

# 极端冰况下的导管架平台解决方案

艾志久<sup>1</sup>, 舒仕勇<sup>1</sup>, 李学志<sup>2</sup>, 孔娜娜<sup>1</sup>, 姜巍<sup>2</sup>  
(1. 西南石油大学, 成都 610500; 2. 中油辽河工程公司, 盘锦 124010)

**摘要:** 针对在严寒地区海冰对导管架平台结构的冲击这种特殊海况, 提出了一种新型抗冰结构形式——正倒三角形简易导管架平台结构, 使用模态和冰激理论进行计算机模拟, 考虑风载的影响因素, 对比新老平台结构进行了冰振反应分析, 探讨了这种结构对减轻冰力和结构反应的作用。结果表明能有效地减少冰板对平台的冲击。

**关键词:** 导管架平台; 冰力; 动态反应; 冰激

**中图分类号:** P75 **文献标识码:** A

## THE SOLUTION TO JACKET TYPE PLATFORM UNDER EXTREME CHILL SITUATION

AI Zhi-jiu, SHU Shi-yong

(Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** This paper provides a new anti-ice force structural platform—regular and inverted triangle structure, which simulates the structure by using the widely-used mode and ice-induced theory. Considering the influence of the wind load, it also compares the ice dynamical response between new and old platform and studies the effect of the new structure to reduce the ice load. The result shows that the new platform may effectively reduce the impact induced by ices.

**Key words:** jacket platform; ice force; dynamical response; ice shaking

在严寒环境下, 冰激平台结构振动是影响海洋石油钻井和采油平台正常生产和安全的重要因素。

葵花 101 平台是辽河滩海油气田的生活动力平台。该平台处在我国冬季冰情最严重的海域, 在冬季冰激振动严重, 以至无法正常生产。本文拟采用一种新型结构对平台进行修复改进, 对新平台进行了固有特性和冰激振动的反应分析, 探讨这种新型结构对减轻冰力和结构反应的效果, 分析平台结构反应的特点, 为进一步对该平台实施振动控制提供依据。

### 1 冰振反应动态计算的基本理论

导管架平台结构受到的冰激振动, 本文采用自激振动理论描述冰引起的结构振动时, 将结构的响应和冰力的变化过程同冰的单轴抗压强度随加载速率变化的关系联系在一起。冰引起的结构振动是一个冰与结构相互作用的过程, 产生自激振动时, 结构内部能量不断积累、振幅不断增大。自激振动的发生一方面取决于海冰本身的强度性质, 另一方面又以结构的运动作为重要的先决条件。根据 Maattanen 模型, 建立振动微分方程如下:

收稿日期: 2007-04-25 修改稿日期: 2007-08-08

基金项目: 中石油集团公司重点项目“辽河滩海工程技术研究”(05B70104-1)

作者简介: 艾志久(1954-), 男, 教授, 主要从事石油矿物机械、海洋工程结构物和现代设计方法研究。

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F(v_r)\} \quad (1)$$

式中的系数的含义可参照文献[2],动冰力矢量是冰排与结构之间的相对速度矢量,  $\{F(v_r)\} = \{F(v_0) - \dot{X}\}$ , 将其在冰速  $v_0$  处按照泰勒级数展开, 略去  $\dot{X}$  的高阶项, 即可得到  $\{F(v_r)\} = \{F_0\} - [\phi]\{\dot{X}\}$ , 式中  $\{F_0\} = \{F(v_0)\}$ , 实际上是冰速为  $v_0$  时的静冰力矢量;  $[\phi]\{\dot{X}\}$  为与结构速度有关的动冰力矢量,  $[\phi]$  为冰力系数矩阵。  $\phi = \partial F / \partial x = (8/\pi)h\sigma_c(\partial\sigma_c/\partial\sigma')$ , 其中  $\sigma_c$ 、 $h$ 、 $\sigma'$  为海冰挤压强度、冰厚、应力速率。振动方程计算中, 采用逐步积分法求解, 并通过振型分解方法减少方程数目。计算结果可以提供结构的反应曲线和受力情况<sup>[1]</sup>。

导管架平台结构的固有频率和主振型是分析结构动力响应的基础。分析结构的固有频率和主振型的问题可归纳为特征值和特征向量问题。在进行结构动力响应分析前, 必须先分析平台的固有频率和主振型, 然后确定平台在当地环境条件下发生共振的可能性。在考虑结构的自振特性时, 它的运动方程  $[M][\ddot{X}] + [C][\dot{X}] + [K][X] = 0$ 。对于无阻尼自由振动情况, 动力学基本方程中的阻尼力项和外加激励项为零, 即  $[M][\ddot{X}] + [K][X] = 0$ , 任何弹性体的自由振动都可分解为一系列简谐振动的叠加。设上述方程的简谐振动解  $X(t) = X_0 \sin \omega t$ , 将此式代入自由振动基本方程可得  $(K - \omega^2 M)X_0 = 0$ , 自由振动时, 结构中各节点的振幅  $X_0$  不全为零, 故方程组系数的行列式的值必须为零,  $|K - \omega^2 M| = 0$ , 由于该式是结构刚度矩阵  $K$  和质量矩阵  $M$  均为  $n$  阶(节点自由度数目)方阵, 所以它是关于  $\omega^2$  的  $n$  次方程, 由此可求得  $n$  个固有频率。  $\omega^2$  称为广义特征值。由动力学得到自由振动频率, 即固有频率  $f_i = \frac{\omega_i}{2\pi}$ , 对应每一个固有频率  $\omega_i$ , 可确定一组各节点的振幅值  $X_{0i}$ , 此振幅值称为广义特征向量或结构的主振型, 其中最小的特征值对应的主振型称为基本振型。即为特征方程的特征值和特征向量, 目前常用的求解方法有广义雅可比法、子空间迭代法和缩聚法。本文模态分析采用 Guyan 缩聚法, 所谓缩聚就是降阶, 其基本思想是结构坐标分为主副坐标, 通过主自由度来缩减矩阵的大小后求得缩减自由度解, 然后通过执行扩展处理将解扩展到完整的自由度集上。缩聚后的质量矩阵和刚度矩阵分别为  $[M_G] = [T_G]^T [M_A] [T_G]$  和  $[K_G] = [T_G]^T [K_A] [T_G]$ 。

## 2 平台结构

葵花 101 平台是由桩、导管架、甲板组块和生活组块组成的四桩腿钢质固定式平台, 导管架桩腿各立面桩腿为双斜, 表观斜度 10:1, 实际斜度 7.07:1, 桩顶设皇冠板与导管架腿焊接, 导管架工作点处标高为 +8.50m (理论深度基准面, 下同), 平面尺寸为 8m×8m。设计水深为 10.8m, 结构总高为 15m (距离海床), 桩入土深度 43m, 该平台改进后在导管架桩腿上设置了抗冰保护装置用来减轻结构所承受的冰力, 这种结构称为正倒三角形简易平台结构。平台结构简化为三维空间杆系模型, 包括导管架和甲板上部结构两部分。平台结构泥线以下模拟为等效桩, 结构附连水质量和管中水质量等效为材料密度, 参照 API 2A 标准, 结构振型的阻尼比取 5%。甲板及生活模块的设备及其他附重按实际的质量进行施加。平台结构的构件尺寸、设备重量及其在平面上的分布严格按照设计文件确定。表 1 为导管架平台的主要构件设计参数表, 其中 MB1—MB2 为甲板上的幅板, 材料分别为 H900300 和 H450200。  $K_y$  和  $K_x$  分别为  $X$  方向和  $Y$  方向的剪切系数。

表 1 平台构件参数表

单元标识	外径 /cm	壁厚 /cm	弹性模量 / $10^5$ MPa	剪切模量 / $10^5$ MPa	屈服极限 /MPa	$K_y$	$K_x$	材料密度 / $10^3$ kg/m <sup>3</sup>
B10/20/30	32.5	1.3	2.06	7.9	31.5	1.00	1.00	7.85
HB1/2/3	70.0	1.9	2.06	7.9	31.5	1.00	1.00	7.85
LG1—LG10	111.0	2.9	2.06	7.9	35.5	1.00	1.00	7.85
PL1—PL4	100.0	1.9	2.06	7.9	31.5	1.00	1.00	7.85
MB1—MB2			2.06	7.9	31.5	1.00	1.00	7.85

3 计算模型和结果对比

3.1 计算模型

图 1 是 101 平台无抗冰结构的有限元结构模型。共 165 个节点,300 个梁单元,72 个板单元。图 2 为有抗冰结构的平台模型,包括 185 个节点,324 个梁单元,72 个板单元。整个结构被模拟成一个三维空间框架结构,所有节点为刚性节点,每个结构杆件的两端模拟成刚性连接。

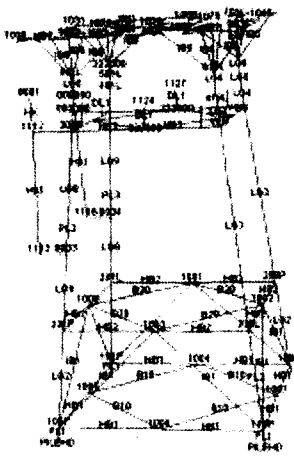


图 1 无抗冰结构计算模型(原结构)

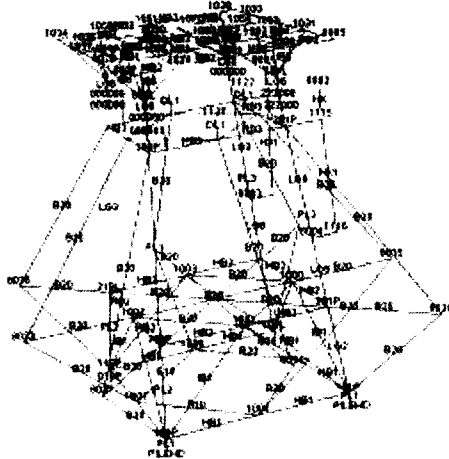


图 2 加抗冰结构计算模型(改进后)

3.2 计算结果对比

设计计算冰厚 33cm,弹性模量  $2.2 \times 10^3 \text{ MPa}$ ,冰上层高度 0.000m,冰的流向和风的方向均为  $45^\circ$  方向,流速为辽东湾地区的冰块的平均速度 1.1m/s,风速为 4.7m/s,冰的密度为  $0.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,冰的刚度系数 0.0315(只考虑结构阻尼),冰持续冲击时间 6min;泥线深度 -10.8 m。

根据本文提出的结构和计算方法,模拟计算了前 10 阶平台的固有特性值,并进行了对比。从表 2 可看出,改进后结构的最大周期减小,且频率逐趋稳定,结构自身的响应减小,在表 3 中,最大的偏移都发生在第 3 阶模态,原结构的最大值为 1.874cm,加抗冰结构后减为 1.405cm。

在相同海况下,计算结果表明原结构最大基底剪力出现在时间 0.30s 时,值为 1850.62kN,最大倾覆力矩 17653.953kN·m。而改进后结构在同种海况下最大基底剪力出现在时间 0.25s 时,值为 1991.04kN,同时最大倾覆力矩 13945.892kN·m。从数据可看出加冰的基底剪力比无冰基底剪力大 8%,但倾覆力矩和最大偏移量分别少了 21.8%和 33.4%,从数值来看,效果很明显。基底剪力加大主要原因是抗冰结构工作面积比无冰结构大,风的作用面积加大,且质量比无冰结构大的原因,当仅考虑冰况情况下,基底剪力也会减少。图 3 和图 4 为两者基底剪力图。

表 2 新旧平台固有特性对比

阶数	频率/Hz		广义质量 t		特征值		周期/s	
	原结构	改进后	原结构	改进后	原结构	改进后	原结构	改进后
1	1.528	1.828	2.58668E+02	1.44025E+02	1.08374E-02	7.57295E-03	0.654	0.546
2	1.550	1.917	3.79742E+02	2.60901E+02	1.08374E-02	6.88813E-03	0.644	0.521
3	1.819	2.084	1.55392E+02	1.10838E+02	7.64779E-03	5.83210E-03	0.549	0.479
4	5.122	2.881	9.17175E+00	6.32808E+00	9.65489E-04	3.04967E-03	0.195	0.346
5	5.635	2.886	2.73270E+01	3.58138E+00	7.97492E-04	3.04050E-03	0.177	0.346
6	7.447	2.886	1.88749E+01	3.72365E+00	4.56727E-04	3.04011E-03	0.134	0.346
7	7.756	2.890	1.76064E+02	6.49613E+00	4.21340E-04	3.03277E-03	0.128	0.346
8	7.772	2.907	5.76504E+01	1.32521E+01	4.19258E-04	2.99603E-03	0.128	0.343
9	8.052	2.918	1.6701E+01	5.73765E+00	3.90649E-04	2.97363E-03	0.124	0.342
10	8.636	2.920	5.83628E+01	8.68640E+00	3.39608E-04	2.96945E-03	0.115	0.3423

表3 新旧平台主要模态产生最大、最小位移

阶数	最大值/cm		出现时间/s		最小值/cm		出现时间/s	
	原结构	改进后	原结构	改进后	原结构	改进后	原结构	改进后
1	0.195	0.142	0.340	0.325	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.646	-0.285	0.280	0.250
3	1.874	1.405	0.330	0.325	0.000	0.000	0.000	0.000
4	0.018	0.009	0.110	0.150	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.000	0.078	0.000	0.100	-0.046	0.000	0.100	0.000
6	0.606	0.000	0.080	0.000	0.000	-0.163	0.000	0.100
7	0.224	0.210	0.070	0.075	0.000	0.000	0.000	0.000
8	0.145	0.155	0.070	0.075	0.000	0.000	0.000	0.000
9	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.547	-0.046	0.070	0.075
10	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.068	-0.086	0.070	0.075

## 4 结 论

从数据输出结果可以得出以下结论:

(1) 在固有特性分析中,两种平台的振型和频率比较接近,可互参考。本计算模型可用于计算导管架平台在不同环境载荷下的振动问题。

(2) 在进行动态分析的同时,也进行了疲劳分析,从结果分析来看,疲劳分析大部分输出数据为无限安全,最小的节点寿命达206年,果真如此的话这个平台从理论上来说还可以进行再次优化,可以从减少导管架的厚度和弱化材料属性来进行分析,找出在此环境下平台的合理设计参数。

(3) 从分析结果表明:本文介绍的正倒三角形抗冰结构可以有效防止冰力对平台的冲击。

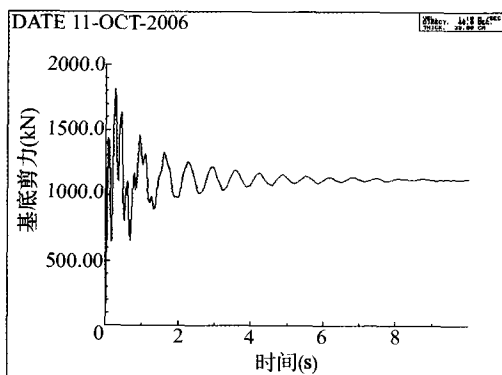


图3 改进后抗冰结构的基底剪力

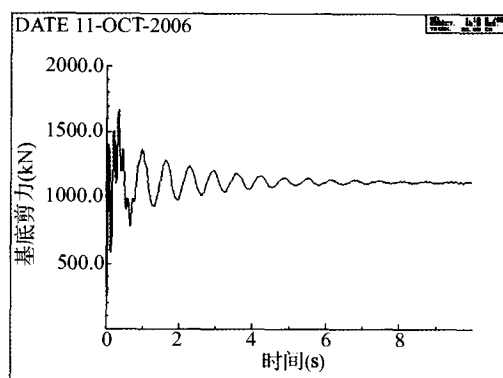


图4 原结构的基底剪力图

## 参考文献

- [1] Maattanen M. Ice-structure dynamic interaction in continuous crushing[A]. CRREL Report[C]. hanover,nh,usa,1981.
- [2] Maattanen M. Ice-induced vibrations of structures, self-excitation[A]. proc. 9<sup>th</sup> int. symp. on ice[C]. (IAHR), Japan,1988.
- [3] Maattanen M P. Ice Interaction with structures,Ice structure interaction,Jones,S. eta:., eds,Canada,1991.
- [4] 欧进萍,段忠东,孙宝仓. 基于实测冰力时程的海洋平台结构冰振反应分析[J]. 海洋工程,1999,17(2):70—78.
- [5] 杨升田. 导管架海洋平台自振特性的简化计算方法[J]. 海洋工程,1994,12(1).
- [6] SACS Use's Manual,5<sup>th</sup> Edition,ENGINEERING DYNAMIC, Inc.