

国外工业控制与智能制造丛书

HZ BOOKS
华章教育

Pearson

动态系统的 反馈控制

(原书第7版)

吉恩 F. 富兰克林 (Gene F. Franklin)

[美] J. 大卫·鲍威尔 (J. David Powell)

阿巴斯·埃马米-纳尼 (Abbas Emami-Naeini)

著

刘建昌 于霞 马丹 译 赵军 审校

*Feedback Control of
Dynamic Systems
Seventh Edition*



机械工业出版社
China Machine Press

动态系统的 反馈控制

(原书第7版)

吉恩 F. 富兰克林 (Gene F. Franklin)

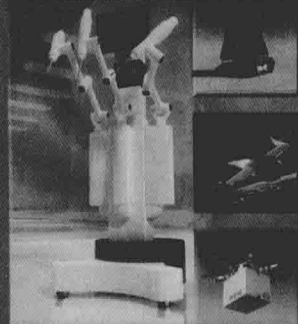
[美] J. 大卫·鲍威尔 (J. David Powell) 著

阿巴斯·埃马米-纳尼 (Abbas Emami-Naeini)

刘建昌 于霞 马丹 译 赵军 审校

*Feedback Control of
Dynamic Systems
Seventh Edition*

Franklin Powell Emami-Naeini



SEVENTH EDITION



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

动态系统的反馈控制 (原书第 7 版)/(美) 吉恩 F. 富兰克林 (Gene F. Franklin) 等著; 刘建昌, 于霞, 马丹译. —北京: 机械工业出版社, 2016.6

(国外工业控制与智能制造丛书)

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

ISBN 978-7-111-53875-2

I. ①动… II. ①吉… ②刘… ③于… ④马… III. 动态系统-反馈控制 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 115371 号

本书版权登记号: 图字: 01-2014-3685

Authorized translation from the English language edition, entitled Feedback Control of Dynamic Systems, 7E, by Gene F. Franklin, J. David Powell, Abbas Emami-Naeini, published by Pearson Education, Inc. Copyright © 2015, 2010, 1999.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

Chinese simplified language edition published by Pearson Education Asia Ltd., and China Machine Press Copyright © 2016.

本书中文简体字版由 Pearson Education (培生教育出版集团) 授权机械工业出版社在中华人民共和国境内 (不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区) 独家出版发行。未经出版者书面许可, 不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

本书封底贴有 Pearson Education (培生教育出版集团) 激光防伪标签, 无标签者不得销售。

本书共分为 10 章, 利用根轨迹、频率响应和状态变量方程等三种方法, 将控制系统的分析和设计结合起来。第 1 章通过实例综述了反馈的基本思想和一些关键的设计问题。第 2 ~ 4 章是本书的基础, 主要介绍了动态系统的建模、控制领域中常碰到的动态响应, 以及反馈控制的基本特征及优越性。第 5 ~ 7 章为本书的核心, 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。在此基础上, 第 8 章通过描述数字控制系统基本结构, 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。第 9 章介绍非线性系统, 描述函数的频率响应、相平面、李雅普诺夫稳定性理论以及圆稳定性判据。第 10 章将三种基本设计方法相结合, 给出了通用的控制系统设计方法, 并将该方法应用到几种复杂的实际系统中。

出版发行: 机械工业出版社

责任编辑: 谢晓芳

印刷: 北京市荣盛彩色印刷有限公司

开本: 185mm × 260mm 1/16

书号: ISBN 978-7-111-53875-2

责任校对: 殷虹

版次: 2016年7月第1版第1次印刷

印张: 32.25

定价: 119.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

投稿热线: (010) 88379604

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光/邹晓东

文艺复兴以来，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势；也正是这样的传统，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，信息学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的信息产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对我国教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其信息科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀教材将对我国教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与Pearson、McGraw-Hill、Elsevier、John Wiley & Sons、CRC、Springer等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从他们现有的数百种教材中甄选出Alan V. Oppenheim、Thomas L. Floyd、Charles K. Alexander、Behzad Razavi、John G. Proakis、Stephen Brown、Allan R. Hambley、Albert Malvino、Peter Wilson、H. Vincent Poor、Hassan K. Khalil、Gene F. Franklin、Rex Miller等大师名家的经典教材，以“国外电子与电气技术丛书”和“国外工业控制与智能制造丛书”为系列出版，供读者学习、研究及珍藏。这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也越来越多被实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着电气与电子信息学科建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外电气与电子信息教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方式如下：

华章网站：www.hzbook.com

电子邮件：hzjsj@hzbook.com

联系电话：(010)88379604

联系地址：北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码：100037



华章科技图书出版中心

译者序

《Feedback Control of Dynamic Systems》的最新版(第7版)于2014年出版,本书是斯坦福大学自动控制专业本科生、研究生以及非控制专业研究生的教材,也可以作为所有工程专业高年级学生的参考用书。与之前版本相比,第7版增加了一些控制理论基本原理方面的内容,对一些关键部分的理论描述进行了修改,补充了一些控制系统在实际应用方面的最新研究结果。本书在提供基本的理论和设计方法的同时,更加重视计算机技术在控制系统设计中的应用,非常适合用于培养学生的工程实践能力和提升工程技术人员的设计能力。

本书由浅入深,内容翔实,论证严谨,具有很强的系统性。重点阐述了反馈控制的基本理论、设计方法及在工程技术领域中的一些实际问题。本书的基本结构与前版相同,主要利用根轨迹、频率响应和状态变量方程这三种方法将控制系统的分析与设计结合起来,并列举了大量的应用实例来验证和说明相关内容。本版更加注重反馈控制在整个控制理论体系中的地位,因而对部分章节进行调整,增加了基本原理的内容,重新编写了关于稳定性和补偿的内容,增加了关于模型跟踪过程和零阶保持器近似方法的内容,整合出单独的一章介绍数字控制,对书中的实际例子进行了更新,而且对各章的习题进行修正和补充,所以本版更加适合读者学习。此外,为了与MATLAB软件符号一致,本版将状态空间描述符号统一进行了修改,并更新了全书的MATLAB指令,以提升读者使用该软件的能力。本版的另外一个特点是每章开篇通过综述和展望,从科学的角度入手论述该章各节的内容,在每章末尾进行历史回顾,以此为读者提供该章的研究背景及其在控制系统理论应用发展中的地位和意义。另外,本书的附录给出学习本书必需的大量基础理论及数学工具,对每章精心设计的复习题给出了参考答案,读者也可以通过网址 www.fpe7e.com 查阅到有关本书的各种原文资料。

本书的三位作者 Gene F. Franklin、J. David Powell、Abbas Emami-Naeini 均为世界知名的控制理论学者,该领域的著名专家,他们不仅研究成果卓著,而且出版了一些很有影响力的著作与教材,本书便是其中最具影响力的一本。本书作者之一 Gene F. Franklin 是斯坦福大学电气工程系教授,国际著名控制学家,IEEE 终身会士。他曾任斯坦福大学电气系主任、IEEE 控制系统学会理事、副主席,其研究领域覆盖了控制的各个方面。2005年,因其对多个控制领域的基础性贡献而荣获美国自动控制学会的最高奖——Bellman 奖。

总之,本书从第1版问世以来,已受到很多读者和有关专家的好评。鉴于本版与过去几版相比更具先进性和实用性,现将本书第7版译成中文,供高等院校有关专业的师生、工程技术人员和更多对反馈控制感兴趣的读者使用和参考,希望读者从这部著作里得到启迪和帮助。

在翻译本书的过程中,译者在自知责任重大的同时也深深感到,读懂一部原著是一回事,而翻译好一部原著又是一回事,区别在于精准性。我们本着尽可能遵循作者原意的原则,力求做到客观准确。并在忠实原文的基础上尽量符合相关专业领域的中文表达习惯,使得读者能够品读本书的原味。为保证全书的一致性,我们在翻译过程中多次对相关术语的表述进行校准与统一,并对可能产生歧义的文字与段落进行了反复讨论。

本书由刘建昌教授主持翻译,其中第1章、第2章、第5章、第9章及索引由马丹

翻译,第3章、第4章、第6章及附录由于霞翻译,前言、第7章、第8章、第10章由刘建昌翻译。最后由赵军教授对全书进行了统稿与审校。除此之外,为本书翻译做出贡献的还有:伍彩云博士后、王霞、杨东、朱孔伟、刘茜、石岩、张文乐、于森、杨敏敏、于泓、李旭等博士研究生。本书由机械工业出版社引进出版,并一直鼓励我们翻译本书,在此我们表示由衷的感谢。最后感谢大连理工大学的连捷副教授对本书译稿所提的意见与建议。

由于译者的水平有限,译文中定有许多不妥之处,欢迎读者批评指正。

前 言

本书的第7版保留了早期版本的精华，是控制方面的一本基础教材。根据之前对读者的调查，我们增加了一些内容(如第2章的齿轮部分)，并将其他较少使用的内容(如前几章的数字控制部分)从书中删除。我们也更新了部分教材内容，以便能够应用 Matlab 中改进的新功能。但是，对读者来说，最大的改变是将以前使用的状态空间描述的符号(F, G, H, J)变为(A, B, C, D)! 在以前的版本中，我们忠实于状态空间方法的先驱者们，没有采用现实研究中的表达方式，而是一直使用经典的符号。然而对于本版，我们接受这一现实，即和 Matlab 中的记号一样，采用(A, B, C, D)这一该领域普遍使用的符号。我们还在第4章增加了关于前馈控制的内容，在第7章增加了关于模型跟踪的内容。此外，还改进了关于 PID(比例积分微分)控制的描述并增加了拉普拉斯(Laplace)变换的内容。我们致力于给控制系统的设计者提供基本的理论与设计方法以及计算机辅助设计方法的入门知识。同时，我们也努力使设计者具备能对计算结果进行指导和验证的能力。第10章的案例根据需要做了一定的保留和更新。最后，为了引导读者在本书中能找到特定的主题，我们扩充了目录。

本书的基本结构并没有改变，仍然利用根轨迹、频率响应和状态变量方程这三种方法将控制系统的分析与设计结合起来。本书依旧包含大量精心设计的例子来验证和说明内容。与以往版本一样，为帮助学生检验所学内容，在每章结尾都提供了大量的复习题，并在书末附上了答案。

在介绍设计方法的三个核心章节中，我们仍希望学生学习如何动手进行基本的计算，并能画出根轨迹或者伯德(Bode)图的草图，然后利用计算机作为辅助设计的工具对结果进行检验。其实我们很早就介绍了如何使用 Matlab 这一被广泛使用的软件工具进行控制系统的分析与设计的方法。除此之外，鉴于很少有教师会用到第6版中第4、5、6章关于数字控制的部分，我们将这部分内容移到了网站上，同时也对第8章进行了改进，用独立的一章介绍数字控制。如果那些想在教学中使用控制器的数字实现这类在早期版本中内容的老师，可以从网站下载使用，其中内容的顺序与第6版的相同，或者学生也可以直接学习第8章的内容。与先前一样，本书收集了全部用于产生本书图形的 Matlab 文件(扩展名为“.m”和“.mdl”)。读者可以到网站 www.fpe7e.com 上查阅这些文件。

第7版新增内容

我们认为第7版能够为教学提供很好的支撑材料，为学习控制提供强大的动力，并为面对教育的挑战奠定坚实的基础。我们介绍的反馈控制研究，既是一个独立的专业，也可在许多其他领域提供支持。

与以往版本比较，第7版更详细的变化列表如下：

- 第1章增加了基本原理的新内容。
- 第2章增加了关于齿轮的新内容。
- 更新了全书 Matlab 指令来提升读者使用该软件的能力。
- 重新编写了第3章中拉普拉斯变换和频率响应的内容。
- 重新编写了第4章中 PID 控制的内容。
- 增加了第4章中前馈控制的内容。
- 将第4章中数字控制的内容移到了本书网站上(www.fpe7e.com)。

- 修改了第 4 章中零点对系统影响的部分。
- 将第 5 章中数字控制和时间延迟的内容移到了网站上。
- 将第 6 章中数字控制的内容移到了网站上。
- 为了保证当前行业标准的清晰性和一致性，重新编写第 6 章关于稳定性和补偿的内容。
- 扩展了第 6 章关于尼科尔斯(Nichols)图的讨论。
- 将第 7 章中数字控制的内容移到了网站上。
- 修改了第 7 章、第 9 章和第 10 章中描述状态空间的符号，即由 (F, G, H, J) 变为 (A, B, C, D) 。
- 为避免产生歧义，根据状态空间符号的变换，整本教材关于补偿的符号由 $D(s)$ 变为 $D_c(s)$ 。
- 增加了第 7 章中模型跟踪的过程。
- 为了清晰，重新编写了第 8 章的几节。
- 增加了第 8 章中零阶保持器的近似方法。
- 更新了第 10 章中发动机控制的例子并全面修改了系统生物学案例研究。
- 本书各章大约 20% 的习题是经过修正或是新增加的。

应对教育面临的挑战

反馈控制专业的学生面临的一些教育挑战是长期存在的，与此同时其他挑战也已在最近几年中初现端倪。其中一些挑战会始终贯穿整个工科教育中，而其他挑战则是这一相对复杂课程所特有的。无论这些挑战是已存在的还是新出现的，是一般的还是特殊的，我们所面临的挑战对本书内容体系的形成都至关重要。在此，我们将叙述几个教育上面临的挑战，并针对每一种挑战提出相应的应对办法。

● 挑战 1：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。学生会发现设计问题以及相应的处理实际应用的机会对他们而言特别具有吸引力。但学生还会发现设计问题很难，因为常常连设计问题的描述都没有很好地形成且缺乏独特的解决方案。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，让大家一开始就对求解设计问题充满信心。

在介绍完系统建模与动态响应之后，从第 4 章开始重点介绍系统设计。首先介绍反馈的基本思想，包括反馈对抑制扰动、跟踪精度以及对参数变化鲁棒性的影响。设计的方式依旧是根轨迹、频率响应及状态变量反馈技术等方法。本书旨在为实现更好的反馈控制设计提供必备的知识，并未给出大量复杂的数学推导，这样使得内容更加清晰易懂。

本书列举了很多例子，将不同设计方法得到的设计效果进行比较。在第 10 章的案例中，用统一的方式使用全部方法来解决复杂的实际设计问题。

● 挑战 2：将新思想引入控制中。

控制是一个非常活跃的研究领域，不断有新概念、新思想和新方法相互交汇融合。随着时间的推移，每个控制工程师都必须掌握这些新方法和新技术。本书致力于为那些既需要掌握传统控制方法又需要更多地掌握现代控制手段的学生提供支持。

在每一个版本中，根轨迹、频率响应及状态变量法都是同等重要的。在第 7 版中，依旧强调扎实掌握一些基本的技术方法，配合使用计算机辅助方法进行精细计算。鉴于数字控制器在控制领域中所扮演的重要角色，第 7 版还介绍了数据采样和离散控制器。虽然为节省时间，即使跳过这一部分内容并不影响本书的连贯性，但我们认为有必要让学生了解计算机控制方法是广泛应用的，并且绝大多数基本的计算机控制技术都很容易掌握。

● 挑战 3：学生需要处理大量信息。

现在大部分的系统都会使用反馈控制，而且可用来解决控制系统问题的方法也越来越多，这意味着学习反馈控制理论的学生必须了解更多的新想法。学生们该如何在钻研冗长

且复杂的教科书内容时依旧保持清晰的思路?如何能够辨认重点并得出合适的结论?如何复习考试?帮助学生完成这些任务既是第4、5、6版的准则,同样也是第7版的立足点。

● 挑战4:反馈控制专业的学生要博学多才。

由于反馈控制可应用到任何可能的工程系统中,所以反馈控制是一个交叉学科领域。因此,一些学校在普通的学科中都单独开设了控制导论方面的课程,还有一些学校,比如斯坦福大学,开设了一系列可供许多学科的学生学习的课程。然而,把例子限制在某个领域内就无法全面认识反馈控制的应用范围及能力,但要想覆盖所有的应用领域也是十分困难的。本书将介绍该专业的跨学科性质,并提供几种最常用技术的复习材料,以使各个学科的学生可以顺利掌握本书内容。对于电气工程专业的学生来说,他们具有扎实的变换分析基础,所以在第2章介绍如何写出反映力学机理的运动方程的内容。考虑到机械工程师的需求,第3章回顾了控制所需的拉普拉斯变换和动态响应的内容。除此之外,我们还简要介绍了一些其他技术,有时,我们给出某个物理系统的运动方程而不给出其推导过程,但会用充分的物理描述从响应的角度帮助我们理解该方程。本书给出了一些物理系统的实例,包括计算机硬盘驱动器的读/写磁头系统、卫星跟踪系统、汽车发动机中空燃比系统及飞机自动驾驶系统。

本书概述

本书分为10章和3个附录。每章的最后都包含一些用三角图标(\triangle)标注的可供选读的前沿内容或用于丰富内容的资料。基于这些资料的一些例子和习题也用三角图标(\triangle)标注。在网站上,会有4个完整的附录和在大部分章节中用作补充材料的附录。纸质版本的附录包含拉普拉斯变换表、每章结尾复习题的答案和Matlab指令清单。网站上的附录包含复变函数回顾、矩阵论回顾、关于状态空间设计的重要结论和支撑或扩充某些章节的选读材料。

第1章介绍了反馈的基本思想和一些关键的设计问题。还简单介绍了控制理论的发展简史,包括从经典过程控制的出现到飞行控制和电子反馈放大器。希望发展简史能够给出该领域的来龙去脉,并且介绍一些在该领域发展过程中做出突出贡献的关键人物,借此来提供学生学习的动力。

第2章对动态模型进行了一个简短的介绍,包括机械、电气、机电一体化、流体力学及热力学等装置的动态模型。这部分内容可忽略,仅用做课后复习材料来为不同层次的学生扫除学习中的障碍,或根据学生的需要扩展其深度。

第3章介绍了控制领域中常碰到的动态响应。对于电气工程专业的学生来说,该章的大部分内容可能已经学过了。但对很多学生而言,极点位置与暂态响应之间的关系、附加零极点对动态响应的影响,均是新内容。该章也介绍了动态系统的稳定性。这些内容需要认真掌握。

第4章介绍了反馈的基本方程和反馈传递函数以及灵敏度函数的定义。运用这些工具,可以对比分析开环控制和闭环控制与抑制扰动、跟踪精度和模型误差灵敏度间的关系,同时根据系统跟踪多项式参考信号或者抑制多项式扰动的能力来对系统进行分类。最后,介绍了经典PID控制结构,并探讨了控制器参数对系统特征方程的影响以及PID的整定方法。

在第4章的反馈综述后,第5章、第6章和第7章是本书的核心,其中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。

第8章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,要想全面掌握用数字计算机实现反馈控制的方法,读者可参阅相关的书籍——由富兰克林(Franklin)、鲍威尔(Powell)和沃尔克曼(Workman)编著,1998年Ellis-Kagle出版的《Digital Control of Dynamic Systems》。

第9章的非线性内容,包括非线性运动方程的线性化技术,可变增益的零记忆非线性

变换分析, 描述函数的频率响应、相平面、李雅普诺夫(Lyapunov)稳定性理论以及圆稳定性判据。

第 10 章将三种基本设计方法相结合用于几个案例研究。提出了一个设计框架, 以处理现实世界中的实际控制设计问题。

课程设置

本书的内容可以灵活使用。大多数控制专业的学生会有一些动力学和拉普拉斯变换的基础。因此, 对这些学生而言, 第 2 章和第 3 章的大部分内容可作为复习材料。在一个 10 周的学季(quarter)内, 可以复习第 3 章, 掌握第 1、4、5、6 章的所有内容。大部分选修章节应当忽略。在第二个学季, 可掌握包括选修部分在内的第 7 章和第 9 章的内容。也可以忽略一些选修的内容, 选择第 8 章的部分内容。一个半学年的课程可以涵盖第 1~7 章的内容, 需要的话, 还可以包括第 2 章和第 3 章中回顾部分的内容。如果掌握这些核心内容后时间还有剩余, 可以将第 8 章中介绍数字控制的内容, 第 9 章中选择性的非线性问题, 以及第 10 章中的若干实例研究包含进来。

整本书也可以按连续的三个学季来使用, 包括系统建模和动态响应(第 2 章和第 3 章)、经典控制理论(第 4~6 章)和现代控制理论(第 7~10 章)。

斯坦福大学为没有上过控制理论课的高年级本科生和一年级研究生讲授两个 10 周的基础课程, 大多数学生来自航空航天系、机械工程系和电气工程系。第一个课程回顾第 2 章和第 3 章, 并学习第 4~6 章的内容。更高级的课程是为研究生开设的, 回顾第 4~6 章的内容, 掌握第 7~10 章的内容。这一系列课程补充了线性系统的研究生课程, 也是学习数字控制、非线性控制、最优控制、飞行控制以及智能产品设计等课程的前提。一些后续的课程还包括大量的实验室实验。学习这一系列课程的必备知识包括动力学或电路分析和拉普拉斯变换。

学习反馈控制课程的必备知识

本书可作为所有工程专业高年级学生第一门课程的教材。重点章节为第 4~7 章, 需要预先掌握建模及动态响应的知识。很多学习这门课程的学生都具有足够多的背景知识, 这些知识是从以前学习的物理、电路及动态响应等课程中获得的。对于那些需要复习这部分内容的学生, 可阅读第 2 章和第 3 章。

必须具有一定的矩阵代数的基本知识才能掌握有关状态空间的内容。虽然很多学生将在后续的数学课上学习这些知识, 我们仍然在 www.fpe7e.com 附录 WB 中回顾了一些基本关系式, 在第 7 章的开头部分简要地介绍了控制中需要的一些特定内容。重点内容为线性动态系统与线性代数之间的关系。

补充

前面提到的网站包含纸质版中生成所有 Matlab 图形所需的 .m 和 .mdl 文件, 根据需要, 学生可以复制、使用这些文件。网站中还包含一些更高级的学习材料和目录中所列的附录。

致谢

最后, 我们向所有为反馈控制领域做出贡献的人表示衷心的感谢, 是他们推动反馈控制领域发展到今天这样令人振奋的局面, 特别是我们的学生和同事, 我们从他们那里得到了重要的帮助和启示。尤其是与下面这些人的讨论也让我们受益匪浅, 他们曾在斯坦福大学教授控制导论课: A. E. Bryson、R. H. Cannon、D. B. DeBra、S. Rock、S. Boyd、C. Tomlin、P. Enge、A. Okamura 以及 C. Gerdes 教授。其他帮助过我们的同事包括 D. Fraser、N. C. Emami、B. Silver、M. Dorfman、D. Brennan、K. Rudie、L. Pao、F. Khorrami、K. Lorell、M. Tischler、D. de Roover 和 P. D. Mathur 教授。

特别感谢为我们教材提供复习题参考答案的众多学生。

向 Gene Franklin 致敬

我们非常悲伤地告诉大家 Gene Franklin 教授在 2012 年 8 月 9 日逝世。他参与了第 7 版最初的规划工作并且重新编写了第 3 章的部分内容。Gene 是一位导师、教师、顾问，也是我们大家的好朋友。我们也非常荣幸能成为他的朋友。为了合作编写这部教材，在过去 28 年多的时间里，我们进行过许多次讨论，每一次的讨论都是相当友好和愉快的。多年来，我们每个人都就如何在书中阐述各种问题表达过不同的意见，但我们总能以友好合作的方式将所有观点涵盖到课本中。我们在 Gene 的研究生课程中学习了控制，从他的指导中获益：当时我们一人刚刚成为副教授，而另一个为博士生。总的来说，我们用了 40 年的时间进行合作研究，创建新课程和实验室，并写了两本书。Gene 总是面带微笑，愉快地工作。我们失去了一位亲爱的朋友和同事。Gene 是真正的绅士。

J. D. P

A. E. -N

加利福尼亚州斯坦福大学

出版者的话

译者序

前言

第 1 章 反馈控制的概述与简史	1
1.1 一个简单的反馈系统	2
1.2 反馈控制的初步分析	4
1.3 反馈系统的基本问题	6
1.4 简史	7
1.5 本书概述	10
小结	11
复习题	12
习题	12
第 2 章 动态模型	14
2.1 机械系统动力学	14
2.2 电路模型	26
2.3 机电系统模型	29
2.4 热流体和热流量模型	33
2.5 历史展望	39
小结	41
复习题	41
习题	41
第 3 章 动态响应	47
3.1 拉普拉斯变换回顾	47
3.2 系统模型框图	68
3.3 极点位置的作用	71
3.4 时域指标	76
3.5 零点和附加极点的作用	79
3.6 稳定性	84
3.7 从实验数据中获取模型： 系统辨识	90
3.8 幅值和时间尺度	90
3.9 历史展望	90
小结	91
复习题	91
习题	91
第 4 章 反馈系统初步分析	102
4.1 控制的基本方程	102

4.2 多项式输入的稳态误差控制： 系统类型	107
4.3 三项控制器：PID 控制	112
4.4 被控对象模型逆的前馈控制	121
4.5 数字控制介绍	122
4.6 时域响应对参数变化的 灵敏度	122
4.7 历史展望	123
小结	124
复习题	124
习题	124
第 5 章 根轨迹设计方法	133
5.1 基本反馈控制系统的根轨迹	133
5.2 确定根轨迹的规则	136
5.3 根轨迹示例	142
5.4 动态补偿设计	149
5.5 应用根轨迹设计示例	155
5.6 根轨迹法的扩展	159
5.7 历史展望	162
小结	164
复习题	164
习题	164
第 6 章 频率响应设计法	173
6.1 频率响应	173
6.2 中性稳定	187
6.3 奈奎斯特稳定判据	188
6.4 稳定裕度	197
6.5 伯德图的幅相关系	201
6.6 闭环频率响应	204
6.7 补偿	205
6.8 时滞	225
6.9 频率特性的其他图示方法	226
6.10 历史展望	229
小结	230
复习题	231
习题	231
第 7 章 状态空间设计	243
7.1 状态空间的优点	243

7.2	系统状态空间描述	244	9.2	线性化分析	368
7.3	框图与状态空间	249	9.3	使用根轨迹进行等价增益 分析	372
7.4	状态方程的分析	250	9.4	使用频率响应进行等价增益分析: 描述函数法	378
7.5	全状态反馈控制律设计	263	9.5	基于稳定性的分析和 设计	385
7.6	为良好设计选取极点位置	272	9.6	历史回顾	397
7.7	估计器设计	278	小结		398
7.8	补偿器设计: 复合控制律与 估计器	287	复习题		398
7.9	估计器中引入参考输入	294	习题		398
7.10	积分控制与鲁棒跟踪	301	第 10 章 控制系统设计: 原理与 案例研究		404
7.11	回路传递恢复	315	10.1	控制系统设计概要	405
7.12	有理传递函数的直接设计	319	10.2	卫星姿态控制设计	408
7.13	具有纯滞后的系统设计	321	10.3	波音 747 的横向和 纵向控制	418
7.14	状态方程的解	324	10.4	汽车发动机的空燃比 控制	428
7.15	历史展望	324	10.5	硬盘读/写磁头组件控制	433
小结		325	10.6	半导体晶片生产中快速 热处理系统的控制	438
复习题		327	10.7	大肠杆菌的趋药性以及如 何远离困境	448
习题		327	10.8	历史展望	453
第 8 章 数字控制		339	小结		455
8.1	数字化	339	复习题		456
8.2	离散系统的动态分析	341	习题		456
8.3	通过离散化等效进行设计	346	附录 A 拉普拉斯变换		463
8.4	硬件特性	353	附录 B 复习题参考答案		473
8.5	采样速率的选择	356	附录 C Matlab 命令		479
8.6	离散化设计	357	索引		484
8.7	状态空间设计法	362			
8.8	历史展望	362			
小结		362			
复习题		363			
习题		363			
第 9 章 非线性系统		366			
9.1	引言与动机: 为什么研究 非线性系统	366			

反馈控制的概述与简史

反馈控制介绍

动态系统反馈控制是一个非常古老的概念，随着时间的推移其具备许多特性。其中心思想是通过测量动态系统的输出并反馈给某种形式的控制器，用于影响系统。反馈系统存在以下几种变化形式。

通过人来操纵机器运行的控制系统称为手动控制系统，例如，驾驶一辆汽车。只含有机器的控制系统称为自动控制系统，例如，利用恒温器来调节房间温度。抑制未知干扰来保持系统输出稳定的装置称为调节器，而设计系统用于跟踪一个参考信号称为跟踪或伺服系统。控制系统也可以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没有利用被控系统的输出的测量值，那么这个系统称为开环控制系统；如果对系统的输出信号进行测量，并反馈用于计算控制作用，则这个系统称为闭环控制或反馈控制系统。除了这些最基本的特性外，控制系统还存在着许多其他的重要特性。例如，我们主要考虑反馈当前时刻的测量信息，而不是未来的预测信息。然而，通过一个非常熟悉的例子可以说明这种假设所带来的局限性。当驾驶一辆汽车时，利用简单的反馈就相当于在浓雾中驾驶，只能看清车前面的一小段路，而看不清更远的位置。能利用前方路况信息的控制属于预测控制的范畴，这些信息显然有用，在可获得时要加以利用；然而，在本书所研究的大部分自动控制情况中，是无法观测到未来轨迹或干扰的。另外，控制设计者应该研究这个过程，看是否存在某些信息能够对跟踪的轨迹或所需抑制的干扰进行预测。若有这样的可能性，则设计者可以利用它来提供给控制系统一个超前的前馈作用。发电厂的锅炉的蒸汽压力控制就是一个实例。我们每天对电的需求已知，因此，电功率需求将要增加的信息可前馈到锅炉控制器来预测所需增加的蒸汽流量。

1

反馈控制的应用从没有像今天这样活跃。防碰撞自动着陆系统的利用以及未来卫星导航技术的应用，为我们具备在越来越拥挤的太空航行的能力带来一次大的变革。在计算机硬盘的磁性数据存储装置中，对读/写磁头的控制通常可达到微米数量级的跟踪误差，且运行速度可达到毫秒数量级。从手机到大型喷气式飞机，从洗衣机到如同小城一样大的炼油厂，控制对于系统的运行都是至关重要的。控制也应用于新兴的无人驾驶汽车和外科手术机器人系统等方面。这样的例子不胜枚举。实际上，许多工程师把此类控制称为隐式技术，因为许多控制装置和系统很重要而不能直观看到。毫无疑问，未来将看到工程师们创造出更富想象力的反馈控制。

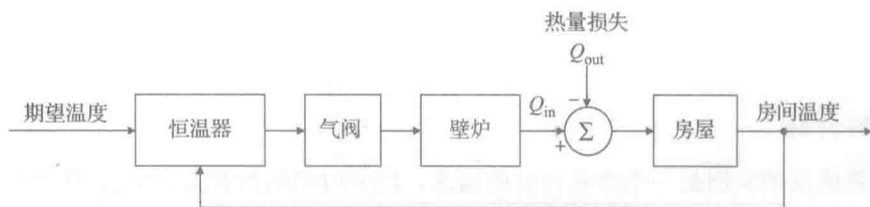
章节概述

本章首先用恒温器控制家用壁炉这一个简单熟悉的例子开启反馈控制的探索之旅。通过这个例子，可以了解控制系统的基本组成。在 1.2 节中的另一个例子——汽车巡航控制中，我们忽略系统动态，推导出基本静态方程，并给系统模型的各项参数赋值，进而对开环控制和反馈控制的性能进行比较分析。然后，1.3 节将介绍控制系统设计的关键要素。1.4 节将会介绍控制理论和设计的简史，以便了解本书的研究内容和发展状况。另外，后续各章都有介绍该章主题简史的小节。最后，1.5 节简要概述全书的内容和组织结构。

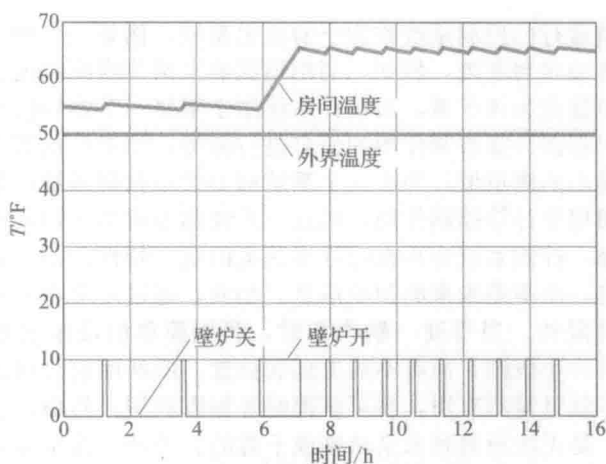
2

1.1 一个简单的反馈系统

反馈系统中的被控变量如温度或速度，通过传感器测量并将测量的信息反馈给控制器去影响这些被控变量。下面用恒温器控制家用壁炉这样一个常见的系统来简单说明这一原理，图 1.1 显示了系统的组成单元、各部分的连接，以及信息从一个部分到另一个部分的流向。



a) 房间温度控制系统的组成框图



b) 房屋温度和壁炉动作曲线

图 1.1 反馈控制

从图 1.1 中，我们很容易分析这个系统的工作过程。当系统工作时，假设恒温器所在房间的温度和外界的温度都明显低于参考温度（也叫设定值），则恒温器就会开始工作，控制逻辑打开气阀，点燃壁炉，此时房屋吸收热量 Q_{in} 的速率明显高于损失热量 Q_{out} 的速率。因此，房间的温度上升，当上升到稍高于恒温器的设定值时，壁炉熄灭，房间的温度开始朝着外界温度值下降。当下降到略低于设定值时，恒温器又开始工作，并且不断重复这个循环。房间温度随着壁炉不断循环开关变化的曲线如图 1.1 所示。外界温度保持在 50°F^\ominus ，恒温器的初始值设定为 55°F ，在上午 6 点时跃变到 65°F ，壁炉工作使温度上升到该值，此后温度如图 1.1 所示做周期变化^①。由于房屋的隔热性良好，所以在图中我们注意到温度随壁炉熄灭下降的速度要比点燃壁炉而上升的速度慢。从这个例子中，我们可知反馈的基本组成如图 1.2 所示。

这个反馈系统的核心部分是过程，它的输出就是被控量。在上面的例子中，过程就是房屋，它的输出就是房屋的温度，过程的干扰是通过墙壁、屋顶与较低的外界温度之间的热传导而导致的房屋热量损失 Q_{out} （向外流动的热量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。比如，一个装有双层隔热玻璃窗的隔热性好的房屋比

① $\frac{\theta}{^\circ\text{F}} = \frac{9}{5} \frac{t}{^\circ\text{C}} + 32$ ，其中 t 表示摄氏温度 ($^\circ\text{C}$)， θ 表示华氏温度 ($^\circ\text{F}$)。

② 注意壁炉根据规定的夜间时刻表在早上 6 点前已经工作了几分钟。

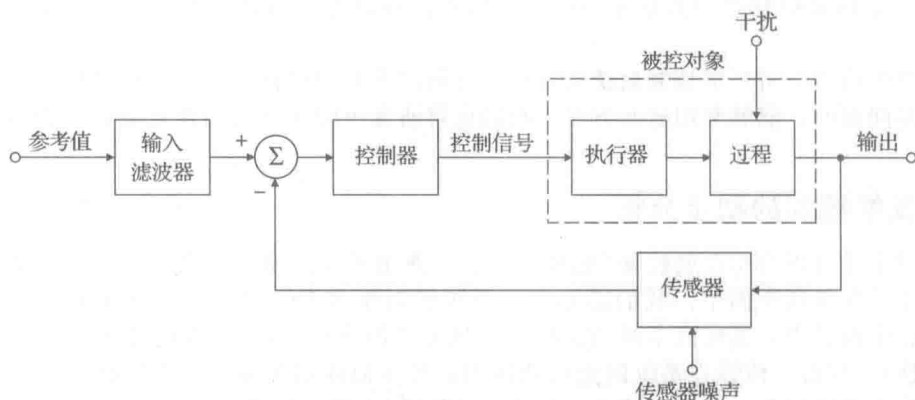


图 1.2 基本反馈控制的组成框图

其他房屋的温度容易控制。同样，想象中的具有控制能力的飞行器的设计与最终实现的性能有着天壤之别。通常，越早把控制问题引入到过程设计中得到的效果越好。执行器就是能够在过程中影响被控变量的装置，在上例中，燃气炉是执行器。实际上，壁炉通常设有喷射打火或点火机构、气阀、鼓风机，它们的开关动作取决于壁炉内的空气温度。这些细节说明了许多反馈系统由各个部分组成，而这些组成部分本身可能是另一个反馈系统[⊖]。执行器的核心问题是具有以满足要求的速度和范围快速改变过程输出的能力。壁炉必须能够提供比最坏的天气损失的热量更多的热量，而且能够快速散发，以使房屋的温度波动保持在一个小范围内。这时，功率、速度和可靠性比精度更重要。通常，过程与执行器紧密相连，控制设计的核心是要找到一个合适的输入或控制信号发送给执行器。过程和执行器组合在一起的部分称为被控对象，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，虽然基于空气压缩的气压控制器在过程控制中起到重要作用，但控制器主要处理的是电信号。随着数字技术的发展，以及各领域控制器需求的日益增加，高性价比及高灵活性使得数字信号处理器占据主导地位。图 1.1 中标注的恒温器用来测量房间的温度，在图 1.2 中称为传感器，它的输出不可避免地含有传感器噪声。传感器的选择和布局在控制设计中非常重要，因为有时候被控量的真实值和测量值不可能完全相同。例如，虽然我们希望能控制房屋的整体温度，但恒温器安放在一个特定的房间，这就有可能与其他房间的温度不同。例如，恒温器被设置为 68°F，但是被放在附近有壁炉的客厅里时，正在其他地方学习的人可能还会感觉到冷^{⊗⊗}。正如我们看到的，除了布局之外，传感器重要的特性还包括测量的精度、低噪声、可靠性以及线性性能等。传感器通常将物理变量转变成电信号后输入给控制器处理。一般的系统还包括一个输入滤波器，它的作用是将参考信号转变成电信号后再由控制器处理，在某些情况下，输入滤波器可以修改参考指令输入以改善系统响应。最后，系统中还有一个控制器，通过计算参考信号和传感器输出之间的差值，将系统误差输入给控制器。墙上的恒温器包括传感器、输入滤波器和控制器。几十年前，用户通过手动设置恒温器来保持房间温度。在过去的几十年间，加入微型计算机的恒温器能够存储超过一天、一周甚至更久的期望温度，恒温器获得了学

- ⊖ Jonathan Swift(1733)这样说过：“如博物学家所观察，一个跳蚤的身上还有更小的跳蚤在打它的主意，而后者还有更小的等着它们，如此以至循环。”
- ⊗ 装修房屋的厨房时，把烤箱靠墙放置，恒温器安放在墙的另一面，如果现在是很寒冷的天气，当有人在厨房里做晚餐时，除非重新安放恒温器，否则在其他地方学习的人仍然感觉到冷。
- ⊗⊗ 故事发生在一个炸药厂，新来的员工要手动控制过程中一个重要部分的温度，他被告知要把读数控制在 300°C 以下，在一次例行巡视中，检察人员意识到这一批材料过热，很危险，并发现这名工人把温度计放在冷水中，使得温度保持在 300°C 以下，他们在爆炸前及时撤离。寓意：有时候自动控制要比手动控制好。

习能力，能够知道期望的温度是多少，并且在某种程度上根据是否有人快要到家来设定温度[⊖]！

本书将给出分析反馈控制系统的方法，并阐述重要的设计技术。工程师们在应用反馈解决控制问题时，能够利用这些方法。我们也将研究反馈在补偿额外复杂性方面所特有的优点。

1.2 反馈控制的初步分析

通过定量分析汽车巡航控制(见图 1.3)这一熟悉系统的简化模型，来论证反馈控制的优点。为了分析这个例子，我们需要建立系统的数学模型，即各变量之间的定量关系形式。在这个例子中，忽略汽车的动态响应，只考虑稳态行为(在后续的章节里将重点讨论动态特性)。并且，假设在系统的速度范围内，各参数间的关系可近似成线性关系。在测得汽车在水平路面上行驶的速度为 65mile/h(英里/小时，1mile/h=1.609 344km/h)，且油门角度(控制变量 u)每改变 1° 后，就会使速度(输出变量 y)改变 10mile/h，因此图 1.4 所示位于 u 和 y 之间为数值 10 即被控对象的框图。通常，框图是用图形来显示系统的数学关系。通过观察汽车的上下坡运动，发现当坡度变化 1%时，速度变化为 5mile/h，因此在图 1.4 上端框中的数值 0.5 反映了坡度变化 1%产生的效果是油门角度变化 1° 所产生效果的一半。速度计可精确到 0.1mile/h，则认为它是精确的。在框图中，连接线代表传输信号，方框类似一个理想放大器，框中数值乘以输入信号就能得到其输出信号。对于两个或两个以上信号的求和，则把这些信号线同时指向一个求和器，求和器用中间带有求和符号 Σ 的圆圈表示，箭头边标注的代数符号(加或减)表示总的输出是加上或者减去这个输入信号。根据这些分析，当参考速度设定为 65mile/h 时，比较 1%的坡度变化在有无反馈给控制器的两种情况下对输出速度的影响。

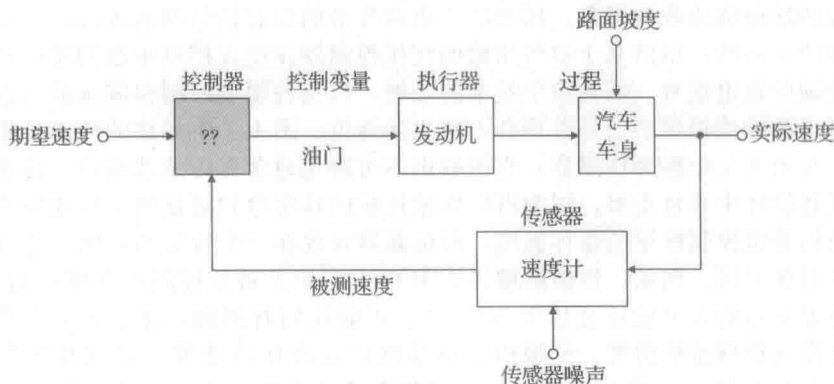


图 1.3 汽车巡航控制框图

首先讨论第一种情况，如图 1.5 所示，控制器没有使用速度计的读数而是设置为 $u=r/10$ ，其中， $r=65\text{mile/h}$ 为参考速度，这是一个开环控制系统的例子。开环就是指在框图中没有信号环绕的封闭路径或回路，也就是说，控制变量 u 与输出变量 y 无关。在这个简单的例子中，开环输出速度 y_{ol} 为

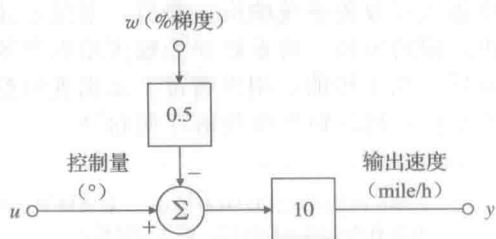


图 1.4 巡航控制被控对象框图

⊖ 传感器通过一个动作感应来确定是否有人在家，用户可以通过网络来控制相应的单元。最近刚被谷歌收购的 Nest 就是一个例子。详情见：www.nest.com。