

文章编号: 1001-0920(2006)07-0721-05

变域传热发汗控制理论研究综述

孙 冀¹, 杨学实², 刘火林³

(1. 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 南京 210042; 2 中国航天科工集团 四部, 北京 100854; 3 中国科学技术大学 地球与空间科学系, 合肥 230027)

摘 要: 论述了变域传热发汗控制理论的发展历史和研究现状 对变域传热发汗控制理论的产生背景及其空气动力学机理和变域传热发汗理论的特点进行分析 提出和建立了快烧蚀、结构温度控制和发汗的理论构架, 总结了已取得的研究成果 分析了在发汗控制理论和技术研究中有待解决的几个问题, 指出了发汗冷却控制技术的前景

关键词: 传热; 发汗冷却; 分布参数控制系统

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

A Survey of Variable Domain Transpiration Control Theory

SUN Ji¹, YANG Xue-shi², LIU Huo-lin³

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China; 2 The 4th Division of China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100854, China; 3 Department of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China Correspondent: SUN Ji, E-mail: sg@nsgk.net)

Abstract: The history and current research of variable domain transpiration control theory are reviewed The developing background of variable domain transpiration cooling control theory, the mechanism of aerodynamics and its characteristics are analyzed The theory of fast ablation, structure temperature control and transpiration cooling are proposed The research results of transpiration cooling control is summarized Some unsolved important theoretical and technical problems in the research of transpiration control are analysed The applied prospect of transpiration cooling control technology is pointed out

Key words: Heat transfer; Transpiration cooling; Distributed parameter control system

1 引 言

变域是指高速飞行器的壳体结构连同防热烧蚀层所构成的热层区域 由于烧蚀, 防热层发生剥蚀, 区域是可变的^[1] 活动边界是指固体融化或液体凝固过程中固体边界发生的变化 这两类问题本质上都是对温度场的描述, 其支配方程同为偏微分方程, 具有无穷维的特征^[1] 发汗冷却属于空气动力学的范畴^[2,3], 这是由于发汗一词源于粘性空气动力学的边界层理论^[2] 变域传热发汗控制属于分布参数控制的范畴

在以往变动边界分布参数控制系统的研究中^[4], 物理背景通常为融化和凝固问题, 其域的变化

速率属于慢烧蚀过程 对于文献[5]研究的发汗冷却控制系统, 由于烧蚀的存在, 其域变化更快, 属于快烧蚀过程, 热物理作用机理也与融化和凝固过程有所不同 在控制特性上, 发汗控制项不但出现在方程中, 而且出现在边界上, 这在分布参数的研究中是不多见的

在工程应用中, 通常把后者称为变域传热发汗控制 所谓变域传热发汗控制理论, 是指具有一套数学模型体系, 可以进行全面系统的理论研究 这些理论包括数学模型的数值方法、数学仿真、数学性质、控制理论、试验研究和应用研究 这些理论^[1,5]是在探索解决飞行器热障问题时提出的 文献[6]根据大

收稿日期: 2005-05-13; 修回日期: 2005-09-21

作者简介: 孙冀(1963—), 男, 河南宜阳人, 副教授, 博士, 从事分布参数控制系统理论与应用的研究; 杨学实(1937—), 男, 陕西安康人, 研究员, 从事空气动力学理论与应用等研究

量文献对此作了总结

第二次世界大战后的冷战时期,各国在发展火箭、导弹、飞船以及星际航行方面展开了竞赛。飞行速度不断提高,可以达到高超音速,即马赫数在 5 以上。此时的空气不能再认为是理想气体,而是具有粘性的气体。飞行器在粘性空气中飞行会产生摩擦,摩擦要产生热量。几千度甚至上万度的炽热空气,能使飞行器瞬间熔化,这就是热障问题。热障问题就象音障那样,会对飞行安全造成很大的威胁。2003 年,美国哥伦比亚号航天飞机因防热瓦脱落飞机解体,致使飞行员瞬间失去生命就是严重的教训。因此,克服热障是高速飞行器安全飞行设计的关键。

对于高速飞行器而言,克服热障的方法通常有 3 种:烧蚀法、隔热法和热沉法。烧蚀法比隔热法或热沉法优越得多,也是使用最多的方法。烧蚀防热是通过飞行器受热后表面高温物质的流失,达到使飞行器降温的目的。但是,烧蚀的结果会使飞行器的最初设计外形发生改变,外形改变后空气动力特性随即发生变化,因而会偏离飞行弹道。为此,作者设想一种符合烧蚀防热机理的方法,即通过飞行器表面高温物质的流失,既使飞行器降温,又使烧蚀表面损失的物质得到补充,以保持外形结构不变。发汗冷却就是这样一种可行的技术。

2 烧蚀发汗冷却控制问题

(1) 快烧蚀现象

在试验室进行烧蚀试验过程中,发现试验模型被火星所包围。放大并集中一点观察,发现一个黑点,随即黑点变红、变白、变亮;紧接着亮点啪地飞离表面,亮点变黑。随即又出现黑点变红、变白、变亮,紧接着又飞离表面,如此反复。可以观察到整个表面被黑星所覆盖,噼啪作响,火星飞溅。这是快烧蚀现象,快烧蚀对传热的影响是不容忽略的。

(2) 发汗冷却与控制的基本思想

建立发汗控制的基本思想是发汗冷却。人在夏天热了就要出汗,冬天冷了就封闭毛孔不出汗。出汗能使身体降温,感觉凉爽。天气越热出汗越多,或者利用扇风增加皮肤表面水分蒸发来降温。前者是人体的自动控制,后者是人为控制。设想在飞行器上携带冷却剂并通过微孔排出,可以调节冷却剂流量,让飞机表面温度刚刚处于不烧蚀状态,使得飞机外形不变,又使发汗剂消耗量最少。这就是发汗冷却控制的主要思想。

(3) 发汗对结构温度的影响

出汗能使身体降温,这一事实表明,对于多孔材料隔热层,当发汗剂渗流通过结构的毛孔时,能够携带结构内部的大量热量,产生降低结构温度的效果。

在型号设计过程中,热防护的最终目的是为满足飞行器的结构强度要求。结构强度受制于结构温度,因此结构温度成为重要的设计参数。

从上述 3 点可以看出,研究发汗冷却问题扩展了前人的研究范围^[2,3]。把边界层热阻塞的影响纳入边界条件,以快烧蚀概念、发汗对结构温度的影响以及引入的控制手段为根据,分析热层内微元体的热平衡,建立了变域传热发汗控制方程式^[1]。它为建立系统的理论研究奠定了基础,并使这一研究内容得到大大丰富。

3 变域传热发汗冷却控制模型

把飞行器受热严重的部位设计成透气性结构,通过舱内提供的冷却剂,从低温到高温渗流通过结构内部,能够携带结构传递的热量。到达表面后,注入气体边界层,以高温的形式流失。同时,根据发汗阻塞系数,可在边界上阻止部分空气动力加热。通过控制,使飞行器表面处于不烧蚀或少烧蚀状态,既满足烧蚀机理的要求,又保持飞行器设计的外形不变。

按照上述思想,在快烧蚀的条件下,根据渗流过程中热传导的局部热平衡原理,分析在可变域中微元体的能量守恒。经过数学运算,建立了一维不可压缩发汗剂所满足的变域传热发汗控制数学模型^[1]如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \beta \frac{\partial T}{\partial y} + s(t) \frac{l-y}{l-s(t)} \frac{\partial T}{\partial y}, \\ \rho_L s(t) - K \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=s(t)} = \Psi(m_L) q(t), \\ -K \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=l} = \dot{m}_L (\Delta h_N - \Delta h_c). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $y = (s(t), l)$, $\alpha = K/\rho c_p$, $\beta = \dot{m}_L c_{pL}/\rho c_p$, \dot{m}_L 是发汗剂流量(控制参数)。

方程(1)的物理含义是,左端和右端第 1 项为通常意义上的热传导所满足的数学物理关系;右端第 2 项为发汗剂流量 \dot{m}_L 渗流过程中所携带的热量;右端末项是在试验中观察到的亮点变成黑点,对温度剖面需要进行的修正项。

模型(1)所约束的控制问题是控制参数 \dot{m}_L (发汗剂流量),它既出现在边界条件上,又出现在分布参数系统控制问题中。模型的第 2 个方程为固体与气体边界层连接处的边界条件,其中函数 $\Psi(\dot{m}_L)$ 是由边界层理论建立的热阻塞系数,其经验表达式为

$$\Psi(\dot{m}_L) = 1 - \left[0.724 \frac{h_c}{q_0} \dot{m}_L - 0.13 \left(\frac{h_c}{q_0} \dot{m}_L \right)^2 \right] \quad (2)$$

式(2)的物理含义是:当不发汗时, $\dot{m}_L = 0$, 气膜厚度为 0, $\Psi(\dot{m}_L) = 1$; 此时加热没有受到阻塞,热流全部进入结构内部。一旦出现发汗, $\dot{m}_L > 0$, 就会

产生气膜,即使它的厚度很小,也会使 $1 > \psi(m_L) > 0$; 此时阻塞系数的作用是让一部分热流传入结构内部,一部分热流被阻挡在结构之外。当发汗量变大时,气膜厚度也变大,大到一定程度,使 $\psi(m_L) = 0$, 表明没有热流传入; 此时气膜就象一块绝热板一样把热流全部堵在结构之外,这就是发汗在表面形成气膜后对热流的阻滞作用

4 主要研究成果

随着二维不可压缩发汗剂变域传热发汗控制数学模型^[7], 三维不可压缩变域传热发汗控制数学模型^[8], 以及气发汗剂变域传热发汗控制数学模型^[9]等的建立,使得对于Prandtl提出的发汗思想开展全面系统的理论研究成为可能。于是吸引了国内一批科学家和学者参与研究,并得到国家自然科学基金连续三期的资助。国内外发表了相当数量的论文,这些论文覆盖的方向包括以下几个方面:

1) 数学模型^[1,7-9]: 包括一维发汗开环控制模型,一维闭环发汗控制模型,二维发汗控制模型,三维发汗控制模型,液体发汗控制模型等;

2) 数值方法^[10-13]: 在我国数值理论和数值方法专家袁兆鼎教授及其博士点的参与下,发展了工程应用性很强的直线法,包括一维直线法及其收敛性和稳定性,二维直线法及其收敛性,以及解耦算法,误差增长分析,并行算法等

3) 温度场计算仿真^[14-17]: 包括单层结构仿真,动态响应仿真,多层结构仿真等;

4) 数学理论^[18-23]: 包括一维解的局部存在性,一维解的整体存在性,一维两个活动界面解的存在唯一性,一维第三边值解的稳定性,一维解的单调性,一维解的依赖性,一维简单解析解等;

5) 控制理论和控制仿真^[8,9,24-31]: 包括能控性,最优控制理论和计算方法,自适应控制,参数辨识,以及闭环控制仿真,二维控制仿真,三维(旋成体)控制仿真,气发汗控制仿真等;

6) 发汗试验研究^[32,33]: 包括飞行条件发汗试验研究,电极放电发汗试验研究,高压大电流电极放电发汗试验研究等;

7) 应用研究^[34]: 包括高速轨道飞行器,发汗电极控制装置及控制方法等

作为奠基性阶段成果的总结,专著《变域传热发汗控制理论》作了系统的综述^[5]。

5 有待探索的几个问题

变域发汗冷却控制系统的研究涉及多个学科,具有高难度和挑战性。目前虽已取得了一系列奠基性成果,但从整个探索的深度和广度而言,还远远不够,仍然存在许多重要的基本理论和应用问题,值得

进一步研究和探索

1) 分布参数控制理论是发汗冷却研究的基础,数学理论的研究有助于理论的完整性和数值方法及控制理论的展开。对于一维数学模型而言,虽然有了一系列理论上的重要成果,然而一维数学解的稳定性至今没有得到解决。二维(三维)以及气发汗问题数学解的存在唯一性、稳定性以及其他的数学性质等,都有待深入研究。上述这些数学理论问题的解决,可为控制理论的研究提供支持

2) 对于变域传热发汗控制问题的能控性研究,已证明热层温度对发汗剂秒流量的单调依赖关系,但这仅仅是一个验证性结果,真正的能控性理论尚未建立。特别是在变域条件下,能控性研究无论在理论上还是在应用指导上都有很大意义。其难点主要表现在系统的非线性特性,以及控制参数同时出现在边界条件和方程中。在分布参数理论中,这是一个非常独特的问题(通常的问题要么控制参数在方程中,要么控制参数在边界条件中,不具备这种混合特性)。与之对应的可观测性理论也没有建立,同样是一个需要研究的问题。对于分布参数系统,状态量具有无穷维的特性,而观测只能在有限点上实现。能观性问题不但在理论上十分重要,而且对于实际控制系统观测点的设置具有指导意义。关于控制稳定性,由建模误差和不确定性导致的控制鲁棒性、最优控制、控制的反问题(一维和高维问题)等,都是需要进一步探索的问题

3) 控制理论的研究是为控制技术的应用提供支持,而控制技术的应用直接决定于控制算法,因此变域传热发汗控制算法成为工程应用的关键所在。对于具体的闭合回路烧蚀控制问题,假设材料的烧蚀温度已经给定,则可在热层内选取有限几个点的温度作为控制反馈的观测温度,而烧蚀温度就是目标温度。根据目标温度的变化规律,可通过积分叠加得到边界的移动规律,因此变域可利用控制算法得到。如果需要控制表面不烧蚀,则选取目标温度小于烧蚀温度,这样在整个飞行过程中表面不会出现烧蚀,飞行器外形就不会发生变化

4) 假设某种防热材料的烧蚀温度未知,需要通过防热层内的烧蚀传感器,对边界移动规律进行观测。这种烧蚀传感器沿热层厚度分布一系列观测点,边界移动速率 $\dot{s}(t)$ 为控制目标函数。当设计要求表面不烧蚀时,可在整个控制过程中始终使 $\dot{s}(t) = 0$ 。这种情况在理论上可以实现,但是工程上存在很大的难度。把上述设计要求修改成同步烧蚀,也可实现飞行器的气动外形不变。为了满足同步烧蚀,发汗状态可能不完全满足小发汗量条件,此时阻塞系数公

式(2)不成立,需要对边界上的加热 $\psi(m_L)q(t)$ 完成参数辨识,这样不仅使控制算法变得复杂,而且控制的实时性也难以保证

5) 关于变域传热发汗控制理论成果的应用问题,主要表现在军事和民用两个方面。在军事上,用于: 高超音速飞行的火箭导弹要求精确外形的热防护控制; 发动机透平叶片烧蚀的热防护控制; 发动机喉道烧蚀的热防护控制; 超低空反导武器电磁导轨炮的放电导轨烧蚀热防护控制。在民用上,用于: 高超音速飞机和极高超音速飞机的热防护控制; 电弧风洞发汗电极防烧蚀的气发汗控制; 航天飞机发汗冷却的热防护控制; 气浮车的气膜控制等。类似于上述几方面的温度场或烧蚀问题,采用发汗冷却控制技术,均能实现有效控制

6 结 论

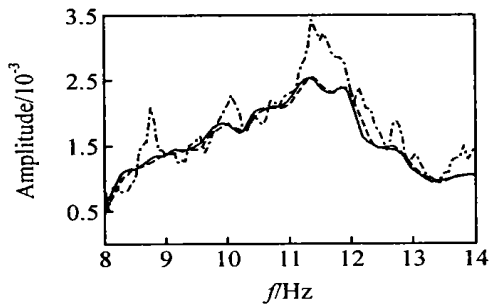
本文对变域烧蚀问题的产生背景和研究现状进行分析和总结,讨论了变域传热发汗冷却控制系统与传统活动边界控制问题的不同之处,即快烧蚀、结构温度控制及控制参数同时出现在边界条件和支配方程中,得出变域传热发汗冷却控制属于更全面和更复杂的控制理论的结论。文中分析了发汗控制理论和技术研究中有待解决的几个问题,指出了发汗冷却控制技术的应用前景

参考文献(References)

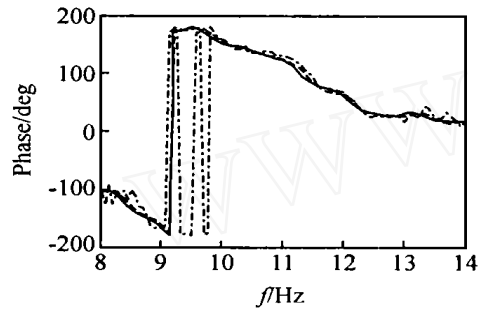
- [1] 杨学实. 热防护发汗冷却控制[J]. *自动化学报*, 1985, 11(4): 345-350
(Yang X S. Transpiration Cooling Control of Thermal Protection [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1985, 11(4): 345-350)
- [2] Schlichting H. *Boundary Layer Theory* [M]. 7th Edition. New York: McGraw Hill Book Company, 1979.
- [3] Beusman C C, Weisman J. Comparison of Transpiration and Ablation Cooling [J]. *J of ARS*, 1960, 30(6): 542-557.
- [4] 钱学森, 宋健. *工程控制论* [M]. 修订版. 北京: 科学出版社, 1980
(Qian X S, Song J. *Engineering Cybernetics* [M]. Beijing: Science Press, 1980)
- [5] 杨学实. *变域传热发汗控制理论* [M]. 北京: 北京大学出版社, 2002
(Yang X S. *Variable Domain Heat Transfer Transpiration Control Theory* [M]. Beijing: Beijing University Press, 2002)
- [6] 杨学实, 于景元, 朱广田. 活动边界分布参数系统控制研究的新进展[J]. *控制与决策*, 1993, 8(5): 311-329
(Yang X S, Yu J Y, Zhu G T. New Development of the Study of the Control of Distributed Parameters System with Moving Boundary [J]. *Control and Decision*, 1993, 8(5): 321-329)
- [7] 杨学实, 袁兆鼎, 徐燕侯. 二维动边界发汗控制数学仿真研究[J]. *自动化学报*, 1993, 19(4): 393-403
(Yang X S, Yuan Z D, Xu Y H. A Mathematical Simulation Research of Two-dimensional Transpiration Control with Moving Boundary [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1993, 19(4): 393-403)
- [8] 徐燕侯, 吴广钰, 弓广辉, 等. 旋成体表面防热的发汗冷却控制及其数值模拟[J]. *计算物理*, 1995, 12(1): 71-78
(Xu Y H, Wu G Y, Gong G H, et al. The Transpiration Cooling Control and Its Numerical Simulation in Heatproofing of the Spin-formed Object Surface [J]. *Computational Physics*, 1995, 12(1): 71-78)
- [9] 杨学实, 郭庄钧, 武津刚. 气发汗温度场控制[J]. *计算物理*, 1999, 16(1): 31-38
(Yang X S, Guo Z J, Wu J G. Temperature Field Control of Gas Transpiration [J]. *Computational Physics*, 1999, 16(1): 31-38)
- [10] 袁兆鼎, 谢亚军, 刘德贵, 等. 发汗控制方程的直线解法[J]. *系统工程与电子技术*, 1996, 18(4): 12-19
(Yuan Z D, Xie Y J, Liu D G, et al. Line method for Transpiration Control Problem [J]. *System Engineering and Electronics*, 1996, 18(4): 12-19)
- [11] 袁兆鼎. 二维发汗控制方程的直线解法及其收敛性[J]. *系统仿真学报*, 1999, 11(6): 395-400
(Yuan Z D. Line methods for Two Dimension Transpiration Control Equations and Their Convergence [J]. *J of System Simulation*, 1999, 11(6): 395-400)
- [12] 陈丽容, 刘德贵. 发汗控制方程差分方法的误差增长分析[J]. *系统工程与电子技术*, 1996, 18(4): 34-38
(Liu L R, Liu D G. Analysis of Error Growth for Difference Schemes in Transpiration Control Equation [J]. *System Engineering and Electronics*, 1996, 18(4): 34-38)
- [13] 薛晓青, 刘德贵, 宋晓秋. 发汗控制方程差分方法的并行化[J]. *系统工程与电子技术*, 1996, 18(9): 20-28
(Xue X Q, Liu D G, Song X Q. Parallelism of Difference Method for Transpiration Problems [J]. *System Engineering and Electronics*, 1996, 18(9): 20-28)
- [14] 杨学实, 王侠超. 发汗控制动态响应数值分析[J]. *自动化学报*, 1988, 14(3): 184-190
(Yang X S, Wang X C. A Numerical Analysis of Dynamic Responses for Transpiration Control [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1988, 14(3): 184-190)

- [15] 杨学实 水发汗温度场控制[J]. *自动化学报*, 1991, 17(4): 269-279.
(Yang X S Transpiration Control with Water for Temperature Field[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1991, 17(4): 269-279.)
- [16] 杨学实, 于景元, 朱广田, 等 发汗冷却控制研究注记[J]. *系统工程与电子技术*, 1996, 18(4): 2-11.
(Yang X S, Yu J Y, Zhu G T, et al Notes on Research into Transpiration Cooling Control [J]. *System Engineering and Electronics*, 1996, 18(4): 2-11.)
- [17] 孙冀, 罗学波, 杨学实 多层介质的发汗冷却自适应控制[J]. *数学的实践与认识*, 2004, 34(9): 69-75.
(Sun J, Luo X B, Yang X S Adaptive Control for Multi-layer Medium Transpiration Cooling System [J]. *Mathematica in Practice and Theory*, 2004, 34(9): 69-75.)
- [18] Zhu G T, Wu J G, Liang B Z, et al Existence of Solution to Transpiration Control Problem [J]. *J of Applied Mathematics and Stochastic Analysis*, 1992, 5(4): 387-493
- [19] 于景元, 武津刚, 李学志, 等 水发汗温度场控制问题的解[J]. *系统工程与电子技术*, 1996, 18(4): 39-47.
(Yu J Y, Wu J G, Li X Z, et al The Solution of the Control Problem for Water Transpiration Temperature Field [J]. *System Engineering and Electronics*, 1996, 18(4): 39-47.)
- [20] Guo B Z Rothe Approach to the Existence of Solution of an Ablation — Transpiration Cooling Control System [J]. *J of Applied Mathematics and Stochastic Analysis*, 1993, 6(2): 161-180
- [21] 宋长池, 齐忠涛, 朱广田, 等 一类 Stefan 问题的适定性[J]. *应用数学*, 1994, 7(4): 437-443.
(Song C C, Qi Z T, Zhu G T, et al Well-posedness of Stefan Problem for Transpiration Problems [J]. *Mathematica Applicata*, 1994, 7(4): 437-443.)
- [22] 于景元, 卜春霞, 杨学实 一类分布参数系统解的性质[J]. *系统工程与电子技术*, 1996, 18(8): 1-10.
(Yu J Y, Pu C X, Yang X S Properties of Solution for a Class of Distributed Parameter System [J]. *System Engineering and Electronics*, 1996, 18(8): 1-10.)
- [23] 于景元, 武津刚, 梁本中, 等 半群方法在发汗控制问题中的应用[J]. *系统工程与电子技术*, 1996, 18(5): 14-22.
(Yu J Y, Wu J G, Liang B Z, et al Application of Semigroup Operator Method in Transpiration Cooling Problem [J]. *System Engineering and Electronics*, 1996, 18(5): 14-22.)
- [24] 徐燕侯, 杨学实 发汗冷却控制系统的控制及其特性[J]. *应用数学和力学*, 1993, 14(11): 993-1001.
(Xu Y H, Yang X S Control of Transpiration Cooling System and Its Characteristic [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 1993, 14(11): 993-1001.)
- [25] 罗学波, 尚亚东 发汗冷却系统烧蚀界面的能控性条件[J]. *宇航学报*, 2000, 21(3): 70-75.
(Luo X B, Shang Y D. Controllability Condition for the Ablation Surface of the Transpiration Cooling System [J]. *J of Astronautics*, 2000, 21(3): 70-75.)
- [26] 于景元, 卜春霞, 朱广田, 等 发汗烧蚀控制问题[J]. *系统工程与电子技术*, 1996, 18(4): 62-70.
(Yu J Y, Pu C X, Zhu G T, et al A Control Problem for Transpiration Ablation [J]. *System Engineering and Electronics*, 1996, 18(4): 62-70.)
- [27] 于景元, 许香敏, 焦红兵, 等 发汗冷却系统的最优控制[J]. *控制与决策*, 1999, 14(5): 398-402.
(Yu J Y, Xu X M, Jiao H B, et al A Optimal Control Problem for Transpiration Cooling System [J]. *Control and Decision*, 1999, 14(5): 398-402.)
- [28] 孙冀, 张亮 发汗烧蚀问题的自校正控制[J]. *南京师范大学学报*, 2003, 3(1): 13-17.
(Sun J, Zhang L. A Self-tuning Control Problem of Transpiration Ablation [J]. *J of Nanjing Normal University*, 2003, 3(1): 13-17.)
- [29] 孙冀, 罗学波 基于两点测温的发汗冷却自校正控制[J]. *控制与决策*, 2001, 16(6): 922-925.
(Sun J, Luo X B. Self-tuning Control of Transpiration Cooling System Based on Two Points Observation [J]. *Control and Decision*, 2001, 16(6): 922-925.)
- [30] 孙冀, 罗学波 发汗冷却系统的自校正控制[J]. *机械科学与技术*, 2000, 19(7): 178-180.
(Sun J, Luo X B. Self-tuning Control of Transpiration Cooling System [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2000, 19(7): 178-180.)
- [31] 孙冀, 罗学波 发汗冷却控制模型边界热流密度的辨识方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2000, 22(4): 7-10.
(Sun J, Luo X B. A Method to Identify Boundary Heating Flux for Transpiration Cooling Control Model [J]. *System Engineering and Electronics*, 2000, 22(4): 7-10.)
- [32] 杨学实, 王侠超, 柳星炎, 等 高超声速头锥驻点发汗控制试验研究[J]. *系统工程与电子技术*, 1996, 18(1): 71-81.
(Yang X S, Wang X C, Liu X Y, et al An Experimental Investigation of Transpiration Cooling Control for the Stagnation Point of Nose Cone in Hypersonic Flows [J]. *System Engineering and Electronics*, 1996, 18(1): 71-81.)

(下转第 729 页)



(a) 幅值曲线



(b) 相位曲线

图 2 频响函数、FGTLS 辨识的传函与理论传函的比较

表 1 参数辨识结果与理论值的比较

| 模态参数 | f_1/Hz | ξ_1 | f_2/Hz | ξ_2 | f_3/Hz | ξ_3 |
|-------|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|---------|
| FGTLS | 9.82 | 0.0657 | 11.27 | 0.0304 | 11.93 | 0.0218 |
| 理论值 | 9.71 | 0.0524 | 11.18 | 0.0451 | 12.10 | 0.0181 |

法, 在噪声环境下获得了与理论值相吻合的传递函数估计结果。表 1 利用 FGTL S 算法得到了接近于理论值的参数辨识结果, 进一步验证了本文算法的有效性。

5 结 论

本文采用频域广义整体最小二乘辨识算法, 准确地辨识飞机模态参数。同极大似然估计相比, 该算法采用线性方法求解传递函数模型的系数, 计算量小且不依赖于初始值, 适合于在线辨识。由于它能获得接近于极大似然法的辨识效果, 可用于极大似然法的初始值选取。

参考文献 (References)

[1] Ghiringhell L G, Lanz M, Mantegazza P. A

Comparison of Methods Used for the Identification of Flutter from Experimental Data [J]. *J of Sound and Vibration*, 1987, 119(1): 39-51.

[2] Tang W, Shi Z K. Wavelet Denoising of Flight Flutter Testing Data for Improvement of Parameter Identification [J]. *Chinese J of Aeronautics*, 2005, 18(1): 72-77.

[3] Fero E, Brenner M, Paduano J, et al. Time-frequency Analysis Transfer Function Estimation and Application to Flutter Clearance [J]. *J of Guidance, Control and Dynamics*, 1998, 21(3): 375-382.

[4] Schoukens J, Pintelon R, Renneboog J. A ML Estimator for Linear and Non-linear Systems — A Practical Application of Estimation Techniques in Measurement Problems [J]. *IEEE Trans on Instrumentation and Measurement*, 1988, 37(3): 10-17.

[5] Balogh L, Kollar I. Generalization of a Total Least Squares Problem in Frequency-domain System Identification [J]. *IEEE Trans on Instrumentation and Measurement*, 2002, 51(6): 1353-1357.

[6] Pintelon R. Analyzes, Development and Applications of TLS Algorithms in Frequency Domain System Identification [J]. *SIAM J on Matrix Analysis and Applications*, 1998, 19(4): 983-1004.

[7] Vandersteen G, Van Hamme H, Pintelon R. General Framework for Asymptotic Properties of Generalized Weighted Nonlinear Least Squares Estimators with Deterministic and Stochastic Weighting [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1996, 41(10): 1501-1507.

[8] Huffel V S, Vandewalle J. The Total Least Squares Problem: Computational Aspects and Analysis [A]. *Frontiers in Applied Mathematics* [M]. Philadelphia: SIAM, 1991.

[9] Gene H G, Van Loan C. *Matrix Computations* [M]. Third Edition. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1996.

[10] Pintelon R, Guillaume P, Rolain Y, et al. Parametric Identification of Transfer Functions in the Frequency Domain — A Survey [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(11): 2245-2260.

(上接第 725 页)

[33] 张嘉祥, 王洁霞, 程淑芬, 等. 电弧放电烧蚀发汗效果试验研究 [J]. *系统工程与电子技术*, 1996, 18(4): 78-81. (Zhang J X, Wang J X, Cheng S F, et al. Experimental Research of Transpiration Effects in Arc Discharge Ablation [J]. *System Engineering and Electronics*, 1996, 18(4): 78-81.)

[34] 杨学实. 气悬浮列车研究的新进展 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2003, 3(3): 66-70. (Yang X S. New Development in Research of Air Suspension Trains [J]. *J of Transportation System Engineering and Information Technology*, 2003, 3(3): 66-70.)