

文章编号:1674-8190(2015)03-279-08

不同类型多级等离子体激励器诱导 气流的力学特性研究

王玉玲¹,高超¹,郝江南¹,王军利²

(1. 西北工业大学 航空学院,西安 710072)

(2. 陕西理工学院 机械工程学院,汉中 723001)

摘要: 等离子体激励器通过产生的等离子加速气流,可以实现对流动的控制。单级等离子体激励器由于受到等离子体放电的物理限制,其控制作用较小;为了提高等离子体流动控制的效果,关于多级等离子体激励器的研究得到发展。采用图像采集和粒子示踪测速系统(PIV),对传统多级等离子体激励器和多级双极性等离子体激励器的放电现象以及气流加速进行研究,并通过流场速度分布计算等离子体激励器对空气产生的推力和吸力。结果表明:随着电压的升高,传统多级等离子体激励器产生的推力和吸力会逐渐减弱;而多级双极性等离子体激励器产生的推力和吸力均呈逐渐增强的趋势。

关键词: 介质阻挡放电;传统多级等离子体激励器;双极性等离子体激励器;流动控制

中图分类号: O355

文献标识码: A

Investigation on Mechanical Properties of the Airflow Induced by Different Kinds of Multi-DBD Plasma Actuators

Wang Yuling¹, Gao Chao¹, Hao Jiangnan¹, Wang Junli²

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China)

Abstract: Plasma produced by plasma actuator can be used to accelerate the airflow, which will achieve the control of flow. However, because of the physical limitations of the plasma discharge, Single-DBD(Dielectric Barrier Discharges) plasma actuators which are widely used always suffer from the feeblish control effect, extremely limiting the development of plasma flow control technology. In order to improve the effect of plasma flow control, researchers have carried out a lot of research works on multi-DBD plasma actuators. By using image acquisition and PIV(Particle Image Velocimetry) equipment, discharge phenomenon and flow acceleration excited by traditional multi-DBD plasma actuator and bipolar-DBD plasma actuator are studied. And the thrust and suction via the velocity distribution of the flow field which is generated by the plasma actuators are calculated. Research results show that the thrust and suction produced by the traditional multi-DBD plasma actuator will become weak with the increase of voltage; for the bipolar-DBD plasma actuator, both of the thrust and suction will gradually increase with the voltage increasing.

Key words: dielectric barrier discharge; traditional multi-DBD plasma actuator; bipolar plasma actuator; fluid flow control

0 引言

等离子体激励器^[1-3]具有无运动部件,响应频率高,可利用微量、局部的气流扰动来控制大流量、全局性的气流等特性,被广泛地应用于主动流动控

收稿日期:2015-04-24; 修回日期:2015-07-14

基金项目:陕西省教育厅科学研究计划项目(14JK1160)

陕西省县域重点科技计划项目(2012XY-15)

通信作者:王玉玲, wangyuling@nwpu.edu.cn

制领域。T. C. Corke 等^[4]详细介绍了单介质阻挡放电等离子体激励器的结构,在分析等离子体流动控制机理的基础上,提出了平板边界层蠕动加速的概念。M. L. Post 等^[5]的实验结果表明,采用等离子体激励器能够有效地控制飞行器翼型表面的流动分离,并且推迟流动的分离迎角。宋慧敏等^[6]、安治永等^[7]研究了不同等离子体激励器的电场特性,分析了电场分布对等离子体运动的影响。国内外在利用等离子体激励器对涡轮叶片分离流动进行控制^[8]、钝头体减阻^[9]、圆柱脱落涡控制^[10]、三角翼纳秒等离子体激励控制^[11]、地面试验模拟高空等离子体流动控制^[12]、高速压气机叶栅纳秒脉冲等离子体流动控制仿真研究气动噪声控制^[13-14]等方面也开展了较深入的研究。

但是,传统等离子体激励器受组成材料特性的限制,通常只能产生 0.10~0.20 N 的体积力,而且只能使静止空气加速到 3.0~6.0 m/s,导致其流动控制的作用范围和效果受到较大限制。为了解决传统等离子体激励器的上述缺陷,研究人员对新型等离子体激励器进行设计研究,并取得了一定成果。例如:M. Eric 等^[15]设计了一种三电极等离子体激励器,消除了传统等离子体激励器一个放电周期内“向后拉”的不利作用,从而提高了激励器的控制效率;E. F. Neal^[16]利用二氧化钛作为等离子体激励器的催化剂,以提高其工作效率;郝江南等^[17-18]利用改变等离子体激励器电极的连接方法,提高其工作效率。

本文针对传统结构的多级等离子体激励器和双极性等离子体激励器开展研究,比较两种激励器的放电现象以及诱导气流加速情况,并通过流场速度分布来计算等离子体激励器对空气产生的推力和吸力。

1 等离子体激励器简介

单级介质阻挡等离子体激励器(Single Dielectric Barrier Discharge,简称 SDBD)由暴露于空气中的上电极、掩埋在绝缘层的下电极以及绝缘层组成,其结构如图 1 所示。

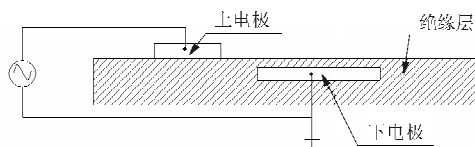


图 1 单级等离子体激励器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SDBD plasma actuator

当施加高频、高压激励后,在激励器的上下电极之间会产生等离子体。其流动控制机理为:空气被高电压电离成等离子态,在外加电场的作用下被驱动,从而实现对附近空气的诱导效果。

传统的激励器(SDBD)存在控制范围小、控制气流速度较低的缺点。为了克服上述缺点,开发了不同形式的激励器,例如将多个激励器组合在一起使用,如图 2 所示。尽管这种多级激励器可以将控制范围增大,并且提高控制气流速度,但是多级激励器上仍会在电极间出现反向电场,制约了其流动控制效果。

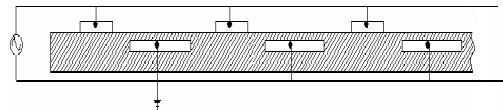


图 2 传统多级等离子体激励器结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of traditional multi-DBD plasma actuator

多级双极性等离子体激励器是一种较为新颖的激励器,其接收极与其相邻的接收极为一体式结构,如图 3 所示。基于等离子体激励器的放电特性,该激励器可以更好地利用等离子体放电的流动性和导电性。

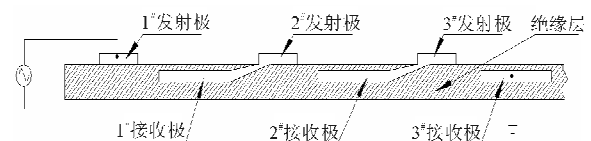


图 3 双极性等离子体激励器结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of bipolar multi-DBD plasma actuator

2 静止大气加速实验设计

为了比较两种不同类型的多级等离子体激励器的放电和诱导气流加速特点,在不同激励电压下,对两种多级激励器进行放电现象的采集和诱导流场的粒子图像测速(Particle Image Velocimetry,简称 PIV)实验,实验电压分别为 7.5、12.0、16.5 和 18.0 kV。

2.1 实验用激励器

实验所用的传统多级激励器结构如图 4 所示,上电极宽 2 mm,下电极宽 6 mm,上、下电极间隔 0,两对电极间相隔 4 mm。

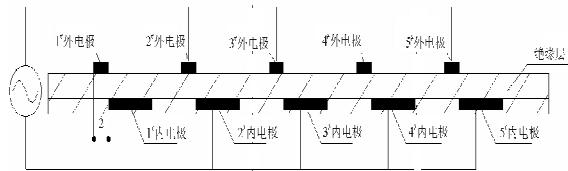


图 4 传统多级等离子体激励器结构示意图
Fig. 4 Schematic diagram of traditional multi-DBD plasma actuator

双极性等离子体激励器结构如图 5 所示,其上、下电极尺寸和间距与传统多级激励器完全一致,只是分别将其上表面和下表面的电极用导线连通使之成为一体。

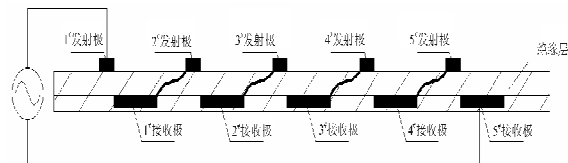


图 5 双极性等离子体激励器结构示意图
Fig. 5 Schematic diagram of bipolar multi-DBD plasma actuator

2.2 粒子图像测速系统(PIV)

等离子体激励器工作时会产生很大的电场梯度和较强的电磁场干扰,导致传统的热线测速和压力测量方法不能准确地测量甚至无法适用。PIV 是新一代流场显示与非接触测量技术,弥补了单点测速技术的局限性,能在同一时刻记录下一个平面或者空间流场的速度分布,并提供流场的详细空间结构,具有较高的精度(测速误差在 0.1%之内),且易于标定。本文应用 PIV 对等离子体激励器诱导流场的特性进行研究。

3 结果与分析

3.1 传统多级激励器放电现象

传统多级激励器的放电现象如图 6 所示。

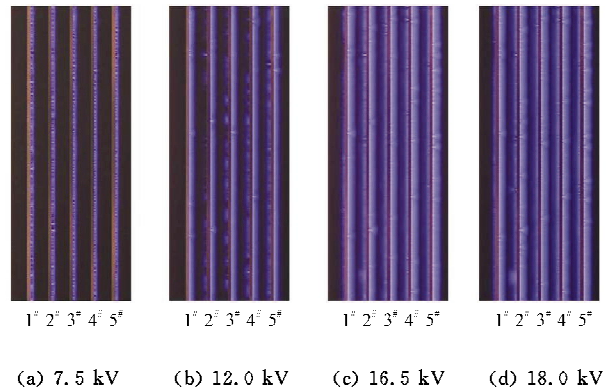


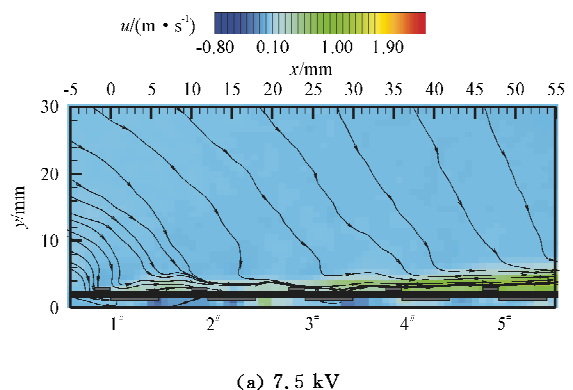
图 6 传统多级等离子体激励器放电现象
Fig. 6 Discharge phenomena of traditional multi-DBD plasma actuator

从图 6 可以看出:在较低电压 7.5 kV 时,电极板出现微弱放电,放电方向向右;随着电压升高至 12.0 kV,上电极的右侧放电增强,左侧同时开始出现微弱的放电(例如,在 5# 上电极与 4# 下电极之间形成的放电),此时反向放电开始出现;随着电压的进一步升高,电极板上的放电逐渐增强,反向放电更加明显。

根据传统多级激励器结构可知:将上、下电极简单地并联,上电极对左右相邻的两条下电极同时存在电势差,而上电极与前后两个下电极之间的间隔不同,故会产生场强差异,这种场强差异体现在正、反向放电发生的电压以及强度有所不同。

3.2 传统多级激励器 PIV 速度场测量结果

本文采用激光粒子测速仪对等离子体激励器诱导流场进行测量,如图 7 所示。



(a) 7.5 kV

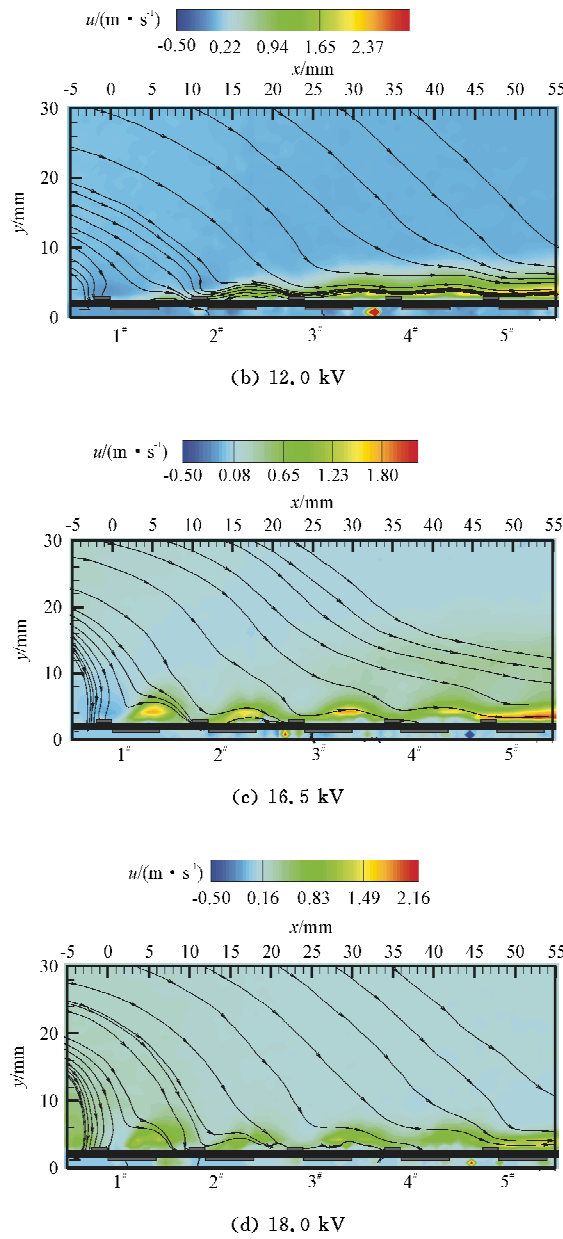


图7 传统等离子体激励器速度场测量结果
 Fig.7 Results of velocity field measurement of traditional multi-DBD plasma actuator

从图7可以看出:在电压为7.5 kV时,气流速度较小,并且气流以层流形式紧贴着电极板表面向后运动;随着电压升高至12.0 kV,气流速度有所提高,但受到反向放电作用的影响,气流在4#和5#电极之间、3#和4#电极之间以及2#和3#电极之间被明显向上抬起;随着电压的进一步升高,前后电极的反向放电逐渐增强,电极板上的气流显著向上拱起,形成多个明显的漩涡。

从距离电极板1 mm处取一组数据对产生的

气流进行分析,数据分别为气流在 x 和 y 方向上的速度分量 u 和 v 。

传统等离子体激励器加速静止大气速度分布图如图8所示。

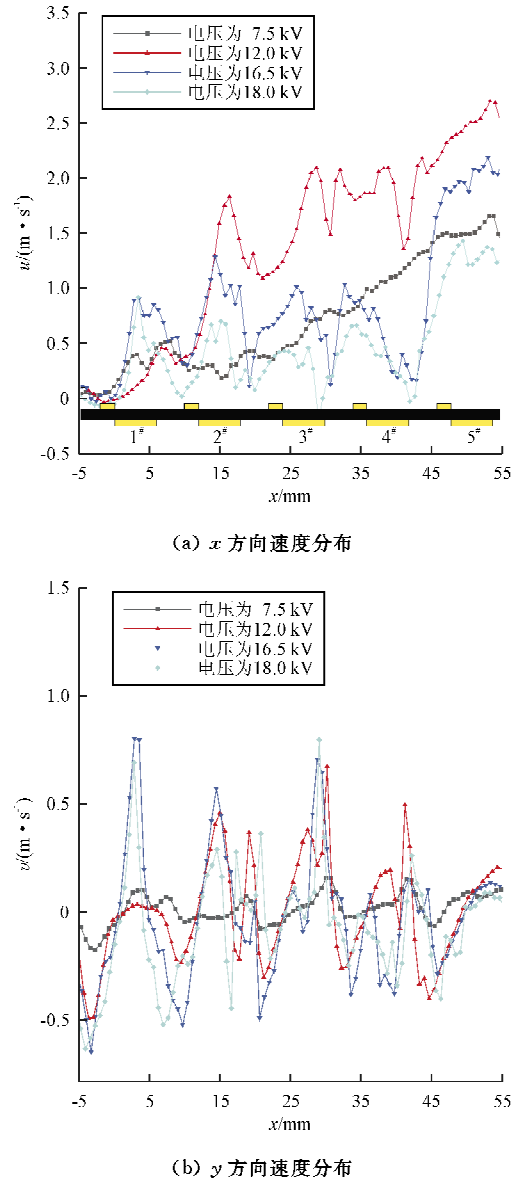


图8 传统等离子体激励器加速静止大气速度分布图
 Fig.8 Velocity distributions of traditional multi-DBD actuator

从图8可以看出,在较低电压下,气流速度 u 沿着电极板向后运动,速度逐渐增加,至电极板最右端时气流获得最大速度;随着电压的升高,在4#和5#电极之间气流速度出现了明显的波动,气流速度快速降低;随着电压不断升高,大范围的气流速度波动开始出现。

通过与图 8 中等离子体位置对比,可以发现:反向放电造成了气流速度的波动,在电压为 7.5 kV 时,其 y 方向上的速度分量 v 为波浪形分布,速度较低;随着电压的升高,速度分布出现明显变化,气流被向下吸附后快速向上抛起。反向放电与正向放电相互作用形成漩涡是导致上述情况出现的原因。

3.3 双极性等离子体激励器放电现象

双极性等离子体激励器的放电现象如图 9 所示。

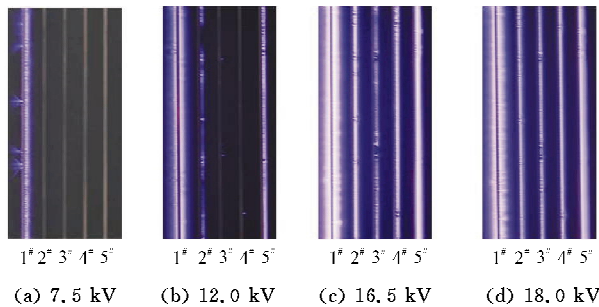


图 9 双极性等离子体激励器放电现象
Fig. 9 Discharge phenomena of bipolar multi-DBD plasma actuator

从图 9 可以看出:当电压为 7.5 kV 时,放电仅在 1# 发射极上出现,由于能量完全聚集在 1# 发射极上,在其上出现了电极左右两侧对于 1# 接收极的完全放电现象;随着电压升高至 12.0 kV,放电逐渐向右进行,在 2#、5# 发射极处放电现象较为明显;在较高电压 16.5 kV 下,所有电极均发生放电现象;当电压达到 18.0 kV 时,所有电极条上都产生了明显、均匀的放电现象。

双极性等离子体激励器没有反向放电现象,这种激励器所有电极上的电场分布均存在差异,前端产生的等离子体在向后运动时起到传递电能的作用。在 7.5 kV 时,只有第一级工作,电压较低,同时由于等离子体密度较低,无法提供足够的能量促使等离子体再次产生;随着电压的升高,放电现象逐渐增强,所有电极均出现放电现象。

3.4 双极性等离子体激励器 PIV 速度场测量结果

双极性等离子体激励器速度测量结果如图 10

所示。

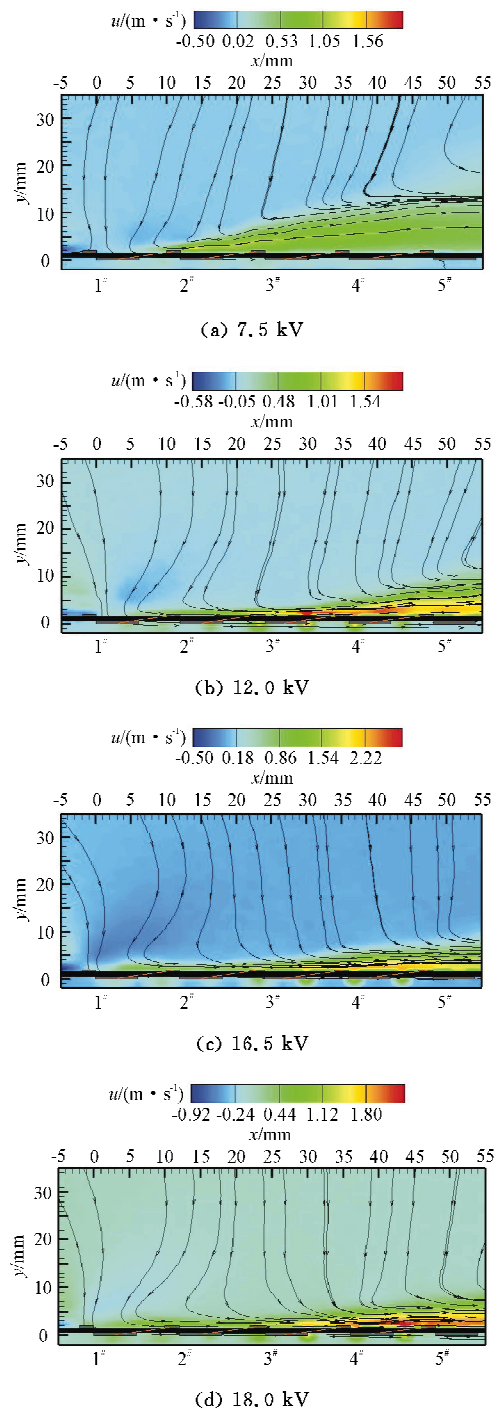
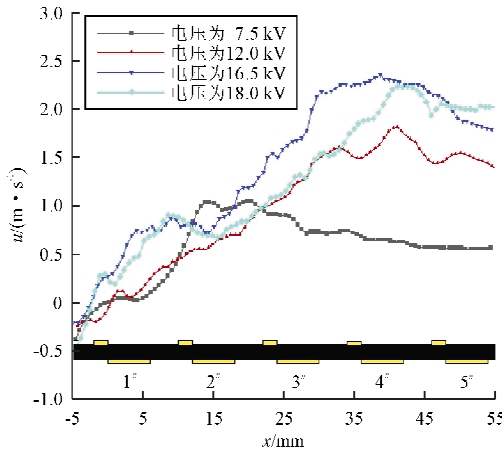


图 10 双极性等离子体激励器速度测量结果
Fig. 10 Results of velocity field measurement of bipolar multi-DBD plasma actuator

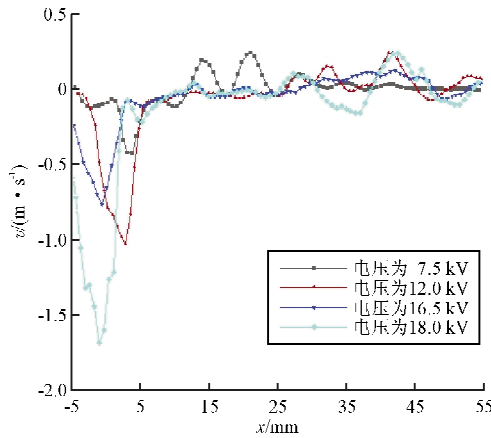
从图 10 可以看出:在较低电压 7.5 kV 下,气流只在第 1# 发射极后有明显加速,随后气流速度开始缓慢下降;随着电压升高至 16.5 kV,气流被大范围加速并保持沿表面向下游运动的趋势;电压

持续升高,气流速度增加,由于电场方向始终指向下游,气流始终保持层流状态向下游运动。

同样,在其电极板上表面 1 mm 处取一组数据对其速度场进行分析。双极性等离子体激励器加速静止大气速度分布图如图 11 所示。



(a) x 方向速度分布



(b) y 方向速度分布

图 11 双极性等离子体激励器加速静止大气速度分布

Fig. 11 Velocity distributions of acceleration of quiescent air via bipolar multi-DBD plasma actuator

从图 11 可以看出:在 7.5 kV 电压下,气流速度 u 沿着电极板 1# ~ 3# 发射极范围进行加速运动,由于电极板后部没有出现放电激励,气流随后出现速度下降趋势;在电压持续升高至 18.0 kV 的过程中,气流速度逐渐升高,气流较高的流速区也随之增加;气流速度 v 的分布呈现出明显向下的吸附状态,在 1# 发射极处,气流被猛烈向下吸附后开始逐渐平稳运动,气流向下运动的速度随电压的升高而增加。

3.5 激励器推力和吸力数值计算结果

利用 PIV 技术测量得到的流场速度分布来计算等离子体激励器对空气产生的推力和吸力。选取控制体如图 12 所示,取上电极右上端为坐标系原点。

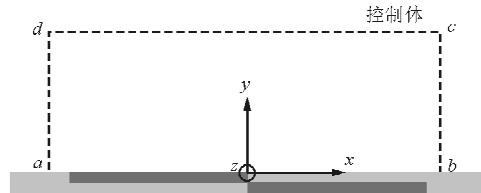


图 12 控制体示意图

Fig. 12 Schematic diagram of control body

对于定常不可压缩流动,由动量方程可得:

$$T = \oint_{abcd} (\rho \mathbf{u} \cdot d\mathbf{s}) u + \oint_{abcd} p d\mathbf{s} \quad (1)$$

式中: T 为等离子体激励器对控制单元内流体施加的合力。

物面采用无滑移边界条件,故穿过物面的动量通量为 0。由式(1)可得 x 方向与 y 方向的体积力分量为

$$T_x = \rho \int_{da} u_x^2 dy + \rho \int_{cd} u_x u_y dx - \rho \int_{bc} u_x^2 dy + \int_{da} p dy - \int_{bc} p dy \quad (2)$$

$$T_y = \rho \int_{da} u_x u_y dy + \rho \int_{cd} u_y^2 dx - \rho \int_{bc} u_x u_y dy + \int_{ad} p dx - \int_{ba} p dx \quad (3)$$

由于通过 PIV 速度场的数据无法得到正确的压力信息,需要做如下假设:如果所选取的控制体边界距离产生等离子体体积力的区域足够远,那么控制体边界上的静压是一个常数。在风洞实验中测量翼型阻力时经常用到该假设。同时, x 方向的推力 T_x 包括等离子体激励器产生的推力 T_x^e 、空气与壁面产生的剪切力 T_x^s 。由上述假设,式(2)~式(3)可以进一步化简为

$$T_x^e + T_x^s = \rho \int_{da} u_x^2 dy + \rho \int_{cd} u_x u_y dx - \rho \int_{bc} u_x^2 dy \quad (4)$$

$$T_y = \rho \int_{da} u_x u_y dy + \rho \int_{cd} u_y^2 dx - \rho \int_{bc} u_x u_y dy + \int_{ad} p dx - \int_{ba} p dx \quad (5)$$

两种激励器推力变化趋势如图 13 所示。

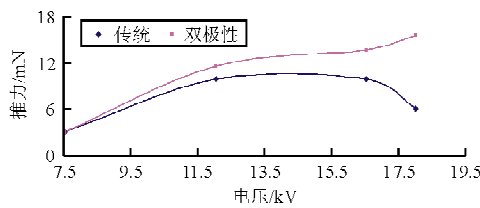


图 13 两种激励器推力变化趋势图

Fig. 13 Thrust change trend of the two kinds of actuator

从图 13 可以看出:在 7.5~9.0 kV 的电压范围内,两种电极板产生的推力基本相等;在 9.0~16.5 kV 的电压范围之间,传统电极板所产生的推力增加的幅度较小,在 12.0~16.5 kV 之间基本维持在 10 mN 左右,随后出现了明显的下降,而双极性电极板从 10.5 kV 起,推力随着电压的升高逐步增加,在 18.0 kV 时达到最大值 15 mN。这与 PIV 所采集到的气流速度分布相吻合。

两种激励器所产生的吸力随电压的变化曲线如图 14 所示。

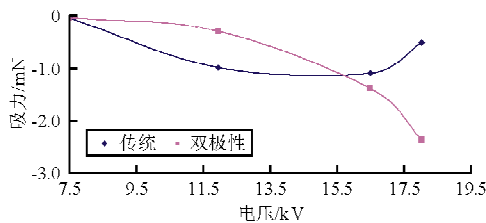


图 14 两种激励器吸力变化趋势图

Fig. 14 Suction change trend of the two kinds of actuator

从图 14 可以看出:两种激励器产生的吸力的变化趋势明显不同,在 7.5~13.5 kV 的电压范围之间,传统电极板产生的吸力缓慢增大,随后呈现减小趋势,在最高电压 18.0 kV 时,电极板所产生的吸力最小;而双极性电极板对空气产生的吸力随电压的升高不断增大,在最高电压 18.0 kV 时获得最大吸力。

与气流 y 方向的速度分布比较,发现传统电极板所产生的吸力是各个电极上产生的吸力的组合,这种吸力的分布面积较大,但是吸力较小;而双极性电极的吸力大部分由 1[#] 发射极产生,这种吸力分布范围较小,但是能量集中,可以对空气产生较大的吸力。

综上所述,传统电极板可以在较低电压下体现出对气流的加速和吸附效果,随着电压的升高,受

反向放电的影响,这种加速和吸附效果逐渐消失;而双极性电极板不受反向放电的影响,其对大气的加速和吸附作用均比较明显,加速和吸附效果随着电压的升高而增加。

4 结 论

随着电压的升高,传统多级等离子体激励器会出现明显的反向放电现象,导致激励器表面出现明显的旋窝,同时激励器产生的推力和吸力也会逐渐下降;而多级双极性等离子体激励器则呈现出放电逐渐加强、区域逐渐增大的趋势,其推力和吸力也逐渐增加,较传统多级等离子体激励器而言,这种激励更为有效。

目前等离子体流动控制技术存在控制效果较小的缺点,主要原因是激励器产生的推力和吸力较小,采用多级双极性等离子体激励器则可有效提高等离子体流动控制技术的控制效果。

参 考 文 献

- [1] Enloe C L, McLaughlin T E, Van Dyken R D, et al. Mechanisms and responses of a single dielectric barrier plasma actuator: plasma morphology[J]. *AIAA Journal*, 2004, 42(3): 589-594.
- [2] Enloe C L, McLaughlin T E, Van Dyken R D, et al. Mechanisms and responses of a single dielectric barrier plasma actuator: geometric effects[J]. *AIAA Journal*, 2004, 42(3): 595-604.
- [3] Roth J R, Sherman D M, Wilkinson S P. Boundary layer flow control with a one atmosphere uniform glow discharge surface plasma[R]. *AIAA-98-0328*, 1998.
- [4] Corke T C, Post M L, Orlov D M. SDBD plasma enhanced aerodynamics: concepts, optimization and applications[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2007, 43(7/8): 193-217.
- [5] Post M L, Corke T C. Separation control on high angle of attack airfoil using plasma actuators[J]. *AIAA Journal*, 2004, 42(11): 2177-2184.
- [6] 宋慧敏, 李应红, 魏洋亭, 等. 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, et al. Modeling and simulation of plasma electrohydrodynamic actuator[J]. *High Voltage Engineering*, 2006, 32(3): 72-74. (in Chinese)
- [7] 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): 49-52. An Zhiyong, Li Yiwen, Li Yinghong, et al. The electric field simulation of asymmetric plasma actuator[J]. *Journal*

- of Air Force Engineering University; Nature Science Edition, 2007, 8(2): 49-52. (in Chinese)
- [8] 王学德, 赵小虎, 王路成, 等. 等离子体气动激励特性及其抑制叶栅流动分离的实验研究[J]. 核聚变与等离子体物理, 2013, 33(4): 366-373.
Wang Xuede, Zhao Xiaohu, Wang Lucheng, et al. Experimental research on the characteristic of plasma aerodynamic actuation and flow separation control on a compressor cascade[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2013, 33(4): 366-373. (in Chinese)
- [9] Thomas F O, Kozlov A, Corke T C. Plasma actuators for bluff body flow control[R]. AIAA-2006-2845, 2006.
- [10] 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.
- [11] 化为卓, 李应红, 牛中国, 等. 低速三角翼纳秒脉冲等离子体激励实验[J]. 航空动力学报, 2014, 29(10): 2331-2339.
Hua Weizhuo, Li Yinghong, Niu Zhongguo, et al. Experiment on low-speed delta wing using nanosecond pulse plasma actuation[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(10): 2331-2339. (in Chinese)
- [12] 车学科, 聂万胜, 侯志勇, 等. 地面试验模拟高空等离子体流动控制效果[J]. 航空学报, 2015, 36(2): 441-448.
Che Xueke, Nie Wansheng, Hou Zhiyong, et al. High altitude plasma flow control simulation through ground experiment[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(2): 441-448. (in Chinese)
- [13] Huang X, Zhang X. Plasma actuators for noise control[J]. International Journal of Aeroacoustics, 2010, 9(4/5): 679-704.
- [14] Thomas F O, Kozlov A, Corke T C. Plasma actuators for landing gear noise control[R]. AIAA-2005-3010, 2005.
- [15] Eric M, Roberto S, Guillermo A. Electric wind produced by surface plasma actuators; a new dielectric barrier discharge based on a three-electrode geometry[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 41: 115204-115216.
- [16] Neal E F, Steven J B. Plasma catalysis for enhanced-thrust single dielectric barrier discharge plasma actuators [J]. AIAA Journal, 2010, 48(12): 2979-2982.
- [17] Hao Jiangnan, Gao Chao, Li Yinzhe. Flow control over a circular-cone-cylinder by unsteady plasma actuations[J]. Advanced Materials Research, 2011, 160~162: 933-938.
- [18] 郝江南, 蔡晋生, 李尹喆. 多级双极性等离子体激励器加速气流的实验研究[J]. 中国科学: 物理学·力学·天文学, 2012, 42(5): 538-546.
Hao Jiangnan, Cai Jinsheng, Li Yinzhe. Experimental study of flow acceleration using plasma actuator of multi-bipolar electrodes[J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2012, 42(5): 538-546. (in Chinese)

作者简介:

王玉玲(1981—),女,博士研究生,讲师。主要研究方向:空气动力学、流体力学。

高超(1960—),男,博士,教授,博导。主要研究方向:空气动力学、流体力学。

郝江南(1977—),男,博士后。主要研究方向:空气动力学、流体力学。

王军利(1977—),男,博士,讲师。主要研究方向:气动弹性、机械振动。

(编辑:马文静)