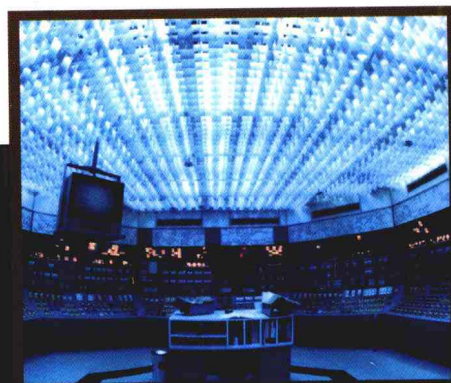


高等院校电气信息类规划教材

# 自动控制原理

张 莲 胡晓倩 余成波 编著



中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

高等院校电气信息类规划教材

# 自动控制原理

张 莲 胡晓倩 余成波 编著

中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

---

## 内 容 简 介

本书比较全面地覆盖了大学本科“自动控制理论”课程的主要内容,介绍分析和设计反馈控制系统的经典理论和应用方法。内容包括自动控制系统概述,控制系统的数学模型,自动控制系统的时域分析法、根轨迹分析法、频率特性法、控制系统的校正,非线性控制系统,离散控制系统的分析和综合等。在每章后面分别介绍了 MATLAB 在自动控制理论中的一些应用,以及如何利用计算机辅助设计方法解决自动控制领域的一些系统分析和设计问题。同时,每章末编有一定数量的习题,主要用以检验、理解基本概念,熟练分析和设计方法。

本书适合作为高等院校自动化专业教材,也可作为电气工程及其自动化等电气信息类专业教学用书,还可供从事自动控制系统的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/张莲,胡晓倩,余成波编著. —北京:  
中国铁道出版社,2008. 1  
(高等院校电气信息类规划教材)  
ISBN 978-7-113-08630-5

I. 自… II. ①张…②胡…③余… 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 009865 号

书 名: 自动控制原理  
作 者: 张 莲 胡晓倩 余成波

策划编辑: 严晓舟 秦绪好  
责任编辑: 王占清  
封面设计: 付 巍  
责任校对: 郝霁江  
特邀编辑: 薛秋沛

编辑部电话: (010)83550579  
封面制作: 白 雪  
责任印制: 李 佳

出版发行: 中国铁道出版社(北京市宣武区右安门西街 8 号 邮政编码:100054)  
印 刷: 北京市彩桥印刷有限责任公司  
版 次: 2008 年 6 月第 1 版 2008 年 6 月第 1 次印刷  
开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 25.75 字数: 623 千  
书 号: ISBN 978-7-113-08630-5/TP·2713  
定 价: 36.00 元

版权所有 侵权必究

本书封面贴有中国铁道出版社激光防伪标签,无标签者不得销售  
凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社计算机图书批销部调换。

《自动控制原理》课程是高等工科院校电气信息类专业的一门重要的技术基础课程,应用领域非常广泛,几乎遍及电类及非电类的各个工程技术学科。

为适应我国对高等学校人才培养的需要,加强素质培养,淡化专业,拓宽基础,促进各学科与专业的交叉与渗透,依据我国当前电气工程学科课程设置与教学改革的实际情况,本教材在编写中,特别考虑了以下几点:

(1)注意和《信号与系统》一书在内容上的衔接,避免不必要的重复。

(2)处理好分析和设计的关系。工科学生学习自动控制理论的目的主要在于应用。对于工科学生而言,应当强调设计与综合能力的培养,特别是在学生已经有了《信号与系统》一书关于系统基本分析方法这一知识基础的情况下,更应如此,所以本教材以设计为主线来讲述自动控制的基本理论。

(3)处理好和计算机辅助设计软件的关系,根据计算机应用软件的发展,本教材编写了有关控制系统计算机辅助分析和辅助设计方面的内容,增加了 MATLAB 和 Simulink 软件在控制技术中的应用内容。

全书共分 8 章,内容包括自动控制系统的基本概念、控制系统的数学模型,自动控制系统的时域分析法、根轨迹分析法、频率特性法、控制系统的校正,非线性控制系统,离散控制系统的分析和综合等。在每章后面分别介绍了 MATLAB 在自动控制理论中的一些应用以及如何利用计算机辅助设计方法解决自动控制领域的一些系统分析和设计问题。同时,每章后面配有习题,加深学生理解基本概念,熟练分析和设计方法。

本书由重庆工学院张莲、胡晓倩、余成波编著。张莲编写第 1、2、3、7 章,胡晓倩编写第 4、5、6、8 章和附录。全书由余成波统稿,张睿、高云、秦华锋、谢东坡等同志参加了本书审核与编排工作。

本书在编写过程中,一些兄弟院校的同行们提出了许多宝贵意见并提供了很多帮助,在此,一并表示衷心的感谢。

由于水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请广大的同行与读者给予批评和指正。

编者

2008 年 3 月

<b>第 1 章 自动控制系统概述</b> .....	1
1.1 自动控制理论发展简史 .....	1
1.2 人工控制与自动控制 .....	3
1.2.1 人工控制 .....	3
1.2.2 自动控制 .....	4
1.3 开环控制系统与闭环控制系统 .....	5
1.3.1 开环控制系统 .....	5
1.3.2 闭环控制系统 .....	6
1.4 自动控制系统的组成 .....	7
1.4.1 基本组成部分 .....	7
1.4.2 自动控制系统中常用的名词术语 .....	8
1.5 自动控制系统的分类 .....	8
1.5.1 按输入信号的特点分类 .....	9
1.5.2 按描述系统的动态方程分类 .....	9
1.5.3 按系统的参数是否随时间而变化分类 .....	9
1.5.4 按信号的传递是否连续分类 .....	9
1.5.5 按照输入信号和输出信号的数目分类 .....	10
1.6 自动控制系统的实例 .....	10
1.6.1 炉温控制系统 .....	10
1.6.2 函数记录仪 .....	11
1.6.3 导弹发射架范围控制系统 .....	12
1.6.4 计算机控制系统 .....	13
1.7 对自动控制系统的基本要求 .....	13
1.8 本课程研究的主要内容 .....	14
本章小结 .....	14
习题 .....	15
<b>第 2 章 控制系统的数学模型</b> .....	17
2.1 控制系统的微分方程 .....	17
2.1.1 线性系统微分方程的建立 .....	17
2.1.2 非线性系统微分方程的线性化 .....	20
2.2 传递函数 .....	22
2.2.1 传递函数的定义和性质 .....	22
2.2.2 用复数阻抗法求电网络的传递函数 .....	25
2.2.3 典型环节及其传递函数 .....	27
2.3 控制系统的结构图及其等效变换 .....	31
2.3.1 结构图的组成 .....	31
2.3.2 结构图的建立 .....	31
2.3.3 结构图的等效变换 .....	32

2.4	自动控制系统的传递函数 .....	37
2.4.1	系统的开环传递函数 .....	37
2.4.2	闭环系统的传递函数 .....	38
2.4.3	闭环系统的偏差传递函数 .....	39
2.5	信号流图 .....	40
2.5.1	信号流图的基本要素 .....	40
2.5.2	信号流图的常用术语 .....	40
2.5.3	信号流图的性质 .....	41
2.5.4	信号流图的等效变换法则 .....	41
2.5.5	梅森(Mason)公式 .....	42
2.6	脉冲响应函数 .....	44
2.7	控制系统数学模型的 MATLAB 实现 .....	44
2.7.1	控制系统的数学模型 .....	44
2.7.2	应用举例 .....	46
	本章小结 .....	47
	习题 .....	48
<b>第3章 时域分析法 .....</b>		<b>51</b>
3.1	稳定性和代数稳定判据 .....	51
3.1.1	稳定性的概念 .....	51
3.1.2	线性定常系统稳定的充分必要条件 .....	52
3.1.3	劳斯稳定判据 .....	52
3.1.4	劳斯稳定判据的应用 .....	54
3.2	典型输入信号和时域性能指标 .....	57
3.2.1	典型输入信号 .....	57
3.2.2	动态过程与稳态过程 .....	59
3.2.3	时域性能指标 .....	60
3.3	一阶系统的动态响应 .....	61
3.3.1	一阶系统的时域数学模型 .....	61
3.3.2	一阶系统的重要特性 .....	64
3.4	二阶系统的动态响应 .....	64
3.4.1	数学模型的标准形式 .....	65
3.4.2	典型二阶系统的单位阶跃响应 .....	65
3.4.3	典型二阶系统动态性能指标 .....	68
3.4.4	二阶系统性能的改善 .....	72
3.5	高阶系统的动态响应 .....	74
3.5.1	高阶系统的数学模型 .....	74
3.5.2	高阶系统的时域分析 .....	74
3.6	控制系统的稳态误差 .....	76
3.6.1	误差与稳态误差的定义 .....	76

3.6.2	控制系统的类型 .....	77
3.6.3	给定输入下的稳态误差 .....	78
3.6.4	扰动作用下的稳态误差 .....	80
3.6.5	改善系统稳态精度的方法 .....	81
3.7	控制系统的基本控制规律 .....	82
3.7.1	基本控制规律 .....	82
3.7.2	比例-微分控制(PD 调节器) .....	83
3.7.3	比例-积分控制(PI 调节器) .....	84
3.7.4	比例-积分-微分控制(PID 调节器) .....	85
3.8	控制系统时域分析的 MATLAB 应用 .....	85
3.8.1	基于 Toolbox 工具箱的时域分析 .....	85
3.8.2	基于 Simulink 的时域分析 .....	88
	本章小结 .....	90
	习题 .....	90
<b>第 4 章</b>	<b>根轨迹分析法 .....</b>	<b>93</b>
4.1	根轨迹的基本概念 .....	93
4.1.1	根轨迹图 .....	93
4.1.2	根轨迹方程 .....	95
4.2	绘制根轨迹的基本规则 .....	97
4.3	控制系统根轨迹的绘制 .....	110
4.3.1	常规根轨迹的绘制 .....	110
4.3.2	参数根轨迹 .....	115
4.3.3	多回路系统的根轨迹 .....	118
4.3.4	正反馈系统的根轨迹 .....	120
4.3.5	延迟系统的根轨迹 .....	123
4.4	利用根轨迹分析控制系统性能 .....	126
4.4.1	由根轨迹法分析闭环系统性能 .....	126
4.4.2	增加开环零极点对根轨迹和系统性能的影响 .....	132
4.4.3	条件稳定系统的分析 .....	134
4.4.4	根轨迹的校正 .....	136
4.5	应用 MATLAB 绘制系统的根轨迹 .....	136
4.5.1	绘制根轨迹的相关函数 .....	136
4.5.2	利用 MATLAB 指令绘制系统的根轨迹 .....	136
	本章小结 .....	138
	习题 .....	139
<b>第 5 章</b>	<b>频率特性法 .....</b>	<b>143</b>
5.1	频率特性的基本概念 .....	143
5.1.1	频率响应 .....	143

5.1.2	频率特性 .....	144
5.1.3	由传递函数求取频率特性 .....	146
5.1.4	常用频率特性曲线 .....	148
5.2	幅相频率特性曲线及其绘制 .....	148
5.2.1	幅相频率特性曲线基本概念 .....	148
5.2.2	典型环节的奈氏图 .....	149
5.2.3	开环奈氏图的绘制 .....	155
5.3	对数频率特性曲线及其绘制 .....	160
5.3.1	对数频率特性曲线基本概念 .....	160
5.3.2	典型环节的波德图 .....	162
5.3.3	开环波德图的绘制 .....	168
5.3.4	最小相位系统 .....	171
5.3.5	由实测波德图求传递函数 .....	173
5.4	奈奎斯特稳定判据 .....	174
5.4.1	幅角原理 .....	174
5.4.2	奈奎斯特稳定判据 .....	175
5.4.3	简化奈奎斯特稳定判据 .....	180
5.4.4	奈奎斯特稳定判据在波德图上的应用 .....	183
5.4.5	奈奎斯特稳定判据的其他应用 .....	185
5.5	控制系统的相对稳定性 .....	186
5.5.1	幅值穿越频率 $\omega_c$ 与相位穿越频率 $\omega_g$ .....	187
5.5.2	相位裕量 .....	187
5.5.3	幅值裕量 .....	188
5.5.4	系统的稳定裕量 .....	188
5.6	利用开环频率特性分析系统的性能 .....	190
5.6.1	开环对数幅频特性 $L(\omega)$ 低频段与系统性能的关系 .....	190
5.6.2	开环对数幅频特性 $L(\omega)$ 中频段与系统性能的关系 .....	192
5.6.3	开环对数幅频特性 $L(\omega)$ 高频段与系统抗干扰性能的关系 .....	198
5.6.4	$L(\omega)$ 应满足的要求 .....	199
5.7	闭环系统频率特性 .....	199
5.7.1	闭环频域指标 .....	199
5.7.2	闭环频率特性的求取 .....	200
5.7.3	闭环频域指标与时域指标的关系 .....	206
5.8	MATLAB 在频率特性法中的应用 .....	208
5.8.1	波德图的绘制 .....	208
5.8.2	奈氏图的绘制 .....	210
5.8.3	尼科尔斯图的绘制 .....	211
	本章小结 .....	213
	习题 .....	213



<b>第 6 章 控制系统的校正</b> .....	218
6.1 校正的基本概念 .....	218
6.1.1 控制系统的性能指标 .....	218
6.1.2 校正的一般概念与基本方法 .....	219
6.1.3 频率法校正 .....	221
6.1.4 其他设计方法 .....	221
6.1.5 系统结构的简化处理 .....	222
6.2 超前校正装置及其参数的确定 .....	223
6.2.1 相位超前校正装置及其特性 .....	223
6.2.2 串联超前校正的分析法设计 .....	226
6.2.3 超前校正的优点 .....	228
6.3 滞后校正装置及其参数的确定 .....	229
6.3.1 相位滞后校正装置及其特性 .....	229
6.3.2 串联滞后校正装置的分析法设计 .....	232
6.3.3 滞后校正的优点 .....	234
6.4 滞后-超前校正装置及其参数的确定 .....	235
6.4.1 相位滞后-超前校正装置及其特性 .....	235
6.4.2 系统滞后-超前校正的分析法设计 .....	237
6.5 串联 PID 校正 .....	240
6.5.1 基本概念 .....	240
6.5.2 设计实例 .....	241
6.6 期望对数频率特性设计法 .....	243
6.6.1 期望法设计的基本概念 .....	243
6.6.2 常见期望特性 .....	243
6.6.3 应用实例 .....	246
6.7 基于根轨迹法的串联校正 .....	250
6.7.1 根轨迹法校正的基本概念 .....	250
6.7.2 利用根轨迹法设计超前校正装置 .....	250
6.7.3 利用根轨迹法设计滞后校正装置 .....	253
6.7.4 利用根轨迹法设计滞后-超前校正装置 .....	257
6.8 反馈校正装置及其参数的确定 .....	257
6.8.1 反馈校正的基本概念 .....	258
6.8.2 反馈校正的设计方法 .....	258
6.8.3 常用反馈校正形式与功能 .....	262
6.8.4 反馈校正的作用 .....	264
6.9 控制系统校正的 MATLAB 应用 .....	264
6.9.1 MATLAB 指令在控制系统校正中的应用 .....	264
6.9.2 基于 Simulink 的系统校正 .....	266
本章小结 .....	267
习题 .....	268

<b>第 7 章 非线性控制系统</b> .....	273
7.1 非线性控制系统的概念 .....	273
7.1.1 非线性控制系统的数学描述 .....	273
7.1.2 典型非线性特性 .....	273
7.1.3 非线性控制系统的特性 .....	276
7.1.4 非线性控制系统的分析和设计方法 .....	277
7.2 描述函数法 .....	277
7.2.1 描述函数的基本概念 .....	277
7.2.2 典型非线性特性的描述函数 .....	279
7.2.3 非线性系统的描述函数法分析 .....	286
7.3 相平面法 .....	291
7.3.1 相平面法的基本概念 .....	291
7.3.2 二阶线性系统的相轨迹 .....	292
7.3.3 相轨迹的绘制方法 .....	294
7.3.4 用相轨迹求系统暂态响应 .....	297
7.3.5 非线性系统的相平面分析 .....	298
7.4 利用非线性特性改善线性系统的性能 .....	305
7.5 MATLAB 在非线性控制系统中的应用 .....	308
7.5.1 利用 MATLAB 分析非线性系统的频率特性与时域响应 .....	308
7.5.2 利用 MATLAB 绘制非线性系统的相平面图 .....	310
本章小结 .....	311
习题 .....	311
<b>第 8 章 离散控制系统的分析和综合</b> .....	314
8.1 离散控制系统的概念 .....	314
8.1.1 采样控制系统 .....	314
8.1.2 数字控制系统 .....	315
8.1.3 离散控制系统的特性 .....	317
8.1.4 离散控制系统的研究方法 .....	318
8.2 信号的采样与保持 .....	318
8.2.1 信号的采样 .....	318
8.2.2 信号的复现及零阶保持器 .....	321
8.3 Z 变换 .....	323
8.3.1 采样信号的拉普拉斯变换 .....	323
8.3.2 Z 变换的定义 .....	324
8.3.3 Z 变换的方法 .....	324
8.3.4 Z 变换的性质 .....	328
8.3.5 Z 反变换 .....	332
8.4 脉冲传递函数 .....	336

8.4.1	脉冲传递函数 .....	336
8.4.2	开环系统的脉冲传递函数 .....	338
8.4.3	离散控制系统的闭环脉冲传递函数 .....	341
8.4.4	应用 Z 变换分析离散系统的局限性与条件 .....	347
8.4.5	差分方程 .....	349
8.5	离散控制系统稳定性分析 .....	351
8.5.1	离散控制系统稳定的充分必要条件 .....	351
8.5.2	离散控制系统的劳斯稳定判据 .....	354
8.5.3	线性离散系统的稳定性 .....	356
8.6	离散系统的稳态误差分析 .....	357
8.6.1	离散系统的稳态误差 .....	357
8.6.2	离散系统的类型与典型输入信号作用下稳态误差 .....	358
8.7	离散系统的动态性能分析 .....	361
8.7.1	离散系统的时间响应 .....	361
8.7.2	闭环极点与动态响应的关系 .....	361
8.8	离散系统的数字校正 .....	366
8.8.1	数字控制器的脉冲传递函数 .....	366
8.8.2	最少拍系统设计 .....	368
8.9	MATLAB 在离散控制系统中的应用 .....	376
8.9.1	利用 Toolbox 工具箱分析离散系统 .....	376
8.9.2	利用 Simulink 分析离散控制系统 .....	377
	本章小结 .....	379
	习题 .....	380
附录 A	拉普拉斯变换及反变换 .....	384
附录 B	Z 变换及反变换 .....	387
附录 C	常见的无源及有源校正网络 .....	389
附录 D	MATLAB 在控制系统的应用简介 .....	392
	参考文献 .....	398

# 第 1 章 自动控制系统概述

## 1.1 自动控制理论发展简史

自动控制理论是在人类认识自然与改造自然的历史中不断发展、完善起来的。它是自动控制技术的理论基础,是研究关于自动控制系统组成、分析和设计的一般性理论,是研究自动控制共同规律的一门技术科学。根据发展的不同阶段,其内容可分为经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论。

自动控制开始只是作为一种技艺,由有天赋的工艺工程师掌握了大量的知识及精心设计才付诸实践的。早期的控制装置原理,大都可以凭直觉解释,尽管有些装置工艺精巧复杂,但都属于自动技术问题;还没有上升到理论层面。

如果要追溯自动控制技术的发展历史,早在两千年前就有了自动控制技术的萌芽。凭借生产实践中积累的丰富经验和对反馈概念的直观认识,人们有了许多闪烁着控制理论智慧火花的发明。例如,古代罗马人家里的水管系统中应用按反馈原理构成的简单水位控制装置;我国和希腊在古代都发展了用反馈原理控制水流速度的水钟(“铜壶滴漏”);春秋战国时代我国发明了指南车;公元 1086~1089 年我国的苏颂和韩公廉发明了反馈调节装置——水运仪象台;大约在 1620 年 Drebbel 设计的鸡蛋孵化器是恒温控制的一个很好的反馈系统;1681 年 Dennis Papin 发明了用作安全调节装置的锅炉压力调节器;1765 年俄国人普尔佐诺夫(I. Polzunov)发明了蒸汽锅炉水位调节器等。

随着科学技术与工业生产的发展,到了 18 世纪,自动控制技术逐渐应用到现代工业中。其中最卓越的代表是 1787 年瓦特(J. Watt)在他发明的蒸汽机上使用了离心调速器,解决了蒸汽机的速度控制问题,加速了第一次工业革命的步伐。以后人们曾经试图改善调速器的准确性,却常常导致系统产生振荡。

1868 年,英国物理学家马克斯韦尔(J. C. Maxwell)发表论文“论调节器”,从微分方程的角度讨论了瓦特速度控制系统可能产生的不稳定现象,提出了简单的稳定性代数判据,开辟了用数学方法研究控制系统中运动的途径,开创了控制理论研究的先河。

英国数学家劳斯(E. J. Routh)和德国数学家赫维茨(A. Hurwitz)把马克斯韦尔的思想扩展到高阶微分方程描述的更复杂的系统中,分别于 1877 年和 1895 年独立地提出了两种著名的稳定性判据——劳斯判据和赫维茨判据,基本上满足了 20 世纪初期控制工程师的需要。

1892 年俄国数学家李雅普诺夫(A. M. Lyapunov)发表了题为“运动稳定性的一般问题”的论文,用严格的数学分析方法全面地论述了稳定性问题,为线性和非线性理论奠定了坚实的理论基础, Lyapunov 稳定性理论至今仍然是分析系统稳定性的重要方法之一。

1927 年美国贝尔实验室的电气工程师伯来克(H. S. Black)在解决电子管放大器失真问题时首先引入“反馈”的概念。1925 年英国电气工程师亥维赛(O. Oliver. Heaviside)把拉普

拉斯变换应用到求解电网络的问题上,创立了运算微积分,不久就被应用到分析自动控制系统的问题上,并取得了显著的成就。传递函数是在拉普拉斯变换的基础上引入的,是描述线性定常系统或线性元件的输入输出关系的函数,是分析自动控制系统的重要工具。

20世纪30年代,自动控制理论逐步形成为一门独立的学科。1932年,美国物理学家奈奎斯特(H. Nyquist)研究了长距离电话线信号传输中出现的失真问题,运用复变函数理论建立了以频率特性为基础的稳定性判据,奠定了频率响应法的基础。随后,波德(H. W. Bode)和尼科尔斯(N. B. Nichols)在30年代末和40年代初进一步将频率响应法加以发展,形成了经典控制理论的频域分析法,为工程技术人员提供了一个设计反馈控制系统的有效工具。

第二次世界大战期间,反馈控制方法被广泛用于设计研制飞机自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达天线控制系统以及其他军用系统。这些系统的复杂性和对快速跟踪、精确控制的高性能追求,迫切要求拓展已有的控制技术,促使了许多新的见解和方法的产生。同时,还促进了对非线性系统、采样系统以及随机控制系统的研究。

1948年,美国科学家伊万斯(W. R. Evans)提出了有名的根轨迹分析方法,并于1950年进一步应用于反馈控制系统的设计,形成了与频率响应法相对应的另一核心方法——根轨迹法。20世纪40年代末和50年代初,频率响应法和根轨迹法被推广应用于研究采样控制系统和简单的非线性控制系统。在这一时期,理论上和应用上所获得的成就,促使人们试图把这些原理推广到像生物控制机理、神经系统、经济及社会过程等非常复杂的系统,美国数学家维纳(N. Wiener)在1949年出版的《控制——关于在动物和机器中控制和通信的科学》,发现了控制论是由信息、反馈和控制三个基本要素构成的,这奠定了控制论的基础,具有重要的影响。

以传递函数作为描述系统的数学模型,以时域分析法、根轨迹法和频域分析法为主要分析设计工具,构成了经典控制理论的基本框架。到了20世纪50年代,经典控制理论已发展到相当成熟的地步,形成了相对完整的理论体系。经典控制理论研究的对象基本上是以线性定常系统为主的单输入-单输出系统,还不能解决如时变参数问题、多变量、强耦合等复杂的控制问题。尽管如此,经典控制理论学科的形成,对于第二次世界大战以来控制学科的发展起到了推动作用。经典控制理论在工业控制和军事技术中的广泛应用,推动了现代科学技术的进步,促进了现代控制理论的产生与发展,取得了不可磨灭的成就。

20世纪50年代中期,由于空间技术的发展,各种高速、高性能的飞行器相继出现,要求高精度地处理多变量、非线性、时变和自适应等控制问题。实践的需求推动了控制理论的进步,同时,计算机技术的发展也从计算手段上为控制理论的发展提供了条件。在这种背景下,建立在状态概念基础上的现代控制理论应运而生了。1956年,苏联科学家庞特里亚金(L. S. Pontryagin)提出极大值原理。同年,美国数学家贝尔曼(R. Bellman)创立动态规划。极大值原理和动态规划为最优控制提供了理论工具。1959年美国数学家卡尔曼(R. E. Kalman)发表了“最优滤波与线性最优调节器”理论,提出了著名的“卡尔曼滤波器”,1960年卡尔曼(R. E. Kalman)又提出能控性和能观测性的概念。到了60年代初,一套以状态方程作为描述系统的数学模型,以最优控制和卡尔曼滤波为核心的控制系统分析、设计的新原理和方法基本确定,现代控制理论应运而生。

现代控制理论研究所使用的数学工具主要是状态空间法。该方法研究对象更为广泛,如多变量、非线性、时变、强变量耦合系统等。借助于计算机技术,现代控制理论在空间技术、导

弹制导、船舶自动驾驶等高精技术领域创造了辉煌的成就,人类迈向宇宙的梦想变为现实。

20世纪60年代以后新的控制理论迅速发展,如最优控制、系统辨识、多变量控制、自适应控制、专家系统、人工智能、神经网络控制、模糊控制、大系统理论等。控制理论向着“大系统理论”和“智能控制”方向发展,前者是控制理论在广度上的开拓,后者是控制理论在深度上的挖掘。“大系统理论”是用控制和信息的观点,研究各种大系统的结构方案、总体设计中的分解方法和协调等问题的技术基础理论;而“智能控制”是研究与模拟人类智能活动及其控制与信息传递过程的规律,研究具有某些仿人类智能的工程控制与信息处理系统。

20世纪70年代中期以来,自动控制理论的概念和方法已应用于交通管理、生态控制、生物和生命现象的研究、经济科学、社会系统等领域。自动控制理论的建立和发展,不仅推动了自动控制技术的发展,也推动了其他相关学科技术的发展。自动控制技术和理论已经成为现代社会生活中不可缺少的重要组成部分。

本教材只介绍经典控制理论的有关问题,以求为进一步深入学习自动控制有关课程及其相关科学奠定良好的基础。同时本书引入MATLAB作为自动控制系统分析和设计的工具,将课程中的重点、难点用MATLAB进行形象、直观的计算机模拟与仿真实现,从而加深对自动控制系统基本原理、设计和分析方法的理解。

## 1.2 人工控制与自动控制

所谓控制,就是根据某种原理或方法,使特定对象(被控对象)的某些物理量(被控量)按照预期规律变化的操纵过程。当这种控制是通过人直接或间接操作执行装置来完成时,其控制方式就称为人工控制;若该控制无需人直接或间接操纵执行机构,而是利用控制装置进行控制,使被控量自动地按照预定的规律变化,其控制方式则称为自动控制。

### 1.2.1 人工控制

图1-1所示是人工控制的水位恒定系统。水池中的水源源不断地经出水管流出,以供用户使用,要求使水池中的水位保持给定值。水池是控制的对象,简称被控对象。水池中的水位是被控制的物理量,简称被控量。当水位在给定位置且流入、流出量相等时,它处于平衡状态。当流出量发生变化或水位给定值发生变化时,就需要操纵者对流入量进行必要的控制。操纵者始终观测实际水位,并和给定的水位进行比较。当发现水池的实际水位高于给定值时,就关小进水阀门开度;反之,则加大进水阀门开度以改变进水量,从而改变水池水位,使之达到给定值。在该系统中,操纵者完成的工作主要有以下几个方面:

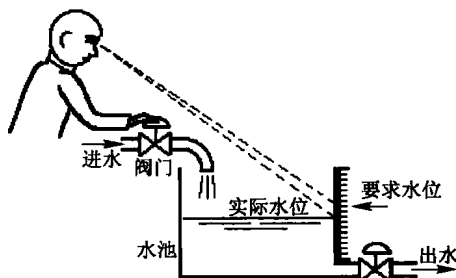


图1-1 水位人工控制系统

- (1) 将水位的给定值(期望水位值)记在大脑中;
- (2) 用眼睛和测量工具观测水池的实际水位;
- (3) 把水池的给定水位和实际水位相比较,得出二者之间误差的极性(正或负)和大小;
- (4) 根据误差的正负性质和大小,用手调节进水阀门的开度,使水位保持在给定值。

可见,人工控制就是一个反复观察测量、比较、调整执行的过程,其目的是力图减少水池

水位的实际值与给定值之间的误差,使被控制量尽可能地等于或接近给定值。

人工控制的水位恒定系统可用图 1-2 所示的框图表示。

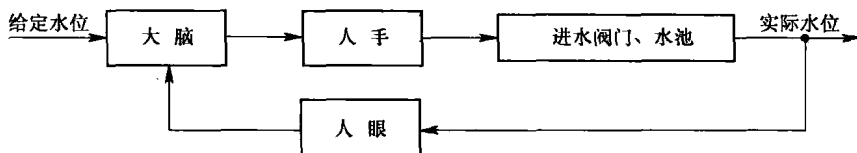


图 1-2 水位人工控制系统框图

## 1.2.2 自动控制

对于水位人工控制系统,如果能用一些设备模仿和代替人的智能,就可以把它变成自动控制系统。

水位自动控制系统如图 1-3 所示。在该系统中,用浮子代替人的眼睛,用来测量水位高低;用一套连杆机构代替人的大脑和手的功能,用来进行比较、计算误差并实施控制。连杆的一端由浮子带动,另一端则连向电位器控制进水阀门。它将期望水位与实际水位两者进行比较,得出误差,同时推动电位器的滑臂上下移动。电位器输出电压反映了误差的性质(大小和方向)。电位器输出的微弱电压经放大器放大后驱动直流伺服电动机,其转轴经减速器后拖动进水阀门,对系统施加控制作用。

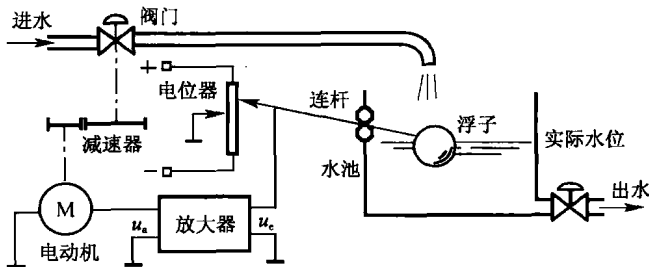


图 1-3 水位自动控制系统

在正常情况下,实际水位等于期望值,此时,电位器的滑臂居中, $u_e=0$ 。当水池出水量增大时,水位开始下降,浮子也随之下落,带动电位器滑臂向上移动, $u_e>0$ ,经放大后成为  $u_a$ ,控制电动机正向旋转,以增大进水阀门开度,促使水位回升。当实际水位回复到期望值时, $u_e=0$ ,系统达到新的平衡状态。

可见,该系统在运行时,无论何种干扰引起水位出现偏差,系统都会进行调节,最终总是使实际水位等于期望值,大大提高了控制精度。该控制系统也可用框图表示,如图 1-4 所示。

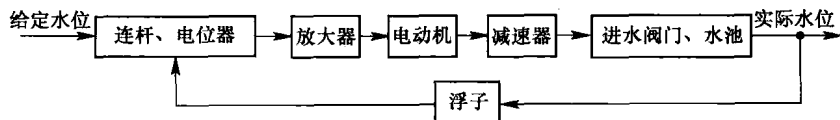


图 1-4 水位自动控制系统框图

比较图 1-2 和图 1-4 可以看出,人工控制系统和自动控制系统非常相似,自动控制系统只不过是把某些装置有机地组合在一起,以代替人的智能而已。图 1-3 中测量装置(浮子)相当

于人的眼睛,对实际水位进行测量;连杆和电位器类似于大脑,完成比较运算,给出误差的大小和极性;放大器、电动机和减速器代替人手,调节阀门开度,对水位实施控制。这些装置相互配合,承担着控制的职能,通常称之为控制器(或控制装置)。任何一个控制系统,都是由被控对象和控制器两部分所组成的。

### 1.3 开环控制系统与闭环控制系统

在自动控制领域,系统是指由内部互相联系的部件按照一定规律组成,能够完成一定功能的有机整体。开环控制和闭环控制是控制系统中最常见的两种控制方式,这两种控制的组合即为复合控制,相对应的控制系统称为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统。

#### 1.3.1 开环控制系统

如果控制系统的输出量对系统没有控制作用,这种系统称为开环控制系统。在开环控制系统中,输入端与输出端之间,只有信号的前向通路而不存在由输出端到输入端的反馈通路。因此,开环控制系统又称为无反馈控制系统。

图 1-5 所示为一直流电动机调速系统,给定电压  $u_g$  经放大后得到电枢电压  $u_a$ ,改变  $u_g$  可得不同的转速  $n$ 。

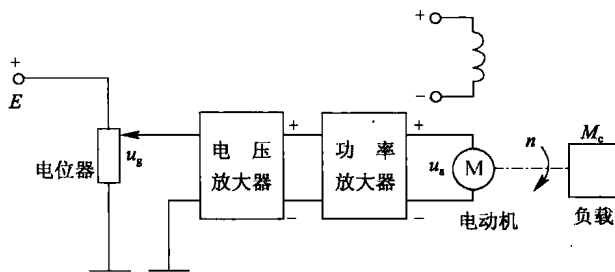


图 1-5 直流电动机转速开环控制系统

在该系统中,输入量是给定电压  $u_g$ ,直流电动机是被控对象,被控量是电动机的转速  $n$ 。系统的给定值(输入量)只对被控量(输出量)起单向控制作用,而输出量对输入量没有任何的影响和联系,即系统的输出端和输入端之间不存在反馈回路,该系统属于开环控制系统。

该系统可用图 1-6 所示的框图表示。电动机负载转矩  $M_c$  的任何变动,均会构成对输出量  $n$  的影响。换言之,对恒速控制系统来说,作用于电动机轴上的阻力矩  $M_c$  将对系统的输出起到破坏作用,这种作用称之为干扰或扰动。

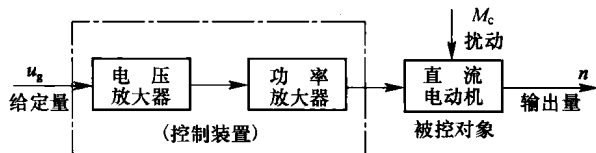


图 1-6 直流电动机转速开环控制系统框图

开环控制系统具有如下特点:

(1) 作用信号由输入到输出单方向传递,不对输出量进行任何检测;或虽然进行检测,但对系统工作不起控制作用。

(2) 外部条件和系统内部参数保持不变时,对于一个确定的输入量,总存在一个与之对应



的输出量。

(3) 控制精度取决于控制装置及被控对象的参数稳定性,因此对元器件的要求比较高。

(4) 由于输出量不能反馈回来影响控制量,所以输出量受扰动信号的影响比较大,系统抗干扰能力差,故控制精度较低。

由于开环控制系统的结构简单、维护容易、成本低、系统稳定性好,所以在输入量和输出量之间的关系固定、系统结构参数稳定、控制精度要求不高、没有干扰作用或所受干扰较小的场合下,应尽量采用开环控制系统。

### 1.3.2 闭环控制系统

闭环控制系统又称反馈控制系统,是在控制系统中,把输出量检测出来,经过物理量的转换,再反馈到输入端与给定值(参考输入)进行比较(相减),并利用比较后的偏差信号,以一定的控制规律产生控制作用,抑制内部或外部扰动对输出量的影响,逐步减小以至消除这一偏差,从而实现要求的控制性能。若在图 1-5 所示的直流电动机调速系统中引入测速发电机,并对电路稍作改变,即可构成如图 1-7 所示的直流电动机转速闭环控制系统。

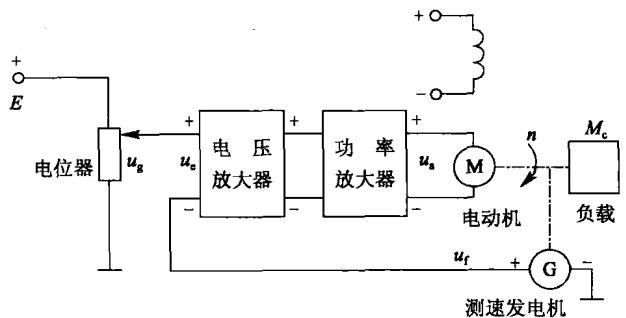


图 1-7 直流电动机转速闭环控制系统

在该系统中,测速发电机由电动机同轴带动,它将电动机的实际转速  $n$  (即系统的输出量)测量出来,并转换成电压  $u_f$ ,再反馈到系统的输入端,与给定电压  $u_g$  (即系统的输入量)进行比较,从而得出电压  $u_c = u_g - u_f$ 。由于该电压能间接地反映出误差的性质(即大小和正负方向),通常称之为偏差信号,简称偏差。偏差  $u_c$  经放大器放大成  $u_a$  后,作为电枢电压控制电动机转速  $n$ 。

该系统可用图 1-8 所示的框图表示。通常,把从系统输入量到输出量之间的通路称为前向通路;从输出量到反馈信号之间的通路称为反馈通路。框图中用符号“○”表示比较环节(输出量等于各个输入量的代数和)。因此,各个输入量均须用正负号表明极性。

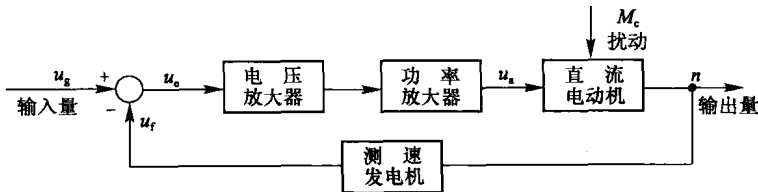


图 1-8 直流电动机转速闭环控制系统框图

闭环控制系统具有很强的纠偏功能,对干扰具有良好的适应性。设如图 1-7 所示系统原已在某个给定电压  $u_g$  相对应的转速  $n$  状态下运行,若一旦受到某些干扰(如负载转矩突然增大)而引起转速下降时,系统就会自动地产生如下的调整过程:

