

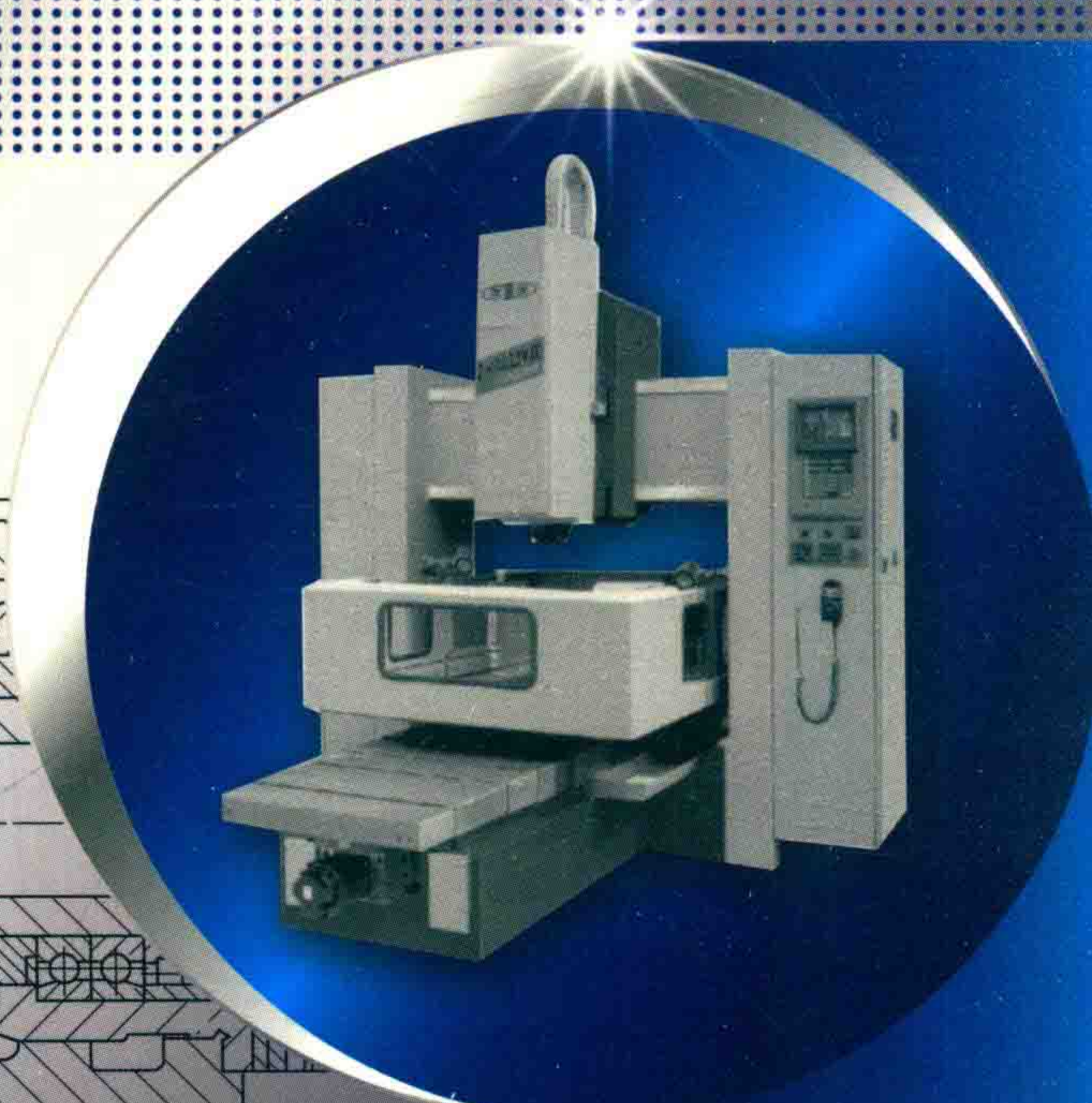
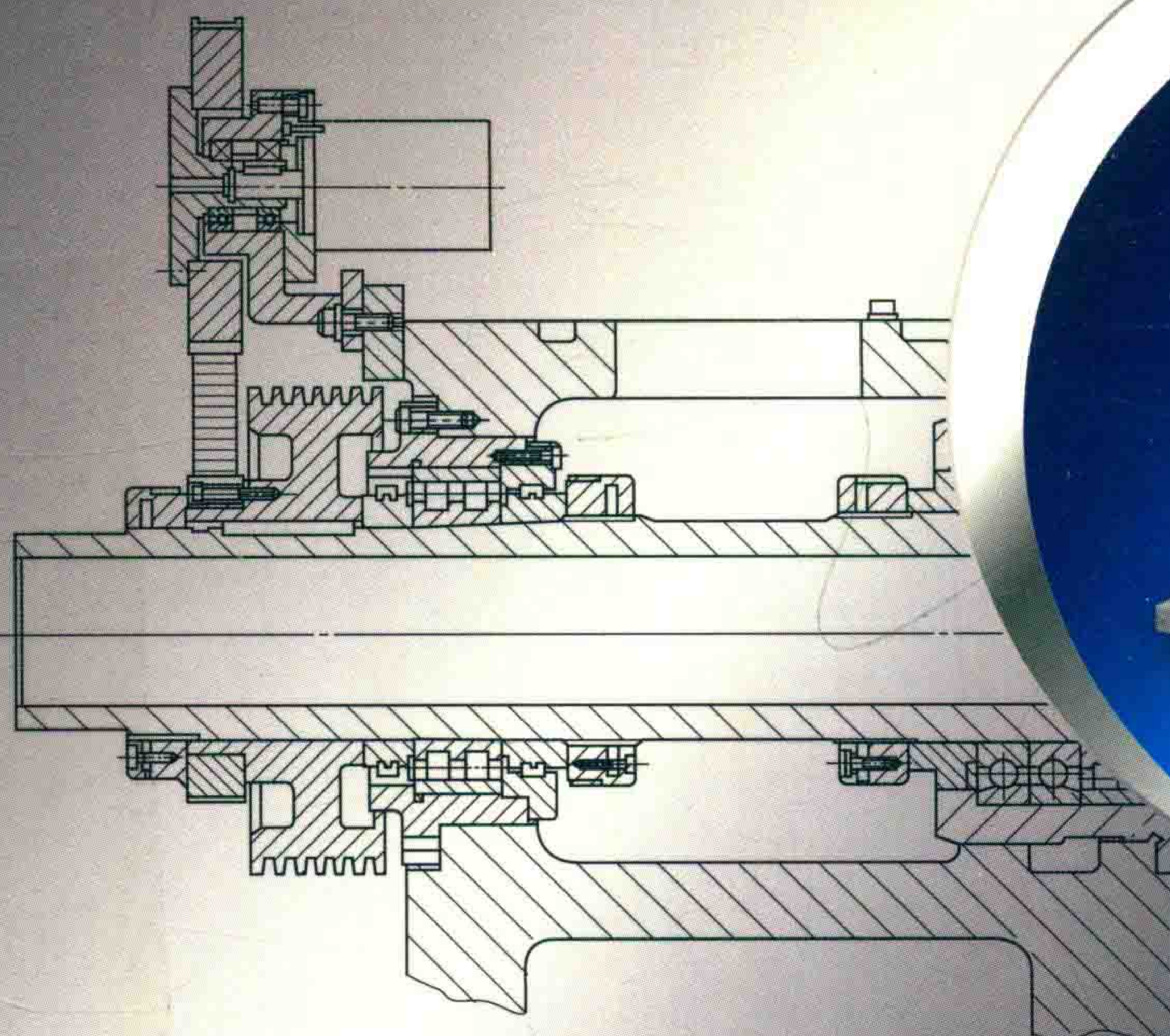


王小荣 主编 张友鹏 主审



机床数控 技术及应用

JICHUANG SHUKONG
JISHU JI YINGYONG



化学工业出版社

王小荣 主编 张友鹏

机床数控 技术及应用

JICHUANG SHUKONG
JISHU JI YINGYONG



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

机床数控技术及应用/王小荣主编. —北京: 化学工业出版社, 2017. 1

ISBN 978-7-122-28542-3

I. ①机… II. ①王… III. ①数控机床-教材
IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 279016 号

责任编辑: 王 焯 项 激
责任校对: 宋 夏

文字编辑: 陈 喆
装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 高教社 (天津) 印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 15¼ 字数 417 千字 2017 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 59.00 元

版权所有 违者必究



数控技术集机械制造技术、计算机技术、自动控制技术、测量技术、液压与气压传动技术等于一体，是制造业自动化、柔性化、集成化生产的基础，它的广泛应用使全球制造业发生根本性的变化，它引起世界各国科技界和工业界的很大重视，可以说数控技术的应用与创新是21世纪机械制造行业进行技术更新与改造、向机电一体化方向发展的主要途径和主要手段。数控技术的水平及应用状况已成为衡量一个国家工业现代化水平的主要标志之一。

随着数控技术在我国普及与发展，迫切需要培养大量素质高、能力强、掌握超硬刀具应用的数控技术应用人才。为适应数控技术和国民经济发展的需要，我们编写了《机床数控技术及应用》一书。在编写中，我们力求反映数控技术基本知识、核心技术与最新技术成就，重视理论与实际相结合，取材和叙述上层次分明、内容合理。本书数控加工实例中的数控加工程序全部由编者经机床加工验证。本书可作为相关专业技术人员的参考书，也可作为高等院校工科机械类专业数控技术课程的教材或参考用书。

本书共分8章：第1章介绍数控机床及其数控技术；第2章介绍计算机数控系统；第3章介绍数控机床伺服系统；第4章介绍数控机床检测系统；第5章介绍数控机床机械结构；第6章介绍数控机床加工程序编制；第7章介绍数控加工工艺；第8章介绍数控加工实例。

本书由王小荣老师主编，王朝琴、张红和陈德道老师参编。其中，第1章由陈德道编写，第2章、第3章、第5章由王朝琴编写，第4章、第7章、第8章由王小荣编写，第6章由张红编写。全书由张友鹏（教授，博士生导师）主审。本教材受到甘肃省国际科技合作专项（1604WKCA008）支持。

由于编者时间有限，书中难免有不足之处，敬请读者批评指正。

编者

第1章 数控机床概述

1.1 数控机床产生与发展	1	1.2.2 数控系统的主要工作过程	5
1.1.1 数控机床的产生	1	1.3 数控机床分类	6
1.1.2 计算机数控系统的特点	2	1.3.1 按控制系统的特点分类	6
1.1.3 数控机床的应用范围	3	1.3.2 按伺服系统分类	8
1.1.4 数控机床和数控系统的发展	3	1.3.3 按工艺方式分类	9
1.2 数控机床基本工作原理	5	1.3.4 按功能水平分类	9
1.2.1 数控机床的工作原理	5		

第2章 计算机数控系统

2.1 计算机数控系统概述	10	2.3 计算机数控系统硬件结构	34
2.1.1 CNC系统的组成	10	2.3.1 概述	34
2.1.2 CNC系统工作过程	10	2.3.2 单CPU结构	34
2.1.3 CNC系统的特点	10	2.3.3 多CPU结构	34
2.2 计算机数控系统基本原理	12	2.3.4 微机基本系统	35
2.2.1 译码	12	2.3.5 接口	36
2.2.2 刀具半径补偿原理	12	2.4 计算机数控系统软件结构	38
2.2.3 速度计算原理	15	2.4.1 计算机数控系统软件结构特点	38
2.2.4 位置控制原理	16	2.4.2 多任务性与并行处理	38
2.2.5 误差补偿原理	17	2.4.3 实时性与优先抢占机制	40
2.2.6 插补计算原理	18	2.4.4 典型的数控系统软件结构模式	41
2.2.7 加减速控制原理	29		

第3章 数控机床伺服系统

3.1 概述	44	3.3.2 直流伺服电动机的特点	57
3.1.1 数控机床对进给伺服系统的基本要求	44	3.3.3 直流伺服电动机的速度控制	58
3.1.2 进给伺服系统的基本组成	45	3.4 交流伺服驱动控制	62
3.1.3 进给伺服系统的分类	46	3.4.1 永磁交流同步伺服电动机	62
3.2 步进式伺服驱动系统	49	3.4.2 交流伺服电动机的特点和分类	63
3.2.1 步进电动机的基本工作原理	49	3.4.3 交流伺服电动机的速度控制	64
3.2.2 步进电动机的分类、结构及特点	50	3.4.4 永磁交流同步伺服电动机的发展	65
3.2.3 步进电动机的参数	51	3.5 主轴伺服驱动系统	65
3.2.4 步进式伺服驱动控制原理	53	3.5.1 直流主轴速度控制	65
3.3 直流伺服驱动系统	56	3.5.2 交流主轴速度控制	68
3.3.1 直流电动机基本工作原理	56	3.5.3 主轴的定向准停控制	72
		3.5.4 典型的主轴驱动控制系统	75

第4章 数控机床检测系统

4.1 概述	79	4.3.1 光栅尺的基本工作原理	82
4.1.1 数控机床对检测系统的要求	79	4.3.2 光栅尺的结构与分类	83
4.1.2 检测装置的分类	79	4.3.3 光栅尺的位移数字变换电路	83
4.2 旋转变压器	80	4.4 光电脉冲编码器	85
4.2.1 旋转变压器的工作原理	80	4.4.1 脉冲编码器的原理	85
4.2.2 旋转变压器的结构	81	4.4.2 脉冲编码器的结构与分类	85
4.2.3 旋转变压器的工作方式	81	4.4.3 光电脉冲编码器的应用	86
4.3 光栅尺	82		

第5章 数控机床机械结构

5.1 数控机床的主体结构	87	5.4 工作台与自动换刀装置	98
5.1.1 数控机床的加工特点	87	5.4.1 分度工作台	98
5.1.2 数控机床对机械结构的要求	88	5.4.2 数控回转工作台	98
5.1.3 数控机床床身	89	5.4.3 刀库自动换刀装置	98
5.1.4 数控机床导轨副	89	5.5 辅助系统结构	100
5.1.5 数控机床总体布局	91	5.5.1 一般辅助系统	100
5.2 数控机床的进给系统结构	92	5.5.2 数控机床液压系统	100
5.2.1 数控机床对进给系统机械部件的要求	92	5.5.3 数控机床气压系统	100
5.2.2 滚珠丝杠螺母副	93	5.6 数控铣床结构	101
5.2.3 直线电动机传动	94	5.6.1 立式数控铣床	101
5.3 数控机床的主运动系统结构	94	5.6.2 卧式数控铣床	102
5.3.1 数控机床对主运动系统机械部件的要求	94	5.6.3 龙门式数控铣床	102
5.3.2 主轴部件结构	95	5.6.4 加工中心	102
5.3.3 典型机床的主轴结构	97	5.7 数控车床结构	107
		5.7.1 水平床身数控车床	107
		5.7.2 斜床身数控车床	107

第6章 数控机床加工程序编制

6.1 数控机床程序编制的概念	109	6.2.1 数控铣床常用编程指令	116
6.1.1 数控加工程序概述	109	6.2.2 数控铣床孔加工循环指令	128
6.1.2 数控加工程序编制坐标系的确立	111	6.2.3 数控铣床宏加工指令的应用	132
6.1.3 数控加工程序编制的格式	115	6.3 数控车床加工程序编制	135
6.2 数控铣床及加工中心加工程序编制	116	6.3.1 数控车床常用编程指令	135
		6.3.2 数控车床循环指令及应用	144

第7章 数控加工工艺分析

7.1 数控机床加工工艺分析基础	151	7.2 数控铣床加工工艺分析	176
7.1.1 工件的装夹	151	7.2.1 加工工艺分析与设计	176
7.1.2 数控加工刀具的选择	153	7.2.2 数控铣削工具系统	186
7.1.3 数控加工工艺分析	156	7.3 数控车床加工工艺分析	194
7.1.4 数控加工工艺路线的设计	159	7.3.1 加工工艺分析与设计	194
7.1.5 数控加工工序设计	165	7.3.2 数控车削工具系统	209

第8章 数控加工实例

8.1 数控铣削系统加工实例	217	8.1.3 孔类零件的加工实例	223
8.1.1 平面凸轮类零件(心形凸轮)的 加工实例	217	8.2 数控车削系统加工实例	226
8.1.2 支承套类零件的加工实例	219	8.2.1 轴类零件加工实例	226
		8.2.2 孔类零件加工实例	231

参考文献



数控机床概述

1.1 数控机床产生与发展

1.1.1 数控机床的产生

科学技术和社会生产的不断发展,对机械产品的质量和生产率提出了越来越高的要求。机械加工工艺过程的自动化是实现上述要求的最重要措施之一。它不仅能够提高产品的质量,提高生产效率,降低生产成本,还能够大大改善工人的劳动强度。

许多生产企业已经采用了自动机床、组合机床和专用自动生产线。采用这种高度自动化和高效率的设备,尽管需要很大的初始投资以及较长的生产准备时间,但在大批量的生产条件下,由于分摊在每一个工件上的费用很少,经济效益仍然是非常显著的。但是,在机械制造业中,并不是所有的产品零件都具有很大的批量,单件与小批生产的零件(批量在10~100件)约占机械加工总量的80%。尤其是在造船、航天、航空、机床、重型机械以及国防部门,其生产特点是加工批量小、改型频繁、零件的形状复杂而且精度要求高,如果采用专用化程度很高的自动化机床加工这类零件就显得很不合适,因为生产过程中需要经常改装与调整设备,对于专用生产线来说,这种改装与调整甚至是不可能实现的。近年来,由于市场竞争日趋激烈,为在竞争中求得生存与发展,就必须频繁地改型,并缩短生产周期,满足市场上不断变化的需要。因此,即使是大批量生产,也改变了产品长期一成不变的做法。频繁地开发新产品,使“刚性”的自动化设备即使在大批生产中也日益暴露其缺点。已经使用的各类仿形加工机床部分地解决了小批量、复杂零件的加工。但在更换零件时,必须制造靠模和调整机床,这不但要耗费大量的手工劳动,延长了生产准备周期,而且由于靠模误差的影响,加工零件的精度很难达到较高的要求。为了解决上述这些问题,满足多品种、小批量的自动化生产,迫切需要一种灵活的、通用的、能够适应产品频繁变化的柔性自动化机床。

数字控制(Numerical Control,简称NC或数控)机床就是在这样的背景下诞生与发展起来的。它极其有效地解决了上述矛盾,为单件、小批生产精密复杂零件提供了自动化加工手段。

数控机床的工作原理是:将加工过程所需的刀具与工件之间的相对位移量以及各种操作(如主轴变速、松夹工件、进刀与退刀、开车与停车、选择刀具、供给切削液等)都用数字化的信息代码来表示,并将数字信息送入专用的或通用的计算机,计算机对输入的信息进行处理与运算,发出各种指令来控制机床的伺服系统或其他执行元件,使机床自动加工出所需要的工件。数控机床与其他自动机床的一个根本区别在于,当加工对象改变时,除了重新装夹工件和

更换刀具之外，只需要更换加工程序，不需要对机床作任何调整。

1952年，美国帕森斯公司（Parsons）和麻省理工学院（MIT）合作研制成功世界上第一台三坐标数控铣床，用于加工直升机叶片轮廓检查用样板。这是一台采用专用计算机进行运算与控制的直线插补轮廓控制数控铣床，专用计算机采用电子管元件，逻辑运算与控制采用硬件连接的电路。1955年后，该类机床进入实用化阶段，在复杂曲面的加工中发挥了重要作用。

我国从1958年开始研制数控机床，在研制与推广使用数控机床方面取得了一定成绩。近年来，由于引进了国外的数控系统与伺服系统的制造技术，使我国数控机床在品种、数量和质量方面得到了迅速发展。目前，我国已有几十家机床厂能够生产不同类型的数控机床和加工中心。我国经济型数控机床的研究、生产和推广工作也取得了较大的进展，它必将对我国各行业的技术改造起到积极的推动作用。目前，在数控技术领域，我国和先进的工业国家之间还存在着不小的差距，但这种差距正在缩小。随着工厂、企业技术改造的深入开展，各行各业对数控机床的需要量将会有大幅度的增长，这将有力地促进数控机床的发展。

1.1.2 计算机数控系统的特点

随着电子技术和计算机技术的不断发展，数控系统经历了逻辑数字控制阶段（NC阶段）和计算机数字控制阶段（CNC阶段）。NC阶段数控系统发展经历了电子管时代、晶体管时代、小规模集成电路时代。自1970年小型计算机用于数控系统，数控系统发展进入CNC阶段，这是第四代数控系统。从1974年微处理器用于数控系统，数控系统发展到第五代，经过几年的发展，数控系统从性能到可靠性均得到很大的提高。自20世纪70~80年代，数控系统在全世界得到了大规模的发展和应用。从20世纪90年代开始，PC机的发展日新月异，基于PC平台的数控系统应运而生，数控系统发展进入第六代，但目前市场上流行的和企业普遍使用的仍然是第五代数控系统。

数控系统中引入了微型计算机（简称微机），使它在质的方面完成了一次飞跃。计算机数控（Computer Numerical Control，简称CNC）系统有许多优点。

(1) 柔性好

硬件数控系统的许多功能是靠硬件电路来实现的。若想改变系统的功能，必须重新布线，但计算机数控系统能利用控制软件灵活地增加或改变数控系统的功能，更能适应生产发展的需要。

(2) 功能强

可利用计算机技术及其外围设备，增强数控系统及数控机床的功能。例如，利用计算机图形显示功能，检查编程的刀具轨迹，纠正编程错误，还可检查刀具与机床、夹具碰撞的可能性等；利用计算机网络通信的功能，便于数控机床组成生产线等。

(3) 可靠性高

计算机数控系统可使用磁带、软盘和网络等许多输入装置，避免了以往数控机床由于频繁地开启光电阅读机而造成的信息出错的缺点。与硬件数控相比，计算机数控尽量减少硬件电路，显著地减少了焊点、接插件和外部连线，提高了可靠性。此外，计算机数控系统一般都具备自诊断功能，可及时指出故障原因，便于维修或预防操作失误，减少停机时间。这一切使得现代数控系统的无故障运行时间大为提高。

(4) 易于实现机电一体化

由于计算机电路板上采用大规模集成电路和先进的印制电路排版技术，只要采用数块印制电路板即可构成整个控制系统，而将数控装置连同操作面板装入一个不大的数控箱内，可与机床结合在一起，减少占地面积，有利于实现机电一体化。

(5) 经济性好

采用微机数控系统后，系统的性能价格比大为提高。现在不但大型企业，就是中小型企业也逐渐采用 CNC 数控机床了。

1.1.3 数控机床的应用范围

数控机床确实存在一般机床所不具备的许多优点，但是这些优点都是以一定条件为前提的。数控机床的应用范围正在不断扩大，但它并不能完全代替其他类型的机床，也不能以最经济的方式解决机械加工中的所有问题。数控机床通常最适合加工具有以下特点的零件。

① 多品种小批量生产的零件。图 1-1 表示了三类机床的零件加工批量与综合费用的关系。从图中可以看出，零件加工批量的增大对于选用数控机床是不利的。其原因在于：数控机床设备费用高昂，与大批量生产采用的专用机床相比，其效率还不够高。通常，采用数控机床加工的合理生产批量在 10~200 件之间，目前有向中批量发展的趋势。

② 结构比较复杂的零件。图 1-2 表示了三类机床的被加工零件复杂程度与零件批量大小的关系。通常数控机床适宜于加工结构比较复杂、在非数控机床上加工时需要有昂贵的工艺装备的零件。

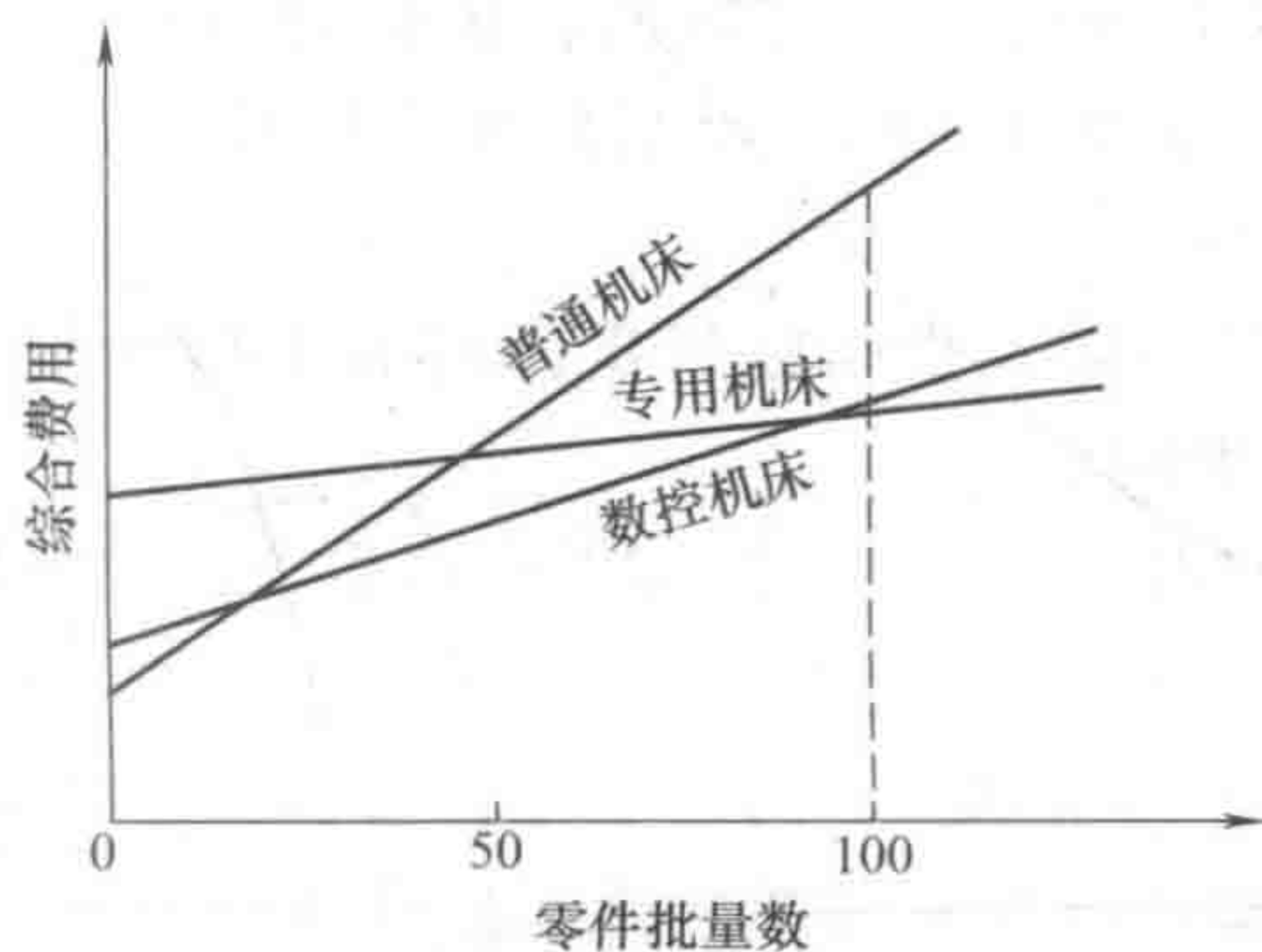


图 1-1 零件加工批量与综合费用的关系

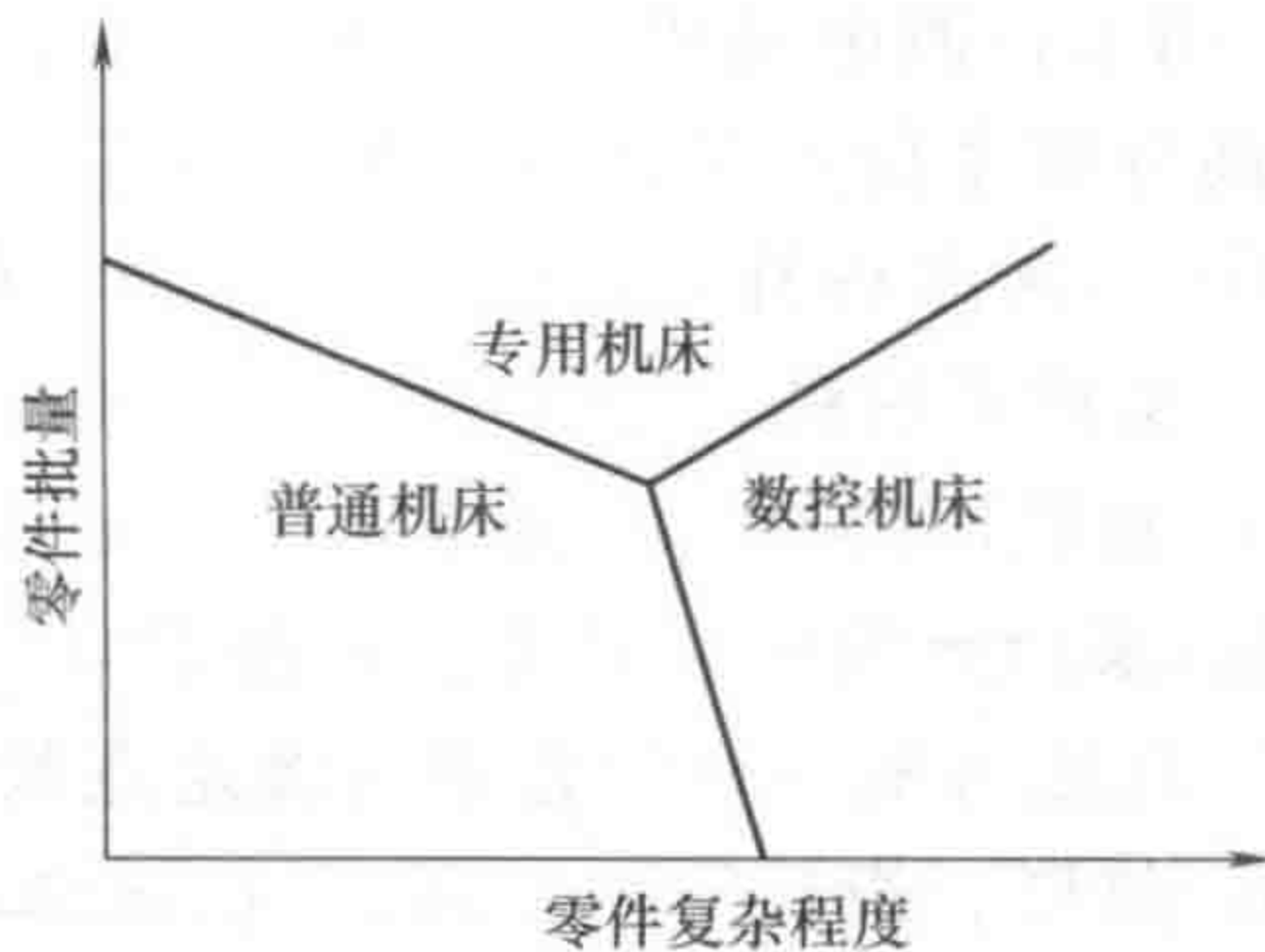


图 1-2 数控机床适用范围示意图

③ 需要频繁改型的零件。它节省了大量的工艺装备费用，使综合费用下降。

④ 价格昂贵、不允许报废的关键零件。

⑤ 需要最短生产周期的急需零件。广泛推广数控机床的最大障碍是设备的初期投资大，由于系统本身的复杂性，又增加了维修费用。如果缺少完善的售后服务，往往不能及时排除设备故障，将会在一定程度上影响机床的利用率，这些因素都会增加综合生产费用。

考虑到以上所述的种种原因，在决定选用数控机床加工时，需要进行反复对比和仔细的经济分析，使数控机床发挥它的最好经济效益。

1.1.4 数控机床和数控系统的发展

现代数控机床及其数控系统，目前主要向高速、高精度化方面发展。

要提高机械加工的生产率，其中最主要的方法是提高速度，但是这样做会降低加工精度。现代数控机床在提高加工速度的同时，也在进行高精度化。目前可在 $0.1\mu\text{m}$ 的最小设定单位时，进给速度达到 $24\text{m}/\text{min}$ 。要做到这一点，就要对机械和数控系统提出更高的要求。

(1) 机械方面

例如，机床主轴要高速化，就要提高主轴和机床机械结构的动、静态刚度；采用能承受高速的机械零件，如采用陶瓷滚珠轴承等。

(2) 数控系统方面

主要是提高计算机的运算速度。现代数控系统已从 16 位的 CPU，发展到普遍采用 32 位的 CPU，并向 64 位的 CPU 发展。主机频率由 5MHz 提高到 20~33MHz。有的系统还制造了插补器的专用芯片，以提高插补速度；有的采用多 CPU 系统，减轻主 CPU 负担，进一步提高控制速度。

(3) 伺服系统方面

① 采用数字伺服系统 使伺服电动机的位置环、速度环的控制都实现数字化。FANUC15 系列开发出专用的数字信号处理器，位置指令输入后，它与从脉冲编码器检测来的位置信息以及从电动机测速装置检测来的速度信息一起，在专用的微处理器芯片内，进行控制位置、速度控制等运算，最后向功率放大器发出指令，以达到对电动机的高速、高精度控制。

② 采用现代控制理论提高跟随精度 当数控系统发出位置指令后，由于机械部分不能很快响应会产生滞后现象，影响了加工精度。现代控制理论中有各种算法能够实现高速和高精度的伺服控制，但是，由于它们的计算方法太复杂，以往的计算机运算速度不够，很难实现。现在计算机的运算速度和存储容量都加大很多，有时还可采用专用芯片的办法，使复杂的计算能够在线实现，使得滞后量减少很多，从而提高了跟随精度。

③ 采用高分辨率的位置编码器 一般交流伺服电动机轴上装有回转编码器（脉冲发生器），用来检测电动机的角位移。显然，编码器的分辨率越高，则电动机转动角位移就越精确。现代高分辨率位置编码器绝对位置的测量可达 163840p/r。

④ 实现多种补偿功能 数控系统能实现多种补偿功能，提高数控机床的加工精度和动态特性。数控系统的补偿功能主要用来补偿机械系统带来的误差。

a. 直线度的补偿。随着某一轴的运动，对另一轴加以补偿，以提高工作台运动的直线度。

b. 采用新的丝杠导程误差补偿方法。用几条近似线表示导程误差，仅对其中几个点进行补偿。此法可减少补偿数据的设定点数，使补偿方法大为简化。

c. 丝杠、齿轮间隙补偿。

d. 热变形误差补偿，用来补偿由于机床热变形而产生机床几何位置变化引起的加工误差。

e. 刀具长度、半径等补偿。

f. 存储型补偿。这种补偿方法，可根据机床使用时的实际情况（如机床零件的磨损情况等）适时地修正补偿值。

提高数控系统的可靠性，可大大降低数控机床的故障率。新型数控系统大量使用大规模和超大规模集成电路，还采用专用芯片提高集成度以及使用表面封装技术等方法，减少了元器件数量和它们之间的连线和焊点数目，从而大幅度降低系统的故障率。

此外，现代数控系统还具有人工智能（AI）故障诊断系统，用它来诊断数控系统及机床的故障，把专家们所掌握的对于各种故障原因及其处置方法作为知识库储存到计算机的存储器中，以知识库为依据来开发软件，分析查找故障原因。只要回答显示器提出的简单问题，就能和专家一样诊断出机床的故障原因，提出排除故障的方法。

由于 CNC 系统使用的计算机容量越来越大，运算速度越来越快，使得 CNC 系统不仅能完成机床的数字控制功能，而且还可以充分利用软件技术，使系统智能化，给使用者以更大的帮助。例如，将迄今为止必须由程序员决定的零件的加工部位、加工工序、加工顺序等由 CNC 系统自动决定。操作者只要将加工形状和必要的毛坯形状输进 CNC 系统，就能自动生成加工程序。这样数控加工的编程时间将大为缩短，即使经验不足的操作者也能进行操作。CNC 系统如何与人工智能技术相结合，尚待研究开发。除了上述故障诊断和编程方面的应用外，还有更大的领域留待我们去探索。

越来越多的工厂希望将多台数控机床组成各种类型的生产线或者 DNC（Direct Numerical

Control 直接数字控制) 系统。这就要求 CNC 系统提高联网能力。一般 CNC 系统都具有 RS232 远距离串行接口, 可以按照用户的格式要求, 与同一级计算机进行多种数据交换。为了满足不同厂家、不同类型数控机床联网功能要求, 现代数控系统大都具有 MAP (制造自动化协议) 接口, 现在已实现了 MAP3.0 版本, 并采用光缆通信, 以提高数据传送速度和可靠性。

1.2 数控机床基本工作原理

1.2.1 数控机床的工作原理

在数控机床上加工零件通常经过以下几个步骤。

- ① 根据加工零件的图样与工艺方案, 用规定的代码和程序格式编写程序单, 并把它记录在载体上。
- ② 把程序载体上的程序通过输入装置输入 CNC 单元中。
- ③ CNC 单元将输入的程序经过处理之后, 向机床各个坐标的伺服系统发出信号。
- ④ 伺服系统根据 CNC 单元发出的信号, 驱动机床的运动部件, 并控制必要的辅助操作。
- ⑤ 通过机床机械部件带动刀具与工件的相对运动, 加工出要求的工件。
- ⑥ 检测机床的运动, 并通过反馈装置反馈给 CNC 单元, 以减小加工误差。当然, 对于开环数控机床来说是没有检测、反馈系统的。

1.2.2 数控系统的主要工作过程

数控系统的主要任务是进行刀具和工件之间相对运动的控制, 图 1-3 初步描绘了数控系统的主要工作过程。

在接通电源后, 微机数控装置和可编程控制器都将对数控系统各组成部分的工作状态进行检查和诊断, 并设置初态。当数控系统具备了正常工作的条件时, 可开始进行加工控制信息的输入。

工件在数控机床上的加工过程由数控加工程序来描述。按照管理形式的不同, 编程工作可以在专门的编程场所进行, 也可以在机床前进行。对于前一种情况, 在加工准备阶段, 利用专门的编程系统产生数控加工程序, 并保存到控制介质上, 再输入数控装置, 或者采用通信方式直接传输到数控装置, 操作员可按照需要, 通过数控面板对读入的数控加工程序进行修改; 对于后一种情况, 操作员可直接利用数控装置本身的编辑器进行数控加工程序的编写和修改。

输入数控装置的加工程序是按工件坐标系来编程的, 而机床刀具相对于工件是按机床坐标系运动的, 同时加工所使用的刀具参数也各不相同, 因此, 在加工前, 还要输入使用的刀具参数, 以及工件编程原点相对于机床原点的坐标位置。

输入加工控制信息后, 可选择一种加工方式 (如手动方式, 或自动方式中的单段方式和连续方式), 启动加工运行, 此时, 数控装置在系统控制程序的作用下, 对输入的加工控制信息进行预处理, 即进行译码以及刀具半径补偿和刀具长度补偿计算, 系统进行数控加工程序译码 (或解释) 时, 将其区分成几何的、工艺的数据和开关功能。几何数据是刀具相对工件的运动路径数据, 如有关坐标指定等, 利用这些数据可加工出要求的工件几何形状; 工艺数据是主轴转速和进给速度等功能, 即 F、S 功能和部分 G 功能; 开关功能是对机床电器的开关命令, 例如主轴启/停、刀具选择和交换、冷却液的启/停、润滑液的启/停等辅助 M 功能指令等。

由于在编写数控加工程序时, 一般不考虑刀具的实际几何数据, 所以, 数控装置根据工件

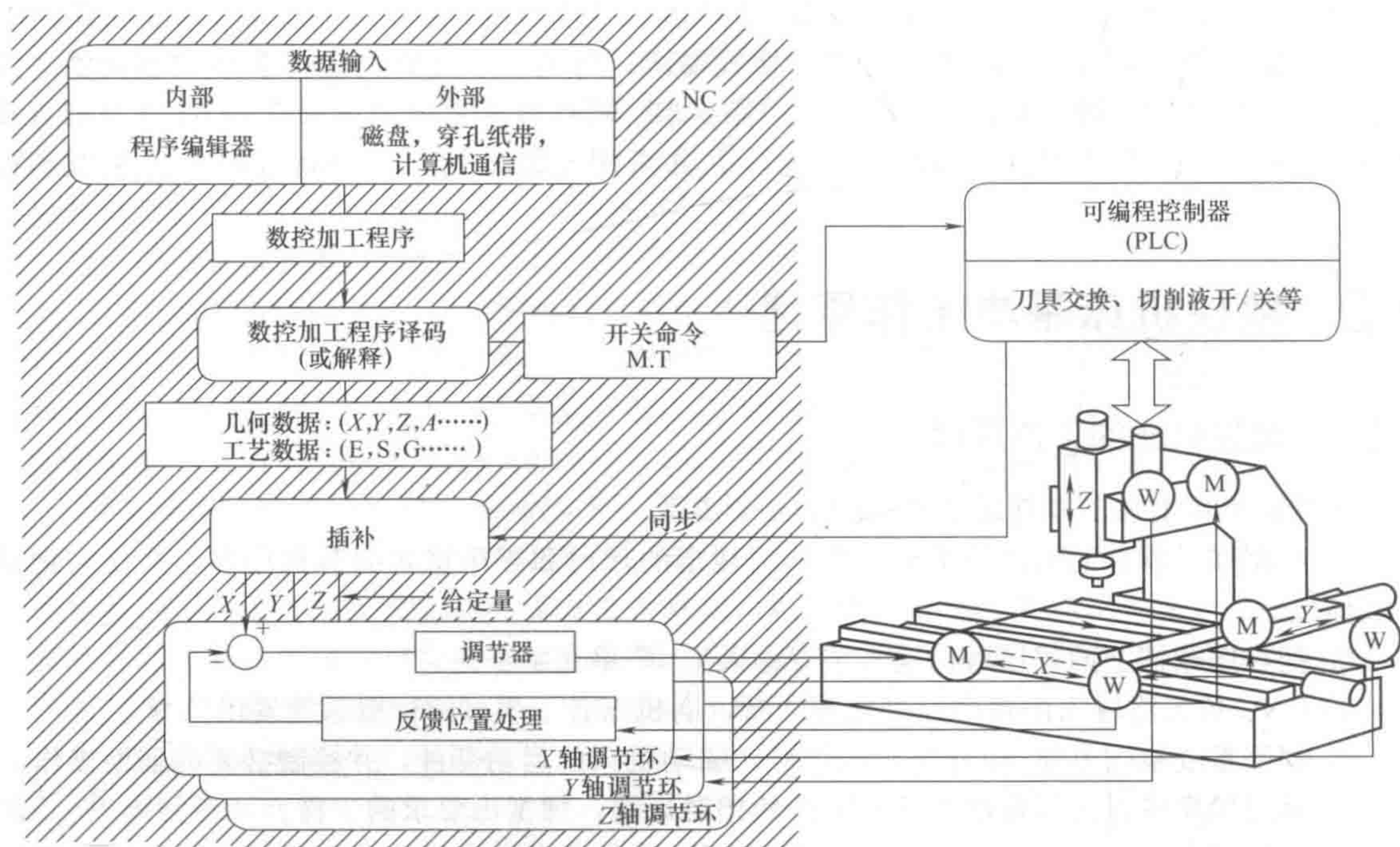


图 1-3 数控系统的主要工作过程

M—电动机；W—位置传感器

几何数据和在加工前输入的实际刀具参数，要进行相应的刀具补偿计算，简称刀补计算。在数控系统中存在着多种坐标系，根据输入的实际工件原点，加工过程所采用的各种坐标系等几何信息，数控装置还要进行相应的坐标变换。

数控装置对加工控制信息预处理完毕后，开始逐段运行数控加工程序。要产生的运动轨迹在几何数据中由各曲线段起、终点及其连接方式（如直线和圆弧等）等主要几何数据给出，数控装置中的插补器能根据已知的几何数据计算出刀具一系列的加工点，并完成所谓的数据“密化”工作，即完成插补处理。插补后的位置信号与检测到的位置信号进行位置处理，处理后的信号控制伺服装置，由伺服装置驱动电动机运动，从而带动机床运动件运动。

由数控装置发出的开关命令在系统程序的控制下，在各加工程序段插补处理开始前或完成后，适时输出给机床控制器。在机床控制器中，开关命令和由机床反馈的回答信号一起被处理和转换为对机床开关设备的控制命令。在现代的数控系统中，大多数机床控制电路都用 PLC 中可靠的开关功能来实现。

在机床的运行过程中，数控系统要随时监视数控机床的工作状态，通过显示部件及时向操作者提供系统工作状态和故障情况。此外，数控系统还要对机床操作面板进行监控，因为机床操作面板的开关状态可以影响加工状态，需及时处理有关信号。

1.3 数控机床分类

目前，为了研究数控机床，可从不同的角度对数控机床进行分类。

1.3.1 按控制系统的特点分类

(1) 点位控制数控机床

对于一些孔加工用数控机床，只要求获得精确的孔系坐标定位精度（图 1-4）而不管从一

个孔到另外一个孔是按照什么轨迹运动，如坐标钻床、坐标铣床以及冲床等，就可以采用简单而价格低廉的点位控制系统。

这种点位控制系统，为了确保准确的定位，系统在高速运行后，一般采用3级减速，以减小定位误差。但是，由于移动件本身存在惯性，而且在低速运动时，摩擦力有可能变化，所以即使系统关断后，工作台并不立即停止，形成定位误差，而且这个值有一定的分散性。

(2) 直线控制数控机床

某些数控机床不仅要求具有准确定位的功能，而且要求从一点到另一点之间按直线移动，并能控制位移的速度（图1-5）。因为这一类型的数控机床在两点间移动时，要进行切削加工。所以对于不同的刀具和工件，需要选用不同的切削用量及进给速度。

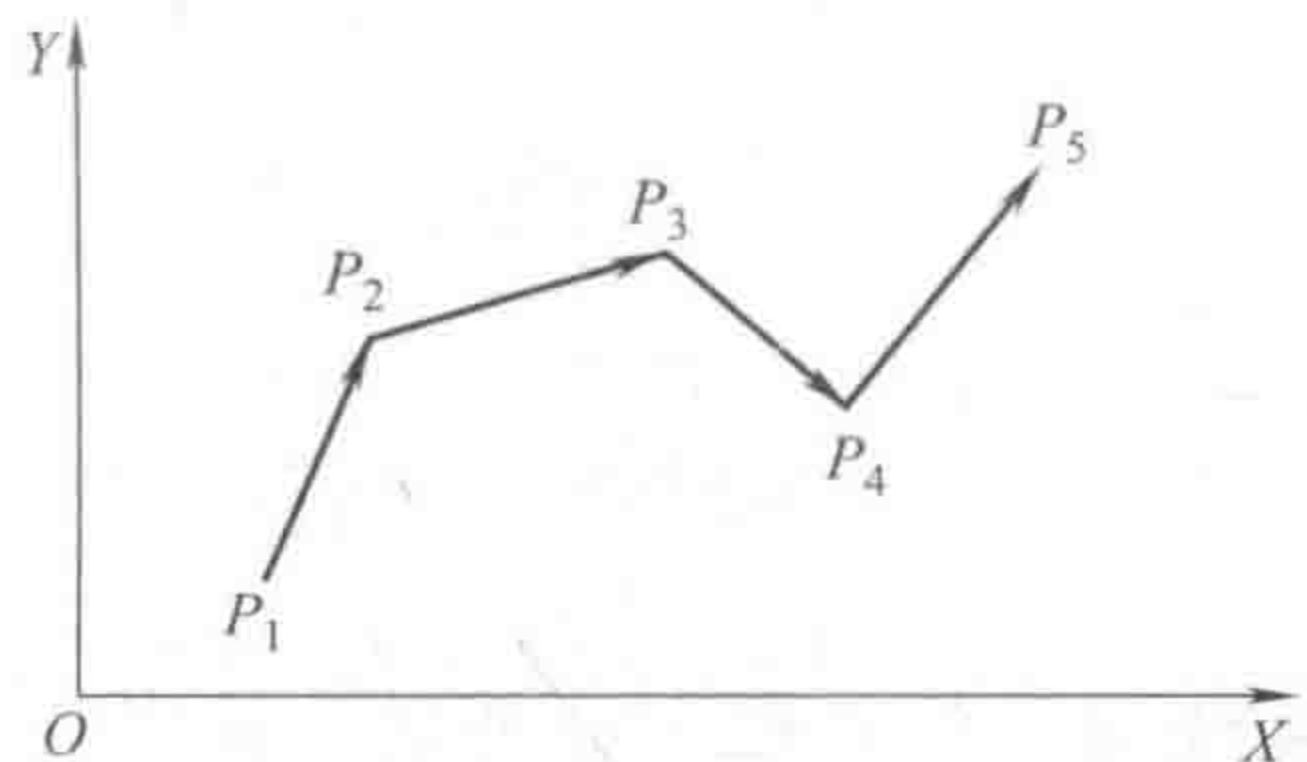


图 1-4 数控机床的点位加工

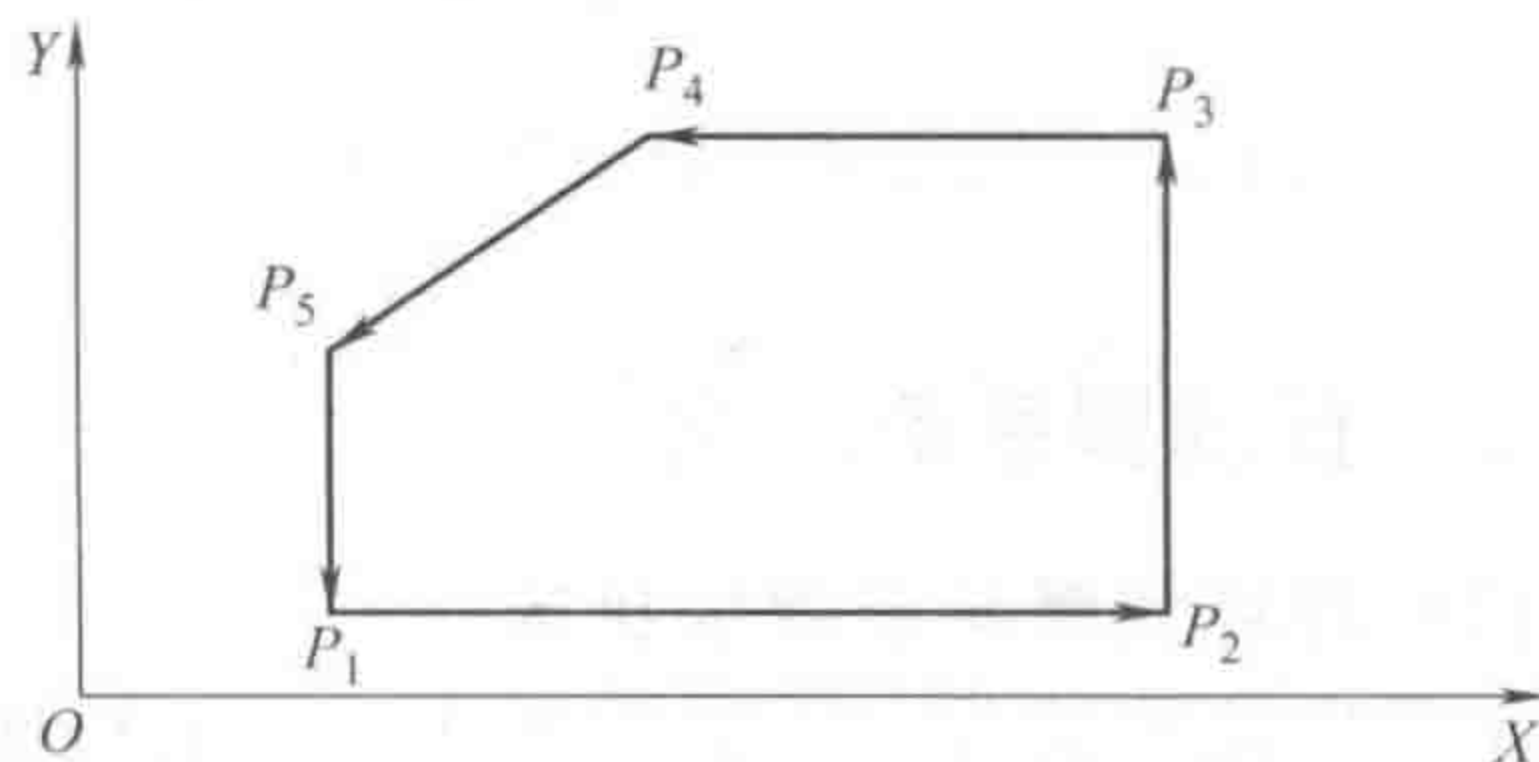


图 1-5 数控机床的直线加工

这一类的数控机床包括经济型数控镗铣床、数控车床等。一般情况下，这些数控机床有2~3个可控轴，但可同时控制轴数只有1个。

为了能在刀具磨损或更换刀具后，仍得到合格的零件，这类机床的数控系统常常具有刀具半径补偿功能、刀具长度补偿功能和主轴转速控制的功能。

(3) 轮廓控制的数控机床

更多的数控机床具有轮廓控制的功能（图1-6），即可以加工具有曲线或者曲面的零件。这类机床有两坐标及两坐标以上的数控铣床、加工中心等。这类数控机床应能同时控制两个或两个以上的轴进行插补运算，对位移和速度进行严格的不间断控制。现代数控机床绝大多数都具有两坐标或两坐标以上联动的功能；不仅有刀具半径补偿、刀具长度补偿，还有机床轴向运动误差补偿，丝杠、齿轮的间隙误差补偿等一系列功能。按照可联动（同时控制）轴数，可以有2轴控制、2.5轴控制、3轴控制、4轴控制、5轴控制等。

2.5轴控制（两个轴是连续控制，第三轴是点位或直线控制）的原理，实现了三个主要轴

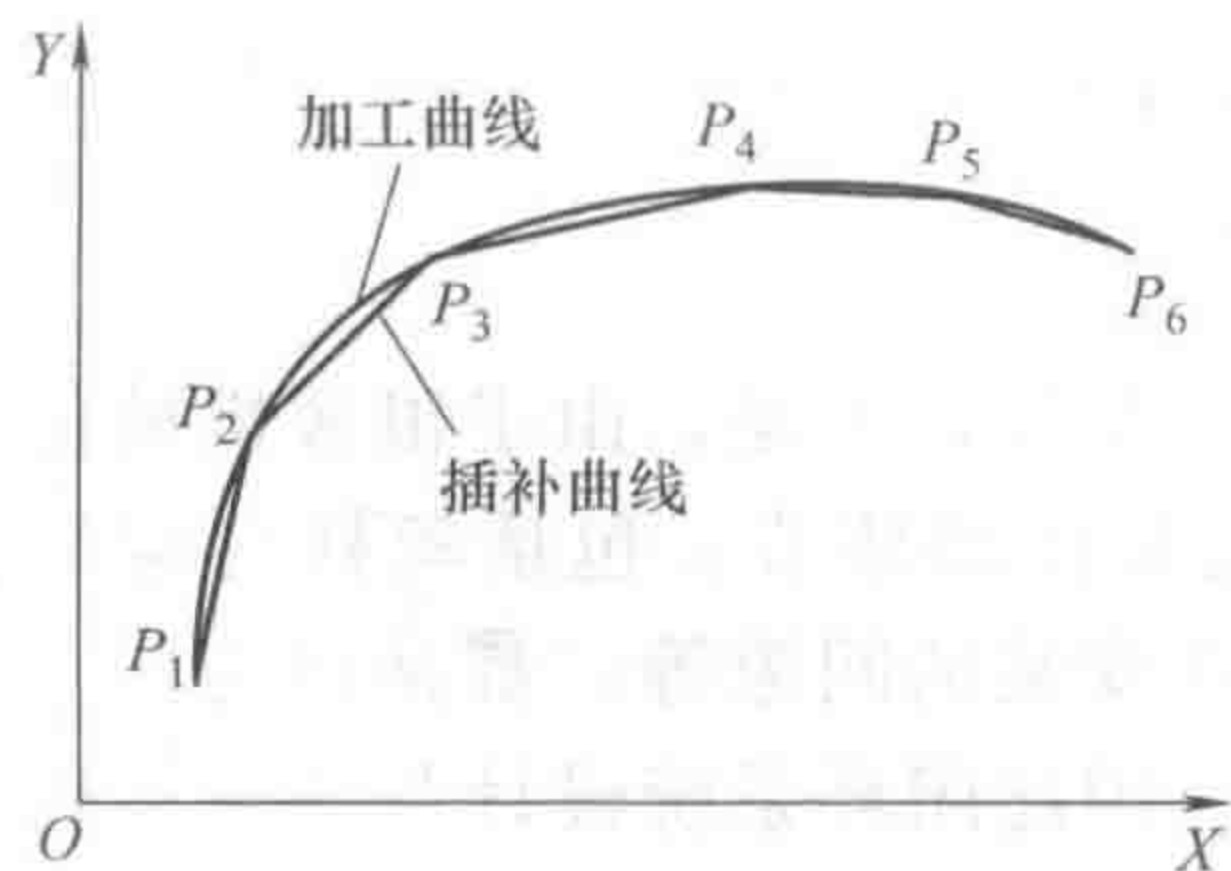


图 1-6 数控机床轮廓加工

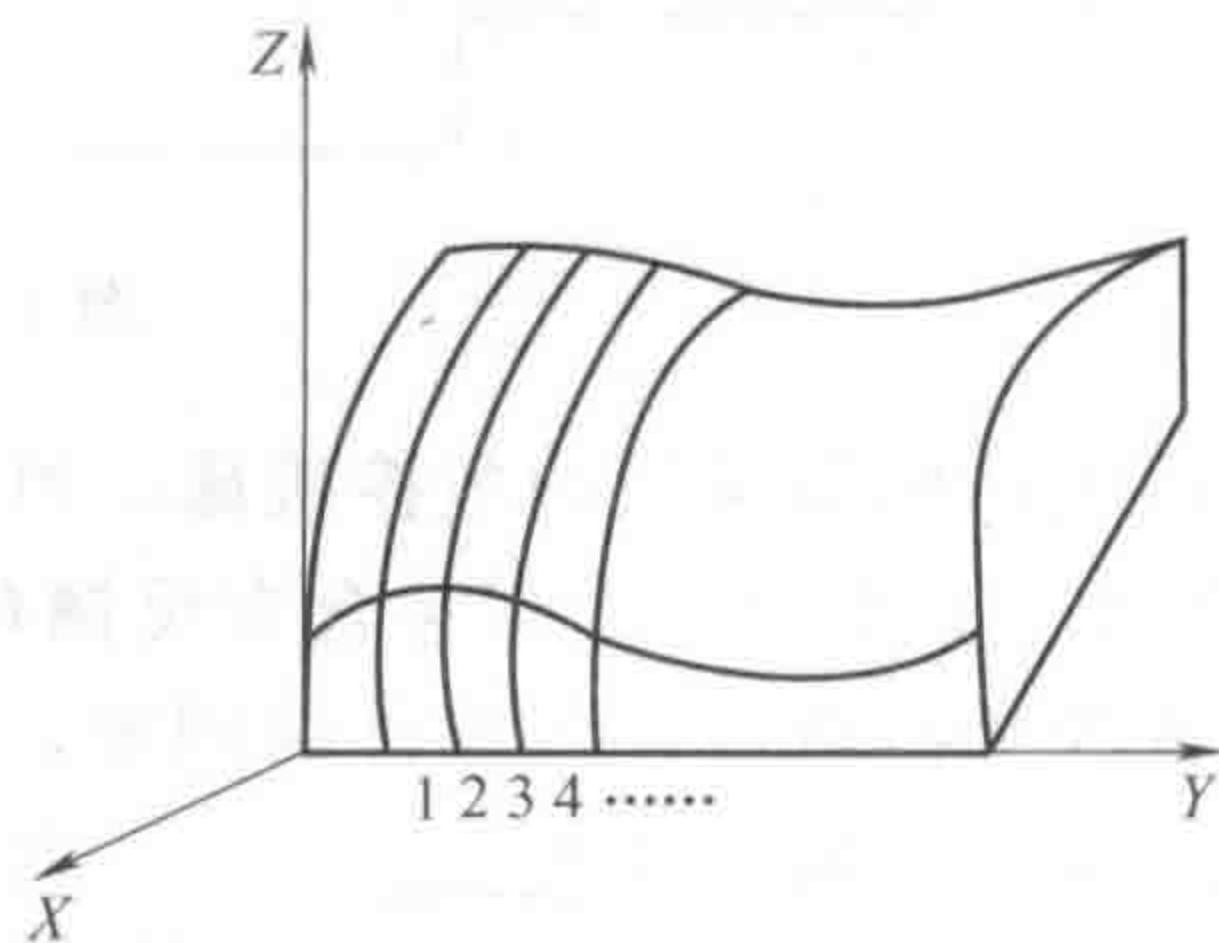


图 1-7 2.5轴数控机床加工空间曲面

X、Y、Z 内的二维控制（图1-7）。

3轴控制是三个坐标轴 X、Y、Z 都同时插补，是三维连续控制（图1-8）。

5轴连续控制是一种很重要的加工形式（图1-9），这时三个坐标轴 X、Y、Z 与工作台的回转、刀具的摆动同时联动（也可以是与两轴的数控转台联动，或刀具做两个方向的摆动）。

由于刀尖可以按数学规律导向，使之垂直于任何双倍曲线平面，因此特别适合于加工透平叶片、机翼等。

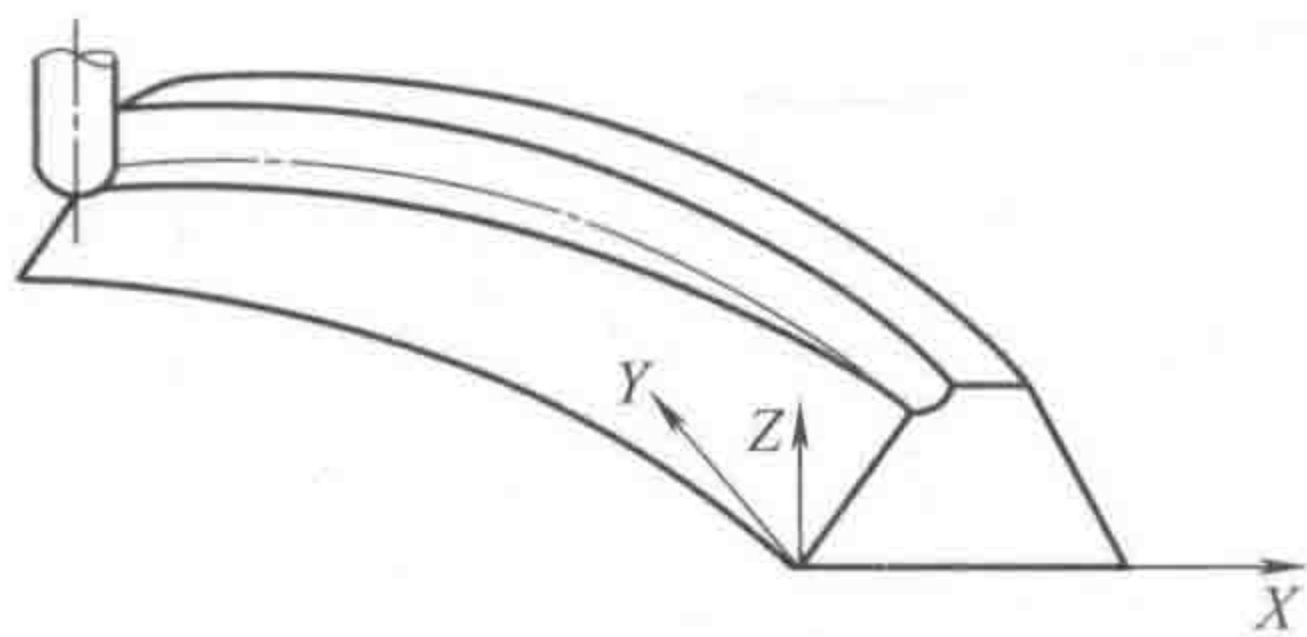


图 1-8 三坐标数控机床曲面加工

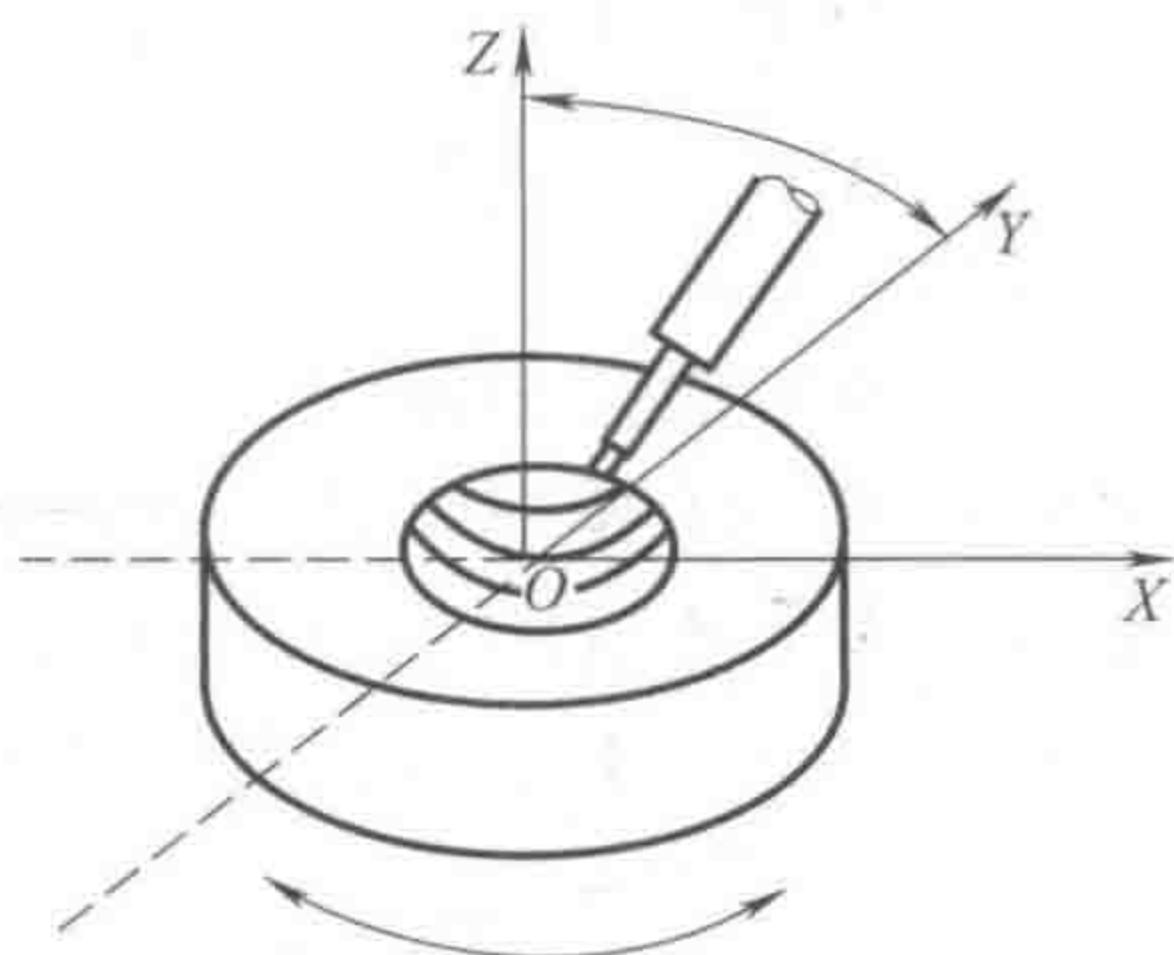


图 1-9 五轴联动数控机床加工

1.3.2 按伺服系统分类

(1) 开环伺服系统数控机床

这是比较原始的一种数控机床，这类机床的数控系统将零件的程序处理后，输出数字指令信号给伺服系统，驱动机床运动，没有来自位置传感器的反馈信号，如图 1-10 所示。最典型的系统就是采用步进电动机的伺服系统。这类机床较为经济，但是速度及精度都较低。因此，目前在国内，仍作为一种经济型数控机床，多用于旧机床改造。

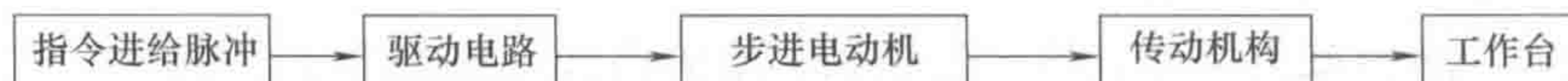


图 1-10 开环伺服系统框图

(2) 闭环伺服系统数控机床

这类机床可以接受插补器的指令，而且随时接受工作台测得的实际位置反馈信号，根据其差值不断进行误差修正，如图 1-11 所示，这类数控机床可以消除由于传动部件制造中存在的精度误差给工件加工带来的影响。

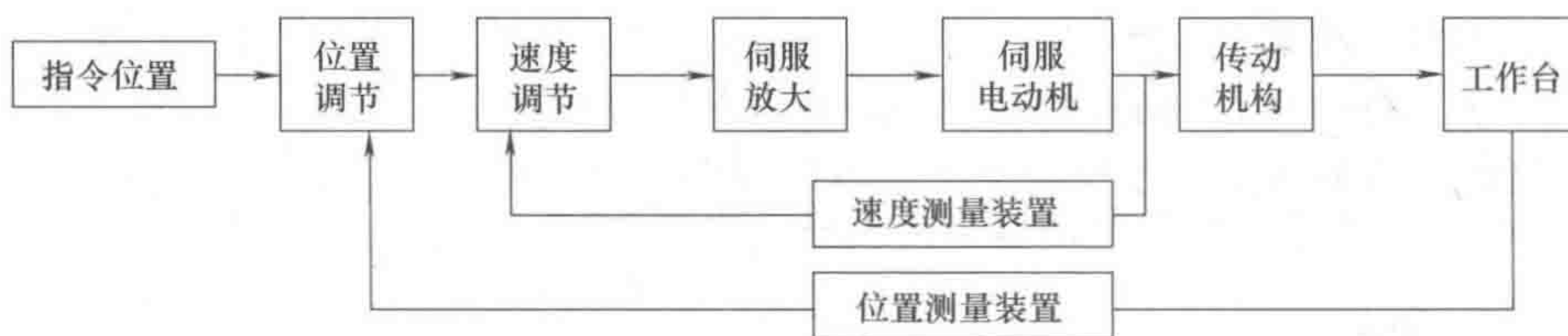


图 1-11 闭环伺服系统框图

采用闭环伺服系统的数控机床，可以得到很高的加工精度，但是，由于很多机械传动环节（如丝杠副、工作台等）都包含在反馈环节内，而各种机械传动环节，包括丝杠与螺母、工作台与导轨的摩擦特性，各部件的刚度，以及位移检测元件安装的间隙等，都是可变的，将直接影响伺服系统的调节参数，而且有一些是非线性的参数。因此闭环系统设计与调整有较大的难度，设计与调整不好，很容易造成系统不稳定。所以，闭环伺服系统主要用于精度要求很高的镗铣床、超精车床、超精铣床等。

(3) 半闭环伺服系统数控机床

大多数数控机床是半闭环伺服系统，将测量元件从工作台移到电动机端头或丝杠端头。这种系统的闭环环路内不包括丝杠、螺母副及工作台，因此可以获得稳定的控制特性，如图 1-12 所示。而且由于采用了高分辨率的测量元件，可以获得比较满意的精度及速度。

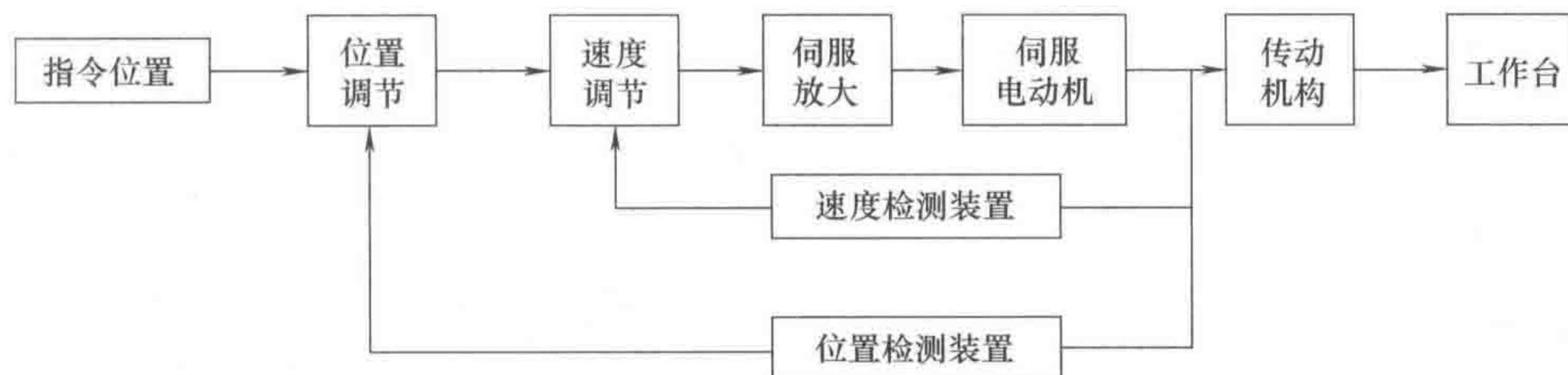


图 1-12 半闭环伺服系统框图

1.3.3 按工艺方式分类

- ① 金属切削类数控机床 如数控车床、加工中心、数控钻床、数控磨床、数控镗床等。
- ② 金属成型类数控机床 如数控折弯机、数控弯管机、数控回转头压力机等。
- 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、数控激光切割机等。
- ④ 其他类型的数控机床 如火焰切割机、数控三坐标测量机等。

1.3.4 按功能水平分类

根据一些功能及指标，可以把数控机床分为低、中、高三个档次（表 1-1），这种分类方法，目前在我国用得很多，但没有一个确切的定义。

表 1-1 数控机床分类

功 能	低档数控机床	中档数控机床	高档数控机床
进给当量和进给速度	进给当量为 $10\mu\text{m}$ ，进给速度为 $8\sim 15\text{m}/\text{min}$	进给当量为 $1\mu\text{m}$ ，进给速度为 $15\sim 24\text{m}/\text{min}$	进给当量为 $0.1\mu\text{m}$ ，进给速度为 $15\sim 100\text{m}/\text{min}$
伺服进给系统	开环、步进电动机	半闭环直流或交流伺服系统	闭环伺服系统、电主轴、直线电动机
联动轴数	2~3 轴	3~4 轴	3 轴以上
通信功能	无	RS232 或 DNC 接口	RS232、RS485、DNC、MAP 接口
显示功能	数码管显示或简单的 CRT 字符显示	功能较齐全的 CRT 显示或液晶显示	功能齐全的 CRT（三维动态图形显示）
内装 PLC	无	有	有强功能的 PLC，有轴控制的扩展功能
主 CPU	8 位或 16 位 CPU	由 16 位向 32 位 CPU 过渡	32 位向 64 位 CPU 发展

计算机数控系统

2.1 计算机数控系统概述

计算机数控系统（简称 CNC 系统），是 20 世纪 70 年代发展起来的机床数控系统，它是靠计算机运行控制软件来替代先前的硬件数控系统（简称 NC 系统）完成对机床的控制。CNC 是一个运行数控控制软件的计算机，按照零件数控加工程序去执行数控装置的一部分或全部功能，在计算机之外的唯一装置是接口。

2.1.1 CNC 系统的组成

CNC 数控系统由加工程序、输入输出设备、CNC 装置、可编程控制器（PLC）、主轴驱动装置和进给驱动装置等组成，图 2-1 所示为 CNC 系统的组成框图。

数控系统是严格按照数控程序对工件进行自动加工的。数控加工程序按零件加工顺序记载机床加工所需的各种信息，如零件加工的轨迹信息、工艺信息及开关命令等。

2.1.2 CNC 系统工作过程

CNC 装置的工作过程是在硬件的支持下，执行软件的过程。CNC 装置的工作原理是：通过输入输出设备输入机床加工零件所需的各种数据信息（数控加工程序），经过计算机的译码、刀具半径补偿、加减速控制、插补等处理和运算，将每个坐标轴的移动分量送到其相应的驱动电路，经过转换、放大，驱动伺服电动机，带动坐标轴运动，同时进行实时反馈控制，使每个坐标轴都能精确移动到指令所要求的位置。从而实现刀具与工件的相对运动，自动完成对零件的加工。

2.1.3 CNC 系统的特点

CNC 系统之所以取代以前的 NC 系统，是因为 CNC 系统具有 NC 系统无法比拟的优点。

(1) 灵活性大

NC 系统是用硬件逻辑线路来实现对机床的控制功能。这种固定接线的电路一旦制成后就很难改变，而 CNC 系统的数控功能大部分是由软件在通用硬件的支持下来实现的，其功能的改变、扩充和适应性方面都具有较大的灵活性，如果要改变、扩充其功能，只需通过对软件的修改和扩充便可实现。

(2) 通用性强

CNC 系统的硬件和软件大多采用模块化的结构。按模块化的结构组成的 CNC 系统基本配