

高阶谱方法与 CFD 方法耦合的数值模拟技术

庄园, 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: 高阶谱方法是一种可以快速准确的造波方法, 可以对非规则波以及真实海域下的多向不规则波进行模拟。本文将高阶谱方法与本课题组 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU 进行结合, 利用高阶谱方法对非线性的波浪的快速准确模拟, 以及 CFD 方法求解复杂波面情况和波浪与结构物相互作用的优点进行船海工程水动力学问题的数值模拟。

关键词: 高阶谱方法; CFD 方法; naoe-FOAM-SJTU 求解器; 粘势流耦合

1 引言

对于海洋工程来说, 波浪的生成和演化一直是工程界和学术界颇为关心的问题。尤其是非规则波和真实海况的强非线性和复杂性, 使得对于结构物在不规则波和真实海况中的受力和运动响应情况的研究颇为困难。数值计算的解决了实验中需要大量耗费人力物力的情况, 同时计算流体力学的发展也使得数值水池的构建成为主流。然而, 一方面如何快速生成不规则波以及开阔海域下的波浪; 另一方面如何确保生成的波浪的准确性, 都是值得探讨的问题。

对于计算流体力学来说, 因其可以模拟复杂水面情况, 解决非线性问题以及考虑黏性效应的情况计算结果更加真实而得到广大研究者的青睐。然而对于计算流体力学方法 (CFD) 来说, 长时间模拟大范围的多向不规则波是极为耗费时间和计算资源的, 同时对于不规则波来说, 如果关注非规则波演化下的极大波对结构物的影响, 应用纯 CFD 方法来计算也极为耗时。因此, 考虑一种快速高效的造波方法, 且对其进行应用, 是本文考虑的主要内容。高阶谱方法^[1-5]是一种伪谱方法, 该方法借助快速傅里叶变换可以对水平面的速度势快速精确求解, 因此利用高阶谱方法进行造波, 可以快速准确地建造规则波、不规则波以及多向不规则波和模拟大范围的真实海况。通过将 CFD 方法与高阶谱方法进行结合, 可以对固定结构物、海洋工程结构物、FLNG 船以及船舶的自航操纵在不规则波以及多向不规则波中进行模拟, 探究物体与强非线性、大波高波浪相互作用的现象。

本课题组对耦合的求解器进行了空场造波的验证^[6]，因此，在保证耦合后 CFD 区域内的波浪与 HOS 造波结果相一致的情况下，我们对 CFD 区域内加入物体进行了数值模拟。

对于该耦合方法来说，主要的优势体现在保留了应用 CFD 方法计算物体时的真实性和处理复杂问题的机动性的同时，相应减少了 CFD 计算需要的大量资源。对于非规则波来讲，如果应用 CFD 进行计算，需要保证在物体前方至少保留一到两个波长来保证波浪的演化发展。同时，非规则波的随机性导致波浪的波高演化随机发生，对于工程上最关心的恶劣海况，可能会在几百秒或者是几千秒之后发生。这对于全域 CFD 来讲，是一件极为耗时、且会发生数值粘性耗散导致波浪无法达到理论值的情况。因此，我们采用势流理论进行对波浪的演化计算，一是可以得到完全发展起来的波浪，减少应用全域 CFD 计算波浪发展演化的时间；而是通过程序可以任意选取 HOS 波浪结果中的时间和区域，可以对某一时刻产生的极大波进行模拟研究，或对某一区域产生的畸形波进行研究。

本文将从以下几个部分进行探讨：①对高阶谱方法与本组 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU 以及 naoe-FOAM-os 的耦合方法进行简要介绍，以及演示应用高阶谱方法^[7-8]进行的造波；②对耦合后的求解器进行数值模拟，验证其是否可以计算平台在耦合方法下的波浪物体相互作用情况；③对船舶在波浪中运动，验证耦合方法下的波浪增阻，模拟 FLNG 船在多向不规则波中与舱内流体晃荡的耦合情况。

2 高阶谱方法与单向耦合方法

本节将会简要介绍高阶谱方法（HOS）和应用 HOS 与 CFD 进行单向耦合的方法。

HOS 方法是应用伪谱法求解势流理论中动力运动自由面边界条件的偏微分方程而来的一种快速速度势展开的方法。自由面动力边界条件为

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + gz + \frac{1}{2}(\nabla \phi)^2 = 0 \quad (1)$$

其中 ϕ 为速度势， g 为重力加速度， z 是垂直方向坐标， t 为时间。自由面运动边界条件为：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla_x \phi \cdot \nabla_x \eta = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (2)$$

其中 η 为自由面波高。对于高阶谱方法来说，利用对于水平面速度势进行对一个小波陡的同阶小量进行摄动展开，这样我们给定小量一个阶数 M ，得到：

$$\phi(\mathbf{x}, z, t) = \sum_{m=1}^M \phi^{(m)}(\mathbf{x}, z, t) \quad (3)$$

对 m 阶的 $z = \eta$ 的速度势进行在 $z = 0$ 处傅里叶展开：

$$\phi^s(\mathbf{x}, t) = \phi(\mathbf{x}, \eta, t) = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{M-m} \frac{\eta^k}{k!} \frac{\partial^k}{\partial z^k} \phi^{(m)}(\mathbf{x}, 0, t) \quad (4)$$

在满足拉普拉斯方程和边界条件下, 将方程 (1) 和 (2) 写成最终形式:

$$\eta_t + \nabla_x \phi^s \cdot \nabla_x \eta - (1 + \nabla_x \eta \cdot \nabla_x \eta) \left[\sum_{m=1}^M \sum_{k=0}^{M-m} \frac{\eta^k}{k!} \sum_{n=1}^N \phi_n^{(m)}(t) \frac{\partial^{k+1}}{\partial z^{k+1}} \psi_n(\mathbf{x}, 0) \right] = 0 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \phi_t^s + \eta + \frac{1}{2} \nabla_x \phi^s \cdot \nabla_x \phi^s - \frac{1}{2} (1 + \nabla_x \eta \cdot \nabla_x \eta) \times \\ & \left[\sum_{m=1}^M \sum_{k=0}^{M-m} \frac{\eta^k}{k!} \sum_{n=1}^N \phi_n^{(m)}(t) \frac{\partial^{k+1}}{\partial z^{k+1}} \psi_n(\mathbf{x}, 0) \right]^2 = -Pa \end{aligned} \quad (6)$$

方程 (5) 和方程 (6) 为展开成关于模态波高 $\phi_n^{(m)}$ 的 ϕ^s 和 η 的方程。这些变量可以根据时间和初始化条件得到。

在得到 HOS 关于速度、水平面波高以及压力等参数的情况下, 本文应用开源 HOS 软件 HOS-ocean^[7]和 HOS-NWT^[8]得到结果, 通过 Grid2Grid^[9]将 HOS 的结果进行三维重构, 并将该数据写成可以与 CFD 软件进行数据交换。利用 OpenFOAM 中的开源程序包 waves2Foam^[10]中的松弛区, 本文添加了一个与 HOS 相交流的接口, 可以将 HOS 的结果提供给 CFD 计算域。

$$\phi = \alpha_R \phi_{\text{computed}} + (1 - \alpha_R) \phi_{\text{target}} \quad (7)$$

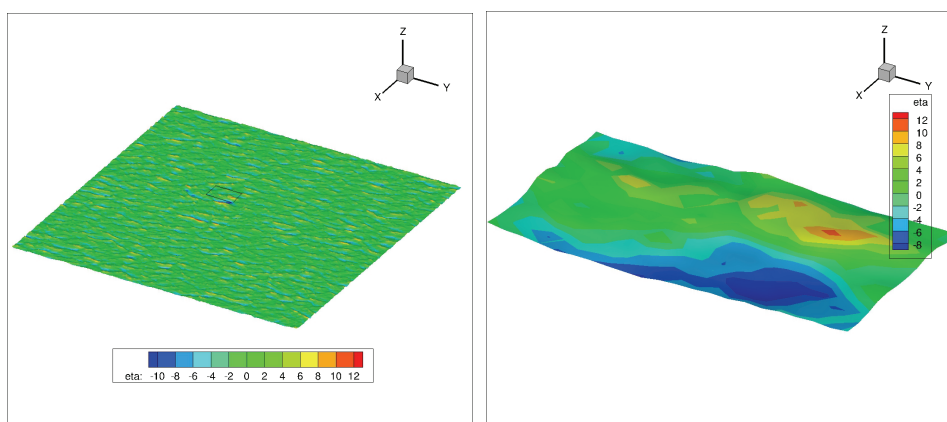
在利用 HOS 提供造波信息后, 重新编译本课题组 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU 和 naoe-FOAM-os, 可以进行波浪与物体的相互作用数值模拟。

3 数值结果

3.1 开阔海域下的高阶谱方法造波

对于本文中的 HOS 结果均采用开源软件 HOS-ocean^[7]和 HOS-NWT^[8]得到。文中的规则波与单向不规则波均采用 HOS-NWT 计算得到, 多向不规则波则采用 HOS-ocean 进行计算。图 1 所以为利用 HOS-ocean 计算得到的多向不规则波, 该波浪场的区域为 4.2km×4.2km, 采用 JONSWAP 谱得到的 $H_s=10.5\text{m}$, $T_p=9.5\text{s}$ 的开阔海域下的真实海浪场情况。在长时间模拟的情况下, 当 $t=627\text{s}$ 时, 在图 1 (a) 所示黑色框的区域内, 将会出现畸形波, 如图 1 (b) 所示。利用高阶谱方法, 可以快速得到恶劣情况下的波浪。同时, HOS-ocean 也可以模拟聚焦波。图 2 所示为 ITTC 波浪谱得到的 $H_s=2.4\text{m}$, $T_p=7.07\text{s}$ 的聚焦波, 聚焦时间为 49.5 秒, 波浪场区域为 1.5km×1.5km。

在应用高阶谱方法可以数值模拟真实海况的情况下, 可以对物体在海浪中的运动响应和受力情况进行进一步的分析。



(a) JONSWAP 谱全场多向不规则波 (b) 出现畸形波的区域
图1 基于 HOS-ocean 建造的 JONSWAP 谱多向不规则波

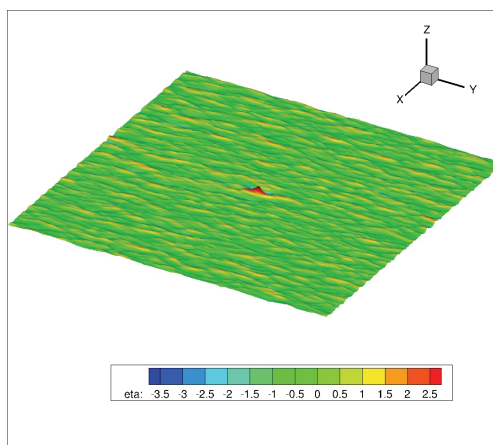


图2 基于 HOS-ocean 建造的聚焦波

3.2 固定平台（圆柱）在波浪中的数值模拟

首先对于固定平台进行了耦合方法造波下的数值模拟。基于耦合方法，对圆柱平台进行了规则波、单向不规则波和多向不规则波的数值模拟。

3.2.1 规则波工况

本节主要探讨了对于耦合方法造波情况下，计算域的大小对圆柱与波浪相互作用的影响。本节主要应用规则波，对两种不同 CFD 计算域下的固定圆柱进行了数值模拟，来比较计算域大小对结果的影响。计算工况如表 1 所示。图 3 所示为计算域配置，网格示意图如图 4 所示，总网格数为 27 万，总 CPU 时间为 73039 秒。图 5 和图 6 分别为在纯 CFD 区域内和在 HOS 全场下的流场信息。波浪会在遇到立柱时沿其迎浪面进行爬升，另一部分波浪将分成两股从侧面推进，形成“边波”。而边波最终会在背面叠加，波面大幅度上升。可以

看出，在外场计算域扩大的情况下，CFD 内的计算可以免去等待波浪发展的时间。

表 1 单圆柱计算工况

参数名称	数值
圆柱直径/m	16
圆柱吃水/m	24
波长/m	76.44
波高/m	4.7775
波浪周期/s	7

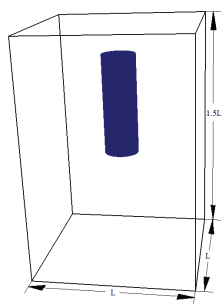


图 3 单圆柱计算域布置

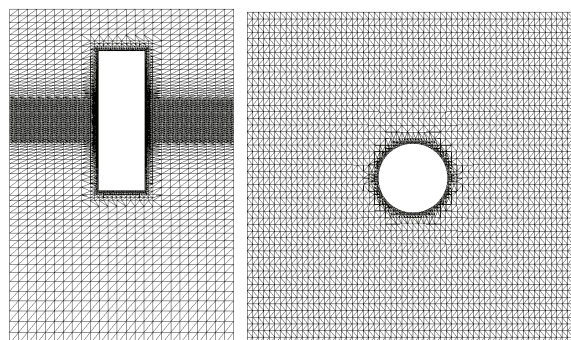


图 4 平面网格布置

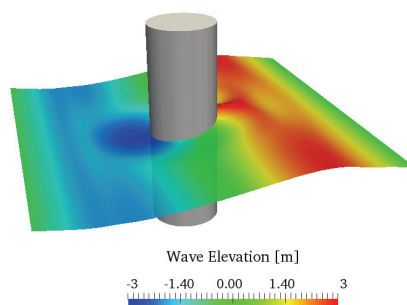


图5 T=29.4s 时 CFD 计算域内波面图

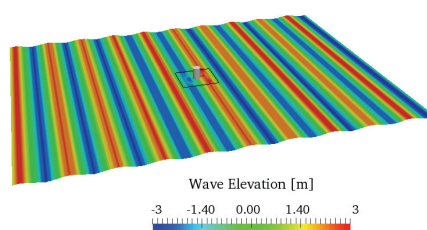
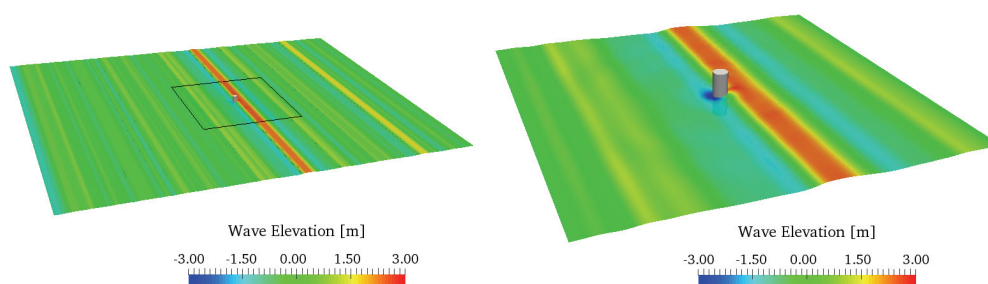


图6 T=28.7s 时全场计算域内波面图

3.2.2 不规则波工况

本节则为单向不规则波与多向不规则波与圆柱相互作用的结果。单向不规则波浪与圆柱相互作用如图7所示。其中 CFD 计算域: $-76.44\text{ m} < x < 76.44\text{ m}$, $-76.44\text{ m} < y < 76.44\text{ m}$, $-76.44\text{ m} < z < 38.22\text{ m}$, 水深 d : 76.44 M . 网格: 114.6 万 HOS 计算域: $x: 20\lambda_p$, $y: 20\lambda_p$, 波浪为 JONSWAP 谱, $H_s=2.8\text{m}$, $T_p=5\text{s}$ 。图示为 CFD 计算为 33s 时刻, 有一个较大的波峰经过圆柱, 使得圆柱周围出现了波浪反射的现象, 即边波在背面进行叠加致使波高陡然增大。图8所示为在圆柱 x 方向 $\pm 8.2063\text{m}$ 处设置的浪高仪的时历曲线。同时对波浪在圆柱体上的受力情况进行了输出 (图9)。



(a) 全场计算域内波面

(b) CFD 计算域内波面

图 7 T=33s 时波面图

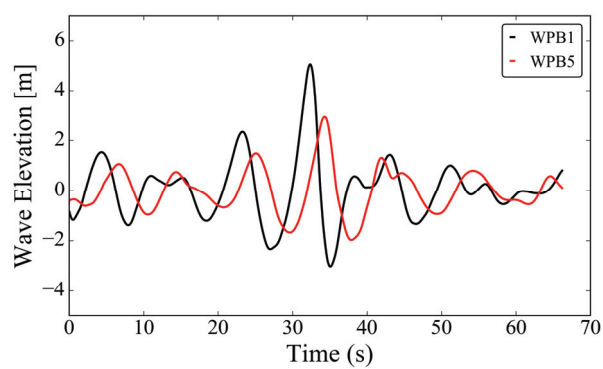


图 8 圆柱周围波面演化时历曲线

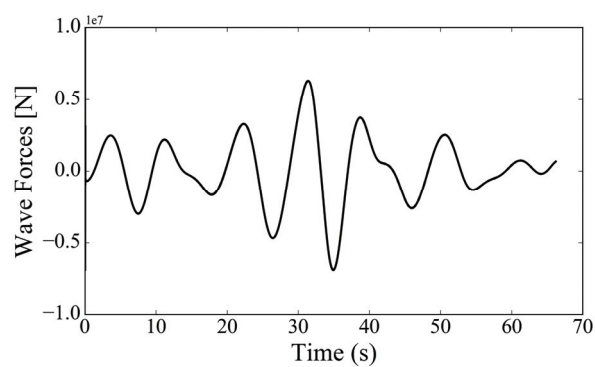


图 9 圆柱受力时历曲线

多向不规则波与圆柱相互作用如图 10 所示, CFD 计算域为: $-76.44 \text{ m} < x < 76.44 \text{ m}$, $-76.44 \text{ m} < y < 76.44 \text{ m}$, $-76.44 \text{ m} < z < 38.22 \text{ m}$, 水深为 76.44 m . 网格 114.6 万, HOS 计算域: $x: 40\lambda_p$, $y: 20\lambda_p$. 波浪选取 JONSWAP 谱 $H_s=2.8\text{m}$, $T_p=10\text{s}$, 波浪方向参数为 1.57 。多向不规则波的波浪情况更为复杂, 波频和波长的数据和随机性更多, 物理情况更为复杂。

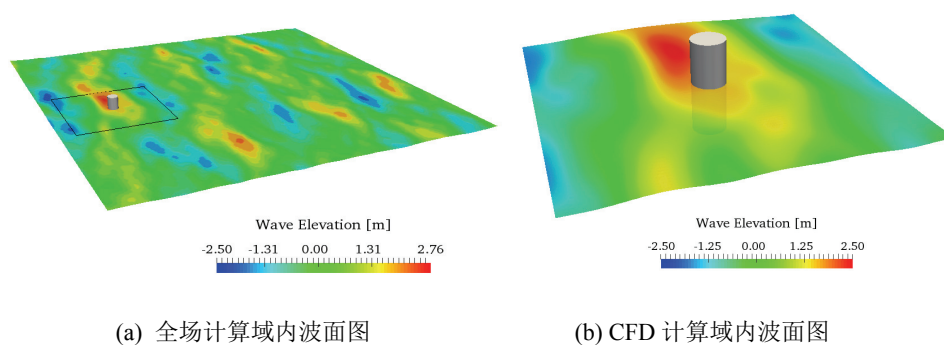


图 10 $T=8\text{s}$ 时波面图

3.3 FPSO 船舶在多向不规则海域中的数值模拟

FPSO 船舶在海洋中进行作业时, 会遭遇的真实海况多为多向不规则波。对于带有液舱的 FPSO 船舶来说, 复杂的海洋工况会使得液舱内的流体的运动更加复杂。HOS 计算域为 $60\text{m} \times 50\text{m}$, 波浪为 $H_s=0.1\text{m}$, $T_p=1.5\text{s}$, 波浪谱为 JONSWAP 谱的多向不规则波。外域 HOS 以及多向不规则波采用模型尺度。FPSO 船舶长为 2.85m , 为模型尺度, 前后两个液舱, 充液率前后舱为 $19.5\%-15.8\%$ 。图 11(b)所示为局部图, 可以看出波浪在船舶周围的爬升, 以及流体在液舱里的剧烈晃动。观察两液舱可以发现, 前舱的液体出现了明显的绕 y 轴晃荡的情况, 并在舱壁产生了爬升和翻卷的现象; 而后舱的液体则为绕 x 轴晃荡的情况。因为波浪的多向性, 因此可以看到明显的前后液舱晃荡方向不同步的现象。

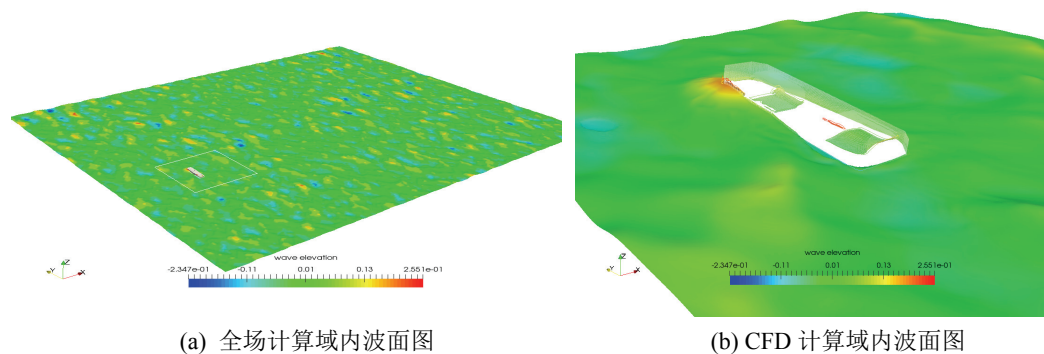


图 11 FPSO 船舶在多向不规则波中的示意图

3.4 船舶波浪增阻

在耦合模型与重叠网格结合后，我们可以计算更为广泛的海洋工程难题。本节对船舶在波浪中的波浪增阻问题应用耦合模型进行了数值模拟和验证。如图 11 所示，采用 KCS 船舶模型，船型的尺度如表 2 所示。船舶航速为 2.017m/s，采用重叠网格方法，使得 CFD 计算域可以在 HOS 域中进行移动，数值模拟真实情况中的船舶运动情况。



图 11 KCS 模型

表 2 KCS 船型主尺度

主尺度	单位	全尺度	模型尺度
缩尺比	-	-	37.9
垂线间长	m	232.5	6.0702
水线宽	m	32.2	0.8498
吃水	m	19	0.2850
排水量	t	51958719	955.7888
湿表面积	m ²	9424	3.747
重心纵向位置	-	-1.48	-1.48
重心垂向位置	m	-	0.093

KCS 船在 $\lambda/L=1.15$ 的一阶 Stokes 深水规则波中垂荡和纵摇的时历曲线如图 12 所示，可以看出垂荡和纵摇的运动响应随时间的变化具有周期性。同时，对 CFD 模型、耦合模型以及实验数据进行比较，可以看出，耦合模型得到的数值结果比纯 CFD 得到的结果与实验结果更为接近。表 3 为 CFD 模型和耦合方法得到的垂荡和纵摇的传递函数。

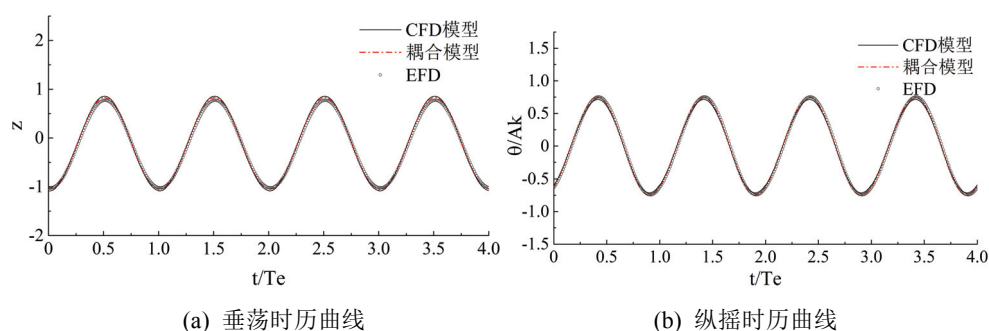


图 12 KCS 船运动时历曲线对比

表 3 垂荡和纵摇的传递函数 ($\lambda / L = 1.15$)

	CFD 模型	耦合模型
TF3	0.830	0.914
TF5	0.783	0.748

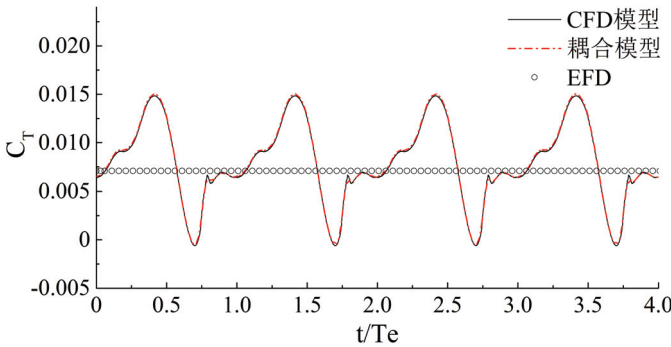


图 13 总阻力系数时历曲线

图 13 所示为 KCS 船总阻力系数时历曲线图。图中的 CFD 模型和耦合模型时历曲线相差不大。表 4 所示为波浪增阻系数在纯 CFD 方法和耦合方法下的数据。波浪增阻系数 C_{aw} 定义为：

$$C_{aw} = \frac{R_{x, calm} - R_{x, wave}}{\rho g A^2 B_{WL}^2 / L_{pp}} \tag{8}$$

表 4 波浪增阻系数

	CFD 模型	耦合模型
C_{aw}	10.912	10.664

给出 $\lambda / L = 1.15$ 工况下计算所得的全域示意图以及局部四个时刻的自由面波形图。规定规则波的波峰传播到船艏时， $t / T_e = 0$ 。图 14 为全域的流场示意图。左图为初始时刻流场，右图为 $t / T_e = 0.75$ 时刻的流场。可以看出 CFD 计算域在重叠网格的作用下在沿 x 轴负向移动，同时，由于耦合算法为单向耦合，即 CFD 域内的流场不会影响 HOS 域流场，可以看出右图在几个周期后，船舶运动产生的波浪叠加使得 CFD 域里的流场与 HOS 域的流场出现了偏差。图 15 所示为局部四个时刻的自由面波形图。

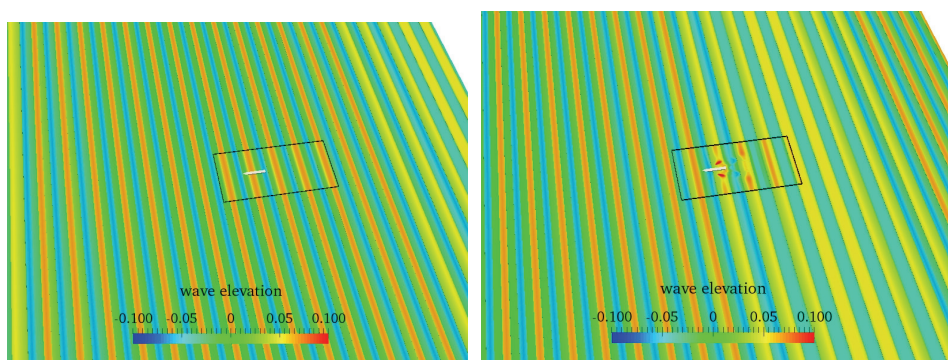
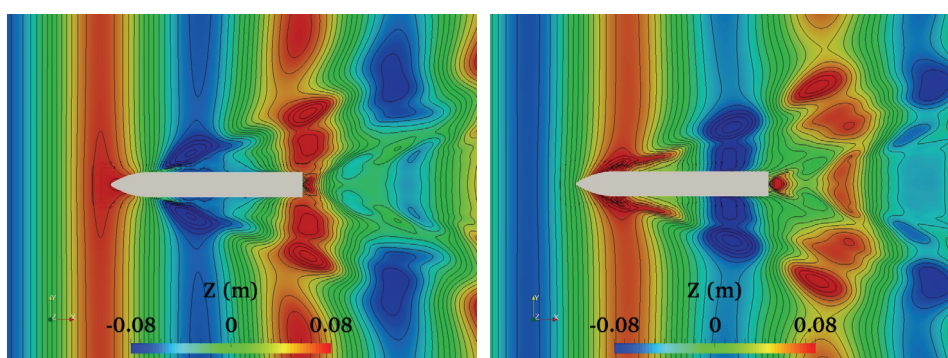
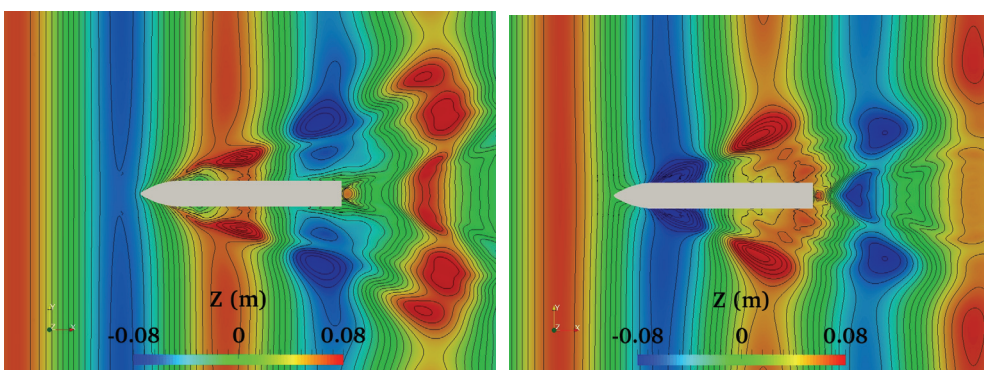


图 14 全域下的流场示意图



(a) $t/Te = 0$

(b) $t/Te = 0.25$



(c) $t/Te = 0.5$

(d) $t/Te = 0.75$

图 15 自由面波形图

本文对将势流理论高阶谱方法与 CFD 方法相结合,应用高阶谱方法快速准确造波的特性,以及 CFD 方法中粘流理论的优势,给出了平台在规则波、单向不规则波、多向不规则

波中的波浪平台相互作用现象；并模拟了带有液舱的 FPSO 船在多向不规则波中的液舱晃动现象；基于重叠网格，模拟计算了规则波中的 KCS 船波浪增阻问题，并与实验和纯 CFD 方法进行了对比验证。

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 Dommermuth D G, Yue D K P. A high-order spectral method for the study of nonlinear gravity waves. J. Journal of Fluid Mechanics, 1987, 184: 267-288.
- 2 Schmid PJ, Henningson D S. Stability and transition in shear flows. New York, Springer Verlag, 2000.
- 3 West B J, Brueckner K A, Janda R S, Milder D M, Milton R M. A new numerical method for surface hydrodynamics. J. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1987, 92(C11): 11803-11824.
- 4 Toffoli A, Onorato M, Bitner - Gregersen E M, Mobaliu J. Development of a bimodal structure in ocean wave spectral. J. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2010, 115(C3)
- 5 Dommermuth D. The initialization of nonlinear waves using an adjustment scheme. J. Wave Motion, 2000, 32(4): 307-317.
- 6 赵西增, 孙昭晨, 梁书秀. 高阶谱数值方法及其应用. J. 船舶力学, 2008, 12(5): 685-691.
- 7 Yuan Z, Decheng W, Benjamin B, Pierre F. Regular and Irregular Wave Generation in OpenFOAM using High Order Spectral Method, The 13th OpenFOAM Workshop (OFW13), June 24-29, 2018, Shanghai, China, pp.189-192
- 8 Ducrozet G, Bonnefoy F, Le Touzé D, Pierre F. HOS-ocean: Open-source solver for nonlinear waves in open ocean based on High-Order Spectral method. J. Computer Physics Communications, 2016, 203: 245-254.
- 9 Ducrozet G, Bonnefoy F, Le Touzé D, Pierre F. Implementation and validation of nonlinear wavemaker models in a HOS numerical wave tank. J. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2006, 16(03).
- 10 Choi Y M, Gouin M, Ducrozet G, Benjamin B, Pierre F. Grid2Grid: HOS Wrapper Program for CFD solvers. J. arXiv preprint arXiv:1801.00026, 2017.

Numerical simulation based on a coupled method with High-Order Spectral method and CFD method

ZHUANG Yuan, WAN De-cheng

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

Abstract: High-Order Spectral method (HOS) is a pseudo-spectral method, which exhibits high efficiency and accuracy in dealing with propagation of irregular waves or open-sea waves. In this paper, we combined HOS with our in-house CFD solver, naoe-FOAM-SJTU and naoe-FOAM-os, to show the ability of our new combined solver in numerical simulations. The combination of HOS and CFD not only dismiss the time consuming in nonlinear wave propagation, but also solve the problem in complex phenomenon during wave and structure interaction.

Key words : High-Order Spectral method; CFD method; naoe-FOAM-SJTU solver; potential-viscous combination.