

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



ZIDONG KONGZHI YUANLI

自动控制原理

侯加林 主 编
周修理 副主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

教育部高等学校自动化专业教学指导委员会推荐教材

教育部高等学校自动化专业教学指导委员会推荐教材

自动控制原理

王长军 主编
王长军 副主编



清华大学出版社

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



ZIDONG KONGZHI YUANLI

自动控制原理

主 编 侯加林
副主编 周修理
编 写 季宝杰 闫银发
刘莫尘 高 迟
主 审 任伟建



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

本书主要介绍自动控制经典理论中的基本概念、基本原理和一些基本分析方法与设计方法。全书共分9章,主要内容包括自动控制系统的基本概念、控制系统的数学模型、线性控制系统的时域分析、控制系统的根轨迹分析、线性系统的频域分析、控制系统的综合与校正、非线性系统、线性离散控制系统和MATLAB在控制系统分析与设计中的应用。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化、农业电气化与自动化及相关专业的本科教材,也可作为高职高专和函授教材,还可供电气工程技术人員阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/侯加林主编. —北京:中国电力出版社,
2008

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-7304-1

I. 自… II. 侯… III. 自动控制理论—高等学校—
教材 IV. TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第077590号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008年7月第一版 2008年7月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 21.25印张 519千字

定价 33.80元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

在现代科学技术迅速发展的过程中,自动控制起着非常重要的作用。不管是石油、化工、机械、冶金、信息、电力、医药、轻工还是农业、军事、航空及航天等无不用到自动控制技术,自动控制的重要作用是人所共知的。因此,掌握自动控制的基本理论是十分重要的。

自动控制理论包括经典的和现代的两个部分。本书只讨论经典理论部分,它是建立在传递函数基础之上的,主要在频率域中分析和综合控制系统;对于线性的、单变量的系统,经典理论是很有成效的,它在 20 世纪 50 年代已经成熟。

本书主要介绍经典理论中的基本概念、基本原理和一些基本分析方法与设计方法。其中,第 1 章主要介绍了自动控制的基本概念、基本分类,对自动控制系统的基本要求和自动控制理论的发展历史。第 2 章以大量机械、电气系统等实际对象为例,介绍了建立控制系统数学模型的建模方法。第 3~6 章对线性定常控制系统进行讨论,介绍了时域分析法、根轨迹法、频域分析法以及校正和设计方法。其中第 3 章讨论了二阶系统的时域响应和相应的性能指标,以及用于稳定性分析的劳斯判据;第 4 章介绍了根轨迹的原理,作图方法和基于根轨迹的系统分析;第 5 章介绍了控制系统分析的频域方法,讨论了基于极坐标的奈奎斯特图和基于对数坐标的频率特性图的绘制及其在系统性能分析和稳定性分析中的应用;第 6 章对单输入、单输出线性定常系统进行讨论,介绍了基于根轨迹和频域方法的控制系统校正。第 7 章对非线性系统进行了分析,讨论了描述函数法、相平面方法等常用的非线性系统分析方法。第 8 章介绍了线性离散系统的理论及其应用,在基本概念、数学模型、动态性能及数字校正方面进行了详细讨论;第 9 章介绍了 MATLAB 的基本知识,讨论了 MATLAB 在控制系统分析中的应用,并且以表格形式,介绍了 MATLAB 控制系统工具箱的函数。

本书由山东农业大学机械与电子工程学院侯加林教授担任主编,东北农业大学工程技术学院周修理教授担任副主编,黑龙江大庆石油学院任伟建担任主审。各章编者为:侯加林(第 1、2、8 章),周修理(第 4、5 章),季宝杰(第 3 章),闫银发(第 6 章),刘莫尘(第 7 章),高迟(第 9 章)。

对于本书中存在的疏漏和不妥之处,欢迎广大读者批评指正。

编者

2008 年 4 月



目

录

前言

第1章 自动控制系统的基本概念	1
1.1 引言.....	1
1.2 自动控制系统分类.....	6
1.3 自动控制系统举例.....	8
1.4 控制系统的控制方式.....	11
1.5 自动控制系统的组成和基本要求.....	13
本章小结.....	17
思考题与习题.....	17
第2章 控制系统的数学模型	19
2.1 引言.....	19
2.2 控制系统的微分方程描述.....	20
2.3 线性控制系统的传递函数.....	30
2.4 控制系统的基本环节.....	34
2.5 动态结构图和信号流程图.....	37
本章小结.....	57
思考题与习题.....	58
第3章 线性控制系统的时域分析	61
3.1 引言.....	61
3.2 典型输入信号.....	61
3.3 控制系统的稳定性分析.....	63
3.4 控制系统的稳态误差分析.....	68
3.5 控制系统的动态性能分析.....	74
3.6 线性控制系统的时域分析.....	75
本章小结.....	93
思考题与习题.....	94
第4章 控制系统的根轨迹分析	97
4.1 引言.....	97
4.2 根轨迹的概念及绘制.....	97
4.3 绘制根轨迹的基本规则.....	99
4.4 参数根轨迹.....	108
4.5 按根轨迹分析系统.....	109
本章小结.....	115
思考题与习题.....	115
第5章 线性系统的频域分析	119
5.1 引言.....	119
5.2 傅立叶变换.....	119

5.3	控制系统的频率特性	121
5.4	控制系统的频率特性图的绘制	126
5.5	Nyquist 稳定判据	141
5.6	控制系统的稳定裕度	147
5.7	控制系统的频率特性分析	150
5.8	闭环频域性能指标与时域性能指标间的关系	157
	本章小结	159
	思考题与习题	159
第 6 章	控制系统的综合与校正	165
6.1	引言	165
6.2	基本控制规律	168
6.3	控制系统的串联校正	171
6.4	控制系统的反馈校正	186
6.5	复合控制校正	190
6.6	基于根轨迹法的串联校正设计	192
	本章小结	202
	思考题与习题	202
第 7 章	非线性系统	205
7.1	典型非线性系统概述	205
7.2	非线性系统的描述函数分析	209
7.3	非线性系统的相平面分析	219
7.4	非线性特性的利用及非线性控制器的应用	235
	本章小结	248
	思考题与习题	248
第 8 章	线性离散控制系统	252
8.1	引言	252
8.2	信号的采样与保持	253
8.3	采样信号的 Z 变换	260
8.4	离散系统的数学模型	274
8.5	离散系统的稳定性与稳态误差	286
8.6	离散控制系统的动态性能分析	294
8.7	数字控制器	298
	本章小结	305
	思考题与习题	306
第 9 章	MATLAB 在控制系统分析与设计中的应用	308
9.1	MATLAB 简介	308
9.2	MATLAB 的数学工具	311
9.3	用 MATLAB 处理系统的数学模型	313
9.4	MATLAB 用于时域分析	318
9.5	MATLAB 用于根轨迹分析	321
9.6	MATLAB 用于频域分析	324
9.7	MATLAB 用于系统校正和设计	327
9.8	MATLAB 对采样控制系统的分析	330
	参考文献	332

第1章 自动控制系统的基本概念

1.1 引言

在生产力发展的过程中,人类总是不断地认识世界和改造世界,不断地提高社会的劳动生产率。经过一个漫长的历史时期,逐步地用机器代替了人工劳动,实现了机械化和自动化,开辟了人类对生产活动有意识控制的新纪元。

在科学技术飞速发展的今天,自动控制所起的作用越来越重要,无论是在宇宙飞船等尖端技术领域,还是在机器制造业及工业过程控制中,它所取得的成就都是惊人的。导弹能够准确地命中目标,“神舟五号”载人航天飞机能按预定的轨道运行并返回地面,宇宙飞船能准确地月球着陆并重返地球,都是由于自动控制技术迅速发展的结果。工业生产过程中,从最基本的机械转速、位置的控制,到对压力、温度、湿度、流量、频率、物位、成分等方面的控制,都是自动控制技术的重要组成部分。不仅如此,自动控制也是一门横向学科。自动控制系统遍及各类工程领域,“系统”的概念已渗透到社会生活的各个方面。自动控制技术的应用范围已经扩展到生物、医学、环境、经济管理和其他许多社会生活领域中,自动控制已经成为现代社会活动中不可缺少的重要组成部分。

“自动控制原理”是研究各类自动控制系统共性问题的一门技术科学,是一门理论性较强的工程科学。根据自动控制技术发展的不同阶段,自动控制理论一般可分为“经典控制理论”和“现代控制理论”两大部分。

经典控制理论的内容主要以传递函数为基础,研究单输入、单输出自动控制系统分析和设计问题。由于发展较早,现已成熟,在工程上已经成功地解决了大量实际问题,因此它是研究自动控制系统的重要理论基础。

现代控制理论的内容主要以状态空间法为基础,研究多输入、多输出、定常数或变参数、线性或非线性的自动控制系统分析和设计问题。随着现代科学技术的发展,已出现最优控制、最佳滤波、模糊控制、系统辨识、自适应控制等一些新的控制方式。因此它也是研究庞大的系统工程和模仿人类的智能控制等方面必不可少的理论基础。

本书只讨论经典控制理论部分的内容。

1.1.1 自动控制理论发展简史

自动控制是社会生产力发展到一定阶段的产物,是人类社会进步的一个象征。今天自动化已被广泛应用于工农业生产、国防建设、社会组织以及人类生活的各个方面,已成为信息化社会的重要技术基础,世界各国对其予以高度的重视。我国将自动化作为重点发展的一个新兴学科,在攀登计划、高技术计划、国家重点科技攻关计划以及经济建设、国防现代化建设和社会管理的各个方面都强调了自动化的地位与作用。

自动控制的前驱可以追溯到古老的年代,世界文明古国对此都作出了许多贡献。尤其是反馈原理的应用,在控制系统中的使用更有着吸引人的历史。

最先使用反馈控制装置的是希腊人,早在公元前300年,古希腊就运用反馈控制原理设

计了浮子调节器，并应用于水钟和油灯中。在图 1-1 所示的水钟原理图中，最上面的蓄水池提供水源，中间蓄水池浮动水塞保证恒定水位，以确保其流出的水滴速度均匀，从而保证最下面水池中的带有指针的浮子均匀上升，并指示出时间信息。

同样早在 1000 多年前，我国古代先人们也发明了铜壶滴漏计时器、木牛流马、指南车等控制装置；公元 1086~1089 年，苏颂和韩公廉发明的水运气象台，是按反馈控制理论工作的。这些无不反映出劳动人民的聪明智慧。但是这些自控装置和系统的设计还处于直觉阶段，没有系统的理论指导，因此在控制系统的各项性能（如稳、准、快）的协调控制方面经常出现问题。

根据自动控制理论的发展历史，大致可将其分为以下四个阶段。

1. 经典控制理论阶段

瓦特 (J. Watt) 首次将压力反馈控制器用于工业控制中，用于限制蒸汽机引擎速度。1788 年，瓦特发明了飞锤调速器，飞锤转速调整器原理图如图 1-2 所示。这种全机械化装置测出转速，利用飞轮来控制进入引擎的蒸汽量。正如先有房子，后有建筑学一样，大约 100 年后麦克斯韦 (J. C. Maxwell) 才对该系统的稳定性作出了分析。

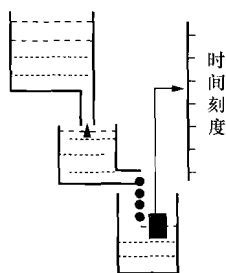


图 1-1 水钟原理图

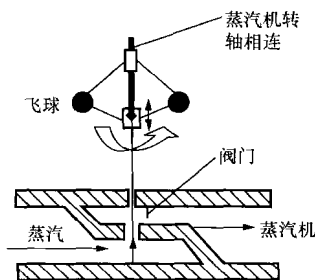


图 1-2 飞锤转速调速器原理图

19 世纪 60 年代是控制系统高速发展的时期，无论是在理论还是在实践上都有很多发展。1868 年，麦克斯韦 (J. C. Maxwell) 基于微分方程描述从理论上给出了系统的稳定性条件。1877 年，劳斯 (E. J. Routh) 以及 1895 年霍尔维茨 (A. Hurwitz) 分别独立给出了高阶线性系统的稳定性判据；另一方面，1892 年，李雅普诺夫 (A. M. Lyapunov) 给出了非线性系统的稳定性判据。

1922 年，米罗斯基 (N. Minorsky) 给出了位置控制系统的分析，并对 PID 三作用控制给出了控制规律公式。1931 年，美国开始出售带有线性放大器和 I (积分) 作用的气动控制器。1934 年，哈仁 (H. L. Hazen) 给出了伺服机构的理论研究成果。1942 年，齐格勒 (J. G. Ziegler) 和尼科尔斯 (N. B. Nichols) 又给出了 PID 控制器的最优参数整定法。上述方法基本上是时域方法。另一方面，针对美国长距离电话线路负反馈放大器应用中出现的失真等问题，1932 年奈奎斯特 (Nyquist) 提出了负反馈系统的频率域稳定性判据，这种方法只需利用频率响应的实验数据，不用导出和求解微分方程。1940 年，波德 (H. Bode) 进一步研究通信系统频域方法，提出了频域响应的对数坐标图描述方法。频域分析法主要用于描述反馈放大器的带宽和其他频域指标。1943 年，哈尔 (A. C. Hall) 利用传递函数（复数域模型）和方框图，把通信工程的频域响应方法和机械工程的时域方法统一起来，人们称此方法为复域方法。

在二战时期使用和发展自动控制系统的主要动力就是设计和发展自动导航系统、自动瞄准系统、自动雷达探测系统和其他在自动控制系统基础上发展的军事系统。这些控制系统的高性能要求和复杂性使所能得到的控制装备和对控制系统的期望及新方法手段得到了飞速发展。对高性能武器的要求还促进了对非线性系统、采样数据系统以及随机控制系统的研究。

第二次世界大战结束时,1948年,美国数学家维纳(Norbert Wiener)发表了《控制论》一书,标志着经典控制技术和理论基本建立,维纳被称为“控制论之父”。同年,伊文斯(W. Evans)又进一步提出了属于经典方法的根轨迹设计法,给出了系统参数变换与时域性能变化之间的关系。至此,复数域与频率域的方法进一步得到完善。

1954年,钱学森在美国出版的《工程控制论》中,从技术科学的观点,对各种工程技术系统的自动控制理论作了全面研究,奠定了我国的工程控制论基础。

2. 现代控制理论阶段

由于航天事业和电子计算机的迅速发展,20世纪60年代初,在原有“经典控制理论”的基础上,又形成了所谓的“现代控制理论”,这是人类在自动控制技术认识上的一次飞跃。

随着人造卫星的发展和太空时代的到来以及其他一些因素,为导弹和太空卫星设计高精度复杂的控制系统变得越来越重要。由于这些原因,时域手段也发展起来。状态空间方法属于时域方法,其核心是最优化技术。它以状态空间描述(实质上是一阶微分或差分方程组)作为数学模型,利用计算机作为系统建模分析、设计乃至控制的手段,适应于多变量、非线性、时变系统。它不但在航空、航天、制导与军事武器控制中有成功的应用,在工业生产过程控制中也得到逐步应用。

我国在现代控制理论方面的主要成就除了航天方面的火箭发射控制技术之外,较为突出的还有人口模型与中国人口控制问题。这是人文社会科学与工程技术科学相结合的研究成果,该项研究成果协助我国政府实现了中国的短期、中期、长期人口控制发展决策,是一项比较突出的现代控制理论研究方面的研究成果。

3. 大系统控制理论阶段

从20世纪70年代开始,一方面现代控制理论继续向深度和广度发展,出现了一些新的控制方法和理论。如:①现代频域方法,该方法以传递函数矩阵为数学模型,研究线性定常多变量系统;②自适应控制理论和方法,该方法以系统辨识和参数估计为基础,处理被控对象不确定和缓时变,在实时辨识基础上在线确定最优控制规律;③鲁棒控制方法,该方法在保证系统稳定性和其他性能基础上,设计不变的鲁棒控制器,以处理数学模型的不确定性;④预测控制方法,该方法为一种计算机控制算法,在预测模型的基础上采用滚动优化和反馈校正,可以处理多变量系统。

另一方面随着控制理论应用范围的扩大,从个别小系统的控制发展到若干个相互关联的子系统组成的大系统进行整体控制,从传统的工程控制领域推广到包括经济管理、生物工程、能源、运输、环境等大型系统以及社会科学领域,人们开始了对大系统理论的研究。

大系统理论是过程控制与信息处理相结合的综合自动化理论基础,是动态的系统工程理论,具有规模庞大、结构复杂、功能综合、目标多样、因素众多等特点。它是一个多输入、多输出、多干扰、多变量的系统。例如人体,就可以看作一个大系统,其中有体温的控制、化学成分的控制、情感的控制等。大系统理论目前仍处于发展和开创性阶段。

4. 智能控制阶段

这是近年来新发展起来的一种控制技术,是人工智能在控制上的应用。智能控制的概念和原理主要是针对被控对象、环境、控制目标或任务的复杂性提出来的,它的指导思想是依据人的思维方式和处理问题的技巧,解决那些目前需要人的智能才能解决的复杂的控制问题。被控对象复杂性体现为模型的不确定性、高度非线性、分布式的传感器和执行器、动态突变、多时间标度、复杂的信息模式、庞大的数据量以及严格的特性指标等。而环境的复杂性则表现为变化的不确定性和难以辨识。

从控制论的观点看,人是最巧妙、最灵活的控制系统。它善于根据条件的变化而作出正确的处理。如何将人的智能应用于实际的自动控制系统中,这是个有重要意义的问题。从20世纪70年代开始,人们不仅解决社会、经济、管理、生态环境等系统问题,而且为解决模拟人脑功能,形成了新的学科——人工智能科学,这是控制论的发展前沿。计算机技术的发展为人工智能的发展提供了坚实的基础。人们通过计算机强大的信息处理能力来开发人工智能,并用来模仿人脑。在没有人的干预下,人工智能系统能够进行自我调节、自我学习和自我组织,以适应外界环境的变化,并作出相应的决策和控制。

智能控制是从“仿人”的概念出发的,它以人工智能的研究为方向,引导人们去探讨自然界更为深刻的运动机理。一般认为,其方法包括模糊控制、神经网络控制、专家控制等。当前主要的研究方向有自适应控制理论、模糊控制理论、人工神经网络以及混沌理论等,并且有许多研究成果产生:不完全依赖于系统数学模型的自适应控制器、模糊控制器等工业控制产品;超大规模集成电路芯片的神经网络计算机已经运行;美国宇航专家应用混沌控制理论,对一颗将要报废的人造卫星,仅利用其自身残存的燃料,成功地将其发射到了火星等。

智能控制理论的研究与发展,给信息与控制学科研究注入了蓬勃的生命力,启发与促进了人的思维方式,标志着信息与控制学科的发展远没有止境。

1.1.2 自动控制的基本原理

所谓自动控制,是指脱离人的直接干预,利用控制装置(简称控制器)使被控对象(如设备生产过程等)的工作状态或被控量(如温度、压力、流量、速度、pH值等)自动地按照预定的规律运行。

从物理角度来看,自动控制理论研究的是特定激励作用下的系统响应变化情况;从数学角度来看,研究的是输入与输出之间的映射关系;从信息处理的角度来看,研究的是信息的获取、处理、变换、输出等问题。

随着科学技术的进步,自动控制的概念也在扩大,人们已赋予它更广泛、更深远的意义。政治、经济、社会等各个领域也越来越多地被认为与自动控制有关。现在已发展成为一门独立的学科——控制论,其中包括工程控制论、生物控制论和经济控制论。我国人口计划生育政策的成功运用以及1998年长江流域特大洪水的控制,可以说是控制理论成功应用的典型范例。从这个意义上来说,自动控制理论的应用几乎是无限的。

自动控制理论研究的对象是系统。我们在日常生活中就接触到很多系统,如经常提到的电力系统、机器系统,还有文教系统、卫生系统等。事实上,系统是一个相当广泛的概念,一部机器、一个生物体、一条生产线、一个电力网都是一个系统,一个企业、一个社会组织也是一个系统。有小系统、大系统,也有把一个国家甚至整个世界作为对象的巨系统。

系统的种类如此繁多，又如此地千差万别，但它们有一个共同的特点，就是都具有一定的功能，自身的各部分是互相依赖、互相制约的。例如，一条生产线是为了加工某个产品而设立的，生产线的各个部分存在一定的结构关系和运动关系。我们把系统的这一特征作为“系统”的定义，即由若干相互制约、相互依赖的事物组合而成的具有一定功能的整体称为系统。或者说，为实现规定功能以达到某一给定目标而构成的相互关联的一组元件称为系统。

由人工控制的系统称为手动控制系统。下面通过具体例子，分析手动控制的过程，从而可以看出控制系统的基本原理。

图1-3所示为一个热力系统。通过调节蒸汽阀门，使流出的热水保持一定的温度。如果由手工控制，就要求控制者观测温度计的指示值，调节阀门开关的开度。调节方法为：如果温度计的指示值高于期望值，则关小阀门，降低热水温度；否则，开大阀门，升高热水温度，从而使流出的热水保持设定的温度。

上述系统是由人工控制的，可以看出，人在控制过程中起三个作用：

- (1) 观测：用眼睛去观测温度计的指示值；
- (2) 比较与决策：人脑把观测得到的数据与要求的数据相比较，并进行判断，根据给定的控制规律给出控制量；
- (3) 执行：根据控制量用手具体调节，如调节阀门开度。

而在自动控制中，用控制装置代替人来完成上述功能。自动控制热力系统如图1-4所示。

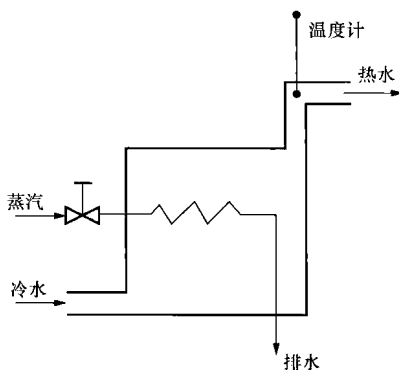


图 1-3 热力系统

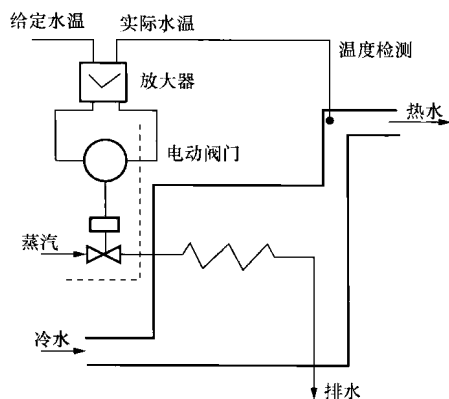


图 1-4 自动控制热力系统

温度测量元件测出实际水温，并转换成电压信号，与给定水温的电压信号一起加在放大器输入端，并进行大小比较，其差值信号经放大器放大后驱动执行电机，从而调节阀门开度。例如，当实际水温偏低时，给定水温与实际水温的偏差是一正值，驱动执行电机朝开启阀门方向运转，增大蒸汽流量，从而使水温上升；反之，当实际水温偏高时，给定水温与实际水温的偏差是一负值，驱动执行电机朝关闭阀门方向运转，减小蒸汽流量，从而使水温下降。可见，控制装置能够代替人工进行控制。

上述系统是在没有人直接参与的情况下，系统的控制器自动地按照人们预定的要求工作，所以此系统是一个自动控制系统。

在自动控制系统中,有许多变量或者信号,从系统外部施加到系统上而与该系统的其他信号无关的信号称为输入信号。输入信号包括参考输入和扰动输入。在控制系统中希望使被控信号恒定的或随时间变化的输入信号称为参考输入,简称为输入。而干扰系统被控量达到期望值的输入称为扰动输入,简称为扰动。例如,温度控制系统中的温度设定是参考输入,而蒸汽温度的变化、热水流量的变化等都是干扰热水温度恒定的,所以都是扰动输入。

在有些系统中,参考输入是随时间变化的,例如啤酒发酵、家禽孵化过程中,温度设定是时间的函数;而在自动火炮系统中,飞机的飞行轨迹是自动火炮系统的参考输入,是一个事先无法预料的信号。

系统中被控制的量称为被控量。例如温度控制系统中的温度。自动控制系统的作用就是使被控量按照期望的规律变化。控制器的输出称为控制量。例如,温度控制系统中的蒸汽阀门开度就是控制量。控制系统输出的量称为输出量。在控制系统分析与设计中,系统的被控量常作为输出量。实际上,控制系统中需要监控的量都可以作为输出量。例如系统的误差信号等。

1.2 自动控制系统分类

控制系统有不同的分类方法,因而也有各种各样的类型。根据系统是否满足叠加原理,控制系统可分为线性系统和非线性系统;根据系统中信号的类型,控制系统可分为连续系统和离散系统;根据信号的传递路径,控制系统可分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统;根据系统输入信号变化规律,控制系统可分为随动控制系统、恒值控制系统和程序控制系统等。另外,控制系统也可以按系统的输入/输出信号的数量来分,有单输入/单输出系统和多输入/多输出系统;按控制系统的功能来分,有温度控制系统、速度控制系统、位置控制系统等;按系统元件组成来分,有机电系统、液压系统、生物系统;按不同的控制理论分支设计的新型控制系统来分,有最优控制系统、自适应控制系统、预测控制系统、模糊控制系统、神经网络控制系统等。然而,不管什么形式、什么控制方式的系统,都希望它能做到可靠、迅速、准确,这就是今后要详细分析的系统的稳定特性、动态响应和稳态特性。这里主要介绍几种最常用的分类。

1.2.1 线性系统与非线性系统

根据所描述的系统的数学模型,凡是由线性微分方程或线性差分方程描述的系统均称为线性系统,而由非线性方程描述的系统则称为非线性系统。线性系统具有可叠加性和均匀性。当有几个输入信号同时作用于系统时,系统的总响应等于每个输入信号单独作用所产生的响应之和,表明系统具有可叠加性,即当输入信号为 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 时,系统输出响应分别为 $c_1(t)$ 和 $c_2(t)$,则当输入为 $r_1(t)+r_2(t)$ 时,输出为 $c_1(t)+c_2(t)$ 。所谓均匀性,是指当输入信号乘一常数时,则输出响应也乘同一常数,即输入为 $r(t)$,输出为 $c(t)$,当输入为 $Kr(t)$ 时,则输出为 $Kc(t)$,其中 K 为任意常数。

线性系统的一个重要性质是系统的响应可以分解为两个部分,即零输入响应和零状态响应。前者是指由非零初始状态所引起的响应,后者是指仅由输入引起的响应,两者可以分别计算,这一性质为线性系统的分析和研究带来很大方便。

非线性系统不满足叠加原理,即不具有可叠加性。非线性控制系统的形成基于两类原因,一是控制系统中包含有不能忽略的非线性因素或非线性元件,二是为提高控制性能或简

化控制系统结构而人为地引入非线性元件。非线性系统的分析远比线性系统复杂,缺乏能统一处理的有效数学工具,因此非线性控制系统至今尚未像线性控制系统那样建立一套完整的理论体系和设计方法。由于线性系统的理论是比较成熟的,特别是线性定常系统,可以方便地用于系统的分析与设计,因此本书所研究和讨论的主要是线性定常系统。

在下面讨论中将充分利用线性系统的上述基本特性,使系统分析大大简化。例如实际控制系统并非完全是单变量的而往往是多输入、单输出系统,应用叠加理论则可分别考虑每个输入单独作用时所引起的响应然后将其叠加,从而将多输入、单输出系统的问题转化为单变量系统问题来处理。又如实际系统输入信号的幅值各色各样运算很不方便,应用均匀性特性则可从计算简便出发,将输入信号的幅值取为1(或其他便于计算的值),这样得到的响应和实际输入信号所产生的响应,其变化特性完全相同,所不同的只是在幅值上按比例缩小或放大而已。这对于系统特性的分析研究毫无影响,如果需要,乘上该比例系数则可得到实际的响应值。

非线性控制系统不能应用叠加原理。严格来讲,实际的控制系统都存在着不同程度的非线性特性,但大部分的非线性特性当系统变量变化范围不大时,可对非线性特性通过近似处理和合理简化,进行“线性化”处理,这样大量的物理系统都可在一定的范围内足够准确地化作线性系统来进行分析和讨论。

但是,如果在系统中能正确地使用非线性元件,有时就可以收到意想不到的控制效果。因此,近年来在实际应用系统中引入非线性特性以改善控制系统的质量,并且取得了很成功的经验。本书将主要研究线性系统,对不能简化及近似处理的非线性系统将在第7章对其控制系统性能的影响作一简要阐述。

1.2.2 连续时间控制系统与离散时间控制系统

在自动控制系统中随时间变化的物理量即信号基本上可分为两种类型:连续信号与离散信号,它们的变化特征如图1-5所示。图1-5(a)所示的信号,其特点是随时间作连续变化,故称这种类型的信号为连续信号,比如直流调速系统中电动机的转速和可调的电枢电压以及测速发电机输出电压等均属于这种类型;图1-5(b)所示的信号,其特点是只在离散的时刻出现,这种类型的信号称为时间离散信号,简称离散信号,比如天线方位角位置随动系统的输入信号,和后面章节中讨论的离散控制系统中采样开关的输出信号等均属于这种类型;图1-5(c)所示的信号叫做离散量化信号,其特点是信号不仅只在离散的时刻出现(时间离散信号),而且其幅值也只取离散的值(叫做被整量化,简称量化),如计算机控制系统中的数字信号就属于这种类型。由于工程上所使用的微型计算机或单片机量化单位很小,量化所造成的误差可忽略不计,故通常认为离散量化信号和时间离散信号属于同一类型并统称为离散信号。

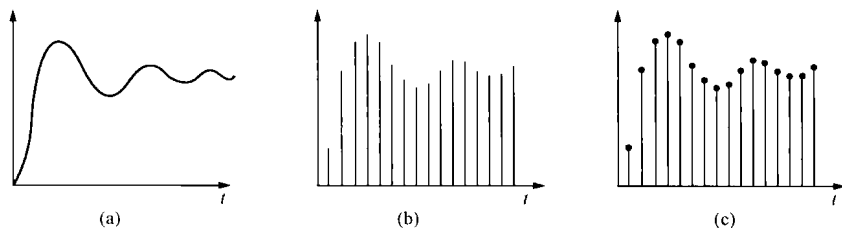


图1-5 连续信号与离散信号的变化特征

(a) 连续信号; (b) 离散信号; (c) 离散量化信号

根据系统信号的变化特征,自动控制系统可分为两种基本类型:连续时间控制系统与离散时间控制系统。连续时间控制系统的特点是,各部分的信号均为时间的连续函数。连续系统的数学模型是用微分方程描述,直流调速系统就属于这种类型。离散控制系统的特点是,在系统的某处或几处的变量为离散信号,或全部的信号为脉冲序列或数码的形式,其信号在时间上是离散的。离散系统的数学模型可用差分方程描述,如工程上所有的计算机控制系统和采样控制系统均属于这种类型。

连续控制系统与离散控制系统虽然是两类性质差异较大的控制系统,但是它们所要讨论的问题以及分析与综合的基本理论和基本方法则具有平行的相似性。为了和读者原有的知识相协调,本书的讨论以连续控制系统为主,在详细讨论连续系统的基础上通过对比介绍离散控制系统。

1.2.3 定常系统与时变系统

根据系统是否含有参数随时间变化的元件,自动控制系统可分为时变系统与定常系统两大类。定常系统又称为时不变系统,其特点是:描述系统运动的微分方程或差分方程,其系数均不随时间的变化而变化;在物理上它代表结构和参数都不随时间变化的系统;反映在系统特性上,系统的响应特性只取决于输入信号的形状和系统的特性,而与输入信号施加的时刻无关。定常系统分为定常线性系统和定常非线性系统。对于定常线性系统,不管输入信号在哪一时刻加入,只要输入信号的波形是一样的,则系统输出响应的波形也总是相同的。若系统在输入 $r(t)$ 作用下的响应为 $c(t)$,当输入延迟一时间 τ ,则系统的响应也延迟同一时间 τ 且形状保持不变。定常系统的这种基本特性给分析研究带来了很大的方便。

如果系统的参数或结构是随时间而变化的,则称为时变系统。例如火箭或带钢卷筒控制系统,在运行过程中随着燃料不断地消耗或卷筒卷绕带钢后直径的变化,使得系统的质量或惯性随时间而变化,故它们属于时变系统。时变系统的特点是:由于系统的参数或结构是随时间变化的,描述系统运动的方程为时变方程;反映在特性上,系统的响应特性不仅取决于输入信号的形状和系统的特性,而且还与输入信号施加的时刻有关,这增加了对时变系统分析和研究的复杂性。在自动控制理论中内容丰富且实用的是定常系统部分,而时变系统理论尚不够成熟。虽然严格说来,在运行过程中由于各种因素的作用,要使实际系统的参数完全不变是不可能的,定常系统只是时变系统的一种理想化模型。但是,只要参数的时变过程比之系统的运动过程慢得多,则用定常系统来描述实际系统所造成的误差就很小,这在工程上是容许的。而大多数实际系统的参数随时间变化并不明显,按定常系统来处理可保证足够的精确度,故在后面的讨论中将以定常系统为主。

1.3 自动控制系统举例

另外一种主要的分类方法是根据系统输入信号的变化规律,可将控制系统分为随动控制系统、恒值控制系统和程序控制系统等。本节举例介绍的就是这三类控制系统。

1.3.1 随动控制系统(或称伺服系统)

随动系统又称伺服系统、跟踪系统。这类系统的特点是输入信号是一个未知的函数,要求输出量以一定的精度和快速性跟踪输入信号变化。随动系统的输入量变化可以是随机、任意的,不能预先知道。在很多情况下,伺服系统专指被控量是机械位移(或位移、速度、加速

度)的闭环控制系统,即要求输出的机械位移(或转角)跟踪输入的位移(或转角)。按所采用的执行机构的类型,可将伺服系统分为机电伺服系统、液压伺服系统和气动伺服系统等。

伺服系统最初用于船舶的自动驾驶、火炮控制和指挥仪中,后来逐步推广到很多领域,如工业自动化仪表中的显示记录仪、跟踪卫星的雷达天线位置伺服系统、导弹和飞船的制导等。例如火炮自动跟踪系统:人们事先不知道飞机的运动规律,当然也就无法驱动火炮瞄准一个确定的位置,所以这类系统要求火炮随飞机的运行轨迹,不断地自行修正位置;考虑到飞机的机动性,要求该系统有较好的跟踪能力,故伺服系统对测量元件的精度要求很高。

火炮随动系统的任务是控制火炮跟踪敌机,以便适时开炮击中目标。火炮随动系统原理线路如图1-6所示。

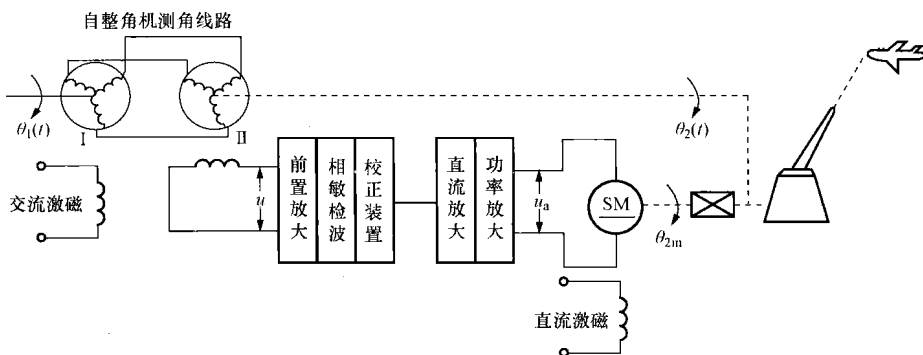


图1-6 火炮随动系统原理线路图

图1-6中一对自整角机组成测角线路。自整角发送机I转轴的位置由指挥仪来控制,此轴为系统的输入轴。当炮瞄雷达已搜索到目标,且目标已进入火炮射程之内时,天线随动系统将进入自动跟踪工作状态。这时安装在天线轴上的数据传递系统,不断地把目标的方位角(俯仰角)数据传递给指挥仪。指挥仪根据当时的气候条件,炮弹在空中飞行的弹道,目标在空中移动的速度、高度等数据,计算出为了使炮弹与目标在空中相遇的火炮炮口的方位角(俯仰角)应有的数值 $\theta_1(t)$,这个 $\theta_1(t)$ 就是火炮随动系统的参考输入信号。自整角接收机II的转子轴与火炮轴相固联,此轴为系统的输出轴。这一对自整角机测量出系统的输入轴与输出轴之间的角差并转换成相应的电压,其输出电压的大小由角差的大小决定,而输出电压的相位由角差的符号决定,即

$$u = K_1(\theta_1 - \theta_2) = K_1\Delta\theta$$

式中, K_1 为自整角机的传递系数,量纲为 $V/^\circ$ (伏/度)。

图1-6中的直流伺服电动机是系统的执行元件,由功率放大器的输出信号控制。直流电动机的转轴经减速器带动被控对象(火炮)。

下面说明随动系统的工作原理。

假设随动系统处于平衡状态,即 $\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$,故 $u = 0$, $u_a = 0$,直流执行电动机不动,火炮也不动。

若自整角发送机转子顺时针转过 10° ,则角差 $\Delta\theta = 10^\circ$,使 $u \neq 0$,此信号经相敏检波变成直流信号,并经功率放大使 u_a 具有足够的功率去驱动直流伺服电动机转动, u_a 的极性决定了电动机经减速器带动火炮顺时针旋转,当火炮轴转 10° 时,由于自整角接收机与火炮同

轴相连, 因此接收机转子也顺时针转 10° , 使得 $\theta_1 = \theta_2 = 10^\circ$, 即 $\Delta\theta = 0^\circ$, $u_a = 0$, 电动机及火炮停止转动。说明火炮已瞄准好目标, 下令发炮即可击中目标。

反之, 若自整角发送机转子逆时针转 10° , 则火炮也逆时针转 10° 。

若自整角发送机转子连续转动, 则火炮也跟着发送机转子按相同方向连续转动。这样, 火炮的轴就始终跟随自整角发送机的轴转动, 从而实现被控制量 $\theta_2(t)$ 始终自动而准确地复现输入量 $\theta_1(t)$ 的规律, 即控制火炮自动地跟踪敌机。这里需要两套相同的随动系统分别控制火炮的方位角和俯仰角。火炮随动系统方块图如图 1-7 所示。

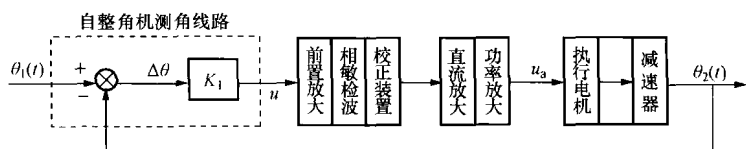


图 1-7 火炮随动系统方块图

1.3.2 恒值调节系统 (或称自动调节系统)

这类系统的特点是输入信号是一个恒定的数值, 当系统受到各种干扰作用时, 该系统能维持输出量与输入量相应的恒值关系, 故称恒值调节系统, 又称镇定系统。恒值控制系统主要研究各种干扰对系统输出的影响以及如何克服这些干扰, 使输入、输出量尽量保持在希望数值上。

常见的有压力调节系统、温度调节系统、水位调节系统、稳压电源、导航稳定平台、船舶稳定系统等。恒值控制系统在工业、农业、国防等部门有广泛的应用。

直流电动机速度控制系统的控制目标是使电动机稳定在要求的转速上运行。由图 1-8 所示的直流电动机速度控制系统可见, 对应滑动电阻器的触点的某一位置, 有一给定电压 U_g , 经过放大器放大为 U_d , 为电动机电枢电压。在没有扰动的情况下, 对应滑动电阻器的触点的某一位置, 则有一电动机转速与之对应。

如果负载恒定, 电动机及放大器参数也不变, 那么, 如果给定电压 U_g 不变, 电动机转速也不会变。但这只是理想情况, 电动机负载实际上是经常变化的, 电动机、放大器的参数也会漂移, 因此, 即使保持给定电压 U_g 不变, 电动机转速也会变化, 不能达到控制的目的。如果用人工控制, 则可以观测转速表的指示值, 调整滑动电阻器的触点位置改变 U_g , 从而使电动机转速保持在期望值运行。

在此系统中, 如果加装一个测速发电机, 就可以用控制装置代替人来完成上述功能, 形成一个自动控制系统。直流电动机自动调速系统如图 1-9 所示。

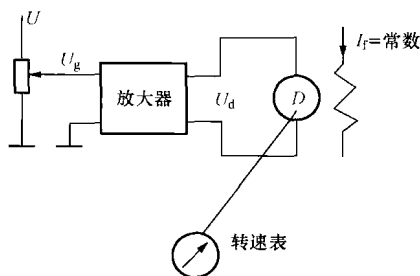


图 1-8 直流电动机速度控制系统

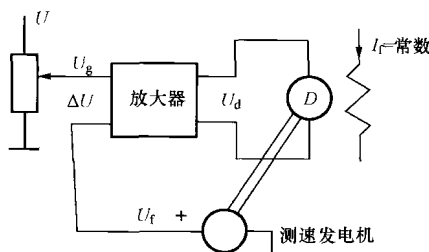


图 1-9 直流电动机自动调速系统