

文章编号: 1000-8055(2026)00-20250282-09

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20250282

基于 OpenFOAM 的二维后向台阶 流动数值仿真

谢奥洁, 田 潇, 闫文辉

(北方工业大学 机械与材料工程学院, 北京 100144)

摘 要: 为提升不可压缩流动中湍流模拟精度并发展高效湍流模型, 本研究在先前提出的 partial averaged fluctuation velocity (PAFV) 湍流模型的基础上进行了部分改进, 通过引入侧偏脉动速度调整动力黏度, 构建了一款相等于无工系数的主要用于不可压缩流体计算的湍流模型, 以优化近壁面边界层分离的预测能力。基于 OpenFOAM 开源平台开发了模型求解器模块, 对二维后向台阶流动进行了高分辨率数值模拟, 获取瞬时速度场与脉动速度分布以及雷诺应力分布数据。结果表明: 与 Spalart-Allmaras (S-A)、 $k-\omega$ SST 两种常用湍流模型相比, PAFV 模型结果与理论值在部分区域的符合度更好, 由于引入了侧偏脉动速度并降低了动力黏度, 该新湍流模型在捕捉台阶下游近区的漩涡时表现出更高的敏感性, 对漩涡的捕捉能力更强, 可准确预测湍流边界层分离过程。然而, 在捕捉上壁旋涡区方面, 该模型表现不及传统湍流模型, 且对远场涡结构的预测存在滞后, 其有待进一步优化。本研究为近壁流动优化提供新思路, 未来将致力于提升模型普适性。

关 键 词: OpenFOAM 软件; 后向台阶流动; PAFV 湍流模型; 边界层分离; 不可压缩流动

中图分类号: V211.1+3; O357.5

文献标志码: A

Numerical simulation of two-dimensional backward-facing step flow using OpenFOAM

Xie Aojie, Tian Xiao, Yan Wenhui

(School of Mechanical and Materials Engineering,
North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: To enhance the accuracy of turbulence modeling in incompressible flows and to develop efficient turbulence models, this study builds upon the previously proposed Partial Averaged Fluctuation Velocity (PAFV) turbulence model and introduces several improvements. By incorporating lateral fluctuation velocity to adjust the viscosity coefficient, a turbulence model was developed that is essentially free of empirical constants and primarily applicable to incompressible flow computations, with improved capability in predicting near-wall boundary layer separation. The model solver was implemented on the open-source platform OpenFOAM, and high-resolution numerical simulations were conducted for two-dimensional backward-facing step flows to obtain instantaneous velocity fields, fluctuation velocity distributions, and Reynolds stress data. The results demonstrate that, compared with the commonly used Spalart-Allmaras (S-A) and $k-\omega$ SST turbulence models, the PAFV model exhibits better agreement with theoretical values in certain regions. Due to the introduction of lateral fluctuation velocity and the

收稿日期: 2025-06-13

基金项目: 北方工业大学毓秀创新项目资助(2024NCUTYXCX106); 先进航空动力创新工作站项目(HKCX2024-01-023)

作者简介: 谢奥洁(2001—), 女, 博士生, 研究方向为计算流体力学。E-mail: 17852978820@163.com

通信作者: 闫文辉(1979—), 男, 教授, 博士, 研究方向为流体力学及湍流数值模拟。E-mail: abuuaa@163.com

引用格式: 谢奥洁, 田潇, 闫文辉. 基于 OpenFOAM 的二维后向台阶流动数值仿真[J]. 航空动力学报, 2026, 42(X): 20250282. Xie Aojie, Tian Xiao, Yan Wenhui. Numerical simulation of two-dimensional backward-facing step flow using OpenFOAM[J]. Journal of Aerospace Power, 2026, 42(X): 20250282.

reduction of viscosity, the new turbulence model shows enhanced sensitivity in capturing vortices in the near-wake region downstream of the step, thereby providing stronger capability in vortex prediction and more accurate characterization of turbulent boundary layer separation. However, in terms of capturing the upper-wall vortex region, this model performs worse than traditional turbulence models, and there is a lag in predicting the far-field vortex structure, which needs further optimization. This study provides new ideas for near-wall flow optimization, and future work will be dedicated to improving the universality of the model.

Keywords: OpenFOAM software; backward-facing step flow; PAFV turbulence model; boundary layer separation; incompressible flow

在流体力学领域,分离流的再附着是典型的多尺度复杂流动现象,涉及分离涡的生成与脱落、涡结构与固壁及涡间相互作用等复杂物理机制。流动分离在机翼绕流、汽车尾流、发动机进气道及燃烧室流动等工程场景中普遍存在。二维后向台阶流动因分离点固定、边界条件明确,成为研究分离再附特性的基准模型,也是检验湍流模型性能的关键问题。传统雷诺平均纳维-斯托克斯(RANS)模型在预测此类分离流时存在局限,因此发展高精度、高效的新型湍流模型具有重要意义^[1-3]。

国内外学者针对后向台阶流动开展了大量研究。连洪祥^[4]在水槽中采用氢气泡法观测后台阶流动,揭示了大涡结构对湍流拟序结构生成及近壁流动演化的调控机制。钱炜祺等^[5]采用基于张量不变性理论推导的二维非线性 $k-\varepsilon$ 模型,对多工况后向台阶分离流进行数值模拟。结果表明:相较标准 $k-\varepsilon$ 模型,该模型显著提升了回流区长度、壁面压力及摩阻分布的预测精度,同时保留了标准模型的计算经济性与工程实用性优势。Chiang 与 Sheu^[6]对雷诺数范围 $100 \leq Re \leq 1\,000$ 的二维后向台阶层流流动进行了数值研究,其结果与 Armaly 等人的实验数据表现出良好一致性。同时,他们通过关键点分析揭示了流动的跨向效应以及由端壁诱导产生的三维涡结构。Tihon 等^[7]则采用电扩散技术研究了湍流状态下的近壁后向台阶流动,结果表明该流动的回流区呈现显著的非定常性,伴随明显的低频波动,并发现逆流区域的峰值壁面摩擦因数随雷诺数而变化。齐鄂荣等^[8]采用高分辨率 PIV 技术研究二维后向台阶流,基于瞬时流速场数据解析瞬态与时间平均流场特性。结果表明:瞬时流场与时间平均流场存在显著差异;定量揭示了回流区长度及旋涡结构演化规律,证实该流动兼具定常与非定常双重

特性。江立军等^[9]通过三维斜掠后台阶实验发现:斜掠角 $>15^\circ$ 时诱发显著二次流,主分离涡系向背风侧偏移 30%,揭示三维效应对再附着长度的抑制规律。李锴萌等^[10]研究的主要内容为低速二维后台阶壁面压强脉动特性。其研究结果发现分离泡内存在 20~200 Hz 主导脉动频带,再附着点脉动强度最大。Rani 等^[11]对过渡态后向台阶流($Re = 1\,000\text{--}2\,000$, 扩张比 2.02, 纵横比 8)开展了数值研究,并与实验及数值结果进行了验证。研究指出,该流动呈现显著的三维非定常特征,伴随 Kelvin-Helmholtz 振荡、类似 Taylor-Görtler 的涡结构,以及底部/顶部回流涡与跨展向螺旋运动之间的复杂相互作用。Schäfer 等^[12]对 $Re = 6\,000$ 的过渡态后向台阶流动进行了直接数值模拟(DNS),结果表明,主再附着线的摆动以及二次回流区的振荡均由不稳定剪切层中的涡结构所激发;同时,压力梯度与涡动力学过程相互关联,共同驱动了流动的非定常性。高南等^[13]基于后台阶 PIV 实验首次量化三维运动能谱,证实展向速度分量占主流 8%-12%,导致回流区呈椭球拓扑结构。孙逸凡等^[14]利用二维后台阶流动验证了一种利用新的漂移速度计算的单方程湍流模型,通过实验计算发现,该新型模型可以有效地降低了湍流模型计算程序的开发难度,显著降低数值模拟计算量。

Uruba^[15]在窄通道内后台阶模型上,给出了 TR-PIV 实验结果及其分析。对回流区进行了详细的研究。平均结构的评估波动速度场。然后利用 POD(BOD)技术对流动的动态特性进行了表征。在回流区域内的高能动力学结构的行为和进一步下游的流动再附着的实质性差异已经被发现。Ratha 等^[16]将 POD 方法与大涡模拟(LES)相结合,用于量化后向台阶流动中过渡位置与台阶高度之间的非线性关系。研究结果表明,当台阶高度每

增加 0.18*(位移厚度)时, 过渡位置将提前 12%。其分析进一步指出, 分离泡内部的湍动能输运过程在很大程度上控制了流动从层流向湍流的过渡机制。Chovet 等^[17]研究了大雷诺数下后向台阶流动的动力学特性, 描述了后台阶分离和再附着流动中, 壁面压力脉动和速度场的非定常特性。Scharnowski 等^[18]采用多视场平面和立体粒子图像测速(PIV)测量方法对来流马赫数为 0.8、雷诺数为 1.86×10^5 的跨声速后向台阶流动进行了实验研究。分析的主要目的是研究再附点位置的巨大时间变化是否与大尺度相干流结构的存在有关。Bolgar 等^[19]在慕尼黑三声速风洞中, 结合 PIV 与动压测量技术, 系统研究亚/跨/超声速后台阶流动。首次实现速度场与压力脉动的同步关联测量, 发现当亚声速变成跨声速时再附面动载荷递增, 平均再附位置下移; 超声速临界转变时, 再附位置突向上游回跳, 归一化动载荷骤降。Pioch 等^[20]对不同 RANS 模型在后向台阶流中表现做了对比研究, 将基于 RANS 的 PINN(物理信息神经网络)方法应用于雷诺数为 5 100 的后台阶流动。应用了标准 $k-\omega$ 模型、混合长度模型、无方程 ν_t 和无方程拟雷诺应力模型。当提供三条垂直线的标注训练数据时, 结果与 DNS 数据进行了比较。对于五行训练数据, 所有模型都能更准确地预测分离剪切层和相关涡流。Zhang 等^[21]实验研究后台阶位置与湍流度对端壁薄膜冷却效率的影响。其结果发现台阶可以使冷却效率提升 17%(湍流度为 10% 时), 但泄漏流会导致冷气覆盖均匀性下降; 当湍流度变大时(湍流度大于 15%)台阶增益效应则会被削弱。Caccia 等^[22]利用交替方向隐式方法, 针对后向台阶流动问题研究共轭传热特性, 同时求解流体区域和固体区域的能量方程, 结果表明共轭效应与雷诺数、普朗特数、导热系数比和台阶高度等参数有关, 并详细给出了这些参数对局部努塞尔数、界面温度和平均努塞尔数的影响。

为了进一步优化与验证新构建的脉动速度分组平均(PAFV)湍流模型, 提升其计算精度与可靠性, 本文通过引入侧偏脉动速改进动力黏度, 提高新型湍流模型的预测能力。基于 OpenFOAM 开源平台对该模型开展了后向台阶流动的数值仿真研究, 通过模拟二维后向台阶流动并与 S-A 模型、 $k-\omega$ SST 模型进行对比, 分析 PAFV 模型的性能及流动预测能力, 评估其在复杂分离流中的适

用性。

1 控制方程及数值方法

1.1 控制方程与湍流模型

本研究采用雷诺平均的不可压缩形式 Navier-Stokes(N-S)方程, 在直角坐标系下, 平均流动的连续方程、动量方程微分形式如下:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (u_i)}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij} + \sigma_{ij}^{\text{turb}}) \quad (2)$$

式中 ρ 代表密度, p 代表压强, u_i 代表速度, σ_{ij} 代表层流黏性应力, $\sigma_{ij}^{\text{turb}}$ 代表湍流黏性应力。

新构造的 PAFV 湍流模型是基于湍流脉动速度的分组平均构造的。湍流的瞬时速度可以表示为 $u = \bar{u} + u'$, 其中, $\bar{u}$ 表示系综平均速度, u' 表示对应的脉动速度。由于对空间某一点所有脉动速度的系综平均都为 0, 使得在建立湍流模型的过程中, 无法使用物理上真实存在且起到重要作用的一阶脉动速度 u' 。借鉴文献 [23] 的分组方式, 获得 PAFV 模型的建模方程:

$$\frac{\partial \hat{u}_j}{\partial t} + \frac{\partial (\hat{u}_j u_i + \hat{u}_i u_j)}{\partial x_i} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial (\hat{\sigma}_{ij} + \hat{\sigma}_{ij}^{\text{turb}} - \sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{\text{turb}})}{\partial x_i} \quad (3)$$

式中 $\hat{u}_j$ 代表分组平均的脉动速度, $\hat{\sigma}_{ij}$ 代表分组平均后脉动速度对应的层流应力, 与 σ_{ij} 的计算相似; $\hat{\sigma}_{ij}^{\text{turb}}$ 代表分组平均后脉动速度对应的湍流应力, 与 $\sigma_{ij}^{\text{turb}}$ 的计算相似, 只是用 $\hat{u}_j$ 替换了 u_j 。

基于之前提出的 PAFV 模型, 本文在已有的基础上构建了新的湍流动力黏度方程, 与之前相比, 动力黏度的构造由平均形变率 S_1 变成了平均形变率 S_1 加脉动形变率 S_2 , 即 $S_1 + S_2$, 从而使黏性降低, 增大回流区。具体构造的湍流动力黏度如下(式(4)~式(6)):

$$\mu_r = C \frac{\rho \hat{u}_i \hat{u}_i}{2(S_1 + S_2)} \quad (4)$$

$$S_1 = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, \quad S_2 = \sqrt{2\hat{S}_{ij}\hat{S}_{ij}} \quad (5)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad \hat{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \hat{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

式中 ρ 代表密度, 系数 C 取 1.0, 此时动力黏度公式中可看作无系数 C , S_1 为平均形变率张量, S_2 为

脉动形变率张量。

1.2 数值方法、网格划分及边界条件

本文使用 OpenFOAM 开源平台对后向台阶流进行计算, 利用其自带的 simpleFoam 求解器(基于有限体积法, 用于求解稳态不可压缩牛顿流体 N-S 方程)进行计算。在 simpleFoam 求解器中, 压力和速度的耦合通过 SIMPLE/SIMPLEC 算法进行计算。通过改写 simpleFoam 求解器, 嵌入新湍流模型方程, 既保证了计算精度和计算的稳定性, 又能对新的湍流模型进行验证。本文对控制方程采用有限体积法进行空间离散, 梯度算子采用高斯线性离散格式, 对流项和扩散项均采用离散格式进行求解计算。本文基于 OpenFOAM 开源平台对后向台阶绕流进行数值模拟, 对比分析 S-A 模型、 $k-\omega$ SST 模型以及 PAFV 湍流模型在对后向台阶流数值计算中的表现, 验证新湍流模型对后向台阶流的适用性。验证算例是基于 Armaly 等^[24]文献中提到的二维后向台阶算例。后向台阶流模型如图 1 所示, 通道截面为矩形, 台阶厚度为 5 mm, 台阶高度为 $h=4.9$ mm, 台阶上游高度为 $H=5.2$ mm, 总高度 $Y=0.010$ 1 m, 入口到台阶处的水平距离为 5 mm, 台阶到出口位置的距离是 300 mm, 总长度 $L=0.305$ m。除入口和出口外, 其余壁面均设为无滑移绝热边界条件。本文计算设置的初始条件为入口处速度采用抛物线型分布, 进口处的压力设置为零梯度, 出口处压力设置为固定值, 流体假定为不可压缩的牛顿流体, 计算过程中物性参数保持不变。

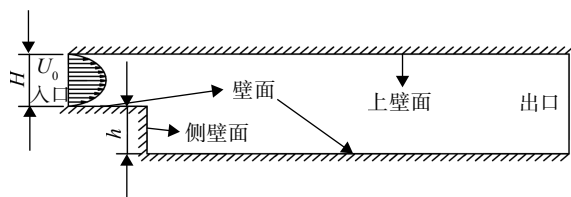


图 1 后向台阶物理模型

Fig. 1 Physical model of the backward-facing step flow

为了验证网格无关性, 本文采用 0.3 万、1.1 万、2.6 万三套网格进行计算。从图 2 中可以看出, 当网格数量为 0.3 万时与其他两套更密网格有较大的部分差异, 而 1.1 万网格和 2.6 万网格的结果基本重合了。由于该模型体积较小, 因此本文后续计算采用 1.1 万网格。另外, 为保证实验数据的准确性, 本文横纵坐标均进行无量纲化处理, 即 $L=H=0.005$ m。

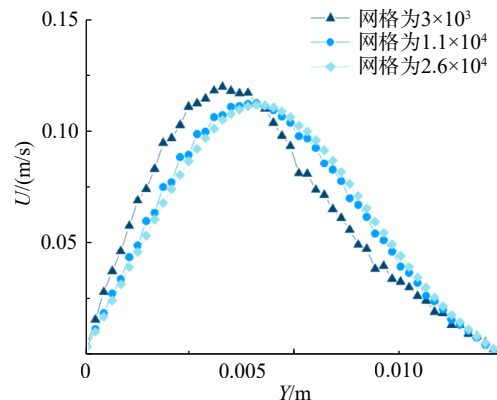


图 2 网格无关性分析

Fig. 2 Grid Independence Analysis

2 计算结果分析

2.1 不同雷诺数情况下台阶下游流场的时均流速场分布特性

图 3 为基于 Tecplot 软件展示的 OpenFOAM 计算的三种湍流模型(S-A、 $k-\omega$ SST 及本文新发展的 PAFV 湍流模型)在 $Re=389$ 时对二维后向台阶流动的数值模拟结果, 重点对比了台阶下游

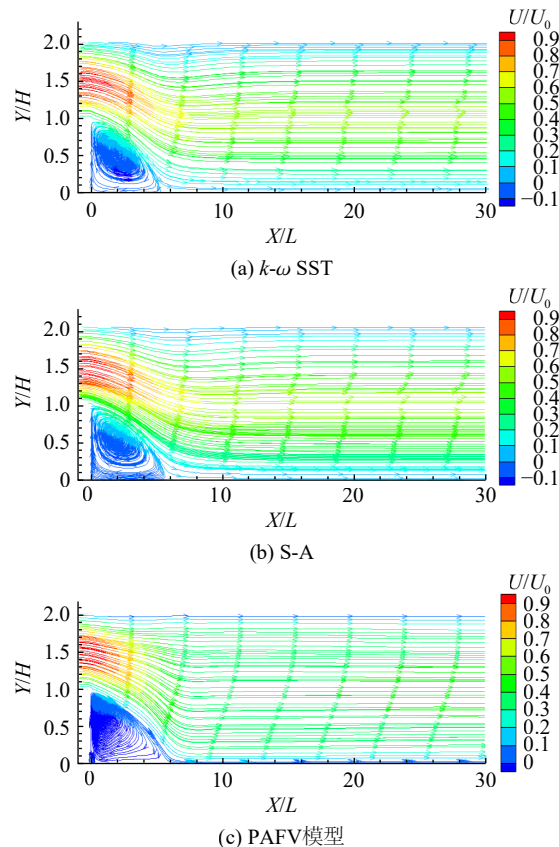


图 3 $Re=389$ 时台阶下游流场的时均流速场分布

Fig. 3 Time-averaged velocity field distribution of the downstream flow field of the step at $Re=389$

近区相同时刻的时均流场流线分布。根据参考文献 [25] 的研究结果, 在后向台阶流动过程中, 如果上游来流为定常流动, 那么台阶上游以及台阶下游远区为定常流动, 而台阶下游近区则为非定常流动。对比图 3 中 3 种不同的湍流模型结果发现, 获得的时均流场流线图与理论知识基本吻合, 且产生的漩涡大小相近。但 PAFV 模型漩涡的涡心位置与其他两个湍流模型不同, 略高与后者。此时数值为无量纲化后的速度变化, 即 U/U_0 。

图 4 为上述 3 种湍流模型在 $Re=1\,000$ 情况下对二维后向台阶流进行数值模拟后得到的时均流场流线图。根据文献 [2, 20] 可知, 当雷诺数较高时湍流下游近区的平均流场结构主要分为主流区、剪切层旋涡区、内角旋涡区、回流区、再附着区和边界层再发展区等 6 个区域。其分区如图 5 所示。

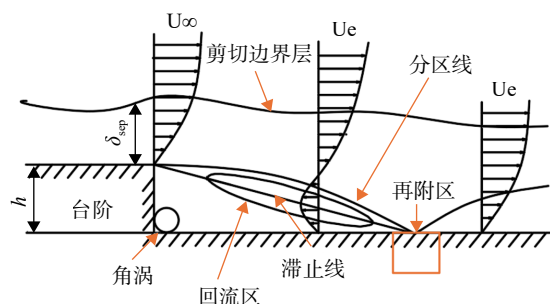


图 4 后向台阶流动中平均流场结构的区域划分
Fig. 4 Regional division of the average flow field structure in backward-facing step flow

对比图 5 中 3 种湍流模型结果发现, 获得的时均流场流线图大致与理论分析大致吻合, 但由于其雷诺数 ($Re=1\,000$) 较小, 流体未达充分湍流状态, 内角旋涡区等特征未明显显现。S-A 及 $k-\omega$ SST 模型可明显捕捉到剪切层旋涡区, 表明这两个传统模型对剪切层流动特征的响应更敏感, 但 PAFV 模型未能观察到该现象, 但其对回流区的捕捉能力优于其他两个模型, 因此, 表明新构造的湍流模型对近壁面边界层的模拟性能更优。

图 6 展示了 3 种湍流模型在 $Re=2\,260$ 条件下对二维后向台阶流动的时均流场流线图对比。此时流体已进入湍流状态, 下游近区的平均流场结构基本与湍流过渡阶段一致, 划分为 6 大部分。从对比结果来看, S-A 模型较好地再现了传统后台阶绕流中速度变化趋势, 并能有效捕捉内角旋涡回流现象; $k-\omega$ SST 模型对流动中漩涡的捕捉能力更强, 但其漩涡形态存在一定偏差; 而 PAFV

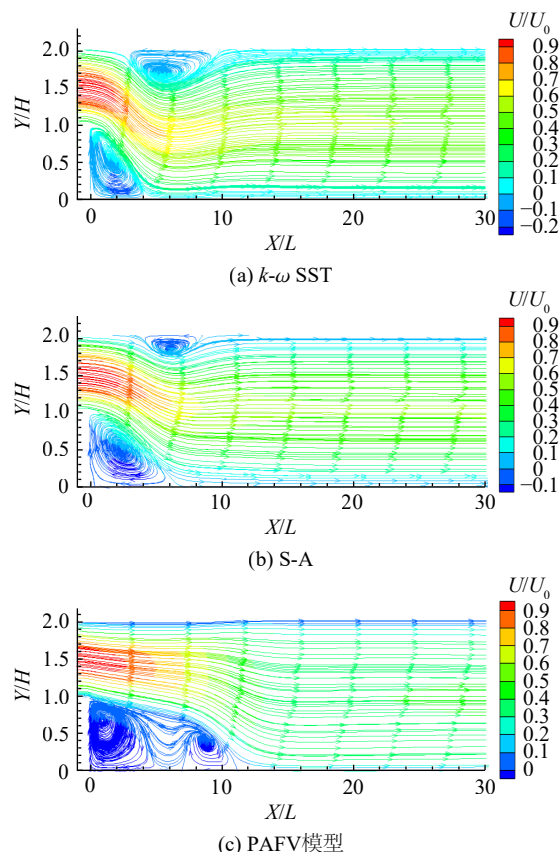
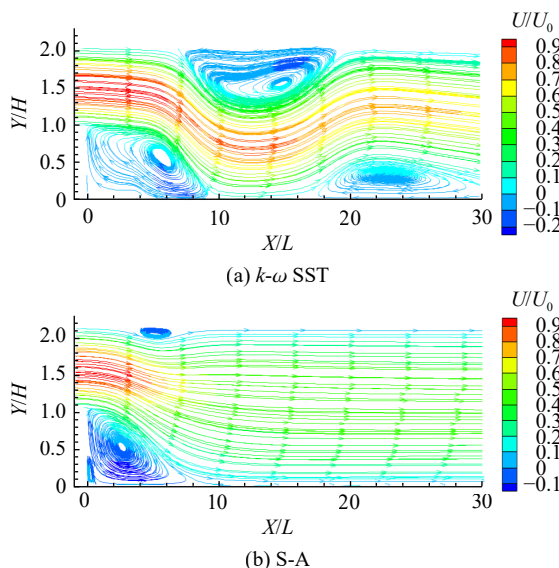
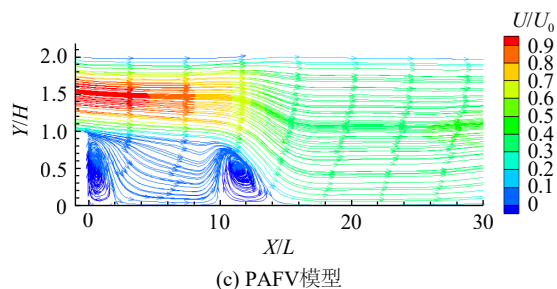


图 5 $Re=1\,000$ 时台阶下游流场的时均流速场分布
Fig. 5 Time-averaged velocity field distribution of the downstream flow field of the step at $Re=1\,000$

湍流模型可以精确捕捉台阶后主回流区及下游小回流区的存在, 且涡旋结构更清晰、分布合理, 说明其对研究复杂涡结构与分离流动建模方面具有更强的能力, 尤其对剪切层和回流区的响应更加敏感, 适用于模拟层流-湍流过渡区的流动特性, 但该模型在近壁面剪切层区域出现了流线膨胀现



图 6 $Re=2\,260$ 时台阶下游流场的时均流速场分布Fig. 6 Time-averaged velocity field distribution downstream of the step at $Re = 2\,260$

象,可能存在一定的数值耗散问题,需要对湍流模型进行进一步优化完善。

2.2 不同 X/L 位置下不同雷诺数的速度曲线对比结果

图 7 为 $Re=389$ 时 3 种湍流模型与实验值在不同位置上速度变化曲线的对比图。根据文献 [20] 可知,当雷诺数比较小时,流体在二维后向台阶中的流动状态为层流,台阶上游速度沿程变化很小,基本为均匀流,且流速分布为抛物线分布。从图中可以看出, S-A 与 $k-\omega$ SST 两种常用湍流模型在低雷诺数情况下与实验结果吻合度好,而 PAFV 湍流模型在低雷诺数情况下与实验结果吻合度较差,只有部分截面的结果相对重合。因此,该湍流模型在低雷诺数工况下的适用性较差。

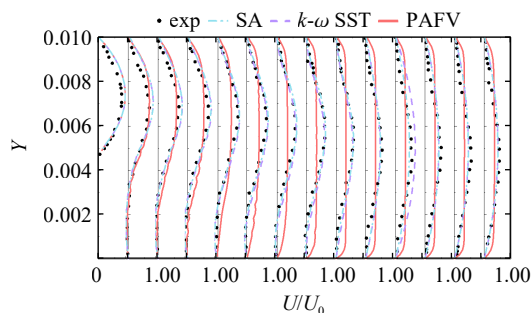
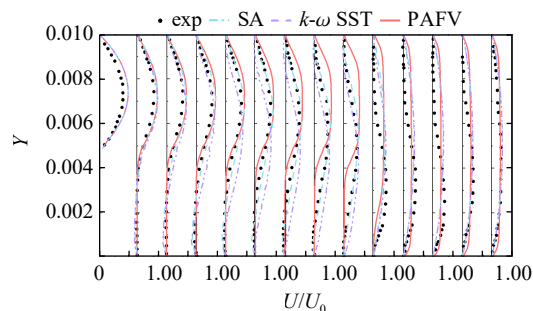
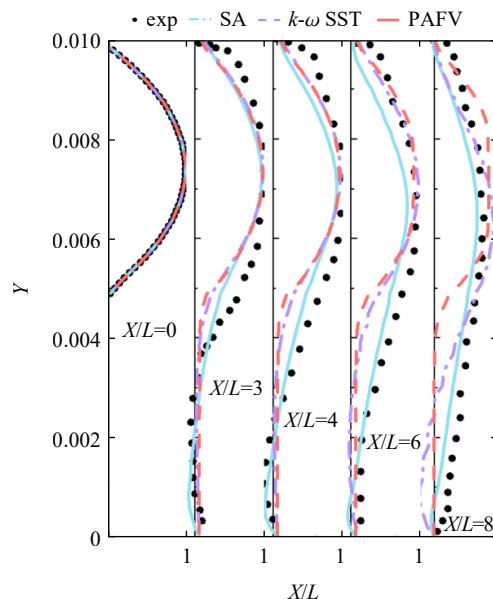
图 7 不同湍流模型在不同位置 X/L 上速度变化曲线 ($Re=389$)Fig. 7 Velocity variation curves of different turbulence models at different positions X/L ($Re=389$)

图 8 为 $Re=1\,000$ 时 3 种湍流模型与实验值在不同位置上速度变化曲线的对比图。根据文献 [20] 可知,随着雷诺数的增大,层流状态会逐渐发展成湍流状态,其流动特性也会随之改变。当流动状态为湍流时,台阶上游及下游远区(至出口处)的流速分布主要为近似对数分布。从图 8 中可以看出,雷诺数增大后, S-A 模型与 PAFV 模

图 8 不同湍流模型在不同位置 X/L 上速度变化曲线 ($Re=1\,000$)Fig. 8 Velocity Variation Curves of Different Turbulence Models at Different Positions X/L ($Re=1\,000$)

型结果相较于 $k-\omega$ SST 模型与实验结果的拟合度更高,并且 PAFV 湍流模型在台阶下游近区的速度分布与理论结果的相似性比 S-A 模型更相似、更贴合,而 $k-\omega$ SST 湍流模型在中间区域的速度曲线与实验结果吻合度较低。由此可知,随着雷诺数的增加, PAFV 模型捕捉湍流边界层变化的能力有所增强,说明其计算精度有所增强,且结果与理论相似度较高。因此该湍流模型性能具有一定的合理性,可有效应用于湍流边界层计算。

图 9 为 $Re=2\,280$ 时 3 种湍流模型与实验值在不同位置上 ($X/L=0, 3, 4, 6, 8$) 速度变化曲线的对比图。根据图中数据显示,随着雷诺数的增大,流动状态已转变为湍流状态。在湍流状态下,台

图 9 不同湍流模型在不同位置 X/L 上速度变化曲线 ($Re=2\,260$)Fig. 9 Velocity variation curves of different turbulence models at different positions X/L ($Re=2\,260$)

阶上游及下游远区(至出口处)的流速分布通常呈现近似对数分布。从图 9 中可以看出,随着雷诺数的增加, S-A 模型和 PAFV 模型的结果与实验数据的拟合度较 $k-\omega$ SST 模型更高,尤其是在 $X/L=3, 4, 6$ 的位置。进一步分析发现, PAFV 模型在台阶下游近区的速度分布与实验结果的相似性明显优于 S-A 模型, PAFV 模型的曲线与理论结果更为贴合。而 $k-\omega$ SST 模型在上游近壁面区域以及台阶下游的速度曲线与实验结果吻合度较低。由此可见,随着雷诺数的增大, PAFV 模型对湍流边界层变化的捕捉能力逐步增强,说明该模型的计算精度得到了提升,并且与实验结果的相似度较高。但由于湍流黏性的增加,施回流区增大,结果与实验值存在一定的差距。因此, PAFV 模型在湍流边界层计算中具有较高的适用性和合理性,可以有效应用于实际流动的数值模拟。但仍需要进行完善。

2.3 不同雷诺数情况下台阶下游流场的瞬时脉动速度场分布特性

图 10 为通过 Tecplot 绘制的用 OpenFOAM 计算的 PAFV 模型在 $Re=389$ 时对二维后向台阶流动的数值模拟结果,展示了台阶下游近区相同时刻的瞬时脉动流场流线分布。从图中可以看出,近壁面脉动速度波动平缓,而在剪切层出现小幅度脉动现象。此时分子黏性仍为主导机制,脉动速度对近壁面流动黏性影响较小。此时数值为无量纲化后的脉动速度变化,即 U_f/U_0

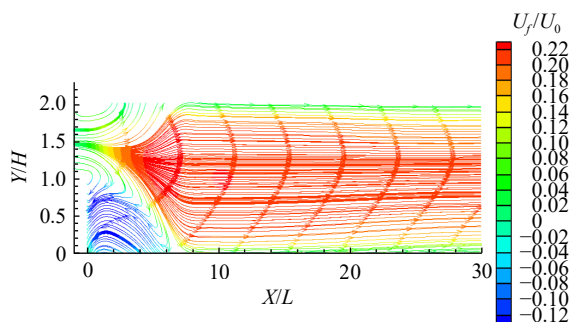


图 10 $Re=389$ 时台阶下游流场的瞬时脉动速度场分布

Fig. 10 Instantaneous fluctuating velocity field distribution of the downstream flow field of the step at $Re=389$

图 11 为通过 Tecplot 绘制的用 OpenFOAM 计算的 PAFV 模型在 $Re=1\,000$ 时台阶下游近区的瞬时脉动流场流线分布。从图中可见,近壁面脉动速度增大,出现强负速度脉动,且高脉动主要集中在再附区;此时湍流黏性由脉动速度主导,

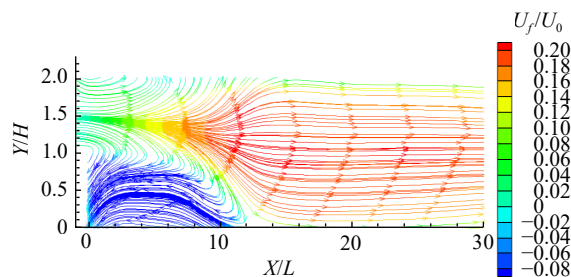


图 11 $Re=1\,000$ 时台阶下游流场的瞬时脉动速度场分布

Fig. 11 Instantaneous fluctuating velocity field distribution of the downstream flow field of the step at $Re=1\,000$

高幅值的负脉动导致壁面切应力增大,进而使局部摩擦力增加,但整体上由于湍流动力黏度的降低,流场混合作用减弱,导致回流区扩大且影响范围扩展。

图 12 为雷诺数 $Re=2\,260$ 时台阶下游近区的瞬时脉动流场流线分布。从图中可见,随着雷诺数的增加,近壁面的脉动速度也随之增大并且在剪切层内变化剧烈,负速度脉动也增大,再附区高脉动出现最多,能够清晰捕捉台阶后的回流区、再附着点及剪切层演化过程,流线连续性较强,可以体现出较好的数值稳定性和物理拟合能力。然而,模型在上游近壁面区域的速度预测仍存在偏差,对小尺度结构的分辨能力也有待加强。PAFV 模型在分析处理湍流边界层问题是具有一定可行性的,但仍需要对湍流模型进行进一步优化。

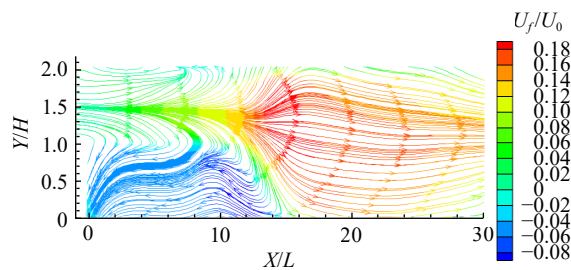


图 12 $Re=2\,260$ 时台阶下游流场的瞬时脉动速度场分布

Fig. 12 Instantaneous pulsating velocity field distribution downstream of the step at $Re=2\,260$

3 结 论

本文利用 OpenFOAM 软件对新发展的 PAFV 湍流模型进行二维后向台阶流算例的数值模拟,通过观察其某时刻时均流速场分布、不同位置上速度变化曲线以及某时刻脉动流场流线分布,得出以下结论:

1) 改进后的 PAFV 模型通过侧偏平均的方

式构造动量方程,一方面简化了湍流方程的形式;另一方面,本文在经验系数 $C=1.0$ 的条件下进行数值计算,相当于无系数构造的动力黏度方程,减少了人为因素的影响,使再附着点位置后移、回流区范围增大,更接近实际结果。后续工作中可通过调整经验系数进一步优化计算精度。

2) 本文通过增加脉动应变率张量来构造新的动力黏度方程,可以使有效黏性降低。从而增大回流区范围,改善对流动分离及再附着过程的预测能力,从而提高了预测的准确性。边界层分离起始点误差较 $S-A/k-\omega$ SST 模型有所减小且对小尺度涡结构的捕捉能力有所提高。

3) 在低雷诺数 ($Re=389$) 条件下,PAFV 模型的速度分布与实验吻合度弱于传统模型,此时脉动速度影响较小且未起主导作用,而在较高雷诺数 ($Re=1\ 000$) 时,其近壁区速度曲线与实验误差较 $S-A$ 模型有所减小,此时虽然高幅值脉动导致壁面切应力增大,使得局部摩擦力增强,但整体上由于湍流动力黏度的降低,流场混合作用减弱,导致回流区扩大漩涡更加明显。从而表明本研究中 PAFV 模型更适用于高雷诺数边界层分离问题。

4) PAFV 湍流模型对下游远场剪切层旋涡区的大尺度涡捕捉能力不足,且涡核位置与传统模型不同,需进一步优化湍流耗散机制以提升其准确性和适用性。

参考文献:

- [1] 胡如云,王亮,符松.后台阶流动及其控制述评[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2015,45(12):44-53.
Hu Ruyun, Wang Liang, Fu Song. Review of backward-facing step flow and separation reduction[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2015, 45(12): 44-53. (in Chinese)
- [2] 张磊,刘滔,高文峰,等.四种常用湍流模型在二维后向台阶流数值模拟上的性能比较[J].云南师范大学学报(自然科学版),2012,32(4):8-16.
Zhang Lei, Liu Tao, Gao Wenfeng, et al. Comparison of performance of four commonly-used turbulence models in numerically simulating two-dimensional backward-facing step turbulent flows [J]. Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition), 2012, 32(4): 8-16. (in Chinese)
- [3] 王晋军,连淇祥,兰世隆.后向台阶层流分离湍流结构的实验研究[J].航空学报,1996,17(2):149-154.
Wang Jinjun, Lian Qixiang, Lan Shilong. Experimental investigation on the turbulent coherent structures of laminar separation flow over a backward-facing step[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1996, 17(2): 149-154. (in Chinese)
- [4] 连淇祥.后向台阶湍流拟序结构的实验研究[J].力学学报,1993,25(2):129-133,257-259.
Lian Qixiang. An experimental investigation of the coherent structures of the flow behind a backward facing step[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1993, 25(2): 129-133, 257-259. (in Chinese)
- [5] 钱炜祺,蔡金狮.用非线性 $K-\epsilon$ 两方程湍流模型计算后向台阶分离流动[J].空气动力学学报,1998,16(4):426-432.
Qian Weiqi, Cai Jinshi. Numerical simulation of backward facing step flow with nonlinear $K-\epsilon$ two equation turbulence model[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1998, 16(4): 426-432. (in Chinese)
- [6] Chiang T P, Sheu T W H. A numerical revisit of backward-facing step flow problem[J]. *Physics of Fluids*, 1999, 11(4): 862-874.
- [7] Tihon J, Legrand J, Legentilhomme P. Near-wall investigation of backward-facing step flows[J]. *Experiments in Fluids*, 2001, 31(5): 484-493.
- [8] 齐鄂荣,黄明海,李炜,等.应用 PIV 进行二维后向台阶流动特性的研究 (1) 二维后向台阶流的旋涡结构的研究[J].水动力学研究与进展 (A 辑),2004,19(4):525-532.
Qi E(Rong), Huang Minghai, Li Wei, et al. Investigation of vortex structure of the 2D backward facing step flow via PIV[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2004, 19(4): 525-532. (in Chinese)
- [9] 江立军,高歌,张常贤.三维斜掠后台阶流动数值模拟[J].北京航空航天大学学报,2010,36(1):87-90.
Jiang Lijun, Gao Ge, Zhang Changxian. Numerical simulation of a swept backward-facing step flow[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010, 36(1): 87-90. (in Chinese)
- [10] 李锴萌,李卓越,高南.低速二维后向台阶流动中的壁面压强脉动[J].气体物理,2020,5(5):35-44.
Li Kaimeng, Li Zhuoyue, Gao Nan. Wall-pressure fluctuations for a low-speed two-dimensional backward-facing step flow[J]. *Physics of Gases*, 2020, 5(5): 35-44. (in Chinese)
- [11] Rani H P, Sheu T W H, Tsai E S F. Eddy structures in a transitional backward-facing step flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2007, 588: 43-58.
- [12] Schäfer F, Breuer M, Durst F. The dynamics of the transitional flow over a backward-facing step[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2009, 623: 85-119.
- [13] 高南,李卓越.后向台阶流动三维展向运动的实验研究 [C]//中国力学学会流体力学专业委员会.第十一届全国流体力学学术会议论文摘要集.哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020:41.
- [14] 孙逸凡,祁海鹰,吴玉新,等.基于 OpenFOAM 的漂移速度单方程湍流模型应用研究 [C]//中国力学学会流体力学专业委员会.第十三届全国流体力学学术会议论文集. XX: XX 出版社,2024:511.
- [15] Uruba V. Dynamics of secondary flow behind backward-facing step in a narrow channel[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2014, 67: 02120.
- [16] Ratha D, Sarkar A. Analysis of flow over backward facing step with transition[J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2015, 9(1): 71-81.
- [17] Chovet C, Lippert M, Foucaut J M, et al. Dynamical aspects of a backward-facing step flow at large Reynolds numbers[J]. *Experiments in Fluids*, 2017, 58(11): 162.
- [18] Scharnowski S, Bolgar I, Kähler C J. Characterization of turbulent structures in a transonic backward-facing step flow[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2017, 98(4): 947-967.
- [19] Bolgar I, Scharnowski S, Kähler C J. The effect of the Mach number on a turbulent backward-facing step flow[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2018, 101(3): 653-680.
- [20] Pioch F, Harmening J H, Müller A M, et al. Turbulence modeling

- for physics-informed neural networks: comparison of different RANS models for the backward-facing step flow[J]. *Fluids*, 2023, 8(2): 43.
- [21] Zhang Jie, Niu Xiyang, Ye Lin, et al. Effect of backward-facing step and turbulence level on film cooling characteristic of a turbine concave endwall with upstream leakage flow[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 243: 122671.
- [22] Caccia C G, Corti M, Della Torre A, et al. Backward facing step: from fluid flow to conjugate heat transfer with the coupling library preCICE[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2024, 1312(1): 012007.
- [23] Yan Wenhui, Sun Zhaozheng, Sun Yifan, et al. Implementation of a PAFV turbulence model for airfoil flow simulation on OpenFOAM[J]. *Physica Scripta*, 2024, 99(5): 055203.
- [24] Armaly B F, Durst F, Pereira J C F, et al. Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1983, 127: 473-496.
- [25] 齐鄂荣, 黄明海, 李炜, 等. 二维后向台阶流动特性的实验研究[J]. *实验力学*, 2006, 21(2): 225-232.
- Qi Erong, Huang Minghai, Li Wei, et al. A experimental study on the 2D time-average flow over a backward facing step via PIV[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2006, 21(2): 225-232. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)