

基于 FBG 传感技术的深海立管涡激振动测试研究^{*}

李 朋¹, 王 来¹, 郭海燕², 张永波³

(1. 山东科技大学土木工程与建筑学院 青岛, 266590) (2. 中国海洋大学工程学院 青岛, 266100)

(3. 青岛国家海洋科学研究中心 青岛, 266071)

摘要 为了探索光纤光栅传感技术在深海立管振动测试中的适用性, 采用光纤光栅应变传感器, 在大型波流耦合试验水池中进行了阶段流作用下大长细比深海立管的涡激振动测试。试验立管模型长为 6.2 m, 长细比为 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。沿立管长度四面对称布置 48 个光栅测点, 通过改变外流流速、内流流速和初始顶张力等影响因素, 采集应变数据并结合模态分析理论, 分析了不同工况下立管的振动频率、幅值及模态等振动特性, 研究了阶段流作用下立管的涡激振动规律。结果表明, 光纤光栅传感技术能很好地满足大长细比深海立管的涡激振动测试要求, 能准确体现立管的应变时程、振幅和频率等振动特性, 清晰反映出在不同外流速下立管振动的多模态特征及每阶主导频率下的锁振区间。

关键词 光纤光栅传感器; 深海立管; 阶段流场; 涡激振动; 测试分析

中图分类号 TH825; P751

引 言

海洋立管是海洋平台与海底井口的连接结构。一个平台上通常有十几根立管, 长度可以达到几千米。深海立管长细比很大, 除了上下端外中间部分再无其他任何固定支撑, 因立管工作环境恶劣, 受力极为复杂, 建设成本巨大, 是深海工程的高科技工程设施, 也是薄弱易损的工程设施之一^[1-2]。当波浪、海流流经立管时, 在一定的流速下会产生漩涡脱落, 引发立管的涡激振动(vortex-induced vibration, 简称 VIV), 而涡激振动是立管产生疲劳破坏的主要诱因。因此, 对海洋立管进行涡激振动模型试验, 研究其在复杂海洋环境荷载作用下的动力特性及动力响应, 是极为必要的^[3-5]。

立管的涡激振动是典型的小尺度构件流固耦合振动。由于其结构本身长细比大、所处环境复杂, 进行模型试验时如果采用传统的电测类传感器进行测试, 往往造成较大误差, 给数据分析带来较大困难, 不易保证结果准确性, 因此深海立管模型的 VIV 测试具有很大难度。光纤光栅传感器是一种新型的传

感技术, 与传统的电测类传感器相比, 具有体积小、质量轻、稳定性好、布线简单、耐腐蚀、精度高、抗电磁干扰、可实现远程传输及分布式测量等优点^[6-7]。其克服了电测法受电磁干扰且在结构小应变时存在零漂的缺点, 比较适合海洋工程中环境潮湿、易腐蚀、电磁干扰复杂的情况。光纤光栅传感器体积小、质量轻, 对立管模型的附加质量可以忽略, 同时还满足水下工作的要求。深海立管涡激振动的模态分析需要沿管道长度布置多个测点, 采用光纤光栅传感器最大的优势在于一根光纤中可以写入多个光栅, 构成传感阵列, 实现分布式传感, 克服了传统电测类传感器需要大量引线、布线困难且需要众多数据采集分析接口的缺点。同时, 还克服了由于引线太多使得立管周围流体产生严重扰动, 改变了初始外部流场, 严重影响数据准确性的缺点。

国内关于光纤光栅传感技术在工程结构中的运用已有不少报道^[8-13], 大部分局限于结构的健康监测方面, 而在海洋工程结构特别是深海立管的测试方面少有报道^[14-15]。笔者利用山东省海洋工程重点实验室的平面随机波流耦合试验水池, 采用布拉格光纤光栅(fiber bragg grating, 简称 FBG)应变传感

^{*} 国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)资助项目(2010AA09Z303); 国家自然科学基金资助项目(51279187); 中央高校基本科研业务费资助项目(201262005); 山东科技大学人才引进科研启动基金资助项目(2013RCJJ032); 青岛市博士后研究人员应用研究资助项目(01020120406); 山东省土木工程防灾减灾重点实验室开放课题基金资助项目(CDPM2013ZR01); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金资助项目(BS2015HZ017)

收稿日期: 2014-12-10; 修回日期: 2015-03-16

器,通过制造不同流速的外流作用于立管模型的上部,同时施加并变换不同的内流和顶张力,进行了阶段流作用下大长细比深海立管的涡激振动测试试验。通过对光纤光栅应变数据的采集,分析了不同工况下深海立管的振动频率、幅值及模态等振动特性,研究了阶段流作用下大长细比深海立管的涡激振动规律。

1 FBG 传感器原理及模态分析理论

1.1 FBG 传感器工作原理

布拉格光纤光栅传感器 (fiber Bragg grating sensors) 是光纤传感器的一个重要分支。作为一种波长调制型光纤传感器,通过外界物理参量对光纤布拉格波长的调制来获得传感信息^[16]。

光纤光栅传感器是利用光纤材料的光敏性制成的,在原理上属于光反射型器件。光源通过光纤射入的连续宽带光,与光场发生耦合作用,从而对该宽带光有选择地反射回相应的一个窄带光,并沿原传输光纤返回;剩余宽带光则直接透射过去,工作原理如图 1 所示。当作用于光纤光栅的温度或应变发生改变时,反射回的窄带光中心波长值会产生线性变化,利用这一点,光纤光栅可以作为应变和温度测量的敏感元件。根据耦合模理论^[17],只有满足布拉格条件的光波才能被反射,表示为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Delta \quad (1)$$

其中: λ_B 为 FBG 的反射光波中心波长; n_{eff} 为纤芯的有效折射率; Δ 为光纤光栅周期。

当光纤光栅发生温度和应力变化时,使纤芯有效折射率 n_{eff} 或光栅周期 Δ 发生改变,中心反射波长也会相应改变,表示为

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e)\Delta\epsilon\lambda_B + (\alpha_f + \xi)\Delta T\lambda_B \quad (2)$$

其中: $\Delta\lambda_B$ 为反射光波中心波长变化量; P_e 为光纤有效弹光系数; $\Delta\epsilon$ 为应变变化量; ΔT 为温度变化量; α_f 为光纤的热膨胀系数; ξ 为光纤的热光系数。

当不考虑温度变化, $\Delta T=0$ 时,式(2)变为

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e)\Delta\epsilon\lambda_B \quad (3)$$

式(2)反映出光纤光波中心波长变化量与应变变化量或温度变化量呈线性关系。本试验研究温度变化很小,试验时间相对较短,主要考察结构振动引起的应变变化。通过测量光纤光波中心波长变化量,由式(3)可得应变变化数据,通过编制程序对应变数据的转换,得到立管振动的频率、幅值及模态等振动特性。

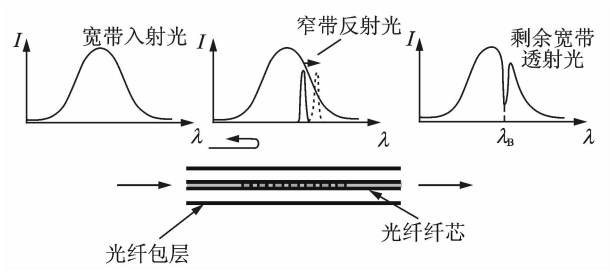


图 1 光纤光栅传感器工作原理示意图

Fig. 1 Working principle of Fiber Bragg Grating sensors

1.2 基于应变输入信号的模态分解法

各个测点的应变数据得到后,为获得沿立管长度每个测点涡激振动响应位移以及幅值和模态等振动特性,可采用模态分解法。该方法不仅能得到每个测点的响应位移,只要沿立管长度有足够个数的传感器且位置布置合理,立管其他位置的响应位移也可以得到。

两端简支的立管结构受力模型如图 2 所示。其中: x 轴为顺流向; y 轴为横向; z 轴沿立管轴向垂直向上。依据结构动力学理论中的动力反应分析方法,对于长度为 L 的立管,任意 t 时刻的结构振动位移表示为 $y = y(z, t)$ 。采用模态分解法,利用振型叠加原理,立管结构在 t 时刻位移可表示为

$$y(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \omega_n(t)\varphi_n(z) \quad (z \in [0, L]) \quad (4)$$

其中: $\varphi_n(z)$ 为振型函数; $\omega_n(t)$ 为广义坐标,也称权重函数。

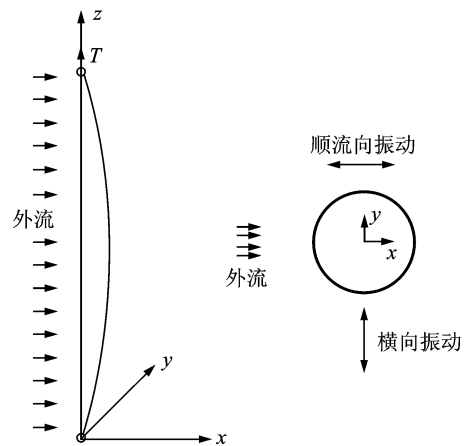


图 2 立管模型受力示意图

Fig. 2 Force diagram of the riser model

立管结构弯曲应变值 $\epsilon(z, t)$ 与曲率 $\kappa(z, t)$ 之间的关系为

$$\kappa(z, t) = \epsilon(z, t)/R \quad (5)$$

由几何关系可知,位移 $y(z, t)$ 对 z 求二阶导数近似等于曲率值,即

$$\frac{\partial^2 y}{\partial z^2} \approx \kappa(z, t) \quad (6)$$

将式(6)带入式(5)可得

$$\varepsilon(z, t)/R \approx \sum_{n=1}^N \omega_n(t) \varphi_n''(z) \quad (7)$$

其中: N 为参与立管振动的最高阶模态数; M 为沿立管长度布置的测点个数。

式(7)写成矩阵形式

$$\boldsymbol{\varphi}'' \boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{\varepsilon}/R \quad (8)$$

如果方程有解,则需要满足 $M \geq N$ 。其中, $\boldsymbol{\omega}$ 为立管不同时刻各阶模态的参与权重。

将式(8)展开可得

$$\begin{bmatrix} \varphi_1''(z_1) & \varphi_2''(z_1) & \cdots & \varphi_n''(z_1) \\ \varphi_1''(z_2) & \varphi_2''(z_2) & \cdots & \varphi_n''(z_2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \varphi_1''(z_M) & \varphi_2''(z_M) & \cdots & \varphi_n''(z_M) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1(t) \\ \omega_2(t) \\ \vdots \\ \omega_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon(t, z_1) \\ \varepsilon(t, z_2) \\ \vdots \\ \varepsilon(t, z_M) \end{bmatrix} /R \quad (9)$$

对于两端简支的立管结构,其振型函数 $\varphi_n(z)$ 可以表示为正弦函数

$$\varphi_n(z) = \sin \frac{n\pi z}{L} \quad (z \in [0, L]) \quad (10)$$

位移函数可表示为

$$y(z, t) = \sum_{n=1}^N \omega_n(t) \sin \frac{n\pi z}{L} \quad (z \in [0, L]) \quad (11)$$

将式(11)带入式(9)可得

$$-\left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \begin{bmatrix} \sin \frac{\pi z_1}{L} & 2^2 \sin \frac{2\pi z_1}{L} & \cdots & n^2 \sin \frac{n\pi z_1}{L} \\ \sin \frac{\pi z_2}{L} & 2^2 \sin \frac{2\pi z_2}{L} & \cdots & n^2 \sin \frac{n\pi z_2}{L} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \sin \frac{\pi z_M}{L} & 2^2 \sin \frac{2\pi z_M}{L} & \cdots & n^2 \sin \frac{n\pi z_M}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1(t) \\ \omega_2(t) \\ \vdots \\ \omega_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon(t, z_1) \\ \varepsilon(t, z_2) \\ \vdots \\ \varepsilon(t, z_M) \end{bmatrix} /R \quad (12)$$

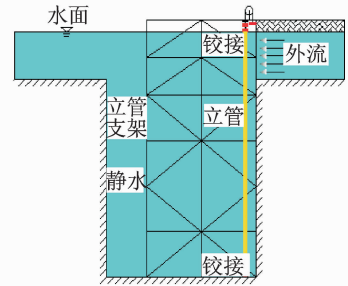
通过求解式(12),得到各模态对应的权重函数 $\omega_n(t)$,将求出的权重函数 $\omega_n(t)$ 代入式(11)可计算出立管各点的位移时程。

2 试验方案

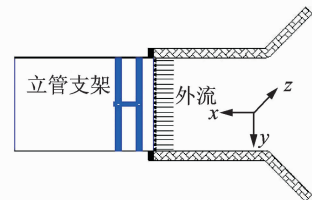
2.1 试验设计

试验在山东省海洋工程重点实验室的平面随机波流耦合水池中进行,水池长为 60 m、宽为 36 m、深为 1.5 m,最大总流量为 4.9 m³/s。水池内部有

大型深水井一处,长为 30 m、宽为 10 m、深为 5 m。为满足海洋立管在复杂海况中的高雷诺数、大长细比及高模态数等要求,使得立管模型在实验室条件下能够沿横向激发出较高的模态,试验选用铜管作为立管模型,总长度为 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。采用实验室天车对钢结构立管支架进行吊装和定位。



(a) 正视图
(a) Elevation view



(b) 俯视图
(b) Vertical view

图3 试验整体布置示意图

Fig. 3 General arrangement of the experiment

表1 试验立管详细参数表

Tab. 1 Detailed parameters of the riser

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 M /kg	0.76
截面积 S /mm ²	88.7
长细比 λ	310
弹性模量 E /GPa	97.79

为保证立管的定位精度,由潜水员水下辅助定位,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。试验整体布置如图 3 所示。立管吊装及定位如图 4 所示。试验立管模型

参数如表 1 所示。



图 4 立管吊装及定位

Fig. 4 Lifting and positioning of the riser

在进行试验时,设计了能够便于施加内流和顶张力的铰接接头,并由专业机械加工企业进行生产和装配。该接头与高压自吸水泵、水管、特制铜阀、智能电子流量计、滑轮以及配重块等组成了内流和顶张力施加系统。立管和水管通过螺纹分别与铰接接头的立管接孔和进出水孔紧密连接,滑轮上涂抹机械润滑油。在试验过程中,通过调节智能电子流量计和更换配重块来分别控制内流流速和顶张力。外流流速的测量采用多谱勒流速仪,可测流速范围为 $0 \sim 4$ m/s,精度为 $\pm 0.5\% \pm 1.2$ mm/s。外流最小流速为 0 m/s,最大流速为 1.2 m/s,共分 22 级。内流最小流速为 0 m/s,最大流速为 2.4 m/s,共分 8 级。

2.2 应变测试技术

本试验采用光纤光栅测试技术。选用美国 Micron optics 公司的光纤光栅应变传感器和四通道 si 425 动态光纤光栅解调仪。该解调仪采用扫描激光器技术,外形设计粗犷,适合复杂环境的数据采集。内置校准器件,无需定期校准。仪器采样频率为 250 Hz,且具有超高分辨率($< 0.2 \mu\epsilon, 0.02^\circ\text{C}$)和更宽的光谱带宽(80 nm),同时可测量更多传感器,每通道可测量多达 128 个传感器。

立管试验为小应变测试,数据结果对外界环境参数敏感。为防止附加质量对试验结果的影响,并保证光纤光栅的应变灵敏度不受影响,沿立管长度

布置均为裸光纤,单个光栅测点如图 5 所示。

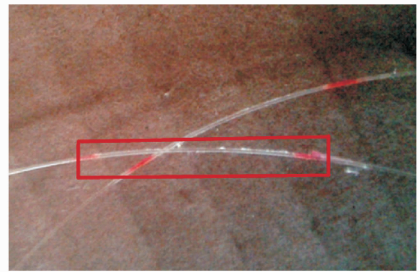


图 5 单个光栅测点

Fig. 5 A single grating measuring point

裸光纤本身直径很小,脆性大且抗剪强度较小,在粘贴过程中极易造成断裂损伤。与传统电测类应变计相比,一根光纤往往分布多个光栅测点,具有串联特性,一处断裂,会造成断裂处之后测点均无法使用。本次试验立管长度为 6.2 m,外径为 20 mm,属大长细比构件且测点较多。因此,为防止光纤在粘贴过程中破坏,粘贴前先将管道测点准确定位、标示,粘贴时将光纤展开并在立管两端固定,然后从第 1 个测点开始逐个粘贴,粘贴完毕待防水胶强度满足要求后连接解调仪,检测每个测点工作情况。测量段以外光纤采用铠装光缆封装,如图 6 所示。



图 6 12 点光纤光栅串及铠装光缆

Fig. 6 12 points FBG series and armored cable

在选定测点位置时,运用海洋立管涡激振动数值模拟软件 NSVIV1.0 进行建模分析,获得沿立管长度方向的涡激振动响应位移及模态信息。由初始对比数据,根据传感器的布置原则^[18],在关键位置处布置传感器,并采集试验数据。根据数值分析结果及试验方案设计,沿立管全长共布置 48 个测点,光纤共 4 组,成 90° 间隔布置在铜管表面,分别测量立管沿横向和顺流向的振动。试验过程中为保证数据采集稳定性,在每级外流稳定后采样,采样频率为 250 Hz,采样时间为 40 s。具体布置如图 7、图 8 所示,粘贴详图如图 9 所示。

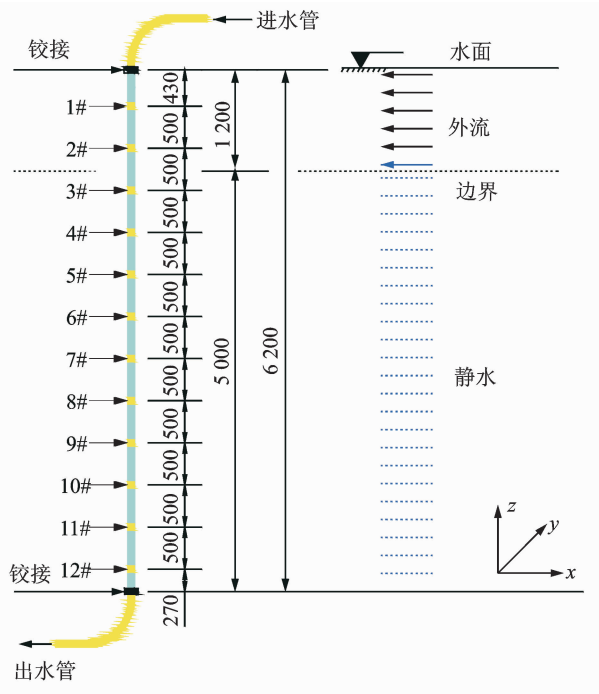


图7 光纤光栅应变传感器布置图(单位:mm)

Fig. 7 Arrangement of FBG strain sensors(unit:mm)

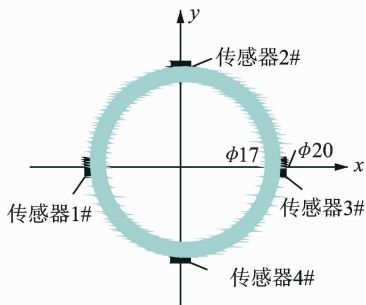


图8 立管横截面详图

Fig. 8 Cross-section of the riser

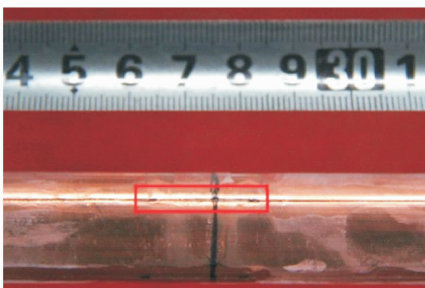


图9 光纤光栅应变传感器粘贴图

Fig. 9 FBG strain sensors attached detailing

3 试验结果分析

为了研究内流流速对立管自振频率的影响,将立管模型置于静水中,在其他影响因素相同时,分别

变化8级不同内流流速,通过外部荷载激励法获得光纤光栅应变的衰减信号,从而得到立管振动应变衰减时程曲线。通过对应变信号进行傅里叶变换,得到立管在不同工况下的自振频率。不同内流流速下的立管模型一阶自振频谱曲线如图10所示。其中:内流流速最小为0 m/s,最大为2.4 m/s。根据图10发现,随着内流流速的增加,立管自振频率逐渐减小,这与文献[5]的结论吻合。

当内流流速 $v=0$ m/s 时,频率约为1.1 Hz,当施加第2级内流 $v=0.4$ m/s 时,相比较 $v=0$ m/s,立管自振频率有一个相对较大的突变,减小约0.08 Hz。随着内流流速的逐渐增加,在 $v=0.8 \sim 1.6$ m/s 区间,相比较前一级内流,立管自振频率减小幅度比较稳定,约为0.02 Hz。随着内流流速的进一步增加,立管自振频率开始呈现较大幅度的减小。例如:在内流流速 $v=2.0$ m/s 时,相比前一级内流,减小约0.04 Hz;在 $v=2.4$ m/s 时,减小约0.05 Hz。可见,内流流速对立管的自振频率有显著影响,流速越大,这种影响越明显。

为探索阶段流作用下深海立管动力响应规律,研究立管涡激振动的多模态特征以及“锁振”的水动力学条件,在进行试验时,上部沿立管长度1.2 m范围内施加均匀流场,下部5 m为静水。试验中外流流速的变化区间为0.1 m/s~1.2 m/s,每级变化0.05 m/s或0.1 m/s,共22级。在每级施加外流稳定后采集数据,测量得到立管测点应变的时程曲线,求得立管测点的位移时程和幅值等。沿立管长度合理布置足够个数传感器,任意位置响应位移均可得到。图11为不同外流流速下沿立管长度方向横向位移的均方根值曲线。该图综合反映了立管各个点处的振动状态及整体曲线振动形状,比较清晰地反映出立管在不同外流速下的模态信息。图12为不同外流流速下沿立管长度不同测点的横向三维频谱图。

由图11分析发现,当外流流速 $v < 0.25$ m/s 时,由于流速很小,因此外部激励较小,立管振幅很小,立管主要以一阶模态振动为主。随着外流流速增加,立管二阶模态振动占主导地位,外流流速 $v=0.35$ m/s~0.45 m/s 时立管发生典型的二阶锁振,且 $v=0.4$ m/s 时振幅达到最大。

比较图12(a)外流流速 $v=0.4$ m/s 时的三维频谱图可以看出,二阶模态为主导模态,其他模态贡献非常小,振型呈双抛物线形状,但空间分布并不完全对称。从水下摄像机采集图像来看,在此速度区间内立管振动强烈,这与数值计算结果比较吻合。

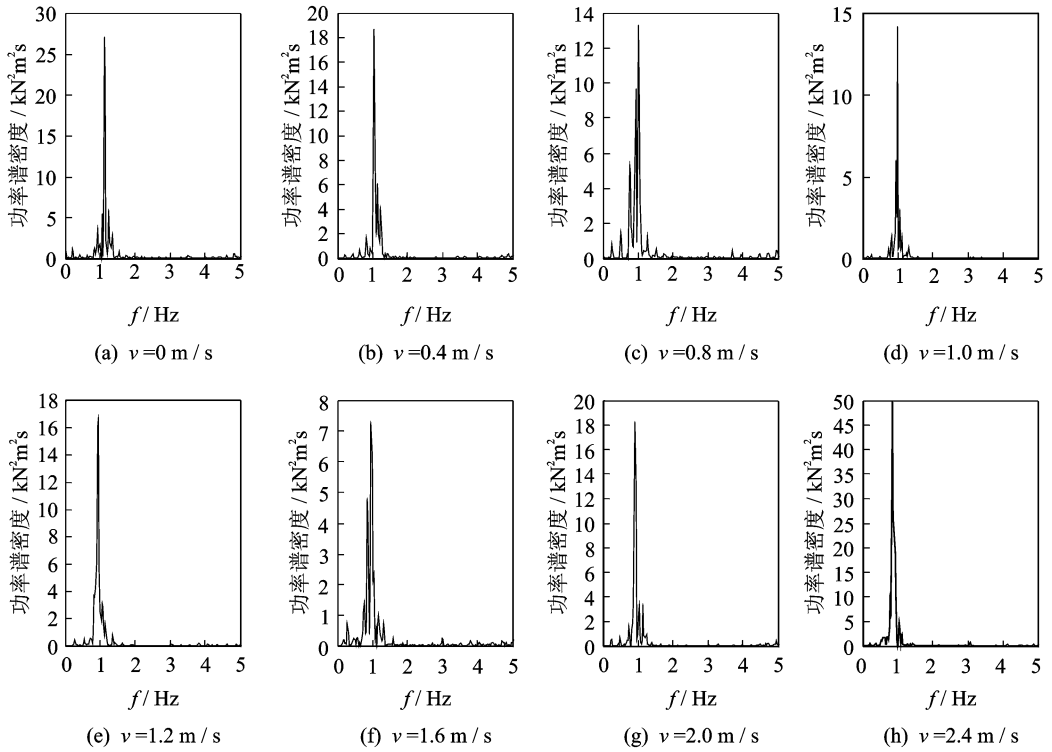


图 10 不同内流流速下立管一阶自振频谱曲线

Fig. 10 The first-order natural frequency spectrogram of the riser under different internal flow velocity

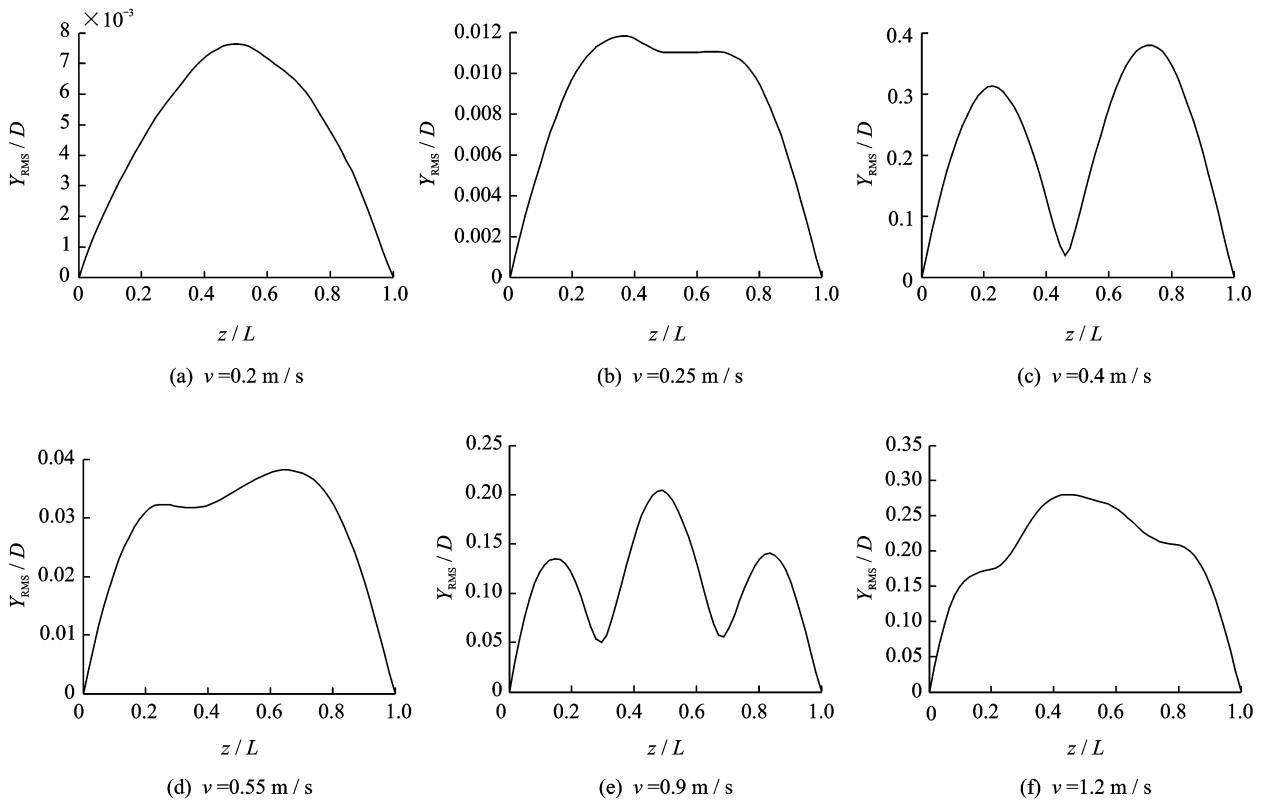


图 11 不同外流流速下沿立管长度方向横向位移均方根值曲线

Fig. 11 The RMS displacement of transverse vibration along the riser under different external flow velocity

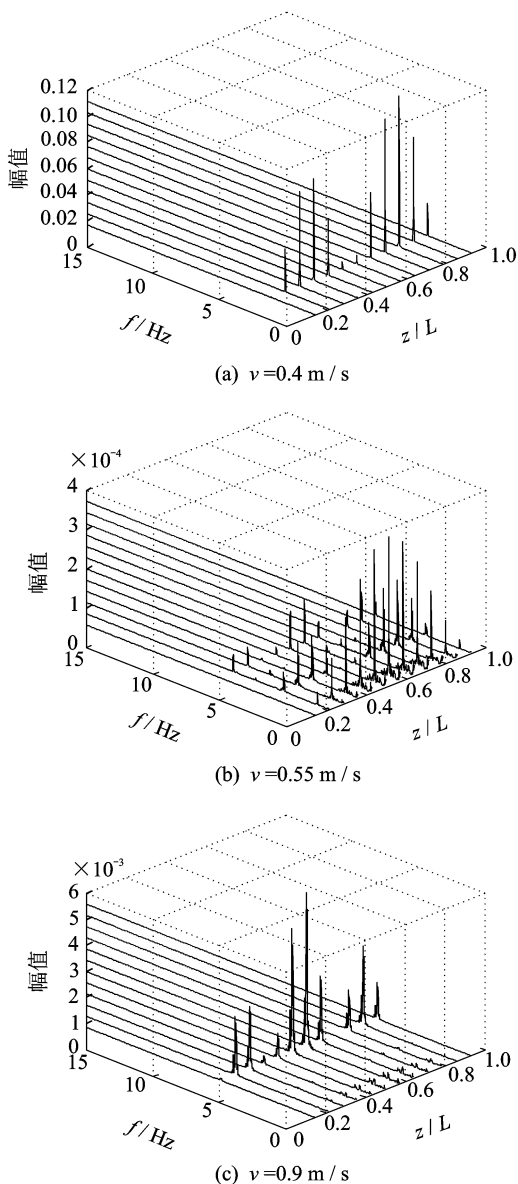


图 12 不同外流流速下沿立管长度不同测点的横向三维频谱图

Fig. 12 Three-dimensional frequency spectrogram of transverse vibration along the riser under different external flow velocity

随着外流流速的进一步增大,立管振动逐渐跳出二阶“锁振”区间,振幅显著减小。当外流流速 $v=0.55$ m/s时,立管三阶模态参与振动,振动开始呈现三阶振型,结合图 12(b)分析,结果清晰体现了立管 VIV 振动的多模态特征。随着外流流速的增加,振幅又开始逐渐增大,但幅度不大。当外流流速 $v=0.85$ m/s \sim 1.0 m/s 时,立管振动进入三阶“锁振”状态,振幅出现突变,增幅较大,振动强烈。此后,随着外流流速的继续增加,立管振动逐渐跳出三阶“锁振”区间。但由于此后外流流速较大,振幅仍

呈现较大值,当外流流速达到 1.2 m/s 时,立管四阶模态已参与振动。

4 结束语

笔者采用光纤光栅应变传感器,利用其体积小、抗电磁干扰、分布式传感、布线简单和对流场扰动小等特点,在海洋工程实验室大型水池进行了阶段流作用下的立管涡激振动模型试验。研究了内流流速对海洋立管动力特性的影响,分析了不同外流作用下大长细比立管模型的动力响应规律。试验结果表明,光纤光栅传感技术能够很好地满足大长细比深海立管的 VIV 测试要求,体现出优越的工作性能。能够准确体现立管的应变时程以及振幅、频率等振动特性。位移均方根值曲线清晰地反映出立管在不同外流速下的模态信息,体现了立管振动的多模态特征。

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. (in Chinese)
- [2] 刘景伟,郭海燕,赵婧,等. 深水海洋立管涡激振动试验流场设计及 CFD 数值模拟[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版,2013,43(4):106-111. Liu Jingwei, Guo Haiyan, Zhao Jing, et al. Design and CFD analysis of the flow field of the VIV experiment of marine riser in deepwater[J]. Journal of Ocean University of China: National Science Edition, 2013, 43(4): 106-111. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] 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.
- [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] 蒋志刚. FBG 光纤光栅的原理和应用[J]. 中国水运, 2008,8(5):128-129.

- Jiang Zhigang. The principle and application of fiber grating sensor[J]. China Water Transport, 2008, 8(5): 128-129. (in Chinese)
- [7] 吴椿烽,冒丽蓉,郑磊. 光纤光栅传感器的研究与应用[J]. 电子元器件应用, 2010, 12(8): 17-20.
- Wu Chunfeng, Mao Lirong, Zheng Lei. The research and application of fiber grating sensor[J]. Electronic Component & Device Applications, 2010, 12(8): 17-20. (in Chinese)
- [8] 何涛,赵鸣,谢强,等. 光纤光栅传感器用于盾构隧道施工的检测[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(1): 157-161.
- He Tao, Zhao Ming, Xie Qiang, et al. Application of the fiber bragg grating sensors in the monitoring of the shield tunnel construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(1): 157-161. (in Chinese)
- [9] 汪日光,叶献国,孙汝蛟,等. 光纤光栅传感器在桥墩模型实验中的应用[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(3): 51-55.
- Wang Riping, Ye Xianguo, Sun Rujiao, et al. Application of fiber grating sensor on experiment of bridge pier modal[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(3): 51-55. (in Chinese)
- [10] 王建平. 光纤光栅传感器在土木工程结构健康检测中的应用[J]. 贵州工业大学学报:自然科学版, 2004, 33(1): 77-84.
- Wang Jianping. Application of fiber grating sensors to civil engineering structure health monitoring[J]. Journal of Guizhou University of Technology: National Science Edition, 2004, 33(1): 77-84. (in Chinese)
- [11] 董建华,谢和平,张林,等. 光纤光栅传感器在重力坝结构模型实验中的应用[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2009, 41(1): 41-46.
- Dong Jianhua, Xie Heping, Zhang Lin, et al. Application of optical fiber grating sensor in gravity dam structure model test[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41(1): 41-46. (in Chinese)
- [12] 李宏男,李东升,赵柏东. 光纤健康检测方法在土木工程中的研究与应用进展[J]. 地质工程与工程震动, 2002, 22(6): 76-83.
- Li Hongnan, Li Dongsheng, Zhao Bodong. Progress in study and application of smart health monitoring method by fiber optic sensor in civil engineering[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(6): 76-83. (in Chinese)
- [13] 谭忆秋,王海朋,马韵军,等. 基于光纤光栅传感技术的沥青路面压实检测[J]. 中国公路学报, 2014, 27(5): 112-117.
- Tan Yiqiu, Wang Haipeng, Ma Yunjun, et al. Asphalt pavement compaction monitoring based on fiber grating sensing technology[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(5): 112-117. (in Chinese)
- [14] 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. (in Chinese)
- [15] 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. (in Chinese)
- [16] 任亮,姜涛,李东升,等. 微型FBG应变传感器在大坝模型实验中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(2): 277-283.
- Ren Liang, Jiang Tao, Li Dongsheng, et al. Application of small FBG strain sensors in dam modal experiment[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(2): 277-283. (in Chinese)
- [17] 朱启荣,谢明如. 光纤光栅传感器在工程结构中的探究[J]. 实验室研究与探索, 2013, 32(5): 32-36.
- Zhu Qirong, Xie Mingru. Application of FBG sensors in monitoring of engineering structure[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2013, 32(5): 32-36. (in Chinese)
- [18] 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. (in Chinese)



第一作者简介:李朋,男,1984年4月生,博士、讲师。主要研究方向为海洋工程结构动力分析。曾发表《基于模型试验的高强度钢筋混凝土梁斜向开裂研究》(《工业建筑》2015年第45卷第1期)等论文。

E-mail: lipeng@sdust.edu.cn