

# 自升式平台桩腿与桩靴连接位置疲劳寿命计算

张 霖

(中海油能源发展股份有限公司采油服务分公司, 天津 300452)

**摘要:** 针对自升式平台在油田生产作业期间的桩腿与桩靴连接位置疲劳问题, 建立桩靴局部有限元模型, 考虑 8 个不同方向下的波浪载荷作用, 采用谱疲劳分析方法, 计算得到平台桩腿与桩靴连接位置处的疲劳寿命; 同时, 研究桩靴周围土壤对平台桩腿-桩靴连接位置疲劳寿命的影响。结果表明: 考虑 10 倍安全系数下, 平台桩腿与桩靴连接位置处的疲劳寿命能够满足设计要求; 考虑桩靴周围土壤作用能使桩腿与桩靴连接位置处的疲劳寿命得到改善。

**关键词:** 桩腿与桩靴; 谱疲劳分析; 疲劳寿命; 土壤刚度

**中图分类号:** TU43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)09-0039-09

随着陆地油气资源的日益减少, 油气行业将目光投向海洋。海洋油气资源开发是一个由浅海向深海开发的过程, 其中海洋油气生产平台是海洋开发的关键设备之一。自升式生产平台是近年来创新研发的一类用于近海油气田短期开采的移动平台, 其在传统自升式平台的艏部增设隔水管架结构, 平台就位后下放隔水管架, 实现油气生产。结束采油后, 可采用与移动式平台相同的方法拔桩撤离<sup>[1]</sup>。平台在长期受到交变的波浪载荷作用下, 结构材料内将产生随时间变化的应力, 材料抵抗这种交变应力的能力将随着应变波动次数的累加而降低产生疲劳损伤<sup>[2]</sup>。自升式平台由于其增设的隔水管架结构导致其所承受的波浪载荷大大增加, 并传递给桩腿。桩腿与桩靴在建造过程中通过焊接的方式进行连接, 桩腿增加的波浪载荷传递到桩腿桩靴连接处, 在生产过程中更容易产生应力集中, 从而影响桩腿桩靴连接处的疲劳寿命。因此, 对自升式平台桩腿和桩靴连接位置进行疲劳寿命评估是保证平台安全生产的重要内容之一。

针对海洋平台疲劳寿命的评估, 国内外很多学者都进行了研究。王晴晴和上官晓峰<sup>[3]</sup>研究了海洋环境对铝合金疲劳性能的影响, 提出了铝合金的腐蚀防护措施。欧阳小穗等<sup>[4]</sup>在残余应力分析的基础上, 估算了循环载荷下不强化、芯棒挤压和衬套挤压强化后元件的疲劳寿命, 并与相应的试验数据进行了对比, 结果表明, 疲劳寿命估算结果与试验结

果基本一致, 估算方法可行。杨海燕等<sup>[5]</sup>利用数字仿真软件对简化后的桩腿桩靴的疲劳寿命进行了评估, 得到了预期的寿命, 对平台结构优化等具有重要意义。郑贞明等<sup>[6]</sup>以桁架式生活服务平台的桩腿为研究对象, 基于谱疲劳分析方法, 论述了桁架式桩腿疲劳计算的原理和流程。唐文献等<sup>[7]</sup>基于 S-N(应力-寿命)曲线和 Miner 线性累计损伤理论, 采用谱分析法对海洋平台的桩腿典型节点的疲劳强度进行了评估, 评估结果可为同类型平台桩腿的结构设计和开发提供一定的参考。李立业<sup>[8]</sup>以某老龄式自升式平台为对象, 针对作业工况, 对平台进行疲劳损伤计算, 得到桩腿与导向装置连接处的疲劳寿命最短, 应当予以高度重视。Shabakhty<sup>[9]</sup>提出了一种关于自升式平台相结合的疲劳与断裂新方法, 其优势在于简单应用程序单独使用表格技术评估每个失效的路径, 最后把它们组合到一起来确定系统的可靠性。上述研究为海洋工程结构的疲劳分析提供了良好的基础, 然而对自升式平台桩腿与桩靴连接位置的疲劳分析, 目前研究尚少。由于自升式平台结构的特殊性和海洋环境的复杂性, 使得桩腿桩靴连接处会产生较大的应力集中, 从而影响其疲劳寿命。若能够采用合适的理论方法较为准确地评估桩腿桩靴连接处的疲劳寿命, 对优化平台设计、保证平台作业期间的安全具有重要意义。

目前, 疲劳分析方法一般包括简单疲劳法、谱疲劳法和时域疲劳法<sup>[10]</sup>。本文以四桩腿的自升式

收稿日期: 2024-06-07

作者简介: 张霖(1984—), 男, 天津人, 工程师, 研究方向为海洋工程设计分析。

平台作业期间的桩腿与桩靴连接的局部结构为研究对象,采用谱疲劳分析方法<sup>[11]</sup>,结合标准和规范,考虑 8 个不同方向下的波浪载荷作用,计算得到平台桩腿与桩靴连接位置处的疲劳寿命,为评估和预测桩腿-桩靴连接位置的疲劳寿命提供一定的参考。随后,研究了桩靴周围土壤对平台桩腿-桩靴连接位置疲劳寿命的影响,计算结果表明,通过考虑桩靴周围土壤的刚度作用能使桩腿-桩靴连接处的疲劳寿命得到有效改善。

## 1 基于谱疲劳的疲劳损伤计算

### 1.1 谱疲劳分析

谱分析法是一种线性分析方法,可以考虑整个服役期内随机波浪的作用<sup>[12]</sup>。该方法根据有义波高  $H_s$ 、平均跨零周期  $T_z$  将波浪划分为不同海况,得到每个海况下的波浪功率谱,再通过计算应力传递函数来求得其应力响应谱密度,得到其零阶谱矩和二阶谱矩,根据短期工况中应力范围服从瑞利分布,求得其概率密度函数和分布函数,然后,结合选取海况场址的波浪的散布图获取应力幅值的长期分布,进而,根据 Miner 线性叠加原理,求得热点的疲劳累计损伤度及疲劳寿命。

### 1.2 波浪谱密度函数

选用 P-M (Pierson-Moscowitz) 谱考虑波浪的随机特征,其波浪能量谱密度函数  $S_{\eta}(f)$ <sup>[13]</sup> 为

$$S_{\eta}(f) = \frac{H_s^2 T_z}{4\pi} (T_z f)^{-5} \exp\left[-\frac{1}{\pi} (T_z f)^{-4}\right] \quad (1)$$

式中:  $H_s$  为有义波高,即 1/3 大波的平均波高, m;  $f$  为波浪频率, 1/s;  $T_z$  为波浪跨零周期, s。

### 1.3 热点应力幅值

根据 CCS (中国船级社) 规范<sup>[14]</sup>, 在站立工况下, 局部模型中桩靴与桩腿连接部位的疲劳动载荷为平台铰支时整体分析中波浪载荷引起的桩腿垂向力、水平力以及下导向处弯矩的 50% 叠加的作用。

热点应力可根据有限元模型计算得到的应力场, 使用分量应力外推得到, 计算时采用  $t/2$  和  $3t/2$  处的正应力  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  和剪应力  $\tau_{xy}$  分量值分别进行外推, 如图 1 所示, 然后合成得到热点位置的最大主应力  $\sigma_{\max}$ 。

### 1.4 应力响应谱密度函数

根据传递函数和波浪谱, 求得应力响应谱密度函数  $S_{\sigma}$  为

$$S_{\sigma}(f) = |T(f)|^2 S_{\eta}(f) \quad (2)$$

式中:  $T(f)$  为应力传递函数。

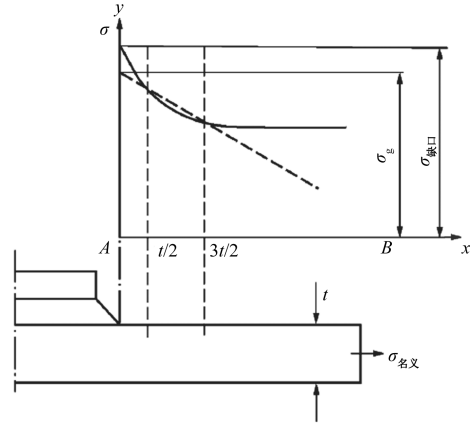


图 1 热点附近应力分布及应力外推

$n$  阶谱矩  $m_n$  为

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S(f) df \quad (3)$$

应力范围标准差  $\sigma_{\text{rms}}$  为

$$\sigma_{\text{rms}} = \sqrt{m_0} \quad (4)$$

应力响应的有效频率  $f_e$  为

$$f_e = \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \quad (5)$$

### 1.5 循环次数

一年中第  $j$  级波浪第  $i$  个应力块的循环次数  $n_{ji}$  为

$$n_{ji} = 31\,536 \times 10^3 P_w P(\sigma_{ri}) f_e \quad (6)$$

式中:  $P_w$  为第  $j$  级波浪出现的概率。

### 1.6 S-N 曲线

设计 S-N 曲线是基于相应实验数据的曲线, 反映了在一定交变应力水平下存活率达到 97.6% 的循环次数。S-N 曲线的基本方程为

$$\lg N = \lg \bar{a} - m \lg \Delta \sigma \quad (7)$$

式中:  $N$  为在应力范围下, 预期发生损坏的循环次数;  $\Delta \sigma$  为应力范围;  $m$  为 S-N 曲线的负导数斜率;  $\lg \bar{a}$  为 S-N 曲线在  $N$  轴的截距值。

考虑板的厚度的影响, 需要对应力范围做出修正。修正的 S-N 曲线方程为

$$\lg N = \lg \bar{a} - m \lg \left[ \Delta \sigma \left( \frac{t}{t_{\text{ref}}} \right)^k \right] \quad (8)$$

式中:  $t$  为板厚;  $t_{\text{ref}}$  为基准厚度, 对于非管节点焊接连接时, 取 25 mm, 厚度小于  $t_{\text{ref}}$  时, 取  $t = t_{\text{ref}}$ ;  $k$  为疲劳强度的厚度指数, 根据不同的 S-N 曲线确定。

根据平台桩腿与桩靴连接位置的性质, 依据《海洋工程结构物疲劳强度评估指南 2013》<sup>[15]</sup> 选用海水中有阴极保护的 D 曲线的 S-N 曲线, 具体取值见表 1。

表 1 S-N 曲线取值

S-N 曲线	$\lg \bar{\alpha}_1$ ( $N \leq 10^6$ ) $m_1 = 3.0$	$\lg \bar{\alpha}_2$ ( $N \leq 10^6$ ) $m_2 = 5.0$	疲劳 极限	厚度 指数	应力集 中系数
D 曲线	0.001 073	932.20	52.63	0.2	1.0

### 1.7 Miner 线性累积损伤及疲劳寿命

基于选定的 S-N 曲线,即可计算总的疲劳损伤为

$$D_1 = \sum_j \sum_i \left( \frac{n_{ji}}{N_{ji}} \right) \quad (9)$$

式中: $D_1$ 为 1 a 的疲劳损伤度; $N_{ji}$ 为从 S-N 曲线得到的应力循环次数。疲劳寿命  $Y$  则为

$$Y = 1/D_1 \quad (10)$$

## 2 有限元模型及热点选取

首先采用 ANSYS 建立平台整体有限元模型,计算平台在不同周期单位波高下的桩腿反力以及下导向处的弯矩。随后,建立桩靴局部结构的有限元模型,选取桩腿桩靴连接处的热点作为研究对象,从而计算得到热点位置桩腿、桩靴面板、桩靴腹板的应力幅值传递函数。

### 2.1 有限元分析模型

采用 ANSYS 建立的该平台整体有限元模型如图 2 所示,该模型用于计算平台在不同周期单位波高下的桩腿反力以及下导向处的弯矩。建模时,平台桩腿泥面以上采用 Pipe59 单元,泥面以下采用 Pipe16 单元,主船体和固桩架采用 Beam188 单元建立。根据文献[16],模拟船体刚度,即选取舱壁进行模拟时,取平均舱壁;舱壁带板宽度取两道舱壁的间距一半,考虑骨材梁材的作用。采用自定义截面定义,船体重量采用 Mass21 单元施加于重量重心处。

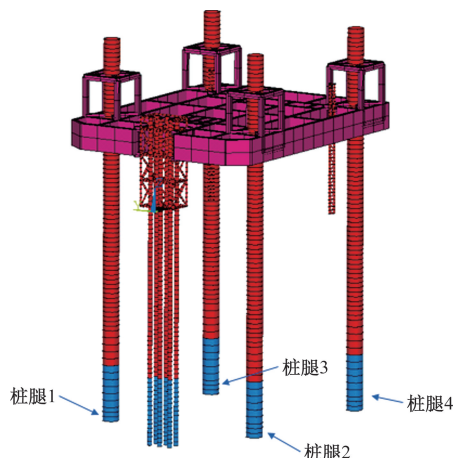


图 2 平台整体有限元模型

平台主船体与桩腿之间通过 CP (coupling points, 节点耦合) 方法进行耦合约束,自由度释放与 SCAS 软件静力分析模型保持一致;隔水管与扶正架之间耦合关系亦与 SACS 静力分析保持一致,仅耦合水平方向自由度,垂向自由度释放;平台桩腿边界条件为泥面以下 11.6 m 处铰支,隔水管边界条件为在 6 倍的隔水管直径处进行固支。耦合及边界条件示意图如图 3 所示。

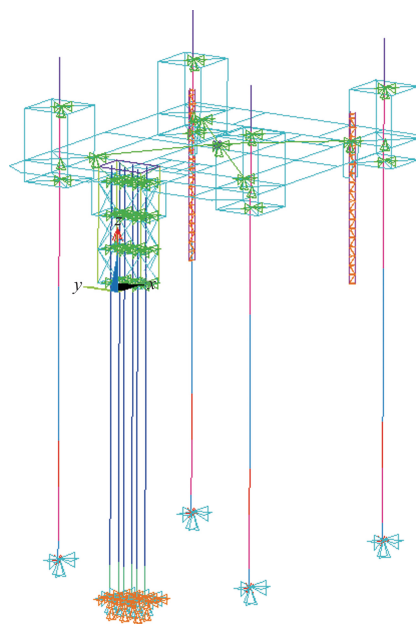


图 3 耦合及边界条件

在上述基础上,建立桩靴局部有限元模型,如图 4(a) 所示。桩腿与桩靴连接位置采用加密网格进行划分,网格大小与板厚一致,以确保分析精度,如图 4(b) 所示。桩靴应力计算时,采用在局部模型顶部施加固支约束,反力载荷施加在桩靴底部的方式对局部模型受力情况进行模拟,其中水平载荷施加至侧板上,导向处弯矩的 50% 折算为力耦,并将垂直支反力按梯度施加,封堵楔块位置的垂向载荷施加于封堵楔块对应开口位置,如图 5 所示。

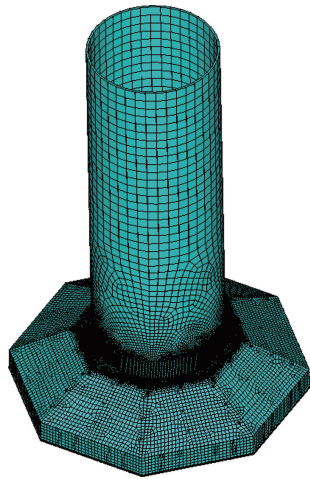
### 2.2 热点位置

选取桩腿与桩靴连接处的 16 个热点位置,热点编号在  $0^\circ \sim 360^\circ$  内分别依次标记为热点 1、热点 2、...、热点 16,如图 6 所示,每个位置分别计算桩腿、桩靴顶部面板、桩靴内部腹板(辐射板)的热点应力幅值,桩腿和桩靴面板及内部腹板有限元模型如图 7 所示。

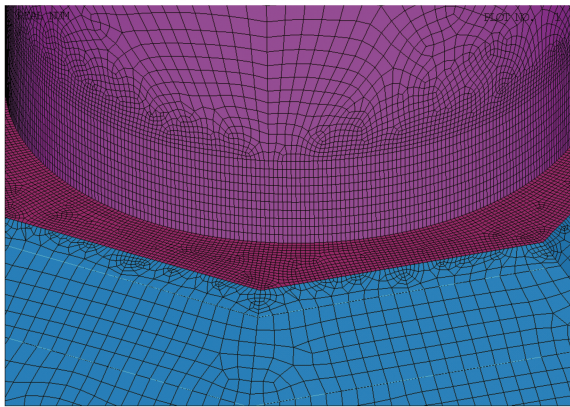
## 3 疲劳寿命计算

在进行疲劳寿命计算过程中,相关参数的设置说明如下。

(1) 基于提供的波浪散布图,考虑  $22.5^\circ$ 、 $67.5^\circ$ 、



(a) 桩腿-桩靴连接局部模型



(b) 连接位置网细化图

图 4 桩腿-桩靴局部有限元模型

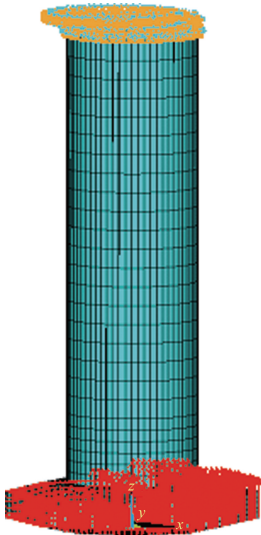


图 5 桩腿-桩靴局部结构边界条件及载荷施加

112.5°、157.5°、202.5°、247.5°、292.5°及 337.5° 这 8 种海况条件进行计算,各个方向的波浪出现概率按照某油田水位数据考虑。

(2)本平台设计使用寿命为 25 年,按照《海上移动平台入级规范》<sup>[14]</sup>,疲劳安全系数取 10。

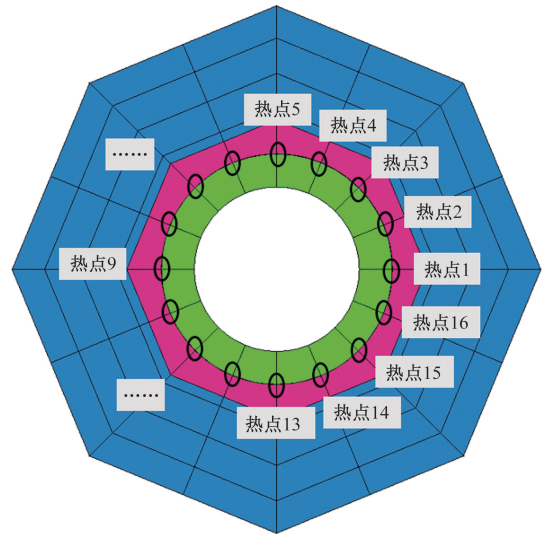


图 6 热点校核位置

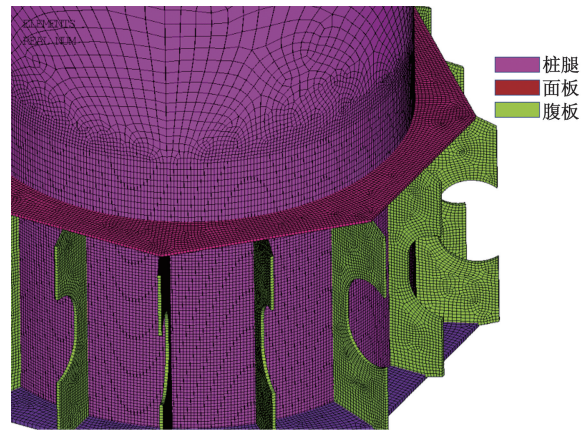


图 7 桩腿和桩靴面板及内部腹板有限元模型

(3)作业水深取 36 m,考虑平台每年 365 d 均在海上作业,疲劳计算时按采油工况重量进行计算。

(4)考虑海生物附着,以泥面处为基线,考虑 0~12.3 m 海生物附着厚度为 9 cm,12.3~32.3 m 附着厚度为 17 cm,拖曳力系数  $C_d$  和惯性力系数  $C_m$  按最保守取值,分别为 1.2 和 2.0。

(5)临界阻尼取 2%。

(6)S-N 曲线选用海水中受阴极保护的 D 曲线。

(7)应力范围采用最大和最小波浪载荷作用下的最大主应力的差值得到,采用单自由度法考虑波浪载荷的动力放大效应。

(8)计算时扣除了腐蚀余量,其中连接位置桩腿腐、桩靴面板和侧板考虑 3.5 mm 的腐蚀裕量,其余部分考虑 1.7 mm 腐蚀裕量。

### 3.1 波浪散布图

选用某油田的波谱数据,具体的波浪散布见表 2。

平台北向与实际北向夹角为  $22.5^\circ$ , 方位布置如图 8 所示。根据平台方位图, 以及提供的波浪概率分布方向, 考虑  $22.5^\circ$ 、 $67.5^\circ$ 、 $112.5^\circ$ 、 $157.5^\circ$ 、 $202.5^\circ$ 、 $247.5^\circ$ 、 $292.5^\circ$  及  $337.5^\circ$  这 8 种波浪方向进

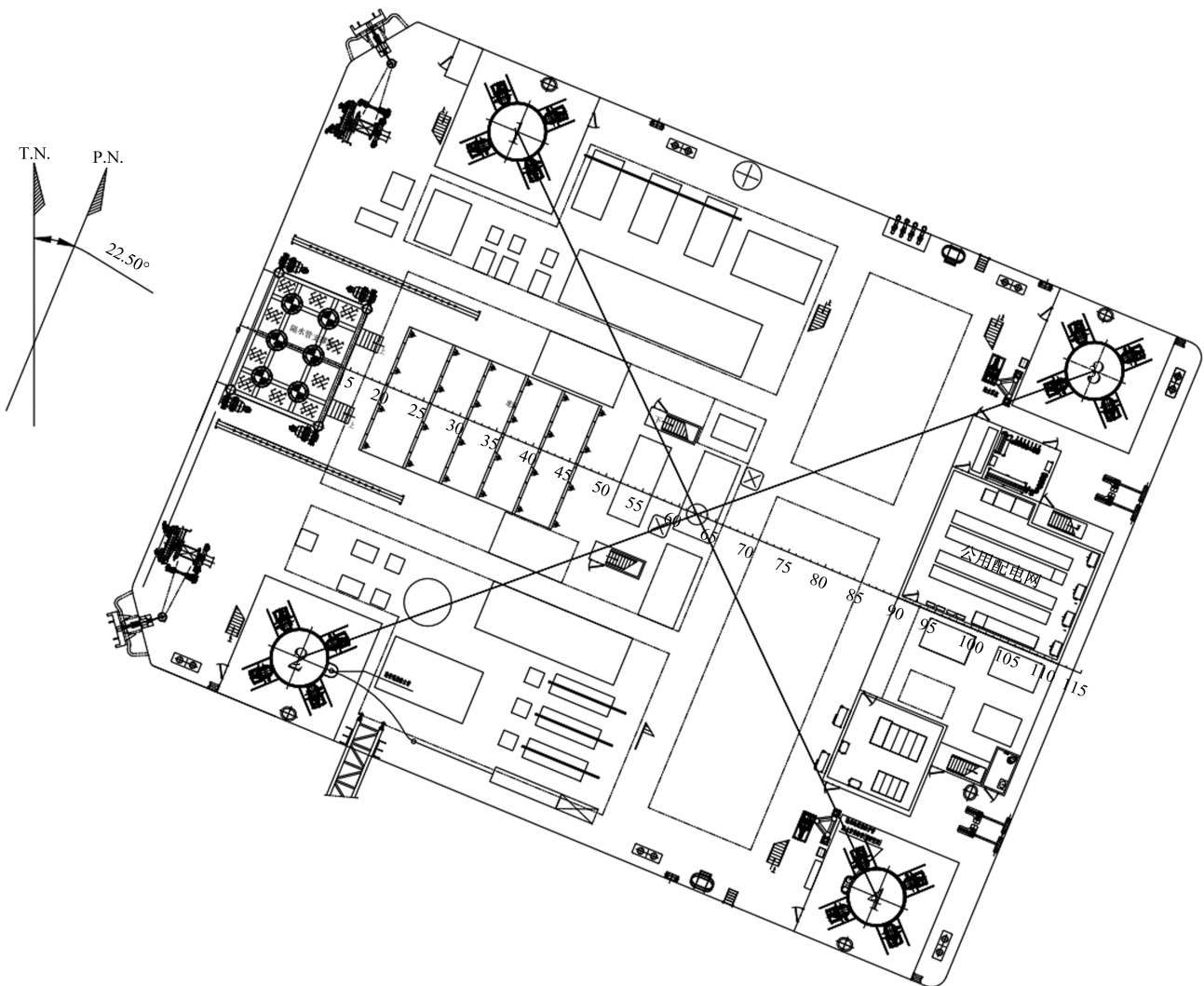
行计算。

### 3.2 应力幅值传递函数

以桩腿 3 处的桩靴为研究对象进行分析, 应力幅值传递函数计算时, 波浪理论采用 Airy 波理论<sup>[17]</sup>,

表 2 有义波高与平均跨零周期全工况联合分布

$H_s/m$	波浪散布/%						总计
	$T_z < 2\text{ s}$	$T_z = 2 \sim 3\text{ s}$	$T_z = 3 \sim 4\text{ s}$	$T_z = 4 \sim 6\text{ s}$	$T_z = 6 \sim 10\text{ s}$	$T_z \geq 10$	
0	0.139	0.269	0.104	0.003	0.090	—	0.515
0.0~0.5	1.844	26.065	17.719	5.802	0.347	—	51.519
0.5~1.0	1.172	8.545	15.523	7.394	0.208	—	32.981
1.0~1.5	0.486	2.170	3.134	4.254	0.211	—	10.244
1.5~2.0	0.075	0.817	0.744	1.499	0.194	—	3.400
2.0~2.5	0.006	0.165	0.148	0.521	0.096	—	1.033
2.5~3.0	—	0.006	0.029	0.096	0.029	—	0.226
3.0~3.5	—	—	0.012	0.017	0.003	—	0.058
3.5~4.0	—	—	—	0.003	0.003	—	0.012
4.0~4.5	—	—	—	0.003	—	—	0.009
>4.5	—	—	—	0.003	—	—	0.003
总计	3.721	36.097	37.415	19.585	1.181	—	100



T. N. 为 true north, 真北; P. N. 为 platform north, 平台北

图 8 平台方位布置

波陡取 0.2,在波浪周期范围 0.4~16 s 内选取波浪点数为 50 个,其中,在平台自振周期附近采用 0.2 s 的频率间隔,详细数据见表 3。

每种波浪工况下,考虑 8 种载荷作用方向,分别计算最大和最小波浪载荷下的平台桩腿反力、下导向处的弯矩。然后,将计算结果代入桩靴局部模型中,计算每种工况下的应力值,从而得到 16 个热点位置处桩腿、桩靴面板、桩靴腹板的应力幅值传递函数。图 9 为桩腿与桩靴连接位置处热点 1 在各个方向下的应力幅值传递函数。

以 22.5° 载荷方向,波浪周期为 8 s 时的典型工况,展示最大波浪载荷作用时的桩腿与桩靴连接位置处的应力分布云图,如图 10 所示。该工况下的反力验证结果见表 4。

由于桩腿—桩靴局部有限元模型约束位于顶部,施加载荷位于底部,反力与施加载荷值在垂向相

表 3 计算波浪周期选取点及对应工况代号

工况	周期/s	波高/m	工况	周期/s	波高/m
1	16.0	14.817	26	6.6	3.398
2	15.6	14.346	27	6.4	3.195
3	15.2	13.874	28	6.2	2.999
4	14.8	13.399	29	6.0	2.809
5	14.4	12.920	30	5.8	2.625
6	14.0	12.439	31	5.6	2.447
7	13.6	11.955	32	5.4	2.276
8	13.2	11.468	33	5.2	2.110
9	12.8	10.977	34	5.0	1.951
10	12.4	10.483	35	4.8	1.798
11	12.0	9.987	36	4.6	1.651
12	11.6	9.486	37	4.3	1.443
13	11.2	8.983	38	4.0	1.249
14	10.8	8.476	39	3.7	1.068
15	10.4	7.968	40	3.4	0.902
16	10.0	7.459	41	3.1	0.750
17	9.6	6.950	42	2.8	0.612
18	9.2	6.443	43	2.5	0.488
19	8.8	5.941	44	2.2	0.378
20	8.4	5.446	45	1.9	0.282
21	8.0	4.961	46	1.6	0.200
22	7.6	4.491	47	1.3	0.132
23	7.2	4.038	48	1.0	0.078
24	7.0	3.819	49	0.7	0.049
25	6.8	3.606	50	0.4	0.021

表 4 典型工况下桩腿与桩靴连接位置反力验证结果

参数	桩腿垂向载荷 $F_z/N$	桩腿水下向载荷 $F_y/N$	桩腿水平向载荷 $F_x/N$	下导向弯矩 $M_x/(N\cdot m)$	下导向弯矩 $M_y/(N\cdot m)$
提取载荷	$-0.15140 \times 10^8$	$-0.57938 \times 10^5$	$-0.13462 \times 10^6$	$0.66237 \times 10^7$	$-0.27199 \times 10^7$
桩靴模型反力	$-0.13988 \times 10^8$	$-0.58135 \times 10^5$	$-0.13578 \times 10^6$	$0.33178 \times 10^7$	$-0.136992 \times 10^7$

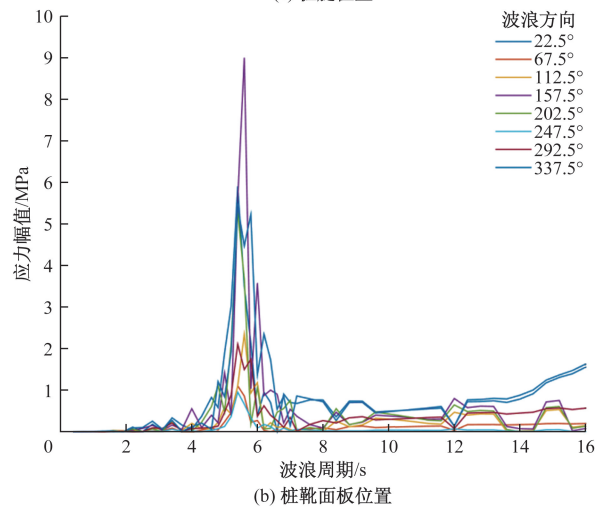
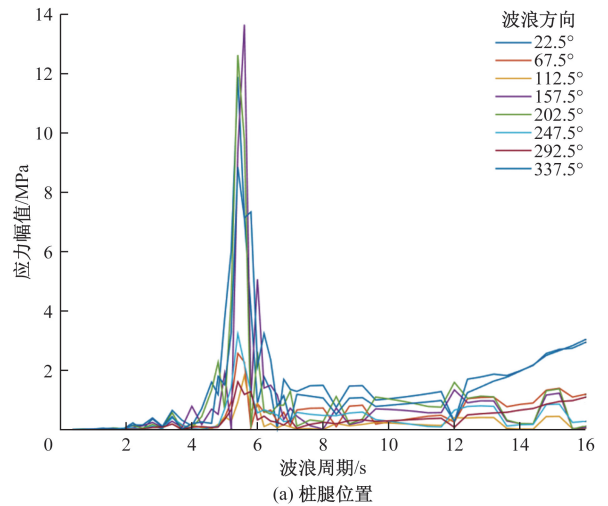


图 9 桩腿与桩靴连接位置热点 1 的应力幅值传递函数

差了 1 152 kN,而桩腿—桩靴局部结构自重为 117.5 t,通过换算其与差值相等,满足要求。

### 3.3 疲劳寿命计算结果

将桩腿与桩靴连接处的疲劳安全系数取为 10,采用《海洋工程结构物疲劳强度评估指南》<sup>[15]</sup> 中海水中的 D 曲线,基于谱疲劳分析方法,计算得到平台桩腿与桩靴连接位置处的疲劳寿命,见表 5~表 7。

由表 5~表 7 计算结果可知,考虑 10 倍安全系数下,平台桩腿与桩靴连接位置处的所有计算热点处的疲劳寿命均能够满足 25 a 设计寿命的要求,其中桩腿疲劳寿命最短为 94.6 a,桩靴疲劳寿命最短为 109.7 a。

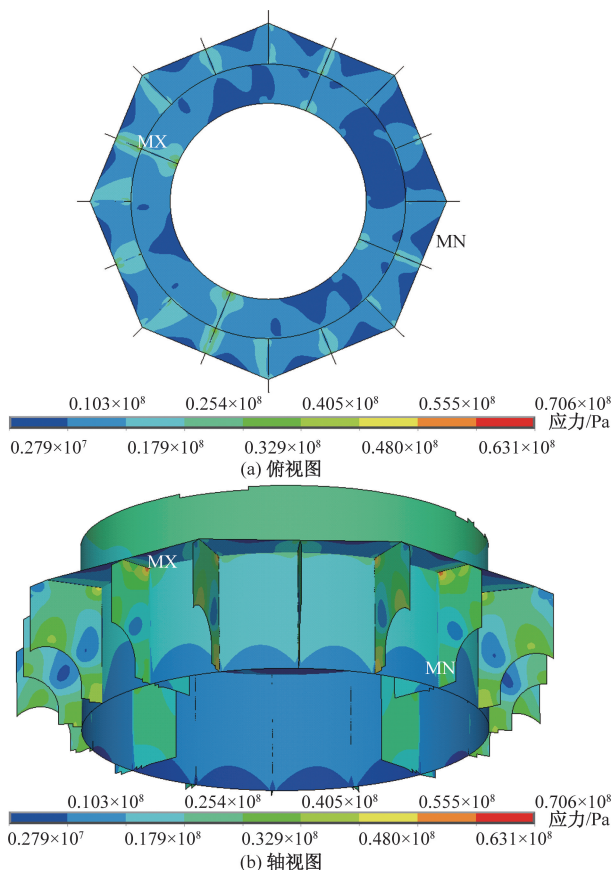


图 10 典型工况下桩腿与桩靴连接位置处的应力分布云图

表 5 桩腿与桩靴连接位置-桩腿疲劳寿命

热点	疲劳损伤	疲劳寿命/a	安全系数	考虑 10 倍安全系数下的疲劳寿命/a	是否满足要求
1	0.000 283	3 527.4	10	352.7	Yes
2	0.000 404	2 476.3	10	247.6	Yes
3	0.000 553	1 809.9	10	181.0	Yes
4	0.000 868	1 152.6	10	115.3	Yes
5	0.000 721	1 386.3	10	138.6	Yes
6	0.000 647	1 545.0	10	154.5	Yes
7	0.000 455	2 196.0	10	219.6	Yes
8	0.000 523	1 911.1	10	191.1	Yes
9	0.000 398	2 512.9	10	251.3	Yes
10	0.000 594	1 684.3	10	168.4	Yes
11	0.000 719	1 390.7	10	139.1	Yes
12	0.001 057	945.8	10	94.6	Yes
13	0.000 851	1 174.7	10	117.5	Yes
14	0.000 695	1 439.2	10	143.9	Yes
15	0.000 410	2 437.1	10	243.7	Yes
16	0.000 427	2 339.7	10	234.0	Yes

#### 4 土壤刚度的影响

为验证平台在位时,桩靴周围土壤对平台桩腿-桩靴连接位置疲劳寿命的影响,取采油作业工况下的最小土壤刚度参数,即垂直刚度取 3 640 098.000 kN/m,

表 6 桩腿与桩靴连接位置-桩靴面板疲劳寿命

热点	疲劳损伤	疲劳寿命/a	安全系数	考虑 10 倍安全系数下的疲劳寿命/a	是否满足要求
1	0.000 227	4 407.3	10	440.7	Yes
2	0.000 286	3 499.5	10	350.0	Yes
3	0.000 382	2 620.5	10	262.1	Yes
4	0.000 471	2 123.2	10	212.3	Yes
5	0.000 470	2 129.0	10	212.9	Yes
6	0.000 442	2 262.2	10	226.2	Yes
7	0.000 323	3 097.0	10	309.7	Yes
8	0.000 230	4 348.1	10	434.8	Yes
9	0.000 285	3 503.2	10	350.3	Yes
10	0.000 423	2 363.4	10	236.3	Yes
11	0.000 505	1 978.9	10	197.9	Yes
12	0.000 586	1 705.5	10	170.6	Yes
13	0.000 550	1 817.5	10	181.8	Yes
14	0.000 466	2 144.2	10	214.4	Yes
15	0.000 279	3 582.6	10	358.3	Yes
16	0.000 170	5 870.8	10	587.1	Yes

表 7 桩腿与桩靴连接位置-桩靴腹板疲劳寿命

热点	疲劳损伤	疲劳寿命/a	安全系数	考虑 10 倍安全系数下的疲劳寿命/a	是否满足要求
1	$9.25 \times 10^{-5}$	10 814.0	10	1 081.4	Yes
2	0.000 145	6 890.3	10	689.0	Yes
3	0.000 253	3 948.0	10	394.8	Yes
4	0.000 727	1 374.6	10	137.5	Yes
5	0.000 314	3 181.1	10	318.1	Yes
6	0.000 276	3 624.9	10	362.5	Yes
7	0.000 185	5 411.0	10	541.1	Yes
8	0.000 495	2 020.2	10	202.0	Yes
9	0.000 137	7 318.8	10	731.9	Yes
10	0.000 227	4 409.1	10	440.9	Yes
11	0.000 358	2 790.8	10	279.1	Yes
12	0.000 912	1 097.0	10	109.7	Yes
13	0.000 408	2 450.6	10	245.1	Yes
14	0.000 315	3 175.0	10	317.5	Yes
15	0.000 200	5 004.9	10	500.5	Yes
16	0.000 404	2 474.9	10	247.5	Yes

水平刚度取 3 731 850.491 kN/m,转动刚度取 3 419 094.360 kN·m/rad进行研究.采用上述谱疲劳分析方法,对考虑桩靴周围土壤刚度下的桩腿-桩靴连接位置的疲劳寿命进行计算,按照桩腿实际支反力和弯矩计算得到的结果见表 8~表 10.

由表 8~表 10 的计算结果可知,在 10 倍安全系数下,考虑土壤刚度后,平台桩腿根部最短疲劳寿命为 163.94 a,桩靴最短疲劳寿命为 175.07 a,相比较支条件,疲劳寿命得到改善.

表 8 桩腿与桩靴连接位置-桩腿疲劳寿命

热点	疲劳损伤	疲劳寿命/a	安全系数	考虑 10 倍安全系数下的疲劳寿命/a	是否满足要求
1	0.000 203 691	4 909.40	10	490.94	Yes
2	0.000 233 499	4 282.68	10	428.27	Yes
3	0.000 293 257	3 409.97	10	341.00	Yes
4	0.000 609 988	1 639.38	10	163.94	Yes
5	0.000 551 969	1 811.70	10	181.17	Yes
6	0.000 525 670	1 902.33	10	190.23	Yes
7	0.000 340 259	2 938.94	10	293.89	Yes
8	0.000 305 678	3 271.42	10	327.14	Yes
9	0.000 195 905	5 104.52	10	510.45	Yes
10	0.000 168 012	5 951.95	10	595.20	Yes
11	0.000 226 984	4 405.61	10	440.56	Yes
12	0.000 516 915	1 934.56	10	193.46	Yes
13	0.000 505 592	1 977.88	10	197.79	Yes
14	0.000 487 686	2 050.50	10	205.05	Yes
15	0.000 322 471	3 101.06	10	310.11	Yes
16	0.000 335 358	2 981.89	10	298.19	Yes

表 10 桩腿与桩靴连接位置-桩靴腹板疲劳寿命

热点	疲劳损伤	疲劳寿命/a	安全系数	考虑 10 倍安全系数下的疲劳寿命/a	是否满足要求
1	0.000 081 925	12 206.29	10	1 220.63	Yes
2	9.538 68 $\times 10^{-5}$	10 483.63	10	1 048.36	Yes
3	0.000 125 223	7 985.75	10	798.58	Yes
4	0.000 571 206	1 750.68	10	175.07	Yes
5	0.000 238 763	4 188.26	10	418.83	Yes
6	0.000 257 883	3 877.73	10	387.77	Yes
7	0.000 165 247	6 051.57	10	605.16	Yes
8	0.000 312 065	3 204.46	10	320.45	Yes
9	6.658 87 $\times 10^{-5}$	15 017.56	10	1 501.76	Yes
10	7.313 07 $\times 10^{-5}$	13 674.15	10	1 367.41	Yes
11	0.000 101 058	9 895.33	10	989.53	Yes
12	0.000 489 944	2 041.05	10	204.11	Yes
13	0.000 216 730	4 614.03	10	461.40	Yes
14	0.000 231 223	4 324.82	10	432.48	Yes
15	0.000 139 955	7 145.13	10	714.51	Yes
16	0.000 337 265	2 965.03	10	296.50	Yes

表 9 桩腿与桩靴连接位置-桩靴面板疲劳寿命

热点	疲劳损伤	疲劳寿命/a	安全系数	考虑 10 倍安全系数下的疲劳寿命/a	是否满足要求
1	0.000 175 014	5 713.84	10	571.38	Yes
2	0.000 186 769	5 354.22	10	535.42	Yes
3	0.000 246 383	4 058.72	10	405.87	Yes
4	0.000 358 804	2 787.04	10	278.70	Yes
5	0.000 412 884	2 421.99	10	242.20	Yes
6	0.000 442 815	2 258.28	10	225.83	Yes
7	0.000 308 211	3 244.53	10	324.45	Yes
8	0.000 187 260	5 340.16	10	534.02	Yes
9	0.000 134 434	7 438.62	10	743.86	Yes
10	0.000 139 920	7 146.93	10	714.69	Yes
11	0.000 185 528	5 390.01	10	539.00	Yes
12	0.000 299 335	3 340.74	10	334.07	Yes
13	0.000 373 394	2 678.13	10	267.81	Yes
14	0.000 404 607	2 471.53	10	247.15	Yes
15	0.000 292 955	3 413.49	10	341.35	Yes
16	0.000 202 483	4 938.69	10	493.87	Yes

## 5 结论

针对自升式平台桩腿与桩靴局部结构的疲劳问题,考虑 8 个不同方向下的波浪载荷作用,采用谱疲劳分析方法,计算得到平台桩腿与桩靴连接位置处的疲劳寿命;同时,研究了桩靴周围土壤对平台桩腿-桩靴连接位置疲劳寿命的影响,得到以下结论。

(1)考虑 10 倍安全系数下,平台桩腿与桩靴连接位置处的最短疲劳寿命为 94.6 a,能够满足设计要求。

(2)考虑土壤刚度作用后,桩腿与桩靴连接位置疲劳寿命有所改善,最短寿命为增至 163.94 a。

## 参考文献

- [1] 朱本瑞,肖广,崔希君,等. 移动式井口平台桩腿与桩靴连接位置结构疲劳分析[J]. 中国造船, 2023, 64(6): 101-111.
- [2] 冯加果,李新仲,谢彬,等. 基于 ANSYS 的海洋平台局部构造疲劳寿命评估的网格精度和外推方法研究[J]. 石油矿场机械, 2011, 40(1): 15-20.
- [3] 王晴晴,上官晓峰. 海洋大气腐蚀对 7475 铝合金疲劳性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(4): 859-866.
- [4] 欧阳小穗,张晓晶,杨树勋. 孔挤压强化有限元分析及疲劳寿命估算[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(12): 2787-2791.
- [5] 杨海燕,江齐锋,周长江. 海洋平台桩靴疲劳寿命的仿真计算及应用[J]. 船舶工程, 2020, 42(11): 124-127.
- [6] 郑贞明,崔超朋,唐柳伦. 桁架式服务平台桩腿疲劳寿命分析[J]. 江苏船舶, 2021, 38(4): 14-15, 29.
- [7] 唐文献,赵海洋,孟森,等. 基于谱分析法的桩腿疲劳寿命研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2016, 30(5): 445-449.
- [8] 李立业. 老龄自升式平台结构强度及疲劳分析[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [9] SHABAKHTY N. System failure probability of offshore jack-up platforms in the combination of fatigue and fracture[J]. Engineering Failure Analysis, 2011(18): 223-243.
- [10] 中国海洋石油总公司. 海上钢结构疲劳强度分析的推荐作法: Q/HS3005[S]. 北京: 中国海洋石油总公司企业标准, 2003.
- [11] 马哲树,胡振,冯国增. 柴油机曲轴疲劳强度的三维有限元分析[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(3): 764-767.

- [12] 朱本瑞, 韩文秀, 杨树耕, 等. 考虑拖航疲劳的火炬臂全寿命评估[J]. 海洋工程, 2019, 37(6): 22-28.
- [13] 吴昕炜, 刘文白, 刘特成. 波浪在近岸水域传播变形特性数值模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(33): 126-131.
- [14] 中国船级社. 海上移动平台入级规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
- [15] 中国船级社. 海洋工程结构物疲劳强度评估指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [16] Technical & research bulletin 5-5A[R]. Jersey City: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2002.
- [17] 陈圣涛, 钟兢军, 孙鹏. 基于线性波理论的波浪数值模拟[C]//中国海洋工程学会. 第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下). 大连: 大连海事大学轮机工程学院, 2015: 5.

## Fatigue Life Assessment of the Connection Region between Legs and Spudcans in Jack-up Platforms

ZHANG Lin

(CNOOC Energy Technology & Services Limited, Oil Production Services Branch, Tianjin 300452, China)

**Abstract:** To address the fatigue issues at the connection between legs and spudcans of jack-up platforms during oilfield production operations, a local finite element model of the spudcan was established. By considering wave loads from eight different directions and employing the spectral fatigue method, the fatigue life at the leg-spudcan connection was calculated. Additionally, the influence of spudcan-surrounding soil on the fatigue life of the connection was investigated. Results indicate that, under a 10-fold safety factor, the fatigue life at the leg-spudcan connection meets design requirements. Incorporating the effect of surrounding soil further improves the fatigue life at this critical joint.

**Keywords:** legs and spudcan; spectral fatigue analysis; fatigue life; soil stiffness