

等离子体合成射流激励器的流场特性分析

刘朋冲, 李军, 贾敏, 文彬

(空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要 等离子体合成射流作为一种新型的主动流动控制技术,是针对传统合成射流激励强度差而设计的。利用 Fluent 6.3 软件,采用结构化网格,对等离子体合成射流激励器流场进行了二维非定常数值模拟,研究单次放电激励器流场的演化规律,并且比较了不同放电时间尺度对激励器出口速度的影响。研究表明:等离子体合成射流激励器能够产生高速射流,最大速度达到 439 m/s,大大增加了流场湍流度;激励器放电时间越长,出口峰值速度越大。计算结果表明等离子体合成射流激励器能够应用于高速流动控制。

关键词 等离子体合成射流;数值模拟;非定常流动;放电时间

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.06.005

中图分类号 V211.3 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)06-0022-04

为了提高新型或下一代飞行器的气动性能,必须采用新的流动控制技术。主动流动控制是指通过辅助能量引入如吸气吹气^[1]、电磁激励^[2-3]等手段,利用微量的、局部的气流扰动来控制流场形态,改变流场特性,例如抑制分离流动、控制旋涡和激波等。

合成射流是主动流动控制技术的一种,近年来受到国内外学者的广泛关注。传统的合成射流激励器有压电膜振动式、活塞振动式、声激励式、形状记忆合金作动式等^[4-6],这些激励器在激励强度、频率等方面有明显的缺陷,导致了应用的局限性。为了提高合成射流的激励强度和激励频率,获得更有效的流动控制效果,将电弧放电等离子体与合成射流气动激励方式相结合,产生一种新的激励方式。美国约翰霍普金斯大学和法国图卢兹 ONERA 的研究人员设计了新型的等离子体合成射流激励器 Plasma synthetic jet(霍普金斯大学称为电火花射流 Sparkjet)^[7-13]。

本文通过对等离子体合成射流激励器单次脉冲放电流场进行数值模拟,详细描述了等离子体合成射流流场的演化规律,对比了不同放电时间对流场特性的影响。

1 等离子体合成射流激励器工作原理

等离子体合成射流激励器是一个固态装置,包括一个嵌入电极的腔体和排气孔,没有运动部件^[8]。电弧放电加热气体产生高压使腔体内气体喷出,随后加热气体排尽后重新恢复。

图 1 为等离子体合成射流激励器,工作时在两电极上施加脉冲高压电源,当电压上升到气体击穿电压时,2 个电极之间形成电弧放电,电弧对腔体内气体快速加热,伴随温度升高腔体内压力急剧增大,驱使腔内的气体高速喷出,可产生高强度的气动激励,随后腔内的气压降低,吸入环境空气,进入下一个激励循环。

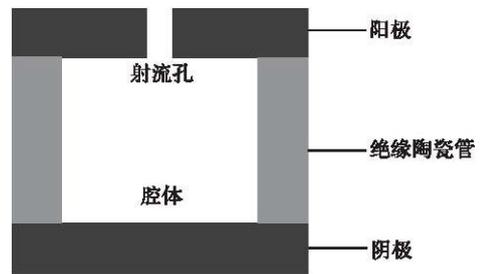


图 1 等离子体合成射流激励器
Fig. 1 Plasma synthetic jet (PSJ) device

* 收稿日期:2011-05-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51007095)

作者简介:刘朋冲(1986-),男,河南许昌人,硕士生,主要从事气动热力学理论与工程研究。

E-mail:liupengchong123@yahoo.com.cn

等离子体合成射流激励器工作循环可以分为典型的3个阶段^[8]:①能量沉积:两电极之间加载脉冲高压电源,当电极间电压增加到一定水平,腔体气体击穿,电极间通电,产生电弧放电,电热效应加热气体,伴随温度升高气体压力增大。放电时间和使用的电源脉冲宽度相关。②气体排出:腔体内高压气体膨胀从阳极射流孔喷出,形成高速射流。腔体内压力逐渐下降,射流孔出口速度减小到零。③气体恢复:排出气体的腔体压力下降,从外界重新吸入新鲜气体,准备下一次循环。

2 物理模型和计算方法

对等离子体合成射流激励器产生电弧放电进行流场特性仿真。实验采用纳秒脉冲电源,放电时间200 ns,激励器工作时,光谱仪采集口对准射流孔,测得激励器放电发射光谱,通过对谱线的拟合得到放电等离子体转动温度为800 K,在一般体系中,因为分子转动和平动之间可以通过能量传递迅速实现热平衡,转动温度可以认为与气动力学温度几乎相同,以800 K(T_2)为仿真初始条件。

等离子体合成射流气动激励产生过程中,电弧瞬间放电,腔体气体击穿,腔体容积不变,腔体内气体变化假设为定容过程,有以下模型:

$$P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1} \quad (1)$$

$$V_1 = c_1 \left(\frac{2}{k-1} \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: T_1 为静止大气温度; P_1 为静止大气压力; P_2 为放电后压力; c_1 为射流出口音速,计算得到出口速度可以达到440 m/s。

计算采用商用CFD软件Fluent 6.3,求解二维非定常雷诺平均N-S方程,采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和离散传播辐射(DTRM)模型,采用中心有限差分格式的有限体积法,利用4阶Runge-Kutta法迭代求解。本文采用结构化网格,射流腔体为 $4 \times 5 \text{ mm}^2$,射流孔直径为1.8 mm,厚度1 mm,外部流场的计算区域为 $20 \times 64 \text{ mm}^2$,网格总数为141 440。计算网格见图2。物理模型和网格分布关于 $X=0$ 轴对称,计算只对一半网格进行。射流孔外为流动出口,设为压力自由远场条件,对称面设对称边界条件,其余为壁面速度无滑移条件。

对等离子体合成射流单次激励进行数值模拟,激励器腔体温度设为800 K,设定不同的温度持续时间,研究等离子体合成射流流场特性及放电时间对流场特性的影响。初始温度注入范围^[10]见图3。

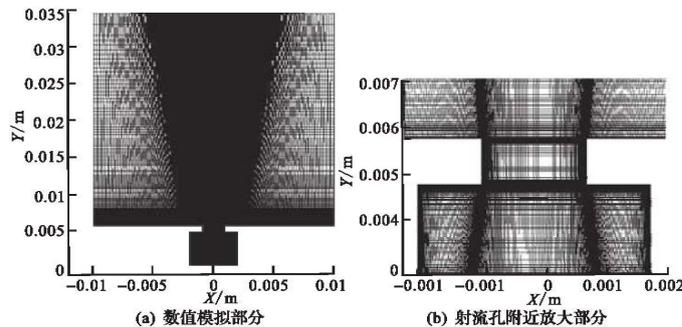


图2 数值计算网格

Fig. 2 Computational grids of PSJ

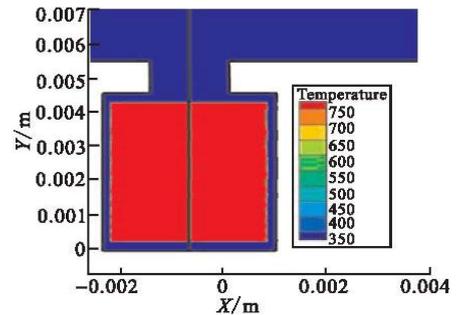


图3 初始温度加入范围

Fig. 3 Area of the initialized temperature

3 计算结果与分析

3.1 等离子体合成射流的演化规律

仿真显示等离子体合成射流的喷出和吸入是一个往复振荡的过程,对激励器射流孔的流量监控见图4。

能量注入初始时刻为0,射流孔处的质量流速从0时刻开始迅速增加,在20 μs 时达到最大值,然后流量减小,在70 μs 时射流孔的整体流速已经为负,开始吸入气体。在140 μs 时射流孔处流速为正,腔体重新喷出气体。射流孔排出、吸入

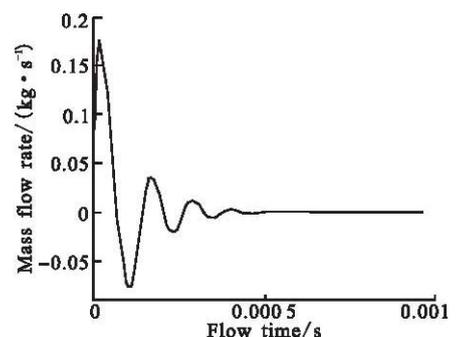


图4 射流孔质量流速

Fig. 4 Mass flow rate of the exit

振荡衰减,在 $500 \mu\text{s}$ 时射流孔出口质量流速为 0,激励器腔体气体趋于静止。

图 5 所示等离子体合成射流各时刻 Y 方向速度云图,图中下侧为激励器腔体,上侧为静止大气。在激励器腔体加入瞬间温度,压力升高,气体迅速膨胀,等离子体合成射流单次脉冲是一个射流喷射-气体吸入的过程。图中流场的变化表明,等离子体合成射流激励器产生高速射流,在射流孔处速度最大,在射流孔外 5 mm 处速度迅速衰减。腔体气体喷出,形成低压,周围大气重新吸入。

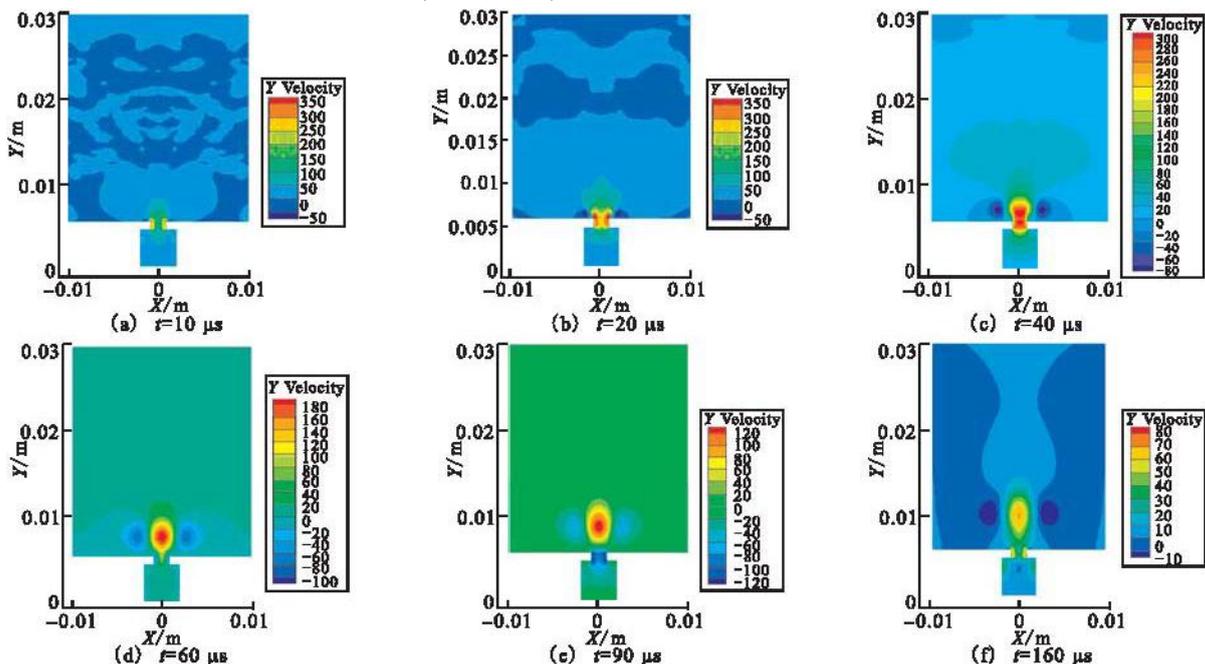


图 5 激励器 Y 方向速度云图

Fig. 5 Contour plot of instantaneous Y -velocity for the PSJ flow field

$t=0$ 时刻注入温度 800 K ,在 $t=10 \mu\text{s}$ 时射流孔已出现明显的射流速度,射流出口速度迅速增大。在 $t=20 \mu\text{s}$ 时,射流速度达到最大为 439 m/s ,集中在射流孔角区位置,并且在射流孔外侧形成对涡。 $t=40 \mu\text{s}$ 时,射流充满整个射流孔,射流速度为 300 m/s ,射流孔两侧对涡进一步发展,涡的影响范围增大,能量增强,增强了气流的掺混,对于增加附面层能量交换、提高附面层动量有明显作用。在 $60 \mu\text{s}$ 时射流继续发展,虽然射流孔的主流方向是 Y 轴正方向,但在靠近射流孔壁面处已经产生回流,射流两侧气体吸入激励器腔体,在 $90 \mu\text{s}$ 时射流主流区已经脱离射流孔,射流孔已经有明显的回流,由此可以得出激励器腔体恢复吸入的气体为射流两侧未受扰动的气体,不会对射流主流区产生“拉力”的影响。腔体吸入的气体重新加热喷出,形成“追赶”主流区的现象(图 5(f)),对射流孔的流量监视同样证明了这一点。在 $500 \mu\text{s}$ 时,整个流场最大速度为 11 m/s ,流场逐渐趋于稳定。

由此得出等离子体合成射流的 2 方面流场特性:①激励器产生高速射流,直接冲击附面层,引起附面层流动紊乱,能够应用于超音速附面层的控制;②等离子体合成射流产生高速射流的同时,在主流两侧产生了很强的对涡,对于流动掺混增强附面层动量有很好的效果。

3.2 放电时间对射流速度的影响

放电时间(即温度注入时间)受放电能量和放电频率的影响^[14],表征电流的持续时间。等离子体合成射流用于控制超音速流动,增强附面层掺混,推迟分离,就必须能够影响附面层。对于马赫数为 3 的超音速气流,附面层厚度为 4 mm ^[15],因此,对出口处 4 mm 处的射流速度进行监控。在放电持续时间分别为 20 ns 、 200 ns 、 $2 \mu\text{s}$ 、 $20 \mu\text{s}$ 的条件下对流场进行仿真,见图 6。由图可知,随着放电时间的增长,射流最大速度明显增大。通过增加脉冲电源的脉冲宽度,提高放电时间,使腔体内高压维持时间长,射流喷射速度更高,有效提高了等离子体合成射流激励器的性能。

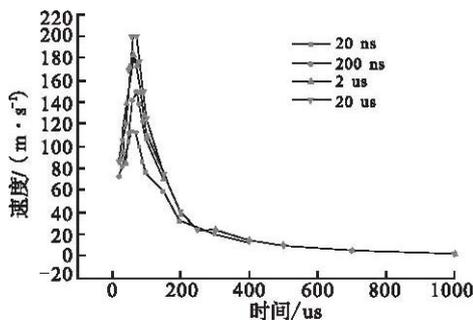


图 6 不同放电时间出口速度

Fig. 6 Exit velocity for different discharge times

4 结论

1) 非定常仿真显示等离子体合成射流激励产生高速射流,在射流孔处最大速度达到 400 m/s 以上,在射流孔外 4 mm 处仍有很高的速度,为百 m 量级,能够穿透超音速附面层厚度,可以应用于超音速流动控制。

2) 等离子体合成射流流场中,在高速射流和回吸空气的作用下射流孔外产生 2 个相反的涡,能够增强附面层和主流的掺混,有利于附面层加速,抑制或推迟附面层分离。

3) 激励器放电时间对射流孔出口速度有影响,放电时间越长,激励器喷射速度越大,射流影响范围越广。

参考文献:

- [1] Huang L, Huang P G, LeBeau R P. Numerical study of blowing and suction control mechanism on NACA0012 airfoil[J]. Journal of aircraft, 2004, 41(5):1005 - 1013.
- [2] Moreau E. Airflow control by non - thermal plasma actuators[J]. J phy D: Appl phy, 2007, 40:605 - 636.
- [3] 李应红, 梁华, 马清源, 等. 脉冲等离子体气动激励抑制翼型吸力面流动分离的实验研究[J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1429 - 1435.
LI Yinghong, LIANG Hua, MA Qingyuan, et al. Experimental investigation on airfoil suction side flow separation by pulse plasma aerodynamic actuation[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2008, 29(6): 1429 - 1435. (in Chinese)
- [4] Smith B L, Glezer A. The formation and evolution of synthetic jets[J]. Phys fluids, 1998, 10(9): 2281 - 2297.
- [5] Gilarranz J L, Traub L W, Rediniotis O K. Characterization of a compact, high power synthetic jet actuator for flow separation control[R]. AIAA 2002 - 0127.
- [6] Liang Y, Kuga Y, Taya M. Design of membrane actuator based on ferromagnetic shape memory alloy composite for synthetic jet applications[J]. Sensors and actuators A, 2006, 125: 512 - 518.
- [7] Cybyk B Z, Wilkerson J T, Grossman K R, et al. Sparkjet actuators for flow control[R]. AIAA 2003 - 57.
- [8] Cybyk B Z, Wilkerson J T, Grossman K R, et al. Computational assessment of the sparkjet flow control actuator[R]. AIAA 2003 - 3711.
- [9] Cybyk B Z, Wilkerson J T, Grossman K R. Performance characteristics of the sparkjet flow control actuator[R]. AIAA 2004 - 2131.
- [10] Grossman K R, Cybyk B Z, Rigling M C. Characterization of sparkjet actuators for flow control[R]. AIAA 2004 - 0089.
- [11] Haaek Sarah J, Trent Taylor, Jerry Emhoff, et al. Development of an analytical sparkjet model[R]. AIAA 2010 - 4979.
- [12] Caruana D, Barricau P, Hardy P, et al. The "plasma synthetic jet" actuator. aero - thermodynamic characterization and first flow control applications[R]. AIAA 2009 - 1307.
- [13] Pierrick Hardy, Philippe Barricau, Antoine belinger, et al. Plasma synthetic jet for flow control[R]. AIAA 2010 - 5103.
- [14] Venkateswaran Narayanaswamy, Laxminarayan L, et al. Clemens characterization of a high - frequency pulsed - plasma jet actuator for supersonic flow control[J]. AIAA Journal, 2010, 48(2): 297 - 305.
- [15] Smith M F. Observations of supersonic flat plate wakes[D]. Austin: Univ of Texas, 1995.

(编辑:徐敏)

Investigation on Flow Filed of the Plasma Synthetic Jet Device

LIU Peng - chong, LI Jun, JIA Min, WEN Bin

(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: As a new type of active control technology, plasma synthetic jet (PSJ) is designed to object the poor robustness of traditional synthetic jet technology. The software is Fluent6.3 and the grids for numerical simulation are structure. The flow field surrounding the PSJ device was simulated numerically to get the evolution regularity of the flow field. The affection on the velocity of the device exit was compared between different discharge durations. The results show that the PSJ device can generate high speed jet which enlarges the instability of flow. The high velocity 439m/s is achieved. It is also suggested that the longer the discharge duration, the higher the speed of the device exit. And it can be used for high speed flow control.

Key words: plasma synthetic jet; numerical simulate; unsteady flow; discharge duration