

文章编号: 1000-8055(2006)04-0675-5

自耦合射流对平行主射流的矢量偏转 PIV 实验

李 念, 张 元, 徐惊雷, 沙 江

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 为研究不同激励信号下自耦合射流对主射流的矢量偏转的影响, 采用二者平行布局的方式, 利用压电陶瓷单缝激励器出口两侧形成的低压区的卷吸作用, 使主射流发生了明显地矢量偏转。PIV 实验表明, 当激励信号 $f = 400$ Hz 时, 自耦合射流的动量通量达到最大, 主射流的对环境气体的卷吸能力最强, 其边界也达到了最宽; 而当激励信号 $f = 500$ Hz 时, 激励器出口缝处表现出最强的卷吸作用, 并使流速 2.6 m/s 的主射流发生了最大 48° 的矢量偏转。

关 键 词: 航空、航天推进系统; PIV 粒子图像测速仪; 自耦合射流; 射流矢量偏转

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Experimental investigation of primary flow vectoring using parallel self-coupling jets

LI Nian, ZHANG Kun-Yuan, XU Jing-lei, SHA Jiang

(College of Energy and Power,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to investigate the influence of self-coupling jet on the vectoring of the primary jet, parallel jets arrangement were adopted. The self-coupling jet exciter is parallel to the primary jet and the formation of a low-pressure region between the jets results in a deflection of the primary jet towards the exciting jet. The PIV experimental study shows that for $f = 400$ Hz, the momentum flux of the self-coupling jet achieves its maximum value, while the boundary of the primary jet reaches its maximum width due to the strongest suction ability to the environmental gas. However, the experiment indicates that for $f = 500$ Hz, due to the self-coupling jet exciting, the maximum 48° vectoring of the primary jet with a flow speed of 2.6 m/s achieves.

Key words: aerospace propulsion system; PIV; self-coupling jet; self-coupling jet exciter; jet vectoring technique

实现射流的矢量化是现代飞行器提高机动性、敏捷性的有效手段。近年来, 一种全新的概念——自耦合射流激励器引起了人们的兴趣和关注, 它不仅在控制流动分离方面表现出极大活力^[1-3], 而且它还能使气流实现矢量偏转^[4]。国外乔治亚理工大学的 Smith 与 Glezer 最早进行了压电陶瓷激励的自耦合射流实验研究, 并成功地

应用于低速流的矢量偏转^[3,4]。国内清华大学的罗小兵等与国防科技大学的罗振兵等对其机理进行了初步的研究, 并采用 CFD 模拟方式研究了影响自耦合射流的因素, 并进行了射流矢量偏转的 CFD 模拟^[6-9]。作者应用压电式激励器进行了射流矢量控制初步研究^[10], 使速度为 5 m/s 的主射流实现了约 30° 的矢量偏转。本文中采用了高分

收稿日期: 2005-09-08; 修订日期: 2005-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(10072027)

作者简介: 李念(1976年-)男, 江苏泰州人, 南京航空航天大学博士生, 主要从事自耦合射流及射流矢量技术研究。

分辨率 PIV 测量系统对三种激励信号下压电式的自耦合射流激励器对主射流的矢量偏转实验进行了详细地研究,考察了三种激励频率下激励器对主射流的影响。

1 自耦合射流激励器

图 1 是自耦合射流激励器及自耦合射流产生的原理。它由密闭振动腔、压电陶瓷振动膜和出口缝组成。

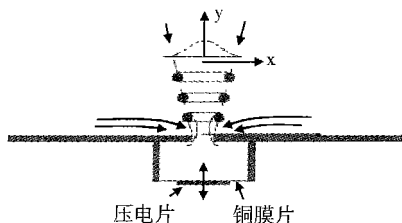


图 1 自耦合射流形成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a synthetic jet

在激励电压作用下压电陶瓷振动膜引起封闭腔内气体的振动,从而在出口缝处形成一系列的涡对,这一系列相继的涡对耦合而成自耦合射流。从一个周期中可以看出,吸入与喷出的气体质量是相同的,因此又称为“零质量”射流。

图 2 为本实验中采用压电陶瓷激励器,出口缝 l 长为 30 mm,宽 h 为 0.8 mm。采用正弦波信号,信号经过 NH-30 功率放大器后输出最大激励电压 $E=250\text{V}$ 。实验中采用了 $f=300\text{Hz}$ 、 400Hz 与 500Hz 的激励信号,热线测量表明,当 $f=400\text{Hz}$ 时可以在激励器出口处得到最强的射流。

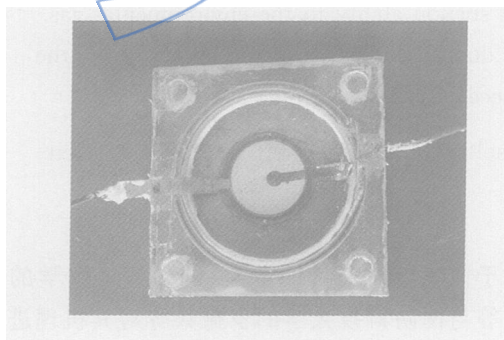


图 2 实验用激励器

Fig. 2 the Synthetic Jet Actuator

2 自耦合射流矢量实验台及 PIV 测量系统

2.1 自耦合射流矢量实验台

研究使用的射流矢量实验台由如下几部分组成:

(1) 自耦合射流激励器及其驱动系统。它包括自耦合射流激励器、信号发生器、放大器及相关电路等;

(2) 矢量射流实验台。风扇、滤网、通气管道、喷管等组成;

2.2 PIV 测量系统及其测量方法

本文采用的 PIV 系统由以下部分组成:

(1) 双脉冲激光器:最大输出功率 200 kW,脉冲间隔时间可调,双脉冲激光重复频率 15 Hz。激光器发出的片光厚度小于 1 mm。

(2) 互相关 CCD 数字相机:分辨率 $1\,600 \times 1\,200$ Pixel,双帧频为 15 帧。

(3) 同步器(Synchronizer):由计算机控制的同步器控制双脉冲激光和 CCD 相机工作时序。

(4) 操作与控制系统:由计算机、高速数据采集卡,PIV 专用分析软件包与处理结果软件组成,进行图像采集、处理、流场显示。同时通过自行设计的相位锁定电路来控制相机的拍摄,从而实现瞬时相位地捕捉。

(5) 示踪粒子:采用 PIV 进行流场测量,示踪粒子的跟随性至关重要,而投放密度、均匀性、粒子的大小则决定着测量结果。本实验中采用香烟燃烧产生的烟作为示踪粒子,其浓度易于调节,可满足测量的需要。

(6) 测量方法:PIV 测量系统的布局如图 3 所示。激光片光平面与射流中心线重合并照亮所测量的流场区域,CCD 相机光轴与片光平面垂直。CCD 相机所拍摄的图像通过采集卡输入到计算机中,通过软件进行相应的处理得到流场的速度矢量分布结果。为得到较高的流场空间分辨率,CCD 相机采集区域大小约为 $140\text{mm} \times 105\text{mm}$ 。计算后

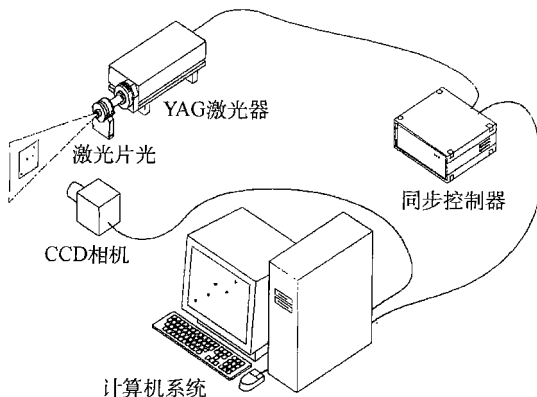


图 3 PIV 系统示意图

Fig. 3 PIV components system overview

每对图像得到 $99 \times 140 = 13\,860$ 个速度矢量,进行互相关计算时查问区的大小取 16×16 Pixel。每个速度矢量的空间分辨率小于 1.5 mm 。

3 平行布置的自耦合射流使主射流矢量偏转的实验研究

3.1 激励器性能考察

实验中采用了 $f = 300\text{ Hz}$ 、 400 Hz 和 500 Hz 三种正弦波激励信号,首先对激励器的性能进行了考察,通过 PIV 对 10 个周期的 120 幅瞬时流场进行了平均得到了激励器流场平均特性图,可以看出三种频率自耦合射流变化规律相似,如图 4 所示。

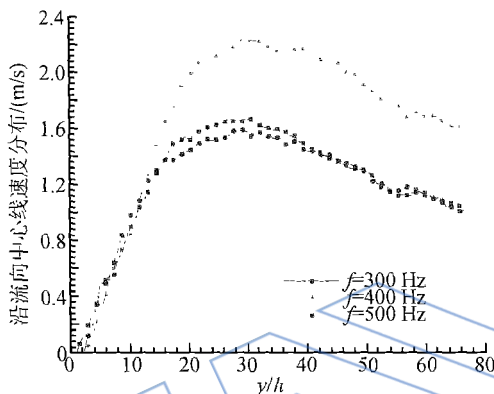


图 4(a) 激励器中心线平均速度分布图
Fig. 4(a) Time-averaged centerline streamwise velocity distributions of synthetic jet

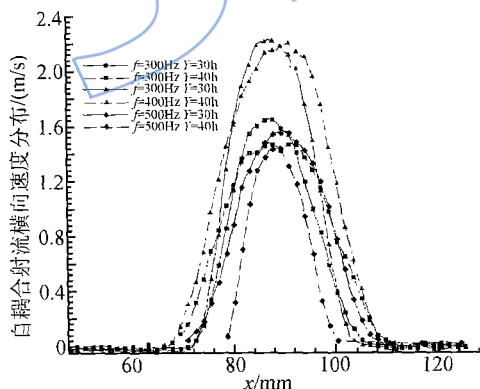


图 4(b) 激励器沿流向方向横截面平均速度分布
Fig. 4(b) Time-averaged cross-stream distributions of streamwise velocity of synthetic jet

图 4(a) 中横坐标以激励器出口缝 h 进行无量纲化,纵坐标为自耦合射流沿流向中心线速度分布,可看出,速度的变化大致分为三个区域:快速增长区,约至出口下游 20 h 处,此时中心线沿流向方向的速度达到最大值的 90% 。在此区域内,由于激励信号的作用,激励器出口形成旋涡,

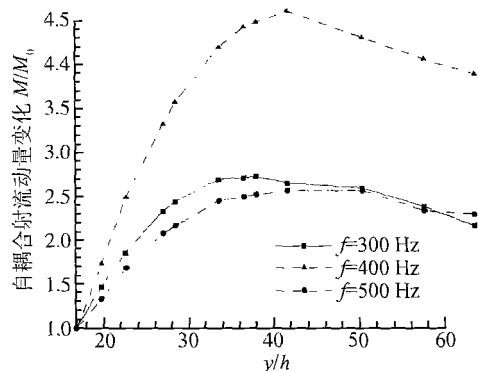


图 4(c) 激励器平均出口动量通量分布
Fig. 4(c) Time-averaged momentum flux distributions of synthetic jet

在其诱导下自耦合射流形成。旋涡向下游推进,射流速度迅速上升;随着向下游的发展,涡开始逐步破碎,即达到所谓的过渡区,处在出口下游 20 h 至 30 h 左右,同时射流速度也达到峰值;从出口下游 30 h 向后,射流速度缓慢,涡耗散于环境流场中,射流进入相对稳定的发展区,射流速度逐渐下降,与定常射流性质相似。图 4(b) 是激励器横向截面沿流向方向速度分布,可以看出三种频率下速度分布相似,但 $f = 400\text{ Hz}$ 时速度峰值最高,且速度型更加饱满;图 4(c) 中以激励器出口缝处动量 m_0 进行无量纲化的动量通量分布,其计算方式为 $J = \rho \int_{-\infty}^{\infty} U^2(y) dx$,与常规射流不同的是,自耦合射流的动量呈先增大然后再减小的趋势,但当激励信号 $f = 400\text{ Hz}$ 时,自耦合射流动量通量均高于其它两个频率,这说明在此频率下激励器表现出较强的喷流性能。

3.2 主射流矢量偏转实验研究

当激励器出口平行于主射流布置时,由于激励器的卷吸作用,在其出口两侧会形成低压区,见图 5,进而对主射流产生卷吸作用,使得主射流发生偏转,其偏转角与主射流被吸引的流量成正比而和主射流的速度成反比^[4]。

图 6 给出了本文研究的自耦合射流与主射流出口截面的相对位置,二者平行布置,其中自耦合射流激励器出口狭缝长 30 mm ,宽 h 为 0.8 mm ,主射流出口长 20 mm ,宽 H 为 2 mm , $y = 0$ 处为主射流的出口平面, x 为横流方向。

图 7 是通过相机拍摄的主射流场照片,当主射流没有受到激励时,射流平稳地向下游发展,可以清晰地看出射流的稳定区与耗散区;启动激励器后,主射流立刻受到扰动,流场变得紊乱,同时

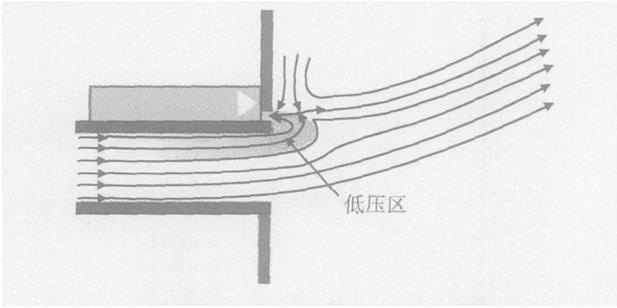


图 5 激励器吸引主射流实现矢量偏转示意图
Fig. 5 Schematic description of flow vectoring induced by the synthetic jet

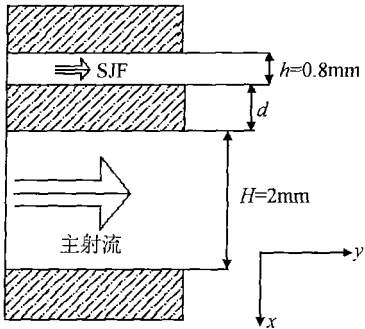


图 6 激励器与主射流空间布局图
Fig. 6 Schematic diagram of primary flow and synthetic jet actuator

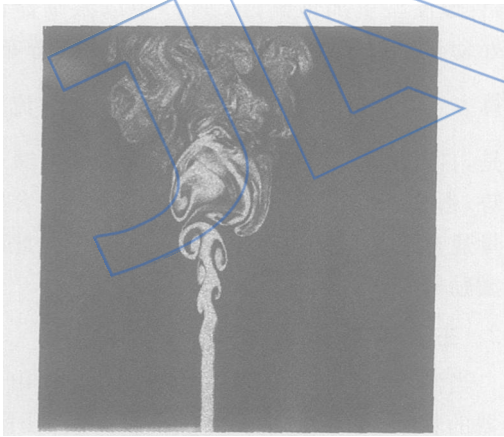


图 7(a) 未受扰动的主射流流场
Fig. 7(a) Image of unforced primary jet field

射流的宽度明显增加,流向偏向激励器一侧,这是由于激励器出口缝低压区的卷吸造成。

图 8 为主射流受激励后边界的变化分布,横坐标表示主射流横向方向,纵坐标表示沿主射流流向方向,均以主射流出口宽度 H 进行无量纲化。主射流边界的判定是以中心线沿流向速度的 $1/2$ 为基准。其中,左边三条曲线为未受激励的主射流边界线,其分布规律不明显,右边三条曲线为受激励部分的边界线,呈线性分布,其增长率明

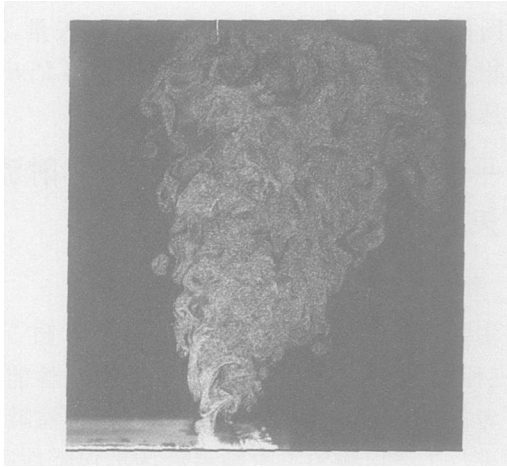


图 7(b) 受激励器作用后的主射流流场
Fig. 7(b) Image of primary jet vectoring by synthetic jet actuator

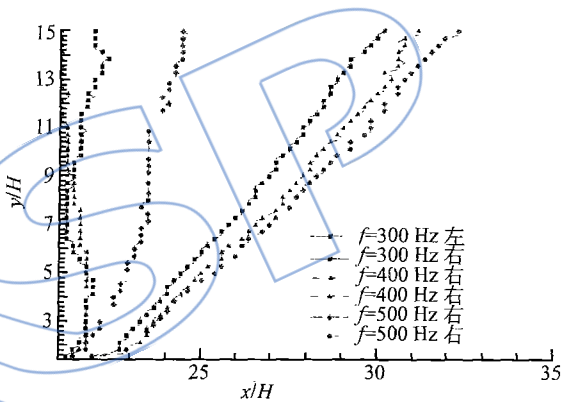


图 8 受激励的主射流边界分布
Fig. 8 Locations of jet boundaries based on half maximum streamwise velocity

显高于未受激励的左半部分。同时可以看出在 $f = 400 \text{ Hz}$ 时,主射流的边界宽度最大,这是由于自耦合射流的动量此时达到最大,并与主射流相互耦合作用,使主射流对环境气体的卷吸能力最强。

图 9 中横坐标为沿主射流流向方向,以主射流出口宽度 H 进行无量纲化,纵坐标分别为(a)主射流中心线沿流向速度值(b)主射流动量值,以出口处的动量 M_0 进行无量纲化。

从图 9 (a) 射流中心线沿流向速度分布图中可看出,速度分布大致可分为三个区域: 0 到 $4H$,速度迅速上升; $4H$ 到 $10H$ 速度达到最高值; $10H$ 向后,速度缓慢下降。

图 9 (b) 为主射流的动量通量变化规律,其计算与激励器计算相似。从图中可看出对于 $f = 400 \text{ Hz}$,在 $y/H = 15$ 时,主射流的动量达到最大,与图 4 (c) 激励器动量通量变化规律相比较发现,

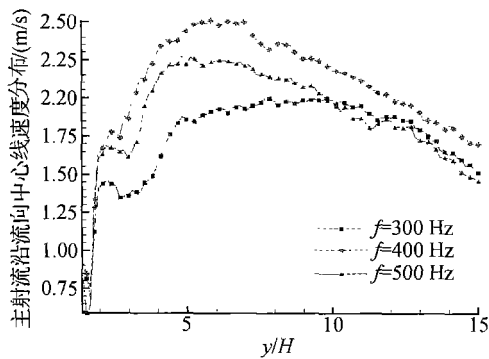


图 9(a) 主射流中心线沿流向速度分布

Fig. 9(a) primary jet centerline streamwise velocity distribution

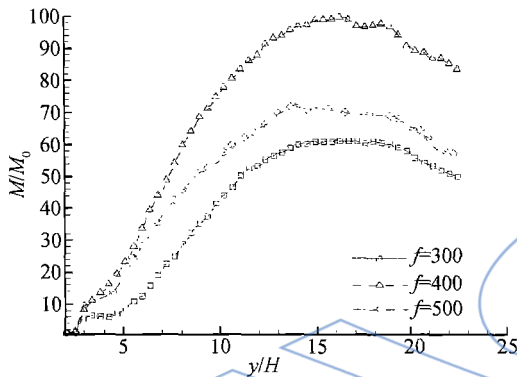


图 9(b) 主射流动量通量分布

Fig. 9(b) primary jet momentum flux distribution

当 $f = 400 \text{ Hz}$,在 $y/h = 41$ 时自耦合射流动量达到最大,自耦合射流与主射流相互耦合作用,使主射流动量达到最大。

图 10 是三种激励频率作用下的主射流流场时间平均速度矢量图。

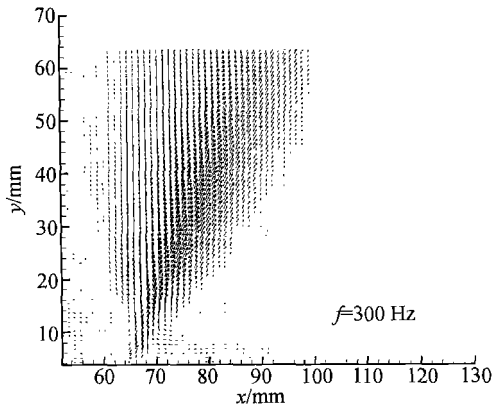


图 10(a) $f = 300 \text{ Hz}$ 主射流时间平均速度矢量图

Fig. 10(a) $f = 300 \text{ Hz}$ Time-averaged primary vector flow field

从图 10(b)中看出在 $f = 400 \text{ Hz}$ 时,主射流明显变宽;当 $f = 500 \text{ Hz}$ 时,主射流的偏转较为

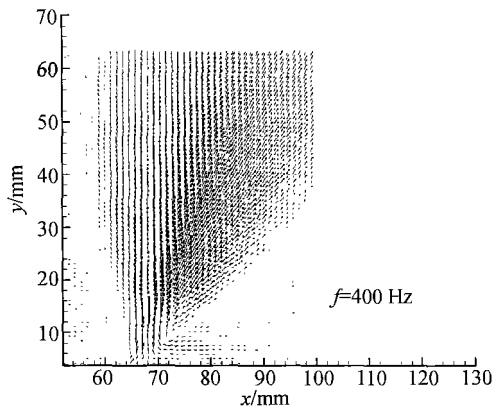


图 10(b) $f = 400 \text{ Hz}$ 主射流时间平均速度矢量图

Fig. 10(b) $f = 400 \text{ Hz}$ Time-averaged primary vector flow field

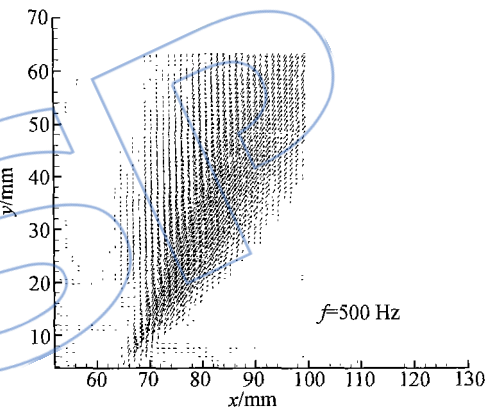


图 10(c) $f = 500 \text{ Hz}$ 主射流时间平均速度矢量图

Fig. 10(c) $f = 500 \text{ Hz}$ Time-averaged primary vector flow field

明显,但射流的宽度却小于 $f = 400 \text{ Hz}$ 时。由于 $f = 400 \text{ Hz}$ 时激励器性能强劲,自耦合射流与主射流相互耦合作用,使得主射流对环境气体的卷吸能力极大增强,进而主射流边界达到最宽。

表 1 列出了三种频率下的实验结果。

主射流的出口 Re_{ave} 的计算公式为 $Re_{ave} = 0.72 \times U_{cm} \times H/\nu^{[4]}$,其中 U_{cm} 为主射流中心线流速;射流的偏转角 $\theta = \text{tg}^{-1}(\Delta x/\Delta y)$,单位为($^{\circ}$)。

表 1 列出了上述三个激励频率实验结果

Table 1 Results achieved in 3 cases				
Case	f	θ	Re_{ave}	Max M/M_0
1	300	39	232	61
2	400	44	230	99
3	500	48	231	72

其中 f 为信号频率,单位为 Hz ; M/M_0 为动量比。

4 结论

本实验条件中,三种频率激励下,自耦合射流

的动量均呈增长趋势,对于频率 $f = 400 \text{ Hz}$,在 $y/h = 65$ 处,自耦合射流的流量增长率高达 4.0,远高于其它两个频率;动量呈先增加后减小的趋势,与定常射流不相同。特别地是当 $f = 400 \text{ Hz}$,自耦合射流的动量比最高达到了 4.5,高于其它两个频率。

采用平行于主射流方向的自耦合射流,由于其在出口截面附近对主流强烈地卷吸作用,当激励信号 $f = 500 \text{ Hz}$ 时而使流速 2.6 m/s 的主射流产生了最大 48° 的矢量偏转。

当激励信号 $f = 400 \text{ Hz}$ 时,自耦合射流的动量达到最大,并与主射流的相互耦合作用,使得主射流的边界最宽,对环境气体的卷吸达到最强。

参考文献:

- [1] Kral L D. Active flow control technology[R]. ASME Paper No. 2001 - 18196.
- [2] Michael Amitay, Smith B L, Glezer Ari. Aerodynamic flow control using synthetic jet technology [R]. AIAA 98 - 0208.
- [3] Smith B L, Glezer Ari. The formation and evolution of synthetic jets[J]. *Physics of Fluids*, 1998, 10(9): 2281 - 2297.
- [4] Smith B L, Gelzer Ari. Jet vectoring using synthetic jets [J]. *J. Fluid Mech*, 2002, 458: 1-34.
- [5] Yao Chungsheng, Chen Fangjenq, Dan Neuhart. Synthetic jet flow field database for CFD validation[R]. AIAA 2004 - 2218.
- [6] 罗小兵,李志信,过增元. 合成喷形成的机理分析[J]. 清华大学学报, 2000, 40(12): 86-89.
LUO Xiaobing, LI Zhixin, Guo Zengyuan. Analysis of the mechanism of synthetic jet formation [J]. *J. Tsinghua Univ. (Sci & Tech)*, 2000, 40(12): 86-89.
- [7] 罗小兵,李志信,过增元,等. 压电驱动合成喷的设计及分析[J]. 功能材料与器件学报, 2001, 7(2): 116-120.
LUO Xiaobing, LI Zhixin, Guo Zengyuan, et al. Design and analysis of synthetic jet actuated by piezoelectric actuator [J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2001, 7(2): 116-120.
- [8] 罗振兵,夏智勋,胡建新,等. 合成射流流场数值模拟及激励器参数分析[J]. 推进技术, 2004, 25(3): 199-205.
LUO Zhengbing, XIA Zhixun, HU Jianxin, et al. Numerical simulation of synthetic jet flow field and parameter analysis of actuator [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(3): 199-205.
- [9] 罗振兵,朱伯鹏,夏智勋,等. 合成射流激励器对射流矢量的影响[J]. 推进技术, 2004, 25(5): 405-410.
LUO Zhengbing, ZHU Bopeng, XIA Zhixun, et al. Jet vectoring using synthetic jet actuators [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2004, 25(5): 405-410.
- [10] 李念,张懿元,徐惊雷. 自耦合射流对平主行主射流的矢量偏转实验研究[J]. 推进技术, 2005, 26(3): 248-251.
Li Nian, ZHANG Kunyuan, XU Jinglei. Experimental investigation of primary flow vectoring using parallel synthetic jets [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2005, 26(3): 248-251.