

文章编号: 1007-7294(2025)12-1943-10

大型海上浮式平台的连接系统疲劳强度研究

李良碧¹, 于鹏飞¹, 韩 越², 张士玉³, 刘磊磊⁴, 姜金辉^{5,6}

(1. 江苏科技大学, 江苏 镇江 212003; 2. 中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011; 3. 上海飞机制造有限公司, 上海 201324; 4. 上海船舶研究设计院, 上海 201203; 5. 上海船舶运输科学研究所有限公司 航运技术交通行业重点实验室/水路交通控制全国重点实验室, 上海 200135; 6. 上海交通大学, 上海 200240)

摘要: 大型海上浮式平台是一种特殊的海上结构物, 其轴承销轴连接结构具有较好的灵活性和适用性, 为了保证大型海上浮式平台连接系统在服役过程中的安全性, 有必要对该连接系统进行疲劳寿命分析。首先, 以含多组轴承销轴的大型海上浮式平台连接系统为研究对象, 采用多种接触形式的非线性接触分析方法进行设计工况载荷下的总体强度研究。然后, 根据该平台连接系统总体强度计算结果, 选取板架结构应力较大部位为关键节点, 并建立有限元子模型, 计算这些关键节点的热点应力, 最后, 采用 $S-N$ 曲线累积损伤法, 对该平台连接系统局部结构在改进前后的疲劳寿命进行计算和分析。结果表明: 含多组轴承销轴的大型海上浮式平台连接系统加载端最外侧轴承与板架连接部位的扁钢处疲劳寿命最低, 而增加加载端最外侧轴承基座板架部分整体板厚, 以及开孔附近板架和扁钢厚度可有效提高疲劳寿命。本文最终提出了一套含多组轴承销轴的大型海上浮式平台连接系统疲劳强度分析方法。

关键词: 浮式平台; 连接结构; 轴承销轴; 疲劳强度; 有限元法

中图分类号: U661.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2025.12.011

Fatigue strength of connection system of large offshore floating platform

LI Liang-bi¹, YU Peng-fei¹, HAN Yue², ZHANG Shi-yu³, LIU Lei-lei⁴, JIANG Jin-hui^{5,6}

(1. Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China; 2. China Ship and Ocean Engineering Design and Research Institute, Shanghai 200011, China; 3. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China; 4. Shanghai Ship Research and Design Institute, Shanghai 201203, China; 5. Key Laboratory of Marine Technology Ministry of Communications/State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Shanghai Ship and Shipping Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200135, China; 6. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Large-scale offshore floating platforms belongs to special offshore structures. Their bearing pin shaft connection structures have good flexibility and applicability. In order to ensure the safety of the large-scale offshore floating platform connection system during service, it is necessary to analyze its fatigue life. Firstly, the large-scale offshore floating platform connection system with multiple sets of bearing pin shaft was studied. A nonlinear contact analysis method of various contact forms was adopted to investigate the overall strength of the structure under the design working condition load. Then, the fatigue life of the platform connection system was

收稿日期: 2025-07-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52171312); 水路交通控制全国重点实验室开放课题资助项目(QZ2022-Y012)

作者简介: 李良碧(1971-), 女, 博士, 教授, 通讯作者, E-mail: liniangbi@163.com; 于鹏飞(1998-), 男, 硕士研究生。

calculated and analyzed before and after the local structural improvement. The results show that, for large-scale offshore floating platform with multiple sets of bearing pins, the lowest fatigue life appears at the flat steel of the connection between the outermost bearing and the plate-frame structure of the loading end. In addition, the fatigue life could be effectively improved by increasing the overall plate thickness of the outermost bearing base plate-frame at the loading end. The thickness of the plate-frame and flat steel near the opening should also be increased. In this paper, a set of fatigue strength analysis methods for large offshore floating platform connection system with multiple sets of bearing pin shaft is finally formed.

Key words: floating platform; connection structure; bearing pin and shaft; fatigue life; Finite Element Method (FEM)

0 引言

大型海上浮式平台是一种特殊的海上结构物,由若干个结构相似的模块通过特定的连接结构连接而成,它需要承受多种载荷,包括风、浪、流等自然环境力量,以及来自设备、人员等的外部载荷,因此,需具备足够的承载能力和耐久性。轴承销轴连接结构具有较好的灵活性和适用性,开展连接结构强度的研究对保证整体平台的安全可靠性具有十分重大且深远的意义。

余澜等^[1-4]研究了移动式海上基地连接器受力的影响因素;Zhao等^[5]针对超大型浮体,确定了连接结构的失效模式和极限承载力条件;赵南^[6]研究了超大型浮体连接器基座周边结构的极限承载能力;汤明刚等^[7]采用接触非线性分析方法计算出海上多模块浮式平台连接器的等效结构刚度;朱璇等^[8]对海上浮式柔性连接器在设计海况和设计刚度下的载荷值进行了分析计算;杨龙塾^[9]基于 $S-N$ 曲线和 Palmgren-Miner 线性累积损伤理论,对刚性连接器疲劳寿命进行了评估;朱玥^[10]针对半潜式超大型浮式结构物连接体,运用 Palmgren-Miner 线性累积损伤理论对铰接式连接器进行了疲劳寿命研究;宋恒^[11]采用 $S-N$ 曲线法和断裂力学法,对超大型浮体柔性连接器在实际海况下的疲劳寿命进行了谱分析。虽然上述文献已对大型浮式结构物的刚性或柔性连接器的疲劳进行过研究,但尚未有相关文献对含多组轴承销轴的大型海上浮式平台连接系统疲劳强度进行分析。

因此,本文以含多组轴承销轴的大型海上浮式平台连接系统为研究对象,根据连接系统总体结构强度的计算结果,选取高应力区为关键节点部位,并建立关键节点的精细有限元模型。通过子模型结构疲劳热点应力计算,采用基于 $S-N$ 曲线的累积损伤法对含多组轴承销轴的大型海上浮式平台连接系统进行疲劳强度分析。

1 基于 $S-N$ 曲线的浮式结构物疲劳分析方法

$S-N$ 曲线方法是用于评估材料疲劳寿命的一种常用方法,它建立起了载荷幅值和寿命之间的关系曲线,即 $S-N$ 曲线。曲线的横坐标一般为寿命或循环次数(N),纵坐标为应力范围(S)。曲线的每一个点(N_i, S_i)表示该类结构的节点在等值循环应力范围 S_i 的作用下达达到疲劳破坏时的寿命或循环数为 N_i 。 $S-N$ 曲线疲劳分析方法主要包括缺口应力、名义应力和热点应力三种分析方法。本文针对含多组轴承销轴的大型海上浮式平台连接系统,主要采用基于热点应力的疲劳分析方法。

1.1 疲劳累积损伤方法

根据 Palmgren-Miner 线性累积损伤理论进行疲劳寿命计算。该理论假设在任意给定的应力水平下,累积损伤的速度与先前的载荷历程无关,且加载顺序不影响计算结果。疲劳累积损伤的产生过程是一个渐进的过程:每次循环载荷都会给材料造成微小的损伤,这些损伤在下一循环载荷时会继续扩大,逐渐积累,最终导致材料失效。

当长期应力范围分布可以表示成一个应力直方图,并且每一个方块应力范围为常值 S_i , 循环次数为 n_i 时, 疲劳准则可以表示如下

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \leq \frac{1}{S_{\text{fig}}} \quad (1)$$

式中: D 为结构发生疲劳破坏时的总损伤量; k 为应力分块的数目; n_i 为第 i 个应力分块中的应力循环数; N_i 为在恒幅应力范围 S_i 作用下直到失效时的应力循环数; S_{fig} 为疲劳强度安全系数。

计算海洋工程结构物的疲劳寿命时, 通常存在多个工况及其时间占比。因此, 需要对每个工况分别计算损伤度, 然后按不同工况在评估目标服役期中所占比例加权计算总的损伤度, 即

$$\bar{D} = \sum_{i=1}^k P_i D_i \quad (2)$$

式中: $\bar{D}$ 为某一热点各工况下损伤期望值; k 为结构服役期中疲劳损伤计算的工况数; D_i 为服役期均为第 i 个工况时结构中某一计算点的疲劳损伤; P_i 为第 i 个工况在结构服役期间所占的时间比例。

1.2 浮式平台连接系统疲劳分析流程

首先, 建立含多组轴承销轴的大型海上浮式平台连接系统有限元模型, 基于非线性接触有限元分析方法计算其在设计工况载荷下的总体应力和位移。获得较高应力的部位; 然后建立连接系统较高应力部位 (疲劳热点) 有限元子模型, 细化网格, 并从整体模型强度分析结果中取出相应位置节点的位移作为子模型的边界条件, 进行热点应力分析。此后, 基于 $S-N$ 曲线累计损伤法及疲劳载荷工况计算和分析连接系统的疲劳寿命。最后, 对连接系统较为薄弱部位进行局部结构加强, 并重新进行疲劳寿命计算和分析, 最终获得含多组轴承销轴的大型海上浮式平台连接系统的疲劳强度。上述研究方法的分析流程如图 1 所示。

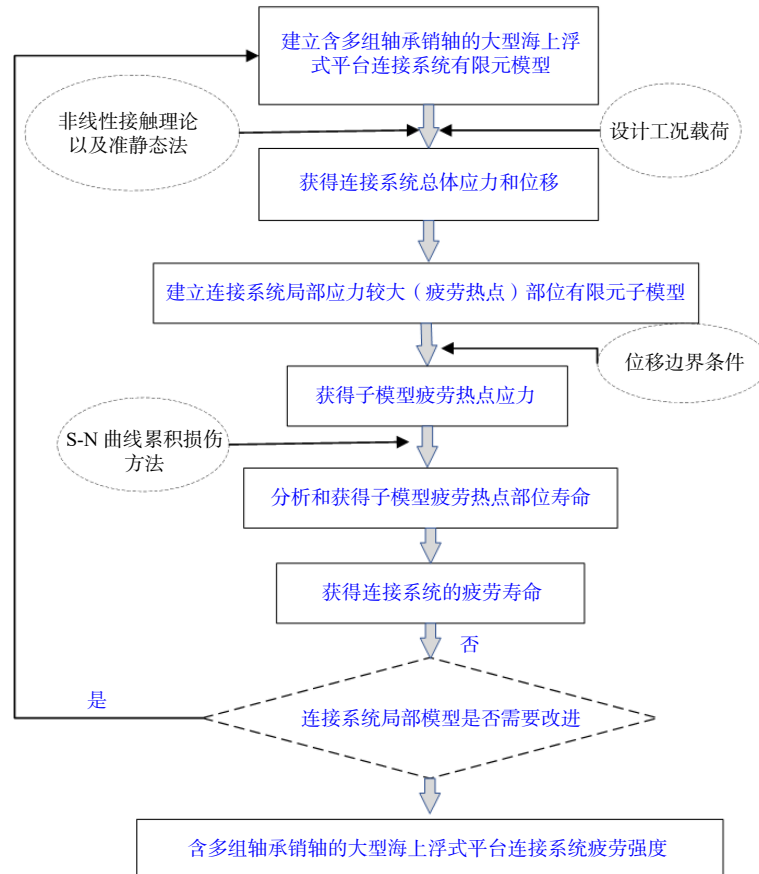


图 1 大型海上浮式平台连接系统疲劳强度分析流程

Fig.1 Fatigue strength analysis process of large offshore floating platform connection system

2 大型海上浮式平台连接系统总体和局部强度研究

2.1 几何模型

含多组轴承销轴的大型海上浮式平台连接系统长为 50 m、宽为 9.8 m、高为 8.6 m,由左垛模块和右垛模块、8 组轴承销轴及周边板架结构组成。其中,以中横剖面 L0 为对称面,形成一个长为 9.8 m、宽为 7 m、高为 3 m 的缺口。坐标系定义如下:坐标原点 O 为 8 组轴承销轴孔轴线连线与中横剖面 L0 所在平面的交点,Y 轴沿轴承孔轴线方向,Y 轴正方向为从轴承 8 到轴承 1 轴线方向,X 轴正方向经过原点 O 垂直指向于右垛模块侧面。整个系统示意如图 2 和图 3 所示。

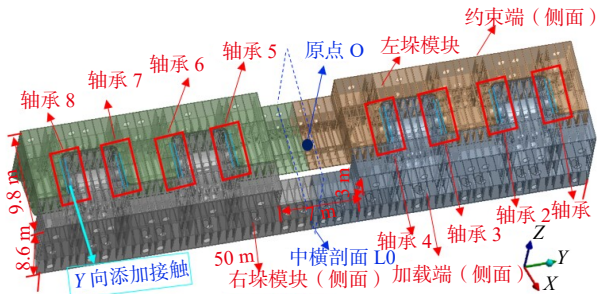


图 2 大型海上浮式平台连接系统几何模型

Fig.2 Geometric model of large offshore floating platform connection system

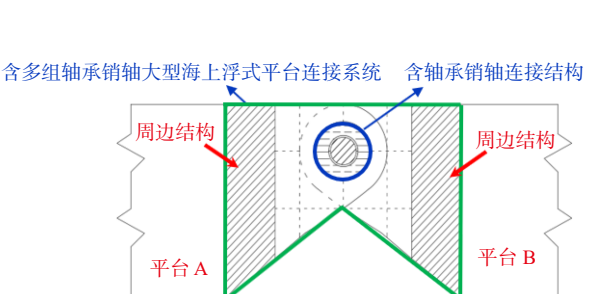


图 3 大型海上浮式平台连接系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of large offshore floating platform connection system

2.2 有限元模型建立及材料

该含多组轴承销轴的大型海上浮式平台连接系统采用 ANSYS/Workbench 软件建模,有限元模型采用高阶四面体 10 节点单元整体建模,单元数为 2 895 527 个,节点数 5 581 012 个。其中,轴承与销轴接触处的网格大小约为 30 mm,其余部分约为 160 mm,如图 4 所示。分析材料选用屈服强度为 550 MPa 的高强度钢。

2.3 边界条件及相关参数设置

(1)约束方式

对该含多组轴承销轴的大型海上浮式平台连接系统约束端侧面(图 2)的 6 个方向的自由度进行全约束。

(2)加载

选取该含多组轴承销轴的大型海上浮式平台连接系统工作海域可能遇到的设计工况载荷 LC1~LC5^[12],如表 1 所示。

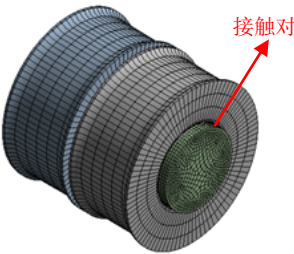


图 4 轴承销轴有限元模型

Fig.4 Finite element model of bearing pin shaft

表 1 可能遇到的设计工况载荷 LC1~LC5^[12]

Tab.1 Design working condition loads LC1-LC5^[12]

载荷工况	$F_x / (\text{N})$	$F_y / (\text{N})$	$F_z / (\text{N})$	$M_x / (\text{N} \cdot \text{m})$	$M_z / (\text{N} \cdot \text{m})$
LC1	5.25E6	4.24E6	2.90E7	8.48E8	8.69E8
LC2	-3.11E6	-9.04E6	-4.07E7	-6.10E8	-6.02E8
LC3	-3.28E6	-7.33E6	-5.04E7	-2.30E8	-3.45E8
LC4	-3.70E6	-7.13E6	-3.06E7	-1.04E9	-8.08E8
LC5	3.97E6	5.02E6	3.82E7	6.34E8	9.73E8

在该含多组轴承销轴的大型海上浮式平台连接系统的轴承销轴对应的加载端侧面上(图 2 和图 5)施加 X 、 Y 、 Z 三个方向的力(表 1)及施加绕 X 轴(图 2)的弯矩 M_x 和绕 Z 轴(图 2)的弯矩 M_z (表 1)。

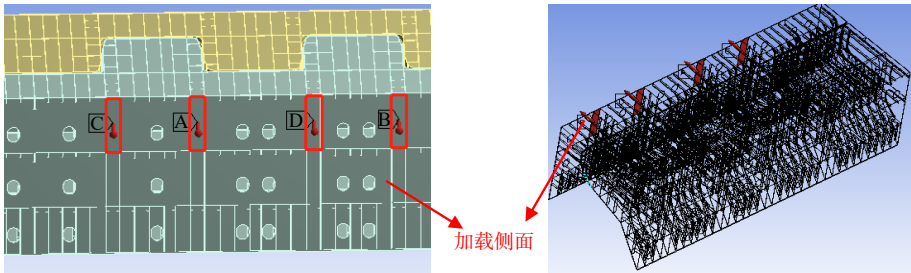


图 5 加载位置
Fig.5 Load position

(3)接触类型
在该大型海上浮式平台连接系统中存在两种不同的接触形式,分别为初始状态就接触的轴承和销轴接触对(图 3 和图 4),及在服役过程中有可能形成左垛模块和右垛模块的接触对,如图 6 所示。

2.4 总体强度分析

采用非线性接触分析方法对该含多组轴承销轴的大型海上浮式平台连接系统(图 2)进行总体强度有限元计算和分析。不同工况(表 1)下的轴承销轴和板架结构最大 von Mises 应力如表 2 所示。从表 2 可以看出,工况 LC4 下的 von Mises 应力最大,因此本文对工况 LC4 下的总体强度计算结果进行详细分析。

该含多组轴承销轴的大型海上浮式平台连接系统(图 2)工况 LC4 下的较大 von Mises 应力及出现位置如表 3 所示。由表可以看出:轴承销轴的最大 von Mises 应力位于加载端轴承 1(图 2)孔内侧(图 7),约为 314.6 MPa;而板架最大 von Mises 应力位于约束端轴承 1(图 2)基座开孔扁钢上(图 10),约为 325.2 MPa。两者均未超过材料的屈服强度,经校核符合相关规范使用要求。

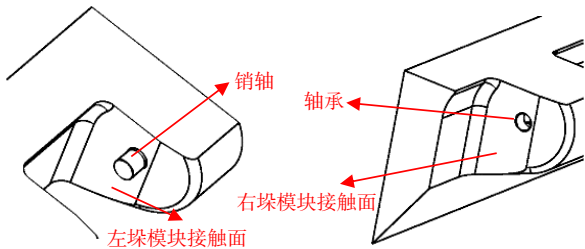


图 6 接触区域示意图
Fig.6 Schematic diagram of contact area

表 2 不同工况下的轴承销轴和板架结构的总体强度计算结果

Tab.2 Calculation results of the overall strength of the bearing pin shaft and plate-frame structure under different working conditions

工况	最大 von Mises应力/(MPa)	
	轴承销轴	板架结构
LC1	294.99	298.68
LC2	258.87	253.23
LC3	188.63	186.36
LC4	314.59	325.23
LC5	289.49	292.55

表 3 工况 LC4 前三 von Mises 应力值及其位置 (应力单位: MPa)

Tab.3 Top 3 values of von Mises stress and their locations in working condition LC4 (MPa)

	最大应力	出现位置	第二大应力	出现位置	第三大应力	出现位置
轴承销轴	314.6	加载端的轴承1 (图2) 孔内侧 (图7)	265.2	轴承销轴1的销轴 (图2) 中间部位 (图8)	228.1	轴承1 (图2) 销轴上
板架结构	325.2	约束端轴承1 (图2) 基座开孔扁钢上 (图10)	317.1	约束端轴承1 (图2) 基座开孔扁钢上 (图11)	303.5	约束端轴承2 (图2) 与板架交接的位置 (图11)

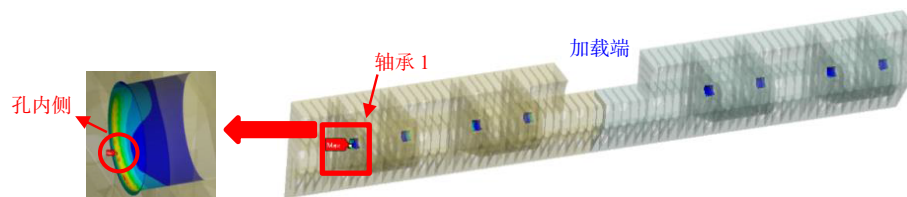


图7 加载端的轴承1孔内侧

Fig.7 Inner side of the hole of Bearing 1 in the loading end

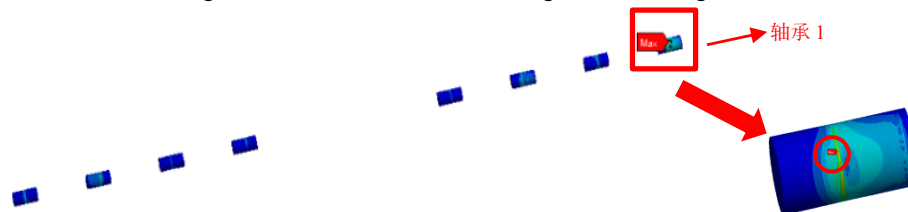


图8 轴承销轴1的销轴中间部位

Fig.8 Middle part of the pin of Bearing Pin Shaft 1

3 大型海上浮式平台连接系统疲劳寿命分析

3.1 工作海况资料

含多组轴承销轴的大型海上浮式平台连接系统的目标海域拟设在南海某典型岛礁附近, 根据中国南海海浪长期资料^[13], 可以得到该海域的波浪散布图数据, 如表4所示, 波浪谱采用 Jonswap 谱, 表达如下

$$S(f) = \alpha H_s^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}] \gamma^{\exp[-(T_p f - 1)^2 / 2\sigma^2]} \quad (3)$$

式中: 形状参数 $\gamma = 2$; $\sigma = \begin{cases} 0.09 & f > f_p \\ 0.07 & f < f_p \end{cases}$; $\alpha = \frac{0.0624}{0.23 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)}$; f_p 为谱峰对应的频率, 即谱峰频率。

表4 南海波浪散布图数据^[13]Tab.4 Data of wave dispersion map of the South China Sea^[13]

总计	1	31	158	288	269	159	66	21	5	1	+	1000
>11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+
9-11	0	0	0	0	0	0	0	+	+	0	0	+
7.5-9	0	0	0	0	0	+	1	1	+	+	0	2
6-7.5	0	0	0	0	+	2	3	2	1	+	0	8
5-6	0	0	0	+	2	6	6	2	1	0	0	18
4-5	0	0	0	2	12	17	10	3	1	0	0	45
3.25-4	0	0	1	11	24	22	10	3	1	+	0	73
2.5-3.25	0	+	7	32	46	31	12	3	1	+	0	132
1.85-2.5	0	1	19	55	57	30	10	2	+	0	0	177
1.25-1.85	0	5	37	72	57	25	8	2	+	0	0	207
0.85-1.25	+	7	34	50	33	13	4	1	+	0	0	141
0.5-0.85	+	8	31	37	21	8	2	+	0	0	0	108
0-0.5	1	10	29	29	15	5	1	+	0	0	0	90
H/T	<3.5	4	5	6	7	8	9	10	11	12	>12.5	总计

注: (1) 表中的概率应是表中数字除以1000, +表示大于0.1但小于0.5, 小于0.1则标为0。

(2) H : 代表有义波高; T : 代表谱峰周期。

(3) 表中含“1”的数据未参与疲劳计算的工况。

3.2 疲劳载荷

由于计算该含多组轴承销轴的大型海上浮式平台连接系统服役期间所有波高和周期(表 4)的工作量较大,且疲劳主要受出现次数较多的海浪影响,因此,本文选取了年出现次数较多的海浪工况进行疲劳计算,共 46 个工况,占整个长期海况的 97%,如表 5 所示。

3.3 关键节点的子模型及热点应力

(1) 热点应力

热点应力是结构表面在热点处的最大应力。在热点应力区域,包括用于插值的区域,网格尺度不得大于受力构件厚度 t (t 为所要评估的焊趾所在的板的板厚),建议采用 $t \times t$ 的网格。关键节点 1-3(图 10 和图 11)均为焊接节点,热点应力可根据距离焊趾 $t/2$ 和 $3t/2$ 处的参考应力并使用插值法获得^[14],如图 9 所示。

(2) 关键节点子模型及热点应力计算

参考总体结构强度计算结果(表 2),选取板架结构较高应力区域为关键节点部位。对三个关键节点部位采用 ANSYS/Workbench 软件建立子模型,进行精细化网格划分,如图 10 和图 11 所示,并从整体模型强度分析结果中取出相应位置节点的位移作为子模型的边界条件,计算其热点应力,如表 6 所示。

表 5 计算工况

Tab.5 Working conditions

工况	概率	年出现次数	波高/m	周期/s
1	7.20E-02	2.88E+05	1.5	5.5
2	5.70E-02	2.28E+05	1.5	6.5
...	...	...		...
45	1.00E-03	4.00E+03	5.5	10.5
46	1.00E-03	4.00E+03	6.5	10.5

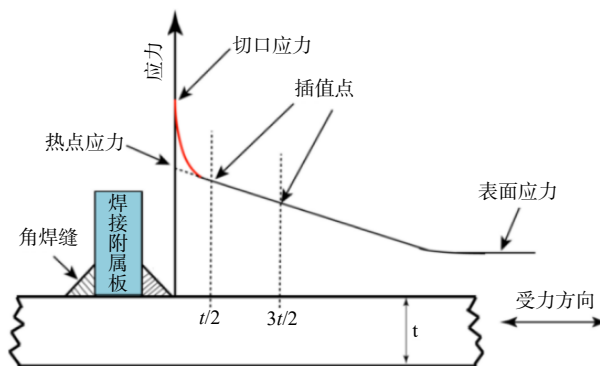


图 9 热点应力插值示意图

Fig.9 Interpolation diagram of hot spot stress

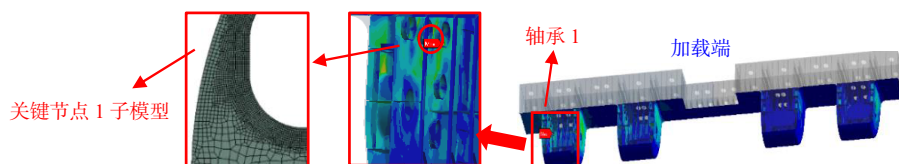


图 10 关键节点 1 位置及子模型

Fig.10 Position and sub-model of key node 1

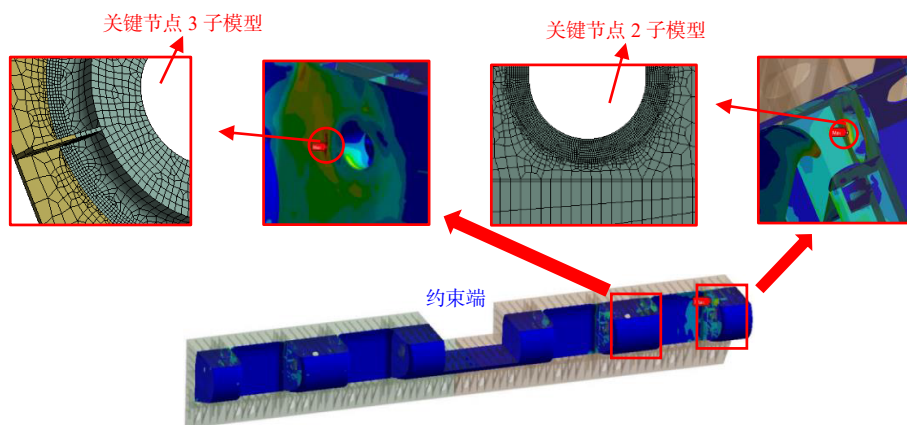


图 11 关键节点 2-3 位置及子模型

Fig.11 Positions and sub-models of key nodes 2-3

表6 关键节点1~3的热点应力
Tab.6 Hot spot stress of key nodes 1-3

工况	关键节点1			关键节点2			关键节点3		
	热点应力 /MPa	$t/2$	$3t/2$	热点应力 /MPa	$t/2$	$3t/2$	热点应力 /MPa	$t/2$	$3t/2$
1	22.44	21.95	20.97	11.27	10.74	9.69	18.07	17.44	16.19
2	26.15	25.64	24.63	13.34	12.77	11.63	21.37	20.59	19.03
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
45	110.97	109.95	107.92	55.82	55.13	53.76	87.20	85.81	83.04
46	72.37	71.58	70.01	29.79	29.14	27.84	52.08	51.51	50.38

3.4 疲劳寿命计算及分析

参考 CCS 和 ABS 关于海洋结构物疲劳的规范^[14-15], 分别采用 CCS 的 D 类曲线和 ABS 的 E 类曲线(表 7), 对该含多组轴承销轴的大型海上浮式平台连接系统板架结构关键节点 1~3 的热点应力部位进行疲劳寿命分析, 结果如表 8 所示。

表7 S-N 曲线参数^[14-15]
Tab.7 Parameters^[14-15] of S-N curve

规范	A	m	C	r	N_Q	S_Q/MPa
CCS	1.52×10^{12}	4.33×10^{15}	3.0	5.0	1.0×10^7	53.4
ABS	1.04×10^{12}	2.30×10^{15}	3.0	5.0	1.0×10^7	47.0

表8 各关键节点处的疲劳寿命
Tab.8 Fatigue life of each key node

规范	关键节点1/年	关键节点2/年	关键节点3/年
CCS	30.24	161.12	74.27
ABS	26.69	82.70	48.43

从表 8 可以看出, 关键节点 1 的疲劳寿命最短, 即该含多组轴承销轴的大型海上浮式平台连接系统约束端轴承 1(图 2)基座开孔扁钢上(图 10)为最先破坏部位, 并且 ABS 规范分析的疲劳寿命结果偏安全。因此, 该含多组轴承销轴的大型海上浮式平台连接系统疲劳寿命在 26 年以上。

4 大型海上浮式平台连接系统板架结构局部厚度改进方案

为了提高该含多组轴承销轴的大型海上浮式平台连接系统(图 2)的疲劳寿命, 提出以下两种局部板架厚度改进方案:

(1) 方案一: 将轴承 1 基座板架部分(图 10)整体板厚由 24 mm 增加至 26 mm;

(2) 方案二: 在方案一的基础上, 将加载端轴承 1 基座开孔附近(图 10)的基座板架厚度从 26 mm 增加至 30 mm, 扁钢厚度从 10 mm 增加至 20 mm。

采用与本文第 3.3 节相同的计算方法, 对增加局部板厚的系统重新进行强度计算。结果显示, 热点应力位置未发生变化, 在此基础上, 采用与本文第 3.4 节相同的方法, 对热点应力部位(图 10)重新进行疲劳寿命的计算和分析, 结果如表 9 所示。从表中可以看出, 参照 CCS 规范评估的疲劳寿命在 37 年左右, ABS 规范在

表9 增加局部板架厚度前后关键节点1的疲劳寿命
Tab.9 Fatigue life of Key Node 1 before and after increasing the thickness of local grillage

疲劳规范	未增加厚度 /年	增加厚度 /年
CCS	30.24	37.18
ABS	26.69	33.94

33 年左右, 均比改进前关键节点 1 的疲劳寿命提高了约 21%。此外, ABS 规范疲劳强度评估结果偏于

保守。因此,增加局部板架结构板厚可有效地提高该系统的疲劳寿命。

5 结 论

本文以含多组轴承销轴的大型海上浮式平台连接系统为研究对象,基于非线性接触有限元分析方法,分析了该结构的总体强度和局部强度。选取板架结构应力较大部位为关键节点,计算其热点应力,并采用 $S-N$ 曲线累积损伤方法计算其疲劳寿命。此外,提出了增加疲劳寿命的局部结构改进方案,形成了一套适用于该系统的疲劳强度分析方法。本文的主要结论如下:

(1) 轴承销轴结构最大的 von Mises 应力出现在加载端最外侧轴承孔内侧,约为 314.6 MPa; 而板架结构最大的 von Mises 应力出现在加载端最外侧轴承与板架连接部位的扁钢上,约为 325.2 MPa, 均满足使用要求。

(2) 板架结构中加载端最外侧轴承与板架连接部位的扁钢处疲劳寿命最低,疲劳寿命约为 26 年; 同时, ABS 规范疲劳强度评估结果偏于保守。

(3) 加载端最外侧轴承基座板架部分整体板厚增加 2 mm, 开孔附近板架厚度增加 4 mm, 扁钢厚度增加 10 mm, 可有效提高疲劳寿命约 21%。

参 考 文 献:

- [1] 余 澜, 李润培, 舒 志. 移动式海上基地连接器的动力特性[J]. 上海交通大学学报, 2003(8): 1159–1163.
Yu L, Li R P, Shu Z. Dynamic characteristics of mobile marine base connectors[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2003(8): 1159–1163. (in Chinese)
- [2] 余 澜, 丁 伟, 李润培. 移动式海上基地多模块间相互作用对连接器载荷的影响[J]. 海洋工程, 2004, 1: 25–31.
Yu L, Ding W, Li R P. Influence of multi-module interaction on connector load in mobile offshore base[J]. Ocean Engineering, 2004, 1: 25–31. (in Chinese)
- [3] Yu L, Li R P, Shu Z P. Recent research and development of the connector design for mobile offshore bases[J]. The Ocean Engineering, 2003, 1: 60–66.
- [4] Yu L, Li R P, Shu Z. Dynamic responses of mobile offshore base connectors[J]. China Ocean Engineering, 2003, 17(4): 469–479.
- [5] Zhao N, Gu X K, Qi E R, et al. Theoretical and experimental study on the ultimate strength of the VLFS connector foundation support reinforcing area structure under complex loads[J]. Journal of Ship Mechanics, 2018, 22(7): 857–864.
- [6] 赵 南. 复杂载荷作用下超大型浮体极限强度研究[D]. 无锡: 中国舰船研究院, 2018.
Zhao N. Study on the ultimate strength of very large floating bodies under complex loads[D]. Wuxi: China Ship Research Institute, 2018. (in Chinese)
- [7] 汤明刚, 李生鹏, 郭泽鹏, 等. 海上多模块浮式平台连接器系统等效结构刚度[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 118–123.
Tang M G, Li S P, Guo Z P, et al. Equivalent structural stiffness of connector system for offshore multi-module floating platform[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(4): 118–123. (in Chinese)
- [8] 朱 璇, 刘 超, 祁恩荣, 等. 超大型海上浮式基地柔性连接器设计及强度分析[J]. 船舶力学, 2014, 18(11): 1361–1366.
Zhu X, Liu C, Qi E R, et al. Design and strength analysis of flexible connectors for very large offshore floating bases[J]. Journal of Ship Mechanics, 2014, 18(11): 1361–1366. (in Chinese)
- [9] 杨龙塾. 海上浮式结构连接器强度及疲劳分析研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
Yang L S. Strength and fatigue analysis of offshore floating structure connectors[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. (in Chinese)

- [10] 朱 玥. 半潜式超大型浮式结构物连接体疲劳分析研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2017.
Zhu Y. Fatigue analysis of connectors in semi-submersible super-large floating structures[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [11] 宋 恒. 超大型浮体柔性连接器疲劳强度研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2018.
Song H. Research on fatigue strength of flexible connectors for very large floating bodies[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [12] 陈彧超. 快速布设平台连接器载荷分析报告[R]. 无锡: 中国船舶科学研究中心, 2021.
Chen Y C. Load analysis report of rapid deployment platform connector[R]. Wuxi: China Ship Scientific Research Center, 2021. (in Chinese)
- [13] 杨生强. 南海北部台风影响下海浪谱研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2015.
Yang S Q. Study on wave spectrum under the influence of typhoon in the northern South China Sea[D]. Qingdao: Graduate School of Chinese Academy of Sciences(Institute of Oceanography), 2015. (in Chinese)
- [14] 中国船级社. 海洋工程结构物疲劳强度评估技术指南(2022)[S]. 北京: 中国人民出版社, 2022.
China Classification Society (CCS). Technical guide for fatigue strength assessment of offshore structures (2022)[S]. Beijing: People's Publishing House of China, 2022. (in Chinese)
- [15] ABS. Guide for the fatigue assessment of offshore structures[S]. 2003.