

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2021.02.009

基于 HOS-CFD 黏势流耦合方法模拟直立圆柱波浪爬升*

韩勃, 赵伟文, 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, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn)

摘要: 对海洋工程结构物的经济性乃至安全性来说, 其水动力学性能的精准预报对其设计具有重要意义。波浪与圆柱之间的相互作用对圆柱周围流场产生严重的非线性干扰, 使自由液面产生明显的衍射现象。在对这样的现象进行模拟时, 势流方法没有考虑到黏性带来的阻力作用, 而完全针对黏性流体的计算流体力学(CFD)求解又在资源占用上非常劣势。该文以纯黏性 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU 为基础, 通过高阶谱(HOS)方法进行造波, 在保证圆柱附近流场精细化计算的同时, 降低外部大范围计算域所需的计算时间和存储空间, 对在规则波中单个直立固定圆柱周围的波浪爬升进行了模拟计算, 将波浪爬升的数据与纯 CFD 求解得出的结果进行了对比, 且通过快速 Fourier 变换分析了对波浪爬升产生影响的主要波浪成分。此外, 该文还通过对比不同黏性计算域布置下的 HOS-CFD 耦合模拟波面的衍射情况以及 HOS-CFD 耦合模拟与纯 CFD 模拟的计算速率, 讨论了 HOS-CFD 耦合模拟中黏性计算域的参考布置尺寸。

关键词: 黏势流耦合; 直立固定圆柱; 高阶谱方法; CFD; 波浪爬升

中图分类号: O357

文献标志码: A

Numerical simulation of Wave Elevation around fixed Vertical Cylinder Based on HOS-CFD

HAN Bo, ZHAO Wei-wen, WAN De-cheng

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

Abstract: For the economy and even safety of the ocean engineering structure, the precise prediction of the hydrodynamic performance is one crucial aspect for its design. Highly non-linear effect around the vertical cylinder is induced by the interaction

* **收稿日期:** 2020-09-07(2020-10-19 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879159)、国家重点研发计划项目(2019YFB1704200, 2019YFC0312400)和长江学者奖励计划(T2014099)

作者简介: 韩勃(1996-), 男, 黑龙江人, 博士研究生。

通讯作者: 万德成, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

Received: September 7, 2020 (**Revised** October 19, 2020)

Project supported by foundations: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51879159), National Key Research and Development Program of China (2019YFB1704200, 2019YFC0312400), Chang Jiang Scholars Program(T2014099)

Biography: HAN Bo (1996-), Male, Ph.D. Candidate.

Corresponding author: WAN De-cheng, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

of wave and the cylinder, which result in an obvious phenomenon of diffraction named "ringing". When it comes to simulation, potential flow method neglects the influence of viscosity, while the full viscous CFD simulation is of great spend of computational source. Based on our in-house full viscous CFD solver naoe-FOAM-SJTU, combined with the HOS-NWT, the present work simulates the wave elevation around the single vertical cylinder in the regular wave with high accuracy solution ensured in the viscous domain near the cylinder, and decreases the computation scales in outer domain. The data is compared with the result of full CFD solution, and main wave components of surface elevation are picked out with fast Fourier analysis. Furthermore, in order to discuss the appropriate size of the viscous domain, wave diffractions of different sets of viscous domains are compared as well as the calculation efficiency of HOS-CFD combined simulation and full CFD simulation.

Key words: Viscous-potential coupling; Vertical cylinder; HOS method; CFD; Wave elevation

引言

安全事故对于海洋工程结构物而言, 一般来说是难以承受的, 因而安全问题一直都是海洋工程结构物设计中的首要问题。在其设计之中, 所设计的结构物就需要在预计最为恶劣的海况下保证存活。例如, 自升式平台需要在平台底部与设计水线之间留有足够高的距离, 以避免极端波浪的波峰对底部外壳以及其他上部结构与设备产生冲击载荷; 而对于浮式海洋结构物而言, 有必要通过各种系泊手段来减小平台随波浪产生的响应运动^[1], 以减轻钻柱及立管所承受的各方向的疲劳载荷, 进而减小或避免它们受到的疲劳损伤。于是波浪自身或者与结构物耦合产生的现象以及波浪力的精准预报就可以为海洋结构物设计中首先要考虑的问题。模型实验只能模拟较为理想情况下的问题, 而且不可避免地, 还存在模型尺度效应的问题; 实船海试不仅代价高很多, 还不可重复利用, 而且在实际海况中, 还难以保证预定的实验工况出现。而数值模拟方法一方面可以在较低成本的条件下直接对实尺度的海洋结构物进行模拟研究, 另一方面可以任意设置想要模拟海况, 也便于重复实验。

在数值模拟方法中, 基于势流理论求解波浪问题所需的计算时间以及计算收敛所需的网格量少, 但是其前提假设就是忽略流体的黏性, 因此势流理论一般只适用于黏性作用微乎其微的问题。而对于波陡较大, 甚至伴随波浪破碎现象的问题时, 势流求解器结果的准确性将难以得到保证, 一般不予以采用。基于Navier-Stokes方程的CFD求解器当处理波浪问题时, 由于计算了黏性的影响, 就可以对自由液面的大幅度变形进行精准的模拟, 进而对海洋工程结构物在较为极端的海况中或者黏性效应影响严重时提供更为准确的水动力学性能预测。但是纯黏性的CFD求解器一般需要投入大量的计算时间以及存储空间资源, 这不利于计算范围广且演化时间长的波浪问题模拟。

流场中的波浪和结构物之间的相互作用问题,

一般既伴随着在时间和空间意义上都比较长的波浪演化, 当波浪经过结构物时又有不可忽略的黏性阻力。为方便快捷, 又能较为精准地考虑波物耦合过程中的黏性影响, 就可以考虑将势流方法与考虑黏性的 CFD 求解相结合, 取长补短, 在结构物周围布置黏性求解区域, 通过基于开源 CFD 软件平台OpenFOAM 编写的naoe-FOAM-SJTU 求解器保证波物耦合作用发生时可以对黏性效应的精细计算。在外部的波浪发展区域通过基于势流理论的高阶谱数值波浪水池(HOS-NWT)进行高效的造波和演化, 可以在保证高精度和快速收敛的情况下支持多种非线性波浪的生成。通过这种方法将黏性求解和势流求解二者的优势结合起来, 才有利于分析上述广阔计算域中的波物耦合问题。

通过高阶谱(HOS)方法进行造波最早于1987年由West等^[2]和Dommermuth等^[3]提出, 基于势流理论, 通过伪谱展开式以及快速Fourier变换等数学方法, 能够高效快速地对完全非线性的波浪生成与演化进行数值模拟。在此基础之上, Tanaka^[4]提供了对于高阶谱展开的海浪谱自由液面初始化方法。

OpenFOAM是一款功能强大且可高度自定义的CFD开源软件平台。Jacobsen等^[5]基于该平台开发了可生成多种形式波浪的wave2Foam, 可直接用于模拟物体在黏性流体中与波浪之间的相互作用。Cao等^[6-7]在该平台的基础之上针对两相不可压缩流体研究开发了naoe-FOAM-SJTU求解器, 该求解器可应用于多种水动力学问题之中。

流固耦合方面, Ferrant等^[8]提出SWENSE (Spectral wave explicit Navier-Stokes equations)模型, 通过在Navier-Stokes方程中添加源项求解绕射问题。Choi等^[9]通过设立松弛区将势流计算域中的波浪信息利用Grid2Grid模块插值到黏性计算域中进行求解。Zhuang等^[10]将HOS造波方法与OpenFOAM进行了结合, 并通过耦合模型实现了二维和三维的单向波浪模拟。Song等^[11]通过该黏势流耦合模型实现了多项不规则波的数值模拟。

本文的研究目的为分析将势流数值波浪水池HOS-NWT和黏性CFD求解器naoe-FOAM-SJTU相

结合求解直立圆柱与规则波之间的相互作用以及纯黏性 CFD 数值模拟结果,对比了两种情形下的圆柱周围波浪爬升情况,分析了两种耦合计算域配置下的自由液面的衍射现象与计算速度,考虑了不同方案对该问题的数值模拟所带来的影响,并提供针对HOS-CFD黏势流耦合方法研究该问题的参考黏性计算域尺寸。

1 数学模型和计算方法

1.1 通过高阶谱数值波浪水池(HOS-NWT)造波

HOS-NWT 是由法国 Nantes 中央理工学院 LHEEA 实验室编写并发布的基于势流理论利用高阶谱方法在数值水池中可对多种非线性波浪进行生成和演化模拟的求解器。

该势流求解器适用于由无黏性和不可压缩流体运动所产生的无旋度流场。势流理论在这样的条件之下求解关于速度势 $\Phi(x, y, z, t)$ 的 Laplace 方程

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

通过速度势 Φ 可以求得流场中的压力以及各方向速度,进而得以描述整个流场的流动。对于波浪,速度势 Φ 在HOS-NWT分解为两部分

$$\Phi(x, y, z, t) = \Phi^{spec}(x, y, z, t) + \Phi^{add}(x, y, z, t) \quad (2)$$

式中: Φ^{add} 为由于造波板运动而产生的速度势; Φ^{spec} 为无造波板运动情形下的速度势,并且将其在自由液面处的速度势定义为

$$\Phi^s(x, y, t) = \Phi^{spec}(x, y, \eta, t) \quad (3)$$

式中: $\eta(x, y, t)$ 为自由液面高度函数,在势流理论适合讨论的无波浪破碎的波浪问题中,它是一个连续的函数。

将式(3)代入自由液面的运动学和动力学边界条件,得

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla(\Phi^s + \Phi^{add}) \cdot \nabla \eta - \frac{\partial \Phi^{add}}{\partial z} - (1 + \nabla \eta \cdot \nabla \eta) \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Phi^s}{\partial t} = -\eta - \frac{1}{2} \left[|\nabla \Phi^s|^2 + (1 + |\nabla \eta|^2) W^2 \right] -$$

$$\frac{1}{2} |\tilde{\nabla} \Phi^{add}|^2 - \nabla \Phi^s \cdot \nabla \Phi^{add} - \frac{\partial \Phi^{add}}{\partial t} - \nu \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (5)$$

式中: W 为自由液面的垂向运动速度, $\tilde{\nabla} \Phi^{add}$ 为自由面处附加速度势水平梯度, ν 为造波板的法向运动速度。

在能够确定造波板运动的情况下,即各边界条件均已知,则上述分解出来的两部分速度势均可以求解。其中 Φ^{add} 可通过以下关系进行求解

$$\Delta \Phi^{add} = 0, \quad \text{计算域全部内点的集合} \quad (6a)$$

$$\frac{\partial \Phi^{add}}{\partial n} = 0, \quad x = L_x; y = 0, L_y; z = -h \quad (6b)$$

$$\frac{\partial \Phi^{add}}{\partial x} + \nabla_\nu X \cdot \nabla_\nu \Phi^{add} =$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} \frac{\partial \Phi^{spec}}{\partial x} - \nabla_\nu X \cdot \nabla_\nu \Phi^{spec}, \quad x = X(y, z, t) \quad (6c)$$

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。 Φ^{spec} 可通过以下关系进行求解

$$\Delta \Phi^{spec} = 0, \quad \text{计算域全部内点的集合} \quad (7a)$$

$$\frac{\partial \Phi^{spec}}{\partial n} = 0, \quad x = 0, L_x; y = 0, L_y; z = -h \quad (7b)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla(\Phi^s + \Phi^{add}) \cdot \nabla \eta - \frac{\partial \Phi^{add}}{\partial z} -$$

$$(1 + \nabla \eta \cdot \nabla \eta) \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \quad z = \eta(x, y, t) \quad (7c)$$

$$\frac{\partial \Phi^s}{\partial t} = -\eta - \frac{1}{2} \left[|\nabla \Phi^s|^2 + (1 + |\nabla \eta|^2) W^2 + |\tilde{\nabla} \Phi^{add}|^2 \right] -$$

$$\nabla \Phi^s \cdot \nabla \Phi^{add} - \frac{\partial \Phi^{add}}{\partial t} - \nu \frac{\partial \eta}{\partial t}, \quad z = \eta(x, y, t) \quad (7d)$$

详细的数值求解算法在Ducrozet等^[12]的工作中 有详尽的介绍,在此不再赘述。

1.2 基于Navier-Stokes方程求解黏性流场

本文对直立固定圆柱附近的流场信息进行了较为精细的计算,在以圆柱为中心的一定范围内使用基于由C++编写的OpenFOAM 开源软件平台的黏性水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU,通过有限体积法(FVM)对计算域进行空间离散,进而在其中求解Navier-Stokes方程。控制方程如下

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho (\mathbf{U} - \mathbf{U}_g) \mathbf{U}] = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{U}) + (\nabla \mathbf{U}) \cdot \nabla \mu_{\text{eff}} + \mathbf{f}_s \quad (9)$$

式中: p_d 为流场动压力, μ_{eff} 为流体的有效动黏性系数, \mathbf{U}_g 为流体质点所在网格的速度, \mathbf{f}_s 为消波源项, 用于计算域末端, 以避免不希望存在的反射波干扰流场。

在OpenFOAM中, 可通过VOF法确定气、液两相具体位置, 进而捕捉两相交界面, 即自由液面, 该方法主要通过体积分数 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, 就可以对当前时间步下的体积分数输运方程进行求解, 该输运方程为

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{U} \alpha + \nabla \cdot (\mathbf{U} - \mathbf{U}_g) \alpha (1 - \alpha) = 0 \quad (10)$$

式中: α 为网格中液相所占的体积分数。

当整个网格全在气体之中, 则该网格的 α 值为 0; 当整个网格全在液体之中, 则该网格的 α 值为 1; 当网格被气液两相交的自由液面分割时, α 值为小于 1 的正数。

然后通过体积分数 α 对自由液面位置进行判断, 通过其他相关计算最终获得黏性波浪流场的全部信息。

1.3 势流与黏流计算模型的耦合

本研究先通过HOS-NWT进行全计算域范围内的快速造波和波浪演化, 然后将其结果作为输入导入黏性计算域通过naoe-FOAM-SJTU求解结构物周围的绕射问题。并在黏性计算域中设置松弛区, 进而构建了两黏势流计算域之间的单向耦合模型, 即只将通过HOS-NWT生成的流场信息经过处理后单向传递到黏性计算域之中, 而黏性计算域中的流场信息不对外部的势流计算域产生影响。但是因为HOS-NWT的编写语言、流场的信息格式以及计算时间和计算域空间的离散规律与naoe-FOAM-SJTU均有所不同, 因此HOS-NWT所生成的流场信息也无法直接传递进入黏性计算域, 而是额外需要接口模块Grid2Grid来执行转码、时间和空间的插值以及波浪场的重构等一系列操作才能最终实现势流和黏性计算域间的信息传递, 如图1所示。

2 数值计算及结果分析

2.1 计算模型设置

本研究的目的是通过进行实尺度的数值模拟

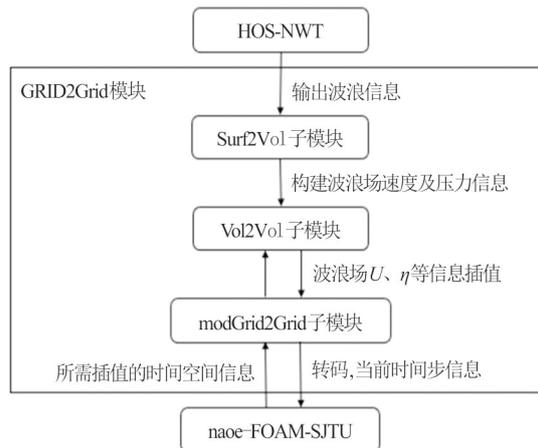


图 1 Grid2Grid 模块转码及插值过程
Fig.1 Transcoding and interpolation process

来研究在截断的固定直立圆柱在规则波中的自由液面波浪爬升情况。其中圆柱的主要尺寸以及规则波的相关数据参见表1。

表 1 计算模型及工况主要参数
Table 1 Main parameter of the numerical model and the working condition

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	4.777 5
周期 T / s	7

该工况下规则波对应波陡为0.125, 尚未达到破波极限, 所以所模拟的工况中不存在由于波浪自身属性导致的波浪破碎问题, 适合在通过HOS-NWT进行生成和演化的模拟。又由于该求解器的快速性, 所以为了能使波浪在与结构物相互作用之前充分发展, 也尽可能避免边界效应对圆柱周围的流场产生干扰, 本研究在水平的两个方向上选取了范围足够大的势流计算域, 使波浪能够充分发展。而由于底部边界条件的一致性, 就选取黏势流计算域对应相同的计算域高度。

本文采用三维笛卡尔坐标系对计算域进行描述, 将原点设于静水面与圆柱的对称轴的交点, z 轴与圆柱的母线平行, 且正方向由水指向空气。在水平方向上, 圆柱置于黏性计算域的中心, 而黏性计算域又布置于势流计算域的中心。在竖直方向上, 计算域中静水水深设置为规则波的一个波长, 静水面以上的空气部分高度为该波长的一半。此外, 为了分析黏性计算域的尺寸布置对圆柱周围流场数值模拟效果的影响, 本研究采用了两套不同尺寸的黏性计算域对上述同一工况下的圆柱周围的波面升高进行了数值模拟。具体尺寸布置如图2和图3所示, 图中左侧为势流计算域布置, 右侧为黏性计算域布置。

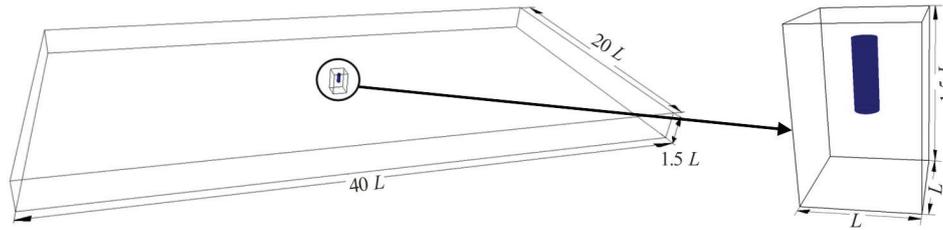


图2 (网上彩图) 计算域1 布置示意图
Fig.2 (Color online) Computational domain 1

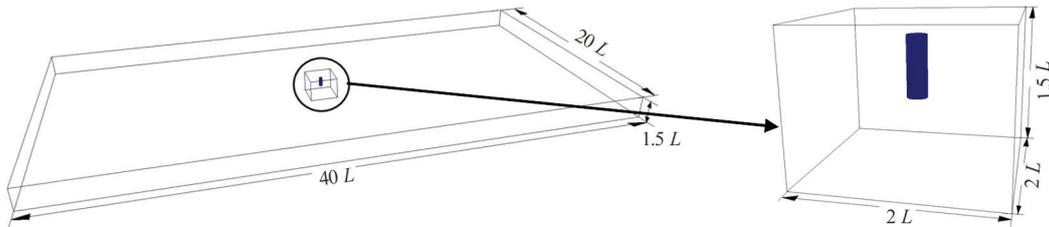


图3 (网上彩图) 计算域2 布置示意图
Fig.3 (Color online) Computational domain 2

圆柱表面的网格剖分如图4所示，两套黏性计算域的网格划分如图5和图6所示。因为两套黏性计算域的水平剖面外部轮廓均为正方形，并且x方向与y方向的网格划分方法也对应完全相同，所以沿上述两个方向视角的网格图完全相同，这里仅展示沿x轴方向视角的网格示意图。



图4 圆柱网格
Fig.4 Mesh of the cylinder

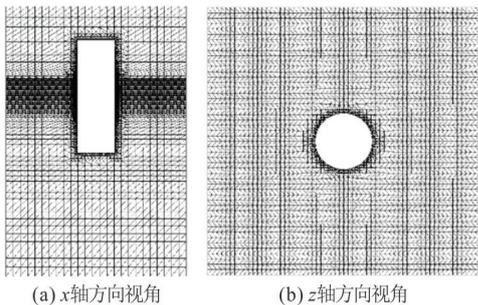


图5 黏性计算域1 网格
Fig.5 Mesh of the viscosity domain 1

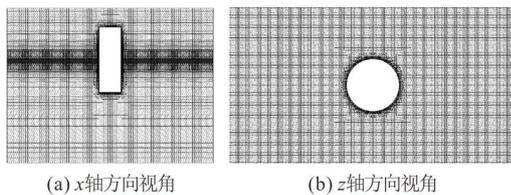


图6 黏性计算域2 网格
Fig.6 Mesh of the viscosity domain 2

本研究中两套黏性计算域的网格由OpenFOAM中的blockMesh和snappyHexMesh进行生成和加密。在blockMesh中，在x、y和z三个方向分别划分150、100和70个网格。为了获得圆柱周围更精细的模拟结果和更精确的自由液面位置，还在snappyHexMesh中分别对自由液面以及圆柱附近的网格进行加密，加密等级分别为1和3。最终在黏性计算域1中所生成的网格数为272 860，在黏性计算域2中所生成的网格数为3 622 721。计算所采用的时间步长选取为0.005 s。

为了测量圆柱周围波浪爬升的一系列具有代表性的数据，本文参考Sun等^[13]的工作，将测波点竖直布置于与文献中相同的水平位置。考虑到整个数值模拟关于xOz平面的对称性，对称位置上自由液面高度时历数据理论上应该完全一致，因此不必将测波点布置在对称位上。最终，本研究中测波点在黏性计算域中的水平分布呈两个同心半圆形，距离圆柱较近的半圆测波点称为WPB系列测波点，其到圆柱表面距离均为0.206 3 m；而较远半圆的侧波点称为WPO系列测波点，它们到圆柱表面距离均为8 m。各测波点的具体水平位置布置见表2。

表2 测波点布置位置
Table 2 Set position of the wave gauges

测波点名称	x/m	y/m
WPB1	-8.206 3	0.000 0
WPB2	-5.802 7	-5.802 7
WPB3	0.000 0	-8.206 3
WPB4	5.802 7	-5.802 7
WPB5	8.206 3	0.000 0
WPO1	-16.000 0	0.000 0
WPO2	-11.313 7	11.313 7
WPO3	0.000 0	16.000 0
WPO4	11.313 7	11.313 7
WPO5	16.000 0	0.000 0

2.2 自由液面高度时历曲线及其频域分析

在上述黏势流耦合计算中所设置的两组测波点中, 本文选择了6个比较具有代表性位置的测波点(WPB2-WPB4和WPO2-WPO4)测量结果来着重进行展示和讨论。将这些测波点的自由液面高度随时间变化曲线与在完全相同工况下, 通过CFD求解器naoe-FOAM-SJTU进行纯黏性求解得到相同位置测波点所记录的自由液面高度时历曲线进行对比, 并分别对这两组时历数据进行了快速Fourier变换, 获得对应的频率谱, 如图7-图10所示。

在WPB系列测波点的自由液面高度时历曲线中, 可以观察出在两种求解方法下, 测波点WPB4处的自由液面高度时历曲线波形在单个周期内都有相对较为明显的多波峰趋势, 类似多相位差距较大的两个及以上的主要的三角函数成分叠加, 体现出了较为显著的非线性特性。具体从频率谱中的波浪成分上进行分析, 就可以看出测波点WPB4处的三阶波浪影响较大, 解释了上述自由液面高度时历曲线的波形特征。而这些是通过纯势流求解方法难以得到的结果^[13]。

相对而言, 经两种求解方法计算所得的自由液面高度时历曲线的总体变化趋势大致相同, 具体数

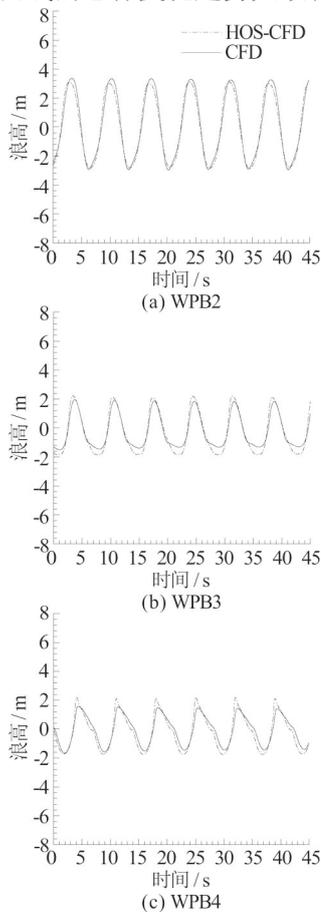


图7 圆柱附近测波点自由面高度时历曲线

Fig.7 Wave elevation of the wave measuring point near the cylinder

据差异也比较小。但是在WPB3和WPB4所记录的数据中, 各个周期的自由液面高度极小值处, 耦合求解结果相对纯黏性求解结果偏小, 这一特征与通过纯势流方法对相同工况下的同一问题进行求解的计算结果^[14]一致。在两个独立研究中该特征的一致性说明, 势流理论中的假设(流体无黏性、流动无旋度)对流体和流场所产生的影响仍然在本研究的黏势流耦合求解过程之中发挥了作用并体现了出来。

对于WPO系列测波点自由液面高度时历曲线中, 可以观察出上述非线性特征相比WPB系列测波点自由液面高度时历曲线小得多。那么为了定量分析这一非线性特征的影响程度, 本文对波浪高阶成分的影响进行如下具体分析: 经频域分析后, 将各二阶和三阶波浪幅值分别与一阶波浪幅值求比值, 并将这一比值定义为相应的高阶波浪影响系数, 上述测波点的高阶波浪影响系数见表3。

显然, WPB系列测波点的三阶波浪影响系数均明显大于对应WPO系列测波点的三阶波浪影响系数, 并且二阶波浪影响系数也几乎都大于对应WPO系列测波点的二阶波浪影响系数。由此, 可以定量说明, 总体上WPB系列测波点自由液面高度时历曲线的非线性特性确实比WPO系列测波点的非线性特性强。

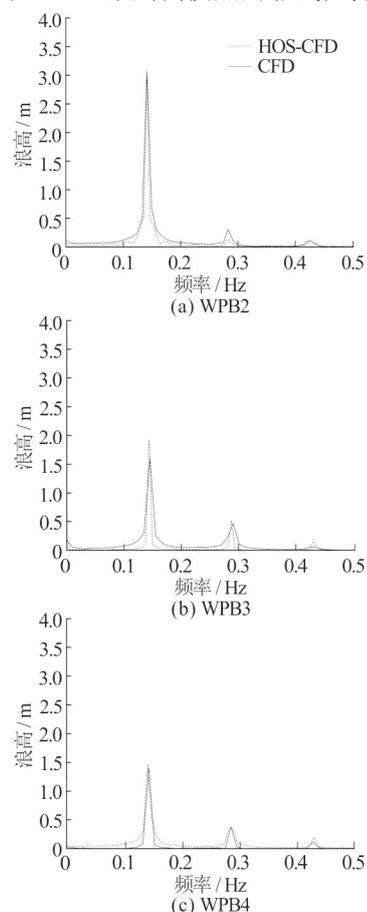


图8 圆柱附近测波点自由面高度频率谱

Fig.8 Frequency spectrum of wave elevation of wave measuring point near the cylinder

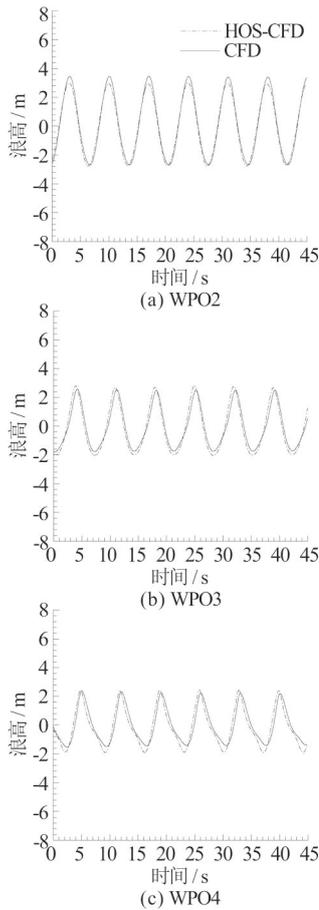


图9 距圆柱较远测波点自由面高度时历曲线

Fig.9 Wave elevation of the wave measuring point far from the cylinder

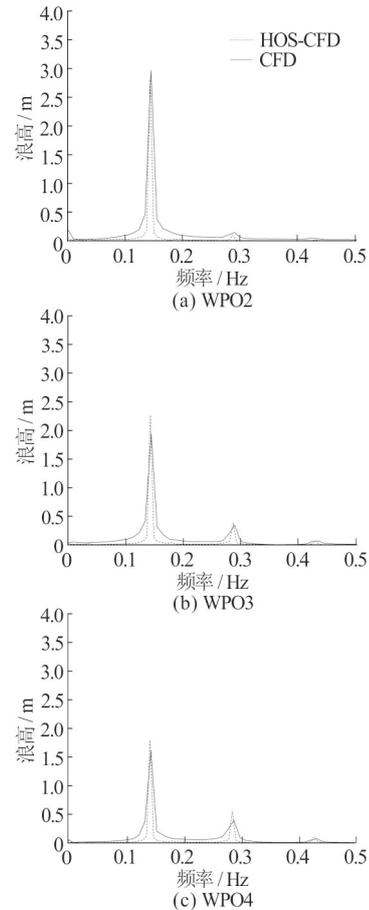


图10 距圆柱较远测波点自由面高度频率谱

Fig.10 Frequency spectrum of wave elevation of wave measuring point far from the cylinder

表3 高阶波浪影响系数

Table 3 High order wave influence coefficient

测波点名称	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

此外，从表3中还可以看出，WPB4所在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，这也说明了WPB4所在测波点的自由液面高度时历曲线非线性特征之明显。

2.3 圆柱周围自由液面对比分析

为了便于较为直观地观察圆柱与波浪的相互干扰情况，本文展示了两套黏性计算域中的自由液面图像，如图11-图14所示。在黏性计算域2的自由液面的图像中，圆柱周围波面的衍射现象能够被清晰地观察到。在规则波的一个稳定的周期内，当波峰靠近圆柱侧面时(如 $t = 71.4$ s附近)，固定的圆柱产生阻力，阻碍了一部分水体的前进，这部分水体

因为惯性，继续前进就必须绕过圆柱，这种运动过程就生成了一种中心在 xOz 平面上的近似圆形的波浪衍射场(Type 1)。然后这部分圆柱两侧的水的继续运动(如 $t = 73.5$ s- 76.3 s之间)，在圆柱的背流侧汇聚并继续向前运动，但此时这部分水由于受过圆柱的阻碍作用，所以运动速度不如其他位置的速度，进而在圆柱背流侧的肩部同时生成两个近似圆形波纹的且中心明显偏移 xOz 平面但关于 xOz 平面对称的并与之前不同的波浪衍射场(Type 2)。最后当波谷运动接触到圆柱侧面时(如 $t = 77$ s附近)，又会产生形似Type 1衍射场的波纹。

但是对于黏性计算域1而言，清晰而完整地观察到上述现象就很困难。由于本研究采用的是由势流计算域向黏性计算域的单向耦合方法，但是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(如一部分衍射场的波纹)就会全部丢失。另外在本研究中，还有松弛区布置与黏性计算域的边界，这也在一定程度上损失了黏性计算域1中的绕射波浪信息。

两套黏势流耦合计算域布置的完整波面图像如图15所示。以 $t = 77$ s时刻的情况为例可以看出，无论对于哪套黏性计算域布置，黏势流计算域在四

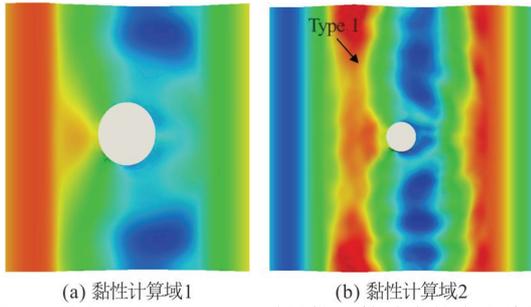


图 11 (网上彩图) $t = 71.4$ s 时黏性计算域内的自由液面
Fig.11 (Color online) Free surface in viscosity domain at 71.4 s

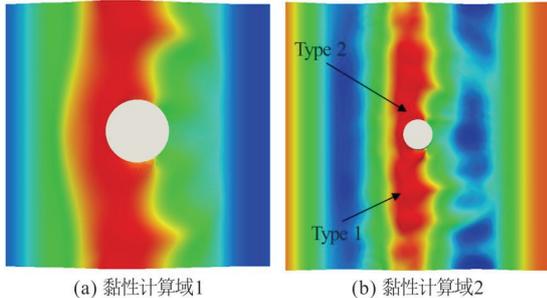


图 12 (网上彩图) $t = 73.5$ s 时黏性计算域内的自由液面
Fig.12 (Color online) Free surface in viscosity domain at 73.5 s

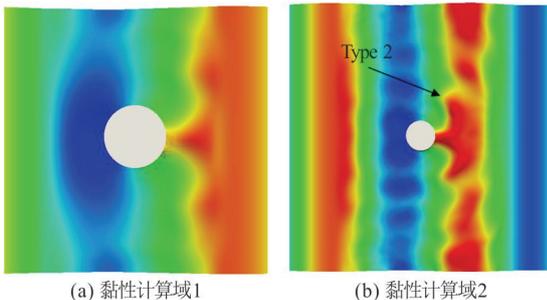


图 13 (网上彩图) $t = 76.3$ s 时黏性计算域内的自由液面
Fig.13 (Color online) Free surface in viscosity domain at 76.3 s

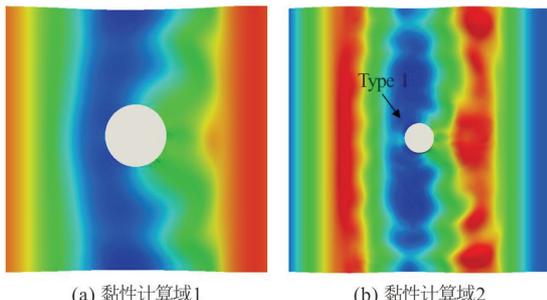


图 14 (网上彩图) $t = 77$ s 时黏性计算域内的自由液面
Fig.14 (Color online) Free surface in viscosity domain at 77 s

个交界处的波面均连续, 说明通过在黏性计算域中设立松弛区域, 黏势流计算域之间的信息交流情况良好。

2.4 计算速率对比

本研究中将黏性CFD求解器和势流求解器相耦合的初衷是在保证对关键位置进行精细黏性求解的前提下提高计算速度, 因此通过该方法数值模拟的计算速率需要与通过纯黏性求解器数值模拟

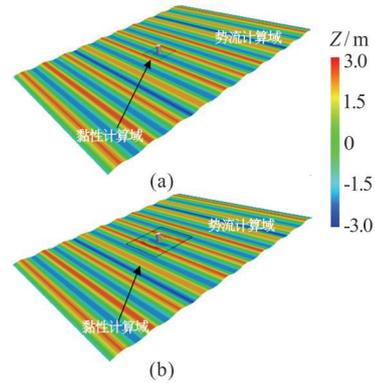


图 15 (网上彩图) $t = 77$ s 时完整计算域自由液面
Fig.15 (Color online) Free surface of the total computational domain at 77s

的情况进行对比。考虑到计算的有效性是更为重要的前提条件, 而上述黏性计算域1的布置方案没能做到对波面衍射现象的有效模拟, 因此选用了黏性计算域2参与计算的数值模拟算例与纯黏性求解器数值模拟的情况进行对比。相关的对比信息如表4所示。

表 4 算例计算信息

Table 4 Computational information of the cases		
计算信息类别	纯黏性 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	244 542	185 507

由表中可知, 纯黏性CFD求解算例在网格数更少、计算使用核心更多的情况下和所计算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。

3 结论

本文结合高阶谱数值波浪水池(HOS-NWT)以及在由C++编写的开源CFD程序库OpenFOAM基础之上开发的黏性水动力学求解器naoe-FOAM-SJTU, 对截断的单个直立固定圆柱在规则波作用下的波面升高进行了数值模拟。

本文把布置于圆柱周围测波点的自由液面高度与纯黏性CFD求解所得的结果进行了比较, 二者的时历曲线波形和幅值均较为接近。然后通过对这些时历曲线进行快速Fourier变换, 获得了自由液面高度信号的频率谱, 计算出高阶波浪影响系数, 进而定量分析了不同测波点的各阶波浪对波面爬升的影响, 即非线性特征的明显程度。而且距离圆柱

较近的(WPB系列)测波点处自由液面高度与距离圆柱较远的(WPO系列)测波点处自由液面高度相比,时历曲线的三阶波浪影响系数都对应更大,二阶波浪影响系数也几乎都对应更大,因此前者的非线性特性更强。在靠近圆柱背流侧肩部处的测波点(WPB4)三阶波浪影响系数最大,其非线性特征也最为明显。

此外,本文还对比了黏势流耦合方法中两套黏性计算域布置算例的不同波面情况,在圆柱直径16 m,周期为7 s,波高为4.777 5 m的规则波情况下,对于x和y方向总长度各为一个波长,并将圆柱置于计算域中心的布置(黏性计算域1)会损失掉较多圆柱周围的波面信息;而对于x和y方向总长度各为两个波长的布置(黏性计算域2)就能够观察到较为完整而清晰的波浪衍射现象。该对比结果能够为今后解决类似的波浪与结构物相互作用问题时,采用黏势流耦合方法来进行数值模拟计算的情况,对其中黏性计算域的尺寸设置提供了一定的参考。

最后,本文比较了相同工况下黏势流耦合求解的有效算例和纯黏性CFD求解算例的计算速率,验证了本文所采用的HOS-CFD耦合方法确实能够大幅节省计算时间,提高计算效率。

参 考 文 献:

- [1] 刘远传. 浮式结构物系泊系统数值分析模块 naoe-FOAM-ms 开发[D]. 上海交通大学, 上海, 中国, 2014.
LIU Yuan-chuan. Numerical analysis of interaction of floating structures and mooring systems[D]. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, 2014.
- [2] WEST B, BRUECKNER K, JANDA R, et al. A new numerical method for surface hydrodynamics[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1987, 92: 11803-11824.
- [3] DOMMERMUTH D G, YUE D K P. A high-order spectral method for the study of nonlinear gravity waves[J]. *Journal Fluid Mechanics*, 1987, 184: 267-288.
- [4] TANAKA M. Verification of hasselmann's energy transfer among surface gravity waves by direct numerical simulations of primitive equations[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2001, 444: 199-221.
- [5] JACOBSEN N G, FUHRMAN D R, FREDSE J. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2012, 70(9): 1073-1088.
- [6] 曹洪建, 万德成. 基于 naoe-FOAM-SJTU 求解器构建三维数值波浪水池[J]. *复旦学报: 自然科学版*, 2013, 52(05): 627-634.
CAO H J, WAN D C. Three-dimensional numerical wave tank based on naoe-FOAM-SJTU solver[J]. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 2013, 52(05): 627-634.
- [7] 曹洪建. 基于 OpenFOAM 的数值波浪水池开发与应用研究[C]. 中国造船工程学会船舶力学学术委员会第八次全体会议文集, 大连, 中国, 2014.
CAO H J. Development of numerical wave tank based on OpenFOAM and its application[C]. The Eighth Plenary Session of Ship Mechanics Academic Committee of China Shipbuilding Engineering Society, Dalian, China, 2014.
- [8] FERRANT P, GENTAZ L, TOUZÉ D L. A new RANSE/Potential approach for water wave diffraction[C]. 5th Numerical Towing Tank Symposium, Pornichet, France, 2002.
- [9] CHOI Y M, BOUSCASSE B, SENG S, et al. Generation of regular and irregular waves in Navier-Stokes CFD solvers by matching with the nonlinear potential wave solution at the boundaries[C]. The ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2018, Madrid, Spain, 2018.
- [10] ZHUANG Y, WAN D C, BENJAMIN B, et al. Regular and irregular wave generation in OpenFOAM using high order spectral method[C]. The 13th OpenFOAM Workshop (OFW13), Shanghai, China, 2018.
- [11] 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[J]. *水动力学研究与进展, A辑*, 2019, 34(1): 1-12.
SONG Jia-qi, WAN De-cheng. Application of coupling model based on High-Order Spectral method and CFD calculation in simulating irregular waves[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2019, 34(1): 1-12.
- [12] DUCROZET G, BONNEFOY F, LE TOUZÉ D, et al. 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.
- [13] SUN L, ZANG J, CHEN L, et al. Regular waves onto a truncated circular column: A comparison of experiments and simulations [J]. *Applied Ocean Research*, 2016, 59: 650-662.
- [14] 刘正浩, 万德成. 规则波下圆柱波浪爬升特性的数值研究[C]. 第二十九届全国水动力学研讨会论文集, 镇江, 中国, 2018.
LIU Zheng-hao, WAN De-cheng. Numerical simulation of regular wave run-up on a circular cylinder[C]. Proceedings of the 29th National Symposium on Hydrodynamics, Zhengjiang, China, 2018.