

等离子体流动控制研究进展

杨波,白敏,薛晓红,白希尧

大连海事大学环境工程研究所,辽宁大连 116026

摘要 介绍了国内外等离子体流动控制的研究进展,主要包括直流电晕放电、大气压辉光放电、表面介质阻挡放电等离子体流动控制。目前等离子体流动控制通常采用表面放电方式,电场强度低,属于弱电离放电,仍没有突破“离子风”技术,诱导的气流速度仅为 8 m/s,不具有实用价值。一种高压纳秒脉冲放电成为等离子体流动控制研究领域中的一个新的热点研究方向,但是纳秒脉冲作用周期的占空比小,能否用一个小占空比获得一个更高的作用效率是一个值得深入探讨的问题。等离子体流动控制技术要想具有实际应用价值,就必须提高等离子体可控的来流速度到 100 m/s 以上。因此必须从根本上解决等离子体激励器的现存问题,在深化研究等离子体流动控制作用机理的基础上,逐步提高等离子体激励器性能,这也是等离子体流动控制领域急待解决的问题。

关键词 等离子体;流动控制;电晕放电;介质阻挡放电;大气压辉光放电

中图分类号 V211.1+9,O539

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)24-0081-05

Recent Progresses in Plasma Flow Control

YANG Bo, BAI Mindi, XUE Xiaohong, BAI Xiyao

Institute of Environmental Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning Province, China

Abstract Plasma is one of newly emerging aerodynamic flow control technologies, with advantages of no moving parts and a short response time, which will become a new research field of great importance in the aerodynamics and plasma physics. This paper reviews the recent progresses in plasma flow control, including DC corona discharge, one atmosphere uniform glow discharge, and surface dielectric barrier discharge. At present, the surface discharge is commonly employed to control plasma flow, which concerns a weakly ionization discharge for low electric fields and the technology of "ion wind" does not have breakthroughs, so the maximum induced neutral gas velocity is only 8 m/s, without any useful value. The pulsed-periodic nanosecond excitation surface dielectric barrier discharge shows a higher efficiency for flow control, and becomes a promising research direction on plasma flow control. But the duty cycle of pulsed-periodic nanosecond is small, so it is still an issue worth to be explored for a small duty cycle to produce a great action efficiency. The plasma flow control techniques are of practical value, it is necessary to increase the velocity of controlled air flow up to over 100 m/s. Therefore, it is necessary to solve the problems in plasma actuators. An urgent problem needs to be solved in the field of plasma flow control is to improve the performance of plasma actuators based on studies on

the mechanism of plasma flow control.

Keywords plasma; flow control; DC corona discharge; dielectric barrier discharge; one atmosphere uniform glow discharge

飞行器流动控制的目的是减少飞行器的阻力、增加升力,提高升/阻比,从而改善飞行器的气动性能^[1-2]。飞行器的飞行阻力每减少 1%,有效载荷即可增加 10%^[3],而全球每年就可以节省上千亿美元燃料成本,或者可以提高飞行器的飞行速度和增大航程^[4]。传统的飞行器流动控制方法有缝翼、襟翼、涡流发生器、边界层吹/吸气等,但会带来非预期的寄生阻力或复杂的移动部件、通气管路等问题^[5]。等离子体激励可以将电场的能量转化为边界层气体分子的动量或热量,改变边界层的流场结构和物理特性,从而抑制边界层流动分离,使飞行器减阻、增升、提高失速攻角、降噪、减振,实现飞行器的流动控制。

等离子体激励流动控制具有响应时间短、无须移动部件、作用频带宽等优势,成为一种新概念飞行器流动控制思路^[6-7],是国际空气动力学和等离子物理领域新兴的重要研究领域,极可能成为主动流动控制领域的重大突破性技术,使飞行器和动力装置性能得到很大提升。

1 等离子体流动控制原理

等离子体流动控制的基本原理是利用等离子体与飞行器绕流的相互作用,改变飞行器周围的流场结构和物理特性,从而达到流动控制目的。但其作用机制目前尚不明确,可以归纳为两种主要的原理:动量传输(离子风效应)和能量传输(热效应)。

1.1 动量传输

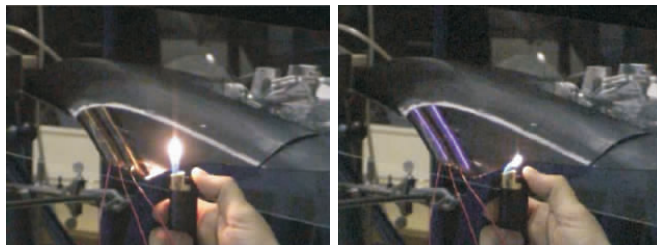
等离子体通过与中性气体分子碰撞,将动量传递给气体

收稿日期:2009-09-09

基金项目:国家自然科学基金项目(60801010,50778028),中国高技术发展计划(863计划)项目(2008AA06Z317)

作者简介:杨波,副教授,研究方向为等离子体流动控制,电子信箱:elfinpapa@yeah.net

分子使气流加速。这样可使翼型表面的最低压强点后移,从而延长顺压梯度段,减短逆压梯度段,减小边界层的湍流度或抑制湍流涡系的形成,使边界层尽量保持层流状态,控制边界层流动的分离,使飞行器增升减阻,提高气动性能。等离子体的动量传输效应像有风推动气流一样,所以也称为“离子风”或“电风”,其对火焰的影响如图 1 所示^[8]。



(a) 无等离子体 (b) 有等离子体
(a) Plasma off (b) Plasma on

图 1 等离子体形成的离子风对火焰的影响
Fig. 1 Effect of ion wind formed by plasma on flame

1.2 能量传输

等离子体通过诱导近壁射流向边界层注入能量,边界层的气体被加热而温度升高,从而改变边界层的气动热力特性,如密度减小、黏性增大,可以有效抑制边界层的流动分离^[9]。

2 等离子体流动控制国外研究进展

近 10 年来,美国、俄罗斯、法国等世界航空航天大国一直致力于飞行器的等离子体流动控制研究,尝试了各种放电(包括直流、交流、射频、微波、介质阻挡、电晕、弧光、火花放电)产生的表面和体积等离子体^[10-12]。近 5 年,研究主要集中在表面放电产生的非平衡等离子体,放电的方式有:表面直流电晕放电、表面介质阻挡放电、大气压均匀辉光放电(如美国的专利技术——OAUGDPTM)。

2.1 表面直流电晕放电

表面直流电晕放电由 2 个电极平齐镶嵌在物体表面组成,其结构如图 2(a)^[13]所示。在 2 个电极间施加直流高电压后,将发生电晕放电,其放电形貌如图 2(b)所示。表面直流电晕放电由于其结构简单、容易实现,一些学者将其应用于流动控制研究。

Moreau 等^[13]研究了在自由来流速度小于 25 m/s 时,表面直流电晕放电对平板边界层气流的影响。结果表明,等离子体诱导的气流速度最大可达 3 m/s;在自由来流的速度为 10 m/s 时,等离子体可以减阻 30%;放电的能量效率非常低,只有百分之几。Magniera 等^[14]利用粒子成像测速(PIV)系统,在亚音速风洞中进行了直流电晕放电等离子体激励器的流动控制实验,发现在自由来流的速度为 14 m/s 时,等离子体可以有效减少平板上的流动分离。

表面直流电晕放电存在的问题是放电不够稳定,容易从流光放电过渡到火花放电,因此限制了它在飞行器流动控制中的应用。

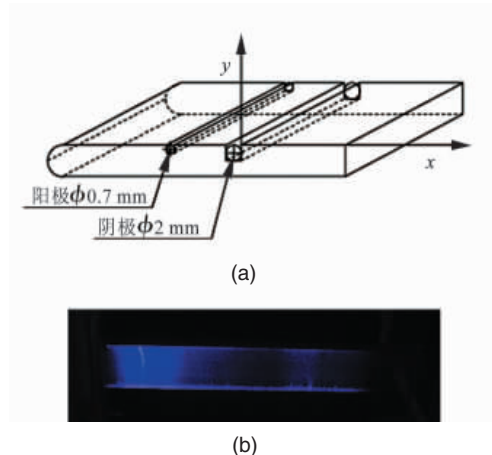


图 2 表面直流电晕放电结构(a)和形貌图(b)
Fig. 2 Schematic diagram (a) and photograph (b) of surface DC corona discharge

2.2 大气压均匀辉光放电

1994 年,美国田纳西大学等离子体科学实验室的 Roth 等采用如图 3(a)^[15]所示结构的装置进行试验,在介质表面产生了一个大气压下均匀辉光放电等离子体层,其放电形貌如图 3(b)^[16]所示。申请美国专利(专利号:5414324)^[17],称为 OAUGDPTM。目前,国际上只有美国田纳西大学等离子体科学实验室的 Roth 等进行了一个大气压均匀辉光放电流动控制研究。

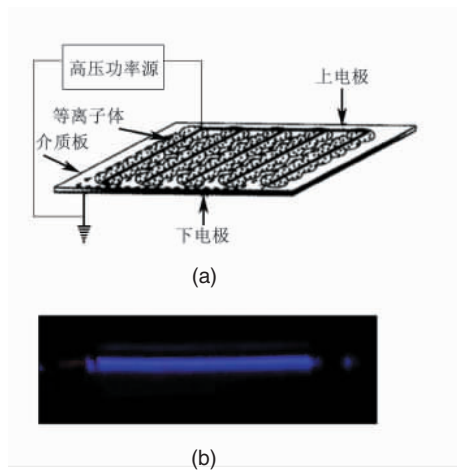


图 3 一个大气压辉光放电结构(a)和形貌图(b)
Fig. 3 Schematic diagram (a) and photograph (b) of one atmosphere uniform glow discharge

1996-1998 年,Roth 等与 NASA 兰利研究中心合作,开展大气压均匀辉光放电表面等离子体控制边界层的研究^[18]。在层流、转捩和完全湍流层中,研究了流向和展向排列的电极阵列对流场的影响,发现对称分布的流向电极之间等离子体会增加平板阻力,而不对称分布的展向电极产生明显推力。分析表明,该现象是作用在流体上的强顺电静电彻体力引起的涡结构和质量传输综合作用的结果。随后,Roth 等^[19]在进行大气压下均匀辉光放电翼型流动控制研究中将等离子体产

生的静电体力分为顺电和蠕动 2 种效应:理论上顺电效应可以使气流加速几十米每秒;蠕动效应可以使气流加速到几百米每秒。实验结果表明,在顺电效应的作用下,诱导的气流速度可达 3.4 m/s, 可以实现大攻角下低速气流的翼型重附,如图 4 所示(翼型为 NACA-0015, 12°攻角, 风洞来流速度为 2.8 m/s, 激励电压为 3.6 kV, 频率为 4.2 kHz);在蠕动效应的作用下,诱导的气流速度小于 6 m/s。

在此基础上, Roth 等^[16]在优化 OAUGDP™ 等离子体激励器放电参数的实验研究中发现最佳的放电间隙为 1~2 mm, 最佳的电介质材料为石英和特氟纶, 但等离子体诱导的气体流速仍小于 6 m/s。

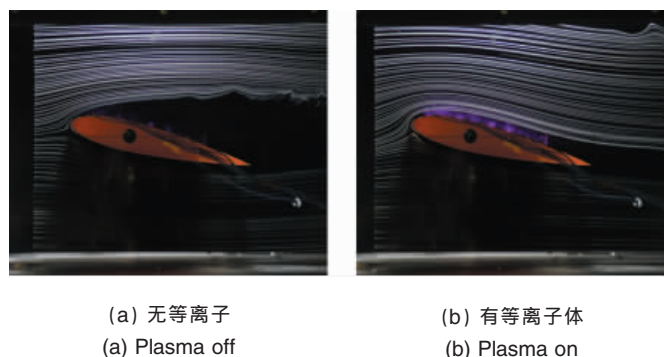


图 4 OAUGDP™ 抑制翼型表面流动分离
Fig. 4 Photograph of OAUGDP™ controlling the flow separation on airfoil

2.3 表面介质阻挡放电

表面介质阻挡放电的结构如图 5(a)所示,在电介质层的两侧分别放置电极(裸露电极和埋入电极),当向 2 个电极间施加高频高压电时,就会形成表面介质阻挡放电,其放电形貌如图 5(b)所示。表面介质阻挡放电由于 2 个电极之间有电介质层,起到镇流作用,因此使放电趋于稳定,目前成为等离子体流动控制中研究最多的一种放电方式。

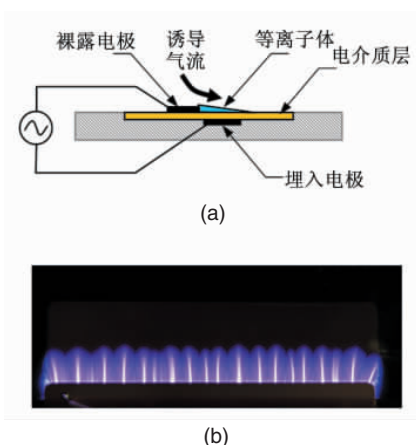


图 5 表面介质阻挡电极放电结构(a)和形貌图(b)
Fig. 5 Schematic diagram (a) and photograph (b) of surface dielectric barrier discharge

Pons 等^[20]进行了表面介质阻挡放电激励器的电特性和诱导气流特性的实验研究,结果表明,产生的等离子体层厚度小于 2 mm,在静止的空气中诱导的气流速度达 3.5 m/s,表面介质阻挡放电激励器的效率仅为 0.1%。Forte 等^[21]对表面介质阻挡放电激励器的放电参数进行了优化,利用 4 个不对称表面介质阻挡放电(AS-DBD)激励器将诱导的气流速度提高到 8 m/s,这是截至目前获得的最大的等离子诱导速度。

人们对传统的高频高压正弦波驱动的表面放电等离子体已经进行了非常系统的研究,但是取得的进展甚微:等离子体气动激励的作用机制尚不统一;等离子体激励器的能量效率很低,只有百分之几;等离子体诱导的气流速度很低,不超过 8 m/s;等离子体可控的来流速度不超过 40~60 m/s^[22]。因此一些学者探索其他的激励方式。

Opaitis 等^[23]采用脉冲驱动的表面介质阻挡放电进行了流动分离控制研究,等离子体可控的来流速度提高到 75 m/s;在等离子体的激励下,翼型的失速迎角从 15°增加到 21°。Roupasso 等^[22]利用高压纳秒脉冲驱动的表面介质阻挡放电进行翼型边界层流动分离控制研究。实验结果表明,虽然高压纳秒脉冲驱动的表面介质阻挡放电等离子体诱导的气流净速度为零,但可以高效地控制边界层的分离;在来流马赫数为 0.05~0.85 时,升力、阻力系数、噪声得到明显改善;通过测量边界层流体的温度发现,高压纳秒脉冲驱动的表面介质阻挡放电可以将电场能量有效地传输给翼型表面的气体,甚至使温度升高到 400 K。它的作用机制属于能量传输,电场的能量转化为热量使气体加热,产生脉冲周期的涡流,从而使主流的动量进行重新分配,这种作用机制不同于高频高压正弦波驱动的表面介质阻挡放电等离子体动量传输流动控制机制。

目前,高压纳秒脉冲驱动的表面介质阻挡放电的作用效果要好于传统的高频高压正弦波驱动的表面介质阻挡放电,成为等离子体流动控制研究领域中的新热点研究方向。

3 中国等离子体流动控制研究进展

等离子体流动控制引起中国学者的高度关注,逐渐掀起研究的热潮。中国科学院工程热物理研究所、空军工程大学、北京航空航天大学、西北工业大学等研究院所的一些学者进行了等离子体流动控制的实验研究。李应红等^[24]在进行大气压等离子体流动控制的初步实验中采用不对称电极结构的激励器产生等离子体,诱导的气流速度为 4.8 m/s,并验证了等离子体激励可有效抑制低速下(4.3 m/s)的翼型失速流动分离。张攀峰等^[5]进行了等离子体激励低速分离流动控制的实验,风洞流动显示实验结果证明了等离子体在低速(<10 m/s)下可以实现平板表面流动控制;在失速攻角附近可以实现流动的完全再附,大迎角下只能减小分离区的宽度。并分析等离子体流动分离控制的机制为:等离子对周围流场的吸附作用;等离子体内部剧烈的粒子运动引起的动量交换。李益文等^[25]在对等离子体气动激励器布局对放电特性与加速效果的影响实验研究中采用表面介质阻挡放电形成等离子体,

研究常规(条形)、半圆和锯齿3种形状的电极结构对等离子体激励器的放电特性及流动加速效果的影响。实验结果表明,常规(条形)电极结构的等离子体激励器可以获得更大的流动加速,当放电电压达到12 kV时,等离子体诱导的气流速度达到3.2 m/s。聂超群等^[26-27]在表面介质阻挡等离子体对平板、压气机叶栅的流动控制实验研究中发现,等离子体激励可以改变边界层的速度特性,当自由来流不为零时,等离子体可使实验平板气流加速3.2 m/s;表面介质阻挡放电等离子体可改善压气机叶栅的性能,当自由来流速度小于20 m/s时,等离子体激励可显著改善栅后总压和速度分布特征;流速接近50 m/s时,等离子体会明显改善总压和速度的最小值;出现流动分离后,等离子体无法抑制流动分离。李应红等^[28]在等离子体激励抑制翼型失速分离的实验研究中采用表面介质阻挡放电形成等离子体,研究了等离子体激励电压、激励电极数目和激励位置对流动分离的抑制效果,实验结果表明等离子体激励器的最佳放置位置为流动分离起始点的前缘;等离子体激励能够有效抑制低雷诺数、大攻角时翼型的流动失速分离,在雷诺数分别为 4.96×10^4 和 7×10^4 的情况下,将NACA-0015翼型的临界失速攻角增大了17°。

在此基础上,李应红等^[29]还进行了微秒脉冲等离子体气动激励抑制NACA-0015翼型失速分离的实验研究,在来流速度为72 m/s时,等离子体气动激励可以有效地抑制翼型吸力面的流动分离,翼型的升力增大约35%,翼型的临界失速迎角由18°增大到21°。

以上表明国内等离子体流动控制的研究已取得一定的进展,逐渐接近国际先进水平。在化石能源日趋短缺和军事战备激烈竞争的今天,在中国进行等离子体飞行器流动控制技术研究,对于节能和提高中国航空工业实力及军事现代化水平具有重大和深远的战略意义。

4 展望

在等离子体流动控制中,等离子体激励器起着至关重要的作用。但是,目前国内外用于流动控制的等离子体激励器通常采用表面放电方式,由于电场强度低(小于30 kV/cm),电离占空比小($10^{-7} \sim 10^{-8}$)^[19],离子浓度低($10^8 \sim 10^{11}/\text{cm}^3$),属于弱电离放电,仍没有突破“离子风”技术。因此,等离子体诱导的最大气流速度只有8 m/s,等离子体可控的来流速度为每秒几十米。纳秒脉冲驱动的表面介质阻挡放电成为近期的等离子体流动控制研究领域的研究热点,但是纳秒脉冲作用周期的占空比小,能否用一个小占空比产生一个更高的作用效率是值得深入探讨的问题。

在实际飞行中,飞行器起飞着陆的速度至少100 m/s,巡航速度需要250 m/s,等离子体流动控制技术要想具有实际应用价值,就必须提高等离子体可控的来流速度。因此,必须从根本上解决等离子体激励器的现存问题,在深化研究等离子体流动控制作用机制的基础上,逐步提高等离子体激励器性能,这也是等离子体流动控制领域亟待解决的问题。

参考文献 (References)

- [1] Boeuf J P, Lagmich Y, Unfer T, *et al.* Electrohydrodynamic force in dielectric barrier discharge plasma actuators [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, 40 (3): 652-662.
- [2] Patel M P, Ng T T, Vasudevan S, *et al.* Scaling effects of an aerodynamic plasma actuator[R]. AIAA-2007-0635, Reston, VA: AIAA, 2007.
- [3] Mullins J. Will plasma revolutionize aircraft design [N]. *Space Daily*, 2000-10-28.
- [4] 孙宗祥. 等离子体减阻技术的研究进展[J]. *力学学报*, 2003, 33(1): 87-94.
Sun Zongxiang. *Advances in Mechanics*, 2003, 33(1): 87-94.
- [5] 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, 21(6): 35-39.
Zhang Panfeng, Wang Jinjun, Shi Weiyi, *et al.* *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2007, 21(6): 35-39.
- [6] Shang J S, Surzhikov S T, Kimmel R, *et al.* Mechanisms of plasma actuators for hypersonic flow control [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2005, 41 (8): 642-668.
- [7] Porter C O, Baughn J W, McLaughlin T E, *et al.* Plasma actuator force measurements[J]. *AIAA Journal*, 2007, 45(7): 1562-1570.
- [8] Goeksel B. MEMS plasma actuators for MAV applications [R]. DGLR UAV-Workshop, Manching, Germany, 2006.
- [9] 李钢, 聂超群, 朱俊强, 等. 介质阻挡放电等离子体流动控制技术的研究进展[J]. *科技导报*, 2008, 26(4): 87-92.
Li Gang, Nie Chaoqun, Zhu Junqiang, *et al.* *Science & Technology Review*, 2008, 26(4): 87-92.
- [10] Moreau E. Airflow control by non-thermal plasma actuators [J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2007, 40(3): 605-636.
- [11] Samimy M, Kim J H, 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.
- [12] Bletzinger P, Ganguly B N, Wie D V, *et al.* Plasmas in high speed aerodynamics [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2005, 38: 33-37.
- [13] Moreau E, Leger L, Touchard G. Effect of a DC surface-corona discharge on a flat plate boundary layer for air flow velocity up to 25 m/s [J]. *Journal of Electrostatics*, 2006, 64: 215-225.
- [14] Magniera P, Hongh D, Leroy-Chesneau A, *et al.* A DC corona discharge on a flat plate to induce air movement [J]. *Journal of Electrostatics*, 2007, 65: 655-659.
- [15] Roth J R. Industrial plasma engineering Vol. 1. Principles[M]. Philadelphia, PA: Institute of Physics Publishing, 1995.
- [16] Roth J R, Dai X. Optimization of the aerodynamic plasma actuator as an electrohydrodynamic (ehd) electrical device [R]. AIAA Paper 2006-1203, Reston, VA: AIAA, 2006.
- [17] Roth J R, Tsai P P, Liu C, *et al.* One atmosphere uniform glow discharge plasma: US Patent 5414324[P]. 1995.
- [18] Roth J R, Sherman D M, Wilkinson S P. Boundary layer flow control with a one atmosphere uniform glow discharge surface plasma[R]. AIAA-1998-0328, Reston, VA: AIAA, 1998.
- [19] Roth, J R. Aerodynamic flow acceleration using paraelectric and peristaltic electrohydrodynamic effects of a one atmosphere uniform glow

- discharge plasma[J]. *Physics of Plasmas*, 2003, 10(5): 2117-2126.
- [20] Pons J, Moreau E, Touchard G. Asymmetric surface dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure: Electrical Properties and induced airflow characteristics [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2005, 38(19): 3635-3642.
- [21] Forte M, Jolibois J, Moreau E, *et al.* Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and instationary measurements of the induced flow velocity [R]. AIAA Paper 2006-2863, Reston, VA: AIAA, 2006.
- [22] Roupasov 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.
- [23] Opaitis D F, Roupasov D V, Starikovskaia S M, *et al.* Plasma control of boundary layer using low-temperature non-equilibrium plasma of gas discharge[R]. AIAA Paper 2005-1180, Reston, VA: AIAA, 2005.
- [24] 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, Zhang Pu, *et al.* *Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition*, 2006, 7(3): 1-3.
- [25] 李益文, 李应红, 吴云, 等. 等离子体气动激励器布局对放电特性与加速效果的影响[J]. 核聚变与等离子体物理, 2008, 28(2): 172-176.
Li Yiwen, Li Yinghong, Wu Yun, *et al.* *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2008, 28(2): 172-176.
- [26] 李钢, 聂超群, 朱俊强, 等. 介质阻挡放电等离子体对压气机叶栅性能影响的实验[J]. 航空动力学报, 2008, 23(3): 522-526.
Li Gang, Nie Chaoqun, Zhu Junqiang, *et al.* *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(3): 522-526.
- [27] 聂超群, 李钢, 朱俊强, 等. 介质阻挡放电等离子体流动控制的研究[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2008, 38(11): 1827-1835.
Nie Chaoqun, Li Gang, Zhu Junqiang, *et al.* *Science in China Series E: Technology Sciences*, 2008, 38(11): 1827-1835.
- [28] 李应红, 吴云, 张朴, 等. 等离子体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.* *Acta Aerodynamica Sinica*, 2008, 26(3): 372-377.
- [29] 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[J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1429-1435.
Li Yinghong, Liang Hua, Ma Qingyuan, *et al.* *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2008, 29(6): 1429-1435.

(责任编辑 岳臣)

第五届国际先进光学制造 与检测学术会议

AOMATT CHINA 2010

时间: 2010年4月26-29日

地点: 辽宁·大连

主办单位: 中国光学学会(COS) 中国科学院光电技术研究所(IOE)

协办单位: 国家科学技术部 中国科学院等

承办单位: 中国光学学会光学制造技术专委会

联系电话: 028-85100583 电子信箱: yangli@ioe.ac.cn

通信地址: 四川成都双流350信箱(610209)

会议网站: <http://159.226.167.88/aomatt2010/english/index.htm>