

# 应用 SA-DDES 方法数值模拟串联双圆柱绕流问题

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)

**摘要:** 基于 OpenFOAM 开源代码工具箱中 Spalart-Allmaras (SA) 模型的延迟分离涡 (DDES) 方法, 即在近壁面的边界层区域使用 SA 模型求解流场, 在其他区域采用亚格子模型求解流场, 对亚临界雷诺数  $Re=3\ 900$  的串联双圆柱绕流进行数值模拟, 数值讨论分析了圆柱间距对流场结构特性和升阻力系数的影响, 并分析了串联双圆柱绕流的流场干扰机理。

**关键词:** 流动分离; 串联双圆柱; SA-DDES 方法; 亚临界雷诺数; 边界层

圆柱型结构常见于海洋工程结构物, 比如立管、Spar 平台以及张力腿平台等, 而绕流则是圆柱型结构不可忽视的一个问题。当流体以一定速度流经圆柱的时候, 由于流体粘性的存在, 会产生边界层分离以及漩涡脱落等现象, 从而引起周期性的横向力和横向振动。这种周期性的力和振动将会影响海洋平台的稳定性, 减少结构物的使用寿命, 因此研究圆柱绕流具有重要的研究价值和工程意义。

串联双圆柱不同于单圆柱, 由于上游圆柱的尾流场会影响下游圆柱, 而下游圆柱尾流场存在又会反过来影响上游圆柱的漩涡, 因此对其绕流问题, 特别是绕流场干扰机理的研究分析对结构物的设计具有十分重要的指导意义。Zdravkovich<sup>[1]</sup>对串联和交错放置的双圆柱绕流问题进行实验研究, 分析了不同圆柱间距对两圆柱周围流动的相互影响。Mittal<sup>[2]</sup>采用有限元方法对雷诺数  $Re=100$  和  $1\ 000$  的串联和交错双圆柱进行数值模拟, 结果表明下游圆柱在低雷诺数情况下也会受上游圆柱的尾流影响而产生颤动。刘松等<sup>[3]</sup>采用有限体积法对串联双圆柱在  $Re=200$  条件下的绕流进行了数值模拟, 分析了圆柱间距对圆柱升阻力系数的影响, 发现间距比在大于某一临界值后会出现一些流体力学量的突然变化。

首先对三维单圆柱进行圆柱绕流模拟, 验证了数值方法的可靠性, 然后以等直径的串联双圆柱为研究对象, 采用 SA-DDES 方法对亚临界雷诺数  $Re=3\ 900$  下的串联双圆柱绕流进行了数值模拟, 研究了圆柱间距对圆柱升阻力系数的影响, 并分析了串联双圆柱的流场干扰机理。

## 1 数值方法

1997 年 Spalart 等<sup>[4]</sup>在 Spalart-Allmaras (SA) 模型<sup>[5]</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。这样将使涡粘性降低, 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>[6]</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。

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

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

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

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51379125, 51490675, 11432009, 51411130131); 长江学者奖励计划(2014099); 上海高校特聘教授(东方学者)岗位跟踪计划(2013022); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2013CB036103); 工信部高技术船舶科研项目的资助

**通讯作者:** 万德成, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

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

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

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

这里,  $r_d$  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:  $\sigma = 2/3$ ,  $\kappa = 0.41$ ,  $C_{b1} = 0.1355$ ,  $C_{b2} = 0.622$ ,  $C_{w1} = C_{b1}/\kappa_2 + (1 + C_{b2})/\sigma$ ,  $C_{w2} = 0.3$ ,  $C_{w3} = 2.0$ ,  $C_{v1} = 7.1$ ,  $C_{i3} = 1.1$ ,  $C_{i4} = 1.0$ 。

## 2 数值模拟

### 2.1 模型与计算域

Lei 等人<sup>[7]</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。坐标系原点位于上游圆柱的中心, 计算域的选取如下:  $-10D \leq x \leq 20D, -10D \leq y \leq 10D, -\pi D/2 \leq z \leq \pi D/2$ 。

间距比  $L/D$  表示两圆柱中心距离与圆柱直径的比值, 为了研究圆柱间距对串联双圆柱绕流流场的影响, 选取  $L/D$  在 2.0~4.0 之间变化计算并研究流场特性变化规律。

### 2.2 网格划分及边界条件

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(如图 1 所示)。

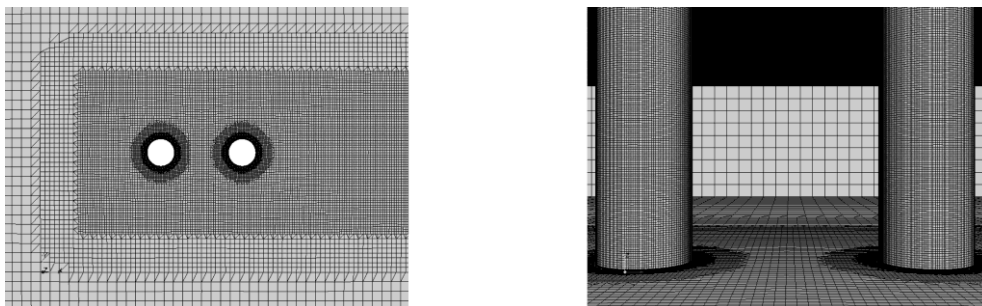


图 1 网格划分

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。

### 2.3 方法验证

在进行双圆柱绕流数值模拟之前，需要先进行数值方法的验证。采用相同的数值方法，选取三套细密程度不同的网格，对  $Re=3\ 900$  条件下的单圆柱绕流问题进行数值模拟，并将结果与实验结果比较。

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	$86 \times 57 \times 9$	81.5 万	0.955	0.212
中	$120 \times 80 \times 12$	179 万	0.938	0.214
细	$168 \times 112 \times 17$	396.6 万	0.949	0.217
Norberg(1987) $C_d^{[8]}$ Ong(1993) $St^{[9]}$			$0.99 \pm 0.05$	$0.215 \pm 0.005$

表 1 为网格收敛性研究的结果。其中阻力系数  $C_d$  为 50 个涡涡周期的统计平均值。从表中可以看出 SA-DES 对单圆柱绕流数值模拟的阻力系数和 Strouhal 数同实验值相比，误差在可接受范围内，验证了本数值方法的可靠性。

## 3 结果分析

### 3.1 涡量场分布

图 2 给出了  $z=0$  平面内不同间距圆柱的尾涡流场图，当间距比在 2.0~3.5 之间时，上游圆柱两侧的涡涡成对称形态，这是由于下游圆柱处于上游圆柱的尾涡回流区内，下流圆柱的存在抑制了上游圆柱尾流区域涡旋的回流；与此同时，下游圆柱受上游圆柱涡旋回流的影响，其自身的涡涡特征不明显。当间距比达到 4.0 时，上游圆柱的涡涡开始出现不对称形态，从下游圆柱前部及两侧的涡量场可以看出，下游圆柱已经在上游圆柱的回流区之外，上游圆柱对下游圆柱的干扰减小。

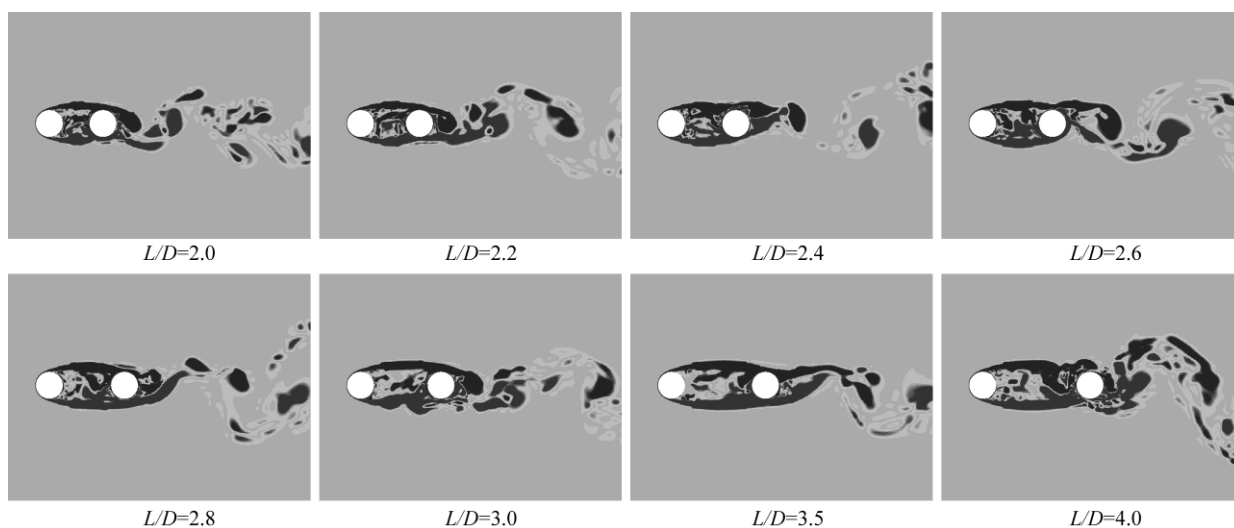


图 2 串联双圆柱尾部流场涡量图

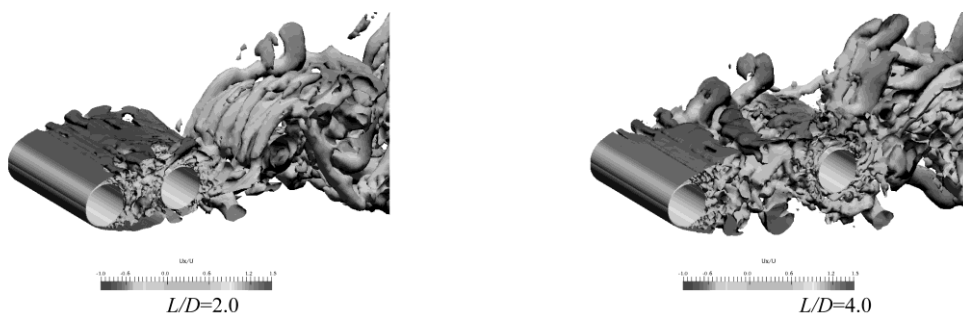


图 3 串联双圆柱尾流区域的涡量等势面图 ( $Q=10$ )

图3是用Q准则(Q-criterion)<sup>[10]</sup>表示的涡量等势面图。Q的定义如下:

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

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,  $S = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$  为应变不变量。

从三维涡量等势面图中可以更加清晰地看出,  $L/D=2.0$  时下游圆柱处于上游圆柱尾涡的回流区域内, 被上游圆柱两侧脱落出来的漩涡“包裹”住; 而  $L/D=4.0$  时, 下游圆柱则明显处于尾涡回流“包裹”区域之外, 涡量场表现出与  $L/D=2.0$  截然不同的特性。

### 3.2 阻力系数

图4给出了阻力系数的变化规律, 这里的阻力系数取50个涡周期内的平均值。如图所示, 上游圆柱的阻力系数一直在0.95附近变化, 这和单圆柱的阻力系数基本一致; 而由于上游圆柱尾涡回流的影响, 当  $L/D$  在2.0~3.5变化时, 下游圆柱阻力系数为负值, 即产生了与流向相反的拖曳力, 两圆柱存在“相吸”现象, 而当  $L/D=4.0$  时, 下游圆柱的阻力系数才变为正值, 但其大小只有单圆柱绕流阻力系数的一半左右, 说明上游圆柱的涡流仍然对下游圆柱的阻力有很大影响。

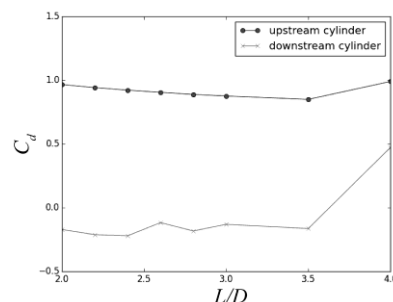


图4 串联双圆柱阻力系数随间距比变化规律

## 4 结语

采用SA-DDES方法研究了等直径的串联双圆柱在  $Re=3900$  情况下的绕流问题, 分析了不同间距比对其绕流流体动力学特性的影响。得出以下结论:

1) 在  $Re=3900$  情况下, 由于上游圆柱的尾流回流区域较大, 在圆柱间距  $L/D$  大于3.5时才会观察到下游圆柱处于上游圆柱回流区域之外, 产生相对“独立”的涡流现象。

2) 在间距比小于某一临界值时, 下游圆柱的阻力系数为负值, 两圆柱产生“相吸”现象, 在工程设计中应当考虑这个问题, 尽量避免出现“相吸”现象。

本文工作只是对串联双圆柱绕流问题的初步探索, 在今后的研究中还需要对更大间距比的双圆柱进行考察。此外, 考察上游圆柱尾流回流区域长度与雷诺数的关系, 并以此来确定间距比临界值, 也是一个值得探讨和研究的方向。

## 参考文献

- Zdravkovich M M. Review of flow interference between two circular cylinders in various arrangements[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1977, 99: 618-633.
- Mittal S, Kumar V, Raghuvanshi A. Unsteady incompressible flows past two cylinders in tandem and staggered arrangements[J]. International Journal for Numerical Method in Fluids, 1997, 25: 1315-1344
- 刘松, 符松. 串联双圆柱绕流问题的数值模拟[J]. 计算力学学报, 2000, 17(3): 260-266.
- 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[J]. Advances in DNS/LES, 1997, 1, 4-8.
- Spalart P R, Allmaras S R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows[J]. Recherche Aerospaciale, 1994, 1, 5-21.
- Spalart P R, Deck S, Shur M L, et al. A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities[J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 2006, 20(3): 181-195.
- Lei C, Cheng L, Kavanagh K. Spanwise length effects on three-dimensional modeling of flow over a circular cylinder[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2001, 190(22-23): 2909-2923.
- Norberg C. Effects of Reynolds number and a low-intensity freestream turbulence on the flow around a circular cylinder[J]. Chalmers University, Goteborg, Sweden, Technological Publications, 1987, 87(2).
- Ong L, Wallace J. The velocity field of the turbulent very near wake of a circular cylinder[J]. Experiments in Fluids, 1996, 20: 441-453
- Hunt J C R, Wray A A, Moin P. Eddies, streams and convergence zones in turbulent flows[R]. Center for Turbulence Research report CTR-S88, 1988, 193-208.