

低 KC 数下振荡流中二维圆柱的涡激振动数值模拟

邓迪, 王哲, 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: dcwan@sjtu.edu.cn)

摘要: 在实际的油气采集过程中, 风、浪和海流的联合作用会使得平台做周期性的振荡运动, 随后在与平台相连的立管和海水间产生振荡流。圆柱在振荡流中的泄涡特性与在均匀流中的泄涡特性存在明显区别。本文采用基于 OpenFOAM 开源平台自主开发的具有重叠网格功能的 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU, 开展了一系列在静水中作周期性振荡运动的二维刚性圆柱涡激振动的数值模拟。本文中圆柱的直径为 0.02 米, 雷诺数为 1000, KC 数从 3 增加到 12。首先, 进行 KC=3 时的网格收敛性验证; 随后, 开展 KC 数为 12 的振荡流中二维圆柱的数值模拟。通过数值模拟结果的对比, 发现圆柱的横向振动加剧了升力系数的变化, 且使得泄涡方向和圆柱表面漩涡分离点的位置发生明显变化。

关键词: 振荡流; naoe-FOAM-SJTU 求解器; KC 数; 涡激振动

Numerical simulations of vortex-induced vibration of a 2D cylinder in oscillatory flow under low KC numbers

Di Deng, Zhe Wang, Decheng Wan*

(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, China)

*Corresponding author: dcwan@sjtu.edu.cn

Abstract: In actual oil exploitation, combined effects of wind, wave and current may cause the offshore platform to oscillate periodically. Then relative oscillatory flow will generate between risers and the water. Apparent distinction of vortex shedding features exists between cylinders in oscillatory flow and uniform flow. In this paper, the in-house CFD code naoe-FOAM-SJTU is used to carry out numerical simulations of 2D circular cylinder in oscillatory flow, which is developed on the basis of open source platform OpenFOAM with overset capability. In this paper, the diameter of the cylinder is 0.02m and the Reynolds Number (Re) is 1000. The Keulegan-Carpenter (KC) number varies from 3 to 12. Firstly, the grid convergence study is conducted to verify that the solution is insensitive to the grid resolution at KC=3. Then, simulations of fixed cylinder and freely vibrated cylinder in oscillatory flow are conducted respectively at KC=12. Comparison of results show that lift force coefficients strengthen under the effect of cross-flow vibration. Vortex trail direction and vortices separation points on the surface of the cylinder generate apparent changes too.

Keywords: oscillatory flow; naoe-FOAM-SJTU solver; KC numbers; vortex-induced vibration

0 引言

在实际生产过程中, 风、浪、流的联合作用会造成海洋浮式结构物的周期性振荡, 进而在与结构物相连

的立管和海水间产生振荡流。近几十年来,Williamson^[1], Sarpkaya^[2,3], Zhao^[4], Graham^[5], Nehari^[6], Tatsuno^[7]和 Obasaju^[8]等人开展了振荡流中刚性圆柱运动和泄涡特性的模型试验和数值模拟。

Williamson^[1]和 Sarpkaya^[2]开展了静水中周期性振荡刚性圆柱的模型试验。试验中, Keulegan-Carpenter (KC) 数设置为 0 至 40, 并从圆柱尾流和泄涡结果中总结出了尾涡区间和 KC 数的关系, 并定义了相关的尾涡区间: 附着涡区间 (0<KC<7), 在此区间内尾涡附着在圆柱表面, 无泄涡现象产生; 一对涡区间 (7<KC<15); 两对涡区间 (15<KC<24); 三对涡区间 (24<KC<32) 和四对涡区间 (32<KC<40)。同时, Sarpkaya^[2]发现当 KC<1.1 时无漩涡分离现象发生, 此时二维特性非常明显; 当 1.1<KC<1.6 时, Honji^[9]涡和漩涡分离现象发生; 当 1.6<KC<4 时, 在圆柱振荡的半周期内有一对对称的涡产生; 而当 4<KC<7 时, 圆柱便面的边界层内湍流现象加剧, 使得漩涡产生不对称性增强, 从而在半周期内产生一对不对称的涡。当 KC 数继续增大并进入到更高的尾涡区间时, 一个周期内泄涡的数量也随之增加。

Kozakiewicz^[10]和 Zhao^[4]等分别开展了不同折合速度下, KC 数为 10 和 20 的刚性圆柱, 在振荡流中强迫振动和自由振动的模型试验和数值模拟, 并对尾涡结构和圆柱振动特性进行对比分析。Kozakiewicz^[10]等发现当圆柱自由振动时, 横流向振动会导致圆柱尾涡结构发生改变, 并且一个周期内的泄涡数量也会增加。Zhao^[4]等发现, 当 KC 数和折合速度改变时, 圆柱自由振动的轨迹线也发生变化, 且当折合速度足够大时, 横流向振动幅值远小于顺流向振动幅值, 横流向振动可忽略。并且, 随着折合速度的增加, 圆柱的涡激振动频率减小。

本文中, 数值模拟采用自主开发的 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU, 求解器基于开源代码平台 OpenFOAM 开发并具有重叠网格技术。采用雷诺平均法(RANS)进行流场求解, 获得圆柱受到的流体力; 采用 6 自由度运动理论和动边界弹簧网格技术求解圆柱的振荡运动。首先, 进行 KC=3 时的网格收敛性验证研究, 确保数值解与网格的尺寸无关。然后, 进行 KC 数为 12 的振荡流中, 自由振动与强迫振动圆柱的数值模拟, 并对流体力、尾涡发展过程和流动分离点进行了对比分析。

本文第一部分对数值方法和计算模型进行简单的介绍, 第二部分给出了数值模拟结果的分析比较, 最后一部分总结全文。

1 数值方法

本文采用基于开源代码平台 OpenFOAM 自主开发的 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU, 并且结合重叠网格插值程序 Suggar++ 进行计算域中重叠区域网格的插值计算, Shen 和 Wan^[11,12]等人进行了大量相关的研究, 验证了求解器的有效性。

1.1 流体动力学控制方程

本文中, 流场假定为不可压, 运动粘度 μ 和密度 ρ 均为常数, 选取 RANS 方程作为流体动力学的控制方程, 并结合 SST $k-\omega$ 湍流模型进行流场求解, 获得圆柱的流体动力学响应。控制方程如下所示:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(2\mu \bar{S}_{ij} - \rho \overline{u'_j u'_i}) \tag{2}$$

式中: $\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$ 是平均应变率张量, $-\rho \overline{u'_j u'_i}$ 代表雷诺应力, 由 $\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_j u'_i} = 2\mu_t \bar{S}_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$ 计算得到, 其中 μ_t 为湍流粘度, $k = (1/2) \overline{u'_i u'_i}$ 为湍流动能, 从振荡的速度场中获得。

1.2 圆柱运动

图1为自由振动圆柱计算域的示意图,其中二维圆柱的直径为 $D=0.02\text{m}$,矩形计算域的顺流向长度为 $40D$,横流向长度为 $30D$ 。圆柱位于计算域的中央,且四根相同的线性弹簧分别设置在 x 轴和 y 轴上,并与圆柱的中心相连。圆柱在顺流向进行周期性的振荡运动,且可在横流向进行振动。圆柱的振荡运动可表示为:

$$A(t) = A_m \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right) \quad (3)$$

式中: A_m 为圆柱振荡运动的幅值, T 为振荡周期, t 为时间, φ 为相位角。

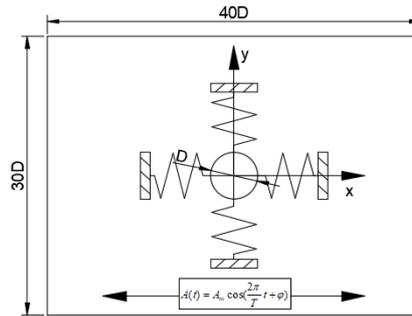


图.1 自由振动圆柱的计算域示意图

圆柱的主要参数可表示为: (1) 质量比: $m^* = m/m_d$, 其中 m 为圆柱的质量, $m_d = \rho g \pi D^2 / 4$ 为圆柱排开水的质量; (2) Keulegan-Carpenter (KC) 数: $KC = 2\pi \cdot A_m / D$; (3) 雷诺数: $Re = U_m D / \nu$, 其中 U_m 为圆柱顺流向振荡速度幅值, ν 为流体粘度; (4) 结构阻尼系数: $\zeta = c / (2\sqrt{km})$, 其中 c 为结构阻尼, k 为弹簧刚度。本文中的数值模拟, 圆柱均做 20 个周期的振荡运动。

2 结果与分析

2.1 网格收敛性验证

首先, 进行 $KC=3$ 时的网格收敛性分析, 确保计算结果与网格的尺度无关, 并选择合适的网格进行后续的数值模拟, 表 1 为三套网格的网格量和加密比。通过三套网格计算出的圆柱阻力系数曲线如图 2 所示, 从图中可以看出阻力系数的误差, 仅在圆柱运动到最左端或最右端并开始反向运动时出现。误差形成的原因, 可能是在端点处圆柱反向时会穿过前半个周期形成的尾涡区域, 使得圆柱周围的流场环境更为复杂, 从而造成了阻力的波动。因此, 使用普通网格进行计算能够满足需求, 圆柱周围的网格布置如图 2 所示。

从 Sarpkaya[2]的试验可知, 当 $KC=3$ 时每半个振荡周期内会有一对对称的漩涡产生并脱落, 此时圆柱的尾涡处于附着涡区间。整个振荡周期内, 无泄涡现象发生。当圆柱运动到端点位置时, 前半个振荡周期产生的一对对称的漩涡脱落。在圆柱开始反向运动时产生一对新的对称涡, 同时重复前半周期的现象, 最终形成一条对称的涡街, 如图 4 所示。同时, 圆柱表面内层漩涡的运动, 会使得上层漩涡“断裂”形成两个小的漩涡, 该现象在圆柱右侧的涡街更为明显。

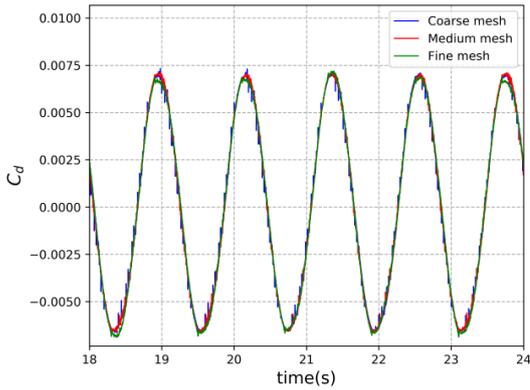


图2 阻力系数时历曲线

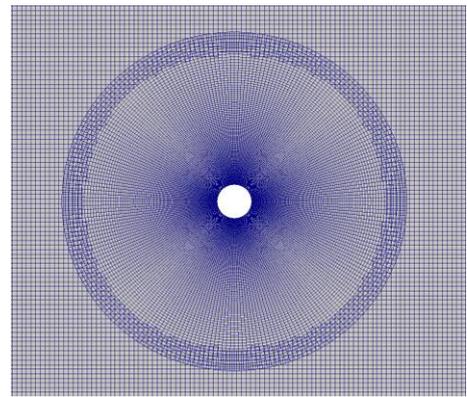


图3 圆柱周围的计算网格

表.1 三套网格的参数

	网格量	加密比
粗网格	0.0923M	/
普通网格	0.185M	1.4
细网格	0.374M	1.4

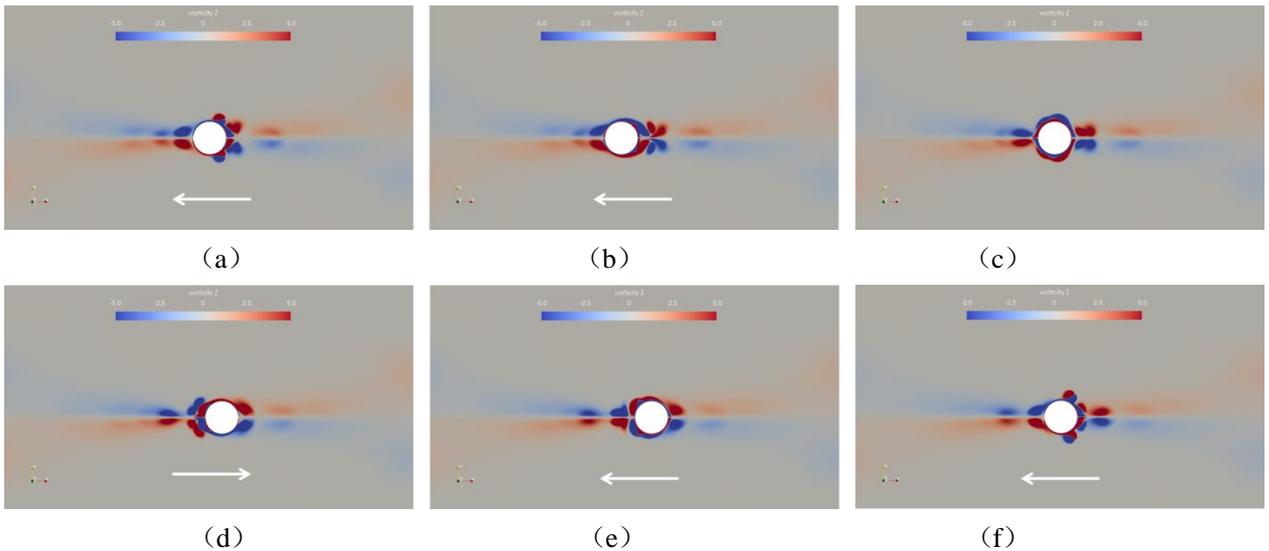


图4 一个振荡周期内的尾涡发展过程：(a) T=36.0s; (b) T=36.24s; (c) T=36.48s; (d) T=36.72s; (e) T=36.96; (f) T=37.2, 箭头代表圆柱的运动方向。

2.2 自由衰减试验

在本节中，给定自由振动的圆柱一个横向的初速度 0.4m/s，进行圆柱的横向自由衰减试验，并将结果与 Zhao^[4]等的数值模拟结果进行对比，验证给定弹簧刚度的正确性。自由衰减试验中，圆柱仅可进行横向振动。其中，质量比为 $m^* = 1.62$ ，结构阻尼比为 $\zeta^* = 0.012$ ，所取数值均参照 Zhao^[4]等的数值模拟。圆柱横流向振动的位移时历曲线如图 5 所示，从图中可知自由衰减周期为 1.26s，频率为 0.79Hz，与 Zhao^[4]等的结果对比，误差在在 3% 以内。因此本文后续数值模拟中，圆柱的自然频率为 0.79Hz。

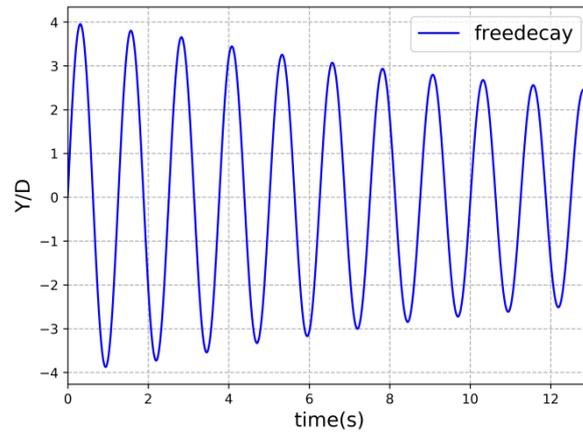


图5 静水中圆柱自由衰减横向位移时历曲线

2.3 KC=12

2.3.1 固定圆柱

当 $KC=12$ 时, 在每个振荡周期内圆柱表面均有泄涡现象发生, 每个周期内会有一对涡从圆柱上泄出, 并沿着垂直于圆柱运动轨迹方向运动。图 6 展示了一个振荡周期中, 圆柱尾涡的演化过程和对应时刻圆柱表面第一层网格的切向速度曲线。

当圆柱运动到最右端位置时, 如图 6 (a), 前半周期内产生的顺时针方向旋转的漩涡 A 从圆柱表面泄出。逆时针方向旋转的漩涡 B 绕圆柱表面由下表面运动至上表面, 同时一个新的漩涡 C 在圆柱上表面产生, 并沿圆柱表面向下方运动。当圆柱运动至最左端, 漩涡 B 从圆柱表面泄出, 并与漩涡 A 会和, 形成漩涡对, 并且此漩涡对沿着垂直于圆柱运动方向 90° 向圆柱上方传递, 如图 6 (c) 所示。同时, 漩涡 C 在此半周期内逐渐增强, 在圆柱下表面出现新的漩涡 D, 在接下来的半个振荡周期内, 漩涡 C、漩涡 D 的演化过程与漩涡 A、漩涡 B 相似。并且, 泄涡以及漩涡对传递方向仅发生在圆柱的一侧。

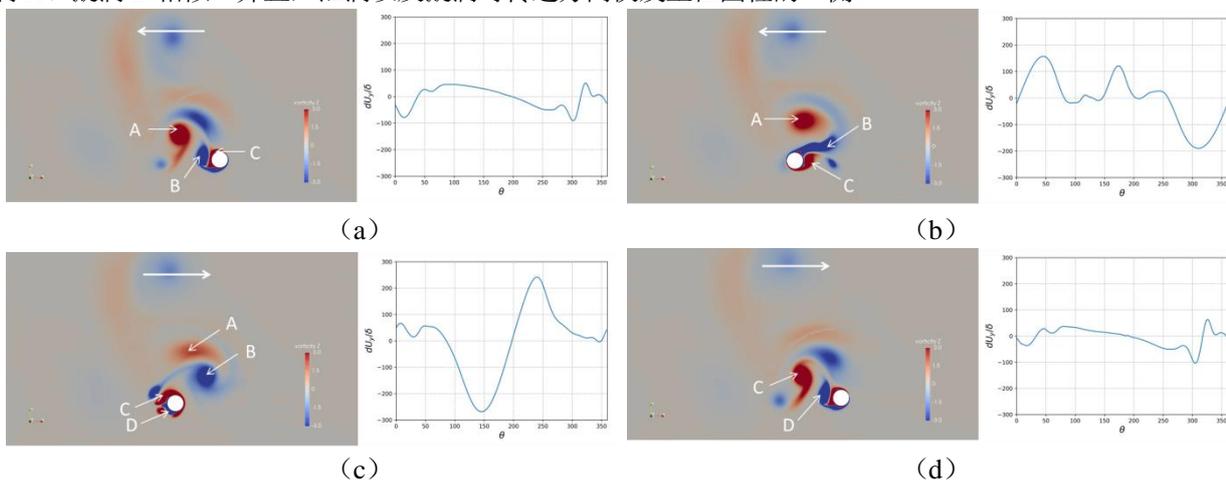


图6 一个振荡周期内尾涡的发展过程和分离点变化: (a) $T=75.6s$; (b) $T=77.2s$; (c) $T=78.8s$; (d) $T=80.4s$,
箭头表示圆柱的运动方向。

与不同时刻尾涡结构对应的圆柱表面第一层网格的切向速度曲线, 过零点分别表示了圆柱表面漩涡的分离点和驻点, 如图 7 所示。从图中可以发现驻点总是出现在朝向圆柱运动方向, 旋转方向相反的两漩涡交界处的圆柱表面。驻点会在圆柱运动至端点位置并且开始反向运动时, 随着漩涡沿圆柱表面移动到另一侧。同时, 从曲线图中的过零位置结合涡量图, 可以判断出漩涡分离的位置, 和新的漩涡产生的位置。曲线仅在圆柱运动到计算域中间, 即运动速度最大的位置会产生明显的切向速度差, 可以认为这期间圆柱表面的漩涡强

度在急剧增加，并在半周期的最后阶段出现泄涡现象。

2.3.2 自由振动圆柱

图7为自由振动圆柱横流向振动的位移时历曲线，图8为固定圆柱和自由振动圆柱的升力系数时历曲线。从图7和图8中可以发现，自由振动圆柱的横向振动位移曲线与升力系数曲线存在 180° 的相位差，即当圆柱横向运动至y轴正向时，产生的升力方向与运动方向相反，产生抑制圆柱朝横流向向外运动的力；当圆柱向y轴负方向运动时，产生的现象正好相反。从图8中可以看出，自由振动圆柱的升力系数明显大于固定圆柱，且具有明显的周期特性。这些说明了横流向的运动会加剧圆柱的升力，且会使得圆柱的升力系数以横向振动频率周期性变化。

图9展示了一个振荡周期中，圆柱尾涡的演化过程 and 对应时刻圆柱表面第一层网格的切向速度曲线。从圆柱表面涡量演化图中可以看出，自由振动圆柱的尾涡演化过程与固定圆柱的尾涡演化过程相似，且每个周期会由一对漩涡泄出并垂直于圆柱的运动方向向外传播。但是，由于圆柱横向振动的影响，使得圆柱表面的泄涡现象仅发生在圆柱的底部，与固定圆柱的尾涡泄出方向相反。图7和图9中的切向速度曲线具有一定的相似性，当圆柱运动到左右端点位置时，由于此时运动速度和横向振动幅度较小，则此时分离点和驻点位置相较于固定圆柱，无明显变化。而当圆柱通过计算域中心时，由于运动速度和横向振动幅值显著增大，使得圆柱表面的漩涡分离点和驻点位置，随着圆柱的横向运动而发生明显改变。

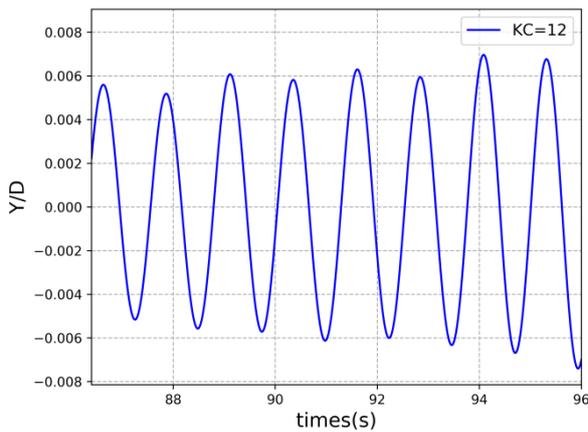


图.7 自由振动圆柱横流向振动时历曲线

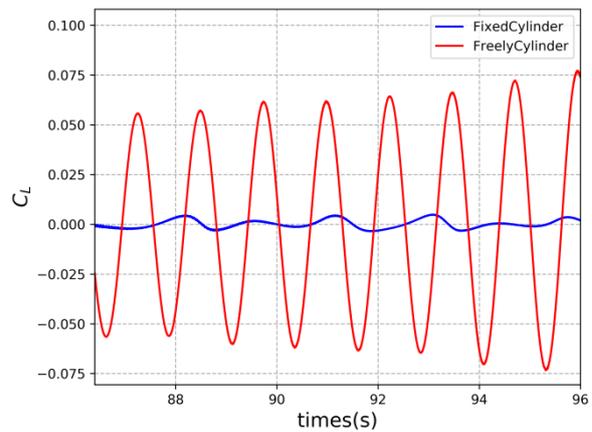


图.8 升力系数时历曲线

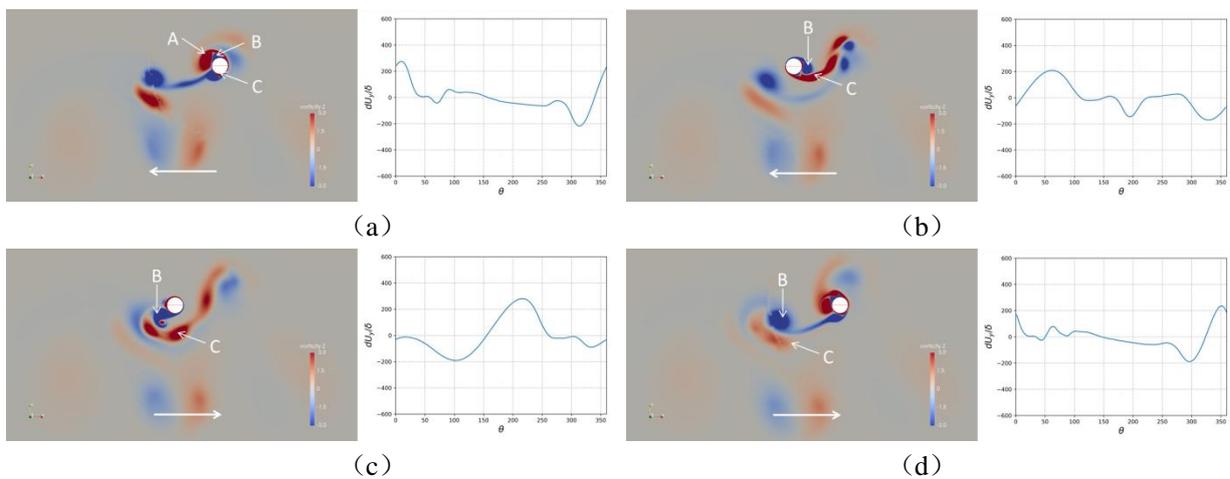


图.9 一个振荡周期内尾涡的发展过程和分离点变化：(a) $T=75.6s$; (b) $T=77.2s$; (c) $T=78.8s$; (d) $T=80.4s$, 箭头表示圆柱的运动方向。

3 结论

本文中, 振荡流中二维固定圆柱和自由振动圆柱的数值模拟采用自主开发的 CFD 求解器 naoeFOAM-SJTU, 并对比分析了圆柱的尾涡演化过程, 水动力系数和泄涡点的变化。

数值模拟结果表明, 由于横向振动的影响, 自由振动圆柱的升力系数明显大于固定圆柱。自由振动圆柱的升力曲线具有明显的周期性, 按照圆柱横向振动频率变化, 且和横向振动曲线存在 180° 的相位差。从尾涡的演化过程中可以看出, 横向振动对尾涡的传播方向有着显著影响。KC=12 时, 固定圆柱每个振荡周期内泄出一对涡, 且泄涡现象仅发生在圆柱上方, 尾涡延垂直于圆柱运动方向向上传播; 自由振动圆柱在每个振荡周期内也仅泄出一对涡, 而泄涡现象发生在圆柱的下方, 尾涡延垂直于圆柱运动方向向下传播, 与固定圆柱的尾涡轨迹相反。从圆柱表面第一层网格的切向速度曲线, 可以判断圆柱表面泄涡点和驻点的位置, 即其随圆柱运动的变化趋势, 并且可以从中观察到圆柱在反向运动初期新的漩涡产生的位置。

致谢

本文工作国家自然科学基金项目(51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划(T2014099)、上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022), 上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300), 以及工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目 (2016-23/09) 资助。在此一并表示衷心感谢。

参考文献

- [1] Williamson C., 1985. Sinusoidal flow relative to circular cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, 155, 141-174.
- [2] Sarpkaya T., 1986. Force on a circular cylinder in viscous oscillatory flow at low Keulegan—Carpenter numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 165, 61-71.
- [3] Sarpkaya T., 1995. Hydrodynamic damping, flow-induced oscillations, and biharmonic response. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 117, 232–238.
- [4] Zhao M., Cheng L., Zhou T., 2011. Numerical Investigation of Vortex-Induced Vibration (VIV) of a Circular Cylinder in Oscillatory Flow. ASME. International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE, Rotterdam, The Netherlands, pp 597-603.
- [5] Graham J., 1980. The forces on sharp-edged cylinders in oscillatory flow at low Keulegan—Carpenter numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 97(2), 331-346.
- [6] Nehari D., Armenio V., Ballio F., 2004. Three-dimensional analysis of the unidirectional oscillatory flow around a circular cylinder at low Keulegan—Carpenter and beta numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 520, 157-186.
- [7] Tatsuno M., Bearman P., 1990. A visual study of the flow around an oscillating circular cylinder at low Keulegan—Carpenter numbers and low Stokes numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 211, 157-182.
- [8] Obasaju E., Bearman P., Graham J., 1988. A study of forces, circulation and vortex patterns around a circular cylinder in oscillating flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 196, 467-494.
- [9] Honji, H., 1981. Streaked flow around an oscillating circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 107, 509-520.
- [10] Kozakiewicz A., Sumer B.M., Fredsøe J., Hansen E.A., 1996. Vortex regimes around a freely vibrating cylinder in oscillatory flow. Proceeding 6th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE, Los Angeles, US, pp490-498.
- [11] Zhirong Shen, Decheng Wan, 2013. RANS computations of added resistance and motions of a ship in head waves. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 23(4): 263–271.
- [12] Zhirong Shen, Decheng Wan, Pablo Carrica, 2015. Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering. *Ocean Engineering*, 108: 287–306.

作者简介:

邓迪, 男, 1994年2月, 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 博士研究生, 主要从事海洋立管涡激振动研究; 通讯地址: 上海市闵行区东川路800号上海交通大学闵行校区木兰船建大楼A608, 邮编: 200240, Email: Dengdi@sjtu.edu.cn

万德成, 男, 1967年9月, 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 长江学者特聘教授, 上海交通大学特聘教授, 博士生导师, 主要从事计算船舶水动力学、无网格粒子法、船型优化、浮式风机、流固耦合、涡激振动/运动等方面的研究。

通讯地址: 上海市闵行区东川路800号上海交通大学木兰船建大楼, 邮编: 200240, 电话: 021-34205697
Email: dcwan@sjtu.edu.cn