

中等专业学校教材

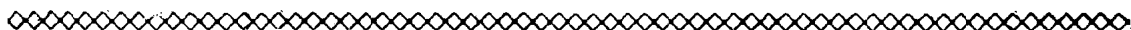


自动控制原理

武汉电力学校 卢盛镐 主编



中等专业学校教材



自动控制原理

武汉电力学校 卢盛镐 主编

中国电力出版社

内 容 提 要

本书对线性定常的自动控制系统,从控制方式、数模建立、品质分析、稳定判别、综合校正和采样控制等方面,按照循序渐近的原则,由浅入深,作了比较全面的介绍。全书着重于基本概念的阐述和基本方法的应用。书中的例题与习题,均与基本内容紧密配合,以培养分析问题和解决问题的能力。

本书系中等专业学校电力系统继电保护专业自动控制原理课程教材,也可供从事自动化的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/卢藏镐主编.--北京:中国电力出版社
1992.11 (1998重印)
中等学校教材
ISBN 7-80125-664-6

I.自… II.卢… III.自动控制理论-专业学校-教材
IV.TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第03129号

中国电力出版社出版

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

冶林印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

1992年11月第一版 1998年9月北京第二次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 11.75印张 260千字
印数 7191—11530册 定价 11.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

本书根据一九八八年水利电力部中等专业学校电力类教研会确定的“自动控制原理”课程教学大纲编写。

书中对线性定常连续的自动控制系统,从控制方式、数模建立、品质分析、稳定判别及综合校正等方面作了较全面的阐述,同时也简要介绍了线性定常离散系统中的采样控制。考虑到中专学生的特点,全书着重于物理概念的阐述和基本方法的应用。书中的例题和习题,均与基本概念、基本方法紧密配合,以培养用控制方法分析和解决问题的能力。

本书虽然是针对中等专业学校电力系统继电保护专业而编写的,但它的基本原理和主要内容仍适应于其它专业之所需。对于从事自动化工作的技术人员也是一个入门的楔子。

全书共六章。除第三章第三节和第四章第五节以及第六章由叶荣编写外,其它部分均由卢盛镐编写。全书由卢盛镐任主编。书稿承沈阳电力专科学校蔡元宇教授审阅。

全书在编写过程中,得到了电力类教研会及其继电保护课程组全体同志的热情支持和关怀,特别是蔡元宇教授亲自指导,对初稿进行了认真地审阅和详细地批改;同时,华中理工大学叶济忠教授、武汉化工学院舒忠烈副教授也提出了宝贵的意见;武汉电力学校严学斌工程师对计算程序的编制调试和习题答案作了大量的工作。在此一并表示最诚挚的感谢。

限于编者水平,书中错误和不妥之处在所难免,恳请批评指正。

编 者

1990.7

目 录

前 言

第一章 自动控制系统的基 本 概 念	1
第一节 概 述	1
第二节 基本控制方式	1
第三节 典型输入信号	4
第四节 对自动控制系统的品质要求	7
习 题	8
第二章 自动控制系统的数 学 模 型	11
第一节 拉普拉斯变 换	11
第二节 传递函 数	16
第三节 动态结构 图	22
第四节 自动控制系统的传递函 数	34
习 题	36
第三章 自动控制系统的品 质 分 析	39
第一节 用时域法分析系统品 质	39
第二节 用频域法分析系统品 质	56
第三节 时域响应的机辅分 析	79
习 题	87
第四章 自动控制系统的稳 定 性 分 析	92
第一节 稳定性的基本概 念	92
第二节 时域稳定判 据	95
第三节 频域稳定判 据	101
第四节 自控系统的相对稳定 性	109
第五节 自控系统稳定性的机辅分 析	115
习 题	120
第五章 自动控制系统的综合校正	124
第一节 概 述	124
第二节 校正方 案	124
第三节 基本控制规 律	127
第四节 常用校正网 络	132
第五节 系统校正举 例	140
习 题	146
第六章 采样控制系统	150
第一节 采样控制系统的基本概 念	150

第二节 Z 变换.....	155
第三节 脉冲传递函数.....	161
第四节 采样控制系统的稳定性分析.....	167
习题.....	171
部分习题答案.....	174
参考文献.....	179

第一章 自动控制系统的基本概念

第一节 概 述

自动控制技术,已被广泛地应用于国防、科技和国民经济的各个领域,并且随着生产、科技和国民经济的不断发展,它将显示着巨大的作用。

所谓自动控制,就是在没有人的直接干预下,利用控制装置的控制作用,使被控制对象(如机器、设备或生产过程)自动地按照预定规律运行(变化)。这种由控制装置和被控对象组成的系统就是自动控制系统。

一般来说,系统是指由若干个互相关联的单元(环节)组成的并用来达到某种特定目标的有机整体。就这个意义而言,系统当然可指电力系统、通讯系统和机械系统等物理系统,政治组织、经济结构和生产管理等非物理系统,计算机网、交通运输网、交响乐团等人机系统以及自然界中的生物系统。而且随着科学技术的不断发展,系统的规模越来越大,内部结构也日益复杂。人们研究系统理论并应用于工程实际,以期使复杂的系统最佳地满足预定要求,因而出现了系统工程学这个新兴的边缘学科。控制论(包括工程控制论、经济控制论和生物控制论)就是这个学科的基础。自动控制原理只是工程控制论的一个分支,着重研究自动控制系统的运动特性。

依据输入量的特性和输出量遵守的规律,自动控制系统可分为线性与非线性系统、连续与离散系统、确定与不确定系统、恒值与程序系统,单输入-单输出与多输入-多输出系统以及由它们综合组成的线性连续系统、线性时变与时不变(定常)系统等等。

形形色色的自动控制系统,均依赖于具有普遍规律的自动控制原理。然而,对系统的分析往往先从线性定常系统入手,这不仅因为实际应用中经常遇到这种系统,还有些非线性系统或时变系统在限定范围内和指定条件下,也遵守线性定常系统的规律。况且,线性定常系统的分析方法已经形成严密体系,日渐完善成熟;而非线性系统与时变系统的研究虽有进展,但仍有困难,目前还不能总结出令人满意的具有普遍意义的分析方法。

第二节 基本控制方式

人们为了有效地完成任何一项工作任务,总要经常不断地了解工作动态,观测实际结果,调查阻碍正常工作顺利进行的各种因素和条件,这个步骤称为观测(调查);然后将所获得的各方面情况进行分析对比,看看实际结果与预期目标有何差异,并作出新的安排,这叫做分析比较(决策);第三步是根据新的安排去执行,进一步再观察实际结果、再分析决策、再执行,循环往复直至工作完成。

人们完成工作的这些职能可用方框图 1-1 表明。图中的方框表示各种工作职能，箭头表示它们之间的信息流向。

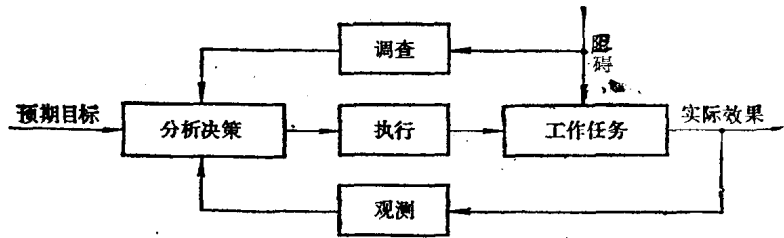


图 1-1 人工职能图

上述工作过程的人工职能，若用工程装置和技术语言来替代，则工作任务就是被控制的对象；调查、观测是由一些检测装置、传感器或变换器等完成；而分析、决策则由一些具有比较、放大和计算功能的部件来完成；实际效果叫被控制量，它是反映被控对象的状态或过程的物理量；预期目标就是指给定指令或参考输入。一个自动控制系统，就是通过控制装置的控制作用，使被控量与给定指令相对应。干扰是一切影响或破坏被控量与给定指令相对应的物理量。于是可得自动控制系统的原理方框图如图1-2 所示。

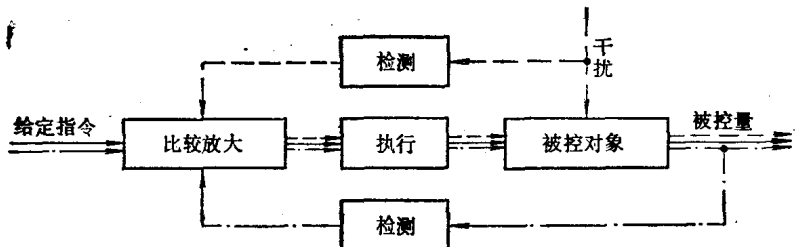


图 1-2 自动控制系统的原理方框图

由图1-2 可见，作为主要控制依据的物理量是给定指令、干扰和被控量，因而可获得三种基本的控制方式，即按给定指令操纵（图中实线）的开环方式和按干扰补偿（图中虚线）的开环控制方式以及按偏差调节的闭环（反馈）控制方式（图中点划线）。

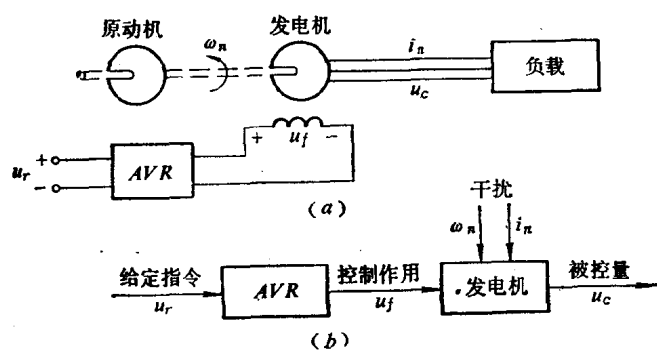


图 1-3 开环状态的发电机励磁系统
(a)电气接线图；(b)原理方框图

下面用具体实例来说明这些控制方式的原理、基本特点和主要性能。

一、按给定指令操纵

图1-3(a)为发电机励磁系统的电气接线图，其任务是使发电机的输出电压 u_c 依据参考输入电压 u_r 而变化。图中，三相同步发电机在原动机（如汽轮机、水轮机）带动下，切割由励磁电压

u_r 所产生的磁场而发电,向负载供电。磁场强弱由自动电压调整器AVR来控制,操纵AVR的恰是指令电压 u_r 。因此,发电机的出口电压 u_c (被控量)将依据 u_r (给定指令)的取值而由AVR操纵,故称为按给定指令操纵的控制方式,其原理方框图如图1-3(b)。

由图可见,这种控制方式的特点是,给定指令是控制依据,从给定指令至被控量的信号是单方向传递的。显然,由于实际负荷电流 i_n 的不断变化及原动机转速 ω_n 的不恒定,均可能使被控量 u_c 偏离期望值,故这种控制方式的控制精度不能保证。

二、按干扰补偿

上述 i_n 、 ω_n 就是对发电机工作状态(由被控量 u_c 表征)的干扰,如果能将它们检测出来,并引入到输入端,利用AVR的控制作用来抵消它们对 u_c 的直接影响,这就构成了按干扰补偿的控制方式。例如用电流互感器加装在发电机的定子电流回路中,将检测的 i_n ,经整流器变换成相应的直流信号,送入AVR中,如图1-4(a)所示,就可以实现对 i_n 的补偿,故称这种控制方式为按干扰补偿,其原理方框图如图1-4(b)所示。

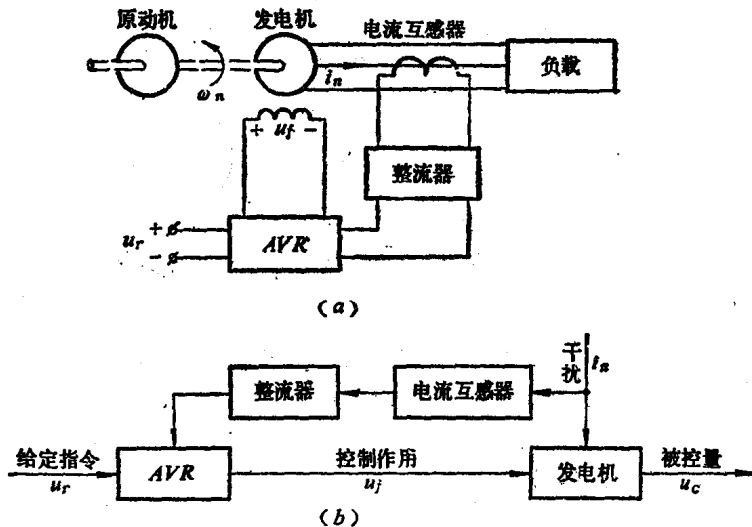


图 1-4 带补偿的开环励磁系统

(a)电气接线图;(b)原理方框图

由图可见,该控制方式的特点是,干扰是控制的依据,信号仍为单方向传递。只是从 i_n 至 u_c 有两条通道:一是直接影响 u_c ,二是经AVR影响 u_c ,只要控制作用选择得适当,完全可以抵消 i_n 的直接影响,因此又称完全补偿。

以上两种控制方式,其信号均单向传递,系统处于开环状态,通称为开环控制方式。对于开环控制系统,虽然采取了电流补偿措施,仍不可能使被控量 u_c 达到令人满意的期望值。原因是还有 ω_n 变化的影响未能补偿。此外,发电机定子、转子温度的变化,控制装置本身参数的变化等众多的影响因素不可能一一补偿,有些干扰因素甚至无法检测,更不能补偿,因此,系统的控制精度也不高。

三、按偏差调节

按偏差调节原理方框图见图1-2中点划线部分。这种控制方式原理是,将被控量反馈

至输入端与给定指令比较, 依据检测的偏差产生控制作用, 只要被控量与给定指令不对应, 就会出现偏差, 而系统的控制作用直至偏差等于零时为止。因此, 无论来自何方的影响因素, 均可由系统自动补偿。故这种控制方式的特点为: 偏差是控制依据, 信号在通道中往返传递, 为闭环(反馈)控制方式, 该系统也称为闭环控制系统。这种系统具有较高的控制精度, 在实际中广泛采用。

在上述励磁系统中, 只要将测量 i_n 的电流互感器, 换装成测量 u_c 的电压互感器, 如图1-5(a), 再整流成直流电压 u_{c2} , 反馈至输入端与 u_r 比较, 获得偏差电压 u_e , 使AVR产生控制作用。因此, 无论是负载电流的变化, 还是原动机转速的变化, 甚至系统本身参数的变化等等, 均可由 u_c 的变化反映出偏差, 只要偏差存在, 就产生控制作用, 直至被控量与给定指令相对应为止, 其原理方框图为图1-5(b)。

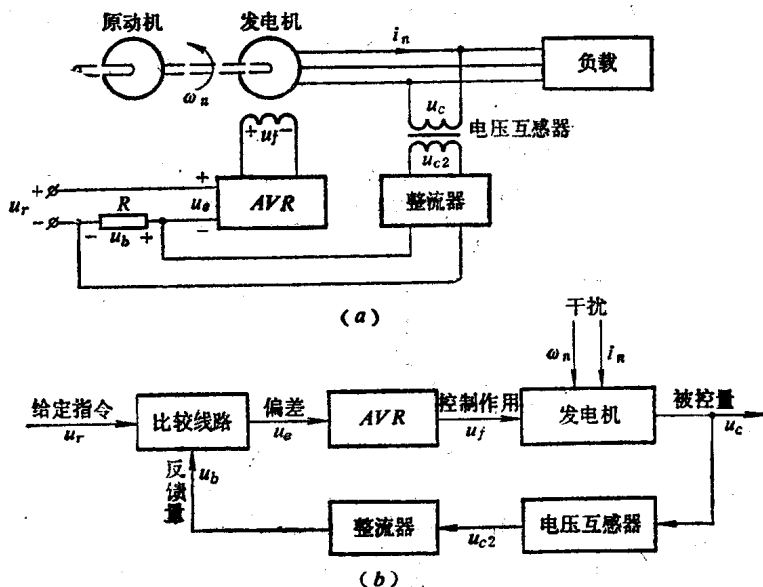


图 1-5 闭环状态的发电机励磁系统
(a)电气接线图; (b)原理方框图

综上所述, 一个自动控制系统是由被控对象和控制装置所组成的, 其任务是使被控量对应(跟踪、复现)给定指令, 这可通过开环或闭环两种控制系统来实现, 其中控制装置具有检测(变换)、比较(计算)和执行的功能。一些新型的控制系统(最优滤波、最优识别、最优控制)也都是在这几种基本控制方式的基础上发展起来的, 所以掌握这几种基本控制方式是至关重要的。

第三节 典型输入信号

自动控制系统是一个动态系统, 它的输出响应与输入激励(给定指令)的形式有关, 输入激励不同, 响应也就不同。在自控系统中, 由于实际的输入激励具有随机的性质, 致使一个自控系统成为一个不确定的系统, 因而对它的分析计算也就十分困难。然而却可以选用某些最不利但又典型的信号模拟这种实际激励, 来进行系统分析。

常用的典型输入激励有下述几种信号。

一、阶跃信号

阶跃信号波形如图1-6(a)和图1-6(b)，其数学表达式分别为

$$\begin{aligned} r(t) &= \begin{cases} 0 & t < 0 \\ A & t \geq 0 \end{cases} \\ r(t-t_0) &= \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ A & t \geq t_0 \end{cases} \end{aligned} \quad (1-1)$$

它们分别在 $t = 0$ 和 $t = t_0$ 时发生跳变。

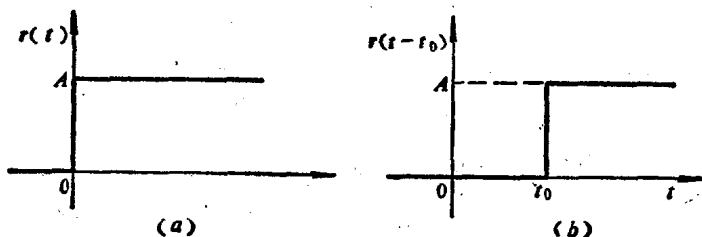


图 1-6 阶跃信号
(a)瞬时; (b)延时

若 $A = 1$ ，称单位阶跃信号，分别记为： $1(t)$ 和 $1(t-t_0)$ 。

阶跃信号可模拟参考输入的突然改变，如用电负荷的突增或突减。

二、斜坡信号

斜坡信号波形如图1-7(a)和图1-7(b)。其数学表达式分别为

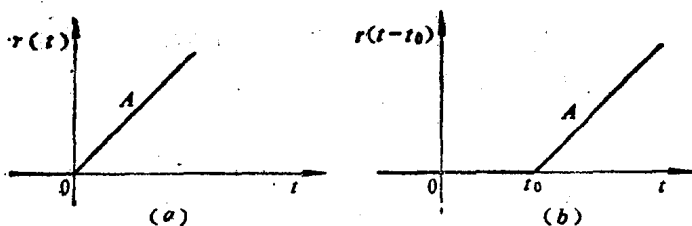


图 1-7 斜坡信号
(a)瞬时; (b)延时

$$\begin{aligned} r(t) &= \begin{cases} 0 & t < 0 \\ At & t \geq 0 \end{cases} \\ r(t-t_0) &= \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ A(t-t_0) & t \geq t_0 \end{cases} \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中 A 为斜率。若 $A = 1$ ，称单位斜坡信号。

斜坡信号又称等速信号，可模拟线性变化的信号。

三、抛物线信号

抛物线信号波形如图1-8(a)和图1-8(b)，其数学表达式分别为

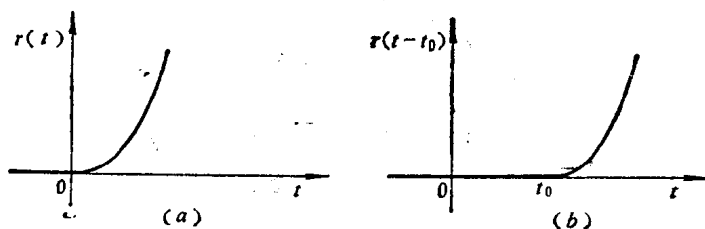


图 1-8 抛物线信号

(a)瞬时; (b)延时

$$r(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \frac{1}{2}At^2 & t \geq 0 \end{cases} \quad (1-3)$$

$$r(t-t_0) = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ \frac{1}{2}A(t-t_0)^2 & t \geq t_0 \end{cases}$$

若 $A=1$ ，称单位抛物线信号。

该信号可模拟加速度变化，也称加速度信号。

四、冲激信号

冲激信号是一个理想信号，为了用数学描述该信号，先看看矩形脉冲的演变情况。

图1-9(a)所示矩形脉冲，底为 τ ，高为 $\frac{A}{\tau}$ ，面积等于 A 。若 τ 不断减小，但面积仍为 A ，则高 $\frac{A}{\tau}$ 将不断增加，在极限情况下，令 $\tau \rightarrow 0$ ，则 $\frac{A}{\tau} \rightarrow \infty$ ，面积还是 A 。这种情况说明了在 $t=0$ 时，存在着一个无限的“冲击”；而在 $t \neq 0$ 时，无“冲击”（其高为0），用图1-9(b)表示，称为冲激信号，图中的 A 表示冲激强度。

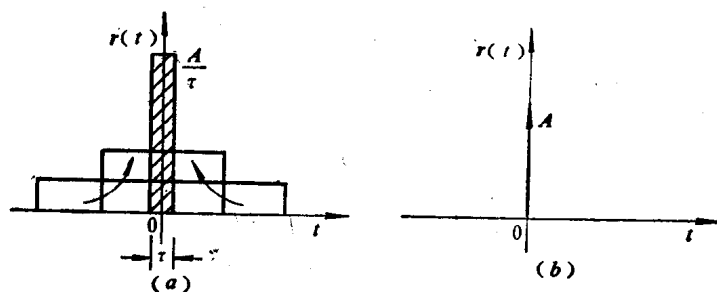


图 1-9 冲激信号

(a)演变过程; (b)表示方法

若 $A=1$ ，称单位冲激信号，又名 δ 或狄拉克信号，其波形如图1-10(a)和图1-10(b)，在数学上可分别表示

$$r(t) \Rightarrow \left\{ \begin{array}{ll} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 & t = 0 \\ \delta(t) = 0 & t \neq 0 \end{array} \right. \quad (1-4)$$

$$r(t-t_0) \Rightarrow \left\{ \begin{array}{ll} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-t_0) dt = 1 & t = t_0 \\ \delta(t-t_0) = 0 & t \neq t_0 \end{array} \right.$$

冲激信号可模拟雷电对电网的袭击，各种可能情况对汽轮机，水轮机的冲击；特别是用于采样控制系统描述离散信号十分有用（见第六章）。

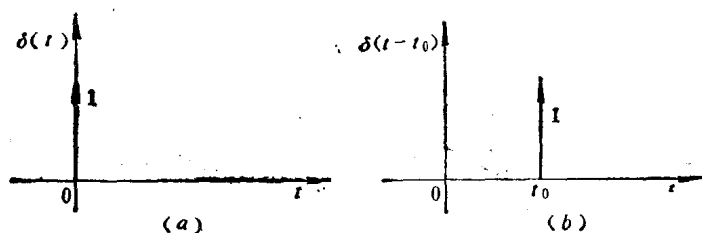


图 1-10 δ 信号
(a)瞬时; (b)延时

五、正弦信号

正弦信号的波形如图1-11(a)和图1-11(b)，其数学表达式分别为

$$r(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ A \sin \omega t & t \geq 0 \end{cases} \quad (1-5)$$

$$r(t-t_0) = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ A \sin \omega(t-t_0) & t \geq t_0 \end{cases}$$

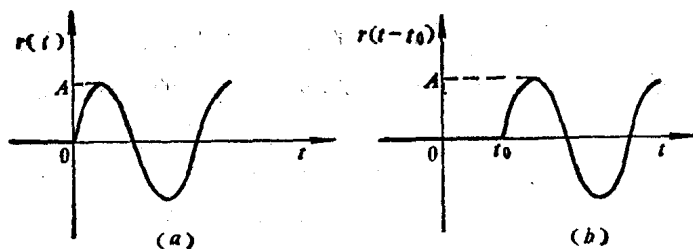


图 1-11 正弦信号
(a)瞬时; (b)延时

究竟采用哪种典型信号作为系统的输入激励，取决于系统正常工作下常用而又最不利的输入形式，或是它们的叠加信号（见习题1-6）。

第四节 对自动控制系统的品质要求

自动控制系统的运动特性，在理想情况下，任何时候都不受干扰的影响，始终保持被

控量 $c(t)$ 与给定值 $r(t)$ 相对应, 即

$$c(t) \equiv r(t) \quad (1-6)$$

然而, 实际系统中, 由于惯性的存在, 能量又不能突变, 致使被控量不可能跟踪给定值的变化, 而需要经历一定时间的过渡过程。评价这种运动特性的品质 (总体控制精度) 可用稳定性、快速性和准确性三方面来衡量。

(1) 稳定性 指系统动态过程的振荡倾向和它恢复平衡工作的能力。当输入指令 $r(t)$ 变化后, 系统 $c(t)$ 不能跟踪指令的变化, 而且偏离越来越大, 如图1-12(a)的曲线③; 或系统受 $n(t)$ 扰动后, 偏离原始平衡状态, 而控制装置再也无法使其恢复, 如图1-12(b)的曲线③。这种不稳定的系统是不能完成自动控制任务的, 所以稳定性是系统正常工作首要条件。

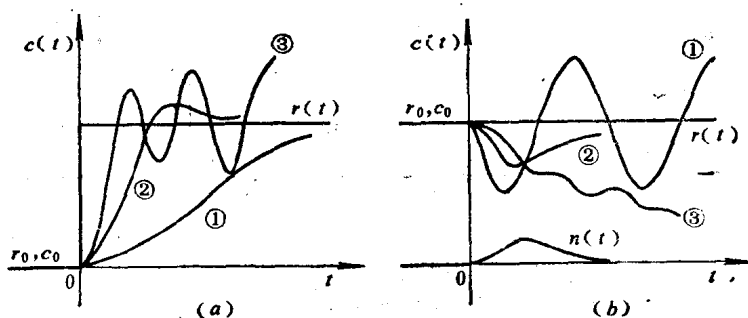


图 1-12 控制系统的动态过程
(a)跟踪过程; (b)扰动过程

(2) 快速性 指稳定系统动态过程的时间长短。动态时间过长, 说明系统迟钝。它一方面反映跟踪指令能力差, 如图1-12(a)的曲线①; 另一方面也反映恢复平衡能力弱, 如图1-12(b)的曲线①。一个好的自控系统, 希望动态时间短, 如图1-12(a)、(b)中的曲线②。

(3) 准确性 指系统跟踪指令变化达到新的平衡状态后, 或系统受扰重新恢复平衡后, 被控量与给定值的偏差大小。它反映系统动态过程所保持的最终精度, 一般用稳态误差这个指标来衡量。

由于各种控制系统的被控对象不同, 对稳定性、快速性、准确性三方面的要求也不一样, 即使是同一系统, 这三方面也相互制约: 提高快速性, 可能导致系统强烈振荡; 改善稳定性, 又使动态时间拉长, 甚至不能保证最终精确性。尽管系统工作要受到多方面因素的影响, 但决定控制品质的根本因素, 还是系统自身的固有特性。

因此, 学习自动控制原理, 一方面了解自控系统的固有特性, 另一方面还要依据对系统品质的不同要求, 采取有效的方法去改善它们的性能, 使其具有最佳的工作状态。

习 题

1-1 自控系统中, 有哪几种基本控制方式? 各有什么特点?

1-2 试举几个日常生活中属开环和闭环自动控制系统的例子，画出其原理方框图，说明工作原理。

1-3 图1-13为晶体管稳压电源装置。试画其原理方框图，并指出装置里哪些元件起着检测、放大和执行的作用？系统的干扰量和给定值是什么？

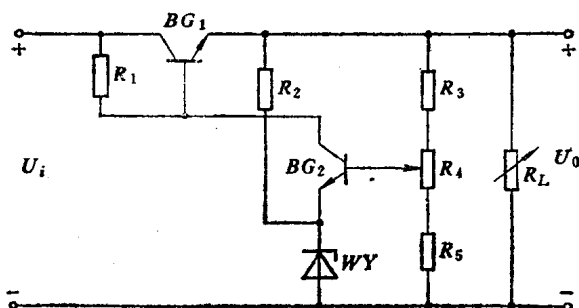


图 1-13 习题1-3图

1-4 大门开闭的自动控制系统如图1-14所示，试说明自动控制大门开启与关闭的工作原理，并画出其原理方框图。

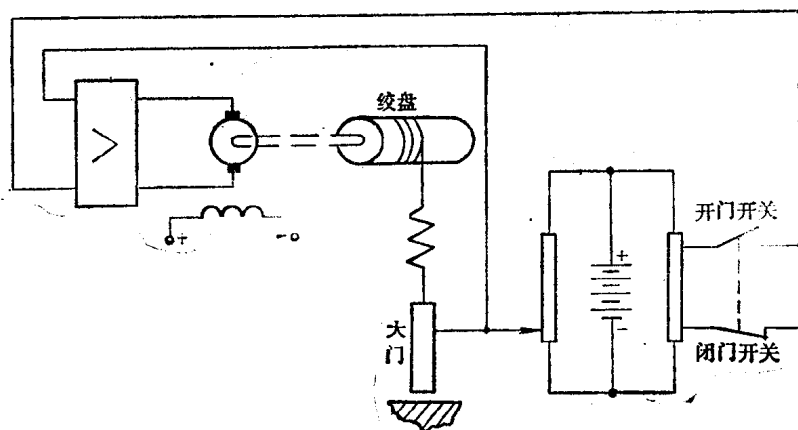


图 1-14 习题1-4图

1-5 试分析图1-15所示水位控制系统工作原理。指出①（浮子）、②（杠杆）和③（进水阀）各起什么作用？该系统的被控对象是什么？给定值、被控量和干扰量又是什

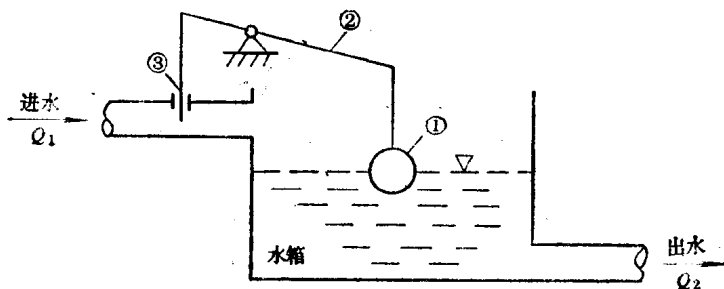


图 1-15 习题1-5图

么？画出其方框图。

1-6 试用典型信号写出图1-16所示波形的数学表达式。

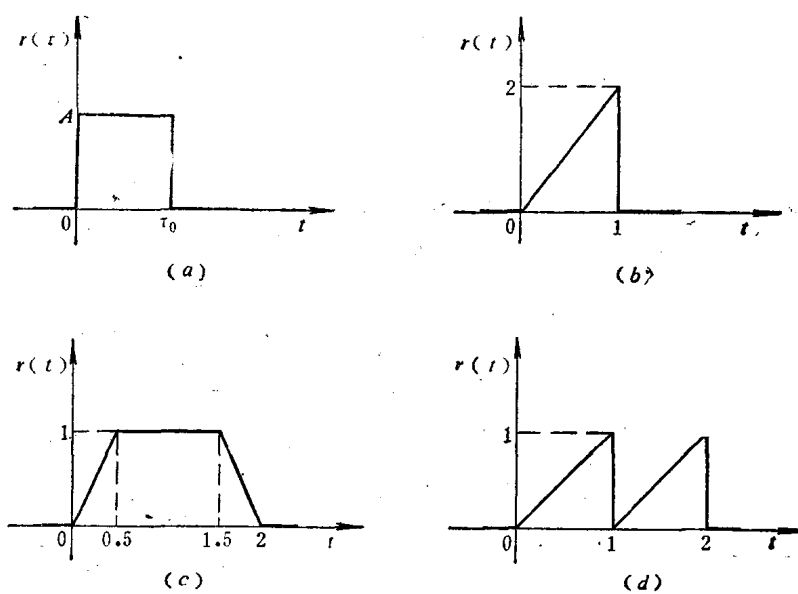


图 1-16 习题1-6图

1-7 自控系统有哪些性能要求？它们之间的关系如何？

第二章 自动控制系统的数学模型

为了分析和计算自动控制系统的动态特性,首先要建立它的数学模型。

描述自动控制系统的数学方法可分为两大类:一是输入-输出描述法,适用于单输入-单输出系统;另是状态变量描述法,适用于多输入-多输出系统。

在经典控制论中,采用输入-输出描述法,它反映系统输入与输出变量间的关系。工程上常用的数学模型有:传递函数、动态结构图。

数学模型可通过解析与实验两种方法建立。然而在建模过程中,必须很好地处理模型的简化性与反映系统动态准确性间的矛盾。通常采用的方法是:根据系统的主要物理特性,忽略次要因素,先建立一个简单模型,然后根据精度要求逐步完善,再建立一个完善的模型。

本章在复习拉普拉斯变换(Z变换在第六章介绍)的基础上,逐一讨论数学模型的建立方法。

第一节 拉普拉斯变换

拉普拉斯变换在科技领域内得到了广泛的应用,在经典控制论中更是如此。

一、拉普拉斯变换的定义

如果实变量 t 的函数 $f(t)$ (称原函数),存在着积分

$$\int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (s=\sigma+j\omega \text{ 为复变量})$$

则称其为 $f(t)$ 的拉普拉斯正变换(简称拉氏变换)或称为象函数,记为

$$F(s) = \mathcal{L}[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (2-1)$$

二、拉氏变换的几个重要定理

根据定义式(2-1),可以求出一些简单原函数 $f(t)$ 的象函数 $F(s)$,见表2-1。但较为复杂的 $f(t)$,要用到下面的定理。

(一) 线性定理

线性定理包含两个内容:原函数之和的拉氏变换等于各函数拉氏变换之和,称叠加性;原函数乘以常数的拉氏变换等于其象函数乘以相同的常数,称齐次性。归纳起来为:

若 $\mathcal{L}[f_1(t)] = F_1(s)$ 、 $\mathcal{L}[f_2(t)] = F_2(s)$, K_1 、 K_2 为常数,则有

$$\mathcal{L}[K_1 f_1(t) \pm K_2 f_2(t)] = K_1 F_1(s) \pm K_2 F_2(s) \quad (2-2)$$