

Research on Ice Induced Fatigue of a Jacket Platform in Bohai Sea

Yufeng Tian

School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin
Email: tianyufeng@tju.edu.cn

Received: Nov. 30th, 2015; accepted: Dec. 20th, 2015; published: Dec. 23rd, 2015

Copyright © 2015 by author and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The ratio of the marginal ice zone in Bohai Sea is increasing with global climate warming. The dynamic condition in the marginal ice zone is complex, so the ice induced fatigue of a jacket platform in Bohai Sea attracts more attention. The ice induced fatigue of a jacket platform in Bohai Sea was analyzed by ANSYS software. According to the ice conditions in that sea area in winter, the reasonable ice induced fatigue working conditions were established first. The dynamic ice load time-history for each ice condition was determined by the dynamic ice load function. Then the transient dynamic analysis in time domain was advanced for the jacket platform. Based on the S-N curve, the fatigue lives of tubular joints in jacket platform legs were analyzed. The fatigue resistance requirement of the structure was satisfied. The analysis method of the ice induced fatigue was effective to solve this kind of problem, and is significant for the design and evaluation for the offshore structure.

Keywords

Marginal Ice Zone, Ice Induced Fatigue, Jacket Platform, Transient Dynamic Analysis

渤海海域导管架平台冰激疲劳研究

田育丰

天津大学建筑工程学院, 天津
Email: tianyufeng@tju.edu.cn

收稿日期：2015年11月30日；录用日期：2015年12月20日；发布日期：2015年12月23日

摘要

随全球气候变暖，渤海海域冰边缘区占比不断升高，冰边缘区复杂的动力学条件使得渤海海域导管架平台的冰激疲劳问题引起人们更多关注。本文使用ANSYS有限元软件对渤海某海域一导管架平台进行了冰激疲劳分析。文中首先根据该海域冬季冰情条件，设置了合理的冰激疲劳分析工况。由概化冰力函数确定了各分析工况下的动冰力时程，进而对导管架平台进行了全时域瞬态动力分析。根据S-N曲线法分析了导管架平台各主桩腿上管节点的疲劳寿命，均满足结构抗疲劳性能要求。文中冰激疲劳分析方法是解决渤海海域海洋工程结构冰激疲劳问题的有效方法，对海洋工程结构设计和评估具有重要意义。

关键词

冰边缘区，冰激疲劳，导管架平台，瞬态动力分析

1. 引言

随着世界化石能源危机加剧，陆地油气资源开采已趋于饱和，海洋油气资源开发已成为世界各国能源领域的发展重心。我国渤海海域大陆架面积广阔，水深较浅，风浪条件较为温和，现已进入油气开发的成熟期，大量海洋工程结构物建立于此。其中，导管架平台安全性高、经济性好、技术成熟，是渤海海域油气开发的主要结构型式。

另一方面，我国渤海海域的环境条件也具有一定的特殊性。我国渤海地理位置偏北，冬季易受西伯利亚南下冷空气影响，每年都会有不同程度的结冰现象，成为北半球结冰海域的南边界。同时，随着全球气候变暖，渤海海域冰边缘区范围扩大，渤海中热力学条件和动力学条件更为复杂。在有冰海域中，冰载荷往往远大于波浪、海流和风等其他环境载荷，成为决定结构安全性能的控制载荷。

随冰边缘区范围扩大，作用于渤海海域导管架平台上的冰力极值有所减小。然而随着海洋动力学条件更为复杂，导管架平台在海冰作用下的疲劳问题日益显著[1] [2]。本文即对渤海某海域一导管架平台的冰激疲劳寿命进行数值模拟分析，检验疲劳寿命是否满足结构设计要求。本文所采用的全时域数值分析方法可以作为渤海有冰海域海洋工程结构疲劳分析的有效方法，从而对渤海海域海洋平台的设计和评估具有重要的意义。

2. 冰激疲劳分析工况

为考虑海冰作用下结构的疲劳寿命，就需要掌握平台所处海域各种海冰参数的概率分布情况。决定海冰对结构作用效果的冰参数主要包括冰厚、冰速和冰向。根据我国对渤海海域进行的一系列冰情和冰参数调查资料，可建立冰厚和冰速的概率分布函数如下：

冰厚概率分布函数：

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

冰速概率分布函数：

$$f(V) = \frac{V}{826.551} \exp\left(-\frac{V^2}{1653.102}\right) \quad (2)$$

本文分析的导管架平台所处海域每年冰期为 32 天, 100 年遇最大冰厚为 47.5 cm, 海冰最大漂移速度为 130 cm/s。这里冰厚以 5 cm 步长递增, 冰速以 20 cm/s 步长递增, 通过概率分布函数得到各冰厚、冰速范围的出现概率。海冰的漂移方向受到海流和风的共同作用, 结合该导管架平台所处海域的主流向和主风向, 确定海冰的主要漂移方向为 SW 和 NE。其中, SW 方向上的概率分布为 55%, NE 方向上的概率分布为 45%。综合上述条件, 可得各冰厚范围、冰速范围和冰向的联合概率分布如表 1 和表 2 所示。

在设置冰激疲劳分析工况时考虑海冰参数应与其概率分布相对应, 因此在计算工况中将冰速分为 20、40、60、80、100、130 cm/s 共 6 种情况, 分别代表相应冰速范围的出现概率; 将冰厚分为 5、10、15、20、25、30、35、48 cm 共 8 种情况, 分别代表相应冰速区间的出现概率; 将冰向分为 SW 和 NE 两种情况。这些冰条件涵盖了导管架平台所处海域可能出现的冰情特征, 组合三种海冰参数共形成 98 种计算工况。按照三种海冰参数对这些计算工况进行区分和命名, 命名示例:

130-48-SW

① ② ③

其中①表示冰速(cm/s), ②表示冰厚(cm), ③表示冰向。由包含冰厚、冰速和冰向的概率分布情况就可以

Table 1. Joint probability distribution of ice thickness and ice velocity in SW ice direction

表 1. SW 冰向的冰厚、冰速联合概率分布

冰厚(cm)	冰速(cm/s)					
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	100~130
0~5	4.14571	5.38145	2.94124	0.87134	0.27799	0.02292
5~10	6.19395	8.04022	4.39440	1.30183	0.41534	0.03425
10~15	2.23283	2.89838	1.58412	0.46929	0.14972	0.01235
15~20	0.71101	0.92294	0.50443	0.14944	0.04768	0.00393
20~25	0.24010	0.31167	0.17034	0.05046	0.01610	0.00133
25~30	0.08778	0.11395	0.06228	0.01845	0.00589	0.00049
30~35	0.03459	0.04490	0.02454	0.00727	0.00232	0.00019
35~40	0.01449	0.01881	0.01028	0.00305	0.00097	0.00008
40~48	0.01272	0.01651	0.00902	0.00267	0.00085	0.00007

Table 2. Joint probability distribution of ice thickness and ice velocity in NE ice direction

表 2. NE 冰向的冰厚、冰速联合概率分布

冰厚(cm)	冰速(cm/s)					
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	100~130
0~5	5.06697	6.57732	3.59485	1.06497	0.33977	0.02802
5~10	7.57038	9.82694	5.37093	1.59113	0.50764	0.04186
10~15	2.72901	3.54247	1.93614	0.57358	0.18300	0.01509
15~20	0.86901	1.12804	0.61653	0.18265	0.05827	0.00480
20~25	0.29346	0.38093	0.20820	0.06168	0.01968	0.00162
25~30	0.10729	0.13927	0.07612	0.02255	0.00719	0.00059
30~35	0.04228	0.05488	0.03000	0.00889	0.00284	0.00023
35~40	0.01771	0.02299	0.01257	0.00372	0.00119	0.00010
40~48	0.01554	0.02017	0.01103	0.00327	0.00104	0.00009

形成冰激疲劳分析工况，对这些工况在时域内进行冰激疲劳分析。

3. 导管架平台动冰力时程

本文分析的导管架平台在水线面附近桩腿上安装了抗冰锥体，抗冰锥体可以引导冰排在结构前由发生挤压破坏变为弯曲破坏，海冰的抗弯强度一般情况下远小于抗压强度，从而减小作用于结构上的静冰力极值[3]。另一方面，抗冰锥体改变了结构冰激振动的控制机理，将由海冰与直立桩相互作用进程控制的振动模式，转变为由弯曲破坏冰力控制的强迫振动[4]。为有效反映海冰载荷的非线性特征，使用概化冰力函数描述各冰激疲劳分析工况下的动冰力时程(如图 1)。概化冰力函数如下式所示[5]：

概化冰力函数：

$$f(t) = \begin{cases} \frac{F_1}{t_1}(t-nT) & 0 \leq t-nT \leq t_1 \\ -\frac{F_1-F_3}{t_2}(t-nT-t_1) & t_1 < t-nT \leq t_2 \\ \frac{F_2-F_3}{t_3}(t-nT-T_1) & t_2 < t-nT \leq t_3 \\ -\frac{F_2}{t_4}(t-nT-T_1-t_3) & t_3 < t-nT \leq t_4 \end{cases} \quad (3)$$

$n = 0, 1, 2, 3, \dots$

式中， F_1 为第一次断裂冰力峰值； t_1 为第一次断裂冰力加载时间； t_2 为第一次断裂冰力卸载时间； F_2 为第二次断裂冰力峰值； t_3 为第二次断裂冰力加载时间； t_4 为第二次断裂冰力卸载时间； T 为二次断裂进程总周期； F_3 为第一次断裂冰力卸载后的残余冰力。

根据图 1，可以从以下几个方面对冰力的作用特征进行描述：

1) 冰力作用周期

由于二次断裂事件是发生在初次断裂的楔形梁上，所以 T 由冰排的初次断裂长度 l 和冰速 V 控制：

$$T = l/V \quad (4)$$

由图 1 可以看出，两次断裂进程的总周期 T 又包含四个分量，即两次冰力加载进程用时 t_1 和 t_3 ，以

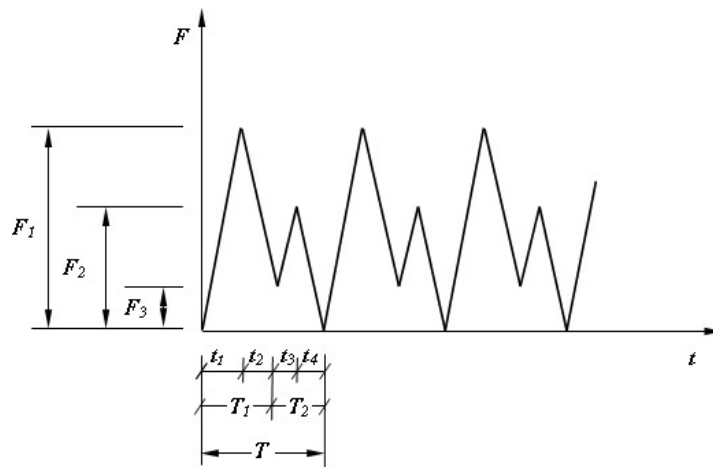


Figure 1. Sketch of the dynamic ice load function of the large pitch angle cone

图 1. 大倾角锥体概化冰力函数示意图

及两次冰力卸载进程用时 t_2 和 t_4 。这几个参量之间的比例关系反映了冰力随时间的变化趋势, 即 t_1/t_2 、 t_3/t_4 和 T_1/T_2 , 其中, $T_1 = t_1 + t_2$, 为第一次冰力加载—卸载过程所需时间; $T_2 = t_3 + t_4$, 为第二次冰力加载—卸载过程所需时间。

2) 二次断裂冰力作用水平

二次断裂冰力作用水平决定了冰力中高频成分能量的大小, 所以对该参量的准确把握是构建冰力函数的关键因素之一。对二次断裂冰力作用水平 r 可作如下定义:

$$r = \frac{F_2 - F_3}{F_1 - F_3} \quad (5)$$

3) 残余冰力水平

残余冰力水平可定义为第一次断裂冰力卸载后的残余冰力 F_3 与第一次断裂冰力峰值的 F_1 比值, 即 F_3/F_1 。

3.1. 冰力周期

尽管冰排初次断裂长度 l 与冰厚的比值处于一个固定的范围之内, 即 4.7~9.3, 但该值随冰速的变化呈现出一种规律性的浮动:

$$l/t = 10.79 - 4.88V/\sqrt{gt} \quad (6)$$

其中, t 为冰厚, V 为冰速, g 为重力加速度。

冰力作用总周期 T 即可根据上述断裂长度的变化规律得到其相应的规律, 其他周期参数的取值为:

$$\begin{cases} t_1/t_2 \approx 1.05 \\ t_3/t_4 \approx 0.98 \\ T_1/T_2 = \frac{t_1 + t_2}{t_3 + t_4} \approx 1.25 \end{cases} \quad (7)$$

3.2. 二次断裂冰力作用水平

二次断裂冰力作用水平 r 同样随冰速的变化呈现规律性的改变:

$$r = -0.33 + 0.97V/\sqrt{gh} \quad (8)$$

3.3. 残余冰力水平

残余冰力水平 F_3/F_1 随冰速的变化规律可归纳为:

$$F_3/F_1 = 0.97 - 0.89V/\sqrt{gh} \quad (9)$$

3.4. 一次断裂冰力作用水平

第一次断裂冰力峰值 F_1 的确定可依照 API RP 2N-1995 规范[6]中推荐的塑性极限法进行计算。塑性极限法是 Ralston 基于冰的塑性极限分析提出的计算模型。Ralston 模型假设外力的作用速率与系统总能量的耗散率相等, 推导出水平方向冰力(公式 10)和垂向冰力(公式 11):

$$R_H = \left[A_1 \sigma_f t^2 + A_2 \rho_w g t D^2 + A_3 \rho_w g t_R (D^2 - D_T^2) \right] A_4 \quad (10)$$

$$R_V = B_1 R_H + B_2 \rho_w g t_R (D^2 - D_T^2) \quad (11)$$

其中, σ_f 是冰排的抗弯强度, ρ_w 是水的密度, t 是完整冰排厚度, t_R 是断裂后沿锥面上爬碎冰层的厚度, D 是锥形结构水线面处直径, D_T 是锥形结构顶部直径, g 是重力加速度, A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 B_1 、 B_2 是系数。水平方向冰力(公式 10)是由能量平衡推导得出, 垂向冰力(公式 11)是由锥形结构上的静力平衡推导得出的。公式 10 右边前两项表示冰排发生弯曲破坏时产生的水平方向的冰力, 第三项表示冰排对锥面的摩擦力。公式 11 右边第一项表示冰排发生弯曲破坏时产生的垂向冰力, 第二项表示锥面上冰排的重力。

公式中的系数 A_1 、 A_2 是 K 的函数, 其中 K 的表达式为(公式 12):

$$K = \frac{\rho_w g t D^2}{\sigma_f t^2} \quad (12)$$

于是得到系数 A_1 、 A_2 的表达式(公式 13, 14):

$$A_1 = \frac{1 + 2.711 p \ln p}{3(p-1)} \quad (13)$$

$$A_2 = 0.075(p^2 + p - 2) \quad (14)$$

其中, p 是方程 15 的数值解, 公式 15 的表达式为:

$$p - \ln p + 0.083k(2p+1)(p-1)^2 = 1.369 \quad (15)$$

4. 导管架平台有限元模型

本文使用 ANSYS 有限元软件建立导管架平台的结构模型(如图 2)。结构模型的 Z 向零点位于海图零点高程处, X、Y 方向上零点位置在主桩腿之间的中心位置处。平台导管架结构在 X 方向上长 45 m, Y 方向上长 40 m, 工作平面高 7 m, 水深 23.9 m。上部模块共 6 层甲板, 甲板在 X 方向上长 55 m, Y 方向上长 56 m, 上层甲板高程为 34.3 m。平台结构的阻尼比为 5%, 设计寿命为 25 年。

在平台下部导管架结构中, 有限元模型使用 pipe 59 和 pipe 16 单元分别模拟了导管架部分的主要构件。模型忽略了附属构件的结构型式, 将其质量施加在导管架结构相应位置处。平台上部模块的结构型式在数学模型中完整模拟, 包括甲板、梁格、立柱和撑杆等。其中, 甲板采用 shell 63 单元模拟, 梁格和

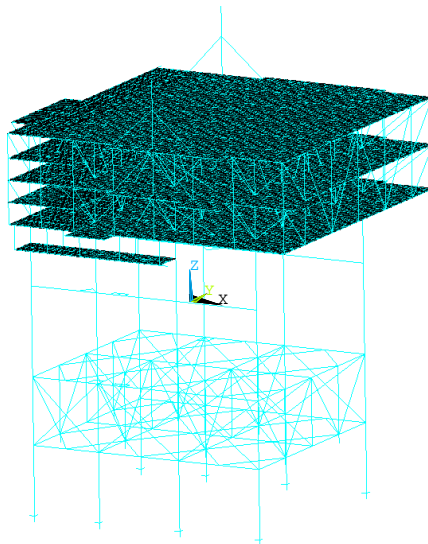


Figure 2. Sketch of the structure model
图 2. 结构模型图

立柱等结构使用 beam 188 单元表示。模型忽略了甲板上各种设备的结构型式，考虑将其质量附加在对应位置。桩基础的约束形式是在各桩泥面位置施加一刚度矩阵，刚度矩阵是通过现场土壤的 P-Y、T-Z 和 Q-Z 三条特性曲线经计算得到的。

5. 模态分析

在对导管架模型进行全时域冰激疲劳分析之前，首先对结构进行模态分析，准确获取结构的动力特性。通过计算得到平台前 3 阶自振频率如表 3 所示，前 3 阶振型如图 3~图 5。

6. 冰激疲劳分析

在数值模拟中将各冰激疲劳分析工况下的动冰力时程施加在导管架平台水线面位置，对结构进行全时域动力分析。在计算中采用瞬态动力分析求解方法，是为了尽可能模拟实际作用过程中的非线性因素，保证计算方法的非线性。在计算中，为避免瞬态效应对分析结果的影响，需保证足够长的计算时间，本文中设置计算时间大于 20 倍冰力作用周期。同时，为保证分析结果精度，计算时间步长需设置足够小，本文中设置为冰力作用周期和结构 1 阶自振周期中较小者的 1/20。

6.1. 应力集中系数(SCF)

管节点是海洋工程结构物最易发生疲劳破坏的位置，造成这一现象的原因正是管节点位置有着很高的局部应力集中效应。应力集中系数(SCF)反映了这一应力集中效应，即管节点处实际应力与名义应力的差异。应力集中系数的取值与管节点类型、管节点处各构件尺寸和位置、以及管节点受力情况等因素有

Table 3. The first three orders natural vibration frequencies of the jacket platform model

表 3. 导管架平台模型前 3 阶自振频率

阶数	频率(Hz)
1	0.346
2	0.379
3	0.470

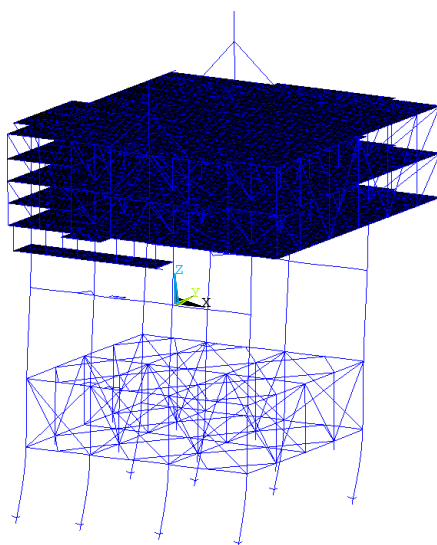


Figure 3. 1st mode shape of the jacket platform

图 3. 导管架平台 1 阶振型

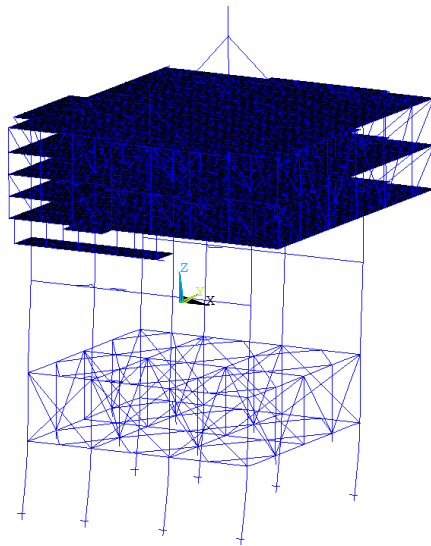


Figure 4. 2nd mode shape of the jacket platform
图 4. 导管架平台 2 阶振型

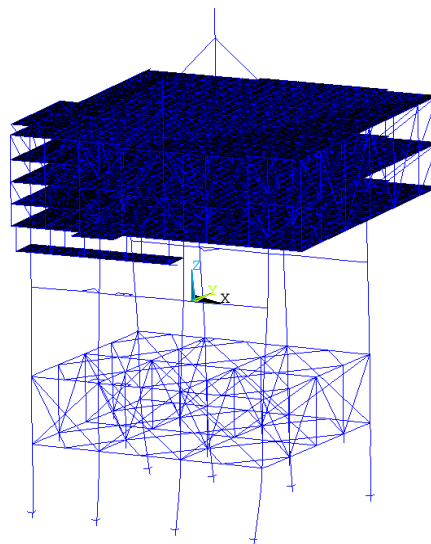


Figure 5. 3rd mode shape of the jacket platform
图 5. 导管架平台 3 阶振型

关。主桩腿上的管节点是导管架结构中的主要管节点，这些位置应力集中效应更为显著，需要重点分析这些主要管节点的疲劳寿命。

为区分导管架主桩腿上各管节点并表达其位置信息，将各管节点按照以下规则命名：

$$\frac{A1-EL+5000}{\textcircled{1} \quad \textcircled{2}}$$

其中①代表导管架桩腿编号，②代表管节点所在高程。

6.2. 热点应力范围

平台结构各主要管节点的名义应力范围可由 ANSYS 软件的时域分析结果中读取。由于在瞬态动力分析中已包含了动力放大效应的影响，所以只需将名义应力范围与应力集中系数相乘即可得到热点应力范围 $\Delta\sigma_{hot}$ 。

$$\Delta\sigma_{hot} = SCF \cdot \Delta\sigma_m \quad (16)$$

6.3. 应力循环次数

使用雨流计数法统计样本应力时程曲线中的应力循环次数。将样本的应力循环次数除以样本加载时间得到应力循环频率 f_n 。结合导管架平台所处海域每年的冰情特征，可以得到年应力循环总次数 n_y 。

$$n_y = 86400 \times 32 \times f_n \quad (17)$$

其中，86400 是一天内秒数，32 是平台所处海域年平均冰期天数。将年应力循环总次数乘以该冰激疲劳工况的出现概率，可以得到该工况下的应力循环次数。

6.4. S-N 曲线的选取

将各冰激疲劳分析工况下各管节点的热点应力范围和年循环次数代入 S-N 曲线中，即可求得该管节点的年疲劳损伤。在冰激疲劳分析中选用 API RP 2A-WSD(2007)规范[7]推荐的管节点 S-N 曲线。管节点基础设计 S-N 曲线可以写成下式形式：

$$\log_{10}(N) = \log_{10}(k_1) - m \log_{10}(S) \quad (18)$$

其中，N 为在应力范围 S 下预计发生破坏时的应力循环次数， k_1 为一常数， m 为 S-N 曲线的反斜率。

规范根据不同管节点类型推荐了两种 S-N 曲线，即 WJ 曲线和 CJ 曲线。其中，WJ 曲线适用于焊接管节点，而 CJ 曲线主要用于浇铸类型的管节点。对于这两种不同类型的管节点，S-N 曲线表达式中的各参数取值不同，取值结果列于表 4。

结合本文分析的导管架平台结构型式，应选用 WJ 曲线进行疲劳分析。WJ 曲线形式如图 6 所示。

Table 4. Parameter values of S-N curve in basic design

表 4. 基础设计 S-N 曲线参数取值

曲线	$\log_{10}(k_1)$ S(ksi)	$\log_{10}(k_1)$ S(MPa)	m
焊接管节点(WJ)	9.95	12.48	3 $N < 10^7$
	11.92	16.13	5 $N > 10^7$
浇铸管节点(CJ)	11.80	15.17	4 $N < 10^7$
	13.00	17.21	5 $N > 10^7$

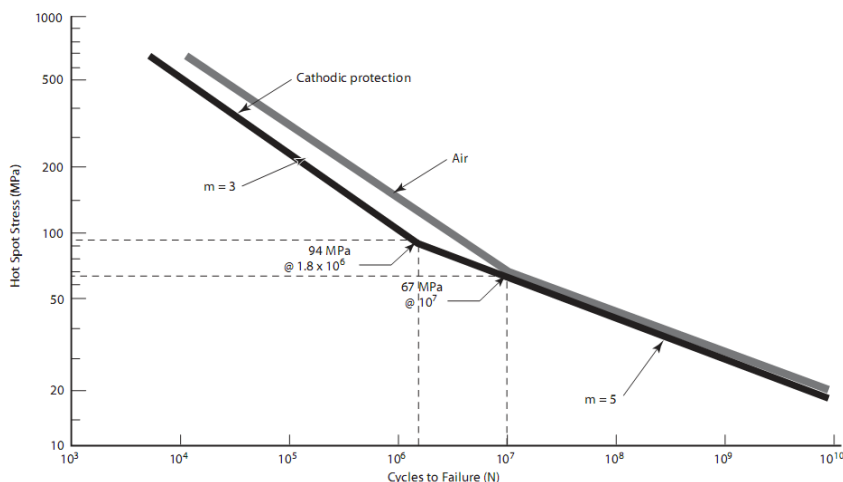


Figure 6. S-N curve of the tubular joint

图 6. 管节点 S-N 曲线

Table 5. Fatigue lives of tubular joints in jacket legs
表 5. 导管架主桩腿各管节点疲劳寿命

管节点	累积疲劳损伤	疲劳寿命(年)
A1-EL+5000	1.33E-03	750.07
A1-EL-11500	9.09E-04	1099.66
A1-EL-23900	1.37E-04	7280.48
A2-EL+5000	1.43E-03	697.49
A2-EL-11500	8.01E-03	124.86
A2-EL-23900	1.78E-04	5604.06
A3-EL+5000	7.57E-04	1320.77
A3-EL-11500	1.56E-03	642.03
A3-EL-23900	3.01E-04	3326.49
A4-EL+5000	7.74E-04	1291.49
A4-EL-11500	2.03E-03	491.54
A4-EL-23900	2.47E-04	4054.85
B1-EL+5000	1.89E-03	530.34
B1-EL-11500	1.58E-03	634.13
B1-EL-23900	1.94E-04	5156.81
B2-EL+5000	2.07E-03	482.47
B2-EL-11500	1.40E-02	71.38
B2-EL-23900	2.89E-04	3465.31
B3-EL+5000	6.94E-04	1441.77
B3-EL-11500	1.69E-03	590.97
B3-EL-23900	2.66E-04	3757.03
B4-EL+5000	7.13E-04	1403.06
B4-EL-11500	2.26E-03	443.24
B4-EL-23900	2.22E-04	4503.06

6.5. 疲劳寿命

本文分析的导管架平台有 8 个桩腿，每个桩腿上有 3 个管节点，共计 24 个主要管节点。将各工况下每个管节点上的疲劳损伤分别线性叠加就得到各管节点的累积疲劳损伤，进而可以确定疲劳寿命(见表 5)。

由表可见，各管节点的最小疲劳寿命为 71.38 年，出现在管节点 B2-EL-11500 处。导管架平台主桩腿上各管节点的疲劳寿命均远大于平台设计寿命 25 年。导管架平台结构可以承受所在海域周期冰力作用下的疲劳损伤，满足平台设计寿命要求。

7. 结语

本文对渤海某海域一导管架平台进行了冰激疲劳分析。在数值模拟过程中，建立了精细的导管架平台结构模型；根据现场冰情条件划分了合理的冰激疲劳分析工况，并依据概化冰力函数确定了动冰力时

程；将海冰载荷施加在结构模型上进行全时域瞬态动力分析；从而准确模拟了导管架平台冰激振动的响应特征。依据规范中推荐的 S-N 曲线法，分析了导管架平台主桩腿上各管节点的累积疲劳损伤，进而得到各管节点的疲劳寿命。经分析，结构各管节点的疲劳寿命均大于设计寿命，该导管架平台满足抗疲劳性能要求。

本文工作是对渤海有冰海域导管架平台冰激疲劳分析方法的有益探讨。该时域分析方法可以作为冰区海洋工程结构冰激疲劳设计和校核的有效方法，对渤海海域海洋平台的设计和评估具有重要意义。

基金项目

国家自然科学基金青年科学基金项目(51409185)。

参考文献 (References)

- [1] Huang, Y., Ma, J.J. and Tian, Y.F. (2013) Model Tests of Four-Legged Jacket Platforms in Ice: Part 1. Model Tests and Results. *Cold Region Science and Technology*, **95**, 74-85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2013.07.004>
- [2] Huang, Y., Yu, M. and Tian, Y.F. (2013) Model Tests of Four-Legged Jacket Platforms in Ice: Part 2. Analyses and Discussions. *Cold Region Science and Technology*, **95**, 86-101. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2013.07.003>
- [3] Sodhi, D.S. (2001) Crushing Failure during Ice-Structure Interaction. *Engineering Fracture Mechanics*, **68**, 1889-1921. [http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7944\(01\)00038-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7944(01)00038-8)
- [4] Yue, Q.J., Guo, F.W. and Karna, T. (2009) Dynamic Ice Forces of Slender Vertical Structures Due to Ice Crushing. *Cold Regions Science and Technology*, **56**, 77-83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2008.11.008>
- [5] Huang, Y., Shi, Q.Z. and Song, A. (2007) Model Test Study of Dynamic Ice Force on Compliant Conical Structures. *China Ocean Engineering*, **21**, 11-22.
- [6] (1995) API RP 2N, Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Structures and Pipelines for Arctic Conditions.
- [7] (2007) API RP 2A-WSD, Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms —Working Stress Design.