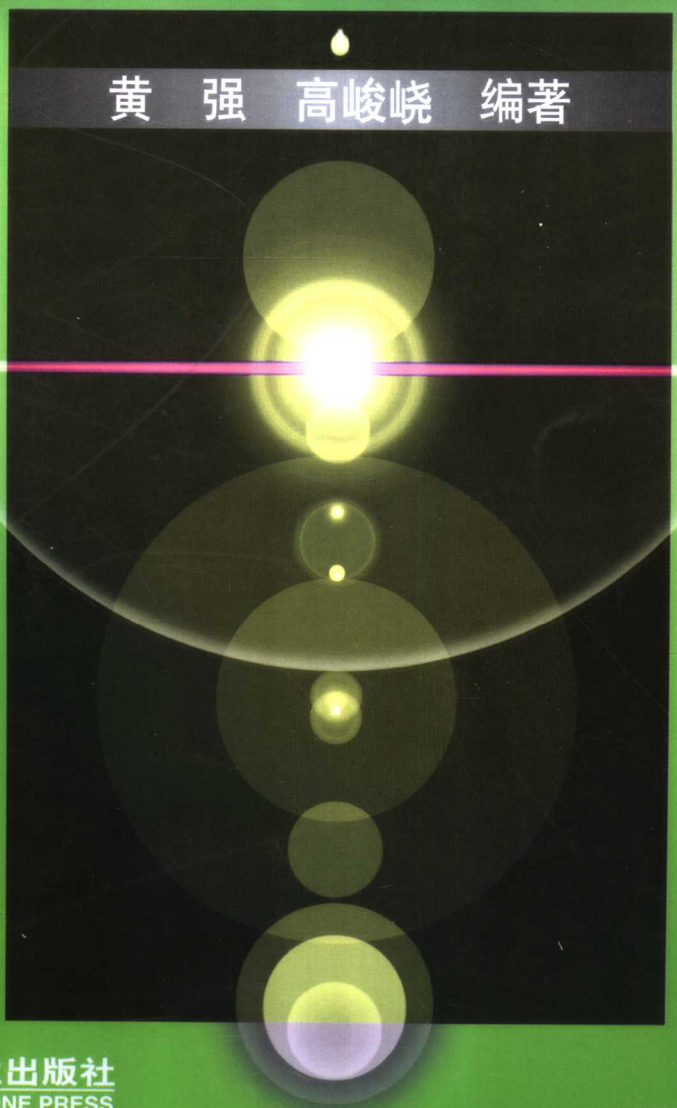
光机电一体化技术丛书

控制技术

黄 强 高峻峣 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

TH-39
77

光机电一体化技术丛书

控制技术

黄 强 高峻峣 编著

机械工业出版社

本书是为从事光机电一体化系统的应用、开发、研究的非控制专业技术人员及教师、学生等编写的快速掌握光机电控制技术的一本入门性书籍，旨在能使读者在短时间内了解和掌握控制理论的基本原理、分析设计方法和控制技术。本书从实用角度出发，剔除了一些艰深而用途不广的内容，便于读者快速总体掌握控制基本理论和基本技术，达到能对控制系统进行基本分析和设计的目的。

全书内容共分为 11 章：第 1 章为控制系统的原理及分析。第 2 章为控制系统博德图分析、设计法。第 3 章为多变量控制系统与计算机控制系统。第 4 章为速度控制系统设计。第 5 章为位置控制系统设计。第 6 章为电动机控制技术。第 7 章为 PLC 控制技术。第 8 章为单片机、DSP 与嵌入式系统控制技术。第 9 章为数控机床控制技术。第 10 章为机器人控制技术。第 11 章为控制系统仿真技术。

图书在版编目（CIP）数据

控制技术/黄强，高峻峣编著. —北京：机械工业出版社，2006.6
（光机电一体化技术丛书）
ISBN 7-111-19221-4

Ⅰ.控… Ⅱ.①黄…②高… Ⅲ.光电技术-机电一体化-自动控制系统 Ⅳ.TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2006）第 052699 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
策划编辑：舒 雯
责任编辑：张亚秋 版式设计：张世琴 责任校对：吴美英
封面设计：姚 毅 责任印制：洪汉军
北京京丰印刷厂印刷
2006 年 7 月第 1 版·第 1 次印刷
169mm×239mm·7.375 印张·282 千字
0 001—4 000 册
定价：22.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话（010）68326294
编辑热线电话（010）68351729
封面无防伪标均为盗版

“光机电一体化技术丛书”编委会

主　任：李科杰

委　员：（按姓氏笔画排列）

王军政　刘明杰　张文栋　范宁军

罗庆生　郑　链　高学山　黄　强

丛 书 序

随着科学技术的快速发展，光机电一体化技术应运而生。光机电一体化技术是机械技术、光电技术、电子技术以及计算机技术等群体技术的综合运用。光机电一体化技术涉及机械制造、交通、家电、仪器仪表、医疗、玩具娱乐等众多行业，在工业和经济发展中有着重要的地位。信息、生物、空间、海洋、新材料、新能源等高科技领域，国防装备的信息化、现代化及传统产业的改造都离不开光机电一体化技术的发展。

目前，光机电一体化技术发展迅速，其中各项技术正从原来的技术体系分离出来，具有较强的系统特色和相对独立的研究和应用领域。随着微电子技术和微系统技术的发展，光机电一体化技术的应用与发展进入了一个全新的阶段。机电产品和光机电产品成为家电、医疗器材、玩具等产业的主要产品；光机电一体化技术对于工业设备改造、提高制造装备精度和效率起到了重要的作用；光机电一体化技术在航空航天、国防、智能机器人研制等凸现国家综合实力的科研领域中更是地位突出。

相比而言，目前图书市场上光机电一体化技术方面的图书还是比较少的。在机械工业出版社的组织下，由北京理工大学和中北大学（原华北工学院）的老师合作编写了这套“光机电一体化技术”丛书，较全面地介绍了国内外光机电一体化技术的发展和应用，以期能够帮助相关工程技术人员学习和更新光机电一体化技术知识，促进光机电一体化技术的发展。

“光机电一体化技术丛书”以光机电一体化领域各项技术的通用原理、具体应用和设计指导为主要内容，分《光机电一体化系统设计》、《光机电一体化系统典型实例》、《控制技术》、《感测技术》、《光机电一体化系统常用机构》、《驱动技术》、《信息识别技术》、《光机电一体化系统仿真与虚拟试验技术》和《微光机电系统（MOEMS）》9个分册。

各分册所介绍的技术内容以先进、通用为标准精心筛选，原理介绍简练准确，具体应用注重结合工程实践经验，使用了大量的图、表和实例，注重加强光机电一体化系统的整体设计和技术协调的理念，各分册均有相应章节深入介绍本技术在系统中的应用和设计实例，以便读者更好地学习、实践和应用，帮助从事单项技术的研发人员快速适应光机电一体化系统的研究开发工作。

丛书力求文字简练、深入浅出、内容精炼、重点突出，实用性较强，目的是

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com

为光机电一体化工程实践提供指导。丛书以光机电一体化领域从事应用和科研开发的中、高级工程技术人员为主要读者对象，也可供大专院校相关专业的学生参考。

由于作者水平有限，不足之处在所难免，欢迎读者批评指正。

“光机电一体化技术丛书”编委会

前　言

亲爱的朋友，你想要掌握自动控制技术吗？在高技术、网络化的今天，很多场合会用到光机电一体化控制技术。无论你原来的专业是机械、电子、计算机、汽车、光学等等，今天你可能都会遇到自动控制的问题。可是，当你翻开现有控制理论的书籍，一堆堆的公式、数学计算可能使你晕头转向、如坠雾中，除非花大力气学上较长时间，否则不可能十分清楚控制技术的基本内容。即使如此，学完理论后，人们也常常感到没有总体感，在实际应用时不知如何下手。然而，对于专业从事实际控制工作的人来讲，自动控制的思想并不复杂，实际工作中理论也不需要很深，长篇大论的数学理论对实际工作也没有很大的必要。为此，本书从实际出发，面向广大非控制理论专业的技术人员，在没有指导的情况下，使读者在较短时间里能掌握控制的基本思想，能在实践中掌握和使用一般的控制理论来完成各自任务。这就是我们编写本书的初衷。

本书力求把最简单、实用的概念和理论介绍给大家，以理论简介、例子说明为主要形式，以基本概念、基本原理、基本用法为主，剔除了那些深奥难懂的数学推导和过深而用途不大的内容。希望读者能在较短的时间内掌握最实用的自动控制技术的主要内容。为了让读者把握控制技术的基本理论和总结思路，本书保留了必要的数学理论介绍。

要想深入学习自动控制理论，书后列举了一些经典的自动控制理论书籍，有兴趣的读者可以再深入学习。

全书内容共分为 11 章。前面 3 章从实用角度介绍了控制理论的基本原理和控制系统的分析、设计方法，后面 7 章介绍了典型的速度控制、位置控制、电动机控制、PLC 控制、单片机、数控机床、机器人等控制系统，最后 1 章简要介绍了控制系统仿真的知识。书中注重说明总体思路，便于读者掌握。

第 1 章为控制系统组成及分析，主要介绍自动控制的概念、组成、工作原理、控制系统的动态性能、稳态性能、数学微分方程、传递函数、系统的动态响应及分析、稳定性判据。

第 2 章为控制系统博德图分析、设计法，主要介绍博德图的绘制，由博德图分析系统稳定性、动态性能，控制器的博德图设计方法。

第 3 章为多变量控制系统与计算机控制系统，主要介绍多变量系统的状态方程、控制器设计，计算机控制系统组成与分析，数字 PID 控制器分析及改进 PID

算法。

第4章为速度控制系统设计，主要介绍单速度环控制系统、双闭环控制系统的分析等速度控制系统。

第5章为位置控制系统设计，主要介绍几种位置控制系统的组成与控制原理。

第6章为电动机控制技术，主要介绍直流电动机控制、交流电动机的控制、步进电动机的控制等电动机控制技术。

第7章为PLC控制技术，主要介绍PLC的组成与工作原理、PLC控制系统的组成。

第8章为单片机、DSP与嵌入式控制技术，主要介绍单片机组成与工作原理、单片机控制技术的应用、嵌入式系统的组成与原理。

第9章为数控机床控制技术，主要介绍数控机床组成与工作原理、插补技术、典型数控机床的例子。

第10章为机器人控制技术，主要介绍机器人组成与工作原理、机器人的运动学、轨迹规划等。

第11章为控制系统仿真简介，主要介绍MATLAB中SIMULINK在控制系统中的应用。

编写过程中，参阅了大量相关图书、资料，其中部分列在参考文献中，但还有很多未能一一列出，在此对所有有关资料的作者表示衷心感谢！本书得到了多位专家关怀和指导，哈尔滨工业大学王炎教授对本书提出了宝贵的建议并进行了审核。在此对所有指导、帮助过本书编写与出版的同志表示衷心感谢！

由于编者水平所限，书中可能有很多错误和缺点，对一些问题的提法和论述过程也有很多不妥与不完善之处，殷切希望读者批评指正。

编　者

目　录

丛书序

前言

第 1 章　自动控制系统的原理及分析 …… 1

1.1　自动控制的概念 …… 1

1.2　自动控制系统的分类 …… 2

1.3　自动控制系统的基本要求 …… 3

1.4　自动控制的产生与发展 …… 6

1.5　建立系统的微分方程 …… 7

1.6　拉普拉斯变换法 …… 9

1.7　控制系统的传递函数结构图 …… 12

1.8　系统的动态响应及分析 …… 14

1.9　一、二阶系统的动态性能 …… 16

1.10　稳定性判据 …… 21

第 2 章　控制系统博德图分析、设计法 …… 25

2.1　基本概念 …… 25

2.2　对数频率特性曲线——博德图 …… 26

2.3　博德图的绘制 …… 29

2.4　由博德图分析系统稳定性 …… 30

2.5　由博德图分析系统动态性能 …… 31

2.6　控制器的博德图设计方法 …… 32

2.7　超前控制器的设计 …… 33

2.8　滞后控制器的设计 …… 36

2.9　滞后-超前控制器设计 …… 38

2.10　PID 控制器的设计 …… 41

第 3 章　多变量控制系统与计算机控制系统 …… 44

3.1　状态方程表达式的建立 …… 44

3.2　多变量系统控制器的设计 …… 49

3.3　计算机控制系统 …… 52

3.4　计算机控制系统的 PID 控制方法 …… 61

3.5　数字 PID 控制器参数选择 …… 63

3.6　数字 PID 算法的不足及改进 PID 算法 …… 64

第 4 章　速度控制系统设计 …… 69

4.1　速度控制系统组成 …… 69

4.2　单速度环控制系统 …… 70

4.3　速度-电流双闭环控制系统 …… 76

4.4　弱磁调速系统 …… 79

第 5 章　位置控制系统设计 …… 81

5.1　位置控制系统组成 …… 81

5.2　典型位置控制系统

分析 …… 82
第 6 章　电动机控制技术 …… 101
6.1　直流电动机的 PWM 控制 …… 101
6.2　步进电动机的控制 …… 109
6.3　交流电动机的控制 …… 115
第 7 章　可编程序控制器(PLC)控制技术 …… 121
7.1　PLC 概述 …… 121
7.2　PLC 的结构与工作原理 …… 122
7.3　PLC 控制系统的设计 …… 127
7.4　PLC 的应用 …… 128
第 8 章　单片机、DSP 与嵌入式系统控制技术 …… 141
8.1　单片机系统 …… 141
8.2　单片机系统开发步骤 …… 152
8.3　一个典型单片机系统简介 …… 153
8.4　单片机在控制系统里的应用 …… 156
8.5　DSP 控制技术 …… 164
8.6　嵌入式系统 …… 173
第 9 章　数控机床控制技术 …… 177
9.1　数控机床的定义、组成、分类 …… 177
9.2　插补算法 …… 181
9.3　数控系统实例 …… 183
第 10 章　机器人控制技术 …… 189
10.1　概述 …… 189
10.2　机器人控制系统组成 …… 191
10.3　机器人的运动学建模 …… 195
10.4　机器人的控制 …… 204
第 11 章　控制系统仿真技术 …… 209
11.1　控制系统仿真技术及 MATLAB 概述 …… 209
11.2　SIMULINK 仿真 …… 210
参考文献 …… 221

第 1 章　自动控制系统的原理及分析

1.1　自动控制的概念

“控制”的意义是使一个对象按你的意志去动作，比如控制房间温度，就是要想使房间温度达到你想要的温度，方法可以是使用电暖器来调节房间温度。“手动控制”就是你通过打开、关闭电暖器使房间温度达到要求。如果房间温度低了，就打开电暖器，如果房间温度高了，就关闭电暖器，这就是我们在生活中经常遇到的情况。但是，你是否觉得这样很麻烦，需要不停地去开、关电暖器。于是你就自然会想，能否用一个东西自动开关电暖器，使房间温度自动达到你想要的温度，这就是“自动控制”的基本思想。按以上思想可以组成下面一个房间温度自动控制系统，如图 1-1 所示。

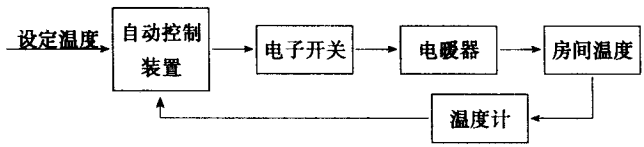


图 1-1　房间温度自动控制原理图

房间温度控制系统工作原理是这样的：自动控制装置通过一个温度计，测量当前房间的实际温度，与设定的温度值进行比较。如果房间温度低于设定温度，就通过电子开关打开电暖器；如果房间温度高于设定温度，就通过电子开关关闭电暖器。这样就能实现房间温度的自动控制，你也就不用经常去亲自开关电暖器了。

“自动控制”就是利用控制装置自动地操纵机器设备或生产过程，使其具有希望的状态或功能。控制器和被控对象一起构成一个“自动控制系统”，“被控对象”是要求实现自动控制的机器、设备或生产过程，“控制器”是对被控对象起控制作用的设备总体。在房间温度控制中，被控对象是房间温度，控制器是温度控制装置，自动控制系统由房间温度、控制装置一起构成。房间温度是系统“输出量”，是要求实现自动控制的物理量，位于系统的输出端。设定温度是系统“输入量”，作为控制目标的物理量，位于系统的输入端。在控制、测量过程中，可能有各种干扰因素，被称为“扰动”。

房间温度自动控制系统中，有一个关键元件：温度计，它是测量元件，用来

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com

测量房间温度的。它在自动控制系统中称为反馈元件，就是把房间温度测量值返回到控制器，用给定值和测量值的差来控制系统的温度。设：偏差 = 给定值 - 测量值，当偏差为正时，说明给定值比测量值高，还要继续加热；当偏差为负时，说明给定值比测量值低，要关闭电暖器。由于反馈值是被给定值减，符号为负，所以被称为负反馈。整个自动控制系统形成了一个封闭的环状结构，叫做控制闭环，这种控制方式也叫闭环控制，如图 1-2 所示。

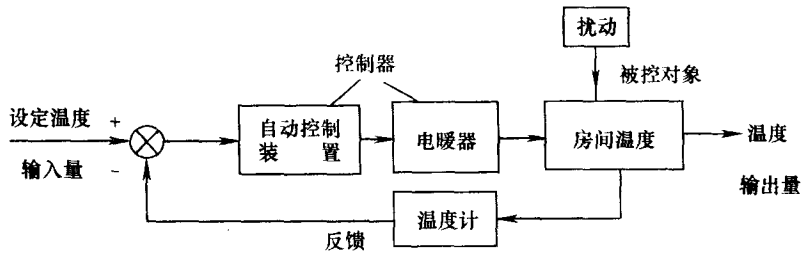


图 1-2　房间温度自动控制闭环

闭环控制的优点是可以根据输入量与输出量的偏差自动调节系统，使输出量与输入量相等，达到控制效果。闭环控制精度好，抗干扰能力强。

如果没有反馈回路，只有前向通路，如图 1-3 所示，则叫开环控制系统。给定值经过控制器控制房间温度，但对温度是否达到要求并不知道，无法自动调节，只能根据经验给定，这种开环控制方式精度差，抗干扰能力差。但结构简单，成本低廉，可用于控制精度要求不高的场合。

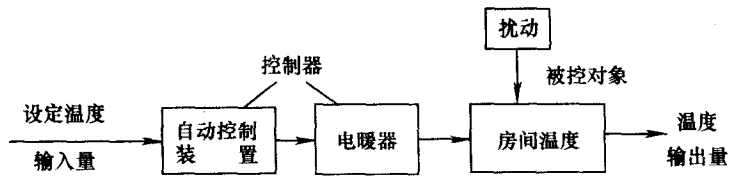


图 1-3　房间温度开环控制

1.2　自动控制系统的分类

自动控制系统分类可以有多种方法。

按能源分，可分为机械、电气、液压、气动控制系统。

按输入信号的特性分，可分为恒值系统、随动系统、程序控制系统。恒值系统即输入信号恒定值，要求系统能克服扰动，使输出量达到输入值，例如恒定温

度控制。随动系统即输入量是一个变化的值，要求系统能按一定关系和精度，使输出量跟踪输入信号，例如高射炮控制。程序控制系统是输入量按已知函数变化，要求系统输出量按预定规律变化或运动，例如化学工业中的化学反应过程控制。

按系统性质分，可分为线性系统和非线性系统。数学模型满足叠加原理的系统，叫线性系统；否则叫非线性系统。连续与离散系统：连续系统是指输入量、输出量都是时间连续函数的系统；若系统中的变量有离散时间函数，称为离散系统。

1.3 自动控制系统的基本要求

作为一个能正常工作的自动控制系统，要满足以下基本要求。

稳定性：系统能稳定正常工作，不出现发散和振荡现象。

动态性能：系统在跟踪输入信号或消除干扰时，要有快速性和平稳性，这些性能可以用调节时间、超调量等指标来评价。

稳态性能：系统进入稳态后，要求稳态误差小，跟踪精度高。

脱离具体的各个具体物理系统，我们可以抽象出一般自动控制系统的原理，如图 1-4 所示。

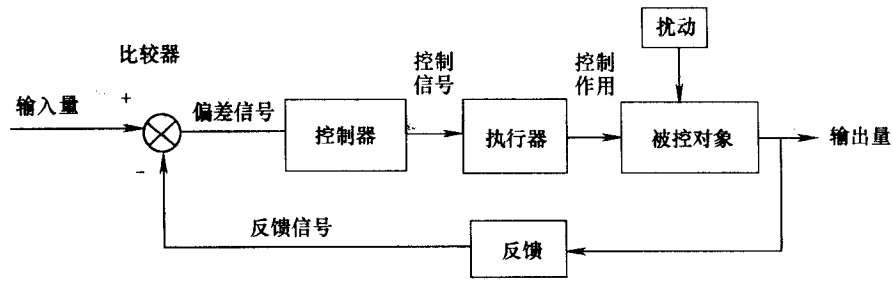


图 1-4 自动控制系统

图中比较器是比较输入量和反馈量大小的，输入量减去反馈量得到偏差信号。控制器的输出为控制弱电信号，需要经执行器放大，具有一定功率，才能控制被控对象，达到控制目的。当系统有干扰时，闭环控制可自动消除干扰引起的偏差，使系统达到控制的要求。

例 1-1 水位控制系统，如图 1-5 所示。

水箱有进水阀门和出水阀门，进水阀门由电动机控制进水速度，水箱水面上有浮子，浮子带动连杆使电触头在电位器上滑动。当水面高度高于希望水面高度

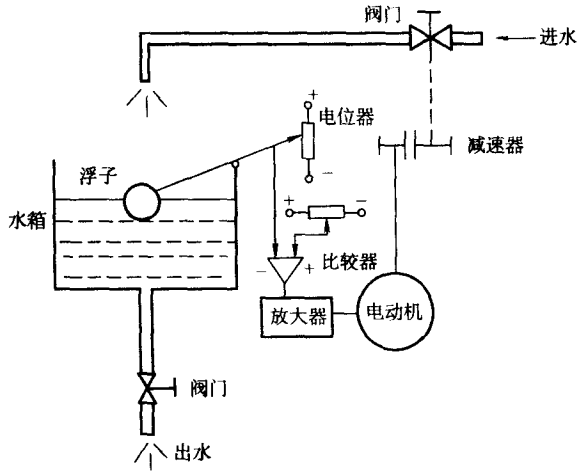


图 1-5　水位控制系统

时，电位器输出负电压，使电动机反转，阀门开口减小，减少进水速度；当水面高度低于希望水面高度时，电位器输出正电压，使电动机正转，阀门开口增大，增加进水速度。这样，无论出水速度如何，总能使水面高度保持在希望高度，形成一个水位自动控制系统。画成自动控制系统框图，如图 1-6 所示。

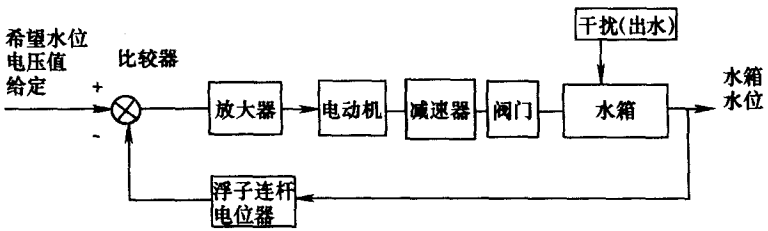


图 1-6　水位自动控制原理图

例 1-2　电动机转速控制系统，如图 1-7 所示。

电动机的转速可由测速发电机测量，速度给定电压值减去测速机测量电压值，得到的差值作为偏差信号给到电动机驱动器，电动机驱动器把偏差信号放大成功率控制作用，控制电动机转动。当电动机转速高于速度给定电压时，偏差为负值，电动机驱动

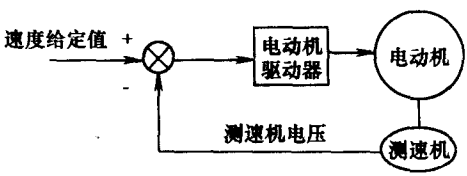


图 1-7　速度自动控制原理图

器使电动机减速；当电动机转速低于速度给定电压时，偏差为正值，电动机驱动器使电动机加速。通过这样的自动调节，使电动机稳定在给定速度运转。

例 1-3 高射炮高低角度随动系统，如图 1-8 所示。

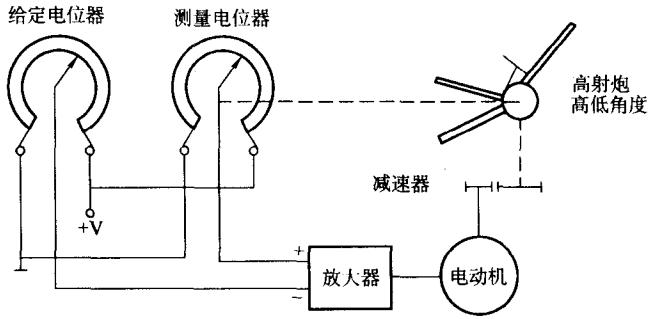


图 1-8 高射炮高低角度随动系统示意图

该系统为一个高射炮高低角的随动控制系统。当控制人员通过给定电位器给定高射炮高低角时，测量电位器就会把当前高射炮高低角转化为电压值，两个电压值进行比较，偏差信号进入放大器，驱动电动机转动，经过减速器驱动高射炮转动，使高射炮的高低角与给定角度相同。在作战射击中，给定值会不停的变化，高射炮会立即跟踪给定值而不停的调节，称为随动，画出控制原理，如图 1-9 所示。

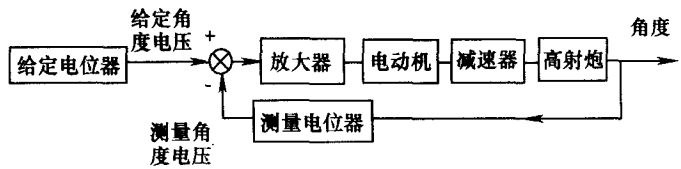


图 1-9 高射炮高低角度随动系统控制原理图

例 1-4 自动热水器系统，如图 1-10 所示。

其工作原理是这样的：首先是浮子可以检测水面高度，当有水流出后，水面降低，浮子下降，打开进水阀，冷水就进入水箱。随着水面升高，浮子上升，减少进水量，当达到预定高度后，进水阀截止，停止进水，实现水面高度自动控制。加热系统由热电偶感知水的温度，由测量电路经过处理成为电压信号，温度给定有一个电位器给出电压信号，两个信号的差作为控制量，经过放大器放大后，驱动加热器工作；当温度低于给定电压时，加热器工作；当温度达到给定电压时，加热器停止工作，保持水温在设定的温度值，控制原理如图 1-11 所示。

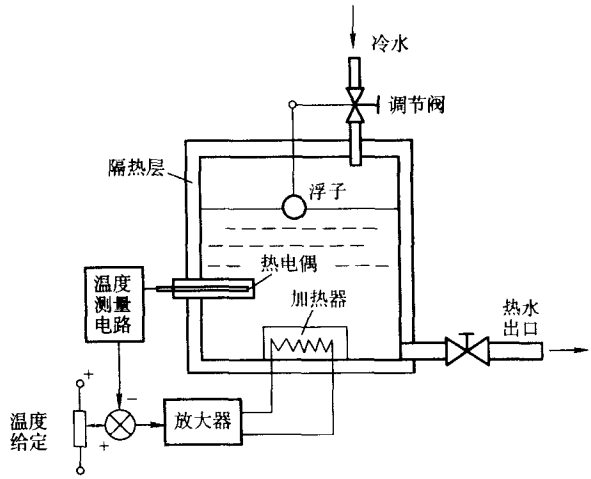


图 1-10　自动热水器示意图

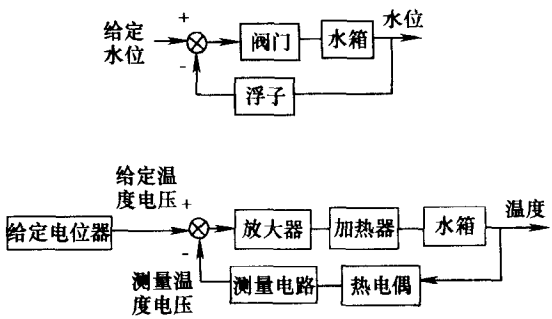


图 1-11　自动热水器控制原理图

1.4　自动控制的产生与发展

自动控制理论产生于“二战”当中，美国科学家维纳在研究火炮跟踪系统时推导出了控制理论的数学模型，提出了反馈的概念，建立了自动控制理论。自动控制理论随即在航天、航空、工业、军事等各方面得到了广泛应用，取得了巨大成果。自动控制理论是火箭、导弹、飞机、卫星、数控机床等必不可少的关键因素，没有自动控制理论，火箭上不了天、导弹打不到目标、卫星完不成任务。

随着自动控制理论研究的不断深入和应用的日益广泛，人们发现当时的控制理论只能适合单变量系统，称为古典控制理论。后来人们提出了现代控制理论，

研究多变量系统。为达到最好的控制效果，提出最优控制理论。为解决系统参数变化和干扰，提出了自适应理论，可以根据控制过程的变化自动调节控制器参数，更好地进行控制。以后又提出模糊控制理论、智能控制理论、大系统理论、神经网络控制理论、遗传算法控制理论、H^{∞}控制理论等很多控制方法，可以说是百花齐放、百家争鸣。在数字化、信息化、网络化的今天，自动控制理论更是飞速发展，作用巨大。了解和掌握自动控制理论的基本概念和基本技术，是每一个工程技术人员的必修课，让我们共同走进自动控制的神奇世界吧。

1.5 建立系统的微分方程

任何一门工程科学，只有数学化后才能成为真正的学科。研究一个控制系统，首先，也要把它用数学工具进行描述，建立系统的数学模型，这样才能对系统进行更加深入、细致、定量的研究，才能抓住其本质特征。

对一个控制系统，可以用微分方程的方法进行描述。微分方程是一种通用的对物理系统进行数学描述的方法，广泛应用于机械、电子、工程、航空、力学等各个领域，是揭示物理系统数学本质的有力工具之一。

对控制系统建立微分方程的一般步骤如下：

(1) 确定系统内各元件的输入量和输出量。

(2) 对系统的每一个元件列写出其输入量和输出量的有关物理的、化学的、力学的、电学的方程。

(3) 从系统的输入端开始，按信号的传递顺序，在所有元件的方程中消去中间变量，最后得到描述系统输入、输出关系的微分方程。

下面我们用几个例子来说明微分方程的建立过程。

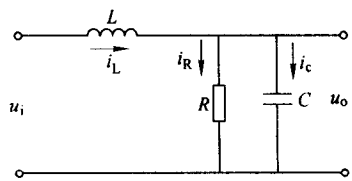


图 1-12 *RLC* 电路

例 1-5 一个 *RLC* 电路，如图 1-12 所示，输入为$u_i(t)$,输出为 $u_o(t)$，写出系统的微分方程。

解 (1) 根据电路理论，列写微分方程。

电感：输入$u_i(t)$,输出 $u_o(t)$，微分方程：

$$u_i(t) = L\frac{di_L(t)}{dt} + u_o(t) \tag{1-1}$$

电阻：输入$u_o(t)$,输出 $i_R(t)$，微分方程：

$$u_o(t) = i_R(t)R \tag{1-2}$$

电容：输入$u_o(t)$,输出 $i_C(t)$，微分方程：

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com