



概 论

本章引导读者走进控制工程领域,主要介绍控制理论在工程中的应用和发展、自动控制系统的基本概念以及控制理论在机械制造业中的一些具体应用;同时也介绍本书的主要内容以及作为教材的讲授学时安排建议。

1.1 控制理论在工程中的应用和发展

控制理论是在产业革命的背景下,在生产和军事需求的刺激下,自动控制、电子技术、计算机科学等多种学科相互交叉发展的产物。

尽管早在约一两千年前就有亚历山大的希罗发明的开闭庙门装置和分发圣水自动计时装置以及中国的记里鼓车、张衡发明的用于观天文的水运浑象仪及自动测量地震的候风地动仪等^[31]控制思想萌芽,但直到1948年,美国科学家维纳(Norbert Wiener, 1894—1964)所著《控制论》的出版^[30],才标志着这门学科的正式诞生。

此前最引人注目的自动控制装备是公元1788年,英国人J. Watt用离心式调速器控制蒸汽机的速度,这也成为第一次工业革命标志性的成就。在工业革命的浪潮里,控制理论积累发展的里程碑式的事件包括:1868年,J. C. Maxwell发表了《调速器》,提出反馈控制的概念及稳定性条件;1884年,E. J. Routh提出劳斯稳定性判据;1892年,A. M. Lyapunov提出李雅普诺夫稳定性理论;1895年,A. Hurwitz提出赫尔维茨稳定性判据;1932年,H. Nyquist提出奈奎斯特稳定性判据;1945年,H. W. Bode提出反馈放大器的一般设计方法等。

控制论的奠基人美国科学家维纳从1919年开始萌发了控制论的思想,1940年提出了数字电子计算机设计的5点建议。第二次世界大战期间,维纳参加了火炮自动控制的研究工作,他把火炮自动打飞机的动作与人狩猎的行为做了对比,并且提炼出了控制理论中最基本和最重要的反馈概念。他提出,准确控制的方法可以把运动结果所决定的量作为信息再反馈回控制装置中,这就是著名的负反馈概念。驾驶车辆也是由人参与的负反馈进行调节。人们不是盲目地按着预定不变的模式来操纵车上的驾驶盘,而是发现靠左了,就向右边做一个修正,反之亦然。因此他认为,目的性行为结果可以引作反馈,可以把目的性行为这个生物所特有的概念赋予机器。于是,维纳等在1943年发表了《行为、目的和目的论》。同时,火炮自动控制的研制获得成功,这些是控制论萌芽的重要实物标志。

20世纪50年代以后,一方面在控制理论的指导下,火炮及导弹控制技术极大地发展,

数控、电力、冶金自动化技术突飞猛进;另一方面在自动控制装备的需求和发展的基础上,控制理论也不断向纵深发展。1954年,我国科学家钱学森在美国运用控制论的思想和方法,用英文出版了《工程控制论》,首先把控制论推广到工程技术领域。接着短短的几十年里,在各国科学家和科学技术人员的努力下,又相继出现了生物控制论、经济控制论和社会控制论等,控制理论已经渗透到各个领域,并伴随着其他科学技术的发展,极大地改变了整个世界。控制理论自身也在创造人类文明中不断向前发展。控制理论的中心思想是通过信息的传递、加工处理并加以反馈来进行控制,控制理论也是信息学科的重要组成方面。

机电工业是我国最重要的支柱产业之一,传统的机电产品正在向机电一体化(mechatronics)方向发展。机电一体化产品或系统的显著特点是控制自动化。机电控制型产品技术含量高,附加值大,在国内外市场上具有很强的竞争优势,形成机电一体化产品发展的主流。当前国内外机电结合型产品,诸如典型的工业机器人、数控机床、自动导引车等都广泛地应用了控制理论。

根据自动控制理论的内容和发展的不同阶段,可以将控制理论分为经典控制理论和现代控制理论两大部分。

经典控制理论的内容是以传递函数为基础,以频率法和根轨迹法作为分析和综合系统的基本方法,主要研究单输入、单输出这类控制系统的分析和设计问题。

现代控制理论是在经典控制理论的基础上,于20世纪60年代以后发展起来的。它的主要内容是以状态空间法为基础,研究多输入、多输出、时变参数、分布参数、随机参数、非线性等控制系统的分析和设计问题。最优控制、最优滤波、系统辨识、自适应控制等理论都是这一领域的重要分支,特别是近年来,由于电子计算机技术和现代应用数学研究的迅速发展,现代控制理论在大系统理论和模仿人类智能活动的人工智能控制等诸多领域有了重大发展。

半个世纪以来,控制理论从主要依靠手工计算的经典控制理论发展到依赖计算机的现代控制理论,发展了最优控制、自适应控制、智能控制。智能控制中,学习控制技术从简单的参数学习向较为复杂的结构学习、环境学习和复杂对象学习的方向发展,并发展了模糊控制、神经网络控制、遗传算法、混沌控制、专家系统、鲁棒控制与 H_∞ 控制等理论和技术。同时,还发展了MATLAB(matrix laboratory)、LabVIEW(laboratory virtual instrumentation engineering workbench)等控制系统计算机辅助分析和设计工具,使控制理论在工程上的应用更加方便。

1.2 自动控制系统的基本概念

所谓自动控制,就是在没有人直接参与的情况下,使被控对象的某些物理量准确地按照预期规律变化。例如,数控加工中心能够按预先排定的工艺程序自动地进刀切削,加工出预期的几何形状;焊接机器人可以按工艺要求焊接流水线上的各个机械部件;温度控制系统能保持恒温,等等。所有这些系统都有一个共同点,即它们都是一个或一些被控制的物理量按照给定量的变化而变化,给定量可以是具体的物理量,例如电压、位移、角度等,也可以是数字量。一般来说,如何使被控制量按照给定量的变化规律而变化,就是控制系统要完成的基本任务。学习自动控制这门科学技术要解决两方面的问题:一是如何分析某个给定控制

系统的工作原理和动态特性,分析该系统的稳定性、准确性、快速性等;二是如何根据需要来进行控制系统的设计,并用机、电、光、液压元部件或设备来实现这一系统。前者主要是分析系统,后者是综合和设计系统,但无论要解决哪方面的问题,都必须具有丰富的控制理论知识。

系统的输入就是控制量,它是作用在系统的激励信号。其中,使系统具有预定性能的输入信号称为控制输入、指令输入或参考输入,而干扰或破坏系统预定性能的输入信号则称为扰动。系统的输出也称为被控制量,它表征控制对象或过程的状态和性能。

1.2.1 自动控制系统的工作原理

首先研究恒温系统的例子。实现恒温自动控制可以参考人工控制的过程。图 1-1 所示为人工控制的恒温箱。可以通过调压器改变电阻丝的电流,以达到控制温度的目的。箱内温度是由温度计测量的,人工调节过程可归结如下:

(1) 观测由测量元件(温度计)测出的恒温箱的温度(被控制量)。

(2) 将被测温度与要求的温度值(给定值)进行比较,得出偏差的大小和方向。

(3) 根据偏差的大小和方向再进行控制。当恒温箱温度高于所要求的给定温度时,就移动调压器滑动端使电流减小,温度降低;当恒温箱温度低于所要求的给定温度时,则移动调压器滑动端使电流增大,温度升高。

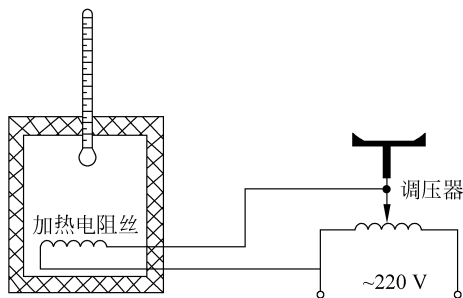


图 1-1 人工控制的恒温箱

因此,人工控制的过程就是测量、求偏差、再控制以纠正偏差的过程。简单地讲,就是检测偏差并用以纠正偏差的过程。

对于这样简单的控制形式,如果能找到一个控制器代替人的职能,那么这样一个人工调节系统就可以变成自动控制系统。图 1-2 所示就是一个自动控制系统。其中,恒温箱的温度是由给定信号电压 u_1 控制的。当外界因素引起箱内温度变化时,作为测量元件的热电偶把温度转换成对应的电压信号 u_2 ,并反馈回去与给定信号比较,所得结果即为温度偏差对

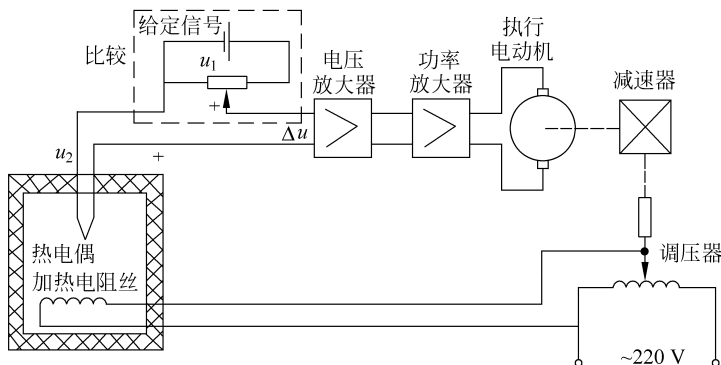


图 1-2 恒温箱的自动控制系统

应的电压信号。经电压放大、功率放大后,用以改变电动机的转速和方向,并通过传动装置拖动调压器动触头。当温度偏高时,动触头向着减小电流的方向运动;反之,加大电流,直到温度达到给定值为止;只有偏差信号为零时,电动机才停转。这样就完成了所要求的控制任务。所有这些装置便组成了一个自动控制系统。

上述人工控制系统和自动控制系统是极相似的。执行机构类似于人手,测量装置相当于人眼,控制器类似于人脑。另外,它们还有一个共同的特点,就是都要检测偏差,并用检测到的偏差去纠正偏差。可见,没有偏差便没有调节过程。在自动控制系统中,这一偏差是通过反馈建立起来的。反馈就是指输出量通过适当的测量装置将信号全部或部分返回输入端,使之与输入量进行比较。比较的结果称为偏差。如前所述,基于反馈基础上的“检测偏差用以纠正偏差”的原理又称为反馈控制原理。利用反馈控制原理组成的系统称为反馈控制系统。

图 1-3 所示为恒温箱温度自动控制系统职能方块图。图中,⊗代表比较元件,箭头代表作用的方向。从图中可以看到反馈控制的基本原理,也可以看到,各职能环节的作用是单向的,每个环节的输出是受输入控制的。总之,实现自动控制的装置可能各不相同,但反馈控制的原理却是相同的。可以说,反馈控制是实现自动控制最基本的方法。

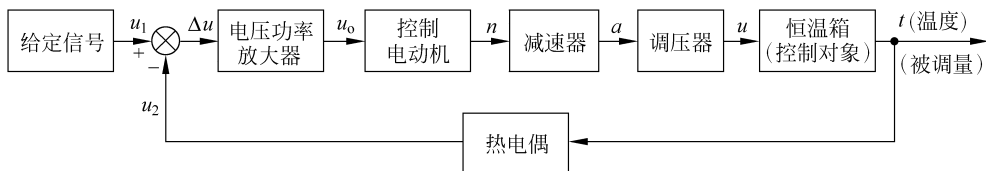


图 1-3 恒温箱温度自动控制系统职能方块图

1.2.2 开环控制与闭环控制

按照有无反馈测量装置分类,控制系统分为两种基本形式,即开环系统和闭环系统,如图 1-4 所示。开环系统(见图 1-4(a))是没有输出反馈的一类控制系统。这种系统的输入直接供给控制器,并通过控制器对受控对象产生控制作用。其主要优点是结构简单、价格便宜、容易维修;缺点是精度低,容易受环境变化(例如电源波动、温度变化等)的干扰。在要求较高的应用领域,绝大多数控制系统的基本结构方案都是采用反馈原理(见图 1-4(b)),其输出的全部或部分被反馈到输入端。输入与反馈信号比较后的差值(即偏差信号)加给控制器,然后再调节受控对象的输出,从而形成闭环控制回路。所以,闭环系统又称为反馈控制系统,这种反馈称为负反馈。与开环系统相比,闭环系统具有突出的优点,包括精度高、动态性能好、抗干扰能力强等。它的缺点是结构比较复杂,价格比较贵,对维修人员要求较高。



开环闭环动画

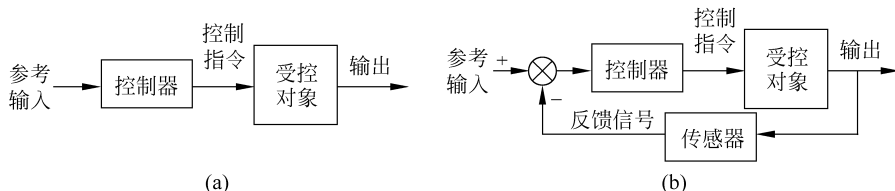


图 1-4 控制系统基本类型

(a) 开环系统; (b) 闭环系统

图 1-5 所示的电动机转速控制系统是开环控制的。当给定电压改变时,电动机转速也跟着改变,但这种控制系统的转速很容易受负载力矩变化的影响。

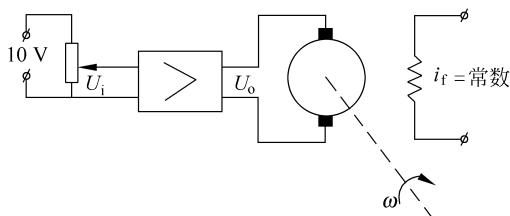


图 1-5 电动机转速控制系统

图 1-6 所示为反馈控制系统,也叫作闭环系统。其特点是系统的输出端和输入端之间存在反馈回路,即输出量对控制作用有直接影响。闭环的作用就是应用反馈来减少偏差。

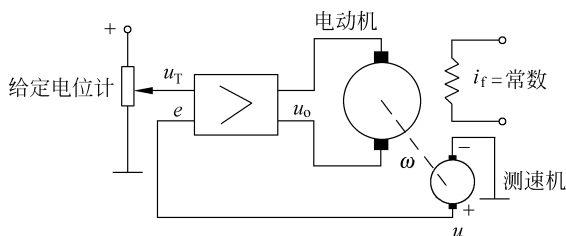


图 1-6 闭环调速系统原理图

闭环控制的突出优点是精度高,可及时减小干扰引起的偏差。图 1-6 所示的闭环调速系统能有效降低负载力矩对转速的影响。例如,负载加大,转速会降低,但有了反馈,偏差就会增大,电动机电压就会升高,转速又会上升。

由于闭环系统是靠偏差进行控制的,对于反馈控制系统,由于元件的惯性或负载的惯性,调节不好容易引起振荡,使系统不稳定。因此精度和稳定性之间的矛盾始终是闭环系统存在的一对矛盾。

从稳定性的角度看,开环系统比较容易建造,结构也比较简单,因为开环系统不存在引入反馈产生的稳定性问题。

这里需要说明,机械动力学系统,也可以画成具有反馈的方块图,但这个反馈不是人为加上的,而是机械系统所固有的,一般来说这不叫反馈控制系统,但它可用反馈控制理论来分析,可认为它是存在内反馈的反馈系统。

1.2.3 反馈控制系统的基本组成

图 1-7 所示为一个典型的反馈控制系统,表示了各元件在系统中的位置和其相互间的关系。由图可以看出,一个典型的反馈控制系统应该包括给定元件、反馈元件、比较元件(或比较环节)、放大元件、执行元件及校正元件等。

给定元件:主要用于产生给定信号或输入信号,例如调速系统的给定电位计。

反馈元件:它量测被调量或输出量,产生主反馈信号(该信号与输出量存在确定的函数关系),例如调速系统的测速电动机。

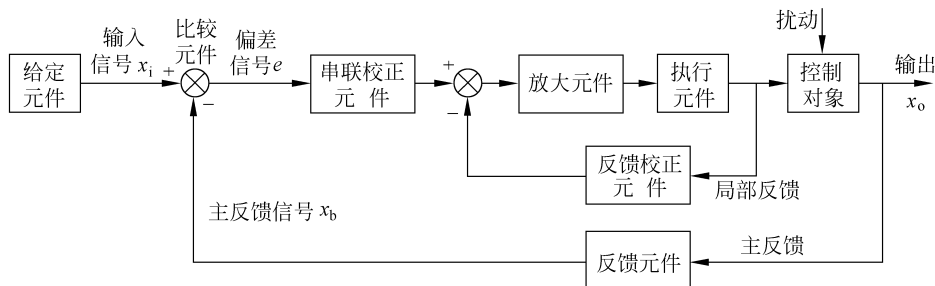


图 1-7 典型的反馈控制系统方块图

比较元件：用来比较输入信号和反馈信号之间的偏差。可以通过电路实现，有时也叫比较环节。自整角机、旋转变压器、机械式差动装置、运算放大器等都可作为物理的比较元件。

放大元件：对偏差信号进行信号放大和功率放大的元件，例如伺服功率放大器等。

执行元件：直接对控制对象进行操作的元件，例如执行电动机、液压马达等。

控制对象：控制系统所要操纵的对象，它的输出量为系统的被调量(或被控制量)，例如机床、工作台等。

校正元件：也称校正装置，用以稳定控制系统，提高精度和快速性能。主要有反馈校正和串联校正两种形式。

1.2.4 自动控制系统的基本类型

根据采用的信号处理技术的不同，控制系统可以分为模拟控制系统和数字控制系统。凡是采用模拟信号技术处理信号的控制系统称为模拟控制系统；而采用数字信号技术处理信号的控制系统则称为数字控制系统。对于给定的系统，采用何种信号处理技术取决于许多因素，例如可靠性、精度、复杂程度以及经济性等。随着微处理机技术的成熟，数字控制系统应用越来越广泛，形成了计算机控制系统。微处理机在控制系统中的作用是采集信号、处理控制规律以及产生控制指令。

如果给定量是恒定的，一般把这种控制系统叫作恒值调节系统，如稳压电源、恒温控制箱。对于这类系统，分析的重点在于克服扰动对被调量的影响。如果被调量随着给定量(也叫输入量)的变化而变化，则称为随动系统，例如火炮自动瞄准敌机的系统、机床随动系统等。这类系统要求输出量能够准确、快速地复现给定量。

所有变量的变化都是连续进行的系统称为连续控制系统。系统中存在离散变量的系统则称为离散控制系统。计算机控制系统属于数字控制系统，多采用离散控制系统理论进行分析。

可用线性微分方程描述的系统称为线性连续控制系统；不能用线性微分方程描述，存在着非线性部件的系统则称作非线性系统。

1.2.5 对控制系统的基本要求

自动控制系统用于不同的目的，要求也往往不一样。但自动控制技术是研究各类控制系统共同规律的一门技术，对控制系统有共同的要求，一般可归结为稳定、准确、快速。

(1) 稳定性: 机械受控对象往往存在惯性, 当系统的各个参数设置不当时, 将会引起系统的振荡而失去工作能力。稳定性就是指动态过程的振荡倾向和系统能够恢复平衡状态的能力。输出量偏离平衡状态后应该随着时间收敛并且最后回到初始的平衡状态。稳定性的要求是系统工作的首要条件。



稳定性
动画

(2) 快速性: 这是在系统稳定的前提下提出的, 是指当系统输出量与给定的输入量之间产生偏差时, 消除这种偏差过程的快慢程度。

(3) 准确性: 是指在调整过程结束后输出量与给定的输入量之间的偏差, 或称为精度, 这也是衡量系统工作性能的重要指标。例如, 数控机床精度越高, 则加工精度也越高。

由于受控对象的具体情况不同, 各种系统对稳、准、快的要求各有侧重。例如, 随动系统对快速性要求较高, 而调速系统对稳定性提出了较严格的要求。

在同一系统中, 稳、准、快有时是相互制约的。反应速度快, 可能会有强烈振荡; 改善稳定性, 控制过程又可能过于迟缓, 精度也可能变差。分析和解决这些矛盾, 是本学科讨论的重要内容。

经典控制理论主要研究单输入-单输出的控制系统, 而很多实际系统则是多输入-多输出的。当不存在相互关联的情况下, 多输入-多输出系统可分解成多个单输入-单输出的控制系统; 否则应当按照多输入-多输出系统建模研究。(参见二维码动画) 直升机动画上部图像是存在相互交联的情况下按照单输入-单输出控制, 而下部图像则是按照多输入-多输出控制。



单输入-单
输出与多
输入-多输
出对比

1.3 控制理论在机械制造业中的应用

随着控制理论的发展, 控制理论在机械制造业中的应用越来越广泛。

1788 年瓦特发明的蒸汽机离心调速器是一个自动调节系统, 如图 1-8 所示, 是控制理论形成的生产实践的典型代表。调速器的轴通过发动机和减速齿轮, 以角速度 ω 旋转。旋转的飞锤所产生的离心力形成的轴向力被飞锤上方的弹簧力抵消, 其位移相当于离心机构形成的检测量。对输出转速进行检测, 并将它反馈到发动机阀门的位移, 通过杠杆装置对蒸汽流量进行控制。所要求的转速由弹簧预应力调准。

伺服系统(servo system)在机电控制系统中有着广泛的应用。伺服系统就是将指令信号精确、快速地转换为相应的物理实现。例如, 飞机和船舶的舵角操纵由于所需的力很大, 不可能由人力直接操纵, 需由伺服系统来完成, 伺服系统的作用就是使舵面的转角精确地跟随驾驶员的操纵动作。当使用自动驾驶方式时, 伺服系统要使舵面转角精确实现自动驾驶仪输入的指令。各种数控机床进给系统、机器人各关节运动都是伺服系统控制的。它们还能依靠多轴伺服系统的配合, 完成复杂的空间曲线运动的控制。在军事上, 雷达天线的自动瞄准跟踪控制、自动火炮和战术导弹发射架的瞄准运动控制、坦克炮塔的防摇稳定控制、导弹和鱼雷的制导控制等, 都采用伺服系统。另外, 自动绘图仪的画笔控制系统、硬盘磁头的位置控制系统、光盘驱动器读出头的控制系统、自动照相机和摄像机的镜头实现自动对焦和变焦, 都采用伺服系统来完成。

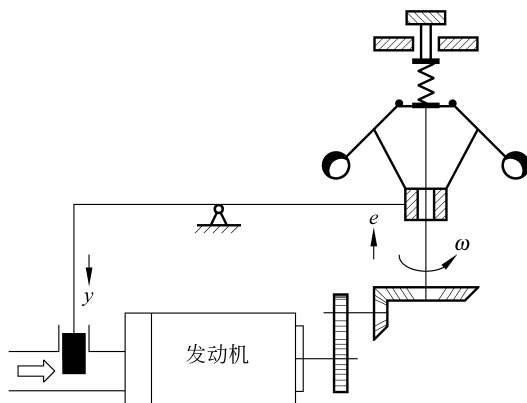


图 1-8 离心调速器

图 1-9 所示为工业机器人的一个关节伺服系统。它的受控过程是机器人的关节运动。采用微处理器作为控制器。关节轴的实际位置由旋转变压器测量,转换为电的数字信号后,反馈给控制器。微处理器经过控制算法后,输出控制指令,再经过数模转换和伺服功率放大,提供给关节轴上的伺服电动机。伺服电动机根据控制指令驱动关节轴转动,直至机器人运动到达输入参考信号设定的位置为止。

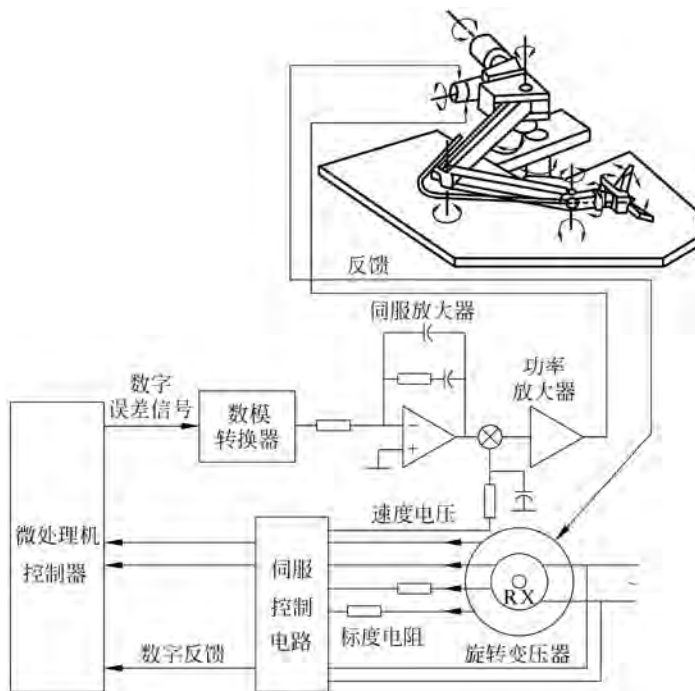


图 1-9 机器人关节伺服系统

在机械行业中广泛使用的数控机床,其进给系统是典型的反馈控制系统。图 1-10 表示一种三坐标闭环数控机床。其中, x 方向控制工作台沿丝杠轴方向水平移动工件; y 方向控制立铣头沿与丝杠轴正交的水平方向移动; z 方向控制垂直进刀。

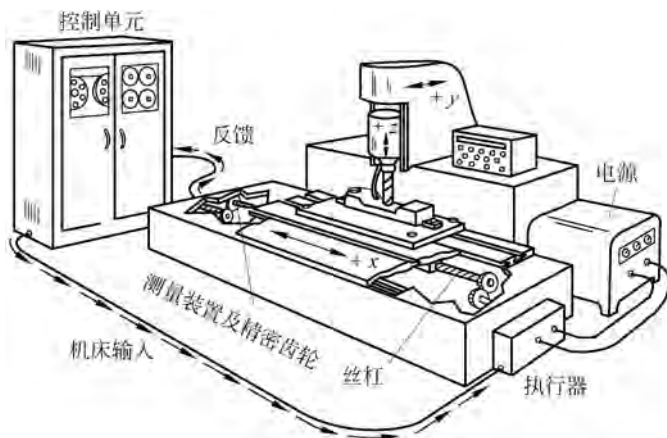


图 1-10 三坐标闭环数控机床

工业机器人是控制理论在机械行业的又一成功应用。最通用的工业机器人是具有多个自由度的机械手。图 1-11 所示为六自由度工业机器人。

每一个运动轴都是一路伺服控制。机器人伺服控制系统利用位置和速度反馈信号控制机械手运动。智能机器人除伺服回路以外，控制器还接收包括视觉、触觉以及语音识别等其他传感器信号。控制器利用这些信号检测目标形貌、目标尺寸以及目标个性。

自动导引车(automatic guided vehicle, AGV)又称移动机器人,能够跟踪编程路径,在工厂内将零部件从一处运送到另一处。在汽车工业、电子产品加工工业以及柔性制造系统中,自动导引车物料运输系统已经得到广泛使用。图 1-12 表示了一种感应导线式自动导引车。

感应导线铺设在地板槽内,导线中通以交流电流,在导线周围形成交变磁场。安装在车身前部的弓形天线跨在感应导线的上方。在导线的交变磁场作用下,天线的两个对称线圈中感应电压的差值代表车辆偏离轨道的误差信号。误差信号经过伺服放大后,驱动控制驾驶方向的电动机,使前轮偏转,改变车辆运动轨迹,从而实现自动驾驶功能。

柔性制造系统(flexible manufacturing system, FMS)是控制理论实现整个加工车间自动化的具体应用。在柔性制造系统中,将计算机数控加工中心、工业机器人以及自动导引车连接起来,以适应加工成组产品。图 1-13 表示了一柔性制造系统。它由 1 台铣削数控加工中心、1 台车削数控加工中心、1 台关节式工业机器人、1 台门吊式工业机器人、3 辆自动导引车、装卸站以及刀具库等组成,并通过单元控制器与局域网(local area network, LAN)相连,以实现各个独立设备之间的通信。

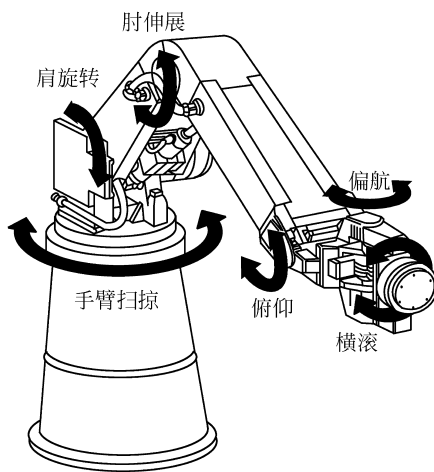


图 1-11 六自由度工业机器人

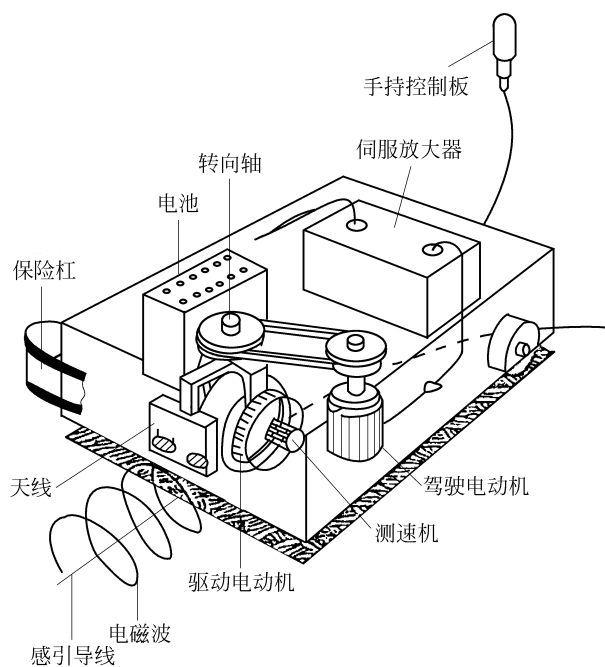


图 1-12 感应导线式自动导引车

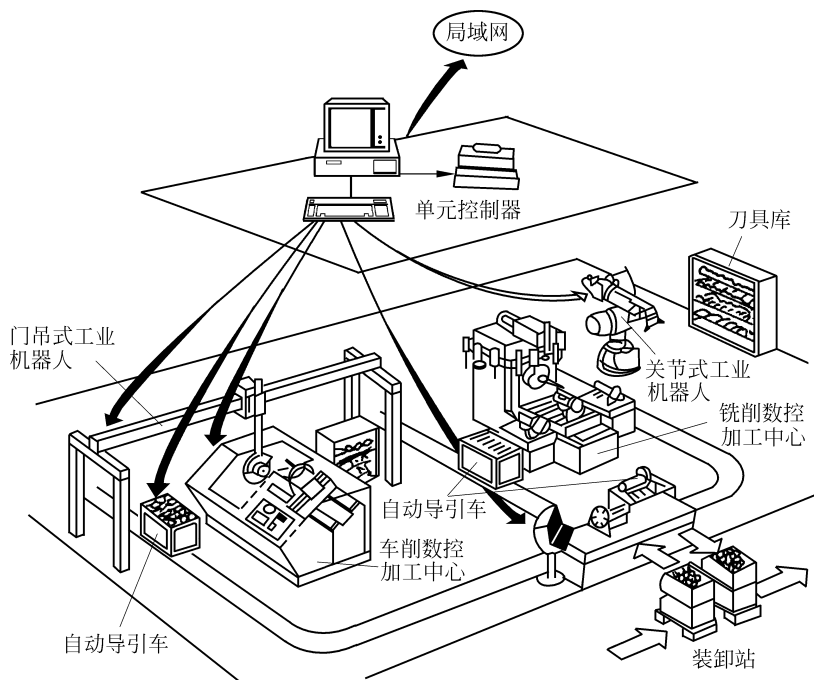


图 1-13 柔性制造系统