

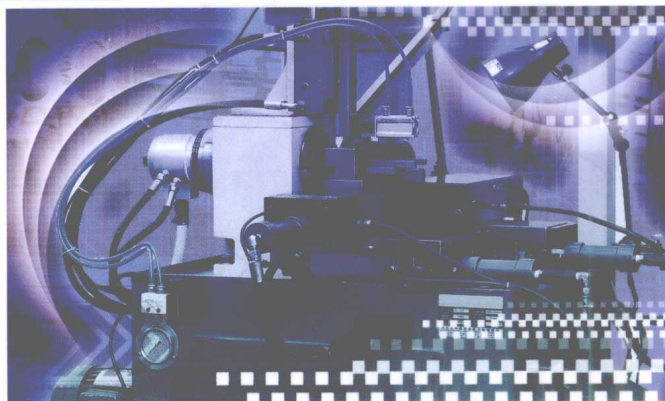


面向“十二五”高等教育课程改革项目研究成果

数控加工工艺

SHUKONG JIAGONG GONGYI

◎ 主 编 翟瑞波



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

面向“十二五”高等教育课程改革项目研究成果

数控加工工艺

主 编 翟瑞波

参 编 刘晓东 郭 平 宋 芳

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内容简介

本教材针对数控专业的教育需求开发。本书包括5个项目：项目一 数控加工基础；项目二 数控车削加工工艺；项目三 数控铣削加工工艺；项目四 加工中心加工工艺；项目五 数控电加工工艺。为增加学生的知识面，项目后还设置了拓展知识模块。

教材可作为高等院校数控技术应用专业和机电技术应用专业的教学与实践教材，同时对数控技术开发、数控设备使用、数控机床编程人员、数控机床操作人员具有指导意义，也可作为各种层次的数控培训教材。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

数控加工工艺 / 翟瑞波主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2010. 7
ISBN 978 - 7 - 5640 - 3565 - 5

I. ①数… II. ①翟… III. ①数控机床—加工工艺 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 151744 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 / 三河市文通印刷有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 21.75

字 数 / 405 千字

版 次 / 2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷

责任编辑 / 廖宏欢

印 数 / 1 ~ 1500 册

责任校对 / 张沁萍

定 价 / 43.00 元

责任印制 / 边心超

图书出现印装质量问题, 本社负责调换

面向“十二五”高等教育课程改革项目研究成果

机电系列编委会

主任：翟瑞波

副主任：徐秀娟 王核心 李稳贤 侯会喜 袁世先

编委（按姓氏笔画为序）：

卜养玲	孔敏	王颖娴	王亚平	王兰
王周让	王保华	王从钗	牛方方	邓小君
邓树君	代美泉	石枫	白娟娟	冯秀萍
孙鹏涛	李俊	李宁	李燕	李俊涛
李妍缘	李丽娟	吕栋腾	朱劲松	朱敬超
朱永迪	闫存富	刘书群	刘峙	刘畅
刘光定	刘龙江	安宏	许云兰	宋芳
宋志峰	宋述林	宋育红	张运真	张俊勇
张保丰	张志军	张俊	张怀广	张明颖
张峰	张文革	冶君妮	时寸	辛小丽
辛梅	罗亚军	宗一妮	房贯军	赵亚英
赵东辉	赵章吉	赵斌	庞应周	杨辉
杨琳	杨维	杨汉嵩	杨爽	郭新民
侯晓芳	徐铭	徐雅娟	徐家忠	高凯
高葛	唐志祥	符林芳	黄明惠	黄金磊
曾霞	雷伟斌	蒋爱云	蔺国民	潘爱民
薛媛丽				

前 言

随着数控机床的日益普及，如何提高数控加工工艺水平成为制约数控技术发展的重要因素。本书以项目教学的模式编排内容，以就业为导向，突出“以素质为基础，以就业为导向，以能力为本位，以学生为主体”的教育课程改革指导思想，从岗位需求出发，以职业能力培养为核心，体现新知识、新技术、新方法的应用，着重强调知识的应用性，即学生实际职业能力的培养。

教材以数控加工基础（包括数控机床、数控机床刀具、夹具、加工工艺的基本概念）引入，进行数控车削加工工艺、数控铣削加工工艺、加工中心加工工艺、数控电加工工艺的讲解，内容设置合理、繁简得当。教材突出应用、实用、适用，项目、课题的设置以够用为原则，可操作性强。书中图片、插图直观，教材内容设置循序渐进、易于理解。以实际出发设计加工工艺实例，将加工工艺、编程知识融入当中。加工工艺的实例在生产中已进行验证。

本书由翟瑞波主编并统稿，刘晓东、郭平、宋芳参编。在编写过程中得到汪化娟、张鹏程、杨晓朋等的帮助，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中不足之处恳请读者批评指正。

目 录

项目一 数控加工基础	1
课题一 数控机床概述	1
拓展知识 数控系统及数控机床的发展	31
课题二 数控机床刀具	36
拓展知识 刀具的磨损和提高刀具耐用度的措施	76
课题三 数控机床夹具	80
拓展知识 工件获得加工精度的方法	117
课题四 数控加工工艺分析	123
拓展知识 工序尺寸及其公差的确 定	151
项目二 数控车削加工工艺	160
课题一 数控车床概述	160
课题二 数控车削刀具及切削用量的选择	168
拓展知识 车刀体的编码（外圆车刀）	178
课题三 数控车削加工工艺分析	182
拓展知识 数控外圆磨削加工	193
课题四 典型零件的数控车削工艺	196
项目三 数控铣削加工工艺	220
课题一 数控铣床概述	220
课题二 数控铣削刀具及切削用量的选择	226
拓展知识 铣刀的合理选择	234
课题三 数控铣削加工工艺的制订	236
拓展知识 高速切削技术	247
课题四 典型零件的数控铣削工艺	250
项目四 加工中心加工工艺	259
课题一 加工中心概述	259
拓展知识 加工中心的选用	268
课题二 加工中心加工工艺方案的制定	270

拓展知识 数控复合加工	278
课题三 加工中心典型零件的加工工艺	281
项目五 数控电加工工艺	297
课题一 数控电火花成型加工工艺	297
课题二 数控电火花线切割加工工艺	313
拓展知识 快速成型制造技术 (RPM)	334

项目一 数控加工基础

学习目标

1. 掌握数控机床的典型结构、分类
2. 掌握数控机床坐标系
3. 掌握数控机床刀具的使用
4. 掌握数控机床常用夹具
5. 掌握数控加工工艺编制

课时分配

课题一 数控机床概述 14H

课题二 数控车削刀具 14H

课题三 数控机床夹具 14H

课题四 数控加工工艺分析 18H

课题一

数控机床概述

学习目标

1. 掌握数控机床的典型结构、分类
2. 掌握数控机床坐标系

一、数控机床的工作原理及组成

数控机床产生于1952年,发展至今数控系统经历了早期的硬件数控系统和现代的计算机数控系统两个阶段。硬件数控系统主要由电路的硬件和连线组成。它的特点是具有很多硬件电路和连接结点,电路复杂,可靠性不好。计算机数控系统(Computer Numerical Control, CNC系统)主要是由计算机硬件和软件组成。它最突出的特点是利用存储在存储器里的软件控制系统工作。这种系统容易扩大功能,柔性好,可靠性高。

国际信息处理联盟(IFIP)第五技术委员会对数控机床定义如下:数控机床

是一个装有程序控制系统的机床。该系统能够逻辑地处理具有使用号码，或其他符号编码指令规定的程序。定义中所说的程序控制系统即数控系统。

进一步说，当把数字化了的刀具移动轨迹的信息输入数控装置，经过译码、运算，从而实现控制刀具与工件相对运动，加工出所需要的零件的一种机床即为数控机床。

1. 数控机床工作原理

数控加工就是根据零件图样及工艺要求等原始条件，编制零件数控加工程序，并输入到数控机床的数控系统，用以控制数控机床中刀具与工件的相对运动，从而完成零件的加工。数控加工原理如图 1-1 所示。

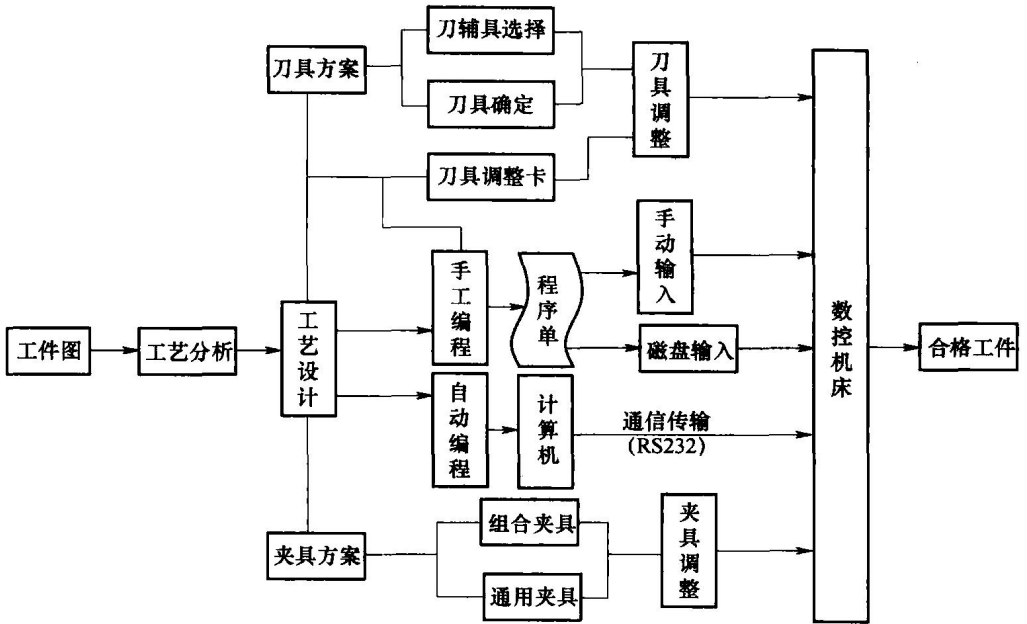


图 1-1 数控加工原理

- ①根据零件图纸要求确定零件加工的工艺过程、工艺参数和刀具参数。
- ②用规定的程序代码和格式编写零件数控加工程序。可采用手工编程、自动编程的方法完成零件的加工程序文件。
- ③通过数控机床操作面板或用计算机传送的方式将数控加工程序输入到数控系统。
- ④按数控程序进行试运行、刀具路径模拟等。
- ⑤通过对机床的正确操作，运行程序，完成零件加工。

2. 数控机床的组成

数控机床一般由机床主体、控制部分、伺服系统、辅助装置四部分组成。

(1) 机床主体

数控机床的机床主体与传统机床相似,由主轴传动装置、进给传动装置、床身、工作台等组成。但数控机床在整体布局、外观造型、传动系统、刀具系统的结构以及操作机构等方面都已发生了很大的变化。这种变化的目的是为了满足不同数控机床的要求和充分发挥数控机床的特点。

数控机床主体结构有以下特点:

①由于采用了高性能的主轴及伺服传动系统,数控机床的机械传动结构大为简化,传动链较短。如主轴变速形式采用无级变速、分段无级变速、内装电动机主轴变速。

②为适应连续地自动化加工,数控机床机械结构具有较高的动态刚度和阻尼精度,较高的耐磨性而且热变形小。

③为减少摩擦,提高传动精度,更多地采用了高效传动部件,如滚珠丝杠副和贴塑导轨、滚动导轨、静压导轨等。

(2) 控制部分(CNC装置)

CNC装置是数控机床的控制核心,一般是一台机床专用计算机,包括输入装置、CPU(包括运算器、控制器、存储器及寄存器等)、屏幕显示器(监视器)和输出装置。它的功能是将输入的各种信息,经CPU的计算处理后再经输出装置向伺服系统发出相应的控制信号,由伺服系统带动机床按预定轨迹、速度及方向运动。

CNC装置的基本工作过程

①输入。输入内容有零件程序、控制参数、补偿数据。

输入形式有键盘输入、磁盘输入、计算机传送、光电阅读机纸带输入等。

②译码。译码的目的是将程序段中的各种信息,按一定语法规则解释成数控装置能识别的语言,并以一定的格式存放在指定的内存专用区间。

③刀具补偿。刀具补偿包括刀具位置补偿、刀具长度补偿、刀具半径补偿。

④进给速度处理。编程所给定的刀具移动速度是加工轨迹切线方向的速度。速度处理就是将其分解成各运动坐标方向的分速度。

⑤插补。当走刀轨迹为直线或圆弧时,数控装置则在线段的起、终点坐标之间进行“数据点的密化”即插补,向各坐标轴输出脉冲数,保证各个坐标轴同时运动到线段的终点坐标,这样数控机床能够加工出需要的直线或圆弧轮廓。一般CNC装置能对直线、圆弧进行插补运算。一些专用或较高档的CNC装置还可以完成对椭圆、抛物线、正弦曲线和一些专用曲线的插补运算。常用的插补运算方法有逐点比较插补法、数字积分插补法、时间分割插补法等。

⑥位置控制。在CNC装置中,通过检测反馈系统,在每个采样周期内,把插补计算得到的理论位置与实际反馈位置相比较用其差值去控制进给电机。检测反馈系统可分为半闭环和闭环两种系统。常用的直线型检测反馈装置有长光栅、绝对编码尺和直线感应同步器;旋转型检测反馈装置有圆光栅、光电编码器及旋

转变压器。

(3) 伺服系统

①机床伺服系统是以机床移动部件（工作台）的位置和速度作为控制量的自动控制系统。伺服系统接受计算机插补生成的进给脉冲或进给位移量，将其转化为机床工作台的位移。

②伺服系统应满足的要求是：进给速度范围要大（如0.1 mm/min 低速趋近，15 m/min 快速移动）、位移精度要高、工作速度响应要快以及工作稳定性要好。

③伺服系统由驱动装置和执行机构组成。

驱动装置是数控机床的执行机构（工作台、主轴）的驱动部件，包括主轴电机、进给伺服电机。

④数控机床的伺服系统按其控制方式，可分为开环伺服系统、半闭环伺服系统、闭环伺服系统三大类。

(4) 辅助装置

辅助装置是指数控机床的一些配套部件，包括刀库、液压、气动装置、冷却系统和排屑装置等，以及辅助运动装置、润滑系统、冷却装置。

二、数控机床的分类

目前，数控机床已发展成为品种齐全，规格繁多的许多类型，可以从不同的角度分类。

1. 按工艺用途分类

数控机床是在普通机床的基础上发展起来的，各种类型的数控机床基本上起源于同类型的普通机床，按工艺用途分类大致如下：

①普通数控机床。如数控车床、数控铣床、数控钻床、数控镗床、数控齿轮加工机床、数控磨床等，这类机床的工艺性能和通用机床相似。

②加工中心。加工中心是带有刀库和自动换刀系统的数控机床。常见的有数控车削中心、数控车铣中心、数控镗铣中心（简称加工中心）等。

③数控特种加工机床。如数控线切割机床、数控电火花加工机床、数控激光切割机床等。

④其他类型的数控机床。如数控三坐标测量机等。

2. 按控制运动的方式分类

数控机床按其刀具与工件相对运动的方式，可以分为点位控制、点位直线控制和轮廓控制数控机床，如图1-2所示。

①点位控制数控机床。该机床只对点的位置进行控制，即机床的数控装置只控制机床移动部件从一个位置（点）精确地移动到另一个位置（点），移动过程中不进行加工，见图1-2（a）。

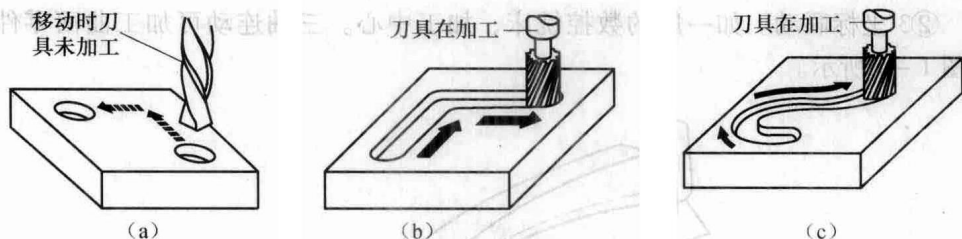


图 1-2 按控制运动的方式分类

(a) 点位控制; (b) 点位直线控制; (c) 轮廓控制

采用点位控制的机床有数控坐标镗床、数控钻床、数控冲床以及数控点焊机等。

② 点位直线控制数控机床。这种机床不仅要控制点的准确位置而且要控制刀具（或工作台）以一定的速度沿着与坐标轴平行的方向进行切削加工。此类机床应具有主轴转速的选择与控制，切削速度与刀具选择以及循环进给加工等辅助功能。这种控制常应用于简易数控车床、数控铣床、数控磨床等，现已较少使用，如图 1-2 (b) 所示。

③ 轮廓控制数控机床。这种机床能同时对两个或两个以上的坐标轴实现连续控制。它不仅能够控制移动部件的起点和终点，而且能控制整个加工过程中每点的位置与速度。也就是说，能连续控制加工轨迹，使之满足零件轮廓形状要求。这种机床具有刀具补偿、主轴转速控制以及自动换刀等较齐全的辅助功能。

轮廓控制主要用于加工曲面、凸轮及叶片等复杂形状的数控铣床、数控车床、数控磨床和数控加工中心等，现在的数控机床多为轮廓控制数控机床，见图 1-2 (c) 所示。

3. 按可控制联动的坐标轴分类

所谓数控机床可控制联动的坐标轴，是指数控装置控制几个伺服电动机，同时驱动机床移动部件运动的坐标轴数目。

① 2 坐标联动。如数控车床，加工曲面回转体，如图 1-3 (a) 所示；某些数控镗床，2 轴联动可镗铣斜面，如图 1-3 (b) 所示。

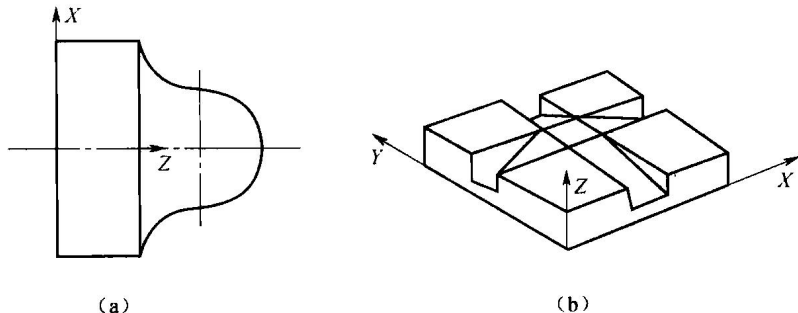


图 1-3 2 坐标联动

(a) 曲面回转体; (b) 镗铣斜面

②3 坐标联动。如一般的数控铣床、加工中心。三轴联动可加工曲面零件，如图 1-4 所示。

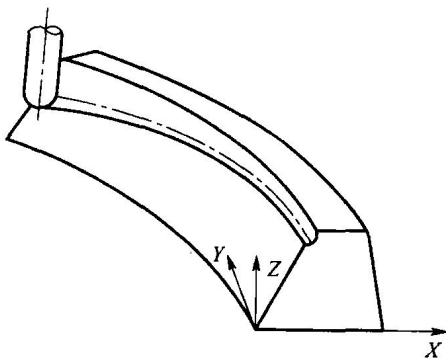


图 1-4 3 坐标联动

③ $2\frac{1}{2}$ 坐标联动。又称 2 轴半。实为 2 坐标联动，第三轴做周期性等距运动，如图 1-5 所示。

④多坐标联动。4 轴及 4 轴以上联动称为多轴联动。例如 5 轴联动铣床，工作台除 X、Y、Z 三个方向可直线进给外，还可绕 Z 轴旋转进给（C 轴）、刀具主轴可绕 Y 轴作摆动进给（B 轴），如图 1-6 所示。

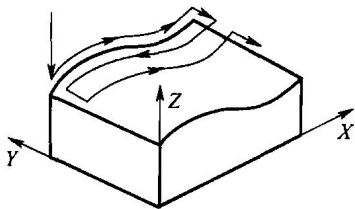


图 1-5 2 轴半联动

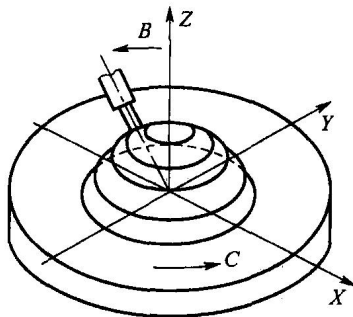


图 1-6 5 轴联动

4. 按伺服系统分类

(1) 根据有无检测反馈元件及其检测装置，机床的伺服系统可分为开环伺服、闭环伺服、半闭环伺服

①开环伺服数控机床。

在开环伺服系统中，机床没有检测反馈装置，见图 1-7 所示，即数控装置发出的信号流程是单向的。工作台的移动速度和移动量是由输入脉冲的频率和脉冲数决定的。由于开环伺服系统对移动部件的实际位移无检测反馈，故不能补偿系统精度，因此伺服电机的误差以及齿轮与丝杠的传动误差，都将影响被加工零件的精度。但开环

伺服系统的结构简单，成本低，调整维修方便及工作可靠。它适用于精度、速度要求不高的场合，如简易机床、小型 X—Y 工作台、线切割机和绘图仪等。

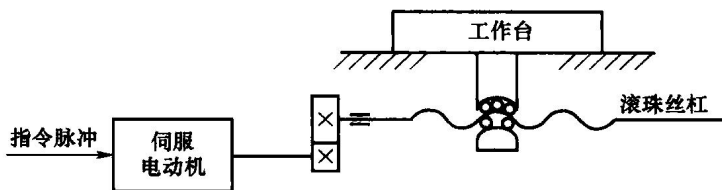


图 1-7 开环伺服系统

② 闭环伺服数控机床。

闭环伺服系统是在机床移动部件上安装直线位置检测装置，见图 1-8，将检测到的实际位置反馈到数控装置中，与指令要求的位置进行比较，用差值进行控制，直到差值消除为止，最终实现移动部件的高位置精度。这种位置补偿回路也称位置环。

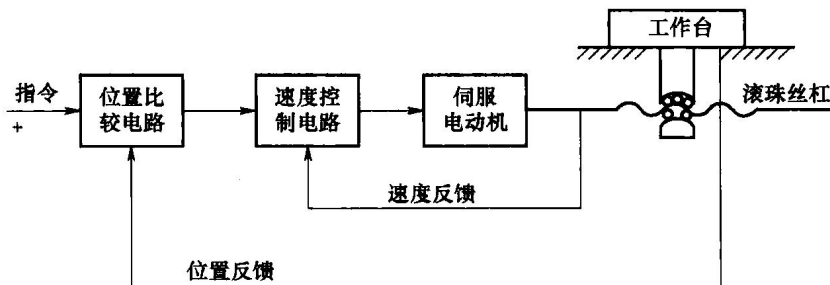


图 1-8 闭环伺服系统

在闭环系统中，机械系统也包括在位置环之内，诸如机械固有频率，阻尼比和间隙等因素，将会影响系统的稳定性，从而增加了系统设计和调试的难度。

③ 半闭环伺服数控机床。

这种控制方式对移动部件的实际位置不进行检测，而是通过检测伺服电机的转角间接地测知移动部件的实际位移量，用此值与指令值相比较，通过差值进行控制，见图 1-9。

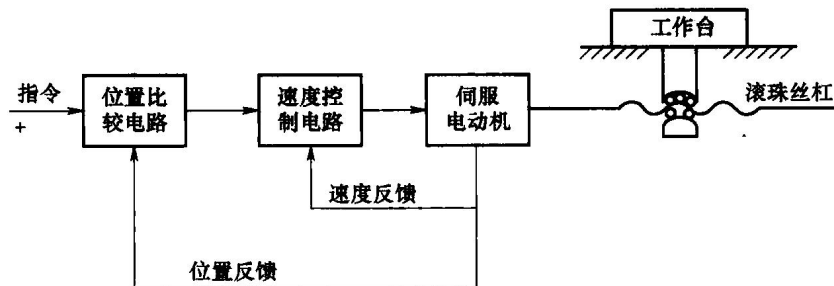


图 1-9 半闭环伺服系统

对于半闭环系统，由于其角位移检测装置结构简单，安装方便，而且惯性大的移动部件不包括在闭环内，所以系统调试方便，并有很好的稳定性。

半闭环系统的控制精度介于开环和闭环之间，应用广泛。

(2) 检测装置

①检测装置作用。检测装置是把位移和速度测量信号作为反馈信号，并将反馈信号转换成数字信号送回计算机与脉冲指令信号进行比较，以控制驱动元件正确运转。检测装置的精度直接影响数控机床的定位精度和加工精度。

②对检测装置的要求。高的可靠性和抗干扰能力，满足机床加工精度和加工速度的要求，使用维护方便，成本低。

③检测装置的分类。

a. 直接测量与间接测量。

直接测量是指所测对象为被测对象本身，其方式有两种：一种是直线测量，即测工作台直线位移（但检测装置需和行程等长）；另一种是角度测量，即测主轴旋转角度。

间接测量是指以旋转型检测装置反映工作台直线位移，该方法使用方便又无长度限制，但精度要受机床传动链精度的影响。

b. 增量式测量和绝对式测量。

增量式测量是指只测位移增量，由系统所发脉冲量累计计算位移。

绝对式测量是指被测任一点均从固定的零点起算，被测点均有对应编码。

c. 位置检测与速度检测。

位置检测指对运动部件的位置做测量，而速度检测则是对运动件速度做测量（如测速发电机）。

位置检测装置有直线型检测装置（感应同步器、光栅图 1-10、磁栅）和旋转型检测装置（旋转变压器、脉冲编码器、测速发电机）。

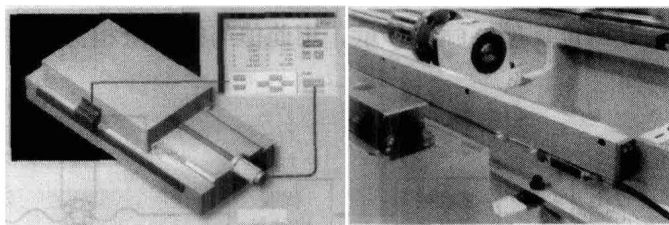


图 1-10 光栅

5. 按数控系统的功能水平分类

数控系统一般分为高级型、普及型和经济型三个档次。数控系统并没有确切

的档次界限,其参考评价指标包括:CPU性能、分辨率、进给速度、联动轴数、伺服水平、通信功能和人机对话界面等。

(1) 高级型数控系统

该档次的数控系统采用32位或更高性能的CPU,联动轴数在5轴以上,分辨率 $\leq 0.1\ \mu\text{m}$,进给速度 $\geq 24\ \text{m}/\text{min}$ (分辨率为 $1\ \mu\text{m}$ 时)或 $\geq 10\ \text{m}/\text{min}$ (分辨率为 $0.1\ \mu\text{m}$ 时),采用数字化交流伺服驱动,具有MAP高性能通信接口,具备联网功能,有三维动态图形显示功能。

(2) 普及型数控系统

该档次的数控系统采用16位或更高性能的CPU,联动轴数在5轴以下,分辨率在 $1\ \mu\text{m}$ 以内,进给速度 $\leq 24\ \text{m}/\text{min}$,可采用交、直流伺服驱动,具有RS232或DNC通信接口,有CRT字符显示和平面线性图形显示功能。

(3) 经济型数控系统

该档次的数控系统采用8位CPU或单片机控制,联动轴数在3轴以下,分辨率为 $0.01\ \text{mm}$,进给速度在 $6\sim 8\ \text{m}/\text{min}$,采用步进电动机驱动,具有简单的RS232通信接口,用数码管或简单的CRT字符显示。

三、数控机床的机械结构

1. 数控机床机械结构的特点

数控机床是机电一体化产品的典型代表,尽管它的机械结构与普通机床的结构有许多相似之处,但并不是简单地在普通机床上配备数控系统即可,它与普通机床相比,结构上进行了改进,主要表现在以下几个方面:

①主传动装置多采用无级变速或分段无级变速方式,可利用程序控制主轴的变向和变速,主传动具有较宽的调速范围。有些数控机床的主传动系统已开始采用结构紧凑、性能优异的电主轴。

②进给传动装置中广泛采用无间隙滚珠丝杠传动和无间隙齿轮传动,利用贴塑导轨或静压导轨来减少运动副的摩擦力,提高传动精度。有些数控机床的进给部件直接使用直线电机驱动,从而实现了高速、高灵敏度伺服驱动。

③床身、立柱、横梁等主要支承件采用合理的截面形状,且采取一些补偿变形的措施,使其具有较高的结构刚度。

④加工中心备有刀库和自动换刀装置,可进行多工序、多面加工,大大提高了生产率。

2. 数控机床对结构的要求

(1) 数控机床应具备更高的静、动刚度

刚度是指构件在恒定载荷和交变载荷作用下抵抗变形的能力。前者称为静刚

度，后者称为动刚度。

合理地设计结构，改善受力情况，以便减少受力变形。机床的基础大件采用封闭箱形机构，合理布置加强筋板，以及加强构件之间的接触刚度，都是提高机床静刚度和固有频率的有力措施。改善机床结构的阻尼特性，如在机床大件内腔填充阻尼材料，表面喷涂阻尼涂层，充分利用结合面间的摩擦阻尼以及采用新材料可提高机床动刚度。

图 1-11 所示为数控机床采用的封闭箱形机构；图 1-12 所示为数控机床采用的大理石床身。

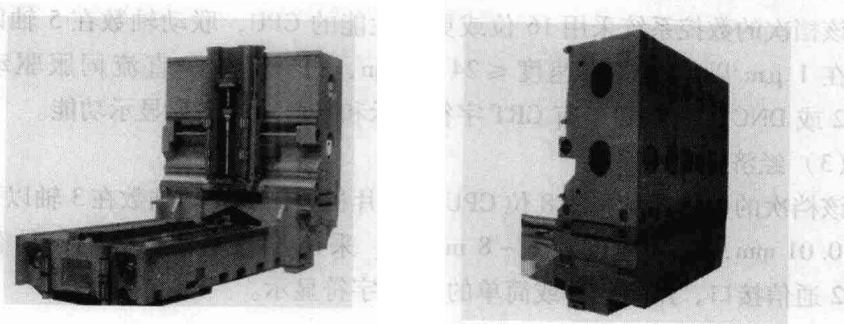


图 1-11 封闭整体箱形结构

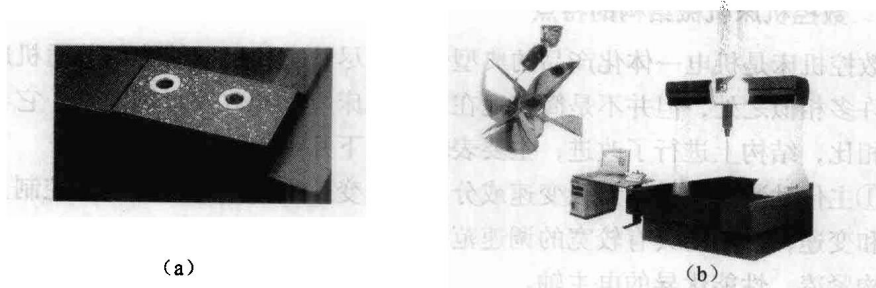


图 1-12 大理石床身
(a) 人造大理石床身（混凝土聚合物）；(b) 天然大理石床身

(2) 数控机床应有更小的热变形

机床在切削热、摩擦热等内、外热源的影响下，各部件将发生不同程度的热变形，使工件与刀具之间的相对位置关系遭到破坏，从而影响工件的加工精度。

减小热变形的措施：对机床热源进行强制冷却以及采用热对称结构，如图 1-13 所示。

(3) 数控机床运动件之间的摩擦要小

摩擦小可消除传动系统的间隙，达到低速时无爬行，高速时快速响应。