

文章编号:1007-2985(2011)05-0062-03

诊断介质阻挡放电激励的空气密度扰动^{*}

周章文, 刘 展, 孙 冬

(空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038)

摘 要:利用激光在空气密度梯度场中的偏转(折射)效应,设计了激光偏转诊断系统,并诊断航空等离子体激励器诱导空气在其附近的密度变化.实验结果显示:激励器两电极之间靠近上电极附近空气密度扰动达到负最大值(-1.7%),而靠近下电极处空气密度略有增加(+0.27%).实验结果与其他手段的诊断结果一致,但激光偏转系统能更快速有效地诊断诱导的空气密度扰动.

关键词:激光偏转系统;空气密度;扰动;折射率

中图分类号:TN744.3

文献标志码:A

等离子体流动控制是一项新概念流动控制技术,通过实时控制改善空气动力特性,对飞行器减阻增升、发动机扩稳增效等领域具有广泛的应用前景.目前美国、俄罗斯、英国、法国、德国、意大利、日本等^[1-7]对等离子体应用于边界层控制、抑制失速分离、翼型减阻、旋涡控制、激波控制、绕流控制、提高点火可靠性和燃烧效率等应用方向进行了广泛研究.

航空等离子体激励器是一种介质阻挡放电装置,它利用高频高压等离子体电源激励,使激励器电极附近空气电离,产生的带电粒子在电场力作用下加速运动,运动过程中与空气中各种粒子发生碰撞,实现动量和能量输运,诱导空气加速运动而形成诱导气流^[1-2].深入研究诱导流动效果与诱导流动区域内气体密度变化间的关系,对研究等离子体气动激励诱导气流机理及实现气动激励的主动流动控制有重要意义.笔者利用光在空气介质密度梯度中的偏转效应来度量光线偏转和空气密度变化间的关系.

1 实验原理

光折射是光由一媒质进入另一媒质或同一不均匀媒质中传播时方向发生偏折的现象,而同一媒质中,当介质参数变化也可使光传播产生不同程度的偏转.

坐标系定义如图 1,其中 ρ_0 为未扰动空气密度值, ρ 表示扰动后空气密度值,密度梯度^[3] 为 $\frac{d\rho}{ds}$

$\lim_{\Delta x, \Delta y \rightarrow 0} \frac{\rho - \rho_0}{\Delta x \Delta y}$, n 为未扰动时空气折射率,而 n_1 表示扰动后空气折射率, n_0 为真空中折射率(一般规定为 1).密度梯度场为矢量场,因此可按 x, y 方向分解,

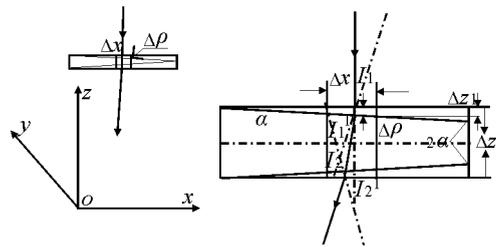


图 1 空气中光线偏转原理图

* 收稿日期:2011-08-25

作者简介:周章文(1979-),男,湖南湘潭人,空军工程大学工程学院讲师,硕士,主要从事材料激光冲击处理及等离子体推进技术方面的研究.

其中 x 方向密度梯度可表示为 $\frac{d\rho}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\rho - \rho_0}{\Delta x}$.

计算空气密度扰动使光发生偏转时假设:扰动密度梯度在 Δx 方向一阶近似下,看作沿轴 z 方向激光经过 Δz ($\lim \Delta z \rightarrow 0$) 厚度的密度变化区(如图 1 所示),密度梯度在该区域内为常数;小角度正弦均可用弧度值近似;光偏转与 z 轴方向放电区成线性比例.

利用折射公式可得偏转角为 $\Delta\varphi = I_1 + I_2' - 2\alpha$, 由于空气密度扰动不大, I_1, I_2', α 均为小角度,其正弦值用弧度近似表示,得 $\Delta\varphi = I_1 + I_2' - 2\alpha \approx (n - n_0) \times \alpha$, 即

$$\Delta\varphi = (n - n_0) \times \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0}, \tag{1}$$

令 $\frac{(n - n_0)}{\rho_0} = k$, 则

$$\Delta\varphi = k(\rho_0 - \rho) = k \nabla \rho, \tag{2}$$

当 $ds \approx dz$ 时,对 z 方向积分得偏转角为

$$\varphi = k \int \nabla \rho ds \approx k \int \nabla \rho dz, \tag{3}$$

得到密度梯度和偏转角之间对应关系,给定边界条件积分便可得出整个空间密度场分布.

2 实验系统

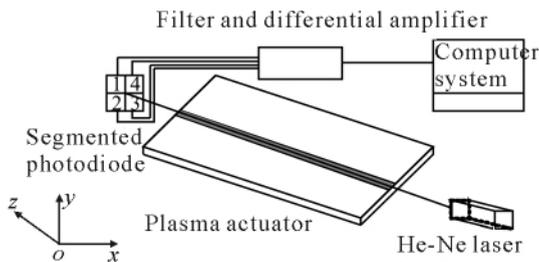


图 2 激光偏转测量空气密度

激光偏转测试系统(如图 2)主要由等离子体激励系统、激光偏转探测系统、光电流信号预处理系统、计算机辅助系统 4 部分组成.

等离子体激励系统是指由航空等离子体激励器产生介质阻挡放电系统^[1-2],主要由高压高频电源、高电压探针、电流探针、等离子体激励器等组成.图 2 中仅给出等离子体激励器(长度为 40 ~ 60 cm),坐标系定义如图 2 所示.

激光偏转探测系统由激光和光电转换两部分组成,实验中激光是微小功率且能量稳定的 He - Ne 激光器基模激光,而光电转换部分由呈“田”字排列的高灵敏度 CCD 传感器组成差分输出信号,圆形光斑面积变化对应光电流差分信号,而光电流差分信号与偏转角对应,为提高精度可对光斑内光强分布加权,典型基模光强分布近似为正态分布,并得到 x 方向和 y 方向的偏转角,即 1 和 2 信号之和与 3 和 4 信号之和的差分得到方向偏转;而 1 和 4 信号之和与 2 和 3 信号之和的差分得到 y 方向偏转:

$$\varphi = k \times k_1(x, y) \int \nabla \rho dz, \tag{4}$$

其中系数 $k_1(x, y)$ 为光强与偏转角的对应关系,可计算得到.

光电流差分信号预处理系统主要完成 3 个功能:首先形成所需的差分信号,同时锁存差分信号的最大值,然后对该信号做滤波处理,最后对信号适当放大并转化为计算机辅助系统可处理的信号.得到输出电压信号与光电流差分信号的转换系数 k_{cv} ,则电压和密度扰动对应关系为

$$V_{x-out} = C(x, y) \left\langle \frac{\partial \rho}{\partial x} \right\rangle, \tag{5}$$

其中 $C(x, y) = k \times k_1(x, y) \times k_{cv} / z$ 已求得.

计算机辅助系统主要是利用(5)式,并考虑初始及边界条件得到密度变化场分布.如果考虑到时间因素,则相应的关系为

$$V(x, y, t)_{out} = C(x, y, t) \int ds \frac{\partial \rho(x, y, t)}{\partial s}. \tag{6}$$

3 实验结果及分析

选择绝缘介质为聚四氟乙烯(氟塑料)的典型等离子体气动激励器(两电极宽度为 2.5 mm, 两电极 x 方向距离为 1 mm, 电极厚度为 0.2 mm), 在激励电压 13 kV、激励频率 23 kHz 激励下产生均匀介质阻挡辉光放电. 坐标系原点位于介质表面和上电极最左端点处, 测得距介质表面 1 mm 高处沿着 x 方向密度变化结果如图 3 所示.

从图 3 中可以得知: 等离子体激励器在诱导边界层流动控制中, 空气密度扰动较大主要位于两个地方: 空气密度显著减小区域, 它位于介质阻挡放电

的两电极附近, 特别是两电极中间位置密度变化达负最大值(-1.7%), 从密度变化曲线得知最大值附近其变化梯度也较大; 而远离电离区的下电极外侧处位密度增大区, 该区域密度变化趋势与两电极间变化趋势相反, 其最大值为+0.27%, 且扰动变化幅度较前者明显趋缓.

从大量航空等离子体介质阻挡放电诊断研究可知^[2-5], 当航空等离子体激励器两电极上施加交流电压大于两极间击穿空气电压时, 两极附近空气在强电场作用下被电离, 产生的电荷在空间不均匀电场中定向运动, 随着放电的进行电离区逐渐靠近上电极, 使得向下电极运动离子平均位移比相反方向位移大, 从而使得向下电极运动与周围空气发生动量传递和能量输运占据主导地位, 并诱导空气介质定向流向下游区域, 从而上电极附近空气密度显著减少, 而下电极附近由于碰撞动量和能量的减弱使得离子和空气介质堆积, 因而此处空气密度稍有增加.

利用密度梯度场中的激光偏转技术诊断航空等离子体激励器诱导边界层气体密度扰动具有其他方式不可比拟的优越性, 它能在流场不产生扰动的情况下高效快速诊断密度变化趋势, 且诊断结果表明与利用其他手段间接诊断结果一致.

4 结语

激光偏转诊断系统诊断航空等离子体激励器诱导的边界层空气密度变化有着与其它诊断方式不可比拟的优点. 该系统诊断等离子体激励器边界层空气密度变化不会对流场本身产生扰动, 而且诊断原理简单、系统可靠性高、诊断速度快、诊断结果直观. 实验结果表明激光偏转诊断空气密度变化与其他诊断手段结果一致, 而对空气密度变化是碰撞还是气动加热的结果等问题有待进一步研究.

参考文献:

- [1] 李应红, 张 朴, 刘建勋, 等. 基于等离子体的流动控制研究现状及分析[C]//自动控制分册(七分册). 中国航空学会航空百年学术论坛动力分论坛论文集. 北京: 中国航空学会动力专业分会, 2003: 131-136.
- [2] WU Yun, SONG Hui-min, LI Ying-hong, et al. Experimental Investigation of Plasma Assisted Flow Control on NACA 0015 Airfoil [C]//Xi'an, XVI International Conference on Gas Discharges and their Applications, 2006: 833-836.
- [3] ROTH J R, SHEMAN D M, WILKINSON S P. Boundary Layer Flow Control with a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Surface Plasma [R]. Reno: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1998.
- [4] ROTH J R, SIN H, MADHAN R C M, et al. Flow Reattachment and Acceleration by Paraelectric and Peristaltic Electrohydrodynamic(EHD) Effects [R]. Reno: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003.
- [5] ENLOE C L, MCLAUGHLIN T E, VANDYKEN R D, et al. Mechanisms and Responses of a Single Dielectric Barrier Plasma Actuator: Plasma Morphology [J]. AIAA Journal, 2004, 42(3): 589-594.
- [6] POST M L, CORKE T C. Flow Control with Single Dielectric Barrier Plasma Actuators [R]. Toronto: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005.

(下转第 74 页)



图 3 等离子体激励器附近高度为 1 mm 处空气密度扰动分布

Analysis of Stability for Carbon Shale High-Filled Embankment

AO Yi-bing¹, LIU Xin-xi², YANG Zi-han², WANG Yi-ming²

(1. Shunda Limited Corporation of Highway Construction, Jingzhou 434100, Hubei China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Taking the highway in Guangxi province as the example, the physical and mechanical performance of carbon shale is tested. The strength of carbon shale increases with the degree of compaction augmentation, while the strength greatly decreases under the condition of water immersion carbon shale. Using the strength reduction finite element method, the influence on compaction and rainfall for carbon shale embankment stability is analyzed by large finite element calculation software. The results show that the safety coefficient of embankment will increase, when the compaction degree increases; while it will significantly decline with rainfall. When the compaction degree is up to more than 93%, the carbon shale high-filled embankment slope will be steady-going.

Key words: carbon shale; stability of high-filled embankment; finite element strength reduction method

(责任编辑 陈炳权)

(上接第 64 页)

- [7] ROUPASSOV D V, ZAVYALOV I N, STARIKOVSKII A Y. Boundary Layer Separation Control by Nanosecond Plasma Actuators [R]. Miami: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [8] BOUEF J P, LAGMICH Y, CALLIGARI T, et al. Electrohydrodynamic Force and Flow Acceleration in Surface Discharges [R]. San Francisco: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006.

Diagnosis of Air Density Harassment

ZHOU Zhang-wen, LIU Zhan, SUN Dong

(Engineering College, Airforce Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: By the laser beam deflection effect in air density gradient field, the laser deflection diagnosis system was designed, and the air density change caused by the aeronautical plasma actuators was diagnosed. The results showed that the air density decreased by -1.7% in the vicinity of the upper electrode's edge between two electrodes, and increased by 0.27% in the vicinity of the lower electrode's edge between two electrodes. The measurement results were consistent with the results of other means. But the diagnosis of the laser deflection system is faster and more effective.

Key words: laser deflection system; air density; harassment; index of refraction

(责任编辑 陈炳权)