文章编号:1673-5005(2016)04-0110-06 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2016.04.014

减振器对串联立管涡激振动抑制研究

娄 敏[1], 王阳阳[1], 轩红超[2]

(1. 中国石油大学石油工程学院,山东青岛 266580; 2. 中海油安全技术服务有限公司,天津 300457)

摘要:基于 Fluent 软件,运用动网格技术及用户自定义接口编程,建立串联立管流固耦合模型,在考虑尾流干涉效应的前提下,分析减振器对串联立管涡激振动的抑制规律,并通过设计实验验证研究结果准确性。结果表明:减振器的存在改变了立管漩涡泄放频率,减振器尾角越小,漩涡泄放频率越小;当减振器尾角小于 60°时,减振器对上下游立管的横向受力均有一定的抑制效果,当尾角大于 60°时,减振器的涡激振动抑制效果不明显。

关键词:流固耦合; 减振器; 涡激振动

中图分类号:TE 973.92 **文献标志码**:A

引用格式:娄敏,王阳阳,轩红超. 减振器对串联立管涡激振动抑制研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(4):110-115.

LOU Min, WANG Yangyang, XUAN Hongchao. Vortexinduced vibration suppression analysis of tandem risers with fairing [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2016,40(4):110-115.

Vortexinduced vibration suppression analysis of tandem risers with fairing

LOU Min[1], WANG Yangyang[1], XUAN Hongchao[2]

(1. *School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum*, *Qingdao* 266580, *China*;
2. *CNOOC Safety Technology Service Company Limited*, *Tianjin* 300457, *China*)

Abstract: The fluid structure interaction model of tandem risers was established using dynamic mesh technology and user-defined function through software Fluent. Under the premise of considering drafting interference effect, the suppression of vortex-induced vibration of tandem risers with fairing was analyzed. And the accuracy of the results of the study was validated by the designed experiments. The results indicate that the presence of fairing changes the vortex shedding frequency of tandem risers and the vortex shedding frequency decreases as the decrease of caudal horn. Fairing can suppress vortex-induced vibration of the tandem risers when the caudal horn is smaller than 60°. However, when it exceeds 60°, the suppression effect is not significant.

Keywords: fluid-structure interaction; fairing; vortex-induced vibration

海洋立管是平台与海底生产系统的连接线,在海洋环境下极易发生涡激振动,涡激振动作为立管损坏的主要威胁已成为近年来研究的热点。张友林[1]等对波动壁面下的圆柱体的涡激振动进行研究,发现圆柱涡街的形成受到柱体的壁面波动方向的影响,壁面波动的周期性改变会引起圆柱涡致振动振幅的变化。娄敏等[2]考察了在立管处于“锁振”状态时,通过敲击立管表面可以改变流固之间的耦合运动关系,表明在非锁振状态下,敲击振动对 VIV 的抑制作用很小,在一定程度上可能会加剧涡激振动,在锁振状态下,敲击振动能够明显地抑制横向和顺流向涡激振动。Hwang 等[3]对层流下的分隔板涡激振动抑制效果进行了数值模拟,发现分隔板长度对涡激振动抑制有一个临界值,当接近这个临界值时,分隔板显著抑制圆柱体因涡激振动诱发的升阻力。孙友义等[4]对铝合金隔水管(AAR)的

收稿日期:2016-02-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51309241,51579245)

作者简介:娄敏(1981-),女,副教授,博士,硕士生导师,研究方向为海洋工程与流体力学。E-mail:muyang187@163.com。

VIV 响应进行预测,得出影响 AAR 涡致疲劳损伤的影响因素,验证了 AAR 比常规钢制隔水管(SR)具有更好的 VIV 疲劳特性。Kwon 等[5]对附带飘带的涡激振动抑制效果进行研究,发现当在飘带长度达到 2 倍管径时,飘带抑制了立管表面漩涡脱落,且抑制效果对来流方向不敏感,来流方向改变时,柔性飘带可以自动调整状态以便适应。Trim 等[6]通过水槽实验研究了螺旋侧板的覆盖率及相关参数的改变对涡激振动抑制效果的影响。Huera-Huart 等[7]通过试验研究了两个串联布置,低质量比、高长径比的圆柱体在水槽中的涡激振动,并采用 PIV 技术研究涡街模式。Stansby 等[8]研究了短扰流板对涡激振动抑制影响,表明其破坏了旋涡泄放,能够降低 70% 的旋涡谐振激励,从而明显抑制由涡激引起的固体横向和顺流向振动。Zdravko-vich 等[9]认为涡激振动抑制装置不一定在尾流干涉的情况下适用,而且还有可能有害。笔者针对减振器这种绕流装置,在考虑流固耦合情况下,展开尾流干涉下涡激振动抑制的数值模拟研究,分析其在尾流干涉下的涡激振动抑制效果。

1　分析模型

根据 Prasanth 等[10]研究,网格尺寸满足尾流区长度大于 $25D$(D 为立管直径),整体区域高度大于 $20D$ 时,圆柱体两自由度涡激振动的响应不再受流体区域边界的影响。本文综合考虑计算精度与计算时间选取整个流场,以串联立管 $4D$ 间距为例,区域设为 $20D\times40D$,下游管道尾流区域长度为 $26D$,如图 1 所示。

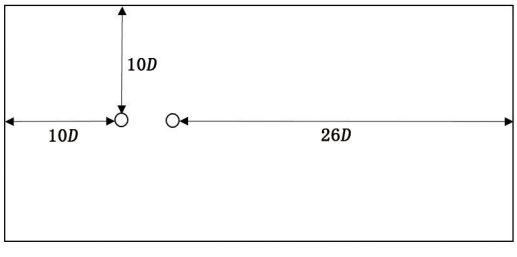

图 1　立管串联排列计算区域几何模型

Fig. 1　Geometric model of two tandem risers

减振器结构造型简单,由迎流端面和尾流段两部分组成[11],如图 2 所示。尾流段的夹角称为尾角 θ,本文针对立管间距为 4 倍管径这种情况,选取 90°、75°、60°和 45°这 4 种尾角类型的减振器进行对比分析。

在建立流固耦合模型时,结构所受流体力通过

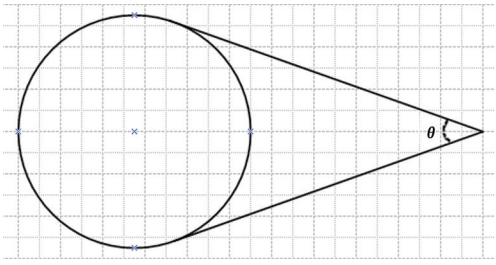

图 2　减振器简化模型

Fig. 2　Physical diagram of fairings model

Fluent 软件求解流体域得到[12];通过 UDF 提取流体作用在海洋结构上的升力和阻力,结构受流体力作用发生运动,并且是非均匀运动,该运动会引起周围流场变化,借助 C 语言编写程序求解结构振动方程,得到不同时刻下运动位移、速度、加速度的量;利用 UDF 将结构运动特征量导入 Fluent 软件中,根据得到的结构运动参数流场网格通过动网格技术更新网格位置。基本求解流程如图 3 所示。

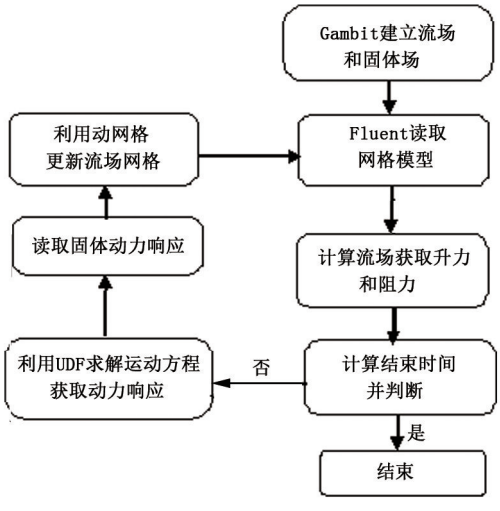

图 3　流固耦合求解流程图

Fig. 3　Flowchart of fluid-structure interaction

2　实　验

为了验证数值模拟的正确性,在中国石油大学(华东)波流水槽进行了立管涡激振动实验研究。实验中采用等直径的有机玻璃管模型模拟立管,其直径为 15 mm,壁厚为 1 mm,立管有效长度 1.2 m,其中 0.7 m 位于水面以下。试验立管垂直放置,两端固支,可在顺流向及升力方向振动。为了准确测量立管的应变,在每个立管的周向上均匀布置了 4 个应变传感器,组成了两个半桥,分别用来采集立管顺流向和横流向的应变信号。

图 4 和图 5 分别为立管应变时程曲线及相应的

频谱图。从图 4 可以看出,实验结果与数值模拟都表明上游立管的振动比下游立管的振动要剧烈,上游立管应变幅值在 500 με 下游立管应变幅值在 200 με,实验与数值模拟结果相近。对于振动频率,从图 5 可知,实验与数值模拟所得的上下游立管的振动频率均在 4 Hz。

通过对比可得,采用数值模拟分析结果与实验结果吻合,表明数值模拟分析模型的正确性。

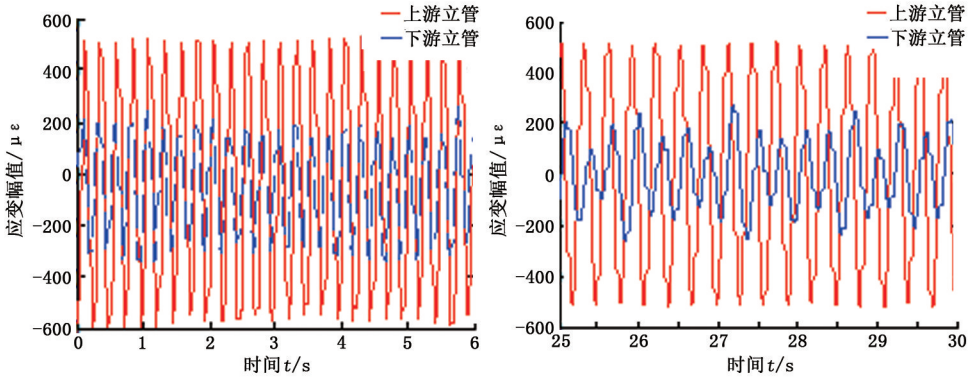

图 4　串联立管应变时程曲线

Fig. 4　Strains of tandem risers

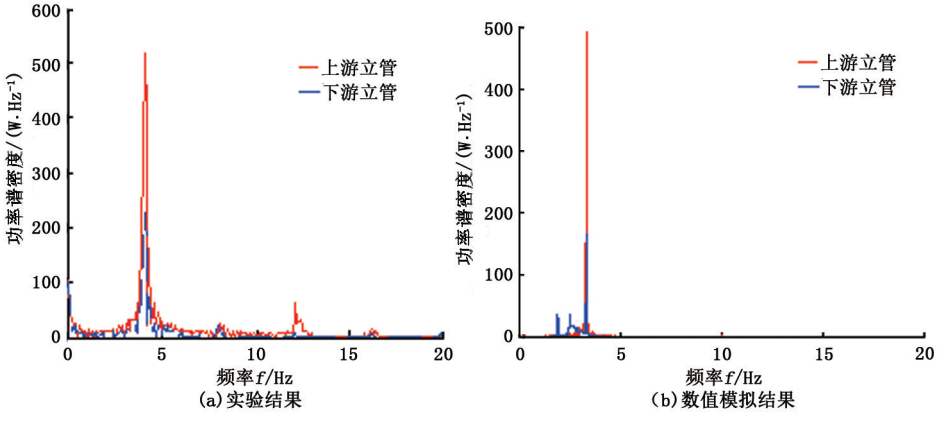

图 5　串联立管应变频谱图

Fig. 5　Frequency spectrogram of tandem risers

3　计算结果分析

选用管径为 0.3 m,单位质量为 340 kg/m,刚度系数为 1 200 N/m,阻尼比 0.003,固有频率为 0.3 Hz 的立管,对间距为 4 倍管径的串联立管涡激振动进行模拟。

图 6 和图 7 为无抑振装置时立管间距为 4 倍管径的升力系数和横向振幅图。图 8 和图 9 为间距为 4 倍管径,附带减振器时立管的升力系数和横向振幅图。

对比图 6 与图 8,在 45°尾角时,减振器抑制了串联立管横向受力,上游立管升力抑制率为 28.5%,下游立管抑制率为 25%。当尾角大于 60°时,上下游立管受减振器影响,所受升力增大。上游立管升力增大相对明显,以至于其最大值大于下游立管,这说明此时减振器对串联立管涡激振动引起横向受力增大并没有起到抑制作用,对上游立管反而有很大危害。

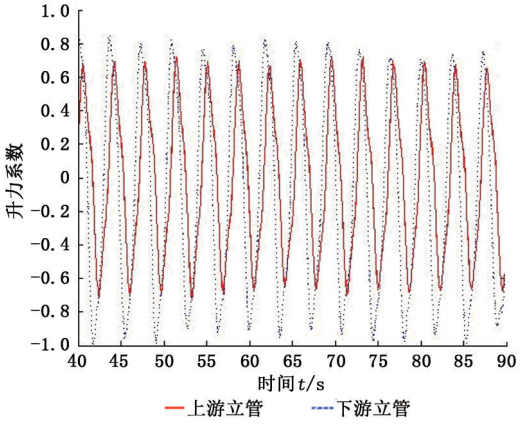

图 6　无抑振装置时立管的升力系数

Fig. 6　Lift coefficient of tandem risers without fairing

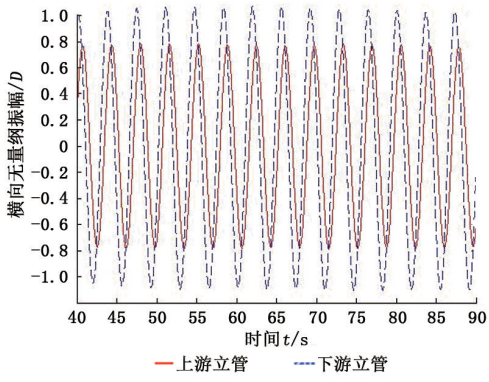

图 7　无抑振装置时立管的横向无量纲振幅

Fig. 7　Transverse dimensionless amplitude of tandem riser without fairing

对比图 7 和图 9 发现,附带减振器后立管横向振动得到了抑制,尾角角度越小,抑制效果越好,这主要是因为附带减振器后改变了立管漩涡泄放频率。无抑制装置时,当串联立管漩涡泄放频率接近立管固有频率 0.3 Hz 时,立管振动进入“锁定”区间,涡激振动最剧烈。如图 10 所示,减振器尾角分别为 90°、75°、60°和 45°时,漩涡泄放频率分别约为 0.16、0.14、0.12 和 0.1。尾角越小,漩涡泄放频率越小,越远离立管固有频率,脱离“锁定”区,进而横向振幅减小。

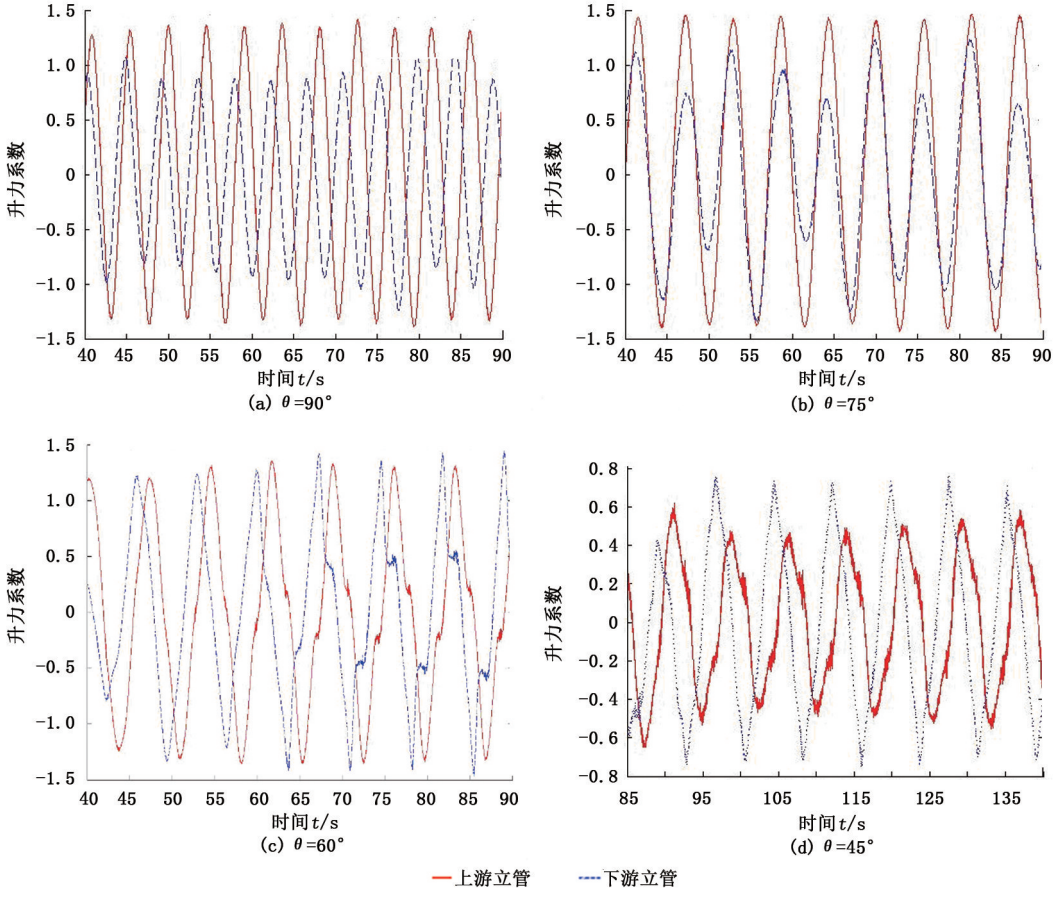

图 8　附带减振器串联立管的升力系数

Fig. 8　Lift coefficient of tandem risers with fairing

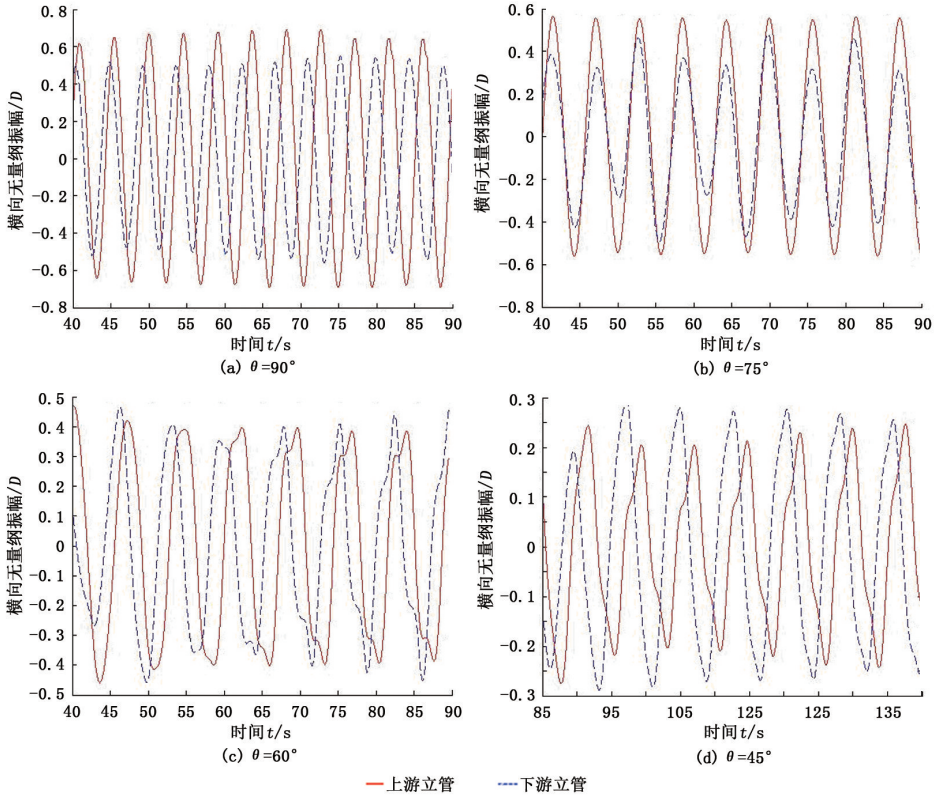

图 9　附带减振器串联立管横向无量纲振幅

Fig. 9　Transverse dimensionless amplitude of tandem risers with fairing

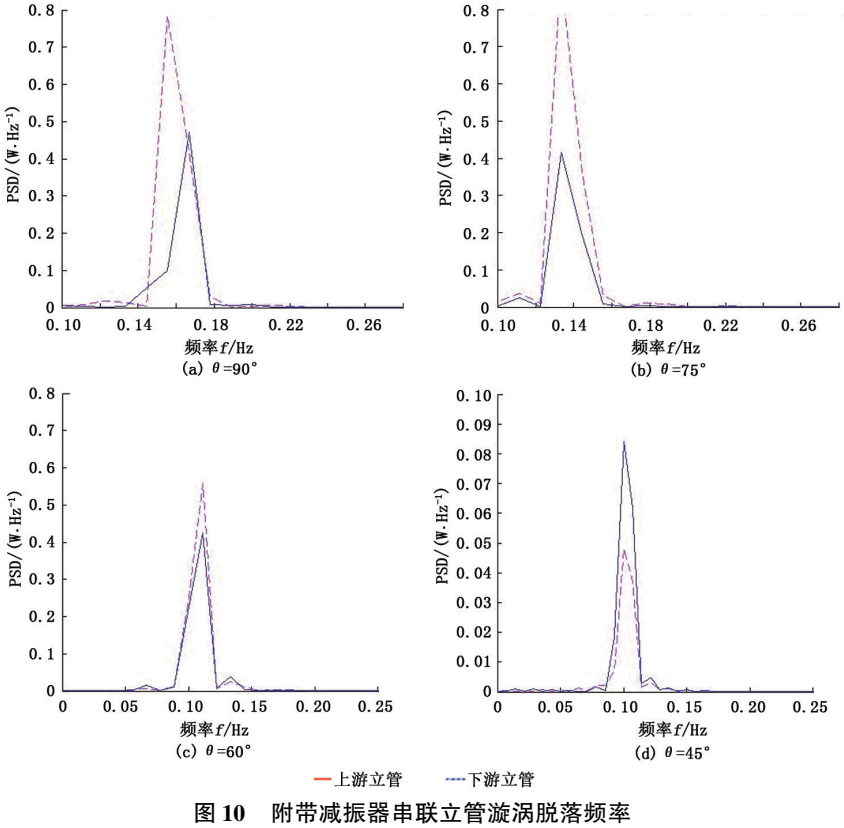

图 10　附带减振器串联立管漩涡脱落频率

Fig. 10　Vortex-induced-frequency of tandem risers with fairing

4　结　论

(1)当立管间距为 4 倍管径,减振器尾角小于 60°时,减振器对上下游立管的横向受力有一定的抑制效果,尾角大于 60°时,减振器对串联立管涡激振动引起横向受力并没有起到抑制作用,对上游立管反而有很大危害。

(2)减振器尾角角度会改变立管漩涡泄放频率,尾角越小,漩涡泄放频率越小,越远离立管固有频率,脱离“锁定”区,进而抑制横向振动。

参考文献:

[1] 张友林. 海洋立管涡激振动抑制方法研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2011.
ZHANG Youlin. Research on the method of vortex-induced vibration suppression of marine riser[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2011.

[2] 娄敏,郭海燕,董文乙. 敲击对海洋立管涡激振动抑制作用的实验研究[J]. 水动力学研究与进展,2007,22(4):508-511.
LOU Min, GUO Haiyan, DONG Wenyi. Suppression of vortex-induced vibration by impact excitation[J]. Journal of Hydrodynamics, 2007,22(4):508-511.

[3] HWANG J Y, YANG K S, SUN S H. Reduction of flow-induced forces on a circular cylinder using a detached splitter plate[J]. Phys Fluids, 2003,15(8):2433-2436.

[4] 孙友义,陈国明,畅元江. 深水铝合金隔水管涡激振动疲劳特性[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2008,32(1):99-104.
SUN Youyi, CHEN Guoming, CHANG Yuanjiang. Vortex-induced vibration fatigue characteristic ofdeepwater aluminum alloy rise[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2008,32(1):99-104.

[5] KWON S H, PARK J S. The effects of drag reduction by ribbons attached to cylindrical pipes[J]. Ocean Engineering, 2002,29:1945-1958.

[6] TRIM A D, BRAATEN H, LIE H, et al. Experimental investigation of vortex-induced vibration of long marine risers[J]. Journal of Fluids and Structures, 2006,21(3):336-361.

[7] HUERA-HUARTE F J, BEARMAN P W. Vortex and wake-induced vibrations of a tandem arrangement of two flexible circular cylinders with near wake interference[J]. Journal of Fluids and Structures, 2011,27:193-211.

[8] STANSBY P K, PINEHBEEK J N, HENDERSON T. Spoilers for the suppression of vortex-induced oscillations[J]. Applied Ocean Research, 1986,8(3):169-173.

[9] ZDRAVKOVICH M. Review of interference-induced oscillations in flow past two circular cylinders in various arrangements[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,1988,28:183-200.

[10] PRASANTH T K, BEHARA S, SINGH S P, et al. Effect of blockage on vortex-induced vibrations at low Reynolds numbers[J]. Journal of Fluids and Structures, 2006,22:865-876.

[11] 吴浩, 孙大鹏. 深海立管涡激振动被动抑制措施的研究[J]. 中国海洋平台,2009,24(4):1-8.
WU Hao, SUN Dapeng. Study on suppression measures for vortex-induced vibration of the deepwaterriser[J]. China Offshore Platform, 2009,24(4):1-8.

[12] 杨安梅,吕林,董国海,等. 附属多圆柱绕流的数值模拟[J]. 中国海洋平台,2009,24(6):7-12.
YANG Anmei, LÜ Lin, DONG Guohai, et al. Numerical simulation of flow around affiliated multi-circular cylinder[J]. China Offshore Platform, 2009,24(6):7-12.

(编辑　刘为清)