

冰振下海洋平台上部天然气管线振动分析^{*}

张 大 勇 岳 前 进 李 刚 周 庆

(“工业装备结构分析”国家重点实验室·大连理工大学)

张 大 勇 等. 冰振下海洋平台上部天然气管线振动分析. 天然气工业, 2006, 26(12): 139-141.

摘 要 渤海辽东湾的导管架平台在海冰作用下会产生比较剧烈的振动。冰激振动除了可引起导管架结构的疲劳破坏,还会引起平台上部管线的疲劳破坏与法兰的松动,因而有必要分析平台在冰振作用下的上部天然气管线振动问题。为此,基于现场监测,建立了管线系统振动力学模型,并采用有限元数值模拟的方法,考虑了管系的复杂支撑、管件、管系设备等因素对管系的影响,计算出冰振下 JZ202 平台上部主要天然气管系的模态、位移、转角响应及动应力幅值。结果表明,冰振对天然气管线的动态响应有重要的影响,在冰区海洋平台上部管道设计时必须加以考虑,并提出了提高管系抗振的措施。

主题词 天然气管道 海上平台 海冰 振动 数值模拟

一、引 言

海冰是渤海近海结构物的控制环境荷载。在以往的抗冰平台设计中通常只考虑了在极值静冰力下结构的最大承载力;而交变冰力作用下对平台结构与上部生产设施的影响尚未充分考虑。基于现场原型结构的监测显示,海冰与平台作用时可以产生明显的周期性荷载,并且激起平台较大的加速度响应^[1]。特别是天然气平台上错综复杂的天然气管线,在长期的冰振作用下,可能会使管道的连接部件发生松动,轻则引起泄漏,重则会由断裂而引起爆炸,给平台的安全生产带来不同程度的经济损失。故有必要对冰振引起海洋平台上部管线振动进行分析。

国内外对管道振动的研究主要集中在:因气体或流体介质与管道系统的相互作用而使管系发生的振动^[2];海洋流对海底管线的影响^[3];地震荷载对管道系统的响应分析^[4,5]。海洋平台冰激上部管线振动现象,类似于地震荷载引起的管线振动。笔者基于对渤海辽东湾 JZ202 油田导管架平台的冰振响应连续多年的监测,得到典型的甲板加速度时程曲线,并将此作为海洋平台上部天然气管线的激振力,建立了管线系统结构振动力学模型。采用有限元数值模拟的方法,计算了冰振下 JZ202 平台上部主要天然气管系的模态、位移、转角响应及动应力幅值。

二、平台冰激振动响应

我国渤海湾的海洋石油平台由于其所在地理位置的特殊性,使得在每年冬季由于海冰引起的平台振动问题比较突出。研究表明,渤海冰区的导管架平台属于柔性抗冰结构,不论是圆柱桩腿还是安装了破冰锥体的平台都存在海冰引起的结构共振现象^[6]。为了定量分析冰振对海洋平台上部天然气管线的影响,笔者在渤海湾 JZ202 海域的平台甲板安装了拾振器,用于对平台甲板层的冰振响应进行连续的监测。

图 1 为监测得到的由冰引起平台甲板振动的典型加速度响应时程曲线。通过监测发现,海洋平台冰激上部管线振动现象,类似于地震荷载引起的管线振动。冰与结构作用引起平台甲板的振动,而甲板加速度响应对上部管线基础施加了惯性力,与地

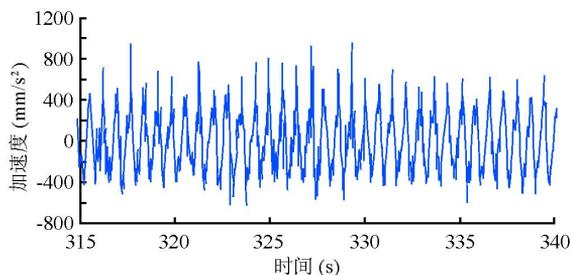


图 1 冰振下 JZ202MSW 平台甲板随机振动曲线图

^{*} 本文受到国家“863”计划项目(编号:2001AA602015)资助。

作者简介:张 大 勇,1978 年生,博士研究生;主要从事海洋平台结构失效与优化方面的研究。地址:(116023)辽宁省大连市大连理工大学工程力学系。电话:(0411)84701271。E-mail:zhangdayong_2001@163.com

震激励不同的是冰激平台振动持续的时间较长,并且为窄带随机振动。

三、冰激平台管线振动力学模型

严格说来,冰激管线系统的振动属于无限自由度体系的随机振动,这给数学描述和求解带来一定的困难。为此,通过离散化的方法,将管线系统的振动问题简化为线性多自由度系统的振动问题。假设管系具有 N 个独立自由度,以 N 个广义坐标 X_i ($i=1,2,\dots,n$) 表示系统的位形,则冰激振动下海洋平台上部管线系统的振动方程为:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{I\}A(t) \quad (1)$$

式中: $[M]$ 、 $[K]$ 、 $[C]$ 分别为管道系统的总质量、总刚度、阻尼矩阵; $\{I\}$ 为单位矩阵; $\{x\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 、 $\{\ddot{x}\}$ 分别为管道振动位移、速度、加速度向量; $A(t)$ 是冰激平台的甲板加速度响应,这里作为管线系统的激振。

求解多自由度系统振动方程时,通常采用直接积分法或振型叠加法。振型叠加法是首先求解无阻尼自由振动得到振型(从数学上讲这是一个矩阵特征值问题),然后利用振型的正交性对振动方程(1)进行变化,使变换后的方程自由度互不耦合。最后对各自度的运动方程进行积分并叠加。综上所述,可以导出主坐标描述的管道系统动力学方程:

$$[M]_p\{\ddot{x}\}_p + [C]_p\{\dot{x}\}_p + [K]_p\{x\}_p = -[M]_p\{I\}A(t) \quad (2)$$

式中: $[M]_p$ 、 $[K]_p$ 是对角矩阵,若振型阻尼矩阵也是对角阵(若阻尼矩阵不是对称阵,一般假定其与质量和刚度矩阵之间有比例关系 $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$, α 、 β 是比例常数),则方程(2)已经成为解耦形式,其中包括 n 个独立的方程:

$$M_{pi}\ddot{x}_{pi} + C_{pi}\dot{x}_{pi} + K_{pi}x_{pi} = -M_{pi}A(t) \quad (3)$$

其标准形式为:

$$\ddot{x}_{pi} + 2\zeta\omega_n\dot{x}_{pi} + \omega_n^2x_{pi} = -A(t) \quad (4)$$

对于式(4)的随机振动方程可以采用频域分析法和时域分析法来求解。后者采用时程分析法,利用数值积分求解式(4),求出管线的振动响应。其中的数值积分根据假设不同,分为线性加速度法、Wilson- θ 法、Newmark- β 法等,本文采用第二种方法。

四、冰激平台管线振动的数值分析

对管道系统进行有限元数值模拟,目的是要得

到与工程实际比较接近的管网结构动力学建模方法,并通过有限元方法加以分析、计算,得到管系的动力特性及其动态响应。笔者基于 CAESAR II 软件,假设管道内气体压强恒定(即认为气体引起管道的振动很小,相对冰振引起的管道振动可以忽略),计算了冰振下 JZ202 平台上部天然气管系的模态、管系位移、转角响应幅值。

1. 分析模型介绍

JZ202 平台上部天然气管线的主体部分模型如图 2 所示,包括生产管汇、测试管汇和计量管汇。管线相连的设备有两个加热器、一个分离器和一个清管发射器。管线上的管件包括 56 个弯头,34 个阀门(包括法兰),8 个三通。整个管系处于十分复杂的约束状态。

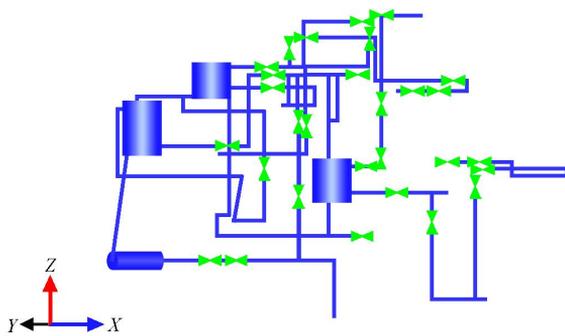


图 2 JZ202 平台上部主要天然气管线模型示意图

2. 计算结果

将监测得到的典型平台甲板加速度时程曲线(如图 1 所示)作为管线的外加扰动,加载到管系的约束点处(由于管线的约束点与平台甲板相连),运用振型叠加和 Wilson- θ 可求出管系在冰激振动下的动态响应。

计算出整个管系前 3 阶频率分别为: 0.80 Hz、0.88 Hz、1.11 Hz。管线局部结构固有频率的计算值与实测值(基于冬季管线监测)如表 1 所示。表 2 是管系部分节点的位移、转角响应的最大值(由于篇幅有限,这里只给出计量管汇部分节点响应值)。

表 1 管系局部结构固有频率表

局部结构 (节点范围)	计算值 (Hz)	实测值 (Hz)
295~365	1.11	1.25
200~285	1.24	1.28
480~515	1.35	1.26
5~130	1.05	1.39
160~220	1.11	1.25

表 2 计量管汇部分节点的响应值幅值表

节 点	动应力 (MPa)	位移(cm)			转角(°)		
		X	Y	Z	X	Y	Z
350	80.243	-0.0091	-0.2342	0.0020	-0.0081	0.0041	0.1170
420	7.748	0.2106	-2.3406	0.3005	-0.2142	0.0353	0.2484
425	14.943	0.2106	-1.6944	0.1425	-0.1881	0.0754	0.2537
430	19.407	0.2045	-1.0234	-0.0094	0.1471	0.0413	0.1801
435	27.223	0.2388	-1.0234	0.1852	-0.1840	0.1519	0.3242
440	45.623	0.3416	-1.6762	0.2449	-0.1735	0.2194	0.4070

由上述计算结果可以看出,由于冰振下平台甲板加速度响应的基频(管线基振频率)为 1.3 Hz(实测得到),而管系局部结构固有频率与之很接近,所以整个管系很容易发生共振现象。节点 350 的动应力幅值最大,为 80.243 MPa。总之,冰振能引起海洋平台上部天然气管线系统复杂而又强烈的振动,对此,海洋平台的业主和设计者应给予充分的重视。

四、结 论

从计算结果看出,冰振对天然气管线的动态响应有着重要的影响,在冰区海洋平台上部管道设计时必须加以考虑。管道系统的支撑和约束是承受平台甲板水平振动的最主要构件,同时作为系统的边界条件又决定了管系的模态。因此要提高管系的抗

振能力,必须合理布置管系支撑和约束,防止产生鞭梢效应;调整支撑刚度,增加其减振缓冲环节;采用采制较好的具有一定柔性的管道接头。另外,根据管系动态特性采取有效的减振措施,例如选用管道减振器、液压式阻尼器或加装调谐器等控制方法。

参 考 文 献

- [1] YUE Q J, BI X J. Ice-induced jacket structure vibrations in Bohai Sea[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2000, 14(2): 81-92.
- [2] 李长俊, 汪玉春, 王元春. 天然气管道系统的振动分析[J]. 天然气工业, 2000, 20(2): 80-83.
- [3] TAO XU, BO LAURIDSEN, YONG BAI. Wave-induced fatigue of multi-span pipelines [J]. Marine Structures, 1999(12): 83-106.
- [4] LUCIANO LAZZERI. On the Nonlinear response of piping to seismic loads [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2001, 123: 324-331.
- [5] 谭平. 天然气管道系统地震响应分析[J]. 天然气工业, 2005, 25(7): 99-101.
- [6] 岳前进, 毕祥军, 于晓, 等. 锥体结构冰激振动与冰立函数[J]. 土木工程学报, 2003, 36(2): 16.

(修改回稿日期 2006-10-16 编辑 赵 勤)