

引用格式: 甄春博, 王天霖, 于鹏垚. 基于直接计算的三体船结构疲劳强度影响因素分析[J]. 中国舰船研究, 2017, 12(3): 86-90.

ZHEN C B, WANG T L, YU P Y. Influencing factor analysis for direct calculation of trimaran structure's fatigue strength[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2017, 12(3): 86-90.

基于直接计算的三体船结构疲劳强度影响因素分析

甄春博, 王天霖, 于鹏垚

大连海事大学 交通运输装备与海洋工程学院, 辽宁 大连 116026

摘要: [目的] 针对三体船连接桥部位的疲劳强度问题, [方法] 以某型三体船为例, 采用三维线性势流理论计算规则波中的船体运动及外部水动力压力分布, 通过全船有限元分析得到不同浪向角规则波中各热点的应力传递函数, 基于线性累积损伤理论, 运用谱分析的直接计算法进行各热点的疲劳累积损伤计算, 并探讨不同海域、浪向时间分配等因素对疲劳损伤的影响。[结果] 结果表明, 采用中、近海海况并考虑浪向时间分配时疲劳损伤较大。[结论] 所得结论对三体船的研发设计具有参考意义。

关键词: 三体船; 热点应力; 谱分析法; 疲劳强度评估

中图分类号: U661.43

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2017.03.012

Influencing factor analysis for direct calculation of trimaran structure's fatigue strength

ZHEN Chunbo, WANG Tianlin, YU Pengyao

College of Traffic Equipment and Ocean Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

Abstract: According to the problem of a trimaran cross-deck structure's fatigue strength, taking one trimaran as an example, the responses of ship motion and hydrodynamic pressure on the ship's surface in regular waves are calculated on the basis of the 3D linear potential flow theory. Next, the stress responses of hot-spots in regular waves with different wave angles are evaluated by the finite element analysis of the global trimaran structure. On the basis of linear cumulative damage theories, the fatigue damage is calculated according to the direct calculate method using spectral analysis. Finally, the effect of different sea areas and heading angles' time factors are discussed. The results show that the fatigue damage is greater when using an inshore sea area and considering the time factors of heading angles. The result can offer a reference for the design and development of trimarans.

Key words: trimaran; hot-spot stress; spectral analysis method; fatigue strength assessment

0 引言

高速三体船作为一种具有优良耐波性等特点

的新型高性能船型, 在未来的海洋开发、远洋运输和海上防御等方面具有极大的发展潜力^[1-3]。目前, 国内在三体船设计建造方面的实例并不多, 研

收稿日期: 2017-02-12

网络出版时间: 2017-5-12 12:49

基金项目: 国家重点研发计划重点专项资金资助(2016YFC0301500); 国家自然科学基金资助项目(51379025, 51609031); 海洋工程国家重点实验室开放基金资助项目(1513); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(3132016346, 3132017032); 辽宁省博士启动基金资助项目(201601070)

作者简介: 甄春博, 男, 1982年生, 博士, 讲师。研究方向: 船舶结构疲劳强度评估。E-mail: zhenchunbo@163.com

王天霖, 男, 1977年生, 博士, 教授。研究方向: 船舶结构强度评估。

E-mail: Tianlin-Wang@163.com

于鹏垚(通信作者), 男, 1988年生, 博士, 讲师。研究方向: 船舶波浪载荷计算。

E-mail: pengyao_yu@126.com



究主要集中在船型和阻力性能等方面^[4-5],很少有关于三体船整船结构强度分析,尤其是疲劳强度计算方面的研究。三体船因其特有的连接桥结构,受力情况明显不同于常规船型,该部位的应力集中问题较严重,疲劳强度问题显得特别突出。而各国船级社规范中有关船体结构疲劳强度评估方法的研究对象主要是油船或散货船等大型船舶,没有关于三体船的疲劳分析方法和指导性规范^[6-7]。因此,开展三体船结构疲劳强度的研究,对该型船的设计开发、改进结构节点设计和提高安全可靠性等具有重要的参考意义。

船体结构的疲劳分析方法主要是基于S-N曲线和Miner线性累积损伤理论的疲劳累积损伤分析方法,可以分为简化算法和直接算法2类。谱分析法作为一种直接算法,在船体结构疲劳分析的所有方法中被认为是最精确的,并已在工程中得到广泛应用^[8-10]。该方法是建立在真实的海况和装载基础上的,涉及复杂的水动力和有限元分析,并需考虑不同的装载、波频和航向组合后的上百种工况,计算量巨大、周期长。但对于高速三体船这一新船型,应用谱分析方法来尽可能准确地评估关键节点的疲劳寿命还是十分有必要的。

本文将某型高速三体船为例,采用建立在实际海况基础上的谱分析法进行全船疲劳评估,并探讨不同海域、浪向时间分配等因素对疲劳损伤直接计算的影响。

1 基本思想

基于谱分析的直接算法的基本思想为:依据特定海域的各种短期统计海况散布图,进行波浪载荷以及船体结构应力响应的分析,进而得到热点应力传递函数;然后,结合波浪功率谱得到船体结构应力的响应谱;各短期海况中应力交变过程的应力峰值服从Rayleigh分布,进行各短期范围的损伤计算,加权组合得到总损伤;最后,针对海域、浪向时间分配等因素对疲劳损伤的影响进行比较分析。

2 有限元模型及分析部位

三体船的船体外形及结构复杂,热点应力计算采用局部细化网格嵌入全船有限元模型中的直接计算方法中。结构细化时,网格尺寸采用板厚大小 $t \times t$,并采用结构净厚度^[11],采用惯性释放方法解决全部分析的边界条件问题。以某排水量为600 t的三体船为例,依据三体船的结构特点,在全船强度计算的基础上,结合船体在不同浪向、频

率下的结构应力响应,经过对比和筛选,确定疲劳校核的热点部位为如图1所示的4个部位:

- 1) FR83连接桥及湿甲板首端与主船体间断处;
- 2) FR47湿甲板与主船体相交处;
- 3) FR25湿甲板与片体相交处;
- 4) FR45纵骨穿越强框架处。

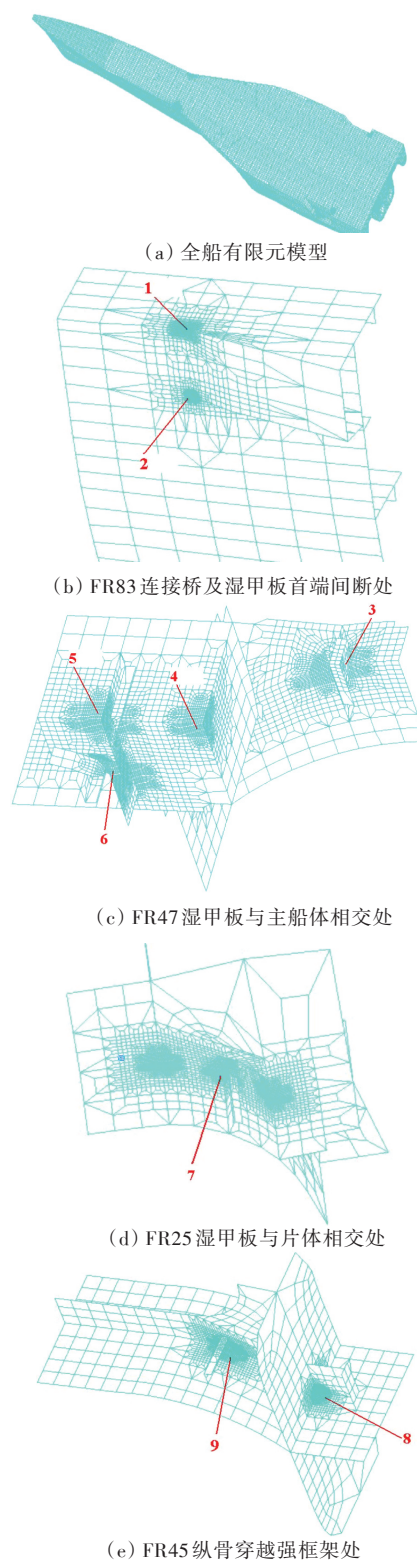


图1 三体船典型节点细化模型

Fig.1 Fine mesh model of trimaran's typical positions

3 波浪载荷计算

目前,船舶波浪载荷的分析主要采用二维切片理论方法和三维水动力分析方法^[12],其中三维水动力分析方法因其理论基础更为完备而备受推崇。本文采用三维线性势流理论方法计算船体运动及外部水动压力分布。取计算航速为0;取航向角 $\theta=0^\circ \sim 330^\circ$,间隔为 30° ,共计12个浪向;取计算波浪圆频率 $\omega=0.1 \sim 2.9 \text{ rad/s}$,步长为0.1,共计29个计算频率。计算参数确定之后,采用波浪载荷计算软件WALCS进行计算,便可得到各规则波中的船体运动响应和船体水动压力分布。受篇幅所限,本文只给出了迎浪情况、航速为0、波浪圆频率 $\omega=0.7 \text{ rad/s}$ 的单位规则波下船体水动压力分布,施加在有限元模型上后如图2所示。

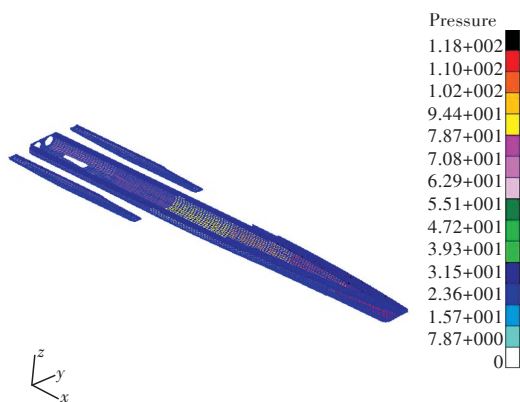


图2 迎浪下船体水动压力分布

Fig.2 Hydrodynamic pressure distribution of hull in head seas

4 传递函数计算

在谱分析法中,传递函数的计算最为重要。采用有限元方法计算时,首先用波浪载荷计算程序得到船舶在航向角为 θ 、圆频率为 ω 的单位波幅规则波中的船体运动以及外部水动压力响应,然后将外部水动压力和与船体运动有关的各种惯性力施加到船体结构有限元模型上,得到应力响应,其结果即为传递函数的值。对于线性系统,可利用响应复数振幅的概念,通过分解与组合响应的实部和虚部来得到响应的幅值。限于篇幅关系,本文只给出了热点3部位的应力响应传递函数,如图3所示。

5 损伤计算

参照文献[11],假定船舶结构为线性系统,则应力的响应谱 $G_{xx}(\omega_e)$ 由下式确定:

$$G_{xx}(\omega_e) = |H_o(\omega_e)|^2 \cdot G_{\eta\eta}(\omega_e) \quad (1)$$

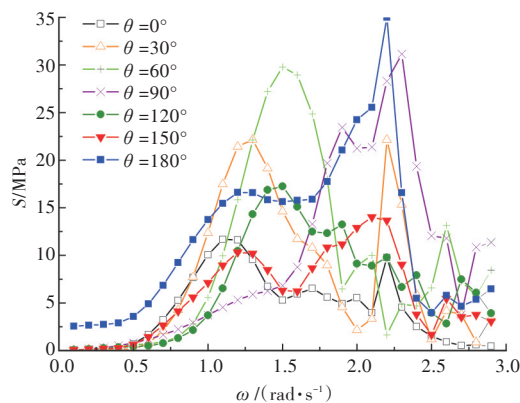


图3 热点3的应力响应传递函数

Fig.3 Stress response transfer function of hot-spot 3

式中: $G_{\eta\eta}(\omega_e)$ 为以遭遇频率 ω_e 表达的波能谱,采用双参数的P-M谱; $H_o(\omega_e)$ 为频率 ω_e 下的应力响应传递函数。

对于每一个短期海况,由随机过程理论可知应力峰值服从Rayleigh分布。采用概率论中随机变量函数的概率密度的计算方法,可得到应力范围的概率密度函数为

$$f_s(S) = \frac{S}{4m_0} \exp\left(-\frac{S^2}{8m_0}\right); 0 \leq S < +\infty \quad (2)$$

式中: m_0 为应力响应谱的零次矩; S 为应力范围。

所考虑的船舶在 i 海况和 j 航向中,航行时间为 T_{ij} 期间的累积损伤度 D_{ij} 为

$$D_{ij} = \frac{T_{ij} f_{0ij}}{A} \int_0^{+\infty} S^m f_{Sij}(S) dS \quad (3)$$

式中: m , A 为S-N曲线参数; f_{0ij} 为该应力交变过程的跨零率; $f_{Sij}(S)$ 为 i 海况和 j 航向中应力范围的概率密度函数。

将式(2)代入上式,可得

$$D_{ij} = \frac{T_{ij} f_{0ij}}{A} \left(2\sqrt{2m_{0ij}}\right)^m \Gamma\left(1 + \frac{m}{2}\right) \quad (4)$$

式中, m_{0ij} 为船舶在 i 海况和 j 航向下应力响应谱的零次矩。

设船舶的设计寿命期为 T_d ,由Miner线性累积损伤准则可知,该期间内总的疲劳累积损伤度 D 为

$$D = \sum_{i=1}^{n_s} \sum_{j=1}^{n_h} D_{ij} = \frac{T}{A} \Gamma\left(1 + \frac{m}{2}\right) \sum_{i=1}^{n_s} \sum_{j=1}^{n_h} p_i p_j f_{0ij} \left(2\sqrt{2m_{0ij}}\right)^m \quad (5)$$

式中: n_s 为海况个数; n_h 为划分的航向数; p_i 为各海况出现的概率; p_j 为各航向出现的概率。

疲劳寿命 T_f 按下式计算:

$$T_f = \frac{T_d}{D} \quad (6)$$

式中, T_d 为该船的设计寿命,为20年。

6 影响因素分析

根据对上述计算理论基础和方法的阐述,对典型热点部位进行损伤计算,按照中国船级社(CCS)规范中关于热点应力S-N曲线的选取原则选取S-N曲线,并按在航率100%计算,计算时考虑如下因素的影响。

6.1 不同海况的影响

海况选取该船经常出现的海域,将以西北太平洋海况和中国沿海海况(表1)为代表。当考虑该船在不同海况航行时,对于极限强度、屈服与屈服强度校核来说,西北太平洋的海况较为严重、危险,而中国沿海的海况则相对较小。但对于疲劳强度校核来说,由于疲劳损伤不仅与有义波高有关,还和跨零周期、该海况出现的概率以及结构的响应等有关,这就导致疲劳损伤对海浪散布图较为敏感。因此,针对三体船这一特殊船型,对航行于西北太平洋海况及中国沿海海况下所产生的损伤,还有待于进一步的计算分析才能比较出疲劳损伤的不同。计算时,各浪向航行时间按通常的计算方法取为等浪向时间分配,结果如表2所示。

表1 中国沿海海况出现概率
Table 1 China coastal sea and its probability of occurrence

有义波高 H_s/m	跨零周期 T_z/s							
	<3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5
0.5	1.3	6.4	7.6	3.6	0.9	0.2	-	-
1.5	0.2	4.1	11.8	10.8	4.7	1.2	0.2	-
2.5	-	1.4	6.4	8.5	5.2	1.9	0.5	0.1
3.5	-	0.4	2.6	4.5	3.4	1.5	0.4	0.1
4.5	-	0.1	0.9	1.9	1.7	0.9	0.3	0.1
5.5	-	-	0.3	0.8	0.8	0.5	0.2	0.1
6.5	-	-	0.1	0.3	0.3	0.2	0.1	-
7.5	-	-	-	0.1	0.2	0.1	0.1	-
8.5	-	-	-	0.1	0.1	0.1	-	-

表2 不同海况下的疲劳累积损伤
Table 2 Fatigue cumulative damage under different wave scatter diagrams

肋位	编号	西北太平洋		中国沿海	
		疲劳累积损伤 D	寿命/年	疲劳累积损伤 D	寿命/年
FR83	1	2.583 1	7.74	4.288 0	4.66
	2	4.174 3	4.79	6.953 5	2.88
FR47	3	0.326 6	61.23	0.548 2	36.48
	4	0.326 7	61.21	0.549 3	36.41
	5	0.275 6	72.56	0.463 5	43.15
	6	0.065 5	305.34	0.107 8	185.47
FR25	7	0.178 4	112.13	0.300 5	66.56
FR45	8	0.008 4	>300	0.013 5	>300
	9	0.005 7	>300	0.009 0	>300

6.2 不同浪向组合的影响

现实中,由于缺少相关规范,目前关于三体船的浪向分配系数还没有明确的规定。可参照CCS规范有关小水线面双体船疲劳计算指南的规定,采用迎浪、随浪占50%,横浪和斜浪各占25%的时间分配比例进行分浪向统计,并与基于等浪向时间分配的计算结果进行对比,以考察时间分配系数对计算结果的影响。计算时,定义0°为迎浪工况,180°为随浪工况,90°和270°为横浪工况,其他为斜浪工况。考虑时间分配系数,进行累积损伤的计算,计算结果如表3所示。

表3 考虑浪向时间分配疲劳累积损伤
Table 3 Fatigue cumulative damage considering heading angles' time factors

肋位	编号	西北太平洋		中国沿海	
		疲劳累积损伤 D	寿命/年	疲劳累积损伤 D	寿命/年
FR83	1	1.494 8	13.38	2.395 9	8.35
	2	2.155 7	9.28	3.479 0	5.75
	3	0.245 6	81.43	0.408 0	49.02
FR47	4	0.223 2	89.60	0.371 3	53.86
	5	0.219 9	90.94	0.367 9	54.37
	6	0.049 8	401.61	0.079 5	251.50
FR25	7	0.192 8	103.73	0.324 8	61.58
FR45	8	0.007 7	>300	0.012 0	>300
	9	0.006 3	>300	0.009 6	>300

6.3 结果分析

通过对计算所采用2种海况的海浪散布图的分析可知,对于中国沿海海况,波浪主要集中在对疲劳损伤贡献较大的中等浪级上,因此采用中国沿海海况海浪散布图计算时疲劳累积损伤较大。从计算结果还可以看出,考虑浪向时间分配系数后,疲劳累积损伤与原数据有一定的差异,这主要取决于各浪向下的损伤所占比例。由此可见,时间分配系数对计算结果有一定的影响,按常规等浪向时间分配计算时,疲劳累积损伤度偏小。

7 结 论

三体船疲劳损伤具有与常规单体船以及双体船不同的特点,这是由各浪向载荷和船体结构特点共同作用的结果。通过应用谱分析方法对三体船结构疲劳强度的评估研究,可以得到以下结论:

1) 三体船疲劳损伤较大的部位主要集中于FR83连接桥在主体部位的间断处和连接桥与主体连接部位,因此在进行结构设计时应特别予以注意,需进一步加强与优化。

2) 采用中国沿海海况海浪散布图计算时,疲劳累积损伤较大,而按常规等浪向时间分配计算时,疲劳累积损伤度偏小。

本文所得结论对于三体船的研发设计具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 卢晓平, 酆云, 董祖舜. 高速三体船研究综述[J]. 海军工程大学学报, 2005, 17(2): 43-48, 52.
LU X P, LI Y, DONG Z S. A research summary on high speed trimaran[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2005, 17(2): 43-48, 52(in Chinese).
- [2] 刁端信, 谢延明. 三体船及其在反水雷舰船上的应用探索[J]. 船舶, 2007(6): 14-16.
DIAO D X, XIE Y M. Trimaran and its application on mine-countermeasure ship[J]. Ship and Boat, 2007(6): 14-16(in Chinese).
- [3] ARMSTRONG T. On the performance of a large high-speed trimaran[J]. Australian Journal of Mechanical Engineering, 2006, 3(2): 121-131.
- [4] FANG M C, CHEN T Y. A parametric study of wave loads on trimaran ships traveling in waves[J]. Ocean Engineering, 2008, 35(8/9): 749-762.
- [5] 张文鹏, 宗智, 倪少玲, 等. 三体船耐波性的模型试验研究[J]. 水动力学研究与进展, 2007, 22(5): 619-624.
ZHANG W P, ZONG Z, NI S L, et al. Model testing of seakeeping performance of trimaran[J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 22(5): 619-624(in Chinese).
- [6] Lloyd's Register. Rules for the classification of trimarans[S]. Britain: Lloyd's Register, 2006.
- [7] Tony Armstrong. On the performance of a large high-speed trimaran[J]. Australian Journal of Mechanical Engineering, 2006, 3(2): 123-132.
- [8] WANG Y G. Spectral fatigue analysis of a ship structural detail—a practical case study[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(2): 310-317.
- [9] LOTSBERG I. Assessment of fatigue capacity in the new bulk carrier and tanker rules[J]. Marine Structures, 2006, 19(1): 83-96.
- [10] BENASCIUTTI D, TOVO R. Spectral methods for lifetime prediction under wide-band stationary random processes[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(8): 867-877.
- [11] 彭营豪. 三体船结构疲劳强度研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011: 42-43.
- [12] 戴仰山, 沈进威, 宋竞正. 船舶波浪载荷[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
DAI Y S, SHEN J W, SONG J Z. Ship wave loads[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007(in Chinese).
- [13] 胡毓仁, 李典庆, 陈伯真. 船舶与海洋工程结构疲劳可靠性分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010: 110-114.
- [14] 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, 2007.
China Classification Society. Guide for fatigue strength of ship structures[S]. Beijing: China Communication Press, 2007(in Chinese).