

文章编号: 1000-4882 (2026) 01-0181-09

带自由面三维阵列圆柱绕流的数值模拟

张钦文, 王建华, 万德成*

(上海交通大学 船海计算水动力学研究中心 (CMHL), 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要

为了探讨三维模式下阵列圆柱绕流的周围流场特性, 对具有自由液面的三维阵列圆柱展开研究。基于 SST-DES 模型和 VOF 方法, 利用计算流体力学软件 STAR-CCM+ 进行数值模拟, 得到了阵列圆柱的速度场分布、尾涡发展以及绕流阻力等。对比分析发现, 上游圆柱阻力系数变化平稳、波动较小; 而下游圆柱受上游尾流干扰影响, 阻力系数波动幅度显著增大并呈现周期性的规律。相应的研究结果可为海洋平台等工程结构设计、优化及寿命预测提供参考。

关键词: 阵列多圆柱; 绕流阻力; 湍流模式; 流场分析

中图分类号: U661.1

文献标志码: A

0 引言

随着海洋资源的不断开发利用, 各类海上平台逐渐成为海上作业的核心装备。为了适应深水、强对流、高风浪等复杂海况, 深海平台普遍采用导管架结构等多柱型支撑结构。这些立柱在海流作用下形成典型的阵列多柱体绕流环境。与单一圆柱的绕流情况相比, 多根柱体间绕流的相互干扰展现了更加复杂和多变的流动特性。这种干扰不仅会影响流场结构, 还会对流场的气动力分布、流动稳定性以及涡激振动现象等产生重要影响。在多柱体阵列系统中, 因为各柱间的相互干扰作用而产生的涡街干涉、尾流再附和剪切层不稳定等一系列复杂流动行为, 会引起流体周围局部压力分布的变化, 诱发涡激振动 (vortex-induced vibration, VIV) 或流致振动 (fluid-induced vibration, FIV), 从而危及结构物的稳定以及安全。

在以往的经典研究中, 大多数圆柱绕流问题被简化为二维、无自由液面和定常流的情形, 但在实际工程中, 物体的三维特性不可忽视。自由液面及自由端的存在极大地改变了结构物周围流场的流动特性, 进而对物体的结构强度等造成额外的影响^[1]。来流在高弗劳德数 (Fr) 和高雷诺数 (Re) 条件下, 自由液面的引入会在圆柱前方形成抬升, 在尾流区形成凹陷, 并在远场尾流区域形成 Kelvin 波系及表面波浪, 使得整个流动呈现气液耦合、多尺度涡结构演化的特性。相较于无限长圆柱绕流问题, 在自由端附近产生的涡旋会影响典型的卡门涡街结构, 带来更为复杂的三维效应^[2-3]。这种自由端效应与自由液面波动相互作用, 进一步强化了尾流区域的三维不稳定性。

近年来, 针对圆柱绕流、多立柱绕流的研究方法有理论研究、模型试验以及数值模拟等。Zdravkovich^[4] 系统总结了双圆柱在串、并列布置下的绕流干扰特性, 提出了基于圆柱间距的尾流干扰

收稿日期: 2025-05-10; 修改稿收稿日期: 2025-08-02
基金项目: 国家重点研发计划项目 (2025YFF0519800)

分类方法,并阐述了不同干扰区域内涡脱落结构的典型特征。在并列柱体绕流研究中,Sumner等^[5]通过试验与粒子图像测速技术揭示了小间距、大间距之间流场结构的显著差异,发现了单一钝体涡脱落、偏流、同步涡脱落三类基础模式。Bourguet等^[6]使用直接数值模拟方法,系统研究了长柔性圆柱在剪切流中涡激振动的机制及涡脱落行为。Rosetti等^[7]采用非定常雷诺平均(unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes, URANS)方法,在 $Fr = 0.31$, $Re = 4.3 \times 10^4$ 的工况下,对带自由液面的低长径比圆柱进行数值模拟,分析了自由表面与自由端的联合作用机制。Benitz等^[8]针对 $Fr = 0.65$, $Re = 2\,900$ 工况下的有限长圆柱,通过计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)方法模拟与试验测量相结合的方式,系统探究了不同长径比下自由表面、自由端及圆柱体长度对绕流流场和载荷的影响。赵伟文等^[9]针对亚临界雷诺数 $Re = 3\,900$ 下的三维圆柱绕流分别采用URANS和分离涡模拟(detached-eddy simulation, DES)方法开展数值模拟,并将两类数值计算结果与已有的试验数据进行对比分析,研究表明,相较于URANS方法,DES方法能够更精准地捕捉柱体周围的流场细节信息。饶勇等^[10]通过格子玻尔兹曼方法对不同间距条件下并列双柱绕流流场进行了数值模拟,得到了对应流线图、方柱升力图及阻力图,同时针对各个流线图、升力图、阻力图及压力图进行了分析讨论。刘为民等^[11]基于SST $k-\omega$ 模型的雷诺平均法(Reynolds averaged Navier-Stokes equations, RANS)开展了对二维阵列式四立柱绕流的数值模拟研究。研究结果表明,在 0° 和 45° 来流时,阵列四立柱柱群中立柱的涡脱频率大于单柱的涡脱频率,而在 22.5° 时两者基本相同,且四柱斯特劳哈尔数均大于单柱,并且在不同流向角的工况下,立柱的尾流涡泄结构均呈现2S模式。

本文以典型的正方形布置四圆柱阵列为研究对象,采用CFD软件STAR-CCM+构建自由液面三维绕流数值模型,结合流体体积(volume of fluid, VOF)方法处理气液界面,基于SST-DES模型捕捉复杂尾流演化行为;对比不同柱位处的阻力系数、速度分布、尾涡脱落与自由液面变形情况,系统探讨自由液面、自由端及柱间干扰三者的耦合作用机制。研究结果可为多柱结构水动力设计、平台抗涡激响应优化及工程结构防振提供理论依据和数值参考。

1 数值方法

1.1 控制方程

对于两相不可压缩流体,控制方程为质量和动量守恒方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{U}) + \mathbf{f}_\sigma \quad (2)$$

式中, \mathbf{U} 为速度, ρ 为加权密度, p_d 为动压力, \mathbf{g} 为重力加速度; \mathbf{x} 为位置矢量, μ_{eff} 为等效动力黏度, \mathbf{f}_σ 为表面张力项, t 为时间。

1.2 湍流模型与分离涡模拟

高雷诺数流体流经柱体时会在柱体后方形成复杂的剪切层结构和周期性的涡街现象。这类流动具有明显的三维特性,通常伴随流动分离、尾迹不稳定以及与自由液面之间的耦合行为。为了准确捕捉上述流场特征,本文选用SST模型与分离涡模拟相结合的混合湍流模型,在保证近壁面预测精度的基础上,提高对尾迹涡旋的解析能力,更好地反映自由液面下有限长四圆柱阵列绕流的非定常性。

SST模型可以很好地满足近壁层与自由剪切层的湍流建模需求。该模型在近壁区采用传统的 $k-\omega$ 模型形式,以保证良好的边界层解析能力,而在远离壁面的自由剪切区域则切换为 $k-\varepsilon$ 模型形式,增强数值稳定性并抑制过度扩散。湍动能 k 和特定湍流耗散率 ω 的输运方程分别为

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(u_j k)}{\partial x_j} = \tilde{G} - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((v + \alpha_k v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial(u_j \omega)}{\partial x_j} = \gamma S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((v + \alpha_\omega v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + (1 - F_1) CD_{k\omega} \quad (4)$$

式中, $\tilde{G} = \min(G, c_1 \beta^* k \omega)$; $G = v_t S^2$; $CD_{k\omega}^* = \max(CD_{k\omega}, 10^{-10})$; $CD_{k\omega} = 2\alpha_{\omega 2} \cdot \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$; F_1 为混合函数, 用于不同区域之间的平滑切换。该模型无需依赖壁面函数, 能够直接解析黏性底层, 非常适合在结构附近进行高精度计算。

虽然 SST 模型在近壁区域具有良好的预测能力, 但在尾迹区湍流结构呈现大量非定常、大尺度涡旋行为, 仅使用 RANS 方法难以捕捉涡的脱落及其演化过程。因此需要引入 DES 方法作为补充。DES 方法是 Spalart 等^[12]提出的一种基于网格的混合 RANS/LES 策略, 其核心思想是在边界层区域保留 RANS 模型以维持计算效率, 在自由剪切区切换为 LES 模式。即所使用的湍流模型在网格密度足够进行 LES 求解的区域退化成为一种亚格子模型, 而在密度不够的区域成为传统的雷诺平均的湍流模型, 从而实现涡结构的直接解析^[13]。

在 SST-DES 模型中, 湍流长度尺度采用如下修正形式:

$$l_{DES} = \min \left(\frac{k^{1/2}}{\beta^* \omega}, C_{DES} \cdot \Delta \right) \quad (5)$$

式中, $\Delta = \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 为局部网格尺度; C_{DES} 为经验常数, 一般取为 0.61, 确保在壁面附近维持 RANS 模型, 而在远离壁面的剪切区逐渐转换至 LES 模型, 这样能够有效避免因模型切换过早而导致的“模型延迟”以及“网格诱导分离”等问题。

SST-DES 模型的主要优势在于其既兼顾计算效率又具有解析精度。在本文中, 四圆柱阵列之间存在明显的干扰现象以及涡的周期性脱落, 尾迹流场具有典型的三维性和瞬时性。采用 SST-DES 模型能够清晰捕捉柱体尾部剪切层的演化、柱间涡结构的形成与脱落过程, 进而准确预测非定常阻力的变化规律。在自由液面附近, 柱体产生的流动扰动也会引起明显的表面波动, SST-DES 模型对这类交界区的复杂涡运动也能表现出很强的适应能力。

1.3 体积分数模型

在考虑自由液面的圆柱绕流问题时, 流体绕圆柱形成的涡结构与自由表面波动之间的相互耦合, 会导致表面变形以及局部回流等问题。同时, 流场的改变也会对阻力、尾流特性以及结构间的干扰造成较大影响。为了更好地捕捉复杂流动中剧烈变化的自由液面, 本文采用的 VOF 方法能够有效追踪定位流体之间的清晰界面, 其核心思想是在每一个计算单元中定义一个体积分数函数 α , 用于描述水相所占据的体积分布:

$$\alpha(\mathbf{x}, t) = \begin{cases} 1, & \text{纯水区域} \\ 0 < \alpha < 1, & \text{界面区域} \\ 0, & \text{纯空气区域} \end{cases} \quad (6)$$

VOF 方法通过求解守恒方程实现界面的时空演化:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \alpha = 0 \quad (7)$$

式中, \mathbf{u} 为流体速度。式 (7) 表明, 体积分数 α 随流体运动。由于界面本身并不具有明确的厚度, 因此 VOF 模型在数值实现中需要配合专用的界面重构算法对 α 的分布进行进一步的几何重构, 以此实现更为精确的界面位置判定与表面曲率计算。

2 计算模型

本文采用的计算域大小为 $25D \times 25D \times 10D$, 如图 1 所示。圆柱直径 $D = 0.2 \text{ m}$, 吃水 $h = 4D$, 选取

长径比 $L/D=6$ (其中 L 为圆柱长) 的圆柱作为研究对象。为了更好地展示自由液面对于流动的影响, 选择 $Fr=1.1$, $Re=2.7 \times 10^5$ 的计算工况进行数值模拟。该工况下雷诺数 $Re \gg 4000$, 处于强湍流绕流状态。来流速度设置为 1.54 m/s 。水的密度为 1000 kg/m^3 , 水的运动黏度取为 $1.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; 空气密度为 1 kg/m^3 , 空气运动黏度取为 $1.48 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 。平台立柱设置方式如图 2 所示。

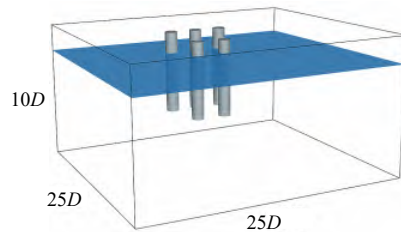


图 1 计算域

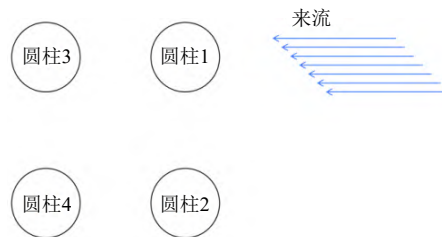


图 2 平台立柱设置方式

计算网格划分情况如图 3 所示。网格总数为 1.1×10^7 。其中, 图 3(a) 展示了 $x-y$ 平面上的网格整体布局情况。为了更加精确地捕捉流场的变化, 在网格划分时对开尔文兴波区域进行了加密处理。图 3(b) 展示 $x-z$ 平面上的网格局部加密情况。图 3(c) 展示了近圆柱表面的网格加密情况, 圆柱外表面共设置了 10 层边界层网格。同时, 为了更好地探究自由液面及自由端对流动产生的影响, 在相对应的关注区域均进行了网格局部加密, 以此来保证计算精度。

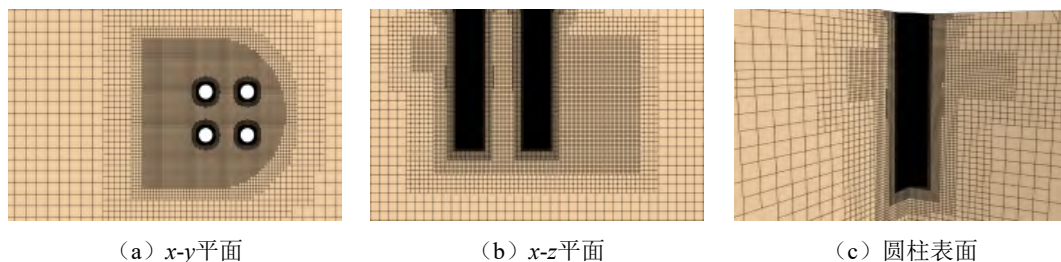


图 3 计算网格划分

在区域划分时, 上游入口处采用均匀来流速度入口边界条件, 下游出口处采用压力出口边界条件。圆柱表面设置为壁面无滑移条件, 用于准确模拟壁面的剪切作用。底部设置为对称边界条件。两侧边界与顶部边界均施加零梯度条件, 以允许流体的自然扩散而不引入额外扰动。

3 结果与分析

3.1 阻力系数

阻力系数是衡量物体在流体中所受阻力的量纲一参数:

$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho_L U^2 D h} \quad (8)$$

式中, C_D 为阻力系数, F_x 为阻力, ρ_L 为流体密度。

图 4 所示为 4 根圆柱的阻力系数时历曲线。可以看出, 上游的圆柱 1 与圆柱 2 的阻力系数基本稳定, 约在 -0.60 左右, 波动幅度较小, 这表明上游圆柱的来流扰动较小, 流场相对稳定。这可能是由于上游圆柱直接暴露在原始来流中, 未受到其他圆柱尾迹的影响; 而阻力系数曲线中的轻微扰动可能是由于自由面波动或近壁湍流结构引起的次级干扰。

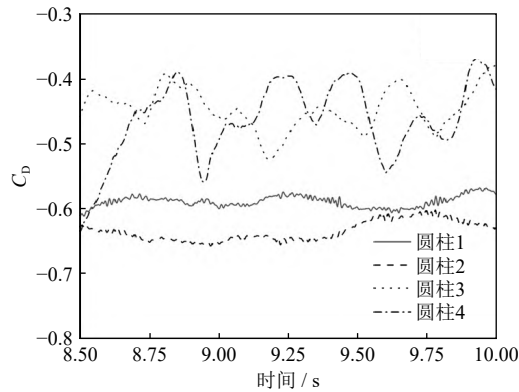


图 4 阻力系数时历曲线

相比于上游的圆柱, 下游的圆柱 3 与圆柱 4 的阻力系数波动幅度明显增大, 存在明显的周期性起伏, 展现了剧烈的涡脱落效应。下游圆柱阻力系数波动剧烈可能是因为下游圆柱受到上游圆柱尾流中速度剪切、压力波动及涡旋干扰的影响, 尤其是尾流中存在的涡脱落现象导致周期性的低压区扫掠过下游圆柱, 从而引起阻力系数的周期性变化。下游两圆柱的阻力系数呈现波峰、波谷交替出现的现象, 说明涡旋在下游存在明显的非对称交替脱落行为, 表现为二维涡街与三维绕流干扰的现象。自由面波动与剪切涡旋耦合形成的垂向扰动传播也可能进一步加剧了阻力系数的波动。

3.2 自由面升降

图 5 为自由液面在 $t = 10$ s 时的瞬时 z 方向位置分布云图。可以看出, 上游两圆柱前方驻点液面上升明显。由于水流撞击圆柱后减速, 动能转化为压能, 形成局部高压区, 导致自由液面产生向上位移。而圆柱尾流后出现大范围的自由面下陷区域, 反映出圆柱后方由于涡的脱落所引起的负压吸引效应。中部区域液面形态变化剧烈, 呈现上升、凹陷的交替现象, 可能是涡旋脱落过程中的周期性低压扰动所致; 四圆柱呈阵列分布, 因而流场中存在多个干扰尾流区域。多柱体尾流交汇区叠加多个尾流诱导的压力场, 液面在此区域内产生显著的起伏现象。这种叠加场造成空间上的非均匀扰动, 使得液面不再呈单一模式的起伏。

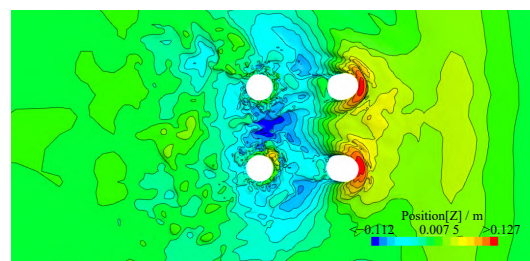


图 5 自由液面瞬时 z 方向位置分布

3.3 速度分布

图 6 所示为在 $t = 10$ s 时不同深度处的流场速度分布。

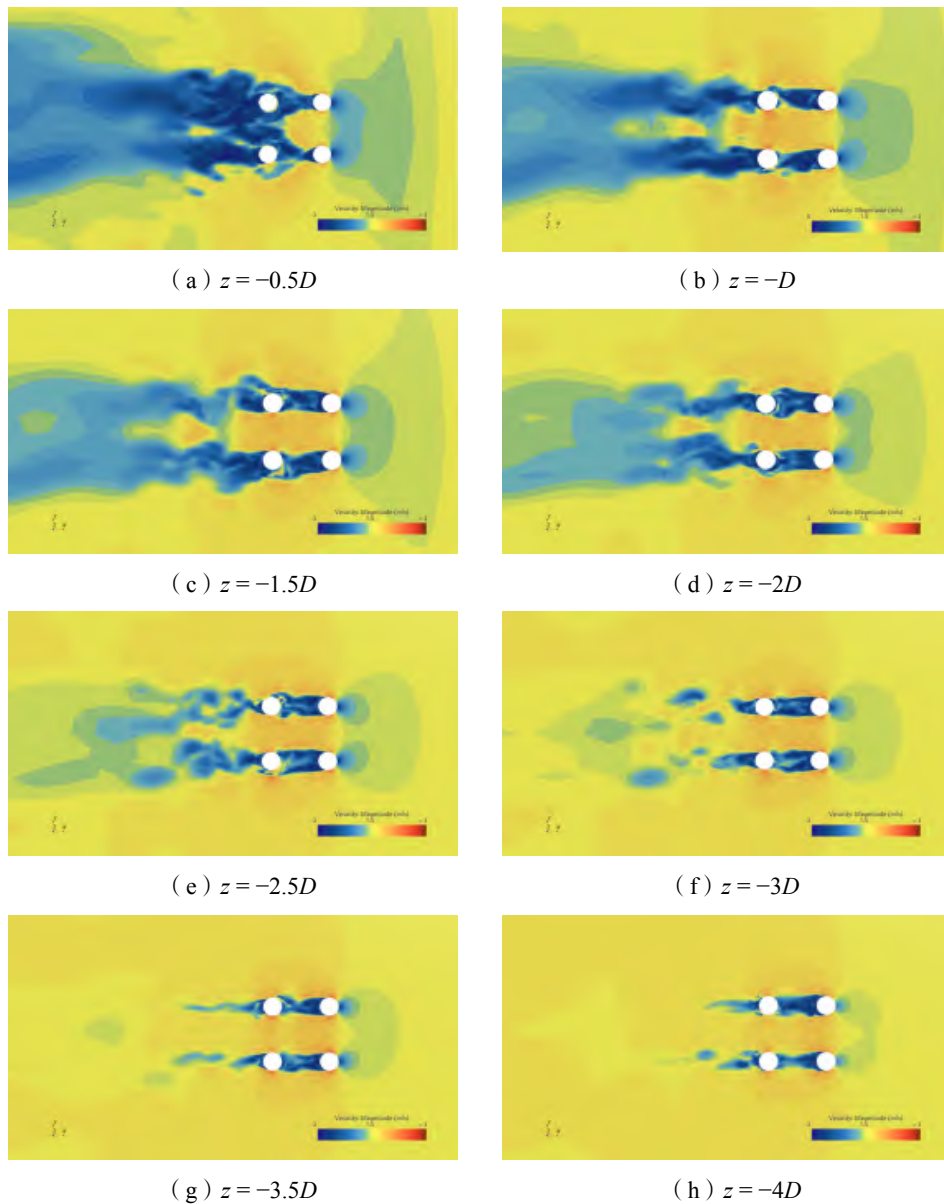
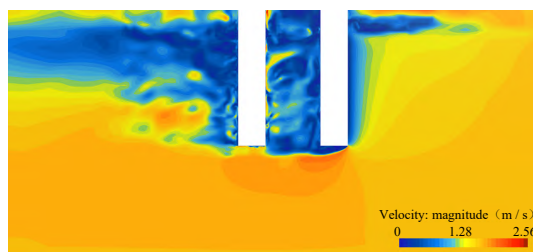


图6 不同深度处的流场速度分布

由图6可知,相较于深吃水工况,自由液面的引入显著延缓了来流在顺流方向上的速度恢复过程,并且在距圆柱尾部较远位置仍然存在着较大范围的低速区。这说明自由液面对流场结构产生了明显干扰,改变了其上方和尾部区域的速度分布特性。因此,自由液面条件下的流动行为具有其独特性,应区别于深吃水情况,作为独立的研究对象进行深入分析。

图7所示为 $x-z$ 平面上的速度分布示意,可以发现,上游柱体对下游柱体的来流产生遮挡效应,使后排柱体受到不稳定的非均匀速度冲击,导致局部流动的剧烈波动,并在其后方形成复杂的尾迹结构。这种由阵列布局和有限长度共同作用下的尾迹干扰效应在自由面存在时被进一步放大,出现了明显的速度偏斜和涡旋交织现象,并且因为自由端的存在,自由端区域成为流体逃逸的有效路径,促使附近的局部速度显著升高。尾迹区靠近自由端的位置出现明显的上冲趋势,即流体沿着柱体上方逸出,形成上洗流动。这种端部效应增强了局部三维扰动,促使原本相对规则的尾迹结构发生扭曲与分裂,从而形成速度增强带和非对称的剪切层结构。

图 7 $x-z$ 平面上的速度分布

3.4 涡量场分布

图 8 为水深分别为 0.1, 0.4, 0.8 m 时的涡量场分布云图。在接近自由面 ($z = -0.5D$) 处, 涡量场展现了涡旋形态破碎和脱落节奏紊乱的现象。涡旋结构在此出现强烈扰动, 其形态由规则的涡街逐渐破碎为不规则的涡旋团。这表明自由面的存在对近表面流动起到了增强扰动的作用, 破坏了尾迹的剪切层稳定性, 导致涡旋脱落节奏紊乱。这是由于自由液面和气液界面存在耦合关系, 导致自由面附近局部压力及速度场发生变化, 加剧了涡量的生成和耗散, 进而引发涡旋的破碎和不定常变化。在圆柱中部区域 ($z = -2D$), 涡量场逐渐趋于规则, 形成涡街现象。涡旋间距及形状已经具有一定规律性, 两侧脱涡剪切层结构完整。而在圆柱自由端区域 ($z = -4D$) 涡量则大量汇聚于圆柱背部。

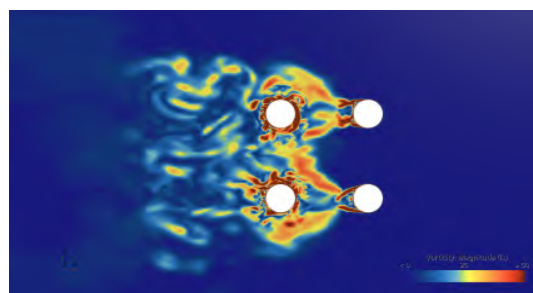
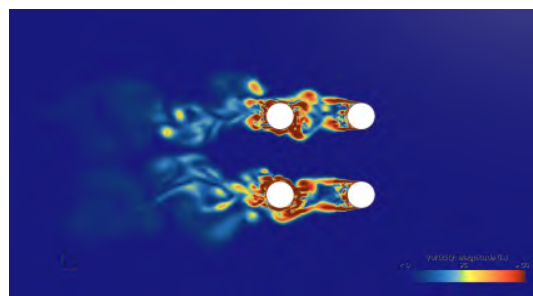
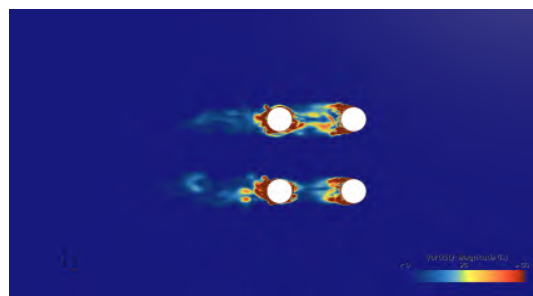
(a) $z = -0.5D$ (0.1 m)(b) $z = -2D$ (0.4 m)(c) $z = -4D$ (0.8 m)

图 8 不同水深的涡量场云图

不难发现, 随着吃水增加, 自由剪切层受自由液面的影响逐渐弱化, 不再受自由液面的约束, 开始向内侧收缩调整, 此时从尾流场中可以观察到交替脱落的卡门涡街, 展现了相对规律的涡脱落现

象。而当吃水位置靠近自由端时，流动特性再度转变，垂直涡量不再沿顺流方向持续传播，而是大量汇聚在圆柱背部区域，形成集中的涡量分布，反映出自由端边界对涡量输运和流动结构的显著影响。

图9所示为瞬时涡量场，从图可以看出，自由端生成的卷拧状涡旋脱离端部后，沿斜向上轨迹运动，对卡门涡街顺流方向的发展起到一定程度的抑制作用，干扰了其顺流向传播与演化的态势。

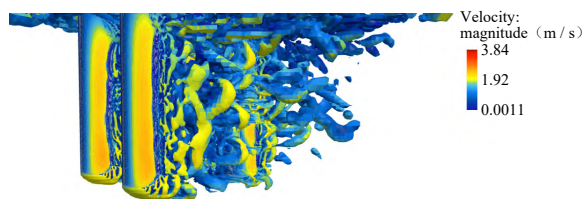


图9 瞬时涡量场

4 结 论

本文采用 STAR-CCM+软件，对带自由液面的有限长四圆柱阵列绕流进行了数值模拟。在湍流模式上选择 SST-DES 方法，结合 VOF 模型系统探究了自由液面、自由端及柱间干扰的耦合作用机制。主要结论如下：

(1) 在阵列圆柱绕流时，下游圆柱受上游尾迹干扰，阻力系数波动大且呈现周期性变化。自由液面有明显升降现象，上游圆柱前液面抬升，下游尾流区凹陷，中部呈现起伏凹陷交替现象。

(2) 自由液面的存在导致流向速度的“恢复”进程较深吃水位置有所放缓，涡量场由于受自由液面的影响呈现与速度场类似的规律。

(3) 由于自由液面与圆柱自由端的影响，在靠近自由面处，涡量场表现为强烈的不规则现象。随着吃水增加，自由剪切层受自由液面的影响逐渐弱化，不再受自由液面的约束，开始向内侧收缩调整，且随着深度增加，垂直涡量不再沿顺流方向持续传播，而是大量汇聚在圆柱背部区域。

(4) 自由端的存在改变了圆柱底部的流场分布，使得流场具有很强的三维效应。自由端生成的卷拧状涡旋脱离端部后向上形成上洗现象，在一定程度上抑制了卡门涡街沿流方向的发展。

在实际工程问题中，考虑流体的自由表面以及物体的三维特性对于准确分析流场具有十分重要的意义。流体的自由表面不仅影响流动的边界条件，还会引发一系列复杂的流动现象。同样，物体的三维特性也影响着流体与物体表面的相互作用。因此，忽略这些因素可能会导致流场预测的偏差，进而无法准确描述实际工程中可能出现的复杂流动现象。本文仅对多圆柱绕流的单个工况进行了数值模拟，后续将进行不同工况下多圆柱绕流的计算模拟。

参 考 文 献

- [1] 陈松涛, 赵伟文, 万德成, 等. 带自由液面有限长圆柱绕流数值模拟[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(1): 91-98.
- [2] KRAJNOVIĆ S. Flow around a tall finite cylinder explored by large eddy simulation[J]. Journal of Fluid Mechanics[J], 2011, 676: 294-317.
- [3] XIAOCONG W, HONGBIN G U I, YANG L I U. Numerical simulation of three-dimensional flow around a circular cylinder of finite length[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018, 13(2): 27-34.
- [4] ZDRAVKOVICH M M. The effects of interference between circular cylinders in cross flow[J]. Journal of Fluids and Structures, 1987, 1(2): 239-261.
- [5] SUMNER D, WONG S S T, PRICE S J, et al. Fluid behaviour of side-by-side circular cylinders in steady cross-flow[J].

- Journal of Fluids and Structures, 1999, 13(3): 309-338.
- [6] BOURGUET R, KARNIADAKIS G E, TRIANTAFYLLOU M S. Vortex-induced vibrations of a long flexible cylinder in shear flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2011, 677: 342-382.
- [7] ROSETTI G F, VAZ G, HOEKSTRA M, et al. CFD calculations for free-surface-piercing low aspect ratio circular cylinder with solution verification and comparison with experiments[C]// International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2013, 55416: V007T08A056.
- [8] BENITZ M A, CARLSON D W, SEYED-AGHAZADEH B, et al. CFD simulations and experimental measurements of flow past free-surface piercing, finite length cylinders with varying aspect ratios[J]. Computers & Fluids, 2016, 136: 247-259.
- [9] 赵伟文, 万德成. 用 SST-DES 和 SST-URANS 方法数值模拟亚临界雷诺数下三维圆柱绕流问题[J]. 水动力学研究与进展 (A 辑), 2016, 31(1): 1-8.
- [10] 饶勇, 倪玉山, 刘超峰. 并列双方柱绕流的 Lattice Boltzmann 模拟分析[J]. 应用力学学报, 2008, 25(2): 192-197+352.
- [11] 刘为民, 谷家扬, 卢燕祥. 阵列四柱绕流的数值模拟[J]. 江苏科技大学学报 (自然科学版), 2012, 26(6): 534-540.
- [12] SPALART P R. Comments on the feasibility of LES for wings and on the hybrid RANS/LES approach[C] // Proceedings of the First AFOSR International Conference on DNS/LES, 1997: 137-147.
- [13] 姬亚鹏, 薛雷平. 分离涡方法对梢涡中脉动量的数值模拟[J]. 力学季刊, 2014, 35(3): 390-399.

Numerical Simulation of Flow around Three-dimensional Arrayed Cylinders with Free Surface

ZHANG Qinwen, WANG Jianhua, WAN Decheng*

(Computational Marine Hydrodynamics Laboratory (CMHL), School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract

To explore the peripheral flow field characteristics of the flow around an arrayed cylinders in a three-dimensional mode, this paper conducts a study on a three-dimensional arrayed cylinders with a free liquid surface. Based on the SST-DES model and the VOF method, numerical simulation was carried out using the computational fluid dynamics software STAR-CCM+. The velocity field distribution, tail vortex development and flow resistance around the arrayed cylinders were obtained through numerical simulation. Comparative analysis of the numerical results indicates that the drag coefficient of the upstream cylinder remains relatively stable with minor fluctuations, whereas the downstream cylinder is significantly influenced by the upstream wake interference, resulting in substantially larger drag coefficient fluctuations with pronounced periodic behavior. The corresponding research results can provide valuable references for the design, optimization, and service life prediction of engineering structures such as offshore platforms.

Key words: array of multiple cylinders; flow resistance; turbulence mode; flow field analysis

作者简介

张钦文 男, 2002 年生, 硕士研究生。主要从事精细流场仿真研究。

王建华 男, 1988 年生, 博士, 副研究员, 博士研究生导师。主要从事船舶计算水动力学等研究。

万德成 男, 1967 年生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要从事计算船舶与海洋工程水动力学、多浮体相互作用、流固耦合、波浪载荷、海上新能源装置开发等研究。

*通讯作者: 万德成