

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905167

# 基于分布式光纤传感器的管道受弯变形监测试验研究\*

许滨华<sup>1,2,3</sup>, 何宁<sup>1,3</sup>, 何斌<sup>1,3</sup>, 李登华<sup>1,3</sup>, 吴帅<sup>4</sup>

(1. 南京水利科学研究院 岩土工程研究所 南京 210029; 2. 河海大学 土木与交通学院 南京 210098;  
3. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室 南京 210029; 4. 南京嘉兆仪器设备有限公司 南京 210037)

**摘要:** 科学合理的管道安全监测技术对管道工程运行具有重要意义, 开展了基于分布式光纤传感技术的管道受弯变形监测试验研究。针对现有分布式光纤变形计算方法的不足, 提出了分布式光纤监测管道受弯变形计算方法, 编写了基于 MATLAB 的分布式光纤管道受弯变形计算程序。研究结果表明, 基于分布式光纤传感技术的管道受弯变形监测方法整体测量精度较高, 在变形量小于 180 mm 范围内时绝对误差小于 4 mm, 平均相对误差在 2% 以内; 当变形量较大时, 绝对误差随之增大, 但是平均相对误差在 3.2% 以下。初步开展了基于分布式光纤传感技术的管道受力分析, 结果表明模拟所得管道剪力模式与理论模式以及实际情况较为吻合。基于分布式光纤传感技术的受弯变形监测方法测量精度较高, 误差较小, 能够满足管道受弯变形监测要求, 具有较好的应用前景, 是一种理想的变形监测技术, 同时该方法也能拓展应用到管道受力等其他安全分析中。

**关键词:** 管道安全; 分布式光纤传感技术; 变形监测; MATLAB

**中图分类号:** TH744 TP212 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

## Experiment study on pipeline bending deformation monitoring based on distributed optical fiber sensor

Xu Binhua<sup>1,2,3</sup>, He Ning<sup>1,3</sup>, He Bin<sup>1,3</sup>, Li Denghua<sup>1,3</sup>, Wu Shuai<sup>4</sup>

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Key Laboratory of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and Safety Control Techniques, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China;  
4. Nanjing Cazor Instruments Co., Ltd, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** Scientific and reasonable pipeline safety monitoring technology is of great significance to pipeline engineering operation. This paper carries out the experiment study on pipeline bending deformation monitoring based on distributed optical fiber sensing technology. Aiming at the deficiency of existing distributed fiber deformation calculation method, a calculation method of pipeline bending deformation monitoring using distributed optical fiber sensor is proposed, and the calculation program of pipeline bending deformation using distributed optical fiber sensor based on MATLAB is written. The study results show that the proposed pipeline bending deformation monitoring method based on distributed optical fiber sensing technology has high overall measurement accuracy. Within the bending deformation range of 180 mm, the absolute error is less than 4 mm and the average relative error is within 2%. When the bending deformation is getting larger, the absolute error increases, however the average relative error is below 3.2%. The pipeline force analysis based on distributed optical fiber sensing technology was carried out preliminarily. The results show that the simulated pipeline shear force pattern is in good agreement with the theoretical pattern and the actual situation. The proposed pipeline bending deformation monitoring method based on distributed optical fiber sensing technology possesses high measurement accuracy and small error, which can meet the requirements of pipeline bending deformation monitoring and has good application prospect. The method is an ideal deformation monitoring technology and can also be extended to the application of other safety analysis such as pipeline force analysis and etc.

**Keywords:** pipeline safety; distributed optical fiber sensing technology; deformation monitoring; MATLAB

收稿日期: 2019-05-20 Received Date: 2019-05-20

\* 基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFC0405100)、国家重点研发计划课题(2018YFC1508505)、国家自然科学基金面上项目(51579152)  
资助

## 0 引言

管道工程是当今社会生活和经济发展的的重要组成部分,其安全关系国计民生安全<sup>[1-2]</sup>。如城市供水管道星罗棋布分布于城市全域,其安全是城市安全的重要保障;西气东输管线长度绵延数千公里,保证沿线管道安全对保障我国中、东部能源安全具有十分重要意义<sup>[3-4]</sup>;海上油气田开发后其油气需通过海底管道将油气资源输送至陆地,其管道安全是海上油气田开发生产的重要保障<sup>[5]</sup>;长距离引调水工程中采用大直径PCCP管和钢管进行输水,其管道安全是保证引调水工程水量和水质安全的重要条件<sup>[6-7]</sup>。

管道工程具有管线长、分布广、管线沿途地形地质条件复杂等特点,管线沿途难免会出现由于管道基础地质条件变化引起的不均匀沉降从而导致管道工程出现安全隐患。海底输油管道工程所处环境和海底地质条件复杂,伴随复杂的海流条件,导致海床不稳定,冲淤频繁,甚至出现管道底部周围冲刷淘空的现象导致管道发生受弯变形,给管道的安全运行带来严重的安全隐患;南水北调中线工程进京段和珠三角水资源配置工程等长距离引调水工程的管道工程采用输水管道管径巨大,下部地质条件复杂,有的建于软土地基上,部分是高压的有压输水管道,其复杂的地质条件和运行条件及其可能的施工缺陷都将给输水管道的安全运行带来安全隐患<sup>[5,8-11]</sup>。

城市供水管道、引调水工程的输水管道和海底输油管道等管道工程的管道大多数处于地下或海底,无法像陆地管道一样进行巡检,如管道工程安全隐患不能及时发现,可能使管道发生破坏,甚至断裂,将给生活生产带来严重后果。如城市供水管道常发生的爆管事故严重影响城市正常供水,甚至引发安全事故。海底输油管道如果发生破坏或断裂,不仅导致停产而造成重大经济损失,且将污染海洋环境,其后续修复工程、清污费用、海洋生态恢复平衡等费用也极其昂贵,安全成本巨大<sup>[12]</sup>。科学合理的管道安全监测技术对管道工程运行具有重要意义。

管道受基础沉降变形、环境变化等因素的影响,管道会产生受弯变形,管道受弯变形监测是管道工程安全监测中最基础、最重要的监测内容之一<sup>[13]</sup>。分布式光纤传感技术具有分布式、长距离、实时高精度等特点,该技术逐渐在工程等领域推广应用<sup>[14-16]</sup>。近年来,许多学者逐步开展采用分布式光纤传感技术监测长距离管道工程的管道安全试验研究和工程应用研究工作,也取得了一些成果。由于分布式光纤传感技术最直接获得的是光纤沿线的应变分布,目前的成果主要集中于应变监测等方面成果<sup>[9,17-19]</sup>,而在管道整体受弯变形的研究一方面研究尚少,另外一方面目前的变形计算精度较低,有的相对误差甚至高达10%<sup>[20-24]</sup>。实际管道的安全准确预测主要是

和管道的变形和受力有关,基于以上研究现状,本文将开展管道受弯变形方面的试验研究。

## 1 光纤测量系统及试验方案设置

### 1.1 布里渊分布式光纤传感原理

光在光纤中传播会产生散射现象,主要有瑞利散射(Rayleigh scattering)、拉曼散射(Raman scattering)和布里渊散射(Brillouin Scattering)。布里渊散射光同时对应变和温度敏感,应变和温度产生变化时,背向布里渊散射光将会产生频移,通过测量测定脉冲光的背向布里渊散射频移量可以实现分布式应变、温度测量<sup>[25-26]</sup>。研究表明布里渊频移和功率与光纤承受的应变和所处的环境温度在一定条件下呈线性关系,表示为:

$$\Delta v_B = C_{vT} \Delta T + C_{v\varepsilon} \Delta \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{100 \Delta P_B}{P_B(T, \varepsilon)} = C_{PT} \Delta T + C_{P\varepsilon} \Delta \varepsilon \quad (2)$$

式中:  $\Delta v_B$  为布里渊频移变化量;  $\Delta T$  为温度变化量;  $\Delta \varepsilon$  为应变变化量;  $C_{vT}$  为布里渊频移温度系数;  $C_{v\varepsilon}$  为布里渊频移应变系数;  $\Delta P_B$  为布里渊功率变化量;  $C_{PT}$  为布里渊功率温度系数;  $C_{P\varepsilon}$  为布里渊功率应变系数。在已知温度和应变系数的情况下,通过测定布里渊信号的频移和功率,就可以通过式(1)、(2)得到温度和应变信息。

目前基于布里渊散射的应变、温度传感技术主要包括:1) 基于光时域反射(Brillouin optical time domain reflectometer, BOTDR)的分布式光纤传感技术;2) 基于光时域分析(Brillouin optical time domain analyzer, BOTDA)的分布式光纤传感技术。BOTDR和BOTDA技术可以实现被测量位置的空间定位。根据入射光(泵浦光)强度的不同,布里渊散射可分为自发布里渊散射和受激布里渊散射(SBS)。BOTDR技术是基于自发布里渊散射,仅需单光源,可单端检测。BOTDA技术是基于受激布里渊散射(SBS)原理,需要双光源,双端检测。BOTDA技术根据脉冲光和连续光之间的相互作用,使得布里渊频谱受激放大,因此可以获得比BOTDR技术更高的空间分辨率和精度<sup>[12-13]</sup>。本文采用的是瑞士OMNISENS公司产的DiTeSt分布式光纤监测系统,该系统是基于SBS原理的BOTDA技术,其应变测量最小空间分辨率0.1 m,准确度为 $\pm 10 \mu\varepsilon$ 。

### 1.2 管道受弯变形试验方案设置

本试验材料采用管径为325 mm,壁厚为6 mm的3PE防腐管道。为了探究基于分布式光纤传感技术测量管道因受弯产生变形量这种方法在不同管道长度的适用性,本试验中采用48和96 m两种管道模型。试验管道分别在每隔12 m处用钢支架支撑,支架可以控制管道的受弯变形,并且在钢架上粘贴了标尺用于测量钢管的竖

向受弯变形量。为了防止光纤传感器在管道吊装过程中受损,并且管道在吊装到位后需要进行拼接,因此传感光纤是在管道吊装在支架并拼接完成后粘贴铺设的。考虑到管道底部压在钢支架上不利于粘贴传感光纤,因此传感光纤设计在管道顶部即 12 点钟方向和管道的 9 点钟方向两处采用回行的布设方式布设。

光纤传感器的应变传递效率是本文变形监测计算的主要影响因素之一,是决定测量精度一个关键指标。如

果传感光纤的应变不能真实地反映管道对应位置的应变,测量精度将受到影响。根据何宁等<sup>[27]</sup>对光纤传感器应变传递效率研究,表明利用 E44 环氧树脂和 593 固化剂混合液作为粘贴胶剂将传感光纤粘贴在钢结构上应变传递效率较高,与应变片所测数据吻合程度较高。本文传感光纤采用 0.6 mm 的紧套光纤,光纤传感器与管道的粘贴方式采用上述方法进行粘贴。试验装置如图 1 所示。

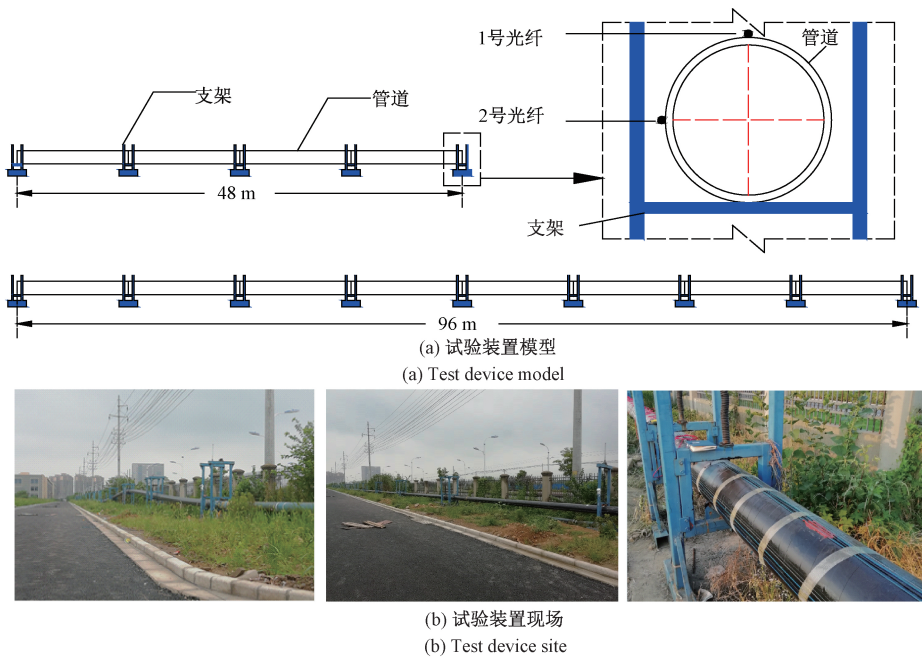


图 1 试验装置  
Fig.1 The test device

试验中管道的两端分别焊接固定在支架上,然后通过支架控制管道中点的变形量设计 5 种管道受弯变形形式,如表 1 所示。在试验前对测量光纤进行初值测定,然后在每组变形过程完成后通过观测房内的 DiTeSt 分布式光纤测量系统对变形后的管道应变进行测量,测量次数为 6 次,如图 2 所示。结合所测应变数据通过本文的计算方法算得管道的受弯变形分布,同时通过支架上的变形测量装置得到管道的实际变形量(每隔 12 m 有一测点)。对比分析两种测量方法得到的变形数据,进而评价光纤测量技术的可行性和适用性。

表 1 管道模型变形设置方案

| Table 1 Test setting scheme of pipeline model deformation |  | 管道中点变形量/mm |       |       |       |       |
|-----------------------------------------------------------|--|------------|-------|-------|-------|-------|
| 管道模型                                                      |  | 第 1 组      | 第 2 组 | 第 2 组 | 第 4 组 | 第 5 组 |
| 长度/m                                                      |  |            |       |       |       |       |
| 48                                                        |  | 5          | 40    | 180   | 540   | 800   |
| 96                                                        |  | 10         | 80    | 120   | 360   | 800   |



图 2 光纤测量系统  
Fig.2 The optical fiber measurement system

2 试验数据计算及处理方法

2.1 管道受弯变形计算方法

将管道的受弯挠度变形简化为梁发生弯曲时的变形,假设以管道轴线为  $x$  轴,由材料力学可知当梁的跨高

比较大的时候,可用纯弯曲理论来计算横截面上的弯矩<sup>[28]</sup>,即管道发生弯曲变形时,在任意一截面处的弯矩表示为:

$$M(x) = \frac{I_z E \varepsilon(x)}{y(x)} \quad (3)$$

式中:  $M(x)$  为某截面处管道弯矩;  $I_z$  为管道截面对中性轴  $z$  的惯性矩(各截面基本一致);  $E$  为管道材料弹性模量(各截面基本一致);  $\varepsilon(x)$  为某截面任意一点的应变;  $y(x)$  为某截面对应该点相对中性面的距离。

本试验分别在管道顶部的12点钟方向沿轴线布设了1号光纤,在9点钟方向布设了2号光纤。由分布式光纤传感技术测量原理可知,可以由测量的频移量得到传感光纤沿着轴线各处的应变值,在此说明本试验中所测的应变值都是相对初始状态的相对应变值,由于管道在初始状态已存在因自重引起的拉伸应变,因此每次变形后所测应变实为扣除了自重作用产生的应变,可认为自重作用对本文管道变形计算没有影响。由式(1)可知,BOTDA的测量值包含了因环境温度变化造成测量值上的假应变和因结构变形而产生的真实应变两部分,假定BOTDA的测量值为应变测量值  $\varepsilon_m$ , 则该应变测量值由两个部分组成:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_e + \varepsilon_s \quad (4)$$

式中:  $\varepsilon_m$  是BOTDA对光纤的应变测量值;  $\varepsilon_e$  是环境温度变化造成测量值上的假应变;  $\varepsilon_s$  是光纤受结构变形而产生的真实应变。

假设在管道某截面1号光纤和2号光纤的应变测量值分别为  $\varepsilon_1(x)$  和  $\varepsilon_2(x)$ 。由式(4)可知,1号光纤和2号光纤的应变测量值可表示为:

$$\varepsilon_1(x) = \varepsilon_{1e}(x) + \varepsilon_{1s}(x) \quad (5)$$

$$\varepsilon_2(x) = \varepsilon_{2e}(x) + \varepsilon_{2s}(x) \quad (6)$$

能够真实反映结构变形产生的应变只与式(5)、(6)中的第一部分有关。因此,在管道某截面的弯矩可由式(3)改写为:

$$M(x) = \frac{I_z E \varepsilon_{1e}(x)}{y_1(x)} = \frac{I_z E \varepsilon_{2e}(x)}{y_2(x)} = \frac{I_z E [\varepsilon_{1e}(x) - \varepsilon_{2e}(x)]}{y_1(x) - y_2(x)} = \frac{I_z E [(\varepsilon_1(x) - \varepsilon_{1s}(x)) - (\varepsilon_2(x) - \varepsilon_{2s}(x))]}{y_1(x) - y_2(x)} \quad (7)$$

式中:  $y_1(x)$  和  $y_2(x)$  分别是某截面1号和2号光纤相对中性面的距离。在同一个截面上,可以认为所处环境温度是一样,因此可以认为1号光纤和2号光纤应变测量值中因环境温度变化造成的假应变是一样的,即  $\varepsilon_{1e}(x) = \varepsilon_{2e}(x)$ 。同时,由于两根光纤沿着管道轴线几乎是平行,因此式(7)中的  $y_1(x) - y_2(x)$  为一定值,令其为  $Y$ ,在本试验中,  $Y = 168.5 \text{ mm}$ 。因此式(7)可表示为:

$$M(x) = \frac{I_z E [(\varepsilon_1(x) - \varepsilon_2(x))]}{Y} \quad (8)$$

由式(8)可知,在计算弯矩时可以通过两根光纤应变测量值的差值来进行温度补偿,而不需要另外铺设专用的温度补偿光纤,同时实现了该测量方式的温度补偿功能。通过两根光纤应变测量值的差值也可以减小侧向弯曲对应变测值的影响,因为当产生侧向弯曲的时候,两根光纤都会产生相应的应变,通过两根光纤应变测量值的差值可以减小对变形计算的影响。

管道的变形量可以用梁受弯时的挠度来表示,管道的挠度沿着管道轴线的分布曲线为:

$$I_z E y_D(x) = - \int \left[ \int M(x) dx \right] dx + C_1 x + C_2 \quad (9)$$

式中:  $y_D(x)$  为管道沿着轴线  $x$  轴的挠度分布函数;  $C_1$  和  $C_2$  是可以由挠度曲线边界条件确定的两个参数。在本试验中由于管道的两端分别焊接固定在支架上,因此管道两端挠度为0,边界条件即为  $y_D(0) = y_D(l_{\max}) = 0$ ,其中  $l_{\max}$  为管道的长度。将式(8)代入式(9)可得管道的弯曲挠度变形分布曲线表达式为:

$$y_D(x) = - \int \left[ \int \frac{I_z E [(\varepsilon_1(x) - \varepsilon_2(x))]}{Y} dx \right] dx + C_1 x + C_2 \quad (10)$$

以上计算方法从理论上即可由应变值算出管道受弯变形的分布函数,从而得到管道沿着轴线各个位置的变形量。

## 2.2 应变数据处理方法

由于受到测量装置和测量环境等多方面因素影响,测量中存在随机误差,为了减小随机误差对试验结果造成影响,可以通过多次测量取算术平均值的方法来消除随机误差的影响<sup>[29]</sup>。理论上测量次数越多,随机性误差的影响越小,测量精度越高,但是随着测量次数的增加测量成本也会不断提高。因此综合考虑测量精度和测量成本的要求,本文中应变数据取6次测量的算术平均值近似作为测量真值。

由式(10)可知,为了得到管道弯曲变形的分布函数,需要求得1、2号光纤的应变差值分布函数,令其为  $\omega(x)$ ,即  $\omega(x) = \varepsilon_1(x) - \varepsilon_2(x)$ 。而由于受到测量仪器的测量空间分辨率、算法的影响,本文中的分布式应变数据为一些散点,连接起来通常表现为连续的不平滑曲线。为了消除这种分散性和不平滑性,可以采用曲线拟合的方法对分布式应变曲线进行数据拟合,本文采用的是多项式拟合方法,阶数取20阶。将式(10)中的应变测量值的差值拟合后表达为:

$$\omega(x) = p_1 \cdot x^{20} + p_2 \cdot x^{19} + \dots + p_n \cdot x^{21-n} + \dots + p_{20} \cdot x + p_{21} \quad (11)$$

式中:  $\omega(x)$  为经过拟合后的应变测量差值的分布曲线;

$p_i(i = 1 - 21)$  为拟合后多项式函数的系数。本文采用基于 MATLAB 程序的多项式曲线拟合计算方法建立应变差值分布曲线  $\omega(x)$ , 选择代表性数据以 48 m 管道模型中点变形为 40 mm 数据为例, 如图 3(a) 所示为仪器实测应变分布, 图 3(b) 所示为数据处理后的应变差曲线及其拟合分布。然后基于拟合的应变函数直接在该程序的运算环境下求得管道的弯曲挠度变形分布曲线。

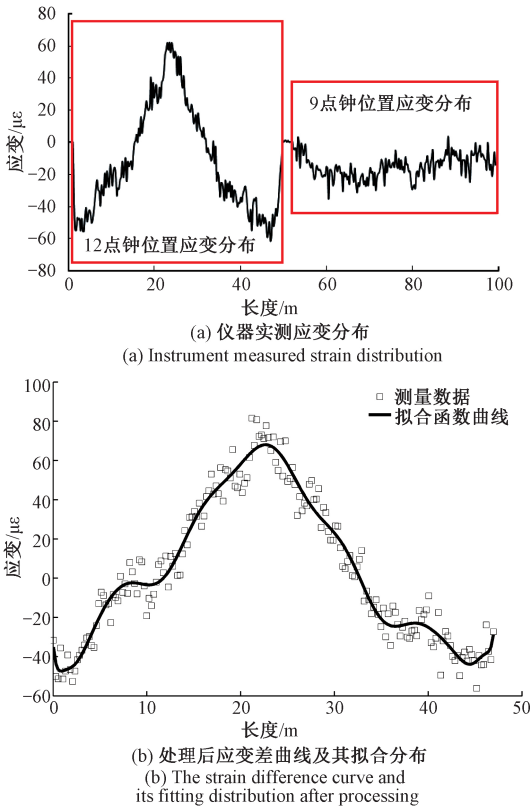


图 3 管道应变数据及拟合分布

Fig.3 Pipeline strain data and fitting distribution

### 3 试验结果分析和讨论

#### 3.1 结果分析

基于分布式光纤传感技术测得准分布式应变, 然后根据第 2 节的计算方法和数据处理方法得到管道受弯变形的计算值, 再与实测变形值进行比较。图 4~5 所示 48 m 管道模型沿线计算变形与实测变形对比, 可以看出采用本文建立的计算方法计算所得管道受弯变形与实际变形形态相似, 吻合程度较高。48 m 管道共设置 3 个变形测点, 如表 2 所示, 3 个测点在前两组变形量相对较小的试验中计算变形和实测变形的绝对误差在 1.5 mm 以内, 最大为 1.4 mm, 相对误差平均值 < 2%。如表 3 所示, 3 个测点在后 3 组变形量相对较大的试验中

计算变形和实测变形的绝对误差相对更大, 并且绝对误差值整体呈现随着变形量增大而变大的趋势, 但是相对误差平均值 < 2.4%。整体分析可得, 对于 48 m 管道模型, 当最大受弯变形量在 180 mm 范围内时, 应用本文方法计算所得受弯变形量的绝对误差和相对误差都较小, 说明基于分布式光纤传感技术测量管道变形的精度较高。

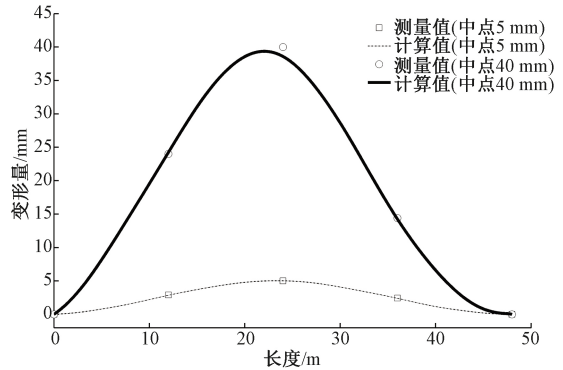


图 4 48 m 管道沿线计算与实测变形对比(1)

Fig.4 The comparison between the calculated deformation and measured deformation along the 48 m pipeline (1)

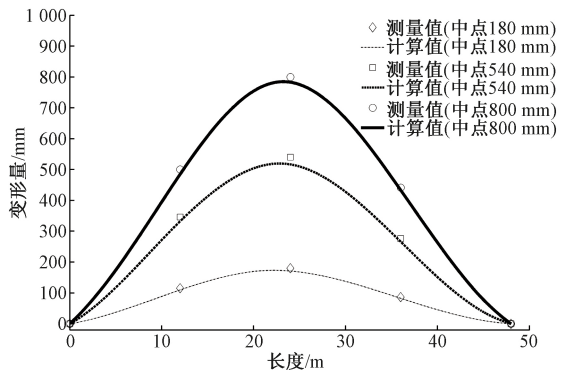


图 5 48 m 管道沿线计算与实测变形对比(2)

Fig.5 The comparison between the calculated deformation and measured deformation along the 48 m pipeline (2)

图 6~7 所示为 96 m 管道模型沿线计算变形与实测变形对比, 由图可得对于 96 m 的管道模型采用本文建立的计算方法计算所得的管道受弯变形量与实测变形量吻合程度也较高。96 m 管道共设置 7 个变形测点, 如表 4 所示, 7 个测点在前两组变形量相对较小的试验中计算变形和实测变形的绝对误差都在 1 mm 以内, 最大为 0.9 mm, 相对误差平均值 < 1.7%。如表 5 所示 7 个测点在后 3 组变形量相对较大的试验中计算变形和实测变形的绝对误差与 48 m 模型呈现相同趋势, 绝对误差值整体也是随着变形量增大而变大, 相对误差平均值 < 3.2%。

表 2 48 m 管道模型变形计算结果分析表 (1)

Table 2 The calculation result analysis table of the 48 m pipeline model deformation (1)

| 位置/m | 第 1 组变形值  |           |             |            |              | 第 2 组变形值  |           |             |            |              |
|------|-----------|-----------|-------------|------------|--------------|-----------|-----------|-------------|------------|--------------|
|      | 实测/<br>mm | 计算/<br>mm | 绝对误差/<br>mm | 相对误差/<br>% | 平均相对<br>误差/% | 实测/<br>mm | 计算/<br>mm | 绝对误差/<br>mm | 相对误差/<br>% | 平均相对<br>误差/% |
| 12   | 2.9       | 2.9       | 0.0         | 0.00       | 0.67         | 24.0      | 24.2      | 0.2         | 0.83       | 1.90         |
| 24   | 5.0       | 5.1       | 0.1         | 2.00       |              | 40.0      | 38.6      | 1.4         | 3.50       |              |
| 36   | 2.4       | 2.4       | 0.0         | 0.00       |              | 14.4      | 14.2      | 0.2         | 1.38       |              |

表 3 48 m 管道模型变形计算结果分析表 (2)

Table 3 The calculation result analysis table of the 48 m pipeline model deformation (2)

| 位置/<br>m | 第 3 组变形值  |           |                 |                |                  | 第 4 组变形值  |           |                 |                |                  | 第 5 组变形值  |           |                 |                |                  |
|----------|-----------|-----------|-----------------|----------------|------------------|-----------|-----------|-----------------|----------------|------------------|-----------|-----------|-----------------|----------------|------------------|
|          | 实测/<br>mm | 计算/<br>mm | 绝对<br>误差/<br>mm | 相对<br>误差/<br>% | 平均相<br>对误差/<br>% | 实测/<br>mm | 计算/<br>mm | 绝对<br>误差/<br>mm | 相对<br>误差/<br>% | 平均相<br>对误差/<br>% | 实测/<br>mm | 计算/<br>mm | 绝对<br>误差/<br>mm | 相对<br>误差/<br>% | 平均相<br>对误差/<br>% |
| 12       | 115.2     | 112.9     | 2.3             | 2.00           | 1.91             | 345.9     | 338.8     | 7.1             | 2.05           | 2.05             | 500.1     | 484.5     | 15.6            | 3.12           | 2.37             |
| 24       | 180.0     | 176.2     | 3.8             | 2.11           |                  | 540.0     | 526.9     | 13.1            | 2.43           |                  | 800.0     | 782.9     | 17.1            | 2.14           |                  |
| 36       | 86.4      | 85.0      | 1.4             | 1.62           |                  | 276.1     | 271.5     | 4.6             | 1.67           |                  | 441.2     | 433.0     | 8.2             | 1.86           |                  |

表 4 96 m 管道模型变形计算结果分析表 (1)

Table 4 The calculation result analysis table of the 96 m pipeline model deformation (1)

| 位置/m | 第 1 组变形值  |           |             |            |              | 第 2 组变形值  |           |             |            |              |
|------|-----------|-----------|-------------|------------|--------------|-----------|-----------|-------------|------------|--------------|
|      | 实测/<br>mm | 计算/<br>mm | 绝对误差/<br>mm | 相对误差/<br>% | 平均相对<br>误差/% | 实测/<br>mm | 计算/<br>mm | 绝对误差/<br>mm | 相对误差/<br>% | 平均相对<br>误差/% |
| 12   | 1.6       | 1.6       | 0.0         | 0.00       | 0.86         | 13.9      | 13.3      | 0.6         | 4.32       | 1.69         |
| 24   | 4.7       | 4.7       | 0.0         | 0.00       |              | 37.5      | 36.7      | 0.8         | 2.13       |              |
| 36   | 8.0       | 8.0       | 0.0         | 0.00       |              | 62.9      | 62.2      | 0.7         | 1.11       |              |
| 48   | 10.0      | 10.0      | 0.0         | 0.00       |              | 80.0      | 80.3      | 0.3         | 0.38       |              |
| 60   | 9.6       | 9.5       | 0.1         | 1.04       |              | 79.5      | 79.0      | 0.5         | 0.63       |              |
| 72   | 6.6       | 6.5       | 0.1         | 1.51       |              | 55.1      | 56.0      | 0.9         | 1.63       |              |
| 84   | 2.9       | 2.8       | 0.1         | 3.45       |              | 24.9      | 25.3      | 0.4         | 1.61       |              |

表 5 96 m 管道模型变形计算结果分析表 (2)

Table 5 The calculation result analysis table of the 96 m pipeline model deformation (2)

| 位置/<br>m | 第 3 组变形值  |           |                 |                |                  | 第 4 组变形值  |           |                 |                |                  | 第 5 组变形值  |           |                 |                |                  |
|----------|-----------|-----------|-----------------|----------------|------------------|-----------|-----------|-----------------|----------------|------------------|-----------|-----------|-----------------|----------------|------------------|
|          | 实测/<br>mm | 计算/<br>mm | 绝对<br>误差/<br>mm | 相对<br>误差/<br>% | 平均相<br>对误差/<br>% | 实测/<br>mm | 计算/<br>mm | 绝对<br>误差/<br>mm | 相对<br>误差/<br>% | 平均相<br>对误差/<br>% | 实测/<br>mm | 计算/<br>mm | 绝对<br>误差/<br>mm | 相对<br>误差/<br>% | 平均相<br>对误差/<br>% |
| 12       | 24.2      | 24.3      | 0.1             | 0.41           | 1.99             | 59.0      | 57.5      | 1.5             | 2.54           | 3.17             | 183.2     | 177.6     | 5.6             | 3.06           | 2.97             |
| 24       | 61.2      | 59.1      | 2.1             | 3.43           |                  | 166.6     | 163.2     | 3.4             | 2.04           |                  | 433.6     | 425.1     | 8.5             | 1.96           |                  |
| 36       | 95.0      | 93.5      | 1.5             | 1.58           |                  | 280.6     | 276.1     | 4.5             | 1.60           |                  | 666.3     | 658.8     | 7.5             | 1.13           |                  |
| 48       | 120.0     | 118.7     | 1.3             | 1.08           |                  | 360.0     | 348.0     | 12              | 3.33           |                  | 800.0     | 780.9     | 19.1            | 2.39           |                  |
| 60       | 109.9     | 110.9     | 1               | 0.91           |                  | 337.1     | 332.9     | 4.2             | 1.25           |                  | 730.6     | 712.3     | 18.3            | 2.50           |                  |
| 72       | 80.1      | 81.7      | 1.6             | 2.00           |                  | 240.6     | 236.9     | 3.7             | 1.54           |                  | 500.5     | 491.4     | 9.1             | 1.82           |                  |
| 84       | 39.0      | 38.8      | 0.2             | 0.51           |                  | 110.2     | 106.3     | 3.9             | 3.54           |                  | 225.6     | 221.1     | 4.5             | 1.99           |                  |

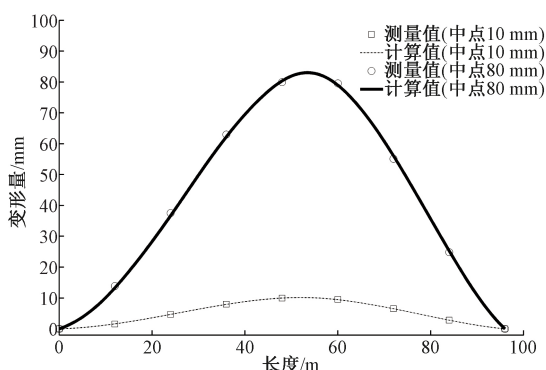


图6 96 m 管道沿线计算与实测变形对比(1)

Fig.6 The comparison between the calculated deformation and measured deformation along the 96 m pipeline (1)

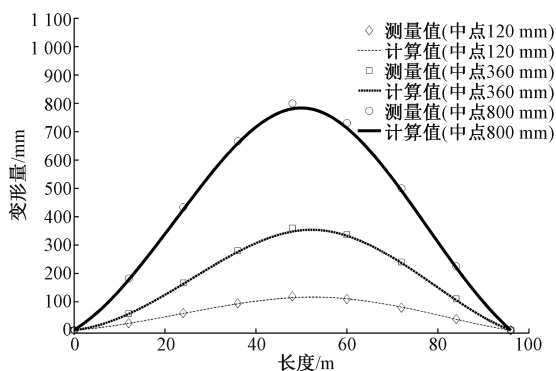


图7 96 m 管道沿线计算与实测变形对比(2)

Fig.7 The comparison between the calculated deformation and measured deformation along the 96 m pipeline (2)

结合两个不同长度管道模型的试验结果分析可得,基于分布式光纤传感技术测量管道受弯变形的测量精度整体较高,管道的长度对测量精度没有明显影响,说明该方法能适应不同长度管道的变形监测。同时该方法在测量不同变形量时,虽然在变形量较大时绝对误差较大,但是平均相对误差较小,在本试验中均小于3.2%,能满足管道受弯变形监测的要求。

### 3.2 讨论

根据以上结果分析可得,对于不同长度以及不同变形模式的管道,由分布式光纤测量技术所得的变形计算值整体精度较高,相对误差较小。该方法的测量精度不受管道长度的影响,但是受到最大变形量的影响,在最大变形量小于180 mm时,绝对误差和相对误差都较小,测量精度较高;当发生大变形的时候,该方法的绝对误差随之增大,分析绝对误差在大变形时增大原因,由于在试验过程中不能理想地完全控制管道

只存在垂直方向的弯曲,在某些部位略微存在侧向弯曲,尤其是在变形量较大的时候侧向弯曲会更明显,所以就导致了在产生大变形时绝对误差增大,这也是本试验中存在的缺陷。但是本文计算方法中通过两根光纤应变相减能够减少侧向弯曲对测量的影响,从试验结果可以看出相对误差都较小,测量精度只是受到略微影响。在现场应用中也可通过更加合理的光纤布设位置减小甚至消除侧向弯曲对测量造成的影响。由此可得基于分布式光纤传感技术测量管道受弯变形的方可适用于管道的受弯变形监测。

本次试验所用光纤解调仪的应变测量准确度为 $\pm 10 \mu\epsilon$ ,从图3可以看出所测应变值在 $\pm 10 \mu\epsilon$ 范围内波动。由不确定度的传播理论可知,如果应变测量的准确度提高,通过应变间接测量受弯变形的准确度也能提高。目前应变测量准确度为 $\pm 1 \mu\epsilon$ 的光纤解调仪已开发并得到应用,现有分布式光纤传感和测量技术可进一步改善基于分布式光纤传感技术的管道受弯变形监测准确度;分布式光纤传感和测量技术完成1 km长的传感光纤测量耗时少于5 min,且可实现自动化测量,该监测技术可实现快速自动化测量。

本次试验方案设置的最大变形情况下测得传感光纤应变的数量级为千应变级,远未达到传感光纤技术的应变测量范围,同时BOTDA光纤监测技术的传感光纤长度最大可达20 km,可满足目前长距离管道受弯变形的监测需要。

通过以上分析讨论,本文基于分布式传感光纤的管道变形监测方法具有以下优点:1)本文变形计算方法简单,与管道结构材料特性及受力状态无关,能消除温度和减小侧向弯曲对测量的影响,主要的影响因素就是粘贴的分布式传感光纤应变传递效率和光纤解调仪的测量精度,且能得到沿长度方向上的连续变形函数;2)相比其他基于分布式传感光纤的变形监测方法精度较高,相对误差在3.2%以下。

## 4 应用展望

### 4.1 管道受力分析的应用

管道的受力状态也是管道结构性能状态评价和服役寿命分析的重要指标,本文初步开展了基于分布式光纤传感技术的管道受力分析。由式(8)可知,在得到管道沿线的应变分布函数后,即可求得管道沿线各个截面的弯矩。根据材料力学可知,弯矩分布函数对管道轴线 $x$ 的导数等于相应截面的剪力。由于实际光纤所测的应变值中扣除了初始应变的相对应变值,因此本文研究的受力情况是在扣除了初始受力之后因外力引起的受力情况进行分析。

将本试验中管道受力模式简化成理想梁的受力,首先分析试验前管道初始受力情况,可将管道自身重量简化为均布荷载  $q$ ,由对称性将支架支撑力简化为集中力  $F_1$ 、 $F_2$ ,以 48 m 管道模型的受力为例,如图 8(a) 所示。然后对变形之后因外力引起的受力变化情况进行分析,当扣除初始受力之后,此时管道的自身重量已经扣除;中点支架由于主要控制管道的变形,因此该处集中力比初始集中力  $F_1$  更大,减去初始受力后变成方向与初始受力方向一致,大小为  $F'_1$  的集中力;另外两个支架在管道变形时并不控制管道的变形,只是随着管道的变形提供少量的支撑力,因此比初始受力更小,减去初始受力后方向与初始受力方向相反,大小变成  $F'_2$  的集中力。扣除初始受力之后的受力分析如图 8(b) 所示。进而分析简化受力模式下的建立模式,如图 9 所示。

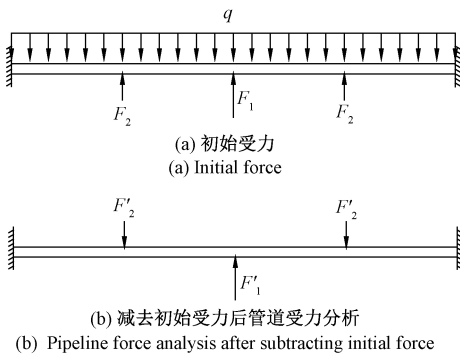


图 8 48 m 管道受力简化示意图

Fig.8 The simplified force diagram of the 48 m pipeline

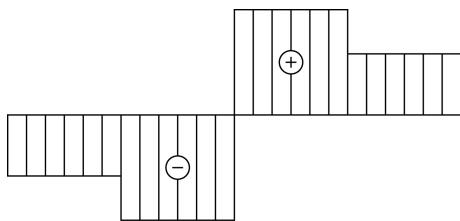


图 9 48 m 管道简化分析剪力分布模式

Fig.9 The distribution pattern of the simply analyzed shear force of the 48 m pipeline

以 48 m 管道模型第 5 组试验为例分析,下面对本试验中的管道受力进行简化分析,假设管道的弹性模量  $E=210 \text{ GPa}$ ,式(8)中的管道的截面参数为  $Y=0.1685 \text{ m}$ ,管道平均半径  $r_0=0.1655 \text{ m}$ ,管道的厚度  $\delta=0.006 \text{ m}$ 。根据以上参数可以由管道应变分布函数  $\omega(x)$  得到管道弯矩分布函数  $M(x)$ 。对管道弯矩分布函数  $M(x)$  进行求导即可得到因外力引起的的剪力分布函数  $F_s(x)$ ,如图 10 所示。模拟所得剪力的分布模式整体与简化理论模

式整体趋势相近,且很明显能看出在管道中点附近剪力变化较大,与实际受力情况吻合,说明该方法能对管道的受力情况进行分析。

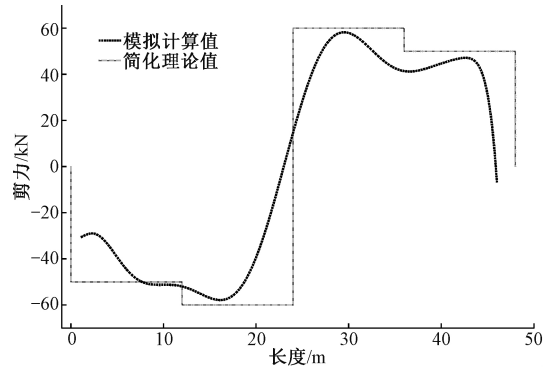


图 10 48 m 管道剪力模拟计算值与理论模式对比

Fig.10 The comparison between the simulated calculation value and theoretical pattern of the 48 m pipeline shear force

## 4.2 管道其他形式变形的应用展望

实际管道工程中,管道的变形不仅包括受弯变形,还可能存在管道轴向拉伸作用产生的变形;同时有些管道内部还可能存在高压力的影响,会产生管道截面方向的变形。这一类的变形都可以通过合理的铺设方式在不同方向铺设测量光纤从而测得相应变形,结合本文研究可以为管道变形提供更合理全面的监测方案。因此基于分布式光纤传感技术的管道受弯变形监测技术在管道变形安全监测中具有较好的应用意义和研究前景。

## 5 结 论

本文通过开展管道受弯变形分布式光纤监测试验,基于 MATLAB 建立了分布式光纤应变数据与管道变形关系的计算方法,研究了分布式光纤传感技术在管道监测中的适用性。主要结论如下:

1) 计算结果表明分布式光纤传感技术在管道变形监测中整体测量精度较高,在变形量小于 180 mm 范围内,绝对误差小于 4 mm,平均相对误差在 2% 以内;当变形量较大时,绝对误差随之增大,但是平均相对误差在 3.2% 以下,可适用于管道的受弯变形监测。

2) 分布式传感技术具有分布式、长距离、实时高精度等特点,该方法的测量精度不受管道长度的影响,在长距离管道受弯变形的监测工程中具有较好的应用前景,是一种理想的变形监测技术。

3) 初步开展了基于分布式光纤传感技术的管道受力分析,结果表明模拟所得管道受力模式与理论模式以及实际情况较为吻合,说明应用分布式光纤传感技术可以

对管道的受力情况进行分析。

4) 可通过应用高精度光纤解调仪、对传感光纤的布设方法以及拟合计算方法进行改进以提高管道变形测量精度,同时还应考虑埋地管道周围地质条件和各类地质灾害引起的管道变形特点,以进一步准确预测预报管道的变形趋势。

## 参考文献

- [1] 姚伟. 油气管道安全管理的思考与探索[J]. 油气储运, 2014, 33(11): 1145-1151.

YAO W. Thinking and exploration on the safety management of oil/gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(11): 1145-1151.

- [2] 黄博. 石油管道储运的安全管理分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2019(03): 106-107.

HUANG B. Safety management analysis of oil pipeline storage and transportation [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2019(03): 106-107. On Line

- [3] 安韶, 王威, 马东辉. 城市供水管道性态抗震设计方法研究[J]. 北京工业大学学报, 2019, 45(5): 39-46.

AN SH, WANG W, MA D H. A study of performance-based seismic design method of urban water supply pipe network[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2019, 45(5): 39-46.

- [4] 孙翔, 薛世峰, 朱秀星. 西气东输管道沿线地质灾害浅议[J]. 低温建筑技术, 2014, 36(9): 132-134.

SUN X, XUE SH F, ZHU X X. Discuss on geological disaster along west-east gas transportation pipeline [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2014, 36(9): 132-134.

- [5] 熊春宝, 李志, 孙轩, 等. 基于 3D 建模的海底管道在位稳定分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(S2): 53-56.

XIONG CH B, LI ZH, SUN X, et al. Stability analysis of submarine pipelines based on 3D model reconstruction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S2): 53-56.

- [6] 佟大威, 孙立强. PCCP 管施工回填土深层压实度检测方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(1): 236-240, 249.

TONG D W, SUN L Q. Research on compactness measurement method for deep backfill soil of PCCP

construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(1): 236-240, 249.

- [7] FARUQI M. Deflection behavior of a prestressed concrete beam reinforced with carbon fibers at elevated temperatures [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2019, 13(1): 81-91.

- [8] 辛君君, 董甲瑞, 黄松岭, 等. 油气管道变形检测技术[J]. 无损检测, 2008, 30(5): 285-288, 294.

XIN J J, DONG J R, HUANG S L, et al. Deformation inspection of petroleum and gas pipeline [J]. Non-destructive Testing, 2008, 30(5): 285-288, 294.

- [9] 陈同彦, 刘锦昆, 谭勇, 等. 埕岛油田海底管道监测与预警技术研究[J]. 石油工程建设, 2017, 43(2): 75-79.

CHEN T Y, LIU J K, TAN Y, et al. Research on monitoring and early warning technology of submarine pipeline in chengdao oilfield[J]. Petroleum Engineering Construction, 2017, 43(2): 75-79.

- [10] 王富祥, 冯庆善, 杨建新, 等. 油气管道惯性测绘内检测及其应用[J]. 油气储运, 2012, 31(5): 372-375, 407.

WANG F X, FENG Q SH, YANG J X, et al. Inertial surveying and application of oil and gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(5): 372-375, 407.

- [11] 张逍. 管道在位状态分布式光纤监测方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015

ZHANG X. The analysis of distributed optical fiber monitoring pipeline in the state method[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.

- [12] MURVAY P S, SILEA I. A survey on gas leak detection and localization techniques [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012, 25(6): 966-973.

- [13] FENG X, WU W J, MENG D W, et al. Distributed monitoring method for upheaval buckling in subsea pipelines with brillouin optical time-domain analysis sensors[J]. Advance in Structural Engineering, 2016, 20(2): 1-11.

- [14] 何凯, 曾捷, 林秋红, 等. 空间伸展结构变形与振动分布式光纤监测研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(2): 56-65.

- HE K, ZENG J, LIN Q H, et al. Research on spatial deployable structure deformation and vibration monitoring with distributed optical fiber [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(2): 56-65.
- [15] 李永倩, 赵丽娟, 杨志, 等. 基于 BOTDR 的海缆 3D 立体监测系统设计与实现 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5): 1029-1036.
- LI Y Q, ZHAO L J, YANG ZH, et al. Design and realization of the submarine cable three-dimensional monitoring system based on BOTDR [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(5): 1029-1036.
- [16] 徐镏, 许海燕, 宋耀华, 等. 基于光纤分布式传感器的时频定位技术 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(10): 2161-2169.
- XU Q, XU H Y, SONG Y H, et al. Positioning technique based on time-frequency domain method in distributed fiber optic system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(10): 2161-2169.
- [17] 冯新, 张宇, 刘洪飞, 等. 基于分布式光纤传感器的埋地管道结构状态监测方法 [J]. 油气储运, 2017, 36(11): 1251-1257.
- FENG X, ZHANG Y, LIU H F, et al. A distributed optical fiber sensor based method for monitoring the structural state of buried pipelines [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(11): 1251-1257.
- [18] FENG X, ZHANG X, SUN C, et al. Stationary wavelet transform method for distributed detection of damage by fiber-optic sensors [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2014, 140(4): 04013004.
- [19] 迟延光, 白清, 王宇, 等. 管道应力危害 BOTDR 分布式光纤检测系统 [J]. 传感技术学报, 2018, 31(11): 1775-1780.
- CHI Y G, BAI Q, WANG Y, et al. Distributed optical fiber system for pipeline strain hazard inspection using BOTDR [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(11): 1775-1780.
- [20] ZHANG D, HE J, XUE Y, et al. Investigation of settlement monitoring method based on distributed brillouin fiber optical sensor [J]. Measurement, 2019, 134: 118-122.
- [21] ZHANG S, LIU B, HE J. Pipeline Deformation monitoring using distributed fiber optical sensor [J]. Measurement, 2019, 133: 208-213.
- [22] CHEN Z, ZHENG D, SHEN J, et al. Research on distributed optical-fiber monitoring of biaxial-bending structural deformations [J]. Measurement, 2019, 140: 462-472.
- [23] 卢毅, 于军, 龚绪龙, 等. 基于 BOFDA 的地面塌陷变形分布式监测模型试验研究 [J]. 高校地质学报, 2018, 24(5): 778-786.
- LU Y, YU J, GONG X L, et al. Experimental study on distributed monitoring of ground collapse deformation based on BOFDA [J]. Geological Journal of China Universities, 2018, 24(5): 778-786.
- [24] 吴铭昊, 唐伟杰, 姜绍飞, 等. 基于分布式光纤技术的古建木结构变形监测策略 [J]. 福州大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 95-103.
- WU MH, TANG W J, JIANG SH F, et al. Deformation monitoring strategy for ancient timber buildings based on distributed optic fiber sensing technology [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science), 2018, 46(1): 95-103.
- [25] PARKER T R, FARHADIROUSHAN M, HANDEREK V A, et al. Temperature and strain dependence of the power level and frequency of spontaneous brillouin scattering in optical fibers [J]. Optics Letters, 1997, 22(11): 787-789.
- [26] 林玉兰, 陈永泰. 拉曼散射分布式光纤温度传感器的设计 [J]. 光电子技术与信息, 2002, 15(2): 33-36.
- LIN Y L, CHEN Y T. Design of a raman scattering distributed optical fiber temperature sensor [J]. Optoelectronic Technology & Information, 2002, 15(2): 33-36.
- [27] 何宁, 王平, 丁勇, 等. 分布式光纤传感技术应变测量试验研究 [J]. 中国测试, 2011, 37(2): 92-96.
- HE N, WANG P, DING Y, et al. Experimental study of distributed fiber optic sensing techniques for the measurement of strain [J]. China Measurement & Testing Technology, 2011, 37(2): 92-96.
- [28] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学 [M]. 北京: 高等

教育出版社, 2008.

SUN X F, FANG X SH, GUAN L T. Material mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.

- [29] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京:机械工业出版社, 2017.

FEI Y T. Error theory and data processing[M]. Beijing: China Machine Press, 2017.

## 作者简介



**许滨华**, 2014 年于石家庄铁道大学获得学士学位, 2017 年于河海大学获得硕士学位, 现为南京水利科学研究院和河海大学联合培养博士研究生, 主要研究方向为软土地基加固和现场原位监测。

E-mail: 317413076@qq.com

**Xu Binhua** received his B. Sc. degree from Shijiazhuang Tiedao University in 2014 and M. Sc. degree from Hohai University in 2017. Now, he is a joint Ph. D. candidate at Nanjing Hydraulic Research Institute and Hohai University. His research interest includes soft soil foundation consolidation and on-site monitoring.



**何宁**, 1992 年于清华大学获得学士学位, 2004 年于荷兰 UNESCO-IHE 获得硕士学位, 现为南京水利科学研究院教授级高级工程师, 主要研究方向为软土地基加固处理, 水利工程和岩土工程安全监测、检测技术。

E-mail: nhe@nhri.cn

**He Ning** received his B. Sc. degree from Tsinghua University in 1992 and M. Sc. degree from UNESCO-IHE, Netherlands in 2004. Now, he is a professor level senior engineer at Nanjing Hydraulic Research Institute. His main research interest includes soft soil foundation consolidation, safety monitoring and detection technology in hydraulic engineering and geotechnical engineering.



**吴帅**, 2016 年于东南大学获得学士学位, 现为南京嘉兆仪器设备有限公司助理工程师, 主要研究方向为光纤传感器监测应用。

E-mail: miracle@cazor.com.cn。

**Wu Shuai** received his B. Sc. degree from Southeast University in 2016. Now, he is an assistant engineer at Nanjing Cazor Instrument Equipment Co., Ltd. His research interest is fiber optic sensor monitoring application.