

引用格式: 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.
CHEN S T, ZHAO W W, WAN D C, et al. Numerical simulation of flows around a finite-length cylinder with free surface[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(1): 91-98.

带自由液面有限长圆柱 绕流数值模拟



扫码阅读全文

陈松涛^{1,2}, 赵伟文^{1,2}, 万德成^{*1,2,3}, 高洋洋³

1 上海交通大学 船海计算水动力学研究中心, 上海 200240

2 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240

3 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021

摘要: [目的] 为了探究自由液面及自由端对典型钝体绕流问题的影响, 对带自由液面的有限长圆柱绕流进行研究。[方法] 基于延时分离涡模拟 (DDES) 技术和分段线性界面重构 (PLIC) 方法, 利用自主开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器开展数值模拟。[结果] 结果显示, 自由液面和自由端的存在增大了局部位置的升、阻力, 推迟了圆柱表面流动分离的发生; 相较于深吃水位置, 自由液面附近流向的速度“恢复”延缓, 横向的速度呈向外运动的趋势; 自由液面的变形产生了大量细碎的漩涡, 自由端的卷拧状漩涡在一定程度上抑制了卡门涡街的发展。[结论] 研究表明, 目前采用的数值方法能够准确捕捉复杂流场, 同时, 自由液面和自由端的存在将显著改变流场沿吃水方向的分布。

关键词: 自由液面; 有限长圆柱; 延时分离涡模拟; 分段线性界面重构

中图分类号: U661.1

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02274

Numerical simulation of flows around a finite-length cylinder with free surface

CHEN Songtao^{1,2}, ZHAO Weiwen^{1,2}, WAN Decheng^{*1,2,3}, GAO Yangyang³

1 Computational Marine Hydrodynamics Laboratory, Shanghai Jiao Tong University,
Shanghai 200240, China

2 School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University,
Shanghai 200240, China

3 Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China

Abstract: [Objectives] In order to explore the influence of the free surface and free end on the flow field around typical bluff bodies, the flow field around a finite-length cylinder with a free surface is studied.

[Methods] Based on the delay detached-eddy simulation (DDES) approach and piecewise linear interface calculation (PLIC) method, our in-house solver naoe-FOAM-SJTU is adopted to carry out numerical simulations. [Results] The results show that the existence of the free surface and free end increases the lift and drag of local positions, and delays the occurrence of flow separation on the cylinder's surface. Compared with the deep draft region, the recovery of streamwise velocity near the free surface is delayed, and the transverse velocity tends to move outward. The deformation of the free surface generates many small vortices, and the twisted vortex at the free end restrains the development of the Kármán vortex street to a certain extent.

[Conclusions] This study shows that the current numerical methods can accurately capture this complex flow field. At the same time, the existence of the free surface and free end significantly changes the distribution of the flow field in the draft direction.

Key words: free surface; finite-length cylinder; delay detached-eddy simulation (DDES); piecewise linear interface calculation (PLIC)

收稿日期: 2021-01-21 修回日期: 2021-03-09 网络首发时间: 2022-02-17 16:15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51879159, 52131102, 51909160); 国家重点研发计划资助项目 (2019YFB1704200)

作者简介: 陈松涛, 男, 1997年生, 博士生。研究方向: 海洋平台涡激运动, 两相流数值模拟。E-mail: songtao.chen@sjtu.edu.cn

赵伟文, 男, 1990年生, 博士, 助理研究员。研究方向: 高雷诺数流动, 自由面流动数值方法, 涡激运动数值模拟。E-mail: weiwen.zhao@sjtu.edu.cn

万德成, 男, 1967年生, 博士, 教授。研究方向: 船海计算水动力学, 高性能计算, CFD 和 CAE 软件研发。
E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

高洋洋, 女, 1987年生, 副教授。研究方向: 海洋工程水动力学研究。Email: yygao@zju.edu.cn

*通信作者: 万德成

0 引言

随着海洋油气资源开发逐渐走向深远海,各类深海平台成为作业的主要装备。圆柱形结构作为典型的结构之一,被广泛应用于 Spar 平台、TLP 平台以及半潜式平台等深海结构物。在实际工程问题中,自由液面及自由端的存在极大地改变了结构物周围的流动特性,从而对结构强度等造成额外的影响。相较于单相圆柱绕流问题^[1-2],自由液面的引入会在圆柱前驻点位置形成液面抬升,在尾流区域内形成液面凹陷,在远场形成与船舶兴波问题中类似的 Kelvin 波系。因此,自由液面的变形、翻卷及破碎会在一定程度上改变流场的流动特性。相较于无限长圆柱绕流问题,在自由端附近产生的漩涡将会影响典型的卡门涡街结构,带来更为复杂的三维效应^[3-4]。

近年来,国内外许多学者采用模型试验和数值模拟的方法对该复杂问题展开了分析研究。Chaplin 和 Teigen^[5]在拖曳水池中对不同吃水下的圆柱以雷诺数 Re 与弗劳德数 Fr 之间的固定比值 ($Re/Fr=2.79\times 10^5$) 开展了模型试验,着重针对阻力系数和自由液面抬升进行了测量对比,发现圆柱前方的液面抬升与 Re/Fr 的取值范围有关。Potts 等^[6]通过拖曳试验对不同吃水比圆柱的水动力载荷和尾流场进行了分析,并采用 3 种不同的自由端形式进行了对比。Zhao 等^[7]在 $Fr=0.3$, $Re=4.2\times 10^4$ 工况下对带自由液面的无限长圆柱进行了数值模拟,并利用无因次化 Rortex/Liutex 涡识别方法从湍流结构的角度出发分析了自由液面给流动带来的影响,结果表明在自由液面附近的尾流区域,原本交替脱落的涡街结构受到了较强的抑制作用。Koo 等^[8]采用大涡模拟 (large eddy simulation, LES) 方法和 CLSVOF (coupled level set and volume of fluid) 界面捕捉方法分析了不同 Fr 和 Re 数下圆柱绕流的自由液面效应,并通过与单相流动的对比,从流动分离和自由液面形态等角度展开了讨论,发现 Fr 的影响更为明显,且在高 Fr 下在圆柱前方观察到了剧烈的波浪破碎现象。Rosetti 等^[9]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,并通过与实验的对比研究了自由液面及自由端的效应。Benitz 等^[10]针对 $Fr=0.65$, $Re=2\ 900$ 工况下的有限长圆柱,利用不同的湍流模型进行数值模拟,主要分析了吃水比对受力和泄涡形式的影响。然而,先前研

究所选取的工况均主要集中在低 Fr 和 Re 数。为了更好地研究其背后的规律和机理,需要借助数值模拟等手段对高 Fr 和 Re 数下的水动力特性进行分析与讨论。

本文拟基于延时分离涡湍流模型和分段线性界面重构 (PLIC) 几何类流体体积 (VOF) 法,利用自主开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器对 $Fr=1.1$, $Re=2.7\times 10^5$ 工况下带自由液面的有限长圆柱绕流开展数值模拟,并通过与实验测量的自由液面结果进行对比来验证求解器的可靠性。然后,在此基础上对不同吃水位置处的受力、速度、流动分离和尾涡分布等进行对比分析,探讨自由液面及自由端效应给流动带来的影响,从而为实际的工程问题提供指导。

1 数值方法

本文采用的基于开源代码框架 OpenFOAM 自主开发的求解器 naoe-FOAM-SJTU^[11],其可靠性和精确度已在船舶阻力试验^[12]、敞水螺旋桨试验^[13]、船-桨-舵干扰^[14]及海洋立管涡激振动 (VIV)^[15]/海洋平台涡激运动 (VIM)^[16]等一系列船舶与海洋工程水动力学问题中得到广泛验证。

1.1 控制方程

对于两相不可压缩黏性流动,其控制方程包括连续性方程和动量方程,可写成如下形式:

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

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

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; f_{σ} 为表面张力项; t 为时间。

1.2 湍流模型

为了精确模拟高 Re 数下的大分离湍流流动问题,本文采用基于剪切应力输运 (shear-stress transport, SST) 两方程模型^[17]的延迟分离涡模拟 (delay detached-eddy simulation, DDES) 技术。对于湍流流动,在工程实际应用中通常有 2 种方法: RANS 方法和 LES 方法。RANS 方法是 Navier-Stokes 方程作时均化处理,将湍流中的物理量分解为时间平均项和脉动项,通过引入涡黏模型或雷诺应力模型来对方程组进行封闭,由于其滤去了时间脉动项,导致在求解大分离流动时往往很难获得精细化的流场细节。LES 方法是利用滤波

函数将湍流运动分离成大尺度运动和小尺度运动,对于大尺度运动,直接进行求解,对于小尺度运动,则引入亚格子模型来模拟其对大尺度运动的影响,通常需要在空间上保证足够的网格分辨率以解析出高精度的湍流细节。本文采用的 SST-DDES 属于一种混合雷诺平均/大涡模拟 (hybrid RANS/LES) 方法,即在近壁面的边界层网格内采用 RANS 模式进行求解,在远离壁面的分离流动区域则采用 LES 模式进行求解。相比 LES, SST-DDES 大大降低了近壁面附近的网格分辨率,同时也保证了尾流区域内的求解精度。其输运方程包括湍流动能 k 和湍流耗散率 ω 方程,其形式如下:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k] + P_k - \frac{\rho k^{3/2}}{l_{DDES}} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \omega) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega] + \\ (1 - F_1) CD_{k\omega} + \alpha \frac{\rho}{\mu_t} P_k - \beta \rho \omega^2 \end{aligned} \quad (4)$$

式中: μ 为介质的分子动力黏度; μ_t 为涡流动力黏度; P_k 为湍流动能产生项; F_1 为一混合函数; $CD_{k\omega}$ 为一限制函数; σ_k , σ_ω , α , β 均为定常数; l_{DDES} 为 DDES 方法中的湍流长度,其定义如下:

$$l_{DDES} = l_{RANS} - f_d \max(0, l_{RANS} - C_{DES} \Delta) \quad (5)$$

式中: l_{RANS} 为 RANS 模式下的湍流长度; C_{DES} 为一混合常数; f_d 为延迟函数; Δ 为网格尺度。相较于原始的分流涡模拟 (detached-eddy simulation, DES), DDES 引入了延迟函数 f_d , 可避免在近壁面处过早地从 RANS 模式切换到 LES 模式,定义如下:

$$f_d = 1 - \tanh[(C_{d1} r_d)^{C_{d2}}] \quad (6)$$

$$r_d = \frac{\nu_t + \nu}{\kappa^2 d_w^2 \sqrt{0.5 \cdot (S^2 + \Omega^2)}} \quad (7)$$

式中: r_d 为延迟因子; d_w 为到壁面的距离; S 为应变率张量; Ω 为涡量; ν 为介质的分子运动黏度; ν_t 为涡流运动黏度; κ 为 von Karman 常数; C_{d1} 和 C_{d2} 为定常数。相关参数的具体定义和取值可参照文献 [18-19]。

1.3 界面捕捉方法

为了更好地捕捉该复杂流动中剧烈变化的自由液面,本文采用了 OpenFOAM v8 版本中最新植入的 PLIC 几何类 VOF 方法^[20],其基本思想是:通过单个平面将网格单元切分成 2 部分,满足每一时间步初始的相体积分,并以此得到各个面的相体积分通量,从而保证在求解相体积分输运方程时的精确性。图 1 展示了该方法的二维示意图

意图,其主要流程为:

- 1) 判断网格相体积分 α_v , 若满足 $0 < \alpha_v < 1$, 则进行切割;
- 2) 将需要进行切割的网格相体积分 α_v 通过各顶点与网格中心处距离的倒数,插值得到各顶点的体积分 α_p ;
- 3) 根据各顶点体积分 α_p 的情况,判断平面切割的位置,得到线性切割平面,如图 1 中黑色虚线所示;
- 4) 将切割得到的浸没部分体积①除以网格体积②,得到相体积分 α'_v ;
- 5) 若满足 $|\alpha'_v - \alpha_v|/\alpha_v \leq 10\%$, 得到各个面的相体积分通量;若不满足,则转而采用基于界面压缩的代数类 VOF 方法进行求解。

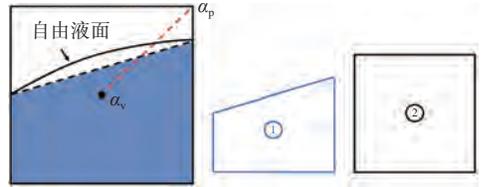


图 1 分段线性界面重构方法二维示意图

Fig. 1 Two-dimensional diagram of PLIC method

相比 OpenFOAM 以往采用的基于界面压缩的代数类 VOF 方法,该方法提高了通量的计算精度,且同时能够避免当压缩系数设定过大时界面失真的问题。相比传统的 PLIC 方法,其在拓展应用于三维非结构化复杂网格时,编程实现的复杂程度降低,且同时能够与代数类方法进行结合,在一定程度上保证了求解复杂问题时的鲁棒性,适用于一般的工程实际问题。

2 计算模型

本文参照美国爱荷华大学水利学研究所 (IIHR) 于 2015 年开展的拖曳水池实验^[21],选取长径比 $L/D=6$ (其中 L 为圆柱长, D 为圆柱直径) 的圆柱作为研究对象。为了更好地体现自由液面对流动的影响,本文从中选取了 $Fr=1.1$, $Re=2.7 \times 10^5$ 的工况进行数值模拟。其中,均匀来流速度 U_∞ 参照实验中的拖车速度设置为 1.54 m/s。在此基础上,水的密度为 1000 kg/m^3 ,运动黏度为 $1.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; 空气的密度为 1 kg/m^3 ,运动黏度为 $1.48 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

本文采用的计算域大小为 $40D \times 30D \times 10D$, 如图 2 所示,其中圆柱置于水平面中心,吃水 $h=4D$ 。图 3 展示了本文采用的计算网格,由 OpenFOAM 自带的 snappyHexMesh 工具绘制而成,总数量为 8.3×10^6 。其中,图 3(a) 展示的是沿 $x-z$ 平面方向的整体布局,图 3(b) 中的红色框线代表 $x-y$ 平面

上的局部加密区域,图3(c)进一步展示了近圆柱表面的分级加密情况。圆柱表面共布置了8层边界层网格,离壁面最近一层的网格高度满足 $y^+ < 1$ 。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,在相应关注的区域进行了局部加密。

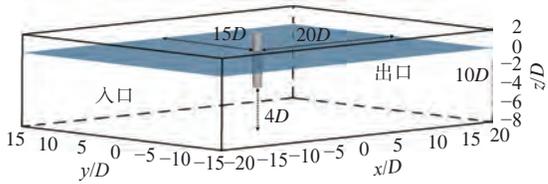
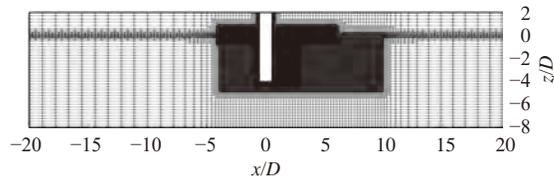
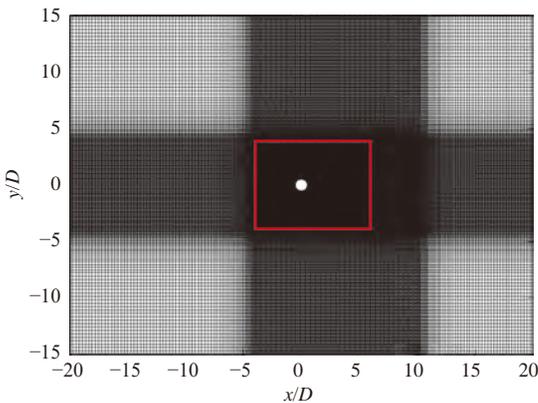


图2 计算域

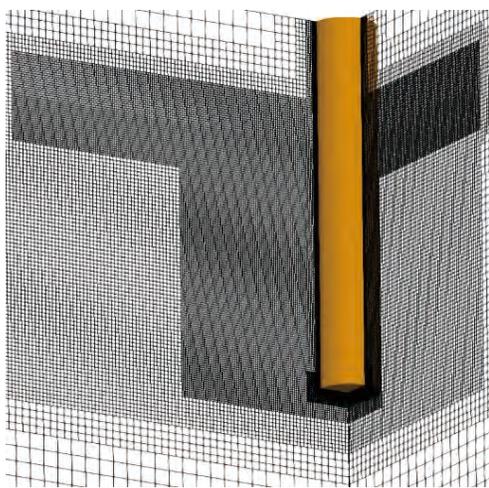
Fig. 2 Computational domain



(a) x-z 平面网格剖面图



(b) x-y 平面网格剖面图



(c) 近圆柱表面网格

图3 计算网格

Fig. 3 Computational grids

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。圆柱表面设置为无滑移边界条件,底部设置为对称边界

条件,两侧及顶部均设置为零梯度边界条件。时间步长为 $2 \times 10^{-3} D/U_\infty$,满足最大库朗数 Co 始终小于1的要求。数值模拟的总时间为 $tU_\infty/D = 120$,取稳定的后半部分进行数据分析。

3 结果与分析

3.1 自由液面抬升

相比传统的单相圆柱绕流问题,自由液面的引入使流动变为气-液两相流动。在一定来流速度下,自由液面会在圆柱前方产生抬升,在后方产生凹陷。图4所示为不同纵剖面位置处的平均自由液面抬升结果,图5所示为平均自由液面的等高线图(图中 $y = 0$ 分割线以上的部分为实验数据,以下部分为本文数值模拟结果)。由图4和图5可知,数值模拟结果与实验值^[21]吻合良好,对于圆柱前方的液面抬升,峰值误差在3%以内,能够很好地捕捉自由液面的变化情况,验证了求解器的可靠性。

3.2 升阻力系数

式(8)和式(9)给出了两相流下圆柱升、阻力系数的公式。为了更好地反映自由液面和自由端对于圆柱升、阻力在吃水方向上的影响,在数值模拟过程中将圆柱沿垂向(z 方向)均分为了 n 份,每一份的长度为 $\Delta h = h/n$ (不应小于圆柱表面网格的最小尺度),每一份的受力为 ΔF ,在式(8)

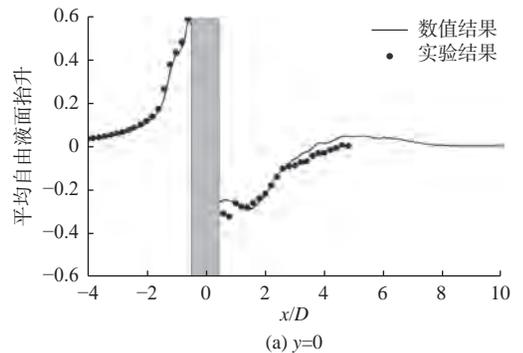
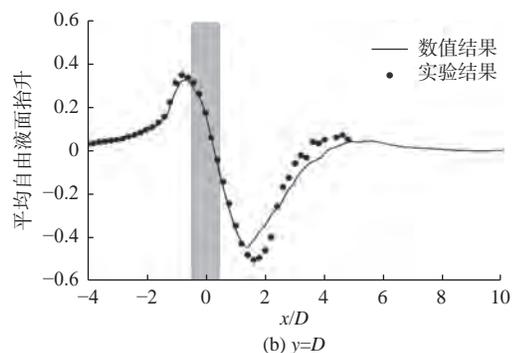
(a) $y=0$ (b) $y=D$

图4 平均自由液面抬升剖面图

Fig. 4 Profiles of the time-averaged free surface elevation

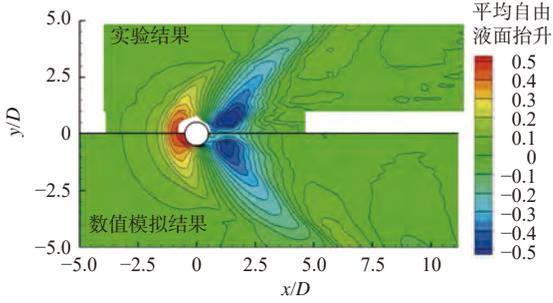


图 5 平均自由液面等高线图

Fig. 5 Contour lines of the time-averaged free surface elevation

和式(9)中替换掉原有的 F 和 h 后,即可得到不同吃水深度位置处的升、阻力系数。

$$C_d = \frac{F_d}{1/2\rho U^2 Dh} \quad (8)$$

$$C_l = \frac{F_l}{1/2\rho U^2 Dh} \quad (9)$$

式中: C_d 为阻力系数; C_l 为升力系数; F_d 为阻力; F_l 为升力。

图 6 和图 7 所示分别为圆柱的平均阻力系数和升力系数均方根随吃水变化的曲线,图 8 和图 9 所示为 3 个不同吃水深度的升、阻力时历曲线。由图 6 可以看出,平均阻力曲线在自由液面($x=0$)及自由端位置($x=-4$)附近存在 2 个峰值,这可结合流场中的压力与速度进行解释。图 10 所示为圆柱表面的时均压力系数云图(图中, C_p 为时均压力系数)。从图 10 中可以看出,圆柱后方产生的液面落差使得压差相比吃水较深的位置更为明显。图 11 所示为流场 $x-z$ 平面时均流向速度分布云图(图中, \bar{U}_x/U_∞ 为无因次化时均流向速度)。自由端的存在使得端部的局部速度增大,且存在明显的上洗趋势,故而在一定垂向范围内改变了圆柱表面的低压区域分布。从图 7 可以看出,升力系数均方根仅在自由端附近存在 1 个明显的峰值,这可结合下文的尾涡分析来看,这是因为该工况下较为剧烈的液面变形使得自由液面附近的泄涡形式变得复杂,不再类似于单相流动中交替脱落的卡门涡街。而对自由端而言,其端部额外产生的泄涡则增强了该位置附近的升力波动。从瞬时角度出发,图 8 和图 9 首先定性地验证了上述时均数据的准确性,同时还可以额外发现,随着吃水位置逐渐靠近自由端,升阻力系数的波动幅值均得到了极大的增加,表明该区域的流动存在着较强的三维瞬时特性。

3.3 速度分布

图 12 给出了圆柱近尾流场中不同横剖面位

置处的无因次化时均流向(x 方向)和横向(y 方向)速度分布。从图中可以看出,与深吃水位置相比,自由液面的存在延缓了顺流向的速度“恢复”,且在远离圆柱后方的一定区域内仍然有着较大的速度“损失”范围。同时,横向速度分布显

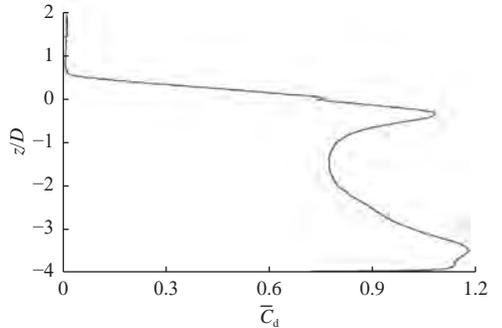


图 6 平均阻力系数曲线

Fig. 6 Profile of the time-averaged drag coefficient

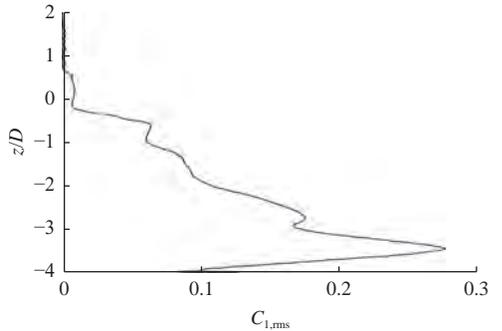


图 7 升力系数均方根曲线

Fig. 7 Root-mean-square profile of the lift coefficient

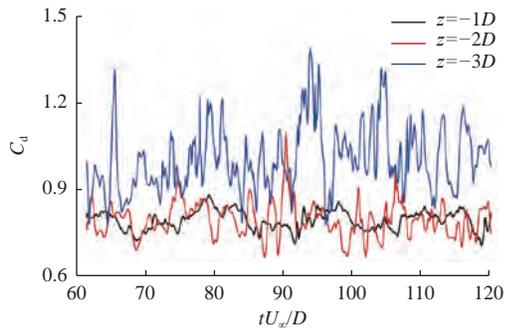


图 8 不同深度阻力系数时历曲线

Fig. 8 Time histories of drag coefficient at different depths

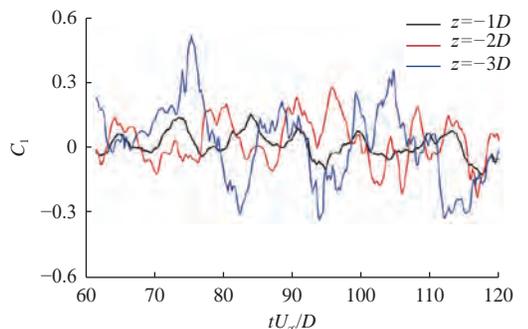


图 9 不同深度升力系数时历曲线

Fig. 9 Time histories of lift coefficient at different depths

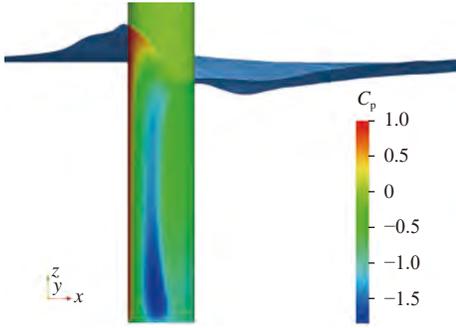


图 10 圆柱表面时均压力系数图

Fig. 10 Time-averaged pressure coefficients of cylinder surface

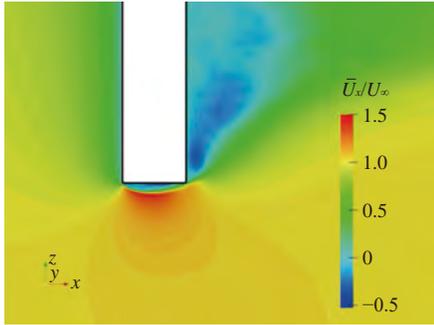


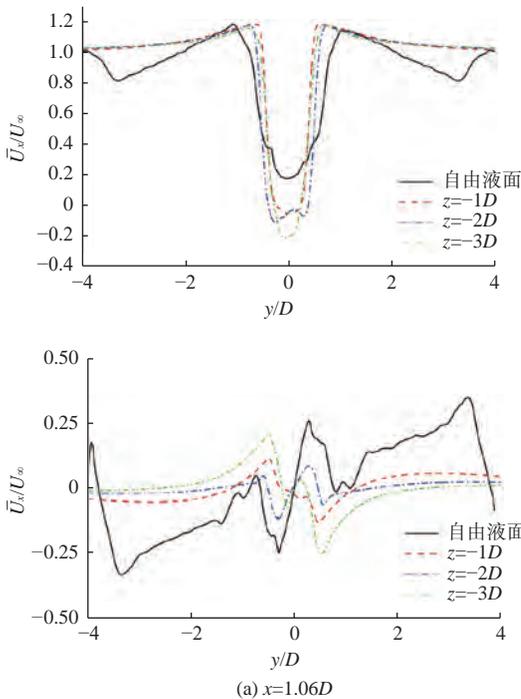
图 11 x-z 平面时均流向速度图

Fig. 11 Time-averaged streamwise velocity on x-z plane

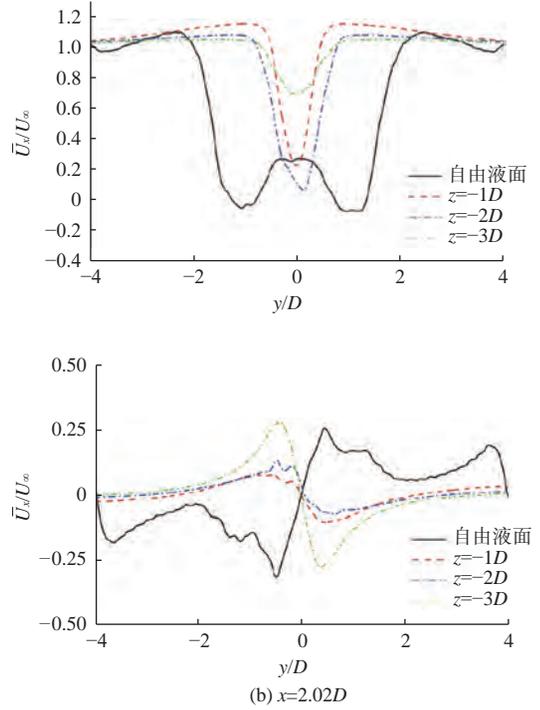
示,在近自由液面附近,流体呈现出向外侧运动的趋势,与吃水较深位置处的正好相反。这说明自由液面的引入在一定程度上改变了其附近的流动特性,今后需要与深吃水位置区分开来单独予以讨论。

3.4 流动分离

图 13 所示为圆柱表面不同吃水位置处的时均速度梯度曲线,其中迎流方向的前驻点位置定



(a) $x=1.06D$



(b) $x=2.02D$

图 12 时均速度剖面曲线

Fig. 12 Profiles of the time-averaged velocity

义为 0° 。从图中可以看出,圆柱表面的分离角 θ 随吃水呈先减小后增大的趋势。为了更好地分析该现象,图 14 给出了圆柱表面不同吃水位置处的时均压力系数曲线。从图中可以看出,随着吃水的增加,圆柱表面前半部分的正压梯度逐渐增大。相应地,这对于靠近自由液面的吃水位置处

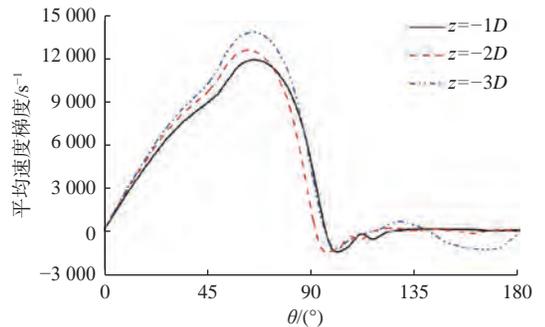


图 13 时均速度梯度曲线

Fig. 13 Profiles of the time-averaged velocity gradient

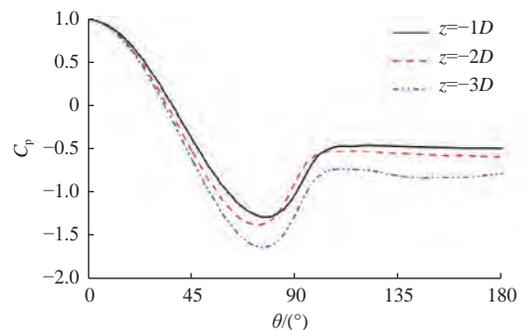


图 14 时均压力系数曲线

Fig. 14 Time-averaged pressure coefficient profiles

($z=-1D$), 减小了其后半部分的逆压梯度, 从而延迟了流动分离的发生。对于靠近自由端的吃水位置处($z=-3D$), 虽然其前半部分的正压梯度较大, 但其背部的低压区域较其余位置也更为显著, 使得压力恢复减缓, 这同样导致了逆压梯度的减小。

3.5 尾涡分析

图 15 所示为自由液面及不同吃水位置处的瞬时垂直涡量(ω_z)云图, 选取的时刻为 $tU_\infty/D = 120$ 。从图中可以看出, 自由液面上的自由剪切层在圆柱后方呈向外扩张的形式, 这与 3.3 节中提到的横向速度分布规律相符合。同时, 在自由液面上

占主导的是由液面变化产生的细碎漩涡。随着吃水的增加, 自由剪切层不再主要受自由液面的影响, 逐渐向内侧收缩, 且此时能够在尾流场发现交替脱落的卡门涡街。但随着吃水位置逐渐靠近自由端, 垂直涡量不再沿顺流向传播, 而是主要集中于圆柱背部。图 16 所示为采用无因次化 Rortex/Liutex 涡识别方法^[22]绘制的圆柱尾流场三维涡结构图。相比其他传统的涡识别方法, Rortex/Liutex 涡识别方法能够更好地排除剪切运动的“污染”, 且能同时捕捉尾流场中的强弱涡。从图 16 中可以看出, 自由端产生的卷拧状漩涡从端部脱落后斜向上运动, 这在一定程度上抑制了卡门涡街沿顺流向的发展。

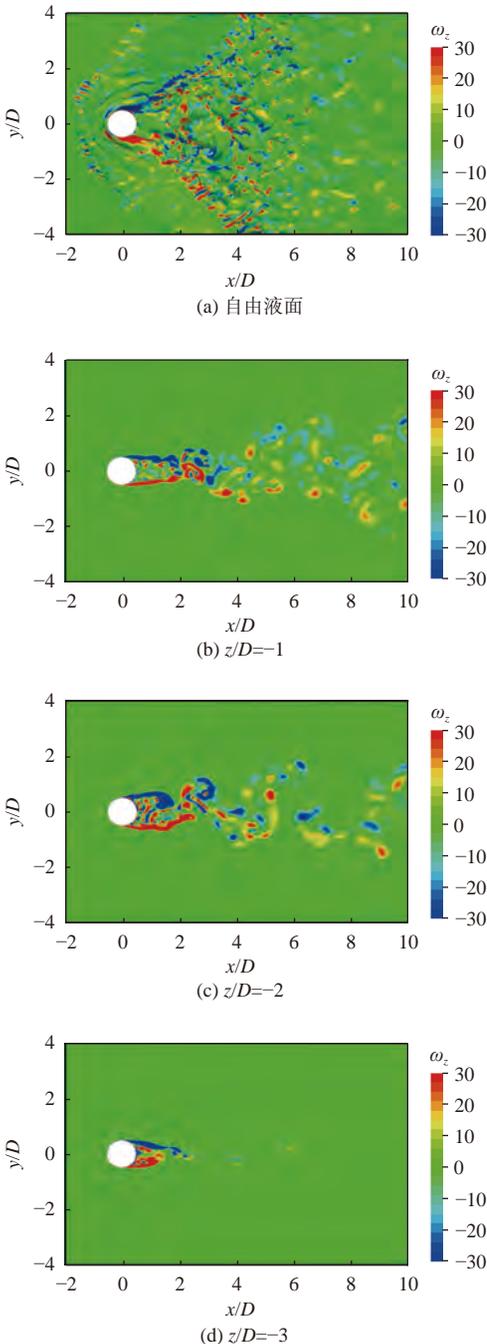


图 15 瞬时垂直涡量云图

Fig. 15 Instantaneous vertical vorticity

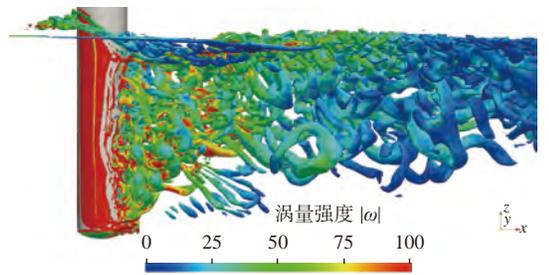


图 16 瞬时涡结构

Fig. 16 Instantaneous vortical structure

4 结 论

本文利用自主开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器, 对带自由液面的有限长圆柱绕流进行了数值模拟。在湍流模型上, 选择 SST-DES 方法, 在自由液面捕捉上, 采用 PLIC 几何类 VOF 方法。通过将自由液面抬升与实验结果进行对比, 验证了求解器的可靠性, 并对不同位置处的受力、速度、流动分离和尾涡分布进行了分析, 主要得到如下结论:

1) 自由液面和自由端的存在使得平均阻力系数沿吃水方向存在 2 个对应的峰值, 其主要原因是圆柱前后液面落差形成的压差和经端部加速后的上洗流动; 升力系数均方根仅在自由端附近存在 1 个明显的峰值, 其主要原因是较为剧烈的液面变形抑制了泄涡的产生, 而端部则产生了明显的卷拧状漩涡。

2) 自由液面的引入使得流向速度相比深吃水位置“恢复”延缓, 并使横向速度呈现出明显向外侧流动的分佈趋势, 后面的瞬时涡量云图则从侧面验证了这一点。

3) 圆柱表面的流动分离在自由液面和自由端的双重作用下, 均由于逆压梯度的减小呈向后延迟的变化规律, 前者与前半部分减小的正压梯

度有关,后者则与背部的低压区域有关。

4) 基于无因次化 Rortex/Liutex 涡识别方法,自由液面上占主导的为自由液面变化产生的细碎漩涡,而自由端产生的卷拧状漩涡则在一定程度上抑制了卡门涡街沿流向的发展。

这说明在实际工程问题中,自由液面和自由端的存在会使流动特性发生较大变化,这就需要根据实际情况分析所带来的影响。目前,本文仅对单个工况进行了数值模拟来验证该计算模型的准确性,今后还需继续补充不同工况下的计算,以进行系统化的对比研究。

参考文献:

- [1] WILLIAMSON C H K. Vortex dynamics in the cylinder wake[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1996, 28(1): 477-539.
- [2] 端木玉, 万德成. 雷诺数为 3 900 时三维圆柱绕流的大涡模拟 [J]. 海洋工程, 2016, 34(6): 11-20.
DUAN M Y, WAN D C. Large-eddy simulation of the flow past a cylinder with $Re=3\ 900$ [J]. Ocean Engineering, 2016, 34(6): 11-20 (in Chinese).
- [3] KRAJNOVIĆ S. Flow around a tall finite cylinder explored by large eddy simulation[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2011, 676: 294-317.
- [4] 王晓聪, 桂洪斌, 刘洋. 三维有限长圆柱绕流数值模拟 [J]. 中国舰船研究, 2018, 13(2): 27-34.
WANG X C, GUI H B, LIU Y. Numerical Simulation of three-dimensional flow around a circular cylinder of finite length[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018, 13(2): 27-34 (in Chinese).
- [5] CHAPLIN J R, TEIGEN P. Steady flow past a vertical surface-piercing circular cylinder[J]. Journal of Fluids and Structures, 2013, 18(3/4): 271-285.
- [6] POTTS D A, BINNS J R, MARCOLLO H, et al. Hydrodynamics of towed vertical surface-piercing cylinders[C]//Proceedings of the 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Glasgow, Scotland, UK: ASME, 2019: 95109.
- [7] ZHAO W W, WAN D C, ZHAO S X. CFD simulation of two-phase flows past a surface-piercing circular cylinder[C]//Proceedings of the 30th International Ocean and Polar Engineering Conference. Shanghai, China: ISOPE, 2020: 1780-1785.
- [8] KOO B, YANG J M, YEON S M, et al. Reynolds and Froude number effect on the flow past an interface-piercing circular cylinder[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2014, 6(3): 529-561.
- [9] 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 experiment[C]//Proceedings of the 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Nantes, France: ASME, 2013: 10963.
- [10] 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.
- [11] WANG J H, ZHAO W W, WAN D C. Development of naoe-FOAM-SJTU solver based on OpenFOAM for marine hydrodynamics[J]. Journal of Hydrodynamics, 2019, 31(1): 1-20.
- [12] ZHAO S, YE H X, SHEN Z R, et al. Numerical computations of resistance of high speed catamaran in calm water[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2015, 26(6): 930-938.
- [13] ZHAO M S, ZHAO W W, WAN D C. Numerical simulations of propeller cavitation flows based on OpenFOAM[J]. Journal of Hydrodynamics, 2020, 32(6): 1071-1079.
- [14] SHEN Z R, WAN D C, CARRICA P M. Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering[J]. Ocean Engineering, 2015, 108: 287-306.
- [15] DUANMU Y, ZOU L, WAN D C. Numerical analysis of multi-modal vibrations of a vertical riser in step currents[J]. Ocean Engineering, 2018, 152: 428-442.
- [16] ZHAO W W, ZOU L, WAN D C, et al. Numerical investigation of vortex-induced motions of a paired-column semi-submersible in currents[J]. Ocean Engineering, 2018, 164: 272-283.
- [17] MENTER F R, KUNTZ M, LANGTRY R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model[M]//HANJALIĆ K, NAGANO Y, TUMMERS M J. Turbulence, Heat and Mass Transfer 4. Washington: Begell House, Inc., 2003: 625-632.
- [18] GRITSKEVICH M S, GARBARUK A V, SCHÜTZE J, et al. Development of DDES and IDDES formulations for the $k-\omega$ shear stress transport model[J]. Flow Turbulence Combust, 2012, 88(3): 431-449.
- [19] 赵伟文, 万德成. 用 DES 分离涡方法数值模拟串列双圆柱绕流问题 [J]. 应用数学和力学, 2016, 37(12): 1272-1281.
ZHAO W W, WAN D C. Detached-eddy simulation of flow past tandem cylinders[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2016, 37(12): 1272-1281 (in Chinese).
- [20] YOUNGS D L. Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion[M]//MORTON K W, BAINES M J. Numerical Methods for Fluid Dynamics. New York: Academic Press, 1982: 273-285.
- [21] STERN F. Integrated high-fidelity validation experiments and les for a surface-piercing truncated cylinder for sub and critical Reynolds and Froude numbers[C]//NATO Specialist Meeting, 2016.
- [22] ZHAO W W, WANG J H, WAN D C. Vortex identification methods in marine hydrodynamics[J]. Journal of Hydrodynamics, 2020, 32(2): 286-295.