

等离子体激励器流场测量及诱导推力实验*

潘 波, 沈锦明, 林 麒

(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, 福建 厦门 361005)

摘 要: 为了深入了解等离子体激励器流动控制原理, 采用 PIV 技术获得了静止空气中的等离子体激励器上表面诱导气流及其末端引射气流流场的流速分布和流态, 并对由此产生的诱导推力进行了测量实验; 研究了等离子体激励器上表面诱导气流加速机理和尾部流场形态以及电极对数对诱导气流加速的影响, 并与推力实验结果进行比较。研究表明, 等离子体激励器上表面空气被诱导产生定向流动, 并在多对平行电极的作用下被逐渐加速; 诱导气流在激励器末端的引射作用形成射流, 增加等离子体激励器电极对数可以增大该射流的流速; 所产生的诱导推力也随诱导气流流速的加速相应增大。

关键词: 等离子体; 诱导气流; PIV 测速; 诱导推力

中图分类号: V211.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2011) 01-0146-05

Experiment on flow field and thrust induced by plasma actuators

PAN Bo, SHEN Jin-ming, LIN Qi

(School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering/

Fujian Key Lab. of Plasma and Magnetic Resonance, Xiamen Univ., Xiamen 361005, China)

Abstract: The velocity distribution and flow pattern of the induced flow on the surface and in the downstream of the plasma actuator were obtained by PIV technique in the still air and the induced thrust produced by the flow also was measured with an electronic balance. The mechanism of the induced flow on the actuator surface was investigated. The effect on accelerating the induced flow by the electrode number was compared with the induced thrust measured. The results show that the air flow induced on the plasma actuator is directional to form a jet in the downstream edge of the actuator and the flow is gradually accelerated by the electrodes parallel in both side of the actuator. Both the jet velocity and the induced thrust increase with adding electrode number.

Key words: Plasma; Induced flow; PIV; Induced thrust

1 引言

等离子体流动控制技术是一种新型主动流动控制技术, 可以利用微量的、局部的气流扰动来控制大流量、全局性的特性(例如, 使边界层尽量保持层流和抑制边界层分离, 控制旋涡流场, 使之产生有利干扰, 从而增加机翼的有效面积、弯度和环量等)^[1]。等离子体流动控制技术受到美俄等发达国家航空领域高度关注, 对应用等离子体流动控制技术抑制翼型失速分离等方面进行了大量的研究实验, 取得了重要的研究成果^[2-4]。近年来, 国内中国空军工程大学、

北京航空航天大学、工程热物理研究所、西北工业大学、厦门大学等相关研究学校及院所也进行了等离子体流动控制的大量实验和仿真, 取得了很多研究成果^[1, 5-8]。

本文应用 PIV 测试技术对等离子体激励器表面和尾缘下游流场进行了测量, 分析在多对电极作用下等离子体激励器表面和尾缘下游的诱导气流流动情况, 为等离子体在流动控制技术的应用提供参考依据。同时, 文中测量了电极对数对等离子体激励器末端流速的影响情况, 并通过诱导推力实验考察了等离子体激励器电极对数对表面诱导气流流速的影响。

* 收稿日期: 2009-09-10; 修订日期: 2010-01-13。

基金项目: 福建省自然科学基金 (2010J01014)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

作者简介: 潘 波 (1980—), 男, 硕士生, 工程师, 研究领域为等离子体特性及其应用。E-mail: bo_pan@126.com

2 实验装置与测量方法

2.1 等离子体激励器诱导气流流动的原理

典型的等离子体激励器结构如图 1 所示。在绝缘介质板上下表面布置平行的交错电极;为防止下表面放电,将下表面电极埋入绝缘介质中,上下表面的电极与高压高频电源连接。等离子体激励器工作时,在高压高频电源的作用下,上下电极之间产生强电场。当电场足够强时,使得上下电极之间的气体电离,产生等离子体。等离子体中的带电粒子在空间不均匀电场和磁场的作用下运动,运动过程中与周围环境的空气分子碰撞,进行动量交换。其相互作用的整体结果是使中性的空气分子做宏观的定向运动,并由此诱导出激励器上表面的空气定向流动。图 1 示出了等离子体激励器上表面诱导气流的方向。对于图 1 的等离子体激励器结构,等离子体激励器周围的空气由静止变成从左向右流动的诱导气流,显然是激励器通过放电对这些流动的空气作用了一个从左向右的力。根据牛顿第三定律,诱导气流必定对激励器施加一个从右向左的反作用力。由于该力与诱导气流有关,故本文称之为“诱导推力”。

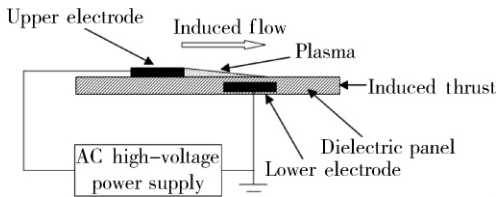


Fig. 1 Induced flow by plasma actuator

2.2 实验装置及测量方法

为了获得较大流量的诱导定向气流,本文采用了

多对电极的等离子体激励器。等离子体激励器的基本结构如图 2 所示,由平面绝缘介质板与覆于其上的多对平行电极组成。图 2(a) 中的粗实线表示覆于板上表面的电极,粗虚线为覆于板下表面的电极。本文选择玻璃纤维环氧树脂薄板作为绝缘介质。如图 2,介质板厚度 H 分别为 1 mm,其大小为 150 mm × 160 mm;在绝缘介质板上下表面均匀布置了 11 对相互平行的铜膜电极;上、下表面电极长度 L 均为 105 mm,宽度 W_1, W_2 均为 1 mm,厚度均为 0.1 mm;每对电极间距 d 为 10 mm;上下电极间距 D 为 2 mm;下电极距绝缘介质板末端边缘距离 W 为 5 mm。

本文的实验系统由等离子体激励器、高压电源、隔离变压器、调压器等组成。高压电源的输入电压为 AC50 ~ 250 V,电源输出电压可调。

为测量图 1 所示的平板等离子体激励器上表面的诱导气流流态及其由此产生的诱导推力,本文分别有针对性地采用了两套测量系统。即采用 PIV (Particle image velocimetry) —— 粒子影像测速技术来获取平板等离子体激励器上表面诱导气流及后缘处尾流的流态与流场数据;诱导推力则采用高精度电子天平进行测量。

PIV 系统主要由成像系统和分析显示系统组成。成像系统由激光器、片光元件、光臂、激光脉冲同步器、CCD 摄像机组成;分析显示系统主要由帧抓取器和图像分析软件及计算机组成。本文的 PIV 测量试验采用集成式的双 Nd: YAG 激光器作为成像的光源,单脉冲能量为 200 mJ,能够产生波长为 532 nm 的绿光;片光元件由柱面镜和球面镜组成;激光脉冲同步器控制图像捕捉和激光脉冲的次序。该系统的互/自相关 CCD 摄像机为 PIVCAM 13-8,其灰度级分辨

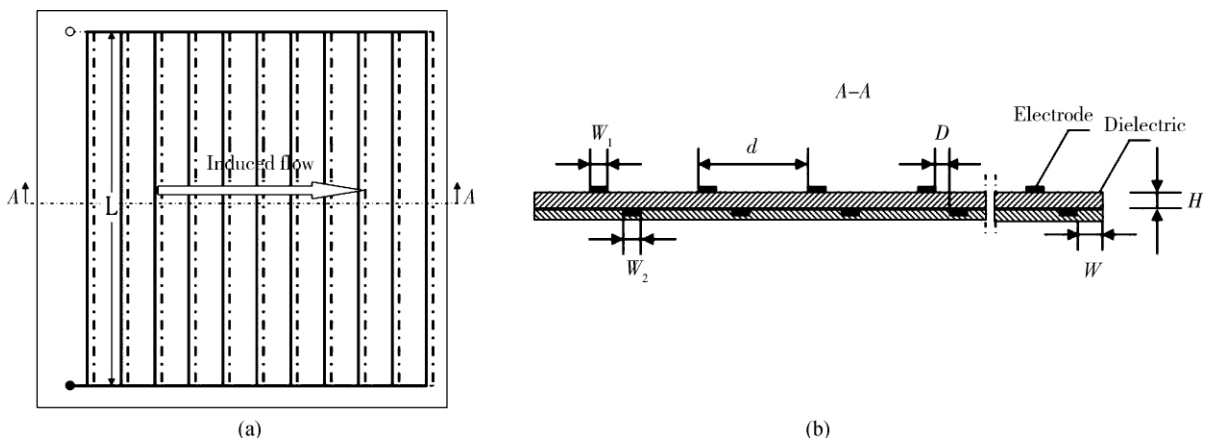


Fig. 2 Structure of the plasma actuator

率为4096,图像分辨率1280×1024像素,图像采集速率为8帧/秒;帧抓取器(Frame grabber)读取CCD摄像机的数字图像保存到计算机内存,由Insight分析软件处理,并由Tecplot软件来显示。

推力测量系统由电子天平、等离子体激励器和高压电源等组成。电子天平的测量精度为0.01g。测量时采取了电磁隔离的防护措施,以避免等离子体对电子天平的电磁干扰造成测量误差。

3 实验结果与讨论

3.1 等离子体激励器诱导气流流场测量

本实验应用PIV技术对如图2的平板等离子体激励器的上表面和尾缘处的诱导气流流场进行了测量,获得了诱导气流的流态,以及诱导气流流动速度分布情况。根据等离子体激励器上表面流场的测量结果,分析等离子体激励器在多对平行电极放电作用下的诱导气流流动机理,为改进等离子体激励器结构设计提供依据。

3.1.1 等离子体激励器上表面流场测量

在用PIV技术测量等离子体激励器诱导气流流场时,将等离子体激励器水平放置在专用的支架上,测量位置为垂直于激励器板面的中央平面(见图2的A-A切面),高压电源输入电压设置为AC235V,加载功率为120W,经过对CCD相机摄取的图像进行处理后,可得如图3所示等离子体激励器上表面诱导气流的流场分布。

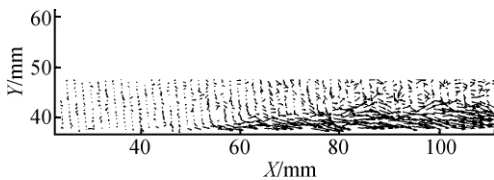


Fig. 3 Induced flow field by the discharge above the plasma actuator

由图3可以看出,由于等离子体激励器表面附近的空气在强电场作用下被电离,等离子体中的离子在空间不均匀电场的作用下,做平行于等离子体激励器表面的定向运动。离子在定向运动的过程中与环境空气分子碰撞,发生动量交换,推动激励器表面的空气进行定向运动。这一流动使激励器近表面处的空气出现空缺,吸引了激励器上方的空气下来补充,因此便形成了自上而下趋向激励器表面的诱导气流。每一对电极放电都有诱导空气流动的作用,而且沿诱

导气流方向,前一对电极还会对后一对电极诱导的平行于激励器表面的气流产生加速影响,从而使激励器表面的定向气流流速不断提高,图3中清楚地显示了这一现象。

从图3中还可以看出,不仅沿诱导气流方向气流流速越来越大,而且诱导层还逐渐加厚。这表明电极对数越多,诱导的气流越强,流量越大。另一方面,由图3还可知,激励器表面的诱导气流的加速过程呈现波浪状态,显然,电极条之间的间距会对诱导气流的加速效果产生影响。这提示,通过改变电极条之间的间距进行更深入和细致的流速试验,分析其规律性,有望得到能效比最佳的激励器电极布置结构。

3.1.2 等离子体激励器尾缘下游流场测量

本文除了测量平板式等离子体激励器上表面的流场外,还运用PIV技术进行了等离子体激励器末端尾缘下游流场的测量。实验时,仍将等离子体激励器水平放置在专用支架上,测量位置为A-A切面右侧末端(见图2(a))下游,高压电源输入电压为AC235V,加载功率为120W,实验测量结果如图4所示。

由图4可知,在等离子体激励器作用下,其上表面产生的诱导气流在激励器末端尾缘下游仍然继续发展,而且不断吸纳周围的空气,产生引射作用,形成一股诱导射流。图4中的(a)图显示了射流流动区域的速度矢量分布情况,(b)图则是尾缘下游射流流场速度分布云图。图4反映出激励器尾缘的诱导射流的最大流速不是出现在激励器的末端,而是在激励器离末端的下游一定距离以后。即诱导气流在离开激励器后仍在继续加速,能量消耗后才逐渐减速。激励器尾缘下游诱导射流流速沿图4(b)中箭头方向的变化如图4(c)所示。

3.1.3 电极对数对等离子体激励器末端下游最大流速的影响

为了考察等离子体激励器上的电极对数对其末端尾缘下游诱导射流最大流速的影响,本文采用绝缘胶带粘贴在激励器上表面,选择性地将若干电极覆盖掉,抑制这些电极放电,达到有目的地改变激励器放电电极的对数。虽然绝缘胶带不会完全抑制激励器放电,但是会大大降低被覆盖的电极的放电强度,使它们诱导的气流显著减小。

实验时高压电源的输入电压保持为AC235V,但是随着参与放电的电极条对数不同,加载功率也有所不同。实验结果表明,电极条对数对激励器尾缘下游

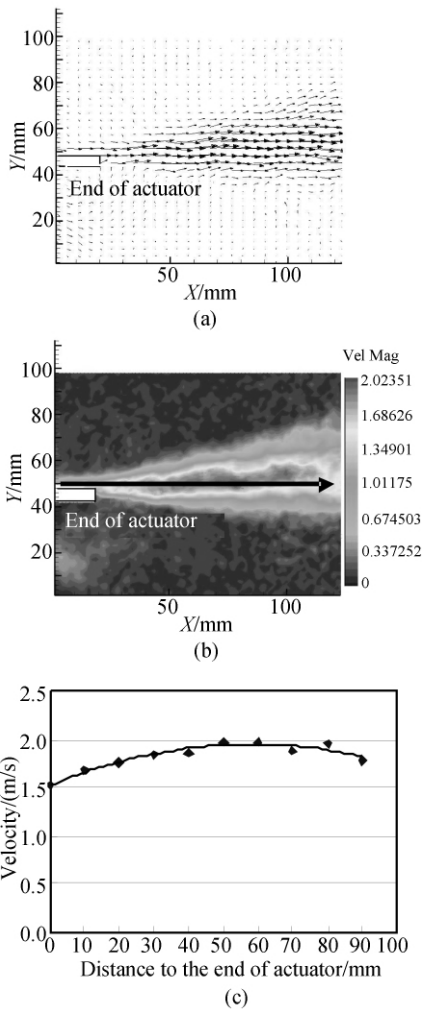


Fig. 4 Flow field in the downstream of the plasma actuator

诱导射流的流速影响是比较大的。图 5 给出了等离子体激励器在电极对数不同时放电,其末端尾缘诱导射流的流速变化规律。由于激励器放电是一种非平衡状态,尾流的紊流流动属于非定常流动,其最大流速的位置不确定,而测其各流动截面的平均流速也有困难。但是由激励器尾缘下游射流流场速度分布云图可知其中的最大流速,因此图 5 中的流速值为从云图得到的等离子体激励器末端尾缘下游诱导射流的最大流速。在图 5 中,当电极条对数为零时,激励器末端尾缘处的流速不为零,这是因为激励器上表面用绝缘胶带覆盖无法完全阻止放电,仍有微弱的诱导气流存在造成的。

结合图 5 和激励器上表面诱导气流流场(图 3)进行分析,可以看出,诱导气流在等离子体激励器多

对电极放电的作用下被逐渐加速。显然,随着电极对数的增加,参与放电的电极越多,注入的能量越多,加速持续得越久,等离子体激励器末端尾缘的最大流速自然也相应增加。

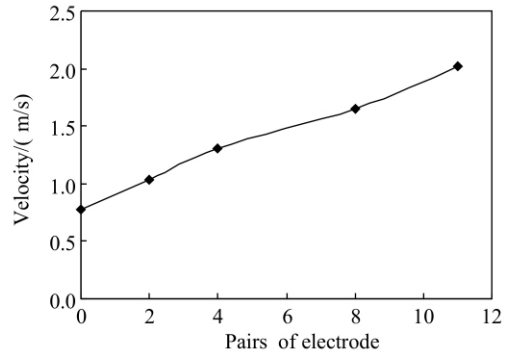


Fig. 5 Influence on downstream velocity by the number of electrode

3.2 电极对数对等离子体激励器诱导推力的影响

如图 1 所示,等离子体激励器在产生诱导气流的同时也受到诱导推力的作用。这是等离子体激励器在为获得诱导气流而付出能量后的一种能量补偿。显然,这也是应用等离子体激励器时应当注意到的能效问题。因此,有必要测量诱导推力,研究其与等离子体激励器结构的关系,它将对指导等离子体激励器的设计具有重要意义。

本文采用高精度电子天平来测量这一诱导推力。为了减小气体放电时对电子天平的干扰,本文设计了一个具有一定高度的绝缘支架,将其置于天平托板上。测量时,将等离子体激励器垂直固定在该绝缘支架上,并使等离子体激励器工作时产生的诱导气流方向向上,激励器所受的诱导推力方向向下。通过电子天平的示数变化即可测量等离子体激励器工作时所受的诱导推力。

诱导推力测量实验的条件与上述实验相同,改变电极对数的方法也相同。本文的等离子体激励器在不同电极对数时放电所产生的诱导推力如图 6 所示。图 6 的曲线表明等离子体激励器所产生的诱导推力随激励器电极对数的增加而增加。随着电极对数增多,形成诱导气流的区域增大,同时激励器表面诱导气流流速也相应增加,从而由此产生的诱导推力也相应增大。

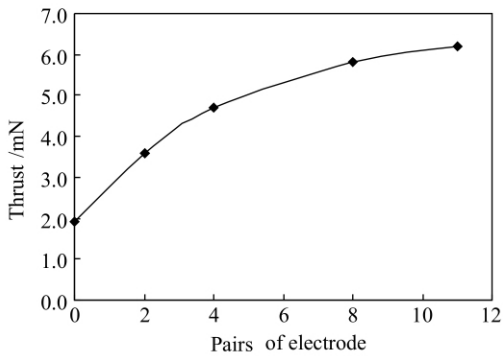


Fig. 6 Effects on thrust by the number of electrode

但是,与图5不同的是,随着电极对数的增加,等离子体激励器末端尾缘的流速呈近似线性增大,但是诱导推力的增大有饱和的现象,即当电极条对数较多时,诱导推力的增加明显减缓,可以预见到,如果再进一步增加电极对数,诱导推力有可能不再增加,而是趋于某一个常数。

4 结论

通过本文的实验研究,可以得到以下几点结论:

(1) 等离子体激励器放电工作时,由于带电粒子的运动推动中性空气分子定向运动,并吸引激励器周围的空气形成诱导气流,诱导气流在多对电极的作用下逐渐加速,诱导层逐渐加厚。

(2) 在诱导气流的作用下,等离子体激励器末端尾缘下游形成诱导射流,气流的流速不是出现在激励器的末端尾缘,而是在激励器末端下游后面一定距离以后,即诱导射流先加速后减速。

(3) 增加等离子体激励器电极的对数,对诱导气流流速具有加速作用,随着电极对数的增加可增加等离子体激励器末端的流速,且加速规律近似呈线性。

(4) 增加等离子体激励器电极的对数同样可以增大等离子体激励器所产生的诱导推力,但是诱导推力的增大有随电极对数增加而呈饱和的趋势。

参考文献:

- [1] 李 钢. 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.
- [2] Roth J R. Aerodynamic flow acceleration using paraelectric and peristaltic electro-hydrodynamic effects of a one atmosphere uniform glow discharge plasma [J]. *Physics of Plasma*, 2003, 10(5).
- [3] Patel M P, Ng T T, Vasudevan S, et al. Scaling effects of an aerodynamic plasma actuator [R]. *AIAA* 2007-0635.
- [4] Roupasov D V, Nikipelov A A, Nudnova M M, et al. Flow separation control by plasma actuator with nanosecond pulse periodic discharge [R]. *AIAA* 2008-1367.
- [5] 李应红, 吴 云, 张 朴, 等. 等离子体激励抑制翼型失速分离的实验研究[J]. 空气动力学报, 2008, 26(3).
- [6] 张攀峰, 王晋军, 施威毅, 等. 等离子体激励低速分离流动控制实验研究[J]. 实验流体力学, 2007, 21(2).
- [7] 李 钢. 等离子体流动控制机理及其应用研究[D]. 北京: 中国科学院, 2008.
- [8] 高荣隆. 应用等离子体实现流场主动控制技术的实验研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.

(编辑: 姚懿巧)

推进技术

JPT

JOURNAL OF
PROPULSION TECHNOLOGY

1980年创刊(双月刊)(总第175期)
第32卷 第1期 2011年2月

Started in 1980 (Bimonthly) (Sum No.175)
Vol.32 No.1 February 2011

主管单位: 中国航天科工集团公司
主办单位: 中国航天科工集团三十一研究所
主 编: 郑日恒
执行主编: 史亚红

Authorities: China Aerospace Science & Industry Corporation (CASIC)
Sponsor: The 31st Research Institute of CASIC
Editor-in-Chief: Riheng Zheng
Executive Editor-in-Chief: Yahong Shi

编辑出版:《推进技术》编辑部
地 址:北京7208信箱26分箱 100074
电 话:(8610)-68376141
传 真:(8610)-68374052
E-mail:tjjs@sina.com

Edited & Published by Editorial Department of
Journal of Propulsion Technology
Address:P.O.Box 7208-26 Beijing 100074, P.R.China
Tel:(8610)-68376141
Fax:(8610)-68374052
E-mail:tjjs@sina.com

印 刷:北京科信印刷有限公司
E-mail:kexinys@263.net

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd
E-mail:kexinys@263.net

国内发行:《推进技术》编辑部
国外发行:中国国际图书贸易总公司
北京399信箱 100020

Domestic distributor: Editorial Department of JPT
Abroad distributor: China International Book Trading Corporation
P.O.Box 399 Beijing 100020, P.R.China

<http://www.tjjs.casic.cn>

刊 号: ISSN 1001-4055
CN 11-1813/V

公开发行

国内定价: 20.00元/期 120.00元/全年

ISSN 1001-4055

