

基于 FBG 传感技术的立管涡激振动过程分析*

李 朋^{1,2}, 王 来^{1,2}, 郭海燕³, 王 飞^{1,2}, 张永波⁴

(1. 山东科技大学土木工程与建筑学院 青岛, 266590)

(2. 山东科技大学山东省土木工程防灾减灾重点实验室 青岛, 266590)

(3. 中国海洋大学工程学院 青岛, 266100) (4. 青岛国家海洋科学研究中心 青岛, 266071)

摘要 为深入研究光纤光栅传感技术在海洋立管涡激振动测试中的适用性,在风-浪-流联合水槽中进行均匀来流下立管涡激振动试验。数据测试采用光纤光栅传感器,同时采用动态电阻传感器作为对比。通过改变多级外流流速,对比分析基于两种传感技术的立管涡激振动过程差异。同时基于光纤光栅传感技术采集应变数据并结合频谱分析及模态理论,研究立管振动的主导频率、幅值及模态响应等振动特性。研究表明,光纤光栅传感技术对海洋立管的涡激振动测试性能优越,能够准确体现立管的应变时程、振幅以及主导频率等振动特性,清晰反映伴随流速进程的立管模态特征及涡激振动过程,同时由模态响应和涡激振动过程分析发现立管锁频区间的产生具有瞬时性及自激性规律,这对海洋立管的模型试验与工程设计具有较大的参考价值。

关键词 光纤光栅传感器; 均匀流场; 海洋立管; 涡激振动; 过程分析

中图分类号 TH825; P751

引 言

立管系统是用于连接水面浮体和海床井口的隔水套管系统,是所有类型平台结构(TLP, SPAR, FPSO, SEMI)传输油气必须的管道^[1]。作为当前深海油气田开发系统中的两个主要平台 FPSO, SEMI,海洋立管本身就是平台的一个核心组成部分。立管在深水环境中承受海流、波浪、冰及地震等复杂海洋环境荷载的作用,而除上下两端外沿立管长度方向没有任何固定装置,这使其具有成本高、易破坏等特点。作为典型的大长细比结构,在波浪、海流作用下引发的涡激振动(vortex-induced vibration, 简称 VIV)是立管产生疲劳破坏的主要原因之一。因此,对立管涡激振动的研究有重要的经济价值和社会意义^[2-5]。

立管的涡激振动特性受到很多外部参数及自身结构特性的影响,试验研究是探寻其内部规律和指导设计的理想手段^[6]。立管的涡激振动是典型的小尺度构件流固耦合振动,由于结构本身长细比大,所

处受力环境复杂,进行模型试验时,测试技术的采用及过程设计往往成为试验成败的关键^[7]。

在已有的立管涡激振动测试中,电阻型等电测类传感器应用较多。但该类传感器是基于电阻变化来获取测试信号,易受电磁信号及外部环境的干扰,给数据的分析带来较大困难。特别是对立管的多测点测试,由于立管处于水下,导线的分布会对实际测试结果产生不可忽视的影响^[8-10]。光纤光栅传感器是一种新型传感技术,近年来应用于多种工程研究及应用领域,发展非常迅速。由于该类型传感器是基于波长变化获得测试数据,其抗电磁干扰能力强,受外部环境的影响较小,如果现场测试温度变化情况较小,可忽略温度的影响^[11-17]。对于立管的 VIV 测试而言,大多采用裸光纤串,其分布式测量优势较电阻型传感器是非常突出的,避免了导线的布线影响,与传统的电测类传感器相比也克服了结构小应变时存在零漂的缺点。对于目前光纤光栅传感器的应用而言,传感器及解调仪的成本较高,是制约其广泛应用的瓶颈。对于立管的 VIV 测试,光栅的串联式分布具有显著的优势,但由于裸光纤串抗折强度极低,光

* 国家自然科学基金资助项目(51279187);山东省优秀中青年科学家科研奖励基金资助项目(BS2015HZ017);山东省高等学校科技计划资助项目(J16LH04);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);青岛市博士后研究人员应用研究资助项目(01020120406)

收稿日期:2016-03-24;修回日期:2016-05-16

纤串局部的断裂会造成后续测点的失效,这给裸光纤串在立管表面的安装带来非常大的难度。

基于以上阐述,数据测试分别采用动态电阻应变传感器和布拉格光纤光栅应变传感器 (fiber Bragg grating sensors,简称 FBG),对比分析基于两种传感技术的立管涡激振动过程差异;同时基于光纤光栅传感技术采集应变数据并结合频谱分析及模态理论,研究立管振动的主导频率、幅值及模态响应等振动特性;以此探索 FBG 传感器针对海洋立管 VIV 测试的适用性及数据敏感性,为海洋立管的模型试验及工程设计提供参考和科学依据。

1 电阻型及 FBG 传感器工作原理

电阻型应变传感器测量应变是基于电阻丝长度的变化引起阻值变化,其工作原理如图 1 所示。式(1)清晰揭示了电阻变化率与机械应变之间确定的线性关系

$$\frac{dR}{R} = K_0 \epsilon \quad (1)$$

其中: R 为电阻; ϵ 为沿电阻丝长度方向上的应变值; K_0 为电阻应变传感器的灵敏度系数,反映电阻值对应变的敏感程度。

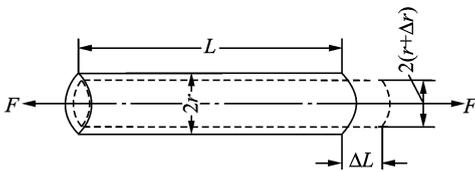


图 1 电阻型传感器工作原理示意图

Fig. 1 Working principle of resistor sensors

布拉格光纤光栅传感器是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的波长调制型光纤传感器^[18-19],工作原理如图 2 所示。

当光纤光栅发生温度、应力变化时,使纤芯有效折射率 n_{eff} 或光栅周期 Λ 发生改变,中心反射波长 λ_B 也会相应的改变,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。

式(2)表明,光纤光波中心波长的变化量与应变变化量或温度变化量呈线性关系,通过上述公式反算进而可得到对应的应变或温度变量。

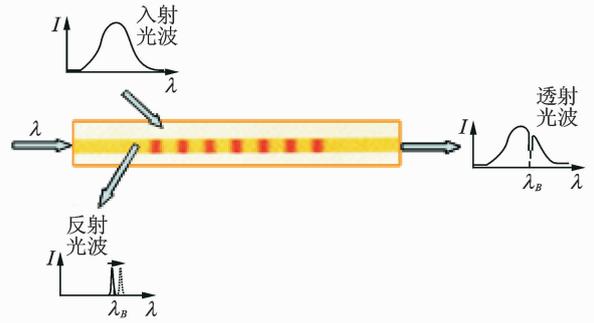


图 2 光纤光栅传感器工作原理示意图

Fig. 2 Working principle of fiber Bragg grating sensors

由式(1)和式(2)可知,对于应力变化引起的应变,灵敏度系数 K_0 及有效弹光系数 P_e 是重要的作用参数。 K_0 由两部分组成,反映了电阻丝材料的几何特性对灵敏度的影响及电阻率随应变的改变量。电阻型传感器受温度、湿度、腐蚀、电磁信号及粘贴质量等因素影响。有效弹光系数 P_e 描述因应力或应变引起的折射率改变量。

2 数据分析方法

2.1 应变数据分析

对于 FBG 应变传感器,分别布置 4 组裸光纤串,按照试验方案沿光纤串长度刻制光栅测点。作为对比,同工况立管模型每个测点布置 4 个动态电阻应变计,半桥连接,应变计位置与光栅刻点对应。分别将对称位置两个测点所得应变求平均值,得立管的弯曲应变,如式(3),(4)所示

$$\epsilon_{CF}(t) = [\epsilon_{CF-2}(t) - \epsilon_{CF-4}(t)]/2 \quad (3)$$

$$\epsilon_{IL}(t) = [\epsilon_{IL-1}(t) - \epsilon_{IL-3}(t)]/2 \quad (4)$$

其中: $\epsilon_{CF}(t)$, $\epsilon_{IL}(t)$ 为 VIV 引起的立管横向及顺流向弯曲应变; $\epsilon_{CF-2}(t)$, $\epsilon_{CF-4}(t)$ 为横向对应 2 个传感器所得应变时程; $\epsilon_{IL-1}(t)$, $\epsilon_{IL-3}(t)$ 为顺流向对应 2 个传感器消除初始弯曲应变后所得应变时程。

2.2 频谱分析

频谱分析是信号处理中的基本分析方法,对于所得时域信号,通过 Fourier 变换得到频域信息,正变换公式为

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (5)$$

其中: $\omega = 2\pi f$, $f(t)$ 为时域数据序列; $F(\omega)$ 为频域的谱函数序列。

傅里叶变换本身是连续的,采用快速傅里叶变换(FFT)计算求解。由于频率分辨率以及时域信号为有限长度等原因,使FFT分析结果具有泄漏的可能,为此采用“加窗”措施来消除。

2.3 基于应变信号的模态分析

对于两端简支、长度为 L 的立管,任意 t 时刻的结构振动位移表示为 $y = y(z, t)$,利用振型叠加原理,在 t 时刻位移可表示为

$$y(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \omega_n(t) \varphi_n(z) \quad (z \in [0, L]) \quad (6)$$

其中: $\varphi_n(z)$ 为振型函数; $\omega_n(t)$ 为权重函数。

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

$$\varphi_n(z) = \sin \frac{n\pi z}{L} \quad (z \in [0, L]) \quad (7)$$

因此,位移函数可表示为

$$y(z, t) = \sum_{n=1}^N \omega_n(t) \sin \frac{n\pi z}{L} \quad (z \in [0, L]) \quad (8)$$

通过求解各阶模态对应的权重函数 $\omega_n(t)$,即可计算出立管各点的位移时程。

3 试验方案

3.1 试验设计

试验在中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室风-浪-流联合水槽进行,水槽长 65 m,宽 1.2 m,高 1.75 m,最大流速为 0.8 m/s。多普勒流速计安装于水槽内部,可精确采集时间步内的外流流速。试验总体设计如图 3 所示。

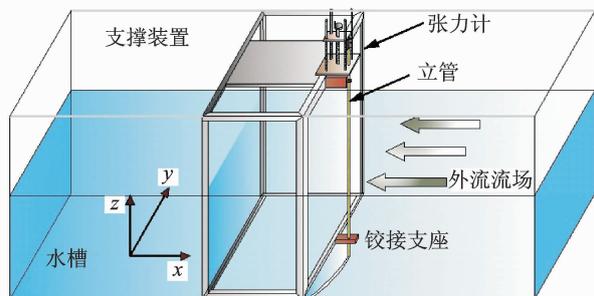


图 3 试验总体布置图

Fig. 3 Diagram of experimental general arrangement

通过多种管道的力学性能测试,并考虑刚度及模态要求,选用外径为 18 mm、壁厚 2 mm 的透明有机玻璃管为立管模型。模型有效长度为 1.5 m,

上部 0.75 m 处于空气中,下部 0.75 m 处于均匀流场中。立管两端有效长度外预留 50 mm,分别与焊接于支撑装置上下两侧的铰接支座相连;铰接支座根据试验要求自主设计,立管模型详细参数如表 1 所示。

表 1 试验立管详细参数表

Tab. 1 Detailed parameters of the riser

立管参数	参数值
有效长度 L /m	1.5
外径 D /mm	18
壁厚 δ /mm	2
弹性模量 E /GPa	0.91
单位长度质量 m_s /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	0.12
长细比(L/D)	83.3

3.2 应变测试技术

为对比,设计一套由 DASP 数据处理软件, YD-28A 型动态电阻应变仪,数据采集仪及动态电阻应变计组成的测试系统。选择两组力学性能参数相同的立管模型,分别在相同位置布置上述两种不同传感器,并在相同外部工况下测试。

考虑立管模型试验受外部参数影响较大,采用动态电阻应变计测试时,对每个测点四面对称粘贴应变计,引出线沿水槽边壁布置,应变计导线与引出线连接处焊接后采用绝缘防水胶密封,引出线全部采用屏蔽电缆,并给予充分的示波时间。采用光纤光栅应变计时,将 4 串裸光纤对称粘贴,引出线均采用铠装光缆。由于裸光纤串抗折强度极低,在粘贴前对光栅测点标定,粘贴过程中连接解调仪,实时监测测点示波情况。

根据立管长度,并考虑动态电阻应变计的布线位置,综合模态及振幅等立管涡激振动特性的需求,依据传感器的布置原则^[6],沿立管长度共设计 5 个测点,如图 4 所示。在立管有效长度范围内均匀布置,上端预留 300 mm,下端预留 400 mm,每个测点布置 4 个应变计,沿立管截面对称粘贴,分别测量立管横向(CF)和顺流向(IL)的应变时程,如图 5 所示。

其中采用光纤光栅应变计时根据测点位置刻制光栅测点,保证两种传感器位置一致,两种应变计粘贴后涂防水胶并采用 704 胶密封,并在外侧包裹聚四氟乙烯,应变计粘贴如图 6 所示。

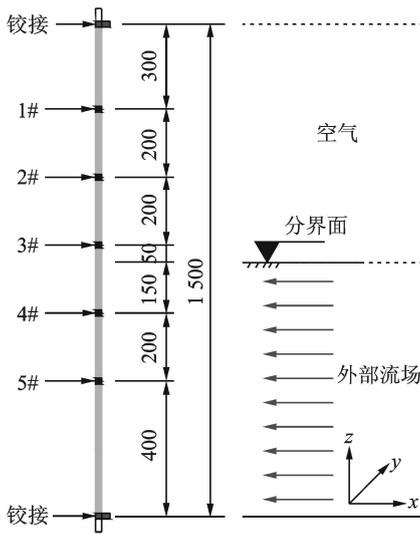


图 4 应变计测点布置详图(单位:mm)

Fig. 4 Arrangement of strain gauges (unit:mm)

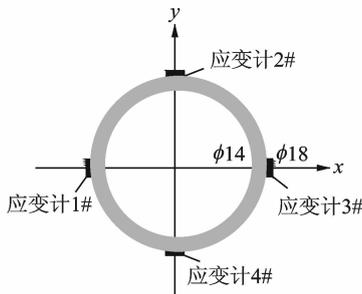
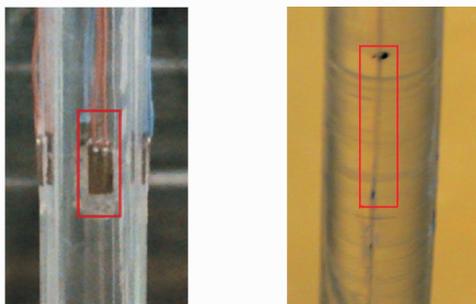


图 5 立管横截面详图

Fig. 5 Cross-section of the riser



(a) 动态电阻应变计

(b) FBG应变计

(a) Dynamic resistance strain gage

(b) FBG strain gage

图 6 应变计粘贴详图

Fig. 6 Strain gages attached detailing

4 试验结果分析

为准确地探求海洋立管涡激振动过程规律,本试验外流流速最大为 0.8 m/s,每级增加 0.1 或 0.05 m/s,所得随时间变化的应变信号,根据上述

数据分析方法,得到立管的应变、位移、振幅及主导频率等各种参量。其中: D 为立管外径; Y 为利用振型分解法,通过编制程序,对试验所采集应变时程数据转换后得到的立管瞬时位移值; Y/D 为无量纲位移; U 为外流流速。

4.1 基于不同传感技术的 VIV 过程差异分析

对于立管的涡激振动“锁频”区间,已有的研究表明^[20],在水中发生“锁频”的约化速度区间约为 $V_r \in [4.5, 10]$; 在外流流速为 0.6 m/s 时,约化速度 $V_r = 5.6$ m/s。该级速度范围内立管振幅发生突变,立管振动强烈。通过将立管模型置于静水中,外部间断输入衰减荷载激励,对所得应变衰减信号通过快速傅里叶变换(FFT),得立管前 2 阶自振频率分别为 2.01, 6.02 Hz。为清晰的反映曲线变化规律,取示波区间前 20 s 数据进行分析。图 7, 8 分别为外流流速 0.2, 0.6 m/s 时由两种传感器所得微应变示波过程及有效值。作为参考,在图 7, 8 中将 0~2 s 范围内的微应变数据单独列出。

由图 7 分析可知,在外流流速较小时,由于采样区间初始点不同,使得曲线相位不同,但两曲线示波过程基本一致。此时立管振幅极小,振动微弱,由试验现象几乎观察不到立管的振动,微应变有效值接近 1,两者相差仅为 0.05,数据一致性较好。两者详细对比可见,电阻应变计采集所得时域过程约间隔 1 s 出现一次规律性突变,但数值较小,相比 FBG 所得曲线规律,造成这种现象的主要原因是电阻应变计小应变漂移及导线对流场的规律性扰动形成的。

对于较高流速特别是“锁频”区间对应外流流速,由图 8 分析可知,在外流流速为 0.6 m/s 时,由于振幅产生突变,幅值较高,两种传感器所得示波过程基本一致。由于在该级外流流速采样时曲线相位差较小,由 0~2 s 的示波曲线可知,两者的时域示波成分组成是基本相同的,同时频率的锁定,大振幅的产生使流场的扰动在“锁频”区间内基本没有体现。由电阻型及 FBG 传感器所得应变时程有效值相差甚微,由图 8(b)可知,两者差值仅为 2.3。由此可见,对于两种不同的传感器所得应变时程,经过噪声处理后的电阻型传感器信号响应与 FBG 传感器基本一致。差异性主要体现在外流流速较低的区域对流场的扰动和小应变漂移。两种传感器所得应变过程有效值是基本相同的,误差均值仅为 4%。由此

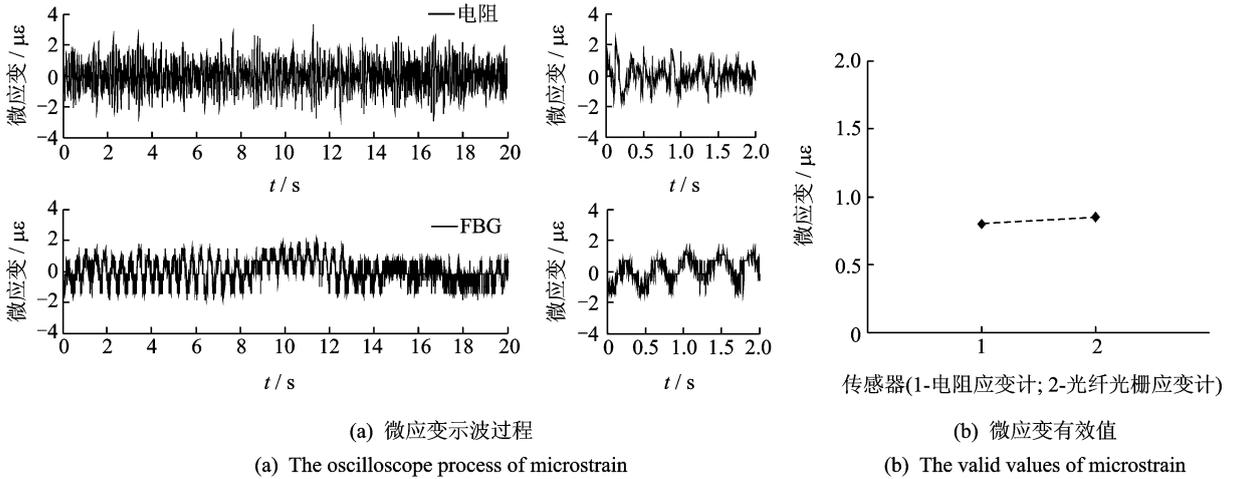


图 7 外流流速为 0.2 m/s 时由两种传感器所得微应变示波过程及有效值

Fig. 7 The oscilloscope process and valid values attained by two different sensors under external flow velocity 0.2 m/s

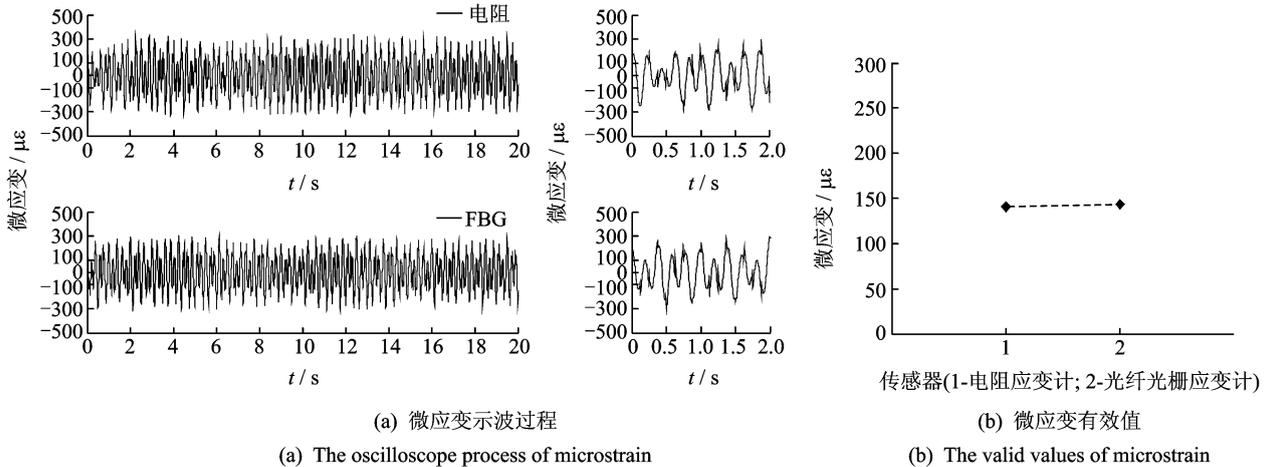


图 8 外流流速为 0.6 m/s 时由两种传感器所得微应变示波过程及有效值

Fig. 8 The oscilloscope process and valid values attained by two different sensors under external flow velocity 0.6 m/s

可知,两种传感器对于深水立管的 VIV 示波过程均能较好体现,但电阻型传感器所得数据分析处理难度大,且在低流速小振幅时其数据存在漂移且流场的扰动明显。

4.2 主导频率过程分析

为研究在试验外流流速区间内立管模型主导频率变化过程,由主导频率规律分析立管模型的“锁频”状态区间,将 FBG 应变传感器采集得到各级外流流速下的应变信号,使用上节所述频谱分析方法,通过快速傅里叶变换(FFT),分别计算不同外流流速下的功率谱密度。图 9 给出了各级外流速时立管模型的振动功率谱密度。

由图 9 分析可知,在较小外流流速时,功率谱幅值较小,与较大流速相比(大于 0.4 m/s),差约两个

数量级,由此也可体现出在较小流速时立管振动较弱。随着外流流速的增大,立管的振动频率逐渐增大,外流流速 0.2~0.5 m/s 时所对应频率值分别为 2.51, 3.51, 4.25, 5.35 Hz。当外流流速达到 0.6 m/s 时,立管进入二阶“锁频”区间,对应频率为 6.28 Hz,接近立管的二阶自振频率,此时立管振幅发生突变,振动强烈。流速进一步增加,如外流流速为 0.65, 0.70 m/s 时,立管振动频率并没有随着外流流速的增加发生明显变化,对应频率值分别为 6.30, 6.31 Hz,均较为接近立管的二阶自振频率。由此体现出清晰的“锁频”区间,即漩涡脱落频率被立管结构的自振频率锁定,出现典型的“共振”现象,在上述外流流速区间内,立管始终保持较高的振幅及振动强度。由于结构阻尼的存在,“共振”现象并没有使立管结构立即产生破坏。流速进一步增加,

结合立管的时域过程可知,立管振幅下降,振动强度减弱,外流流速为 0.75,0.80 m/s 时对应振动频率分别为 6.98,7.18 Hz,其振动频率远离二阶自振频率且重新开始出现逐渐增大的趋势,由此可知此时立管模型的振动已跳出“锁频”区间。

图 10 为通过小波分析所得各级外流流速下立管模型振动时间-频率尺度图,其中横轴代表时间轴,纵轴代表振动频率。

由图 10 分析可知,在示波区间内,当外流流速较小时($U < 0.5$ m/s),立管模型振动尚未进入“锁频”区间,振动烈度较弱且在时间序列上体现出较大不均匀性,仅出现 1~2 段振动强烈的红色区域,且时间短,离散性大。而外流流速 $U = 0.5$ m/s 时,振动烈度加强,时间-频率尺度图出现多个振动强烈区

域,但并没有连续性且出现 4 处明显的间断点。频率范围的增加也体现了立管多模态参与振动的特点。在外流流速为 0.6~0.7 m/s 区间内,由上述分析可知,立管处于“锁频”区间,图 10 可给予准确验证。分析该图,在“锁频”区间流速内,振动强烈的红色区域有较好连续性,振动烈度强而均匀,示波区间内没有间断。外流流速达到 0.75 m/s 以后,振动强烈的红色区域开始出现多次间断,且区域逐渐减小,烈度减弱。同时由上述分析可知,FBG 传感器所得时域信号通过变换分析,可精确反映立管模型的主导频率变化过程及烈度变化,比较精准的体现“锁频”区间内外的变化规律,特别针对较小外流流速,可清晰体现涡激振动频率在时间序列上的不稳定性。

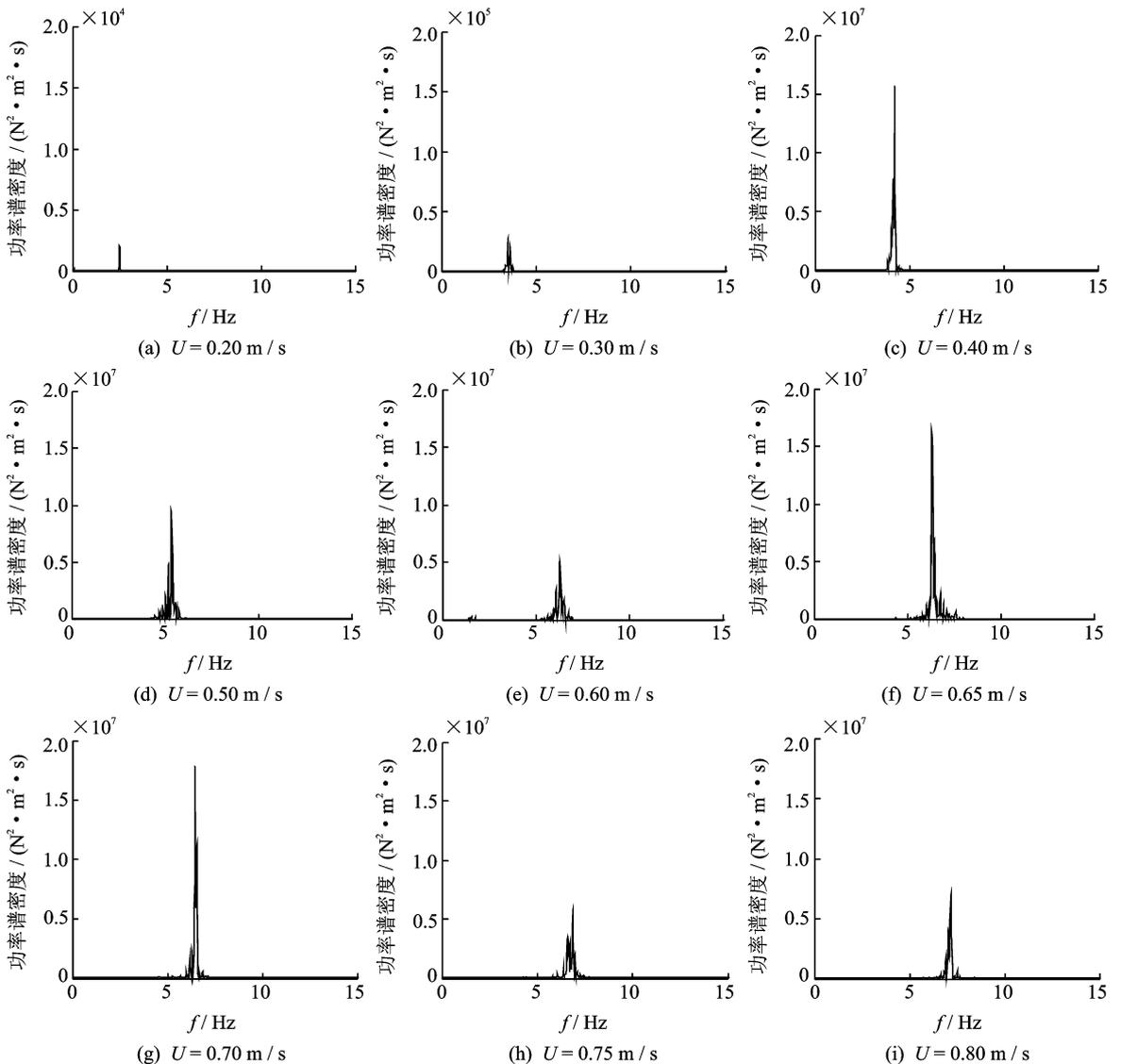


图 9 不同外流流速时立管模型横向振动功率谱密度图

Fig. 9 Power spectrum density of CF direction of the risers under different external flow velocity

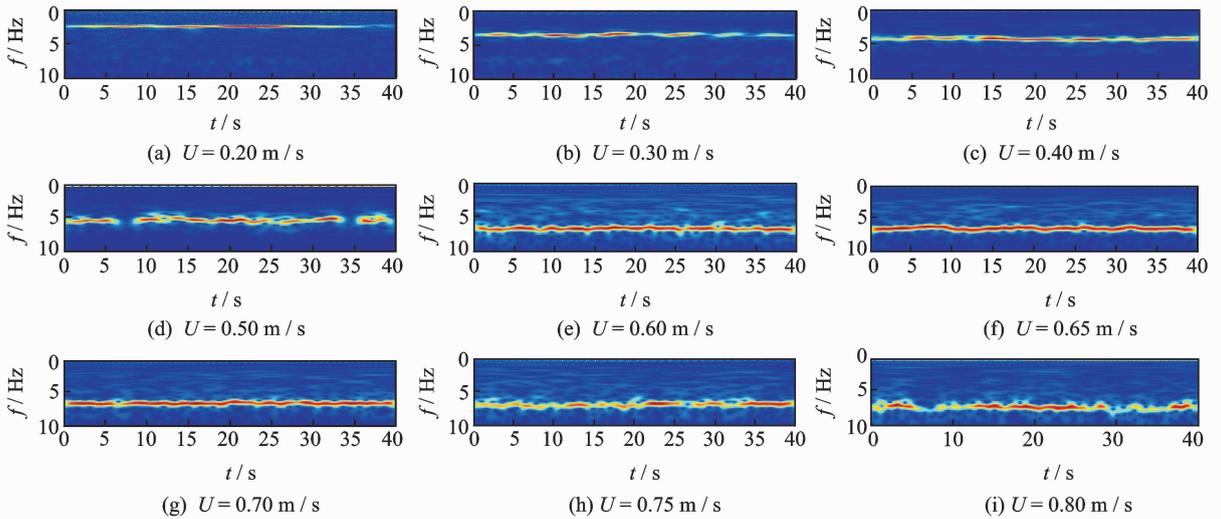


图 10 不同外流流速时立管模型通过小波分析所得横向时间-频率尺度图

Fig. 10 The CF time-frequency plots for different external flow velocity, which were obtained using the wavelet analysis

4.3 无量纲位移及模态响应过程分析

通过所获测点 FBG 传感器应变数据,根据上述模态分析方法,编制分析程序,可得到立管沿长度变化的无量纲位移及模态响应曲线。立管模型位移有效值(RMS)及最大值(MAX)沿立管长度的分布可表示立管响应幅度的变化,并一定程度上反映其疲劳程度。根据频谱分析,选择“锁频”区间内、外的四级典型外流流速 0.40, 0.60, 0.65, 0.80 m/s 进行讨论分析。图 11 为四级不同外流流速时所得位移有效

值及最大值沿立管模型长度分布曲线。

根据图 11 分析可知,随着外流流速的增大,无论是无量纲位移最大值还是有效值在“锁频”区间内、外均体现出规律性的变化和过渡。由于振型函数采用正弦函数,因此在较小流速时,如图典型外流流速为 0.40 m/s 时,立管模型以一阶模态振动,振型曲线呈单峰抛物线状,沿跨中基本呈对称状态。略有不同的是,立管模型在空气中的部分,曲线曲率比水中部分要小,由图 11(a)分析也可发现,在该级外流流速下,幅值较小,最大值仅为 0.36D。

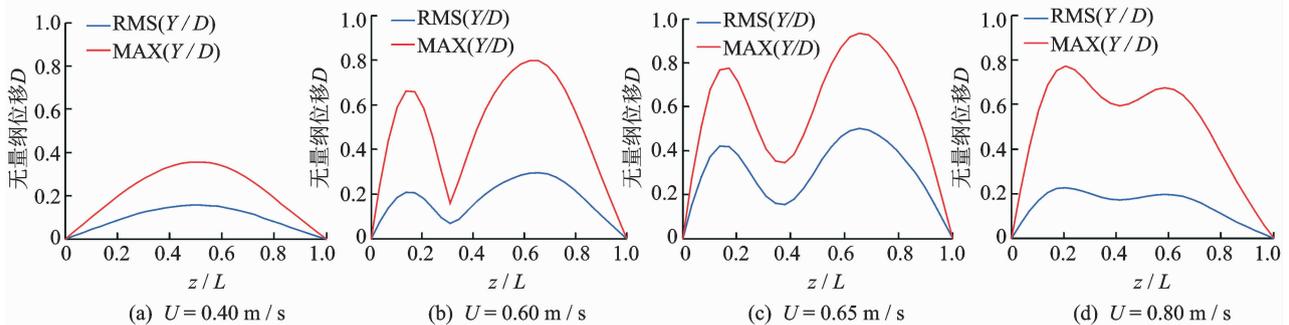


图 11 不同外流流速时立管位移有效值及最大值沿长度分布曲线

Fig. 11 The MAX and RMS displacement/diameter along the riser under different external flow velocity

二阶阵型函数的有效值及最大值曲线在中间有凹陷,对图 11(b), (c) 分析可知,外流流速达到 0.60 m/s 时,立管振动进入二阶“锁频”区间,振型曲线呈双抛物线状,由于模态的叠加,两抛物线结合“鞍状”低谷处位移大于零。由模态曲线也可明显看出,沿立管长度方向位移都有较大增幅,外流流速为 0.40 m/s 时,位移最大值和有效值分别为 0.36D,

0.15D; 而外流流速为 0.60 m/s 时出现明显的突变,对应值分别为 0.8D, 0.30D。而一阶模态的不完全对称也使得二阶曲线的两个峰值存在差异和空间上的不完全对称。由于立管模型仅一半长度置于水中,随着外流流速的增加,两抛物线中间的“鞍状”低谷存在一个沿立管空气部分向水中部分能量传递的过程。在外流流速为 0.65 m/s 时,立管模型处于

“锁频”区间的近中间区域,振幅较外流流速为 0.60 m/s 时略有增加。而立管跳出“锁频”区间后,如图 11(d)所示,振幅下降,但外部激励较大,因此位移较“锁频”前的低流速仍有较大增幅,而“鞍状”低谷峰值增加到一个较大数值,为 $0.59D$,与此时双抛物线峰值较小者相差仅为 $0.08D$,由曲线发展可知在该级外流流速下振动处于向高阶模态的转换状态。

由图 11 可知,立管模型在“锁频”区间前区,即外流流速较小时主要以一阶模态振动,在“锁频”区间发生“共振”现象时以二阶主导频率对应二阶模态振动。为分析沿流速变化区间的位移响应及立管“锁频”区间的敏感性,取立管模型特征测点,求得其沿外流流速变化的位移响应值。图 12 为外流流速区间内立管特征点位移有效值及最大值响应过程散点图。

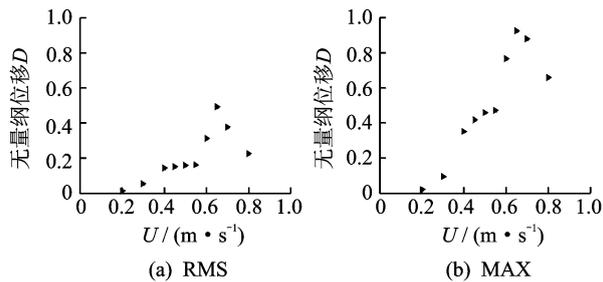


图 12 外流流速区间内立管位移有效值及最大值响应过程散点图

Fig. 12 Response process of RMS and MAX displacement/diameter of the riser during the flow velocity range

由图 12 分析可知,无论是位移响应的有效值还是特征点随外流流速的最大值,随着流速的增加,在示波区间内体现了较为一致的变化规律。在外流流速为 $0.60\sim 0.70 \text{ m/s}$ 区间内,位移响应幅值较其他级流速有较大增幅,且一直处于较高的状态,位移最大值均达 $0.8D$ 左右,而在进入锁频区间之前,随着流速的增大,位移幅值逐渐增大,但幅度较小,特别是在外流流速 $0.40\sim 0.55 \text{ m/s}$ 区间内,流速的增幅较缓,四级外流流速对应位移有效值的增幅均值仅为 $0.01D$,而最大值增幅均值仅为 $0.03D$ 。当外流流速达到 0.60 m/s 时,进入“锁频”区间,位移最大值增为 $0.8D$ 。因此,由上述分析可得,位移的突变具有瞬时性,“锁频”区间的出现具有自激性,而且没有明显的过渡阶段,跳出“锁频”区间时的规律过程与其是相似的,不同的是,跳出“锁频”区间时外部激励较大,使振幅仍保持一个相对较大值。

5 结论

1) 对于两种不同的传感器所得应变时域过程基本一致,有效值基本相同,误差均值仅为 4% ,电阻型传感器在低流速小振幅时的数据漂移及流场的扰动明显。

2) FBG 传感技术能够很好地满足海洋立管的 VIV 过程测试要求,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、主导频率等振动特性。

3) 用 FBG 传感器所得数据分析,清晰反映出伴随流速进程的立管振动模态特征及涡激振动过程,精确得到立管“锁频”区间内、外的模态转换过程;清晰体现峰值细部及波形结合处的能量传递,同时发现立管“锁频”区间产生的瞬时性及自激性规律。

参 考 文 献

- [1] 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. (in Chinese)
- [2] 王俊高,付世晓,许玉旺,等.正弦振荡来流下柔性立管涡激振动发展过程[J].力学学报,2014,46(2):173-182.
Wang Jungao, Fu Shixiao, Xu Yuwang, et al. VIV developing process of a flexible cylinder under oscillatory flow[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2014,46(2):173-182. (in Chinese)
- [3] 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(2):193-211.
- [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(1):3-24.
- [5] 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(3):335-361.
- [6] 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]. Jour-

- nal of Vibration and Shock, 2010,30(2):149-154. (in Chinese)
- [7] 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. (in Chinese)
- [8] Guo H Y, Lou M. Effect of internal flow on vortex-induced vibration of risers[J]. Journal of Fluids and Structures, 2008,24(4):496-504.
- [9] 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)
- [10] 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:自然科学版, 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]. Journal of Ocean University of China: National Science Edition, 2012,42(6):126-132. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] 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)
- [14] 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)
- [15] 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)
- [16] 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)
- [17] 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)
- [18] 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)
- [19] 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)
- [20] Carberry J, Sheridan J, Rockwell D. Forces and wake modes of an oscillating cylinder [J]. Journal of Fluids and Structures, 2001,15(3-4):523-532.



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《干涉对海洋立管涡激振动影响实验研究》(《船舶力学》2015年第19卷第10期)等论文。
E-mail:lipeng@sdust.edu.cn

