



国防科技图书出版基金

Nussbaum Gain Control of Supersonic Missiles

超声速导弹 Nussbaum 增益控制技术



雷军委 梁勇 吴华丽 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

超声速导弹 Nussbaum 增益控制技术

Nussbaum Gain Control of
Supersonic Missiles

雷军委 梁勇 吴华丽 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

超声速导弹 Nussbaum 增益控制技术/雷军委,梁勇,吴华
丽著. —北京:国防工业出版社,2014.5

ISBN 978-7-118-09285-1

I. ①超... II. ①雷...②梁...③吴... III. ①导弹控
制—增益控制—研究 IV. ①TJ765

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 049750 号

※

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 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 6 字数 163 千字

2014 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 69.90 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助

的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)				
	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

随着超声速武器的发展,尤其是武器速度增加所带来的非线性问题更加突出,传统控制理论对非线性问题的处理面临着巨大的挑战。因而新理论的研究需求越来越迫切,在未来高超声速武器的控制中,自适应控制技术是一项非常有潜力与发展前途的理论。而 Nussbaum 增益理论又是自适应理论中较新的一个分支。

当飞行速度小于马赫数 4 时,超声速导弹很少出现控制方向未知问题。然而随着飞行速度的进一步增加,首先出现的问题是基于部分舵效应可以忽略的假设难以成立,即 a_{35} 不可完全忽略,此时出现多控制方向未知问题。尤其是 a_{35} 的方向性,在一大类超声速导弹中是难以预知的,且其发生变化的可能性是较大的。

必须强调的是,超声速导弹控制问题在未来很长一段时间都是一个复杂、任重而道远的问题,而且 Nussbaum 增益技术是一项较新的理论,将其应用于超声速导弹控制,本书工作显然是不够的。因此本书仅仅是“抛砖引玉”,希望后来人能够进一步将其完善。

本书以超声速导弹控制方向未知问题为背景,研究其 Nussbaum 增益控制技术。本书可作为工科院校航空航天领域控制类、计算机类、电气类和仪器仪表等相关专业的高年级本科生及硕士和博士研究生的教材或教学参考书;也可供从事航空航天飞行控制专业的工程技术人员学习参考。

本书的出版得到海军航空工程学院控制工程系的大力支持,在此对控制工程系赵国荣、张正良、周绍磊、胡云安、商锦斌和吴进华表示诚

挚的谢意。感谢飞行器控制教研室梁勇主任与吴华丽主任,他们完成了本书部分内容的编辑与书稿修订工作,使得本书得以顺利出版。

由于作者水平有限,书中不妥之处,敬请读者批评指正。

雷军委
2013 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究现状	5
1.2.1 超声速导弹的研究现状	5
1.2.2 Nussbaum 增益与相关控制技术的研究现状	9
1.2.3 本书的内容安排	14
第 2 章 Nussbaum 增益控制相关基本理论	16
2.1 Lyapunov 稳定性相关理论	16
2.1.1 Lyapunov 稳定性	16
2.1.2 输入-状态稳定性	18
2.1.3 控制 Lyapunov 函数	19
2.2 Global Terminal 控制理论	20
2.2.1 定义与定理	20
2.2.2 全局 Terminal 函数的构造准则	22
2.2.3 仿真与举例	23
2.3 Nussbaum 增益自适应控制与参数辨识	25
2.3.1 Nussbaum 增益的定义与相关引理	26
2.3.2 普通自适应方法	28
2.3.3 Nussbaum 增益自适应方法设计	30
2.3.4 仿真分析	33
2.4 本章小结	41

第 3 章 超声速导弹 Nussbaum 增益反演自适应控制	42
3.1 引言	42
3.2 问题描述	43
3.2.1 模型描述	43
3.2.2 预备知识	44
3.2.3 模型不确定性	44
3.2.4 主要假设	45
3.3 基于 Nussbaum 增益的反演自适应控制器设计	45
3.4 超声速导弹 Nussbaum 增益控制仿真分析	49
3.4.1 模型参数设定	49
3.4.2 控制参数选取	50
3.4.3 仿真分析	51
3.5 本章小结	53
第 4 章 超声速导弹 Nussbaum 增益滑模自适应控制	54
4.1 引言	54
4.2 问题描述	54
4.2.1 模型描述	54
4.2.2 预备知识	55
4.3 超声速导弹 Nussbaum 增益滑模自适应控制器设计	56
4.4 仿真分析	60
4.5 本章小结	63
第 5 章 超声速导弹的单边 Nussbaum 增益控制	64
5.1 引言	64
5.2 下三角型系统的单边 Nussbaum 增益控制方法	65
5.2.1 模型描述	65
5.2.2 单边 Nussbaum 增益控制方法	66
5.3 超声速导弹的单边 Nussbaum 增益控制	68
5.3.1 模型描述	68

5.3.2	控制器设计	68
5.3.3	仿真分析	73
5.4	复杂系统的单边 Nussbaum 增益控制方法	75
5.4.1	模型描述	75
5.4.2	复杂系统的 Nussbaum 增益控制方法	76
5.5	复杂超声速导弹的单边 Nussbaum 增益控制	84
5.5.1	模型描述	84
5.5.2	控制器设计	85
5.5.3	仿真分析	90
5.6	本章小结	92
第 6 章 超声速导弹 Nussbaum 增益普适输出		
	反馈自适应控制	93
6.1	引言	93
6.2	问题描述	94
6.3	双动态增益普适输出反馈自适应控制	95
6.4	基于极点自调节的普适输出反馈自适应控制	101
6.4.1	控制律设计	101
6.4.2	实例与仿真	104
6.5	超声速导弹 Nussbaum 增益普适输出反馈自适应控制	107
6.5.1	模型描述	107
6.5.2	控制律设计	107
6.5.3	仿真与分析	110
6.6	本章小结	113
第 7 章 超声速导弹有界 Nussbaum 增益与		
	反演 LPID 复合控制	114
7.1	引言	114
7.2	有界 Nussbaum 增益自适应方法	115
7.3	反演积分型 PI 复合控制方法	120
7.4	反演滤波微分型 PID 复合控制方法	122

7.5	反演高阶积分型 PID 复合控制方法.....	129
7.6	反演自适应型 PID 复合控制方法.....	131
7.7	超声速导弹有界 Nussbaum 增益与 反演 LPID 复合控制	136
7.7.1	模型描述	136
7.7.2	控制律设计	137
7.7.3	仿真分析	139
7.8	本章小结.....	142
附录 A	仿真程序.....	144
附录 B	控制系统仿真框图	157
参考文献		160
后记		169
致谢		171

CONTENTS

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Background	1
1.2	Development Status	5
1.2.1	Development Status of Supersonic Missiles	5
1.2.2	Development Status of NGA Control and Related Methods	9
1.3	Arrangement of The Dissertation	14
Chapter 2	Related Theory about the Nussbaum	
	Gain Control	16
2.1	Lyapunov Stability Theory	16
2.1.1	Lyapunov Stability	16
2.1.2	Input – State Stability	18
2.1.3	Control Lyapunov Function	19
2.2	Global Terminal Control Theory	20
2.2.1	Defination and Theory	20
2.2.2	Global Terminal Function	22
2.2.3	Simulation and example	23
2.3	Nussbaum Gain Adaptive Control and Parameter Identification	25
2.3.1	Nussbaum Gain Related Theory	26
2.3.2	Common Adaptive Control Method	28
2.3.3	Nussbaum Gain Adaptive Control Method	30
2.3.4	Simulation Analysis	33
2.4	Summary	41

Chapter 3	Nussbaum Gain & Adaptive Backstepping Control of Supersonic Missiles	42
3.1	Introduction	42
3.2	Problem Description	43
3.2.1	Model Description	43
3.2.2	Basic Knowledge	44
3.2.3	Uncertainties of Model	44
3.2.4	Main Assumption	45
3.3	Backstepping Adaptive Controller Design Based on Nussbaum Gain Theory	45
3.4	Simulation of Supersonic Missiles with Nussbaum Gain Control	49
3.4.1	Parameters of Model	49
3.4.2	Parameters of Controller	50
3.4.3	Simulation Analysis	51
3.5	Summary	53
Chapter 4	Nussbaum Gain & Adaptive Sliding Mode Control of Supersonic Missiles	54
4.1	Introduction	54
4.2	Problem Description	54
4.2.1	Model Description	54
4.2.2	Basic Knowledge	55
4.3	Nussbaum Gain Sliding Mode Control of Supersonic Missiles	56
4.4	Simulation and Analysis	60
4.5	Sammary	63
Chapter 5	Unilateral Nussbaum Gain Control of Supersonic Missiles	64
5.1	Introduction	64
5.2	Unilateral Nussbaum Gain Control of Triangle Type Systems	65

5.2.1	Model Description	65
5.2.2	Unilateral Nussbaum Gain Control Theory	66
5.3	Unilateral Nussbaum Gain Control of Supersonic Missiles	68
5.3.1	Model Description	68
5.3.2	Controller Design	68
5.3.3	Simulation Analysis	73
5.4	Unilateral Nussbaum Gain Control of Complex Systems	75
5.4.1	Model Description	75
5.4.2	Nussbaum Gain Control Method of Complex Systems	76
5.5	Unilateral Nussbaum Gain Control of Complex Supersonic Missiles	84
5.5.1	Model Description	84
5.5.2	Controller Design	85
5.5.3	Simulation Analysis	90
5.6	Sammary	92
Chapter 6	Nussbaum Gain Universal Output Feedback Control of Supersonic Missiles	93
6.1	Introduction	93
6.2	Problem Description	94
6.3	Double Dynamic Gain Universal Output Feedback Adaptive Control	95
6.4	Universal Output Feedback Control Based on Adaptive Poles	101
6.4.1	Controller Design	101
6.4.2	Simulation Analysis	104
6.5	Nussbaum Gain Universal Output Feedback Adaptive Control of Supersonic Missiles	107
6.5.1	Model Description	107

6.5.2	Controller Design	107
6.5.3	Simulation Analysis	110
6.6	Sammary	113
Chapter 7	Bounded Nussbaum Gain and Backstepping LPID	
	Hybrid Control of Supersonic Missiles	114
7.1	Introduction	114
7.2	Adaptive Bouned Nussbaum Gain Method	115
7.3	Backstepping Integral PI Hybrid Control Method	120
7.4	Backstepping Filter Differential PID Control Method	122
7.5	Backstepping High – order intergral Hybrid Control Method	129
7.6	Backstepping adaptive PID Hybrid Control Method	131
7.7	Bounded Nussbaum Gain and Backstepping LPID	
	Hybrid Control of Supersonic Missiles	136
7.7.1	Model Description	136
7.7.2	Control Design	137
7.7.3	Simulation Analysis	139
7.8	Sammary	142
Appendix A	Simulation Progarm	144
Appendix B	Simulation Structure of Control System	157
References		160
Postscript		169
Acknowledgements		171

第1章 绪 论

1.1 研究背景

超声速技术作为航空、航天技术的结合点,涉及许多学科,是诸多前沿技术的集合。而其中高超声速技术有很强的前瞻性、战略性与带动性^[1-5],且高超声速技术的发展将会对未来军事发展战略、空间技术、武器体系构建乃至整个科学技术进步产生重大影响。在民用航空方面,利用高超声速技术设计的空天飞机可以将中国本土到世界任何地方的飞行时间大大缩短^[6-9]。在军事方面,高超声速导弹比常规的战斗机和运输机有效载荷多,飞得更快、更远,而且再次飞行准备所需的完善基础设施比较少。此外,由于其较高的飞行高度、极快的飞行速度以及较强的侧向机动性,使得目前任何的防空武器都无法击中它^[10,11]。

本书是在某型超声速导弹过载控制与某型高超声速试飞器设计两个课题的背景下完成的。当前超声速导弹在追求更快速度的同时,给控制系统的设计带来了前所未有的挑战。简单来说,主要体现有以下几个方面:

(1) 攻角控制。高超声速导弹对攻角控制提出了比传统姿态控制更高的要求。如发动机的推力和工作状态与攻角密切耦合,需要对攻角有更精准的控制。然而,攻角信号本身难以准确测量,给控制带来了困难。

(2) 非线性。由于很多原因,使高超声速导弹的非线性特征会更加显著。高超声速发动机的推力/速度对攻角的强依赖特性本身就是加剧导弹系统非线性的原因之一。因此整个控制系统的设计上,可能