



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

ZIDONG KONGZHI YUANLI

自动控制原理

于希宁 主 编
孙建平 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

要 参 内

本书是“十一五”国家级规划教材，由教育部组织编写，内容全面，重点突出，可作为高等院校自动化专业及相关专业的教材，也可供从事自动化工作的工程技术人员参考。

ZIDONG KONGZHI YUANLI

自动控制原理

主 编 于希宁

副主编 孙建平

编 写 孙海蓉 袁桂丽 禹 梅

刘鑫屏 戴毅姜

主 审 李元春 刘 富

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第011032号

中国电力出版社出版
北京市西城区三里河路6号 100044 http://jc.cepp.com.cn
北京市西城区三里河路6号 100044

2008年3月第1版 2008年3月第1次印刷
787毫米×1092毫米 1/32 216千字
定价 35.00元



中国电力出版社

http://jc.cepp.com.cn



内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

全书共分为10章,主要内容包括绪论、控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹法、频域分析法、线性控制系统的设计与校正、非线性系统分析、线性离散控制系统的分析与综合、自动控制原理实验、自动控制理论的计算机辅助设计。

本书可作为高等院校自动化、电气工程及其自动化专业及相关专业的本科教材,也可作为高职高专和函授教材,还可供从事自动化专业工作的工程技术人员阅读和参考。

自动控制原理

于希宁 主 编

平 毅 主 编

容 毅 主 编

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/于希宁主编. —北京:中国电力出版社, 2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5083-6490-2

I. 自… II. 于… III. 自动控制理论—高等学校—教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 011027 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008年2月第一版 2008年2月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 21.25印张 516千字

定价 32.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

自动控制理论与众多学科相联系,其应用已遍及众多技术领域。控制理论已日趋成为一般性的控制科学,虽然它已从第一代经典控制理论发展到第二代现代控制理论,并已开始进入第三代大系统理论和智能控制理论阶段,但经典控制理论仍是学习现代控制和其他高等控制理论的基础,也是工科院校普遍开设的一门重要的专业基础理论课。

本书是在于希宁教授、刘红军教授主编的、2001年出版的《自动控制原理》一书的基础上,总结了近年的使用经验,由对这门课程具有多年教学经验的多名教师联合编写的。本次教材编写的宗旨是:内容精炼,突出重点;注重物理概念,强化理论联系实际;注意深入浅出,循序渐进,符合教学规律;注重启发性,易于自学。另考虑到新知识的不断增加,教学学时的进一步压缩,为了保证基础理论知识的教学,对其中的一些传统教学内容进行了删改,增加了使用 MATLAB 计算仿真工具进行系统分析与设计的内容,使读者在学习理论知识的同时,掌握一种高效便利的工具,减轻繁琐枯燥的计算负担,使其把主要精力集中到思考本质问题、加深对控制理论的理解、掌握控制理论的各种分析方法、并用它研究解决一些实际工程问题上。另外,为方便读者使用,把相关的实验内容也一并列入本书。

本书共分十章。第一~六章主要讲述线性定常连续控制系统的建模,以及分析和设计控制系统的时域法、根轨迹法和频域法;第七章简要介绍非线性控制系统的建模与分析方法;第八章介绍线性定常离散控制系统的建模与分析方法;第九章介绍了四个典型实验的指导;第十章为使用 MATLAB 计算仿真工具进行系统的分析与设计。为了便于理解和巩固所学内容,书中每一章有适当数量的例题讲解,并且提供了不同层次的习题供读者选择,此外还附加了部分习题的参考答案。

本书由华北电力大学于希宁担任主编,孙建平担任副主编。其中,第一、七章由于希宁编写;第二章由袁桂丽编写;第三章由禹梅编写;第四、五章由孙建平编写;第六、八章由孙海蓉编写;第九章由戴毅姜编写;第十章由刘鑫屏编写。全书由于希宁统稿、定稿。本书由吉林大学李元春教授、刘富教授主审,提出了许多宝贵意见,在此表示感谢。

在本书的编写过程中,参考了很多优秀的教材和习题集。作者向被引用于本书相关信息的各位作者表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,恳请读者批评指正。

编者

2007年12月

目 录

前言

第一章 绪论

第一节 引言	1
第二节 自动控制系统的一般概念	2
第三节 自动控制系统的分类	3
第四节 自动控制系统的基本要求	6
习题	7
参考答案	8

第二章 控制系统的数学模型

第一节 微分方程	9
第二节 传递函数	15
第三节 动态结构图	20
第四节 动态结构图的等效变换	23
第五节 信号流图与梅逊公式	28
第六节 典型传递函数与典型环节的传递函数	31
习题	37
参考答案	40

第三章 时域分析法

第一节 控制系统的稳定性分析	42
第二节 控制系统的稳态误差	50
第三节 控制系统的典型输入信号和时域性能指标	60
第四节 一阶系统的动态分析	63
第五节 二阶系统的动态分析	65
第六节 高阶系统的近似分析	75
习题	78
参考答案	81

第四章 根轨迹法

第一节 根轨迹的基本概念	83
第二节 绘制根轨迹的依据	84
第三节 绘制一般根轨迹的基本法则	86
第四节 控制系统根轨迹的绘制举例	93
第五节 参量根轨迹	96
第六节 零度根轨迹	97
第七节 控制系统的根轨迹分析	100

习题	104
参考答案	106
第五章 频域分析法	107
第一节 频率特性	107
第二节 典型环节的频率特性	111
第三节 控制系统的开环频率特性	122
第四节 频率特性的稳定判据	129
第五节 控制系统的相对稳定性	138
第六节 开环频率特性与闭环时域指标的关系	141
第七节 闭环系统频率特性	146
第八节 闭环频率特性与时域指标间的关系	148
习题	150
参考答案	154
第六章 线性控制系统的设计与校正	157
第一节 概述	157
第二节 线性控制系统设计与校正的基础知识	157
第三节 校正装置(控制器)的构成及其特性	160
第四节 根轨迹法串联校正	167
第五节 频率法串联校正	174
第六节 局部反馈校正	182
第七节 复合控制校正	184
习题	186
参考答案	189
第七章 非线性系统分析	192
第一节 概述	192
第二节 典型本质非线性环节的描述函数	196
第三节 用描述函数法分析系统的稳定性	200
第四节 相平面图	208
第五节 相平面分析法	226
习题	228
参考答案	230
第八章 线性离散控制系统的分析与综合	232
第一节 概述	232
第二节 采样过程及信号复现	233
第三节 z 变换	237
第四节 脉冲传递函数	244
第五节 离散控制系统的稳定性分析	250
第六节 离散控制系统的稳态性能	255
第七节 离散控制系统的动态性能分析	258

第八节 离散系统的校正方法	261
习题	265
参考答案	267
第九章 自动控制原理实验	269
实验一 典型环节的电模拟及其阶跃响应分析	269
实验二 随动系统的开环控制、闭环控制及其稳定性	270
实验三 随动控制系统的静、动态性能指标及系统校正	272
实验四 控制系统的频率特性分析	274
实验五 频率特性测试	275
第十章 自动控制理论的计算机辅助设计	278
第一节 引言	278
第二节 前期基础知识	278
第三节 控制系统模型	283
第四节 控制系统的时域分析	285
第五节 控制系统的根轨迹分析	289
第六节 控制系统的频域分析	297
第七节 控制系统的校正	303
第八节 离散控制系统分析	309
第九节 非线性系统分析	315
习题	317
附录 A 常用函数的拉普拉斯变换	323
附录 B 常用拉普拉斯变换的性质和定理	324
附录 C 拉氏反变换	325
附录 D 模拟计算机简介	327
参考文献	330

第一章 绪论

第一节 引言

从20世纪40年代起,特别是第二次世界大战以来,由于工业的发展和军事技术上的需要,自动控制技术得到了迅速的发展和广泛的应用。如今,自动控制技术不仅广泛应用于工业控制中,在军事、农业、航空、航海、核能利用等领域也发挥着重要的作用。例如,电厂中锅炉的温度或压力能够自动维持恒定不变,机械加工中数控机床按预定程序自动地切削工件,军事上导弹能准确地击中目标,空间技术中人造卫星能按预定轨道运行并能准确地回收等,都是应用了自动控制技术的结果。

所谓自动控制,是指在没有人直接参与的情况下,利用控制装置对机器设备或生产过程进行控制,使之达到预期的状态或性能要求。

自动控制的应用可以追溯到18世纪(1784年)瓦特(Watt)利用离心飞锤式调速器使蒸汽机转速保持恒定的开创性突破,以及19世纪(1868年)麦克斯威尔(Maxwell)对轮船摆动(稳定性)的研究。但在初期,自动控制应用的进展并不快。自动控制的飞速发展是在20世纪。如1932年奈奎斯特(Nyquist)对控制系统稳定性的研究(奈氏判据),伯德(Bode)于1940年在频域法中引入对数坐标,伊万思(Evans)于1948年提出根轨迹,维纳(Weiner)于1949年出版了划时代著作《控制论》,都对控制理论作了系统的阐述。他们的研究工作以及前人的努力,奠定了经典控制理论的基础,经典控制理论到50年代趋于成熟。经典控制理论的特点是以传递函数为数学工具,主要研究单输入—单输出的线性定常连续和离散系统的建模、分析与设计问题,对非线性系统的性能分析方法也作了初步研究。

20世纪50年代末60年代初期,由于空间技术发展的需要,对自动控制的精确性和经济指标提出了极其严格的要求,数字计算机特别是微型计算机的迅速发展,又在客观上提供了必要的技术手段,从而使自动控制理论有了重大发展。如庞特里亚金(Pontryagin)的极大值原理、贝尔曼的动态规划理论、卡尔曼的最优滤波理论等,这些都标志着控制理论发展到了现代控制理论阶段。现代控制理论的特点是采用状态空间法,对多输入—多输出、定常和时变、线性 and 非线性系统进行分析与设计。

20世纪70年代以来,随着技术革命和大规模复杂系统的发展,自动控制理论又向大系统理论和智能控制理论发展。智能控制理论的研究是以人工智能的研究为方向,引导人们去探讨自然界更为深刻的运动机理。当前的研究方向有自适应控制、模糊控制、人工神经网络以及混沌理论等,并且有许多研究成果产生。智能控制理论的研究和发展,启发且促进了人们的思维方式,标志着信息与控制学科的发展远没有止境。

值得指出的是,现代控制理论、大系统理论和智能控制理论,虽然解决了经典控制理论不能解决的理论和工程问题,但这并不意味着经典控制理论已经过时,相反,在自动控制技术的发展中,由于经典控制理论便于工程应用,今后还将继续发挥其理论指导作用,同时它也是进一步学习现代控制理论和其他高等控制理论的基础。

本书将对经典控制理论的基本内容作系统、详细的介绍。

第二节 自动控制系统的一般概念

自动控制是在人工控制的基础上发展起来的。图 1-1 所示为锅炉汽包水位控制系统的原理图。图 1-1 中 $W(t)$ 、 $D(t)$ 分别为进入汽包的给水流量和从汽包流出的蒸汽流量（负荷），而蒸汽流量的大小是随机组负荷的变化而变化的。该系统的控制任务就是通过调节给水流量的大小以一定精度，保持汽包中水位为某一期望（给定）的数值。

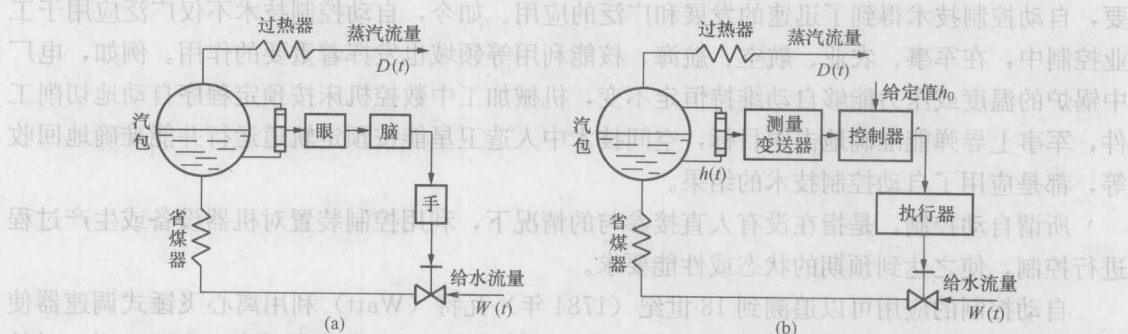


图 1-1 锅炉汽包水位控制系统的原理图

(a) 人工控制；(b) 自动控制

在人工控制中，人是通过眼、脑、手三个器官来进行汽包水位 $h(t)$ 控制的。首先用眼睛观察水位的高低变化，然后用大脑分析比较实际水位是否偏离期望值，若偏离了，则经过思考（运算）按操作经验，指挥手去执行这一命令，调节给水阀的开度，从而把水位控制在所期望的数值上。而在自动控制中，汽包水位 $h(t)$ 经测量变送器（代替人的眼睛）自动测量出来并按一定函数关系（通常为比例关系）转换成统一信号（电流或电压），与水位给定值进行比较，二者之差送入控制器（代替人的大脑）。控制器根据偏差的正负及大小，发出一定规律的输出信号，指挥执行器（代替人的手）去操作给水控制阀的开度，改变给水流量，从而改变汽包水位。水位的变化由测量变送器测出，并反馈回来与给定值比较，控制器根据偏差的正负及大小不断校正执行器的动作，直到最后水位等于给定值为止。

为便于理论联系实际地研究工程控制问题，下面介绍几个描述控制系统的常用术语。

1. 控制系统信号名称

(1) 被控（被调）量——表征设备或生产过程运行情况或状态并需要加以控制的物理量，如图 1-1 中的汽包水位 $h(t)$ 。

(2) 给定（期望）值——按生产和管理的要求，被控量必须维持的期望值。该值又叫参考输入或设定值。

(3) 扰动——引起被控量变化的各种原因，如图 1-1 中的蒸汽流量 $D(t)$ 的变化。

(4) 控制（调节）量——由控制装置改变的用以控制被控量变化的物理量，如图 1-1 中的给水流量 $W(t)$ 。

另外应该需要注意的是，控制系统研究的是一个动态过程，因此所有信号均为时间的函数。

2. 控制系统设备名称

(1) 被控对象——被控量相应的生产过程或进行生产的设备、机器等,如图 1-1 中的汽包。

(2) 测量变送器——将被控量测量出来并按一定线性关系转换成统一信号的一种控制设备。

(3) 执行器(机构)——接受控制指令,对被控量产生控制作用的一种控制设备。

(4) 控制(调节)器——根据给定值和测量值的偏差正负及大小,发出一定规律的控制信号指挥执行器动作的一种控制设备。

通过上面的内容,可以归纳出自动控制系统的一般概念,即自动控制系统由被控对象和控制装置(包括测量变送器、执行器和控制器)两大部分组成。为了便于分析并直观地表示自动控制系统各组成部分间的相互影响和信号的传递关系,一般采用如图 1-2 所示的原则性方框图表示。

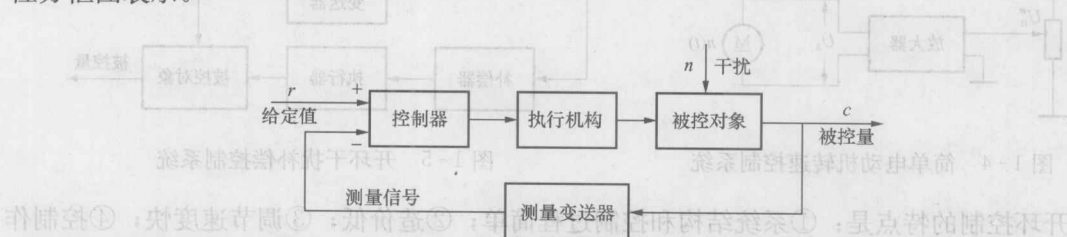


图 1-2 自动控制系统原则性方框图

在方框图中,控制系统的每一个具有一定功能的组成部分又称为“环节”。环节在图中用一个方框表示,各环节之间的信号传递用带箭头的直线表示。需要注意的是,箭头表示的是信号传递的方向,而不是实际物料流动的方向,两者不能混淆。进入环节的信号称为输入,离开环节的信号称为输出。就整个控制系统来说,输出量就是被控量,输入量则有给定值输入和干扰输入两类,在控制系统中干扰一般不止一个,其作用点也各不相同。

第三节 自动控制系统的分类

随着自动控制理论和自动控制技术的日益发展,自动控制系统也日趋复杂和完善,出现了各种各样的控制系统。为系统地研究控制系统的性能,可从不同的角度对其加以分类。本节重点讨论以下几种分类方法。

一、按系统的结构分类

1. 开环(前馈)控制系统

控制装置与被控对象之间只有顺向作用而无反向作用的控制方式,称为开环控制系统,如图 1-3 所示。



图 1-3 开环控制系统

图 1-4 所示为简单电动机转速控制系统, 受控对象为电动机, 控制装置为电位器、放大器。当改变给定电压 U_n^* 时, 经放大器放大后的电压 U_a 随之变化, 作为被控量的电动机转速 $n(t)$ 也随之变化。就是说, 系统正常工作时, 应由 U_n^* 的大小来确定 $n(t)$ 。

当电网电压波动或负载改变等扰动量的影响使得转速 $n(t)$ 发生变化时, 这种开环控制由于被控量不能被反馈至控制装置并影响控制过程, 故无法克服由此产生的偏差。

如果系统存在破坏系统正常运行的干扰, 而干扰又能被测量, 则可利用干扰信号产生开环控制作用, 以补偿干扰对被控量的影响, 如图 1-5 所示。这种按开环补偿原理建立起来的系统又称为“前馈控制”。前馈控制是一种主动控制方式, 即它能做到在干扰影响被控量之前, 就将干扰削弱或抵消。

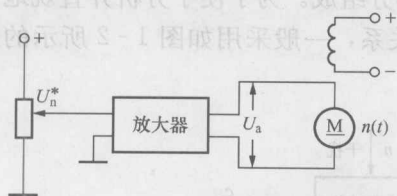


图 1-4 简单电动机转速控制系统



图 1-5 开环干扰补偿控制系统

开环控制的特点是：①系统结构和控制过程简单；②造价低；③调节速度快；④控制作用或抗干扰能力单一；⑤控制精度不高。故单纯的开环控制一般只能用于对控制性能要求较低且干扰因素较少的场合。

单纯的前馈控制一般很难满足控制要求, 这是因为系统往往存在很多干扰, 不能一一补偿, 而且有的干扰限于技术条件而无法测量, 也就无法实现前馈补偿。因此, 其控制精度受到原理上的限制。

2. 闭环（负反馈）控制系统

控制装置与被控对象之间不仅有顺向作用, 而且还有反向联系, 即有被控量对控制过程的影响, 这种控制称为闭环控制, 如图 1-2 所示。这类控制系统的输出经测量变送器又反送至系统的输入端, 形成所谓“反馈信号”参与控制系统的调节, 从而构成一个闭环回路, 且反馈信号与系统给定值极性相反, 因此这种控制系统又称为负反馈。控制器根据将反馈信号和给定信号相比较后所得到的偏差信号, 经运算后输出控制作用去消除或尽可能地减小偏差, 使被控量等于或接近给定值。由此可见, 闭环控制是按偏差进行的控制。

闭环（负反馈）控制系统的一个突出优点就是, 不管是由于干扰还是由于系统结构参数变化所引起的被控量偏离给定值, 都会产生控制作用去消除或减小此偏差。闭环（负反馈）控制系统的调节机理是：依据偏差调节, 消除或尽可能减小偏差。

这种控制系统也存在一些不足, 控制作用只有在偏差出现之后才会产生, 因此总是比前馈控制作用慢, 当系统在强干扰作用下时, 被控量有可能产生较大波动。

3. 复合控制系统

如图 1-6 所示, 将前馈和负反馈控制有机结合的控制方案称为复合控制系统。定性的看, 两种控制的结合将弥补各自存在的不足, 使控制系统的控制水平有显著提高。有关该控制系统性能的定量分析将在系统性能分析的相关章节中陆续展开。

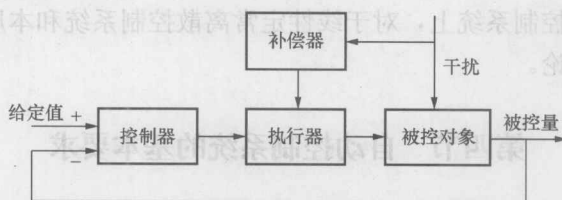


图 1-6 复合控制系统

二、按给定值的特征分类

(1) 定值控制系统。这类控制系统在运行中被控量的给定值保持不变，为恒定值。多数控制系统均属于此类，如图 1-1 所示的锅炉汽包水位控制系统就是一例。

(2) 随动控制系统。这种控制系统被控量的给定值不是预先设定的，而是受某些外来的随机因素影响而变化，其变化规律是未知的的时间函数。此系统要求其输出信号（被控量）以一定精确度跟随给定值而变化，故名随动。如跟踪卫星的雷达天线控制系统、发电机组负荷控制系统、炮位跟踪控制系统等。

(3) 程序控制系统。这种控制系统被控量的给定值是预定的时间函数，并要求被控量随之变化。如数控伺服系统、发电机组启停控制系统以及一些自动化生产线等均属此类系统。

三、按系统的特性分类

(1) 线性控制系统。系统中各组成部分或元件特性可以用线性微分方程来描述，这类系统称为线性系统。线性控制系统的特点是满足齐次性和叠加性原理：当系统存在几个输入时，系统的输出等于各个输入分别作用于系统的输出之和；当系统输入幅度增加或缩小时，系统的输出幅度也按同样比例增加或缩小。

(2) 非线性控制系统。当系统中存在非线性元件或具有非线性特性，就要用非线性微分方程来描述，这类系统称为非线性系统。非线性系统不满足齐次性和叠加性原理。

四、按系统中参数随时间的变化情况来分类

(1) 定常系统。从系统的数学模型来看，若描述系统的全部结构参数不随时间变化，可用定常微分方程来描述，则称这类系统是定常（或时不变）系统。在实际中遇到的系统，大多属于这一类或近似于这一类系统。

(2) 时变系统。从系统的数学模型来看，若系统中有结构参数是时间的函数，则称这类系统是时变系统。

五、按系统中传输信号对时间的关系来分类

(1) 连续控制系统。当系统中各元件的输入量和输出量均是连续量或模拟量时，就称此类系统为连续控制系统或模拟控制系统。连续控制系统的运动规律通常可用微分方程来描述。

(2) 离散控制系统。当系统中某处或多处的信号是脉冲序列或数字形式时，就称这种系统为离散系统。通常采用数字计算机控制的系统都是离散控制系统。离散控制系统的运动规律通常可用差分方程来描述，其分析方法也不同于连续控制系统。

当然，除了以上的分类方法之外，还可以根据其他特点进行分类。

本书只讨论闭环随动控制系统和闭环定值控制系统的分析、综合设计与校正，且重点放

在单变量线性定常连续控制系统上,对于线性定常离散控制系统和本质非线性系统,也会用一定篇幅进行分析和讨论。

第四节 自动控制系统的基本要求

自动控制系统的基本要求主要有稳定性、快速性和准确性三个方面。

一、稳定性

稳定性是指系统处于平衡状态下,受到外作用(给定值变化或干扰介入)后具有重新恢复平衡状态的能力。如果系统受到外作用后,经过一段时间,其被控量可以达到某一平衡状态,则称系统稳定。如图 1-7 所示,给定值 $r(t)$ 变化,测量值 $c(t)$ 跟踪给定值且重新达到新的平衡状态,则系统稳定。否则系统不稳定,如图 1-8 所示。图 1-8 (a) 所示为在给定信号作用下,被控量振荡或单调发散的情况;图 1-8 (b) 所示为系统受到扰动作用后被控量不能恢复平衡的情况。另外,若系统出现等幅振荡,即处于临界稳定状态,严格说也属于不稳定状态。

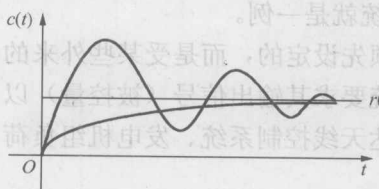


图 1-7 稳定系统的动态过程

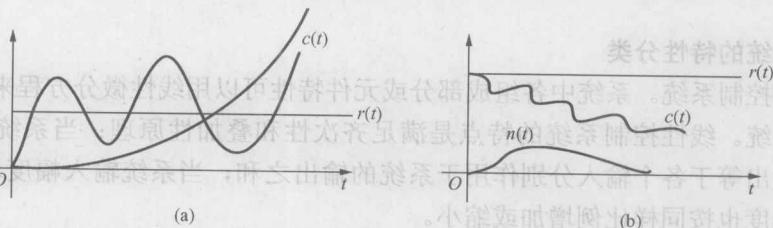


图 1-8 不稳定系统的动态过程

(a) 被控量振荡或单调发散的情况; (b) 被控量不能恢复平衡的情况

显然,控制系统的设计首先要确保的是控制系统的稳定性。即便是稳定的系统,仍然存在研究系统稳定程度的评判指标。

二、快速性

对于稳定系统而言,快速性是通过动态过程时间的长短来表征的。动态调节过程时间越短,表明快速性越好。快速性表明了系统输出对输入的响应快慢程度。

三、准确性

对于稳定系统而言,动态过程结束后所处的状态称为稳态。准确性描述的是稳态时系统期望值和被控量的测量值之间的残差大小,它反映了系统的稳态精度。

上述的基本要求只是对控制系统的定性描述。在设计或分析一个控制系统时的有关定量描述将在后续章节陆续展开。另外,对于同一个控制系统,其稳定性、快速性、准确性三方面之间是相互制约的。如果提高了过程的快速性,可能会引起系统强烈的振荡;改善了平稳性,动态过程又可能很缓慢,甚至使最终精度也很差。怎样根据控制系统的工作任务,使其对三方面的性能有所侧重并兼顾其他,以达到设计要求,正是本课程及其后续相关专业课程要解决的问题。

习 题

1-1 试比较开环控制系统和闭环控制系统的优缺点。

1-2 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。

1-3 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):

$$(1) \frac{d^2 c(t)}{dt^2} + 3 \frac{dc(t)}{dt} + 2c(t) = 5 \frac{dr(t)}{dt} + r(t) \quad (2) t \frac{dc(t)}{dt} + 2c(t) = \frac{dr(t)}{dt} + 2r(t)$$

$$(3) \frac{d^2 c(t)}{dt^2} + 2 \frac{dc(t)}{dt} + 2c^2(t) = r(t) \quad (4) 5 \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = 3 \frac{dr(t)}{dt} + 2r(t) + 3 \int r(t) dt$$

1-4 图 1-9 所示为设计的两个不同的机械式水箱水位控制系统。简单陈述这两个系统的工作原理和各自的优缺点, 并按系统结构分类, 说明各自属于哪一种?

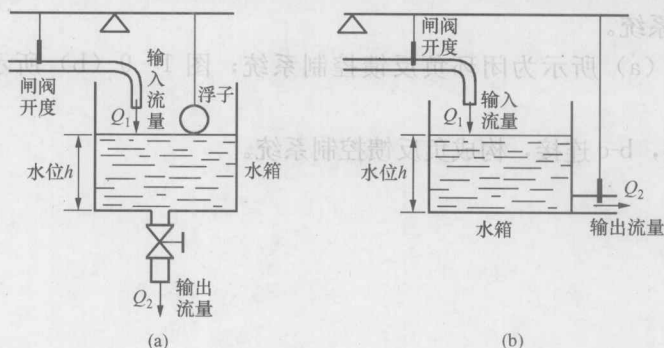


图 1-9 习题 1-4 图

1-5 图 1-10 所示为电动机速度控制系统工作原理图, 试完成:

(1) 将 a, b 与 c, d 用线连接成负反馈系统;

(2) 画出系统方框图。

1-6 图 1-11 所示为电动水位控制系统, 图中 Q_1 , Q_2 分别为进水流量和出水流量。控制的目的是保持水位为一定的高度。试说明该系统的工作原理并画出其方框图。

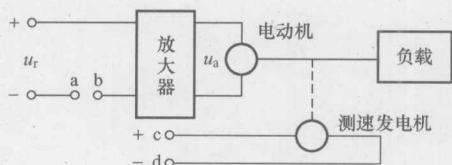


图 1-10 习题 1-5 图

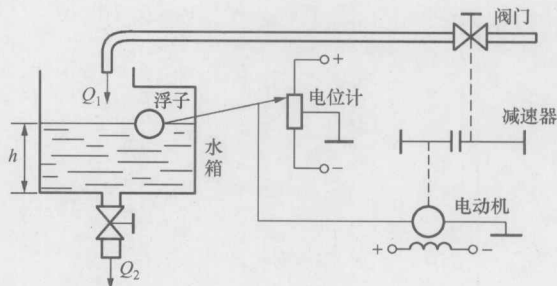


图 1-11 习题 1-6 图

1-7 图 1-12 所示为仓库大门自动控制系统, 试分析系统的工作原理, 绘制系统的方框图, 并指出各实际元件的功能及输入、输出量。

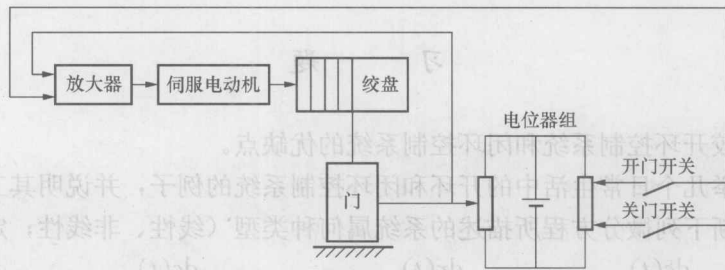


图 1-12 习题 1-7 图

参 考 答 案

1-3 (1) 线性定常连续系统；(2) 线性时变连续系统；(3) 非线性定常连续系统；(4) 线性定常连续系统。

1-4 图 1-9 (a) 所示为闭环负反馈控制系统；图 1-9 (b) 所示为开环前馈控制系统。

1-5 a-d 连接，b-c 连接，构成负反馈控制系统。



图 1-10 习题 1-4 图

如图 1-10 所示，图 1-10 (a) 所示为闭环负反馈控制系统；图 1-10 (b) 所示为开环前馈控制系统。

(1) 将 a、b、c、d 用导线连接起来，构成负反馈控制系统。

(2) 画出系统方框图。

图 1-11 所示为水塔水位控制系统，图中 Q_1 、 Q_2 为流量， h 为水位， Q_3 为出水流量。

图 1-11 所示为水塔水位控制系统，图中 Q_1 、 Q_2 为流量， h 为水位， Q_3 为出水流量。

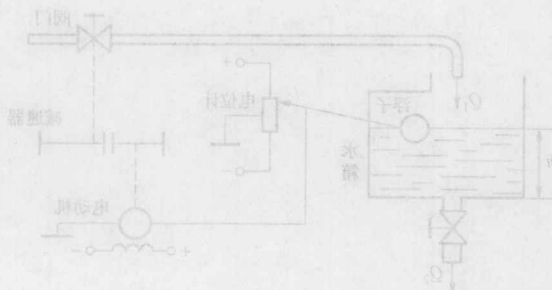


图 1-11 习题 1-5 图

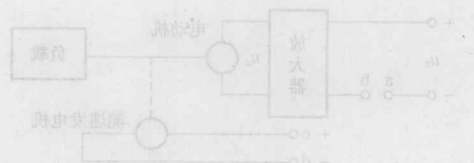


图 1-12 习题 1-7 图

图 1-13 所示为水塔水位控制系统，图中 Q_1 、 Q_2 为流量， h 为水位， Q_3 为出水流量。

图 1-13 所示为水塔水位控制系统，图中 Q_1 、 Q_2 为流量， h 为水位， Q_3 为出水流量。

第二章 控制系统的数学模型

在控制系统的分析和设计中,定性了解控制系统的工作原理及运动过程非常重要,但要更深入地定量研究控制系统的动态特性,要做的首要工作就是要建立控制系统的数学模型。数学模型是描述系统输入、输出变量以及内部各变量之间相互关系的数学表达式。控制系统的数学模型可以分为静态模型和动态模型、线性模型和非线性模型。其中,静态模型是指在静态条件下(即变量的各阶导数为零),描述变量之间关系的代数方程。静态模型描述各变量之间的关系不随时间变化,在量值上有确定的对应关系。动态模型是指描述变量各阶导数之间关系的微分方程。对于系统性能的全面分析,一般要以动态模型为对象,详细研究各变量的运动特性。

从数学模型入手研究自动控制系统是本课程的研究方法。控制系统的种类多种多样,有电气的、机械的、液压的和汽动的等。但若它们运动过程的数学表达式相同,则其分析和计算也就完全一样。因此,利用控制系统的数学模型,可以撇开系统的具体物理属性,探求这些系统运动过程的共同规律,对控制系统从理论上进行具有普遍意义的分析和研究,研究所得的结论就必然会有效地指导各种控制系统的分析与设计。

建立控制系统的数学模型有两种基本方法,即分析法和实验法。分析法是对系统各部分的运动机理进行分析,根据它们所遵循的物理或化学规律(如牛顿定律、基尔霍夫定律、热力学第二定律等)分别列写相应的运动方程,并将它们合在一起组成描述整个系统的方程。当然和数学模型有关的因素很多,在建立模型时不可能也没必要把一些非主要因素都囊括进去,而使模型过于复杂,但也不能片面地强调简化,简化得太多,会使分析结果与实际情况出入太大。因此应在模型的准确性和简化性之间进行恰当的考虑,根据实际需要建立关于系统某一方面属性的描述。实验法是人为地给系统施加某种测试信号,然后测量并记录系统的输出,并对这些输出数据进行分析 and 处理,求出一种数学表示方式,这种建模方法又称为系统辨识。近几年来,系统辨识已发展成一门独立的学科分支。本章不讨论该项内容,重点研究用分析法建立线性定常系统数学模型的方法。

作为线性定常系统,其数学模型可用微分方程、传递函数、动态结构图和频率特性几种形式描述。本章将介绍前三种,频率特性模型将在第五章中讨论。

第一节 微分方程

一、系统微分方程的建立

一个完整的控制系统通常是由若干个元器件或环节以一定方式连接而成的,对系统中每一个具体的元器件或环节按照其运动规律可以比较容易地列写出其运动方程,然后将这些微分方程联立起来,以求出整个系统的微分方程。

下面举例说明控制系统中常用的电气元件、力学元件的微分方程的列写方法。

【例 2-1】 图 2-1 所示的 RLC 串联电路中,设输入量为 $u_i(t)$, 输出量为 $u_c(t)$, 试列

写其微分方程。

解：为建立系统输出 $u_c(t)$ 和输入 $u_r(t)$ 的动态关系，可设回路电流 $i(t)$ 为中间变量，根据基尔霍夫定律，可以列出

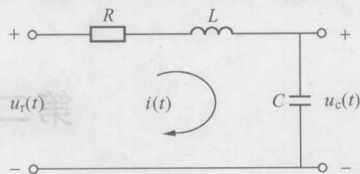


图 2-1 RLC 串联电路

$$\begin{cases} L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt = u_r(t) \\ \frac{1}{C} \int i(t) dt = u_c(t) \end{cases}$$

这是该系统的原始微分方程组，为了便于分析和求解，必须将原始的微分方程组化成标准形式。所谓标准形式就是把原始微分方程组消去中间变量，合并为一个微分方程，在该方程中只包含输入量、输出量以及它们的导数项，并把与输出量有关的项写在方程的左端，与输入量有关的项写在方程的右边，方程两端变量的导数项均按降阶排列。

在本例中，消去中间变量 $i(t)$ 及其导数项可得

$$LC \frac{d^2 u_c(t)}{dt^2} + RC \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) = u_r(t) \quad (2-1)$$

可见，RLC 串联电路的数学模型是一个二阶常系数线性微分方程。

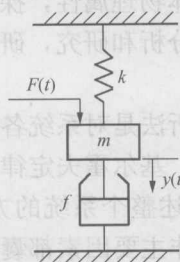


图 2-2 由弹簧、物体和
阻尼器组成的机械系统

【例 2-2】设有一个由弹簧、阻尼器和质量为 m 的物体组成的机械系统，如图 2-2 所示，设外作用力 $F(t)$ 为输入量，位移 $y(t)$ 为输出量，试列写该系统的微分方程。

解：根据牛顿第二定律可得

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} = F(t) - F_B(t) - F_k(t) \quad (2-2)$$

$$F_B(t) = f \frac{dy(t)}{dt}$$

$$F_k(t) = ky(t)$$

式中 $F_B(t)$ ——阻尼器粘性阻力，与物体运动速度成正比；

$F_k(t)$ ——弹簧的弹性力，与物体的位移成正比；

f ——阻尼系数；

k ——弹性系数。

将上述关系整理得微分方程为

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} = F(t) - f \frac{dy(t)}{dt} - ky(t)$$

化成标准形式得

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + f \frac{dy(t)}{dt} + ky(t) = F(t) \quad (2-3)$$

由式 (2-1) 与式 (2-3) 可以看出，以上两例虽然是不同的物理系统，但它们的微分方程却具有相同的形式，这样的系统称为相似系统。相似系统的动态特性也相似，因此可以通过研究电路的动态特性来研究机械系统的动态特性。由于电子电路具有易于实现和变换结构等特点，因此常采用电子电路来模拟其他实际系统，这种方法称为电子模拟技术。还可以通过数字计算机求解系统的微分方程来研究实际系统的动态特性，这就是计算机仿真技术。