

自动控制原理

白文峰 李霄燕 主编

吉林科学技术出版社

自动控制原理

主编 白文峰 李霄燕

吉林科学技术出版社

内 容 提 要

本书首先介绍了自动控制系统的一般概念,在此基础上,着重论述了线性定常系统常用的三种分析方法(时域分析法、根轨迹法和频率响应分析法)以及系统校正和设计等方法。本书的内容还包括非线性系统理论和线性离散系统理论等。

本书编写力求内容精练,概念清晰,重点突出,易于自学。为了便于读者在学习过程中更好地掌握基本概念、基本理论以及分析、综合系统的基本方法,各章都编集了较多的例题和习题。

本书可作为高等院校自动化专业、电气工程及其自动化专业以及相近专业的教材,也可供有关专业师生及从事自动控制方面工作的工程技术人员参考。

自动控制原理

白文峰 李霄燕 主编

责任编辑:齐 郁 焦 红

封面设计:薛 冰

出版 吉林科学技术出版社 787×1092 毫米 16 开 384.000 字 17 印张

发行 2000 年 1 月第 1 版 2000 年 1 月第 1 次印刷

印刷 吉林工学院印刷厂 ISBN 7-5384-2136-X/TP·72 定价:26.50 元

地址 长春市人民大街 124 号 邮编 130021 电话 5635177 传真 3635185

电子信箱 JLKJCBS@public.cc.jl.cn

前 言

自动控制理论的形成和发展,经历了半个多世纪的历程。一般把 20 世纪 50 年代建立起来的主要处理单输入单输出定常反馈控制系统的理论称为经典控制理论,而把 60 年代初建立起来的用于处理多变量和时变系统的理论称为现代控制理论。随着微型计算机的出现和普及,现代控制理论早已进入了实际应用阶段。但是,经典控制理论还在各领域的自动控制中获得广泛的应用,目前仍是一种很有用的方法。

本书是根据新制定的工科大学本科培养计划关于《自动控制原理》课程的要求编写。全书共分九章;第一章深入浅出地介绍了自动控制的基本概念;第二章介绍了在时域和复域中建立控制系统数学模型的方法以及其结构图和信号流图的表示方法;第三章至第六章比较全面地给出了线性控制系统的时域分析法、根轨迹法、频域分析法以及校正和设计等方法;第七章论述了非线性系统理论,给出了相平面和描述函数两种常用的分析方法;第八章和第九章介绍了线性离散系统的基本理论及离散控制系统的分析与综合。

编者根据多年讲授该课程的经验,在编写本书时力求内容精练、概念清晰、重点突出、易于自学。为便于读者在学习中更好地掌握基本概念、基本理论以及分析、综合系统的基本方法,各章都编集了较多的例题和习题。

本书第一章由尤文编写,第二章和第六章由付虹编写,第三章和第四章由白文峰编写,第五章和第八章由李霄燕编写,第七章由刘君义、姜万军合写,第九章由胡贞编写。全书由白文峰、李霄燕担任主编,付虹、尤文、胡贞担任副主编,艾明兰负责主审并最后修改定稿。

在编写过程中,吉林工业大学李元春教授、吉林工学院电气工程及其自动化教研室王玉华、邱东等有关同志进行了审查和讨论,提出了许多宝贵意见和建议,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在一些错误和不足,敬请广大读者批评指正。

编 者

2000 年 1 月

目 录

第一章 自动控制的基本概念	(1)
§ 1-1 引 言	(1)
§ 1-2 自动控制的基本方式	(1)
§ 1-3 自动控制系统的分类	(6)
§ 1-4 自动控制系统的研究内容和对系统的基本要求	(7)
习 题	(8)
第二章 控制系统的数学模型	(11)
§ 2-1 微分方程	(11)
§ 2-2 非线性模型的线性化	(14)
§ 2-3 传递函数	(15)
§ 2-4 结构图及其等效变换	(21)
§ 2-5 闭环控制系统的传递函数	(30)
§ 2-6 信号流图	(33)
习 题	(37)
第三章 自动控制系统的时域分析	(41)
§ 3-1 典型输入信号和暂态性能指标	(41)
§ 3-2 一阶系统的时域分析	(45)
§ 3-3 二阶系统的时域分析	(46)
§ 3-4 具有闭环零点的二阶系统的时域分析	(55)
§ 3-5 高阶系统的时域分析	(56)
§ 3-6 线性系统的稳定性分析	(59)
§ 3-7 稳态误差分析	(65)
习 题	(73)
第四章 根轨迹法	(76)
§ 4-1 根轨迹的基本概念	(76)
§ 4-2 根轨迹绘制的基本法则	(78)
§ 4-3 广义根轨迹	(90)
§ 4-4 控制系统的根轨迹法分析	(95)
习 题	(97)
第五章 线性系统的频域分析	(100)
§ 5-1 频率特性的基本概念	(100)
§ 5-2 频率特性的几何表示方法	(103)
§ 5-3 典型环节的频率特性	(106)
§ 5-4 开环系统幅相频率特性的绘制及奈氏判据	(116)

§ 5-5	系统开环对数频率特性的绘制及对数稳定判据	(127)
§ 5-6	稳定裕度	(133)
§ 5-7	闭环频率特性	(136)
§ 5-8	系统的频率法分析	(139)
习 题		(143)
第六章	自动控制系统的校正	(146)
§ 6-1	关于控制系统校正的概念	(146)
§ 6-2	基本控制规律	(147)
§ 6-3	常用校正装置及其特性	(150)
§ 6-4	频率响应法校正	(156)
§ 6-5	用反馈校正装置设计系统	(166)
§ 6-6	复合校正	(170)
习 题		(172)
第七章	非线性控制系统分析	(175)
§ 7-1	非线性系统概述	(175)
§ 7-2	描述函数法	(177)
§ 7-3	相平面分析法	(188)
习 题		(203)
第八章	线性离散系统理论基础	(205)
§ 8-1	离散系统的基本概念	(205)
§ 8-2	信号的采样与保持	(209)
§ 8-3	z 变换	(216)
习 题		(226)
第九章	线性离散控制系统的分析与综合	(228)
§ 9-1	脉冲传递函数	(228)
§ 9-2	离散系统的稳定性分析	(237)
§ 9-3	离散系统的稳态误差	(241)
§ 9-4	离散系统的暂态性能	(244)
§ 9-5	离散系统的综合	(250)
§ 9-6	数字控制器的实现	(258)
习 题		(259)
附录 I-1	常用函数拉氏变换表	(262)
附录 I-2	拉氏变换的一些定理	(263)
附录 II	z 变换表	(264)
主要参考文献		(266)

260页表中划线需记

第一章 自动控制的基本概念

§ 1-1 引言

在现代科学技术的许多领域中,自动控制技术起着愈来愈重要的作用。并且,随着生产和科学技术的发展,自动化水平也越来越高。

所谓自动控制,是指在没有人直接参与的情况下,利用控制装置使被控对象(机器设备或生产过程)的某个参数(称被控量)自动地按照预定的规律运行。导弹能够准确命中目标,人造卫星能够按预定的轨道运行并返回地面,宇宙飞船能准确地在月球着陆并返回地球,都是由于自动控制技术高速发展的结果。

在工业生产过程中,诸如对压力、温度、湿度、流量、频率以及原料、燃料成分比例等方面的控制,也都是自动控制技术的重要组成部分。

在国民经济各部门中,由于广泛地应用了自动控制技术,因此在改善劳动条件、提高产品质量和劳动生产率、实现企业自动化等多个方面,取得了明显的效果。特别是近二十多年来,计算机已成为自动控制技术不可分割的重要组成部分,并为自动控制技术的发展和应用开辟了广阔的新天地。

《自动控制原理》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。自动控制理论按其发展过程分成经典控制理论和现代控制理论两大部分。

经典控制理论在 50 年代末期已形成比较完整的体系,它主要以传递函数为基础,研究单输入、单输出反馈控制系统的分析和设计问题,采用的主要研究方法有时域分析法、根轨迹法和频率法。

现代控制理论是 60 年代在古典控制理论的基础上,随着科学技术的发展和工程实践的需要而迅速发展起来的,现代控制理论以状态空间法为基础,研究多变量、变参数、非线性、高精度等各种复杂控制系统的理论。近年来,由于计算机和现代应用数学研究的迅速发展,使现代控制理论又在大系统工程、人工智能控制等方面继续向纵深发展。

§ 1-2 自动控制的基本方式

开环
闭环
复合

首先,通过举例来简要分析自动控制的含义。设有一个直流电动机,用它来带动一个需要以恒速转动的负载,其电枢上加有由可控硅整流装置供给的整流电压,而可控硅整流装置输出的整流电压的大小,可由电位器 R_w 的给出电压 U_g 来调节。其原理示意图见图 1-1。

当电位器 R_w 给出一个电压 U_g 后,可控硅整流装置的触发电路便产生一串与电压 U_g

相对应的、具有一定相位的触发脉冲去控制可控硅的导通角,从而控制可控硅放大器的输出电压 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恒定的转速运转,则只要给定一个相应的恒定电压 U_g 。

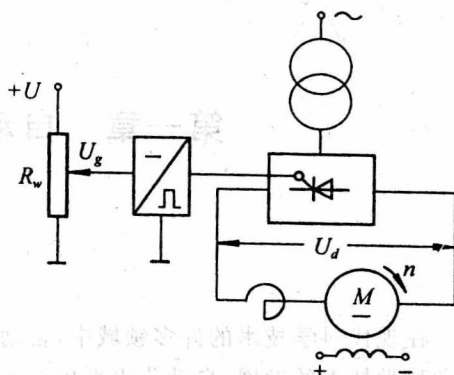


图 1-1 电动机的开环控制

这里,我们把被控对象和控制装置按照一定的方式连接起来,组成的一个有机整体称为自动控制系统。被控制的对象(被控对象)是指要求实现自动控制的机器、设备或生产过程。通常,把控制系统的被控量叫做系统输出量。而把

影响系统输出的外界输入叫做系统的输入量,一般系统的输入有两类,即给定输入和扰动输入。给定输入决定系统输出量的变化规律或要求值,扰动输入则是系统不希望的外作用,它影响给定输入量对系统被控量的控制。在上例控制电动机转速的系统中,电动机就是被控对象,用以控制电动机 M 转速的给定电压 U_g 为系统的控制量或输入量。而负载的转速 n 被称为系统的输出量或被控制量。对任何一个控制系统来说,被控对象的输出量即被控量是一个极为重要的物理量,它的变化在控制过程中要求加以严格的控制。

可以看出,上述控制系统只根据给定的输入量进行控制,而输出量在整个过程中对系统不产生任何影响。这种输出量只能受控于输入量,而对系统不能反施任何影响的系统称为开环控制系统。开环控制系统可用图 1-2 所示方框图表示。

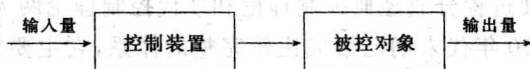


图 1-2 开环控制的方块图

图中,控制装置与被控对象分别用方块表示。系统中的物理量,如电流、电压等称为信号,信号的传递方向用箭头表示。进入方块的箭头表示输入信号(也称输入量)离开方块的箭头表示输出信号(也称输出量)。控制系统的输出量就是被控量,它的期望值一般是系统输入信号的函数。

在开环系统中,对于每一个输入信号,必有一个固定的工作状态和一个系统的输出量与之对应。因此,系统的控制精度将取决于控制器及被控对象的参数稳定性。即使要使开环系统具有要求的控制精度,在工作过程中系统各部分的参数值都必须严格保持在事先校准的数值上。

在图 1-1 所示的开环系统中,若保证电动机 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,如果输出量较预期值出现偏差,上述系统没有自动修正的能力。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。

在开环控制的基础上,可通过人的参与消除扰动因素的影响,而使输出量按预期要求变化。例如上例中,可在电动机轴上装上转速表,人通过监视转速表发现转速变化。若发现扰动使转速 n 偏离期望值而增大,那么可通过调节电位器 R_w 使 U_g 减小,从而使转速下降,直到转速 n 恢复到预期值为止。在上述控制过程中,人起到了将系统输出端的输出量反馈到输入端,并以适当的方式影响输入量的控制作用。即通过人的控制作用把开环系统输出量和输入量联系起来,从而有可能消除由于扰动在输出端造成的使输出量偏离预期值的偏差。

闭环控制: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。闭环控制是自然界中一切生物控制自身运动的基本规律,也是工程自动控制的基本原理。它可以实现复杂而准确的控制。

现在仍以上面例举过的电机转速控制系统为例说明闭环控制系统的组成及工作原理。

图 1-3 为在无人参与情况下,自动控制电动机的转速并使其保持恒定的控制系统原理图。

图 1-3 中 TG 为测速发电机,其输出电压正比于电动机 M 转速 n ,并给出与转速成正比的电压 U_f 。测速发电机完成了转速测量并将其转换成相应电压的任务。该测速发电机称为测量转换元件。

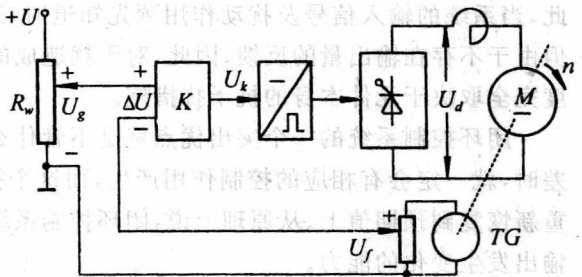


图 1-3 电动机转速的自动控制原理图

电压 U_g 为给定的基准电压,其值与电动机转速的期望值相对应。因此,把 U_f 反馈到系统的输入端并与给定电压 U_g 进行比较,可以代替人观察电动机转速并判断是否与期望值发生偏差的过程。其中 U_g 为系统的给定量, U_f 则是与输出量 n 成正比的反馈量。给定量(输入量) U_g 与反馈量反向串联得到的电压差 $\Delta U = U_g - U_f$ 叫做偏差量。如果 $\Delta U \neq 0$,便意味着电动机转速在扰动作用下偏离了它的预期值。

一般情况下,偏差电压较小,故需经放大器放大后才能作为触发器的控制电压,进而控制可控硅功率放大器的输出电压的大小,使电动机的转速得到控制,直到 $\Delta U = 0$,此时,电动机的转速恢复到期望值上。

在该系统中,被控对象是直流电动机,触发器和整流装置起着执行控制任务的作用,因此,把它叫做执行元件。

其控制过程如下:设 U_g 与 n 有一一对应的关系。例如当已调整好 $U_g = U_{g1}$ 时, $n = n_1$,一旦扰动作用引起转速变化,如转速 n 小于 n_1 ,测速发电机输出电压 U_f 降低,偏差电压 ΔU 相应增大,该偏差电压使触发器控制电压 U_k 增加,进而控制可控硅整流装置的输出电压 U_d 增加,转速上升。反之,转速大于 n_1 , ΔU 减小, U_d 减小,转速下降。

可以看出,这里对电动机转速的控制,完全是无人参与的,因此,把这种不需要人直接参与,而使系统输出量自动按预定规律变化的控制过程叫做自动控制。在闭环控制中,输出量一般由测量装置测量并反馈到输入端,然后由比较装置将它与输入信号相减,这种连接形式称为负反馈。利用负反馈得到偏差产生的控制作用,再去消除偏差,这种控制原理叫自动控制原理,也称反馈控制原理。显然反馈控制实质上是一个按偏差进行控制的过程,因此它也称为按偏差的控制,自动控制原理就是按偏差控制的原理。

作为反馈控制系统一例的电动机转速控制系统的功能方块图如图 1-4 所示。

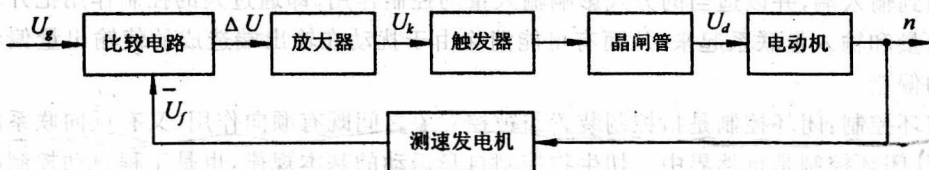


图 1-4 电动机转速控制系统的功能方块图

开环控制与闭环控制的比较:一般来说,开环控制结构简单,成本低廉,工作稳定。因此,当系统的输入信号及扰动作用预先知道时,采用开环控制即可取得较为满意的效果。但由于不存在输出量的反馈,因此,对干扰造成的误差无自动修正能力。该系统的控制精度完全取决于元件本身的抗干扰措施。

闭环控制系统的一个突出优点就是不管什么原因引起的输出量偏离预期值而产生偏差时,就一定会相应的控制作用产生,而这个控制作用将去减小或消除偏差,使输出量重新恢复到预期值上。从原理上说,闭环控制系统具有抑制内部和外部各种干扰引起系统输出发生变化的能力。

在闭环控制系统中,由于引入了负反馈,使输出量对外部和内部的干扰不甚敏感,从而有可能采用不太精密或成本低廉的元件来构成控制质量较高的系统,同时,也正是由于存在反馈,闭环控制也有其不足之处,这就是输出量可能出现振荡,严重时会使系统无法工作。这是由于输出量出现偏离之后,经过反馈形成一个修正偏离的控制作用,但在这个控制作用和它所产生的修正偏离的效果之间,一般是有时间延迟的,此时输出量的偏离不能立即得到修正,从而有可能使输出量处于振荡状态。如果系统参数选择不当,不仅不能修正偏离,反而会使偏离越来越大,系统无法正常工作。因此,对闭环系统来说,稳定性始终是一个十分重要的问题。

闭环控制系统的基本组成:从以上闭环系统的实例看出,一个闭环控制系统应由以下基本元件(或装置)组成。

测量元件:对系统的输出量进行测量,测量元件也称敏感元件。

比较元件:对系统输出量与输入量进行加减运算,给出偏差(误差)信号。

放大元件:对微弱的偏差信号进行放大和变换,输出足够功率和要求的物理量。

执行机构:根据放大后的偏差信号,对被控对象执行控制任务,使输出量与预期值趋于一致。

被控对象:自动控制系统需要进行控制的机器、设备或生产过程。被控对象内要求实

现自动控制的物理量称为系统的输出量或被控制量。

校正补偿装置:参数或结构便于调整的元件,用串联或反馈的方式连接在系统中以改善系统的性能。通常它使控制执行机构的控制信号与放大后的偏差信号之间具有一定的关系(称调节规律)。

尽管闭环控制系统的控制任务多不相同,以及使用元件的结构和能源形式均不同,但都具有相同的工作原理(负反馈工作原理)。就其信号的传递、变换的功能来说可抽象成图 1-5 的功能方块图。

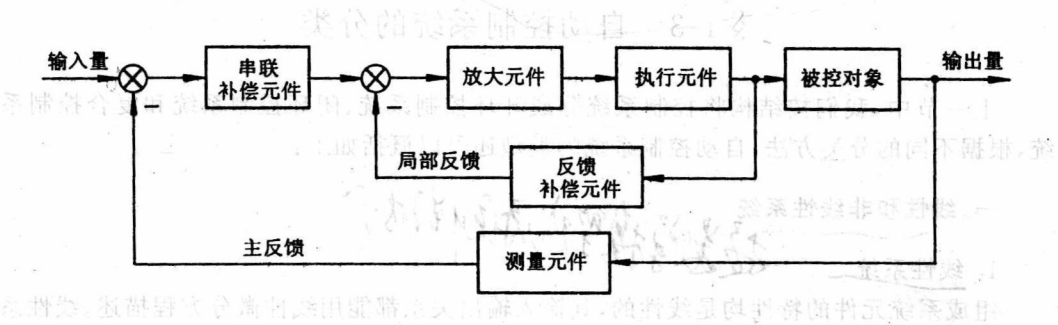


图 1-5 闭环(反馈)控制系统的功能方块图

图中,用“ $\otimes$ ”代表比较元件,它将测量元件检测到的输出量与输入量进行比较,“-”号表示两者符号相反,即负反馈;“+”号表示两者符号相同,即正反馈。信号从输入端沿箭头方向到达输出端的传输通路称之为前向通路;系统输出量经测量元件反馈到输入端的传输通路称为主反馈通路。前向通路与主反馈通路共同构成主回路。此外,还有局部反馈通路以及由它构成的内回路。只包含一个主反馈通路的系统称为单回路系统;有两个或两个以上反馈通路的系统称为多回路系统。

复合控制:将开环和闭环控制结合在一起,构成开环——闭环控制方式,称为复合控制。实质上,它是在闭环控制回路的基础上,附加一个输入信号或扰动作用的前馈通道;来提高系统的控制精度。前馈通路通常由对输入信号的补偿装置或对扰动作用的补偿装置组成,分别称为按输入信号补偿和按扰动作用补偿的复合控制系统,如图 1-6 所示。

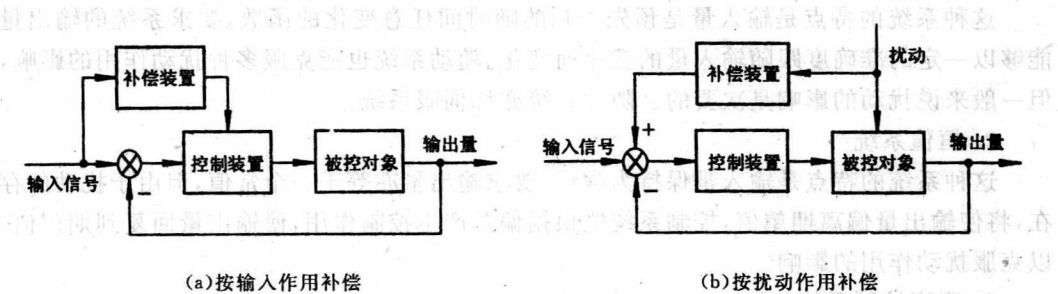


图 1-6 复合控制典型方块图

通常,按输入信号补偿的补偿装置可提供一个输入信号的微分作用,并作为前馈控制信号,与原输入信号一起对被控对象进行控制,以提高系统的跟踪精度。按扰动作用补偿

的补偿装置,能够在可测扰动对系统的不利影响产生前,提供一个控制作用以抵消扰动对系统输出的影响。补偿装置按照不变性原理设计,即在任何输入下,均保证系统输出与作用在系统上的扰动完全无关或部分无关,从而使系统输出完全复现输入。

复合控制中的前馈通路相当于开环控制,因此,对补偿装置的参数稳定性要求较高,否则,会由于补偿装置参数本身的漂移而减弱其补偿效果。前馈通路的引入,可以大大提高系统的控制精度,因而获得了广泛应用。

§ 1-3 自动控制系统的分类

上一节中,我们按结构将控制系统分成开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统,根据不同的分类方法,自动控制系统的类型还可以概括如下:

一、线性和非线性系统

1. 线性系统

组成系统元件的特性均是线性的,其输入输出关系都能用线性微分方程描述。线性系统的主要特点是具有齐次性和叠加性,系统的响应与初始状态无关。

如果线性微分方程的各项系数都是与时间无关的常数,则称这种系统为线性定常系统,或称时不变线性系统。如果描述系统微分方程的系数是时间的函数,则称该系统为线性非定常系统,或称时变线性系统。

2. 非线性系统

组成系统的元件中,有一个或多个元件的特性是用非线性微分方程来描述的,这种系统称为非线性系统。描述非线性系统的微分方程式中,输出量及其各阶导数不都是一次的,或者有的项的系数是输出量的函数。非线性方程没有一个完整统一的求解方法,也不能应用叠加原理。非线性系统的响应与初始状态有极大的关系。

二、随动系统、恒值系统及程序控制系统

1. 随动系统

这种系统的特点是输入量是预先未知的随时间任意变化的函数,要求系统的输出量能够以一定的准确度跟随输入量的变化而变化。随动系统也能克服多种扰动作用的影响,但一般来说扰动的影响是次要的。随动系统亦称伺服系统。

2. 恒值系统

这种系统的特点是输入量保持为常量,要求输出量亦等于一个常值,但由于扰动的存在,将使输出量偏离期望值,控制系统能根据偏差产生控制作用,使输出量回复到期望值,以克服扰动作用的影响。

3. 程序控制系统

这类控制系统的输入量是按预定规律随时间变化的函数,要求输出量迅速、准确地复现输入量。程序控制系统和随动系统的输入量都是时间的函数,不同之处在于前者是已知的时间函数,后者是未知的任意时间函数,而恒值控制系统也可视为程序控制系统的特

例。

三、连续系统和离散系统

1. 连续系统

连续系统是指系统各部分的信号都是连续函数形式的模拟量。

2. 离散系统

离散系统的特点是某一处或多处的信号是以脉冲列或数码的形式传递的系统。

§ 1-4 自动控制系统的研究内容和对系统的基本要求

自动控制系统虽然有不同的类型,但具有相类似的研究内容和方法。例如,已知系统的结构和参数时,研究它在某种典型输入信号作用下输出量变化的全过程,从这个变化过程得出其性能指标与系统的结构、参数的关系,这类问题叫做系统分析。对恒值系统来说,是研究典型扰动作用引起输出量的变化过程。对随动系统来说,是研究典型输入量变化时,输出量跟随输入量变化的过程。如果系统中扰动作用和输入量均在改变,则研究如何克服扰动的影响而使输出量跟随输入量的变化。

例如,研究随动系统在给定值为单位阶跃变化(如图 1-7(a)所示)的输出量的跟踪过程。由于系统中存在惯性,输出量不可能具有阶跃变化的跟踪过程。而通常如图 1-7(b)所示。

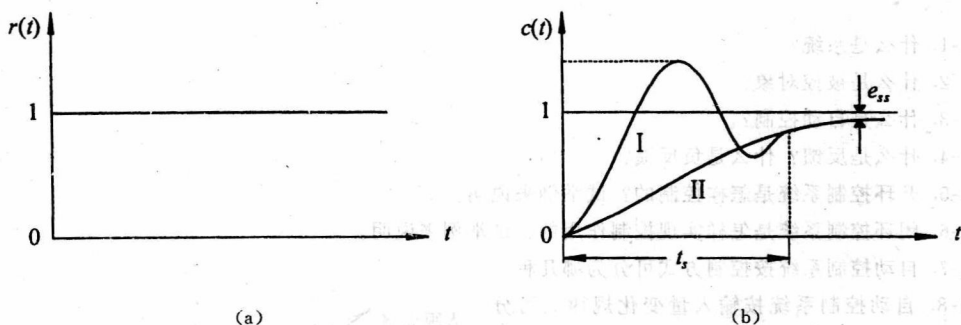


图 1-7 系统在阶跃输入时输出量跟踪过程

出现单调的或振荡的跟踪过程。随着时间的增长,输出量逐渐趋于它的期望值(或新的稳定值)。我们称阶跃加入后输出量的变化过程为暂态过程,时间足够大(理论上)以后,输出量趋于新的稳态值的变化过程为稳态过程。我们利用阻尼程度、反应输入信号的速度等来描述系统的暂态过程性能,用稳态误差来描述稳态时的性能。外作用加入后,系统须经过一段时间才能过渡到稳态,所以暂态过程也称作过渡过程。

但并不是所有的反馈控制系统在阶跃信号的作用加入后都具有如图 1-7 所示的变化过程。例如随动系统的情况,因为惯性的存在,跟踪过程开始时(即 $t=0$),输出量 $c(t)$ 的变化速度不会突变而是慢慢加大,随着时间的增加,输出量逐渐上升,它与输入的阶跃信号

之差即误差也将逐渐变小,当误差为零时,控制作用也为零,由于系统有惯性,输出量并不因控制作用为零而停在给定值上,仍以一定的速度继续运动,产生了反方向的误差。这时控制作用反向,使原来的跟踪速度逐渐减到零,并出现与反向控制作用相应的反向消除误差的运动。这样周而复始,出现振荡的跟踪过程。如果振荡的振幅保持不变(如图 1-8 中线 a)或随时间逐渐加大(图中线 b),或输出量单调增大(图中线 c)而无法保持在期望值上,这种跟踪过程叫做不稳定的跟踪过程,相应的系统为不稳定系统。从调节过程中输出量的变化情况来看,对系统进行分析,就是系统在给定信号的作用下,研究它的稳定性、暂态过程的进行情况,性能指标和稳态误差等问题。因此,对一般的反馈控制系统提出了以下基本要求:

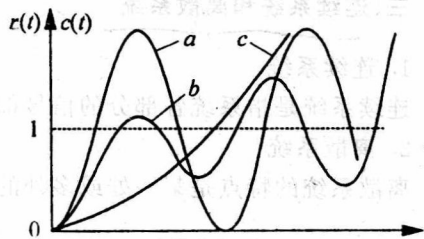


图 1-8 系统在阶跃输入时输出量的不稳定的跟踪过程

- 第一:系统必须是稳定的。不稳定的系统是无法正常工作的。
- 第二:暂态过程的进行情况和性能指标,例如,最大超调量、上升时间、调节时间等都应满足一定的要求。
- 第三:稳态时的情况,一般用稳态误差来描述。所谓稳态误差即稳态过程中时间趋于无穷大时系统输出量和期望值之差,它也应满足要求。

习 题

- 1-1. 什么是系统?
- 1-2. 什么是被控对象?
- 1-3. 什么是自动控制?
- 1-4. 什么是反馈?什么是负反馈?
- 1-5. 开环控制系统是怎样控制的?试举例来说明。
- 1-6. 闭环控制系统是怎样实现控制作用的?试举例来说明。
- 1-7. 自动控制系统按控制方式可分为哪几种?
- 1-8. 自动控制系统按输入量变化规律又可分为哪几种?其相互之间的区别是什么?
- 1-9. 自动控制系统主要是由哪几大部分组成的?各组成部分都有哪些功能?
- 1-10. 如图 1-9 所示,水池中,水源源不断地经阀门流进水池,而由出水管流出供用户使用。若要求在出水量随意改变的情况下,保持水位高度不变,试述人工操作的实现过程。

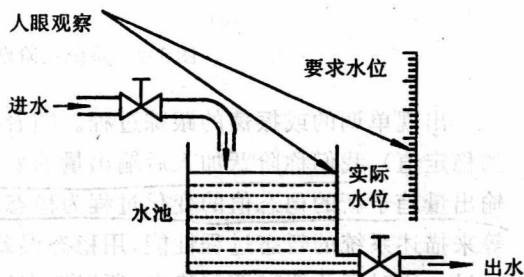


图 1-9 水池水流人工操作系统

- 1-11. 图 1-10 是液位自动控制系统原理示意图。在任何情况下,希望液面高度 c 维持不变,试说明系统工作原理,并画出方块图。

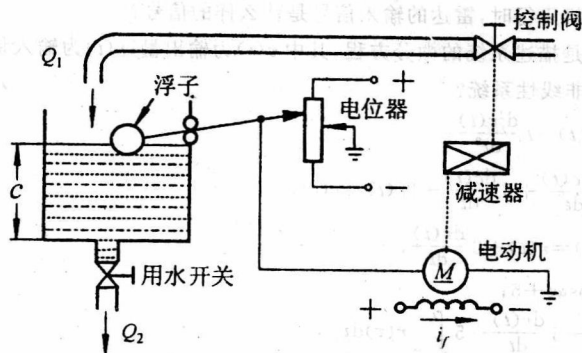


图 1-10 液位自动控制系统

1-12. 图 1-11 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，最后画出系统的方块图。

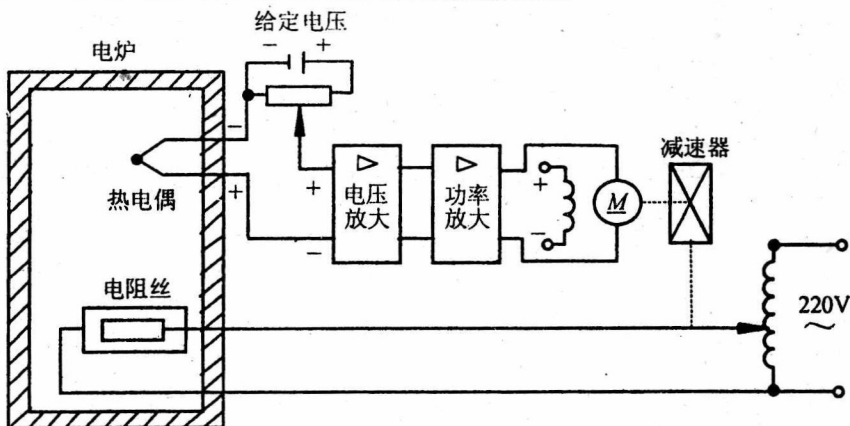


图 1-11 电炉温度控制系统原理图

1-13. 对自动控制系统的基本要求是什么？试举例来说明。

1-14. 图 1-12 是水温控制系统示意图。冷水在热交换器中由通入的蒸汽加热，从而得到一定温度的热水。冷水流量变化用流量计测量。试绘制系统方块图，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？

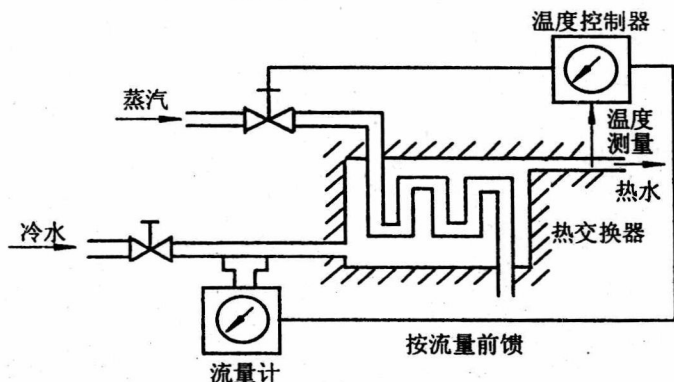
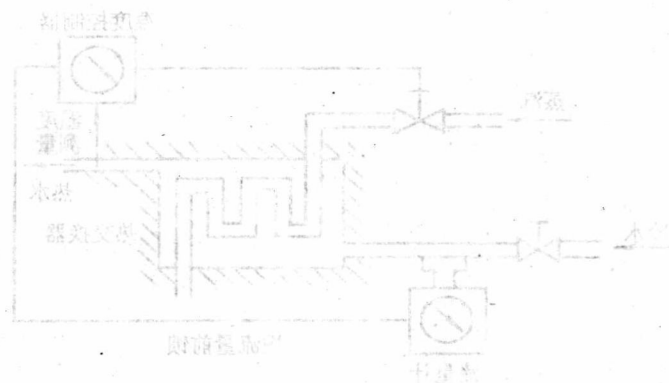
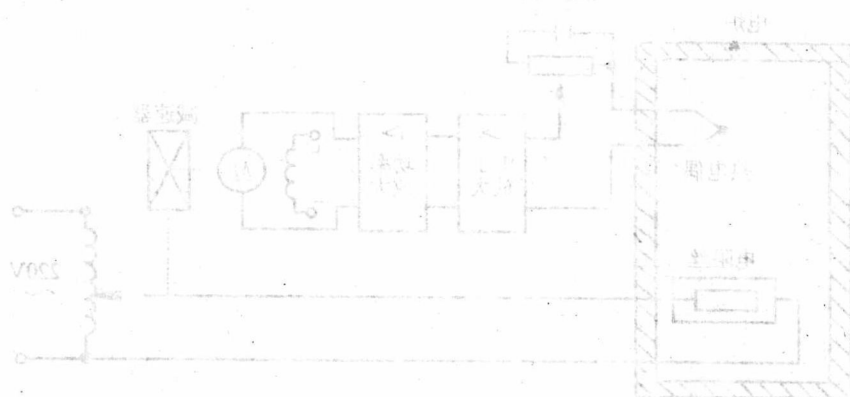


图 1-12 水温控制系统示意图

1-15. 在跟踪飞机飞行时,雷达的输入信号是什么样的信号?

1-16. 下列各式是描述系统的微分方程,其中 $c(t)$ 为输出量, $r(t)$ 为输入量,试判断哪些是线性定常或时变系统,哪些是非线性系统?

- (1) $c(t) = 5 + r^2(t) + t \frac{d^2 r(t)}{dt^2}$;
- (2) $\frac{d^3 c(t)}{dt^3} + 3 \frac{d^2 c(t)}{dt^2} + 6 \frac{dc(t)}{dt} + 8c(t) = r(t)$;
- (3) $t \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = r(t) + 3 \frac{dr(t)}{dt}$;
- (4) $c(t) = r(t) \cos \omega t + 5$;
- (5) $c(t) = 3r(t) + 6 \frac{dr(t)}{dt} + 5 \int_{-\infty}^t r(\tau) d\tau$.



第二章 控制系统的数学模型

控制系统的数学模型就是描述系统变量之间关系的数学表达式。我们要想设计一个自动控制系统，就要求系统能达到一定的性能指标，也就是说系统的暂态性能能满足要求，这就需要对系统的暂态过程进行理论分析，掌握其内在规律。为此，就必须将系统的暂态过程用一个反映其运动状态的方程式表达出来，以便进行分析。所以了解和掌握系统的数学模型是非常重要的。在自动控制系统的分析设计中，只有真正准确地掌握了系统的数学模型，我们才能对系统进行分析，准确了解其性能特点，才能以此为依据，将系统设计成我们所要求的状态，实现给定的任务。

数学模型有静态模型和动态模型。所谓静态模型是指在静态条件下（即变量的各阶导数为零），描述各变量之间关系的数学方程。在动态过程中，各变量之间的关系用微分方程描述，称为动态模型。由于微分方程中各变量的导数表示了它们随时间变化的特性，如一阶导数表示速度，二阶导数表示加速度等，因此，微分方程完全可以描述系统的动态特性，本章主要研究控制系统的动态数学模型，简称为数学模型。

上一章中我们已经介绍过自动控制系统有线性系统和非线性系统，这就是以数学模型来划分的。线性系统满足叠加原理。绝大多数控制系统，在一定的限制条件下，都可以用线性微分方程来描述。有一部分非线性系统在一定的近似条件下，可以当作线性系统来研究，并且线性系统的研究有一整套的成熟方法，因此，线性系统的研究具有重要的实用价值。

§ 2-1 微分方程

一个控制系统是由许多环节组成，为了建立控制系统的数学模型，我们应当首先建立各环节的数学模型。下面我们通过例子来说明数学模型的建立方法。

数学模型的建立，常用的有两种方法，一种是分析法，即依据各环节所遵循的物理学定律，如机械、电气、热力等方面的基本定律，通过理论推导的方法建立；另一种方法是实验法，即根据实验数据进行整理建立。这里我们着重讨论理论推导的方法。

例 2-1 列写图 2-1 所示的 RLC 串联电路的微分方程。

解：(1) 确定电路的输入量和输出量。

$u_i(t)$ 为输入量 $u_o(t)$ 为输出量。

(2) 依据电路所遵循的电学基本定律列写微分方程。

设回路电流为 $i(t)$ ，依基尔霍夫定律，则有

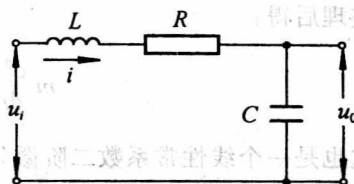


图 2-1 RLC 无源网络