

■ 王艳秋 / 主编

自动控制原理

“十三五”普通高等教育应用型本科院校重点建设系列教材

自动控制原理

主 编 王艳秋

副主编 金亚玲 郭 锐 罗 丹

内 容 简 介

本书以经典控制理论为主,全面阐述了经典控制理论的基本概念、基本原理及其各种分析方法。本书共8章,主要内容有线性系统的数学模型、时域法、根轨迹法、频域法、控制系统的校正、采样控制系统分析法和非线性控制系统分析法。本书配备了大量习题,有客观题型,如选择题、填空题、判断题等,有主观题型,如简答题和计算题,并对计算题进行了精选。通过各种类型的习题练习,有助于学生对课堂所授理论知识进行消化、理解。

本书可作为高等学校自动化、电气工程及其自动化、通信、电子信息、检测技术与自动化装置等电类专业的教材,也可作为相关专业工程技术人员的参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/王艳秋主编. —北京:北京理工大学出版社,2018.12(2019.1重印)
ISBN 978-7-5682-6563-8

I. ①自… II. ①王… 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(2018)第296518号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址/<http://www.bitpress.com.cn>

经 销/全国各地新华书店

印 刷/

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/19

字 数/448千字

版 次/2018年12月第1版 2019年1月第2次印刷

定 价/49.80元

责任编辑/陈莉华

文案编辑/陈莉华

责任校对/周瑞红

责任印制/李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前 言

自动控制技术起源于 20 世纪中叶，有 60 多年的历史。自动控制技术以自动控制理论为基础，以计算机为手段，解决了一系列高科技难题，为人类的文明和进步做出了重要贡献，诸如宇宙航行、导弹制导与防御、万米深海探测和火星表面探测；在工业生产过程中，诸如对压力、温度、湿度、流量、频率及原料、燃料成分比例控制等都离不开自动控制技术。

随着自动控制技术需求量的不断增长，自动控制理论本身也取得了显著进步，线性控制系统日趋成熟；非线性控制系统的研究取得了突破性进展；线性离散控制系统的描述和分析能力得到加强；而现代控制理论无论是在数学工具、理论基础，还是在研究方法上都不是经典控制理论的延伸和推广，而是认识上的一次飞跃，如最优控制、最佳滤波、系统识别、自适应控制、预测控制等。

由于自动控制技术在各个行业广泛渗透，在科学技术现代化的发展进程中，发挥着越来越重要的作用，自动控制理论已成为高等学校许多学科共同的专业基础必修课，且地位越来越重要。

根据编者多年的教学经历发现，自动控制教材虽然较多，但在内容的编排顺序和例题的选材上或多或少存在不足，缺少新理论、新知识、新的控制手段的补充。鉴于此，决定编写《自动控制原理》一书，力求奉献给读者一本比较完美的自动控制理论教科书。

本书的主要特点如下：

(1) 始终遵循高等教育人才培养目标及培养规格的要求，适应应用型人才培养模式，理实一体，学用结合，追求实效。

(2) 贯彻理论部分“必需、够用”为度，精选必需的理论知识。

(3) 每一章前配有“学习导航”的内容，使学生们明确本章的学习任务和知识脉络。

(4) 精选了每章习题，题型多样化，有客观题型，如选择题、填空题、判断题等，有主观题型，如简答题和计算题，并对计算题进行了精选。通过各种类型的习题练习，有助于学生对课堂所授理论知识进行消化、理解。

(5) 本书还配有辅助教材：《自动控制理论习题详解》《自动控制理论题库及详解》(王艳秋教授主编、清华大学出版社与北京交通大学出版社联合出版)，读者可以从辅助教

材中得到全部习题的详尽解答。

在经典控制理论中，主要介绍了线性控制系统的数学模型、时域法、根轨迹法、频域法及自动控制系统的校正等，而且还介绍了线性离散控制系统分析法及非线性控制系统分析法。

本书由王艳秋、金亚玲、郭锐、罗丹编写。全书共分为8章，第1、2章由郭锐编写，第3、4章由金亚玲编写，第5章由罗丹编写，前言及第6~8章由王艳秋编写。全书由王艳秋教授统稿。

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

本书在编写过程中得到了北京理工大学出版社教材出版中心的大力协助，在此一并表示感谢。

由于编者经验不足，业务水平有限，书中难免有不当或错误之处，恳请有关专家和广大读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 开环控制系统和闭环控制系统	3
1.2.1 开环控制系统	3
1.2.2 闭环控制系统	4
1.3 闭环控制系统的组成	5
1.4 自动控制系统的类型	6
1.4.1 线性控制系统和非线性控制系统	6
1.4.2 连续控制系统和离散控制系统	7
1.4.3 恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统	8
1.5 自动控制系统举例	9
第 2 章 自动控制系统的数学模型	18
2.1 系统微分方程的建立	19
2.2 非线性微分方程的线性化	22
2.3 传递函数	23
2.3.1 传递函数的定义	23
2.3.2 传递函数的性质	24
2.3.3 典型环节及其传递函数	25
2.4 动态结构图	31
2.4.1 动态结构图的组成	31
2.4.2 动态结构图的绘制	31
2.4.3 动态结构图的等效变换	35
2.4.4 闭环系统的传递函数	40
2.4.5 动态结构图等效变换举例	41
2.5 信号流图	44
2.5.1 信号流图的组成	44
2.5.2 信号流图的绘制	45
2.5.3 梅森公式	46

第3章 时域法	55
3.1 典型输入函数和时域性能指标	56
3.1.1 系统的稳定性	56
3.1.2 自动控制系统的典型输入信号	56
3.1.3 时域性能指标	59
3.2 一阶系统的时域分析	60
3.2.1 一阶系统的数学模型	61
3.2.2 一阶系统的单位阶跃响应	61
3.3 二阶系统的时域分析	63
3.3.1 二阶系统的数学模型	63
3.3.2 二阶系统的阶跃响应	64
3.3.3 二阶欠阻尼系统的动态性能指标	67
3.3.4 二阶系统特征参数与暂态性能指标之间的关系	69
3.3.5 二阶系统工程最佳参数	70
3.3.6 二阶系统计算举例	71
3.4 高阶系统的时域分析	74
3.5 控制系统的稳定性分析	76
3.5.1 稳定性的基本概念	76
3.5.2 稳定判据	76
3.6 稳态误差	82
3.6.1 稳态误差的定义	82
3.6.2 自动控制系统的类型	83
3.6.3 给定输入作用下稳态误差系数和稳态误差分析	84
3.6.4 扰动输入作用下的稳态误差分析	89
3.6.5 减小稳态误差的方法	90
第4章 根轨迹法	98
4.1 根轨迹的基本概念	99
4.1.1 根轨迹的概念	99
4.1.2 根轨迹方程	101
4.2 绘制根轨迹的基本法则	103
4.2.1 根轨迹的基本法则	103
4.2.2 根轨迹的绘制与分析	111
4.3 参数根轨迹的绘制	117
4.4 零度根轨迹的绘制	118
4.5 利用根轨迹分析系统性能	122
第5章 频域法	128
5.1 频率特性	129

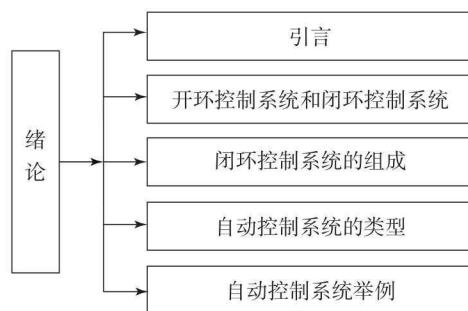
5.2 频率特性的表示方法	130
5.2.1 幅相频率特性的表示方法	130
5.2.2 对数幅相频率特性的表示方法	131
5.3 典型环节的频率特性	132
5.4 开环频率特性的绘制	145
5.4.1 开环幅相频率特性的绘制	145
5.4.2 开环对数幅相频率特性的绘制	149
5.5 用频率法分析控制系统的稳定性	156
5.5.1 奈奎斯特稳定判据	156
5.5.2 系统的稳定裕度	164
5.6 闭环系统频率特性	165
5.6.1 闭环频率特性曲线的绘制	165
5.6.2 闭环系统等 M 圆、等 N 圆及尼科尔斯图	165
5.7 系统暂态特性和闭环频率特性的关系	168
5.8 开环频率特性与系统阶跃响应的关系	170
第 6 章 自动控制系统的校正	177
6.1 引言	177
6.1.1 控制系统的性能指标与校正的基本概念	177
6.1.2 校正方式	179
6.1.3 基本校正规律	180
6.1.4 校正方法	182
6.1.5 用频率法校正的特点	182
6.2 校正装置	183
6.2.1 超前校正装置	184
6.2.2 滞后校正装置	185
6.2.3 滞后—超前校正装置	187
6.2.4 期望的对数频率特性	190
6.3 串联校正	191
6.3.1 串联超前校正	191
6.3.2 串联滞后校正	193
6.3.3 串联滞后—超前校正	196
6.4 反馈校正	199
6.4.1 反馈校正的原理	199
6.4.2 反馈校正的作用	199
6.4.3 反馈校正装置的设计	202
6.5 复合校正	205
6.5.1 反馈与按输入前馈的复合控制	205
6.5.2 反馈与按扰动前馈的复合控制	206

第 7 章 采样控制系统分析	212
7.1 线性离散控制系统的基本概念	212
7.1.1 采样控制系统	212
7.1.2 数字控制系统	213
7.2 采样过程与采样定理	214
7.2.1 采样过程	214
7.2.2 采样信号的频谱	215
7.2.3 采样定理	216
7.2.4 信号的复现	217
7.3 z 变换	219
7.3.1 z 变换的定义	219
7.3.2 z 变换的求法	220
7.3.3 z 变换的性质	223
7.4 z 反变换	226
7.5 差分方程	227
7.5.1 差分方程概述	227
7.5.2 差分方程的解法	227
7.6 脉冲传递函数	228
7.6.1 脉冲传递函数的定义	228
7.6.2 开环脉冲传递函数	229
7.6.3 闭环脉冲传递函数	231
7.6.4 应用 z 变换法分析系统的条件	234
7.7 采样系统的性能分析	234
7.7.1 采样系统的稳定性	234
7.7.2 采样系统闭环极点与动态响应的关系	238
7.7.3 采样系统的稳态误差	240
7.8 最少拍采样控制系统的设计	242
第 8 章 非线性控制系统分析	253
8.1 概述	253
8.1.1 非线性系统的特点	253
8.1.2 非线性系统的研究方法	254
8.1.3 典型非线性环节及其特性	255
8.2 描述函数法	257
8.2.1 描述函数的基本概念	257
8.2.2 典型非线性特性的描述函数	259
8.2.3 非线性系统的简化	263
8.3 用描述函数法分析非线性系统	265

8.3.1 稳定性判据	265
8.3.2 自激振荡	267
8.3.3 用描述函数法分析非线性系统	267
8.4 相平面法	272
8.4.1 相平面图	272
8.4.2 相轨迹和相平面图的性质	273
8.4.3 奇点的类型	275
8.4.4 相平面图中的极限环	276
8.4.5 由相平面图求时间响应	277
8.5 相轨迹的绘制方法	278
8.5.1 解析法	278
8.5.2 图解法	279
8.6 非线性系统的相平面图分析	281
8.6.1 死区非线性系统	281
8.6.2 继电器非线性特性	283
8.7 非线性系统的校正	284
8.7.1 对线性部分进行校正	284
8.7.2 改变非线性特性	285
参考文献	290

第 1 章 绪 论

学习导航



1.1 引 言

过去的 100 年是科学与技术发展的一个鼎盛时期，人类的许多期望和梦想被科学家由神话变成现实。其中，自动控制技术所取得的成就更是令世人瞩目。自动控制技术以控制理论为基础，以计算机为手段解决了一系列高科技难题，诸如宇宙航行（人造卫星能按预定的轨道运行并返回地面、宇宙飞船能准确地在月球着陆并重返地面）、机器人行走、导弹制导与防御、万米深海探测和火星表面探测等。自动控制技术在科学技术现代化的发展与创新过程中，正在发挥着越来越重要的作用。从冶金、电力、机械、化工、航天航空、核反应到经济管理、生物、医学、环境等，自动控制技术已经渗透到许多学科和社会生活领域。

自动控制技术的广泛应用，不但可以提高生产效率，减轻劳动强度，改善工作条件，节约能源等，而且在人类征服自然、探索新能源、发展空间技术和改善人民物质生活等方面都起着极为重要的作用。

自动控制理论是自动控制技术的基础，是一门理论性较强的学科，按自动控制理论发展的不同阶段，自动控制理论一般可分为经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论三大部分。

经典控制理论起源于 20 世纪中叶，经过半个多世纪的发展，经典控制理论日臻成熟，该理论主要是以传递函数为基础，研究单输入单输出（SISO）系统的分析和设计问题。经典控制理论发展较早，在工程上，也比较成功地解决了诸如伺服系统自动控制的实践问题。

现代控制理论起源于 20 世纪 60 年代,是在经典控制理论的基础上,随着科学技术发展和工程实践的需要而迅速发展起来的。它无论在数学工具、理论基础,还是在研究方法上都不是经典控制理论的简单延伸和推广,而是认识上的一次飞跃。现代控制理论主要以状态空间法为基础,研究多输入、多输出、变参数、非线性、高精度、高效能等控制系统的分析和设计问题。最优控制、最佳滤波、系统识别、自适应控制、预测控制等理论都是这一领域研究的主要课题。特别是近年来由于计算机技术和现代应用数学研究的迅速发展,使现代控制理论又在研究庞大的系统工程的大系统理论和模仿人类智能活动的智能控制等方面有了重大发展。目前,现代控制理论正随着现代科学技术的发展日新月异地向前发展着。

智能控制是一门新兴的学科领域,目前虽未建立起一套完整的智能控制的理论体系,但是关于智能控制理论的研究日新月异,正在对人类社会产生深远的影响。

智能控制是控制理论发展的高级阶段。智能控制理论主要包括:模糊逻辑控制、神经网络控制及专家控制等。它主要用来解决那些用传统方法难以解决的复杂系统的控制问题。诸如智能机器人系统、计算机集成制造系统(CIMS)、复杂的工业过程控制系统、航天航空控制系统、社会经济管理系统、交通运输系统、环保及能源系统等。具体地说,智能控制的研究对象具有以下一些特点。

1. 不确定性的模型

传统的控制是基于模型的控制。对于传统控制,通常认为模型已知或者经过辨识可以得到,而智能控制的对象通常存在严重的不确定性。这里所说的模型不确定性包含两层意思:一是模型未知或知之甚少;二是模型的结构和参数可能在很大范围内变化。无论哪种情况,传统方法都难以对它们进行控制,而这些正是智能控制所要研究解决的问题。

2. 高度的非线性

在传统的控制理论中,线性系统理论比较成熟。对于具有高度非线性的控制对象,虽然也有一些非线性控制方法,但总的来说,非线性控制理论还很不成熟,而且方法比较复杂。采用智能控制的方法往往可以较好地解决非线性系统的控制问题。

3. 复杂的任务要求

在传统的控制理论中,控制任务或者要求输出量为定值,或者要求输出量跟随期望的运动轨迹一致,任务的要求比较单一。对于智能控制系统,任务的要求往往比较复杂。例如,在智能机器人系统中,它要求系统对一个复杂的任务具有自行规划和决策的能力,有自动躲避障碍运动到期望目标的能力。

总体来说,传统控制方法的应用在很大程度上依赖于已知的系统数学模型,而且这些数学模型往往有许多严格的限制,在实际应用中存在难以逾越的障碍。智能控制则通过引入人工智能、专家系统、模糊数学、神经网络、模式识别等一些新的理论与学科,为复杂的控制问题得以解决提供了新的途径,从而为传统的控制技术带来了生机,摆脱了常规数学模型的窘境,突破了现有控制理论的局限,所以说智能控制是控制理论发展的一个新阶段。

经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论是自动控制理论发展的三个阶段,但它们又是相互联系、相互促进的。现代控制理论和智能控制理论不能看成是经典控制理论简单的

延伸和推广,所采用的数学工具、理论基础、研究方法、研究对象等方面都有明显不同,可以说是质的飞跃。但是,这并不意味着这三种方法原理截然分离,在解决实际工程问题的过程中,许多用经典控制理论能够解决的问题,同样可以用现代控制理论和智能控制理论的方法来实现,反之亦然。尽管现代控制理论从方法上看更加完备或结果更加理想,但是,经典控制理论简捷实效的分析方法和控制方式,往往是现代控制理论难以实现的。也就是说,它们又有很强的互补性。现代科学技术的发展和生产技术的提高,为经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论的发展和应用提供了广阔的前景。

1.2 开环控制系统和闭环控制系统

自动控制系统按其结构可分为开环控制系统和闭环控制系统。

1.2.1 开环控制系统

开环控制系统是一种最简单的控制方式,其特点是:在控制器与被控对象之间只有正向控制作用而没有反馈控制作用,即只有输入量对输出量产生控制作用,输出量对输入量没有作用,因此它不具备抗干扰能力。在开环控制系统中,对于每一个参考输入量,就有一个与之相对应的工作状态和输出量。系统的精度取决于元器件的精度和系统的性能,当系统的内扰和外扰影响不大,要求不高时,可采用开环控制方式。

图 1-1 是一个电加热的温度控制系统,图 1-2 示出了该系统的结构图。

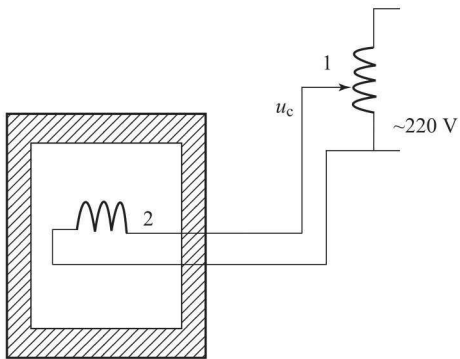


图 1-1 温度控制系统

1—自耦变压器; 2—加热炉

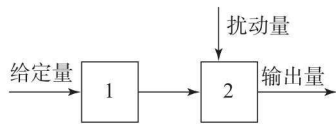


图 1-2 开环控制系统结构图

1—控制器（自耦变压器）;
2—被控对象（加热炉）

该系统由自耦变压器和加热炉两部分组成。控制器是自耦变压器,给定量(输入量)是自耦变压器的输出电压;被控对象是加热炉,被控制量(输出量)是加热炉的温度。其工作原理是:通过调整自耦变压器滑动端的位置,调节电加热炉的给定值,确定加热炉的温度,并使其恒定不变。因为被控制的对象是加热炉,被控制的量是加热炉的温度,所以该系统被称为温度控制系统。

开环控制的主要优点是结构简单,调试容易。但是当工作环境和系统本身的元器件性能参数发生变化时,输入量可能偏离理想输入,输出量(温度)就会改变,实现不了保持温

度恒定的目的，即抗干扰能力差，所以开环控制对环境 and 元件的要求比较严格。

1.2.2 闭环控制系统

凡是系统的输出端与输入端之间存在反馈回路，即输出量对输入量产生控制作用的系统叫作闭环系统。

图 1-3 是一个炉温闭环控制系统，图 1-4 示出了该系统的结构图。

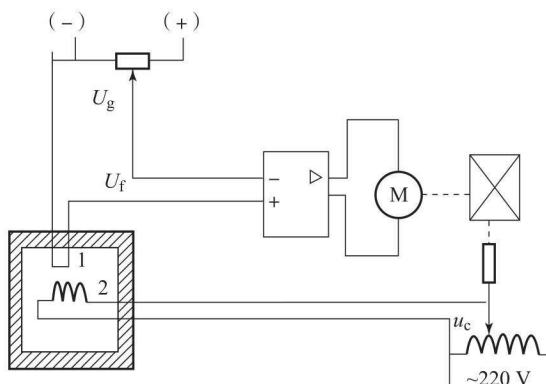


图 1-3 炉温闭环控制系统

1—热电偶；2—加热器

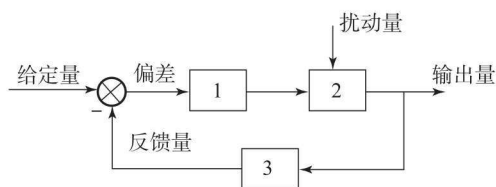


图 1-4 闭环控制系统结构图

1—控制器；2—控制对象；3—检测装置

该系统由自耦变压器、加热炉和检测装置三部分组成。与开环控制系统相比，闭环控制系统多了一个测温电路。

这个系统比开环控制系统多了一个功能，即无论是否出现扰动，都能使炉温保持恒定。

系统是怎样实现这个功能的呢？在这里，炉温的给定量由电位器滑动端位置所对应的电压值 U_g 给出，炉温的实际值由热电偶检测出来，并转换成电压 U_f ，再把 U_f 反馈到系统的输入端与给定电压 U_g 相比较（通过二者极性反接实现）。由于扰动（例如电源电压波动或加热物体多少等）影响，炉温偏离了给定值，其偏差电压经过放大，控制可逆伺服电动机 M，带动自耦变压器的滑动端，改变电压 u_c ，使炉温保持在给定温度上。系统的自动调节过程可用图 1-5 表示。

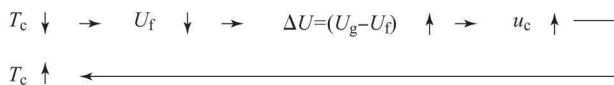


图 1-5 温度闭环控制的自动调节过程

在工业生产中，按照偏差控制的闭环系统种类繁多，尽管它们完成的控制任务不同，具体结构可能不一样，但是从检测偏差、利用偏差信号对被控对象进行控制，以减小或纠正输出量的偏差这一控制过程却是相同的。通过这种反馈控制，可以使控制系统的性能得到显著的改善。

现在我们把开环控制系统与闭环控制系统的特点归纳如下。

- (1) 无论是开环控制系统还是闭环控制系统，输入量和输出量都存在一一对应关系。
- (2) 在开环控制系统中，只有输入量对输出量产生控制作用，输出量不参与系统的控制，因而开环系统没有抗干扰能力；在闭环控制系统中，除输入量对输出量产生控制作用

外, 输出量也参与系统控制, 因而闭环控制系统具有较强的抗干扰能力。

(3) 为了检测偏差, 必须直接或间接地检测出输出量, 并将其变换为与输入量相同的物理量, 以便与给定量相比较, 得出偏差信号。所以闭环系统必须有检测环节、给定环节和比较环节。而开环系统则没有检测环节和比较环节。

(4) 闭环控制系统是利用偏差量作为控制信号来纠正偏差的, 因此系统中必须具有执行纠正偏差这一任务的执行机构。闭环控制系统正是靠放大的偏差信号来推动执行机构, 进一步对控制对象进行控制。只要输出量与给定量之间存在偏差, 就有控制作用存在, 力图纠正这一偏差。由于闭环控制系统利用偏差信号作为控制信号。自动纠正输出量与期望值之间的误差, 因此可以构成精确的控制系统。

闭环控制系统广泛地应用于各工业部门, 例如加热炉和锅炉的温度控制、轧钢厂主传动和辅助传动的速度控制、位置控制等。

闭环控制系统是本书研究的重点。

1.3 闭环控制系统的组成

控制系统种类很多, 应用的范围也很广泛, 它们的结构、性能和完成的任务也各不相同, 但是概括起来, 一般由以下基本环节组成: 给定环节、比较环节、校正环节、放大环节、执行机构、被控对象和检测装置。

1. 被控对象 (也称调节对象)

指要进行控制的设备或过程, 如温度控制系统的电加热器、速度控制系统的电动机等。相应地, 控制系统所控制的某个物理量, 就是系统的被控制量或输出量, 如加热器的温度和电动机的转速等。闭环控制系统的任务就是控制这些系统输出量, 以满足生产工艺的要求。

2. 执行机构

一般由传动装置和调节机构组成。执行机构直接作用于被控对象, 使被控制量达到所要求的数值。

3. 检测装置或传感器

该装置用来检测被控制量, 并将其转换为与给定量相同的物理量。如温度控制系统中的热电偶、速度控制系统中的测速发电机等, 检测装置的精度和特性直接影响控制系统的控制品质, 它是构成自动控制系统的关键性元件, 所以一般要求检测装置的测量精度高, 反应灵敏, 性能稳定等。

4. 给定环节

指设定被控制量的给定值的装置, 如电位器等。给定环节的精度对被控制量的控制精度有较大的影响, 在控制精度要求高时, 常采用数字给定装置。

5. 比较环节

比较环节将所检测到的被控制量与给定量进行比较, 确定两者之间的偏差量。该偏差量

由于功率较小或者由于物理性质不同，还不能直接作用于执行机构，所以在执行机构和比较环节之间还有中间环节。

6. 中间环节

中间环节一般是放大元件，将偏差信号变换成适于控制执行机构工作的信号。根据控制的要求，中间环节可以是一个简单的环节，如放大器；或者是将偏差信号变换为适于执行机构工作的物理量，如功率放大器。除此之外，还希望中间环节能够按某种规律对偏差信号进行运算，用运算的结果控制执行机构，以改善被控制量的稳态和暂态性能，这种中间环节常称为校正环节。

在控制系统中，常把比较环节、放大环节、校正环节合在一起称为控制器。

图 1-6 示出了一个典型的闭环控制系统的方框图，它说明了上述各环节和元件在系统中的位置和相互间的联系。

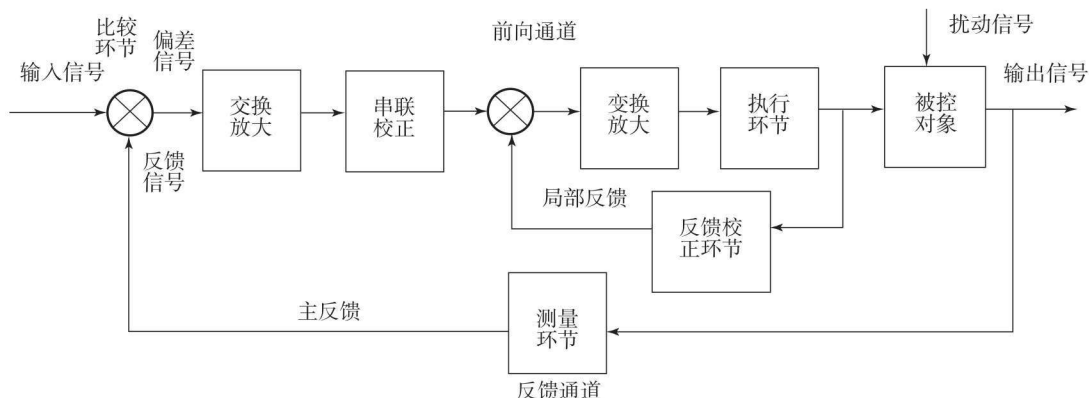


图 1-6 闭环控制系统方框图

1.4 自动控制系统的类型

自动控制系统的类型有很多，分类方法也多种多样，例如，按照输入量的变化规律可将系统分为恒值系统和随动系统；按照系统传输信号与时间的关系可将系统分为连续系统和离散系统；按照系统的输出量和输入量之间的关系可将系统分为线性系统和非线性系统；按照系统参数对时间的变化情况可将系统分为定常系统和时变系统；按照系统的结构和参数是否确定可将系统分为确定系统和不确定系统等。根据不同的分类方法，自动控制系统的类型可以概括如下。

1.4.1 线性控制系统和非线性控制系统

按照系统的输出量和输入量之间的关系可将系统分为线性控制系统和非线性控制系统。

1. 线性控制系统

线性控制系统是由线性元件组成的系统，该系统的运动方程式可以用线性微分方程描

述。线性微分方程的各项系数为常数时，称为线性定常系统。

线性控制系统的主要特点是具有叠加性和齐次性。叠加性和齐次性是鉴别系统是否为线性系统的依据。

2. 非线性控制系统

在组成系统的元器件中，只要有一个元器件的性能不能用线性方程描述，即为非线性系统。描述非线性系统的常微分方程中，输出量及其各阶导数不都是一次的，或者有的输出量导数项的系数是输入量的函数。非线性常微分方程没有一种完整、成熟、统一的解法，不能应用叠加原理。在自动控制系统中，典型的非线性环节有继电器非线性特性（如图 1-7（a）所示）、饱和非线性特性（如图 1-7（b）所示）和不灵敏区非线性特性（如图 1-7（c）所示）等。

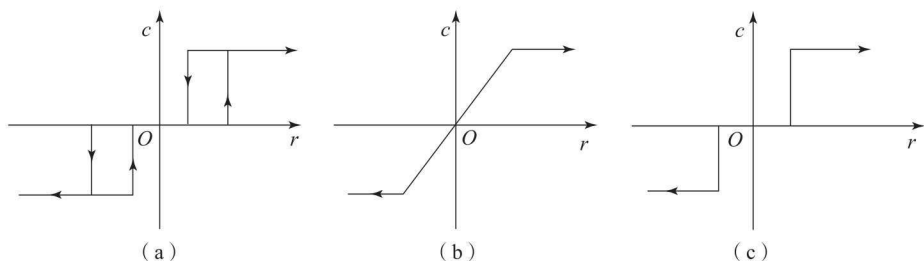


图 1-7 典型非线性环节特性

(a) 继电器特性；(b) 饱和特性；(c) 不灵敏区特性

应当指出的是，任何物理系统的特性，精确地说都是非线性的，但是在误差允许范围内，可以将非线性特性线性化，近似地用线性微分方程来描述，这样就可以按照线性系统来处理。

非线性系统的暂态特性与其初始条件有关。从这一点来看，它与线性系统有很大的区别。例如，当偏差的初始值很小时，系统的暂态过程为稳定的；而当偏差量的初始值较大时，则可能变为不稳定。而线性系统的暂态过程则与初始条件无关。

1.4.2 连续控制系统和离散控制系统

按照系统传输信号与时间的关系可将系统分为连续控制系统和离散控制系统。

1. 连续控制系统

指系统中各部分的传输信号都是时间 t 的连续函数。目前大多数闭环控制系统都是这种形式的，描述连续控制系统的动态方程是微分方程。

2. 离散控制系统

如果控制系统在信号传输过程中存在着间歇采样、脉冲序列等离散信号，则称为离散控制系统。描述离散控制系统的动态方程是差分方程。

离散系统的主要特点是：在系统中使用脉冲采样开关，将连续信号转变为离散信号。通常对于离散信号取脉冲形式的系统，称为脉冲控制系统；而对于采用数字计算机或数字控制