

TURING

图灵电子与电气工程丛书

PEARSON
Prentice
Hall

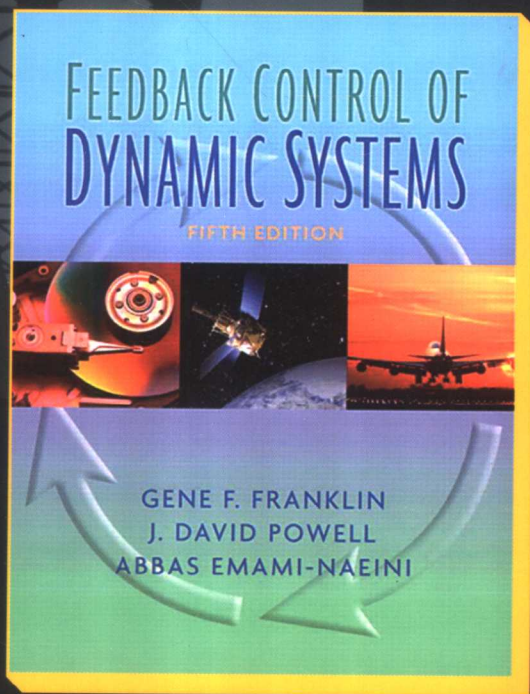
自动控制原理与设计

(第5版)

Feedback Control of Dynamic Systems

Fifth Edition

[美] Gene F. Franklin 著
J. David Powell
Abbas Emami-Naeini
李中华 张雨浓 译



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

TURING

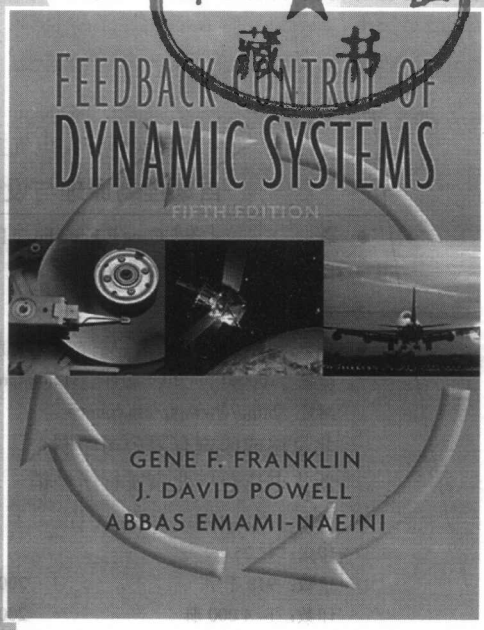
图灵电子与电气工程丛书

自动控制原理与设计

(第5版)

**Feedback Control of
Dynamic Systems**
Fifth Edition

Gene F. Franklin
[美] J. David Powell 著
Abbas Emami-Naeini
李中华 张雨浓 译



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理与设计: 第5版 / (美)富兰克林 (Franklin G. F.), (美)鲍威尔 (Powell J. D.), (美)那谟尼 (Nacini A. E.) 著; 李中华, 张雨浓译. —北京: 人民邮电出版社, 2007.11
(图灵电子与电气工程丛书)
ISBN 978-7-115-16638-8

I. 自… II. ①富…②鲍…③那…④李…⑤张…
III. ①自动控制理论②自动控制系统—系统设计 IV. TP13
TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 119052 号

内 容 提 要

本书是自动控制经典著作,内容紧密围绕自动控制系统的分析与设计理论展开,主要介绍了自动控制的动态模型、动态响应、基本特性,着重介绍了自动控制的几种常规设计技术,还涉及了非线性系统的分析与设计,并穿插了许多自动控制在 MATLAB 下的仿真实例。

本书可作为高等院校自动化及相关专业的高年级本科生和研究生的教材,还可供有关专业的教师、研究人员及从事自动化工作的工程技术人员参考。

图灵电子与电气工程丛书

自动控制原理与设计(第5版)

-
- ◆ 著 [美] Gene F. Franklin, J. David Powell, Abbas Emami-Naeini
译 李中华 张雨浓
责任编辑 朱 巍
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京铭成印刷有限公司印刷
新华书店总店北京发行所经销
 - ◆ 开本: 700 × 1000 1/16
印张: 43.25
字数: 948 千字 2007年11月第1版
印数: 1—4 000 册 2007年11月北京第1次印刷

著作权合同登记号 图字: 01-2006-3684 号

ISBN 978-7-115-16638-8/TN

定价: 79.00 元

读者服务热线: (010)88593802 印装质量热线: (010)67129223

版 权 声 明

Authorized translation from the English language edition, entitled: *Feedback Control of Dynamic Systems, Fifth Edition*, 0131499300 by Gene F. Franklin, J. David Powell and Abbas Emami-Naeini, published by Pearson Education, Inc., Copyright © 2006, 2002, 1994, 1991, 1986 by Pearson Education, Inc.

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 POSTS & TELECOM PRESS. Copyright © 2007.

本书中文简体字版由 Pearson Education Asia Ltd. 授权人民邮电出版社独家出版。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

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。

版权所有,侵权必究。

谨以此书献给

Gertrude、David、Carole、Valerie、Daisy、
Annika、Davenport、Malahat、Sheila 和 Nima

译者序

时至今日,各种自动化装置、机器人、无人工厂、办公自动化设备、农业自动化、家庭自动化等所形成的社会生产力,把人类社会推进到一个崭新的时代——自动化时代。虽然自动化装置的种类繁多并且应用领域十分广泛,但是如何分析和设计自动控制系统的基本概念和基本理论却是不变的。因此,控制工程师们需要对控制系统的特性和分析设计方法有基本的了解。另外,控制系统设计中所采用的许多技术和原理也在其他学科中有着广泛的应用。

本书在帮助读者掌握实际控制系统技术的全景过程中贯穿了由基本概念到具体应用的思想。众所周知,精通控制系统的具体分析和设计需要有一定的悟性。坚实的理论基础只是确保充分理解控制系统,更为重要的是,在实际工作中敏锐地判断系统的运行情况,进而思考改进系统性能的方法,而且要明白如何改进系统设计来得到期望的控制要求。本书的编排和讲解正是沿着这条有效的学习途径进行的,即在对问题有一个很好的理解的基础上,再提出有效的系统设计方案。

本书涵盖了自动控制理论的基础知识,重点强调了基本理论分析、应用和技术实践,具有以下鲜明的特点:

- 本书整合了自动化专业过去分散的专业课程,将经典自动控制原理、现代控制理论、数字控制技术和非线性系统理论中的基础知识全部囊括其中,知识体系清晰、内容丰富,适应当今社会对宽口径自动化专业学生的培养需求。
- 每章的开篇都提纲挈领地给出了本章的知识背景和控制要求,也给出了全章的主要内容结构分布,在每章末尾还给出了关键知识点的小结,有助于学生进一步理解所学知识,形成完整的知识体系。
- 本书在介绍自动控制基础分析和设计方法的同时,还以丰富的设计实例配以详实的设计步骤,让读者能充分体会到每一个设计细节,有利于快速地培养起学生的分析和设计控制系统的能 力。
- 配套网站(<http://www.scsolutions.com/feedbackcontrol.html>)提供了绘制本书中许多图形的计算机仿真程序集合和学习帮助文件。书中和配套网站提供的 MATLAB 仿真程序为读者提供了验证、分析和设计自动控制系统的范例,让读者能真实体验控制效果。

本书内容丰富、概念清晰、通俗易懂,是一部不可多得 的优秀教材。

本书的第 1 章、第 2 章和第 4 章由陆许明翻译,第 3 章和第 5 章由张介翻译,第 6

2 译者序

章由谭炎坤翻译,第7章由曾庆淡翻译,第8章和第9章由宋文婧翻译,第10章和附录由潘天鹭翻译。全书由李中华负责统稿、张雨浓负责审校。

由于译者水平所限,翻译不妥或错误之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

译者

前 言

本书这一版本依然针对控制理论的入门课程,并且保留了之前版本的优点。新版对描述反馈特征的第4章做了很大改动,内容安排更合乎逻辑,风格更为简约。本版还新增加了第9章非线性系统的内容,这一章把非线性问题零散的知识点集中在一起,组织成一个连贯的章节,并增加了部分新内容,第一次详细介绍这一重要领域。这种组织结构改善了之前把非线性系统内容随意散落在各个章节的情况。这对希望更早介绍这些内容的教师来说是很便利的。

本书的基本架构未变,依然包括利用根轨迹、频率响应和状态变量方程三种途径实现的设计分析,以及为阐明控制理论而精心准备的实例。跟过去一样,为了帮助学生检验学习效果,我们在每章的最后部分提供了复习题,并在书后附有答案。

在介绍设计方法的三个核心章节里,依然希望学生能够掌握基本的手工计算方法,并能快速绘制出根轨迹或者伯德图的草图作为设计指导。鉴于 MATLAB 软件在控制分析与设计中的广泛应用,本书较早介绍了如何使用 MATLAB。而且,鉴于越来越多的控制器在嵌入式计算机中实现,我们在第4章介绍了数字控制,并且在大量的反馈系统例子中对模拟控制器和数字控制器的效果进行了比较研究。一如从前,我们给出了一系列 MATLAB 的“m”文件用来输出本书的图形,这些文件可以在如下网页的 publications 栏目下找到:<http://www.scsolutions.com/feedbackcontrol.html>。

本书将实例研究放在第10章,其内容涉及计算机硬盘的读写头控制和用于集成电路制造工艺中快速热处理器的硅片温度控制。

本版内容根据教学规律进行了安排,有助于提高学生对控制理论的兴趣,并为教师应对反馈控制入门课程教学的挑战打下了坚实的基础。

应对挑战

在学习自动控制的过程中,学生所面对的一些挑战是长期存在的,另一些是近几年新出现的;有些挑战存在于他们整个的工科学习过程,有些则是这门相对复杂的课程中所独有的。无论挑战是已存在的还是新生的,普遍的还是特殊的,它们对本书的不断修订起到了非常关键的作用。下面逐一介绍这些挑战,并讨论我们的解决方法。

□ 挑战 必须掌握设计方法和分析工具

设计是工程尤其是控制系统的核心。学生们发现,有机会解决实际应用问题的设

设计课题会让人激动不已。但同时也会发现,由于设计问题陈述不清楚以及解决方案不唯一,设计并不容易。由于设计对学生固有的重要性和激励性,整本书都对设计问题给予了相当的重视,从头开始树立解决设计问题的信心。

在学习了建模和动态响应后,第4章将开始介绍设计问题。首先介绍的是反馈的基本思想,描述了它对扰动抑制、跟踪精度、参数变化时的鲁棒性的影响。随后,在根轨迹、频率响应和状态变量反馈技术的一致讨论中继续深入介绍设计方法。所有的论述旨在提供必要的知识,以找到一个在数学上便于理解的优秀反馈控制设计。

全书引用了大量的例子来比较不同设计方法所提供的设计技术的异同优劣。在集中研究实例的第10章,将以统一的方式采用所有方法来解决复杂的实际设计问题。

□ 挑战 新概念不断引入

控制是一个活跃的研究领域,因此,不断有新的概念、思想和技术涌入。其中一些内容很快就发展到每个控制工程师都必须掌握的程度。本书将同时满足学生掌握传统以及现代知识的双重要求。

在过去的每个版本中,我们都会尽力地平衡根轨迹、频率响应和状态变量设计法之间的学时分配。这一版继续强调对基本技巧的掌握,同时,也重视详细运算的计算机实现方法。考虑数字控制器在目前领域中的重要地位,我们还将提前介绍数据采样和离散控制器。虽然跳过这部分内容对全书的流畅性并无损害,但是我们认为,让学生了解计算机控制的广泛应用程度以及掌握计算机控制基本方法的简易性,是十分重要的。

□ 挑战 需要运用大量信息

大量的系统都要应用反馈控制,控制问题的解决方案不断增多,这意味着当今学习自动控制的学生必须掌握许多新的知识。学生们应如何在冗长复杂的理论学习中保持敏锐呢?如何确定重点和归纳总结?如何复习考试?帮助学生解决这些任务是第4版的准则,同样在第5版中会继续列出。

本书的特色环节如下。

特 点	举 例
每章以总览和概述开始。从整体上说明该章主题在这个学科中的位置,并简要概括该章的内容	第3章开始 见第54页至第55页
黑体段落显示,提示文章中的重要概念,也用来总结重要的设计程序	反馈的优点,见第152页
海报式章节归纳帮助学生复习并区分重点,简要地重申关键概念和结论	第2章小结 见第45页
设计辅助大纲。为方便查阅,将设计中和全书中用到的关系式集中列出	见参考文献后
复习题,位于每章的末尾,答案附书后,指导学生自学	第2章,见第45页

□ 挑战 自动控制的学生来自广泛的学科

控制可应用于工程中可想到的任何领域,因此自动控制具有跨学科的特性。因此,许多学校在各个传统学科中分设了控制导论课程,而另一些学校(例如斯坦福大学)开设了一系列可以供不同学科的学生学习的课程。然而,把实例限制于单个领域内,则牺牲了反馈的广度和影响力,因此覆盖应用的整个范围是必然的趋势。本书体现了自动控制的跨学科特性,为许多最普遍的技术提供素材以方便各学科学生使用。针对在状态转移分析方面有良好背景知识的电子工程学科的学生,我们在第2章介绍了机械运动方程的列写。而针对机械工程学生,我们在第3章回顾了用于控制理论的拉普拉斯变换和动态响应。另外,我们还简要介绍了其他技术。有时,我们忽略其推导过程,而从响应的角度运用易于理解的足够的物理描述,给出物理系统的运动方程。本书介绍的物理系统实例包括计算机磁盘驱动器的读写磁头、卫星跟踪系统、汽车发动机油一气比例调节和飞机的自动导航系统。

本书概要

本书共有10章和7个附录。一些章节的末尾使用▲标出了高级或增强的选学内容。基于上述内容的实例和问题也标注了▲。附录包括了背景资料和参考文献,如拉普拉斯变换表、复变量、矩阵理论以及各章末尾复习题的答案。

第1章介绍了反馈的基本思想以及重要的设计问题。这一章还介绍了从古老的过程控制到飞行控制和电子反馈放大器的控制理论简史。希望这份简史能够阐明该领域的发展过程,介绍对其发展起到重要作用的关键人物,以此激发学生的学习热情。

第2章简要地介绍了动态建模,涉及机械、电子、电机、流体以及热力学装置。这一章可以跳过,其出发点是作为复习要点来帮助学生理清参差不齐的基础知识,或者可完全根据学生的需要来处理。

第3章阐述了用于控制理论的动态响应。尤其对于电气工程专业的学生来说,这一章的大部分内容也已经学过了。极点位置与暂态响应间的关系,以及附加零点和极点对动态响应的影响,对许多学生来说还是新知识。动态系统的稳定性在本章也会涉及。这些都需要认真学习。

第4章介绍了反馈的基本方程和传递函数,以及灵敏度和互补灵敏度方程的定义。利用这些工具,可以通过扰动抑制、跟踪精度以及误差敏感度对开环和闭环控制进行对比。根据跟踪多项式参考信号或者抑制多项式扰动的能力,系统分类可与系统类型的概念一起描述。最后,介绍经典的比例、积分、微分(PID)控制结构,探索控制器参数对系统特性方程的影响。在该章末尾的选学部分还涉及了数字控制、PID整定和时间响应敏感度。

在第4章对反馈进行概述后,本书的核心内容,即基于根轨迹、频率响应和状态变量反馈的设计方法分别第5章、第6章和第7章进行介绍。

第 8 章更详细地开发了一些在数字计算机中实现反馈控制设计所需的工具。

第 9 章介绍非线性内容,涵盖运动方程的线性化方法、变量增益的零记忆非线性分析、描述方程的频率响应、相平面、李雅普诺夫稳定性定理和循环稳定标准。

在第 10 章里,我们将三种主要的方法整合在几个实例当中,并建立了一个可应用于现实控制设计的框架。

课程结构

本书结构灵活。多数控制专业的大一学生可能已掌握了动态方程和拉普拉斯变换,因此,第 2 章和第 3 章可用作复习。在 10 周的学期中,可以复习第 3 章,学习第 1 章、第 4 章、第 5 章、第 6 章。其中大部分的选学内容可以忽略。在第二个 10 周的学期里,可以顺利完成第 7 章和第 9 章的学习,包括选学的内容在内。若忽略选学的内容,可以选择第 8 章的部分内容进行学习。一个学期能够顺利掌握第 1 章至第 7 章,如有必要也可包含第 2 章、第 3 章的复习内容。如果时间有余,学完这些核心内容后,可以学习第 8 章数字控制的部分内容、第 9 章非线性的部分内容和第 10 章的一些实例研究。

全书也可以实行三段 10 周教学法,分为建模和动态响应(第 2 章、第 3 章)、经典控制理论(第 4 章、第 5 章、第 6 章)和现代控制理论(第 7 章至第 10 章)三个部分授课。

这两种基本的 10 周教学过程都已在斯坦福大学实践过,可应用于高年级的控制专业本科学生和没有学习过控制的航空航天类、机械工程和电子工程类一年级研究生。初级课程复习第 2 章、第 3 章并学习第 4 章至第 6 章。高级课程为研究生设计,复习第 4 章至第 6 章,并学习第 7 章至第 10 章。这些顺序安排,补充了研究生课程在线性系统方面的不足,而且是数字控制、非线性控制、最优控制、飞行器控制和智能产品设计的入门课程。许多的后续课程还包括了大量实验。在学习本课程之前,要求掌握动态系统或者电路分析和拉普拉斯变换的知识。

学习反馈控制课程的前提

本书针对所有工科专业高年级学生。对于第 4 章至第 7 章的核心内容,理解建模和动态响应是必备的。通过之前的物理学、电路和动态响应课程的学习,许多学生已经具有足够的背景知识来学习这门课程。对于需要复习的学生,第 2 章和第 3 章可以弥补这一漏洞。

理解矩阵代数是理解状态空间的基础。尽管通过之前的数学课,所有的学生都有这方面的知识,附录 C 还是列出了它的基本关系,对控制系统特定内容的运算也在第 7 章的开始部分给出。重点是线性动态系统和线性代数的关系。

补充

前述网页载有可以输出本书所有 MATLAB 图形的 m 文件,这些文件可以复制并由学生使用。

致谢

最后,我们向为反馈控制理论发展到今天这样激动人心的程度做出过贡献的学者,特别是给予我们巨大帮助和建议的学生、同事们致谢。尤其应该提到的是,我们在与斯坦福大学控制理论导论教师 A. E. Bryson、R. H. Cannon、D. B. DeBra、S. Rock、S. Boyd、C. Tomlin 和 P. Enge 的讨论过程中受益匪浅。

还要特别地感谢为本书几乎全部的习题提供答案的同学们。

G. F. F.

J. D. P.

A. E. -N.

加州斯坦福大学

目 录

第 1 章 反馈控制纵览及简单

历史回顾 1

1.1 简单的反馈系统 2

1.2 反馈的分析 5

1.3 历史简介 8

1.4 全书概述 13

小结 14

复习题 14

习题 15

第 2 章 动态模型 17

2.1 机械系统动力学 18

2.2 电路模型 27

2.3 电机系统模型 30

▲2.4 热和流体流动模型 34

2.4.1 热流 34

2.4.2 不可压缩流体的流动 37

▲2.5 复杂机械系统 42

2.5.1 平移和旋转系统 42

2.5.2 分布参数系统 45

小结 46

复习题 47

习题 47

第 3 章 动态响应 56

3.1 拉普拉斯变换回顾 57

3.1.1 卷积响应 57

3.1.2 传递函数与频率响应 59

3.1.3 拉普拉斯变换 63

3.1.4 拉普拉斯变换的性质 65

3.1.5 部分分式求拉普拉斯反 变换 67

3.1.6 终值定理 68

3.1.7 应用拉普拉斯变换解决 问题 70

3.1.8 极点和零点 71

3.1.9 用 MATLAB 分析线性 系统 72

3.2 系统模型图 76

3.2.1 框图 76

3.2.2 利用 MATLAB 进行框图 化简 79

3.3 极点配置的影响 80

3.4 时域特性 86

3.4.1 上升时间 87

3.4.2 超调量和峰值时间 87

3.4.3 调节时间 88

3.5 零点和附加极点的影响 90

3.6 幅值变换与时间变换 95

3.6.1 幅值变换 95

3.6.2 时间变换 96

3.7 稳定性 97

3.7.1 线性时不变系统的稳定性 97

3.7.2 劳斯稳定判据 98

▲3.8 由实验数据建立模型 104

▲3.9 梅森公式与信号流图 105

小结 109

复习题 110

习题 111

第4章 反馈的基本特点	125	5.2.2 绘制根轨迹规则总结	189
4.1 控制的基本方程	126	5.3 根轨迹应用举例	190
4.1.1 瓦特问题:干扰抑制	128	5.4 选取参数值	201
4.1.2 布莱克问题:系统增益 对参数变化的灵敏度	130	5.5 运用动态补偿进行设计	203
4.1.3 传感器的噪声引起的 矛盾	131	5.5.1 超前补偿	204
4.1.4 雷达问题:跟随一个变 化的参考信号	132	5.5.2 滞后补偿	209
4.2 稳态误差的控制:系统类型	133	5.5.3 超前滞后补偿	210
4.2.1 参考输入作用下的系统 类型:单位反馈的情形	133	5.5.4 模拟和数字补偿的实现	211
4.2.2 参考输入作用下的系统 类型:一般情形	136	5.6 根轨迹法设计实例	213
4.2.3 干扰输入作用下的系统 类型	138	5.7 扩展根轨迹法	218
4.3 动态误差的控制:PID控制	141	5.7.1 绘制负(0°)根轨迹规则	219
4.3.1 比例控制(P)	141	5.7.2 考虑两个参数的情况	221
4.3.2 比例加积分控制(PI)	141	5.7.3 时间延迟	223
4.3.3 比例积分微分控制(PID)	142	小结	225
4.4 基本反馈概念的扩展	144	复习题	227
4.4.1 控制器的数字实现	144	习题	227
▲4.4.2 PID控制器参数的Z-N 整定法	150	第6章 频率响应设计法	242
▲4.4.3 误差常数的Truxal 公式	154	6.1 频率响应	243
▲4.4.4 时间响应对参数变化的 灵敏度	155	6.1.1 伯德图法	248
小结	159	6.1.2 稳态误差	258
复习题	160	6.2 临界稳定	259
习题	160	6.3 奈奎斯特稳定性判据	261
第5章 根轨迹法	175	6.3.1 幅角原理	261
5.1 基本反馈系统的根轨迹	176	6.3.2 在控制设计中的应用	262
5.2 绘制根轨迹的指导原则	180	6.4 稳定裕度	270
5.2.1 绘制正(180°)根轨迹规则	182	6.5 伯德增益—相位关系	276
		6.6 闭环频率响应	280
		6.7 补偿环节	281
		6.7.1 PD补偿	282
		6.7.2 超前补偿	282
		6.7.3 PI补偿	291
		6.7.4 滞后补偿	292
		6.7.5 PID补偿	296
		6.7.6 设计的考虑因素	299
		▲6.8 频率特性的其他图示方法	301
		6.8.1 尼科尔斯图	301
		6.8.2 逆奈奎斯特图	304

▲6.9 根据灵敏度函数定义的性能指标	305	▲7.11 回路传递恢复(LTR)	424
6.10 时滞环节	312	▲7.12 有理传递函数的直接设计	428
小结	314	▲7.13 含纯滞后时间的系统设计	431
复习题	316	小结	435
习题	316	复习题	436
		习题	438
第7章 状态空间设计	335	第8章 数字控制	455
7.1 状态空间设计法的优点	336	8.1 数字化	456
7.2 状态空间中的系统描述	337	8.2 离散系统的动态分析	458
7.3 框图和状态空间	342	8.2.1 z 变换	458
7.4 状态方程的分析	345	8.2.2 z 逆变换	459
7.4.1 框图与标准型	345	8.2.3 s 与 z 的关系	461
7.4.2 从状态方程求解动态响应	355	8.2.4 终值定理	462
7.5 全状态反馈的控制规律设计	360	8.3 仿真设计	464
7.5.1 寻找控制规律	361	8.3.1 零点匹配法	467
7.5.2 引入全状态反馈的参考输入	368	8.3.2 修正的零点匹配法	469
7.6 优良设计的极点位置的选择	371	8.3.3 几种数字逼近法的比较	470
7.6.1 主导二阶极点	372	8.3.4 仿真设计法的应用范围	471
7.6.2 对称根轨迹法(SRL)	373	8.4 硬件特征	471
7.6.3 几种方法的评论	380	8.4.1 模数(A/D)转换器	472
7.7 估计器设计	380	8.4.2 数模(D/A)转换器	472
7.7.1 全阶估计器	381	8.4.3 抗混叠预滤波器	472
7.7.2 降阶估计器	386	8.4.4 计算机	473
7.7.3 估计器极点的选择	388	8.5 采样速率的选择	474
7.8 补偿器设计:结合控制规律和估计器	391	8.5.1 跟踪效率	475
7.9 对含估计器的系统引入参考输入	401	8.5.2 抑制扰动	475
7.9.1 引入参考输入的一般结构	403	8.5.3 抗混叠预滤波器的影响	476
7.9.2 选择增益	410	8.5.4 异步采样	477
7.10 积分控制和鲁棒跟踪	411	▲8.6 离散设计	477
7.10.1 积分控制	411	8.6.1 分析工具	477
▲7.10.2 鲁棒跟踪控制:误差空间法	414	8.6.2 反馈特性	479
▲7.10.3 扩展估计器	421	8.6.3 离散设计举例	479
		8.6.4 设计的离散分析	481
		▲8.7 状态空间设计方法	483
		小结	488
		复习题	490
		习题	490

第 9 章 非线性系统	499	10.2 卫星姿态控制设计	553
9.1 引言和动机:为什么学习非线性系统	500	10.3 波音 747 飞机的侧面和纵向控制	565
9.2 线性化分析	501	10.3.1 偏移阻尼器	570
9.2.1 小信号分析的线性化	502	10.3.2 姿态保持自动导航仪	576
9.2.2 通过非线性反馈进行线性化	505	10.4 汽车引擎的油—气比控制	581
9.2.3 通过反向非线性进行线性化	506	10.5 硬盘的读/写磁头组件控制	587
9.3 用根轨迹法进行等效增益分析	507	10.6 半导体晶片制造中的快速热处理器控制系统	593
9.4 用频率响应分析等效增益:描述函数	515	小结	604
▲9.5 基于稳定性的分析和设计	524	复习题	605
9.5.1 相平面	524	习题	606
9.5.2 李雅普诺夫稳定性分析	529	附录 A 拉普拉斯变换	615
9.5.3 圆判据	535	附录 B 复变量回顾	627
小结	540	附录 C 矩阵理论概述	635
复习题	540	附录 D 能控性和能观性	643
习题	541	附录 E 极点配置的阿克曼公式	649
第 10 章 控制系统设计:原理与实例研究	548	附录 F MATLAB 命令	652
10.1 控制系统设计概述	548	附录 G 章末复习题答案	654
		参考文献	666

第 1 章 反馈控制纵览及简单历史回顾

自动控制介绍

动态系统的控制是一个非常普通的概念,它具有很多特性。如果一个系统由人来操作机器,例如开汽车,那么称为人工控制(**manual control**)。如果一个系统仅由机器构成,例如用恒温器调节室内温度,那么就称为自动控制(**automatic control**)。用于抑制各种未知干扰信号、保持输出稳定的系统称为调节器(**regulator**),而用于跟踪某个参考信号的系统则称为跟踪(**tracking**)系统或伺服(**servo**)系统。控制系统还可以根据计算控制信号所使用的信息进行划分。如果控制器在计算控制信号时没有使用系统输出的测量信号,则称这个系统为开环控制(**open-loop control**)。如果测量了系统输出信号并反馈用于控制运算,则称这个系统是闭环控制或反馈控制(**feedback control**)。除了这些最基本的特性之外,控制系统还有很多重要的特点。例如,在本书中我们主要关注的是可以用线性(**linear**)、时不变(**time-invariant**)方程描述的控制过程,尽管当信号相当大时所有的物理过程都是非线性的,而且如果观察的时间足够长,物理过程的各种特性也会随时间的变化而变化。另外,我们考虑的反馈主要针对输出,但是下面一个常见的事例会表明它存在巨大局限性。在开车的时候,存在应用反馈的一个简单情形:在大雾中开车,人只能看清靠近车前的一小部分路面,而不能看到更远的情况。看前面的路就是一种预测控制的形式,这种预测的信息显然是非常有用的。如果可能,我们就应该充分地利用这种信息,但在本书研究的大部分自动控制系统的例子中,观测未来的运动轨迹或干扰都是不可能的。不管怎么样,控制设计者都应该首先研究具体的控制过程,观察能否用某种传感器预测系统需要跟踪的轨迹或需要抑制的干扰信号。如果可能,控制设计者可以将它作为早期的预测信号,并前馈(**feed forward**)给控制系统。例如对发电装置中水箱的蒸汽压力进行控制。我们可以测量外界对输出功率的需求,然后将信息前馈到水箱控制器,预先增大蒸汽的流动量,从而提高系统响应的速度。

全章概述

在这一章,我们先举一个简单而常见的例子来介绍反馈控制:用恒温器控制家