

某船关键结构典型节点疲劳寿命分析方法研究

朱雨生¹, 曹俊伟²

(1. 中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471000; 2. 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064)

摘 要: 当前海上执行任务越来越频繁, 任务周期越来越长。某船关键结构的疲劳寿命愈发重要, 船舶在波浪中航行时受载状态随着波浪变化而变化, 使船舶构件长期处于交变应力状态, 变化载荷的累积效应造成疲劳损坏。某船关键结构典型焊接节点是疲劳裂纹萌生和扩展的关键区域, 为了综合评估全寿命周期下船体结构的安全性, 本文以某船为对象, 基于热点应力法对关键结构危险节点开展疲劳寿命校核。

关键词: 船体结构; 疲劳评估; 疲劳寿命; 损伤度

中图分类号: U66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 07—0096—03

1 引言

近年来, 海上执行任务越来越频繁, 任务周期越来越长。海上波浪复杂多变, 船舶在海上航行, 在复杂海况下船体结构也随之产生交变响应。在交变载荷作用下, 关键结构中应变应力较大的典型节点易发生疲劳问题。

针对船体结构典型节点疲劳强度问题, 学者们开展了一系列研究。杨永祥等^[1]采用热点应力法对某一巴拿马型成品油轮疲劳热点位置处(内底与底边舱斜板的焊接折角)的疲劳应力进行了计算, 并根据 JTP 规范对热点位置的疲劳寿命进行了评估。范云等^[2]CSR 规范中的油船疲劳强度有限元分析的要求, 采用直接计算的方法分析不同的节点形式对疲劳损伤的影响。本文针对某船的结构特点, 确定了船体结构的危险剖面 and 典型节点评估位置。主要典型节点位于中部底边舱斜板与内底板的连接折角处、底边舱斜板与内舷板的连接折角处、甲板与槽形舱壁的连接处、内底板与槽形舱壁连接处, 依据《船体结构疲劳强度指南》(2021)^[3], 选取船体中部区域 5 种典型节点对该船进行疲劳寿命评估。

2 总体介绍

2.1 船型介绍

本论文的对象船的船长 77.8m, 船宽 14.8m, 型深 6.10m, 吃水为 4.7m。

2.2 计算工况

按照《船体结构疲劳强度指南》(2021) 的规定, 按规范初步核算下列工况: 满载出港工况; 空载到港工况。在计算波浪弯矩时取波峰或波谷在船中状态, 对应中拱和中垂两种工况。两种工况装载情况如表 1 所示。

表 1 作业工况组合表

工况	工况装载描述	弯矩方向
LC1	均匀满载	中拱/中垂
LC2	正常压载	中拱/中垂

2.3 计算载荷

依据规范载荷包括以下项目: 垂向弯矩; 舷外水压力; 货物压力及液体压力, 见图 1 和图 2 所示。

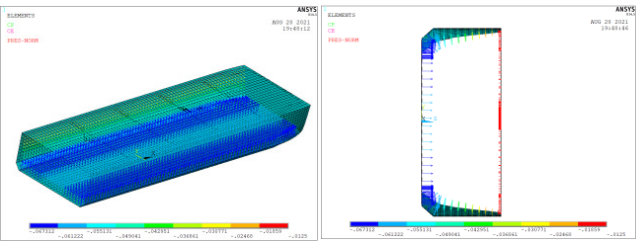


图 1 舷外水压力加载图

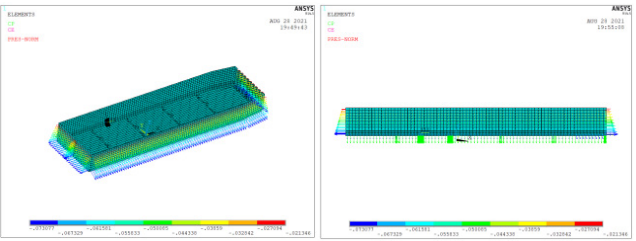


图 2 货物压力及液体压力加载图

2.4 边界条件

(1) 在端面 A 与 B 内中和轴与纵中剖面相交处建立一个独立点 H, 在独立点上施加垂向弯矩, 端面各纵向构件节点自由度 δ_x 、 δ_y 、 δ_z 与独立点相关。

(2) 端面 A 与 B 内独立点 H 的横向线位移、垂向线位移、绕纵向轴的角位移约束, 即: $\delta_y = \delta_z = \theta_x = 0$; 端面 A 内独立点 H 纵向线位移约束, 即 $\delta_x = 0$ 。

3 疲劳评估公式

3.1 热点应力计算

在船舶与海洋工程领域, 世界各大船级社 (DNV, CCS 等) 基本都推荐采用 $t \times t$ 的网格尺寸, 取距焊趾 0.5t 和 1.5t 处为计算参考点。在从有限元模型中提取热点应力后, 进行插值, 即由 $t/2$ 和 $3t/2$ 处的最大主应力外插得到焊趾 (热点) 处的应力, 热点应力按公式 (1) 计算得到。

$$\sigma_{HS} = 1.5 \times \sigma_{t/2} - 0.5 \times \sigma_{3t/2} = 1.5 \times \left(\frac{3\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) - 0.5 \times \left(\frac{3\sigma_2 - \sigma_4}{2} \right) \quad (1)$$

3.2 疲劳寿命评估方法

根据《船体结构疲劳强度指南》(2021), 疲劳寿命评估按照下述方法进行计算。

结构节点在工况“(k)”时的累积损伤度 D_k 应按式计算:

$$D_k = \frac{N_D \alpha_k}{K} \frac{S_{D(k)}^m}{(\ln N_L)^{m/\zeta_k}} \mu_k \Gamma \left(1 + \frac{m}{\zeta_k} \right) \quad (2)$$

$$\mu_k = 1.0 - \frac{\gamma \left(1 + \frac{m}{\zeta_k}, v_k \right) - v_k^{-\frac{\nabla m}{\zeta_k}} \gamma \left(1 + \frac{m + \nabla m}{\zeta_k}, v_k \right)}{\Gamma \left(1 + \frac{m}{\zeta_k} \right)} \quad (3)$$

$$v_k = \left(\frac{S_q}{S_{D(k)}} \right)^{\zeta_k} \ln N_L \quad (4)$$

式中: N_D 是船舶在 20 年营运期间的载荷循环总次数, 取值 0.65×10^8 ; N_L 是载荷谱回复周期的循环次数, 取为 10^2 ; α_k 是工况“(k)”的时间分配系数, 其中满载工况取 0.425, 压载工况 0.425; K 是热点应力 S-N 曲线参数; $S_{D(k)}$ 是工况“(k)”的设计应力范围; ζ_k 是工况“(k)”的 Weibull 形状参数, 取为 1; m 是热点应力 S-N 曲线反斜率; ∇m 是热点应力 S-N 曲线两段反斜率差; $\gamma(x, v)$ 是不完全 GAMMA 函数值; r 是完 $\gamma(x, v) = \int_0^v u^{x-1} e^{-u} du$ 全 GAMMA 函数值, $\Gamma(x) = \int_0^\infty u^{x-1} e^{-u} du$ 。 S_q 是 S-N 曲线二线段的交点处的应力幅值。

S-N 曲线选用规范^[3]中 CCS-C 曲线和 CCS-D 曲线。 K 和 S_q 取值见表 2。

表 2 K 和 S_q 取值表

S-N 曲线	K	S_q
C	3.464×10^{12}	70.2305
D	1.520×10^{12}	53.3680

4 疲劳评估结果

4.1 评估疲劳热点

如图 3 (a) 是中部 51# 肋位船底纵骨细化具体位置示意图, (b) 中部 51# 肋位船底纵骨满载中垂应力云图对比图。

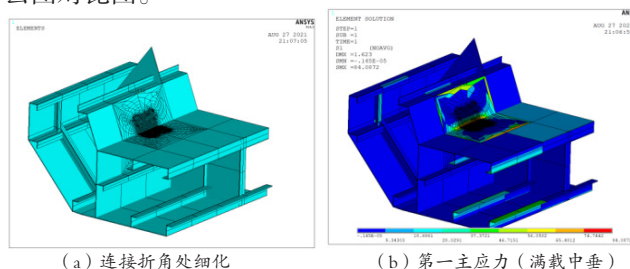


图 3 51# 底边舱斜板与内底板的连接折角处细化及其应力

如图 4 (a) 是 2 号和 3 号货舱 51# 中间舱口角隅细化具体位置示意图, (b) 2 号和 3 号货舱 51# 中间舱口角隅满载中垂应力云图对比图。

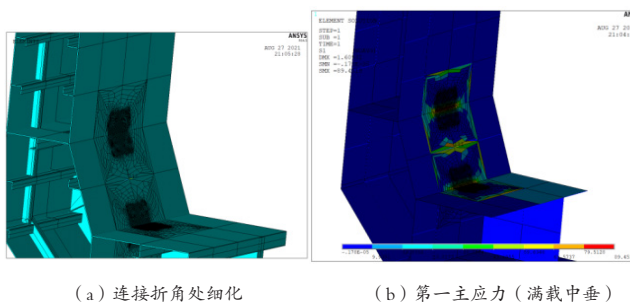


图 4 51# 货舱中间舱口角隅细化及第一主应力

如图 5 (a) 是中部 60# 肋位内舷侧与内底相交处细化具体位置示意图, (b) 中部 60# 肋位内舷侧与内底相交处满载中垂应力云图对比图。

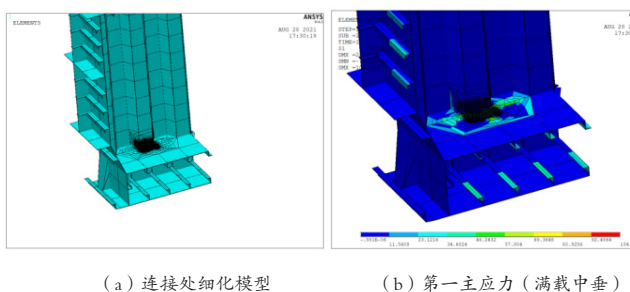


图 5 60# 内底板与槽型横舱壁连接处细化及其应力

表 3 典型节点疲劳评估结果

编号	节点位置	疲劳寿命/年
1	51#底边舱斜板与内底板的连接折角处	3.50E5
2	51#底边舱斜板与内舱的连接折角处	3.20E5
3	60#内底板与槽型横舱壁连接处	2.02E5
4	76#槽型舱壁与主甲板连接处	202.6
5	80#强框架与主甲板和纵舱壁交接处	313.7

综上所述,得到如下结论:

(1) 经过计算,典型节点 1、2 和 3 在满载和压载工况的热点应力最大值介于(80~110) MPa,但是对应的设计应力范围较小,评估得到的疲劳寿命远超过设计寿命 30 年;典型节点 4 和 5 在满载和压载工况的热点应力最大值介于(110~130) MPa,对应的设计应力范围最大值介于(40~50) MPa,评估得到的疲劳寿命介于(200~300) 年,满足设计寿命 30 年的要求。

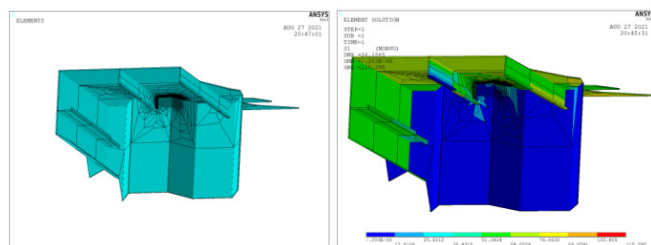
(2) 通过对某船进行有限元计算及典型节点的疲劳评估,各典型节点均满足寿命大于 30 年的要求,满足规范需求。

参考文献:

- [1] 杨永祥,嵇春艳,罗广恩. 基于 JTP 规范大型油船疲劳热点寿命评估 [J]. 舰船科学技术,2007,29(4):44-46,60.
- [2] 范云,许允,张少雄,等. HCSR 油船热点疲劳强度案例析 [J]. 船海工程,2019,48(1):5-8.
- [3] 中国船级社. 船体结构疲劳强度指南. 人民交通出版社,2021.



如图 6(a) 是中部 76# 槽型舱壁与纵桁相交处细化具体位置示意图, (b) 中部 76# 槽型舱壁与纵桁相交处满载中垂应力云图对比图。



(a) 连接处细化模型

(b) 第一主应力(满载中垂)

图 6 76# 槽型舱壁与主甲板连接处细化及其应力

如图 7(a) 是 80# 强框架与主甲板和纵舱壁交接处细化具体位置示意图, (b) 是 80# 强框架与主甲板和纵舱壁交接处满载中垂应力云图对比图。

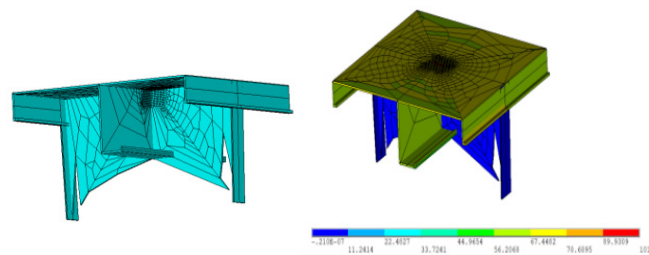


图 7 80# 强框架与主甲板和纵舱壁交接处细化及其应力

5 结论

针对某船的结构特点,确定了船体结构的危险剖面 and 典型节点评估位置;依据规范,选取船体中部区域 5 种典型节点对该船进行疲劳寿命评估。疲劳寿命评估结果如下:

