 国外名校最新教材精选

Sigurd Skogestad, Ian Postlethwaite

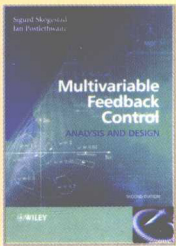
多变量反馈控制分析与设计

Multivariable Feedback Control: Analysis and Design


[挪] 西格德·斯科格斯特德 著
[英] 伊恩·波斯尔思韦特

韩崇昭 张爱民 刘晓风 等 译

(第2版)



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

 国外名校最新教材精选

Multivariable Feedback Control: Analysis and Design
(Second Edition)

多 变 量 反 馈 控 制

——分析与设计

(第 2 版)

[挪] 西格德·斯科格斯特德 著
[英] 伊恩·波斯尔思韦特



西安交通大学出版社
Xi'an Jiaotong University Press

Multivariable Feedback Control, Analysis and Design, Second Edition

No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, scanning or otherwise, except under the terms of the Copyright, Designs and Patents Act 1988 or under the terms of a licence issued by the Copyright Licensing Agency Ltd, 90 Tottenham Court Road, London W1T 4LP, UK, without the permission in writing of the Publisher. Requests to the Publisher should be addressed to the Permissions Department, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, or emailed to permreq@wiley.co.uk, or faxed to (+44)1243 770620.

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Xi'an Jiaotong University Press and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

陕西省版权局著作权合同登记号:25-2007-003

图书在版编目(CIP)数据

多变量反馈控制—分析与设计(第2版)/(挪)斯科格斯特德
(Skogestad, S), (英)波斯尔思韦特(Postlethwaite, I)著;韩崇昭
张爱民, 刘晓风译. —西安:西安交通大学出版社, 2011. 12
书名原文: Multivariable Feedback Control: Analysis and Design
ISBN 978-7-5605-3971-3

I. ①多… II. ①斯… ②波… ③韩… ④张… ⑤刘…
III. ①多变量控制; 反馈控制 IV. ①TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 143449 号

书 名 多变量反馈控制——分析与设计(第2版)
著 者 (挪)西格德·斯科格斯特德 (英)伊恩·波斯尔思韦特
译 者 韩崇昭 张爱民 刘晓风 等

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路10号 邮政编码710049)

网 址 <http://ligong.xjtupress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315 82669096(总编办)

传 真 (029)82669097

印 刷 西安交通大学印刷厂

开 本 787mm×1 092mm 1/16 印张 32.5 字数 728千字
版次印次 2011年12月第1版 2011年12月第1次印刷
印 数 0001~3000
书 号 ISBN 978-7-5605-3971-3/TP·552
定 价 78.00元

读者购书、书店添货,如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82665380

读者信箱:banquan1809@126.com

版权所有 侵权必究

译者序言

呈现在读者面前的这本《多变量反馈控制——分析与设计》(第2版),是近年来国际上所出版的同类书籍中难得的一本非常实用的好书。正如作者在“前言”中所说,本书讨论的是实际的反馈控制,而不是一般的系统理论。

自动控制界长期以来困惑于理论研究与工程实际需求的严重脱节。一方面每年有大量的控制理论文献发表,而这些理论很难得到工程实践的验证,难免步入理论上的空谈;另一方面,实际工程中遇到的种种技术难题却很难找到理论成果的强有力支持,因而很多工程应用带有一定的盲目性。这种怪圈对于控制学科的发展是致命的,在国际范围内形成控制学科理论严重脱离工程实际的强烈印象,有些国家的科学研究基金甚至对控制理论的研究做出了某些限制。

该书最具吸引力之处,正是从工程的观点深入分析多变量反馈控制问题,并不拘泥于控制理论的现成结论,而是根据实际问题衍生出新的概念,并采用新的方法解决这些问题。书中大量列举蒸馏过程控制、飞机发动机控制系统设计等实际工程问题,采用新的理论方法进行设计或控制系统实现,得到非常好的结果。该书另一个特点是,把传统方法和现代理论成果的密切结合,许多分析都是基于经典频域法、奇异值分解和 μ 分析等。书中还给出了许多实用的计算机可执行程序,可用于一类控制问题的设计或实现。本书关于经典反馈控制、多变量控制,以及线性系统理论给出了具有独到见解的介绍,而重点给出输入-输出能控性的

新概念,并由此给出 SISO 系统和 MIMO 系统性能的限制,各种系统的不确定性和鲁棒性等性能的分析,由此产生的各种控制器设计方法和控制系统结构设计方法等。这本书内容浩瀚,不仅涉及控制工程各种尖端技术领域,而且利用了控制理论发展的最新成果,是一本理论联系实际,而不受现成理论束缚的科学巨著。

本书前 8 章的初稿由刘晓风副教授提供,张爱民副教授对其中第 1、第 2、第 3 和第 7 章进行了重新整理和修改,韩崇昭教授对第 4、第 5、第 6 和第 8 章进行了重新整理和修改。韩崇昭教授还提供了第 9 到第 13 章以及两个附录的翻译初稿,张爱民副教授对其进行了认真勘误和修改。张爱民副教授还整理了索引部分。需要提及的是,王勇博士参与了第 7 章的重新整理和修改工作,任志刚博士参与了第 1、第 9、第 10、第 11 和第 12 章的勘误和修改工作。最后,由韩崇昭教授对全书稿件进行了统编,任志刚博士对全书进行了校对。

尽管我们做出很大努力,也对原著中明显的错误进行了修订,但译书中难免出现用词不当或概念偏差之类的翻译错误,望广大读者不吝赐教,我们将不胜感激。

译 者

2011 年 9 月于西安交通大学自动化系

作者前言

本书讨论的是实际的反馈控制，而不是一般的系统理论。反馈在控制系统中是用来改变系统的动态行为（通常是使系统稳定且充分快速），降低系统对信号不确定性（扰动）和模型不确定性的灵敏度。本书涵盖的重要题目包括：

- 经典频域法；
- 利用奇异值分解的多变量系统方向性分析；
- 输入-输出能控性（对于对象固有的控制限制）；
- 模型不确定性与鲁棒性；
- 性能要求；
- 控制器设计与模型简化方法；
- 控制结构选择与分散控制；
- 线性矩阵不等式 LMI。

我们的讨论限于线性系统，这样涉及的理论会简单很多，而且也发展得相当完善，大量的实践经验告诉我们用线性方法设计出的线性控制器用于现实中的非线性对象也能有满意的效果。

我们力图使书中用到的数学知识保持在一个合理的简单水平，强调的是提高洞察力和直觉的结果。目前可用的线性系统的设计方法已发展得颇为完备，对于大多数多变量对象来说，在软件的帮助下控制器的设计相对来说比较便捷。然而，如果没有洞察力和直觉，就很难评估一个解决方案，同时也不清楚如何进一步去改进这个设计（例如怎样调整权值）。

本书适合作为研究生多变量控制方面的入门教材，也可用于高年级本科课程。我们认为，本书对于那些想要了解多变量控制、其种种限制因素，以及在工业实际中如何应用的读者来说也是很有用的。关于控制结构设计的分析方法和素材，在新兴的系统生物学领域将被证明也是极为有用的。书中有多个已完成的例题、习题和案例研究，并经常用到 MatlabTM①。

阅读本书所需的基础知识仅为单输入单输出（SISO）控制方面的一个入门课程以及矩阵和线性代数方面的一些基础知识。某些章节可以单独阅

① Matlab 是 MathWorks, Inc. 的注册商标。

读,还可作为一些本科和研究在线性控制方面课程的素材,这些内容有:经典回路整形控制、多变量控制导论、高级多变量控制、鲁棒控制、控制器设计、控制结构与能控性分析。也许有人想按与书中不同的次序来讲授这些内容。例如,Manfred Morari 教授在苏黎世 ETH 的授课中,在讲授多输入多输出(MIMO)系统(第 3、6、8、9 章)之前,先讲 SISO 系统(第 1、2、5、7 章),然后再讲系统理论(第 4 章)。

本书部分内容基于第一作者在特隆赫姆(Trondheim)挪威科技大学控制论系给研究生讲授的多变量控制课程。学生来自电气工程系、化学系和机械工程系,每周 3 节课,共 12 周。除了平常的作业外,学生还要利用 Matlab 完成一个 50 小时的设计项目。在附录 B 中有项目的介绍,同时还有一套测试样题。

例题与网络资源

所有的数值计算例题都采用了 Matlab 求解。书中也有一些样本程序以说明所包含的步骤。这些程序或是采用新版的鲁棒控制工具箱(Robust Control Toolbox),或控制工具箱(Control Toolbox),不过这些例题用其他软件包也易求解。

以下是可通过互联网获取的资源:

- 例题和图解所用到的 Matlab 文件;
- 部分习题的解(标有 * 号)^①;
- 案例研究中对象的线性状态空间模型;
- 勘误、评介、增补的习题和试题;
- 基于本书的授课笔记。

以上信息可从作者主页获取,其网址用 Google 之类的搜索引擎容易获取。目前的网址为:

- <http://www.nt.ntnu.no/users/skoge>
- <http://www.le.ac.uk/engineering/staff/Postlethwaite>

评论和问题

您若有关于本书的任何疑问,发现任何错误或者有评论意见可通过 Email 发给作者,地址如下:

- skoge@chemeng.ntnu.no
- ixp@le.ac.uk

致谢

John Doyle 教授和 Manfred Morari 教授的课程与思想对本书内容有着很大的影响,当时本书第一作者从 1983~1986 年作为研究生就读于加州理工学院,而更早一些,1975~1981 年期间,第二作者曾师从于剑桥大学的 Alistair MacFarlane 教授。我们非常感谢 1993 年欧洲控

^① 讲授有关课程者若需要其他习题的解答可与作者联系。

制会议邀请作者们讲授一个关于应用 \mathcal{H}_∞ 控制的短期讲座,从此开始了我们的合作。本书第1版的最终稿开始成形于1994~1995年间,在此期间作者们都在加州大学伯克利分校,我们要感谢 Andy Packard、Kameshwar Poolla、Masayoshi Tomizuka 以及 BCCI 实验室的其他人,还有 *Brewed Awakening* 沁人心扉的咖啡。

我们感谢 Yi Cao、Kjetil Havre、Ghassan Murad 和 Ying Zhao 在技术与编辑方面所做的大量工作。在伯克利与作者同处一间办公室的 Roy S. Smith 为我们完成了例 4.5 的计算。还有 Richard Braatz、Jie Chen、Atle C. Christiansen、Wankyun Chung、Bjørn Glemmestad、John Morten Godhavn、Finn Are Michelsen、Per Johan Nicklasson 给予的颇有助益的评论,以及对内容的增补与指正。很多人参与了书稿各个版本的编辑与录入,有 Zi-Qin Wang、Yongjiang Yu、Greg Becker、Fen Wu、Regina Raag 和 Anneli Laur。在此也要感谢我们的研究生们所做的工作,特别是 Neale Foster、Morten Hovd、Elling W. Jacobsen、Petter Lundström、John Morud、Raza Samar 和 Erik A. Wolff。

我们感谢 Vinay Kariwala 为本书第2版所做的许多技术上的工作和编辑上的更改。在特隆赫姆的其他学者也给予了帮助,我们特别要感谢 Vidar Alstad 和 Espen Storkaas。在莱斯特(Leicester)的 Matthew Turner 和 Guido Herrmann 对关于线性矩阵不等式新的章节的准备工作给予了极大的帮助。最后,本书的第一作者要感谢在特隆赫姆和加州理工学院现在和以前的同事,而第二作者则要感谢在莱斯特、牛津和剑桥现在和以前的同事。

书中所用的飞机发动机模型(第11章和第13章)和直升机模型(第13章)分别得到了劳斯莱斯军用航空发动机公司、英国国防部、贝德福德 DRA(现为 QinetiQ)的许可,在此谨表谢意。

书中采用了另外几本书中的内容。特别值得推荐的是 Zhou 等(1996)的著作,这是系统理论和 \mathcal{H}_∞ 控制方面的一本非常好的参考书。此外《控制手册》(Levine,1996)作为一般性的参考书也很不错。此外我们心怀谢意地建议读者参阅以下文献:Rosenbrock(1970)、Rosenbrock(1974)、Kwakernaak 与 Sivan(1972)、Kailath(1980)、Chen(1984)、Francis(1987)、Anderson 与 Moore(1989)、Maciejowski(1989)、Morari 与 Zafiriou(1989)、Boyd 与 Barratt(1991)、Doyle 等(1992)、Boyd 等(1994)、Green 与 Limebeer(1995)、Grace 等编写的 Matlab toolbox 手册(1992)、Balas 等(1993)、Chiang 与 Safonov(1992)、Balas 等(2005)。

第2版

在第2版中,我们改正了许多小错误并对全书做了多处修改与增补,这一方面是由于来自读者的许多问题和意见,而另一方面则是为了能够反映出在该领域的新发展。主要的增补和修改如下:

第2章:增加了关于不稳定对象、反馈放大器、低端增益裕度、PID 控制的简单 IMC 整定规则、估计有效延时的对分法则等内容。

第3章:一些关于相对增益阵列的资料从第10章移动到这一章。

第4章:对状态能控性和能观测性的检验方法进行了修改(当然必须与原来的方法等效)。

第 5 章与第 6 章:在 RHP 极点与 RHP 零点产生的基本性能限制方面添加了新的结果。

第 6 章:重写了关于不确定性产生限制的一节。

第 7 章:关于参数不确定性的例子移到前面并有所缩减。

第 9 章:增加了在 LQG 控制中加入积分作用的明确策略。

第 10 章:重新组织了这一章的内容。增加了关于被控变量选择和自优化控制的新内容。
重写了关于分散控制的一节并增加了几个例子。

第 12 章:关于线性矩阵不等式全新的一章。

附录:对正定矩阵和全通分解做了微小改动。

实际上全书增加了一百多页,此外每页的长度也有所增加。

所有的 Matlab 程序都进行了更新以便和新的鲁棒控制工具箱兼容。

Siguard Skogestad

Ian Postlethwaite

2005 年 8 月

目 录

译者序言

作者前言

第 1 章 引言

1.1 控制系统的设计过程	(1)
1.2 控制问题	(2)
1.3 传递函数	(3)
1.4 尺度变换	(4)
1.5 推导线性模型	(6)
1.6 记法	(8)

第 2 章 经典反馈控制

(12)

2.1 频率响应	(12)
2.2 反馈控制	(17)
2.3 闭环稳定性	(21)
2.4 闭环性能评估	(23)
2.5 控制器设计	(34)
2.6 回路整形	(35)
2.7 稳定对象的 IMC 设计步骤与 PID 控制	(46)
2.8 闭环传递函数的整形	(51)
2.9 结论	(56)

第 3 章 多变量控制导论

(57)

3.1 引言	(57)
3.2 MIMO 系统的传递函数	(58)
3.3 多变量频率响应分析	(60)
3.4 相对增益阵列(RGA)	(70)
3.5 多变量对象控制	(77)
3.6 多变量 RHP 零点介绍	(82)
3.7 MIMO 鲁棒性导论	(84)
3.8 一般性控制问题描述	(89)
3.9 附加习题	(99)

3.10	结论	(100)
第4章	线性系统理论基础	(102)
4.1	系统描述	(102)
4.2	状态能控性与状态能观性	(109)
4.3	稳定性	(115)
4.4	极点	(116)
4.5	零点	(118)
4.6	关于极点和零点的一些重要说明	(121)
4.7	反馈系统的内部稳定性	(124)
4.8	镇定控制器	(128)
4.9	频域稳定性分析	(130)
4.10	系统范数	(134)
4.11	结论	(139)
第5章	对 SISO 系统性能的限制	(140)
5.1	输入-输出能控性	(140)
5.2	对灵敏度的主要限制	(143)
5.3	基本限制:峰值界	(147)
5.4	完美控制与对象反演	(154)
5.5	理想 ISE 最优控制	(155)
5.6	时延带来的限制	(156)
5.7	由 RHP 零点带来的限制	(157)
5.8	相位滞后带来的限制	(164)
5.9	不稳定(RHP)极点带来的限制	(165)
5.10	扰动和指令带来的性能需求	(170)
5.11	输入约束带来的限制	(171)
5.12	不确定性带来的限制	(174)
5.13	总结:反馈控制的能控性分析	(177)
5.14	总结:前馈控制的能控性分析	(179)
5.15	能控性分析的应用	(180)
5.16	结论	(188)
第6章	对 MIMO 系统性能的限制	(189)
6.1	引言	(189)
6.2	对灵敏度的基本限制	(190)
6.3	基本限制:峰值界	(191)
6.4	功能能控性	(199)
6.5	时延带来的限制	(200)

6.6	RHP 零点带来的限制	(201)
6.7	不稳定(RHP)极点带来的限制	(204)
6.8	扰动带来的性能要求	(205)
6.9	输入约束带来的限制	(206)
6.10	不确定性带来的限制	(208)
6.11	MIMO 系统的输入-输出能控性	(218)
6.12	结论	(223)
第7章	SISO 系统的不确定性与鲁棒性	(224)
7.1	鲁棒性简介	(224)
7.2	表示不确定性	(225)
7.3	参数不确定性	(227)
7.4	在频域表示不确定性	(229)
7.5	SISO 系统的鲁棒稳定性	(237)
7.6	SISO 系统的鲁棒性能	(243)
7.7	附加习题	(248)
7.8	结论	(249)
第8章	MIMO 系统的鲁棒稳定性与性能分析	(251)
8.1	带不确定性的一般控制构成	(251)
8.2	表示不确定性	(253)
8.3	获取 P 、 N 和 M	(258)
8.4	鲁棒稳定性与鲁棒性能的定义	(260)
8.5	$M\Delta$ 结构的鲁棒稳定性	(261)
8.6	关于复数非结构化不确定性的鲁棒稳定性	(262)
8.7	关于结构化不确定性的鲁棒稳定性:引子	(264)
8.8	关于结构化奇异值	(266)
8.9	关于结构化不确定性的鲁棒稳定性	(272)
8.10	鲁棒性能	(275)
8.11	应用:关于输入不确定性的鲁棒性能	(278)
8.12	μ 综合与 DK 迭代	(285)
8.13	关于 μ 的进一步讨论	(292)
8.14	结论	(294)
第9章	控制器设计	(296)
9.1	MIMO 反馈设计中的折衷	(296)
9.2	LQG 控制	(298)
9.3	\mathcal{H}_2 与 \mathcal{H}_∞ 控制	(306)
9.4	\mathcal{H}_∞ 回路整形设计	(316)

9.5	结论	(331)
第 10 章	控制结构设计	(332)
10.1	引言	(332)
10.2	最优运行与控制	(334)
10.3	选择主被控输出	(336)
10.4	调节控制层	(348)
10.5	控制构成组件	(363)
10.6	分散反馈控制	(371)
10.7	结论	(395)
第 11 章	模型约简	(396)
11.1	引言	(396)
11.2	截项和残化	(397)
11.3	均衡实现	(398)
11.4	均衡截项与均衡残化	(399)
11.5	最优 Hankel 范数近似	(400)
11.6	不稳定模型的约简	(402)
11.7	利用 Matlab 约简模型	(403)
11.8	两个实际例子	(403)
11.9	结论	(410)
第 12 章	线性矩阵不等式	(411)
12.1	LMI 问题介绍	(411)
12.2	LMI 问题的类型	(413)
12.3	LMI 问题中的技巧	(417)
12.4	案例研究:抗饱和补偿器的综合	(421)
12.5	结论	(425)
第 13 章	案例研究	(426)
13.1	引言	(426)
13.2	直升机控制	(427)
13.3	航空发动机控制	(434)
13.4	蒸馏过程	(442)
13.5	结论	(447)
附录 A	矩阵论和范数	(448)
A.1	基本知识	(448)
A.2	特征值和特征向量	(450)

A. 3	奇异值分解	(452)
A. 4	相对增益阵列	(457)
A. 5	范数	(460)
A. 6	传递函数矩阵的全通分解	(469)
A. 7	灵敏度函数分解	(470)
A. 8	线性分块变换	(471)
附录B	项目工作与测验样题	(474)
B. 1	项目工作	(474)
B. 2	测验样题	(475)
参考文献	(478)
索引	(488)

引言

本章首先概括介绍控制系统的设计过程,然后讨论线性模型与传递函数,它们是本书分析与设计技术的基本构件。变量的尺度变换在应用中非常重要,为此给出一个简单的尺度变换方法。此外,采用一个例子说明在实际应用中如何依据偏差变量推导线性模型。最后,总结本书用到的一些重要记法。

1.1 控制系统的设计过程

所谓控制,就是调节可支配的自由度(调节变量)使系统(过程或对象)达到可接受的运行状态。(自动)控制系统的设计过程通常对设计人员或设计团队有许多要求,而这些要求体现在如下所示的逐步设计过程中:

1. 对被控系统(过程或对象)进行研究,获得关于控制目标的初始信息;
2. 建立系统的模型,并在必要时对模型进行简化;
3. 对变量进行尺度变换,并分析由此得到的模型,了解其性质;
4. 确定对哪些变量进行控制(被控输出);
5. 确定量测和调节变量:确定采用何种传感器与执行机构,并确定它们的安放位置;
6. 选择控制构成;
7. 确定将要使用的控制器类型;
8. 根据总体控制目标,确定性能指标;
9. 设计控制器;
10. 分析得到的控制系统是否满足性能指标;若不满足,则修改指标或控制器的类型;
11. 在计算机或试验对象上,对设计出的控制系统进行仿真;
12. 若有必要,重复步骤 2~11;
13. 选择软硬件,并实现控制器;
14. 测试并验证控制系统的有效性;若有必要,对控制器进行在线调整。

控制课程和教材通常重点讲述上述过程中的步骤 9 和 10,即控制器设计与控制系统分析的方法。有趣的是,在许多真实控制系统的设计过程中根本没有考虑这两步。举例来说,即使对于具有多个输入输出的复杂系统,通常基于级联控制回路的层次结构,仅通过在线调整(包括步骤 1、4、5、6、7、13 和 14),便能设计出可用的控制系统。然而,对于这种情况,可能无法预先确定合适的控制结构,而需要利用系统工具,通过深入分析,以帮助设计人员完成步骤 4、5、6。本书的一个特色就是提供了输入输出能控性分析(步骤 3)与控制结构设计(步骤 4、5、6、7)的工具。

输入输出能控性是指系统达到可接受的控制性能的能力,该性能与传感器和执行机构的位置有关,但不能被人为改变。简而言之,“最好的控制系统也无法将大众汽车变为法拉利”。因此在有些情况下,控制系统的设计过程还需包括一个步骤 0,即过程设备本身的设计。将过程设备设计和控制系统设计看作一个整体的想法并不新鲜,如下选自 Ziegler 与 Nichols (1943)论文中的引用清楚地说明了这一点:

在自动控制器的应用中,将控制器和过程看作一个整体非常重要,二者对控制结果好坏的影响程度相差不多。对于容易控制的过程,一个较差的控制器也能给出可接受的性能;而对于一个设计得很糟糕的过程,再精准的控制器也无法提供令人满意的性能。当然,对于这类过程,先进的控制器能够提供优于老式控制器的结果,但控制方法所能产生的效果是非常有限的,不可能达到完美。

Ziegler 与 Nichols 还注意到,在设备设计中存在一个被忽略的因素,他们阐述道:

这个被忽略的特性可称为“能控性”,即过程达到并保持期望平衡值的能力。

第 5 章与第 6 章的目标就是推导简单的工具,用以量化对象内在的输入-输出能控性。

1.2 控制问题

控制系统的目标就是通过调节对象的输入 u ,使输出 y 按照期望的方式变化。调节器问题就是调节 u 以抵消扰动 d 的影响;伺服问题则是调节 u 以保持输出 y 接近给定的参考输入 r 。因此,在这两种情况下,我们都希望控制误差 $e = y - r$ 较小。根据可获取的信息调节 u 的算法就是控制器 K 。为设计出性能良好的控制器 K ,需要知道预期扰动和参考输入,以及对象模型(G)和扰动模型(G_d)的先验信息。本书将采用具有如下形式的线性模型:

$$y = Gu + G_d d \quad (1.1)$$

面临的主要困难是模型 (G, G_d) 可能不准确或随时间改变。由于对象是反馈回路的一部分, G 的不准确性可能引起很多问题。为处理该问题,我们将利用模型不确定性的概念。例如,我们可能研究一类模型 $G_p = G + E$ 而不是单个模型 G 的行为,其中的模型“不确定性”或“摄动” E 是有界的,但其它方面并不知道。在很多情况下,采用权函数 $w(s)$,并根据标准化的摄动 Δ 表示 $E = w\Delta$,其中 Δ 的幅值(范数)小于等于 1。本书将会用到如下一些术语:

标称稳定性(Nominal Stability, NS):在不考虑模型不确定性的条件下,系统是稳定的。

标称性能(Nominal Performance, NP):在不考虑模型不确定性的条件下,系统满足性能指标。

鲁棒稳定性(Robust Stability, RS):对于所有相对于标称模型的摄动对象,甚至包括最坏情况下的模型不确定性,系统仍是稳定的。

鲁棒性能(Robust Performance, RP):对于所有相对于标称模型的摄动对象,甚至包括最坏情况下的模型不确定性,系统仍满足性能指标。

1.3 传递函数

本书广泛使用了传递函数 $G(s)$ 和频域,它们在实际应用中非常有用,原因如下:

- 从简单的频域图中可以得到非常有价值的信息;
- 可以为反馈定义闭环传递函数的带宽和峰值等重要概念;
- $G(j\omega)$ 给出了系统对频率为 ω 的正弦输入的响应;
- 若干个系统串联后,只需在频域将各个传递函数相乘,但在时域需要进行复杂的卷积运算;
- 因式分解后的标量传递函数直观显示了极点和零点;
- 在频域中更易处理不确定性,这是因为如果两个系统具有相似的频率响应,那么可以认为它们很接近(即具有相似的行为);而另一方面,状态空间描述中参数的微小变化,便可能导致完全不同的系统响应。

本书考虑线性时不变系统,其输入输出响应由线性常微分方程决定。这类系统的一个例子为:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= -a_1 x_1(t) + x_2(t) + \beta_1 u(t) \\ \dot{x}_2(t) &= -a_0 x_1(t) + \beta_0 u(t) \\ y(t) &= x_1(t)\end{aligned}\quad (1.2)$$

其中, $\dot{x}(t) \equiv dx/dt$ 。这里的 $u(t)$ 表示输入信号, $x_1(t)$ 与 $x_2(t)$ 表示状态, $y(t)$ 表示输出信号;系数 a_1 、 a_0 、 β_1 和 β_0 均与时间无关,因此这是一个时不变系统。如果对式(1.2)作 Laplace 变换,则有

$$\begin{aligned}s\bar{x}_1(s) - x_1(t=0) &= -a_1 \bar{x}_1(s) + \bar{x}_2(s) + \beta_1 \bar{u}(s) \\ s\bar{x}_2(s) - x_2(t=0) &= -a_0 \bar{x}_1(s) + \beta_0 \bar{u}(s) \\ \bar{y}(s) &= \bar{x}_1(s)\end{aligned}\quad (1.3)$$

这里的 $\bar{y}(s)$ 表示 $y(t)$ 的 Laplace 变换,其它依此类推。为简化描述,根据惯例,将 $\bar{y}(s)$ 写为 $y(s)$;此外,在不产生混淆的情况下,略去自变量 s 和 t 。

如果 $u(t)$ 、 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 和 $y(t)$ 表示相对于标称运行点或运行轨迹的偏差变量,那么可以假定 $x_1(t=0) = x_2(t=0) = 0$,从式(1.3)中消去 $\bar{x}_1(s)$ 和 $\bar{x}_2(s)$ 可得传递函数

$$\frac{y(s)}{u(s)} = G(s) = \frac{\beta_1 s + \beta_0}{s^2 + a_1 s + a_0}\quad (1.4)$$

重要的是,对于线性系统,传递函数与输入信号(强制函数)无关。请注意,式(1.4)所示传递函数也可表示如下系统:

$$\ddot{y}(t) + a_1 \dot{y}(t) + a_0 y(t) = \beta_1 \dot{u}(t) + \beta_0 u(t)\quad (1.5)$$

其中, $u(t)$ 为输入, $y(t)$ 为输出。

全书会频繁使用如式(1.4)所示的传递函数 $G(s)$,用以对系统或其构件进行建模。更一般地,考虑如下有理传递函数

$$G(s) = \frac{\beta_{n_z} s^{n_z} + \cdots + \beta_1 s + \beta_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0}\quad (1.6)$$