

等离子体气动激励建模仿真综述

李应红, 梁华, 吴云, 王健, 武卫

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:等离子体流动控制是一种新概念的主动流动控制技术,已成为国际上空气动力学和气动热力学领域新兴的研究热点。分析了等离子体气动激励建模仿真的特点和国内外的研究现状,研究了目前常用的4种等离子体气动激励的建模仿真方法,对各种仿真方法的优缺点进行了归纳。分析了等离子体气动激励建模仿真研究的发展趋势,即今后更多的研究工作将偏向粒子模拟方法,建模时考虑的因素会越来越多,从非定常的角度对等离子体气动激励展开研究,使得模型与实际物理过程更加接近;更高来流速度下的等离子体流动控制的仿真研究将增多,和实际应用的条件更为接近。深入的仿真研究有助于揭示等离子体气动激励及其和边界层相互作用的物理本质,以促进等离子体流动控制技术在我国的 Research 和发展。

关键词:介质阻挡放电;等离子体;气动激励;建模仿真;流动控制

中图分类号: V23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)05-0001-05

等离子体流动控制是一种新的流动控制技术,近年来已成为国际上空气动力学和气动热力学领域新兴的重要研究热点,美国、俄罗斯、英国、法国、德国、阿根廷等国家的研究机构在国家或军队资助下进行了广泛的研究。等离子体流动控制的主要特点是:等离子体气动激励是电场力作用,没有运动部件、响应迅速、作用频带宽、便于实时控制、结构简单、能耗较低等。

大气压低温非平衡等离子体及其与边界层的相互作用,涉及等离子体物理学、空气动力学和电磁学等学科的交叉,其物理机制尚不十分明晰。所以开始阶段国内外等离子体流动控制领域实验研究重于理论研究,现象报道多于机理分析,在翼型减阻增升、圆柱绕流减阻、抑制叶栅通道流动分离以及压气机叶尖间隙流动控制等方面开展了大量实验研究。国内外已开展的大量的实验研究表明:等离子体流动控制在控制流场附面层、分离流、剪切流、泄漏流、旋涡、激波,以及抑制失速分离、减小流动阻力、加快喷气流动掺混、抑制气动噪声、提高燃烧稳定性和效率等方面,都有明显的作用效果^[1-5]。

目前国内外的研究重点已经从刚开始时的单纯实验研究到现在的实验与仿真并重,开展了大量的建模仿真研究,以揭示等离子体气动激励及其与边界层相互作用的物理机制,探索等离子体流动控制中的能量转化机制,优化等离子体气动激励器。

1 等离子体气动激励器的基本工作原理

等离子体流动控制所采用的等离子体气动激励,是以等离子体为载体,主要在电场力作用下,对流场施加的一种可控扰动,从而达到流动控制的目的。

典型的介质阻挡表面放电等离子体气动激励器的布局形式如文献[1]中图1所示。将等离子体气动激励器上下表面的电极与高压、高频电源相连接,等离子体气动激励器表面附近的空气在强电场作用下被电离,等离子体中的离子在空间不均匀电场的作用下,向电场梯度方向进行定向运动,离子在定向运动的过程

收稿日期:2008-03-24

基金项目:国家“863”计划(2005AAX53031);空军工程大学工程学院优秀博士论文创新基金资助项目(BC07001)

作者简介:李应红(1963-),男,重庆奉节人,教授,博士生导师,主要从事航空推进系统研究。

E-mail:yinghong-li@163.com

中与环境空气分子碰撞,发生动量交换,诱导激励器表面的空气发生定向运动,向附面层注入能量,改变其空气动力特性。

2 等离子体气动激励建模仿真的研究现状

国外对等离子体气动激励建模仿真的研究始于2000年左右,目前常用的等离子体气动激励器的建模仿真方法有以下4种:基于唯象学描述的仿真方法、基于集总电路模型描述的电特性仿真方法、基于物理原理的耦合求解等离子体-流体方程组仿真方法以及粒子群-蒙特卡罗模拟方法。开始时的研究重点主要集中在唯象学描述,到现在逐步发展到等离子体-流体方程组耦合求解法、粒子群-蒙特卡罗模拟法。国内等离子体气动激励的建模仿真研究刚刚起步,目前只能利用唯象学方法,耦合求解流体方程和极其简化的电势、电荷方程,主要的研究思路和方法都借鉴国外。

2.1 基于唯象学仿真法

美国圣母大学 Corke 等进行了等离子体气动激励抑制鼓包模型紊流分离的数值仿真研究^[6],将等离子体气动激励简化为体积力与 Navier-Stokes 方程耦合求解,结果表明:流向和展向的等离子体气动激励都可以有效抑制流动分离。

肯塔基大学的 Suzen 等将等离子体气动激励对流体的作用以体力矢量的形式引入 Navier-Stokes 方程^[7],通过求解电荷方程和电势方程得到由等离子体气动激励所产生的体力。仿真得到的在静止空气条件下等离子体气动激励诱导空气流动的流场与实验测量结果一致。

中国空气动力研究与发展中心的毛枚良、邓小刚通过求解电势方程得到电场分布,给定电荷密度,得到了作用于流体上的电场力,通过求解带源项的 Navier-Stokes 方程,研究了一个大气压下的均匀辉光放电等离子体对边界层流动的影响,考察了电场力做功对流动的影响^[8]。

空军工程大学将等离子体气动激励对边界层的作用,等效成体积力,通过求解电势方程和电荷密度方程,得到等离子体气动激励的体力分布,进一步得到向边界层注入的能量分布,并将能量以源项的形式引入 Navier-Stokes 方程求解,得到了与实验一致的仿真结果,目前正在进行基于物理原理的二维电流体体力模型的建模和粒子模拟等方面的工作。

2.2 基于集总电路仿真方法

圣母大学的 Corke 等利用等离子体放电中电流密度与电场强度存在的依赖关系,建立了等离子体气动激励器电特性的分析模型^[9],可以求出功率和电流随时间变化的数学表达式,电功率、电流和相位差对电压幅值、交流电频率、绝缘层厚度和介电常数的参数依赖关系。Corke 认为集总参数电路模型可以很好的描述等离子体气动激励器的行为^[10],将离子体气动激励器描述为一个电路元件的网络。模型验证了等离子体气动激励器的推力与施加在电极两端的电压成 $7/2$ 次方的关系,仿真结果与光电倍增管得到的等离子体空间分布的实验数据符合较好。

空军工程大学宋慧敏采用 PSpice 软件对等离子体气动激励器进行了建模与仿真,利用 PSpice 中的数学宏模型建立了等离子体放电的模型^[11],将等离子体放电建模为分段非线性的电压控制电流源子模块,对等离子体流动控制实验系统进行了仿真,仿真结果符合辉光放电的电压-电流幂律;安治永利用时域有限差分法的电磁场数值计算理论对非对称等离子体气动激励器进行了电场仿真^[12],分析了顺电和蠕动加速的机理,得出了和理论分析一致的非对称等离子体气动激励器的电场分布。

2.3 基于物理原理的多场耦合仿真方法

法国图卢兹三大的 Boeuf 认为,放电通过离子诱导的表面二次电子发射和体积电离来维持,提出了基于表面放电二维流体模型的体力计算模型^[13-14]。通过求解连续性方程、动量方程和能量方程得到等离子体中的电子、离子数密度、电场、电势分布等。研究表明:表面介质阻挡放电和电晕放电产生的体积力在本质上是-致的;带电粒子对中性粒子的动量传递只在离子电流密度最大的非电中性区域,例如鞘层区域内明显;放电电流波形的低电流区间内等离子体气动激励诱导的体积力更大;激励电压的上升率、绝缘材料的介电常数等参数对等离子体气动激励特性影响显著。

美国空军研究实验室的 Poggie 将等离子体电流体动力的平均体力模型与三维可压缩 N-S 方程耦合^[15-16],通过求解流体方程、带电粒子连续方程(迁移-扩散模型)和泊松方程,得到电子、离子、中性粒子

数密度,离子速度、鞘层电势、电子温度等,实现了体力与非线性的惯量项和压力梯度的复杂耦合。研究表明等离子体气动激励的电体力并不起决定性作用,其加热效应不可忽视,在高超音速情况下,等离子体气动激励起作用主要是因为加热效应,而并非是体力的加速效应。

美国凯特林大学 Roy 研究小组进行了等离子体气动激励诱导气体流动、抑制翼型大攻角流动分离的数值仿真研究,将电子、离子和中性粒子的连续方程与泊松方程、N-S 方程耦合求解,结果表明^[17-19]:电压、频率、绝缘材料介电常数、初始电离率、雷诺数、攻角、非定常激励频率等参数对等离子体气动激励特性和流动控制效果均有显著的影响。

美国佛罗里达大学 Shyy 研究小组建立了等离子体气动激励与低速流动耦合的仿真模型,将电子、离子的连续方程、动量方程,泊松方程耦合求解,然后由电荷密度和电场分布得到等离子体气动激励诱导的体积力,将其代入 N-S 方程求解,结果表明^[20-21]:等离子体气动激励诱导的体积力可以建模为一个近壁面射流;增加下表面电极的宽度、介电常数和激励电压可以增大等离子体气动激励诱导的体积力。

2.4 粒子群-蒙特卡罗模拟法

美国空军学院的 Font 和 McLaughlin 利用 PIC-DSMC (Particle-in-cell, Monte-carlo) 方法,对等离子体气动激励器的放电过程进行了模拟。纯氧气放电的 PIC-DSMC 模拟用来研究典型放电产生的体力矢量^[22-23]。结果表明:等离子体气动激励在上半个周期将气体往回拉,下半个周期将气体往下游推。总的下游方向的力大约是上游方向力的 20 倍。将体力矢量与 N-S 方程耦合求解,研究了等离子体气动激励对中性气体的作用。结果表明:等离子体气动激励作用于中性气体的效果类似于一个壁面射流,数值仿真的结果与实验结果吻合较好。纯氮气中连续放电的粒子模拟结果表明:实验中观察到的等离子体的扩张是因为连续的流柱使得绝缘层表面带电,进而改变后续流柱的轨迹。改变了的轨迹允许后续的电子流柱移动得更远,也使得整个等离子体体积发生扩张。

普林斯顿大学的 Likhanskii 和 Shneider 建立了空气中不对称布局介质阻挡放电的详细物理模型^[24],模型将泊松方程与其他方程耦合求解,考虑了绝缘材料和金属材料表面发生的物理过程,如绝缘材料表面电子的附着、金属材料表面二次发射。研究表明:电子雪崩过程只持续了小段时间,但是其对加速中性气体有着重要的作用,离子向裸露电极运动是施加正弦或类正弦电压激励情况下的最主要的效率降低源;基于对介质阻挡放电物理本质的理解,提出了优化的电压波形,通过向裸露电极施加高循环率的时间尺度为纳秒级的负脉冲和正的直流偏置组成的电压。在相同的工作条件下,可以提高等离子体激励诱导的近壁气流速度 1-2 倍,利用电压幅值为 5 kV-10 kV 的纳秒级的负脉冲和高的重复频率,诱导的气流速度有可能达到 100 m/s。

3 等离子体气动激励器的建模仿真发展趋势

等离子体气动激励是通过带电粒子在空间不均匀电场作用下定向运动,并向边界层中的中性气体粒子传递动量和能量而形成的一个“粒子的集体运动行为”。等离子体中的带电粒子是空气中气体分子以不同程度电离形成的电子和离子,有几十种之多;带电粒子与中性气体粒子碰撞的形式多种多样。

目前研究者建模时考虑的因素越来越多,使得模型与实际物理过程更加接近,更多的工作将偏向粒子模拟的方法,从目前只能对单一惰性气体环境下的等离子体气动激励进行定性的仿真研究转向考虑多成份的复杂物理过程建模的研究。例如建立大气压下的氮、氧混合气体的粒子碰撞模型,考虑的粒子种类以及带电粒子和中性粒子的碰撞形式将基本接近实际物理过程。另外,等离子体气动激励与边界层的相互作用是非定常,而目前从非定常的角度对等离子体流动控制物理本质的研究相对较少,随着计算机技术的发展,对等离子体气动激励的非定常研究将成为可能。在更小的时间步长下求解介质阻挡放电的物理模型,使之和放电的实际物理过程更接近,可以更好的揭示等离子体气动激励及其与边界层相互作用的物理机制。

通过对之前仿真研究的分析发现,大部分的研究工作均在低速条件下开展。今后,更高来流速度下的等离子体流动控制仿真研究将占据主导,使之和实际的应用条件更加接近。莫斯科物理技术学院的 D. V. Roupasov 研究小组将纳秒脉冲等离子体气动激励的作用简化成局部的压力和温度冲击波,对等离子体气动激励及其和边界层的相互作用进行了仿真研究^[25],通过对压力和温度的测试来确定模型的边界条件,仿真结果表明,纳秒脉冲等离子体气动激励在来流速度为 0.75M 时,仍可以有效的抑制大迎角下翼型吸力面的流

动分离,达到减阻增升的流动控制目的。

另外,目前的大多数仿真模型均是极其简化的二维模型,并且研究对象仅限于局部部件,如二维翼型、二维平面叶栅、圆柱等,今后更多精力将转向三维仿真研究,研究对象将由部件向整机过渡。肯塔基大学的 Suzen 等将等离子体气动激励的作用简化成体积力^[26],通过求解简化的电势和电荷方程,建立了初步的三维数值仿真模型,得到了电场强度和电荷密度的空间分布规律。

实验研究表明,利用等离子体气动激励可以有效减弱激波强度。关于等离子体气动激励对激波影响的研究,国内外主要以实验研究为主,今后,超音速条件下等离子体流动控制的仿真研究将逐渐兴起。空军工程大学已进行了初步的仿真研究,将等离子体气动激励简化为局部区域的热量注入,注入区域简化为矩形,设定恒定的温度(几千 K)与流体方程耦合求解,仿真结果表明,注入热能足够大时,周围会诱导出斜激波,原有的钝头前脱体激波会前移,并且强度减弱,钝体的激波阻力能减小 30% - 50%。

等离子体流动控制具有其独特的优势,可以预见,随着研究的深入,等离子体流动控制技术将会开拓出更多的应用前景。提高等离子体气动激励器使用寿命、效率以及扩大等离子体气动激励的作用范围和能力,是应用中需要解决的关键课题。等离子体气动激励器的建模仿真理论需要进一步地完善,以适应应用要求,提供更准确的理论指导。

参考文献:

- [1] 李应红, 吴云, 张朴. 大气压等离子体流动控制初步实验研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2006, 7(3): 1-3.
LI Yinghong, WU Yun, ZHANG Pu. Preliminary Experimental Investigation of Atmosphere Plasma Flow Control Technology [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2006, 7(3): 1-3. (in Chinese)
- [2] 魏泮亭, 宋慧敏, 李应红, 等. 等离子体激励控制圆柱绕流的影响因素分析[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2007, 8(3): 1-3.
WEI Fengting, SONG Huimin, LI Yinghong, et al. Analysis of Factors Affecting Plasma Actuation Based Cylinder - Around - Flow Control [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2007, 8(3): 1-3. (in Chinese)
- [3] 安治永, 李益文, 李应红, 等. 非对称等离子体激励器的电场仿真[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2007, 8(2): 49-51.
AN Zhiyong, LI Yiwen, LI Yinghong, et al. The Electric Field Calculation of Asymmetry Plasma Actuator [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2007, 8(2): 49-51. (in Chinese)
- [4] Sosa R, Moreau E, Touchard G, et al. Stall Control at High Angle of Attack with Periodically Excited EHD Actuators [R]. AIAA 2004 - 2738.
- [5] Corke T C, Post M L. Overview of Plasma Flow Control Concepts, Optimization and Applications [R]. AIAA 2005 - 0563.
- [6] He C, Corke T C. Numerical Analysis of Plasma Flow Control over a Hump Model [R]. AIAA 2007 - 935.
- [7] Suzen Y B, Huang P G, Jacob J D, et al. Numerical Simulations of Plasma Based Flow Control Applications [R]. AIAA 2005 - 4633.
- [8] Mao Meiliang, Deng Xiaogang, Xiang Daping. Numerical Study for the Influence of High - pressure Glow Discharge - induced Plasma on the Flow of Boundary Region [R]. AIAA 2005 - 4619.
- [9] Orlov D M, Corke T C. Electric Circuit Model for Aerodynamic Plasma Actuator [R]. AIAA 2006 - 1206.
- [10] Orlov D M, Corke T C. Numerical Simulation of Aerodynamic Plasma Actuator Effects [R]. AIAA 2005 - 1083.
- [11] 宋慧敏, 李应红, 魏泮亭. 等离子体电流体动力激励器的建模与仿真 [J]. 高电压技术, 2006, 32(3): 72-74.
SONG Huimin, LI Yinghong, WEI Fengting. Modeling and Simulation of Plasma Electrohydrodynamic Actuator [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(3): 72-74. (in Chinese)
- [12] 安治永, 李应红, 吴云, 等. 对称等离子体激励器系统电场仿真研究 [J]. 物理学报, 2007, 56(8): 4778-4784.
AN ZhiYong, LI Yinghong, WU Yun, et al. Research on the Electric Field Calculation of Symmetry Plasma Actuator System [J]. Chinese Physics, 2007, 56(8): 4778-4784. (in Chinese)
- [13] Bouef J P, Pitchford L C. Electrohydrodynamic Force and Aerodynamic Flow Acceleration in Surface Dielectric Barrier Discharge [J]. Journal of Applied Physics, 2005: 103307.
- [14] Bouef J P, Lagmich Y. Electrohydrodynamic Force and Acceleration in Surfaces Discharges [R]. AIAA 2006 - 3574.
- [15] Poggie J. Numerical Exploration of Flow Control with Glow Discharge [R]. AIAA 2004 - 2658.
- [16] Poggie J. Computational Studies of High - speed Flow Control with Weakly - ionized Plasma [R]. AIAA 2005 - 0784.

- [17] Roy S, Singh K, Kumar H, et al. Effective Discharge Dynamics for Plasma Actuators[R]. AIAA 2006 - 0374.
- [18] Roy S, Gaitonde D V. Ionized Collisional Flow Model for Atmosphere RF Application[R]. AIAA 2004 - 0354.
- [19] Roy S, Gaitonde D V. Force Interaction of High Pressure Glow Discharge with Fluid Flow for Active Separation Control[J]. Journal of Applied Physics, 2006: 023503.
- [20] Jayaraman B, Thakur S, Shyy W. Modeling of Fluid Dynamics and Heat transfer Induced by Dielectric Barrier Plasma Actuator[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2007, 129(2): 517 - 525.
- [21] Jayaraman B, Cho Y C, Shyy W. Modeling of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator [R]. AIAA 2007 - 4531.
- [22] Font G, Jung S, Enloe C, et al. Simulation of the Effects of Force and Heat Produced by a Plasma Actuator on Neutral Flow Evolution[R]. AIAA 2006 - 0167.
- [23] Font G, Morgan W L. Plasma Discharges in Atmospheric Pressure Oxygen for Boundary Layer Separation Control[R]. AIAA 2005 - 4632.
- [24] Likhanskii A, Shneider M, Macheret S, et al. Modeling of Interaction Between Weakly Ionized Near - surface Plasmas and Gas Flow[R]. AIAA 2006 - 1204.
- [25] Roupasov D V, Nikipelov A, Nudnova M M, et al. Flow Separation Control by Plasma Actuator with Nanosecond Pulse Periodic Discharge[R]. AIAA 2008 - 1367.
- [26] Suzen Y B, Huang P G, Jacob J D, et al. Unstructured Grid Simulations of Flow Separation Control Using Plasma Actuators: 18th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, June 25 - 28, 2007, Miami, FL[C]. Miami: AIAA, 2007.

(编辑: 姚树峰)

Research Status Quo of Modeling and Simulation Technology of Plasma Aerodynamic Actuation

LI Ying - hong, LIANG Hua, WU Yun, WANG Jian, WU Wei

(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Plasma flow control, as a novel active flow control technique, has become a newly - rising focus in the international aerodynamics and aerothermodynamics fields. The character and research status quo of plasma aerodynamic actuation modeling are introduced in the paper. A detail specification of four basic models of plasma aerodynamic actuation is discussed. The simulation technologies, the merits and defects of the methods are discussed. The development direction of plasma flow control is analyzed. More researches based on particle simulation will be developed in the future. More and more factors, such as the unsteady characteristic of plasma aerodynamic actuation, will be considered in modeling, which makes the simulation model much more accord with the physical process. Researches of higher inflow velocity will be carried on to meet the application demand. The deep simulation research is a help to revealing the physical essence of plasma aerodynamic actuation and its interplay with boundary layer. so as to promote the research and development of plasma flow control technology in our country.

Key words: dielectric barrier discharge (DBD); plasma; aerodynamic actuation; modeling and simulation; flow control