

# 平面线圈电磁耦合的沿面 DBD 气体放电加速诱导气流的实验研究

刘汝兵<sup>1</sup>, 孙伟<sup>1,2</sup>, 黄印阳<sup>1,2</sup>, 王萌萌<sup>1</sup>, 牛中国<sup>3</sup>, 林麒<sup>1</sup>

(1. 厦门大学物理与机电工程学院福建省等离子体与磁共振重点实验室, 厦门 361005;

2. 厦门航空有限公司, 厦门 361006; 3. 中航工业空气动力研究院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 为了提高典型沿面 DBD 平板激励器诱导气流速度, 通过实验研究了典型 DBD 平板激励器表面的磁场分布, 提出了在 DBD 平板激励器的上、下电极之间夹进平面线圈, 运用电磁耦合原理增强等离子体激励器放电效果, 从而加速 DBD 等离子体诱导气流的方法。探究了不同结构参数的电感线圈产生的电磁耦合作用对大气压下平板式 DBD 等离子体激励器放电加强的效果, 以及夹进平面线圈后加载电源的电压和频率对 DBD 放电的影响, 并利用粒子图像测速技术测量了电磁耦合作用下典型 DBD 等离子体诱导气流流场, 考察了其中电磁耦合对加速诱导气流的作用。实验结果表明, 运用电磁耦合作用可在一定程度上增强等离子体激励器的放电效果, 一些电感线圈产生的电磁耦合作用可显著改善 DBD 等离子体诱导气流的连续性和加厚流场区域。

**关键词:** 等离子体; 电磁耦合; 介质阻挡放电; 诱导气流; 平面电感线圈; 粒子图像测速

## Experimental Study on Accelerating the Gas Flow Induced by Planar Coil Electromagnetic Coupling Surface DBD Gas Discharge

LIU Rubing<sup>1</sup>, SUN Wei<sup>1,2</sup>, HUANG Yinyang<sup>1,2</sup>, WANG Mengmeng<sup>1</sup>, NIU Zhongguo<sup>3</sup>, LIN Qi<sup>1</sup>

(1. Fujian Key Laboratory of Plasma and Magnetic Resonance, School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering,

Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Xiamen Airlines, Xiamen 361006, China;

3. Aerodynamics Research Institute, AVIC, Harbin 150001, China)

**Abstract:** To accelerate the flow induced by typical surface DBD actuator, we studied the magnetic distribution on the surface of a typical DBD actuator qualitatively through experiments. We proposed a method that inductance coils between the upper electrode and the lower electrode were installed to enhance the discharge and increase the flow speed due to the electromagnetic coupling applied to the plasma actuator. Inductance coils with different structure parameters which could create various electromagnetic coupling impacts were used to improve the DBD plasma discharge. Furthermore, we measured the induced flow charts of DBD plasma actuators with electromagnetic coupling using the particle image velocimetry to study the electromagnetic coupling impact on increasing the flow speed induced by DBD plasma. The results show that, by applying electromagnetic coupling to the typical DBD plasma actuator, its discharge can be improved and the airflow induced by the plasma can be accelerated by some kinds of inductance coils, improving the induced flow in both continuity and thickness.

**Key words:** plasma; electromagnetic coupling; dielectric barrier discharge; induced flow; planar coil; particle image velocimetry

## 0 引言

在等离子体主动流动控制领域中, 利用介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)等离子体产生诱导气流, 进行主动流动控制, 已经被国内外众

多学者所研究<sup>[1-3]</sup>。研究结果表明采用高频高压连续波交流电激励的沿面 DBD 诱导气流速度较低(<10 m/s), 国外学者 Roth<sup>[4]</sup>、Corke<sup>[5]</sup>等测得诱导气流速度<6 m/s。Forte 等对表面介质阻挡放电激励器的放电参数进行了优化, 利用 4 个不对称表面介质阻挡放电激励器, 将诱导气流速度提高到 8 m/s<sup>[6]</sup>。国内空军工程大学<sup>[7]</sup>、厦门大学<sup>[8]</sup>、南京航空航天大学<sup>[9]</sup>、

基金资助项目: 福建省自然科学基金 (2010J01014)。

Project supported by Fujian Provincial Natural Science Foundation of China (2010J01014).

中国科学院工程热物理研究所<sup>[10]</sup>等实验测到的诱导气流速度也都 $<10\text{ m/s}$ 。在其应用研究方面,当来流速度较低( $<30\text{ m/s}$ )时,可以对流动边界层分离起到一定控制作用;当来流速度较高时,该方法的流动控制效果不明显<sup>[11-16]</sup>。究其原因,主要是由于沿面 DBD 等离子体的诱导气流能量较低造成的。

DBD 伴随着电磁现象,施加给等离子体激励器的是交变的正弦波高压交流电,而交变电场又产生交变磁场。由于等离子体激励器在工作时产生了电场和磁场,那么设法改变电磁场,将有可能对等离子体的产生以及对诱导气流的大小施加影响,这是本文开展对 DBD 放电进行电磁耦合实验的根据。

文献[17]中,采用有源恒定磁场作用于直流表面电弧放电产生的等离子体,使带电粒子受到恒定磁场的 Lorentz 力作用,产生整体定向移动。但是,需要恒定磁场作为外加能量源。

本文提出通过无源的平面线圈产生电磁耦合作用来改变 DBD 等离子体激励器放电状态,无需外加能量源,仅依靠 DBD 放电产生的交变电磁场通过电感线圈的电磁感应,改变放电区域电磁场强度,进而使得带电粒子的运动发生变化,从而影响 DBD 放电等离子体诱导气流特性。

首先,通过 DBD 放电与磁粉显示实验来定性分析放电过程中磁场的分布情况;其次,设计电磁耦合实验方式,将不同结构参数的平面电感线圈置于 DBD 激励器上下电极之间进行实验;然后,测量电磁耦合作用下典型平板式 DBD 等离子体激励器的放电特性,定量研究电磁耦合作用对等离子体放电的加强效果;最后,利用粒子图像测速(PIV, particle image velocimetry)技术测量电磁耦合作用下典型 DBD 平板式等离子体激励器诱导的气流流场,研究电磁耦合作用对加速 DBD 等离子体诱导气流流速的影响效果。

## 1 DBD 放电磁场显示实验

沿面 DBD 激励器放电过程中,加载高频高压交变电源产生交变电场的同时,也必定产生变化磁场。为了定性分析 DBD 放电过程中磁场的分布情况,通过磁粉显示实验方法对其进行研究。因为在磁场作用下,磁粉沿磁力线分布,所以在放电过程中磁粉分布的变化情况将在一定程度上反映出沿面 DBD 放电磁场的分布状态。

图 1(a)所示为典型梳状 DBD 激励器,图中与极板上表面黑色电极条平行的阴影为下表面电极条。实验时为避免诱导气流对磁粉产生作用,先将一张白纸覆盖在激励器上表面,并在白纸上均匀地撒上磁粉(见图 1(b))。在放电过程中仔细观察并拍摄磁粉的变化情况。

当电极板工作时(图 1(c)),磁粉逐渐移动(图中黑色阴影为磁粉铺盖范围),并集中到各对电极放电区域(明亮条状区)的中心,直至形成图 1(d)的分布情况。图 1(d)中磁粉呈现出电极条走向,条状磁粉右侧存在明显的空白区域。磁粉移动主要是受到沿面 DBD 放电时产生的磁场的作用。

DBD 激励器上有 5 对电极,图 1(d)中本应出现 5 条磁粉集中的条状区域。但从图 1(c)中的磁粉分布阴影中可看出,由于磁粉铺设时白纸盖住了电极条,在左侧第 1 条放电区上覆盖的磁粉很少,放电时向最左侧电极条放电区域集中磁粉非常少,所以图 1(d)中只有 4 条磁粉集中的条状区域。

实验结果表明,DBD 放电过程中产生了较强磁场,并且磁场作用较强区域主要在电极条放电区域。放电时产生的磁场对诱导气流的产生所起的作用实际上是不能被完全忽略掉的。

通过上述定性实验研究,说明电磁耦合作用改善区域应该选择在电极对放电区域附近。为下述的 DBD 气体放电电磁耦合实验方式提供了设计依据。

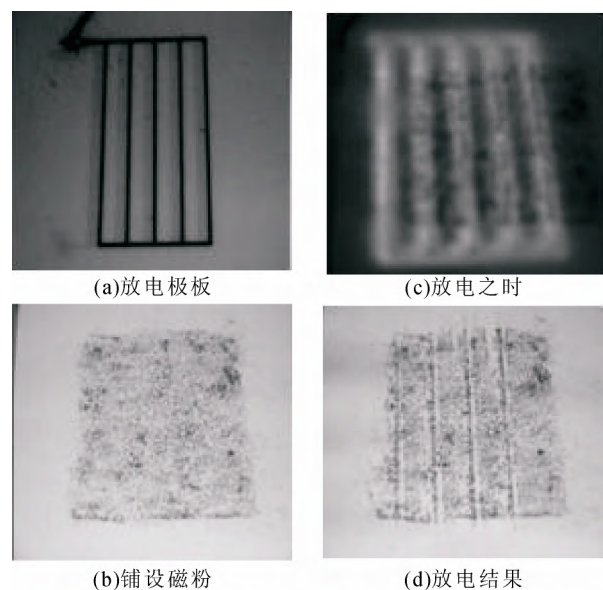


图 1 放电过程及磁粉分布情况

Fig. 1 Discharge process and distribution of magnetic powder

## 2 沿面 DBD 气体放电电磁耦合实验装置

### 2.1 电磁耦合 DBD 等离子体激励器

上述 DBD 磁场磁粉显示实验结果表明, 在电极对放电区域磁场作用最强。若在其附近加入无源的平面电感线圈, DBD 放电时, 平面电感线圈处于交变电磁场中, 会产生感应电动势。该电动势通过电磁感应耦合作用, 使得放电区域的交变电场和磁场的强度发生变化。电感线圈参数不同, 电磁感应耦合作用不同, 或促进, 或阻碍线圈放置区域的放电电磁场, 从而对等离子体中的带电粒子运动产生一定影响, 改变沿面 DBD 激励器放电效果, 并影响其诱导气流流场特性。

无源平面电感线圈具有体积小、无需外加输入能量的优点。图 2 所示为本文设计的几种平面电感线圈, 其中图 2(a)为漆包线手工制作的方形和圆形平面电感线圈, 图 2(b)为采用印刷电路板技术制作的平面电感线圈。由于后者可精确设计其结构参数, 故本文采用后者作为电磁耦合激励源, 用于改进典型的 DBD 激励器。

本文的电磁耦合 DBD 等离子体激励器由上、下绝缘电介质层、若干对电极及平面电感线圈组成。典型的 DBD 等离子体激励器结构如图 3 所示。其中上电极暴露在大气中, 下电极埋在电介质材料里。当电极如图 3 采用非对称布置时, 放电将产生定向诱导气流。

图 4 所示为本文的电磁耦合 DBD 等离子体激励器的结构。图 4(a)中, 激励器的上电极宽度为  $W_1$ , 下电极宽度为  $W_2$ ,  $D_1$  表示电极对间距,  $D_2$  表示上、下电极间距, 以及用  $N$  表示电极对的数目。如图 4(b)所示, 电感线圈长度为  $L$ , 宽度为  $H$ , 相邻线圈距离为  $T$ 。本文采用纯度 96% 的三氧化二铝陶瓷材料作为绝缘电介质基板, 厚度为 0.63 mm, 上覆平行铜膜电极。实验中选择电磁耦合等离子体激励器参数如表 1、表 2 所示。实验所用等离子体激励器电源为南京苏曼电子公司出品的 CTP-2000K 型等离子体电源。

### 2.2 流场测量系统

PIV 粒子图像测速实验仪器配有一个可产生波长为 532 nm 绿光的双脉冲 Nd:YAG 激光器, 一台分辨率为 2 048 像素×2 048 像素的 Imager pro X CCD 摄像机, 其图像采集速率为 14 帧/s。示踪粒子为橄榄油加压后产生的烟雾。测量时将等离子体激

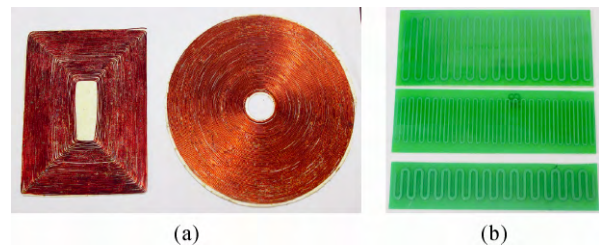


图 2 平面电感线圈

Fig.2 Inductance coils

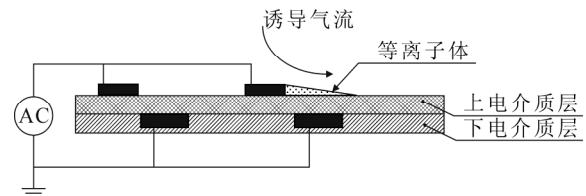
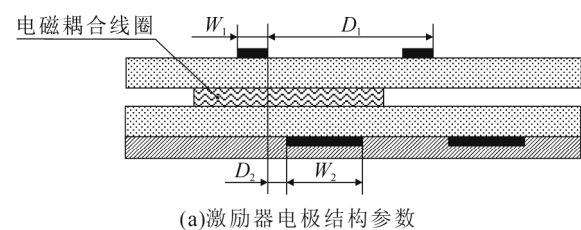
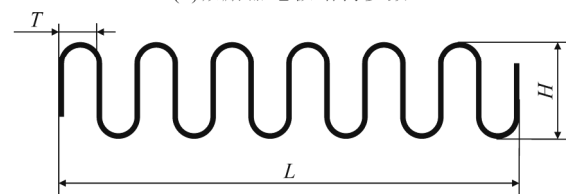


图 3 沿面 DBD 放电等离子体诱导气流示意图

Fig.3 Flow induced by plasma



(a)激励器电极结构参数



(b)电感线圈结构参数

图 4 电磁耦合 DBD 等离子体激励器参考图

Fig.4 Electromagnetic coupling DBD plasma actuator's reference

表 1 电极结构参数

Table 1 Structure parameters of electrodes

| 编号 | $W_1/mm$ | $W_2/mm$ | $D_1/mm$ | $D_2/mm$ | $N$ |
|----|----------|----------|----------|----------|-----|
| I  | 3        | 7        | 27       | 1        | 3   |
| II | 3        | 5        | 8        | 1        | 5   |

励器水平放置在专用支架上, 测量位置为垂直于激励器板面的中央平面。每个实验状态均采集 20 帧图像, 进行时均处理后可得到该状态下的流场信息。

## 3 沿面 DBD 气体放电电磁耦合实验结果及分析

### 3.1 电感线圈对 DBD 放电的加强效果

为了研究电感线圈电磁耦合作用对 DBD 等离

表 2 电感线圈结构参数 ( $L=120\text{ mm}$ )

Table 2 Structure parameters of inductance coils ( $L=120\text{ mm}$ )

| 编号    | H/mm | T/mm | 编号    | H/mm | T/mm |
|-------|------|------|-------|------|------|
| 10/10 | 10   | 10   | 30/10 | 30   | 10   |
| 10/3  | 10   | 3    | 30/3  | 30   | 3    |
| 10/2  | 10   | 2    | 30/2  | 30   | 2    |
| 10/1  | 10   | 1    | 30/1  | 30   | 1    |
| 20/10 | 20   | 10   | 40/10 | 40   | 10   |
| 20/3  | 20   | 3    | 40/3  | 40   | 3    |
| 20/2  | 20   | 2    | 40/2  | 40   | 2    |
| 20/1  | 20   | 1    | 40/1  | 40   | 1    |

子体激励器的放电影响效果, 分别测量了在表 1 中编号 I 的等离子体激励器不夹线圈和夹入表 2 中所列不同结构参数平面电感线圈的放电特性。实验过程中加载一定电压后, 通过调节等离子体电源频率, 使得放电电流达到最大。此时 DBD 激励器消耗的功率最大, 诱导气流的速度最大, 此频率为 DBD 激励器放电的最佳频率。

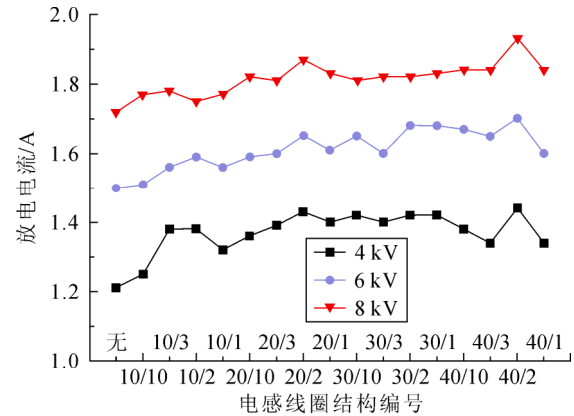
图 5 反映了不同结构参数的平面电感线圈对 DBD 激励器最大放电电流及最佳放电频率的影响。图 6 则显示了同一加载电压(8 kV)、放电频率下, 不同结构参数的平面电感线圈类型 DBD 激励器的对放电电流的影响。

如图 5 所示, 在同一加载电压下, 最大放电电流及此时的放电频率(即最佳放电频率)随着电感线圈的结构参数变化而变化。电感线圈结构参数不同时, 其产生的电磁耦合作用也不同。当电感线圈参数  $H=40\text{ mm}$ 、 $T=2\text{ mm}$  时, 与无电感线圈情况相比, 放电电流增加了 12%, 可见该结构参数的线圈产生的电磁耦合作用对等离子体激励器放电具有较好的加强作用。此外, 在不同加载电压下, 相同结构参数的电感线圈, 放电电流随着电压的增大而显著增加, 最佳放电频率随着加载电压的增大而降低。

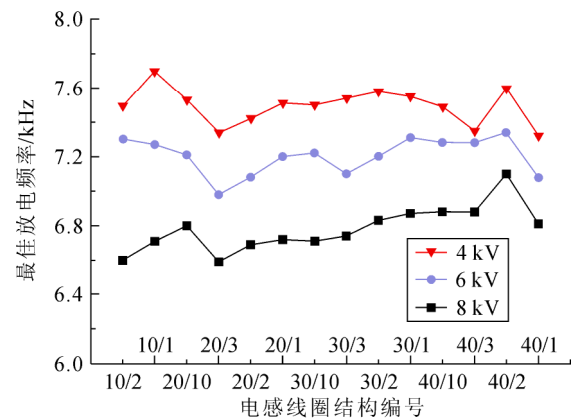
由图 6 可见, 在同一加载电压、放电频率下, 不同结构参数的线圈对放电电流有不同影响。在不同加载电压频率下, 其电磁耦合作用效果差异较大。说明不同参数的电感线圈, 在不同放电频率下, 产生的电磁耦合作用不同。

### 3.2 电磁耦合等离子体加速诱导气流 PIV 实验结果及分析

为了考察电磁耦合作用对等离子体诱导气流的影响, 根据上述电感线圈产生电磁耦合作用的大小, 选择了对等离子体激励器放电增强效果较好的表 2 中编号为 10/2、20/2 及 40/2 的电感线圈, 对表



(a)最大放电电流



(b)最佳放电频率

图 5 电磁耦合 DBD 等离子体激励器放电特性

Fig.5 Electromagnetic coupling DBD plasma actuator's discharge characteristics

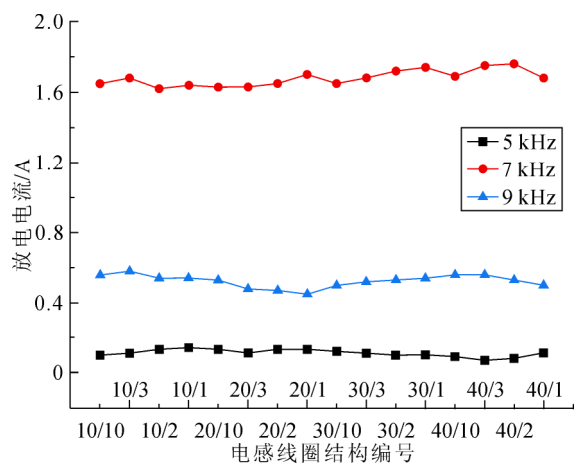


图 6 不同频率下放电电流

Fig.6 Discharge currents at different frequencies

1 中编号 II 的等离子体激励器在不夹线圈和夹入线圈的情况下, 分别测量了诱导气流流场。放电时, 加载电压为 9 kV, 流场测量结果如图 7 所示。图 7 中(a)为不夹线圈时的  $x$  方向速度  $v_{xa}$  云图, (b)-(d)

分别为夹入表 2 中编号为 10/2、20/2 及 40/2 的电感线圈后的  $v_{xa}$  云图。

比较可知, 在同一加载电压下, 不加线圈时近激励器壁面流场的气流速度和尺寸较小, 主要集中在激励器板垂直距离 10 mm 内, 且贴近板面诱导气流比较零散, 5 对电极接力效果较差; 对上层气流的带动作用不明显, 上层气流速度大部分  $<1$  m/s。

夹入 20/2 线圈后, 激励器产生的等离子体诱导气流作用范围显著增强且效果最佳, 贴近板面诱导气流连续, 5 对电极接力效果得到显著改善; 对上层气流的带动作用明显, 在激励器  $x$  向距离 100 mm 之后, 垂直距离 10 mm 以上, 流场速度大部分  $>1$  m/s。40/2 线圈也起到类似作用, 但是增强效果弱于 20/2 线圈。

而夹入 10/2 线圈后, 激励器产生的等离子体诱导气流控制作用反而显著减小, 作用范围只有在  $x$  向距离 100 mm, 垂直距离 5 mm 以内。

以上结果表明, 夹入不同结构参数线圈, 对 DBD 放电影响的效果不同, 例如编号为 20/2、40/2 线圈的电磁耦合作用, 增强了激励器放电强度, 诱导气流的流场特性得到改善, 可以带动离激励器表面较远的上层气流。由此可见, 通过电磁耦合作用可以在一定程度上增强典型 DBD 等离子体诱导气流对流场的控制作用。但是, 编号 10/2 线圈的电磁耦合作用, 却起到相反作用。

## 4 结论

1) DBD 放电磁场作用较强区域在电极条放电区域。

2) 电磁耦合作用可以明显增大典型等离子体激励器的放电强度。

3) 电磁耦合作用与线圈的结构参数有紧密的关系, 不同结构参数的电感线圈产生的电磁耦合作用不同, 编号为 20/2、40/2 的电感线圈改善了 DBD 等离子体诱导流场特性, 而编号为 10/2 的电感线圈起到相反作用。

4) 在编号为 20/2 的电感线圈电磁耦合作用下, 激励器产生的等离子体诱导气流作用范围显著增强且效果最佳, 贴近板面诱导气流连续, 多对电极接力效果得到显著改善, 诱导气流的影响可扩展到距激励器板面垂直距离 10 mm 以上。

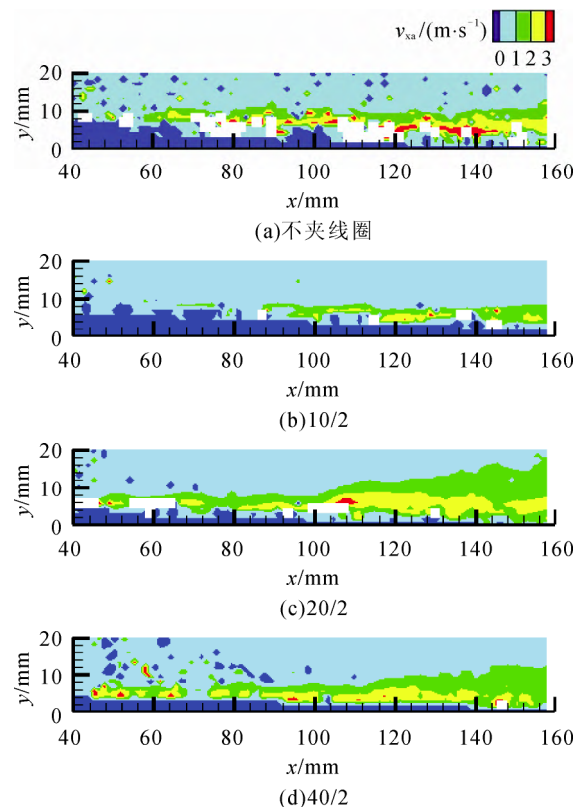


图 7 加载 9 kV 时流场测量结果

Fig.7 Flow chart under 9 kV load

## 参考文献 References

- [1] 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(1): 505-529.
- [2] 李应红, 吴 云. 等离子体流动控制技术研究进展[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2012, 13(3): 1-5.  
LI Yinghong, WU Yun. Progress of research on plasma flow control technology[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural science edition), 2012, 13(3): 1-5.
- [3] Wang J J, Choi K S, Feng L H, *et al.* Recent developments in DBD plasma flow control[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2013, 62: 52-78.
- [4] Roth J R, Dai X. Optimization of the aerodynamic plasma actuator as an electrohydrodynamic (EHD) electrical device[R]. Reston, USA: AIAA, 2006.
- [5] Thomas F O, Corke T C, Iqbal M, *et al.* Optimization of dielectric barrier discharge plasma actuators for active aerodynamic flow control[J]. AIAA Journal, 2012, 47(9): 2169-2178
- [6] Forte M, Jolibois J, Pons J, *et al.* Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity: application to airflow control[J]. Experiments in Fluids, 2007, 43(6): 917-928.
- [7] 潘 波, 沈锦明, 林 麒. 等离子体激励器流场测量及诱导推力实验[J]. 推进技术, 2011, 32(1): 146-150.  
PAN Bo, SHEN Jinming, LIN Qi. Experiment on flow field and thrust induced by plasma actuators[J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(1): 146-150.

- [8] 宋慧敏, 张明莲, 贾敏, 等. 对称布局等离子体气动激励器的放电特性与加速效应[J]. 高电压技术, 2011, 37(6): 1465-1470.  
SONG Huimin, ZHANG Minglian, JIA Min, *et al.* Discharge characteristics and acceleration effect of symmetric plasma aerodynamic actuators[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(6): 1465-1470.
- [9] 史志伟, 范本根. 不同结构等离子体激励器的流场特性实验研究[J]. 航空学报, 2011, 32(9): 1583-1589.  
SHI Zhiwei, FAN Bengen. Experimental study on low field characteristics of different plasma actuators[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(9): 1583-1589.
- [10] 李钢, 杨凌云, 聂超群, 等. 等离子体激励频率对压气机扩稳效果的影响[J]. 高电压技术, 2012, 38(7): 1629-1635.  
LI Gang, YANG Lingyuan, NIE Chaoqun, *et al.* Effect of plasma exciting frequency on compressor stable operating range improvement[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(7): 1629-1635.
- [11] Zhang P F, Wang J J, Feng L H, *et al.* Experimental study of plasma flow control on highly swept delta wing[J]. AIAA Journal, 2010, 48(1): 249-253.
- [12] 赵小虎, 李应红, 岳太鹏, 等. 等离子体气动激励抑制高负荷压气机叶栅流动分离的实验研究[J]. 高电压技术, 2011, 37(6): 1521-1528.  
ZHAO Xiaohu, LI Yinghong, YUE Taipeng, *et al.* Experimental investigation of flow separation control on highly loaded compressor cascade by plasma aerodynamic actuation[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(6): 1521-1528.
- [13] 程钰锋, 聂万胜, 车学科. 临近空间介质阻挡放电等离子体气动激励效果的数值分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(6): 1542-1547.  
CHEN Yufeng, NIE Wansheng, CHE Xueke. Numerical analysis of dielectric barrier discharge plasma aerodynamic actuation in near space[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(6): 1542-1547.
- [14] He W, Niu Z G, Pan B, *et al.* Experimental investigation on improving the aerodynamic performance of swept aircraft by DBD plasma[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 110-116(15): 3234-3242.
- [15] 王万波, 黄勇, 黄宗波, 等. 介质阻挡放电等离子体对 NACA0015 翼型流动控制的 PIV 实验研究[J]. 实验流体力学, 2012, 26(2): 1-5.  
WANG Wanbo, HUANG Yong, HUANG Zongbo, *et al.* PIV measurement of dielectric barrier discharge plasma flow control on NACA0015 airfoil[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2012, 26(2): 1-5.
- [16] 王斌, 李华星, 郝江南. 新型等离子体激励器对翼型的减阻效果[J]. 应用力学学报, 2013, 30(2): 223-227/304.  
WANG Bin, LI Huaxing, HAO Jiangnan. The drag-reducing effect of new plasma actuator on airfoil[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013, 30(2): 223-227/304.
- [17] Kalra C S, Zaidi S H, Miles R B, *et al.* Shockwave-turbulent boundary layer interaction control using magnetically driven surface discharges[J]. Experiments in Fluids, 2011, 50(3): 547-559.



LIU Rubing

Ph.D. candidate



LIN Qi

Ph.D., Professor

刘汝兵

1984—, 男, 博士生

研究方向为等离子体特性及其应用技术

E-mail: lrb@sa.buaa.edu.cn

林麒(通信作者)

1954—, 女, 博士, 教授, 博导

1978年2月考入南京航空学院航空涡轮发动机设计专业, 1988年4月毕业于南京航空学院动力工程系, 期间获工学学士、硕士、博士学位。1988年5月起任教于厦门大学。主要从事低温等离子体特性测试及其应用研究。

E-mail: qilin@xmu.edu.cn

收稿日期 2013-10-10 修回日期 2014-05-08 编辑 肖铮