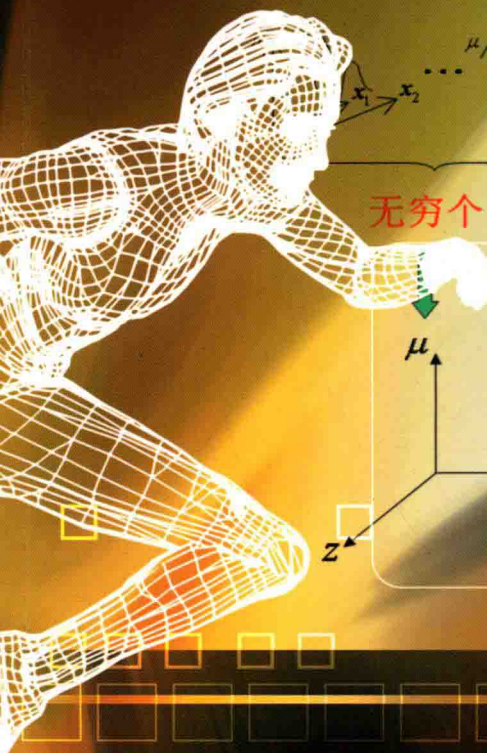


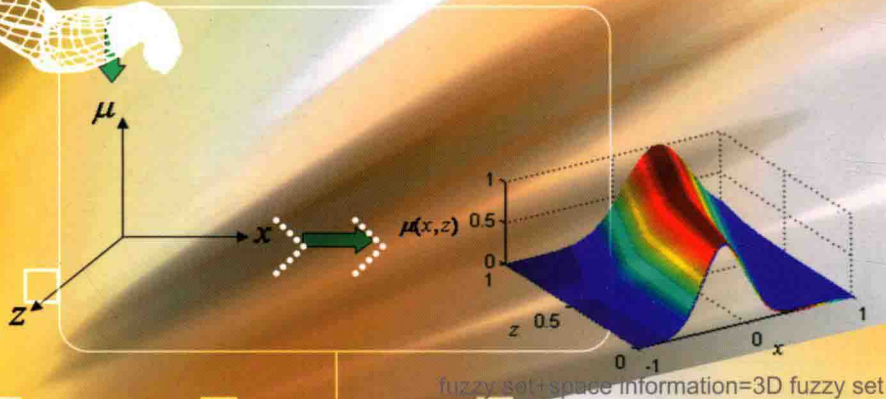
融合空间信息 的三域模糊控制器

RONGHE KONGJIAN XINXI
DE SANYU MOHU KONGZHIQI

张宪霞 著



无穷个



 中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

融合空间信息的 三域模糊控制器

张宪霞 著

電子工業出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书针对现实世界中广泛存在的空间分布动态系统,介绍一种三域模糊控制器。三域模糊控制器将表征空间信息、处理空间信息与模糊逻辑控制完美地融合在一起,拓展了传统意义上的模糊逻辑控制。本书详细介绍三域模糊控制器的基础理论,对空间分布三域模糊控制系统进行理论分析,并且给出基于数据驱动的设计方法。

全书分为4篇,由浅至深,各自独立又相互关联。第一篇主要介绍三域模糊集合、三域模糊控制策略、三域模糊控制器基本构成等相关基础知识;第二篇着重讨论三域模糊控制器的数学解析结构和三域模糊控制系统的稳定性设计问题;第三篇通过空间分解和协调策略,探讨具有多个控制源的空间分布系统的三域模糊控制问题;第四篇探讨仅有输入输出数据的情况下,利用机器学习算法设计三域模糊控制器的方法。

本书内容丰富且详实,可作为模糊控制、智能控制、自动控制、软计算、数据挖掘等领域的教师、研究人员、技术人员的参考书,也可作为相关专业的研究生教材。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

融合空间信息的三域模糊控制器/张宪霞著. —北京:电子工业出版社,2017.1
ISBN 978-7-121-30678-5

I. ①融… II. ①张… III. ①模糊控制器—研究 IV. ①TM571

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第311561号

责任编辑:许存权

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:720×1 000 1/16 印张:12.25 字数:274千字

版次:2017年1月第1版

印次:2017年1月第1次印刷

定价:59.00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)88254888,88258888。

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

本书咨询联系方式:(010)88254484, xucq@phei.com.cn。

前 言

PREFACE

在现实生活和生产过程中，空间分布几乎无处不在。尤其是石油、化工、炼钢、轧钢等一些在国民经济中占有着重要地位的复杂大型工业过程，不但具有非线性、不确定性、大时滞、时变性特点，而且还具有较强的空间分布特性。这类系统被称为空间分布系统或分布参数系统。系统的动态行为通常可由偏微分或者偏积分-积分方程或积分方程等所描述。传统上，通常忽略或者简化被控对象的空间分布特性，采用集总参数控制方法进行控制。而在过去几十年发展起来的经典分布参数系统控制方法，不但需要系统的精确数学模型，并且涉及大量复杂的数学知识，难以在工程实践中得以应用。研究能够表征、处理空间信息的模糊控制，成为空间分布系统领域一个重要的研究课题之一。

模糊控制自产生到现在，已取得许多成果，得到广泛应用。它在实际应用中具有两个显著优势，一是设计控制器不需要被控系统的数学模型，二是通过实际经验而非复杂数学推导可获得令人满意的控制器。正是这两个优势，使得模糊控制一直活跃在控制领域这个大舞台上。

传统的模糊控制是基于二维模糊集合的模糊系统，并不具备表征空间信息和处理空间信息的能力。当空间分布系统的空间分布均匀或者接近均匀时，整体空间可用一个质点来近似，对此质点可设计传统模糊控制器。当空间分布系统的空间分布不均匀，而这种空间分布特性又足以用空间上的有限特征点来近似时，可针对这些特征点设计传统多变量模糊控制器。当空间分布系统的空间分布不均匀，并且这种空间分布特性又不能够以空间上的有限特征点来近似时，基于传统模糊集合的传统模糊控制已无法提出有效的解决方案。因此，研究能够表征空间信息的模糊集合，研究能够处理空间信息的模糊控制器，成为

空间分布系统智能控制的新热点。

作者在博士生导师李少远教授与李涵雄教授的指导下开始接触这个领域，十余年一直开展这个领域的研究。作者也终身受益于在攻读博士期间与导师们相处的日子，深深感受到他们对科学研究的热爱、执着与勤奋，学到了他们看待科学问题的眼光与解决具体问题的能力。

作者刚开始工作的那一年，凭借研究空间分布系统三域模糊控制问题获得了生平第一项国家自然科学基金项目的资助，这对作者学术生涯的启动和后续发展起到了极其重要的作用。在该项目的支持下，作者带领学生继续深入研究这个领域的热点问题。从2008年起，作者指导了研究生江晔、秦静静、孙梦、李佳佳、戚俊达、秦磊、赵立国、苏夏、付志强、谢伟、赵连荣、代杰、章进强、成冲，对基于数据学习的三域模糊控制问题与建模问题进行了持续多年的研究。特别值得一提的是江晔，对新思路新方法进行了各种艰苦探索，取得了出色的成果，最终以可以跟博士论文相媲美的硕士论文毕业。本书部分内容是来自作者指导研究生的工作成果。作者对他们辛勤的劳动表示衷心感谢。

本书是空间分布系统模糊控制领域的第一本专著，由相互独立的4篇组成，内容涉及空间分布系统三域模糊控制领域的前沿内容和作者的研究成果，凝聚了作者十余年来在两项国家自然科学基金项目、上海市优秀青年教师与上海大学创新基金项目支持下的研究成果与心得。

本书可供模糊控制、智能控制、自动控制、软计算、数据挖掘、分布参数系统等领域的教师、研究人员、技术人员阅读，也可作为相关专业的研究生教材。由于作者学识有限，不足之处在所难免，恳请广大读者给予批评指正。

本书是作者多年研究思路和工作成果的一个阶段性小结。本书向感兴趣的读者全面介绍相关领域的研究思路和目前所取得的点滴成果，期望它的出版能引起更多学者对三域模糊控制器的兴趣，希望读者能将三域模糊控制器应用于更多领域，同时也寄希望于读者能提供新的思路，以继续进行该领域的研究。

张宪霞

2016年9月

目 录

CONTENTS

第一篇 基础知识	1
第 1 章 概述	2
1.1 引言	2
1.2 空间分布动态系统的经典控制方法	4
1.3 空间分布动态系统的模糊控制方法	8
1.4 处理空间信息的传统模糊控制方案	9
1.5 本篇主要工作	12
第 2 章 空间分布动态系统	13
2.1 系统概述	13
2.2 四个典型系统	15
2.2.1 填充床催化反应器	15
2.2.2 棒式催化反应器	16
2.2.3 非等温填充床反应器	18
2.2.4 三区快速加热化学气相沉积 (RTCVD) 反应器	19
第 3 章 三域模糊集合与三域模糊控制策略	22
3.1 三域模糊集合	22
3.1.1 定义	22
3.1.2 运算法则	23
3.2 三域模糊集合与其他模糊集合的比较	24

■融合空间信息的三域模糊控制器■

3.2.1	传统模糊集	24
3.2.2	type-2 模糊集	25
3.2.3	区间值模糊集	25
3.2.4	四种模糊集合比较	26
3.3	模糊控制策略	27
3.3.1	传统模糊控制策略	27
3.3.2	三域模糊控制策略	28
第4章	三域模糊控制器	30
4.1	三域模糊控制器构成	30
4.2	三域模糊控制器设计	36
第5章	基于专家经验的三域模糊控制器设计	38
5.1	三域模糊控制器设计	38
5.2	仿真结果与比较	40
	本篇小结	49
	本篇参考文献	50
第二篇	理论分析	59
第6章	概述	60
6.1	引言	60
6.2	传统模糊控制的解析分析	60
6.3	传统模糊控制系统的稳定性分析及设计	62
6.4	规则库平面分解法	65
6.5	本篇主要工作	69
第7章	三域模糊控制器的数学解析	71
7.1	三域模糊控制器的规则库平面分解	71
7.2	三域模糊控制的数学解析结果	77

第 8 章 三域模糊控制器的结构分析	79
8.1 三域模糊控制器的滑模结构	79
8.2 三域模糊控制器的空间等价结构	81
第 9 章 三域模糊控制系统的稳定性分析	89
9.1 Lyapunov 稳定性	89
9.1.1 系统描述	89
9.1.2 全局稳定性条件	91
9.1.3 仿真研究	96
9.2 BIBO 稳定性	97
9.2.1 BIBO 稳定性条件	98
9.2.2 仿真研究	106
本篇小结	108
本篇参考文献	109
第三篇 多控制源空间分布系统	117
第 10 章 概述	118
第 11 章 基于分解协调的三域模糊控制器设计	119
11.1 分解策略	119
11.1.1 空间分解	119
11.1.2 复杂系统分解	121
11.2 协调策略	121
11.3 基于分解协调的三域模糊控制系统框架	122
11.4 基于分解协调的三域模糊控制器设计	123
11.4.1 设计原理	123
11.4.2 设计步骤	126
11.4.3 设计实例与仿真研究	126

本篇小结	130
本篇参考文献	131
第四篇 基于数据驱动的设计方法	133
第 12 章 概述	134
12.1 引言	134
12.2 基于数据驱动的传统模糊控制设计	134
12.3 本篇主要工作	137
第 13 章 三域模糊控制器作为非线性映射器	138
13.1 三域模糊控制器是一个非线性映射器	138
13.2 空间模糊基函数及三域模糊控制器的三层网络结构	140
13.3 三域模糊控制器的万能逼近性	142
第 14 章 基于最近邻域聚类与支持向量回归机的三域模糊 控制器设计	146
14.1 设计框架	146
14.2 结构学习	147
14.2.1 基于最近邻域聚类的初始结构学习	147
14.2.2 结构简化	149
14.3 参数学习	151
14.4 仿真应用	153
第 15 章 基于支持向量回归机的三域模糊控制器设计	159
15.1 设计原理	159
15.1.1 空间模糊基函数与空间核函数	160
15.1.2 单输出三域模糊控制器与单输出 SVR 的等价关系	161
15.2 设计步骤	162

15.3 仿真应用·····	165
本篇小结·····	172
本篇参考文献·····	173
第16章 结束语 ·····	176
附录 支持向量回归机 (SVR) ·····	178
本附录参考文献·····	183

第一篇 基础知识

第1章 概述

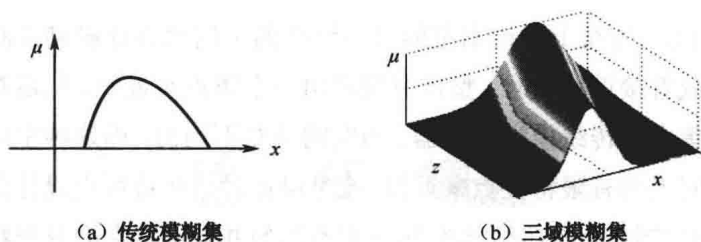
1.1 引言

模糊逻辑控制自首次介绍^[1]，并成功应用于蒸汽锅炉机组^[2]，已成为模糊集理论中最活跃、取得成果最多的研究领域之一，这主要得力于它在实际应用中具有两个显著优势^[3]：一是设计控制器不需要被控系统的数学模型，二是可以通过实际经验而非复杂数学推导获得令人满意的控制器。此外，模糊控制本身所具有的语词计算和处理不确定性、不精确性和模糊信息的能力^[4]，使它成为解决非线性复杂系统控制问题的一种有效方法。迄今为止，它已被广泛应用于多种实际控制领域，如家电控制、生物医药系统控制^[3]、蒸汽机控制^[2]、机器人控制^[5]以及电厂控制^[6]等。模糊控制的理论和应用研究已受到了自动控制界学者和工程师们越来越多的关注。

在现实生活中及许多工业系统中，空间分布是一显著特征。许多复杂大工业过程，如石油、化工、炼钢、轧钢等在国民经济中占有着极其重要的地位，系统的状态、控制、输出及参数等不但随时间变化，而且也随空间变化^[7]。这类系统被称为空间分布系统（Spatially-Distributed System）^{[8][9]}，或者分布参数系统（Distributed Parameter System）^{[10][11]}，系统的动态行为通常可由偏微分或者偏积分—积分方程或积分方程描述等所描述。而在过去几十年中发展起来的经典分布参数系统控制方法，不但需要系统的精确数学模型，并且涉及大量复杂的数学知识^[11]，难以在工程实践中得以应用。模糊控制因其自身所具有的两个显著优点，即不需要被控系统的数学模型与可利用人类控制经验，为 DPS 控制问题提供了新的解决途径。

针对 DPS, 传统上可根据空间分布性质的不同来设计模糊控制器。当空间分布均匀或者接近均匀时, 整体空间可用一个质点来近似, 然后对此质点设计传统模糊集合及传统模糊控制器。当空间分布不均匀, 而这种空间分布特性又足以用空间上的有限特征点来近似, 此时可针对这些特征点设计传统模糊集合及传统模糊控制器。然而, 当空间分布不均匀并且这种空间分布特性又不能够以空间上的有限特征点来近似, 在这种情况下, 基于传统模糊集合的传统模糊控制器已无法提出有效的解决方案。这主要是因为传统模糊集合(参见图 1-1 (a))是二域(变量域和隶属度域)信息的集合, 没有将表征分布参数性质的空间信息考虑在内, 这种固有特性使得传统模糊控制器不能有效地解决 DPS 控制问题^[12]。

一种新型的三域模糊集合与三域模糊控制器^[12]应运而生。三域模糊集是在传统模糊集的基础上增加了表征空间信息的第三个域, 因此称为“三域”(Three Domains, 3D)模糊集(其三域为: 变量域、隶属度域及空间域, 参见图 1-1 (b))。三域模糊集在本质上具备了表征空间信息的能力。三域模糊控制器(Three-domain Fuzzy logic controller)是在三域模糊集合的基础上, 提出的一种能表征空间信息与处理空间信息的模糊逻辑控制器。三域模糊控制器与传统模糊控制器具有相似结构, 由空间模糊化、空间模糊规则推理及去模糊化构成, 但却有着其独特的特点, ①可将来自空间域上的多个传感器输入作为空间分布输入, 采用三域模糊集构造空间信息; ②具有能够处理空间信息的模糊规则推理机制; ③规则数目不会随着测量传感器的数目增加而增加。在控制策略上, 三域模糊控制器能够模拟人类操作员知识或者专家经验从整个空间角度去控制一个空间分布的场。这种新型的三域模糊控制器不但具备了传统模糊控制器的各种优点, 而且能有效地表征和处理空间信息, 这使得它成为一类具有理论探讨意义和广阔应用前景的模糊控制器。



x : 基本变量 μ : 隶属度 z : 空间

图 1-1 传统模糊集与三域模糊集

1.2 空间分布动态系统的经典控制方法

在过去的四五十年中,人们对空间分布系统控制问题进行了大量研究,根据处理空间信息的不同,主要分为三类方法:简化法、早期集总化法和后期集总化法。前两类方法,最终都将集总参数控制方法应用于空间分布系统。而第三类方法,则采用了分布参数系统理论来设计控制器。分布参数系统理论主要是基于精确的动态数学模型,应用半群理论、算子方程等,来解决无限维系统问题^[8]。

1. 简化法

在实际工程应用中,由于空间分布系统的分布复杂及缺乏合适的测量手段来表征系统的分布特性,人们常把系统的空间分布特性忽略掉,把它简化成为一个集总参数系统,从而使用许多经典的成熟的集总参数控制方法对其进行控制和优化。采用这种简化方法,由于完全忽略了系统所固有的空间分布特性,因而通常得不到理想的控制效果。

2. 早期集总化法

这种方法是将描述空间分布系统的偏微分方程(PDE)和边界条件转换成

常微分方程组，用产生的常微分方程（ODE）组来近似原来的空间分布系统，换言之，用有限维系统近似原来的无限维系统。然后针对产生的有限维系统，应用经典的成熟的集总参数控制方法设计控制器。而有限维系统对无限维系统的逼近程度决定了控制系统的性能。为了使得近似系统有效，一般希望它满足以下要求。

- 相容性。通过某种离散化方法得到的近似系统，当空间增量或者（与）时间增量趋于零时，近似系统能够逼近于原来的系统。
- 收敛性。当空间增量或者（与）时间增量满足一定的条件时，要求近似系统控制问题的准确解收敛于原系统问题的解。
- 稳定性。要求在求解近似系统时，如果在计算的开始就存在误差，在计算过程中，误差的影响能够逐渐消失或者保持有界。

因此，对建立的近似系统必须进行相容性、收敛性和稳定性的分析。有限差分法^[13]与有限元法^[14]为常用的两种空间离散方法。

① 有限差分方法

将空间域或者（与）时间域划分为差分网格，用有限个网格节点代替连续的空间域或者（与）时间域，用 Taylor 级数展开等方法，把偏微分方程中的导数项用网格节点上的函数值的差商代替进行离散，从而建立以网格节点上的值为未知数的常微分方程组或者代数方程组。对于有限差分格式，从格式的精度来划分，有一阶格式、二阶格式、高阶格式。从差分的空间形式来考虑，可分为中心格式和逆风格式等。有限差分法作为一种重要的数值离散方法，以其求解问题时的易操作性和较大的灵活性，在科学研究和工程计算中得到了广泛应用。

② 有限元方法

将求解区域按一定规则作单位剖分，并在部分集上构造一个具有紧支撑的线性无关测试函数集，再将微分方程在该函数集上积分，然后，微分方程的解就可以表示成为这些测试函数的某种线性组合。有限元的主要优点是：概念浅显，易于掌握，既可以从直观的物理模型来理解，也可以按严格的数学逻辑来研究；适应性强，应用范围广，能成功地分析具有复杂边界条件、非线性、非

匀质材料、动力学等难题。

与简化法相比较,早期集总化法虽然存在一定的优势,但也存在一些缺点。例如,为了使得有限维系统能够较好地逼近原系统,那么需要高阶近似,而阶数越高,计算量越大;由执行器与传感器的空间配置问题而产生的可控性、稳定性问题;由于早期空间离散化失去了系统的物理特性,从而导致由此设计的控制器并没有充分利用系统的分布特性等。

3. 后期集总化法

利用分布参数系统理论,根据可控性、稳定性、控制器结构等对系统的全部偏微分方程进行分析、设计控制器,由于有限维控制器实施的需要,最后才对控制器进行集总化的方法。这种方法可充分考虑系统的空间分布特性,采用了一套分布参数系统理论来设计控制器。

① 线性空间分布系统

早在上世纪六十年代,人们便开始了对线性空间分布控制系统的研究,至今在稳定性、能控性、能观性等方面已经形成了比较完善的理论体系。最早系统地从事空间分布系统控制理论研究的是布特柯夫斯基、王耿介、Lions 等人。布特柯夫斯基把集总参数系统控制理论中的极值原理推广到某些空间分布系统中,后来把矩量法应用到空间分布系统的最优控制^[15]。王耿介讨论了空间分布系统的稳定性、能控性、能观性以及最优控制问题^[16]。Lions 发展了空间分布系统的最优控制和辨识理论^[17]。在国内,早在六十年代初期,钱学森、宋健、张学铭、关肇直等已开始从事空间分布系统控制理论及其应用的研究,并取得了一些成果^{[18][19][20]}。随着现代科学技术的发展以及实际工程控制系统设计的需要,空间分布系统控制问题已经成为一个重要研究领域,在这领域相继取得了比较丰富的理论成果。Balas 先后给出了利用早期集总化法与后期集总化法进行线性空间分布系统控制器设计和稳定性分析的结果^{[21][22][23][24][25]}。Byrnes 等针对线性抛物型空间分布系统研究了状态反馈调节问题^[26],然后又将输出调节几何理论推广具有有界输入/输出算子的线性空间分布系统^[27]。针对线性抛物型空间分布系统, Yoshida 和 Matsumoto 首先使用有限积分变换技

术将系统进行降阶,然后针对降阶的耦合状态模型设计了卡尔曼观测器和状态反馈控制器^[28]。基于相似的集总化方法, Yoshida 等设计了基于内模调整规则的控制^[29]。Sadek 和 Bokhari 采用了有限差值正交多项式的集总化方法,研究了线性抛物型 PDE 方程的优化控制问题^[30]。Lu 和 Fong 研究了包含有未知参数的扰动算子的线性空间分布系统的稳定鲁棒性分析的问题^[31]。Reinschke 和 Smith 针对开环不稳定的线性时不变空间分布系统设计了基于 H^∞ 框架的反馈控制器^[32]。

② 非线性空间分布系统

近年来,国内外学者对非线性空间分布系统做了大量的分析研究,采用了多种控制方法,包括 PID 控制^[33]、模态控制^[34]、滑模控制^[35]、几何控制^[36]、基于 Lyapunov 稳定性控制^[37]、基于无限维系统理论的控制^[38]、模型预测控制^[39]、自适应控制^[40]、优化控制^[41]等。

虽然利用了丰富的分布参数系统理论来指导控制器设计,由于在实施控制的时候需要对无限维控制解进行近似(如无限级数的截断),因此会存在一定的误差。基于上述的考虑,有些学者针对能够主导空间分布系统的低阶控制方法进行了大量的研究。很多空间分布系统的主导动态行为可以由少量自由度所表征,这使得人们可以利用高级模型降阶技术得到无限维系统的精确低维近似模型。模型降阶技术包括基于数据构建基函数的 Galerkin 方法、非线性 Galerkin 方法^[42]等。为此,适用于非线性集总参数系统的一些控制方法,如微分几何^[43]和 Lyapunov 技术^[44]可以应用于非线性空间分布系统的控制器设计。在过去的十多年,非线性控制理论与非线性无限维系统相结合使得非线性空间分布控制系统在理论和实践上得到一些突破。尤其对于传递反应过程(如抛物型 PDEs)^[37]、流体流动(如 Navier-Stokes 方程)^[45]及颗粒分布(如群体平衡)^[46]这些系统,已经形成了非线性低阶反馈控制综合分析的一般框架。在所设计的框架下,无限维闭环系统的稳定性、性能及鲁棒性均能由低维模型逼近精度所给出。

有些系统,如双曲型空间分布系统,具有能量相近的无限维模态。对于此类系统,就不能利用模型降阶技术,需要采用新的控制方法。针对非线性一阶