

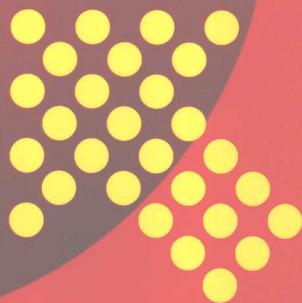
21世纪高等学校规划教材



KONGZHI GONGCHENG JICHU

控制工程基础

何琳琳 许丽佳 主 编
王燕芳 宋 辉 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

21世纪高等学校规划教材



KONGZHI GONGCHENG JICHU

控制工程基础

主 编 何琳琳 许丽佳
副主编 王燕芳 宋 辉
编 写 陈晓燕
主 审 杨 平



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

全书共分为 7 章，主要内容包括自动控制概论、控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹法、频域分析法、自动控制系统的校正和离散控制系统。本书针对本科院校非控制专业的少学时课程教学需要编写，力求内容简明扼要，通俗易懂，便于教学和自学。

本书主要作为普通高等院校工学本科非控制类专业以及高职高专自动化类专业的自动控制原理课程教材，也可供从事自动化技术的工程人员学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

控制工程基础/何琳琳，许丽佳主编. —北京：中国电力出版社，2010.8

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 0699 - 8

I. ①控… II. ①何… ②许… 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 (2010) 第 142534 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

2011 年 6 月第一版 2011 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.125 印张 344 千字

定价 24.00 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

控制理论不仅是高等院校自动化专业主修的专业基础课,同时也是与自动化相关的工科专业必修的一门重要的学科基础课程。对于该门课程,由于专业要求的不同,教材的侧重点也不相同。但是相关的自动控制系统的概念、基本原理和基本方法是相同的。

为进一步适应高等院校各相关专业对控制技术和理论的需求,本书比较全面地介绍了自动控制的基本理论,注重于最基本概念和基础知识的讲解,控制技术与相关行业知识融合与应用,以及利用计算机辅助工具解决自动控制系统的分析和设计问题。本书以经典控制理论的基本内容为主,主要包括自动控制概论、控制系统的数学模型、时域分析法、根轨迹法、频域分析法、系统的综合与校正和离散控制系统。为了便于读者深入理解和掌握书所述的重要概念,每章都包含了一定数量的例题、习题,书后附有部分参考答案。

本书可作为高等院校本科少学时《控制工程基础》或类似课程的教材,也可作为各类院校专科层次相关专业类似课程的选用教材,还可作为电子信息类或其他与控制有关专业工程技术人员参考书。

本书由何琳琳和许丽佳主编。第1章、第2章由何琳琳编写,第3章由宋辉编写,第4章、第6章由王燕芳编写,第5章由许丽佳编写,第7章由陈晓燕编写。全书由何琳琳统稿。本书由上海电力学院杨平教授主审,并提出许多宝贵意见,在此表示感谢,同时也向为本书出版给予支持和帮助的所有同志致以真诚的谢意。

在编写本书的过程中,参考了许多相关的优秀教材和经典著作,在此,编者向参考文献所列的各位作者表示真诚的感谢。对于本书的错误与不妥之处,敬请读者和专家批评指正。

编 者

2011年1月

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 控制系统简介	1
1.2 自动控制系统的工作原理及组成	3
1.3 自动控制系统的类型	6
1.4 对控制系统的基本要求和研究内容	8
本章小结	11
习题	11
第 2 章 控制系统的数学模型	14
2.1 控制系统的微分方程及其线性化	14
2.2 用拉普拉斯变换法求解微分方程	19
2.3 传递函数	26
2.4 方框图	34
2.5 信号流图	44
2.6 MATLAB 在数学模型中的应用	46
本章小结	48
习题	48
第 3 章 时域分析法	53
3.1 控制系统的时域性能指标	53
3.2 一阶系统的时域分析	54
3.3 二阶系统时域分析	56
3.4 高阶系统的时域分析	63
3.5 线性定常系统的稳定性和稳定判据	64
3.6 控制系统的稳态误差	71
3.7 MATLAB 和 SIMULINK 时域分析	78
本章小结	82
习题	82
第 4 章 根轨迹法	86
4.1 根轨迹的基本概念	86
4.2 绘制根轨迹的基本法则	91
4.3 广义根轨迹和零度根轨迹	100
4.4 用根轨迹法分析系统性能	104

4.5 应用 MATLAB 绘制根轨迹	106
本章小结	107
习题	107
第 5 章 频域分析法	110
5.1 频率特性	110
5.2 频率特性的几何表示方法	113
5.3 控制系统的对数频率特性图	115
5.4 控制系统的极坐标图	125
5.5 频域稳定判据及相对稳定性分析	130
5.6 利用频率特性分析系统的性能	141
本章小结	149
习题	149
第 6 章 自动控制系统的校正	152
6.1 控制系统校正的基本概念	152
6.2 频域法串联校正	154
6.3 根轨迹法串联校正	160
6.4 反馈校正	163
6.5 复合校正	166
6.6 应用 MATLAB 进行系统校正设计	171
本章小结	174
习题	174
第 7 章 离散控制系统	178
7.1 离散控制系统的基本概念	178
7.2 信号的采样和采样定理	179
7.3 信号复现与零阶保持器	182
7.4 Z 变换和 Z 反变换	184
7.5 离散系统的数学模型	189
7.6 线性离散系统的稳定性	196
7.7 线性离散系统的稳态误差	201
7.8 线性离散系统动态性能分析	203
本章小结	205
习题	206
部分习题答案	208
参考文献	220

第 1 章 概 述

了解自动控制理论的发展过程与基本概念是学习自动控制技术的基础。本章在介绍自动控制理论发展简史和基本概念的基础上,通过工程实例来阐述自动控制系统的基本原理和研究方法。同时介绍了开环控制系统和闭环控制系统、控制系统的基本原理和组成、控制系统的类型以及对自动控制系统性能的要求。

1.1 控制系统简介

1.1.1 引言

在现代科学技术的众多领域以及工程和技术发展的过程中,自动控制作为一种重要的技术发挥着越来越重要的作用。什么是自动控制呢?所谓自动控制,是指在没有人的直接参与的情况下,利用外加的设备或装置,使机器、设备或生产过程的某个工作状态或参数(即被控量,如压力、流量、位移、速度等)自动准确地按照预定的规律运行。例如,数控机床自动切削系统、天线雷达自动跟踪系统、导弹发射和制导系统、按照预定航迹飞行和自动升降的无人机、按照规定轨道运行并保持正确姿态的人造卫星等。这些都是以自动控制技术为前提的。在过程控制工业中,对压力、流量、温度、湿度等这些工业参数的操作过程也离不开自动控制技术。自动控制技术的应用范围已经扩展到生物、医学、环境、经济管理等领域。总之,自动控制技术已经成为工业(电力、机械、冶金、化工等)、军事、航空航天、科学研究、医学、企业管理等几乎是一切领域中必不可少的手段。因此,各个领域的科学工作者和工程技术人员都应当具备一定的自动控制工程知识。

1.1.2 自动控制理论的发展简况

自动控制是一门具有较强理论性及工程实践性的技术学科,被称为“控制科学与工程学科”。该学科的理论常称为“自动控制理论”。自动控制在现代工业中起着越来越重要的作用,自动控制技术已成为现代一切领域中必不可少的手段。

自动控制技术的最早应用可追溯到 1768 年英国人詹姆斯·瓦特(JamsWatt)为控制蒸汽机速度而设计的离心调节器,继而引发了工程界对系统稳定性的讨论。而自动控制理论的创立则应从英国物理学家麦克斯威尔于 1868 年发表的关于用微分方程描述并总结的飞球调速器运动的论文开始。

1877 年,英国数学家劳斯(E. J. Routh)提出用劳斯阵列系数判别稳定性的代数判据;德国数学家胡尔维茨(A. Hurwitz)于 1895 年提出根据胡尔维茨行列式的各阶主子式来判别稳定性的代数判据;1892 年,俄国数学家李雅普诺夫(Lyapunov)提出了稳定的严格数学定义并发表了专著;1932 年,美国电信工程师 N. 奈奎斯特(Nyquist)提出了根据开环系统对正弦输入信号的稳态响应来判定闭环系统的稳定性的方法;1938 年,前苏联电气工程师 A. 米哈伊诺夫提出的根据闭环系统频率特性判定反馈系统稳定性的判据。这些稳定判

据再加上 1922 年 N. 米诺尔斯基 (Minorsky) 的论文“关于船舶自动操舵的稳定性”和 1934 年美国 H. 黑曾 (Hazen) 发表的论文“关于伺服机构理论”, 标志着经典控制理论的诞生。其中, 李雅普诺夫的稳定性理论至今还是研究分析线性和非线性系统稳定性的重要方法。

自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学。第二次世界大战期间, 为满足军事领域对高性能军事装备系统的需要, 设计和建造反馈控制系统的方法有了很大的发展。1948 年, 控制理论的创始人维纳 (N. Wiener) 发表了著名的“控制论——关于动物和机器中控制和通信的科学”一文, 奠定了控制论的基础。维纳发现机器和生命系统都有一个共同的特点, 即通过信息的传递、处理和反馈来进行控制。控制理论所具有的信息、反馈与控制三个要素, 也是控制论的中心思想。1948 年和 1950 年, 埃文斯 (Evans) 发表了关于控制系统图形分析和综合的论文, 用闭环特征方程根在开环参数变化时的轨迹来研究稳定性, 提出了根轨迹方法。1954 年我国科学家钱学森对经典控制论进行了全面的总结和提高, 出版了《工程控制论》这一经典名著, 把控制论推广到其他领域。继而出现了生物控制论、经济控制论、社会控制论等, 为控制科学与工程这门学科奠定了理论基础。这些控制理论建立后, 极大推动了近代科学技术的发展, 并由此派生出许多新的边缘学科。

经典控制理论的研究对象主要为单输入—单输出的线性定常系统。经典控制理论以传递函数为系统的数学模型, 以频率响应法和根轨迹法为核心工具, 其在系统分析和设计上的简单、清晰特色, 使它至今仍在工程上广泛应用。

一般, 采用经典控制理论设计的系统是稳定的、满足系统指标要求的, 但不一定是最优的。对于多输入多输出的复杂系统, 经典控制理论便表现出它的局限性。随着现代应用数学新成果的推出和数字计算机的出现, 自动控制理论进入了一个新阶段, 即利用状态变量、基于时域分析的现代控制理论阶段。

现代控制理论主要研究具有高性能、高精度的多变量变参数系统的最优控制问题, 以适应现代设备日益增加的复杂性、精度、质量要求。现代控制理论采用的主要方法是以状态为基础的状态空间法。状态空间法比频域的理论更为一般、更为严格, 更深刻地反映系统的内在结构。俄国科学家李雅普诺夫 (Liapunov)、前苏联的庞特里亚金 (Pontryagin)、美国的贝尔曼 (R. I. Bellman) 和卡尔曼 (R. E. Kalman) 等都对现代控制理论的发展作出了贡献。目前, 现代控制理论的进展主要集中在鲁棒控制、 H_∞ 控制等相关课题的研究。

20 世纪末至今, 控制理论向着“大系统理论”和“智能控制理论”发展, 并逐渐扩展到非工程系统。控制理论正在与模糊数学、混沌理论、人工智能、神经网络、遗传算法等科学交叉、渗透、结合, 不断发展并派生出新的学科。

1.1.3 基本术语

下面介绍自动控制理论中的一些基本术语。

1. 系统

系统是指有相互关联、相互制约、相互影响的部分组成的具有某种功能的有机整体。在工程上, 系统通常定义为用来完成一定任务的一些部件的组合。系统环境对系统的作用称为系统输入, 系统对环境的作用称为系统输出。实际中系统的概念相当广泛, 应理解为包含物理学、生物学、经济学等方面的系统。

2. 工程

工程是指如何应用科学知识,从而使自然资源最好地为人类服务的专门技术。工程不等于技术,它要受到政治、经济、法律、美学等非技术内容的影响,技术存在于工程之中。

3. 被控变量和操作变量

被控变量是一种被测量和被控制的量值或状态。操作变量是一种由控制器改变的量值或状态,从而来影响被控变量。被控变量通常是系统的输出量。控制意味着通过对系统的被控变量进行测量,把操作变量作用于系统来修正测量值对期望值的偏离。

4. 反馈控制

反馈是指将系统的实际输出和期望输出进行比较,形成误差,进而为确定下一步的控制行为提供依据。反馈控制是在对系统被控量进行适时检测,并不断地直接或经过中间变换传递后的全部或部分反送到系统中,力图减小系统输出量与参考输入量之间的偏差。

5. 扰动

对系统输出量产生不利影响的信号称为扰动,如果扰动产生在系统的内部称为内部扰动;反之,如果扰动产生在系统的外部称为外部扰动。

6. 方框图

方框图通常简称为框图,控制系统一般由多个元件和环节构成,在控制工程中,常用方框图表示元件或环节在系统中的功能。控制系统的方框图由方块图单元构成。

1.2 自动控制系统的工作原理及组成

1.2.1 控制系统实例

现代社会中,自动控制已经渗透到从日常生活到生产系统的各个方面。

【示例 1-1】 龙门刨床速度控制系统。

图 1-1 所示为龙门刨床速度控制系统原理示意图。刨床主电动机 SM 为直流电动机,由晶闸管整流装置 VZ 提供其电枢电压,通过调节触发器 CF 的控制电压 u_k 来改变电动机的电枢电压,从而改变电动机的转速(被控量)。测速发电机 TG 用来测量刨床速度并给出与速度成正比的电压 u_i 。测速发电机 TG 将输出的电压 u_i 与给定电压 u_0 反向串联,得到偏差电压 $\Delta u = u_0 -$

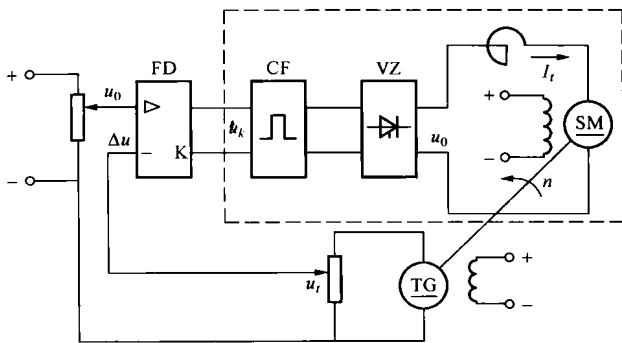


图 1-1 龙门刨床速度控制系统原理示意图

u_i 。 u_0 是根据刨床工作情况预先设置的给定速度下的电压。偏差电压 Δu 在经过放大器 FD 放大后,作为触发器的控制电压,驱动电动机 SM。测速发电机 TG 产生与速度成正比的电压信号 u_i ,不断与给定电压信号 u_0 比较。通过这个反馈控制过程使电动机速度与要求速度不断接近,偏差信号越来越小,从而使刨床保持稳定切削速度。

【示例 1-2】 锅炉水位控制系统。

锅炉是电厂和化工厂里常见的生产蒸汽的设备。为了保证锅炉正常运行，需要维持锅炉水位为正常标准值。锅炉水位过低，易烧干锅而发生严重事故；锅炉水位过高，则易使蒸汽带水并有溢出危险。因此，必须严格控制锅炉水位的高低，以保证锅炉正常安全地运行。图 1-2 所示为锅炉水位控制系统示意图。

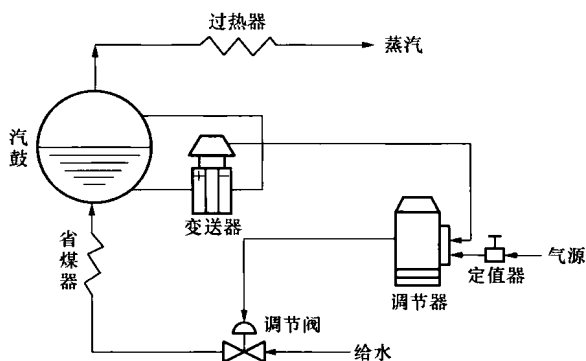


图 1-2 锅炉水位控制系统示意图

只要实际水位高度与正常给定水位之间出现了偏差，水位传感器的输出值就会与给定值有偏差信号，此时，调节器应立即进行控制，去开大或关小给水调节阀门，使锅炉水位恢复到给定值，实现锅炉水位的自动控制。

【示例 1-3】 飞机俯仰角自动控制系统。

图 1-3 所示为飞机俯仰角自动控制系统示意图。图中，垂直陀螺仪用来测量飞机的俯仰角。当飞机受到扰动后，如果飞行状态变成机头偏向下方，此时陀螺仪电位器输出一个与俯仰角偏差成正比的信号，经放大器放大后驱动舵机。由于舵机带动升降舵，使升降舵舵面向上偏转，产生一个使机头向上的力矩。同时舵机也带动反馈电位器，产生与舵面偏转角成正比的信号，该信号被送回到放大器的输入端，与陀螺仪电位器信号加以比较。随着俯仰角偏差的减小，陀螺仪电位器的输出信号变小，舵面偏转角变小，反馈电位器信号也减小。最后，当俯仰角变为零时，舵面回到初始位置，此时放大器输入信号为零，飞机保持水平方向飞行。该系统中，飞机的俯仰角由升降舵的转动角度控制，而升降舵的转动角度又由垂直陀螺仪电位器产生的偏差信号决定。

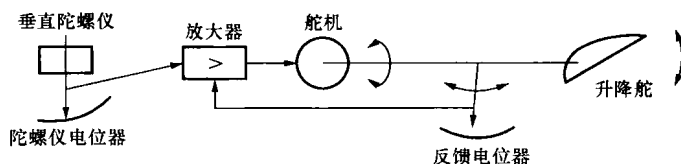


图 1-3 飞机俯仰角自动控制系统示意图

1.2.2 开环控制和闭环控制

自动控制系统有两种最基本的控制方式，即开环控制和闭环控制。

1. 开环控制

开环控制是指无被控量反馈的控制系统，即控制装置与被控对象之间只有顺向作用而没有反向联系。其控制的是被控对象的某一量，而被控量对于控制作用没有任何影响。开环控制特点是系统的输出量不对系统的控制作用发生影响。在开环控制系统中，既不要对输出量进行测量，也不需要将被输出量反馈到系统的输入端与输入量进行比较。图 1-4 所示即为开环控制系统结构框图，它表示了这类系统的输入量与输出量之间的关系。开环控制较简单，但有很大缺陷。

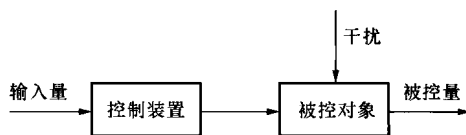


图 1-4 开环控制系统结构框图

工作中特性参数的变化和对象或控制系统装置受到干扰时，都会直接影响被控量而且无法实现自动补偿。从而使系统的精度难以保证，抗干扰能力差。但由于结构简单，成本低，在系统要求精度不高的或干扰影响较小的情况下，具有一定的实用价值。目前，用于国民经济各部门的一些自动化装置，如自动售货机、自动洗衣机、产品生产自动线、数控机床、包装机以及指挥交通的红绿灯的转换等，一般都是开环控制系统。

2. 闭环控制

闭环控制系统也叫反馈控制系统。这种系统的输出端和输入端之间存在反馈回路，即系统的输出量沿反馈通道又回到系统的输入端，构成闭合通道。反馈控制方式是按偏差进行控制的，其特点是当被控量偏离期望值出现偏差时，系统必定会产生一个相应的控制作用去减小或消除这个偏差，从而使被控量与期望值趋于一致。由于闭环控制系统是利用偏差来纠正偏差，因此能使系统达到较高的控制精度。但与开环系统比较，闭环控制系统结构较复杂，构造比较困难。由于在工作过程中系统总会存在偏差，加之元件的惯性，如果设计不当，很容易引起振荡，使系统无法正常和稳定工作。

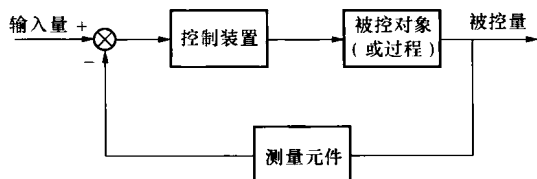


图 1-5 闭环控制系统结构框图

精度和稳定性是闭环系统存在的一对矛盾。闭环控制系统的结构框图如图 1-5 所示。

在图 1-5 中，人们将检测出来的输出量送回到系统的输入端，并与输入量进行比较的过程称为反馈。如果反馈与输入信号相减，

称为负反馈，反之，若相加，称为正反馈。输入信号与反馈信号之差称为偏差信号。

另外还有一种复合控制方式，即在反馈控制系统基础上增加对主要扰动的前馈补偿作用，这里不过多介绍。总之，闭环控制系统是自动控制原理研究的主要对象。

1.2.3 自动控制系统的组成

反馈控制系统是由各种结构不同的元件组成的。一种典型反馈控制系统的原理框图如图 1-6 所示，该图表示了这些元件在系统中的位置及其相互间的关系。

(1) 被控对象：它是控制系统所控制和操纵的对象，它接受控制量并输出被控量。

(2) 执行器：其职能是直接推动被控对象，使其被控量发生变化。

(3) 放大变换环节：将比较后的偏差信号进行放大、变换为适合控制器执行的信号后去控制被控对象。它根据控制的形式、幅值及功率来放大变换。

(4) 校正装置：为改善系统动态和静态特性而附加的装置。如果校正装置串联在系统的

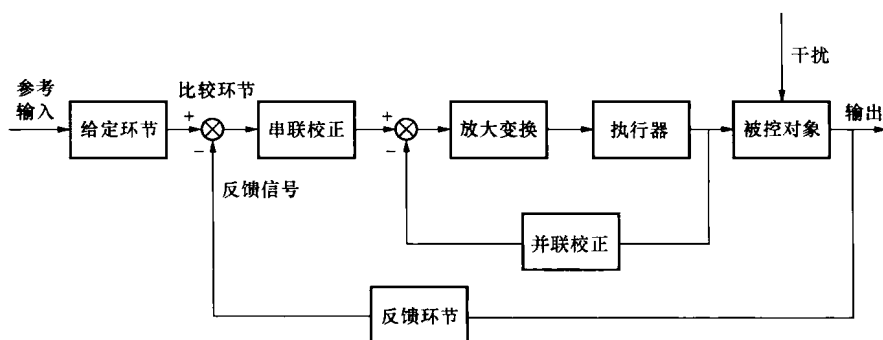


图 1-6 反馈控制系统原理框图

前向通道中，称为串联校正装置；如果校正装置接成反馈形式，称为并联校正装置，又称局部反馈。校正装置的结构或参数可调整，以改善系统的性能。最简单的校正装置是由电阻、电容组成的无源或有源网络，复杂的则用电子计算机。

(5) 反馈环节：用来测量被控物理量的实际值。经过信号处理，转换为与被控量有一定函数关系，且与输入信号为同一物理量的信号。

(6) 给定环节：产生与期望的被控量相对应的系统输入控制信号的装置。

图 1-6 中，“ $\otimes$ ”代表比较元件，它将测量元件检测到的被控量与参考输入量进行比较，“-”表示两者符号相反，即负反馈；“+”表示两者符号相同，即正反馈。方框两边直线及其标注代表该组成部分在控制过程中相互作用的变量。信号从输入端沿箭头方向到达输出端的传输通路称前向通路。系统输出量经测量元件反馈到输入端的传输通路称主反馈通路。前向通路与主反馈通路共同构成主回路。此外还有局部反馈通路以及由它构成的内回路。

尽管一个控制系统有许多起不同作用的环节构成，但从总体来看，系统可看作由控制装置和被控对象两大部分组成，其中控制装置由具有一定职能的各种基本元件组成。

1.3 自动控制系统的类型

自动控制系统的类型很多，它们的结构类型和所完成的功能也各不相同。因此有多种分类方法。例如，根据控制方式可分为开环控制系统、闭环控制系统；根据元件类型或信号传递介质可分为机械系统、电气系统、机电系统、液压系统等；按系统功用可分为温度控制系统、压力控制系统、位置控制系统和速度控制系统等；根据系统性能可分为线性系统和非线性系统、连续系统和离散系统、定常系统和时变系统、确定性系统和不确定性系统等；根据输入信号的变化规律又可分为恒值控制系统、程序控制系统和随动系统等。具有反馈控制的线性定常控制系统是最常见的控制系统，下面介绍几种常用的分类。

1.3.1 按系统输入信号的特点分类

1. 恒值控制系统

自动控制系统的任务是保持被控量恒定不变，在控制过程结束时，被控量等于给定值。这是生产过程中用得最多的一种控制系统，如温度控制系统、压力控制系统、液位控制系统

等均为恒值控制系统。在工业控制中,如果被控量是温度、流量、压力、液位等生产过程参量时,则这种控制系统称为过程控制系统,它们大多数都属于恒值控制系统。

2. 随动控制系统

随动控制系统又称跟踪系统,这类系统的输入信号随时间变化的规律函数不能预先确定,随动系统的任务是要求被控量能迅速平稳地复现或跟踪输入信号的变化。如,自动跟踪卫星雷达天线控制系统、工业控制中的位置控制系统、函数记录仪等都是典型的随动系统。在随动控制系统中,如果被控量是机械位置或其导数时,又称之为伺服系统。

3. 程序控制系统

程序控制系统输入信号的给定值按事先确定的规律变化,是一个已知的时间函数。其控制的目的是使被控对象的被控量按要求的程序动作。如机械加工使用的数字程序控制机床、加热炉自动温度控制系统等均属于这类控制系统。

程序控制系统和随动系统的输入量都是时间函数,不同之处在于前者是已知的时间函数,后者则是未知的任意时间函数,而恒值控制系统也可视为程序控制系统的特例。

1.3.2 按系统的性能分类

1. 线性连续控制系统

这类系统可用线性微分方程式描述,其一般形式为

$$\begin{aligned} a_0 \frac{d^n c(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} c(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_{n-1} \frac{dc(t)}{dt} + a_n c(t) \\ = b_0 \frac{d^m r(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} r(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_{m-1} \frac{dr(t)}{dt} + b_m r(t) \end{aligned}$$

其中: $\frac{d^i c(t)}{dt^i}$ ($i=0, 1, 2, \cdots, i$) 为 $c(t)$ 的 i 阶导数; $\frac{d^j r(t)}{dt^j}$ ($j=0, 1, 2, \cdots, j$) 为 $r(t)$ 的 j 阶导数; $c(t)$ 是输出量; $r(t)$ 是输入量。系数 $a_0, a_1, \cdots, a_n, b_1, b_2, \cdots, b_m$ 是常数时,称为定常系统;当系数 $a_0, a_1, \cdots, a_n, b_1, b_2, \cdots, b_m$ 随时间变化时,称为时变系统。

2. 线性定常离散控制系统

离散系统是指系统的某处或多处的信号为脉冲序列或数字量(数码形式)的控制系统,也叫数字控制系统、采样控制系统。离散系统中,数字测量、放大、比较、给定等信息的处理由微处理器实现,控制器用数字计算机实现,所以系统中必须有信号变换装置。计算机的输出经 D/A 转换后,经过放大后驱动执行元件;或计算机的输出经数字放大器后直接驱动数字执行元件。离散系统的传输信号在时间上是离散的,因此采用差分方程来描述离散系统的运动状态,线性差分方程的一般形式为

$$\begin{aligned} a_0 c(k+n) + a_1 c(k+n-1) + \cdots + a_{n-1} c(k+1) + a_n c(k) \\ = b_0 r(k+m) + b_1 r(k+m-1) + \cdots + b_{m-1} r(k+1) + b_m r(k) \end{aligned}$$

式中: $m \leq n$, n 为差分方程的次数; $a_0, a_1, \cdots, a_n, b_0, b_1, b_2, \cdots, b_m$ 为常系数; $r(k), c(k)$ 分别为输入和输出采样序列。

工业计算机控制系统就是典型的离散系统,电炉温度微机控制系统也是离散系统等。

3. 非线性控制系统

系统中只要有一个元部件的输入—输出特性是非线性的,即不能用线性微分方程描述其输入—输出特性关系,这类系统就称为非线性控制系统。这时要用非线性微分(或差分)方程描述其特性。非线性方程的特点是系数与变量有关,或者方程中含有变量及其导数的高次

幂或乘积项，例如

$$\ddot{x}(t) + x(t)\dot{x}(t) + x^2(t) = y(t)$$

严格地说，实际物理系统都含有程度不同的非线性元部件，如放大器和电磁元件的饱和特性、运动部件的死区、间隙和摩擦特性等。由于非线性方程在数学处理上较困难，目前对不同类型的非线性控制系统的研究还没有统一的方法。在经典控制理论中，对非线性程度不太严重的元部件，采用在一定范围内（如零位或稳态值附近）作线性化的处理，从而将非线性控制系统近似为线性控制系统。

1.4 对控制系统的基本要求和研究内容

1.4.1 基本性能要求

控制理论是研究自动控制共同规律的一门科学。尽管控制系统的类型及功能各不相同，但其研究的内容及方法都是类似的。控制系统在没有受到外作用时，其处于一个平衡状态，系统的输出亦保持其原来状态不变。当系统受到各种干扰或人为要求给定值（参考输入）改变时，被控量就会发生相应的变化，偏离给定值。由于系统中总是包含具有惯性或储能特性的元件，因此要经过一个过渡过程，输出量才能恢复到原来的稳态值或稳定到一个新的给定值。当系统从原来的平衡状态过渡到一个新的平衡状态时，把被控量在变化中的过渡过程称为动态过程，把被控量处于平衡时的状态称为静态或稳态。控制系统在不同的外作用下，表现出的不同的过渡过程特性是衡量控制系统动态品质的重要标志。

虽然控制系统的类型及功能各不相同，但对系统被控量变化全过程提出的基本要求都是一样的，可以归结为稳定性、快速性和准确性，即稳、准、快的要求。其中最基本的要求是稳定性。准确性就是要求控制系统被控量的稳态误差为零或在允许的范围内（根据具体要求来定）。但在实际生产过程中，只能要求误差越小越好。

1. 稳定性（稳）

稳定性是对系统的基本要求，是一个系统能否工作的前提条件。不稳定的系统是根本无法完成控制任务的。对于稳定的系统，由于系统工作环境或参数的变动，可能导致系统不稳定，因此，还要求稳定系统具有一定的稳定裕度。线性系统的稳定性由系统的结构、参数决定，与外界因素无关。

对于恒值控制系统，当受到扰动后，要求系统经过一定时间的调整能够回到原来的期望值。这个调整过程一般以振荡形式出现。如果这个振荡过程是逐渐减弱的，系统最后可以达到平衡状态，控制目的得以实现；反之，如果振荡过程逐步增强，系统被控量将失控，则系统不稳定。

2. 准确性（准）

控制系统的准确性一般用稳态误差来评价。当过渡过程结束后，被控量的稳态值与期望值之间的误差称为稳态误差。稳态误差与系统的结构相关，又与输入信号的形式相关。稳态误差越小，表示系统的输出跟随参考输入的精度越高。稳态误差是衡量控制系统控制精度的重要标志，在技术指标中一般都有具体要求。

3. 快速性（快）

在系统稳定的前提下，对过渡过程的形式和快慢也提出了要求，即系统的动态性能要求。一般希望过渡过程进行的越快越好，但如果要求过渡过程时间很短，可能使动态误差过

大, 因此进行系统设计时, 要兼顾这两方面的要求。衡量过渡过程品质的好坏常用单位阶跃信号作用下过渡过程的超调量、过渡过程时间等性能指标来衡量。

对于不同的被控对象, 系统对稳、准、快的要求有所侧重。例如, 随动系统对快速性要求较高, 而调速系统则对稳定性要求较严格。对于同一个系统, 稳、准、快是相互制约的。提高过程的快速性可能会使系统有强烈振荡; 改善了平稳性, 控制过程有可能过于迟缓, 甚至精度变差。分析和解决这些矛盾, 是本书讨论的主要内容之一。

1.4.2 研究内容

自动控制系统的种类很多, 用途也各不相同。本课程主要从控制理论的观点出发来分析研究自动控制系统中一些带有共性的问题。主要研究的内容可分为三个方面, 即控制系统的分析、设计和辨识。

1. 系统分析

所谓系统分析, 是指对于一个给定的具体系统, 如何从理论上对系统的动态性能和稳态性能进行定性分析和定量计算。根据输入信号的形式不同, 可分为时域特性分析和频域特性分析。

2. 系统设计

系统设计就是根据所要求的系统性能指标, 合理地构建控制系统的结构和参数, 以满足工作及系统性能的要求。系统设计不是一个简单的一次能完成的过程, 而是一个逐步试探和完善的过 程, 所以也称为系统的综合。

3. 系统辨识

在对实际系统施加典型控制信号下检测它的输出信号下, 结合输入与输出的典型关系来判定系统性能结构或传递函数的过程就是系统辨识。

1.4.3 典型外作用

在工程实践中, 自动控制系统承受的外作用形式多种多样, 既有确定性外作用, 又有随机性外作用。对不同形式的外作用, 系统被控量的变化情况 (即响应) 各不相同。因此, 在研究自动控制系统的响应时, 为了便于用统一的方法研究和比较控制系统的性能, 往往选择一些典型输入信号, 而且以最不利的信号作为系统的输入信号, 分析系统在此输入信号作用下, 其输出响应是否满足要求, 由此来评判系统在比较复杂信号作用下的性能。

作为典型输入信号的函数不但要求函数的数学表达式简单, 在现场或实验室中容易得到, 而且还应使控制系统在这种函数作用下的性能代表在实际工作条件下的性能。控制工程设计中常用的典型的输入信号有以下几种。

1. 阶跃函数

阶跃函数的数学表达式为

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ R, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1-1)$$

它表示一个在 $t=0$ 时出现的幅值为 R 的阶跃变化函数, 如图 1-7 所示。意味着在 $t=0$ 时突然加到系统上的一个幅值不变的外作用信号。

$R=1$ 时的阶跃函数称单位阶跃函数, 记为 $1(t)$ 。则幅值为 R 的阶跃函数便可表示为

$$f(t) = R \cdot 1(t) \quad (1-2)$$

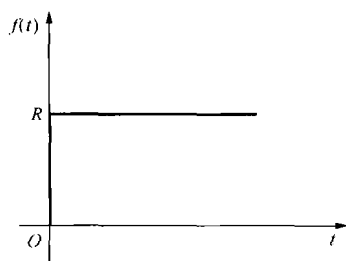


图 1-7 阶跃函数

在任意时刻 t_0 出现的阶跃函数可表示为

$$f(t-t_0) = R \cdot 1(t-t_0) = \begin{cases} 0, & t < t_0 \\ R, & t \geq t_0 \end{cases} \quad (1-3)$$

阶跃函数是自动控制系统在实际工作条件下经常遇到的一种外作用形式。在实际系统中,如电源电压突然跳动;负载突然增大或减小;流量阀门的突然开大或关小;飞机飞行中遇到的常值阵风扰动等,都可近似看成给系统添加阶跃函数形式的外作用。在控制系统的分析设计工作中,一般将阶跃函数作用下系统的响应特性作为评价系统动态性能指标的依据。

2. 斜坡函数

斜坡函数的数学表达式为

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ Rt, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1-4)$$

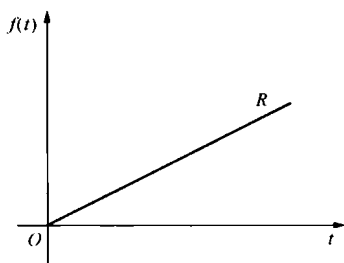


图 1-8 斜坡函数

它表示在 $t=0$ 时刻开始,以恒定速率 R 随时间而变化的函数,如图 1-8 所示。这种函数相当于随动系统中加入一个按恒速变化的位置信号,恒速为 R 。如雷达—高射炮防空系统,当雷达跟踪的目标以恒定速率飞行时,就可视为该系统工作于斜坡函数作用之下。当 $R=1$ 时,称为单位斜坡函数。

3. 脉冲函数

脉冲函数定义为

$$f(t) = \lim_{t_0 \rightarrow 0} \frac{A}{t_0} [1(t) - 1(t-t_0)] \quad (1-5)$$

式中, $(A/t_0)[1(t) - 1(t-t_0)]$ 是由两个阶跃函数合成的脉动函数,其面积 $A = (A/t_0)t_0$,如图 1-9 (a) 所示。当宽度 t_0 趋于零时,脉动函数的极限便是脉冲函数,它是一个宽度为零、幅值为无穷大、面积为 A 的极限脉冲,如图 1-9 (b) 所示。脉冲函数的强度通常用其面积表示。

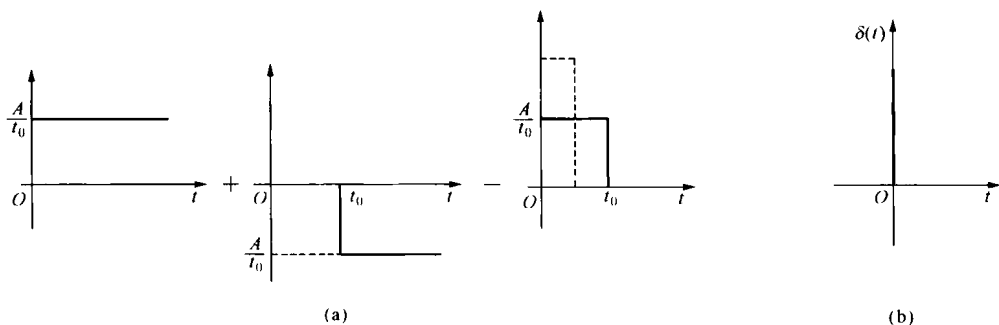


图 1-9 脉动函数和脉冲函数

(a) 脉动函数; (b) 脉冲函数

当 $A=1$, $t_0 \rightarrow 0$ 的脉冲函数称为单位脉冲函数,记为 $\delta(t)$,即

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & t \neq 0 \\ \infty, & t = 0 \end{cases} \quad (1-6)$$

有

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$$

于是强度为 A 的脉冲函数可表示为 $A\delta(t)$ 。在 t_0 时刻出现的单位脉冲函数则表示为

$$\delta(t-t_0) = \begin{cases} 0, & t \neq t_0 \\ \infty, & t = t_0 \end{cases} \quad (1-7)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-t_0) dt = 1$$

单位脉冲函数在现实中是不存在的，只有数学上的意义，但它却是一个重要而有效的数学工具，在自动控制理论研究中，它 also 具有重要作用。例如，一个任意形式的外作用，可以分解成不同时刻的一系列脉冲函数之和，这样，通过研究控制系统在脉冲函数作用下的响应特性，便可以了解在其他输入作用下的响应特性。

4. 抛物线函数

抛物线函数定义为

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \frac{1}{2}Rt^2, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1-8)$$

抛物线函数曲线如图 1-10 所示。它相当于系统中加入一个按加速度变化的位置信号，加速度为 R 。当 $R=1$ 时，称为单位抛物线函数。

5. 正弦函数

正弦函数的数学表达式为

$$f(t) = A\sin(\omega t - \varphi) \quad (1-9)$$

式中， A 为正弦函数的振幅； ω 为正弦函数角频率 $\omega = 2\pi f$ ； φ 为初始相角。

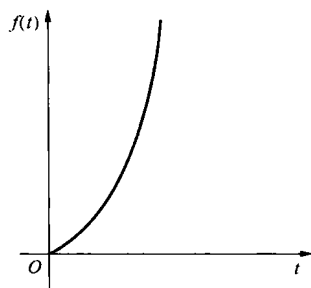


图 1-10 抛物线函数

正弦函数是控制系统常用的一种典型外作用，用正弦函数作输入信号作用于线性系统时，可以求得系统对不同频率的正弦输入函数的稳态响应，由此判断系统的性能。很多实际的随动系统就是经常在这种正弦函数外作用下工作的。如舰船的消摆系统、稳定平台的随动系统等。

本 章 小 结

本章介绍了自动控制理论发展的简史及控制系统的基本概念和术语；引用工程实例讲述控制系统的工作原理、组成元件及其作用；分析了开环控制系统和闭环控制系统的区别，指出控制系统最基本的控制方式是闭环控制；介绍了关于控制系统的多种分类方法、控制系统的基本要求和研究内容；明确系统的稳定性、准确性和快速性是对自动控制系统的最低基本要求。

习 题

- 1-1 试列举几个日常生活中遇到的开环控制和闭环控制的示例，并说明它们的工作原理。
- 1-2 开环控制系统和闭环控制系统各有什么优缺点？
- 1-3 反馈控制系统的动态过程有哪几种类型？希望的生产过程的动态特性是什么？