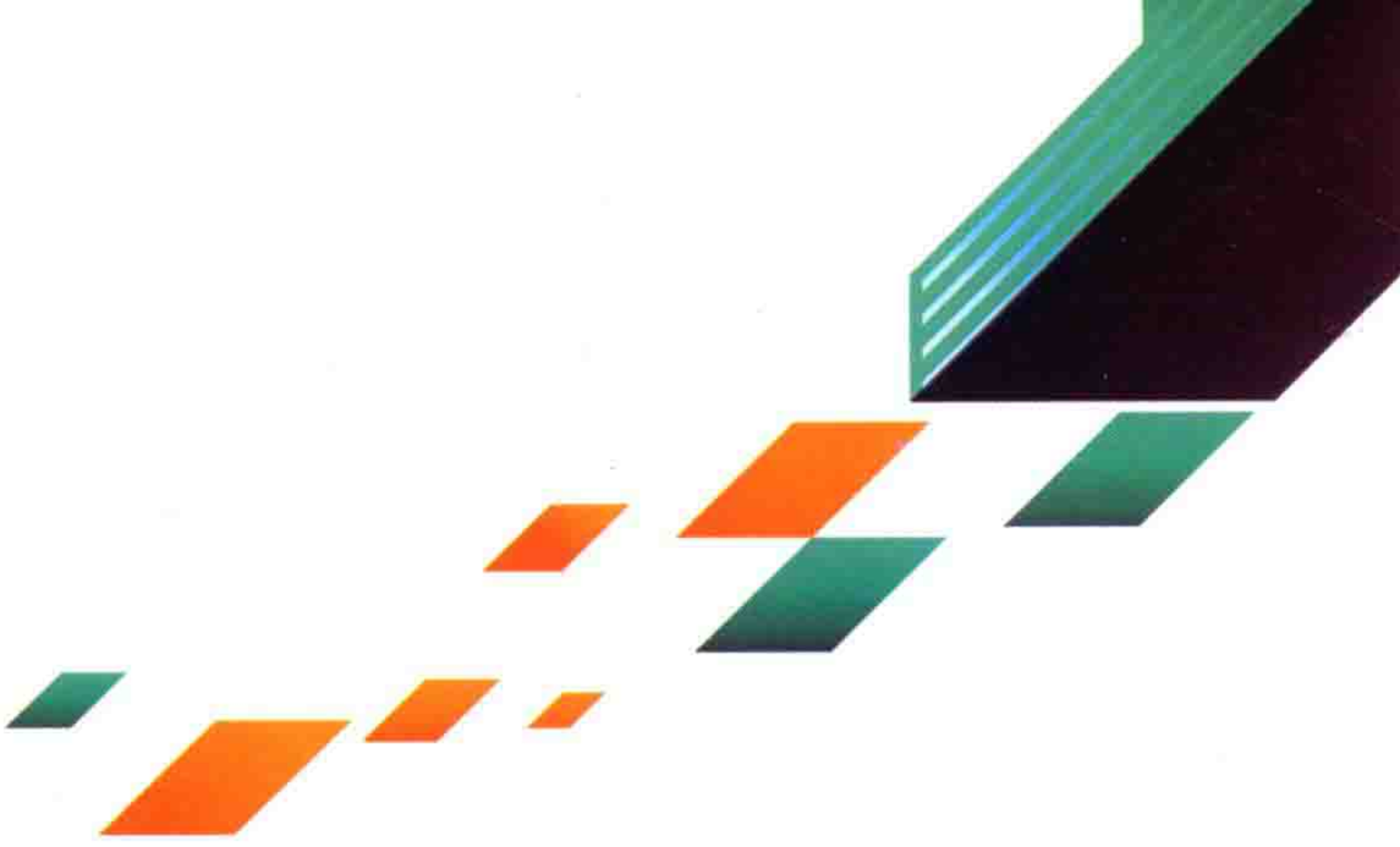
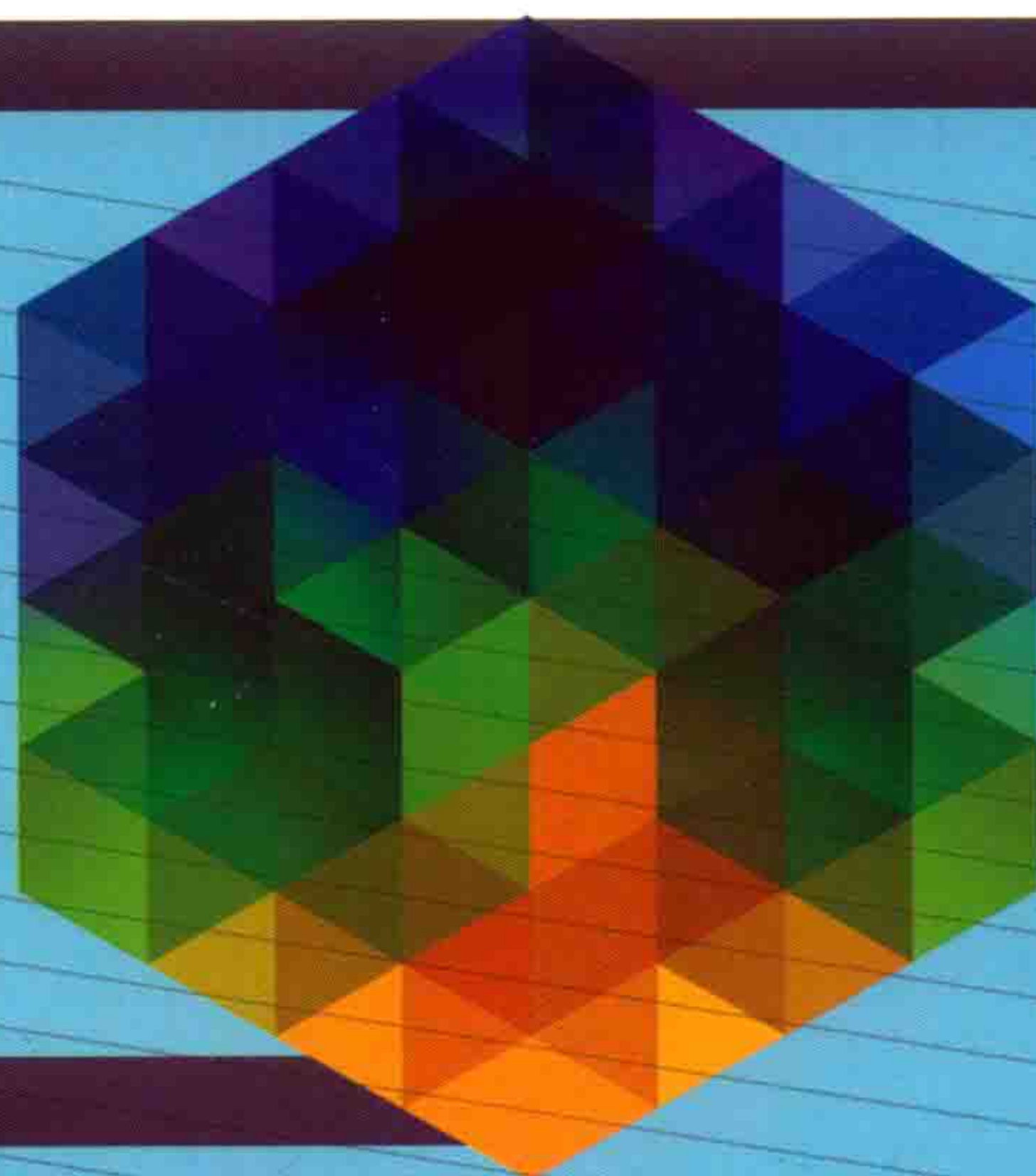




# 模具数控加工技术

MUJU SHUKONG  
JIAGONG JISHU

陈光军 刘亦智 石文勇 主编



哈尔滨工业大学出版社  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

# 模具数控加工技术

主 编 陈光军 刘亦智 石文勇  
副主编 耿艳旭

哈尔滨工业大学出版社

## 内容简介

本书共分5章,第1章介绍数控机床的发展和现状,并给出了关于数控机床的数控编程基础;第2章和第3章则是结合现有的数控车床和数控铣床,对其工艺进行介绍,并结合实际工艺给出部分典型零件的编程指令及常用指令,增强了本书的实用性;第4章介绍电火花加工机床及加工技术,重点给出了电火花成型加工和电火花线切加工两种加工技术的应用;第5章介绍除以上加工工艺以外的其他加工技术,让读者对其他模具加工技术能有一定的了解。所有章节中,每种机床技术都按现有的机床和技术要求给出了典型例子,让读者在读完本书以后就能进行一些基本的机床操作,实现书本教学与实际操作质的结合。

本书可作为机械类和机电类专业的本科、专科学生教材,同时也可作为相关的技术人员的指导用书和参考资料。

模具数控加工技术/陈光军,刘亦智,石文勇主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2017.1

## 图书在版编目(CIP)数据

模具数控加工技术/陈光军,刘亦智,石文勇主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2017.1

ISBN 978 - 7 - 5603 - 6389 - 9

I. ①模… II. ①陈…②刘…③石… III. ①模具 - 数控机床 - 加工 IV. ①TG76

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 303007 号

策划编辑 杨秀华

责任编辑 李长波

封面设计 恒润设计

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451 - 86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂

开 本 787mm × 1092mm 1/16 印张 15.5 字数 355 千字

版 次 2017 年 1 月第 1 版 2017 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5603 - 6389 - 9

定 价 36.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

# 前 言

在科技飞速发展的今天,数控加工已经成为机械加工的主要方法之一,数控机床也成为当下机械加工的一种主要机器,它不仅有传统机床的特点,同时增加了数控功能,很大程度上释放了工人的双手,减轻了工人负担,还提高了被加工工件的质量,是未来机械加工行业必不可少的加工设备。

本书是以数控机床的实际加工工艺为基础,以工厂典型数控模具加工为方向,结合实际的数控加工流程,介绍知识的同时也穿插着各种实例,做到了知识来源于实际,应用于实际,将实际操作和书本知识完美结合,也即实现理论和实际应用的结合,从一定程度上增强了学者的上手能力,真正做到即学即用,得心应手。本书共分5章,分别是第1章模具数控加工技术基础,第2章模具数控车削加工,第3章模具数控铣削加工,第4章模具电加工技术和第5章其他模具加工技术。

本书得到了国家自然科学基金项目(51675231)的资助。本书由沈阳建筑大学陈光军、哈尔滨理工大学刘亦智和石文勇任主编,哈尔滨职业技术学院耿艳旭任副主编并参与编写,其中,第2章和第5章由陈光军编写,第4章由刘亦智编写,第1章、第3章和参考文献由石文勇编写。全书由陈光军统稿。

本书在编写过程中参考了国内外相关领域一些专家学者的论著,在此表示感谢。由于编者水平有限,书中疏漏与不妥之处,恳请各位专家、读者批评指正。

编 者

2016年11月

# 目 录

|       |                       |     |
|-------|-----------------------|-----|
| 第 1 章 | 模具数控加工技术基础 .....      | 1   |
| 1.1   | 数控机床概述 .....          | 1   |
| 1.2   | 数控编程基础 .....          | 13  |
| 第 2 章 | 模具数控车削加工 .....        | 20  |
| 2.1   | 数控车床的结构及加工特点 .....    | 20  |
| 2.2   | 零件定位及安装 .....         | 23  |
| 2.3   | 数控车削加工工艺 .....        | 24  |
| 2.4   | 数控车削常用的编程指令及应用 .....  | 33  |
| 2.5   | 典型零件的编程与加工举例 .....    | 78  |
| 第 3 章 | 模具数控铣削加工 .....        | 86  |
| 3.1   | 数控铣削加工机床结构及加工特点 ..... | 86  |
| 3.2   | 工件的定位与装夹 .....        | 94  |
| 3.3   | 数控铣床的加工工艺 .....       | 97  |
| 3.4   | 数控铣削加工常用的编程指令 .....   | 107 |
| 3.5   | 数控铣床加工编程举例 .....      | 157 |
| 第 4 章 | 模具电加工技术 .....         | 185 |
| 4.1   | 电火花加工的基本原理与特点 .....   | 185 |
| 4.2   | 电火花加工机床简介 .....       | 188 |
| 4.3   | 电火花加工工艺与实例 .....      | 193 |
| 4.4   | 线切割编程 .....           | 203 |
| 4.5   | 典型模具零件的电加工 .....      | 216 |
| 第 5 章 | 其他模具加工技术 .....        | 224 |
| 5.1   | 特种模具加工技术 .....        | 224 |
| 5.2   | 快速原型制造技术 .....        | 228 |
| 5.3   | 模具高速加工技术 .....        | 233 |
| 5.4   | 超精密模具数控加工技术 .....     | 237 |
| 参考文献  | .....                 | 241 |

# 第 1 章 模具数控加工技术基础

## 1.1 数控机床概述

### 1.1.1 数控机床的产生

对于大批量生产的产品,如汽车、拖拉机及家用电器的零件,为了提高其产量和质量,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,产品更新及修改加工工艺时产生的费用较高,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,难以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。

数控机床可以解决单件小批量、多品种,特别是复杂型面零件加工的自动化,并保证加工质量。1952 年,美国 PARSONS 公司与麻省理工学院(MIT)合作研制了第一台坐标数控铣床,它综合应用了电子计算机、自动控制、伺服驱动、精密检测及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、造船及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、数控弯管机及数控冲压机等;随后又出现了特种加工数控机床,如数控线(电极)切割机、数控火焰切割机及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, Direct Numerical Control, DNC)、自适应控制系统(AC - Adaptive Control)、柔性制造系统(Flexible Manufacturing System, FMS)及计算机集成(综合)制造系统(Computer Integrated Manufacturing System, CIMS)等,进一步说明,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)、计算机辅助制造(CAM)、计算机辅助检验(CAT)及生产管理等全部生产过程自动化的基本设备。

1.1.2 数控机床的组成、控制原理及特点

1. 数控机床的组成

数控机床的组成如图 1.1 所示。

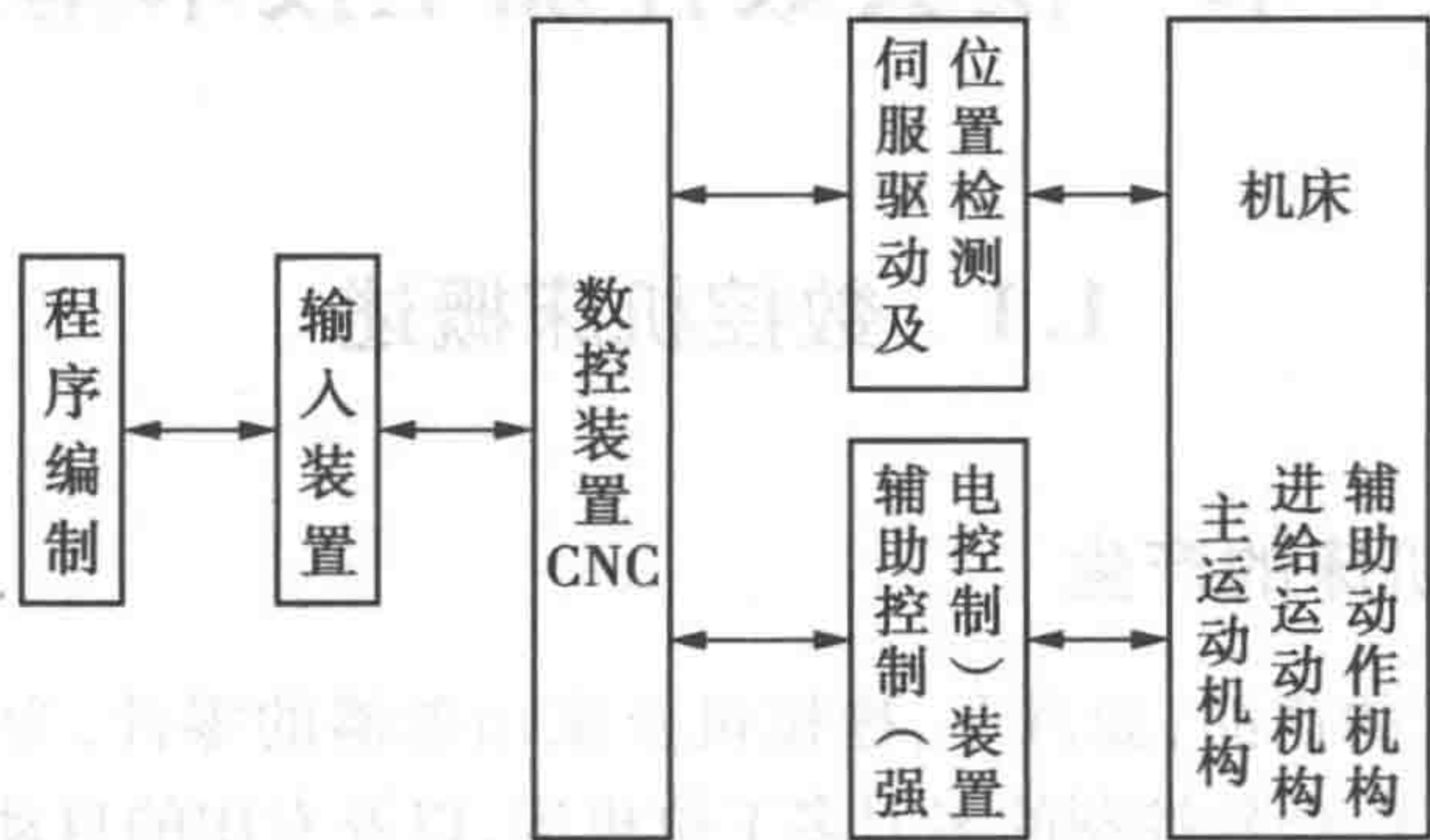


图 1.1 数控机床的组成

(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及辅助装置的动作等,得到零件的所有运动、尺寸及工艺参数等加工信息,然后用由文字、数组和符号组成的数控代码,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;对于比较先进的数控机床,可以在其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,如磁卡、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。输入装置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装置如阅读机、录放机或软盘驱动器。有些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通过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、运送和逻辑处理后,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(即做进给运动的执行部件)的进给位移量、进给方向和速度指令,经伺服驱动系统驱动执行部件做进给运动。此外还有主运动部件的变速、换向和起停信号,选择和更换刀具的刀具指令信号,切削液的开关,工件和机床部件的松开、夹紧,以及分度工作台转位等辅助指令信号。

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、刀具的选择与更换及辅助装置动作等指令信号,经

必要的编译、逻辑判断和功率放大后直接驱动相应的电器、液压、气动和机械部件,完成指令部件规定的动作。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(如伺服电动机)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,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。每个做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,还需使用位置检测装置,间接或直接测量执行部件的实际进给位移,并与指令位移进行比较,将误差转换、放大后驱动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、拖板及其传动部件和床身立柱等支撑部件,以及冷却、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、更换刀具的机械手等部件,如图1.2所示为TH5632立式加工中心。数控机床机械部件的组成与普通机床相似,但传动机构要求更为简单,在精度、刚度及抗震性等方面要求更高,而且其传动和变速系统要便于实现自动化控制。

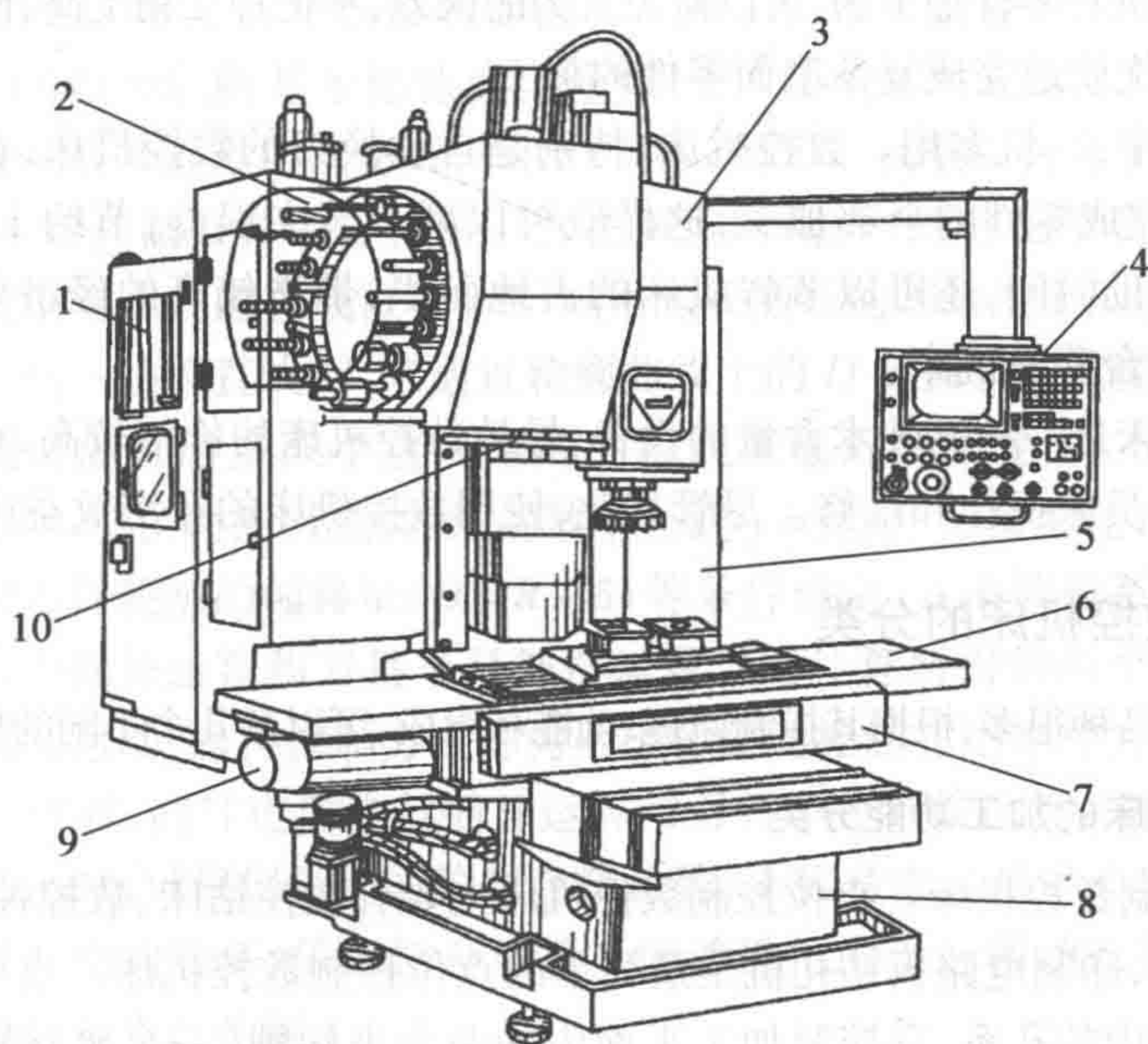


图 1.2 TH5632 立式加工中心

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

## 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,两者最根本的不同点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(如进给量)、切削加工的工艺参数(如主运动和进给运动的速度、背吃刀量等)及各种辅助操作(主运动变速、刀具更换、切削液开停及工件的夹紧与松开等)等,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,再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,发出各种与程序相对应的信号和指令控制机床进行自动加工。该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。

### 3. 数控机床的特点

数控机床在机械制造业中得到了日益广泛的应用,其特点如下:

(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进行自动加工的。当改变加工零件时,只要改变数控程序,不必更换凸轮、靠模、样板或钻模等专用工艺装备。因此,它的生产准备周期短,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。数控机床可以采用较大的切削用量,有效地节省了机动工时。自动变速、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,而且不需工序间的检验与测量,所以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,因此还可以利用软件进行精度校正和补偿;且数控机床是根据数控程序自动进行零件加工的,可以避免人为的误差,不但加工精度高,而且质量稳定。

(3)能高效优质地完成复杂型面零件的加工。

(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,这样既可以减少装夹误差,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。一台数控机床可以代替数台普通机床。

(5)数控机床是一种高技术含量的设备,导致数控机床的价格较高,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。

#### 1.1.3 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。点位控制数控机床主要有数控钻床、数控镗床、数控冲床及三坐标测量机等,印制电路板钻孔机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切削加工。该类机床要求坐标位置有较高的定位精度,为了提高生产效率,机床采用设定的最高进给速度进行定位运动,在接近定位点前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,数控机床不进行切削加工,对运动轨迹没有任何要求(图1.3)。

(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进给速度,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,驱动动力头带着多个轴箱沿轴向进给,进行切削加工,它也可以算作一种直线控制的数控机床。图1.4所示为直线控制加工示意图。

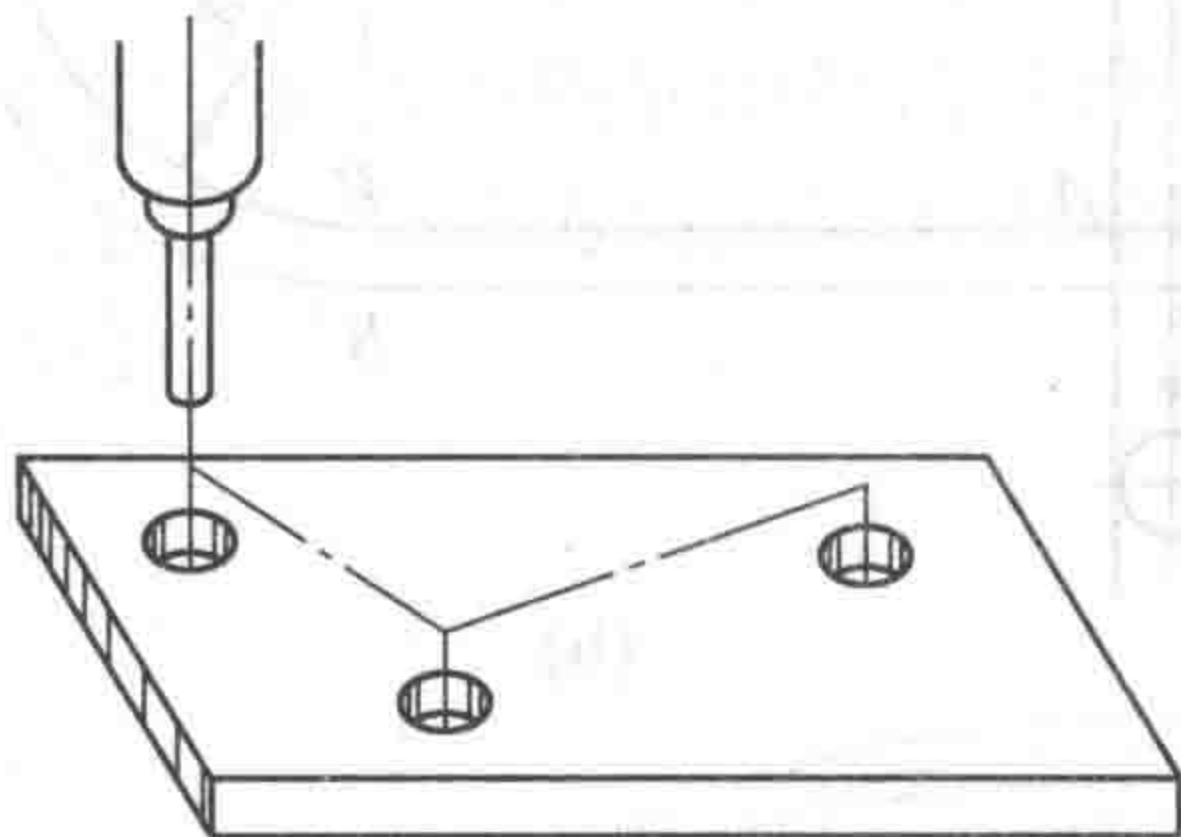


图1.3 点位控制加工示意图

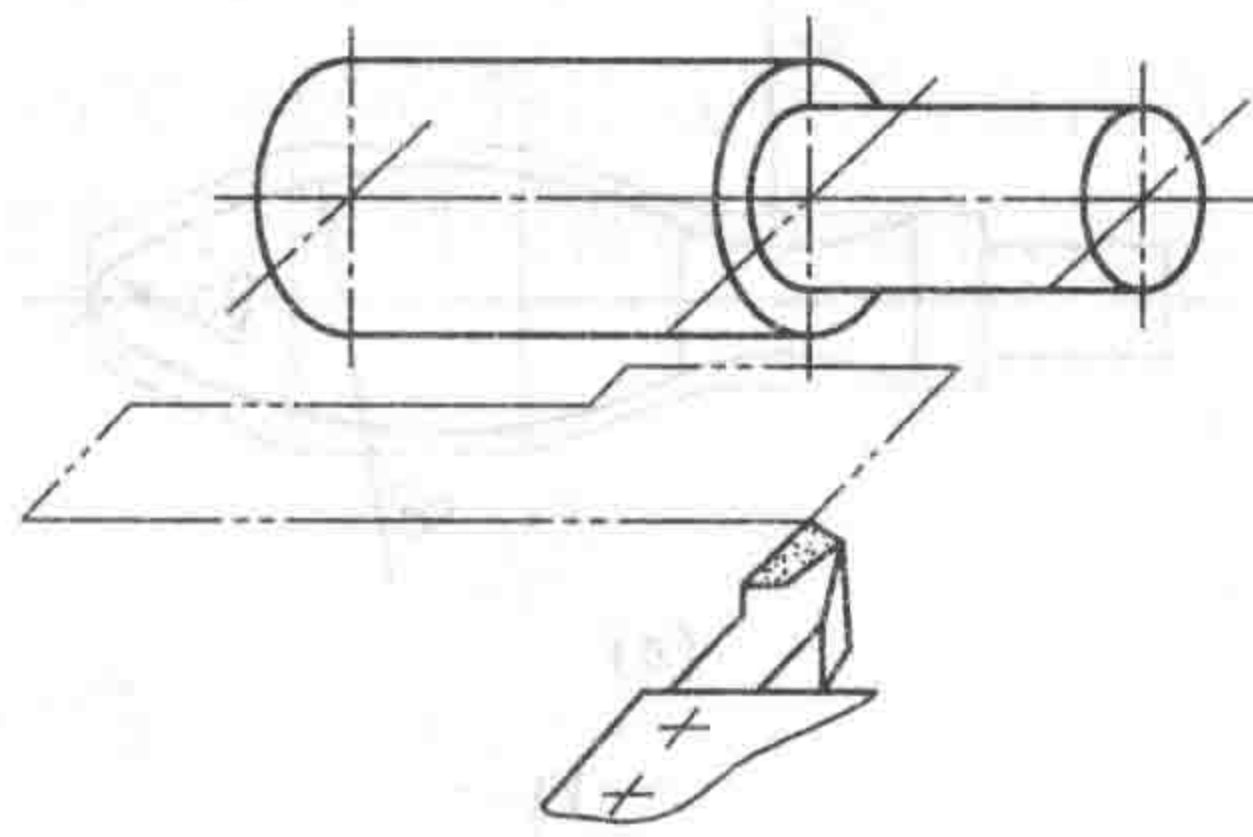


图1.4 直线控制加工示意图

(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车削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1.5(c)所示。在数控铣床上用圆柱铣刀铣削轮廓面时,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 $\Delta x_i$ 、 $\Delta y_i$ ,刀具中对工件的合成位移 $\Delta L_i$ ,则由轮廓曲线的等距线上的点 $I'$ 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 $IJ$ 圆弧。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 $\Delta x_i$ 、 $\Delta y_i$ ,由合成进给速度、单位时间、轮廓曲线的数学公式 $y=f(x)$ 、刀具半径 $R$ 及加工余量 $\delta$ 确定的刀具中心对零件轮廓的偏移量( $D=R+\delta$ )等条件确定,并由数控系统实时计算获得。这样的运算称为插补运算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。用半径为 $R$ 的圆弧切削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。用半径 $R=0$ 的切削刃车刀进行加工时,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,故无须进行刀具半径补偿的运算,只做插补运算。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刀具形状的不同有以下几种加工方法:

(1) 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 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 三轴中任意两轴做插补运动,第三轴做周期性进给运动,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 $ZX$ 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,以减小表面粗糙度 $Ra$ 值,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,以免产生切削刃干涉。

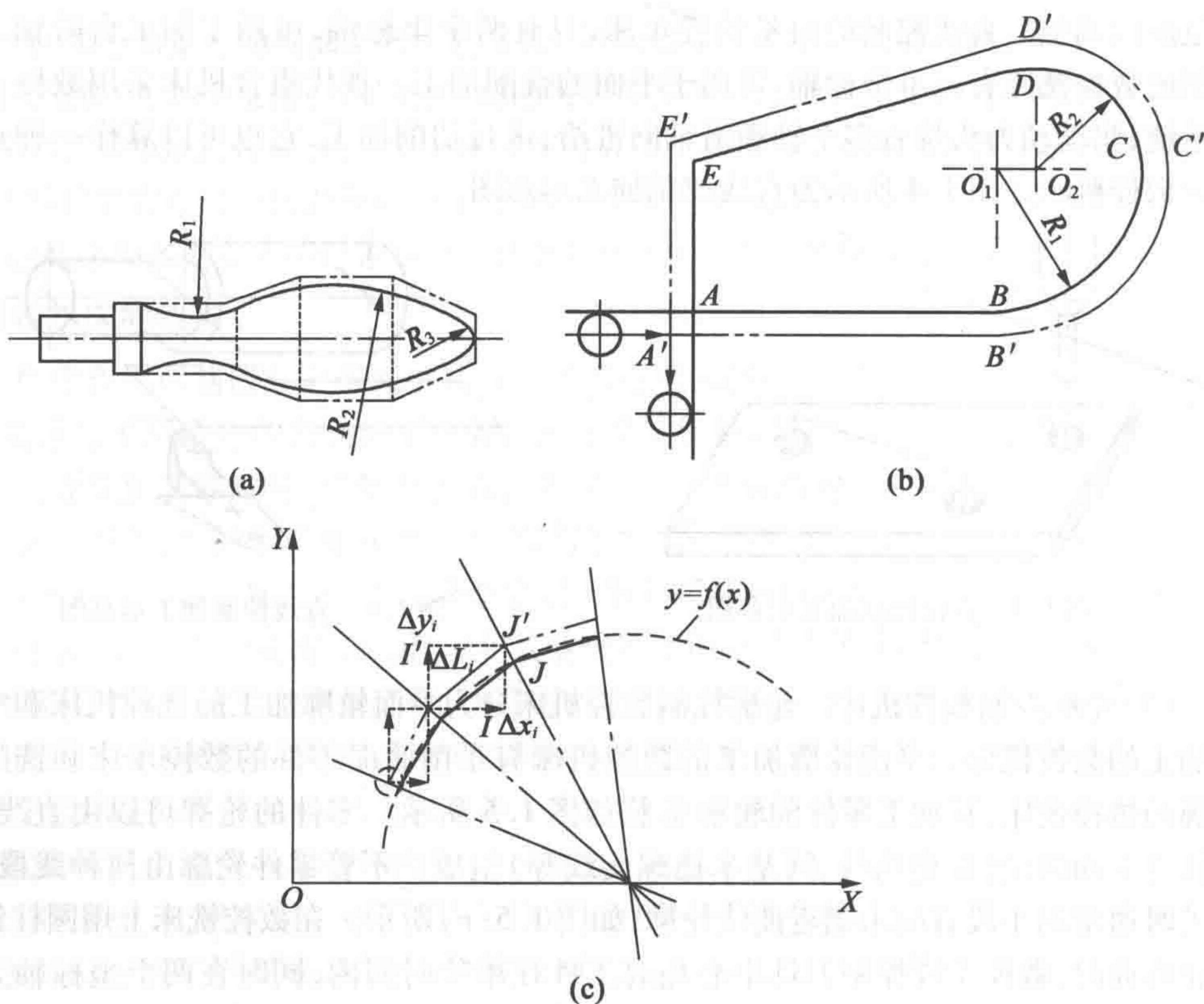


图 1.5 数控加工平面轮廓的成形

(2)三坐标联动加工。图 1.7 所示为内循环滚珠螺母的回珠器示意图,其滚道母线  $SS'$  为一条空间曲线,它可用空间直线去逼近,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。

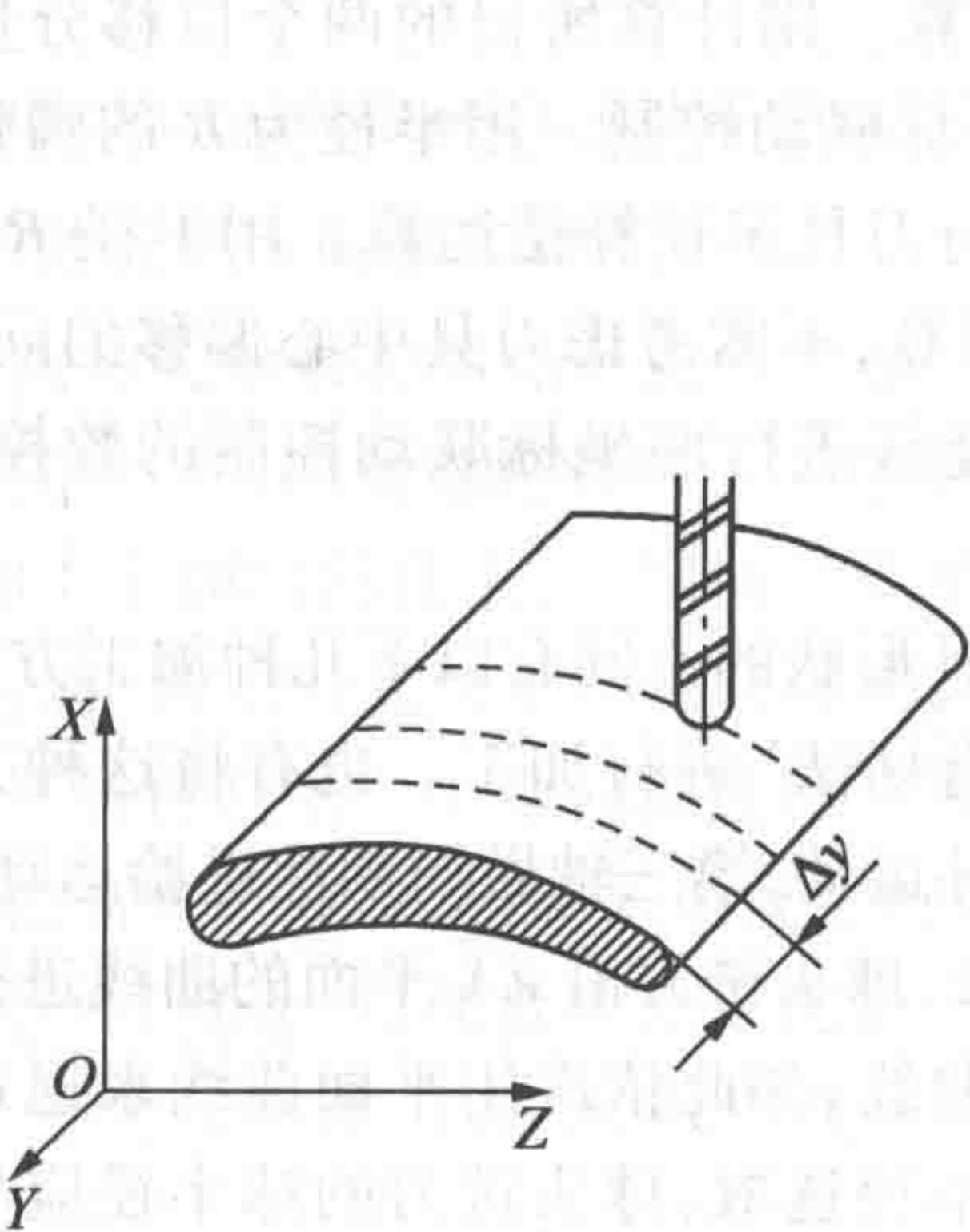


图 1.6 行切法加工空间轮廓

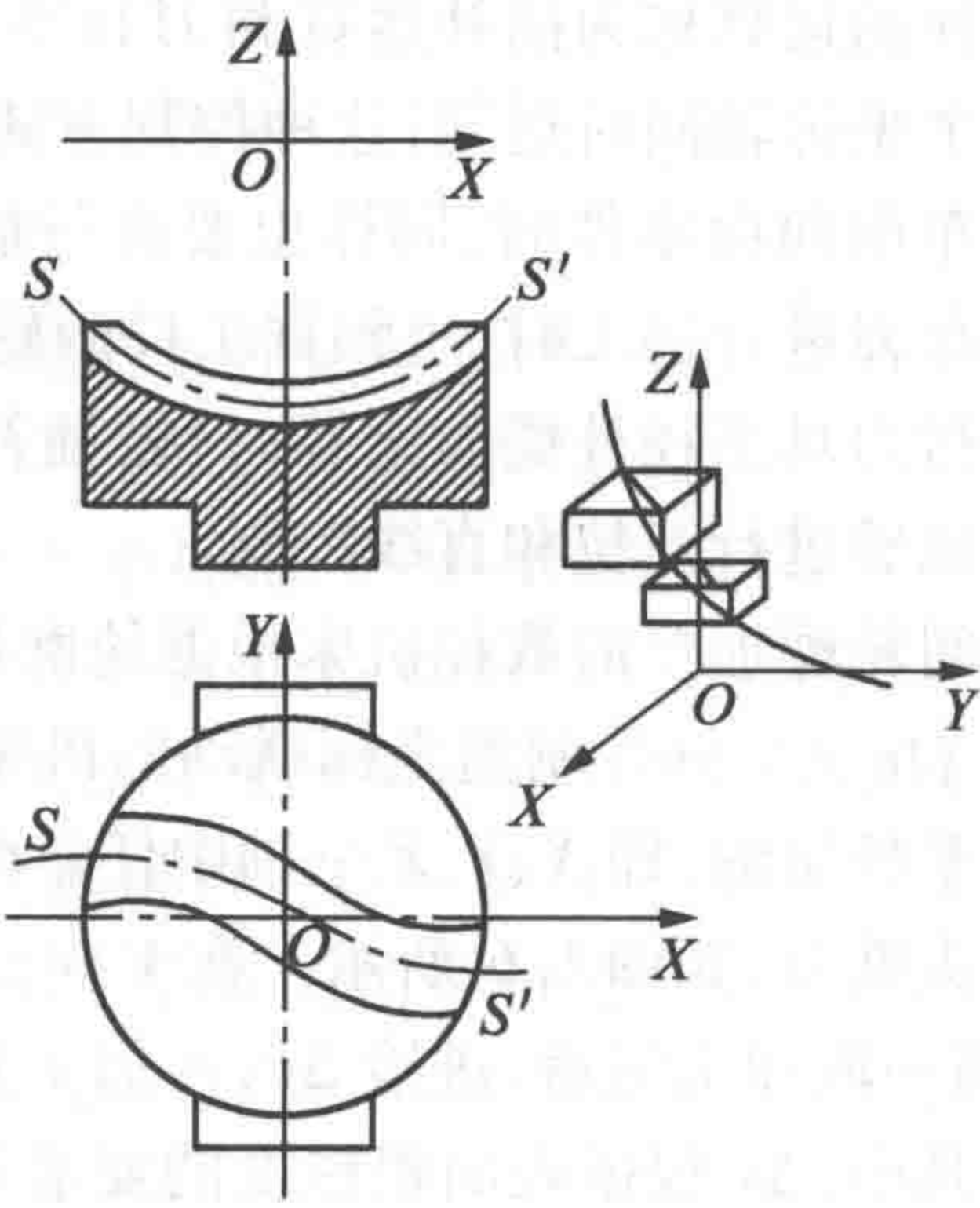


图 1.7 三坐标联动加工

(3) 四坐标联动加工。如图 1.8 所示的飞机大梁,其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也很差。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  $O_2$ ) 做摆动联动。此摆动联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。

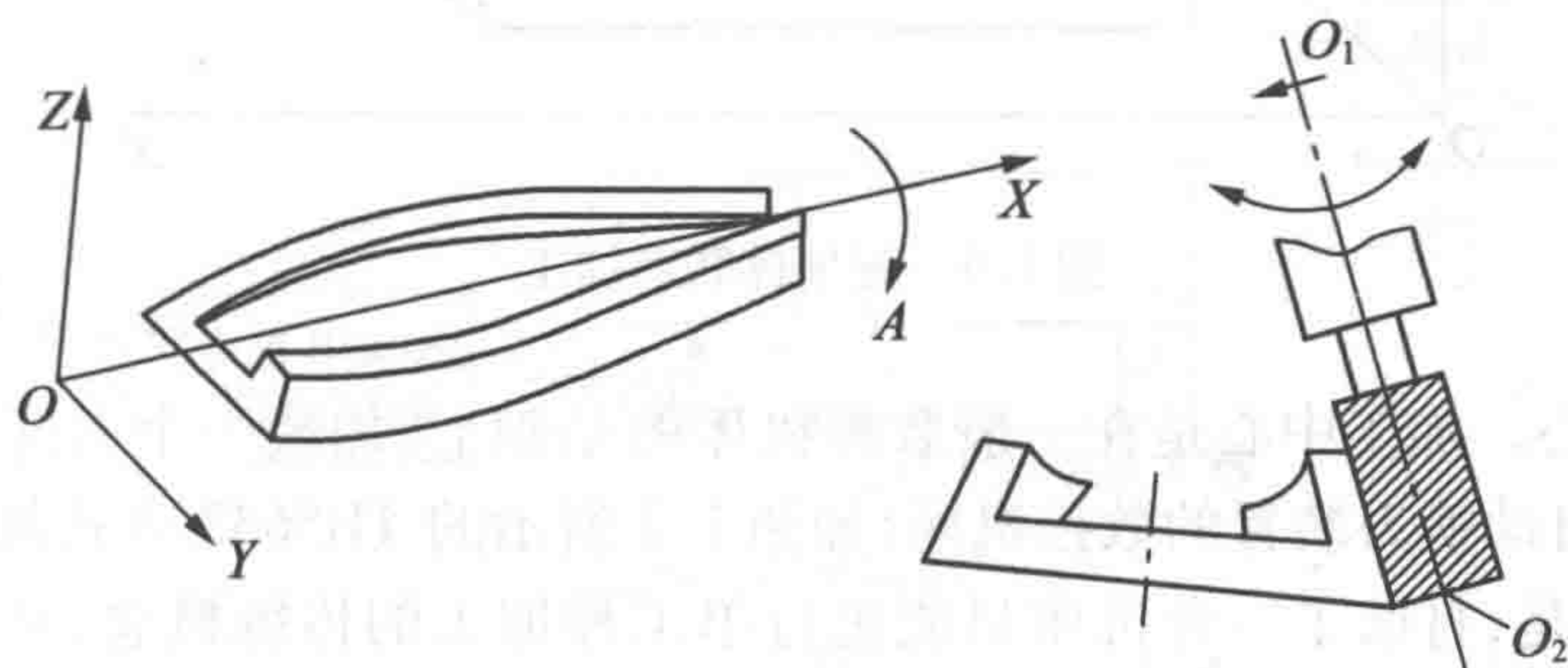


图 1.8 四坐标联动加工

(4) 五坐标联动加工。所有的空间轮廓几乎都可以用球头铣刀按“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,改用面铣刀进行加工,可以提高生产率、减少加工的残留量(减小表面粗糙度  $Ra$  值),如图 1.9 所示。用面铣刀加工时,刀具的端面与工件轮廓在切削点处的切平面重合(加工凸面),或者与切平面成某一夹角(加工凹面),亦即刀具轴线与工件轮廓的法线平行或成某一夹角(该夹角可以避免产生切削刃干涉)。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,故刀具刀位点  $O$  的坐标与刀具轴线的方向角也要做相应的变化。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对应的刀位点  $O$  的坐标与方向角(即刀位数据),通过程序输入到数控系统,以控制刀具。刀位点的坐标位置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转角合成实现。因此,用面铣刀加工空间曲面轮廓时,需控制五个坐标轴(三个直线坐标轴和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,五轴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。

上述分类主要是基于数控机床的加工功能。如果从控制轴数和联动轴数的角度来分类,数控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、三轴联动数控机床及五轴联动数控机床等。

## 2. 按工艺用途分类

(1) 普通数控机床。普通数控机床有数控钻床、数控车床、数控铣床及数控镗床等。它们和传统的通用机床的工艺用途相似,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、小批和复杂形状零件的加工。

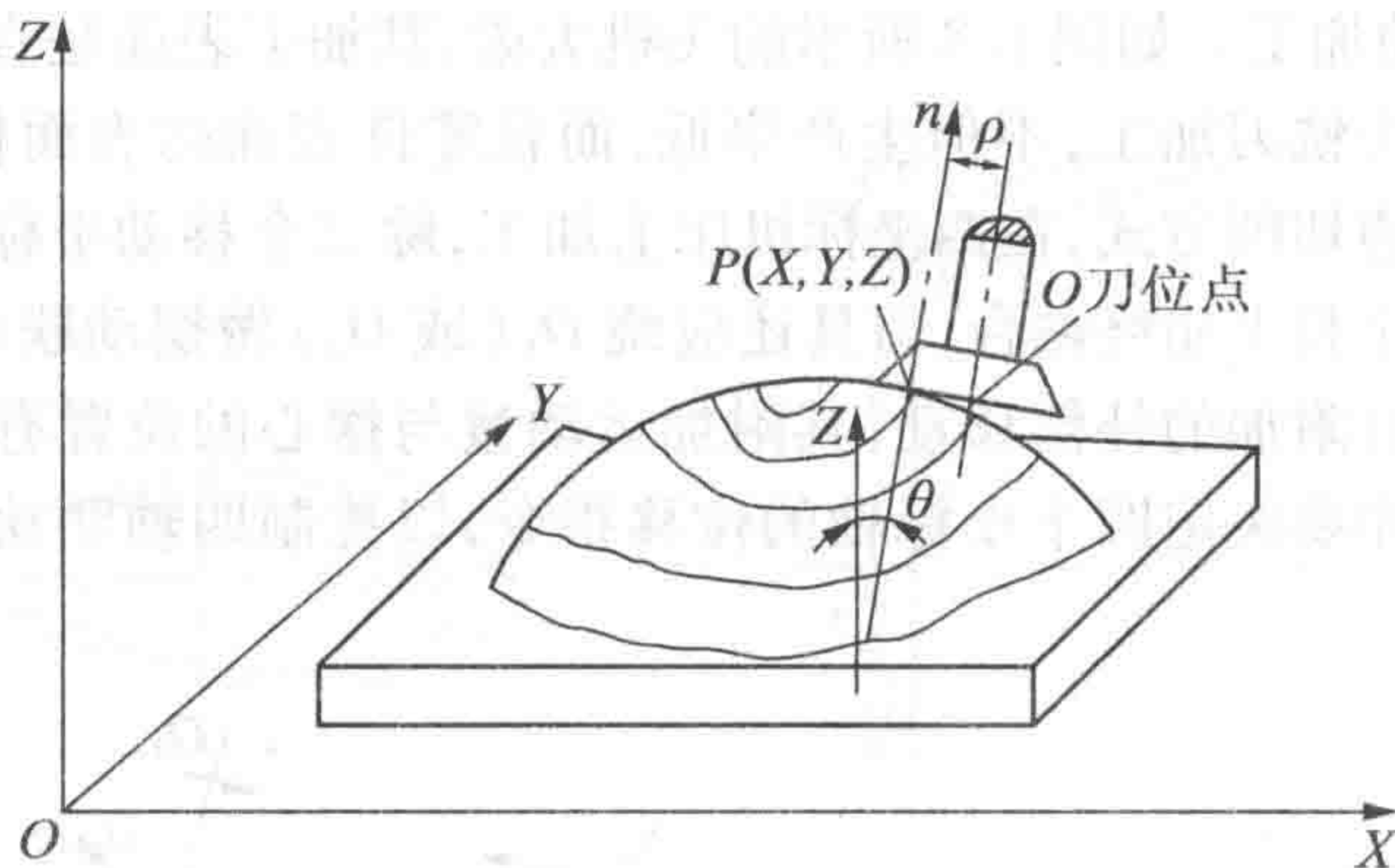


图 1.9 五坐标联动加工

(2)加工中心。加工中心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,可在一次装夹定位后完成多工序加工。

(3)多坐标轴数控机床。有些复杂的工件,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 1.10(a)所示为由功率步进电动机驱动的开环进给系统,数控装置根据要求的进给速度和进给量,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、滚珠丝杠螺母副,转换成工作台的一个当量直线位移。对于圆周进给,一般通过减速齿轮、蜗杆副带动转台进给一个当量角位移。由于功率步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,故可采用由小型号的步进电动机与液压扭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 1.10(b)所示,这类机床的速度及精度都较低。图 1.10(a)的方案多用于经济型数控机床或对旧机床的改造,图 1.10(b)的方案已不再采用了。

(2)半闭环数控机床。如图 1.11(a)所示,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(见图 1.11(a)中的虚线),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。半闭环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低,但比闭环系统更易于实现系统的稳定性。现在大多数数控机床都采用半闭环进给伺服系统。

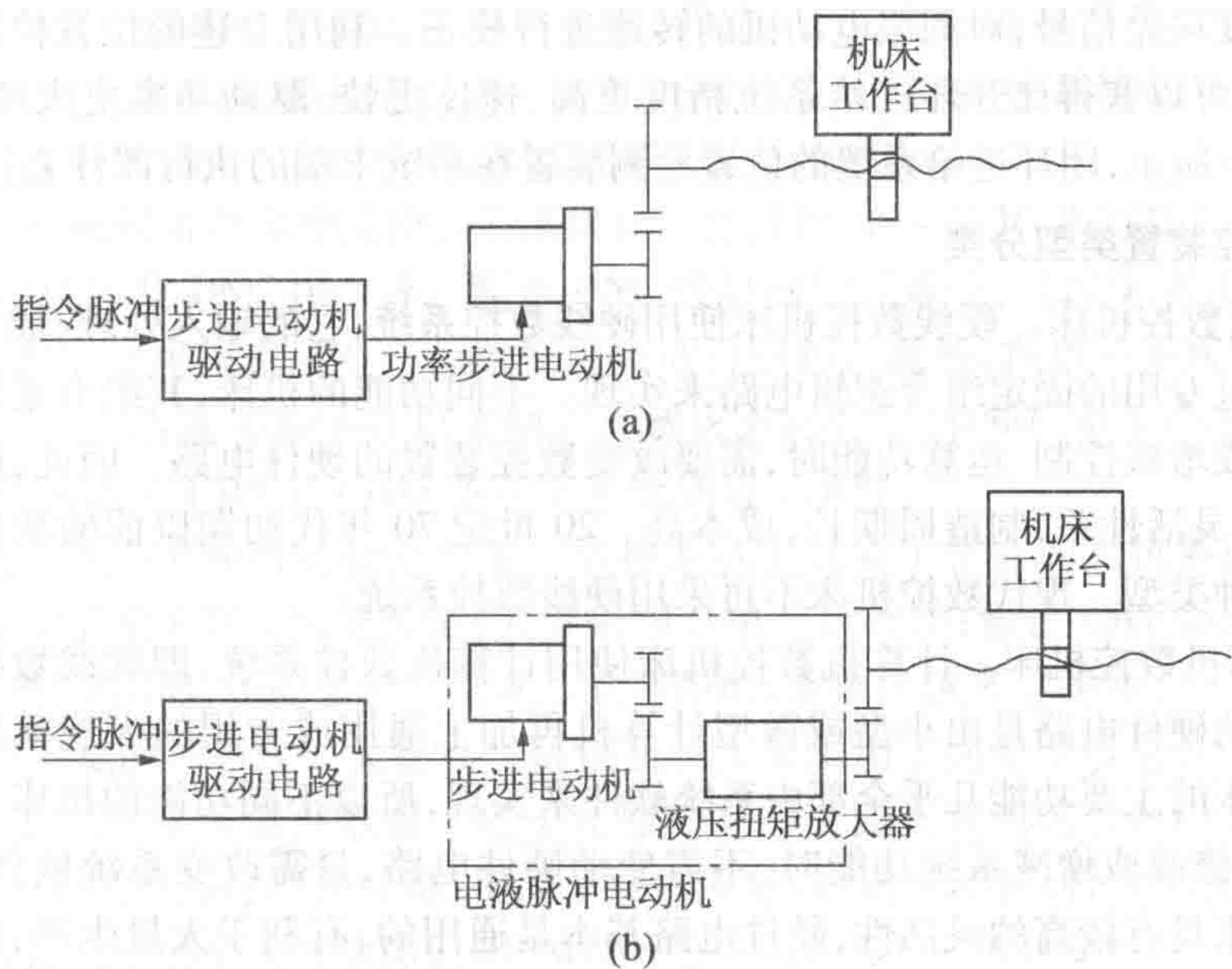


图 1.10 开环进给伺服系统

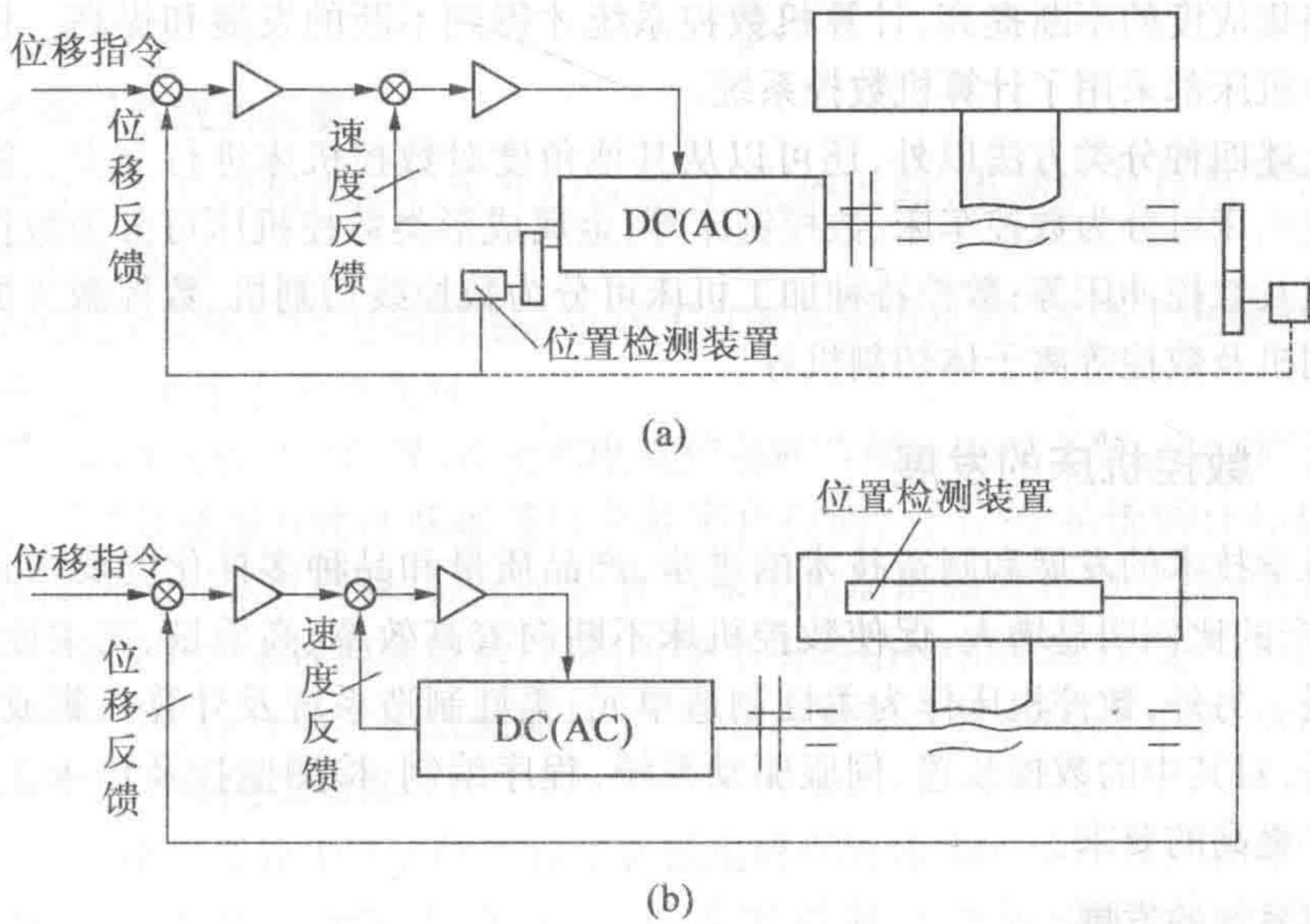


图 1.11 闭环、半闭环进给伺服系统

(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 1.11(b)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进行比较,根据其差值及指令进给量的要求,按一定规律进行转换,得到进给伺服系统的新的位移指令。另一方面,利用和伺服电动机同轴刚性连接的测速元器件,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,对伺服电动机的转速进行校正。利用上述的位置控制和速度控制两个回路,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 1.11(b)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。

#### 4. 按数控装置类型分类

(1)硬线数控机床。硬线数控机床使用硬线数控系统,它的输入处理、插补运算和控制功能都通过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,硬线数控机床的通用性、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。

(2)计算机数控机床。计算机数控机床使用计算机数控系统,即软线数控系统。这种数控系统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,计算机数控机床具有较高的灵活性,硬件电路基本是通用的,有利于大量生产,提高质量和可靠性,缩短制造周期,以及降低成本。早在 20 世纪 60 年代初期就出现了计算机数控机床,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,以及集成电路集成度的不断提高,计算机数控系统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系统。

除了上述四种分类方法以外,还可以从其他角度对数控机床进行分类。例如,金属切削类数控机床可分为数控车床、数控铣床等;金属成形类数控机床可分为数控折弯机、数控弯管机及数控冲床等;数控特种加工机床可分为数控线切割机、数控激光加工机、数控火焰切割机及数控等离子体切割机等。

### 1.1.4 数控机床的发展

随着科学技术的发展和制造技术的进步,产品质量和品种多样化的要求日益提高,中、小批生产的比例明显增大,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。另外,数控机床作为柔性制造单元、柔性制造系统及计算机集成制造系统的基础设备,对其中的数控装置、伺服驱动系统、程序编制、检测监控及机床主机等组成部分提出了更高的要求。

#### 1. 数控系统的发展

数控系统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系统的发展。最初的数控系统使用电子管器件,后来使用晶体管和印制电路板,20 世纪 60 年代末期开始使用小规模集成电路器件,这些都是所谓的硬线数控系统。20 世纪 70 年代以来,随着计算机技术的发展,出现了以小型计算机、微处理器为核心的计算机数控系统(CNC)。现在,它已被广泛采用并占据绝对的优势。

(1)数控系统的中央处理器。数控系统的中央处理器(CPU)已由 8 位字长增加至 16 位或 32 位,时钟频率由 2 MHz 提高到 16 MHz、20 MHz 或 32 MHz,最近还出现了 64 位

CPU,并且开始采用精简指令集运算芯片 RISC 作为 CPU,使运算速度得到进一步提高。此外,大规模、超大规模集成电路和多个微处理器的应用,使数控系统的硬件结构标准化、模块化和通用化,使数控功能可根据需要进行组合和扩展。

(2)数控系统配备有多种遥控和智能接口。接口如 RS-232C 串行接口、Rs-422 高速远距离串行接口及 DNC 接口等。配备 DNC 接口的数控系统,可以实现几台数控机床之间的数据通信,也可以直接对几台数控机床进行控制。此外,在数控系统中采用 MAP 等高级工业控制网络或 Ethernet(以太网),为解决不同类型、不同厂家生产的数控机床的联网和数控机床进入 FMS 和 CIMS 等制造系统创造了条件。

(3)数控系统具有很好的操作性能。数控系统上设置了很好的人机界面,普遍采用薄膜按键,减少了指示灯和按键数量;大量采用菜单选择操作;彩色 CRT 显示屏,不仅可以显示字符、平面图形,还能显示三维动态立体图形,使操作越来越简便。

(4)数控系统的可靠性大大提高。数控系统大量采用了高集成度芯片、专用芯片及合成集成电路,减少了元器件数量。电子元器件采用表面安装工艺(SMT),出现了三维高密度安装。元器件经过严格筛选,提高了硬件质量,降低了功耗,极大地提高了系统的可靠性,使数控系统的平均无故障时间(MTBF)达到 10 000 ~ 36 000 h。

(5)开发式体系。20 世纪 80 年代末、90 年代初出现的 CNC 系统的结构硬件、软件和总线规范均是对外开放的,为数控设备制造厂家和用户二次开发具有各自技术特色的系统提供了有力的支持。

## 2. 进给伺服系统的发展

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。

(1)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,基本上无须维修。

(2)伺服驱动电路中的位置、速度和电流控制环节部分实现了数字化,甚至以单片机或高速数字信号处理器为硬件基础进行全数字化控制,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;由于采用软件控制,故系统可以引用多种控制策略,容易改变系统的结构和参数,以适应不同机械负载的要求,有的甚至可以自动辨识负载惯量,并自动调整和优化系统的参数,从而获得最佳的静态和动态控制性能和效果。

(3)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。增量式位置检测编码器达到 10 000 脉冲/r,绝对式编码器可以达到 1 000 000 脉冲/r 和 0.01  $\mu\text{m}$ /脉冲的分辨率。分辨率为 0.1  $\mu\text{m}$ /脉冲时,位移速度可达 240 m/min,这极大地提高了位置控制的精度,即机床的定位精度。

(4)进给伺服系统不但可以实现丝杠螺距误差的补偿,而且使热变形误差补偿和空间误差补偿取得了显著的成效。综合误差补偿技术的应用可以将加工误差减小 60% 左右。

## 3. 数控机床编程技术的发展

(1)数控机床的自动编程系统除语言编程系统外,图形编程也取得了长足的发展,增

加了自动编程的手段。实物编程和语言编程也得到了发展。

(2)从脱机编程逐渐发展到在线编程。脱机编程是指由手工或编程计算机系统完成程序编制,然后再通过输入装置输入到数控系统内。现代的 CNC 系统具有很强的运算能力、很高的运算速度和很大的存储容量,可以将自动编程的很多功能植入到数控系统里,使零件的加工程序可以在数控系统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。有的数控系统还具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,提高了加工的可靠性。

(3)在线编程过程中,数控系统不仅可以处理几何信息,还可以处理工艺信息,数控系统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,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。红外、超声发射等监控装置可对刀具工况进行监控,遇有刀具磨损超标或刀具破损时,系统能及时报警,以便调换刀具,从而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、显示及报警,以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控制器

对于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,而且要由用户设计制造。现代数控机床广泛采用内装型或独立型可编程控制器 PC (Programmable Controller),它有专用的 32 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 16 000 step 以上,可以采用 C 语言或 Pascal 语言来编制 PC 程序,程序容量为 68 ~ 256 KB,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。表现如下:

(1)主运动部件不断实现电气化的高速化。为了提高主运动的速度和调速范围,减少机械传动链,除采用直流调速电动机和交流变频调速电动机驱动主轴部件外,近年来更有采用内装式主轴电动机的机床出现,将主轴部件做在电机转子上,从而大大提高了主轴转速,主轴转速最高可达  $10\,000 \sim 100\,000 \text{ r/min}$ ,而且仅用 1.8 s 即可从零升到最高转速。

(2)增加加工功能。集中工序可以提高生产率和工件的形位精度。例如,采用自动换刀装置、自动更换工件机构、数控夹具等,开发出铣镗加工中心、车削加工中心等机床;采用转位主轴头架,形成五面加工能力。

(3)采用机电一体化和全封闭式结构。数控机床将过去与主机分离的数控装置、强