

文章编号: 1001-4888(2010)03-0286-07

等离子体 EHD 顺电加速效应 影响因素实验研究^{*}

周小旭¹, 钟诚文¹, 李凯¹, 陈效鹏²

(1. 西北工业大学 翼型、叶栅空气动力学国防科技重点实验室, 陕西西安 710072;

2. 西北工业大学 力学与土木建筑学院, 陕西西安 710072)

摘要: 利用 PIV 系统, 在静止空气中, 定量测量了等离子体激励器的诱导速度场, 分析了激励参数等因素对等离子体 EHD 顺电加速效应的影响。通过实验发现: 在激励频率固定的情况下, 诱导气流速度随着电压的升高逐渐增大; 在激励电压固定的情况下, 存在一个诱导气流速度最大的最优频率, 并且不同的激励器对应不同的最优频率。另外, 初步分析了激励器布局、绝缘材料以及通电时间对诱导气流速度的影响。

关键词: 等离子体; EHD; 顺电效应; PIV

中图分类号: V211

文献标识码: A

0 引言

流动控制作为流体力学的重要分支和研究前沿, 其目的是为了改善物体的受力状态, 进而获得减小阻力、提高升力、拓宽稳定工作范围等效果。大气压均匀辉光放电等离子体流动控制技术是一种新型的、基于等离子体气动激励的主动流动控制技术, 相比其它流动控制技术, 它具有结构简单紧凑、没有运动部件、可靠性强、宽频快速响应、低成本、不使用时不会产生负面影响等优势^[1], 因此近年来逐渐成为空气动力学领域新兴的重要研究课题, 并已在加速边界层流动^[2-5]、抑制大迎角下的流动分离^[4-6]等方面取得了一定的成效。在加速边界层流动方面, 主要采用 EHD(Electrohydrodynamic, 电流体动力)加速。它的加速机制主要有三种, 即直流电场加速、顺电加速和蠕动加速^[7]。三种机制中, 顺电加速对电源要求最低, 因此得到了最广泛的关注。

在顺电加速方面, 田纳西大学 Roth 等人分析了绝缘材料、激励参数以及激励器布局等因素对诱导速度大小的影响, 试图找到一种最优的方案^[3]; 空军工程大学李应红教授等人研究了激励参数以及激励器布局对等离子体 EHD 加速效应的影响^[8,9], 并根据不同位置最大速度出现的高度推测出流场中有诱导涡的出现^[8]。但他们受制于速度测量手段(皮托管), 不能对流场进行全面的分析, 这样就不能得到全面的流场速度分布, 也不能对诱导涡等比较复杂的流动现象进行较为直观的分析。因此, 采用先进的速度测量系统(PIV)对等离子体激励器的诱导速度场进行定量测量, 进而分析等离子体 EHD 顺电加速效应的影响因素, 是十分必要的。

^{*} 收稿日期: 2010-01-08; 修订日期: 2010-03-01

基金项目: 本项目受到国防科技重点实验室基金资助(N6CZ0003)

通讯作者: 钟诚文(1966—)男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 计算流体力学, 测控技术, 高性能计算。E-mail: zhongcw@nwpu.edu.cn

1 实验原理

1.1 顺电 EHD 加速现象

静电场中的顺电效应类似于磁场中的顺磁性,它直接作用在等离子体的净电荷上。所谓“顺电”是指非均匀电场向电中性、但被电离了的电介质施加一个单一方向的作用力。这个作用力总是指向电场梯度增大的方向,而与电极的瞬时极性无关。等离子体在此电场力作用下,加速向电场梯度增大的方向运动,并通过离子-中性气体分子碰撞带动中性气体沿同方向运动,最终中性气体在常压下的流速可达到 1m/s 至 10m/s 量级^[5]。

依据文献[5]的推导,顺电 EHD 激励诱导的中性气流速度可由下式进行计算:

$$u_0 = E \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\rho}} \quad \text{m/s} \quad (1)$$

式中: E 是电场强度; ρ 是中性气体的密度; ϵ_0 是真空介电常数。

典型的等离子体气动激励器布局如图 1 所示:在绝缘材料两侧非对称地布置两块金属电极,上表面电极裸露在空气中,下表面电极通过将激励器平放在绝缘基板上使之与空气隔离,在高压高频交流电作用下,可在下表面电极上方、绝缘材料上表面处生成弱电离等离子体,等离子诱导流动使周围空气形成水平方向射流,加速边界层内的气流流动。

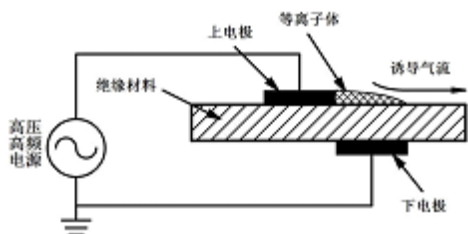


图 1 典型的等离子体气动激励器布局

Fig. 1 Typical configuration of plasma aerodynamic actuator

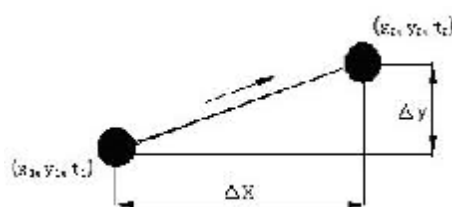


图 2 PIV 测速原理图

Fig. 2 Schematic diagram of PIV method

1.2 PIV 测速原理

粒子成像测速(Particle Image Velocimetry, PIV) 是随着光电技术、计算机技术和图像处理技术的快速发展,于上世纪 80 年代初出现的实现全流场流动显示和非接触定量测量的新一代流动参数测试技术。目前 PIV 技术已经发展成为测量二维平面速度场的较为成熟的工具。它的主要特点是超出了单点测速(例如 LDA)技术的局限性,能在同一时刻记录下整个二维平面流场的速度分布,可提供流场丰富的空间结构。其基本原理是:在被测流场中加入适当大小和浓度的示踪粒子,用高强度的激光脉冲片光源两次照亮要测量的流场平面,记录下两次曝光的粒子影像(如图 2)。

通过对粒子影像的相关性分析,确定粒子两次成像的位移量 Δx , Δy 。由于激光器发生两次脉冲的时间间隔是已知的,这样就可以得到粒子的运动速度矢量:

$$u = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2)$$

$$v = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (3)$$

所测平面内大量粒子的运动矢量构成了二维平面速度矢量场^[10]。

2 实验装置

等离子体流动控制实验系统主要包括等离子体电源、等离子体激励器、速度测量系统和激励参数测量系统等几部分。本实验中采用的电源系统为单相高压高频电源,输出波型为正弦波,电压 0~30kV

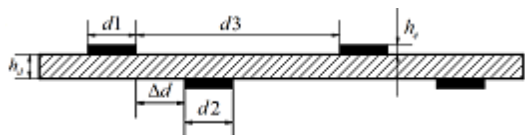


图 3 激励器结构示意图

Fig. 3 Configuration sketch map of the actuator

(峰-峰值, 本文所述电压均为峰-峰值) 连续可调, 频率 7.5kHz~15kHz 连续可调; 采用的等离子体激励器为如图 3 所示的非对称布局 FR-5 印刷电路板, 板厚 h_d 为 1.5mm, 上下表面铺设铜电极, 电极厚度 h_e 为 0.035mm, 本文共使用了 5 块不同布局的激励器, 这些激励器均包含 8 对电极, 且 h_d 、

h_e 这两个参数保持不变, 其它参数如表 1 所示; 采用的速度测量系统为 DANTEC 公司的二维 PIV 测速系统, 此系统使用烟饼燃烧产生的烟来充当示踪粒子; 采用的激励参数测量系统为配合分压器使用的 TDS1001B 型示波器, 分压器分压比为 960。

表 1 激励器主要布局参数

Tab. 1 Key configuration parameters of the actuator

序号	d_1 (mm)	d_2 (mm)	Δd (mm)	d_3 (mm)
1	2	2	0	10
2	1	2	0	10
3	2	4	0	10
4	2	2	1	10
5	2	2	0	9

3 实验结果及分析

3.1 诱导气流速度分布

取表 1 中激励器 3 为研究对象, 分析此激励器在频率为 10.5kHz, 电压为 15.36kV 以及 17.28kV 状态的诱导气流速度分布。选取空间坐标如图 4 所示; 取最后一根电极中间位置为坐标原点, x 轴正向为激励器平面内垂直电极向右方向, y 轴正向为垂直向上方向, z 轴为沿电极方向。图中 $z=0$ 平面即为 PIV 激光照亮的平面, 亦即我们分析诱导气流速度分布的平面, 得到的结果如图 5 及图 6 所示。

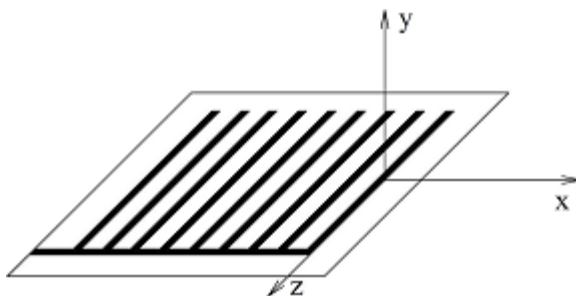


图 4 坐标轴示意图

Fig. 4 Schematic diagram of coordinate axis

由于激光照射在激励器表面会出现漫射现象, 这使得 PIV 系统无法得到离物面较近的流场分布, 因此图 5 及图 6 中的四组曲线分别为高度 (y 值) 1.85mm、2.4mm、2.95mm 以及 3.5mm 时的速度分布, 由图可知: 在这一范围内, 速度随着高度的增大而逐渐减小, 但这一趋势当 x 值超过 20mm 后变得不再明显; 在同一高度上, 速度分布趋势均为先增后降。上述结果的出现是由于当 x 值大于 0 时, 随着 x 的增大; 当高度在附面层以上时, 随着 y 值的增大, 等离子体加速作用逐渐减弱, 直至消失。电压为 17.28kV 时, 在 x 值为 -30mm 位置出现了一个较为明显的涡, 如图 7 所示, 这造成该区域速度变化较为剧烈。

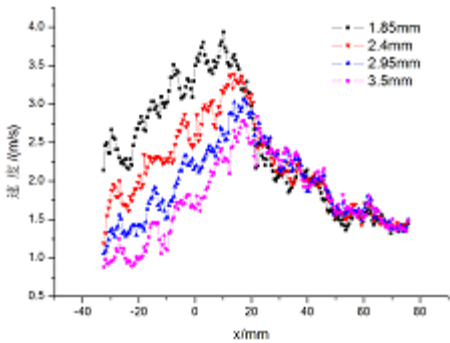


图 5 电压 15.36kV 时的诱导气流速度分布
Fig. 5 Induced flow velocity profiles with actuation voltage is 15.36kV

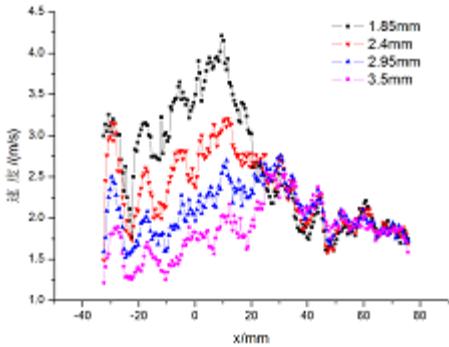


图 6 电压 17.28kV 时的诱导气流速度分布
Fig. 6 Induced flow velocity profiles with actuation voltage is 17.28kV

3.2 激励参数的影响

将频率固定在 10.5kHz,电压由 12.48kV 逐渐增加至 17.28kV,分析电压对诱导速度的影响。对每种状态,均取高度 1.3mm 的最大速度为记录值。这一最大速度出现位置稍有差异,但均处于 x 值为 7~10mm 这一范围内。

通过实验发现(图 8),对于各种激励器布局,在激励频率固定的情况下,诱导气流速度总体随电压的升高而增大;通过图中激励器 1、3、4 的变化曲线可知,在激励频率及激励器布局固定的情况下,诱导气流速度随着电压的升高逐渐增大,同时这一增大趋势又在逐步减弱,这一结果与文[8]一致,并初步验证了前文所述的速度公式。对于激励器 2、5,总体趋势也是诱导气流速度随着电压的升高而增大,但在中间位置这一趋势很不明显。通过流场分析发现,激励器 1、3、4 在电压较高时出现了较为明显的诱导涡(图 7),而激励器 2、5 在较低电压值时就开始出现诱导涡,并且随着电压的升高,诱导涡在逐步增强(图 9)。这可能就是激励器 2、5 曲线中间位置速度变化较小的原因: EHD 顺

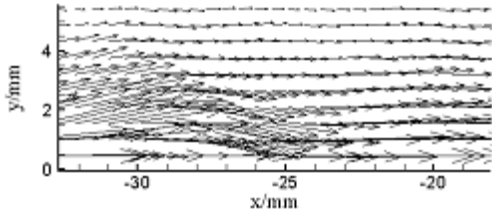


图 7 电压 17.28kV 时 $x=-30$ mm 附近的速度矢量图
Fig. 7 Velocity vector graph of the area around $x=-30$ mm with actuation voltage is 17.28kV

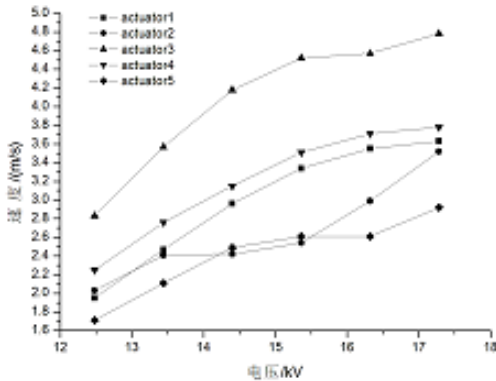


图 8 诱导速度随激励电压变化曲线
Fig. 8 Variation of induced flow velocity with actuation voltage

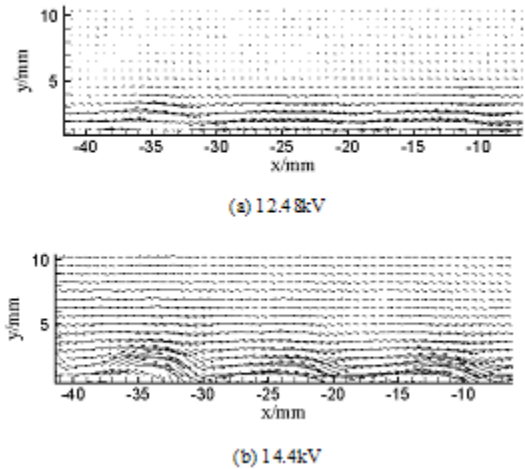


图 9 不同电压下的流场对比图
Fig. 9 The flow comparison chart with different applied actuation voltage

电加速作用所需能量来源于高压高频电源,增大电压能增大这一能量,进而增大电场强度,提高诱导速度,而一旦流场中出现了涡,这些新增的能量就会被消耗掉,不能被用于提高诱导速度。

将电压固定在 15.36kV,频率由 8.5kHz 逐渐增大至 14.5kHz,分析频率对诱导速度的影响。最大速度记录方式同前文所述,结果如图 10 所示。图中激励器 1 和 4 的曲线均为先升后降,说明在激励电压及激励器布局固定的情况下,存在一个最优频率,在这个频率下诱导速度最大,这一趋势与 Roth、VanDyken、李应红等人试验中所得到的趋势一致^[2,5,9],并且激励器 1 和 4 的最优频率并不相同,分别在 13.5kHz 和 12.5kHz 左右,从而验证了文[9]中激励器布局影响最优频率大小的推测。对于激励器 3,由于电源所限,没有找到最优频率,从已有数据看,诱导气流速度随频率的增大而逐渐增大。

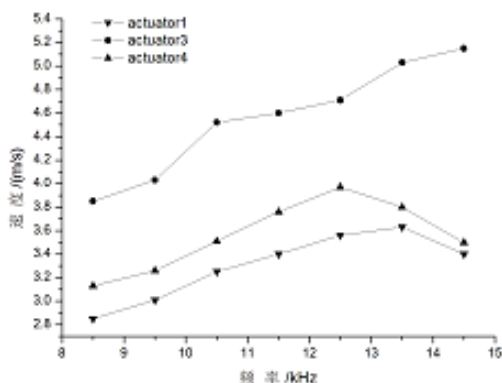


图 10 诱导速度随激励频率变化曲线

Fig. 10 Variation of induced flow velocity with actuation frequency

3.3 激励器布局的影响

通过纵向比较图 8 或图 10 中激励器 1、3、4 的诱导速度可知:对于给定的电压及频率,下电极宽度(d_2)及上、下电极水平间距(Δd)越大,加速作用越明显。这是因为较宽的下电极,以及较宽的上、下电极水平间距,意味着其生成的等离子体可以覆盖相对更大的范围,使吸入其中的中性气体融入到更多的动量交换过程之中,从而获得更高的诱导速度。由于图 8 中激励器 2、5 在第二组以后电压作用下的诱导速度受诱导涡的影响较大,故只和激励器 1 纵向比较前两组电压的诱导速度可知:上电极宽度对诱导速度影响较小,这是因为它对生成等离子体的覆盖范围影响较小;上表面

电极间距由 10mm 变至 9mm 时,使激励器“非对称性”变弱,进而使得诱导速度变小。另外,通过前文分析还可以得出:不合适的激励器布局容易使流场中出现诱导涡,进而影响加速效果。出现这种情况可能是由于不合适的激励器布局,使 8 对电极对附面层的加速作用不能很好的叠加,相互干扰,进而使得流场紊乱,产生诱导涡。因此,选取合适的激励器布局,从而获得更好的加速效果就显得尤为重要了。

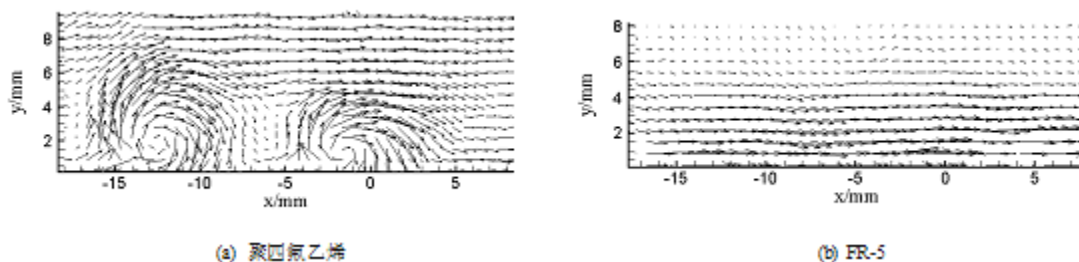


图 11 二种不同材料激励器诱导出的不同流场

Fig. 11 The different flow induced by two actuators of different insulated material

3.4 激励器材料及通电时间的影响

本文同时采用聚四氟乙烯和 FR-5 印刷电路板作为绝缘材料加工了布局完全一致的激励器(d_1 、 d_2 、 Δd 、 d_3 分别为 1mm、1mm、1mm、10mm)进行对比实验。通过实验发现(图 11),当施加的激励参数均为电压 14.4kV、频率 10.5kHz 时,聚四氟乙烯的激励器产生了明显的诱导涡,造成诱导速度较小:1.35m/s,而 FR-5 的激励器产生了明显的水平射流,获得了较大的诱导速度:2.85m/s。究其原因,一方面可能是由于电介质加热消耗了部分电源功率,而不同绝缘材料消耗的这部分功率不同;另一方面可能是由于绝缘材料相对介电常数不同(聚四氟乙烯为 2.65,FR-5 板为 4.75),导致电场不同,从而导致诱导气流速度的变化。因此,绝缘材料对诱导速度也有较大影响,想要获得较高的诱导速度,绝缘材料的选择也很重要。

通过实验还发现,当激励器累计通电时间超过 1 小时后,激励器上等离子体产生区域的绝缘材料明显变质,这时相比施加相同激励参数的刚通电状态,速度也有较大下降。这就对激励器绝缘材料的耐久性提出了要求。

4 结论

通过等离子体 EHD 顺电加速效应影响因素的实验研究,得出了以下结论:

(1) 沿诱导气流方向,越远离末根电极位置,沿垂直激励器平面向上方向(附面层以上),越远离激励器平面,等离子体加速作用越弱。

(2) 在激励频率及激励器布局固定的情况下,诱导气流速度随着电压的升高而逐渐增大;在激励电压及激励器布局固定的情况下,存在一个诱导气流速度最大的最优频率,并且不同的激励器对应不同的最优频率。

(3) 激励器布局是顺电加速作用的重要影响因素:下电极宽度,上、下电极水平间距对加速作用影响明显,而上电极宽度对加速作用影响较小。另外,激励器布局还能够影响诱导速度场的分布。

(4) 不同绝缘材料的激励器,在相同激励参数及激励器布局情况下,诱导出的流场有很大差异。

(5) 随着激励器通电时间的变长,等离子体产生区域的绝缘材料发生变质,进而影响加速作用。

参考文献:

- [1] 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. Development of Flow Control by Dielectric Barrier Discharge Plasma[J]. Science & Technology Review, 2008, 26(4): 87—92(in Chinese))
- [2] Enloe C L, McLaughlin T E, Van Dyken R D, et al. Responses of a single dielectric barrier discharge [J]. AIAA Journal, 2004, 42(3): 589—594.
- [3] Roth J R, Dai X. Optimization of the Aerodynamic Plasma Actuator as an Electrohydrodynamic (EHD) Electrical Device[R]. AIAA 2006-1203, 2006.
- [4] Reece Roth J, Hojung Sin, Raja Chandra Mohan Madhan. Flow re-attachment and acceleration by paraelectric and peristaltic electrohydrodynamic (EHD) effects. [C]//41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 6-9 January 2003, Reno, Nevada. AIAA 2003—531.
- [5] Roth J R. Aerodynamic Flow Acceleration using Paraelectric and Peristaltic Electrohydro-dynamic (EHD) Effects of a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma (OAUGDPTM)[J]. Physics of Plasma, 2003, 10(5): 1—10.
- [6] Post M L, Corke T C. Separation control on high angle of attack airfoil using plasma actuator [R]. AIAA Paper 2003—1024.
- [7] Sherman D M, Roth J R. Boundary Layers Using a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma. [C]//25th IEEE International Conference on Plasma Science, Raleigh, North Carolina, 1998.
- [8] Li Yiwen, Li Yinghong, Zhou Zhangwen, et al. Experimental Investigation on Induced Flow Velocity of Plasma Aerodynamic Actuation[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics&Astronautics, 2009, 26(1): 23—28.
- [9] 宋慧敏,李应红,苏长兵,等. 激励参数对等离子体 EHD 加速效应影响的试验研究[J]. 高压电器, 2006, 42(6): 435—437 (SONG Hui-min, LI Ying-hong, SU Chang-bing, et al. Experimental Studies of Excitation Parameters' Influences on Plasma EHD Acceleration Effect[J]. High Voltage apparatus, 2006, 42(6): 435—437(in Chinese))
- [10] Keane, Richard D. Adrian, Ronald J. Theory and simulation of particle image velocimetry[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1993, 2052: 477—492.

Experimental Studies on Influencing Factors of Plasma Paraelectric EHD Acceleration Effect

ZHOU Xiao-xu¹, ZHONG Cheng-wen¹, LI Kai¹, CHEN Xiao-peng²

(1. National Key Laboratory of Aerodynamic Design and Research, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The induced velocity fields of plasma actuators were measured quantitatively in quiescent air by using Particle Image Velocimetry (PIV). In the meantime, that the analysis of excitation parameters and other factors' influence on plasma paraelectric EHD acceleration effect was also conducted. It is found that under fixed frequency, the induced airflow velocity increases as the applied voltage increases; while under fixed voltage, the induced airflow velocity has a maximum value under an optimal frequency, and actuator with different configuration has a different optimal frequency. In addition, other factors' influences on the induced airflow velocity were analyzed preliminarily, such as actuator configuration, insulated material and power time.

Keywords: plasma; EHD; paraelectric; PIV