产生巨大影响。当前先进制造技术的发展大致有以下特点。

### 1. 信息技术、管理技术与工艺技术紧密结合

信息技术向制造技术的注入和融合,使制造技术不断发展。它使制造技术的技术含量提高,使传统制造技术发生质的变化;促进加工制造的精密化、快速化,自动化技术的柔性化、智能化,整个制造过程的网络化、全球化。相继出现的各种先进制造模式,如并行工程、精益生产、敏捷制造、虚拟企业、虚拟制造和 CIMS 等,均以信息技术的发展为支撑。

### 2. CAD/CAM/CAE<sup>①</sup>

制造信息的数字化,将实现 CAD/CAPP<sup>②</sup>/CAM/CAE 的一体化,使产品向无图纸制造方向发展。在发达国家的大型企业中,已广泛使用 CAD/CAM,实现 100% 数字化设计。将数字化技术注入产品设计开发,提高了企业产品自主开发能力和产品档次,同时也提高了企业对市场的应变能力和快速响应能力。通过局域网实现企业内部并行工程,通过 Internet 建立跨地区的虚拟企业,实现资源共享、优化配置,也使制造业向互联网辅助制造方向发展。

### 3. 加工制造技术向着超精密、超高速以及发展新一代制造装备的方向发展

(1)超精密加工技术。超精密加工技术是为了使被加工工件的形状、尺寸精度和表面粗糙度均优于亚微米级的一门高新技术。超精加工技术的加工精度由红外波段向可见光和紫外波段趋进,目前加工精度达到  $0.025\text{ }\mu\text{m}$ ,表面粗糙度达  $0.045\text{ }\mu\text{m}$ 。美国为适应航空、航天等尖端技术的发展,已研制出多种数控超精密加工车床,最大的加工直径可达  $1.63\text{ m}$ ,定位精度为  $28\text{ nm}$  ( $1\text{ nm}=10^{-9}\text{ m}$ )。

(2)超高速切削。目前,铝合金超高速切削的切削速度已超过  $1\,600\text{ m/min}$ ,铸铁为  $1\,500\text{ m/min}$ ,超耐热镍合金为  $300\text{ m/min}$ ,钛合金为  $200\text{ m/min}$ 。超高速切削的发展已转移到一些难加工材料的切削加工。现代数控机床主轴的最高转速可达到  $10\,000\sim 20\,000\text{ r/min}$ ,采用高速内装式主轴电动机后,主轴直接与电动机连接成一体,主轴转速可提高到  $40\,000\sim 50\,000\text{ r/min}$ 。

(3)新一代制造装备的发展。市场竞争和新产品、新技术、新材料的发展推动着新型加工设备的研究与开发,如“并联桁架式结构数控机床”(俗称“六腿”机床),突破传统机床的结构方案,采用可以伸缩的六条“腿”连接定平台和动平台,每条“腿”均由各自的伺服电动机和精密滚珠丝杠驱动,控制这六条“腿”的伸缩就可以控制装有主轴头的动平台的空间位置和姿势,满足刀具运动轨迹的要求。

### 4. 工艺研究由“经验”走向“定量分析”

先进制造技术的一个重要发展趋势是通过计算机技术和模拟技术的应用,使工艺研究由“经验判断”走向“定量分析”,加工工艺由技艺发展为工程科学。

### 5. 虚拟现实技术在制造业中获得越来越多的应用

虚拟现实技术(Virtual Reality Technology)主要包括虚拟制造技术和虚拟企业两部分。

① CAE 为计算机辅助工程。

② CAPP 为计算机辅助工艺设计。

虚拟制造技术将从根本上改变设计、试制、修改设计、规模生产的传统制造模式。在产品真正制出之前,首先在虚拟制造环境中生成软产品(Soft Prototype)原型代替传统的硬样品(Hard Prototype)进行试验,对其性能和可制造性进行预测和评价,从而缩短产品的设计与制造周期,降低产品的开发成本。

虚拟企业是为了快速响应某一市场需求,通过信息高速公路,将产品涉及的不同企业临时组建成为一个没有围墙、超越空间约束、靠计算机网络联系、统一指挥的合作经济实体。虚拟企业的特点是企业功能上的不完整、地域上的分散性和组织结构上的非永久性,即功能的虚拟化、组织的虚拟化、地域的虚拟化。

## 二、数控机床和数控系统的发展

随着先进生产技术的发展,要求现代数控机床向高速度、高精度、高可靠性、智能化和更完善的功能方向发展。

### 1. 高速度、高精度化

高速化指数控机床的高速切削和高速插补进给,目标是在保证加工精度的前提下,提高加工速度。这不仅要求数控系统的处理速度快,同时还要求数控机床具有大功率和大转矩的高速主轴、高速进给电动机、高性能的刀具、稳定的高频动态刚度。

高精度包括高进给分辨率、高定位精度和重复定位精度、高动态刚度、高性能闭环交流数字伺服系统等。

数控机床由于装备有新型的数控系统和伺服系统,其分辨率和进给速度分别达到  $0.1\text{ }\mu\text{m}$  ( $24\text{ m/min}$ ),  $1\text{ }\mu\text{m}$  ( $100\sim 240\text{ m/min}$ ),现代数控系统已经逐步由 16 bit CPU 过渡到 32 bit CPU。日本产的 FANUC15 系统开发出 64 bit CPU 系统,能达到最小移动单位  $0.1\text{ }\mu\text{m}$  时,最大进给速度为  $100\text{ m/min}$ 。FANUC16 和 FANUC18 采用简化与减少控制基本指令的精简指令集计算机(Reduced Instruction Set Computer, RISC),能进行更高速度的数据处理,使一个程序段的处理时间缩短到  $0.5\text{ ms}$ ,连续  $1\text{ mm}$  移动指令的最大进给速度可达到  $120\text{ m/min}$ 。日本交流伺服电动机已装上每转可产生 100 万个脉冲的内藏位置检测器,其位置检测精度可达到  $0.01\text{ mm/脉冲}$ ,在位置伺服系统中采用前馈控制与非线性控制等方法。在补偿技术方面,除采用齿隙补偿、丝杠螺距误差补偿、刀具补偿等技术外,还开发热补偿技术,减少由热变形引起的加工误差。

### 2. 开放式

要求新一代数控机床的控制系统是一种开放式、模块化的体系结构:系统的构成要素应是模块化的,同时各模块之间的接口必须是标准化的;系统的软件、硬件构造应是“透明的”“可移植的”;系统应具有“连续升级”的能力。

为满足现代机械加工的多样化需求,新一代数控机床机械结构更趋向于“开放式”:机床结构按模块化、系列化原则进行设计与制造,以便缩短供货周期,最大限度满足用户的工艺需求。数控机床的很多部件的质量指标不断提高,品种规格逐渐增加,机电一体化内容更加丰富,因此专门为数控机床配套的各种功能部件已完全商品化。

### 3. 智能化

所谓智能化数控系统,是指具有拟人智能特征,智能数控系统通过对影响加工精度和效率的物理量进行检测、建模、提取特征、自动感知加工系统的内部状态及外部环境,快速做出实现最佳目标的智能决策,对进给速度、切削深度、坐标移动、主轴转速等工艺参数进行实时控制,使机床的加工过程处于最佳状态。

(1)在数控系统中引进自适应控制技术。数控机床中工件毛坯余量不匀、材料硬度不一致、刀具磨损、工件变形、润滑或冷却液等因素的变化直接或间接影响加工效果。自适应控制是在加工过程中不断检查某些能代表加工状态的参数,如切削力、切削温度等,通过评价函数计算和最佳化处理,对主轴转速、刀具(或工作台)进给速度等切削用量参数进行校正,使数控机床能够始终在最佳的切削状态下工作。

(2)设置故障自诊断功能。数控机床工作过程中出现故障时,控制系统能自动诊断,并立即采取措施排除故障,以适应长时间在无人环境下的正常运行要求。

(3)具有人机对话自动编程功能。可以把自动编程机具有的功能装入数控系统,使零件的程序编制工作可以在数控系统上在线进行,用人机对话方式,通过 CRT 彩色显示和手动操作键盘的配合,实现程序的输入、编辑和修改,并在数控系统中建立切削用量专家系统,从而达到提高编程效率和降低操作者技术水平的要求。

(4)应用图像识别和声控技术。由机床自己辨别图样,并自动地进行数控加工,根据人的语言声音对数控机床进行自动控制。

### 4. 复合化

复合化加工,即在一台机床上工件一次装夹便可以完成多工种、多工序的加工,通过减少装卸刀具、装卸工件、调整机床的辅助时间,实现一机多能,最大限度提高机床的开机率和利用率。20 世纪 60 年代初期,在一般数控机床的基础上开发了数控加工中心,即自备刀库的自动换刀数控机床。在加工中心机床上,工件一次装夹后,机床的机械手可自动更换刀具,连续地对工件的各加工面进行多种工序加工。目前,加工中心的刀库容量可多达 120 把,自动换刀装置的换刀时间为 1~2 s。加工中心中除了镗铣类加工中心和车削类车削中心外,还出现了集成型车/铣加工中心、自动更换电极的电火花加工中心、带有自动更换砂轮装置的内圆磨削加工中心等。

随着数控技术的不断发展,打破了原有机械分类的工艺性能界限,出现了相互兼容、扩大工艺范围的趋势。复合加工技术不仅是加工中心、车削中心等在同类技术领域内的复合,而且正向不同类技术领域内的复合发展。

多轴同时联动移动是衡量数控系统的重要指标,现代数控系统的控制轴数可多达 16 轴,同时联动轴数已达到 6 轴。高档次的数控系统还增加了自动上下料的轴控制功能,有的在 PLC 里增加位置控制功能,以补充轴控制数的不足,这将会进一步扩大数控机床的工艺范围。

### 5. 高可靠性

高可靠性的数控系统是提高数控机床可靠性的关键。选用高质量的印制电路和元器件,对元器件进行严格的筛选,建立稳定的制造工艺及产品性能测试等一整套质量保证体系。在新型的数控系统中采用大规模、超大规模集成电路实现三维高密度插装技术,进一步