

船舶波浪中复原力臂时域预报方法研究

卜淑霞, 顾民, 鲁江, 王田华

(中国船舶科学研究中心, 无锡, 214082, Email: bushuxia8@163.com)

摘要: 波浪中复原力臂的变化是与复原力臂相关失效模式(参数横摇和纯稳性丧失)的主要发生原因, 因此完善的波浪稳性预报方法需要以波浪中复原力臂变化的准确评估为依据。本研究分别选取了二维切片法和三维时域混合源法, 对比分析了两种评估方法对波浪中复原力臂变化的计算精度。研究表明, 不同的方法均可以较好地计算常规 FK 和静水力引起的复原力臂成分; 由于三维时域混合源法根据瞬时湿表面的变化计算了垂荡和纵摇对横摇运动的耦合影响, 因此, 与模型试验相比, 更好地计算了辐射力和绕射力引起的成分; 顶浪和艏斜浪中由于辐射力和绕射力引起的复原力臂成分是船舶波浪稳性预报中不能忽视的成分。

关键词: IMO 二代完整稳性; 波浪中复原力臂; 三维时域混合源法; 二维切片法

1 引言

目前, 国际海事组织正在制定的船舶第二代完整稳性衡准, 包括了影响船舶安全航行的 5 种失效模式, 并且提出了采用多层次的评估框架以保证船舶的航行安全, 其中第三层次的稳性直接评估对失效模式的精度提出了较高的要求^[1]。

波浪中复原力臂的变化是与复原力臂相关失效模式(参数横摇和纯稳性丧失)的主要发生原因, 因此完善的波浪稳性预报方法需要以波浪中复原力臂变化的准确评估为依据。当波长近似船长, 船中位于波峰时, 复原力臂比静水复原力臂小; 当船中位于波谷时, 复原力臂会比静水复原力臂大, 进而引起波浪复原力臂的周期性变化, 对于具有大型外飘船艏和方艏的船, 这种变化在纵浪中十分明显。因此, 研究波浪中复原力臂的变化规律, 以及建立相应的数值模拟方法, 对于了解波浪稳性的发生机理, 提高相应的预报精度至关重要。波浪中复原力臂变化主要包括两部分, 一部分是由常规 Froude-Krylov 力和静水力引起的成分; 一部分是辐射力和绕射力引起的成分。早期的研究认为, Froude-Krylov 假设可以解释波浪对横摇复原力臂的影响^[2], 但是一些约束模型试验表明, 基于 Froude-Krylov 假设的数值模拟结果与模型试验结果之间存在较大的误差^[3-4]。目前在波浪稳性的研究中,

Froude-Krylov 力和静水力引起的成分均采用了瞬时湿表面,也就是考虑了非线性特征,而大部分研究中忽略了辐射力和绕射力引起的成分,或者基于近似非线性物面条件考虑辐射力和绕射力的影响^[5-6]。本文作者前期基于二维切片法,研究了辐射力和绕射力部分对参数横摇精度的影响^[7];后基于三维时域混合源法,采用近似非线性物面条件计算辐射力和绕射力引起的复原力臂成分,对该成分进行了详细的研究,并引入精确物面处理条件,研究了考虑物面全非线性的辐射力和绕射力引起的复原力臂成分^[8]。

本文在前期已有预报方法的基础上,重点研究了辐射力和绕射力引起的复原力臂成分,以国际 C11 集装箱船为对象,对比分析了三维时域混合源法和二维切片法在计算 GZ_{FK} 和 GZ_{FK+RD} 计算精度上的区别。

2 理论模型和预报方法

2.1 理论模型

一般刚体运动具有 6 个自由度,但可以通过考虑一些限制条件,将其减少^[9]。首先,假设船舶在顶浪航行时航向固定,此时横荡和艏摇运动可以忽略;其次,假设船体可以保持恒定的航速,此时纵荡运动可以忽略,这时只剩下垂荡、纵摇和横摇运动。考虑到顶浪航行时垂荡和纵摇对横摇运动存在强耦合作用,两者不能忽略,因此本文选取垂荡-横摇-纵摇相互耦合的三自由度数学模型。

$$\begin{aligned} (m + A_{33})\ddot{\zeta} + B_{33}\dot{\zeta} + A_{34}\ddot{\phi} + B_{34}\dot{\phi} + A_{35}\ddot{\theta} + B_{35}\dot{\theta} &= F_3^{FK+H} + F_3^D \\ (I_{xx} + A_{44})\ddot{\phi} + N_1\dot{\phi} + N_3\dot{\phi}^3 + A_{43}\ddot{\zeta} + B_{43}\dot{\zeta} + A_{45}\ddot{\theta} + B_{45}\dot{\theta} &= F_4^{FK+H} + F_4^D \\ (I_{yy} + A_{55})\ddot{\theta} + B_{55}\dot{\theta} + A_{53}\ddot{\zeta} + B_{53}\dot{\zeta} + A_{54}\ddot{\phi} + B_{54}\dot{\phi} &= F_5^{FK+H} + F_5^D \end{aligned} \quad (1)$$

其中, m 是船体质量; I_{xx} 是船体横摇惯性矩; I_{yy} 是船体纵摇惯性矩; A_{ij} 是船体附加质量; B_{ij} 是船体阻尼系数; ζ 是船体垂荡位移; θ 是船体纵摇运动; ϕ 是船体横摇运动; N_1 、 N_3 分别是线性和立方项的横摇阻尼,本文采用模型试验结果; F^{FK+H} 是 Froude-Krylov 力和静水力,沿船体瞬时湿表面进行压力积分得到; F^D 是船体绕射力。船体运动的偏微分方程利用 Runge-Kutta 方法求解。

动稳性研究的关键在于横摇力矩求解的准确性,因此,可以通过评估不同成分在横摇力矩方向的贡献进而研究不同成分作用力的影响,为了方便计算,在研究中将所有作用在横摇方向的力/力矩转换为横摇方向的复原力臂。此时波浪中复原力臂可以进一步划分成两部分,一部分是静水和 Froude-Krylov 力引起的成分 (GZ_{FK}),另一部分是辐射力和绕射力引起的成分 (GZ_{RD})。公式可表示为:

$$\begin{aligned}
 GZ &= -\frac{F_4^{\text{FK}+\text{H}} + F_4^{\text{D}} - (A_{43}\ddot{\zeta} + B_{43}\dot{\zeta} + A_{45}\ddot{\theta} + B_{45}\dot{\theta})}{mg} \\
 &= -\frac{F_4^{\text{FK}+\text{H}}}{mg} - \frac{F_4^{\text{D}} - (A_{43}\ddot{\zeta} + B_{43}\dot{\zeta} + A_{45}\ddot{\theta} + B_{45}\dot{\theta})}{mg} = GZ_{\text{FK}} + GZ_{\text{RD}}
 \end{aligned} \quad (2)$$

上述公式中, 静水力和 Froude-Krylov 力的计算沿物面瞬时湿表面积分; 对于辐射力和绕射力的计算, 可进一步划分为: 仅考虑初始平均湿表面的线性方法, 对于纵浪中航行的对称正浮船体, 此时, 辐射力和绕射力引起的横摇复原力臂变化几乎为 0, 因此, 此种方法可认为未考虑辐射力和绕射力引起的复原力臂变化, 也就是该方法中仅考虑了 Froude-Krylov 力和静水力引起的复原力臂变化, 称为 GZ_{FK} ; 另一种方法是考虑瞬时平均湿表面的近似非线性物面方法, 也就是近似非线性物面方法。

因此, 计算中由于 Froude-Krylov 力和静水力引起的力/力矩以及复原力臂可表示为:

$$\vec{F}(F^{\text{FK}}, F^{\text{H}}) = \iint_S p \vec{n} ds = \iint_S -\rho \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + gz \right) \vec{n} ds \Rightarrow mgGZ_{\text{FK}} = \iint_S \rho \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + gz \right) \vec{n} ds \quad (3)$$

由于辐射力和绕射力引起的力/力矩可以采用两种方式计算, 一种是考虑瞬时位置引起的平均湿表面, 也即近似非线性物面方法, 计算公式可以表示为:

$$\vec{F}(F^{\text{D}}, F^{\text{R}}) = \iint_{\bar{S}(\phi)} p \vec{n} ds = \iint_{\bar{S}(\phi)} -\rho \left(\frac{\partial \Phi_{\text{D}}}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_{\text{R}}}{\partial t} \right) \vec{n} ds \Rightarrow mgGZ_{\text{RD}} = \iint_{\bar{S}(\phi)} \rho \left(\frac{\partial \Phi_{\text{D}}}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_{\text{R}}}{\partial t} \right) \vec{n} ds \quad (4)$$

其中, $\bar{S}(\phi)$ 代表考虑横倾角度之后的平均湿表面; ϕ 代表固定横倾角度。

2.2 三维时域混合源法

该三维时域混合源法在数值求解中引入了控制面 S_{C} , 将流场分为内场 I 和外场 II。内场 I 是由船体湿表面 S_{b} 、部分自由液面 S_{fl} 和控制面 S_{C} 包围的闭合区域; 外场 II 由控制面 S_{C} 、剩余的自由液面 S_{f2} 和无穷边界 S_{∞} 组成, 流场分布和船体网格划分如图 1 所示^[10-11]。

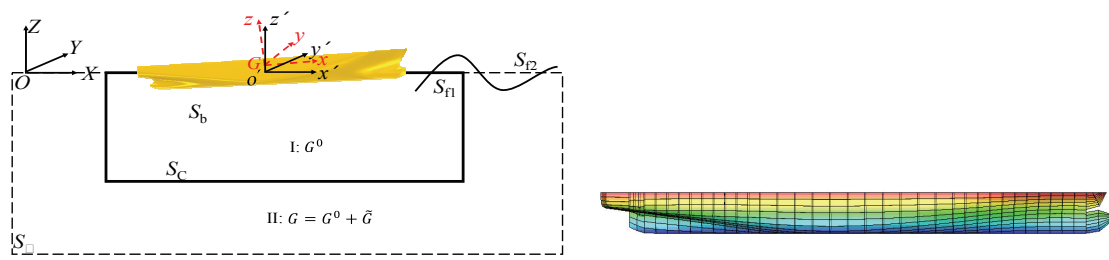


图 1 混合源法区域划分示意图

记内场总扰动势 $\Phi(P, t)$ 为 $\Phi_1(P, t)$, 那么 $\Phi_1(P, t)$ 在大地坐标系下应该满足以下条件:

$$\begin{aligned}
 \nabla^2 \Phi_I &= 0 & \text{内部流场} \\
 \frac{\partial^2 \Phi_I}{\partial^2 t} + g \frac{\partial \Phi_I}{\partial Z} &= 0 & \text{on } S_{\Pi}, t > 0 \\
 \frac{\partial \Phi_I}{\partial \vec{n}} &= \vec{V}_n - \frac{\partial \Phi_w}{\partial \vec{n}} & \text{on } S_b, t > 0 \\
 \Phi_I = \frac{\partial \Phi_I}{\partial t} &= 0 & \text{at } t = 0
 \end{aligned} \tag{7}$$

则内场 I 中 Rankine 源的边界积分方程如下:

$$2\pi\Phi_I(P) + \iint_{S_1} (\Phi_I G_n - \Phi_{In} G) dS = 0 \tag{8}$$

其中, Φ_I 是内场 I 总扰动速度势; $G = 1/r_{PQ}$ 为简单格林函数。定义 $\vec{x} = P(X(t), Y(t), Z(t))$ 为场点、 $\vec{\xi} = Q(\xi(t), \eta(t), \zeta(t))$ 为源点, 则 $r_{PQ} = |\vec{P} - \vec{Q}| = \sqrt{(X - \xi)^2 + (Y - \eta)^2 + (Z - \zeta)^2}$ 。

记外场总扰动势 $\Phi(P, t)$ 为 $\Phi_{II}(P, t)$, 那么 $\Phi_{II}(P, t)$ 在大地坐标系下应满足以下条件:

$$\begin{aligned}
 \nabla^2 \Phi_{II} &= 0 & \text{外部流场} \\
 \frac{\partial^2 \Phi_{II}}{\partial^2 t} + g \frac{\partial \Phi_{II}}{\partial Z} &= 0 & \text{on } S_{I2}, t > 0 \\
 \nabla \Phi_{II} &\rightarrow 0 & \text{on } S_{\infty} \\
 \Phi_{II} = \frac{\partial \Phi_{II}}{\partial t} &= 0 & \text{at } t = 0
 \end{aligned} \tag{9}$$

则外场 II 中边界积分方程可以写成:

$$\begin{aligned}
 2\pi\Phi_{II} + \iint_{S_C(t)} \left\{ \Phi_{II} \frac{\partial G^0}{\partial n_Q} - G^0 \frac{\partial \Phi_{II}}{\partial n_Q} \right\} dS_Q &= \int_{t_0}^t d\tau \iint_{S_C(\tau)} \left\{ \tilde{G} \frac{\partial \Phi_{II}}{\partial n_Q} - \Phi_{II} \frac{\partial \tilde{G}}{\partial n_Q} \right\} dS_Q \\
 + \frac{1}{g} \int_{t_0}^t d\tau \oint_{w(\tau)} \vec{V}_N \left\{ \tilde{G} \frac{\partial \Phi_{II}}{\partial \tau} - \Phi_{II} \frac{\partial \tilde{G}}{\partial \tau} \right\} dl_Q &
 \end{aligned} \tag{10}$$

在控制面上, 满足连续条件:

$$\Phi_I = \Phi_{II}, \quad \frac{\partial \Phi_I}{\partial n} = -\frac{\partial \Phi_{II}}{\partial n} \quad (\text{On } S_C) \tag{11}$$

求得每个面元控制点的压力后, 对每个面元积分即可求得作用于该面元上的流体作用力 F 和力矩 M 。

$$\vec{F} = \iint_{S_b} p \vec{n} dS; \quad \vec{M} = \iint_{S_b} (\vec{r} \times \vec{n}) p dS \tag{12}$$

2.3 二维切片法

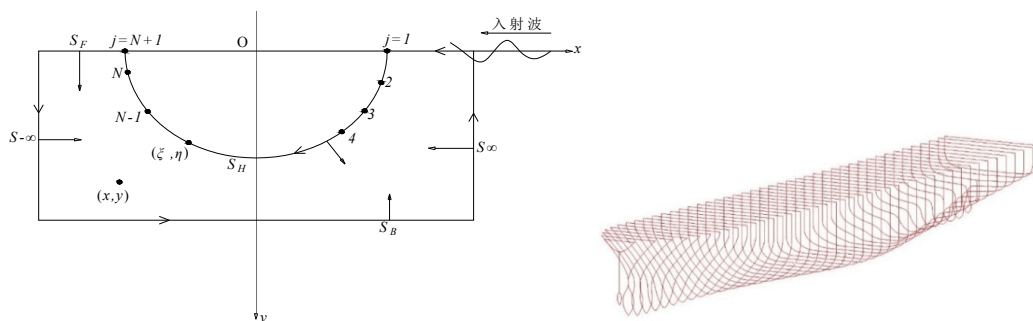


图2 速度势求解和船体剖面示意图

基于切片理论求解水动力系数，求解的关键在于速度势的求解。可采用二维格林函数求解剖面的速度势，也即在船体剖面的浸湿表面上连续分布脉动源，然后根据剖面的边界条件求出连续分布脉动源的速度势，进而求出各剖面的水动力系数，最后沿船体积分求出整个船体的水动力系数^[12]。如图2所示，将物面分成 n 段（ $n=1\sim N$ ），设 $P=(x,y)$ 为场点， $Q=(\xi,\eta)$ 为源点，则辐射势和格林函数应满足以下条件：

$$\begin{aligned}
 [L] \quad & \nabla^2 \varphi_j = 0; \quad \nabla^2 G = \delta(x-\xi)\delta(y-\eta) \\
 [F] \quad & \frac{\partial \varphi_j}{\partial n} = \frac{\partial \varphi_j}{\partial \eta} = -K\varphi_j; \quad \frac{\partial G}{\partial n} = \frac{\partial G}{\partial \eta} = -KG \quad \text{on } \eta=0 \\
 [B] \quad & \frac{\partial \varphi_j}{\partial n} = \frac{\partial \varphi_j}{\partial \eta} = 0; \quad \frac{\partial G}{\partial n} = \frac{\partial G}{\partial \eta} = 0 \quad \text{as } y \rightarrow \infty \\
 [R] \quad & \frac{\partial}{\partial n} = \mp \frac{\partial}{\partial \xi}; \quad \varphi_j \sim Ae^{-K\eta \mp iK\xi}; \quad G \sim Be^{-K\eta \mp iK\xi}
 \end{aligned} \tag{13}$$

积分方程可写成：

$$\frac{1}{2} \varphi_j(P) + \int_{S_H} \varphi_j(Q) \frac{\partial}{\partial n_Q} G(P;Q) ds(Q) = \begin{cases} \int_{S_H} n_j(Q) G(P;Q) ds(Q), & j=2 \sim 4 \\ \varphi_0(P), & j=D \end{cases} \tag{14}$$

选取如下的格林函数：

$$\begin{aligned}
 G(x,y;\xi,\eta) &= \frac{1}{2\pi} \log \frac{r}{r_1} - \frac{1}{\pi} \lim_{\mu \rightarrow 0} \int_0^\infty \frac{e^{-k(y+\eta)} \cos k(x-\xi)}{k - (K - i\mu)} dk \\
 &= \frac{1}{2\pi} \log \frac{r}{r_1} - \frac{1}{\pi} \oint_{0 \rightarrow \infty} \frac{e^{-k(y+\eta)} \cos k(x-\xi)}{k - K} dk + ie^{-K(y+\eta)} \cos K(x-\xi) \\
 &= \frac{1}{2\pi} \log \frac{r}{r_1} - \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \frac{k \cos k(y+\eta) - K \sin k(y+\eta)}{k^2 + K^2} e^{-k|x-\xi|} dk \\
 &\quad + ie^{-K(y+\eta) - iK|x-\xi|}
 \end{aligned} \tag{15}$$

其中 $r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$; $r_1 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y+\eta)^2}$

对方程进行离散,可得到二维剖面的辐射势 φ_r 和绕射势 φ_d ,进而得到相应的作用力。

3 研究对象和模型试验简介

1998 年巴拿马型 C11 集装箱船在北太平洋海域发生了严重的参数横摇事故,船舶横摇角度高达 40° ,属于典型的参数横摇事故。因此 C11 集装箱船被公认为是参数横摇研究的标准模型之一。该船的主要参数见表 1,船体型线见图 3。从图 3 中可以看出:该船的外飘船艏和方艏比较明显,在纵浪中波浪复原力臂的变化可能会非常显著。目前考虑船舶前进速度的大倾角复原力臂模型试验开展的较少。因此,本文以 C11 集装箱船为对象,首先通过模型试验测量了顶浪规则波及不规则波、随浪规则波中复原力臂的变化规律。

模型与实船的缩尺比为 1:65.5,实船吃水 $d=11.5\text{m}$,该吃水状态也是目前国际上采用该模型进行参数横摇研究常用的吃水状态。区别于常规耐波性试验,波浪稳性的研究与 GM 值密切相关,因此,在模型重心位置和纵向惯量调试完成后,在静水中进行 GM 值的调试,以保证 GM 值的精度。波浪中复原力臂的模型试验采用中国船舶科学研究中心自主研发的随动平衡式船模波浪稳性力臂测量仪^[13],该装置基本构造如图 4 所示,装置由基座、位移机构、三分力组合式传感器及重量平衡机构等部件组成。该装置可实现多种船舶水动力性能的测量,包括不同方向的力/力矩以及模型运动姿态。模型试验中释放垂荡、横摇和纵摇运动,约束纵荡、横荡和艏摇运动,将模型固定在某一横倾角度下,模型可以在该固定横倾角度下进行自由垂荡和纵摇运动,测量此时的横摇力矩,进而得到对应的横摇复原力臂。模型试验在中国船舶科学研究中心耐波性水池中进行,在不同浪向下开展波浪中复原力臂的模型试验,模型试验照片如图 4 所示。

表 1 C11 集装箱船主尺度参数(缩尺比 1:65.5)

项目	值	项目	值	项目	值
垂线间长 (L_{pp})	262.00m	型深 (D)	24.45m	横摇固有周期 (T)	24.68s
平均吃水 (d)	11.50m	船宽 (B)	40.00m	纵摇惯性半径 (k_{yy})	$0.24L_{pp}$
排水量 (W)	67508.0ton	初稳性高 (GM)	1.928m		

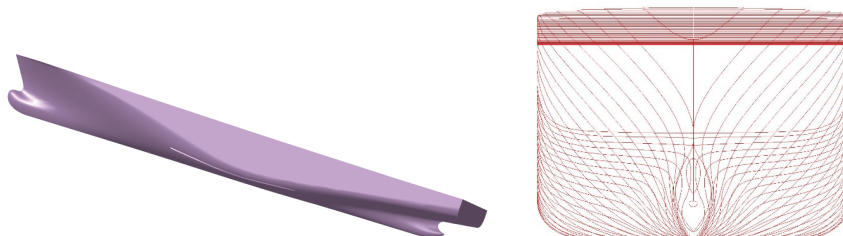
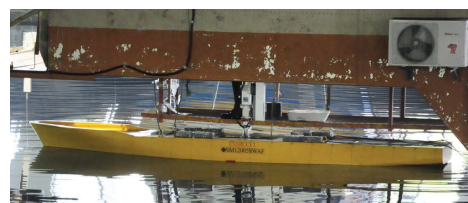


图 3 巴拿马型 C11 集装箱船船体几何外形和船体剖面



(a) 随动平衡式船模波浪稳性力臂测量仪



(b) 波浪中复原力臂模型试验照片

图4 波浪中复原力臂测量设备和模型试验照片

4 计算结果和分析

分别采用三维时域混合源法和二维切片法计算不同波浪条件下复原力臂的变化，并通过模型试验对比两种计算方法的区别。

4.1 随浪计算结果和分析

图6为随浪状态不同航速对应的 GZ_{FK} ，其中横坐标代表船舶-波浪的相对位置。从图6中可以看出，两种计算方法计算得到的 GZ_{FK} 基本一致，均和模型试验结果吻合良好。由于FK和静水力产生的GZ，主要取决于船舶-波浪相对位置计算的准确性，因此，两种方法计算结果区别不大。考虑 GZ_{RD} 之后的 GZ_{FK+RD} ，两种方法计算结果区别也不大。上述对比结果表明，两种方法对于随浪中 GZ_{FK} 和 GZ_{FK+RD} 的计算结果均与模型试验结果吻合良好。

另外，从模型试验结果可以看出，随浪中GZ曲线基本符合规则振动的余弦曲线，多频率叠加现象不明显，间接证明了第二共振响应不明显，可以忽略。从计算结果也可以看出， GZ_{FK+RD} 和 GZ_{FK} 近似相等，并且与模型试验结果也吻合较好。因此，可以认为辐射力和绕射力对GZ的影响在随浪中可以忽略。

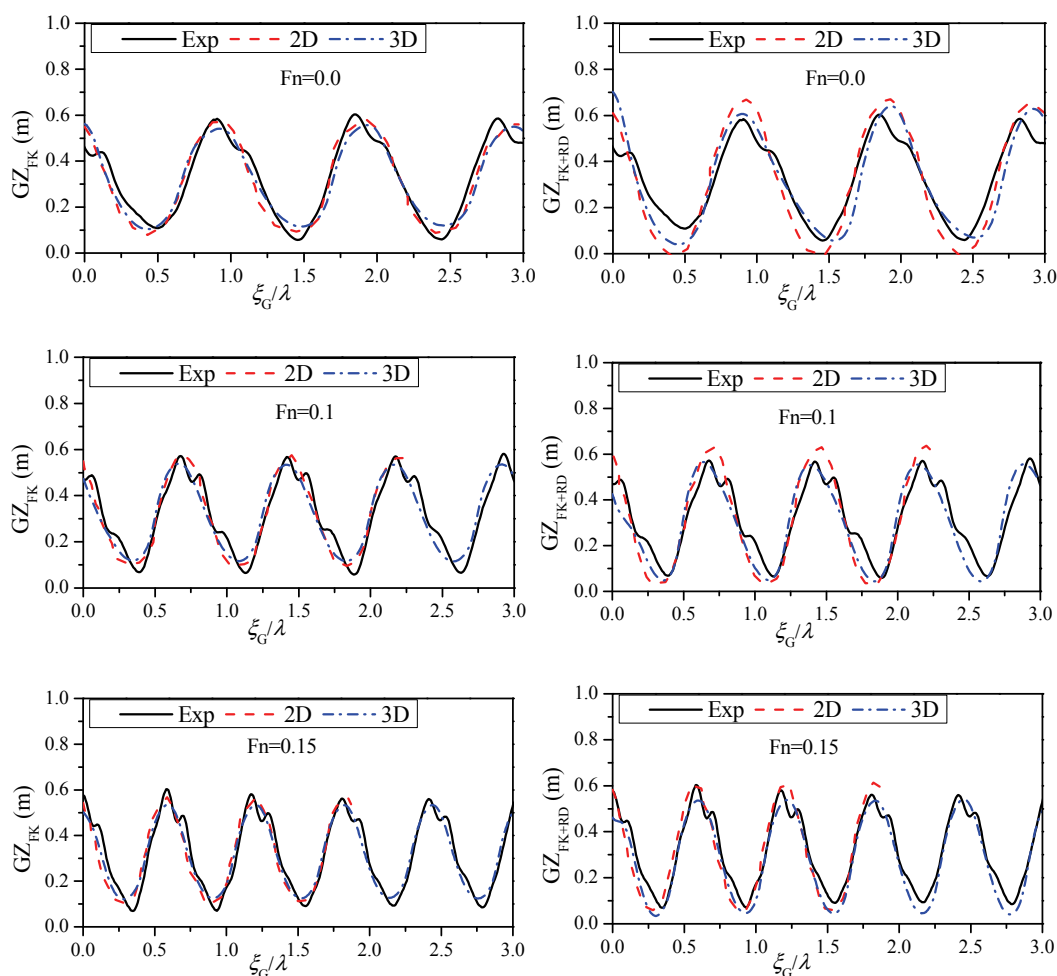


图6 随浪中三维时域混合源法和二维切片法对比($\lambda/L_{pp}=1.0$, $H/\lambda=2.62$, $\phi_c=8.0^\circ$, $\chi=0^\circ$)

4.2 顶浪计算结果和分析

图7为顶浪状态下，三维时域混合源法和二维切片法的对比结果。对于 GZ_{FK} ，从图7中可以看出，两种方法对于 GZ_{FK} 的计算精度区别不大。对于 GZ_{FK+RD} ，两种方法计算结果在零航速下区别不大；随着航速的增加，二维切片方法计算结果偏大，可能是因为顶浪状态，垂荡和纵摇较为明显，且对横摇的影响也较为明显，而目前二维切片方法计算中，对垂荡和纵摇的处理采用频域计算的思想，即首先计算初始时刻的垂荡和纵摇幅值，然后根据单幅波幅和相位进行转换。

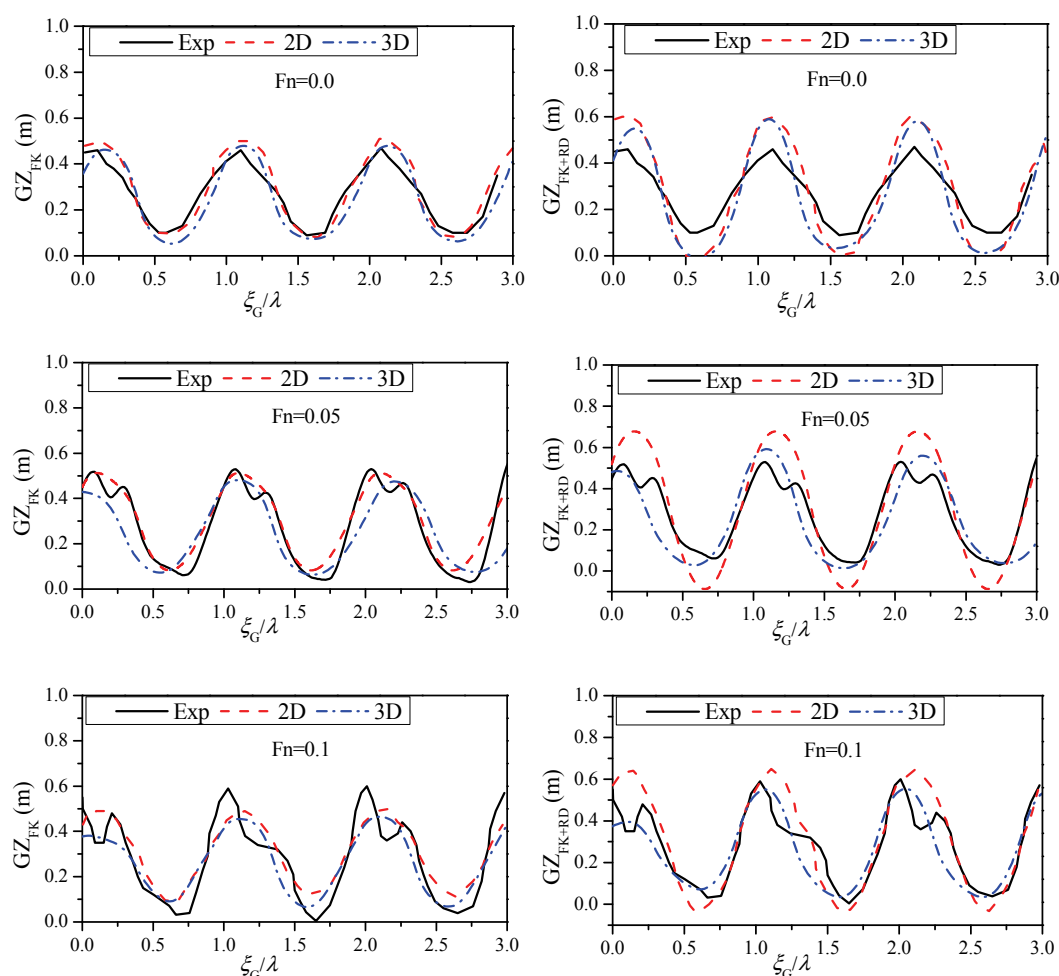


图7 顶浪中三维时域混合源法和二维切片法对比($\lambda/L_{pp}=1.0$, $H/\lambda=2.62$, $\phi_c=7.3^\circ$, $\chi=180^\circ$)

从上述模型试验结果可以看出,随着航速的增加,复原力臂曲线越来越不符合简谐规律,多频率叠加现象变的明显,这种非线性现象使得高航速下 GZ 的预报十分复杂。从数值模拟结果可以看出,当 $Fn=0.0$ 和 $Fn=0.05$ 时, GZ_{FK} 和模型试验吻合良好, GZ_{FK+RD} 比模型试验稍微偏大,可以推断出此种情况下 GZ_{RD} 所占的成分比较小,仅用 GZ_{FK} 就可以较好地预报波浪中的 GZ 。但随着速度的增大(图8), GZ_{FK} 远小于模型试验结果,而 GZ_{FK+RD} 和模型试验结果吻合越来越好,可以间接地推断出 GZ_{RD} 的作用在不断增加,也可以证明基于 Froude-Krylov 假设不足以精确预报 GZ ,高航速下复原力臂多频率叠加现象主要是 GZ_{RD} 的影响。

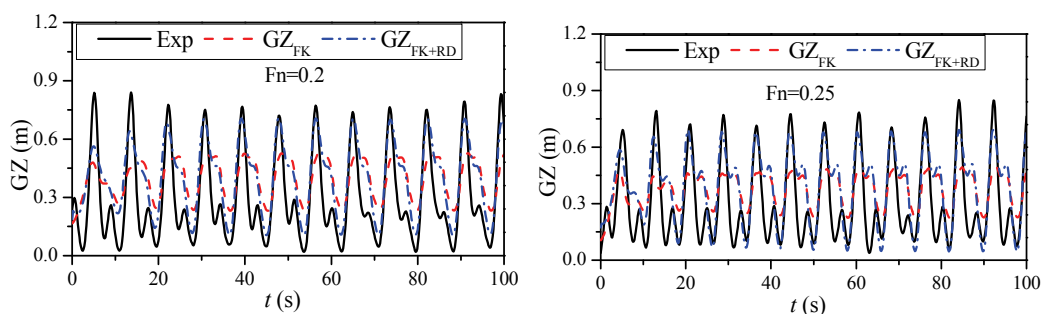


图8 顶浪中 GZ_{FK} 与 GZ_{FK+RD} 结果对比($\lambda/L_{pp}=1.0$, $H/\lambda=2.62$, $\phi_c=7.3^\circ$, $\chi=180^\circ$)

5 结论

本文针对波浪中复原力臂的计算方法开展了研究,以国际标模 C11 集装箱船为对象,对比分析了三维时域混合源法和二维切片法的计算精度,研究表明:①三维时域混合源法和二维切片法均可以较好地计算常规 Froude-Krylov 力和静水力引起的复原力臂成分;三维时域混合源法计算绕射力和绕射力引起的成分精度略好。②顶浪中由于辐射力和绕射力引起的复原力臂成分是不能忽视的成分。

参考文献

- 1 IMO SDC 3, WP.5. Draft explanatory notes on the vulnerability of ships to the parametric roll stability failure mode[R]. Report of the working group, Annex 4, 2016
- 2 Paulling, J.R.. The Transverse Stability of a Ship in a Longitudinal Seaway[J]. J. Ship Research, 1961,4(4):37-49.
- 3 Umeda, N., Hashimoto, H., Vassalos, D., et al. Nonlinear dynamics on parametric roll resonance with realistic numerical modelling[J]. International Shipbuilding Progress, 2004,51 (2-3): 205-220.
- 4 Hashimoto, H., Umeda, N. Nonlinear analysis of parametric rolling in longitudinal and quartering seas with realistic modelling of roll-restoring moment[J]. J Mar Sci Technol, 2004,9(3): 117-126.
- 5 Umeda, N., Hashimoto, H., Sakamoto, G. et al. Research on estimation of roll restoring variation in waves[C]// Proc. Kansai Society of Naval Architects, 2005,24:17-19.
- 6 Hashimoto, H., Head-sea parametric rolling of a car carrier[C]//Proc. 9th ISSW, Hamburg, Germany, 2007.
- 7 卜淑霞, 鲁江, 顾民, 等. 顶浪规则波中参数横摇数值预报研究[J]. 中国造船, 2014, 55(2): 1-7.
- 8 Shuxia Bu, Min Gu, Moustafa Abdel-Maksoud. Study on roll restoring arm variation using a three-dimensional hybrid panel method[J]. J. Ship Research. <https://doi.org/10.5957/JOSR.09180078>
- 9 Lu J, Gu M, Umeda N. Experimental and numerical study on several crucial elements for predicting parametric roll in regular head seas[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2017(22): 25-37
- 10 Shuxia Bu, Min Gu, Jiang Lu, Moustafa Abdel-Maksoud. Effects of radiation and diffraction forces on the

- prediction of parametric roll[J]. Ocean Engineering. 175(2019):262-272.
- 11 Min Gu, Shuxia Bu, Jiang Lu. Study on parametric roll in oblique waves with a three-dimensional hybrid panel method[J]. Journal of Hydrodynamics. <https://doi.org/10.1007/s42241-019-0029-X>
- 12 卜淑霞. 船舶参数横摇衡准技术研究[D]. 硕士学位论文, 中国船舶科学研究中心, 2014.
- 13 Gu, M., Lu, J., Wang, T.H., 2014. Experimental and numerical study on roll restoring variation using the C11 containership[C]/Proc. 14th ISSW, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 126-132.

Study on the time domain prediction method for roll restoring arm variation in waves

BU Shu-xia, GU Min, LU Jiang, WANG Tian-hua

(China Ship Scientific Research Center, National Key Laboratory of Science and Technology on Hydrodynamics, Wuxi, 214082. Email: bushuxia8@163.com)

Abstract: It is acknowledged that the occurrence of parametric roll and pure loss of stability is mainly attributed to the variation of roll restoring arm, which should be calculated accurately. In this paper, two methods are used for the prediction of roll restoring arm variation in waves, one is two dimensional strip method and the other is three dimensional time domain hybrid method. The results calculated by these two methods are compared with the experimental results. The research show that, the normal component of roll restoring arm caused by FK and hydrostatic forces can be calculated very well by both methods. However, the results of the component caused by radiation and diffraction forces calculated by three dimensional time domain hybrid method are compared better with experimental results than two dimensional strip method, because the coupled heave and pitch motions are calculated instantaneously in three dimensional time domain hybrid method, while calculated based on linear theory in two dimensional strip method. The results also show that the component caused by radiation and diffraction forces can not be ignored in head waves.

Key words: IMO second generation intact stability; roll restoring arm variation in waves; three dimensional time domain hybrid method; two dimensional strip method.