

改进 S-A 湍流模型对横向射流的 CFD 模拟

张 仪¹, 王晓东¹, 梁俊宇², 康 顺¹, 张 锴¹

(1. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 北京 102206;

2. 云南电网公司 电力科学研究院, 昆明 650217)

摘 要: 通过在 Spalart-Allmaras(S-A)湍流模型中加入应变率张量,来改善模型对横向射流(JICF)的计算精度。模拟了速度比分别为 0.5 和 1.5 工况下的横向射流。经实验值验证,结果表明:改进后的 S-A 模型预测精度有所提升;并对湍流模型改进部分对横向射流的作用机制做出了分析。将改进后 S-A 模型的计算结果与 $k-\epsilon$ 模型,雷诺应力模型(RSM)和大涡模拟(LES)的结果进行比较,发现 S-A 模型在速度比为 0.5 时精度最高,而在速度比为 1.5 工况下没有明显优势;并对这一现象做出了合理分析。

关 键 词: 横向射流; 速度比; CFD 模拟; 湍流模型; 湍流生成项

中图分类号: V231.3; TK224.1

文献标志码: A

CFD simulations of jet in cross-flow with modified S-A turbulence model

ZHANG Yi¹, WANG Xiaodong¹, LIANG Junyu²,
KANG Shun¹, ZHANG Kai¹

(1. School of Energy Power and Mechanical Engineering,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Electric Power Science Research Institute,
Yunnan Electric Power Grid Company, Kunming 650217, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of simulating jet in cross-flow (JICF), Spalart-Allmaras (S-A) turbulence model was improved by introducing strain rate tensor into the turbulence production term because of the significant influence of shear in JICF. The JICF with velocity ratios of 0.5 and 1.5 was simulated by the modified S-A turbulence model. According to the validation with experimental data, the results showed that accuracy of predicting JICF with modified S-A model was promoted; mechanism of the modified parts in S-A model was also analyzed. Modified S-A model, $k-\epsilon$ model, Reynolds stress model (RSM) and large eddy simulation (LES) were compared in the simulations of JICF. The results showed that the modified S-A model performed best at the velocity ratio of 0.5, and had a similar accuracy to other models at the velocity ratio of 1.5; in addition, the results were analyzed reasonably.

收稿日期: 2016-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(51576065); 山西省煤基重点科技攻关项目(MD2014-03);
中央高校基本科研业务费专项资金(JB2015RCY05)

作者简介: 张仪(1988—),男,博士生,主要从事湍流射流的 CFD 模拟研究。

通讯作者: 张锴(1968—),男,教授、博士生导师,博士,主要从事两相流的实验与数值模拟研究。E-mail: kzhang@ncepu.edu.cn

引用格式: 张仪,王晓东,梁俊宇,等. 改进 S-A 湍流模型对横向射流的 CFD 模拟[J]. 航空动力学报, 2017, 32(11): 2761-2768.

ZHANG Yi, WANG Xiaodong, LIANG Junyu, et al. CFD simulations of jet in cross-flow with modified S-A turbulence model[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(11): 2761-2768.

Key words: jet in cross-flow; velocity ratio; CFD simulations; turbulence model; turbulence production term

作为流体力学中的经典流动现象,横向射流(jet in cross-flow, JICF)在航空航天与能源动力等领域中有着广泛的适用:燃烧过程中物料掺混的强化^[1-2],透平叶片的气膜冷却^[3-4],飞机的垂直或短距离起落(V/STOL)^[5-6],以及叶片边界层流动的控制^[7-8]等等。因此,研究横向射流对诸多工程实践具有重要的指导意义。

横向射流的研究始于 20 世纪 30 年代工程师对烟囱排烟的关注^[9],70 年代横向射流开始得到大量深入的研究;到了 90 年代,Margason^[10]归纳总结了 50 多年来的研究成果,对 JICF 的流场进行了全面的描述,提出射流孔附近完整的涡系结构;在此基础上,Fric 等^[11]提出了 JICF 的四涡特征流动结构,如图 1 所示,该流动结构已经成为了 JICF 研究的共识^[12-13]。近些年来,全面刻画横向射流的流动细节和深入探究其流动机制,成为学者们关注的重点;而 CFD 在这方面发挥了日益重要的作用,通过直接数值模拟(direct numerical simulation, DNS)和大涡模拟(large eddy simulation, LES)等技术,得到了 JICF 流场的拟序结构^[14-15]和旋涡的演化发展规律^[16-17]等重要信息。

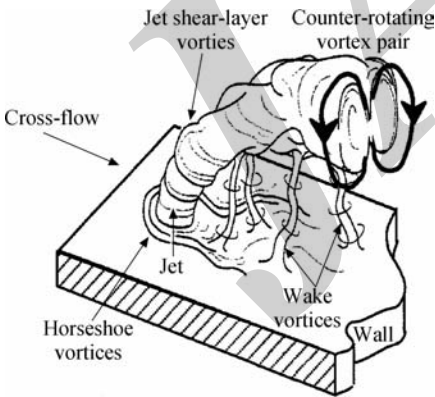


图 1 JICF 的四涡结构^[11]

Fig. 1 Four vortices structural of JICF^[11]

采用雷诺平均 N-S(Reynolds average Navier-Stokes, RANS)方法研究横向射流,在工程背景的研究中占主要地位。在 RANS 中应用最广泛的是标准 $k-\epsilon$ 湍流模型^[18]以及 $k-\epsilon$ 的一系列改进模型^[19-20],这些模型的计算精度尚可,但存在着明显不足:由于湍动能耗散机制复杂,对 ϵ (湍流耗散率)构造准确模型十分困难,所以 ϵ 方程精度较差,对平均切变率较大的流动,如回流和分离

等模拟并不十分准确。所以,有学者采用其他湍流模型来研究横向射流^[21-22],康顺等^[22]采用 Spalart-Allmaras(S-A)湍流模型对 JICF 流场进行了拓扑分析,验证了 Margason 提出的涡系结构。雷诺时均方法研究 JICF 的文献很多,但是,关于计算该流动的最佳湍流模型,至今尚未达成共识。

文献[21-22]表明 S-A 湍流模型能够解析出 JICF 的主要流动特征结构,该模型的计算精度尚可。而当前通过改进湍流模型来提升 JICF 模拟精度的研究鲜有报道,因此,在深入理解 JICF 流动现象的基础上,本文选择对 S-A 模型进行修改,以此对该问题展开研究。

1 数值方法与物理模型

1.1 湍流模型修改

S-A 湍流模型^[23]是一方程模型,其输运方程如下:

$$\frac{D(\rho\bar{v})}{Dt} = G_v + \frac{1}{\sigma_v} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \rho\bar{v}) \frac{\partial \bar{v}}{\partial x_j} \right] + C_{b2} \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x_j} \right)^2 \right\} - Y_v \quad (1)$$

式中 G_v 为湍流生成项,满足

$$G_v = c_{b1} \rho \bar{v} \left(S + \frac{\bar{v}}{\kappa^2 d^2} f_{v2} \right) \quad (2)$$

式中参数意义及取值详见文献[23],其中 S 在数值上等于涡量的模

$$S = \sqrt{2\boldsymbol{\Omega}_{ij}\boldsymbol{\Omega}_{ij}} \quad (3)$$

Mariani 等^[24]认为,湍流模型中的湍流生成项只与 $\boldsymbol{\Omega}_{ij}$ (vorticity tensor, 涡量张量)相关联而不考虑 $\boldsymbol{S}_{ij}$ (strain rate tensor, 应变率张量),是不全面的。他们提出一种经验型的混合形式

$$S = \sqrt{2\boldsymbol{\Omega}_{ij}\boldsymbol{\Omega}_{ij}} + 2 \times \min(0, \sqrt{2\boldsymbol{S}_{ij}\boldsymbol{S}_{ij}} - \sqrt{2\boldsymbol{\Omega}_{ij}\boldsymbol{\Omega}_{ij}}) \quad (4)$$

尽管 $\sqrt{2\boldsymbol{\Omega}_{ij}\boldsymbol{\Omega}_{ij}}$ 与 $\sqrt{2\boldsymbol{S}_{ij}\boldsymbol{S}_{ij}}$ 在数值上接近,然而这种关联形式会在流体的旋转效应强于剪切效应时,减小 G_v 的大小,抑制湍流的生成。这是因为受旋涡支配,涡核附近的流体在做有序地旋转运动,而湍流脉动会受其影响而减弱。因此 Mariani 等给出的表达式更符合旋涡流动的物理真实情形。

5 所示: $y/D=0$ 平面与流场下游 3 个截面的交线。 $x=D, 3D, 5D$ 表示这 3 个截面到射流孔的距离分别为 1 倍、3 倍和 5 倍射流孔孔径。

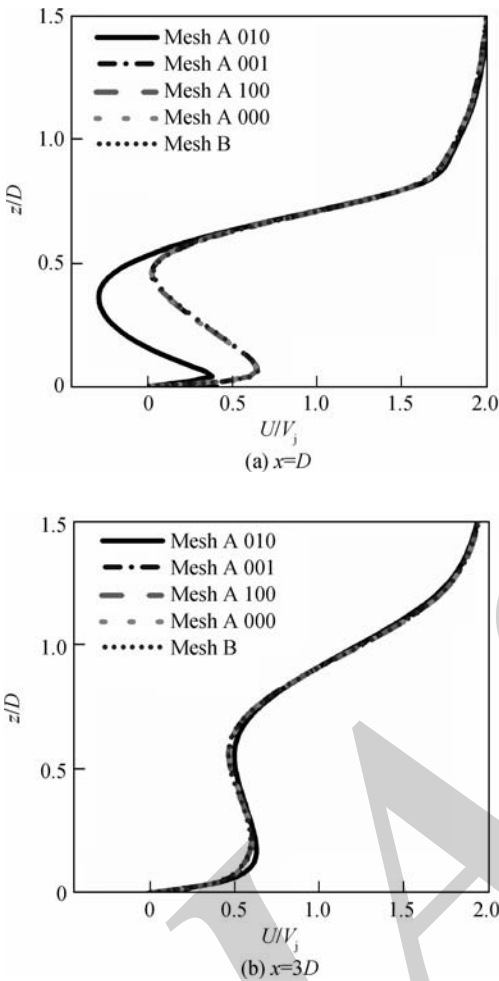


图 4 网格无关性研究(U 在 $y/D=0$ 平面的分布)
Fig. 4 Mesh independence study (U in $y/D=0$ plane)

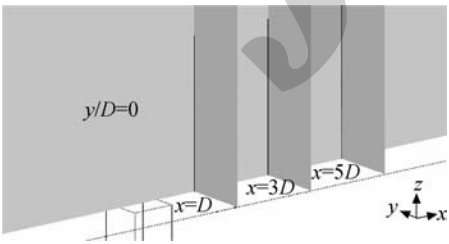


图 5 射流孔下游位置示意图($y/D=0$ 平面)
Fig. 5 Schematic diagram of locations at downstream of jet hole ($y/D=0$ plane)

从图 5 中可得,在 $x=3D$ 截面处,所有网格的计算结果近乎重合;在 $x=D$ 截面,只有 Mesh A 010 与其他 3 套 Mesh A 有着较为明显的差别。这表明 Mesh A 000 在 x 和 z 方向上的精度已经足够,而在 y 方向的精度还有待进一步的验

证。因此,对基准网格在 y 方向上加密,得到 Mesh B,其网格总数约为 420 万。对比 Mesh B 与 Mesh A 000 可知,这两套网格的计算结果近乎重合,这说明 Mesh A 000 在 y 方向的精度已经足够。综上,本文计算所用网格达到了收敛性要求。

2.2 修改 S-A 模型的计算结果讨论

本节考察了式(5)中的常系数 C 取值分别为 0、1、2、4 的条件下,S-A 模型对 JICF 流动的影响,并对其做出分析。当 C 取值为 3 时,其结果与 C 取 2 时非常接近,限于篇幅而没有展示;继续增大 C 的取值,会导致计算难以收敛,因此 C 最大取值为 4。

2.2.1 $R=0.5$ 工况

图 6 和图 7 分别是 $R=0.5$ 工况下的速度云图和速度轮廓线图。观察图 6 和图 7(a),在 $x=D$ 截面,在贴近平板的区域,约 $z/D=0.5$ 时,射流背风面的区域压强较低,存在着一个空穴。由于横流与射流之间存在着强烈的剪切作用,致使射流被迫弯曲运动;而由于受到射流的阻滞,近壁面处的横流就绕过射流进入空穴,因此,射流背风面形成了一个逆流区。这一现象类似于流体绕流圆柱而形成的回流,但其只发生在射流刚性最强的射流根部。在此区域内, $C=0$ 的结果背离实验值趋势,未预测出逆流现象,这说明原始 S-A 湍流模型的偏差较大。 C 取值由 1 逐渐增大到 4 的计算结果与实验值愈来愈接近,其中 $C=2$ 与 $C=4$ 的结果近乎重合,这初步说明修改湍流模型是有效的。在 $z/D=0.5\sim 1$ 的范围,速度 U 的梯度极大,这是一个横流与射流之间发生剧烈掺混与动量交换的混流区。在该区域内,各个计算结果与实验值都较为接近,其中 $C=4$ 的结果略好。自 $z/D=1$ 高度起,速度 U 基本恢复至横流来流速度大小,所有算例的结果都很切合实验值。

由图 6 和图 7(b)可知,在离射流孔较远的下游截面 $x=5D$ 处,回流现象消失;但是在近壁面约 $z/D=1$ 时,存在着逆横流方向的速度梯度;混流区内速度梯度减小,而且混流区径向(z 方向)范围也大于其在 $x=D$ 截面处的范围;直到 $z/D>1.5$, U 才恢复至横流速度。这些流动现象表明射流对横流的阻碍作用在远射流孔下游逐渐减弱。在此截面处,混流区内各个计算结果与实验值趋势均相同,随着 C 取值的增大,其结果与实验值愈发吻合。在混流区之上,所有计算结果都很贴近实验值。

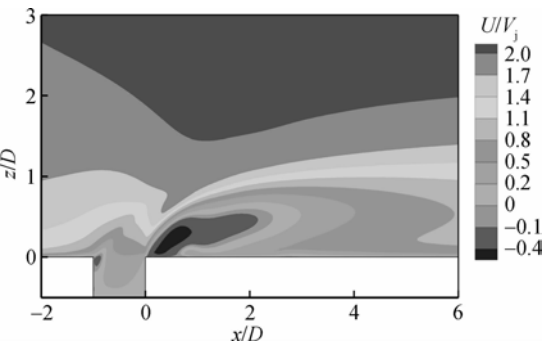


图 6 U/V_j 在 $y/D=0$ 平面的云图($R=0.5$)
Fig. 6 Contour of U/V_j at $y/D=0$ plane ($R=0.5$)

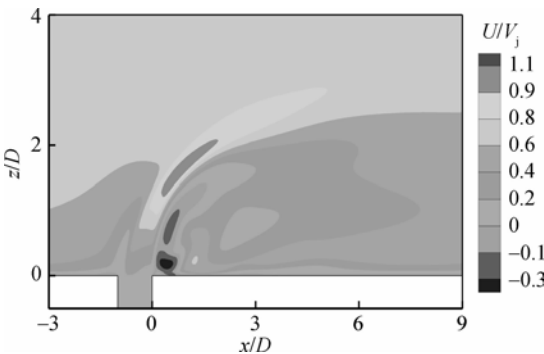


图 8 U/V_j 在 $y/D=0$ 平面的云图($R=1.5$)
Fig. 8 Contour of U/V_j at $y/D=0$ plane ($R=1.5$)

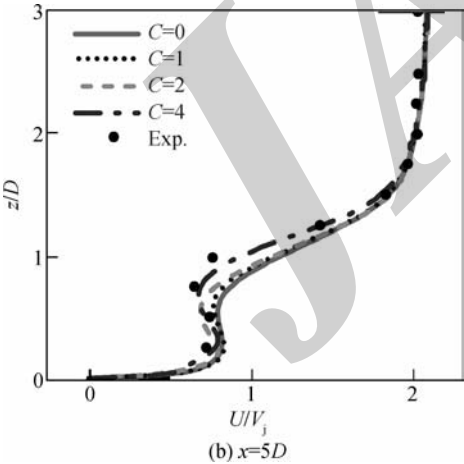
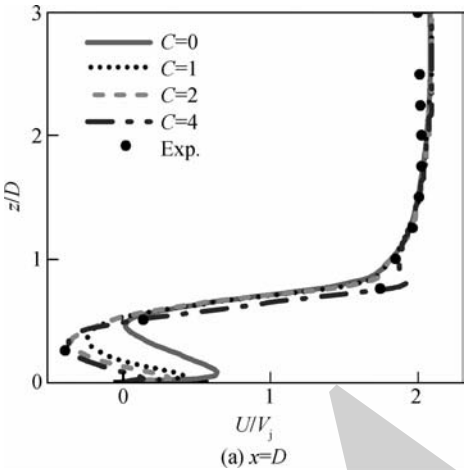


图 7 射流孔下流的速度 U 分布($R=0.5$)
Fig. 7 Velocity U at downstream of jet hole ($R=0.5$)

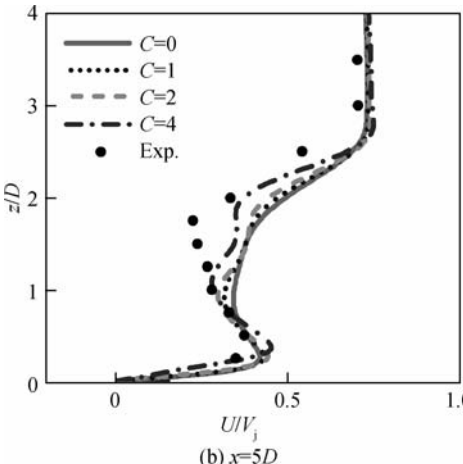
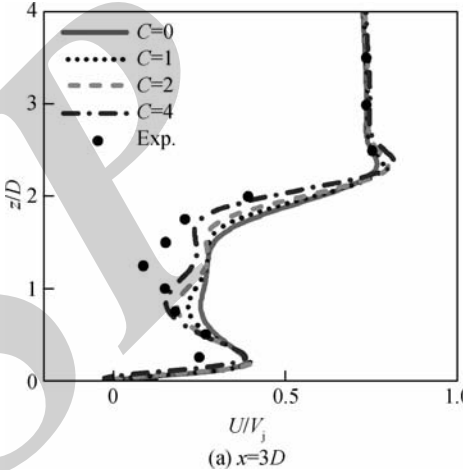


图 9 射流孔下流的速度 U 分布($R=1.5$)
Fig. 9 Velocity U at downstream of jet hole ($R=1.5$)

2.2.2 $R=1.5$ 工况

图 8 和图 9 对应着 $R=1.5$ 的计算结果。较 $R=0.5$ 时,速度比增大后,射流刚度增强,其对横流的阻滞作用亦增强。因此,在图 8 和图 9 中的近壁面附近,逆横流方向的速度梯度场被径向拉伸,而最小速度所出现的位置也相应升高,这表

明在大速度比的条件下,射流与横流的质量掺混和动量交换更加剧烈,流动现象更加复杂,故在两股流体强烈作用的混流区,精确模拟横向射流是具有较大难度的。在射流孔近区的 $x=3D$ 截面处和距离较远的 $x=5D$ 截面处,各个计算结果的趋势与实验值基本一致,而且随着 C 取值的增

大,其与实验值越来越接近;但是在最小速度点附近区域,各个计算结果均与实验值趋势相背离。整体来看, $C=4$ 的计算结果稍好,但优势并不明显。

综合这两个工况下的计算, $R=1.5$ 时较实验值偏差稍大, $R=0.5$ 条件下的结果更为准确;常系数 C 取值为 4 时,计算结果对比实验数据最接近,湍流生成项的修正效果最佳。

2.2.3 结果分析与讨论

一方面,应变率张量体现了剪切力对流体微团的作用,而对于横流与射流之间存在着显著剪切作用的 JICF 流动,加入了 S_{ij} 的 S-A 湍流模型计算结果更优。剪切作用在射流与横流强烈动量交换的区域最强,随着射流对横流的阻滞作用减弱而减弱,所以,改进后的 S-A 模型在近射流孔流场的预测精度优于其在远射流孔的下游流场。

另一方面,对 S-A 模型的改进是通过作用于湍流生成项而实现的,湍流生成项作为湍流模型中产生、猝发湍流的源项,其与流场中的湍流强度密切相关;而湍流强度作为湍流脉动剧烈程度的衡量标志,其对速度、压力等流场信息有着重要影响,尤其是在湍流强度较大的流域。如图 10 所示,在 $x=D$ 处,湍流旺盛,湍流生成项对流动影响很大,而在 $x=3D,5D$ 区域,由于湍流强度较小,即使对湍流生成项做出较大修改,其对流场的影响也十分有限。

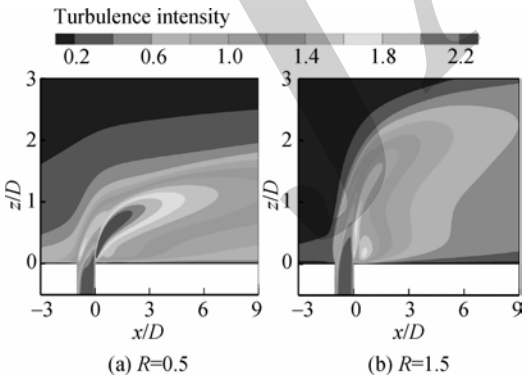


图 10 湍流强度云图($y/D=0$ 平面)
Fig. 10 Contours of turbulence intensity ($y/D=0$ plane)

2.3 不同模型的计算结果对比分析

前文的讨论与分析都局限于 S-A 湍流模型。有必要将 S-A 模型($C=4$)的计算结果与 $k-\epsilon$ 湍流模型、雷诺应力模型 (Reynolds stress model, RSM) 以及能够解析更多流动细节的大涡模拟所得到的结果进行对比分析。

对于 $k-\epsilon$ 和 RSM 的计算,所用网格与之前所用的相同。对于 LES 的求解,由于该方法对网格精度要求较高,故在 Mesh A 000 之上加密,得到一套总数约为 550 万的网格来进行计算。大涡模拟计算采用动力亚格子模型,计算时间为 10 个流通周期(一个流通周期定义为 $31D/V_c$),对后 5 个周期进行统计平均。

2.3.1 $R=0.5$ 工况

图 11 的速度轮廓线所在流场的位置仍如图 4 所示。图例中 S-A 所代表的是 $C=4$ 修正的计算结果。在 $x=D$ 位置:逆流区内的模拟结果成为区别计算精度的关键,S-A 模型和实验值最接近;逆流区以外,不同计算的预测结果相差不大。在 $x=5D$ 截面:混流区内 S-A 的计算结果与实验值最为切合,与在 $x=D$ 截面时类似, $k-\epsilon$ 湍流模型、RSM 以及 LES 都对逆横流方向的速度梯度预测不足;在混流区之上,各个计算的结果都与实验值非常吻合。综上, $R=0.5$ 工况下的 S-A 模

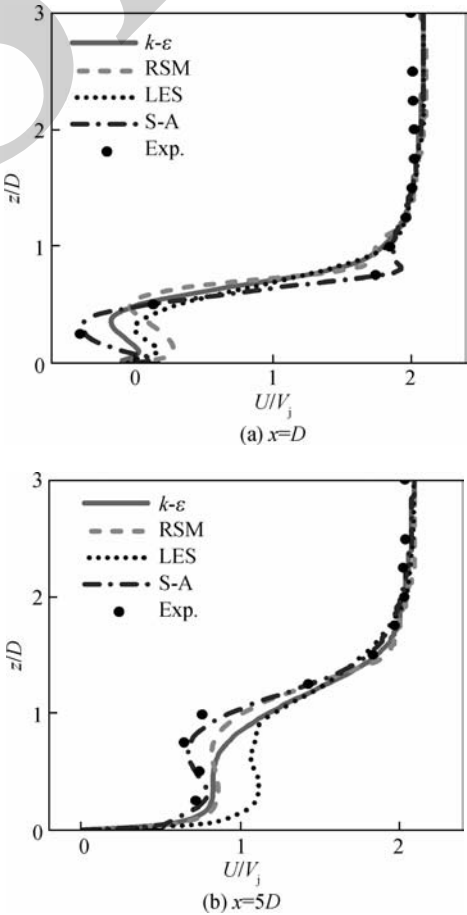


图 11 下游不同位置处的速度 U 分布($R=0.5$)
Fig. 11 Velocity U at different streamwise locations ($R=0.5$)

型预测精度比其他计算的精度更优。

2.3.2 $R=1.5$ 工况

观察图 12 可知,在出现速度最小值附近的流场区域,S-A 模型的结果与实验值偏差较大; $k-\epsilon$ 模型对混流区内的速度预测过大;RMS 和 LES 的计算结果在混流区内比其他模型更接近实验值。但是在速度接近主流的区域,RMS 和 LES 的预测值偏大,导致速度曲线出现了一个明显的“驼峰”;而 $k-\epsilon$ 和 S-A 模型的结果更加接近实验值。

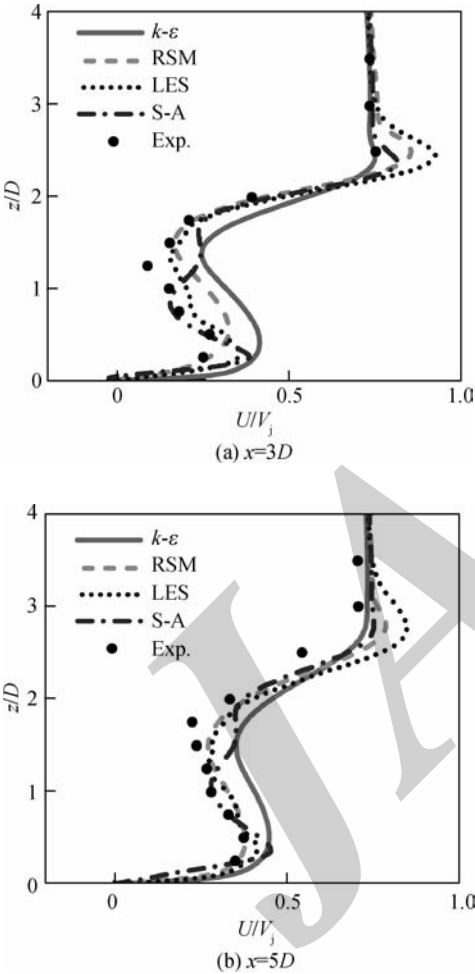


图 12 下游不同位置处的速度 U 分布($R=1.5$)
Fig. 12 Velocity U at different streamwise locations ($R=1.5$)

2.3.3 计算结果分析

横向射流可以被认为两种流动现象的组合,其一为自由射流;其二为平板上的自由剪切流动。JICF 在一定程度上兼有这两种流动的特点,而它与哪一种流动现象更接近则取决于速度比的大小。

在小速度比工况下,射流动量较小,其对横流的影响较为有限,此时的 JICF 流动接近于平板上

的自由来流。在叶轮机械领域得到成功应用的 S-A 湍流模型,对机翼的绕流、边界层流动等模拟效果较好。至于平板上的自由来流,其与翼型的绕流和边界层流动有相似之处,因此,在小速度比工况下,S-A 模型计算横向射流有一定的优势。

大速度比工况下,射流的相对速度大、刚度强,在出射方向经历较长的距离才发生弯曲,因此更具有自由剪切射流的特征。而 S-A 模型由于不求解当地剪切层厚度的长度尺度,所以对自由剪切射流的模拟能力不足。通过引入应变率张量可以得到令人满意的结果,对 JICF 的预测精度略优于 $k-\epsilon$ 模型、RMS 模型和 LES 方法。

3 结 论

本文通过对 S-A 湍流模型的湍流生成项进行修改,以此提升 S-A 模型对横向射流 CFD 模拟的精度,并将改进的 S-A 模型与其他湍流模型和模拟方法的计算结果进行了对比与分析。现得出以下结论:

- 1) 由于横向射流中的剪切作用显著,所以湍流模型的修改引入了应变率张量 S_{ij} 。改进后的 S-A 模型对 JICF 的计算精度提升,且优于其他模型的结果。
- 2) 随着 C 取值增大, S_{ij} 所代表的剪切作用对流动的影响同样增大。当系数 $C=4$ 时,S-A 湍流模型对 JICF 的预测精度最优。
- 3) S-A 湍流模型在 $R=0.5$ 工况下的计算精度优于其在 $R=1.5$ 工况下的精度。这可能是由于 S-A 模型不求解当地剪切层厚度的长度尺度,所以对精确模拟流场尺度变化明显的大速度比下的 JICF 流动有一定的难度。

参考文献:

[1] 赵延辉,梁剑寒,闫田田. 涡流发生器控制下横向射流穿透特性及优化[J]. 航空动力学报,2016,31(4):800-806.
ZHAO Yanhui, LIANG Jianhan, YAN Tiantian. Penetration characteristics and optimization of transverse jet on condition of vortex generator[J]. Journal of Aerospace Power,2016,31(4):800-806. (in Chinese)

[2] DRISCOLL R, AGHASI P, ST GEORGE A, et al. Three-dimensional, numerical investigation of reactant injection variation in a H_2 /air rotating detonation engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2016,41(9):5162-5175.

[3] 王晓东,康顺. 涡轮叶栅前缘槽缝气膜冷却的数值模拟[J]. 工程热物理学报,2008,29(11):1835-1838.
WANG Xiaodong, KANG Shun. Numerical simulation on

- the slot film cooling field at the leading edge of a turbine cascade[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(11):1835-1838. (in Chinese)
- [4] 贾广森, 张丽, 卢聪明, 等. 内冷通道横流条件下气膜冷却特性[J]. 航空动力学报, 2015, 30(4):823-830.
JIA Guangsen, ZHANG Li, LU Congming, et al. Film cooling performance with internal coolant channel crossflow[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(4):823-830. (in Chinese)
- [5] 陈著, 单勇, 沈锡钢, 等. 射流控制反推力装置流场数值研究[J]. 推进技术, 2014, 35(9):1181-1187.
CHEN Zhu, SHAN Yong, SHEN Xigang, et al. Numerical study on thrust reverser controlled with secondary flow[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(9):1181-1187. (in Chinese)
- [6] 洪亮, 额日其太, 徐惊雷. 双喷管 STOVL 飞行器升力突降动态过程的三维数值模拟[J]. 航空动力学报, 2015, 30(11):2688-2694.
HONG Liang, Eriqitai, XU Jinglei. Three dimensional numerical simulation of dynamic process of twin nozzle STOVL aircraft lift loss[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(11):2688-2694. (in Chinese)
- [7] 樊涛, 谢永慧, 张荻. 涡旋射流控制扩压器分离流动的大涡模拟[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(35):57-65.
FAN Tao, XIE Yonghui, ZHANG Di. Large-eddy simulation for control of flow separation in conical diffuser by vortex generator jets[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering(CSEE), 2008, 28(35):57-65. (in Chinese)
- [8] 李龙婷, 宋彦萍, 刘华坪, 等. 射流式旋涡发生器对弯曲扩压叶栅流场的影响[J]. 航空动力学报, 2015, 30(11):2658-2665.
LI Longting, SONG Yanping, LIU Huaping, et al. Effects of vortex generator jet on the flow of bowed compressor cascades[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(11):2658-2665. (in Chinese)
- [9] BOSANQUET C H, PEARSON J L. The spread of smoke and gases from chimneys[J]. Transactions of the Faraday Society, 1936, 32(3):1249-1263.
- [10] MARGASON R J. Fifty years of jet in cross-flow research[R]. Advisory Group for Aerospace Research and Development, AGARD-CP-534, 1993.
- [11] FRIC T F, ROSHKO A. Vortical structure in the wake of a transverse jet[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1994, 279:1-47.
- [12] MAHESH K. The interaction of jets with crossflow[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2013, 45(3):379-407.
- [13] KARAGOZIAN A R. The jet in crossflow[J]. Physics of Fluids, 2014, 26(10):101303. 1-101303. 14.
- [14] DAI C, JIA L, ZHANG J, et al. On the flow structure of an inclined jet in crossflow at low velocity ratios[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2016, 58:11-18.
- [15] IYER P S, MAHESH K. A numerical study of shear layer characteristics of low-speed transverse jets[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2016, 790:275-307.
- [16] GUI N, XU W K, GE L, et al. LBE simulation of coherent vortex motion and heat transfer in jets of cross flow[J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2016, 28(6/7/8/9/10):383-392.
- [17] SAU R, MAHESH K. Dynamics and mixing of vortex rings in crossflow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2008, 604:389-409.
- [18] THEODORIDIS G S, LAKEHAL D, RODI W. Three-dimensional calculations of the flow field around a turbine blade with film cooling injection near the leading edge[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2001, 66(1):57-83.
- [19] 谷建龙, 张芝涛, 白敏冬. 动量比对气液射入压载水管路混溶过程的影响[J]. 化工学报, 2009, 60(1):48-54.
GU Jianlong, ZHANG Zhitao, BAI Mindong. Influence of momentum ratio on mixing process of gas-liquid jetting into ballast water discharge pipe crossflow[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2009, 60(1):48-54. (in Chinese)
- [20] 李志伟, 槐文信, 钱忠东. 横流中单排多孔射流的流场与浓度特性数值模拟[J]. 中国科学:技术科学, 2012, 42(12):1395-1406.
LI Zhiwei, HUAI Wenxin, QIAN Zhongdong. Study on the flow field and concentration characteristics of the multiple tandem jets in crossflow[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 42(12):1395-1406. (in Chinese)
- [21] WANG X D, LI Z, LIANG J Y, et al. Numerical simulations of imperfect bifurcation of jet in crossflow[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2012, 6(4):595-607.
- [22] 康顺, 马丽, 陈党慧. 矩形冷却孔附近流动的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(1):28-31.
KANG Shun, MA Li, CHEN Danghui. Numerical study of flow structure nearby rectangular cooling holes[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(1):28-31. (in Chinese)
- [23] SPALART P R, ALLMARAS S R. One-equation turbulence model for aerodynamic flows[R]. AIAA 92-0439, 1992.
- [24] MARIANI J D, ZILLIAC G G, CHOW J S, et al. Numerical/experimental study of a wingtip vortex in the near field[J]. AIAA Journal, 1995, 33(9):1561-1568.
- [25] AJERSCH P, ZHOU J M, KETLER S, et al. Multiple jets in a crossflow: detailed measurements and numerical simulations[J]. Journal of Turbomachinery, 1997, 119(2):330-341.