

基于高阶谱方法的聚焦波下船舶的运动

肖倩, 朱仁传

(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)

摘要: 为了研究入射波浪的非线性对船舶运动的影响, 本文提出了一种基于三维弱非线性间接时域法与高阶谱方法的新型耦合方法, 采用了高阶谱方法来模拟非线性入射波场, 基于弱非线性假设和脉冲响应函数法在瞬时湿表面上实时积分计算求得了非线性入射波浪力和非线性恢复力, 通过频域结果的傅里叶逆变换得到了线性散射力, 建立了船舶在非线性波浪中的时域运动方程, 对 WigleyIII 在给定频带聚焦波下的运动响应进行了计算与分析。在线性规则波下, 通过与实验结果进行 RAO 值的对比, 验证了耦合模型的有效性; 通过与聚焦波实验结果的对比, 验证了波浪模型的正确性, 并进一步分析了入射波浪间相互作用的高阶非线性对船舶受力和运动的影响。研究表明: 非线性波浪的相互作用对聚焦结果有较大的影响, 对船舶的入射力以及垂荡运动的影响最为显著。

关键词: 高阶谱方法; 弱非线性; 间接时域法; 非线性聚焦波;

1 引言

势流理论凭借其计算消耗小和时间成本低的优点, 在船舶耐波性问题中得到了广泛的应用。考虑非线性 F-K 力以及非线性恢复力的弱非线性方法能在不较大牺牲计算效率的情况下抓住主要的非线性特征, 提高问题求解的准确度, 因此得到了越来越多学者的青睐^[1-2]。在弱非线性方法中, 对于无航速问题的线性散射力大多采用间接时域法得到, 基于脉冲响应函数法考虑流场记忆效应^[3-4]。

研究极限海况下的运动响应对船舶的设计以及船舶安全性能的校核具有重要的指导意义, 其中聚焦波常常作为极值波的典型情况, 在实验和数值模拟中得到了广泛关注^[5-6,8]。Baldock^[5]通过实验的方法模拟了聚焦波。高阶谱方法^[6-7]基于小波陡假设, 通过快速傅里叶变换解决非线性自由面波动问题, 具有高效和快速收敛等特性。赵西增等^[8]学者运用高阶谱方法对聚焦波进行了数值模拟。

本文采用高阶谱方法对非线性入射聚焦波场进行数值模拟, 考虑了入射波浪间的非线性作用, 并基于三维间接时域法, 模拟计算了船舶在非线性迎浪波浪下的运动响应, 探讨

了聚焦波浪下波浪的非线性对船舶受力和运动的影响。研究表明，与线性聚焦波相比，非线性聚焦波浪的波峰值增大，聚焦点和聚焦时间存在滞后，聚焦处波峰更陡峭相邻波谷更平坦，船舶所受入射力和垂荡运动增大。

2 弱非线性间接时域法基本理论

假设流动无旋，流体无黏，不可压，坐标系 $oxyz$ 原点 o 位于静水面船中处， x 轴指向船首， z 轴竖直向上，零航速船舶在波浪中运动的时域方程可为：

$$\sum_{j=1}^6 \left\{ (M_{kj} + \mu_{kj}) \ddot{\xi}_j(t) + \int_0^t K_{kj}(t-\tau) \dot{\xi}_j(\tau) d\tau \right\} + C_k(t) = F_{k0}(t) + \int_{-\infty}^{\infty} K_{k7}(t-\tau) \zeta(\tau) d\tau, k=1,2,\dots,6 \quad (1)$$

式中： M_{kj} 为质量矩阵， μ_{kj} 为无穷频率附加质量， K_{kj} 为时延函数。 C_k 为非线性回复力， F_{k0} 为入射波浪力， K_{k7} 为绕射力脉冲响应函数， ζ 为船中处波面升高时历。

基于频域势流理论^[9]，时域辐射力 $F_{kj}^R(t)$ 可通过时延函数 K_{kj} 求得^[3]：

$$F_{kj}^R(t) = -\mu_{kj} \ddot{\xi}_j(t) - \int_0^t K_{kj}(t-\tau) \dot{\xi}_j(\tau) d\tau \quad (2)$$

基于脉冲响应函数法的绕射力 $F_{k7}(t)$ 可通过绕射力脉冲响应函数 K_{k7} 求得^[3]：

$$F_{k7}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} K_{k7}(t-\tau) \zeta(\tau) d\tau, k=1,2,\dots,6 \quad (3)$$

基于弱非线性理论，非线性的入射力和回复力 F_{k0} 和 C_k 均基于瞬时湿表面 S 进行计算：

$$F_{k0}(t) = \iint_S p n_k dS = \iint_S \left(-\rho \frac{\partial \Phi_I}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho |\nabla \Phi_I|^2 \right) n_k dS \quad (4)$$

$$C_k = -\iint_S \rho g z \cdot n_k dS \quad (5)$$

式中 p 为动态压强， Φ_I 为入射波浪的入射势。

3 高阶谱方法基本理论

入射波浪模型选择了高阶谱方法，该方法基于势流理论，坐标系 $o_0x_0y_0z_0$ 的原点为 o_0 ， $o_0x_0y_0$ 与静水面重合， z 轴竖直向上，将非线性自由表面边界条件就自由表面升高 $\eta(x, y, t)$ (单值) 和自由表面速度势 $\phi^S(x, y, t) = \phi(x, y, \eta, t)$ 可表示为^[10]：

$$\frac{\partial \phi^S}{\partial t} = -g\eta - \frac{1}{2}|\nabla \phi^S|^2 + \frac{1}{2}(1+|\nabla \eta|^2)\phi_z^2(x, y, \eta, t) \quad (6)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = (1+|\nabla \eta|^2)\phi_z(x, y, \eta, t) - \nabla \phi^S \nabla \eta \quad (7)$$

从上两式可以看到：若已知某一时刻自由表面上垂直速度 $\phi_z(x, y, \eta, t)$ ，对上两式进行时间积分即可求得下一时间步的自由表面速度势 $\phi^S(x, y, t+dt)$ 以及波面升高 $\eta(x, y, t+dt)$ 。在高阶谱方法中，基于小波陡假设对速度势进行摄动展开至 M 阶，可以得到一系列满足狄利克雷边界条件的边值问题，后采用伪谱方法进行求解，具体过程参见文献[6-7]。

在坐标系 $o_0x_0y_0z_0$ 中对非线性波浪场进行模拟，将 t 时刻的入射波浪场自由表面升高，速度场以及压强场提取出来，并将其转换到坐标系 $oxyz$ 中进行耦合计算（大地坐标系与参考坐标系的转换关系^[9]）。将转换后的 t 时刻自由表面升高截切该瞬时的船体表面从而得到瞬时湿表面 S ；将转换后 t 时刻的速度场和压强场带入式(6)中进行非线性入射力的计算。最后对船舶时域运动方程进行求解并对船舶的运动姿态进行调整，为 $t+dt$ 时刻的计算做准备。

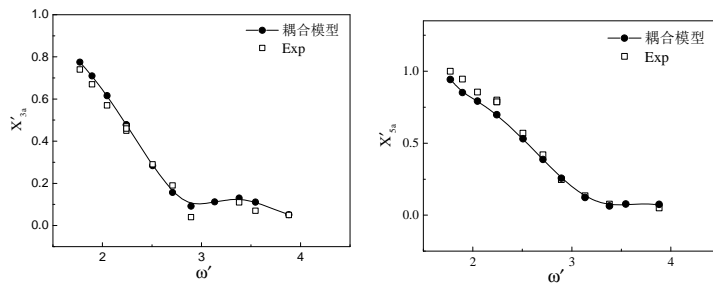


图2 WigleyIII 垂荡纵摇 RAO

4 数值计算与结果分析

4.1 规则波下的验证

为了验证耦合模型的准确性，本文以 Wigley III 为对象，在迎浪工况下对船舶运动响应进行了数值计算。采用 $M=1$ 的高阶谱方法模拟线性规则波，将该入射波场引入到时域运动模型中进行计算。图2给出了基于该波浪模型下的 Wigley III 的垂荡和纵摇运动 RAO 并与实验^[11]中无航速的情况进行了比较。耦合模型的计算结果与实验结果对比良好，其准确性得到了验证。

4.2 聚焦波验证

实现理论聚焦的方式有很多种，为了简便起见此处选择等幅线性聚焦的方法来给定初

始波浪^[5]。此处选取实验[5]中 case D 进行数值模拟,高阶谱方法的相关参数设置为: $L_x=20\text{m}$, $T_{\text{total}}=60\text{s}$, $x_b=8\text{m}$, $t_b=30\text{s}$, $M=3$, $N_f=27$ 。图 3 给出了不同聚焦波幅下对应的数值模拟波峰值,并与线性解和实验结果进行了对比。从图 3 中可以看出,本文所使用的入射波模型能较为准确地模拟非线性聚焦波且能抓住聚焦事件的强非线性特性。

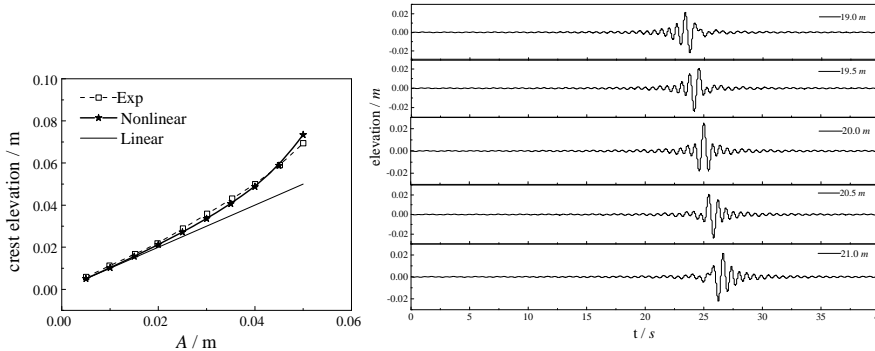


图 3 聚焦波峰

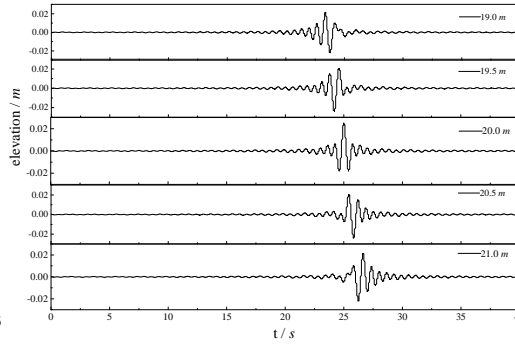


图 4 聚焦波群

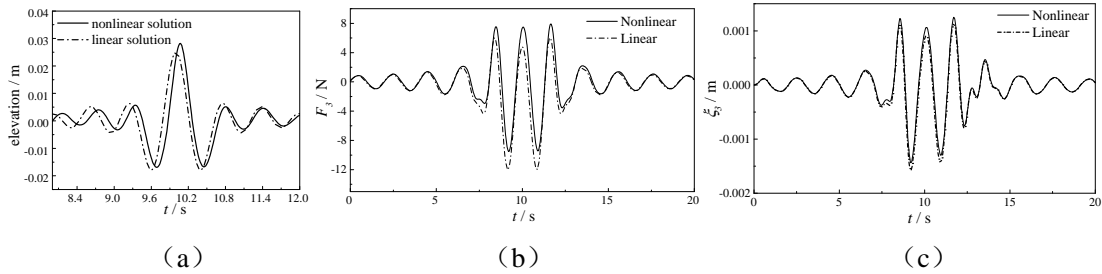


图 5 (a) 船中波面升高时历 (b) 垂荡入射力时历 (c) 垂荡运动时历

4.3 聚焦波下船舶的运动

固定聚焦波来波频带为 $f_n \in [0.51, 1.613]$, 选取聚焦波幅 $A=0.025\text{m}$ 进行数值计算, 使得船中位于聚焦点处, 对应时间为 $0\text{s} \leq t' \leq 20\text{s}$, 线性聚焦时间为 $t'=10\text{s}$ 。相应的高阶谱方法计算中的参数设置为: $L_x=54\text{m}$, $T_{\text{total}}=40\text{s}$, $dt=0.01\text{s}$, $x_b=20\text{m}$, $t_b=25\text{s}$ 。表 1 给出了线性理论聚焦时间、聚焦地点以及聚焦幅值与相对应的非线性模拟结果。图 4 给出了线性聚焦事件中, 聚焦点以及其前后点的波高时历。图 5 (a) 给出了位于聚焦点处 $8\text{s} \leq t' \leq 12\text{s}$ 船中的波面升高时历, 可以看出与线性波浪相比, 非线性波浪的波峰较陡峭, 两边相邻的波谷较平坦, 与 Baldock 等^[5]文献中分析的一致。图 (b) 和图 (c) 分别给出了垂荡入射力时历以及垂荡运动时历。可以看出非线性波浪场的引入增大了入射力和运动响应的正向幅值。

表 1 聚焦波特性

M	聚焦波幅	聚焦时间	聚焦点
1	0.025m	25.00s	20.0m
3	0.0281999m	25.07s	20.1445m

5 结论

本文基于三维弱非线性间接时域法和高阶谱方法提出了一种新的耦合方法,对零航速 Wigley III 船模在规则波和非线性聚焦波中的运动响应进行了计算,并进一步分析了入射聚焦波场的非线性对聚焦事件以及船舶受力和运动的影响,得出了如下结论。

(1) 本文的耦合模型在线性规则波工况下的数值模拟结果与实验结果吻合良好,验证了耦合模型的可行性和有效性。

(2) 采用 HOS 对非线性聚焦波场进行了模拟并与实验结果吻合良好,可以较好地抓住聚焦波中的强非线性特征。该非线性特征主要体现为:与线性结果相比具有聚焦波幅增大,聚焦点和聚焦时间滞后,聚焦处波峰更陡峭相邻波谷更平坦。

(3) 相比于线性结果,非线性聚焦波场下船舶遭遇的波形等发生变化,从而导致船体的受力和运动响应发生变化,其中垂荡入射力和垂荡运动响应影响最为明显,两者均变大。

参 考 文 献

- 1 Chen X, Zhu R, Zhao J, et al. Study on weakly nonlinear motions of ship advancing in waves and influences of steady ship wave[J]. Ocean Engineering, 2018, 150: 243-257.
- 2 Ma S, Wang R, Zhang J, Duan WY, Ertekin, R.C. Consistent formulation of ship motions in time-domain simulations by use of the results of strip theory[J]. Ship Technology Research, 2016,63(3):146-158.
- 3 胡天宇, 朱仁传, 范菊. 海上浮式风机平台弱非线性耦合动力响应分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(07):1132-1137.
- 4 唐恺,朱仁传,缪国平等.时域分析波浪中浮体运动的时延函数计算[J]. 上海交通大学学报, 2013,47(2):300-306.
- 5 Baldock T E, Swan C, Taylor P H. A laboratory study of nonlinear surface waves on water[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1996, 354(1707): 649-676.
- 6 Ducrozet G, Bonnefoy F, Le Touzé D, et al. 3-D HOS simulations of extreme waves in open seas[J]. Natural Hazards and Earth System Science, 2007, 7(1): 109-122.
- 7 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.

- 8 赵西增, 孙昭晨, 梁书秀. 模拟畸形波的聚焦波浪模型[J]. 力学学报, 2008, 40(4).
- 9 朱仁传, 缪国平. 船舶在波浪上的运动理论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2019.
- 10 Zakharov V E. Stability of periodic waves of finite amplitude on the surface of a deep fluid[J]. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 1968, 9(2): 190-194.
- 11 Journée, J. M. J. (1992). Experiments and Calculations on 4 Wigley Hull Forms in Head Waves. Delft University of Technology Report.

Numerical simulations of ship motion in focusing wave based on HOS method

XIAO Qian, ZHU Ren-chuan

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To analyze the influence of nonlinearities in incident wave field on ship motion response, a new hybrid method is proposed based on 3D weakly nonlinear indirect time-domain method and High-Order Spectral (HOS) method. In the proposed method, HOS method is employed to simulate the nonlinear incident wave field, nonlinear F-K (Froude-krylov) and restoring forces are evaluated over the instantaneous wetted surface while linear scattering forces are obtained through inverse Fourier transform based on the IRF (Impulse Response Function) method and weakly nonlinear assumption. The equations of time-domain ship motions in nonlinear waves are established and numerical simulations of motion responses of WigleyIII in focusing wave with pre-determined frequency band are conducted. The feasibility of the hybrid model are validated in regular linear waves through comparison of RAO (Response Amplitude Operator) between obtained results and experimental data. The incident wave model to catch the strong nonlinearity in focusing wave is validated through results comparisons with the related experiment and the effects of nonlinearity of wave-wave interaction in incident field on ship bearing forces and ship motions are further investigated. It is shown that nonlinear wave-wave interaction causes a significant impact on focusing event and subsequently a remarkable influence on F-K force and heave motion.

Key words: High-order spectral method; weakly nonlinear; indirect time-domain method; nonlinear focusing wave.