



“十三五”普通高等教育规划教材

卓越工程师系列教材

自动控制系统

张 允 主 编
梁春辉 副主编



配套课件



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

第1章 概 论

1.1 自动控制理论的发展与现状

自动控制技术在现代工业、农业、国防和科学技术的发展过程中起着举足轻重的作用。在各种工业部门,例如电力、化工、冶金、机械、电子、汽车、航空等部门都广泛采用自动控制技术。随着自动控制理论和实践的不断发展和完善,经济、管理、生物学、社会学、生态等各种非工程领域,也广泛应用自动控制理论和技术。

最早的自动控制可追溯到公元前,如我国古代的漏壶指南车,希腊人公元前 300 年使用的浮子控制器等。自动控制的大量应用始于第一次工业革命时期。1788 年,瓦特发明的自动调节进气阀门开度以控制蒸汽机转速的离心式调速器是闭环自动控制装置在工程实践中应用的第一项重大成果。1868 年以前,自动控制和系统的设计还处于直觉阶段,没有系统的理论指导,因此在控制系统的各项性能指标(如稳、准、快)的协调控制方面经常出现问题。1868 年,麦克斯威尔在他的论文《论调节器》中,首次对反馈控制系统的稳定性进行了系统分析,指出系统稳定性取决于特征方程的根在复平面上的分布位置,该论文是控制理论早期发展的奠基之作。1895 年,霍尔维茨也提出了类似的霍尔维茨稳定性判据。1892 年,李雅普诺夫发表了具有深远历史意义的论文《运动稳定性的一般问题》,提出了极其重要的李雅普诺夫第二方法,该方法不仅可应用于线性系统而且可用于非线性系统的分析与设计。第二次世界大战后,由于自动武器研发的需要,对控制理论的研究和实践提出了更大的需求,从而大大推动了自动控制的发展。

纵观自动控制理论 100 多年的发展历史,根据研究方法和思路的不同,一般可分为三个阶段。

第一阶段是 20 世纪 40 年代末到 50 年代的经典控制理论时期,着重研究单机自动化,解决单输入/单输出系统的控制问题;主要数学工具是微分方程、拉氏变换和传递函数;主要研究方法是时域分析法、频域分析法和根轨迹法;主要研究问题是控制系统的快速性、稳定性及其精确度。

第二阶段是 20 世纪 60 年代的现代控制理论时期,着重解决机组自动化和生物系统的多输入/多输出系统的控制问题;主要数学工具是一次微分方程组,矩阵论、状态空间法等;主要方法是变分法、极大值原理、动态规划理论等;主要研究问题是最优控制、随机控制和自适应控制;核心控制装置是电子计算机。

经典控制理论与现代控制理论统称为传统控制理论。

第三阶段是 20 世纪 70 年代以来的大系统理论和智能控制理论阶段。其中,大系统理论着重解决规模庞大、结构复杂、变量众多、功能综合、目标多样的过程控制与生物系统、社会系统等一些众多变量的大系统的综合自动化问题,该理论是控制理论在广度上的开拓;智能控制理论是人工智能、运筹学与控制理论相结合的产物,借助于计算机技术的快速发展而得以实现,它是传统控制理论发展的高级阶段。智能控制研究对象的特点主要包括模型未知或知之甚少,且模型的结构和参数可能在很大范围内变化;被控对象具有高度的非线性;控

制任务比较复杂等。智能控制研究的数学工具主要有符号推理与数值计算的结合、模糊数学等。智能控制的方法很多,目前比较成熟的主要有模糊控制、神经网络控制、专家系统控制、分级递阶控制等。

回顾控制理论的发展历程可以看出,它的发展过程反映了人类由机械化时代进入电气化时代,并走向自动化、信息化、智能自动化时代的过程。

本书讨论的自动控制理论,是自动控制技术的基础理论,是研究自动控制共同规律的技术科学。目前,自动控制理论已不仅仅是数学研究人员关心的课题,由于它对工程实践的指导作用,已成为工程技术人员和科学工作者的必修课。在科学技术高度发达的今天,控制工程师已更多、更广泛地将控制理论与控制技术结合起来,在各个专业工程领域中,将人类的许多梦想变成了现实。所以自动控制理论及其实际应用已成为一个极具价值的热门工程学科领域,有着无可限量的发展趋势。

1.2 自动控制的基本概念

所谓自动控制是指在没有人直接参与的情况下,利用外加的设备或装置(称为控制器),使机器、设备或生产过程(称为被控对象)的某个工作状态或参数(即被控量)自动地按照人们规定或者希望的性能指标运行。不同的机器设备或生产过程有不同要求的性能指标。例如,要使发电机正常供电,就必须保持其输出电压恒定,尽量不受负荷变化和原动机转速波动的影响;要求电动机正常工作,就必须保持其转速恒定,尽量不受电源电压波动的影响。

自动控制系统是为实现某一控制目标,将被控对象和控制装置(即控制器)按照一定的方式连接起来组成的一个有机总体。在自动控制系统中,被控对象的输出量即被控量是要求严格加以控制的物理量,它可以要求保持为某一恒定的值,例如速度、位置、温度、压力等;也可以要求按照某个给定规律去运行,例如飞行轨迹、数控机床的运动规律等;而控制装置(控制器)则是对被控对象施加控制作用的机构的总体,它可以采用不同的原理和方式对被控对象进行控制。

1.3 自动控制系统的组成

自动控制系统组成框图如图 1-1 所示,主要包括控制器与被控对象两大部分。

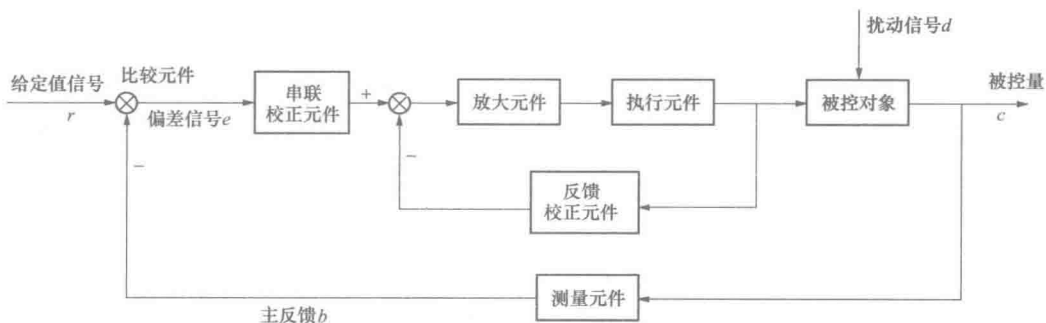


图 1-1 自动控制系统组成框图

其中控制器是由具有一定功能的各种基本控制元件组成的,下面介绍这些元件在系统中的功能和作用。

(1) 定值元件。定值元件通常被安装在操作台上或装在控制器的内部,其作用是产生给定值信号 r 。给定值信号的类型应与测量元件测得的信号的类型一致,同时也应和控制器发出的信号的类型相一致。

(2) 比较元件。比较元件用于将给定值信号与主反馈信号进行比较并发出偏差信号 $e=r-b$ 。常用的比较元件有差动放大器、机械差动装置、电桥电路等。

(3) 放大元件。放大元件的功能是将微弱的信号放大,使信号具有足够大的幅值或功率,进而推动执行元件去控制被控对象。放大元件又分为前置放大器和功率放大器两类。前置放大器能放大一个信号的数值,但功率并不大,它靠近系统的输入端。如由运算放大器构成的前置放大器只能放大电压信号,而能输出的电流却很小。功率放大器输出的功率大,它输出的信号可直接带动执行元件运转和动作。例如,用功率晶体管组成的功率放大器同时输出足够大的电压和电流,能直接带动直流电动机运转。

(4) 执行元件。执行元件的功能是直接推动被控对象,使其被控量发生变化。用来作为执行元件的有机电控制系统中的各种电动机,液动控制系统中的液压电动机,温度控制系统中的加热器等。执行元件有时也被归入被控对象中。

(5) 校正元件。校正元件也叫补偿元件,它是结构和参数便于调整的元部件,用串联或反馈的方式连接在系统中,以改善系统的性能。最简单的校正元件是由电阻、电容组成的无源或有源网络,复杂的则用电子计算机。

(6) 测量元件。测量元件的功能是将一种物理量检测出来,并且按照某种规律转换成容易处理和使用的另一种物理量输出。测量元件一般称为传感器。过程控制中的变送器、敏感元件都属于测量元件。

1.4 自动控制系统的分类

自动控制系统可根据需要和使用方便从各个不同的角度进行分类。例如,按自动控制系统是否形成闭合回路分为开环控制系统和闭环控制系统;按给定信号的变化规律分为恒值、随动与程序控制系统;按控制系统元件特性的不同,分为线性系统与非线性系统;按照系统内部传输信号的性质,分为连续控制系统和离散控制系统;按照系统是否含有参数随时间变化的元件,分为定常系统和时变系统;按系统输入输出信号的数量,分为单变量系统和多变量系统。此外,也可以按照组成系统的元件的种类来划分,如机电控制系统、液压控制系统和气动控制系统等。若按被控量的名称来分类,有温度或湿度控制系统、压力控制系统、转速控制系统等。这里只介绍几种常用的控制方法,使在分析和设计系统之前,对其特征有一个初步的认识。

1.4.1 开环控制系统与闭环控制系统

1. 开环控制系统

开环控制是指控制装置与被控对象之间只有顺向作用而没有反向联系的控制过程,按这种方式组成的系统称为开环控制系统,如图 1-2 所示。由图可见,这种控制方式的特点是控制作用直接由系统的输入量产生。给定一个输入量就有一个输出量与之对应,且系统的输出

量对系统的控制作用没有影响。控制精确度完全取决于信息传递过程中所用元件性能的优劣及校准的准确度。由于开环控制结构简单、调整方便、成本低,在国民经济各部门均有采用。如采用集中供热方式的室内供热系统,供热锅炉按预定的时间向暖气管道中送去规定温度的热水以实现供热,而不监测各房间的温度;又如自动洗衣机、自动售货机、产品自动生产线、交通指挥红绿灯转换等均属于开环系统的应用。



图 1-2 开环控制系统框图

如图 1-3 所示为一个直流电动机转速开环控制系统的原理示意图,它的系统框图如图 1-4 所示。图中电动机是电枢控制的直流电动机,用它来带动一个需要以恒速转动的负载,其电枢电压由晶闸管整流装置提供。当调节电位器 R_p 的滑壁位置时,输入电压 U_g 随之改变。晶闸管整流装置的触发电路便产生一串与 U_g 相对应的、具有一定相位的触发脉冲去控制晶闸管的导通角,从而改变晶闸管放大器的输出电压 U_d 。由于电动机 M 的励磁绕组中加的是恒定的励磁电流,因此,随着电枢电压 U_d 的变化电动机便以不同的转速带动负载运转。如果要求负载以某一期望的恒定转速 n 运转,则只要给定一个相应的 U_g 。对于本系统,用以控制电动机 M 转速的 U_g 为系统的控制量或输入量,电动机就是被控对象,而负载的转速 n 被称为系统的输出量或被控制量。

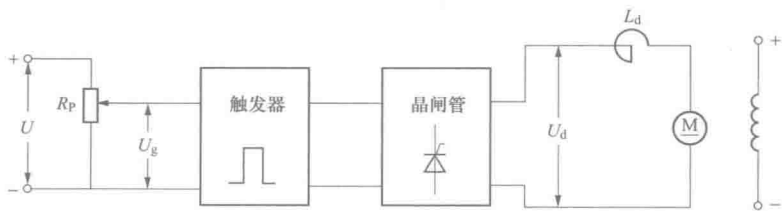


图 1-3 直流电动机转速开环控制系统

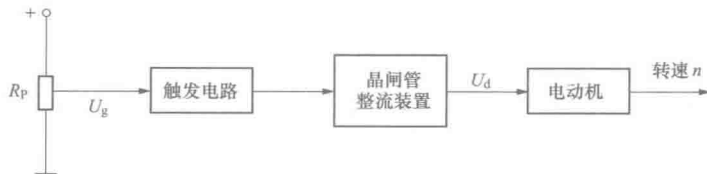


图 1-4 直流电动机转速开环控制框图

在图 1-3 所示的开环控制系统中,若要求电动机 M 拖动负载以恒定转速转动,仅调节给定电压 U_g 是不够的,这是因为在电动机运行的过程中,有许多因素会使电动机的转速发生变化,例如,负载大小发生变化、电源电压波动、系统中各元件参数的变化等,都会使电动机转速 n 偏离给定电压 U_g 所对应的转速期望值,我们把这些因素称为扰动量。由于上述控制系统只是根据给定的输入量进行控制,而输出量在整个控制过程中对系统不产生任何影响,因此当系统受到干扰作用后,输出量一旦较预期值出现偏差,系统就没有消除或减小误差的功能,即没有自动修正的能力,这是开环系统的一个“致命缺点”。由于开环系统的抗干扰能力差,因此它的使用有一定的局限性。

2. 闭环控制系统

闭环控制是指控制装置与被控对象之间既有顺向作用,又有反向联系的控制过程。图 1-1 所示的系统就是一个闭环控制系统。这种控制系统由于存在输出对输入的反馈,因此对系统的输出形成了一个闭合的回路,故称为闭环控制系统,又称反馈控制系统。

前面已分析过,在直流电动机转速开环控制系统中,由于负载变化直接引起输出转速变化,导致开环调速系统性能指标不能满足高性能工作机械的要求。若要使负载变化时转速稳定,根据反馈原理,要稳定哪一个参数就引入该参数的负反馈,构成转速负反馈直流调速系统。为此,在图 1-3 所示开环直流调速系统的基础上,增加一个由测速发电机构成的反馈回路,便得到了与之相应的闭环调速系统,如图 1-5 所示。在此系统中, TG 为测速发电机,用来检测电动机 M 输出的转速 n ,并给出与电动机转速成正比的反馈电压 U_f 。将代表实际输出转速的反馈电压 U_f 与代表希望输出转速的给定电压 U_g 进行比较,得到偏差信号 ΔU ,偏差信号经功率放大器放大以后驱动执行元件去控制电动机的转速,使其能完全按照参考输入的要求去变化。在整个控制过程中,只要电动机转速在扰动作用下偏离了它的期望值,即 $\Delta U \neq 0$,系统就能通过闭环控制的作用,自动地消除或削弱扰动信号对被控量的影响,以减小偏差,提高控制精确度。

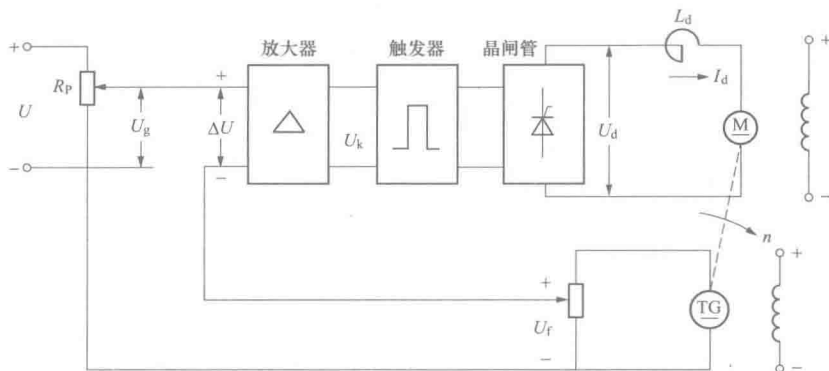


图 1-5 直流电动机转速闭环控制系统

用框图可直观地将上述控制过程描述出来,更方便进行性能分析,如图 1-6 所示。由框图分析电动机转速自动调节的过程如下:当系统受到扰动影响,例如,电动机的负载转矩 T_L 突然增大时,流经电动机电枢中的电流便相应地增大,电枢电阻上的压降也变大,从而导致电动机转速的降低,测速发电机的输出电压 U_f 减小,误差电压 ΔU 便相应地增大,经放大器放大后,使触发脉冲前移,晶闸管整流装置的输出电压 U_d 增大,转速上升,从而补偿了由于负载转矩 T_L 的增大而造成的电动机转速的下降,使电动机的转速近似地保持不变。

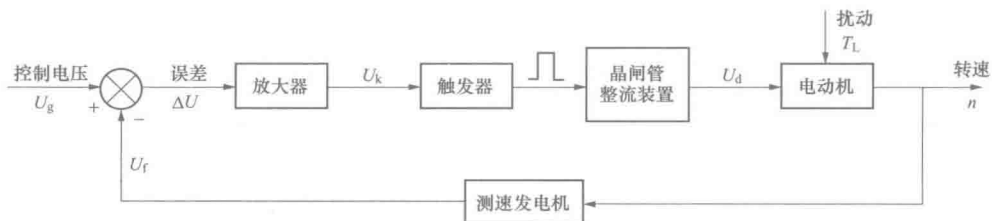


图 1-6 直流电动机转速闭环控制框图

1.4.2 恒值、随动与程序控制系统

1. 恒值控制系统

恒值控制系统的输入信号为常量，这种系统的任务是在存在扰动的情况下，通过自动地调节，使被控量保持在一个恒定的、期望的数值上。前面提到的直流电动机调速系统，以及其他恒定压力、恒定流量、恒定温度等多数过程控制系统都属于这一类系统。

2. 随动控制系统

随动控制系统的输入信号是一个随时间任意变化的函数，其变化规律无法预测。这类系统的任务是在存在扰动的情况下，保证被控量快速、准确地随给定值的变化而变化。在随动系统中，被控量通常是机械位移、速度或加速度等。随动系统也称为跟踪系统或伺服系统。用于军事上的雷达高射炮的角度控制系统，用于航天、航海中的自动导航系统，工业自动化仪表中的各种变送器、显示记录仪等都属于随动系统的例子。

3. 程序控制系统

程序控制系统的输入信号是按预定规律随时间变化的函数，要求输出量迅速、准确地跟踪输入量。程序控制系统和随动系统的相同点是它们的输入量都是时间的函数，不同之处在于前者的输入量是已知的时间函数，而后的输入量是未知的、随机的、任意的时间函数。在工业生产中广泛应用的程序控制有机床数控加工系统、加热炉温度自动变化控制系统等。实际上，程序控制系统是随动系统的一种特殊情况，其分析研究方法也和随动系统相同，而恒值控制系统也可视为程序控制系统的特例。

1.4.3 线性与非线性控制系统

1. 线性控制系统

若组成系统的各元件都具有线性特性，其输入、输出关系都能用线性微分方程描述，则称这种系统为线性控制系统。线性系统的特点是具有叠加性和齐次性，在系统存在有几个输入时，系统的输出等于各个输入分别作用于系统时系统输出之和，当系统输入增大或减小时，系统的输出也按比例增大或减小。线性系统的响应与初始状态无关。

线性系统可以分为线性定常系统和线性时变系统两大类。如果描述系统运动状态的微分（或差分）方程的系数为常数而不随时间变化，则这种线性系统称为线性定常（或时不变）系统。这类系统的明显特征是，系统的响应曲线形状，只取决于具体的输入，而与输入的时间起点无关。也就是说无论什么时刻开始输入，只要输入信号一致，响应就是相同的，这称为定常特性。如果微分（或差分）方程的系数是时间的函数，则这种线性系统称为线性时变系统。时变系统中含有时变元件，例如，航天卫星是一个时变对象，在飞行的各阶段，由于燃料的不断减少其质量随时间而变化。时变系统的分析比定常系统要复杂。

2. 非线性控制系统

组成系统的元件中，只要有一个元件具有非线性特性，这类系统就称为非线性控制系统。该系统的输入、输出关系要用非线性微分方程描述。非线性系统一般不具有齐次性，也不适用叠加原理。而且它的输出响应和稳态值与其初始状态有很大的关系。

严格地讲，绝对的线性控制系统（或元件）是不存在的，因为所有的物理系统和元件在不同程度上都具有非线性特性。例如，系统中应用的放大器的饱和特性，运动部件的间隙、摩擦和死区，弹性元件的非线性关系等。为了简化对系统的分析和设计，在一定的条件下，可以对某些非线性特性作线性化处理。这样，非线性系统就近似为线性系统，从而可以用分

析线性系统的理论和方法对其进行研究。

1.4.4 连续与离散控制系统

1. 连续控制系统

控制系统中各部分的信号若都是时间 t 的连续函数, 则称这类系统为连续控制系统。连续系统的运动状态是用微分方程来描述的。连续系统中各元件传输的信息在工程上称为模拟量, 多数实际物理系统都属于这一类。例如, 模拟式的工业自动化仪表以及用模拟式仪表来实现自动化的过程控制系统都属于连续系统。

2. 离散(时间)控制系统

控制系统中各部分的信号中只要有一个是时间 t 的离散函数, 即为脉冲序列或数码的形式, 这类系统称为离散控制系统。对离散系统常采用差分方程建立数学模型。如图 1-7 所示的炉温计算机控制系统就是一种常见的离散控制系统。该系统中, 炉温本是时间的连续变量, 但经 A/D 转换后, 变成数码进入计算机, 由于 A/D 转换含有一个采样开关, 所以计算机得到的炉温信号是一个在时间上离散的变量。

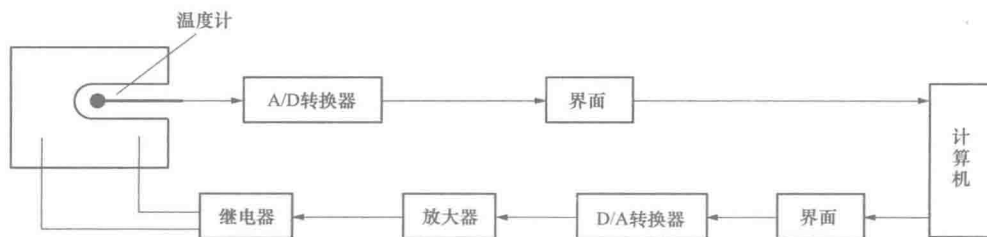


图 1-7 炉温的计算机控制系统

1.4.5 单变量与多变量控制系统

1. 单变量控制系统

在一个控制系统中, 如果只有一个输入量和一个输出量则这类系统称为单变量控制系统, 又叫单输入/单输出系统。所谓单变量是从系统外部变量的描述来分类的, 而不考虑系统内部的通路与结构。系统内部的结构可以是单回路的也可以是多回路的, 内部变量形式也多种多样, 如图 1-8 所示。内部变量可称为中间变量, 输入与输出变量称为外部变量。对系统性能的分析只研究外部变量之间的关系。

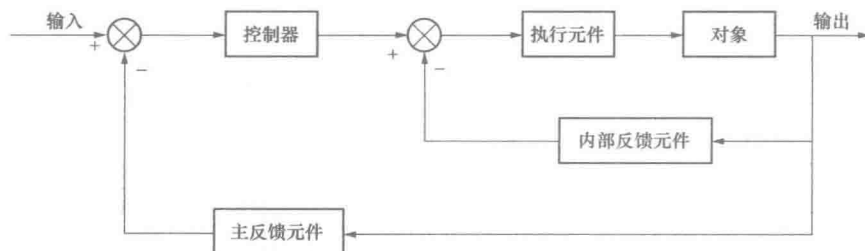


图 1-8 单变量多回路系统

单变量系统是经典控制理论的主要研究对象。它以传递函数作为基本数学工具, 讨论线性定常系统的分析和设计问题, 也是本课程讲述的主要内容。

2. 多变量控制系统

在一个控制系统中,如果有多个输入量和多个输出量,且各控制回路相互之间有耦合关系,则称这种系统为多变量控制系统,也叫多输入/多输出控制系统,如图 1-9 所示。

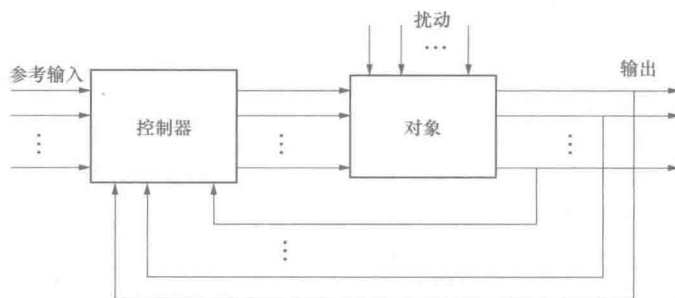


图 1-9 多变量控制系统

多变量系统是现代控制理论研究的主要对象。在数学上以状态空间法为基础,讨论多变量、变参数、非线性、高精度度、高效能等控制系统的分析和设计。

1.5 对自动控制系统的性能要求

当自动控制系统受到各种干扰或人为要求给定值改变时,被控量就会发生变化,偏离给定值。通过系统的自动控制作用,经过一定的过渡过程,被控量又恢复到原来的稳态值或稳定到一个新的给定值。这时,系统从原来的平衡状态过渡到一个新的平衡状态。通常将系统受到外作用后,被控量随时间变化的全过程称为动态过程或过渡过程。控制系统的性能,可以用动态过程的特性来衡量。考虑到动态过程在不同阶段的特点,工程上常常从稳、快、准三个方面来评价自动控制系统的总体精确度。

1.5.1 稳

稳是指控制系统的稳定性与平稳性。

1. 稳定性

稳定性是对控制系统最基本的要求,是保证控制系统正常工作的先决条件。一个稳定的控制系统,其被控量 $c(t)$ 偏离期望值 $r(t)$ 的偏差量应随时间的增长逐渐减小或趋于零,如图 1-10 中曲线①所示。如果被控量 $c(t)$ 随时间的增长,越来越偏离给定值,则称系统是不稳定的,如图 1-10 中曲线②所示。

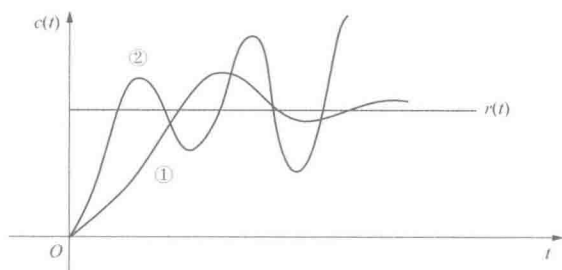


图 1-10 控制系统稳定与不稳定动态过程曲线

2. 平稳性

平稳性是指动态过程震荡的振幅与频率,即被控量围绕给定值摆动的幅度和摆动的次数。好的动态过程摆动的幅度要小,摆动的次数要少。

1.5.2 快

快是指系统的快速性,即动态过程进行的时间长短。动态过程时间越短,说明系统

的快速性越好,反之动态过程时间越长,说明系统响应越慢,难以实现快速变化的指令信号,如图 1-11 中响应曲线①所示。

稳定性和快速性反映了系统在控制过程中的性能。系统在跟踪过程中,被控量偏离给定值越小,偏离的时间越短,说明系统的动态精确度越高,如图 1-11 中响应曲线②所示。

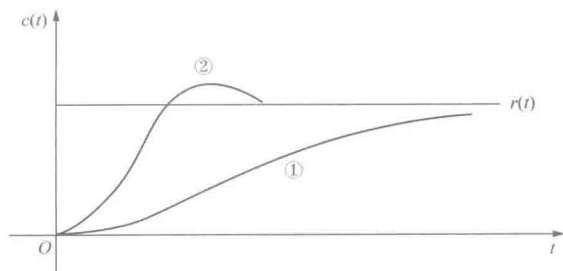


图 1-11 控制系统动态过程

1.5.3 准

准是指系统在动态过程结束后,其被控量对给定值的偏差而言,这一偏差称为稳态误差。它是衡量系统稳态精确度的指标,反映了动态过程后期的性能。显然,这种误差越小,表示系统的输出跟随参考输入的精确度越高。系统在扰动信号作用下,其输出必然偏离原平衡状态。由于系统自动调节的作用,其输出量会逐渐向原平衡状态方向恢复。当达到稳态后,系统的输出量若不能恢复到原平衡状态时的稳态值,所产生的差值叫作扰动稳态误差。这种误差越小,表示系统抗扰动的能力越强,其稳态精确度也越高。

1.6 自动控制系统设计概论

控制系统设计就是为达到特定的目的,而构思或创建系统的结构、组成和技术细节的过程。

设计过程的第一步是确立系统目标,例如,可以将精确控制电机的运行速度作为控制目标。第二步是确定要控制的系统变量(如电动机转速)。第三步是拟定设计规范,以明确系统变量应该达到的精确度指标,如速度控制的精确度指标。所要求的控制精确度将指导选择用于测量受控变量的传感器。

对于系统设计师而言,首要的任务应是设计能达到预期控制性能的系统结构配置。系统通常的结构配置包括传感器、受控对象、执行机构和控制器。其次是选定执行机构,这当然与受控对象有关,应选择能有效调节对象工作性能的装置作为执行机构。例如,如果想控制飞轮的旋转速度,就应选择电动机作为执行机构。再次,应选择合适的传感器,在实施电动机速度控制时所选传感器应该能精确测定转速。这样便可以得到控制系统各个组成部分的模型。接下来就是选择控制器。它通常包含一个求和放大器,通过它将预期响应与实际响应进行比较,然后将偏差信号送入另一个放大器。

设计过程的最后步骤是调节系统参数以便获得所期望的系统性能。如果通过参数调节达到了期望的系统性能,设计工作就告结束,可着手形成设计文档。否则,就需要改进系统结构配置,甚至可能需要选择功能更强的执行机构和传感器。此后就是重复上述设计步骤,直到满足了设计指标的要求,或者确认设计指标的要求过于苛刻,必须放宽指标要求。控制系统的设计过程如图 1-12 所示。

性能规范应对闭环系统所达到的性能作出说明,通常包括:①抗干扰能力;②对命令的响应能力;③产生使用执行机构驱动信号的能力;④灵敏度;⑤鲁棒性。

功能强大且价格适中的计算机以及高效的控制系统设计与分析软件的出现,戏剧性的影响着上述设计过程。例如,采用了最先进的航空飞行技术的民用客机波音 77,几乎完全是通

过计算机设计的。在高度真实的计算机仿真实验中验证最后设计方案也因此成了设计工作的一个基本工作项目。在许多实际工程中,都需要花费大量的时间和资金,在逼真的仿真中反复验证控制系统设计方案。例如,在最终制造出第一架实物飞机之前,波音 77 在高度逼真的仿真环境中进行了大约 2400 次的飞行试验和测试。

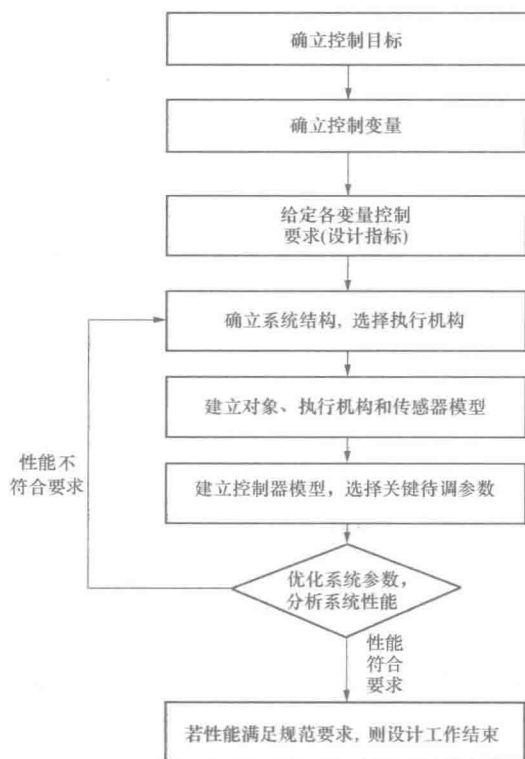


图 1-12 控制系统设计过程

总之,控制系统设计问题的基本流程是:确定设计目标,建立控制系统(包括传感器和执行机构)模型,设计合适的控制器或断言不存在满足要求的控制系统。

1.7 自动控制系统设计实例——转盘速度控制

许多现代装置都利用转台驱动盘片匀速旋转,例如 CD 机、计算机磁盘驱动器、留声机等。都需要在电机和其他部件发生变化的情况下,仍然保持盘片恒定的旋转速度。我们的目的就是为转台设计一个速度控制系统,以保证实际转速保持在允许范围之内,即每分钟 43~46 转。下面将同时讨论无反馈和有反馈的控制系统。

为驱动盘片旋转,选择直流电机作为执行机构,它能提供与电压成比例的转速,选取直流放大器来提供电机的输入电压,放大器应具有足够的功率。

开环系统(无反馈)如图 1-13(a)所示。该系统利用电池提供与预期速度成比例的电压,电压经放大后作用于驱动电机。标明了开环系统的控制装置、执行机构和受控对象的框图如图 1-13(b)所示。

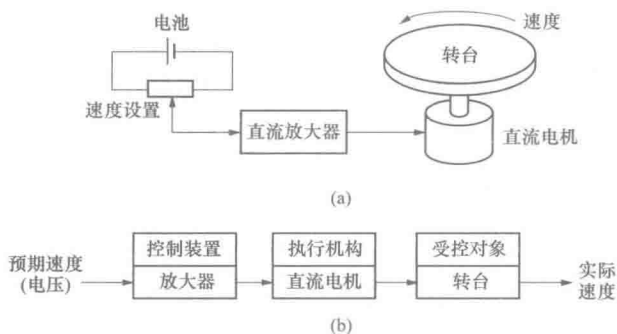


图 1-13 转台速度控制的开环系统

(a) 转台速度控制开环系统物理模型; (b) 转台速度控制开环系统框图模型

要得到反馈系统, 需要选择一个传感器。转速计是一种有用的传感器, 它能提供与转轴速度成比例的电压信号。以转速计作传感器, 便可得到如图 1-14 (a) 所示形式的闭环反馈系统, 其框图则如图 1-14 (b) 所示。偏差电压信号是由输入电压与转速计输出电压比较相减后得到的。

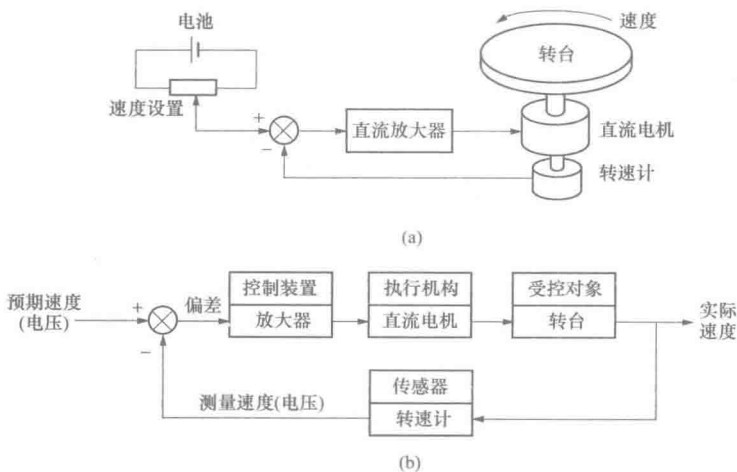


图 1-14 转台速度控制的闭环系统

(a) 转台速度控制闭环系统物理模型; (b) 转台速度控制闭环系统框图模型

由于反馈系统能对偏差信号做出响应, 并在运行中不断减小偏差。图 1-14 所示的反馈系统将优于图 1-13 所示的开环系统。采用精密部件, 该反馈系统的误差可望达到开环系统误差的 1%。



本章小结

本章首先介绍了自动控制理论的发展与现状, 在此基础上结合实例分别介绍了自动控制的基本概念, 自动控制系统的组成、分类及对自动控制系统的性能要求。最后介绍了控制系统设计的一般过程, 并以转盘速度控制系统为例给出了自动控制系统设计实例。



习 题

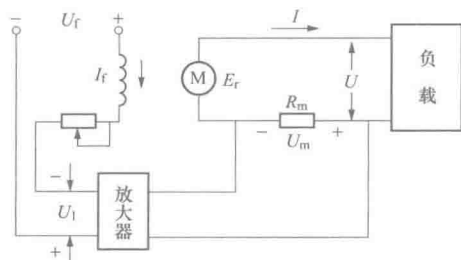


图 1-15 自动调压系统

1-1 试列举几个日常生活中的开环和闭环控制系统的例子，并说明其工作原理。

1-2 如图 1-15 所示是一个自动调压系统。试简述系统的工作原理，说明什么是受控对象，控制器中的测量元件及执行元件分别是什么，被控量和给定量又分别是什么，并画出系统的原理框图。

1-3 如图 1-16 所示是一个控制导弹发射架方位的角位置随动系统原理图。图中，电位器 P1, P2 并联后跨接到同一电源 E_0 的两端，其滑臂分别与输入轴和输出轴相连接，以组成方位角的给定装置和反馈装置。输入轴由手轮操纵；输出轴则由电动机经减速器后带动，电动机采用电枢控制方式工作。试简述系统的工作原理，说明什么是受控对象，控制器中的给定元件、测量与比较元件及执行元件分别是什么，被控量和给定量又分别是什么，并画出系统的原理框图。

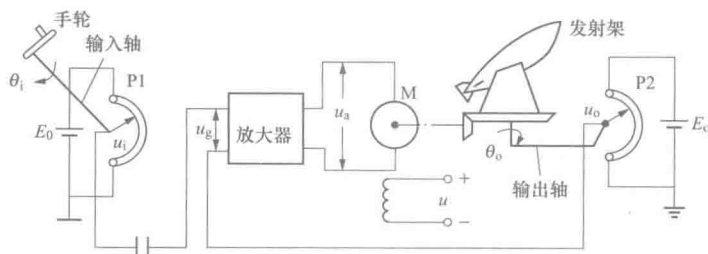


图 1-16 角位置随动系统的原理图

1-4 如图 1-17 所示是一个电冰箱制冷系统，试简述系统的工作原理，说明什么是受控对象，控制器中的给定元件、测量元件及执行元件分别是什么，被控量和给定量又分别是什么，并画出系统的原理框图。

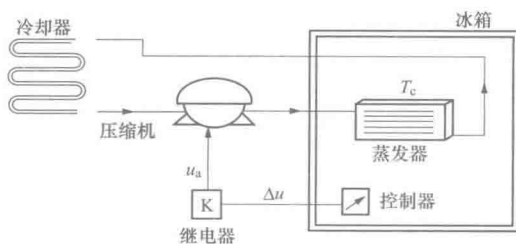


图 1-17 电冰箱制冷系统原理图

1-5 如图 1-18 所示是一个谷物湿度自动控制系统示意图。在谷物磨粉的生产过程中，有一个出粉最多的湿度，因此，磨粉之前要给谷物加水以得到给定的湿度。图中，谷物用传送装置按一定流量通过加水点，加水量由自动阀门控制。加水过程中，谷物流量、加水前谷

物湿度以及水压都是对谷物湿度控制的扰动作用。为了提高控制精确度，系统中采用了谷物湿度的前馈控制。试简述系统的工作原理，说明什么是受控对象，控制器中的测量元件及执行元件分别是什么，被控量、给定量和扰动量又分别是什么，并画出系统的原理框图。

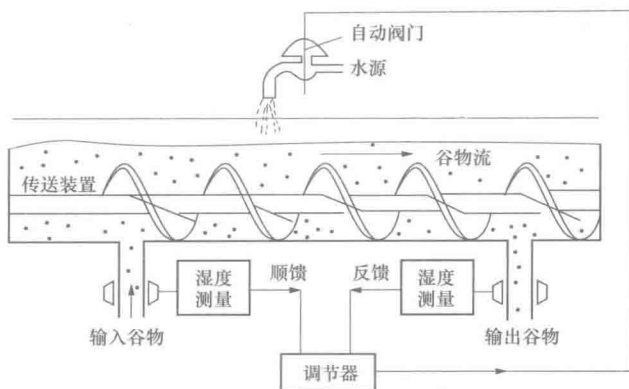


图 1-18 谷物湿度控制系统原理图

1-6 如图 1-19 所示是一晶体管稳压电源电路图，试说明哪个是给定量、被控量、反馈量和扰动量，并画出系统的框图，说明其自动调节过程。

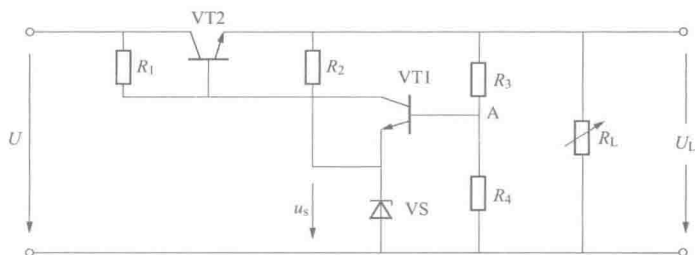


图 1-19 晶体管稳压电源图

1-7 如图 1-20 所示是电炉温度控制系统原理示意图。试分析系统保持电炉温度恒定的工作过程。指出系统的被控对象、被控量以及各部件的作用，最后给出系统的框图。

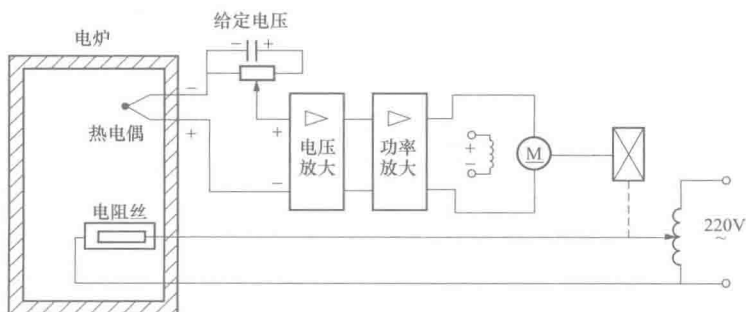


图 1-20 电炉温度控制系统

1-8 如图 1-21 所示是一个液位自动控制系统，试简述系统的工作原理，说明什么是受控对象，控制器中的测量元件、比较元件及执行元件分别是什么，被控量、给定量和扰动量

又分别是什么，并画出系统的原理框图。

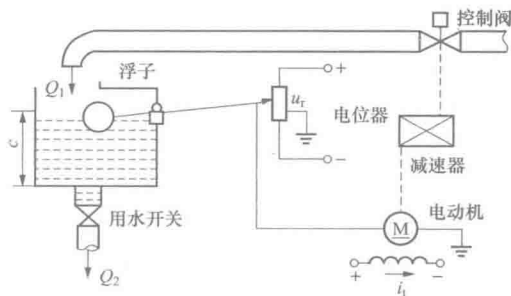


图 1-21 液位自动控制系统原理图

1-9 试判断下列微分方程所描述的系统属何种类型（线性、非线性；定常、时变）：

(1) $2t \frac{d^2 c(t)}{dt^2} + 5 \frac{dc(t)}{dt} + e^{-t} c(t) = r(t)$;

(2) $c(t) = r^2(t) + \sqrt{t} \frac{d^2 r(t)}{dt^2}$;

(3) $\frac{d^3 c(t)}{dt^3} + 3 \frac{dc(t)}{dt} + 6c(t) + 10 = r(t)$;

(4) $c(t) = e^{-r(t)}$;

(5) $c(t) = \begin{cases} 0 & [r(t) < 2] \\ 2r(t) & [r(t) \geq 2] \end{cases}$;

(6) $\frac{d^2 c(t)}{dt^2} + 2 \frac{dc(t)}{dt} + 4c(t) = 2 \frac{dr(t)}{dt}$;

(7) $\sin \omega \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = 3r(t)$;

(8) $5 \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = 3 \frac{dr(t)}{dt} + 2r(t) + 3 \int r(t) dt$ 。

第2章 自动控制系统的数学模型

描述自动控制系统输入、输出变量以及内部各变量之间关系的数学表达式称为数学模型。

根据所采用的数学工具不同,数学模型可有不同的形式。但它们彼此之间有紧密的联系,各有特长及最适用的场合。如果模型着重描述的是系统输入量和输出量之间的数学关系,则称这种模型为输入/输出模型,输入/输出模型是对系统的外部描述,微分方程是这种描述的最基本形式,传递函数、框图等其他形式的数学模型均由它而导出;如果模型着重描述的是系统输入量与内部状态之间以及内部状态和输出量之间的关系,则这种模型通常称为状态空间模型,状态空间模型不仅描述了系统的输入、输出的关系,而且也描述了系统的内部特性,因此它是对系统的内部描述,多变量控制系统适用于用状态空间模型来描述。

建立系统数学模型的方法有解析法和实验法两种。解析法是对系统各部分的运动机理进行分析,根据它们所依据的物理规律或化学规律分别列写相应的运动方程,然后消去中间变量,从而求得系统输入、输出关系的数学表达式。实验法是人为地给系统施加某种测试信号,记录其输出响应,并用适当的数学模型去逼近。这种方法称为系统辨识,主要用于系统运动机理复杂因而不便分析或不可能分析的情况,近年来系统辨识已发展成一门独立的学科分支。

系统的数学模型关系到整个系统的分析和研究,建立合理的和比较准确的数学模型是自动控制系统分析中很重要的环节。本章主要介绍自动控制系统中受控对象和常规控制器数学模型的建立及其动态特性。

2.1 微分方程与拉氏变换

2.1.1 系统微分方程的建立

描述自动控制系统的动态过程和动态特性最常用的方法是建立微分方程。微分方程式是对物理系统的输入、输出描述,故有时称为外部描述。为使建立的数学模型既简单又具有足够的精确度,在着手编写微分方程式之前,必须对系统做全面深入的考察,以求对元件或系统的故有作用原理有足够的了解,进而将对系统性能影响较小的一些次要因素略去。用这种解析法建立系统微分方程的一般步骤是:

- (1) 分析系统运动的因果关系,确定系统的输入量和输出量。
- (2) 将系统根据原理分成若干环节,依次确定各环节的输入、输出变量,按信号传输顺序,根据各环节所遵循的物理规律,列写微分方程。
- (3) 联立上述方程,消去中间变量,最终得到只包含系统输入量与输出量的方程式。

下面举例说明建立元件和系统微分方程式的步骤与方法。

1. RC 电路

【例 2-1】 编写如图 2-1 所示 RC 电路的微分方程式。

解 (1) 确定系统的输入量和输出量。 $u_i(t)$ 为输入量, $u_o(t)$

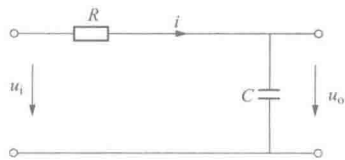


图 2-1 RC 串联电路

为输出量。

(2) 列写微分方程。根据基尔霍夫电压定律和 R 、 C 元件的电压与电流关系, 可得到下列方程

$$u_i = iR + u_o$$

式中

$$u_o = \frac{q}{C}$$

$$i = \frac{dq}{dt}$$

(3) 消去中间变量 i , 可得电路微分方程式

$$RC \frac{du_o}{dt} + u_o = u_i$$

2. 直流电动机转速控制系统

【例 2-2】 写出图 2-2 所示速度控制系统的微分方程。

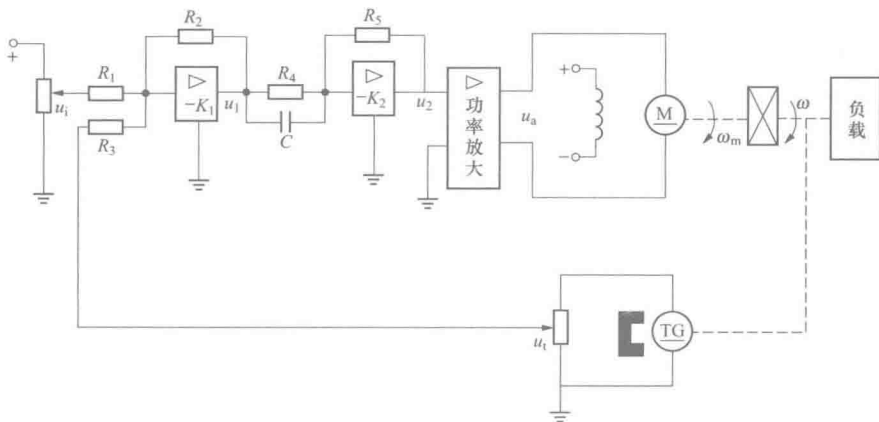


图 2-2 速度控制系统

解 系统的被控对象是电动机 (带负载), 输出量是转速 ω , 输入量为 u_i 。

系统由给定电位器, 含比较作用的运算放大器 I, 含 RC 校正网络的运算放大器 II, 功率放大器, 减速器, 测速发电机等部分组成。

各部分微分方程分别为:

(1) 运算放大器 I。给定输入电压 u_i 与速度反馈电压 u_f 在此合成产生偏差电压经运算放大器 I 放大后有

$$u_1 = K_1(u_i - u_f) = \frac{R_2}{R_1}(u_i - u_f) = \frac{R_2}{R_1}u_e = K_1u_e$$

式中: K_1 为运算放大器 I 的比例系数, $K_1 = \frac{R_2}{R_1}$ 。

(2) 运算放大器 II。

$$\frac{u_1}{R_4} + C \frac{du_1}{dt} = -\frac{u_2}{R_5}$$