

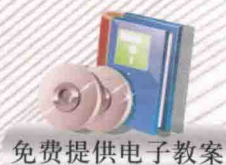


普通高等教育 **电气信息类** 应用型规划教材

自动控制原理

张明君 主编

 科学出版社



免费提供电子教案

普通高等教育电气信息类应用型规划教材

自动控制原理

张明君 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书面向应用型本科教学,从工程实际出发介绍自动控制的基本原理及应用方法。内容包括自动控制的基本概念、线性系统的数学模型、时域响应分析法、根轨迹分析法、频域分析法、控制系统的设计与校正、非线性系统分析、采样控制系统分析以及应用 Matlab 软件分析和设计控制系统。本书也是一本学习引导式教材,以学生认知和学习的思路为顺序编写,主要知识点前后插入思考题,引导读者在学习前思考和在学习后对知识进行引申,并配有大量习题,用于巩固和加强学习效果。

本书适合作为应用型本科院校自动化、电气工程及自动化、机电一体化等相关专业教学用书,也可供相关专业的研究生或从事自动化技术工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/张明君主编. —北京: 科学出版社, 2015

(普通高等教育电气信息类应用型规划教材)

ISBN 978-7-03-044462-2

I. ①自… II. ①张… 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 114457 号

责任编辑: 陈晓萍 孙露露 / 责任校对: 王万红

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 耕者设计工作室

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>

北京鑫丰华彩印有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015 年 8 月第一次印刷 印张: 18

字数: 429 000

定价: 36.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换 <鑫华>)

销售部电话 010-62142126 编辑部电话 010-62138978-2010

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

普通高等教育电气信息类应用型规划教材

编 委 会

主 任：刘向东

副主任：方志刚 张明君

成 员：万 旭 万林生 王泽兵 龙建忠 叶时平 代 燕

伍良富 刘加海 祁亨年 杜益虹 李联宁 张永炬

张永奎 张克军 杨起帆 周永恒 金小刚 洪 宁

秦洪军 凌惜勤 陶德元

秘书长：刘加海（兼）

秘 书：陈晓萍 周钗美

前 言

自动控制原理是系统和控制科学的一门基础课程，主要讲解建立在传递函数输入输出描述基础之上的反馈控制系统的分析与综合方法。随着科学技术的发展，自动控制技术的应用日新月异，并且日益渗透到其他学科领域，促进其他学科的发展。

当前，我国的高等教育已由精英教育过渡到大众化教育，国家已经作出要引导一批地方本科高校向应用技术型高校转型的决定。应用技术型高校必须按照真正培养应用型人才的目标对现有课程体系、教学内容，尤其是教材进行改革。现有的自动控制原理教材大多是按照“宽口径、厚基础”，培养学术型人才编写的，突出学科体系的完整性和系统性，这些教材不完全适合以培养应用技术型人才为目标的地方本科高校使用。

本书针对以培养应用技术型人才为目标的地方本科高校的教学特点编写，由数家应用技术型院校中具有丰富教学经验和工程实践经历的资深教师共同参与，书稿经过多年打磨和教学实践、研讨，使编写质量得到了充分的保证。

本书从工程实际出发，阐述了自动控制的基本原理及应用方法。全书共分为8章和附录，主要内容包括自动控制的基本概念、线性系统的数学模型、时域响应分析法、根轨迹分析法、频域分析法、控制系统的设计与校正、非线性系统分析、采样控制系统分析以及应用 Matlab 软件分析和设计控制系统。

本书以基本知识、基本概念和方法的工程应用为重点，内容深入浅出，在工程背景下介绍各种分析设计方法的基本原理和应用，是一本学习引导式教材，方便读者自学。本书具有如下特点。

(1) 面向应用型本科教学，以工程为背景展开知识点描述。每个概念和分析方法均以具体的工程问题为例引出；讲清如何从工程的角度理解系统的分析方法；按照“工程实际—理论讲解—工程应用”三个步骤进行知识点展开，缩短理论与工程实际的距离，建立知识与应用的联系，体现“工程化”特征。

(2) 以学生认知和学习的思路为顺序编写，在主要知识点的前后插入思考题，引导读者在学习前思考和在学习后对知识引申，插入的思考题在后续的讲解或例题中都能得到答案。

(3) 以基本知识、基本概念和方法的工程应用为重点，适当淡化数学推导。

(4) 内容精炼，重点突出，层次分明，知识体系连贯简洁，每章前有本章要点，每章后附有小结，易于读者梳理掌握知识。

(5) 删除部分工程应用较少的内容，如动态误差系数、等 N 圆、等 M 圆等。

(6) 例题丰富，主要知识点后有配套例题，使读者更容易掌握知识点的应用方法，同时方便教学。

(7) 习题中除计算题和设计题外，增加填空、选择、判断、分析题等以基本概念学习为主的习题。

(8) 每章都配套有 Matlab 仿真软件的分析 and 设计实现, 方便学生学习和验证, 以培养学生的应用和分析能力。

本书由张明君任主编, 杜鹏英任副主编。各章编写分工如下: 第 1 章、第 3 章由张明君编写, 第 2 章、第 8 章、附录由梅彦平编写, 第 4 章由李占英编写, 第 5 章、第 6 章由杜鹏英编写, 第 7 章由汪洋编写。全书由张明君统稿。

本书适合作为应用型本科院校自动化、电气工程及自动化、机电一体化等相关专业教学用书, 以及高等职业院校教学使用, 也可供相关专业的研究生或从事自动化工作的技术人员参考。

书中引用了部分高校期末考试题及硕士研究生入学考试题, 因来源广泛, 无法一一核实, 在此一并表示感谢。

由于作者水平有限, 书中错误和不妥之处在所难免, 恳请广大读者批评指正。

作者

2015 年 6 月

目 录

前言

第 1 章 自动控制的基本概念	1
1.1 自动控制理论的发展和应用	1
1.1.1 自动控制理论的发展历程	1
1.1.2 自动控制应用实例	2
1.2 本课程的作用及特点	4
1.2.1 本课程的作用	4
1.2.2 本课程的特点	4
1.2.3 本课程知识的联系性	4
1.3 系统的基本控制方式	4
1.3.1 开环控制及特点	5
1.3.2 闭环控制及特点	5
1.3.3 补偿控制及特点	6
1.3.4 复合控制及特点	7
1.3.5 控制方式选择	7
1.4 自控系统的组成和术语	7
1.4.1 自控系统组成	8
1.4.2 自控系统的名词术语	8
1.5 控制系统的分类	8
1.5.1 按信号流向分类	9
1.5.2 按系统输入信号分类	9
1.5.3 按系统元器件特性分类	9
1.5.4 按系统参数特征分类	10
1.5.5 按变量函数特征分类	10
1.5.6 按输入输出量分类	10
1.6 对控制系统性能的基本要求	11
小结	12
习题	13
第 2 章 线性系统的数学模型	14
2.1 线性系统的微分方程	14
2.1.1 微分方程的建立	15
2.1.2 微分方程的一般表达式	17
2.2 非线性微分方程的线性化	18

2.3	线性定常系统的传递函数	20
2.3.1	传递函数的定义	20
2.3.2	传递函数的特点	21
2.3.3	典型环节及其传递函数	22
2.4	控制系统的结构图	26
2.4.1	结构图的组成	26
2.4.2	结构图的绘制	27
2.4.3	控制系统环节间的连接	31
2.4.4	结构图的等效变换和化简	33
2.5	用 Matlab 软件建立数学模型	38
2.5.1	传递函数	39
2.5.2	控制系统的建立	40
	小结	42
	习题	42
第 3 章	时域响应分析法	46
3.1	自动控制系统的典型输入信号	46
3.2	线性定常系统的时域响应	48
3.2.1	时域分析法	48
3.2.2	时域响应	49
3.2.3	时域响应的性能指标	49
3.3	线性定常系统的稳定性	50
3.3.1	稳定性概念	50
3.3.2	线性系统稳定的充要条件	51
3.3.3	劳斯判据	52
3.3.4	劳斯判据的应用	55
3.3.5	相对稳定性和稳定裕量	57
3.4	系统的稳态误差	58
3.4.1	误差	58
3.4.2	稳态误差	58
3.4.3	稳态误差 e_{ss} 的计算	59
3.4.4	改善系统稳态精度的途径	64
3.5	一阶系统的时域响应	65
3.5.1	数学模型	65
3.5.2	单位阶跃响应	65
3.5.3	性能指标计算	66
3.5.4	单位脉冲响应	66
3.6	二阶系统的时域响应	67
3.6.1	数学模型	67

3.6.2	单位阶跃响应	67
3.6.3	系统性能指标	71
3.6.4	单位脉冲响应	73
3.6.5	改善二阶系统性能的措施	74
3.7	高阶系统的暂态响应	76
3.7.1	高阶系统的传递函数	76
3.7.2	高阶系统的降阶	78
3.8	用 Matlab 进行时域响应分析	79
3.8.1	单位脉冲响应	79
3.8.2	单位阶跃响应	80
3.8.3	单位斜坡响应	80
3.8.4	性能指标	81
3.8.5	系统稳定性分析	82
小结	.....	83
习题	.....	84
第 4 章	根轨迹分析法	88
4.1	根轨迹的基本概念	88
4.2	绘制典型根轨迹	90
4.2.1	根轨迹方程	90
4.2.2	根轨迹绘制的基本规则	91
4.2.3	根轨迹绘制	103
4.3	根轨迹分析系统的性能	106
4.3.1	根轨迹与稳定性	106
4.3.2	引入开环零、极点对根轨迹的影响	107
4.3.3	使用根轨迹法确定主导极点	109
4.4	用 Matlab 进行根轨迹分析和校正	111
4.4.1	使用 Matlab 绘制根轨迹图	111
4.4.2	用 Matlab 进行根轨迹分析和校正	113
小结	.....	121
习题	.....	122
第 5 章	频域分析法	124
5.1	频率特性	124
5.1.1	频率特性的定义	124
5.1.2	频率特性的求取	125
5.1.3	频域性能指标	126
5.2	开环对数频率特性	126
5.2.1	对数坐标图	127
5.2.2	典型环节的频率特性	127

5.2.3	系统的开环对数频率特性	134
5.2.4	最小相位系统与非最小相位系统	138
5.3	系统开环极坐标图	140
5.3.1	极坐标图	140
5.3.2	系统开环极坐标图	141
5.4	奈氏稳定判据	142
5.4.1	奈氏曲线及映射	142
5.4.2	奈氏稳定判据一	144
5.4.3	奈氏稳定判据二	145
5.4.4	奈氏对数稳定判据	145
5.5	系统相对稳定性	147
5.5.1	增益裕量 K_g	147
5.5.2	相角裕量 γ	149
5.5.3	用幅相频率特性分析系统的稳定性	149
5.6	用频率特性分析系统品质	150
5.6.1	开环频率特性与时域响应的关系	150
5.6.2	闭环频域性能指标与时域性能指标的关系	152
5.7	用 Matlab 实现频率特性分析	153
5.7.1	伯得图绘制和分析	153
5.7.2	奈奎斯特图绘制和分析	155
	小结	156
	习题	157
第 6 章	控制系统的设计与校正	161
6.1	概述	161
6.1.1	系统各种性能指标的关系	161
6.1.2	系统校正	162
6.2	串联超前校正	164
6.2.1	串联超前校正装置及其特性	164
6.2.2	系统的串联超前校正	165
6.3	串联滞后校正	168
6.3.1	串联滞后校正装置及特点	168
6.3.2	系统的串联滞后校正	170
6.4	系统滞后-超前校正	174
6.4.1	串联滞后-超前校正装置	174
6.4.2	系统的串联滞后-超前校正	175
6.5	按期望特性对系统校正	176
6.6	线性系统的基本控制(校正)规律	178
6.6.1	PID 控制规律	178

6.6.2	PID 控制器的实现与应用	180
6.7	反馈校正	182
6.7.1	比例反馈校正	182
6.7.2	微分反馈校正	183
6.7.3	反馈校正的设计	183
6.8	复合校正	184
6.8.1	反馈与前馈校正的复合控制	184
6.8.2	反馈与扰动补偿的复合控制	185
6.9	基于 Matlab 和 Simulink 的线性控制系统设计	186
6.9.1	超前校正和滞后校正	186
6.9.2	用 Simulink 实现线性控制系统设计仿真	188
	小结	189
	习题	190
第 7 章	非线性系统分析	194
7.1	典型的非线性特性	196
7.2	相平面法	199
7.2.1	相平面的基本概念	199
7.2.2	相轨迹图	200
7.2.3	相轨迹的绘制方法	201
7.3	线性系统的相轨迹	204
7.3.1	二阶线性系统的相轨迹	204
7.3.2	奇点的稳定性	205
7.4	非线性系统的相平面分析	206
7.4.1	饱和特性的非线性系统分析	206
7.4.2	继电器的非线性特性系统分析	207
7.4.3	极限环	208
7.5	描述函数法	209
7.5.1	描述函数定义	210
7.5.2	描述函数的计算	211
7.5.3	非线性系统的描述函数分析	218
7.6	用 Simulink 实现非线性控制系统设计仿真	221
	小结	223
	习题	224
第 8 章	采样控制系统分析	227
8.1	采样控制系统	227
8.1.1	采样控制系统的基本结构	227
8.1.2	采样过程与采样定理	228
8.2	采样信号保持器	230

8.2.1	零阶保持器	230
8.2.2	一阶保持器	232
8.3	Z 变换	233
8.3.1	Z 变换定义	233
8.3.2	Z 变换方法	234
8.3.3	Z 变换性质	236
8.3.4	Z 反变换	237
8.4	采样控制系统的数学模型	240
8.4.1	线性常系数差分方程	240
8.4.2	脉冲传递函数	242
8.4.3	开环系统脉冲传递函数	243
8.4.4	闭环系统脉冲传递函数	245
8.5	采样控制系统的稳定性分析	248
8.5.1	从 s 平面到 z 平面的映射	249
8.5.2	线性采样控制系统的稳定条件	249
8.5.3	线性采样控制系统的稳定判据	250
8.6	采样控制系统的稳态误差	252
8.7	采样控制系统的瞬态响应与脉冲传递函数极点分布关系	255
8.8	采样控制系统的校正	257
8.8.1	数字控制器的脉冲传递函数	257
8.8.2	最小拍控制系统的脉冲传递函数	258
8.8.3	最小拍控制系统的设计	259
8.9	基于 Matlab 的采样控制系统仿真	261
8.9.1	脉冲传递函数在 Matlab 中的表示	261
8.9.2	连续系统模型与采样系统模型的转换	262
8.9.3	求采样控制系统的时间响应	262
8.9.4	采样控制系统的性能分析	263
小结	.....	264
习题	.....	266
附录	.....	270
附录 A	常用函数的拉普拉斯变换表	270
附录 B	常用函数的 Z 变换表	271
附录 C	留数法求 Z 变换	272
附录 D	留数法求 Z 反变换	273
参考文献	.....	275

第1章 自动控制的基本概念

本章要点

- ◇ 自动控制的定义和实例。
- ◇ 本课程的作用、特点。
- ◇ 控制系统的基本组成、分类和基本术语。
- ◇ 自动控制系统的基本控制方式。
- ◇ 对控制系统性能的三大基本要求。

1.1 自动控制理论的发展和应用

自 20 世纪 40 年代, 自动控制理论诞生以来, 以此为理论基础的自动控制技术迅速发展, 并在现代科学技术众多领域中发挥了越来越重要的作用。自动控制技术不仅广泛应用于工农业生产、交通运输、航天航空、国防军事以及日常生活中, 而且正向经济、教育、人口、卫生、生物等领域渗透, 其应用越来越广泛。

自动控制技术的广泛应用不仅实现了生产设备和过程的自动化, 改善了人类的劳动条件, 而且极大地提高了人类的生活品质, 甚至实现了飞向太空、登上月球的人类梦想。可以说, 自动控制技术手段已经成为人类生存发展必不可少的一门科学技术。

1.1.1 自动控制理论的发展历程

自动控制技术是以自动控制理论为理论基础的一门学科。根据自动控制理论发展的不同阶段, 自动控制理论通常可以分为经典控制理论和现代控制理论两个部分。

1948 年, 美国数学家维纳 (N. Wiener) 发表的《控制论》标志着经典控制理论的诞生。20 世纪 30~40 年代, 在奈奎斯特 (H. Nyquist)、伯得 (H. W. Bode) 等众多学者的努力下, 逐渐形成了较为完善的经典控制理论。通常, 将建立在时域分析法、根轨迹法和频域法基础上的控制系统分析和设计理论及方法, 称为经典控制理论。

经典控制理论是以单输入单输出的一类自动控制系统为主要研究对象, 以反馈控制为基本原理, 以拉普拉斯变换为数学工具的系统分析和设计方法。它主要包括时域法、根轨迹法和频域法三大方法。因为经典控制理论的物理概念清晰, 易于应用, 至今仍广泛应用于实际工程中。目前, 国内出版的自动控制原理方面的教材一般以经典控制理论为主, 本书同样以介绍经典控制理论为主。

20 世纪 50 年代, 伴随着计算机技术的飞速发展, 人类在航空航天领域上取得了举世瞩目的成就。1957 年苏联成功发射了第一颗人造卫星; 1968 年美国阿波罗宇宙飞船成功登上月球。这些成绩也标志着自动控制理论的应用推向了又一新的历史阶段。在此阶段,

自动控制理论突破了经典控制理论的方法，以矩阵理论为数学工具，用状态空间法来研究多输入多输出的控制系统，甚至可以应用到系统参数随时间变化的时变系统、非线性系统的分析设计。按照通常的习惯，将以状态空间法为主的多变量控制方法称为现代控制理论。

20 世纪 60~70 年代，随着自动控制理论的发展，系统辨识、最优控制、自适应控制、智能控制等成为自动控制理论近代的发展分支。近年来，随着经济和科学技术的飞速发展，出现了复杂大系统理论，用于解决交通运输、生物控制、环境保护等方面的问题。如今，自动控制理论的研究对象越来越广泛，应用涉及社会发展的各个领域。自动化的发展水平已经成为衡量一个国家或地区发展的标志之一。

1.1.2 自动控制应用实例

人们经常问：“控制”一词的概念在工程中如何定义？“自动控制”概念又如何定义？首先以日常生活中常见的家用热水器实例。

人们使用热水器是为了获得一定温度（热度）的热水。最初的水热水器是手动操作的，它由一个加热电阻丝和水箱构成，其结构如图 1-1 所示。使用时，需要手动操作给电阻丝通电一定时间，使水温上升；使用者通过水箱上的温度计显示值获得实际的水温信息，并且使用者与期望的水温值比较，得到温度差值；然后使用者根据温度差值的大小，确定是否继续加热，产生控制指令。人们通过上述手动操作过程，使热水器的水温控制在期望值附近。在控制过程中，热水器各部分相互联系，其工作原理如图 1-2 所示，图中箭头方向表示各部分信息的流向。

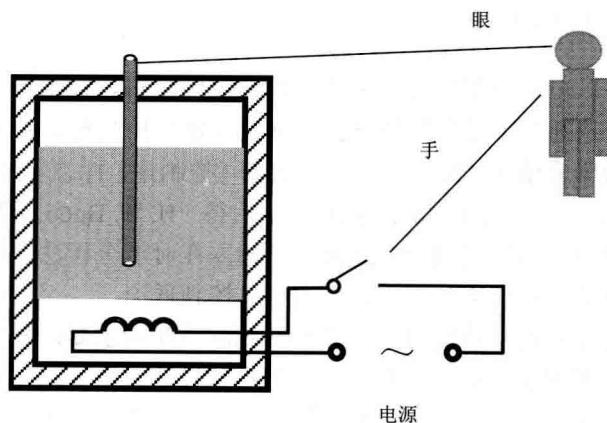


图 1-1 手动控制热水器的结构

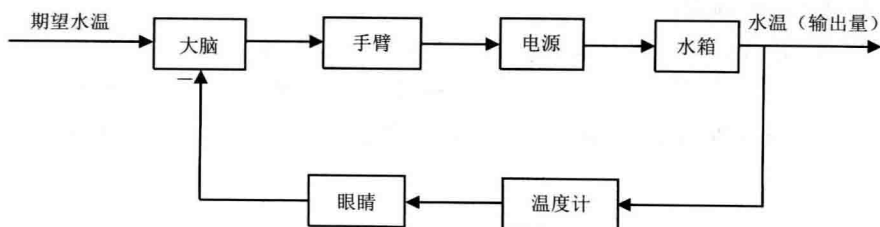


图 1-2 手动控制热水器的工作原理

通过研究上述手动控制热水器的加热过程可以看到,所谓控制就是使某个被控制对象中的物理量按照一定的目标来变化。本例中,被控对象为热水器水箱,其中的物理量是指水箱中水的温度,控制的目标就是期望达到的水温。

显然,当水温控制精度要求较高时,上述手动控制水温的方法就很难满足要求了。因此,诞生了现在常用的自动控温的热水器。

自动控温的热水器结构如图 1-3 所示。它由测温元件(热电偶)、加热源(电阻丝)、信号放大变换装置、功率放大器、水箱等构成。热电偶为测温装置,将箱体内的水温实际值测量出来,并传送给控制部分,与使用者设定的水温值(称为给定信号)比较作差,形成偏差信号。偏差信号经电压放大和功率放大,输出电压量送给加热器电阻丝。当偏差大时,功率放大器输出电压量增大,加热器增加热量,直到偏差为零,保持水温不变。上述自动控温热水器原理如图 1-4 所示。

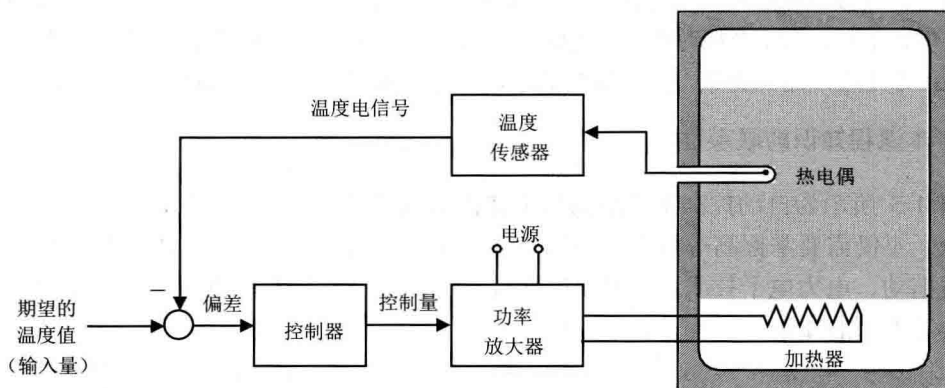


图 1-3 自动控温热水器的结构

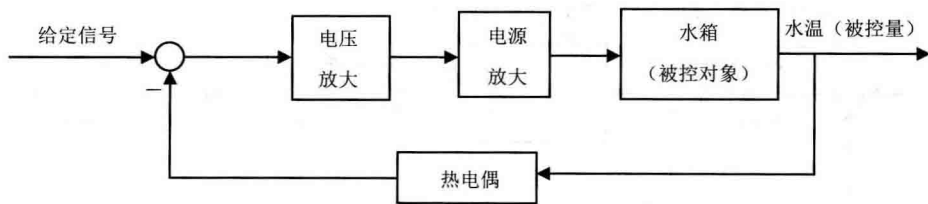


图 1-4 自动控温热水器工作原理^①

由上述分析可知,自动控制实际上就是基于手动控制的基本原理,它们都是建立在“比较作差、减少偏差”的控制思路。因此,不论是自动控制系统还是手动控制系统,都必须把系统的实际被测物理量测量出来,并反馈到输入端。两者的区别在于自动控制系统用控制装置代替人完成控制。

至此,可以定义自动控制在:在没有人直接参与的情况下,利用控制装置使被控对象中某一物理量或多个物理量按照预定的要求规律去变化的过程。为实现某一自动控制目标而设计的各种控制装置的有机组合体,称为自动控制系统,简称为自控系统。自动控制系统的结构有简有繁,它既可以是仅控制一个物理量(如温度、速度)的简单系统,也可以是包括整个企业全部过程的大系统,还可以是抽象的社会系统、生态系统或经济系统。

^① 系统原理图、结构图、方框图中的信号汇合点处,可以用“○”表示,也可以用“⊗”表示。

1.2 本课程的作用及特点

1.2.1 本课程的作用

自动控制系统的结构多种多样，其运行机理有一定的内在规律。自动控制原理课程就是介绍自动控制系统组成、运行规律，阐述对自动控制系统的分析和设计方法的课程。本课程为自动化、电气工程及自动化、机电一体化等本科专业的专业核心课程。

1.2.2 本课程的特点

因为自动控制原理是研究分析自动控制过程共同规律性、系统设计的一般性理论的课程，它以数学为工具，系统介绍时域法、根轨迹法和频域法等系统分析和设计方法，其知识的逻辑性较强，以工程应用为背景，物理概念清晰，理论性偏强，需要用到的数学基础知识较多。

1.2.3 本课程知识的联系性

图 1-5 所示为自动控制系统结构与本课程知识的联系，可见，掌握一个典型的自动控制系统，不仅需要掌握高等数学、普通物理，还需了解掌握电路、模拟电路、数字电路、电机与拖动、电力电子技术、PLC、单片机、计算机控制技术、电气控制、检测技术和信号处理等方面的知识。

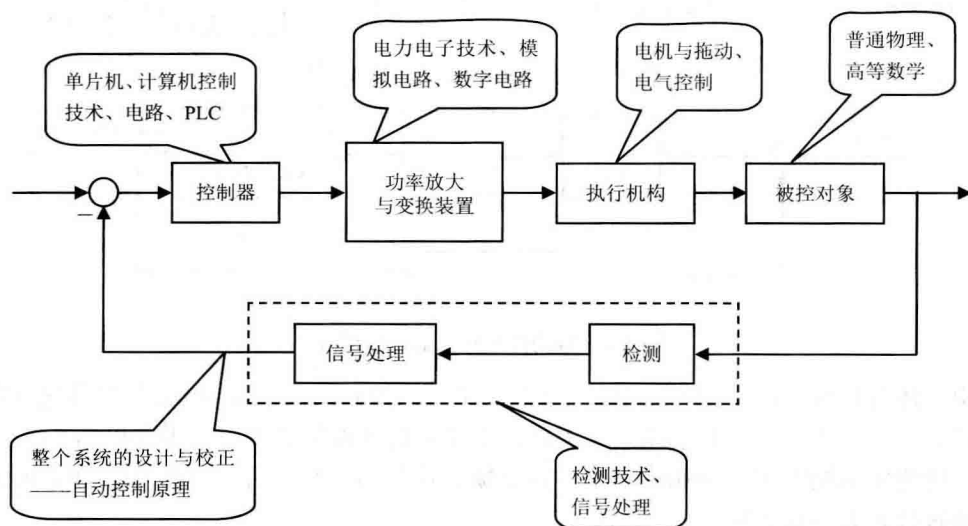


图 1-5 自动控制系统结构与本课程知识的联系

1.3 系统的基本控制方式

各种控制系统的控制形式多种多样，其中有哪些基本控制方式？具有什么特点？设计

者或使用者应如何选择这些控制方式?

1.3.1 开环控制及特点

前面分析的手控热水器,其输出量水温仅仅用于显示给使用者观察,对系统的控制没有直接影响,称这种控制方式为开环控制。开环控制系统的结构可以简化,如图1-6所示。

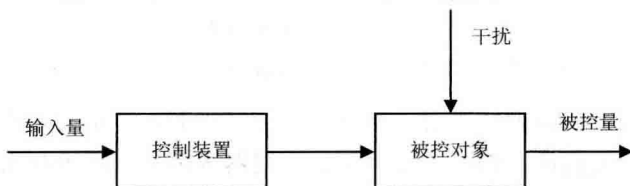


图 1-6 开环控制系统的结构

开环控制系统的优点是系统信号由给定值至被控量单向传递;控制系统结构简单;因不需要其他辅助设备,系统的经济性好,成本低。缺点是当被控对象或控制装置受到干扰或工作中系统的参数变化时,会直接影响被控量,因此,系统的控制精度难以保证,系统的抗干扰能力差。

开环控制系统适用于对系统精度要求不高或干扰影响较小的场合中,例如家庭中热水器对水温控制精度要求较低,所以早期的热水器是手动控制的。但是因为它不节能,随着对控制要求的提高,早已被自动控制的水热水器所取代。当然,因其具有结构简单、成本低的优点,生产生活中还有许多控制装置采用开环控制方式。例如,男士使用的电动剃须刀、家用电风扇等,均是开环控制装置。如图1-7所示为一个直流电动机控制的开环控制系统。

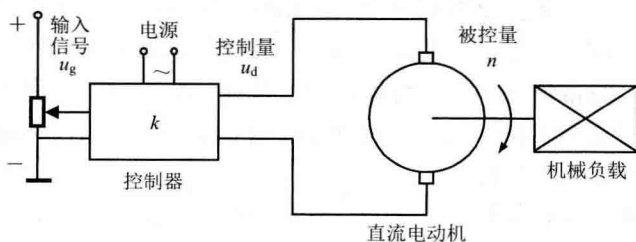


图 1-7 直流电动机控制的开环控制系统

1.3.2 闭环控制及特点

前面介绍的自动控制热水器,其水温通过热电偶测出后,被引到系统输入端,并与定量比较作差,构成了闭合回路,故称为闭环控制或反馈控制。闭环控制系统(反馈控制系统)的结构如图1-8所示。

仔细观察闭环控制系统结构,发现其输出信号沿反馈通道又回到系统的输入端,形成了信号流向的闭合回路。因此,闭环控制系统的结构要比开环系统复杂;因需要测量和反馈元件,成本要比开环系统高。其优点是:无论是由干扰造成的,还是系统结构参数变化引起的被控量偏差,只要被控量与期望值不一致,存在偏差,控制系统就自动纠正偏差,故系统的这种控制方式称为偏差调节。在偏差调节下,闭环控制系统可获得较高的控制精度。