

阶段流下大长细比深海立管抑振敏感性试验研究

李朋¹, 郭海燕², 刘景伟³, 张永波⁴

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590; 2. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100;
3. 青岛市工程咨询院, 山东 青岛 266071; 4. 青岛国家海洋科学研究中心, 山东 青岛 266100)

摘要:在大型波流耦合试验水池中进行了阶段流作用下深海立管涡激振动抑振敏感性试验研究。试验立管模型长6.2 m, 长细比310, 模型材料采用铜管, 立管上部1.2 m处于均匀稳定的流场中, 下部5.0 m处于静水之中。采用螺高为0.25D的梯形截面双螺旋和三螺旋导板作为抑振装置, 研究了不同覆盖率对立管涡激振动抑制效率及振动频率的影响, 分析了其敏感性规律。结果表明:螺旋导板在立管上的覆盖率对抑制涡激振动有着重要的影响;在敏感区域内, 覆盖率对抑制效率及振动频率的影响产生明显的过渡;当覆盖率超出敏感区域, 抑制效率高且变化较小, 而立管振动频率则产生明显的降阶。

关键词:深海立管; 涡激振动; 螺旋导板; 覆盖率; 抑振敏感性

中图分类号: P751; TV32

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2015)04-0093-09

Experimental Study on Sensibility of VIV Suppression of Deep-sea Risers with Large Slenderness Ratio in a Stepped Current

Li Peng¹, Guo Haiyan², Liu Jingwei³, Zhang Yongbo⁴

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China;
3. Qingdao Engineering Consulting Institute, Qingdao, Shandong 266071, China;
4. National Oceanographic Center of Qingdao, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: This paper studied the experiment on the sensibility of VIV (vortex induced vibration) suppression of model deep-sea risers in a stepped current. The experiment was carried out in a large-scale wave-current coupling tank. The model risers, made of copper, were 6.2 m long and had a slenderness ratio of 310. The upper 1.2 m of the risers was placed in a uniform current while the lower 5.0 m was put in still water. The trapezoid cross-section double and triple helical strakes with screw height of 0.25D were used as the suppression devices. The suppressing efficiency for VIV of the risers with different coverage rate was observed and the sensibility rules were analyzed. The results indicate that the coverage rate of helical strakes has an important influence on VIV suppression. In sensitive region, the effect of coverage rate for suppressing efficiency and oscillation frequency has a significant transition. When the coverage rate is beyond sensitive region, the suppressing efficiency is prominent and has little change while the oscillation frequency generates obvious order reduction.

Key words: deep-sea riser; vortex-induced vibration; helical strake; coverage rate; sensibility of VIV suppression

收稿日期: 2014-12-22

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目(2010AA09Z303); 国家自然科学基金项目(51279187); 中央高校基本科研业务费(201262005); 山东省土木工程防灾减灾重点实验室开放课题基金项目(CDPM2013ZR01); 青岛市博士后研究人员应用研究项目(01020120406); 山东科技大学人才引进科研启动基金项目(2013RCJJ032)

作者简介: 李朋(1984—), 男, 山东邹城人, 讲师, 博士, 主要从事海洋工程结构动力分析及防灾减灾技术研究。

E-mail: lipeng@sdust.edu.cn

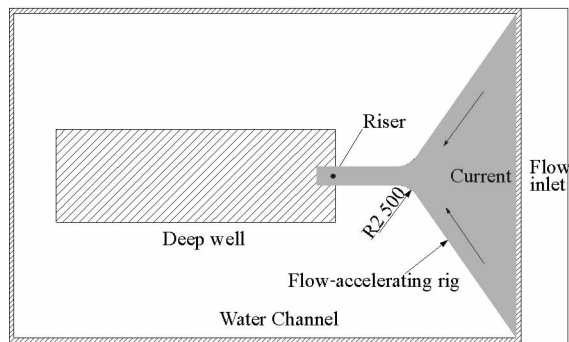
海洋立管是深海油气田开发系统的重要组成部分,是海洋平台与海底井口的连接结构。在波浪和海流的作用下,涡激振动是引发其疲劳破坏的主要诱因^[1]。为了减少涡激振动对立管的破坏作用,国内外学者进行了大量的研究^[2-7],提出通过在立管表面附加扰流抑振装置,达到抑制漩涡脱落及降低立管振动幅值,提高立管服役寿命的目的^[8-13]。螺旋导板是一种常见的抑振装置,影响螺旋导板抑振效果的几何特性有螺高、螺距和螺旋数等因素^[14-15]。立管沿长度全部覆盖抑振装置能产生较好的抑振效果,但会使曳力增大,增加顺流向振幅,加剧立管的疲劳破坏。在实际工程中,针对海洋环境上层流速非常大、下层流速较小的特点,螺旋导板通常从立管顶部开始布置,覆盖率达到一定数值后,抑振效果比较理想;并且从实际工程角度来看,也能降低工程成本。

本研究利用山东省海洋工程重点实验室大型平面波流耦合试验水池,通过制造不同流速的外流作用于立管模型的上部,进行阶段流作用下大长细比深海立管的涡激振动抑振敏感性试验。采用螺旋导板作为抑振装置,设计制作了双螺旋和三螺旋两种不同形式的螺旋导板。通过改变抑振装置的覆盖率,研究其对深海立管涡激振动的抑制影响规律,分析抑制效率对覆盖率的敏感性,为深海立管的工程设计、应用及安全服役提供参考依据。

1 试验概况

1.1 试验水池

试验在山东省海洋工程重点实验室平面随机波流耦合水池中进行,水池长 60 m、宽 36 m、深 1.5 m,水池内部有大型深水井,长 30 m、宽 10 m、深 5 m,最大总流量为 4.9 m³/s。由于沿水池宽度方向最大外流流速不能够满足试验要求,因此对试验水池进行设计改造,改造方案及工程如图 1 所示。该方案形状近似为“漏斗”状,最宽处 34 m,最窄处 2 m,采用圆弧拐角的过渡方式,总长度为 19 m。直线段的末端设计了长 2.0 m 的延长段,以避免尾流在泄放过程中引起直线段内的水流流态发生突变。根据采用 Fluent 软件数值模拟和测试流速对比结果分析,该方案能够满足试验外流流速大小及均匀性的要求。



(a) 试验水池改造方案
(a) Reform scheme of the experimental tank



(b) 改造后的试验水池
(b) Reconstructive tank

图 1 试验水池

Fig. 1 Experimental tank

1.2 立管模型及试验支架

试验选用铜管作为立管模型,总长度 6.2 m,上部 1.2 m 处于均匀流中,下部 5.0 m 处于静水之中。由钢结构企业现场制作 6.5 m 高钢结构支架,用来固定立管。支架由三个标准节组合而成,为防止在外流的作用下钢结构支架自身也随之振动,标准节之间采用高强螺栓连接,在支架底部设计 4 mm 厚钢板来增加支架配重,同时在支架顶端采用高强螺栓与改造后水槽侧壁进行连接,采用实验室天车对支架进行吊装、定位。

为保证立管的定位精度,由潜水员水下辅助定位,并采用美国 JW Fishers 公司的 MC-1 型微型水下摄像系统监测立管的振动状态。立管依靠支架支撑,两端连接方式均为铰接,根据试验方案,设计一套铰接支

座,由专业机械企业生产和装配。试验整体布置如图 2 所示,立管吊装及定位如图 3 所示,试验立管模型详细参数如表 1 所示。

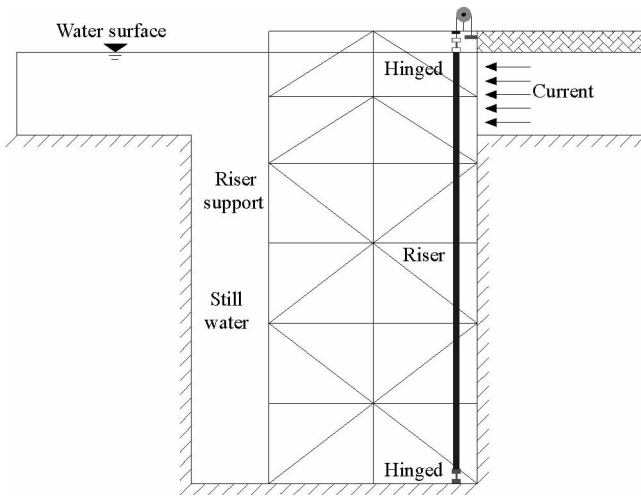


图 2 试验整体布置示意图

Fig. 2 General arrangement of the experiment

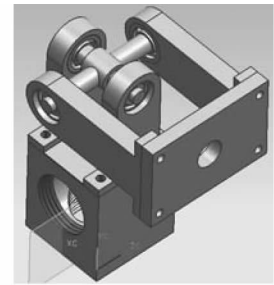
表 1 试验立管详细参数表

Tab. 1 Detailed parameters of the riser

立管参数	数值
立管总长度 L/m	6.2
静水中长度 L_1/m	5.0
均匀流中长度 L_2/m	1.2
外径 D/mm	20
壁厚 δ/mm	1.5
单位长度质量/(kg/m)	0.76
截面积 S/mm^2	88.7
长细比 $\lambda(L/D)$	310
弹性模量 E/GPa	97.79



(a) 吊装
(a) Lifting



(b) 设计支座
(b) Support design



(c) 定位
(c) Positioning



(d) MC-1型微型水下摄像系统
(d) Miniature underwater camera system

图 3 立管吊装及定位

Fig. 3 Lifting and positioning of the riser

1.3 测试技术及数据采集

试验采用动态电阻应变测试技术,由 YD-28A 型动态电阻应变仪,数据采集仪,DASP 数据处理软件组成数据采集分析系统。螺旋导板及应变计布置如图 4 所示,每个测点间隔 90° 布置四个电阻应变计,分别测量横向和顺流向应变。由于立管模型全部处于水中,应变计外涂防水胶并用 704 胶密封,待密封胶强度稳定后包裹聚四氟乙烯,立管模型横截面详图如图 5 所示,应变计粘贴如图 6 所示。

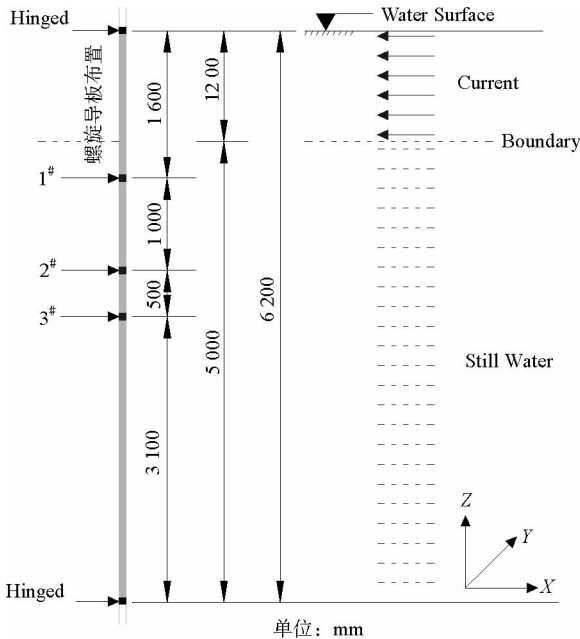


图 4 试验模型示意图
Fig. 4 Layout of the experiment

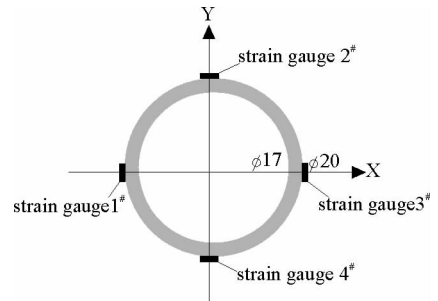


图 5 立管横截面详图
Fig. 5 Cross-section of the riser

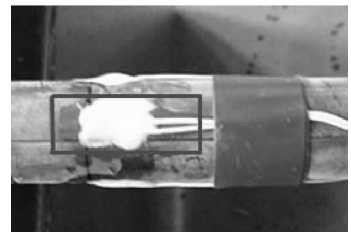


图 6 应变计粘贴详图
Fig. 6 Strain gauges attached detailing

2 抑振装置及设计原理

螺旋导板主要是通过引导来流使边界层的分离方向发生改变,影响边界层、剪切层的形成以及尾流漩涡的脱落形态,破坏结构尾流的正负漩涡交替,从而达到削弱漩涡强度并减小结构作用力的目的。因此,基于一种常用截面尺寸的螺旋导板,研究不同覆盖率时螺旋导板的抑振效果受其影响的敏感性规律。

在海洋工程中,螺旋导板一般按照螺高 $(0.1 \sim 0.25)D$,螺距 $(5 \sim 17.5)D$ 进行设计,但是螺旋导板的抑振效果与上述几何特性的敏感程度尚未形成统一结论,尤其是阶段流作用下的抑振规律,更是鲜有报道。试验中采用螺高为 $0.25D$,截面形状为梯形的螺旋导板,采用橡胶材料定制加工,如图 7 所示,详细参数如表 2 所示。为便于准确定位和粘贴螺旋导板,先采用热缩管包裹螺旋导板的覆盖区域,再将螺旋导板粘贴于热缩管表面,如图 8 所示。

试验中设计了双螺旋和三螺旋两种不同螺旋数的螺旋导板,并分别采用 30%,50%,70%,90%,100% 等 5 种不同覆盖率,如图 9 所示,具体工况如表 3 所示。在进行试验时,通过计算机造流控制系统控制水泵的输出功率,调节外流流速的大小,外流速共分为 12 级,每级变化 0.1 m/s,最大流速为 1.2 m/s。外流速的测量采用多谱勒流速仪,可测流速范围 $0 \sim 4$ m/s,精度 $\pm 0.5\%$ (± 1.2 mm/s),为防止外流流速不稳定对采集数据产生影响,在达到每一级目标流速后,给予充分的示波时间,待流速稳定后开始采样。

3 试验结果分析

对于抑振装置的抑制效率而言,双螺旋和三螺旋导板均有较好的抑振效果,能大幅降低立管的振幅,尤

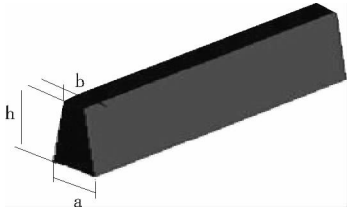


图 7 螺旋导板截面图

Fig. 7 Cross-section of helical strake

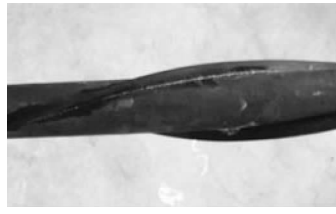


图 8 粘贴后的螺旋导板

Fig. 8 Helical strake pasted

表 2 螺旋导板参数表

Tab. 2 Properties of helical strake

参数	取值
截面形式	等腰梯形
材料	橡胶
螺高(h)	$0.25D$
上底(b)	$0.05D$
下底(a)	$0.1D$

表 3 螺旋导板工况设计表

Tab. 3 Schedule of working conditions of helical strakes

编号	螺旋数	螺高	螺距	导流角/ $^{\circ}$	覆盖率/ $\%$
YZFD-1					30
YZFD-2					50
YZFD-3	双螺旋	$0.25D$	$17.5D$	86.7	70
YZFD-4					90
YZFD-5					100
YZFT-6					30
YZFT-7					50
YZFT-8	三螺旋	$0.25D$	$17.5D$	86.7	70
YZFT-9					90
YZFT-10					100

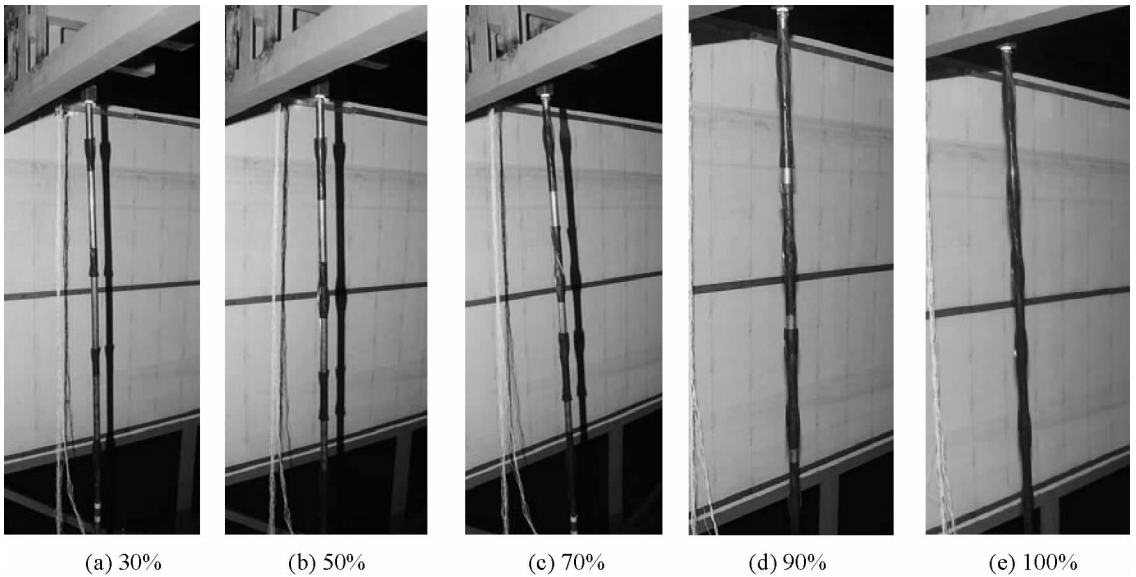


图 9 不同覆盖率的螺旋导板

Fig. 9 Helical strakes with different coverage rate

其是在较高外流速下或立管处于“锁振”区间时,双螺旋和三螺旋导板具有相对稳定的抑制效率。由上述螺旋导板的抑振原理可知,导流次数越多,并不意味着抑振效果越好。因此,当抑制效率达到一定程度时,对于实际海洋工程而言,通过控制单位长度内螺旋导板的覆盖率来控制导流次数,不但能够保证螺旋导板的抑振效果,还能降低工程成本。

选取 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 m/s 四个典型外流速下不同覆盖率的立管振动进行分析。图 10 为不同覆盖率的双螺旋导板在不同外流速时 3[#] 测点横向微应变时程曲线。可以看出, 当外流速 $U=0.7$ m/s 时, 覆盖率为 30% 的双螺旋抑振管应变值较大, 抑振效果不理想, 随着覆盖率的增加, 抑振效果逐渐增加; 覆盖率大于 70% 的双螺旋抑振管, 抑振效果比较显著, 抑制效率能达到 90%。随着外流速的增大, 配重裸管进入三阶锁振状态, 振动强烈, 振幅产生突变, 在外流速 $U=0.9$ m/s 时振动最为强烈, 随着外流速的进一步增大, 当外流速 $U=1.0$ m/s 时, 振幅仍保持较大值, 但与前两级流速相比, 振幅已有减小。在外流速 $U=0.8\sim 1.0$ m/s 的区间内, 覆盖率大于 70% 的抑振管都取得良好的抑振效果, 特别是在外流速为 0.8 和 0.9 m/s 时, 抑制效率均能达到 90% 以上。

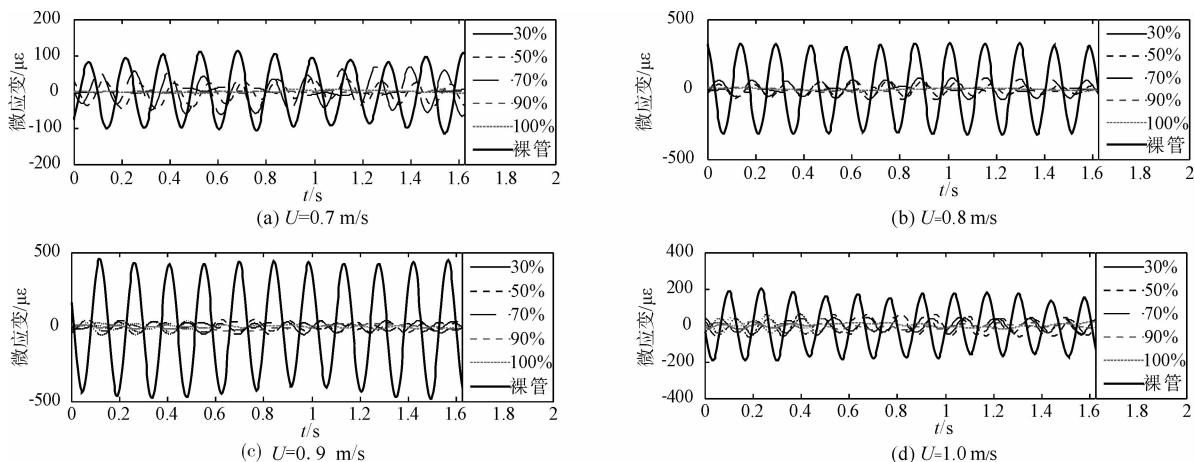


图 10 不同外流速下双螺旋抑振管不同覆盖率时微应变时程曲线

Fig. 10 Micro-strain time history curves of double helical strake risers with different coverage rate under different external flow velocity

图 11 是不同覆盖率的三螺旋导板在不同外流速时 3[#] 测点横向的微应变时程曲线。对图 11 综合分析可以得到与图 10 比较相似的规律。但与双螺旋导板不同的是, 在外流速 $U=0.8\sim 1.0$ m/s 的区间内, 覆盖率大于 50% 的抑振管都取得良好的抑振效果。由此可见, 在锁振区间内三螺旋导板比双螺旋导板有更好的抑振效果。

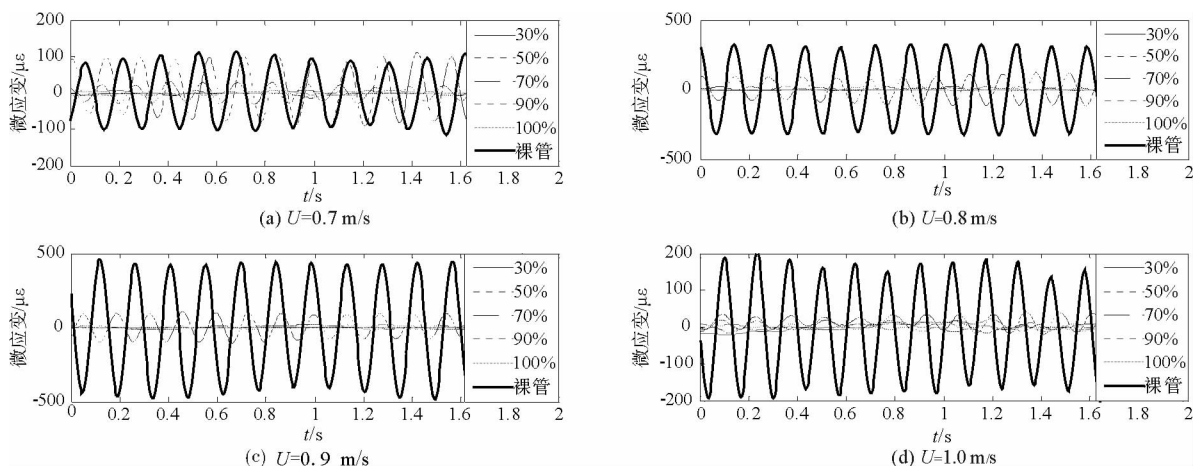


图 11 不同外流速下三螺旋抑振管不同覆盖率时微应变时程曲线

Fig. 11 Micro-strain time history curves of triple helical strake risers with different coverage rate under different external flow velocity

图 12 为不同覆盖率的双螺旋和三螺旋抑振管在不同流速时的微应变均方根值曲线。从图 12(a)中可以看出,覆盖率小于 50%时,振动微应变值相对较大,且数据离散性大,当覆盖率大于 50%时,振动幅值开始大幅减小,但当覆盖率大于 70%以后,减小幅度变缓,而图 12(b)将这种规律性体现得更明显,并且在覆盖率为 30%~50%时应变幅值产生突变,而在覆盖率大于 50%以后,这种趋势变缓。综上分析,从覆盖率对立管抑振效率的敏感性角度分析,50%~70%是一个相对敏感的区域,在此区域内,覆盖率对立管抑振效率的影响产生明显过渡。覆盖率大于 70%以后,抑制效率高且对覆盖率敏感性弱。

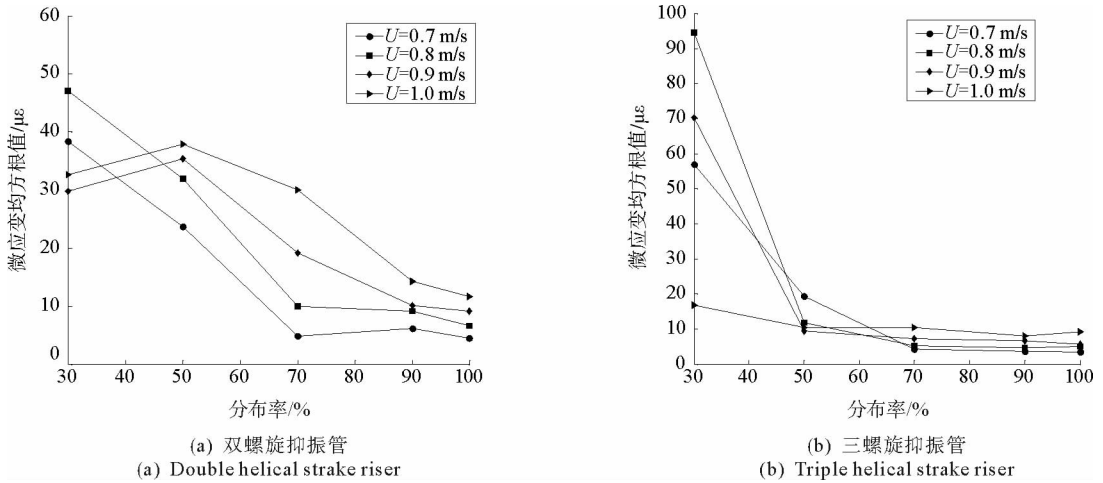


图 12 不同外流速下多螺旋抑振管不同覆盖率时微应变均方根值曲线

Fig. 12 Micro-strain RMS of helical strake risers with different coverage rate under different external flow velocity

为了研究不同覆盖率对抑振管振动频率的影响,将采集得到的时域信号通过快速傅里叶变换,可得到如图 13 和图 14 所示频谱图。

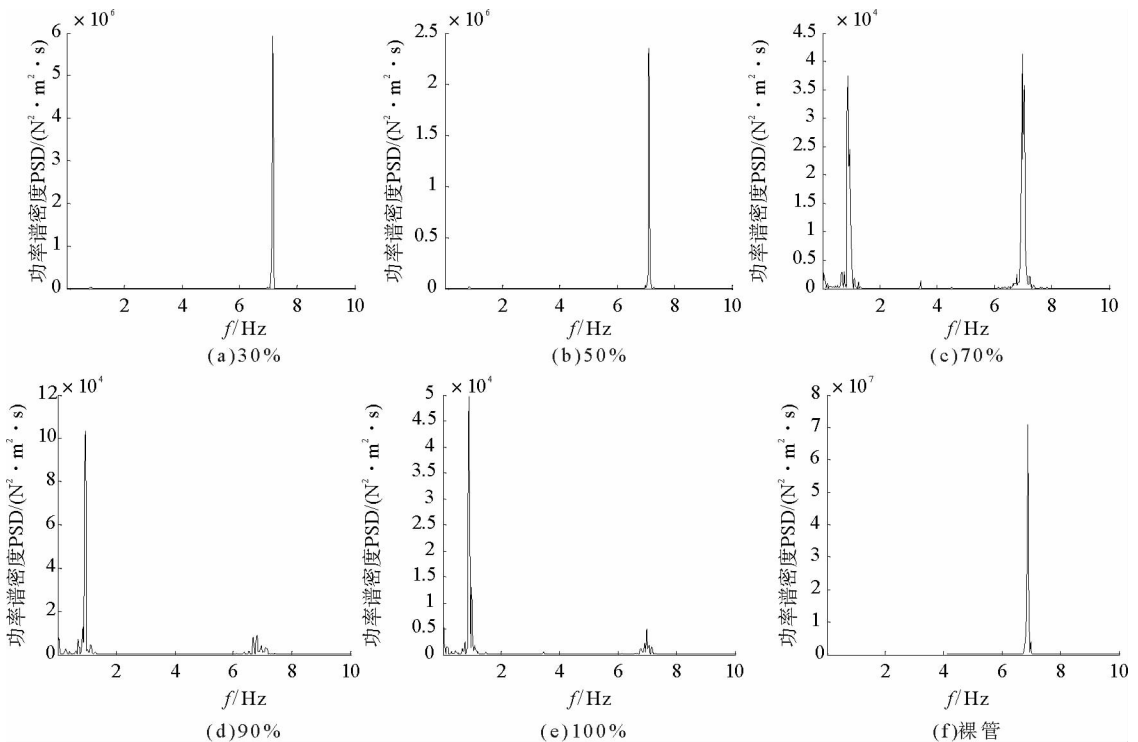


图 13 外流速 $U=0.8 \text{ m/s}$ 时不同覆盖率双螺旋抑振管频谱图

Fig. 13 Frequency spectrum of double helical strake risers with different coverage rate under $U=0.8 \text{ m/s}$

由图 13 分析可知,对于双螺旋导板抑振装置,配重裸管在外流速 $U=0.8 \text{ m/s}$ 时三阶模态为主导模态,其他模态参与很少,覆盖率为 30%、50% 的抑振管与此相似,由此可见覆盖率较小的情况下,抑振装置对立管的振动频率影响较小;而随着覆盖率的增大,对振动频率的影响逐渐显著。在覆盖率为 70% 时,同样外流速下,振动出现了明显的多模态特征,主要以一阶和三阶参与,此时 PSD 值比较接近,当覆盖率为 90% 和 100% 时,一阶模态为主导模态。对于三螺旋导板抑振装置,通过图 14 整体分析,可呈现与双螺旋比较相似的规律。在覆盖率为 30%、50%,即覆盖率相对较小的情况下,抑振装置对立管的振动频率影响很小;不同的是在覆盖率为 70%、90% 时,三螺旋抑振管振动主导频率不明显。通过水下摄像系统观测分析也可发现,双螺旋和三螺旋导板抑振管振动频率明显减弱。

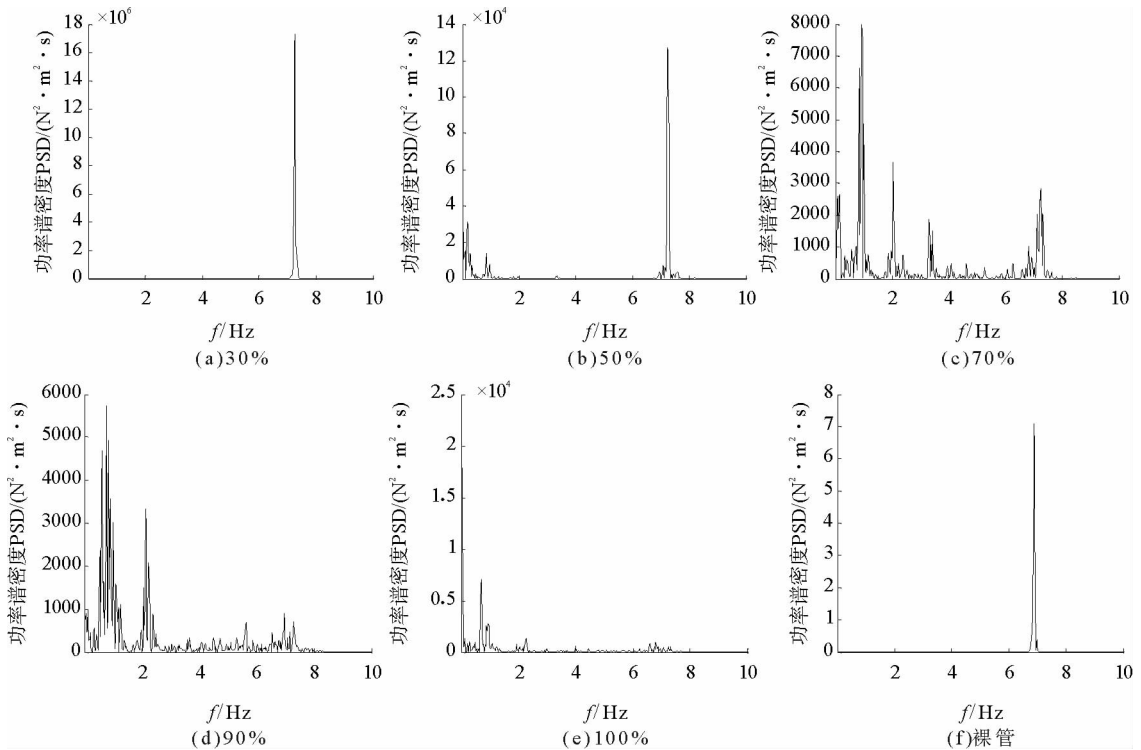


图 14 外流速 $U=0.8 \text{ m/s}$ 时不同覆盖率三螺旋抑振管频谱图

Fig. 14 Frequency spectrum of triple helical strake risers with different coverage rate under $U=0.8 \text{ m/s}$

通过上述分析可知,抑振装置覆盖率对立管振动频率的影响呈现两个不同阶段。对于本次试验,当覆盖率小于 50% 时,与配重裸管对比,抑振装置对立管的振动频率影响很小,振动主导模态与配重裸管一致。而随着覆盖率的增大,当覆盖率大于 50%,即覆盖率为 70%、90%、100% 时,立管振动频率产生明显的降阶,且覆盖率越大,这种现象越明显。从覆盖率对立管振动频率的敏感性角度分析,覆盖率 50%~70% 也是一个相对敏感的区域,在此区域内,覆盖率对立管振动频率的影响同样存在一个明显的过渡。在实际海洋工程中,高频率的振动是使立管产生疲劳破坏的主要原因之一,覆盖率在敏感区域以上的螺旋导板降低了立管振动频率,可显著增加立管的疲劳寿命,降低工程成本。

4 结论

以螺高为 $0.25D$ 的双螺旋和三螺旋导板抑振装置为研究对象,分别变化 5 种不同覆盖率,在波流耦合平面水池中进行了阶段流作用下大长细比深海立管的抑振敏感性试验,分析了不同覆盖率对立管涡激振动抑制效率和振动频率的影响,研究了其对覆盖率的敏感性规律,主要得出以下结论:

1) 双螺旋导板和三螺旋导板,覆盖率在 50% 以下时,抑振效果不够理想,覆盖率大于 70% 时有显著的抑振效果且变化较小;尤其是在配重裸管的锁振区间内,抑制效率可达 90% 以上,并且在锁振区间内三螺旋导

板比双螺旋导板有更好的抑振效果。

2) 覆盖率较小的情况下, 抑振装置对立管的振动频率影响较小, 随着覆盖率的增大, 对振动频率的影响逐渐显著。在覆盖率大于 70% 以后, 同样外流速下, 振动出现了明显的多模态特征。

3) 从覆盖率对立管抑振的敏感性角度分析, 覆盖率 50%~70% 是一个相对敏感区域, 在此区域内, 覆盖率对立管抑制效率及振动频率影响都有一个明显的过渡。当覆盖率超出此区域, 抑制效率高且变化较小, 而立管振动频率则产生明显的降阶。

参考文献:

- [1] 黄旭东, 张海, 王雪松. 海洋立管涡激振动的研究现状、热点与展望[J]. 海洋学研究, 2009, 27(4): 95-101.
Huang Xudong, Zhang Hai, Wang Xuesong. An overview on the study of vortex-induced vibration of marine riser[J]. Journal of Marine Sciences, 2009, 27(4): 95-101.
- [2] 陈云水, 王德禹. 深水立管的若干结构力学研究进展[J]. 中国海洋平台, 2009, 22(5): 1-5.
Chen Yunshui, Wang Deyu. Some advance of research on structural mechanics of deepwater risers[J]. China Offshore Platform, 2009, 22(5): 1-5.
- [3] 唐国强, 吕林, 滕斌, 等. 基于光纤光栅传感器的细长柔性立管涡激振动响应实验[J]. 中国海上油气, 2010, 22(5): 338-343.
Tang Guoqiang, Lü Lin, Teng Bin, et al. Application of the fiber bragg grating sensors in laboratory tests of the vortex induced vibration of a long flexible riser[J]. China Offshore Oil and Gas, 2010, 22(5): 338-343.
- [4] 李琳, 付世晓, 杨建民. 运用光纤光栅传感器的涡激振动测试技术[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(6): 728-732.
Li Lin, Fu Shixiao, Yang Jianmin. Measuring technique based on the fiber bragg used in the vortex-induced vibration model test[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(6): 728-732.
- [5] Guo H Y, Lou M. Effect of internal flow on vortex-induced vibration of risers[J]. Journal of Fluids and Structures, 2008, 24: 496-504.
- [6] Chaplin J R, Bearman P W, Huera-Huarte F J, et al. Laboratory measurements of vortex-induced vibrations of a vertical tension riser in a stepped current[J]. Journal of Fluids and Structures, 2005, 21: 3-24.
- [7] 张永波, 郭海燕, 孟凡顺, 等. 基于小波变换的顶张力立管涡激振动规律实验研究[J]. 振动与冲击, 2010, 30(2): 149-154.
Zhang Yongbo, Guo Haiyan, Meng Fanshun, et al. Model tests for vortex-induced vibration of a top tension riser based on wavelet transform ation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 30(2): 149-154.
- [8] 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, 2005, 21: 335-361.
- [9] 鞠少栋, 陈国明, 盛磊祥, 等. 基于 CFD 的深水隔水管螺旋列板几何参数优选[J]. 中国石油大学学报, 2010, 34(2): 110-113.
Ju Shaodong, Chen Guoming, Sheng Leixiang, et al. CFD-based optimization for geometric parameters of deepwater riser helical strakes[J]. Journal of China University of Petroleum, 2010, 34(2): 110-113.
- [10] 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 deepwater riser[J]. China Offshore Platform, 2009, 24(4): 1-8.
- [11] 宋吉宁, 吕林, 张健桥, 等. 三根附属控制杆对海洋立管涡激振动抑制作用试验研究[J]. 海洋工程, 2009, 27(3): 23-29.
Song Jining, Lü Lin, Zhang Jianqiao, et al. Experimental investigation of suppression of vortex-induced vibration of marine risers by three control rods[J]. The Ocean Engineering, 2009, 27(3): 23-29.
- [12] 杨加栋, 张晓灵, 杜宝银, 等. 螺旋列板-深水立管涡激振动抑制装置[J]. 海洋技术, 2010, 29(4): 88-92.
Yang Jiadong, Zhang Xiaoling, Du Baoyin, et al. Helical stakes-vortex induced vibration suppression devices of deepwater risers[J]. Ocean Technology, 2010, 29(4): 88-92.
- [13] 郭海燕, 李相环, 张永波, 等. 海洋立管抑振装置优化布置的实验研究[J]. 中国海洋大学学报, 2012, 42(6): 126-132.
Guo Haiyan, Li Xianghuan, Zhang Yongbo, et al. Experimental investigation on optimized arrangement of suppression devices of marine riser[J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(6): 126-132.
- [14] 矫滨田, 贾旭, 曹静, 等. 深水立管涡激振动抑振装置的研制[J]. 中国海上油气, 2012, 24(3): 70-75.
Jiao Bintian, Jia Xu, Cao Jing, et al. The study and development of a vortex-induced vibration suppression device for deepwater riser[J]. China Offshore Oil and Gas, 2012, 24(3): 70-75.
- [15] 高云, 付世晓, 宋磊建. 柔性立管涡激振动抑制装置试验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(14): 77-83.
Gao Yun, Fu Shixiao, Song Leijian. Experimental investigation on the suppression device of VIV of a flexible riser[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(14): 77-83.