

文章编号: 1000-4750(2010)01-0215-06

抗冰导管架平台疲劳可靠性优化

刘 翔¹, *李 刚¹, 岳前进¹, 时忠民²

(1. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁, 大连 116024; 2. 中国海洋石油研究中心, 北京 100027)

摘 要: 疲劳破坏是海洋工程结构的一种主要破坏形式。对于渤海有冰边际油田, 需要在满足冰激疲劳要求的同时考虑平台成本。该文建立了抗冰导管架疲劳可靠性优化模型, 利用虚拟激励法并结合兼顾整体和局部的混合有限元模型, 实现了复杂管节点冰激疲劳的快速高效分析, 并利用对数正态格式计算冰激节点疲劳可靠性。渤海 JZ20-2 NW 平台算例分析表明, 通过优化设计可以在满足节点疲劳可靠性要求的同时降低结构重量, 可以为冰区海洋平台设计提供参考。

关键词: 疲劳可靠性; 结构优化; 抗冰导管架平台; 冰力谱; 海冰疲劳环境

中图分类号: O346.2 文献标识码: A

OPTIMIZATION OF ICE-RESISTANT JACKET PLATFORM DESIGN BASED ON FATIGUE RELIABILITY

LIU Xiang¹, *LI Gang¹, YUE Qian-jin¹, SHI Zhong-min²

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. China National Offshore Oil Corporation Research Center, Beijing 100027, China)

Abstract: Fatigue is one of the chief damage patterns in ocean engineering. As for the marginal fields of the Bohai Gulf, the design needs to satisfy the requirements of ice-induced fatigue in view of the cost. This paper developed a method to optimize the design of ice-resistant jacket platform based on fatigue reliability. The pseudo excitation method was employed to achieve the efficient ice-induced fatigue analysis for complex tubular joints based on a mixed finite element model that can handle the global and local structural characteristics simultaneously, and then the lognormal format was used to assess the ice-induced fatigue reliability of tubular joints. Finally, a real platform JZ20-2 NW platform was used as a demonstration, and the results showed that the design optimization can provide a lighter structure satisfying the requirement of fatigue reliability, and is useful for economic ice-resistant jacket platform design.

Key words: fatigue reliability; structural optimization; ice resistant jacket platform; ice force spectrum; sea ice fatigue environments

海洋工程结构在服役期间会受到波浪、海流、风以及海冰等复杂的环境载荷作用, 疲劳破坏是一种主要的破坏形式。基于 Miner 线性累积损伤理论和 S-N 曲线的结构疲劳分析方法得到广泛应用^[1]。

收稿日期: 2008-08-10; 修改日期: 2009-10-13

基金项目: 863 计划项目(2001AA602015); 国家自然科学基金项目(90815023, 10721062)

作者简介: 刘 翔(1981—), 男, 陕西人, 博士, 从事海洋工程研究(E-mail: xiangliu@eagle.org);

*李 刚(1966—), 男, 山东人, 教授, 博士, 博导, 从事工程力学与海洋工程研究(E-mail: ligang@dlut.edu.cn);

岳前进(1958—), 男, 辽宁人, 教授, 博士, 博导, 从事海洋工程研究(E-mail: yueqj@dlut.edu.cn);

时忠民(1954—), 男, 辽宁人, 首席工程师, 博士, 从事海洋工程研究(E-mail: shizhm@cnooc.com.cn).

热点应力计算是疲劳分析的关键内容, 主要方法有规范采用的适合简单平面节点的应力集中系数法(SCF)^[2-3]、处理复杂的空间管节点的精细有限元分析方法^[3-4]。海冰是渤海海域海洋平台的控制荷载, 冬季现场监测发现导管架结构存在明显的冰激振动现象, 可能引起管节点的疲劳问题。目前国内外针对冰激疲劳寿命估计的研究还较少。国内学者方华灿等对冰激疲劳分析方法开展了一些研究^[5-7]。近年随着动冰力^[8-10]和海冰疲劳环境参数^[11-12]研究的深入, 岳前进、李刚等研究了冰激疲劳寿命估计的谱分析方法以及考虑节点疲劳的动力优化^[13-14]。而由于海洋环境荷载、结构尺寸与材料特性、分析模型等存在的不确定性, 海洋工程结构疲劳可靠性分析也一直是人们关注的问题。Wirsching在进行了大量的数据分析研究之后建议在船舶和海洋工程中的疲劳可靠性估计中采用对数正态格式^[15]。胡毓仁和陈伯真系统地总结了船舶及海洋工程结构疲劳可靠性分析的工作^[16]。而对于冰激疲劳可靠性的研究还很少, 方华灿、段梦兰等研究了海洋平台的冰振疲劳可靠性问题^[17-18]。李刚等结合现有的渤海动冰力研究成果, 考虑管节点抗力随时间的衰减, 研究了冰振下海洋平台管节点的时变疲劳可靠性分析^[19]。

经济可靠的抗冰导管架平台的设计对于渤海边际油田开发意义重大, 为此本文在现有抗冰导管架平台研究基础上提出了抗冰导管架平台疲劳可靠性优化问题, 利用谱分析方法和疲劳寿命可靠性预测的对数正态格式, 结合虚拟激励法和混合有限元模型实现优化问题中的高效的冰激疲劳寿命可靠性估算, 对JZ20-2NW平台进行了疲劳可靠性优化分析。

1 复杂管节点的冰激疲劳分析

1.1 锥体冰力谱和海冰疲劳环境

动冰力作用模型和海冰疲劳环境是冰激疲劳分析的前提, 本文鉴于目前渤海平台多为加锥结构, 采用锥体冰力谱^[9]。

$$S(f) = \frac{10\bar{F}_0^2\bar{T}^{-2.5}}{f^{3.5}} \exp\left(-\frac{5.47}{\bar{T}^{0.64}f^{0.64}}\right) \quad (1)$$

其中: \bar{F}_0 是锥体冰力幅值; \bar{T} 是锥体冰力周期, 此处 $\bar{T} = L_b/V$, 由破碎长度 L_b 与冰速 V 确定, 而 $L_b = kh$, h 是冰厚, k 是冰破碎长厚比。实测数据

统计结果表明冰破碎长厚比 k 接近正态分布, 范围在 3-10 之间, 均值为 7。

\bar{F}_0 可通过 Hirayama-Obara 公式计算如下:

$$F = B\sigma_f h^2 \left(\frac{D}{L_c}\right)^{0.34} \quad (2)$$

其中: F 为冰力; B 取 3.7; σ_f 为海冰弯曲强度, 本文取 0.7MPa; h 为冰厚; D 为锥体直径; L_c 为冰板特征长度, $L_c = \left(\frac{Eh^3}{12g\rho_w}\right)^{0.25}$, E 为冰弹性模量, 取 0.5GPa, ρ_w 为海水密度, g 为重力加速度。

锥体结构的冰荷载主要参数为冰厚、冰速以及冰弯曲强度。在进行疲劳寿命估计中还需要考虑冰期与冰流向, 因此, 冰疲劳环境分析主要包括上述五个参数。此处只列出冰厚 h 和冰速 V 的分布^[11-12], 以及平均有效冰期, 其它疲劳参数的概率分布可以参考文献[11-12]。

冰厚 h/cm 服从对数正态分布:

$$f(h) = \frac{1}{0.5503h\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln h - 1.8671}{0.5503}\right)^2\right] \quad (3)$$

冰速 $V/(\text{cm/s})$ 服从 Rayleigh 分布:

$$f(V) = \frac{V}{826.5512} \exp\left(-\frac{V^2}{1653.1024}\right) \quad (4)$$

平均有效冰期:

$$T_{\text{eff}} = \sum T_i \cdot P_i \quad /d \quad (5)$$

其中: P_i 是第 i 冰情等级出现的频次; T_i 是与之对应的有效冰期。数据表明 JZ20-2 海域的平均有效冰期是 42d。

1.2 复杂管节点热点应力的计算模型

热点应力是疲劳分析的一个关键环节。热点应力计算主要有两种方法。一种是通过名义应力乘以应力集中因子组合得到节点的热点应力^[2-3]。这种方法对于复杂荷载作用下的复杂空间节点很难应用, 如确定合适的应力集中因子、选择合适的热点应力计算组合方式等都很难。

另一种方法是直接利用有限元方法来计算热点应力。这个方法可处理复杂载荷工况和复杂管节点。比如, 规范就建议利用壳单元或者实体单元来模拟管节点, 然而如果对整体结构按照壳单元或者实体单元来计算热点应力计算量巨大。为了在提高计算效率的同时获得满意的热点应力, 我们提出了导管架平台疲劳分析的混合有限元模型, 在管节点

部位采用壳单元来划分单元，而对结构的其他部分采用梁单元模拟，并且通过约束方程来连接不同类型的单元。在 ANSYS 中可以通过约束方程(刚性域)按照 Saint-Venant 原理把壳单元和梁单元连接，这样可以直接获得复杂节点的热点应力。

1.3 改进的冰激疲劳谱分析方法

对于冰激疲劳寿命的谱分析，假设热点应力范围的分布是 Rayleigh 分布^[13]：

$$p(s) = \frac{s}{4m_0} \exp\left(-\frac{s^2}{8m_0}\right) \quad (6)$$

此处， s 是热点应力范围； m_0 是热点应力功率谱的零阶谱矩。

为了在疲劳分析中高效地计算热点应力响应的零阶谱矩，我们采用虚拟激励法^[20]。

虚拟激励法的基本思想^[20]是对于一个受到零均值的平稳随机激励的线性系统，输入功率谱密度 (PSD) S_{xx} ，而且输出 y 的自功率谱密度是 $S_{yy} = |H|^2 S_{xx}$ ，其中 H 为系统的频率响应函数。如果输入是简谐的 $\exp(i\omega)$ ，输出响应为 $H(\omega)\exp(i\omega)$ 。这样，如果实际输入的功率谱密度 S_{xx} 被一个简谐的虚拟激励 $\tilde{x} = \sqrt{S_{xx}} e^{i\omega t}$ 代替，响应就是 $\tilde{y} = \sqrt{S_{xx}} H e^{i\omega t}$ ，而且对于任意的响应有 $\tilde{y}_1 = \sqrt{S_{xx}} H_1 e^{i\omega t}$ 和 $\tilde{y}_2 = \sqrt{S_{xx}} H_2 e^{i\omega t}$ 。按照虚拟激励法有：

$$S_{yy} = \tilde{y}^* \tilde{y} = |\tilde{y}|^2 = |H|^2 S_{xx} \quad (7)$$

$$S_{y_1 y_2} = \tilde{y}_1^* \tilde{y}_2 = H_1^* S_{xx} H_2 \quad (8)$$

$$S_{y_2 y_1} = \tilde{y}_2^* \tilde{y}_1 = H_2^* S_{xx} H_1 \quad (9)$$

这里 \tilde{y}^* 是 \tilde{y} 的共轭。虚拟激励法意味着可以按照上文的方式通过构造的虚拟激励来计算输出的自功率谱密度和互功率谱密度。

利用虚拟激励法来计算热点应力的自功率谱密度，首先施加单位虚拟激励来计算相应的热点应力 $F_{hot,0}$ ，然后可以得到单位虚拟激励作用下的自功率谱密度：

$$S_{hot,0}(f) = F_{hot,0} F_{hot,0}^* = |F_{hot,0}|^2 \quad (10)$$

这里 $F_{hot,0}^*$ 是 $F_{hot,0}$ 的共轭。

而线性系统在第 k 个疲劳环境按公式(1)对应的冰力谱 $S_k(f)$ 的热点应力功率谱如下：

$$S_{hot,k}(f) = S_k(f) S_{hot,0}(f) \quad (11)$$

则它所对应的热点应力功率谱的零阶谱矩 $m_{0,k}$ 如下：

$$m_{0,k} = \int_{-\infty}^{\infty} S_{hot,k}(f) df \quad (12)$$

至此第 k 个疲劳环境按作用下的热点应力幅的概率密度函数 $p_k(s)$ 就可以按照式(6)计算。

图 1 给出了利用虚拟激励法进行冰激疲劳寿命预测的改进的方法的流程图，其中， D 表示累计疲

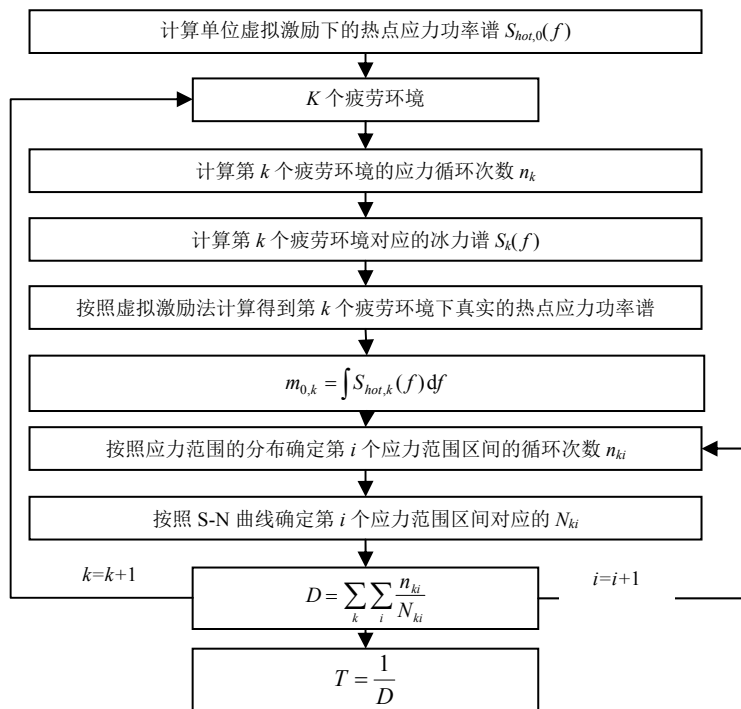


图 1 采用虚拟激励法的疲劳分析
Fig.1 Fatigue analysis using pseudo excitation method

劳损伤, T 表示疲劳寿命。本文的方法通过计算单位虚拟激励下的热点应力功率谱 $S_{hot,0}(f)$, 并利用虚拟激励法就可以通过代数运算得到第 k 个疲劳环境下的热点应力功率谱的零阶谱矩 $m_{0,k}$, 与传统的方法相比, 极大地减少了得到第 k 个疲劳环境下的热点应力功率谱 $S_{hot,k}(f)$ 所需的结构分析次数, 从而显著提高了疲劳寿命估计的效率。

2 冰激疲劳寿命可靠性估计

本文的冰激疲劳可靠性估计采用海洋工程结构可靠度分析中普遍采用的对数正态格式^[15]。

假设 S-N 曲线可以写成下式:

$$NS^m = A \quad (13)$$

于是结构的疲劳寿命为:

$$T_f = \frac{\Delta A}{B^m \Omega} \quad (14)$$

其中: Ω 为应力参数; A 是描述 S-N 曲线的随机变量; Δ 是表示结构发生疲劳破坏的累计损伤的随机变量; B 是描述疲劳分析中应力范围计算过程中的随机变量。

在对数正态格式的疲劳可靠性分析中, 假设 A 、 Δ 和 B 均为对数正态变量。

疲劳寿命的安全余量方程可写成:

$$Z = \ln T_f - \ln T_D \quad (15)$$

其中 T_D 是给定的设计寿命。

于是可靠度指标:

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\ln\left(\frac{\tilde{\Delta}\tilde{A}}{\tilde{B}^m \Omega T_D}\right)}{[\ln(1+C_\Delta^2) + \ln(1+C_A^2) + m^2 \ln(1+C_B^2)]^{\frac{1}{2}}} \quad (16)$$

其中: $\tilde{\Delta}$ 、 \tilde{A} 、 \tilde{B} 分别为 A 、 Δ 、 B 的中值; C_Δ 、 C_A 、 C_B 分别为 A 、 Δ 、 B 的变异系数; μ_z 、 σ_z 分别为式(15)中 Z 的均值和标准差。

在疲劳可靠性分析中应力参数 Ω 的计算量很大, 当应力范围短期分布为 Rayleigh 分布时有:

$$E(S^m)_k = \int_0^{+\infty} S^m \frac{S}{4\sigma_{S_k}^2} \exp\left(-\frac{S^2}{8\sigma_{S_k}^2}\right) ds = (2\sqrt{2}\sigma_{S_k})^m \Gamma\left(\frac{m}{2}+1\right) \quad (17)$$

其中 $\Gamma(\cdot)$ 是 Gamma 函数。

此时这个海况下的应力参数:

$$\Omega_k = f_{0k} E(S^m)_k = f_{0k} (2\sqrt{2}\sigma_{S_k})^m \Gamma\left(\frac{m}{2}+1\right) \quad (18)$$

则应力参数 Ω 如下:

$$\Omega = (2\sqrt{2})^m \Gamma\left(\frac{m}{2}+1\right) \sum_{k=1}^K \gamma_k f_{0k} \sigma_{S_k}^m \quad (19)$$

其中: γ_k 是第 k 个海况所占的比例; f_{0k} 是第 k 个海况中交变应力过程的跨零率; σ_{S_k} 为交变应力过程的标准差, 见下式。

$$\sigma_{S_k} = \sqrt{m_{0,k}} \quad (20)$$

按照改进的冰激疲劳寿命预测方法可以得到热点应力功率谱的零阶谱矩 $m_{0,k}$, 进而可以得到应力参数 Ω , 从而可以完成冰激疲劳可靠性的估计。

3 抗冰导管架疲劳可靠性优化模型

在渤海湾, 冰力周期和结构的固有周期接近, 这可能引发共振。所以在抗冰导管架疲劳可靠性优化模型中也应把结构的基频作为一个约束条件。故抗冰导管架疲劳可靠性优化模型如下:

设计变量: $\mathbf{X} = \{X_i, i=1, 2, \dots, n\}$

目标函数: 重量

约束条件: $\underline{f}_1 \leq f_1 \leq \overline{f}_1$ (21)

$$\beta \geq \underline{\beta}$$

$$\underline{X}_i \leq X_i \leq \overline{X}_i$$

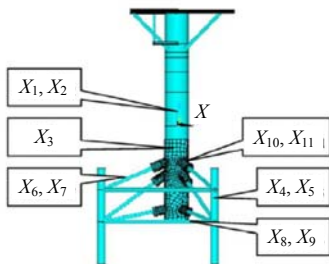
式中: 目标函数是导管架重量; \mathbf{X} 为设计变量向量, 可取构件尺寸(如管的直径和壁厚); 约束条件有结构的基频 f_1 、管节点的冰激疲劳可靠度指标 β 和构件尺寸 X_i 的约束。 \underline{f}_1 和 \overline{f}_1 为 f_1 的下限和上限, $\underline{\beta}$ 是 β 的下限, \underline{X}_i 和 \overline{X}_i 分别是设计变量 X_i 的下限和上限。对于极值静冰力下结构和构件的强度、刚度和稳定性等静力性能要求可以隐含地包括在设计变量的尺寸约束中^[21]。

对渤海 JZ20-2 NW 平台进行疲劳可靠性优化, 见图 2(a)。JZ20-2 NW 平台是独腿三桩的固定式导管架平台, 设计寿命 20 年, 安装水深 13.5m, 甲板高程 16.0m, 甲板上的质量 250t, 在海平面处安装有直径 6m 的锥体。利用 ANSYS 的 Mass 21 用来模拟上部质量, Shell 93 用来模拟管节点和 Pipe16 用来模拟导管架主体。采用 6 倍桩径等效的基础约束。Shell 93 和 Pipe16 的连接通过 ANSYS 提供的约束方程实现。管节点部分的网格划分参考 DNV 规范

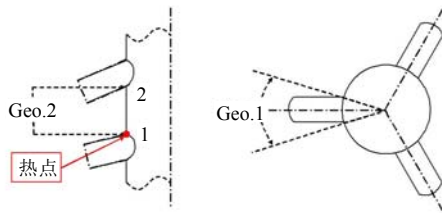
的建议^[3]。



(a) JZ20-2 NW 平台



(b) 网格划分与设计变量



(c) 热点示意图

图2 JZ20-2 NW 平台示意图

Fig.2 JZ20-2 NW platform

在结构疲劳分析时，冰力作用用海平面处，而且由于 JZ20-2 NW 是独腿平台此处忽略冰流向的影响。假设冰厚和冰速是相互独立的随机变量，并且把冰厚和冰速各分成 10 组(见表 1)，可以组合构成 100 种疲劳环境。疲劳可靠性估计时的参数取值如下：设计寿命 $T_D = 20$ a，可接受的可靠度指标 $\beta_0 = 3.0$ ， $m = 4.38$ ，且 $\tilde{\Delta} = 1.0$ 、 $\tilde{A} = 2.16 \times 10^{16}$ 、 $\tilde{B} = 1.0$ ； $C_{\Delta} = 0.53$ 、 $C_A = 0.73$ 、 $C_B = 0.20$ 。由于不改变节点的构型和结构的加载模式，所以热点位置见图 2(c)所示。表 2 中几何构型参数的意义如下：Geo.1 和 Geo.2 见图 2(c)，表明撑管之间不能出现重叠，这可保证布尔运算和网格划分可执行；Geo.3= X_{10}/X_6 ，说明节点部位弦杆的直径应当大于斜撑的直径；Geo.4= X_{11}/X_7 ，说明节点部位弦杆的壁厚应当大于斜撑的壁厚。Geo.3 和 Geo.4 的意思

是节点部位应当适当加强。

表 1 冰参数分组

Table 1 Groups of ice parameters

冰厚 h/m	标识	P_h	冰速 $v/(m/s)$	标识	P_v
0—0.04	h1	0.191137	0—0.1	v1	0.058699
0.04—0.08	h2	0.459065	0.1—0.2	v2	0.156221
0.08—0.12	h3	0.21901	0.2—0.3	v3	0.204908
0.12—0.16	h4	0.080849	0.3—0.4	v4	0.200283
0.16—0.20	h5	0.029803	0.4—0.5	v5	0.159488
0.20—0.24	h6	0.011533	0.5—0.6	v6	0.107102
0.24—0.28	h7	0.004724	0.6—0.7	v7	0.061693
0.28—0.32	h8	0.002043	0.7—0.8	v8	0.030779
0.32—0.36	h9	0.000929	0.8—0.9	v9	0.013379
0.36—0.40	h10	0.000907	0.9—1.0	v10	0.007447

注：采用分组的上限来生成冰力谱。

表 2 JZ20-2 NW 平台的优化设计的信息

Table 2 Optimization information of JZ20-2 NW platform

	初始值	优化值	下限	上限	说明
X_1/m	3.500	3.147	2.000	4.000	主柱的直径
X_2/m	0.038	0.021	0.020	0.070	主柱的壁厚
X_3/m	0.060	0.052	0.030	0.080	主柱节点部位的壁厚
X_4/m	1.300	1.000	1.000	2.500	桩腿的直径
X_5/m	0.050	0.039	0.030	0.080	桩腿的壁厚
X_6/m	0.762	0.500	0.500	1.500	斜撑的直径
X_7/m	0.025	0.021	0.020	0.050	斜撑的壁厚
X_8/m	0.610	0.521	0.400	1.000	水平撑杆的直径
X_9/m	0.025	0.020	0.020	0.050	水平撑杆的壁厚
X_{10}/m	1.300	1.219	0.500	1.500	斜撑节点部位的直径
X_{11}/m	0.050	0.043	0.020	0.080	斜撑节点部位的壁厚
f_1/Hz	1.006	0.747	0.630	2.000	结构的基频
β	4.743	4.149	3.0	—	可靠度指标
Geo.1/(°)	43.608	45.599	—	90	
Geo.2/m	0.230	0.268	0.06	—	
Geo.3	1.706	2.439	1.00	—	几何构型参数
Geo.4	2.000	2.091	1.00	—	
重量/t	319.67	206.11	—	—	导管架重量

设计变量和约束条件的收敛容差为 0.001，目标函数按初始设计归一化处理的收敛容差为 0.01，经过 7 次迭代目标函数收敛。优化结果见表 2，其中结构重量从 319.67t 减少到 206.11t，降低 35.52%，优化后的节点疲劳可靠指标为 4.149，满足 3.0 的要求。由于篇幅限制，详细的结果讨论可以参考文献[21]。

4 结论

本文利用锥体动冰力谱结合虚拟激励法实现冰激疲劳的快速高效分析，并考虑到热点应力计算的精度和效率，建立了在兼顾整体和局部的混合有限元模型，基于对数正态的疲劳可靠性，构造了抗

冰导管架疲劳可靠性优化模型。最后渤海 JZ20-2NW 平台算例分析表明,通过优化设计可以在满足节点疲劳可靠性要求的同时降低结构重量。本文提出的抗冰导管架疲劳可靠性优化方法可以为冰区海洋平台设计提供参考。

参考文献:

- [1] Almar-Naess A. Fatigue handbook: Offshore steel structures [M]. Flatasen, Norway: Tapir Publishers, 1985.
- [2] API RP 2A, Recommended practice for planning; designing and constructing fixed offshore platforms—Working stress design [S]. American Petroleum Institute, 2000.
- [3] DNV, Recommended practice DNV-RP-C203 fatigue strength analysis of offshore steel structures [S]. October, 2001.
- [4] 谭开忍, 肖熙, 黄小平. 非常规管节点疲劳寿命分析与计算[J]. 海洋工程, 2005, 23(3): 51—54, 59.
Tan Kairen, Xiao Xi, Huang Xiaoping. Analysis and calculation of fatigue life of unconventional tubular joints [J]. The Ocean Engineering, 2005, 23(3): 51—54, 59. (in Chinese)
- [5] 方华灿, 许发彦, 陈国明. 冰区海上平台管节点疲劳寿命计算的新方法[J]. 中国海洋平台, 1997, 12(6): 259—264.
Fang Huacan, Xu Fayan, Chen Guoming. A new method for fatigue life calculation of tubular joint of offshore platform in ice region [J]. China Offshore Platform, 1997, 12(6): 259—264. (in Chinese)
- [6] Fang H, Duan M, Wu Y, Fang X, Xu F. An integrated approach to fatigue life prediction of whole system for offshore platforms [J]. China Ocean Engineering, 2001, 15(2): 177—184.
- [7] 方华灿, 吴小微, 贾星兰. 渤海海冰作用下采油平台的模糊疲劳寿命估算[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 317—321.
Fang Huacan, Wu Xiaowei, Jia Xinglan. The fuzzy fatigue life estimation of a production platform under the action of sea ice in the Bohai sea [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 317—321. (in Chinese)
- [8] 岳前进, 毕祥军, 于晓, 时钟民. 锥体结构的冰激振动与冰力函数[J]. 土木工程学报, 2003, 36(2): 16—19.
Yue Qianjin, Bi Xiangjun, Yu Xiao, Shi Zhongmin. Ice-induced vibration and ice force function of conical structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(2): 16—19. (in Chinese)
- [9] Yue Q J, Qu Y, Bi X J, Kärnä T. Ice force spectrum on narrow conical structures [J]. Cold regions science and technology, 2007, 49(2): 161—169.
- [10] Qu Y, Yue Q J, Bi X J, Kärnä T. A random ice force model for narrow conical structures [J]. Cold Regions Science and Technology, 2006, 45(3): 148—157.
- [11] 季顺迎, 岳前进, 毕祥军. 辽东湾 JZ20-2 海域海冰参数的概率分布[J]. 海洋工程, 2002, 20(3): 39—44.
Ji Shunying, Yue Qianjin, Bi Xiangjun. Probability distribution of sea ice fatigue parameters in JZ20-2 sea area of the Liaodong bay [J]. The Ocean Engineering, 2002, 20(3): 39—44. (in Chinese)
- [12] 季顺迎, 岳前进. 辽东湾锥体平台结构疲劳冰荷载的蒙特卡洛模拟[J]. 海洋学报, 2003, 25(2): 114—119.
Ji Shunying, Yue Qianjin. Monte-Carlo simulation of fatigue ice-load for offshore platform with ice-broken cone in the Liaodong gulf [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003, 25(2): 114—119. (in Chinese)
- [13] Yue Q J, Liu Y, Zhang R, Qu Y, Wang R. Ice-induced fatigue analysis by spectral approach for offshore jacket platforms with ice-breaking cones [J]. China Ocean Engineering, 2007, 21(1): 1—10.
- [14] Li G, Liu X, Liu Y, Yue Q J. Optimum design of ice-resistant offshore jacket platforms in the Bohai gulf in consideration of fatigue life of tubular joints [J]. Ocean Engineering, 2008, 35(5-6): 484—493.
- [15] Wirsching P H. Fatigue reliability for offshore structures [J]. Journal of Structural Engineering, 1984, 110(10): 2340—2356.
- [16] 胡毓仁, 陈伯真. 船舶及海洋工程结构疲劳可靠性分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
Hu Yuren, Chen Bozhen. Fatigue reliability analysis of ship and ocean engineering structures [M]. Beijing: Communications Press, 1996. (in Chinese)
- [17] Fang H, Duan M, Xu F, Shen Z, Liu Y. Reliability analysis of ice-induced fatigue and damage in offshore engineering structures [J]. China Ocean Engineering, 2000, 14(1): 15—24.
- [18] Fang H, Duan M, Jia X, Xie B. Fuzzy fatigue reliability analysis of offshore platforms in ice-infested waters [J]. China Ocean Engineering, 2003, 17(3): 307—314.
- [19] 李刚, 张大勇, 岳前进. 冰区海洋平台的时变疲劳可靠性分析[J]. 计算力学学报, 2006, 23(5): 513—517.
Li Gang, Zhang Dayong, Yue Qianjin. Time-dependent fatigue reliability analysis of offshore platforms in ice zone [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2006, 23(5): 513—517. (in Chinese)
- [20] 林家浩, 张亚辉. 随机振动的虚拟激励法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
Lin Jiahao, Zhang Yahui. Pseudo excitation method of random vibration [M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [21] 刘翔. 面向动力性能的抗冰导管架平台优化设计研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
Liu Xiang. Research on dynamic performance-oriented design optimization for ice-resistant jacket platforms [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)