

波浪中多船近距离并行航行的 水动力干扰研究*

许 勇, 董文才

(海军工程大学 舰船工程系, 武汉 430033)

摘要: 采用三维势流理论及多体动力学理论建立了波浪中近距离并行航行多船波浪作用力及运动响应的计算模型.为考虑航速效应对船体间自由面的影响,采用三维移动脉动源 Green(格林)函数来模拟船间的辐射波及绕射波.采用该数学模型求解了零航速及有航速情形下两船近距离并行时的流体动力项及运动响应,和模型试验结果比较验证了方法的可靠性.将该方法推广至三船并行航行的情形,重点分析了三船并行时水动力干扰和两船并行时水动力干扰的差异.

关键词: 水动力干扰; 多船; 波浪作用力; 运动响应; 移动脉动源

中图分类号: U661.32; O352 **文献标志码:** A

doi: 10.3879/j.issn.1000-0887.2014.04.005

引 言

波浪中近距离航行两船或多船水动力干扰的理论研究一直是船舶流体力学中的一个经典而又重要的研究课题.其中确定波浪中航行补给时舰船的波浪力及运动响应就是一个典型的案例.航行补给时两船(或多船)在有限间距范围内同速、同向航行,在静水中两船内侧的流场发生干扰,会产生相互作用力,可能使船体产生横向运动而危及船体的安全航行;在波浪中船体会产生摇荡运动并传播辐射波,入射波在遭遇船舶时产生绕射波,各船的辐射波及绕射波传递到毗邻船体并产生新的激励作用,这种新的激励必然影响船体的摇荡运动,同时还会形成新的绕射,从而形成船体间的波浪干扰,因此求解有航速船体的辐射-绕射波是研究并行航行的多船间水动力干扰的关键,本文重点讨论船体间的这种波浪干扰.这种干扰可能加剧各船的波浪载荷和运动响应,导致补给困难或补给失败,而且还可能使船体发生碰撞,产生不必要的事情和人员伤亡.随着我海军舰艇编队远洋航行和护航任务的增加,航行补给时间的增长、补给舰和被补给舰种类的增多,航行补给所涉及的水动力干扰问题更为复杂.为提高补给效率,航行补给将不仅仅只在两舰之间开展,还会出现多舰补给的工况.因此开展波浪中多船水动力干扰的理论研究,不仅具有理论研究价值,而且具有现实意义.

求解波浪中近距离船体间水动力干扰的理论方法主要包括切片法^[1-2]、势流和粘性流相结合的混合方法^[3-4]、三维势流方法^[5-10]及三维势流时域法^[11-12].切片法无法考虑流体对船体的

* 收稿日期: 2013-10-08; 修订日期: 2014-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(50879090);水动力重点基金(9140A14030712JB11044)

作者简介: 许勇(1981—),男,湖南岳阳人,博士生(通讯作者. E-mail: nancy23670@163.com);

董文才(1967—),男,武汉人,教授,博士生导师(E-mail: haigongdwc@163.com).

三维动力效应,限制了其预报精度;势流及粘性流相结合的方法目前还处于二维阶段,仍无法应用于多个复杂船体水动力干扰问题;三维势流方法则多采用脉动源 Green 函数法,当有航速时其预报的辐射波及绕射波为环形波,难以正确反映船体间真实的波浪干扰,常在船体共振频率处出现数值共振现象^[10];文献[10]将三维移动脉动源 Green 函数用于求解有航速时两船的水动力干扰问题,其精度要高于脉动源 Green 函数预报结果,并消除了在船体共振频率处脉动源 Green 函数预报所出现的数值共振,该函数严格满足有航速时的线性自由面条件,可较真实地模拟船产生的辐射及绕射波,适合求解多个船体间及多体船片体间的波浪干扰^[10,13].本文采用三维势流理论,以该函数为基本内核,建立了多船水动力干扰的预报模型,通过模型试验验证了该方法的可靠性,重点分析了三船并行和两船并行时水动力干扰的差异.

1 基本方程

1.1 速度势

设 N 艘船以相同航速 U 近距离同向航行在规则波中,为分析船体间的水动力干扰,在各船船体上建立随船正交坐标系 $O_l-x_l y_l z_l (l=1,2,\dots,N)$,其中各坐标系的 xOy 平面均处于未扰动的自由面上, Oz 轴铅直向上并通过各船的重心, Ox 轴正方向平行于船体航速方向, Oy 轴指向各船的左舷为正.假定各船航行时的静水阻力由各船推进器产生的推力平衡,船体的摇荡运动和操纵运动可以分离,各船通过操舵来保持航向以避免碰撞.假设流体是不可压的理想流体,密度为 ρ ,整个流域内流动无旋.设水深无限,并忽略流体的表面张力.各船视为刚体,并在各自平衡位置作六自由度的摇荡运动.进一步假定入射波为微幅波,则各船各模态的摇荡运动可视为频率为 ω_e (船体的遭遇频率) 的简谐振动.在流场中引入严格满足 Laplace (拉普拉斯) 方程的非定常速度势,该速度势包括各船作摇荡运动时产生的辐射势,入射波速度势,入射波遭遇各船时产生的绕射势.根据线性势流理论的叠加原理,船 l 上总的非定常速度势 Φ^l 可写成

$$\Phi^l = \left(\sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^6 \phi_j^{lk} \eta_j^k + \phi_7 + \phi_0 \right) e^{-i\omega_e t}, \quad (1)$$

式中 ϕ_j^{lk} 为船 k 作 j 模态单位振幅简谐振动时产生的辐射波在船 l 上产生的速度势; η_j^k 为船 k 作 j 模态简谐振动的振幅(下标 $j=1,2,\dots,6$,分别表示纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇及首摇); ϕ_7 为耦合的绕射势,既包括入射波遭遇船 l 时形成的绕射势,还包括其它各船产生的绕射波传播到该船时形成的绕射势; ϕ_0 为入射波的速度势,其定义式如下:

$$\phi_0(x, y, z) = \frac{-ig\zeta}{\omega_0} \exp[k_0 z + ik_0(x \cos \beta + y \sin \beta)], \quad (2)$$

其中 ω_0, k_0, β 及 ζ 分别表示入射波的自然频率、波数、入射角及波幅.

1.2 边界条件

速度势 ϕ_j^{lk} 及 ϕ_7 除在流场内需满足 Laplace 方程,还需严格满足线性自由面条件、流场底部条件和远方的辐射条件^[14].此外, ϕ_j^{lk} 及 ϕ_7 还需在各船的平均船湿表面 S_k 上满足不可穿透条件.波浪中并行多船的辐射问题比单船要复杂得多,其原因在于各船的简谐振动是各波浪在其船体上综合作用的结果,因此其辐射问题是耦合的.为简化该问题,文献[1]在分析两船情形下的辐射问题时将其简化为两种情况的叠加,即其中一船作简谐振动而另一船受六自由度运动约束及另一船作简谐振动而其中一船受各自由度运动约束.将该方法推广至本文多船的情形,则可将辐射势的物面条件简化为

$$\left. \frac{\partial \phi_j^{lk}}{\partial n_k} \right|_{S_k} = \begin{cases} -i\omega_e n_j^k + m_j^k, & k = l, \\ 0, & k \neq l, \end{cases} \quad (3)$$

其中 $(n_1^k, n_2^k, n_3^k) = \mathbf{n}_k$, $(n_4^k, n_5^k, n_6^k) = \mathbf{r}_k \times \mathbf{n}_k$, \mathbf{n}_k 为船 k 船湿表面的单位法线向量, 指向流体为正, \mathbf{r}_k 为船 k 船湿表面场点指向该船重心的方向向量. 假设船体细长, 忽略定常兴波对扰动势的影响, 式(3)中 m_j^k 可简化为: 当 $j = 1, 2, 3, 4$ 时 $m_j^k = 0$, $m_5^k = Un_3^k$ 及 $m_6^k = -Un_2^k$. 绕射问题比辐射问题简单, 可直接耦合求解^[2], 其物面条件可写成

$$\left. \frac{\partial \phi_7}{\partial n_k} \right|_{S_k} = -\frac{\partial \phi_0}{\partial n_k}. \quad (4)$$

2 数值求解

2.1 边界元积分方程

满足上述边界条件的辐射势或绕射势, 可用合适的点源形式的 Green 函数或混合使用点源和点偶形式的 Green 函数在物面上的分布来表达. 本文采用点源形式的 Green 函数来表达速度势:

$$\phi(p) = \frac{1}{4\pi} \sum_{k=1}^N \iint_{S_k} \sigma(q) G(p, q) ds + \sum_{k=1}^N \frac{U^2}{4\pi g} \oint_{G_k} \sigma(q) G(p, q) n_1(q) d\eta, \quad (5)$$

其中 ϕ 可替换为 ϕ_j^{lk} 或 ϕ_7 , $p(x, y, z)$ 为场点, $q(\xi, \eta, \zeta)$ 为源点, $\sigma(q)$ 为船湿表面的源强分布密度. $G(p, q)$ 为满足线性自由面条件的三维移动脉动源 Green 函数, 其表达式如式(6)所示.

$$G = \frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} + \sum_{i,j=1}^2 \int_0^\pi \frac{k_i \exp(k_i x_j) [E_1(k_i x_j) + 2\pi i H_{ij}]}{(-1)^{i-1} \pi \sqrt{1 - 4Sr \cos \theta}} d\theta, \quad (6)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} r & \left\{ \begin{aligned} &= \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2}, \\ r_1 & \end{aligned} \right. \\ k_i &= \frac{1 - 2Sr \cos \theta + (-1)^i \sqrt{1 - 4Sr \cos \theta}}{2 \cos^2 \theta} \frac{g}{U^2}, \end{aligned}$$

$$x_j = Z + i[X \cos \theta + (-1)^{j-1} Y \sin \theta], \quad X = (x - \xi), \quad Y = (y - \eta), \quad Z = (z + \zeta).$$

参数 $Sr = U\omega_e/g$, 为 Strouhal(斯特劳哈尔)数, g 为重力加速度; E_1 为指数积分函数, H_{ij} 为控制因子, 其表达式及物理含义可参见文献[15]. 将式(5)代入式(3)及式(4)的物面条件, 借助数值方法可以求得船湿表面各速度势对应的源强分布密度 $\sigma(q)$, 将所求的源强分布密度 $\sigma(q)$ 代入式(5)可确定各模态辐射势或绕射势.

2.2 脉动压力及波浪作用力

将船湿表面的各速度势代入线性 Bernoulli(伯努利)方程可求得船湿表面上各速度势对应的脉动压力幅值. 沿船体平均湿表面对各脉动压力进行积分可求得船体的波浪作用力. 设 f_{Ri}^{lk} 为第 k 条船作摇荡运动时产生的辐射波传播到第 l 条船体上时, 在该船 i (其中 $i = 1, 2, \dots, 6$) 方向产生的波浪作用力(或力矩), 其表达式可写成

$$f_{Ri}^{lk} = -\rho i \omega_e \iint_{S_i} \sum_{j=1}^6 \left(1 + \frac{U}{i\omega_e} \frac{\partial}{\partial x} \right) \phi_j^{lk} \eta_j^k n_i^l ds. \quad (7)$$

相应地, 第 l 条船在 i 方向的入射力(或力矩) f_{0i}^l 及绕射力(或力矩) f_{7i}^l 可写作

$$f_{0i}^l = -\rho i \omega_e e^{-i\omega_e t} \iint_{S_i} \left(1 + \frac{U}{i\omega_e} \frac{\partial}{\partial x} \right) \phi_0^l n_i^l ds, \quad (8)$$

$$f_{7i}^l = -\rho i \omega_e e^{-i\omega_e t} \iint_{S_i} \left(1 + \frac{U}{i\omega_e} \frac{\partial}{\partial x} \right) \phi_7^l n_i^l ds. \quad (9)$$

2.3 运动方程

各船除受到上述波浪作用力外,还受到惯性力及回复力作用,对各船受力分析,并根据刚体动力学理论可建立各船在频域内的运动方程为

$$\sum_{j=1}^6 (-M_{ij}^l \omega_e^2 + C_{ij}^l) \eta_j^l = f_{0i}^l + f_{7i}^l + \sum_{k=1}^N f_{Ri}^{lk}, \quad (10)$$

式中 M_{ij}^l 为船 l 的 6×6 广义惯量矩阵, C_{ij}^l 为其静水力系数矩阵,这两个系数矩阵的计算可参见文献[16].求解上述线性方程组可以求得各船的运动响应幅值 η_j^l .

3 两船的水动力干扰分析

3.1 无航速时两船辐射及绕射问题

采用该模型对零航速情况下两船的水动力干扰问题进行分析.计算对象为一 Wigley 船与一 Barge 船.两船水线长 L 均为 2 m,宽 B 为 0.3 m,吃水 T 为 0.125 m.两船中对中布置,横向间距 $D_y = 0.898 5L$.两船的几何形状及其它相关参数见文献[17].Wigley 船(记为船 a)作垂荡运动,Barge 船(记为船 b)固定.图 1 及图 2 分别给出了计算所得的 Wigley 船无因次垂荡-横荡附加质量及阻尼系数随无因次波数 $k_0 L$ 的变化曲线;图 3 及图 4 分别为无因次垂荡附加质量及阻尼系数的变化曲线,其中 ∇_a 为船 a 的排水体积, A_{a23} 及 B_{a23} 表示船 a 的垂荡-横荡附加质量及阻尼系数, A_{a33} 及 B_{a33} 为该船的垂荡附加质量及阻尼系数.图中还给出了文献[17]的试验结果及文献[12]采用 3D Rankine Source 及时域方法求得的计算结果.两船并行时船体附加质量及阻尼系数的定义式可参见文献[18].由图可见本文计算结果和文献[12]计算结果非常吻合,除低频段外其余频率处的计算结果和试验结果也非常吻合.在低频段存在差异的原因可能是因为模型试验时池壁效应影响所致^[17].

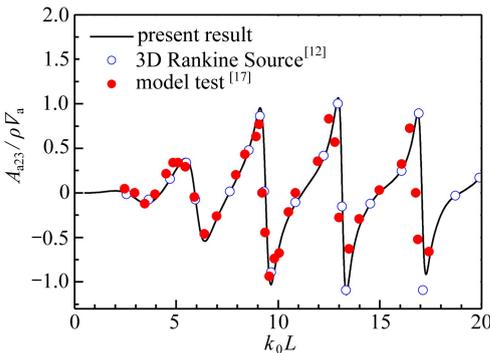


图 1 Wigley 船的横荡-垂荡附加质量

Fig.1 Sway-heave added mass of the Wigley hull

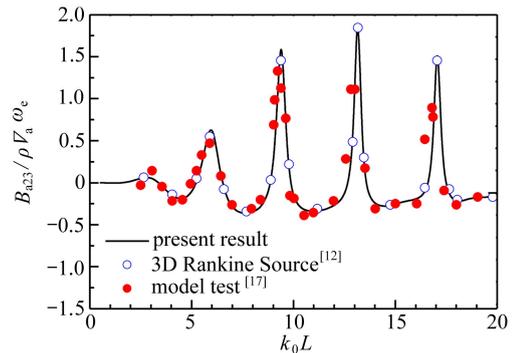


图 2 Wigley 船的横荡-垂荡阻尼系数

Fig.2 Sway-heave damping coefficient of the Wigley hull

为验证本文模型求解零速情形下绕射问题的可靠性,仍以上述两模型为计算对象求解正横浪时两船受到的波浪干扰力.其中 Wigley 船布置在迎风侧,两船横向间距 $D_y = 0.548 5L$.图 5 ~ 图 8 分别给出了两船的无因次横荡力及垂荡力的计算结果及试验结果,图中 A_{wa} 及 A_{wb} 为两船的水线面面积, f_{wa2} , f_{wa3} 为船 a 横荡方向及垂荡方向受到的波浪干扰力, f_{wb2} , f_{wb3} 为船 b 横荡方向及垂荡方向受到的波浪干扰力.从图可见本方法和文献[12]的计算结果及试验结果吻合良好.

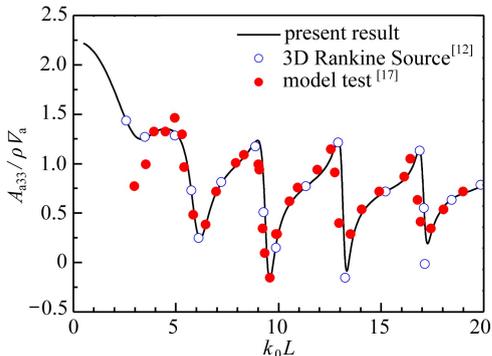


图3 Wigley 船的垂荡附加质量

Fig.3 Heave added mass of the Wigley hull

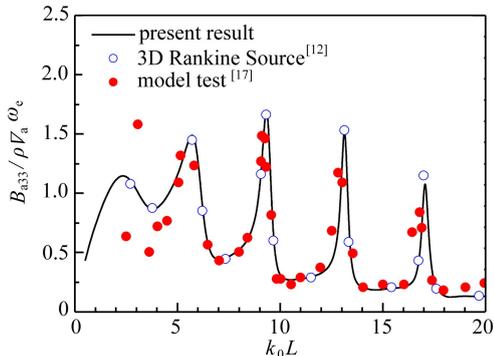


图4 Wigley 船的垂荡阻尼系数

Fig.4 Heave damping coefficient of the Wigley hull

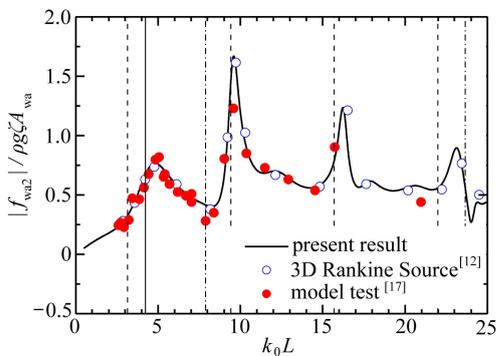


图5 Wigley 船的非因次横荡力

Fig.5 Sway excitation force on the Wigley hull

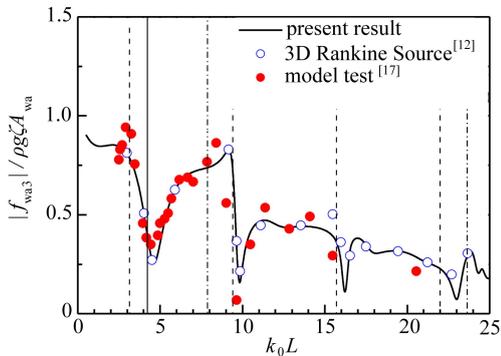


图6 Wigley 船的非因次垂荡力

Fig.6 Heave excitation force on the Wigley hull

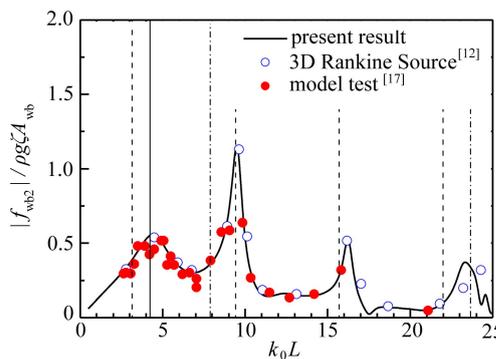


图7 Barge 的非因次横荡力

Fig.7 Sway excitation force on the Barge

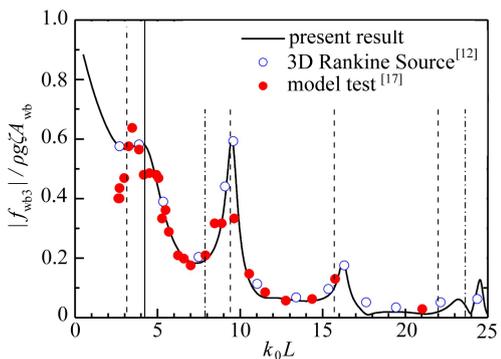


图8 Barge 的非因次垂荡力

Fig.8 Heave excitation force on the Barge

本节的算例表明移动脉动源 Green 函数亦可处理无航速时两船的水动力干扰问题,即在零速时移动脉动源退化为脉动源,这也表明脉动源 Green 函数仅是移动脉动源 Green 函数的一种极限形式.值得关注的是图中所给的水动力系数及波浪干扰力均呈现波动状态,且存在多峰值情况,注意到在求解辐射问题时仅 Wigley 船作强迫振荡,求解绕射问题时两船均约束,因此这些作用力的峰值是由于船间的流体共振产生的.文献[12]指出这些共振对应的是两船间流体运动的“活塞模式”(piston mode)及“晃荡模式”(sloshing mode),其中“晃荡模式”包括纵

向模式及横向模式.图 5~图 8 中分别用垂向的实线,虚线及点划线分别标出了“活塞模式”、纵向“晃荡模式”、横向“晃荡模式”对应的无因次波数.大体上而言这些估算的共振频率基本能够和这些波浪干扰力的峰值频率对应,差别主要在短波中,这表明 Wigley 船在纵向船型的变化对短波而言是重要的^[12].

3.2 有航速时水动力干扰对两船运动响应的影响

文献[18]开展了规则波中两模型并行近距离航行时船模运动响应影响的测量试验,研究了补给间距变化时水动力干扰对模型运动响应的影响.采用本文程序对横向间距变化时两船运动响应进行了计算,以考核程序的普适性.图 9 给出了两船模的三维轮廓,模型基本参数如表 1 所示.两模型中对中布置,入射波波长 λ 范围为 2~10 m,航速对应的 Froude(傅汝德)数 $Fr = 0.171$,浪向 $\beta = 180^\circ$,横向间距 D_y 分别为 $0.35L_a$, $0.395L_a$ 及 $0.437L_a$.

表 1 模型主要参数及惯量数据

Table 1 Main particulars of the tested models

specification	ship a	ship b
waterline length L/m	3.651	4.352
breadth B/m	0.462	0.524
draft T/m	0.156	0.148
displacement volume ∇/m^3	0.173	0.226
roll radius of gyration k_{xx}/m	0.162	0.183
pitch radius of gyration k_{yy}/m	0.895	1.066

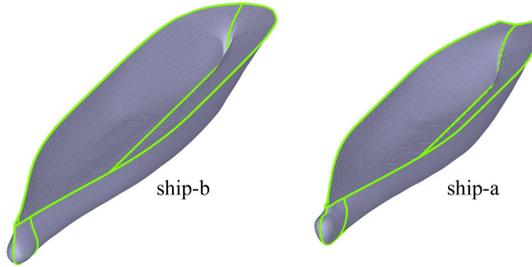


图 9 计算模型的三维轮廓

Fig.9 3-D profiles of the two ship models

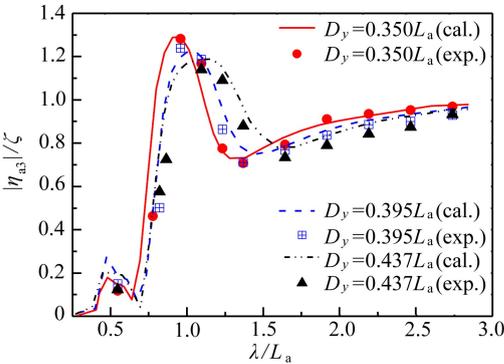


图 10 横向间距对船 a 垂荡运动的影响

Fig.10 Heave motion of ship-a with different D_y

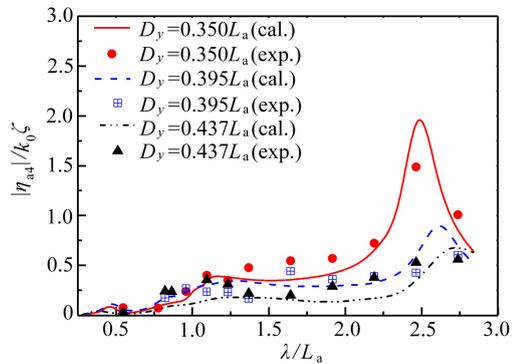


图 11 横向间距对船 a 横摇运动的影响

Fig.11 Roll motion of ship-a with different D_y

图 10~图 15 分别给出了横向间距变化时船 a 及船 b 的垂荡、横摇及纵摇运动响应随无因

次波长(入射波长与船模水线长的比值)的变化曲线,其中 $\eta_{a3}, \eta_{a4}, \eta_{a5}$ 为船 a 的垂荡、横摇及纵摇运动响应, $\eta_{b3}, \eta_{b4}, \eta_{b5}$ 为船 b 的垂荡、横摇及纵摇运动响应.由图可知数值计算结果和试验结果均吻合较好,验证了本文数学模型在求解有航速时两船水动力干扰问题时的可靠性;另外,垂荡及横摇运动在共振区及附近区域内受横向间距的影响较大,一方面,共振点对应的运动幅值随横向间距的增大而变小;另一方面横向间距还影响着船体运动的共振频率,随着横向间距的增大,横摇及垂荡的共振频率会变小(共振点向长波方向移动),且这种共振频率变化的现象在两船模中都能观察到,该现象产生的原因也是下一步需要进行更深层次研究的内容.相对纵向运动而言,横摇运动对横向间距的变化更敏感,其原因可能在于船体的横摇惯量相对较小造成的.

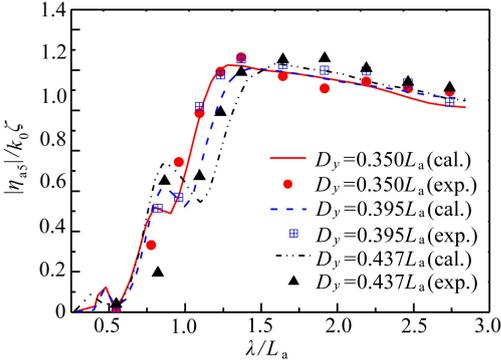


图 12 横向间距对船 a 纵摇运动的影响

Fig.12 Pitch motion of ship-a with different D_y

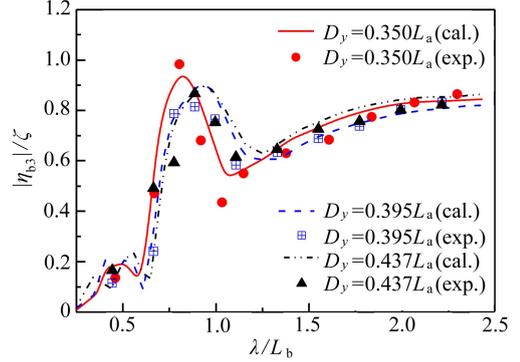


图 13 横向间距对船 b 垂荡运动的影响

Fig.13 Heave motion of ship-b with different D_y

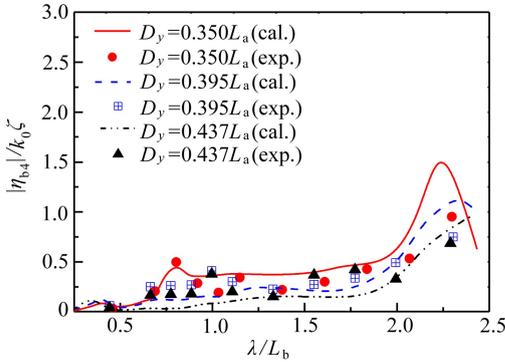


图 14 横向间距对船 b 横摇运动的影响

Fig.14 Roll motion of ship-b with different D_y

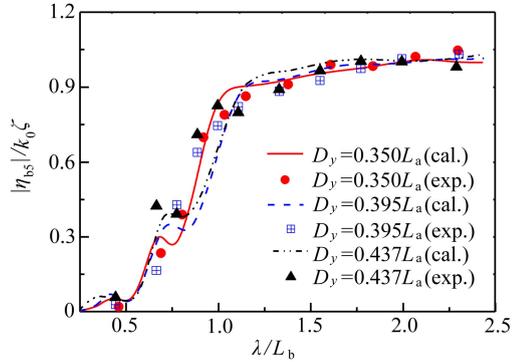


图 15 横向间距对船 b 纵摇运动的影响

Fig.15 Pitch motion of ship-b with different D_y

4 三船水动力干扰分析

采用本文方法对三条大小一致的 Wigley III 模型在规则波中顶浪航行时水动力系数、波浪作用力及运动响应进行了计算.模型长 $L = 3$ m, 水线宽 $B = 0.3$ m, 吃水 $T = 0.1875$ m.模型的几何形状及其它相关参数见文献[19].计算时航速对应的 Froude 数 $Fr = 0.2$, 无因次频率 ω'_e ($\omega'_e = \omega_e \sqrt{L/g}$) 范围为 1~8.设这三船分别为船 a, 船 b 及船 c, 三船中对中布置, 中间船为船 a, 船 b 及船 c 分别位于船 a 的左右舷, 和船 a 的横向间距 D_y 均为 $0.3L$.为便于分析三船的水动力干扰特性, 对船 a 单独航行及船 a 和船 b 并行航行时的情形也进行了计算.图 16~图 21 给出

了有无其它船体干扰时船 a 作垂荡、纵摇及首摇运动的部分水动力系数,图中还给出了三船并行时仅船 b 作摇荡运动的计算结果,其中 ∇ 为船模排水体积, A_{33} 及 B_{33} 表示垂荡附加质量及阻尼, A_{35} 及 B_{35} 为垂荡-纵摇附加质量及阻尼, A_{26} 及 B_{26} 为横荡-首摇附加质量及阻尼.从图可见:

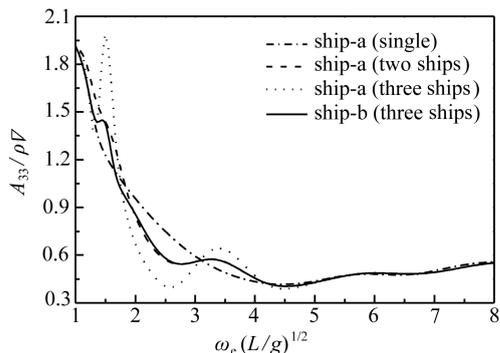


图 16 垂荡附加质量

Fig.16 Heave added mass

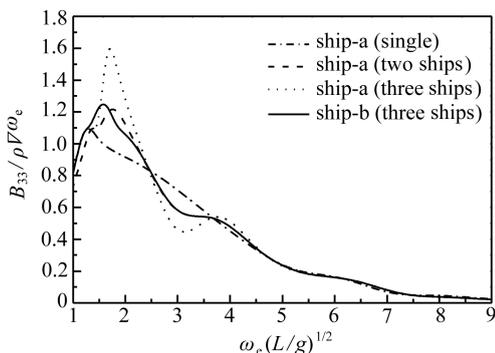


图 17 垂荡阻尼系数

Fig.17 Heave damping coefficient

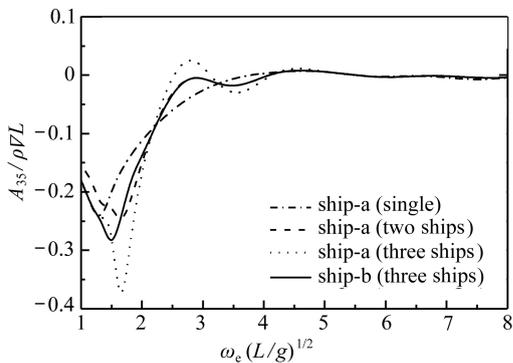


图 18 垂荡-纵摇附加质量

Fig.18 Heave-pitch added mass

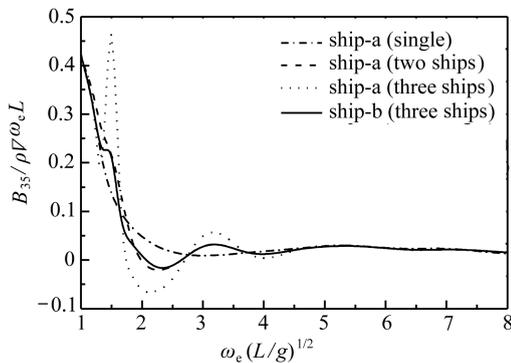


图 19 垂荡-纵摇阻尼系数

Fig.19 Heave-pitch damping coefficient

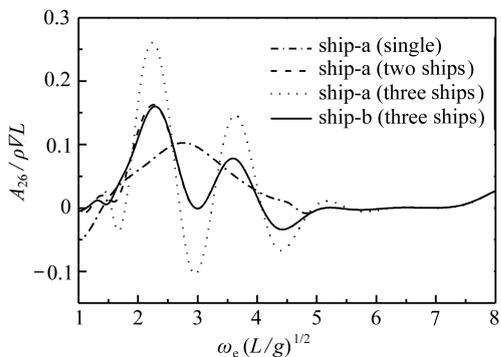


图 20 横荡-首摇附加质量

Fig.20 Sway-yaw added mass

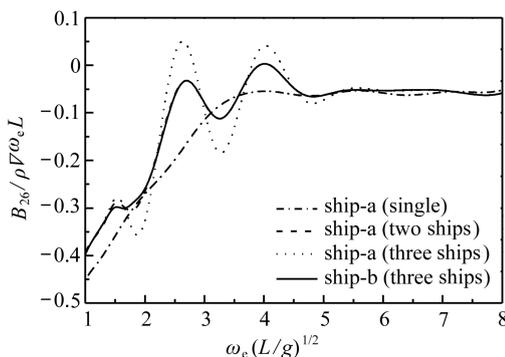


图 21 横荡-首摇阻尼系数

Fig.21 Sway-yaw damping coefficient

1) 当存在干扰时,干扰效应对水动力系数的影响主要在 $\omega'_e < 5.2$ 的低频区内,当 $\omega'_e > 5.2$ 时,两船或三船并行时所得的结果和单独航行时的计算结果基本相同,即船体之间无水动力干扰.这一现象可通过船体间波浪干扰的本质得到解释:当船 a 作摇荡运动时产生辐射波,传播至其毗邻船体并反射后可能再次传播到船体 a 上,当这些反射波能作用于船体 a 时并会

形成干扰,否则不会产生干扰.当 $\tau > 0.272$ 时,船体产生的辐射波会被限制在一个楔形区域内,该区域关于船体的航向对称并向船尾传播,楔形区两边的夹角是参数 τ 的单值函数,当 τ 越大,夹角越小^[20].当 $\omega'_c = 5.2$ 时 $\tau = 1.04$, 对应于船 a 产生的辐射波经船 b 或船 c 反射后刚好能作用于船 a 上,当 $\omega'_c > 5.2$ 时,由于辐射波楔形区域的夹角变小,辐射波反射后无法作用于船体 a 上,因此水动力干扰作用消失.这和零速时水动力干扰的情形不同,3.1 小节的算例表明水动力干扰在整个计算频率范围都存在,这是因为零速时船体产生的辐射或绕射波均为环形波,船体的运动频率仅影响辐射波或绕射波的波长,因此船体的运动频率即使增大,这种环形波总能经毗邻船体的反射后作用于自身,所以干扰始终存在.

2) 有干扰时,水动力系数呈现多峰值情况,这和零速时的情形类似,这些峰值表明了船体间的流体也产生了共振,即 3.1 小节所述船体间流体共振模态在有航速时也存在;另外,三船并行时船 a 水动力系数的峰值明显大于两船并行时的情形.

3) 当三船并行时,干扰效应对船 a 的影响要大于船 b 的影响.对船 b 而言,由于船 c 位于船 a 的右舷,船 b 产生的辐射波会由于船 a 的遮蔽而无法顺利到达船体 c 并再次反射至船体 b 上,因此船 a 的存在遮蔽了船 c 对船 b 的干扰.对船 a 而言,船体 b 及船体 c 分别位于其两舷,其产生的辐射波传播至船 b 及船 c 后可顺利的反射至船 a 上,所以干扰对船 a 影响更大.

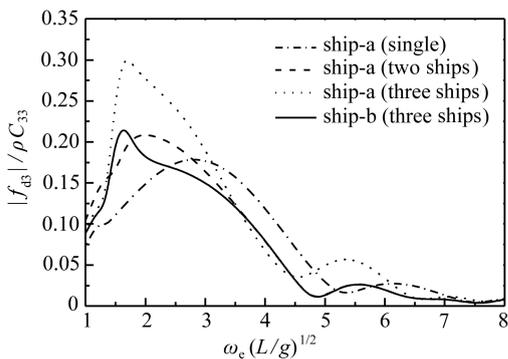


图 22 绕射波垂向作用力

Fig.22 Heave force produced by the diffraction waves

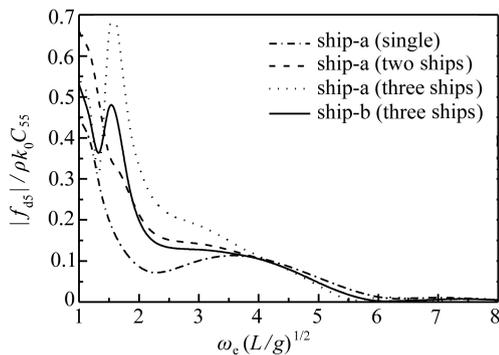


图 23 绕射波纵摇作用力矩

Fig.23 Pitch moment produced by the diffraction waves

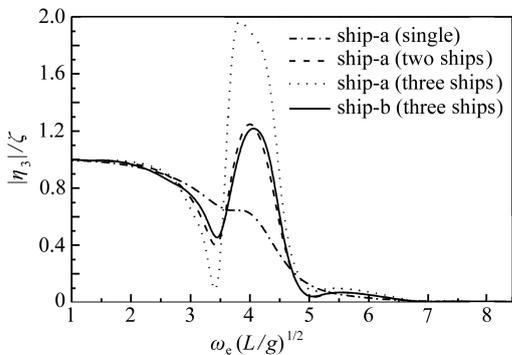


图 24 垂荡运动响应

Fig.24 Heave motion responses

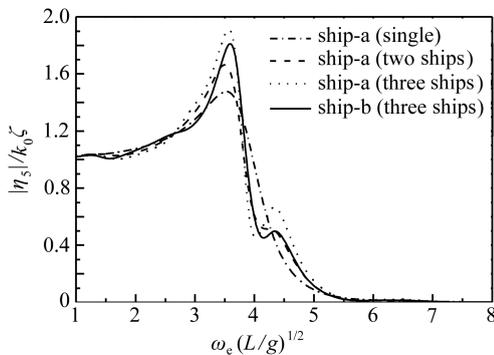


图 25 纵摇运动响应

Fig.25 Pitch motion responses

图 22 及图 23 分别给出了绕射波在船体上垂向作用力 (f_{d3}) 及纵摇力矩 (f_{d5}) 的计算结果,图中 C_{33} 及 C_{55} 为船体的静水力系数.图 24 及 25 给出了船体的垂荡 (η_3) 及纵摇 (η_5) 的运

动响应,从图可见:

1) 和辐射问题相似,绕射问题的干扰效应主要在低频区,且干扰效应的强度在低频时要更明显;但和辐射问题不同的是绕射力或力矩受干扰对应的频率范围要大于辐射情况,其原因在于在处理绕射问题时是全耦合求解的,这和辐射问题有差异.从波浪传播的角度来看,当两船或三船并行时,除自身的绕射波经相邻船反射再次形成激励作用外,其它船体产生的绕射波传播到该船体时同样会产生激励作用并形成干扰,相对反射波而言,其它船体产生的绕射波会更易对其产生干扰效应.另外,三船并行时船 a 绕射力或力矩受水动力干扰的强度要大于船 b 的情形,其原因也在于船 a 的遮蔽作用.

2) 干扰效应对运动响应的影响主要出现在船体运动的共振区及附近区域(如 $3 < \omega'_e < 5$ 的频率范围内).尽管在低频区水动力系数及绕射力受到的干扰效应明显,船体间流体发生了剧烈的共振,但对运动响应的影响甚微,其原因在于在低频区船体的运动频率远离船体的固有共振频率而导致的.在图中仍可观察到三船并行时水动力干扰对船 a 的影响最大,如垂荡响应峰值约为单船航行时的 3 倍,约为两船航行时的 1.5 倍.

5 结论及建议

以势流理论及多体运动理论为基础,建立了求解波浪中多船近距离并行航行时水动力干扰的数值计算模型.针对波浪中无航速及有航速时两船的水动力项及运动响应进行了计算,和模型试验结果比较验证了数学模型的可靠性,将其推广至三船的情形,分析了水动力干扰对船体所受波浪力及运动响应的影响.主要结论及建议如下:

1) 无论是两船还是三船的情形,船体水动力干扰效应是明显的,在特定频率处船体间的流体会产生共振,并形成流体作用力的峰值;当有航速时,水动力干扰对船体动力项的影响主要出现在低频区,在高频区水动力干扰影响较小,甚至无干扰.

2) 横向间距不仅影响船体垂荡及横摇运动的共振幅值,还影响共振频率,当水动力干扰存在时随着横向间距的增大共振频率会变小.

3) 水动力干扰仅在船体共振频率及其附近区域内对船体运动响应起作用,当船体运动频率远离船体共振频率时,即使船体间流体发生共振,对船体运动响应也不会产生大的干扰.

4) 三船并行航行时,中间船受干扰效应的影响是显著的,且中间船能够阻隔两侧船体间的波浪传播,进而产生遮蔽作用.当计算条件相当时,和两船并行的情况相比,三船并行时水动力干扰效应强度更大.

5) 进一步开展不同尺度船舶、航速、入射波参数等因素对多船间水动力干扰的影响研究,为航行补给的安全实施提供指导意见.

参考文献(References):

- [1] Fang M C, Kim C H. Hydrodynamically coupled motions of two ships advancing in oblique waves[J]. *Journal of Ship Research*, 1986, **30**(3): 159-171.
- [2] Skejic R, Faltinsen O M. A unified seakeeping and maneuvering analysis of ships in regular waves[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2008, **13**(4): 371-394.
- [3] Kistiansen T, Faltinsen O M. Gap resonances analyzed by a new domain-decomposition method combining potential and viscous flow DRAFT[J]. *Applied Ocean Research*, 2012, **34**: 198-208.
- [4] LU Lin, TENG Bin, CHENG Liang, SUN Liang, CHEN Xiao-bo. Modelling of multi-bodies in

- close proximity under water waves—fluid resonance in narrow gaps[J]. *Science China: Physics, Mechanics & Astronomy*, 2011, **54**(1): 16-25.
- [5] WANG Jiang-fang, LI Ji-de, CAI Xin-gong. Coupled motions of two ships in waves on 3D method[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2003, **7**(6): 15-26.
- [6] LI Lin. Numerical seakeeping predictions of shallow water effect on two ship interactions in waves[D]. PhD Thesis. Canada: Dalhousie University, 2001: 15-60.
- [7] Chen G-R, Fang M-C. Hydrodynamic interaction between two ships advancing in waves[J]. *Ocean Engineering*, 2001, **28**(8): 1053-1078.
- [8] McTaggart K, Cumming D, Hsiung C C, LI L. Seakeeping of two ships in close proximity[J]. *Ocean Engineering*, 2003, **30**(8): 1051-1063.
- [9] 邓凯, 李红涛, 余建星. 高架索航行补给中船舶在波浪中的运动性能研究[J]. 船舶力学, 2009, **13**(2): 217-225. (DENG Kai, LI Hong-tao, YU Jian-xing. Behaviour of ships in replenishment of highline system in waves[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2009, **13**(2): 217-225. (in Chinese))
- [10] XU Yong, DONG Wen-cai. Numerical study on wave loads and motions of two ships advancing in waves by using three-dimensional translating-pulsating source[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2013, **29**(4): 494-502.
- [11] Zhang S, Weems K M, Lin W-M. Numerical simulation and validation of ship-ship interactions in waves[C]//*9th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*. Ann Arbor, Michigan, USA, 2007: 345-353.
- [12] Xu X, Faltinsen O M. Time domain simulation of two interacting ships advancing parallel in waves[C]//*ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Vol 6: Ocean Engineering*. Rotterdam, Netherlands, 2011: 357-369.
- [13] 宗智, 钱昆. 三维移动脉动源法在波浪中三体船型运动求解的应用研究[J]. 船舶力学, 2012, **16**(11): 1239-1247. (ZONG Zhi, QIAN Kun. A three-dimensional moving and pulsating source (MAPS) method for calculating motions of trimaran hull forms[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2012, **16**(11): 1239-1247. (in Chinese))
- [14] 刘应中, 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, 1986: 30-90. (LIU Ying-zhong, MIAO Guo-ping. *Theories of Ship's Motions in Waves*[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1986: 30-90. (in Chinese))
- [15] XU Yong, DONG Wen-cai. Study on characteristics of 3-D translating-pulsating source Green function of deep-water havelock form and its fast integration method[J]. *China Ocean Engineering*, 2011, **25**(3): 365-380.
- [16] 戴遗山, 段文洋. 船舶在波浪中运动的势流理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 101-131. (DAI Yi-shan, DUAN Wen-yang. *Potential Flow Theory of Ship Motions in Waves*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 101-131. (in Chinese))
- [17] Kashiwagi M, Endo K, Yamaguchi H. Wave drift forces and moments on two ship arranged side by side in waves[J]. *Ocean Engineering*, 2005, **32**(5/6): 529-555.
- [18] 许勇. 波浪中近距离航行的多船水动力干扰机理研究[D]. 博士学位论文. 武汉: 海军工程大学, 2012: 41-99. (XU Yong. Study on the mechanism of hydrodynamic interaction between multiple ships advancing in waves at close proximit[D]. PhD Thesis. Wuhan: Naval University of Engineering, 2012: 41-99. (in Chinese))
- [19] Journée J M J. Experiments and calculations on 4 Wigley hull forms in head waves[R]. Technical and Research Report of SNAME, 1992.

- [20] Noblesse F, Hendrix D. On the theory of potential flow about a ship advancing in waves[J]. *Journal of Ship Research*, 1992, 36(1): 17-29.

Hydrodynamic Interactions Between Multiple Ships Advancing Parallel in Close Proximity in Waves

XU Yong, DONG Wen-cai

(*Department of Naval Architecture, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, P.R.China*)

Abstract: A three-dimensional frequency-domain calculation model based on the potential flow theory and multi-body dynamics theory was developed to investigate wave loads and free motions of multiple closely-spaced, hydrodynamically interacting ships advancing parallel in waves. In order to consider the speed effects on free surface in the gaps between these ship bodies, the translating-pulsating source Green's function was chosen to simulate the radiation and diffraction waves. The model was validated through solving of the hydrodynamic terms and free motions of two parallel closely-arranged ship models advancing at zero or positive forward speeds in regular waves. Numerical results were also presented in the case of three parallel ships. Comparison of the dynamic behaviors between the two-ship case and three-ship case shows that in the two cases hydrodynamic interaction effects are quite different. The presented model is useful to predict wave loads and free motions of multiple vessels in underway replenishment on the sea.

Key words: hydrodynamic interaction; multiple ships; wave loads; free motions; translating-pulsating source

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China(50879090)