



新世纪普通高等教育电气工程与自动化类课程规划教材

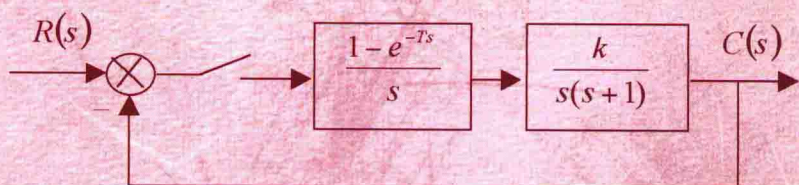
(第二版)

# 自动控制原理

ZIDONG KONGZHI YUANLI

主 编 吴秀华 邹秋滢 吴 锴 王永刚

主 审 孟 华



大连理工大学出版社

高等教育电气工程与自动化类课程规划教材

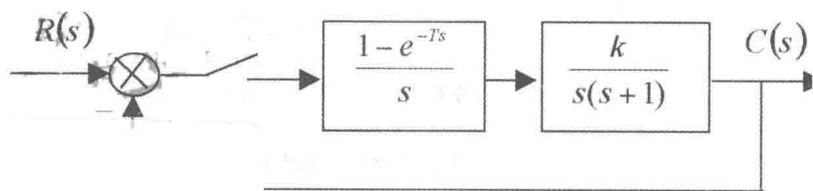
新世纪

(第二版)

# 自动控制原理

ZIDONG KONGZHI YUANLI

主 编 吴秀华 邹秋滢 吴 锴 王永刚  
副主编 石敏惠 张楠楠  
主 审 孟 华



大连理工大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理 / 吴秀华等主编. — 2 版. — 大连 :  
大连理工大学出版社, 2015. 10  
新世纪普通高等教育电气工程与自动化类课程规划教  
材  
ISBN 978-7-5685-0122-4

I. ①自… II. ①吴… III. ①自动控制理论—高等学  
校—教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 212370 号

### 大连理工大学出版社出版

地址:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116023

发行:0411-84708842 邮购:0411-84708943 传真:0411-84701466

E-mail:dutp@dutp.cn URL:<http://www.dutp.cn>

大连日升彩色印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

---

幅面尺寸:185mm×260mm 印张:15.5 字数:377 千字  
印数:1~3000

2011 年 11 月第 1 版 2015 年 10 月第 2 版  
2015 年 10 月第 1 次印刷

---

责任编辑:王晓历

责任校对:罗晴晴

封面设计:张莹

---

ISBN 978-7-5685-0122-4

定 价:33.80 元

# 前 言

《自动控制原理》(第二版)是由新世纪普通高等教育教材编审委员会组编的电气工程与自动化系列规划教材之一。

自动控制技术已广泛应用于工业、农业、交通、国防、航空及航天等众多部门,提高了社会生产率,改善了人们的劳动条件,丰富和提高了人民的生活水平。在今天的社会生活中,自动化技术和设备无所不在,为人类文明进步做出了重要贡献,同时自动控制理论也得到了空前发展,形成了完善而深厚的理论体系。

目前,在一些非自动化类工科高等院校,或者一些农业高等院校中,由于课程体系和实际生产实践的需要,相继开设了自动控制原理课程,且逐渐成为专业基础课。为适应这些院校的学时少、重基础的教学要求和教学需要,特修订了此书。

本教材根据非自动化类工科和农科的相关专业对本理论体系的要求,把重点放在基本概念和基本原理的讲述和理解应用上,尽量做到深入浅出。通过阅读本教材,使学生能够正确理解有关控制理论的基本概念,掌握分析自动控制系统性能的基本方法,并初步具备综合设计简单控制系统的能 力。

本教材共八章。第一章为绪论,主要介绍自动控制系统的相关概念、自动控制技术的应用范围、自动控制系统的分类以及自动控制理论的发展历史等;第二章为自动控制系统的数学模型,主要针对控制系统的微分方程和传递函数做较详细的阐述,以使学生在理解基本概念的基础上能够熟练掌握这两种数学模型的建立以及转换过程;第三章为自动控制系统时域分析,鉴于多数院校在此课程的前续课程中均开设了电路理论或信号与系统等课程,相关内容在本章中不再赘述,所以主要讨论了低阶系统阶跃响应的动、静态性能指标,重点论述了控制系统稳定性的判别方法和稳态误差的计算;第四章为根轨迹法,主要讲述系统分析方法中的根轨迹法的概念和根轨迹图的绘制原则,以及运



用根轨迹分析系统性能的过程和方法;第五章为频域分析法,重点叙述了频率特性的定义、各典型环节频率特性以及开、闭环控制系统的频率特性,阐述了应用频率特性对控制系统进行分析的方法;第六章为自动控制系统的设计与校正,把频域法校正作为基本内容,叙述了串联校正、反馈校正、复合校正的基本概念和方法;第七章为离散控制系统分析,主要介绍离散系统的概念和数学模型以及进行离散系统分析的基本方法;第八章为非线性控制系统分析,主要介绍了非线性系统的基本种类和目前对非线性系统进行分析的基本方法:相平面法分析法和描述函数法。

本教材建议学时为90学时。不同院校可根据需要取舍某些章节的内容进行不同学时的讲授。若按40~60学时可讲授前六章线性定常系统的相关内容。本教材配备6~8个实验,可根据具体实验条件进行选择。

本教材的编写团队主要来自沈阳农业大学、山西农林科技大学、沈阳农业大学科学技术学院等多所院校,编写人员有吴秀华、邹秋滢、吴锴、王永刚、石敏惠、张楠楠等。吴秀华负责统稿工作。

在编写本教材的过程中,编者参考、借鉴了许多专家、学者的相关著作,对于引用的段落、文字尽可能一一列出,谨向各位专家、学者一并表示感谢。

限于水平,书中也许仍有疏漏和不妥之处,敬请专家和读者批评指正,以使教材日臻完善。

编者  
2015年10月

所有意见和建议请发往:dutpbk@163.com

欢迎访问我们的网站:<http://www.dutpbook.com>

联系电话:0411-84708445 84708462

# 目 录

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| <b>第 1 章 绪 论</b> .....         | 1   |
| 1.1 自动控制系统的基本概念 .....          | 1   |
| 1.2 自动控制系统的组成与结构 .....         | 4   |
| 1.3 自动控制系统的分类 .....            | 6   |
| 1.4 自动控制系统分析与设计的基本要求 .....     | 8   |
| 1.5 自动控制理论的内容与发展 .....         | 9   |
| 习 题 .....                      | 12  |
| <b>第 2 章 自动控制系统的数学模型</b> ..... | 14  |
| 2.1 控制系统微分方程的建立 .....          | 14  |
| 2.2 非线性特性的线性化 .....            | 22  |
| 2.3 拉普拉斯变换及其应用 .....           | 24  |
| 2.4 传递函数 .....                 | 31  |
| 2.5 动态结构图 .....                | 35  |
| 2.6 数学模型的 MATLAB 仿真分析 .....    | 45  |
| 习 题 .....                      | 49  |
| <b>第 3 章 自动控制系统时域分析</b> .....  | 53  |
| 3.1 典型输入信号和时域性能指标 .....        | 53  |
| 3.2 一阶系统时域分析 .....             | 56  |
| 3.3 二阶系统时域分析 .....             | 57  |
| 3.4 高阶系统时域分析 .....             | 63  |
| 3.5 控制系统的稳定性分析 .....           | 64  |
| 3.6 控制系统稳态误差分析 .....           | 71  |
| 3.7 运用 MATLAB 进行控制系统时域分析 ..... | 76  |
| 习 题 .....                      | 81  |
| <b>第 4 章 根轨迹法</b> .....        | 84  |
| 4.1 根轨迹法的基本概念 .....            | 84  |
| 4.2 根轨迹的基本绘制法则 .....           | 87  |
| 4.3 广义根轨迹 .....                | 100 |
| 4.4 根轨迹分析法 .....               | 102 |
| 4.5 运用 MATLAB 绘制根轨迹及分析 .....   | 104 |
| 习 题 .....                      | 107 |



|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| <b>第 5 章 频域分析法</b> .....        | 109 |
| 5.1 频率特性 .....                  | 109 |
| 5.2 典型环节的频率特性 .....             | 112 |
| 5.3 控制系统的开环频率特性 .....           | 120 |
| 5.4 频域稳定判据 .....                | 127 |
| 5.5 控制系统的频域性能分析 .....           | 136 |
| 5.6 运用 MATLAB 进行控制系统频域分析 .....  | 140 |
| 习 题.....                        | 146 |
| <b>第 6 章 自动控制系统的分析与校正</b> ..... | 149 |
| 6.1 控制系统的性能指标 .....             | 149 |
| 6.2 基本控制规律 .....                | 152 |
| 6.3 常用串联校正网络 .....              | 156 |
| 6.4 反馈校正 .....                  | 165 |
| 6.5 复合校正 .....                  | 168 |
| 6.6 运用 MATLAB 进行控制系统设计与校正 ..... | 171 |
| 习 题.....                        | 174 |
| <b>第 7 章 离散控制系统分析</b> .....     | 176 |
| 7.1 信号的采样与保持 .....              | 177 |
| 7.2 Z 变换及其应用 .....              | 180 |
| 7.3 离散系统的数学模型 .....             | 185 |
| 7.4 离散系统稳定性与稳态误差分析 .....        | 192 |
| 7.5 离散系统动态性能分析 .....            | 196 |
| 7.6 运用 MATLAB 进行离散系统分析 .....    | 201 |
| 习 题.....                        | 205 |
| <b>第 8 章 非线性控制系统分析</b> .....    | 207 |
| 8.1 非线性系统概述 .....               | 207 |
| 8.2 控制系统的非线性特性 .....            | 209 |
| 8.3 相平面分析法 .....                | 212 |
| 8.4 描述函数法 .....                 | 222 |
| 8.5 运用 MATLAB 进行非线性系统分析 .....   | 227 |
| 习 题.....                        | 230 |
| <b>附 录</b> .....                | 232 |
| 附录 1 控制系统 MATLAB 常用命令 .....     | 232 |
| 附录 2 控制系统常用词汇中英汉对照 .....        | 234 |
| <b>习题答案</b> .....               | 237 |
| <b>参考文献</b> .....               | 242 |

# 第 1 章

## 绪 论

自动控制技术是现代工业、农业、国防、科学研究以及人类日常生活中不可缺少的一门技术。应用自动控制技术能使机器设备高速高效地运行,使生产过程自动化,提高产品的数量和质量,改善人类劳动条件,减小劳动强度,使汽车等交通工具在无人参与的情况下能自动驾驶,使现代军事武器自动地跟踪和定位入侵目标,使空间事业得以突飞猛进地发展。如今,自动控制技术的应用已渗透到各个工程领域。

自动控制原理是研究各类自动控制系统共同规律的一门技术科学。主要讲述自动控制的基本理论和分析、设计控制系统的基本方法等内容,它是自动控制学科相关专业的核心课程。学习并掌握好自动控制原理及其相关技术,对于工程技术人员有着十分重要的作用。

本章从工程实例出发,介绍自动控制的基本概念、基本组成与结构、自动控制系统的分类、自动控制系统分析与设计的基本要求以及自动控制理论的简要发展历史等内容。

### 1.1 自动控制系统的基本概念

所谓自动控制是指在无人参与的情况下,利用自动控制装置使被控制的生产设备或生产过程自动地按照预定的规律去工作的过程。而自动控制系统是按照某些规律结为一个整体的元件的组合,这些元件按照输入信号或输入指令的要求调节相应的物理量,使之达到预期的固定数值,或按照预期的规律进行变化。

如图 1-1 所示为直流电动机转速控制系统。

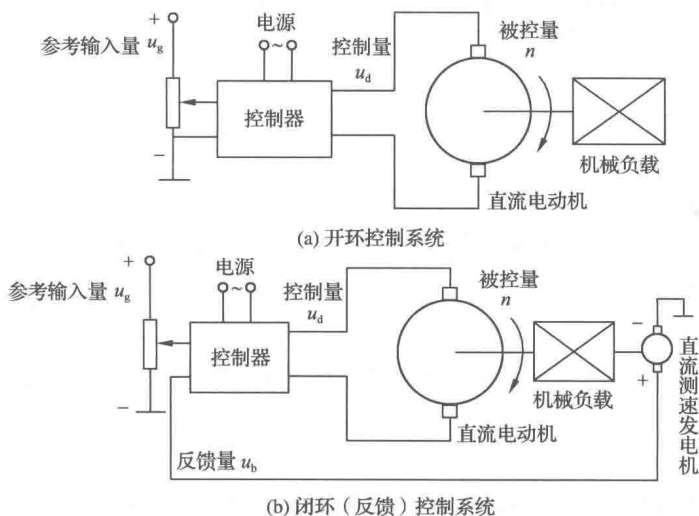


图 1-1 直流电动机转速控制系统原理示意图



直流电动机转速控制系统的工作过程是:电位器产生初始输入电压信号  $u_g$ , 通过控制器的处理产生控制直流电动机电枢回路的控制电压  $u_d$ , 并将  $u_d$  加在电动机电枢回路上, 使直流电动机旋转, 产生一定的转速  $n$  或角速度  $\omega$  从而带动负载运转。如图 1-1(a)所示为一个开环控制系统。在此系统中, 当由于负载的增减等因素使电动机转速发生变化, 偏离希望值时, 系统不能自动地进行调节, 使之恢复希望的转速。若要实现此功能, 就应该采用如图 1-1(b)所示的闭环控制系统, 也称反馈控制系统。它通过一个直流测速发电机, 把直流电动机的输出转速变换为一个电压值  $u_b$ , 返送回输入端, 与初始的输入电压  $u_g$  作比较, 若二者相等, 表明电动机实际转速与希望转速相等, 可以不调节; 若二者不等, 表明电动机实际转速偏离了希望转速, 则系统把两个电压的差值经过控制器的放大处理后送给电动机, 使电动机调节转速的大小, 直到电动机的输出转速与希望转速达到一致。如负载增加时,  $n$  会下降, 测速发电机的输出电压  $u_b$  下降, 差值  $u_g - u_b$  上升(一般参考输入  $u_g$  保持不变), 控制器输出  $u_d$  也增加, 则电动机的转速上升, 直到与希望值相等。

可见, 闭环控制系统比开环系统性能优越, 实现了系统的自动控制过程, 控制的精度得到极大的提高。所以, 闭环控制系统是本课程研究的主要对象。

现对闭环控制系统中涉及的相关概念进行如下说明:

### 1. 被控对象

也称受控对象, 指被控制的装置或设备, 也可指某个生产或工艺过程。如图 1-1 所示的直流电动机。

### 2. 被控量

指被控制的物理量, 即被控对象的输出量, 也是控制系统的输出量, 也称受控量或输出量。实际控制系统中被控量往往是可以测量装置检测出来的可控物理量, 如温度、压力、转速、流量等。如图 1-1 所示的直流电动机的转速  $n$  即是系统的被控量。

### 3. 控制器

将输入信号按一定控制规律转换成控制作用, 产生控制量的元件或设备, 也称为调节器、控制装置或校正装置。一般控制器的前级为电子电路或微型计算机, 后级为功率变换器。控制器将弱电信号转换成具有一定能量的可以驱动执行机构动作的电压、电流、力矩等物理量。控制器不仅可以起放大作用, 还可以具有复杂的函数关系。

### 4. 控制量

指控制被控对象的物理量, 是控制器或执行机构的输出, 是被控对象的输入。如图 1-1 所示的  $u_d$ 。

### 5. 参考输入量

也称为给定值或希望值, 是控制系统的输入量, 也是系统输出量应该达到的标准值或希望值。如图 1-1 所示的  $u_g$ 。

### 6. 偏差信号

参考输入量与被控对象输出量的测量反馈量之差, 是控制器的输入信号, 是驱动系统实现自动控制的激励信号, 即  $u_g - u_b$ 。

### 7. 反馈

把被控量通过测量元件或设备返送回输入端的过程, 称为反馈。反馈量与参考输入量作差得到的偏差信号作为控制器输入量的系统, 称为负反馈系统。反馈量与参考输入量作

和作为控制器输入量的系统,称为正反馈系统。若系统没有反馈回路,则构成开环控制系统;若系统有反馈回路,则构成闭环控制系统,如图 1-1 所示。

### 8. 测量元件

指将一种物理量检测出来,按照某种规律转换成容易处理或使用的另一种物理量的元件或设备,也称为传感器或测量变送元件。在控制系统中,测量元件用来检测被控量,并将其转换成相应的电信号、气压信号等与参考输入量作比较。

### 9. 比较元件

将参考输入量与反馈量作差,得到偏差信号的元件。常用的比较元件有差动运放器、机械差动装置和电桥电路等。

### 10. 定值元件

也称为给定元件或装置,是设定或给出参考输入量的设备。常用的定值元件有电位器、指令开关、旋转变压器和计算机等。

### 11. 执行元件

是控制决策的执行机构,用来将控制量进行功率级别转换后加载在被控对象上控制其输出。控制系统中,执行元件有时被看成独立的环节,有时被看成被控对象的一部分。常用的执行元件有功率放大器、执行电动机和调节阀等。

### 12. 扰动信号

指系统外部或内部影响被控对象输出的所有输入信号。若扰动来自系统外部称为外扰,来自系统内部称为内扰。

了解自动控制系统中相关的基本概念后,对如下的控制系统进行分析,如图 1-2 所示为导弹发射架方位角控制系统结构原理示意图。

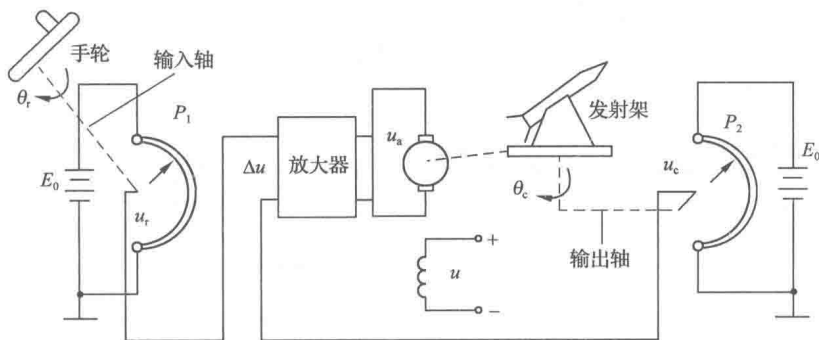


图 1-2 导弹发射架方位角控制系统结构原理示意图

该系统的控制任务是使发射架能够转动到与手轮转动的方位角  $\theta_r$  相一致的角度。系统的被控对象是导弹发射架,被控量是发射架转动的方位角  $\theta_c$ ,参考输入量是手轮转动的方位角  $\theta_r$ ,手轮和发射架的转动方位角分别通过电位器  $P_1$  和  $P_2$  转变为相应的电压值。电位器  $P_1$  和  $P_2$  并联后外接统一电源  $E_0$ ,形成电桥电路,其滑臂分别与输入轴和输出轴相连接,起检测和比较作用,产生偏差信号  $\Delta u$ 。输入轴由手轮操作,输出轴由电枢控制直流电动机经减速后控制。

当导弹发射架的方位角与输入轴的方位角一致时,系统处于相对静止状态。当摇动手轮顺时针转动时,将会使电位器  $P_1$  的滑臂转过一个角度,此时  $\theta_r > \theta_c$ ,产生误差角  $\theta_e = \theta_r -$

$\theta_r, \theta_c$  通过电位器  $P_1$  和  $P_2$  转换成偏差电压  $\Delta u = u_r - u_c$ ,  $\Delta u$  经过放大器放大后驱动电动机转动, 带动导弹发射架顺时针转动, 直至  $\theta_c = \theta_r, u_c = u_r$ , 偏差电压  $\Delta u = 0$ , 电动机停止转动, 系统在新的条件下达到平衡, 即发射架处于新的希望位置。若手轮逆时针转动, 则调节过程相反。绘制系统的原理框图如图 1-3 所示。



图 1-3 导弹发射架方位角控制系统原理框图

只要该系统中  $\theta_c \neq \theta_r$ , 偏差就会产生调节作用。作用的结果是消除偏差  $\theta_e$ , 使输出量  $\theta_c$  严格地跟随参考输入量  $\theta_r$  的变化而变化。

## 1.2 自动控制系统的组成与结构

自动控制系统的任务就是根据参考输入量决定控制作用, 并施加在被控对象上, 使被控对象的输出等于参考输入量规定的数值。一般控制系统有开环控制和闭环控制两种基本控制方式。它们的基本组成和结构可以用原理框图表示, 如图 1-4 和图 1-5 所示。



图 1-4 开环控制系统原理框图

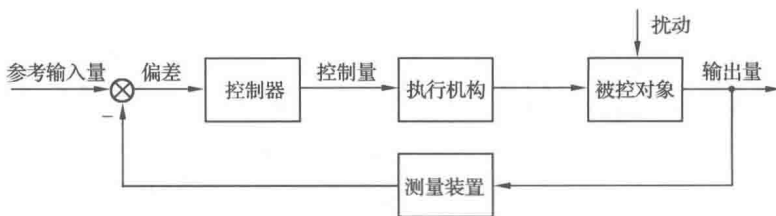


图 1-5 闭环控制系统原理框图

在开环控制系统中, 控制器根据执行机构和被控对象的特性进行设计。在参考输入量的控制作用下, 被控对象的输出可以迅速而准确地响应参考输入信号。开环控制系统无需对被控量进行测量, 系统结构简单、成本低。

然而, 在实际中被控对象不仅受到参考输入量的影响, 还会受到扰动输入量的影响, 它们会使被控对象的输出偏离希望值。另外, 被控对象和执行机构的特性参数也会随时间发生变化, 使系统达不到预想的设计性能。而开环控制系统对于扰动作用和参数变化引起的系统性能的改变无法进行及时的修正或补偿。

所以开环控制系统适用于控制精度要求不高、系统特性参数相对稳定且干扰比较弱的

场合。例如,打印机打字头的位置控制、洗衣机的顺序控制和步进电动机的进给控制等。

当作用于被控对象上的干扰较强,可实时测量时,可以采用基于干扰补偿的控制方式。如图 1-6 所示,将测量到的干扰信号牵引给控制器,改变控制作用去抵消干扰对输出的影响。但基于干扰的补偿控制对不可测的干扰和被控对象特性参数发生变化引起的输出变化仍无法改进。

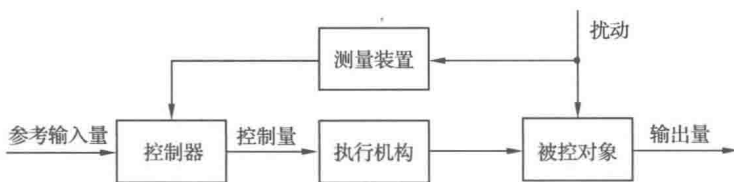


图 1-6 干扰补偿控制的原理框图

闭环控制系统可以克服开环控制系统的以上缺陷。在闭环控制系统中,被控对象的输出被返送回输入端,与参考输入量形成偏差信号进行控制。只要输出量的实测值与系统希望值之间有偏差,闭环控制系统就有输出,直至偏差为零。可见,闭环控制系统可以消除扰动信号对系统输出量产生的影响,达到精确控制的目的,提高系统的抗干扰能力,例如前述直流电动机转速的自动控制过程分析。

在工程实际中,有时将闭环控制与开环控制相结合,往往可以达到更好的控制效果。图 1-7 所示为反馈控制与前馈控制相结合的复合控制原理框图。

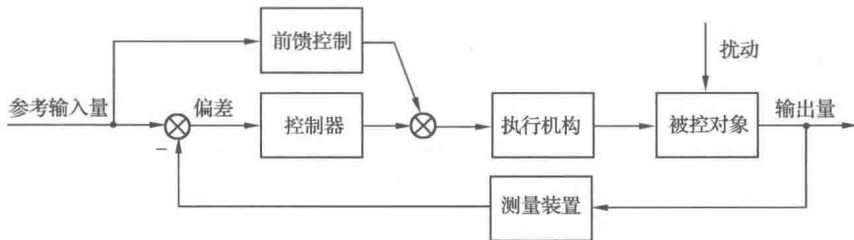


图 1-7 反馈控制与前馈控制相结合的复合控制系统原理框图

此系统除偏差信号外,控制作用还综合参考了输入量的信息,因此前馈控制常用来提高系统对参考输入量的响应特性。

如图 1-8 所示为反馈控制、前馈控制和干扰补偿控制相结合的复合控制系统原理框图。

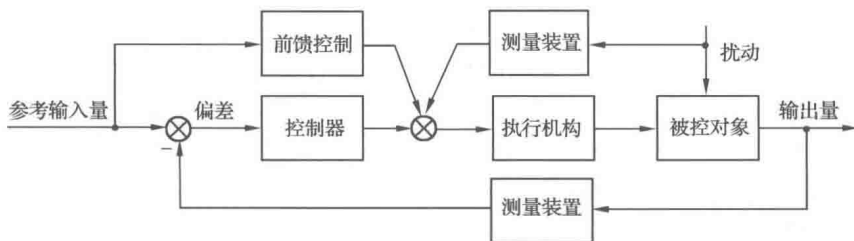


图 1-8 反馈控制、前馈控制和干扰补偿控制相结合的复合控制系统原理框图

前馈控制和干扰补偿控制都是开环控制,与反馈控制结合成复合控制。此控制作用综合了偏差和系统扰动的因素,可用来更好地提高系统的抗干扰能力。

## 1.3 自动控制系统的分类

实际工程中,尽管自动控制系统的控制有其基本规律,然而自动控制系统因其工作环境、组成结构和被控对象的不同,其分类的方法也有很多。了解自动控制系统的类型,从而分门别类地掌握不同类型自动控制系统的规律,对于自动控制系统的分析和设计很有必要。

### 1. 按照系统的结构分类

(1)开环控制系统:系统中无反馈环节,输出量对控制作用无影响;结构简单、成本低、调整方便;抗干扰能力差,控制精度不高。

(2)闭环控制系统:系统中含有反馈环节,输出量对输入量有反馈作用;结构复杂、成本高、适应性强;抗干扰能力强,控制精度高。

(3)复合控制系统:由开环和闭环控制系统结合而成,兼有开环控制系统和闭环控制系统的特点。

### 2. 按照参考输入量的变化规律分类

(1)恒值控制系统:又称自动调节系统。系统的参考输入量在工作过程中保持不变或变化很小,输出量保持恒值的系统。例如:电压、温度、转速、液位控制系统等。

(2)随动控制系统:又称伺服控制系统、跟踪控制系统。系统参考输入量随机变化,且输出量以一定精度跟踪输入量变化的系统。例如:雷达高射炮炮身位置随动控制系统、火炮群跟踪雷达天线方位角位置控制系统、轧钢机压下装置位置控制系统、液压仿形刀架控制系统和轮船位置控制系统等。

(3)程序控制系统:参考输入量是预定的时间函数,输出量能够准确而自动地按事先给定的规律进行变化的系统。例如:数控机床、数控加工中心和自动化生产线等控制系统。

恒值控制系统和随动控制系统是两类典型的自动控制系统,在工程中得到了广泛的应用。而程序控制系统近年来在工业领域中得到了广泛应用。

### 3. 按照输入量与输出量的关系分类

(1)线性控制系统:由线性微分、差分、代数方程等线性函数描述的控制系统称为线性控制系统。线性控制系统满足齐次叠加原理。

(2)非线性控制系统:由非线性函数描述的控制系统称为非线性控制系统。非线性控制系统不满足齐次叠加原理。

设系统有如下输入、输出的关系式: $f(x_1) = y_1, f(x_2) = y_2$ ,若满足 $f(ax_1 + bx_2) = ay_1 + by_2 = af(x_1) + bf(x_2)$ ( $a, b$ 为常数)的关系,则称为满足齐次叠加原理。

满足齐次叠加原理是线性控制系统的充分必要条件。由此可知,若两个外作用同时加于控制系统,则总输出等于各个外作用单独作用时分别产生的输出之和,且外作用的数值增大若干倍时,其输出亦相应增大同样的倍数。因此,对线性控制系统进行分析和设计时,对于多个输入的系统,可以分别处理,最后将各自的输出叠加。此外,每个外作用在数值上可只取单位值,从而大大简化了线性控制系统的研究工作。

非线性函数是指函数的系数与变量有关,或含有变量及其导数的高次幂或乘积项的函数。如 $\frac{dy^2(t)}{dt^2} + x(t)\frac{dy(t)}{dt} + y(t) + y^2(t) = x(t)$ 就是非线性函数。

线性控制系统理论是控制理论中历史最悠久、体系最完善、技术较成熟,且应用最为广

泛的理论;而非线性控制系统理论虽然近年来有很大发展,但还没有形成统一的理论体系,而且,现有的非线性理论也多以线性理论体系为基础进行分析研究。虽然,实际中每个元件或系统都或多或少地存在非线性特性,但如果非线性程度不重,则完全可以用线性控制系统来代替非线性控制系统进行系统分析,所以本书以线性控制系统为主要研究对象。

#### 4. 按照系统参数是否随时间变化分类

(1)定常控制系统:又称时不变系统,指结构和参数都不随时间变化的系统。定常控制系统响应特性只取决于输入信号的形式和特性,与输入信号的作用时刻无关。

(2)时变控制系统:指结构和参数随时间变化的系统。时变控制系统的响应特性取决于输入信号的形式及信号作用的时刻。如火箭控制系统,随着燃料的消耗,系统的质量和惯性都在随时变化,其控制方式也必然发生变化。

定常控制系统理论体系完整,便于实用,而时变控制系统理论尚不成熟。严格来说,在运行过程中,由于各种因素的作用,要使实际系统的参数完全不变是不可能的,定常控制系统只是时变控制系统的一种理想化模型。但是,只要参数的时变过程比系统的运动过程慢很多,用定常控制系统来描述实际控制系统所造成的误差就很小,可以满足工程需要。而大多数实际控制系统的参数随时间变化并不明显,所以本书以定常控制系统的分析设计为主。

#### 5. 按照系统传输信号的不同分类

(1)连续控制系统:所有传输信号都是随时间连续变化的系统,如模拟量控制系统。

(2)离散控制系统:指某处或多处传输信号随时间离散变化的系统。它包括采样控制系统和数字控制系统等。

连续信号和离散信号曲线如图 1-9 所示。

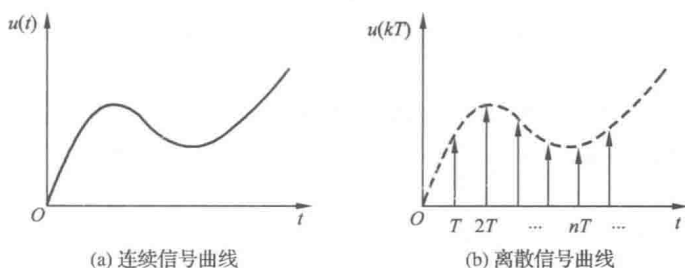


图 1-9 连续信号和离散信号曲线

连续控制系统和离散控制系统虽然是两类性质差异较大的控制系统,但它们所讨论的问题以及分析与综合的基本理论、方法具有平行的相似性。本书讨论以连续控制系统为主,通过对比再介绍离散控制系统的相关内容。

#### 6. 按照系统输入输出端口关系分类

(1)单入单出控制系统:简称 SISO 控制系统,指只有一个输入量和一个输出量端口关系的系统,如图 1-10(a)所示。

(2)多人多出控制系统:简称 MIMO 控制系统,指具有多个输入量和多个输出量端口关系的系统,如图 1-10(b)所示。

单入单出控制系统是最简单的自动控制系统,是多人多出控制系统的基础。单入单出控制系统是经典控制理论的主要研究对象,多人多出控制系统是现代控制理论的主要研究对象。



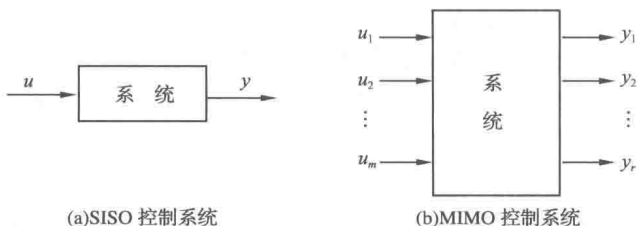


图 1-10 自动控制系统输入输出端口关系示意图

## 1.4 自动控制系统分析与设计的基本要求

### 1.4.1 自动控制系统分析与设计的基本要求

自动控制系统分析和设计的基本要求可以归纳为以下三点：稳定性、准确性和快速性，即稳、准、快。

#### 1. 稳定性

稳定性是自动控制系统的重要特性，也是衡量闭环控制系统性能的主要指标之一。保证系统稳定是对系统最基本也是最重要的要求。系统的稳定性指当系统受到外界或内部的扰动时能重新回到初始稳定运行状态的性能。系统不稳定，即系统失控，指系统受到扰动作用后被控量不是趋于希望值，而是趋于所能达到的最大值，或在两个较大的量值之间剧烈波动或振荡。当系统失稳时，常常会损伤设备，甚至造成系统的彻底损坏，引起重大事故。如图 1-11 所示，曲线①是稳定控制系统的响应曲线，曲线②是不稳定控制系统的响应曲线。

#### 2. 准确性

系统在输入信号作用下，被控量由初始稳定值变化到另一个稳定值需要一段时间，有一个变化过程，这个过程称为过渡过程。系统在过渡过程结束后，被控量的实际值与系统希望值的误差称为系统的稳态误差，用来表示系统的准确性，它是衡量系统性能的重要指标。一般控制系统的准确性控制在允许的精度范围内。如图 1-12 所示，曲线③的准确性好，曲线④的准确性差。

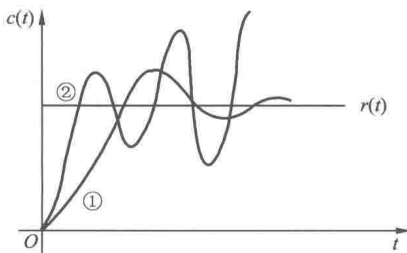


图 1-11 稳定与不稳定控制系统响应曲线

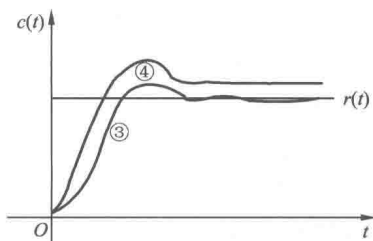


图 1-12 不同控制系统动态响应曲线

#### 3. 快速性

快速性是描述系统过渡过程结束快慢的重要特性。一般希望控制系统的过渡过程既快速又平稳，所以快速性和平稳性是衡量系统过渡过程中动态性能的主要指标。

如图 1-12 所示，曲线④的响应快，快速性好，曲线③的响应慢，快速性差。而曲线③的

振荡幅值小,平稳性好,曲线④的振荡幅值大,平稳性差。

稳定性是系统正常工作的前提;快速性和平稳性是对稳定系统动态性能的要求;准确性是对稳定系统稳态性能的要求。只有在系统稳定的前提下,谈论其快速性及准确性才有意义。从上面的分析也可以看出,稳定性、准确性、快速性以及平稳性常常是互相制约、互相矛盾的,所以在进行系统设计时要考虑多方面因素,结合实际系统的具体要求,综合进行分析设计。

### 1.4.2 自动控制系统分析与设计的步骤

根据系统分析与设计的基本要求,进行自动控制系统设计的基本步骤可以归纳如下:

#### 1. 确定设计目标

主要是设计被控变量和性能指标。控制系统的性能指标包括动态性能指标和稳态性能指标。此外,还有抗干扰能力、鲁棒性(当系统数学模型和参数不精确并在一定范围内变化时,系统仍能稳定地工作并具有良好的控制性能的特性)等指标。性能指标是根据用户和现场实际的需求提出来的,同时也应该考虑现实条件和成本等因素。

#### 2. 确定控制系统结构

主要指选择驱动装置和配置适当的传感器等设备,但设计者不能改变被控对象的结构。对于复杂的控制系统还要确定多个反馈回路的结构。

#### 3. 建立控制系统数学模型、设计控制装置

根据系统结构,建立控制系统的微分方程或传递函数等数学模型,分析系统性能,进而设计控制装置,修正、改善控制系统性能。设计控制系统的关键部件时,需要反复调整控制装置的结构和参数来获得期望的性能指标。最后,对所设计的控制系统进行计算机仿真,校验系统的输出响应。

#### 4. 实验室或现场调试

理论分析和设计过程都经过了一定简化,忽略了某些因素的影响。因此,一个工程设计方案必须经过实验的验证,并且一般的控制系统往往经过多次从理论到实践、从实践到理论的反复修正,才能达到工程要求的结果。所以经过实验或现场调试后,再进行调整是必要的。

## 1.5 自动控制理论的内容与发展

自动控制是社会生产力发展到一定阶段的产物,是人类社会进步的象征。自动控制的发展可以追溯到古代。我国古代的指南车、木牛流马、铜壶滴漏、水运仪象台,欧洲的钟表报时装置和一些手工机械等,均反映了劳动人民的聪明智慧。据考证,指南车是按扰动补偿原理工作的,水运仪象台是按反馈调节原理工作的。自动控制在工业上的成熟应用最早应该在第一次产业革命期间,1788年,瓦特(J. Watt)的离心式飞球调速器运用于蒸汽机转速自动调节系统,开创了自动控制理论应用于工业产业的先河,继而也逐步形成了完整的自动控制理论体系。

自动控制理论根据其发展过程可以分为以下三个阶段。

#### 1. 经典控制理论阶段

20世纪30年代至50年代,由于生产和军事的需求,以三项理论性成果为标志,自动控

制理论形成了完整的理论体系。其中奈奎斯特(H. Nyquist)提出的关于反馈控制系统稳定性的理论,揭示了反馈控制系统出现不稳定的原因,给出了判定反馈控制系统稳定性的奈奎斯特判据,提供了避免系统不稳定的设计方法;伯德(H. W. Bode)引入的对数增益图和线性相位图,即伯德图,大大简化了系统频率响应特性的运算和作图过程,使基于频率响应特性的系统分析和综合方法得以形成;另外,伊文思(W. R. Evans)提出的根轨迹法,为时域内的分析和综合开辟了有效途径。到20世纪50年代中期,自动控制理论已经是一门十分成熟的理论,我们把这阶段的自动控制理论称为经典控制理论。经典控制理论在第二次世界大战期间和二战之后各国工业生产中取得了广泛的应用,其中自动火炮跟踪系统和火箭自动导航系统是最为突出的范例。

经典控制理论研究的对象是线性定常控制系统中的单入单出控制系统,采用的数学工具是微分方程和传递函数,研究的方法有根轨迹法和频率分析法。

## 2. 现代控制理论阶段

20世纪60年代至70年代,随着航空航天事业的发展,对自动控制系统的要求越来越高,控制系统也越来越复杂,单入单出控制系统不能满足要求,于是产生了对多个输入变量、多个输出变量的复杂控制系统进行分析和设计的现代控制理论。另外,数字计算机的产生和发展也为现代控制理论的发展提供了技术保障。现代控制理论中主要的理论成果有庞特里亚金(Pontryagin)的极大值原理、贝尔曼(R. Bellman)的动态规划原理、卡尔曼(R. E. Kalman)的可控性、可观性以及最优滤波原理等。现代控制理论在航空、航天、导弹控制系统以及人口控制领域的实际应用中取得了巨大成就。

现代控制理论研究的对象更为广泛,主要是多人多出控制系统,它可以是线性控制系统和非线性控制系统或定常控制系统和时变控制系统等,采用的数学工具主要是状态空间表达式,研究的方法主要是状态空间法。

## 3. 智能控制理论阶段

现代控制理论在广泛的实践特别是应用到民用工业控制系统中时,效果并不理想,究其原因,关键在于客观实际中不可避免地存在着许多不确定性因素,要想获得精确的系统数学模型往往是不可能的,使得具有严谨的数学结构和严密的系统分析和综合方法的现代控制理论难于广泛应用。20世纪70年代至90年代,现代控制理论逐渐吸收了很多相关学科、边缘学科和新兴学科的精华,并模拟人类智能活动及其控制与信息传递、加工处理的机理等,形成了系统辨识理论、自适应理论、模糊控制理论、鲁棒控制理论、人工神经网络、混沌控制理论和专家控制系统等能够处理更复杂系统的控制理论,此阶段称为智能控制理论阶段。

智能控制理论体系包罗的知识领域很宽,可以处理的问题和控制的系统更加复杂、更加庞大,经典控制理论和现代控制理论处理的问题和研究的方法都可以用智能控制理论和方法来实现,所以可以把经典控制理论和现代控制理论视为智能控制理论的初级阶段理论。

智能控制理论的研究以人工智能的研究为主要方向,引导人们去探讨自然界更为深刻的运动机理。目前,人们利用智能控制理论已取得许多研究成果,如不依赖于系统数学模型的自适应控制器和模糊控制器等工业控制产品已投入使用;基于超大规模集成电路芯片(VLSI)的神经网络计算机已经运行;美国宇航专家应用混沌控制理论,将一颗即将废弃的人造卫星仅利用自身残存的燃料成功地发射到了火星等。

智能控制理论的研究与发展,为自动控制理论的研究注入了勃勃生机,开拓了广阔的研