

文章编号: 1007-7294(2024)09-1307-10

双桨双舵内倾船型的横甩失稳运动预报研究

储纪龙, 顾民, 鲁江

(中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

摘要: 目前国际海事组织(IMO)已经发布了第二代完整稳性衡准骑浪/横甩直接稳性评估方法的最终指南, 如何准确高效地数值预报骑浪/横甩运动是目前骑浪/横甩直接稳性评估方法中亟待解决的关键问题。本文构建一个纵荡-横荡-垂荡-横摇-纵摇-首摇六自由度运动耦合的数学模型, 该数学模型首先在纵荡-横荡-横摇-首摇四自由度操纵性数学模型基础上考虑垂荡和纵摇运动的影响, 采用基于加强积分的切片法求解垂荡和纵摇运动的幅值和相位, 可以有效解决尾浪中高航速船舶直接耐波性时域计算容易发散的问题; 其次, 船舶在波浪中的Froude-Krylov力和绕射力是通过对船体平均湿表面进行压力积分获得的。同时, 在数学模型中还考虑非线性水动力导数、静水横倾产生的水动力和非线性横摇阻尼等因素。在螺旋桨推力和舵力模型中考虑由于波浪粒子速度和船舶速度共存产生的水动升力的影响, 舵力模型中还加入了垂荡、纵摇运动对波浪中双舵实时出入水导致的舵力动态变化。最后, 以双桨双舵的ONR内倾船型为研究对象, 开展尾斜浪中骑浪/横甩数值预报, 分析船-波的初始相对位置对船舶骑浪/横甩运动的影响。计算结果表明, 文中建立的六自由度骑浪/横甩数学模型具有足够的计算精度, 可以用于骑浪/横甩的直接稳性评估。

关键词: 第二代完整稳性衡准; 直接稳性评估; 横甩; 内倾船

中图分类号: U661.33

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2024.09.002

Prediction method of the broaching of a tumblehome ship with twin propeller and double rudders

CHU Ji-long, GU Min, LU Jiang

(China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

Abstract: At present, the International Maritime Organization (IMO) has issued the final guidelines of the direct stability assessment of surf-riding/broaching for the second generation intact stability criteria, and how to accurately and efficiently predict the surf-riding/broaching is a key problem to be solved for the direct stability assessment of surf-riding/broaching. So a surge-sway-heave-roll-pitch-yaw coupled mathematical model (6-DOF) is established in this paper. Firstly, the heave and pitch motions are considered in the surge-sway-roll-yaw maneuvering mathematical model, and the amplitudes and phases of heave and pitch motions are calculated by a strip method using an enhanced integrating method, which can solve the problem of divergence resulting from direct seakeeping calculation in time-domain for high speed vessel in stern-quartering waves. Secondly, the Froude-Krylov forces and diffraction forces are calculated by integrating the wave pressure up to the mean wave surface. At the same time, nonlinear hydrodynamic derivations, heel-induced hydrodynamic forces and nonlinear roll damping are considered in the mathematical model. The hydrodynamic lift forces due to the coexistence of wave particle velocity and ship forward velocity are taken into account in

收稿日期: 2024-03-10

基金项目: 工信部高技术船舶项目(2017[614])

作者简介: 储纪龙(1987-), 女, 博士研究生, 高级工程师, E-mail: long8616767@163.com。

the propeller thrust and rudder force model. And the real-time emersion of double rudders in waves is considered in the rudder force model. Finally, a tumblehome ship with twin propellers and double rudders is utilized to study surf-riding/broaching in stern-quartering waves, and the effect of initial relative position of the ship to waves on predicting surf-riding/broaching motion is investigated. The computation results show that the established 6-DOF mathematical model has enough accuracy to be used for the direct stability assessment of the surf-riding/broaching failure mode.

Key words: second generation intact stability criteria; direct stability assessment; broaching; tumblehome ship

0 引 言

2020年国际海事组织(IMO)发布了第二代完整稳性衡准的最终指南^[1],涵盖了参数横摇、纯稳性丧失、瘫船稳性、过度加速度和骑浪/横甩五种稳性失效模式的三层稳性评估方法和操作指南的指导性建议。五种稳性失效模式中,骑浪/横甩是目前研究最少的稳性失效模式,所谓骑浪是指在随浪或尾斜浪中高速航行的船舶,在波浪力的作用下被加速到波速并以波速前进的现象;而发生骑浪的船舶,通常会因为航向不稳定性而引起不可控制的转向,进而发生横甩甚至倾覆。骑浪/横甩属于极端恶劣海况下的波浪操纵性问题,具有强非线性特性,数值模拟骑浪/横甩涉及到船舶操纵性、耐波性、快速性、波浪稳性等多学科的交叉耦合,如何准确高效地数值预报骑浪/横甩运动,正是目前骑浪/横甩直接稳性评估方法中亟待解决的关键问题。

针对骑浪/横甩稳性失效模式,国外学者 Umeda 等^[2]采用考虑线性波浪力的纵荡-横荡-横摇-首摇四自由度操纵性模型,定性预报了规则波中 ITTC A2 渔船的骑浪/横甩现象。为了实现定量预报骑浪/横甩,他们先后分析了九种非线性因素的影响,包括静水中非线性操纵力、波浪对线性操纵力的影响、波浪对横摇恢复力矩的影响、波浪对舵力的影响、非线性波浪力、非线性横荡-横摇耦合、波浪对螺旋桨推力的影响、静水中大角度横倾产生的水动力,以及波浪对大角度横倾产生的水动力,由此建立了考虑九种非线性因素的“加强模型”,其计算结果与试验吻合较好^[3-5]。随后,他们将该四自由度数学模型应用于双桨双舵的非常规船型的骑浪/横甩现象预报,可以较好地预报周期运动区域与骑浪运动区域,但横甩运动区域预报与试验结果差距较大^[6]。Araki 等^[7]为了表达舵和螺旋桨出水,考虑垂荡和纵摇的影响,建立了六自由度数学模型,通过与四自由度模型及试验对比分析,发现桨舵出水对预报结果影响较大。Umeda 等^[8]将纵荡-横荡-横摇-首摇四自由度数学模型与临界波法相结合,针对 ONR 外飘船型开展了规则波中横甩数值模拟和不规则波中横甩发生概率计算。波浪力计算的准确度对骑浪/横甩的预报影响较大, Htet 等^[9]为了提高波浪力的计算精度,基于波浪力试验测量结果修正了波浪力的理论计算公式,改进了应用纵荡-横荡-横摇-首摇四自由度数学模型数值预报的 ONR 内倾船横甩运动区域。国内学者于立伟^[10]基于统一理论构建了操纵性和耐波性运动耦合的六自由度弱非线性模型,数值预报了规则波中 ITTC A2 渔船的骑浪/横甩现象;王廷昊^[11]在该模型的基础上考虑了不规则波的影响,模拟了不规则波中 ITTC A2 渔船的横甩运动。

本文作者前期曾构建了纵荡-横荡-首摇-横摇四自由度骑浪数学模型,考虑了舵和螺旋桨出入水、纵荡方向的绕射效应和非线性水动力导数等非线性因素,并数值预报了随浪和尾斜浪中双桨双舵非常规内倾船的骑浪运动^[12-13]。为了进一步预报双桨双舵非常规内倾船的横甩运动,本文在四自由度纵荡-横荡-首摇-横摇运动数学模型基础上加入垂荡和纵摇时历方程,建立六自由度骑浪/横甩数学模型,同时考虑垂荡、纵摇和大幅横摇运动对舵出水时舵力的影响,并采用 FORTRAN 语言编写计算程序,开展双桨双舵内倾船型在尾斜浪中骑浪/横甩运动数值模拟,同时分析船舶与波浪的初始相对位置对船舶骑浪/横甩运动的影响。

1 数学模型

1.1 船舶运动坐标系

本文采用下述三种坐标系,如图1所示:一是空间固定坐标系 $O-\xi\eta\zeta$, 原点 O 位于水平面, ζ 轴向下为正, 该坐标系用来描述波浪, 波浪沿 ξ 轴正向传播, 初始时刻波谷位于原点; 二是船体坐标系 $G-xyz$, 以船舶重心 G 为原点, x 轴在中线面内, 平行于基面, 指向船首为正, z 轴向下为正, 该坐标系随船一起摇荡; 三是参考坐标系 $G-x'y'z'$, 以船舶重心 G 为原点, x' 轴在中线面内, 平行于静水面, 指向船首为正, z' 轴向下为正, 该坐标系随船舶一起纵荡、横荡、垂荡和首摇, 但不随船舶横摇和纵摇。图中, χ 为航向角, φ 为横摇角, θ 为纵摇角, δ 为舵角, ξ_G 为船舶重心 G 在空间固定坐标系 $O-\xi\eta\zeta$ 中的纵向位置。

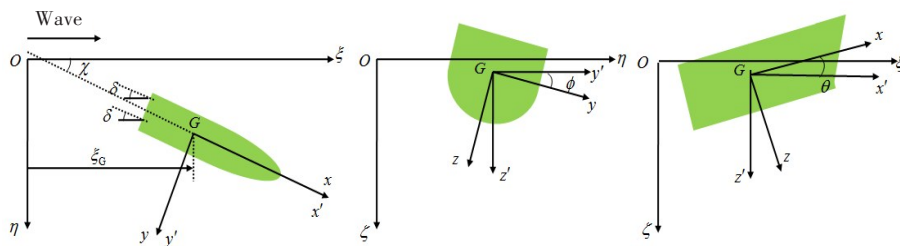


图1 坐标系

Fig.1 Coordinate systems

1.2 数学模型构建

本文构建了纵荡-横荡-垂荡-横摇-纵摇-首摇六自由度数学模型进行骑浪/横甩运动数值预报。首先,为了获得船舶在随浪和尾斜浪中高速航行时稳定的垂荡和纵摇运动,本文采用基于加强积分的切片法^[14]求解垂荡和纵摇运动的幅值和相位,进而获得垂荡和纵摇运动的时间序列方程,即公式(5)和公式(6),有效解决了尾浪中高航速船舶直接耐波性时域计算容易发散的问题。详细的数学模型如下:

$$(m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)vr = X_H + X_R + X_P + X_W \tag{1}$$

$$(m + m_y)\dot{v} + (m + m_x)ur = Y_H + Y_R + Y_W \tag{2}$$

$$(I_{zz} + J_{zz})\dot{r} = N_H + N_R + N_P + N_W \tag{3}$$

$$(I_{xx} + J_{xx})\dot{p} - m_x z_H ur = K_H + K_R + K_W \tag{4}$$

$$\zeta_c(\xi_G, t) = \zeta_{Ga} \cos [k(\xi_G - ct) - \delta_\zeta] \tag{5}$$

$$\theta(\xi_G, t) = \theta_a \cos [k(\xi_G - ct) - \delta_\theta] \tag{6}$$

$$\dot{\delta} = \{-\delta - K_p(\chi - \chi_c) - K_p T_D r\} / T_E \tag{7}$$

式中,下标H、R、W分别代表船体上粘性流体动力、舵力和波浪力; X_P 为螺旋桨推力; u 、 v 分别为船舶纵荡速度和横荡速度; r 、 p 分别为船舶首摇角速度和横摇角速度; m 、 I_{zz} 、 I_{xx} 分别为船舶质量、首摇惯性矩和横摇惯性矩; m_x 、 m_y 、 J_{zz} 、 J_{xx} 分别为纵荡附加质量、横荡附加质量、首摇附加惯性矩和横摇附加惯性矩; ζ_{Ga} 、 θ_a 分别是垂荡、纵摇运动的振幅; δ_ζ 、 δ_θ 分别是垂荡、纵摇运动的初始相位; k 为波数; c 为波速; T_E 为舵机常数; K_p 为舵增益系数; T_D 为微分控制常数; χ_c 为目标航向。

1.3 船体上粘性流体动力

纵向流体动力 X_H 、横向流体动力 Y_H 、首摇流体动力力矩 N_H 和横摇流体动力力矩 K_H 表达式分别为

$$X_H = -R(u) + X_{vv}v^2 + X_{vr}vr + X_{rr}r^2 \tag{8}$$

$$Y_H = Y_vv + Y_r r + Y_{vvv}v^3 + Y_{vvr}v^2r + Y_{vrr}vr^2 + Y_{rrr}r^3 + Y_\varphi\varphi \tag{9}$$

$$N_H = N_v v + N_r r + N_{vv} v^3 + N_{vr} v^2 r + N_{rr} r^3 + N_{\varphi} \varphi \quad (10)$$

$$K_H = -D(p) - WGZ(\phi) - Y_H z_H \quad (11)$$

式中, Y_v 、 Y_r 、 N_v 、 N_r 为线性水动力导数; X_{vv} 、 X_{vr} 、 X_{rr} 、 Y_{vv} 、 Y_{vr} 、 Y_{rr} 、 N_{vv} 、 N_{vr} 、 N_{rr} 为非线性水动力导数; X_ϕ 、 Y_ϕ 、 N_ϕ 为静水中横倾产生的水动力导数; z_H 为横向流体动力 Y_H 的作用点的垂向坐标; $R(u)$ 为船舶静水阻力; $D(p)$ 为非线性横摇阻尼; W 为船舶重量; $GZ(\phi)$ 为静水中横摇复原力臂。其中, 船舶静水阻力 $R(u)$ 和非线性横摇阻尼 $D(p)$ 的表达式分别为

$$R(u) = \frac{1}{2} \rho u^2 S_F C_T (u/\sqrt{gL}) \quad (12)$$

$$D(p) = (I_{xx} + J_{xx})(\alpha p + \gamma p^3) \quad (13)$$

式中, ρ 为水密度, g 为重力加速度, L 为船舶垂线间长, S_F 为船舶湿表面积, C_T 为船舶总阻力系数, α 和 γ 分别为线性项和立方项横摇阻尼系数。

1.4 螺旋桨推力

按照 IMO 第二代完整稳性最终指南^[1] 中的要求, 骑浪/横甩数学模型中除了需要考虑静水操纵力外, 还应该考虑因船速和波浪粒子速度共存而产生的水动升力, 以便能正确地模拟船体漩涡脱落产生的水动力。因此, 本文在螺旋桨推力模型和舵力模型中加入了波浪粒子速度的影响。

双螺旋桨推力 X_p 和首摇力矩 N_p 的表达式如下:

$$X_p = T_p + T_s = (1 - t_p) \rho n_p^2 D_p^4 [K_T(J_{pp}) + K_T(J_{ps})] \quad (14)$$

$$N_p = -(T_p y_{pp} + T_s y_{ps}) = -(1 - t_p) \rho n_p^2 D_p^4 [K_T(J_{pp}) y_{pp} + K_T(J_{ps}) y_{ps}] \quad (15)$$

$$J_{pp} = \frac{(1 - w_p)(u - y_{pp} r) - u_{wpp}}{n_p D_p}, \quad J_{ps} = \frac{(1 - w_p)(u - y_{ps} r) - u_{wps}}{n_p D_p} \quad (16)$$

$$u_{wpp} = -\zeta_w \omega \cos \chi \exp(-k z_{pp}) \cos [k(\xi_G + x_{pp} \cos \chi - y_{pp} \sin \chi)] \quad (17)$$

$$u_{wps} = -\zeta_w \omega \cos \chi \exp(-k z_{ps}) \cos [k(\xi_G + x_{ps} \cos \chi - y_{ps} \sin \chi)] \quad (18)$$

式中, t_p 为螺旋桨推力减额分数, w_p 为螺旋桨伴流分数, n_p 为螺旋桨转速, D_p 为螺旋桨直径, K_T 为螺旋桨推力系数, T_p 、 T_s 为分别为左、右侧螺旋桨推力, J_{pp} 、 J_{ps} 分别为左、右侧螺旋桨的进速系数, u_{wpp} 、 u_{wps} 分别为左、右侧螺旋桨处波浪粒子速度, x_{pp} 、 x_{ps} 、 y_{pp} 、 y_{ps} 、 z_{pp} 、 z_{ps} 分别为左、右侧螺旋桨纵向位置、横向位置和垂向位置, ζ_w 为波幅, ω 为波浪频率。

1.5 舵力

舵力除了考虑波浪粒子速度影响, 还要考虑垂荡、纵摇以及大幅横摇运动导致的舵实时出入水情况的影响。纵荡、横荡、首摇和横摇方向舵力表达式如下:

$$X_R = X_{RP} + X_{RS} = -(1 - t_R) F_{NP} \sin \delta - (1 - t_R) F_{NS} \sin \delta \quad (19)$$

$$Y_R = -(1 + a_H)(F_{NP} + F_{NS}) \cos \delta \quad (20)$$

$$N_R = -(x_R + a_H x_{HR})(F_{NP} + F_{NS}) \cos \delta - (y_{RP} X_{RP} + y_{RS} X_{RS}) \quad (21)$$

$$K_R = (z_R + a_H z_{HR})(F_{NP} + F_{NS}) \cos \delta \quad (22)$$

式中, t_R 为舵阻力减额系数; a_H 为操舵诱导船体横向力的修正因子; x_R 为舵力作用点的纵向位置; x_{HR} 为操舵诱导船体横向力作用点的纵向位置; z_R 为舵力作用点的垂向位置; z_{HR} 为操舵诱导船体横向力作用点的垂向位置; X_{RP} 、 X_{RS} 分别为左、右舵的纵向推力; F_{NP} 、 F_{NS} 分别为左、右舵的正压力; y_{RP} 、 y_{RS} 分别为左、右舵的横向位置。

左、右舵正压力 F_{NP} 、 F_{NS} 的表达式分别为

$$F_{NP} = \frac{1}{2} \rho A_{RP} U_{RP}^2 f_{\alpha P} \sin \alpha_{RP} \quad (23)$$

$$F_{NS} = \frac{1}{2} \rho A_{RS} U_{RS}^2 f_{\alpha S} \sin \alpha_{RS}$$

其中,

$$U_{RP} = \sqrt{u_{RP}^2 + v_R^2}, U_{RS} = \sqrt{u_{RS}^2 + v_R^2} \tag{24}$$

$$f_{\alpha P} = \frac{6.13\Lambda_P}{2.25 + \Lambda_P}, f_{\alpha S} = \frac{6.13\Lambda_S}{2.25 + \Lambda_S} \tag{25}$$

$$\alpha_{RP} = \delta - \frac{v_R}{u_{RP}}, \alpha_{RS} = \delta - \frac{v_R}{u_{RS}} \tag{26}$$

$$u_{RP} = \varepsilon(1 - w_p)u \sqrt{\eta \left\{ 1 + \kappa \left(\sqrt{1 + \frac{8K_T(J_{PP})}{\pi J_{PP}^2}} - 1 \right) \right\}^2 + 1 - \eta - u_{WRP}} \tag{27}$$

$$u_{RS} = \varepsilon(1 - w_p)u \sqrt{\eta \left\{ 1 + \kappa \left(\sqrt{1 + \frac{8K_T(J_{PS})}{\pi J_{PS}^2}} - 1 \right) \right\}^2 + 1 - \eta - u_{WRS}}$$

$$A_{RP} = A_R + (h_{RP} - 0.5\sqrt{A_R\Lambda}) \times \sqrt{\frac{A_R}{\Lambda}}, \text{ 当 } (h_{RP} - 0.5\sqrt{A_R\Lambda}) < 0 \tag{28}$$

$$A_{RS} = A_R + (h_{RS} - 0.5\sqrt{A_R\Lambda}) \times \sqrt{\frac{A_R}{\Lambda}}, \text{ 当 } (h_{RS} - 0.5\sqrt{A_R\Lambda}) < 0$$

$$\Lambda_P = [\sqrt{A_R\Lambda} + (h_{RP} - 0.5\sqrt{A_R\Lambda})] / \sqrt{A_R/\Lambda} \tag{29}$$

$$\Lambda_S = [\sqrt{A_R\Lambda} + (h_{RS} - 0.5\sqrt{A_R\Lambda})] / \sqrt{A_R/\Lambda}$$

式中, A_{RP} 、 A_{RS} 分别为左、右舵实时浸水面积; U_{RP} 、 U_{RS} 分别为左、右舵来流速度; α_{RP} 、 α_{RS} 分别为左、右舵攻角; $f_{\alpha P}$ 、 $f_{\alpha S}$ 分别为左、右舵力系数; Λ_P 、 Λ_S 分别为左、右舵实时展弦比; ε 为桨舵伴流分数比; η 为螺旋桨直径与舵展弦比; κ 为桨舵相互作用系数; u_{WRP} 、 u_{WRS} 分别为左、右舵位置处的波浪粒子速度; A_R 为舵面积; Λ 为舵展弦比; h_{RP} 、 h_{RS} 分别为左、右舵相对于波面的瞬时垂向高度。

1.6 波浪力

波浪力主要包括 Froude-Krylov 力(下标为 W_FK)和绕射力(下标为 W_Diff), 纵荡、横荡、首摇和横摇方向波浪力的表达式如下:

$$X_W = \mu_x X_{W_FK}(\xi_G/\lambda, u, \chi) = -\mu_x \rho g \zeta_w k \cos \chi \int_{AE}^{FE} C_1(x) S(x) e^{-kd(x)/2} \sin k(\xi_G + x \cos \chi) dx \tag{30}$$

$$Y_W = Y_{W_FK}(\xi_G/\lambda, u, \chi) + Y_{W_Diff}(\xi_G/\lambda, u, \chi) = \rho g \zeta_w k \sin \chi \int_{AE}^{FE} C_1(x) S(x) e^{-kd(x)/2} \sin k(\xi_G + x \cos \chi) dx + \zeta_w \omega \omega_e \sin \chi \int_{AE}^{FE} \rho S_y(x) e^{-kd(x)/2} \sin k(\xi_G + x \cos \chi) dx - \zeta_w \omega \sin \chi \left[\rho S_y(x) e^{-kd(x)/2} \cos k(\xi_G + x \cos \chi) \right]_{AE}^{FE} \tag{31}$$

$$N_W = N_{W_FK}(\xi_G/\lambda, u, \chi) + N_{W_Diff}(\xi_G/\lambda, u, \chi) = \rho g \zeta_w k \sin \chi \int_{AE}^{FE} C_1(x) S(x) e^{-kd(x)/2} x \sin k(\xi_G + x \cos \chi) dx + \zeta_w \omega \omega_e \sin \chi \int_{AE}^{FE} \rho S_y(x) e^{-kd(x)/2} x \sin k(\xi_G + x \cos \chi) dx + \zeta_w \omega \sin \chi \int_{AE}^{FE} \rho S_y(x) e^{-kd(x)/2} \cos k(\xi_G + x \cos \chi) dx - \zeta_w \omega \sin \chi \left[\rho S_y(x) e^{-kd(x)/2} x \cos k(\xi_G + x \cos \chi) \right]_{AE}^{FE} \tag{32}$$

$$K_W = K_{W_FK}(\xi_G/\lambda, u, \chi) + K_{W_Diff}(\xi_G/\lambda, u, \chi) = -\rho g \zeta_w k \sin \chi \int_{AE}^{FE} C_1(x) \frac{B(x)}{2} \{d(x)\}^2 e^{-kd(x)/2} \sin k(\xi_G + x \cos \chi) dx - \rho g \zeta_w k^2 \sin \chi \int_{AE}^{FE} C_4(x) \left\{ \frac{B(x)}{2} \right\}^3 d(x) e^{-kd(x)/2} \sin k(\xi_G + x \cos \chi) dx - \zeta_w \omega \omega_e \sin \chi \int_{AE}^{FE} \rho S_y l_\eta(x) e^{-kd(x)/2} \sin k(\xi_G + x \cos \chi) dx + \zeta_w \omega \sin \chi \left[\rho S_y l_\eta(x) e^{-kd(x)/2} \cos k(\xi_G + x \cos \chi) \right]_{AE}^{FE} + Y_W(\xi_G/\lambda, u, \chi) \cdot \overline{OG} \tag{33}$$

其中,

$$C_1 = \frac{\sin(k\sin\chi \cdot B(x)/2)}{k\sin\chi \cdot B(x)/2} \tag{34}$$

$$C_4 = \{k\sin\chi \cdot B(x)/2\}^{-3} [2\sin\{k\sin\chi \cdot B(x)/2\} - k\sin\chi \cdot B(x)\cos\{k\sin\chi \cdot B(x)/2\}] \tag{35}$$

$$\mu_x = \begin{cases} 1.46C_b - 0.05 & \text{当 } C_m < 0.86 \\ (5.76 - 5.00C_m)C_b - 0.05 & \text{当 } 0.86 < C_m < 0.94 \\ 1.06C_b - 0.05 & \text{当 } C_m \geq 0.94 \end{cases} \tag{36}$$

式中, μ_x 为纵荡绕射效应的修正因子; ω_e 为船舶遭遇频率; $d(x)$ 为船体横剖面吃水; $B(x)$ 为船体横剖面宽度; $S(x)$ 为船体横剖面浸水面积; $S_y(x)$ 为船体横剖面的横荡附加质量; $l_\eta(x)$ 为船体横剖面的横摇附加惯性矩; \overline{OG} 为船舶重心到水线面的垂向距离; C_m 为中船体横剖面系数; C_b 为船体方形系数; FE 代表船首; AE 代表船尾。

2 计算模型

选取双桨双舵的 ONR 内倾船为研究对象, 其主尺度参数、几何外形和船体型线分别如表 1 和图 2 所示。

表 1 ONR 内倾船主尺度参数
Tab.1 Main parameters of the ONR tumblehome vessel

参数	数值
垂线间长 L_{pp}/m	154.0
型宽 B/m	18.8
型深 D/m	14.5
吃水 d/m	5.494
排水量 Δ/t	8507
方形系数 C_b	0.535

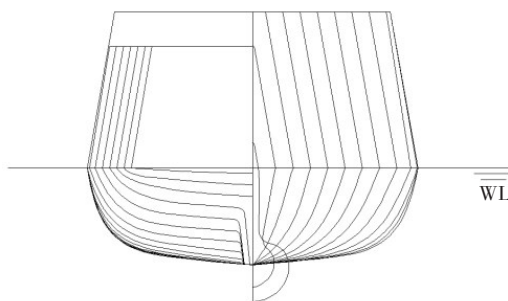


图 2 ONR 内倾船型线图
Fig.2 Body plan of the ONR tumblehome vessel

3 结果与分析

3.1 垂荡和纵摇运动影响

分别采用纵荡-横荡-横摇-首摇四自由度数学模型(4DOF)和纵荡-横荡-垂荡-横摇-纵摇-首摇六自由度数学模型(6DOF)对 ONR 内倾船进行骑浪/横甩数值预报, 分析垂荡和纵摇运动对船舶骑浪/横甩运动的影响。计算工况如下: 波陡 H/L_{pp} 为 0.05; 波长与船长比 λ/L_{pp} 为 1.25; 航向 χ 分别为 5° 、 15° 、 22.5° 、 30° 和 37.5° ; Fn 从 0.25 到 0.5, 间隔为 0.05; 初始时刻的船舶位置 ξ_{c0} 为 0。数值计算结果(CAL)和试验结果(EXP)对比情况如图 3 所示, 其中试验结果来自参考文献[6, 15]。

从以上对比中可以看出, 采用 4DOF 数学模型和 6DOF 数学模型计算的大部分周期运动和骑浪运动区域与试验结果都吻合较好, 但 4DOF 数学模型计算结果中未出现横甩区域, 而考虑了垂荡和纵摇运动的 6DOF 数学模型的计算结果中出现了横甩区域, 且大部分横甩计算结果与试验结果吻合较好。因为垂荡和纵摇运动对舵出水的模拟影响较大, 尤其在纵摇运动较大的情况下, 舵出水现象会比较严

重,致使舵效降低进而发生横甩,因此考虑垂荡和纵摇运动的6DOF数学模型能更好地预报内倾船的横甩运动。

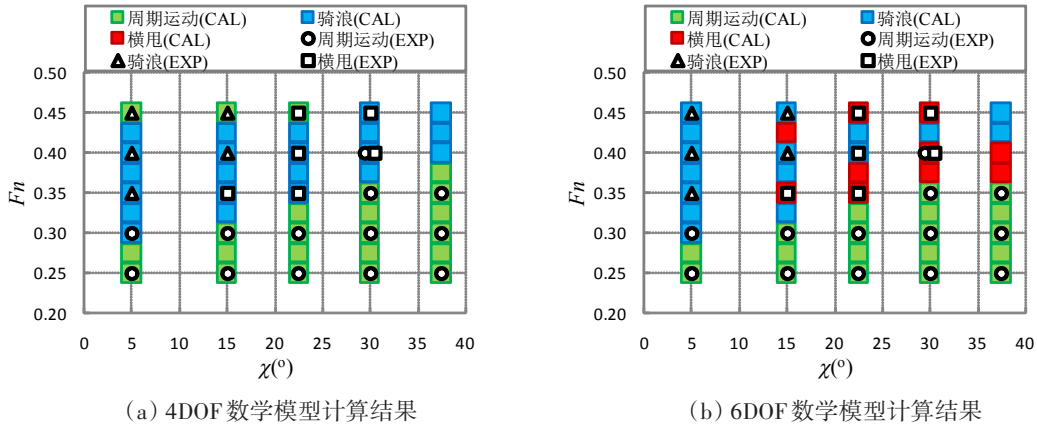


图3 船舶运动模式数值计算结果与试验结果对比

Fig.3 Comparison of ship motion modes between numerical results and experimental results

下面分别给出周期运动、骑浪运动、骑浪导致的横甩运动的典型6DOF数学模型计算结果,包括各典型运动状态下纵荡速度与波速比 u/c 、横摇、首摇和舵角的时间历程曲线,如图4~6所示(图中为了便于观察将 u/c 放大了10倍)。

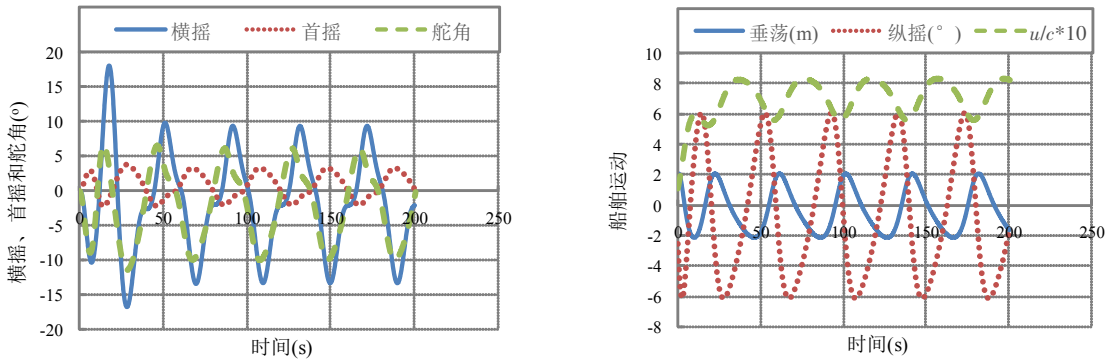


图4 ONR内倾船周期运动的时间历程曲线 ($F_n=0.25, \chi=15^\circ$)

Fig.4 Time histories of periodic motion of the ONR tumblehome vessel

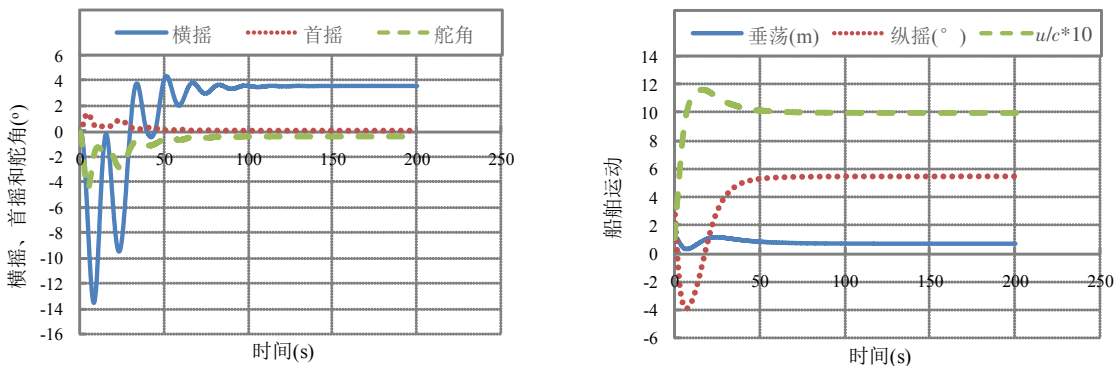


图5 ONR内倾船骑浪运动的时间历程曲线 ($F_n=0.4, \chi=15^\circ$)

Fig.5 Time histories of surf-riding motion of the ONR tumblehome vessel

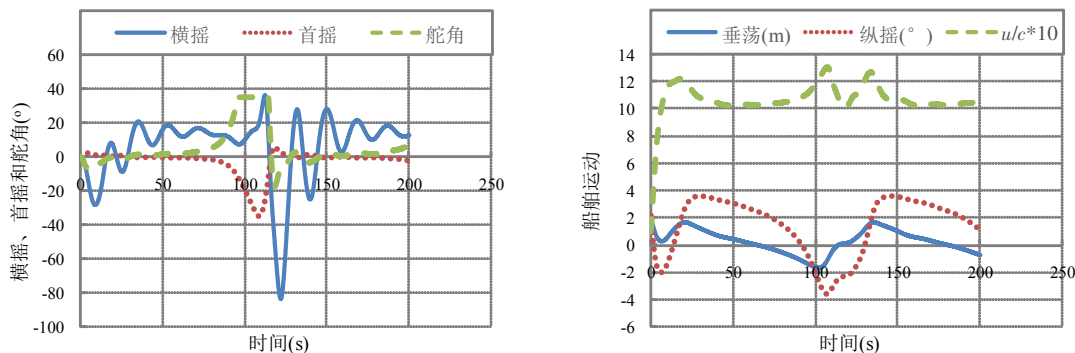


图6 ONR内倾船横甩运动的时间历程曲线($F_n = 0.45, \chi = 30^\circ$)

Fig.6 Time histories of broaching motion of the ONR tumblehome vessel

图4中纵荡速度与波速比 u/c 、横摇、纵摇、垂荡、首摇和舵角的时间历程曲线都呈稳定的周期性变化,说明该工况下船舶做稳定周期运动。图5中船舶运动振荡一段时间后达到稳定状态,此时纵荡速度与波速比 u/c 接近1,首摇角接近 0° ,说明在该工况下船舶被波浪捕获后与波浪相对静止,在原航向发生了稳定的骑浪运动。从图6中可见,在50s附近纵荡速度与波速比 u/c 接近1,船舶发生了骑浪,随后首摇角逐渐增大,增大到约 12° 时,舵角达到了最大 35° ,此时尽管舵角已经达到最大也没有方法控制住航向,故首摇角继续增大,最大达到约 35° ,横摇角最大达到约 37° ,船舶发生了骑浪导致的横甩。数值模拟中该状态下船舶在舵的控制下进入了下一次的骑浪状态。

3.2 初始船-波纵向相对位置影响

横甩运动是一种强非线性的随机运动过程,横甩运动过程的随机性与船舶和波浪环境的初始状态关系很大,初始状态影响因素有很多,包括船舶初始姿态参数(纵向位置、横向位置、垂向位置、横摇角、纵摇角和首摇角)、船舶初始控制参数(螺旋桨转速、舵角)、波浪初始参数(波幅、波长、相位)等。这里主要考虑船舶初始纵向位置和波浪初始相位的影响,也就是分析初始时刻船-波的纵向相对位置对船舶横甩运动的影响。

选取典型骑浪/横甩工况: $F_n = 0.4, \chi = 22.5^\circ$, 初始船-波纵向相对位置 ξ_{c0}/λ 在 $0 \sim 1.0$ 范围内,间隔 0.1 共取 11 个位置点(图7),应用6DOF数学模型,考虑舵出水、波浪粒子速度和垂荡、纵摇的影响,分析不同的初始船-波纵向相对位置 ξ_{c0}/λ 对船舶骑浪/横甩运动的影响,数值计算获得的最大船舶纵荡速度与波速比 u/c 、最大/小首摇角和最大/小舵角如图7~9所示。

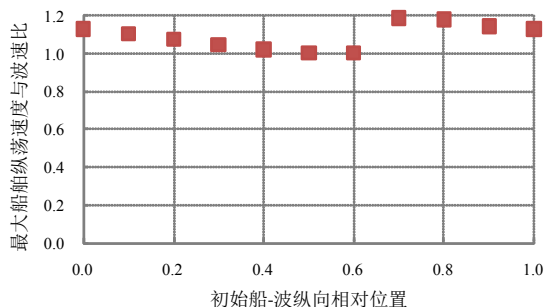


图7 不同初始船-波纵向相对位置对应的最大船舶纵荡速度与波速比

Fig.7 Maximum ratio of surge velocity to wave celerity versus initial ship-wave-position

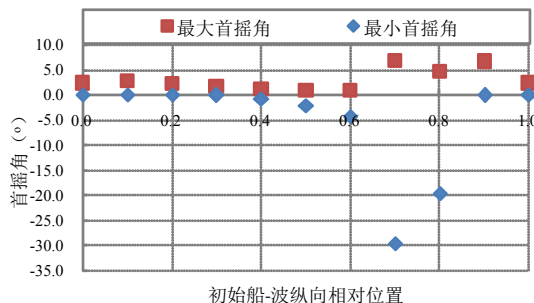


图8 不同初始船-波纵向相对位置对应的最大首摇角和最小首摇角

Fig.8 Maximum yaw angle and minimum yaw angle versus initial ship-wave-position

从图7中可以看出,在不同的初始船-波纵向相对位置 ξ_{c0}/λ 条件下,计算得到的最大船舶纵荡速度与波速比都稍大于或等于1.0,说明在不同初始船-波纵向相对位置 ξ_{c0}/λ 条件下船舶都发生了骑浪,而计算获得的最大/小首摇角、最大/小舵角都具有较大的离散性,当初始船-波纵向相对位置 $\xi_{c0}/\lambda = 0.7$ 和 0.8 时,船舶最大舵角都达到 35° ,最大首摇角绝对值分别为 29.6° 、 19.6° ,说明船舶发生了骑浪导致的横甩。图10给出了 $\xi_{c0}/\lambda = 0.7$ 时船舶运动的时历曲线,可以观察到此时船舶发生了明显的骑浪导致的横甩现象。

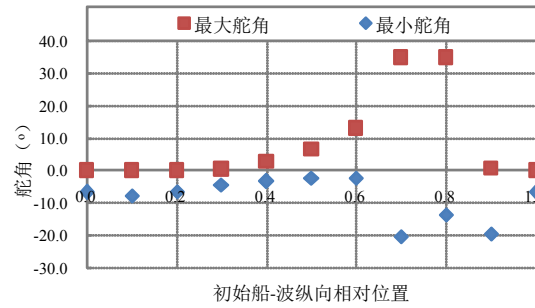


图9 不同初始船-波纵向相对位置对应的最大舵角和最小舵角

Fig.9 Maximum rudder angle and minimum rudder angle versus initial ship-wave-position

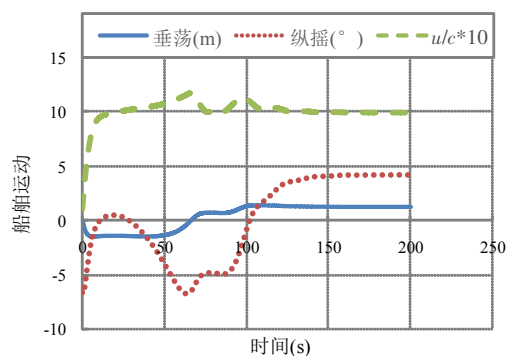
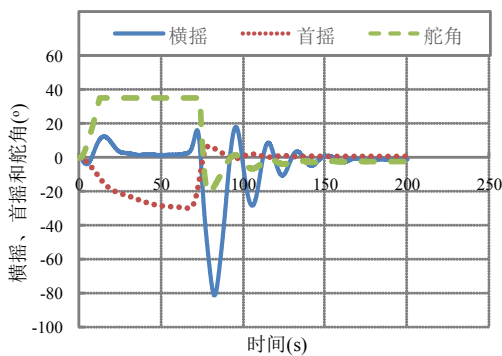


图10 ONR内倾船骑浪导致的横甩运动时间历程曲线($F_n = 0.4, \chi = 22.5^\circ, \xi_{c0}/\lambda = 0.7$)

Fig.10 Time histories of ship motion (broaching/surf-riding) of the ONR tumblehome vessel

考虑初始船-波纵向相对位置 ξ_{c0}/λ 的影响,重新计算如下工况:波陡 H/L_{pp} 为0.05;波长与船长比 λ/L_{pp} 为1.25;航向 χ 分别为 5° 、 15° 、 22.5° 、 30° 和 37.5° ; F_n 从0.25到0.5,间隔为0.05;初始船-波纵向相对位置 ξ_{c0}/λ 在0~1.0范围内,间隔为0.1。数值计算结果(CAL)和试验结果(EXP)对比情况如图11所示。与图3(b)结果相比,考虑初始船-波纵向相对位置 ξ_{c0}/λ 的影响后数值计算的横甩区域扩大,且与试验横甩区域更吻合。

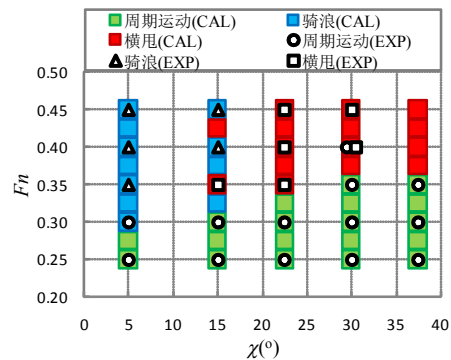


图11 船舶运动模式数值计算结果与试验结果^[6,15]对比

Fig.11 Comparison of ship motion modes between numerical results and experimental results

4 结 论

本文分别基于纵荡-横荡-横摇-首摇四自由度数学模型(4DOF)和纵荡-横荡-垂荡-横摇-纵摇-首摇六自由度数学模型(6DOF)对非常规内倾船进行了骑浪/横甩数值预报,并分析了初始船-波纵向相对位置对船舶骑浪/横甩运动影响。研究结果表明:

(1) 4DOF数学模型和6DOF数学模型都可用于非常规内倾船的周期运动和骑浪运动的直接数值模拟,但6DOF数学模型还可用于非常规内倾船的横甩运动的数值模拟。由于垂荡和纵摇运动对模拟舵出水很重要,舵出水严重时舵效降低进而引发船舶横甩,因此考虑垂荡和纵摇运动的6DOF数学模型能更好地预报非常规内倾船的横甩运动,可以用于非常规内倾船横甩运动的直接稳性评估。

(2) 考虑初始船-波纵向相对位置 ξ_{c0}/λ 的影响提高了横甩区域的预报精度,与试验结果吻合更好。且不同初始船-波纵向相对位置 ξ_{c0}/λ 条件下数值计算的首摇角和舵角都具有较大的离散性,很好地说明了横甩运动是一种强非线性的随机运动过程,且横甩运动过程的随机性受船舶和波浪环境的初始状态影响很大。

(3) 骑浪/横甩6DOF数学模型计算结果在临界速度区域还存在一定误差,可以进一步改进数学模型,例如考虑螺旋桨出水、瞬时湿表面等非线性因素影响,进一步提高骑浪/横甩数值预报的准确性。

致谢:本文中ONR内倾船型、阻力和KT系数来自日本大阪大学梅田直哉教授,本文工作得到工业和信息化部高技术船舶项目资助和船舶二代稳性研究项目组的支持,对上述机构和个人表示诚挚的感谢。

参 考 文 献:

- [1] Interim guidelines on the second generation intact stability criteria[R]. London: IMU, Report of the Working Group, MSC.1/Circ. 1627, 2020.
- [2] Umeda N, Hashimoto H. Qualitative aspects of nonlinear ship motions in following and quartering seas with high forward velocity[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2002, 6(2): 111-121.
- [3] Umeda N, Hashimoto H. Broaching prediction in the light of an enhanced mathematical model, with higher-order terms taken into account[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2003, 7: 145-155.
- [4] Hashimoto H, Umeda N, Matsuda A. Importance of several nonlinear factors on broaching prediction[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2004, 9: 80-93.
- [5] Hashimoto H, Umeda N, Matsuda A. Model experiment on heel-induced hydrodynamic forces in waves for realizing quantitative prediction of broaching[J]. *Fluid Mechanics and Its Application*, 2011, 96: 379-398.
- [6] Hashimoto H, Umeda N, Matsuda A. Broaching prediction of a wave-piercing tumblehome vessel with twin screws and twin rudders[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2011, 16: 448-461.
- [7] Araki M, Umeda N, Hashimoto H, Matsuda A. An improvement of broaching prediction with a nonlinear 6 degrees of freedom model[J]. *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, 2011, 14: 85-96.
- [8] Umeda N, Usada S, Mizumoto K, et al. Broaching probability for a ship in irregular stern-quartering waves: Theoretical prediction and experimental validation[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2016, 21: 23-37.
- [9] Htet T Z, Umeda N, Maki A, et al. Estimation of broaching probability using wave-induced forces and moments measured in captive model tests[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2019, 24:317-327.
- [10] 于立伟. 统一模型下船舶纵浪中的非线性横向失稳运动的预报与规避研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
Yu L W. Prediction and prevention of ship transverse stability failure events in longitudinal seaway based on the unified model[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [11] 王廷昊. 骑浪横甩数值预报方法及其非线性动力学特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
Wang T H. Study on prediction method and nonlinear dynamics for ship surf-riding/broaching[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [12] 储纪龙, 鲁江, 顾民. 非常规内倾船型骑浪数值预报方法研究[J]. *船舶力学*, 2022, 26(8): 1150-1159.
Chu J L, Lu J, Gu M. Prediction method for surf-riding of unconventional tumblehome ship[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2022, 26(8): 1150-1159.
- [13] 储纪龙, 顾民, 鲁江, 等. 内倾船骑浪概率评估方法和安全边界研究[J]. *中国造船*, 2022, 63(6): 1-13.
Chu J L, Gu M, Lu J, et al. Study on probabilistic estimation for surf-riding and safety boundary of the tumblehome ship[J]. *Shipbuilding of China*, 2022, 63(6): 1-13.
- [14] Lu J, Gu M, Evangelos B. Model experiments and direct stability assessments on pure loss of stability of the ONR tumblehome in following seas[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 194: 1-13.
- [15] Araki M, Umeda N, Hashimoto H, et al. Broaching prediction using an improved system-based approach[C]//28th Symposium on Naval Hydrodynamics, Pasadena, California, 2010.