

文章编号: 1000-8055(2007)11-1846-06

多压电膜式零质量射流激励器的设计与性能研究

徐惊雷, 李超, 沙江, 张堃元
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 设计了一种多压电膜式零质量射流激励器, 并利用热线风速仪, 得到了对应于射流中心线上固定位置处速度最大时的最佳频率. 在该频率下, 测量了零质量射流在不同孔径时沿中心线的速度分布; 测量、分析和比较了不同激励膜数目对射流出口速度分布的影响. 表明: 在其他条件完全相同的情况下, 一片振动膜时的激励器出口中心线上的平均速度和峰值速度, 都较5片膜的情况小一半左右, 而3片和5片压电膜时的激励器性能差别却不大. 也就是说, 虽然压电膜的数目增加能使激励器出口射流的能量增加, 但这两者之间并非呈线性关系. 此外还用 PIV 测量方法, 直观地显示了射流出口的涡结构.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 多压电膜式零质量射流激励器; 热线风速仪; 粒子图像测速仪 (PIV); 涡结构

中图分类号: V211.6

文献标识码: A

The design and performance study of a multi-diaphragm piezoelectric synthetic jet actuator

XU Jing-lei, LI Chao, SHA Jiang, ZHANG Kun-yuan

(College of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: Considering the shortcomings and incompetence of conventional piezoelectric synthetic jet actuator (PE-SJA), a novel multi-diaphragm PE-SJA design was proposed in this paper and some detailed experimental studies were carried out upon it. By using the hotwire anemometry, the optimum resonance frequency of the actuator was obtained through measuring the velocity magnitude at a fixed position on the axis of the orifice exit flow field at different frequencies. Then the orifice exit velocities with different numbers of diaphragm were measured, analyzed and compared, which showed that at the axis of the orifice exit flow field the averaged and peak velocities of one-diaphragm PE-SJA was only the half of those of the five-diaphragm PE-SJA. But the performance of three-diaphragm PE-SJA was almost the same as that of the five-diaphragm PE-SJA, which suggested that although the performance of the PE-SJA increase with the number of the piezoelectric diaphragm, it did not occur in a linear way. PIV was also used to obtain the structure of vortex of the flow-field.

Key words: aerospace propulsion system; multi-diaphragm piezoelectric synthetic jet actuator; hot-wire anemometry; PIV (particle image velocimetry); vortex structure

收稿日期: 2007-04-27; 修订日期: 2007-07-03

基金项目: 航空科学基金资助(03A52005)

作者简介: 徐惊雷(1971-), 男, 河南西华县人, 副教授, 工学博士, 主要从事内流气动力学和实验流体力学等方面的研究工作, xujl

@nuaa.edu.cn.

零质量射流技术的历史发展溯源可以追溯到 20 世纪后叶的声学整流效应。进入 20 世纪 90 年代,美国乔治亚理工大学的 Ari Glezer 教授领导的研究小组首先研制成功了一种压电膜式的合成射流激励器^[1]。它是通过控制漩涡结构的融合来“合成”射流的。其结构是一系列不断向外扩展的非定常涡环(或涡对),这列非定常涡环(或涡对)是由合成射流激励器振动膜的周期性振动,引起环境流体在激励器出口孔(缝)处周期性地剪切分离、向外喷射而产生的。由于在激励信号的一个完整周期内,通过激励器出口“流出”和“吸入”激励器腔体的流体质量流量相同。对外界环境来讲,激励器具有“零净质量效应”,所以又称为零质量射流。

零质量射流激励器是产生射流的激励部件,对于它的设计和研究是零质量射流技术发展的核心问题之一。目前国内外在研的零质量射流激励器主要有以下几种:压电膜振动式^[2]、活塞振动式^[3]、声激励式^[4]、形状记忆合金振动式^[4]、聚偏二氟乙烯膜振动式^[4]、燃烧驱动射流激励器^[4]等。以上激励器在实际应用中都存在相应的缺点。声激励式激励器在出口合成的射流能量较小,且需要发声装置;活塞振动式激励器能够提供大的合成射流能量,但是需要电机传动装置,且频率不高;形状记忆合金激励式激励器和聚偏二氟乙烯膜振动式也能提供较大的合成射流能量,但工作频率低。目前国内外针对流动控制的一个重要的研究热点问题是压电膜振动式零质量射流激励器。它是由压电陶瓷片振动膜和设置有开口孔(或缝)的腔体组成。激励器开始工作时,压电陶瓷片在周期性变化的电压信号作用下,发生逆压电效应,腔体底面金属薄膜随之产生周期性振动,将输入的电能转化为薄膜振动的动能,从而在激励器开口窄缝处有非定常射流产生。其结构非常简单、工作频带宽、响应迅速,且易于微型化,与微传感器、微控制器集成为三位一体的 MEMS 系统,具有反馈自动调节功能。它在工作时只需要电能,易于实现电参数(电压幅值、频率、相位)控制,因此也具有对复杂动力系统进行相位控制的潜力。所以这是目前研究最多、应用前景最广泛的一种零质量射流激励器。在此之前,常规的流体控制激励器需要流体供应和管道输送系统,因此有结构笨重、加工复杂、反应滞后、时间长等缺点。但是,制约压电式零质量射流激励器在工程实际中推广

应用的最大障碍在于:这种激励器产生的射流量太低,对于主流的穿透能力不够,因此在高速主流的矢量控制中显得力不从心。因此,如何有效地提高压电膜振动式零质量射流激励器的出口射流的动量,是它能否应用于实际流动的关键所在。

本文将在前期研究工作的基础上,针对目前所采用的压电式零质量射流激励器的不足,设计和制作了一种多压电膜式零质量射流激励器,并利用热线风速仪和粒子影像测速仪(PIV),对该激励器的性能进行了较为详细的实验研究,得出了有价值的结论。

1 激励器模型的结构及工作原理

本次实验采用的是压电膜式激励器。一般这种激励器都只有一片振动膜,振动能量有限,射流出口动量也比较小,腔体沿出口孔轴线方向的尺寸都较小,即比较“扁”。我们为本次实验设计了一种“多膜”式的压电激励器,把腔体做成立方体,其 6 个面中有 5 个面是振动膜,每个金属膜都贴一片压电片,剩下的一面作为射流出口板。

首先,用线切割做出一个立方体的框架,其外部尺寸为 56 mm×56 mm×56 mm,内部尺寸为 40 mm×40 mm×40 mm。然后将其中的 5 个面粘上厚度为 0.1mm 的铜膜,并在这 5 片铜膜上分别再贴上 5 片压电片,如图 1 所示。当激励器工作时,给这 5 片压电片施加同频率、同相位、同幅值的正弦信号,激励器的 5 个振动膜就会同时振动,腔体的体积随之作周期性的变化,环境气体周期性地穿入、穿出激励器的小孔,从而形成零质量射流。

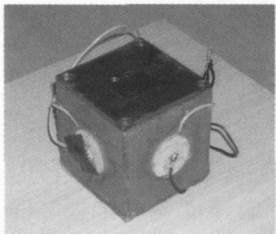


图 1 本实验制作的激励器模型
Fig.1 SJA model in this experiment

激励器腔体尺寸的不同,对其性能有很大影响,这影响体现在腔体谐振频率(即最佳频率)不同、体积变化率不同,以及射流出口速度不同。用 ANSYS 可以算得不同尺寸时的腔体谐振频率,以及在此频率下的激励器激励膜的位移,然后根

据薄膜的一阶固有模态的方程可以算得腔体的容积变化量,进而可得容积变化率.而体积变化率就可以代表射流出口速度的大小(孔径不变).按照计算得到的结果,再综合考虑压电片的尺寸以及能量,这次实验最终选用的激励器腔体尺寸为 40 mm×40 mm×40 mm,按照 ANSYS 的计算结果,该激励器谐振频率为 554.2 Hz,实验中用热线风速仪测出的谐振频率为 560Hz,与计算结果很吻合.

2 实验结果及分析

2.1 热线风速仪的测量结果

热线风速仪的数据采样频率可高达 10 kHz,这样射流出口周期性变化的速度值就能轻而易举地被记录下来.图 2 是在该采样频率下射流出口速度随时间的变化,一次测量记录了 14 个周期.此时激励器频率为 $f_2=560\text{ Hz}$,射流出口孔直径 2.5 mm,采集点位于射流出口 1.5 mm 处.

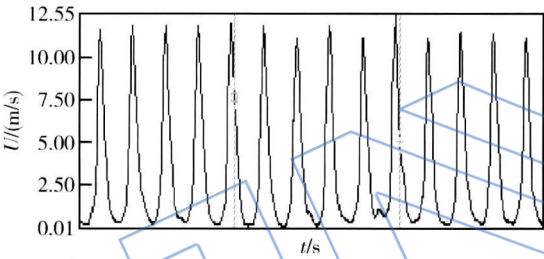


图 2 $y=1.5\text{ mm}$ 处射流出口中心线速度波形

Fig.2 Periodical orifice exit axis velocity, $y=1.5\text{ mm}$

因为在鞍点下游的射流中心线上,速度没有回流,因此只测量了中心线上速度标量.后面的数据出现的平均速度就是这 14 个周期总的平均速度,峰值速度就是这 14 个周期的峰值速度的平均值.

2.1.1 最佳频率

当射流出口孔径为 2.5 mm 时,沿孔轴线方向距射流出口平面 1.5 mm 处(如图 3 所示 Y 射流流动方向, X 垂直射流流动方向),用热线测得的不同频率下的速度分布如图 4(a), 4(b) 所示.从图可以看出该激励器有两个明显的峰值频率: $f_1=100\text{ Hz}$, $f_2=560\text{ Hz}$.在 f_1 处速度峰值较小,变化较为平缓; f_2 处速度峰值较大,但变化很剧烈.后面的实验将在 $f_2=560\text{ Hz}$ 处测量.

2.1.2 不同孔径下射流出口中心线的速度分布

本次实验测量了孔径为 1 mm, 1.5 mm, 2 mm, 2.5 mm, 3 mm 时的射流出口中心线速度分布,实验结果如图 5 所示,频率为 $f_2=560\text{ Hz}$.从

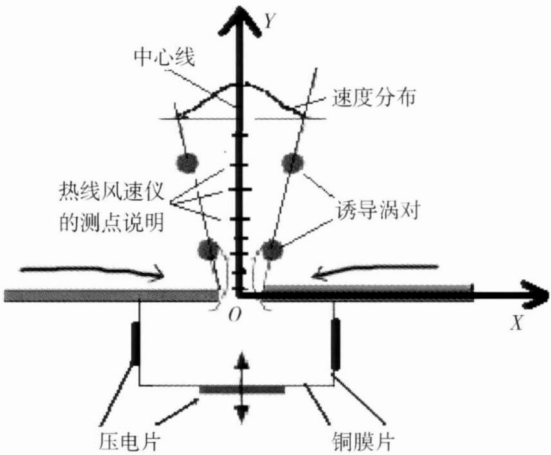
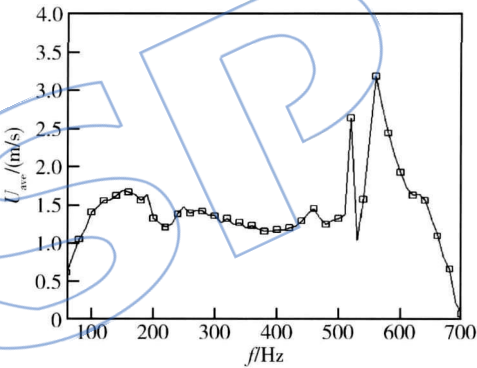
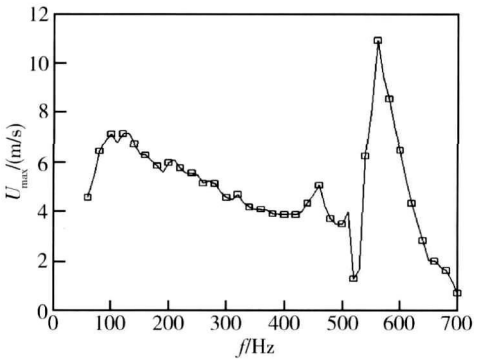


图 3 流场结构、坐标系及测点位置示意图

Fig.3 Flow structure, coordinate and the measurement point of orifice exit flow field



(a) 平均速度



(b) 峰值速度

图 4 不同频率下的中心线平均速度和峰值速度分布

Fig 4 Axis mean and peak velocity under different frequency

图中可以看出,对于一定厚度的出口板,有一个最佳直径的孔,能使出口射流峰值速度达到最大.从实验结果以看出,最佳孔径为 2.5 mm.从平均速度和峰值速度的轴向分布还可以看出,随着孔径的减小,速度值沿轴向下降得更快.说明小孔虽然

有可能产生较高的速度, 但沿轴向衰减很快; 大孔能产生平稳的射流出口速度场, 但其峰值速度和平均速度不一定最大的. 初步分析认为: 这是由于流体都有一定的压缩性. 当激励器腔体中的空气受到压缩, 就要向外排出, 排出的时间都是半个激励器周期, 腔内总有一部分气体来不及排出. 在这半个周期内, 剩余的气体越多, 出口质量流量就越小, 纵然出口速度增加, 但增加的程度不能补偿流量减小的程度, 二者之积即动量就会减小. 所以, 虽然激励器腔体产生的体积变化量是一样的, 但是孔径越小, 腔内气体所受压缩作用就越大, 憋在腔体内的气体就越多, 出口动量也越小, 相应的涡的能量也越小, 产生的涡很快便耗散在环境流体中, 但其出口速度较大. 孔径越大, 则恰好相反.

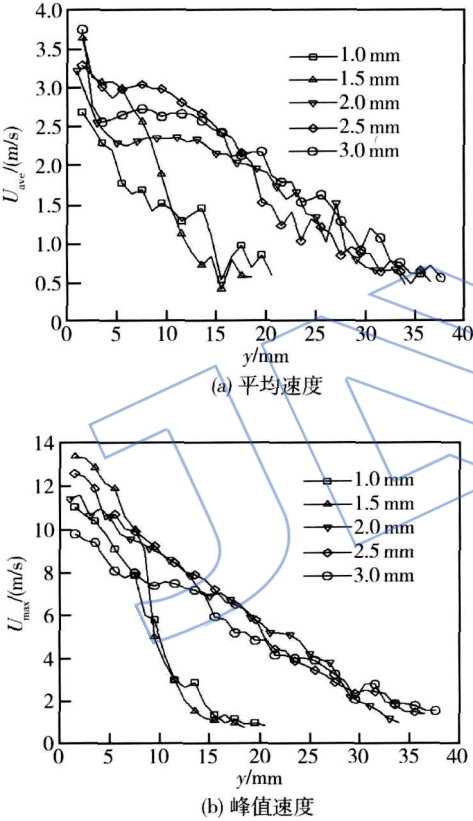


图 5 不同孔径下出口中心线平均速度和峰值速度分布

Fig. 5 Axis mean and peak velocity of different orifice diameter

2.1.3 不同压电片数时激励器性能对比

当射流出口孔直径固定为 2.5 mm、频率为 $f = 560\text{ Hz}$ 、压电片数为 1 片, 3 片, 5 片时的情况作了实验对比, 其出口轴向平均速度和峰值速度分布如图 6(a), 6(b) 所示.

由图可见, 3 片膜和 5 片膜同时振动的射流

出口中心线速度分布相差并不大, 尤其是平均速度, 分布几乎相同, 但是峰值速度有一些差别, 此时 3 片振动膜的情况下射流出口中心线速度沿轴线方向衰减得要比五片振动膜时的要稍快一些, 而 1 片振动膜的情况和其余两种情况差别较大. 5 片膜的情况下出口射流最大速度可达 13 m/s 以上, 而一片膜的情况下出口射流最大速度只有 6 m/s , 平均速度和峰值速度都较五片的情况小一半左右. 这说明: 虽然振动膜的数目增加能使激励器出口射流的能量增加, 但这种增加并非呈线性的关系.

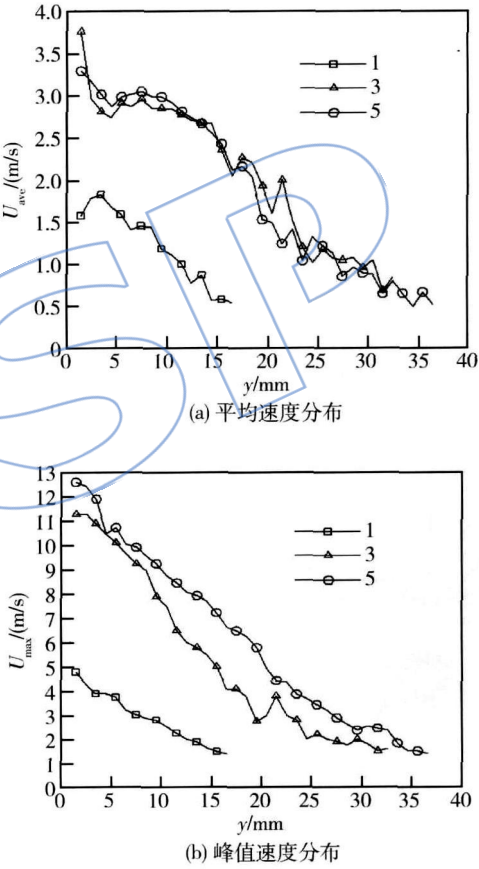


图 6 不同数目压电片的作动器出口流场中心线平均速度和峰值速度分布, $f = 560\text{ Hz}$
Fig. 6 Axis mean and peak velocity of different PE SJA diaphragms, $f = 560\text{ Hz}$

2.2 PIV 测量结果

2.2.1 流场中的涡结构

图 7 是 PIV 系统组成和结构原理示意图. 图 8(a) 是用 PIV 测得的零质量射流出口某一瞬时流场速度矢量图, 范围从小孔出口平面延伸到下游 $y = 20\text{ mm}$ 处, 激励器频率为 175 Hz , 小孔直径 $d = 2.5\text{ mm}$. 图中 3 个涡对和一个鞍点都清晰可见, 此图拍摄于激励器“吸”的半周期, 小孔周围

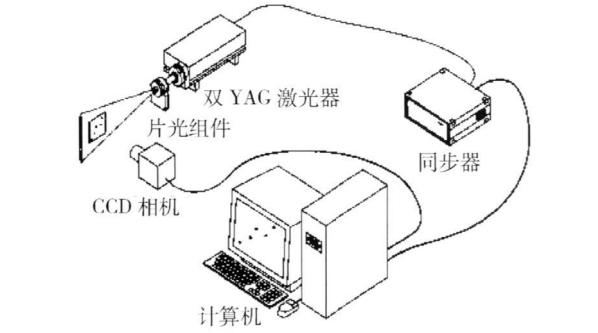


图 7 PIV 系统组成和结构原理示意图
Fig. 7 System structure and principle of PIV

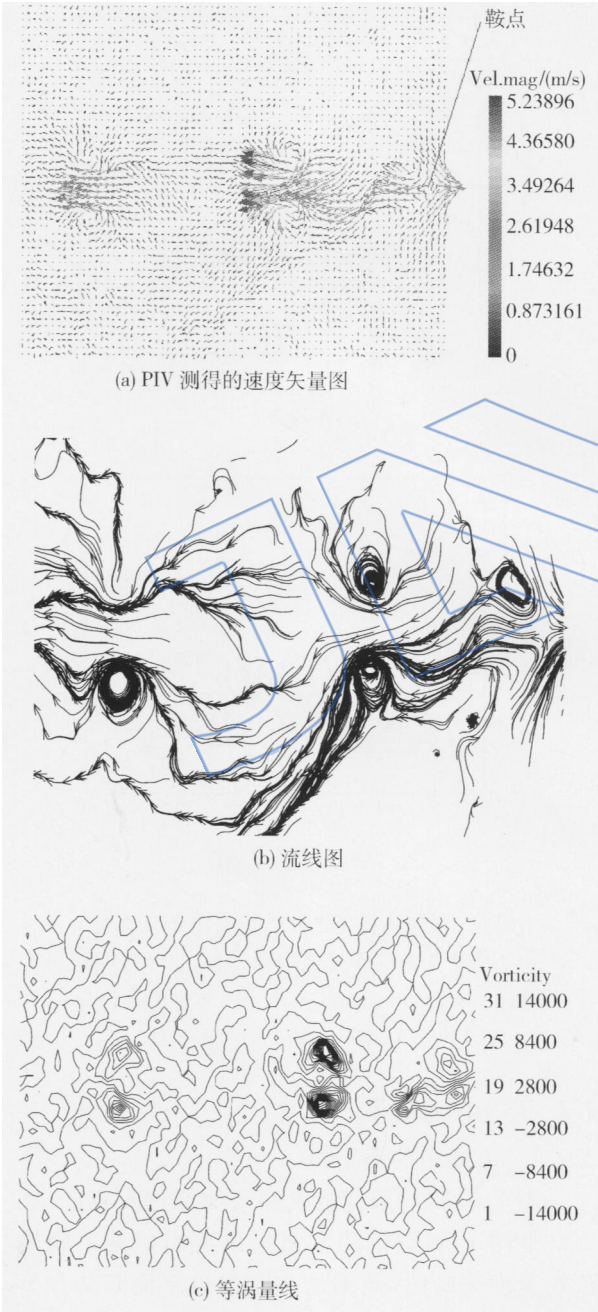


图 8 流场中的涡结构
Fig. 8 Vortex structure in the flowfield by PIV

的气体正在被吸入激励器内. 射流出口下游轴线“鞍”点将中心射流分为两个流向区: 向下游迁移区和流向激励器腔体的回流区, 二者互不相干. 鞍点左边的第一对涡正在形成, 中心喷流将外部流体卷吸进来, 第二对涡已经完全形成, 最大速度出现在该涡对的中心线偏下游处. 第三对涡已经开始耗散, 在向下游迁移过程中, 它将失稳, 破裂, 解体为无数微小尺度的涡, 形成湍流射流. 另外环境气体是从小孔的四面八方贴着壁面吸入, 但是喷出的时候总是沿着射流中心线方向. 流场的流线和等涡量线图如图 8(b), 图 8(c) 所示, 涡结构清晰可见.

2. 2. 2 射流出口流场中心线速度分布以及不同截面的动量分布

与图 8 对应的射流出口流场中心线速度分布如图 9(a) 所示. 对比图 8 可以看出, 每对涡都对应着一个速度峰值, 其中以第二对涡对应的速度峰值最大, 这对涡是刚刚完全形成. 注意在大约 $y < 0.5 \text{ mm}$ 以下处, 速度为负值. 这表明鞍点大约位于 $y = 0.5 \text{ mm}$ 处. 图 9(b) 是射流出口流场不同截面的体积流率分布, 它和图 9(a) 非常一致, 这表明在某一瞬时流场中心线不同 y 坐标的速度分布很大程度上决定了流场不同截面处的动量分布.

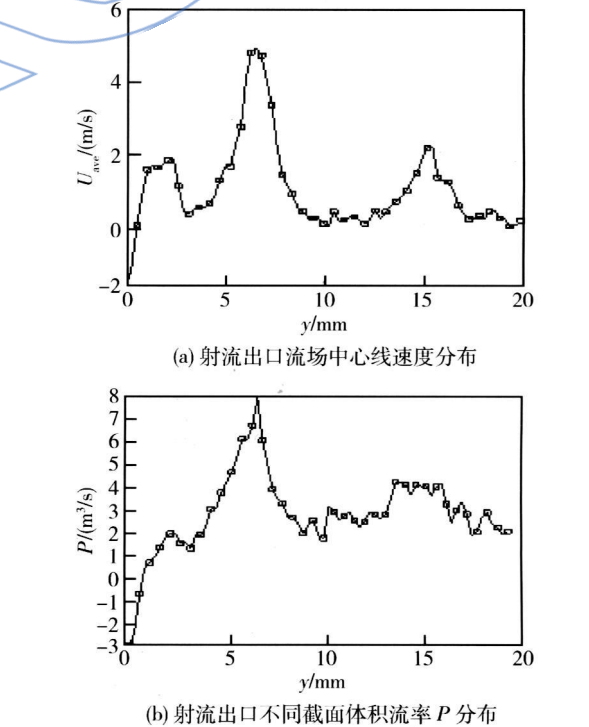


图 9 射流出口流场中心线速度分布和不同截面体积流率分布
Fig. 9 Axis velocity downstream of the exit and volume flow rate on the different section along the orifice centerline, PIV

2.3 实验结果的误差估计

本次实验中误差的来源主要是模型加工精度、信号发生器和功放的误差、测点位置误差、热线风速仪和 PIV 仪器本身的误差等, 其中后面两项为主要误差来源. 热线风速仪的测点位置的精度为 0.01 mm, 热线的测量精度高于 1%, PIV 的测量精度在 1% 左右, 所以整个测量结果的误差应该在 1% 左右.

3 结 论

利用热线风速仪, 测量不同频率下射流中心线上固定位置处的速度, 得到对应于射流出口速度最大时的最佳频率为 560 Hz. 在该频率下, 测量了零质量射流在不同孔径时沿中心线的速度分布, 确定了最佳的孔径为 2.5 mm. 通过测量、比较了不同激励膜数目对射流出口速度分布的影响, 得出: 在其他条件完全相同的情况下, 1 片振动膜时的激励器出口中心线上的平均速度和峰值速度, 都较 5 片膜的情况小一半左右, 5 片膜的情况下出口射流最大速度可达 13 m/s 以上, 而一片膜的情况下出口射流最大速度只有 6 m/s, 但是 3

片和 5 片压电膜时的激励器性能差别却不大. 也就是说, 虽然压电膜的数目增加能使激励器出口射流的能量增加, 但这两者之间并非呈线性关系. 这一研究结果对于提高现有压电式零质量射流激励器的性能提供了有益的参考. 此外还用 PIV 测量方法, 直观地显示了射流出口流场的涡结构, 其中最大速度出现在第二对涡中心线的下游. 鞍点位于出口截面下游 0.5 mm 处.

参考文献:

[1] Smith B L, Glezer A. The formation and evolution of synthetic jets[J]. Phys. Fluids, 1998, 10(9): 2281-2297.

[2] Utturkar Y, Holman R, Mittal R, et al. A jet formation criterion for synthetic jet actuators[R]. AIAA-2003-636.

[3] McMichael J M. Progress and prespect for active flow control using microfabricated electromechanical systems (MEMS) [R]. AIAA-96-0306.

[4] 罗振兵 夏智勋. 合成射流技术及其在流动控制中应用的进展[J]. 力学进展, 2005, 35(2): 221-23.

LUO Zhenbing, XIA Zhixun. Advances in synthetic jet technology and application in flow control[J]. Advances In Mechanics, 2005, 35(2): 221-234.