

21
商

高等学校规划教材

自动控制原理

(第二版)

薛安克 彭冬亮 陈雪亭 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

面向 21 世纪高等学校规划教材

自动控制原理

(第二版)

薛安克 彭冬亮 陈雪亭 编著

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理 / 薛安克, 彭冬亮, 陈雪亭编著. — 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.9

ISBN 978-7-5546-0000-0

Ⅰ. 自… Ⅱ. ①薛… ②彭… ③陈… 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 (2007) 第 109670 号

策 划 彭冬亮

责任编辑 彭冬亮

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029) 8839365 88391457 邮 政 710071

网 址 http://www.xjpuh.com E-mail: xjpuh@pub.xjpuh.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华冰印刷科技有限责任公司

版 次 2007 年 9 月第 2 版 2007 年 9 月第 3 次印刷

开 本 787 毫米×109

字 数 438 千字

印 数 12 001—18 000

定 价 34.00 元

ISBN 978-7-5546-0000-0

西安电子科技大学出版社

2007

内 容 简 介

本书从理论和工程应用相结合的角度,比较全面和系统地阐述了控制理论(包括经典控制理论和现代控制理论)的基本内容。书中内容侧重介绍一些基本概念、基本理论和基本分析方法,尽量降低理论方面的难度,并注意强化读者的工程意识,提高其工程实践能力。本书的主要特色是在保持理论完整性和系统性的前提下,从仿真实现的角度,采用目前流行的控制系统分析和综合的软件包——MATLAB 完成了相关内容的论述。

全书共分为 12 章,主要内容有:控制系统数学模型的建立、时域分析法、根轨迹法、频率响应法、控制系统的校正、离散控制系统、非线性控制系统分析、线性系统的状态空间描述与分析和李亚普诺夫稳定性分析,最后给出了一些控制系统设计的实例,以便提高本书的实用性。书中结合相关的理论,以例题的方式介绍了 MATLAB 在控制系统分析和设计中的应用。同时,对每一章的内容进行了小结,并配合了一定数量的典型例题和习题,便于读者学习和巩固所学知识。

本书可作为本科自动化及相关专业“自动控制理论”课程的教材,还可供从事自动化工作的科技人员作参考。

★ 本书配有电子教案,需要者可与出版社联系,免费提供。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/薛安克,彭冬亮,陈雪亭编著. —2 版.

—西安:西安电子科技大学出版社,2007.9

面向 21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 1384 - 0

I. 自… II. ①薛… ②彭… ③陈… 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(2007)第 109670 号

策 划 马乐惠

责任编辑 张 友 马乐惠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 <http://www.xduph.com> E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2007 年 9 月第 2 版 2007 年 9 月第 3 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 18.5

字 数 438 千字

印 数 12 001~16 000 册

定 价 24.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 1384 - 0/TP · 0735

XDUP 1655012-3

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

本书是西安电子科技大学出版社推出的“面向 21 世纪高等学校规划教材”之一。原书主要讲述了经典控制理论、现代控制理论和控制系统设计实例分析三大部分。

在过去的 3 年中,原书在一些工科高等院校中得到较广泛的使用,我们也收到来自全国各地教师和学生的几十封来信和电子邮件,他们对原书中在内容安排、编写形式及印刷等方面存在的问题,给予了中肯的批评和认真的指正。在此,编者对关注本教材建设的教师和学生表示衷心的感谢。

按照读者的意见和编者几年来的课堂教学经验,本次修订对全书做了充分修订。将原书第二章中的“线性系统的状态空间描述”内容调整到第九章,并在第九章中细化了状态空间表达式的建立方法,补充了可控性、可观性判据的部分证明;在第六章中补充了 PID 参数整定的工程化方法;修改了书中的部分例题和习题。

在本次修订工作中,编者同事鲁仁全副教授主持修改了现代控制理论的相关章节,陈雪亭副教授补充了 PID 参数整定的工程化方法,彭冬亮副教授负责全书的修订组织工作,最后由薛安克教授主审。另外,张国锋副教授、文成林教授、林岳松副教授和柴利教授等多位老师也为本书的修订工作提出了宝贵意见,在此表示感谢。

编 者

2007.6.14 于杭州

香 港

民 国 100 年

第一版前言

随着工业生产和科学技术的发展,自动控制技术已广泛应用于制造业、农业、交通、航空航天和国防等诸多领域。“自动控制原理”课程是专门研究有关自动控制系统的基本概念、基本原理和基本方法的一门课程,也是工科院校自动控制或自动化专业及其相关专业学生必修的技术基础课之一。

本书面向高等院校相关专业的学生,系统而有重点地论述了控制理论的基本内容。主要内容包括:线性系统的数学模型及其建立方法、线性系统的时域分析和频域分析、根轨迹法、线性系统校正、数字控制系统、非线性控制系统、控制系统的可控性和可观性、极点配置和状态观测器设计、最优控制,以及控制系统设计。这些研究内容是被国内外公认的关于自动控制理论的基本内容。在本书的论述过程中,结合有关内容和例题介绍了 MATLAB 语言在控制系统分析和设计中的应用,这是本书的特色之一。另外,与其他同类著作相比,本书降低了理论难度,尽量避免比较复杂、繁琐的证明和推导,重点在于强化读者的工程意识和提高其工程实践能力。

全书共分为 12 章,基本上按照经典控制理论、现代控制理论和控制系统设计的顺序组织。全书由薛安克教授主编、主审,其中第一、二、三、四章和第九、十、十一、十二章由彭冬亮编写,第五、六、七、八章由陈雪亭编写。另外,林岳松和柴利老师为本书的编写提供了有关素材并提出了宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,恳请广大读者不吝指正。

编 者

2004 年 3 月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 自动控制系统简介	1
1.2 自动控制系统分类	3
1.3 自动控制理论的发展历史	5
1.4 工程控制问题的基本要求	6
小结	7
习题	7
第二章 线性系统的数学描述	8
2.1 线性系统的时域数学模型	8
2.2 传递函数	11
2.3 结构图	17
2.4 信号流图	25
2.5 线性定常系统数学模型的 MATLAB 实现	29
小结	31
习题	31
第三章 线性系统的时域分析法	34
3.1 动态和稳态性能指标	34
3.2 一阶系统的时域分析	38
3.3 二阶系统的时域分析	40
3.4 高阶系统的时域分析	48
3.5 线性系统的稳定性分析	49
3.6 控制系统的稳态误差	53
3.7 基于 MATLAB 的线性系统时域分析	57
小结	59
习题	60
第四章 根轨迹法	63
4.1 根轨迹的基本概念	63
4.2 根轨迹的绘制	64
4.3 系统性能的分析	70
小结	71
习题	72
第五章 频率响应法	74
5.1 频率特性	74

5.2 典型环节的频率特性	78
5.3 控制系统开环频率特性曲线的绘制	86
5.4 频域稳定性判据	95
5.5 稳定裕度	102
5.6 闭环系统的频域性能指标	106
5.7 频率特性的试验确定方法	108
小结	112
习题	112
第六章 线性系统的校正方法	116
6.1 校正的基本概念	116
6.2 线性系统的基本控制规律	117
6.3 常用校正装置及其特性	121
6.4 串联校正	126
6.5 反馈校正	133
6.6 复合校正	135
小结	137
习题	137
第七章 数字控制系统分析基础	141
7.1 引言	141
7.2 信号的采样与保持	142
7.3 Z变换理论	145
7.4 脉冲传递函数	152
7.5 数字控制系统的性能与控制	156
小结	164
习题	165
第八章 非线性控制系统分析	167
8.1 非线性控制系统概述	167
8.2 相平面分析法	170
8.3 描述函数法	187
小结	195
习题	195
第九章 线性系统的状态空间描述与分析	200
9.1 状态空间描述的基本概念	200
9.2 状态空间表达式的建立	204
9.3 线性定常系统的响应	216
9.4 状态转移矩阵	218
9.5 线性离散系统的响应	222
9.6 可控性和可观性	226

9.7 线性定常系统的线性变换	233
9.8 对偶原理	238
9.9 线性定常系统的结构分解	239
9.10 线性系统状态空间描述的 MATLAB 实现	241
小结	244
习题	244
第十章 线性反馈系统的时间域综合	249
10.1 输出反馈与状态反馈	249
10.2 极点配置问题	250
10.3 状态重构与状态观测器设计	253
10.4 最优控制问题概论	260
10.5 MATLAB 在线性反馈系统时间域综合中的应用	261
小结	264
习题	265
第十一章 李亚普诺夫稳定性分析	267
11.1 李亚普诺夫关于稳定性的定义	267
11.2 李亚普诺夫第一方法	268
11.3 李亚普诺夫第二方法	269
11.4 线性定常系统的李亚普诺夫稳定性分析	272
小结	275
习题	275
第十二章 控制系统设计实例分析	277
12.1 火炮稳定器的设计	277
12.2 船舶自动驾驶仪的设计	279
12.3 磁盘读写头的控制	280
12.4 倒立摆控制系统的设计	283
小结	286
附录 常用函数的拉氏变换和 Z 变换对照表	287
主要参考文献	288

第一章 绪 论

随着生产和科学技术的发展,自动控制技术在国民经济和国防建设中所起的作用越来越大。从最初的机械转速、位置的控制到工业过程中温度、压力、流量的控制,从远洋巨轮到深水潜艇的控制,从飞机自动驾驶、神舟飞船的返回控制到“勇气”号、“机遇”号的火星登陆控制,自动控制技术的应用几乎无所不在。从电气、机械、航空航天、化工到经济管理、生物工程,自动控制理论和技术已经介入到许多学科,渗透到各个工程领域。所以许多工程技术人员和科学工作者都希望具备一定的自动控制方面的知识,根据自身需要设计自动控制系统。

自动控制原理是研究自动控制共同规律的技术科学,主要讲述自动控制的基本理论与控制系统的分析和设计方法等内容。根据自动控制技术发展的不同阶段,自动控制原理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,以频率法和根轨迹法为核心,研究单输入单输出类自动控制系统的分析和设计问题。这些理论研究较早,现在已经成熟,并且在工程实践中得到了广泛的应用。现代控制理论是 20 世纪 60 年代在经典控制理论的基础上,随着科学技术的发展和工程实践的需要而迅速发展起来的。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、变参数、非线性、高精度、高效能等控制系统的分析和设计问题。最优控制、最佳滤波、系统辨识、自适应控制、鲁棒控制和预测控制等理论都是这一领域研究的主要课题。特别是近十年来由于电子计算机技术和现代应用数学研究的迅速发展,使现代控制理论又在研究庞大系统工程的大系统理论和模仿人类智能活动的智能控制、生物控制、模糊控制等方面有了重大进展。

1.1 自动控制系统简介

自动控制是指在没有人直接参与的情况下,利用外加的设备或装置(称控制装置或控制器),使机器、设备或生产过程(统称被控对象)的某个工作状态或参数(即被控量)自动地按照预定的规律运行。系统是指按照某些规律结合在一起的物体(元部件)的组合,它们相互作用、相互依存,并能完成一定的任务。能够实现自动控制的系统就可称为自动控制系统,一般由控制装置和被控对象组成。可以通过一个实例来说明有关自动控制与自动控制系统的基本概念。

例 室温控制系统。

图 1-1 表示采用空调器的室内温度控制系统的元件框图。图中方块表示元部件,方框之间的有向线段代表信号(或变量)及其传递方向。室内温度是要被控制的物理量,它由

空调器直接控制。电位器的输入电压 r 代表设定的室内温度。实际温度 c 由热敏电阻组成的温度传感器检测并转换成电压 y 。电子放大器的输出电压 e 代表设定温度与实际温度之差。当这个温度差大于某个规定值时，空调器开始运行，缩小室内温度与设定温度之间的差值。一旦室内温度达到设定值后，放大器输出电压 e 使空调断电而停止运行。于是室内温度就被控制在设定值的附近。

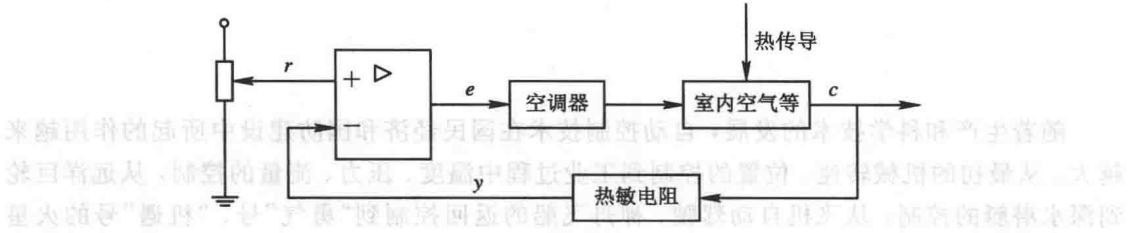


图 1-1 室温控制系统元部件框图

在自动化领域，被控制的装置、物理系统或过程称为被控对象。这个“过程”的含义是广泛的，它包括化学反应过程、核反应过程、热传导过程、工业生产调度过程等等。另外，控制对象还可以属于生物领域、社会经济领域等其他领域。对控制对象产生控制作用的装置称为控制器，有时也称为控制元件、调节器等。在控制系统中被控制的物理量是被控变量。直接改变被控变量的元件称为执行元件。能够将一种物理量检测出来并转化成另一种容易处理和使用的物理量的装置称为传感器或测量元件。在图 1-1 中，室内的空气就是被控对象，室内温度是被控变量，空调器是执行元件，放大器是控制器，热敏电阻属于传感器或测量元件。按照各元件的不同功能可以将图 1-1 抽象为如图 1-2 所示的功能框图。

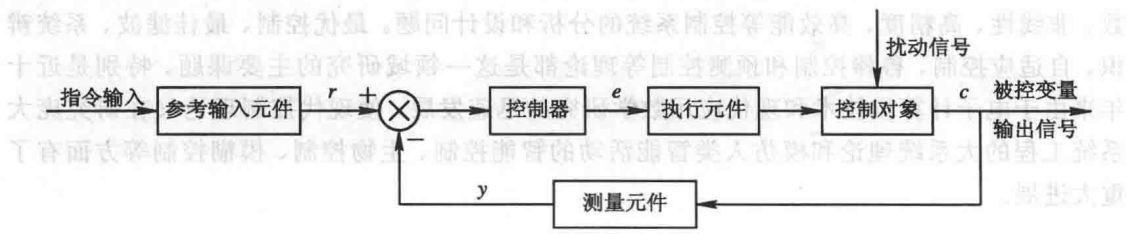


图 1-2 室温控制系统功能框图

为了论述方便，以下给出一些关于变量的常用术语。

由外部加到系统中的变量称为输入信号，它不受系统中其他变量的影响和控制。由系统或元件产生的变量称为输出信号，其中最受关注的输出信号又称为被控变量。由某一个输入信号产生的输出信号又称为该输入信号的响应。控制器的输出信号称为控制变量，它作用在控制对象(执行元件、功率放大器)上，影响和改变被控变量。反馈信号是被控变量经传感器等元件变换并返回到输入端的信号，一般与被控变量成正比。给定值又称为指令输入信号，它与被控变量是同一物理单位，用来表示被控变量的设定值。代表指令输入信号与反馈信号进行比较的基准信号称为参考输入信号。参考输入信号与反馈信号之差称为偏差信号。扰动信号是加于系统上的不希望的外来信号，它对被控变量产生不利的影响。将指令输入信号变成参考输入信号的元件可称为参考输入元件。

在图 1-1 和图 1-2 表示的室温控制系统中，室内温度的设定值就是给定值，或称为指令输入。室内的实际温度 c 就是被控变量，也是系统的输出信号。电位器的输出电压 r 是参考输入信号，热敏电阻即温度传感器的输出信号 y 是反馈信号， $e=r-y$ 称为偏差信号。放大器(控制器)的输出信号 e 也就是加到空调器上的信号，它就是控制变量。电位器是参考输入元件，它将设定的温度转换为电压。周围环境温度的变化及房间散热条件的变化等都属于扰动信号。

1.2 自动控制系统分类

对控制系统进行分类，从不同观点出发可以有不同的分类方法，常见的分类情况有以下几种。

1.2.1 开环控制和闭环控制

按照控制方式和策略，系统可分为开环控制系统和闭环控制系统两大类。

开环控制系统是一种最简单的控制系统，在控制器和控制对象间只有正向控制作用，系统的输出量不会对控制器产生任何影响，如图 1-3 所示。在该类控制系统中，对于每一个输入量，就有一个与之对应的工作状态和输出量，系统的精度仅取决于元器件的精度和执行机构的调整精度。这类系统结构简单，成本低，容易控制，但控制精度低。因为如果在控制器或控制对象上存在干扰，或者由于控制元器件老化，控制对象结构或参数因工作环境而发生变化，均会导致系统输出的不稳定，使输出值偏离预期值。因此，开环控制系统一般适合于干扰不强或可预测的、控制精度要求不高的场合。

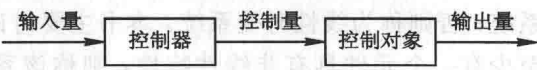


图 1-3 开环控制系统

另外，如果系统的给定输入与被控量之间的关系固定，且其内部参数或外来扰动的变化都比较小，或这些扰动因素可以事先确定并能给予补偿，则采用开环控制也能取得较为满意的控制效果。

闭环控制系统指的是系统输出量对控制作用有直接影响的一类控制系统。在闭环控制系统中，需要对系统输出不断地进行测量、变换并反馈到系统的控制端与参考输入信号进行比较，产生偏差信号，实现按偏差控制。因此闭环控制又称为反馈控制，其控制结构如图 1-4 所示。在这样的结构下，系统的控制器和控制对象共同构成了前向通道，而反馈装置构成了系统的反馈通道。



图 1-4 闭环控制系统

在控制系统中,反馈的概念非常重要。在图 1-4 中,如果将反馈环节取得的实际输出信号加以处理,并在输入信号中减去这个反馈量,再将结果输入到控制器中去控制被控对象,这样的反馈称为负反馈;反之,若由输入量与反馈量相加作为控制器的输入,则称为正反馈。在一个实际的控制系统中,具有正反馈形式的系统一般是不能改进系统性能的,而且容易使系统性能变坏,因此不被采用;而具有负反馈形式的系统,它通过自动修正偏离量,使系统输出趋于给定值,并能抑制系统回路中存在的内扰和外扰的影响,最终达到自动控制的目的。通常而言,反馈控制就是指负反馈控制。

与开环控制系统相比,闭环控制系统的最大特点是检测偏差、纠正偏差。从系统结构上看,闭环系统具有反向通道,即反馈;从功能上看,闭环系统具有如下特点:

(1) 由于增加了反馈通道,系统的控制精度得到了提高,若采用开环控制,要达到同样的精度,则需要高精度的控制器,从而大大增加了成本。

(2) 由于存在系统的反馈,可以较好地抑制系统各环节中可能存在的扰动和由于器件的老化而引起的结构和参数的不确定性。

(3) 反馈环节的存在可以较好地改善系统的动态性能。

虽然在实际系统中,反馈控制系统的形式是多样的,但一般均可化为图 1-4 的形式。

1.2.2 线性控制系统和非线性控制系统

按照系统是否满足叠加原理,系统可分为线性系统和非线性系统两类。

在线性控制系统中,组成控制系统的元件都具有线性特性。这种系统的输入/输出关系一般可以用微分方程、差分方程或传递函数等来描述,也可以用状态空间表达式来表示。线性系统的主要特点是具有齐次性和适用叠加原理。如果线性系统中的参数不随时间变化,则称为线性定常系统;否则称为线性时变系统。本书主要讨论线性定常系统。

在控制系统中,若至少有一个元件具有非线性特性,则称该系统为非线性控制系统。非线性系统一般不具有齐次性,也不适用叠加原理,而且它的输出响应和稳定性与输入信号和初始状态有很大关系。非线性系统也有时变系统和定常系统之分。

严格地讲,绝对线性的控制系统(或元件)是不存在的,因为所有的物理系统和元件在不同程度上都具有非线性特性。但为了简化系统的分析和设计,在一定的条件下,可以用分析线性系统的理论和方法对它进行研究。

1.2.3 定值控制系统、伺服系统和程序控制系统

按照输入信号分类,控制系统可分为定值控制系统、伺服系统和程序控制系统。

定值控制系统的输入信号是恒值,要求被控变量保持相对应的数值不变。室温控制系统、直流电机转速控制系统、发电厂的电压频率控制系统、高精度稳压电源装置中的电压控制系统等都是典型的定值控制系统。

伺服系统的输入信号是变化规律未知的任意时间函数,系统的任务是使被控变量按照同样规律变化并与输入信号的误差保持在规定的范围内。导弹发射架控制系统、雷达天线控制系统等都是典型的伺服控制系统。当被控量为位置或角度时,伺服系统又称为随动系统。

程序控制系统中的输入信号是按已知的规律(事先规定的程序)变化的,要求被控变量也按相应的规律随输入信号变化,误差不超过规定值。热处理炉的温控系统、机床的数控

加工系统和仿形控制系统等都是典型的程序控制系统。

1.2.4 连续控制系统和离散控制系统

控制系统中各部分的信号若都是时间 t 的连续函数,则称这类系统为连续控制系统。在控制系统各部分的信号中只要有一个是时间 t 的离散信号,则称这类系统为离散控制系统。离散模型是计算机控制的最主要模型。

应当指出的是,上述的分类方法只是常见的分类方法,此外还有其他的分类方法。比如集总参数系统和分布参数系统、确定性系统和不确定性系统、单输入/输出系统和多输入/输出系统、时变和非时变系统、有静差和无静差系统等等。

1.3 自动控制理论的发展历史

自动控制是一门年轻学科,从 1945 年开始形成。这以前,是自动控制理论的胚胎与萌芽时期。在这一时期,我国具有杰出的成就。中国是世界文明最早的发达国家之一。天文学等有关领域的需要产生了自动装置。三千年前发明了自动计时的“铜壶滴漏”装置;公元前 2 世纪发明了用来模拟天体运动和研究天体运动规律的“浑天仪”;两千一百年前研制出指南车;公元 132 年产生了世界上第一架自动测量地震的“地动仪”;公元 3 世纪发明了自动记录里数的“记里鼓车”。

工业生产和军事技术的需要,促进了经典自动控制理论和技术的产生和发展。18 世纪欧洲产业革命后,由于生产力的发展,蒸汽机被广泛用作原动力。为使工作更完善(解决不易控制问题),1765 年俄国机械师波尔组诺夫发明了蒸汽机锅炉水位调节器,1784 年英国人瓦特发明了蒸汽机离心式调速器。在蒸汽机控制中,人们总希望转速恒定,因此判定稳定、设计稳定可靠的调节器成为重要课题。1877 年劳斯(Routh)和赫尔维茨(Hurwitz)提出判定系统稳定的判据。19 世纪前半期,生产中开始利用发电机和电动机,这促进了水利发展,出现了水电站遥控、简单程序控制、电压和电流的自动调整等技术。19 世纪末到 20 世纪前半期,由于内燃机的应用,促进了船舶、汽车、飞机制造业及石油工业的发展,同时对自动化又提出了新的要求,由此相应产生了伺服控制、过程控制等技术。二次世界大战中,为了生产和设计飞机、雷达和火炮上的各种伺服机构,需要把过去的自动调节技术和反馈放大器技术进行总结,于是搭起了经典控制理论的框架,战后这些理论被公开,并用于一般工业生产控制中。

经典控制理论期(20 世纪 40~60 年代) 1945 年美国人波德(Bode)写了《网络分析和反馈放大器设计》一文,奠定了经典控制理论基础,在西方国家开始形成了自动控制学科;1947 年美国出版了第一本自动控制教材《伺服机件原理》;1948 年美国麻省理工学院出版了另一本《伺服机件原理》教材,建立了现在广泛使用的频率法。20 世纪 50 年代是经典控制理论发展和成熟的时期。主要内容为频率法(拉氏变换及 Z 变换)、根轨迹法、相平面法、描述函数法、稳定性的代数判据和几何判据、校正网络等,这些理论基本解决了单输入单输出自动控制系统的有关问题。

现代控制理论期(20 世纪 60 年代中期成熟) 空间技术的需要和电子计算机的应用,推动了现代控制理论和技术的产生与发展。20 世纪 50 年代末 60 年代初,空间技术的发展

迫切要求对多输入/多输出、高精度、参数时变系统进行分析与设计,这是经典控制理论无法有效解决的问题,于是出现了新的自动控制理论,称为“现代控制理论”。1960年卡尔曼(Kalman)发表了《控制系统的一般理论》一文,1961年又与Bush发表了《线性过滤和预测问题的新结果》。西方国家公认卡尔曼奠定了现代控制理论的基础。他的工作是控制论创始人维纳(Wiener)工作的发展,主要引进了数学计算方法中的“校正”概念。现代控制理论的主要内容为:状态空间法、系统辨识、最佳估计、最优控制和自适应控制。

大系统理论和智能控制理论 这一理论是20世纪70年代后,控制理论向广度和深度发展的结果。大系统是指规模庞大、结构复杂、变量众多的信息与控制系统,它涉及生产过程、交通运输、计划管理、环境保护、空间技术等多方面的控制和信息处理问题。而智能控制系统是具有某些仿人智能的工程控制与信息处理系统,其中最典型的例子就是智能机器人。

1.4 工程控制问题的基本要求

为实现自动控制,必须对控制系统提出一定的要求。对于一个闭环控制系统而言,当输入量和扰动量均不变时,系统输出量也恒定不变,这种状态称为平衡态或静态、稳态。通常系统在稳态时的输出量是我们所关心的,当输入量或扰动量发生变化时,反馈量将与输入量产生偏差,通过控制器的作用,从而使输出量最终稳定,即达到一个新的平衡状态。但由于系统中各环节总存在惯性,系统从一个平衡点到另一个平衡点无法瞬间完成,即存在一个过渡过程,该过程称为动态过程或暂态过程。根据系统稳态输出和暂态过程的特性,对闭环控制系统的基本要求可以归纳为三个方面:稳定性、准确性(稳态精度)、快速和平稳性(动态性能)。

1. 稳定性

稳定性是保证控制系统正常工作的先决条件,是控制系统的重要特性。所谓稳定性是指控制系统偏离平衡状态后,自动恢复到平衡状态的能力。在扰动信号的干扰、系统内部参数发生变化和环境条件改变的情况下,系统状态偏离了平衡状态。如果在随后所有时间内,系统的输出响应能够最终回到原先的平衡状态,则系统是稳定的;反之,如果系统的输出响应逐渐增加趋于无穷,或者进入振荡状态,则系统是不稳定的。不稳定的系统是不能工作的。

2. 准确性

准确性就是要求被控量和设定值之间的误差达到所要求的精度范围。准确性反映了系统的稳态精度,通常控制系统的稳态精度可以用稳态误差来表示。根据输入点的不同,一般可以分为参考输入稳态误差和扰动输入稳态误差。对于随动系统或其他有控制轨迹要求的系统,还应当考虑动态误差。误差越小,控制精度或准确性就越高。

3. 快速和平稳性

为了很好完成控制任务,控制系统不仅要稳定并具有较高的精度,还必须对过渡过程的形式和快慢提出要求,这个要求一般称为系统的动态性能。通常情况下,当系统由一个平衡态过渡到另一个平衡态时都希望过渡过程既快速又平稳。因此,在控制系统设计时,对控制系统的过渡过程时间(即快速性)和最大振荡幅度(即超调量)都有一定的要求。

小 结

本章主要讨论了四个方面的内容：自动控制系统的有关基本概念，自动控制系统的不同分类方法，自动控制理论的发展历史和工程控制问题的基本要求。对所涉及到的有关概念和思想没有进行深入的展开，我们将在后面的章节中具体阐述。通过对本章内容的学习，读者会对自动控制理论有一个初步的了解，便于后面章节的学习。

习 题

1-1 什么是开环控制系统？什么是闭环控制系统？试比较开环控制系统和闭环控制系统的区别及其优缺点。

1-2 试列举几个日常生活中开环控制和闭环控制的实际例子，画出它们的示意图并说明其工作原理。

1-3 图1-5是一个自动液位控制系统。在任意情况下希望液面高度维持不变，试说明其工作原理，并画出系统的功能框图。

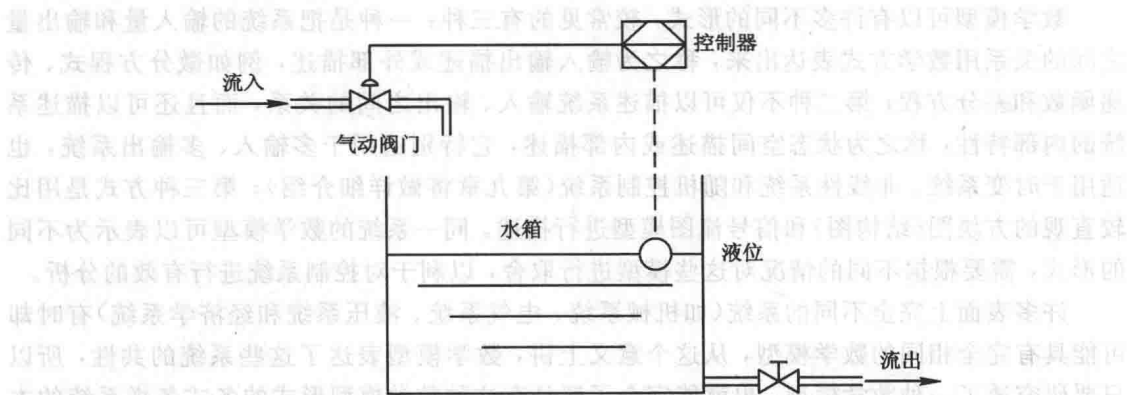


图 1-5 自动液位控制系统

1-4 以下各式是描述系统的微分方程，其中 $r(t)$ 和 $c(t)$ 分别为系统的输入和输出。试判断哪些是线性定常或时变系统，哪些是非线性系统。

$$(1) c(t) = 7 + r^2(t) + t \cdot r(t)$$

$$(2) c(t) = r(t) \sin \omega t + 3$$

$$(3) \frac{d^3 c(t)}{dt^3} + 3 \frac{d^2 c(t)}{dt^2} + 6 \frac{dc(t)}{dt} + 8c(t) = r(t)$$

$$(4) c(t) = 2r(t) + 3 \frac{dr(t)}{dt} + 4 \int_{-\infty}^t r(\tau) d\tau$$

$$(5) t \cdot \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = r(t) + 3 \frac{dr(t)}{dt}$$

$$(6) c(t) = \begin{cases} 0 & t < 3 \\ r(t) & t \geq 3 \end{cases}$$

第二章 线性系统的数学描述

分析和设计控制系统,首先要建立它的数学模型。数学模型就是用数学的方法和形式来表示和描述系统中各变量间的关系。经典控制理论和现代控制理论都以数学模型为基础。数学模型的建立和简化是定量分析和设计控制系统的基础,也是目前许多学科向纵深发展需要解决的问题。

如果系统中各变量随时间变化缓慢,以至于它们对时间的变化率(导数)可以忽略不计,这些变量之间的关系称为静态关系或静态特性。静态特性的数学表达式中不含有变量对时间的导数。如果系统中变量对时间的变化率不可忽略,这时各变量之间的关系称为动态关系或动态特性,系统称为动态系统,相应的数学模型称为动态模型。控制系统中的数学模型绝大部分都指的是动态系统的数学模型。

数学模型可以有許多不同的形式,较常见的有三种:一种是把系统的输入量和输出量之间的关系用数学方式表达出来,称之为输入输出描述或外部描述,例如微分方程式、传递函数和差分方程;第二种不仅可以描述系统输入、输出之间的关系,而且还可以描述系统的内部特性,称之为状态空间描述或内部描述,它特别适用于多输入、多输出系统,也适用于时变系统、非线性系统和随机控制系统(第九章将做详细介绍);第三种方式是用比较直观的方块图(结构图)和信号流图模型进行描述。同一系统的数学模型可以表示为不同的形式,需要根据不同的情况对这些模型进行取舍,以利于对控制系统进行有效的分析。

许多表面上完全不同的系统(如机械系统、电气系统、液压系统和经济学系统)有时却可能具有完全相同的数学模型,从这个意义上讲,数学模型表达了这些系统的共性,所以只要研究透了一种数学模型,也就能完全了解具有这种数学模型形式的各式各样系统的本质特征。因此数学模型建立以后,研究系统主要是以数学模型为基础,分析并综合系统的各项性能,而不再涉及实际系统的物理性质和具体特点。

本章将讨论线性定常且集总参数系统的数学模型,从系统的时域数学模型——微分方程入手,重点研究动态系统的复域数学模型——传递函数以及系统结构图(方块图),对信号流图仅作简要介绍。

2.1 线性系统的时域数学模型

控制系统中的输出量和输入量通常都是时间 t 的函数。很多常见的元件或系统的输出量和输入量之间的关系都可以用一个微分方程表示,方程中含有输出量、输入量及它们各自对时间的导数或积分。这种微分方程又称为动态方程或运动方程。微分方程的阶数一般是指方程中最高导数项的阶数,又称为系统的阶数。

对于单输入、单输出线性定常系统,采用下列微分方程来描述:

$$c^{(n)}(t) + a_1 c^{(n-1)}(t) + a_2 c^{(n-2)}(t) + \cdots + a_{n-1} \dot{c}(t) + a_n c(t) \\ = b_0 r^{(m)}(t) + b_1 r^{(m-1)}(t) + b_2 r^{(m-2)}(t) + \cdots + b_{m-1} \dot{r}(t) + b_m r(t) \quad (2.1)$$

式中, $r(t)$ 和 $c(t)$ 分别是系统的输入信号和输出信号; $c^{(n)}(t)$ 为 $c(t)$ 对时间 t 的 n 阶导数; $a_i (i=1, 2, \cdots, n)$ 和 $b_j (j=0, 1, \cdots, m)$ 是由系统的结构参数决定的系数, $n \geq m$ 。

一般情况下, 列写控制系统运动方程的步骤是, 首先分析系统的工作原理及其各变量之间的关系, 找出系统的输入量和输出量; 其次根据系统运动特性的基本定律, 一般从系统的输入端开始依次写出各元件的运动方程, 在列写元件运动方程时, 需要考虑相接元件间的相互作用; 最后由组成系统各元件的运动方程中, 消去中间变量, 求取只含有系统输入和输出变量及其各阶导数的方程, 并将其化为标准形式。所谓标准形式是指在系统运动方程中将输入变量及其导数置于等号的右边, 将输出变量及其导数置于等号左边, 等号两边的导数项均按降幂排列, 并且将系数规划为反映系统动态特性的参数, 如时间常数、阻尼系数等。

下面我们分别以电气系统和机械系统为例, 说明如何列写系统或元件的微分方程式。这里所举的例子都属于简单系统, 实际系统往往是很复杂的, 我们将在以后各节逐渐介绍如何建立复杂系统的数学模型。

2.1.1 电气系统

电气系统中最常见的装置是由电阻、电容、运算放大器等元件组成的电路, 又称电气网络。我们将电阻、电感和电容等本身不含有电源的器件称为无源器件, 而将运算放大器这样本身包含电源的器件称为有源器件。仅由无源器件构成的电气网络称为无源网络; 如果电气网络中含有有源器件或电源, 就称之为有源网络。

【例 2-1】 图 2-1 是由电阻 R 、电感 L 和电容 C 组成的无源网络, 试列写以 $u_i(t)$ 为输入量, 以 $u_o(t)$ 为输出量的网络微分方程。

解 设回路电流为 $i(t)$, 由基尔霍夫电压定律可写出回路方程为

$$L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i(t) dt + Ri(t) = u_i(t)$$

$$u_o(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt$$

消去中间变量 $i(t)$, 可得描述该无源网络输入输出关系的微分方程

$$LC \frac{d^2 u_o(t)}{dt^2} + RC \frac{du_o(t)}{dt} + u_o(t) = u_i(t) \quad (2.2)$$

上式也可以写为

$$T_1 T_2 \frac{d^2 u_o(t)}{dt^2} + T_2 \frac{du_o(t)}{dt} + u_o(t) = u_i(t) \quad (2.3)$$

其中, $T_1 = L/R$, $T_2 = RC$ 。方程 (2.2) 和 (2.3) 就是所求的微分方程。这是一个典型的二阶线性常数系数微分方程, 对应的系统称为二阶线性定常系统。

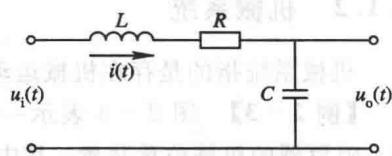


图 2-1 RLC 无源网络