

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.028

ISAS 模型在高亚临界圆柱绕流中的应用研究

常玲玲, 刘跃, 宁春梅

(陕西国防工业职业技术学院 航天高端制造陕西省高校工程研究中心, 陕西 西安 7103002)

摘 要:通过对高亚临界雷诺数圆柱绕流的数值计算, 来比较 ISAS、DES、SAS 湍流模型的流场调控机制及对大分离流动的解析能力。数值结果表明: 3 种模型均表现出良好的湍流谱生成能力, SAS 模型计算的黏度水平稍高, 表现出较大的耗散性; ISAS 模型有效改善 DES 模型使用网格尺度时的网格敏感问题, 计算的剪切层及统计物理量更接近实验值; 与 SAS 模型相比, ISAS 更加简化、直观, 方程求解效率能得到明显提升。

关键词:湍流模型; 尺度自适应模拟; 分离涡模拟; 圆柱绕流; 数值模拟

中图分类号:TJ011.2; V211.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)04-0155-04

Application Study on ISAS Model in Cylinder Flow at High Sub-Critical Reynolds

CHANG Lingling, LIU Yue, NING Chunmei

(Engineering Research Center of Aerospace High-end Manufacturing—Universities of Shaanxi Province,
Shaanxi Institute of Technology, Xi'an 710302, China)

Abstract: Based on the numerical calculation of cylinder flow at high sub-critical Reynolds number, the flow field control mechanism of the turbulence models of ISAS, DES and SAS and the resolution capability of most separate flow are compared. The numerical results show that the three models all perform well in generating turbulence spectrum, but the viscosity level calculated by SAS model is a bit higher with greater dissipation, and ISAS model effectively improves the grid sensitiveness when using grid scale by DES model, and its calculated shear layers and statistical physical quantities are more close to experimental values. Compared with SAS model, ISAS model is even more simplified, intuitive and efficient in equation solving.

Keywords: turbulence model; scale-adaptive simulation; detached-eddy simulation; cylinder flow; numerical simulation

0 引言

以圆柱绕流为代表的钝体绕流问题广泛存在于工程领域^[1-3], 其流动包含边界层、涡脱落、流动分离及再附等复杂非线性现象, 并与振动控制、空气减阻等力学问题密切相关。现实中钝体绕流多为湍流, 在使用数值方法 (computational fluid dynamics, CFD) 对此类多尺度分离问题进行计算时, 湍流模型的选择成为影响流场求解精度的瓶颈^[4]。目前, 由于雷诺平均方法 (RANS) 过大的耗散性及大涡模拟方法 (LES) 较高的网格要求, 兼顾计算精度与计算效率的 RANS/LES 混合方法受到人们的青睐^[5-6], 混合方法思路为构造一特征尺度达到类似使用 LES 亚格子模型释放湍流信息的目的。使用最普遍的特征尺度为网格尺度, 主要代表为 DES 方法^[7-8]。DES 模型构造简单, 能够有效地对流场尺度进行调控, 但其存在

“网格敏感”导致的“灰区”等问题。寻找具有多尺度解析能力的新尺度替代网格尺度是解决 DES 类湍流模型缺点的主要方法, MENTER 等^[9]提出的 SAS 类模型中使用基于当地流动速度量而不显式依赖网格的冯卡门尺度^[10], 其尺度自适应模拟这一概念一经提出便受到广泛关注, 但传统的 SAS 方法同样存在缺点, 其函数构造相比于 DES 模式过于复杂, 使其计算效率受到影响^[11]。后续学者使用冯卡门尺度替换 DES 方法中的网格尺度, 提出 ISAS 方法。但目前 ISAS 方法验证工作较少, 只可见少量低雷诺数应用比较 ($Re = 3\ 900$), 其对高雷诺数工程问题的预测能力仍需深入研究。

$Re = 1.4 \times 10^5$ 圆柱绕流位于高亚临界区间, 壁面边界层厚度较小, 其计算对数值条件非常敏感, 存在层流分离及湍流分离两种数值结果。目前, 该雷诺数圆柱绕流实验研究较多, 使用数值方法准确预测高亚临界雷诺数下圆柱绕流仍是一个具

基金项目:陕西省教育厅重点科研课题项目 (24JR019); 陕西国防学院工程中心专项项目 (Pt24-04); 陕西国际工业职业技术学院科研课题 (Gfy23-25)

第一作者简介:常玲玲 (1990—), 女, 陕西宝鸡人, 讲师, 硕士, 研究方向为计算机应用技术研究, 1172053631@qq.com。

有难度的问题,这也使其成为验证模型精度的经典算例^[12]。本文使用 ISAS 方法计算高亚临界雷诺数($Re=1.4\times 10^5$)圆柱绕流流场,并将计算结果与 DES、SAS 方法进行对比,可为工程问题求解提供方法和参考。

1 ISAS 湍流方程

文中湍流模型发展关系如图 1 所示, SST 为雷诺平均模型, ISAS、DES、SAS 模型为在 SST 模型方程基础上修改获得的混合方法。

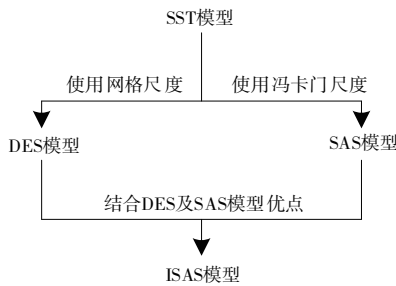


图 1 湍流模型发展关系

SST 具体方程如下:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = P_k - \beta^* \rho k \omega + \nabla \cdot [(\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k] \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \omega) = \frac{\alpha}{\nu t} P_k - \beta \rho \omega^2 + \nabla \cdot [(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega] + (1 - F_1) \frac{2\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \nabla k \nabla \omega \quad (2)$$

式中: k 为湍动能; ω 为湍动能耗散率; ρ 为密度; U 为速度矢量; 模型常数 $\beta^* = 0.09$; $\sigma_{\omega 2} = 0.856$ 。此外, 湍动能生成项 P_k 、动力黏度 μ_t 及混合模型参数 σ_k 、 α 、 β 、 σ_ω 定义及取值分别详见文献[13]。

DES 模型为使用网格尺度重构 SST 模型 k 方程毁灭项:

$$\beta^* \rho k \omega \rightarrow \beta^* \rho k \omega \cdot F_{DES} \quad (3)$$

式中调控函数 F_{DES} 表达式为

$$F_{DES} = \max\left(\frac{L}{C_{DES} \Delta}, 1.0\right) \quad (4)$$

式中: 模型常数 $C_{DES} = 0.61$; L 为湍流特征长度尺度; Δ 为网格尺度。

SAS 模型为在 SST 模型 ω 方程中添加源项 Q_{SAS} 构成:

$$Q_{SAS} = \rho \xi \kappa S^2 \left(\frac{L}{L_{vk}}\right)^2 - C \cdot \frac{2\rho k}{\sigma_\varphi} \max\left(\frac{|\nabla \omega|^2}{\omega^2}, \frac{|\nabla k|^2}{k^2}\right) \quad (5)$$

式中: 卡门常数 κ 取值为 0.41; 模型常数 $C = 2.0$;

$\xi = 2.0$; S 为 1 阶速度应变率张量值; 冯卡门长度尺度 $L_{vk} = \kappa S / |\nabla^2 U|$ 。

ISAS 模型为使用 L_{vk} 替代 DES 构造中的网格尺度, 其调控函数 F_{ISAS} 构造为

$$F_{ISAS} = \max\left(\frac{L}{C_{ISAS} L_{vk}}, 1.0\right) \quad (6)$$

式中模型常数 $C_{ISAS} = 1.67$ 。对比式(4)、式(5)、式(6)3种模型调控函数可知: 相比于 DES 模型, ISAS 模型使用 L_{vk} 尺度替代网格尺度 Δ , 修正网格敏感性缺陷; 相比于 SAS 模型, ISAS 模型调控函数得到简化, 这对提升方程求解效率是有利的。

2 数值方法

2.1 网格划分及边界设置

$Re = 1.4 \times 10^5$ 圆柱绕流计算区域如图 2 所示。圆柱直径 D 设置为 0.1 m, 来流速度 u 为 14 m/s。圆柱上游计算域设置为 $30D$, 下游计算域延伸至 $40D$, 以降低远场流动影响, 展向计算域(z 方向)为 πD ^[14] 以适应波长。文中坐标系设置如图 2 所示, 流动方向为 x 正方向, 竖直方向为 y 方向, 展向为 z 方向。

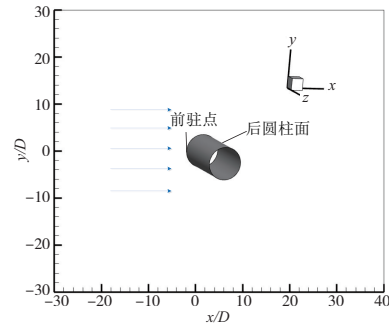


图 2 计算域

三维计算网格整体为分块结构化网格, 参照文献[15]中相同雷诺数下通过无关性验证的网格划分方法, 3 个方向的节点数设置为 (310, 230, 90), 局部计算网格如图 3 所示。

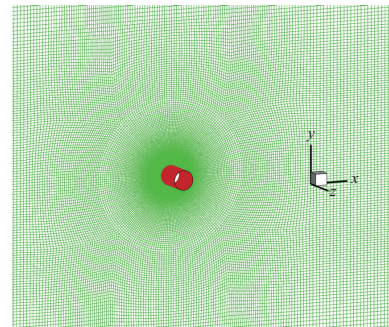


图 3 计算网格

2.2 离散方法及数据采集

文中求解方程组采用 2 阶精度格式。此外,根据 FRANKE 等^[16]对圆柱绕流统计周期的研究结果,总计算时间约为 60 个涡脱落周期,最终在对计算结果进行分析时,只保留后 50 个周期数据并进行时间平均处理,以保证数据可信。

3 计算结果分析

3.1 尺度调控对比

图 4 给出了用速度染色显示的流场瞬时湍流结构,3 种方法均捕捉到流场中的主要结构及小尺度涡结构,说明 3 种混合方法均有良好的湍流

谱生成能力。但仔细观察可以发现 ISAS 模型的流场细节捕捉能力与 DES 相近,而 SAS 模型重现的小尺度涡结构最少,预示着其相对较大的耗散性。

图 5 给出了 3 种湍流求解方法的调控尺度分布,结合第 1 部分中模型构造分析可知:ISAS 模型与 SAS 模型均使用立足于当地速度特征的冯卡门尺度,其对流场细部调控效果优于使用网格尺度的 DES 模型;同时可以看到 DES 近壁区域出现了尺度较大的区域,说明由于网格较密导致了边界侵入即“灰区”问题。由图例中数值可以发现 ISAS 模型尺度与 DES 尺度相近,这两种方法方程调控机制相近是对应的。

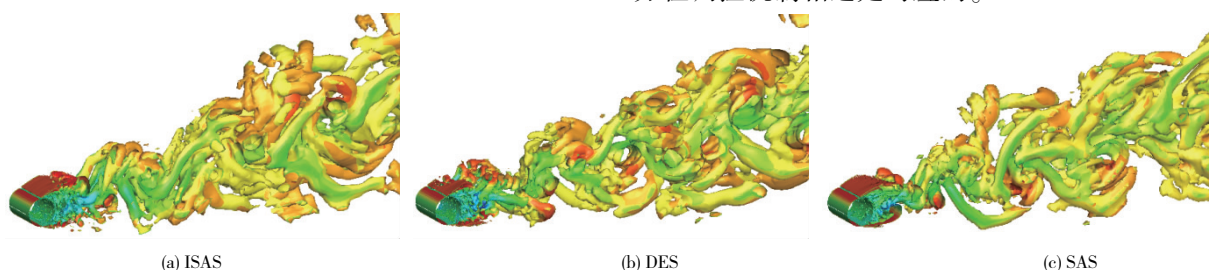


图 4 瞬时湍流结构图

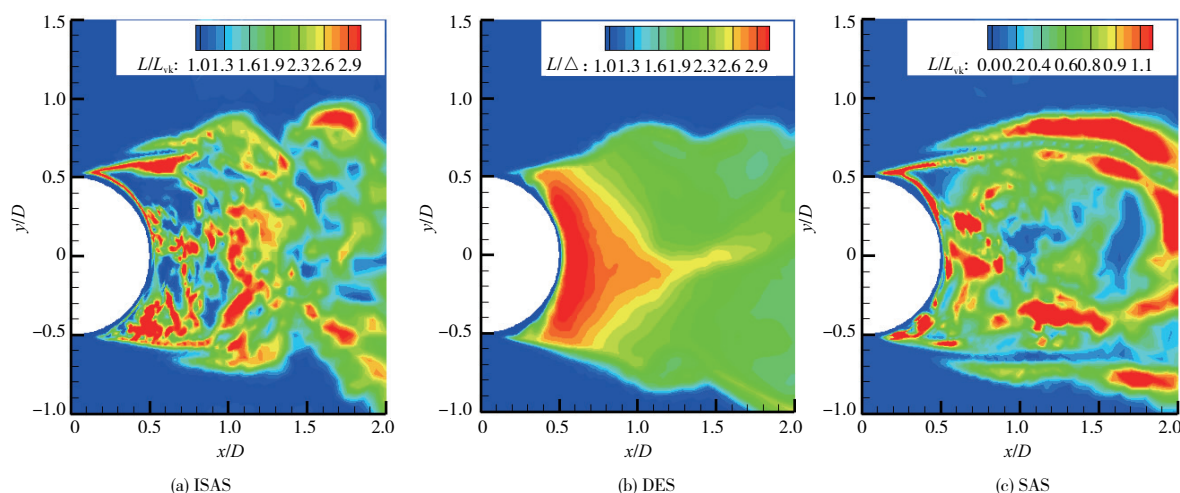


图 5 瞬时调控尺度图

图 6 为 3 种方法计算的流场尾迹区湍动黏度 (μ_t/μ) 对比,可以看到在对远场的调节过程中,ISAS 模型黏度趋近于 DES 模型,SAS 模型黏度值较大,这与图 4 中 SAS 模型捕捉到最少的湍流结构及较大的耗散性结论是一致的。

3.2 统计积分量对比

图 7 给出了圆柱壁面压力分布 (C_p , 壁面周向角 θ 以圆柱前驻点为起始位置,顺时针方向为正) 及相同雷诺数下的 Cantwell & Coles^[17] 实验值。

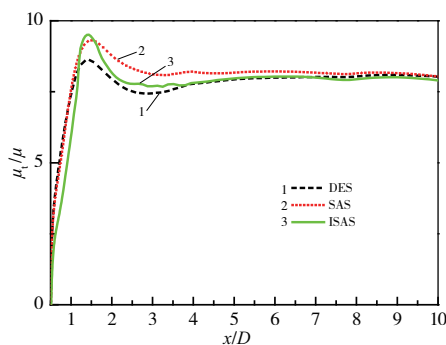


图 6 湍动黏度分布

3 种方法得到的后圆柱面(背风面,图 2 所示)及 90° 位置附近压力变化较为平缓,其均较好地反映了高亚临界雷诺数区域圆柱绕流层流分离特征。同时,由于近壁区域过早激活了类 LES 计算,DES 的边界侵入缺陷导致计算的压力小于实验值;而 ISAS 与 SAS 使用冯卡门尺度,获得了较理想的壁面压力分布,说明壁面计算较合理。

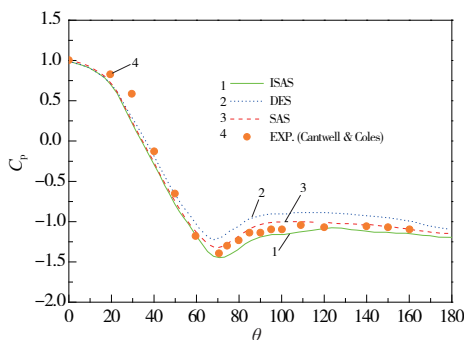


图 7 壁面时均压力分布

表 1 给出了 $Re = 1.4 \times 10^5$ 时的圆柱绕流统计积分量比较,可以看到 3 种湍流模型计算的分离角 θ_{sep} 均小于 90° ,说明分离点位于圆柱迎风侧,同时计算的涡脱落主频 $S_t \approx 0.2$,这些特征均符合该计算雷诺数下圆柱绕流转换靠近分离点特征。在对剪切层及近壁区域计算要求较高的物理量方面,由于 DES 模型出现了边界侵入,造成壁面剪切层延迟脱落,预测的回流区长度 L_r/D 大于测量值,同时阻力系数 C_d 值及底部压力值 $-C_{pb}$ 偏小;此外,ISAS 与 SAS 数据相近,但由于 SAS 模型较大的黏度耗散,计算的阻力系数稍大、回流区较小,ISAS 计算结果更贴近于实验值。

表 1 全局积分流动变量对比

模型类别	C_d	L_r/D	$-C_{pb}$	S_t	$\theta_{sep}/(^{\circ})$
EXP	1.24	0.44	1.21	0.179	—
ISAS	1.22	0.51	1.18	0.200	79.6
DES	0.87	0.92	1.10	0.197	80.1
SAS	1.27	0.33	1.20	0.201	79.3

3.3 计算效率对比

图 8 给出了各湍流方法的计算效率对比,其中横轴数值计算时间为模拟的流动时间(以 U_∞/D 无量纲化),纵轴物理时间为计算耗费的实际时间(以 1 h 无量纲化)。可以看出:在相同网格及数值条件下,3 种湍流模型所耗费的实际时间与模拟时间均成线性关系,此外,ISAS 模型与 DES 模型计算效率相当且两者均优于 SAS 模型。结

合前述不同湍流模型的调节尺度构造可知,ISAS 方法与 DES 方法尺度调节机制相似,使得 ISAS 方法计算效率非常接近于 DES 方法。SAS 方法调节源项 Q_{SAS} 构造相对复杂,导致其在求解方程时花费时间最多。

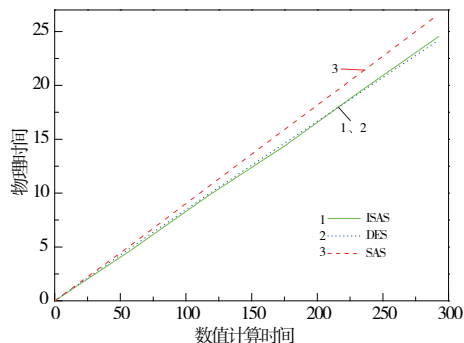


图 8 不同模型计算效率对比

4 结语

本文基于 DES 方程构造并引入冯卡门尺度介绍了一种新型尺度自适应湍流模型 ISAS。文中给出了新模型的尺度构造方法,并通过具有复杂流动特征的高亚临界区间圆柱绕流算例对 ISAS 湍流模型的调控机制及计算能力进行了系统分析。数值结果表明:在计算的高亚临界雷诺数区间内,ISAS 模型在近壁区及分离区分别具有良好的湍流模化及尺度解析能力,通过与实验测量值及 DES、SAS 计算结果的详细比较,得出以下结论。

1) 冯卡门尺度相比于网格尺度能更精细、合理地反映局部流动特征。ISAS 方法有效避免了使用网格尺度的 DES 方法出现的近壁灰区问题,计算的流场黏度较合理。

2) ISAS 方程构造相对 SAS 方程更加简化、直观,使得在计算效率上 ISAS 方法明显优于 SAS 方法,这在计算流动时间增长时更加明显。

3) 对于高亚临界雷诺数 ($Re = 1.4 \times 10^5$) 圆柱绕流积分量计算,3 种方法计算结果均为层流分离,但 DES 的灰区缺陷导致计算积分量偏离实验值,ISAS 计算的阻力系数结果稍好于 SAS 结果;SAS 捕捉到的三维小尺度涡较少,表现出较大的耗散性。

参考文献:

- [1] 李会,邱旭,闫姝,等. 带扰流板结构的海上风电单桩基础受来流攻角的影响研究[J]. 太阳能学报,2025,46(3):635-642.

(下转第 169 页)

- 收稿日期:2023-10-11

simulation model for massively separated flows [J].
International Journal of Aerospace Engineering, 2018,
2018:5231798.

- 收稿日期:2024-01-15