



21世纪高等职业技术教育 机电一体化专业规划教材
数控技术

数控

加工技术

■ 主编 陈子银 徐鲲鹏

Shukong
jiagong jishu



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本教材以培养技能型人才为目的,从应用的角度出发主要介绍了数控加工方法、工艺和编程。全书分为6章,包括数控加工基础知识、数控车削加工技术、数控铣削加工技术、特种加工技术、高新加工技术和机械加工质量等内容。

本书可作为高职高专和中等职业学校教学用书,也可作为本科院校教学参考书以及工厂维修人员的自学参考书。本书适用于数控技术、机电一体化、机械制造及自动化等专业教学。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

数控加工技术 / 陈子银, 徐鲲鹏主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2006. 8

ISBN 7 - 5640 - 0776 - 1

I. 数… II. ①陈… ②徐 III. 数控机床 - 加工 - 高等学校: 技术学校 - 教材 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 095810 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (办公室) 68944990 (批销中心) 68911084 (读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京圣瑞伦印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 960 毫米 1/16

印 张 / 17.25

字 数 / 351 千字

版 次 / 2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

印 数 / 1 ~ 3000 册

定 价 / 25.00 元

责任校对 / 陈玉梅

责任印制 / 母长新

图书出现印装质量问题, 本社负责调换

出版说明

当前，高度发达的制造业和先进的制造技术已经成为衡量一个国家综合经济实力和科技水平的重要标志之一，成为一个国家在竞争激烈的国际市场上获胜的关键因素。

如今，中国已成为制造业大国，但还不是制造业强国。我们要从制造业大国走向制造业强国，必须大力发展以数控技术为主的先进制造技术，提高计算机辅助设计与制造（CAD/CAM）的技术水平。

制造业要发展，人才是关键。尽快培养一批高技能人才和高素质劳动者，是先进制造业实现技术创新和技术升级的迫切要求。高等职业教育既担负着培养高技能人才的任务，也为自身的发展提供了难得的机遇。

为适应制造业的深层次发展和数控技术的广泛应用，根据高等职业教育发展与改革的新形势，北京理工大学出版社组织知名专家、学者，与生产制造企业的技术人员反复研讨，以教育部《关于加强高职高专人才培养工作的若干意见》等文件对高职高专人才培养的要求为指导思想，确立了“满足制造业对人才培养的需求，适应行业技术改革，紧跟前沿技术发展”的思路，编写了这套高职高专教材。本套教材力图实现：以培养综合素质为基础，以能力为本位，把提高学生的职业能力放在突出位置，加强实践性教学环节，使学生成为企业生产服务一线迫切需要的高素质劳动者；以企业需求为基本依据，以就业为导向，增强针对性，又兼顾适应性；课程设置和教学内容适应技术发展，突出机电一体化、数控技术应用专业领域的新知识、新技术、新工艺和新方法；教学组织以学生为主体，提供选择和创新的空間，构建开放、富有弹性、充满活力的课程体系，适应学生个性化发展的需要。

本套教材的主要特色有：

1. 借鉴国内外职业教育先进教学模式，顺应现代职业教育教学制度的改革趋势；
2. 以就业为导向，进行了整体优化；
3. 理论与实践一体化，强化了知识性和实践性的统一。

本套教材适合于作为高职高专院校机电一体化、数控技术、机械制造及自动化、模具设计与制造等专业的课程教学和技能培训用书。

北京理工大学出版社

前 言

本书是根据国家教育部数控技术应用专业技能紧缺型人才培养方案与劳动和社会保障部制定的有关国家职业标准及相关的职业技能鉴定规范,结合编者多年的教学实践经验编写而成。

随着我国工业化进程的加速、产业结构的调整和升级,数控技术在现代企业中得到了广泛应用,使制造业朝着数字化的方向发展。同时经济发展对高素质技能人才的需求不断上升,急需一大批熟练掌握数控加工技术的应用型高素质人才。

本书共分为6章,全面细致地介绍了数控加工基础知识、数控车削加工技术、数控铣削加工技术、特种加工技术、高新加工技术及机械加工质量等。本书取材较好地结合了专业特点和高新技术发展需求,内容的深度和广度体现了先进性、灵活性和实用性。

从计算机的诞生到数控机床的出现和应用,数控机床已经成为具有高科技含量的机电一体化产品,如何用好、发挥好数控机床的优势也变得越来越重要了。本书以数控加工基础知识作为理论基础,以各种数控加工方法为学习主线,结合具体的典型数控机床加工,从本质上进行分析介绍,使读者理解掌握数控机床加工的实质。本书内容精炼,深入浅出,并注重相关知识间的联系与结合,便于学生自学。本书结合文字叙述,配有大量的零件加工图形、操作界面图形、编程界面图形、各种数控机床加工轨迹图形等,内容清晰、直观、易懂。每章都配有一定量的复习实训作业题。掌握本书所介绍的几种数控机床加工技术,将为使用其他数控机床打下坚实的基础。

本书由徐州机电工程高等职业学校陈子银、徐鲲鹏主编,由陈子银统稿。其中第1章由佟廷友编写;第2章、第3章由徐鲲鹏编写;第4章由汤郁编写;第5章、第6章由陈子银编写。另外,本书在编写中得到了王昌福、黄美英和张欣等老师的大力支持和技术指导,特

此表示感谢。

本书可作为高职高专院校和中等职业学校数控技术、机电一体化、机械制造及自动化专业教学用书，也可作为本科院校相关专业的教学参考书以及工厂维修人员的自学参考书。

限于编者的水平，许多问题还有待探讨。因此，本书的谬误与不妥之处在所难免，恳请读者不吝赐教，提出批评意见。

编者

目 录

第1章 数控加工基础知识	(1)
1.1 数控机床相关知识	(1)
1.2 数控编程概述	(11)
1.3 数控加工的特点	(21)
第2章 数控车削加工技术	(25)
2.1 数控车床概述	(25)
2.2 数控车床刀具与夹具系统	(32)
2.3 数控车削加工工艺	(42)
2.4 数控车床编程指令及要点	(50)
2.5 数控车床加工实例与操作	(62)
第3章 数控铣削加工技术	(75)
3.1 数控铣床概述	(75)
3.2 数控铣床刀具与夹具系统	(84)
3.3 数控铣削加工工艺	(101)
3.4 数控铣床编程指令及要点	(110)
3.5 数控铣床加工实例与操作	(140)
第4章 特种加工技术	(146)
4.1 电火花加工的基本原理与特点	(146)
4.2 电火花加工机床简介	(150)
4.3 电火花加工工艺规律	(157)
4.4 电火花加工工艺与实例	(164)
4.5 数控电火花线切割加工	(177)
4.6 电火花线切割加工工艺	(184)

4.7 电火花线切割机床编程技术	(189)
第5章 高新加工技术	(201)
5.1 高速切削加工技术	(201)
5.2 超精密加工技术	(227)
5.3 微细加工技术	(234)
5.4 快速成形制造技术 (RPM)	(237)
5.5 敏捷制造	(244)
5.6 虚拟制造	(245)
第6章 机械加工质量	(250)
6.1 机械加工精度	(250)
6.2 机械加工表面质量	(257)
6.3 质量管理与保证技术	(261)
参考文献	(267)

第 1 章

数控加工基础知识

■ 本章提要

- ① 数控机床的组成;
- ② 数控机床的工作原理与工作过程;
- ③ 数控机床的特点;
- ④ 数控机床的分类;
- ⑤ 数控编程的内容与步骤, 数控编程的方法;
- ⑥ 数控程序的结构与格式;
- ⑦ 典型数控系统与数控指令代码;
- ⑧ 数控加工的特点与数控加工的适用范围;
- ⑨ 数控加工工艺过程。

1.1 数控机床相关知识

1.1.1 数控机床的组成

数控机床一般由输入/输出 (I/O) 设备、计算机数控装置 (CNC 装置或称 CNC 单元)、伺服单元、驱动装置 (或称执行机构)、可编程序控制器 (PLC) 及电气回路、辅助装置、机床本体及测量装置组成, 如图 1-1 所示。

1. 计算机数控装置

计算机数控装置是计算机数控系统的核心, 其主要作用是根据输入的工件加工程序或操作指令进行相应的处理, 然后输出控制指令到相应的执行部件 (伺服单元、驱动装置和 PLC 等) 完成工件加工程序或操作指令所要求的工作。所有这些都是在 CNC 装置的协调控制及合理组织下使整个系统有条理地工作。CNC 装置主要由计算机系统、位置控制面板、PLC 接口板、通信接口板、扩展功能模块以及相应的控制软件等组成。

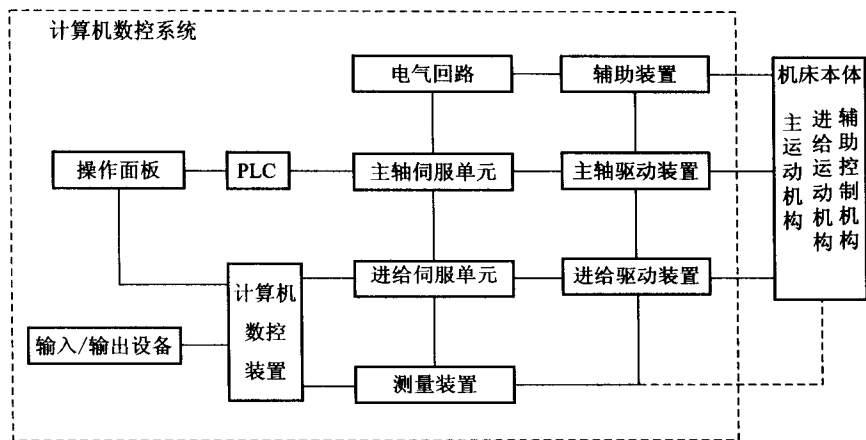


图 1-1 数控机床的组成

2. 伺服单元、驱动装置和测量装置

伺服单元和驱动装置包括主轴伺服驱动装置、主轴电动机、进给伺服驱动装置及进给电动机。测量装置是指位置和速度测量装置，是实现主轴控制、进给速度闭环控制和进给位置闭环控制的必要装置。主轴伺服系统的作用是实现工件加工中的切削运动，其控制量为速度。进给伺服系统的作用是实现工件加工中所需要的成形运动，灵活、准确地执行 CNC 装置的位置和速度指令，其控制量为速度和位置。

3. 操作面板

操作面板是操作人员与数控机床进行信息交换的工具。操作人员可以通过它对机床进行操作、编程、调试或对机床参数进行设定和修改，也可以通过它了解和查询数控机床的运行状态。它是数控机床的一个输入/输出设备，主要由按钮、状态灯和显示器等部分组成。

4. 控制介质与程序输入/输出设备

控制介质是记录工件加工程序的媒介，是人与机床建立联系的介质。程序输入/输出设备是 CNC 装置与外部设备进行信息交换的装置，其作用是将记录在控制介质上的工件加工程序输入 CNC 装置，或将调试好的工件加工程序通过输出设备存放或记录在相应的介质上。目前数控机床的控制介质和程序输入/输出设备是磁盘和磁盘驱动器。

此外，现代数控系统一般可利用通信方式进行信息交换。通信技术是实现 CAD/CAM 的集成和柔性制造系统（FMS）、计算机集成制造系统（CIMS）的基本技术。目前在数控机床上常用的通信方式有：

- ① 串行通信；
- ② 自动控制专用接口；
- ③ 网络技术。

5. 可编程序控制器

可编程序控制器（PLC）是一种以微处理器为基础的通用型自动控制装置，专为在工业环境下的应用而设计。PLC 已成为数控机床上不可缺少的控制装置。CNC 装置和 PLC 协调配合，共同完成对数控机床的控制。机床 I/O 电路和装置是实现 I/O 控制的执行部件，是由继电器、电磁阀、行程开关、接触器等组成的逻辑电路，其作用是：

① 接收 CNC 装置的 M、S、T 指令，对其进行译码并转换成为对应的控制信号，控制装置完成机床相应的开关动作。

② 接收操作面板和机床传送来的 I/O 信号，经处理后输出指令给 CNC 装置，控制 CNC 系统的工作状态和机床的动作。

6. 机床本体

机床本体是数控系统的控制对象，是实现工件加工的执行部件，主要由主运动部件（主轴、主运动传动机构）、进给运动部件（工作台、拖板及相应的传动机构）、支承件（立柱、床身），以及特殊装置、自动工作台交换（APC）系统、自动刀具交换（ATC）系统和辅助装置（如冷却、润滑、排屑、转位和夹紧装置）等组成。

数控机床的组成相对普通机床有以下几个优点：

① 由于采用了高性能的主轴及进给伺服驱动装置，因此数控机床的机械传动装置得到了简化，传动链较短。

② 数控机床的机械结构具有较高的动态特性、动态刚性、阻尼精度、耐磨性及抗热变形等性能。

③ 较多地采用高效传动部件，如滚珠丝杠、直线导轨等，大大提高了传动效率和传动精度。

1.1.2 数控机床的工作原理与工作过程

1. 数控机床的工作原理

数控机床是用数字信息进行控制，机床的所有运动包括主运动、进给运动及各种辅助运动，都是用输入数控装置的数字信号来控制的。它用数字代码将刀具相对工件移动的轨迹、速度的信息记录在程序介质上，然后送入数控系统经过译码和运算，控制刀具相对于工件的运动轨迹、位移量和速度等实现自动控制，加工出所需要的零件。

2. 数控机床的工作过程

① 根据被加工零件图样中所规定的零件尺寸、形状、材料及技术要求等，制定工件加工的工艺过程，刀具相对于工件的运动轨迹、切削参数以及辅助动作顺序等，进行工件加工的程序设计。

② 将上述工艺安排和数据按数控装置所规定的程序格式编制出加工程序。

③ 将加工程序的内容以代码形式完整地记录在信息介质（如穿孔带或磁带）上。

④ 通过阅读机把信息介质上的代码转变为电信号，并输入给数控装置。如是人工输入，则可通过微型计算机键盘，将加工程序的内容直接输送给数控装置。

⑤ 数控装置将所接受的信号进行一系列处理后，再将处理结果以脉冲信号的形式向伺服系统发出执行的命令。

⑥ 伺服系统接收到执行的指令信息后，立即驱动机床进给机构严格按照指令的要求进行位移，使机床自动完成相应工件的加工。具体工作过程如图 1-2 所示。

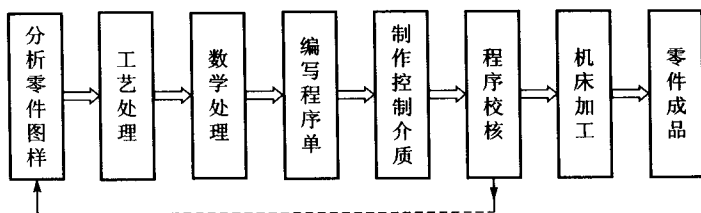


图 1-2 数控机床的工作过程

1.1.3 数控机床的特点与分类

1. 数控机床的特点

数控机床的产生改变了传统的机械加工工艺，给机械制造业注入了新的生机和活力。与普通机床相比，数控机床具有以下特点：

① 自动化程度高，劳动强度低。数控机床能够在程序的控制下自动实现工件的加工，加工过程一般不需要人工干预，可大大降低工人的劳动强度。

② 加工精度高。数控机床一般采用闭环（半闭环）控制，并且可以利用软件进行间隙补偿和螺距补偿，因此可以获得比机床本身精度还高的加工精度。此外像加工中心一类的数控机床还配有刀库，具有多工序加工能力，可实现工件在一次装夹后多道工序连续加工，从而消除了多次装夹引起的定位误差。

③ 产品一致性好。由于数控机床按照预定的加工程序自动进行加工，在加工过程中消除了操作者人为的操作误差，因而零件加工的一致性好。

④ 能够实现复杂零件的加工。由于数控机床能够实现多轴联动，可加工出普通机床无法完成的空间曲线和曲面，因而在航空、航天领域和对复杂型面的模具加工中得到了广泛应用。

⑤ 生产效率高。数控机床的刚性好，功率大，主轴转速高，进给速度范围宽，平滑无级变速，容易选择较大及合理的切削用量，可减少许多调整时间。此外，数控机床加工可免去划线工序，节省加工过程的中间检验时间。由于空行程速度远高于普通机床，因此也能节省很多时间。



⑥ 机械传动链短, 结构简单。数控机床的主传动多采用分段无级变速, 主轴箱结构简单; 进给采用伺服电动机驱动, 省去了庞杂的进给变速箱。因此传动链短, 机械结构简单。

2. 数控机床的分类

数控机床可从不同的角度进行分类, 通常的分类方法有: 按控制系统的特点分类、按控制联动的坐标轴分类、按伺服系统控制的方式分类、按工艺用途分类、按数控装置类型分类以及按数控系统的功能水平分类。

(1) 按控制系统的特点分类

① 点位控制数控机床。这类数控机床的主要特点是, 只控制刀具(或工作台)从一点移动到另一点的准确定位, 数控机床移动部件在移动中不进行加工, 只要求以最快的速度从一点移动到另一点。至于点与点之间的移动轨迹(路径与方向)并无严格要求, 各坐标轴之间的运动并不相关, 如图1-3所示。例如, 数控钻床、数控镗床和数控冲床等。

② 直线控制数控机床。这类机床是在定位控制基础上, 除控制点与点之间的准确定位外, 还要求从一点到另一点之间按直线移动、按指定的进给速度做直线切削, 如图1-4所示。例如, 平面铣削的数控铣床、阶梯车削的数控车床、磨削加工的数控磨床等都按指定的进给速度做直线切削。

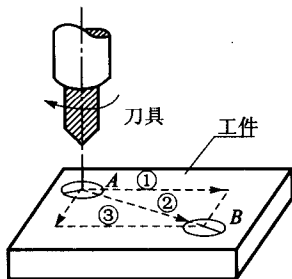


图 1-3 点位控制数控机床

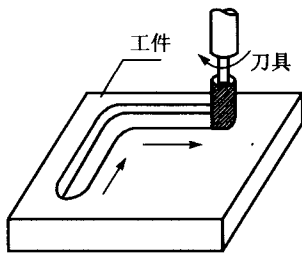


图 1-4 直线控制数控机床

③ 轮廓控制数控机床。轮廓控制数控机床也称为连续控制数控机床, 其特点是能够同时对两个或两个以上的运动坐标的位移和速度进行连接相关控制。它不仅要控制起点、终点坐标的准确性, 而且对每瞬时的位移和速度也要进行严格的、不间断的控制, 使刀具与工件间的相对运动符合工件加工轮廓的表面要求。在这类控制方式中, 要求数控装置具有插补运算的功能。即根据加工程序输入的基本数据(如直线的起点、终点坐标, 圆弧的起点、终点坐标和圆心坐标或半径), 通过数控系统的插补运算器的数学处理, 把直线或曲线形状的相关坐标点计算出来, 并边计算、边根据计算结果控制运动部件沿两个或两个以上坐标轴协调运动, 如图1-5所示。这类数控机床可以加工曲线和曲面。例如, 具有两坐

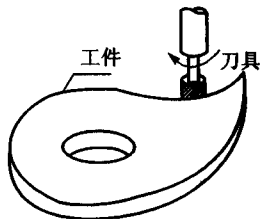


图 1-5 轮廓控制
数控机床

标或两坐标以上联动的数控铣床、数控车床、数控磨床和数控加工中心等。目前大多数金属切削机床的数控系统都是轮廓控制系统。

(2) 按控制联动的坐标轴分类

① 2 轴联动。2 轴联动同时控制两个坐标轴联动，即数控装置控制同时运动部件沿 X 、 Y 和 Z 三个坐标轴中的两个坐标方向运动，以实现对二维直线、斜线和圆弧等曲线的轨迹控制。2 轴联动数控机床用于加工如图 1-6 (a) 所示的零件沟槽。

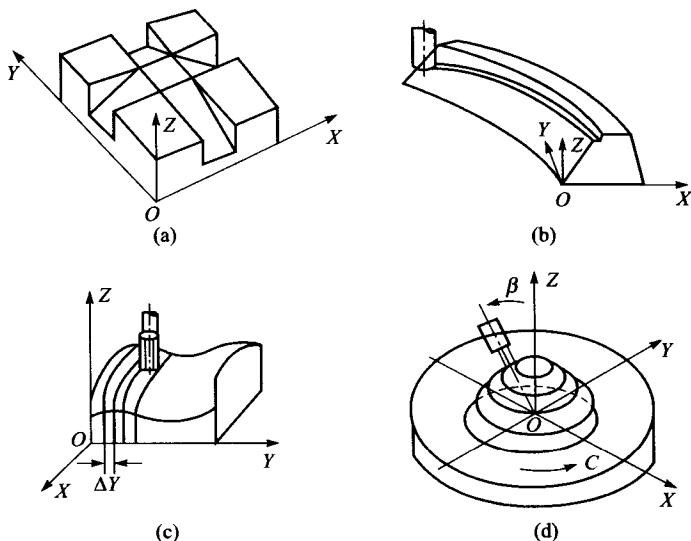


图 1-6 空间平面和曲面的数控加工

(a) 2 轴联动加工零件沟槽；(b) 3 轴联动加工曲面；
(c) 2 轴半联动加工曲面；(d) 5 轴联动铣床加工曲面

② 3 轴联动。3 轴联动同时控制 X 、 Y 、 Z 三个直线坐标轴联动，或控制 X 、 Y 、 Z 中的两个直线坐标轴和绕其中某一直线坐标轴旋转运动的坐标轴。例如，车削加工中心除了控制纵向 (Z 轴)、横向 (X 轴) 两个直线坐标轴外，还同时控制绕 Z 轴旋转的主轴联动。3 坐标数控铣床可用于加工曲面，如图 1-6 (b) 所示。

③ 2 轴半联动。数控机床本身有三个坐标，能做三个方向的运动，但控制装置只能同时控制两个坐标，而第三个坐标只能做等距周期移动，可加工出零件的空间曲面如图 1-6 (c) 所示。

④ 多轴联动。4 轴或 5 轴联动的数控铣床或加工中心，在某些复杂曲面的加工中，为保证加工精度或提高加工效率，铣刀的侧面或端面应始终与曲面贴合，这就需要铣刀轴线位于曲线或曲面的切线或法线方向。为此，除需要 X 、 Y 、 Z 三个直线坐标轴联动外，还需要同

时控制三个旋转坐标轴 A 、 B 、 C 中的一个或两个，使铣刀轴线围绕直线坐标轴摆动，形成 4 轴或 5 轴联动。图 1-6 (d) 所示为 5 轴联动铣床加工曲面。

(3) 按伺服系统控制的方式分类

数控机床是由数控装置发出脉冲或电压信号，通过伺服系统控制机床各运动部件运动。数控机床按伺服系统的控制方式分类可分为三种形式：开环控制数控机床、闭环控制数控机床和半闭环控制数控机床。

① 开环控制数控机床。这类机床的伺服进给系统中没有位移检测反馈装置，数控装置将工件加工程序处理后，输出数字指令信号给伺服驱动系统，驱动机床运动，但不检测运动部件的实际位置，即没有位置反馈信号。开环控制的伺服系统主要使用步进电动机。插补器进行插补运算后，发出脉冲指令（又称进给脉冲），经驱动电路放大后，驱动步进电动机转动。一个进给脉冲使步进电动机转动一个角度，通过齿轮丝杠传动使工作台移动一定距离。因此，工作台的位移量与步进电动机转动的角位移成正比，即与进给脉冲的数目成正比。改变进给脉冲的数目和频率，就可以控制工作台的位移量和速度。在这类机床中指令信息单方向传送，并且指令发出后不再反馈回来，故称为开环控制，如图 1-7 所示。



图 1-7 开环控制系统框图

开环控制数控机床由于受步进电动机的步距精度和工作频率及传动精度的影响，系统速度和精度都较低。但由于开环控制结构简单、调试方便、容易维修、成本较低，仍被广泛应用于经济型数控机床上。

② 闭环控制数控机床。开环控制数控机床的控制精度不高，主要是没有检测工作台移动的实际位置，即没有纠正偏差的能力。图 1-8 为闭环控制系统框图，安装在工作台上的检测装置将工作台实际位移量反馈到计算机中，与所求的位置指令进行比较，用比较的差值进行控制，直到差值消除为止。可见，闭环控制系统可以消除机械传动部件的各种误差和工

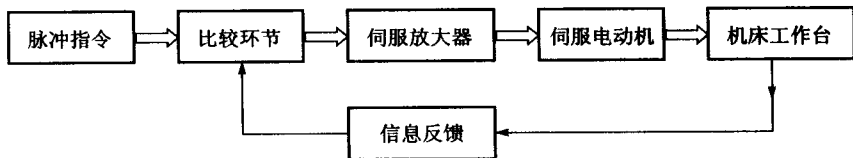


图 1-8 闭环控制系统框图

件加工过程中产生的干扰的影响,从而使加工精度大大提高。速度检测装置的作用是将伺服电动机的实际转速转换成电信号送到速度控制电路中,进行反馈校正,保证电动机转速恒定不变。常采用的速度检测装置是位移传感器。

闭环控制的特点是加工精度高,移动速度快。这类数控机床采用直流伺服电动机或交流伺服电动机作为驱动装置,电动机的控制电路较复杂,检测装置价格昂贵,因此调试和维修比较复杂,成本高。

③ 半闭环控制数控机床。半闭环控制系统框图如图 1-9 所示,它不是直接检测工作台的位移量,而是采用转角位移检测装置,如采用光电编码器,测出伺服电动机或丝杠的转角,推算出工作台的实际位移量,并反馈到计算机中进行位置比较,用比较的差值进行控制。由于反馈环内没有包含工作台,故称为半闭环控制。

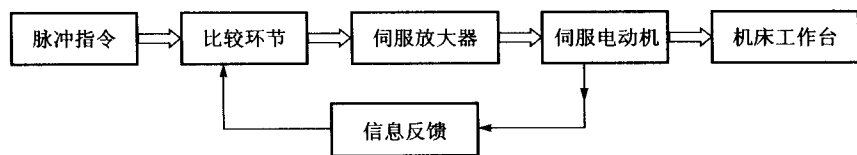


图 1-9 半闭环控制系统框图

半闭环控制系统的精度较闭环控制差,但稳定性好,成本较低,调试维修也较容易,兼顾了开环控制和闭环控制两者的特点,因此应用比较普遍。

(4) 按工艺用途分类

按工艺用途的不同,可将数控机床分为以下几类:

① 单工序的数控机床。这类数控机床一般只能完成某一工序的加工过程,如数控车床、数控钻床、数控铣床、数控磨床等。

② 加工中心。加工中心是带有刀库和自动换刀装置的数控机床,它将数控铣床、数控镗床、数控钻床的功能结合在一起,工件一次装夹后可实现多工序加工,如图 1-10 所示。加工中心的类型很多,一般分为立式加工中心、卧式加工中心、龙门式加工中心和车削中心等。

③ 特种加工数控机床。特种加工数控机床包括数控线切割机、数控火焰切割机、数控电火花成形机床、数控激光加工机床、数控冲床和数控剪切机床等。

④ 其他类型的数控设备。例如三坐标测量机等也属于数控机床的范畴。

(5) 按数控装置的类型分类

① 硬件数控。早期的数控装置基本上都属于硬件数控(NC)类型,主要由固化的数字逻辑电路处理数字信息,数控机床的功能基本上是靠此控制。硬件数控系统于 20 世纪 60 年代投入使用,结构如图 1-11 所示,其工作原理是先根据应用程序制备穿孔带,磁带阅读机将穿孔带上的信息读入数控装置,由数控装置控制机床加工出合格的零件。由于功能少、线路复杂和可靠性低等缺点,硬件数控系统已经基本上被淘汰。

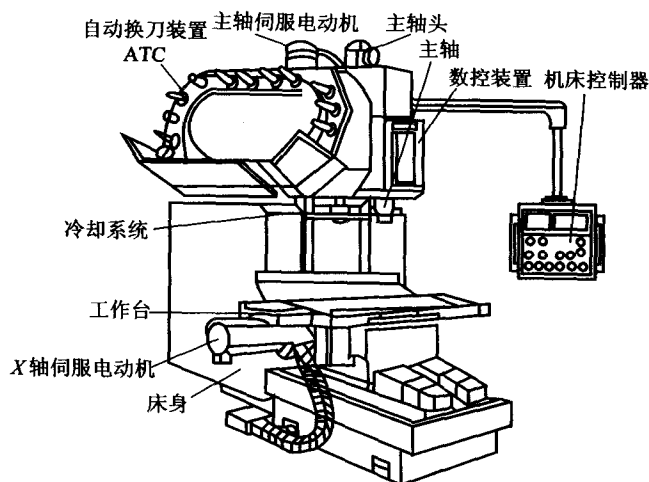


图 1-10 加工中心

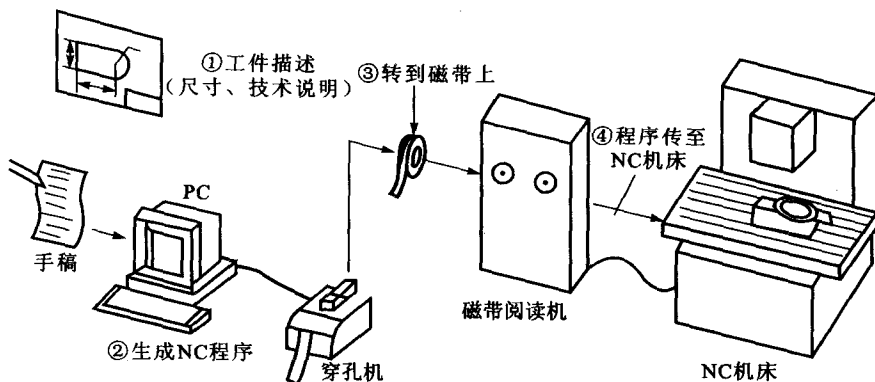


图 1-11 硬件数控系统

② 计算机数控。它是用计算机处理数字信息的计算机系统。数控机床的功能基本上是靠软件控制的，系统软件与应用程序放在 ROM 中，关机后不会丢失；也有少数老式的 CNC 机床的应用程序存放在 RAM 中，这样关机后就会丢失。当然，应用程序也可以存放在磁盘、磁带等程序载体上。随着微电子技术的迅速发展，微处理器功能越来越强，价格越来越便宜，现在数控系统的主流是微机控制（MNC）。根据数控系统微处理器的多少，可分为单微处理器数控系统和多微处理器数控系统，如图 1-12 所示。

(6) 按数控系统的功能水平分类

按数控系统的功能水平可分为经济型数控机床、中档数控机床、高档数控机床三类。