

基于 HOS 方法的 KCS 运动响应与波浪增阻数值研究

郭浩, 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: 本研究将高阶谱 (HOS) 方法与自主开发的 CFD 求解器 naoeFOAM-os-SJTU 相结合, 研究规则波中 KCS 的阻力增值和运动响应的特性。采用 HOS 方法生成 Stokes 一阶深水规则波作为无黏的外域波浪场, 基于 naoeFOAM-os-SJTU 求解器采用重叠网格技术数值求解黏性的内域波浪场中 KCS 的运动, 两区域交界处通过松弛区 (relaxation zone) 进行信息传递。通过对比 HOS 方法模拟的波浪场参数与 CFD 数值造波以及试验结果, 验证了 HOS 方法的准确性并分析了其造波的高效率优势。然后研究了 $Fr=0.261$ 的 KCS 船在 $\lambda/L=1.15$ 的迎浪规则波中的阻力与运动, 并采用快速傅里叶变换 (FFT) 对共振工况下的阻力与运动响应进行了频谱分析, 验证了黏势流耦合方法对规则波中船舶运动研究的适用性。本文将远场的势流求解方法与黏性数值方法相结合, 在保证计算准确性的同时提高了数值计算效率, 可为船舶在波浪中的波浪增阻与运动响应研究提供重要参考。

关键词: HOS 方法; 规则波; 阻力增值; 运动响应; KCS

1 引言

船舶共振工况下的波浪增阻与运动响应问题是船舶设计的重点关注领域。因为船舶在波浪中航行相较于静水所受到的阻力有一定增加的现象, 为精确估算燃油消耗和主机功率等以满足 EEDI 和 EEOI 的要求^[1], 需要在设计阶段考虑由于波浪和风的作用引起的船舶阻力增加值。此外, 迎浪中船舶会发生显著的垂荡和纵摇运动, 这不仅会影响船舶的操纵性和耐波性, 还会对船舶阻力产生重要影响。特别是船舶与波浪处于共振状态时, 显著的船舶运动会大幅增加波浪增阻系数, 给船舶带来较大的燃油消耗, 使船舶经济性大大降低。

在船舶所受的波浪力与波浪中船舶运动的预报问题中, 船模试验是势流理论和 CFD 方法的基础, 但由于试验设备的局限性, 试验方法难以完整呈现出船体周围复杂的流场情况, 且必须考虑高昂的试验设备和试验成本。基于势流理论的方法虽然计算效率高, 但不能准确预报波浪破碎、大幅度运动等强非线性现象和短波情况下的黏性流场问题。近年来, CFD 技术在船舶水动力性能预报方面发挥着重要作用。大量科学研究^[2-3]表明 CFD 方法可以较精确地预报波浪中船舶多自由度运动等非线性问题。Sadat-Hosseini 等⁴对 KVLCC2 固定和放开纵摇运动的情况进行了试验研究和 CFD 计算, CFD 计算结果与试验结果吻合较好, 并且能够清晰地展现船体周围的流场以及尾流场状况。Guo 等^[5]也预测了 KVLCC2 在迎浪规

则波中的波浪增阻和运动响应,然后将 RANS 结果与势流结果^[6-8]进行了比较,发现 RANS 方法较势流方法更为准确。此外, Castiglione 等^[9]采用 RANS 方法研究了迎浪规则波中高速双体船的耐波性能。对于 KCS 船 (KRISO 3600 TEU Container Ship), Simonsen 等^[10]利用 URANS 方法和动网格方法研究了 KCS 船模以不同航速航行时纵摇、垂荡和阻力增加值的变化。然而, CFD 方法往往需要较长的计算时间,特别是船舶运动幅值较大时,动网格往往难以满足数值准确性要求,需要将重叠网格技术加入到数值求解中,这又会增加计算资源。因此黏势流耦合方法是一个合适的手段,它结合了势流的高效率优势,又能在船舶大幅运动问题中保证求解的准确性。

高阶谱 (High Order Spectral, 简称 HOS) 方法是一种通过快速傅里叶变换求解无黏非线性问题模拟自由面波动的方法,用于生成波浪环境的外域波浪场,这为船舶运动问题中数值波浪场的产生提供了有利的工具。本文的黏势流耦合模型是基于 HOS-NWT 建立而来,采用 Waves2Foam 中的松弛区造波边界建立该模型。HOS-NWT 由法国南特理工 LHEEA 实验室于 2016 年开发并发布的开源求解器,可用于快速生成规则波和不规则波,且由于没有黏性,波浪不会因为长距离传播而衰减,采用 HOS 造波为波浪中船舶运动研究提供了准确可靠的波浪环境。而基于 CFD 方法的 naoeFOAM-os-SJTU 求解器可以真实模拟结构物附近的自由面非线性变形及黏性效应等现象,保证规则波中船舶运动的求解准确性,因此将其运用于船体附近的内域波浪场。目前几乎没有将 HOS 造波方法应用于波浪中船舶的运动响应研究领域的相关文献发表,因此本文对该问题的研究是对该数值求解方法的初步探索与验证,具有重要的研究意义。

本文将 HOS 方法与 CFD 方法相结合,采用 HOS 方法生成充分发展的外域波浪场,充分发挥其造波的高效率优势,采用 naoeFOAM-os-SJTU 求解器中的重叠网格技术求解船体附近黏性内域波浪场中 KCS 船的阻力增值和运动响应。两区域交界处通过松弛区 (relaxation zone) 进行信息交换,从而达到高效求解整个计算域的目的。为了验证 HOS 造波的准确性,将 HOS 方法模拟的波浪场与 CFD 数值造波结果以及试验结果进行了对比。然后研究了共振工况下 KCS 船的阻力与运动,并采用快速傅里叶变换 (FFT) 对数值结果进行了频谱分析。本文的数值方法证明了将高阶谱方法加入 CFD 模拟的可行性,在保证计算准确性的同时提高了数值计算效率,可为波浪中结构物运动的研究提供重要参考。

2 数值方法

2.1 HOS 方法

HOS 方法以伪谱方法和快速傅里叶变换 (FFT) 为基础,于 1987 年由 West^[11]和 Dommermuth 等^[12]提出,能够对完全非线性波浪演化进行高效准确模拟。该方法针对无黏不可压缩流体进行求解,流场是基于势流理论的无旋各向同性流场。流体速度势 $\phi(x, y, z, t)$ 满足 Laplace 方程,结合波面抬高 $z=\eta(x, y, t)$, 波面速度势 $\phi^s(x, y, t)$ 可以表示为:

$$\phi^s(x, y, t) = \phi(x, y, \eta(x, y, t), t) \quad (1)$$

波面速度势 ϕ^s 对时间和水平空间求导:

$$\phi^s_t(x, y, t) = \phi_t(x, y, \eta(x, y, t), t) + \phi_z(x, y, \eta(x, y, t), t)\eta_t(x, y, t) \quad (2)$$

$$\nabla \phi^s(x, y, t) = \nabla \phi(x, y, \eta(x, y, t), t) + \phi_z(x, y, \eta(x, y, t), t) \cdot \nabla \eta(x, y, t) \quad (3)$$

式中梯度算子 ∇ 表示在 x 和 y 方向的水平梯度。

考虑造波板造成的附加速度势 ϕ_a 的影响，自由面运动学和动力学边界条件表示为：

$$\eta_t + \nabla(\phi^s + \phi_a) \cdot \nabla \eta - \partial_z \phi_a - (1 + \nabla \eta \cdot \nabla \eta) \phi_z(x, y, \eta, t) = 0 \quad (4)$$

$$\phi_t^s + \eta + \frac{1}{2} \nabla \phi^s \cdot \nabla \phi^s - \frac{1}{2} (1 + \nabla \eta \cdot \nabla \eta) \phi_z^2(x, y, \eta, t) + \nabla \phi^s \cdot \nabla \phi_a + \frac{1}{2} |\tilde{\nabla} \phi_a|^2 + \partial_t \phi_a = 0 \quad (5)$$

式中 $\partial_z \phi_a$ 表示附加速度势关于 z 的导数， $\partial_t \phi_a$ 和 $\partial_t \eta$ 分别表示附加速度势和波面抬高关于时间 t 的导数， v 为造波板的水平速度， $\tilde{\nabla} \phi_a$ 为波面处附加速度势的水平梯度。结合以上边界条件与控制方程，一旦给定 $t=0$ 初值时的波面速度势 $\phi^s(x, y, 0)$ 和波面抬高 $\eta(x, y, 0)$ ，就能一直计算。在 HOS 方法中，将速度势 ϕ 摄动展开成 M 阶摄动级数，然后在波面处将每一阶分量 $\phi^{(m)}$ 绕 $z=0$ 进行泰勒展开，并保留 M 阶，由该时刻的 ϕ^s 和 η 求解下一时刻的值，从而得到波面的演化结果。

2.2 黏势流耦合求解器

基于以上高阶谱方法理论，运用 HOS-NWT 可以演化出准确的外域波浪场。为了将该波浪场用于波浪中船舶运动的数值模型中，必须构建一个耦合波浪求解器。该耦合求解器基于 Jacobsen¹³开发的 Waves2Foam 改进而来，它通过求解黏性的 Navier-Stokes 方程，并结合流体体积法¹⁴（Volume of Fluid，以下简称 VOF）对自由液面进行求解。黏性内域波浪场的控制方程为非定常不可压缩的雷诺平均 Navier-Stokes（RANS）方程：

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

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(\mathbf{U} - \mathbf{U}_g) \mathbf{U}) = -\nabla p_d - g \cdot x \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu_d \nabla \mathbf{U}) \quad (7)$$

式中， $\mathbf{U}$ 为流场的速度场， $\mathbf{U}_g$ 为网格移动速度； p_d 为动压力； ρ 和 g 分别为重力加速度和流体（气体或液体）密度， $\mu_{eff} = \rho(\nu + \nu_t)$ 为有效动力黏性系数，其中 ν 表示运动黏度， ν_t 表示涡黏度； f_σ 为表面张力项。

由于 RANS 方程是不封闭的，本文采用 Menter^[15]提出的 SST $k-\omega$ 湍流模型封闭此方程。该模型是一种结合了 $k-\omega$ 模型和 $k-\varepsilon$ 模型的优点的湍流模型，采用 $k-\omega$ 处理近壁面的边界层区域的流动，并采用 $k-\varepsilon$ 求解自由剪切流区域的流动。

该耦合波浪求解器通过加入人工压缩项的 VOF 方法处理空气和水两相流自由面。VOF 方法实质上是定义流体在每个控制单元中的体积函数（公式 8），由网格单元中的流体体积量及网格体积决定体积函数的取值，从而实现对自由液面的捕捉。体积分数函数 α 定义为一个网格单元内液体所占的体积比例，该体积分数函数 α 满足的两相流的关系和带有人工压缩项的输运方程为：

$$\begin{cases} \alpha = 0 & \text{空气} \\ \alpha = 1 & \text{水} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{交界面} \end{cases} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(U - U_g)\alpha) + \nabla \cdot (U_r(1 - \alpha)\alpha) = 0 \quad (9)$$

为了将 HOS 产生的外域波浪场参数加入内域波浪场，构建单向耦合的数值求解器，需要将 HOS 产生的波浪场数据通过 Waves2Foam 中的松弛区输入到黏性内域波浪场，而内域波浪场中对船舶运动的求解均不会对外域波浪场中波浪的演化产生影响，保证了波浪参数的准确性。松弛区的松弛格式为：

$$\alpha = (1 - \chi)\alpha_c + \chi\alpha_t \quad (10)$$

$$\mathbf{u} = (1 - \chi)\mathbf{u}_c + \chi\mathbf{u}_t \quad (11)$$

式中 α_c 和 $\mathbf{u}_c$ 是黏性求解器求得的体积分数和速度矢量，而 α_t 和 $\mathbf{u}_t$ 是势流求解器求得的。 χ 为权重系数，它可以表示为：

$$\chi(\xi) = 1 - \frac{\exp(\xi^\beta) - 1}{e - 1} \quad (12)$$

式中， β 一般为 3.5， ξ 在松弛区与外域波浪场交界处取 0，在松弛区与内域波浪场交界处取 1。

通过黏势流耦合模型准确生成了波浪场，而求解波浪中船体运动时，需要依靠重叠网格方法，保证共振工况下大幅度运动响应的数值求解准确性和稳定性。重叠网格方法是将物体的每个部件单独划分网格，再嵌入到背景网格当中。网格之间会有重叠部分。计算中首先按标记洞单元、活动单元、边界单元和贡献单元等，然后执行挖洞命令，去除物面内部的单元和多余的重叠单元，通过在重叠网格区域进行插值，使得每套网格可以在重叠区域的边界进行数据交换，以实现流场域的整体计算。在基于 OpenFOAM 的数值方法、数据存储方式以及非结构网格的特点上，利用插值程序 SUGGAR++ 生成重叠网格的插值信息 DCI，通过流场与 DCI 的信息交换，完成流场信息的求解。

3 数值模型

3.1 几何模型

本文以韩国海洋工程研究所 (MOERI) 提供的标准船型 KCS 为研究对象，船体主视图和主尺度见图 1 和表 1。



图 1 KCS 船主视图

表 1 KCS 船型主尺度

主尺度	单位	全尺度	模型尺度
缩尺比 λ	-	-	37.9
垂线间长 L_{pp}	m	232.5	6.0702
水线宽 B_{WL}	m	32.2	0.8498
吃水 T	m	19	0.2850
排水量 ∇	t	51958719	955.7888
湿表面积 S	m ²	9424	3.747
重心纵向位置 $LCB(\%L_{pp})$	-	-1.48	-1.48
重心垂向位置	m	-	0.093

3.2 计算域和网格

HOS 演化的外域波浪场和黏性内域波浪场均为长方体计算域,HOS 演化范围为 $0 < x < 50\lambda$, $0 < y < 30\lambda$, $0 < z < 3\lambda$ (λ 为波长, $\lambda=6.981\text{m}$)。自由面高度为 $z=0\text{m}$ 。由于 HOS 演化范围比较广,图 2 仅显示出内域波浪场的计算域,主要分为两个区域,分别划分背景网格和船体周围网格。坐标系满足右手定则,原点位于艏垂线和自由面交界处, x 轴正向指向船尾, y 轴正向为指向右舷, z 轴向上为正。背景网格的计算域尺寸为: $-\lambda < x < \lambda$, $0 < y < 1.5L_{pp}$, $-L_{pp} < z < 0.5L_{pp}$,船体周围网格的计算域尺寸为: $-0.2L_{pp} < x < 0.2L_{pp}$, $-0.2L_{pp} < y < 0.2L_{pp}$, $-0.1L_{pp} < z < 0.1L_{pp}$ 。两个区域采用重叠网格技术进行数据交换,因此船体周围网格允许发生大幅度运动。黏性内域波浪场在实际计算时需要水平偏移 to 外域波浪场内部,以便采用同一坐标系统。

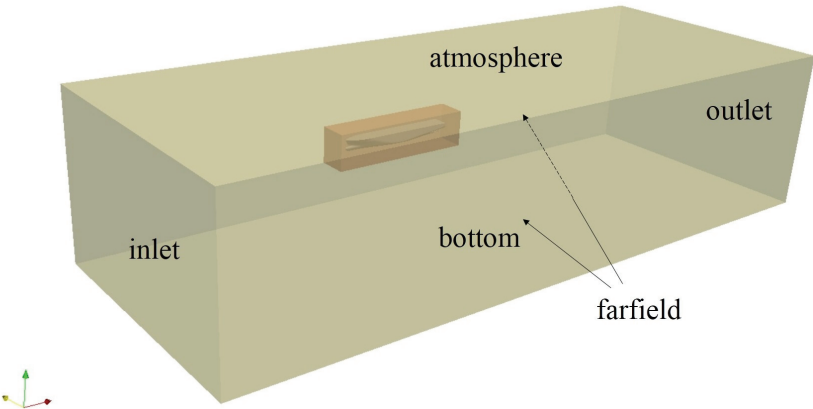


图 2 计算域示意图

为了精确地控制船体网格和自由面附近的网格尺寸,采用 HEXPRESS 对计算域划分六面体非结构网格(图 3)。网格划分主要考虑以下两点:①为了精确捕捉自由面的抬高,同时避免数值耗散引起波浪的沿程衰减,保证一个波高的范围至少有 20 个网格,且波高范围内网格的长细比最大为 4;②为了精确获取船体周围的流场信息,同时保证流场变化剧烈处(如船艏和船尾)各物理量的计算精度,需要进行相应的网格加密;船体壁面设置 7 层

边界层网格 ($y^+=30$), 同时为减少网格数量, 甲板不设置边界层。通过空场造波的验证, 本文所设置的网格可以保证波浪在演化过程中维持稳定的波浪参数, 波高不会随波浪传播过程而衰减, 为准确求解船舶运动提供了保障。

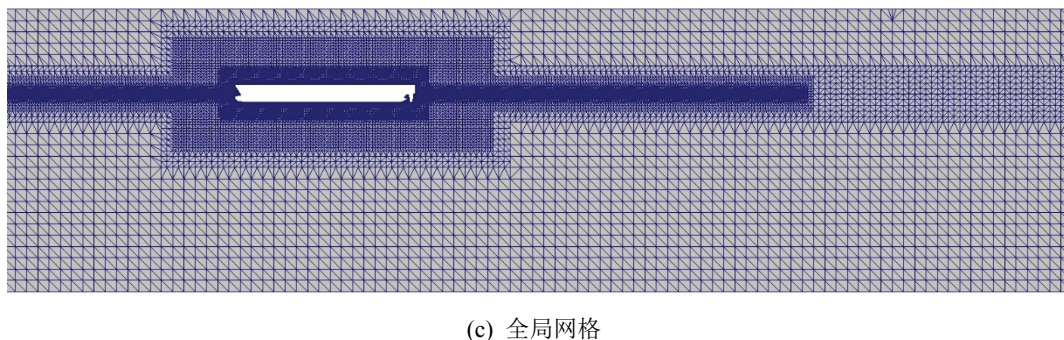
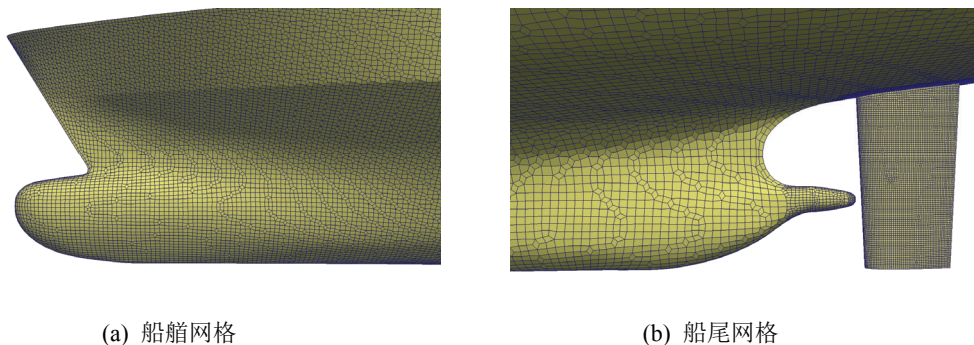


图3 船体表面与计算域的网格划分

采用耦合数值方法对 $Fr = 0.261$ 的 KCS 船的波浪增阻和运动响应进行了研究, 采用重叠网格求解波浪中船舶的运动。由于迎浪工况下垂荡和纵摇运动对阻力的影响最明显, 而其他自由度上的运动可以忽略, 因此本文仅放开垂荡和纵摇两个自由度, 固定横荡、纵荡、横摇和首摇。我们知道波长与船长接近时容易发生共振, 此时船舶发生显著的运动响应, 并使船舶阻力大幅增加, 该工况是波浪中船舶运动研究中重点关注的工况。为了研究共振工况下的船舶运动和阻力特性, 本文集中研究入射波长为 6.981m 的迎浪规则波, 即波长船长比 $\lambda/L=1.15$, 波陡 H/λ 为 $1/60$, 船舶航行时, 波浪实际作用于船体上的频率为遭遇频率 (ω_e), 周期为遭遇周期 (T_e), 遭遇频率和遭遇周期按下面的公式计算:

$$\omega_e = \sqrt{g / (2\pi\lambda)} + U_{\text{ship}} / \lambda \quad (13)$$

$$T_e = 1 / \omega_e \quad (14)$$

其中, g 为重力加速度, U_{ship} 为船速。该工况下计算所得的遭遇频率为 0.762 , 遭遇周期为 1.312s 。

3.3 网格收敛性

网格收敛性验证在静水工况下完成, 其他工况的网格均由静水阻力工况的网格改进而

来。为了减少计算结果的不确定性和避免不必要的计算量,采用了 ITTC 推荐的不确定性分析中关于网格收敛性的建议。采用 3 套不同加密等级的网格,网格沿 x, y, z 3 个方向的缩放比例为 $\sqrt{2}$ 。

船舶在静水中沿 x 方向的纵向力即静水阻力,记为 $R_{x, \text{calm}}$, 将其无量纲化得到静水阻力系数 C_T , 按式 (15) 计算:

$$C_T = \frac{R_{x, \text{calm}}}{0.5 \rho S U_{\text{ship}}^2} \quad (15)$$

其中, S 为船体湿表面积, ρ 为水的密度, U_{ship} 为船速。

将不同网格计算的网格收敛性的验证结果和试验值列于表 2。试验值来自于船舶水动力会议——Tokyo 2015。

表 2 网格收敛性验证结果

网格	网格数量	C_T (naoeFOAM-os-SJTU)	C_T (EFD)	误差
粗网格	1.43×10^6	3.792×10^{-3}	3.84×10^{-3}	-1.25%
中网格	2.36×10^6	3.827×10^{-3}	3.84×10^{-3}	-0.34%
细网格	3.21×10^6	3.828×10^{-3}	3.84×10^{-3}	-0.31%

由 3 套不同网格数量的计算结果可以看出, 计算结果表现出一致收敛的趋势, 因此采用中等网格密度的计算结果同网格依赖程度不高, 在网格数量不多的情况下保证了数值结果的可靠性。因此, 计算静水阻力采用中网格; 计算波浪中的船舶阻力与运动时, 根据静水阻力的中网格在船体和自由面附近加密网格, 自由面附近网格满足波形捕捉要求。

4 数值结果分析

4.1 静水阻力

静水阻力计算是分析波浪增阻的基础, 首先数值模拟了 $Fr=0.261$ 的 KCS 船在静水中匀速航行, 计算得到静水阻力系数、无量纲垂荡值和无量纲纵摇值 (表 3)。从表 3 中可以看出, 误差在 1.46% 以内, naoeFOAM-os-SJTU 的数值模拟结果与 Tokyo 2015 的试验结果吻合良好。

表 3 静水工况的数值结果

	CFD	EFD	误差
静水阻力系数 C_T	3.824×10^{-3}	3.85×10^{-3}	0.34%
升沉值 z/Lpp	-2.067×10^{-3}	-2.074×10^{-3}	0.337%
纵倾 θ	-0.167	-0.1646	1.46%

自由面波形可以直观地展示数值方法对自由面地捕捉能力, 这也决定了波浪场求解的准确性。图 4 展示了数值计算得到的沿船体的兴波高度曲线与 Kim 等¹⁶的试验的对比, 水平轴和垂直轴分别为无量纲化的 x 坐标和 z 坐标, 与试验的浪高仪测得的兴波高度对比可以发现, 自由面捕捉良好。这进一步验证了基于 VOF 方法的 naoeFOAM-os-SJTU 求解器对自由面的准确计算能力, 这为黏势流耦合模型的数值准确性奠定了基础。

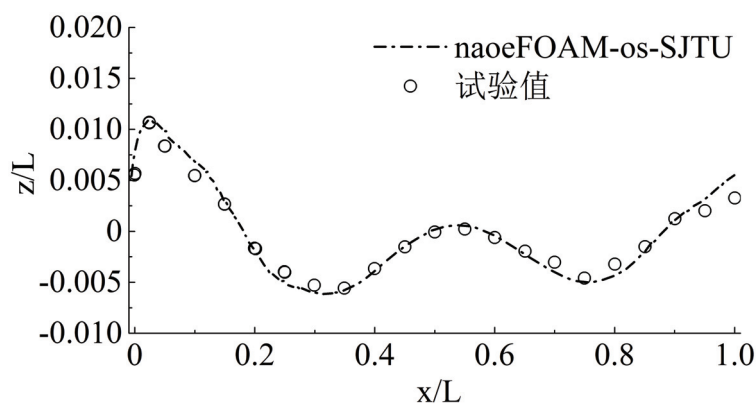


图4 兴波高度曲线图

4.2 空场造波

为了验证基于 HOS 方法耦合模型的数值波浪水池的造波效果, 不考虑船体, 在单独生成的网格中进行造波验证。分别采用 waves2Foam 和 HOS-NWT 生成 $\lambda/L=1.15$ 的一阶 Stokes 深水规则波, 在船艏位置和船艉位置处各设置一个浪高仪, 船艏位置处测波点的波高时历曲线如图 5 所示。横坐标为时间, 纵坐标为浪高仪测得的自由面波形高度。

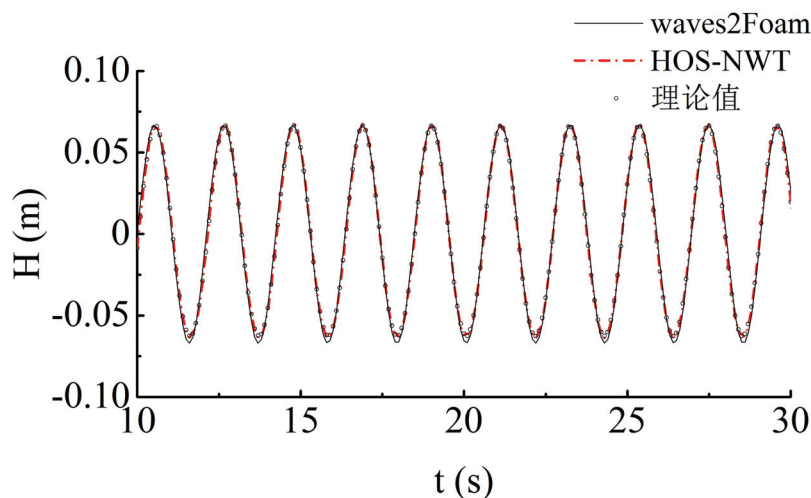


图5 波高时历曲线

将 waves2Foam 和 HOS-NWT 的空场造波结果与理论波形对比可以看出, 计算所得的波幅和波周期均与理论波形结果均十分接近。虽然 waves2Foam 和 HOS 方法均能对规则波进行准确模拟, 但对于需要长时间演化和较大区域的波浪场, HOS 方法显示出显著的高效性优势。本文采用 HOS 进行外域波浪场的演化, 波浪经过了长达 1000s 的演化, 消耗的计算时间不到一小时, 在保证波浪参数准确性和不衰减的情况下, 表现出非常高效的计算性

能。

4.3 垂荡和纵摇运动响应

船舶在航行中发生六自由度的运动（横荡、纵荡、垂荡、横摇、纵摇和首摇），由于船舶在迎浪行中时横荡、纵荡、横摇和首摇均较小，可以忽略不计。本文采用固定这四个自由度放开垂荡和纵摇两个自由度的方式，在保证计算结果准确性的同时提高了计算效率。

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 6 和图 7 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。

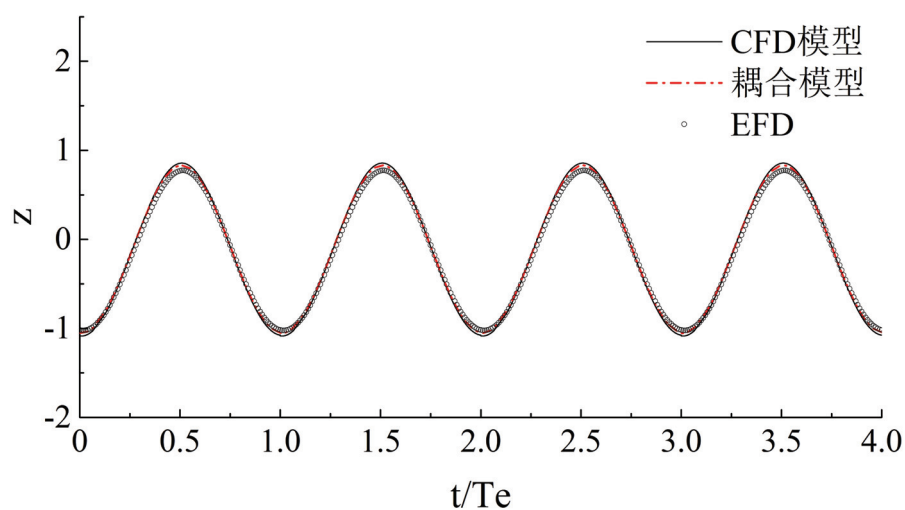


图 6 KCS 的垂荡时历曲线

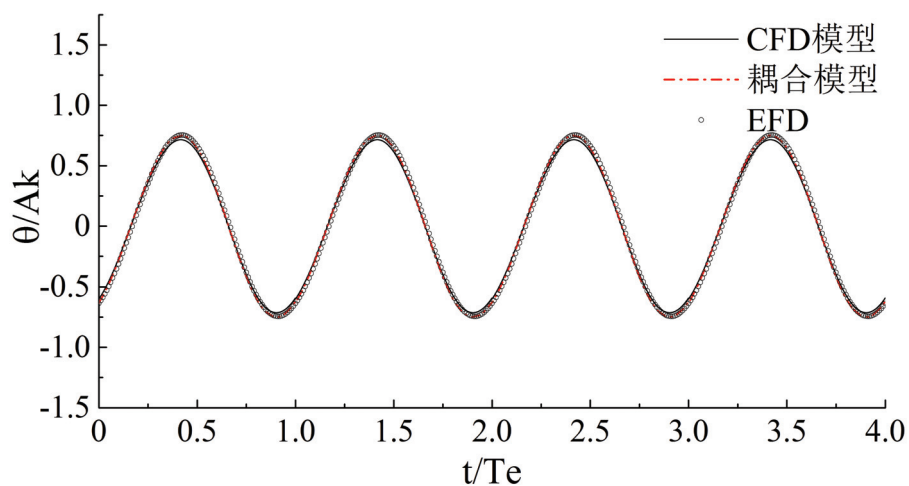


图 7 KCS 的纵摇时历曲线

通过傅里叶级数展开的方法分析了时历曲线，根据傅里叶级数展开的原理，将某个随

时间变化的变量展开为傅里叶级数的形式为:

$$\varphi(t) = \frac{\varphi_0}{2} + \sum_{n=1}^N \varphi_n \cos(n\omega_e t + \gamma_n), n = 1, 2, \dots \quad (16)$$

傅里叶级数展开的各阶级数中, 0 阶幅值为时历曲线的时间平均值。0 阶幅值和 1 阶幅值代表了函数的线性项, 2 阶及以上的幅值代表函数的非线性项。在线性问题中, 0 阶和 1 阶幅值占主要成分, 高阶幅值可以忽略不计。在非线性问题中, 高阶幅值必须考虑在内。

分别对 KCS 船在波浪中运动的垂荡和纵摇的时历曲线进行傅里叶变换, 图 8 和图 9 分别为采用 CFD 模型和耦合模型计算得到的垂荡和纵摇运动的频率曲线, 采用 CFD 模型计算和耦合模型计算的运动响应经傅里叶变换得到的频率曲线图吻合较好, 耦合模型的计算结果具有可靠性。可以看出, 垂荡和纵摇运动以波浪的遭遇频率为基频, 即 1 阶成分对应的频率 0.7019Hz 约为遭遇频率, 2 阶和 3 阶成分对应的频率均为遭遇频率的整数倍。KCS 在迎浪航行时, 垂荡和纵摇的 1 阶频率远大于 2 阶和 3 阶等阶成分, 故 1 阶成分是主要成分, 即 KCS 运动的高阶幅值较小, 线性成分占主导。

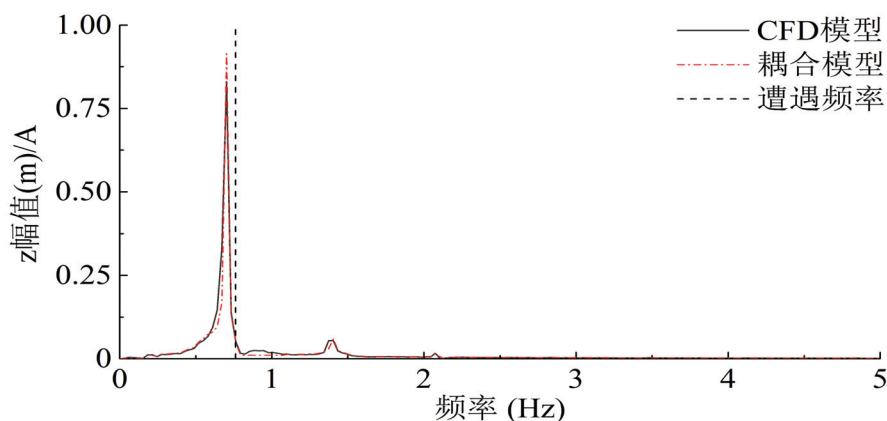


图 8 垂荡运动频率曲线

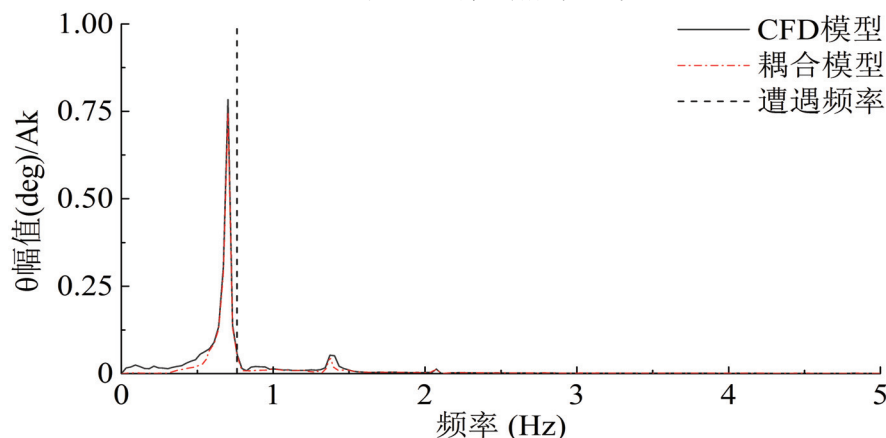


图 9 纵摇运动频率曲线

垂荡和纵摇频域曲线的 1 阶成分无量纲化后得到幅值响应算子 (Response Amplitude Operator, RAO), 即传递函数 (Transfer Function, TF)。垂荡和纵摇幅值的响应幅值算子 (RAO) 按式(17)和(18)计算:

$$TF_3 = \frac{X_3^{(1)}}{A} \tag{17}$$

$$TF_5 = \frac{X_5^{(1)}}{Ak} \tag{18}$$

其中, X_3 和 X_5 的 n 阶频率成分幅值表示为 $X_3^{(n)}$ 和 $X_5^{(n)}$, $X_3^{(1)}$ 和 $X_5^{(1)}$ 分别表示垂荡和纵摇的一阶幅值。 A 为入射波波幅, k 为入射波波数。

表 4 为 KCS 在 $\lambda/L = 1.15$ 的迎浪工况下航行时的垂荡和纵摇的传递函数。采用耦合模型计算的 TF3 较 CFD 模型计算结果 0.830 稍大, 而 TF5 较 CFD 模型计算结果 0.783 较小。总体而言, 耦合模型与 CFD 模型的计算结构几乎一致。垂荡和纵摇的传递函数均大于 0.75 且接近于 1, 因此船体的运动较为剧烈, 此时船体的固有频率与遭遇频率相差不大, 与波浪发生共振。

表 4 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

4.4 波浪增阻

为方便将本文的数值结果与试验数据比较, 将阻力值通过式 (19) 无量纲化:

$$C_T = \frac{R_{x, wave}^{(0)}}{0.5\rho S U_{ship}^2} \tag{19}$$

其中, $R_{x, wave}$ 为迎浪工况下 x 方向船舶的阻力值, ρ 为水的密度, S 为船体湿表面积。

通过式 (19) 计算得到固定和放开自由度的 KCS 的无量纲化的阻力系数 C_T , C_T 的时历曲线呈现出周期性变化, 并与试验数据 (Hosseini⁴) 对比(图 10)。图 10 中水平轴表示无量纲化的时间, 垂直轴表示总阻力系数。

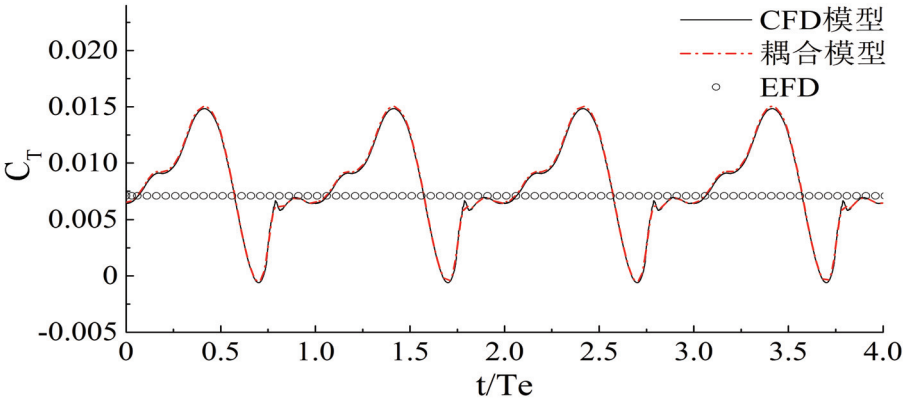


图 10 KCS 的总阻力系数时历曲线

波浪增阻系数 C_{aw} 定义为:

$$C_{aw} = \frac{R_{x, calm} - R_{x, wave}}{\rho g A^2 B_{WL}^2 / L_{PP}} \tag{20}$$

其中, A 为入射规则波的一阶谐波振幅对应的波幅, B_{WL} 为船体水线宽, L_{PP} 为垂线间长。表 5 为 CFD 模型和耦合模型计算得到的波浪增阻系数, 二者较为接近。

表 5 波浪增阻系数 ($\lambda/L = 1.15$)

	CFD 模型	耦合模型
C_{aw}	10.912	10.664

通过对总阻力时历曲线进行傅里叶变换后, 得到频率曲线图(图 11)。从图 11 中可以看出, 阻力的 1 阶、2 阶及 3 阶成分分别为 0.91、0.60 和 0.18, 2 阶和 3 阶的高阶成分较大, 阻力呈现出非线性的现象。

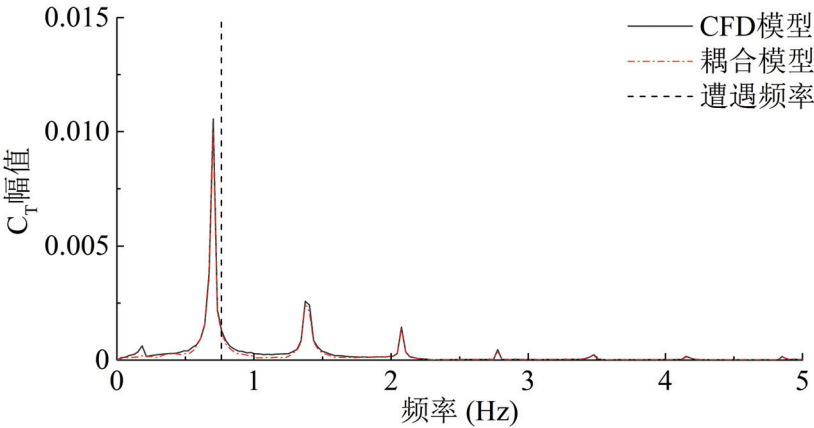


图 11 总阻力频率曲线

提取频率的峰值得到阻力中各阶频率成分, 表 6 中列出了 n 阶幅值的大小。对于 $\lambda/L = 1.15$ 的工况, 强非线性分量与线性项具有相同的数量级, 2 阶成分与 1 阶成分的比值高达 24%, 因此, 不能忽略该工况的非线性部分。

表 6 各阶阻力幅值对比

	CFD 模型	耦合模型
0 阶	0.0079	0.0080
1 阶	0.0106	0.0100
2 阶	0.0026	0.0025
3 阶	0.0014	0.0014

4.5 自由面波形图

在相同波浪工况条件下, 将 CFD 模拟结果与结合 HOS 方法后的耦合模型计算结果进行了对比。本文给出 $\lambda/L = 1.15$ 工况下两个求解器计算所得的 4 个时刻的自由面波形图。规定规则波的波峰传播到船艏时, $t/T_e = 0$ 。

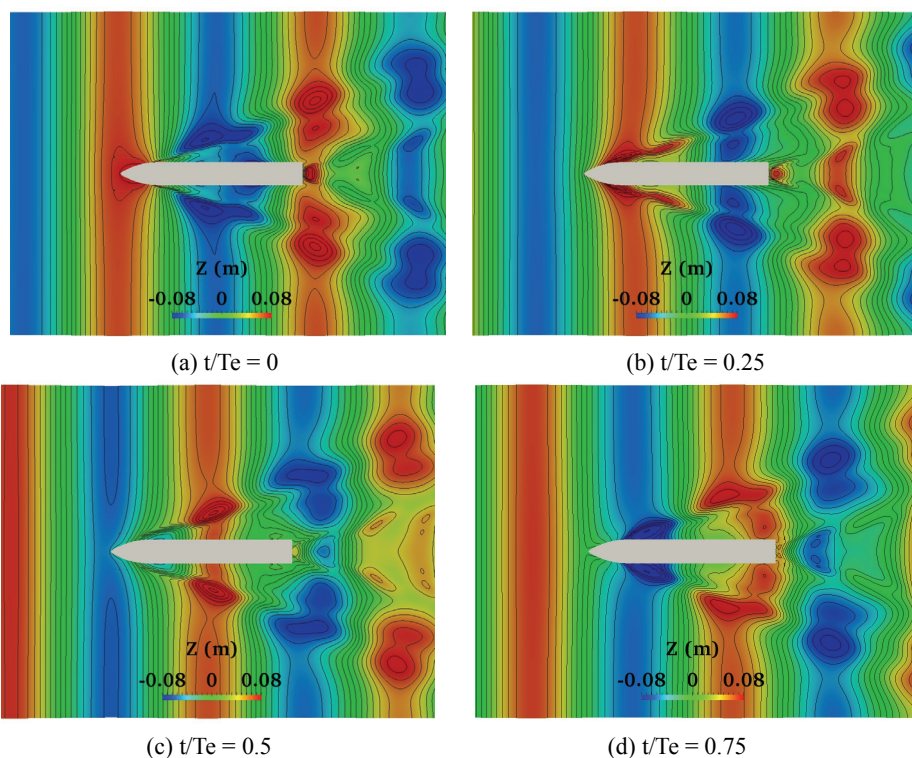


图 12 基于 CFD 模型计算得到的 KCS 附近自由面波形 ($\lambda/L = 1.15$)

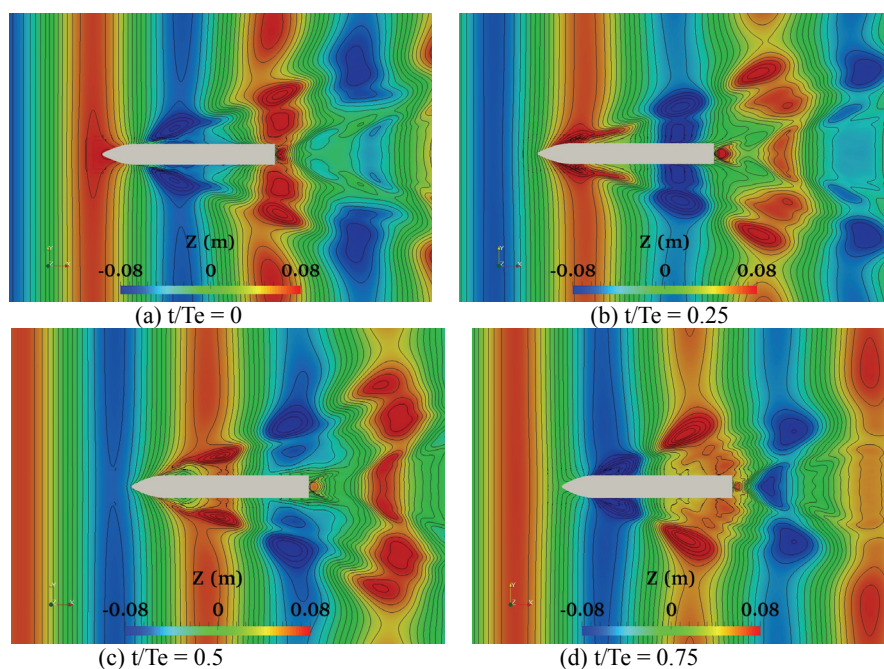


图 13 基于耦合模型计算得到的 KCS 附近自由面波形 ($\lambda/L = 1.15$)

结合了 HOS 造波的耦合模型计算波形与 CFD 计算的波形十分接近。在 $t/T_e = 0$ 时刻, 规则波的波峰达到船艏, 甲板低于自由面, 自由液面沿首部爬升, 且波浪产生翻卷。由于此时船艏接近于最低位置, 基本浸于波浪中。由于入射波和定常兴波的叠加, 波峰较入射波波峰更高, 波谷较入射波波谷更低。自由船体产生的辐射波使得放开船体自由度产生的波幅大于固定船体自由度产生的波幅。在 $t/T_e = 0.25$ 时刻, 船艏开始向上抬起, 接近于正浮状态。沿船尾波系的开尔文角的波峰线(放开船体)的长度较固定船体长。在 $t/T_e = 0.5$ 时刻, 船艏接近于最高位置, 此时的波形与 $t/T_e = 0$ 时刻的波形相反。在 $t/T_e = 0.75$ 时刻, 波峰再次出现在船艏和船尾位置处。

从船舶的运动变化情况可以看出: 随着波浪向船体后方传播, 船体产生严重的纵摇运动变化, 船艏处自由面变化较为剧烈, 且会发生轻微的甲板上浪。

5 结论

本文将高阶谱(HOS)方法与自主开发的 CFD 求解器 naoeFOAM-os-SJTU 相结合, 研究规则波中 KCS 的阻力增值和运动响应的特性。采用 HOS 方法生成 Stokes 一阶深水规则波作为无黏的外域波浪场, 基于 naoeFOAM-os-SJTU 求解器采用重叠网格技术数值求解黏性的内域波浪场中 KCS 的运动, 得出以下结论。

(1) 通过 HOS 方法和 CFD 数值造波得到的波浪场参数与理论数据对比, 验证了 HOS 方法的造波准确性, 为黏势流耦合模型对船体运动的精确求解提供了较准确的波浪环境, 并且因为 HOS 方法的势流特性, 展现出独特的无耗散特点和造波高效性, 在长时间长距离造波问题中具有良好的应用前景。

(2) 采用 HOS 与 CFD 的耦合模型计算 KCS 在共振工况下的垂荡和纵摇运动及波浪增阻, 并分析其频率分布情况, 与 CFD 计算结果以及试验结果进行对比, 验证了该耦合模型的求解准确性。在极值点附近存在微小的数值误差, 主要是引入 HOS 造波后流体黏性的影响减小导致的。

(3) 在船舶与波浪共振工况下, 将 CFD 模拟与结合 HOS 方法后的耦合模型计算所得的自由面波形图进行了对比, 在一个周期内 4 个时刻的波面高度分布均十分吻合, 表明了耦合模型应用于波浪中船舶运动问题的适用性。本文的计算结果展示了 HOS 方法在船舶运动响应与波浪增阻研究领域的应用, 提供了一种较新颖的数值解法, 可为船舶运动响应研究提供方法的借鉴。

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 MEPC 62/24/Add.1. Amendments to the annex of the Protocol of 1997 to amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto. IMO, London, 2011.
- 2 Orihara H., Miyata H. Evaluation of added resistance in regular incident waves by computational fluid dynamics motion simulation using an overlapping grid system. *J Mar Sci Technol*, 2003, 8(2):47–60.
- 3 Ley J., Sigmund S., El Moutar O. Numerical prediction of the added resistance of ships in waves. In: *Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, San Francisco, USA, Paper OMAE2014-24216, 2014.
- 4 Sadat-Hosseini H., Wu P C., Carrica P M, et al. CFD verification and validation of added resistance and motions of KVLCC2 with fixed and free surge in short and long head waves. *Ocean Engineering*, 2013, 59(1):240-273.
- 5 Guo B.J., Steen S. Evaluation of added resistance of kvlcc2 in short waves. *Journal of Hydrodynamics*, Ser.B, 2011, 23(6):709-722.
- 6 Maruo H. Resistance in waves. In: *Researches on seakeeping qualities of ships in Japan*. The Society of Naval Architects of Japan, Tokyo, 1963, 67–102.
- 7 Gerritsma J. Beukelman W. Analysis of the resistance increase in waves of a fast cargo ship. *Int Shipbuild Prog*, 1972, 19(217):285–293.
- 8 Salvesen N. Added resistance of ships in waves. *J Hydronaut*, 1978, 12(1):24–34.
- 9 Castiglione T., Stern F., Bova S., et al. Numerical investigation of the seakeeping behavior of a catamaran advancing in regular head waves[J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(16):1806-1822.
- 10 Simonsen C.D., Otzen J.F., Joncquez S., et al. EFD and CFD for KCS heaving and pitching in regular head waves. *Journal of Marine Science & Technology*, 2013, 18(4):435-459.
- 11 West B., Brueckner K., Janda R., et al. A new numerical method for surface hydrodynamics. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1987, 92: 11803-11824.
- 12 Dommermuth D.G., Yue D.K.P. A high-order spectral method for the study of nonlinear gravity waves. *Journal Fluid Mechanics*, 1987, 184: 267-288.
- 13 Jacobsen N.G., Fuhrman D.R., Fredson J. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2012, 70(9): 1073-1088.
- 14 Hirt C.W., Nichols B.D.. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 1981, 39(1):201-225.
- 15 Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA J* 1994, 32(8):1598–1605.
- 16 Kim W.J., Van S.H., Kim D.H. Measurement of flows around modern commercial ship models. *Experiments in Fluids*, 2001, 31(5):567-578.

Numerical study of added resistance and motions of KCS based on HOS Method

GUO Hao, WAN De-cheng*

State Key Laboratory of Ocean Engineering,
School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University
Email: dewan@sjtu.edu.cn

Abstract: The high-order spectrum (HOS) method is combined with the self-developed CFD solver naoeFOAM-os-SJTU to study the added resistance and motions of KCS. The 1st Stokes regular waves is generated as the non-viscous outer-domain by the HOS method. The KCS motions in the viscous inner-domain wave field is numerically solved by naoeFOAM-os-SJTU

solver combining with overset grid technique. The relaxation zone is performed to transfer information for the two regions above. The accuracy of the HOS method is verified and its high efficiency advantage is analyzed by comparing the wave parameters simulated by HOS method, CFD and experimental results. Then the added resistance and motions of KCS in the waves of $\lambda/L=1.15$ at $Fr=0.261$ are studied, and the fast Fourier transform (FFT) is used in the frequency analysis of added resistance and motions. The present study could verify the applicability of the coupled viscous-potential flow method for the ship motion prediction. The coupled viscous-potential flow method could improve the computational efficiency while ensuring the numerical accuracy, which could provide an important reference for the numerical study of resistance and motions in waves.

Key words: HOS method; regular waves; added resistance; motion response; KCS