

# 基于 SA-DDES 的三维圆柱绕流数值模拟

赵伟文, 万德成\*

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室,  
高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

\*通信作者 Email: dcwan@sjtu.edu.cn

**摘要:** 本文基于 Spalart-Allmaras (SA) 模型的延迟分离涡 (DDES) 方法在近壁面的边界层区域使用 SA 模型, 而在其他区域采用亚格子模型求数值模拟三维圆柱绕流流场。本研究基于 OpenFOAM 开源代码工具箱, 采用 SA-DDES 方法, 对亚临界雷诺数  $Re=3900$  的圆柱绕流进行了数值模拟。观察并分析了圆柱绕流三维漩涡脱落特征, 与前人的实验结果进行对比, 验证了 SA-DDES 方法在亚临界雷诺数下对大分离流动问题可靠性与有效性。

**关键词:** 流动分离; 圆柱; 分离涡模拟; 亚临界雷诺数

## 1 引言

圆柱绕流一直是流体力学中的经典问题。当流体以流经圆柱的时候, 由于流体黏性的存在, 在达到一定速度时会产生边界层分离以及漩涡脱落等现象。由于雷诺平均方法 (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS) 对 Navier-Stokes 方程在时间上进行了平均处理, 求解的是时均处理之后的方程, 忽略了流体的湍流脉动, 因此难以捕捉到流体的瞬时脉动。尽管人们提出了非定常 RANS 方法 (URANS) 来处理非稳态流动问题, 但仍显不足。而直接数值模拟方法 (Direct Numerical Simulation, DNS) 和大涡模拟方法 (Large Eddy Simulation, LES) 由于对网格量的要求非常高, 工程中常见的又都是高雷诺数流动, 因此近年来研究人员提出了混合 RANS/LES 方法来解决这类问题。混合 RANS/LES 方法结合了 RANS 和 LES 的优点: 在近壁面区域采用 RANS 方法模拟, 减少网格和计算量; 在远离壁面的区域使用 LES 方法模拟, 保证能捕捉到大尺度分离流动。

分离涡 (Detached-Eddy Simulation, DES) 方法为常见的混合 RANS/LES 方法之一, 1997 年 Spalart 等<sup>[1]</sup>在 Spalart-Allmaras (SA) 模型<sup>[2]</sup>的基础上提出了 SA-DES (又称 DES97) 方法。DES97 方法将当地网格尺寸和 RANS 计算得到的长度尺度比较得到混合长度尺度  $\tilde{d}$ , 用  $\tilde{d}$  代替了 SA 模型中的距壁面距离  $d$ 。然而这种处理方法在近壁面网格布置不当时, 会将本应使用 RANS 求解的边界层区域判断为 LES 区域, 从而过早地转换到 LES 模式, 而网格又不足以支持 LES 计算。这样将使涡黏性降低, 并导致模型的雷诺应力不平衡, 这种现象被称为模化应力损耗 (Modeled Stress Depletion, MSD)。Spalart<sup>[3]</sup>通过修改  $\tilde{d}$  的定义提出

了基于 SA 模型的延迟 DES (Delayed DES, DDES) 方法解决了 MSD 问题。

本文以三维圆柱为研究对象, 首先进行网格收敛性研究, 验证了所用网格的可靠性。然后在此基础上, 选用其中一套网格, 采用 SA-DDES 方法对亚临界雷诺数  $Re=3900$  下的圆柱绕流进行了数值模拟, 分析了 SA-DDES 方法在处理大分离流动问题上的计算结果, 为 SA-DDES 方法以后推广应用到更复杂的流动问题上奠定了基础。

## 2 数值模拟

### 2.1 SA-DDES 模型

SA-DDES 模型的湍流黏度按  $\mu_t = \rho \tilde{\nu} f_{v1}$  计算。其中,

$$f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}^3}, \chi = \frac{\tilde{\nu}}{\nu}$$

这里  $\nu$  为流体的运动黏度。 $\tilde{\nu}$  为需要求解的量, 其输运方程按以下形式给出

$$\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} = C_{b1}(1 - f_{i2})\tilde{S}\tilde{\nu} - \left[ C_{w1}f_w - \frac{C_{b1}}{\kappa^2}f_{i2} \right] \left( \frac{\tilde{\nu}}{\tilde{d}} \right)^2 + \frac{1}{\sigma} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\nu + \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right] + C_{b2} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_i} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_i} \right\} \quad (1)$$

$$\text{其中, } \tilde{S} = \Omega + \frac{\tilde{\nu}}{\kappa^2 \tilde{d}^2} f_{v2}, \Omega = \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}, \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right), f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}},$$

$$f_w = g \left( \frac{1 + C_{w3}^6}{g^6 + C_{w3}^6} \right)^{1/6}, g = r_d + C_{w2} (r_d^6 - r_d), r_d = \frac{\nu_t + \nu}{\sqrt{U_{i,j}U_{i,j}} \kappa^2 d^2}, f_{i2} = C_{i3} \exp(-C_{i4}\chi^2),$$

其中,  $r_d$  被用于一个转换函数

$$f_d = 1 - \tanh([8r_d]^3) \quad (2)$$

这个转换函数在  $r_d \ll 1$  的 LES 区域为 1, 在接近壁面的 RANS 区域为 0。这很类似于 Menter SST 模型中的混合函数  $1 - F_2$ , 在  $r_d = 0.1$  处非常陡峭。

混合长度尺度  $\tilde{d}$  用  $f_d$  来定义

$$\tilde{d} = d - f_d \max(0, d - C_{DES}\Delta) \quad (3)$$

各常数的取值如下:  $\sigma = 2/3$ ,  $\kappa = 0.41$ ,  $C_{b1} = 0.1355$ ,  $C_{b2} = 0.622$ ,  $C_{w1} = C_{b1}/\kappa_2 + (1 + C_{b2})/\sigma$ ,  $C_{w2} = 0.3$ ,  $C_{w3} = 2.0$ ,  $C_{v1} = 7.1$ ,  $C_{i3} = 1.1$ ,  $C_{i4} = 1.0$ 。

在求解方程时, 空间上采用有限体积法离散, 时间上采用隐式欧拉格式离散, 压力与速度的耦合求解采用 PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operator) 方法, 该方法通过先预估一步, 再校正两步的方法求解 Navier-Stokes 方程。

### 2.2 几何模型与计算域

Lei 等<sup>[4]</sup>的研究表明圆柱的展向长度大于两倍的圆柱直径时, 数值模拟能取得较接近试验值的结果。本研究选取的圆柱展向长度为  $\pi D$ ,  $D$  为圆柱直径。坐标系原点位于圆柱中心, 计算域的选取如下:  $-10D \leq x \leq 20D$ ,  $-10D \leq y \leq 10D$ ,  $-\pi D/2 \leq z \leq \pi D/2$ 。

### 2.3 网格划分

本文所采用的网格是通过 OpenFOAM 提供的 blockMesh 和 snappyHexMesh 工具生成的。首先用 blockMesh 生成结构化的六面体背景网格, 然后在背景网格的基础上使用

snappyHexMesh 进行物体表面的捕捉以及局部网格的加密。

为了对网格进行收敛性验证,本研究选取了粗、中、密三套网格。每套网格只对背景网格进行修改,粗与中、中与细之间的背景网格在  $xyz$  三个方向上均采用  $\sqrt{2}$  倍的等级加密。

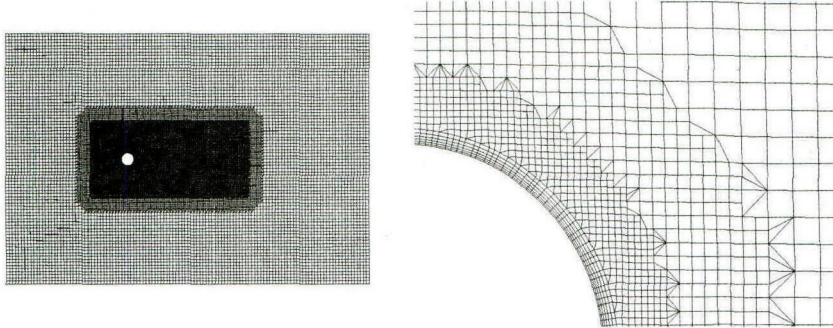


图1 整体网格和局部网格(中网格)

表1为网格收敛性研究的结果。其中阻力系数  $C_d$  为50个涡周期统计平均值。在接下来的研究中均采用中等网格计算。

表1 网格收敛性验证结果

网格	背景网格	总网格量	$C_d$	$St$
粗	86x57x9	81.5 万	0.955	0.212
中	120x80x12	179 万	0.938	0.214
细	168x112x17	396.6 万	0.949	0.217

## 2.4 边界条件

计算域的边界条件具体设置如下:上游入口处采用速度入口,下游出口边界条件采用压力积分为零,前后和两侧均采用对称边界条件。

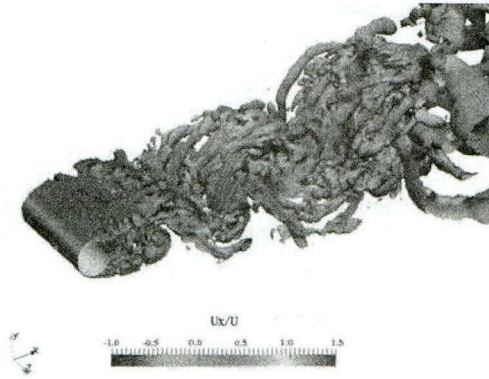
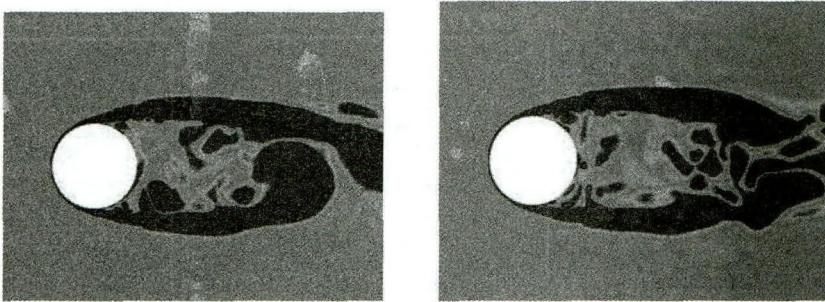
## 3 结果分析

### 3.1 瞬时流场分析

图2给出了圆柱尾部的瞬时流场涡量,其中的涡量等势面用 Hunt 等<sup>[5]</sup>建议的  $Q$  准则 ( $Q$ -criterion) 表示。 $Q$  的定义如下:

$$Q = \frac{1}{2} (|\boldsymbol{\Omega}|^2 - |\mathbf{S}|^2) \quad (4)$$

其中  $\boldsymbol{\Omega} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$  为涡量,  $\mathbf{S} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$  为应变不变量。

图2 圆柱尾流区域的涡量等势面图 ( $Q=10$ )图3  $z=0$  平面内的涡量图 (左: 强升力; 右: 弱升力)

在圆柱尾部区域, 出现了卡门涡街现象, 涡量表现出明显的三维效应, 这和 DNS<sup>[6]</sup>以及 LES<sup>[7]</sup>的结果一致。同时可以观察到, DDES 方法在 RANS 和 LES 交界区域过渡光滑, 没有出现不连续的间断。

图 3 给出了  $z=0$  平面在不同时刻的涡量图。由于圆柱绕流三维、非定常的特性, 我们无法通过某个截面在某一时刻的流场信息来分析整个流场的特征, 但是二维截面的结果对于分析圆柱整体的漩涡脱落具有一定参考性。左图中一个大涡形成并且即将脱落, 而右图中则没有大涡。不同时刻的流场表现出完全不同的特征性质, 可以看出圆柱绕流表现出的强烈的非定常特性。

### 3.2 时均统计分析

由于圆柱绕流是非定常问题, 因此在分析速度和压力等物理量时需要对其进行时间平均。以下对压力和速度的分析均取 10 个漩涡周期内的时间平均值作为统计结果。

图 4 给出了压力系数  $C_p$  沿圆柱周向的分布。由于 OpenFOAM 中的压力实际值为压力与密度的比值, 因此这里的压力系数定义如下:

$$C_p = \frac{2(p - p_0)}{U_0^2} \quad (5)$$

其中,  $p_0$  和  $U_0$  为参考压力和参考速度, 这里取无穷远处的压力和速度。

图4还给出了Norberg<sup>[8]</sup>的试验结果( $Re=3000$ )。可以看出,在 $0-60^\circ$ 之间(圆柱前部)压力系数的数值计算结果和实验值吻合较好,这是由于在此区域内流体运动以层流为主,未发生流动分离。

图5给出了 $x/D=0.58, 1.06, 1.52, 2.02$ 四个剖面延展长方向平均后的速度剖面分布,在 $x/D=0.58$ 截面处,速度剖面呈“U”型,而其他速度剖面则呈“V”型。这与Lourenco的试验结果<sup>[9]</sup>和Wissink的数值模拟结果<sup>[6]</sup>一致。同时可以观察到圆柱后方离圆柱越远的地方速度剖面变化越小。值得注意的是,Zhao<sup>[10]</sup>指出在 $x/D=1.06$ 这个截面内的速度剖面和圆柱的展长有关:小展长(展长为 $D$ )的圆柱呈“V”型分布,随着展长增大速度剖面逐渐变为“U”型分布。本文的结果部分验证了这一结论。

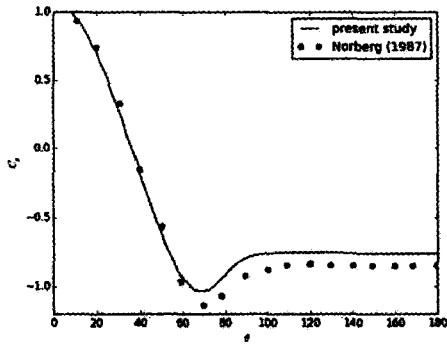


图4 压力系数沿圆柱周向分布

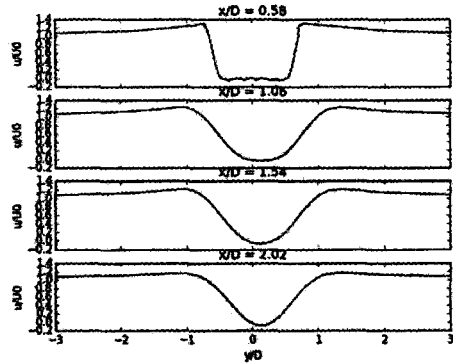


图5 尾流区域不同截面的速度剖面分布

## 5 结论

本文基于OpenFOAM 源代码工具箱,采用SA-DDES方法对亚临界雷诺数 $Re=3900$ 的三维圆柱绕流进行了数值模拟,得出以下结论:

网格收敛性研究结果说明,本文采用不同细密程度网格对于圆柱绕流问题数值模拟的结果是收敛的,证明了数值方法的可靠性。对圆柱绕流的数值模拟表明,SA-DDES方法在处理大分离流动的问题上能够达到LES的水平,而计算网格量却比LES小很多,使得现有计算机硬件资源能够进行更高雷诺数流动问题的数值模拟,为SA-DDES下一步应用到更加复杂的流动问题上奠定了基础。

## 致谢

本文工作得到国家自然科学基金项目(Grant Nos 51379125, 51490675, 11432009, 51411130131),长江学者奖励计划(Grant No. 2014099),上海高校特聘教授(东方学者)岗位跟踪计划(Grant No. 2013022),国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(Grant No. 2013CB036103),工信部高技术船舶科研项目的资助。在此一并表示衷心感谢。

## 参 考 文 献

- 1 Spalart P R, Jou W H, Strelets M, et al. Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach. *Advances in DNS/LES*, 1997, (1), 4-8.
- 2 Spalart P R, Allmaras S R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. *Recherche Aerospaciale*, 1994, (1), 5-21.
- 3 Spalart P R, Deck S, Shur M L, et al. A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 2006, 3(20), 181-195.
- 4 Lei C, Cheng L, Kavanagh K. Spanwise length effects on three-dimensional modeling of flow over a circular cylinder. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2001, 22-23(190), 2909-2923.
- 5 Hunt J C R, Wray A A, Moin P. Eddies, streams and convergence zones in turbulent flows. *Center for Turbulence Research report CTR-S88*, 1988, 193-208.
- 6 Wissink J G, Rodi W. Numerical study of the near wake of a circular cylinder. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2008, 4(29), 1060-1070.
- 7 Lysenko D A, Ertesvag I S, Rian K E. Large-eddy simulation of the flow over a circular cylinder at Reynolds number 3900 using the OpenFOAM toolbox. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2012, 4(89), 291-518.
- 8 Norberg C. Effects of Reynolds number, low-intensity free-stream turbulence on the flow around a circular cylinder. *Department of Applied Themoscience and Fluid Mechanics. Chalmers University of Technology, Gothenberg*, 1987.
- 9 Lourenco L M, Shih C. Characteristics of the plane turbulent near wake of a circular cylinder. *A particle image velocimetry study (data taken from Beaudan, Moin)*, 1993.
- 10 Zhao, R, Liu J, Yan C. Detailed Investigation of Detached-Eddy Simulation for the Flow Past a Circular Cylinder at  $Re=3900$ . In *Progress in Hybrid RANS-LES Modelling*. Springer Berlin Heidelberg, 2012. 401-412.

### **Spalart-allmaras delayed detached-eddy simulations of flow past a circular cylinder**

ZHAO Wei-wen, WAN De-cheng\*

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)

\*Corresponding author, Email: [dcwan@sjtu.edu.cn](mailto:dcwan@sjtu.edu.cn)

**Abstract:** Delayed Detached-Eddy Simulation (DDES) based on Spalart-Allmaras (SA) model employs Reynolds-Averaged Navies-Stokes (RANS) in the boundary layers, and Large-Eddy Simulation (LES) in the separated regions. Based on the open source CFD toolkit OpenFOAM, this paper carried out numerical simulations of flow past a circular cylinder at subcritical Reynolds number ( $Re=3900$ ). The vortex shedding patterns are observed and studied. The practical reliabilities of SA-DDES at subcritical Reynolds number in massively separated flows are evaluated.

**Key words:** Flow separation; Circular cylinder; Delayed-Detached Simulation; Subcritical Reynolds number.