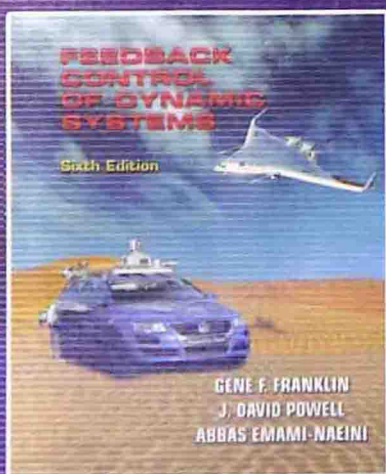


自动控制原理与设计 (第六版)

Feedback Control of Dynamic Systems
Sixth Edition



[美] Gene F. Franklin
J. David Powell 著
Abbas Emami-Naeini

李中华 等译



国外计算机科学教材系列

自动控制原理与设计 (第六版)

Feedback Control of Dynamic Systems
Sixth Edition

Gene F. Franklin

[美] J. David Powell 著

Abbas Emami-Naeini

李中华 等译



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是自动控制领域的经典著作,以自动控制系统的分析和设计为主线,在回顾自动控制系统动态响应和反馈控制的基本特性基础上,重点介绍了自动控制系统的3种主流设计方法,即根轨迹设计法、频率响应设计法和状态空间设计法。此外,还阐述了非线性系统的分析与设计,给出了一系列经典控制系统设计实例。全书在阐述自动控制原理和设计方法的过程中,适时地穿插 MATLAB 仿真源代码和仿真实验结果。

本书可作为高等院校自动化、电气工程、机电自动化及相关专业的高年级本科生和研究生的教材,还可供从事半导体制造、汽车控制、宇航自动化、运动控制、机器人、化工自动化等相关领域的教师、科研人员、工程技术人员作为参考用书。

Authorized translation from the English language edition, entitled Feedback Control of Dynamic Systems, Sixth Edition, ISBN 9780136019695 by Gene F. Franklin, J. David Powell and Abbas Emami-Naeini, published by Pearson Education, Inc., Copyright © 2010 Pearson Education.

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 PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY Copyright © 2014.

本书中文简体版专有出版权由 Pearson Education(培生教育出版集团)授予电子工业出版社。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:01-2011-7697

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理与设计:第6版/(美)富兰克林(Franklin, G. F.)等著;李中华等译.

北京:电子工业出版社,2014.7

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

国外计算机科学教材系列

ISBN 978-7-121-23272-5

I. ①自… II. ①富… ②李… III. ①自动控制理论-高等学校-教材 ②自动控制系统-系统设计-高等学校-教材 IV. ①TP13 ②TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 105226 号

策划编辑:马 岚

责任编辑:李秦华

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

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

开 本:787 × 1092 1/16 印张:38.75 字数:1042 千字

版 次:2014 年 7 月第 1 版(原著第 6 版)

印 次:2014 年 7 月第 1 次印刷

定 价:89.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

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

服务热线:(010)88258888。

译者序

今天,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、家庭自动化等形成的社会生产力,在物联网技术革新和产业浪潮助推下,把人类社会引领到一个崭新的时代——智能自动化时代。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一个基本的认识 and 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设计技术的全景过程中,融会贯通了由基本概念到实际应用的思想。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和洞察力。坚实的理论基础只是确保充分地理解控制系统,更为重要的是,在实际工作中要能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满足期望的控制要求。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理解的基础上,再提出有效的系统设计方案,并辅之以必要的仿真实验进行验证设计的结果。

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、应用设计和技术案例实践,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,将经典自动控制理论、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全章所讲述主题的发展历史,并对关键的知识点及时地进行了小结,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的分析方法的同时,还以丰富的设计实例配以翔实的设计步骤,特别是第10章提供的来自实际问题的丰富而系统的案例研究,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能力。
- 配套网站(<http://www.FPE6e.com>)^①提供了绘制本书中一系列图形的计算机仿真程序和学习帮助文件。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,让读者能够真实地体验到控制效果。

本书的第1章和第2章由张拥杰翻译,第3章和第4章由霍利超翻译,第5章和第9章由黄桂英翻译,第6章和第8章由刘贻杰翻译,第7章由刘佰兰翻译,第10章和附录由陈夏翻译。颜杰、李坚明、段鹏斌、欧阳灿参与了本书译稿的整理和校对工作。全书由李中华负责统稿、审校。

由于水平所限,翻译不妥或错误之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

另外,在本书付印之前,我们得到了原书作者提供的勘误表,因而在最短的时间内对其进行了逐一订正,不尽之处请谅解。

^① 若由于网络原因无法打开此网址,读者也可登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>)注册下载配套资源——编者注。

前 言

本书第六版依然致力于控制理论的入门课程，并且保留了过去版本的最佳特点。在新版中，我们实质上重写了描述反馈基本特性的第4章，使得内容安排更合乎逻辑顺序，组稿方式更为有效。还更新了使用计算机辅助设计方法的内容，以更充分地反映当今的设计是如何实现的。同时，我们还配备了控制系统工程师，以更好地指导和检验计算机的计算结果。在内容的更新方面，对MATLAB的使用也进行了更新，包括了一些最新的软件功能。我们保留了第10章的案例研究，并增加了关于新兴的生物工程领域的新案例。在每一章的最后增加了一个小节，用于描述相关技术的发展历史，这是为了阐述这些概念是如何提出的。

本书的基本架构保持不变，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案例。跟过去一样，为了帮助学生检验学习效果，在每章的末尾提供了复习题，并在书后附有答案。

在介绍设计方法的三个核心章节里，我们依然希望学生能够掌握基本的手工计算方法，并且能够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，本书较早地引入了MATLAB的使用。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章中还介绍了数字控制，并且在大量的实例中对使用模拟控制器和数字控制器的反馈系统响应进行了比较研究。与以前一样，给出了一系列的MATLAB文件(包括m文件和Simulink仿真文件)用来输出本书的图形。这些可用的文件，可以通过网站找到。

对于Simulink文件，通过相同网站上的链接可以获得等效的LabView文件。

我们删除了一些对于介绍控制设计入门知识帮助不大的内容。然而，在意识到有些教师仍有可能讲授这些内容或者有些学生想要学习这部分内容，因此，将这部分内容放到了网站上。仅在目录中提供了相关题目。

第六版的内容安排符合教育学原理，为学习控制理论提供了清晰的动机，并为应对教学挑战打下坚实的基础。

教育挑战

在反馈控制学习中，学生面对的有些挑战是长期存在的，而有些挑战是近几年才新出现的。有些挑战伴随着他们的整个工科学习过程，而有些挑战则是这门相对复杂的课程中所独有的。无论这些挑战是现存的还是新生的，普通的还是特殊的，它们对本书的不断修订都是非常关键的。下面介绍几个教育挑战，并讨论我们的解决方法。

• 挑战 学生必须掌握设计和分析方法

设计是工程尤其是控制系统的核心工作。学生们将发现，有机会解决实际应用问题的设计课题令人激动不已。但同时也将发现，由于设计问题给定的描述不足以及解决方案的不唯一，所以导致设计变得困难起来。鉴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，从头开始就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、对参数变化的鲁棒性影响。随后，在关于根轨迹、频率响应和状态变量反馈方法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良反馈控制设计。

全书引用了大量的实例来比较或者对比采用不同设计方法得到的设计方案。在集中介绍案例研究的第10章，我们将采用所有的方法来解决复杂的实际设计问题。

• 挑战 不断地将新理念引入到控制中

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会发展成每个控制工程师都必须掌握的技术。本书将同时满足学生掌握传统和现代知识的双重要求。

在过去的每一个版本中，我们都会尽力地赋予根轨迹、频率响应和状态变量设计法对于控制的同等重要性。这一版继续强调对基本方法的掌握，同时，也重视用于详细运算的计算机实现方法。考虑到数字控制器在目前控制领域中的重要地位，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计算机控制基本方法掌握的简易性，这是十分重要的。

• 挑战 学生需要管理大量的信息

大量的系统应用到反馈控制，而且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。学生们应该如何冗长复杂的理论学习中保持敏锐性呢？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四版和第五版的准则，同样也是第六版的准则。现将本书的特点列举如下。

特点

1. 章节开篇。每章以主题介绍和全章概述作为开始，从整体上介绍该章的主题在学科中的位置，并简要地概括该章各个小节的内容。
2. 页边注解^①。页边注解有助于提醒学生浏览每章的重点，指出重要的定义、公式和概念。
3. 加框显示。加框显示用于识别文中的重要概念。它们也用于总结重要的设计步骤中。
4. 章节小结。海报式的章节小结，简要地重申关键的概念和结论，有助于学生复习并区分重点。
5. 设计辅助大纲。为方便查阅，将在设计和全书中用到的关系式集中地列出。
6. 蓝色强调。使用蓝色显示意义特别。(1)强调有用的教学特点；(2)强调在方框图中的特殊组件；(3)区分图中的曲线；(4)使物理系统的图像看起来更真实。
7. 复习题。在每章的末尾给出复习题，并将答案附于书后，用于指导学生自学。

• 挑战 学习反馈控制的学生来自不同的学科

控制可应用于工程中可以想到的任何领域，因此反馈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别开设了控制导论课程，而另一些学校(如斯坦福大学)开设了一系

^① “页边注解”和“蓝色强调”系指原英文版本的排版方式。在本翻译版本做了一些技术处理——编者注。

列供不同学科学生学习的课程。然而,把实例限制在单一领域,这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。本书体现了反馈控制的跨学科特性,为许多最普遍的技术提供素材以方便各学科的学生使用。特别地,针对在变换分析方面有良好背景知识的电气工程学科的学生,我们在第2章介绍了机械运动方程。而针对机械工程师,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,还简要地介绍了其他的技术。有时我们忽略了其推导过程,而是从响应的角度,运用易于理解足够的物理描述来列写物理系统的动态方程。本书介绍的物理系统实例,包括计算机磁盘驱动器的读/写磁头控制、卫星跟踪系统、汽车引擎燃料空气比例控制和飞机自动导航系统。

内容提要

全书内容共分10章和3个附录。在一些章节的末尾,使用 Δ 标注了高级的或增强的选学内容。在网站上还有附加的详细资料。基于上述内容的实例和问题也被标注了 Δ 。附录包括了背景资料和参考文献,如拉普拉斯变换表、每章末尾复习题的答案以及MATLAB命令列表。网站上的附录包括复数变量综述、矩阵理论综述,有关状态空间设计的一些重要结果、MATLAB中RLTOOL命令的用法指导以及选学内容支持材料或几个章节的扩展知识。

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章简要介绍了动态模型,涉及机械、电气、机电、流体以及热力学装置。这一章是可以跳过的,或者可完全根据学生的需要来处理,其出发点是作为复习要点来帮助学生厘清参差不齐的基础知识。

第3章阐述了用于控制理论的动态响应。尤其是对于电气工程专业的学生,这一章的大部分内容已经学习过了。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,对于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,以及灵敏度函数的定义。利用这些工具,可以通过扰动抑制、精度跟踪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,对系统分类和系统类型的概念一起做了描述。最后,介绍了经典的比例、积分、微分(PID)控制结构,讨论了控制器参数对系统特性的影响。在该章末尾的选修部分涉及了数字控制。

在第4章对反馈进行讲述后,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,分别在第5章至第7章进行介绍。

第8章更详细地开发一些工具,有助于在数字计算机中实现反馈控制设计。但是,对于用数字计算机实现反馈控制的完整处理,读者需要参阅Franklin、Powell和Workman编写的同步教材*Digital Control of Dynamic System*(Ellis-Kagle Press, 1998)。

第9章介绍了非线性内容,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、描述函数的频率响应、相平面、李雅普诺夫稳定性定理和圆稳定性判据。

第10章将三种主要的设计方法综合应用在几个案例研究中,建立了一个可应用于实际问题控制设计的设计框架。

课程结构

本书结构灵活。大多数初学控制理论的学生都掌握了动态方程和拉普拉斯变换。因此，第2章和第3章的大部分对于他们可以起到复习的作用。用10周时间来复习第3章，以及第1章、第4章、第5章和第6章的全部内容，这是可能的。其中大部分的选学内容都可以跳过。在第二个10周的学习中，可以顺利地完成了第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，在学完这些核心内容后，可以学习第8章关于数字控制的部分内容、第9章关于非线性的部分内容和第10章的实例研究。

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(第4章至第6章)和现代控制(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学本科生和没有学习过控制的航空航天类、机械工程类和电气工程类的一年级的研究生。初级课程为复习第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，包括复习第4章至第6章，并学习第7章至第10章。这些顺序化的安排，弥补了研究生课程在线性系统方面的不足，而且它们是数字控制、非线性控制、最优控制、飞行器控制和智能产品设计的预备课程。许多的后续课程还包括了大量的实验。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。

反馈控制课程的预备知识

本书针对所有工科专业的高年级学生。对于第4章至第7章的核心内容，理解建模和动态响应的预备知识是必需的。通过过去的物理学、电路和动态响应等方面的概念学习，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。尽管通过过去的数学课，所有的学生都具备这方面的知识，但是，在网上的附录WE列写了一些基本的关系式，对控制系统需要的特定知识也在第7章开始处给出。这里需要强调的是线性动态系统和线性代数之间的关系。

补充

前面提到的网站包括有可以用来输出本书所有MATLAB图形的m文件和mdl文件，这些文件可以根据需要进行复制和使用。具有完整习题答案的教师手册也是可用的^①。网站同样包括了高级的内容和附录。

^① 有关教师手册的获取方法请参阅“目录”后所附的“教学支持说明”——编者注。

致谢

最后,我们向为反馈控制理论发展到今天这个水平做出过贡献的学者,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、Jr.、R. H. Cannon、Jr.、D. B. DeBra、S. Rock、S. Boyd、C. Tomlin、P. Enge 和 C. Gerdes 的讨论过程中受益匪浅。其他帮助过我的同事还有 D. Fraser、N. C. Emami、B. Silver、M. Dorfman、D. Brennan、K. Rudie、L. Pao、F. Khorrami、K. Lorell 和 P. D. Mathur。

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。

Gene F. Franklin

J. David Powell

Abbas Emami-Naeini

斯坦福大学,加利福利亚

目 录

第 1 章 反馈控制概述及其历史回顾	1
1.1 简单的反馈系统	2
1.2 反馈分析	4
1.3 历史简介	7
1.4 全书概述	11
本章小结	12
复习题	12
习题	13
第 2 章 动态模型	15
2.1 机械系统动力学	16
2.1.1 平移运动	16
2.1.2 旋转运动	20
2.1.3 旋转和平移的组合	25
2.1.4 分布参数系统	28
2.1.5 小结: 推导刚体的运动方程	28
2.2 电路模型	29
2.3 机电系统模型	31
△2.4 热和液体流动模型	35
2.4.1 热流动	35
2.4.2 不可压缩液体的流动	37
2.5 历史回顾	41
本章小结	43
复习题	44
习题	44
第 3 章 动态响应	51
3.1 拉普拉斯变换回顾	52
3.1.1 卷积响应	52
3.1.2 传递函数与频率响应	56
3.1.3 拉普拉斯变换	61
3.1.4 拉普拉斯变换的性质	63
3.1.5 部分分式法求拉普拉斯反变换	64
3.1.6 终值定理	66
3.1.7 应用拉普拉斯变换解决问题	67
3.1.8 极点和零点	69

3.1.9	用 MATLAB 分析线性系统	70
3.2	系统建模图	73
3.2.1	方框图	73
3.2.2	利用 MATLAB 进行方框图化简	76
3.3	极点配置的影响	77
3.4	时域特性	83
3.4.1	上升时间	83
3.4.2	超调量和峰值时间	84
3.4.3	调节时间	85
3.5	零点和附加极点的影响	86
3.6	稳定性	93
3.6.1	有界输入和有界输出稳定性	93
3.6.2	线性时不变系统的稳定性	94
3.6.3	劳斯稳定性判据	95
△3.7	由实验数据建立模型	101
3.7.1	由瞬态响应数据建立模型	102
3.7.2	由其他数据建立模型	105
△3.8	幅值变换与时间变换	105
3.8.1	幅值变换	105
3.8.2	时间变换	106
3.9	历史回顾	107
	本章小结	107
	复习题	108
	习题	109
第 4 章	反馈分析的基本概念	122
4.1	控制系统的基本方程	123
4.1.1	稳定性	124
4.1.2	跟踪性	125
4.1.3	校正性	125
4.1.4	灵敏度	126
4.2	对于多项式输入的稳态误差控制: 系统类型	128
4.2.1	对于跟踪的系统类型	129
4.2.2	用于校正和干扰抑制的系统类型	132
4.3	PID 控制器	135
4.3.1	比例控制(P)	135
4.3.2	比例积分控制(PI)	136
4.3.3	比例积分微分控制(PID)	137
4.3.4	PID 控制器的 Z-N(Ziegler-Nichols) 整定法	140
4.4	数字控制简介	143

4.5	历史回顾	148
	本章小结	149
	复习题	150
	习题	151
第5章	根轨迹设计法	161
5.1	基本反馈系统的根轨迹	162
5.2	绘制根轨迹的原则	165
5.2.1	绘制正(180°)根轨迹的规则	167
5.2.2	绘制根轨迹规则小结	171
5.2.3	参数值的选取	171
5.3	根轨迹图解举例	173
5.4	使用动态补偿的设计	182
5.4.1	使用超前补偿的设计	183
5.4.2	使用滞后补偿的设计	185
5.4.3	使用陷波补偿的设计	187
5.4.4	模拟和数字补偿的实现	188
5.5	使用根轨迹法的设计实例	191
5.6	根轨迹法的扩展	196
5.6.1	绘制负(0°)根轨迹的规则	196
5.6.2	考虑两个参数的情况	198
△5.6.3	时间延迟	199
5.7	历史回顾	201
	本章小结	203
	复习题	204
	习题	204
第6章	频率响应设计法	217
6.1	频率响应	218
6.1.1	伯德图法	223
6.1.2	稳态误差	232
6.2	临界稳定	233
6.3	奈奎斯特稳定性判据	235
6.3.1	幅角原理	235
6.3.2	在控制设计中的应用	236
6.4	稳定裕度	244
6.5	伯德增益-相位关系	250
6.6	闭环频率响应	253
6.7	补偿	254
6.7.1	PD补偿	254
6.7.2	超前补偿	255

6.7.3	PI 补偿	263
6.7.4	滞后补偿	264
6.7.5	PID 补偿	268
6.7.6	设计的考虑因素	272
△6.7.7	灵敏度函数性能指标	273
△6.7.8	灵敏度函数的设计限制	277
△6.8	时滞	279
△6.9	数据的其他表示	280
6.9.1	尼科尔斯图	281
6.10	历史回顾	283
	本章小结	284
	复习题	286
	习题	286
第 7 章	状态空间设计法	303
7.1	状态空间的优点	304
7.2	状态空间中的系统描述	305
7.3	方框图和状态空间	309
	状态空间的时间和幅值换算	311
7.4	状态方程的分析	312
7.4.1	方框图与标准型	312
7.4.2	从状态方程求解动态响应	321
7.5	全状态反馈的控制规律设计	326
7.5.1	寻找控制规律	327
7.5.2	引入全状态反馈的参考输入	333
7.6	优良设计的极点位置选择	336
7.6.1	主导二阶极点	337
7.6.2	对称根轨迹(SRL)	338
7.6.3	两种方法的评论	344
7.7	估计器设计	344
7.7.1	全阶估计器	344
7.7.2	降阶估计器	349
7.7.3	估计器极点选择	352
7.8	补偿器设计: 结合控制规律和估计器	354
7.9	带有估计器的参考输入	362
7.9.1	参考输入的一般结构	363
7.9.2	选择增益	370
7.10	积分控制和鲁棒跟踪	371
7.10.1	积分控制	371
△7.10.2	鲁棒跟踪控制: 误差空间法	373

△7.10.3 扩展估计器	381
△7.11 回路传递恢复(LTR)	383
△7.12 使用有理传递函数的直接设计	387
△7.13 含纯时滞的系统设计	390
7.14 历史回顾	393
本章小结	394
复习题	396
习题	397
第8章 数字控制	411
8.1 数字化	411
8.2 离散系统的动态分析	413
8.2.1 z 变换	413
8.2.2 z 逆变换	414
8.2.3 s 与 z 的关系	416
8.2.4 终值定理	417
8.3 离散等效设计	419
8.3.1 零极点匹配法(MPZ)	421
8.3.2 改进的零极点匹配法(MMPZ)	424
8.3.3 比较三种数字逼近方法	424
8.3.4 离散等效设计法的应用限制	425
8.4 硬件特性	425
8.4.1 模数(A/D)转换器	426
8.4.2 数模(D/A)转换器	426
8.4.3 抗混叠预滤波器	426
8.4.4 计算机	427
8.5 采样速率的选择	428
8.5.1 跟踪有效性	428
8.5.2 扰动抑制	429
8.5.3 抗混叠预滤波器的作用	429
8.5.4 异步采样	430
△8.6 离散设计	430
8.6.1 分析工具	430
8.6.2 反馈特性	432
8.6.3 离散设计举例	432
8.6.4 设计的离散分析	434
8.7 历史回顾	435
本章小结	436
复习题	437
习题	437

第 9 章 非线性系统	442
9.1 引言和动机：为什么学习非线性系统	443
9.2 线性化分析	444
9.2.1 使用小信号分析的线性化	444
9.2.2 使用非线性反馈的线性化	448
9.2.3 使用反向非线性的线性化	448
9.3 使用根轨迹法的等效增益分析	449
9.3.1 积分器抗漂移	453
9.4 使用频率响应的等效增益分析：描述函数	456
9.4.1 用描述函数的稳定性分析	460
△9.5 基于稳定性的分析和设计	463
9.5.1 相平面	464
9.5.2 李雅普诺夫稳定性分析	467
9.5.3 圆判据	473
9.6 历史回顾	477
本章小结	477
复习题	478
习题	478
第 10 章 控制系统设计：原理与案例研究	485
10.1 控制系统设计概要	486
10.2 卫星姿态控制设计	490
10.3 波音 747 飞机的侧向和纵向控制	500
10.3.1 偏移阻尼器	503
10.3.2 姿态保持自动导航仪	508
10.4 汽车引擎的油气比例控制	512
10.5 硬盘的读/写磁头组件控制	517
10.6 半导体芯片制造中的快速热处理器控制系统	522
10.7 趋化性或者大肠杆菌的顺利游动	533
10.8 历史回顾	539
本章小结	540
复习题	541
习题	541
附录 A 拉普拉斯变换	550
附录 B 章末复习题答案	562
附录 C MATLAB 命令	573
参考文献	576
术语表	581

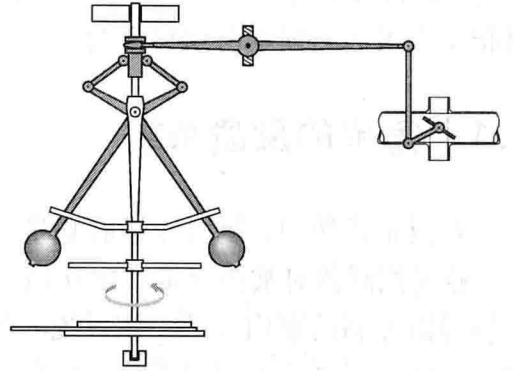
网上附录

- 附录 WD 复变量回顾
- 附录 WE 矩阵理论总结
- 附录 WF 能控性和能观性
- 附录 WG Ackermann 公式的极点配置
- 附录 W2 动态模型
- 附录 W3 框图化简
- 附录 W4 时域响应对参数变化的灵敏度
- 附录 W5 根轨迹设计法
- 附录 W6 频率响应设计法
- 附录 W7 数据的其他表示
- 附录 W8 数字控制

第1章 反馈控制概述及其历史回顾

反馈控制简介

动态系统的反馈控制是一个很早就提出来的概念，具有很多特性。其核心思想是，对一个系统的输出进行检测，然后反馈给某种类型的控制器，并用以影响控制。这表明，信号反馈可以用来控制许多的动态系统，如飞机、硬盘数据存储设备。为了实现精确的控制，应满足四个基本的要求。



- 系统必须一直处于稳定状态。
- 系统输出必须跟踪控制输入信号。
- 系统输出必须尽量避免来自扰动输入的响应。
- 虽然在设计中使用的模型不是完全精确的，或者物理系统的动态特性随时间变化或者因环境变化而变化，但是这些目标也必须满足。

稳定性是最基本的要求。引起系统不稳定的原因有两个方面。一方面，系统可能是不稳定的。以 Segway 代步车为例，在控制关闭时，代步车将失去平衡。另一方面，增加反馈可能会使系统自身变得不稳定。根据以往的经验，这种不稳定性被看做是“恶性循环”，回传的反馈信号将使得系统状态更差，而不是更好。

许多例子可以表明，系统输出需要跟踪控制信号。例如，驾驶车辆并保持在车道内，就是控制跟踪。相似地，驾驶飞机在接近起降跑道时，需要精确地跟踪滑翔道。

抗扰动是反馈控制的早期应用之一。在这里，“控制”只是一个恒值设定点，在环境变化时用以保持输出。一个常见的例子就是室内恒温器。不管外部温度和风力如何变化，不管门窗处于打开还是关闭状态，室内恒温器都会将房间内的温度保持在设定的温度值附近。

最后，若要为动态系统设计一个控制器，则需要最简单的情况下建立系统动态响应的数学模型。遗憾的是，几乎所有的物理系统都是非常复杂而且是非线性的，因此，设计通常会以简化的模型为基础，并且必须足够稳定，以使得系统在应用于实际设备时能够满足其性能要求。更进一步地，在几乎所有的情况下，随着时间及环境的变化，即使是最好的模型也会因为系统动态特性变化而出现误差。另外，设计对这些不可避免的变化不能够过于敏感，同时，也必须保证系统能够足够稳定地工作。

随着时间的推移，有效解决控制设计系统的各种问题的方法逐渐成形。尤其重要的是数字计算机的辅助计算以及嵌入式控制设备的发展。作为计算设备，计算机允许识别更加复杂的模型以及复杂的控制设计方法。同样，作为嵌入式设备，数字设备也允许实现复杂的控制规律。控制工程师不仅需要熟练地操作这些设计工具，同时还需要理解这些工具背后的概念，以最佳地使用它们。控制工程师需要了解可用的控制器设备的性能及其局限性，这同样也很重要。