



江苏高校品牌专业建设工程资助项目

“十二五” 江苏省高等学校重点教材

现代控制工程基础

(第二版)

主 编 刘春生 吴庆宪

副主编 丁 勇 张绍杰



科学出版社



“十二五”江苏省高等学校重点教材

现代控制工程基础

(第二版)

主 编 刘春生 吴庆宪
副主编 丁 勇 张绍杰

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书简要阐述了自动控制的基本理论与应用。全书共 9 章, 前 8 章着重以现代控制工程为背景, 介绍系统建模、时域分析法、根轨迹法、频域分析法、离散系统分析、状态空间分析以及非线性系统分析, 各章均包含有 Matlab 应用技术实例以及与内容密切相关的多种形式的二维码。第 9 章内容借鉴了国际著名商学院的教育理念与方法, 进行现代控制系统的案例分析, 以强化学生对控制系统概念的理解, 提高对控制系统的分析、设计能力, 激发学生的创新理念。

本书为 2003 年国家精品课程“自动控制原理”主干教材, 2008 年“自动控制系列课程”国家优秀教学团队精品教材, 2013 年国家级精品资源共享课程“自动控制原理”主干教材, “十二五”江苏省高等学校重点教材。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化、电子信息工程、测控技术及仪器、热能与动力工程、化工自动化、飞行器设计与制造等专业的教材, 也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代控制工程基础 / 刘春生, 吴庆宪主编. —2 版. —北京: 科学出版社, 2017.6

“十二五”江苏省高等学校重点教材(编号: 2015-1-079)

ISBN 978-7-03-053288-6

I. ①现… II. ①刘… ②吴… III. ①现代控制理论—高等学校—教材 IV. ①O231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 127317 号

责任编辑: 余 江 张 帆 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 迷底书装

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>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 7 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 6 月第 二 版 印张: 19 3/4

2017 年 6 月第一次印刷 字数: 487 000

定价: 49.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着生产的发展和科学技术的进步,自动控制技术已广泛地应用于工农业生产、交通运输和国防、宇航等领域,并成为当今备受重视的高技术之一。控制工程基础是研究各类控制系统共性的一门技术基础科学,具有科学方法论的鲜明特点,研究的问题带有普遍性,对工程实践具有重要的指导意义,能为培养学生运用控制原理的方法,分析和解决各种工程问题奠定扎实的理论基础。

本书以现代控制工程为背景,介绍系统建模、时域分析法、根轨迹法、频域分析法、离散系统分析、状态空间分析以及非线性系统分析。各章均包含有 Matlab 应用技术实例以及与内容密切相关的二维码视频(或文档),以拓宽学生的知识面和提高学生的学习兴趣。第 9 章内容借鉴了国际著名商学院的教育理念,进行现代控制系统的案例分析,以强化学生对控制系统概念的理解,提高对控制系统的分析、设计能力,激发学生的创新理念。

本书编写组成员是 2003 年国家精品课程“自动控制原理”的主要建设者,是 2005 年国家教学成果二等奖的主要获奖人员,主编之一吴庆宪教授为 2008 年“自动控制系列课程”国家优秀教学团队负责人,其他人员为教学团队主要建设者。由于作者长期工作在“控制系统工程”教学一线,教学经验丰富,对教材改革与人才培养的关系有着深刻的理解和全面的认识。全书的内容体现了作者多年的教学改革成果与理念,满足复合性人才培养的要求。

本书的创新点是紧密围绕学生、突出工程背景、形式多样创新,具体体现在以下方面:

(1) 强化工程背景,通过现代控制系统实例理解自动控制原理的概念、方法,而不拘泥于理论上过多的严格证明。

(2) 二维码技术拓展教材资源、丰富教材内容,利于强化自动控制原理的应用背景,提高学生对现代控制工程的学习兴趣。

(3) 借鉴了国际著名商学院的教育理念,以不同行业的典型系统为背景,增加了“现代控制系统案例分析”,以提高对控制系统分析、设计的能力以及诱发学生的创新理念。

(4) 教材既体现自动控制理论体系的完整性与系统性,也有其相对的独立性与模块化。教材章节的安排既体现了内容、形式的创新又考虑到教师的方便使用,讲课内容可自主“剪裁”,自主安排。

(5) 书后附有“中英文术语对照”,目的是使学生学完本课程后能掌握本专业的科技术语,为熟练地阅读控制类的科技文献打下良好基础。

本书由刘春生教授和吴庆宪教授主编,负责教材的架构设计。各章的编写分工如下:刘春生编写第 1、5、9 章,吴庆宪编写第 2、7 章,丁勇编写第 3、8 章、张绍杰编写第 4、6 章。全书由刘春生统稿与定稿。此外,对在本书编写过程中给予帮助的各位同仁表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者不吝指正。

作 者

2017 年 3 月

目 录

前言

第 1 章 控制系统一般概念	1
1.1 引言	1
1.2 控制科学与控制论、系统论、信息论	2
1.3 自动控制的发展	2
1.4 自动控制系统分类和组成	4
1.4.1 自动控制的有关概念	4
1.4.2 自动控制系统分类	4
1.4.3 开环控制系统与闭环控制系统	5
1.4.4 恒值控制系统和伺服系统	7
1.5 闭环控制系统的基本组成	8
1.6 现代控制系统实例	10
1.7 对控制系统的基本要求	14
1.8 典型控制输入信号或者测试信号	15
习题	17
第 2 章 控制系统的数学模型	20
2.1 控制系统的微分方程	20
2.1.1 控制系统微分方程的建立	20
2.1.2 非线性系统的线性近似	24
2.2 控制系统的传递函数	27
2.2.1 传递函数的定义	27
2.2.2 常用控制元件的传递函数	32
2.3 控制系统的频率特性	33
2.3.1 频率特性的基本概念	33
2.3.2 频率特性的几何表示方法	35
2.4 控制系统的状态空间模型	37
2.4.1 状态变量与状态空间	37
2.4.2 状态空间表达式	37
2.4.3 各数学模型间的相互转换	40
2.5 控制系统的结构图与信号流图	46
2.5.1 控制系统的结构图	46
2.5.2 控制系统的信号流图	51
2.6 典型控制系统的数学模型	54
2.7 拉普拉斯变换	57

2.7.1	拉普拉斯变换的定义	57
2.7.2	拉普拉斯变换的常用定理	58
2.7.3	拉普拉斯逆变换	61
2.7.4	利用拉普拉斯变换法求解微分方程	64
	习题	65
第3章	时域分析法	70
3.1	控制系统的时域响应和时域性能指标	70
3.1.1	控制系统的时域响应	70
3.1.2	控制系统的时域性能指标	70
3.2	线性系统的动态性能分析	71
3.2.1	一阶系统的动态性能分析	71
3.2.2	二阶系统的动态性能分析	76
3.2.3	高阶系统的动态性能近似分析	88
3.3	线性系统的稳定性分析	90
3.3.1	系统稳定性的基本概念	90
3.3.2	线性定常系统稳定的充要条件	91
3.3.3	劳斯判据	92
3.4	线性系统的稳态性能分析	98
3.4.1	误差及稳态误差	98
3.4.2	系统稳态误差的一般性分析	101
3.4.3	利用前馈控制减小或消除稳态误差的方法	107
3.5	PID 控制器设计	112
3.5.1	PID 控制原理及形式	113
3.5.2	PID 参数整定方法	115
3.5.3	时域法的设计实例	121
	习题	125
第4章	根轨迹法	132
4.1	根轨迹法的基本概念	132
4.1.1	根轨迹的基本概念	132
4.1.2	根轨迹与系统性能关系分析	133
4.1.3	根轨迹方程	134
4.2	绘制根轨迹的一般方法	136
4.2.1	180°根轨迹(常规根轨迹)	136
4.2.2	0°根轨迹	147
4.2.3	参数根轨迹	148
4.3	根轨迹法设计实例	150
	习题	156
第5章	频率响应法	159
5.1	控制系统的频率响应	159

5.1.1	频率响应的概念	159
5.1.2	利用频率响应的概念求稳态输出	161
5.2	开环极坐标图	163
5.2.1	典型环节的极坐标图	163
5.2.2	开环传递函数的极坐标图绘制	168
5.3	开环 Bode 图	171
5.3.1	典型环节的 Bode 图	171
5.3.2	开环传递函数的 Bode 图绘制	176
5.3.3	用 Matlab 绘制系统的 Bode 图	180
5.3.4	最小相角和非最小相角系统	182
5.4	频域稳定判据	184
5.4.1	Nyquist 稳定判据的数学基础	185
5.4.2	对数频域稳定判据	191
5.4.3	频域稳定裕度	192
5.5	频域性能指标	194
5.6	用 Matlab 分析系统稳定性	198
5.7	校正补偿及设计	202
5.7.1	典型补偿环节	202
5.7.2	补偿设计实例	204
	习题	210
第 6 章	线性离散系统分析	216
6.1	离散系统的基本概念	216
6.1.1	采样控制系统	216
6.1.2	数字控制系统	218
6.1.3	离散控制系统的特点	219
6.2	信号采样与保持	220
6.2.1	信号采样	220
6.2.2	零阶保持器	221
6.3	z 变换理论	221
6.3.1	z 变换定义	221
6.3.2	z 变换方法	222
6.3.3	z 变换的基本性质	223
6.3.4	z 反变换	224
6.4	离散系统的数学模型	226
6.4.1	线性常系数差分方程及其解法	226
6.4.2	脉冲传递函数	229
6.4.3	开环系统脉冲传递函数	231
6.4.4	闭环系统脉冲传递函数	233
6.5	离散系统的性能分析	235

6.5.1	稳定性分析	235
6.5.2	离散系统的稳态误差	238
6.6	离散系统的数字 PID 控制	241
	习题	243
第 7 章	状态反馈系统设计	246
7.1	系统的可控性与可观性	246
7.1.1	系统的可控性	246
7.1.2	系统的可观性	247
7.1.3	系统的可控性与可观性判据	248
7.2	用状态反馈配置闭环系统的极点	249
7.2.1	状态反馈与极点配置	250
7.2.2	用 Matlab 工具箱进行控制律设计	251
	习题	254
第 8 章	非线性控制系统分析	257
8.1	引言	257
8.2	非线性控制系统概述	257
8.2.1	非线性系统的特点	257
8.2.2	非线性系统的分析与设计方法	260
8.3	常见非线性特性及其对系统性能的影响	260
8.4	描述函数法	265
8.4.1	描述函数的基本概念	265
8.4.2	典型非线性特性描述函数	267
8.4.3	非线性系统的简化	272
8.4.4	描述函数法进行非线性系统分析	275
8.5	非线性控制系统仿真实例	279
	习题	282
第 9 章	现代控制系统案例分析	285
9.1	磁悬浮球控制系统	285
9.1.1	磁悬浮球系统的结构和工作机理	285
9.1.2	磁悬浮球的数学模型	285
9.1.3	磁悬浮球的 PID 控制	286
9.2	彩色显像管厂玻璃窑炉控制系统	288
9.2.1	玻璃窑炉结构与工作原理	288
9.2.2	玻璃窑炉的温度控制	289
9.3	炼油厂蒸馏塔加热炉纯滞后温度控制系统	293
9.3.1	石油分馏加工流程简介	293
9.3.2	加热炉数学模型的建立	294
9.3.3	加热炉温度系统的 PID 控制算法设计与研究	294

9.4 四旋翼飞行器视觉跟踪控制系统 297

9.4.1 四旋翼飞行器的结构和飞行原理 297

9.4.2 四旋翼俯仰方向飞行器模型的建立和 PID 控制 299

附录 中英文术语对照 301

参考文献 304

第 1 章 控制系统一般概念

1.1 引言

在现代科学技术发展中,自动控制理论(automatic control theory)与自动控制系统起着越来越重要的作用。例如,人造卫星要在预定轨道上运行并完成特定的任务、导弹准确命中目标、雷达跟踪系统的准确定位、先进的战斗机超机动飞行以及格斗等都是以自动控制技术为前提的。人们熟悉的第二次世界大战中的地毯式轰炸:为了炸毁所选中的工业或军事目标,不加选择地在居住区投下无制导的炸弹。现在,这些已经被精确制导武器所取代,精确制导武器是相当准确的,能够一次只打击一个既定目标,而不损伤无辜,自动控制技术为这些武器系统提供了稳定性和准确性,并且当存在大的环境变化和系统不确定性时系统具有良好的跟踪性能。自动控制技术在宇宙飞船、导弹制导和机器人等领域中具有特别重要的作用,并已经成为现代制造业和工业过程中不可缺少的组成部分。例如,造纸厂中对纸张滚卷的恒张力控制、热轧厂中对金属薄板厚度的控制,特别是化学工业,要监控成千上万个传感信号和对成百上千个阀门、加热器、泵和其他执行器,并实现对压力、温度、流量等物理量的控制,从而保证产品质量。同样,通信系统、互联网以及智能交通系统、现代物流系统也离不开自动控制技术。



动画: 导弹拦截



视频: 亚马逊自动化仓储系统



视频: 伐木机器人

自动控制技术的核心就是反馈(feedback)控制或闭环(closed loop)控制。图 1.1.1 是一个闭环速度控制系统,目的是使直流电动机速度 n 维持在 1000r/min (revolutions per minute) 左右。

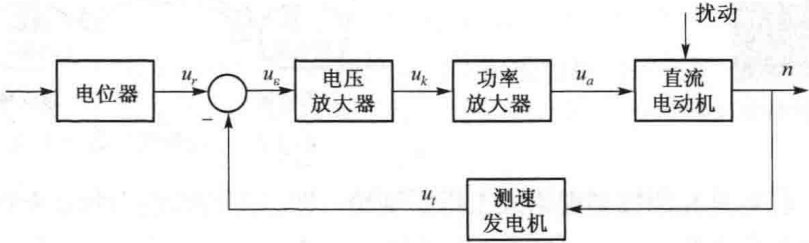


图 1.1.1 闭环速度控制系统

电位器的输出电压 u_r 是给定值,决定所期望转速值的大小,在本例中是 1000r/min。当外界扰动使得电动机的转速 n 升高时,测速发电机的输出电压 u_f 增大,从而导致电压放大器的输入电压 u_e ($u_e = u_r - u_f$) 降低,放大器的输出电压 u_k 降低,并导致电动机两端的电压 u_a 降低,最终使得电动机的输出转速降低,维持在希望的转速值 1000r/min 左右。

从以上分析可以认识到,反馈的含义是将系统的输出经过测量、处理后再送回到系统的输入端,以使系统的输出进行再调整的过程。

除了工程系统以外,生物系统中的变量,如人体的血糖和血压受某些过程的影响,而这些过程都可以通过自动控制方法进行研究。同样,在经济系统中,大到宏观控制,小到商业

经济管理系统中的变量，如受政府财政政策影响的失业和通货膨胀，亦可利用控制的思想来研究。

自动控制的这些应用对现代社会的生产力产生了巨大的影响。目前，自动控制理论还在继续发展，正向以控制论(cybernetics)、信息论(information theory)、系统论(systematology)和仿生学(bionics)为基础的智能控制(intelligent control)理论发展。

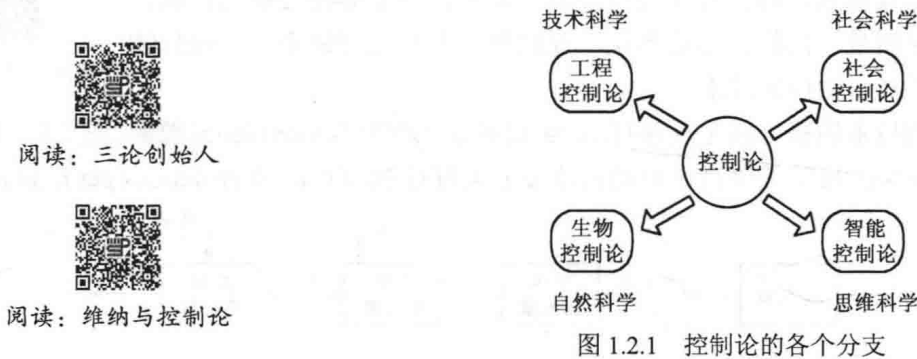
1.2 控制科学与控制论、系统论、信息论

图 1.1.1 所示的自动控制系统是由各环节、部件组成，按反馈原理进行控制的。反馈控制是一种最基本的控制方式，它要求根据误差信息 u_e 通过一定的控制算法形成控制作用 u_k 。在自动控制系统中包括多个环节：信息的量测(提取)、处理(加工和变换)和信息的传输(图中的箭头代表信息的传输方向或称信息流向)、存储及利用，并最终形成控制作用(也是一种信息)。因此可以看出，系统、信息和控制相互联系、密不可分。系统是信息和控制的载体，而信息反映系统的性能，控制则是实现预期性能的手段。

控制论、系统论和信息论为现代科学技术提供了全新的思维方式和科学方法论原则，它们对整个人类社会的进步起着巨大的作用。

然而，控制论不等同于控制理论(control theory)，但一般都认为，“控制论”的一个分支“工程控制论”就是“控制理论”。《工程控制论》是中国科学家钱学森1954年所著的英文著作，后来被翻译成简体中文版。钱学森在《工程控制论》中首次把控制论推广到工程技术领域。

图 1.2.1 给出了控制论的各个分支。



本书的主要任务是介绍控制理论或工程控制论，即以工程系统为背景介绍自动控制的基本概念、设计及其应用。

1.3 自动控制的发展

人们普遍认为最早应用于工业过程的自动反馈控制器(controller)，是 James Watt 于 1876 年发明的离心飞球调速器，它被用来调节(adjust)蒸汽机的速度，如图 1.3.1 所示。图中的机械装置用来调节阀门，进而控制进入蒸汽机的蒸汽流量。调速器的飞球杆的长度设定驱动杆的转速，当转速超过设定转速时，飞球偏离原定轴线，重心上移，于是减小蒸汽阀门，又使转速回到设定转速。反之亦然。

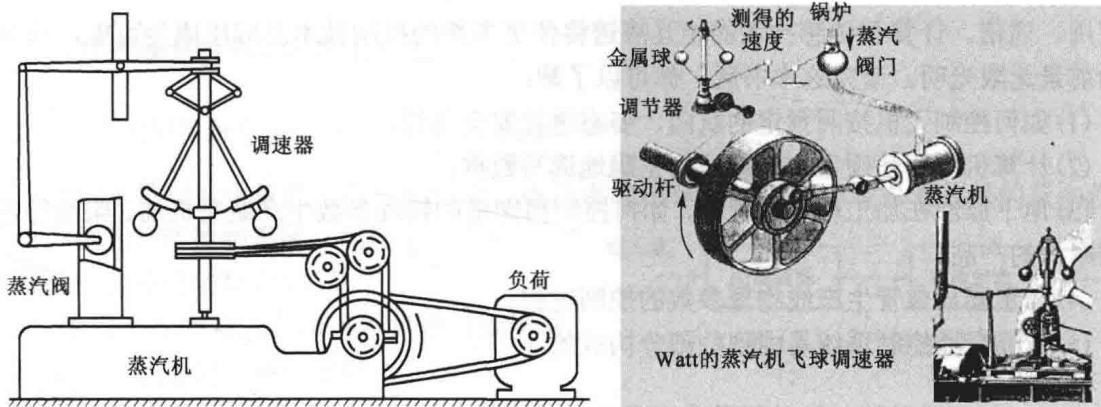


图 1.3.1 Watt 离心式调速器

第二次世界大战之前，控制理论与应用在美国和欧洲得到了较快发展。美国的 Bode、Nyquist 和 Black 等在贝尔电话实验室对电话系统和电子反馈放大器所做的研究，是促进反馈系统应用的主要动力，创立了频域稳定性判据的两种形式。第二次世界大战期间，控制理论与应用得到了巨大发展，大量运用反馈控制的方法设计和制造飞机自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达天线控制系统以及其他军用系统。这些军用系统的复杂性以及对高性能的追求就导致更多研究者的关注和投入，因而逐渐使自动控制发展成一门工程科学。

随着人造卫星和空间飞行器的出现和网络时代的到来，自动控制技术又有了新的推动力，要求控制理论能够解决多输入多输出 (multiple input multiple output, MIMO)、非线性 (nonlinear)、时变 (time-varying)、时滞 (time delay) 的被控对象。再加上现代数学和计算机的快速发展，因而促成了现代控制理论的产生，包括线性系统 (linear system) 分析、最优控制 (optimal control)、自适应控制 (adaptive control)、鲁棒控制 (robust control)、智能控制 (intelligent controls) 以及近些年的网络控制 (network control) 等。

控制理论通常分为经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论。经典控制理论以传递函数为基础，研究单输入-单输出 (single input single output, SISO)、线性、时不变被控对象的控制器分析与设计。数学工具是常系数线性微分方程和复变函数。而现代控制理论是以状态方程为基础，研究多输入-多输出、非线性、时变被控对象的控制器分析与设计，数学工具是线性代数或矩阵论。智能控制理论以人工智能为基础，研究模糊性、不确定性以及无法用数学模型描述的复杂被控对象的控制器分析与设计。

当前，自动化所处的环境与以往大为不同。大型系统和网络的规模以及复杂程度已大大超出了传统控制的应用范围，发展为有着复杂的相互间联系和影响的物质与信息系统的庞大集合，如电力系统、城市交通系统、数字通信网、柔性制造系统、生态系统、水资源系统、社会经济系统等。这类系统的特点是规模庞大、结构复杂、地理位置分散，自动控制问题不再局限于研究一个被控对象以及单回路的控制，而是延伸至一个工段、一个车间、一个工厂、一个地区甚至更大的范围。物联网 (internet of things) 时代的到来，如同第一次工业革命中蒸汽机的发明和应用，将彻底改变一个时代的生产、生活方式，也将成为一个创新时代的起点和标杆。物联网是继计算机、互联网之后世界信息产业的第三次浪潮。工业自动化作为物联网的一部分，物联网技术的发展必定为规模庞大、结构复杂、地理位置分散的大系统控制提供了新的内涵与发展动力。

总之，控制领域历史悠久、成果丰硕、发展迅速，影响着商业、军事和科学技术的发展

与应用。通信、计算和传感技术的相互渗透将使更多新的控制技术及应用成为可能，控制领域的前景无限光明。读完这本书后，你可以了解：

- (1) 如何控制飞机按照预定的航向、姿态进行安全飞行；
- (2) 计算机中移动硬盘如何被控制正确地读写数据；
- (3) 地下原油在加工精炼过程中，如何控制精馏塔的物理参数生产航空机油、柴油等各种不同用途的产品；
- (4) 显示器显像管生产线物理参数的控制过程；
- (5) 智能交通控制系统是由哪些部分构成的。

你也能够：

- (1) 对简单的被控对象进行建模与分析；
- (2) 对简单的被控对象进行控制器设计；
- (3) 参与大型自动化设备、过程、系统的开发和研制；
- (4) 在工业、国防等领域，运用自动控制的科学方法论运筹帷幄，成为一个卓越的管理者与决策者。

来吧，让我们继续阅读本书的内容，品味自动控制的魅力！

1.4 自动控制系统分类和组成

1.4.1 自动控制的有关概念

控制：通过对系统输入的操作使得输出达到指定的目标。

自动控制：在无人直接参与的情况下，利用控制装置(control device)使被控对象(controlled plant)、过程(process)自动地按预定规律变化的控制过程。

自动控制理论：研究自动控制系统组成、进行系统分析设计的一般性理论，是研究自动控制共同规律的科学。

自动控制系统：由控制装置和被控对象组成，它们以某种相互依赖的方式组合成为一个有机整体，并对被控对象输出的物理量(如玻璃窑炉控制系统中的温度、压力、液位)进行自动控制。

1.4.2 自动控制系统分类

根据控制方式分为开环控制系统、闭环控制(反馈控制)系统等。

根据系统的性质分为线性系统和非线性系统、连续(continuous)系统和离散(discrete)系统、定常(time-invariant)系统和时变系统、确定性(certain)系统和不确定性(uncertain)系统等。

根据被控制量变化规律分为恒值(fixed set-point)控制系统、随动(servo)系统和程序(program)控制系统等。

根据元件类型分为机械系统、电气系统、机电系统、液压系统、气动系统和生物系统等。

根据系统功用分为温度控制系统、压力控制系统和位置控制系统等。

1.4.3 开环控制系统与闭环控制系统

1. 开环控制系统 (open-loop control system)

只有输入量对输出量的单向控制作用，而没有输出量或被控物理量对输入量的反向作用的系统，称为开环控制系统，如图 1.4.1 所示。

开环控制系统的特点如下：

- (1) 输出不影响输入，所以不需要对输出量进行测量，调试方便，易于实现；
- (2) 结构简单，成本低廉，多用于系统结构参数稳定和扰动信号较弱的场合；
- (3) 抗干扰能力差，控制精度不高。

目前比较常见的开环控制系统有自动洗衣机、自动装配流水线、自动售货机、自动报警器。

例 1.4.1 直流电动机开环转速控制系统。

图 1.4.2 为直流电动机 (motor) 开环转速控制系统原理图与框图，电动机的希望转速是通过电位器的输出电压 u_r 给定，经过电压放大和功率放大得到电机两端的电枢电压 u_a ，使电动机实际转速 n 达到希望转速。该控制系统使用元件少、简单、可靠，但抗干扰能力差，例如，电网电压降低会导致转速 n 下降。这种开环系统通常用于控制精度要求不高的系统。而对于控制精度要求高的系统，转速太大的波动可能导致产品的质量变差，此时必须采用闭环控制系统。

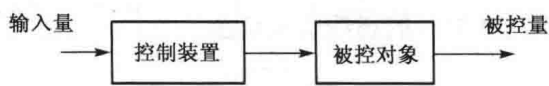
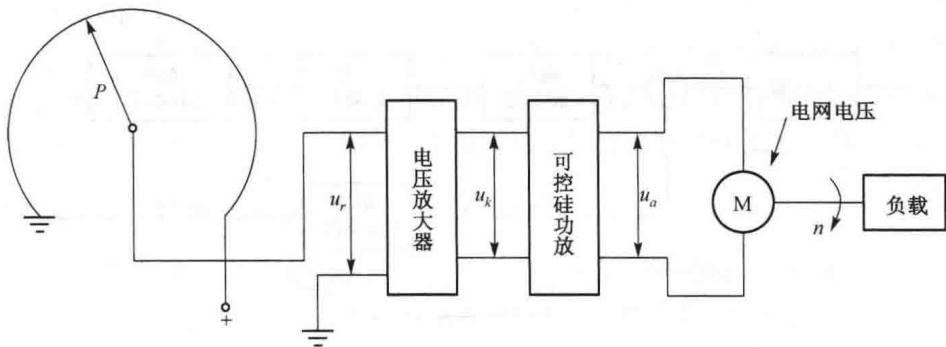
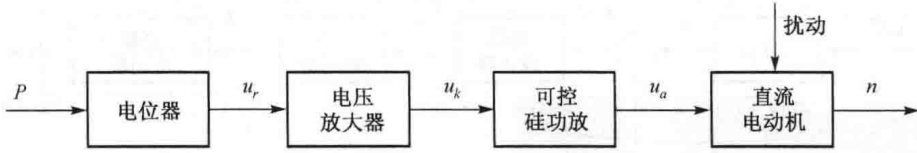


图 1.4.1 开环控制系统



(a) 原理图



(b) 框图

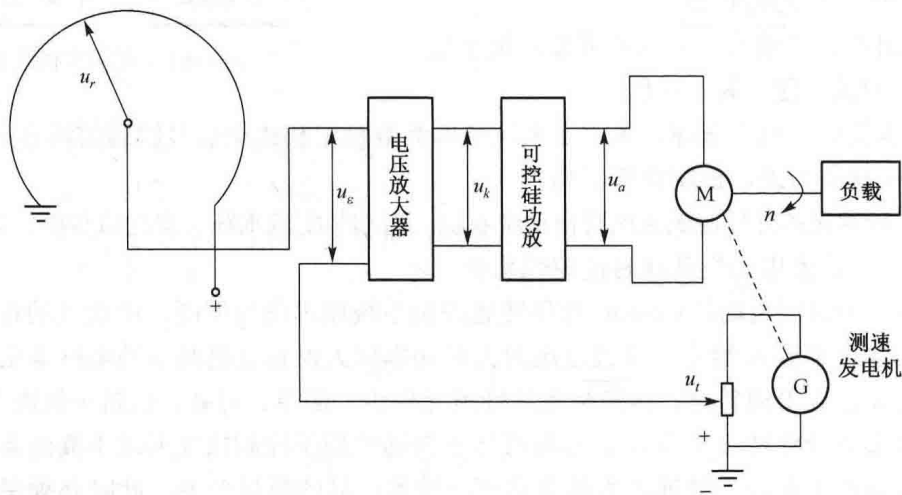
图 1.4.2 直流电动机开环转速控制系统

2. 闭环控制系统 (closed-loop control system)

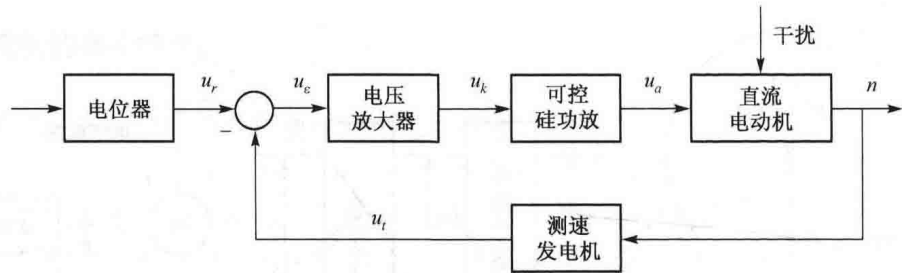
在闭环控制系统中，不仅输入量对输出量进行控制，输出量对输入量也有反向作用。反馈是指把系统输出量的全部或一部分回馈到输入端并进行比较，用偏差对输出量进行控制。闭环控制系统又称反馈控制系统 (feedback control system)。

例 1.4.2 直流电动机闭环转速控制系统。

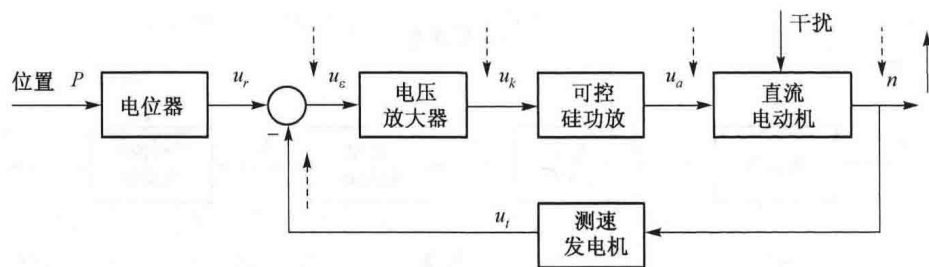
图 1.4.3 为直流电动机闭环转速控制系统原理图与框图。如图 1.4.3 (a) 所示，测速发电机与电动机同轴安装。电网电压突然升高将导致电动机的转速变大，测速发电机的电压 u_t 也变大。因为放大器的输入电压即偏差电压 $u_\varepsilon = u_r - u_t$ ， u_r 不变，所以 u_ε 变小，电动机电枢电压 u_a 随之变小，因而使电动机的转速下降，整个调整过程在很短时间内完成，动态调整过程如图 1.4.3 (c) 的虚线箭头所示。



(a) 原理图



(b) 框图



(c) 外界干扰出现后转速的动态调整过程

图 1.4.3 直流电动机闭环转速控制系统

闭环控制系统的特点如下：

- (1) 系统具有降低偏差的能力；
- (2) 抗扰性好，控制精度高；
- (3) 包含元件多，结构复杂，价格高；

(4) 系统存在稳定性问题。

反馈控制系统(简称反馈系统)分为负反馈系统和正反馈系统。当给定信号与反馈信号相减时为负反馈,否则为正反馈。一般情况下为负反馈系统。

人取书的过程也是负反馈控制过程,如图 1.4.4 所示。

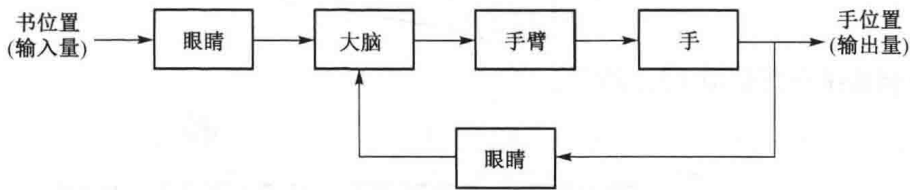


图 1.4.4 人取书的反馈控制系统方块图

思考: 在图 1.4.3 (b) 中, 若测速机的输出电压极性接反, 则会出现何种现象?

1.4.4 恒值控制系统和伺服系统

1. 恒值控制系统

输入量为恒定常值的反馈系统为恒值控制系统。系统的任务是保证在任何扰动作用下, 输出量以一定的精度接近给定值。如化工生产过程中的温度、压力、流量和液位等物理量的控制均为恒值控制。

图 1.4.5 所示的一物料加热用的炉温系统是一个恒值控制系统。电炉是被控对象, 炉温是被控制量。由电位器组成的温度给定环节给出的电压 u_r 对应所期望的炉内温度, 它与测量实际炉温的热电偶的电压 u_f 相比较, 形成误差电压 $\Delta u = u_r - u_f$ 。 Δu 经过电压放大器和功率放大后驱动电动机向一定方向转动, 再经过减速器提高或降低调压器的电压 u_h , 提供给加热炉, 并使 u_f 接近 u_r , 即使 $\Delta u \approx 0$ 。这时电动机不再转动, 自动调节系统使输出温度接近于给定值。

2. 随动系统(伺服系统或跟踪系统)

输入量是事先不确定的反馈系统称为随动系统或伺服系统或跟踪系统, 例如, 雷达跟踪系统就是这种系统。在图 1.4.6 所示的典型雷达系统中, 抛物面形状的天线不断地发射电脉冲, 系统接收从目标飞行器(飞行器位置是变化的、不确定的)发射回来的回波, 并计算雷达天线的坐标和指向目标的向量之间的偏差。系统的任务是克服扰动作用, 让天线指向各个角落以保持与这些指向目标的向量平行。

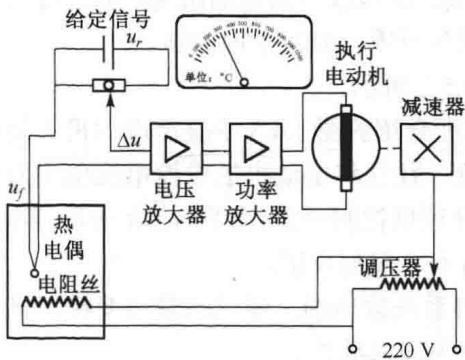


图 1.4.5 物料加热用电炉炉温自动控制系统

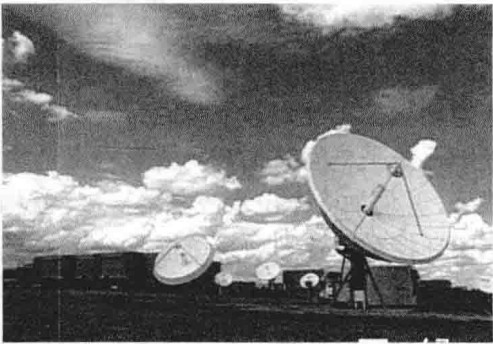


图 1.4.6 雷达系统

火炮自动瞄准系统、飞机俯仰角的仪表指示系统、X-Y 记录仪、数控机床的轨迹控制等均为类似的随动系统。

1.5 闭环控制系统的基本组成

闭环控制系统框图如图 1.5.1 所示。

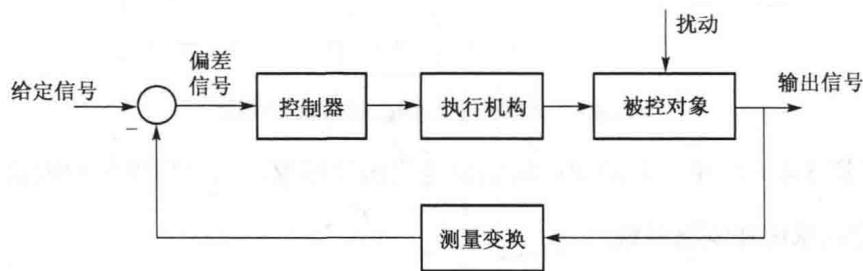


图 1.5.1 闭环控制系统框图

闭环控制系统由各种不同的元部件组成，将组成系统的元部件按职能分类主要有以下几种。

- (1) 测量元件：检测系统输出并参与系统控制的元件，如闭环调速系统中的测速机。
- (2) 给定元件：给定系统输入，且决定系统控制目标的元件，如闭环调速系统中的电位器。
- (3) 比较元件：比较系统输入和反馈信号，并给出差值的元件，如大脑比较手和书的位置。
- (4) 放大元件：对差值信号进行放大(包括功率放大)的元件。
- (5) 执行元件：执行控制信号、驱动控制对象运动的元件，如手臂和手执行大脑的信号使手向书的位置移动。

此外，还有一些有关概念如下所示。

- (1) 主反馈：反馈信号取自系统输出端，经过测量和变换，又被引入到系统输入端的称为主反馈信号，相应的反馈称为主反馈。
- (2) 前向通道：从系统输入端到输出端之间，信号的传输通道称为前向通道。
- (3) 主反馈通道：从输出量到主反馈信号之间的传输通道称为主反馈通道。
- (4) 单位反馈系统(unit feedback system)：主反馈信号与输出量相等的系统称为单位反馈系统。
- (5) 非单位反馈系统：主反馈信号不等于输出量的系统称为非单位反馈系统。
- (6) 局部反馈：反馈信号不是直接取自系统输出端，或虽取自系统输出端，但经过测量和变换后不直接引入到系统输入端，这样的反馈称为局部反馈，对应于内回路。

较为复杂的控制系统可能包括多个回路，如图 1.5.2 所示。

电动机的控制是一个多回路控制的典型例子。前面介绍的图 1.4.3 中直流电动机的闭环转速控制系统是单回路控制，为了提高速度的控制精度，往往将电动机的电枢电流也作为负反馈信号，并增加一个电流控制器，这样就构成了双闭环速度控制系统，如图 1.5.3 所示。图 1.5.4 为三闭环控制位置随动系统框图，除了主反馈外还有两个局部反馈。

总之，在多回路反馈系统中，反馈信号直接取自系统输出端，经过测量和变换，又引入到系统输入端的反馈称为主反馈，其内回路的反馈称为局部反馈。

若采用计算机控制，则闭环控制系统框图如图 1.5.5 所示。