

文章编号: 1000-8055 (2004) 02-0259-06

高超声速发动机分布参数控制问题

于达仁, 崔涛, 鲍文

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 高超声速发动机表现出了明显的分布参数特性, 采用集中参数控制方法难以满足发动机控制要求。本文结合分布参数控制理论的研究进展和周边的学科的发展, 提出了高超声速发动机分布参数控制问题, 是对传统的集中参数控制构架的继承和突破。分布参数控制体系的新原理、方法、实现手段将对高超声速发动机系统的运行和设计产生重要影响。

关键词: 航空、航天推进系统; 高超声速发动机; 分布参数控制; 集中参数控制

中图分类号: V233.7

文献标识码: A

Distributed Parameter Control method for Hypersonic Jets

YU Da-ren, CUI Tao, BAO Wen

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract Hypersonic jets show obvious distributed parameter characteristics, and the concentrated parameter control method is hard to function. In this paper, the distributed parameter control method for hypersonic jets which is the succession and breakthrough of traditional concentrated parameter control method is put forward after analyzing the development of distributed parameter control theory and corresponding circumjacent subjects. The new principles and methods of distributed parameter control may have an impact on the operation and design of hypersonic jets.

Key words aerospace propulsion system; hypersonic jets; distributed parameter control; concentrated parameter control

1 航空发动机控制的简要回顾

航空动力装置研制的初期, 由于飞行速度不高, 发动机的推力不大, 所采用的控制方案基本是不变的开环控制方案, 控制精度较低。随着发动机性能要求的提高和经典控制理论的完善, 在发动机控制中应用了经典控制理论的闭环反馈控制原理, 较大的提高了控制精度和系统的动态性能, 但经典的反馈控制理论设计方法仅解决了单

输入-单输出控制系统的设计问题。现代航空发动机的工作范围进一步扩大, 要求在较大飞行包线内具有良好的工作性能, 需要设计复杂的多变量耦合控制系统。

现代控制理论在航空发动机多变量控制中的研究已进行了大量的工作。基于小偏差理论的线性控制系统设计是主要研究手段^[1], 内容包括镇定、线性二次型最优控制、随机控制、自适应控制、鲁棒控制、系统辨识、状态观测器技术等。由

收稿日期: 2003-05-12 修订日期: 2003-08-15

基金项目: 哈尔滨工业大学校基金资助项目 (HIT-2003-43); 黑龙江省杰出青年科学基金资助项目

作者简介: 于达仁 (1966-), 男, 山西朔县人, 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院教授、博导, 博士, 主要从事发动机建模、仿真及控制方向的研究。

于航空发动机系统大范围工况变化的强非线性特性,根据工作点设计的线性控制器难保证大范围工作的稳定性和动态性能,因此如何将先进的多变量控制规律有效的用于航空发动机强非线性的多变量系统仍将是重要的研究课题。近年来,随着人工智能技术、非线性控制理论的发展,人们在航空发动机系统的神经网络控制、模糊控制、非线性控制等方面作了不少工作^[2,3]。可是尽管将现代控制理论用于航空发动机的研究文献非常多,但由于种种原因,即使世界上最先进的航空发动机真正应用现代控制理论的仍很少,研究在逐步深入过程中,需要人们不断探索。

可以看出,航空发动机的控制主要采用集中参数控制模式,其特征是:忽略了参数在空间上的分布,数学上以常微分方程为描述手段。但是随着高超声速发动机($Ma > 6$)的出现(如高超声速冲压发动机、脉冲爆震发动机),发动机的飞行高度、速度、本体结构、工作特性较常规航空发动机发生了一些质的变化,系统表现为非常强的分布参数特性,要解决高超声速发动机控制的问题,客观上要求突破集中参数控制的框框,采用新的控制策略。

2 高超声速发动机分布参数控制问题的提出

绝大部分物理系统都属于分布参数系统,而将系统模式近似成为集中参数系统,并在此基础上开展的控制技术(多变量控制、最优控制、解耦控制、变结构控制、自适应及鲁棒控制等)至今已十分成熟,在很多领域已证明其实用性与可行性。

发动机系统都是用偏微分方程描述的分布参数对象,但从过去的工作来看,集中参数(平均参数或末端参数)控制是主要的^[4]。而把实际分布参数系统简化成集中参数对象来处理,不外乎两种情况,其一是可以合理简化——例如扰动可以在远小于特征时间尺度的短时间内传播到整个特征空间(如固体传热问题,当物体内部热阻远小于外部热阻时);其二是不得已而为之(受研究手段所限,采取近似处理,牺牲精度)。

但随着发动机进入高超声速飞行阶段,情况发生了变化。集中参数控制不能满足技术的要求了,提出了分布参数控制的问题,其特征是:以偏微分方程为描述手段,考虑了参数在空间上的分布。这个趋势可以从几个方面来分析。

从高超声速发动机的控制要求来看,随着技术的进步,高超声速发动机遇到了许多极端条件下的控制问题(高速、高温、高热流、高强度燃烧),使得研究所面对的特征时间尺度大大缩短,对象的分布参数特征表现明显。如超声速燃烧过程,由于燃烧过程微观尺度的分子碰撞、反应和能量传递,宏观尺度的扩散、对流、湍流和辐射等质量和能量输运,以及气流高速运动和燃烧的相互耦合等,使得超声速燃烧过程表现为明显的分布参数特性,其中高强度燃烧引起的不稳定,将时间尺度减小到 0.1 ms 。如超声速流动过程,由于高超声速流场激波振荡、气流分离、流动分离引起的气流参数的剧烈变化以及局部气流的畸变,单纯的截面状态难以反映系统的工作特性,针对截面状态的控制无法获得整体的控制性能。需要考虑对状态参数的空间分布进行更有效的控制。

分布参数控制问题在双模态超燃冲压发动机燃烧控制上的体现尤为突出。双模态超燃冲压发动机燃烧控制的关键点是能否随着飞行速度的改变,实时的控制发动机的燃烧模态(亚燃、各种过渡模态、超燃),燃烧模态实际是对发动机参数沿轴向分布特性的不同描述,这种参数的分布决定了发动机工作的稳定性和经济性能。但是由于超声速燃烧和流动过程具有强分布参数特性,利用集中参数控制截面参数的方法不能获得整体的性能,甚至造成发动机飞行控制失败。可见,高超声速发动机分布参数控制问题的提出,首先源于其控制需求。

从周边学科的发展来看,近 20 年来计算流体力学、计算传热学、计算燃烧学取得了突破性进展,逐步进入工程应用阶段,同时为偏微分方程处理积累了丰富的知识;流动、传热的反问题研究也取得了不少成果(对应于分布参数对象的辨识问题);这两方面的理论研究进展为高超声速发动机从分布参数角度研究控制问题提供了对象模型方面的支持。

近几十年来分布参数控制理论已取得了长足的进展(见后),针对线性分布参数对象基本上形成了一个初步的理论和设计体系,为高超声速发动机分布参数控制的应用基础研究提供了必要的理论支持。

结合高超声速发动机研制的需求和学科环境,提出从分布参数控制的角度研究其控制问题。

3 分布参数控制理论的发展现状

分布参数控制对象的能量和质量在空间上是连续分布的, 一般用偏微分方程、积分微分方程或泛函微分方程来描述其状态变化规律。这些控制系统具有无穷维自由度的特征。分布参数控制系统包含许多独特的问题, 如变域问题、点控制、边界控制和分布控制问题。传感器和执行器位置控制问题等, 应用集中参数控制模式来解决分布参数对象的控制问题面临着许多理论和实践困难^[5]。采用集中参数的控制模式, 需要对分布参数系统进行某种离散化的近似处理, 这就存在近似系统的有效性问题, 要求集中参数模型与原分布参数模型具有相容性、收敛性、稳定性, 并且近似前后, 系统的可控性要保持一致。对于所建立的近似系统, 需要进行有效性分析。利用集中参数模型准确描述系统将造成模型维数的极大提高, 而系统可控性的要求使得控制维数相应增加。由此将引起控制系统结构复杂、控制算法计算量过大、传感器测量信息过多等问题, 大大增加了控制系统计算容量、速度和可靠性的要求。因此从根本上解决高超声速发动机分布参数系统的控制问题, 依赖于分布参数控制理论的发展和应用。

分布参数控制理论研究始于上世纪 60 年代, 随着现代科学技术的发展以及实际工程控制系统(空间飞行器、柔性机器人、化工过程等)设计的需要, 分布参数系统的控制问题已成为一个十分重要的研究领域^[6~8], 近几十年来, 这一领域已取得了比较丰富的理论和应用成果, 特别是在系统的分析上面, 对线性分布参数控制系统已作了较系统的研究, 得到了关于稳定性、能控性、能观性等方面比较完整的理论结果^[9~11], 在最优控制、镇定、随机控制、自适应控制、鲁棒控制、系统辨识、状态估计、传感器和执行器位置控制等方面也取得了较大的成果^[12~18], 为线性分布参数控制系统的深入研究提供了较完整的方法体系。近年来, 国内外对非线性分布参数控制系统也作了大量的分析研究工作, 在非线性分布参数系统稳定性、镇定、最优控制、变结构控制和状态估计等方面也取得了一定的进展。目前线性分布参数控制理论的研究成果, 已在不少领域得到了初步的应用, 如热处理过程的温度场控制、热防护发汗控制、柔性梁控制等。但是分布参数系统的控制研究领域还主要局限于系统的分析方面, 综合方面的研究还很少, 理论和应用研究仍有待发

展。

分布参数控制系统稳定性理论的研究, 由于系统描述的多样性, 早期主要集中于解决某一类问题, 如分别针对于抛物线型、双曲线型和椭圆型分布参数系统的研究成果。随着集中参数控制系统稳定性理论的日益完善, 人们借助于半群理论及抽象空间中的有关算子理论, 把集中参数控制系统关于稳定性理论的研究方法逐渐推广到分布参数控制系统, 利用李雅普诺夫稳定性和基于频域分析的奈氏稳定性、波波夫超稳定性等理论来研究分布参数控制系统^[19~21]。另外的许多分析方法如基于 Lasalle 不变性原理^[22]和谱理论^[23]的分析方法等, 仍在不断发展之中。随着研究的深入, 分布参数控制系统的稳定性理论将更加体系化。

能控性、能观性是分布参数控制系统两个极其重要的内在性质, 与集中参数控制系统的不同的是, 分布参数控制系统的能控性、能观性与控制器、观测器的位置密切相关。早在上世纪 60 年代集中参数控制系统能控性、能观性的概念就推广到分布参数控制系统中, 较基础的研究根据泛函分析的关于有界线性算子值域的结果, 用线性算子半群理论来处理, 并且用线性算子半群的生成算子的本征元来给出了相应的判别条件^[24, 25], 但分布参数控制系统转移算子的确定仍面临具体的问题。

分布参数控制系统设计方法的研究也开展了大量的工作。关于最优控制问题, 针对不同的系统, 已形成了一套研究方法, 包括变分法、矩量法、庞特里雅金极大值原理、贝尔曼动态规划方法等, 但在最优控制的综合等问题上还存在问题。对于分布参数控制系统镇定和极点配置问题, 已有不少的研究成果, 如用一阶、二阶发展方程描述的控制系统的镇定和极点配置研究^[26], 分布参数和集中参数耦合系统的镇定和极点配置研究等^[27]。对于随机分布参数系统, 研究包括滤波、平滑、预测等^[28, 29]内容。由于系统的结构和参数的不确定性带来的实际控制问题, 分布参数系统自适应和鲁棒控制研究发展很快, 主要的工作包括基于分布参数系统的模型参考自适应控制和自校正控制的方法研究, 自适应控制系统的鲁棒性和收敛性分析^[30, 31]等。分布参数控制系统的鲁棒控制问题在很多方面得到了展开, 如线性时不变集中参数系统的 H_∞ 控制理论的混合灵敏度的设计方法在设计分布参数控制系统 H_∞ 最优和次优控制器时得到了很好的推广^[32], 众多的研究成果已使得分布参数控制系统的 H_∞ 控制方法逐渐体系化^[33, 34]。由于变结构控制在解决非线性分布参数

控制问题时的优异性能,近年来得到了快速发展,提出了无限维系统的变结构控制理论^[35],给出了滑动模的数学描述方程,解决了一些重要的理论问题,并对若干实际系统给出了数值仿真结果^[36]。

分布参数控制系统的实现方法研究也取得了进展。针对分布参数控制系统的系统辨识技术已推广了一些理论算法,如梯度法、最小二乘法、极大似然估计、随机近似、准线性化、卡尔曼滤波、模式收索等方法^[37],但对有效的实时辨识方法的研究仍待深化。另外在有限维降阶观测器、自适应观测器设计^[38,39],传感器和执行器位置的最优控制等方面也开展了研究工作^[40]。

4 分布参数控制问题的几个典型例子及研究概况

分布参数控制理论和各工程领域的结合日益密切,在金属材料最优加热控制、热防护发汗控制、大型航天器柔性结构控制等方面早已开展了较系统的研究,尤其大型航天器柔性结构控制的有关成果已开始用于工程实际^[22]。

由于传热问题是典型的线性分布参数控制对象,所以伴随着线性分布参数控制理论的发展,传热的分布参数控制研究开展较早,国际上早在1980年左右已取得了一系列的研究成果;大约从1990年开始,国际学术界将很大的注意力集中在流动主动控制(active flow control)上^[41-43],到目前为止,通过流动主动控制进行圆柱流场减阻的实验($Re=6500$)已取得了减阻60%的结果^[44,45]。在燃烧主动控制方面,受火箭发动机稳定燃烧问题的推动,也开展了很多研究,对航天动力系统的研制起到了关键的作用。

下面,我们给出高超声速发动机系统一些分布参数控制的典型例子或构想,以此来说明分布参数控制的应用潜力和研究的必要性。

4.1 超燃冲压发动机中的气动热力调节问题

超燃冲压发动机没有转动部件,缺少这些部件对流场的约束,控制流场参数的分布就变得很困难,即使截面两端的参数状态确定下来,中间的流场参数分布仍有很大的自由度,可能存在多种多样的分布模式。而流场参数的分布却决定了发动机的推力性能(壁面静压分布的积分)和运行效率(冷阻和热阻),并且对其安全飞行有大的影响,如无法控制参数的分布而造成的燃烧熄火、喘振、超温等。另外超燃冲压发动机在宽 Ma 范围内飞行必须要求实现亚声速燃烧、超声速燃烧等不同的工作模式,而亚燃和超燃在燃烧特性上的

巨大差异使得流场参数的分布变化很大(图1)。因此,控制发动机参数的分布对超燃冲压发动机是至关重要的。

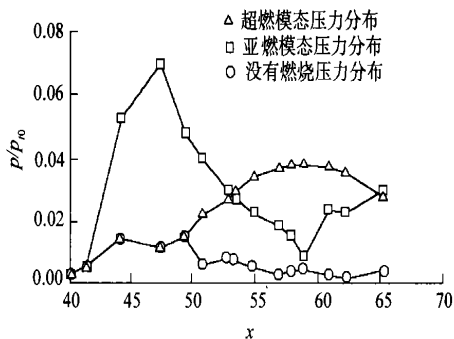


图1 超燃冲压发动机不同工作模式的压力分布

Fig. 1 Pressure distributions of scramjet in different modes

然而采用集中参数的设计方法难以实现对超燃冲压发动机参数分布的控制。从安全性角度,采用集中参数针对截面的设计方法,无法实现对燃前激波系性态和声速截面的准确判断和稳定调节,而激波与燃烧室和进气道的剧烈耦合将引起燃烧熄火、进气道不起动、喘振、超温等安全问题。从经济性角度,超燃冲压发动机参数的分布决定了激波系损失(冷阻)和多模态燃烧损失(热阻),采用集中参数的设计方法无法实现对参数分布的控制,难以保证发动机的推力性能要求和运行效率。客观上要求分布参数控制的设计方法引入气动热力调节的方法体系。

4.2 高超飞行器冲压发动机等离子体进气道的磁场控制

磁流体发电—冲压发动机联合循环是解决冲压发动机高超声速飞行问题的重要方法(图2)。冲压发动机在高 Ma (大于6)飞行时,来流已经有部分等离子化,因此可在进气道中增加磁流体发电装置降低进入燃烧室气流的参数,致使冲压发动机燃烧室进口温度降低,燃烧室条件得到了改善并可加入更多的能量,磁流体发电得到的能量在尾喷管中用电弧方式加热注入,提高了发动机效率。

可见,磁流体发电—冲压发动机联合循环是电磁场与流场之间的作用,特性上是分布参数场控制问题,即通过电磁场对进气道流场的场对场之间的分布参数控制,极大的提高了对流场参数的控制能力,使得流场的温度、压力、速度获得

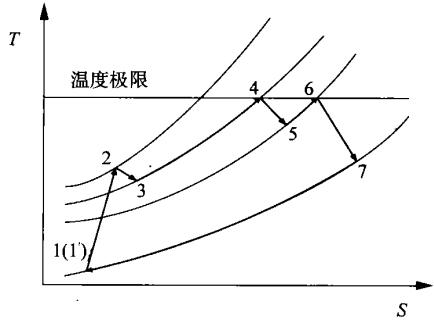
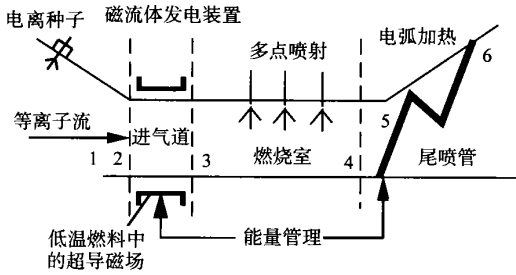


图 2 磁流体发电—冲压发动机联合循环图

Fig. 2 Cycle diagram for MHD- Arc- Ramjet Combined cycle

了极大的改变，从根本上提高了整个热力循环的性能

4. 3 利用电磁力对通道流动进行湍流减阻

超声速流动的减阻与提高发动机的性能紧密相关，以湍流为主的表面摩擦阻力在发动机总阻力中占有很大比重，因此，湍流减阻问题的研究具有重要的意义。利用电磁力的外在作用，通过流场的主动反馈控制，阻止附面层内的层流向湍流的转变，可以很大程度上降低由于湍流通过通道表面而产生的流阻，有关的研究给出了减阻 60% 的结果

4. 4 超声速燃烧室磁控等离子电弧助燃

超声速燃烧的稳点火和充分燃烧对发动机的结构和运行的稳定性和经济性有重要影响。发动机在宽 Ma 范围内工作，燃烧室的进口气流参数发生很大变化，并且还由于气流畸变等干扰因素的存在，对点火造成影响；超声速气流在燃烧室停留时间很短 (ms 级)，燃料的混合和火焰稳定影响燃烧效率。采用电弧助燃的方法，并通过电磁场对等离子燃气流的控制，实现稳定连续点火，提高燃料与空气的混合程度，强化火焰传播，并能扩大超声速燃烧室的稳定工作范围。

5 讨论与展望

高超声速发动机控制的目标是研究系统动特性变化的客观规律，面向高超声速气动热力学系统 (超声速燃烧、流动、传热、传质、能量转换等) 的控制、检测等问题，构建性能更好的新原理、新方法、新工艺，以满足技术发展的需要。

高超声速发动机分布参数控制问题就是面对发动机研制的客观需求，并结合分布参数控制理论的研究进展和周边的学科环境，提出的新的控制策略。是对现有集中参数控制构架的继承和突破，分布参数控制体系的新原理、方法，实现手

段将对高超声速发动机系统的运行和设计产生重大影响。

分布参数控制在国防和民用的许多高技术领域有重要的应用前景，国外已开展了很多应用性的研究工作，国内几乎处于零星和松散的研究状态，差距很大，现状促使我们集中研究力量，缩短差距，推进分布参数控制体系的发展及其在高技术领域的应用。以上对高超声速发动机分布参数控制问题进行了初步的综合，希望能起到抛砖引玉的作用。

参考文献:

[1] 冯正平, 孙健国. 航空发动机小偏差状态变量模型的建立方法 [J]. 推进技术, 2001, 22 (1): 54- 57.

[2] 陶涛, 张加桢. 航空发动机神经网络控制 [J]. 航空学报, 1997, 18 (2): 231- 233.

[3] 钟谦, 王镛根. 航空发动机鲁棒容错控制 [J]. 西北工业大学学报, 1997, 15 (3): 413- 417.

[4] 孙健国. 面向 21 世纪航空动力控制展望 [J]. 航空动力学报, 2001, 16 (2): 97- 102.

[5] 钱学森. 宋健. 工程控制论 [M]. 北京: 科学出版社, 1980.

[6] Hironoyi A Fujh. Dstributed Parameter Approach to Control Large Space Structures [A]. Proceeding of the 35th Conference on Decision and Control[C]. Kobe, Japan, 1995 191- 196.

[7] Dongik Lee, Allan Je. PID Control for a Distributed Systemwith a Smart actuator [J]. Control Engineering Practice 9, 2001: 1235- 1244.

[8] Joseph J Winkin, Denis Dochain. Dynamical Analysis of Distributed Parameter Tubukr Reactors [J]. Automatica 36, 2000 349- 361.

[9] Richard rebarber. Conditions for Stabilizability of Distributed Parameter Systems [A]. Proceeding of the 27th Conference on decision and control [C]. Austin, Texas, 1988 369- 373.

[10] Tarek Alaeddine. Distributed Parameter Thermal Controllability-The Inverse Heat Conduction Problem in Material Processing [A]. Proceedings of the American Control Conference [C]. Anchorage, AK, 2002 4967- 4974.

[11] Rafaralahy H. Exponential State Observer for a Class of Distributed Parameter Systems Via Generalized

- Orthogonal polynomials [A]. Proceeding of the 32th Conference on Decision and Control [C]. San Antonio, Texas, 1993 1864– 1865.
- [12] Niklas Karlsson. Optimal Nonlinear Distributed Control of Spatially-Invariant Systems [A]. Proceeding of the 40th IEEE Conference on Decision and Control [C]. Orlando, Florida, 2001 4382– 4388.
- [13] Elarbi Achhab M. Feedback Stabilization of a Class of Distributed Parameter Systems with Control Constraints [J]. Systems & Control Letters 45, 2002 163– 171.
- [14] Eduncan T. Some Properties of Linear Stochastic Distributed Parameter Systems with Fractional Brownian Motion [A]. Proceeding of the 40th IEEE Conference on Decision and Control [C]. Orlando, Florida, 2001 808 – 813.
- [15] Yuri Orlov, Joseph Bentsman. Adaptive Distributed Parameter Systems Identification with Enforceable Identifiability Conditions and Reduced-Order Spatial Differentiation [J]. IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, 2000, 45 (2): 203– 217.
- [16] Stewart G E. Design of a Practical Robust Controller for a Sampled Distributed Parameter System [A]. Proceeding of the 37th IEEE Conference on Decision and control [C]. Tampa, Florida, 1998 3156– 3162.
- [17] Mark P Wachowiak. Estimation of Distribution Parameters Using Neural Networks [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2002, 49 (6): 617– 621.
- [18] John A Burns. A Distributed Parameter Control Approach to Sensor Location for Optimal Feedback Control of Thermal Processes [A]. Proceedings of the 36th Conference on Decision & control [C]. California, USA. 1997.
- [19] Wang P K C. Control of Distributed Parameter Systems [A]. Advanced in Control Systems [C]. New York. 1964.
- [20] Luse D W. A Nyquist-Type Stability Test for Multivariable Distributed Systems [J]. IEEE Trans. Automat. Contr. 1988, 33 (6): 563– 566.
- [21] Popov V M. Hyperstability of Control System [C]. Springer Verlag, N- Y, Berlin, 1970.
- [22] Ball J M. On the Asymptotic Behavior of Generalized Processes with Application to Nonlinear Evolutions Equations [J]. J. Diff. Equations, 1978, 27 (4): 26 – 30.
- [23] Huang F L. Characteristic Conditions for exponential stability of Linear Dynamical Systems in Hilbert Space [J]. Ann. Diff. Equations, 1985, 1 (1): 54– 56.
- [24] Curtain R F. Infinite Dimensional Linear Systems Theory [A]. Lecture Notes in Control and Information Science [C]. 8. Springer, 1978.
- [25] Wang Kangning. Controllability and Observability for Distributed Parameter Control Systems [J]. Acta Mathematica Scientia, 1982, 2 (6): 105– 107.
- [26] 王康宁. 分布参数控制系统的极点配置问题 [J]. 系统科学与数学, 1982, 2 (2): 48– 50.
- [27] 王康宁. 分布参数系统与集中参数系统的耦合系统的极点配置问题 [J]. 系统科学与数学, 1982, 2 (2): 67– 70.
- [28] Atre S R. A Note on Kalman-Bucy Filtering for Linear Distributed Parameter System [J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1972, 17 (5): 612– 615.
- [29] Omatu S. Fixed-Lag Smoothing for a Linear Distributed Parameter System [J]. Information and Control, 1980, 44 (4): 213– 216.
- [30] Yu V Orlov. Model Reference Adaptive Control of Distributed Parameter Systems [A]. Proceedings of the 36th Conference on Decision & Control [C]. California, USA. 1997.
- [31] Yoshihiko Miyasato. Model Reference Adaptive Control for Distributed Parameter systems of parabolic type by finite dimensional controller [A]. Proceedings of the 29th Conference on Decision & Control [C]. Honolulu, Hawaii. 1990.
- [32] Kathryn Lenz. Robust Control Design for a Flexible Beam Using a Distributed-Parameter H_∞ Infinity Method [A]. Proceedings of the 28th Conference on Decision & control [C]. Tampa, Florida. 1989.
- [33] Ruth F, Curtain H. Infinity Control for Distributed Parameter Systems a Survey [A]. Proceedings of the 29th Conference on Decision & Control [C]. Honolulu, Hawaii. 1990.
- [34] Andrzej W Olbrot. Robust Stability of Distributed Parameter Systems [A]. Proceedings of the 29th Conference on Decision & Control [C]. Honolulu, Hawaii. 1990.
- [35] Orlov Yu V. Sliding Model Control in Indefinite-Dimension Systems [J]. Automatic. 1987, 23 (6): 106– 108.
- [36] 胡跃明, 等. 分布参数变结构控制系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [37] Robert Leland. Approximate Maximum Likelihood Parameter Estimates for Stochastic Distributed Parameter Systems [A]. Proceeding of the American Control Conference [C]. New Mexico. 1997.
- [38] John H Lilly. Finite-Dimensional Adaptive Observers Applied to Distributed Parameter Systems [J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1993, 38 (6): 533– 536.
- [39] Rafaralahy H. Exponential State Observer for a Class of Distributed Parameter Systems Via Generalized Orthogonal Polynomials [A]. Proceedings of the 32th Conference on Decision & control [C]. Texas, 1993.
- [40] John A, Burns. A distributed Parameter Control Approach to Sensor Location for Optimal Feedback Control of Thermal Processes [A]. Proceedings of the 36th Conference on Decision & control [C]. California, USA. 1997.
- [41] Fernández-Cara E. On the Approximate and Null Controllability of the Navier-Stokes Equations [J]. SIAM Rev. 1999, 41 (2): 269– 277.
- [42] Joshi S S, Speyer J L, Kim J. Finite Dimensional Optimal Control of Poiseuille Flow [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1999, 22 (2): 340– 348.
- [43] Kawanago T. Stability Estimate for Strong Solutions of the Navier-Stokes System and Its Applications [J]. Electronic J. Differential Equations, 1998, 1 (15): 1 – 23.
- [44] Keefe L R. Method and Apparatus for Reducing the Drag of Flows Over Surfaces [P]. US Patent Us 58033409, 1998.
- [45] James Baker. Drag Reduction in Incompressible Channel Flow Using Electromagnetic Forcing [A]. Proceedings of the American Control Conference [C]. Chicago 2000.