

第 1 章

概 述

在科学技术飞速发展的今天,自动控制技术和理论已经成为现代科学体系不可缺少的组成部分,广泛地应用于机械、冶金、石油、化工、电力、电子、航空、航海和航天等各个科学领域。本章将简要介绍有关自动控制的一般概念、自动控制系统的组成和分类、对控制系统的基本要求以及有关自动控制理论的基本情况。

任务 1 自动控制与自动控制系统

任务描述: 掌握自动控制及自动控制系统的概念;

理解生活中常见的自动控制系统的應用;

熟悉自动控制系统的组成;

掌握根据不同分类标准划分的自动控制系统的分类。

任务分析: 自动控制理论是研究关于自动控制系统的组成、分析和设计的一般性理论,是研究自动控制共同规律的技术科学。学习和研究自动控制理论是为了探索自动控制系统中变量的运动规律和改变这种运动规律的可能性和途径,为建立高性能的自动控制系统提供必要的理论根据。

阶段 1 自动控制概念的提出

在许多工业生产过程或生产设备运行中,为了保证正常的工作条件,往往需要对某些物理量(如温度、压力、流量、液位、电压、位移和转速等)进行控制,使其尽量维持在某个数值附近或按一定规律变化。要满足这种需要,就应该对生产机械或设备进行及时的操作,以抵消外界干扰的影响。这种操作通常称为控制,用人工操作称为人工控制,用自动装置来完成称为自动控制。具体来讲,自动控制是指在无人直接参与的情况下,利用外加的设备或装置(称为控制装置或控制器),使机器、设备或生产过程(统称为被控对象)的某个工作状态或参数(称为被控量)自动地按照预定的规律运行。下面举例加以说明。

图 1-1(a)所示是人工控制水位保持恒定的供水系统。图中,水池中的水位是被控制的物理量,即被控量;水池作为物理设备是控制的对象,即被控对象。当水位在给定位置且流入量和流出量相等时,它处于平衡状态。当流出量发生变化或水位的给定值发生变化时,就需要对流入量进行必要的控制。在人工控制方式下,人用眼观看水位情况,用脑比较实际水位与期望水位的差异,并根据经验做出决策,确定进水阀门的调节方向与幅度,然后用手调节进水阀门,最终使水位等于给定值。只要水位偏离了期望值,工人便要重复上述调节过程。

图 1-1(b)所示是一种自动控制的水位控制系统,这是一种简单的水位自动控制系统。图中,用浮子代替人的眼睛,用来测量水位高低;用一套杠杆机构代替人的大脑和手的功能,用来进行比较、计算误差并实施控制。连杆的一端由浮子带动,另一端则连接进水阀门。当用水量增大时,水位开始下降,浮子也随之降低,通过连杆的作用将进水阀门开大,使水位回到期望值附近。反之,当用水量变小时,水位及浮子上升,进水阀关小,水位自动下降到期望值附近。整个过程中无须人工直接参与,控制过程是自动进行的。

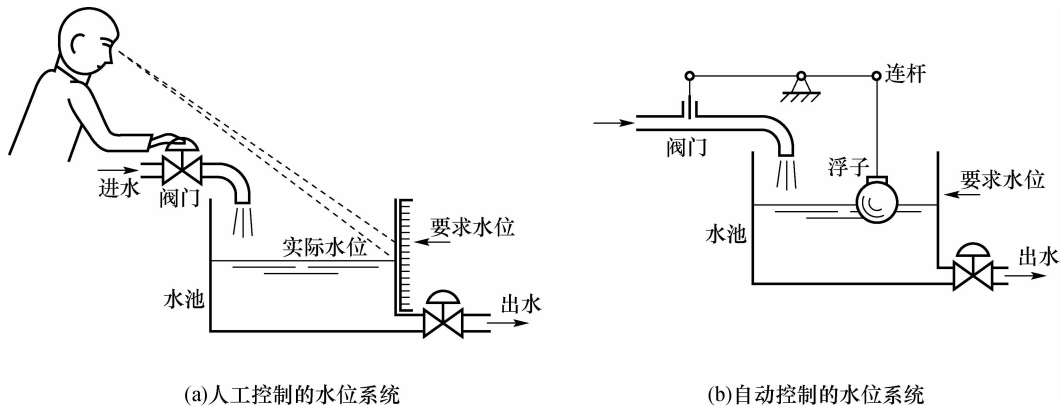


图 1-1 水位控制系统

图 1-1(b)所示的系统虽然可以实现自动控制,但由于结构简单而存在缺陷,主要表现在被控制的水位将随着出水量的变化而变化。出水量越多,水位就越低,偏离期望值就越远,误差也就越大。控制的结果总存在一定范围的误差值。这是因为当出水量增加时,为了使水位基本保持恒定不变,就得开大阀门,增加进水量。要开大进水阀,唯一的途径是浮子要下降得更多,这意味着实际水位要偏离期望值更多。这样,整个系统就会在较低的水位上建立起新的平衡状态。

为了克服上述缺点,可在原系统中增加一些设备而组成较完善的自动控制系统,如图 1-2所示。图中,浮子仍是测量元件,连杆起着比较作用,它将期望水位与实际水位两者进行比较,得出误差,同时推动电位器的滑臂上、下移动。电位器的输出电压反映了误差的大小和方向。电位器输出的微弱电压经放大器放大后驱动直流伺服电动机,其转轴经减速器后拖动进水阀门,对系统施加控制作用。

在正常情况下,实际水位等于期望值,此时,电位器的滑臂居中, $u_c = 0$ 。当出水量增大

时,浮子下降,带动电位器的滑臂向上移动, $u_c > 0$,控制电动机正向旋转,以增大进水阀门的开度,促使水位回升。当实际水位回复到期望值时, $u_c = 0$,系统达到新的平衡状态。

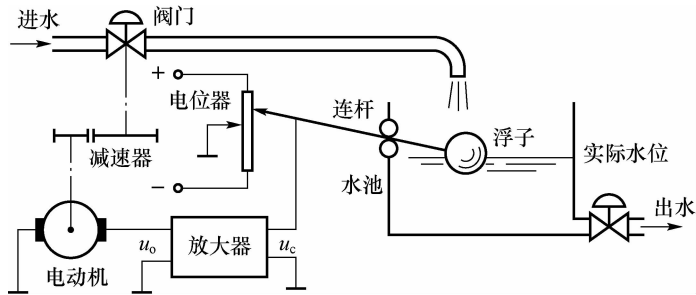


图 1-2 复杂的水位自动控制系统

可见,该系统在运行时,无论何种干扰引起水位的偏差,系统都要进行调节,最终总是使实际水位等于期望值,大大提高了控制精度。

由此例可知,自动控制 and 人工控制极为相似,自动控制系统只是把某些装置有机地组合在一起,以代替人的职能而已。图 1-2 中的浮子相当于人的眼睛,对实际水位进行测量;连杆和电位器类似于大脑,完成比较运算,给出偏差的大小和极性;电动机相当于人手,调节阀门的开度,对水位实施控制。这些装置相互配合,承担着控制的职能,通常称为控制器(或控制装置)。任何一个控制系统,都是由被控对象和控制器两部分组成的。

图 1-3 所示是一个电压调节系统的原理图。系统在运行过程中,无论负载如何变化,要求发电机都能够提供由给定电位器设定的规定电压值。在负载恒定、发电机输出规定电压的情况下,偏差电压 $\Delta u = u_r - u = 0$,放大器输出电压为零,电动机不动,励磁电位器的滑臂保持在原来的位置上,发电机的励磁电流不变,发电机在原动机带动下维持恒定的输出电压。当负载增加使发电机的输出电压低于规定电压时,输出电压在反馈口与给定电压经比较后所得的偏差电压 $\Delta u = u_r - u > 0$,经放大器放大后便驱动电动机带动励磁电位器的滑臂顺时针旋转,使励磁电流增加,发电机的输出电压上升。当上升至规定电压时,电动机停止转动,发电机在新的平衡状态下运行,输出满足要求的电压。

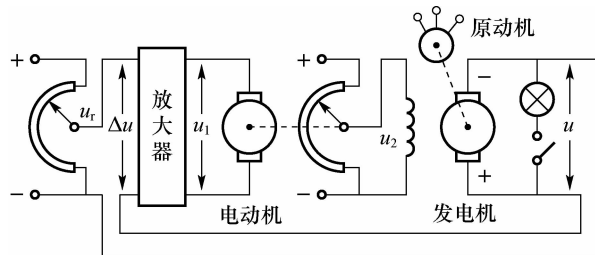


图 1-3 电压调节系统原理图

系统中,发电机是被控对象,发电机的输出电压是被控量,给定量是给定电位器设定的电压 u_r 。电压调节系统的方框图如图 1-4 所示。

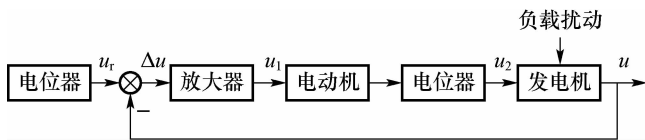


图 1-4 电压调节系统方框图

阶段 2 自动控制系统的基本组成

自动控制系统根据被控对象和具体用途的不同,可以有各种不同的结构形式。如图 1-5 所示是一个典型自动控制系统的方框图。图中,每一个方框代表一个具有特定功能的元件。除了被控对象外,控制装置通常是由给定元件、测量元件、比较元件、放大元件、执行机构和校正元件组成的。这些功能元件分别承担相应的职能,共同完成控制任务。

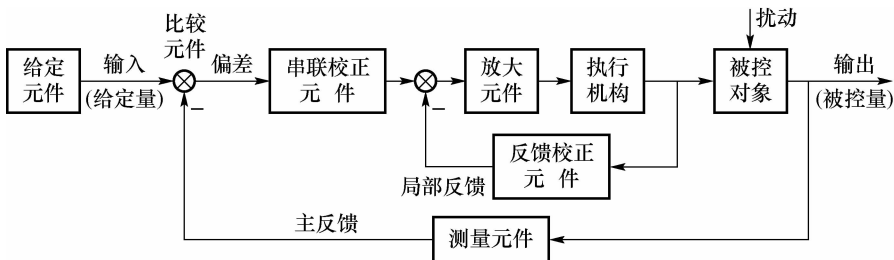


图 1-5 典型自动控制系统的方框图

- (1)被控对象。一般是指生产过程中需要进行控制的工作机械、装置或生产过程。描述被控对象工作状态的、需要进行控制的物理量就是被控量。
- (2)给定元件。主要用于产生给定信号或控制输入信号。
- (3)测量元件。用于检测被控量或输出量,产生反馈信号。如果测出的物理量属于非电量,一般要转换成电量以便处理。
- (4)比较元件。用来比较输入信号和反馈信号之间的偏差。它可以是一个差动电路,也可以是一个物理元件(如电桥电路、差动放大器和自整角机等)。
- (5)放大元件。用来放大偏差信号的幅值和功率,使之能够推动执行机构调节被控对象,如功率放大器等。
- (6)执行机构。用于直接对被控对象进行操作,调节被控量,如阀门和伺服电动机等。
- (7)校正元件。用来改善或提高系统的性能。常用串联或反馈的方式连接在系统中,如 RC 网络和测速发电机等。

阶段 3 自动控制系统的分类

按给定信号的形式不同,可将系统划分为恒值控制系统和随动控制系统两种。

- (1)恒值控制系统。输入量一经设定,就维持不变,希望输出量维持在某一特定值上。

(2) 随动控制系统。若给定信号的变化规律是事先不能确定的、随时间变化的信号,则称该系统为自动跟踪系统;若给定输入是预先设定的、按预定规律变化的信号,则称相应系统为程序控制系统。上述两种系统称为随动控制系统。

按系统参数是否随时间变化,可以将系统分为定常系统和时变系统两种。其中,如果控制系统的参数在系统运行过程中不随时间变化,则称为定常系统或者时不变系统。否则,称为时变系统。

按系统是否满足叠加原理,可将系统分为线性系统和非线性系统两种。本课程重点研究线性定常系统。如果一个系统在输入 $r_1(t)$ 的作用下产生输出 $c_1(t)$,在输入 $r_2(t)$ 的作用下产生输出 $c_2(t)$,若在输入 $a_1 r_1(t) + a_2 r_2(t)$ 的作用下,系统输出为 $a_1 c_1(t) + a_2 c_2(t)$,其中 $r_1(t), r_2(t)$ 是任意的输入信号; a_1, a_2 是任意的常数,那么该系统满足叠加原理,是线性系统,否则是非线性系统。

按系统信号是连续信号还是离散信号,可将系统分为连续系统与离散系统两种。其中,若系统中所有信号都是连续信号,则称为连续系统;若系统中有一处或几处的信号是离散信号(脉冲序列或数字编码),则称为离散系统(包括采样系统和数字系统)。

按照输入信号和输出信号的数目,可将系统分为单输入-单输出(SISO)系统和多输入-多输出(MIMO)系统。其中,单输入-单输出系统通常称为单变量系统,这种系统只有一个输入(不包括扰动输入)和一个输出;多输入-多输出系统通常称为多变量系统,有多个输入和多个输出。

任务 2 开环控制与闭环控制

任务描述: 掌握开环控制与闭环控制的特点、区别和优缺点;

熟悉生活中常见的开环控制和闭环控制的应用。

任务分析: 自动控制系统一般有两种基本结构,对应着两种基本控制方式,即开环控制方式和闭环控制方式。应会根据控制要求和控制场合的不同合理选择控制方式。

阶段 1 开环控制

系统的输入不受输出影响的控制系统称为开环控制系统。在开环控制系统中,输入端与输出端之间只有信号的前向通道,而不存在由输出端到输入端的反馈通路。

如图 1-6(a)所示的他激直流电动机转速控制系统就是一个开环控制系统。它的任务是控制直流电动机以恒定的转速带动负载工作。系统的工作原理是:调节电位器 R 的滑臂,使其输出参考电压 u_r, u_r 经电压放大和功率放大后成为 u_a ,送到电动机的电枢端,用来控制电动机的转速。在负载恒定的条件下,他激直流电动机的转速 ω 与电枢电压 u_a 成正比,只

要改变给定电压 u_r , 便可得到相应的电动机转速 ω 。

在本系统中, 直流电动机是被控对象; 电动机的转速 ω 是被控量, 或称系统的输出量或输出信号; 参考电压 u_r 通常被称为系统的给定量或输入量。

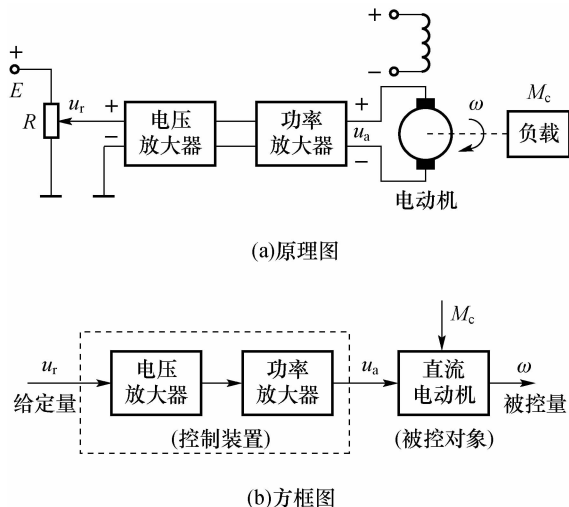


图 1-6 直流电动机转速开环控制系统

由图 1-6(a)可知, 该系统只有输入量 u_r 对输出量 ω 的单向控制作用, 而输出量 ω 对输入量 u_r 却没有任何影响和联系, 故称这种系统为开环控制系统。

如图 1-6(b)所示是直流电动机转速开环控制系统的方框图。图中, 方框代表系统中具有相应职能的元部件; 箭头表示元部件之间的信号及其传递方向。电动机负载转矩 M_c 的任何变动, 都会使输出量 ω 偏离期望值, 这种作用称为干扰或扰动, 在图 1-6(b)中用一个作用在电动机上的箭头来表示。

一般来说, 开环控制系统结构比较简单, 成本较低。开环控制系统的缺点是控制精度不高, 抑制干扰能力差, 而且对系统参数的变化比较敏感。一般用于可以不考虑外界影响或精度要求不高的场合, 如洗衣机、步进电机控制及水位调节等。

阶段 2 闭环控制

开环控制系统精度不高和适应性不强的主要原因是缺少从系统输出到输入的反馈回路。若要提高控制精度, 必须把输出量的信息反馈到输入端, 通过比较输入值与输出值, 产生偏差信号, 该偏差信号以一定的控制规律产生控制作用, 逐步减小以至消除这一偏差, 从而实现所要求的控制性能。

在图 1-6(a)所示的直流电动机转速开环控制系统中, 加入一台测速发电机, 并对电路稍作改变, 便构成了如图 1-7(a)所示的直流电动机转速闭环控制系统。图中, 测速发电机由电动机同轴带动, 它先将电动机的实际转速 ω (系统输出量) 测量出来, 并转换成电压 u_f , 再反馈到系统的输入端, 与给定电压 u_r (系统输入量) 进行比较, 从而得出电压 $u_e = u_r - u_f$ 。由于

该电压能间接地反映出误差的大小和正负方向,通常称之为偏差信号,简称偏差。偏差 u 。经放大器放大后成为 u_a ,用以控制电动机的转速 ω 。

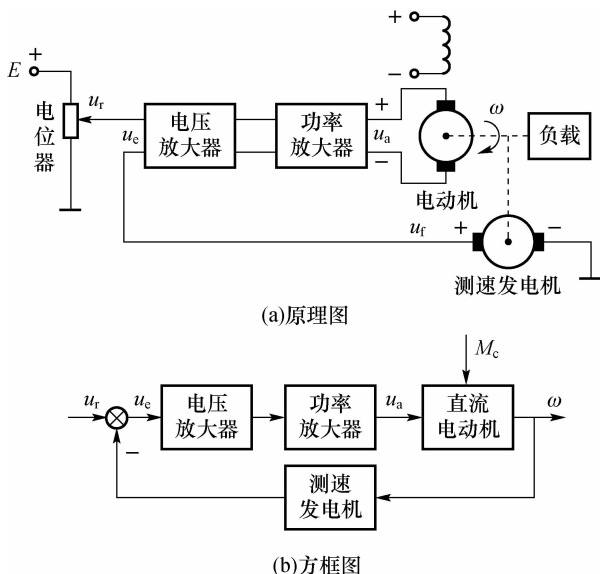


图 1-7 直流电动机转速闭环控制系统

如图 1-7(b)所示是直流电动机转速闭环控制系统的方框图。图中,用符号“ \otimes ”表示比较点,其输出量等于各个输入量的代数和。因此,各个输入量均须用正、负号表明其极性。图中清楚地表明,由于采用了反馈回路,使得信号的传输路径形成闭合回路,使输出量反过来直接影响控制作用。这种通过反馈回路使系统构成闭环,并按偏差产生控制作用,用以减小或消除偏差的控制系统,称为闭环控制系统,或称为反馈控制系统。而把从系统输入量到输出量之间的通道称为前向通道;从输出量到反馈信号之间的通道称为反馈通道。

提醒

必须指出,在系统主反馈通道中,只有采用负反馈才能达到控制的目的。若采用正反馈,将使偏差越来越大,导致系统发散而无法工作。

闭环控制系统工作的本质是:将系统的输出信号引回到输入端,与输入信号相比较,利用所得的偏差信号对系统进行调节,达到减小偏差或消除偏差的目的。这就是负反馈控制原理,它是构成闭环控制系统的核心。在闭环控制系统中,无论是输入信号的变化,还是干扰的影响或者系统内部的变化,只要是被控量偏离了给定值,都会产生相应的作用去消除偏差。因此,闭环控制抑制干扰能力强,与开环控制相比,系统对参数变化不敏感,可以选用不太精密的元件构成较为精密的控制系统,获得满意的动态特性和控制精度。但是采用反馈装置需要添加元部件,造价较高,同时也增加了系统的复杂性。如果系统的结构参数选取不适当,控制过程可能变得很差,甚至出现振荡或发散等不稳定的情况。因此,如何分析系统、合理选择系统的结构参数,从而获得满意的系统性能,是自动控制理论必须研究解决的问题。

闭环控制是最常用的控制方式,通常所说的控制系统,一般都是指闭环控制系统。闭环控制系统是本课程讨论的重点。另外,也可将闭环控制与补偿控制相结合,形成复合控制。

任务3 对自动控制系统的性能要求

任务描述: 掌握对自动控制系统的性能要求,即稳、准、快。

任务分析: 由动态过程可以反映系统内在性能的好坏,而常见的评价系统优劣的性能指标也是从动态过程中定义出来的。怎样根据工作任务的不同,分析和设计自动控制系统,使其对三方面的性能有所侧重,并兼顾其他,以全面满足要求,这正是本课程所要研究的内容。

由于实际物理系统一般都含有储能元件或惯性元件,因而系统的输出量和反馈量总是迟于输入量的变化。因此,当输入量发生变化时,输出量从原平衡状态变化到新平衡状态总是要经历一定时间。在输入量的作用下,系统的输出变量由初始状态达到最终稳态的中间变化过程称为动态过程,又称瞬态过程。动态过程结束后的输出响应称为稳态过程。系统的输出响应由动态过程和稳态过程两部分组成。

不同的控制对象、不同的工作方式和控制任务,对系统的性能要求也往往不相同。一般来说,对系统性能的基本要求可以归纳为三个字:稳、准、快。

(1) 稳:是指系统的稳定性。稳定性是系统重新恢复平衡状态的能力。任何一个能够正常工作的控制系统,首先必须是稳定的。稳定是对自动控制系统的最低要求。

并不是只要连接成负反馈形式后系统就一定能正常工作,若系统设计不当或参数调整不合理,系统的响应过程可能出现振荡,甚至发散。如图 1-8 中曲线 3、曲线 4 或曲线 5 所示。这种情况就称系统不稳定。

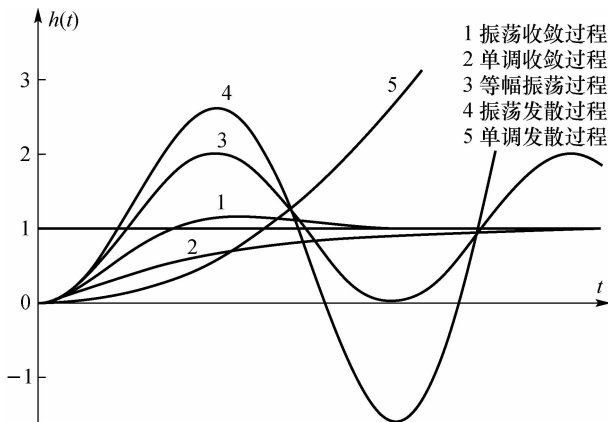


图 1-8 系统的单位阶跃响应过程

提醒

不稳定的系统是无法使用的,系统激烈而持久的振荡会导致功率元件过载,甚至使设备损坏而发生事故,这是绝不允许的。

(2)准:是对系统稳态(静态)性能的要求。对一个稳定的系统而言,动态过程结束后,系统输出量的实际值与期望值之差称为稳态误差,它是衡量系统控制精度的重要指标。稳态误差越小,表示系统的准确性越好,控制精度越高。

(3)快:是对系统动态性能(瞬态过程性能)的要求。描述系统动态性能可以用平稳性和快速性加以衡量。其中,平稳是指系统由初始状态运动到新的平衡状态时,具有较小的超调量和振荡性;快速是指系统运动到新的平衡状态所需要的调节时间较短。动态性能是衡量系统质量高低的重要指标。

由于被控对象的具体情况不同,各种系统对3项性能指标的要求应有所侧重。例如,恒值系统一般对稳态性能的限制比较严格,随动系统一般对动态性能的要求较高。

对于同一个系统,上述3项性能指标之间往往是相互制约的。提高过程的快速性,可能会引起系统强烈振荡;改善了平稳性,控制过程又可能很迟缓,甚至使最终精度也很差。分析和解决这些矛盾,将是本课程讨论的重要内容。

任务4 自动控制的发展及本课程的要求

任务描述: 了解自动控制的发展过程;

理解本课程的学习任务。

任务分析: 自动控制的发展过程正是人类认知自动控制客观规律的过程,本任务主要是通过了解其发展过程和明确本课程学习目标为后续课程做准备。

阶段1 自动控制的发展

自动控制理论是在人类征服自然的生产实践活动中孕育、产生,并随着社会生产和科学技术的进步而不断发展、完善起来的。自动控制理论研究的是如何按被控对象和环境特征,通过能动地采集和运用信息施加控制作用,使系统在变化或不确定的条件下正常运行,并具有预定功能。它是研究自动控制共同规律的技术科学,其主要内容涉及被控对象、环境特征、控制目标和控制手段以及它们之间的相互作用。

1788年,英国人瓦特在他发明的蒸汽机上使用了离心调速器,解决了蒸汽机的速度控制问题,引起了人们对控制技术的重视。以后人们曾经试图改善调速器的准确性,却常常导致系统产生振荡。实践中出现的问题,促使科学家们从理论上进行探索研究。1868年,英

国物理学家麦克斯韦(J.C.Maxwell)通过对调速系统线性常微分方程的建立和分析,解释了瓦特速度控制系统中出现的稳定性问题,开辟了用数学方法研究控制系统的途径。1877年和1895年,英国数学家劳斯(E.J.Routh)和德国数学家古尔维茨(A.Hurwitz)分别独立地建立了直接根据代数方程的系数判别系统稳定性的准则。这些方法奠定了经典控制理论中时域分析法的基础。

1932年,美国物理学家奈奎斯特(H.Nyquist)研究了长距离电话线信号传输中出现的失真问题,运用复变函数理论建立了以频率特性为基础的稳定性判据,奠定了频率响应法的基础。随后,伯德(H.W.Bode)和尼柯尔斯(N.B.Nichols)在20世纪30年代末到40年代初进一步将频率响应法加以发展,形成了经典控制理论的频域分析法。

1948年,美国科学家伊万斯(W.R.Evans)创立了根轨迹分析方法,为分析系统性能随系统参数变化的规律性提供了有力工具,被广泛应用于反馈控制系统的分析和设计中。

从20世纪20年代到40年代形成了以传递函数作为描述系统的数学模型,以时域分析法、根轨迹法和频域分析法为主要分析设计工具,构成了经典控制理论的基本框架。

20世纪60年代以来,随着计算机技术的发展和航天等高科技的推动,又产生了基于状态空间模型的所谓“现代”控制理论。

随着自动化技术的发展,人们力求使设计的控制系统达到最优的性能指标,为了使系统在一定的约束条件下,其某项性能指标达到最优而实行的控制称为最优控制。

当对象或环境特性变化时,为了使系统能自行调节,以跟踪这种变化,并保持良好的品质,又出现了自适应控制。

虽然现代控制理论的内容很丰富,与古典控制理论相比,它能解决更多更复杂的控制问题,但对于单输入-单输出线性定常系统而言,用古典控制理论来分析和设计,仍是最实用最方便的。

真正优良的设计必须允许模型的结构和参数不精确并可能在一定范围内变化,即具有鲁棒性。这是当前的重要前沿课题之一。另外,使理论实用化的一个重要途径就是数学模拟(仿真)和计算机辅助设计(CAD)。

前面谈到的主要是针对线性系统的线性理论。近年来,在非线性和离散事件系统、大系统和复杂系统理论等方面均有不同程度的发展。智能控制在实用方面也得到了很快的发展,它主要包括专家系统、模糊控制和人工神经网络等内容。

控制理论目前还在向更纵深、更广阔的领域发展,无论是在数学工具、理论基础,还是在研究方法上都产生了实质性的飞跃,在信息与控制学科研究中注入了蓬勃的生命力,启发并扩展了人的思维方式,引导人们去探讨自然界更为深刻的运动机理。控制理论的深入发展,必将有力地推动社会生产力的发展,提高人民的生活水平,促进人类社会的向前发展。

阶段 2 本课程的研究内容

自动控制原理是一门研究自动控制共同规律的工程技术科学,是研究自动控制技术的基础理论。自动控制系统虽然种类繁多,形式不同,但所研究的内容和方法却是类似的。本课程的研究内容主要分为系统分析和系统设计两个方面。

1. 系统分析

系统分析是指在控制系统结构参数已知、系统数学模型建立的条件下,判定系统的稳定性,计算系统的动态和静态性能指标,研究系统性能与系统结构、参数之间的关系。

2. 系统设计

系统设计是在给出被控对象及其技术指标要求的情况下,寻求一个能完成控制任务、满足技术指标要求的控制系统。在控制系统的主要元件和结构形式确定的前提下,设计任务往往是需要改变系统的某些参数,有时还要改变系统的结构,选择合适的校正装置,计算、确定其参数,加入系统之中,使其满足预定的性能指标要求。这个过程称为系统的校正。

设计问题要比分析问题更为复杂。首先,设计问题的答案往往并不唯一,对系统提出的同样一组要求,往往可以采用不同的方案来满足;其次,在选择系统的结构和参数时,往往会出现相互矛盾的情况,需要进行折中,同时必须考虑控制方案的可实现性和实现方法;最后,设计时还要通盘考虑经济性、可靠性、安装工艺和使用环境等各个方面的问题。

分析和设计是两个完全相反的命题。分析系统的目的在于了解和认识已有的系统。对于从事自动控制的工程技术人员而言,更重要的工作是设计系统,改造那些性能指标未达到要求的系统,使其能够完成确定的工作。

本章小结

本章从人工控制和自动控制的比较入手,通过具体的自动控制系统,介绍了控制系统的组成和工作原理,从而使读者熟悉和了解自动控制的基本概念和有关的名词、术语。

自动控制系统的分类方法很多,其中最常见的是按系统输入信号的时间特性进行分类,可分为恒值控制系统和随动控制系统。

控制系统按其是否存在反馈可分为开环控制系统和闭环控制系统。闭环控制系统又称为反馈控制系统,其主要特点是将系统输出量经测量后反馈到系统输入端,与输入信号进行比较得到偏差,由偏差产生控制作用,控制的结果是使被控量朝着减少偏差或消除偏差的方向运动。

在分析系统的工作原理时,应注意控制装置各组成部分的功能,以及在系统中如何完成其相应的工作,并能用方框图对系统进行分析。

对自动控制系统的基本要求是:系统必须是稳定的;系统的稳定控制精度要高(稳态误差要小);系统的响应过程要平稳快速。这些要求可归纳成稳、准、快三个字。

本章习题

1. 试阐述下列术语的意义并举例说明：

自动控制；控制装置与被控对象；给定值与被控量；开环控制与闭环控制；线性系统与非线性系统；连续系统与采样系统；恒值系统与随动系统；稳定性、快速性和准确性。

2. 试列举开环控制和闭环控制的例子，并说明其工作原理。

3. 根据图 1-9 所示的电动机速度控制系统工作原理图，完成以下题目。

(1) 将 a, b 与 c, d 用线连接成负反馈状态。

(2) 画出系统方框图。

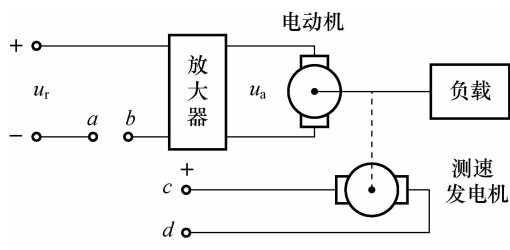


图 1-9 速度控制系统原理图

4. 图 1-10 所示是仓库大门自动控制系统原理图。试说明系统自动控制大门开、闭的工作原理，并画出系统方框图。

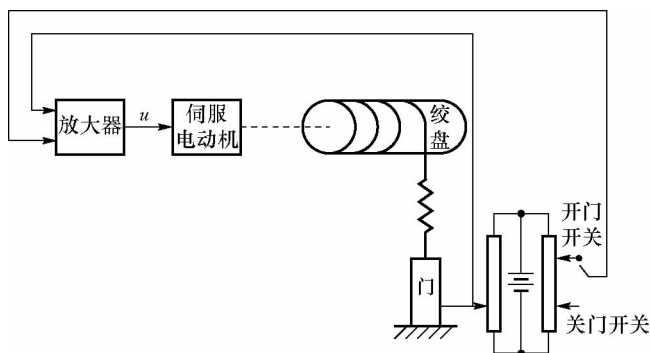


图 1-10 仓库大门自动开闭控制系统原理图

5. 图 1-11(a)(b)所示的系统均为电压调节系统。假设空载时两系统发电机的端电压均为 110V，试问带上负载后，图 1-11(a)(b)中哪个能保持 110V 不变？哪个电压会低于 110V？为什么？

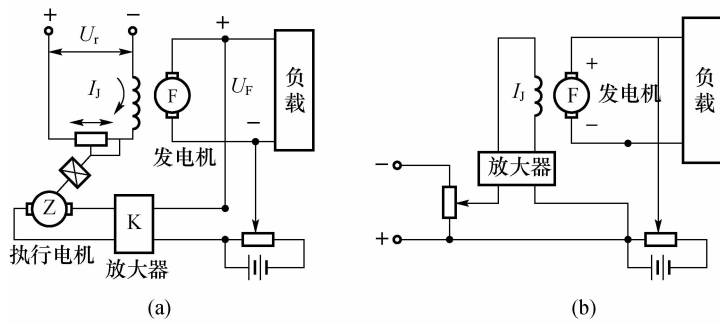


图 1-11 电压调节系统原理图

6. 图 1-12 所示为水温控制系统原理图。冷水在热交换器中由通入的蒸气加热, 从而得到一定温度的热水。冷水流量变化用流量计测量。试绘制系统方框图, 并说明为了保持热水温度为期望值, 系统是如何工作的? 系统的被控对象和控制装置各是什么?

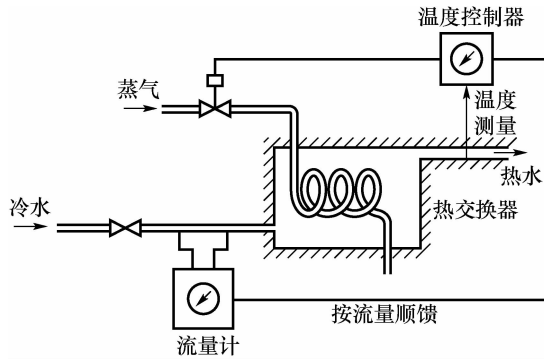


图 1-12 水温控制系统原理图