文章编号:1000 - 4653(2026)04 - 0136 - 07

基于 UR S11A 规范的超大集装箱船极限强度可靠性研究

胡向忠[1], 廖龙冰[2], 吕永坤[1], 王晓飞[1], 娄本强[2*]
(1. 大连中远海运重工有限公司, 辽宁 大连 116000;
2. 江苏科技大学 船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212100)

摘 要:文章根据国际船级社协会(IACS)规范要求对超大型集装箱船极限强度进行分析,以此评估船体结构极限强度的可靠性。研究选取一艘超大型双岛式集装箱船为研究对象,结合 IACS UR S11A 规范,计算该船极限强度并进行校核与可靠性分析。研究结果表明,船舶在极端工况下,可能存在强度不足的风险,需根据 UR S11A 规范要求进行结构加强。创新性地将 UR S11A 规范要求和结构可靠性理论相结合,实现对超大型集装箱船极限强度的量化评估,研究结果对老旧船舶的检测维护建议以及航线优化具有一定的参考价值。

关键词:船舶工程;集装箱船;UR S11A;可靠性分析;极限强度
中图分类号:U662.3 **文献标志码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1000 - 4653.2026.04.015

Reliability analysis of ultimate strength for ultra-large container ships based on UR S11A

Hu Xiangzhong[1], *Liao Longbing*[2], *Lyu Yongkun*[1], *Wang Xiaofei*[1], *Lou Benqiang*[2*]
(1. COSCO SHIPPING Heavy Industry (Dalian) Co., Ltd., Dalian 116000, China; 2. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

Abstract: This study analyzes the ultimate strength of an ultra-large container ship in accordance with the requirements of the International Association of Classification Societies (IACS) to assess the reliability of its hull structural ultimate strength.. A twin-island ultra-large container vessel is selected as the research object. Based on IACS UR S11A the ultimate strength of the ship is calculated, validated, and subjected to reliability analysis. Results indicate that ship may face a risk of insufficient strength under extreme operating conditions, and structural reinforcement is therefore required in accordance with UR S11A. By innovatively integrating the requirements of UR S11A with structural reliability theory, this study realizes a quantitative assessment of the ultimate strength for ultra-large container ships. The findings provide reference value for inspection and maintenance recommendations for aging vessels, as well as for route optimization.

Key words: ship engineering; container ship; UR S11A; reliability analysis; ultimate strength

随着经济全球化的发展,超大型集装箱船装卸效率高、货物损失率低、方便快捷等特点使其在当代海上货物运输中的地位日益重要,未来集装箱船朝着更大装载量发展。

随着船舶尺寸不断达到新的高度,船舶固有频率与波浪遭遇频率更接近,对船体结构安全带来极大隐患,大型集装箱船的安全问题日益突出[1]。随着船舶能效设计指数(Energy Efficiency Design In-

收稿日期:2025-12-01
基金项目:工信部船舶总装建造数字化再造应用示范科研项目(KY24DL10)资助
第一作者:胡向忠(1975—),男,高级工程师,研究方向为船舶与海洋工程设计与建造,(E-mail)hu.xiangzhong@coscoshipping.com
* **通信作者**:娄本强(1982—),男,副教授,博士,研究方向为船舶与海洋结构振动分析,(E-mail)benqiang.lou@hotmail.com
引用格式:胡向忠,廖龙冰,吕永坤,等. 基于 UR S11A 规范的超大集装箱船极限强度可靠性研究[J]. 中国航海,2026,49(4):136 - 142.
Hu X Z, Liao L B, Lyu Y K, et al. Reliability analysis of ultimate strength for ultra-large container ships based on UR S11A[J]. Navigation of China, 2026, 49(4): 136 - 142. (in Chinese)

dex, EEDI)的推进,集装箱船降速已成为大势所趋。在这种情况下,超大型集装箱船开始采用更丰满的设计理念,这将导致船首和船尾的静态弯矩和货物载荷增加,船体强度问题更见突出。

2013 年,日本三菱重工长崎船厂建造的世界上第一艘超巴拿马型集装箱"MOL COMFORT"号在从新加坡前往吉达港的途中,突发船舶中部断裂继而沉没。事故报告显示,船舶在船体结构载荷计算中忽略了两种载荷的联合作用,船舶在船体结构载荷计算中忽略了两种载荷的联合作用,导致波浪载荷在中拱状态下超过了船体结构的极限承载能力、双层底结构屈曲破坏并延伸到舷侧。为防止类似事故再次发生,国际船级社协会(International Association of Classification Societies, IACS)新增有关集装箱船总纵强度的 UR-S11A 条款作为海上运输船舶结构新要求,有效保障集装箱船的安全性。

当前超大型集装箱船设计上大多采用双岛式布局,可以灵活布置生活区和驾驶台,在不影响驾驶台视线的情况下,有效降低生活区内的噪声污染,也不受影响生活区后方的甲板堆箱。双岛式布局还能有效提高抗扭刚性、降低中拱程度、降低空船质量[2]。

本文以一艘 22 000 TEU 双岛式集装箱船为例,采用 UR S11A 规定的载荷进行整个船体的极限强度进行可靠性分析。

1 UR S11 和 UR S11A 对比

UR S11 和 UR S11A 都是 IACS 制定的关于船舶总纵强度的要求。在 UR S11A 之前,UR S11 适用于 90 米以上无限航行的船舶的总纵强度校核(也包括集装箱船)。之后,参考了各主要船级社的主导思想和技术,专门针对集装箱船,更新了规范要求,引入包括波浪载荷、载荷组合、刚度强度、屈曲剪切、板厚基准等方面的标准 UR S11A。本节从二者的适用范围、计算厚度计算和波浪弯矩等方面进行对比区分。

1.1 适用范围

UR S11 和 UR S11A 各自适用范围如表 1。

1.2 计算厚度

在 UR S11 中,除校核屈曲强度外,其他强度校核都是基于结构的总厚度,即建造厚度。在 UR S11A 中规定必须采用净厚度法进行所有强度校核,需要在计算净厚度时建造厚度减去一定的腐蚀余量。以下是计算净厚度的公式[3]。

$$t_{\text{net}} = t_{\text{as_buid}} - t_{\text{val_}\alpha\text{id}} - \alpha t_{\text{c}} \tag{1}$$

表 1 适用范围对比

Tab. 1 Comparison of application scope

主尺度	UR S11	UR S11A
长度/m	90 ~ 500	$L \geqslant 100$ $B \geqslant 25$
船型	油船,散货船除 CSR	集装箱船
长宽比	>5	5 ~ 9
宽吃水比	<2.5	2 ~ 6
方形系数	>0.6	0.55 ~ 0.9

式(1)中:t_{net}表示净厚度,即建造厚度,$t_{\text{as_buid}}$表示自愿添加的体积余量,t_{c} 表示腐蚀余量,α 表示了腐蚀余量系数。

对于强度校核的不同类型,UR S11A 规定了不同的腐蚀余量系数,见表 2。

表 2 腐蚀余量系数

Tab. 2 Coefficient of corrosion margin

结构要求	分析类型	α
强度评估	截面特性	0.5
屈曲强度	截面特性(应力测定)	0.5
	屈曲强度	1.0
极限强度	截面特性	0.5
	屈曲/破坏能力	0.5

1.3 波浪弯矩

关于静水弯矩的可参照相应船舶的装载手册。对于波浪弯矩的计算 UR S11 和 UR S11A 有所不同,UR S11 中的具体计算公式[4]如下:

$$M_{\text{w-hog}} = +190MCLBC_{\text{b}} \times 10^{-3} \tag{2}$$

$$M_{\text{W-sag}} = -110MCLB(C_{\text{b}} + 0.7) \times 10^{-3} \tag{3}$$

式(2)和(3)中:M 代表分布系数,具体数值如图 1 所示;L 表示规范船长;B 表示船宽;C_{b} 表示方形系数;C 表示波浪系数,具体计算公式如下:

$$C = \begin{cases} 10.75 - \left(\dfrac{300 - L}{100}\right)^{\frac{3}{2}}, & 90\ \text{m} \leqslant L \leqslant 300\ \text{m} \\ 10.75, & 300\ \text{m} \leqslant L \leqslant 350\ \text{m} \\ 10.75 - \left(\dfrac{L - 350}{100}\right)^{\frac{3}{2}}, & 350\ \text{m} \leqslant L \leqslant 500\ \text{m} \end{cases} \tag{4}$$

UR S11 沿船长分布的中拱型与中垂型波浪型力矩一致(图 1);而 UR S11A 在此基础上作出一定的修正:分布曲线有中拱与中垂之分。而且针对大

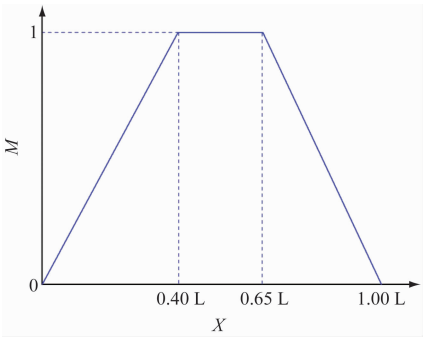


图 1 波浪弯矩分布系数(UR S11)

Fig. 1 Distribution factor of wave bending moment (UR S11)

型集装箱船的特点,考虑船首外飘的影响,在 UR S11A 中引入非线性修正系数,更新后的垂向波浪弯矩计算公式如下所示:

$$M_{w-hog} = +1.5fRL^3CC_w\left(\frac{B}{L}\right)^{0.8}F_{NL-hog} \quad (5)$$

$$M_{w-sag} = -1.5f_RL^3CC_w\left(\frac{B}{L}\right)^{0.8}F_{NL-sag} \quad (6)$$

式(5)和(6)中:f_R 表示与结构外轮廓有关的系数,一般取为 0.85;L 为规范船长;C 表示波浪系数;C_w 表示水线面系数;B 表示建造宽度;F_{NL-hog} 表示中拱状态非线性修正系数,$F_{NL-hog}=0.3\dfrac{C_b}{C_w}\sqrt{T}$ 且不得大于 1.1;F_{NL-sag} 表示中垂状态非线性修正系数,$F_{NL-sag}=4.5\dfrac{1+0.2f_{Bow}}{C_w\sqrt{C_b}L^{0.3}}$ 且不得小于 1.0,f_{BOW} 为船首外飘形状系数。

波浪系数计算公式如下所示:

$$C = 1-1.50\left(1-\sqrt{\frac{L}{L_{ref}}}\right)^{22} \quad (7)$$

$$C = 1-0.45\left(\sqrt{\frac{L}{L_{ref}}}-1\right)^{17} \quad (8)$$

式(7)和式(8)中:L_{ref} 指的是船舶的参考长度,由公式 $L_{ref}=315C_w^{-1.3}$ 计算得到。那么,垂向波浪弯矩沿船长的分布情况如图 2 所示。

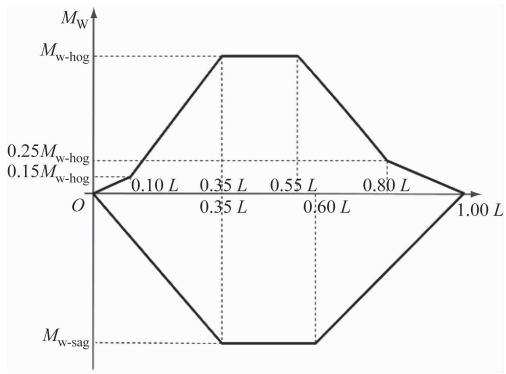


图 2 垂向波浪弯矩沿船长的分布情况(URS11A)

Fig. 2 Distribution factor of vertical wave bending moment (UR S11A)

2 极限强度数值计算

2.1 有限元分析模型

尽管计算机技术已取得长足发展,然而建立全船有限元模型以开展船体梁极限强度分析,仍属一项耗时费力的复杂工程。为此,实践中通常采用在模型两端纵向增加延长段并施加外部载荷的方法来应对[5]。

在基于非线性有限元法的结构极限强度分析中,网格尺寸的确定至关重要,需在离散误差与计算成本之间取得平衡。推荐采用迭代式网格细化流程:从粗网格开始试算,继而逐步加密,并以连续两次计算结果的相对误差小于 3% 作为网格收敛标准,据此确定最优网格尺寸。

确定网格类型是有限元建模过程中的关键考量。ABAQUS 中的 S4 单元(四节点减缩积分单元)适用于薄厚壳结构受力分析;S4R 单元能有效处理边角区域的大应变问题;S4R5 单元则仅限于小应变状态分析[6]。板单元统一采用 S4R 四节点壳单元进行划分。22 000 TEU 双岛式集装箱船的有限元分析模型,如图 3 所示。

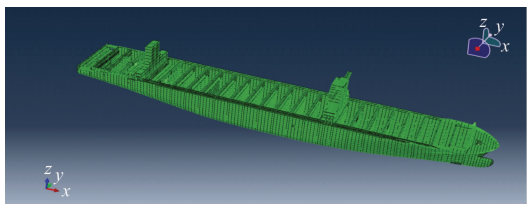


图 3 22 000 TEU 集装箱船有限元模型

Fig. 3 FEM model of 22 000 TEU container ship

根据规范要求,三维有限元模型范围至少包括货舱区 0.4L 及前后各一个舱长。因此,本文将沿船长方向选取船中“1/2 +1 +1/2 货舱”区域,横向取船宽、垂向取型深范围。该船型包含了横向水密舱壁和横向支撑舱壁,并且横向支撑舱壁应位于两舱长模型的中央位置[7]。

2.2 载荷与边界条件设置

本文将边界条件设置为两端简支,利用 MPC 将端面节点约束关联到型心的参考点,通过对主节点施加约束,控制整个模型的边界条件,如图 4 所示。

在模型的左端面,约束沿 x 轴、y 轴、z 轴的线位移和绕 x 轴、z 轴的转角;在右端面,除了不约束 x 轴的线位移,其余设置与左端面一致,如表 3 所示。

在本节中选择满载工况进行分析,把对应的集装箱船载荷以及静水压力,通过施加一对相反的转角 0.015 rad 将垂向弯矩,在 0—1 秒内均匀地加载在船体上。

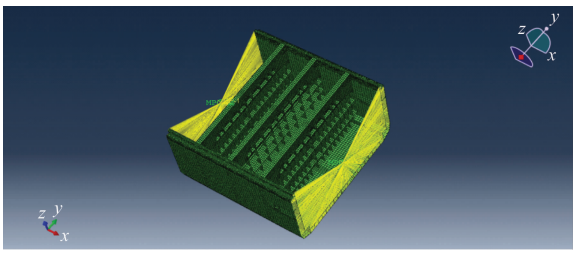


图 4 典型舱段 MPC 约束

Fig. 4 Typical MPC Constraints

表 3 边界条件

Tab. 3 Boundary conditions

边界	U1	U2	U3	UR1	UR2	UR3
左端	0	0	0	0	—	0
右端	—	0	0	0	—	0

进行分析时,采用准静态法,利用 Smooth 功能在 0—3 秒内平缓地把转角加载到模型上。使用 ABAQUS 中的 Smooth 功能加载一条光顺载荷曲线于结构上,加载过程如图 5 所示,能够尽可能避免结构上加载不均衡所导致的计算出现较大波动的情况,由于不需要进行迭代,因此可以很好地运用于船体的极限强度计算,不存在计算不收敛的情况。

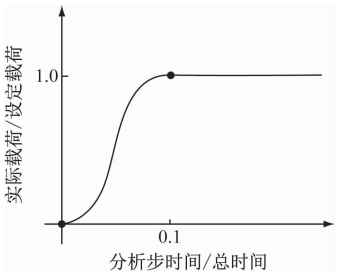


图 5 Smooth 加载过程

Fig. 5 The loading process of Smooth

2.3 材料参数

假设钢材本身存在缺陷,导致屈服极限、疲劳极限、强度极限均不确定,即使采用同型号钢材,其性能也存在一定差异。本文假设采用钢材屈服极限平均值和最小值两种情况计算船体梁的极限强度。

对于大型集装箱船,实船通常设计采用普通船体结构钢和高强度结构钢结合以满足强度和经济性等方面的需要;本文用于三舱段模型弹塑性分析,基于普通船体结构钢(A 级钢)的理想弹塑性材料进行研究,钢材的材料性能见表 4,屈服应力见表 5。

2.4 计算结果与分析

实船分析中对模型施加的位移与转角约束,以支持逐步崩溃分析。相关设定如下:分析步时间增量取 0.01,设置完成后提交作业进行计算,结果见图 6 和图 7。

表 4 材料性能

Tab. 4 Material properties

材料名称	普通船体结构钢
屈服强度/(N/mm^2)	235
杨氏模量/MPa	2.06×10^5
泊松比	0.3
密度/(kg/m^3)	7 850

表 5 屈服极限应力

Tab. 5 Yield limit stress

屈服极限平均值/MPa	屈服极限最小值/MPa	标准差/MPa	变异系数
269	204.44	21.52	0.08

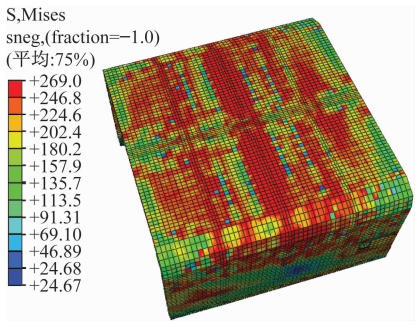


图 6 侧向载荷作用下船体梁破坏应力云图(平均屈服极限)

Fig. 6 Equivalent stress contour of hull girder failure under lateral loading (average yield strength)

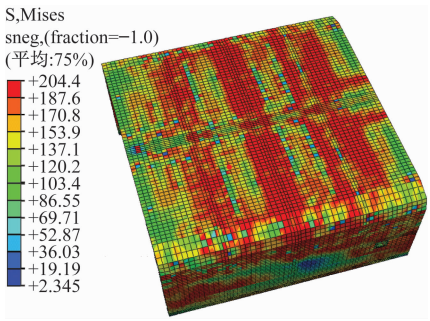


图 7 侧向载荷作用下船体梁破坏应力云图(屈服极限最小值)

Fig. 7 Equivalent stress contour of hull girder failure under lateral loading (minimum yield strength)

通过计算得到了平均屈服极限和最小屈服极限两种情况下,作用在船体梁上的垂向弯矩随转角的变化曲线,如图 8 和图 9 所示。

图中显示了作用在船体梁上的垂向弯矩变化的过程,其中虚线与曲线的交点表示船体强度达到了最大值,即船体梁的极限强度,此后随着转角的变大,船体梁出现破坏,极限强度开始下降。船体梁极限强度明显受到屈服极限的影响,当考虑屈服极限最小值时,船体梁的极限强度有 13% 左右的下降。

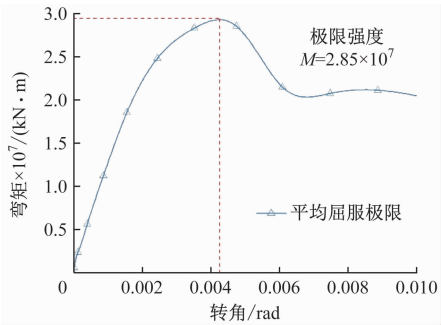


图 8 平均屈服极限的船体梁极限强度

Fig. 8 Hull girder ultimate strength at average yield stress

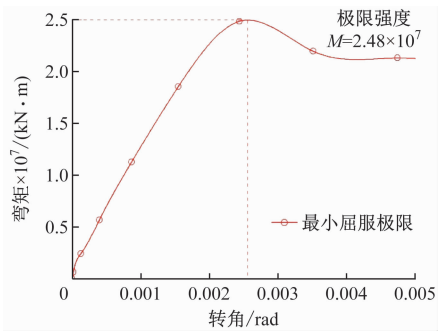


图 9 最小屈服极限的船体梁极限强度

Fig. 9 Hull girder ultimate strength at minimum yield limit

以上分析并未考虑建造时焊接残余应力影响极限强度。总的来说,焊接残余应力的存在会降低船体结构的强度、刚度和稳定性。在船底纵骨焊接残余应力作用的考虑下,将造成约 2% 的极限强度下降[8]。对极限强度均值和最小值分析见表 6。

表 6 船体梁极限强度

Tab. 6 Hull girder ultimate strength 单位:kN·m

极限强度	数值
对应平均屈服极限的船体梁极限强度	2.85×10^7
对应最小屈服极限的船体梁极限强度	2.48×10^7
船体梁极限强度下限(最小屈服极限的极限强度乘以焊接残余应力的影响系数 0.98)	2.43×10^7

3 可靠性分析

3.1 垂向弯矩

垂向弯矩有静水弯矩和波浪弯矩之分,在选用静水弯矩时应参考装载手册上对应的工作情况。当 22 000 TEU 集装箱船满载航行时,沿船长方向的静水弯矩分布如图 10 所示。

三舱段模型分析时选取距离基点 167.70 m 至 223.95 m 之间的一段,该段船体横梁受到的静水弯矩为 1.15×10^7 kN·m。对于 22 000 TEU 集装箱船,其主尺度见表 7,根据 URS11A 中拱波浪弯矩计算公式见表 8。

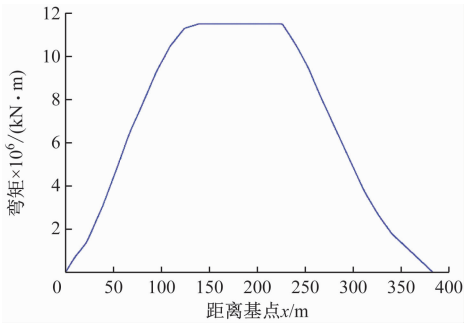


图 10 静水弯矩沿船长的分布

Fig. 10 Distribution of still water bending moment along the ship length

表 7 22 000 TEU 集装箱船主尺度

Tab. 7 Principal dimensions of a 22 000 TEU container ship

主尺度参数	数值
规范船长 L/m	383
船宽 B/m	58.6
型深 D/m	30.5
结构吃水 T/m	16.0
方形系数 C_b	0.715
水线面系数 C_w	0.850 9

3.2 可靠性分析

静水弯矩作为船体外部载荷主要载荷,其随机性取决于货物装载状况,并受燃油消耗和压载水调整的影响。该载荷通常被建模为正态分布[9]。本研究依据装载手册,取对应工况的最大静水弯矩作为均值,并设定中拱航行时的变异系数为 0,即将其视为定值 1.15×10^7 kN·m。

表 8 波浪弯矩状态测算表

Tab. 8 Calculation of wave bending moment in hogging condition

计算项目	数值
参考长度 L_{ref}/m	388.569
波浪参数 C	0.999 971
非线性修正系数 $F_{NL\text{-}hog}$	1.008 3
波浪弯矩 $M_{w\text{-}hog}$/(kN·m)	1.37×10^7

波浪弯矩是对船体结构影响显著的载荷之一,其特性源于海洋波浪的复杂多变性。实际海况中的波浪可视为由多个不同频率、幅度和相位的规则波叠加而成的非规则波,具有显著的不确定性。大量海浪观测资料表明,短期海浪记录可被视作一种零

均值的平稳正态随机过程,其波峰幅值符合瑞利分布。在波浪弯矩的长期极值分布方面,其极值应服从对数正态分布[10],亦有文献主张采用指数分布进行描述。为简化计算过程,本文假定波浪弯矩极值服从正态分布,分布参数见表 9,概率分布如图 11 所示。

表 9 波浪弯矩分布参数

Tab. 9 Wave bending moment distribution parameters

均值/(kN·m)	标准差/(kN·m)	变异系数
1.37×10^7	9.13×10^5	0.06

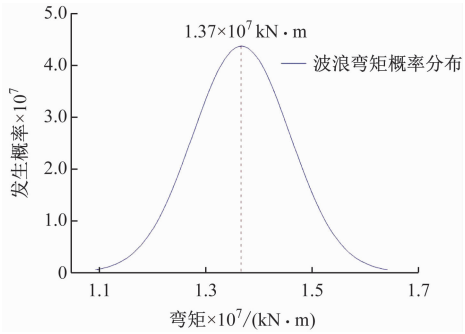


图 11 波浪弯矩的概率分布曲线

Fig. 11 Probability distribution of wave bending moments

船体梁的极限强度受钢材材质性能、船体底板初始变形及焊接残余应力等多种不确定性因素的影响[11]。同时,船舶建造板厚及运营过程中的腐蚀损耗对船体梁极限强度的影响亦呈现显著的随机特性[12]。在当前可靠性计算中,极限强度一般处理为正态随机变量。极限强度统计特性见表 10,对应的概率分布曲线如图 12 所示。

表 10 极限强度分布系数

Tab. 10 Distribution parameters of ultimate strength

均值/(kN·m)	标准差/(kN·m)	变异系数
2.85×10^7	1.24×10^6	0.04

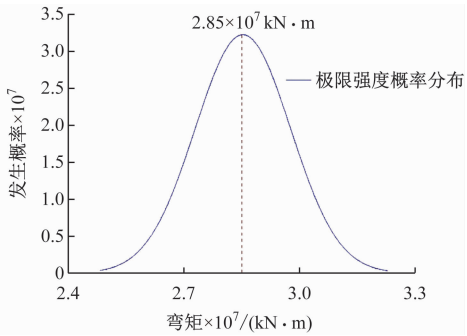


图 12 极限强度的概率分布曲线

Fig. 12 Probability distribution of ultimate strength

在结构可靠性分析中,将极限强度 R 与垂直弯矩 S 均视为具有不确定性的随机变量。故定义极限状态函数如下:

$$G(x) = R - S \tag{9}$$

当 $G(x)\leqslant 0$,即 $R-S\leqslant 0$ 时结构失效;反之安全。

这里失效是广义上的概念,既可以是结构发生实际破坏或未达到预期设计目的。一般来说,结构失效的可能性总是存在的,但只要失效概率足够小,就可认为结构是安全可靠的。

对于极限强度与垂直弯矩的分布关系,实线(左侧)曲线预示着垂向弯矩出现的概率,虚线(右侧)曲线预示着极限强度出现的概率,如图 13 所示。可知,在考虑不确定因素时,船体梁承受的垂向弯矩存在超过极限强度的可能,即存在实线与虚线的重叠部分,即如下积分所示:

$$P_f = P(G(x)\leqslant 0) = \int_0^{\infty} f_s(s)\int_0^{s} f_R(r)\,\mathrm{d}r\mathrm{d}s \tag{10}$$

式(10)中:$f_R(r)$ 与 $f_s(s)$ 分别为极限强度与垂直弯矩的概率密度函数。

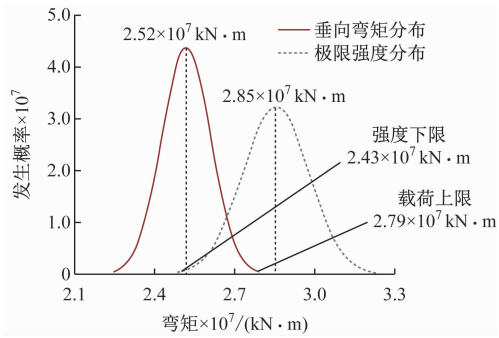


图 13 极限强度与垂直弯矩分布关系

Fig. 13 Relationship between ultimate strength and vertical bending moment distribution

重叠区的面积表明船体梁可能发生断裂的危险,两条曲线峰值间的间隙代表了船体结构对抗载荷的裕度。

$$M = \mu_R - \mu_S \tag{11}$$

其标准化格式 $\beta = \dfrac{\mu_R-\mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2+\sigma_S^2}}$ 近似定义为可靠性指标。其中,μ_R 和 σ_R 为极限强度的均值和标准差,μ_S 和 σ_S 为垂直弯矩的均值与标准差。计算可得 $\beta<1.5$,结构存在潜在的破坏风险。

4 结 论

本文对一艘 22 000 TEU 双岛式集装箱船开展了极限强度可靠性分析。基于 IACS UR S11A 规范,采用有限元分析软件,运用概率统计方法计算了作用在船体上的载荷,并评估了船体结构发生断裂的可能性。通过分析,得出如下结论:

1）IACS UR S11A 在 UR S11 基础上进行了系统性修订，从多方面提高了大型集装箱船纵向强度的评估标准。新规范在波浪弯矩计算中引入非线性修正系数，能更为真实地模拟船体在实际海况中的波浪载荷响应。同时，规范还提高了材料强度和板厚要求，并增强了有限元直接计算法的适用性。

2）在将静水弯矩视为常量、波浪弯矩与极限强度服从正态分布的假设条件下，对该船的概率密度曲线分析表明，在特定波浪载荷组合情况下，船体结构存在断裂或屈服失效的可能性，揭示出潜在的破坏风险，也表明传统安全系数法在设计上存在局限性。

3）基于 UR S11A 规范的有限元分析结果表明，该船体结构在设计波浪弯矩作用下存在局部强度不足的问题。建议对关键受力区域进行结构加强或材料升级，以确保在极端波浪载荷下仍具备足够的安全储备。

4）针对老旧或服役年限较长的大型集装箱船，建议依据 UR S11A 中关于板厚和材料强度的最新要求，定期开展结构厚度检测与疲劳损伤评估。对于检测中发现的板厚不足或屈服强度不满足要求的部位，应及时进行修理或换板。在运营管理方面，可考虑优化航线规划与航速控制，以避开高海况区域，从而降低结构载荷。此外，应对船底及应力集中区域进行局部结构加强或布局优化，以提升全船的极限强度和可靠性。上述分析与措施可为超大型集装箱船的安全运营提供参考。

参 考 文 献

[1] 徐敏，汤明文. UR S11A 和 URS34 对超大型集装箱船结构强度直接计算的影响[J]. 船舶工程，2017，39(10)：5-7.
Xu M，Tang M W. The influence of UR S11A and URS34 on the direct calculation of structural strength of ultra large container ships[J]. Ship Engineering，2017，39(10)：5-7.（in Chinese）

[2] 吴剑国，伍友军，李钧晖，等. 船体梁约束扭转极限承载力计算的简化逐步迭代法[J]. 中国造船，2022，63(1)：188-197.
Wu J G，Wu Y J，Li J H，et al. Simplified step-by-step iteration method for calculating the ultimate bearing capacity of constrained torsion of ship hull girders[J]. Shipbuilding of China，2022，63(1)：188-197.（in Chinese）

[3] IACS：2024 Requirements concerning strength of ships[S].

[4] IACS UR-S11A：2023 Longitudinal strength standard for container ships[S].

[5] 杨源，唐文勇，陆明锋，等. 适用于超大型集装箱船的外飘砰击规范要求对比[J]. 船海工程，2017，46(4)：34-40.
Yang Y，Tang W Y，Lu M F，et al. Comparison of outer heave impact specifications applicable to super large container ships[J]. Ship and Ocean Engineering，2017，46(4)：34-40.（in Chinese）

[6] 徐敏，汤明文，王旌生，等. 支线集装箱船整船强度和疲劳有限元分析[J]. 船海工程，2021，50(1)：42-45.
Xu M，Tang M W，Wang J S，et al. Finite element analysis of ship strength and fatigue for branch container ships[J]. Ship and Ocean Engineering，2021，50(1)：42-45.（in Chinese）

[7] GD 05-2005 集装箱船结构强度直接计算指南[S].
GD 05-2005 Direct calculation guide for structural strength of container ships[S].（in Chinese）

[8] 王铭彦，陈震. 焊接变形和应力对甲板板架极限强度的影响[J]. 舰船科学技术，2019，41(21)：59-63.
Wang M Y，Chen Z. The influence of welding deformation and stress on the ultimate strength of deck frame[J]. Ship Science and Technology，2019，41(21)：59-63.（in Chinese）

[9] 袁梦，蔡诗剑，王德禹. 三向载荷联合作用下的超大型集装箱船极限强度可靠性研究[J]. 海洋工程，2020，38(6)：33-41.
Yuan M，Cai S J，Wang D Y. Research on the reliability of ultimate strength of ultra-large container ships under the combined action of three-dimensional loads[J]. Ocean Engineering，2020，38(6)：33-41.（in Chinese）

[10] 肖声浩，张会霞. 超大型集装箱船体结构极限强度研究方法[J]. 船舶标准化工程师，2024，57(1)：65-67.
Xiao S H，Zhang H X. Research methods on the ultimate strength of ultra-large container ship hull structure[J]. Ship Standardization Engineer，2024，57(1)：65-67.（in Chinese）

[11] 郭磊. UR-S11A 对集装箱船极限强度的影响[J]. 船舶设计通讯，2021(增刊1)：50-57.
Guo L. The impact of UR-S11A on the ultimate strength of container ships[J]. Marine Design Newsletter，2021(Suppl.1)：50-57.（in Chinese）

[12] 刘维勤，屈毫拓，黄宇，等. 集装箱船在波浪下的结构动态崩溃数值仿真研究[J]. 中国航海，2022，45(1)：43-49.
Liu W Q，Qu H T，Huang Y，et al. Numerical simulation study on structural dynamic collapse of container ships under waves[J]. China Maritime Affairs，2022，45(1)：43-49.（in Chinese）