

21 世纪全国高职高专电子信息系列实用规划教材

自动控制原理与应用

主 编 梁南丁 赵永君
副主编 董红生 刘林山
参 编 白树森 王广云 张佰慧



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书系统地介绍了自动控制原理的基本理论及其应用，并引入了目前自动控制领域中广泛使用的 MATLAB 软件作为计算机辅助分析和设计的手段。全书共分 8 章，包括；自动控制系统的基本概念，自动控制系统的数学模型，自动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，MATLAB 软件在自动控制系统性能分析中的应用，自动控制系统的校正和自动控制原理的应用。每章后面都有小结和思考题与习题，便于教师教学和学生自学。

本书可作为高职高专院校电气化专业、工业自动化类、机电一体化专业及相关专业的教材，也可作为成人教育和继续教育的教材，还可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理与应用/梁南丁, 赵永君主编. —北京: 北京大学出版社, 2007.8

(21 世纪全国高职高专电子信息系列实用规划教材)

ISBN 978-7-301-12181-8

. 自... . 梁... 赵... . 自动控制理论—高等学校: 技术学校—教材 . TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 074918 号

书 名: 自动控制原理与应用

著作责任者: 梁南丁 赵永君 主编

策划编辑: 徐 凡

责任编辑: 李娉婷

标准书号: ISBN 978-7-301-12181-8/TP · 0870

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 邮 箱: pup_6@163.com

印 刷 者:

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 15.25 印张 363 千字

2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 23.00 元

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究

举报电话：010-62752024

电子邮箱：fd@pup.pku.edu.cn

前 言

本教材根据高等职业技术教育的特点,面向 21 世纪科技发展的需要以及电气化、自动化学科教学改革的要求而组织编写。

本教材重点介绍了自动控制原理的经典控制理论部分,内容包括:自动控制系统的基本概念,自动控制系统的数学模型,自动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, MATLAB 软件在自动控制系统性能分析中的应用,自动控制系统的校正和自动控制原理的应用等。

本教材在编写思路坚持理论“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。力求做到深入浅出,循序渐进,通俗易懂,注重物理概念叙述的同时引入实例,做到理论联系实际。培养学生学习的逻辑思维能力、综合运用能力和解决问题的能力。在教材结构上,每章都设置有“本章小结”和“思考题与习题”,便于学生巩固所学知识及自学。在分析手段上引入了目前自动控制领域中广泛使用的 MATLAB 软件,强化了经典控制理论中的计算机辅助分析和设计的应用。

本教材由梁南丁、赵永君担任主编。参加本教材编写工作的有:河南平顶山工业职业技术学院的张佰慧(第 1、6 章)、梁南丁(第 8 章 8.1、8.2)、王广云(第 7 章 7.1、7.2、7.3,第 8 章 8.3、8.4、8.5、8.6)、吉林电子信息职业技术学院刘林山(第 2 章),济南铁道职业学院赵永君(第 3、4 章),兰州工业高等专科学校董红生(第 5 章),张家口职业技术学院白树森(第 7 章 7.4、7.5、7.6)。全书由梁南丁统稿。

在本教材的编写过程中,查阅和参考了大量的文献资料,在此谨向参考文献的作者致以诚挚的谢意。

限于编者水平,书中不足之处在所难免,恳请广大读者提出宝贵意见,以便修改。

编 者
2007 年 7 月

目 录

第 1 章 绪论.....	1	2.2.3 传递函数的性质.....	23
1.1 自动控制理论概述.....	1	2.2.4 传递函数的求法.....	25
1.2 自动控制系统的基本概念.....	2	2.3 典型环节的数学模型及其阶跃响应... 26	
1.2.1 自动控制系统的基本原理.....	2	2.3.1 比例环节.....	26
1.2.2 自动控制系统的控制方式.....	3	2.3.2 惯性环节.....	27
1.2.3 自动控制系统的组成.....	4	2.3.3 积分环节.....	28
1.2.4 自动控制系统.....	5	2.3.4 微分环节.....	29
1.3 自动控制系统的分类.....	7	2.3.5 振荡环节.....	30
1.3.1 按输入信号变化的规律分类.....	8	2.3.6 延迟环节.....	31
1.3.2 按系统传输信号对时间的 关系分类.....	8	2.4 控制系统的动态结构图.....	32
1.3.3 按系统的输出量和输入量间 的关系分类.....	9	2.4.1 动态结构图.....	32
1.3.4 按系统中的参数对时间的 变化情况分类.....	9	2.4.2 动态结构图的绘制.....	33
1.4 对自动控制系统的基本要求.....	9	2.4.3 动态结构图的等效变换 和化简.....	34
1.4.1 系统的稳定性.....	9	2.4.4 信号流图与梅逊公式.....	40
1.4.2 系统的稳态性能指标.....	10	2.5 自动控制系统的传递函数.....	43
1.4.3 系统的动态性能指标.....	10	2.5.1 闭环控制系统的开环 传递函数.....	43
1.5 自动控制系统实例分析.....	12	2.5.2 给定输入信号 $R(s)$ 作用下 的闭环传递函数.....	44
1.6 本章小结.....	15	2.5.3 扰动信号 $N(s)$ 作用下的闭环 传递函数.....	44
1.7 思考题与习题.....	15	2.5.4 闭环系统的误差传递函数.....	44
第 2 章 自动控制系统的数学模型.....	17	2.6 本章小结.....	45
2.1 控制系统的微分方程.....	17	2.7 思考题与习题.....	46
2.1.1 机械系统.....	18	第 3 章 时域分析法.....	49
2.1.2 电路系统.....	18	3.1 典型输入信号及性能指标.....	49
2.1.3 机电系统.....	19	3.1.1 典型输入信号.....	49
2.1.4 线性定常微分方程的求解.....	21	3.1.2 典型初状态.....	50
2.2 传递函数.....	21	3.1.3 典型时间响应.....	51
2.2.1 传递函数的基本概念.....	22	3.2 一阶系统分析.....	51
2.2.2 传递函数的定义.....	23		

3.2.1 一阶系统的数学模型.....	52	4.3 控制系统的根轨迹分析法.....	79
3.2.2 一阶系统的单位阶跃响应.....	52	4.3.1 闭环零、极点与阶跃响应的 定性关系.....	79
3.2.3 一阶系统的单位阶跃响应的 性能指标.....	52	4.3.2 利用主导极点估算系统 性能指标.....	80
3.3 二阶系统分析.....	53	4.3.3 根轨迹的改造对系统的影响... ..	81
3.3.1 二阶系统的数学模型.....	53	4.3.4 根轨迹法系统动态特性中 的应用.....	82
3.3.2 二阶系统的特征根及性质.....	54	4.4 本章小结.....	87
3.3.3 二阶系统的单位阶跃响应.....	55	4.5 思考题与习题.....	87
3.4 系统稳定性分析.....	59	第 5 章 自控系统的频域分析法.....	89
3.4.1 稳定的基本概念.....	59	5.1 系统频率特性的基本概念.....	89
3.4.2 稳定的数学条件.....	59	5.1.1 基本概念.....	89
3.4.3 代数稳定判据.....	60	5.1.2 频率特性的性质.....	92
3.5 系统稳态误差分析.....	62	5.1.3 频率特性的图形表示方法.....	93
3.5.1 误差与稳态误差.....	62	5.2 典型环节的频率特性.....	95
3.5.2 稳态误差计算.....	62	5.3 系统开环对数频率特性曲线 的绘制.....	105
3.5.3 系统型别.....	64	5.3.1 系统开环对数频率特性及 绘制步骤.....	105
3.5.4 $r(t)$ 作用下的稳态误差与 静态误差系数.....	64	5.3.2 系统开环对数频率特性绘 制举例.....	106
3.5.5 干扰 $n(t)$ 作用下的稳态误差... ..	67	5.4 系统稳定性的频域分析.....	110
3.6 本章小结.....	68	5.4.1 奈奎斯特稳定判据.....	111
3.7 思考题与习题.....	68	5.4.2 对数频率稳定判据.....	112
第 4 章 根轨迹法.....	71	5.4.3 稳定裕度.....	114
4.1 根轨迹与根轨迹方程.....	71	5.4.4 动态性能的频域分析.....	116
4.1.1 根轨迹.....	71	5.4.5 典型系统频域分析.....	123
4.1.2 根轨迹方程.....	72	5.5 本章小结.....	128
4.2 绘制根轨迹的基本法则.....	73	5.6 思考题与习题.....	129
4.2.1 根轨迹的个数.....	73	第 6 章 MATLAB 软件在自动控制系统 性能分析中的应用.....	133
4.2.2 根轨迹的对称性.....	73	6.1 MATLAB 的主要功能.....	133
4.2.3 根轨迹的起点和终点.....	74	6.2 MATLAB 的安装与启动.....	134
4.2.4 实轴上的根轨迹.....	74	6.2.1 MATLAB 的安装.....	134
4.2.5 根轨迹的渐近线.....	74		
4.2.6 起始角与终止角.....	75		
4.2.7 分离点 d	76		
4.2.8 分离角与会合角.....	77		
4.2.9 虚轴交点 ω	77		
4.2.10 根之和.....	78		

6.2.2	MATLAB 的启动.....	134	7.2	串联校正	161
6.2.3	MATLAB 的退出.....	134	7.2.1	比例(P)校正.....	161
6.3	MATLAB 的命令窗口.....	134	7.2.2	比例-微分(PD)校正.....	163
6.3.1	MATLAB 菜单栏.....	134	7.2.3	比例-积分(PI)校正.....	165
6.3.2	MATLAB 的命令窗口.....	135	7.2.4	比例-积分-微分(PID)校正.....	167
6.4	MATLAB 中的命令函数和 M 文件.....	136	7.3	反馈校正	169
6.4.1	M 文件概述.....	136	7.3.1	反馈校正的原理.....	169
6.4.2	M 文件的建立与打开.....	139	7.3.2	反馈校正的分类与应用.....	169
6.5	MATLAB 中的数值表示、变量 命名、运算符和表达式.....	140	7.4	复合校正	172
6.5.1	数值的表示.....	140	7.4.1	按输入补偿的复合校正.....	172
6.5.2	变量命名规定.....	140	7.4.2	按扰动补偿的复合校正.....	173
6.5.3	基本运算符.....	140	7.5	自动控制系统的 一般设计方法.....	173
6.5.4	表达式.....	140	7.5.1	自动控制系统设计的 基本步骤.....	173
6.5.5	应用 MATLAB 进行数值 运算.....	141	7.5.2	系统固有部分开环频率特性 的确定.....	174
6.5.6	应用 MATLAB 绘制二维 图线.....	141	7.5.3	系统预期开环对数频率特性 的确定.....	176
6.6	MATLAB 在自动控制系统性能 分析中的应用.....	143	7.5.4	系统校正举例.....	178
6.6.1	MATLAB 在传递函数的 变换中的应用.....	143	7.6	MATLAB 在系统校正中的应用.....	179
6.6.2	MATLAB 在时域分析中 的应用.....	145	7.7	本章小结.....	182
6.6.3	MATLAB 在频域分析中 的应用.....	147	7.8	思考题与习题.....	182
6.7	SIMULINK 仿真软件及其应用.....	151	第 8 章	自动控制原理的应用.....	184
6.8	本章小结.....	157	8.1	直流调速系统.....	184
6.9	思考题与习题.....	157	8.1.1	单闭环转速负反馈晶闸管直流 调速系统.....	184
第 7 章	自动控制系统的校正.....	158	8.1.2	转速电流双闭环直流 调速系统.....	191
7.1	系统校正概述.....	158	8.1.3	双极晶体管脉宽调制控制的 直流调速系统.....	201
7.1.1	系统校正的基本概念.....	158	8.1.4	晶闸管可逆直流调速系统.....	206
7.1.2	系统校正的方式.....	158	8.2	位置随动系统.....	216
7.1.3	常用校正装置.....	159	8.2.1	位置随动系统的组成.....	216
7.1.4	系统指标的确定.....	161	8.2.2	位置随动系统各组成部件的 工作原理.....	217
			8.2.3	位置随动系统的控制特点与	

实例分析	224	8.4 通用变频器.....	236
8.3 交流调速系统	226	8.4.1 通用变频器的功能.....	236
8.3.1 绝缘栅双极晶体管(IGBT)- 正弦脉宽调制(SPWM)型交流 变频电路	227	8.4.2 通用变频器的结构.....	236
8.3.2 交流调速的基本方案与变压 变频的基本控制方式.....	232	8.4.3 通用变频器的使用.....	237
8.3.3 矢量控制的基本思路.....	235	8.5 本章小结	239
		8.6 思考题与习题.....	240
		参考文献	241

第 1 章 绪 论

教学提示：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(控制装置或控制器)，使生产机械或生产过程(被控对象)自动地按照预定的规律运行，使被控对象的一个或几个物理量(如转速、压力、流量、温度)按照预定的要求变化。自动控制理论与实践的不断发展，促进了自动控制技术的进步。目前自动控制已渗透到人类生活的各个领域，成为工程技术人员和科技工作者必须掌握的基础理论。本章主要介绍自动控制理论的发展、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 自动控制理论概述

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，而且都是为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。

自动控制理论是一门多学科性的技术科学，它的任务是：对各类系统中的信息传递与转换关系进行定量分析，然后根据这些定量关系预见控制系统的运动规律。自动控制理论的发展可追溯到 1788 年，瓦特在发明蒸汽机的同时，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，频域法为主要研究方法，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，为了满足当时宇航、国防等尖端科学技术和复杂系统发展的需要，自动控制理论跨入了一个新阶段——现代控制理论。它主要研究具有高性能、高精度、多输入-多输出、线性或非线性、定常或时变系统的分析与设计问题，如最优控制、最佳滤波、自适应控制、系统辨识和随机控制等。

智能控制理论和大系统理论是在 20 世纪随着计算机技术和人工智能理论取得重大进展而发展起来的新型控制理论。它主要研究具有人工智能的工程控制和信息处理问题，试图模仿具有高度自组织、自适应和自调节能力的人类生命的机理，以使具有高度复杂性、高度不确定性的系统达到更高的要求。

综上所述，自动控制理论的发展过程如图 1.1 所示。

自动控制理论不断发展，反映了人类社会由机械化步入电气化、自动化，进而走向信息化、智能化的时代特征。面对深奥的自动控制理论和众多的自动控制系统，本书只能起到入门的作用。通过本书的学习，可以对自动控制系统的工作原理、数学模型、系统的校正和调试等方面有一个相对完整的认识，掌握自动控制系统的一般分析方法，为从事自

动控制技术工作建立初步的但非常重要的理论基础。

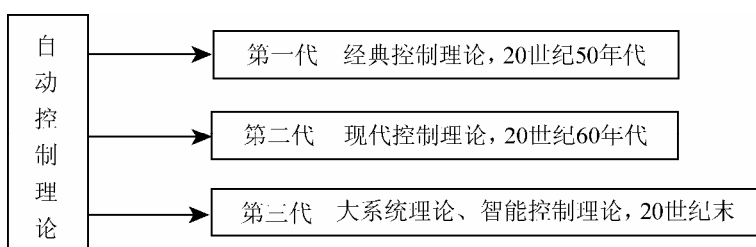


图 1.1 自动控制理论的发展过程

1.2 自动控制系统的基本概念

1.2.1 自动控制系统的基本原理

自动控制作为重要的技术手段，主要用于解决各类工程和科学研究中的技术问题。实际上，在各种生产过程和生产设备中，常常需要使其中的某些物理量或保持恒定或按照某种规律变化，以满足系统运行的要求。

首先以水位控制系统为例，对其实现水位自动控制的基本原理加以研究，从中引出自动控制和自动控制系统的基本概念。

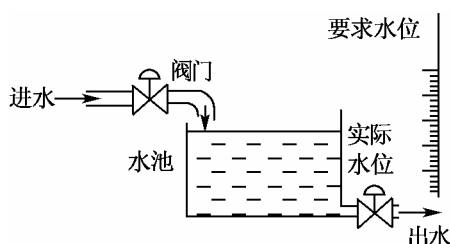


图 1.2 人工控制的水箱水位控制系统

实现水位控制有两种方法：人工控制和自动控制。如图 1.2 所示为人工控制的水箱水位控制系统。人可以通过控制阀门的开度达到控制水位的目的。

这种人工调节过程可归纳为：

- (1) 通过测量元件(刻度标尺)，观测出水箱中的实际水位(也称被控量)；
- (2) 将实际水位与要求的水位值(也称给定值)相比较，得出两者偏差；

(3) 根据偏差的大小和方向调节进水阀门的开度。当实际水位高于要求值时，关小进水阀门开度，否则加大阀门开度以改变进水量，从而改变水箱水位，使之与要求值保持一致。

由此可见，人工控制的过程就是测量、求偏差、实施控制以纠正偏差的过程。也就是检测偏差并用以纠正偏差的过程。

对于这样简单的控制形式，如果能找到一个控制器代替人的大脑，那么这样一个人工控制系统就可变成一个自动控制系统了。如图 1.3 所示就是一个自动控制系统。阀门的开度由电位器电压控制，浮子为实际水位的测量装置，当实际水位低于要求水位时，电位器输出电压值为正，且其大小反映了实际水位与水位要求值的差值，放大器输出信号将有正的变化，电动机带动减速器使阀门开度增加，直到实际水位重新与水位要求值相等时为止。因此，水位自动控制的目的是消除或减小偏差，使实际水位达到要求的水位值。

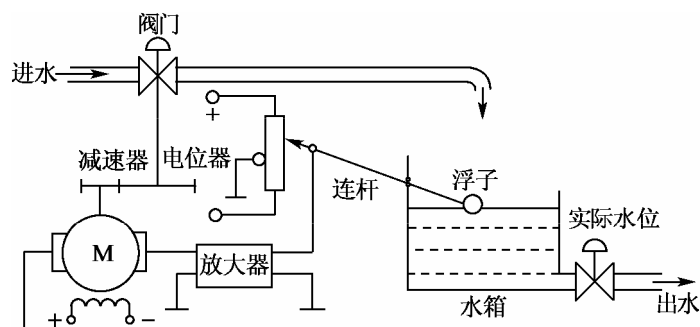
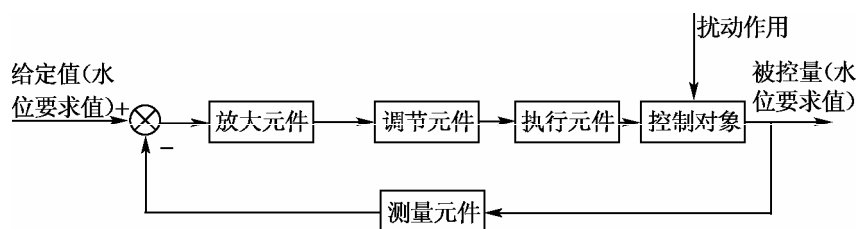


图 1.3 自动控制的水箱水位控制系统图

浮子—测量作用；连杆—比较作用；放大器、伺服电动机和减速器—调节作用；阀门—执行元件作用

比较上述人工控制和自动控制可知，执行机构类似于人手，测量装置相当于人眼，控制器类似于人脑。另外，它们之间还有一个共同的特点，就是都要检测偏差，并用检测到的偏差去纠正偏差，可见没有偏差便没有调节过程。在自动控制系统中，这一偏差是通过反馈建立起来的。反馈就是指输出量通过适当的测量装置将信号全部或部分返回输入端，使之与输入端信号进行比较，比较的结果称为偏差。基于反馈基础上的“检测偏差用以纠正偏差”的原理又称为反馈控制原理，利用反馈控制原理组成的系统称为反馈控制系统。

如图 1.4 所示为水位自动控制系统的方框图。“ \otimes ”表示比较元件，方框表示各个环节，箭头代表信号的流动方向。从图中可看到反馈控制的基本原理，也可以看到各职能环节的作用是单向的，每个环节的输出受输入控制。总之，实现自动控制的装置可各不相同，但反馈控制的原理是相同的，可以说，反馈控制是实现自动控制最基本的方法。



1.2.2 自动控制系统的控制方式

自动控制有两种基本的控制方式：开环控制与闭环控制。与这两种控制方式对应的系统分别称为开环控制系统和闭环控制系统。

1. 开环控制

开环控制系统是指被控量对控制过程无影响的系统，控制信号的传递方向只有顺向没有反向。也就是说，控制作用的传递路径不是完全闭合的，故称为开环控制系统。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。

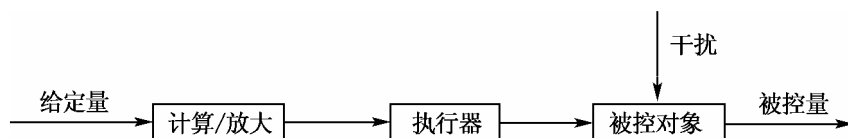


图 1.5 开环控制原理框图

这种控制的特点是系统的结构和控制都很简单，但抗干扰能力差，控制精度不高。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，该系统适用于结构参数稳定，干扰很弱或对被控量要求不高的场合，如家用电风扇的转速控制、自动洗衣机、包装机以及某些自动化流水线等。

2. 闭环控制

闭环控制是有被控量反馈的控制，其原理框图如图 1.6 所示。从系统的信号流向看，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。

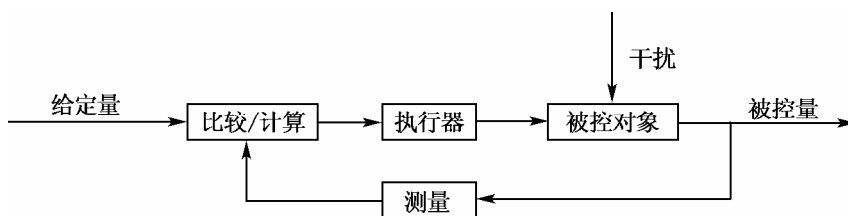


图 1.6 闭环控制原理框图

在这种控制方式中，无论是由于外界干扰造成的、还是由系统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，调试比较困难。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，如果设计调试不当，将会产生振荡，使系统无法正常和稳定地工作。

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，即控制装置和被控对象，如图 1.7 所示，其中控制装置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。

1. 给定装置

其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量纲上保持一致。常见的给定装置有电位器、给定积分器等。

2. 比较、放大装置

其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工作的程度，如各种放大器等。

3. 执行装置

其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，从而减小或消除偏差，如执行电动机、过程调节阀等。

4. 测量与变送装置

其功能是检测被控量，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，如调速系统的测速发电机等。

5. 校正装置

当自控系统由于自身结构或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，如 RC 网络、调节器等。

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。

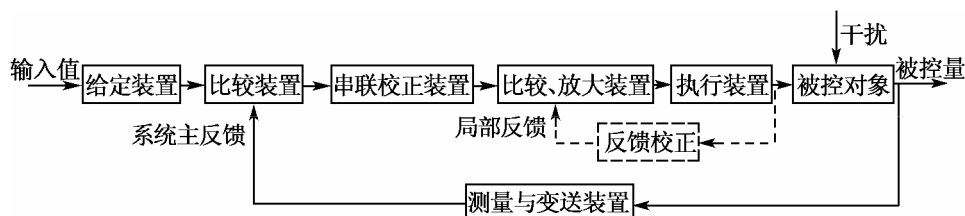


图 1.7 自动控制系统的组成

1.2.4 自动控制系统

1. 恒温控制系统

如图 1.8 所示为电炉箱恒温自动控制系统。

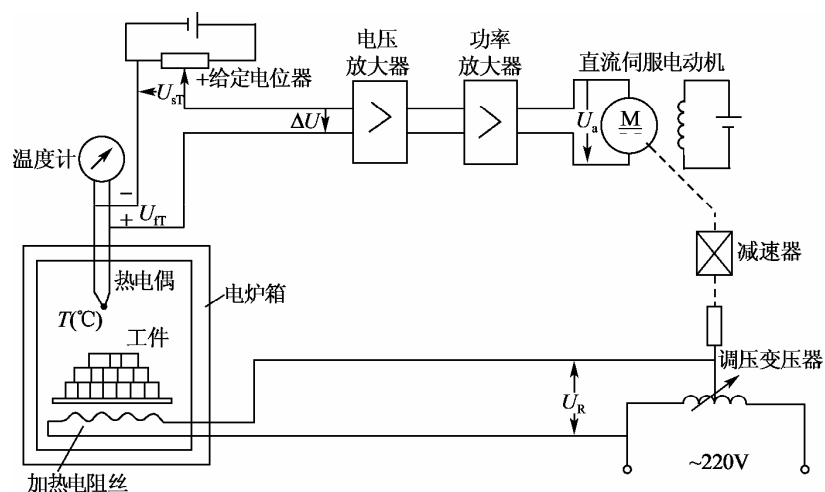


图 1.8 电炉箱恒温自动控制系统

一个由电阻丝通电加热的电炉箱，由于炉壁散热和增、减工件，使炉温产生变化，而这种变化通常是无法预先确定的。因此，若工艺要求保持炉温恒定，则开环控制将无法自动补偿，必须采用闭环控制。由于需要保持恒定的物理量是温度，所以最常用的方法便是采用温度负反馈。如图 1.8 所示，该系统采用热电偶来检测温度，并将炉温转换成电压信号 U_{FT} (毫伏级)，然后反馈至输入端，与给定电压 U_{ST} 进行比较，由于是采用负反馈控制，因此两者极性相反，两者的差值 ΔU 称为偏差电压 ($\Delta U = U_{ST} - U_{FT}$)。此偏差电压作为控制电压，经电压放大和功率放大后，去驱动直流伺服电动机 (控制电动机电枢电压)，电动机经减速器带动调压变压器的滑动触头，来调节炉温。电炉箱自动控制系统框图如图 1.9 所示。

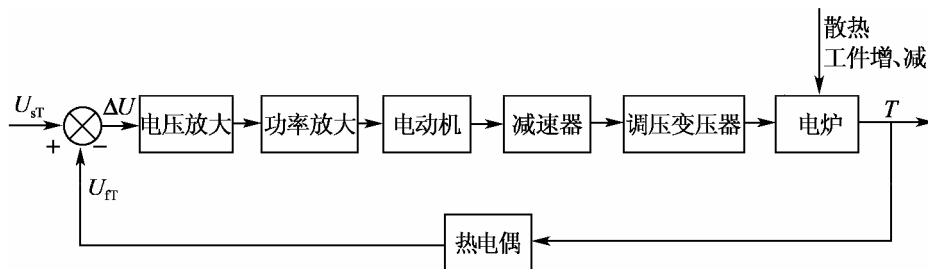


图 1.9 电炉箱自动控制系统框图

当炉温偏低时， $U_{FT} < U_{ST}$ ， $\Delta U = (U_{ST} - U_{FT}) > 0$ ，此时偏差电压极性为正，此偏差电压经电压放大和功率放大后，产生电压 U_a (设 $U_a > 0$)，供给电动机电枢，使电动机“正”转，带动调压变压器滑动触点右移，从而使电炉供电电压 (U_R) 增加，电流加大，炉温上升，直至炉温升至给定值，即 $T = T_{ST}$ (T_{ST} 为给定值)， $U_{FT} = U_{ST}$ ， $\Delta U = 0$ 时为止。这样炉温可自动恢复，并保持恒定。

炉温自动调节过程如图 1.10 所示。

反之，当炉温偏高时，则 ΔU 为负，经放大后使电动机“反”转，滑动触点左移，供电电压减小，直至炉温降至给定值。

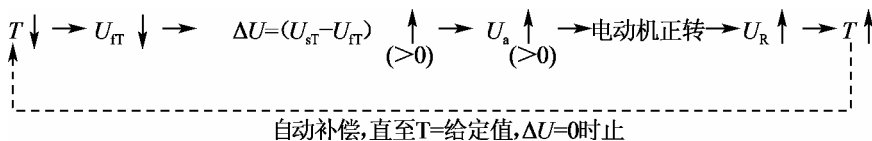


图 1.10 炉温自动调节过程

炉温处于给定值时， $\Delta U = 0$ ，电动机停转。

由以上分析可见，反馈控制可以自动进行补偿，这是闭环控制的一个突出的优点。当然，闭环控制要增加检测、反馈比较、调节器等部件，会使系统复杂、成本提高。而且闭环控制会带来副作用，使系统的稳定性变差，甚至造成不稳定。这是采用闭环控制时必须重视并要加以解决的问题。

2. 水位控制系统

水位控制系统的工作原理图如图 1.11 所示，其控制任务是使水池的水位保持恒定。

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，水面高度保持设定高度 H 。

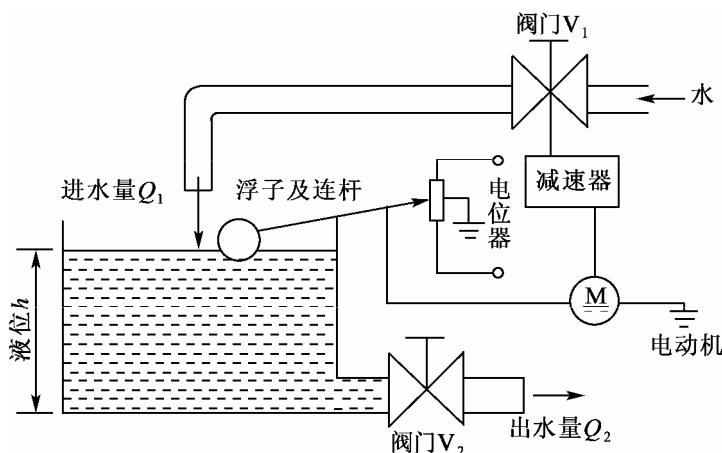


图 1.11 水位控制系统的工作原理图

如果这时由于阀门 V_2 突然开大，出水量增大，则水位开始下降， $\Delta h > 0$ ，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，水位渐渐上升，直至重新等于设定高度 H 。

如果这时由于阀门 V_2 突然关小，出水量减小，则水位开始上升， $\Delta h < 0$ ，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，水位渐渐下降，直至重新等于设定高度 H 。可见系统在此两种情况下都能保持希望高度。

通过以上分析可以得出：此系统是通过测量水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；被控量是水面高度；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 1.12 所示的水位控制系统的原理框图。

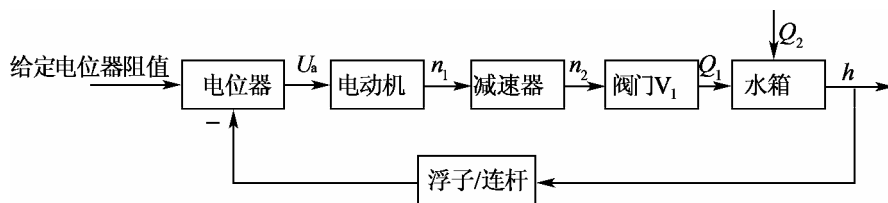


图 1.12 水位控制系统的原理框图

由图 1.2 可以看出，水位控制系统也存在负反馈环节。

1.3 自动控制系统的分类

自动控制系统的的应用渗透到各个领域，其形式是多种多样的，因此，可以从不同的角

度来进行分类。

1.3.1 按输入信号变化的规律分类

1. 恒值控制系统

恒值控制系统的特点是系统的输入信号是恒定值，并且要求系统的输出量相应地保持恒定。

恒值控制系统是最常见的一类自动控制系统，如自动调速系统，恒温控制系统，恒张力控制系统等。此外许多恒压(液压)、稳压(电压)、稳流(电流)、恒频(电频率)的自动控制系统也都是恒值控制系统。图 1.8 所示的电炉箱温度控制系统和图 1.11 所示的水位控制系统都是恒值控制系统。

2. 随动控制系统(又称伺服系统)

随动控制系统的特点是输入信号是变化着的(有时是随机的)，并且要求系统的输出量能跟随输入量的变化而做出相应的变化。

这种控制系统的另一个特点是可以功率很小的输入信号操纵功率很大的工作机械(这只要选用大功率的功放装置和电动机即可)，此外还可以进行远距离控制。

随动控制系统在工业和国防上有着极为广泛的应用。例如刀架跟随系统，自动火炮控制系统，雷达跟踪系统，机器人控制系统，自动驾驶系统，自动导航系统和工业生产中的自动测量仪器等。

3. 程序控制系统

程序控制系统与随动控制系统不同之处是它的给定输入不是随机不可知的，而是按事先预定的规律变化。这类系统往往适用于特定的生产工艺或生产过程，按所需要的控制规律给定输入，并要求输出按预定的规律变化。设计此类系统比随动控制系统有针对性。由于变化规律已知，可根据要求事先选择方案，保证控制性能和精度。在工业生产中广泛应用的程序控制系统有仿形控制系统、机床数控加工系统等。

1.3.2 按系统传输信号对时间的关系分类

1. 连续控制系统

连续控制系统的特点是各元件的输入量与输出量都是连续量或模拟量，所以它又称为模拟控制系统。

如图 1.8 所示的恒温控制系统就是连续控制系统。连续控制系统的运动规律通常可用微分方程来描述。

2. 离散控制系统

离散控制系统又称采样数据控制系统，它的特点是系统中有的信号是脉冲序列、采样数据量或数字量。通常，采用数字计算机控制的系统都是离散控制系统。离散控制系统的运动规律通常可用差分方程来描述。

1.3.3 按系统的输出量和输入量间的关系分类

1. 线性系统

线性系统的特点是系统全部由线性元件组成，它的输出量与输入量间的关系用线性微分方程来描述。线性系统最重要的特性是可以应用叠加原理。叠加原理为：两个不同的作用量同时作用于系统时的响应等于两个作用量单独作用时的响应的叠加。

2. 非线性系统

非线性系统的特点是系统中存在非线性元件(如具有死区、出现饱和、含有库仑摩擦等非线性特性的元件)，要用非线性微分方程来描述。非线性系统不能应用叠加原理(分析非线性系统的工程方法常用“描述函数”和“相平面法”)。

1.3.4 按系统中的参数对时间的变化情况分类

1. 定常系统(又称时不变系统)

定常系统的特点是系统的全部参数不随时间变化，它用定常微分方程来描述。在实践中遇到的系统，大多属于(或基本属于)这一类系统。

2. 时变系统

时变系统的特点是系统中有的参数是时间 t 的函数，它随时间变化而改变。例如宇宙飞船控制系统，就是时变控制系统的一个例子(宇宙飞船飞行过程中，飞船内燃料质量、飞船受的重力等都随时间发生变化)。

当然，除了以上的分类方法外，还可以根据其他的条件进行分类。本书只讨论线性定常恒值给定的自动调速系统。

1.4 对自动控制系统的基本要求

一个理想的自动控制系统，在其整个控制过程中，被控量应始终等于给定值。但是，由于系统中存在着电磁惯性，在动态过程中被控量不可能立即等于给定值，而需要经过一个过渡过程。因此，评价系统性能优劣的性能指标也是从系统的动态过程中定义出来的。工程上常常是从稳定性、快速性、准确性 3 个方面对系统性能进行评价。

1.4.1 系统的稳定性

当扰动作用(或给定值发生变化)时，输出量将会偏离原来的稳定值。这时，由于反馈环节的作用，通过系统内部的自动调节，系统可能回到(或接近)原来的稳定值(或跟随给定值)稳定下来，如图 1.13(a)所示。但也可能由于内部的相互作用，使系统出现发散而处于不稳定状态，如图 1.13(b)所示。显然，不稳定的系统是无法进行工作的。因此，对任何自动控制系统，首要的条件便是系统能稳定正常运行。

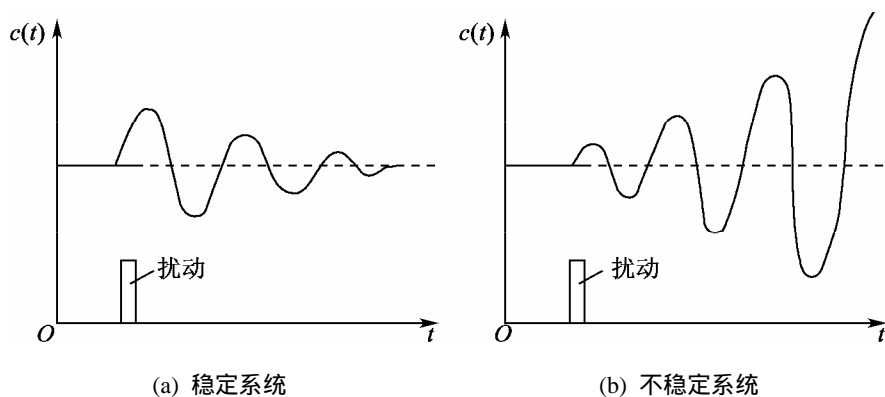


图 1.13 稳定系统和不稳定系统

1.4.2 系统的稳态性能指标

当系统从一个稳态过渡到新的稳态,或系统受扰动作用又重新平衡后,系统可能会出现偏差,这种偏差称为稳态误差(e_{ss})。系统稳态误差的大小反映了系统的稳态精度(或静态精度),它表明了系统控制的准确程度。稳态误差 e_{ss} 越小,则系统的稳态精度越高。若 $e_{ss} \neq 0$,则称为有静差系统,如图 1.14(a)所示。反之,若 $e_{ss}=0$,则系统称为无静差系统,如图 1.14(b)所示。

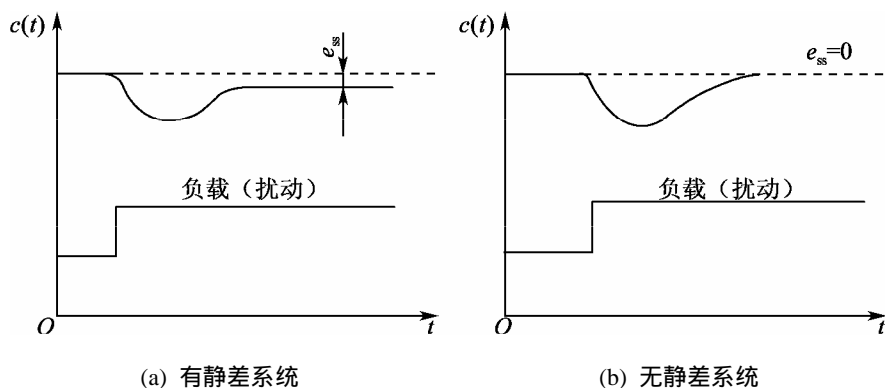


图 1.14 自动控制系统的稳态性能

事实上,对一个实际系统,要求系统的输出量丝毫不变地稳定在某一确定的数值上,往往是办不到的,要求稳态误差绝对等于零,也是很难实现的。因此,我们通常把系统的输出量进入并一直保持在某个允许的足够小的误差范围(称为误差带)内,即认为系统已进入稳定运行状态。此误差带的数值可看作系统的稳态误差。此外,对一个实际的无静差系统,理论上,它的稳态误差 $e_{ss}=0$,但实际上,只是其稳态误差极小而已。

1.4.3 系统的动态性能指标

由于系统的对象和元件通常都具有一定的惯性(如机械惯性、电磁惯性、热惯性等),并且也由于能源功率的限制,系统中各种量值(加速度、位移、电流、温度等)的变化不可