纳秒脉冲等离子体对静止大气的激励特性

李结，李华星，王健磊，孟宣市

（西北工业大学 翼型叶栅国家级重点实验室，陕西 西安 710072）

摘 要： 应用介质阻挡放电（dielectric barrier discharge，DBD）等离子体激励对静止大气进行诱导，分别使用交流（alternative current ，AC）等离子体电源和纳秒脉冲（nanosecond pulse，NS）等离子体电源进行激励。激励器放置在 600 mm×500 mm×500 mm 的光学玻璃箱内。利用粒子图像测速技术（PIV，particle lmage vbelocimetry）对激励器周围的诱导速度场进行了测量，给出了时间平均速度分布结果。实验结果表明：纳秒脉冲介质阻挡放电等离子体（NS-DBD）对静止大气的时均诱导效应和连续交流介质阻挡放电等离子体（AC-DBD）类似，都是以壁面诱导气流的形式出现，激励电压越大，壁面射流诱导速度场范围及最大诱导速度越大；AC-DBD 等离子体激励产生的诱导速度场由裸露电极指向覆盖电极，最大诱导速度约为 4 m/s；而 NS-DBD 等离子体激励在激励器顺电势和逆电势方向均有诱导速度，且主要诱导速度场出现在激励器逆电势方向；NS-DBD 的最大诱导速度约为 0.3 m/s；从对静止大气的诱导速度场大小来看，纳秒的动量输入几乎可以忽略不计。

关 键 词： 激励器，流动控制，等离子体，介质阻挡放电，纳秒脉冲，粒子图像测速

中图分类号： V211.7 **文献标志码：** A **文章编号：** 1000-2758（2014）02-0176-05

基于常压等离子体激励的流动控制是近十多年来发展非常快的一类新型流动控制模式，是等离子体动力学在空气动力学领域的典型应用。相对于传统的流动控制技术，常压等离子体激励没有复杂的机械装置，并具有较宽的频带、较低的能耗、零反应时间的优点，并且，其最大的优点在于激励器的敷设非常简单，可用于大面积的流动控制[1-2]。基于交流电源的介质阻挡放电（AC-DBD）等离子体激励被广泛应用于流场速度相对低时（<30 m/s）的翼型前缘分离流动控制[3-4]、湍流减阻[5]、降噪[6]、边界层控制[7]、分离涡控制[8-9]等方面。

AC-DBD 等离子体激励机理是从电流体动力（EHD）现象提出的。已有的研究结果表明，基于连续放电的交流介质阻挡放电（AC-DBD）等离子体激励的流动控制，其主要机理是等离子体中的带电粒子和壁面附近的中性粒子的相互作用会在静止的空气中产生一个低速（<10 m/s）近壁射流，这样的速度很难应用于高速流动分离控制。在现有的诱导气流速度水平下，AC-DBD 等离子体气动激励有效抑制控制风速范围在 30 m/s 以内[10-13]。因此，目前 AC-DBD 等离子体激励用于流动控制的主要问题为：等离子体注入动量低，从而当主流速度进一步提高时，流动控制就变得没有效果。

对于 NS-DBD 等离子体激励，Ohio 大学 Keisuke Takashima[14] 等通过锁相纹影研究发现，NS-DBD 是通过由丝状放电产生连续单个波重叠产生的压缩波对控制区域的流动进行影响。Little 等[15] 的研究结果表明，当脉冲宽度达到纳秒量级后，极短的脉冲可以在短时间内产生球面压缩波与近似平面压缩波组合波，在周期性的高压脉冲作用下，会产生相干的组合压缩波结构，这种相干结构可以对流动产生扰动，从而增强自由来流的动量。Patel 等、李应红等[16-17] 利用微秒脉冲等离子体气动激励对 NACA 0015 翼型的风洞流场进行了控制，结果表明，来流速度达到约 0.2 *Ma* 时，等离子体气动激励仍然可以有效地抑制翼型吸力面的流动分离。Roupassov 等[11] 利

收稿日期：2013-10-06 基金项目：国家自然基金（11172243、51107101）、高等学校博士学科点专项科研基金（20106102110002）和西北工业大学翱翔之星资助

作者简介：李结（1985—），西北工业大学硕士研究生，主要从事等离子体控制的研究。

用，纳秒脉冲等离子体激励对翼型分离流动进行了主动控制研究，实验结果表明，来流速度增大到 0.74 *Ma* 纳秒脉冲等离子体激励仍然可以有效抑制翼型表面流动分离。

本文利用粒子图像测速技术(particle image velocimetry，PIV) 对 AC-DBD 和 NS-DBD 等离子体激励下的诱导速度场进行流场测量，给出 2 种不同等离子体激励下的时间平均诱导速度场，通过比较分析，为下一步研究提供方向。

1　实验设备

1.1　等离子体电源及激励器

手工制作的长条形 DBD 等离子体激励器安装一块有机玻璃表面。激励器由裸露电极、掩埋电极及两者之间的绝缘层组成。裸露电极和掩埋电极均为 0.03 mm 厚的铜片，电极长度为 200 mm，裸露和覆盖电极的宽度分别为 5 mm 和 10 mm。中间为厚度 0.4 mm 的 Kapton 绝缘层，水平间距为零。激励器直接粘贴到有机玻璃板上。图 1 给出了激励器的剖面图和产生辉光的示意图。

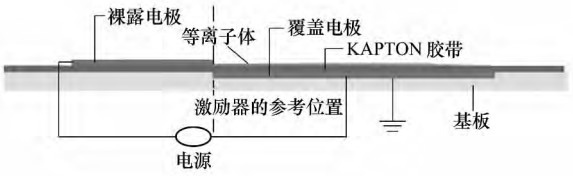


图 1　等离子体激励器布局

本实验中分别使用 1 台 AC 等离子体电源和 1 台 NS 等离子体电源对激励器供电。AC 电源输入电压为 220 V 交流电，输出电压峰-峰值范围为 0～35 kV(图 2a))，载波频率为 5～20 kHz。NS 电源输入电压为 220 V 交流电，输出电压波形为周期脉冲波形(图 2b))，负载为 200～500 Ω 纯电阻时最大输出电压为 20 kV，脉冲上升沿(10～90%) 为 2～3 ns，半脉宽约为 8～10 ns，单脉冲能量为 15 mJ。当负载为 DBD 等离子体激励器时，电源输出最大电压为 17.1 kV，脉冲上升沿为 3 ns，半脉宽约为 10 ns。

1.2　电源及 PIV 系统

PIV 系统采用丹麦 DANTEC 公司的三维 PIV 系统，主要有激光器、CCD 相机、同步控制器以及专业图像处理软件 Dynamicstudio 构成。其中，激光器型号为 DANTEC 公司的 CLASS 4 LASER PRODUCT，最大功率输出 1 200 mJ，脉冲持续时间 4 ns，激光介质为 Nd: YAG。CCD 相机像素为 2 048×2 048，镜头为 Nikon 85 mm f/1.4 镜头。

本实验中，激光垂直于激励器展 向轴线，固定在 50%展长位置，激光产生双脉冲的间隔为 50 s。数据处理时搜索区域设置 328 像素、重叠区设置为 75%。激光双脉冲的频率为 10 s 并连续 20 s 采样。

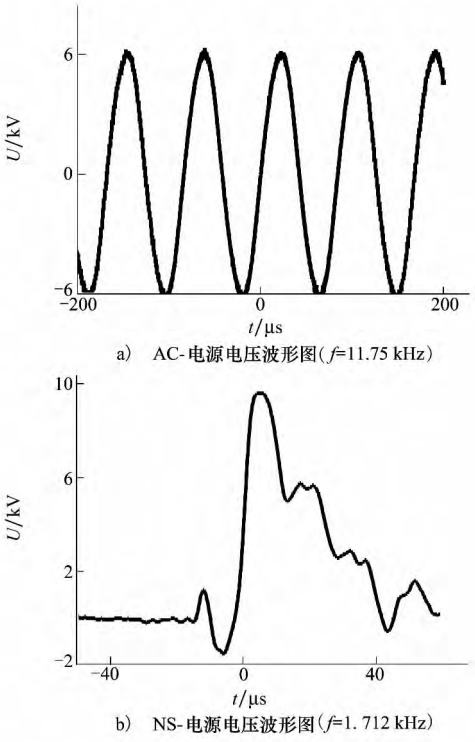


图 2　纳秒电源和交流电源的波形图

图 3 给出了实验布局。激励器放置在一个长×宽×高为 600 mm×500 mm×500 mm 的光学玻璃箱

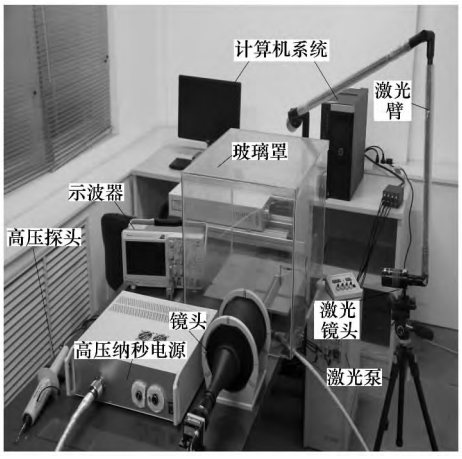


图 3　PIV 实验布局图

内，箱体内为实验室环境大气。示踪粒子由发烟饼燃烧产生，燃烧后烟粒子扩散均匀，对静止后的烟粒子进行等离子体激励可产生诱导流场。点燃烟块，待烟与空气混合均匀充满实验箱后开始进行拍摄和采集。

2 实验结果及分析

图 4 给出了 AC-和 NS-DBD 等离子体激励下诱导的时间平均速度场及速度云图。裸露的电极位于 $x=-5$ mm 与 $x=0$ mm 之间，覆盖电极位于 $x=0$ mm 与 $x=10$ mm 之间。箭头表示平均流速矢量，不同的深浅表示平均速度的大小。

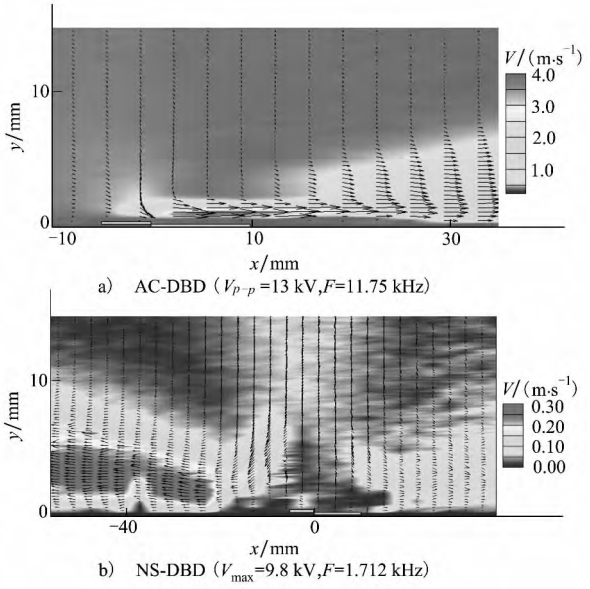


图 4 等离子体激励产生的诱导速度场

表 1 不同电压下最大诱导速度大小及坐标

电源	激励频率 /kHz	电压 /kV	最大速度 /(m·s⁻¹)	最大速度坐标 /mm
AC	11.75	12.0	2.57	(4.72, 1.27)
		13.0	3.97	(5.68, 0.72)
NS	1.712	6.9	0.21	(-16.07, 0.68)
		9.2	0.30	(-22.96, 1.53)
		9.8	0.31	(-24.97, 1.75)

图 4a) 中 AC-DBD 等离子体激励电压为 13 kV，激励频率为 11.75 kHz，最大诱导速度约为 4 m/s，出现在激励器下游 $x=5.68$ mm 处。图 4b) 中 NS-DBD 等离子体激励电压为 9.8 kV，激励频率为 1.712 kHz。此时最大诱导速度为 0.31 m/s，出现在激励器上游 $x=-24.97$ mm 处。

为了更好的对比两种电源诱导的流场，图 5 给出了激励器上游 $x=-30$ mm 和下游 $x=20$ mm 处沿 y 方向的速度分布。

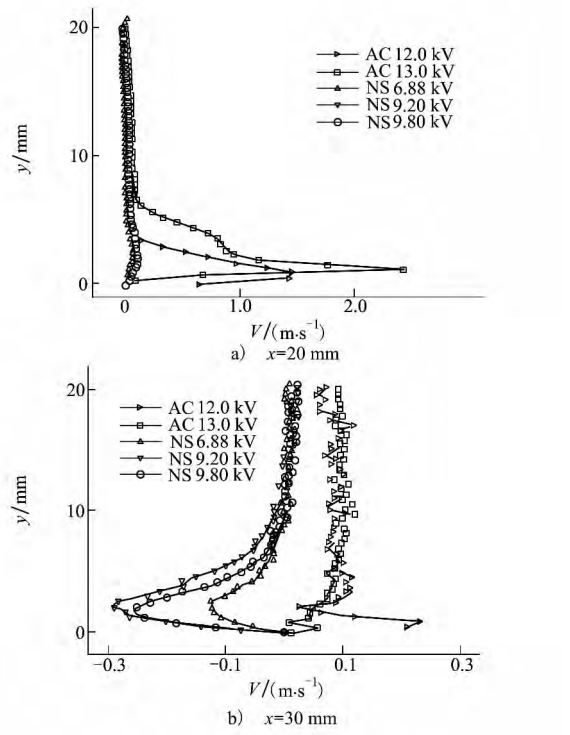


图 5 AC-与 NS-DBD 等离子体激励对静止大气的诱导流场 x 方向时均速度分布

从表 1 和图 5 可以看出，NS-和 AC-DBD 对静止大气的时均诱导效应相似，随着激励电压增大，气动激励的强度增大。所不同的是 NS-DBD 在激励器两侧均有诱导流场，且主要流场在激励器上游，但诱导速度场平均速度大小比 AC 小一个量级。可以看出，AC-DBD 等离子体激励对流场产生影响的主要机理是动量的注入，而 NS-DBD 等离子体激励对流场产生影响动量注入可以忽略不计，因为宏观诱导的时均速度场基本在 0.5 m/s 以下。

3 结 论

应用介质阻挡放电等离子体激励对静止大气进行诱导，分别使用 AC-和 NS-DBD 等离子体电源进行激励。利用 PIV 对激励器周围的诱导速度场进行了测量，给出了时间平均速度分布结果。

实验结果表明: (1) NS-DBD 等离子体激励对静止大气的时均诱导效应与 AC-DBD 等离子体激励类似,激励电压越大,壁面射流诱导速度场范围及最大诱导速度越大; (2) AC-DBD 等离子体激励主要的诱导速度场方向由裸露电极指向掩埋电极,最大诱导速度约为 4 m/s; 而 NS-DBD 等离子体激励在激励器顺电势和逆电势方向均有诱导速度,但诱导速度场小一个量级,均在 0.5 m/s 以下; (3) AC-DBD 等离子体激励对流场产生影响的主要机理是动量的注入,而 NS-DBD 等离子体激励对流场产生影响动量注入可以忽略不计。

致谢　感谢罗时钧教授、刘锋教授对本文的指导,李明洋和赵佶男硕士研究生在实验研究方面对于本文的贡献。

参考文献:

[1] Thomas C Corke, Martiqua L Post, Dmitriy M Orlov. Single-Dielectric Barrier Discharge Plasma Enhanced Aerodynamics: Concepts, Optimization, and Applications [J]. Journal of Propulsion and Power, 2008, 24(5): 935-945

[2] Eric Moreau. Airflow Control by Non-Thermal Plasma Actuators [J]. J Phys D: Appl Phys, 2007, 40: 605-636

[3] Post M L, Corke T C. Separation Control on High Angle of Attack Airfoil Using Plasma Actuators [C]. AIAA-2003-1024

[4] Post M L, Corke T C. Separation Control Using Plasma Actuators: Dynamic Stall Vortex Control on Oscillating Airfoil [J]. AIAA Journal, 2006, 44(12): 3125-3135

[5] Jukes T N, Choi K, Johnson G A, Scott S J. Turbulent Drag Reduction by Surface Plasma through Spanwise Flow Oscillation [C]. AIAA-2006-3693

[6] Thomas F O, Kozlov A, Corke T C. Plasma Actuators for Cylinder Flow Control and Noise Reduction [J]. AIAA Journal, 2008, 45(8): 1921-1931

[7] Jacob J D, Rivir R, Carter C, Estevadeordal J. Boundary Layer Flow Control Using AC Discharge Plasma Actuators [C]. 2nd AIAA Flow Control Conference, 2004

[8] Liu F, Luo S J, Gao C, Meng X S, Hao J N, Wang J L, Zhao Z J. Flow Control over a Conical Forebody Using Duty-Cycled Plasma Actuators [J]. AIAA J, 2008, 46(11): 2969-2973

[9] Zhang P F, Wang J J , Feng L H, Wang G B. Experimental Study of Plasma Flow Control on Highly Swept Delta Wing [J]. AIAA J, 2010, 48(1): 249-252

[10] Reece J Roth, Xin Da. Optimization of the Aerodynamic Plasma Actuator as an Electrohydrodynamic (EHD) Electrical Device [C]. AIAA-2006-1203

[11] Roupassov D V, Nikipelov A A, Nudnova, Starikovskii A Yu. Flow Separation Control by Plasma Actuator with Nanosecond Pulsed Periodic Discharge [J]. AIAA J, 2009, 47(1): 168-185

[12] 李应红, 吴云, 梁华, 宋慧敏, 贾敏. 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, Song HuiMin, Jia Min. The Mechanism of Plasma Shock Flow Control for Enhancing Flowseparation Control Capability [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(31): 3060-3068 (in Chinese)

[13] Post M, Corke T C. Separation Control Using Plasma Actuators: Dynamic Stall Vortex Control on Oscillating Airfoil [J]. AIAA Journal, 2006, 44(12): 3125-3135

[14] Takashima Keisuke, Zuzeek Yvette, Walter R Lempert, Igor V. Adamovich. Characterization of Surface Dielectric Barrier Discharge Plasma Sustained by Repetitive Nanosecond Pulses [C]. AIAA-2010-4764

[15] 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

[16] Patel M P, Ng T T, Vasudevan S, Thomas C Corke, et al. Scaling Effects of an Aerodynamic Plasma Actuator [C]. AIAA-2007-0635

[17] 李应红，梁华，马清源，吴云，宋慧敏，武卫. 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，Wu Yun，Song Huimin，Wu Wei. Experimental Investigation on Airfoil Suction Side Flow Separation by Pulse Plasma Aerodynamic Actuation[J]. Acta Aeronauticaet Astronautica Sinica，2008，29(6)：1429-1435 (in Chinese)

Characteristics Comparison between AC- and NS-DBD Plasma Actuatoions in Quiescent Air

Li Jie，Li Huaxing，Wang Jianlei，Meng Xuanshi
(National Key Labratory of Aerodynamics Design and Research，Northwestern Polytechnical University，Xi'an 710072，China)

Abstract: The character of the plasma actuator that induces the quiescent air is studied. The plasma actuator is powered by two different kinds of power sources. One is Alternative Current (AC) plasma power source and the other is Nanosecond Pulse (NS) plasma power source. The experiments are conducted in an optical glass box whose dimension is 600 mm×500 mm×500 mm. A Particle Image Velocimetry (PIV) system used in this study to measure the flow field is induced by the plasma actuator; the average velocity distribution is shown as the results. The average results of effects on quiescent air of two different kinds of power sources are similar. Both of them are present in the form of flow jet along the wall. The highest velocity and jet flow field area are increased by the power source voltage. The induced jet flow which is powered by AC power source is pointed from the exposed electrode to the encapsulated electrode，however，the induced jet flow which is powered by NS power source is pointed to both sides and the main jet flow field is from the encapsulated electrode to the exposed electrode. The highest jet flow velocity is 4m/s for the AC power source and 0.3m/s for the NS power source. The jet velocity induced by the NS power source is almost ignorable from the point of view of inducing velocity of the quiescent air.

Key words: actuators，experiments，flow control，flow fields，pixels，plasmas，velocity distribution，velocity measurement; dielectric barrier discharge，nano-second pulse，PIV(particle image velocimetry)

《西北工业大学学报》第32卷第1期(2014年2月)平均每篇有1.54个21世纪Ei主题词

《西北工业大学学报》第32卷第1期有28篇论文，共有43篇21世纪Ei主题词，平均每篇1.54个。

这期最高的1篇是5个21世纪Ei主题词。这篇的第一作者是吴成富，出现在141页上的5个21世纪Ei主题词是：ailerons(2009)，controllers(2009)，fault tolerance(2006)，MATLAB(2006)，unmanned aerial vehicles(UAV)(2006)。

胡沛泉

2014年4月