

文章编号:1000-8055(2009)03-0558-08

自耦合射流流动特性的 PIV 实验研究

谭晓茗, 张靖周

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 采用三维粒子图像测速仪(PIV)对具有相同出口面积的圆孔喷口和狭缝喷口自耦合射流发生器外部流场特征进行了实验研究. 结果表明:狭缝喷口自耦合射流与圆孔喷口自耦合射流的形成过程相同, 都经历了涡环产生、发展、破碎融合的周期性过程, 在某个法向距离上形成较为稳定的连续性射流. 时均流场分布表明狭缝喷口自耦合射流的流场型面较宽, 扩展角度较大. 狭缝短轴方向和圆孔水平方向上自耦合射流的时均速度曲线呈现规则的对称分布和速度自模的特征, 而狭缝长轴方向自耦合射流在靠近喷口处的速度分布呈现马鞍状, 这一特征随着法向距离增大而逐渐消失.

关 键 词: 自耦合射流; 流动特性; PIV; 速度分布; 实验研究

中图分类号: O354; V231.1

文献标识码: A

PIV experimental study on flow characteristics of synthetic jets

TAN Xiao-Ming, ZHANG Jing-Zhou

(College of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: The characteristics of flowfields of synthetic jets with slot-nozzle and hole-nozzle were investigated experimentally by utilizing Particle Image Velocimetry (PIV). The results show that: the formations of the synthetic jets from different nozzles are the same. During the formation process, the rings of vortexes were generated, developed, broken down and merged together periodically, forming a steady jet within a certain normal distance near the orifice exit. The time-averaged flowfields of the synthetic jets were continuous and steady. However, the slot-nozzle synthetic jet appeared wider than the hole-nozzle synthetic jet with a bigger spreading angle. The velocity profiles of the slot-nozzle synthetic jet along the slot-width and the horizontal hole-nozzle synthetic jet appeared symmetrically and self-similarly. But, the velocity profiles of the slot-nozzle synthetic jet along the slot length direction took on a saddle shape and disappeared with the increase of normal distance from the nozzle.

Key words: synthetic jet; flow characteristics; PIV (Particle image velocimetry); velocity distribution; experimental investigation

近年来,自耦合射流的研究已成为国内外学者关注的热点之一^[1-4]. 和常规射流相比,自耦合射流的产生不需要流体供给设备,它是在一个表面开有喷口的腔体上利用底面膜片的周期性振动

使出口处产生一系列向外扩展的非定常涡环,这一系列的涡环对外流的作用类似于一股射流. 自耦合射流具有结构简单,易于操作等优点,只需要改变激发器的激励参数或几何参数就可以控制射

收稿日期:2008-01-10; 修订日期:2008-06-26

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金(20070287040)

作者简介:谭晓茗(1976-),女,江苏徐州人,副教授,博士,主要从事传热传质研究. E-mail:catam@sina.com

流的整体状态,因此其应用非常广泛,它可以提供动量通量、进行矢量控制、增强掺混、加强换热传质控制等^[5-7].目前,国内的清华大学^[8]、国防科技大学^[9]、南京航空航天大学^[10-11]等科研机构在这方面已经开展了大量的研究工作.在航空航天领域,这一技术还可以用于机翼前沿边界层分离控制和增加升力,尾喷管的矢量推力控制和卫星姿态的调整等^[12-13].显然,这一技术具备非常广阔的应用前景,因而加深对自耦合射流的了解与认知就成为必然趋势.本文利用三维粒子图像测速仪(PIV)对压电驱动的具有圆孔喷口和狭缝喷口自耦合射流的流场结构进行了详细显示与比较分析,以进一步了解自耦合射流的形成机理与流场特征.

1 实验装置和测量方法

自耦合射流原理如图 1 所示.自耦合射流激发器简图如图 2 所示,腔体为圆柱体,腔体直径 $D=30\text{ mm}$,腔体高度 $H=5\text{ mm}$;腔体顶面为射流出口孔板,狭缝喷口尺寸:长 $l=10\text{ mm}$,宽 $b=0.5\text{ mm}$;圆孔喷口直径 $d=2.5\text{ mm}$;为了结果的可比性,狭缝出口面积和圆孔出口面积基本相同.腔体底面为压电膜片,由 PZT-5 型压电陶瓷片和紫铜膜片粘结而成,压电陶瓷片直径为 20 mm ,紫铜片厚度为 0.1 mm .

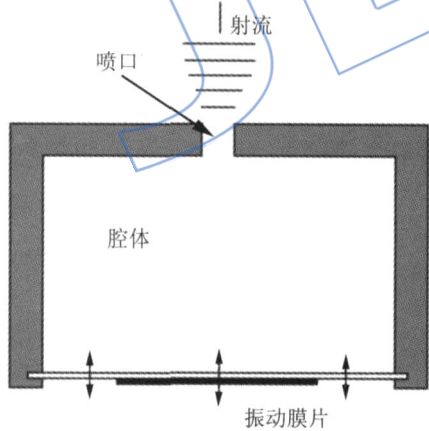
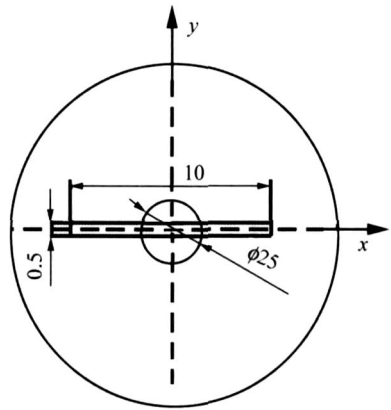


图 1 自耦合射流原理简图

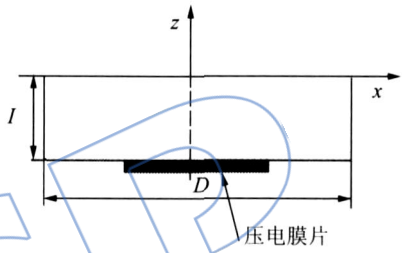
Fig. 1 Schematic of synthetic jet actuator

对流场的测量采用的是三维粒子图像测速仪(PIV),它可以无接触测量速度矢量,测量精度高,在片光源面上速度精度为 0.1% ,穿过片光源面方向 0.2% .测量系统简图如图 3 所示,系统的主要组成部分为:

1) 双脉冲激光器:最大输出功率 200 mJ/Pulse ,脉冲波长为 532 nm ,双脉冲激光重复频率 15 Hz ;



(a) 激发器顶面



(b) 激发器纵剖面图

图 2 激发器实验件简图(单位:mm)

Fig. 2 Synthetic diaphragm of synthetic jet actuators (Unit:mm)

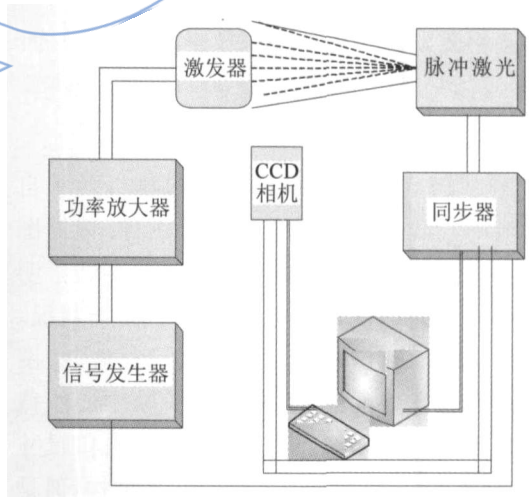


图 3 PIV 测试系统简图

Fig. 3 Schematic diagram of PIV system

- 2) 互相关 CCD 数字相机:分辨率 1016×1008 Pixel,双帧频为 15 fps ;
- 3) 片光源:由柱面镜和球面镜组成的光学原件,片光小于 1 mm ;
- 4) 同步器: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;
- 5) 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;

6) 示踪粒子:本实验中采用香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.

实验过程中,投放示踪粒子,调节粒子分布的均匀性并保证足够的粒子浓度.打开激光,照亮所要测量的流场区域,调整片光平面与自耦合射流中心线重合,并且保持 CCD 相机光轴与片光平面垂直.由于 PIV 测量系统对瞬时速度场的最高采样率为 15 Hz,不能满足实际动态连续采样的要求,故本实验中采用了相位锁定技术,由外部正弦波信号作为主时序触发信号,同时输给实验件与同步器,从而得到一个周期内约 12 个相位的流动图像.为了得到较高的流场空间分辨率,将 CCD 相机的采集区域保持为 $140\text{ mm} \times 105\text{ mm}$ 大小. CCD 相机所拍摄的图像通过采集卡输入到计算机中,通过 Insight 软件和 Tecplot 软件进行相应的处理从而得到流场的速度矢量分布结果.每对图像计算后将得到 $101 \times 96 = 9696$ 个速度矢量,进行互相关计算时所取查询区的大小为 16×16 Pixel.

2 实验结果与讨论

实验中激发器采用方波信号输入,电参数为:电压 $E = 175\text{ V}$ 、激发频率 $f = 1000\text{ Hz}^{[11]}$.

2.1 流场显示

图 4 为 PIV 系统捕捉到的不同喷口形状自耦合射流中心截面的瞬态流动原始图像.根据图中自耦合射流对示踪粒子的干扰而产生的粒子明暗区域可以定性地观察自耦合射流的流场状况.如图 4 所示,狭缝短轴喷口处产生的“豆瓣”状图案就是激发器产生的涡对.从狭缝长轴中心线截面上拍摄到的流动图像可以看出,由于出口尺寸较大,流体在出口处形成了一个条状涡结构,但是这个条形涡在向下游运动的过程中也破碎成了大小不一的涡串,并逐渐消散到主流当中.从实验中还可以发现一个有趣的现象:在喷口出现明显涡对下游的一段距离内,长轴方向的自耦合射流作用范围大于短轴方向的,但再向下游发展,短轴方向的自耦合射流明显向外发展,而长轴方向的自耦合射流则呈现了收敛的趋势.

在同一时刻,圆孔喷口自耦合射流的外流场流域形态和狭缝喷口自耦合射流差别很大,流场的构成是一系列间隔明显的涡串,涡对并没有很快破碎融合到一起.而狭缝喷口自耦合射流只是

在喷口处出现了明显的涡对,在流场下游涡对已

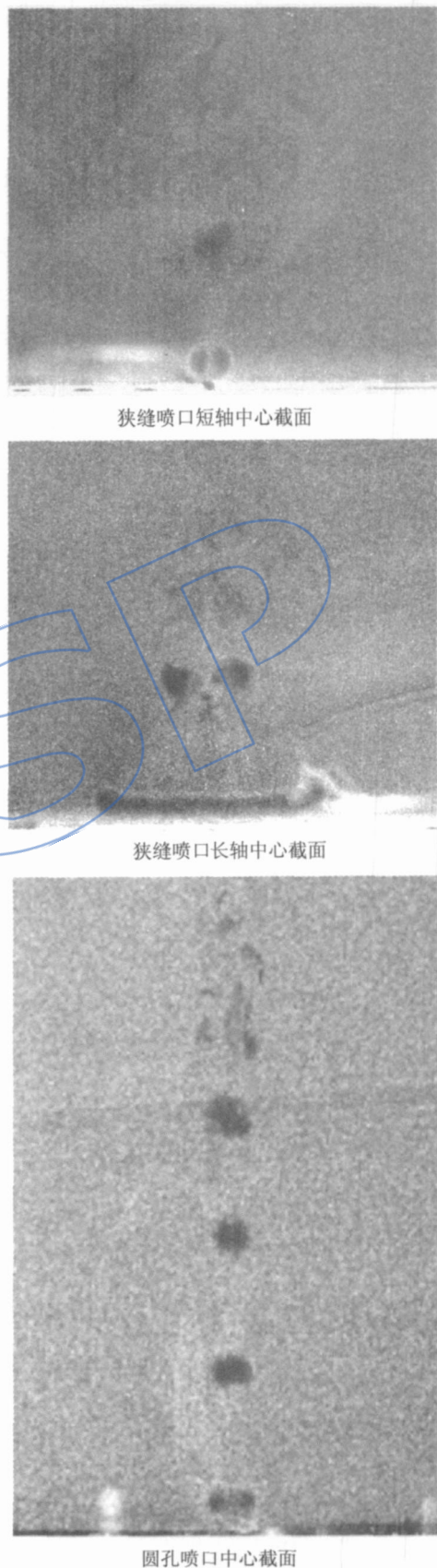
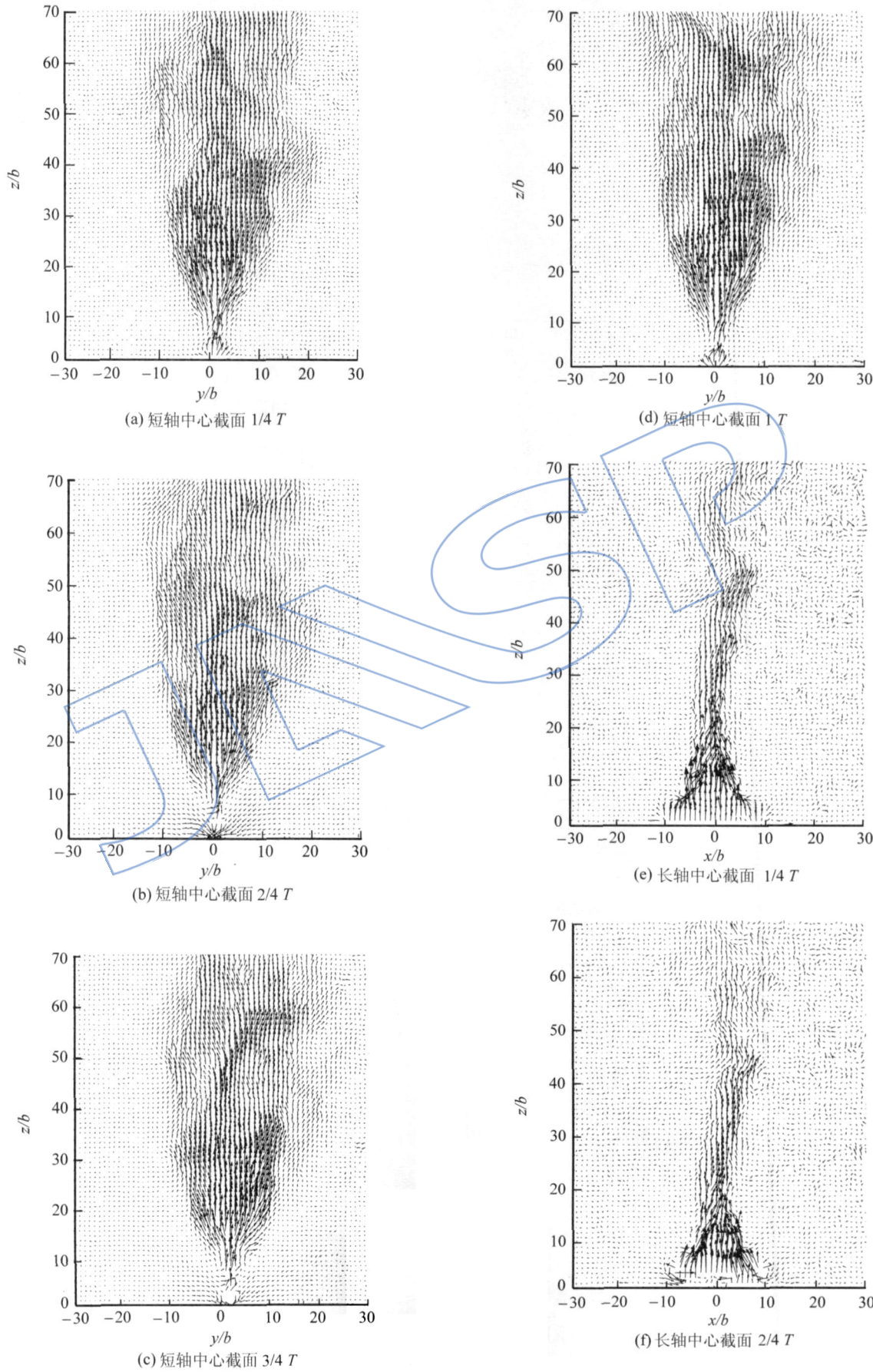


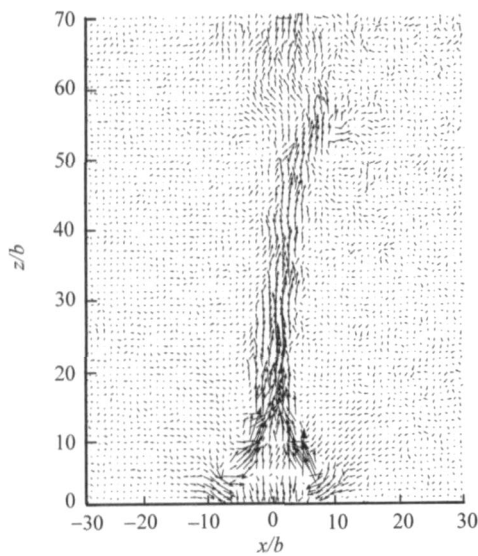
图 4 自耦合射流 PIV 原场图($t = 0.25\text{ T}$)

Fig. 4 Flow visualization of synthetic jet ($t = 0.25\text{ T}$)

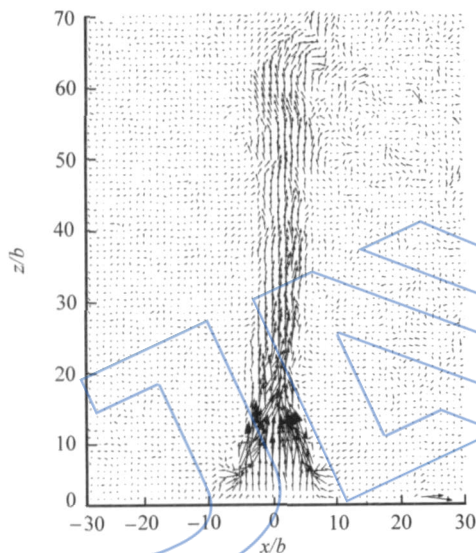
经破碎融合到主流当中,很难再看到清晰的涡对(见图 4).

图 5 所示为狭缝喷嘴自耦合射流在喷嘴长轴和短轴中心截面上一个激发周期内不同时刻的





(g) 长轴中心截面 $3/4 T$



(h) 长轴中心截面 $1 T$

图 5 狭缝喷口自耦合射流一个周期的速度矢量图

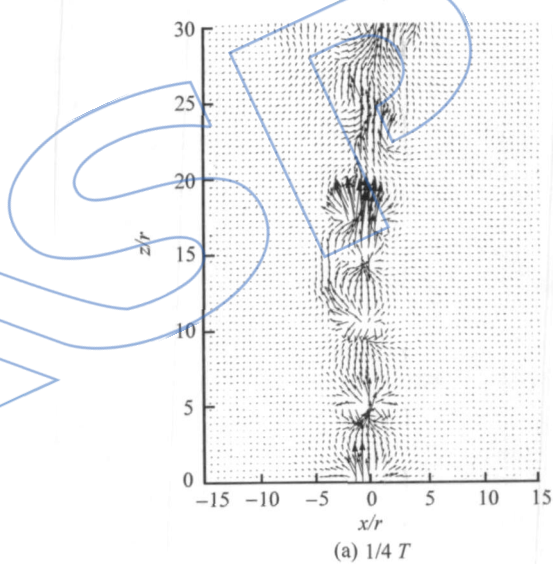
Fig. 5 Plots of velocity vectors on centrisymmetrical sections of slot-nozzle synthetic jet

速度矢量,图 5(a)~图 5(d)为短轴中心截面,图 5(e)~图 5(h)为长轴中心截面,从图中可以看出,不管是在喷口长轴方向还是短轴方向,流场都经历了周期性的发展.在 $t = 1/4 T$ 时,腔体底面膜片向上运动,气体从腔体内部喷出,在喷口附近形成一个反向涡对;在 $t = 1/2 T$ 时,这一涡对已经在自耦合射流自身的牵引作用下移动到了相对较远的位置,逐步与周围的气体掺混,不断进行动量交换,喷口出口的涡对消失;在 $t = 3/4 T$ 时,自耦合射流继续向下游发展并最终耗散于下游的流场中,同时腔体底面膜片向下运动,将喷口外部附近的流体抽吸进激发器腔体;到 $t = 1 T$ 时,一个

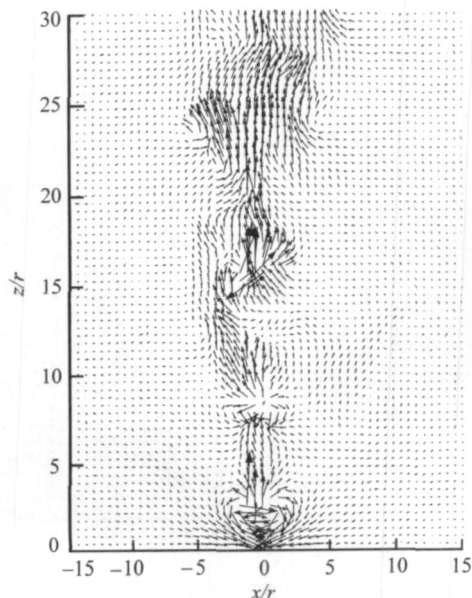
周期结束的同时伴随着又一个新周期的开始,气体从腔体喷出,生成新的涡对.正因为激发器底面膜片不停地做着周期性振动,出口处不断有反向涡对生成,并向下游发展,补充到自耦合射流中去,维持了自耦合射流的延续性.从整体上看,自耦合射流在短轴方向的发展较长轴方向的发展强度大.

图 6 是圆孔喷口自耦合射流喷口中心截面上的流场矢量图,从射流发展的整体趋势来看,射流的发展同样经历了周期性的变化,但是和狭缝喷口自耦合射流相比,其流场涡对之间的间隔非常明显,这说明了圆孔喷口自耦合射流在发展过程中对周围流体的卷绕以及自身的融合功能不强.

根据 PIV 在一定时间段内拍摄的流场图像迭加可以得到如图 7 所示的平均流场图像.



(a) $1/4 T$



(b) $2/4 T$

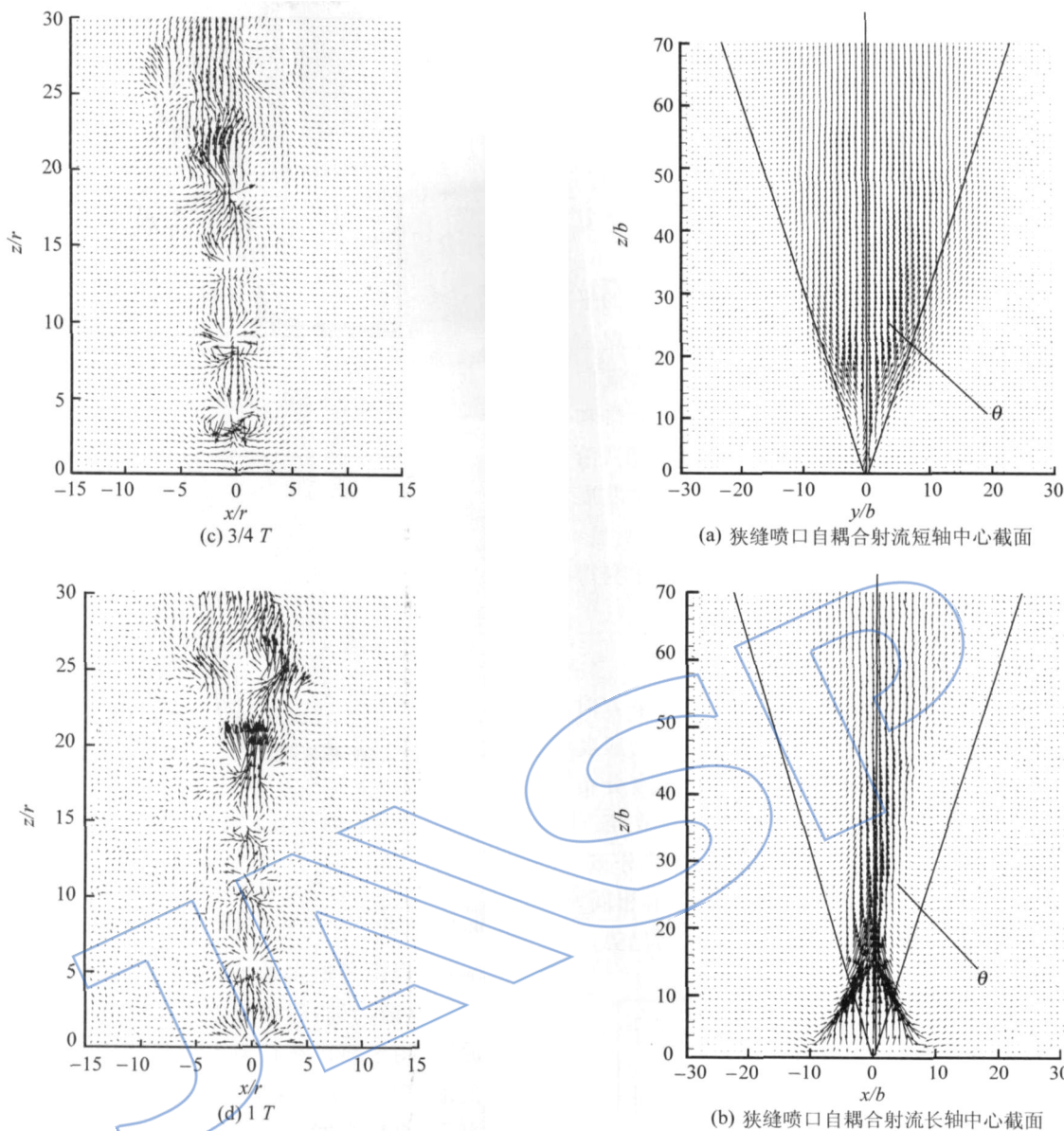


图 6 圆孔喷嘴自耦合射流一个周期内的速度矢量图

Fig. 6 Plots of velocity vectors on centrisymmetrical section of hole-nozzle synthetic jet

图 7(a), (b) 所示是狭缝喷嘴自耦合射流喷嘴中心线截面上的平均流场矢量图. 图中横坐标零点位置对应着喷嘴的中心位置, 纵坐标是无量纲流向距离 z/b (b 为喷嘴宽度). 可以看到, 平均流场是连续的、相对稳定的, 自耦合射流的作用距离很长, 在距离喷嘴 70 倍喷嘴宽度的地方自耦合射流仍然向外扩展并且向下游延续. 从狭缝短轴方向看, 自耦合射流的扩展角度比较大, 在距离喷嘴大约 10 倍喷嘴宽度位置流场迅速扩展开来, 其扩展角度 $\theta \approx 22^\circ$. 但是在狭缝长轴方向, 自耦合射流的流场却呈现出先收缩又缓慢扩张的趋势, 其扩张角度比较小, $\theta \approx 9^\circ$. 分析其原因, 条状涡两端的强度较弱, 当自耦合射流向下游发展时, 两端强

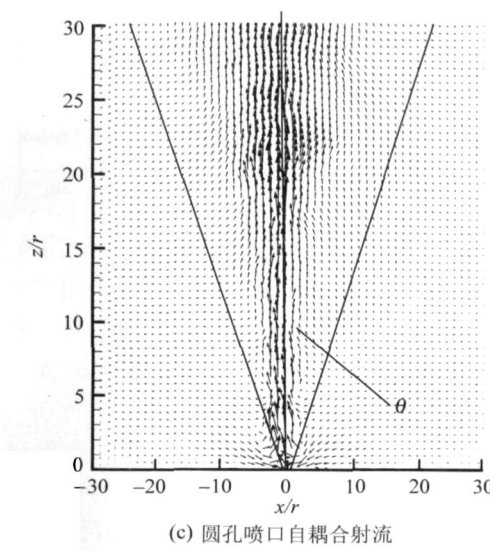


图 7 自耦合射流时均流场分布

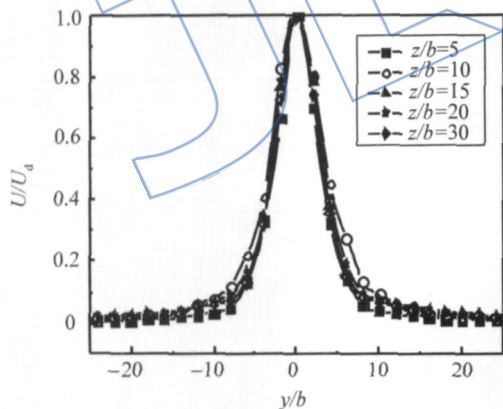
Fig. 7 Plots of time-averaged velocity vectors on centrisymmetrical section of synthetic jets

度较弱的涡对被中央高强度的涡对卷吸融合,形成自耦合射流的内向收缩特征;随着自耦合射流继续向下游发展,自耦合射流对周围流体的卷绕使得射流流量加大,作用范围变宽,但速度下降,因此,呈现出一个“拉伐尔喷管”形状的发展过程.所以说,自耦合射流的流动过程比常规射流要复杂得多,其三维特征也更为显著.

圆孔喷口自耦合射流喷口中心线截面上的平均流场矢量图如图 7(c) 所示. 图中横坐标零点位置对应着喷口的中心位置,纵坐标是无量纲流向距离 z/r (r 为喷口半径). 总体来看,圆孔喷口和狭缝喷口的流场分布趋势相同,流场连续发展,沿流向也呈现出一个向外扩展的趋势. 射流在发展初期速度型面比较窄,向外扩张的趋势很不明显,在距离喷口约 $z/r = 12$ 位置处其速度型面才变得比较宽,但是扩张角度较小, $\theta \approx 12.9^\circ$.

2.2 速度场分布

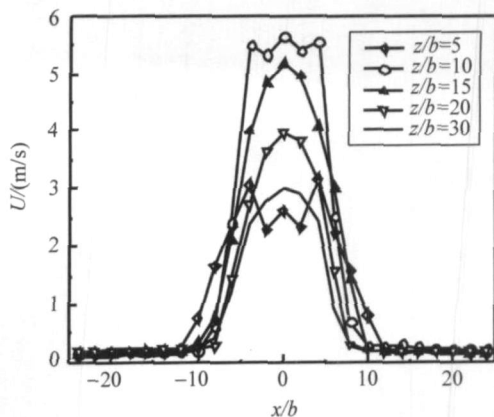
图 8 是自耦合射流时均速度在喷口水平方向的分布,由图可以看出,狭缝喷口短轴方向的速度分布和圆孔喷口自耦合射流水平方向的速度分布规律一致,从中心位置向两侧速度迅速下降至一个稳定值,在水平方向上呈现出对称的波峰分布,这一分布趋势和常规射流的分布趋势基本相同,但是其演变的过程并非是一个单调衰减的趋势,



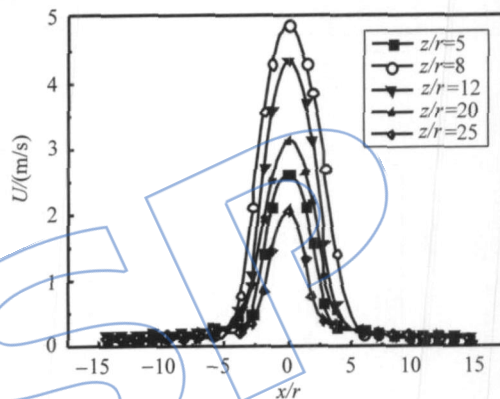
(a) 狭缝喷口自耦合射流在短轴方向时均速度分布

而是在距离喷口某一特定的法向位置上出现峰值速度最大、作用范围最宽的速度分布型;对于狭缝喷口来说,这一位置大约出现在 $z/b = 10$,而圆孔喷口出现在 $z/r = 8$ 的法向位置.

尤其值得注意的是,狭缝喷口自耦合射流在长轴开口方向的速度分布曲线呈现出特殊的分布规律.如图 8(b) 所示,在沿喷口长轴方向的开缝长度内呈现一个马鞍状的速度分布,尤其是在距离喷口比较近的法向位置上,其马鞍状的分布尤



(b) 狭缝喷口自耦合射流在长轴方向时均速度分布



(c) 圆孔喷口自耦合射流水平方向时均速度分布

图 8 自耦合射流时均速度分布曲线

Fig. 8 Time-averaged velocity profiles of synthetic jets

其明显,当距离增大到 $z/b = 15$ 以后,这种马鞍状的分布逐渐消失,趋向于中间凸的波峰分布.分析其原因,由于喷口在长轴方向开口较大,自耦合射流的形成和运动受喷口处气流的抽吸运动影响比较严重,自耦合射流的非稳态特性表现明显;离喷口越远,自耦合射流越接近于稳态射流,射流的发展受到膜片振动的影响越来越小.

3 结 论

采用 PIV 实验系统,在特定激发器输入参数条件下,对狭缝喷口和圆孔喷口自耦合射流的流场特性进行了研究,得到如下结论:

1) 不同喷口形状的自耦合射流形成过程规律相同,都经历了涡环产生、破碎、融合等一系列周期性过程,在离开喷口某一法向距离内形成一股连续的稳定射流.

2) 狭缝喷口自耦合射流在狭缝长轴和短轴方向所产生的流场现象有所不同.从狭缝短轴方向看,自耦合射流的扩展角度比较大,在距离喷口大约 10 倍喷口宽度位置流场迅速扩展开来,其扩展角度达到 22° .但是在狭缝长轴方向,自耦合射

流的流场却呈现出先收缩又扩张的趋势,其扩张角度比较小,大约为 9° 。

3) 圆孔喷口产生的自耦合射流几乎是一系列涡串接而成的,涡对在向下游运动的过程中,对周围流体的卷绕作用不强,涡对的破碎和融合效果不显著,可以明显看到新旧涡对之间的间隔。从平均流场看,自耦合射流发展初期速度型面比较窄,向外扩张的趋势很不明显,在距离喷口约 $z/r=12$ 时其速度型面才变得比较宽。扩张角度大约为 12.9° 。

4) 狭缝喷口短轴方向的速度分布和圆孔喷口自耦合射流的速度分布规律一致,在水平方向上呈现出对称的波峰分布,这一分布趋势和常规射流的分布趋势相似,但其演变的过程并非呈现单调衰减的趋势,而是在距喷口某一特定的法向位置上出现峰值速度最大、作用范围最宽的速度分布型;对于狭缝喷口来说,这一位置出现在 $z/b=10$,而圆孔喷口出现在 $z/r=8$ 的法向位置。

5) 狭缝喷口自耦合射流在长轴开口方向的速度分布曲线呈现出特殊的分布规律,在沿喷口长轴方向的开缝长度内呈现一个马鞍状的速度分布,尤其是在距离喷口比较近的法向位置上,其马鞍状的分布尤其明显,当距离增大到 $z/b=15$ 以后,这种马鞍状的分布逐渐消失,趋向于中间凸的波峰分布。

参考文献:

- [1] Savas O, Coles D. Coherence measurements in synthetic turbulent boundary layers[J]. J. Fluid Mech., 1985, 160(5): 421-442.
- [2] Smith B L, Glezer A. The formation and evolution of synthetic jets[J]. Physics of Fluids, 1998, 10(9): 2281-2297.
- [3] Mallinson S G. The operation and application of synthetic jet actuators[R]. AIAA 2000-2402.
- [4] 罗小兵,李志信,过增元. 一种流体驱动器 - 合成喷驱动器[J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(5): 504-507.
- LUO Xiaobing, LI Zhixin, GUO Zengyuan. A kind of fluid actuator-synthetic jet actuator[J]. Journal of Scientific Instrument, 2000, 21(5): 504-507. (in Chinese)
- [5] Guy Y, McLaughlin T, Morrow J A. Velocity measurements in a synthetic jet[R]. AIAA Paper, 2001-0118.
- [6] Pothos S, Longmire E K. Asymmetric forcing of a turbulent rectangular jet with a piezoelectric actuator[J]. Physics of Fluid, 2001, 13(5): 1480-1491.
- [7] Wang H, Menon S. Fuel-air mixing enhancement by synthetic microjets[J]. AIAA 2001, 39(2): 2308-2319.
- [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(S1): 56-58.
- LUO Xiaobing, LI Zhixin, GUO Zengyuan. Numerical Simulations on Flow Field of Incompressible Synthetic Jet[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22(S1): 56-58. (in Chinese)
- [9] 罗振兵,朱伯鹏,夏智勋. 合成射流激励器射流矢量的影响[J]. 推进技术, 2004, 25(5): 405-410.
- LUO Zhenbing, ZHU Bopeng, XIA Zhixun. Jet vectoring using synthetic jet actuators[J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(5): 405-410. (in Chinese)
- [10] 谭晓茗,张靖周. 自耦合射流流动特性和相关参数影响规律的数值研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(5): 836-840.
- TAN Xiaoming, ZHANG Jingzhou. Numerical investigation of influence factors and flow characteristics for a synthetic jet[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(5): 836-840. (in Chinese)
- [11] 李念,张堃元,徐惊雷. 自耦合射流对平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 for primary flow vectoring using parallel synthetic jet[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(3): 248-251. (in Chinese)
- [12] Amy C, Grayson R. Electronic MEMS for triggered delivery[R]. Advanced Drug Delivery Reviews 56, 2004: 173-184.
- [13] Chen F J, Yao C, Beeler G B. Virtual shaping of two-dimensional NACA 0015 airfoil using synthetic jet actuator[R]. AIAA Paper, 2002-3273.