



全国高等专科教育自动化类专业规划教材

# 自动控制原理

陈铁牛 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



全国高等专科学校教育自动化类专业规划教材

# 自动控制原理

主 编 陈铁牛  
副主编 黄 玮 胡学芝  
参 编 王 瑛 陈 震  
主 审 张云生

（此处文字模糊，疑似为ISBN或定价信息）



机械工业出版社

本书是高职高专教育新一轮自动化类专业规划教材。该教材从贴近实际应用出发,系统地介绍了自动控制原理的基本理论及其应用,并引入目前控制领域广泛使用的 MATLAB 软件进行辅助分析。全书共分 7 章,包括:自动控制的基本概念,自动控制系统的数学描述方法,控制系统的时域分析法,控制系统的根轨迹分析法,控制系统的频域分析法,控制系统的校正及非线性系统分析。每章后面配有本章小结和思考题与习题。另外在附录中介绍了自动控制系统辅助分析工具——MATLAB 软件及其应用。

本书强调理论的工程应用,突出物理概念的理解和掌握,尽量减少繁琐的数学推导,前后知识衔接紧密,表述深入浅出,通俗易懂,易于教学和自学。

本书可作为高职高专院校电气工程及自动化类专业及相关专业的教材,也可作为应用型本科、成人教育相关专业教材,还可供有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理/陈铁牛主编. —北京:机械工业出版社, 2006.7  
全国高等专科教育自动化类专业规划教材  
ISBN 7-111-19356-3

I. 自… II. 陈… 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 (2006) 第 063833 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)  
策划编辑: 于宁 高倩  
责任编辑: 高倩 版式设计: 冉晓华 责任校对: 魏俊云  
封面设计: 鞠杨 责任印制: 洪汉军  
北京京丰印刷厂印刷  
2006 年 7 月第 1 版·第 1 次印刷  
184mm × 260mm · 14.75 印张 · 362 千字  
0 001—4 000 册  
定价: 22.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
本社购书热线电话 (010) 68326294  
编辑热线电话 (010) 88379758  
封面无防伪标均为盗版

# 前 言

本教材是在教育部高等学校高职高专自动化技术专业教学指导委员会的指导下，为适应高职高专电气工程及自动化类专业人才培养而编写的新一轮规划教材，可兼顾三年制和两年制高职高专电气工程及自动化类专业的教学要求。

该教材重点介绍了自动控制原理的经典控制理论部分，基本内容包括：自动控制系统的基本概念，自动控制系统的数学描述方法，控制系统的时域分析法，控制系统的根轨迹分析法，控制系统的频域分析法，控制系统的校正及非线性系统分析等章节，并在附录中介绍了自动控制系统辅助分析工具——MATLAB 软件及其应用。

本教材在结构上保持了作为原理性课程教材的系统性和完整性要求，同时把贴近生产实际的应用作为教材内容的引入点和出发点。在分析手段上引入了目前控制领域广泛使用的 MATLAB 软件，强化了在传统理论中计算机的辅助分析和设计作用。在教学内容安排上坚持了理论“够用为度”的原则，对传统的学科式教育教学内容进行了较大的精练和压缩。教材内容前后知识衔接紧密，表述深入浅出，通俗易懂，每章后配有“本章小结”和“思考题与习题”，便于学生巩固所学知识及自学。

参加本教材编写工作的有：昆明冶金高等专科学校陈铁牛（第 1、5 章）、黄玮（第 2、7 章）、王瑛（第 6 章）；黄石理工学院胡学芝（第 3、4 章）；河南机电高等专科学校陈震（附录）。全书由陈铁牛统稿。

本教材由昆明理工大学张云生教授担任主审，对该书进行了认真细致的审阅，提出了许多宝贵的修改意见，在此表示衷心的感谢。在本教材的编写过程中，查阅和参考了大量的文献资料，得到了许多有益的启发和教益，在此谨向参考文献的作者致以诚挚的谢意。

限于编者水平，书中缺点错误在所难免，恳请广大读者提出宝贵意见，以便修改。

为方便教学，凡选用本书作为授课教材的学校，均可向本书责任编辑索取免费电子教案，垂询电话 010—88379758。

编 者

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 自动控制系统的基本概念</b> .....	1
1.1 自动控制及自动控制理论的发展简述 .....	1
1.2 自动控制的基本原理与方式 .....	2
1.3 自动控制系统的分类 .....	7
1.4 对自动控制系统的基本要求 .....	8
本章小结 .....	9
思考题与习题 .....	10
<b>第 2 章 自动控制系统的数学描述方法</b> .....	11
2.1 控制系统的微分方程 .....	11
2.2 传递函数 .....	23
2.3 动态结构图与梅森公式 .....	31
2.4 控制系统的几种常用传递函数 .....	41
2.5 数学模型的 MATLAB 变换 .....	44
本章小结 .....	49
思考题与习题 .....	49
<b>第 3 章 控制系统的时域分析法</b> .....	52
3.1 典型输入信号和时域性能指标 .....	52
3.2 一阶系统的时域分析 .....	54
3.3 二阶系统的时域分析 .....	56
3.4 控制系统的稳定性分析 .....	64
3.5 控制系统的稳态误差分析 .....	70
3.6 MATLAB 在时域分析中的应用 .....	77
本章小结 .....	84
思考题与习题 .....	85
<b>第 4 章 控制系统的根轨迹分析法</b> .....	88
4.1 根轨迹的概念与根轨迹方程 .....	88
4.2 绘制根轨迹的基本规则和方法 .....	90
4.3 用根轨迹分析控制系统 .....	96
4.4 根轨迹的改造 .....	98
4.5 用 MATLAB 软件绘制和分析根轨迹图 .....	101
本章小结 .....	104
思考题与习题 .....	105

<b>第 5 章 控制系统的频域分析法</b> .....	107
5.1 频率特性的基本概念 .....	107
5.2 典型环节的频率特性 .....	111
5.3 系统的开环频率特性 .....	117
5.4 频域法分析闭环系统的稳定性 .....	125
5.5 用开环频率特性分析系统的性能 .....	132
5.6 MATLAB 在频域分析中的应用 .....	136
本章小结 .....	143
思考题与习题 .....	143
<b>第 6 章 控制系统的校正</b> .....	147
6.1 系统校正概述 .....	147
6.2 串联超前校正 .....	149
6.3 串联滞后校正 .....	155
6.4 串联滞后-超前校正 .....	158
6.5 串联校正的期望特性法 .....	162
6.6 PID 校正装置及 PID 串联校正 .....	165
6.7 反馈校正 .....	168
6.8 MATLAB 用于系统校正设计 .....	172
本章小结 .....	180
思考题与习题 .....	180
<b>第 7 章 非线性系统分析</b> .....	183
7.1 非线性微分方程的线性化 .....	183
7.2 典型非线性特性及其对系统性能的影响 .....	184
7.3 描述函数法 .....	187
7.4 用描述函数法分析非线性控制系统 .....	193
本章小结 .....	198
思考题与习题 .....	198
<b>附录 A 自动控制系统辅助分析工具——MATLAB 软件及其应用</b> .....	200
A1 MATLAB 概述 .....	200
A2 MATLAB 的安装与启动 .....	201
A3 MATLAB 的命令窗口 .....	202
A4 MATLAB 中的命令函数和 M 文件 .....	205
A5 MATLAB 中的变量和语句 .....	210
A6 用 MATLAB 绘制响应曲线 .....	212
A7 Simulink 仿真软件介绍 .....	217
<b>参考文献</b> .....	229

# 第 1 章 自动控制系统的基本概念

自动控制原理的研究对象是自动控制系统。为了使读者对本课程的学习有一个初步的认识,本章首先介绍自动控制系统及自动控制理论的简单发展情况,然后介绍自动控制的基本原理与方式、自动控制系统的分类及对控制系统的基本要求等。

## 1.1 自动控制及自动控制理论的发展简述

自动控制作为技术改造和技术发展的重要手段,在工业、农业、国防乃至日常生活和社会科学领域中都起着极其重要的作用,尤其是在航天、制导、核能等方面,自动控制技术更是不可缺少。

所谓自动控制,是指在无人直接参与的情况下,利用外加的设备或装置(称控制装置或控制器),使机器、设备或生产过程(统称被控对象)的某个工作状态或参数(即被控量)自动地按照预定的规律运行。例如,造纸机卷取系统的张力恒定控制、轧钢机机架速度的控制、炉窑的温度控制、火炮系统的自动跟踪控制以及人造卫星的轨道控制等。这些都是自动控制的结果。

对于不同的控制对象,所要实现的控制要求不同,它们的功能与结构也各有不同,但它们都是由控制器、被控对象等部件组成,且都是为了了一定的目的有机地连接在一起的一个整体,这个整体即称为自动控制系统。

自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学。它的发展初期,是以反馈理论为基础的自动调节原理,主要用于工业控制。1788年瓦特发明蒸汽机的同时,发明了离心式调速器,使蒸汽机转速保持恒定,这是最早的被用于工业的自动控制装置。在第二次世界大战期间,对于军用装备,如飞机及船用自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达跟踪系统以及其他基于反馈原理的军用装备等的设计与制造的强烈需求,进一步促进并完善了自动控制理论。第二次世界大战后,完整的自动控制理论体系(即所谓的经典控制理论)已基本形成,它以传递函数为数学工具,频率法为主要研究方法,研究单输入—单输出的线性定常系统的分析和设计问题,并在工程上比较成功地解决了如恒值控制系统与随动控制系统的设计与实践问题。

20世纪60年代初期,随着现代应用数学新成果的推出和电子计算机技术的应用,特别是制导、宇航等技术的发展,推动自动控制理论跨入了一个新阶段——现代控制理论。它主要研究多输入—多输出、时变和非线性等控制系统的分析与设计问题,其基本方法是基于时域的分析方法,研究内容十分广泛,主要有线性系统、最优控制、最佳滤波、自适应控制、系统辨识、随机控制等。

近年来,随着技术革命和大规模复杂系统的发展,已促使自动控制理论开始向第三代发展,即大系统理论和智能控制理论。

作为自动化类专业的一门专业基础课教材,本书将重点放在经典控制理论。

## 1.2 自动控制的基本原理与方式

### 1.2.1 人工控制与自动控制

自动控制作为一种重要的技术手段，在工程技术和科学研究中起着极为重要的作用。什么是人工控制？什么是自动控制？为说明这些概念，首先用控制一台直流电动机转速不变的例子来说明。

图 1-1 所示为人工控制直流电动机转速的示意图。人通过肉眼观察电动机同轴的转速表，看电动机转速是否符合希望的转速值，如果某种原因使转速偏离了希望值，人根据偏差作出判断，并及时向正确方向调节电位器，使电动机转速恢复到（或接近）希望值。上述过程中，人起到了“观测、比较、执行”的作用，因此在这种控制系统中人是主导因素。这一过程可用框图 1-2 表示。图中箭头方向表示各部分的联系。

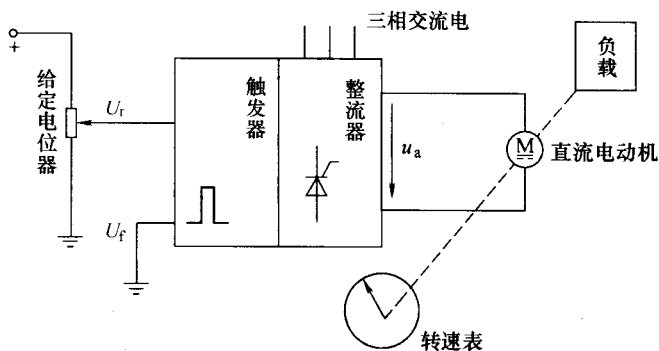


图 1-1 人工控制直流电动机转速的示意图

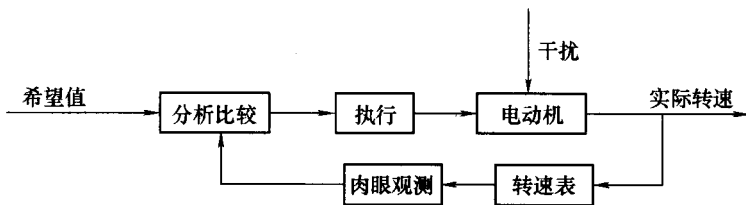


图 1-2 人工控制框图

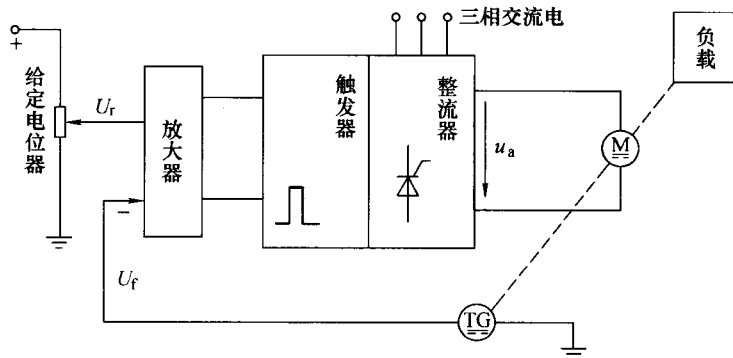


图 1-3 直流电动机转速自动控制系统



通过研究上述人工控制电动机转速的过程可以看到，所谓控制就是使某个对象中的某些物理量按照一定的目标来动作。本例中，对象指电动机，其中物理量指电动机的转速，一定目标就是事先要求的转速希望值。显然若要求电动机的转速稳定精度高，由人来控制就很难满足要求，这时就需要用控制装置代替人，形成转速自动控制系统，如图 1-3 所示。

该系统中测速发电机 TG 为测速装置，将电动机的转速测量出来并转换为电压信号，与输入给定电压比较，得到的偏差电压经放大器放大后送去控制电动机，以缩小转速的偏差。其自动控制的信号流动及相互关系，可由如图 1-4 所示的框图表示。

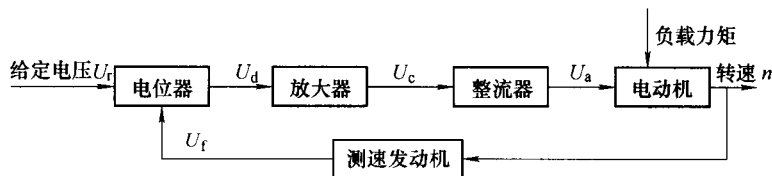


图 1-4 直流电机转速控制系统的原理框图

自动控制和人工控制的基本原理是相同的，它们都是建立在“测量偏差，修正偏差”的基础上，并且为了测量偏差，必须把系统的实际输出反馈到输入端。自动控制和人工控制的区别在于自动控制用控制器代替人完成控制。

### 1.2.2 开环控制和闭环控制

**1. 开环控制** 开环控制系统是指无被控量反馈的系统，即在系统中控制信息的流动未形成闭合回路。这种控制方式需要控制的是被控量，而系统可以调节的只是给定值，系统的信号由给定值至被控量单向传递。其原理框图如图 1-5 所示。

显而易见，这种控制较简单，但有较大的缺陷，即当被控对象受到干扰影响而使被控量偏离希望值，或工作过程中特性参数发生变化时，系统无法实现自动补偿。因此，系统的控制精度难以保证。当然，在系统的结构参数稳定，干扰很弱或对被控量要求不高的场合，这种控制简单的系统还在被广泛应用着。比如家用电风扇的转速控制、传统的空调机、包装机以及某些自动化流水线等。

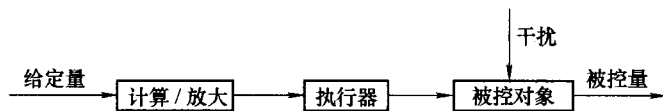


图 1-5 开环控制原理框图

**2. 闭环控制** 闭环控制就是有被控量反馈的控制，其原理框图如图 1-6 所示。从系统中信号流向看，系统的输出信号沿反馈通道又回到系统的输入端，构成闭合通道，故称闭环控制，或反馈控制。

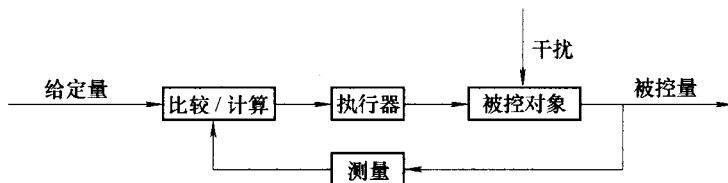


图 1-6 闭环控制原理框图

在这种控制方式中，无论是由于外界干扰造成的、还是由自身结构参数的变化引起的被控量与给定量之间的偏差，系统都能够自行减小或消除这个偏差，因此这种控制方式也称为按偏差调节。闭环控制系统的突出优点就是利用偏差来纠正偏差，使系统达到较高的控制精度。但与开环控制系统比较，闭环系统的结构比较复杂，构造起来比较困难。需要指出的是，由于闭环控制存在反馈信号，利用偏差进行控制，如果设计不当，将会使系统无法正常工作 and 稳定的工作。另外，控制系统的精度与系统的稳定性之间也常常存在矛盾。

### 1.2.3 自动控制系统的组成

自动控制系统主要由两大部分组成，即控制装置及被控对象。如图 1-7 所示，其中控制器根据其在系统中的功能可分为 3 个部分，即检测装置、执行装置和校正装置。图中各部分的功能如下。

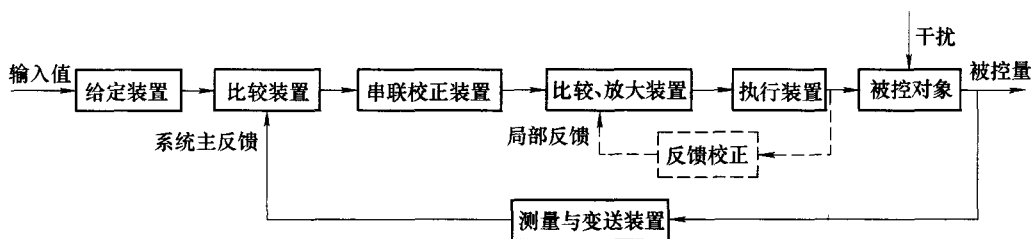


图 1-7 自动控制系统的组成

(1) 给定装置。给定装置的功能是设定与被控量相对应的给定量，并要求给定量与测量变送装置输出的信号在种类和纲量上一致。

(2) 比较、放大装置。比较、放大装置的功能是首先将给定量与测量值进行运算，得到偏差量，然后再将其放大到足以推动下一级的工作的程度。

(3) 执行装置。执行装置的功能是根据前面环节的输出信号，直接对被控对象作用，以改变被控量的值，从而减小，最好能消除偏差。

(4) 测量与变送装置。测量与变送装置的功能是检测被控量，并将检测值转换为便于处理的信号（常见的如电压、电流等），然后将该信号输入比较装置。

(5) 校正装置。当自控系统由于自身结构及参数问题而导致控制结果不符合工艺要求时，必须在系统中添加一些装置以改善系统的控制性能。这些装置就称为校正装置。

(6) 被控对象。被控对象是指控制系统中所要控制的对象，一般指工作机构或生产设备等。

### 1.2.4 自动控制系统的实例

**1. 炉温控制系统** 炉温控制系统的工作原理图如图 1-8 所示，其控制任务是使炉温保持恒定。

首先来分析一下该系统的控制原理：假设系统在开始工作时，经过事先整定，这时炉温  $t$  正好等于给定温度，即  $U_t = U_r$ ，故  $\Delta U = 0$ ，电动机、阀门都静止不动，燃油流量保持不变，燃油炉处于恒温状态，保持设定温度。

如果这时负载（工件的数目）突然增大或燃油减小，则炉温开始下降，经过热电偶转换得到的与炉温相应的电压  $U_i$  便会减小，故  $\Delta U > 0$ ，电动机正转，使阀门开度增大，从而增加燃油流量，炉温渐渐回升，直至重新等于设定温度（此时  $U_i = U_r$ ， $\Delta U = 0$ ）。可见该系统在负载增大的情况下仍能保持希望温度。

再来看看相反的情况，如果负载（工件的数目）突然减小或燃油流量增大，则炉温开始上升，经过热电偶转换得到的与炉温相应的电压  $U_i$  也会随之增大，故  $\Delta U < 0$ ，电动机反转，使阀门开度减小，从而减小燃油流量，炉温渐渐下降，直至重新等于设定温度（此时  $U_i = U_r$ ， $\Delta U = 0$ ）。可见系统在此情况下也能保持希望温度。

通过以上对该系统的控制原理的分析不难得出以下结论：该系统是通过测量炉温与给定温度的偏差值来进行控制工作的，故称按偏差调节的控制系统。同时不难分析出：该系统的被控对象是燃油炉；被控量是炉温；给定装置是给定电位器；测量变送装置是热电偶；干扰是负载大小、环境温度、燃油压力等；执行装置是电动机、阀门。这样就得到了如图 1-9 所示的炉温控制系统的原理框图。

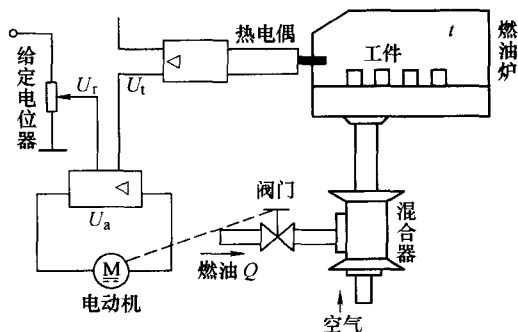


图 1-8 炉温控制系统的工作原理图

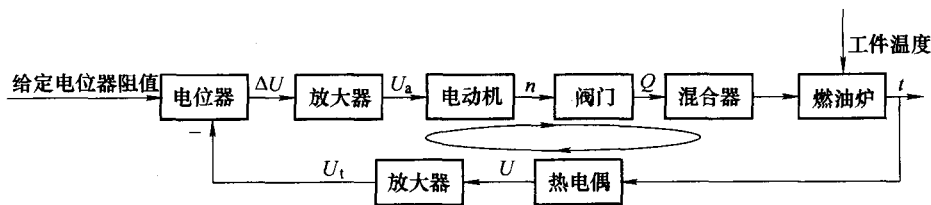


图 1-9 炉温控制系统的原理框图

在图 1-9 中，系统所传递的信号存在一个闭合回路，且反馈信号经过变换后与给定信号相减便得到偏差信号，所以这类反馈又称为负反馈。

**2. 液位控制系统** 液位控制系统的工作原理图如图 1-10 所示，其控制任务是使水池的液位保持恒定。

系统的控制原理分析：假设经过事先设定，系统在开始工作时液位  $h$  正好等于给定高度  $H$ ，即  $\Delta h = 0$ ，浮子带动连杆位于电位器 0 电位，故电动机、阀门  $V_1$  都静止不动，进水量保持不变，液面高度  $h$  保持设定高度  $H$ 。

如果这时由于阀门  $V_2$  突然开大，出水量增大，则液位开始下降， $\Delta h > 0$ ，经过浮子测量，此时连杆上移，电动机得电正转，使阀门  $V_1$  开度增大，从而增加进水量，液位渐渐上

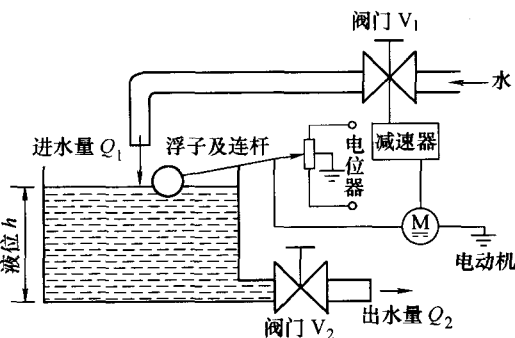


图 1-10 液位控制系统的工作原理图

升，直至重新等于设定高度。

如果这时由于阀门  $V_2$  突然关小，出水量减小，则液位开始上升， $\Delta h < 0$ ，经过浮子测量，此时连杆下移，电动机得电反转，使阀门  $V_1$  开度减小，从而减少进水量，液位渐渐下降，直至重新等于设定高度。可见系统在此两种情况下都能保持希望高度。

通过分析可以得出：此系统是通过测量液面实际高度与给定液面高度的偏差值来进行控制工作的，也是按偏差调节的控制系统。同时不难看出：该系统的被控对象是水池；被控量是液面高度；设定装置是电位器；测量变送装置是浮子连杆；干扰是出水量；执行装置是电动机、减速器、阀门  $V_1$ 。这样就得到了如图 1-11 所示的液位控制系统的原理框图。

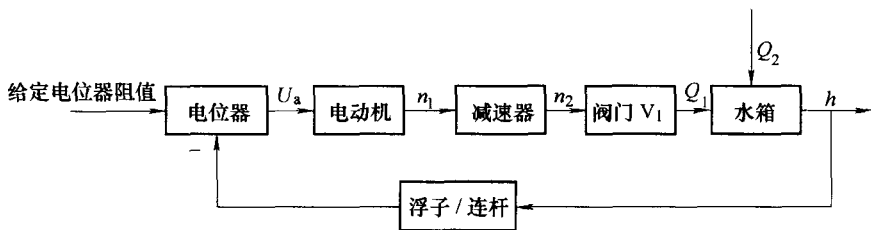


图 1-11 液位控制系统的原理框图

从在上图可以看出液位控制系统也存在负反馈环节。

**3. 舵轮随动系统** 舵轮随动系统的任务是使轮船的尾舵随时跟随舵轮的角度而旋转，其工作原理图如图 1-12 所示。由图可见，在船只航行时，如果船的尾舵转角与舵轮的转角相等时，两电位器  $A$ 、 $B$  的电压相等，此时的  $\Delta U = 0$ ，电动机不动，系统处于平衡状态。如果舵轮的输入角度  $\theta_r$  变化了，而尾舵仍处于原位，则  $\Delta\theta \neq 0$ ，两电位器  $A$ 、 $B$  的电压就不相等了，此时的  $\Delta U \neq 0$ ，电动机开始旋转，拖带尾舵朝所要求的方向旋转，直至尾舵的角度  $\theta_c$  与舵轮的输入角度  $\theta_r$  相等， $\Delta U$  又恢复为零值，电动机停转。系统即在新的位置上重新保持平衡直到舵轮的角度再次发生变化。也就是说此类系统是使被控量一直随给定量的变化而变化，而给定量的变化规律又无法事先确定。这种能够任意操纵和跟踪的系统就称为随动系统。其原理框图如图 1-13 所示。

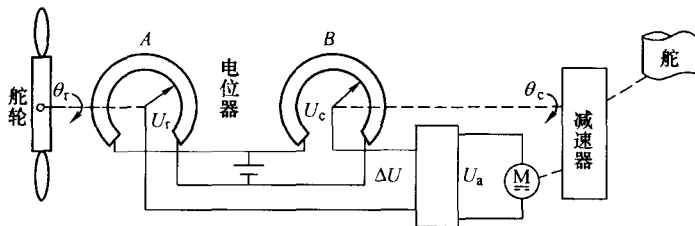


图 1-12 舵轮随动系统的工作原理图

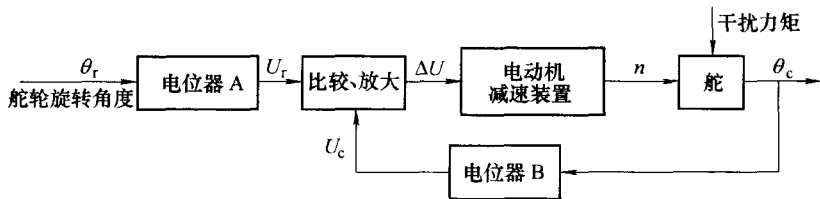


图 1-13 舵轮随动系统的原理框图

以上3个实例都有以下特点：需要控制的是被控对象的被控量，而测量的是被控量与给定量之间的偏差。无论是外界干扰造成的，还是由自身结构参数的变化引起的被控量出现的偏差，系统都能够自行减小或消除偏差，这也是为什么称这种控制方式为按偏差调节的原因。

## 1.3 自动控制系统的分类

随着自动化技术的飞速发展和控制理论的日趋完善，自动控制系统在广泛应用的同时也日趋复杂，出现了各式各样的系统。这里从不同的角度对系统进行分类，而分类的目的是为了在对系统分析、设计之前，从不同的角度来认识系统，以便于选择恰当的分析方法和设计手段。

### 1.3.1 按给定量的特征分类

按给定量的特征分类，自动控制系统可分为恒值给定系统、随动系统、程序给定系统。

(1) 恒值给定控制系统。恒值给定控制系统的特征是给定量一经设定就维持不变。系统的主要任务是：当被控量在扰动作用下偏离给定量时，通过系统的控制作用尽快地恢复到给定量。即使由于系统本身的原因不能完全恢复，误差也应该控制在规定的允许范围内。注意，若生产工艺要求被控量改变，可通过改变给定量来实现，但这种改变是控制系统根据工艺要求重新设定的过程，而且一经设定，长时间不再变化，即生产工艺要求不会频繁改变。因此，对被控量能否快速而准确地跟踪给定量的变化可不作重点研究。分析和研究该类系统的重点应放在系统能否有效、快速地克服各类干扰量对被控量的影响使被控量维持在给定量上。这类系统有恒速（直流电动机调速系统）、恒温（炉温自动控制系统）、恒压、恒流、恒定液位等。

(2) 随动控制系统。随动控制系统，也常常称作伺服系统，它的特征为给定量是变化的，而且其变化规律是未知的。系统的主要任务是：使被控量快速、准确地随给定量的变化而变化。因此，分析和研究这类系统的重点应放在系统的被控量跟踪输入信号变化而变化的能力上。例如前面讲过的轮船的尾舵随动系统就是一个位置随动系统的实例。

(3) 程序控制系统。程序控制系统的特征是给定量按事先设定的规律而变化。系统的主要任务是：使被控量随给定的变化规律而变化。因此，在设计该类控制系统时需要先设计一个给定器，用来产生按一定规律变化的信号，作为系统的给定量。这类系统有仿形机床、程序控制机床等。

### 1.3.2 按系统中元件的特性分类

按自动控制系统中元件的特性分类，可分为线性系统和非线性系统。

(1) 线性控制系统。线性控制系统特点是系统中所有元件都是线性元件，分析这类系统时可以应用叠加原理，即当有多个信号同时作用于系统时，系统总输出为每个输入信号作用于系统的输出之和。同时，该类系统的状态和性能可以用线性微分方程来描述。

(2) 非线性控制系统。非线性控制系统的特点是系统中含有一个或多个非线性元件。实际应用的自动控制系统都不同程度存在非线性。严格地说，任何物理系统的特性都是非线性的，但是在允许的误差范围里，将非线性化元件进行线性化处理后，就可以使用线性控制理

论来研究。

### 1.3.3 按系统中信号的形式分类

按自动控制系统中信号在时间或空间上是连续还是离散的形式来分类，可分连续控制系统和数字控制系统。

(1) 连续控制系统。连续控制系统的特点是系统中所有的信号都是连续时间变量的函数。这类系统的运动状态是用微分方程来描述的。目前大多数闭环控制系统都属这类形式，这类系统也是本教材讨论的重点。

(2) 数字控制系统。数字控制系统的特点是系统中各种参数及信号是以在时间上离散的数码或脉冲序列形式传递的，所以可以采用数字计算机来参与控制。这种系统的运动状态是用差分方程来描述的，因此，在分析这类系统时，有与连续系统的分析方法不同的特点。例如，图 1-14 就是数字控制系统的一种组成结构。

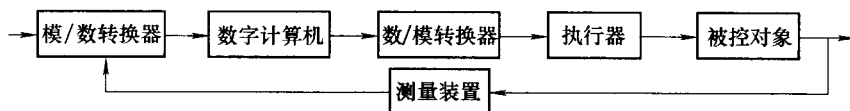


图 1-14 数字控制系统原理框图

## 1.4 对自动控制系统的基本要求

自动控制系统在实际应用中，由于服务的对象千差万别，对系统性能的具体要求也就不尽相同。但是所有自动控制系统要达到的控制目标是一致的，即在理想情况下，希望自动控制系统的被控量  $c(t)$  和给定量  $r(t)$ ，在任何时候都相等或保持一个固定的比例关系，没有任何偏差，而且不受干扰的影响，也可以用如下恒等式表达：

$$c(t) \equiv r(t)$$

或者

$$c(t) \equiv Kr(t)$$

然而，实际的自动控制系统，难免会受干扰的影响，比如机械部分存在质量、惯量，加之电路中存在电感、电容，以及能源功率的限制等，使得生产机构运动部件的加速度不可能很大。所以其速度和位移不会瞬间达到希望值，而要经历一段时间，即存在一个变化过程。在理论上，通常把系统受到外加信号（给定值或干扰）作用后，被控量随时间变化的全过程称为系统的**动态过程**或**过渡过程**。系统控制性能

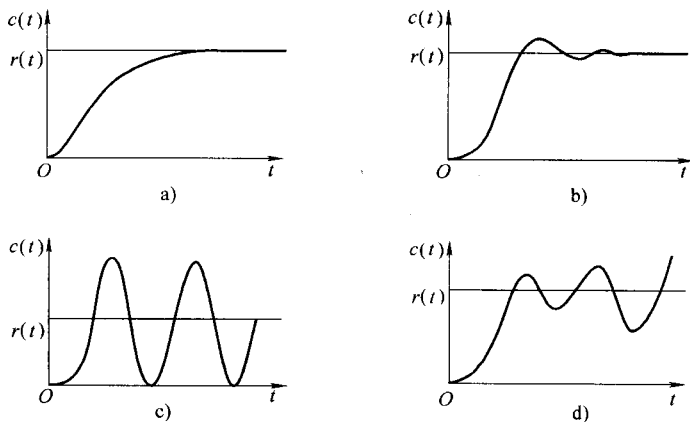


图 1-15 系统的阶跃响应

的优劣,便可以通过动态过程中  $c(t)$  的变化较充分地显示出来。图 1-15 所示为被控量的几种变化情况。

由图 1-15a, b 可以看出,曲线是振荡收敛的,系统最后可以达到控制要求,它们是实际控制系统常见的过渡过程。而图 1-15c, d 的曲线是等幅振荡的、发散的,处于这两种情况下的系统是无法工作的,在实际应用中是不允许的。

综上所述,一个高质量的自动控制系统,在其整个控制过程中,被控量与给定量之间的偏差应该越小越好。考虑到动态过程被控量在不同阶段的特点,工程上常常从稳定性、快速性、准确性 3 个方面来评价自控系统的总体控制性能。

**1. 稳定性** 稳定性是指控制系统动态过程的振荡倾向和重新恢复平衡工作能力,是评价系统能否正常工作的重要性能指标。

如果系统受到干扰后偏离了原来的稳定工作状态,而控制装置却不能使系统恢复到希望的稳定状态,如图 1-15c 中过程所示;或当指令变化以后,控制装置再也无法使受控对象跟随指令运行,并且是越差越大,如图 1-15d 中过程所示,则称这样的系统为不稳定系统,显然这是根本完不成控制任务的,甚至会造成设备的损坏。

反之,如果系统受到干扰后或指令变化后,经过一段过渡过程,控制装置能使系统恢复到希望的稳定状态,或受控对象能够跟随变化的指令运行,如图 1-15a, b 中过程所示,则称这样的系统为稳定系统。在系统稳定的前提下,要求其动态过程的振荡越小越好,且振幅和频率应有所限制,否则过大的波动将使系统中的运动部件由于超载而松动或被破坏。

**2. 快速性** 快速性是指控制系统过渡过程的时间长短,是评价稳定系统暂态性能的指标。过渡过程的时间过长,则系统长时间地处在在大偏差状态中,这就说明系统响应迟钝,也就很难复现、跟踪快速变化的输入信号。因此,在实际控制系统中,人们总是希望在满足稳定性要求的前提下,系统的过渡时间越短越好。

**3. 准确性** 准确性是指控制系统过渡过程结束后,或系统受干扰重新恢复平衡状态时,最终保持的精度,是反映过渡过程后期性能的指标。人们总是希望此时被控量与给定量之间的偏差越小越好。

上面所提到的 3 个性能指标是自控系统基本控制性能要求,具有普遍性。但在实际应用中,由于被控对象的具体情况不同,最终对控制性能的要求侧重点也各不相同。例如随动系统对快速性要求最高,而调速系统最为关心的则是系统的稳定性。

同一个系统的稳定性、快速性、准确性是相互制约的。若要提高系统的快速性,就可能引起系统强烈的振动,从而降低了稳定性;若要改善系统的稳定性,又会延长系统的控制过程,影响了系统的快速性。分析和解决这些矛盾、优化系统的控制性能,将是本学科讨论的重要内容。

## 本章小结

1. 自动控制原理是分析设计自动控制系统的理论基础,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,它也是现代控制理论的基础。

2. 自动控制原理的研究对象是自动控制系统。自动控制系统最基本的控制方式是闭环控制,也称反馈控制,它的基本原理是利用偏差纠正偏差。

3. 自动控制系统的框图是对系统物理特性的抽象表示，它描述系统的主要矛盾和内在联系，是研究自动控制系统的有力工具。

4. 自动控制系统讨论的主要问题是系统动态过程的性能，其主要性能归纳起来就是3个字：稳、快、准。

### 思考题与习题

1-1 试列举开环控制和闭环控制系统的例子，并说明其工作原理。

1-2 请说明开环系统和闭环系统的主要特点，并比较两者的优缺点。

1-3 闭环控制系统由哪些主要环节构成？各环节在系统中的职能是什么？

1-4 直流电动机转速控制系统的工作原理如图 1-16 所示。试分析系统自动稳速的控制原理，并画出原理框图。

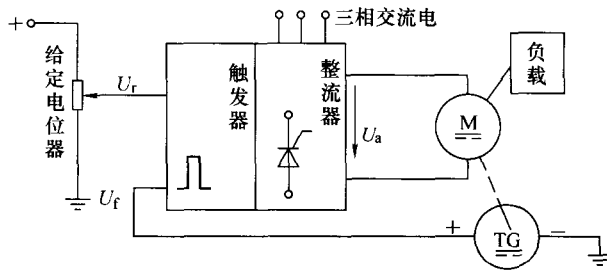


图 1-16 习题 1-4 图

1-5 温度自动记录仪的工作原理如图 1-17 所示，记录笔所记录的是被测温度的变化，该温度由热电偶采自工作现场。试说明其控制原理并画出原理框图。本系统是恒值给定系统还是随动系统？

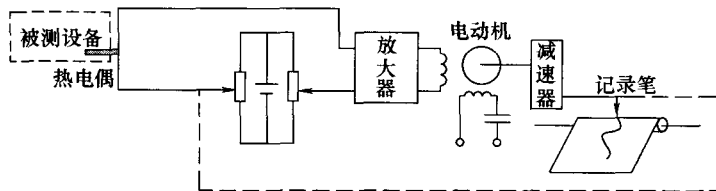


图 1-17 习题 1-5 图

1-6 有一晶体管稳压电路如图 1-18 所示，试分析该电路，并说出系统的给定量、被控量和干扰信号是什么？哪些元件起着测量、放大、执行的作用？最后请根据分析画出其原理框图。

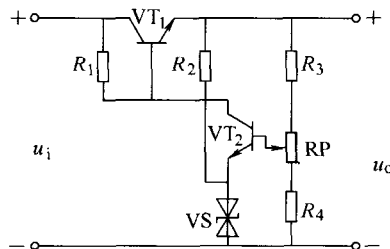


图 1-18 习题 1-6 图



## 第 2 章 自动控制系统的数学描述方法

自动控制系统是由控制对象、执行机构、放大器、检测（测量）装置和控制器等组成。要从理论上定性和定量地分析、计算系统的控制性能，必须首先建立描述系统动态关系的数学模型。

控制系统的数学模型是指描述系统或元件输入量、输出量以及内部各变量之间关系的数学表达式，而把描述各变量动态关系的数学表达式称为动态模型。

对系统的分析和研究都依赖于合理的数学模型。在建立系统的数学模型时，应根据系统的实际结构、参数及所要求的计算精度等主要因素建立模型。模型应能准确地反映系统的动态本质，同时又能简化分析计算的工作。常用的动态数学模型有微分方程、传递函数及动态结构图等。

控制系统或元件的数学模型的建立，可以使用解析法和实验法。所谓解析法，是指根据系统及元件各变量之间所遵循的物理、化学定律，列出各变量间的数学表达式，从而建立起数学模型。所谓实验法，是指对实际系统或元件加入一定形式的输入信号，根据输入信号与输出信号间的关系来建立数学模型的方法。本章仅讨论解析法建模。

### 2.1 控制系统的微分方程

微分方程是描述自动控制系统动态特性最基本的方法。一个完整的控制系统通常是由若干元件或环节以一定方式连接而成的，系统可以由一个环节组成的小系统，也可以是由多个环节组成的大系统。对系统中每个具体的元件或环节按照其运动规律可以比较容易地列出其微分方程，然后将这些微分方程联立起来，以得出整个系统的微分方程。

#### 2.1.1 系统微分方程的建立

解析法建立系统或元件微分方程的一般步骤是：

- ①根据实际工作情况，确定系统和各元件的输入、输出量；
- ②将系统划分为若干环节，从输入端开始，按照信号的传递时序及方向，根据各变量所遵循的物理、化学定律，列出变化（运动）过程中的微分方程组；
- ③消去中间变量，得到只包含输入、输出量的微分方程；
- ④最后一步为标准化工作，即将与输入有关的各项放在等号的右侧，将与输出有关的各项放在等号的左侧，并按照降幂排列。最后将系数化为具有一定物理意义的形式。

下面通过一些例子来具体说明建立系统微分方程的步骤及方法。

**【例 2-1】** 试列写图 2-1 所示的 RC 无源网络的微分方程。

**解：**根据电路理论的基尔霍夫电压定律及线性电容元件电压、电流关系，列写方程

$$U_r = Ri + \frac{1}{C} \int idt$$

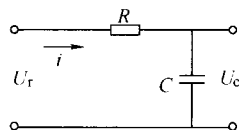


图 2-1 RC 无源网络