

随机海浪中船舶波浪载荷与砰击载荷的 时域水弹性响应分析

焦甲龙¹, 陈超核¹, 任慧龙², 李辉²

(1.华南理工大学 土木与交通学院, 广州, 510641; 2.哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 哈尔滨, 150001

Email: jiaojl@scut.edu.cn)

摘要: 本文基于三维时域非线性水弹性理论研究航行于恶劣海况不规则波中艏外飘船舶的大幅运动、波浪载荷和砰击载荷。采用迁移矩阵法计算细长型船体梁的振动模态并基于模态叠加原理模拟船体结构振动响应与结构变形。在船舶时域水弹性微分方程中引入基于动量冲击理论的砰击载荷计算项, 考虑瞬时物面变化的入射波力和静水恢复力的非线性, 而辐射力和绕射力仍在静态平均湿表面上进行计算。基于频域自由面 Green 函数法求解弹性船体周围流场速度势及各阶波浪力, 通过时域卷积积分法及延迟函数法扩展至不规则波中入射波力和绕射力的计算, 并基于 Runge-Kutta 法求解时域非线性运动微分方程。最后, 基于分段龙骨梁模型水池试验对上述不规则波中船舶水弹性响应分析方法进行了验证。

关键词: 超大型船舶; 耐波性; 水弹性; 砰击颤振; 波激振动

1 引言

舰船在其整个服役寿命期间都是以不同速度、不同航向角和不同装载工况在海上运营或停泊作业的。海面上 70%以上时间都存在海浪, 舰船大部分时间都是处于波浪的作用之中, 研究船舶在波浪中的运动与载荷响应是必要的。此外, 随着现代船舶的大型化、高速化、轻量化发展, 船体结构的弹性变形与流体的耦合作用效果愈加显著。舰船在高海况下的瞬时湿表面会发生实时变化, 使得波浪扰动力和静水恢复力具有明显的非线性特征。高速水面舰船具有艏部外飘明显、舷侧非直壁等特点, 此类船舶在高海况下常常发生砰击现象, 导致波浪载荷与高频砰击颤振载荷的相互叠加。因此, 研究计及船体弹性效应、瞬时物面变化及砰击载荷的时域非线性水弹性预报方法具有重大意义。

船舶水弹性理论融合了结构力学和流体力学的共同思想, 综合考虑了惯性力、流体力及弹性力的动态耦合效应, 是解决大型船舶流固耦合问题的有效途径。迄今, 基于二维切片法^[1]及三维面元法^[2]的频域及时域水弹性理论已取得了较大进展, 能够较好地解决船舶在

规则波中的运动、载荷及结构变形等问题。目前, 虽有学者采用计算流体力学 (CFD) 及光滑粒子法 (SPH) 等新型水动力计算方法解决水弹性问题^[3-4], 但这些方法的计算效率和数值稳定性都有待提高, 使得无法应用于实际工程当中。因此, 势流理论体系下的水弹性理论仍具有重要研究价值。另一方面, 实际海浪是随机不规则波, 研究不规则波中船舶波浪载荷及水弹性响应是十分必要的。因此, 本文提出一种能够计及船舶在高海况不规则波中大幅运动、瞬时物面变化、砰击载荷的 Froude-Krylov (弱) 非线性水弹性理论。

2 不规则波中船舶水弹性理论

本文采用模态叠加原理求解船体梁水弹性振动, 船体结构模态采用一维梁理论求解。船舶在波浪中运动的时域非线性水弹性微分方程可表达为:

$$[\mathbf{a}]\{\ddot{\mathbf{p}}(t)\} + [\mathbf{b}]\{\dot{\mathbf{p}}(t)\} + [\mathbf{c}]\{\mathbf{p}\} = \{\mathbf{F}_I(t)\} + \{\mathbf{F}_S(t)\} + \{\mathbf{F}_D(t)\} + \{\mathbf{F}_R(t)\} + \{\mathbf{F}_{SL}(t)\} \quad (1)$$

其中 $[\mathbf{a}]$ 、 $[\mathbf{b}]$ 、 $[\mathbf{c}]$ 分别为结构广义质量、阻尼、刚度矩阵, $\{\mathbf{p}(t)\}$ 为主坐标列阵, $\{\mathbf{F}_I(t)\}$ 、 $\{\mathbf{F}_S(t)\}$ 、 $\{\mathbf{F}_D(t)\}$ 、 $\{\mathbf{F}_R(t)\}$ 、 $\{\mathbf{F}_{SL}(t)\}$ 分别为广义入射波力、静水恢复力、绕射力、辐射力、砰击力矩阵。

船体在波浪中的非线性静水恢复力可在各个时刻沿瞬时弹性船体湿网格积分得到:

$$F_S^r(t) = -\rho g \sum_{k=1}^m p_k(t) \iint_{S_B(t)} \mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_r w_k \, ds - \int_L F_g(x) w_r \, dx \quad (r=1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

式中, ρ 为流体密度; p_k 为 k 阶主坐标; w_k 为垂向位移矢量, 即 \mathbf{u}_k 中 (u_k, v_k, w_k) 的分量; L 为船长; F_g 为单位船长的重量。

船舶在不规则波中计及瞬时湿表面的非线性入射波力可表达为:

$$F_I^r(t) = -\rho \sum_{i=1}^M \zeta_{ai} \iint_{S_B(t)} \mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_r \left(i\omega_{ei} - U \frac{\partial}{\partial x} \right) \phi_{0i} \, ds \quad (r=1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

其中, ζ_{ai} 、 ω_{ei} 、 ϕ_{0i} 分别为不同频率规则波子波成分的波幅、遭遇频率、入射波势。

船舶在不规则波中的线性绕射力仍在静态平均湿表面上采用卷积分法计算, 时域绕射力及脉冲响应函数可分别表达为:

$$F_D^r(t) = \int_0^t h_D^r(t-\tau) \zeta(\tau) \, d\tau \quad (r=1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

$$h_D^r(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty H_D^r(i\omega_e) e^{i\omega_e t} \, d\omega_e \quad (r=1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

其中, $H_D^r(i\omega_e)$ 为规则波中的绕射力频域响应函数。

由于船舶运动产生的辐射力可表达为:

$$\{\mathbf{F}_R(t)\} = -[\mathbf{A}^\infty]\{\ddot{\mathbf{p}}(t)\} - [\mathbf{B}^U]\{\dot{\mathbf{p}}(t)\} - [\mathbf{C}^U]\{\mathbf{p}(t)\} - \int_0^t \mathbf{K}(\tau)\dot{\mathbf{p}}(t-\tau)d\tau \quad (6)$$

其中 $[\mathbf{A}^\infty]$ 、 $[\mathbf{B}^U]$ 、 $[\mathbf{C}^U]$ 分别为考虑有航速效应所引起的无穷大频率附加质量、阻尼系数、恢复力矩阵^[5]， $\mathbf{K}(\tau)$ 为计及波浪记忆效应的延迟函数矩阵，其元素 $K_{rk}(\tau)$ ($r, k=1, 2, \dots, m$)可采用 Kramer-Kronig 关系求解^[5]：

$$K_{rk}(\tau) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty [B_{rk}(\omega_e) - B_{rk}^U] \cos(\omega_e \tau) d\omega_e \quad (7)$$

其中， $B_{rk}(\omega)$ 为频域阻尼系数。

剖面砰击力采用动量冲击理论（von Karman 模型）计算：

$$f_{SL}(x, t) = \frac{dm_\infty(x)}{dz} \cdot \frac{d^2 w_{rel}(x, t)}{dt^2} \left(\frac{dw_{rel}(x, t)}{dt} < -V_{cr} \right) \quad (8)$$

式中， $m_\infty(x)$ 为剖面垂荡方向的无穷大频率附加质量，可采用保角变换得到； V_{cr} 为临界速度可取 0； $w_{rel}(x, t)$ 为船体剖面与波面的垂向相对位移：

$$w_{rel}(x, t) = \sum_{r=1}^m w_r(x) p_r(t) - \zeta(x, t) \quad (9)$$

式中， $w_r(x)$ 为 r 阶垂向位移分量； $\zeta(x, t)$ 为入射波面高程。沿船长方向积分可以得到全船砰击力：

$$F_{SL}^r(t) = \int_L f_{SL}(x, t) w_r(x) dx \quad (10)$$

采用四阶 Runge-Kutta 法对水弹性微分方程（1）进行时域步进求解，进而基于模态叠加原理可求得任意船体剖面的垂向位移、弯矩和剪力：

$$\begin{cases} w(x, t) = \sum_{r=1}^m p_r(t) w_r(x) \\ M(x, t) = \sum_{r=1}^m p_r(t) M_r(x) \\ V(x, t) = \sum_{r=1}^m p_r(t) V_r(x) \end{cases} \quad (11)$$

式中， $w_r(x)$ 、 $M_r(x)$ 、 $V_r(x)$ 分别为垂向位移、弯矩和剪力的第 r 阶模态振型分量。

3 分段模型水池试验建立

本文基于某外飘船型的水池模型试验数据对理论算法进行验证，实船总长 310 m，排

水量 73 000 t, 模型缩尺比为 1:50。船模外壳采用玻璃钢制作, 并在中和轴位置布置龙骨梁。在 2、4、6、8、10 和 12 站处将模型切开分成七段, 并测量 6 个剖面位置的载荷。在 1、3、5、7、9、11 和 13 站处设置固定装置将分段船壳刚性固定于龙骨梁上。在模型的 8~9 站和 13~14 站安装适航仪的测量杆, 测量两杆连接船体处的升沉和纵摇, 进而推算出模型重心处的升沉和纵摇。尾部一整段的较大空间用于布置自航模推进系统。为了获取更多时历样本以研究船舶在不规则波中的极值载荷, 试验在中国特种飞行器研究所(605 所) 高速水动力水池进行, 该水池长宽深分别为 510m、6.5m、4m。本文选取的计算工况为: 实船航速 18kn、有义波高 16m、平均周期 12.5s, 采用 ISSC 谱模拟长峰不规则波。试验过程中模型的砰击及出水现象如图 1 所示。



图 1 水池模型试验系统建立

4 结果对比与分析

图 2 为理论计算与试验测量所得到的实船在 1000s 内的总载荷时历、波频载荷时历和高频砰击载荷时历, 傅里叶滤波的截断频率选取 0.25 Hz。值得说明的是, 由于理论计算中入射波是基于随机相位生成的, 因此理论计算结果与试验结果的时历曲线是不同的。但整体而言, 数值计算与试验结果的趋势和量级较为一致, 证明了数值方法的正确性。

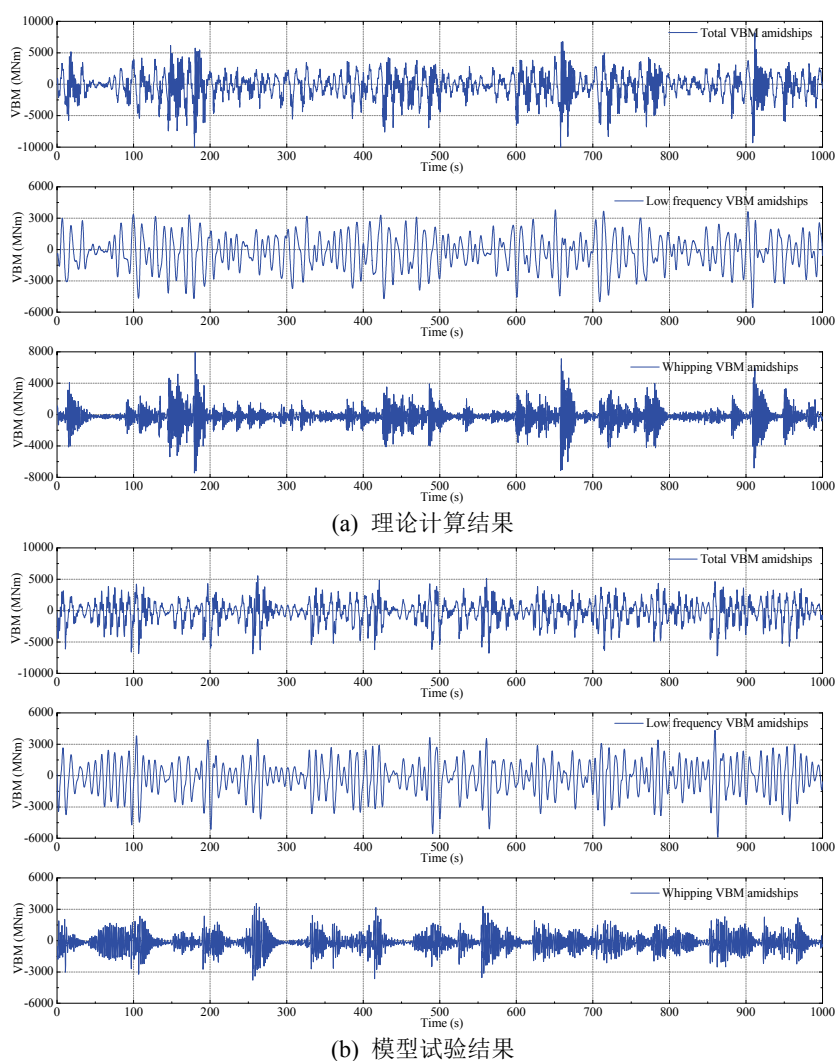


图2 船舳弯矩时历曲线对比

图3中左右两图分别为基于傅里叶变换的理论计算船舳弯矩频谱密度函数和基于相关函数法并进行光滑处理后的理论与试验谱密度函数的对比。由于砰击颤振作用效果使得船舳弯矩谱包含低频和高频两种成分。图4为理论与试验所得的总载荷与波频载荷统计峰谷值超越概率对比。整体而言，数值计算结果与实验测量结果吻合良好，但理论计算高估了砰击极值载荷。

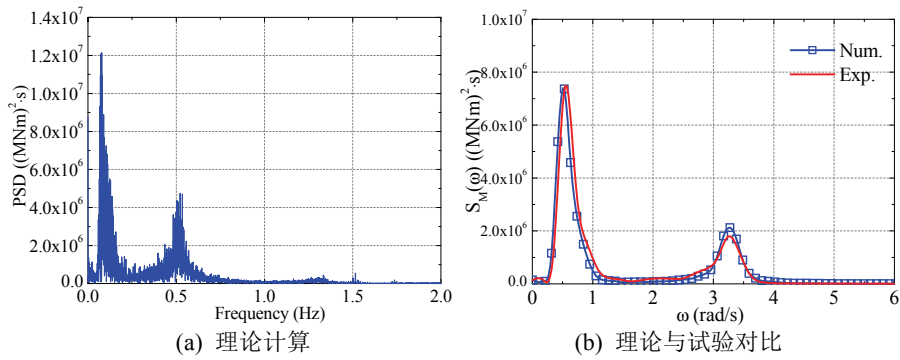


图3 船舶弯矩载荷响应谱对比

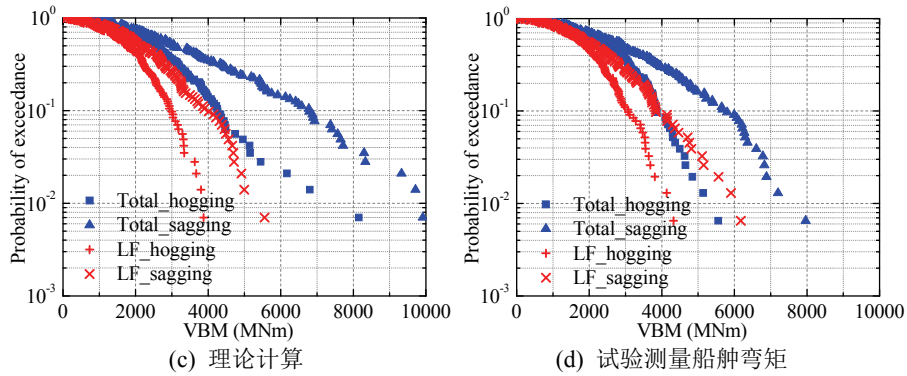


图4 船舶弯矩的总载荷与波频载荷统计峰值超越概率对比

5 结论

本文建立了考虑瞬时物面变化及砰击载荷的三维时域弱非线性水弹性理论方法预报不规则波中航行船舶的运动与载荷响应，并基于某外飘船型的水池模型试验数据验证了高海况下水弹性理论算法的正确性。所提理论算法计算效率高、数值稳定性好，可用于船舶运动与载荷长短期预报及极值载荷预报。

参考文献

- 1 Bishop RED, Price WG. The generalized anti-symmetric fluid forces applied to a ship in a seaway. International Shipbuilding Progress, 1977, 24: 3-14.
- 2 Wu YS. Hydroelasticity of Floating Bodies. Doctoral Thesis, Brunel University, London, UK, 1984.
- 3 Cheng YX, Okada T, Kobayakawa H, et al. Simulation of whipping response of a large container ship fitted with a linear generator on board in irregular head seas. Journal of Marine Science and Technology, 2018, 23: 706-717.
- 4 Sun Z, Zhang GY, Zong Z, et al. Numerical analysis of violent hydroelastic problems based on a mixed MPS-mode superposition method. Ocean Engineering, 2019, 179: 285-297.

5 戴遗山, 段文洋. 船舶在波浪中运动的势流理论. 北京: 国防工业出版社, 2008.

Time-domain hydroelastic analysis of ship wave loads and slamming loads in random seaways

JIAO Jia-long¹, CHEN Chao-he¹, REN Hui-long², LI Hui²

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou, 510641;

2. College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract : A 3D time-domain nonlinear hydroelasticity theory for the prediction of large-amplitude motions, wave loads and slamming loads of bow-flare ship in harsh irregular waves is presented in this paper. Transfer matrix method is used to estimate vibrational mode of slender hull girder and modal superposition theory is used to estimate hull vibrations and structural deformations. The nonlinear Froude–Krylov force and hydrostatic restoring force are calculated on the instantaneous wetted hull surface while the linear diffraction force and radiation force are estimated on the static mean wetted surface. The slamming force is estimated by momentum impact theory. Frequency free-surface Green function is used to calculate velocity potentials and wave forces on elastic hull. The incident wave force and diffraction force in irregular waves are estimated by convolution integral method and retardation function method, respectively. The Runge–Kutta algorithm is used to solve time-domain nonlinear hydroelastic differential equation. The numerical results are well validated by the tank experimental data of a segmented model with backbone beam.

Key words: Ultra-large ships, Seakeeping, Hydroelasticity, Slamming and whipping, Springing.