

文章编号: 1000-8055(2010)08-1791-08

介质阻挡放电等离子体气动激励的动量特性

赵小虎, 李应红, 李益文, 岳太鹏, 王学德
(空军工程大学 工程学院, 西安 710038)

摘 要: 从诱导气流速度和体积力两个方面开展了介质阻挡放电等离子体气动激励的动量特性研究, 对不同激励参数下的诱导气流速度进行了测量与结果分析; 通过对体积力的实验测量与理论计算, 对比研究了体积力的变化规律与主要影响因素. 结果表明: 等离子体气动激励可以增大气流速度, 但随着气流速度的增大, 等离子体气动激励的加速效果减弱; 激励电压或激励频率增大, 体积力均表现为线性增加, 但激励电压增大时可以更好的增大体积力; 与增大电极内间距相比, 增大下层电极宽度可以产生更大的体积力.

关 键 词: 诱导; 体积力; 介质阻挡放电; 等离子体; 附面层

中图分类号: V211.7 文献标识码: A

Momentum characteristic of dielectric barrier discharge plasma aerodynamic actuation

ZHAO Xiao-hu, LI Ying-hong, LI Yi-wen, YUE Tai-peng, WANG Xue-de
(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Momentum characteristic of dielectric barrier discharge plasma actuation was studied from induced airflow velocity and body force. The former one under different actuation parameters was measured and analyzed, and the latter one was compared by the measured and calculated values to consider the variable regular and key factors for body force. Results show that the reference velocity can be enhanced by plasma actuation, but the acceleration effect is weakened with the rise of incoming velocity; the body force values increase linearly with the rise of actuation voltage or frequency, but increase more with the former one; increasing low-layer electrode width can enhance body force better than inner electrode distance.

Key words: induce; body force; dielectric barrier discharge; plasma; boundary layer

等离子体流动控制是基于等离子体气动激励的新型主动流动控制技术, 已成为国际上空气动力学和气动热力学领域新兴的研究热点, 并且在抑制流动分离与飞行器减阻增升、发动机扩稳增效等方面取得了许多重要的研究进展^[1-7].

在肯定等离子体流动控制的同时, 还存在许多制约其发展和应用的关键科学问题, 例如: 如何深入理解等离子体气动激励的动量特性, 实现向气流的更多动量注入, 从而产生有效的激励作用

是大家关注的研究热点. 诱导气流速度和体积力作为动量特性的两个重要方面, 是提高流动控制能力的关键, 而介质阻挡放电等离子体气动激励诱导的气流速度最大只有 8 m/s, 体积力一般仅为几个毫牛到几十个毫牛, 限制了等离子体气动激励的作用范围与激励效果, 而且制约诱导气流速度和体积力提升的物理机制尚不清晰, 如何在这方面取得突破, 已成为等离子体流动控制基础研究的一个重要课题. 为此, 国内外许多科研机构开

收稿日期: 2009-07-04; 修订日期: 2010-03-16
基金项目: 国家自然科学基金(50906100); 教育部新世纪优秀人才计划
作者简介: 赵小虎(1986-), 男, 山东济南人, 博士生, 主要研究方向为等离子体流动控制.

展了大量的相关实验研究. 例如: 美国航空航天局格伦研究中心(NASA-GRC) Hoskinson 等人利用滞止探针测量法与电子平衡测量法对静止条件下介质阻挡放电的体积力进行了分析比较, 并就如何提高体积力大小与效能的问题进行了深入研究^[8]. 日本航空宇航开发署 Sato 等人进行了等离子体气动激励在典型电压波形、激励器布局 and 绝缘材料下的实验研究, 对诱导气流速度和体积力进行了详细的测试^[9].

根据伯努利方程, 使用自行研制的速度测量系统直接对介质阻挡放电等离子体气动激励作用下的气流速度进行测量, 并对结果进行分析; 根据动量平衡法, 将等离子体气动激励器作为控制体, 对其取动量方程和连续方程, 将静止条件下测得的诱导气流速度分布作为源项代入方程求解, 可以推导出体积力的理论计算公式, 并与电子分析天平测得的体积力进行对比分析. 为了解决诱导气流速度只能进行单点测量而不能连续测量的缺陷, 将速度分布进行高斯拟合后求解体积力.

通过诱导气流速度的测量以及体积力的对比分析, 总结诱导气流速度和体积力随激励参数(激励电压、激励频率和激励器布局等) 的变化规律, 找到影响动量注入的因素, 以便更好的理解等离子体流动控制“如何起作用”、“如何提高作用效果”等问题.

1 原理介绍

对交错布置在激励器绝缘介质上下两侧的电极通以高压高频的交流电, 附近的空气在强电场作用下被电离成为等离子体, 这种形式的放电称为介质阻挡放电. 其中, 离子在空间不均匀电场的作用下向电场梯度方向运动, 在运动过程中与环境空气分子碰撞, 通过向静止空气注入动量诱导激励器表面的空气发生定向运动, 产生加速运动的诱导气流, 其机理示意图如图 1 所示.

在前半个放电周期, 上层电极是负极, 其释放

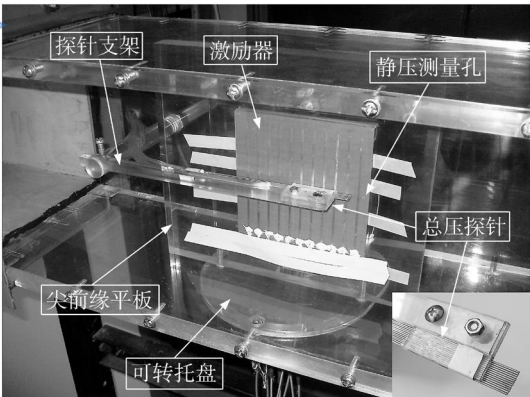
出的电子在电场作用下向下游运动, 中途与中性粒子发生碰撞使其电离产生正离子, 因为下层电极覆盖着绝缘材料, 电子驻留在绝缘材料表面, 与此同时, 正离子向上游运动, 并将动量传递给中性粒子, 从而形成了指向上游的作用力; 当极性改变后, 之前聚集在绝缘材料表面的电子使电子数目增加, 计算表明后半周期平均离子密度是前半周期的十多倍, 因此产生的作用力比前半周期大很多. 而在一个完整的放电周期结束前, 几乎所有的电子都进到上层电极中, 这样下一个放电周期开始时只有少量几个电子. 一个放电周期结束, 作用力得到积累, 形成指向下游的顺电 EHD(electrohydrodynamics) 体力, 即体积力.

2 实验系统

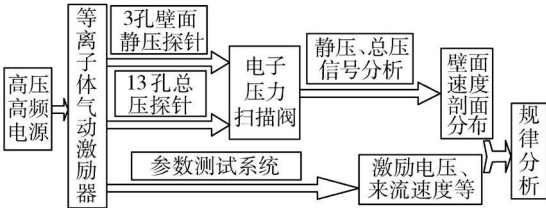
实验系统包括低速直流风洞、高压高频电源、等离子体气动激励器、数据测量系统和电参数测试系统等.

2.1 低速直流风洞

低速直流风洞的风速范围为 5~ 110 m/s, 速度测量是在风洞的实验段内进行, 其尺寸为 0. 2 m×0. 2 m×0. 6 m, 其实验段设计与气流速度测量流程如图 2 所示.



(a)



(b)

图 2 实验段设计与速度测量流程

Fig. 2 Photo of experimental section design and velocity measurement procedure

图 1 气流加速机理示意图

Fig. 1 Sketch map of airflow acceleration mechanism

2.2 高压高频电源

高压高频电源由多相信号发生器和 4 个等离子体发生器模块组成, 其输出频率为 5~ 30 kHz, 电压为 0~ 25 kV 连续可调, 占空比(duty cycle) 为 5%~ 100% 连续可调.

2.3 等离子体气动激励器

激励器采用聚四氟乙烯作为绝缘介质, 铜箔为电极. 根据实验需求, 选用了 4 种布局不同的激励器, 并进行标号, 其结构示意图如图 3 所示. 激励器的主要变化参数如表 1 所示.

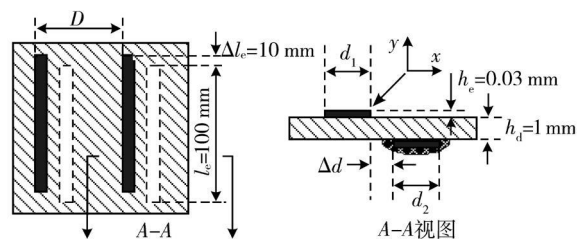


图 3 等离子体激励器结构示意图

Fig. 3 Configuration diagram of plasma actuator

表 1 激励器的主要变化参数

Table 1 Parameters of plasma aerodynamic actuator

几何参数	1 号	2 号	3 号	4 号
上层电极宽度 d_1 / mm	2	2	2	2
电极间间距 Δd / mm	0	0	1	0
下层电极宽度 d_2 / mm	2	2	2	4
电极组间距 D / mm	10			
电极组数目	11	1	1	1

由于等离子体气动激励诱导的气流在激励器表面会产生剪切力, 影响测量结果的准确性, 应减小气流与激励器表面的接触面积, 因此使用 2~ 4 号激励器进行体积力的实验测量; 根据低速直流风洞实验段的设计要求, 使用 1 号激励器进行诱导气流速度的实验测量.

2.4 数据测量系统

数据测量系统主要包括速度测量系统和体积力测量系统.

速度测量系统包括自行研制的 13 孔总压探针、3 孔激励器壁面静压孔和 DSY-JB 电子压力扫描阀等, 其中压力扫描阀的测量量程为 ± 7 kPa, 测量精度优于 0. 1% FS, 速度测量以伯努利方程为依据, 通过压差获取单点速度.

体积力测试系统由梅特勒-多利多 AB204-S 型电子分析天平及数据采集系统等组成, 其可读性为 0. 1 mg, 重复性为 0. 1 mg, 量程为 0~ 220 g.

2.5 电参数测试系统

电参数测试系统由 P6015A 型高压探针、P6022 型电流探针和 TDS3012B 型示波器等组成, 分别用来测量放电过程中激励电压、激励频率和放电电流等参数.

3 诱导气流速度结果与分析

在低速直流风洞中开展实验, 首先进行静止空气条件下的诱导气流速度测量, 然后开启风洞, 利用速度测量系统对尖前缘平板表面的气流基准速度进行测量, 随即开启激励器进行重复测量. 在数据采集过程中保持风洞一直运行, 避免风机启动时对风洞品质的影响.

3.1 气流速度随激励电压的变化

固定激励频率为 23 kHz, 调节激励电压, 在来流速度 u 分别为 0, 8 m/s 和 15 m/s 时, 对 1 号激励器上层电极下游 $x = 5$ mm (对应雷诺数分别为 0, 3.56×10^4 与 6.67×10^4) 和 $x = 15$ mm (对应雷诺数分别为 0, 4.11×10^4 与 7.70×10^4) 处等离子体气动激励作用下的气流速度进行测量, 结果如图 4 所示.

由图 4 可以看出: 等离子体气动激励诱导的气流速度随激励电压的增大而增加. 在静止空气条件下, 等离子体气动激励诱导的气流速度沿高度方向的分布规律为: 从壁面速度为 0 开始增加, 在距壁面 0. 5~ 1. 5 mm 范围内达到最大值, 然后开始逐渐减小, 最后趋于 0; 沿下游方向的分布规律为诱导气流速度逐渐减小. 在有来流条件下, 等离子体气动激励可以增大气流基准速度, 使速度分布变得饱满, 从而改变平板附面层的流动状态.

3.2 气流速度随激励频率的变化

固定激励电压为 12 kV, 调节激励频率, 在来流速度 u 分别为 0, 8 m/s 和 15 m/s 时, 对 1 号激励器上层电极下游 $x = 5$ mm 和 $x = 15$ mm 处等离子体气动激励作用下的气流速度进行测量, 结果如图 5 所示.

由图 5 可以看出: 随着激励频率的增大, 等离子体气动激励诱导的气流速度略有增加, 但作用不明显. 等离子体气动激励作用下的气流速度沿高度或下游方向的分布规律与图 4 的结果一致.

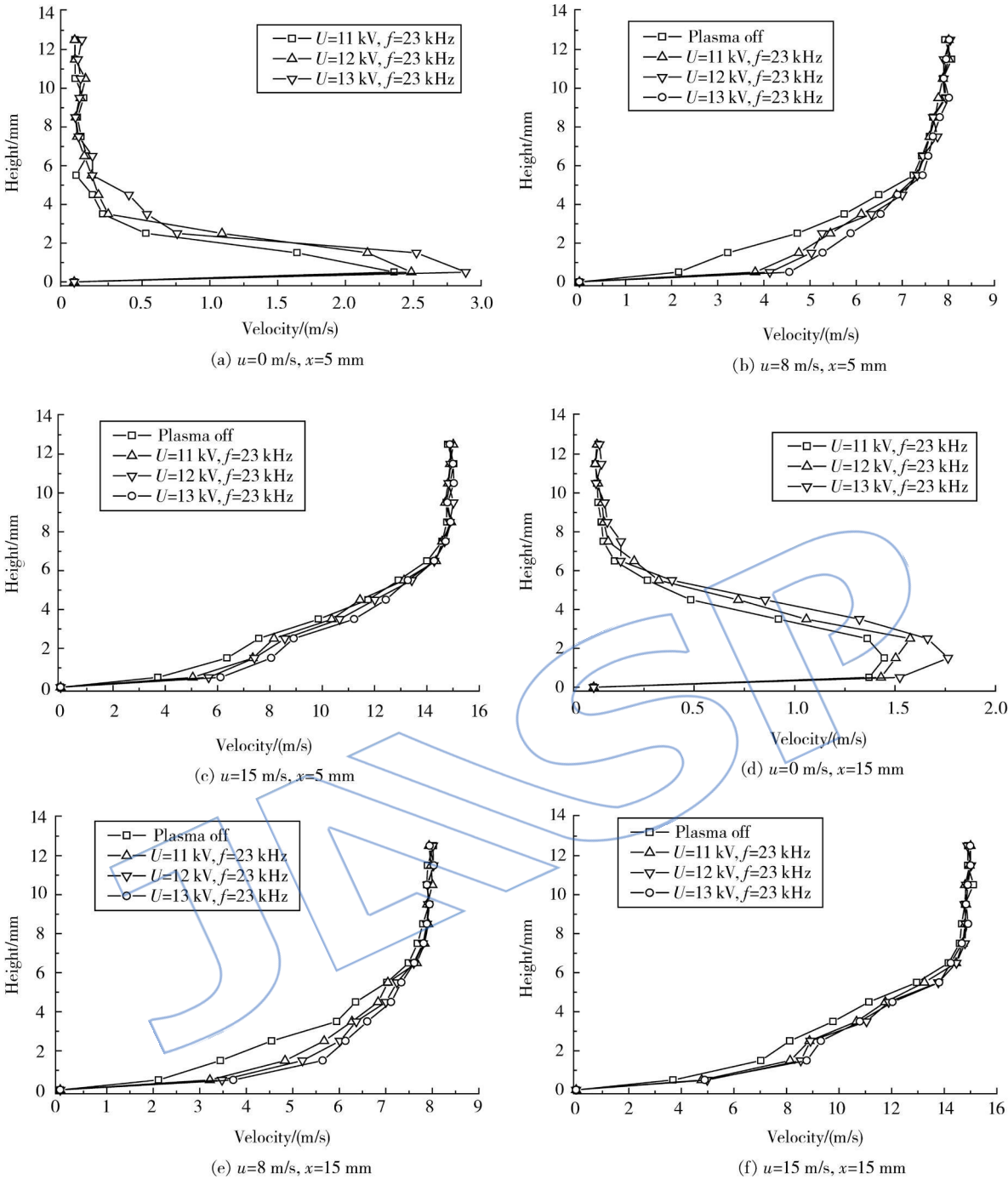


图 4 来流条件下气流速度分布随激励电压的变化

Fig.4 Profile of airflow velocities under incoming flow while actuation voltage changes

3.3 不同激励参数下的激励效果比较

为比较激励电压与激励频率变化时等离子体气动激励的作用效果, 将图 4 与图 5 的结果进行提取处理, 可以得到气流速度相对于基准速度随激励参数的相对变化率, 结果如图 6 所示.

由图 6 可以得出: 在靠近壁面 4 mm 高度范围内, 激励电压作用下的气流速度相对变化率远大于激励频率作用下的相对变化率; 而远离壁面

时相对变化率均趋于 0, 结合图 4 与图 5, 说明在靠近壁面时, 激励电压变化时的激励效果明显强于激励频率; 在远离壁面时, 激励参数的变化均没有明显的加速效果. 以图 6(a) 中气流速度随激励电压、激励频率的相对变化率为例, 当来流速度由 8 m/s 增大到 15 m/s 时, 相对变化率的最大值分别为 $0.1664 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kV}^{-1}$, $0.0824 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kHz}^{-1}$ 和 $0.1557 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kV}^{-1}$, $0.0743 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot$

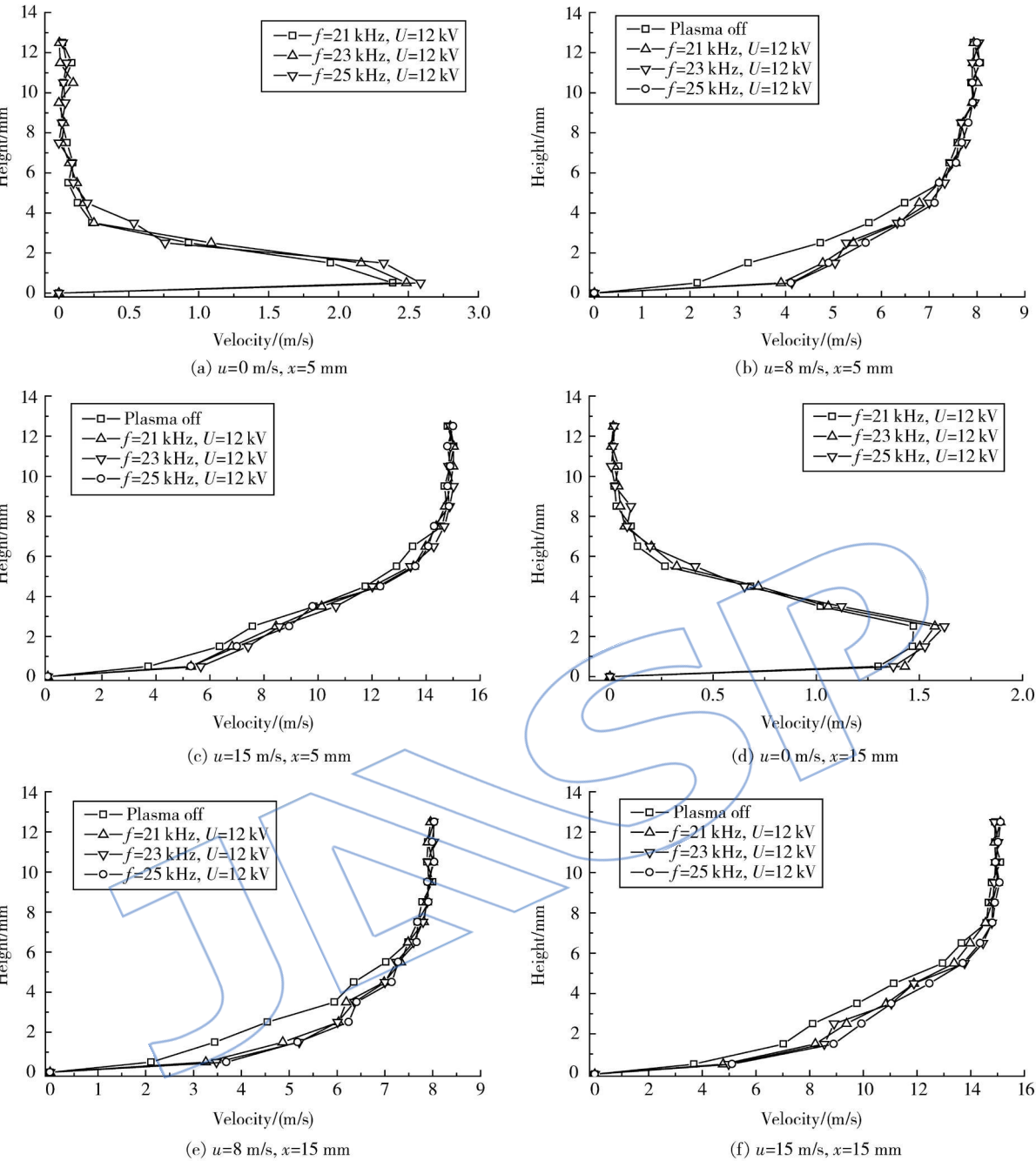


图 5 来流条件下气流速度分布随激励频率的变化

Fig. 5 Profile of airflow velocities under incoming flow while actuation frequency changes

kHz^{-1} , 相对变化率有所减小, 说明随着气流速度的增大, 等离子体气动激励的加速效果减弱.

4 体积力结果与分析

4.1 诱导气流速度拟合

在静止空气条件下, 对 1 号激励器上层电极下游 $x = 35 \text{ mm}$ 和 $x = 45 \text{ mm}$ 处等离子体气动激励作用下的气流速度进行测量, 并使用倾斜式高斯方程对速度分布进行拟合, 结果如图 7 所示.

式(1)为高斯拟合方程式, 其中 a , b 和 c 均

为待定常数, y 为测量点距离激励器表面的高度.

$$u_{\text{fit}} = a \sqrt{y} \exp \left[- \left(\frac{y - b}{c} \right)^2 \right] \quad (1)$$

由图 7 可以看出: 使用高斯方程式拟合诱导气流速度得到的曲线与测量点能很好的重合. 经误差分析, 拟合曲线与测量点之间的相对误差不超过 4%, 说明拟合是成立的.

4.2 体积力理论计算

对 1 号激励器选取控制体如图 8 所示, 取 δ 为 12.5 mm , S 为 25 mm , L 为 60 mm 和 70 mm

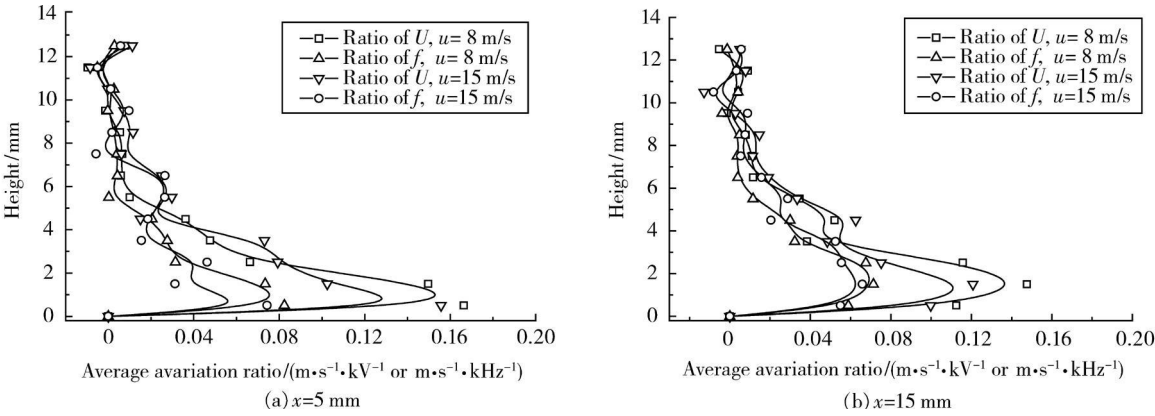


图 6 气流速度随激励电压与激励频率的变化

Fig. 6 Result of airflow velocities while actuation voltage or actuation frequency changes

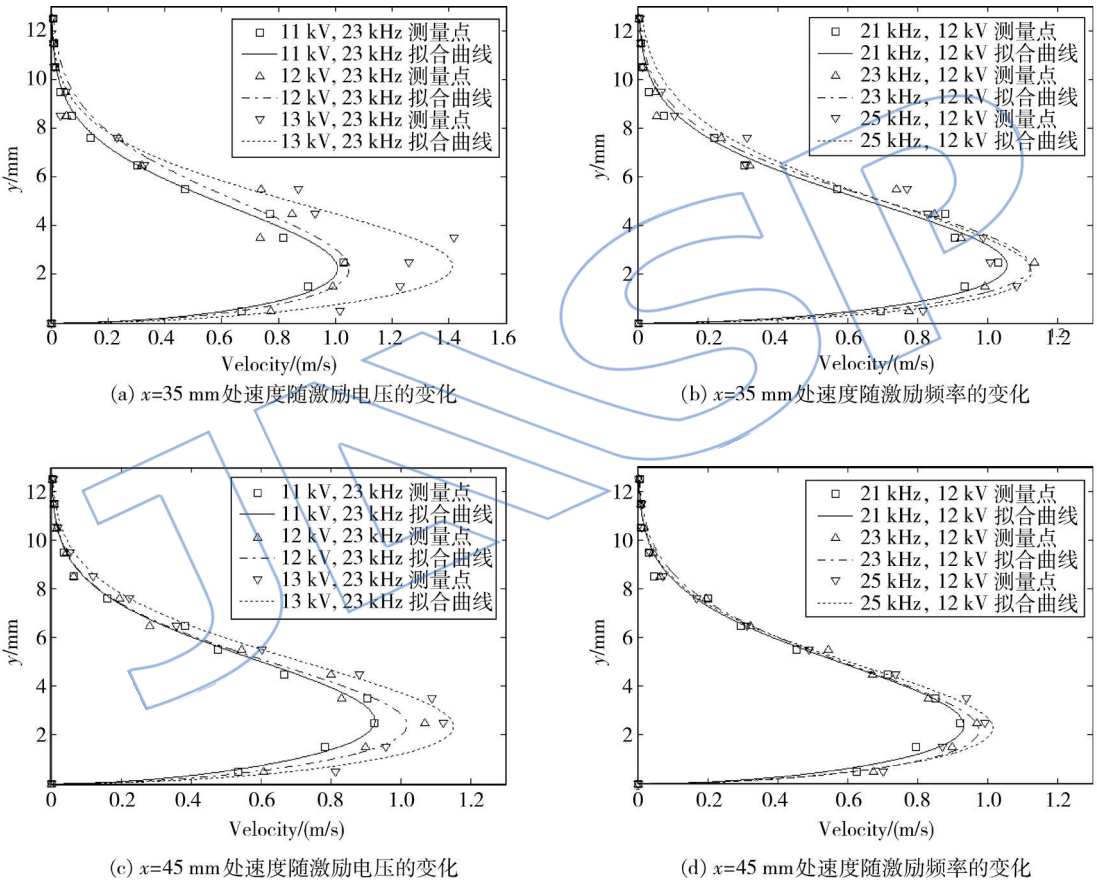


图 7 诱导气流速度拟合结果

Fig. 7 Result of fitting induced airflow velocities

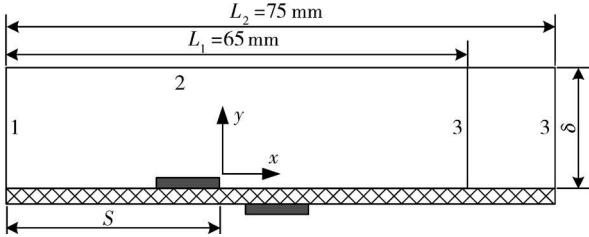


图 8 控制体示意图

Fig. 8 Sketch diagram of control volume

(分别对应于 $x = 35 \text{ mm}$ 和 45 mm).

对控制体取积分动量方程有

$$\sum F = \oint V(\rho V \cdot \hat{n} dA) \quad (2)$$

式中 $\sum F$ 为控制体上的合力, 有研究^[10]表明: 等离子体区域空气密度的变化量不会超过当地大气密度的 2%, 因此, 取 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$.

式(2)为动量项的变化率, 在 x 方向可分

解为

$$F_b + F_s + F_p = \left[-2 \int_0^\delta q_u(y) dy \right]_1 + \left[\rho u_\infty \int_0^L v dx \right]_2 + \left[2 \int_0^\delta q_d(y) dy \right]_3 \tag{3}$$

式中 F_b 为体积力, F_s 为壁面剪切力, F_p 为压力, u_∞ 为 x 方向的来流速度, q 为动压, 且 $q(y) = \rho [u(y)]^2/2$.

激励器放电开启与关闭时的动量方程如式 (4)、式(5) 所示.

$$0 + F_{s, \text{off}} + F_{p, \text{off}} = -2 \int_0^\delta q_{u, \text{off}} dy + p u_\infty \int_0^L v_{\text{off}} dx + 2 \int_0^\delta q_{d, \text{off}} dy \tag{4}$$

$$F_b + F_{s, \text{on}} + F_{p, \text{on}} = -2 \int_0^\delta q_{u, \text{on}} dy + p u_\infty \int_0^L v_{\text{on}} dx + 2 \int_0^\delta q_{d, \text{on}} dy \tag{5}$$

激励器放电前后 1 截面的速度基本不发生变化, 因此式 (4)、式 (5) 中的动压和压力项不变, 两式相减得

$$F_b = \Delta F_s + p u_\infty \int_0^L (v_{\text{on}} - v_{\text{off}}) dy + 2 \int_0^\delta (q_{d, \text{on}} - q_{d, \text{off}}) dy \tag{6}$$

假设流体是不可压缩的, 对控制体取连续方程有

$$\left[\int_0^\delta u_u dy \right]_1 + \left[\int_0^L v dx \right]_2 + \left[\int_0^\delta u_d dy \right]_3 = 0 \tag{7}$$

对激励器放电前后由式 (7) 可推得

$$\int_0^L (v_{\text{on}} - v_{\text{off}}) dx = - \int_0^\delta (u_{d, \text{on}} - u_{d, \text{off}}) dy \tag{8}$$

代入式(6) 得

$$F_b = \Delta F_s - \int_0^\delta (u_{d, \text{on}} - u_{d, \text{off}}) dy + 2 \int_0^\delta (q_{d, \text{on}} - q_{d, \text{off}}) dy \tag{9}$$

式(9) 所求得的体积力计算方程中积分项只与激励器上层电极下游的速度分布有关, 因此, 将图 7 中的拟合曲线作为源项代入式(9) 进行变步长辛普生法数值积分.

对式 (9) 中剪切力 ΔF_s 的计算, 可以利用等

$$\Delta F_s = \mu \left[\left. \frac{du}{dy} \right|_{s, \text{on}} - \left. \frac{du}{dy} \right|_{s, \text{off}} \right] \tag{10}$$

式中 $\mu = 1.78938 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 为动力黏度.

综合式(9)、式 (10), 可以求出体积力的计算值. 为了验证理论计算的准确性, 将结果与相同实验条件下电子分析天平测得的体积力数值进行对比, 结果如图 9 所示.

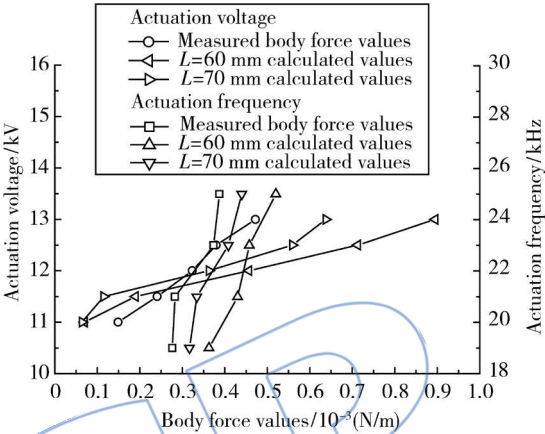


图 9 体积力的对比结果

Fig.9 Result of body force comparison

由图 9 可以发现: 体积力的测量值与计算值保持相同的变化规律, 即: 激励电压或激励频率增大时, 体积力均表现为线性增加. 经计算, 激励频率增大 1kHz 或激励电压增大 1kV, 对应的体积力平均增加 $0.017 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ 和 $0.237 \times 10^{-3} \text{ N/m}$, 说明激励电压或激励频率的增大会促使体积力有不同程度的增加, 与激励频率相比, 激励电压可以更好的增大体积力.

4.3 体积力测量值随激励参数的变化

在静止空气条件下, 使用电子分析天平分别对 2~ 4 号激励器在不同激励电压与频率下的体积力进行了测量, 结果如图 10 所示.

图 10 结果表明: 激励器布局不同, 体积力表现出较大的差距, 以 2 号激励器测得的体积力为基准, 4 号激励器产生的体积力要明显大于 3 号激励器, 以图 10(a) 为例, 3 号和 4 号两种布局激励器与 2 号激励器相比, 激励电压增大 1 kV, 体积力平均增加 $0.043 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ 和 $0.0076 \times 10^{-3} \text{ N/m}$, 说明与增大电极内间距相比, 增大下层电极宽度可以产生更大的体积力.

综合上面的研究结论, 可以得出: 等离子体气动激励随激励电压的作用效果远强于激励频率, 因此可以优先考虑增大激励电压来增加诱导气流速度和体积力; 诱导气流速度沿下游方向逐渐减

小,说明靠近上层电极附近时等离子体气动激励的加速效果最好,因此在翼型与叶片失速分离、圆柱绕流等分离流动控制中,要考虑将等离子体气动激励器的敷设位置靠近分离点,以产生最佳的激励效果。

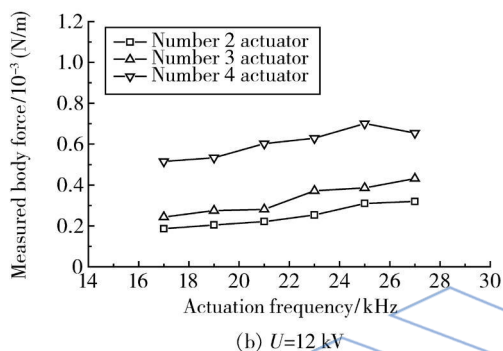
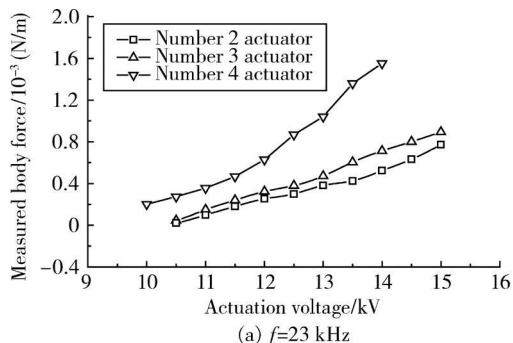


图 10 体积力的实验测量结果

Fig. 10 Result of measured body force values

5 结论与展望

5.1 结论

1) 在静止空气条件下,等离子体气动激励诱导的气流速度沿高度方向为先增加后减小的分布规律,沿下游方向速度逐渐减小。

2) 在有来流条件下,等离子体气动激励可以增大气流基准速度,使速度分布变得饱满,从而改变平板附面层的流动状态,但随着气流速度的增大,等离子体气动激励的加速效果减弱。

3) 在靠近壁面时,激励电压变化对诱导气流速度的激励效果明显强于激励频率;在远离壁面时,激励参数的变化均没有明显的加速效果。

4) 激励电压或激励频率增大,体积力均表现为线性增加,但激励电压增大时可以更好地增大体积力。

5) 激励器布局不同,体积力表现出较大的差距,与增大电极内间距相比,增大下层电极宽度可以产生更大的体积力。

5.2 展望

俄罗斯 Litvinov 等进行了不同大气压力条

件下的体积力实验研究^[11],结果表明:在 26 664~101 325 Pa (200~760 Torr,相当于距海平面约 31~40 km) 之间,等离子体气动激励诱导产生的体积力随着气压的降低逐渐增大,说明基于等离子体气动激励的相关推进技术可能在低气压环境的邻近空间中具有很广阔的应用前景。在以后的研究中,将开展低气压条件下介质阻挡放电与其他放电形式等离子体气动激励的相关研究,结合不同的激励参数与布局形式,实现高强度、高效能的等离子体气动激励。

参考文献:

- [1] Roupasov D, Zavialov I, Starikovskii A, et al. Boundary layer separation plasma control using low-temperature non-equilibrium plasma of gas discharge [R]. AIAA 2006-0373, 2006.
- [2] LI Yinghong, SONG Huimin, WU Yun, et al. Experiments of plasma actuation based compressor cascade flow separation suppression [R]. Proceedings of the 1st International Symposium on Jet Propulsion and Power Engineering. Kunming: School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 2: 420-422.
- [3] Moreau E. Airflow control by non-thermal plasma actuators [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40: 605-636.
- [4] Patel M P, Ng T T, Vasudevan S, et al. Plasma actuators for hingeless aerodynamic control of an unmanned air vehicle [R]. AIAA 2006-3495, 2006.
- [5] 吴云,李应红,朱俊强,等.等离子体气动激励扩大低速轴流式压气机稳定性的实验研究 [J]. 航空动力学报, 2007, 22(12): 2025-2030.
WU Yun, LI Yinghong, ZHU Junqiang, et al. Experimental investigation of using plasma aerodynamic actuation to extend low-speed axial compressor's stability [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(12): 2025-2030. (in Chinese)
- [6] Sosa R, Artana G, Moreau E, et al. Stall control at high angle of attack with plasma sheet actuators [J]. Experiments in Fluids, 2007, 42: 143-167.
- [7] Vo H D. Control of rotating stall in axial compressors using plasma actuators [R]. AIAA 2007-3845, 2007.
- [8] Hoskinson A R, Hershkowitz N, Ashpis D E. Comparisons of force measurement methods for DBD plasma actuators in quiescent air [R]. AIAA 2009-0485, 2009.
- [9] Sato E, Sato S, Abe T. Interaction between shock wave and glow discharge plasmas [R]. AIAA 2005-0402, 2005.
- [10] Enloe C L, McLaughlin T E, Font G I. Parameterization of temporal structure in the single dielectric barrier aerodynamic plasma actuator [R]. AIAA 2005-0564, 2005.
- [11] Litvinov V M, Skvortsov V V, Uspenskii A A. Role of the static pressure in experiments on flow control by means of surface capacitor discharges [J]. Fluid Dynamics, 2006, 41(2): 286-291.