

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.04.013

等离子体流动控制技术原理及典型应用

史志伟, 杜海, 李铮, 陆纪椿, 蒋旋

(南京航空航天大学航空宇航学院, 南京 210016)

摘要: 等离子体流动控制激励器由于其具有响应时间短、激励频带宽、器件小、能耗低的技术优势,是流动控制领域最活跃的控制方式之一。等离子体激励器在飞行器的增升减阻、性能增强、力矩控制等方面具有重要的应用前景。文中通过实验和数值模拟方法研究了介质阻挡放电等离子体激励器(DBD)和等离子体合成射流激励器(PSJ)的基本气动特性。AC-DBD激励器主要产生射流扰动,NS-DBD等离子体激励器产生的扰动包括压力波、射流和旋涡结构,PSJ激励器能形成压力波和速度更高的射流扰动。采用AC-DBD激励器可以在低速流动下,推迟平板转捩;采用NS-DBD激励器可以在来流速度为25 m/s时,抑制翼型的流动分离,同时NS-DBD在 $Ma=4.6$ 时,可以控制圆柱脱体激波的激波强度。

关键词: 等离子体; 合成射流; 流动控制; 纳秒脉冲

Mechanism and Applications of Plasma Flow Control Technology

SHI Zhiwei¹, DU Hai, LI Zheng, LU Jichun, JIANG Xuan

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Because of its advantages in flow control such as with a short response time, wide frequency range, small scale and low energy consumption, the plasma flow control actuator is one of the most active technologies in flow control. Plasma actuator is widely used for air vehicle's lift augmentation and drag reduction, performance enhancements and moment control. The basic characterizes of surface dielectric barrier discharge and plasma synthetic jet have been researched. The dominant disturbance of AC-DBD is jet, NS-DBD actuator disturbs the flow in various types such as temperature disturbance, density variation and momentum injection, and the PSJ could induce shock wave and the jet. The AC-DBD actuator could delay transition on a flat at low speed velocity condition; the NS-DBD actuator could control the flow separation on an airfoil up to 25 m/s, at the same time, the NS-DBD actuator has realized the control of shock wave upon a cylinder at $Ma=4.6$.

Key words: plasma; synthetic jet; flow control; nanosecond pulse

0 引言

等离子体激励器由于结构简单、质量轻、厚度小、功率低,在飞行器的性能改善及主动控制等方面具有广阔的应用前景。近年来国内外很多专家及研究人员做了大量的等离子体的机理及应用研究,使得等离子体技术迅猛发展^[1-7]。

常用于流动控制的等离子体激励器包括介质阻挡放电(surface dielectric barrier discharge, SDBD)

等离子体激励器,等离子体合成射流激励器(PSJ),而DBD的驱动电压又分为毫秒交流电压驱动和纳秒脉冲驱动,AC-DBD和NS-DBD被认为是两种不同作用机理的激励器,AC-DBD流动控制原理被认为是通过动量注入,以射流的形式扰动流场。文[8]中做了AC-DBD等离子体的基本特性的研究;文[9]中研究了等离子体激励器对大迎角机翼的分离控制;文[10]中研究了UVA的等离子体气动力控制;文[11]中对细长圆锥前体非对称涡流场的等离子体控制进行了详细的研究;文[12]中做了等离子体激励低

收稿日期:2016-10-25; 修回日期:2017-01-20

基金项目:国家自然科学基金重点项目(11532007)。

Project Supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China(11532007).

速分离流动控制实验研究。

而 NS-DBD 其控制机理, 目前广泛认可的是, 在短时间内形成快速温度升, 产生冲击波, 纳秒脉冲激励器主要以焦耳热的形式作用流场^[13-17]。NS-DBD 激励器能在亚音速和超音速流动范围内都有流动控制效果, 文[18]最先验证了在 0.05 到 0.85 马赫范围内, 采用纳秒放电的激励器都可控制控制边界层分离及噪音抑制; 文[19-23]研制了在 62 m/s 时, 纳秒脉冲等离子体激励器可以控制翼型的前缘分离, 同时认为纳秒放电注入流场的动量小, 控制机理主要是热效应。

等离子体激励器在推迟转捩、延迟分离、提升失速迎角、增加升力、减小阻力等方面具有广阔的应用前景。文中分别讨论了 AC-DBD 和 NS-DBD 以及 PSJ 的流动激励特性, 并将其应用于转捩推迟, 分离流动控制以及激波控制, 探讨了等离子体激励器的能力以及潜在的应用方向。

1 等离子体流动控制技术原理

1.1 AC-DBD 等离子体激励器

实验采用表面单介质阻挡放电等离子体激励器作为流动控制激励器, 其基本结构见图 1。AC-DBD 激励器放电电压波形见图 2。

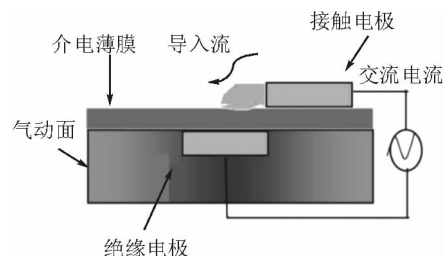


图 1 DBD 等离子体激励器结构示意图

Fig. 1 Schematic of DBD plasma actuator

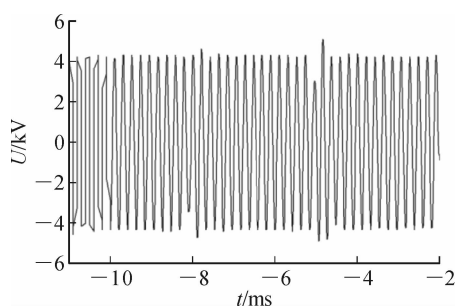


图 2 AC-DBD 激励器放电电压波形

Fig. 2 Voltage waveform of AC-DBD actuator discharge

当施加交流电压(图 2)后, 激励器表面空气被电离, 带电粒子在电场力作用下沿电场定向运动, 同时与中性空气气体分子碰撞, 从而诱导这一区域的气流发生定向运动形成连续射流, 见图 3。

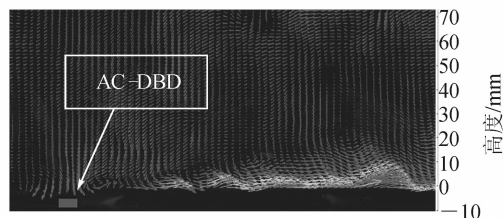


图 3 AC-DBD 激励器产生的射流速度矢量图

Fig. 3 Velocity vector chart of jet induced by AC-DBD actuator

1.2 NS-DBD 等离子体激励器

NS-DBD 激励器采用的是纳秒脉冲电源提供高压脉冲, 图 4 是典型的放电电压波形, 脉冲上升沿为 4 ns, 幅值为 22 kV。

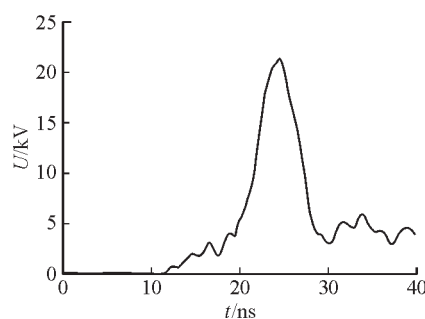


图 4 NS-DBD 激励器放电电压波形

Fig. 4 Voltage waveform of NS-DBD actuator discharge

图 5 是 NS-DBD 激励器在一个脉冲周期的纹影结果。文中试验使用的是一个直径为 200 mm 纹影仪, 光源为 3 W 的 LED 灯珠。一个脉冲周期为 350 μ s。实验采用同步高速摄影, 曝光时间为 2 μ s, 帧数为 30 000 fps。在一个脉冲周期内, 放电时间约 10 ns, 可见冲击波出现在 33 μ s, 至 198 μ s 后, 冲击波传播至纹影视窗之外。

在一个放电脉冲下, 记录冲击波的位置及时间参数, 就可以算出扰动波的速度, 见图 6。从计算结果可以看出, 冲击波速度为 346 m/s, 约为当地音速。

当放电脉冲数增加到 350 个, 可发现, 在放电期间, 每一个纳秒脉冲都形成一个独立的冲击波, 同时, 非平衡等离子体宏观上对空气有一个局部的微加热作用, 随着脉冲数量的增加, 被加热的热量体积也逐渐增大, 加热体积在不断扩大的同时, 伴随着膨胀过程, 向空气中扩散, 体积中的粒子在电场作用下, 形成垂直壁面的射流, 见图 7。

从产生的射流速度的时间、射流正面位置估算, 射流的最大速度达到 1.26 m/s, 在 122.5 ms 的时间内, 平均射流速度为 0.762 m/s, 见图 8。

1.3 等离子体合成射流(PSJ)

常见的 PSJ 激励器有三电极和两电极的, 文中激励器设计为两电极式的等离子体合成射流激励

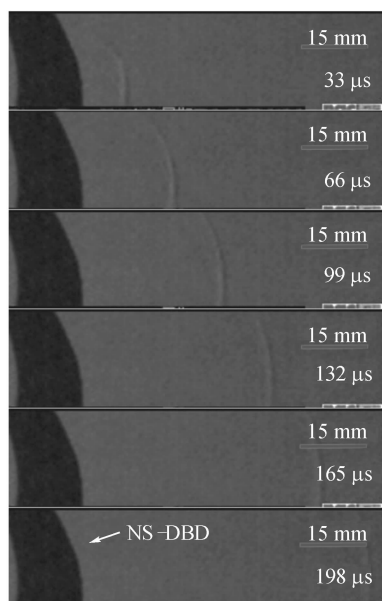


图 5 单脉冲放电产生冲击波结果

Fig. 5 Shock wave induced after one pulse discharge

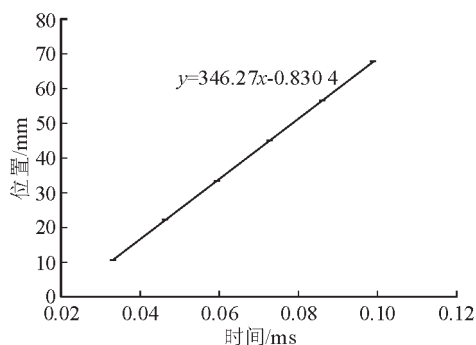


图 6 冲击波传播速度

Fig. 6 Propagation velocity of the shock wave

器,见图 9。腔体内径 ϕ 为 8 mm,高度为 8 mm;正负电极直径 ϕ 为 1 mm,电极间距为 1.7 mm;腔体出口直径 ϕ 为 1 mm,腔内倒角 45° ,孔高度为 1 mm;电极距离出口的高度为 3.5 mm。

在一个脉冲作用下,当 $t=50 \mu\text{s}$ 时,产生两道冲击波, $t=150 \mu\text{s}$ 时,合成射流由射流孔向外喷出,见图 10。在一个放电脉冲下,记录冲击波与合成射流的位置及对应的时间参数,便可算出冲击波和合成射流的速度。每道冲击波的速度约为 290 m/s,合成射流的速度约为 45 m/s。

数值模拟 PSJ 单脉冲放电产生的冲击波、射流结果见图 11。从图 11 的数值模拟结果可以看出, $5 \mu\text{s}$ 时,冲击波扫过的区域,原来静止的空气速度迅速增大。在 $10 \mu\text{s}$ 时,腔内气体基本完全掺混,并有少量气体随冲击波喷出激励器。 $25 \mu\text{s}$ 时,腔内高温形成的一股高压气体,由射流孔向外界喷出。

2 等离子体流动控制技术应用

等离子体流动控制技术由于其明显的技术优势,

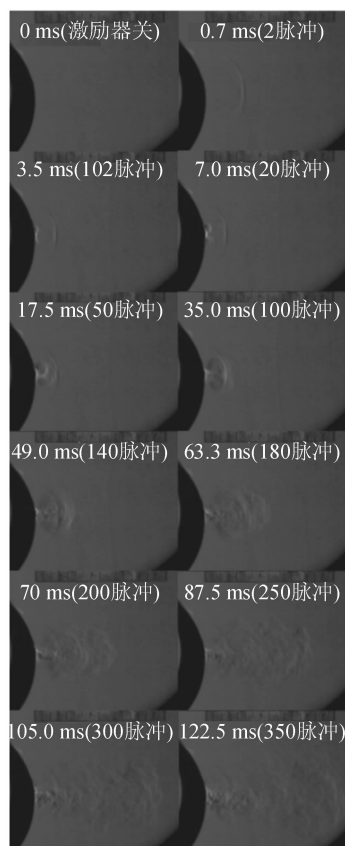


图 7 多脉冲放电产生的冲击波、射流

Fig. 7 Shock wave and jet induced after multiple-pulse discharge

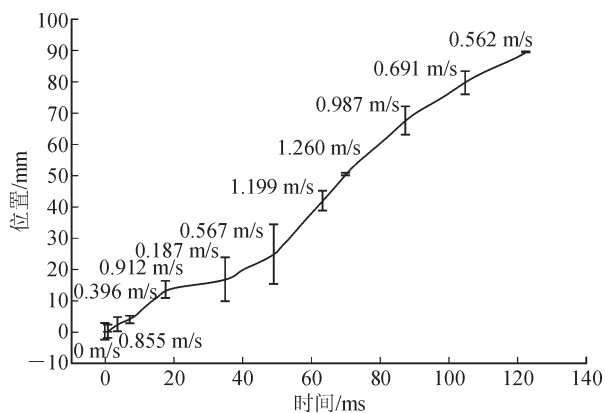


图 8 多脉冲放电产生的射流速度

Fig. 8 Jet velocity after multiple-pulse discharge

可以应用于转捩控制、分离流动控制以及激波控制。

2.1 转捩控制

实验模型为长 220 mm,宽 100 mm 的光滑有机玻璃平板,带有 8 mm 长,宽高比为 5:8 的半椭圆形前缘。实验中使用 5 mm 宽,0.05 mm 厚的铜箔作为激励器电极,两层 10 mm 宽,0.06 mm 厚的聚酰亚胺薄膜作为绝缘介质,激励器放电长度为 80 mm,放电位置位于平板距前缘 35 mm 处,DBD 激励器采用交流电压驱动。平板模型和激励器位置示意图见图 12。

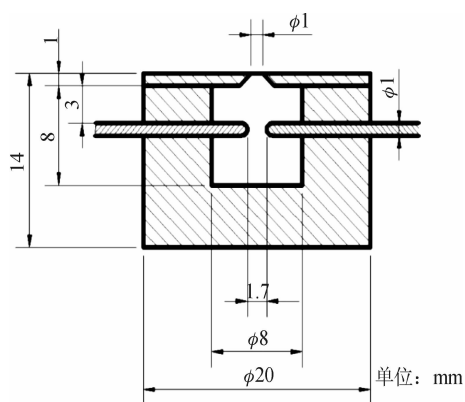


图9 等离子体合成射流激励器结构示意图

Fig. 9 Schematic of PSJ plasma actuator

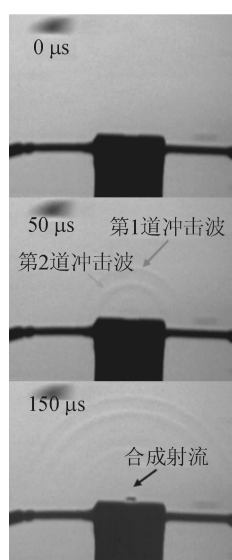


图10 PSJ激励器单脉冲放电产生的冲击波、射流

Fig. 10 Shock wave and jet induced by PSJ actuator after one pulse discharge

电源输出电压 $U_{pp}=11, 12, 13$ kV, 输出频率 4.7 kHz 时, 脉动信号强度沿平板流向位置的变化情况见图13。从图13可以看出, 在激励器电压 $U_{pp}=11$ kV 时, 脉动信号强度发生显著升高的位置相比无激励时后移, 这表明转捩位置得到推迟, 电压越大, 效果越明显。

图14中位输出电压 $U_{pp}=11$ kV 时, 在平板距前缘 $x=155$ mm 处, 边界层脉动信号强度与激励器电源输出频率的关系。

从图14中可以看出, 随输出频率增加, 脉动速度强度逐步减低, 在当前激励电压和测量位置下, 当频率增加到 5.2 kHz 时达到最低, 进一步增加频率对脉动速度的影响效果不明显, 这表明激励器作用存在一个截止频率。

在电源连续放电实验研究的基础上, 研究占空比对转捩控制效果的影响, 电源本身参数为输出电压 $U_{pp}=8$ kV, 频率为 4.7 kHz, 调制参数为调制频率

70 Hz, 占空比分别为 30%、50%、70%、100%。图15给出了在平板流向 $x=95$ mm 处, 基本流场, 连续放电控制以及不同占空比调制放电控制下的流场边界层内距壁面 $y=1$ mm 处的热线信号幅值谱。

从图15中可以看出, 当激励器放电占空比为 30% 时, 幅值谱信号削减效果不明显, 这是因为激励器产生的射流存在时间短, 对边界层的加速效果较弱, 随着占空比增加直至放电连续过程中, 幅值谱信号强度不断降低, 这表明增加占空比能增加激励器向边界层输入的能量, 提高边界层稳定性, 使得转捩推迟效果更为显著。

2.2 分离流动控制

流动控制实现在南京航空航天大学 1.5 m×1 m 低湍流风洞中进行, 湍流度 0.08%, 实验风速 25 m/s, 迎角为 20°。NASA SC(2)-0712 翼型通过支撑机构固定在试验段中, 机翼弦长 $C=30$ cm, DBD 激励器布置在机翼前缘 $x/C=0.016$ 的位置。

压力数据通过压力扫描阀获得, 实验过程中, 数据扫描阀的数据采集频率保持为 200 Hz, 采样样本数为 100 个点, 最后数据处理时, 将 100 个点作平均处理, 所得到的结果即为压力的平均结果。

试验中分别对激励电压、频率两个参数的影响进行了研究。从测压结果看, 控制效果对电压不敏感。通常, 激励频率是影响控制效果的重要参数, 最优频率是与边界条件有关的, 不同激励频率会导致不同的激励效果。从图16可以看出, 高频放电时 ($f=100$ Hz 和 200 Hz), 靠近前缘的压力影响较大; 低频放电时 ($f=50$ Hz), 靠近后缘的压力影响较大。高频放电时, 等离子体主要影响前缘剪切层中的旋涡结构, 而对后缘尾涡的结构影响不大; 低频放电时, 脱落涡受到剧烈影响。从剪切流动的角度讲, 针对大攻角绕流, 前缘剪切层的频率是后缘脱落涡频率的 10 倍量级^[24]。考虑频率耦合的因素, 高频的前缘剪切流更容易耦合高频的放电脉冲, 低频的后缘脱落旋涡更容易感受低频的放电脉冲。

2.3 激波控制

文中研究了 NS-DBD 等离子体对圆柱脱体激波的影响作用。圆柱直径为 6 mm, 马赫数 $Ma=4.6$, 迎角 0°, 静压 $P_0=3\ 000$ Pa, $T_0=50$ K。采用数值模拟的方法, 流体计算中气体简化为理想气体。

为研究放电产生的压缩波与脱体激波之间的相互作用, 仿真中所用电压重复频率设置为 1 kHz, 考虑开始放电后 25 μs 内的流场现象。由于所考虑的流场现象较为复杂, 且放电过程非常短暂, 在放电过程中不考虑气体性质的微小变化。将无气动激

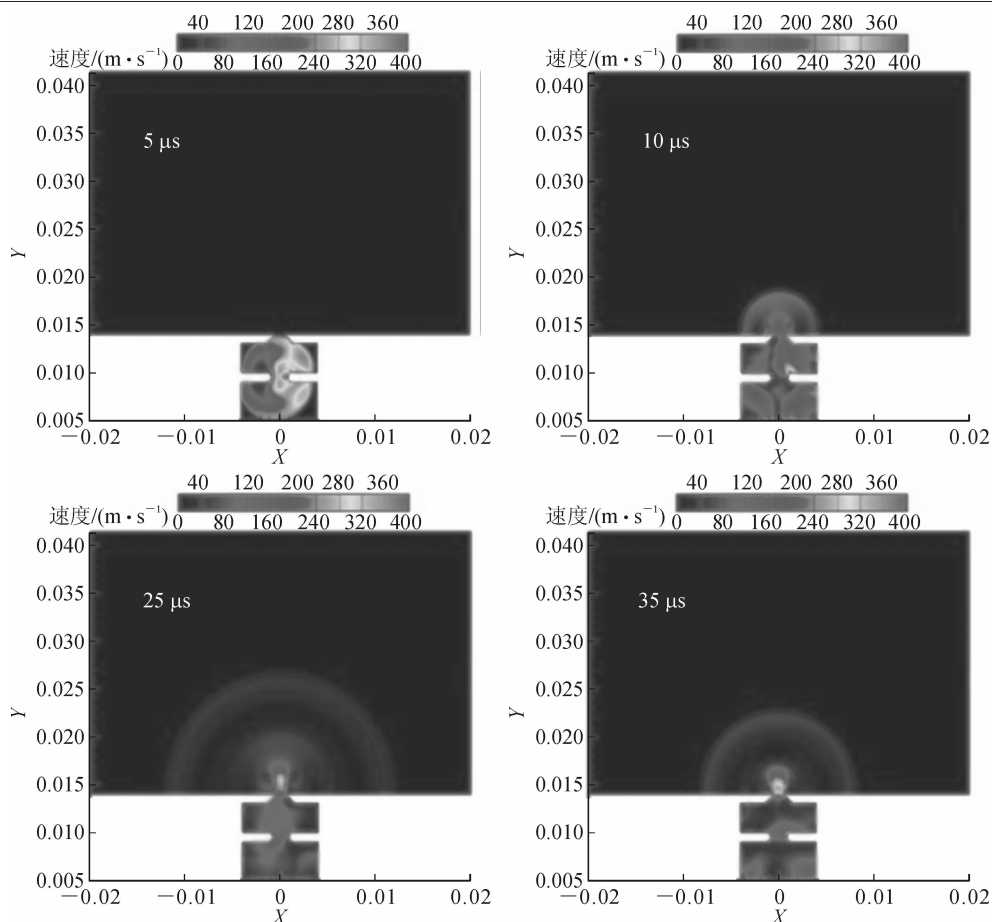


图 11 数值模拟 PSJ 单脉冲放电产生的冲击波、射流结果

Fig. 11 Numerical simulation results of shock wave and jet induced after one pulse discharge by PSJ

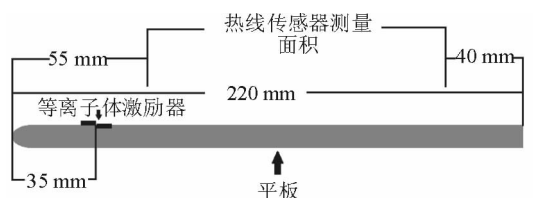


图 12 平板模型示意图

Fig. 12 Schematic of flat model

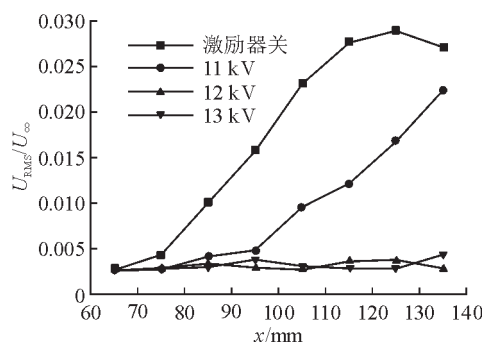


图 13 不同输入电压下的边界层转换情况

Fig. 13 Transition behavior of boundary-layer flow under different output voltage

励控制的圆柱流场作为放电的初始条件。

图 17 为 NS-DBD 放电过程开始后的圆柱表面

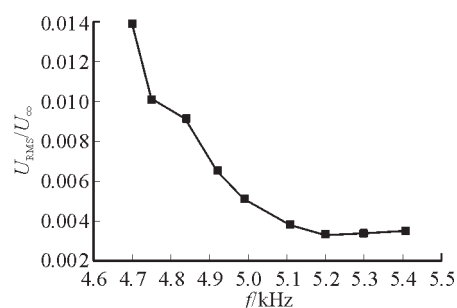


图 14 热线信号标准差随频率变化

Fig. 14 Standard deviation of hot wire signal at different input frequencies

电极覆盖区域的压力系数值。取各点的 Y 向坐标代表局部覆盖区域。图 18 为 NS-DBD 放电过程开始后的不同时刻的阻力系数值。分析表明,放电结束后,伴随着局部温度,压力迅速升高,足够大的压力扰动使得圆柱表面电极覆盖区域压力系数迅速增加,导致阻力也急剧增加。

在 $1 \mu\text{s}$ 左右,圆柱表面压力系数达到最大值,相对应的阻力也达到最大值。随着压缩波向外推进,对圆柱表面的影响作用减弱。由于压缩波推进速度较大,对圆柱表面的强干扰作用时间也就较短。在 $3 \mu\text{s}$ 左右,压缩波接近脱体激波位置,开始

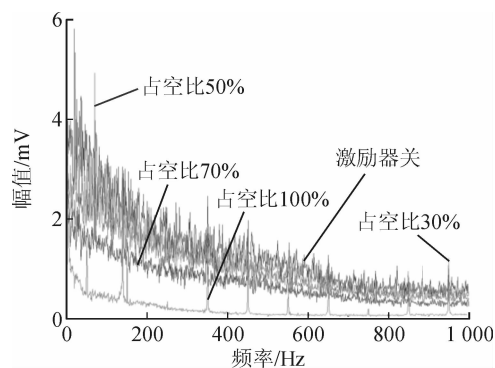


图 15 不同占空比下热线信号幅值谱

Fig. 15 Amplitude spectrum of hot wire signal at different duty ratios

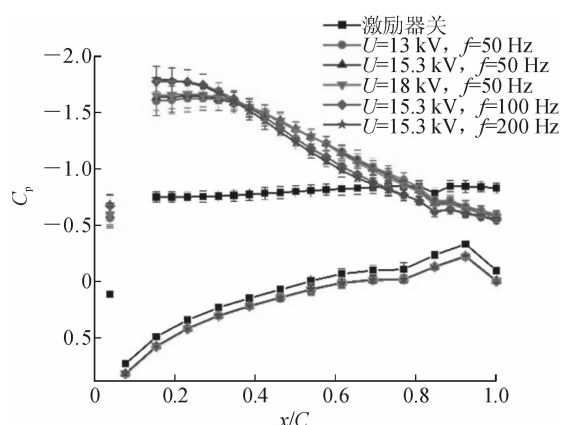


图 16 NS-DBD 激励器对翼型分离流的控制结果

Fig. 16 Flow separation control result on an airfoil by NS-DBD actuator

与脱体激波相互干扰作用,削弱了激波强度,激波阻力减少。观察 $7 \mu\text{s}$ 左右的激波距离与阻力系数值可知,这种削弱作用随着激波距离越远,减阻效果越明显,阻力下降约 13%。 $7 \mu\text{s}$ 后随着激波的后退,阻力系数也渐渐增加。到 $14 \mu\text{s}$ 左右,压缩波对流场几乎无影响作用,阻力系数值出现了细微的动荡,最终趋于稳定,回到最初的稳定状态。

3 结论

文中分别讨论了 AC-DBD 和 NS-DBD 以及 PSJ 的流动特性,并将其应用于转捩推迟,分离流动控制以及激波控制。主要结论如下:

1)AC-DBD 主要以射流的方式对流场形成扰动,而 NS-DBD 以射流和冲击波的方式对流场形成扰动,其波速到 346 m/s 。PSJ 激励器同样也有冲击波和射流产生,射流速度达 45 m/s 。

2)AC-DBD 可明显控制转捩,其中输入电压越大,效果越好,频率增大,效果也增强,存在一个截止频率 5.2 kHz 。

3)NS-DBD 可有效控制分离流动,且激励频率和流场的特征频率有关。

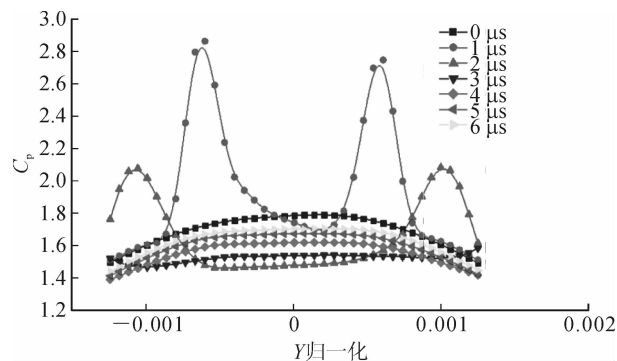


图 17 圆柱表面压力系数值

Fig. 17 Pressure coefficient on the cylindrical surface

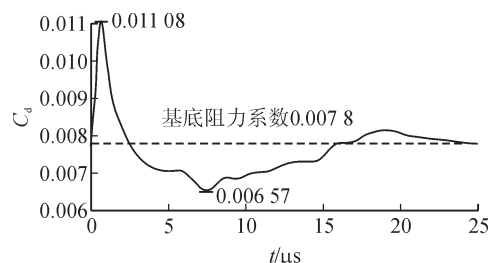


图 18 放电后不同时刻的阻力系数值

Fig. 18 Drag coefficient at different time after discharge

4)NS-DBD 激励器对圆柱高速流动有一定的控制效果,特别是激励器放电产生的压缩波体现出了较强的干扰激波的能力,为今后激励器在翼型或是其他结构上的应用提供参考。

参考文献:

- [1] 吴阳阳,贾敏,王蔚龙,等. 新型介质阻挡放电等离子体激励器的放电与诱导流动特性实验[J]. 电工技术学报, 2016, 31(24): 45-53.
WU Yangyang, JIA Min, WANG Weilong, et al. Experimental research on the discharge and induced flow characteristics of a new dielectric barrier discharge plasma actuator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(24): 45-53.
- [2] 王磊,章程,罗振兵,等. 面向等离子体合成射流应用的微秒脉冲源研制[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(4): 133-139.
WANG Lei, ZHANG Cheng, LUO Zhenbing, et al. Compact microsecond-pulse generator for plasma synthetic jet[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(4): 133-139.
- [3] 张亚春,何湘,沈中华,等. 进气道内衬筒形等离子体隐身性能三维模拟[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(5): 114-119.
ZHANG Yachun, HE Xiang, SHEN Zhonghua, et al. Three-dimensional simulation of plasma stealth for cylindrical inlet[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(5): 114-119.
- [4] 张欣伟,李安帮,杨国清,等. 常压正弦激励射流等离子体的光谱特性研究[J]. 高压电器, 2013, 49(11): 25-30.
ZHANG Xinwei, LI Anbang, YANG Guoqing, et al. Spec

- tral characteristics of sinusoidal excitation plasma jet produced in atmospheric air[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(11):25-30.
- [5] 杨国清,张青,钟思,等. 表面粗糙度对表面介质阻挡放电特性的影响研究[J]. 高压电器, 2016, 52(8):96-100. YANG Guoqing, ZHANG Qing, ZHONG Si, et al. Effect of surface roughness on characteristics of surface dielectric barrier discharge[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(8):96-100.
- [6] KHOSHKHOO R, JAHANGIRIAN A. Numerical simulation of stall flow control using a DBD plasma actuator in pulse mode[J]. Plasma Science and Technology, 2016, 18(9):933-942.
- [7] QI Xiaohua, YANG Liang, YAN Huijie, et al. Experimental study on surface dielectric barrier discharge plasma actuator with different encapsulated electrode widths for airflow control at atmospheric pressure[J]. Plasma Science and Technology, 2016, 18(10):1005-1011.
- [8] 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.
- [9] BENARD N, MOREAU E. On the vortex dynamic of airflow reattachment forced by a single non-thermal plasma discharge actuator[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2011, 87(1):1-31.
- [10] PATEL M P, NG T T, VASUDEVAN S, et al. Plasma actuators for hingeless aerodynamic control of an unmanned air vehicle[C]//3rd AIAA Flow Control Conference. San Francisco, California: AIAA, 2007:1264-1274.
- [11] 孟宣市, 龙玥霄, 李华星. AC和NS等离子体激励对细长前体分离涡流场的控制[J]. 航空工程进展, 2014, 5(3):354-361. MENG Xuanshi, LONG Yuexiao, LI Huaxing. Flow control over a slender force body using AC and NS-DBD plasma actuators[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2014, 5(3):354-361.
- [12] FENG L, JUKES T N, CHOI K, et al. Flow control over a NACA 0012 airfoil using dielectric-barrier-discharge plasma actuator with a Gurney flap[J]. Experiments in Fluids, 2012, 52(6):1533-1546.
- [13] 胡文, 李黎, 刘云龙, 等. 纳秒脉冲激励下大气压空气弥散放电电流特性的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16):4263-4270. HU Wen, LI Li, LIU Yunlong, et al. Experimental study on current characteristics of nanosecond-pulse diffuse discharge in atmospheric pressure air[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16):4263-4270.
- [14] 牛宗涛, 章程, 王瑞雪, 等. 脉冲重复频率对微秒脉冲滑动放电特性影响的实验研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(19):191-198. NIU Zongtao, ZHANG Cheng, WANG Ruixue, et al. Experimental study on the effect of the pulse repetition frequency on the characteristics of microsecond-pulse gliding discharges[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(19):191-198.
- [15] 章程, 邵涛, 龙凯华, 等. 大气压空气中纳秒脉冲介质阻挡放电特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7):111-117. ZHANG Cheng, SHAO Tao, LONG Kaihua, et al. Characteristics of nanosecond-pulse dielectric barrier discharge in atmospheric air[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7):111-117.
- [16] SERGEY B, LEONOV V P A I. Dynamics of energy coupling and thermalization in barrier discharges over dielectric and weakly conducting surfaces on μ s to ms time scales[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2014, 47(46):465201.
- [17] HOUP T A, HEDLUND B, LEONOV S B, et al. Controllable shock wave generation by near-surface electrical discharge [C]//47th AIAA Plasma dynamics and Lasers Conference. Washington, D.C.: AIAA, 2016:1-11.
- [18] 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.
- [19] LITTLE J, TAKASHIMA K, NISHIHARA M, et al. Separation control with nanosecond-pulse-driven dielectric barrier discharge plasma actuators[J]. Aiaa Journal, 2012, 50(2):350-365.
- [20] NISHIHARA M, TAKASHIMA K, RICH J W, et al. Mach 5 bow shock control by a nanosecond pulse surface dielectric barrier discharge[J]. Physics of Fluids, 2011, 23(6):66101.
- [21] DAWSON R, LITTLE J. Characterization of nanosecond pulse driven dielectric barrier discharge plasma actuators for aerodynamic flow control[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(10):103302.
- [22] 魏彪, 梁华, 牛中国, 等. 三角翼微秒脉冲等离子体流动控制的试验研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(3):782-789. WEI Biao, LIANG Hua, NIU Zhongguo, et al. Experimental investigation of delta-wing flow control by microsecond pulse plasma actuator[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3):782-789.
- [23] 韩孟虎, 李军, 梁华, 等. 不同布局等离子体激励器的纳秒脉冲放电特性与流动控制效果[J]. 高电压技术, 2015, 41(6):2060-2065. HAN Menghu, LI Jun, LIANG Hua, et al. Discharge characteristics and flow control effect of nanosecond pulsed plasma actuators configurations[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6):2060-2065.
- [24] WU J, LU X, DENNY A G, et al. Post-stall flow control on an airfoil by local unsteady forcing[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1998, 371(1):21-58.

史志伟(1972—),男,博士,教授,博导,主要从事实验流体力学、流动控制和无人飞行器设计方面的研究工作。