Jun. 2022

网络首发地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1755.TJ.20220527.1725.001.html

期刊网址:www.ship-research.com

**引用格式:**许维军,华真,任慧龙,等. 计及砰击载荷的舰船疲劳损伤直接计算法分析 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(3): 264–272.

XU W J, HUA Z, REN H L, et al. Analysis of the direct calculation method of ship fatigue damage considering slamming load[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(3): 264–272.

# 计及砰击载荷的舰船疲劳损伤 直接计算法分析



Vol. 17 No. 3

许维军<sup>1,2</sup>,华真<sup>1</sup>,任慧龙<sup>1,2</sup>,李陈峰<sup>\*1,2</sup>,李沃达<sup>3</sup> 1哈尔滨工程大学船舶工程学院,黑龙江哈尔滨150001 2教育部船舶与海洋工程技术国际联合合作实验室,黑龙江哈尔滨150001 3中国船舶及海洋工程设计研究院,上海200011

摘 要: [目的]为了提高砰击载荷对舰船疲劳损伤影响计算的准确性,提出一种计及砰击载荷的疲劳损伤 直接计算法。[方法]首先,将非线性载荷的时域计算与线性频域的谱分析方法相结合,基于梁理论得到舰 船短期海况下的应力时历;然后,采用雨流计数法和 S-N 曲线计算出考核点的损伤;其后,参考中国船级社 (CCS)指南计算计及非线性砰击载荷对疲劳损伤的贡献度及影响系数,再结合谱分析方法修正对应的应力响 应传递函数;最后,对应力谱进行计算,得到计及非线性砰击载荷的疲劳损伤。[结果]结果显示,相比传统 谱分析方法,采用计及砰击载荷的舰船疲劳损伤直接计算方法得到的损伤结果其损伤度约增加了 10%~50%。[结论]研究表明,对航行于恶劣海况下的舰船进行疲劳强度评估时,使用所提方法可以提高载 荷计算的准确性。

**DOI:** 10.19693/j.issn.1673-3185.02431

# Analysis of the direct calculation method of ship fatigue damage considering slamming load

XU Weijun<sup>1,2</sup>, HUA Zhen<sup>1</sup>, REN Huilong<sup>1,2</sup>, LI Chenfeng<sup>\*1,2</sup>, LI Woda<sup>3</sup>

1 College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China 2 MOE International Joint Laboratory of Naval Architecture and Offshore Technology, Harbin 150001, China 3 Marine Design and Research Institute of China, Shanghai 200011, China

**Abstract**: **[Objective**] In order to improve the calculation accuracy of the influence of slamming load on ship fatigue damage, and evaluate ship fatigue life more effectively, a direct calculation method of ship fatigue damage which accounts for slamming load is proposed. **[Methods**] First, the time domain calculation of nonlinear load is combined with the spectral analysis method of linear frequency domain, and the stress time history of the ship in a short-term sea state is obtained based on beam theory. Second, the damage of the check points is calculated using the rain flow counting method and S-N curve, the contribution and influence coefficients of nonlinear slamming load on fatigue damage are calculated with reference to the CCS guidelines, and the corresponding stress response transfer function is corrected by combining the spectral analysis method. Finally, the stress spectrum is calculated and fatigue damage accounting for nonlinear slamming is obtained.

[**Results**] The results show that compared with traditional spectral analysis method, it is found that the ship fatigue damage obtained by the direct calculation method accounting for slamming load is about 10%-50%.

[**Conclusion**] The proposed method can improve the accuracy of load calculation when evaluating the fatigue strength of ships sailing in harsh sea states.

Key words: fatigue damage; nonlinear slamming load; spectral analysis; direct calculation method

收稿日期: 2021-06-28 修回日期: 2021-10-20 网络首发时间: 2022-05-31 11:26
基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目(LH2020E078); 国家自然科学基金资助项目(52171305)
作者简介: 许维军, 男, 1973 年生, 博士, 副教授。研究方向: 船舶与海洋工程结构强度与稳定性研究。
E-mail: xuweijun@hrbeu.edu.cn
华真, 女, 1996 年生, 硕士生。研究方向: 船舶与海洋工程结构强度与稳定性研究
任慧龙, 男, 1965 年生, 博士, 副教授。研究方向: 环境载荷与结构强度
李陈峰, 男, 1981 年生, 博士, 副教授。研究方向: 船舶与海洋结构物强度评估, 结构稳定性与极限强度分析。E-mail: lichenfeng@hrbeu.edu.cn
李沃达, 男, 1994 年生, 硕士生
\*通信作者: 李陈峰

# 0 引 言

随着舰船大型化发展以及高强度钢的应用, 航行于恶劣海况下舰船结构的疲劳强度问题开始 倍受关注。目前,疲劳评估方法主要包含时域疲 劳评估方法和频域疲劳评估方法2种。在对舰船 结构进行疲劳强度分析的过程中,若计算载荷考 虑非线性问题,一般采用时域载荷结合雨流计数 法的疲劳评估方法:若能方便获取舰船结构的应 力功率谱密度函数,一般采用频域载荷结合谱分 析的方法。传统的船体结构疲劳强度评估方法一 般仅考虑了波浪载荷,却忽略了砰击等高频载 荷,而由砰击所引起的高频交变应力对大型舰船 的疲劳强度具有较大影响,忽略该因素必然会导 致高估结构的疲劳寿命,这对舰船的安全航行来 说十分不利[1-2]。因此,为能准确预报恶劣海况下 的舰船疲劳强度,有必要考虑计及了非线性砰击 的载荷对疲劳强度的影响。

目前,国内外学者针对舰船结构疲劳强度问 题采用时域和频域的方法开展了大量研究。 Mansour 等<sup>13</sup>利用模态分析法推导出了舰船的脉 冲响应和系统函数,建立并讨论了输入冲击响应 和输出冲击响应的概率密度函数、谱密度函数、 自相关函数以及其他相关统计量。戴仰山等件讨 论了底部砰击对船体总纵强度的影响,其将试验 结果与纵向运动的时域分析结合起来,提出了一 种用于计算不规则波中砰击弯矩的方法。王东海 等的分析了线性波浪载荷作用下平均应力对船体 结构疲劳累积损伤的影响,并给出了影响船舶结 构疲劳损伤计算的平均应力影响因子以及其简化 表达式。王东海<sup>60</sup>对非线性波浪载荷作用下船体 总纵弯曲时的疲劳强度进行研究,分析了平均应 力、非线性波浪载荷幅值与高频特性对船体结构 疲劳损伤的影响,以及不同海况、不同航向所预 报波的浪载荷对船体结构疲劳损伤的贡献,结果 显示在非线性波浪载荷作用下的船体结构疲劳损 伤明显大于按线性理论所得结果。徐志亭等 采用非线性时域方法对船体总弯矩的时历分布予 以了计算,随后结合雨流计数法计算了船体节点 在非线性砰击载荷下的疲劳应力范围分布,进而 得到了砰击载荷和波浪载荷下的损伤,通过对比 两者的结果,发现考虑砰击载荷后疲劳损伤增加 了约40%。彭丽华<sup>®</sup>通过分析采用时域法和频率 法计算出的损伤值, 对采用这2种方法得到的应 力功率密度谱进行了处理并予以了对比,结果显 示疲劳累积损伤值产生差值的主要原因是对应力

统计的计数方式不同,因此提出了一种基于雨流 计数法的频域计算方法,即首先应用频域计算获 得的热点应力功率密度谱生成应力随时间分布的 历程,然后运用雨流计数法及 S-N 曲线法进行累 积损伤计算。周渝航<sup>10</sup>设计了高、低频组合应力 作用下的疲劳试验,通过将不同频率比下的高频 载荷与低频载荷相组合,得到了弹振和颤振响应 中高频应力对超大型集装箱船船体结构疲劳损伤 的贡献度,并结合雨流计数法对弹振和颤振响应 时的修正系数进行了计算。甘进等<sup>100</sup>则通过引入 非线性载荷耦合损伤因子,提出了一种宽扁肥大 型江海直达船疲劳损伤精细化评估方法,考虑了 高、低频叠加载荷的疲劳耦合损伤。

结合上述文献以及大量的舰船结构疲劳强度 研究发现,对疲劳损伤的分析通常采用时域结合 雨流计数法,或是频域结合谱分析法。采用时域 计算虽然结果准确,但由于在实际计算过程中工 况众多,非常耗时耗力,而采用梁理论与时域载 荷结合的方法虽然可以简化计算,但基于梁理论 的计算在精度上会大大降低。采用谱分析法计算 舰船的疲劳强度问题时,虽然考虑得更为全面, 但也只能针对频域波浪载荷,而无法考虑砰击载 荷。若能将时域与频域相结合,则可在保证结果 准确性的前提下,减小计算的复杂度。目前,有 学者提出将频域载荷转化时域,然后再通过运用 雨流计数法和线性损伤理论计算损伤的方法,将 时域与频域相结合,但这样计算便无法考虑非线 性载荷(如砰击等)对疲劳的影响。另外,由于非 线性载荷的计算结果与船型有很大的相关性,舰 船的结构类型与普通集装箱船等差别较大,故不 能将用于集装箱船的非线性影响系数直接应用于 舰船中。

因此,本文将基于梁理论,将非线性载荷的时 域计算与线性频域的谱分析方法相结合,提出一 种计及砰击的舰船疲劳损伤直接计算方法。首 先,利用非线性结构响应计算得到砰击影响系 数,并对线性结构响应进行修正,然后,再通过算 例进行疲劳损伤计算,对比分析砰击影响系数修 正与否非线性砰击载荷对舰船疲劳寿命的影响。

## 1 理论阐述

### 1.1 基于非线性时域载荷的损伤计算

对于非线性时域载荷下的结构损伤,可以基 于非线性波浪载荷时域分析方法来计算船体梁垂 向波浪弯矩的时历,其中包含砰击颤振诱导弯矩

的高频分量和波频分量<sup>[11]</sup>。采用三点雨流计数法 获得应力范围和应力均值,然后再计算考核点的 长期损伤。若采用纯时域方法来预报计及砰击的 应力,虽然计算结果准确但计算量极大,不适合 工程应用,故本文通过三维非线性水弹性方法来 计算得到各短期海况下舰船的弯矩时历。先基于 梁理论按式(1)计算得到热点的剖面模数,再按 式(2)得到计算点的应力时历。

$$W = \frac{I_{yy}}{Z} \tag{1}$$

$$\sigma(t) = \frac{M(t)}{W}$$
(2)

式中: W为剖面模数; I<sub>yy</sub>为热点处结构的垂向惯性 矩; Z为热点与其所在位置垂向中和轴的垂向长 度; M(t)为弯矩时历; σ(t)为应力时历。

使用三点雨流计数法对上述计算得到的热点 应力时历进行处理与分析,得到应力时历的应力 范围和应力均值。由于应力幅值是应力范围的一 半,故可以得到各应力范围所对应的应力峰值。 因为这样计算的应力范围是根据梁理论得到的, 因此还需要对其进行平均应力修正,本文使用 Goodman 方法对应力范围进行修正,修正的原理 是把计算所得的应力范围变成应力比为*R* = –1的 S-N 曲线的等效应力范围<sup>112</sup>,等效应力的计算如 式(3)所示。

$$S_{\rm eq} = \frac{S}{1 - \frac{S_{\rm m} - S/2}{\sigma_{\rm b}}} = \frac{S}{1 - \frac{\sigma_{\rm min}}{\sigma_{\rm b}}}$$
(3)

式中: S<sub>eq</sub> 为修正后的等效应力范围; S, S<sub>m</sub> 分别为 通过雨流计数得到的应力范围与应力均值; σ<sub>b</sub>为 材料的抗拉极限; σ<sub>min</sub>为应力范围的最小值。

得到修正后的等效应力范围后,便可根据 Miner 线性累积损伤理论,按照装载、浪向、各海 况概率将短期损伤予以加权从而得到设计寿命期 内的总损伤度 *D*<sup>[13]</sup>,如式(4)和式(5)所示。

$$D = T \sum_{n=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_s} \sum_{i=1}^{n_h} p_n p_j p_i d_i$$
(4)

$$d_{t} = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{N(S_{k})}$$
(5)

式中: *p*<sub>n</sub>为第 *n* 个装载的时间分配系数; *p*<sub>i</sub>为第 *i* 个海况出现的概率; *p*<sub>j</sub>为第 *j* 个浪向角出现的概 率; *d*<sub>i</sub> 为单位时间内第 *n* 装载工况、第 *i* 个海况和 第 *j* 个浪向角的疲劳损伤度; *S*<sub>k</sub> 为第 *k* 个应力循 环的应力范围; *n*<sub>1</sub>, *n*<sub>8</sub>, *n*<sub>h</sub>分别为装载工况总数、海 况总数和浪向总数; T为计算疲劳寿命; N(S<sub>k</sub>)为相应条件下第 k个应力范围S<sub>k</sub>的疲劳失效循环次数。

#### 1.2 基于线性频域载荷的疲劳谱分析

对于线性频域载荷下结构的损伤,其基本的 思路是基于线性水弹性理论和谱分析方法,先计 算船体梁的垂向波浪弯矩,然后再与谱分析方法 相结合计算得到结构的疲劳损伤度<sup>[14]</sup>。本文使用 波浪载荷计算软件 WALCS 得到船体运动响应和 湿表面网格的水动压力响应,通过将其加载到船 体有限元模型上,来获得应力响应。应力响应与 规则波的波幅之比就是此时浪向角和圆频率条件 下的应力响应传递函数,也即谱分析计算所用的 应力幅值。

假设波浪与船舶航向之间的夹角 $\theta$ (浪向角) 所对应的传递函数为 $H(\omega_e, \theta)$ ,波能谱为ISSC (international ship and offshore structures congress) 提供的 P-M 谱<sup>[15]</sup>,则应力的功率谱密度可以写为

$$G_{XX}(\omega_{\rm e}) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} f(\beta) [H_{\sigma}(\omega_{\rm e}, \theta - \beta)]^2 G_{\eta\eta}(\omega_{\rm e}) \mathrm{d}\beta \qquad (6)$$

式中:ω<sub>e</sub>为波浪遭遇频率;G<sub>m</sub>(ω<sub>e</sub>)为遭遇频率下的 应力响应谱;H<sub>o</sub>为遭遇频率下的应力响应传递函 数;f(β)为波浪扩散函数,其中β为相应的角度,这 里使用 ISSC 推荐的波浪扩散公式:

$$f(\beta) = \frac{2}{\pi} \cos^2(\beta) \tag{7}$$

定义 m<sub>0</sub>, m<sub>2</sub> 分别为功率谱密度的零阶矩与二 阶矩,则由随机过程原理可知,此时平均跨零率 f<sub>0</sub>为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}}$$
(8)

假设应力循环为窄带高斯过程,一个跨零均 值对应一个应力峰值<sup>15</sup>,因此,可以假设应力范围 *S*与应力峰值*y*的关系为

$$y = S/2 \tag{9}$$

应力范围的概率密度函数可由式(10)获得:

$$f_{s}(S) = \frac{S}{4m_{0}} \exp\left(-\frac{S^{2}}{8m_{0}}\right), \quad 0 \le S < +\infty$$
 (10)

假设所计算舰船在第*i*个海况和第*j*个浪向角 的航行时间为*T<sub>ii</sub>*,则在*T<sub>ii</sub>*时间中的损伤度*D<sub>ii</sub>*,为

$$D_{ij} = \frac{T_{ij} f_{0,ij}}{A} \int_{0}^{+\infty} S^m F_{sij}(S) dS$$
(11)

式中: fo.ij为短期海况应力交变过程的平均跨零

率; F<sub>sij</sub>(S)为短期应力范围分布; A 和 m 为 S-N 曲 线的常数。

对于设计寿命期内的总损伤度 D, 可以通过 对各短期分布所得的所有疲劳损伤的加权求和来 获得, 具体公式如下:

$$D_{ij} = \frac{\delta \cdot T_{\rm d}}{\bar{a}} \Gamma \left( 1 + \frac{m}{2} \right) \sum_{n=1}^{n_{\rm l}} p_n \cdot \sum_{i=1}^{n_{\rm s}} \sum_{j=1}^{n_{\rm b}} p_i p_j \upsilon_{ijn} (2\sqrt{2m_{0,ijn}})^m$$
(12)

式中: $\delta$ 为在航率系数; $T_d$ 为船舶的设计疲劳寿命,s; $\bar{a}$ 为S-N曲线的参数; $\Gamma(1+m/2)$ 为伽玛函数; $m_{0,in}$ 为各短期分布的应力响应谱零阶矩; $v_{ijn}$ 为各短期海况下的应力响应跨零率。

### 1.3 基于非线性时域载荷的疲劳谱分析计算

对于考虑砰击载荷的舰船疲劳寿命分析,若

仅用1.1节的梁理论方法,则其对热点的疲劳评估不如1.2节的谱分析法准确;而谱分析法仅针对线性载荷,无法计及砰击载荷,若仅用该方法则不如梁理论方法考虑的全面。因此,本文将非线性载荷的时域计算与线性频域的谱分析法相结合,提出了一种计及砰击的谱分析计算方法。

首先,使用三维非线性水弹性软件 WALCS-NE, 基于梁理论分析得到各短期海况下舰船的应力时 历;然后,通过雨流计数法和 S-N 曲线,计算得到 各计算点的损伤;接着,参考中国船级社(CCS)的 指南<sup>[13]</sup>,计算得到计及砰击的非线性载荷对疲劳 损伤的贡献度及影响系数;最后,结合谱分析法 修正对应的应力响应传递函数并计算应力谱,最 终得到计及砰击的疲劳损伤。具体过程如图 1 所示。



Fig. 1 Fatigue assessment process accounting for slamming load

按照1.1节内容,可分别计算出含砰击弯矩 与不含砰击弯矩所造成的损伤度,然后按照CCS 指南,即可得到计及砰击的非线性贡献度αws和影 响系数 f<sup>m</sup><sub>ews</sub>, 分别如式 (13) 和式 (14) 所示。

$$\alpha_{\rm WS} = \frac{D_{\rm total,t}}{D_{\rm wave,t}} - 1 \tag{13}$$

$$\alpha_{\rm WS} = f_{\rm ews}^m \frac{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_{\rm tws}\right) + v_{\rm tws}^{-\left(\frac{\Delta m}{\xi}\right)} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_{\rm tws}\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_{\rm ws}\right) + v_{\rm ws}^{-\left(\frac{\Delta m}{\xi}\right)} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_{\rm ws}\right)} - 1$$
(14)

式中: ξ为 Weibull 形状参数, 其值取 1; D<sub>wave,t</sub> 为由 垂向波浪弯矩波频分量应力响应产生的疲劳累积 损伤度; D<sub>total,t</sub> 为由垂向波浪总弯矩应力响应产生 的疲劳累积损伤度; v<sub>tws</sub>, v<sub>ws</sub>可由式(15)和式(16) 求得:

$$v_{\rm tws} = \left(\frac{S_{\rm Q}}{f_{\rm ews} \cdot \Delta \sigma_{\rm HG,WV}}\right)^{\xi} \ln N_{\rm R}$$
(15)

$$v_{\rm ws} = \left(\frac{S_{\rm Q}}{\Delta\sigma_{\rm HG,WV}}\right)^{\xi} \ln N_{\rm R} \tag{16}$$

式中:  $S_Q$  为应力循环的应力范围;  $N_R$  为应力范围的疲劳失效循环次数;  $\Delta\sigma_{HG,WV}$  为船体梁垂向波浪弯矩产生的应力范围。

在 CCS 指南中,影响系数 f<sup>m</sup><sub>ews</sub>在简化计算中用 于修正船体垂向波浪弯矩,但简化计算法不如谱 分析法精确,而在谱分析计算中,载荷是通过各 浪向角每个频率的规则波来具体表示的,垂向波 浪弯矩不能直接体现在其中。又因波浪弯矩与应 力呈线性关系,所以可以通过修正对应浪向的单 位波幅规则波,即用影响系数修正对应的应力响 应传递函数来计算出应力谱,从而得到计及砰击 的疲劳损伤。由此,可实现在通过谱分析法计算 损伤的同时又能考虑砰击效应的影响这一目标。 修正后的应力谱公式如下:

$$S_{\sigma}(\omega_{\rm e}|H_{\rm s},T_{\rm z},\theta,L_{\rm o}) = |f_{\rm ews,\theta} \cdot H_{\sigma}(\omega|\theta,L_{\rm o})|^{2} \boldsymbol{g} \cdot S_{\eta}(\omega|H_{\rm s},T_{\rm z}) \left|1 - \frac{2\omega V\cos\theta}{\boldsymbol{g}}\right|^{-1}$$
(17)

式中: $S_{\sigma}$ 为应力的功率谱密度; $S_{\eta}$ 为波浪谱; $\omega$ 为 波浪圆频率; $L_{o}$ 为装载工况; $H_{s}$ 为有义波高; $T_{z}$ 为 跨零周期;V为航速;g为重力加速度; $H_{\sigma}$ 为应力 响应传递函数; $f_{ews\theta}$ 为非线性影响系数,其具体数

第 17 卷

值可分为2种情况,当计算的浪向角不计及砰击时, *f*<sub>ews,0</sub> = 1,当计算的浪向角需要计及砰击时,使用式(13)~式(16)即可计算得到。

# 2 算例计算

本文将以一艘长约 250 m 的某型舰船为例进 行非线性砰击载荷的疲劳损伤计算。表 1 和表 2 所示分别为该舰船所选的计算点信息以及疲劳损 伤基本参数。

表 1 某船疲劳热点位置 Table 1 Location of fatigue hotspots of a ship

热点编号	热点所在位置		
Hotspot01	345号肋位,横舱壁、06甲板与纵舱壁三者交点处		
Hotspot02	345号肋位,横舱壁、03甲板与纵舱壁三者交点处		
Hotspot03	262号肋位,横舱壁、07甲板与纵舱壁三者交点处		
Hotspot04	208号肋位,03甲板左舷右侧舱口角隅处		
Hotspot05	136号肋位,上层建筑左端部与03甲板交点处		
Hotspot06	137号肋位,02甲板左端上层建筑折角处		
Hotspot07	60号肋位,04甲板横梁与横舱壁交点处		
Hotspot08	52号肋位,横舱壁和03甲板与纵舱壁交点处		
Hotspot09	234号肋位,03甲板下横梁与横舱壁交点处		
Hotspot10	222号肋位,横舱壁和04甲板与左侧距船舯 1 000 mm处纵舱壁交点处		

表 2 疲劳损伤计算的基本参数 Table 2 Basic parameters of fatigue damage calculation

参数	数值
装载工况	满载
浪向角θ/(°)	0, 30, 60
波浪圆频率ω/(rad·s-i)	0~2.5(间隔频率为0.01)
海况	北大西洋海况
海浪谱	双参数P-M谱
设计寿命/年	50

算例船所用高强度钢的屈服极限为 550 MPa, 而 CCS 提供的 S-N 曲线则只适用于屈服极限小 于 400 MPa 的钢材,故采用疲劳试验所得到的 S-N 曲线进行疲劳损伤计算。S-N 曲线主要修正 了 自 由边的 C 曲线和双面全焊透对接焊缝的 E 曲线。对于焊接节点,疲劳强度评估采用 D 曲 线,对于母材自由边,疲劳强度评估采用 C 曲线, 试验所得 S-N 曲线如表 3 所示。表中, K 为 S-N 曲线常数, S<sub>a</sub> 为两线段交点处的应力范围值。

在计算垂向波浪弯矩时,需要选用适合的波 浪频率范围,既要包含对砰击影响较大的海况, 又不能因计算过多的工况而影响工作效率。参 考 CCS 指南,选取频率范围 0.1~2.5 rad/s,该频率

表 3 实验 S-N 曲线参数

辑

Table 3 Experimental S-N	curve parameters
--------------------------	------------------

S-N曲线	K	$S_{ m q}$
С	4.677×1012	77.624 7
D	1.520×1012	53.368 0
Е	1.282×1012	50.43

范围包含绝大部分的波浪频率。另外,在计算时,还应对频率间隔进行适当的加密以保证结果的准确性。因此,本文频率步长采用0.01 rad/s,此时频率的计算总量为241个。

## 2.1 基于时域雨流计数法和梁理论的疲劳 损伤计算

由文献 [13] 中关于在全浪向下计及砰击疲劳 损伤结果的计算可知, 砰击在浪向角 $\theta = 0^{\circ}, 30^{\circ},$ 60°, 300°和 330°时对疲劳损伤的影响最大, 其余 浪向角下的影响则不大, 而且由于是基于梁理论 进行的计算, 可假设船体为左右对称, 因此本节 只计算 $\theta = 0^{\circ}, 30^{\circ}, 60^{\circ}这3 个浪向角下的垂向波$ 浪弯矩时历结果, 但航向的发生概率需全航向等 $概率确定。最后, 再由<math>\theta = 30^{\circ}, 60^{\circ}$ 的结果对称得 到 $\theta = 300^{\circ}, 330^{\circ}$ 这 2 个浪向角的时历结果。

根据以上计算参数和相关公式,可以计算出 计及砰击和不计及砰击的垂向波浪弯矩时历及应 力时历,而由式(1)和式(2)计算得出的应力时历 可知,同一个计算点在相同海况(*H*<sub>s</sub>=9.5 m, *T*<sub>z</sub>=5.5 s) 下的应力时历与弯矩时历是完全呈线性关系的, 故此处仅截取了部分海况的弯矩时历,如图 2 和 图 3 所示。图 2 中的 3 600 s 是根据文献 [13] 中 规定的 1 h 时历,图 3 所示是截取的图 2 中的部分 数据。

基于 S-N 曲线以及应力范围结果,可得各热 点在北大西洋海况散点图中的损伤结果,然后再 根据各海况的发生概率对其进行加权求和,可得 到每个热点在 3 600 s 时历中的疲劳损伤度,随后



Fig. 2 Time histories of bending moment at the midship section

(0-3 600 s)





再根据舰船的设计航行概率、设计寿命和在航 率,即可计算出算例船的各热点在计及和不计及 砰击时的垂向波浪弯矩诱导损伤度,以及非线性 贡献度和影响系数。

根据贡献度公式,可计算得到计及砰击的垂向波浪弯矩疲劳损伤的贡献度及其影响系数,各 热点在3600s时历内所有海况下的疲劳损伤度 以及非线性贡献度如表4所示。

表 4 各热点的疲劳损伤度与非线性贡献度

Table 4 Fatigue damage and nonlinear contribution of each hotspot

热点编号	波频分量的 疲劳损伤度	计及砰击的 总损伤度	非线性 贡献度	非线性影响 系数
Hotspot01	3.40×10 <sup>-12</sup>	5.58×10 <sup>-12</sup>	0.642	1.104
Hotspot02	5.27×10-9	8.82×10-9	0.674	1.171
Hotspot03	1.10×10 <sup>-1</sup>	1.80×10 <sup>-1</sup>	0.640	1.147
Hotspot04	3.48×10 <sup>-7</sup>	5.83×10 <sup>-7</sup>	0.672	1.167
Hotspot05	3.08×10-8	5.47×10-8	0.775	1.215
Hotspot06	3.96×10-8	6.90×10-8	0.744	1.216
Hotspot07	3.00×10-9	5.69×10-9	0.895	1.255
Hotspot08	2.00×10-8	3.70×10-8	0.847	1.296
Hotspot09	7.39×10-8	1.27×10-7	0.718	1.148
Hotspot10	1.21×10 <sup>-7</sup>	2.07×10 <sup>-7</sup>	0.703	1.152

在采用简化计算法对舰船疲劳热点进行疲劳 强度评估时,按照文献[15]中的简化计算方法, 可采用非线性影响系数对波浪弯矩进行修正。通 常,需要计算以下外载荷:船体梁载荷、海水动压 力、由全船运动引起的舱内货物动压力。由于筛 选的疲劳热点没有处于船底至舷侧位置的结构, 因此本文不计算海水的动压力,只计算梁载荷和 货物动压力这2个外载荷。具体的计算公式和规 定详见文献[15]。由于本文选取的10个考核点 不止位于纵位处,所以应力集中系数不能简单地 根据规范给定的数值进行计算。本文采用的方法 是,通过热点应力与名义应力的比值来得到应力 集中系数,其中热点应力和名义应力按文献[15]

第4章中的计算方法求得。

根据上述内容,即可得到由 CCS 规范所得的 计及砰击的损伤度,具体如表 5 所示。

表 5 时域结合梁理论法计算所得损伤 Table 5 Damage calculated by time domain combined beam theory method

热点编号	非线性影响系数	应力集中系数	计及砰击的损伤度
Hotspot01	1.104	1.454	0.172
Hotspot02	1.171	1.312	0.087
Hotspot03	1.147	1.453	0.180
Hotspot04	1.167	4.644	0.617
Hotspot05	1.215	1.384	0.107
Hotspot06	1.216	1.305	0.132
Hotspot07	1.255	1.336	0.107
Hotspot08	1.296	1.152	0.408
Hotspot09	1.148	1.251	0.050
Hotspot10	1.152	1.819	0.292

# 2.2 基于频域谱分析法及砰击修正的疲劳 损伤计算

本节将基于 P-M 线性累积损伤理论对大型 舰船进行疲劳损伤计算。基本的思路是:首先进 行线性频域的载荷计算,得到遭遇频率下的应力 响应传递函数,然后再利用砰击影响系数对应力 响应传递函数进行修正。对于线性疲劳载荷,需 要计算水动压力和惯性力这 2 个部分,然后根据 确定的装载工况,利用三维水弹性波浪载荷软 件,得到各浪向各频率线性规则波在整船 6 个自 由度的运动响应、局部计算点的计算加速度及船体 水线面以下的水动压力。接着,利用 MSC/NASTRAN 软件建立整船结构的有限元模型,并使模型在达 到平衡条件和边界条件后进行加载,得到各装 载、浪向、频率工况下模型的应力响应,再由插值 获取主应力响应的传递函数。最后,通过谱分析 法计算考核点的疲劳损伤度与寿命。

算例船的在航率为0.75,其装载工况有压载 和满载2种,时间分配系数均为0.5。在2种装载 工况下,因船体在谱分析计算过程中的波浪载荷 及结构响应均不相同,故应分别计算出各装载工 况所对应时间分配系数的疲劳损伤度。由线性损 伤累计理论,得到总损伤度为压载和满载工况下 的损伤分别乘以相应的时间分配系数并相加之后 再乘以在航率,如式(18)所示。

$$D = (D_{\rm B} \times T_{\rm B} + D_{\rm F} \times T_{\rm F}) \times f \tag{18}$$

269

式中: D<sub>B</sub>, D<sub>F</sub> 分别为压载和满载工况下的损伤度;

 $T_{\rm B}, T_{\rm F}$ 分别为压载和满载工况下的时间分配系数;f为在航率。

根据疲劳规范,进行疲劳计算时计算航速取 最大航速的75%时损伤最大,此时,算例船的计 算航速为16kn。浪向角θ取为0°~330°,间隔为 30°, 共12个浪向。船长约等于波长时所受的应 力最大, 算例船的计算船长为250 m, 根据频率--波长公式, 波浪频率约为0.5 时波长与船长大致 相等。因此, 波浪频率可以取为0.1~2.0 rad/s, 原 则上以0.1 为间隔。具体的信息如表6所示。

表 6 波浪载荷响应计算参数

Table 6	Calculation parameters of	wave load response

参数	数 值
计算航速/kn	16
计算浪向角θ/(°)	0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330
各航向出现的概率	1/12
计算波浪圆频率ω/(rad·s <sup>-1</sup> )	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0

完成波浪载荷的选取后,通过三维波浪载荷 计算软件 WALCS,可获得各规则波6个自由度的 运动响应、主要剖面载荷、水动压力等载荷成 分。将上述载荷施加到细化后的有限元模型上 后,可计算得到各工况的热点应力,再根据插值 和主应力计算得到最大主应力(对应45°浪向角 时主应力达到最大值),即可得到各热点的应力 响应传递函数。

根据式(6)得到应力响应谱后,采用谱分析法 计算的考核点的疲劳损伤结果如表7所示。

表 7 算例船谱分析评估结果 Table 7 Spectrum analysis and evaluation results of example

ship

热点编号	疲劳累积损伤度 (压载)	疲劳累积损伤度 (满载)	总损伤度
Hotspot01	0.105	0.116	0.221
Hotspot02	0.075	0.084	0.160
Hotspot03	0.093	0.125	0.217
Hotspot04	0.317	0.355	0.671
Hotspot05	0.085	0.095	0.179
Hotspot06	0.075	0.09	0.165
Hotspot07	0.063	0.071	0.134
Hotspot08	0.156	0.175	0.331
Hotspot09	0.085	0.110	0.194
Hotspot10	0.273	0.305	0.578

要对砰击进行修正,首先需计算出各浪向角的影响系数,然后再对应力响应传递函数进行修正,随后按照上述谱分析方法求得计及砰击的疲劳损伤。根据贡献度公式以及 2.1 节的计算步骤,计算出各热点在 3 600 s 时历内在 $\theta = 0^\circ$ , 30°, 60°时的砰击影响系数如表 8 所示。其中, $\theta = 300°$ 时的结果与 $\theta = 60°$ 时的相同, $\theta = 330°$ 时的结果与 $\theta = 30°$ 时的相同。

表 8 各工况下各热点的砰击影响系数

 Table 8
 Slamming influence coefficients of each hot spot under each working condition

抽上炉口		砰击影响系数	
热点狮亏	$\theta = 0^{\circ}$	$\theta = 30^{\circ}$	$\theta = 60^{\circ}$
Hotspot01	1.129	1.110	1.079
Hotspot02	1.215	1.175	1.123
Hotspot03	1.131	1.092	1.084
Hotspot04	1.207	1.169	1.058
Hotspot05	1.247	1.199	1.107
Hotspot06	1.252	1.201	1.112
Hotspot07	1.263	1.210	1.144
Hotspot08	1.300	1.245	1.160
Hotspot09	1.188	1.126	1.097
Hotspot10	1.181	1.139	1.113

将每个热点的5个砰击影响系数代入各自的 应力响应传递函数以后,可得到砰击修正后的满 载工况下的应力响应传递函数,随后,再根据谱 分析法计算得到修正后的计及砰击影响的舰船疲 劳损伤度。各热点的疲劳损伤度以及砰击影响系 数如表9所示。

#### 2.3 对比分析

由 2.1 和 2.2 节的损伤度计算结果可以发现, Hotspot04, Hotspot10 的疲劳损伤度较大。这是因 为 Hotspot04 的结构形式为大型舰船主甲板的大 开口角隅结构, Hotspot10 的结构形式为船舯位置 压载舱底部、横舱壁和纵舱壁三者交接的结构, 这 2 个位置都是突变比较明显的结构,容易发生 应力集中。按照 2.1 和 2.2 节的计算,相同设计寿 命下的损伤值如表 10 所示。

2.1 节是采用时域载荷结合梁理论的方式进

#### 表 9 各热点的疲劳损伤结果和砰击影响系数

Table 9 Fatigue damage results and slamming influence coefficients of each hotspots

热点编号	压载工况下的 疲劳损伤度	满载工况下的 疲劳损伤度	不考虑砰击 的总损伤度	计及砰击的 总损伤度	砰击影 响系数
Hotspot01	0.105	0.116	0.221	0.260	1.18
Hotspot02	0.075	0.084	0.160	0.194	1.21
Hotspot03	0.093	0.125	0.217	0.238	1.10
Hotspot04	0.317	0.355	0.671	0.770	1.15
Hotspot05	0.085	0.095	0.179	0.192	1.07
Hotspot06	0.075	0.090	0.165	0.200	1.21
Hotspot07	0.063	0.071	0.134	0.208	1.55
Hotspot08	0.156	0.175	0.331	0.429	1.30
Hotspot09	0.085	0.110	0.194	0.223	1.15
Hotspot10	0.273	0.305	0.578	0.663	1.15

表 10	时域雨流计数法和频域谱分析法的疲劳损伤度

 Table 10
 Fatigue damage degree of time domain rain flow counting method and frequency domain spectrum analysis method

热点编号	未计及砰击的损伤度		计及砰击的损伤度		砰击影响系数	
	时域雨流 计数法	频域谱 分析法	时域雨流 计数法	频域谱 分析法	时域雨 流计数法	频域谱 :分析法
Hotspot01	0.156	0.221	0.172	0.260	1.103	1.176
Hotspot02	0.074	0.160	0.087	0.194	1.176	1.213
Hotspot03	0.157	0.217	0.180	0.238	1.146	1.097
Hotspot04	0.529	0.671	0.617	0.770	1.166	1.148
Hotspot05	0.088	0.179	0.107	0.192	1.216	1.073
Hotspot06	0.109	0.165	0.132	0.200	1.211	1.212
Hotspot07	0.085	0.134	0.107	0.208	1.259	1.552
Hotspot08	0.315	0.331	0.408	0.429	1.295	1.296
Hotspot09	0.044	0.194	0.050	0.223	1.136	1.149
Hotspot10	0.253	0.578	0.292	0.663	1.154	1.147

行的计算, 而采用梁理论计算热点应力时, 仅考虑了热点位于剖面的位置, 未考虑热点处具体的结构, 所以相对于 2.2 节的谱分析结合有限元方法而言误差较大, 整体损伤度均偏小。通过对比采用上述 2 种方法分别计算得到的砰击影响系数, 可以看出两者相差不大, 说明无论是采用哪种方法, 砰击发生的概率和影响比例均一样, 也说明本文提出的计及砰击的直接计算方法是可行的。而由于谱分析法相比梁理论计算考虑得更全面, 计算更精准, 故按本文方法计算的计及砰击载荷的疲劳损伤度相比雨流计数法结合梁理论计算的结果更为准确。

## 3 结 论

直接计算方法,将非线性载荷的时域计算与线性 频域的谱分析方法相结合,基于船体梁理论与非 线性时域计算得出了砰击影响系数,然后结合谱 分析的应力响应传递函数,得到了舰船各热点计 及砰击载荷时的疲劳损伤度。通过与线性谱分析 计算结果的比较,主要得到如下结论:

1) 在计及砰击载荷的情况下,各热点的疲劳 损伤度的增加约为10%~50%,影响较大,因此在 评估疲劳强度时,砰击载荷不可忽略。

 2)不同部位所受砰击载荷和计算得到的损 伤度不同,产生差异的原因除了沿船长方向的位 置不同外,还与热点处的结构不同有关。

3)采用常规算法得到的砰击影响系数与本 文直接计算方法的结果相差不大,说明无论是采 用哪种方法,砰击发生的概率和影响比例都一 样,也说明本文所提计及砰击载荷的直接计算方 法是可行的。

4)所提计算方法可应用于各种砰击载荷严重 的船型以及全船所有节点,可以在提高计算精确 度的同时减少计算时长和复杂度,但因在计算砰 击影响系数时采用了梁理论,会带来一定的误 差,故后续建议采用有限元方法来计算应力时 历,从而得出影响系数。

因本文只针对一种船型的一艘目标船进行了 计算,故所得砰击影响系数仅对同船型具有参考 价值,后续仍需针对同一种船型的多艘目标船进 行非线性砰击载荷影响研究,总结归纳出该船型 的砰击载荷放大系数,以便为同船型后续船的设 计工作提供支撑。

此外,因采用纯时域计算耗时量巨大,本文未 给出纯时域计算结果,故按本文所提计算方法得 出的结果无法与纯时域计算结果进行对比,后续 若无法得出纯时域计算结果,建议进行相关的试 验,以进一步验证本文方法。

综上,本文所提方法为评估大外飘、高航速 等遭受严重砰击载荷影响船型的船体疲劳强度提 供了一种思路,将时域载荷与频域谱分析相结 合,可在提高计算精度的同时节约计算时间。

#### 参考文献:

[1] 冯国庆. 船舶结构疲劳强度评估方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.

FENG G Q. Research on fatigue strength assessment method of ship structures[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006 (in Chinese).

[2] 任慧龙, 翟帅帅, 于鹏垚, 等. 砰击载荷作用下船艏结构 瞬态响应研究 [J]. 中国舰船研究, 2013, 8(6): 14–19.

- 1

REN H L, ZHAI S S, YU P Y, et al. Transient re-

sponse of the bow structure under slamming loads[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2013, 8(6): 14–19 (in Chinese).

- [3] MANSOUR A E, LOZOW J. Stochastic theory of the slamming response of marine vehicle in waves[J]. Journal of Ship Research, 1982, 26(4): 276–285.
- [4] 戴仰山, 贺五洲. 底部砰击预报 [J]. 中国造船, 1979(2): 37-48.

DAI Y S, HE W Z. Bottom slamming prediction[J]. China Shipbuilding, 1979(2): 37–48 (in Chinese).

[5] 王东海,任慧龙,邹勇.平均应力对船体结构疲劳损伤 计算的影响[J].哈尔滨工程大学学报,1998,19(1): 1-7.

WANG D H, REN H L, ZOU Y. The mean stress effect on fatigue damage calculation of ship structure[J]. Journal of Harbin Engineering University, 1998, 19(1): 1–7 (in Chinese).

 [6] 王东海. 船体总纵弯曲时的疲劳强度分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 1998.
 WANG D H. Fatigue strength analysis of hull under

longitudinal bending[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 1998 (in Chinese).

 [7] 徐志亭,赵超,王福花.非线性砰击载荷对某大外飘型船舶疲劳损伤的影响[J].中国舰船研究,2019,14(6): 180–185.

XU Z T, ZHAO C, WANG F H. Effect of nonlinear slamming loads on the fatigue damage of a ship with large flare[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(6): 180–185 (in Chinese).

- [8] 彭丽华.考虑雨流计数的频域疲劳计算方法 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
   PENG L H. A new frequency domain fatigue damage computational method considering rain-flow counting[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,
- 2018 (in Chinese).
  [9] 周渝航. 高低频组合应力对超大型集装箱船疲劳强度的 影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.

ZHOU Y H. Affect study of structural fatigue strength under high-low frequency combined stress[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020 (in Chinese).

- [10] 甘进,刘祥,吴卫国,等. 宽扁肥大型江海直达船疲劳损 伤精细化评估方法:中国,112597592A[P]. 2021-04-02.
  GAN J, LIU X, WU W G, et al. Refined fatigue damage assessment method for wide flat fat large river sea direct ship: CN, 112597592A[P]. 2021-04-02 (in Chinese).
- [11] 汪雪良,杨鹏,顾学康,等. 船体结构砰击总体载荷理论研究综述 [J]. 中国舰船研究, 2015, 10(1): 7–18.
  WANG X L, YANG P, GU X K, et al. Review of the theoretical investigation of slamming of global wave loads on ship structures[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(1): 7–18 (in Chinese).
- [12] 王迪. 弹振与颤振响应对超大型集装箱船的疲劳强度影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
  WANG D. Investigation of the effect of springing and whipping responses on the fatigue strength of ultra large container ships[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017 (in Chinese).
- [13] 中国船级社. 船体结构波激振动和砰击颤振直接计算评 估指南 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2018. China Classification Society. Guide for direct calculation and evaluation of wave-induced vibration and slamming flutter of hull structures[S]. Beijing: People's Communications Press, 2018 (in Chinese).
- [14] 任晨辉. 非线性波浪载荷对船体结构强度的影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
  REN C H. Research of effect of nonlinear wave load on ship structural strength[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016 (in Chinese).
- [15] 中国船级社. 船体结构疲劳强度指南 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
   China Classification Society. Guide to fatigue strength of hull structures[S]. Beijing: People's Communications Press, 2001 (in Chinese).

#### (上接第245页)

Chinese).

 [9] 陈伟, 芦海, 杨雯, 等. 欠驱动自主水下航行器航迹追踪 控制 [J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2021, 35(3):
 1-7.

CHEN W, LU H, YANG W, et al. Path tracing control of under-actuated autonomous underwater vehicle[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 35(3): 1–7 (in Chinese).

[10] 刘志民.水下球形探测机器人自主运动控制研究 [D]. 北京:北京邮电大学, 2018.

LIU Z M. Autonomous motion control of underwater spherical exploring robot[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018 (in

aded from

- [11] LUO W L, QI X. L2-gain-based practical stabilization of an Underactuated surface vessel[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(3): 341.
- [12] 吴乃龙.水下机器人建模与非线性自适应控制研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2018.
  WU N L. Study on modeling and nonlinear adaptive control of underwater vehicle[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018 (in Chinese).
- [13] 刘金琨. 滑膜变结构控制 MATLAB 仿真: 基本理论与 设计方法 [M]. 4 版. 北京: 清华大学出版社, 2019: 57.
  LIU J K. Sliding Mode Control Design and MATLAB Simulation: the Basic Theory and Design Method[M].
  4th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2019: 57 (in

-research.com

Chinese).