

海上导管架平台结构隔振控制方案与减振效果分析

刘山¹ 麦汉超¹ 申仲翰²

(1 北京航空航天大学飞行器设计与应用力学系, 北京 100083)

(2 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 本文针对海上导管架平台结构的冰激振动问题提出了一种整体隔振方案,通过采用建筑抗震用叠层橡胶支座作为基础隔振元件,对以渤海的JZ20-2MUQ采油平台为基础而设计的1:25的模型试验平台进行数值仿真分析,模拟了模型平台采用隔振方案后的冰激振动响应。通过对隔振前后平台顶部层的振动位移和加速度的比较和分析,同时兼顾考虑了隔振层的最大相对位移,通过优化算法反过来为模型试验平台和隔振支座参数的设计提供理论指导。

关键词: 隔振; 冰激振动; 海上平台; 叠层橡胶支座; 优化算法

中图分类号:O328 文献标识码:A 文章编号:1006-3919(2004)03-0012-07

Vibration isolation scheme and vibration-suppressed effectiveness analysis for offshore platform jacket structures

LIU Shan¹ MAI Han-chao¹ SHEN Zhong-han²

(1 Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Dept. of Flight Vehicle Design and Applied Mechanics, Beijing 100083, China)

(2 Institute of Solid Mechanics, C.A.S., Beijing 100080, China)

Abstract: This paper proposed a scheme which solve ice-induced vibration problem of offshore jacket platform via installation of isolator under the whole deck of offshore platform. Steel-rubber bearings which are widely used in architecture engineering against earthquakes are adopted as isolator. Via numerical emulate analysis for a 1:25 model test structure which is designed based on actual platform JZ20-2MUQ, the vibration behaviors of model platform are obtained after installation of steel-rubber bearing under the deck. By comparatively numerical analysis of displacement and acceleration of isolated model platform and non-isolated model platform, in the mean time taking into account the relative displacement of isolator, this paper adopted an optimal method to offer the model platform and isolator the optimal parameters.

Key words: vibration isolation; ice-induced vibration; offshore platform; muti-layer steel-rubber bearings; optimal arithmetic

收稿日期:2003-11-06; 修回日期:2004-02-17

作者简介:刘山(1980-),男,硕士生,研究方向:平台隔振;(100083)北京航空航天大学固体力学研究所。

1 引言

海洋平台结构所处的环境十分恶劣,时时遭受着风、浪、流以及地震等载荷的作用。在近海处,海洋平台还遭受冰载荷的强烈撞击,冰致振动现象非常突出^[1],强烈振动时会致使平台结构严重损坏甚至倒塌^{[2][3][4]},我国的渤海老 2 号平台在 1969 年也被冰振损坏。根据对我国渤海 JZ20-2MUQ 等导管架平台的振动分析及实测结果,该海域平台的冰致振动非常严重,实测 20~30cm 厚单层冰作用下平台结构振动加速度最高达 300gal^[5],严重影响到正常的生产,并且已经威胁到结构的安全。基于上述情况,早在 60 年代,国内外学者就对冰的破坏机理以及冰与结构的耦合振动问题开始了不同程度的研究,并应用先进的结构振动控制技术到海洋平台,以降低海洋平台的动力响应,确保平台正常的生产和平台结构的安全。为此,提出了许多减振方案,包括采用正倒锥体结合、在夹板处放置粘弹性耗能器、调谐液体阻尼器等^{[5][6][7][8]},收到了一些效果。但是由于在真正的采油平台上施加减振措施有诸多困难,加之这些减振方案尚无最后定论,因此,有关研究工作仍然在继续。

本文针对渤海的 JZ20-2MUQ 平台提出了一种整体隔振方案,采用国际上热门的工程抗震新技术—橡胶垫隔震技术,通过对 1:25 的缩比尺模型进行冰致振动数值计算,比较和分析了隔震前后平台结构的振动响应情况,为正在设计的缩比尺模型和隔振层支座参数提供了理论指导。

2 平台隔振方案

本文拟采用叠层橡胶钢板隔振方案,即在导管架端帽与上部组块之间设置叠层橡胶隔振装置。叠层橡胶隔振装置由于在橡胶层中加入若干块薄钢板,并且橡胶层与钢板紧密粘结,当橡胶支座承受竖向载荷时,橡胶层的横向变形受到上下钢板的约束,使橡胶支座有很大的竖向承载力和刚度。根据试验,这种装置可承受高达 5MPa 的压应力和 0.5MPa~1MPa 的拉应力。当橡胶支座承受水平载荷时,各橡胶层的相对位移大大减小,使橡胶支座可达到很大的整体侧移而不致失稳,并且保持较小的水平刚度(约为竖向刚度的 1/500~1/1000)。此隔振措施属于基础隔振范畴,其机理是通过隔振层调整结构的固有频率,错开外部激励的频率,这样,改变了结构的动力特性,从而达到减轻结构振动响应的目的。

本文提出的隔振方案的思路基于建筑的结构抗震设计,通过隔震装置耗散能量而降低上部建筑结构对地震的反应,使上部结构免于或减轻地震破坏。但是建筑结构上使用的隔震层一般设置在基础,而本文由于导管架平台结构的特点,隔振层设置位置如图 1 所示,所以其结构隔振设计计算更加复杂。

本文的隔振层为铅芯叠层橡胶支座,其构造图如图 2 所示。它隔离导管架的振动传递到上部生活模块和夹板模块,降低了上部模块的振动。由于铅具有较低的屈服点和较高的塑性变形能力,可使铅芯叠层橡胶支座的阻尼比达到 20%~30%,提高隔振支座的吸能能力。所以使用铅芯叠层橡胶支座到导管架平台结构进行减振控制在理论上是可行的。

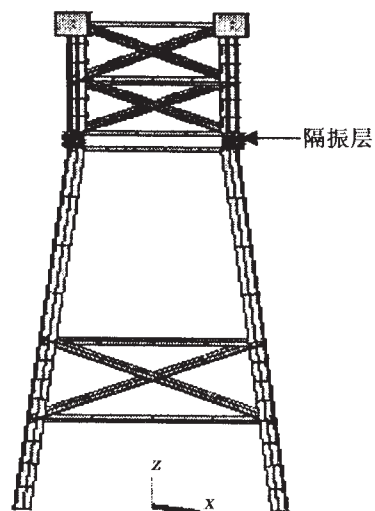


图 1 隔振试验平台有限元模型

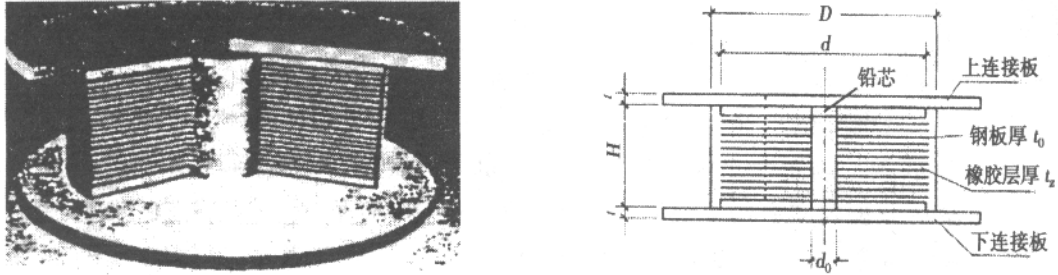


图2 铅芯叠层橡胶支座的构造图

3 实际平台结构及冰载荷简化

3.1 平台结构参数

渤海 JZ20-2MUQ 平台是我国自行设计、制造和安装的海洋采油生活动力平台^[10],平台概貌如图 3 所示。平台上部构件和设备总质量 $m_1^e=1780(T)$,刚度 $k_1^e=3.02 \times 10^6 \text{kN/m}$,下部总质量 $m_2^e=837(T)$,刚度 $k_2^e=2.09 \times 10^5 \text{kN/m}$,此平台结构的前 3 阶频率^[9]依次为 0.95Hz,1.01Hz,1.12Hz,给定阻尼比为 $\xi^e=4.0\%$,其有限元模型如图 4 所示^[9]。注意,所有上标 e 代表原型。

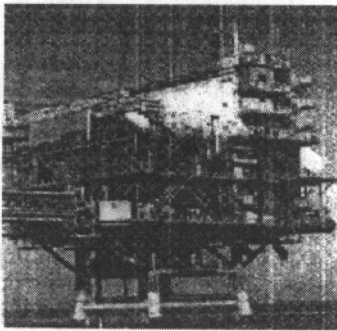


图3 渤海 JZ20-2MUQ 平台

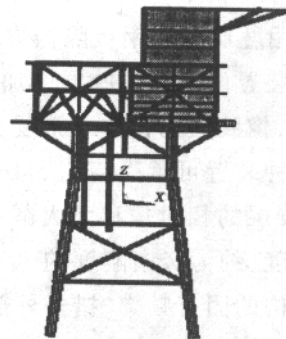


图4 JZ20-2MUQ 有限元模型

3.2 冰载荷简化

文^[11]中指出,当厚度为 t 的冰板以匀速 v 与平台的桩柱相撞时,会经历三种状态:加载状态、穿透状态、分离状态。根据不同的海冰环境,冰的加载状态会表现出不同的特征。根据文^[12]中通过实验与理论分析得到的简化动冰力函数,结合渤海海域的冰况经验公式,可得渤海海域的典型动冰力时间历程如图 5 所示(加载时间为 0.24s,峰值为 119kN)。

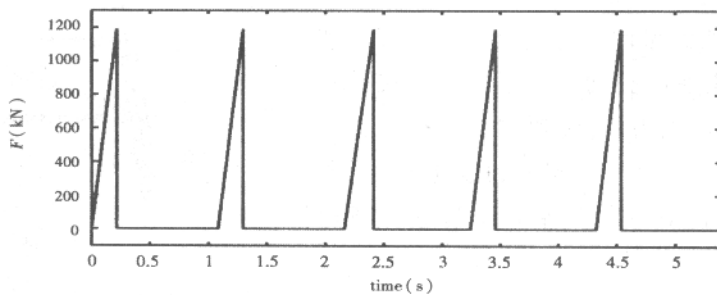


图5 渤海海域简化动冰力时程曲线

由以上渤海的 JZ20-2MUQ 平台结构和简化冰载荷可知 :冰力激励的频率为 0.91Hz ,而平台结构的一阶频率为 0.95Hz ,两者非常接近 ,因此在海冰激励下 ,平台结构的动力响应会很大 ;加之实际平台结构的阻尼很低 ,振动能量很难消耗掉 ,因此在不考虑加固结构从而导致平台造价增加的前提下 ,对平台进行隔振处理不失为一个有效的办法。

4 隔振试验平台模型

为了能把隔振试验的效果推演到实际平台的隔振中去 ,从而对海洋隔振平台的设计提供指导意义 ,试验模型隔振与真正的平台结构隔振必须满足一定的相似关系。

本模型试验的平台模型如图 1 所示 ,令 π 定理中自变量为 :时间相似比 α_t 为 6:1 , 缩尺比例 α_L 为 1:25(模型:原型)。

4.1 试验模型相似性要求

由于本模型试验关心的是平台顶端层的位移、加速度以及隔振层的最大相对位移 ,所以试验模型与真实模型在动力特性方面和外载方面必须尽量相似 ,而在几何形状方面不必完全相似 ,并且可以把本模型试验隔振系统简化为两自由度体系 ,如图 6 所示。

4.2 模型相似条件推导

平台结构的运动方程为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F_0 \sin \omega t \tag{1}$$

无量纲方程为(模态坐标下)

$$r_i^2 \ddot{z}_i + 2\xi_i r_i \dot{z}_i + z_i = \sin r_i \omega \tau \tag{2}$$

根据式(1)、(2)可得如下相似条件 ($i=1,2,3, \dots, N$)

$$\left. \begin{aligned} z_i^e &= z_i^p, \tau^e = \tau^p, \xi_i^e = \xi_i^p, r_i^e = r_i^p, r_\omega^e = r_\omega^p \\ M^e &= \alpha_m M^p, K^e = \alpha_k K^p, C^e = \alpha_c C^p \\ \frac{\omega_i^e}{\omega_{i+1}^e} &= \frac{\omega_i^p}{\omega_{i+1}^p}, \frac{k_i^e}{k_{i+1}^e} = \frac{k_i^p}{k_{i+1}^p}, \frac{c_i^e}{c_{i+1}^e} = \frac{c_i^p}{c_{i+1}^p} \\ \alpha_i &= \sqrt{\frac{\alpha_m}{\alpha_k}}, \alpha_\omega = \frac{1}{\alpha_t}, \alpha_j = \alpha_k \alpha_L \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

式中上标 e 和 p 分别代表原形和模型 , M 、 C 、 K 分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵。

4.3 隔振试验平台模型

基于以上的实际平台结构模型 , 结合考虑模型试验的相似性 , 本文导出如表 1 的试验模型参数。

表 1 隔振平台模型的动力参数

	刚度 k (kN/m)	质量 m (kg)	阻尼比 ξ^p
上层	$k_1^p = 4.44 \times 10^3$	$m_1^p = 110.2$	4%
下层	$k_2^p = 3.36 \times 10^2$	$m_2^p = 52.2$	4%

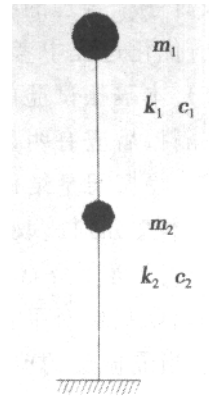


图 6 模型试验隔振系统力学模型

4.4 隔振试验冰力载荷简化

基于上述渤海冰载荷激励模型,考虑模型试验的相似性,本文导出与图5相似的冰力载荷时间历程(但加载时间为0.04s,峰值为79.4N,周期为0.18s)。

分析:以上的平台试验模型完全基于原JZ20-2MUQ平台结构模型和相似性要求导出,其自振频率为6.17Hz,在上述的冰力载荷频率5.55Hz的激励下,其动力响应很大(图6和图7中的虚线分别为平台顶部层的位移和加速度的数值计算结果)。因此以下考虑在导管架端帽处给此试验模型加上隔振控制装置,从而降低其动力响应。

5 隔振层参数优化设计

在平台隔振方案中,不同的隔振支座刚度和阻尼比将会使平台结构产生不同的动力响应,因此必须设计一个合理的参数才能达到隔振控制的目的。

◆ 优化过程中考虑如下两个因素:

(1) 本隔振试验的最终目的是减小平台结构冰致振动的动力响应,因此平台顶端的位移和加速度在隔振后应有明显的减小;

(2) 隔振层是结构的重要部位,层间最大相对位移不宜过大。

◆ 本文分别选取多组隔振层参数进行数值计算,发现:

(1) 当阻尼比 $\xi < 0.2$ 时,随着 ξ 的增大,平台顶部的加速度和位移的响应逐渐减小;当阻尼比 $\xi > 0.2$ 后,阻尼比对平台结构的响应的影响已经很小;

(2) 当隔振层的剪切刚度使名义隔振频率 $f_r = 5.6\text{Hz}$ 左右时,结构的响应不但没有减小,反而较无隔振装置情况下有大幅度的增长;当 $f_r < 3.55\text{Hz}$ 后,位移的减振效果不再明显增加,而隔振层的最大相对位移却有很大的上升势头(其中 $f_r = 1/2\pi\sqrt{k/m}$, k 为隔振层剪切刚度, m 为上层总质量)。

优化后的阻尼比 ξ 取为0.2, f_r 取为3.55(Hz)。

6 结构冰致振动响应及减振效果分析

对于上述的结构模型,采用优化后的隔振层参数,针对图7所示的冰力载荷模型,本文采用有限元分析方法进行数值计算,所得结果如图7~9所示,减振效果列于表2中。根据结构的动力特性,最大的响应必将发生在平台结构的顶部;由于本试验的模型结构是对称的,所以转动响应量小, X 向与 Y 向的位移和加速度响应应该分别相同。因此表中中和图中只显示出 X 向平台顶部的加速度、位移以及隔振层间的相对位移。

由计算结果可以看出:采用两自由度模型计算的隔振体系,平台顶部的加速度减振效果为

表2 平台顶部响应及减振效果

	平台顶部最大加速度 (m/s^2)	平台顶部最大位移 (mm)	隔振层的最大相对位移 (mm)
原结构	0.39	0.19	—
隔振结构	0.23	0.17	0.17
减振效果	41%	10%	—

注:减振效果=(原结构量-隔振结构量)/原结构量

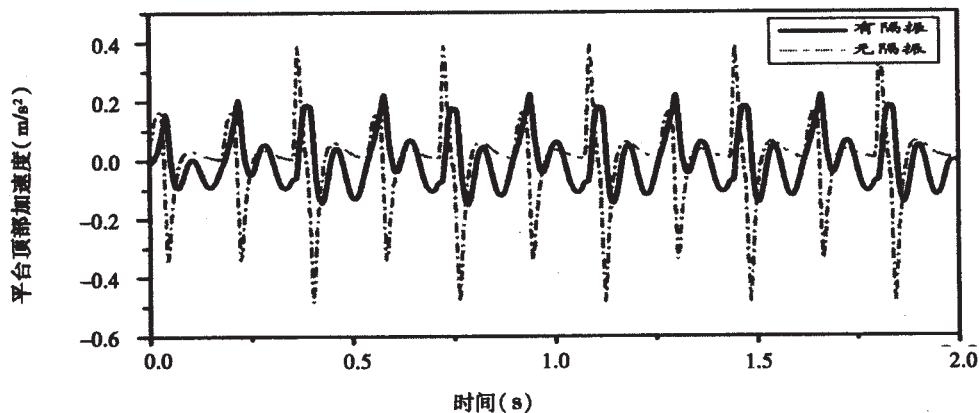


图7 隔振前后平台顶部加速度对比

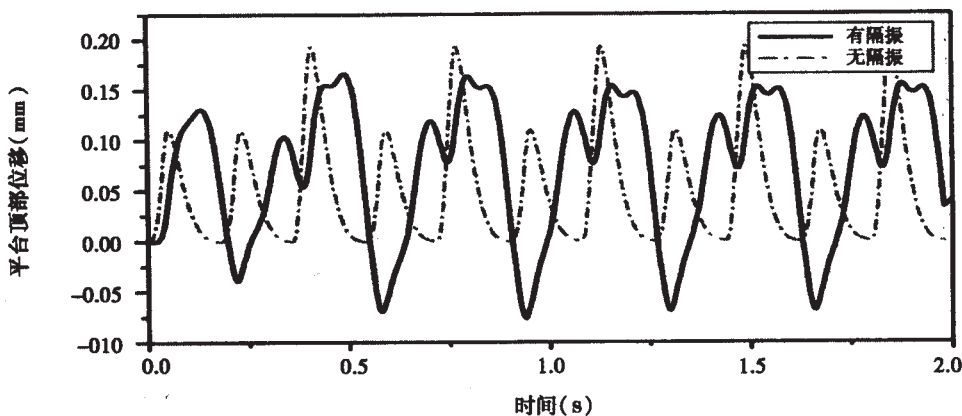


图8 隔振前后平台顶部位移对比

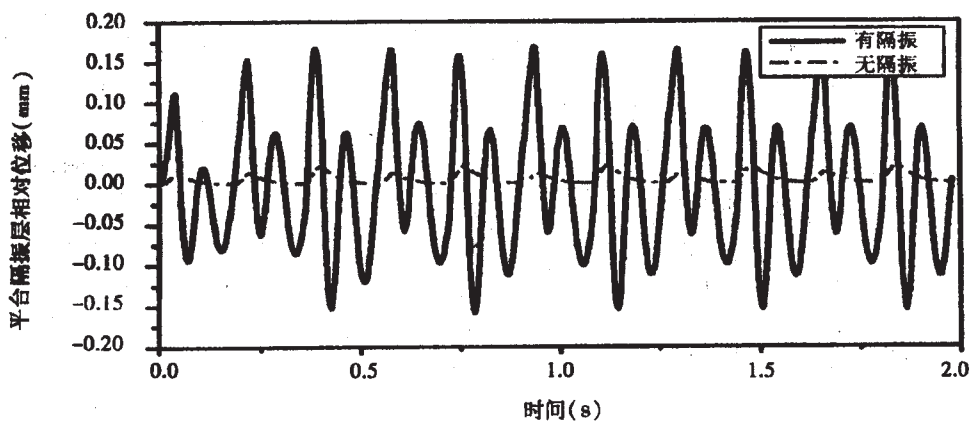


图9 隔振前后平台隔振层间相对位移对比

41% ,平台顶部的位移减振效果为 10% ,隔振层间的最大相对位移为 0.17mm ;加速度的减振效果较好 ,因此会减轻平台工作人员的不安全感 ,而位移的减振效果不甚理想 ,不过隔振后的位移也小于隔振前的 ,隔振层间的相对位移比较大 ,因此在实际设计隔振控制装置时 ,必须考虑叠层橡胶的失稳问题和海洋采油平台的钻采工艺要求 ,选择合适的叠层橡胶并设计合理的限位装置。

7 结论

本文根据文[9]提供的渤海 JZ20-2MUQ 平台结构模型以及文[12]的冰载时间历程模型,结合渤海的海域冰况参数,根据模型试验相似性理论,导出了本模型试验的实验模型参数和冰载荷时间历程,通过选用多组隔振层参数对其进行隔振控制数值模拟,得到以下结论:

(1) 选用陆地建筑上常见使用的减振控制装置—叠层橡胶支座,将其安装在导管架式海洋平台结构的导管架端帽与上部组块之间,对其进行减振控制是有效的。

(2) 增加叠层橡胶的阻尼比可以减轻平台顶端的响应,但是当阻尼比 $\xi > 0.2$ 以后,增加阻尼比的影响已经不再明显,因此模型试验中选取叠层橡胶的阻尼比为 $\xi = 0.2$ 。

(3) 减小隔振层的侧向刚度可以降低上部组块的自振频率,从而避开外激励的频率,但是过小的侧向刚度将会导致隔振层间的相对位移太大致使结构失稳,这在设计隔振层的过程中是不容忽视的。

(4) 本文的平台结构计算模型和冰载荷模型都是基于实际的模型并结合相似理论推导出来的,因此所得计算结果可以根据相似理论推演到原型中去,为新型抗冰振平台的设计提供参数,为即将进行的 1:25 的模型试验提供理论指导。

参考文献

- [1] 欧进萍等. 基于实测动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.
- [2] Maattanen M P. Ten years of ice-induced vibration isolation in lighthouses[J]. OMAE '87, 1987,4:261-266.
- [3] Engelbrekton A. A refined ice-structure interaction model based on observations in the Gulf of Bothnia[C]. Proceedings of MAE/POAC '97, Japan, 1997, 4:373-376.
- [4] Jefferes M G and Wright W H. Dynamic response of Molikpaq to ice structure interaction[C]. OMAE '88, Feb.7-12, Houston, TX, 1998, 4:201-220.
- [5] 王翎羽等. 调谐液体阻尼器(TLD)的减振原理及其在 JZ20-2MUQ 平台上的减振应用研究[R]. 天津大学海洋与船舶工程系研究报告, 1994.
- [6] 欧进萍等. 设置粘弹性耗能器的 JZ20-2MUQ 平台结构冰振控制[J]. 海洋工程, 2000, 18(3):9-14.
- [7] K Yoshida, H Suzuki, etc. Control of dynamic response of towerlike offshore structures in wave[J]. Transaction of ASME, 112:14-20.
- [8] Suhardjo J and Kareem A. Structure control of offshore platforms[C]. Proceedings of the 7th International Offshore and Polar Engineering Conference IOSPE-97, Honolulu, 1997.
- [9] 刘玉标,申仲翰. JZ20-2MUQ 平台的冰致振动分析[R]. 中国科学院力学所研究报告.
- [10] JZ20-2MUQ 平台结构设计报告. 中国石油海上工程股份有限公司, 1990(内部资料)
- [11] 刘玉标,申仲翰. 冰与结构的耦合振动模型[J]. 海洋工程, 2000, 18(4)
- [12] Yue Q J and Bi X J. Full-scale tests and analysis of dynamic interaction between ice sheet and conical structures [C]. Proc. of 14th International Association for Hydraulic Research [IAHR] Symposium on Ice, Vol.II, Potsdam, 1998.