



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 自动控制原理

(第二版)

梅晓榕 主编

庄显义 主审



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

## 内 容 简 介

本书在哈尔滨工业大学“自动控制原理”课程历届教材的基础上编写,并在荣获普通高等教育“十一五”国家级规划教材之后进行了修订。本书内容包括系统的数学模型、时域分析、根轨迹、频域特性法、典型非线性环节、计算机控制系统、现代控制理论。最后按照全书内容逐章介绍 MATLAB 的应用,包括系统分析、设计和仿真框图等。

本书可以作为高等院校“自动控制原理”课程(50~90 学时)的教材,适用于电气、自动化、电子、信息与通信、计算机、机械、航天工程、光学工程、动力机械以及工商管理等专业,也可供从事控制工程的技术人员参考。

本书配有多媒体课件,可免费提供给用书教师。

### 图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/梅晓榕主编. —2 版. —北京:科学出版社,2007.2

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-03-018457-3

I. 自… II. 梅… 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(2007)第 005830 号

责任编辑:段博原 / 责任校对:郑金红

责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2002 年 9 月 第 一 版 开本:185(720×1000)

2007 年 2 月 第 二 版 印张:22 3/4

2007 年 2 月第六次印刷 字数:450 000

印数:25 001—32 000

定价:25.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<路通>)

## 第二版前言

哈尔滨工业大学控制科学与工程系 20 多年来一直承担着学校各专业的“自动控制原理”课的教学和实验工作,并完成了很多重大科研项目。本书就是在历届所用教材的基础上重新编写而成,包含着各位教师的教学经验和科研工作体会。哈尔滨工业大学“自动控制原理”课近年来一直使用本教材,并于 2005 年评为黑龙江省精品课程。

本书内容包括经典控制理论,计算机控制系统,现代控制理论基础, MATLAB 在控制系统分析、设计和仿真中的应用等。可满足“自动控制原理”课程 50~90 学时的教学要求,适用于电气、自动化、电子、机械、计算机、信息与通信、航天工程、动力机械、光学工程和工商管理等专业。

本书于 2002 年 9 月第一次出版后,在全国很多高校得到采用,累计发行 25 000 余册。这是本书的第二版,并荣获普通高等教育“十一五”国家级规划教材。编者根据几年使用过程中的体会和读者的建议,在第二版中对部分内容进行了改进,同时改正了第一版中的错误。

本书有以下特点:

1) 从工程应用的角度,阐述了自动控制的基本概念、基本原理和基本方法。充分考虑到各专业的需求和特点,注重简明扼要、通俗易懂。

2) 设有“基于 MATLAB 的系统分析、设计和仿真”一章。内容包括 MATLAB 在前述各章中的应用,包括程序和仿真框图。作者力图使控制原理的学习和教学摆脱繁琐的手工计算,同时通过大量的仿真使学生对基本原理和方法有更深刻的认识和更深入的理解。

3) 名词术语全部采用全国自动化名词审定委员会公布的规范名词。

4) 已出版与本书配套的习题集(《自动控制原理名师大课堂》、《自动控制原理考研大串讲》、《自动控制原理学习与考研指导》等),方便学生学习。

5) 为了方便教师使用本教材备课,正式出版电子教案,可免费赠送给使用本书的教师(请见书后“教学支持说明”)。

本书由梅晓榕教授主编,王彤、柏桂珍、王述一、麻亮任副主编,庄显义教授主审。参加编写工作的还有张卯瑞、何朕、宁永臣、强盛等。在此,也要感谢马广富、沈毅、陈兴林、冯汝鹏、刘志远等教授对本书的支持、关心和帮助。

在编写中编者参考了很多优秀教材和著作。编者向收录于参考文献中的各位作者表示真诚的谢意。

书中不当之处,敬请读者批评指正。

编者

2006年10月

## 第一版前言

本书是高等院校“自动控制原理”课程(50~90学时)的教材,内容包括经典控制理论、计算机控制系统、现代控制理论基础、MATLAB在控制系统分析、设计和仿真中的应用等,适用于电气、电子、机械、计算机、信息与通信、航天工程、动力机械、光学工程和工商管理等专业。

本书有以下特点:

1)本书从工程应用的角度,阐述了自动控制的基本概念、基本原理和基本方法。考虑到各专业的需求和特点,本书注重简明扼要、通俗易懂。

2)书中设有“基于MATLAB的系统分析、设计和仿真”一章。内容包括MATLAB在前述各章中的应用,包括程序和仿真框图。编者力图使控制原理的学习和教学摆脱繁琐的手工计算,同时通过大量的仿真使学生对基本原理和方法有更深刻的认识和更深入的理解。

3)名词术语全部采用全国自动化名词审定委员会公布的规范名词。

哈尔滨工业大学自动控制理论及应用教研室20多年来一直承担着学校各专业的“自动控制原理”课的教学和实验工作,并完成了很多重大科研项目。本书就是在教研室历届所用教材的基础上重新编写而成,饱含着教研室各位教师的教学经验和科研工作体会。

本书由梅晓榕教授主编,庄显义教授主审,王彤、柏桂珍、王述一、麻亮等副教授任副主编。参加本书编写工作的还有张卯瑞、强盛、宁永臣、邱化州等。在此还要感谢马广富、陈兴林、冯汝鹏、傅佩琛、刘志远等教授对本书的支持、关心和帮助。

本书在编写过程中参考了很多优秀教材和著作。编者向收录于参考文献中的各位作者表示真诚的谢意。

书中不当之处,敬请读者批评指正。

编者

2002年7月

# 目 录

第二版前言

第一版前言

第一章 自动控制概述	1
1.1 引言	1
1.2 自动控制系统的初步概念	1
1.3 自动控制系统的分类	3
1.3.1 开环控制和闭环控制	3
1.3.2 伺服系统、定值控制系统和程序控制系统	4
1.3.3 控制系统的其他类型	4
1.4 控制系统的组成及对控制系统的基本要求	4
1.4.1 控制系统的基本组成	4
1.4.2 对控制系统的基本要求	5
习题	6
第二章 系统的数学模型	9
2.1 控制系统微分方程的建立	9
2.2 传递函数	15
2.2.1 传递函数的定义	15
2.2.2 关于传递函数的几点说明	17
2.2.3 基本环节及其传递函数	19
2.2.4 电气网络的运算阻抗与传递函数	21
2.3 控制系统的框图和传递函数	23
2.3.1 框图的概念和绘制	23
2.3.2 框图的变换规则	25
2.3.3 闭环系统的传递函数	30
2.3.4 框图的化简	33
2.3.5 梅森增益公式	35
2.3.6 机电装置的传递函数	36
2.4 非线性方程的线性化	40
习题	45

<b>第三章 控制系统的时域分析法</b> .....	51
3.1 引言 .....	51
3.1.1 典型输入信号 .....	51
3.1.2 单位冲激响应 .....	53
3.1.3 系统的时间响应 .....	53
3.1.4 时间响应的性能指标 .....	54
3.2 一阶系统的时域分析 .....	55
3.2.1 一阶系统的单位阶跃响应 .....	55
3.2.2 一阶系统的单位斜坡响应 .....	56
3.2.3 单位冲激响应 .....	57
3.3 二阶系统的时域分析 .....	58
3.3.1 二阶系统的典型形式 .....	58
3.3.2 二阶系统的单位阶跃响应 .....	59
3.3.3 二阶欠阻尼系统的动态性能指标 .....	62
3.3.4 二阶系统计算举例 .....	65
3.3.5 二阶系统的单位冲激响应 .....	68
3.3.6 二阶系统的单位斜坡响应 .....	69
3.3.7 初始条件不为零时二阶系统的时间响应 .....	70
3.4 高阶系统的时间响应概述 .....	71
3.5 控制系统的稳定性 .....	72
3.5.1 稳定的概念 .....	72
3.5.2 线性定常系统稳定的充分必要条件 .....	73
3.5.3 劳思稳定判据 .....	75
3.6 控制系统的稳态误差 .....	78
3.6.1 稳态误差的基本概念 .....	78
3.6.2 利用终值定理求稳态误差 .....	80
3.6.3 系统的型别与参考输入的稳态误差 .....	81
3.6.4 扰动信号的稳态误差 .....	85
3.6.5 动态误差系数法 .....	85
3.7 复合控制 .....	87
3.7.1 按输入补偿的复合控制 .....	87
3.7.2 按扰动补偿的复合控制 .....	90
习题 .....	90
<b>第四章 根轨迹法</b> .....	96
4.1 根轨迹的初步概念 .....	96

4.2	绘制根轨迹的基本规则	97
4.2.1	根轨迹的分支数	98
4.2.2	根轨迹的连续性与对称性	98
4.2.3	根轨迹的起点和终点	99
4.2.4	根轨迹的渐近线	99
4.2.5	实轴上的根轨迹	100
4.2.6	根轨迹在实轴上的分离点与会合点	101
4.2.7	根轨迹与虚轴的交点	103
4.2.8	根轨迹的出射角与入射角	104
4.2.9	闭环极点的和与积	106
4.2.10	放大系数的求取	106
4.3	按根轨迹分析控制系统	109
	习题	111
<b>第五章</b>	<b>频率特性法</b>	<b>112</b>
5.1	频率特性的初步概念	112
5.2	频率特性的图形	114
5.2.1	极坐标图	114
5.2.2	对数频率特性图	120
5.2.3	最小相位系统	130
5.2.4	Nichols 图	131
5.3	Nyquist 稳定判据	131
5.3.1	完整的频率特性极坐标图	131
5.3.2	Nyquist 稳定判据	134
5.3.3	用开环伯德图判定闭环稳定性	138
5.4	控制系统的相对稳定性	139
5.4.1	相位裕度	139
5.4.2	幅值裕度	141
5.5	闭环频率特性图	141
5.5.1	闭环频率特性图	141
5.5.2	等 $M$ 圆	143
5.5.3	非单位反馈系统的闭环频率特性	144
5.6	频率特性与控制系统性能的关系	144
5.6.1	控制系统的性能指标	144
5.6.2	二阶系统性能指标间的关系	145
5.6.3	高阶系统性能指标间的关系	146



5.6.4	开环对数幅频特性与性能指标间的关系	146
5.7	控制系统设计的初步概念	148
5.8	PID 控制器简述	149
5.8.1	比例(P)控制器	149
5.8.2	比例微分(PD)控制器	150
5.8.3	积分(I)控制器	152
5.8.4	比例积分(PI)控制器	152
5.8.5	比例积分微分(PID)控制器	154
5.9	超前补偿	155
5.9.1	超前补偿网络的特性	155
5.9.2	超前补偿网络设计	156
5.10	滞后补偿	158
5.10.1	滞后补偿网络的特性	158
5.10.2	滞后补偿网络设计	159
5.11	滞后超前补偿	163
5.11.1	滞后超前网络的特性	163
5.11.2	补偿原理与设计步骤	164
5.12	串联补偿网络的期望幅频特性设计方法	165
5.13	反馈补偿	167
5.13.1	反馈的功能	167
5.13.2	反馈补偿网络的设计	170
5.14	电子放大器的数学模型与补偿方法	172
5.14.1	电子放大器的数学模型	172
5.14.2	放大器的内部补偿	175
5.14.3	放大器的外部补偿	176
	习题	176
<b>第六章</b>	<b>典型非线性环节及其对系统的影响</b>	<b>188</b>
6.1	概述	188
6.1.1	典型非线性环节	188
6.1.2	非线性系统的特点	190
6.2	描述函数法	190
6.2.1	描述函数的基本概念	191
6.2.2	用描述函数分析非线性系统的稳定性	197
	习题	200

<b>第七章 计算机控制系统</b> .....	203
7.1 计算机控制系统概述 .....	203
7.2 A/D转换与采样定理 .....	204
7.2.1 A/D转换 .....	204
7.2.2 采样定理 .....	206
7.2.3 采样周期的选取 .....	209
7.3 D/A转换 .....	210
7.4 $z$ 变换 .....	211
7.4.1 $z$ 变换 .....	212
7.4.2 $z$ 变换的基本定理 .....	215
7.4.3 $z$ 反变换 .....	216
7.5 $z$ 传递函数 .....	219
7.5.1 $z$ 传递函数的概念 .....	219
7.5.2 串联环节的脉冲传递函数 .....	220
7.5.3 线性离散系统的脉冲传递函数 .....	222
7.6 线性离散系统的稳定性 .....	227
7.6.1 $s$ 平面到 $z$ 平面的映射关系 .....	227
7.6.2 线性离散系统稳定的充要条件 .....	229
7.6.3 劳思稳定判据 .....	229
7.7 线性离散系统的时域分析 .....	232
7.7.1 极点在 $z$ 平面上的分布与瞬态响应 .....	232
7.7.2 线性离散系统的时间响应 .....	235
7.7.3 线性离散系统的稳态误差 .....	237
7.8 数字控制器的模拟化设计 .....	242
7.8.1 模拟补偿装置的离散化方法 .....	242
7.8.2 模拟化设计举例 .....	245
7.8.3 数字PID算式 .....	248
7.8.4 PD—PID双模控制 .....	249
习题 .....	250
<b>第八章 现代控制理论基础</b> .....	254
8.1 状态空间法的基本概念 .....	254
8.2 线性定常系统状态空间表达式的建立 .....	257
8.2.1 根据系统的工作原理建立状态空间表达式 .....	257
8.2.2 根据微分方程和传递函数建立状态空间表达式 .....	260
8.2.3 根据传递函数的实数极点建立状态空间表达式 .....	265

8.2.4	状态变量的非唯一性和特征值不变性 .....	270
8.2.5	状态变量图 .....	271
8.3	由状态空间表达式求传递函数 .....	272
8.4	线性定常系统状态方程的解 .....	273
8.4.1	齐次状态方程的解 .....	273
8.4.2	矩阵指数和状态转移矩阵的性质 .....	275
8.4.3	非齐次状态方程的解 .....	275
8.5	线性定常离散系统的状态空间表达式 .....	277
8.5.1	由差分方程或 $z$ 传递函数建立状态方程 .....	277
8.5.2	定常系统状态方程的离散化 .....	278
8.5.3	线性定常离散系统状态方程的解 .....	279
8.6	李雅普诺夫稳定性分析 .....	279
8.6.1	李雅普诺夫稳定性的定义 .....	279
8.6.2	李雅普诺夫第一法(间接法) .....	281
8.6.3	李雅普诺夫第二法(直接法) .....	282
8.6.4	线性系统的李雅普诺夫大稳定性分析 .....	286
8.7	线性系统的可控性与可观性 .....	289
8.7.1	线性系统的可控性与可控性判据 .....	289
8.7.2	线性系统的可观性与可观性判据 .....	295
8.7.3	可控规范型和可观测规范型 .....	298
8.7.4	对偶原理 .....	300
8.7.5	非奇异线性变换的不变特性和可控性与可观性判据的其他形式 .....	300
8.8	线性系统的状态反馈与极点配置 .....	304
8.8.1	状态反馈 .....	304
8.8.2	单变量控制系统的极点配置 .....	305
8.9	状态观测器 .....	308
8.9.1	全维状态观测器 .....	309
8.9.2	降维状态观测器 .....	315
8.10	二次型性能指标的最优控制 .....	321
	习题 .....	323
<b>第九章</b>	<b>基于 MATLAB 的系统分析、设计与仿真 .....</b>	<b>329</b>
9.1	引言 .....	329
9.1.1	进入 MATLAB 操作环境和执行 MATLAB 的命令与程序 .....	329
9.1.2	Simulink 软件包 .....	329
9.2	系统的初步概念与数学模型 .....	330

9.2.1	开环控制与闭环控制	330
9.2.2	系统的稳定性	331
9.2.3	MATLAB 函数简介	331
9.2.4	系统的数学模型	332
9.3	系统的时域分析法	332
9.3.1	系统的时域响应	332
9.3.2	线性系统的稳定性	332
9.3.3	稳态误差	334
9.4	根轨迹	334
9.4.1	根轨迹的绘制	334
9.4.2	基于根轨迹的系统设计	335
9.5	频率特性	335
9.5.1	绘制 Nyquist 图	335
9.5.2	绘制 Bode 图	336
9.5.3	求稳定裕度	336
9.6	典型非线性环节	336
9.6.1	饱和非线性	336
9.6.2	间隙非线性	336
9.7	计算机控制系统	337
9.8	状态空间法	338
9.8.1	数学模型及相互转换	338
9.8.2	矩阵指数及状态方程的解	339
9.8.3	系统的稳定性	339
9.8.4	系统的可控性与可观测性	339
9.8.5	极点配置	340
9.8.6	状态观测器	340
9.8.7	带观测器的极点配置及最优控制	340
附录一	拉普拉斯变换的基本特性	342
附录二	拉氏变换-z 变换表	343
附录三	常用补偿网络	344
附录四	本书所用的 MATLAB 命令	348
参考文献		349

# 第一章 自动控制概述

## 1.1 引言

过去的一百年是科学和工程技术发展最迅速的一个世纪。人类的许多希望和梦想,被科学和技术变成现实;其中,自动控制技术所取得的成就和起到的作用给各行各业的人们留下了深刻的印象。从最初的机械转速、位移的控制到工业过程中温度、压力、流量、物位的控制,从远洋巨轮到深水潜艇的控制,从电动假肢到机器人的控制,自动控制技术的应用几乎无处不在。从电气、机械、航空、化工、核反应到经济管理、生物工程,自动控制理论和技术已经介入到许多学科,渗透到各个工程领域。所以,大多数工程技术人员和科学工作者都希望具备一定的自动控制知识,以能够设计自动控制系统。

自动控制原理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。控制原理包括经典控制理论和现代控制理论。经典控制理论主要以传递函数为工具和基础,以频域法和根轨迹法为核心,研究单变量控制系统的分析和设计。经典控制理论在 20 世纪 50 年代就已经发展成熟,至今在工程实践中仍得到广泛的应用。现代控制理论从 1960 年开始得到迅速发展。它以状态空间方法作为标志和基础,研究多变量控制系统和复杂系统的分析和设计,以便满足军事、空间技术和复杂的工业领域对精度、速度、重量、加速度、成本等的严格要求。

## 1.2 自动控制系统的初步概念

所谓自动控制就是在没有人直接操作的情况下,通过控制器使一个装置或过程(统称为控制对象)自动的按照给定的规律运行,使被控变量能按照给定的规律变化。系统是指按照某些规律结合在一起的物体(元部件)的组合,它们互相作用、互相依存,并能完成一定的任务。能够实现自动控制的系统就可称为自动控制系统。

图 1-2-1 表示采用空调器的室内温度控制系统的元件框图。图中方框代表元部件,方框之间的带箭头的线段代表信号(或变量)及传递方向。室内温度是要被控制的物理量,它由空调器直接控制。电位器输出电压  $r$  代表设定的室内温度。实际温度  $c$  由热敏电阻组成的温度传感器检测并转换成电压  $y$ 。电子放大器的输出电压  $e$  代表设定温度与实际温度之差。当这个差值大于某个规定值时,空调器

就通电运行,使室内温度朝设定值变化。当室内温度达到规定值后,放大器输出电压  $e$  使空调器断电而停止运行。于是室内温度就被控制在设定值附近。

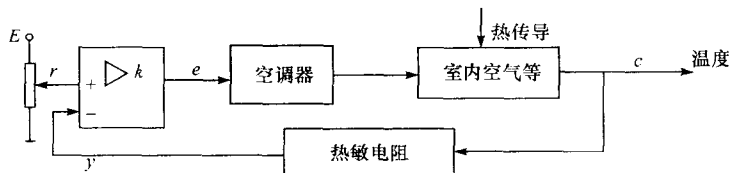


图 1-2-1 室温控制系统元件框图

在自动化领域,被控制的装置、物理系统或过程称为控制对象。这个“过程”包括化学反应过程、核反应过程、热传导过程等。控制对象还可以属于生物领域或其他领域。对控制对象产生控制作用的装置称为控制器。直接改变被控变量的元件称为执行元件。能将一种物理量检测出来并转换成另一种容易处理和使用的物理量的装置称为传感器或测量元件。图 1-2-1 中,室内的空气等物体就是控制对象,空调器是执行元件,放大器属于控制器,热敏电阻属于传感器或测量元件。于是图 1-2-1 的元件方框图就可抽象成图 1-2-2 的功能框图。

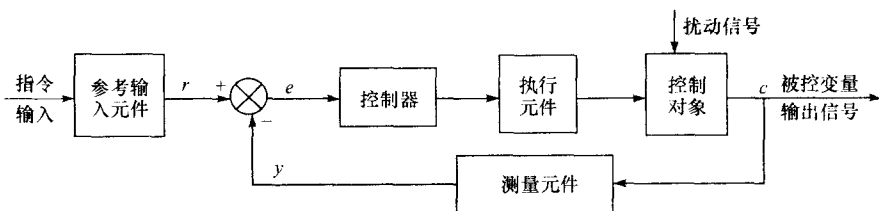


图 1-2-2 室温控制系统功能框图

下面介绍几个关于变量的术语。

由外部加到系统中的变量称为输入信号,它不受系统中其他变量的影响和控制。由系统或元件产生的变量称为输出信号,最关注的输出信号又称为被控变量。由某一个输入信号产生的输出信号又称为该输入信号的响应。控制器输出的信号称为控制变量,它作用在控制对象(执行元件,功率放大器)上,影响和改变被控变量。反馈信号是被控变量经由传感器等元件变换并返回到输入端的信号,它要与输入信号进行比较(相减)以便产生偏差信号。反馈信号一般与被控变量成正比。给定值又称为指令输入信号,它与被控变量是同一物理单位,用来表示被控变量的设定值。代表指令输入信号与反馈信号进行比较的基准信号称为参考输入信号。参考输入信号与反馈信号之差称为偏差信号。扰动(信号)是加于系统上的不希望的外来信号,它对被控变量产生不利影响。将指令输入信号变成参考输入信号的元件可称为参考输入元件。

在图 1-2-1 和图 1-2-2 所示系统中,室内温度的设定值就是给定值,或称为指令输入。室内的实际温度  $c$  就是被控变量,也是系统的输出信号。电位器的输出电压  $r$  是参考输入信号,热敏电阻即温度传感器的输出信号  $y$  是反馈信号, $e = r - y$  称为偏差信号。放大器(控制器)的输出信号  $e$  也就是加到空调机上的信号,它就是控制变量。电位器就是参考输入元件,它将设定的温度值转换成电压。周围环境温度的变化及房间散热条件的变化等都属于扰动信号。

## 1.3 自动控制系统的分类

### 1.3.1 开环控制和闭环控制

按照控制方式和策略,系统可分为开环控制和闭环控制两大类。

图 1-2-1 和 1-2-2 所示系统,输出信号不仅受到输入信号的控制,而且还受到与输出信号成比例的反馈信号的控制。从框图看,代表信号传递路线和方向的信号流线按箭头方向形成闭合的环路,所以这种控制方式称为闭环控制,对应的系统就是闭环控制系统。闭环系统中的被控量实际是受偏差量控制。闭环控制方式中总是要用到反馈信号,所以又称为反馈控制。

如果图 1-2-2 的系统中没有测量元件,不使用反馈信号,系统框图如图 1-3-1 所示。系统输出信号只取决于输入信号,与输出信号无关。框图中的信号流线没有形成闭合回路,所以这种控制方式被称为开环控制,对应的系统就是开环控制系统。采用集中供热方式的室内供热系统是典型的开环控制系统。供热锅炉按预定的时间向暖气管道中送去规定温度的热水以实现供热,而不监测各房间的温度。

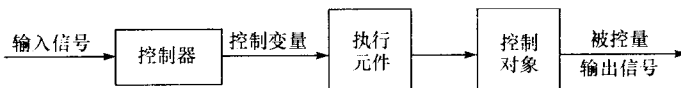


图 1-3-1 开环控制系统

开环控制的主要优点是系统结构简单,调试容易。但是当工作环境和系统本身的元部件性能参数发生变化时,开环系统的被控变量会受到较大影响,即抗干扰能力差。一般说,高精度的开环控制系统要求所有的元部件都有较高的精度和很稳定的性能。所以开环控制对环境和元件的要求比较严格。

闭环控制系统本身能检测出被控量的设定值与实际值之差,实际上是用偏差量去减小和消除偏差,所以抗干扰能力强。闭环系统可以明显减弱某些元件参数和控制对象本身的参数变化对被控量的不利影响,所以对这些元部件的要求不是很严格。闭环系统结构复杂,设计和调试技术也复杂。闭环系统还会产生一种失控现象——不稳定。本书主要研究闭环控制系统。

### 1.3.2 伺服系统、定值控制系统和程序控制系统

按输入信号分类,控制系统可分为定值控制系统、伺服系统、程序控制系统。

定值控制系统的输入信号是恒值,要求被控变量保持相对应的数值不变。室温控制系统,直流电机转速控制系统,发电厂的电压频率控制系统,高精度稳压电源装置中的电压控制系统就是典型的定值控制系统。

伺服系统的输入信号是变化规律未知的任意时间函数,系统的任务是使被控变量按同样规律变化并与输入信号的误差保持在规定范围内。导弹发射架控制系统,雷达天线控制系统都是典型的伺服系统。伺服系统又称为随动系统。

程序控制系统中的输入信号按已知的规律(事先规定的程序)变化,要求被控变量也按相应的规律随输入信号变化,误差不超过规定值。热处理炉的温控系统、机床的数控加工系统和仿形控制系统就是典型的程序控制系统。

### 1.3.3 控制系统的其他类型

控制系统还有很多种分类方法。例如,按照系统是否满足叠加原理可分为线性系统和非线性系统。对于线性系统,初始条件为零时,几个输入信号同时作用在系统上所产生的输出信号,等于各输入信号单独作用时所产生的输出的和。按照系统控制器是否采用计算机,可分为计算机(数字)控制系统和模拟系统。按照控制对象的范畴可分为运动控制系统、过程控制系统等。按照系统参数是否随时间变化可分为时变系统和定常系统。本书主要研究线性定常系统。

## 1.4 控制系统的组成及对控制系统的基本要求

### 1.4.1 控制系统的基本组成

控制系统中控制对象以外的元部件统称为控制元件。由于控制对象的不同,控制系统也是各种各样的。但是根据控制元件在系统中的功能和作用,可将控制元件分成4大类。

#### 1. 执行元件

执行元件的功能是直接带动控制对象,直接改变被控变量。例如机电控制系统中的各种电动机,液动控制系统中的液压马达,温度控制系统中的加热器等都属于执行元件。执行元件有时也被归入控制对象中。

#### 2. 放大元件

放大元件的功能是将微弱信号放大,使信号具有足够大的幅值或功率。放大元件又分为前置放大器和功率放大器两类。前置放大器能放大一个信号的数值,但功率并不大,它靠近系统的输入(前)端。如由运算放大器构成的前置放大器只



能放大电压信号,而能输出的电流却很小。功率放大器输出的功率大,它输出的信号可直接带动执行元件运转和动作。例如由功率晶体管组成的功率放大器同时输出足够大的电压和电流,能直接带动直流电动机转动。

### 3. 测量元件

测量元件的功能是将一种物理量检测出来,并且按着某种规律转换成容易处理和使用的另一种物理量输出。测量元件一般称为传感器。过程控制中的变送器、敏感元件都属于测量元件。图 1-2-1 中的热敏电阻的功能就是将温度转变成电压信号。

热敏电阻、热电偶、温度变送器、流量变送器、测速发电机、电位器、光电码盘、旋转变压器、感应同步器等元件包括它们的信号处理电路都属于测量元件。

测量元件的精度直接影响到系统的精度,所以高精度的系统必须采用高精度的测量元件(包括可靠的线路)。

### 4. 补偿元件

由上述三大类元件与控制对象组成的系统往往不能满足技术要求。为了保证系统能正常工作(稳定)并提高系统的性能,控制系统中还要另外补充一些元件,这些元件统称为补偿元件,又称为校正元件。如何选择补偿方法,补偿元件应当具有什么样的性能,这是本书将要讨论的主要问题。最常见的补偿方法有串联补偿、反馈补偿,如图 1-4-1 所示。

常用的补偿元件有模拟电子线路、计算机、部分测量元件(如测速发电机)等。

从系统工作原理和框图看,控制系统中还有比较元件,它把两个信号相减,比较它们的大小,产生偏差信号。但比较元件一般不是一个单独的实际元件,电子放大器就具有比较元件的功能,有些测量元件也包含比较元件的功能。

由控制元件和控制对象组成的控制系统的典型功能框图。如图 1-4-1 所示。

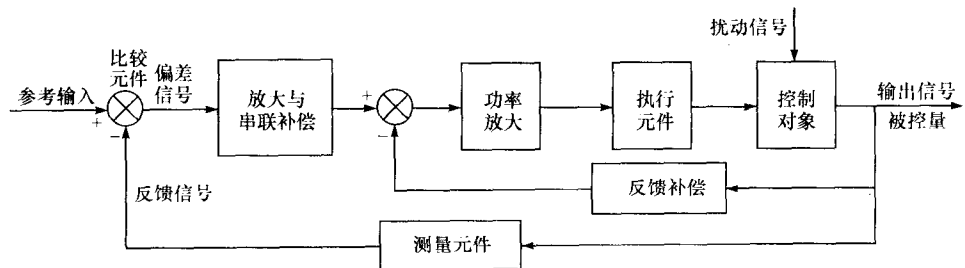


图 1-4-1 控制系统的典型功能框图

## 1.4.2 对控制系统的基本要求

对闭环控制系统的基本要求可归纳为 3 个方面:稳定性、准确性(稳态精度)、