

基于 SESAM 的船体波浪载荷与结构强度直接计算方法研究

马英华¹, 朱雨生², 曹俊伟³

(1. 海装沈阳局驻大连地区某军事代表室, 辽宁 大连 116000; 2. 中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471000; 3. 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064)

摘 要: 随着海上任务的多样化, 船体结构所受载荷变得复杂多样。本文以某船为研究对象, 基于三维线性势流理论建立水动力模型, 运用等效设计波方法对其在典型工况作业下主船体和基座局部结构强度进行了计算, 并按照相关规范中规定的强度标准对主要构件进行了强度评估。结果表明, 基于 SESAM 的船体波浪载荷与结构强度直接计算方法适用载荷复杂的船体强度计算。

关键词: 波浪载荷直接计算; 有限元分析; 船体强度

中图分类号: TV698 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 08—0059—04

随着海上作业方式的多样化, 特种船的综合使命功能多样。不同的作业功能所遭受的波浪载荷差异较大。而不同的波浪载荷作用下船体结构强度有所不同。船体结构强度评估对船舶安全至关重要, 然而现有规范主要针对常规船型, 对于主尺度超出规范规定的适用范围, 在强度计算时, 不能再使用规范波浪载荷, 需要寻找适用的波浪载荷和结构强度计算方法。

关于船体结构强度计算方法研究的学者较多。其中, 许璠璠等人^[1]对典型工况下起重船船段和起重基座的有限元模型进行了强度分析, 提出了一些关于起重船结构设计方面的合理建议。王国学等人^[2]对 SL151 起重船总纵强度进行了计算, 给出了新旧船体结合附近结构优化方案。安改宁^[3]基于等效设计波法对大型起重船进行有限元分析, 提出了全船直接计算方法。赵尚辉^[4]等人以整船有限元计算结果为边界, 对救生船中央月池开口部位的应力集中问题进行分析, 与光弹性试验结果进行比较, 结果较为吻合。邛帅^[5]运用 MOSES 软件建立起重船有限元模型, 结合三维势流理论, 研究了起重船对南海海况的适用性问题。马亮等人^[6]结合 CCS 相关规范对起重船上旋转吊机对其强度和屈曲进行了校核。

从上述学者中的研究中可以发现, 目前针对某特种船结构强度计算时, 波浪载荷主要采用规范中经验公式, 对超规范设计船舶的波浪载荷研究较少。对于超规范设计的工作船, 其波浪载荷需要采用水动力软件开展波浪载荷直接计算, 之后才能开展船体结构强度校核。本文基于三维线性势流理论, 采用 DNV 的 SESAM 软件建立水动力模型, 运用等效设计波方法对工作船船体结构强

度进行了有限元分析, 并结合 CCS 规范^[7]对船体结构强度进行了校核。

1 主尺度

某船的主船体为单甲板、双底的纵骨架式结构, 主尺度见表 1。

表 1 船舶主尺度 (单位: m)

总长 L	两柱间长 L_{pp}	型宽 B	型深 D	设计吃水 d_w	结构吃水 d	肋距 s	航区
101.00	95.60	28.80	8.00	4.50	4.20	0.65/0.60	近海

主尺度比值: $L/B=2.481<5$, $B/D=5.975>2.5$, 超出规范主尺度要求, 波浪载荷和船体强度均应采用直接计算。

2 波浪载荷直接计算

2.1 水动力模型

本文所使用的波浪载直接计算方法基于三维线性势流理论, 采用 DNV 的 SESAM 软件。波浪谱为 P-M 双参数谱, 波浪资料采用 IACS 推荐波浪长期统计资料, 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)。坐标系统采用右手坐标系, 原点位于 Fr0 船底中线处, 在 X 轴向船首为正方向, Y 轴向左舷为正方向, Z 轴向上为正方向, Panel 模型见图 1。

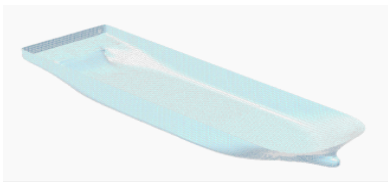


图 1 Panel 模型

2.2 波浪浪向和频率

计算共选取了 13 个浪向角：0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°、105°、120°、135°、150°、165°、180°，每隔 30° 一个浪向角。以 0.1 作为频率的间隔，范围从 0.1 到 3.0，共 30 个频率。同时在长期预报的过程中，认为这 13 个浪向角作用在船体上的概率上相等的，即每个浪向角的概率为 1/13=0.0769。选取距离尾垂线 1/4L、1/2L、3/4L 处的三个剖面计算起波浪直接载荷，横剖面的设置如图 2。

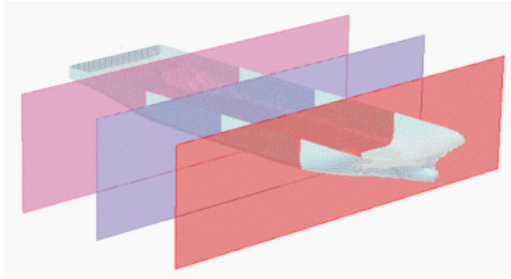


图 2 横剖面分布图

2.3 运动响应结果

根据《钢质海船入级规范》（2021 年版）对某新型工作船的总纵强度校核的规定，计算工况包括调迁和起重工况，工况 1：满载甲板货出港，工况 2：压载到港，工况 3：98% 燃料及备品作业 68°（500t），工况 4：98% 燃料及备品作业 68°（500t，吊机朝艏）。船体外壳上的水动力以及各种在单位规则波作用下的剪力、弯矩、扭矩等都是船体运动和载荷的传递函数。选取横截面 2 进行船舳垂直弯矩传递函数的分析，如图 3 所示。计算出主要载荷控制参数的传递函数之后，将传递函数与实际的波浪环境参数相结合即为船体主要载荷参数的长期预报值。对典型装载工况下控制波的波幅、波长、浪向等参数进行计算，得到设计波参数如表 2 所示。设计波方程如下：

$$y = h \cdot \cos \left[\zeta \left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{\alpha}{180} \right) \right] \tag{1}$$

$$P = \rho g (d + \zeta_A \cos(2\pi x / \lambda / 1000) - z / 1000) / 1000 \tag{2}$$

式中：h 为波幅，m；d 为吃水，m； ζ_A 为半波高，m； λ 为波长，m； α 为浪向角；P 为单元压力，MPa。

表 2 设计波参数

装载工况	吃水 d (m)	波幅 h (m)	半波高 ζ_A (m)	波长 λ (m)	浪向角 α
工况 1	4.177	9.18	4.59	125.73	0°
工况 2	3.275	7.97	3.99	96.26	0°
工况 3	3.728	7.94	3.97	96.26	180°
工况 4	3.210	6.61	3.31	96.26	180°

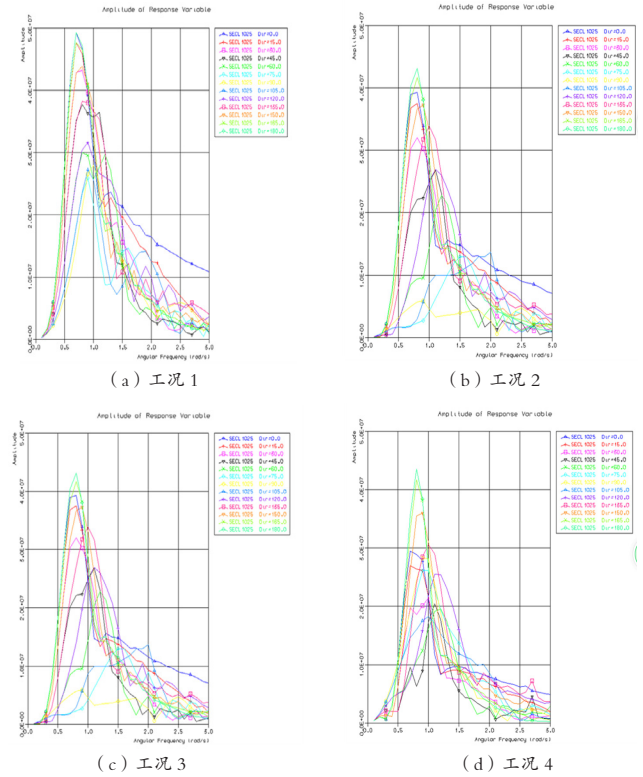


图 3 横截面 2 垂直弯矩传递函数

3 有限元强度分析

3.1 计算模型

依据《钢质海船入级规范》（2021 年版）第 1 章第 5 节“结构强度直接计算”的有关规定，运用 PATRAN 对整船进行有限元建模，包括强力甲板及以下整个船长、船宽范围内的船体结构。有限元模型如图 4 所示。船体结构采用 Q235 和 AH36 两种钢材，具体材料布置见表 3。

表 3 材料布置及参数

钢材型号	材料在船舶中布置	弹性模量 E (MPa)	泊松比 ν	密度 ρ (t/mm ³)
Q235	内外底板、舷侧外板、横舱壁、纵舱壁、双层底肋板、肋骨、起重基座	2.06×10^5	0.3	7.85×10^{-9}
AH36	主甲板、舷侧外板、甲板纵桁、横舱壁、纵舱壁	2.06×10^5	0.3	7.85×10^{-9}

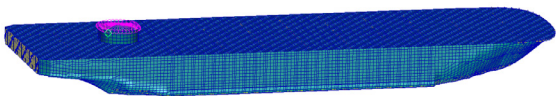


图 4 有限元模型图

3.2 计算载荷

计算载荷包括舷外水压力、结构自重和压载以及起重载荷。

(1) 舷外水压力。根据波浪载荷直接计算结果将舷外水压力载荷按压力分布施加到表面各单元上, 标准计算波的波形取为余弦波, 解析场坐标系原点设置在船舶重心位置, 通过对坐标系进行旋转实现对浪向的模拟。

(2) 结构自重和压载。船体重量以节点力的形式施加, 依据“船体重量重心计算书”调整重量重心, 压载水重量根据实际重量施加对应的舱室。

(3) 起重载荷。在基座构件模型的最顶端端面的几何形心处创建 MPC 点, 将起重机的载荷施加在 MPC 点。

3.3 边界条件

对整体模型施加约束: 首端点施加线位移约束:

$$u_{1x}=u_{1y}=u_{1z}=0, \text{ 尾部端点施加 } u_{2y}=u_{2z}=0, u_{3z}=0。$$

4 强度校核

4.1 许用值

依据 2021 年版《钢质海船入级规范》和 2007 版《船舶与海上设施起重设备规范》得到构件的许用应力如表 4 所示。对于普通碳素钢, $K=1$; 对 AH36 钢, $K=0.72$ 。其中, σ_s 为单元的 von Mises 应力, σ_l 为船长方向的应力, σ_z 为梁单元节点合成应力, τ 为剪应力。

表 4 船体各构件许用应力

应力种类	许用应力					
	主甲板、内外底板、舷侧外板	甲板纵桁、船底纵桁的腹板	横舱壁板	双层底肋板	强横梁腹板	起重机基座
σ_l	175/K	175/K			195/K	
σ_z	220/K	235/K	175/K	175/K	95/K	235/1.33/K
τ	115/K	115/K	95/K	95/K	175/K	235/1.5/K

注: 甲板纵桁、龙骨的面板校核应力为 $[\sigma_z]=195/K$, 起重机基座校核应力 $[\sigma_z]=235/225/K$ 。

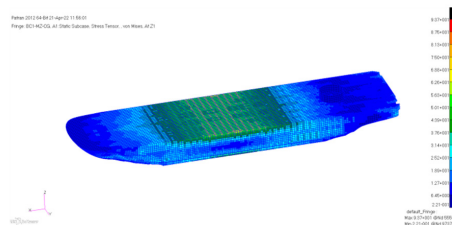
4.2 强度校核

图 5 是各工况下有限元模型 von Mises 应力云图, 各工况下总纵强度应力校核如表 5 所示。经校核, 最危险工况为 98% 燃料及备品作业 68° (500t, 吊机朝艏) 工况, 主甲板最大弯曲正应力 230MPa, 最大 von Mises

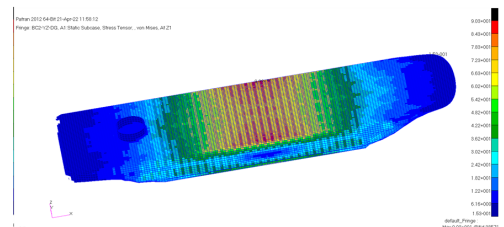
应力 294MPa, 最大剪切应力 155MPa, 均小于其许用应力, 其总纵强度满足规范要求。

表 5 各工况下应力校核结果

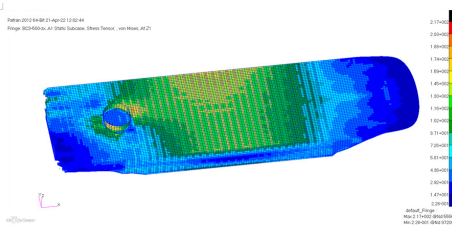
结构分类		最大计算应力/MPa				许用应力/MPa	强度是否满足
		工况 1	工况 2	工况 3	工况 4		
主甲板 (AH36)	σ_l	74.4	93.6	191	230	243	满足
	σ_z	69.9	94.7	226	294	305	满足
	τ	18.6	14.2	111	155	159	满足
外底板、内底板 (Q235)	σ_l	-64.6	-87.7	157	-172	175	满足
	σ_z	59.0	82.2	188	218	235	满足
	τ	27.7	28.3	90.2	102	115	满足
舷侧外板 (AH36)	σ_l	66.7	92.3	176	193	243	满足
	σ_z	65.9	90.2	172	188	305	满足
	τ	-22.3	-23.9	75.6	57.7	159	满足
甲板纵桁腹板 (AH36)	σ_l	81.9	88.2	180	214	243	满足
	σ_z	80.7	85.6	179	213	326	满足
	τ	25.2	6.56	22.7	34.9	159	满足
甲板强横梁面板 (AH36)	σ_z	106	87.3	224	226	270	满足
	σ_z	-8.22	8.27	-107	-140	156	满足
	σ_z	10.5	13.6	170	174	176	满足
起重机基座	τ	4.77	4.89	72.4	70.7	104	满足



(a) 满载出港



(b) 避风压载到港



(c) 98% 燃料及备品作业 68° (500t)

跨河大桥主线钢箱梁双向滑移施工问题探讨

张玉涛

(山西路桥建设集团有限公司, 山西 太原 030000)

摘要: 以某跨河大桥为研究对象,在概述桥梁结构形式及作业面狭窄、工期紧迫、上下同步施工扰动大等难点的基础上,提出钢箱梁单节段拼装、逐节段拼装再横移和纵移的施工方案,进而从胎架施工、滑移施工等方面对钢箱梁双向滑移施工技术要点展开探讨。该跨河大桥工程对滑移施工技术创造性的应用,保证了项目节点工期,也为类似工程提供了宝贵的经验。

关键词: 跨河大桥; 主线桥; 钢箱梁; 双向滑移; 施工

中图分类号: U445

文献标识码: A

文章编号: 1006—7973 (2022) 08—0062—04

原位吊装是钢箱梁工程施工常见的工艺,但是对于桥位无法直接吊装的情形,则必须选择滑移法、顶推法或其他方案。滑移法要求必须设置滑移轨道,确保钢箱梁在轨道上平稳滑移;并通过轨道的合理选择和设置调整胎架位置,防止对桥下产生扰动和影响;梁底增设调平装置后能适应梁底曲线高度变化的情形。钢箱梁滑移施工工艺所用设备简单、成本可控,钢箱梁逐节段纵移或累积纵移均能取得较好的施工效果。

1 工程概况

某跨河大桥与所跨越河流呈 28° 的斜交角,原地面桥拆除重建的同时,还进行主线高架桥施工。高架桥和地面桥斜交正做,地面桥分四副设置,沿河错开排列,跨径均按照 $40\text{m}+65\text{m}+40\text{m}$ 设计,桥墩由地面桥间隙穿出;高架桥跨径为 $31\text{m}+65\text{m}+31\text{m}$,桥面设计宽度为 25m ,采用单箱四室钢箱梁结构。高架桥主线 24 联,墩号为 70#~73#,中跨跨中和边墩处梁高 2.0m ,中墩处梁高 3.2m 。结合施工环境,在地面桥以外北侧空地拼装钢箱梁后整体横移的原方案因拼装场地上方存在高压线,故调整为在桥东南侧空地单节段拼装,而后逐节段

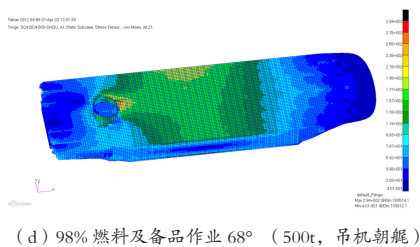


图 5 各工况下 von Mises 应力云图

5 结论

本文以某船为研究对象,由于本船尺度比不满足规范要求,本文基于三维线性势流理论运用 SWSAM 软件建立水动力模型,使用直接计算方法计算波浪载荷,运用等效设计波方法对主船体结构总纵强度进行了有限元分析,并结合规范中相关规定对船体主要构件,尤其是起重机基座位置进行了校核。相对于规范规定的舱段有限元计算,超规范设计船舶需要建立全船模型,建模工作量增大许多,但可以更真实的反应船舶整体结构和局

部基座位置结构的应力水平对于更准确与合理地评估船体结构的强度具有一定的指导和借鉴意义。

参考文献:

- [1] 许瑞璠,夏利娟,李朝阳.12000 吨自航全回转起重船强度分析和评估[J].船舶工程,2015,37:5-8.
- [2] 王国学,胡志宽,桂洪斌等.SL151 起重船强度计算及加强方案[J].中国修船,2012,25:37-39.
- [3] 安改宁.大型起重船全船结构强度直接计算方法研究[M].武汉:武汉理工大学出版社,2016.
- [4] 赵尚辉,任鸿,李福军.救生船中央月池开口部位应力集中分析[J].船舶力学,2009,13(2):278-284.
- [5] 邵帅.起重船对南海海况的适用性研究[M].天津:天津大学出版社,2011.
- [6] 马亮,蒋晟梧,李明明.起重船旋转吊机的布置及支撑结构设计[J].广东造船,2021,30:30-33.
- [7] 中国船级社.钢质海船入级规范[S].北京:人民交通出版社,2021.