

21 世纪高等学校电子信息类教材

自动控制原理

● 田玉平 主编

● 田玉平 蒋 珉 李世华 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

74

TP13-43

758

21 世纪高等学校电子信息类教材

自动控制原理

田玉平 主编

*

田玉平 蒋 珉 李世华 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内容简介

本书系统地介绍了自动控制的基本理论。全书共八章。第1章介绍自动控制的一些基本概念,第2章介绍连续和离散控制系统的数学描述,第3章介绍基于系统辨识的建模方法,第4章介绍控制系统基于时域和频域的稳定性分析方法,第5章介绍控制系统的时域运动性能分析,第6章介绍连续和离散系统的校正方法,第7章介绍线性连续和离散控制系统的状态空间分析与综合,最后一章介绍非线性控制系统的分析方法,主要是描述函数法和相平面法。

本书的特色在于不是采用传统的编排方式,即按照经典控制和现代控制两部分划分的体系,而是按照控制理论三个任务,即系统建模、系统分析(主要包括动态和静态性能分析、稳定性分析以及系统结构分析)和系统综合校正、来统一编排内容。

本书作为高等院校包括电工电子类在内的电类各专业以及非电类相关专业本科生的教材,亦可供从事自动控制科研工作的专业工程技术人员自学和参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/田玉平等编著. —北京:电子工业出版社,2002.8

21世纪高等学校电子信息类教材

ISBN 7-5053-7955-0

I. 自… II. 田… 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(2002)第063437号

责任编辑:王传臣 束传政 特约编辑:徐 堃

印刷者:北京市增富印刷有限责任公司

出版发行:电子工业出版社 www.phei.com.cn

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编100036

经销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:26.5 字数:678千字

版 次:2002年8月第1版 2002年8月第1次印刷

印 数:6000册 定价:32.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。
联系电话 (010)68279077

前 言

《自动控制原理》不仅是电类学科的一门专业基础课,而且在机械、化工等非电类工程专业的课程设置中也占有重要地位。近年来,甚至是生物和经济类专业的学生中也多有选修这一课程的。自动控制原理教材的编写历来受到国内高校和学术界的重视,已出版了许多不同版本的教材,其中有些优秀版本已被广泛采用。这些教材从使用对象考虑,通常分为自动化专业类和非自动化专业类。自动化专业类的教材一般较为深入和详尽,而非自动化专业类的教材通常较为浅易和简略。从教材的编排方式看,通常又分为两种。第一种方式是将教学内容分为所谓“经典”和“现代”两部分。经典部分介绍基于输入—输出模型(传递函数)的建模、分析与校正方法,现代部分介绍基于状态空间模型的建模、分析与综合方法。第二种方式试图打破经典与现代的界限,将两部分内容糅合在一起。不过,由于基于传递函数的方法和基于状态方程的方法之间存在着明显的差异,要将它们完全融为一体,是相当困难的,实际上也是不必要的。

其实,之所以产生“经典”和“现代”的差别,是因为我们过多地关注了自动控制理论的历史形成过程,或者说,过多地关注了这一理论发展过程中所形成的不同方法。正是由于这一原因,即使在经典控制理论这一部分,也要将根轨迹法和频率特性法分章介绍。如果我们将目光转向控制理论的自身内容和体系,不难注意到,控制理论是由三部分——系统建模、系统分析(主要包括动态和静态性能分析、稳定性分析以及系统结构分析)和系统综合校正——有机组合而成的,所有不同的方法都是为了完成这三方面的某些任务。因此,一种自然的教材编排方式是根据控制理论的上述三个任务而不是各种方法来划分章节。这样做的好处,一方面可以避免在介绍不同方法时重复叙述相同的问题,因而节省了教材篇幅和教学用时;另一方面,可以在同一章针对同一问题讲解和比较不同方法,使读者或学生融会贯通,加深理解。

促使我们完成这一改革方案的契机是以东南大学为主承担的面向 21 世纪教育部高等教育项目——“电工电子系列课程教学内容与课程体系改革的研究与实践”的实施。这是一个力图使我国电工电子类专业(国外称为 EE)的高等教育尽快适应现代化教学需要的教改计划。根据这一项目的设计思想,《自动控制原理》将作为平台课程之一向包括电工电子类在内的电类各相关专业讲授。这就意味着传统意义上的“自动化类”和“非自动化类”的界限将变得模糊。如果采用原来的自动化专业类教材作为平台课程的教材,难免有些专业的学生会觉得难以“消化”。而且作为平台课,课时显然不宜过多,而在较少的课时下采用传统的(通常是上、下两册的)教材,也是不现实的。如果采用原来的非自动化专业类教材,则有些专业(如自动化专业)又会有“吃不饱”的感觉,而且这些教材很难和自动化专业后续的有关控制理论的课程相衔接。因此,编写一本适合平台课的新教材就成了我们实施教改计划的当务之急。

授完本书的全部内容约需 80 学时,但根据专业需要和课时的限制,本书可以按多种“套餐”方式讲授。对于 64 课时的课程,建议按以下两种方式讲授:第一种方式讲授第 1,2,3,4,5,6,7,8 章,第二种方式讲授第 1,2,3,4,5,6,7 章。对于 48 课时的课程,也可以按两种方式讲授,第一种方式讲授第 1,2,3,4,5,6,7,8 章,第二种方式讲授第 1,2,4,5,7 章。上述各种方式都可自成一体。第一种方式可能更适合自动化专业的学生,因为对于这些专业的学生,有些

内容,如系统辨识、状态空间法等,可在后续课程中深入学习。第二种方式省去了非线性系统等内容,却包含了线性系统结构分析的内容,使得线性系统的控制原理得以较为完整地讲授,因此它可能更适合非自动化专业的学生,因为对他们而言,可能不会有更多的后续课程来补充控制理论方面的知识。

本书是在主编者的教学讲义基础上编写而成的。第1,2,6,7章由田玉平执笔,第3,4,5章由蒋珉执笔,第8章由李世华执笔。全书由田玉平统稿审定。本书的编写和出版得到电子工业出版社和东南大学的大力支持和资助,东南大学自动控制系刘京南教授、东南大学无线电系邹家禄教授对作者的工作给予许多帮助和鼓励,书中插图的计算机绘制由编者们的几位研究生完成。对此,谨致诚挚的谢意!

限于作者水平,书中不妥和疏漏之处恐难避免,切望读者批评指正。

田玉平

2002年6月于 UC Berkeley

目 录



第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 自动控制系统的构成	1
1.3 闭环控制和开环控制	3
1.4 控制系统的分类	4
1.4.1 恒值调节系统和随动系统	4
1.4.2 线性系统 and 非线性系统	4
1.4.3 定常系统和时变系统	5
1.4.4 连续系统和离散系统	5
第 2 章 控制系统的数学描述	7
2.1 引言	7
2.2 列写输入—输出运动方程	7
2.2.1 机械系统	8
2.2.2 电路系统	11
2.2.3 机电系统	12
2.2.4 液位系统	13
2.3 传递函数与系统框图	14
2.3.1 传递函数	14
2.3.2 方框图	15
2.3.3 典型环节的传递函数	18
2.3.4 方框图化简	22
2.4 信号流图与梅逊公式	24
2.4.1 信号流图	24
2.4.2 梅逊公式	26
2.5 频率特性函数	29
2.5.1 频率特性函数的定义	29
2.5.2 频率特性的图示方法	30
2.5.3 典型环节的频率特性	34
2.5.4 复杂频率特性图的绘制	41
2.6 状态空间模型	47
2.6.1 状态	47
2.6.2 状态空间	48
2.6.3 状态方程和输出方程	48
2.6.4 状态空间模型与输入—输出模型之间的关系	53
2.7 采样控制系统的数学描述	59

2.7.1 采样控制系统	59
2.7.2 信号采样与恢复	61
2.7.3 采样系统的差分方程描述	64
2.7.4 Z 变换	66
2.7.5 脉冲传递函数	71
2.7.6 离散系统的状态空间模型	76
习题	78
第 3 章 基于系统辨识的建模方法	86
3.1 系统辨识的基本概念	86
3.1.1 系统辨识问题	86
3.1.2 系统辨识的任务及分类	87
3.1.3 系统辨识的基本步骤	87
3.2 最小二乘参数估计	88
3.2.1 最小二乘法原理	89
3.2.2 最小二乘估计的批处理算法	91
3.2.3 最小二乘估计量的统计性质	93
3.3 最小二乘参数估计的递推算法及其推广	94
3.3.1 最小二乘估计的递推算法	94
3.3.2 最小二乘估计的渐消记忆递推算法	97
3.3.3 参数个数的递推	99
3.4 系统建模的计算机仿真算法	101
3.4.1 模型的阶次与阶次辨识	101
3.4.2 损失函数检验法	102
3.4.3 系统建模的计算机仿真算法步骤	104
习题	104
第 4 章 控制系统的稳定性分析	106
4.1 稳定性的概念和定义	106
4.2 线性系统稳定的充分必要条件	110
4.2.1 状态空间模型	110
4.2.2 输入—输出模型	111
4.2.3 离散控制系统	113
4.3 系统稳定性的代数判据	115
4.3.1 连续系统稳定性的代数判据及其应用	115
4.3.2 离散系统稳定性的代数判据	123
4.4 根轨迹图及系统稳定性分析	128
4.4.1 根轨迹图的基本概念	129
4.4.2 幅值条件和幅角条件	130
4.4.3 绘制根轨迹的基本法则	132
4.4.4 根轨迹图的绘制及系统稳定性分析	141
4.5 奈奎斯特稳定性判据	145

4.5.1 幅角定理	145
4.5.2 奈奎斯特稳定性判据	149
4.5.3 开环系统含有积分环节时判据的应用	153
4.5.4 奈奎斯特稳定性判据在波德图中的表示形式	156
4.5.5 稳定裕度	157
4.6 利用 MATLAB 进行稳定性绘图分析	161
习题	164
第 5 章 控制系统的时域运动性能分析	169
5.1 典型输入信号	169
5.2 控制系统时域响应的求解	171
5.2.1 利用传递函数求解输出响应	172
5.2.2 利用 Z 变换法求解差分方程的输出响应	174
5.2.3 利用状态空间模型求解线性定常系统	176
5.2.4 利用状态空间模型求解线性离散系统	187
5.3 控制系统瞬态性能分析	191
5.3.1 瞬态性能指标	191
5.3.2 一阶系统瞬态性能分析	193
5.3.3 典型二阶系统瞬态性能分析	195
5.3.4 高阶系统瞬态性能分析	212
5.4 控制系统稳态性能分析	214
5.4.1 控制系统的误差与稳态误差	214
5.4.2 误差的数学模型	216
5.4.3 稳态误差分析与静态误差系数	217
5.4.4 控制系统的动态误差	223
5.4.5 扰动输入作用下的稳态误差	227
5.4.6 减小或消除稳态误差的措施	229
5.4.7 离散系统的稳态误差	230
5.5 利用 MATLAB 进行时域分析	234
5.5.1 MATLAB 时域响应命令	234
5.5.2 时域响应命令的应用	236
5.5.3 SIMULINK 仿真简介	241
习题	246
第 6 章 系统校正方法	251
6.1 引言	251
6.2 系统校正的根轨迹法	253
6.2.1 增加零、极点对根轨迹的影响	253
6.2.2 根轨迹校正举例	255
6.2.3 校正装置的实现	260
6.3 系统校正的频率响应法	261
6.3.1 开环频率特性与时域性能指标间的关系	261

6.3.2 频率特性法校正举例	265
6.4 基本控制规律分析	274
6.4.1 比例控制规律	274
6.4.2 积分控制规律	275
6.4.3 比例加积分控制规律	276
6.4.4 比例加微分控制规律	277
6.4.5 比例加积分加微分控制规律	278
6.4.6 PID 控制器的参数调整	280
6.5 局部反馈校正	281
6.6 离散系统的数学校正	285
6.6.1 概述	285
6.6.2 离散系统校正的根轨迹法	285
6.6.3 离散系统校正的频域法	286
6.6.4 离散系统的最少拍校正法	288
习题	294
第 7 章 线性控制系统的状态空间分析与综合	297
7.1 特征值规范型	297
7.1.1 对角线规范型	297
7.1.2 约当规范型	301
7.2 状态能控性	305
7.2.1 状态能控性定义	305
7.2.2 能控性判据	307
7.3 状态能观性	313
7.3.1 状态能观性定义	313
7.3.2 能观性判据	314
7.3.3 对偶原理	317
7.4 离散系统的能控性和能观性	317
7.5 控制系统的结构分解	318
7.5.1 按能控性分解	318
7.5.2 按能观性分解	324
7.5.3 按能控性和能观性分解	327
7.6 能控规范型和能观规范型	329
7.6.1 能控规范型	330
7.6.2 能观规范型	331
7.7 状态反馈与输出反馈	333
7.7.1 状态反馈和输出反馈的概念	333
7.7.2 状态反馈和输出反馈对系统能控性和能观性的影响	335
7.8 闭环系统的极点配置	336
7.8.1 极点配置问题	336
7.8.2 极点配置定理	338

7.8.3 极点配置的阿克曼(Ackermann)公式	342
7.8.4 基于输出反馈的极点配置	344
7.8.5 镇定问题	345
7.9 状态观测器设计	348
7.9.1 全维状态观测器	348
7.9.2 降维观测器	352
7.10 带有状态观测器的反馈控制系统	356
习题	360
第 8 章 非线性控制系统	365
8.1 概述	365
8.2 描述函数法	370
8.3 相平面法	387
8.4 利用非线性特性改善系统的性能	408
习题	409
参考文献	414

第1章 绪 论

1.1 引 言

人类进入 20 世纪以来,科学技术得到突飞猛进的发展,在此过程中,自动控制始终担负着重要的角色。在航空、航天和国防工业中,自动控制在宇宙飞船系统、导弹制导系统和飞机的自动驾驶仪系统中发挥着特别重要的作用。在现代制造业和工业生产过程中,自动控制同样起着无法替代的作用,比如对数控机床的控制,对工业过程中流量、压力、温度、湿度的控制等均离不开自动控制。此外,在机器人控制、城市交通控制、网络拥塞控制等问题中,自动控制也都发挥着重要作用。

简而言之,自动控制的作用就是在人不直接参与的情况下,能够使某些被控量(如飞机的飞行速度和仰角、工业加热炉的炉温等)按指定的规律变化。自动控制极大地提高了劳动生产率和产品质量,使人们从繁重的体力劳动和大量重复性手工操作中解放出来。对大多数工程技术人员和科学工作者来说,懂得一些自动控制知识是十分必要的。

尽管自动控制的某些思想或许可以追溯到久远的古代,但 18 世纪詹姆斯(James Watt)为控制蒸汽机速度而设计的离心调节器可以说是自动控制领域中的第一项重大成果。不过,这一装置易于振荡。大约一百年之后,麦克斯韦(Maxwell)才对这一系统的动态特性进行了分析。第一次世界大战爆发后,军事工业的需要促进了自动控制理论的发展。1922 年米纳斯基(Minosky)首先研制出船舶操纵自动控制器,并给出了控制系统的稳定性分析。1932 年奈奎斯特(Nyquist)提出一种利用系统频率特性图确定系统稳定性的简便方法。1934 年赫曾(Hezen)首次提出“伺服”的概念,讨论了可以精确跟踪变化的输入信号的继电器伺服机构。到了第二次世界大战,由于设计和建造飞机自动驾驶仪、大炮定位系统、雷达跟踪系统等军用装备的需要,自动控制理论取得了长足的进步。1945 年伯德(Bode)发表了关于控制系统频域设计方法的经典著作。稍后,伊万思(Evans)提出并且完善了根轨迹方法。至此,以频率特性法和根轨迹法为核心的经典控制理论的框架已构建完毕。然而控制理论前进的脚步并未停止,相反,速度更快了。大约从 1960 年开始,由于数字计算机的出现以及工业、军事特别是空间技术的需求,以时域方法为主的诸多分析设计方法得到迅猛发展。比如,卡尔曼(Kalman)滤波理论、最优控制理论、自适应控制理论等都是在 20 世纪 60 年代至 80 年代这一期间提出并发展的。在这一时期,控制的对象从单输入—单输出发展到多输入—多输出,从确定性系统发展到随机系统。自 1980 年至今,控制理论的主要成就集中在不确定系统的鲁棒控制方面,突出表现在 H_∞ 控制理论的建立和发展。

1.2 自动控制系统的构成

为了考察自动控制系统的构成,我们先来考虑一个电加热炉的炉温控制。

图 1.1 是一个手动控制的电加热炉的示意图。从图 1.1 看出,控制的过程主要有三个部

分：一是测量炉温，并用眼观察温度计，将读数送至大脑；二是在大脑中将观察读数与给定温度（700℃）比较，并根据比较的结果指挥手臂的动作；三是增加或减小加热电阻丝两端的电压，以使炉温尽可能接近给定值。

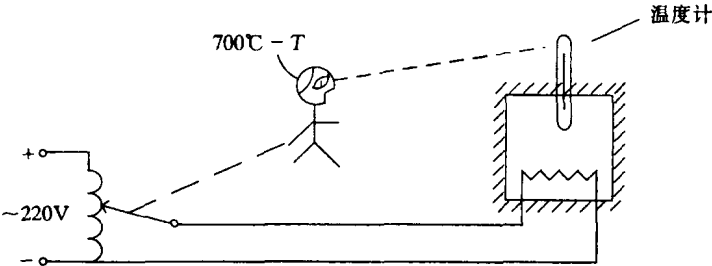


图 1.1 手动控制电加热炉

自动控制的目的是要在人不直接参与的情况下实现同样的控制目的。为此可以建立如图 1.2 所示的自动控制系统。该系统中，炉温通过热电偶测量，并将温度值转换为一个电压值 U_2 。给定炉温通过一个电位器的电压值 U_1 反映，这一给定值还可以通过调节可变电阻的大小来改变。通过 U_1 与 U_2 的反向串接，就可以实现人脑中的比较算法 $U_1 - U_2 = \Delta U$ 。 ΔU 的大小反映了实测炉温与给定炉温的差别，而且它的正负决定了执行机构——电机的转向。显然，执行电机代替了人的手臂。图 1.3 给出了系统构成框图。

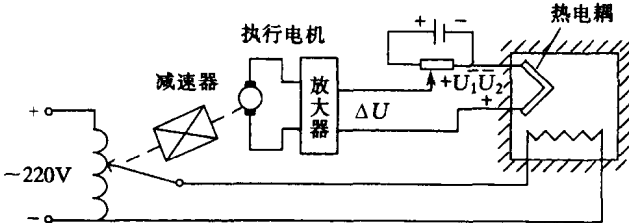


图 1.2 自动控制电加热炉

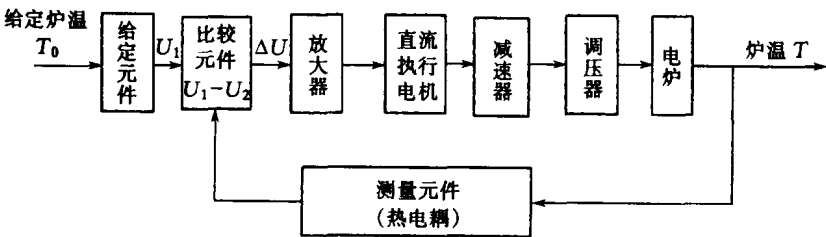


图 1.3 系统构成框图

通过分析，我们知道，一个自动控制系统主要由以下基本元件构成。

- (1) 整定元件：也称给定元件，给出了被控量应取的值，在图 1.2 所示系统中是通过一个电位器实现的。
- (2) 测量元件：检测被控量的大小，如热电偶、测速电机等。
- (3) 比较元件：用来得到给定值与被控量之间的误差，常用差动放大器、电桥等。在计算机控制系统中，由于直接进行数值计算，不需要特定的比较元件。
- (4) 放大元件：用来将误差信号放大，用以驱动执行机构。它可以是电子元件网络，也可以

是电机放大器等。

(5) 执行元件：用来执行控制命令，推动被控对象。电机是典型的执行元件。

(6) 校正元件：用来改善系统的动、静态性能，它可以用模拟 / 数字电路来实现，也可以用计算机程序来实现。

(7) 能源元件：用来提供控制系统所需的能量。

在研究控制理论和控制工程时常遇到一些专用术语，最常见的介绍如下。

(1) 被控量和控制量(controlled variable and controlling variable)：被控量是指被测量和被控制的量或状态，如上述系统中的炉温。控制量是一种由控制器改变的量或状态，它将影响被控量的值，如上述系统中加热电阻丝两端的电压。被控量通常是系统的输出量，而控制量是输入量。

(2) 对象(plant)：它一般是一个设备，常常由一些机器零件有机地组合在一起。通常将被控物体称为对象，如电加热炉。

(3) 系统(system)：系统是一些部件的组合，这些部件组合在一起，完成一定的任务。系统并不限于物理系统。系统的概念有时是很抽象的，可以指一个特定的动态现象，如股市或汇率的变化，某国家人口的变化，某地区物种的变迁都可看成动态系统来分析。

(4) 扰动(disturbance)：扰动是一种对系统的输出量产生不利影响的因素或信号。如果扰动来自于系统内部，称为内部扰动；如果扰动来自于系统外部，则称之为外部扰动。如电加热炉中被加热物体的增多或减少等显然会影响炉温的高低，这种因素对系统来说是一种外部扰动。

1.3 闭环控制和开环控制

反馈控制(feedback control)原理是设计自动控制系统的基本原理之一。所谓反馈，就是将控制输出量反向传递到系统的输入端并与给定输入信号比较，根据所得的偏差信号来实现对被控量的控制，并在有不可预知的扰动的情况下，使得输出量与给定量(也称参考输入量)之间的偏差尽可能小。由于在这种控制系统中，信号的流程构成一个闭环，所以也称为闭环控制。

闭环控制对扰动有较好的抑制作用。图 1.4 所示是一台发电机向负载供电的系统示意图。显然，通过调节励磁电流可以改变发电机的电势 E_r ，进而达到控制发电机端电压 U 的目的。然而，由于负载的变化，端电压 U 常常会波动，因为

$$U = E_r - IR - L \frac{dI}{dt}$$

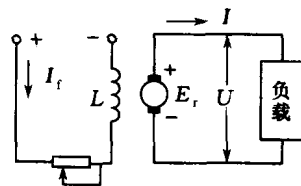


图 1.4 供电系统

其中， R 和 L 分别为负载电阻和电感。为了减小 U 的波动，采用图 1.5 所示的闭环控制。在这一系统中，端电压的给定值通过 U_0 来设定，当端电压 $U > U_0$ 时， $\Delta U > 0$ ，驱动执行电机朝某一方向转动，增大可变电阻 R_f 的值，使 I_f 减小，从而减小 E_r ，达到减小 U 的目的。当 $U < U_0$ 时， $\Delta U < 0$ ，驱动电机反向旋转，减小 R_f ，使 I_f 增大，从而增大 E_r ，达到增大 U 的目的。只有当 $U = U_0$ 时，电机停转。可见，这样的一个自动控制系统可以很好地抑制因负载变化而引起的端电压的变化。

然而对于某些可以预知或可以测量的扰动，闭环控制并不是惟一的选择，可以将预知的或测得的扰动折算到系统输入端，对控制量的大小进行修正，这种控制方法称为补偿控制。补偿控制常较反馈控制简单、经济。补偿控制没有在空中形成信号流程的闭合回路，所以也称做前馈控制，是一种开环控制。例如，在图 1.4 所示的供电系统中，如果对端电压的扰动来自负载

电流的变化,可以在负载回路中加测量电阻 R_m ,其两端的电压降的变化反映了负载电流 I_f 的变化(如图 1.6 所示),然后将 U_m 通过适当的放大串到励磁回路中。当负载电流突然增大时,已知端电压 U 会减小,但由于在励磁回路中 U_m 的增大会使励磁电流 I_f 增大,所以发电机电势 E_r 增大,从而使 U 回升,达到控制 U 的目的。

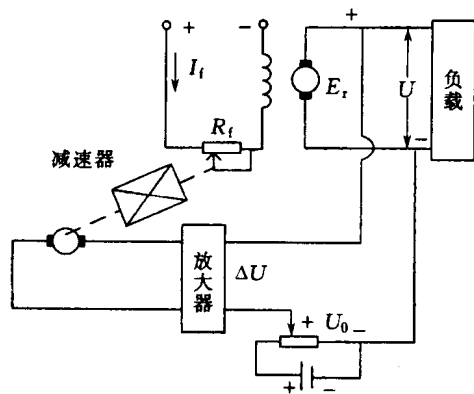


图 1.5 闭环控制

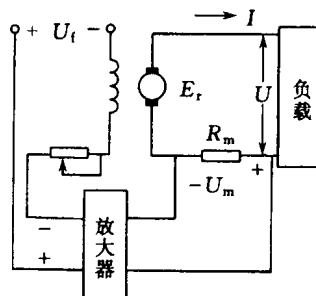


图 1.6 前馈控制系统

前馈控制的局限在于它通常只能抵消一种扰动的作用,对于其他扰动,不仅无益,可能反倒有害。例如,在图 1.6 所示的系统中,发电机转速的波动也是一种扰动,当转速 Ω 下降时, E_r 下降, U 也下降。但此时,负载电流 I 下降,前馈控制的作用使得 U 进一步下降,与期望的结果正相反。因此在实际系统中常常采用前馈控制与反馈控制相结合的办法,这种控制方案称为复合控制。

1.4 控制系统的分类

控制系统的分类方法很多,根据不同的控制原理构成的自动控制系统种类繁多,这里不一列举,只根据自动控制的基本特性进行粗略划分。

1.4.1 恒值调节系统和随动系统

恒值调节系统的任务是保持被控制量为一个给定的常值。例如前面介绍的炉温控制系统、电压控制系统均是恒值调节系统。在恒值调节系统的设计中,应当考虑的主要问题是如何抑制各种能使系统输出量偏离常值的扰动。当然,恒值调节系统的给定量不是一成不变的,有时也需要将被控量从一个常值调整到另一个常值。此时系统反应的灵敏性(惯性)必然会对系统的性能产生影响,但由于改变给定量在恒值调节系统中不是频繁发生的,所以惯性的问题在这里不是主要矛盾。

随动系统的任务是保持被控制量跟随某个变化着的不能预知的量。例如,雷达高射炮的角度控制系统必须使火炮时刻跟踪敌方飞行器,而敌方飞行器的位置是时刻变化的,又是不能预知的。因此,在设计随动控制系统时,主要矛盾是如何克服系统的惯性,使之能随被跟踪信号而灵活地变动。此时,抗干扰问题降为次要矛盾。

1.4.2 线性系统和非线性系统

根据系统的特性,自动控制系统可分为线性系统和非线性系统。凡是具有叠加性和齐次性

的系统称为线性系统,否则称为非线性系统。

所谓叠加性,是指当有几个输入信号同时作用于系统时,系统的总响应(输出)等于每个信号单独作用所产生的响应之和,即若输入 $u_1(t)$ 产生输出 $y_1(t)$, $u_2(t)$ 产生输出 $y_2(t)$,则当 $u_1(t) + u_2(t)$ 作用于系统时,系统输出为 $y_1(t) + y_2(t)$ 。

所谓齐次性,是指当输入信号乘以某一倍数作用于系统时,系统响应也在原基础上放大同一倍数,即若输入 $u(t)$ 产生输出 $y(t)$,则 $ku(t)$ 产生的输出为 $ky(t)$ 。

从数学模型来看,凡是用线性方程(线性微分方程、线性差分方程或线性代数方程等)描述的系统,称为线性系统,而用非线性方程描述的系统称为非线性系统。

线性系统具有许多良好的性质,处理线性系统的数学工具也相对较成熟,因此相对于非线性系统,线性系统的控制理论已相当完善。本书将重点介绍线性控制系统的分析和设计方法。然而应当指出,绝对的线性系统在自然界和工程实际中是不存在的,实际的系统严格说来都是非线性的。但有些系统非线性程度不高,可近似看做线性系统来处理。即使是一般的非线性系统,也通常可以在其工作点附近进行线性化,在一定范围内将它当做线性系统来处理。

1.4.3 定常系统和时变系统

根据系统是否含有参数随时间变化的元件,自动控制系统分为时变系统和定常系统两大类。定常系统又称为时不变系统,其特点是系统的自身性质不随时间而变化。具体而言,系统响应的形状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,即若输入 $u(t)$ 产生输出 $y(t)$,则当输入延时 τ 后施加于系统, $u(t - \tau)$ 产生的输出为 $y(t - \tau)$ 。

时变系统中含有时变元件,其数学模型中某些参数随时间而变化。例如,航天卫星是一个时变对象,在飞行的各阶段,由于燃料的不断减少,其质量随时间而变化。时变系统的分析比定常系统要困难得多。

本书除个别地方特别说明外,只介绍定常系统的控制理论。这一方面是因为目前定常系统的控制理论远较时变系统控制理论成熟;另一方面,虽然严格来说实际系统都具有时变的特性,但对大多数工业系统而言,其参数随时间变化并不明显,通常可以当做定常系统来处理。

1.4.4 连续系统和离散系统

根据系统中信号的特点,自动控制系统可分为连续(时间)系统和离散(时间)系统。连续系统中各部分的信号均是时间变量的连续函数,描述它的数学模型是微分方程。有些系统中某处或多处的信号为脉冲序列或数码的形式,这些信号变量在时间上是离散的,这样的系统称为离散系统。图 1.7 所示的是一个计算机控制的数字采样系统,炉温本是时间的连续变量,但

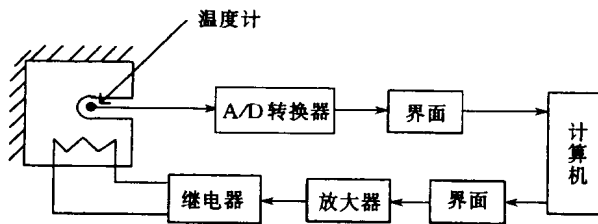


图 1.7 炉温的计算机控制系统

经过 A/D 转换后,变成数码进入计算机。由于 A/D 转换含有一个采样开关,所以计算机得到

的炉温信号是一个在时间上离散的变量。

除了上述分类之外,自动控制系统还可以按照其动态特性是否与系统的空间分布特性有关而分成集中参数系统和分布参数系统,等等,在此不一一列举。

第2章 控制系统的数学描述

2.1 引言

自动控制系统不单纯是各种元器件的连接,从系统学的角度看,它是信号传递和转换的过程。数学模型就是用来描述系统中各种信号(或变量)的传递和转换关系的。

数学模型为我们的研究带来了极大的方便。它使我们得以暂时离开系统的物理特性,在一般意义下研究控制系统的普遍规律。当然,当把具有普遍性的规律运用到分析和设计具体系统时,仍要充分注意到系统的物理特性。

数学模型通常是描述系统各变量之间关系的一个或一组方程式。由于自动控制系统是动态系统(即以时间为变量的系统),描述控制系统的基本工具是微分方程(连续系统)或差分方程(离散系统)。这种模型一般称为时域模型。对于线性系统,利用拉普拉斯变换和傅里叶变换,可以将时域模型转换为频域模型。时域模型和频域模型各有千秋,在控制系统的分析和设计中都有着非常重要的作用。

如果模型着重描述的是系统输入量和输出量之间的数学关系,则称这种模型为输入—输出模型;如果模型着重描述的是系统输入量与内部状态之间以及内部状态和输出量之间的关系,则这种模型通常称为状态空间模型。当然,这两种模型在一定意义下是可以相互转化的。

建立系统的数学模型通常要遵循以下几个步骤:

(1) 建立物理模型。由于不能将实际系统错综复杂的特性完全表示出来,为了系统分析与设计的目的,总是要作一些理想化的假设。一个理想化的物理系统称为物理模型。例如,一个电子放大器可以看成为理想的线性放大环节,而忽略它的非线性成分;通信卫星可以看成是一个质点来建模,而不考虑其形状和质量分布。但这种理想化是有一定范围和前提条件的。例如,电子放大器的工作范围超出其线性区,就必须考虑其非线性因素(如饱和特性)对系统的影响;在轨道控制中卫星可以看成是一个质点来建模,而在卫星的姿态控制中则要考虑其天线和太阳能帆板的柔性体特性。

(2) 列写原始方程。有了物理模型以后,利用适当的物理定律(如牛顿定律、基尔霍夫电流和电压定律、能量守恒定律等)建立各物理量之间的数学关系。

(3) 选定系统的输入量、输出量及状态变量(仅在建立状态空间模型时要求),消去中间变量,建立适当的输入—输出模型或状态空间模型。

上述建模方法通常称为机理建模,它将是本章讨论的主要内容。这种方法要求对实际过程或对象的运行机理比较清楚。在不清楚系统内部机制的情况下,还可以利用系统的输入、输出数据建立模型,这种建模方法要用到系统辨识等知识,将在下一章介绍。

2.2 列写输入—输出运动方程

列写系统运动方程是机理建模中极其重要的一步,后面讨论的多种数学模型都是在此基