

偏心对双级旋流器出口流场影响数值模拟

蒋 尧, 胡 建, 胡好生

(中国航空工业集团公司 中国航空动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 采用 Fluent 软件, 数值模拟了一级旋流器和二级旋流器偏心情况下, 双级旋流器出口流场变化, 湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型, 计算了 3 种不同偏心量(0, 0.5, 1.7 mm)下的双级旋流器出口流场, 并将计算结果与试验结果进行了对比. 研究表明: 偏心对双级旋流器出口流场影响较大, 0.5 mm 偏心下双级旋流器出口的回流区发生畸变, 径向速度峰值区域位于 $X/D=0.5\sim 1.0$ 范围内; 轴向速度和径向速度的计算结果与试验结果吻合良好.

关 键 词: 双级旋流器; 偏心; 标准 $k-\epsilon$ 模型; 冷态流场; 回流区

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Numerical simulation on the effect of misalignment on outlet flow field of double-swirler

JIANG Yao, HU Jian, HU Hao-sheng

(China Aviation Powerplant Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: Numerical simulation on outlet flow field of a double-swirler with misalignment of the first and second stages was performed by Fluent software, and standard $k-\epsilon$ model was chosen for the turbulence model. The numerical simulation was conducted on three configurations with different misaligned dimensions (0, 0.5, 1.7 mm) and validated against the test data. The results show that misalignment has significant influence on the outlet flow field of a double-swirler, and distortion on the recirculation zone has already appeared since 0.5 mm misalignment. Meanwhile, the zone with peak radial velocity is located at the region of $X/D=0.5\sim 1.0$. Numerical simulations accord well with the test results for both axial and radial velocities.

Key words: double-swirler; misalignment; standard $k-\epsilon$ model; non-reacting flow field; recirculation zone

双级旋流器是航空发动机燃烧室重要部件, 主要由一级旋流器、二级旋流器、文氏管及套筒等 4 个部分组成. 旋流器产生的旋涡能在火焰筒头部形成回流区, 稳定火焰^[1]. 双级旋流器直接影响整个燃烧室火焰筒内的流场和燃油分布, 从而影响燃烧室的综合性能, 因此, 国内外很多学者对旋流器进行了大量的数值模拟研究. 文献[2]中研究了文氏管与二级旋流器偏心对冷态流场的影响, 研究结果表明不同偏心量情况下的有效面积之间

的偏差小于 2%. 文献[3-4]中采用 Fluent 软件分别采用 5 种湍流模型对单个旋流器的流场进行了数值计算, 并与试验数据进行了对比, 结果显示在计算旋流器出口流场的形态上, 采用标准 $k-\epsilon$ 模型误差最小. 根据文献[5], 标准 $k-\epsilon$ 模型在计算旋流器流量系数时的误差在 2.5% 以内, 而且, 计算所得到的轴向速度、切向速度和湍流动能与试验结果吻合良好. 文献[6]运用一种混合模拟方法研究轴对称旋流燃烧室内的湍动, 研究了多级旋

流器的旋流数、进口长度以及特征速度分布. 文献[7-10]对双级旋流器以及多级旋流器进行了大量的数值模拟研究和试验研究. 文献[11-14]对燃烧室内的湍流流场、旋流器出口流场特性以及燃烧室性能进行了详细研究. 文献[15-17]试验研究了加工及装配误差对喷嘴不均匀度的影响, 结果表明喷嘴和旋流器的径向偏心对喷雾形态影响很大.

双级旋流器一般都固定在火焰筒头部, 安装在燃烧室机匣的燃油喷嘴需要伸入到双级旋流器中, 为方便燃油喷嘴的安装, 双级旋流器中的一级旋流器一般都设计成可以径向活动, 如图 1 所示. 由于受到加工精度以及工作状态下火焰筒与机匣之间的不均匀热膨胀的影响, 双级旋流器的一级旋流器和二级旋流器之间不可避免会出现偏心的现象. 国内外绝大部分对双级旋流器的研究都是针对双级旋流器同心的状态, 即双级旋流器的一级旋流器和二级旋流器不偏心的状态, 很少对双级旋流器偏心对其出口流场影响进行研究, 本文针对旋流器实际使用过程中不同心的情况, 采用数值模拟方法探索双级旋流器在不同偏心量下其出口流场变化, 为双级旋流器设计提供参考.

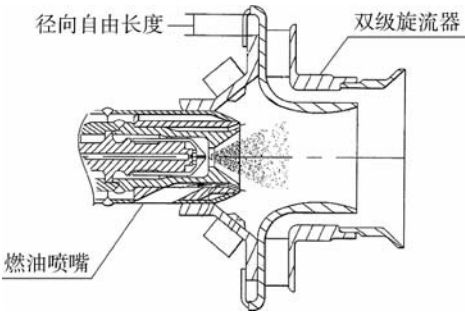


图 1 双级旋流器径向间隙示意图
Fig. 1 Schematic of radial gap in double-swirler

1 数值计算

1.1 几何模型

双级旋流器(下文简称旋流器)的计算模型几何尺寸如图 2 所示:进口直径为 105 mm,长度为 30 mm;出口直径为 90 mm,长度为 150 mm. 坐标原点 O 设置在旋流器出口平面中心; X 轴设在进出口的中心线上. 一、二级旋流器偏心距分别为 0, 0.5, 1.7 mm, 一级旋流器相对于二级旋流器的偏心方向都为 Z 轴的正方向. 图 2 中的 D 是双级旋流器出口直径.

网格划分的质量对计算结果影响较大. 考虑

到模型较为简单, 直接采用 Gambit 软件划分网格, 网格质量能达到要求, 双级旋流器模型网格见图 3.

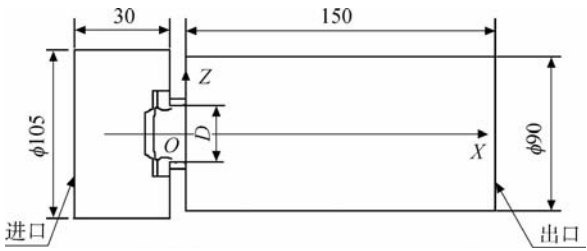


图 2 计算模型几何尺寸(单位: mm)
Fig. 2 Geometry dimensions of caculation model
(unit: mm)

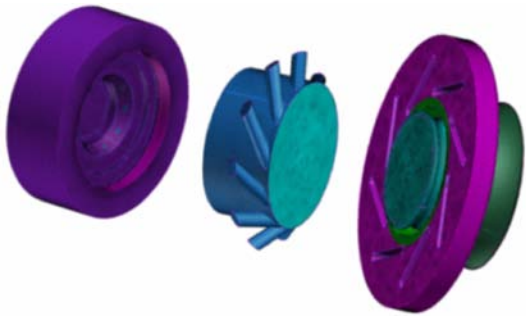


图 3 计算模型网格图
Fig. 3 Mesh for calculation model

1.2 湍流模型

文献[3]采用 5 种湍流模型对旋流器出口流场进行计算, 并将结果与激光多普勒测速仪(laser Doppler velocimetry, LDV)试验结果对比, 得出标准 $k-\epsilon$ 模型与试验结果吻合度最高, 所以本文的数值模拟采用标准 $k-\epsilon$ 模型.

1.3 边界条件

- 进口条件: 压力进口, 5 500 Pa, 室温.
- 出口条件: 压力出口, 压力值设置为 0 Pa(即出口背压为 101 325 Pa), 室温.
- 壁面条件: 标准壁面函数.

2 计算结果及分析

图 4 示出了不同偏心量下旋流器出口的轴向速度(V_x)云图. 从图中可以看出, 无偏心下, 回流区比较狭长, 出口下游远处的流体回流入旋流器中心的旋流中, 射流形态对称, 在旋流器出口形成一对眼状涡. 而在 0.5 mm 偏心下, 流场较无偏心下变化较大, 出口下游的流场形式发生变化, 原本出口下游远处的回流被流向 $-Z$ 侧的流体截断,

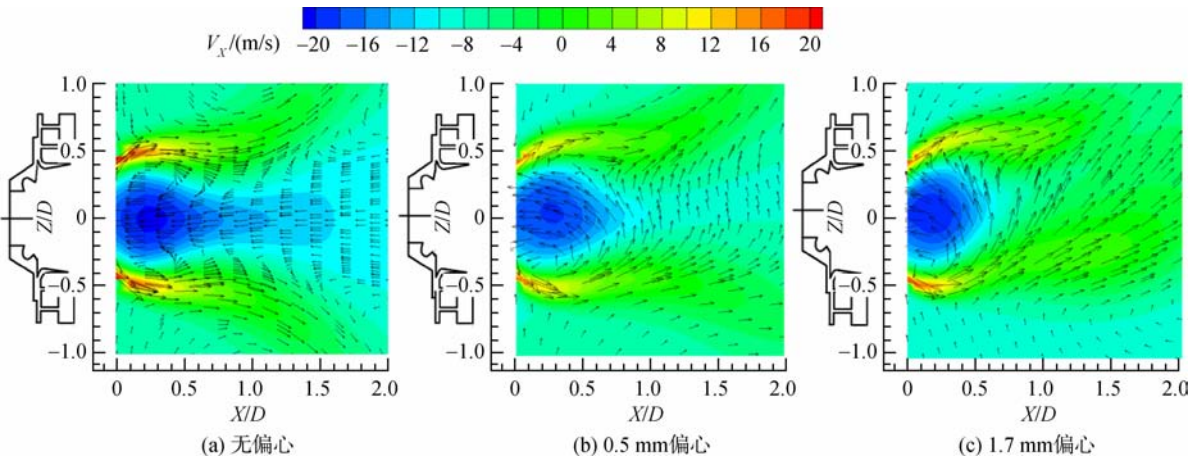


图 4 过旋流器中心线截面轴向速度云图(计算)

Fig. 4 Axial velocity contours along the plane in line with double-swirler centerline (calculation)

回流区呈现椭球形,且随着偏心量的增加,回流区越来越短.旋流器出口下游整个流场的流向偏心+Z侧,且这种趋势随着偏心量的增加越来越明显.从 0.5 mm 偏心开始旋流器出口两个对称的眼状涡消失,-Z侧的一直存在,而+Z侧的旋涡由于受到-Z侧射流变化的影响而逐渐消失.

图 5 示出了不同偏心量下旋流器出口的径向速度 V_y 云图.从图中可以清楚地看出,无偏心下在旋流器出口形成一对对称的眼状涡,流场分布沿旋流器出口中心线对称,回流区规则均匀.而在

0.5 mm 偏心时径向速度分布以及流线分布就已经跟无偏心下差异较大,对称的眼状涡结构消失,回流区被截断,回流区形态变化较大.在旋流器出口下游 $X/D=0.5\sim 1.0$ 范围内出现正向的径向速度区域,且随着偏心量的增加,这个区域的径向速度幅值越大.从流线图也可以看出,0.5 mm 偏心下,流场下游远处的流场不参与旋流器的中心回流,-Z侧一部分的射流参与了旋流器的中心回流,这也导致了一Z侧的射流方向偏向+Z侧,-Z侧的眼状涡变大.

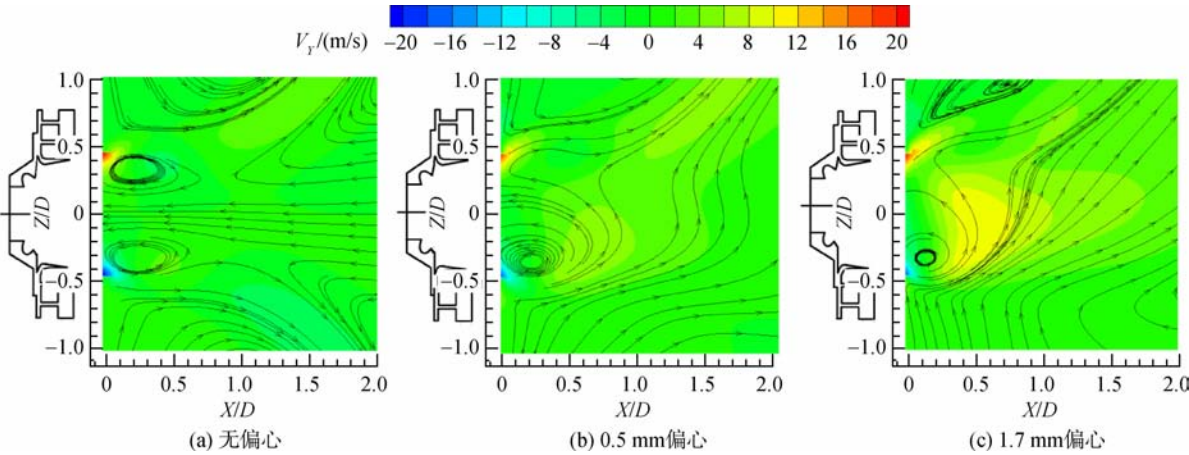


图 5 过旋流器中心线截面径向速度云图(计算)

Fig. 5 Radial velocity contours along the plane in line with the double-swirler centerline (calculation)

3 试验验证

采用德国 LaVision 公司的粒子图像测速仪 (particle image velocimetry, PIV) 对旋流器在偏心条件下的出口流场进行了试验. PIV 主要包括激光器、相机、同步控制系统、计算机等组成,见图 6,其中激光器的功率为 200 mJ,频率为 15 Hz,相

机分辨率为 2048 像素×2048 像素,曝光时间间隔为 3 μs,速度测量精度为 3%. 试验时需要配置示踪粒子发生器,本试验采用植物油作为示踪粒子,示踪粒子粒径为 1~5 μm.

为了保证试验进口边界条件与计算进口边界条件的基本一致,在进口段的进口处沿周向均匀分布 3 个进气口,如图 7 所示. 为了保证旋流器进

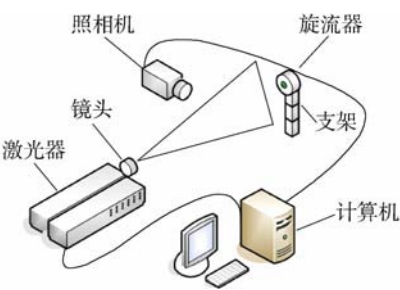


图 6 PIV 试验装置
Fig. 6 Test facility of PIV

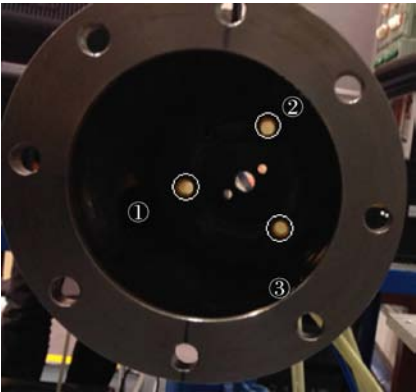


图 7 旋流器进气装置实物图
Fig. 7 Photo of test facility of air inflow for swirler

口压力的稳定性,设计的进口长度为 150 mm,这样可使 3 股气流能够充分地均匀混合后进入旋流器,详见文献[18].

部分试验结果见图 8~图 12.

图 8 和图 4 分别为不同偏心下纵截面轴向速度云图的试验和计算结果. 从两者的对比可以看出,偏心对轴向速度的影响规律基本一致. 对比结果表明,在 0.5 mm 偏心时, +Z 侧的旋涡消失,中

心回流区被 -Z 侧的气流截断, -Z 侧的射流角度逐渐变小. 所有方案下计算的回流区长度都比试验得到的长.

图 9 和图 5 分别为不同偏心下纵截面径向速度云图的试验结果和计算结果. 从两者的对比可以看出,随着偏心量的增加, -Z 侧以及中心线附近的径向速度随着偏心量的增加而增加,但是径向速度的幅值差别较大.

图 10 对比了 1.7 mm 偏心下轴向速度的试验和计算结果. 从图中可以看出,1.7 mm 偏心下的轴向速度分布的计算结果与试验结果基本一致,轴向速度分布在 $X/D < 0.75$ 范围内两者的结果吻合较好,但 $X/D > 0.75$ 时,计算结果与试验结果差别较大. 计算结果和试验结果都表明:在远离旋流器出口处,速度分布的对称中心偏向 +Z 侧; +Z 侧的轴向速度峰值明显大于 -Z 侧的轴向速度峰值,且随着气流向下游流动,轴向速度分布的对称性逐渐消失.

图 11 对比了 1.7 mm 偏心下径向速度试验和计算结果. 从图中可以看出,在 5 个轴向位置处,1.7 mm 偏心下的径向速度分布的计算结果与试验结果基本一致. 计算结果和试验结果都表明:在 1.7 mm 偏心下,在旋流器出口的中心线附近产生径向速度峰值,且径向速度峰值随着气流向下游的流动先增大后减小;在所研究的径向位置范围内,关于中心线对称的同一径向位置处, +Z 侧径向速度大小比 -Z 侧大,特别是在远离中心线处, +Z 的径向速度远大于 -Z 侧的径向速度,而 -Z 侧的径向速度接近为零.

图 12 对比了 1.7 mm 偏心下不同轴向位置处速度幅值 (V_{mag}) 云图的计算与试验结果,其中

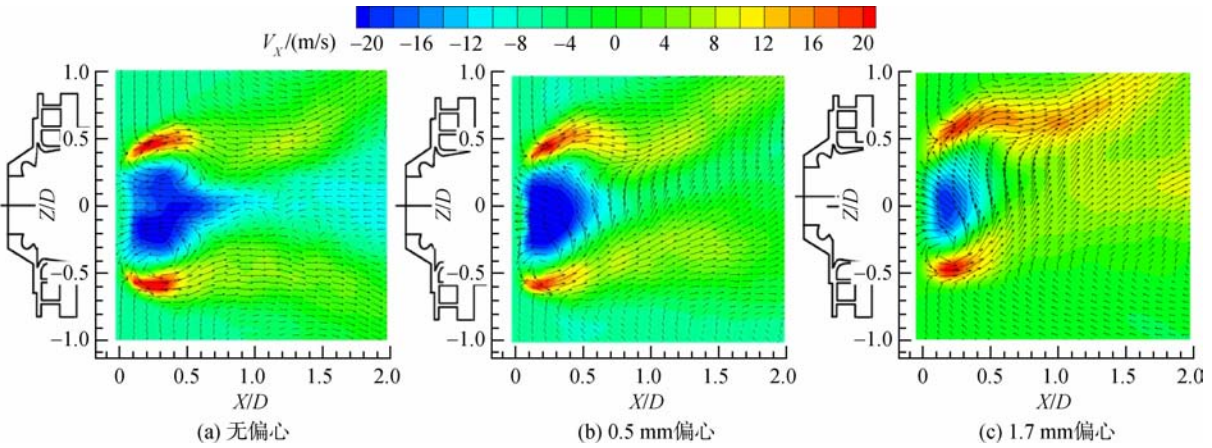


图 8 过旋流器中心线截面轴向速度云图(试验)
Fig. 8 Axial velocity contours along the plane in line with double-swirler centerline (experiment)

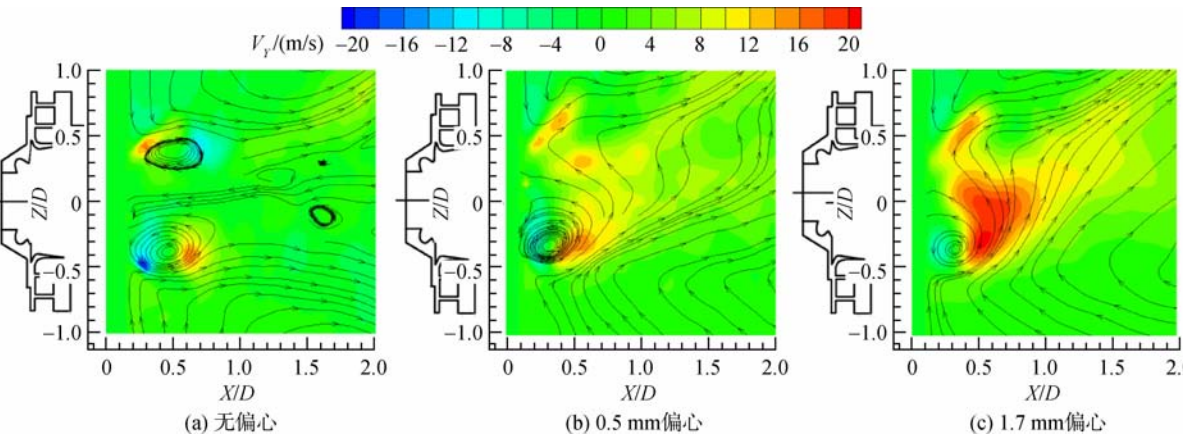


图 9 过旋流器中心线截面径向速度云图(试验)

Fig. 9 Radial velocity contours along the plane in line with double-swirler centerline (experiment)

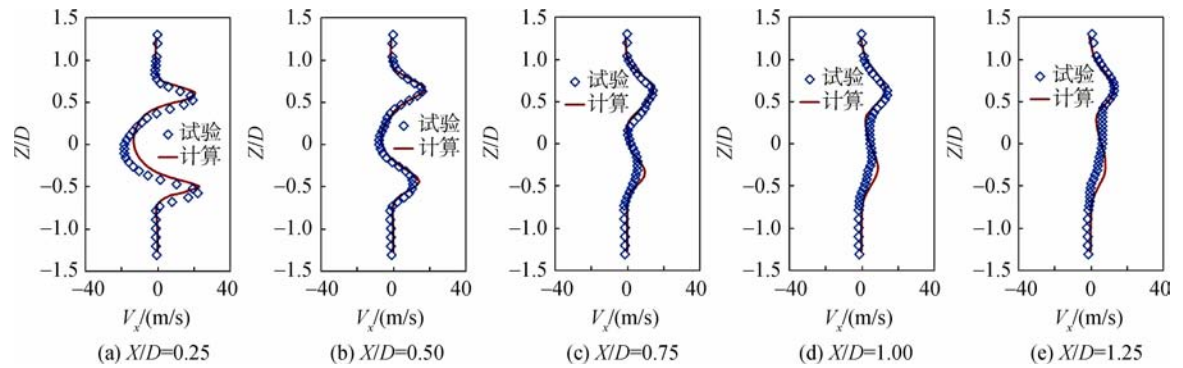


图 10 1.7 mm 偏心下轴向速度分布对比

Fig. 10 Axial velocity profile comparison of 1.7 mm misalignment

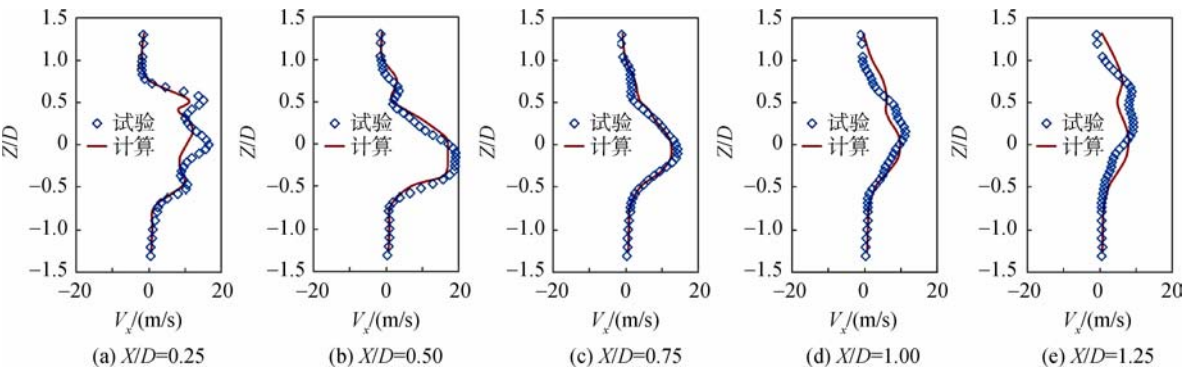


图 11 1.7 mm 偏心下径向速度分布对比

Fig. 11 Radial velocity profile comparison of 1.7 mm misalignment

图 12(a)为计算结果,图 12(b)为试验结果. 计算结果和试验结果都表明,在靠近旋流器出口的横截面($X/D=0.25,0.50$)处,流场明显不对称,出现了两片速度峰值区域. 随着 X/D 的增大,速度峰值逐渐消失,但气流往右上偏斜(从出口往上游看),且气流逐渐顺时针旋转. 计算结果在对应位置的速度峰值大小以及峰值的衰减变化与试验结果有一定差别.

从图 12 中试验与计算结果的对比结果中可以看出,计算结果与试验结果基本一致. 计算得到的偏心影响规律与试验结果吻合度较高,从一个侧面证明数值计算能够真实模拟偏心对旋流器流场的影响. 但是试验与计算结果在对应位置的速度峰值、峰值的衰减变化和回流区的轴向长度等方面有一定差别,需要进行网格优化以及进一步的湍流模型修正.

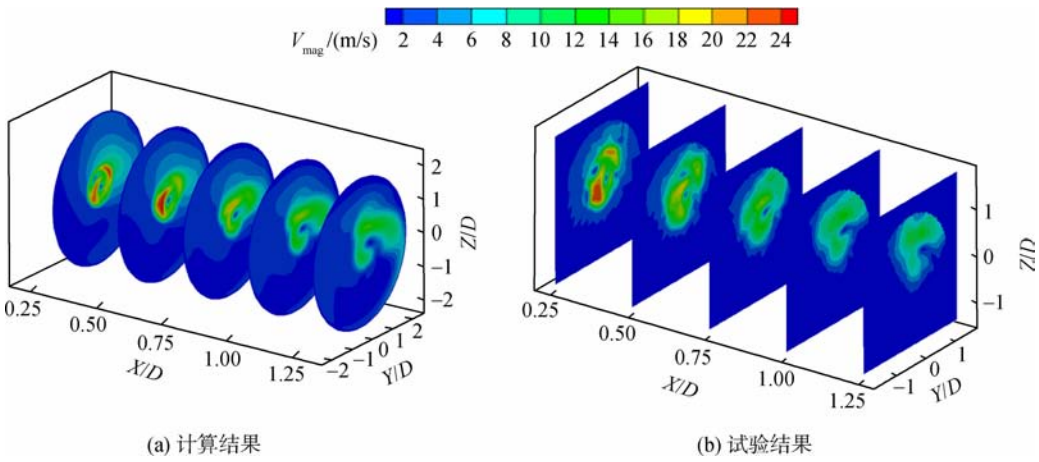


图 12 1.7 mm 偏心下不同轴向位置截面的速度幅值云图对比

Fig. 12 Velocity magnitude contour comparison at different axial locations of 1.7 mm misalignment

4 结 论

本文采用 PIV 试验结果验证数值模拟方法在研究双级旋流器偏心对旋流器出口流场的影响中的可靠性,结果表明:偏心对旋流器出口流场影响较大,出口回流区形态发生较大变化,出口轴向速度和径向速度分布变化剧烈;旋流器出口流场的数值模拟结果与试验结果一致,计算与试验得出的关于旋流器偏心对旋流器出口流场的影响规律一致,同时也验证了标准 $k-\epsilon$ 模型可以用于旋流器流场的计算。

参考文献:

[1] McDonell V G, Arellao L, Lee S W, et al. Effect of hardware alignment of fuel distribution and combustion performance for a production engine fuel injection assembly [R]. Irvine, California: 26th Symposium on Combustion, 1996.

[2] Nikjooy M, Mongia H C, Samuelsen G S, et al. A numerical and experimental study of confined swirling jets [R]. AIAA 89-2898, 1989.

[3] Ateshkadi A, Mcdonell V, Samuelsen G S. Effect of hardware geometry on gas and drop behavior in a radial mixer spray [R]. AIAA 98-0247, 1998.

[4] Hsiao G, Mongia H C. Swirl cup modeling: Part III grid independent solution with different turbulence models [R]. AIAA-2003-1349, 2003.

[5] Hsiao G, Mongia H C, Vij A. Swirl cup modeling: Part II inlet boundary conditions [J]. AIAA-2003-1350, 2003.

[6] Grinstein F F, Young T R, LI Guoqiang, et al. Computational and experimental analysis of the flow dynamics in a multi-swirler combustor [R]. AIAA-2002-1006, 2002.

[7] Mongia H C, Al-Roub M, Danis A, et al. Swirl cup modeling:

Part I [R]. AIAA-2001-3576, 2001.

[8] FU Yongqiang, CAI Jun, Jeng S M, et al. Confinement effects on the swirling flow of a counter-rotating swirl cup [J]. ASME Paper GT2005-68622, 2005.

[9] CAI Jun, FU Yongqiang, Flohre N. Experimental study on coherent structures of a counter-rotating multi-swirler cup [J]. AIAA-2007-5674, 2007.

[10] Reddy A P, Sujith R I, Chakravarthy S R. Swirler flow field characteristic in a sudden expansion combustor geometry [J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22 (4): 800-808.

[11] Syred N, Beer J M. Combustion in swirling flows: a review [J]. Combustion and Flame, 1974, 23 (2): 143-201.

[12] Adrian S, Hollis D, Carrote J. PIV measurements of combustor turbulence fields [J]. ASME Paper GT2007-28050, 2007.

[13] Ramos J I, Somert H T. Swirling flow in a research combustor [J]. AIAA Journal, 1985, 23 (2): 241-248.

[14] Rizk N K, Mongia H C. Three-dimensional analysis of gas turbine combustors [J]. Journal of Propulsion and Power, 1991, 7 (3): 445-451.

[15] Rosfjord T J, Russell S. Nozzle design and manufacturing influences on fuel spray circumferential uniformity [J]. Journal of Propulsion and Power, 1989, 5 (2): 144-150.

[16] Rosfjord T J, Eckerle W A. Aerating fuel nozzle design influence on airflow features [J]. Journal of Propulsion and Power, 1991, 7 (6): 849-856.

[17] Cohen J M, Rosfjord T J. Influences on the sprays formed by high-shear fuel nozzle/swirler assemblies [R]. Journal of Propulsion and Power, 1993, 9 (1): 16-27.

[18] 蒋尧. 双级旋流器偏心对旋流器出口流场影响研究 [D]. 湖南 株洲: 中国航空动力机械研究所, 2013.

JIANG Yao. Research on the outlet flow field of double-swirler's misalignment [D]. Zhuzhou Hunan: China Aviation Powerplant Research Institute, 2013. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)