

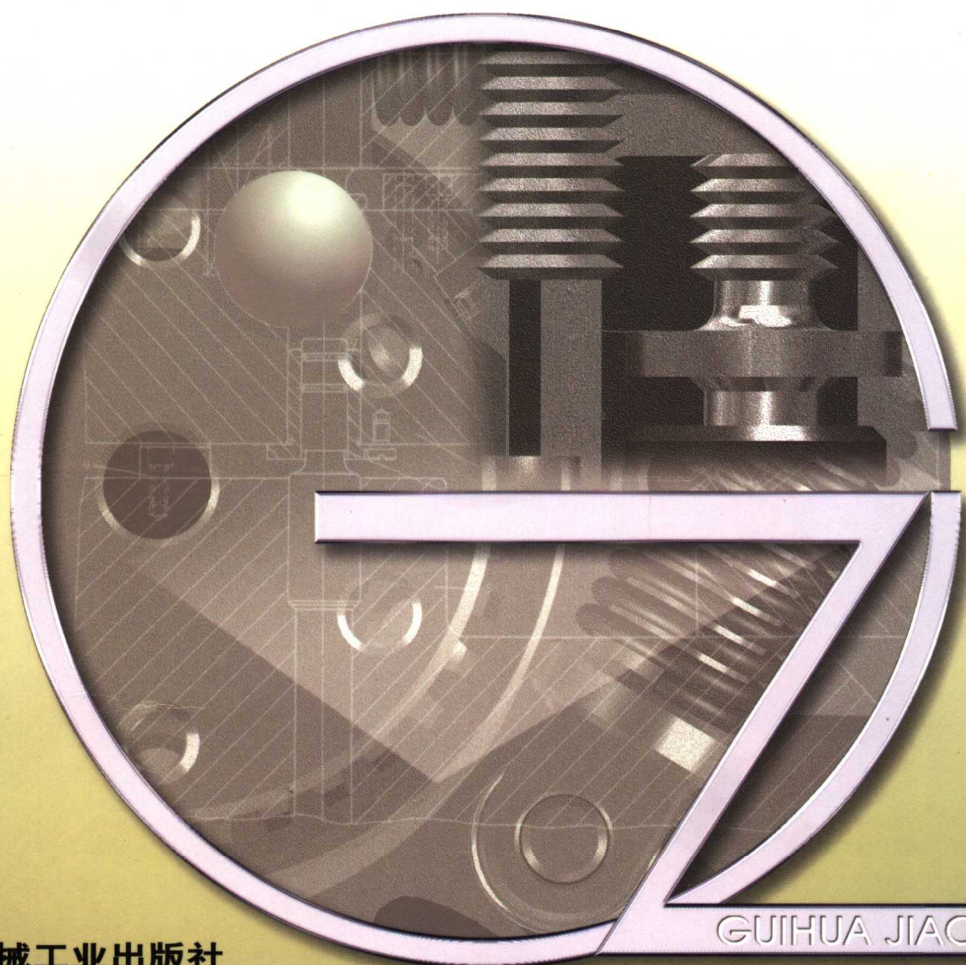


教育部职业教育与成人教育司推荐教材  
模具专业教学用书

# 模具数控加工

教育部机械职业教育教学指导委员会 组编  
中国机械工业教育协会

武友德 主编



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

GUIHUA JIAOCAI

gz



本书共分五章,内容包括模具数控加工基础知识、数控车床加工、数控铣床加工、加工中心加工、数控电火花线切割加工等。本书的主要特色在于所有的例子都来自于生产实际,内容紧紧围绕着现场实际应用这一主线,理论与实际紧密地结合。读者学了这本书后,就可掌握一般数控设备的基本操作与应用,特别适合于高职高专教育。

本书不仅可以满足高职高专的模具设计与制造专业、机电一体化专业、机械制造与控制专业的教学要求,也适合于工厂的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

模具数控加工/武友德主编. —北京:机械工业出版社,2005.6

教育部职业教育与成人教育司推荐教材 模具专业教学用书

ISBN 7-111-16717-1

I. 模... II. 武... III. 模具-数控机床-加工-高等学校:技术学校-教材 IV. TG76

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第059082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:王世刚 汪光灿

责任编辑:汪光灿 版式设计:冉晓华 责任校对:李秋荣

封面设计:姚毅 责任印制:杨曦

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005年7月第1版第1次印刷

787mm×1092mm<sup>1/16</sup>·12.75印张·310千字

定价:17.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68326294

封面防伪标均为盗版

## 机电类高等职业技术教育教材建设 领导小组人员名单

顾问：郝广发

组长：杨黎明

成员：刘亚琴 李超群 惠新才 王世刚  
姜立增 李向东 刘大康 鲍风雨  
储克森 薛 涛

## 模具设计与制造专业教材编审委员会

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 刘大康 | 戴 勇 | 刘 航 | 虞学军 | 武友德 |
| 甄瑞林 | 胡占军 | 夏江梅 | 史铁梁 | 范建蓓 |
| 彭 雁 | 徐政坤 | 张 华 | 殷 铖 | 窦君英 |
| 杨善义 | 赵国增 | 夏 曠 | 汪光灿 |     |

# 前 言

随着科学技术的发展,机械行业的产品,其结构日趋复杂,精度和性能要求日趋提高,因此对生产设备——机床也相应地提出了高效率、高精度和高自动化的要求。为满足人们的需要,产品需日益更新,且向多品种、单件小批量的趋势发展。为了适应这种趋势,就必须找到一种解决单件、小批量、多品种,特别是复杂型面零件加工的自动化并保证质量要求的设备,数控机床就是在此背景下产生的。数控机床加工技术就是利用数控设备、根据不同的工艺要求来完成零件加工的技术,应用技术水平的高低直接影响到数控机床功能的发挥。目前,市场上详细介绍这方面的书籍还很少,因此,我们编写了这本书。在编写过程中始终突出实际应用技术这一主线,让读者看了这本书后,真正能够运用数控技术来为生产服务。另外,在编写过程中紧紧结合生产实际,以现场加工的实例为主线来组织编写内容。

本书由四川工程职业技术学院武友德副教授主编,湖南工业职业技术学院周晓宏为副主编,重庆工业职业技术学院虞学军副教授担任主审。第一章由武友德副教授编写,第二章由湖南工业职业技术学院周晓宏副教授编写,第三章由河北机电职业技术学院陈文杰副教授编写,第四章由四川工程职业技术学院廖慧勇老师编写,第五章由四川工程职业技术学院冷真龙副教授编写。

因为该书涉及内容广泛,编者水平有限,难免出现错误和处理不妥之处,请读者批评指正。

编 者

2005 年 3 月

# 目 录

## 前言

## 第一章 模具数控加工基础知识 ..... 1

### 第一节 数控机床概述 ..... 1

### 第二节 数控编程基础 ..... 10

### 第三节 典型模具零件的数控 加工 ..... 16

## 第二章 数控车床加工 ..... 23

### 第一节 数控车床加工概述 ..... 23

### 第二节 数控车床加工编程 ..... 30

### 第三节 典型模具零件的加工 ..... 60

### 习题与思考题 ..... 68

## 第三章 数控铣床加工 ..... 70

### 第一节 数控铣床加工概述 ..... 70

### 第二节 数控铣床加工编程 ..... 76

### 第三节 典型模具零件的加工 ..... 93

### 习题与思考题 ..... 106

## 第四章 加工中心加工 ..... 107

### 第一节 加工中心概述 ..... 107

### 第二节 加工中心加工编程 ..... 114

### 第三节 典型模具零件的加工 ... 131

### 习题与思考题 ..... 158

## 第五章 数控电火花线切割加工 ..... 159

### 第一节 数控电火花线切割 加工概述 ..... 159

### 第二节 线切割编程 ..... 163

### 第三节 典型模具零件的加工 ... 181

### 习题与思考题 ..... 195

## 参考文献 ..... 196

# 第一章 模具数控加工基础知识

## 第一节 数控机床概述

### 一、数控机床的产生

在机械制造行业中，机床是一种主要的生产设备。机械制造行业的产品，其结构日趋复杂，精度和性能要求日趋提高，因此对生产设备——机床也相应地提出了高效率、高精度和高自动化的要求。

大批大量生产的产品，如汽车、拖拉机与家用电器的零件，为了提高产量和质量，广泛采用组合机床、凸轮控制的多刀多工位机床以及专用的自动生产线和自动化车间进行加工。但是应用这类专用机床和生产设备，生产准备周期长，使更新产品及修改加工工艺的时间较长，费用较高，制约了产品的更新换代。在制造行业中，单件与小批量产品占 70% ~ 80%，这类产品的零件一般都采用通用机床来加工，通用机床的自动化程度不高，基本上由人工操作，难于提高生产效率和保证产品质量。特别是一些由曲线、曲面组成的复杂零件，只能借助划线和样板用手工操作的方法来加工，或者利用靠模和仿形机床来加工，其加工精度和生产效率仍会受到很大的限制。

数控机床就是为了解决单件、小批量、多品种，特别是复杂型面零件加工的自动化并保证质量要求而产生的。1952 年美国 PARSONS 公司与麻省理工学院 (MIT) 合作研制了第一台三坐标数控铣床，它综合应用了电子计算机、自动控制、伺服驱动、精密检测与新型机械结构等多方面的技术成果，是一种新型的机床，可用于加工复杂曲面零件。该铣床的研制成功是机械制造行业中的一次技术革命，使机械制造业的发展进入了一个新的阶段。从第一台数控机床问世到现在的半个多世纪中，数控技术的发展非常迅速，几乎所有品种的机床都实现了数控化。数控机床的应用领域也从航空工业部门逐步扩大到汽车、造船、机床、建筑等民用机械制造行业。此外，还出现了金属成形类数控机床，如数控折弯机、数控弯管机、数控步冲机等；特种加工数控机床，如数控线（电极）切割机、数控火焰切割机、数控激光切割机床等；其他还有数控绘图机、数控三坐标测量机等。特别是相继出现的自动换刀数控机床（即加工中心，Machining center）、直接数字控制系统（即计算机群控系统，DNC，Direct Numericalw Control）、自适应控制系统（AC，Adaptive Control）、柔性制造系统（FMS，Flexible Manufacturing System）、计算机集成（综合）制造系统（CIMS，Computer Interated Manufacturing System）等，这说明数控机床已经成为组成现代机械制造生产系统、实现计算机辅助设计（CAD）、制造（CAM）、检验（CAT）与生产管理等全部生产过程自动化的基本设备。

### 二、数控机床的组成、控制原理和特点

#### 1. 数控机床的组成

数控机床由以下几个部分组成，如图 1-1 所示。

(1) 程序编制及程序载体 数控程序是数控机床自动加工零件的工作指令，在对加工零件进行工艺分析的基础上，确定零件坐标系在机床坐标系上的相对位置，即零件在机床上的

安装位置、刀具与零件相对运动的尺寸参数、零件加工的工艺路线或加工顺序、切削加工的工艺参数以及辅助装置的动作等。这样得到零件的所有运动、尺寸、工艺参数等加工信息，然后用由文字、数字和符号组成的标准的数控代码，按规定的方法和格式，编制零件加工的数控程序单。编制程序的工作可由人工进行，或者在数控机床以外用自动编程计算机系统来完成。

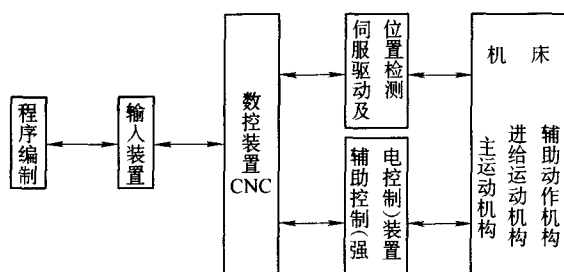


图 1-1 数控机床的组成

目前，几乎所有的数控机床，都可以在它的数控装置上直接编程。

编好的数控程序，存放在便于输入到数控装置的一种存储载体上，它可以是磁卡、磁盘等。采用哪一种存储载体，取决于数控装置的设计类型。

(2) 输入装置 它的作用是将程序载体上的数控代码变成相应的电脉冲信号，传送并存入数控装置内。根据程序存储介质的不同，输入装置可以是光电阅读机、录放机或软盘驱动器。目前的数控机床，不用任何程序存储载体，而是将数控程序单的内容通过数控装置上的键盘，用手工方式（MDI 方式）输入，或者将数控程序由编程计算机用通信方式传送到数控装置。

(3) 数控装置及强电控制装置 数控装置是数控机床的核心，它接受输入装置送来的脉冲信号，经过数控装置的系统软件或逻辑电路进行编译、运算和逻辑处理后，输出各种信号和指令控制机床的各个部分，进行规定的、有序的动作。这些控制信号中最基本的信号是由插补运算决定的各坐标轴（即作进给运动的各执行部件）的进给位移量、进给方向和速度的指令，经伺服驱动系统驱动执行部件作进给运动。其他还有主运动部件的变速、换向和起停信号，选择和交换刀具的刀具指令信号，控制冷却、润滑的起停、工件和机床部件松开、夹紧、分度工作台转位等辅助指令信号等。

强电控制装置是介于数控装置和机床机械、液压部件之间的控制系统，其主要作用是接收数控装置输出的主运动变速、刀具选择交换、辅助装置动作等指令信号，经必要的编译、逻辑判断、功率放大后直接驱动相应的电器、液压、气动和机械部件，以完成指令所规定的动作，此外还有行程开关和监控检测等开关信号也要经过强电控制装置送到数控装置进行处理。

(4) 伺服驱动系统及位置检测装置 伺服驱动系统由伺服驱动电路和伺服驱动装置（电动机）组成，并与机床上的执行部件和机械传动部件组成数控机床的进给系统。它根据数控装置发来的速度和位移指令控制执行部件的进给速度、方向和位移。每个作进给运动的执行部件，都配有一套伺服驱动系统。伺服驱动系统有开环、半闭环和闭环之分。在半闭环和闭环伺服驱动系统中，还得使用位置检测装置，间接或直接测量执行部件的实际进给位移，与指令位移进行比较，按闭环原理，将其误差转换放大后控制执行部件的进给运动。

(5) 机床的机械部件 数控机床的机械部件包括主运动部件、进给运动执行部件、工作台、滑板及其传动部件和床身立柱等支撑部件，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，还有存放刀具的刀库、交换刀具的机械手等部件，如图 1-2 所示。数控机床机械部件的组成与普通机床相似，但传动结构要求更为简单，

在精度、刚度、抗振性等方面要求更高，而且其传动和变速系统要便于实现自动化控制。

## 2. 数控机床的控制原理

数控机床是一种高度自动化的机床，在加工工艺与加工表面形成方法上，与普通机床是基本相同的，最根本的不同在于实现自动化控制的原理与方法上。数控机床是用数字化的信息来实现自动控制的，将与加工零件有关的信息——工件与刀具相对运动轨迹的尺寸参数（进给执行部件的进给尺寸）、切削加工的工艺参数（主运动和进给运动的速度、背吃刀量等）以及各种辅助操作（主运动变速、刀具更换、切削液开停、工件夹紧、松开等）等加工信息用规定的文字、数字和符号组成的代码，按一定的格式编写成加工程序单，将加工程序输入到数控装置中，由数控装置经过分析处理后，发出各种与加工程序相对应的信号和指令控制机床进行自动加工。这一数字控制的原理与过程通过上述数控机床的各个组成部分来完成。

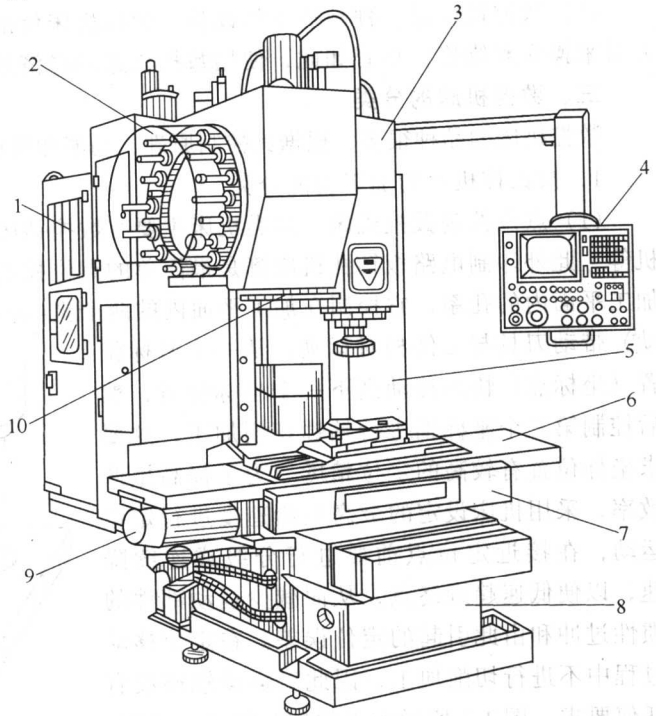


图 1-2 TH5632 立式加工中心

- 1—数控柜 2—刀库 3—主轴箱 4—操纵台  
5—驱动电源柜 6—纵向工作台 7—滑座 8—床身  
9—X 轴进给伺服电动机 10—换刀机械手

## 3. 数控机床的特点

数控机床在机械制造业中得到日益广泛的应用，是因为它具有如下特点：

(1) 能适应不同零件的自动加工 数控机床是按照被加工零件的数控程序来进行自动加工的，当改变加工零件时，只要改变数控程序，而无需更换凸轮、靠模、样板或钻模等专用工艺装备。因此，生产准备周期短，有利于机械产品的更新换代。

(2) 生产效率和加工精度高、加工质量稳定 数控机床上可以采用较大的切削用量，有效地节省了机动工时，还有自动换速、自动换刀和其他辅助操作自动化等功能，使辅助时间大为缩短，而且无需工序间的检验与测量。所以，它比普通机床的生产率高 3~4 倍甚至更高。同时由于数控机床本身的精度较高，还可以利用软件进行精度校正和补偿，又因为它是根据数控程序自动进行加工，可以避免人为的误差，因此，不但加工精度高，而且质量稳定。

(3) 能高效优质完成复杂型面零件的加工 其生产效率比之通用机床加工可提高十几倍甚至几十倍。

(4) 工序集中，一机多用 数控机床，特别是自动换刀的数控机床，在一次装夹的情况下，几乎可以完成零件的全部加工，一台数控机床可以代替数台普通机床。这样可以减少装夹误差，节约工序之间的运输、测量和装夹等辅助时间，还可以节省机床的占地面积，带来

较高的经济效益。

(5) 数控机床是一种高技术的设备 数控机床价格较高, 而且要求具有较高技术水平的人员来操作和维修。尽管如此, 使用数控机床的经济效益还是很高的。

### 三、数控机床的分类

数控机床的品种很多, 根据其控制原理、功能和组成, 可以从几个不同的角度进行分类。

#### 1. 按数控机床的加工功能分类

(1) 点位控制数控机床 这类机床主要有数控钻床、数控镗床、数控冲床、三坐标测量机等, 此外印制电路板钻孔机应算是最简单的点位控制数控机床。点位控制的数控机床用于加工平面内的孔系, 它控制在加工平面内的两个坐标轴 (一个坐标轴就是一个方向的进给运动) 带动刀具与工件相对运动, 从一个坐标位置 (坐标点) 快速移动到下一个坐标位置, 然后控制第三个坐标轴进行钻镗切削加工, 这要求坐标位置有较高的定位精度。为了提高生产效率, 采用机床设定的最高进给速度进行定位运动, 在接近定位点前要进行分级或连续降速, 以便低速趋近终点, 从而减少运动部件的惯性过冲和由此引起的定位误差。在定位移动过程中不进行切削加工, 因此对运动轨迹没有任何要求。图 1-3 所示为点位控制加工示意图。

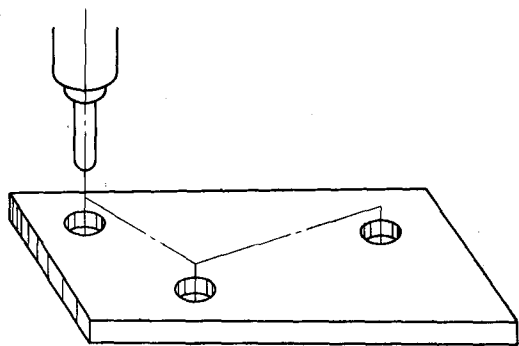


图 1-3 点位控制加工示意图

(2) 直线控制数控机床 直线控制数控机床可控制刀具或工作台以适当的送给速度, 沿着平行于坐标轴的方向进行直线移动和切削加工, 进给速度根据切削条件可在一定范围内调整。直线控制的简易数控车床, 只有两个坐标轴, 可用于加工台阶轴。直线控制的数控铣床有三个坐标轴, 可用于平面的铣削加工。现代组合机床采用数控进给伺服系统, 驱动动力头带着多轴箱轴向进给进行钻镗加工, 它也可以算作一种直线控制的数控机床。如图 1-4 所示为直线控制加工示意图。

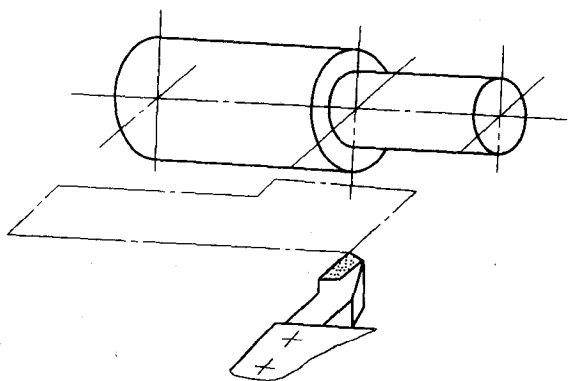


图 1-4 直线控制加工示意图

(3) 轮廓控制数控机床 轮廓控制数控机床分为平面轮廓加工的数控机床和空间轮廓加工的数控机床, 平面轮廓加工的数控机床有加工曲面零件的数控车床和铣削曲面轮廓的数控铣床, 其加工零件的轮廓形状如图 1-5 所示。零件的轮廓可以由直线、圆弧或任意平面曲线 (如抛物线、阿基米德螺旋线等) 组成。不管零件轮廓由何种线段组成, 加工时通常用小段直线来逼近曲线轮廓, 如图 1-5c 所示。在数控铣床上用圆柱铣刀铣削轮廓侧面时, 数控系统控制刀具中心相对工件在单位时间内, 同时在两个坐标轴方向上移动  $\Delta X_i$ 、 $\Delta Y_i$ , 刀具中心对工件的合成位移为  $\Delta L_i$ , 则由轮廓曲线的等距线上的  $I'$  点移到点  $J'$ , 从而在工件上加工出一小段直线  $IJ$ , 来逼近轮廓曲线上的  $IJ$  弧段。连续控制两个相对位移分量  $\Delta X_i$ 、 $\Delta Y_i$ , 便

可加工出多段小直线组成的折线来逼近曲线轮廓。进给分量  $\Delta X_i$ 、 $\Delta Y_i$ ，要根据合成进给速度、单位时间的长短、轮廓曲线的数学公式  $Y = F(X)$ 、由刀具半径  $R$  和加工裕量  $\delta$  所决定的刀具中心对工件轮廓的偏移量  $D = R + \delta$  等诸条件，由数控系统实时计算。这样的运算称为插补运动和刀具半径补偿运算。用计算所得的两个位移分量分别指令两个坐标轴同时运动，这种控制方式称为两坐标联动控制。当用半径为  $R$  的圆弧刀刃车刀车削曲面零件时，同样也要进行插补运算与刀具半径补偿运算。如果用半径  $R=0$  的尖刃车刀进行加工时，可根据工件的轮廓直接运算不需考虑刀具中心偏移的问题，因此无需进行刀具半径补偿的运算，只作插补运算。这类机床又称为连续控制或多坐标联动数控机床，它具有两轴联动的插补运算功能和刀具半径补偿功能。这类机床的数控装置的功能是最齐全的。能够进行两坐标联动控制的数控机床，一般也能够进行点位和直线控制。

空间轮廓加工的数控机床，根据轮廓形状和所用刀具形状的不同有以下几种方法。

第一种是在三坐标控制两坐标联动的机床上，用“行切法”进行加工，也有将这种方法称为两轴半控制的，即以  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三轴中任意两轴作插补运动，第三轴作周期性进给，刀具采用球头铣刀，如图 1-6 所示。在  $y$  向分为若干段，球头铣刀沿  $XZ$  平面的曲线进行插补加工，当一段加工完后，进给  $\Delta Y$ ，再加工另一相邻曲线，如此依次用平面曲线来逼近整个曲面。其中  $\Delta Y$ ，根据表面粗糙度的要求及刀头的半径选取，球头铣刀的球半径应尽可能选得大一些，以利于降低表面粗糙度提高精度，增加刀具刚度和散热性能。但在加工凹面时，球头半径必须小于被加工曲面的最小曲率半径，以免产生刀刃干涉。

第二种情况是三坐标联动加工。图 1-7 为内循环滚珠螺母的回珠器示意图，其滚道母线  $SS'$  为一空间曲线，它可用空间直线去逼近，因此，可在有空间直线插补功能的三坐标联动机床上加工。但是编程计算较复杂，其加工程序可采用自动编程系统来编制。

第三种情况是四坐标联动加工。如图 1-8 所示的飞机大梁，它的加工表面是直纹扭曲面，若用三坐标联动机床和球头铣刀加工不但生产率低，而且零件表面的表面粗糙度值也很大。为此，可以采用圆柱铣刀周边切削方式，在四坐标机床上加工。除三个移动坐标的联动

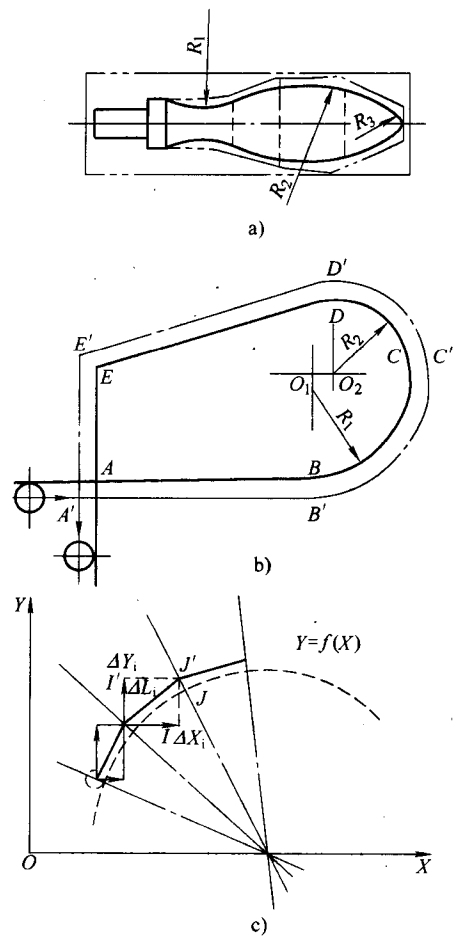


图 1-5 数控加工平面轮廓的成形

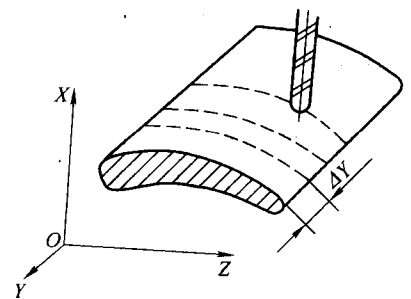


图 1-6 行切法加工空间轮廓

外,为保证刀具与工件型面在全长上始终贴合,刀具还应绕  $O_1$  (或  $O_2$ ) 作摆动联动。由于摆动运动,导致直线移动坐标要有附加的补偿移动,其附加运动量与摆心的位置有关,也需在编程时进行计算,加工程序要决定四个坐标轴的位移指令,以控制四轴联动加工,因此编程是相当复杂的。

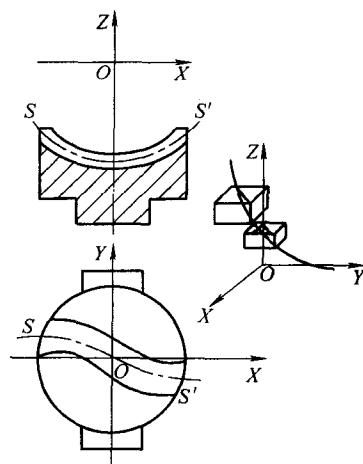


图 1-7 三坐标联动加工

第四种情况是五坐标联动加工。所有的空间轮廓几乎都可以用球头刀按“行切法”进行加工。对于一些大型的曲面轮廓,零件尺寸和曲面的曲率半径都比较大,改用端铣刀进行加工,可以提高生产率和减少加工的残留量(减小表面粗糙度值),如图 1-9 所示。用端铣刀加工时,刀具的端面与工件轮廓在切削点处的切平面相重合(加工凸面),或者与切平面成某一夹角(加工凹面),也就是刀具轴线与工件轮廓的法线平行或成某一夹角(成一夹角可以避免产生刀刃干涉)。加工时切削点  $P(x, y, z)$  处的坐标与法线  $n$  的方向角  $\theta$  是不断变化的,因此刀具刀位点  $O$  的坐标与刀具轴线的方向角也要作相应的变化。目前的数控机床,在编制加工程序时都是根据零件曲面轮廓的数学模型,计算出每一个切削点相对应的刀位点  $O$  的坐标与方向角(即刀位数据),通过

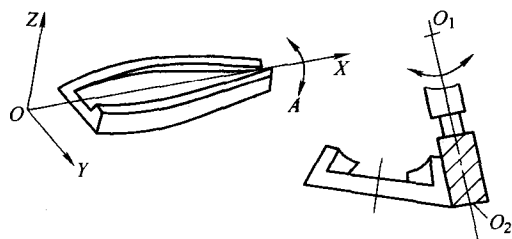


图 1-8 四坐标联动加工

程序输送到数控系统控制刀具与所要求的切削位置。刀位点的坐标位置可以由三个直线进给坐标轴来实现,刀具轴线的方向角则可以由任意两个绕坐标轴旋转的圆周进给坐标的两个转角合成实现。因此用端铣刀加工空间曲面轮廓时,需控制五个坐标轴,即三个直线坐标轴,两个圆周进给坐标轴进行联动。五轴联动的数控机床是功能最全、控制最复杂的一种数控机床,五坐标联动加工的程序编制也是最复杂的,应使用自动编程系统来编制。

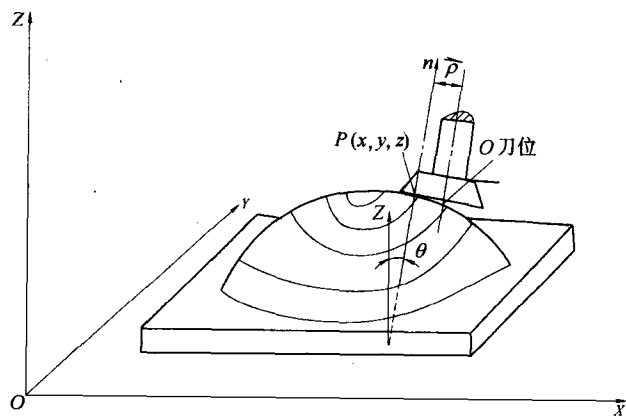


图 1-9 五坐标联动加工

上面所述是从加工功能来分类的,如果从控制轴数和联动轴数的角度来考虑,上述的各类机床可分为两轴联动数控机床、三轴控制两轴联动数控机床、三轴联动数控机床、五轴联动数控机床等。

## 2. 按工艺用途分类

(1) 一般数控机床 最普通的数控机床有钻床、车床、铣床、镗床等。它们和传统的通

用机床工艺用途相似，但是它们的生产率和自动化程度比传统机床高，都适合于单件、小批量和复杂形状的加工。

(2) 数控加工中心 这类数控机床是在一般数控机床的基础上，加装一个刀库和自动换刀装置，构成一种带自动换刀装置的数控机床，如图 1-2 所示的 TH5632 立式加工中心。这类机床的突出特点是，打破了一台机床只能进行单工种加工的传统概念，实行一次安装定位，完成多工序加工方式。

(3) 多坐标轴数控机床 有些复杂的工件，例如螺旋桨、飞机发动机叶片曲面等用三坐标数控机床无法加工，于是出现了多坐标轴的数控机床。其特点是控制轴数较多，机床结构比较复杂。

### 3. 按所用进给伺服系统的类型分类

(1) 开环数控机床 开环数控机床采用开环进给伺服系统，图 1-10 所示为典型的开环进给伺服系统。其中图 1-10a 是由功率步进电动机驱动的开环进给系统；数控装置根据所要求的进给速度和进给位移，输出一定频率和数量的进给指令脉冲，经驱动电路放大后，每一个进给脉冲驱动功率步进电动机旋转一个步距角，再经减速齿轮、丝杠螺母副，转换成工作台的一个当量直线位移。对于圆周进给，一般都是通过减速齿轮、蜗杆蜗轮副带动转台进给一个当量角位移。由于功率步

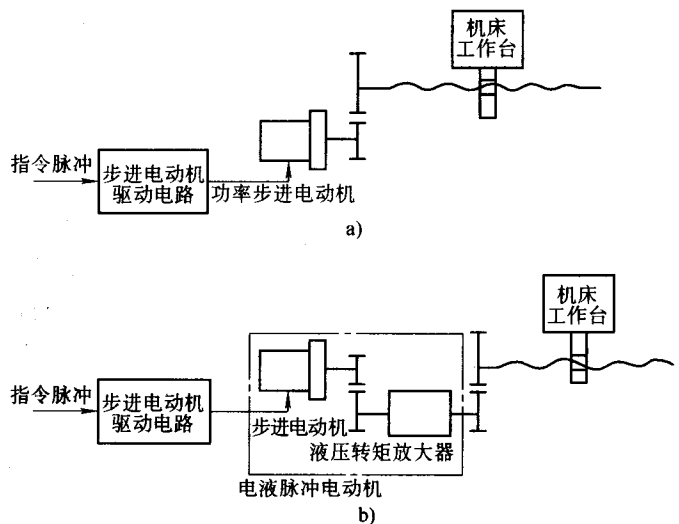


图 1-10 开环进给伺服系统

进电动机的输出转矩有限，不足以驱动较大的工作台等部件，可采用由小的信号步进电动机与由液压转矩放大器组成的电液脉冲电动机作为驱动装置，它可以输出较大的转矩，能驱动较大的工作台执行进给运动，如图 1-10b 所示。这类机床速度及精度都较低。图 1-10a 的方案多用于经济型数控机床或对旧机床进行改造。图 1-10b 的方案已不再采用了。

(2) 半闭环数控机床 如图 1-11b 所示，如果将位置检测装置安装在驱动电动机的端部，或安装在传动丝杠端部（如图 1-11b 中虚线所示），间接测量执行部件的实际位置或位移，这种系统就是半闭环进给系统。可以获得比开环系统更高的精度，但它的位移精度比闭环系统的要低。与闭环系统相比，易于实现系统的稳定性。现在大多数数控机床都采用这种半闭环进给伺服系统。

(3) 闭环数控机床 闭环数控机床的进给伺服系统是按闭环原理工作的。图 1-11a 所示为典型的闭环进给系统。数控装置将位移指令与位置检测装置测得的实际位置反馈信号，随时进行比较，根据其差值与指令进给速度的要求。按一定规律进行转换后，得到进给伺服系统的速度指令。另一方面还利用和伺服驱动电动机同轴刚性连接的测速元器件，随时实测驱动电动机的转速，得到速度反馈信号，将它与速度指令信号进行比较，以其比较的结果即速

度误差信号,对驱动电动机的转速随时进行校正。利用上述的位置控制和速度控制的两个回路,可以获得比开环进给系统精度更高、速度更快、驱动功率更大的特性指标。如图 1-11a 中所示,闭环进给系统的位置检测装置在系统末端的执行部件上,实测位置或位移量。

#### 4. 按所用数控装置类型分类

(1) 硬线数控机床 硬线数控机床 (NC) 使用硬线数控装置,它的输入处理、插补运算和控制功能,都由专用的固定组合逻辑电路来实现。不同功能的机床,其组合逻辑电路也不相同。改变或增减控制、运算功能时,需要改变数控装置的硬件电路。因此通用性、灵活性差,制造周期长,成本高。20 世纪 70 年代初期以前的数控机床基本上都属于这种类型。现代数控机床不再采用硬线数控系统。

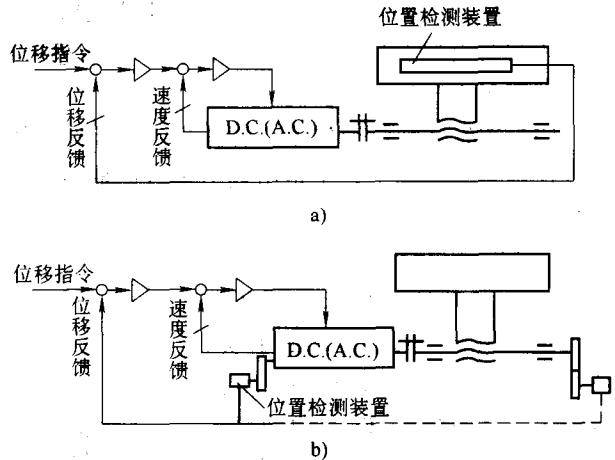


图 1-11 闭环、半闭环进给伺服系统

(2) 计算机数控机床 这类机床使用计算机数控装置 (CNC), 即软线数控装置。这种数控装置的硬件电路是由小型或微型计算机再加上通用或专用的大规模集成电路制成, 数控机床的主要功能几乎全部由系统软件来实现, 所以不同功能的机床其系统软件也就不同, 而修改或增减系统功能时, 不需变动硬件电路, 只需改变系统软件, 因此, 具有较高的灵活性。同时, 由于硬件电路基本上是通用的, 这就有利于大量生产、提高质量和可靠性、缩短制造周期和降低成本。早在 20 世纪 60 年代初期就出现了这类数控机床, 但是直到 20 世纪 70 年代中期以后, 随着微电子技术的发展和微型计算机的出现, 以及集成电路的集成度不断提高, 计算机数控装置才得到不断的发展和提高, 目前几乎所有的数控机床都采用了计算机数控装置。

除了上述三种分类方法以外, 还可以从其他角度进行分类。例如, 金属切削类数控机床有数控车床、数控铣床等等; 金属成形类数控机床有数控折弯机、数控弯管机、数控冲床等; 数控特种加工机床有数控线切割机、数控激光加工机、数控火焰切割机、数控等离子体切割机等。

#### 四、数控机床的发展

随着科学技术的发展, 制造技术的进步, 产品质量和品种多样化的要求日益提高, 中小批量生产的比重明显增加, 促使数控机床不断向着高效率、高质量、高柔性和低成本的方向发展。而且, 数控机床作为柔性制造单元、柔性制造系统、计算机集成制造系统的基础设备, 对其数控装置、伺服驱动系统、程序编制、检测监控以及机床主机等组成部分提出了更高的要求。以下几个方面可以说明数控技术和数控机床当前的发展和水平。

##### 1. 数控装置

数控装置的发展是数控技术和数控机床发展的关键。电子元器件和计算机技术的发展推动了数控装置的发展。最初的数控装置使用电子管器件, 以后使用晶体管和印制电路板, 发展到 20 世纪 60 年代末期使用的小规模集成电路器件, 这些都是所谓硬线数控装置。20 世纪 70 年代以来, 随着计算机技术的发展, 才出现了以小型计算机、微处理器为核心的计算机

数控装置 (CNC)。当今它已被广泛采用, 占据绝对的优势。

## 2. 进给伺服驱动系统

进给伺服系统是数控机床的重要组成部分, 它的电路、电动机及检测装置等的技术水平都有极大的提高。目前, 永磁同步交流伺服电动机逐渐取代了直流伺服电动机, 提高了电动机的可靠性, 降低了制造成本, 基本上无需维修; 组成伺服驱动电路的位置、速度和电流控制环节部分实现数字化, 与 CNC 系统的计算机有双向通信联系。这样避免了零点漂移, 提高了位置与速度控制的精度和稳定性; 采用高速和高分辨率的位置检测装置组成半闭环和闭环位置控制系统, 这样极大地提高了位置控制的精度, 即机床的定位精度。

## 3. 程序编制

数控机床的自动编程系统除语言编程系统外, 图形编程、实物编程和语言编程都得到了长足的发展, 增加了自动编程的手段; 从脱机编程逐渐发展到在线编程, 脱机编程是由手工或编程计算机系统完成程序编制, 然后再由输入装置输入数控装置。现代的 CNC 系统具有很强的运算能力、很高的运算速度和存储容量, 可以将自动编程的很多功能植入到数控装置里, 使零件的加工程序可以在数控装置的操作面板上在线编制, 如 FANUC 公司的 Symbolic FAPT 就是采用这样的编程方法, 也可称之为图形人机对话编程。有的数控系统, 还开发有空间曲面插补功能, 插补软件可根据存放在数控系统内的空间曲面的数学模型, 插补加工出曲面轮廓。极大地简化了编程和程序输入, 极大地提高了加工可靠性。此外, 在线编程过程中不仅可以处理几何信息, 还可以处理工艺信息, 数控装置内设有与该机床加工工艺相关的小型工艺数据库或专家系统, 可以自动选择最佳的工艺参数。

## 4. 数控机床的工况检测、监控和故障诊断

现代数控机床上装有工件尺寸检测装置。对工件加工尺寸进行定期检测, 发现超差则及时发出报警或补偿信号。还有红外、超声发射等监控装置, 对刀具工况进行监控。遇有刀具磨损超标或刀具破损, 能及时报警, 以便调换刀具, 保证加工产品的质量。目前, CNC 系统中已经采用了开机诊断、运行诊断、通信诊断和专家诊断系统等故障自诊断技术, 对故障进行自动查找、分类、显示、报警, 便于及时发现和排除系统的故障。

## 5. 采用功能很强的可编程序控制器

数控机床辅助功能的控制, 以前都采用继电器逻辑硬件电路, 而且要由用户去设计制造。现代数控机床广泛采用内装型或独立型可编程序控制器 PC (Programmable Controller)。它有专用的 22 位微处理器, 基本指令执行时间是  $0.2\mu\text{s}/\text{step}$ , 有梯形语言程序 16000step 以上, 可以采用 C 语言或 Pascal 语言来编制 PC 程序, 程序容量 68 ~ 256KB 以上, 在 PC 与 CNC 之间有高速窗口。采用 C 语言编程时, 可以在个人计算机的开发环境下工作。利用 PC 的高速处理功能, 使 CNC 与 PC 有机地结合起来, 而且可以利用梯形图 (Ladder) 的监控功能, 使机床的故障诊断和维修更加方便。

## 6. 机床的主机

数控机床的主机也有很多新的发展。主要表现在主运动部件不断实现电气化和高速化, 除采用直流调速电动机和交流变频调速电动主轴部件, 以提高主运动的速度和调速范围, 并减少机械传动链以外, 近来更有采用内装式主轴电动机, 将主轴部件装在电动机转子上, 从而大大提高了主轴转速和减少了机械传动, 轴转速最高可达 10000 ~ 100000r/min, 而且仅用 1.8s 即可从 0 升到最高转速。

采用机电一体化和全封闭式结构,将以前与主机分离的数控装置、强电控制装置和液压传动油箱等设备全部与主机集成为一体,使结构紧凑,减少管线,减少占地面积,零件加工区域完全封闭在可以窥视的罩壳内,并采用自动排屑装置,改善了加工环境和条件,用气动液压机构以控制和驱动各种辅助运动机构,利用集中的压缩空气动力,避免了液压泵的耗能、发热和噪声等缺点。

主机的大件采用焊接结构和合理的结构形式,在减轻机床自重的条件下,获得极高的结构刚度和抗振性。采用电动机无级调速驱动,缩短机械传动链的长度,减小噪声,提高机械效率。采用低摩擦阻力的滚珠丝杠螺母副、静压丝杠螺母副、滚动导轨、静压导轨、贴塑导轨等传动元件和导向导轨,极大地提高了传动刚度和减小摩擦阻力,从而提高了进给运动的动态响应性能和低速运动平稳性能。

## 第二节 数控编程基础

### 一、数控机床的坐标系

#### 1. 坐标轴及其运动方向

建立机床坐标系是为了确定刀具或工件在机床中的位置,确定机床运动部件的位置及其运动范围。统一规定数控机床坐标系各轴的名称及其正负方向,可以简化数控程序编制,并使编制的程序对同类型机床有互换性。机床的运动是指刀具和工件之间的相对运动,一律假定工件是静止的,刀具在坐标系内相对于工件运动。对数控机床中的坐标系和运动方向的命名,ISO标准和我国都统一规定采用标准的右手笛卡尔直角坐标系,并规定增大刀具与工件之间距离的方向为坐标正方向。坐标系三坐标轴  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  及其正方向用右手定则判断。相应地用  $A$ 、 $B$ 、 $C$  表示回转轴线与  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴重合或平行的回转运动,并用右手螺旋法则判断,其正方向用

$+A$ 、 $+B$ 、 $+C$  表示。用  $+X'$ 、 $+Y'$ 、 $+Z'$ 、 $+A'$ 、 $+B'$ 、 $+C'$  表示工件相对于刀具运动的正方向,与  $+X$ 、 $+Y$ 、 $+Z$ 、 $+A$ 、 $+B$ 、 $+C$  相反。机床坐标系及其方向的确定如图 1-12 所示。

如果数控机床的运动多于  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个坐标,则用附加坐标轴  $U$ 、 $V$ 、 $W$  分别表示平行于  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个坐标轴的第二组直线运动;如还有平行于  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴的第三组直线运动,则附加坐标轴可分别指定为  $P$ 、 $Q$  及  $R$  轴。如果在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个坐标轴主要直线运动之外存在不平行  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴的直线运动,也可相应地指定附加坐标轴  $U$ 、 $V$ 、 $W$  或  $P$ 、 $Q$  及  $R$  表示。如果在第一组回转运动  $A$ 、 $B$ 、 $C$  之外还有平行  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的第二组回转运动,

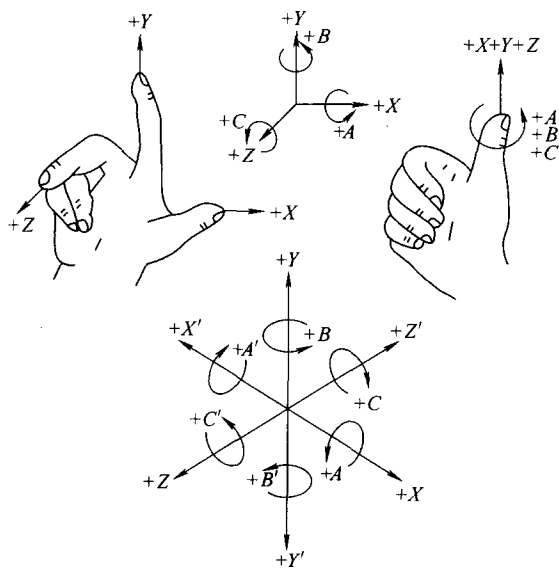


图 1-12 笛卡尔右手直角坐标系与右手螺旋法则

可分别指定为  $D$ 、 $E$  及  $F$ 。

(1)  $Z$  轴的确定 机床主轴是传递主要切削动力的轴, 可以表现为加工过程带动工具旋转, 也可表现为带动工件旋转。例如, 卧式或立式数控车床、数控外圆磨床是主轴带动工件旋转, 而数控铣床、数控钻床、数控攻螺纹机等则是主轴带动刀具旋转。统一规定与机床主轴重合或平行的刀具运动坐标为  $Z$  轴, 远离工件的刀具运动方向为  $Z$  轴正方向 ( $+Z$ )。当机床有几个主轴时, 则选一个垂直于工件装夹面的主轴为主要的轴, 与该轴重合或平行的刀具运动坐标轴为  $Z$  轴。如果机床没有主轴, 例如数控悬臂刨床, 则  $Z$  轴垂直于工件在机床工作台上的定位表面, 如图 1-13 所示; 数控立式冲床虽然可以旋转冲头盘更换冲头, 但在冲裁过程中则是冲头作直线往复运动。 $Z$  轴方向如图 1-14 所示。

(2)  $X$  轴的确定  $X$  轴是水平的, 平行于工件的装夹面。对于加工过程中不产生刀具旋转或工件旋转的机床,  $X$  轴平行于主切削方向, 坐标轴正方向与切削方向一致, 例如前面提到的数控悬臂刨床。对于加工过程主轴带动工件旋转的机床, 例如数控车床、数控磨床等,  $X$  坐标轴沿工件的径向, 平行于横向滑座或导轨, 刀架上刀具或砂轮离开工件旋转中心的方向为坐标轴正方向; 对于刀具旋转的机床, 如果  $Z$  轴是水平的, 例如数控卧式镗铣床, 则从与  $Z$  平行的主轴向工件看时,  $X$  轴的正向 ( $+X$ ) 指向右方; 如果  $Z$  轴是垂直的, 对单立柱机床, 例如立式数控铣床和数控水平转塔头立式钻床, 则从与  $Z$  轴平行的主轴向立柱看时,  $X$  轴的正向指向右方; 对于龙门式机床, 例如数控龙门铣床, 则从与  $Z$  轴平行的主轴向左侧立柱看时,  $X$  轴的正向指向右方。根据上面所讲的, 同学们请判断如图 1-15 中 a、b、c、d、e、f、g 所示的机床的  $X$  轴和  $Z$  轴的正方向。

根据  $X$ 、 $Z$  轴及其方向, 利用右手定则即可确定  $Y$  轴的方向; 根据  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴及其方向, 利用右手螺旋定则即可确定轴线平行于  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴的旋转运动  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的方向。机床坐标可在机床使用说明书或机床标牌上找到。

## 2. 机床原点、机床参考点

(1) 机床原点 机床原点又称为机械原点, 它是机床坐标系的原点。该点是机床上的一个固定的点, 其位置是由机床设计和制造单位确定的, 通常用户不允许改变。机床原点是工件坐标系、编程坐标系、机床参考点的基准点。数控车床的机床原点一般设在卡盘前端面或后端面的中心。数控铣床的机床原点, 各生产厂不一致, 有的设在机床工作台的中心, 有的设在进给行程的终点。

(2) 机床参考点 机床参考点是机床坐标系中一个固定不变的位置点, 是用于对机床工

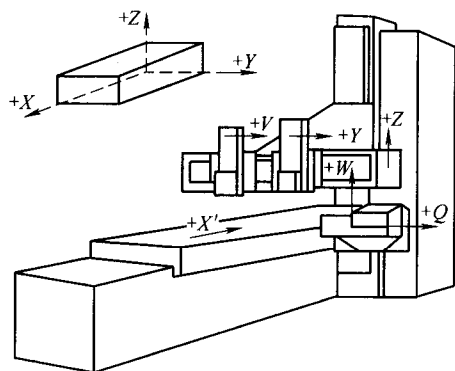


图 1-13 数控悬臂刨床

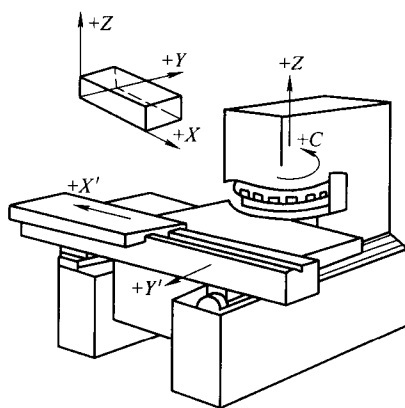


图 1-14 数控立式冲床

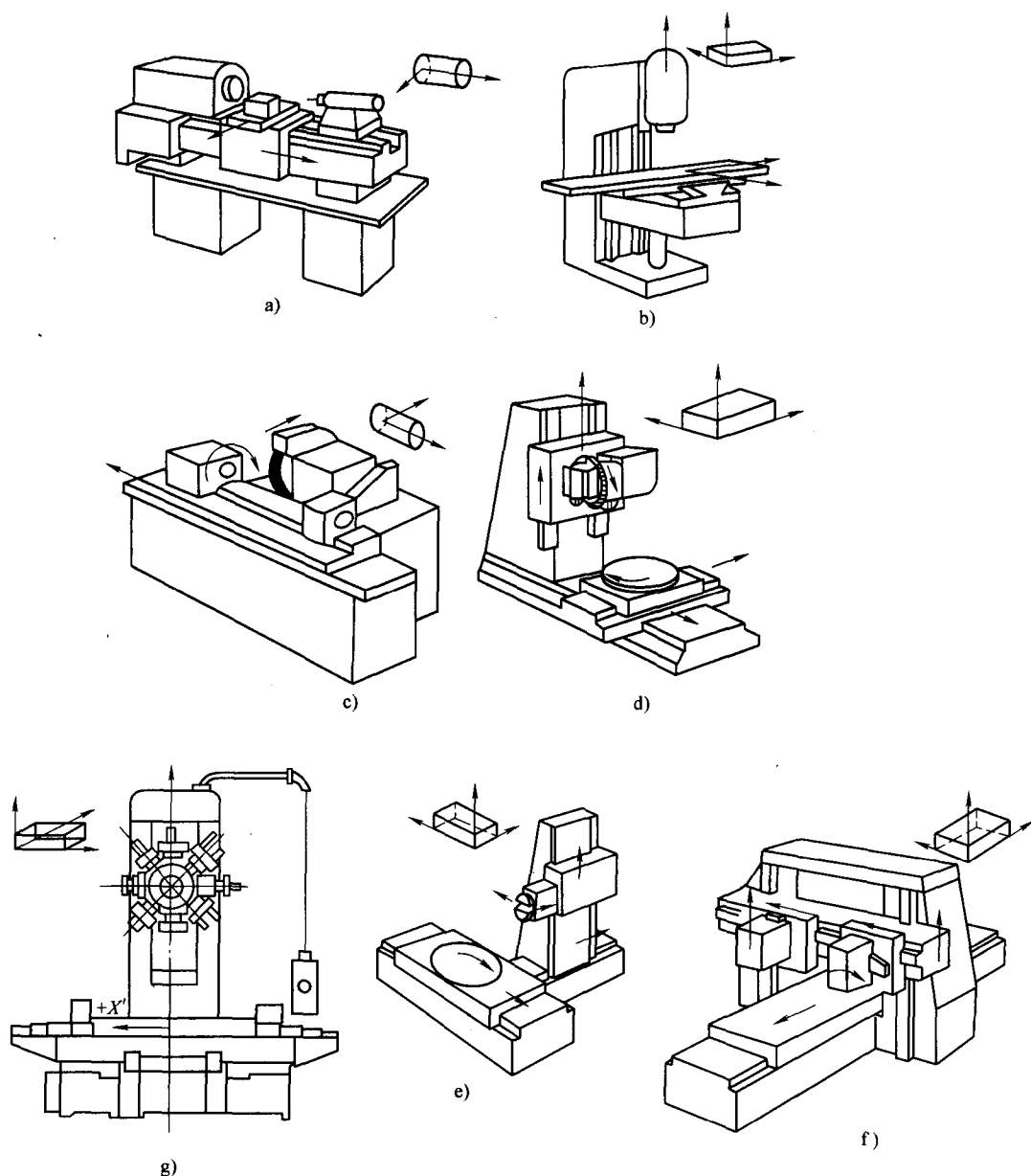


图 1-15 各类机床

a) 卧式数控车床 b) 立式升降台数控铣床 c) 数控外圆磨床  
d) 五坐标摆动铣头数控铣床 e) 卧式数控镗铣床 f) 数控龙门铣床 g) 数控水平转塔钻床

作台、滑板与刀具相对运动的测量系统进行标定和控制的点。机床参考点通常设置在机床各轴靠近正向极限的位置，通过减速行程开关粗定位而由零位点脉冲精确定位。机床参考点对机床原点的坐标是一个已知定值。也就是说，可以根据机床参考点在机床坐标系中的坐标值间接确定机床原点的位置。在机床接通电源后，通常都要做回零操作，即利用 CRT/MDI 控制面板上的功能键和机床操作面板上的有关按钮，使刀具或工作台退离到机床参考点。回零操作又称为返回参考点操作。当返回参考点的工作完成后，显示器即显示出机床参考点在机床坐标系中的坐标值，表明机床坐标系已自动建立。回零操作后，测量系统进行标定，置零