



普通高等教育“十二五”规划教材

# 自动控制原理

主编 毕效辉 于春梅



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

# 自动控制原理

主编 毕效辉 于春梅

参编 徐 苏 梁艳阳 张春峰  
杨 芳 乔之勇 倪小敏

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是一部高融合立体化教材,纸质内容与光盘内容密切配合、融为一体,较全面系统地阐述自动控制的基本分析和研究方法。全书共分8章,主要内容有:自动控制概述、线性控制系统的数学模型、时域响应分析、根轨迹分析、频率特性分析、控制系统的设计与校正、非线性控制系统分析、离散控制系统等。书中强化了工程应用,给出了较多的工程应用实例和MATLAB辅助分析、Flash动画演示的内容。为便于自学,各章均附有小结和丰富的例题与习题,习题给出了参考答案。

本书可作为普通高等学校自动化等电气信息类专业和相关专业的本科生教材,也可作为职业技术教育和继续教育的教材,还可作为研究生和从事自动化技术的人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/毕效群,于春海主编. —北京:科学出版社,2014.6  
(普通高等教育“十二五”规划教材)  
ISBN 978-7-03-040961-4

I. ①自… II. ①毕… ②于… 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(2014)第121926号

责任编辑:余江 张丽花 / 责任校对:包志虹  
责任印制:阎磊 / 封面设计:速底书装

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

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014年6月第一版 开本:787×1092 1/16

2014年6月第一次印刷 印张:19 1/2

字数:500 000

定价:47.00元(含光盘)

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

自动控制理论是自动控制学科的重要理论基础,自动控制原理是专门研究有关自动控制系统基本概念、基本原理和基本方法的一门课程,是高等学校自动化类专业的一门核心基础理论课程,也是诸多专业普遍开设的重要课程。学好自动控制原理对掌握自动化技术有着重要的作用。实践证明,该课程不仅对工程技术有指导作用,而且对培养学生的辩证思维能力,建立理论联系实际的科学观点和提高综合分析问题的能力,都具有重要的作用。

西南科技大学的“自动控制理论”课程是省级精品课程、省级精品开放课程和省级资源共享课程,本教材也是四川省“十二五”规划教材。本书是在作者经过长期的教学实践和研究、编写出版过多部同类教材、积累和整合多种资源的基础上,精心加工编撰而成的。书中全面阐述了自动控制的基本概念和基本原理,系统地介绍了自动控制系统分析和综合的基本方法。教材具有以下主要特点:

(1) 这是一部国内首创高融合立体化教材,多种媒体密切配合,形成了一个有机整体。

在纸质主教材主要知识点后简要标注了相应辅助材料在光盘中的代号;如“G305”代表第3章第5个“工程案例”,“[F507]”代表第5章第7个“Flash 演示动画”,“[M216]”代表第2章第16个“MATLAB 仿真程序段”等。

仿真程序在运行时逐段显示题目、图片、所编程序和运行结果,特别适合于教学。

(2) 资源比较丰富。光盘中提供了34个工程应用实例、90余个MATLAB仿真程序段和近百个Flash演示动画;有包括课程全部内容的大型电子教材:《Matlab·自控理论学习与仿真》(以辅助仿真为主);另有其他较多资源。

(3) 以最基本的内容为主线,理论严谨而精练,系统性较强,便于读者自学。

(4) 注重基本理论阐述的同时,兼顾工科学生特点,突出工程应用。

(5) 配有较多的精选例题和适量的习题,习题附有参考答案,对学生解题能力训练特别是考研很有帮助。

(6) 作为省级精品课程、省级资源共享课程,教材所附光盘中有丰富的辅助资源(更多内容请登录“四川省精品课程——自动控制理论”网站 <http://www.jpkc.swust.edu.cn/c566/>)。

本书第1章简述自动控制理论的发展历史,介绍自动控制的基本概念,引出了自动控制系统的常用术语,并介绍控制理论研究的对象和目的。

第2章是控制系统数学描述方法,系统地介绍分析控制系统的微分方程和传递函数模型;介绍了利用结构图等等效化简和梅森增益公式确定系统闭环传递函数的方法。

第3章介绍线性系统的时域分析方法,重点讨论了系统的稳定性、快速性、准确性的分析方法。

第4章介绍线性系统的根轨迹分析方法,重点讨论了根轨迹的绘制法则以及利用根轨迹对系统性能进行分析的方法。

第5章频域分析法是工程上重点应用的方法,详细讨论了频率域作图、分析的原理,介绍了频域稳定判据,给出了频域指标的计算及分析方法。

第6章介绍线性系统的校正方法,主要有常用校正方案、根轨迹校正法、频率响应校正法以及反馈校正法等。

第7章介绍工程实际中常见的非线性特性,讨论了系统分析的描述函数法和相平面法。

第8章介绍线性离散系统的数学模型和时域分析法,以及数字控制器的直接设计方法。

本书可作为普通高等学校自动化等电气信息类专业和相关专业的本科生教材,也可作为职业技术教育和继续教育的教材,还可作为研究生和从事自动化技术的人员的参考书。

本书编写分工如下:毕效辉(第1、2章),于春梅(第3、4章),徐苏(第5、6章),梁艳阳(第7章),张春峰(第8章主要部分、部分MATLAB仿真程序),杨芳(第8章部分、3个附录、部分Flash动画),乔之勇(第2、5、6、7章习题解答),倪小敏(第1、3、4、8章习题解答)。全书由毕效辉统稿。

对部分注释性、拓展性的内容,书中以小字号排印,这些部分不作教学要求。

科学出版社的编辑为本书的出版付出了辛勤的劳动,四川大学黄家英教授对本书的编写给予了支持,研究生王效杰编写调试了部分程序。在此向关心并为本书出版做出贡献的所有人员表示诚挚的谢意!

对书中存在的不妥之处,恳请各位读者批评指正。

编 者

2014年5月



# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.1.1 控制理论的发展历程 .....	1
1.1.2 自动控制系统的组成及术语 .....	2
1.2 自动控制举例 .....	4
1.2.1 温度控制 .....	4
1.2.2 液位控制 .....	5
1.2.3 速度控制 .....	6
1.2.4 随动控制 .....	6
1.3 自动控制的基本方式 .....	8
1.3.1 开环控制 .....	8
1.3.2 闭环控制 .....	8
1.3.3 复合控制 .....	9
1.4 控制系统的分类 .....	9
1.4.1 按系统输入信号的变化规律不同来分 .....	9
1.4.2 按系统传输信号的性质来分 .....	10
1.4.3 按描述系统的数学模型不同来分 .....	10
1.4.4 其他分类方法 .....	11
1.5 对控制系统的基本要求 .....	11
1.6 例题精解 .....	13
1.7 工程应用实例 .....	15
本章小结 .....	16
习题 .....	16
<b>第 2 章 控制系统的数学模型</b> .....	19
2.1 引言 .....	19
2.1.1 数学模型的特点 .....	19
2.1.2 数学模型的类型 .....	20
2.1.3 建模途径与原则 .....	21
2.2 控制系统的微分方程 .....	21
2.2.1 建立微分方程模型的一般步骤 .....	21
2.2.2 建模举例 .....	22
2.2.3 非线性系统(数学模型)的线性化 .....	25
2.3 控制系统的传递函数 .....	28
2.3.1 传递函数的概念 .....	28
2.3.2 典型环节及其传递函数 .....	30

2.3.3	控制系统的传递函数	34
2.3.4	传递函数的标准形式	37
2.3.5	传递函数的零点和极点对输出的影响	38
2.4	控制系统的结构图	38
2.4.1	结构图的概念	38
2.4.2	系统结构图的建立	39
2.4.3	结构图的等效变换	41
2.5	信号流图与梅森公式	46
2.5.1	信号流图中的术语	46
2.5.2	信号流图的绘制	47
2.5.3	梅森公式	48
2.6	应用 MATLAB 进行模型处理	50
2.6.1	拉氏变换与反变换	50
2.6.2	传递函数	51
2.7	例题精解	54
2.8	工程应用实例	59
	本章小结	59
	习题	59
<b>第 3 章</b>	<b>线性系统的时域分析</b>	<b>63</b>
3.1	引言	63
3.1.1	典型信号	64
3.1.2	性能指标	65
3.2	一阶系统的分析和计算	66
3.2.1	一阶系统的数学模型	66
3.2.2	一阶系统的单位阶跃响应	67
3.2.3	单位斜坡响应	68
3.2.4	单位脉冲响应	69
3.3	二阶系统的分析和计算	69
3.3.1	二阶系统的数学模型	69
3.3.2	单位阶跃响应	70
3.3.3	二阶系统性能指标分析	73
3.3.4	单位脉冲响应	75
3.4	改善二阶系统性能的措施	76
3.4.1	二阶系统的比例-微分控制	76
3.4.2	二阶系统的速度反馈控制	78
3.4.3	比例-微分控制与速度反馈控制的比较	79
3.4.4	控制系统的基本控制律——比例-积分-微分控制	79
3.5	高阶系统的时间响应	81
3.5.1	高阶系统的阶跃响应	81
3.5.2	高阶系统性能估计	82

3.6	用 MATLAB 进行动态响应分析	84
3.6.1	绘制响应曲线	84
3.6.2	阶跃响应性能分析	85
3.6.3	应用 Simulink 进行仿真	86
3.7	稳定性分析	87
3.7.1	稳定性的概念和定义	87
3.7.2	线性系统稳定的条件	88
3.7.3	劳斯-赫尔维茨判据	89
3.8	线性系统的稳态误差计算	92
3.8.1	稳态误差的定义	92
3.8.2	参考输入作用下的稳态误差	94
3.8.3	扰动作用下的稳态误差	96
3.8.4	动态误差系数	98
3.9	例题精解	99
3.10	工程应用实例	107
	本章小结	107
	习题	107
<b>第 4 章</b>	<b>线性系统的根轨迹法</b>	<b>112</b>
4.1	根轨迹的基本概念	112
4.1.1	闭环零、极点与开环零、极点之间的关系	112
4.1.2	根轨迹的基本概念	113
4.2	根轨迹方程	114
4.3	根轨迹绘制的基本规则	115
4.3.1	180°根轨迹绘制的基本规则	116
4.3.2	零度根轨迹的绘制规则	123
4.4	典型反馈系统的根轨迹分析	125
4.4.1	反馈系统的根轨迹分析举例	125
4.4.2	典型的根轨迹图	128
4.4.3	非最小相位系统的根轨迹	129
4.4.4	参数根轨迹	130
4.5	用 MATLAB 绘制系统的根轨迹	132
4.5.1	命令介绍	132
4.5.2	绘图示例	133
4.6	例题精解	135
4.7	工程应用实例	140
	本章小结	140
	习题	140
<b>第 5 章</b>	<b>线性系统的频域分析法</b>	<b>144</b>
5.1	频率特性的基本概念	144
5.1.1	频率特性的定义	144



5.1.2	频率特性的几何表示法	145
5.2	典型环节的频率特性	146
5.2.1	比例环节	146
5.2.2	积分环节	147
5.2.3	微分环节	148
5.2.4	惯性环节	149
5.2.5	一阶微分环节	150
5.2.6	振荡环节	150
5.2.7	二阶微分环节	153
5.2.8	延迟环节	153
5.3	控制系统的开环频率特性	153
5.3.1	开环 Nyquist 图	154
5.3.2	开环 Bode 图	155
5.3.3	最小相位系统与非最小相位系统	157
5.4	奈奎斯特稳定判据	159
5.4.1	辅助函数 $F(s)$	159
5.4.2	幅角原理	160
5.4.3	奈奎斯特稳定判据	161
5.4.4	对数频率特性稳定判据	163
5.5	控制系统的稳定裕度	165
5.6	闭环频率特性	167
5.7	频率特性分析	167
5.7.1	用开环频率特性分析系统的性能	168
5.7.2	开环频域性能指标与时域指标的关系	169
5.7.3	开环频域指标与闭环频域指标的关系	171
5.8	MATLAB 频率特性分析	172
5.8.1	Bode 图	172
5.8.2	Nyquist 图	174
5.8.3	Nichols 图	176
5.9	例题精解	177
5.10	工程应用实例	180
	本章小结	180
	习题	181
<b>第 6 章</b>	<b>控制系统综合与设计</b>	<b>184</b>
6.1	引言	184
6.1.1	性能指标	184
6.1.2	控制系统校正的基本方法	184
6.2	校正方案	185
6.2.1	校正方式	185
6.2.2	校正装置	185

6.2.3	校正方案	187
6.3	根轨迹法校正	187
6.3.1	基于根轨迹法的超前校正	187
6.3.2	基于根轨迹法的滞后校正	189
6.3.3	基于根轨迹法的滞后-超前校正	190
6.4	频率响应法校正	191
6.4.1	应用伯德图设计的思路	191
6.4.2	频率响应超前校正	192
6.4.3	频率响应滞后校正	197
6.4.4	频率响应滞后-超前校正	200
6.5	反馈校正	203
6.6	例题精解	204
6.7	工程应用实例	209
	本章小结	209
	习题	210
<b>第7章</b>	<b>非线性控制系统</b>	<b>212</b>
7.1	引言	212
7.1.1	非线性控制系统的特点	212
7.1.2	典型非线性特性	213
7.2	描述函数法	215
7.2.1	描述函数的含义	215
7.2.2	典型非线性环节的描述函数	216
7.2.3	典型非线性环节组合时的描述函数	221
7.3	非线性控制系统描述函数分析	223
7.3.1	非线性系统的稳定性	223
7.3.2	自持振荡分析	224
7.4	相平面法	227
7.4.1	相平面的基本概念	227
7.4.2	相平面的特点	228
7.4.3	线性系统相轨迹	229
7.4.4	相轨迹绘制	232
7.5	非线性系统相平面分析	234
7.5.1	奇点与极限环	234
7.5.2	相平面法分析非线性系统	237
7.6	例题精解	241
7.7	工程应用实例	245
	本章小结	245
	习题	245
<b>第8章</b>	<b>离散控制系统</b>	<b>249</b>
8.1	离散系统的基本概念	249

8.1.1	采样控制系统 .....	249
8.1.2	数字控制系统 .....	251
8.1.3	离散控制系统的特点 .....	252
8.2	信号的采样与保持 .....	253
8.2.1	采样过程 .....	253
8.2.2	采样过程的数学描述 .....	254
8.2.3	采样定理 .....	256
8.2.4	信号保持 .....	257
8.3	Z 变换 .....	260
8.3.1	Z 变换的定义 .....	260
8.3.2	Z 变换的方法 .....	260
8.3.3	Z 变换的性质 .....	263
8.3.4	Z 反变换 .....	263
8.4	离散系统的数学模型 .....	264
8.4.1	差分方程 .....	265
8.4.2	脉冲传递函数 .....	266
8.5	离散系统的稳定性和稳态误差 .....	272
8.5.1	离散系统的稳定性 .....	272
8.5.2	离散系统的稳态误差 .....	276
8.6	离散系统的动态性能分析 .....	278
8.7	离散系统的数字校正 .....	280
8.8	MATLAB 离散控制系统分析 .....	281
8.8.1	Z 变换和 Z 反变换 .....	281
8.8.2	连续系统的离散化 .....	281
8.8.3	采样系统的响应 .....	282
8.9	例题精解 .....	283
8.10	工程应用实例 .....	286
	本章小结 .....	286
	习题 .....	287
	习题参考答案 .....	290
	参考文献 .....	300
	光盘与纸质教材关联索引 .....	301

# 第 1 章 绪 论

## 基本要求

- (1) 了解自动控制系统的工作原理、分类和特点。
- (2) 掌握负反馈在自动控制系统中的作用。
- (3) 掌握自动控制系统的组成和各部分的作用。
- (4) 根据工作原理图,确定控制系统的被控对象、控制量和被控制量,正确画出系统的方框图。
- (5) 了解对控制系统的要求。

## 1.1 引 言

近一个世纪以来,科学技术取得了突飞猛进的发展,在这一发展过程中,自动控制始终担负着重要的角色。自动控制作为一种技术手段已经广泛地应用于工业、农业、国防乃至日常生活和社会科学的许多领域。例如,控制车床按照预先编制好的程序加工部件,雷达自动跟踪空中的飞行体,洗衣机、微波炉等家用电器按照预定规律自动运行等,所有这些都离不开自动控制技术。

所谓自动控制,就是在人不直接参与的情况下,利用控制装置使某些被控量(如飞机的飞行速度和仰角、工业加热炉的炉温等)按指定的规律变化。[F101]

自动控制技术的广泛应用,不仅可以改善工作条件,减小劳动强度和提高了生产效率,而且在人类征服自然、探知未来、建设高度文明的新社会等方面有着重要的意义。随着经济以及科技、国防事业的发展 and 人们生活水平的提高,自动控制技术所起的作用越来越重要,自动控制技术本身也将会得到进一步发展。作为一个工程技术人员,了解和掌握自动控制方面的知识是十分必要的。[F102]

### 1.1.1 控制理论的发展历程

#### 1.1.1.1 经典控制理论阶段

自动控制领域的第一项重大成果,是 18 世纪詹姆斯·瓦特(James Watt)为控制蒸汽机速度而设计的离心调节器。在控制理论发展初期,做出过重大贡献的众多学者中有迈纳斯基(Minorsky)、黑曾(Hezen)和奈魁斯特(Nyquist)。1922 年,迈纳斯基研制出船舶操纵自动控制器,并且证明了如何从描述系统的微分方程中确定系统的稳定性。1932 年,奈魁斯特提出了一种相当简便的方法,就是根据对稳态正弦输入的开环响应确定闭环系统的响应性能。1934 年,黑曾提出了用于位置控制系统的伺服机构的概念,讨论了可以精确跟踪变化的输入信号的继电器式伺服机构。

20 世纪 40 年代,频率响应法为工程技术人员设计满足性能要求的线性闭环控制系统提供了一种可行的方法。20 世纪 40 年代末~50 年代初,伊万思(Evans)提出了形象、直观、使用方便的根轨迹法。

频率响应法和根轨迹法是经典控制理论的核心。由这两种方法设计出来的系统是稳定的,并且不同程度地满足一组适当的性能要求。一般来说,这些系统是令人满意的,但它不是某种意义上的最佳系统。从20世纪50年代末期开始,控制系统设计问题的重点从设计许多可行系统中的一种系统,转变到设计在某种意义上的最佳系统。

维纳(N. Wiener)于1948年出版了专著《控制论》,它是经典控制理论的辉煌总结。而且该书的内容覆盖了更广阔的领域,正如该书的副标题“动物和机器中的控制与通信”所揭示的,是一部继往开来的、具有深远影响的名作。1954年我国学者钱学森出版了专著《工程控制论》,系统地揭示了控制论对自动化、航空、航天、电子通信等工程技术领域的意义和深远影响。这标志着控制论学科分化而产生的第一个分支学科“工程控制论”的诞生。

### 1.1.1.2 现代控制理论阶段

大约从1960年开始,由于数字计算机的出现以及工业、军事特别是空间技术的需求,以时域方法为主的诸多分析设计方法得以迅猛发展,在原有“经典控制理论”的基础上,又形成了所谓的“现代控制理论”,这是人类在自动控制技术认识上的一次飞跃。

为现代控制理论的状态空间法的建立做出开拓性贡献的有,1954年贝尔曼(R. Bellman)的动态规划理论;1956年,庞特里雅金(L. S. Pontryagin)的极大值原理;1960年,卡尔曼(R. E. Kalman)的多变量最优控制和最优滤波理论。

在20世纪50年代,控制理论的发展主要集中在复平面上及根轨迹的发展。同时,在这一时期,控制的对象从单输入-单输出发展到多输入-多输出,从确定性系统发展到随机系统,由于数字计算机在控制系统中的使用变得普遍起来,这些新控制部件的使用使得控制变得精确、快速。

状态空间方法属于时域方法,其核心是最优化技术。它以状态空间描述(实质上是一阶微分或差分方程组)作为数学模型,利用计算机作为系统建模、分析、设计乃至控制的手段,适应于多变量、非线性、时变系统。它不仅在航天、航空、制导与军事武器控制中有成功的应用,在工业生产过程控制中也得到逐步应用。

### 1.1.1.3 智能控制理论阶段

近十多年来,把传统控制理论与模糊逻辑、神经网络、遗传算法等人工智能技术相结合,充分利用人类的控制知识对复杂系统进行控制,逐渐形成了智能控制理论的雏形。这种新发展起来的控制技术,是人工智能在控制上的应用。

智能控制的概念和原理主要是针对被控对象、环境、控制目标或任务的复杂性提出来的,它的指导思想是依据人的思维方式和处理问题的技巧,解决目前那些需要人的智能才能解决的复杂的控制问题。被控对象的复杂性体现在:模型的不确定性;高度非线性;分布式的传感器和执行器;动态突变;多时间标度;复杂的信息模式;庞大的数据量以及严格的特性指标等。而环境的复杂性则表现为变化的不确定性和难以辨识。

虽然智能控制体系形成的历史不长,理论还未完全成熟,但其已有的应用成果和理论发展说明了智能控制正成为自动控制的前沿学科之一。

## 1.1.2 自动控制系统的组成及术语

在各种各样的自动控制系统中,反馈控制是最基本的控制方式之一。一个典型的反馈控

制系统总是由控制对象和各种结构不同的元器件组成的。除控制对象外,其他各部分可通称为控制装置。每一部分各司其职,共同完成控制任务。

典型反馈控制系统基本组成可用图 1-1 表示。其中用“ $\otimes$ ”或“ $\circ$ ”代表多路信号会合点(也称综合点),“+”表示信息相加(图中往往省略),“-”表示信息相减。从这种方框图中可明显地看出各环节之间的关系和控制作用的传递过程。

(1) 被控对象(controlled plant)。通常是一个设备、物体或过程(一般称任何被控制的运行状态为过程),其作用是完成一种特定的操作。它是控制系统所控制和操纵的对象,接受控制量并输出被控量。

(2) 给定环节。给出与期望的输出相对应的系统输入量,是一类产生系统控制指令的装置(或软件界面)。

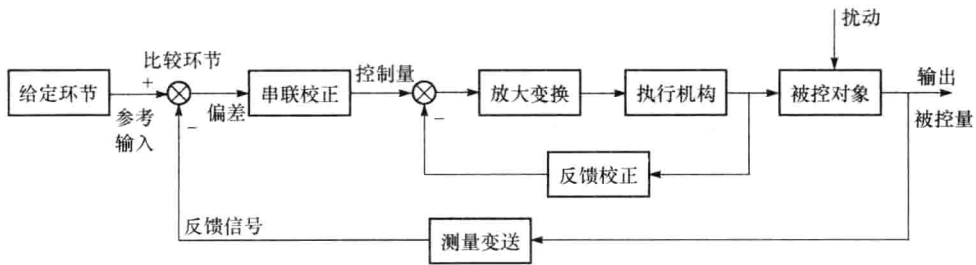


图 1-1 反馈控制系统基本组成

(3) 测量变送环节。它用来检测被控量的实际值。如果输出的物理量属于非电量,大多数情况下要把它转换成电量,以便利用电的手段加以处理。测量变送环节一般也称为反馈环节。

(4) 比较环节。其作用是把测量元件检测到的实际输出值与给定环节给出的输入值进行比较,求出它们之间的偏差。常用的电量比较元件有差动放大器、电桥电路等。在计算机控制系统中通过编程可实现。

(5) 放大变换环节。将比较微弱的偏差信号加以放大,以足够的功率来推动执行机构或被控对象。当然,放大倍数越大,系统的反应越敏感。一般情况下,只要系统稳定,放大倍数应适当大些。

(6) 执行环节。其职能是直接推动被控对象,使其被控量发生变化。常见的执行元件有阀门、伺服电动机等。

(7) 校正环节。为改善系统的动态和静态性能特性而附加的装置,其参数可灵活调整。工程上称为调节器或控制器。常用串联或反馈的方式连接在系统中。简单的校正元件可以是一个 RC 网络,复杂的校正元件可含有电子计算机。

在具体讨论控制系统之前,还应了解一些常用的名词术语。

(1) 被控量(controlled variable)。被控量即系统的输出,是一种被测量和被控制的量值或状态。

(2) 控制量(controlling variable)。控制量也称操纵量,是一种由控制器改变的量值或状态,它将影响被控量的值。通常,被控量是系统的输出量。控制意味着对系统的被控量的值进行测量,并且使控制量作用于系统,以修正或限制测量值对期望值的偏离。

(3) 参考输入(reference input)。是人为给定的,使系统具有预定性能或预定输出的激发



信号,它代表输出的希望值。故又称为给定输入、给定值、期望输出等。

(4) 反馈(feedback)。将系统(或环节)的输出量经变换、处理送到系统(或环节)的输入端,称为反馈。若此变量是从系统输出端取出送入系统输入端,这种反馈称为主反馈;而其他称为局部反馈。

(5) 偏差(deviation)。给定输入量与主反馈量之差。

(6) 误差(error)。是指系统输出量的实际值与希望值之差。系统希望值是理想化系统的输出,实际上很难达到,因而用与控制输入量有一定比例关系的信号来表示。在单位反馈情况下,希望值就是系统的输入量,误差量就等于偏差量。

(7) 扰动(disturbance)。扰动是一种对系统的输出量产生不利影响的信号。如果扰动产生在系统的内部,称为内部扰动;反之,当扰动产生在系统的外部时,则称为外部扰动。外部扰动也是系统的输入量。

(8) 系统(system)。系统是一些部件的组合,这些部件组合在一起,完成一定的任务。系统不限于物理系统。系统的概念可以应用于抽象的动态现象,如在经济学中遇到的一些现象。因此“系统”这个词,应当理解为包含了物理学、生物学和经济学等方面的系统。

## 1.2 自动控制举例

### 1.2.1 温度控制

以电炉恒温箱的温度控制为例。恒温控制的任务是,在扰动因素作用(如打开箱门取放物品,电源电压的波动以及环境温度的变化等)下保持箱内温度恒定,以满足生产工艺对温度的要求。

图 1-2(a)所示的是电炉恒温箱的手动控制系统。手动控制的方法:通过眼睛观察温度计所显示温度与希望温度的偏差,人工调节活动触点的位置,改变加在加热电阻丝两端的电压,从而调节电阻丝电流的大小以达到恒温控制的目的。控制系统的方框图可简便地用图 1-2(b)来表示。[F103]

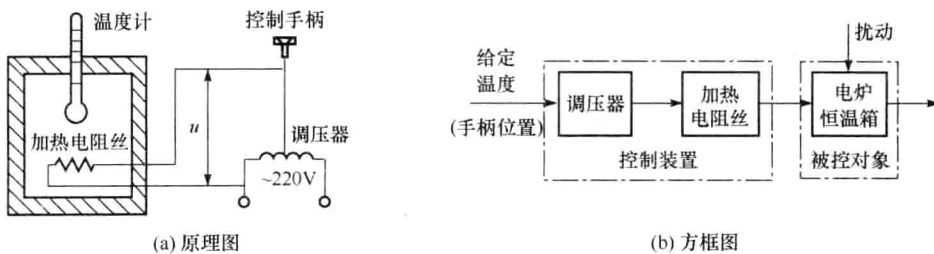


图 1-2 电炉恒温箱手动控制系统

图 1-3(a)所示的是电炉恒温箱的自动控制系统。自动控制的过程:用热电偶对炉温(被控量)进行检测并转换成对应的电压,反馈送至输入端与给定温度进行比较(相减)得到偏差电压;经放大器放大后驱动电动机运转,再经减速器调节调压器活动触点的位置,从而改变加在加热电阻丝两端的电压,以达到恒温控制的目的。自动控制系统的方框图可用图 1-3(b)来表示。[F104]

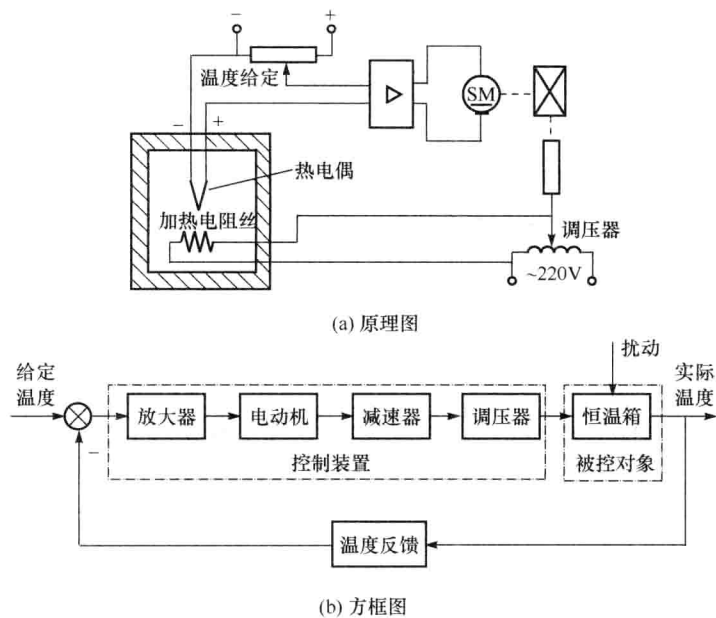


图 1-3 电炉恒温箱自动控制系统

### 1.2.2 液位控制 [F105]

图 1-4(a)所示的是一个水箱液位自动控制系统。因生产和生活的需要,希望液面高度  $h$  维持恒定(或在允许的偏差范围以内)。当水的流入量与流出量平衡时,水箱的液面高度维持在预定(希望)的高度上。

当水的流出量或流入量发生变化时,平衡就会被破坏,液面的高度不能自然地维持恒定。而且这种出水量与进水量的不平衡现象是必然要经常发生的(例如,进水压力的下降或用水量的增加)。这便使得这种“水位恒定的要求”变得难以实现。

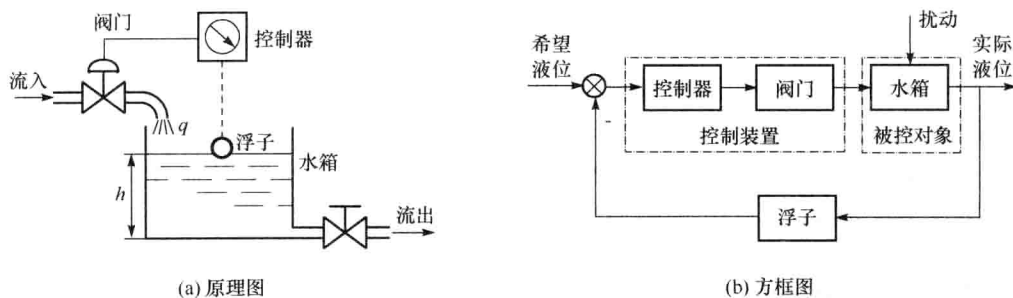


图 1-4 液位自动控制

对液面进行自动控制时,液面的希望高度由自动控制器刻度盘上的指针标定。当出水与进水的平衡被破坏时,水箱水位下降(或上升),出现偏差。这偏差由浮子标测出来,自动控制器在偏差的作用下,控制阀门使其开大(或关小),对偏差进行修正,从而保持液面高度不变。控制系统的方框图如图 1-4(b)所示。

### 1.2.3 速度控制 [F106]

直流电动机速度自动控制系统的原理结构如图 1-5(a)所示。图中,电位器电压  $u_g$  为输入信号。电位器动点的位置一定,电动机速度就有一定值,故电位器电压的变化称为参考输入或给定值。测速发电机是电动机转速的测量元件,又称为变送元件(变送器)。图 1-5(a)中,代表电动机转速变化的测速发电机电压  $u_t$  送到输入端与电位器电压  $u_g$  进行比较,两者的差值  $u_e$  (又称偏差信号)经放大器放大后加到触发器-晶闸管可控整流装置的输入端,整流装置的输出  $u_{do}$  控制电动机的转速和方向,进而对被控量进行相应的调节。这就形成了电动机转速自动控制系统。

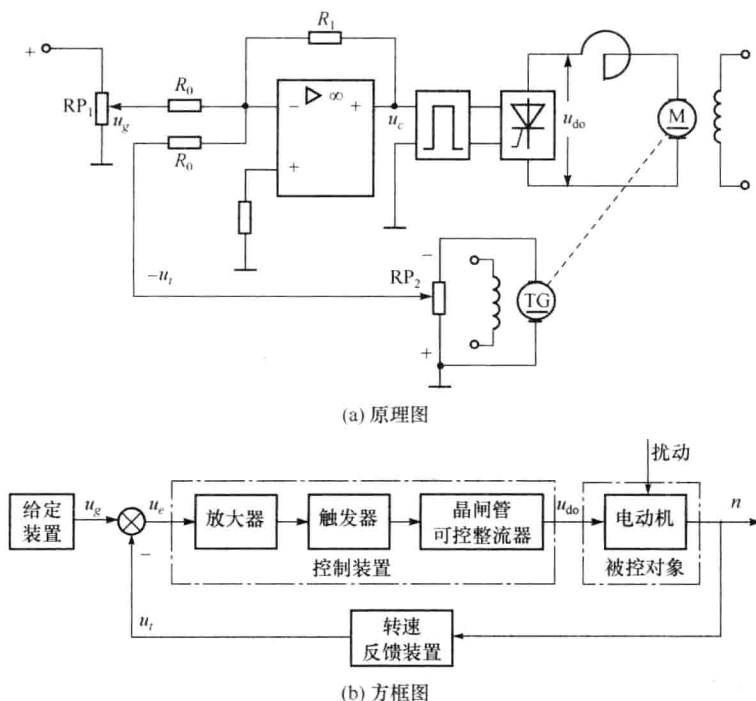


图 1-5 直流电动机速度自动控制系统

电源变化、负载变化等引起转速变化,即为扰动。当电动机(被控对象)受到扰动后,转速(被控量)发生变化,经测量元件(测速发电机)将转速信号(又称为反馈信号)反馈到控制器(功率放大与整流装置),使控制器的输出(称为控制量)发生相应的变化,从而可以自动地保持转速不变或使偏差保持在允许的范围内,也即使被控量自动地保持为给定值或在给定值附近的一个很小的允许范围内变动。

如果在图 1-5(a)中,取消测速发电机及其反馈回路,电动机的转速由人工监测,当转速偏离给定值时,由人工去改变电位器的动点,改变放大器的输出,从而改变电动机的电枢电压,改变电动机的转速,使之恢复到转速的定值。这样,电动机的转速控制就成人工控制系统。

图 1-5(b)是该控制系统的方框图。

### 1.2.4 随动控制 [F107]

前面所介绍的控制系统的特点是,给定信号一经整定好后就保持恒值,具有这一特点的系统在实际中不乏其例,通常称这类系统为恒值调节系统。而随动系统是工程上应用领域非常