

规则波中船舶迎浪航行波浪增阻数值计算

查若思, 沈志荣, 万德成*

摘要: 本文采用基于 RANS 方程的黏性数值模拟方法, 对某 Wigley 改型船型在规则波中迎浪航行的阻力性能进行了研究与分析。使用了基于开源 CFD 软件 OpenFOAM 开发的多功能求解器 naoe-FOAM-SJTU, 对航速为 $Fn=0.2$ 工况下船体的运动响应和波浪增阻进行了计算, 并与试验数据进行了对比验证。考虑了不同波长和不同波高的规则波对船体阻力增值的影响, 并通过运动幅值响应算子、自由面波形等对波浪增阻的影响因素进行了分析。结果表明航速一定时, 在 $\lambda/L=1.1$ 附近阻力和运动响应达到峰值, 另外短波范围内船体运动辐射增阻的影响不大。

关键词: 波浪增阻; 运动响应; 规则波; naoe-FOAM-SJTU 求解器

1 引言

近年来, IMO 提出的船舶能效指数 EEDI 已经开始正式施行。出于提高经济效益和加强环境保护的双重要求, 针对船舶能效的研究已成为备受瞩目的热门课题。船体在波浪中的阻力增加会导致额外的燃料消耗和失速现象, 影响其快速性和耐波性, 因此精确预报波浪增阻具有十分重要的意义。

国内外已有很多学者利用不同方法研究了波浪增阻, 包括船模试验 (EFD)、基于势流理论的理论计算和基于全黏性流场计算的计算流体力学 (CFD) 数值模拟等方法。Maruo^[1] 基于线性势流理论, 将流场总的速度势分为入射势、辐射势和绕射势三部分, 通过沿船体中心线分布奇点来表达船型。Faltinsen^[2] 提出了短波渐近理论, 研究了波浪作用于船体并产生反射 (绕射效应) 作用于船体上的力。近年来日本专家提出了一种考虑短波影响的计算增阻的方法^[3], 并在 MEPC 第 59 次会议上提出用该方法计算失速系数。该方法首先利用 Maruo 理论计算船舶由于运动导致的增阻, 然后再加上短波时船舶绕射修正项, 最后得到船舶的波浪增阻。

随着计算机处理能力的提高, 三维时域分析方法得到了广泛应用。Dawson^[4] 提出了基

于 Rankine 源的线性兴波数值方法, 利用分布在船体表面和自由面上的 Rankine 源来满足线性自由面条件和物面条件。Kim 等^[5]分别使用了 WISH 和 AEGIR 程序计算了 Wigley 船型、系列 60 和 S175 集装箱船在波浪中阻力增值, 计算结果表明波长在接近船长附近辐射增阻成分要远大于绕射增阻成分。但在短波和长波范围内, 绕射增阻成分占较大比例。

近年来, CFD 方法得到了很大的发展, 能很好地模拟大幅运动响应以及波浪破碎等强非线性现象。Orihara 和 Miyata^[6]使用 WISDAM-X 程序, 对 SR108 集装箱船在波浪中航行的运动响应和阻力增值进行了 CFD 模拟计算, 结果显示该船型突出的船艏能够有效减小波浪中的阻力增值。Simonsen 等^[7]对 KCS 集装箱船在不同航速下的波浪增阻和船体运动响应进行了试验研究和 CFD 计算预报。沈志荣和万德成等^[8]利用基于开源代码 OpenFOAM 工具箱和数据结构开发而成的 naoe-FOAM-SJTU 求解器计算分析了 Wigley III、DTMB5415、S175 等船型在迎浪中的运动响应和波浪增阻。

2 数值方法

本文利用 naoe-FOAM-SJTU 求解器^[9]进行数值模拟求解。其控制方程为两相不可压 RANS 方程, 包括连续性方程和动量方程:

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

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

其中: \mathbf{U} 代表速度场, \mathbf{U}_g 表示网格移动速度。 p_d 为动压力, 其数值等于总压力值减去静水压力, ρ 为液体或者气体的密度, \mathbf{g} 为重力加速度向量。 μ_{eff} 表示有效动力黏性, ν 表示运动黏度, ν_t 表示涡黏度。 \mathbf{f}_σ 为表面张力项, \mathbf{f}_s 是用于消波的源项。

本文中采用 SST $k-\omega$ 湍流模型来实现方程的闭合。 k 表示流体质点的湍动能, ω 表示特征耗散率该湍流模型综合了标准 $k-\omega$ 模型和 $k-\varepsilon$ 模型的优点, 既不受自由面的影响, 又能保证在壁面处求解的精确性和可靠性。本文使用带有可压缩项的 VOF 方法来处理自由面。VOF 输运方程定义为:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [(\mathbf{U} - \mathbf{U}_g) \alpha] + \nabla \cdot [\mathbf{U}_r (1 - \alpha) \alpha] = 0 \quad (3)$$

其中, \mathbf{U}_r 为用于压缩界面的速度场, α 为两相流体的体积分, 代表液体部分所占体积的百分比, $\alpha = 0$ 表示空气, $\alpha = 1$ 表示水, $0 < \alpha < 1$ 表示水和空气的交界面。RANS 方程和 VOF 输运方程都采用有限体积法来进行离散。对于离散后所得到的压力速度耦合方程, 采用 PISO (Pressure-Implicit-Split-Operator) 算法进行循环迭代求解。

利用 naoe-FOAM-SJTU 求解器中的造波模块可以实现数值波浪水池的造波与消波。通过设置入口边界条件来实现模拟造波板运动, 本文采用考虑遭遇频率的一阶 Stokes 深水波

用来产生不同规则波的工况。消波功能是通过在数值水池的末端设置海绵层来实现的，用来避免反射波浪造成数值计算结果的剧烈震荡。

3 船型模型与网格生成

本文对某 Wigley 改型船型在不同规则波工况下的运动响应和总阻力进行了粘性数值模拟计算，并与试验值进行了对比。船型参数及试验数据引自 Kashiwagi^[10]的研究，船型参数表达式为：

$$\eta = (1 - \zeta^2)(1 - \xi^2)(1 + 0.6\xi^2 + \xi^4) + \zeta^2(1 - \zeta^8)(1 - \xi^2)^4 \quad (4)$$

其中， ζ 等于 $x/(L/2)$ ， ξ 等于 z/d ， η 等于 $y/(B/2)$ 。模型船长为 2.5m，其长宽比为 $L/B=5$ 。

网格由 OpenFOAM 自带的网格生成工具 *SnappyHexMesh* 生成。计算域尺寸为： $-1.0L \leq x \leq 4.0L$ ， $0 \leq y \leq 1.5L_p$ ， $-1.0L \leq z \leq 0.5L$ 。由于船体的对称性，实际网格只需按半船进行生成。为了提高计算精度，更好地捕捉自由面兴波，我们在自由面、船体壁面、首尾流场等附近进行了加密，总网格量约 140 万。模型及网格如图 1 和图 2 所示。

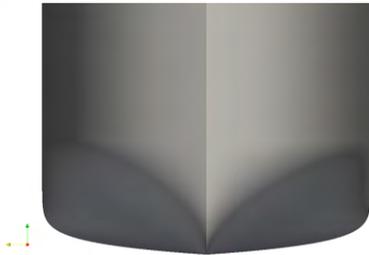


图 1 Wigley 改型船型正视图

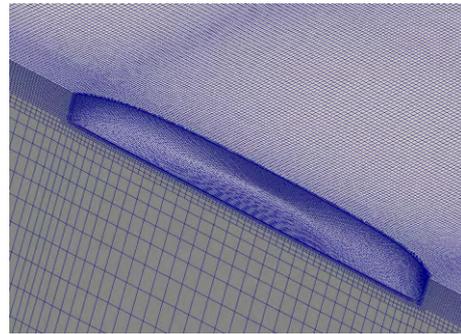


图 2 船体表面网格

4 计算工况及数值结果

本文选取的规则波波长范围为 $0.4 < \lambda/L < 1.6$ ，入射波的波幅 A 取 0.03m、0.02m 和 0.01m。另外针对波幅为 0.03m 的各个不同波长工况，分析了固定船体自由度和放开船体自由度（本文考虑纵摇和升沉）两种不同情况的影响。通过计算迎浪航行工况下的总阻力平均值减去相同条件下静水航行工况下的总阻力即可得到波浪中的阻力增值。无因次化的阻力增值定义为 $C_{aw} = R_{aw} / \rho g A^2 (B^2/L)$ 。其中 R_{aw} 为波浪增阻， B 为船宽， L 为船长。

各工况下的波浪增阻系数计算结果如图 3 所示。图 4 展示了不同波高下波浪增阻大小。从图 3 可以看出，计算结果与模型试验符合较好。在短波范围内波浪增阻系数较小，随着波长增大到稍大于船长 ($\lambda/L=1.1$) 附近，波浪增阻系数逐渐增大至峰值点。随后随着波长

的继续增大，处于长波情况下的波浪增阻系数逐渐减小。对于波长一定时，随着波高的增加，波浪增阻明显增大。

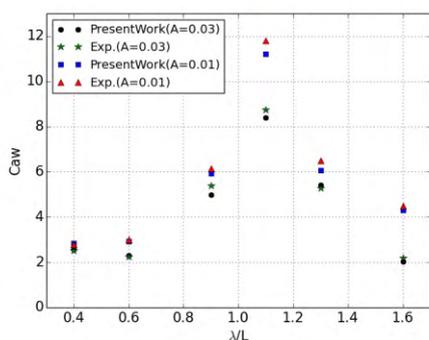


图3 波浪增阻系数随波长变化情况

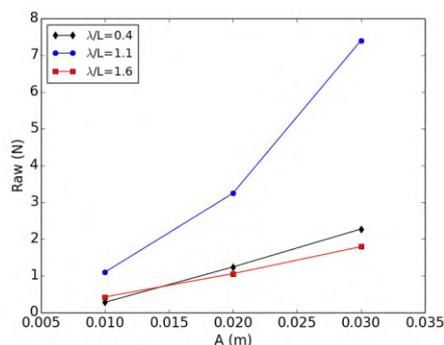


图4 波浪增阻随波高变化情况

各工况下的纵摇和垂荡的运动响应传递函数如图5~图6所示。可以看出，在短波范围内，两种船型的纵摇和垂荡运动响应传递函数均很小，而在 $\lambda/L=1.1$ 附近运动最为剧烈，随后逐渐减小，计算结果与试验测量结果符合较好。由此可以说明短波情况下的运动辐射增阻分量占总增阻的比例很小，此时主要是波浪绕射增阻。另外不同波高下的运动传递函数差别不大，说明垂荡运动响应与规则波波高成比例，纵摇运动响应则与波陡成比例。

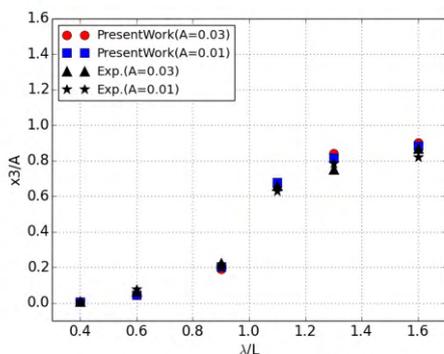


图5 垂荡 RAO 对比

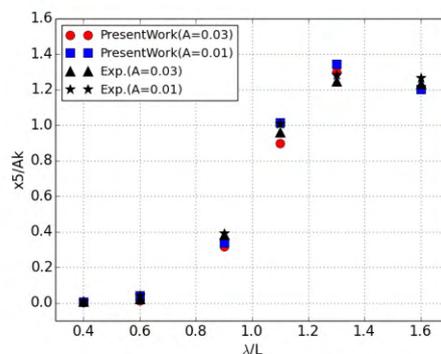


图6 纵摇 RAO 对比

5 自由面波形

考虑船体运动时，流场中有入射波、定常兴波、辐射波和散射波四种成分及其相互间的干扰。若将船体固定，则没有辐射波。本文以波高为 $h=0.06\text{m}$ 为例，对于短波($\lambda/L=0.6$)和长波($\lambda/L=1.1$)两种波浪条件下，分别分析了船体固定和船体运动两种情况对应相同时刻的波高等值面图，如图7至图10所示。

从图 7 和图 8 可以看出两者的波形差别很小，表明对于短波 ($\lambda/L=0.6$) 工况下辐射波影响很小，此时波浪增阻的主要成分是绕射增阻。而对于 $\lambda/L=1.1$ ，当考虑船体运动时，整个流场的波峰和波谷均有所增大，另外船体两侧的兴波范围也较大。

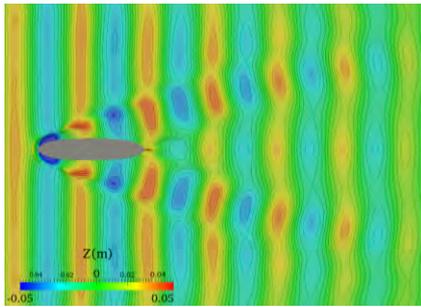


图 7 船体固定条件下波形 ($\lambda/L=0.6$)

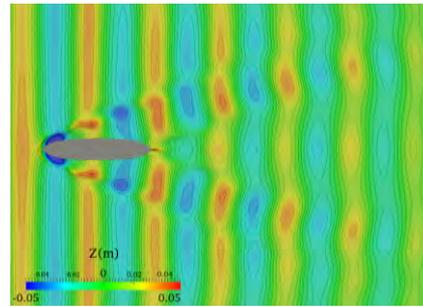


图 8 船体运动条件下波形 ($\lambda/L=0.6$)

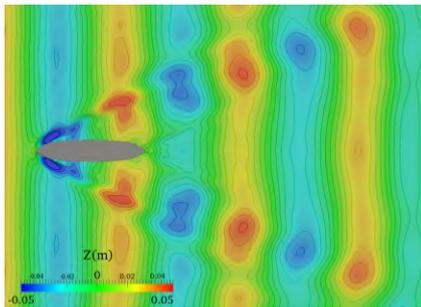


图 9 船体固定条件下波形 ($\lambda/L=1.1$)

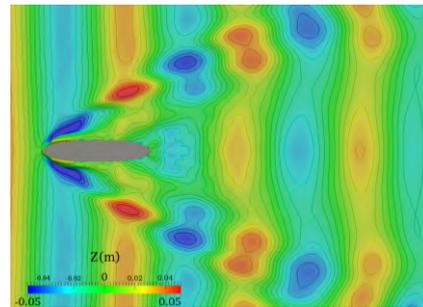


图 10 船体运动条件下波形 ($\lambda/L=1.1$)

6 结论

本文利用 naoe-FOAM-SJTU 求解器对某改型 Wigley 船在规则波作用下迎浪航行的波浪增阻进行了数值模拟计算，结果与试验值符合较好。结果表明：波浪增阻随入射波波高的增加而增大。短波情况下辐射增阻不大，必须考虑船体绕射效应。在共振频率范围内，船体运动响应达到最大，此时波浪增阻也相应达到峰值。而对于长波工况，船体处于“随波逐流”状态，尽管运动响应也较大，但波浪增阻系数却随波长的增大而减小。

致谢

本文工作得到国家自然科学基金项目 (Grant No. 11072154, 51379125, 11272120), 上海高校特聘教授 (东方学者) 岗位跟踪计划 (Grant No. 2013022), 国家重点基础研究发

展计划（973 计划）项目（Grant No. 2013CB036103），工信部高技术船舶科研项目，以及上海交通大学高性能计算中心（HPC）的资助。在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 Maruo H. Resistance in waves[J]. Research on Seakeeping Qualities of Ships in Japan, The Society of Naval Architects of Japan, 1963, 8: 67-102.
- 2 Faltinsen K, Minsaaa NL, Svein O. Skjoldal. Prediction of Resistance and Propulsion of a Ship in a Seaway[C], Proc of 13th Symp On Naval Hydrodynamics, 1980.
- 3 Tsujimoto M, Kuroda M, Shibata K, et al. On a Calculation of Decrease of Ship Speed in Actual Seas[J], 日本船舶海洋工学会论文集. 2009, (9): 79-85.
- 4 Dawson C. A practical computer method for solving ship-wave problems[C]. Proceedings of Second International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, DTIC Document, 1977: 30-8.
- 5 Kim Y, Kim K-H, Kim J-H, et al. Time-domain analysis of nonlinear motion responses and structural loads on ships and offshore structures: development of WISH programs[J]. Int J Nav Archit Ocean Eng, 2011, 3(1): 37-52.
- 6 Orihara H, Miyata H. Evaluation of added resistance in regular incident waves by computational fluid dynamics motion simulation using an overlapping grid system[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2003, 8(2): 47-60.
- 7 Simonsen CD, Otzen JF, Joncquez S, et al. EFD and CFD for KCS heaving and pitching in regular head waves[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2013, 18(4): 435-59.
- 8 沈志荣, 叶海轩, 万德成. 船舶在迎浪中运动响应和波浪增阻的 RANS 数值模拟[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2012, 27(6): 621-33.
- 9 Shen ZR, Cao HJ, Wan DC. Manual of CFD solver for Ship and Ocean Engineering Flows: naoe-FOAM-SJTU, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, 2012.
- 10 Kashiwagi M. Hydrodynamic Study on Added Resistance Using Unsteady Wave Analysis[J]. Journal of Ship Research, 2013, 57(4): 220-40.

RANS Simulation on added resistance of ship sailing in different regular wave conditions

ZHA Ruo-si, SHEN Zhi-rong, WAN De-cheng

Abstract: In this paper, RANS simulations on added resistances and vertical motions of modified

Wigley ship advancing in head waves with a Froude number of 0.2 are presented. By using the solver naoe-FOAM-SJTU based on open source package OpenFOAM, regular wave conditions with a wide range of wave length and wave amplitude are considered. Great agreement with experimental measurement is also observed. It shows that added resistance from ship motion is less important in a short wave length range. The wave patterns of fixed DOF cases are compared with that of motion free cases with heave and pitch of the ship.

Key words: Added Resistance; Motion Response; Regular Wave; naoe-FOAM-SJTU solver.