

合成射流激励器实现共轴射流掺混控制^{*}

刘艳明¹, 王保国¹, 刘淑艳¹, 伍耐明²

(1 北京理工大学 宇航科学技术学院, 北京 100081;

2 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘 要: 对多排列合成射流激励器控制共轴射流掺混流场进行了详细的二维非定常数值模拟。结果表明, 激励器的采用可以增强共轴射流的掺混效果; 相邻合成射流产生涡对在孔口处经过相互耦合, 形成了更强的旋涡对, 并以一种新生合成射流作用周围流场; 两排激励器较单排激励器相比, 前者控制掺混能力更强, 这主要是由于相邻合成射流比单个合成射流有着更显著作用力的缘故。

关键词: 合成射流激励器⁺; 掺混控制⁺; 数值仿真

中图分类号: V211.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2008) 06-0681-04

Numerical simulation of mixing control for coaxial jets with synthetic jet

LIU Yan-ming¹, WANG Bao-guo¹, LIU Shu-yan¹, WU Nai-ming²

(1 School of Aerospace Science and Engineering Beijing Inst of Technology Beijing 100081, China

2 Coll of Energy and Power Engineering Beijing Univ of Aeronautics and Astronautics Beijing 100083, China)

Abstract A numerical simulation has been conducted to investigate the mixing of coaxial jets with zero mass-flux synthetic jet actuators, two arrays of which are placed around coaxial jets and in the exit plane of the outer primary jet. Both the velocity field of the primary jet and mixing processes were studied. The comparison was made between the control effectiveness of two arrays of actuators and that of an array of actuators. The results show both of the synthetic jet actuator configurations can result in the significant mixing enhancement, but the former exhibits higher effectiveness, which mainly results from the stronger control capability of adjacent synthetic jets. After the vortex pairs of adjacent synthetic jets couple with each other, the new stronger vortex pair forms and affects the ambient fluid as a new synthetic jet.

Key words Synthetic jet actuator⁺; Mixing control⁺; Numerical simulation

1 引 言

近年来, 合成射流技术作为主动流动控制技术的一种而受到了国内外研究者的广泛关注^[1~4]。在进行主动流动控制时, 可用于减弱阻力, 消减噪声, 分离控制^[5]和增加掺混^[6~7]等。现代飞机不但要求喷管具有推力换向和反向的能力以提高飞机机动性和起飞、着陆性能, 而且喷管的设计还应考虑尽量减小红外线辐射、噪声和雷达信号反射强度等, 这都需要借助流动控制方法来增强排气射流与外界气流的掺混。

在激励器的设计和研制中, 兴起不久的大功率合成射流激励器虽然作功能力得到了明显提高, 但结构

不紧凑, 给安装带来了很大麻烦^[5]。因此, 采用合成射流激励器的多排列多组合优化设计方法, 来满足一定条件下“强壮”、“小型”的合成射流激励器的要求, 就成了另一个重要的研究方向。

本文针对设计的多排(两排)压电陶瓷片合成射流激励器作用下的共轴射流掺混控制流场进行了详细的数值模拟, 对比分析了单排激励器和多排激励器对控制掺混效果的影响; 在研究激励器实现掺混控制机理的同时, 讨论了相邻合成射流的相互作用规律。

2 计算方法与数值模型

本文数值模拟过程中, 采用 Realizable $k-\varepsilon$ Model

* 收稿日期: 2007-11-03 修订日期: 2008-06-03。

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (20060390024)。

作者简介: 刘艳明 (1976-), 女, 博士后, 研究领域为气动热力学。E-mail liuym@bit.edu.cn

湍流模型和标准壁面函数 (standard wall function)。计算采用二阶迎风隐式时间推进格式。采用结构化网格布置 (见图 1)。

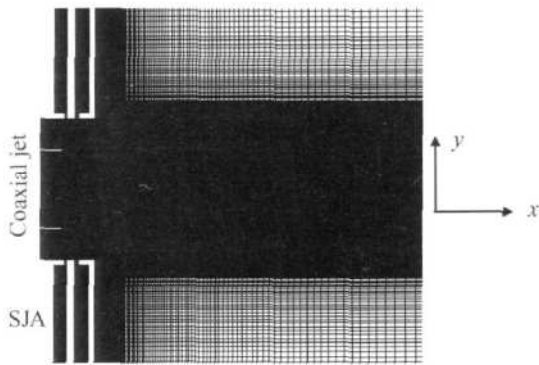


Fig 1 Computational mesh of coaxial jets

对采用的振动膜片式激励器计算模型^[1,2,4], 振动边界处有 $u(t) = U_0 \cdot \sin(2\pi ft + \Phi_0)$, 式中 U_0 为振动边界名义最大速度; f 为驱动频率; Φ_0 为初始相角。本文计算中, 选取 $A = 0.3 \text{ mm}$, $f = 500 \text{ Hz}$, $\Phi_0 = 0$ 。计算过程中所有激励器同相。

外场边界为流动出口, 提自由远场条件。其它均为固壁无滑移条件。

主要几何参数满足的关系为: 共同射流喷管内、外涵直径比 $D_i/D_o = 0.54$, 内、外涵速度比 $U_i/U_o = 2$, 激励器孔口宽度 h_0 为 0.5 mm 。

3 计算结果与分析

3.1 单排合成射流激励器控制掺混流场特性分析

图 2(a)给出了单排合成射流作用下的共轴射流掺混流场流向速度等值线分布图。从图中可以看到, 在合成射流作用下, 外场速度呈波伏状分布, 而未加激励时的速度分布情况则显得较为平缓 (图 2(b)), 这主要是由于合成射流激励器作用所引起的。合成射流以持续旋涡对作用主流场, 对主流场形成一股扰动作用, 使其速度分布发生变化, 同时对周围流体也产生了一定影响。因此, 可以说, 合成射流的存在是增强内、外涵气流以及与周围流体间掺混的重要原因。

图 2(c)给出了单排激励和未加激励时 $x/D_o = 2$ 处的速度展向分布 (即 $y+$ 向分布, 因为分布曲线沿中心线对称分布, 所以只给出半个展向), 图中横坐标表示相对展向位移, 纵坐标表示相对流向速度。二者对比来看, 在激励器作用下, 中心点附近的速度较未加激励时的速度明显要低些, 这说明中心高速流与周围气流有着很好的掺混, 从而使速度很快得到降低; 而在距中心线较远处的较大范围内, 加激励方案下的速

度又大于相应的未加激励时的速度值, 这说明周围气流速度由于与高速流掺混而有所增加, 而在未加激励时则不明显。总之, 在加激励时, 展向速度分布曲线没有未加激励时那么陡峭, 相对平缓些, 这说明合成射流激励器的采用的确改善了共轴射流的掺混效果。

3.2 相邻合成射流激励器流场特性分析

图 3(a)和 3(b)给出了相邻合成射流激励器流向速度等值线分布图。图中表明, 当两个激励器距离较近时, 孔口涡对将会发生相互作用, 单个激励器孔口的合成射流特性已不明显。两个激励器出口旋涡经过相互耦合, 形成了更强的旋涡对, 它们对称分布在相邻合成射流中心线两侧, 并以一种新生合成射流的形式作用外场。

由两个相邻合成射流耦合形成的这种新生合成射流较单个合成射流来说, 有着更强的作用力。如图 3(c)中给出了 $x/h_0 = 40$ 处相邻合成射流和单个合成射流速度分布对比图, 图中表明, 相邻合成射流的中心最大速度 V_a 要大于单个合成射流的最大速度 V_s , 而且此截面 ($x/h_0 = 40$) 上质量平均速度 $V_a (10.19) > V_s (2.88)$ 。另外, 从相邻激励器和单个激励器在相同条件下的外场中心线速度对比图 (图 3(d)) 中也可以看到, 相邻合成射流的中心线速度在大范围内高于单个合成射流激励器的中心线速度, 这说明前者形成的涡对的强度以及控制效果都要比后者好一些, 从而对外场也有着更好的作用效果。所以我们断定: 两排激励器比单排激励器在控制掺混上效果更显著一些, 这在后面要详细讨论。

3.3 两排合成射流激励器控制掺混流场特性分析

如图 4所示为合成射流激励器实现掺混控制流场的涡量等值线分布图。从图中可知, 将两排激励器加装在喷管外侧与单排激励器进行掺混控制时有着相似的流场特性。不同的是, 在两排激励器作用下, 外场旋涡对更强, 尺度较大, 并且同一时刻前者旋涡的作用范围较宽, 可以在较大的区域内控制掺混。这主要是由于相邻合成射流的影响, 两个激励器出口的涡对经过汇合形成了更强的旋涡 (其旋向与主流划过的方向相同), 其中也包括内管壁面附面层卷起形成的旋涡, 这些旋涡增强了外场的湍流度, 使得整个流场的脉动增强, 从而加速了内、外涵与外界气体之间的掺混。

仅有单排激励器作用时 (图 2(a)), 当激励器出口形成两个旋向相反的涡对后, 旋向与主流划过孔口方向相反的旋涡在主流作用下很快消散, 而另一个旋

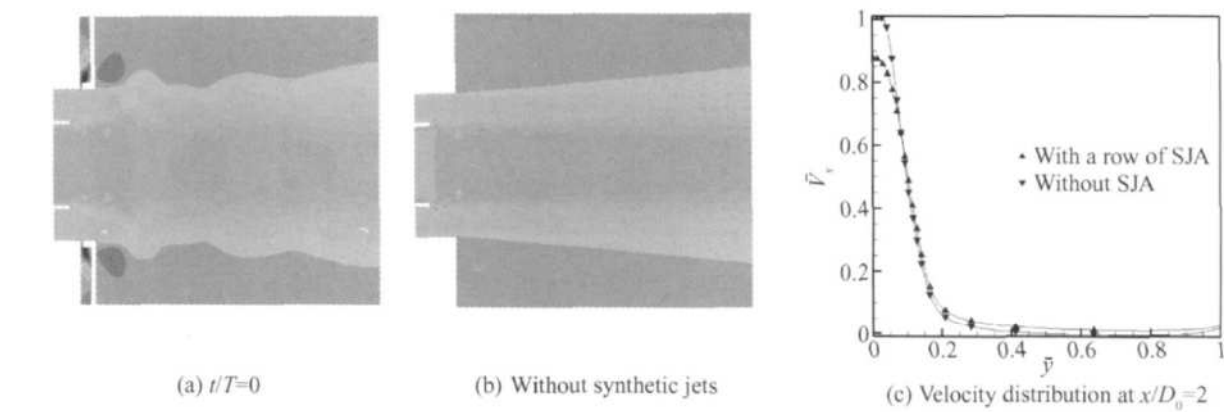


Fig. 2 Contour plots of instantaneous streamwise velocity distribution for the coaxial jets flowfield

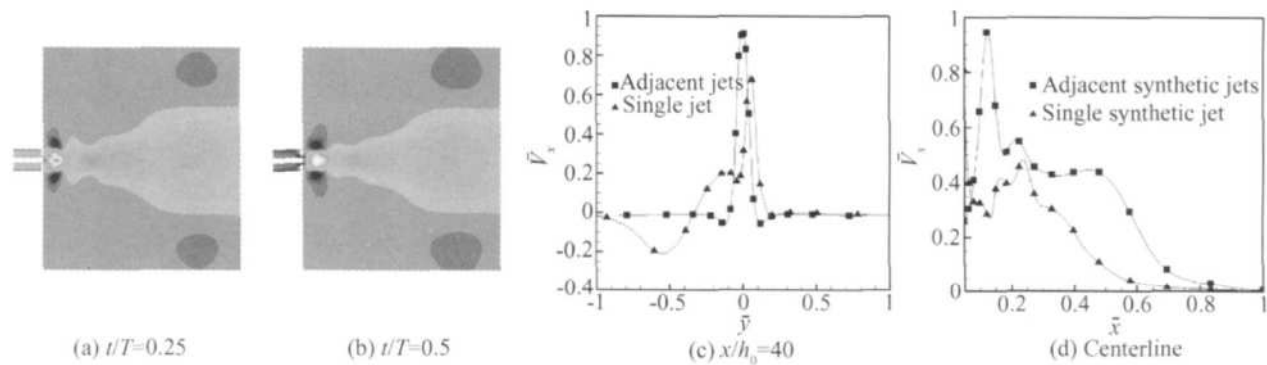


Fig. 3 Velocity distribution for coaxial jets

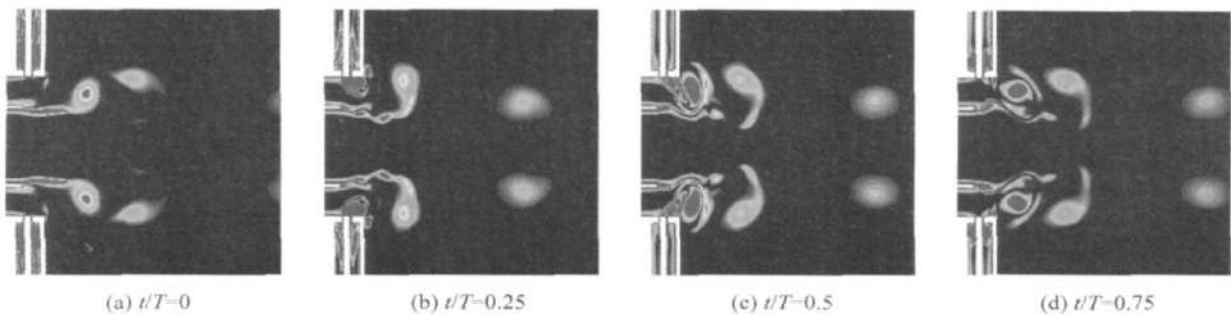


Fig. 4 Contour plots of streamwise velocity distribution for the coaxial jets with two rows of synthetic jets

涡 (即旋向与主流流过的切线方向相同的那个旋涡) 则在主流的推动下向下游运移, 并在这个过程中形状发生变化。这种情况下, 旋涡比较分散, 旋涡强度和涡尺度都较小, 向远场运移速度也较低。

从图 5 中对比可知, 无激励器方案下的中心线速度分布在较大范围内高于单排和两排激励器方案中相应的中心线速度 (图中横坐标表示相对流向位移, 纵坐标表示相对速度), 这说明激励器的采用的确可以增强共轴射流的掺混, 使中心线速度值很快得到降低。但对两排激励器和单排激励器来说, 前者方案中的中心线速度分布的波伏性要比单排激励器方案中的强一些, 即非定常性更显著一些, 作用掺混区域更大, 内外涵与外界气流的掺混更强, 所以说明两排激

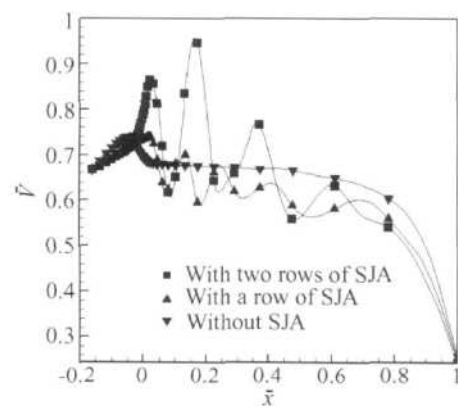


Fig. 5 Centerline velocity distribution

励器要比单排激励器有着更明显的作用效果。

(下转第 715 页)

- [3] Deckers M, Denton J D. The aerodynamics of trailing-edge-cooled transonic turbine blades part 1-experimental approach [R]. *ASME* 97-GT-518
- [4] Sieverding C H. The influence of trailing edge ejection on the base pressure in transonic turbine cascades [R]. *ASME* 82-GT-50
- [5] Metzger D E, Kim Y W, Yu Y. Turbine cooling an overview and some focus topics [C]. *Proc 1993 International Symposium on Transport Phenomena in Thermal Engineering*, 1993
- [6] Uzoilo, Canci C, Glezer B. Aerodynamic loss characteristics of a turbine blade with trailing edge coolant ejection part 1-effect of cut-back length, spanwise rib spacing, free-stream Reynolds number, and chordwise rib length on discharge coefficients [R]. *ASME* 2000-GT-258
- [7] Uzoilo, Canci C, Glezer B. Aerodynamic loss characteristics of a turbine blade with trailing edge coolant ejection part 2-external aerodynamics, total pressure losses and predictions [R]. *ASME* 2000-GT-557
- [8] 乔渭阳, 曾 军, 曾文演, 等. 气膜孔喷气对涡轮气动性能影响的实验研究 [J]. 推进技术, 2007, 28 (1). (QIAO Wei-yang ZENG Jun, ZENG Wen-yan, et al Experimental studies for the aerodynamic loss in gas turbine with film cooling [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2007, 28 (1).)
- [9] Menter F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering application [J]. *AIAA Journal*, 1994, 32 (8).
- [10] Bardina J E, Huang P G, Coakley T J. Turbulence modeling validation testing and development [R]. *NASA TM* 110446, 1997.

(编辑: 郭振伶)

(上接第 683 页)

两排激励器的这种明显的作用效果与相邻合成射流作用机理有密切的联系。合成射流激励器控制掺混的机理在于加强了射流出口附近的涡结构, 通过涡结构的强对流作用极大地增强了射流在出口附近的混合; 同时其非定常性使得整个流场的脉动增强、湍流度增大, 从而增强混合^[3]。前面已有结论, 相邻合成射流较单个合成射流有着更强的作用力, 从而在控制掺混时效果更佳, 所以两排激励器较单排激励器相比有着更强的控制能力。

需要注意的是, 在分析作用效果孰强孰弱的时候, 不能忽视实验模型或计算模型的一体化设计问题, 即不但要对激励器本身进行优化, 还应该对模型有关结构参数和气动参数进行优化, 只有综合多方面的因素, 才能达到更为理想的控制效果。

4 结 论

(1) 合成射流控制掺混流场中, 单排激励器的采用可以增强对共轴射流的掺混效果。

(2) 相邻合成射流激励器出口旋涡经过相互耦合, 形成了更强的旋涡对, 并以一种新生合成射流的形式作用外场。这种新生合成射流较单个合成射流来说, 有着更强的作用力。

(3) 计算分析表明: 两排激励器较单排激励器相比, 前者有着更明显的作用效果, 在控制共轴射流掺混方面前者也更好一些。

参考文献:

- [1] Conrad Y Lee, David B Goldstein. Two-dimensional synthetic jet simulation [R]. *AIAA* 2000-0406
- [2] Jing Cui, Ranesh K Aganwal, Dahai Guo, et al. Numerical simulation of behavior of synthetic jets in cross-flow [R]. *AIAA* 2003-1264
- [3] 杨京南, 赵 宏, 伍耐明, 等. 主动流动控制实验台及测量系统 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2004, 17 (1): 50~53
- [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): 221~234
- [5] Gilarranz J L, Rediniotis O K. Compact high-power synthetic jet actuators for flow separation control [R]. *AIAA* 2001-0737
- [6] Ritchie B D, Seitzman J M. Controlled fuel-air mixing using a synthetic jet array [R]. *AIAA* 2000-3465
- [7] Anwar Ahmed, Zafar Bangash. Axisymmetric coaxial synthetic jets [R]. *AIAA* 2002-0269

(编辑: 刘萝威)