

鲁棒与最优控制

ROBUST AND OPTIMAL CONTROL

周克敏 J.C.Doyle K.Glover 著
毛剑琴 钟宜生 林 岩 等译

H_∞

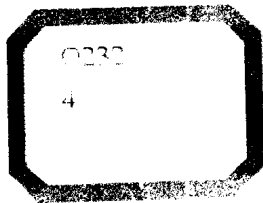
Kemin Zhou

WITH

J.C. Doyle K. Glover

愛
趣
無
窮

國防工業出版社



鲁棒与最优控制

Robust and Optimal Control

周克敏 J. C. Doyle K. Glover 著

毛剑琴 钟宜生 林 岩 等译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军—2001—018 号

图书在版编目(CIP)数据

鲁棒与最优控制/(美)周克敏,(美)多伊尔(Doyle,J. C.), (英)格洛弗(Glover,K.)著;毛剑琴等译. —北京:国防工业出版社, 2002.7

书名原文:Robust and Optimal Control

ISBN 7-118-02696-4

I. 鲁... II. ①周... ②多... ③格... ④毛...

III. ①鲁棒控制②自动控制:最佳控制 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 077104 号

Robust and Optimal Control

Kemin Zhou with John C. Doyle and Keith Glover

Granted by Kemin Zhou. All rights reserved. This book

was previously published by Prentice—Hall, Inc.

本书中文版由周克敏教授授予国防工业出版社(独家)出版发行。版权所有,侵权必究。

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 21 1/2 561 千字

2002 年 7 月第 1 版 2002 年 7 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:46.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

献给亲爱的父母

中 译 本 序

控制科学从本质上讲是一门技术科学,它以工程技术中的实际需要为背景和动力,以数学(主要是应用数学)和计算机为工具,以解决工程技术中的控制问题为主要目的。

控制科学从产生、发展到辉煌,几乎贯穿了整个 20 世纪。对它的研究从一开始就表现出与研究其他自然科学(例如物理学)不同的特点。马克思在《资本论》序言中曾指出:“物理学家是在自然过程表现得最确实、最少受干扰的地方考察自然过程的,或者如有可能,是在保证过程以其纯粹化形态进行的条件下从事实验的”。少受干扰与纯粹化是自然科学中研究基本原理的准则。控制科学由于其目的是针对现实解决问题的,因此从它一产生起就必须不断地考虑干扰和非纯粹化的影响,而且,在不同阶段不同条件下这种考虑有其不同表现。

控制科学中最重要的一个概念就是反馈,而反馈的最主要之点就在于考虑了实际系统中存在的不确定性。人们发现,当反馈不再限于常数增益而是动态系统时,反馈在闭环系统动力学中十分重要。在一定程度上它可使闭环系统具有合适的动态特征而不受开环所可能产生的摄动影响。这一点能奏效的原因之一是毕竟系统还相对简单。此时的研究对于什么是摄动,怎样刻画摄动以及在较高的水平上实现系统性能对摄动的某种不变性(或现今的鲁棒性)等,均还没有条件进行讨论。

随着控制系统应用范围的扩大,对象的日益复杂,系统与环境均充满不确定性以及更为严格的控制要求,使我们正面对一个系统复杂程度日益增大和控制要求日益提高的充满挑战的时代。而控制系统复杂性中不确定性是最重要的一个因素。大量数学工具

从应用角度引入控制研究和计算机技术的飞速发展为迎接这个挑战创造了条件。这就是 20 世纪 80 年代出现的鲁棒控制飞速发展的前提。

G. Zames 在 1981 年发表的著名论文,可以看成是现代鲁棒控制特别是 H_∞ 控制的先驱。它以最优敏感性,即干扰在输出上影响最小作为 H_∞ 控制的基本提法。这实际上是 Wiener-Hopf 理论和二次型最优控制的发展。但随后的研究发现,这种 H_∞ 最优控制的求解实际上可以解决一系列鲁棒控制问题。这表明鲁棒控制与最优控制具有某种深刻联系。

H_∞ 控制中一个具有里程碑性质的结果是 J. C. Doyle 等四人的著名文章。他们将 H_∞ 问题的求解归结为求解两个 Riccati 方程,从而沟通了二次型最优控制与 H_∞ 控制的本质联系。如同绝对稳定性问题的研究中 Popov 频域方法与 Lyapunov 函数的时域方法得到沟通时出现的学术繁荣场面一样,这一新的突破性的联系就使得 H_∞ 的研究获得了新的推动力,使在理论上和计算上均取得了极大的发展,从而使线性 H_∞ 控制的研究在几年里就取得成功并达到了基本完善。

周克敏博士所著的《Robust and Optimal Control》,正是适应这个形势需要,及时地对线性鲁棒与最优控制,特别是对 H_∞ 控制进行了总结提炼并系统化,使其成为这个领域最早的高水平的理论著作。作者在前言中简略介绍了全书的内容与安排,并给出如何阅读本书的建议。这对读者来说无疑指出了如何进入宝山的途径。

翔实的材料、严谨的推理、系统的论述和必要的应用考虑,是这本著作的特征。也正因为如此,它一出版,就不仅受到理论研究者的极大欢迎,同时也为应用研究者提供了一本很好的参考书。这一点从该书出版后极高的引用率就可以得到证明。

国内同行早已期盼该书能早出中文版,以促进国内控制理论教学和科研的开展。现在该书由北京航空航天大学毛剑琴教授主

笔组织与清华大学钟宜生教授等合作将其译出,由国防工业出版社正式出版,可谓是中国控制科学界的一件幸事。我相信本书中文版的发行,将极大地推动中国控制科学,特别是鲁棒控制研究的发展。

黄 琳 2001 年 5 月 1 日
于北京大学力学与工程科学系

译 者 的 话

周克敏博士多年来从事控制理论方面,特别是鲁棒控制理论方面的研究和教学,取得了一系列卓越的成就。他的论文 SCI 引用次数已超过 1500 篇次。他现任美国路易斯安那州立大学的冠名教授,是华人学子中的佼佼者。

周克敏博士一直关注国内控制学科的发展,曾在国内多所院校讲学,并为此作出了许多重要贡献。在他和 J. C. Doyle 及 K. Glover 的著作“Robust and Optimal Control”中,包含了 20 世纪 80 年代以来鲁棒与最优控制方面主要和基本的内容,其中包括了作者对该理论作出的重要贡献。该书已被译成日文,并在美国、欧洲、南美、中国台湾和香港、日本、韩国等各大学被广泛地用作研究生教材,得到一致好评。

为使该书也能更好地为中国的教学与科研起到促进作用,周克敏博士出于一片赤子之心,无偿地奉献了该书的中文版权,为我们进行中文翻译提供了基本的条件。周博士还亲自担任了中文译版的全部校对工作,在匆忙的访问期间与我们一起工作到深夜,往往为一个专业名词的译法要多处考证,反复推敲。在本书问世之际,谨表衷心的感谢!

我们的师长黄琳先生在百忙之中抽空作序,向读者推荐和介绍本书,在此也向他致谢。

全书共二十一章,我们的分工如下,毛剑琴教授译前言、目录、符号、缩写及一、五、十六、十九章;钟宜生教授译十五、十七、十八、二十、二十一章及编写索引;毛剑琴教授的博士生们在学习期间和毕业之后有机会参加本书的翻译工作,对他们是一个很好的学习机会,其中林岩博士译四及六至十四章;代冀阳博士译二、三章;卜

庆忠负责部分章节的录入和修改以及全书的计算机管理;孙秀霞博士也为翻译做了有益的工作,还有一些研究生参加了部分录入工作。

全书的统一和协调由毛剑琴教授担任,钟宜生教授对全书进行了最后校核。由于译者水平有限,不当之处欢迎读者批评指正。

译 者

原著者中文版前言

亲爱的读者,非常高兴这本关于爱趣无穷(H_{∞})控制的中文版和大家见面了。这里我要感谢毛剑琴教授,钟宜生教授,林岩博士及其他译者们所付出的辛勤劳动。中文版改正了原英文版中的一些错误,但不可避免地还会有其他的错误,敬请读者给予指正。写此书的初衷只是为了给自己的研究和教学带来方便。在写此书之前,常常为了一个记不清的结果或公式查找数本参考书,甚感不便,于是就想把一些常用的结果和公式进行系统的总结,以便参考。对我来说,它确实是不可缺少的手册,我也真诚地希望它给朋友们带来一些方便。

我想借此机会感谢养育我的祖国,愿她永远富强昌盛。感谢教育过我的师长和帮助过我的朋友们,特别是我的中学老师张行科、胡寿元、张永生,我的大学老师王朝宝和大学同学金其明及其父母。最后,我要感谢我的父母,他们用自己的言行教导了我怎样做一个无愧的人。

周克敏

2002 年

前 言

近年来,鲁棒与 $\mathcal{H}_\infty$ 控制理论的发展,特别是状态空间 $\mathcal{H}_\infty$ 控制理论的发展,使本书应运而生。书中采用了 Doyle、Glover、Khargonekar 及 Francis[1989]的风格,对状态空间 $\mathcal{H}_\infty$ 控制理论给出了完整的、循序渐进的阐述。我们尽可能使本书自成体系。作为参考,书中包括了很多线性系统、Riccati 方程的理论及应用和模型降阶方面的背景结果。本书对具有非结构不确定性及结构不确定性的鲁棒控制问题都进行了论述。线性分式变换(LFT)和结构奇异值(称为 μ)是作为统一的工具进行介绍的,它们用于鲁棒稳定性及性能指标的分析和综合。在第一章较详细地介绍了书中各章的主题和结论。在这一版书中没有给出习题,有兴趣者可在 www.ee.lsu.edu/kemin/kemin.html 中得到相关信息。与任何一本书一样,本书不可避免的存在着错误,我们欢迎广大读者给我们写信告之有关书中的错误及对本书的建议,也欢迎读者给我们寄有关书中的习题,以便与其他的读者共享。

我们愿向 Toronto 大学的 Bruce A. Francis 教授表示感谢,他对本书的初稿给予了评论和建议。事实上,我们的初稿是受到 1987 年他在 Caltech 所讲课程和他的杰作《A Course in $\mathcal{H}_\infty$ Control Theory》的启发而产生的。Maryland 大学的 André Tits 教授曾对本书稿提出了许多有益的评论和建议,从而在很大程度上改进了书稿的质量,在此向他表示衷心的感谢。Denmark 技术大学的 Jakob Stoustrup 教授、Hans Henrik Niemann 教授及他们的学生们曾阅读了本书几个版本的手稿并给予了許多有益的评论和建议,在此也表示感谢。我们还特别感谢 California 大学 Berkeley 分

校 Andrew Packard 教授在本书初稿筹备阶段所给予的帮助。California 大学 Riverside 分校的 Jie Chen 教授提供了第六章中的一些素材,在此也向他致谢。我们愿向日本 Chiba 大学的 Kang Zhi Liu 教授和 Calgary 大学的 Tongwen Chen 教授致谢,他们为本书提供了宝贵的评论和建议。同时,我们还要感谢 Gary Balas、Carolyn Beck、Dennis S. Bernstein、Bobby Bodenheimer、Guoxiang Gu、Weimin Lu、John Morris、Matt Newlin、Li Qiu、Hector P. Rotstein Malcolm、Smith 及其他许多为本书提出过评论和建议的人。第一作者还要特别感谢引导他进入鲁棒和 $\mathcal{H}_\infty$ 控制的 Michigan 大学的 Pramod P. Khargonekar 教授,及鼓励他完成本书的 Minnesota 大学的 Tryphon Georgiou 教授。后两位作者愿感谢第一位作者,因为他在本书的著作过程中作出了主要的贡献。

最后,第一作者还要感谢他的家庭所给予的支持和鼓励。

周克敏

John C. Doyle

Keith Glover



周克敏教授 1962 年出生于安徽芜湖。于 1982 年获北京航空航天大学自动控制专业学士学位，于 1986 年和 1988 年分别获美国明尼苏达大学电气工程专业硕士学位和控制科学与动态系统专业博士学位。1988 年至 1990 年他为加州理工学院电气工程系研究员和讲师。1990 年之后，周克敏博士任教于路易斯安那州立大学电气与计算机系，现为冠名正教授(endowed full professor)。他是两本著作的第一作者：即《鲁棒和最优控制》(ROBUST AND OPTIMAL CONTROL, Prentice Hall, 1995) 和《鲁棒控制的基础》(ESSENTIALS OF ROBUST CONTROL, Prentice Hall, 1997)。他曾是 IEEE Transactions on Automatic Control 的编委，目前为 Systems and Control Letters 和 SIAM J. on Control and Optimization 的编委。他的研究兴趣包括鲁棒控制、模型和控制器降阶、容错控制、数值优化以及燃烧控制。他对现代控制的最自豪的贡献是发明了 H_∞ 的中文翻译：爱趣无穷。他祝愿大家都能在自己工作的领域找到各自的“爱趣”。

John Doyle 教授于 1977 年获美国麻省理工学院电气工程系学士和硕士学位, 于 1984 年获加州大学伯克利分校数学系博士学位。1986 年成为加州理工大学副教授, 1991 年晋升为教授。他获得了多项论文奖, 包括 IEEE Transactions George S. Axelby 杰出论文奖, 1991 年 IEEE Baker Prize (一年一度授予 IEEE 的 50 种学术期刊中发表的杰出论文) 等。他的主要学术贡献在于现代控制理论, 包括对 LQG/LTR 的开拓性工作、结构奇异值分析、 $\mathcal{H}_\infty$ 控制的状态空间理论。他还获得了若干个人奖励, 其中有 1984 年 IEEE 百年纪念杰出年轻工程师奖等。

Keith Glover 教授于 1967 年获英国帝国学院学士学位, 于 1971 年和 1973 年获美国麻省理工学院电气工程系硕士和博士学位。1973 年至 1976 年任教于南加州大学; 1976 年开始任教英国剑桥大学, 现为该校工程系教授、主任和信息工程研究室主任。1969 年至 1971 年期间任 MIT 的 Kennedy 研究员, 1983 年至 1984 年为澳大利亚国立大学的访问学者, 1991 年以 JSPS 研究员的身份访问日本。他曾获得多项论文奖, 包括 1990 年 IEEE Transactions George S. Axelby 杰出论文奖, 1983 年美国自动控制协会 Huge Schuck 奖, 1991 年 IEEE Baker 奖, 2001 年获得 IEEE 控制系统奖等。Glover 博士在 Hankel 范数逼近、模型降价以及 $\mathcal{H}_\infty$ 控制有杰出的学术贡献, 特别是对 $\mathcal{H}_\infty$ 回路成型设计技术作出了奠基性的贡献。他是 IEEE 的会上(Fellow)、英皇家学会、皇家工程学院院士。

目 录

符号与注释	1
缩写表	5
第一章 绪论	7
1.1 历史的回顾	7
1.2 如何使用本书	12
1.3 本书的重点	14
第二章 线性代数	25
2.1 线性子空间	25
2.2 特征值和特征向量	28
2.3 矩阵求逆公式	31
2.4 矩阵微积分	32
2.5 Kronecker 积与 Kronecker 和	34
2.6 不变子空间	35
2.7 向量范数与矩阵范数	37
2.8 奇异值分解	42
2.9 广义逆	46
2.10 半定矩阵	47
2.11 矩阵扩展问题	50
2.12 注释和参考	56
第三章 线性动态系统	57
3.1 线性动态系统的描述	57
3.2 可控性和可观测性	59
3.3 Kalman 规范分解	66
3.4 极点配置和规范型	71

3.5	观测器和基于观测器的控制器	77
3.6	系统的运算	80
3.7	传递函数矩阵的状态空间实现	82
3.8	Lyapunov 方程	86
3.9	平衡实现	87
3.10	隐模态和零极相消	94
3.11	多变量系统的极点和零点	96
3.12	注释和参考	108
第四章	性能指标	109
4.1	赋范空间	109
4.2	Hilbert 空间	112
4.3	Hardy 空间 $\mathcal{H}_2$ 和 $\mathcal{H}_\infty$	115
4.4	功率和谱信号	122
4.5	诱导系统增益	123
4.6	$\mathcal{L}_2$ 和 $\mathcal{H}_2$ 范数的计算	132
4.7	$\mathcal{L}_\infty$ 和 $\mathcal{H}_\infty$ 范数的计算	134
4.8	注释和参考	137
第五章	反馈系统的稳定性和性能	138
5.1	反馈结构	138
5.2	反馈回路的适定性	139
5.3	内稳定	142
5.4	$\mathcal{RH}_\infty$ 上的互质分解	148
5.5	反馈的性质	153
5.6	回路成形的概念	157
5.7	加权的 $\mathcal{H}_2$ 和 $\mathcal{H}_\infty$ 性能	161
5.8	注释和参考	165
第六章	性能极限	167
6.1	引言	167
6.2	积分关系	169

6.3	设计极限和灵敏度界	173
6.4	Bode 增益和相角关系	176
6.5	注释和参考	177
第七章	模型降阶的平衡截断法	179
7.1	模型降阶的平衡截断	180
7.2	频率加权平衡模型降阶	189
7.3	相对和乘性模型降阶	191
7.4	注释和参考	197
第八章	Hankel 范数逼近	199
8.1	Hankel 算子	200
8.2	全通扩展	206
8.3	最优 Hankel 范数逼近	217
8.4	Hankel 范数逼近的 $\mathcal{L}_\infty$ 界	222
8.5	平衡截断的界	227
8.6	Toeplitz 算子	230
8.7	圆盘上的 Hankel 和 Toeplitz 算子*	231
8.8	Nehari 定理	237
8.9	注释和参考	244
第九章	模型不确定性和鲁棒性	245
9.1	模型不确定性	245
9.2	小增益定理	250
9.3	稳定无结构不确定性下的稳定性	254
9.4	无结构鲁棒性能	263
9.5	增益裕度和相角裕度	272
9.6	经典控制论在处理 MIMO 系统时的不足之处	275
9.7	注释和参考	279
第十章	线性分式变换	281
10.1	线性分式变换(LFT)	281
10.2	关于 LFT 的例子	289
10.3	基本原则	300