

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工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^[32],才标志着这门学科의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提出乃奎斯特稳定性判据;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调节着。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,又使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)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;二是如何根据生产和国

防的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控制箱。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。

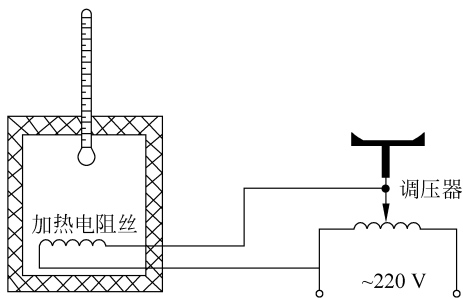


图 1-1 人工控制的恒温箱

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了。图 1-2 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

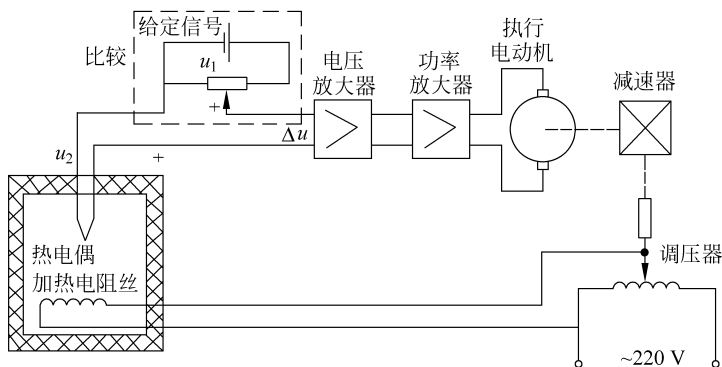


图 1-2 恒温箱的自动控制系统

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一部分返回输入端,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。 $\otimes$ 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。

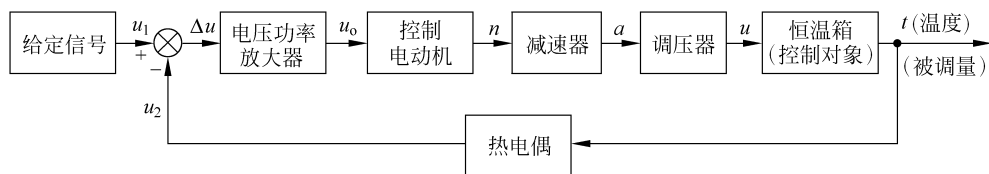


图 1-3 恒温箱温度自动控制系统职能方块图

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(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。在工业与国防等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(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。

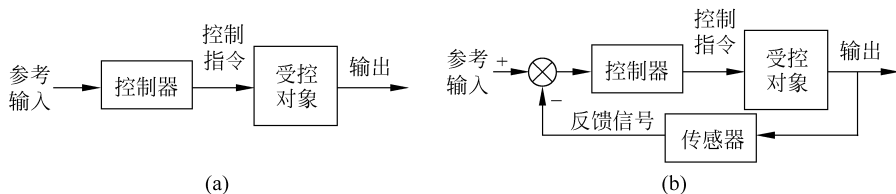


图 1-4 控制系统基本类型

(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。

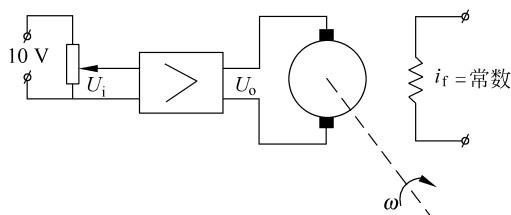


图 1-5 电动机转速控制系统

图 1-6 是反馈控制系统,也叫做闭环系统。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。

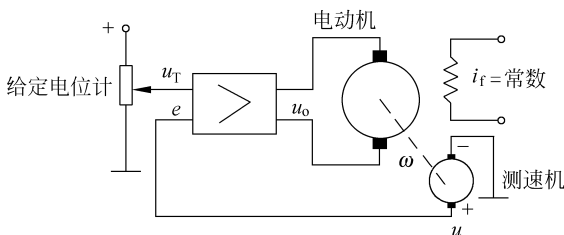


图 1-6 闭环调速系统原理图

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主要矛盾。

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 是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。

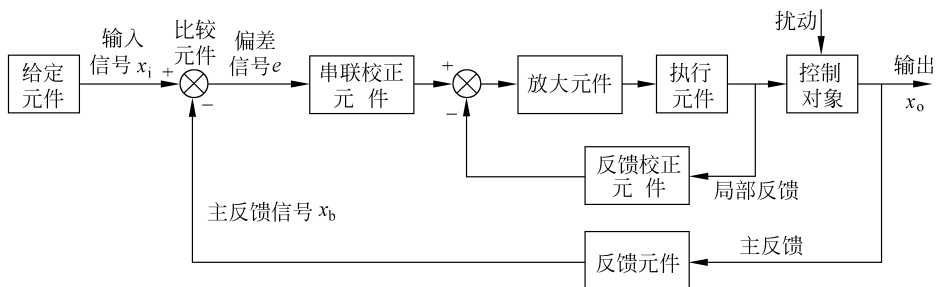


图 1-7 典型的反馈控制系统方块图

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，例如同步功率放大器等。

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。凡是采用模拟技术处理信号的控制系统称为模拟控制系统；而采用数字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做恒值调节系统，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：系统往往存在惯性，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。

(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。

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，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。

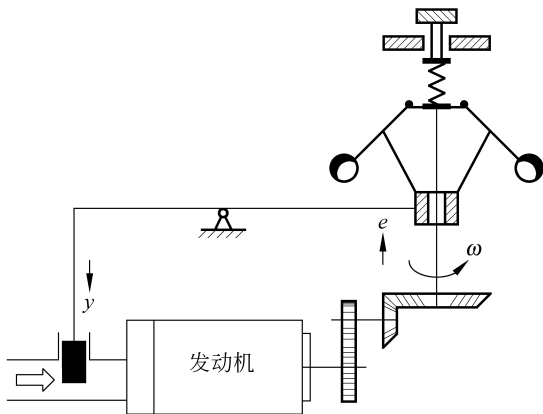


图 1-8 离心调速器

伺服系统(servosystem)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 1-9 是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。采用微处理机作为控制器。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。微处理机经过控制算法后,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。

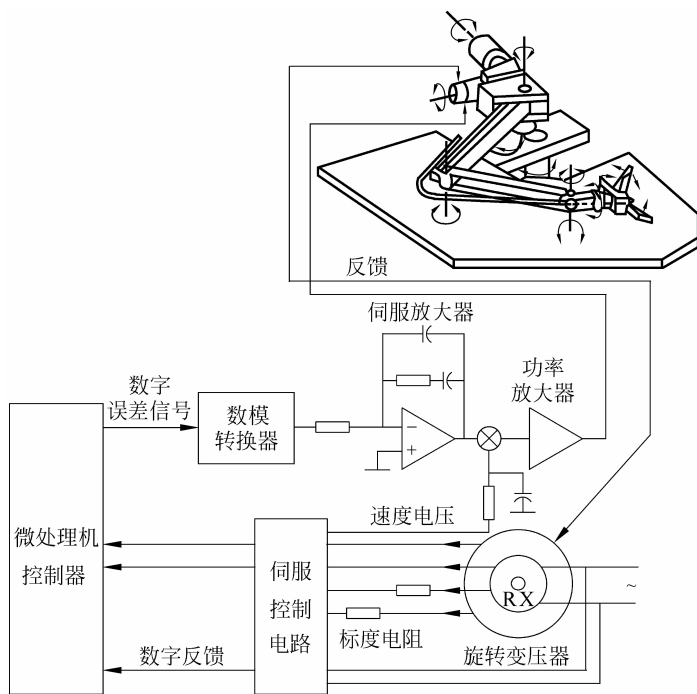


图 1-9 机器人关节伺服系统

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。

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。如图 1-11 所示为六自由度机械手运动。

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

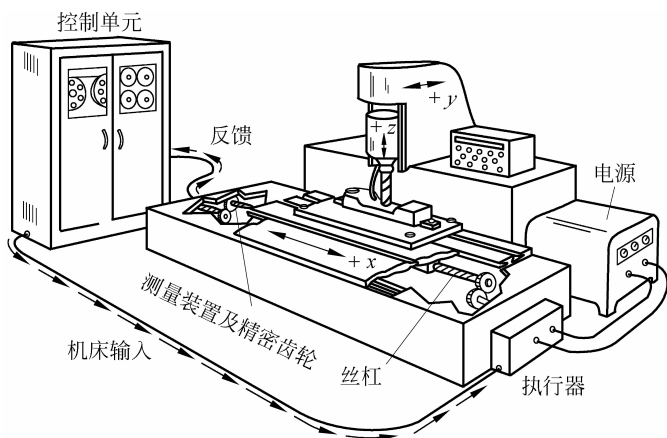


图 1-10 三坐标数控机床

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。

在柔性制造系统的基础上,加上计算机辅助设计(computer aided design, CAD)、计算机辅助规划(computer aided process planning, CAPP),可形成全工厂级的自动化,即计算机集成制造系统(computer integrated manufacturing system, CIMS)。这是自动控制理论在机械制造领域的集大成,代表了当今机械制造领域的前沿。

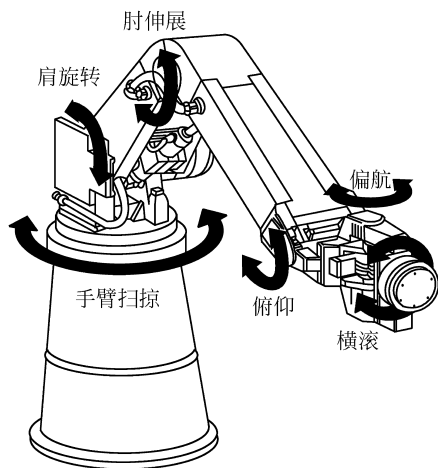


图 1-11 六自由度工业机器人

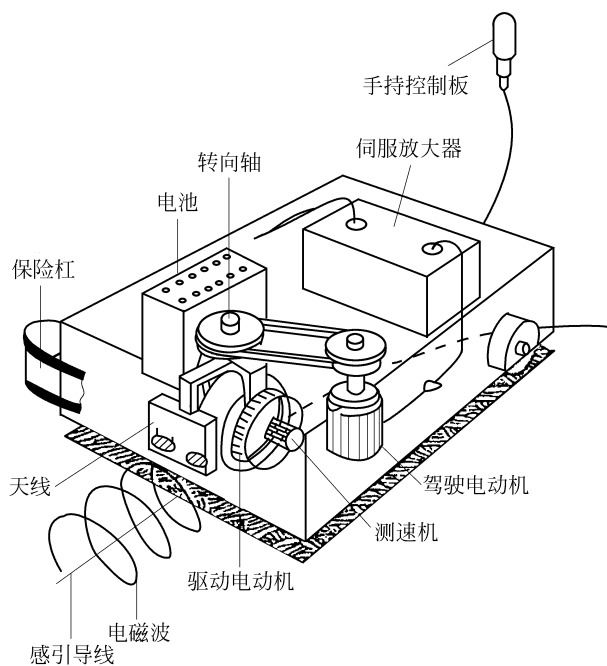


图 1-12 感应导线式自动导引车

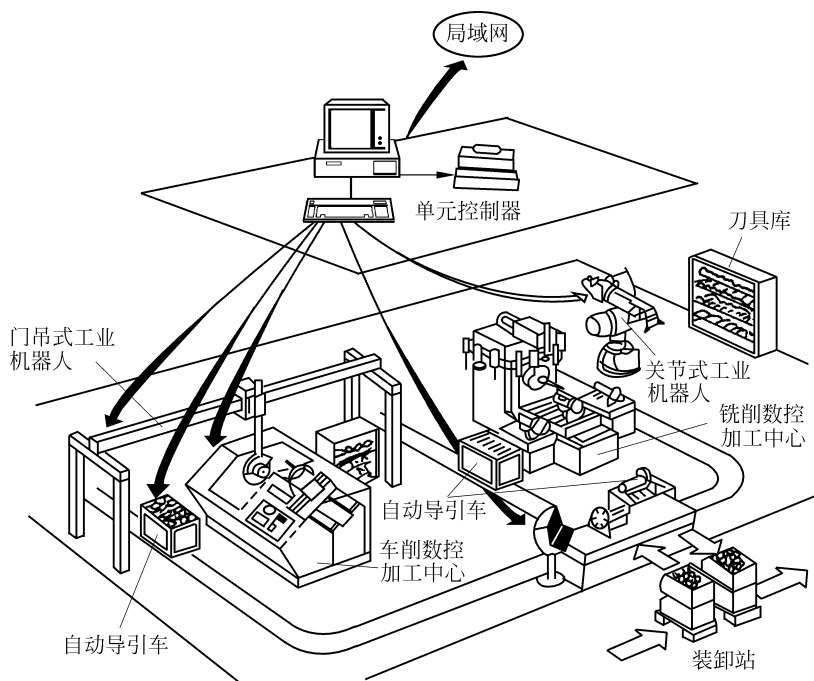


图 1-13 柔性制造系统

1.4 课程主要内容及学时安排

“控制工程基础”课程主要阐述的是有关反馈自动控制技术的基础理论。当前,精密仪器和机械制造业发展的一个明显而重要的趋势是越来越广泛而深刻地引入了控制理论。本课程是一门非常重要的技术基础课,是机械类和仪器仪表类等专业的本科生必修的一门课程。它是适应机电一体化的技术需要,针对机械对象的控制,重点结合经典控制理论形成的一门课程。本课程涉及经典控制理论的主要内容及应用,更加突出了机电控制的特点。

本课程在高等数学、理论力学、电工电子学等先修课的基础上,使学生掌握机电控制系统的基本原理及必要的实用知识。值得指出的是,尽管经典控制理论在 20 世纪 60 年代已完全发展成熟,但它并不过时,经典控制理论是整个自动控制理论(包括现代控制理论)的基础。用一个不十分贴切的比喻,尽管微积分的基本理论在几百年前已经发展成熟,但在高等数学中并不过时,至今仍然起着重大作用。

本课程的基本要求包括:

- (1) 掌握机电反馈控制系统的基本概念,其中包括机电反馈控制系统的基本原理、机电反馈控制系统的基本组成、开环控制、闭环控制等;
- (2) 掌握建立机电系统动力学模型的方法;
- (3) 掌握机电系统的时域分析方法;
- (4) 掌握机电系统的频域分析方法;
- (5) 掌握模拟机电控制系统的分析及设计综合方法;
- (6) 掌握计算机控制的基本概念及分析综合方法。

本书第 1 章为概论,要求了解机电控制系统的发展历史、国内外发展现状以及机电控制系统的基本概念。第 2 章为控制系统的动态数学模型,要求掌握拉氏变换的工程数学方法以及建立机电系统动力学模型的方法和推导过程。第 3 章为时域瞬态响应分析,要求掌握典型输入信号作用下的系统瞬态响应特点以及时域性能指标。第 4 章为控制系统的频率特性,要求掌握幅频特性和相频特性等基本概念、乃氏图和伯德图的画法以及频域性能指标的提法。第 5 章为控制系统的稳定性分析,要求掌握系统稳定的充分必要条件以及劳斯判据、乃氏判据和系统相对稳定性指标。第 6 章为控制系统的误差分析和计算,要求掌握系统稳态误差的计算方法以及减小系统误差的途径和方法。第 7 章为控制系统的综合与校正,要求了解机电控制系统的常用组成、系统校正的概念、控制器的设计方法以及直流电动机驱动的位置控制系统的设计综合。第 8 章为根轨迹法,要求掌握根轨迹法的基本概念、绘制根轨迹图的基本法则以及系统的基本分析方法。第 9 章为控制系统的非线性问题,要求了解非线性系统的特性以及描述函数和相平面的基本分析方法。第 10 章为计算机控制系统,要求掌握其分析综合方法等基本内容。随着计算机软、硬件的发展, MATLAB 软件工具和 LabVIEW 工具在控制系统分析和综合中发挥着越来越重要的作用, MATLAB 方面的内容分散在各章中讲授,而 LabVIEW 方面内容形成第 11 章,为基于 LabVIEW 的控制系统动态仿真演示软件内容,要求了解使用方法。

本课程讲授 48~64 学时,实验 6~10 学时。实际授课时,可根据对象、要求及实验条件的不同适当增减学时。

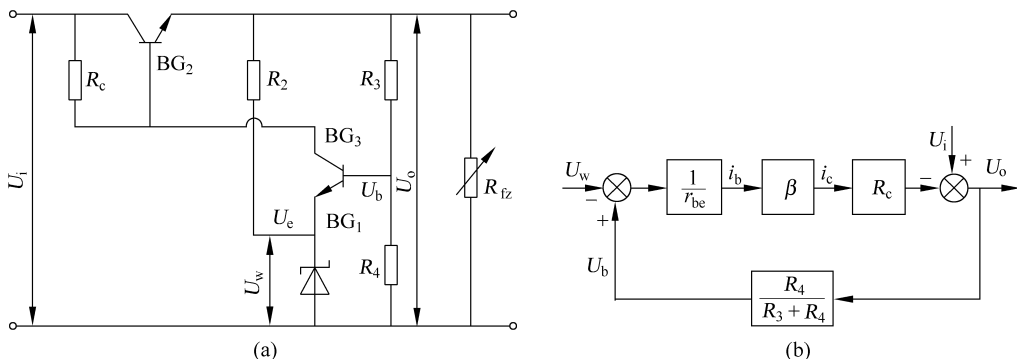
本教材主要涉及经典控制理论部分,对现代控制理论只作简单涉及。现代控制理论的主要内容将在后续课及研究生课程中讲授。

例题及习题

本章要求学生了解控制系统的基本概念、研究对象及任务,了解系统的信息传递、反馈和反馈控制的概念及控制系统的分类、开环控制与闭环控制的区别、闭环控制系统的基本原理和组成环节,学会将简单系统原理图抽象成职能方块图。

例题

1. 例图 1-1(a)为晶体管直流稳压电源电路图。试画出其系统方块图。



例图 1-1 晶体管稳压电源

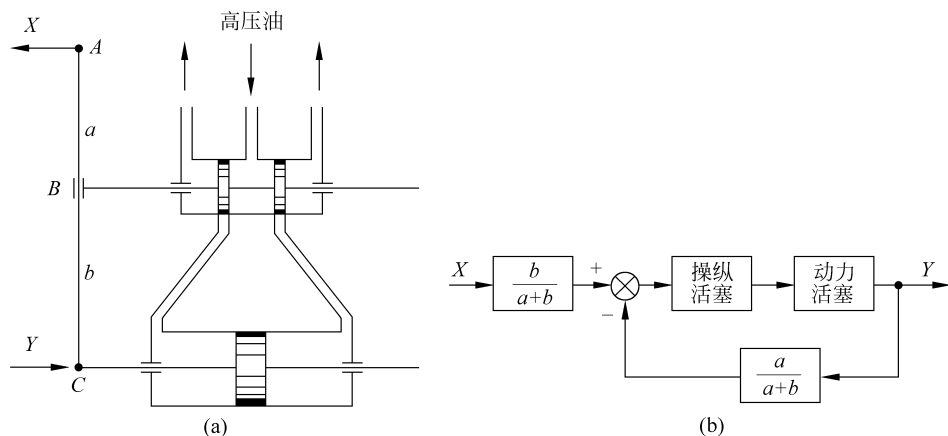
(a) 电路图; (b) 方块图

解: 在抽象出闭环系统方块图时,首先要抓住比较点,搞清比较的是什么量;对于恒值系统,要明确基准是什么量;还应当清楚输入和输出量是什么。对于本题,可画出方块图如例图 1-1(b)所示。

本题直流稳压电源的基准是稳压管的电压,输出电压通过 R_3 和 R_4 分压后与稳压管的电压 U_w 比较,如果输出电压偏高,则经 R_3 和 R_4 分压后电压也偏高,使与之相连的晶体管基极电流增大,集电极电流随之增大,加在 R_c 两端的电压也相应增加,于是输出电压相应减小。反之,如果输出电压偏低,则通过类似的过程使输出电压增大,以达到稳压的作用。

2. 例图 1-2(a)为一简单液压系统工作原理图。其中, X 为输入位移, Y 为输出位移。试画出该系统的职能方块图。

解: 该系统是一种阀控液压油缸。当阀向左移动时,高压油从左端进入动力油缸,推动动力活塞向右移动;当阀向右移动时,高压油则从右端进入动力油缸,推动动力活塞向左移动;当阀的位置居中时,动力活塞也就停止移动。因此,阀的位移,即 B 点的位移是该系统的比较点。当 X 向左时, B 点亦向左,而高压油使 Y 向右,将 B 点拉回到原来的中点,堵住了高压油, Y 的运动也随之停下;当 X 向右时,其运动完全类似,只是运动方向相反。由此可画出如例图 1-2(b)所示的职能方块图。



例图 1-2 简单液压系统

(a) 工作原理图; (b) 职能方块图

习题

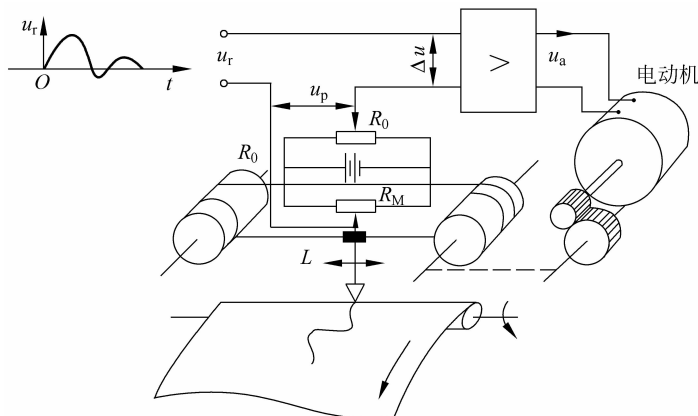
1-1 在给出的几种答案里,选择正确的答案。

- (1) 以同等精度元件组成的开环系统和闭环系统,其精度_____。
- A. 开环高 B. 闭环高 C. 相差不多 D. 一样高
- (2) 系统的输出信号对控制作用的影响_____。
- A. 开环有 B. 闭环有 C. 都没有 D. 都有
- (3) 对于系统抗干扰能力_____。
- A. 开环强 B. 闭环强 C. 都强 D. 都不强
- (4) 作为系统_____。
- A. 开环不振荡 B. 闭环不振荡
C. 开环一定振荡 D. 闭环一定振荡

1-2 试比较开环系统和闭环系统的优缺点。

1-3 举出 5 个身边控制系统的例子,试用职能方块图说明其基本原理,并指出是开环还是闭环控制。

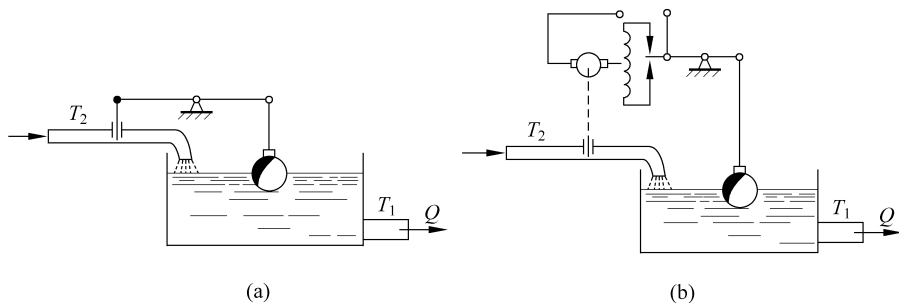
1-4 函数记录仪是一种自动记录电压信号的设备,其原理如题图 1-4 所示。其中,记录笔



题图 1-4 函数记录仪原理图

与电位器 R_M 的电刷机构连接。因此,由电位器 R_0 和 R_M 组成桥式线路的输出电压 u_p 与记录笔位移是成正比的。当有输入信号 u_r 时,在放大器输入端得到偏差电压 $\Delta u = u_r - u_p$,经放大后驱动伺服电动机,并通过齿轮系及绳轮带动记录笔移动,同时使偏差电压减小,直至 $u_r = u_p$ 时,电动机停止转动。这时,记录笔的位移 L 就代表了输入信号的大小。若输入信号随时间连续变化,则记录笔便跟随并描绘出信号随时间变化的曲线。试说明系统的输入量、输出量和被控对象,并画出该系统的职能方块图。

- 1-5 题图 1-5(a)和(b)是两种类型的水位自动控制系统。试画出它们的职能方块图,说明自动控制水位的过程,指出两者的区别。



题图 1-5 水位自动控制系统

- 1-6 试画出图 1-8 所示离心调速器的职能方块图。

2

控制系统的动态数学模型

建立控制系统的数学模型,并在此基础上对控制系统进行分析、综合,是机电控制工程的基本方法。对于机电控制系统,在输入作用下有些什么运动规律,我们不仅希望了解其稳态情况,更重要的是要了解其动态过程。如果将物理系统在信号传递过程中的这一动态特性用数学表达式描述出来,就得到了组成物理系统的数学模型。系统数学模型既是分析系统的基础,又是综合设计系统的依据。

经典控制理论采用的数学模型主要以传递函数为基础;现代控制理论采用的数学模型主要以状态空间方程为基础。而以物理定律及实验规律为依据的微分方程又是最基本的数学模型,是列写传递函数和状态空间方程的基础。

2.1 微分方程表示的基本环节数学模型

2.1.1 质量-弹簧-阻尼系统

机电控制系统的受控对象是机械系统。在机械系统中,有些构件具有较大的惯性和刚度,有些构件则惯性较小、柔度较大。在集中参数法中,将前一类构件的弹性忽略,将其视为质量块;而把后一类构件的惯性忽略,将其视为无质量的弹簧。这样受控对象的机械系统可抽象为质量-弹簧-阻尼系统。

图 2-1 是典型的进给传动装置结构示意图及其等效的力学模型。可见,一般机械受控对象可抽象为质量-弹簧-阻尼系统或其组合。

下面通过相对简单系统的分析,学习质量-弹簧-阻尼系统数学模型的建立。例如,图 2-2(a)所示为组合机床动力滑台铣平面时的情况。当切削力 $f_i(t)$ 变化时,滑台可能产生振动,从而降低被加工工件的切削表面的加工精度。为了分析这个系统,首先将动力滑台连同铣刀抽象成如图 2-2(b)所示的质量-弹簧-阻尼系统的力学模型(其中, M 为受控质量, k 为弹性刚度, D 为黏性阻尼系数, $y_o(t)$ 为输出位移)。根据牛顿第二定律 $\sum f = ma$, 可得

$$f_i(t) - D\dot{y}_o(t) - ky_o(t) = M\ddot{y}_o(t)$$

将输出变量项写在等号左边,将输入变量项写在等号右边,阶次由高向低排列,得

$$M\ddot{y}_o(t) + D\dot{y}_o(t) + ky_o(t) = f_i(t)$$

用微分方程表示的简单质量-弹簧-阻尼系统的数学模型就是如上式的二阶微分方程。

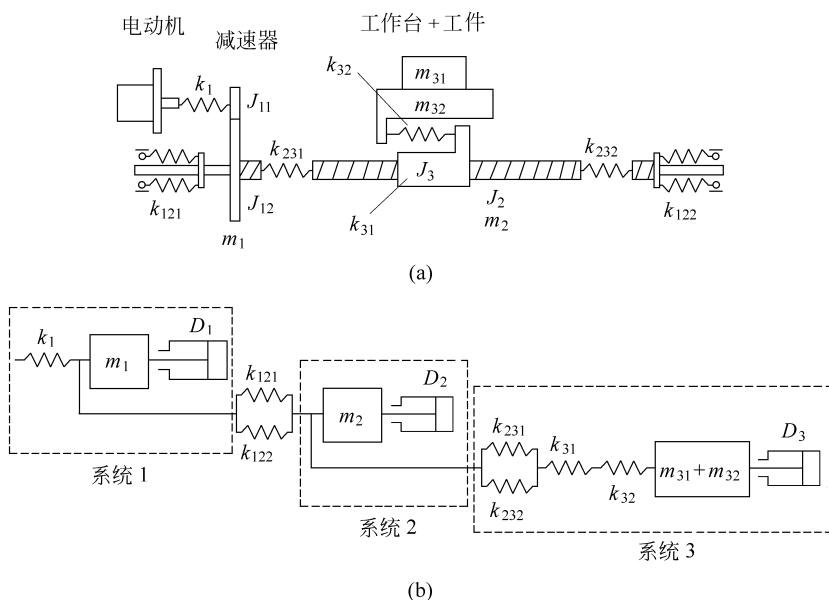


图 2-1 进给传动装置

(a) 结构示意图; (b) 等效力学模型

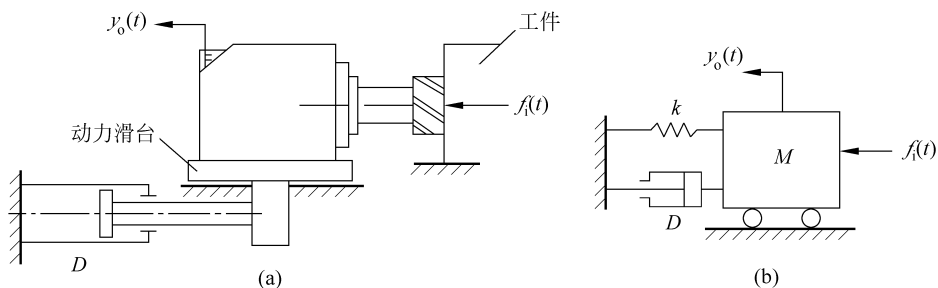


图 2-2 组合机床动力滑台及其力学模型

微分方程的系数取决于系统的结构参数,而阶次通常等于系统中独立储能元件的数量。上例中惯性质量和弹簧是储能元件;而阻尼器不是储能元件,是耗能元件,将得到的能量变成热耗散掉。

如图 2-3 所示为机械旋转系统的转动惯量-扭簧-阻尼系统图(其中, $\theta_i(t)$ 为输入转角; $\theta_o(t)$ 为输出转角; J 为负载转动体的转动惯量; k 为扭簧弹性刚度; D 为黏性阻尼系数),有

$$\begin{cases} T_k(t) = k[\theta_i(t) - \theta_o(t)] \\ T_D(t) = D \frac{d}{dt}\theta_o(t) \\ J \frac{d^2}{dt^2}\theta_o(t) = T_k(t) - T_D(t) \end{cases}$$

联立消去中间变量 $T_k(t)$ $T_D(t)$, 整理得

$$J \frac{d^2}{dt^2}\theta_o(t) + D \frac{d}{dt}\theta_o(t) + k\theta_o(t) = k\theta_i(t)$$

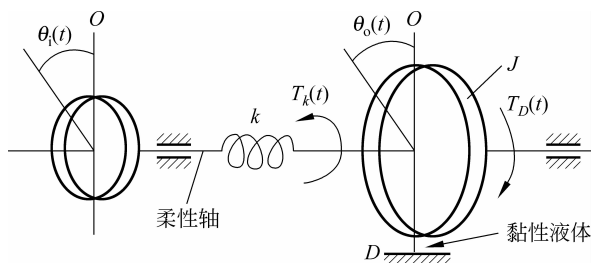


图 2-3 机械旋转系统的转动惯量-扭簧-阻尼系统图

2.1.2 电路网络

电路网络是机电控制系统的重要组成部分。例如,图 2-4 所示的无源电路网络系统(其中, R 为电阻, C 为电容)中, $u_i(t)$ 为输入电压; $u_o(t)$ 为输出电压。根据基尔霍夫定律和欧姆定律,有

$$\frac{u_i(t) - u_o(t)}{R_1} + C \frac{d[u_i(t) - u_o(t)]}{dt} = \frac{u_o(t)}{R_2}$$

经过整理,可得到其数学模型为

$$R_1 C \dot{u}_o(t) + \frac{R_1 + R_2}{R_2} u_o(t) = R_1 C \dot{u}_i(t) + u_i(t)$$

图 2-5 所示的有源电路网络系统(其中, R 为电阻, C 为电容)中, $u_i(t)$ 为输入电压; $u_o(t)$ 为输出电压; K_0 为运算放大器开环放大倍数。

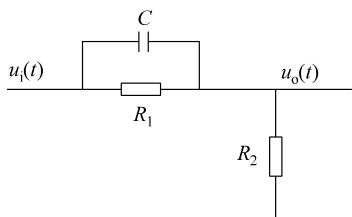


图 2-4 无源电路网络例

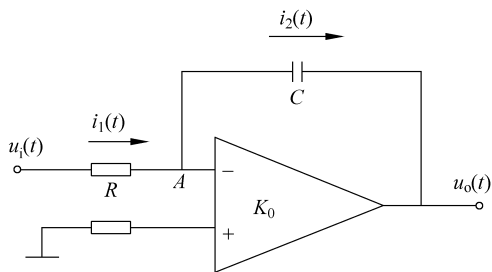


图 2-5 有源电路网络例

设运算放大器的反相输入端为 A 点。通常,运算放大器的正相输入端通过电阻接地,此时因为一般 K_0 值很大,又

$$u_o(t) = -K_0 u_A(t)$$

所以, A 点电位

$$u_A(t) = -\frac{u_o(t)}{K_0} \approx 0$$

即 A 点为虚地点。

另外,因为一般输入阻抗很高,所以

$$i_1(t) \approx i_2(t)$$

据此,可列出

$$\frac{u_i(t)}{R} = -C \frac{du_o(t)}{dt}$$

经过整理,可得到其数学模型为

$$RC \frac{du_o(t)}{dt} = -u_i(t)$$

2.1.3 电动机

电动机是机电系统中最常用、最重要的执行部件。例如,图 2-6 所示的电枢控制式直流电动机, $e_i(t)$ 为电动机电枢输入电压, $\theta_o(t)$ 为电动机输出转角, R_a 为电枢绕组电阻, L_a 为电枢绕组电感, $i_a(t)$ 为流过电枢绕组的电流, $e_m(t)$ 为电动机感应反电势, $T(t)$ 为电动机转矩, J 为电动机及负载折合到电动机轴上的转动惯量, D 为电动机及负载折合到电动机轴上的黏性摩擦系数。

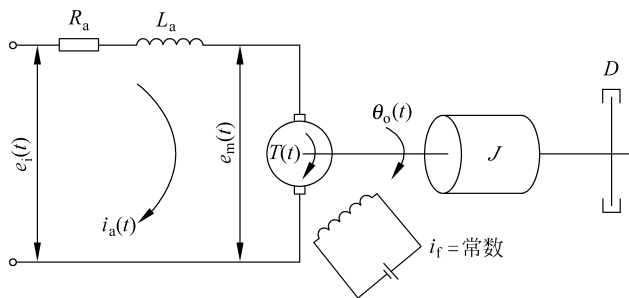


图 2-6 电枢控制式直流电动机

根据基尔霍夫定律,有

$$e_i(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_m(t) \quad (2-1)$$

根据磁场对载流线圈的作用定律,有

$$T(t) = K_T i_a(t) \quad (2-2)$$

其中, K_T 为电动机转矩系数。

根据电磁感应定律,有

$$e_m(t) = K_e \frac{d\theta_o(t)}{dt} \quad (2-3)$$

其中, K_e 为电动机反电势系数。

根据转动体的牛顿第二定律,有

$$T(t) - D \frac{d\theta_o(t)}{dt} = J \frac{d^2\theta_o(t)}{dt^2} \quad (2-4)$$

将式(2-2)代入式(2-4),得

$$i_a(t) = \frac{J}{K_T} \frac{d^2\theta_o(t)}{dt^2} + \frac{D}{K_T} \frac{d\theta_o(t)}{dt} \quad (2-5)$$

将式(2-3)和式(2-5)代入式(2-1)并整理,得

$$L_a J \ddot{\theta}_o(t) + (L_a D + R_a J) \dot{\theta}_o(t) + (R_a D + K_T K_e) \theta_o(t) = K_T e_i(t) \quad (2-6)$$

式(2-6)即为电枢控制式直流电动机的数学模型。当电枢电感较小时,通常可忽略不

计,系统微分方程可简化为

$$R_a J \ddot{\theta}_o(t) + (R_a D + K_T K_e) \dot{\theta}_o(t) = K_T e_i(t) \quad (2-7)$$

对于较复杂的系统,建立系统微分方程形式的数学模型可采用以下一般步骤:

(1) 分析系统工作原理和信号传递变换的过程,将系统划分环节,确定各环节的输入及输出信号,每个环节可考虑列写一个方程;

(2) 从输入端开始,按照信号传递变换过程,依据各变量遵循的物理定律或通过实验等方法得出的物理规律,依次列写出各元部件相关的原始动态微分方程,并考虑适当简化和线性化;

(3) 将各环节方程式联立,消去中间变量,最后得出只含输入变量、输出变量以及参量的系统方程式;

(4) 进行标准化列写,将输出变量有关的项放在等号左边,将输入变量有关的项放在等号右边,两边分别按降阶次排列。

单输入、单输出系统的微分方程表示的数学模型有如下的一般形式:

$$\begin{aligned} & a_0 x_o^{(n)}(t) + a_1 x_o^{(n-1)}(t) + \cdots + a_{n-1} \dot{x}_o(t) + a_n x_o(t) \\ & = b_0 x_i^{(m)}(t) + b_1 x_i^{(m-1)}(t) + \cdots + b_{m-1} \dot{x}_i(t) + b_m x_i(t) \end{aligned} \quad (2-8)$$

从以上基本环节建模案例,可看出:

(1) 物理本质不同的系统,可以有类似的数学模型,从而可以抛开系统的物理属性,用同一方法进行具有普遍意义的分析研究,这是一种信息方法。

(2) 从动态性能看,在相同形式的输入作用下,数学模型相同而物理本质不同的系统其输出响应相似。相似系统是控制理论中进行实验模拟或仿真的基础。

(3) 通常情况下,元件或系统微分方程的阶次等于元件或系统中所包含的独立储能元件(惯性质量、弹性要素、电感、电容等)的个数;因为系统每增加一个独立储能元件,其内部就多一层能量(信息)的交换。

(4) 系统的动态特性是系统的固有特性,仅取决于系统的结构及其参数,与系统的输入无关。

2.2 数学模型的线性化

实际的机电物理系统往往存在各类非线性现象。例如机械系统中的高速阻尼器,阻尼力与速度的平方有关;具有铁芯的电感,电流与电压的非线性关系;晶体管等电子器件的非线性特性等。严格地讲,几乎所有实际物理系统都是非线性的。尽管线性系统的理论已经相当成熟,但非线性系统的理论还不完善。另外,由于叠加原理不适用于非线性系统,这给解非线性系统带来了很大不便。故我们尽量对所研究的系统进行线性化处理,然后用线性理论进行分析。

当非线性因素对系统影响很小时,一般可以予以忽略,将系统当作线性系统处理。另外,如果系统的变量只发生微小的偏移,可以通过取其线性主部,用切线法进行线性化,以求得其增量方程式。所谓增量指的并不是各个变量的绝对数量,而是它们偏离平衡点的量。由于反馈系统不允许出现大的偏差,故这种情况的线性化对于闭环控制系统具有实际意义。

例如,图 2-7 所示单摆(其中, $T_i(t)$ 为输入力矩, $\theta_o(t)$ 为输出摆角, m 为单摆质量, l 为单摆摆长),根据转动体的牛顿第二定律,有

$$T_i(t) - mgl \sin \theta_o(t) = ml^2 \ddot{\theta}_o(t) \quad (2-9)$$

这是一个非线性微分方程,将非线性项 $\sin \theta_o$ 在 $\theta_o=0$ 点附近用泰勒级数展开,当 θ_o 很小时,可忽略高阶小量,则可近似得到如下的线性方程:

$$ml^2 \ddot{\theta}_o(t) + mgl\theta_o(t) = T_i(t) \quad (2-10)$$

式(2-10)即为单摆线性化后的数学模型。

另外,图 2-8 为阀控液压缸线性化的例子。其中, x 为阀芯位移输入; y 为液压缸活塞位移输出; Q_L 为负载流量; p_L 为负载压差; M 为负载质量。

已知 $Q_L = f(p_L, x)$ 为非线性函数,如图 2-9 所示。设阀的额定工作点参量为 p_{L0} 和 x_0 ,其静态方程为

$$Q_{L0} = f(p_{L0}, x_0) \quad (2-11)$$

在额定工作点附近展开成泰勒级数,有

$$Q_L = f(p_{L0}, x_0) + \left[\frac{\partial f(p_L, x)}{\partial x} \right]_{\substack{x=x_0 \\ p_L=p_{L0}}} \Delta x + \left[\frac{\partial f(p_L, x)}{\partial p_L} \right]_{\substack{x=x_0 \\ p_L=p_{L0}}} \Delta p_L + \dots \quad (2-12)$$

式(2-12)减去式(2-11),并舍去高阶项,得线性方程

$$\Delta Q_L = K_q \Delta x - K_c \Delta p_L \quad (2-13)$$

其中, $K_q = \left[\frac{\partial f(p_L, x)}{\partial x} \right]_{\substack{x=x_0 \\ p_L=p_{L0}}}$, $K_c = - \left[\frac{\partial f(p_L, x)}{\partial p_L} \right]_{\substack{x=x_0 \\ p_L=p_{L0}}}$ 。

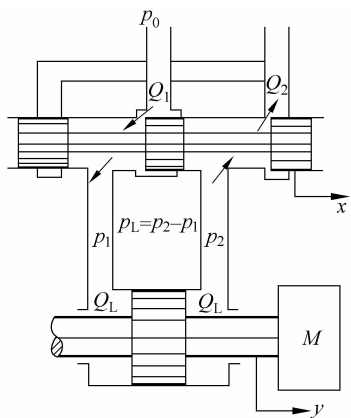


图 2-8 阀控液压缸

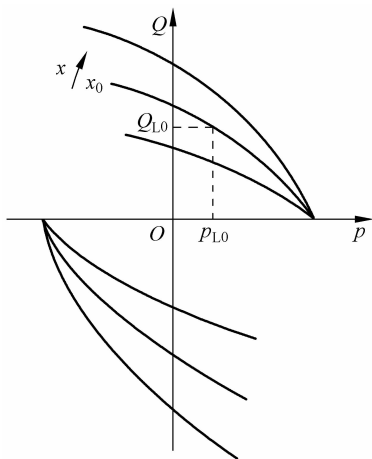


图 2-9 $Q_L = f(p_L, x)$ 曲线

液压缸工作腔流动连续性方程为

$$\Delta Q = A \frac{d(\Delta y)}{dt} \quad (2-14)$$

式中, A 为液压缸工作面积。液压缸力平衡方程为

$$\Delta p_L A = M \frac{d^2(\Delta y)}{dt^2} + D \frac{d(\Delta y)}{dt} \quad (2-15)$$