

文章编号 :1001 - 2486(2004)06 - 0009 - 06

激励器结构参数对合成射流影响的试验研究*

罗振兵,朱伯鹏,夏智勋,王德全

(国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘要:为了设计高性能的合成射流激励器,实验采用热线风速仪测量激励器出口的流动速度,对不同大小激励器、不同出口形状激励器、单/双膜激励器以及金属振动膜处于不同装配受压状态下的激励器分别进行了试验。实验结果显示,激励器的结构决定了合成射流激励器的性能,激励器出口射流平均速度除了与激励器大小、出口面积有关外,还与出口形状有关,采用方孔/矩形孔形式的开口有利于建立较强的合成射流,双膜与单膜工作相比,合成射流最大速度基本上是成两倍关系,金属振动膜的安装形式(受压状态)不影响合成射流随频率的变化规律,但对合成射流速度影响很大,当激励器振动膜处于螺栓拧紧受压状态时,与振动膜不受压状态相比,合成射流出口速度几乎下降了一个数量级。

关键词:合成射流;流动主动控制;实验;结构参数

中图分类号:O35 文献标识码:A

Experimental Study of the Effects of the Geometric Parameters of Actuator on Synthetic Jets

LUO Zhen-bing, ZHU Bo-peng, XIA Zhi-xun, WANG De-quan

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: For the purpose of designing a high performance synthetic jet actuator, the performance of actuators has been investigated experimentally for a range of geometric parameters. It is showed that the performance of a synthetic jet actuator is determined by these geometric parameters, the square/rectangle exit-slot is propitious to found a powerful synthetic jet, and the maximal velocity of actuator with dual-membranes is doubled compared with the actuator with a single-membrane. It is also found that varying the pressing states of membrane does not change the main relations between synthetic jets and the exciting frequency but affects the synthetic jet velocity values a lot.

Key words: synthetic jet; active flow control; experiment; geometric parameter

随着现代生物技术、纳米技术和信息技术的发展,21 世纪的空气动力学将首先在流动控制方面取得重大突破^[1]。基于 MEMS 及非线性复杂大系统不稳定性理论,在国际上诞生了一种全新、高效的流动控制技术——合成射流技术^[2],它是流动控制领域近十年来最热门、最活跃的流动主动控制技术之一。目前,国外包括美国 NASA 研究中心、乔治理工大学和麻省理工学院以及加拿大多伦多大学、澳大利亚悉尼科技大学和日本东京大学在内的科研机构和院校正在对它进行机理、实验和应用等方面的研究^[2-6];国内,清华大学、国防科技大学、西北工业大学等也在这方面开展了研究^[7-13]。随着研究的进一步深入,合成射流技术可望用于增强燃烧掺混、飞行器气动力控制和射流向量控制以及各种元器件的换热控制等,应用前景十分广阔。

合成射流激励器结构决定了合成射流激励器的性能。合成射流技术要实现其在工程上的广泛应用,首先必须对激励器结构参数对合成射流的影响规律进行考察。作为激励器作动部件的压电陶瓷金属复合振动膜是通过逆压电效应工作的,涉及到电力转换、合成射流的形成和发展演变、流体力学和声学的耦合过程,目前要对合成射流激励器的整个工作过程进行数值仿真还十分困难;另外,激励器相关项目的实验结果是建立合成射流激励器数学计算模型的基础,因此有必要对合成射流激励器

* 收稿日期 2004 - 04 - 23

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90205016),国家自然科学基金资助项目(50176055)

作者简介:罗振兵(1979—)男,博士生。

进行相关项目的试验研究。本文实验采用热线风速仪测量激励器出口的流动速度,对不同大小激励器、不同出口形状激励器、单/双膜激励器以及金属振动膜处于不同受压状态等对激励器出口合成射流速度的影响分别进行了比较试验,以期设计高性能合成射流激励器提供指导。

1 实验设备

1.1 合成射流激励器

合成射流激励器是一种小型或微型流体控制器件,作为合成射流的驱动部件,是合成射流技术发展的一个核心问题。合成射流激励器的结构主要由两部分组成:激励器腔体和振动部件。振动部件即压电陶瓷金属复合振动膜。振动膜通过逆压电效应将输入的电能转化为振动膜的动能,并通过激励器腔体转化为合成射流动能。图1是自行设计的合成射流实验激励器实物照片,激励器I为双膜结构,激励器II和III为单膜结构,激励器腔体及出口主要参数见表1,振动膜采用黄铜金属膜,金属膜中心贴有压电陶瓷片,对应金属振动膜及压电陶瓷片的主要参数见表2。

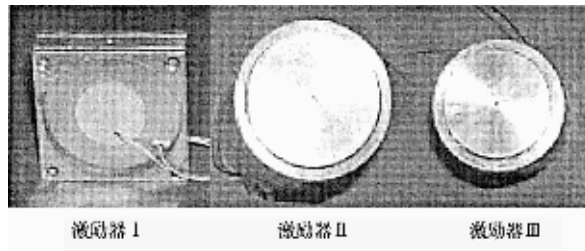


图1 合成射流实验激励器实物照片

Fig. 1 Photograph of synthetic jet actuators

表1 激励器腔体及出口主要参数

Tab. 1 Parameters of actuator cavities and exits

激励器	I			II	III
	圆孔	方孔	矩形孔	圆孔	圆孔
出口孔形状	圆孔	方孔	矩形孔	圆孔	圆孔
出口孔尺寸 d (mm)	$\phi 2$	2×2	2×4	$\phi 2$	$\phi 1$
出口孔壁厚度 h (mm)	2			3	5
腔体直径 D_c (mm)	$\phi 46$			$\phi 44$	$\phi 34$
腔体高度 H (mm)	8			8	2

表2 金属振动膜及压电陶瓷片的主要参数

Tab. 2 Parameters of metal membrane and PZT

激励器	I	II	III
金属振动膜(黄铜)			
直径 d (mm)	$\phi 50$		$\phi 41$
厚度 t (mm)	0.20		0.10
弹性模量 E (Pa)	8.963×10^{10}		
泊松比 ν	0.324		
密度 ρ (kg/m^3)	8700		
压电陶瓷片(PZT)			
直径 D_p (mm)	$\phi 30$		$\phi 25$
厚度 t_p (mm)	0.15		0.12

1.2 实验测试系统

实验在静止空气环境中进行,实验测试系统原理图如图 2 所示,整个实验测试系统由四部分组成:电压输入系统、激励器定位系统、数据采集系统及数据分析系统。实验用热线及热线风速仪作为速度测量设备,用高速数据采集记录仪采集数据并向计算机输入数据进行分析,采样频率为 10kHz,激励器工作电压由激励电源提供,激励电源放大系数为 100,电压信号波形、幅值及激励频率由函数发生器控制。实验时,热线位置保持不动,通过激励器定位仪改变和确定激励器位置,实现合成射流下游各点的速度测量。

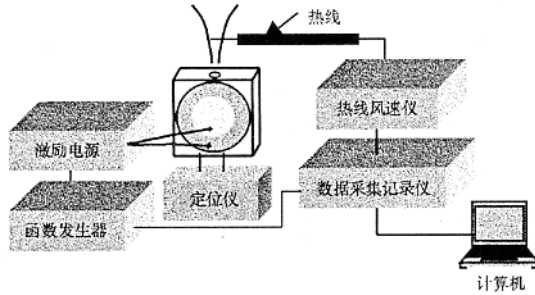


图 2 实验测试系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

2 实验结果及分析

本实验采用恒温式热线风速仪测量出口的流动速度,函数发生器输出电压幅值为 U_0 ,激励频率为 f ,激励电压信号波形为正弦波和方波(以下分析中 d 的取值为 2mm)。

由于实验采用热线风速仪测量出口的流动速度,因此记录数据是通过热线电流的电压幅值来衡量的,同时数据只能反映气体流动速度值的大小。恒温式热线仪的输出电流的电压大小 U_{out} 与测量的气体流动速度大小 V 有如下关系式^[14]:

$$U_{out} = a + b\sqrt{V}$$

其中 a 为气体流动速度为零时的电压值,对于激励器每次实验进行了调零,即 $a \approx 0$; b 为气体流动速度与输入电压的比系数,实验后,将热线置于风洞中进行校准以获取比系数值,本实验 $b \approx 0.667$ 。

2.1 不同激励器出口速度分布

在相同条件下,分别对激励器 II 和 III 进行了试验,图 3 是激励器 II 和 III 在不同激励电压幅值下,在出口下游 $x = 2\text{mm}$ 处的合成射流速度随频率变化的曲线。从图 3 可以得到以下结论(1)激励器的金属振动膜、压电陶瓷片、出口大小等因素对合成射流影响很大,从图 3 右图可以看到,激励器 II 比激励器 III 的合成射流平均速度大得多。(2)激励电压的幅值存在最佳值,使得合成射流能量最强(平均速度最大),而且在这个电压条件下,有效工作频率带宽最宽,图 3 右图显示,随着激励电压幅值从 100mV 增大到 300mV,合成射流平均速度显著提高,但从 300 mV 增大到 500mV,合成射流平均速度是下降的,而且在 300mV 条件下,有效工作频率带宽较 100mV 和 500mV 大得多。

另外,试验还观察到了合成射流“锁频”现象,即在某激励电压下,当激励频率高于某频率时,再提高激励频率,激励器出口最大速度基本保持不变,且出口射流振动频率不变,如图 3 所示,激励器 II 和 III 在激励信号电压幅值为 100mV,当激励频率大于 100Hz 时,再提高激励频率,出口最大速度都基本保持不变,并且在实验中记录到激励器 II 和 III 出口射流振动频率分别保持 20Hz 和 21Hz 不变。

2.2 激励器不同出口形状射流的影响

激励器 I 的出口采用三种形式,如表 1 所示。在出口下游 $x/d = 1.3$ 处,通过实验测得的不同出口形式下合成射流速度随频率变化曲线如图 4 所示。从图 4 可以得到结论(1)合成射流最大速度随着激励器出口面积的增大而减小,这与理论分析及数值计算结果吻合^[9,10](2)激励器出口近处的射流平均速度除了与出口面积有关外,还与出口采用的形状有关,采用方孔/矩形孔形状的开口有利

于建立较强的合成射流(3)存在最佳激励频率使得合成射流平均速度最大,且最佳激励频率不受出口形状以及激励器结构的影响,只与金属振动膜有关,这个最佳激励频率与激励器金属振动膜的谐振频率接近,金属振动膜的谐振频率由下式^[15]确定:

$$f_{1,2} = \frac{K_{1,2}}{2\pi} \sqrt{\frac{4Et^2}{3(1-\nu^2)\rho D^4}}$$

其中 $K_{1,2} = 10.2, 21.3$ 。由上式及激励器金属振动膜主要参数(见表2),计算得到的金属振动膜的一阶、二阶谐振频率分别为 $f_1 = 509\text{Hz}$ 、 $f_2 = 1062\text{Hz}$ 。图3和图4右图显示,实验测得的最佳激励频率为500Hz左右,与金属振动膜的一阶谐振频率 f_1 接近。这是因为压电振动膜电路在处于谐振时,电路阻抗最小,金属振动膜获得的机械能最大,即金属振动膜振幅最大,因此合成射流动能最大。

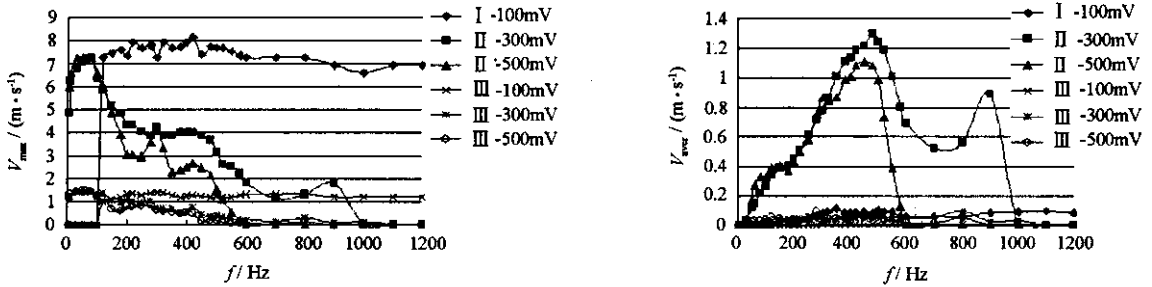


图3 不同电压下合成射流最大速度和平均速度与激励频率关系曲线

Fig. 3 Maximum and average jet velocity as a function of the forcing frequencies with different voltage

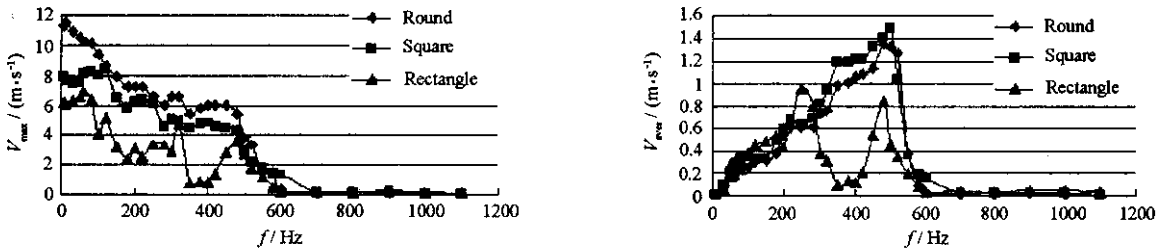


图4 不同出口激励器合成射流最大速度和平均速度与激励频率关系曲线 ($U_0 = 400\text{mV}$)

Fig. 4 Maximum and average jet velocity as a function of the forcing frequencies with different exit-stot

2.3 激励器单/双膜工作比较

对激励器 I 在双膜同时工作和单膜工作下进行了比较实验,图5即为实验测得的在激励器出口下游 $x/d = 1.3$ 处单/双膜工作的合成射流速度随频率变化的曲线,1代表单膜,2代表双膜。

从图5可以得到结论:双膜与单膜工作相比,合成射流最大速度基本上是成两倍关系。其原因是:双膜工作与单膜工作相比,金属振动膜的振幅增加了一倍。双膜工作时合成射流平均速度也有增加。

2.4 激励器金属振动膜装配受压状态的影响

实验研究了激励器金属振动膜的装配形式(受压状态)对射流的影响,激励器金属振动膜的装配形式采用四种形式(1)胶粘(不受压)(2)胶粘+螺栓拧紧(受压很大)(3)胶粘+螺栓预紧(受压小)(4)胶粘+单侧螺栓拧紧(单侧受压,受压较大)。

图6为在激励器出口下游 $x/d = 1.3$ 处实验测得的金属振动膜不同装配形式下的合成射流速度随频率变化的曲线。从图6可以得到以下结论(1)金属振动膜的受压程度对合成射流影响很大,当激励器振动膜处于螺栓拧紧状态时,相对于振动膜不受压状态,合成射流出口速度几乎下降了一个数量级。这是因为受压限制了金属振动膜的振动,振幅减小,从而导致激励器出口合成射流的速度显著

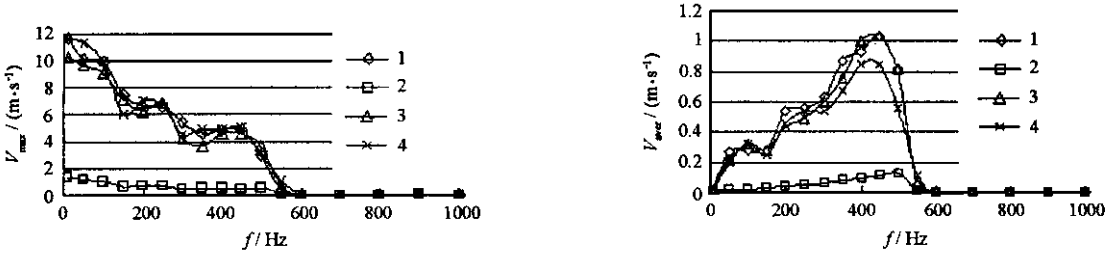


图5 单/双膜工作的合成射流最大速度和平均速度与激励频率关系曲线 ($U_0 = 400\text{mV}$)

Fig. 5 Maximum and average jet velocity as a function of the forcing frequencies with dual-membrane and single-membrane

减小。(2)与金属振动膜胶粘不受压状态相比,金属振动膜处于胶粘+单侧螺栓拧紧(单侧受压)状态,虽然出口最大速度无明显变化,但激励器出口合成射流平均速度明显减小。(3)金属振动膜的装配形式(受压状态)不影响合成射流随频率的变化规律。

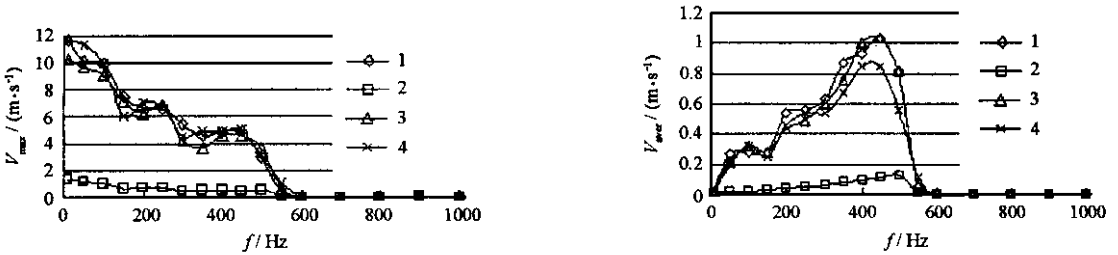


图6 不同装配形式下合成射流最大速度和平均速度与激励频率关系曲线 ($U_0 = 400\text{mV}$)

Fig. 6 Maximum and average jet velocity as a function of the forcing frequencies with different pressing states of membrane

2.5 合成射流出口速度分布

图7是激励器I出口为矩形口时,在出口下游 $x/d = 1$ 径向位置的合成射流速度分布。从图可以看到,激励频率为 100Hz 时,合成射流速度呈“鞍”状分布,可以推测在激励器出口即 $x/d = 0$ 处,合成射流速度的这种“鞍”状分布将更明显,因此在进行合成射流数值计算时,激励器出口流动模型不能采用简单单一的函数表达式近似。由本实验获得的数据进一步证明了我们建立并采用的激励器全流场计算模型(X-L模型^[9,11])的优越性和完善性,与国际上通常采用的激励器出口流动模型^[8,13]相比,它有了很大的提高。

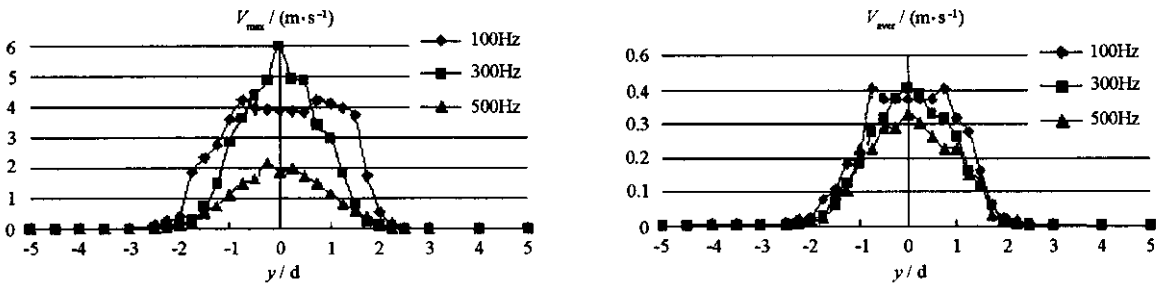


图7 合成射流最大速度和平均速度在径向位置的分布 ($U_0 = 400\text{mV}$)

Fig. 7 Maximum and average jet velocity as a function of the radial distance from the exit axes

3 结论

激励器的结构决定了合成射流激励器的性能,激励器出口射流平均速度除了与激励器大小、出口面积有关外,还与出口形状有关,采用方孔/矩形孔形状的开口有利于建立较强的合成射流;双膜工作与单膜工作相比,合成射流最大速度基本上是成两倍关系,金属振动膜的受压状态不影响合成射流随频率的变化规律,但对合成射流速度影响很大,当激励器振动膜边界处于压紧状态时,相对于不受压

状态,合成射流出口速度几乎下降了一个数量级,这是因为金属振动膜的受压大大限制了金属振动膜振动,导致金属膜振幅显著减小。因此,为设计高性能合成射流激励器,建议(1)激励器采用双膜对称结构,或多膜对称阵列结构(2)金属振动膜的安装避免受到挤压(3)激励器出口形状采用方口或矩形口(4)金属振动膜面积不宜过小,激励器出口的孔缝大小应当适中。

实验还发现,合成射流存在“锁频”现象。合成射流在出口截面的速度分布不能采用简单函数表达式近似。

参考文献:

- [1] 庄逢甘,黄志澄. 未来高技术战争对空气动力学创新发展的需求[A]. 2003 空气动力学前沿研究论文集,北京:中国宇航出版社,2003:73-80.
- [2] Kral L D. Active Flow Control Technology[R]. ASME Paper ,No. FEDSM2001-18196,2001:1-28.
- [3] Smith B L, Glezer A. The Formation and Evolution of Synthetic Jets[J]. Phys. Fluids,1998,10(9):2281-2297.
- [4] Yakymyk, William N N. Experimental Investigation of Synthetic Jet Actuators for the Control of Separated Flow[D]. Ph. D Thesis, University of Toronto(Canada),2002.
- [5] Lee C, Guang H, Ha Q P, et al. A Piezoelectrically Actuated Micro Synthetic Jet for Active Flow Control[J]. Sensors and Actuators A: Physical,2003,108:168-174.
- [6] Kurimoto N, Suzuki Y, Kasagi N. Active Control of Coaxial Jet Mixing and Combustion with Arrayed Micro Actuators[A]. Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics,2001:511-516.
- [7] 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(自然科学版),2000,40(12):86-89.
- [8] 罗小兵,李志信,过增元. 不可压缩合成喷流场的数值模拟[J]. 工程热物理学报,2001,22(增刊):56-58.
- [9] 罗振兵. 合成射流流动机理及应用技术研究[D]. 首届全军优秀硕士学位论文,国防科技大学,2002.
- [10] 罗振兵,夏智勋,方丁酉. 合成射流影响因素[J]. 国防科技大学学报,2002,24(3):32-35.
- [11] 罗振兵,夏智勋,胡建新. 相邻激励器合成射流流场数值模拟及机理研究[J]. 空气动力学学报,2004,22(1):52-59.
- [12] 罗振兵,夏智勋,方丁酉. 合成射流激励器实验及结果分析[J]. 宇航学报,2004,25(2):201-204,218.
- [13] 高峰,汪亮,杜新. 微射流作动器外流场数值模拟[J]. 西北工业大学学报,2003,21(2):244-247.
- [14] 徐有恒,穆晟. 基础流体实验[M]. 上海:复旦大学出版社,1990.
- [15] 吴淇泰. 振动分析[M]. 济南:山东大学出版社,1989.

