

国外计算机科 学教材系列

# 动态系统的 反馈控制

(第四版)

Feedback Control of Dynamic Systems

Fourth Edition

FEEDBACK  
CONTROL OF  
Dynamic Systems  
FOURTH EDITION

GENE F. FRANKLIN  
J. DAVID POWELL  
ABBAS EMAMI-NAEINI

Gene F. Franklin

[美] J. David Powell 著

Abbas Emami-Naeini

朱齐丹 张丽珂 原新 等译

赵国良 审校

PEARSON  
Prentice  
Hall



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry  
<http://www.phei.com.cn>

国外计算机科学教材系列

# 动态系统的反馈控制

(第四版)

Feedback Control of Dynamic Systems

Fourth Edition

Gene F. Franklin

[美] J. David Powell 著

Abbas Emami-Naeini

朱齐丹 张丽珂 原新 等译

赵国良 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内容简介

本书共分为9章,集古典控制与现代控制理论于一体。第1章通过实例综述了控制系统的组成及原理,同时详细介绍了控制理论的发展历史及主要人物;第2章至第4章为本书的基础,对动态系统的建模、动态响应进行了深入分析,在此基础上,得出反馈控制的基本特性及优越性;第5章至第7章为本书的核心,分别介绍了系统设计的三种有效方法——根轨迹法、频率响应法及状态空间法;在此基础上,第8章详细研究了控制规律的计算机实现,即数字控制理论,并提供了详细的设计方法;最后,第9章通过多个具体实例,综合了以上控制系统的设计手段,并总结了适合于一般控制系统设计的方法和步骤。此外,本书提供了大量关于控制理论的基础知识附录,对本书的学习有很好的帮助。

本书适用于自动控制专业的本科生及研究生、非控制专业研究生,也可供相关技术人员参考。

Simplified Chinese edition Copyright © 2004 by PEARSON EDUCATION ASIA LIMITED and Publishing House of Electronics Industry.

Feedback Control of Dynamic Systems, Fourth Edition, ISBN: 0130323934 by Gene F. Franklin, J. David Powell, Abbas Emami-Naeini. Copyright © 2002.

All Rights Reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China (excluding the Special Administrative Region of Hong Kong and Macau).

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和Pearson Education培生教育出版亚洲有限公司合作出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有Pearson Education培生教育出版集团激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2003-0582

### 图书在版编目(CIP)数据

动态系统的反馈控制: 第四版/(美)富兰克林(Franklin, G. F.)等著;朱齐丹等译.

-北京:电子工业出版社,2004.5

(国外计算机科学教材系列)

书名原文:Feedback Control of Dynamic Systems, Fourth Edition

ISBN 7-5053-9333-2

I. 动… II. ①富… ②朱… III. 动态系统-反馈-控制-教材 IV. TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第038994号

责任编辑:谭海平 特约编辑:王蕊

印刷:北京兴华印刷厂

出版发行:电子工业出版社

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:38.75 字数:992千字

印次:2004年5月第1次印刷

定价:55.00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。质量投诉请发邮件至zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至dbqq@phei.com.cn。

# 出版说明

21世纪初的5至10年是我国国民经济和社会发展的关键时期,也是信息产业快速发展的关键时期。在我国加入WTO后的今天,培养一支适应国际化竞争的一流IT人才队伍是我国高等教育的重要任务之一。信息科学和技术方面人才的优劣与多寡,是我国面对国际竞争时成败的关键因素。

当前,正值我国高等教育特别是信息科学领域的教育调整、变革的重大时期,为使我国教育体制与国际化接轨,有条件的高等院校正在为某些信息学科和技术课程使用国外优秀教材和优秀原版教材,以使我国在计算机教学上尽快赶上国际先进水平。

电子工业出版社秉承多年来引进国外优秀图书的经验,翻译出版了“国外计算机科学教材系列”丛书,这套教材覆盖学科范围广、领域宽、层次多,既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择和自由组合使用。这些教材涉及的学科方向包括网络与通信、操作系统、计算机组织与结构、算法与数据结构、数据库与信息处理、编程语言、图形图像与多媒体、软件工程等。同时,我们也适当引进了一些优秀英文原版教材,本着翻译版本和英文原版并重的原则,对重点图书既提供英文原版又提供相应的翻译版本。

在图书选题上,我们大都选择国外著名出版公司出版的高校教材,如Pearson Education培生教育出版集团、麦格劳-希尔教育出版集团、麻省理工学院出版社、剑桥大学出版社等。撰写教材的许多作者都是蜚声世界的教授、学者,如道格拉斯·科默(Douglas E. Comer)、威廉·斯托林斯(William Stallings)、哈维·戴特尔(Harvey M. Deitel)、尤利斯·布莱克(Uyless Black)等。

为确保教材的选题质量和翻译质量,我们约请了清华大学、北京大学、北京航空航天大学、复旦大学、上海交通大学、南京大学、浙江大学、哈尔滨工业大学、华中科技大学、西安交通大学、国防科学技术大学、解放军理工大学等著名高校的教授和骨干教师参与了本系列教材的选题、翻译和审校工作。他们中既有讲授同类教材的骨干教师、博士,也有积累了几十年教学经验的老教授和博士生导师。

在该系列教材的选题、翻译和编辑加工过程中,为提高教材质量,我们做了大量细致的工作,包括对所选教材进行全面论证;选择编辑时力求达到专业对口;对排版、印制质量进行严格把关。对于英文教材中出现的错误,我们通过与作者联络和网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订。

此外,我们还将与国外著名出版公司合作,提供一些教材的教学支持资料,希望能为授课老师提供帮助。今后,我们将继续加强与各高校教师的密切联系,为广大师生引进更多的国外优秀教材和参考书,为我国计算机科学教学体系与国际教学体系的接轨做出努力。

电子工业出版社

## 教材出版委员会

- 主任** 杨芙清 北京大学教授  
中国科学院院士  
北京大学信息与工程学部主任  
北京大学软件工程研究所所长
- 委员** 王 珊 中国人民大学信息学院院长、教授
- 胡道元 清华大学计算机科学与技术系教授  
国际信息处理联合会通信系统中国代表
- 钟玉琢 清华大学计算机科学与技术系教授  
中国计算机学会多媒体专业委员会主任
- 谢希仁 中国人民解放军理工大学教授  
全军网络技术研究中心主任、博士生导师
- 尤晋元 上海交通大学计算机科学与工程系教授  
上海分布计算技术中心主任
- 施伯乐 上海国际数据库研究中心主任、复旦大学教授  
中国计算机学会常务理事、上海市计算机学会理事长
- 邹 鹏 国防科学技术大学计算机学院教授、博士生导师  
教育部计算机基础课程教学指导委员会副主任委员
- 张昆藏 青岛大学信息工程学院教授

# 译 者 序

本书是斯坦福大学自动控制专业的本科生、研究生、非控制专业研究生的教材。到2002年该书已是第四版。与第三版相比，增加了近年来控制系统在理论和应用方面的最新研究成果，并对一些关键部分的理论描述进行了修改，尤其充分强调了当今计算机技术在控制系统设计中的广泛应用，使本书更具有先进性和实用性，对提高教学效果也有很大帮助。

本书比较系统地阐述了反馈控制的基本理论、设计方法及在现实应用中遇到的许多实际问题。主要介绍了根轨迹法、频率响应法等古典控制理论及状态空间法、计算机控制技术等现代控制理论的设计手段、设计方法、实现技术以及分析工具等。本版注重实际应用，结合作者多年实际工作经验，列举了大量应用实例，虽然具有很大难度，但对本书理论的理解与掌握具有极大的帮助。本书的另一特点是大量引用了在控制系统分析与设计中广泛使用的计算机工具，如MATLAB和Simulink工具，并详细给出了计算程序和结果，对控制系统的分析与设计有极好的应用价值。另外，本书附录中给出了大量学习本书必需的基础理论及数学工具，并对每章精心设计的习题给出了解答，使全书更加完整，有利于工程技术人员的自学。作者在撰写本书时纳入了多年的教学经验，比较重视工程概念、实际问题和工程应用，基本理论和设计方法的讲解是循序渐进、逐步深入的，将有益于读者理解本书的内容。

Gene F. Franklin 是美国加州斯坦福大学电气工程专业教授。他的研究领域为自适应控制、非线性控制、计算机控制等，有多部著作，其中《自动控制系统》、《反馈控制理论》、《采样系统数字控制》等著名的著作涉及了控制领域的绝大部分内容。Franklin 教授曾于1994年为IEEE年会做过专题讲座。J. David Powell 是美国加州斯坦福大学教授，目前从事的专业是导航与控制，主要研究航天飞船及地面车辆的GPS导航控制，在控制系统领域里有两部著作，发表过100多篇科技论文。两位作者均是当今世界知名的控制理论学者中的佼佼者。

总之，本书是颇具特色的经典高校教材，自它问世以来，已受到很多读者和有关专家的好评。鉴于以上原因，特将此书第四版译成中文，供高等院校有关专业的师生、工程技术人员和对反馈控制感兴趣的读者参考使用。

本书第1章至第3章、第9章由朱齐丹、张秀苹翻译，第4章至第6章由张丽珂、刘舟翻译，第7章、第8章及附录由原新、胡陵山翻译，温素芳、高尔龙、宋雪良、韩新宇、张惠君也参加了翻译工作，最后由赵国良教授对全书进行了审校。

限于译者水平，译文中定有许多不妥之处，敬请读者批评指正。

# 前 言

本书为第四版，在保留了前几版精华的基础上，修改了我们认为能改进理论叙述、提高教学效果的关键部分，更好地利用了计算机技术在控制系统设计中的长足进步，尤其注意了 MATLAB 和 Simulink 工具箱的使用。

本书的基本结构没有改变，还是利用根轨迹、频率响应和状态变量方程三种方法，把控制系统的分析和设计结合起来。本书仍然包含大量精心设计的实例，大多是本版新增的，以促进对所学内容的理解。为帮助学生检验所学的内容，每章都提供了大量习题，并且书后附有答案，这是本书的一个新特性。同时整本书都做了一些适当的更改，尤其要特别注意第 3 章对拉普拉斯变换的介绍、第 4 章对反馈的介绍以及每章末尾习题的编排和描述。

在介绍设计方法的核心三章中，为引导学生在理解的基础上进行设计，我们仍希望学生学习如何用手工而不用计算机进行基本的计算。然而，与以前版本不同，我们不再重点强调手工计算，而是更多地引入了上述在控制系统分析和设计中广泛使用的计算机工具。比如，不再标注需要计算机计算的问题，而期望同学们在每种情况需要时自己应用计算机。

众所周知，在嵌入式计算机中实现的控制器越来越多，因此，在第 4 章中介绍了数字控制。同时，在多种情况下，对模拟控制器的反馈系统和相应的数字控制器的反馈系统的响应进行了比较。像以前一样，本书收集了全部 MATLAB 中用于产生本书图形的、扩展名为“.m”的文件，读者可到网站 <http://www.prenhall.com/franklin> 或 SC Solutions 公司的首页 <http://scsolutions.com/scsolutions.control.html> 去查阅这些文件。

作为控制理论的典型应用，第 9 章给出了大量的实例。本版的实例还加入了计算机硬盘读/写磁头组件控制系统和集成电路制作中快速热处理器的硅片温度控制系统。

我们认为第四版讲述的内容给教学提供了很好的支持，为控制理论的学习提供了强有力的动力，也为满足反馈控制理论的深层次学习奠定了坚实的基础。

## 面对教育的挑战

反馈控制专业的学生面对的教育挑战中有些是长期的，而其他挑战已在最近几年中初露端倪。一些挑战会贯穿学生们整个技术教育的始终，而其他挑战是这一相对复杂课程特有的。不论这些挑战是已存在的还是新出现的、一般的还是特殊的，我们接受的挑战对本书内容体系的形成至关重要。在此，将陈述几个教育上的挑战并针对每种挑战给出相应的解决办法。

- **挑战：**学生必须掌握设计与分析方法。

设计对所有工程尤其对控制系统而言是核心。同学们会发现设计问题及相应的处理实际应用的愿望对学生而言尤其具有挑战性；但同学们还会发现，由于设计问题的表述通常都不够具体，而且一般得不到惟一解，因此设计问题对学生们来说很难。但由于它固有的重要性及对学生的启发性影响，本书自始至终都在强调设计，使大家一开始就对求解设计问题满怀信心。

讲解了系统建模和动态响应之后，第 4 章开始重点介绍有关设计的内容。首先引入了反馈的



基本思想,介绍了反馈对抑制扰动、跟踪精度及对参数变化健壮性的影响。然后以相同的方式介绍了根轨迹、频率响应及状态变量反馈的分析法。所有分析的目的在于为实现好的反馈控制设计提供一些必需的知识,在其中应用了并不复杂的数学推导,使得内容更加清晰易懂。

本书通篇列举了大量例子,以将不同设计方法得到的设计效果进行比较。在第9章的综合实例分析中,综合运用了所有的方法来处理复杂的现实世界的设计问题。

- **挑战:** 将新思想引入到控制中。

控制是一个活跃的研究领域,不断有新概念、新思想、新方法交汇融合。在不久的将来,新方法会进入每个控制工程师必须掌握的技术之列。本书为那些既需要掌握传统控制方法又需要掌握现代控制手段的学生提供了有力支持。

在前面的几个版本中,尽量用几乎相同的学时讲述设计中使用的根轨迹、频率响应及状态变量法。本版将重点从借助计算机工具的手工设计方法转移到基于基本技术的计算机辅助设计方法。先前介绍的实现数字控制器设计的采样也包含在重新强调的内容之列。虽然为了节省时间,可以跳过这一内容而不会打断本书的连贯性,但我们认为有必要让同学们认识到越来越多的系统正在使用数字控制,而且最基本的数字控制方法很容易掌握。

遗憾的是,这一版并不介绍基于各种优化方法的混合控制或设计的重要内容。

- **挑战:** 学生需要掌握大量信息。

大量系统应用反馈控制,而且解决控制问题可用的方法也越来越多,这意味着当今学习反馈控制的学生必须了解许多新的思想。如何让学生在钻研冗长而复杂的教科书内容时能够保持清晰的思路?他们如何能辨认重点并得出结论?他们该如何复习考试?帮助大家完成这些任务是本版的一个原则。本页的附表总结了这些特点。

- **挑战:** 反馈控制专业的学生来自于广泛的学科。

反馈控制是一个跨学科领域,因为在每一个工程领域的系统中均可应用反馈控制。因此,一些学校在各标准学科中都开设了单独的关于控制的导论课程,还有一些学校,像斯坦福大学,开设了一系列可供许多学科的学生选修的课程。然而,把应用实例限制在某个领域内就会对反馈控制的应用范围及威力得不到全面认识,但要想覆盖所有的应用领域也很难。本书介绍了该专业跨学科的特性,并提供几种最常用技术的复习材料,以使各学科的学生都能够顺利掌握本书介绍的内容。第2章为具有良好变换分析基础的电子工程专业学生纳入了一些列写机械机构运动方程的内容;第3章为机械专业的学生介绍了拉普拉斯变换及控制中需要用到的动态响应。另外,我们也简要地介绍了一些其他技术,经常给出一些物理系统的运动方程,虽然没有推导过程,但给出了从响应的角度是可以理解的物理描述。本书给出的一些物理系统的例子,包括计算机磁带驱动读/写磁头系统、卫星跟踪系统、汽车发动机中燃料-空气比系统及飞机自动驾驶系统。

特 征	参考例子
每章开篇都提供了介绍及概述,将每章的特定内容从总体上作为该学科的一部分,简要地概述了每章各节的内容	第3章开篇
楷体印刷部分标志着行文中的关键概念,同时也起着总结重要设计步骤的作用	反馈的优点,补偿设计
各章小结帮助学生复习及关注重点。这些小结简要地重申了每章的关键概念及重要结论	第2章总结
每章末尾的复习题及书后的解答可引导学生自学	第2章



## 本书组成

本书的内容分9章介绍并附有7个附录。每章都有一些前沿的或丰富的资料用三角形图标标注,忽略掉这些内容不影响本书的连贯性。与这些内容相关的例题和习题也用这种图标标记出来。附录包括基础知识和参考资料,如拉普拉斯变换表、复变函数基础、矩阵论基础及各章复习题的答案。

第1章介绍了反馈的基本思想和一些关键的设计问题。本章还介绍了控制理论的发展简史,从古代的过程控制开始到飞行控制和电子反馈放大器的发展。通过发展简史给出该领域的发展进程,介绍一些在该领域发展过程中做出贡献的关键人物,希望能提高学生的学习兴致。

第2章简要地介绍了动态建模,包括机械、电子、机电一体化、流体力学及热力学等装置的建模。本章还讨论了微分方程的状态变量表达式。这部分内容作为习题的基础,可为不同层次的学生扫除学习过程中的障碍,故而可以省略或可以扩展其深度。

第3章介绍了控制系统分析中用到的动态响应。同样,本章大部分内容尤其对于主修电子工程专业的学生而言可能是以前学过的,而极点位置和瞬态响应之间的关系、外加极点和零点对动态响应的影响及闭环系统稳定的概念,对大多数学生来说都是新内容。上述内容需要认真掌握。

第4章介绍了最常用的反馈,集中讨论了反馈对跟踪精度、抑制扰动和模型误差灵敏度的基本影响。在介绍了灵敏度的定义和互补灵敏度函数的同时,也介绍了反馈的基本方程和传递函数。本章还以一阶速度控制模型为背景介绍了比例、积分、微分控制的概念。这样,在研究根轨迹和奈奎斯特稳定性判据的繁杂规则之前,学生能够对控制系统有全面的了解。本章最后介绍了数字控制系统的基本问题及等效的数字控制器的实现。至此,提出了控制系统设计的核心问题;在组成复杂的设计工具进行必要的分析深入过程中,这一核心问题应始终贯穿其中。本章还介绍了稳态跟踪误差和系统类型的概念。

在全面阐述反馈的概念后,第5章、第6章、第7章分别介绍了基于根轨迹、频率响应和状态变量反馈的设计方法,这三章是本书的核心。

第8章更详尽地介绍了应用数字计算机实现反馈控制系统设计所需的工具。然而,要想全面了解如何用数字计算机实现反馈系统,读者可参阅相关的书籍,例如由Franklin、Powell和Workman编著的“Digital Control of Dynamic Systems”(Prentice Hall, 1998)。

第9章在对几个实例的研究中,把三种基本设计方法有效结合进行控制系统的设计。同时,联系控制系统设计的现实背景介绍了控制系统设计的步骤。

## 课程设置

本书的内容可以灵活讲授。由于大多数控制专业的学生都有一定的动态系统和拉普拉斯变换的基础知识,因此,对这些学生而言,第2章和第3章大部分内容将可作为复习材料。在一个10周的学期里,可以复习第3章,并且掌握第1章、第4章、第5章、第6章的所有内容,用三角形标注的选学内容大多应该略去不学。在第2个10周的学期里,可以轻松地掌握第7章和第9章及前面提到的选学内容,另外,一些选修的部分可以略掉,第8章的内容也可根据需要有选择地学习。通过一个学期的学习,应该可以轻松地掌握第1章至第7章的内容;如需要,还可以学习第2章、第3章的内容。掌握这些核心内容后,若时间允许,还可以再学习第9章精选的实例或第8章关于数字控制系统的一些内容。

整本书的内容还可用做一个三学期课程，由系统建模和动态响应（第2章、第3章）、古典控制理论（第4章至第6章）和现代控制理论（第7章至第9章）组成。

斯坦福大学为未上过控制理论课的本科高年级和研究生一年级学生讲授两门基础的10星期课程，这些学生大多是航空系、机械工程系和电子工程系的学生。第一门课复习了第2章、第3章的内容，讲解了第4章至第6章的内容。另一门更高级的课程复习了第4章至第6章的内容，讲解了第7章至第9章的内容，这门课是为研究生开设的。这一系列课程补充了研究生的线性系统理论课，是数字控制、最优控制、飞行控制、精密仪器设计等的先导课程。几门后续课程涉及了广泛的实验内容。动态系统或电路分析和拉普拉斯变换是学习这一系列课程的前提。

## 学习反馈控制课程的必要条件

本书是所有工程专业高年级学生的第一课程。要掌握第4章至第7章的核心内容，必须掌握一些建模及动态响应的知识。许多学习本门课程的学生都掌握了足够的基础知识，这些知识源自于以前学习的物理、电路及动态响应等课程中的概念。对于那些需要复习的学生，第2章和第3章会有所帮助。

要掌握有关状态空间的内容，必须有一定的矩阵代数的基本知识。虽然所有的学生都将在先导的数学课程中学到这些知识，但我们仍在附录C中给出了基本关系式回顾，在第7章开头的部分简要复习了控制中需要用到的特殊内容。重点是线性动态系统与线性代数之间的关系。

## 补充

采用本书第四版作为教材的教师可使用本书的教师手册，该手册具有本书全部习题的解答。前面提到的网站包含用来得到本书中所有MATLAB图形的.m文件。

## 致谢

最后，希望向所有那些促进反馈系统发展到今天这种令人鼓舞的局面的人们表达我们衷心的感谢。尤其要专门感谢我们的学生及同事，因为我们从他们那里得到了巨大的帮助和指导。尤其是与以下几个人进行了许多讨论，我们在这一过程中受益匪浅，这些人都曾在斯坦福大学教过控制导论课：A. E. Bryson、R. H. Cannon、D. B. DeBra、S. Rock、C. Tomlin、S. Boyd和P. Enge。尤其要感谢Dan DeBra教授，他认真地阅读了手稿并给出了许多建设性的意见。另外，我们的同事M. Spong、L. Pao、D. Meyer、K. Pasino、P. Dorato和M. Saif也提供了宝贵的反馈意见。还要感谢D. deRoover、G. van der Linden、J. Ebert、R. Kosut、M. Tao及A. Rahimi的帮助。此外，L. Kobayashi、H-T. Lee、E. Thuriyasena及M. Matsuoka在校对各章及准备答案手册的过程中提供了重要帮助。

也要感谢以下的评审者：新墨西哥大学的Hy D. Tran，北卡罗莱纳州立大学的Paul I. Ro，克罗拉多大学的Lucy Y. Pao，Brigham青年大学的Arnold Lee Swindlehurst及Clemson大学的E. Harry Law。

Gene F. Franklin

J. David Powell

Abbas Emami-Naeini

Stanford, California

# 目 录

第 1 章 反馈控制简史与综述 .....	1
概述 .....	1
反馈控制介绍 .....	1
1.1 一个简单的反馈系统 .....	2
1.2 反馈的初步分析 .....	4
1.3 简史 .....	7
1.4 本书综述 .....	10
小结 .....	11
复习题 .....	12
习题 .....	12
第 2 章 动态模型 .....	15
概述 .....	15
动态模型介绍 .....	15
2.1 机械系统动力学 .....	15
2.2 状态变量形式的微分方程 .....	26
2.3 电路模型 .....	30
2.4 机电系统模型 .....	33
2.5 热流量和液体流量模型 .....	37
2.6 线性化和换算 .....	44
小结 .....	50
复习题 .....	51
习题 .....	51
第 3 章 动态响应 .....	62
概述 .....	62
系统响应介绍 .....	62
3.1 拉普拉斯变换回顾 .....	62
3.2 系统模型图 .....	82
3.3 极点分布的影响 .....	91
3.4 时域指标 .....	96
3.5 零点和附加极点的影响 .....	100
3.6 稳定性 .....	104

3.7 数值仿真	111
3.8 由实验数据获得模型	115
小结	119
复习题	120
习题	120
<b>第4章 反馈的基本特性</b>	<b>133</b>
概述	133
反馈特性介绍	133
4.1 速度控制实例研究	134
4.2 经典三项控制器	144
4.3 稳态跟踪与系统类型	154
4.4 控制器的数字实现	164
小结	169
复习题	169
习题	170
<b>第5章 根轨迹设计法</b>	<b>183</b>
概述	183
根轨迹设计法介绍	183
5.1 基本反馈系统的根轨迹	183
5.2 绘制根轨迹的规则	187
5.3 精选的根轨迹示例	197
5.4 选取参数值	207
5.5 动态补偿	208
5.6 应用根轨迹的设计示例	215
5.7 根轨迹法的扩展	220
小结	228
复习题	230
习题	230
<b>第6章 频率响应设计法</b>	<b>244</b>
概述	244
频率响应设计法介绍	244
6.1 频率响应	245
6.2 临界稳定	260
6.3 奈奎斯特稳定判据	261
6.4 稳定裕度	269
6.5 波特幅相关系	274
6.6 闭环频率响应	278

6.7 补偿	278
6.8 频率特性的其他图示方法	295
6.9 根据灵敏度函数定义的性能指标	299
6.10 时间延迟环节	305
6.11 根据频率响应特性确定系统的零极点模型	307
小结	309
复习题	311
习题	312
<b>第7章 状态空间设计</b>	<b>332</b>
概述	332
状态空间法介绍	332
7.1 状态空间法的优点	332
7.2 状态方程分析	333
7.3 全状态反馈的控制规律设计	349
7.4 理想设计的极点位置选取	359
7.5 观测器设计	367
7.6 将控制规律与观测器结合进行补偿器设计	377
7.7 回路传递恢复	386
7.8 存在观测器的情况下引入参考输入	390
7.9 积分控制和鲁棒跟踪	399
7.10 用有理传递函数直接设计	411
7.11 带纯时间延迟的系统设计	414
7.12 李亚普诺夫稳定性	417
小结	421
复习题	423
习题	424
<b>第8章 数字控制</b>	<b>441</b>
概述	441
数字控制介绍	441
8.1 数字化	441
8.2 离散系统的动态分析	443
8.3 仿真设计	449
8.4 离散设计	456
8.5 状态空间设计法	461
8.6 硬件特征	467
8.7 字长的影响	469
8.8 采样速率的选取	471
小结	473

复习题	474
习题	474
<b>第 9 章 控制系统的设计: 原理与实例研究</b>	<b>484</b>
概述	484
设计原理简介	484
9.1 控制系统设计概要	484
9.2 卫星姿态控制系统设计	488
9.3 波音 747 的侧向和纵向控制	498
9.4 汽车发动机中的燃料-空气比控制	510
9.5 数字磁带传动的控制	515
9.6 硬盘读/写磁头组件控制	522
9.7 半导体晶片制造中快速热处理系统的控制	529
小结	539
复习题	541
习题	542
<b>附录 A 拉普拉斯变换</b>	<b>551</b>
<b>附录 B 复变函数概述</b>	<b>562</b>
<b>附录 C 矩阵论概述</b>	<b>570</b>
<b>附录 D 能控性与能观性</b>	<b>578</b>
<b>附录 E 用于极点配置的阿克曼公式</b>	<b>584</b>
<b>附录 F MATLAB 函数</b>	<b>587</b>
<b>附录 G 复习题解答</b>	<b>589</b>

# 第 1 章 反馈控制简史与综述

## 概述

本章我们首先用自动调温器控制家用壁炉这一简单的例子来说明反馈控制。通过这个例子我们可以了解控制系统的基本组成。在另一个汽车巡航控制的实例中，忽略动态的情况下，我们导出基本静态方程，且给系统模型的各参数赋以数值，对开环控制和闭环控制的性能加以比较、分析。为了了解我们所要研究内容的来龙去脉和控制领域的大致发展状况，在1.3节简要介绍控制理论和设计的简史。最后，在1.4节介绍全书的组织结构和内容。

## 反馈控制介绍

动态系统控制是一个有许多特性的普遍概念。通过人来操纵机器运行的系统称为手动控制，例如，驾驶一辆汽车就是手动控制；仅含有机器的系统称为自动控制，例如，由自动调温器来调节房间温度；抑制未知干扰来保持输出稳定的装置称为调节器；用来跟踪某一参考信号的系统称为跟踪系统或伺服系统。控制系统也可根据计算控制作用的信息进行分类，如果控制器在计算控制作用时未利用系统被控输出的测量值，则这个系统称为开环控制；如果对系统的输出进行测量并反馈回来加以利用来计算控制作用，则称为闭环控制或反馈控制。除了这些最基本的特性外，控制系统还有许多其他重要的特性，例如，本书中我们主要讨论由线性时不变方程描述的控制过程。然而，如果信号幅度很大，则所有的物理过程都是非线性的，如果观察时间很长，它们的特性都是随时间变化的。在反馈中我们主要考虑的是现时刻输出的反馈，下面通过一个非常熟悉的例子说明该设想的局限性。例如，当驾驶一辆汽车时。简单的反馈系统就相当于在浓雾中行车，只能看清前面一小段路，而看不清更远处的位置，能看清更远处位置的控制形式称为预测控制，该明显有用的信息在可以获得的地方就要加以利用，然而在本书的大部分自动控制研究中，未来轨迹或干扰是无法获取的。无论如何，控制设计者应研究这个过程，看是否存在一种传感器能够对跟踪的轨迹或需抑制的干扰进行预测，若可行的话，设计者则利用它提供控制系统超前的前馈作用。发电厂锅炉的蒸汽压力控制就是一个实例，电厂需要输出的电功率值可前馈到锅炉控制器来预测所需增加的蒸汽流量。

廉价而功能强大的数字计算机的发展，对控制系统的设计和实现起了很大的推动作用。像 MATLAB 语言这种软件对求解方程和实现控制设计方法的图形分析有很大的帮助。为了分析系统的响应，同学们可以运用像 Simulink 这样的工具，很容易地求解过程控制中线性和非线性模型的响应。计算控制信号的控制器主要利用电子器件，因为电子器件有很好的灵活性和性价比。虽然模拟元件在实现简单方程时比数字逻辑更快、更廉价，但对于嵌入式数字处理器更好的可编程能力和更高的性价比，使得数字处理器在实现控制器方面得到更普遍的应用，这些趋势对入门学习控制领域的影响明显贯穿于全书。

反馈控制的应用从没有像现在这样活跃，用全球定位系统(GPS)的着陆和避碰系统目前得以



发展, 为我们在越来越拥挤的太空航行带来大的变革。像计算机硬盘这类磁性存储装置, 对读写磁头的控制可达到微米级的磁道误差, 且运行速度达到毫秒数量级。从微型电话机到大型喷气式客机, 从洗衣机到像一个小城市一样的炼油厂, 对这些系统的正常运行, 控制是相当重要的, 这样的例子不胜枚举。实际上, 由于许多控制装置和系统是非常重要而且不能直观看到的, 因此工程师们把此控制称为隐式技术。无疑, 将来会看到工程师们开发出更富有想像力的反馈控制。200多年来控制问题的研究, 对手动和自动控制已形成一套完整的知识体系, 并逐步发展成控制系统设计学科, 而这也正是本书的内容。

## 1.1 一个简单的反馈系统

在反馈控制系统中, 通过一个传感器测量诸如温度、速度这样的被控制量, 并把测量信息反馈给控制器去影响被控制变量。下面用自动调温器控制壁炉的简单例子来解释这一原理, 该系统的组成单元及各部分的连接关系如图1.1(a)所示。由图可以看出系统的主要组成部分以及信息从一部分到另一部分的信息流向。

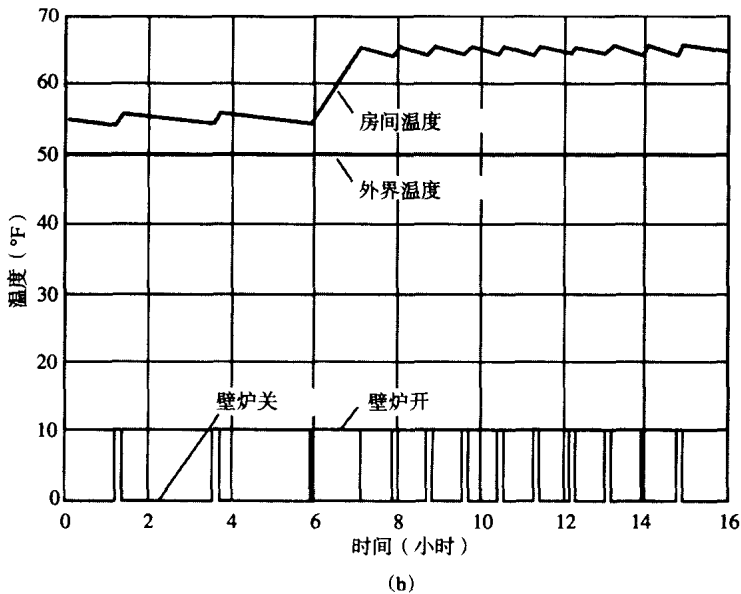
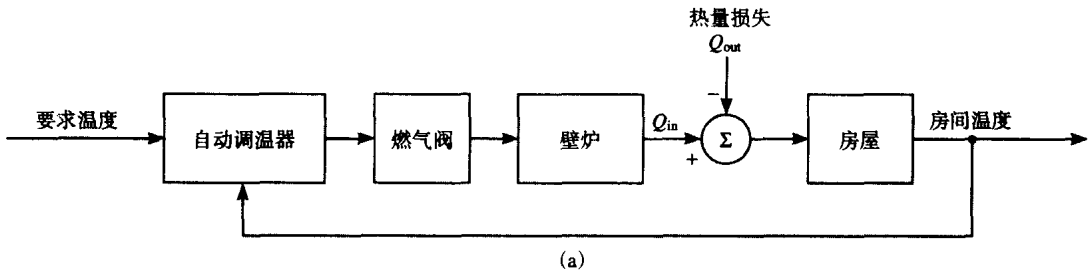


图 1.1 (a) 房间温度控制系统组成框图; (b) 房间温度和壁炉动作曲线

我们可以从图中很容易分析这个系统的工作过程。系统工作过程中,假设自动调温器所在的房间温度和外界温度都低于参考温度(也叫设定值)时,则自动调温器开始工作,控制逻辑打开火炉燃气阀,点燃壁炉,此时房屋吸热量  $Q_{in}$  大于散热量  $Q_{out}$ ,房间温度上升,当上升到稍微高于自动调温器的设定值时,壁炉熄灭,温度开始朝外界温度值下降。当下降到略低于设定值时,自动调温器又开始工作,以后不断重复这个循环。房间温度随壁炉不断开关的变化曲线如图1.1(b)所示。外界温度保持在  $50^{\circ}\text{F}$ ,自动调温器最初在上午6点前设为  $55^{\circ}\text{F}$ ,后来跃变到  $65^{\circ}\text{F}$ ,壁炉使温度上升到该值,此后温度如图做周期变化<sup>①</sup>。由于房屋的隔热性良好,因此在图中我们注意到温度随壁炉熄灭而下降的速度要比随点燃壁炉而上升的速度慢些。从这个例子,我们得知反馈控制的基本组成如图1.2所示。

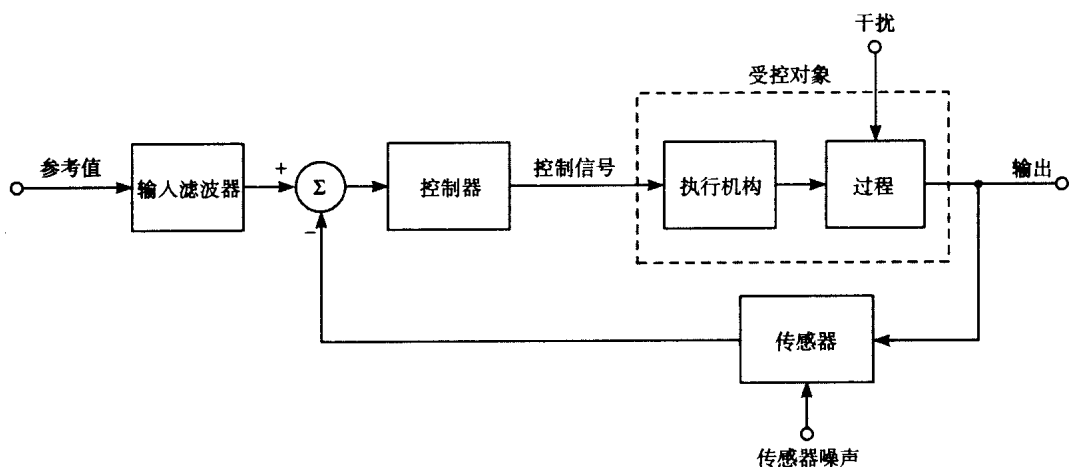


图 1.2 基本反馈控制的组成框图

这个反馈系统的中心部分是过程,它的输出就是被控量,在上面的例子中其过程就是房屋,它的输出是房间温度,对这个过程的干扰是通过墙壁、屋顶与比较低的外界温度之间的热传导而导致的的热量损失(也取决于其他因素如风、开门等)。过程的设计对控制的效果有很大影响。例如,一个装有双层隔热玻璃窗、隔热性能良好的房屋比其他房屋的温度容易控制。同样,想像中的具有控制能力的飞行器的设计与最终实现的性能有天壤之别。一般情况下,越早地把控制问题引入到过程设计中会得到越好的效果。执行机构就是调节过程被控量的装置,在上面的例子中,燃气炉是执行机构。实际上,壁炉通常设有喷射打火或点火机构、气阀、鼓风机等,它们的开关动作取决于壁炉内的空气温度。这就说明许多反馈系统是由各部分组成的,而这些组成部分本身可能又是另一个反馈系统<sup>②</sup>。执行机构的主要问题是具有能够满足以要求的速度和范围快速改变过程输出的能力,壁炉必须能提供比在最坏天气散热更多的热量而且必须能够迅速散发,以使温度误差保持在小范围内。功率、速度和可靠性通常比精度更重要,一般地,过程和执行机构紧密连接,控制设计主要是寻找一个合适输入或称控制信号输入给执行机构,过程和执行机构组合在一起称为受控对象,用来准确求解要求的控制信号的装置称为控制器。由于电信号处理的灵活性,虽然基于压缩空气的气压调节器在过程控制中起重要作用,但控制器主要处理的是电信号。随着数字

① 注意壁炉根据其规定的夜间时刻表在早晨6点前已经工作了几分钟。

② Jonathan Swift 曾这样说:“如博物学家所观察,大鱼吃小鱼,小鱼吃虾米,如此反复无穷”。