

文章编号:1673-5005(2009)02-0123-05

基于涡激抑制的隔水管浮力块分布方案优化

孙友义¹, 陈国明¹, 畅元江¹, 许亮斌²

(1. 中国石油大学 机电工程学院, 山东东营 257061; 2. 中海石油研究中心, 北京 100027)

摘要: 浮力块是深水钻井隔水管系统的重要组成部分,其主要作用是降低隔水管湿重,以减少对钻机的张力需求。涡激振动(VIV)是引起隔水管屈服失效与疲劳失效的主要因素,也是隔水管设计过程中需要考虑的主要问题。基于 SHEAR7 程序对隔水管系统进行 VIV 分析,通过研究不同浮力块分布形式对隔水管系统涡激振动疲劳特性的影响,对浮力块分布方案进行优化。从抑制 VIV 疲劳损伤角度出发,对隔水管系统配置浮力块时,应尽量促使系统响应频率由浮力块与隔水管共同控制,以避免发生涡激共振。还可在避开高流速区域的前提下,促使系统激励频率由浮力块控制,这样既避免来流通过浮力块为系统输入较多的能量,同时又能降低系统的响应模态阶次。

关键词: 深水钻井; 隔水管; 涡激振动; 浮力块分布; 涡激抑制

中图分类号: TE 58 **文献标识码:** A

Riser buoyancy distribution optimization based on vortex-induced vibration suppression

SUN You-yi¹, CHEN Guo-ming¹, CHANG Yuan-jiang¹, XU Liang-bin²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;

2. China Offshore Oil Research Center, Beijing 100027, China)

Abstract: Buoyancy modules are important constituent parts of deepwater drilling riser systems. The main function of buoyancy modules is to reduce wet weight of riser as well as rig tension demand. Vortex-induced vibration (VIV) is the main cause of yield failure and fatigue failure of risers, and is an important issue in riser design. Riser VIV analyses were conducted using SHEAR7 software. The effects of buoyancy distributions on riser VIV fatigue characteristics were investigated. Buoyancy distributions were optimized based on VIV suppression, and corresponding guidelines were summarized. Primarily, buoyancy distributions should make the system response frequencies be controlled jointly by buoyant joints and slick joints so as to avoid resonance. Alternatively, at the premise of keeping away from high velocity regions, buoyancy distributions should make the system response frequencies be controlled by buoyant joints so as to lower input energy as well as response mode number.

Key words: deepwater drilling; riser; vortex-induced vibration; buoyancy distribution; vortex-induced vibration suppression

钻井隔水管作为水下井口与浮式钻井平台之间的重要部件,其主要功能是隔离海水、引导钻具、循环钻井液等。浮力块是深水钻井隔水管系统的重要组成部分,它的主要功能是降低隔水管系统湿重,以减小对钻机的张力需求。浮力块由复合泡沫塑料制成,合理安装的情况下可将系统湿重降至千重的 90%~95%^[1]。随着海洋油气开发进入深水领域,

隔水管的涡激振动(VIV)问题引起了广泛的关注。涡激振动是引起隔水管屈服失效与疲劳失效的主要因素,也是隔水管设计中需要考虑的主要问题^[2]。对隔水管配置浮力块时,需考虑浮力块对系统涡激振动疲劳特性的影响。笔者通过研究不同浮力块分布形式对隔水管系统涡激振动疲劳特性的影响,对浮力块分布方案进行优化。

收稿日期:2008-12-08

基金项目:国家“863”高技术发展计划项目(2006AA09A106-4);中海石油研究中心外委课题(ZHKY2005-013-01)

作者简介:孙友义(1983-),男(汉族),山东东营人,博士研究生,从事深海石油装备强度与可靠性研究。

1 VIV 疲劳分析方法

基于 SHEAR7 程序进行 VIV 分析。SHEAR7 是当前国际上应用最广泛的涡激振动分析软件,用于预测细长结构在横流方向上的 VIV 响应,可以模拟多种结构模型以及多种约束条件^[3]。

工作状态下,隔水管承受海流的长期作用。来流绕过隔水管在其背后泄放漩涡。隔水管静止时,漩涡泄放频率遵循斯脱哈尔关系

$$f_v = S_t U/D. \quad (1)$$

式中, S_t 为无量纲的斯脱哈尔数; U 为流速; D 为结构水动力外径。

隔水管在交替泄放的漩涡作用下开始振动。当 f_v 处在隔水管固有频率 f_n 附近时, f_v 不再遵循斯脱哈尔关系,而是被 f_n “锁定”,由此导致隔水管的大幅振动^[4-5]。

在深水海域,海流流速通常随水深发生改变,隔水管的多阶固有模态可能被激励发生振动^[6]。SHEAR7 程序根据输入的海流剖面与隔水管结构参数识别潜在的响应模态,基于能量平衡原理预测结构的各阶模态响应,并基于模态叠加方法计算结构总的响应。

r 阶模态振动造成的均方根应力 $S_r(x)$ 由下式进行计算^[7]:

$$S_r(x) = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left[\sum_n Y_n''(x) E d_n \bar{p}_n H_n \right]. \quad (2)$$

式中, $Y_n''(x)$ 为模态曲率; E 为弹性模量; d_n 为应力外径; $\bar{p}_n$ 为模态力; H_n 为频率响应函数。

r 阶模态振动造成的疲劳损伤 $D_r(x)$ 可表示为

$$D_r(x) = \frac{t_f}{K} [2\sqrt{2} S_r(x)]^m \Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right). \quad (3)$$

式中, t_f 为服役时间; m 和 K 为由 $S-N$ 曲线表达式定义的常数, $NS^m = K$, S 为应力范围, N 为 S 的循环次数; Γ 为伽马函数。

隔水管的总体疲劳损伤为各振动模态造成的疲劳损伤之和,即

$$D(x) = \sum_r D_r(x). \quad (4)$$

2 交错浮力块分布对隔水管 VIV 的影响

目前工程上普遍认为浮力块交错分布有助于降低涡激振动对隔水管造成的疲劳损伤^[8-10]。针对 25% 与 50% 的浮力块覆盖范围,分析隔水管柱在均

匀交错覆盖浮力块后的涡激振动响应特性,并与裸管柱(0)及全部覆盖浮力块的管柱(100%)进行比较,探讨交错浮力块分布形式对隔水管涡激振动响应特性的影响。4 种分析模型见图 1。

针对水深为 609.6 m 的隔水管系统进行分析。隔水管主管外径为 0.533 4 m,壁厚为 0.015 9 m,干重为 380 kg/m,湿重为 330.4 kg/m。浮力块外径为 1.13 m,干重为 282.2 kg/m,提供净浮力为 368.7 kg/m。

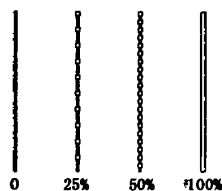


图 1 交错浮力块分布模型

Fig. 1 Staggered buoyancy distribution models

海流剖面的形状近似为剪切流。对剪切参数为 0.67, 1.2 与 2.0 的 3 类剪切流剖面进行分析。剪切参数 S_h 定义为

$$S_h = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\text{mean}}}.$$

式中, $U_{\max}$, $U_{\min}$ 与 U_{mean} 分别为海流剖面的最大、最小与平均流速。

图 2 所示为 4 种分析模型在 3 类剪切参数流剖面作用下的主导响应频率。从图中可以看出,在 3 类剪切参数流剖面作用下,4 种模型的主导响应频率均明显落在两条趋势线附近。因浮力块外径显著大于隔水管外径,当激励频率(漩涡泄放频率)由浮力块控制时,模型的响应频率明显较小,响应模态阶次较低。对于 50% 覆盖模型,系统主导响应频率全部落在 100% 覆盖模型的趋势线附近,表明起决定性作用的激励频率遵循浮力块外径对应的斯脱哈尔关系,即系统激励频率主要由浮力块控制。对于 25% 覆盖模型,系统主导响应频率离散地落在两条趋势线附近,表明主导激励频率或遵循浮力块外径对应的斯脱哈尔关系或遵循隔水管外径对应的斯脱哈尔关系,即来流通过隔水管为系统输入的能量与通过浮力块为系统输入的能量相当。

图 3 所示为 4 种分析模型在 3 类剪切参数流剖面作用下的最大疲劳损伤曲线。从图中可以看出,在 3 类剪切参数流剖面作用下,4 种模型的相对疲劳损伤程度是基本一致的。其中,50% 覆盖模型具有与 0 覆盖模型相当的疲劳损伤程度;25% 覆盖模型具有

较低的疲劳损伤程度;100% 覆盖模型具有较高的疲劳损伤程度。与其他 3 种模型相比,25% 覆盖模型具有的最大不同之处在于该模型的响应频率由隔水管与浮力块共同控制,使得系统不易发生涡激共振,这是该模型具有较好疲劳特性的主要原因。尽管

50% 覆盖模型与 100% 覆盖模型的响应频率均由浮力块控制,因浮力块交错分布扰乱了沿系统展向漩涡泄放的一致性,从而降低了漩涡对系统的输入能量,50% 覆盖模型的疲劳特性要明显优于 100% 覆盖模型。

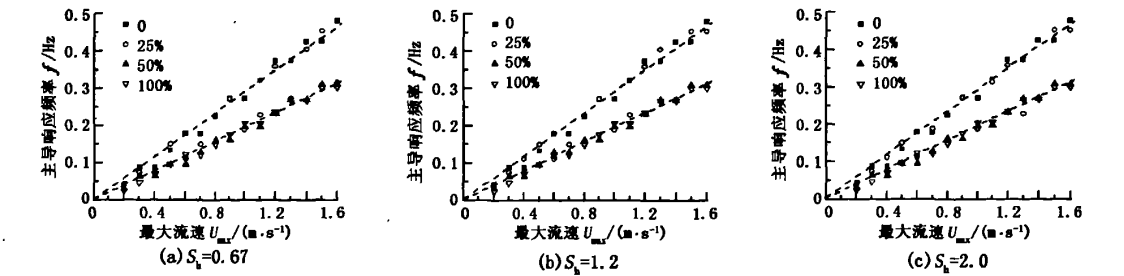


图 2 不同海流剖面作用下的主导响应频率
Fig. 2 Dominant response frequencies under different flow profiles

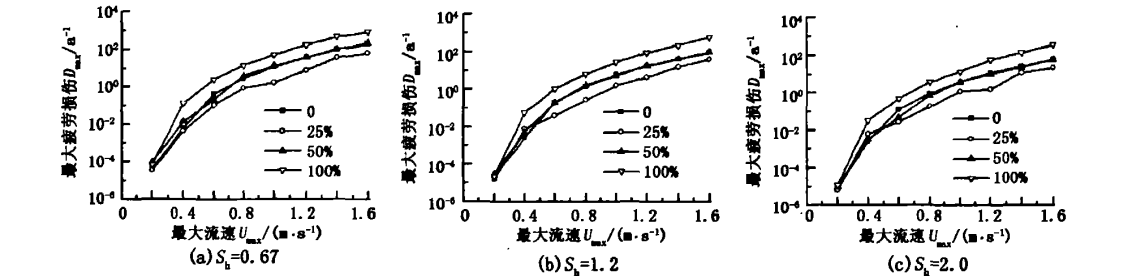


图 3 不同海流剖面作用下的最大疲劳损伤
Fig. 3 Maximum fatigue damages under different flow profiles

3 浮力块分布方案优化

针对 25% 与 50% 两种浮力块覆盖范围,从抑制 VIV 疲劳损伤角度出发,对浮力块分布方案进行优化。海流剖面剪切参数对分析模型的疲劳特性影响不大,针对 $S_h = 1.2$ 的一系列流剖面进行分析。

3.1 25% 的浮力块覆盖范围

在 25% 的浮力块覆盖范围下,对图 4 所示的 5 种浮力块分布方案进行分析。

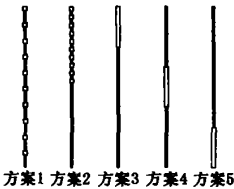


图 4 25% 覆盖范围浮力块分布方案
Fig. 4 Schematic diagrams of buoyancy distributions with coverage of 25%

图 5 所示为 5 种浮力块分布方案在不同海流剖

面作用下的主导响应频率及最大疲劳损伤曲线。从图中可以看出:方案 2,3 的主导响应频率由浮力块控制;方案 5 的主导响应频率由隔水管控制;方案 1,4 的主导响应频率或由浮力块控制或由隔水管控制。分析表明:在高流速区内,50% 的浮力块覆盖范围即可使系统响应频率被浮力块控制;处于低流速区内的浮力块对响应频率不起控制作用。与方案 1~3 不同,方案 4 中由浮力块控制的响应频率明显偏小,这是由浮力块所处区域流速偏小造成的。

方案 2,3,5 的响应频率由浮力块或隔水管单独控制,易发生涡激共振,疲劳损伤程度整体较高。对于方案 3,因激励区域小,同时响应模态阶次低,其疲劳损伤程度与方案 5 相当。对于方案 2,因浮力块交错分布削弱了漩涡强度,其疲劳损伤程度低于方案 3 和方案 5。方案 1 的响应频率由浮力块与隔水管共同控制,不易发生涡激共振,疲劳损伤程度整体较小。方案 4 的疲劳特性比较复杂:当响应频率由隔水管控制时,疲劳损伤较大;当响应频率由隔水管与浮力块共同控制时,疲劳损伤较小,如最大流速为 1.4

m/s 或 1.6 m/s 海流剖面作用的情形;当响应频率由浮力块控制时,因浮力块所处区域流速较小,疲劳损

伤亦较小,如最大流速为 1.0 m/s 海流剖面作用的情形。从整体上看,方案 1 具有最优的疲劳特性。

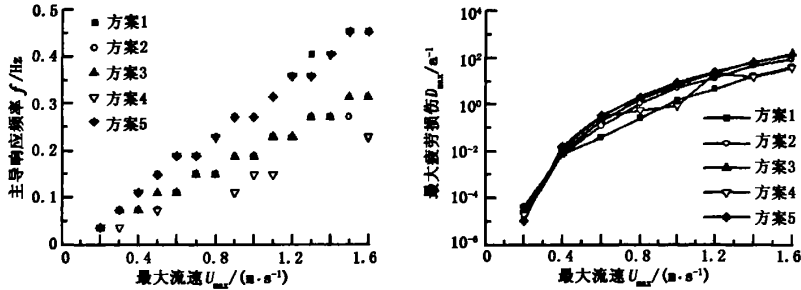


图 5 不同浮力块分布方案的主导响应频率及最大疲劳损伤(25% 覆盖范围)

Fig.5 Dominant response frequencies and maximum fatigue damages for different buoyancy distributions with coverage of 25%

3.2 50% 的浮力块覆盖范围

在 50% 的浮力块覆盖范围下,对图 6 所示的 5 种浮力块分布方案进行分析。设计了方案 2 所示的浮力块分布形式,拟在实现与图 4 中方案 1 相似的作用效果。

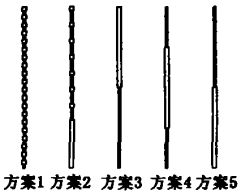


图 6 50% 覆盖范围浮力块分布方案

Fig.6 Schematic diagrams of buoyancy distributions with coverage of 50%

图 7 所示为 5 种浮力块分布方案在不同海流剖面作用下的主导响应频率及最大疲劳损伤曲线。从图中可以看出:方案 1,3 的主导响应频率由浮力块

控制;方案 5 的主导响应频率由隔水管控制;方案 2, 4 的主导响应频率或由浮力块控制或由隔水管控制。

方案 1,3,5 的响应频率由浮力块或隔水管单独控制,易发生涡激共振,疲劳损伤程度整体较大。对于方案 3,来流通过浮力块为系统输入大量能量,导致其疲劳损伤程度高于方案 5。对于方案 1,浮力块交错分布削弱了漩涡强度,同时响应模态阶次较低,其疲劳损伤程度低于方案 5。方案 2 的响应频率由浮力块与隔水管共同控制,不易发生涡激共振,疲劳损伤程度整体较小。方案 4 的响应频率不由隔水管单独控制,当响应频率由浮力块与隔水管共同控制时,因不发生涡激共振,疲劳损伤较小;当响应频率由浮力块单独控制时,因浮力块所处区域流速较小,疲劳损伤亦较小。从整体上看,方案 2 的疲劳特性最好,方案 4 次之。

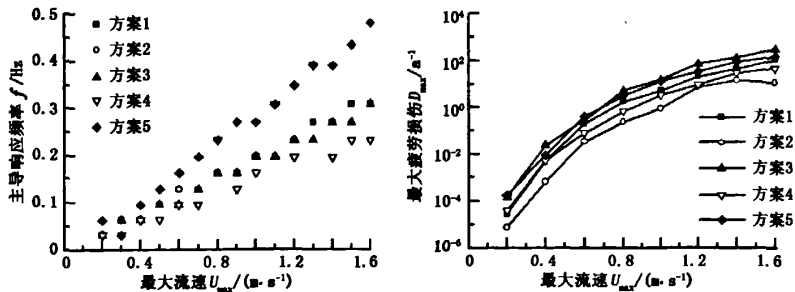


图 7 不同浮力块分布方案的主导响应频率及最大疲劳损伤(50%覆盖范围)

Fig.7 Dominant response frequencies and maximum fatigue damages for different buoyancy distributions with coverage of 50%

4 结 论

(1) 配置浮力块后,若隔水管系统的响应频率由浮力块或隔水管单独控制,系统易发生涡激共振,进而造成较大的疲劳损伤;若隔水管系统的响应频率由浮力块与隔水管共同控制,系统不易发生涡激共振,造成的疲劳损伤较小。

(2) 从抑制 VIV 疲劳损伤角度出发,对隔水管系统配置浮力块时,应尽量促使系统响应频率由浮力块与隔水管共同控制,以避免发生涡激共振。还可在避开高流速区域的前提下,促使系统激励频率由浮力块控制,这样既避免来流通过浮力块为系统输入较多的能量,同时又降低系统的响应模态阶次。

(3) 若浮力块覆盖范围低于 25%,推荐将浮力单根与裸单根按 1:3 的比例自隔水管系统上部开始排列。若浮力块覆盖范围高于 25% 而低于 50%,推荐将浮力单根与裸单根按 1:3 的比例自隔水管系统上部开始排列,多余浮力单根布置在系统下部;若浮力块覆盖范围高于 50%,推荐将浮力单根布置在隔水管系统中部。

参考文献:

- [1] MCCRAE H. Marine riser systems and subsea blowout preventers: formerly subsea blowout preventers and marine riser systems [M]. Austin, USA: PETEX, 2003.
- [2] 许亮斌. 深水钻井隔水管设计及应用技术研究[D].

北京:中海油研究中心,2006.

- [3] BAI Yong, BAI Qiang. Subsea pipelines and risers [M]. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science Ltd, 2005.
- [4] SARPKEYA T. A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations [J]. Journal of Fluids and Structures, 2004,19:389-447.
- [5] WILLIAMSON C H K, GOVARDHAN R. Vortex-induced vibrations [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2004,36:413-455.
- [6] ALLEN D W. Vortex-induced vibration of deepwater risers [C]//Proceedings of the 1998 Offshore Technology Conference, Houston, 1998.
- [7] VANDIVER J K, LI L. SHEAR7 V4. 3 program theoretical manual [M]. Cambridge, USA: MIT, 2003.
- [8] HOWELLS H. Drilling riser optimization for deep water [C]//Proceedings of Advances in Riser Technologies, Aberdeen, 1997.
- [9] TOGNARELLI M A, TAGGART S, CAMPBELL M. Actual VIV fatigue response of full scale drilling risers: with and without suppression devices [C]//Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Estoril, 2008.
- [10] VANDIVER J K, PEOPLES W W. The effect of staggered buoyancy modules on flow-induced vibration of marine risers [C]//Proceedings of the 2003 Offshore Technology Conference, Houston, 2003.

(编辑 沈玉英)

(上接第 117 页)

- [7] KATO T, HARUKI M, IAMANAKA T. Isolation and characterization of long-chain *n*-alkane degrading bacillus thermoleovorans from deep subterranean petroleum reservoirs [J]. Journal of Biosci Bioeng, 2001,91:64-70.
- [8] 包木太,王兵,袁长忠,等.胜利油田沾3区块内源微生物室内模拟激活实验研究[J].化工学报,2008,59(9):2334-2338.
- BAO Mu-tai, WANG Bing, YUAN Chang-zhong, et al. Simulated activation of indigenous microorganisms in Zhan3 block, Shengli Oilfield [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2008,59(9):2334-2338.
- [9] 路璐,向廷生,黑花丽.本源微生物降解原油的饱和烃色谱分析[J].油气地质与采收率,2008,15(1):77-79.

LU Lu, XIANG Yan-sheng, HEI Hua-li. Gas chromatographic analysis of the saturated hydrocarbon in the crude oil by indigenous microorganisms [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008,15(1):77-79.

- [10] BORDOLOI N K, KONWAR B K. Microbial surfactant-enhanced mineral oil recovery under laboratory conditions [J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2008(63):73-82.
- [11] 王大威,刘永建,杨振宇,等.脂肽生物表面活性剂在微生物采油中的应用[J].石油学报,2008,29(1):111-115.
- WANG Da-wei, LIU Yong-jian, YANG Zhen-yu, et al. Application of surfactin in microbial enhanced oil recovery [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008,29(1):111-115.

(编辑 刘为清)