

文章编号:0254-0096(2018)09-2508-07

极端海冰荷载作用下海上升压站平台安全评价

左晶晶^{1,2}, 李 昕^{1,2}, 王文华^{1,2}, 娄诣科^{1,2}, 钟 耀³

(1. 大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室, 大连 116024; 2. 大连理工大学建设工程学部水利工程学院工程抗震研究所, 大连 116024;
3. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 长沙 410014)

摘 要: 为验证海上升压站在极端冰荷载作用下具有足够可靠度, 首先基于包含截面弯曲刚度相似的弹性相似律设计得到了简易海上升压站平台动力试验模型, 然后采用 DUT-1 模型冰开展不同来冰方向下的动力模型试验, 得到作用于模型桩腿的挤压破碎冰力时程, 并验证桩腿遮蔽效应对冰力时程的影响。依据荷载相似比尺换算得到原型相似冰力时程, 在 SACS 中建立海上升压站平台有限元模型, 开展动冰荷载作用下结构强迫振动分析, 得到动冰荷载作用下的结构反应, 进一步依据海上电气平台设计规范验证上述极端海冰荷载作用下海上电器平台结构具有足够可靠度。

关键词: 海上平台; 海冰; 试验设计; 可靠度评价; 有限元

中图分类号: U674.38

文献标识码: A

0 引 言

参照国内外已有工程经验, 距离海岸线 15 km 以上的大型海上风电场需要采用海上升压站平台进行海上升压^[1]。目前国内外海上升压站平台在无冰浅海区域的设计理论及方法均较成熟, 考虑到冰区海洋石油平台由于海冰荷载影响曾发生多次工程事故^[2-4], 冰区的海上升压站平台结构安全设计应当引起足够重视。目前对于冰区海上升压站平台设计仍处于探索阶段, 海上升压站平台的结构特征与石油平台基本相同^[5], 所以现阶段对升压站平台的抗冰性能分析可参考同一冰区采油平台的相关研究成果。

渤海作为中国唯一冬季结冰的海域, 在该海域内建设海上风电场, 要特别考虑海冰载荷的影响。研究表明^[6], 海冰荷载已成为渤海海域近海工程结构安全校核的控制荷载之一。

海冰荷载对海洋结构的作用可分为静冰荷载和动冰荷载两种形式。对于静冰荷载研究重点在于结构最大静冰力计算以及极端冰荷载作用下的结构安全校核。李玉珊^[7]提出考虑堵塞和非堵塞

2 种情况下导管架静冰力计算方法, 并结合工程实例与试验结果进行比较。陶冉冉^[8]运用 Schwarz 公式和有限元方法计算得到辽东湾某导管架平台在极限静冰荷载作用下的结构安全储备系数。杨耀鹏等^[5]采用有限元方法得到渤海某新建升压站平台在极值冰力下的最大结构变形和应力强度。

随着研究的深入发现由动冰荷载导致的平台结构振动已成为威胁冰区海洋结构物可靠度的重要因素^[9]。动冰荷载引起的结构振动包括强迫振动、自激振动和偶联振动, 但多数为冰致强迫振动^[10]。

本文以国内某海上风电场升压站平台为研究背景, 通过开展模型冰作用下的海上升压站平台模型试验得到动冰力时程, 基于有限元模型, 研究不同来冰方向下结构的动力反应, 对极端海冰荷载作用下的海上升压站平台结构进行安全评价分析。

1 结构动力模型试验

1.1 试验设计

为保证模型试验的测量精度, 选用较大的模型比尺进行试验设计, 本试验选用的几何比尺为 30。

收稿日期: 2016-05-18

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体基金(51421064)

通信作者: 李 昕(1971—) 男, 博士、教授, 主要从事海上风电、海底管线以及工程结构防灾减灾方面的研究。lixin@dlut.edu.cn

几何比尺为结构原型尺寸与结构模型模型几何尺寸的比值。后续推导中同理, λ 代表结构原型与结构模型所对应的下标物理量的比值。在保证海冰破坏形态相似的前提下, 采用弹性相似律^[11]设计海上升压站平台简易动力试验模型和 DUT-1 模型冰几何及材料参数。

$$\lambda_\rho \cdot \lambda_A \cdot \lambda \cdot \lambda_u \cdot \lambda_t^{-2} = \lambda_l \cdot \lambda_E \cdot \lambda_u \cdot \lambda^{-3} \quad (1)$$

式中, λ_ρ ——密度比尺; λ_A ——横截面面积比尺; λ ——几何比尺; λ_u ——变形比尺; λ_t ——时间比尺;

表1 试验模型及海冰关键设计参数

Table 1 Key Parameters of test model and sea ice

| 项目 | 模型参数 | | 海冰参数 | | |
|----|--------|--------|-------|-----------|------------------------|
| | 桩腿长度/m | 桩腿直径/m | 冰厚/m | 冰抗压强度/MPa | 试验冰速/m.s ⁻¹ |
| 原型 | 24.690 | 2.200 | 0.349 | 2.020 | 1.100 |
| 模型 | 0.823 | 0.073 | 0.012 | 0.070 | 0.200 |

本次试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室冰与结构物作用力专用模拟水槽进行, 该模拟水槽的尺寸为 20.0 m×2.0 m×1.2 m。模型冰采用大连理工大学自主研发的 DUT-1 非冻结可破碎合成模拟冰材料制作, 如图 1a 所示。在低速运动下, DUT-1 模型冰作用于直立柱体结构的试验冰力与中国固定平台入级规范推荐的公式结果吻合良好^[13]。试验中布置于桩腿顶部的 5 个测力传

λ_l ——横截面惯性矩比尺; λ_E ——弹性模量比尺。

依据截面刚度相似, 可将式(1)改写为:

$$\lambda_\rho \cdot \lambda_E^{-1} \cdot \lambda_r^{-2} = \lambda_l^2 \cdot \lambda^{-4} \quad (2)$$

式中, λ_r ——截面惯性半径比尺。

参考《中国海冰条件与应用规定》^[12], 确定海上风电场所在冰区为 10 区, 考虑海冰重现期为 50 a, 依据弹性相似律对海冰设计参数进行相似转换, 相似比尺 30, 试验冰速的相似比尺为 $\sqrt{30}$, 其他参数如表 1 所示。

感器可同时记录作用在结构模型上的水平面内二维冰力时程, 该传感器由中国船舶总公司 702 所生产, 量程为 ±500 N, 精度为 0.001 N。海上升压站平台动力试验模型和传感器布置如图 1b 所示。

1.2 试验方案

基于极端冰荷载作用下的海上升压站平台有限元分析结果可知, 该平台的静冰力荷载控制方向为 -60°、0° 和 90° 方向。因此在模型试验中按照上述方向确定海上平台可能承受的最大冰力。试验中来冰方向如图 2 所示。

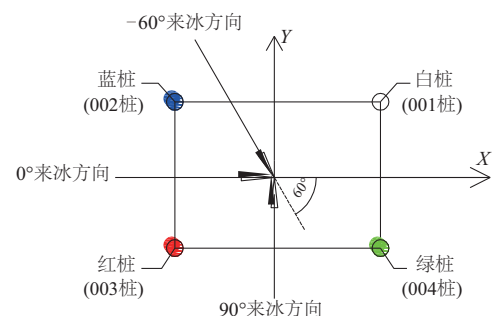
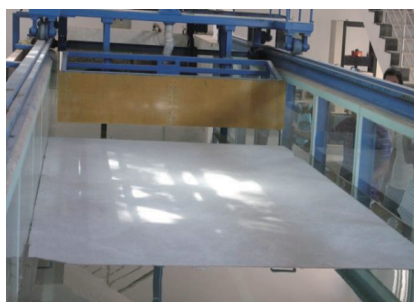


图2 整体坐标系下冰荷载作用方向

Fig. 2 Load directions in the global coordinate system of the test model

1.3 传感器标定

首先可利用经验公式检验本次试验海冰荷载测量系统的可靠性和准确性。本次试验采用直径为 32 mm 的单直桩为检验桩, 如图 1b 所示(左侧黑



a. DUT-1 模型冰



b. 动力试验模型

图1 动力试验模型设计

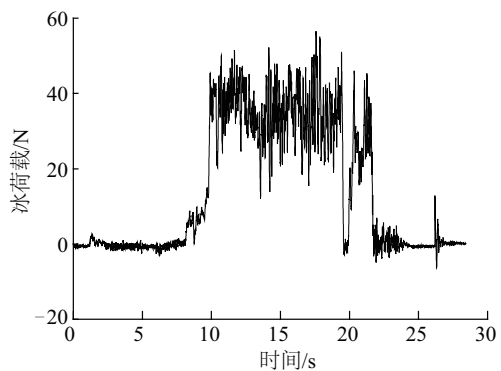
Fig. 1 Design of dynamic test model

色为单直桩,右侧为海上升压站桩腿)。冰力理论计算公式采用 A fanasev 公式^[14]:

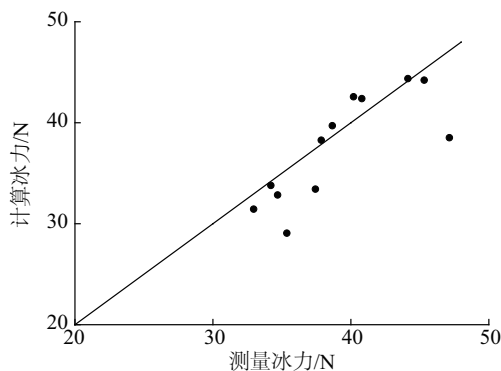
$$F_c = mIDH\sigma_c \quad (3)$$

式中, m ——形状系数,圆柱取 0.86; I ——冰力系数,当 $1 < D/H \leq 6$ 时,取 $I = (1 + 5H/D)^{1/2}$; D ——桩腿直径, m; H ——冰排厚度, m; σ_c ——冰排抗压强度, Pa。

典型的桩腿冰力时程曲线如图 3a 所示,取时程曲线中冰力值稳定段峰 16 s 到 18 s 的均值作为最终试验冰荷载。单直桩冰力的试验结果与经验公式计算结果对比如图 3b 所示。由图 3 可知,试验结果得到的测量冰力与理论计算得到的冰力结果基本吻合,说明本试验的测试系统是可靠的。



a. 桩腿典型冰力时程曲线



b. 冰力结果对比

图3 实验数据验证

Fig. 3 Validation of the experimental results

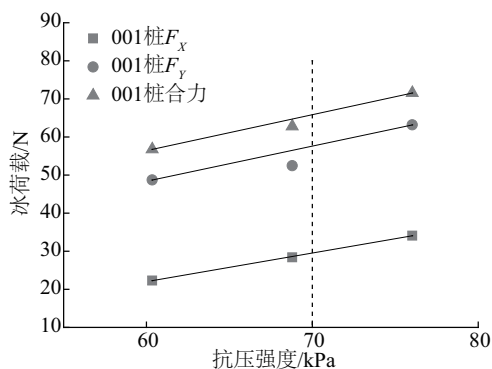
1.4 结果分析

由于直立式结构的海冰破坏形式主要表现为挤压破坏,其冰荷载由冰的抗压强度决定^[15]。模型冰排抗压强度测量采用小试件测量方法,其抗压强度的计算公式为:

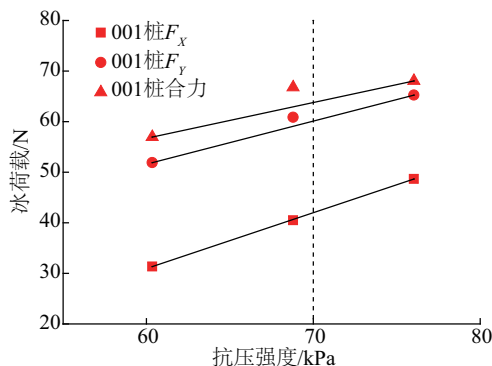
$$\sigma_{cu} = \frac{P_f}{B \cdot H} \quad (4)$$

式中, σ_{cu} ——海冰试样的单轴抗压强度, Pa; P_f ——试样挤压破坏时的荷载, N; B ——试样宽度, m; H ——试样厚度, m。

通过试验可以测得不同来冰方向下各桩腿的海冰荷载与模型冰抗压强度之间的关系,以 -60° 来冰方向试验结果为例,桩腿正向冰力、横向冰力及合力随模型冰抗压强度之间的关系如图 4 所示。从图中可以看出:各冰荷载与抗压强度成线性关系,冰荷载随抗压强度的增大而增大。模型冰的设计抗压强度为 70 kPa,从图 4 中可插值得到模型冰设计抗压强度对应的冰力值(即图中点划线对应的纵轴冰荷载)。将各组试验按抗压强度的比值换算得到相应的转换系数,每组试验的冰力时程结果乘以转换系数即可得到设计抗压强度下的冰力时程曲线。



a. 001 桩结果



b. 003 桩结果

图4 -60° 来冰方向时001桩和003桩冰荷载与抗压强度的关系

Fig. 4 Linear relations of compressive stress and ice load in the direction of -60°

2 海上升压站平台冰振分析

2.1 运动控制方程

多自由度结构在动冰力作用下的运动方程^[10]可表示为:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (5)$$

式中, $[M]$ 、 $[C]$ 和 $[K]$ ——结构的质量矩阵、阻尼矩

阵和刚度矩阵; $\{x\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 和 $\{\ddot{x}\}$ ——结构的位移、速度和加速度列向量; $\{F(t)\}$ ——海冰荷载列向量。

采用振型分解法,求得结构的平稳响应为:

$$\{x\} = \sum_{i=1}^N \{\varphi\}_i q_i(t) \quad (6)$$

式中, $\{\varphi\}_i$ ——结构的第 i 阶振型; N ——振型数目; $q_i(t)$ ——第 i 阶振型对应的广义坐标,可表示为:

$$q_i(t) = \{F_s\} \left\{ \frac{a_0}{2M_i^* \omega_{0i}^2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_{ni}}{M_i^* \omega_{0i}^2} [a_n \cos(n\theta t - \varepsilon_{ni}) + b_n \sin(n\theta t - \varepsilon_{ni})] \right\} \quad (7)$$

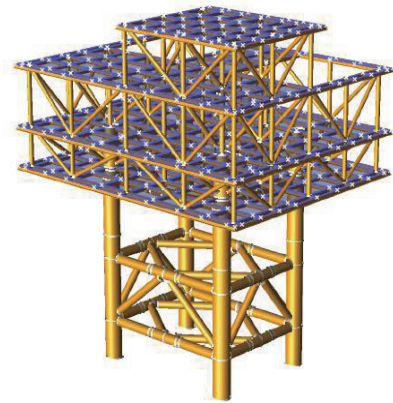
$$\text{其中, } \begin{cases} \mu_{ni} = \left\{ \left[1 - \left(\frac{n\theta}{\omega_{di}} \right)^2 \right]^2 + \left(2\xi_i \frac{n\theta}{\omega_{di}} \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \\ \varepsilon_{ni} = \arctan \left\{ \frac{2\xi_i n\theta / \omega_{di}}{1 - \left(n\theta / \omega_{di} \right)^2} \right\} \\ \omega_{di} = \omega_{0i} \sqrt{1 - \xi_i^2} \end{cases} \quad (8)$$

式中, F_s ——静冰力, N; M_i^* ——第 i 阶振型的广义质量, Kg; ω_{0i} ——第 i 阶无阻尼自振频率, rad/s; ξ_i ——结构阻尼比。

2.2 有限元模型

海上升压站平台采用整体式布置,包括上部结构和基础结构。上部结构由三层钢结构甲板平台和直升机平台组成。基础结构采用四桩导管架结构,如图 5a 所示,图中杆件横截面尺寸单位为 mm,高程单位为 m。

采用 SACS 建立升压站平台有限元模型如图 5b 所示,模型中采用的单元类型主要有圆截面、同心



b. 有限元模型

图5 基础结构参数及有限元模型

Fig. 5 Basic parameters and FE model of the substructure

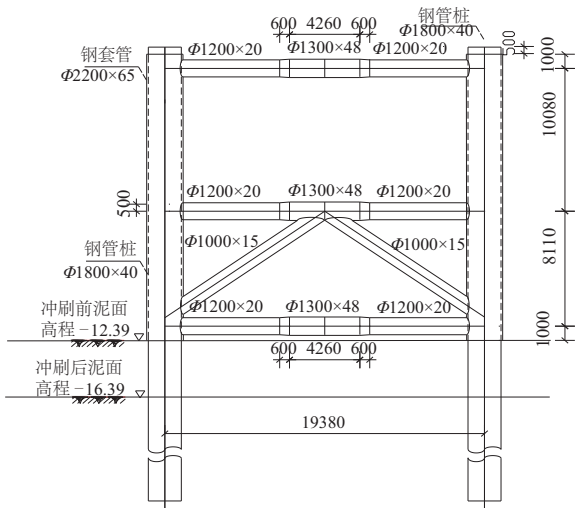
圆管、圆锥形过渡体、工字钢等截面类型的梁单元与板单元等。泥面以下桩基采用 Pile-Soil 模块进行模拟,分别采用 P - Y 、 T - Z 和 Q - Z 曲线计算水平向和轴向桩基承载力。

2.3 原型冰力时程

通过开展模型冰作用下的结构动力模型试验测得作用于模型桩腿的挤压冰力时程,基于牛顿相似律对模型冰力进行相似转换,得到原型不同来冰方向各个桩腿的挤压冰力时程。对应不同来冰方向 003 号桩冰力时程曲线如图 6 所示。由图 6 可知,对应 0° 来冰方向 003 号桩只受到横向力 F_x 的作用;对于 90° 方向 003 号桩只受到纵向力 F_y 的作用;而对于 -60° 来冰方向由于桩腿直径远小于桩腿间距,桩腿间遮蔽效应不明显,故 003 号桩受到水平方向二维冰荷载作用。

2.4 结构动力时程分析

将图 6 所示的冰力荷载时程作用于有限元



a. 基础结构示意图

模型,对结构进行冰激强迫振动分析,并依据分析结果对结构构件进行依规范 DNV-OS-J201^[15]和 API RP 2A^[16]校核,校核结果如表 2 和图 7 所示。表中数值为杆件内力及地基承载力校核的 UC 值 (unity check ratios), UC 值为计算荷载(应力)与许用荷载(应力)的比值, UC 值小于 1,表明结构反应满足规范要求。

由图 7 可知,对应不同来冰方向,杆件应力校核结果差别较大。在 0° 和 90° 来冰方向下,危险杆件主要集中于一、二层甲板间的立柱和斜撑,这一结果与极值静冰力的校核结果一致。而对于 -60° 来冰方向,危险杆件的数量有所增加,最危险杆件位于导管架的斜撑。由此说明在没有桩腿柱遮蔽效应的前提下,4 根桩腿同时受到较大的海冰荷载冲击作用,基础结构杆件产生了较大的应力。

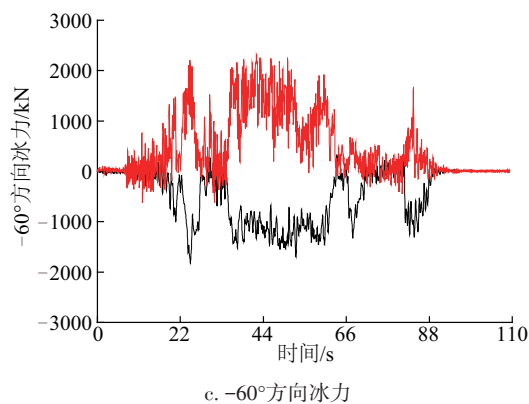
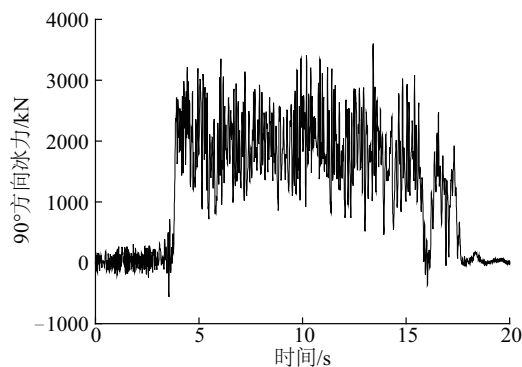
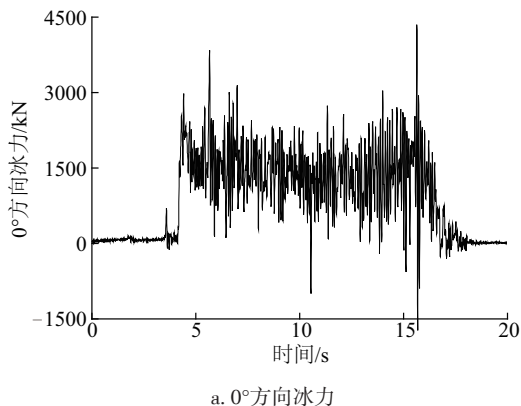


图 6 003 号桩不同来冰方向冰荷载时程曲线

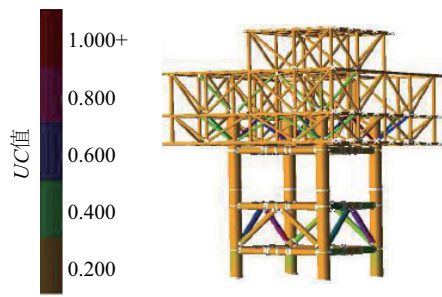
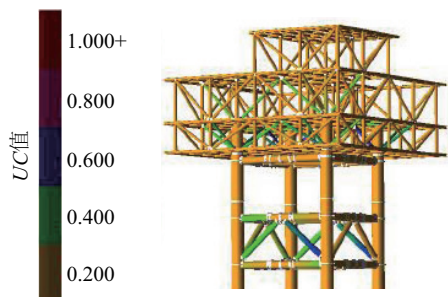
Fig. 6 Time histories of ice loads in different directions

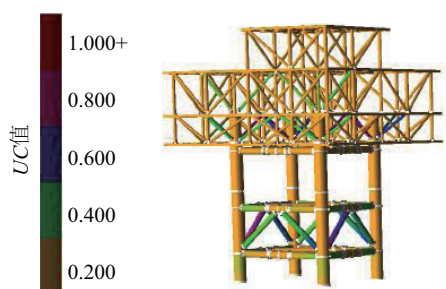
在极端冰荷载作用下结构顶层的最大位移和加速度反应如图 8 所示。此时对应 90° 来冰方向,结构在 Y 方向的位移和加速度反应达到最大值,分别为 15 cm 和 4.905 m/s^2 。

表 2 结构杆件内力校核

Table 2 Validation of the internal structural forces

| 来冰方向 | 杆件应力校核 最大 UC 值 | 节点冲剪校核 最大 UC 值 | 节点构造冲剪校核 最大 UC 值 | 桩基应力校核 最大 UC 值 | 地基承载力校核 最大 UC 值 |
|-------------|---------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|
| 0° | 0.695 | 0.142 | 0.379 | 0.449 | 0.730 |
| 90° | 0.847 | 0.256 | 0.379 | 0.612 | 0.840 |
| -60° | 0.802 | 0.245 | 0.379 | 0.400 | 0.730 |

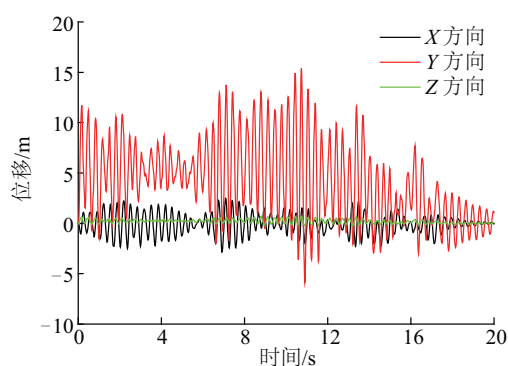




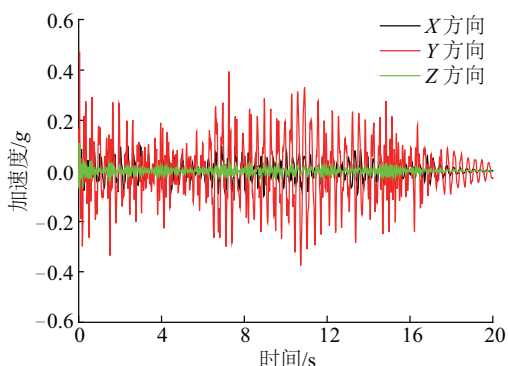
c. 60°来冰方向杆件最大组合 UC 值

图7 杆件内力校核结果云图

Fig. 7 Map of internal member forces validation



a. 冰振最大位移响应时程



b. 冰振最大加速度响应时程

图8 海冰作用下的结构反应

Fig. 8 Structural responses under dynamic ice loads

3 结 论

本文通过开展海冰作用下的海上升压站平台物理模型试验,得到对应不同来冰方向的结构动冰力时程,并依据实验数据开展了结构原型在极端冰荷载作用下的冰致强迫振动分析。通过以上研究得出:

1)不同来冰方向下,各桩腿冰荷载差别明显;尤其对于一般来冰方向,会导致结构桩腿上产生水平双向冰荷载,并且由于冰排的挤压作用,会造成桩腿上瞬时冰力增加。

2)结构在动冰荷载作用下,结构杆件、节点以及桩基应力等相对于静力分析结果增加明显,所以在考虑海冰对海上升压站平台结构的影响时,必须考虑动冰荷载的动力放大作用。

3)结构在校核高水位与极端低水位之间未布置水平撑和次撑,这有效减小了结构所受的冰荷载。但是此时结构仍受到对应挤压破坏模式的海冰荷载,对于一般来冰方向下仍会导致基础杆件产生较大内力反应。所以从结构可靠度角度出发应该考虑布置抗冰结构,改变海冰的破坏模式,降低作用于基础结构桩腿的动冰荷载。

海冰荷载作为结构的控制荷载,如果可通过布置抗冰结构有效降低海冰荷载幅值,这对于整体结构优化设计也是有利的。

[参考文献]

- [1] 张明,张哲,叶军.海上风电场升压平台布置研究初探[J].上海节能,2015,(2):80—84.
- [1] Zhang Ming, Zhang Zhe, Ye Jun. Research on boost platform layout on offshore wind farm[J]. Shanghai Energy Conservation, 2015, (2): 80—84.
- [2] Engelbrektson A, Janson J E. Field observations of ice action on concrete structures in the Baltic sea[J]. Concrete International, 1985, 7(8): 48—52.
- [3] 段梦兰,方华灿.渤海老二号平台被冰推倒的调查报告[J].石油矿场机械,1994,23(3):1—4.
- [3] Duan Menglan, Fang Huacan. The investigations conclusions of platforms in Bohai Sea[J]. Oil Field Equipment, 1994, 23(3): 1—4.
- [4] 杨国金.海冰工程学[M].北京:石油工业出版社,2000.
- [4] Yang Guojing. Sea ice engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.
- [5] 杨耀鹏,张大勇,娄春娟,等.渤海某新建升压站平台的抗冰性能分析[J].船海工程,2015,(6):111—115.
- [5] Yang Yaopeng, Zhang Dayong, Lou Chunjuan, et al. Analysis of the structural ice-resistant performance for the booster station platform in the Bohai Sea[J]. Ship & Ocean Engineering, 2015, (06): 111—115.
- [6] 金书成,杨炎华.冰荷载对导管架海洋平台的作用研究[J].中国海洋平台,2010(5):15—19.
- [6] Jin Shucheng, Yang Yanhua. Study on the effect of ice loads on the offshore jacket platform[J]. China offshore platform, 2010, (5): 15—19.
- [7] 李玉珊.导管架静冰力计算实用方法[J].中国海上油

- 气(工程), 1995, 7(6): 4—8.
- [7] Li Yushan. Static ice force calculations and practical methods[J]. China Offshore Oil and Gas: Engineering, 1995, 7(6): 4—8.
- [8] 陶冉冉. 辽东湾导管架平台结构安全评估[D]. 北京: 中国石油大学, 2010.
- [8] Tao Ranran. The structural safety assessment of jacket platforms in Liaodong Bay[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2010.
- [9] Wang Q J. A tentative view on ice load applied on jacket platforms in Bohai gulf[A], International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC)[C], Helsinki, Finland: 1983.
- [10] 欧进萍, 段忠东, 肖仪清. 海洋平台结构安全评定[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [10] Ou Jinping, Duan Zhongdong, Xiao Yiqing. Safety assessment of offshore platform[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [11] 林 皋, 朱 彤, 林 蓓. 结构动力模型试验的相似技巧[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(1): 1—8.
- [11] Lin Gao, Zhu Tong, Lin Pei. Similarity technique for dynamic structural model test[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2000, 40(1): 1—8.
- [12] 中国海洋石油总公司. 中国海冰条件及应用规定[S]. 中国, 2002.
- [12] China National Offshore Oil Corporation. Regulations for offshore ice conditions and application in china sea[S]. China, 2002.
- [13] 王永学, 李志军, 李广伟. DUT-1非冻结成模型冰物模技术及应用[J]. 大连理工大学学报, 2001, 41(1): 94—99.
- [13] Wang Yongxue, Li Zhijun, Li Guangwei. Technique of DUT-1 non-refrigerated breakable ice materials and its applications[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2001, 41(1): 94—99.
- [14] 卢 鹏, 李志军. 现行规范中计算桩柱冰荷载的比较[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 356—359.
- [14] Lu Peng, Li Zhijun. A comparison of ice load on a picket calculated from current criterions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 356—359.
- [15] 李福成. 渤海海冰设计抗压强度的确定[J]. 冰川冻土, 1987, (Sup1): 97—102.
- [15] Li Fucheng. Determination of compressive strength of sea ice on bohai aimed at designing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1987, (Sup1): 97—102.
- [16] DNV-OS-J201 Offshore Standard. Offshore Substations for wind farms[S]. Norway, 2013.
- [17] API: API recommended practices for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-load and resistance factor design[S]. USA, 1993.

SAFETY ASSESSMENT OF OFFSHORE SUBSTATION PLATFORM UNDER EXTREME ICE CONDITIONS

Zuo Jingjing^{1,2}, Li Xin^{1,2}, Wang Wenhuan^{1,2}, Lou Yike^{1,2}, Zhong Yao³

(1. State Key Lab of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Institute of Earthquake Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

3. PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China)

Abstract: Firstly, the simplified test model of the substation platform is designed based on the elastic similarity, which can comprise the similarity of the section bending stiffness of the structure. Then, dynamic model tests under different ice directions are performed by using DUT-1 model ice. Dynamic ice loads in the crushing failure mode are measured and the shielding effects of the pile groups are proved during the tests. Moreover, the measured dynamic ice loads are scaled based on the ratio of the external loads. The finite element model of the prototype is established in SACS, and the full scaled dynamic ice loads are applied. Structural responses under dynamic ice loads in crushing failure mode are analyzed, such as maximum internal forces of the member, maximum displacements and accelerations of the integrated platform. Finally, the safety of the substation platform under extreme load conditions is validated based on the design standards of the substation platform.

Keywords: marine platforms; sea ice; design of experiments; reliability analysis; finite element method