

等离子体流动控制技术研究进展

李应红, 吴云

(空军工程大学等离子体动力学重点实验室, 陕西西安, 710038)

摘要 基于等离子体气动激励的等离子体流动控制技术, 可显著改善飞行器/动力装置的气动特性, 已成为国际上空气动力学和气动热力学领域的研究前沿。简要介绍国外等离子体流动控制研究的重要进展, 主要介绍国内在等离子体冲击波流动控制理论、等离子体气动激励特性、等离子体气动激励扩大压气机稳定性、等离子体气动激励减弱超/高超声速激波强度等方面的研究进展, 并指出了未来发展需要解决的重大问题。

关键词 等离子体; 流动控制; 等离子体气动激励; 压气机

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.03.001

中图分类号 V23 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)03-0001-05

更高、更快、更远、隐身是军用飞行器发展的主要趋势。优良的气动特性和高效的动力装置是飞行器在性能上跨越新高度的必要保证。对于未来的新型飞行器, 常规气动设计已经不能满足要求, 需要采用新的技术手段。国内外专家认为, 主动流动控制技术是21世纪最有发展潜力的航空前沿技术之一, 将作为未来新型飞行器和航空发动机气动设计中一个新的自由度(手段)。

等离子体是液体、固体、气体之外的物质第四态。等离子体流动控制是基于等离子体气动激励的新型主动流动控制技术, 利用等离子体在电磁场力作用下运动或气体放电引起温度、压力变化对流场局部施加扰动, 实现飞行器减阻增升和发动机增推扩稳, 其主要技术优势是: 没有活动部件、响应快(微秒量级); 高带宽(激励频率从10 Hz到100 kHz量级)。

1 国外研究进展

2004年, 美国国防部将等离子体流动控制列为面向空军未来发展的重点资助领域之一, 主要研究“理解、预测和控制弱电离流动, 进而实现飞行器性能革命的科学基础”。2005年, 美国空军将等离子体动力学列为未来几十年保持技术领先地位的6大基础领域之一, 主要研究等离子体改善亚声速、超声速和高超声速飞行器气动特性和推进效率的科学基础。2009年, 美国航空航天学会将以等离子体流动控制为代表的主动流动控制技术列为十大航空前沿技术之一。2009年, 欧洲制定了“PLASMAERO(PLASM as for AERO dynamic control)”合作研究计划。美、俄、英、法、德、日、意、阿等开展了大量研究, 美国、俄罗斯最具代表性, 处于领先地位。

1.1 等离子体气动激励特性与建模仿真

电晕放电、介质阻挡放电、电弧放电、微波放电、电晕/介质阻挡组合放电、局部丝状放电等离子体气动激励进行了大量研究^[1]。通过探针、光谱仪、天平、PIV等手段, 对放电特性、等离子体特性和流动特性进行了时空分辨测试, 获得了等离子体气动激励的功耗、等离子体转动和振动温度、诱导的速度场和涡量场等特性。

* 收稿日期: 2011-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10972236; 50906100)

作者简介: 李应红(1963-), 男, 重庆奉节人, 教授, 博士生导师, 主要从事航空等离子体研究。

E-mail: wuyun1223@126.com

根据体积力的测试结果进行了等离子体气动激励特性的唯象仿真,其优势是容易实现,缺点是物理过程不清晰。通过将泊松方程、等离子体方程、N-S方程耦合求解进行的等离子体-流体耦合仿真,其优势是物理过程清晰,但是由于化学反应复杂,多时间尺度计算难度大,计算资源要求高,并且跟实验结果只能定性一致。

1.2 外流等离子体流动控制

美国圣母大学进行了无人机等离子体飞行控制的风洞实验^[2],与贝尔直升机公司合作进行了V-22机翼等离子体流动控制实验。俄罗斯理论和应用力学研究所进行了滑翔机机翼等离子体流动控制飞行实验^[3]。莫斯科物理技术学院进行了来流速度110 m/s下抑制流动分离的实验^[4],并对高亚声速条件下的流动控制效果进行了探索^[5]。

1.3 内流等离子体流动控制

美国圣母大学在等离子体气动激励抑制涡轮低雷诺数流动分离方面开展了一系列的研究工作^[6],加拿大蒙大工学院进行了等离子体气动激励抑制轴流压气机旋转失速扰动波的仿真研究^[7],GE公司全球研发中心进行了等离子体气动激励控制压气机叶尖流动、扩大压气机稳定性的仿真研究^[8],俄亥俄州立大学进行了等离子体气动激励控制喷管流动与噪声的实验研究^[9]。

1.4 等离子体气动激励器和电源

2006年,美国大气辉光技术公司宣布在美国空军科研局的资助下,在高效、高鲁棒性的等离子体激励器研制方面取得突破,并准备将其用于无人机飞行控制,美国空军科研局宣布在柔性等离子体激励器技术方面取得突破。

波音公司、通用电气公司、普惠公司、贝尔公司、霍尼韦尔公司等申请了大量的专利,呈现出应用基础研究和关键技术攻关结合的趋势。

2 国内研究进展

2001年以来,针对提升飞行器气动性能和推进效能的重大需求,国内等离子体流动控制研究呈现蓬勃发展的态势。空军工程大学、中国空气动力研究与发展中心、中科院工程热物理研究所、北京大学、北京航空航天大学、西北工业大学、南京航空航天大学、装备学院、中航工业气动院、南京理工大学、哈尔滨工业大学、国防科技大学、厦门大学等单位开展了大量研究工作。文献[10-33]研究了高效能等离子体气动激励及其与飞行器、发动机典型流场耦合的基础问题,在等离子体冲击波流动控制理论、等离子体气动激励特性、等离子体气动激励扩大压气机稳定性、等离子体气动激励减弱超/高超声速激波强度等进展很大。

2.1 等离子体冲击波流动控制理论

等离子体气动激励有效抑制流动分离的速度,是决定等离子体流动控制能否走向应用的重要因素。受绝缘材料抗击穿能力和等离子体产生方式的限制,“壁面射流”速度很难显著提高(8 m/s),只能抑制低速(几十 m/s)流场分离。要提高等离子体流动控制作用能力,一是提高激励强度特别是激励的初始强度,二是变定常等离子体气动激励为非定常脉冲等离子体气动激励,从非定常、非线性的角度寻求等离子体气动激励对流场的最佳作用方式。

受高功率脉冲激光诱导等离子体冲击波对材料强化的启发,研究人员提出了“等离子体冲击流动控制”原理和方法,包括“冲击激励”、“扰动涡流”和“频率耦合”3个内涵。“冲击激励”是指通过脉冲放电,能量集中在瞬间释放,形成高强度冲击(波),且降低平均功耗;“扰动涡流”是指冲击激励形成垂直于壁面或流向的射流冲击扰动或旋涡,通过涡流控制,抑制分离流动;“频率耦合”是指从非定常、非线性的角度,实现“等离子体气动激励/流场耦合”。纳秒脉冲放电等离子体冲击气动激励器比较系统揭示了其原理与特性。相关研究建立了等离子体冲击气动激励特性估算的2种方法,获得了产生冲击波气动激励的条件。实现纳秒脉冲放电等离子体气动激励抑制来流速度0.4 Ma下NACA 0015翼型流动分离,临界失速攻角由23°增大到26°,攻角为23°时,翼型升力增大16.9%,阻力减小21.7%。

2.2 等离子体气动激励特性

目前,放电特性、等离子体特性和流场特性综合测试系统已建立,重点对表面弱电介质阻挡放电等离

子体特性进行了测试诊断。电子密度直接反映空气的电离程度,在一定程度上表征参与动量传递的离子数量,因此也是等离子体流动控制物理原理研究中的重要参数,但是目前国内外公开报道的文献中,还没有手段可以直接对表面弱电离等离子体电子数密度进行测试诊断。根据发光粒子 $N_2(C)$ 和 $N_2^+(B)$ 的化学动力学模型,可建立氮分子基态不同振动能级的相对浓度、C 态振动能级分布与电子数密度之间的定量关系,利用 371.1 nm 和 380.5 nm 两根谱线的强度比,建立了表面介质阻挡放电等离子体电离率的估算模型,从而在解决表面弱电离等离子体电子数密度诊断的关键问题方面有所突破。针对航空和临近空间飞行器的典型工作环境(0-35 km)对低气压环境等离子体气动激励诱导流动特性变化的基本规律进行研究,实验得到了低气压环境等离子体气动激励电子数密度、转动温度、振动温度和电子温度等参数的演化特性。随着气压降低,等离子体气动激励器放电在 45 Torr 附近发生了丝状放电向辉光放电的转换,导致激励特性发生了显著变化。

2.3 等离子体气动激励扩大压气机稳定性

风扇/压气机级增压比和稳定性是决定涡扇发动机推重比和稳定性的关键因素,为了研制高推重比涡轮发动机,需要解决抑制静子叶片吸力面和角区流动分离、控制叶尖脱落涡等失稳扰动的技术难题。文献[25]提出了在压气机转子机匣内壁和静叶角区施加等离子体激励抑制失稳扰动的方法。空军工程大学与中科院工程热物理研究所合作首次开展了等离子体气动激励扩大轴流式压气机稳定性的实验,在压气机转速 750 r/min 和 1 080 r/min 的情况下,压气机近失速点流量系数分别降低 12.5% 和 5.1%,列入了《2007-2008 工程热物理学科发展报告》,国际上 2009 年才有实验研究报道。等离子体气动激励抑制低速压气机叶栅角区流动分离的数值仿真与实验研究结果表明:小攻角情况下,叶片吸力面角区流动分离导致显著的尾迹总压损失,来流速度为 50 m/s 时,等离子体气动激励可以有效的抑制角区流动分离,降低总压损失,激励电压、频率分别为 10 kV 和 22 kHz 时,50% 叶高处的尾迹压力分布基本不变,60% 和 70% 叶高处的最大总压损失分别减小了 13.83% 和 10.74%,增加激励电极组数或激励电压,可以增强抑制效果。在大雷诺数或大攻角条件下,非定常等离子体气动激励的作用效果更加明显,而且占空比和激励频率是作用效果强弱的重要参数,在 70% 叶高处可以降低总压损失系数 28%。

2.4 等离子体气动激励减弱超/高超声速激波强度

等离子体气动激励控制激波存在 2 个主要问题:①逆向喷流式等离子体激励的能耗大;②表面电弧放电等离子体激励不稳定。为此,提出了“脉冲电磁激励激波控制”原理,包括“脉冲放电”、“磁控热阻”、“频率耦合”等 3 个内涵。“脉冲放电”是指表面电极对空气强电离形成热阻、压阻,通过脉冲放电实现高强度、低功耗;“磁控热阻”是指磁场力提高脉冲放电强度、增加激励稳定性,产生有效阻塞;“频率耦合”是指放电频率与流场耦合,形成近似稳定的虚拟气动型面。在 2.2 Ma 的条件下,等离子体气动激励有效减弱激波强度(波前波后压力升)11.6% 以上,最多减小 20%。

3 未来研究重点展望

国外对等离子体流动控制技术十分重视,正在逐渐走向工程应用。国内也开展了很多研究,取得了若干重要进展。等离子体流动控制技术未来发展需要解决的重大问题包括:等离子体气动激励环境特性和激励器工艺;高速轴流压气机等等离子体扩稳增效;提高电磁推力矢量的效果和稳定性,与气动设计结合,减阻增升、增推扩稳、提高飞行控制效能的设计方法;等离子体流动控制激励设备的减量化等。因此我国应大力发展等离子体流动控制技术,为新型飞行器/发动机发展提供技术支撑。

参考文献(References):

- [1] Corke T C, Enloe C L, Wilkinson S P. Dielectric barrier discharge plasma actuators for flow control[J]. Annual review of fluid mechanics, 2010, 42: 505-529.
- [2] Sidorenko A A, Budovsky A D, Pushkarev A V, et al. Flight testing of DBD plasma separation control system[R]. AIAA 2008-373.
- [3] Patel M P, Ng T T, Vasudevan S, et al. Plasma actuators for hingeless aerodynamic control of an unmanned air vehicle[R].

- AIAA 2006 – 3495.
- [4] Roupassov D V, Zavyalov I N, Starikovskii A Y, et al. Boundary layer separation plasma control using low – temperature non – equilibrium plasma of gas discharge[R]. AIAA 2006 – 0373.
- [5] Roupassov D V, Nikipelov A A, Nudnova M M, et al. Flow separation control by plasma actuator with nanosecond pulsed – periodic discharge[J]. AIAA Journal, 2009, 47(1): 168 – 185.
- [6] Huang J, Corke T C, Thomas F O. Plasma actuators for separation control of low pressure turbine blades[R]. AIAA 2003 – 1027.
- [7] Vo D H. Suppression of short length – scale rotating stall inception with glow discharge[R]. ASME GT 2007 – 27673.
- [8] Jothiprasad G, Murray R C, Essenhigh K, et al. Control of tip – clearance flow in a low speed axial compressor rotor with plasma actuation[R]. ASME GT2010 – 22345.
- [9] Samimy M, Kim J, Kastner J, et al. Active control of high – speed and high Reynolds number jets using plasma actuators[J]. Journal of fluid mechanics, 2007, 578: 305 – 330.
- [10] 张攀峰, 王晋军, 施威毅, 等. 等离子体激励低速分离流动控制实验研究[J]. 实验流体力学, 2007, 27(2): 35 – 39. ZHANG Panfeng, WANG Jinjun, SHI Weiyi, et al. Experimental study on the separation control by plasma actuator in subsonic flow[J]. Journal of experiments in fluid mechanics, 2007, 27(2): 35 – 39. (in Chinese)
- [11] Li Ying – hong, Wang Jian, Wang Cheng, et al. Properties of surface arc discharge in a supersonic airflow[J]. Plasma sources science and technology, 2010, 19(2): 025016.
- [12] Li Ying – hong, Wu Yun, Zhou Min, et al. Control of the corner separation in a compressor cascade by steady and unsteady plasma aerodynamic actuation[J]. Experiments in fluids, 2010, 48(6): 1015 – 1023.
- [13] Wu Yun, Li Ying – hong, Jia Min, et al. Influence of operating pressure on surface dielectric barrier discharge plasma aerodynamic actuation characteristics[J]. Applied physics letters, 2008, 93(3): 031503.
- [14] Wang Jian, Li Ying – hong, Xing Fei. Investigation on oblique shock wave control by arc discharge plasma in supersonic airflow[J]. Journal of applied physics, 2009, 106(7): 073307.
- [15] Wang Jian, Li Ying – hong, Cheng Bang – qin, et al. Effects of plasma aerodynamic actuation on oblique shock wave in a cold supersonic flow[J]. Journal of physics D: applied physics, 2009, 42(16): 165503.
- [16] Jia Min, Song Hui – min, Li Ying – hong, et al. Influence of excitation voltage waveform on dielectric barrier discharge plasma aerodynamic actuation characteristics[J]. Journal of applied electromagnetics and mechanics, 2009, 33: 1405 – 1410.
- [17] Li Ying – hong, Wu Yun, Jia Min, et al. Optical emission spectroscopy investigation of a surface dielectric barrier discharge plasma aerodynamic actuator[J]. Chinese physics letters, 2008, 25(11): 4068 – 4071.
- [18] Wu Yun, Li Ying – hong, Jia Min, et al. Experimental investigation into characteristics of plasma aerodynamic actuation generated by dielectric barrier discharge[J]. Chinese journal of aeronautics, 2010, 23(1): 39 – 45.
- [19] Su Changbing, Li Yinghong, Cheng Bangqin, et al. MHD flow control of oblique shock waves around ramps in low – temperature supersonic flows[J]. Chinese journal of aeronautics, 2010, 23(1): 22 – 32.
- [20] Wu Yun, Li Ying – hong, Zhu Jun – qiang, et al. Experimental investigation of a subsonic compressor with plasma actuation treated casing[R]. AIAA 2007 – 3849.
- [21] Wu Yun, Li Ying – hong, Pu Yikang, et al. Experimental investigation on plasma aerodynamic actuator’s emission spectrum characteristic[R]. AIAA 2008 – 1105.
- [22] 李应红, 吴云, 梁华, 等. 提高抑制流动分离能力的等离子体冲击流动控制原理[J]. 科学通报, 2010, 55(31): 3060 – 3068.
- LI Yinghong, WU Yun, LIANG Hua, et al. The mechanism of plasma shock flow control for enhancing flow separation control capability[J]. Chinese science bulletin, 2010, 55(31): 3060 – 3068. (in Chinese)
- [23] 李应红, 梁华, 马清源, 等. 脉冲等离子体气动激励抑制翼型吸力面流动分离的实验研究[J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1429 – 1435.
- LI Yinghong, LIANG Hua, MA Qingyuan, et al. Experimental investigation on airfoil suction side flow separation by pulse plasma aerodynamic actuation[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2008, 29(6): 1429 – 1435. (in Chinese)
- [24] 李应红, 吴云, 张朴, 等. 等离子体气动激励抑制翼型失速分离的实验研究[J]. 空气动力学学报, 2008, 26(3): 372 – 377.
- LI Yinghong, WU Yun, ZHANG Pu, et al. Experimental investigation on airfoil stall separation suppression by plasma actuation[J]. Acta aerodynamica sinica, 2008, 26(3): 372 – 377. (in Chinese)

- [25] 吴云,李应红,朱俊强,等. 等离子体气动激励抑制压气机叶栅角区流动分离的仿真与实验[J]. 航空动力学报, 2009, 24(4): 830-835.
WU Yun, LI Yinghong, ZHU Junqiang, et al. Computational and experimental investigation of plasma aerodynamic actuation based corner flow separation control in a compressor cascade[J]. Journal of aerospace power, 2009, 24(4): 830-835. (in Chinese)
- [26] 吴云,李应红,朱俊强,等. 等离子体气动激励扩大低速轴流式压气机稳定性的实验[J]. 航空动力学报, 2007, 22(12): 2025-2030.
WU Yun, LI Yinghong, ZHU Junqiang, et al. Experimental investigation of using plasma aerodynamic actuation to extend low-speed axial compressor's stability[J]. Journal of aerospace power, 2007, 22(12): 2025-2030. (in Chinese)
- [27] 李应红,吴云,宋慧敏,等. 大气压等离子体流动控制实验[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2006, 7(3): 1-3.
LI Yinghong, WU Yun, SONG Huimin, et al. 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)
- [28] 李应红,梁华,吴云,等. 等离子体气动激励建模仿真综述[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2008, 9(5): 1-5.
LI Yinghong, LIANG Hua, WU Yun, et al. Research status quo of modeling and simulation technology of plasma aerodynamic actuation[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2008, 9(5): 1-5. (in Chinese)
- [29] 王海兴,陈熙,潘文霞,等. 层流与湍流等离子体冲击射流特性比较[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(4): 52-54.
WANG Haixing, CHEN Xi, PAN Wenxia, et al. Comparison of the characteristics of laminar and turbulent impinging plasma jets[J]. Journal of engineering thermophysics, 2007, 28(4): 52-54. (in Chinese)
- [30] 黄护林,张炎. 磁控等离子体对尾喷管壁传热特性的影响[J]. 航空动力学报, 2007, 22(8): 1209-1215.
HUANG Hulin, ZHANG Yan. Effect of magnetic plasma on heat transfer characteristics of nozzle wall[J]. Journal of aerospace power, 2007, 22(8): 1209-1215. (in Chinese)
- [31] 傅鑫,张文宣,栗保明. 低温等离子体诱导的速度边界层的实验研究[J]. 弹道学报, 2008, 20(1): 15-18.
FU Xin, ZHANG Wenxuan, LI Baoming. Experimental study of boundary layer velocity profile induced by low-temperature Plasma[J]. Journal of ballistics, 2008, 20(1): 15-18. (in Chinese)
- [32] 王健磊,李华星,孟宣市,等. 大迎角分离流场在等离子体控制下的特性研究[J]. 实验流体力学, 2010, 24(2): 34-38.
WANG Jianlei, LI Huaxing, MENG Xuanshi, et al. Study on the characteristics of fore-body separate flow at high angle of attack under plasma control[J]. Journal of experiments in fluid mechanics, 2010, 24(2): 34-38. (in Chinese)
- [33] 薛帮猛,杨永. 翼型前缘分离流动在等离子体激励器控制下的响应[J]. 计算物理, 2008, 25(6): 1-5.
XUE Bangmeng, YANG Yong. Airfoil leading edge separation flows under control of plasma actuator[J]. Chinese journal of computational physics, 2008, 25(6): 1-5. (in Chinese)

(编辑:徐敏)

Progress of Research on Plasma Flow Control Technology

LI Ying-hong, WU Yun

(Science and Technology on Plasma Dynamics Lab, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Plasma flow control can significantly improve the aerodynamic characteristics of aircraft and power plant through plasma aerodynamic actuation, and this technology has already become a front subject in international aerodynamics and aerothermodynamics fields. Status of overseas plasma flow control research is introduced briefly. Progress of Air Force Engineering University in plasma shock flow control theory, plasma aerodynamic actuation characteristics, plasma based compressor stability extension and shock control is presented. Also, the important problems in future are pointed out.

Key words: plasma; flow control; plasma aerodynamic actuation; compressor