



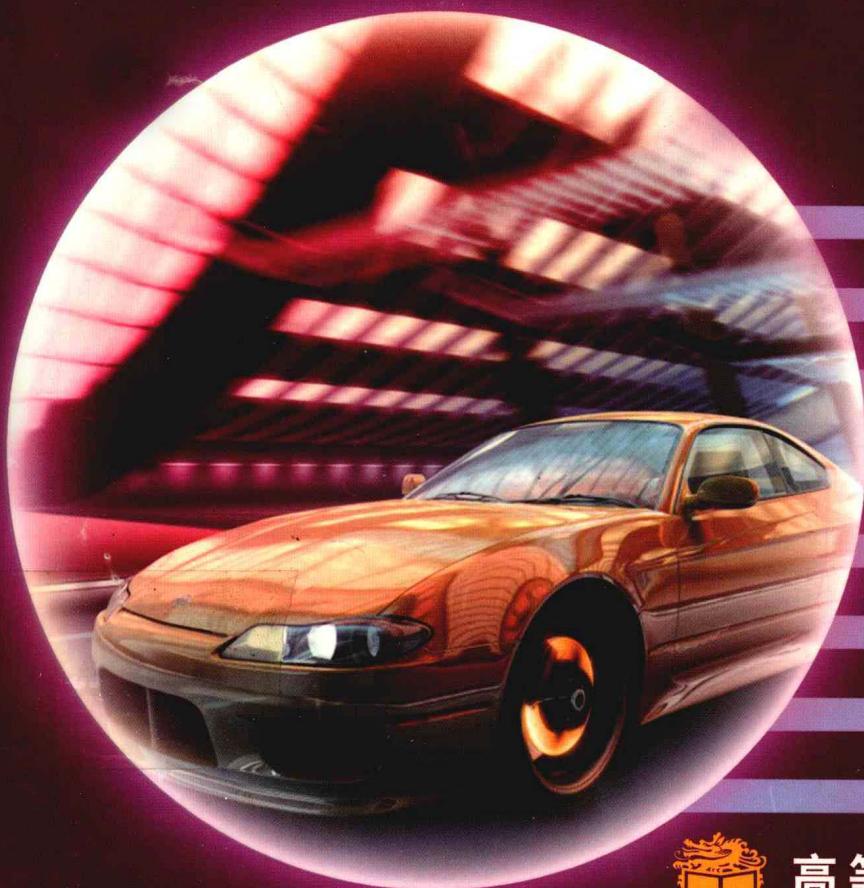
普通高等教育“十五”国家级规划教材

( 高职高专教育 )

# 自动控制原理 及其应用

(第2版)

黄 坚 主编



高等教育出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材  
(高职高专教育)

# 自动控制原理及其应用

(第2版)

黄 坚 主 编

高等教育出版社

## 内 容 提 要

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育)。

全书从工程实际应用出发,介绍了经典控制理论的基本概念、基本分析方法及其应用。书中包括控制系统的数学模型、时域分析法、频率特性法、控制系统的校正与设计、采样控制系统分析等内容。

全书强调理论的工程应用。在突出物理概念的同时,尽量减少繁琐的数学推导,叙述深入浅出,通俗易懂,并配有大量实例。每章都附有小结和习题,书末还附有部分习题参考答案。本书还结合各章的内容,以附录形式介绍了 MATLAB 在自动控制方面的基本应用。

本书适用于高职高专院校电气、自动化及机电类各专业,也可作为各类职业技术学院、成人高校相关专业的教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理及其应用/黄坚主编.—2版.—北京:  
高等教育出版社,2005.6  
ISBN 7-04-016752-2

I.自... II.黄... 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046526号

|      |     |      |     |      |     |      |     |
|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| 策划编辑 | 孙 杰 | 责任编辑 | 郑 欢 | 封面设计 | 王凌波 | 责任绘图 | 朱 静 |
| 版式设计 | 王艳红 | 责任校对 | 杨雪莲 | 责任印制 | 孔 源 |      |     |

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100011  
总 机 010-58581000

经 销 北京蓝色畅想图书发行有限公司  
印 刷 北京明月印务有限责任公司

开 本 787×1092 1/16  
印 张 13  
字 数 310 000

购书热线 010-58581118  
免费咨询 800-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landaco.com>  
<http://www.landaco.com.cn>

版 次 2001 年 7 月第 1 版  
2005 年 6 月第 2 版  
印 次 2005 年 6 月第 1 次印刷  
定 价 16.70 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 16752-00

## 出版说明

为加强高职高专教育的教材建设工作,2000年教育部高等教育司颁布了《关于加强高职高专教育教材建设的若干意见》(教高司[2000]19号),提出了“力争经过5年的努力,编写、出版500本左右高职高专教育规划教材”的目标,并将高职高专教育规划教材的建设工作分为两步实施:先用2至3年时间,在继承原有教材建设成果的基础上,充分汲取近年来高职高专院校在探索培养高等技术应用性专门人才和教材建设方面取得的成功经验,解决好高职高专教育教材的有无问题;然后,再用2至3年的时间,在实施《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,推出一批特色鲜明的高质量的高职高专教育教材。根据这一精神,有关院校和出版社从2000年秋季开始,积极组织编写和出版了一批“教育部高职高专规划教材”。这些高职高专规划教材是依据1999年教育部组织制定的《高职高专教育基础课程教学基本要求》(草案)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(草案)编写的,随着这些教材的陆续出版,基本上解决了高职高专教材的有无问题,完成了教育部高职高专规划教材建设工作的第一步。

2002年教育部确定了普通高等教育“十五”国家级教材规划选题,将高职高专教育规划教材纳入其中。“十五”国家级规划教材的建设将以“实施精品战略,抓好重点规划”为指导方针,重点抓好公共基础课、专业基础课和专业主干课教材的建设,特别要注意选择一部分原来基础较好的优秀教材进行修订使其逐步形成精品教材;同时还要扩大教材品种,实现教材系列配套,并处理好教材的统一性与多样化、基本教材与辅助教材、文字教材与软件教材的关系,在此基础上形成特色鲜明、一纲多本、优化配套的高职高专教育教材体系。

普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育)适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2002年11月30日

# 前 言

本书是在第1版的基础上,根据自动控制技术的发展,为适应我国高等教育的形势而编写的。

自动控制技术已经大量应用于空间科技、冶金、轻工、机电工程以及交通管理、环境保护等领域。这不但使得生产设备或生产过程实现了自动化,大大提高了劳动生产率和产品质量,改善了劳动条件,还在人类征服大自然,改善居住、生活条件等方面发挥了非常重要的作用。

自动控制技术的研究对象为自动控制系统,而分析和设计自动控制系统的理论基础就是自动控制原理。一般可将自动控制原理分为经典控制理论和现代控制理论。本书以工程中用得较多的、同时也是基础的经典控制理论及其应用为主要内容。全书分为六章,包括概述、自动控制系统的数学模型、时域分析法、频率特性法、控制系统的校正与设计、采样控制系统分析。

本书的主要特点是:在第1版的基础上,更加突出物理概念的阐述,进一步简化了数学推导,增加了实例。从自动控制原理的角度对工程实例进行了分析和设计。每章都配有小结和习题,书末还附有部分习题参考答案。考虑到计算机辅助分析和设计在自动控制领域内的广泛运用,本书结合各章的内容,以附录的形式介绍了MATLAB在自动控制系统分析和设计方面的基本知识和方法。

本书由南京工程学院黄坚任主编,并编写了大部分章节,宋丽蓉任副主编,陈桂参加了本书的编写。在此,向所有为本书出版给予支持和帮助的同志致以深切的谢意。

由于编者的水平有限,时间较紧,书中不妥与错误之处在所难免,恳请广大读者和专家批评指正。

编者

2005年2月

# 目 录

|                              |    |                             |     |
|------------------------------|----|-----------------------------|-----|
| <b>第一章 概述</b> .....          | 1  | 第三节 用频率特性法分析系统稳定性           | 90  |
| 第一节 自动控制与自动控制系统              | 1  | 第四节 用频率特性法分析系统性能            | 98  |
| 第二节 自动控制系统的分类                | 5  | 第五节 用频率特性法分析系统性能举例          | 105 |
| 第三节 对控制系统性能的要求               | 5  | 小结                          | 106 |
| 第四节 自动控制理论发展简述               | 7  | 习题                          | 107 |
| 小结                           | 8  |                             |     |
| 习题                           | 8  | <b>第五章 控制系统的校正与设计</b> ..... | 110 |
| <b>第二章 自动控制系统的数学模型</b> ..... | 10 | 第一节 系统校正的一般方法               | 110 |
| 第一节 控制系统的微分方程                | 10 | 第二节 控制系统的工程设计方法             | 125 |
| 第二节 传递函数                     | 13 | 第三节 控制系统设计举例                | 133 |
| 第三节 动态结构图                    | 21 | 小结                          | 139 |
| 第四节 反馈控制系统的传递函数              | 30 | 习题                          | 140 |
| 第五节 控制系统数学模型的建立与化简           |    |                             |     |
| 举例                           | 31 | <b>第六章 采样控制系统分析</b> .....   | 143 |
| 小结                           | 34 | 第一节 采样控制系统的基本概念             | 143 |
| 习题                           | 35 | 第二节 采样控制系统的数学基础             | 147 |
| <b>第三章 时域分析法</b> .....       | 38 | 第三节 采样控制系统的脉冲传递函数           | 154 |
| 第一节 控制系统的性能指标                | 38 | 第四节 采样控制系统的动态性能分析           | 160 |
| 第二节 控制系统的性能分析                | 41 | 第五节 采样控制系统的稳定性分析            | 164 |
| 第三节 控制系统的稳定性分析               | 52 | 第六节 采样控制系统的稳态误差分析           | 167 |
| 第四节 控制系统的稳态误差分析              | 57 | 小结                          | 169 |
| 第五节 用时域法分析系统性能举例             | 63 | 习题                          | 169 |
| 小结                           | 68 |                             |     |
| 习题                           | 69 | <b>附录</b> .....             | 173 |
| <b>第四章 频率特性法</b> .....       | 72 | 附录 1 常用函数的拉普拉斯变换与 $z$ 变换    |     |
| 第一节 频率特性的基本概念                | 72 | 对照表                         | 173 |
| 第二节 典型环节与系统的频率特性             | 75 | 附录 2 MATLAB 应用简介            | 176 |
|                              |    | 附录 3 部分习题参考答案               | 193 |
|                              |    | <b>参考文献</b> .....           | 199 |

# 第一章

## 概 述

本章将简要介绍有关自动控制的一般概念、自动控制系统的组成和分类、对控制系统的基本要求以及有关自动控制原理的基本情况。

### 第一节 自动控制与自动控制系统

#### 一、自动控制的基本概念

在现代科学技术的许多领域中,自动控制技术得到了广泛的应用。所谓自动控制,是指在无人直接参与的情况下,利用控制装置操纵受控对象,使被控量等于给定值或按给定信号变化规律去变化的过程,如图 1-1 所示。

图中,控制装置和受控对象为物理装置,而给定值和被控量均为一定形式的物理量。自动控制系统由控制装置和受控对象构成。对自动控制系统的性能进行分析和设计则是自动控制原理的主要任务。下面举例加以说明。

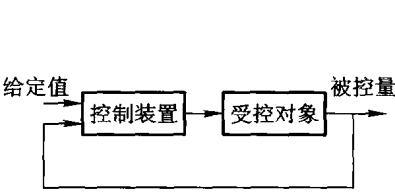


图 1-1 自动控制示意图

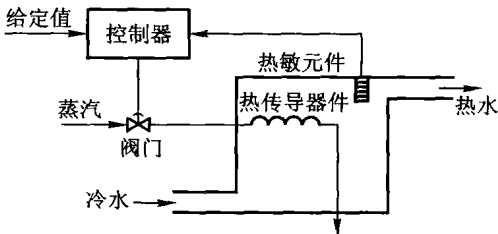


图 1-2 水温控制系统

**例 1-1** 水温控制系统如图 1-2 所示。这里受控对象为水箱,被控量是水箱中水的温度。控制装置包括测量水温的热敏元件、比较给定值和检测值并进行计算的控制器、执行控制器控制命令的阀门。

该控制系统的工作原理为:水箱中流入的为冷水,热蒸汽经阀门并流经热传导器件,通过热传导

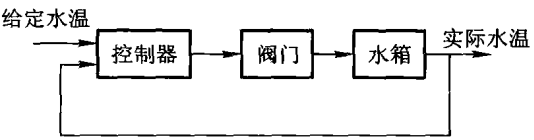


图 1-3 水温控制系统的结构图

作用将冷水加热,加热后的水流出水箱。热蒸汽冷却后也变成水由排水口排出。热敏元件将检测到的水温值转换成一定形式的物理量之后,反馈给控制器,控制器将给定温度值与检测到的实际温度值比较后,发出控制信号,调节阀门的开度,从而调节蒸汽流量,直至实际水温与给定值相符为止。这样,就实现了没有人直接参与的自动水温控制。

为了方便地分析系统性能,一般用框图来表示系统的结构,水温控制系统的结构如图 1-3 所示。

二、自动控制系统的基本构成及控制方式

自动控制系统一般有两种基本控制方式。

1. 开环控制

控制装置与受控对象之间只有顺向作用而无反向联系时,称为开环控制。

**例 1-2** 图 1-4 所示为一驱动盘片匀速旋转的转台,这种转台在 CD 机、计算机磁盘驱动器等许多现代装置中广泛应用。该系统利用电池提供与预期速度成比例的电压,直流放大器将给定信号作功率放大后,用来驱动直流电动机。作为执行机构,直流电动机的转速与加在其电枢上的电压成比例,系统结构如图 1-5 所示。

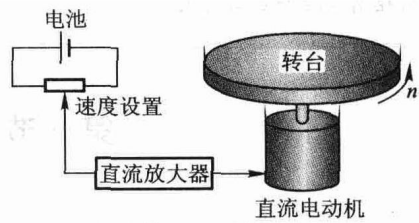


图 1-4 转台速度开环控制系统

由图 1-5 可见,系统的被控量没有反馈到系统的输入端与给定量进行比较,即被控量不对系统产生控制作用,故属开环控制系统。这种转台需要保持

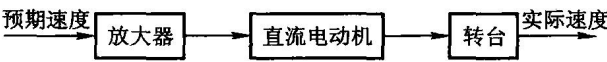


图 1-5 转台速度开环控制系统结构图

恒定的转速,但电机或直流放大器受到的任何扰动,如电网电压的波动、环境温度变化引起的放大系数的变动等都会引起速度  $n$  的改变,而这种变化未能被反馈至控制装置并影响控制过程,因此,系统无法克服由此产生的速度偏差。

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。

2. 闭环控制

控制装置与受控对象之间,不但有顺向作用,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,相应的控制系统称为闭环控制系统。闭环控制又称为反馈控制或按偏差控制。

**例 1-3** 图 1-6 所示为转台速度闭环控制系统,对应的系统结构图如图 1-7 所示。

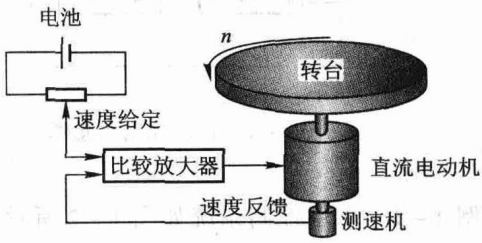


图 1-6 转台速度闭环控制系统

在此系统中,测速机是一种传感器,它能提供与转速成比例的电压信号。偏差电压信号是由对应预期速度的给定电压与代表实际速度的测速机反馈电压比较相减后得到的。当预期速度为定值,而实际速度受扰动的影响发生变化时,偏差电压也会随之变化。通过对系统的调节,可以

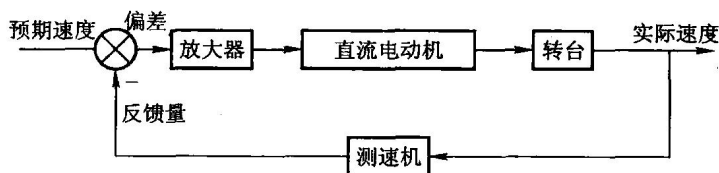


图 1-7 转台速度闭环控制系统结构图

使实际速度接近或等于预期速度,从而抵御扰动对速度的影响,提高系统的控制精度。

**例 1-4** 图 1-8 是一个位置随动系统,其系统结构图如图 1-9 所示。

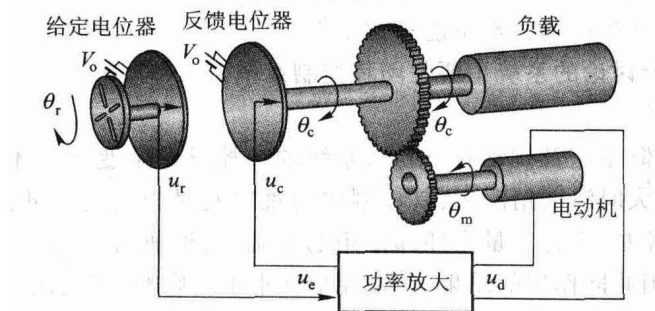


图 1-8 位置随动系统

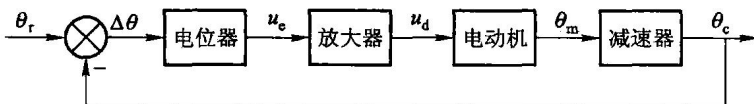


图 1-9 位置随动系统结构图

该系统用一对电位器作为位置给定和检测元件,并形成比较电路。两个电位器分别将系统的输入和输出位置信号转换成与之成比例的电压信号,并作出比较。当发送电位器的转角  $\theta_r$  和接受电位器的转角  $\theta_c$  相等时,对应的电压亦相等,即  $u_r = u_c$ ,  $u_e = u_r - u_c = 0$ ,因而  $u_d = 0$ ,电动机处于静止状态。若使发送电位器的转角按逆时针方向增加一个角度  $\Delta\theta$ ,则由于  $u_r$  大于  $u_c$  而产生一个相应极性的偏差电压  $u_e$ ,经放大器放大后得到  $u_d$ ,供给直流电动机,使其带动负载和接收电位器的动臂一起逆时针旋转,直至  $\theta_r = \theta_c$  为止。

**例 1-5** 采用转速负反馈的直流电动机调速系统,如图 1-10 所示。系统的结构如图 1-11 所示。此系统的测量装置为测速机和分压电位器,电动机的转速  $n$  被其转换成反馈电压  $u_f$ ,并反馈至系统的输入端,形成闭合回路。加在放大器输入端的电压  $e$  为给定电压  $u_n$  与  $u_f$  的差值,即  $e = u_n - u_f$ 。

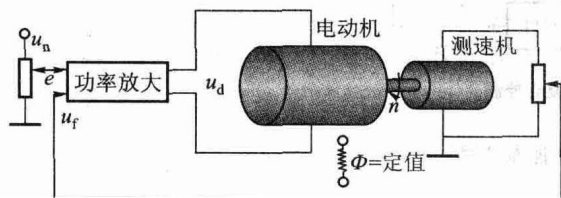


图 1-10 闭环控制的调速系统



图 1-11 调速系统结构图

此闭环控制系统中,输出转速  $n$  取决于给定电压  $u_n$ 。对于由电网电压波动,负载变化以及除测量装置之外的其他部分的参数变化所引起的转速变化,都可以通过系统的自动调整加以抑制。例如,如果由于以上原因使得转速下降( $n \downarrow$ ),将通过以下的调节过程使  $n$  基本维持恒定。

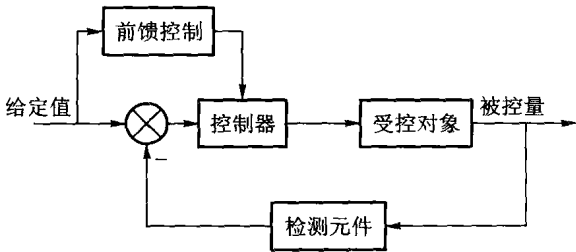
$$n \downarrow \rightarrow u_f \downarrow \rightarrow e \uparrow \rightarrow u_d \uparrow \rightarrow n \uparrow$$

由上述例子可知,闭环控制系统是通过给定值与反馈量的偏差来实现控制作用的,故这种控制常称为按偏差控制,或称反馈控制。此类系统包括两种传输信号的通道:由给定值至被控量的通道称为前向通道;由被控量至系统输入端的通道称为反馈通道。闭环系统能减小或消除作用在前向通道上的扰动所引起的被控量的偏差值,因而具有较高的控制精度和较强的抗扰能力。但若设计调试不当,易产生振荡甚至不能正常工作。

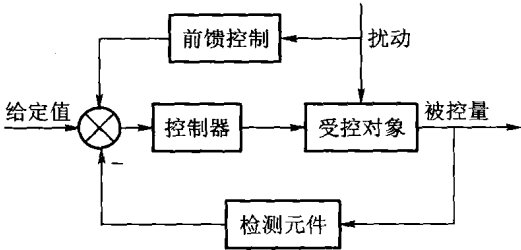
自动控制原理中所讨论的系统主要是闭环控制系统。

### 3. 复合控制

反馈控制是在外部(给定及扰动)作用下,系统的被控量发生变化后才作出相应调节和控制的,在受控对象具有较大时滞的情况下,其控制作用难以及时影响被控量,进而形成快速有效的反馈控制。前馈补偿控制,则在测量出外部作用的基础上,形成与外部作用相反的控制量,该控制量与相应的外部作用共同作用的结果,使被控量基本不受影响,即在偏差产生之前就进行了防止偏差产生的控制。在这种控制方式中,由于被控量对控制过程不产生任何影响,故它也属于开环控制。前馈补偿控制与反馈控制相结合,就构成了复合控制。复合控制有两种基本形式:按输入前馈补偿的复合控制和按扰动前馈补偿的复合控制,如图 1-12 所示。



(a) 按输入前馈补偿的复合控制



(b) 按扰动前馈补偿的复合控制

图 1-12 复合控制方式

## 第二节 自动控制系统的分类

自动控制系统的分类方法较多,常见的有以下几种。

### 一、线性系统和非线性系统

由线性微分方程或线性差分方程所描述的系统称为线性系统;由非线性方程所描述的系统称为非线性系统。

### 二、定常系统和时变系统

从系统的数学模型来看,若微分方程的系数不是时间变量的函数则称此类系统为定常系统,否则称为时变系统。

若系统既是线性的又是定常的,则称之为线性定常系统。此类系统为本书主要讨论对象。

### 三、连续系统、离散系统和采样系统

从系统中的信号来看,若系统各部分的信号都是时间的连续函数即模拟量,则称此系统为连续系统。若系统中有一处或多处信号为时间的离散函数,如脉冲或数码信号,则称之为离散系统。若系统中既有模拟量也有离散信号,则又可称为采样系统。

### 四、恒值系统、随动系统和程序控制系统

若系统的给定值为一定值,而控制任务就是克服扰动,使被控量保持恒值,此类系统称为恒值系统。例如,电机速度控制、恒温、恒压、水位控制等。若系统给定值按照事先不知道的时间函数变化,并要求被控量跟随给定值变化,则此类系统称为随动系统。如火炮自动跟踪系统、轮船位置控制系统等。

若系统的给定值按照一定的时间函数变化,并要求被控量随之变化,则此类系统称为程序控制系统。例如,数控伺服系统以及一些自动化生产线等。

此外,根据组成系统的物理部件的类型,可分为机电控制系统、液压控制系统、气动系统以及生物系统等。根据系统的被控制量,又可分为位置控制系统、速度控制系统、温度控制系统等。

## 第三节 对控制系统性能的要求

一个理想的控制系统,在其控制过程中应始终使被控量等于给定值。但是,由于系统中储能元件的存在以及能源功率的限制,使得运动部件的加速度受到限制,其速度和位置难以瞬时变化。所以,当给定值变化时,被控量不可能立即等于给定值,而需要经过一个过渡过程,即瞬态过程。所谓瞬态过程就是指系统受到外加信号(给定值或扰动)作用后,被控量随时间变化的全过程。

瞬态过程可以反映系统内在性能的好坏,而常见的评价系统优劣的性能指标也是从瞬态过程中定义出来的。对系统性能的基本要求有三个方面。

## 一、稳定性

稳定性是这样来表述的:系统受到外作用后,其瞬态过程的振荡倾向和系统恢复平衡的能力。如果系统受到外作用力后,经过一段时间,其被控量可以达到某一稳定状态,则称系统是稳定的,如图 1-13 所示;否则称为不稳定的,如图 1-14 所示。图 1-14(a)为在给定信号作用下,被控量振荡发散的情况;图 1-14(b)为系统受扰动 $d(t)$ 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,即处于临界稳定的状态,也视为不稳定。

显然,不稳定的系统是无法正常工作的。一个能在生产实际中应用的系统,不仅应具有稳定性,而且在瞬态过程中被控量的振荡也不能过于强烈,否则不能满足生产实际的要求,甚至会导致系统部件的松动和被破坏。

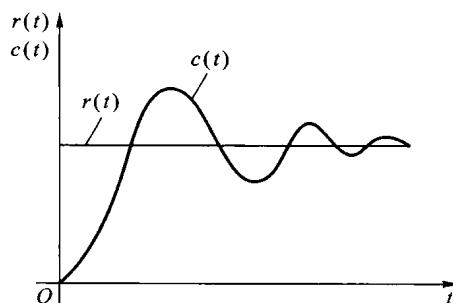


图 1-13 稳定系统的瞬态过程

## 二、快速性

快速性是通过瞬态过程时间长短来表征的,如图 1-15 所示。过渡过程时间越短,表明快速性越好,反之亦然。快速性表明了系统输出 $c(t)$ 对输入 $r(t)$ 响应的快慢程度。系统响应越快,说明系统的输出复现输入信号的能力越强。

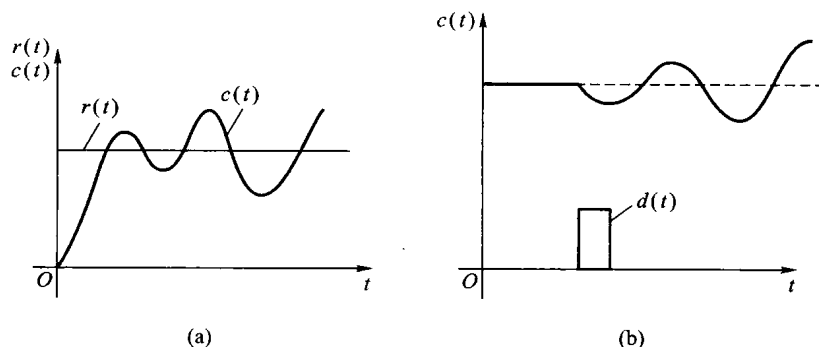


图 1-14 不稳定系统的瞬态过程

## 三、准确性

准确性是由输入给定值与输出响应的终值之间的差值 $e_{ss}$ 来表征的,如图 1-16 所示。它反映了系统的稳态精度。若系统的最终误差为零,则称为无差系统,否则称为有差系统。

稳定性、快速性和准确性往往是互相制约的。在设计与调试过程中,若过分强调系统的稳定性,则可能会造成系统响应迟缓和控制精度较低后果;反之,若过分强调系统响应的快速性,则又会使系统的振荡加剧,甚至引起不稳定。

怎样根据工作任务的不同,分析和设计自动控制系统,使其对三方面的性能有所侧重,并兼顾其他,以全面满足要求,这正是本课程所要研究的内容。

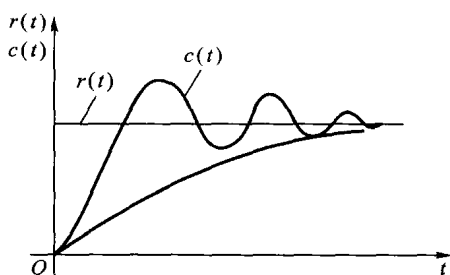


图 1-15 控制系统的快速性

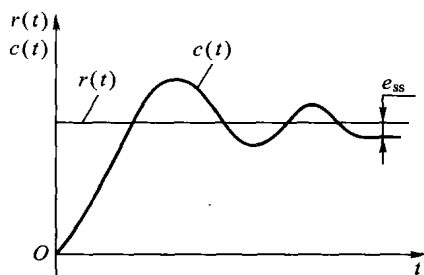


图 1-16 控制系统的稳态精度

## 第四节 自动控制理论发展简述

自动控制理论研究的是如何按受控对象和环境特征,通过能动地采集和运用信息,施加控制作用,使系统在变化或不确定的条件下正常运行并具有预定功能。它是研究自动控制共同规律的技术科学,其主要内容涉及受控对象、环境特征、控制目标和控制手段以及它们之间的相互作用。

具有“自动”功能的装置自古有之,瓦特发明的蒸汽机上的离心调速器是比较自觉地运用反馈原理进行设计并取得成功的首例。麦克斯韦对它的稳定性进行分析,于 1868 年发表的论文当属最早的理论工作。从 20 世纪 20 年代到 40 年代形成了以时域法、频率法和根轨迹法为主要内容的“经典”控制理论。60 年代以来,随着计算机技术的发展和航天等高科技的推动,又产生了基于状态空间模型的“现代”控制理论。

随着自动化技术的发展,人们力求使设计的控制系统达到最优的性能指标,为了使系统在一定的约束条件下,其某项性能指标达到最优而实行的控制称为最优控制。

当对象或环境特性变化时,为了使系统能自行调节,以跟踪这种变化并保持良好的品质,又出现了自适应控制。

虽然现代控制理论的内容很丰富,与经典控制理论相比较,它能解决更多更复杂的控制问题,但对于单输入、单输出线性定常系统而言,用经典控制理论来分析和设计,仍是最实用最方便的。

真正优良的设计必须允许模型的结构和参数不精确并可能在一定范围内变化,即具有鲁棒性。这是当前的重要前沿课题之一。另外,使理论实用化的一个重要途径就是数学模拟(仿真)和计算机辅助设计(CAD)。

前面谈到的主要是针对线性系统的理论。近年来,在非线性系统理论、离散事件系统、大系统和复杂系统理论等方面均有不同程度的发展。智能控制在实用方面也得到了很快的发展,它主要包括专家系统、模糊控制和人工神经网络等内容。

总之,自动控制理论正随着技术和生产的发展而不断发展,而它反过来又成为高新技术发展的重要理论根据和推动力。本书所介绍的内容是该理论中最基本的也是最重要的内容,即经典控制理论部分。它在工程实践中用得最多,也是进一步学习自动控制理论的基础。

## 小 结

① 自动控制就是在没有人直接参与的情况下,利用控制装置操纵受控对象,使被控量等于给定值。

② 自动控制的基本方式有开环控制和闭环控制两种。开环控制实施起来简单,但抗扰动能力较差,控制精度也不高。自动控制原理中主要讨论闭环控制方式,其主要特点是抗扰动能力强,控制精度高,但存在能否正常工作,即稳定与否的问题。

③ 可根据需要,将自动控制系统按照不同的方法来分类。

④ 一般地,可从稳(能否正常工作)、快(快速响应能力)、准(控制精度)等几方面的性能来评价自动控制系统。而这几方面的性能往往是相互制约的,因而需根据不同的工作任务来分析和设计自动控制系统,使其在满足主要性能要求的同时,兼顾其他性能。

⑤ 自动控制原理是分析和设计自动控制系统的理论基础,大致可分为经典控制理论和现代控制理论两大部分,本书主要介绍经典控制理论。随着生产技术的不断更新和发展,自动控制理论也在不断发展,了解这方面的情况,对于学习和掌握好自动控制技术也是十分必要的。

## 习 题

1-1 试阐述下列术语的意义并举例说明:

自动控制;控制装置与受控对象;给定值与被控量;开环控制与闭环控制;线性系统与非线性系统;连续系统与采样系统;恒值系统与随动系统;稳定性、快速性和准确性。

1-2 试列举开环控制和闭环控制的例子,并说明其工作原理。

1-3 直流发电机电压控制系统如图 1-17 所示,(a)为开环控制,(b)为闭环控制。发电机电势与原动机转速成正比,同时与励磁电流成正比。当负载变化时,由于发电机电枢内阻上电压降的变化,会引起输出电压的波动。

① 试说明开环控制的工作原理,并分析原动机转速的波动和负载的变化对发电机输出电压的影响;

② 试分析闭环控制的控制过程,并与开环控制进行比较,说明负反馈的作用。

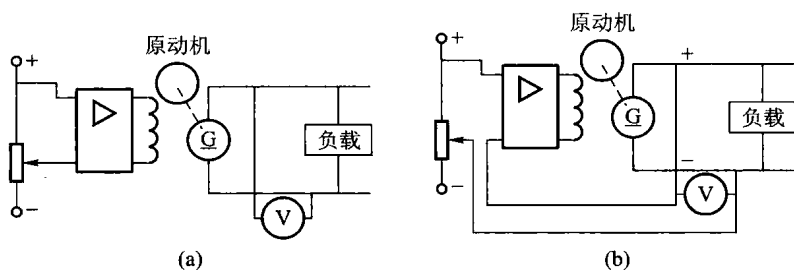


图 1-17 题 1-3 图

1-4 炉温控制系统如图 1-18 所示,要求:

① 指出系统输出量、给定输入量、扰动输入量、被控对象和自动控制器的各组成部分,并画出其方框图。

② 说明该系统是怎样消除或减少偏差的。

1-5 图 1-19 所示为水位控制系统,要求:

① 画出系统的原理方框图,指出系统的输出量和输入量(包括给定输入量和扰动输入量)。

② 分析工作原理。

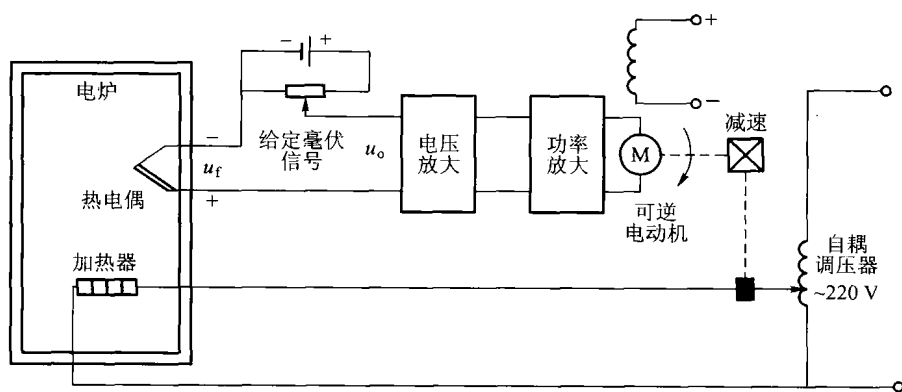


图 1-18 题 1-4 图

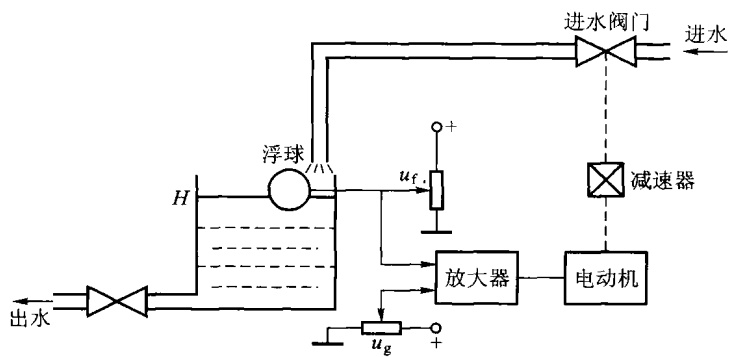


图 1-19 题 1-5 图

## 第二章

# 自动控制系统的数学模型

自动控制理论的研究对象是自动控制系统,研究内容是自动控制系统稳、准、快三方面的性能。当控制系统的输入发生变化时,其输出往往要经过一个瞬态过程才能跟上输入的变化。对系统性能的分析,就是通过对瞬态过程的分析来实现的。为了掌握其规律,就必须将系统的瞬态过程用一个反映其运动状态的数学表达式表示出来。这种描述系统瞬态过程中各变量之间相互关系的数学表达式就称为系统的数学模型。在分析系统性能之前,必须建立系统的数学模型。

建立系统数学模型的方法主要有两种。①解析法:根据系统所遵循的物理定律,经过数学推导,求出数学模型;②实验法:在系统的输入端加上一定形式的测试信号,通过实验测试出系统的输出信号,再根据输入、输出特性确定数学模型。本章只介绍用解析法建立数学模型的方法。

系统的数学模型有多种,常用的有微分方程、传递函数、动态结构图、频率特性等。

本章主要介绍建立数学模型的一般方法以及几种数学模型之间的相互转换。

## 第一节 控制系统的微分方程

### 一、建立系统微分方程的一般步骤

一个系统通常是由一些环节连接而成的,将系统中每个环节的微分方程求出来,然后将这些微分方程联立起来,消除中间变量,便可求出整个系统的微分方程。

列写系统微分方程的一般步骤:

- ① 确定系统的输入变量和输出变量。
- ② 建立初始微分方程组。即根据各环节所遵循的基本物理规律,分别列写出相应的微分方程,并构成微分方程组。
- ③ 消除中间变量,将式子标准化。将与输入量有关的项写在方程式等号的右边,与输出量有关的项写在等号的左边。

### 二、常见环节和系统的微分方程的建立

下面举例说明常见环节和系统的微分方程的建立。

#### 1. RC 电路

RC 电路如图 2-1 所示。

(1) 确定输入、输出量

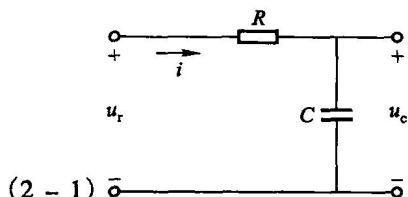
输入量为电压  $u_r$ , 输出量为电压  $u_c$ 。

(2) 建立初始微分方程组

根据基尔霍夫定律得

$$u_r = Ri + u_c$$

$$i = C \frac{du_c}{dt}$$



(2-1)

(2-2) 图 2-1 RC 电路

式中,  $i$  为回路电流, 它是一个中间变量。

(3) 消除中间变量, 使式子标准化

将式(2-2)代入式(2-1), 消除中间变量  $i$ , 微分方程中只留下输入、输出量。将与输出量有关的各项放在方程式等号的左边, 与输入量有关各项放在等号的右边。于是得

$$RC \frac{du_c}{dt} + u_c = u_r \quad (2-3)$$

可见, RC 电路的数学模型是一个一阶常系数线性微分方程。

## 2. 机械位移系统

图 2-2 所示是一个由弹簧、质量物体和阻尼器所组成的机械位移系统。其中,  $K$  为弹簧系数,  $m$  为物体的质量,  $f$  为阻尼系数。

(1) 确定输入、输出量

设外作用力  $F(t)$  为输入量, 质量物体的位移  $y(t)$  为输出量。

(2) 建立初始微分方程组

根据牛顿第二定律  $F = ma$ , 可得

$$F(t) - F_B(t) - F_K(t) = ma \quad (2-4)$$

其中,  $F_B(t)$  为阻尼器的粘性阻力, 与物体运动的速度成正比, 即

$$F_B(t) = f \frac{dy(t)}{dt} \quad (2-5)$$

$F_K(t)$  为弹簧的弹性力, 与物体的位移成正比, 即

$$F_K(t) = Ky(t) \quad (2-6)$$

$a$  为物体的加速度, 即

$$a = \frac{d^2 y(t)}{dt^2} \quad (2-7)$$

(3) 消除中间变量, 将式子标准化

将式(2-5)、(2-6)、(2-7)代入式(2-4), 整理得

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + f \frac{dy(t)}{dt} + Ky(t) = F(t) \quad (2-8)$$

可见, 机械位移系统的数学模型是一个二阶常系数线性微分方程。

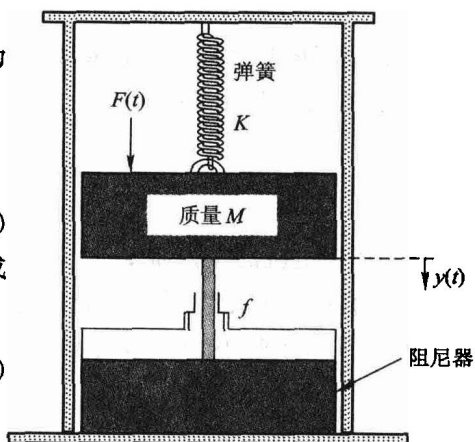


图 2-2 机械位移系统