



“十二五”普通高等教育
本科国家级规划教材

教育部普通高等教育精品教材



普通高等教育“十一五”
国家级规划教材



普通高等教育
电气工程与自动化类
规划教材

AUTOMATIC CONTROL THEORY

自动控制理论

第2版

刘丁 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

教育部普通高等教育精品教材

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

普通高等教育电气工程与自动化类规划教材

自动控制理论

第2版

刘 丁 主编
万百五 主审



机械工业出版社

本书依据高等院校本科自动控制理论课程的教学要求,从注重理论基础与基本概念,拓宽专业面的目的出发,结合自动化专业及其他相近专业的教学特点和教学要求,比较全面地阐述了经典控制理论的基本内容。全书共分八章,包括经典控制理论的线性定常系统理论(自动控制理论的基本概念与数学模型、时域分析法、根轨迹法和频率法等),非线性控制理论基础和采样控制系统理论等。

本书编写中注重突出重点,淡化繁冗的理论推导,力求以简洁明了的表达方式,准确、全面地讲述自动控制的基本原理和概念。书中注重理论与工程实际的紧密结合,注意培养读者用所学知识分析、研究、解决复杂工程问题的能力。为了便于读者自学和更好地掌握本课程的基本理论和方法,锻炼和培养分析、综合以及解决实际问题的能力,章中附有典型例题解析和习题。在主要章节中安排了基于 MATLAB 软件的系统分析和设计实例,以适应计算机辅助教学的要求。每章末给出小结,供读者学习、归纳之用。

本书配有电子课件,欢迎选用本书作为教材的教师登录 www.cmpedu.com 注册后下载。与本书配套的国家精品资源共享课可登录爱课程网在线观看。

本书可作为高等学校自动化专业及电子信息工程、电气工程及其自动化、轨道交通信号与控制、物联网工程等相关专业的教材或教学参考书,也可供有关专业的师生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制理论/刘丁主编. —2版. —北京:机械工业出版社,2016.5

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 普通高等教育电气工程与自动化类规划教材

ISBN 978-7-111-53448-8

I. ①刘… II. ①刘… 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(2016)第 067417 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:贡克勤 责任编辑:贡克勤

责任校对:陈延翔 封面设计:马精明

责任印制:李洋

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2016 年 8 月第 2 版第 1 次印刷

184mm×260mm·26.5 印张·652 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-53448-8

定价:49.80 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

全国高等学校电气工程与自动化系列教材

编 审 委 员 会

主任委员 汪樵生 浙江大学

副主任委员 (按姓氏笔划排序)

王兆安 西安交通大学

王孝武 合肥工业大学

田作华 上海交通大学

刘 丁 西安理工大学

陈伯时 上海大学

郑大钟 清华大学

赵光宙 浙江大学

赵 曜 四川大学

韩雪清 机械工业出版社

委 员 (按姓氏笔划排序)

戈宝军 哈尔滨理工大学

方 敏 合肥工业大学

王钦若 广东工业大学

白保东 沈阳工业大学

吴 刚 中国科学技术大学

张化光 东北大学

张纯江 燕山大学

张 波 华南理工大学

张晓华 哈尔滨工业大学

杨 耕 清华大学

邹积岩 大连理工大学

陈 冲 福州大学

陈庆伟 南京理工大学

范 瑜 北京交通大学

夏长亮 天津大学

章 兢 湖南大学

萧蕴诗 同济大学

程 明 东南大学

韩 力 重庆大学

雷银照 北京航空航天大学

熊 蕊 华中科技大学

序

随着科学技术的不断进步，电气工程与自动化技术正以令人瞩目的发展速度改变着我国工业的整体面貌。同时，对社会的生产方式、人们的生活方式和思想观念也产生了重大的影响，并在现代化建设中发挥着越来越重要的作用。随着与信息科学、计算机科学和能源科学等相关学科的交叉融合，它正在向智能化、网络化和集成化的方向发展。

教育是培养人才和增强民族创新能力的基础，高等学校作为国家培养人才的主要基地，肩负着教书育人的神圣使命。在实际教学中，根据社会需求，构建具有时代特征、反映最新科技成果的知识体系是每个教育工作者义不容辞的光荣任务。

教书育人，教材先行。机械工业出版社几十年来出版了大量的电气工程与自动化类教材，有些教材十几年、几十年长盛不衰，有着很好的基础。为了适应我国目前高等学校电气工程与自动化类专业人才培养的需要，配合各高等学校的教学改革进程，满足不同类型、不同层次的学校在课程设置上的需求，由中国机械工业教育协会电气工程及自动化学科教学委员会、中国电工技术学会高校工业自动化教育专业委员会、机械工业出版社共同发起成立了“全国高等学校电气工程与自动化系列教材编审委员会”，组织出版新的电气工程与自动化类系列教材。这套教材基于“加强基础，削枝强干，循序渐进，力求创新”的原则，通过对传统课程内容的整合、交融和改革，以不同的模块组合来满足各类学校特色办学的需要。并力求做到：

1. 适用性：结合电气工程与自动化类专业的培养目标、专业定位，按技术基础课、专业基础课、专业课和教学实践等环节，进行选材组稿。对有的具有特色的教材采取一纲多本的方法，注重课程之间的交叉与衔接，在满足系统性的前提下，尽量减少内容上的重复。

2. 示范性：力求教材中展现的教学理念、知识体系、知识点和实施方案在本领域中具有广泛的辐射性和示范性，代表并引导教学发展的趋势和方向。

3. 创新性：在教材编写中强调与时俱进，对原有的知识体系进行实质性的改革和发展，鼓励教材涵盖新体系、新内容、新技术，注重教学理论创新和实践创新，以适应新形势下的教学规律。

4. 权威性：本系列教材的编委由长期工作在教学第一线的知名教授和学者组成。他们知识渊博，经验丰富。组稿过程严谨细致，对书目确定、主编征集、资料申报和专家评审等都有明确的规范和要求，为确保教材的高质量提供了有

力保障。

此套教材的顺利出版，先后得到全国数十所高校相关领导的大力支持和广大骨干教师的积极参与，在此谨表示衷心的感谢，并欢迎广大师生提出宝贵的意见和建议。

此套教材的出版如能在转变教学思想、推动教学改革、更新专业知识体系、创造适应学生个性和多样化发展的学习环境、培养学生的创新能力等方面收到成效，我们将会感到莫大的欣慰。

全国高等学校电气工程与自动化系列教材编审委员会

汪植生 陈明时 郑大钟

前 言

自动控制理论作为一门科学,自它诞生之日起就显示出了强大的生命力。在人类社会进步和生产技术发展的各个阶段,自动控制理论都发挥着重要的作用。同时,科学技术日新月异的发展,为自动控制理论的广泛应用提供了更加完备和有效的技术手段,使自动控制理论不断展现出新的活力和生机。在国家实施以信息化带动工业化,走新型工业化道路的战略,实现制造业数字化、网络化、智能化的过程中,以自动控制理论为理论指导的自动化技术无疑将起着重要的桥梁和纽带作用。

本书介绍的经典控制理论是整个自动控制理论的基础,也是进一步学习和研究其他控制理论的“先行课程”。本书共分八章,第一章深入浅出地介绍了自动控制理论的发展简史和自动控制系统的一般概念。第二章介绍了自动控制系统的一般表示方法和数学模型。第三章至第五章分别详细介绍了经典控制理论中的三种常用的分析方法即时域分析法、根轨迹法和频率法,并对各种分析方法的基本概念、基本原理及其应用都做了较为全面的阐述。第六章介绍了控制系统的校正。第七章论述了非线性控制系统理论基础,分别主要介绍了描述函数分析法和相平面分析法。第八章介绍了采样控制系统的基本理论和分析、设计方法。完成本书的教学内容应安排 60~80 课内学时,教师可根据不同情况在教学过程中对其讲授的内容进行调整。

编者从事自动控制理论课程的教学工作多年,在不断总结心得经验、充实内容、提高水平的基础上,于 2006 年编写出版了本书并已印刷多次。为了适应我国高等教育改革发展的要求和社会、经济发展对人才的不同需求,我们从扩大读者知识面,适时更新教学内容,拓宽专业口径和注重培养学生解决复杂工程问题能力的目标出发,在保持特色的基础上对原书进行了修订。新版教材中强调对基本概念的建立与理解,注重理论与实际结合,尽量简化繁冗的理论推导,在内容组织和编排上适当增加了来自于工程实际的案例和例题,力求做到深入浅出,融会贯通,帮助读者能够更好掌握本书的主要内容和相关课程的知识点,培养科学思维方法和创新能力,具备在实际中分析问题和解决问题的能力。在主要章节均安排了基于 MATLAB 软件的系统分析和设计实现方面的内容,便于读者自学,书中附有一定数量的典型例题解析和习题,并有小结。

本书由刘丁教授主编,辛菁、季瑞瑞、李敏远、任海鹏等参与编写了部分章节,吴亚丽、谢国为本书选编了部分习题、MATLAB 系统分析和设计实例,并绘制了书中的插图。

本书由西安交通大学万百五教授担任主审。审者对本书提出了许多宝贵的修改意见,编者在此表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正,以便进一步修订和完善。

编 者

目 录

序

前言

第一章 自动控制理论的一般概念 1

第一节 自动控制发展简史与主要任务 1

第二节 自动控制的基本方式 3

第三节 典型控制系统举例 7

第四节 对于自动控制系统的要求 12

小结 13

习题 14

第二章 控制系统的数学模型 16

第一节 建立数学模型的一般方法 16

第二节 非线性微分方程的线性化 22

第三节 用拉普拉斯变换求解线性 微分方程 24

第四节 传递函数 29

第五节 典型环节的传递函数 31

第六节 动态结构图及等效变换 35

第七节 信号流图及梅逊公式 42

第八节 控制系统的传递函数 46

第九节 线性系统的状态空间描述 49

第十节 网络化控制系统的延迟 与建模 54

第十一节 基于 MATLAB 的拉普拉斯变换 及系统模型转换实现 56

小结 60

典型例题解析 60

习题 63

第三章 时域分析法 69

第一节 典型输入信号与时域性能 指标 69

第二节 一阶系统分析 72

第三节 二阶系统分析 76

第四节 高阶系统分析 87

第五节 稳定性与劳斯判据 89

第六节 稳态误差分析 97

第七节 基于 MATLAB 的控制系统 时域分析 107

小结 111

典型例题解析 111

习题 116

第四章 根轨迹法 121

第一节 根轨迹与根轨迹方程 121

第二节 绘制根轨迹的基本法则 123

第三节 系统闭环零、极点分布与 阶跃响应的关系 136

第四节 系统阶跃响应的 根轨迹分析 140

第五节 开环极点和零点的变化对系统性能 的影响 146

第六节 特殊根轨迹 150

第七节 基于 MATLAB 的控制系统 根轨迹分析 159

小结 166

典型例题解析 167

习题 170

第五章 频率法 174

第一节 频率特性的概念 174

第二节 典型环节的频率特性 179

第三节 开环系统对数频率 特性图的绘制 189

第四节 控制系统的频域稳定判据 194

第五节 稳定裕量 204

第六节 开环频率特性与闭环 系统性能的关系 208

第七节 闭环频率特性 212

第八节 传递函数的实验确定法 219

第九节 基于 MATLAB 的控制 系统频域分析 222

小结 231

典型例题解析 232

习题 237

第六章 控制系统的校正 242

第一节 引言	242	系统的时域响应	332
第二节 基于频率法的串联校正	243	小结	333
第三节 基于根轨迹法的串联校正	259	典型例题解析	334
第四节 PID 校正	267	习题	337
第五节 反馈校正	274	第八章 采样控制系统的分析	
第六节 复合校正	283	与设计	342
第七节 基于 MATLAB 的控制系统		第一节 采样过程和采样定理	343
校正	285	第二节 信号复现与信号保持器	347
小结	295	第三节 z 变换和 z 反变换	350
典型例题解析	295	第四节 脉冲传递函数	361
习题	297	第五节 采样系统的分析	371
第七章 非线性系统的分析	300	第六节 最少拍采样系统的校正	382
第一节 非线性特性对系统的影响	300	第七节 基于 MATLAB 的采样控制	
第二节 描述函数的基本概念	306	系统分析	386
第三节 典型非线性环节的描述函数	307	小结	390
第四节 用描述函数法研究非线性		典型例题解析	391
系统	311	习题	393
第五节 相平面的基本概念	317	习题参考答案	397
第六节 线性控制系统的相平面分析	320	参考文献	414
第七节 非线性系统的相平面分析	327		
第八节 利用 Simulink 求解非线性			

第一章 自动控制理论的一般概念

在现代工业、农业、国防和科学技术领域中，自动控制担负着越来越重要的角色。

所谓自动控制，就是采用控制装置或机械使被控制对象达到预期的目标。自动控制理论和技术的不断发展，为人们提供了达到优良控制目标的方法和手段。自动控制理论的应用使人们在探索和利用新能源、提高生产效率、降低劳动强度、改善生活质量等方面取得了瞩目的成果，发挥着日益重要的作用。

第一节 自动控制发展简史与主要任务

一、自动控制发展简史

控制论是在 20 世纪 40 年代末诞生的，而它的思想可以追溯到遥远的古代社会。最早的自动控制装置出现于两千多年以前，早在我国西汉（公元前 206—公元 25 年）或夏朝（公元前 2070—前 600 年）以前，劳动人民就发明了指南车，它是按扰动原理构成的开环自动调节系统。北宋年间（公元 1068—1089），苏颂和韩公廉制成了一座水运仪象台，这是对东汉时代张衡制造的铜壶滴漏装置的改进，是一个依照被调节量偏差进行调节的闭环非线性自动调节系统。中国古代科学技术发展的历史表明，自动控制的思想是很早就形成的，中国人自古就是极其聪明和富有创造力的。

应用自动控制方法来控制各种机械设备是人类发展史上的一大创举。由于自动控制的引入，使各种机械装置能够在无人或用人很少的情况下连续工作，并使各种机械设备能够更有效、更安全的运行，生产出来的产品质量明显提高，同时也大大降低了人们的劳动强度。17 世纪以来，随着工业生产的发展，在欧洲一些国家相继出现了多种自动化装置，其中以俄国学者普尔佐诺夫在 1765 年发明的保持蒸汽锅炉水位恒定的浮子式阀门水位调节器（如图 1-1 所示）和 1788 年英国机械师 J. 瓦特（Watt）发明的用于蒸汽机速度控制的离心式调速器（如图 1-2 所示）最具代表性。这些发明对第一次工业革命和自动控制理论后来的发展都产生了重要影响。

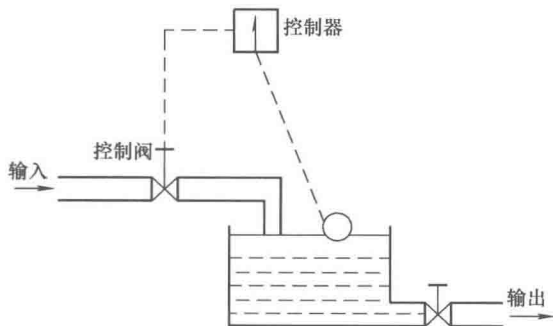


图 1-1 浮子式阀门水位调节器

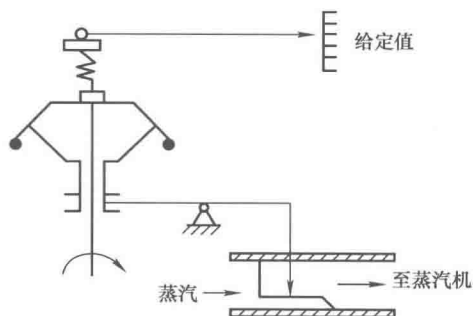


图 1-2 离心式调速器

通过对上述装置的研究,人们发现在有些条件下,锅炉的水位不能稳定于所期望的数值从而产生振荡,蒸汽机转速也会忽高忽低。这些现象引发了自动控制中的一个核心问题——稳定性问题,早期的科学家都围绕这一问题开展了研究工作。1868年英国物理学家 J. 麦克斯韦尔 (Maxwell) 基于微分方程方法,从理论上总结出了调节器的稳定条件。1877年和1895年英国数学家 E. 劳斯 (Routh) 和德国数学家 A. 赫尔维茨 (Hurwitz) 相继提出了用于线性系统的稳定性代数判据,并沿用至今。1892年俄国数学家李雅普诺夫提出了稳定性的严格数学定义并发表了专著,他的研究成果至今仍然是人们进行线性 and 非线性系统稳定性分析的重要方法。

人类进入20世纪以后,随着电子管反馈放大器的发明,各种类型的电子式自动调节器被广泛应用,促进了对自动调节系统分析和设计的研究。1927年美国贝尔电话实验室的电气工程师 H. 布莱克 (Black) 发明了电子反馈放大器,在对系统的分析过程中引入了反馈的概念,使人们对自动控制系统中的反馈控制有了更深入的理解。1932年美国电气工程师 N. 奈奎斯特 (Nyquist) 提出了根据系统开环传递函数或频率响应曲线判定系统稳定性的方法,即著名的奈奎斯特稳定判据。根据这一结论, A. 博德 (Bode) 于1945年提出了用对数频率特性曲线分析反馈控制系统的方法。上述研究成果一方面满足了在当时条件下系统分析和研究的需要,另一方面为控制论作为一门独立学科的建立和发展奠定了基础。

二战期间,自动控制理论得到了很大的发展,并不断成熟和完善,成为指导生产实践的重要理论。控制论是在20世纪40年代末诞生的。“控制论”的英文“Cybernetics”是由希腊文 *Κυβερνητική* 演变而来的,其原意是掌舵人,它还演化为拉丁文 *governor*,原意是调速器,古希腊的著名哲学家柏拉图就使用过这个词。我国出现控制一词是在1060年(北宋时代)成书的《新唐书·王忠嗣》中,书中就有“劲兵重地,控制万里”之说。控制论作为一门独立的科学理论,是以美国数学家 N. 维纳 (Wiener) 1947年完成定稿,1948年出版的名著《控制论》(*Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*) 为标志的。

自维纳创立控制论以来,控制论大体经历了几个发展阶段。1947年是经典控制论的起点,到1957年它已发展成为一门相对独立的学科,在这一时期,相继产生了若干分析实际控制系统的有效方法,其核心是采用传递函数来研究设计自动化系统,将系统的稳定性作为设计标准,而不足之处是当系统变量较多且相互关联时,难以确定其稳定性。20世纪50年代以后,人们探索太空领域的需求,大大促进了控制理论的发展。通过引入状态、状态变量和状态空间等重要概念,产生了基于时域的线性系统描述方法。同时,提出了“最优化”等概念,并由此发展起来一整套新的控制理论与控制技术,到1965年出现了现代控制理论体系并得到了广泛的应用。20世纪70年代前后,由于控制系统越来越庞大,形成了所谓的“大系统”,使得控制论逐步进入了大系统控制论阶段。在此期间,人们着重研究大系统的组成结构,各子系统或变量间的分解、协调和控制方法,逐步解决了大系统的最优设计、最优控制和最优管理等问题,美国阿波罗计划的实现就是大系统控制论应用的成功实例。

自20世纪后半叶以来,世界各国工业向着大型、连续和综合化方向发展,构成的控制系统也愈发复杂,这种对象、过程 and 环境的复杂性对传统的控制理论和方法提出了挑战。为此,人们必须建立新的理论和方法。1971年著名学者美籍华人傅京逊 (K. S. Fu) 将控制论与人工智能相结合,首次正式提出了智能控制这个新兴学科,控制论进入了发展的新阶段。

控制论是从宏观上将动物、人、通信和控制机器的控制功能加以类比,概括出一切控制对象都必须遵循的观点、法则和定律,将控制的基本功能归结为信息的接收、交换、存储、处理、反馈和输出。控制论的原始含义非常广泛,可分为工程控制论、生物控制论、经济控制论、社会控制论和教育控制论等。随着控制论向各学科的渗透,今后还会形成新的分支。所以,控制论已经和正在从最初的工程技术领域走向更为广泛的天地,成为人们认识世界和改造世界的科学的方法论。

计算机技术的迅猛发展,对控制系统的设计和应用起到了很大的推动作用。使用诸如 MATLAB 这样的语言,能够为分析自动控制系统的性能提供便利的工具。微型计算机以其更高的性价比,使得自动控制的应用从没有像现在这样活跃。从火星探索登陆到微型机器人实施医学手术;从微型电话,到大型喷气式客机;从洗衣机到大型炼油厂、钢铁厂……自动控制正为社会的发展、人类进步做着不懈的贡献。

控制论虽然有多个分支,但从其发展历史、核心内容以及应用范围等方面来看,其中最为基本、最为重要的内容,同时与工业控制系统密切相关的,应是控制论的主体,这部分内容多称之为控制理论 (*Control Theory*),本书所介绍的也是这些内容。

二、自动控制的主要任务

在现代工程科学技术发展过程中,自动控制无论是作为一项先进的技术还是作为有效的方法,都在各个领域扮演着越来越重要的角色。自动控制的主要任务就是在没有人直接参与的情况下,应用某种设备或装置(称为控制器)自动地、有目的地操纵生产机械或生产过程(称为被控对象),使其工作状态或参数(即被控量)按预期的规律运行。将自动控制技术应用于生产实际,能够有效地提高产品质量,降低生产成本和劳动强度。

自动控制理论和技术的不断发展,不仅使飞船登月、人类遨游太空成为现实,而且已成为现代制造业和工业生产过程中重要且不可缺少的组成部分。例如,在制造业中,数控机床能够高精度、高效率地完成复杂形状的加工任务;在化工生产过程中,化学反应炉的温度或流量自动地根据生产工艺的要求而变化与调整;在电力生产中,发电设备可以自动地协调多个变量的变化,满足电网负荷的要求;在军事上,导弹发射和制导系统自动地将导弹精确引导至敌方目标等。近几十年来,随着计算机技术的迅猛发展,使自动控制不仅在工程技术领域得到了日益广泛的应用,而且在生物、化学、环境、经济管理和社会科学等领域日益发挥着重要的作用。

第二节 自动控制的基本方式

系统是由一些相互联系、相互制约的环节或部件组成,并具有特定功能的整体。每个系统都有输入量和输出量,含有控制器和被控对象的系统被称为控制系统,如图 1-3 所示。

在这个控制系统中,控制器接收输入量 $r(t)$,产生相应的控制作用 $u(t)$ 去操纵被控对象,使其输出量 $y(t)$ 符合预期的性能要求。自动控制系统可具有各种各样的形式,一般根据信号传送的特点或系统的结构特点,分为开环控制系统和闭环控制系统两种基本形式。

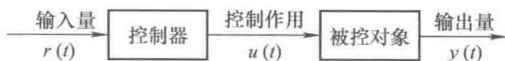


图 1-3 控制系统的组成

一、开环控制

图 1-4 为一台直流电动机转速开环控制系统。电动机带动生产机构转动，电动机的转速可由给定电压改变。移动电位器触头，获得功率放大器的输入电压，经过功率放大，作用在电动机的电枢上，从而改变电动机的转速。不同的电位器位置，对应不同的给定电压，即对应不同的转速。该系统具有以下特点：

- 1) 电动机的转速由电位器的输出电压控制。
- 2) 转速对电位器的控制作用没有影响，即没有反作用。

这种输出量对输入量没有影响的系统称为开环系统（或非反馈系统）。为了说明系统各环节之间的作用关系，常用如图 1-5 所示的框图来表示上述过程。

图 1-5 中，每个框的输入就是输入至该元件的作用量，框的输出是该元件受到输入信号作用后的响应。作用信号是单方向的，形成开环，这也是所有开环系统的基本特征。

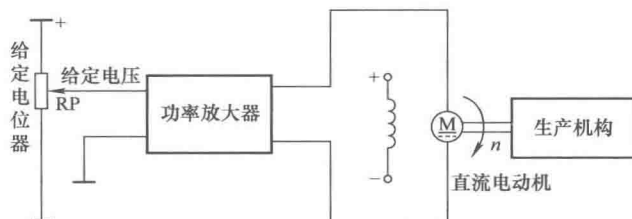


图 1-4 直流电动机转速开环控制系统

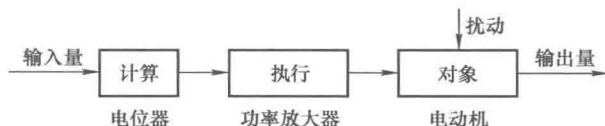


图 1-5 电动机转速开环控制系统框图

综上所述，开环控制的原理是：需要控制的是受控对象的控制量，而测量的是给定值。开环系统比较简单，易于实现，但这类系统存在不可忽视的缺点。在系统工作过程中，周围环境的变化（系统内部元件参数的改变，电网电压波动，工作机构负载变化等）都将对系统产生扰动，在输入信号作用一定时，这些扰动量会影响系统的输出量，使其偏离预期值，导致整个系统难以达到较高的控制精度。因此，开环控制适用于对控制精度要求不高或不存在扰动作用的场合。

二、闭环控制

由以上分析可以看出，开环控制精度不高的重要原因是：没有根据系统的实际输出及时地修改输入，以便使输出具有准确的值，即输出对输入没有影响。为了提高开环控制的精度，在人工控制中，可由人对输入做相应的修正，如在上例中，人一边监视作为检测设备的转速表，一边在头脑里与他希望的转速做比较，当发现电动机转速高于希望转速值时，立刻操纵电位器使电枢电压减小，降低转速；反之也一样，这样就形成闭环控制系统，如图 1-6

所示。

这里将输出量与输入量进行了比较, 根据它们的差值实行控制, 从而使输出量有较准确的值, 构成了反馈控制系统。在自动控制系统中, 常见的是具有负反馈功能的闭环控制系统。负反馈的含义是把系统的输出量直接或通过测量元件引向输入端, 与系统的输入量进行比较, 然后用它们的差值对系统进行控制。因此, 在实践中, 反馈控制与闭环控制这两个术语没有本质的不同, 常常可交换使用。

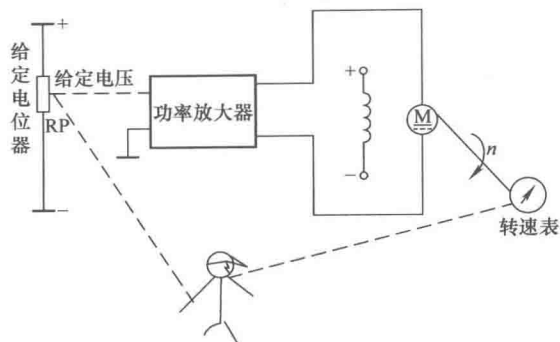


图 1-6 人工电动机转速闭环控制系统

显然, 人工控制在复杂、快速、准确的系统中是不能满足要求的, 也不利于减轻劳动强度, 所以在自动控制系统中, 都是应用自动控制器来代替人工操作。在图 1-6 中, 用电位器电压作为给定值, 用测速发电机代替转速表作为检测元件, 再将代表转速的测速发电机的输出电压送至输入端与电位器电压进行比较, 将其差值送至功率放大器 (控制器), 从而形成了电动机转速自动闭环控制系统, 如图 1-7 所示。当电位器位置一定时, 电动机转速就为一定值。当电网电压变化或负载变化时, 将引起转速变化, 此时, 测速发电机就会将该变化反映到控制器的输入端, 使控制器的输出产生相应的变化, 从而自动地维持电动机转速基本不变, 以达到较高的控制精度。

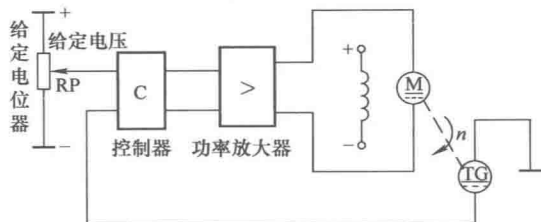


图 1-7 电动机转速自动闭环控制系统

闭环控制系统的典型结构框图如图 1-8 所示: 图中“ $\otimes$ ”表示比较器 (或比较环节), 负号“-”表示是负反馈。在此, 输入信号与反馈信号相比较, 其差值为误差信号, 作为控制器输入, 系统的输出对控制量有直接的影响 (即有负反馈), 这些就是闭环控制系统的主要特点。



图 1-8 闭环控制系统的典型结构框图

采用基于负反馈的闭环控制, 可以有效抑制干扰对系统输出量的影响。如当系统输入量为一定值, 而扰动作用使系统输出量减小, 则反馈量也随之减小, 使得输入量与反馈量的差值增大, 控制器输出的控制量也相应增大, 从而可以提高输出量, 达到了抑制扰动对系统的影响, 维持输出量不变的目的, 起到了自动调节的作用, 反之亦然。所以, 具有负反馈的闭

环控制能够增强系统的抗干扰能力,提高系统的稳态精度,改善系统的性能。然而,在闭环控制系统的工作过程中,由于系统存在惯性,控制作用所起的效果是有时间延迟的,系统往往得不到及时的控制与调整。如果控制器的控制作用与被控对象的惯性之间匹配不当,则闭环系统可能产生振荡,甚至不稳定,使系统不能正常工作。

在此,要再强调一下反馈的概念。控制系统中采用负反馈,除了能够降低系统误差、提高控制精度外,和在反馈放大器中一样,还能使系统对内部参数的变化不敏感,元件参数变化或外部干扰对系统的影响将大大降低,对于一定的控制要求,就有可能采用一般精度的元件来构成系统,降低了生产成本,而这在开环系统中是无法办到的。

以上主要讨论了开环控制和闭环控制问题的基本概念。为了加深读者对开环控制、闭环控制、反馈等概念的理解,可从另一个角度对上述问题加以说明。

当选择了某个控制对象,但所拥有的控制方法达不到需要的控制能力怎么办?例如向月球发射一枚火箭,火箭要到达38万公里外的月球就如同要用步枪击中10公里外的一只苍蝇一样困难。人们可能以为火箭上装有一个非常精确的瞄准器,按算准的量向月亮发射,就像用步枪打靶一样,其实这是完全办不到的。因为在38万公里的遥远路途中,有许多干扰根本无法事先预测到,无论发射前把轨迹算得多么准确,把发射方向控制得多么精准也无济于事。这就是说,仅仅依靠发射时的控制手段是不可能达到这样的控制能力的。那么火箭是如何到达目标的呢?

飞鹰捕食,不但可以准确捕捉静止猎物,而且能够捕捉到快速躲避的猎物。显然,鹰不可能事先计算好自己和目标的运动方程。当鹰发现猎物后,马上估计它和目标的大致距离及相对位置,然后选择一个大致的方向飞去。在这一过程中,鹰的眼睛一直盯着目标,不断向大脑报告自己的位置和目标之间的差距,不管猎物如何躲闪,它的大脑做出的决定都是为了缩小自身与目标的位置差,这种决定通过翅膀来执行,随时改变其飞行方向和速度,调整位置,使差距越来越小,直到这个差距为零时,鹰就捕获到自己的猎物了,这一过程如图1-9所示。

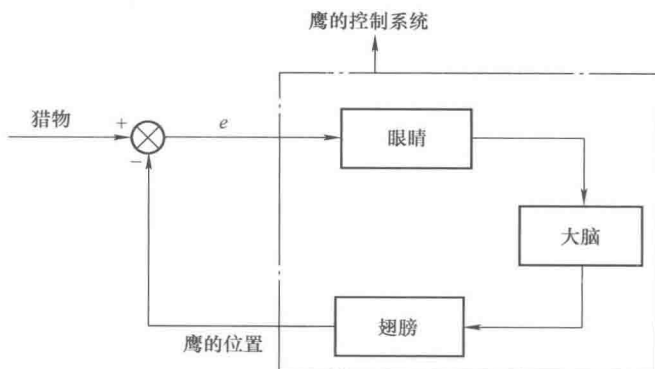


图 1-9 鹰捉猎物闭环系统

图1-9中, e 代表鹰与猎物的实际差距,称为目标差,眼睛主要接收这种目标差的信息,并把它传送到大脑,大脑指挥着翅膀改变鹰的位置,使鹰向着目标差不断减小的方向运动。这个控制重复进行,就构成了鹰捉猎物的连续动作。

这里关键的一点是大脑的决定始终使鹰的位置向减小目标差的方向改变，这就是控制理论中的负反馈控制过程。因此负反馈的本质就在于设计了一个使目标误差不断减小的过程，最终达到控制目的。

二次大战前后，随着科学技术的发展，飞机的速度越来越快，性能越来越好，用老式的高射炮击落飞机很困难。人们发现无论如何提高火炮的精确度，能力总是有限的，飞机飞行的轨迹因驾驶员动作的随机性几乎是不能预先求出的。这一类被认为是极为困难的问题，由工程师们从自然界的动物身上找到了答案。

工程师为导弹安上了眼睛——红外线寻找装置，配上大脑——计算机，同时给它一副可以调节的翅膀——姿态控制装置。这样导弹就可以向不断减小目标差的方向运动了，直到将飞机击落。当然，人们将火箭送上月球也是采用了类似方法。

三、闭环控制系统的术语和定义

闭环控制系统框图如图 1-10 所示。

图中：给定信号 $r(t)$ ——输入至控制系统的指令信号；

主反馈 $b(t)$ ——与输出成正比或某种函数关系，但量纲与给定信号相同的信号；

误差 $e(t)$ ——给定信号与主反馈信号 $b(t)$ 之差的信号；

控制单元 G_1 ——接收误差信号，通过转换与运算，产生期望的控制量；

控制量 $u(t)$ ——来自控制单元，作用于被控对象的信号；

扰动 $n(t)$ ——对系统输出产生不利影响的信号；

控制对象 G_2 ——接收控制信号并产生被控制量；

输出 $y(t)$ ——自动控制系统的被控制量；

反馈单元 H ——将输出信号转换成为反馈信号（将输出量转换成为与给定输入信号相同量纲的信号）；

⊗ ——比较环节，相当于误差检测器，它的输出等于参考输入与反馈信号的差，即完成 $r(t) - b(t)$ 的功能。

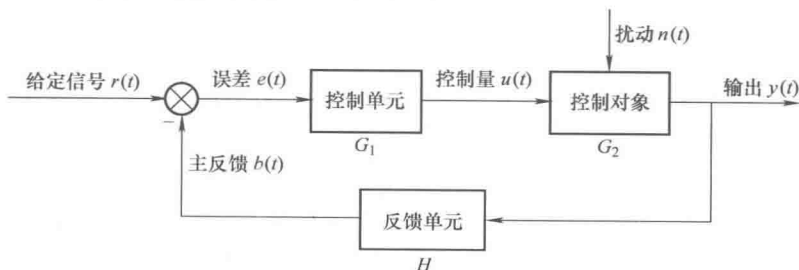


图 1-10 闭环控制系统框图

第三节 典型控制系统举例

本节将介绍控制系统的一些典型例子。

一、温度控制系统

图 1-11 是一个电炉温度控制系统的原理图。其中加热器由晶闸管电路构成，炉内的温度由温度传感器（一般为热电偶或热电阻）测量，将得到的反映电炉内实际温度的模拟量信号经模-数转换器（A-D 转换器）变成数字信号送入计算机，并将此反馈信号与设计者期望的温度值进行比较后产生误差信号，计算机依据此信号并按预定的控制算法计算出相应的控制量，再经数-模转换器（D-A 转换器）变成用来控制晶闸管电路通断的电流信号，从而改变加热器的工作电流，最终达到控制炉温的目的。

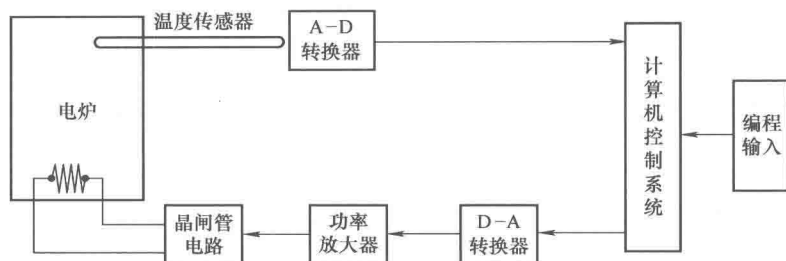


图 1-11 电炉温度控制系统

根据以上电炉温度控制原理不难给出其控制系统框图，如图 1-12 所示。

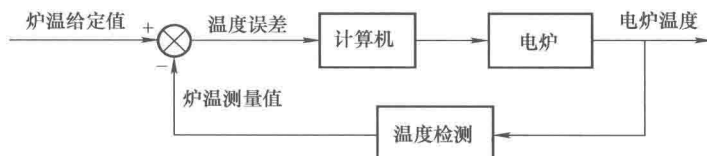


图 1-12 电炉温度控制系统框图

二、电站锅炉空气预热器密封间隙控制系统

图 1-13 是电站锅炉空气预热器密封间隙控制系统原理图。空气预热器是电站锅炉中广泛使用的节能设备。在实际运行中，为提高效率，要求空气预热器转子与密封板之间的密封间隙保持恒定。由于空气预热器转子工作在高温环境中，会产生机械变形，导致密封间隙值

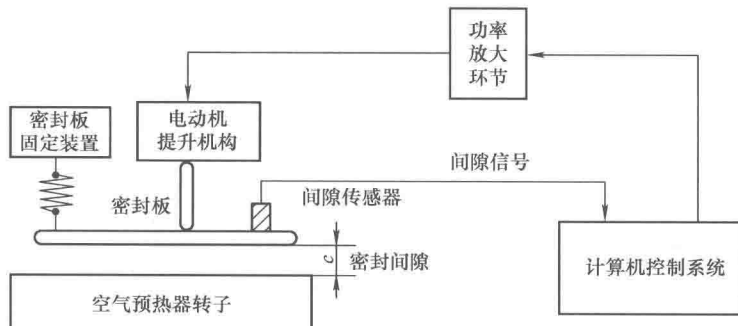


图 1-13 电站锅炉空气预热器密封间隙控制系统