

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.04176>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 柴威, 张家兴, 封培元, 等. 风浪环境下破损舰船动稳性安全评估方法分析[J]. 中国舰船研究, 2025, 20(4): 80–87.
CHAI W, ZHANG J X, FENG P Y, et al. Evaluation of dynamic stability for damaged ships under wind and wave conditions[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(4): 80–87 (in both Chinese and English).

风浪环境下破损舰船动稳性 安全评估方法分析



扫码阅读全文

柴威¹, 张家兴¹, 封培元², 杨霄楠¹, 吴俊², 齐健璋¹

1 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 湖北 武汉 430063

2 中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011

摘要: [目的] 为有效评估破损舰船在风浪中的稳性安全, 提出一种基于横摇运动响应极值预报的评估方法。[方法] 首先, 以 DTMB 5415 舰船标模为研究对象, 计算典型破损工况下舰船的静稳性参数; 其次, 构建横风横浪联合作用下破损舰船的单自由度横摇运动方程, 使用 CFD 方法获取横摇阻尼系数, 计算风浪中破损舰船的横摇运动响应; 最后, 结合蒙特卡罗方法和 Gumbel 方法, 预报破损舰船在不同风浪条件下的横摇运动响应极值分布, 评估船舶的动稳性安全, 并与基于极限动倾角的动稳性评估方法进行对比分析。[结果] 结果显示, 所提方法充分考虑了波浪参数(有义波高、波浪周期)对舰船动稳性安全的影响, 相比基于极限动倾角的动稳性评估方法更全面。[结论] 所做研究能为破损舰船稳性评估提供重要参考。

关键词: 舰船; 破损舰船; 稳性; 横摇极值; 风浪环境

中图分类号: U661.32

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04176

0 引言

舰船在航行的过程中可能会遭受碰撞、搁浅、触礁等事故, 导致船体发生破损和浸水, 对船舶浮性和稳性造成显著影响。另外, 舰船在风浪环境下航行还会遭遇一系列的摇荡运动, 破损舰船在风浪环境下的抗沉性将是其生命力评估中的重要组成部分。因此, 开展风浪环境下破损舰船的稳性评估, 尤其是可能导致船舶倾覆事故的极限稳性评估研究, 对于确保舰船生命力与安全性至关重要。

目前, 国内外学者主要采用准静态方法、模型试验和数值方法对舰船破损稳性开展相关研究。浦金云等^[1]基于船舶静力学理论提出了一套方法, 可用于评估舰船在完整和破损状态下的抗风浪能力; Korkut 等^[2]利用静态模型, 考虑了不同波高、频率和方向的波浪对破损舰船六自由度运动的影响, 研究表明, 破损情况会对船舶运动产生不利影响; Begovic 等^[3]基于模型试验研究了横

浪、迎浪和尾斜浪条件下舰船破损前后运动响应的变化, 探索了模型缩尺比、试验约束条件以及破口开口方向对船舶运动响应的影响; Gao 等^[4]采用 CFD 方法讨论了舱室布置方案、破损发生时间和波高对船舶运动响应的影响; 吴浩等^[5]运用 CFD 方法研究了破损舰船在规则横浪中的运动响应; 卜淑霞等^[6]采用四自由度模型预报了破损舰船在规则波中的运动响应, 并通过模型试验对数值模型的可靠性进行了验证, 确定了规则波中破损舰船的安全边界。由上述研究可知, 针对破损舰船稳性的研究以规则波作用为主, 风浪环境下破损舰船的稳性评估研究尚未广泛展开。

本文将简述一种基于动稳性曲线和极限动倾角评估舰船抗风浪能力的方法, 该方法采用共振角量化波浪对舰船稳性的影响, 但其对真实海洋环境下破损舰船动稳性的评估可能存在一定的局限性。为此, 本文拟建立风浪环境下破损舰船的横摇运动方程, 基于横摇运动响应时历开展极值预报分析与舰船动稳性安全评估分析, 通过对比

收稿日期: 2024-09-09 修回日期: 2024-10-17 网络首发时间: 2025-03-10 09:38

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52201379); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(3120624109); 上海市船舶工程重点实验室开放基金(SE202305)

作者简介: 柴威, 男, 1988 年生, 博士, 教授。研究方向: 船舶稳性, 结构可靠性。E-mail: chaiwei@whut.edu.cn

封培元, 男, 1987 年生, 博士, 研究员

*通信作者: 封培元

不同破损舰船动稳性安全评估方法,为破损舰船的抗沉性与生命力评估提供参考。

1 极限动倾角

基于舰船动稳性曲线等理论评估舰船的抗风浪能力需要解决 2 个方面的问题:一是求出舰船在风压作用下的倾侧力矩;二是将波浪视为涌浪,求出涌浪作用下舰船处于摇摆情况时所能承受的最大动倾力矩,可视为舰船本身所具有的动稳度特性。

风压倾侧力矩 M_{WST} 可由下式计算得到:

$$M_{WST} = F_{ST}(Z_n - T)/1\,000 \tag{1}$$

式中: $F_{ST} = p_{ST} \cdot A_L$, 为风作用下的静压力,其中 p_{ST} 为风压强度,可根据蒲氏风级表以及风压与风速的关系计算得到, A_L 为舰船水上部分横向受风面积; Z_n 为舰船水上部分侧面积上风作用中心的竖坐标; T 为舰船水下部分侧面积上水作用中心的竖坐标。

如图 1 所示,舰船在某一级风对应的平均风压力矩 M_{WST} 的静力作用下,会产生静平衡角 θ_{ST} ,在涌浪的作用下,舰船将围绕 θ_{ST} 在初始横倾角 θ_0 与动横倾角 θ'_0 之间摇摆。图中, θ 为横倾角, m_θ 为倾斜力矩, θ_D 为极限动倾角。当涌浪作用的周期与舰船横摇固有周期接近时,会出现共振现象。目前,关于共振角的计算研究通常参考有关稳性规范^[1]将其取为 $20^\circ \sim 25^\circ$,如果舰船在波浪中发生共振,当摇摆到一舷方向最大角度,也即极限动倾角 θ_{Dmax} 时,受到同一方向突风倾侧力矩 M_{WD} 的共同作用,会促使舰船倾斜加剧,即为最为危险的情况。

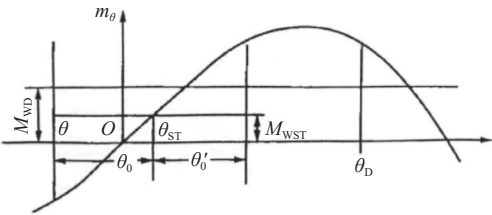


图 1 风压力矩与静平衡角关系图^[1]
Fig. 1 Relationship between moment of wind pressure and angle of statical inclination^[1]

因此,基于动稳性曲线和极限动倾角评估舰船抗风浪能力的方法是根据舰船受到的风压倾侧力矩与动倾力矩的共同作用,再结合动稳性曲线计算得到舰船在风浪作用下的极限动倾角 θ_{Dmax} ,即可表示舰船所允许横倾的最大角度,由此评估舰船在风浪环境下的动稳性安全。

2 横摇运动响应极值预报方法

基于极限动倾角的舰船动稳性评估方法仅以共振角来量化波浪对动稳性的影响,为有效评估破损舰船在风浪中的动稳性安全问题,本文将基于舰船单自由度横摇运动方程,结合蒙特卡罗方法和 Gumbel 方法开展破损舰船在不同风浪环境下的横摇运动响应极值预报,通过舰船横摇运动响应极值分布情况对破损舰船在风浪中的动稳性安全进行评估。

2.1 舰船单自由度横摇运动方程

在横风横浪的联合作用下,舰船单自由度横摇运动方程可表示如下^[7-9]:

$$\ddot{\theta}(t) + b_{44}\dot{\theta}(t) + b_{44q}\dot{\theta}(t)|\dot{\theta}(t)| + \sum_{i=1,3,5,\dots} c_i \theta^i(t) = m_{wave}(t) + m_{wind}(t) \tag{2}$$

式中: $\theta(t)$ 为横摇角; $\dot{\theta}(t)$ 和 $\ddot{\theta}(t)$ 分别为横摇角速度和横摇角加速度; c_i 为舰船相对复原力系数; b_{44} 和 b_{44q} 分别为线性横摇阻尼系数和非线性横摇阻尼系数;波浪激励力矩 $m_{wave}(t) = M_{wave}(t)/(I_{44} + A_{44})$, 风作用力矩 $m_{wind}(t) = M_{wind}(t)/(I_{44} + A_{44})$, 其中 M_{wave} , M_{wind} 分别为波浪作用力矩和风作用力矩, I_{44} 和 A_{44} 分别为横摇惯性矩及附加惯性矩。

舰船复原力项可由下式近似给出:

$$GZ(\theta) = \sum_{i=1}^{2r+1} C_i \theta^i \tag{3}$$

式中: C_i 为复原力系数; $r = 1, 2, 3, \dots$, 其取值可通过拟合复原力臂曲线获得。

舰船相对复原力系数 c_i 可表示为

$$c_i = \Delta C_i / (I_{44} + A_{44}) \tag{4}$$

式中, Δ 为舰船排水量。

横摇阻尼对船舶横摇运动的响应值具有重要影响。本文采用 CFD 方法模拟船舶横摇自由衰减运动,然后根据模拟得到的横摇幅值绘制消灭曲线,进而求得横摇阻尼系数,通过除以 $(I_{44} + A_{44})$,即可得到方程(2)中的相对阻尼系数 b_{44} 和 b_{44q} 。

风倾力矩可通过下式计算得到:

$$M_{wind}(t) = 0.5 \cdot \rho_{air} C_m (U_w + U(t))^2 A_L H_C \tag{5}$$

式中: ρ_{air} 为空气密度; C_m 为空气阻力系数; U_w 为平均风速; $U(t)$ 为阵风风速; A_L 为舰船水面以上部分横向受风面积; H_C 为从风作用中心到波浪作用中心的距离。

随机海浪可以通过平稳的高斯过程描述,因此通过波浪激励力矩谱描述波浪的作用。波浪激

励力矩 $M_{\text{wave}}(t)$ 对应的谱密度函数 $S_M(\omega)$ 为

$$S_M(\omega) = \frac{\omega^4}{g^2} [A \cdot GM \cdot f_{r, \text{waves}}(\omega)]^2 \cdot S_\zeta(\omega) \tag{6}$$

式中: ω 为波浪圆频率; g 为重力加速度; GM 为初稳性高; $f_{r, \text{waves}}(\omega)$ 为有效波倾系数, 可通过谐摇试验求得; $S_\zeta(\omega)$ 为海浪谱, 本文选用 ITTC 双参数谱, 其一般形式可表示为

$$S_\zeta(\omega) = A \cdot \exp(-B/\omega^4)/\omega^5 \tag{7}$$

式中: $A = 173 H_s^2/T_z^4$, 其中 H_s 为有义波高, T_z 为过零周期; $B = 691/T_z^4$ 。

2.2 横摇运动响应极值预报

极值预报是指根据一个随机过程的样本数据推算其极端值出现的概率。对于一个随机过程 $X(t)$, $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 表示随机过程的 n 个序列样本, 定义序列样本极值 $M_n = \max\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 。若各序列样本彼此独立且满足同一分布 $F_X(x)$, 则随机过程的极值 η 满足以下分布^[10]:

$$\begin{aligned} F_{M_n}(\eta) &= P(M_n \leq \eta) = P(X_1 \leq \eta, \dots, X_n \leq \eta) = \\ &P(X_1 \leq \eta) \cdot \dots \cdot P(X_n \leq \eta) = (F_X(\eta))^n \end{aligned} \tag{8}$$

式中, P 表示概率, 其取值为 $0 \leq P \leq 1$ 。

随着序列样本 n 的逐渐增大, 不论 $F_X(x)$ 为何分布, 随机过程的极值分布都趋近于某些渐近极值分布, 如 Gumbel 分布等。Gumbel 分布模型累积分布函数可表示为

$$G(\eta) = \exp\{-\exp[-\alpha_G(\eta - \mu_G)]\} \tag{9}$$

式中: α_G 为比例参数; μ_G 为位置参数。通过在 Gumbel 概率图纸中将样本点拟合为一条直线, 即可确定比例参数和位置参数的数值。

对上式两边 2 次取对数, 可得

$$-\ln\{-\ln[F_{M_n}(\eta)]\} = \alpha_G(\eta - \mu_G) \tag{10}$$

引入 $y = -\ln(-\ln(F_{M_n}(\eta)))$, 则上式转化为 $y = \alpha_G(\eta - \mu_G)$, 其中 η 与 y 成正比例关系, 即在 X - Y 坐标系中呈一条直线。以 η 为横坐标, $y = -\ln(-\ln(F_{M_n}(\eta)))$ 为纵坐标, 即为 Gumbel 概率图纸。

对于船舶在风浪中的动稳性问题, 当船舶运动超过左右两侧阈值(例如, 浸水角)时, 会导致极限失稳, 因此选取船舶横摇运动响应的绝对值为随机过程 $X(t)$, 通过分析 $X(t)$ 的极值分布情况, 可评估船舶的动稳性安全。

根据 Gumbel 概率图纸拟合确定分布函数后, 可计算不同超越概率水平 λ 对应的横摇运动响应极值分布情况:

$$H = G^{-1}(1 - \lambda) \tag{11}$$

式中, $G^{-1}(\cdot)$ 为 Gumbel 分布模型累积分布函数的逆分布函数。

3 算例分析

本文以 DTMB 5415 舰船标模为研究对象, 其主要船型参数如表 1 所示。参考 Begovic 等^[3]对 DTMB 5415 破损船模开展的试验研究, 考虑到第 3 类舱室破损是最为普遍的破损情况且舰船舷侧不对称破损对稳性影响最为严重, 选择舰船破损形式为中部舱室一侧发生第 3 类舱室破损的非对称破损(仅右舷浸水)。破损舱位置如表 2 所示, 破损舰船示意图如图 2 所示。

表 1 DTMB 5415 主要船型参数

Table 1 Main parameters of DTMB 5415

参数	数值
垂线间长/m	142.20
型宽/m	20.54
型深/m	12.47
吃水/m	6.15
初稳性高/m	1.94
排水量/t	8 635
重心垂向位置/m	7.56
横向受风面积/m ²	3 168.91
风倾作用力臂/m	13.94

表 2 DTMB 5415 破损舱位置

Table 2 Damaged compartment location of DTMB 5415

参数	实船数值
前舱壁距船尾距离/m	67.65
中间舱壁距船尾距离/m	76.15
后舱壁距船尾距离/m	84.65
纵舱壁距船中距离/m	0



图 2 破损舰船示意图

Fig. 2 Schematic diagram of damaged ship

根据蒲式风级表选取的风浪情况如表 3 所示。其中, 风速的选取与风级有关^[1], 有义波高的选取主要依据波高与风速在开阔海域的近似关联公式选取。

考虑破损舱自由液面以及不对称横倾影响后的舰船复原力臂曲线与动稳性曲线分别如图 3 和图 4 所示, 破损舰船主要静稳性参数由图 3 获得。

表 3 风浪环境工况

Table 3 Environmental conditions for wind and waves		
风级	风速/(m·s ⁻¹)	有义波高/m
7	15.2	4.0
8	18.9	5.5
9	22.1	7.0

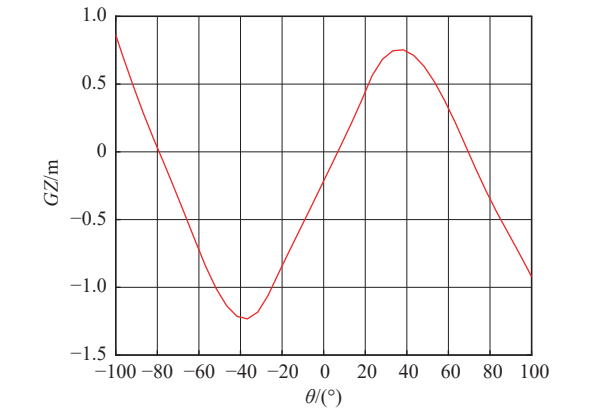


图 3 破损舰船复原力臂曲线

Fig. 3 Righting arm curve of damaged ship

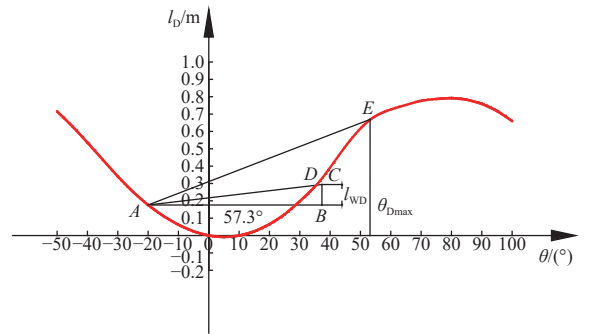


图 4 破损舰船极限动倾角计算

Fig. 4 Calculation of dynamical roll angle of damaged ships

在图 4 中,依据文献 [1] 取共振角为 20°,自初始角点 A 沿坐标系横轴正方向量取 57.3°的距离得点 B,然后再由点 B 沿纵坐标向上作垂线得点 C,垂线长度为风压倾侧力臂 l_{WD} ;随后,连接 AC 直线与动稳性曲线相交于点 D,其横坐标对应的角度代表舰船在倾侧力矩作用下的动横倾角;最后,从点 A 作动稳性曲线的切线 AE,切点 E 对应的横坐标角度即为极限动倾角 θ_{Dmax} 。图中, l_D 为动稳性力臂。根据这一方法计算得到破损舰船在 3 种风浪环境下的极限动倾角如表 4 所示。由计算结果可知,随着风级的增大,极限动倾角也显著增大。

另一方面,由于破损形式为非对称破损,导致船舶存在约 5.4°的永倾角。对于本文选用的研究对象 DTMB 5415 舰船,公式 (5) 中阵风对应的风倾力矩相比平均风速对应的定常风倾力矩可以忽略不计。由非对称破损和定常风倾力矩会引起舰

表 4 不同风级下破损舰船极限动倾角

Table 4 Dynamical roll angle of damaged ships under different levels of wind	
风级	极限动倾角/(°)
7	46.06
8	48.62
9	52.88

船出现定常侧倾角 θ_s ,在方程 (2) 中需考虑定常侧倾力矩^[11]。对于由不同风浪环境造成的定常侧倾角,本文均进行了计算与考虑。

破损舰船横摇阻尼系数采用 CFD 方法计算。选取 1:51 的缩尺模型对 DTMB 5415 破损舰船的横摇自由衰减运动进行数值模拟。将计算区域分为背景区域和重叠区域,其中背景区域中的出口边界类型设置为压力出口,入口、底部、顶部以及左右两侧面均设置为速度进口;重叠区域中的船体表面设置为壁面,其余边界设置为重叠网格,如图 5 所示。对计算域进行网格划分,并对相应的部分进行网格细化,网格总数量为 344 万,计算网格如图 6 所示。选取初始横倾角为 13.50°和 19.58°,计算得到破损舰船模型的横摇自由衰减曲线如图 7 所示。

依据横摇衰减曲线,绘制了横摇消灭曲线,如图 8 所示。图中: θ_{AM} 表示平均横摇幅值, $\Delta\theta_A$ 表示横摇幅值变化量。通过拟合横摇消灭曲线,即可以计算得到方程 (2) 中的横摇阻尼系数: $b_{44} = 0.038$, $b_{44q} = 0.517$ 。

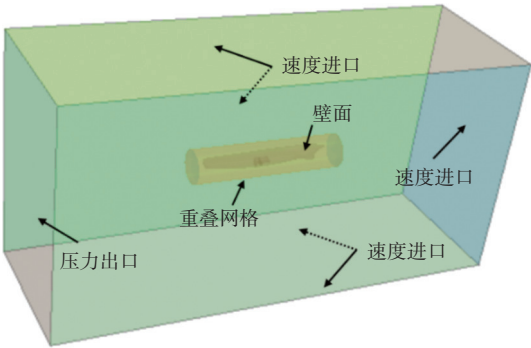


图 5 船体计算域

Fig. 5 Computational domain of hull

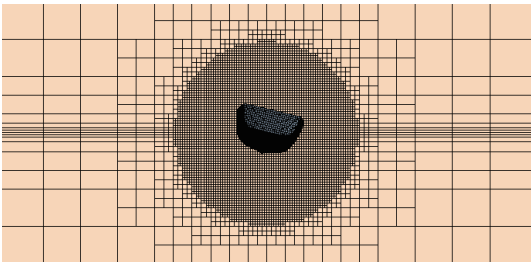


图 6 CFD 计算网格划分

Fig. 6 Division of CFD calculation grids

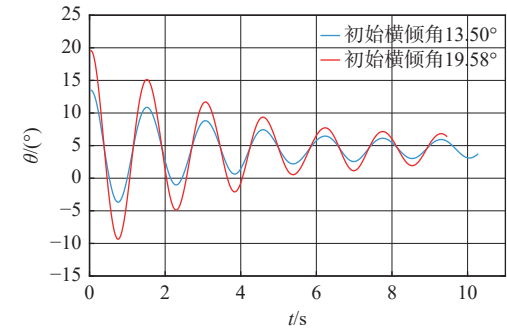


图 7 破损舰船模型的横摇衰减曲线

Fig. 7 The roll decay curves of damaged ship model

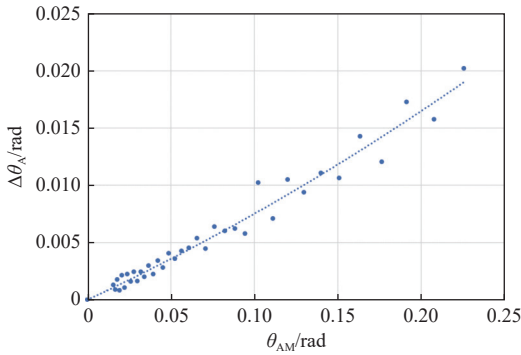


图 8 破损舰船横摇消灭曲线

Fig. 8 The roll motion extinction curves of damaged ship

取公式(5)中的空气阻尼系数为 1.22, 横向受风面积为 3 168.91 m², 风作用中心到波浪作用中心距离为 13.94 m, 选取公式(6)中的有效波倾系数为定值 0.84^[12-13]。结合破损舰船的船型参数, 采用四阶 Runge-Kutta 法求解风浪联合作用下的舰船单自由度横摇运动方程(2), 可以得到舰船横摇运动响应时历。由于船舶倾覆是一个不可恢复的过程, 因此在数值模拟过程中当舰船横摇角达到稳性消失角或浸水角时, 视为发生了倾覆事件, 模拟立即停止^[14]。以 7 级风为例, 风速 $U_w=15.2$ m/s, 有义波高 $H_s=4.0$ m, 过零周期 $T_z=11.0$ s, 计算时长 $t=3600$ s, 破损舰船的横摇运动响应如图 9 所示。

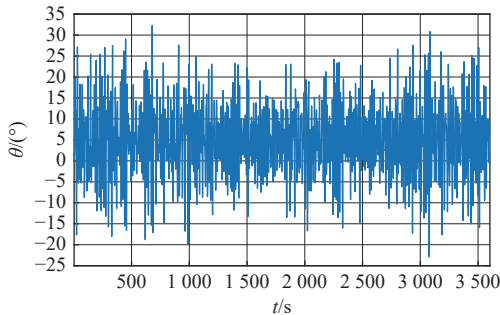


图 9 风浪联合作用下破损舰船横摇运动响应($U_w=15.2$ m/s, $H_s=4.0$ m, $T_z=11.0$ s)

Fig. 9 The roll motion response of damage ship under combined action of wind and waves ($U_w=15.2$ m/s, $H_s=4.0$ m, $T_z=11.0$ s)

随后, 选取该风浪条件下的 50 个种子数开展蒙特卡罗仿真分析。每个种子数对应的计算时间设为 3 600 s, 当倾覆事件发生时, 数值仿真即可停止。根据每个种子数对应的横摇运动响应时历, 确定随机过程 $X(t)$ 的最大值即为样本值。在得到相应的样本数据集后, 引入 Gumbel 概率图纸进行拟合分析, 其结果如图 10 所示。由图可知, 破损舰船在风浪环境下的横摇运动响应极值在 Gumbel 概率图纸中拟合效果较好, 认为该方法能够用于预报舰船横摇运动响应极值分布。

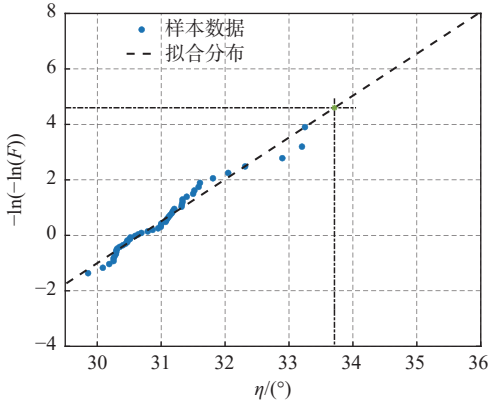


图 10 Gumbel 方法预报的横摇极值

Fig. 10 The extreme values of roll motion predicted by the Gumbel method

通过将拟合分布进行外推, 即可得到不同超越概率 λ 对应的横摇响应极值 η 。如图 11 所示, 选取超越概率 $\lambda=0.10, 0.05$ 和 0.01 , 其对应的横摇响应极值分别为 $\eta=32.15^\circ, 32.63^\circ$ 和 33.71° 。

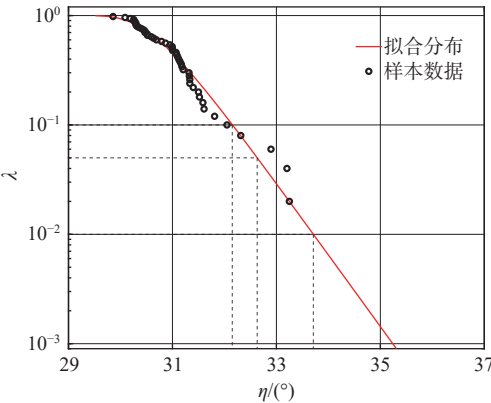


图 11 风浪联合作用下破损舰船横摇运动响应极值的分布($U_w=15.2$ m/s, $H_s=4.0$ m, $T_z=11.0$ s)

Fig. 11 Prediction distribution of extreme values of the roll motion response for the damaged ship under combined action of wind and waves ($U_w=15.2$ m/s, $H_s=4.0$ m, $T_z=11.0$ s)

为了系统地对比 2 种不同的动稳性评估方法, 选取表 3 所示的不同风级和有义波高, 波浪的过零周期分别选为 $T_z=5, 7, 9, 11, 13$ 和 15 s。不同风浪条件下对应的极限动倾角及基于横摇运动极值分布的动稳性评估方法计算结果如图 12~图 14

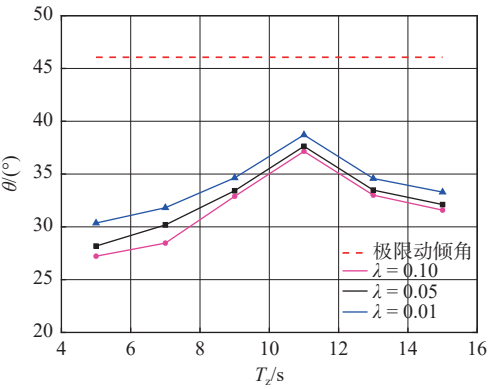


图 12 风浪联合作用下破损舰船横摇运动响应极值分布与极限动倾角对比图($U_w = 15.2\text{ m/s}$, $H_s = 4.0\text{ m}$)

Fig. 12 Comparison of the extreme value distribution of the roll motion response and the limit dynamical upsetting angle of the damaged ship under combined action of wind and waves ($U_w = 15.2\text{ m/s}$, $H_s = 4.0\text{ m}$)

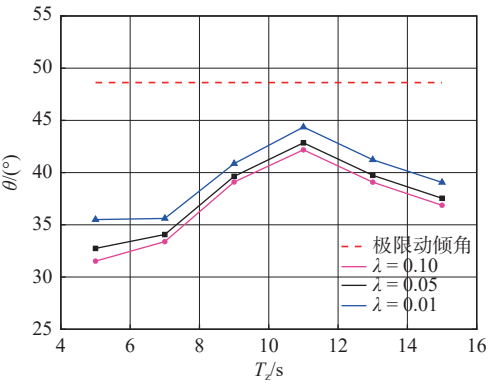


图 13 风浪联合作用下破损舰船横摇运动响应极值分布与极限动倾角对比图($U_w = 18.9\text{ m/s}$, $H_s = 5.5\text{ m}$)

Fig. 13 Comparison of the extreme value distribution of the roll motion response and the limit dynamical upsetting angle of the damaged ship under combined action of wind and waves ($U_w = 18.9\text{ m/s}$, $H_s = 5.5\text{ m}$)

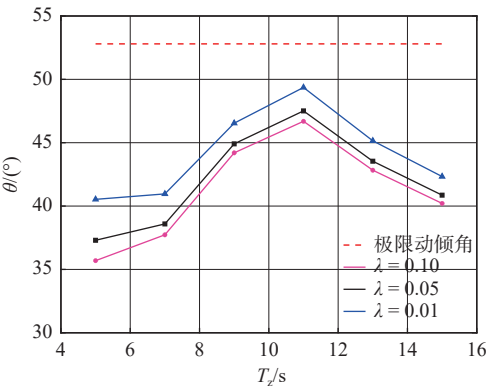


图 14 风浪联合作用下破损舰船横摇运动响应极值分布与极限动倾角对比图($U_w = 22.1\text{ m/s}$, $H_s = 7.0\text{ m}$)

Fig. 14 Comparison of the extreme value distribution of the roll motion response and the limit dynamical upsetting angle of the damaged ship under combined action of wind and waves ($U_w = 22.1\text{ m/s}$, $H_s = 7.0\text{ m}$)

所示。

由图 12~图 14 可知,随着风级的提高,有义

波高增大,破损舰船的横摇运动响应极值显著增大。波浪周期对船舶横摇运动响应极值的分布有着显著影响,但基于极限动倾角的舰船动稳性评估方法并未充分考虑该影响因素。在图 12~图 14 中,当波浪的过零周期 $T_z = 11.0\text{ s}$ 时,船舶的横摇运动响应最大。这是因为舰船在破损浸水后,其横摇固有周期为 10.8 s ,在上述波浪周期下,波浪激励力矩的主要频率部分接近于船舶横摇固有频率,因此在该波浪周期下,舰船模型处于最危险情况。另由上述计算结果可知,不同风浪条件下的极限动倾角均明显大于破损舰船的横摇运动响应极值,因此,采用基于极限动倾角的舰船动稳性评估方法可以得出较为保守的计算结果,进而会低估破损舰船抵御突风倾侧力矩 M_{WD} 的能力。

4 结 论

本文建立了风浪联合作用下破损舰船的单自由度横摇运动模型,通过时域模拟得到风浪联合作用下舰船的横摇运动响应时历,同时结合 Gumbel 方法预报了横摇运动极值的分布并与极限动倾角进行了对比,分析了不同动稳性安全评估方法,主要得到如下结论:

- 1) 在风浪联合作用下,破损舰船横摇运动响应极值的分布符合 Gumbel 分布模型,采用 Gumbel 方法可以对破损舰船横摇运动响应极值的分布进行预报。
- 2) 波浪周期对舰船横摇运动响应极值的分布有着显著影响,而传统基于极限动倾角的评估方法并未充分考虑波浪周期对舰船动稳性安全的影响,本文所提的动稳性安全评估方法所考虑的因素更为全面。
- 3) 不同风浪条件下的极限动倾角均明显大于破损舰船的横摇运动响应极值,可能会使基于极限动倾角的动稳性安全评估低估破损舰船抵御突风侧倾力矩的能力。

此外,本文提出的基于时域仿真计算和横摇极值预报的动稳性评估方法同样适用于完整状态下的舰船动稳性安全评估,能够为舰船稳性安全评估提供重要参考。

参考文献:

[1] 浦金云,金涛,邱金水,等. 舰船生命力 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
PU J Y, JIN T, QIU J S, et al. Naval ship survivability [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009 (in Chinese).

[2] KORKUT E, ATILAR M, INCECIK A. An experimental

- study of motion behaviour with an intact and damaged Ro-Ro ship model[J]. *Ocean Engineering*, 2004, 31(3/4): 483–512.
- [3] BEGOVIC E, MORTOLA G, INCECIK A, et al. Experimental assessment of intact and damaged ship motions in head, beam and quartering seas[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 72: 209–226.
- [4] GAO Z L, WANG Y L, SU Y. On damaged ship motion and capsizing in beam waves due to sudden water ingress using the RANS method[J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 95: 102047.
- [5] 吴浩, 高志亮, 苏焱. 规则和随机横浪中破损船舶运动响应研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2020, 44(3): 500–505.
- WU H, GAO Z L, SU Y. Research on motion response of damaged ships in regular and random beam Seas[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2020, 44(3): 500–505 (in Chinese).
- [6] 卜淑霞, 祁江涛, 顾民. 规则波中破损船舶倾覆特性及影响因素研究[J]. *中国造船*, 2020, 61(4): 60–69.
- BU S X, QI J T, GU M. Study on capsizing characteristics and influencing factors of damaged ships in regular waves[J]. *Shipbuilding of China*, 2020, 61(4): 60–69 (in Chinese).
- [7] CHAI W. Reliability evaluation of the roll motion under the wind and irregular beam waves[J]. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 2016, 1(2): 149–156.
- [8] MAKI A, UMEDA N, MATSUDA A, et al. Non-Gaussian PDF of ship roll motion in irregular beam sea and wind conditions-comparison between theory and experiment[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 188: 106278.
- [9] 胡丽芬, 李刚, 齐慧博, 等. 横风横浪中破损船舶稳性倾覆概率研究[J]. *中国造船*, 2019, 60(1): 80–87.
- HU L F, LI G, QI H B, et al. Research on capsizing probability of damaged ship with dead ship stability failure in beam wind and waves[J]. *Shipbuilding of China*, 2019, 60(1): 80–87 (in Chinese).
- [10] NAESS A, MOAN T. Stochastic dynamics of marine structures[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [11] 章泽文, 娄相芽, 余象鹏, 等. 初始横倾角对船舶横摇运动响应的影响[J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(6): 187–192.
- ZHANG Z W, LOU X Y, YU X P, et al. Influence of Initial heeling angle on ship roll motion response[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2022, 17(6): 187–192 (in both Chinese and English).
- [12] IMO. Finalization of second generation intact stability criteria (part A): IMO SDC 7/INF, 2[S]. 2019.
- [13] 赖国锐. 破损舰船非线性横摇运动模拟及倾覆安全评估[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.
- LAI G R. Nonlinear rolling motion simulation and capsizing safety assessment of damaged naval ship[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2021 (in Chinese).
- [14] 杨培青, 周耀华. 国内沿海航区海船波浪中动稳性安全水平研究[J/OL]. *中国舰船研究*, 2025. [2025-03-05]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03643>
- YANG P Q, ZHOU Y H. Safety of dynamic stability in waves of domestic coastal sea-going ships[J/OL]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2025.[2025-03-05]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03643> (in Chinese).

Evaluation of dynamic stability for damaged ships under wind and wave conditions

CHAI Wei¹, ZHANG Jiaying¹, FENG Peiyuan², YANG Xiaonan¹, WU Jun², QI Jianzhang¹

1 School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

2 Marine Design and Research Institute of China, Shanghai 200011, China

Abstract: [Objectives] Ships may encounter accidents such as collisions, groundings, and reef impacts during navigation, which can lead to hull damage and flooding, thereby significantly reducing buoyancy and stability. Under wind and wave conditions, a damaged ship's resistance to sinking is a crucial to its survivability assessment. Traditional methods evaluate the dynamic stability of ships in wind and waves by analyzing resonance angles to quantify wave effects. These methods are limited in their ability to assess the survivability and resistance to sinking of damaged ships under real-world conditions. Therefore, this study aims to develop a more comprehensive and accurate method for evaluating the dynamic stability of damaged ships under wind and wave conditions, providing a reliable reference for enhancing their survivability and safety.

[Methods] Firstly, the DTMB 5415 standard ship model was selected as the test case, and its static stability parameters were calculated under typical damage conditions. Then, a single-degree-of-freedom roll motion equation for the damaged ship under the combined action of wind and waves was constructed. The CFD method was used to obtain the roll damping coefficient, which is of great significance for accurately calculating

ing the roll motion response. Subsequently, a numerical method was employed to calculate the roll motion response of the damaged ship under wind and wave conditions. Finally, the Monte Carlo method and the Gumbel method were combined. [**Results**] The results show that the proposed method takes into account the effects of wave parameters such as significant wave height and wave period on the dynamic stability of damaged ships. It was found that the wave period has a significant impact on the extreme roll motion response distribution. When the wave period approaches the natural roll period of the damaged ship, the roll motion response reaches its peak. In contrast, traditional methods based on the limiting dynamic heel angle fail to fully consider this factor. Calculations and comparisons reveal that the limiting dynamic heel angles under various wind and wave conditions are considerably greater than the extreme roll motion responses of damaged ships. This indicates that traditional methods may lead to conservative calculation results and underestimate the ability of damaged ships to withstand sudden wind-induced heeling. [**Conclusions**] The study shows that the extreme roll motion response of damaged ships under the combined action of wind and waves follows a Gumbel distribution. The Gumbel method can effectively predict this distribution. The proposed dynamic stability assessment method, which incorporates wave parameters, offers a more comprehensive evaluation than traditional methods. It is applicable not only to the dynamic stability assessment of damaged ships but also to that of intact ships, providing an important reference for ship stability assessment, which helps to improve the accuracy of ship stability evaluation and enhance the ship safety in complex sea conditions.

Key words: ships; damaged ships; stability; extreme roll motion; wind and waves

相关论文

[1] 杨培青, 周耀华. 国内沿海航区海船波浪中动稳性安全水平研究 [J]. 中国舰船研究, 2025, 20(3): 45–52. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03643>

[2] 朱杰, 刘在良, 林艳, 等. 随机海浪下船舶横摇运动响应极值预报研究 [J]. 中国舰船研究, 2025, 20(2): 196–202. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03589>

[3] 王瑞, 于曹阳, 钟一鸣, 等. 可潜浮式沉积物捕获器结构与稳性分析 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(5): 104–110. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02946>

[4] 刘李为, 余嘉威, 冯大奎, 等. 艏斜浪下船舶倾覆特性直接 CFD 数值模拟 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(3): 78–84. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02728>

[5] 陈晶晶, 周雪春, 顾雅娟, 等. 邮轮关键设计因素对破损稳性的影响 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(2): 8–16. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02219>

[6] 马坤, 梅树猛, 于津钊. 瘫船稳性横摇周期计算方法讨论分析 [J]. 中国舰船研究, 2020, 15(3): 32–37. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.01574>

[7] 边金宁, 陈森, 韩涛. 基于船舶破损安全性的舱室优化方法 [J]. 中国舰船研究, 2020, 15(2): 23–30. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.01785>

[8] 王廷昊, 顾解仲, 马骋远, 马宁. 基于局部线性化方法的瘫船稳性敏感性分析及衡准完善 [J]. 中国舰船研究, 2018, 13(1): 65–72. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.3969/j.issn.1673-3185.2018.01.010>