

高等学校教材

GAODENG
XUEXIAO
JIAOCAI

自动控制原理 (第二版)

华北电力大学 于希宁 刘红军 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是在金慰刚教授主编的 1995 年出版的《自动控制原理》一书的基础上,总结了多年的使用经验,并根据 1999 年制订的《自动控制原理》教学大纲的要求编写的。本书包括古典控制理论基础知识、控制原理实验和用计算机辅助分析和设计控制系统三大部分。

本书编写的宗旨是:内容精炼、突出重点;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;注重物理概念,强化理论联系实际。通过实验的方法使读者了解控制系统性能分析的物理意义,同时增加了计算机辅助分析和设计控制系统的内容,使其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,使读者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。

全书共分为十章,其中第一章至第六章主要讲述线性控制理论,以及分析和设计控制系统的时域分析法、根轨迹分析法和频域分析法,第七章简要介绍非线性控制系统的分析方法,第八章介绍了离散控制系统的分析方法,第九章为五个典型实验的指导书,第十章为使用 MATLAB 计算仿真工具进行系统辅助分析和设计的指导。

本书可作为工科院校控制类专业及其他相关专业的本科生教材,也可供控制类专业师生及从事自动化方面的工程技术人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/于希宁,刘红军主编. —2 版, —北京:
中国电力出版社, 2005

高等学校教材

ISBN 7-5083-3452-3

I. 自… II. ①于…②刘… 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 (2005) 第 075607 号

中国电力出版社出版、发行

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

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2001 年 7 月第一版

2006 年 1 月第二版 2006 年 1 月北京第二次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.125 印张 480 千字

印数 3501—7500 册 定价 29.00 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)

第三版前言

本书第一版是在金慰刚教授主编, 1995 年出版的《自动控制原理》一书基础上, 总结了多年的使用经验, 并根据 1999 年制订的《自动控制原理》课教学大纲的要求编写的, 于 2001 年 7 月出版。现根据 2003 年新版教学大纲的要求, 在总结使用本书授课经验的基础上, 对本书进行重新修订再版。

本书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。考虑到新知识的不断增加, 课程的教学学时还要进一步压缩, 为了保证基础理论知识的教学, 我们对其其中的一些传统教学内容进行了删改, 加大了使用 MATLAB 计算仿真工具进行系统分析与设计的内容。另外为方便读者使用, 把相关的实验内容也一并列入本书。

对本版进行修订的指导原则是: 保持一版编排上已被证明是行之有效的体系结构; 加强对本学科中的基本概念、基本理论和基本方法叙述的简明性和准确性; 修正已发现的某些错误和不妥之处; 对每章后的习题做了较大的改动与充实; 增加了实验内容; 扩充和加深了自动控制理论的计算机辅助设计的内容。另外在排版上力求更清楚、更规范。修订后的本书基本保证了原书的体系、特色不变, 内容编排上更紧凑、连贯。

本书共分十章, 第一章至第六章主要讲述线性控制理论, 以及分析和设计控制系统的时域分析法、根轨迹分析法和频域分析法; 第七章简要介绍非线性控制系统的分析方法; 第八章介绍了离散控制系统的分析方法; 第九章为五个典型实验的指导书; 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, 书中每一章均附有适当数量的例题和习题。

本书由华北电力大学于希宁、刘红军、刘鑫屏、戴毅姜老师编写, 于希宁、刘红军任主编。另外在本书的整个编写过程中, 许多同行曾提出了不少宝贵意见并给予了大力的支持和帮助, 在此一并致以衷心感谢。

另外, 为配合本书的使用, 编者又编写了《自动控制理论复习指导与试题精解》一书, 可作为本书的辅助教材, 供读者参考。

由于作者水平有限, 肯定存在不少缺点和错误, 恳请广大读者继续批评指正。

编 者

2005 年 9 月

第一版前言

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,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技术基础理论课。

本书是在金慰刚教授主编,1995年出版的《自动控制原理》一书基础上,总结了多年的使用经验,并根据1999年制订的新版《自动控制原理》教学大纲的要求,由对这门课程具有多年教学经验的教师编写的。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,课程的教学学时还要进一步压缩,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,第一章至第六章主要讲述线性控制理论,以及分析和设计控制系统的时域分析法、根轨迹分析法和频域分析法;第七章简要介绍非线性控制系统的分析方法;第八章介绍了离散控制系统的分析方法;第九章为五个典型实验的指导书;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,书中每一章均附有小结,并有适当数量的例题和习题。

本书可作为控制类专业本科生的教学用书,对于非控制类专业少学时授课,可以采用选讲其中的主要内容来完成。另外本书也可供控制类专业师生及从事自动化方面的工程技术人员阅读和参考。

本书由华北电力大学于希宁、刘红军、刘鑫屏、戴毅姜等老师编写,于希宁、刘红军任主编。本书的编写受到华北电力大学教改基金项目的资助,本书的出版受到国家电力公司重点学科建设项目的资助。另外在本书的整个编写过程中,韩璞教授和许多同行曾给予大力的支持和帮助,并提出许多宝贵意见,在此一并致以衷心感谢。

由于作者水平有限,错误或不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2001年1月

目 录

第二版前言

第一版前言

第一章 绪论	1
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 对自动控制系统的基本要求	5
习题	6
第二章 控制系统的数学模型	8
第一节 控制系统的微分方程	8
第二节 传递函数	14
第三节 动态结构图	17
第四节 动态结构图的等效变换	19
第五节 信号流图与梅逊公式	23
第六节 典型传递函数及典型环节的传递函数	26
习题	31
第三章 时域分析法	35
第一节 控制系统的典型输入信号和时域性能指标	35
第二节 一阶系统的动态分析	38
第三节 二阶系统的动态分析	40
第四节 高阶系统的近似分析	49
第五节 控制系统的稳定性分析	52
第六节 控制系统的稳态误差	60
习题	69
第四章 根轨迹法	73
第一节 根轨迹的基本概念	73
第二节 绘制根轨迹的依据	74
第三节 绘制一般根轨迹的基本法则	76
第四节 控制系统根轨迹的绘制举例	83
第五节 参量根轨迹	86
第六节 多回路系统的根轨迹	87

第七节 零度根轨迹	89
第八节 纯迟延系统根轨迹	92
第九节 控制系统的根轨迹分析	96
习题	99
第五章 频域分析法	101
第一节 频率特性	101
第二节 典型环节的频率特性	105
第三节 控制系统开环频率特性	114
第四节 频率特性的稳定判据	121
第五节 控制系统的相对稳定性	129
第六节 开环频率特性与闭环时域指标的关系	132
第七节 闭环系统频率特性	136
第八节 闭环频率特性与时域指标间的关系	139
习题	141
第六章 线性控制系统的设计与校正	145
第一节 概述	145
第二节 线性控制系统设计与校正的基础知识	145
第三节 校正装置(控制器)的构成及其特性	148
第四节 根轨迹法串联校正	154
第五节 频率法串联校正	161
第六节 局部反馈校正	169
第七节 复合控制校正	171
习题	173
第七章 非线性系统分析	175
第一节 概述	175
第二节 典型本质非线性环节的描述函数	179
第三节 用描述函数法分析系统的稳定性	183
第四节 相平面图	189
第五节 相平面分析法	204
习题	207
第八章 线性离散控制系统的分析与综合	210
第一节 概述	210
第二节 信号的采样和复现	211
第三节 z 变换	215
第四节 脉冲传递函数(z 传递函数)	222
第五节 离散控制系统的稳定性分析	227
第六节 离散控制系统的稳态性能	231

第七节 离散控制系统的动态性能分析·····	234
第八节 离散系统的校正方法·····	236
习题·····	241
第九章 自动控制原理实验 ·····	243
实验一 典型环节的电模拟及其阶跃响应分析·····	243
实验二 随动系统的开环控制、闭环控制及稳定性·····	244
实验三 随动控制系统的定、动态性能指标及系统校正·····	246
实验四 控制系统频率特性分析·····	248
实验五 频率特性测试·····	249
第九章附录 模拟计算机简介·····	250
第十章 自动控制理论的计算机辅助设计 ·····	254
第一节 引言·····	254
第二节 前期基础知识·····	254
第三节 控制系统模型·····	259
第四节 控制系统的时域分析·····	261
第五节 控制系统的根轨迹分析·····	265
第六节 控制系统的频域分析·····	272
第七节 控制系统的校正·····	278
第八节 离散控制系统分析·····	285
习题·····	291
附录 A 常用函数拉普拉斯变换 ·····	295
附录 B 常用拉普拉斯变换的性质和定理 ·····	296
附录 C 拉氏反变换 ·····	296

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等,都是应用了自动控制技术的结果。

所谓自动控制,就是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。

自动控制的应用虽然可以追溯到 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的突破,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。自动控制的发展是在 20 世纪。例如 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》,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,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—单输出的线性定常系统的分析与设计问题。

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,研究多输入—多输出、定常和时变、线性和非线性系统的分析与设计。

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,启发与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 是锅炉汽包水位控制系统的原理图。图中 W 、 D 分别为给水流量和蒸汽流量 (负荷), 控制的任务就是以一定精度保持汽包中液位为某一期望 (给定) 的数值。

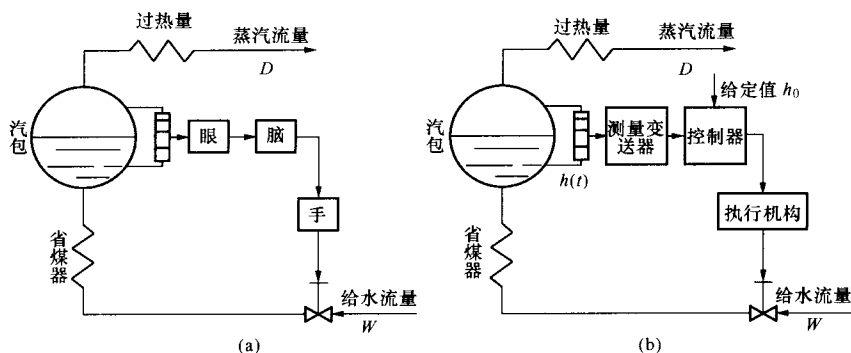


图 1-1 锅炉汽包液位控制原理图

(a) 人工控制; (b) 自动控制

在人工控制中, 人是通过眼、脑、手这三个器官来进行液位控制的。首先用眼睛观察液位的高低变化, 然后用大脑分析比较实际液位是否偏离期望值, 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, 调节给水调节阀的开度, 从而把液位控制在所期望的数值上。

在自动控制中, 汽包水位 $h(t)$ 经测量变送器 (代替了人的眼睛) 自动测量出来并按一定函数关系转换成 (通常为比例关系) 统一信号 (电流或电压)。与水位给定值进行比较, 将二者之差送入控制器 (相当于人的大脑)。控制器根据偏差的正负及大小, 发出具有一定规律的输出信号, 指挥执行器 (相当于人的手) 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。

为便于研究控制问题, 下面介绍几个常用术语。

(1) 被控量。表征设备或生产过程的运行情况或状态并需要加以控制的物理量。如图 1-1 中汽包水位 $h(t)$ 。

(2) 给定值。按生产和管理的要求, 被控量必须维持的希望值。该值也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 的变化。

(4) 控制量。由控制机构改变的, 用以控制被控量变化的物理量, 如图 1-1 中的给水流量 W 。

(5) 被控对象。被控制的物理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。

通过上例的液位控制, 我们可以看出, 自动控制系统是由被控对象和控制装置两大部分组成。在工业过程控制中, 控制装置包括检测元件、变送器、控制器或计算机装置、执行机

构等,分别完成检测、运算和执行等职能。为了便于分析并直观地表示系统各组成部分间的相互影响和信号传递关系,一般习惯上采用原理性方框图直观地表示,如图 1-2 所示。

在方框图中,系统的每个具有一定功能的组成部分称为“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,注意箭头表示的是信号的传递方向,而不是实际物料的流动方向,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。就整个系统来说,输出量就是被控量,输入量则有两类:一类是给定值输入 r ,另一类是干扰输入 n ,系统中干扰可能不止一个,其作用点也不尽相同。

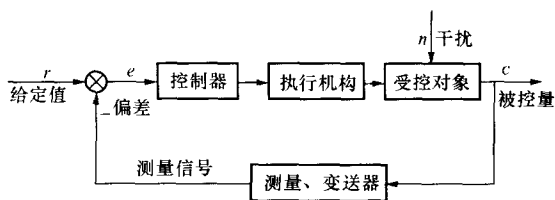


图 1-2 自动控制系统方框图

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,可从不同的角度加以分类。本节重点讨论以下几种分类方法。

一、按系统的结构分类

1. 开环控制

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

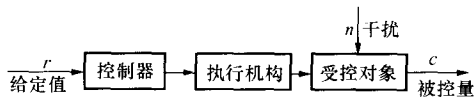


图 1-3 开环控制系统

例如简单的电动机转速控制系统,如图 1-4 所示,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^* 来确定 $n(t)$ 。

若由于电网电压的波动,或负载的改变等扰动量的影响使得转速 n 发生变化,而这种变化未能被反馈至控制装置并影响控制过程,故系统无法克服由此产生的偏差。

开环控制的特点是,系统结构和控制过程均很简单,但抗干扰能力差,控制精度不高,故一般只能用于对控制性能要求较低的场合。

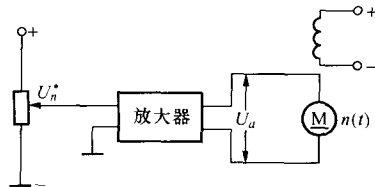


图 1-4 开环控制的调速系统

如果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,就将干扰完全抵消。

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检测,也就无法实现前馈补偿,因此,其控制精度受

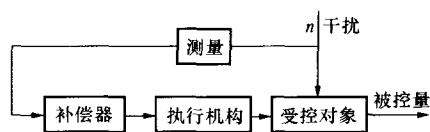


图 1-5 开环干扰补偿控制系统

到一定的限制。

2. 闭环控制

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，即存在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。由图 1-2 可知，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”，从而构成一个闭环回路。若反馈信号与系统输入信号（给定值）相反，则称为负反馈；若极性相同，则称为正反馈。控制器根据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偏差，使被控量等于给定值。由此可见，闭环控制是按偏差进行的控制。

闭环控制系统的一个突出优点就是不管是由于干扰或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此偏差。但由于闭环控制只有在偏差出现之后才产生控制作用，因此系统在强干扰作用下，被控量有可能产生较大波动。对于这种工作环境，适宜于采用按偏差调节和按干扰补偿相结合的复合控制系统，如图 1-6 所示。

二、按给定值的特征分类

(1) 定值控制系统。这种控制系统在运行中被控量的给定值保持不变，要求被控量的稳态值不变，也保持恒定。多数控制系统均属于此类系统，如图 1-1 所示的锅炉汽包液位控制系统就是一例。

(2) 随动控制系统。这种控制系统的被控量给定值，不是预先设定的，而是受某些外来的随机因素控制而变化，其变化规律是未知的函数。此系统要求其输出信号（被控量）以一定精确度跟随输入信号（给定值）而变化，故名随动系统。如跟踪卫星的雷达天线控制系统、发电机组负荷控制系统、舵舵位置控制系统等。

(3) 程序控制系统。这种控制系统的被控量给定值是预定的时间函数，并要求被控量随之变化。例如数控伺服系统、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。

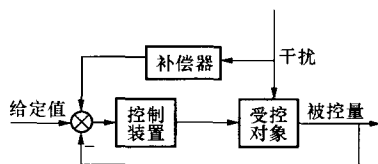


图 1-6 复合控制系统

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，称这种系统为线性系统。线性控制系统的特点是满足叠加原理。即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；当系统输入增加或缩小时，系统的输出也按同样比例增加或缩小，如图 1-7 所示。

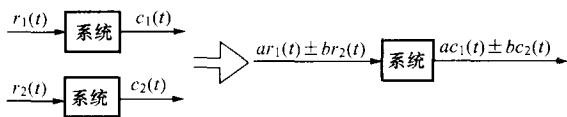


图 1-7 线性控制系统的叠加原理

(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，这类系统就称为非线性系统。非线性系统不满足叠加原理。

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，若全部参数不随时间变化，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。本书也主要研究线性定常系统。

(2) 时变系统。从系统的数学模型来看,若系统中有的参数是时间的函数,随时间变化而改变,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码形式时,这种系统称为离散系统。通常采用数字计算机控制的系统都是离散系统。离散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,还可以根据其他的特点来进行分类。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、综合校正方法,且重点放在单变量线性连续系统上,对于线性离散控制系统和非线性系统,也用一定篇幅进行分析和讨论。

第四节 对自动控制系统的基本要求

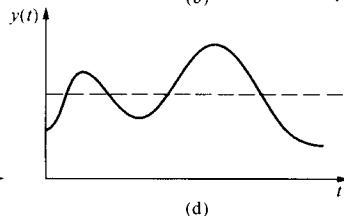
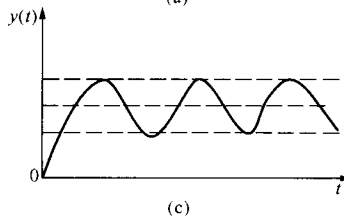
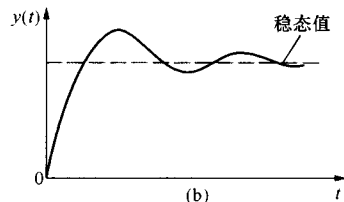
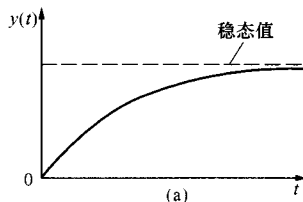
当自动控制系统受到各种干扰(扰动)或人为要求给定值(参考输入)改变时,被控量就要发生变化,偏离给定值。通过系统的自动控制作用,经过一定的过渡过程,被控量又恢复到原来的稳态值或稳定到一个新的给定值。这时系统从原来的平衡状态过渡到一个新的平衡状态,我们把被控量在变化中的过渡过程称为动态过程(即随时间而变的过程),而把被控量处于平衡状态时称为静态或稳态。

对自动控制系统最基本的要求是必须稳定,也就是要求控制系统被控量的稳态误差为零或在允许的范围之内(具体稳态误差可以多大,要根据具体的生产过程的要求而定)。对于一个好的自动控制系统来说,最好稳态误差为零。但在实际生产过程中往往做不到,只能要求稳态误差越小越好。一般要求稳态误差在被控量额定值的2%~5%之内。

自动控制系统除了要求稳态性能之外,还应满足动态过程的性能要求,在具体介绍自动控制系统的动态过程要求之前,先看看控制系统的动态过程(动态特性)有哪几种类型,一般的自动控制系统被控量变化的动态特性有以下几种。

(1) 单调过程。被控量 $y(t)$

单调变化(即没有“正”,“负”的变化),缓慢地到达新的平衡状态(新的稳态值),如图1-8(a)所示,一般这种动态过程具有较长的动态过程时间。



(2) 衰减振荡过程。被控量 $y(t)$ 的动态过程是一个振荡过程,但是振荡的幅度不断地衰减,到过渡过程结束时,被控量会达到新的稳态值。这种过程的最大幅度称为超调量,如图1-8

图1-8 自动控制系统被控量的动态特性

(b) 所示。

(3) 等幅振荡过程。被控量 $y(t)$ 的动态过程是一个持续等幅振荡过程, 始终不能达到新的稳态值, 如图 1-8 (c) 所示。这种过程如果振荡的幅度较大, 生产过程不允许, 则认为是一种不稳定的系统, 如果振荡的幅度较小, 生产过程可以允许, 则认为是稳定的系统。

(4) 发散振荡过程。被控量 $y(t)$ 的动态过程不但是一个振荡的过程, 而且振荡的幅度越来越大, 以致会大大超过被控量允许的误差范围, 如图 1-8 (d) 所示, 这是一种典型的不稳定过程, 设计自动控制系统要绝对避免产生这种情况。

一般来说, 自动控制系统如果设计合理, 其动态过程多属于图 1-8 (b) 的情况。为了满足生产过程的要求, 我们希望控制系统的动态过程不仅是稳定的, 并且希望过渡过程时间 (又称调节时间) 越短越好, 振荡幅度越小越好, 衰减得越快越好。

关于稳态性能和动态性能指标问题, 将在第三章详细介绍。

综上所述, 对于一个自动控制系统的性能要求可以概括为三个方面: 稳定性、快速性和准确性。

(1) 稳定性。一个自动控制系统的的基本要求是系统必须是稳定的, 不稳定的控制系统是不能工作的。

(2) 快速性。在系统稳定的前提下, 希望控制过程 (过渡过程) 进行得越快越好, 但是有矛盾, 如果要求过渡过程时间很短, 可能使动态误差 (偏差) 过大。合理的设计应该兼顾这两方面的要求。

(3) 准确性。即要求动态误差 (偏差) 和稳态误差都越小越好。当与快速性有矛盾时, 应兼顾两方面的要求。

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 根据图 1-9 所示的电动机速度控制系统工作原理图:

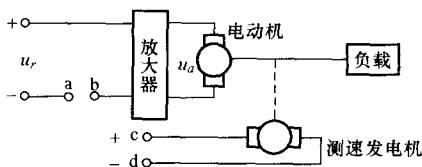


图 1-9 电动机速度控制系统工作原理图

(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。

1-5 图 1-10 是水位控制系统示意图, 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。

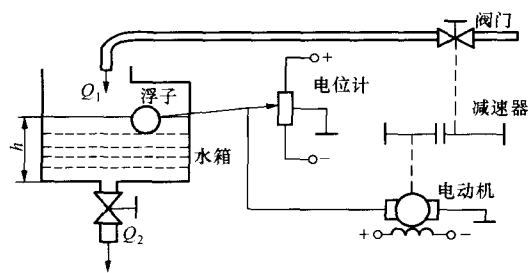


图 1-10 液位自动控制系统示意图

1-6 仓库大门自动控制系统如图 1-11 所示，试分析系统的工作原理，绘制系统的方框图，指出各实际元件的功能及输入、输出量。

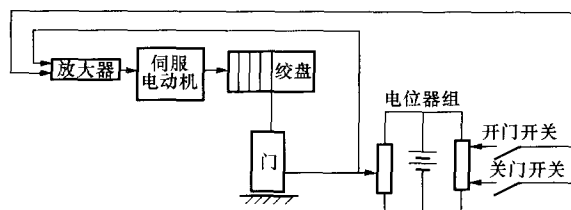


图 1-11 仓库大门自动控制系统示意图

第二章 控制系统的数学模型

在进行系统的分析和设计中,定性地了解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。

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、液压的和气动的等。但若它们的运动过程的数学表达式相同,则它们的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。

通常可以用分析法和实验法来建立系统的数学模型。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、热力学第一定律等)分别列写相应的运动方程。当然和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,应根据实际情况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,这种建模方法称为系统辨识,这是一项需要专门课程来加以学习和研究的内容。本章不讨论该内容,而将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,第四种频率特性模型将在第五章中讨论。

第一节 控制系统的微分方程

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的列写出其运动方程,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 RLC 串联电路中,设输入量为 $u_r(t)$, 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

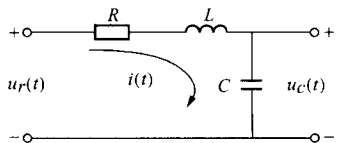


图 2-1 RLC 串联电路

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

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，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 无源网络的数学模型是一个二阶常系数线性微分方程。

【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，列写该系统的微分方程。

解 根据牛顿第二定律可得

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

式中 $F_B(t)$ ——阻尼器粘性阻力；

$F_k(t)$ ——弹簧的弹性力。

$F_B(t)$ 与物体运动速度成正比，即

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

式中 f ——阻尼系数。

$F_k(t)$ 与物体的位移成正比，即

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

式中 k ——弹性系数。

将上述关系代入式 (2-2) 中得微分方程为

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

化成标准形式得

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

比较式 (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的特点，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。

【例 2-3】 图 2-3 所示为两级 RC 电路串联组成的无源滤波网络，试列写以 $u_r(t)$ 为输入、 $u_c(t)$ 为输出的网络的微分方程。

解 根据回路电流法可列写如下方程

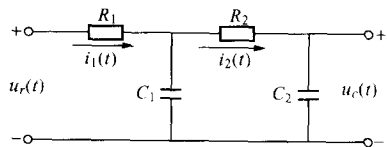


图 2-3 两级 RC 滤波电路

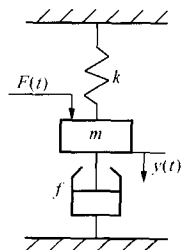


图 2-2 弹簧、物体和阻尼器系统

$$\begin{cases} u_r(t) = i_1(t)R_1 + \frac{1}{C_1}\int [i_1(t) - i_2(t)]dt \\ \frac{1}{C_1}\int [i_2(t) - i_1(t)]dt + i_2(t)R_2 + \frac{1}{C_2}\int i_2(t)dt = 0 \\ u_c(t) = \frac{1}{C_2}\int i_2(t)dt \end{cases}$$

综合上述方程组, 消去中间变量 $i_1(t)$ 、 $i_2(t)$, 化简整理得

$$R_1 R_2 C_1 C_2 \frac{d^2 u_c(t)}{dt^2} + (R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2) \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) = u_r(t)$$

令 $R_1 C_1 = T_1$, $R_2 C_2 = T_2$, $R_1 C_2 = T_3$, 则得到

$$T_1 T_2 \frac{d^2 u_c(t)}{dt^2} + (T_1 + T_2 + T_3) \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) = u_r(t) \quad (2-4)$$

可见, 该滤波网络的动态数学模型也是一个二阶常系数线性微分方程。

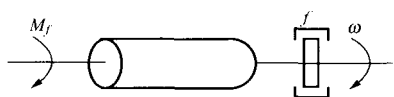


图 2-4 机械旋转运动系统

【例 2-4】 图 2-4 为一个圆柱体被轴承支承并在粘性介质中转动。当力矩 M_f 作用于系统时, 产生角位移 $\theta(t)$ 。试列写以 M_f 为输入、 $\theta(t)$ 为输出系统的微分方程。

解 根据牛顿力学第二定律, 系统的诸力矩之和为

$$\sum M = J \frac{d^2 \theta}{dt^2}$$

式中 J ——转动惯量;

$\sum M$ ——和力矩, $\sum M = M_f - M_d$ 。

$$M_d = f \frac{d\theta}{dt}$$

式中 M_d ——阻尼力矩, 其大小与转速成正比, 方向与作用力矩方向相反;

f ——粘性阻尼系数。

整理, 得

$$J \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} = M_f - f \frac{d\theta}{dt}$$

化成标准式, 得机械旋转系统的微分方程式

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + f \frac{d\theta}{dt} = M_f$$

对于由多个环节组成的复合控制系统建立微分方程时, 一般先列写组成系统各环节的微分方程, 然后, 消去中间变量便得到描述系统输出量与输入量之间关系的微分方程。

现在以图 2-5 所示的直流电动机系统为例, 说明复合控制系统的微分方程的列写。

【例 2-5】 如图 2-5 所示系统, 输入为电枢电压 U_a , 输出为转轴角速度 ω , 试列写其微分方程式。

解 直流电动机是由两个子系统构成, 一个是电网络系统, 由电网络得到电能, 产生电

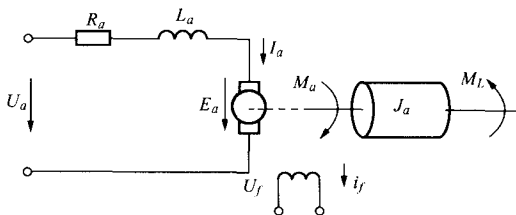


图 2-5 直流电动机系统