

文章编号:1000-8055(2009)03-0566-07

合成射流激励器阵列对共轴射流掺混的影响

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 100191)

摘 要: 分别对单列和多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, 通过对其温度场分布和掺混过程进行分析, 探讨激励器阵列进行掺混控制的机理. 在研究过程中, 考虑了相邻合成射流的影响. 结果表明, 激励器的采用使得整个流场的非定常性增强、湍流度增大, 从而增强了共轴射流及其与周围流体间的掺混; 两列激励器较单列激励器相比, 前者具有更强的控制能力, 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: 合成射流激励器阵列; 掺混; 控制能力; 温度场

中图分类号: O354

文献标识码: A

Influence of synthetic jet actuator arrays on the mixing in coaxial jets

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

(1. School of Aerospace Science and Engineering,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Detailed unsteady numerical simulation has been carried to investigate the mixing of coaxial jets with zero-mass-flux synthetic jet actuator array placed side by side around coaxial jets. Firstly, the influence of an array of actuators and two arrays of actuators on the flowfield was studied, respectively, by analyzing their control effectiveness comparatively. Secondly, both the temperature fields of the primary jet and mixing processes were analyzed to study the mixing control mechanism of synthetic jet actuator array. In addition, the effect of adjacent synthetic jets was considered during the analysis. The results show that the mixing enhancement can be achieved by using synthetic jet actuators, which result from the stronger instability of flow. Both of the actuator's configurations can result in the significant mixing enhancement, but the former exhibits more stronger controlling ability due to bigger acting force of adjacent synthetic jet than that of single synthetic jet.

Key words: synthetic jet actuator array; mixing; controlling ability; temperature flowfield

近年来,主动流动控制技术作为一种新型流 动控制方式引起了国内外研究者的广泛关注,其

收稿日期:2008-03-04; 修订日期:2008-07-07

基金项目:中国博士后科学基金(20070420300)

作者简介:刘艳明(1976-),女,河南南阳人,讲师,博士,主要从事气动热力学和主动流动控制方面的研究工作.

E-mail:liuym@bit.edu.cn

中合成射流技术^[1-6]可用于减弱阻力、消减噪声、分离控制、推力矢量控制^[7]和增加掺混^[7-11]等。现代的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^[12]。比如,为了提高军用飞机的隐蔽性,就必须降低推进系统的红外辐射。很显然,排气射流柱中燃烧产物的红外辐射信号的强弱,是与射流柱的高温核心区大小、气动结构以及紧靠核心区的混合区状况等因素密切相关的。因此,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,从而把高温热核心区大大缩小,使排气流的红外辐射强度显著衰减下来。

在激励器的设计和研制中,压电陶瓷片激励器虽然结构较小,但是由于受到压电材料的限制,振幅很小,这使得激励器的作用效果也一直难以得到改善。而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。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^[2,13]。

本文针对设计的多列(两列)合成射流激励器进行掺混控制流场进行了详细的数值模拟,在分析激励器控制机理的同时,讨论了相邻合成射流激励器相互作用情况对控制效果的影响,并对多列激励器与单列激励器作用效果的不同进行了对比。

1 计算方法与数值模型

本文用 FLUENT 软件计算,采用 Realizable $k-\epsilon$ Model 湍流模型和二阶迎风隐式时间推进格式,并进行结构化网格布置(图1所示)。为保证计算结果的可靠性,在计算域的选取时,喷管上下两侧长度取值均大于 $6D_0$ (D_0 为外涵直径),轴向长度取值大于 $10D_0$ 。数值模型中,主要几何参数满足的关系为:内、外涵直径比 $D_i/D_0 = 0.54$;内涵温度 $T_i = 650\text{ K}$,内、外涵温度比 $T_i/T_0 = 1.7$;孔口宽度 $h_0 = 0.5\text{ mm}$,激励器腔体厚度 $t = 2.5\text{ mm}$;振动膜片直径 $d = 30\text{ mm}$,两相邻合成射流之间的距离为 $l = 1.5\text{ mm}$ 。

对采用的激励器计算模型^[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。

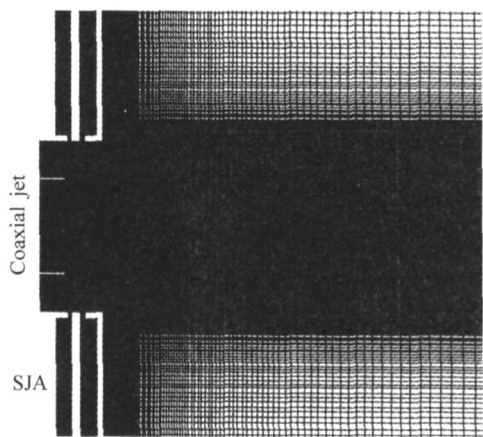


图1 计算模型和网格布置

Fig. 1 Computational grid

外场边界为流动出口,给自由远场条件,其它均为固壁无滑移条件,为绝热壁面。

文中计算主要涉及3个方案:方案1,采用两列激励器的共轴射流流场;方案2,采用单列激励器的共轴射流流场;方案3,未加激励器的共轴射流流场。

2 计算结果与分析

2.1 单列合成射流激励器控制掺混流场特性分析

图2和图3分别给出了单列合成射流激励器作用下的共轴射流流场温度等值线分布图,两图具有相同的色度标示。从图中可以看到不同时刻内、外涵温度场以及与周围流场间的掺混情况。与方案3中未加激励器情形(图3)相比,方案2中单列激励器作用下的温度场分布不象图3中那样均匀,整体分布状况较为复杂(图2(a)~(d))。如在图3中,中部高温区宽度随着 $\bar{x}$ 的增加而有所减小, $\bar{x} = 0$ 位置处,中部高温区宽度为 15 mm ,而在 $\bar{x} = 0.1$ 时,减少为 10 mm ,这是其与周围低温流体掺混的结果。而在方案2中(图2),中部高温区呈起伏状分布,两侧旋涡作用比较明显;激励器产生的旋涡对在随主流向下运移的过程中,与中心气流发生相互作用,进行能量交换,从而改变了中心高温区的分布形态,而旋涡则向下游迁移而最终消散,这是流场非定常性作用的结果;如在 $\bar{x} = 0$ 位置处,中部高温区宽度几乎与方案3中相同位置处的高温区宽度(图3)相同,而在 $\bar{x} = 0.1$ 时,中部高温区则变得很窄,在一周期中的某些时刻,可以说没有明显的高温区(图2(c)和

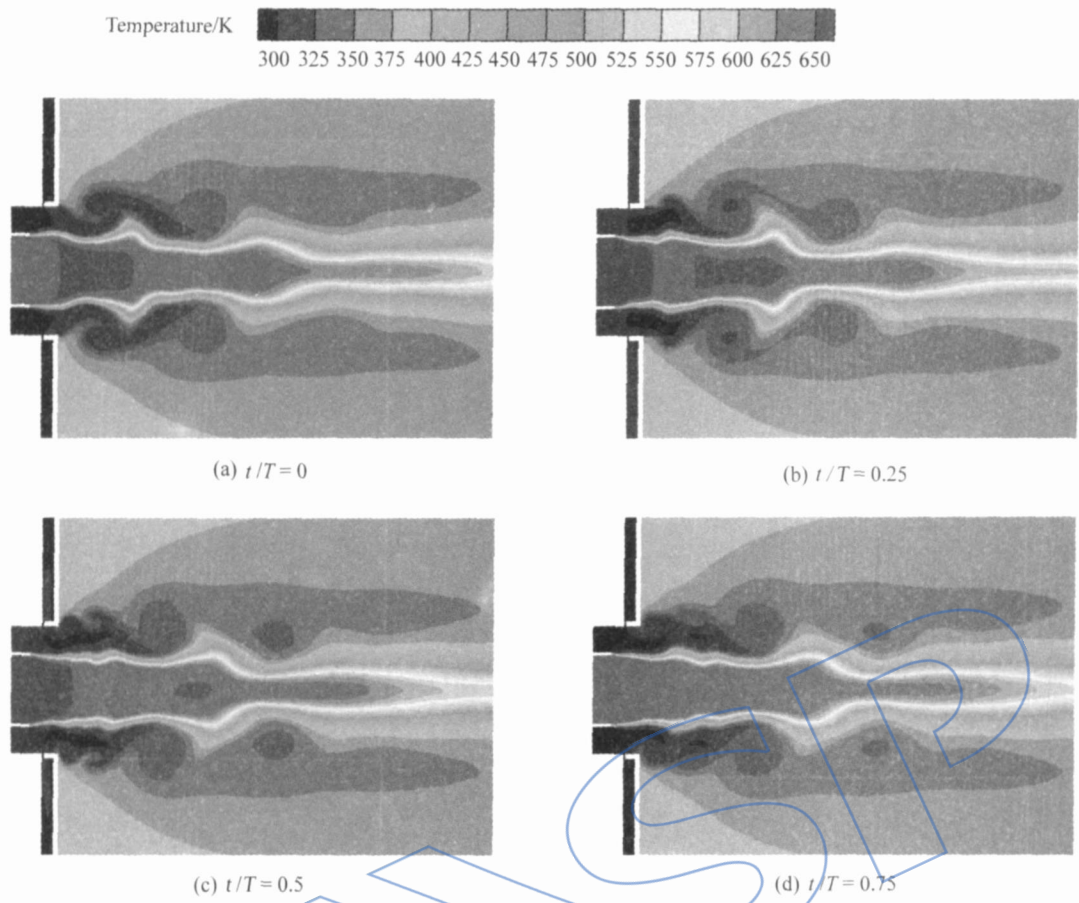


图 2 单列合成射流激励器作用下的共轴射流流场温度等值线分布图(方案 2)

Fig. 2 Temperature contours of coaxial jets with an array of actuators (Case 2)

(d)), 这说明与图 3 中情形相比,图 2 中掺混速度较快,并且掺混效果较好.

增强、湍流度增大,从而加速了内、外涵及周围流体间的温度掺混效果.

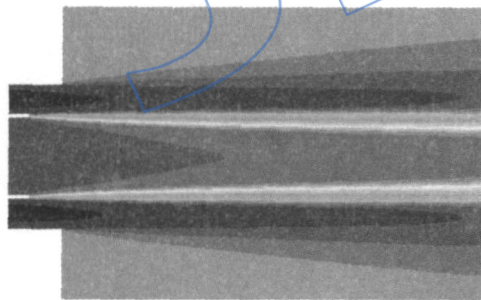


图 3 方案 3 中的温度场分布

Fig. 3 Contour plot of static temperature for case 3

不同方案下共轴射流流场中心线温度分布如图 4 所示,图中表明在 $\bar{x}$ 较大范围 ($0.1 \leq \bar{x} \leq 0.85$) 内,采用单列激励器方案的温度要低于未加激励情形下相应的温度值,也就是说单列激励器作用可以使中心高温区的温度很快得到降低,其作用机理在乎:由于合成射流作用下的流场非定常性增强,对流场施加激励使得整个流场的脉动

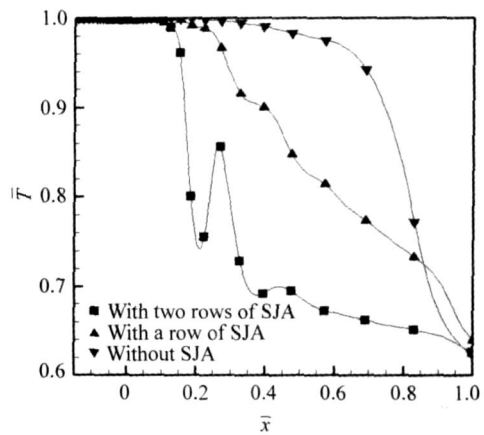


图 4 不同方案下的中心线温度分布

Fig. 4 Centerline temperature distribution

2.2 相邻合成射流激励器特性分析

图 5(a)和(b)给出了相邻合成射流激励器不同时刻的涡量等值线分布图(涡量表征涡矢量的大小,涡的定义式: $\Omega = \nabla \times V$).图中表明,当两

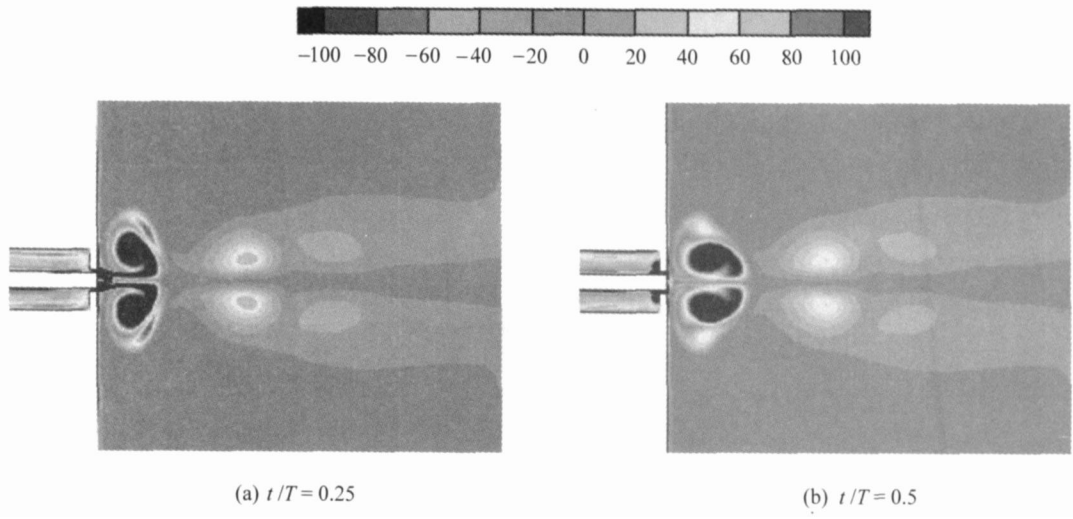


图 5 相邻合成射流流场涡量分布图

Fig. 5 Vorticity contours for adjacent synthetic jet flowfield

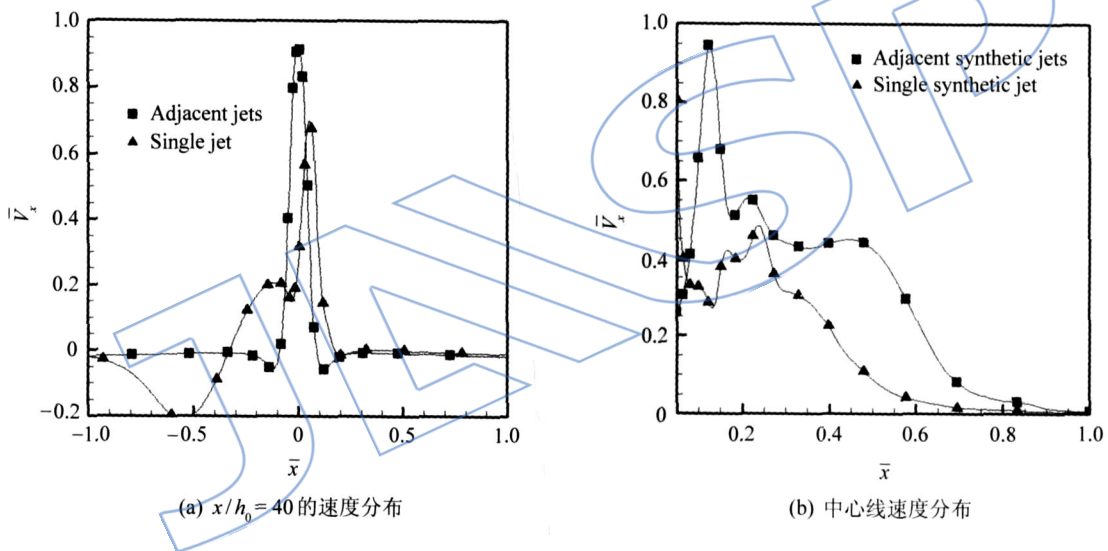


图 6 两种合成射流流场不同位置处的速度分布

Fig. 6 Velocity distribution for synthetic jet flowfield

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.图 6 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 ,而且此截面上质量平均速度: $\bar{V}_a(10.19) > \bar{V}_s(2.88)$.另外,由于相邻合成射流计算模型呈

中心线对称布置,所以图 6(a)中展向分布几乎沿中心点对称;而单个合成射流计算模型因出口靠近腔体一侧而不具有这种特点,故速度分布不具有对称性.

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 6(b))中也可以明显看到,相邻合成射流的中心线速度几乎在整个 $\bar{x}$ 分布范围内高于单个合成射流激励器的中心线速度,这说明前者的作用能力以及控制效果都要强于后者.所以我们断定:两列合成射流激励器比单列激励器在控制掺混上效果更显著一些,接下来就详细探讨这一点.

2.3 两列合成射流激励器控制掺混流场特性分析

如图 7 所示为两列合成射流激励器作用下实现共轴射流掺混控制流场的涡量等值线分布图(方案 1). 从图中可以看到两列激励器与单列激励器进行掺混控制时有着相似的流场特性, 整个流场中高涡量区主要集中在激励器周围, 这说明合成射流是产生非定常性的主要原因. 在图 7(a)中, $t/T = 0$ 时, 激励器出口气流处在“吹”的起始时刻, 出口旋涡尚未形成; 较远处旋涡是上一周期涡对随主流迁移而来的, 并在迁移过程中与主流和周围流体相互作用, 进行能量交换, 使流体间掺混增强.

$t/T = 0.25$ 时, 激励器出口处较强的旋涡对开始形成, 形成的涡对在与主流发生相互作用中, 近喷管进口一侧的旋涡因旋向与主流流动方向相反而很快消散, 另一旋涡则在主流推动下向下游

发展(图 7(b)). 并且两列激励器作用下, 由于相邻合成射流的影响, 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. 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.

$t/T = 0.5$ 和 $t/T = 0.75$ 时, 即在图 7(c) 和 (d) 中, 激励器出口形成的旋涡对逐渐移离孔口进一步向远场移动, 成为外流场的一部分, 并慢慢破裂而消散.

而图 4 也表明, 方案 3 中的中心线温度分布在很大范围内高于方案 2 和方案 1 中相应的中心线温度, 这说明激励器的采用的确可以增强共轴射流的掺混. 但对两列激励器和单列激励器来说,

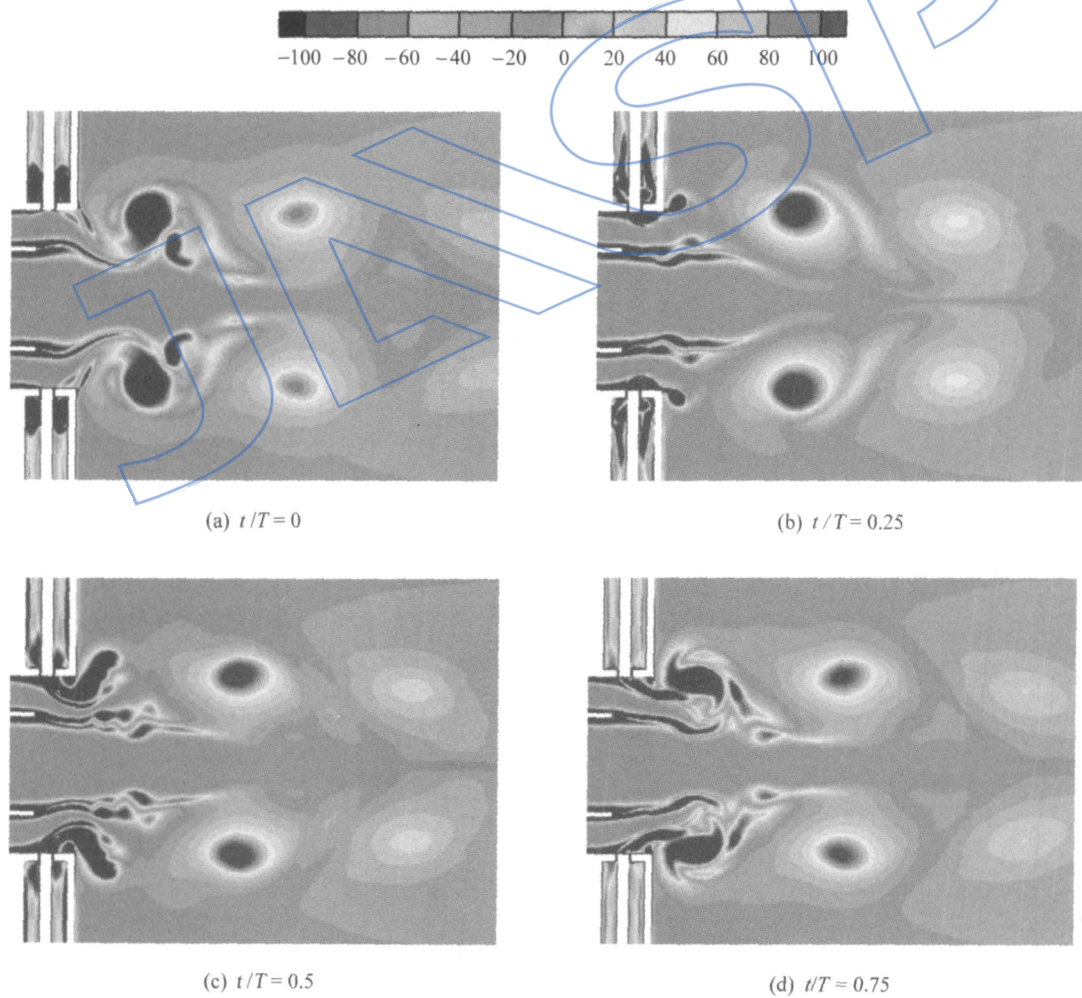
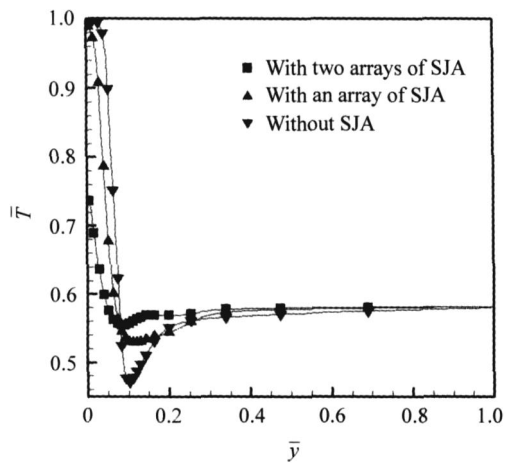


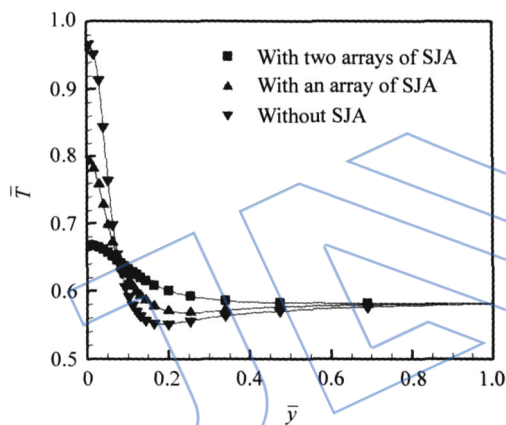
图 7 两列合成射流激励器作用下的共轴射流流场涡量等值线分布图(方案 1)

Fig. 7 Contour plots of instantaneous vorticity for the coaxial jet with two arrays of synthetic jet actuators (Case 1)

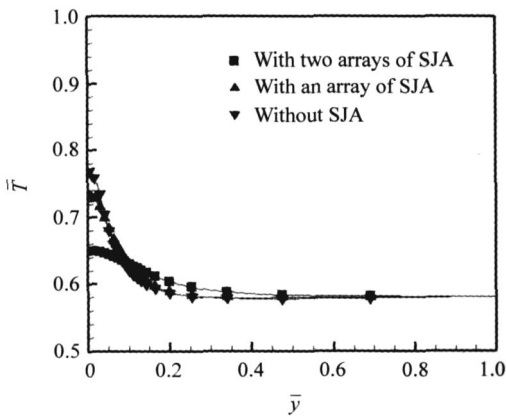
前者方案中的中心线温度分布的波伏性要比单列激励器方案中的强一些,即非定常性更显著一些,作用掺混区域更大.从图中知,几乎在整个 $\bar{x}$ 范围内($0.1 \leq \bar{x} \leq 1$),中心线温度都要小于相同位



(a) $x/D_0 = 2$



(b) $x/D_0 = 6$



(c) $x/D_0 = 8$

图8 不同流向位置处展向速度分布图

Fig. 8 Spanwise velocity distribution at different streamwise stations for three cases

置处的中心线温度,这些都说明方案1较方案2相比,掺混效果更好,即两列激励器要比单列激励器在控制掺混方面有着更显著的作用效果.

图8中给出不同横向位移(即距喷管出口不同位置处)处的温度分布情况,由于整个分布曲线关于中心线对称,所以图中只给出了 Y^+ 方向的分布情况.图中表明,在给出的所有横向位移处(图8(a)~(c)),方案1的中心点温度都为最低,方案2次之,方案3中的情形最高.而且从曲线形状来看,显得最为平坦光滑,也就是 Y 方向温度在不同位置处相差不大,而且 x 越大,这种趋势越明显(图8(c)),这是中心高温区流体与周围低温流体进行掺混而引起的,这同时也说明方案1中这种掺混效果较好,而方案2次之,方案3最差.方案1中的这种现象不仅使得中心点高温区温度很快得到降低,而且以较快的速度与周围低温流体进行掺混从侧保持近似均一的温度.由此也说明,激励器的采用可以加速流体间的掺混,并且采用两列激励器作用共轴射流流场比单列激励器更能有效地增加混合.

两列激励器的这种明显的作用效果与前面提到的相邻合成射流作用机理有着密切的亲系.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,使整个流场的非定常性增强、湍流度增大,从而增强混合^[6].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,所以两列激励器较单列激励器相比有着更强的控制掺混能力.

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,综合多方面的因素,才能达到更为理想的效果.

3 结论

1) 合成射流控制掺混流场中,由于非定常性增强,无论是单列激励器还是两列激励器的采用均可以增强共轴射流及其与周围流体间的掺混,这主要是由于在激励器作用下,使得整个流场的脉动增强,较强的旋涡增强了外场的湍流度,从而加速了内、外涵与外界气体之间的掺混,使温度场分布呈起伏状分布.

2) 两列激励器的掺混作用效果与相邻合成射流之间有着密切之间的关系.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,这种更强的作用力是两列激励器对共轴射流有更强掺混控制力的重要原因.

3) 计算分析表明:两列激励器较单列激励器相比,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显著一些.

参考文献:

- [1] Cattafesta L N III, Garg S, Shukla D. Development of piezoelectric actuators for active flow control [J]. AIAA Journal, 2001, 39(8): 1562-1568.
- [2] Gálarranz J L, Rediniotis O K. Compact, high-power synthetic jet actuators for flow separation control [R]. AIAA 2001-0737.
- [3] Kral L D, Donovan J F, Cain A B, et al. Numerical simulation of synthetic jet actuators [R]. AIAA 97-1824.
- [4] Lee C Y, Goldstein D B. Two-dimensional synthetic jet simulation [R]. AIAA 2000-0406.
- [5] Cui Jing, Agarwal R K, Guo Dahai, et al. Numerical simulation of behavior of synthetic jets in cross-flow [R]. AIAA 2003-1264.
- [6] Rizzetta D P, Visbal M R, Stanek M J. Numerical investigation of synthetic jet flowfields [R]. AIAA 98-2910.
- [7] La Pack T G, Seifert A. Periodic excitation for jet vectoring and enhanced spreading [R]. AIAA 99-0672.
- [8] Davis S, Glezer A. Mixing control of fuel jets using synthetic jet technology: Velocity field measurements [R]. AIAA 99-0447.
- [9] Davis S A, Glezer A. The manipulation of large- and small- scales in coaxial jets using synthetic jet actuators [R]. AIAA 2000-0403.
- [10] Ritchie B D, Seitzman J M. Controlled fuel-air mixing using a synthetic jet array [R]. AIAA 2000-3465.
- [11] Chen Y, Liang S, Aung K, et al. Enhanced mixing in a simulated combustor using synthetic jet actuators [R]. AIAA 99-0449.
- [12] 廉小纯, 吴虎. 航空燃气轮机原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 211-239.
LIAN Xiaochun, WU Hu. The theory of aero gas turbine [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001: 211-239. (in Chinese)
- [13] 罗振兵, 夏智勋. 合成射流技术及其在流动控制中的应用的进展 [J]. 力学进展, 2005, 35(2): 221-234.
LUO Zhenbing, XIA Zhixun. Advances in synthetic jet technology and application in flow control [J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(2): 221-234. (in Chinese)