

自动控制原理 学习指南

主编 冯 江 王晓燕

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

208

2007

自动控制原理学习指南

主 编 冯 江 王晓燕
副主编 钟 山 赵书玲
主 审 王新民

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内容简介

本书按照教育部颁发的《高等工科院校自动控制理论课程教学基本要求》，本着加强基础、拓宽专业、培养学生的自学能力和知识更新能力的指导思想，将自动控制理论的知识点进行了归纳和总结，对教学内容进行了浓缩、提炼和适当、有益的补充，并精心设计组编了相应的典型例题。

本书同时具有授课讲义、学习纲要、理论手册和解题指南的作用。全书力求语言简洁、重点突出、便于查阅和复习，着重对相关的重要、难点进行详细剖析，特别注重“一题多解”的指导和启发，使读者彻底理解和掌握自动控制的基本原理和基本方法，并达到举一反三、事半功倍之效。

本书可以作为自动化、电子、电气、信息与通信、计算机、机械等专业学生学习自动控制原理和参加相关考试的复习参考资料。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理学习指南/冯江,王晓燕主编. —北京:北京理工大学出版社,2007. 1.

ISBN 978-7-5640-0980-9

I. 自... II. ①冯... ②王... III. 自动控制理论—高等学校—教学参考资料 IV. TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第156325号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京圣瑞伦印刷厂

开 本 / 787毫米×1092毫米 1/16

印 张 / 12.75

字 数 / 303千字

版 次 / 2007年1月第1版 2007年1月第1次印刷

印 数 / 1~5000册

责任校对 / 陈玉梅

定 价 / 18.00元

责任印制 / 母长新

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前 言

自动控制理论是自动控制、自动化、电气、仪表及测控、电子信息、通信、机械等专业的一门重要技术理论基础课程。在课时压缩、教学要求提高的条件下,许多教师和学生都迫切希望拥有一本与教材相配套的系统性强、指导性强、纲要性强的教学参考书。

按照教育部颁发的《高等工科院校自动控制原理课程教学基本要求》,秉着加强基础、拓宽专业、培养学生的自学能力和知识更新能力的指导思想,针对自动控制理论课程的特点,并结合编者长年从事该课程一线教学的经验和体会,特在沿用多年的讲义、资料的基础上编写了本书。希望对广大师生有所帮助,并起到抛砖引玉的效果。

本书作为自动控制理论课程的教学辅导用书,书中的体系结构和符号说明等均力求与教材相一致,同时尽量采用全国自动化名词审定委员会公布的规范名词。全书共划分为一般概念、数学模型、时域分析法、根轨迹法、频域分析法、校正方法、离散系统、非线性控制系统八章。每一章均由教学要求、理论纲要和典型范例三部分组成。

(1)“教学要求”部分:对教材各章节的知识点进行了归纳和总结,划分为“了解”、“理解”、“掌握”和“熟练掌握(应用)”四个层次,同时给出了每个章节的重点和难点,以方便读者在学习和系统复习中比照,对教师的备课、授课也有很好的明确指导作用。

(2)“理论纲要”部分:对教学内容进行了浓缩、提炼,并作了适当、有益的补充,力求语言简洁、重点突出、便于查阅和复习。这部分内容同时具有授课讲义、学习纲要、控制理论手册的作用,使读者能够迅速全面地掌握控制理论知识,达到事半功倍的效果。

(3)“典型范例”部分:精心设计组编了相应的典型例题(几乎覆盖了相应的所有题型)。着重对相关的重、难点进行详细剖析,特别注重“一题多解”的指导和启发,同时附有解题小结或讨论。可使读者彻底理解和掌握控制理论的基本原理和基本知识,并达到举一反三的效果。

本书由江西理工大学冯江和王晓燕担任主编并担负了大部分内容的编写工作,钟山和赵书玲担任副主编负责全书的统稿工作。参与编写和校对的人员还有:卢帆兴、张晓莉、温如春等。全书由西北工业大学自动化学院院长、博士生导师王新民教授主审。还有很多同事和同行参与了编写纲要的讨论,限于篇幅不能一一列写。没有他们的热情支持和帮助,本书不可能如此顺利地和大家见面。在此,对他们表示衷心的感谢和崇高的敬意!

“十年磨一剑,三年成本书。”为给读者奉献一本精品辅导教材,我们“编修千日”,字里行间无不饱浸着众多编者的心血。当然由于编者水平有限,书中内容虽经仔细斟酌,仍然可能存在纰漏和不妥之处,恳请广大读者不吝赐教为盼,以便本书的修订、补充和再版,更好地为读者服务。我们的联系邮箱为 Teacher. F@163. com

编 者
于赣州八境台

目 录

第一章 自动控制的一般概念	1
一、教学要求.....	1
二、理论纲要.....	1
(一) 自动控制的概念及理论.....	1
(二) 自动控制系统的基本组成.....	2
(三) 自动控制系统的分类.....	2
(四) 自动控制的基本方式以及负反馈控制原理.....	3
(五) 对控制系统的基本要求.....	5
(六) 控制系统的典型外作用函数.....	5
三、典型范例.....	7
第二章 控制系统的数学模型	10
一、教学要求.....	10
二、理论纲要.....	11
(一) 数学模型概述.....	11
(二) 控制系统的微分方程.....	11
(三) 控制系统的传递函数.....	12
(四) 数学模型的实验测定.....	13
(五) 结构图与信号流图.....	15
(六) 梅森(Mason)增益公式.....	18
三、典型范例.....	18
第三章 线性系统的时域分析法	35
一、教学要求.....	35
二、理论纲要.....	36
(一) 系统时间响应的性能指标.....	36
(二) 控制系统的动态性能.....	37
(三) 控制系统的闭环零极点.....	39
(四) 控制系统的稳定性判定.....	40
(五) 系统的稳态误差.....	42
三、典型范例.....	45
第四章 线性系统的根轨迹法	56
一、教学要求.....	56
二、理论纲要.....	57

(一) 根轨迹的概念	57
(二) 常规根轨迹的绘制	58
(三) 零度根轨迹	60
(四) 时滞根轨迹	61
(五) 参数根轨迹	62
(六) 根轨迹的综合与应用	63
三、典型范例	64
第五章 线性系统的频域分析法	75
一、教学要求	75
二、理论纲要	76
(一) 系统的频域分析法和频率特性	76
(二) 频率特性的几何表示	77
(三) 典型环节的频率特性	78
(四) 开环幅相曲线(Nyquist 图)的绘制	80
(五) 开环对数频率曲线(Bode 图)的绘制	81
(六) 尼科尔斯(Nichols)图线	82
(七) 奈氏(Nyquist)稳定判据	82
(八) 系统的频域性能指标	83
三、典型范例	85
第六章 线性系统的校正方法	105
一、教学要求	105
二、理论纲要	106
(一) 控制系统的设计及主要校正方式	106
(二) 常用的校正装置及其特性	107
(三) 串联校正	110
(四) 反馈校正	113
(五) 复合校正	114
(六) 根轨迹校正	115
三、典型范例	116
第七章 线性离散系统的分析与校正	133
一、教学要求	133
二、理论纲要	134
(一) 离散系统的基本概念	134
(二) 香农(Shannon)采样定理	136
(三) 信号的保持	138
(四) Z 变换理论	139
(五) 离散系统的数学模型	144
(六) 离散系统的稳态性能分析	147
(七) 离散系统的动态性能分析	149

(八) 离散系统的数字校正	151
三、典型范例	152
第八章 非线性控制系统分析	171
一、教学要求	171
二、理论纲要	172
(一) 非线性系统的基本概念	172
(二) 典型的非线性特性	173
(三) 相平面分析法	174
(四) 描述函数法	178
(五) 逆系统法	180
三、典型范例	182
参考文献	196

第一章 自动控制的一般概念

一、教学要求

(一) 自动控制的概念及理论

- (1) 理解自动控制与自动控制系统的一般概念及其任务；
- (2) 掌握控制系统的控制装置、被控对象和被控量、给定量的确定方法；
- (3) 了解传统控制理论与现代控制理论的研究对象,以及它们之间的联系与区别。

(二) 自动控制系统的基本组成

- (1) 了解自动控制系统的基本组成环节及其功能；
- (2) 掌握根据系统工作原理图确定其组成环节、并绘制其系统框图的方法。

(三) 自动控制系统的分类

- (1) 了解控制系统的分类方法及其类别；
- (2) 掌握线性系统与非线性系统的划分,以及线性系统的可叠加性和齐次性；
- (3) 掌握定常系统与时变系统、连续系统与离散系统的定义。

(四) 自动控制的基本方式以及负反馈控制原理

- (1) 理解开环控制、闭环控制与复合控制的概念及其性能特点；
- (2) 掌握正反馈、负反馈的基本原理,以及负反馈在控制系统中的作用。

(五) 对控制系统的基本要求

- (1) 理解对控制系统的稳、准、快的要求；
- (2) 了解相关的基本概念,如动态过程、稳态过程、稳态误差、稳定裕度等。

(六) 控制系统的典型外作用函数

- (1) 掌握控制系统典型输入信号的形式及其特点；
- (2) 熟练掌握常用典型输入信号的时域和复域表达式。

二、理论纲要

(一) 自动控制的概念及理论

1. 自动控制

在没有人直接参与的情况下,利用控制装置,使被控对象的被控量按预定的规律自动地运

行(或具有希望的状态或功能)。

控制装置:也称为控制器。即对被控对象起控制作用的外加的设备或装置的总称。

被控对象:希望实现自动控制的机器设备或生产过程。

被控量:也称为输出量。即要求实现自动控制的被控对象的某个工作状态或参数。

参据量:也称为输入量或给定量。即作用于被控对象,使系统实现自动控制的物理量。

扰动量:作用于被控对象,影响或破坏系统实现自动控制的物理量。

自动控制系统:能够实现自动控制任务的系统。

2. 自动控制理论

分析和研究自动控制系统的运行规律、控制性能、输入—输出关系及其设计方法的理论。它可分为传统控制理论和现代控制理论两部分。

传统控制理论:也称经典控制理论。主要以单输入—单输出系统(SISO)为研究对象。

现代控制理论:也称状态空间控制理论。主要研究多输入—多输出系统(MIMO)。

两种理论的分析思路和方法截然不同,但有着密切的内在互通性:SISO理论是MIMO理论的基础和特例;研究MIMO系统时,常将其分解成多个独立的SISO系统来分析和综合。

(二) 自动控制系统的基本组成

自动控制系统由被控对象和控制装置组成。控制装置按照功能的不同,可以分为给定元件、校正元件、测量元件、比较元件、放大元件和执行元件等环节。各元件的功能如下:

给定元件:也称为参据环节。它给出与被控量的期望值相对应的系统输入量。

校正元件:也称为补偿元件或反馈环节。它是结构或参数便于调整的元部件,用串联(顺馈)或并联(反馈)的方式连接在自动控制系统中,以改善系统的性能。

测量元件:也称为检测环节。它检测被控量的实际工作状态或物理参数,并将之转换为控制装置能识别的输出量或输入量。

比较元件:也称为偏差环节。它把测量元件检测的被控量实际值与给定元件给出的参据量进行比较,求出它们之间的偏差。

放大元件:也称为转换环节。它将比较元件给出的偏差信号(一般为电信号)进行放大,转换为用来推动执行元件去控制被控对象的信号。

执行元件:也称为执行环节。它直接推动被控对象,使被控量发生变化。

(三) 自动控制系统的分类

一般情况下,为了全面反映自动控制系统的特性,常常将下述各种分类方法组合应用。

按控制方式可以分为开环控制、闭环(反馈)控制、复合控制等。

按元件类型可以分为机械系统、电气系统、机电系统、气动系统、液压系统、生物系统等。

按系统功用可以分为温度控制系统、压力控制系统、位置控制系统等。

按系统性能可以分为线性系统和非线性系统、定常系统和时变系统、模拟(连续)系统和数字控制(离散)系统、确定性系统和不确定性系统等。

线性系统:可以用线性微分(差分)方程来描述其特性的系统。其一般形式为

$$\text{线性微分方程} \quad a_0 \frac{d^{(n)}}{dt^n} c(t) + a_1 \frac{d^{(n-1)}}{dt^{n-1}} c(t) + \cdots + a_{n-1} \frac{d}{dt} c(t) + a_n c(t)$$

$$=b_0 \frac{d^{(m)}}{dt^m} r(t) + b_1 \frac{d^{(m-1)}}{dt^{m-1}} r(t) + \cdots + b_{m-1} \frac{d}{dt} r(t) + b_m r(t)$$

$$\begin{aligned} \text{线性差分方程} \quad & a_0 c(k+n) + a_1 c(k+n-1) + \cdots + a_{n-1} c(k+1) + a_n c(k) \\ & = b_0 r(k+m) + b_1 r(k+m-1) + \cdots + b_{m-1} r(k+1) + b_m r(k) \end{aligned}$$

式中, $c(t)$ 、 $r(t)$ 与 $c(k)$ 、 $r(k)$ 分别是系统的输出量、输入量和输出采样序列、输入采样序列。

★ 线性系统的重要特性: 满足叠加原理, 即可叠加性和齐次性。

非线性系统: 要用非线性微分(差分)方程来描述其特性的系统。其特点是方程的系数与方程的变量有关, 或者方程中含有变量及其导数的高次幂或乘积项。系统中只要有一个元件的输入—输出特性是非线性的, 这个系统就是非线性系统。

严格地说, 各类实际系统都含有不同程度的非线性元部件, 但由于非线性方程在数学处理上较困难, 对于非线性程度不太严重的系统, 可在一定范围内采用线性化的方法近似研究。

定常(时变)系统: 方程的系数 a_n 、 b_m 为常数(随时间变化)的系统。

模拟(连续)系统: 系统的输入和输出量都是时间的连续函数。在连续系统中, 信号在全部时间上都有定义。

数字(离散)系统: 系统的输入和输出量的信号中, 至少有一处是时间的离散函数。在离散系统中, 信号只在离散时间上有定义。

确定性系统: 结构、参数和输入量都是确定的、已知的系统。

不确定性系统: 结构、参数或者输入信号具有不确定性或模糊性的系统。

按输入形式可分为恒值控制系统、随动系统、程序控制系统等。

恒值控制系统: 也称镇定系统。即参据量为恒值或随时间缓慢变化的系统。系统的基本任务是保持被控量为恒定的期望值。如液位控制、恒温控制、稳压控制等系统。

随动系统: 也称跟踪系统、伺服系统。即参据量随时间无规则变化的系统。系统的基本任务是使得被控量按期望的精度跟随参据量变化。系统的被控量往往是物体的位移或速度。如火炮控制、卫星测控、雷达天线跟踪等系统。

程序控制系统: 参据量随时间按预定的规律变化的系统。系统的基本任务是使得被控量按预设的规律变化。如飞弹制导、数控机床加工、炉温微机控制等系统。

按其他分类可分为运动控制系统和过程控制系统、单输入—输出系统和多输入—输出系统等。

(四) 自动控制的基本方式以及负反馈控制原理

1. 开环控制

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。其特点是结构简单、稳定性好, 但系统的输出量不能对系统的控制作用发生影响。

按给定量控制方式: 控制作用直接由系统的输入量产生, 给定一个输入量, 就有一个相应的输出量。原理方框图如图 1-1(a) 所示。其控制精度完全取决于所用的元件及校准的精度, 没有自动修正偏差的能力, 抗扰动性较差; 但具有结构简单、调整方便、成本低廉的优点, 适用于精度要求不高或扰动影响较小的领域。

按扰动量控制方式: 也称为顺馈控制或前馈控制。即直接从扰动取得信息, 并据以产生一种补偿作用, 以减小或抵消扰动对输出量的影响, 从而改变被控量。原理方框图如图 1-1(b)

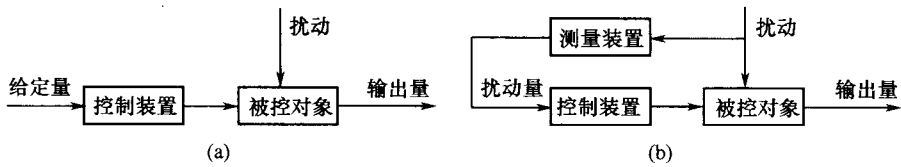


图 1-1

(a) 按给定量控制方式; (b) 按扰动量控制方式(顺馈)

所示。其技术简单,抗扰动性好,控制精度高;但只适用于扰动量可测的场合,并且一个补偿装置只能补偿一种扰动量,而对其他扰动一般均不起补偿作用。

2. 闭环控制

闭环控制也称为反馈控制。即控制装置与被控对象之间不仅有顺向作用而且有反向联系的控制过程,其特点是系统的输出量对系统的控制作用有反向影响。其实质就是按偏差进行控制。即被控量偏离期望值而出现偏差时,会反馈给控制装置的输入端,产生一个偏差信号,从而影响对被控对象的控制作用。它极大地提高了系统控制精度,但使得系统稳定性变差,典型方框图如图 1-2 所示。

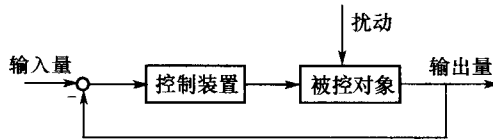


图 1-2

正反馈:被控量偏离期望值时出现的偏差信号对输入量有一个促进作用,使得系统产生的偏差越来越大。在一般情况下,应该尽量避免这种方式。

负反馈:被控量偏离期望值时出现的偏差信号对输入量有一个补偿和抵消的作用,即只要出现偏差,就会产生一个相应的控制作用去减小或者消除这个偏差,从而有抑制任何内外扰动对被控量产生影响的能力,具有较高的控制精度。在没有特别说明的情况下,负反馈控制也直接简称为反馈控制,它是自动控制理论主要研究的对象。

3. 复合控制

对主要扰动采用适当的补偿装置实现按扰动控制,同时再组成反馈控制系统实现按偏差控制,以消除其余扰动产生的偏差。这样,主要的扰动已被补偿,反馈控制系统就比较容易设计,控制效果也会更好,典型方框图如图 1-3 所示。

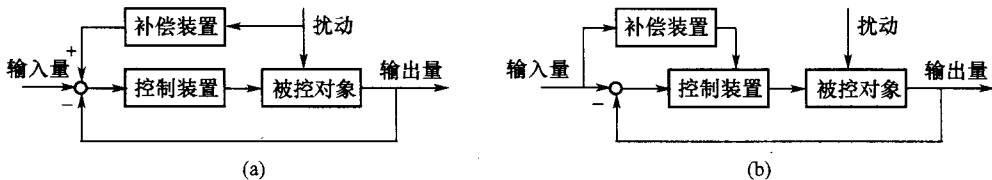


图 1-3

(a) 对扰动量进行补偿; (b) 对输入量进行补偿

4. 负反馈控制原理

将系统输出信号(输出量)引回输入端,与输入信号(输入量)相比较,利用所得的偏差信号

不断地修正和调节对被控对象的控制作用,使得偏差消失或减小到允许的范围,从而实现对被控对象的自动控制。也称之为反馈控制原理。

(五) 对控制系统的基本要求

1. 稳定性

要求系统在受到扰动后,被控量偏离期望值的偏差应随时间不断地减小或趋于一个满足精度要求的恒值。它是控制系统的基本要求,也是保证控制系统正常工作的先决条件。

对于镇定系统,要求被控量在受到扰动时,应能够恢复到原来期望的恒定值。

对于随动系统,要求被控量在受到扰动时,应能够始终跟踪参据量的变化。

在受到扰动后,系统的响应可分为动态过程和稳态过程两部分。线性系统的稳定性取决于系统的内部结构,而与外界因素无关。

动态过程:系统在受到扰动后,由于惯性或者摩擦的因素,被控量经过一段时间的振荡调节或延缓,最终恢复到原来期望值或跟踪参据量的过程。也称为动态响应或瞬态过程(响应)、暂态过程、过渡过程、调节过程、振荡—延缓过程等。

当时间 t 趋于无穷时,稳定系统的动态过程将逐渐消失。

稳态过程:系统在受到扰动后,当时间 t 趋于无穷时被控量的最终表现形式,表征系统的被控量最终跟踪给定量的程度。也称为稳态响应或终态过程、终值响应。

稳定裕度:描述系统稳定性的程度(详见第五章“系统的频域性能指标”)。

2. 准确性

要求系统在受到扰动后,被控量的终值响应与原来的期望值相一致或在允许的误差范围内。它是控制系统的稳态要求,反映了控制系统跟踪参据量或抑制扰动量的能力和精度,常用稳态误差来衡量。

稳态误差:系统在受到扰动后,被控量的终值响应与原来的期望值之间存在的误差。它是衡量控制系统控制精度的重要标志。通常要求系统的稳态误差越小越好。

稳态误差不仅与系统自身的结构参数有关,而且与系统参据量的形式、大小、作用点等因素都有关。另外,只有对于稳定的系统,稳态误差才有意义。

3. 快速性

要求系统在受到扰动后,被控量的振荡—延缓过程应尽可能地快速。它是控制系统的动态要求,常用系统的响应速度和振荡波动程度来描述。

(六) 控制系统的典型外作用函数

为了便于用统一的方法研究和比较控制系统的性能而选用的几种作为系统参据量的确定性的函数。也称为典型输入信号。它实际上就是根据系统常遇到的输入信号形式,在数学描述上加以理想化的一些基本输入函数。可选作典型输入信号的函数应该同时具备以下条件:

可获性:这种函数应该在现场或实验室中容易获取。

可仿性:控制系统在这种函数下的性能应该能代表实际状态下的性能。

可算性:这种函数的数学表达式应该比较简单,便于理论计算。

目前在控制系统分析与设计中常用的典型外作用函数有冲激函数、阶跃函数、斜坡函数、抛物线函数、正弦函数等,如表 1-1 所示。

表 1-1 典型输入信号(外作用函数)

函数名称	时域表达式	复域表达式(拉氏变换)
单位冲激函数	$\delta(t), t=0$	1
单位阶跃函数	$1(t), t \geq 0$	$\frac{1}{s}$
单位斜坡函数	$t, t \geq 0$	$\frac{1}{s^2}$
单位抛物线函数	$\frac{1}{2}t^2, t \geq 0$	$\frac{1}{s^3}$
正弦函数	$A \sin \omega t$	$\frac{A\omega}{s^2 + \omega^2}$

1. 冲激函数 $f(t) = \lim_{t_0 \rightarrow 0} \frac{A}{t_0} [1(t) - 1(t-t_0)]$

冲激函数即单位理想狄拉克函数。表示在 $t=0$ 时出现的一个宽度(即持续作用时间)为零、幅值为无穷大、面积(即冲激强度)为 A 的极限脉冲,如图 1-4(a)所示。它可以看作是一个从 $t=0$ 出现至 $t=t_0$ 消失,幅值为 A/t_0 的阶跃函数在 $t_0 \rightarrow 0$ 时的极限,如图 1-4(b)所示。

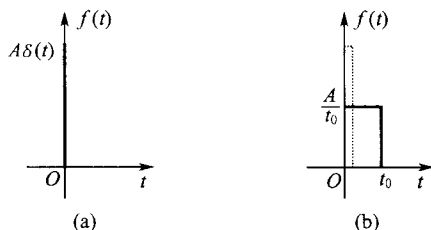


图 1-4

在实际系统中冲激函数是不存在的,但它是控制系统研究中的一个重要而有效的数学工具:任何形式的外作用函数都可以分解成一系列不同时刻、不同强度的冲激函数之和。

强度为 A 的冲激函数可以表示为 $f(t) = A \cdot \delta(t)$ ($A=1$ 时称为单位冲激函数)。

在 t_0 时刻出现的冲激函数可以表示为 $f(t) = A \cdot \delta(t-t_0)$ 。

2. 阶跃函数 $f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ R & t \geq 0 \end{cases}$

阶跃函数也称为恒值函数或位置函数。表示从 $t=0$ 时开始突然出现的一个幅值恒为 R 的阶跃持续信号,如图 1-5 所示。在实际系统中意味着系统从 $t=0$ 开始突然受到一个恒定的外作用。如电源突然通电、负载突然减小、重力突然消失等。

幅值为 R 的阶跃函数可以表示为 $f(t) = R \cdot 1(t)$ ($R=1$ 时称为单位阶跃函数)。

在 t_0 时刻出现的阶跃函数可以表示为 $f(t) = R \cdot 1(t-t_0)$ 。

3. 斜坡函数 $f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ Rt & t \geq 0 \end{cases}$

斜坡函数也称为速度函数。表示一个从 $t=0$ 时开始以恒定速度 R 随时间而变化的函数,如图 1-6 所示。在实际中,某些随动系统的参据量就常常表现为斜坡函数特性。如防空雷达系统的跟踪目标、卫星测控系统的测控对象等。

恒定速度 $R=1$ 的斜坡函数称为单位斜坡函数。

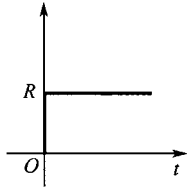


图 1-5

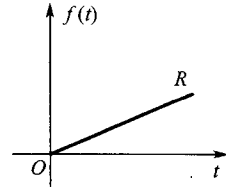


图 1-6

4. 抛物线函数 $f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \frac{1}{2}Rt^2 & t \geq 0 \end{cases}$

抛物线函数也称为加速度函数。表示一个在 $t=0$ 时突然开始以恒定加速度 R 随时间而变化的函数。

恒定加速度 $R=1$ 的抛物线函数称为单位抛物线函数。

5. 正弦函数 $f(t) = A \sin(\omega t - \varphi)$

正弦函数也称为摆动函数。表示一个以 A 为振幅、以 φ 为初始相角、以 $\omega = 2\pi f$ 为角频率的随时间正弦变化的函数。在实际系统中如舰船的摆动、物体的振动等。

对于稳定的线性定常系统,如果输入信号为正弦函数,则输出信号的终值响应也是同频率的正弦函数,只是幅值和相位发生变化。

三、典型范例

例 1-1 设热水加热器如图 1-7 所示。为了保持希望的温度,由温控开关接通或断开电加热器的电源。在使用热水时,水箱中流出热水并补充冷水。试说明系统的被控对象、输出量、输入量、工作原理并画出系统原理方框图。

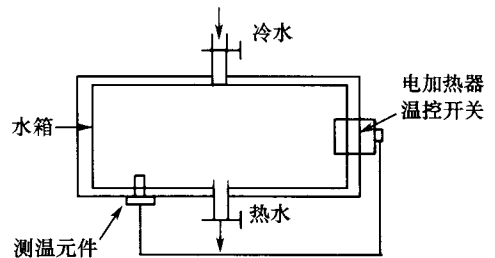


图 1-7

解 在热水电加热器系统中,输入量为预定的希望温度(给定值),设为 $T_{\text{希}}$,被控量(输出量)为水箱实际温度,设为 T ,控制对象为水箱。扰动

信号主要是由于放出热水并注入冷水而产生的降温作用。当 $T = T_{\text{希}}$ 时,温控开关断开,电加热器不工作,此时水箱保持在希望水温值上。当使用热水时,由于扰动作用使实际水温下降,测温元件感受 $T < T_{\text{希}}$ 的变化,并把这一温度变化转换为电信号使温控开关接通电源,电加热器工作,使水温上升,直到 $T = T_{\text{希}}$ 为止。系统原理如图 1-8 所示。

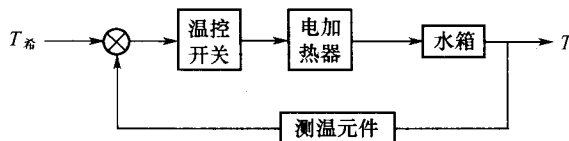


图 1-8

例 1-2 图 1-9 为一自动调压系统。当负载电流 I_F 变化时,发电机 G 的电枢绕组压降也随之改变,造成端电压不能保持恒定。为了补偿这个影响,把电阻 R_F 上的压降经放大后的电压 U_1 负反馈到输入端,与 U_F 比较使 I_F 随之变化,以补偿电枢压降,使端电压维持不变。试指出系统的输入量,输出量,扰动量和控制对象,并画出系统原理方框图。

解 输入量为给定电压 U_F ,输出量为发电机端电压 U_F ,扰动量为负载电流 I_F ,控制对象为发电机 G。系统原理方框图如图 1-10 所示。

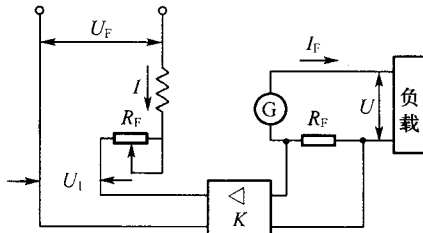


图 1-9

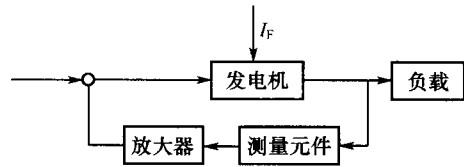


图 1-10

例 1-3 两水位控制系统如图 1-11(a)、(b)所示,要求画出其方框图(包括给定输入量和扰动量)。

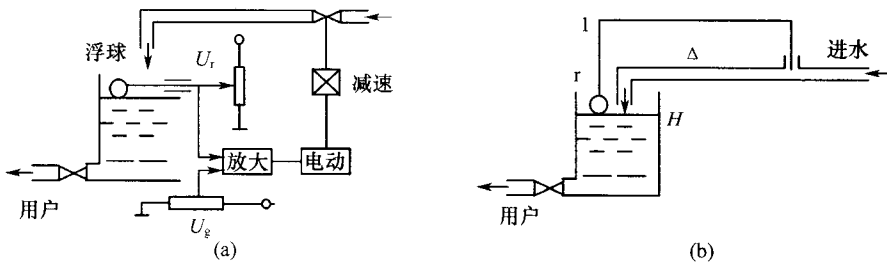


图 1-11

解 (1) 图 1-11(a)中输出量为水池水位,给定输入量为 U_g ,扰动输入量为用水量。方框图如图 1-12 所示。图 1-11(b)中的输出量、扰动输入量与图 1-11(a)的相同。给定输入量为水位的希望值,由浮球 r、悬杆 1、连杆两臂比及进水阀门等参数确定。

(2) 图 1-11(a)中的误差和扰动无关,即图 1-11(a)为无差系统,图 1-11(b)中的误差与扰动有关。

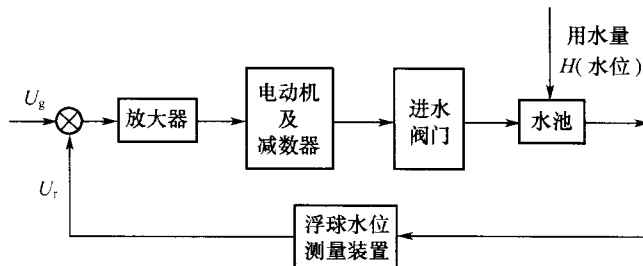


图 1-12

例 1-4 远距离操作的机器人手臂工作原理如图 1-13 所示,试简述其工作原理并画出系统方框图。

解 系统的任务是控制从动手的手爪角度 θ_2 跟踪主动手手爪的角度 θ_1 ,从动手的角位移

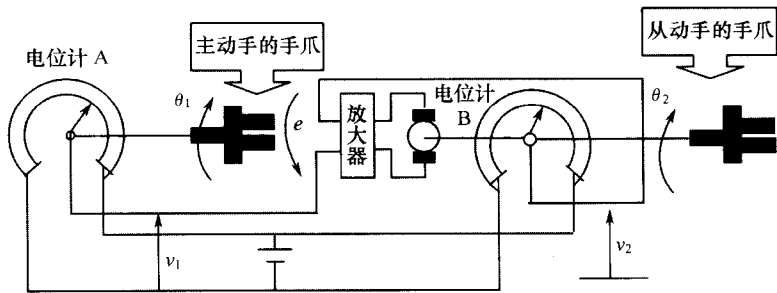


图 1-13

是被控量,主动手的角位移是给定量。电位计 A 的作用是将主动手手爪的角度 θ_1 变成电压 v_1 , 电位计 B 的作用是将从动手手爪的角度 θ_2 变成电压 v_2 。

当从动手手爪角位移 θ_2 与主动手手爪的角位移 θ_1 相等时, $v_1 = v_2$, 环型电位计 A、B 组成的桥式电路处于平衡状态, 输出电压 $e = 0$, 电机不动, 系统相对静止。

当主动手手爪角位移 θ_1 变化, 从动手手爪的角度 θ_2 不等于 θ_1 时, 差电压 $e (e = v_1 - v_2)$ 被输入到放大器, 使直流伺服电机向减少角度 θ_1 和 θ_2 之差的方向回转。当 $\theta_1 = \theta_2$ 时, $v_1 = v_2$, $e = 0$ 。因此, 从动手手爪的旋转角度几乎和主动手手爪的角度一致。

系统中主动手手爪是给定元件, 电位计 A、B 组成的电桥、电路同时完成测量、比较功能, 电机和从动手手爪组成执行结构。系统方框图如图 1-14 所示。

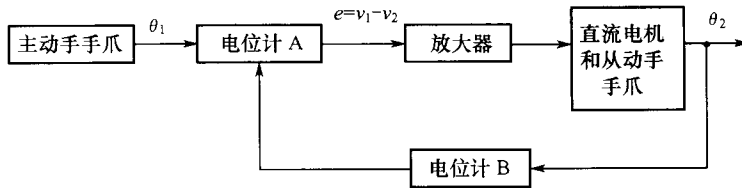


图 1-14

例 1-5 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?

$$(1) c(t) = r(t) \cos \omega t + 5; \quad (2) c(t) = \begin{cases} 0 & t < 6 \\ r(t) & t \geq 6 \end{cases}$$

解 (1) 因为 $c(t)$ 的表达式中 $r(t)$ 的系数为非线性函数 $\cos \omega t$, 所以该系统为非线性系统。

$$(2) \text{ 因为 } c(t) \text{ 的表达式可写为 } c(t) = a \cdot r(t), \text{ 其中 } a = \begin{cases} 0 & t < 6 \\ 1 & t \geq 6 \end{cases}$$

所以该系统可看作是线性时变系统。

第二章 控制系统的数学模型

一、教学要求

(一) 数学模型概述

了解控制系统数学模型的概念及其形式。

(二) 控制系统的微分方程

(1) 了解微分方程的建立方法和非线性方程线性化的方法；

(2) 掌握微分方程的拉氏变换法求解方法。

(三) 控制系统的传递函数

(1) 掌握传递函数的定义、性质及其与微分方程之间的关系；

(2) 理解零初始条件的物理含义以及系统增益、零极点的概念；

(3) 掌握开环、闭环传递函数以及误差传递函数的定义；

(4) 掌握典型系统的传递函数形式；

(5) 了解环节的概念以及常用元部件的传递函数。

(四) 数学模型的实验测定

(1) 了解数学模型的实验测定法；

(2) 了解常用的实验结果的数据处理方法。

(五) 结构图与信号流图

(1) 掌握结构图与信号流图的基本组成、特点及其绘制方法；

(2) 掌握由系统微分方程建立系统结构图的方法；

(3) 熟练掌握结构图、信号流图的等效变换方法；

(4) 掌握结构图与信号流图的相互转换。

(六) 梅森(Mason)增益公式

(1) 了解梅森增益公式的计算依据；

(2) 熟练掌握运用梅森增益公式求系统传递函数的方法。