

深海立管姿态监测的分布式光纤传感技术

任鹏 申宇 李轩 周智*

(大连理工大学 土木工程学院 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对恶劣服役环境下深海立管水下姿态的不确定性与铺管过程中立管的大变形易损特性, 提出基于分布式光纤应变传感的深海立管姿态在线监测方法。本文采用空间曲线重构算法处理立管表面获取的光纤应变信息, 构建了集传感技术、信息处理、可视化输出于一体的立管姿态监测系统, 通过柔性模型立管对监测方法的有效性进行了验证。结果表明, 本方法能够有效跟踪模型立管的姿态变化, 特别是针对模拟铺管过程的可视化效果良好; 姿态监测数据与实际几何形态比较吻合, 适合作为深海立管长期健康监测与完整性管理的潜在技术手段。

关键词: 深海立管; 姿态监测; 分布式光纤传感; 曲线重构算法;

中图分类号: P752 文献标识码: A

A Distributed Fiber Optic Sensing Technology for Shape Monitoring of Deepwater riser

REN Peng, LI Xuan, SHEN Yu, ZHOU Zhi*

(School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Liaoning, Dalian, 116024)

Abstract: The shape of the deepwater riser is uncertain in a harsh environment, especially the large deformation characteristic during a pipe-laying process. This paper proposed a distributed fiber optic strain sensing based method for on-line shape monitoring of deepwater riser. A type of spatial curve reconstruction algorithm has been utilized to handle the fiber strain obtained on the surface of risers. Thus, an on-line shape monitoring system has been constructed by integrating sensing technology, data process and visualized output. The effectiveness of the method is verified by flexible model riser tests. The test results show that the change of the actual shape can be tracked by this method and the measured data agree well with the actual geometric one. The visualization plays a good role on simulating the pipe-laying process. This study meets the long-term monitoring and the integrity management for deepwater risers potentially.

Keywords: Deepwater riser, Shape monitoring, distributed fiber optic sensing, spatial curve reconstruction algorithm

引言

随着我国南海油气资源的开发逐步拓展到 3000 米左右的深海, 作为油气输送生命线的深海立管大量投入使用。深海立管是具有几何大变形的柔性结构, 由于上部平台位置变化、大尺度涡激运动和海床接触等复杂因素的影响, 铺管作业等复杂工况下的水下姿态处于不确定状态; 采取实时、有效的监测手段掌握深海立管的几何形态, 及时进行状态评定, 对于保障浮式平台的安全作业意义重大。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2011CB013705); 国家科技支撑项目(2011BAK02B01); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0290)

通信作者: 周智(1973.07), 男, 湖南永州人, 教授, 博士生导师, 主要从事结构健康监测研究。
E-mail: zhouzhi@dlut.edu.cn

目前深海立管的水下姿态监测,主要依赖集成在自容式数据记录器(logger)的倾角仪完成^[1];该监测方法容易受到传感器布设区段局部振动的干扰,数据的准确性受到质疑^[2]。Menegaldo 等研发了能够沿立管爬行并装载惯性定位设备的水下机器人,利用机器人爬行轨迹得到立管的几何形态,进行了有限元分析验证^[3]。以上方法获取的立管姿态信息均基于后期的数据处理,难以实时监测。与此同时,光纤传感器凭借无源、耐久、易于封装以及实时获取高精度应变信息等优良性能已应用于深海立管的健康监测:Robert 等研发了 FRP 材料封装的光纤光栅(FBG)传感阵列,用来监测钻井立管顶部的波致疲劳响应^[4];2H Offshore 公司的研究人员已将类似的 FBG 传感器布设在钢悬链立管触地段和流线段,通过监测立管的曲率变化防止屈曲的发生^[5]。可以说,深海立管的光纤传感器布设条件已逐渐具备,但对深海立管水下姿态的实时监测尚未实现^[6]。

近年来,利用已知空间曲率实现三维曲线重构的方法得到了大力发展。在已知初始点位置坐标的前提下,可以通过逐段积分并递推得到各段端点位置坐标,并最终拟合出曲线^[7]。文献^[8]改进了上述算法,利用构建每一微段的运动坐标系及其密切平面,节省了计算时间并减小了累积误差。已应用于太空机械臂^[9]与废墟搜救机器人^[10]等工程领域。该算法在符合平截面假定的条件下,根据应变与曲率的线性关系使用 FBG 应变传感器记录并换算得到曲率数据,通过离散点曲率插值获得每一微段曲率。如果测试距离过长,需要进行较多插值,造成了大量累积误差。本文基于全分布式光纤的布里渊光时域分析(BOTDA)技术弥补 FBG 应变传感器空间覆盖与复用能力上的不足,获取立管表面的全尺度应变信息。采用空间曲线重构算法得到立管的几何坐标,构建集传感技术、信息处理、可视化输出于一体的立管姿态在线监测系统。通过柔性模型立管实验对比验证了本监测方法的有效性。

1 基于分布式光纤传感的立管姿态监测方法

1.1 布里渊散射分布式应变传感原理

Horiguchi 等在 1989 年提出了基于受激布里渊散射放大效应的 BOTDA 技术^[11],已成为众多基于光纤光散射的分布式传感技术中较为成熟、稳定的一种^[12]。布里渊散射是光在光纤中传播时,与光纤中不规则的微观粒子发生非弹性碰撞产生的光散射现象,也可以简单描述为入射到介质中的光波场与介质内热激励声波相互作用而产生的一种光散射现象。由于声波的存在,导致光纤材料的密度发生变化,从而对光纤折射率产生周期性的调制。声波的传播,使布里渊散射光的频率产生一个多普勒频移,即称为布里渊频移^[13]:

$$V_B = 2n\nu_A / \lambda_p \quad (1)$$

式中: λ_p 为泵浦光波长; n 为光纤介质的折射率; ν_A 为光纤中声速。其中 n 和 ν_A 均与光纤所处的温度场与应变场有关。研究表明,忽略应变与温度的耦合影响,布里渊频移与应变、温度之间关系可表示为:

$$\Delta V_B = C_\varepsilon \Delta \varepsilon + C_T \Delta T \quad (2)$$

式中: ΔV_B 表示布里渊频移; C_ε 与 C_T 分别表示应变与温度的灵敏度系数,本研究中对一般裸光纤标定结果为 $C_\varepsilon = 0.05\text{MHz}/\mu\varepsilon$ 以及 $C_T = 1.0\text{MHz}/^\circ\text{C}$; 在温度变化不大或温度变化已知的条件下,可忽略右边第二项,得到 ΔV 与 $\Delta \varepsilon$ 的线性关系。据此可得到待测物表面的光纤全尺度应变分布。

1.2 基于分布式应变信息的曲线重构算法

空间曲线的重构算法源于微分几何原理，即曲线的几何形态可由其曲率唯一确定。曲率则根据传感器获取的应变信息计算得到^[9-10]。如受弯圆管外半径为 R 、某微段外壁的圆弧轴向正应变 ε_1 、圆弧弧度为 θ 。则该微段曲率半径 ρ （曲率表示为 ρ^{-1} ）与轴向正应变关系可根据平截面假定：即中性面内受弯前后不发生轴向拉伸和压缩，其长度为 $\theta\rho$ ；管壁外侧如发生轴向拉伸，其长度为 $\theta(\rho+R)$ 。根据工程应变定义：

$$\varepsilon_1 = \frac{\theta(\rho+R) - \theta\rho}{\theta\rho} = \frac{R}{\rho} \quad (3)$$

立管通常受到拉弯作用，为排除单根光纤拉伸应变 ε_0 的影响，采用与上述 ε_1 呈中性轴对称布置的第二根光纤测试 ε_2 ，则两者相减同样得到：

$$\Delta(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) = \frac{\theta(\rho+R) + \varepsilon_0\theta\rho - \theta\rho}{\theta\rho} - \frac{\theta(\rho-R) + \varepsilon_0\theta\rho - \theta\rho}{\theta\rho} = \frac{2R}{\rho} \quad (4)$$

上式可以看出测试应变与立管曲率呈理论上的线性关系，而压弯作用时与上述同理。另外，考虑空间三维曲率，可沿中性轴间隔 90° 布置另一对光纤。两对光纤得到两个空间正交曲率，经叠加计算得到所需曲率。本文采用分布式光纤应变传感器用来弥补 FBG 应变传感器空间覆盖与复用能力上的不足，为曲线重构算法提供较完备的实测数据以减小累积误差。本文采用了 MATLAB 软件平台实现了文献[8]所述算法。算法封装为如下的函数：

$$\text{function []} = \text{get Curve3}(kA, kB, s, op) \quad (5)$$

其中， kA 与 kB 分别是两个正交方向的曲率数组， s 为 BOTDA 的空间分辨率， op 为可选参数，用于选择输出有限元软件运行脚本。BOTDA 测量的应变数据，通过 (3) 或 (4) 式计算得到曲率值，经 MATLAB 程序运算即可获得有限元软件运行脚本文件，以实现可视化的模型输出。算法流程如图 1 所示。

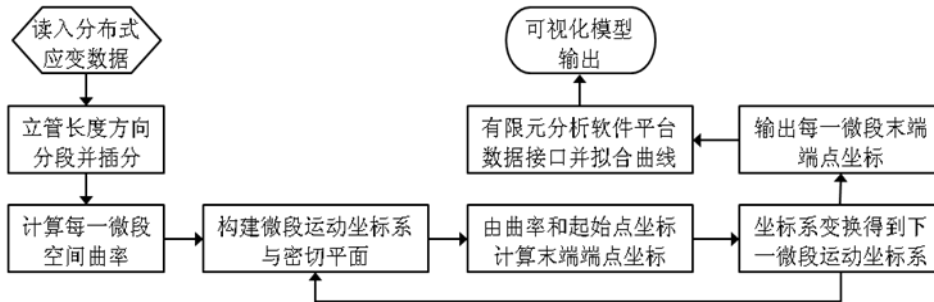


图 1 基于分布式应变数据的曲线重构算法流程图

1.3 立管姿态在线监测系统

为实现深海立管几何形态的在线监测方法，本文的立管姿态在线监测系统由光纤布里渊分布式应变传感器、分布式光纤解调仪以及曲线重构程序与可视化平台三个部分组成，如图 2 所示。分布式应变传感器为轴向呈圆周角度 90° 成对布置。本文的验证阶段，布设方式以表面粘贴为主；使用瑞士 OMnisens 公司 DiTeSt STA 202 分布式光纤解调仪，测试的空间分辨率为 0.5 m；上述空间曲线重构算法及其可视化基于 MATLAB 软件编程实现。

可视化技术指的是运用计算机图形学和图像处理技术，将数据换为图形或图像显示出来，并进行交互处理的理论方法和技术。在土木工程方面的应用包括几何模型可视化与结构损伤可视化等。对几何模型进行可视化，就是将可见或隐蔽的工程结构建立相应的数值模型。大多数通用有限元分析软件的前处理平台都具有前者的功能。然而，对于深海立管这类隐蔽在水下且几何形态不确定的结构对象，则需要结合健康监测手段，将实测的空间姿态数据可视化在相应软件平台上，以便建立真切、合理的数值模型。

本文基于 ABAQUS 有限元软件平台实现模型立管实际姿态的可视化^[14]。与其他通用软件相比，ABAQUS 尤以强大的非线性分析能力见长。当用户使用 ABAQUS/CAE 的图形用户界面进行前处理建模时，ABAQUS/CAE 会记录每一步操作相应的命令，这些命令反映了用户创建的几何体参数，有限元建模的每一个设置，包括所有对话框中的选择。这些命令保存在 temp 文件夹下 .rpy 文件中，是 Python 语言格式的脚本，更改后缀名为 .py，得到可以运行的 ABAQUS 脚本文件。脚本文件是一个文本文件，可以使用任何文本编辑软件进行修改，也可以使用程序进行修改。

模型立管姿态监测的可视化实现分为以下两个部分：利用 MATLAB 编写程序，将曲线重构算法的输出数据作为关键节点数据写入脚本文件；在主程序中利用上述脚本文件调用 ABAQUS/CAE 图形用户界面进行前处理建模。

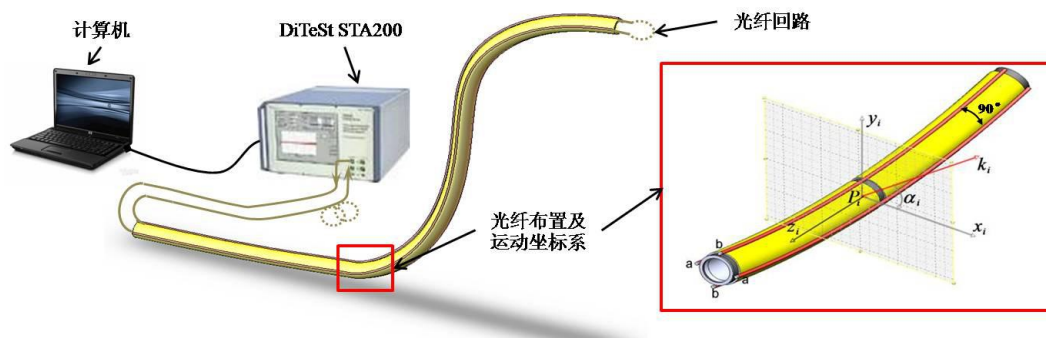


图2 模型立管姿态在线监测系统示意图

2 深海立管姿态监测的模型验证

2.1 实验材料与准备

为验证上述基于分布式光纤传感的立管姿态监测方法与系统的有效性，本文利用若干聚合物柔性管材（ $\Phi 33\text{ mm}$ ）进行实验验证。光纤传感器分别沿外表面轴向对称布置，使用 502 胶将光纤传感器粘结在事先刻好的微槽中，如图 2 中 b-b 的形式，使对称布置的两传感器获得数值相等的反向应变，便于标定。为了进一步保护好光纤，用硅胶对刻槽进行填充，等待 24 小时以上硅胶凝结后再进行实验。光纤表面粘贴布置如图 3 所示。

采用人为固定和夹具夹持的方法，将模型立管从直线状态逐步弯曲成若干姿态，其中最大弯曲状态呈尖锐圆弧，如图 4 所示。标定期间，利用管材与地面参照物划线比较的方法，令两条光纤轴向形成的平面与地面保持水平，防止横向弯曲影响标定结果。与此同时，将预先选定的管材区段描画在粘贴于地面的网格纸上或由米尺等测量实际坐标值。立管姿态在线监测系统首先获取立管表面的光纤应变信息，经过多项式插值处理并计算得到曲率数据，通过空间曲线重构算法得到立管的几何坐标，必要时将进行可视化输出。在不考虑可视化的情况下，一次曲线坐标数据输出时间依光纤解调仪测试时间所定。

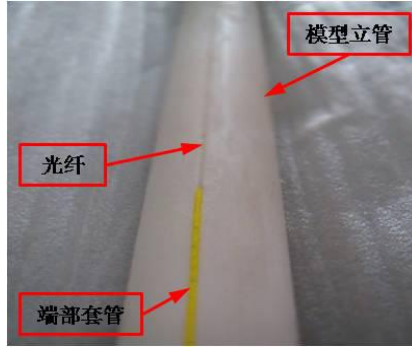


图3 模型立管的光纤表面粘贴布置



图4 模型立管测试实物图

2.2 传感器的标定

对粘贴在模型立管表面的光纤传感器进行标定实验，目的是为验证本文分布式光纤传感器测试数据与立管曲率在大变形过程中是否成线性关系，即能否符合工程上的平截面假定。

模型立管采用易发生塑性大变形的 PPR 管材，测试得到模型立管选定截面的光纤数据与立管实际曲率关系如图 5 所示。在线性拟合后得到标定系数为 343 MHz/mm^{-1} 、拟合系数为 99.83%。可知分布式光纤受到拉伸与压缩后布里渊频移与曲率变化量呈线性关系。虽然 PPR 管材发生大变形，材料进入塑性阶段；但是表面布设的光纤仍然忠实反映应变变化，并且测试应变与立管曲率仍呈线性关系。可以预测，在立管为均匀直径（或为不发生大规模屈曲）的条件下，符合工程上的平截面假定，能够进一步应用曲线重构算法进行在线监测研究。

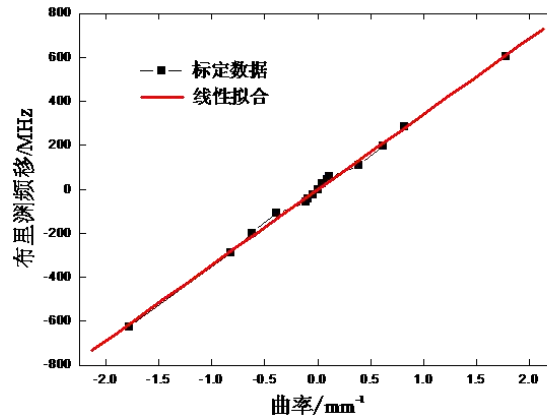


图5 光纤布里渊频移随曲率的变化关系

2.3 悬链线模型立管的姿态监测

考虑钢悬链式深海立管（SCR）逐渐成为国内外油气开发的主流设施，本文利用较长（7 m）的 UPVC 管材模拟水下自由作业工况的悬链线深海立管。考虑到管材条件的限制，模型立管的悬链线几何形态很难发生三维方向的曲率变化，这与实际情况中的 SCR 相类似。基于以上，本文仅分别进行模型立管两个正交方向的姿态监测。观察表明，在不造成管材大幅度扭转的条件下，柔性模型立管可以较为准确地模拟实际立管的姿态变化。实验中光纤布置与数据测量方式与上文相同，其中实际坐标值由米尺等测量工具得到。图 6 是实际测量的悬链线模型立管姿态曲线与在线监测结果对比。两者图示 X 轴和 Y 轴方向的相对误差均不超过 5%，证明了本监测方法的定位误差在工程允许的范围内。

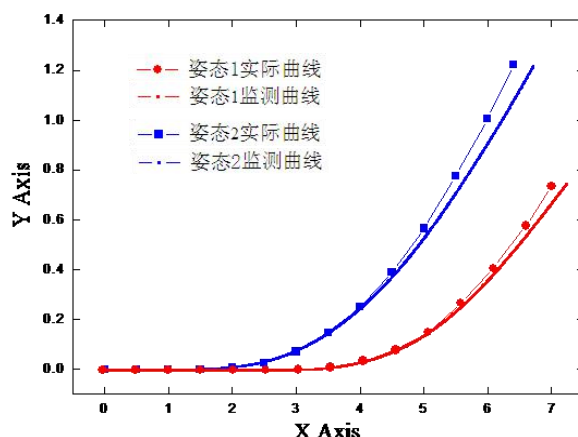


图6 模型立管实际曲线与监测结果对比

2.4 模拟铺管过程的大变形监测及可视化

在上文研究的基础上，考虑铺管作业（尤其为卷轴铺管和“S”型铺管）中立管会进入塑性冷弯阶段，大变形过后钢管产生不可忽略的残余应变。拟利用 PPR 管材（长度 4 m）模拟铺管过程的大变形，研究本文方法在铺管过程中实时监控立管变形与应力的可行性，并实现变形过程的可视化。该实验进程与传感器标定实验基本相同（不再赘述），受拉光纤的应变云图如图 7 所示（初始姿态设为 0），该应变数据为光纤光路上离散点监测的多项式插值结果，可直接作为曲线重构算法的输入数据。

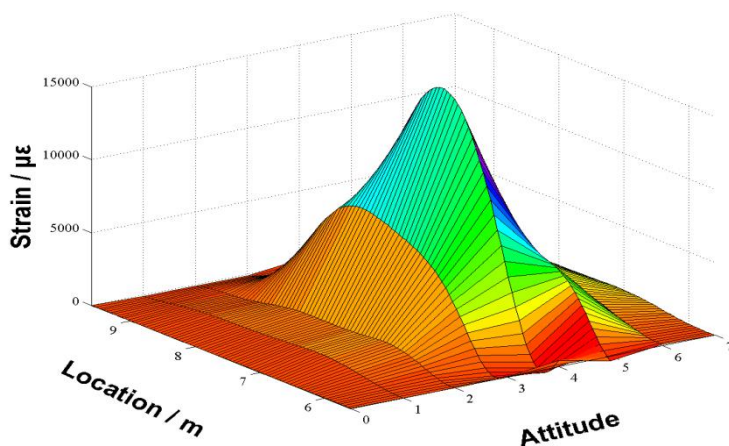


图7 模型立管姿态连续变化的分布式光纤应变测试数据

结构局部发生塑性大变形并卸载后残留的塑性应变称为残余应变。为获取模型立管上的残余应变，将上述姿态（Attitude）5、6 和 7 分别与姿态 3、2 和 1 变形相同，是人为卸载回复后应变分布。研究表明^[15]，由铺管冷弯造成的残余应变在很大程度上减小了立管的延性断裂阻力。对立管进行状态评定时，应该考虑塑性应变历史的影响。图 8 是人为将模型立管回复到原姿态 2 的残余应变分布。最大残余应变发生在立管的受弯曲率（即塑性变形）最大位置。数据中的负值可能由于立管变形不均匀，该位置处加载时未受力，在卸载时人为受力所致。

图 9 是模型立管大变形过程的实际姿态与可视化图形对比，有限元模型与实物的相对误差在允许范围内，表明可视化效果良好。实验证明了本文立管姿态监测方法进行铺管过程大变形监测的可行性。

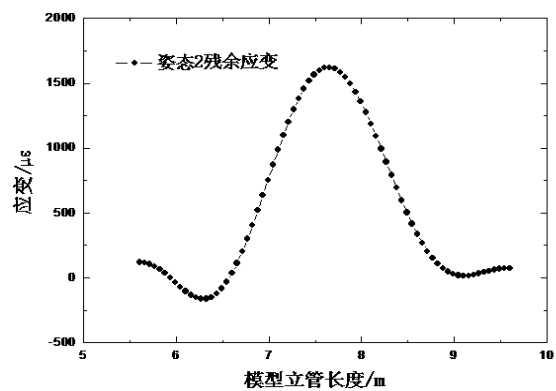


图 8 模型立管过弯大变形后残余应变分布

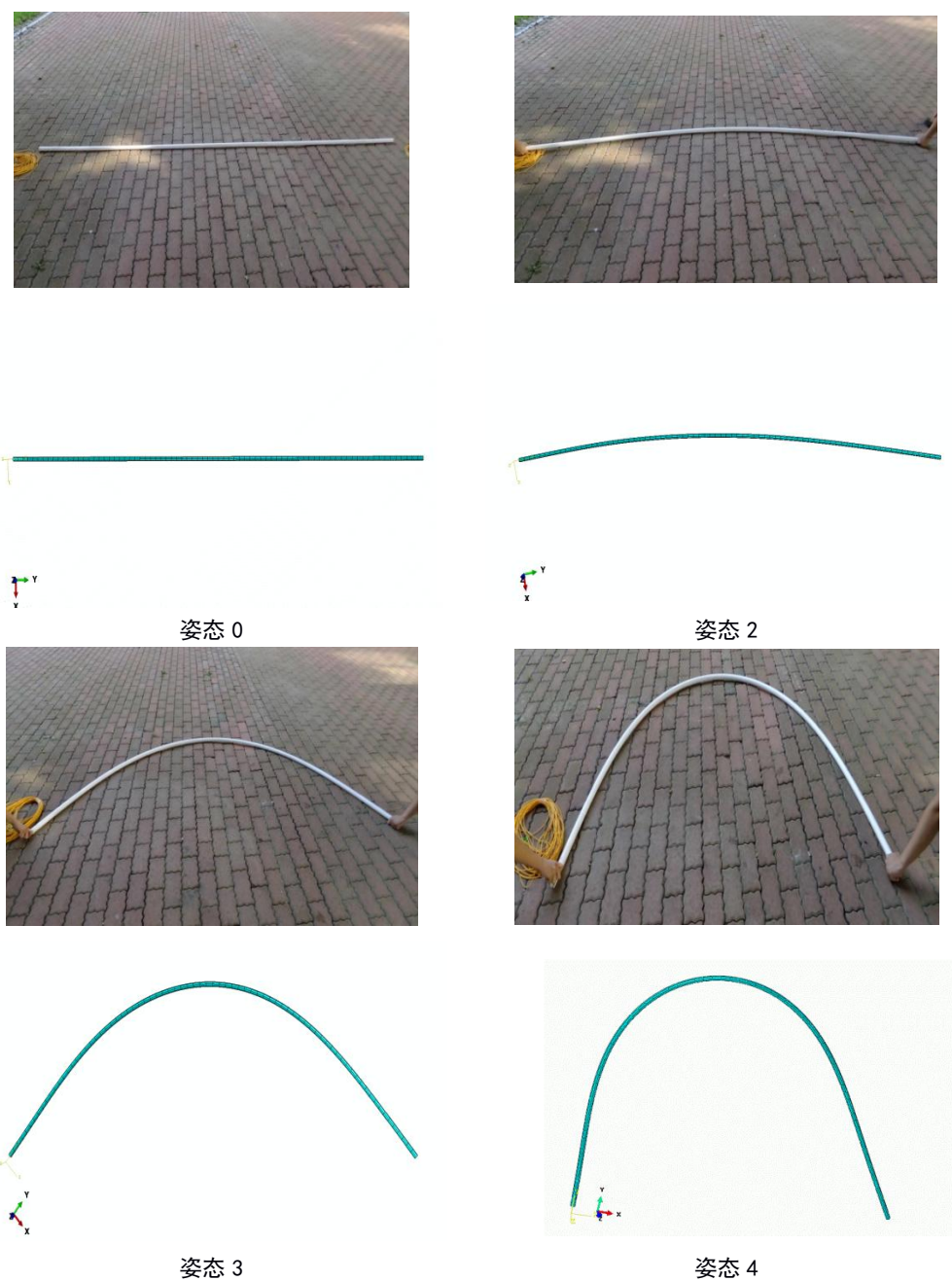


图 9 模型立管实际姿态与可视化有限元模型对比

3 结论

本文针对深海立管水下姿态的不确定性与铺管过程中立管的大变形易损特性,提出基于分布式布里渊光纤传感技术以及结合空间曲线重构算法的深海立管姿态监测方法。利用聚合物柔性管材进行了两种立管作业工况下的验证性实验,实验结果表明:姿态监测数据与模型立管实际几何形态吻合较好,误差在工程允许范围内;模拟铺管过程的可视化效果良好。本文方法充分利用了分布式光纤传感技术实时、全尺度、高精度测试的优点,有效获取并处理深海立管的应变传感信息,可以为深海工程的长期健康监测与完整性管理提供了技术储备。

参考文献:

- [1] An P, Willis N, Hatton S. Standalone subsea data monitoring system [C]. 6th Underwater Science Symposium, Aberdeen University, Scotland, 2003.
- [2] Li S, Tran L, Enuganti P. Deepwater SCR benchmarking methodology [C]. 30th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Rotterdam, Netherlands, 2011.
- [3] Menegaldo L L, Panzieri S, Neves C. Reconstruction of riser profiles by underwater robot using inertial navigation [J]. Journal of Robotics, 2007, 1-15.
- [4] Robert D, Moros T. The successful development and deployment of a reusable composite shape sensing mat to provide real-time load and cumulative fatigue data on deepwater production risers in the Gulf of Mexico [C]. Offshore Technology Conference, Houston, TX, 2006.
- [5] Karayaka M, Chen J, Blankenship C, Ruf W, Podskarbi M. Tahiti online monitoring system for steel catenary risers and flowlines [C]. Offshore Technology Conference, Houston, TX, 2009.
- [6] Ren P, Zhou Z. A State-of-the-art review on structural health monitoring of deepwater floating platform[J]. Pacific Science Review, 2012, 14(3): 253-263.
- [7] 陈建军, 沈林勇, 钱晋武, 吴家麒. 已知离散点曲率的曲线拟合递推方法[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2003, 9(2): 123-126.
- [8] 朱晓锦, 季玲晓, 张合生, 金晓斌, 易金聪. 基于空间正交曲率信息的三维曲线重构方法分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(2): 305-313.
- [9] 朱晓锦, 陆美玉, 赵晓瑜, 樊红朝. 太空机械臂振动形态三维重构算法及可视化分析[J]. 2009, 21(15): 4706-4713.
- [10] 余见能, 沈林勇, 张震, 章亚男. 废墟搜救机器人形位检测系统[J]. 2011, 17(3): 253-258.
- [11] Horiguchi T, Kurashima T, Tateda M. A technique to measure distributed strain in optical fibers [J]. IEEE Photonics technology Letters, 1990, 2: 352-354.
- [12] 张旭苹. 全分布式光纤传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [13] 周智, 何建平, 欧进萍. 输油管道冻胀融沉监测的光纤布里渊传感技术[J]. 压电与声光, 2010, 32(4): 543-546.
- [14] 庄茁, 由小川, 廖剑晖等. 基于ABAQUS的有限元分析和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [15] Eikrem P A, Zhang Z L, Østby E and Nyhus B. Numerical study on the effect of prestrain history on ductile fracture resistance by using the complete Gurson model [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75: 4568-4582.