

直立圆柱波浪爬升 HOS-CFD 数值模拟

韩勃, 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, *通讯作者 Email: dcwan@sjtu.edu.cn)

摘要: 对于处在极端海况下的海洋工程结构物, 准确预报水动力性能对其设计的安全性和经济性具有重要意义。规则波中的单个固定直立圆柱背流侧, 流场受到波浪和圆柱之间的非线性相互干扰严重。势流方法不能考虑黏性导致的流动分离以及高阶波浪可能带来的影响, 而全黏性 CFD 求解又需要大量的计算时间和空间资源。

本文基于全黏性 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU, 结合高阶谱方法(HOS), 在保证对圆柱周围流场高精度计算的同时减少了所需的计算时间和空间需求, 对单个直立截断固定圆柱在规则波作用下的波浪爬升进行了数值模拟, 把圆柱周围波面爬升的计算结果与全黏性 CFD 求解计算结果进行了比较, 并通过 Fourier 变换分析了各阶波浪对波面爬升的影响。对比了结合 HOS-CFD 时与全黏性 CFD 方法所求解圆柱周围的流场与计算速度, 并讨论了在势流计算域中黏性计算域的合适尺寸问题。

关键词: 直立圆柱; 高阶谱方法 HOS; 数值波浪水池; CFD ; 波浪爬升

1 引言

对海洋结构物设计而言, 安全一直以来都是至关重要的问题。海洋结构物一般难以接受事故的发生, 因此从设计的角度上, 它就应该能在最恶劣的海况下存活。石油和天然气平台都应该留有充足的气隙, 以避免波浪对甲板处上部结构以及设备的冲击载荷。对于浮式结构物而言, 要最大限度地减小平台对波浪的响应运动, 以减轻立管以及钻柱所受的疲劳载荷, 尽可能避免它们可能会发生的疲劳损坏。

波浪状态和波浪力预报的准确性就成为了海洋结构物设计的关键问题。虽然势流求解器具有计算时间短、计算收敛所需网格数量少等优点, 但是对于黏性效应较为关键的情况, 特别是在模拟波陡较大以及具有波浪破碎的现象时, 势流求解器模拟的局部非线性自由面正确性将面临巨大的挑战。而对于 CFD 求解器而言, 虽然可能需要投入大量的计算资源, 但是它可以考虑黏性效应, 并且可以对自由面的大变形进行模拟, 进而提供更为准确的预

报。而高阶谱数值波浪水池(HOS-NWT)能够在保证快速收敛和高精度的情况下高效生成目标非线性波浪, 因此为了缓解全黏性 CFD 求解需要大量计算时间和空间资源的问题, 可以考虑在求解的过程中将 CFD 求解器和高阶谱方法(HOS)相结合。

本文研究目的在于评估将全黏性 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU 以及与 HOS-CFD 相结合方法分别应用于规则波中的海洋结构物时的表现。本文研究了在规则波中的单个固定直立截断圆柱周围波浪爬升情况, 对比了流场与计算速度, 并考虑了不同黏流计算域方案带来的影响。

2 数值方法

2.1 通过高阶谱数值波浪水池 (HOS-NWT) 造波

HOS-NWT 是法国南特中央理工学院 LHEEA 实验室研究、设计并发布的一种基于高阶谱方法在数值水池中对非线性波浪进行模拟的求解器。

高阶谱方法是一种基于势流理论的方法, 适用于对由无黏性、不可压缩流体运动所产生的无旋度流场进行研究。势流理论是通过满足 Laplace 方程的速度势 $\Phi(x, y, z, t)$ 来描述流场的流动的。本文通过 HOS-NWT 对目标工况的规则波进行模拟求解, 那么就要在计算中将速度势 Φ 分解为

$$\Phi(x, y, z, t) = \Phi^{spec}(x, y, z, t) + \Phi^{add}(x, y, z, t) \quad (1)$$

式中, Φ^{add} 为由造波板运动所产生的速度势;

Φ^{spec} 为无造波板情形下的速度势, 其在自由面处的情形定义为

$$\Phi^s(x, y, t) = \Phi^{spec}(x, y, \eta, t) \quad (2)$$

式中, $\eta(x, y, t)$ 为自由面高度, 势流理论的前提要求它是一个连续的函数。

将式(2)代入自由面的运动学和动力学边界条件, 得

$$\begin{aligned} \eta_t + \nabla(\Phi^s + \Phi^{add}) \cdot \nabla \eta - \partial_z \Phi^{add} - (1 + \nabla \eta \cdot \nabla \eta) \Phi_z(x, y, \eta, t) &= 0 \\ \Phi_t^s &= -\eta - \frac{1}{2} |\nabla \Phi^s|^2 - \frac{1}{2} (1 + |\nabla \eta|^2) W^2 - \nabla \Phi^s \cdot \nabla \Phi^{add} - \frac{1}{2} |\tilde{\nabla} \Phi^{add}|^2 - \Phi^{add}_t - \nu \eta_t \end{aligned} \quad (3)$$

式中, W 为自由面处的垂向速度; $\tilde{\nabla} \Phi^{add}$ 为自由面处附加速度势的水平梯度; ν 为造波板的水平速度。

对于确定的造波板运动，各边界条件均已知，则两部分速度势均可以求解

$$\Phi^{add} \Rightarrow \begin{cases} \Delta \Phi^{add} = 0, & \text{在计算域之中;} \\ \partial_n \Phi^{add} = 0, & x = L_x; y = 0, L_y; z = -h; \\ \partial_x \Phi^{add} + \nabla_{\nu} X \cdot \nabla_{\nu} \Phi^{add} = \partial_t X \partial_x \Phi^{spec} - \nabla_{\nu} X \cdot \nabla_{\nu} \Phi^{spec}, & x = X(y, z, t). \end{cases} \quad (4)$$

$$\Phi^{spec} \Rightarrow \begin{cases} \Delta \Phi^{spec} = 0, & \text{在计算域之中;} \\ \partial_n \Phi^{spec} = 0, & x = 0, L_x; y = 0, L_y; z = -h; \\ \text{自由表面边界条件, 同式(3)} & z = \eta(x, y, t). \end{cases} \quad (5)$$

式中， L_x 为计算域 x 方向的尺寸； L_y 为计算域 y 方向的尺寸； h 为水深。

详细的求解算法在 Ducroz et al.^[1] 的工作中有具体的介绍，本文不再赘述。

2.2 基于 Navier-Stokes 方程对黏性流场进行求解

本文为精确模拟圆柱周围的流场，在其周围的一定范围内，采用基于开源软件 OpenFOAM 开发的黏性波浪求解器 waves2Foam，采用有限体积法(FVM)对计算域进行空间离散，并对 Navier-Stokes 方程进行求解。控制方程具体形式为

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\nabla \mathbf{u}) \mathbf{u} = -\nabla p_d - (\mathbf{g} \cdot \mathbf{x}) \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{f}_\sigma \quad (7)$$

式中， p_d 为流场动压力； μ 为流体动黏性系数。

OpenFOAM 通过流体体积法 (VOF 法) 捕捉自由面信息，主要通过体积分数 α 进行控制。在通过 PISO 算法 (Pressure Implicit Splitting Operator algorithm, 压力隐式算子分裂算法) 求解速度场后，就可以对体积分数 α 由输运方程进行这个时间步下的计算

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u} \alpha + \nabla \cdot \mathbf{u}_r \alpha (1 - \alpha) = 0 \quad (8)$$

式中， $\mathbf{u}_r$ 为流体质点与其所在网格之间的相对速度。然后通过体积分数 α 对自由面位置进行判断，最终获得黏性波浪信息。

2.3 势流与黏流计算模型的耦合

本文采用 SWENSE (Spectral Wave Explicit Navier-Stokes Equations) 模型^[2]，以 HOS-NWT 造波的结果作为输入，导入 waves2Foam 中求解绕射问题，并在 waves2Foam 中设置松弛区，建立单向耦合模型，即仅将 HOS-NWT 中的流场信息单向传递到黏性域中，而黏性域中的信息不会对势流域的流场造成干扰。由于 HOS-NWT 与 OpenFOAM 编写语言不同，以及波浪场重构、时间和空间的插值等问题，所以需要通过接口模块 Grid2Grid 来实现二者之间的信息交流。

3 计算模型设定

本文的计算模型为一个在水中固定的直立截断圆柱，本研究主要通过进行实尺度的模拟计算来分析规则波流过圆柱时的自由面波浪爬升情况。圆柱的主要尺度以及规则波参数如表 1 所示。

表 1 计算模型及工况主要参数

参数名称	参数值
模型直径 d/m	16
模型吃水 D/m	24
波长 L/m	76.44
波高 H/m	4.7775
周期 T/s	7

由于势流计算域内可以通过 HOS-NWT 进行快速求解，所以为了使波浪充分发展，也尽可能避免边界对圆柱周围流场产生影响，本文选取了水平方向足够大的势流计算域，而竖直方向上为了满足两种计算域水底边界条件的一致性，就选取了和黏流计算域相同的尺寸。研究黏性计算域的尺寸对流场模拟效果的影响，本文采用两套黏性计算域对该工况进行模拟计算。坐标系原点设于直立截断圆柱的对称轴与静水面的交点处， z 轴正方向与圆柱的母线平行且竖直向上。圆柱在水平方向上布置于黏流计算域的中心，黏流计算域又布置于势流计算域的中心；竖直方向上，水深设置为一个波长，静水面以上的高度设置为半个波长。具体计算域尺寸布置如图 1 和图 2 所示，左侧为黏流计算域，右侧为势流计算域。

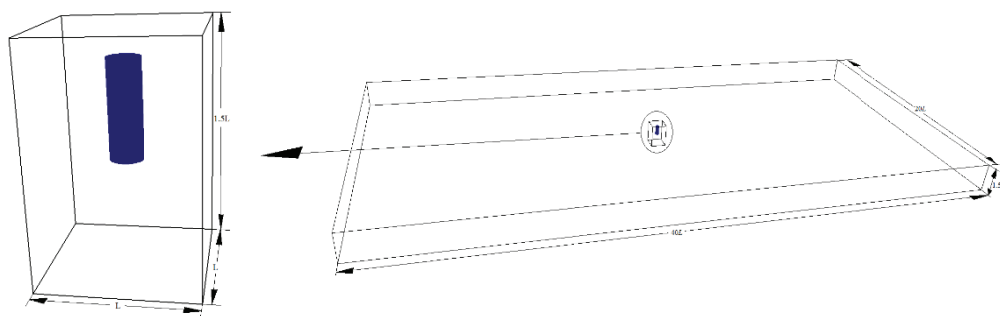


图 1 计算域 1 布置示意图

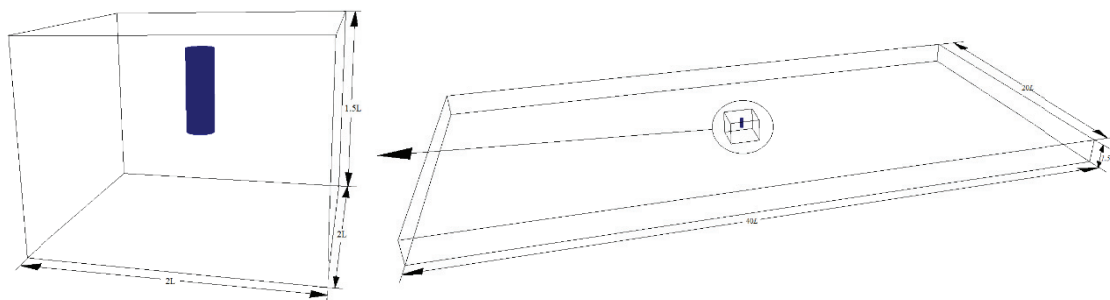


图2 计算域2 布置示意图

圆柱的网格如图3所示,黏流计算域网格如图4和图5所示。由于黏流计算域水平剖面均为正方形, x 方向与 y 方向的网格画法也完全相同,因此上述两个角度这里仅展示 x 方向视角的网格。

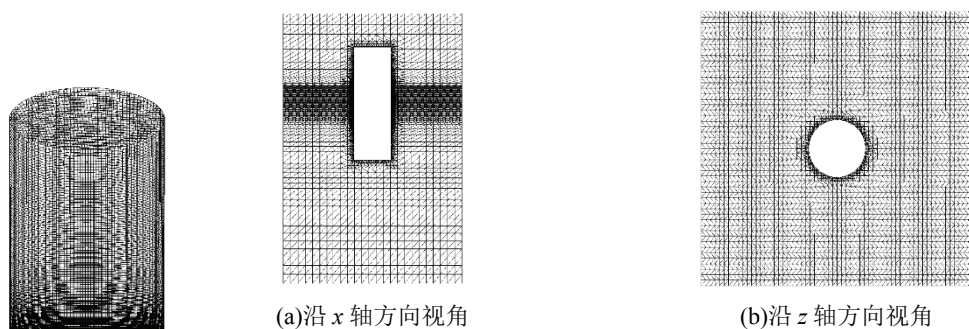


图3 圆柱网格

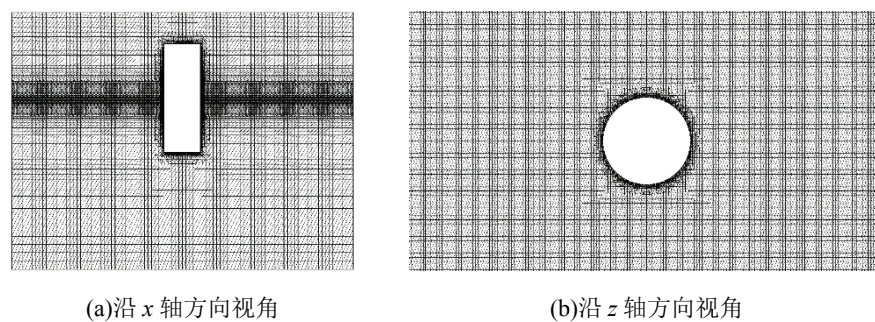


图4 黏流计算域1 网格

图5 黏流计算域2 网格

本研究的计算网格由 OpenFOAM 中的 snappyHexMesh 求解器生成,为更精确的自由面获取与研究提供方便,还对自由面附近的网格进行了加密。最终生成黏流计算域1的网格数为272860,黏流计算域2的网格数为3622721。计算时间步长采用0.005s。

为了方便对圆柱周围的波浪爬升进行测量,本研究参照 L.Sun 等^[3]的文献垂直于水平面设置了一系列浪高仪。浪高仪的分布呈两个半圆的形状,且在水平面上均与圆柱的截面圆同心。WPB 系列浪高仪离圆柱比较近,到圆柱表面距离均为 0.2063m,而 WPO 系列浪高仪布置于圆柱的另一侧,且距离圆柱较远,到圆柱表面距离均为 8m。浪高仪的布置具体位置如表 2 所示。

表 2 浪高仪布置位置

浪高仪名称	x (m)	y (m)
WPB1	-8.2063	0.0000
WPB2	-5.8027	-5.8027
WPB3	0.0000	-8.2063
WPB4	5.8027	-5.8027
WPB5	8.2063	0.0000
WPO1	-16.0000	0.0000
WPO2	-11.3137	11.3137
WPO3	0.0000	16.0000
WPO4	11.3137	11.3137
WPO5	16.0000	0.0000

4 结果分析

4.1 自由面高度时历曲线及其 Fourier 分析

在计算模型设定中所布置的一系列浪高仪中,本文选择了 6 个位置比较具有代表性的,将其所测量的自由面高度时历曲线与在相同工况全黏性 CFD 求解算例中的相同位置自由面高度时历曲线进行对比,并分别对其进行了 Fourier 变换,得到频率谱(图 6 至图 9)。

对距圆柱较近的一组测波点自由面高度时历曲线进行分析,可以看出,在两种求解方法下,WPB4 处的自由面高度时历曲线都有相对较为明显的多次波峰形式,体现了较强的非线性特征,具体从波浪成分上进行分析,可以看出 WPB4 处的三阶波浪影响较大,这是通过纯势流求解方法难以进行分析的^[3]。

比较而言,两种求解方法所得的自由面高度时历曲线的总体变化趋势相同,具体数据差异也比较小。但是在 WPB3 和 WPB4 的时历曲线中,各个周期中的自由面高度极小值处,黏势流耦合计算的结果比全黏性的结果偏小,这一特征与用纯势流方法对该工况进行求解的计算结果^[3]相似,这说明势流理论的假设对流体和流场所产生的影响在本研究的黏势流耦合求解中仍然有所体现。

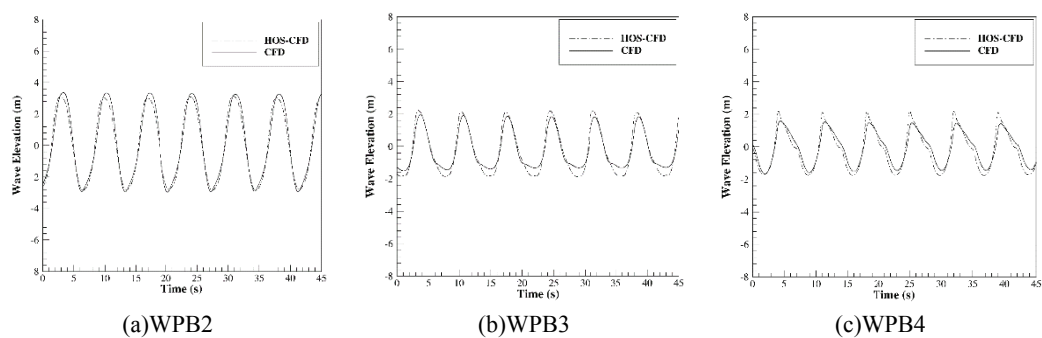


图 6 圆柱附近测波点自由面高度时历曲线

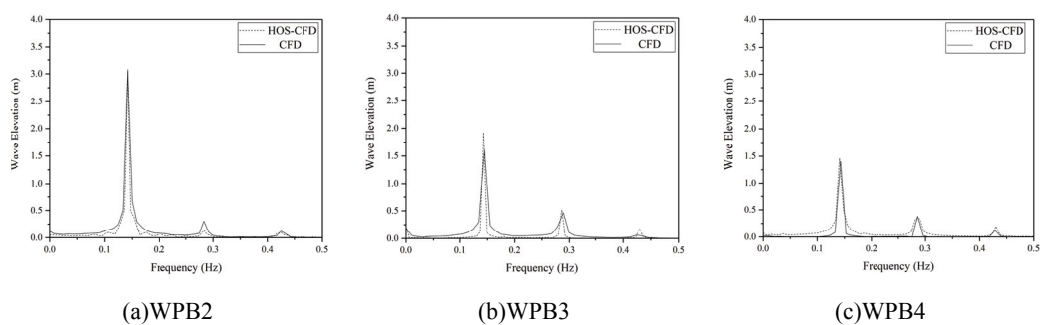


图 7 圆柱附近测波点自由面高度频率谱

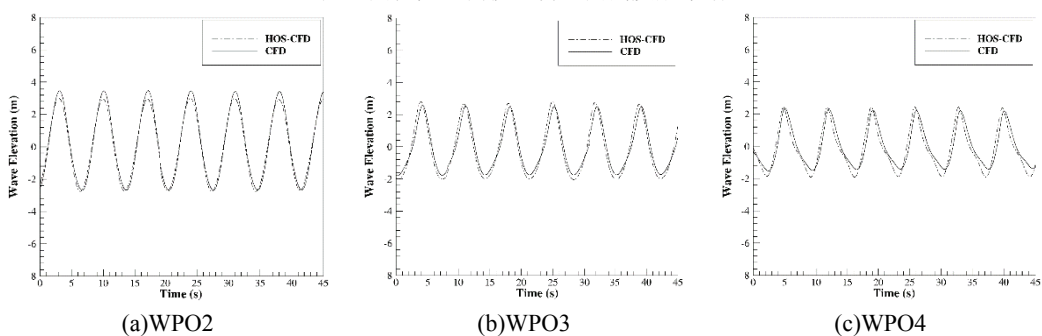


图 8 距圆柱较远测波点自由面高度时历曲线

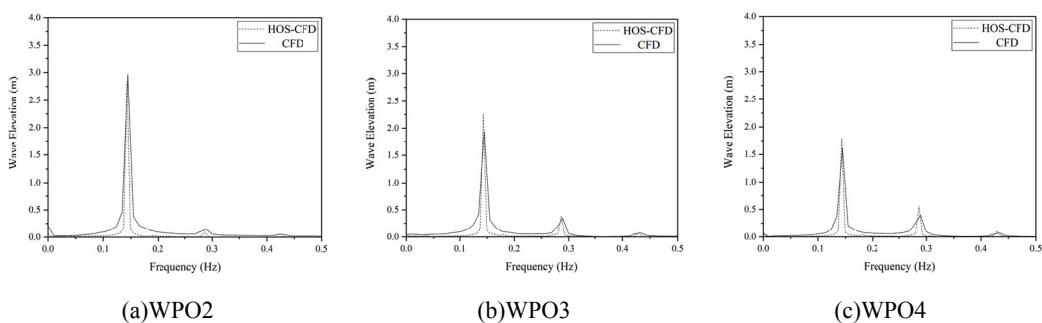


图 9 距圆柱较远测波点自由面高度频率谱

对于距离圆柱较远的测波点自由面升高,可以观察出其非线性特征相比距较近的测波点自由面升高的小得多。为定量分析这一特征,本文对具体波浪高阶成分的影响进行分析,将各二阶、三阶波浪幅值分别与一阶波浪幅值做比,将这一比值定义为高阶波浪影响系数,结果如表 3 所示。

表 3 高阶波浪影响系数表

浪高仪名称	二阶波浪影响系数		三阶波浪影响系数	
	HOS-CFD	CFD	HOS-CFD	CFD
WPB2	0.044	0.099	0.038	0.042
WPB3	0.272	0.294	0.099	0.048
WPB4	0.238	0.276	0.129	0.089
WPO2	0.038	0.052	0.009	0.021
WPO3	0.171	0.177	0.037	0.043
WPO4	0.312	0.246	0.063	0.048

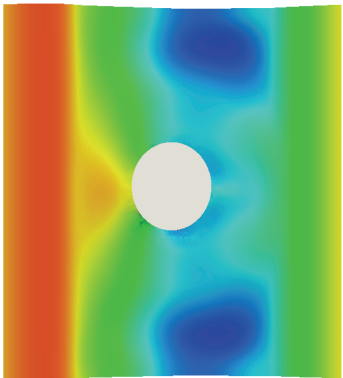
可以看出,WPB 系列测波点的三阶波浪影响系数均大于对应 WPO 测波点的三阶波浪影响系数,二阶波浪影响系数也几乎都大于对应 WPO 测波点的二阶波浪影响系数。可以说明,WPB 系列测波点自由面升高时历曲线的非线性特征确实比 WPO 系列测波点的强。

此外,从表 3 中还可以看出 WPB4 测波点的高阶波浪影响系数均大于同系列中其他测波点的对应高阶波浪影响系数,也说明了 WPB4 测波点的非线性特征之明显。

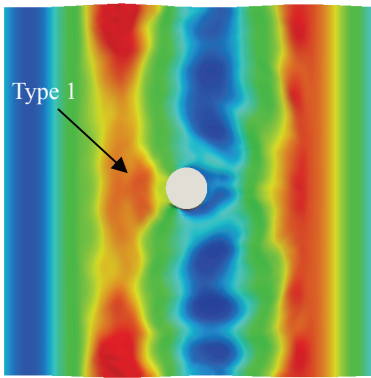
4.2 圆柱周围波面分析对比

本研究绘制出了两种黏性计算域中的自由面(图 10 至图 13)。在黏性计算域 2 的波面上能够清晰地观察到圆柱周围波面的衍射现象。在一个波浪周期的时间范围内,当规则波的波峰接近圆柱侧面时,固定的圆柱阻碍了一部分水体的前进,这部分水体只能绕过圆柱才能继续前进,这种运动生成了一种近似圆心在 x 轴上的圆形波浪衍射场(Type 1)。这部分水体的继续运动,圆柱两侧的水在圆柱背流侧汇聚并继续向前运动,但运动速度不如未受到阻碍的部分,在圆柱背流侧的两侧肩部生成另一种两个近似圆形波纹的关于 xOz 平面对称的波浪衍射场(Type 2)。而当波谷运动接触到圆柱侧面时,又会产生 Type 1 衍射场。

但是以上现象在黏性计算域 1 中就难以完整而清晰地观察到。由于本研究采用由势流计算域向黏流计算域的单向耦合方法,又只由黏性计算域来求解绕射问题,因此超出黏性计算域的绕射波浪信息就会全部丢失。另外本研究还在黏流计算域内布置了松弛区,也在一定程度上导致了黏性计算域 1 中的绕射波浪信息丢失。

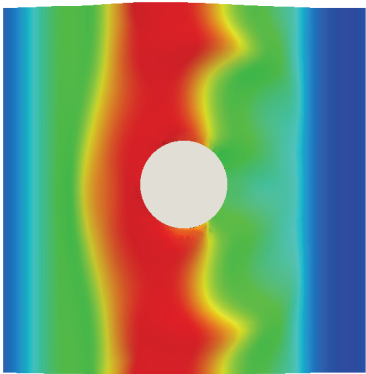


(a)黏性计算域 1 内的波面

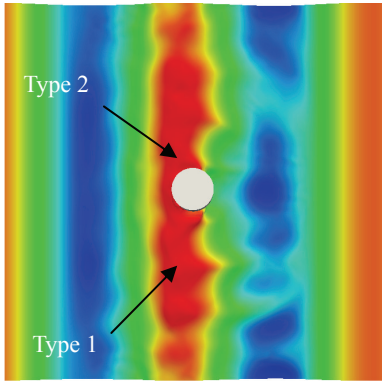


(b)黏性计算域 2 内的波面

图 10 $t=71.4s$ 时黏性计算域内的波面

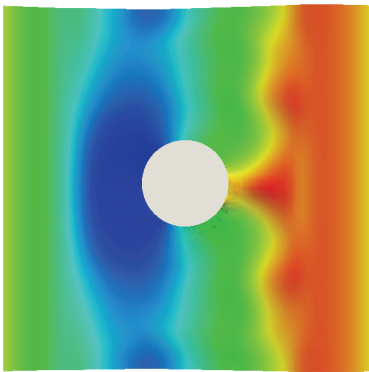


(a)黏性计算域 1 内的波面

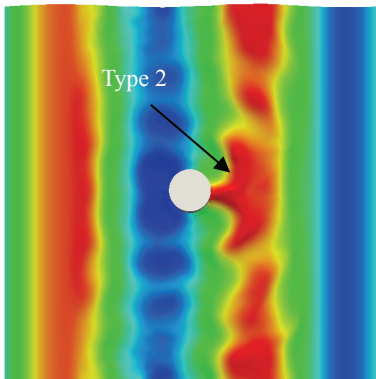


(b)黏性计算域 2 内的波面

图 11 $t=73.5s$ 时黏性计算域内的波面



(a)黏性计算域 1 内的波面



(b)黏性计算域 2 内的波面

图 12 $t=76.3s$ 时黏性计算域内的波面

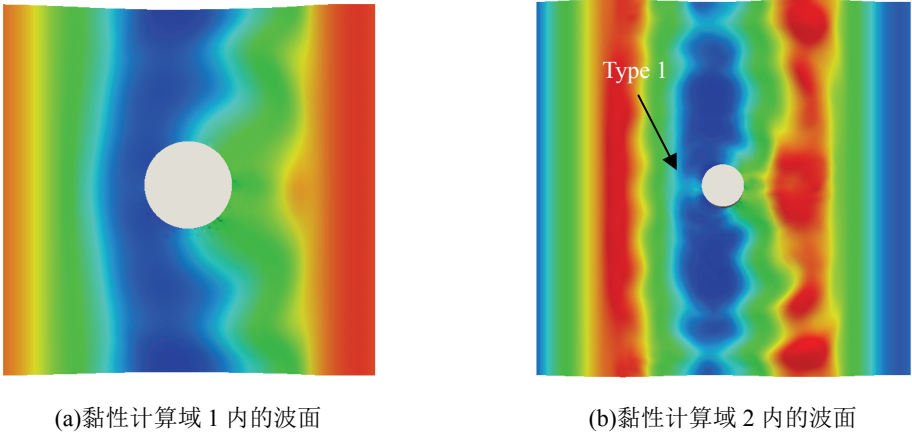


图 13 $t=77s$ 时黏性计算域内的波面

两种计算域布置的整体波面如图 14 所示。可以看出黏势流计算域交界处波面连续，说明通过设立松弛区域进行计算域间的信息交流效果很好。

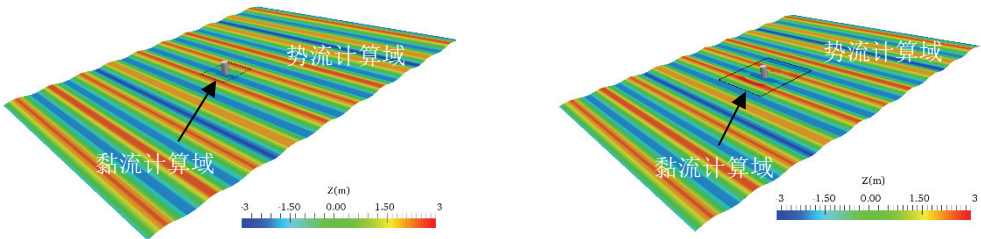


图 14 $t=77s$ 时完整计算域波面

4.3 计算速度对比

将全黏性 CFD 求解器和势流求解器相耦合的初衷是提高计算速度，因此需要对两种方法的计算速度进行对比。考虑到计算的有效性是更为重要的条件，这里参与对比的黏势流耦合求解的算例只采用了黏性计算域 2 的算例，相关计算信息如表 4 所示。

表 4 算例计算信息		
计算信息类别	全黏性 CFD 求解算例	黏势流耦合求解算例
网格数	168 万	362 万
计算使用核心数	32	28
CFD 时间/s	150	203.62
墙上时间/s	244542	185507

全黏性 CFD 求解算例在网格数更少、计算使用核心更多的情况下、所计算 CFD 时间较少的情况下,墙上时间仍明显比黏势流耦合求解算例多,说明本文所采用的黏势流耦合方法确实能够大幅节省计算时间,提高计算速度。

5 结论

本文基于高阶谱方法(HOS)和在开源软件 OpenFOAM 基础之上开发的黏性波浪求解器 naoe-FOAM-SJTU,对单个直立截断固定圆柱在规则波作用下的波浪爬升进行了数值模拟。本文把圆柱周围波面爬升的计算结果与全黏性 CFD 求解计算结果进行了比较,二者时历曲线较为接近。然后通过对时历曲线的 Fourier 变换定量分析了不同测波点的各阶波浪对波面爬升的影响,在圆柱背流侧肩部的测波点非线性特征最为明显,而且圆柱附近的所选测波点处自由面高度时历曲线非线性特征比距离圆柱侧面一个半径位置的相应测波点强。此外,本文还对比了两种黏流计算域布置算例的波面信息,对圆柱直径 16m,规则波周期为 7s,波高为 4.7775m 的工况而言, x, y 方向总长度各为一个波长的布置会损失掉较多圆柱周围的波浪信息,而 x, y 方向总长度各为两个波长,并将圆柱置于计算域中心的布置就能够观察到较为完整的波浪衍射现象,该结果能够为今后的黏势流耦合计算中黏流计算域的布置提供一定的指导。最后,本文比较了相同工况下全黏性 CFD 求解算例和有效的黏势流耦合求解算例的计算速度,证明了黏势流耦合方法确实能够节省计算时间,提高计算速度。

致谢

本文得到国家自然科学基金(51879159, 51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划(T2014099)、上海高校特聘教授(东方学者)岗位跟踪计划(2013022)、上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300)、工信部数值水池创新专项课题(2016-23/09)资助项目。在此一并表示感谢。

参考文献

- 1 Ducrozet, Guillaume, Bonnefoy, Félicien, Le Touzé, David, Ferrant, P. A modified High-Order Spectral method for wavemaker modeling in a Numerical Wave Tank. J. European Journal of Mechanics - B/Fluids. 2012, 34:19-34
- 2 Ferrant P, Gentaz L, Alessandrini B, et al. A Potential/RANSE Approach for Regular Water Wave Diffraction about 2-d Structures. J. Ship Technology Research, 2003, 50(4):165-171.
- 3 L. Sun, J. Zang, L. Chen, R. Eatock Taylor, P.H. Taylor. Regular waves onto a truncated circular column: A

- comparison of experiments and simulations . J. Applied Ocean Research, 2016,59: 650-662
- 4 West B J ,Brueckner K A , Janda R S , et al. A new numerical method for surface hydrodynamics .J. Journal of Geophysical Research, 1987, 92(C11):11803.
 - 5 Monroy C , Ducrozet G , Bonnefoy F , et al. RANS Simulations of a Calm Buoy in Regular and Irregular Seas Using the SWENSE Method . J. International Journal of Offshore & Polar Engineering, 2011, 21(4):81-90.
 - 6 Choi, Youngmyung,Gouin, Maïté, Ducrozet, Guillaume, Bouscasse, Benjamin, Ferrant, P. Grid2Grid : HOS Wrapper Program for CFD solvers. Nantes,2017.
 - 7 宋家琦,万德成.基于高阶谱方法与 CFD 计算的耦合模型在不规则波模拟中的应用. 水动力学研究与进展(A 辑),2019,34(01):1-12

Numerical simulation of surface elevation around a circular column based on HOS-CFD

HAN Bo, WAN De-cheng

(School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai, 200240, Email: dcwan@sjtu.edu.cn)

Abstract: As to the ocean engineering structures under extreme sea conditions, accurate prediction of hydrodynamic performance is of great significance to the safety and economy of their design. The flow field of the back direction of a single fixed cylinder in regular waves is seriously disturbed by the non-linear interaction between the wave and the cylinder. Potential flow method can not consider the flow separation caused by viscous flow and the possible influence of high-order waves, while the full viscous CFD solution requires a lot of computational time and space resources. Based on our in-house solver naoe-FOAM-SJTU, a full viscous CFD solver, and combined with HOS-NWT, this paper simulates the wave climb of a single vertical truncated fixed cylinder under regular waves while ensuring the high-precision calculation of the flow field around the cylinder. Comparisons are made between the calculated results of the wave surface elevation around the cylinder and the ones with full viscous CFD solver. The effects of different wave orders on wave surface climbing are also analyzed by Fourier transform. The flow field and computational speed around the cylinder solved by full viscous CFD method independently and combined with HOS-NWT are compared. The appropriate size of viscous computational domain in potential flow domain is discussed.

Key words: Circular cylinder; HOS-NWT; CFD; Surface elevation.