

高等学校规划教材

自动控制原理

(非自动化专业适用)

第二版

王敏 秦肖臻 编



化学工业出版社

高等学校规划教材

自动控制原理

(非自动化专业适用)

第二版

王 敏 秦肖臻 编



化学工业出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书介绍了自动控制原理的基本概念和方法,包括经典控制理论和现代控制理论的主要内容,适合作为信息学科本科学生平台课程教材和非自动控制专业理工科学生的教材。全书共分7章,第1章绪论,引入控制系统的基本概念、定义、术语;第2章控制系统的数学模型,介绍连续系统的时域模型、复域模型、状态空间描述;第3章线性系统的时域分析,对系统动态性能、稳态性能和稳定性进行分析的方法作了详细的讨论;第4章线性系统的频域分析,介绍线性系统的频率特性和频域分析方法;第5章线性系统的校正,介绍线性系统校正的原理和方法,着重讨论了PID控制器的设计及其在系统校正中的作用。第6章采样系统分析,介绍了 z 变换、脉冲传递函数以及离散系统的分析方法;第7章状态空间分析设计,讨论了线性定常系统的状态空间分析和基本设计方法,各学校可根据专业需要,选择有关章节组织教学。

本书的特点是内容精炼,重点突出,强调基本概念、基本原理的掌握与应用,特别适合少学时数自动控制原理教学的要求。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/王敏,秦肖臻编. —2版. —北京:化学工业出版社,2008.10
非自动化专业适用
ISBN 978-7-122-03660-5

I. 自… II. ①王…②秦… 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138993号

责任编辑:唐旭华

文字编辑:徐卿华

责任校对:蒋 宇

装帧设计:潘 峰

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:大厂聚鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张12¼ 字数301千字 2008年9月北京第2版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:22.00元

版权所有 违者必究

前 言

在科学技术发展的进程中,自动控制技术一直起着极其重要的作用。自动控制理论作为一门涉及多学科的科学,已广泛应用到电气、机械、化工、冶金、航空航天、核反应等工程领域,并进一步扩展和渗透到生物、医学、社会、经济、金融和生命科学等工程领域以外的范围。随着科学技术的高速发展,人类在过去的 20 世纪和已经跨入的 21 世纪中,利用自动控制技术已经和正在把许多梦想变成现实。

自动控制原理是自动控制技术的基础理论,是一门理论性较强的工程科学。从 20 世纪 40 年代经典控制理论体系建立至今,自动控制技术一直是伴随着生产实际的需要发展起来的,其理论也在实际应用和与其他相关学科交叉渗透中日臻完善,并不断发展和创新。随着现代科学的日新月异,自动控制理论已经成为应用最为广泛的学科之一,其发展潜力是不可限量的。

本书主要是为工科院校非自动化专业本科生自动控制理论教学和信息学科平台课程的教学而编写的教材,适合少学时数自动控制原理教学需要,有关专业可根据实际情况选择部分内容进行教学。

本书主要介绍自动控制理论的基本概念、基本原理和基本分析方法,全书共分 7 章。第 1 章给出了控制理论和控制系统的基本概念、定义、一般要求和控制理论的发展过程;第 2 章主要介绍线性系统数学模型的建立,模型的表示方法;第 3 章对线性系统时域分析的基本方法进行了阐述,主要讨论了系统稳定性、瞬态性能和稳态性能分析,以及二阶系统性能指标和计算方法;第 4 章介绍线性系统频率特性的概念和频域分析方法,频率特性的图形表示以及频域指标的计算;第 5 章介绍线性系统校正的原理和方法,着重讨论了 PID 控制器的设计及其在系统校正中的作用;第 6 章讨论了离散系统的基本理论和分析方法;第 7 章介绍了现代控制理论的有关内容,主要包括状态空间模型的建立、系统的能控性和能观性等。

本次修订由华中科技大学王敏教授和秦肖臻副教授完成。其中,1、3、4 章由王敏编写,2、5、6、7 章由秦肖臻编写,全书由王敏统稿。

本书内容的电子文档可为使用本教材的大专院校制作教学课件时提供参考,如有需要可与编者联系,联系方法为:wm526@163.com。

限于编者水平和时间,书中如有错误和不妥之处,请读者不吝指正。

编者

2008 年 7 月

目 录

1 绪论	1
1.1 自动控制的基本概念	1
1.1.1 基本概念	1
1.1.2 开环控制与闭环控制的实例	2
1.2 自动控制理论的发展	3
1.2.1 经典控制理论	3
1.2.2 现代控制理论	4
1.2.3 大系统理论	4
1.2.4 智能控制	4
1.3 控制系统的分类	5
1.3.1 恒值系统和随动系统	5
1.3.2 线性系统 and 非线性系统	5
1.3.3 连续系统和离散系统	5
1.4 对控制系统的基本要求	6
1.4.1 稳定性	6
1.4.2 动态性能	6
1.4.3 稳态性能	6
本章小结	6
习题	6
2 控制系统的数学模型	8
2.1 基本概念	8
2.1.1 数学模型	8
2.1.2 控制系统	8
2.2 时域模型——微分方程	9
2.2.1 建立系统或元件微分方程的步骤	9
2.2.2 典型系统的微分方程	10
2.2.3 非线性方程线性化方法	14
2.3 复域模型——传递函数	15
2.3.1 传递函数的定义	15
2.3.2 传递函数的性质和物理意义	16
2.3.3 典型环节的传递函数	16
2.3.4 传递函数的表示方式和术语	18
2.4 控制系统方块图	20
2.4.1 方块图简介	20
2.4.2 方块图的化简	22

2.4.3 闭环系统的方块图和传递函数	25
2.5 状态空间模型	28
2.5.1 状态变量表达式相关概念	29
2.5.2 由微分方程建立状态变量表达式	31
2.5.3 状态变量表达式和传递函数的关系	35
本章小结	41
习题	41
3 线性系统的时域分析	44
3.1 系统的稳定性分析	44
3.1.1 稳定的概念	44
3.1.2 稳定的充要条件	45
3.1.3 劳斯稳定判据	46
3.2 二阶系统的动态性能分析	52
3.2.1 典型输入信号	52
3.2.2 动态性能指标	53
3.2.3 二阶系统的时域响应	54
3.2.4 高阶系统的时域响应	59
3.3 系统稳态性能分析	62
3.3.1 稳态误差的定义	63
3.3.2 输入信号作用下系统的稳态误差	64
3.3.3 扰动信号作用时系统的稳态误差	68
本章小结	70
习题	70
4 线性系统的频域分析	75
4.1 线性系统的频率响应	75
4.2 频率特性的图形表示	77
4.2.1 幅相频率特性曲线	78
4.2.2 对数频率特性曲线	86
4.3 奈奎斯特稳定判据	95
4.3.1 奈奎斯特稳定判据的数学基础	95
4.3.2 奈奎斯特稳定判据	95
4.4 控制系统的相对稳定性	100
4.4.1 相对稳定性	100
4.4.2 稳定裕度的求取	102
4.5 频域响应分析	105
4.5.1 频率性能指标	105
4.5.2 频域指标与时域指标的关系	105
本章小结	108
习题	108
5 线性系统的校正	113

5.1 系统设计与校正的概念	113
5.1.1 系统性能指标	113
5.1.2 校正的实质	114
5.1.3 校正方式	115
5.1.4 对数幅频特性的形状对系统性能指标的影响	115
5.2 常用校正装置	117
5.2.1 无源超前网络	117
5.2.2 无源滞后网络	118
5.2.3 滞后-超前无源网络	119
5.3 串联校正的频率法设计	120
5.3.1 串联超前校正	120
5.3.2 串联滞后校正	122
5.3.3 串联滞后-超前校正	124
5.4 PID 调节器	126
5.4.1 PID 的基本控制作用	126
5.4.2 PID 控制器的参数确定	129
本章小结	133
习题	133
6 采样系统分析	135
6.1 引言	135
6.2 信号的采样与保持	135
6.2.1 采样信号的数学表示	135
6.2.2 采样信号的频谱分析	136
6.2.3 采样定理	137
6.2.4 信号的保持	138
6.3 z 变换	139
6.3.1 z 变换的定义	140
6.3.2 z 变换的求法	140
6.3.3 z 变换的性质	141
6.3.4 z 反变换	144
6.4 采样系统的脉冲传递函数	146
6.4.1 脉冲传递函数的定义和意义	146
6.4.2 脉冲传递函数的求法	147
6.4.3 开环脉冲传递函数	148
6.4.4 闭环脉冲传递函数	149
6.5 采样系统分析	151
6.5.1 采样系统的稳定性	151
6.5.2 采样系统的稳态性能	153
6.5.3 采样系统的动态性能	155
本章小结	158

习题.....	158
7 状态空间分析设计	161
7.1 状态空间的线性变换	161
7.1.1 线性变换	161
7.1.2 线性变换的不变性	162
7.1.3 线性系统的规范化	163
7.2 线性定常系统状态方程的解	168
7.2.1 线性定常系统齐次方程的解	168
7.2.2 状态转移矩阵的性质	169
7.2.3 状态转移矩阵的求取	170
7.2.4 非齐次状态方程的解	171
7.3 线性连续系统的可控性与可观测性分析	172
7.3.1 线性连续系统的可控性与可观测性的概念	172
7.3.2 线性连续系统的可控性判据	173
7.3.3 线性定常连续系统的可观测性判据	175
7.3.4 通过线性变换将单输入系统化为可控标准型和可观测标准型	177
7.3.5 对偶原理	180
7.3.6 传递函数矩阵与可控性、可观测性的关系	180
7.4 线性定常系统的状态反馈和极点配置	180
7.4.1 状态反馈和输出反馈	180
7.4.2 状态反馈进行极点的任意配置	182
本章小结.....	184
习题.....	184
参考文献.....	187

1 绪 论

本章介绍自动控制的基本概念、自动控制理论的发展、控制系统的分类以及对控制系统设计的基本要求等内容。

1.1 自动控制的基本概念

现代科学技术的众多领域中，自动控制技术起着越来越重要的作用。所谓自动控制，就是在没有人直接参与的情况下，利用外加的设备或装置（控制装置），使机器、设备或生产过程（控制对象）的某个工作状态或参数（被控量）自动地按照预定的规律运行。如数控机床按预定程序自动切削，人造卫星准确进入预定轨道并回收，雷达自动跟踪空中的飞行体等，所有这些都离不开自动控制技术。

随着计算机技术的发展和应用，自动控制理论和技术在宇航、机器人控制、导弹制导及核动力等高新技术领域中的应用也愈来愈深入广泛。不仅如此，自动控制技术的应用范围现在已扩展到生物、医学、环境、经济管理和其他许多社会生活领域中，成为现代社会生活中不可缺少的一部分。随着时代进步和人们生活水平的提高，在人类探知未来，认识和改造自然，建设高度文明和发达社会的活动中，自动控制理论和技术必将进一步发挥更加重要的作用。作为一个工程技术人员，了解和掌握自动控制的有关知识是十分必要的。

1.1.1 基本概念

(1) 自动控制

是指在没有人直接参与的情况下，利用控制装置使被控对象（如机器、设备或生产过程）的一个或数个物理量（如电压、电流、速度、位置、温度、流量、化学成分等）自动地按照预定的规律运行（或变化）。

(2) 自动控制系统

是指能够对被控对象的工作状态进行自动控制的系统。它一般由控制装置和被控对象组成。被控对象是指那些要求实现自动控制的机器、设备或生产过程。控制装置是指对被控对象起控制作用的设备总体。自动控制系统的功能和组成是多种多样的，其结构有简单的也有复杂的。它可以只控制一个物理量，也可以控制多个物理量，甚至一个企业机构的全部生产和管理过程；它可以是一个具体的工程系统，也可以是比较抽象的社会系统、生态系统或经济系统。

(3) 方框图

常用方框图来表示一个控制系统的结构及信号在系统中的传递路径，如图 1-1 所示。方框图通常由以下几部分组成。

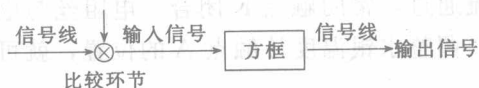


图 1-1 方框图的组成

① 方框 控制装置和被控对象分别用方框表示。

② 信号线 方框的输入和输出以及它们之间的连接用带箭头的信号线表示。

③ 输入信号 进入方框的信号。

④ 输出信号 离开方框的信号。

⑤ 比较环节 表示两个或两个以上的信号的叠加，常用符号 $\otimes$ 表示。

(4) 开环控制

开环控制是指系统的被控制量（输出量）只受控于控制作用，而对控制作用不能反施任何影响的控制方式，采用这一控制方式的系统称为开环控制系统。

(5) 闭环控制

闭环控制是指系统的被控制量（输出量）与控制作用之间存在着负反馈的控制方式。采用闭环控制的系统称为闭环控制系统或反馈控制系统。

1.1.2 开环控制与闭环控制的实例

(1) 炉温开环控制系统

如图 1-2 所示为一炉温开环控制系统，电炉是控制对象，炉温是要求进行自动控制的物理量，称为被控量。控制装置是电阻丝和开关，电阻丝接通电源受时间继电器触点开关 K 的控制，开关 K 闭合与断开的

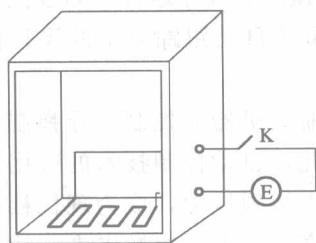


图 1-2 炉温开环控制系统

时间按照在正常情况下炉温可达到的希望值的经验数据预先设定。实际炉温虽然可能高于或低于希望值，但基本能保持恒温。但是，如果工作条件发生变化，例如，炉门开关次数增加，由于没有对被控制量炉温进行测量，并根据实际炉温与希望值的偏差来改变开关 K 接通和断开时间，炉温就会低于希望值，因此，系统的控制精度较低。从本例可看出，开环控制的特点是控制装置只按照给定的输入信号对被控制量进行单向

控制，而不对控制量进行测量并反向影响控制作用。因此，开环控制不具有修正由于扰动（使被控制量偏离希望值的因素）而出现的被控制量与希望值之间偏差的能力，即开环系统的抗干扰能力较差。

(2) 炉温闭环控制系统

如果在图 1-2 所示炉温开环控制系统中加入一个接触式水银温度计测量炉温，就可由开环系统转换成闭环系统，如图 1-3 所示。水银温度计的两个触点 A 和 B 接在常闭继电器的线圈电路中，它们随着水银柱的升降接通或断开电源，使触点 K 开启或闭合。例如，当温度升至希望值时（对应水银柱在 A 点位置），A、B 两点接通，此时继电器线圈回路电源接通，常闭触点 K 断开，使电阻丝没有电流流过，炉温开始下降，当温度低于设定值时，水银柱下降，继电器线圈无电流通过，常闭触点 K 闭合，电阻丝与电源接通，使温度上升。调整水银温度计触点 A 的位置，就可改变炉温的希望值。图 1-4 所示是闭环炉温控制系统的方框图。

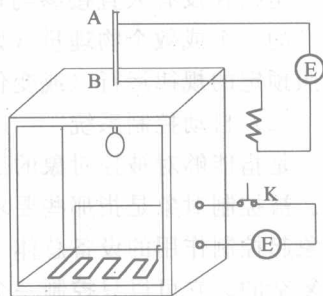


图 1-3 炉温闭环控制系统

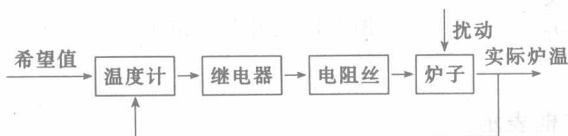


图 1-4 闭环炉温控制系统方框图

在闭环控制系统中，被控制量一般由测量装置反馈到输入端，然后由比较装置将反馈量与输入信号加以比较，得到实际值与希望值之间的偏差，再对控制量进行调整。有时测量与比较由同一个装置完

成,如炉温控制系统中的温度计。典型闭环控制系统方框图如图 1-5 所示,图中在比较环节处的“-”号表示负反馈,输入量与反馈量在比较环节的叠加关系是相减。



图 1-5 闭环控制系统方框图

图 1-6 所示为一主从机械手的原理,其工作原理如下:主动手发出指令信号

θ_1 , 希望从动手跟随转动相同角度,即 $\theta_2 = \theta_1$, 若主从手转动角度不一致,则电位计 A 和 B 就会产生与角度差成比例的电压差 e , 经放大器放大后加到电动机的电枢回路中,电动机带动从动手和电位计 B 旋转,使角度差 $\theta_e = \theta_1 - \theta_2$ 减小,当角度差为零时,电压差也为零,电动机停止转动,这样,就保证了主从手旋转角度的一致性。该系统中,电位计 A 给出指令信号,电位计 B 起着检测被控制量(从动手的旋转角度)并将其转换成电压反馈到输入端的作用,电位计组 A、B 同时起着偏差检测器的作用,这是一典型的闭环控制系统。

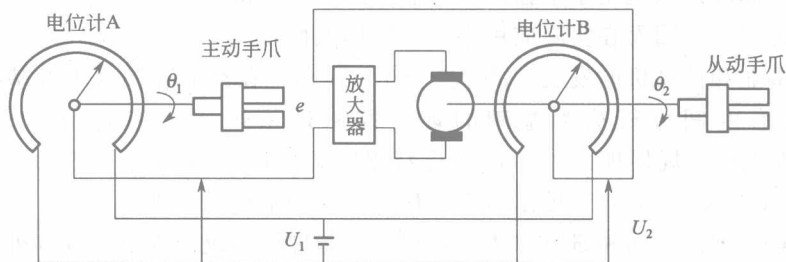


图 1-6 主从机械手原理

1.2 自动控制理论的发展

自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学,既是一门古老的、已臻成熟的学科,又是一门正在发展的、具有强大生命力的新兴学科。从 1868 年马克斯威尔(J. C. Maxwell)提出低阶系统稳定性判据至今一百多年里,自动控制理论的发展可分为四个主要阶段。

第一阶段:经典控制理论(或古典控制理论)的产生、发展和成熟;

第二阶段:现代控制理论的兴起和发展;

第三阶段:大系统控制兴起和发展阶段;

第四阶段:智能控制发展阶段。

1.2.1 经典控制理论

控制理论的发展初期,是以反馈理论为基础的自动调节原理,主要用于工业控制。第二次世界大战期间,为了设计和制造飞机及船用自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达跟踪系统等基于反馈原理的军用装备,进一步促进和完善了自动控制理论的发展。

1895 年,数学家劳斯(Routh)和赫尔威茨(Hurwitz)分别独立地提出了高阶系统的稳定性判据,即 Routh 和 Hurwitz 判据。

二战期间(1938~1945 年)奈奎斯特(H. Nyquist)提出了频率响应理论;1948 年,伊万斯(W. R. Evans)提出了根轨迹法。至此,控制理论发展的第一阶段基本完成,形成

了以频率法和根轨迹法为主要方法的经典控制理论。

经典控制理论的基本特征如下。

① 主要用于线性定常系统的研究,即用于常系数线性微分方程描述的系统的分析与综合。

② 只用于单输入、单输出的反馈控制系统。

③ 只讨论系统输入与输出之间的关系,而忽视系统的内部状态,是一种对系统的外部描述方法。

应该指出的是,反馈控制是一种最基本最重要的控制方式,引入反馈信号后,系统对来自内部和外部干扰的响应变得十分迟钝,从而提高了系统的抗干扰能力和控制精度。与此同时,反馈作用又带来了系统稳定性问题,正是这个曾一度困扰人们的系统稳定性问题激发了人们对反馈控制系统进行深入研究的热情,推动了自动控制理论的发展与完善。因此从某种意义上讲,经典控制理论是伴随着反馈控制技术的产生和发展而逐渐完善和成熟起来的。

1.2.2 现代控制理论

由于经典控制理论只适用于单输入、单输出的线性定常系统,只注重系统的外部描述而忽视系统的内部状态,因而在实际应用中有很大局限性。

随着航天事业和计算机的发展,20世纪60年代初,在经典控制理论的基础上,以线性代数理论和状态空间分析法为基础的现代控制理论迅速发展起来。1954年贝尔曼(R. Belman)提出动态规划理论;1956年庞特里雅金(L. S. Pontryagin)提出极大值原理;1960年卡尔曼(R. K. Kalman)提出多变量最优控制和最优滤波理论。

在数学工具、理论基础和研究方法上,现代控制理论不仅能提供系统的外部信息(输出量和输入量),而且还能提供系统内部状态变量的信息。它无论对线性系统或非线性系统,定常系统或时变系统,单变量系统或多变量系统,都是十分重要的。

1.2.3 大系统理论

从20世纪70年代开始,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a. 现代频域方法。它是以传递函数矩阵为数学模型,研究线性定常多变量系统。b. 自适应控制理论和方法。是以系统辨识和参数估计为基础,在实时辨识基础上在线确定最优控制规律。c. 鲁棒控制方法。由于实际系统不可避免存在一些不确定性,如模型参数的不确定性,外界扰动的不确定性等。鲁棒控制就是使系统在最不利的情况下仍然能够稳定工作,并能满足一定的性能指标。

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。

大系统理论是过程控制与信息处理相结合的系统工程理论,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,目前仍处于发展和开创性阶段。

1.2.4 智能控制

人工智能的出现和发展,促进自动控制向着更高层次——智能控制发展。从人工智能的角度来看,智能控制是智能科学的一个新的应用领域,从控制的角度来看,智能控制是控制科学发展的一个新的阶段,它是无需人的干预就能够独立驱动智能机器实现其目标的自动控制。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。被控对象的复杂性体现为：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。

智能控制的任务在于对实际环境或过程进行组织，即决策和规划，实现广义问题的求解。这些问题的求解过程与人脑的思维程度具有一定的相似性，即具有不同程度的智能。一般认为，智能控制的方法包括学习控制、模糊控制、神经网络控制和专家控制等。

长期以来，自动控制科学已对整个科学技术的理论和实践作出了重要贡献，为人类社会带来了巨大利益。随着社会进步和科学技术的发展，必将对控制学科提出更高的要求，自动控制既面临严峻的挑战又存在良好的发展机遇，为解决这一问题，一方面需要推进硬件、软件和智能的结合，实现控制系统的智能化；另一方面要实现自动控制科学与计算机科学、信息科学、系统科学以及人工智能的结合，为自动控制提供新思想、新方法和新技术，创立边缘新学科，推动自动控制的发展。

1.3 控制系统的分类

自动控制系统有很多分类的方法，如按照系统的控制方式分类，可将系统分为开环控制与闭环控制系统；按照信号的连接特点分类，可分为反馈控制、前馈控制以及含有反馈和前馈的复合控制系统；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……；按系统的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、确定系统和不确定系统等。几种常见的分类描述如下。

1.3.1 恒值系统和随动系统

按输入信号的形式可将系统分为恒值系统和随动系统。恒值系统是指参考输入量保持常值的系统。其任务是消除或减少扰动信号对系统输出的影响，使被控制量（即系统的输出量）保持在给定或希望的数值上。如工业控制中的电机调速系统、温度控制系统和位置控制系统等。随动系统是指参考输入量随时间任意变化的系统。其任务是要求输出量以一定的精度和速度跟踪参考输入量，跟踪的速度和精度是随动系统的两项主要性能指标。

1.3.2 线性系统和非线性系统

按组成系统的元件特性可将系统分为线性系统和非线性系统。线性系统是指构成系统的所有元件都是线性元件的系统。其动态性能可用线性微分方程描述，系统满足叠加原理。非线性系统是指构成系统的元件中含有非线性元件的系统，它只能用非线性微分方程描述，不满足叠加原理。实际中，理想的线性系统是不存在的，构成系统的元件中总会或多或少含有非线性特性，如果系统的这种非线性特性在一定条件下，或在一定范围内呈线性特性，则可将它们进行线性化处理，这类系统或元件的特性称为非本质非线性特性。反之，称之为本质非线性，只能用非线性理论进行分析研究。

1.3.3 连续系统和离散系统

按系统中信号的特征可将系统分为连续系统和离散系统。连续系统是指系统内各处的信号都是以连续的模拟量传递的系统，系统内某处或数处信号是以脉冲序列或数码形式传递的系统则称为离散系统，其运动方程只能用差分方程描述。脉冲序列可由脉冲信号发生器或振荡器产生，也可用采样开关将连续信号变成脉冲序列，这类控制系统又称为采样控制系统或脉冲控制系统。而用数字计算机或数字控制器控制的系统又称为数字控制系统或计算机控制系统。

1.4 对控制系统的基本要求

尽管控制系统有各种不同的类型,对每个系统的要求也各不相同,但对系统的要求和对系统性能的评价通常可分为三个方面:系统的稳定性,系统的动态性能和稳态性能。

1.4.1 稳定性

系统的稳定性是指系统在受到扰动作用后自动返回原来的平衡状态的能力。如果系统受到扰动作用(系统内或系统外)后,能自动返回到原来的平衡状态,则该系统是稳定的。稳定系统的数学特征是其输出量具有非发散性;反之,系统是不稳定系统。稳定性是系统能正常工作的前提条件,控制系统稳定与否只与系统本身的结构参数有关,与外部条件无关。

1.4.2 动态性能

当系统受到外部扰动的影响或是参考输入发生变化时,被控量就会随之发生变化,经过一段时间后,被控量恢复到原来的平衡状态或到达一个新的给定状态,称这一过程为过渡过程。在时域中,通常用单位阶跃信号作用下,系统输出的超调量 σ_p ,上升时间 t_r ,峰值时间 t_p ,过渡过程时间(或调整时间) t_s 等特征量表示过渡过程中系统的动态性能。这些特征量的定义及计算在第3章中详细介绍。

1.4.3 稳态性能

指稳定的系统在过渡过程结束后,其稳态输出偏离希望值的程度,用稳态误差来度量,这是系统精度的衡量指标。开环控制系统的稳态误差通常与系统的增益或放大倍数有关,而反馈控制系统(闭环系统)的控制精度主要取决于它的反馈深度。稳态误差越小,系统的精度越高。

本章小结

本章介绍了自动控制和自动控制系统的基本概念、有关名词术语及控制理论发展的几个重要阶段。以炉温控制系统为例说明了开环控制和闭环控制两种基本控制方式,指出“反馈”是自动控制原理的一个非常重要的概念。介绍了控制系统分类的一般方法,可根据系统的控制方式、信号的特点、元器件的性质及系统的功用等,将系统分成各种不同的类型。尽管系统的结构、组成和类型各有不同,但都可以用方框图来表示其工作原理和信号的传递过程,并且用性能指标来分析和评价系统的性能。系统分析可分为三方面的内容:稳定性分析、动态性能分析和稳态性能分析,在以后的各章节中对这三方面的问题将进行详细的介绍。

习 题

- 1-1 试列举几个日常生活中开环控制系统和闭环控制系统的实例,并分析它们的工作原理。
- 1-2 开环控制系统与闭环控制系统各有什么特点?
- 1-3 家用电冰箱的控制方式是开环还是闭环控制方式?试分析冰箱控制系统的工作原理,并画出系统的方框图。
- 1-4 说明负反馈的工作原理及其在自动控制系统中的应用。
- 1-5 图1-7(a)和(b)是直流电机调速系统的两个例子,试分析系统的工作原理,并画出系统的方块图。

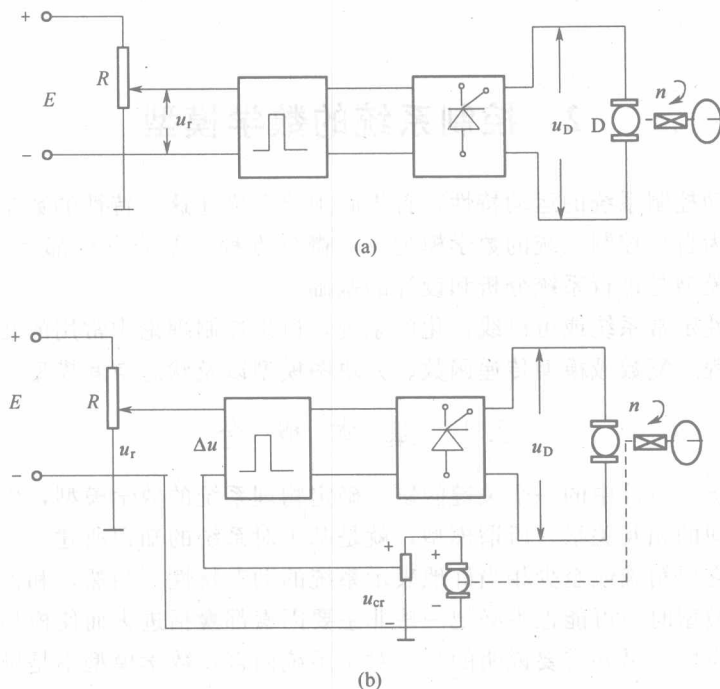


图 1-7 题 1-5 图

2 控制系统的数学模型

为了研究自动控制系统的运动特性,首先必须建立描述这一特性的数学表达式,这个数学表达式通常称为自动控制系统的数学模型,如微分方程、差分方程都是常见的数学模型。建立系统的数学模型是进行系统分析和设计的基础。

本章针对线性定常系统或可以线性化的系统,讨论控制理论中常用的几种数学模型——时域模型微分方程、复数域模型传递函数、方块图模型以及状态空间模型。

2.1 基本概念

控制系统分析和设计中的一个关键问题是确定物理系统的数学模型,以便定量地给出系统中一些变量之间的相互关系。所谓模型,就是基于对系统的知识所建立的关于系统某一方面属性的描述。它要精确或至少相当好地表示系统的动态特性。当然,和模型有关的因素可能很多,在建立模型时不可能也不必把一些非主要因素都囊括进去而使模型过于复杂,以致难于理解和实际应用。另外需要说明的是,对于系统而言,数学模型不是惟一的,它可以采用不同的表示方式。

2.1.1 数学模型

数学模型是描述系统内部物理量(或变量)之间关系的数学表达式。根据不同的需要和系统不同的特点,它的形式有多种。如只需要反映系统静态关系,就可以用代数方程;如果要表示系统输入和输出之间的动态关系,就可以用常微分方程或偏微分方程,具体采用什么形式的数学模型,还要取决于系统的特点和对系统精度的要求。一般来说,模型精度越高就越复杂,但是采用过于复杂的数学模型,对系统进行分析和设计非常困难。所以通常在建立模型时,会在模型精确性和可行性之间作出折衷考虑。

通常建立模型的方法有两种。一种是根据系统的运动学或动力学的规律和机理,如机械系统中的牛顿定律、电力系统中的克希霍夫定律建立系统的数学表达式,这种模型称为机理模型;另一种是根据系统输入输出数据,通过辨识的方法建立模型,称之为实验建模。本章仅讨论机理建模的方法。

不同的系统,其数学模型也不同,下面介绍几种常见的系统。

2.1.2 控制系统

前面提过,系统的特点不同,其数学模型也不同,下面就系统的不同进行分类。

(1) 集中参数系统

集中参数系统中变量仅仅是时间的函数。这类系统建立的动态数学模型通常是微分方程。

(2) 分布参数系统

分布参数系统中变量不仅是时间的函数,而且还是空间的函数。这类系统建立的动态数学模型通常是偏微分方程。如很大的蒸馏罐,温度随空间位置不同是有梯度变化的。在实际系统中,大多数系统都是分布式参数系统,但由于偏微分方程求解比较困难,因此在一定误差允许范围内,对系统作一个近似,近似为集中参数系统,这样就可以用微分方程进行分析。下面仅讨论集中参数系统。

(3) 线性系统

如果一个系统满足叠加原理,那么称该系统为线性系统。叠加原理是当两个不同的作用函数同时作用于系统时,其系统响应等于两个作用函数单独作用的响应之和。这一点对系统分析提供了很大的方便。

(4) 非线性系统

不满足叠加原理的系统,就是非线性系统。因此非线性系统对两个输入量的响应不能单独进行计算,这样系统分析将比较困难,很难找到一般通用方法。但在实际系统中,绝对线性的系统是不存在的,通常所谓的线性系统也是在一定的工作范围内才保证线性的,如放大器,在小信号时可能出现“死区”,在大信号时,又可能出现饱和现象。如图 2-1 所示即为几种常见的非线性关系曲线。下面给出一个非线性微分方程的例子。

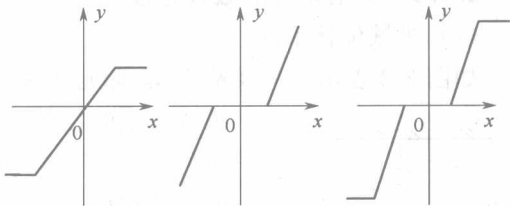


图 2-1 典型的非线性关系

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 + y = A \sin \omega t$$

显然上面的微分方程不容易求解,系统分析很困难,所以常常需要引入“等效”线性系统来代替非线性系统,这种等效线性系统仅在有限的工作范围内是正确的。下面研究的系统就是线性系统或能等效为线性系统的非线性系统。

(5) 线性定常系统

如果描述一个线性系统的微分方程的系数为常数,那么称系统为线性定常系统。如

$$\frac{d^3 y}{dt^3} + 2 \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{dy}{dt} = u(t)$$

(6) 线性时变系统

如果描述一个线性系统的微分方程的系数为时间的函数,那么称系统为线性时变系统。如

$$\frac{d^3 y}{dt^3} + 2t \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{dy}{dt} = u(t)$$

2.2 时域模型——微分方程

不论是机械系统、电系统还是液压系统,都是按照一定的运动规律进行的,这些运动规律通常是可以微分方程来表示的,因此建立微分方程是建立系统数学模型的基础。

2.2.1 建立系统或元件微分方程的步骤

自动控制系统是由若干元件组成的。因此,在建立系统的数学模型之前,先建立元件的数学模型,下面首先介绍建立微分方程的一般步骤,举例说明其建立方法。

① 根据系统要求确定系统或元件的输入输出变量。微分方程通常建立的是输入和输出之间的数学关系。

② 根据物理或化学定律列出原始方程,这里的原始方程,就是指物理或化学的定律,如牛顿第二定律、能量守恒定律、克希霍夫定律等。如果是元件,就直接列写元件的相应的原始方程;如果是多个元件组成的系统,则对每一个元件建立原始方程。

③ 在适当情况下进行简化,忽略一些次要因素。实际系统或多或少带有一定的非线性