

文章编号: 1007-7294(2026)01-0032-09

基于 IDDES-Tr 模型的高亚临界 雷诺数圆柱绕流数值模拟

伍发明^{1,2}, 季 梦¹, 韩盼盼¹, 邱小平³, 马 乔³, 尤云祥^{1,2}, 吴凯健³

(1. 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240; 2. 上海交通大学三亚崖州湾深海科技研究院, 海南 三亚 572000; 3. 上海君显信息科技有限公司, 上海 201800)

摘要: 在高亚临界雷诺数下, 圆柱绕流具有大分离流动及剪切层层流-湍流转捩流动两类复杂流动现象。目前主流的脱体涡方法 (IDDES) 是基于完全湍流建立的, 不能处理转捩问题, 而针对转捩问题的 TRANS (Transition RANS) 方法又不能模拟大分离引起的三维湍流结构。为此, 本文将 IDDES 方法与 TRANS 模型相结合, 构建可同时模拟大分离流动及剪切层转捩流动的 IDDES-Tr 模型, 对 $Re=1.4\times 10^5$ 的高亚临界雷诺数下圆柱绕流进行数值模拟, 并与试验结果进行对比验证。结果表明, 本文数值模拟结果与试验高度吻合, 这说明构建的 IDDES-Tr 模型可准确模拟高亚临界雷诺数圆柱绕流, 具备了同时模拟大分离流动及剪切层转捩流动的能力。

关键词: 大分离流动; 转捩; IDDES-Tr; 高亚临界雷诺数; 圆柱绕流

中图分类号: O357.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2026.01.004

Numerical simulation of the flow around a circular cylinder based on IDDES-Tr model at high subcritical Reynolds number

WU Fa-ming^{1,2}, JI Meng¹, HAN Pan-pan¹, QIU Xiao-ping³, MA Qiao³, YOU Yun-xiang^{1,2}, WU Kai-jian³

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Yazhou Bay Institute of Deepsea Technology, Shanghai Jiao Tong University, Sanya 572000, China; 3. Shanghai Junyu Information Technology Limited, Shanghai 201800, China)

Abstract: At high subcritical Reynolds numbers, the flow past the circular cylinder has two types of complex flow phenomena, namely massive separation flow and shear layer transition. The traditional Improved Detached Eddy Simulation method (IDDES) is based on a fully turbulent assumption and is not suitable for dealing with transition. Meanwhile, the transition models (TRANS) based on the RANS method are incompetent to simulate the three-dimensional turbulent structure caused by massive separation. Therefore, this article integrates the IDDES approach with the TRANS model to develop an IDDES-Tr model capable of simultaneously resolving massive flow separation and shear layer transition. Numerical simulations were conducted for flow around a cylinder at a high subcritical Reynolds number of $Re=1.4\times 10^5$, with results subsequently validated against experimental data. The comparison demonstrates a strong agreement between the simulation and experimental data, indicating that the IDDES-Tr model accurately captures the features of flow around a cylinder at high subcritical Reynolds numbers. In other words, the new model can effectively simulate simultaneously massive separation and shear layer transition.

收稿日期: 2025-05-28

作者简介: 伍发明 (2000-), 男, 硕士研究生;

韩盼盼 (1990-), 男, 助理研究员, 通讯作者, E-mail: hanpanpan@sjtu.edu.cn。

Key words: massive separation; transition; IDDES-Tr; high subcritical Reynolds number; flow around a cylinder

0 引 言

钝体绕流是常见的流动现象, 其中的大分离流动及剪切层转捩是最复杂和最具有挑战性的流体力学难题之一。对于雷诺数 $Re=1.4\times 10^5$ 的圆柱绕流, 其流动已接近亚临界流动的极限, 在该雷诺数下同时存在层流边界层分离、自由剪切层的层流-湍流转捩及尾流区的旋涡脱落, 是兼具上述两类难题的典型算例。

Cantwell 和 Coles^[1] 最早对高亚临界雷诺数 $Re=1.4\times 10^5$ 圆柱绕流进行了试验研究, 提供了大量测量结果。而后, 相关数值模拟研究均以此试验为对标。由于该问题非常复杂, 研究人员通常将大分离流动或剪切层转捩的其中之一忽略, 单独研究另外一种流动, 如 Zheng 等^[2] 采用尺度解析模拟方法 (Scale Resolving Simulation, SRS) 中的脱体涡模拟 (Detached Eddy Simulation, DES) 及自适应尺度模拟 (Scale Adaptive Simulation, SAS) 两种方法, Luo 等^[3] 采用 SST-DES 及局部时均化模型 (Partially Averaged Navier Stokes Model, PANS 模型), Pereira 等^[4] 及 Lakshmipathy 等^[5] 采用 SST-PANS, Zhao 等^[6] 采用 SST-DES, Mays 等^[7] 采用延迟脱体涡模型 (Delayed Detached Eddy Simulation, DDES) 和尺度混合解析模型 (Scale Resolving Hybrid Model, SRH 模型), 分别对 $Re=1.4\times 10^5$ 圆柱绕流进行了数值仿真, 但均未在方程中考虑转捩, 因此计算结果与试验结果相差较大。Pereira 等^[4] 用雷诺平均方法 (RANS) 之 TRANS (Transition RANS), 基于 SST $\gamma-Re_\theta$ 转捩模型对 $Re=1.4\times 10^5$ 圆柱绕流进行了计算, 虽然考虑了转捩, 但 RANS 方法无法解析大分离引起的三维湍流结构^[8]。

上述研究均受限于 SRS 及 TRANS 方法两者本身对大分离流动或剪切层转捩求解的局限性, 即 SRS 可求解大分离湍流相干结构, 但无法求解转捩问题, 而 TRANS 方法可求解剪切层转捩, 但在捕捉三维涡结构方面力有未逮。有鉴于此, 相关学者提出可将 SRS 及 TRANS 二者相结合, 以达到同时求解大分离流动及转捩流动之目的。如 Xiao 等^[9] 将 DDES 与 $k-\omega-\gamma$ 模型相结合, Zhou 等^[10] 将 DDES 与 SST $\gamma-Re_\theta$ 相结合, Fard 等^[11] 将 DDES 与 SST γ 相结合, 分别提出了 DDES-Tr 模型。Feng 等^[12] 将 IDDES 与 SST γ 相结合, Cui 等^[13] 将 IDDES 与 $k-\omega-\gamma$ 模型相结合, 易森荣等^[14-15] 将 IDDES 与 SST $\gamma-Re_\theta$ 相结合, 分别提出了不同的 IDDES-Tr 模型。You 等^[16] 将 SAS 与 SST $\gamma-Re_\theta$ 相结合, 提出了 SAS-Tr 模型。

为处理 $Re=1.4\times 10^5$ 圆柱绕流中同时存在的转捩及大分离流动, 早期 Travin 等^[17] 基于 SA-DES 方法, 并采用人工干预的方法 (Trip-Less) 使流动在分离前为层流, 分离后转换成湍流以模拟转捩, 但该方法预设了转捩位置, 在工程上不具有通用性。近年来, Kim 等^[18] 将 IDDES 方法与 TRANS $\gamma-Re_\theta-CF^+$ 相结合, 提出了“blended model”, 通过引入 $\tilde{f}_d$ 的截断函数, 从而将 TRANS 与 IDDES 区域进行区分。不足的是, 在 $0 < \tilde{f}_d < 1$ 的 RANS 与 LES 的混合区域没有做到很好的结合, 在该部分采用的是 RANS 求解而非 TRANS 求解。同时, Kim 等^[18] 只对比了 $Re=1.4\times 10^5$ 圆柱绕流的压力系数分布和尾流中线速度, 且尾流中线速度与试验结果差异明显。Wang 等^[19] 将 DDES 与 TRANS 方法 $k-\omega-\gamma$ 相结合, 提出了 RANS-LES-Tr 模型, 通过引入间歇因子 γ 来桥接 TRANS 区域和 DDES 区域。不足的是, $k-\omega-\gamma$ 转捩模型主要用于高超声速下的转捩预测, 其压力系数分布的数值计算结果与超临界雷诺数圆柱绕流的结果相近, 而与亚临界雷诺数 $Re=1.4\times 10^5$ 下的圆柱绕流试验结果相差很大。Mays 等^[7] 将 DDES 及 SRH 混合模型与转捩模型 $\gamma-Re_\theta$ 相结合, 对 $Re=1.4\times 10^5$ 圆柱绕流进行计算, 但是他未考虑两种模型结合时的兼容性问题, 因此压力系数分布与试验结果差异巨大。杜磊等^[20] 将 SST-SAS 和 $\gamma-Re_\theta$ 相结合, 但其压力系数分布的数值计算结果也与试验结果相差很大。对于雷诺数 $Re=1.4\times 10^5$ 的圆柱绕流, 目前还没有方法可以充分解决其同时存在的大分离流动及转捩流动计算难题。

有鉴于此,本文考虑了 IDDES 方法与转捩方法相结合时均需对毁灭项进行修正从而产生干扰的兼容性问题,通过将 IDDES 方法与 SST γ 转捩模型结合,构建了 IDDES-Tr 模型。将该模型植入自研软件平台 NUWA: FLOW_{UV}, 对 $Re=1.4 \times 10^5$ 的高亚临界雷诺数下圆柱绕流进行了数值模拟,并与试验结果及其他学者的计算结果进行了对比研究。

1 理论模型

1.1 SST γ 转捩模型

SST γ 模型是 Menter 等^[21]在 SST $\gamma-Re_\theta$ 模型基础上发展而来的先进转捩模型,具有 $\gamma-Re_\theta$ 缺少的伽利略不变性且具有更好的通用性^[22],其湍流方程表示如下

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \tilde{P}_k + P_k^{\text{lim}} - \tilde{D}_k + \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i} = \frac{\alpha \rho P_k}{\mu_t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] - \beta^* \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (2)$$

式中: P_k^{lim} 为附加产生项,用来保证在转捩点产生合适的湍动能 k ; $\tilde{P}_k$ 及 $\tilde{D}_k$ 分别为湍动能生成项及毁灭项,表示如下

$$\tilde{P}_k = \gamma P_k, \quad \tilde{D}_k = \max(\gamma, 0.1) \cdot \beta^* \rho k \omega \quad (3)$$

式中: γ 为间歇因子,表示流场的层流/湍流流动状态,通过如下方程求解

$$\frac{\partial(\rho \gamma)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \gamma)}{\partial x_i} = P_\gamma - E_\gamma + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\gamma} \right) \frac{\partial \gamma}{\partial x_i} \right] \quad (4)$$

间歇因子 γ 是层流边界层与湍流边界层之间转换的一个触发函数。当 $\gamma=1$ 时,模型扮演解析湍流边界层的作用。当 $\gamma=0$ 时,模型扮演解析层流边界层的作用。该模型其他参数的详细取值可参考文献[21]。

1.2 IDDES-Tr 模型

IDDES 方法^[23]通过修改湍动能 k 方程的毁灭项,使方程在近壁面主要采用 RANS 模式,而在远离壁面以及流动分离区域采用 LES 模式。其 k 方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = P_k - \frac{\rho k^{3/2}}{l_{\text{IDDES}}} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

式中: l_{IDDES} 为 IDDES 模型的长度尺度,表达式为

$$l_{\text{IDDES}} = \tilde{f}_d \cdot l_{\text{RANS}} + (1 - \tilde{f}_d) \cdot l_{\text{LES}} \quad (6)$$

式中: $\tilde{f}_d$ 为过渡函数。在湍流脉动较小的近壁面区域 $\tilde{f}_d = 1$, 式(5)等效为 RANS 模式; 在湍流脉动较大的远壁面区域 $\tilde{f}_d = 0$, 式(5)等效为 LES 模式; 在这两个区域之间, $0 < \tilde{f}_d < 1$, 为 RANS 模式及 LES 模式的过渡, 这是 IDDES 方法与传统 RANS 模型结合的方式。当 IDDES 方法与 TRANS 模型结合时, 由式(1)及式(3)可知, TRANS 模型同样对 k 方程进行了修正, 因此二者结合时将面临相互干扰从而产生兼容性问题^[13]。

Mays 等^[7]未考虑兼容性问题, Wang 等^[19]结合的转捩模型主要适用于高超声速下转捩流动, Kim 等^[18]在 TRANS 和 LES 的混合区域没有做到很好的结合, 因此上述学者对 $Re=1.4 \times 10^5$ 圆柱绕流的计算结果均与试验值相差很大。对 IDDES 与 TRANS 结合的兼容性问题还没有得到很好的解决。事实上, 考虑到当转捩模型和 IDDES 同时打开时, 在层流和转捩区可能会因 γ 转捩模型的影响, 使长度尺度的判断出现错误。针对该问题, 本文借鉴 Cui 等^[13]将 IDDES 与 TRANS 相结合的方式, 引入限制以确保 γ 转捩模型作用于层流或转捩区域, 而 IDDES-Tr 模型的长度尺度仅作用于完全湍流区域。IDDES-Tr 模型的长度尺度表达式如下

$$l_{\text{IDDES-Tr}} = l_{\text{RANS}} + \frac{1 + \text{sign}(1.0, \gamma - C)}{2} \times \{(\tilde{f}_d - 1) \cdot l_{\text{RANS}} + (1 - \tilde{f}_d) l_{\text{LES}}\} \quad (7)$$

结合该处理方式, 将 SST γ 转捩模型与 IDDES 方法相结合, 通过修改式(1)的毁灭项, 建立 IDDES-Tr 模型, 表示如下

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \tilde{P}_k + P_k^{\text{lim}} - \tilde{D}_{k-\text{Tr}} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i} = \frac{\alpha \rho P_k}{\mu_t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] - \beta^* \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (9)$$

式中: $\tilde{D}_{k-\text{Tr}}$ 表示如下

$$\tilde{D}_{k-\text{Tr}} = \max(\gamma, 0.1) \cdot \frac{\rho k^{3/2}}{l_{\text{IDDES-Tr}}} \quad (10)$$

式中: $l_{\text{IDDES-Tr}}$ 为 IDDES-Tr 模型的长度尺度, 其表达式为式(7)。在式(7)中, sign 函数用于区分转捩 RANS 部分或 IDDES 部分, C 是一个经验常数, 取值为 $C=0.99$ 。当 $\gamma < C$ 时, $\text{sign}(1.0, \gamma - C) = -1$, 此时, $l_{\text{IDDES-Tr}} = l_{\text{RANS}}$, IDDES-Tr 模型的 RANS 部分起作用, 扮演转捩模型作用。当 $\gamma \geq C$ 时, 此时, $\text{sign}(1.0, \gamma - C) = 1$, IDDES-Tr 模型扮演 IDDES 的作用, 即用 LES 求解基于转捩模型的湍流部分。式(7)中 l_{RANS} 和 l_{LES} 分别为 RANS 含能尺度和 LES 长度尺度, 定义如下

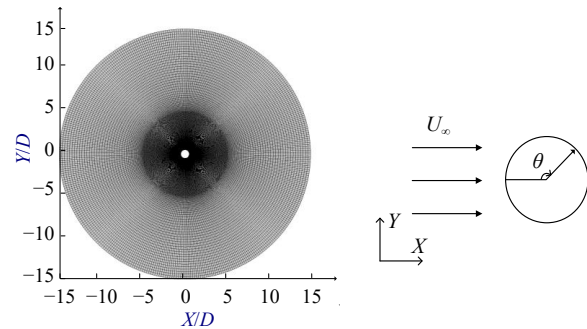
$$l_{\text{RANS}} = \frac{\sqrt{k}}{C_\mu \omega}, \quad l_{\text{LES}} = C_{\text{DES}} \Delta \quad (11)$$

式中出现的其他参数与传统 IDDES 方法一致, 详细取值可参考文献[24], 本文不再赘述。

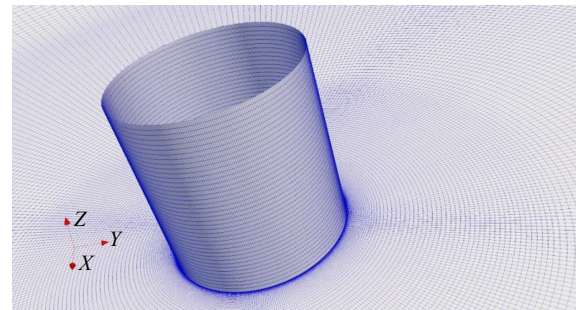
2 数值方法及计算网格

本文采用的计算域为圆柱形区域, 圆柱形计算域的直径为 $30D$, 圆柱展向长度为 $2D$, 其中 D 为圆柱直径。基于该直径的雷诺数 $Re = \rho U_\infty D / \mu = 1.4 \times 10^5$ 。图 1(a) 所示为该圆柱形区域的横截面, 其中 XY 坐标系为本文采用的坐标系, 坐标原点位于圆柱圆心位置, X 轴为水平方向, 其中来流方向为正, Y 轴为垂直方向。圆柱形计算区域包含四个边界—入口、出口、展向边界及圆柱壁面, 其中 X 轴负半轴为入口边界, X 轴正半轴为出口边界。边界条件设置为: 入口边界设置为速度入口边界条件, 湍流度设置为 0.6%, 与 Cantwell 等^[1] 的试验保持一致, 出口设置为零压梯度出口边界条件, 展向边界设置为对称边界条件, 圆柱壁面设置为无滑移边界条件。如图 1 所示, θ 为圆柱表面角度坐标, 以圆柱迎流面驻点处为 0 点, 背流面尾缘点处为 180° 点, 以顺时针方向转动为正。

本文采用六面体结构化网格, 并设计三套不同网格进行数值计算, 不同网格在 X 、 Y 、 Z 方向上均按照 1.2 增长率增长, 计算结果如表 1 及图 2 所示, 其中 C_d 表示时均阻力系数, C_{pb} 为尾缘点压力系数, St 为斯特劳哈尔数, θ_{sep} 为分离角, Lr/D 为无量纲回流区长度, U/U_∞ 为无量纲流向速度。由表 1 及图 2 可知, 中等网格和稀疏网格的相



(a) 横截面



(b) 三维图

图 1 计算域示意图

Fig.1 Schematic diagram of the computational domain

关流场统计量、圆柱表面时均压力系数分布以及沿尾流中线时均流向速度分布的计算结果均差异较大,而中等网格和密网格在相关流场统计量、圆柱表面时均压力系数分布以及沿尾流中线时均流向速度分布的计算结果上基本一致,可见继续增加网格量并不能提高计算精度。在考虑计算资源情况下,本文选择中等网格为计算网格,其近壁面 y^+ 分布如图3所示,由图可知在计算过程中能满足整个近壁面的 y^+ 均小于1,该网格沿径向的增长率为1.1。压力速度解耦采用 PIMPLE 算法^[25],对流项及扩散项的空间离散采用二阶中心差分格式,时间离散格式为二阶隐式格式中的 backward 格式。

表1 雷诺数 $Re=1.4\times 10^5$ 时圆柱绕流相关流场统计量的试验值及在不同网格密度下的数值结果

Tab.1 Experimental data, and numerical results with different mesh density, of flow statistical characteristics for flow around a circular cylinder at $Re=1.4\times 10^5$

	总网格数	C_d	$-C_{pb}$	St	$\theta_{sep}/^\circ$	Lr/D
稀疏网格结果	338万	0.7157	0.5377	0.2114	89.67	0.495
中等网格结果	637万	1.1120	1.0070	0.2007	83.98	0.533
密网格结果	1101万	1.1140	1.0050	0.2007	83.52	0.539
试验结果(Cantwell) ^[1]	—	1.237	1.21	0.179	77	0.4~0.5

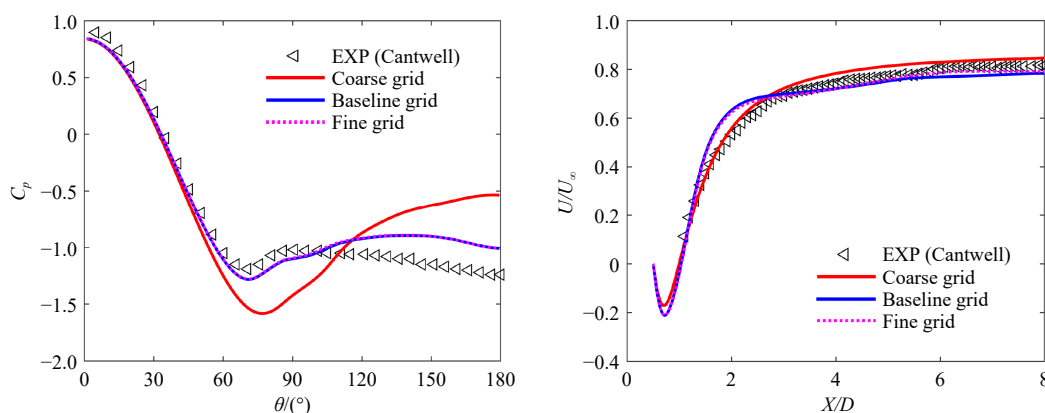


图2 圆柱表面时均压力系数分布和沿尾流中线时均流向速度分布

Fig.2 Time-averaged pressure coefficient distribution on the circular cylinder surface and distribution of time-averaged streamwise velocity along the wake centerline

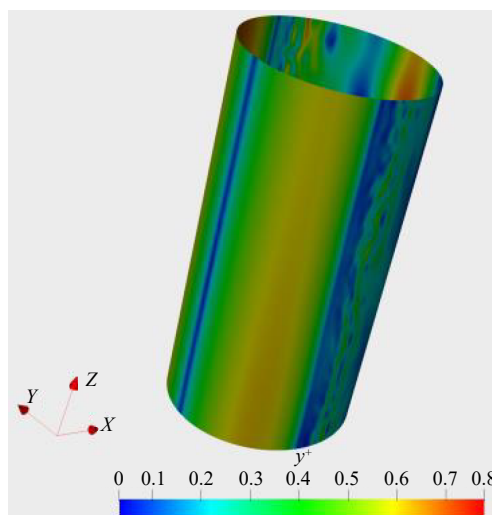


图3 圆柱近壁面 y^+ 分布

Fig.3 y^+ distribution in the near-wall region of the cylinder

3 数值结果与分析

数值计算的时长为 50 个涡脱落周期。将初始的 20 个周期进行舍弃, 对后 30 个周期的数据进行统计平均。表 2 为不同湍流模型的流场统计量数值计算结果, 由表可见, 本文的 IDDES-Tr (NUWA) 模型在 C_d 的计算上同 Kim 的计算结果一致, 较为接近试验结果, 明显优于 DDES-Tr; 在 C_{pb} 的计算上同 Kim 及 Wang 的计算结果一致, 较为接近试验结果; 在 θ_{sep} 的计算上优于 Wang 的计算结果, 接近试验结果; 尤其注意的是, IDDES-Tr 的 Lr/D 计算结果为 0.533, 与试验结果(0.4~0.5)高度吻合, 而 Mays 的 DDES-Tr、Wang 的 DDES-Tr 及 Kim 的 IDDES-Tr 的 Lr/D 结果分别为 1.04、0.72 和 1.01, 与试验结果有很大差距。由此可见, 本文提出的 IDDES-Tr 模型在处理高亚临界雷诺数圆柱绕流这一类问题上具有一定的优越性。

表 2 雷诺数 $Re=1.4 \times 10^5$ 圆柱绕流相关流场统计量的试验及数值结果

Tab.2 Experimental and numerical results of flow statistical characteristics for flow around a circular cylinder at $Re=1.4 \times 10^5$

	C_d	$-C_{pb}$	St	$\theta_{sep}/^\circ$	Lr/D
IDDES-Tr (NUWA)	1.1120	1.0070	0.2007	83.98	0.533
Mays (DDES-Tr) [7]	0.695	0.72	—	—	1.04
Wang (DDES-Tr) [19]	0.886	1.05	0.23	86.5	0.72
Kim (IDDES-Tr) [18]	1.118	1.09	0.212	76.9	1.01
试验结果 (Cantwell) [1]	1.237	1.21	0.179	77	0.4~0.5

3.1 一阶统计量特性

图 4 为 IDDES-Tr(NUWA) 模型的圆柱表面时均压力系数计算结果, 其中横轴 θ 为圆柱表面角度坐标, 纵轴 C_p 为压力系数。图中, 三角形为 Cantwell 等[1] 的试验结果, 红色实线为 IDDES-Tr(NUWA) 的计算结果, 蓝色点划线为 Wang 的 DDES-Tr 计算结果, 黑色实线为 Mays 的 DDES-Tr 计算结果, 洋红色虚线为 Kim 的 IDDES-Tr 计算结果。由图可见, 在 $0 < \theta < 100^\circ$ 范围内, IDDES-Tr 的计算结果均与试验结果吻合良好, 在 $100 < \theta < 180^\circ$ 范围内, IDDES-Tr 结果与试验值有一定的差距, 但仍优于 Mays 的 DDES-Tr 模型的计算结果。Mays 和 Wang 的 DDES-Tr 模型在 $40 < \theta < 100^\circ$ 范围内压力系数相比试验值大幅偏低, 相关研究[13] 认为这是由于边界层分离预测延迟, 流动在圆柱表面加速过多造成的。事实上, Mays 和 Wang 的 DDES-Tr 计算结果更接近超临界雷诺数下的试验结果[26-27]。文献[28] 认为这种现象是由于湍流模型预测了更高强度的湍流, 而非本文的亚临界流动。

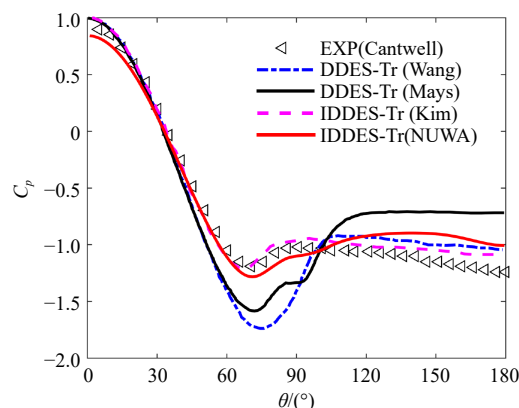


图 4 圆柱表面时均压力系数曲线

Fig.4 Time-averaged pressure coefficient curves on the circular cylinder surface

图 5 为 IDDES-Tr(NUWA) 模型在圆柱尾流中线的时均流向速度分布。曲线设置与图 2 相同, 在此不再赘述。由图可知, IDDES-Tr 模型在整个尾流中线均与试验结果吻合良好, 仅在 $X/D=1.5 \sim 2.5$ 区域内略大于试验值。而 Wang 的 DDES-Tr 和 Kim 的 IDDES-Tr 模型在回流区长度预测偏大, 与试验结果差异较大。

图 6 为 IDDES-Tr(NUWA) 模型在圆柱尾流区 $X/D=1$ 站位的时均速度分布, 其中图 6(a)为流向速度, 6(b)为垂向速度。由图 6 可知, IDDES-Tr 模型在站位 $X/D=1$ 处的速度分布与试验高度吻合, 而

Wang 的 DDES-Tr 模型的计算结果在流向速度上差异明显,回流区偏大。

3.2 二阶统计量特性

图 7 为 IDDES-Tr(NUWA) 模型在 $X/D=1$ 站位处的雷诺应力分布,其中图 7(a)为雷诺应力分量 $u'u'$,图 7(b)为分量 $v'v'$,图 7(c)为切应力 $u'v'$ 。由图 7(a)~(b)可知, IDDES-Tr 及 Wang 的 DDES-Tr 模型所预测的正应力分布形态均与试验结果一致,其中 IDDES-Tr 对 $u'u'$ 的峰值预测偏高,对 $v'v'$ 的预测与试验结果一致。由图 7(c)可知, IDDES-Tr 对切应力的预测与试验高度吻合,而 Wang 的 DDES-Tr 对 $u'v'$ 的峰值预测偏低,且分布形态与试验结果差异较大。

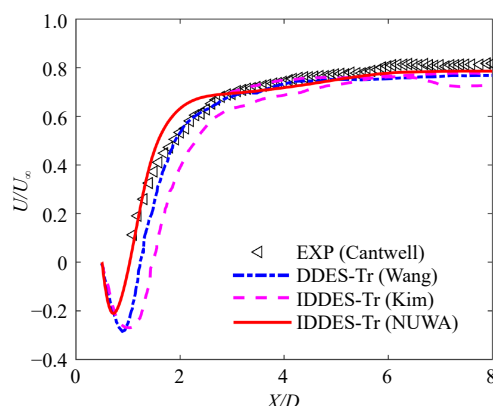


图 5 沿尾流中线的时均流向速度分布

Fig.5 Distribution of time-averaged stream-wise velocity along the wake centerline

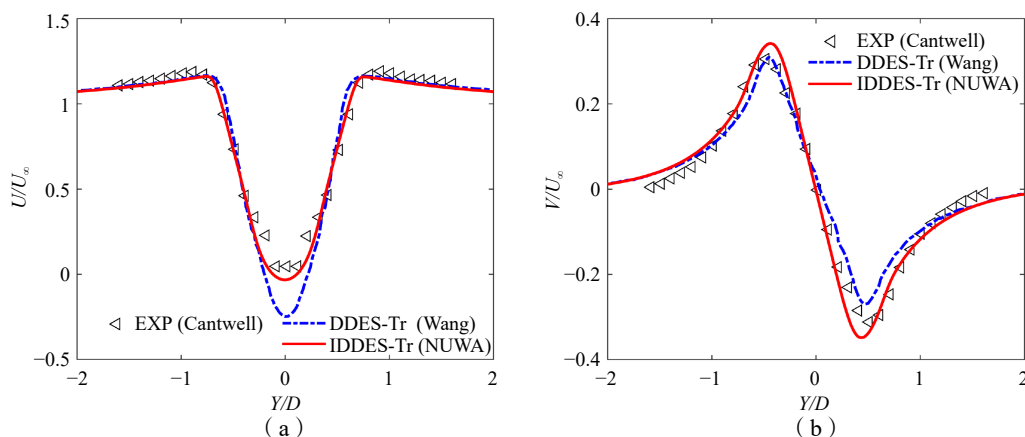


图 6 圆柱后方 $X/D=1$ 站位的速度分布

Fig.6 Velocity distribution at $X/D=1$ location behind the circular cylinder

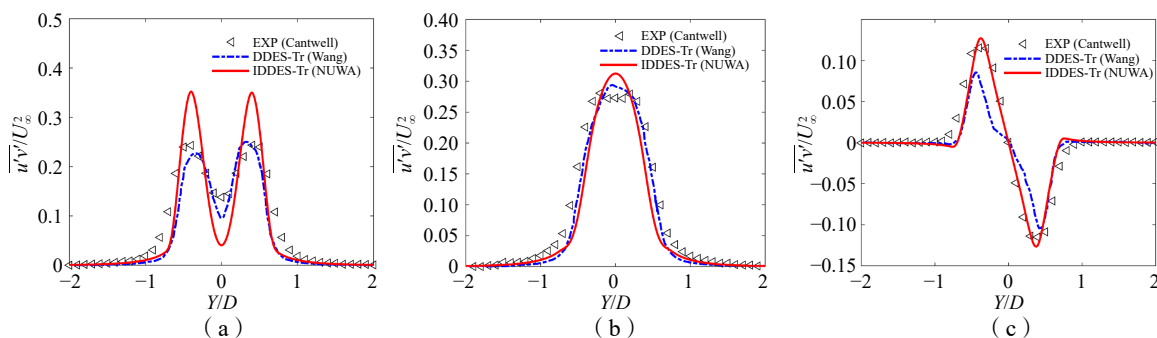


图 7 圆柱后方 $X/D=1$ 站位处的雷诺应力分布

Fig.7 Distribution of the Reynolds stresses at $X/D=1$ location behind the cylinder

4 结 论

本文将 IDDES 方法及 SST γ 转换模型相结合,构建了可同时模拟大分离流动及剪切层转捩的 IDDES-Tr 模型,对 $Re=1.4 \times 10^5$ 高亚临界雷诺数圆柱绕流进行了数值模拟,并与试验及其他数值计算研究结果进行了对比,主要得出如下结论:

(1) 构建的 IDDES-Tr 模型数值模拟结果与试验结果高度吻合, 相比其他数值计算结果更加贴合试验, 这说明构建的模型可精确模拟高亚临界雷诺数圆柱绕流。

(2) IDDES-Tr 模型充分考虑了转捩模型对 IDDES 方法的修正干扰问题, 相比其他同类方法计算效果更佳, 具备同时模拟大分离流动及剪切层转捩的能力。

参 考 文 献:

- [1] Cantwell B, Coles D. An experimental study of entrainment and transport in the turbulent near wake of a circular cylinder[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1983, 136: 321–374.
- [2] Zheng W, Yan C, Liu H, et al. Comparative assessment of SAS and DES turbulence modeling for massively separated flows[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2015, 32(1): 12–21.
- [3] Luo D, Yan C, Liu H, et al. Comparative assessment of PANS and DES for simulation of flow past a circular cylinder[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2014, 134: 65–77.
- [4] Pereira F S, Eça L, Vaz G, et al. On the simulation of the flow around a circular cylinder at $Re=140\ 000$ [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2019, 76: 40–56.
- [5] Lakshmipathy S, Girimaji S S. Partially averaged Navier-Stokes (PANS) method for turbulence simulations: Flow past a circular cylinder[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2010, 132: 121203.
- [6] Zhao W, Wan D, Sun R. Detached-eddy simulation of flows over a circular cylinder at high Reynolds number[C]//The 26th International Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece, 2016.
- [7] Mays M D, Laizet S, Lardeau S. Performance of various turbulence models for simulating sub-critical high-Reynolds number flows over a smooth cylinder[C]//AIAA AVIATION 2021 FORUM, 2021.
- [8] 季 梦, 尤云祥, 韩盼盼, 等. 亚临界区圆柱绕流相干结构壁面模化混合 RANS/LES 模型[J]. *物理学报*, 2024, 73(5): 054701.
Ji M, You Y X, Han P P, et al. A wall-modeled hybrid RANS/LES model for flow around circular cylinder with coherent structures in subcritical Reynolds number regions[J]. *Acta Physica Sinica*, 2024, 73(5): 054701. (in Chinese)
- [9] Xiao Z, Wang G, Yang M, et al. Numerical investigations of hypersonic transition and massive separation past Orion capsule by DDES-Tr[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 137: 90–107.
- [10] Zhou L, Gao Z, Du Y. Flow-dependent DDES/ $\gamma-Re_{\theta t}$ coupling model for the simulation of separated transitional flow[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 87: 389–403.
- [11] Fard A N, Möller F M, Henninger S, et al. Assessment of the DDES- γ model for the simulation of a highly loaded turbine cascade[C]//ASME Turbo Expo 2023: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Boston, Massachusetts, 2023, 13: 100670.
- [12] Feng X, Liu Y, Wang B. An improved laminar–turbulent transition cavitation model using the IDDES method[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 297: 117182.
- [13] Cui W, Xiao Z, Yuan X. Simulations of transition and separation past a wind-turbine airfoil near stall[J]. *Energy*, 2020, 205: 118003.
- [14] 易淼荣, 赵慧勇, 乐嘉陵, 等. 基于 IDDES 框架的 $\gamma-Re_{\theta}$ 转捩模型[J]. *航空学报*, 2019, 40(8): 51–65.
Yi M R, Zhao H Y, Le J L, et al. $\gamma-Re_{\theta}$ transition model based on IDDES frame[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(8): 51–65. (in Chinese)
- [15] 易淼荣, 赵慧勇, 乐嘉陵. 基于 IDDES 方法和 $\gamma-Re_{\theta}$ 转捩模型的粗糙颗粒诱导高速边界层强制转捩模拟[J]. *推进技术*, 2020, 41(4): 778–790.
Yi M R, Zhao H Y, Le J L. Roughness induced high speed boundary layer forced transition simulation using $\gamma-Re_{\theta}$ transition model based on IDDES method[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(4): 778–790. (in Chinese)
- [16] You J Y, Kwon O J. Blending of SAS and correlation-based transition models for flow simulation at supercritical Reynolds numbers[J]. *Computers & Fluids*, 2013, 80: 63–70.
- [17] Travin A, Shur M, Strelets M, et al. Detached-eddy simulations past a circular cylinder[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*

- stion, 2000, 63: 293–313.
- [18] Kim H J, Kwon O J. Numerical simulation of transitional flows using a blended IDDES and correlation-based transition model[J]. *Computers & Fluids*, 2021, 222: 104916.
- [19] Wang G, Xiao Z, Chen L. Simultaneous simulation of transition and massive separation by RANS-LES-Tr model[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 105: 106026.
- [20] 杜 磊, 宁方飞. 高亚临界雷诺数圆柱绕流的尺度自适应模拟[J]. *力学学报*, 2014, 46(4): 487–496.
Du L, Ning F F. Scale adaptive simulation of flows around a circular cylinder at high sub-critical Reynolds number[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2014, 46(4): 487–496. (in Chinese)
- [21] Menter F, Smirnov P, Liu T, et al. A one-equation local correlation-based transition model[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2015, 95: 1–37.
- [22] 黄章峰, 张宇琦. 高超声速三维边界层转换数值研究进展及预测软件[J]. *空气动力学学报*, 2023, 41(11): 1–19.
Huang Z F, Zhang Y Q. Numerical research progress and prediction software of transition in hypersonic three-dimensional boundary layer[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2023, 41(11): 1–19. (in Chinese)
- [23] Shur M L, Spalart P R, Strelets M K, et al. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2008, 29(6): 1638–1649.
- [24] Gritskevich M, Garbaruk A, Schütze J, et al. Development of DDES and IDDES Formulations for the $k-\omega$ Shear Stress Transport Model[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2012, 88: 431–449.
- [25] 宋志军, 陈宗宇, 吕 敬, 等. 基于 OpenFOAM 的充液航天器刚-液耦合仿真[J]. *系统仿真学报*, 2022, 34(8): 1789–1798.
- [26] Roshko A. Experiment on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds Number[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1961, 10(3): 345–356.
- [27] Nunen V. Pressure and forces on a circular cylinder in across flow at high Reynolds numbers[C]//*Flow Induced Structural Vibrations*, Berlin: Springer-Verlag, 1974: 748–754.
- [28] Islam A, Thornber B. A high-order hybrid turbulence model with implicit large-eddy simulation[J]. *Computers & Fluids*, 2018, 167: 292–312.