

双体趸船波浪载荷与结构强度分析*

张 波¹, 赵 陈¹, 李永顺², 陈倩清¹

(1. 浙江国际海运职业技术学院, 浙江 舟山 316021; 2. 舟山海驰船舶技术有限公司, 浙江 舟山 316100)

摘 要: 双体船船体结构形式较为特殊, 导致其连接桥结构承受极大的弯矩和扭矩, 准确预报双体船所受波浪载荷并进行强度评估是双体船研究的热点。以双体趸船为研究对象, 建立了水动力模型和质量模型, 对 2 种典型装载工况下的最大总纵波浪弯矩, 总横波浪弯矩和总横波浪扭矩进行了长期预报。建立了全船有限元模型, 计算了 12 种载荷组合工况下双体船连接桥屈服强度, 采用简化公式法计算了屈曲强度, 并提出了增大屈曲安全因子的方法。计算结果表明, 本船在波浪作用下的结构强度满足规范要求。本船的总纵强度相对较弱, 这与本船瘦长的结构形式有关。文中的计算方法对超尺度比双体船波浪载荷预报和结构性能评估有较大的参考价值。

关键词: 双体船; 波浪载荷; 屈服强度; 屈曲

中图分类号: U674

文献标识码: A

文章编号: 1006-7973 (2023) 01-0001-03

引言

双体船是一种新型船舶, 其横稳性、耐波性相比传统单体船都有显著提升。但是, 双体船船体由左右两个片体组成, 横向跨度较大, 这也导致双体船受到的载荷比较复杂。由于两个片体在波浪中运动的非一致性将导致连接桥承受极大的载荷, 其横向波浪弯矩和剪力以及横向波浪扭矩将达到相当大的值, 这对连接桥结构的抗弯和抗扭能力来说是一种严峻的考验。

波浪载荷预报和全船结构强度分析是双体船研究的热点。目前, 主要采用势流理论预报波浪载荷, 采用有限元计算方法分析结构强度。上海交通大学戴佳莉对超大型多功能海洋工程双体船进行了运动响应预报。对波浪载荷各分量沿船长和船宽方向的分布进行了分析^[1]。中国舰船研究中心闫小顺基于设计波法对双体铝合金船进行强度校核, 发现开口角隅处存在应力集中现象^[2]。上海交通大学海洋工程国家重点实验室周清华针对 1,000t 级单舱双体船重吊船的弯扭强度问题, 运用水动力分析和全船有限元分析方法, 对全船结构强度进行计算^[3]。上海海事大学商船学院白鑫利用水动力软件 HydroStar 对一艘半潜船进行了预报, 并与 WALCS 软件预报值、规范值进行了比较, 表明利用直接计算得出的计算结论更为可靠^[4]。上海船舶运输研究所张小雅等基于三维线性水动力理论波浪载荷计算软件对 1,600t 全回转浮吊船进行了波浪载荷计算, 得到不通工况下载荷分布的特点, 结果表明直接算法能够较为准确地预报波浪载荷及其分布^[5]。上海交通大学海洋工程国家重点实验室张倩倩利用有限元分析软件 SESAM 计算了 FLNG (深海天然气开发浮式平台) 波浪载荷及全船弯扭强度。

文中以一艘双体趸船作为研究对象, 该船船长 62m, 型宽 8m, 型深 2.3m, 连接桥宽度 2.6m, 片体宽度 2.7m。采用直接计算的方法确定本船的波浪载荷。建立水动力模型模拟船体外型, 建立等效质量模型模拟船体实际装载工况。针对双体船载荷分布点, 对其总纵弯矩、总横弯矩和总横扭矩进行预报, 并进一步分析双体船抗弯和抗扭力学性能。强度分析过程中, 采用力矩等效原则施加弯矩和扭矩。

一、波浪载荷直接计算

本船为非常规尺度船舶, 载荷由直接计算方法得到。波浪载荷直接计算采用的波浪谱是 P-M 双参数谱, 波浪资料是北大西洋波浪浪散布图, 波浪载荷设计计算值取为 10^{-8} 概率水平 (代表设计寿命为 20 年)。计算满载和压载 2 种装载工况下总纵弯矩、总横弯矩和总横扭矩。

计算所取浪向角共 13 个, 包括 0° (顶浪)、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° 、 105° 、 120° 、 135° 、 150° 、 165° 、 180° (随浪); 所取的波浪频率 (波长) 数 29 个, 波浪频率范围按波长与船长比 (λ/L) 范围的 0.2~3 选取, 步长取 0.1。

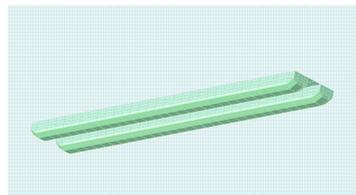


图 1 双体趸船水动力模型

计算总纵弯矩, 沿船长方向均匀分布 11 个横剖面。计算总横弯矩和总横扭矩时, 沿船宽方向分布 1 个纵剖面, 计算剖面的位置为中纵剖面。

收稿日期: 2022-05-09

作者简介: 张 波 (1988-), 男, 硕士, 讲师, 浙江国际海运职业技术学院, 主要研究方向为船舶与海洋结构物水动力分析与结构强度评估。

基金项目: 浙江省教育厅一般项目“双体船波浪载荷与抗弯扭性能研究” (编号 Y202147894); 舟山市科技计划资助项目“自升式海洋牧场综合平台研发与设计” (编号 2019C31062)。

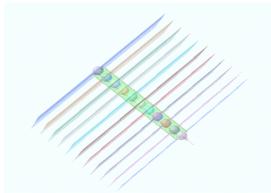


图 2 载荷计算剖面图

在规则波下计算各主要剖面的波浪载荷, 结合波浪谱和波浪散布图, 对各剖面载荷进行长期预报^[6]。取出各装载工况下最大总纵波浪弯矩, 总横弯矩和总横扭矩, 如表 1 所示。其中, LC1 为满载工况, LC2 为压载工况。

表 1 波浪载荷最大值

工况	最大总纵弯矩 (N.m)	最大总横弯矩 (N.m)	最大总横扭矩 (N.m)
LC1 (满载)	3.688E+07	9.686E+05	2.085E+07
LC2 (压载)	3.660E+07	8.457E+05	2.099E+07

二、强度直接计算

本船甲板和船底采用纵骨架式结构, 连接桥部位采用横骨架式结构。本船的连接桥采用敞开式, 连接桥下设置强横梁, 在艏部、舦部和艉部位置抗扭箱结构增强结构抗扭转强度。船体有限元模型如图 3 所示, 包括整个船体结构, 主要有船体外板、纵横舱壁、甲板结构、连接桥、片体等构件。

对连接桥连接前、后端部与片体连接的内角处进行网格细化, 对应力集中部位进行网格细化, 网格细化区域和粗网格区域应平稳过渡。



图 3 全船有限元计算模型

1. 边界条件

双体船整船有限元边界条件施加位置如图 4 所示。A 点约束 x, y, z 三个方向的线位移, B 点约束 y 和 z 方向的线位移, C 点约束 z 方向的线位移, C' 点约束 y 方向的线位移。A, B, C' 组合用于扭转工况^[7]。

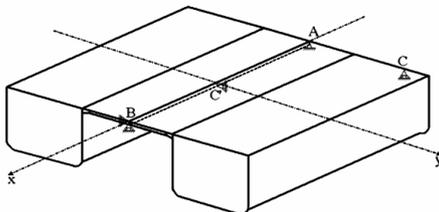


图 4 边界条件示意图

2. 工况

双体船连接桥结构分析中, 根据《钢质海船入级规范》要求计算 12 种载荷组合工况。

3. 载荷施加

(1) 总横弯矩

连接桥的总横弯矩 M_{bx} 通过沿片体底部系列节点上施

加横向对开力等效, 如图 5 所示。横向对开力 f_y 按下式计算:

$$f_y = \frac{M_{bx}}{nz} \quad (1)$$

式中: z 为横向对开力施加点至连接桥中纵剖面中和轴的垂向距离; n 为单个片体施加横向对开力的节点总数。



图 5 总横弯矩施加图

(2) 总横扭矩

总横扭矩 M_{ty} 可通过反对称分布在片体中纵剖面内的垂向等效集中力施加, 每个集中力等于分布力 p_x 乘以该集中力加载区间的长度如图 6 所示。等效的垂向分布载荷 p_x 由下式计算:

$$p_x = \frac{4M_{ty}}{L^2} \quad (2)$$

式中: L 为双体船船长; M_{ty} 为连接桥扭矩。

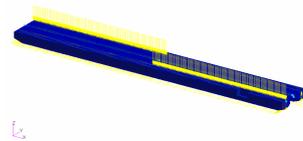


图 6 总横扭矩施加图

(3) 总纵弯矩

双体船的总纵弯矩 M_{by} 为静水弯矩与波浪弯矩的叠加值。可通过在计算模型上施加沿船长分布的等效垂向分布力 $q(x)$ 或与之等效的一系列集中力的方式进行。载荷应施加于片体纵向主要构件上。当使用系列集中力时, 每个集中力应等于分布力乘以该集中力加载区间的长度。 $q(x)$ 按下式计算:

$$q(x) = q_0 \left(\sin \frac{\pi x}{L} - 0.637 \right) \quad (3)$$

4. 屈服强度计算结果

对 12 种工况进行计算, 结果表明本船屈服强度满足规范要求。规范规定板单元的许用相当应力为 200MPa, 许用剪应力为 90MPa。应力云图如图 7 所示, 应力结果汇总表 2 所示。

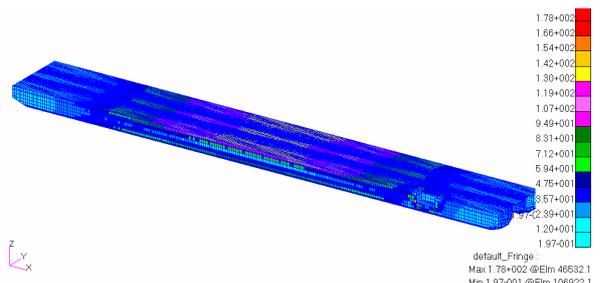


图 7 纵向板的相当应力 (LC8)

表 2 应力分析结果汇总表

工况	甲板、舷侧板、船底板、甲板纵桁、船底纵桁		实肋板、横舱壁板、强横梁、肘板	
	相当应力 (MPa)	剪应力 (MPa)	相当应力 (MPa)	剪应力 (MPa)
LC1	33.7	17.7	34.7	16.3
LC2	33.7	17.7	34.7	18.5
LC3	44.5	23.3	47.6	24.8
LC4	45	23.6	49.5	25.1
LC5	43.6	22.8	52.1	26.6
LC6	44.3	23.2	5.44	27.7
LC7	155	79.5	105	59.2
LC8	178	88.4	120	67.8
LC9	126	64.5	93.5	52.9
LC10	143	73.5	86.6	48.9
LC11	95.6	49	75.8	42.9
LC12	108	55.5	59.3	33.5

经计算发现船底纵桁位于船艏位置附近为应力集中区域，连接桥横梁与横舱壁连接处为应力集中区域，如图 7 所示。这主要是因为船底纵桁是抵抗总纵弯矩的重要构件，连接桥横梁是抵抗总横弯矩和总横扭矩的重要构件。在 LC8 中垂工况时，最大合成应力值达 178MPa，最大剪应力为 88.4MPa，位置在船底纵桁位于船艏附近处。说明相对总横弯曲和和总横扭转强度来说，本船总纵弯曲强度相对较弱，这与本船瘦长的船体结构形式有关。

三、屈曲强度计算

采用简化公式法进行板格屈曲安全因子计算，计算过程中对不同位置的板减薄相应的厚度。露天甲板下 1.5m 内，甲板和外板的标准减薄厚度为 1mm，内壳板、纵舱壁和内部结构标准减薄厚度为 2mm。其它部位板的减薄厚度为 1mm。

短边受压板格弹性临界屈曲应力 σ_{xcr_e} 的计算公式为：

$$\sigma_{xcr_e} = k_x C_1 \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{s}\right)^2 \quad (4)$$

式中： k_x 为短边受压和弯曲屈曲系数； C_1 为边界约束系数； t 为板格厚度； s 为板格的短边长度，取扶强材间距； E 为材料的弹性模量； ν 为材料泊松比，对钢材来说， $\nu=0.3$ ；

双向压缩+剪切状态下屈曲安全因子的计算公式为：

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{(1+k_1^2+k_2^2)}} \frac{\sigma_{xcr}}{\sigma_x} \quad (5)$$

其中： $k_1 = \frac{\sigma_y / \sigma_{xcr}}{\sigma_x / \sigma_{xcr}}$ ， $k_2 = \frac{\tau_{xy} / \tau_{cr}}{\sigma_x / \sigma_{xcr}}$ ， σ_x ， σ_y 为板格边

中面应力的平均值， τ_{xy} 为平均剪应力。

由公式 4 可知，短边受压板格弹性屈曲安全因子和板厚、短边边长度有关。可以通过增大板厚，减小短边长度的方法提高临界屈曲应力，进而增大短边受压状态下屈曲安全因子。选择最危险工况进行计算，得出板格屈曲安全因子如下表 3 所示。

表 3 屈曲安全因子

工况 (位置)	短边压缩+剪		长边压缩+剪		双向压缩	双向压缩+剪	
	切	切	切	切		切	切
甲板	1.17	1.68	1.33	1.68	LC8 (甲板靠船中部板格位置)		
连接桥	1.71	1.13	1.20	1.13	LC8 (连接桥靠船中部板格位置)		
外底板	1.14	1.61	1.34	1.61	LC7 (船底板在船中部板格位置)		

由表 3 可知本船最小屈曲安全因子为 1.13，位于连接桥靠船中部位置板格处，工况为 LC8 中垂工况，大于规范规定的最小屈曲安全因子要求，所以本船屈曲满足规范要求。

四、结论

文中对双体趸船进行了波浪载荷计算，并进一步计算了船体在总纵弯矩、总横弯矩和总横扭矩作用下的屈服和屈曲强度。计算结果表明：

(1) 采用直接计算方法可以得到超尺度比船舶的波浪载荷值。直接计算方法考虑了两个片体之间的水动力相互作用，比规范公式计算更为准确。

(2) 本船总纵、总横和扭转强度满足规范要求。本船的总纵强度相比总横和扭转强度而言相对较弱，这与本双体趸船瘦长的结构形式有关。

(3) 本船屈曲强度校核最危险的部位在连接桥，应予以关注。设计过程中，可通过增加受压板的厚度、增加加强筋数量来增大屈曲安全因子使其满足规范要求。

所以，本双体趸船屈服和屈曲强度能够满足规范要求。文中的计算方法能够为双体船的设计研发提供参考。

参考文献

[1] 戴佳莉, 陈新权, 杨启. 超大型双体船运动响应与波浪载荷研究[J]. 舰船科学技术, 2020, 42 (9): 30-35.
 [2] 闫小顺, 董威, 胡要武等. 含大开口的槽道型铝合金船结构强度直接计算[J]. 舰船科学技术, 2019, 41 (5): 44-48.
 [3] 周清华, 杨启. 单舱大开口重吊船弯扭强度有限元分析[J]. 造船技术, 2010, (2): 11-15.
 [4] 白鑫, 张宝吉, 李棱等. 半潜船波浪载荷长期预报方法研究与分析[J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2016, 40 (1): 190-194.
 [5] 张小雅, 金允龙, 姜河蓉等. 起重船波浪载荷直接计算与规范计算比较研究[J]. 中国航海, 2011, 34 (4): 71-75.
 [6] 陈超核, 钟伟芳. 集装箱船结构设计波浪载荷计算[J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2008, 36 (10): 110-113.
 [7] 中国船级社. 钢质海船入级规范[S]. 北京: 中国船级社, 2021.