

不同时间尺度等离子体气动激励特性的测试诊断

赵光银¹, 梁 华^{1,2}, 吴 云¹, 宋慧敏¹, 贾 敏¹

(1. 空军工程大学工程学院等离子体动力学重点实验室, 陕西 西安 710038; 2. 空军第五飞行学院, 甘肃 武威 733003)

摘要 为了揭示 ns 脉冲等离子体气动激励与流场附面层耦合作用机制, 提高等离子体气动激励控制附面层的能力, 对不同时间尺度的等离子体气动激励的放电特性和体积力等进行了测试诊断。实验结果表明: ms、 μ s、ns 脉冲放电的放电电压相差不大, 但 ns 脉冲的最大放电电流明显高于 ms 和 μ s 脉冲, 最高可达到 4 A; 激励电压越大, 等离子体气动激励诱导体积力越大; ms、 μ s 脉冲等离子体气动激励诱导体积力水平方向分量较大, ns 脉冲水平方向体积力近似为零; ns 脉冲垂直方向体积力不为零, 与 ms 和 μ s 脉冲相差较小。

关键词 ns 脉冲; 流动控制; 等离子体气动激励; 体积力; 附面层

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.05.005

中图分类号 O53 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)05-0020-05

等离子体流动控制目前已成为空气动力学和气动热力学领域新兴的研究热点^[1-3], 其突出优点是结构简单、作用频带宽、响应迅速。等离子体气动激励特性的测试诊断是揭示等离子体流动控制物理作用机制的重要基础。国内外相关研究机构对等离子体气动激励的放电特性、电场特性、发光特性、声特性和力特性等进行了大量的研究^[4-18]。

在等离子体流动控制用于抑制流动分离、增升减阻的研究中, 介质阻挡放电等离子体流动控制的研究最为广泛。根据激励电压波形的时间尺度, 介质阻挡放电等离子体流动控制可以分为 ms、 μ s 放电和 ns 脉冲放电等离子体流动控制, 其中 ms、 μ s 放电等离子体流动控制的研究最为广泛深入。ns 脉冲放电等离子体流动控制的研究始于 2005 年, 是等离子体流动控制研究领域一个新兴的重要发展方向和研究前沿^[19-23]。

静止空气条件下, ms、 μ s 脉冲放电等离子体诱导的空气速度一般为 3-5 m/s, 最大也不超过 8 m/s, 这说明等离子体诱导空气流动的能力是非常有限, 最大只能在 70 m/s 的来流速度下, 对流场附面层进行有效控制^[23]。虽然 ns 脉冲放电诱导宏观气流速度小于 1 m/s, 但是其流动控制能力远大于 ms 和 μ s 脉冲放电, 在来流速度为 270 m/s 时, ns 脉冲放电仍可有效控制翼型大攻角下的流动分离^[25]。

本文进行了常规大气环境条件下, ms 脉冲、 μ s 脉冲、ns 脉冲等离子体气动激励特性的放电特性和体积力特性等的测试诊断, 并根据测试结果, 对 ns 脉冲等离子体气动激励的作用机理进行了分析。

1 实验系统

实验系统由脉冲等离子体电源、等离子体气动激励器、电参数测试系统、体积力测试系统等组成。

1.1 脉冲等离子体电源

CTP-2000 Kms 脉冲等离子体电源: 输入为 0-220 V、50 Hz 的交流电, 输出波形为正弦波, 输出电压 0-30 kV 连续可调, 放电频率 6-40 kHz 连续可调, 脉冲频率 10-1 000 Hz 连续可调, 占空比 1%-100% 可

* 收稿日期: 2011-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10972236)

作者简介: 赵光银(1986-), 男, 河南淮阳人, 硕士生, 主要从事等离子体流动控制研究。

E-mail: zym19860615@163.com

调,电源功率为 1 kW。

PU-20 μs 脉冲等离子体电源:输入为 0-220 V、50 Hz 的交流电,输出电压 6-20 kV 连续可调,上升时间约为 4 μs ,脉冲宽度为 8-20 μs ,中心频率为 22 kHz,脉冲频率 10-2 000 Hz 连续可调,占空比 10%-99% 可调。

Proteus-2 ns 脉冲等离子体电源:输入为 0-220 V、50 Hz 的交流电,输出电压为 2-100 kV,上升沿为 10-25 ns,半高宽为 30-40 ns,下降沿为 20-25 ns,脉冲功率为 10 MW,脉冲频率为 0-2 000 Hz 可调,电源功率为 2 kW。

1.2 等离子体气动激励器

典型介质阻挡放电等离子体气动激励器如图 1 所示。实验中采用的绝缘材料为聚四氟乙烯,介电常数 $\epsilon_r = 2.7$,绝缘材料厚度 $h_d = 1 \text{ mm}$;电极材料为铜箔,电极长度 l_e 为 50 mm,电极偏置长度 Δl_e 为 15 mm,厚度 h_e 约为 18 μm ,上表面电极宽度 d_1 和下表面电极宽度 d_2 均为 2 mm,电极组内间距 $\Delta d = 0 \text{ mm}$ 。

1.3 电参数测试系统

放电参数测试系统,包括示波器 DPO4104、高压探针 P6015A、电流探针 TCP312 和放大器 TCPA300,用于测量等离子体气动激励器放电电压、放电电流。

1.4 体积力测试系统

作用在流体上的体积力本质上是一种电场力,流体微团 ΔV 所受的电场力 ΔF 与电场强度 E 以及电荷密度 q 成正比即 $\Delta F = qE\Delta V^{[20]}$,采用等离子体气动激励诱导气流加速后对激励器的反作用力,来度量体积力。体积力测试系统原理见图 2,电子天平型号为梅特勒-多利多 AB204-S,采用单模块传感器技术,内置砝码自动校准,其分辨率为 0.1 mg,量程为 0-220 g,带 RS232 通讯接口,可以与计算机实现数据通信。

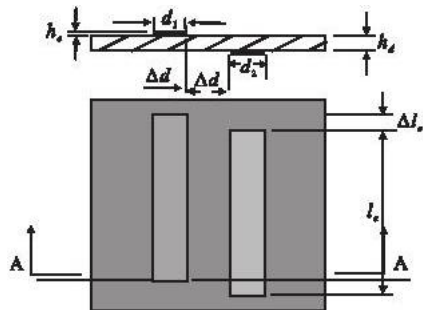


图 1 等离子体气动激励器布局示意图

Fig. 1 Schematic diagram of plasma aerodynamic actuator

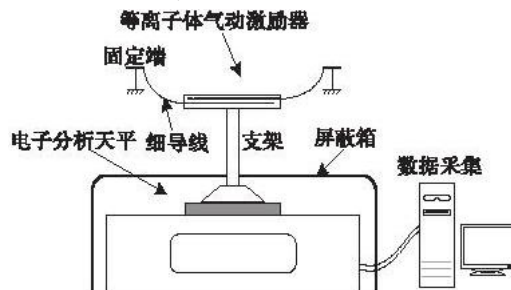


图 2 体积力测试系统

Fig. 2 Body force measurement system

2 实验结果与分析

2.1 放电特性

图 3 为实验测量得到的 ms、 μs 、ns 脉冲等离子体气动激励的放电电压-电流波形图,放电电压分别为 12 kV(峰-峰值)、14 kV(峰-峰值)、13 kV(单峰值);脉冲频率均为 1 000 Hz。可见:放电电压相差不大,ms 脉冲放电的最大放电电流为 0.1 A, μs 脉冲为 0.2 A,而 ns 脉冲高达 4 A,表明 ns 脉冲等离子体气动激励瞬间放电的功率较大。在电压的上升沿和下降沿各发生一次显著的放电,即在正半周期的上升沿和负半周期的下降沿分别有一次显著的放电。实验中,由于等离子体气动激励器为容性负载,导致实验测量到的电压上升时间为百 ns 量级。

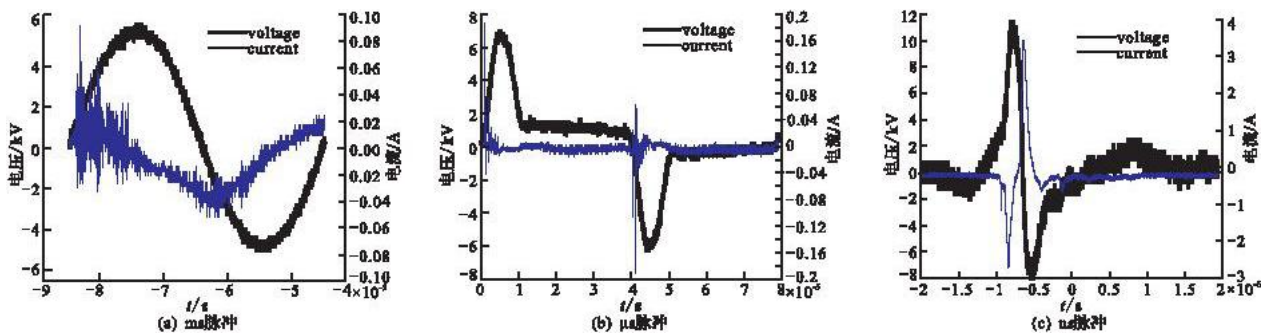


图3 不同时间尺度等离子体气动激励的电压-电流波形图

Fig. 3 Discharge voltage and discharge current waveform of plasma aerodynamic actuation of different time scales

不同布局激励器的 ms 脉冲放电图像见图 4。可以看出,电极组内间距为 0 mm 时,放电呈现均匀的弥散放电;电极组内间距为 1 mm 时,放电变成明显的丝状放电。 μs 脉冲放电图像与 ms 脉冲放电图像相似。

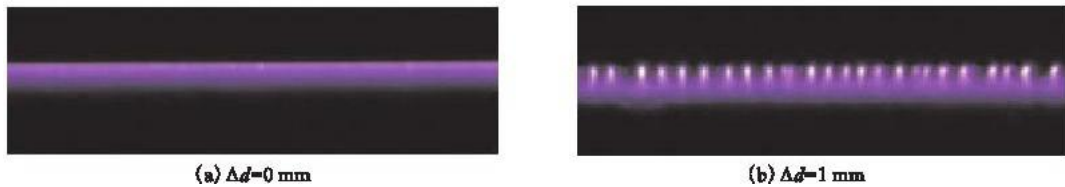


图4 ms 脉冲等离子体气动激励的放电图像

Fig. 4 Discharge images of millisecond pulsed plasma aerodynamic actuation

不同布局激励器的 ns 脉冲放电图像见图 5,电极组内间距为 0 mm 和 1 mm 时,ns 脉冲放电都表现为均匀的弥散放电。

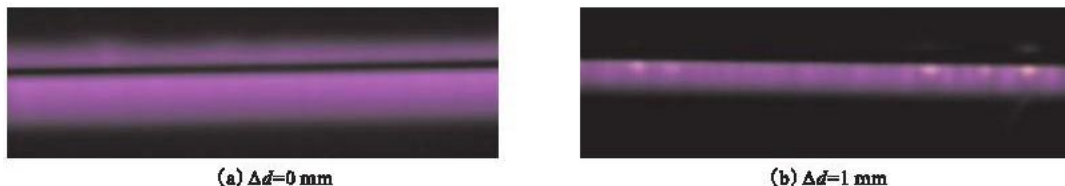


图5 ns 脉冲等离子体气动激励的放电图像

Fig. 5 Discharge images of nanosecond pulsed plasma aerodynamic actuation

2.2 体积力特性

等离子体气动激励诱导的体积力是表征“动力效应”的重要参数之一,本文研究各种激励参数对等离子体气动激励诱导体积力的影响。体积力的大小通过当地重力加速度(本文中取 9.8 m/s^2)与天平测量值相乘得到。

图 6-7 为不同时间尺度等离子体气动激励诱导水平方向和垂直方向体积力随激励电压的变化。

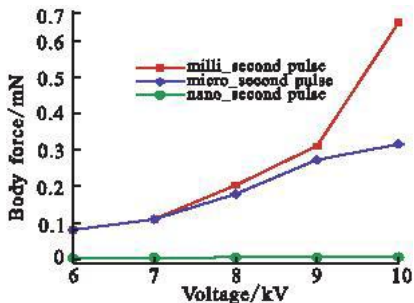


图6 水平方向体积力随激励电压的变化
Fig. 6 The horizontal body force induced with the actuation voltage

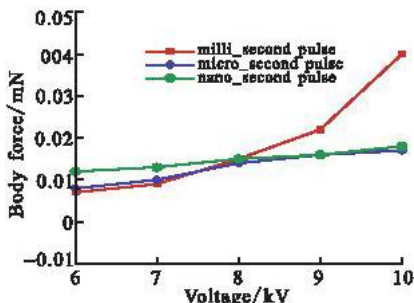


图7 垂直方向体积力随激励电压的变化
Fig. 7 The vertical body force induced with the actuation voltage

水平方向上可见,ms 脉冲等离子体气动激励诱导的水平体积力最大(激励电压为 10 kV 时,诱导体积力为 0.64 mN), μs 脉冲等离子体气动激励诱导的水平体积力次之,两者都随着激励电压的增大而增大;ns 脉

冲等离子体气动激励诱导体积力在水平方向分量几乎为零,表明 ns 脉冲等离子体气动激励诱导气流在水平方向速度分量很小。可以得出,脉宽时间尺度越小,诱导的水平体积力越小。

垂直方向上可见: μs 和 ns 脉冲等离子体气动激励诱导体积力大小相当,ms 脉冲等离子体气动激励诱导的垂直体积力稍大(激励电压为 10 kV 时,垂直方向体积力为 0.042 mN),并且体积力都随激励电压的升高而增大。垂直方向体积力不为零,表示等离子体气动激励在垂直方向上的速度分量不为零。这表示 ns 脉冲等离子体气动激励诱导速度垂直方向的分量比水平方向的分量要大。

总体上比较两图, μs 脉冲和 ms 脉冲诱导体积力的水平分量(10^{-1} mN 量级)比其垂直分量(10^{-2} mN 量级)要大的多,而 ns 脉冲诱导的体积力水平分量比垂直分量小。

就等离子体作用于流场的体积力而言,激励电压波形为连续正弦波时,产生的激励为定常激励;而激励电压波形为 μs 和 ns 量级的脉冲时,产生的激励为非定常激励。从激励和流场耦合作用的角度看,非定常激励方式可以取得比定常激励方式更好的流动控制效果,激励系统功耗更低,对于流动控制研究更为有益^[15]。说明作为“动力效应”重要参数的体积力不能有效地作为评价脉冲激励冲击效应作用能力的指标,相比之下,瞬时放电功率大的 ns 脉冲激励能取得更好的流动控制效果,有理由认为瞬时功率是衡量冲击作用能力的关键指标。ns 脉冲放电将能量在瞬间释放,高的电压梯度导致加热,热在传播过程中,在流场的局部诱导出激波和旋涡^[17],可极大地增强附面层内的能量掺混,达到抑制流动分离的目的。

3 结束语

本文对典型时间尺度的等离子体气动激励进行了电特性、体积力特性的测试诊断研究,对 3 种时间尺度的等离子体气动激励的起始放电电压、放电电流做了对比分析,在对诱导体积力比较后,提出了体积力不适于作为衡量等离子体冲击流动改性作用能力的关键指标;从能量的角度出发初步认为瞬时放电功率是衡量冲击作用能力的关键指标。这对如何提高等离子体气动激励的作用能力具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] Roth J R. Aerodynamic flow acceleration using paraelectric and peristaltic electrohydrodynamic effects of one atmosphere uniform glow discharge plasma[J]. *Physics of plasmas*, 2003, 10(5): 2117–2126.
 - [2] Moreau E. Airflow control by non-thermal plasma actuators[J]. *Journal of physics D: applied physics*, 2007, 40(3): 605–636.
 - [3] 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.
 - [4] Gregory J W, Enloe C L, Font G I, et al. Force production mechanisms of a dielectric-barrier discharge plasma actuator [R]. AIAA 2007-0185.
 - [5] Porter C O, Baughn J W, McLaughlin T E, et al. Plasma actuator force measurements[J]. *AIAA journal*, 2007, 45(7): 1562–1570.
 - [6] Porter C, Baughn J, McLaughlin T, et al. Temporal force measurements on an aerodynamic plasma actuator[R]. AIAA 2006-0104.
 - [7] Do H, Kim W, Mungal M G, et al. On the role of oxygen in dielectric barrier discharge actuation of aerodynamic flows[J]. *Applied physics letters*, 2007, 91: 181501.
 - [8] Golyatin V Y, Kuchinsky V V, Sukhomlinov V S. Mechanism of low-temperature plasma effect on aerodynamic flow[R]. AIAA 2005-0403.
 - [9] Santhanakrishnan A, Jacob J D. Flow control with plasma synthetic jet actuators[J]. *Journal of physics D: applied physics*, 2007, 40: 637–651.
 - [10] Moreau E. Airflow control by non-thermal plasma actuators[J]. *Journal of physics D: applied physics*, 2007, 40: 605–636.
 - [11] 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: 3635–3642.
 - [12] 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.
 - [13] 李益文,李应红,周章文,等. 等离子体气动激励体积力的实验研究[J]. *实验流体力学*, 2009, 23(2): 82–86.
- LI Yiwen, LI Yinghong, ZHOU Zhangwen, et al. Experimental investigation on body force of plasma aerodynamic actuation

- [J]. Journal of experiments in fluid mechanics, 2009, 23(2): 82–86. (in Chinese)
- [14] 李应红, 梁华, 吴云, 等. 等离子体气动激励建模仿真系统综述[J]. 空军工程大学: 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)
- [15] 吴云, 李应红, 苏长兵, 等. 等离子体气动激励系统的谐振特性实验研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 87–90.
WU Yun, LI Yinghong, SU Changbing, et al. Experimental investigation on resonance characteristic of plasma aerodynamic actuation system[J]. High voltage engineering, 2008, 34(1): 87–90. (in Chinese)
- [16] 宋慧敏, 李应红, 梁华, 等. μs 脉冲等离子体气动激励特性的实验研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1672–1676.
SONG Huimin, LI Yinghong, LIANG Hua, et al. Experimental investigation on characteristics of microsecond pulsed plasma aerodynamic actuation[J]. High voltage engineering, 2009, 35(7): 1672–1676. (in Chinese)
- [17] 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 sci bull(Chinese ver), 2010, 55(31): 3060–3068. (in Chinese)
- [18] 李益文, 李应红, 张百灵, 等. 锯齿等离子体气动激励器放电特性与加速效应[J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 83–86.
LI Yiwen, LI Yinghong, ZHANG Bailing, et al. Discharge characteristic and acceleration effect[J]. High voltage engineering, 2008, 34(1): 83–86. (in Chinese)
- [19] Roupasov 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.
- [20] Likhanskii A V, Shneider M N, Macheret S O, et al. Modeling of dielectric barrier discharge plasma actuators driven by repetitive nanosecond pulses[J]. Physics of plasmas, 2007, 14: 073501.
- [21] Unfer T, Boeuf J P. Modeling of a nanosecond surface discharge actuator[J]. Journal of physics D: applied physics, 2009, 42: 1–7.
- [22] Roupasov D, Starikovskii A. Development of nanosecond surface discharge in actuator geometry[J]. IEEE trans plasma science, 2008, 36: 1312.
- [23] Starikovskii A, Roupasov D, Nikipelov A, et al. SDBD plasma actuator with nanosecond pulse periodic discharge[J]. Plasma sources science technology, 2009, 18: 034015.
- [24] Patel M P, Ng T T, Vasudevan S, et al. Scaling effects of an aerodynamic plasma actuator[R]. AIAA 2007–0635.
- [25] 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.

(编辑: 徐敏)

Diagnosis Investigations of Plasma Aerodynamic Actuation Characteristics of Different Time Scales

ZHAO Guang-yin¹, LIANG Hua^{1,2}, WU Yun¹, SONG Hui-min¹, JIA Min¹

(1. Plasma Dynamics Lab, Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Training Center, the Fifth Flight College of the Air Force, Wuwei 733003, Gansu, China)

Abstract: In order to reveal the mechanism of nanosecond pulse plasma flow control and then enhance the boundary layer control ability of plasma aerodynamic actuation, the electric characteristic and the body force of plasma aerodynamic actuation of different time scales are diagnosed experimentally. The results indicate that the inception discharge voltages for microsecond, millisecond and nanosecond pulse actuation are nearly the same, but the maximum discharging current of nanosecond pulse actuation is 4 A, which is much higher than that of the microsecond and of the millisecond. The body force will increase with the rise of the actuation voltage; the differences of the vertical components of the body force induced by plasma aerodynamic actuation of different time scales are little, but the horizontal components induced by millisecond and microsecond actuation are greater.

Key words: nanosecond pulse; flow control; plasma aerodynamic actuation; body force; boundary layer