

# 基于 BOFDA 的 PE 管道微弯变形检测方法

冯维一<sup>1,2</sup>, 刘礼华<sup>1\*</sup>, 张旭苹<sup>2</sup>, 赵霞<sup>1</sup>, 方玄<sup>1</sup>, 谢永宏<sup>1</sup>

(1. 法尔胜泓昇集团有限公司, 江苏 无锡 214433; 2. 南京大学 材料与工程博士后流动站, 南京 210008)

**摘要:**为监测埋地管道因地质不稳定产生的弯曲变形情况,提出了一种基于布里渊光频域分析(BOFDA)技术的聚乙烯(PE)管道微弯检测方法。将玻璃纤维基带应变光缆沿管壁胶粘敷设,使光纤与管道协同变形,通过布里渊频移量计算得到光纤应力变化值,并采用共轭梁重构算法反演管道弯曲扰度。实验结果表明:该方法能够很好地分辨和测量管道弯曲的方向和位移量,误差小于 0.4 cm,提升了管道的数字化安全监测和预警水平。

**关键词:**光纤传感;布里渊频移;管道变形;布里渊光频域分析;智慧管道

**中图分类号:**TN29 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2020)12-0033-04

**DOI:**10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.12.008

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Detection method of PE pipe microbending deformation based on BOFDA

FENG Weiyi<sup>1,2</sup>, LIU Lihua<sup>1\*</sup>, ZHANG Xuping<sup>2</sup>, ZHAO Xia<sup>1</sup>, FANG Xuan<sup>1</sup>, XIE Yonghong<sup>1</sup>

(1. Fasten Group Co. Ltd., Wuxi Jiangsu 214433, China;

2. Post-Doctoral Research Station of Materials and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** In order to monitor the bending deformation of buried pipelines due to geological instability, a method of polyethylene (PE) pipeline microbending detection based on Brillouin optical frequency domain analysis (BOFDA) technology is proposed in this paper. The fiberglass substrate strain cable is laid along the wall of the pipe to make the fiber and the pipe deform together. The Brillouin frequency shift is used to calculate the stress variation of the fiber, and conjugate beam reconstruction algorithm is used to invert the bending disturbance of the pipe. The experiment result shows that this method can distinguish and measure the direction and displacement of pipe bending very well, and the error is less than 0.4 cm, which improves the digital safety monitoring and early warning level of pipe.

**Key words:** optical fiber sensing; Brillouin frequency shift; pipe deformation; Brillouin optical frequency domain analysis; smart pipeline

## 0 引言

管道作为一种可靠连续的运输载体,已经广泛应用于石油、天然气以及水暖供应等城市生命线中。但随着新建管道数量的不断增加,其密度和复杂性越来越

收稿日期:2020-06-22。

**基金项目:**江苏省科技成果转化项目(BA2019011)资助;国家重点研发计划光纤传感系统应用示范项目(2017YFB0405505)资助;国家博士后基金面上项目(2019M661704)资助。

**作者简介:**冯维一(1988—),男,博士,法尔胜泓昇集团有限公司与南京大学联合培养博士后,主要研究分布式光纤传感技术、光纤光栅传感技术及传感器在安全监测系统中的应用,特别是基于分布式光纤传感技术的智慧管道安全监测。

\*通信作者:刘礼华(E-mail: fwyng@163.com)。



越大,管道灾害事件频繁发生。特别是长距离埋地管道,沿线涉及山地、平原和河流等多种地质、地貌,降雨和地层移动都会引起管道变形,从而导致地下管线被破坏<sup>[1-2]</sup>。此外,周边地下工程施工和地面交通动荷载的扰动,也会增加管道疲劳、变形等缺陷,进而发生断裂、泄漏等事故。因此,实时掌握管道的结构应力状态信息,对保障地下管线的安全运行非常重要。

管线分布距离长,有时达到上百千米,若采用点式传感器,势必会受到布点数量的限制,增加了布点连线和数据采集的复杂度,而且成本高,无法全面反映管道上每个位置的安全情况。近年来,兴起的基于布里渊散射原理的分布式光纤传感技术,使长距离埋地管道的全线结构监测变成可能,这种传感技术拥有

较高的测量精度和空间分辨率,且无需供电<sup>[3-6]</sup>。

目前,基于布里渊散射的分布式光纤应变传感技术主要包括布里渊光时域反射(BOTDR)技术、布里渊光时域分析(BOTDA)技术以及布里渊光频域分析(BOFDA)技术<sup>[7-8]</sup>。这3种技术均可实现应变量的测量和空间位置定位,其中BOTDR属于单端检测,BOTDA和BOFDA属于回路检测。由于回路检测使用双光源,根据脉冲光和连续光之间的相互作用,BOTDA和BOFDA可获得更高的空间分辨率和精度。贾振安等人<sup>[9]</sup>利用BOTDA技术进行了输油管道长期监测、管道变形实验和油气管道应力监测等,并取得了一定成果。相对于时域分析技术,BOFDA具有高测试精度、低探测光功率等优点,且稳定性更好,适合在工程领域应用。目前,该技术的应变测量精度小于 $2\mu\epsilon$ <sup>[10]</sup>。

本文基于BOFDA技术进行聚乙烯(PE)管道微弯检测试验,评估管道的受力变形状态。

## 1 基于 BOFDA 的应变成调技术

1996年,德国科学家D. Garus<sup>[7]</sup>首先提出了基于频域分析的BOFDA技术,其实质是利用计算探测光和泵浦光在光纤中的冲击响应函数来确定光纤沿线的温度和应变信息。BOFDA的传感系统如图1所示,窄线宽的泵浦激光器产生连续泵浦光经过传感光纤后与被电光调制器以布里渊频移调制的探测光进行耦合,由平衡探测器输出至矢量分析仪,得到传感光纤中的脉冲响应传输函数,最后经逆傅里叶变换得到温度和应变信息。

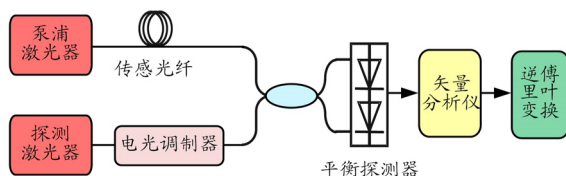


图1 BOFDA解调原理结构图

相对于BOTDA技术,BOFDA技术的应变量探测精度更高,更适合于结构形变监测场景,2种技术参数对比情况如表1所示。

本文所用的BOFDA设备为德国fibrisTerre公司生产的fTB-2505系列产品,该设备具有较高的空间分辨率和高精度的应变测量精度,且稳定性好,非常适合用于各类科研试验研究和现场工程监测场合,其设备性能指标如表2所示。

## 2 管道变形共轭梁重构算法

本文通过敷设应变光缆可以测得管道上、下表面的应变值,设应变光缆的分辨率为 $l$ ,管道弯曲后可取长度为 $l$ 的管道单元段进行分析,其变形情况如图2所示。

管道变形后的单元形状按照圆弧计算,设 $l'$ 上为管道变形后单元段上表面长度, $l'$ 下为变形后单元段下表面长度,管道直径为 $2r$ ,管道弯曲半径为 $R$ ,对应圆心角为 $\theta$ 。采用欧拉-伯努利梁模型,即变形后管道横截面与中心轴垂直,不考虑剪切效应,可得单元段末端

中心轴线与起始位置中心轴线的垂直位移量为:

$$T_1 = (R_1 - r) - (R_1 - r) \cos \theta_1 \quad (1)$$

由于 $R$ 远大于 $r$ ,式(1)可近似为:

$$T_1 \approx (1 - \cos \theta_1) R_1 = 2R_1 \sin \frac{\theta_1}{2} \cdot \sin \frac{\theta_1}{2} \quad (2)$$

对于第二段单元, $\alpha_2 = \frac{\theta_2}{2} + \theta_1$ ,可得:

$$T_2 \approx 2R_2 \sin \frac{\theta_2}{2} \cdot \sin \left( \frac{\theta_2}{2} + \theta_1 \right) \quad (3)$$

对于第 $n$ 段单元,单元末端中心轴线与单元起始位置轴线的垂直距离为:

$$T_n = 2R_n \sin \frac{\theta_n}{2} \cdot \sin \left( \frac{\theta_n}{2} + \sum_{m=1}^{n-1} \theta_m \right) \quad (4)$$

其中, $m=1,2,3,\dots,n$ 。设 $\epsilon_{上}$ 、 $\epsilon_{下}$ 分别为利用应变光缆测得的弯曲管道单元段上、下表面的应变量,则 $l'_{上} = (\epsilon_{上} + 1)l$ , $l'_{下} = (\epsilon_{下} + 1)l$ 。将关系式 $R_n = \frac{2r(\epsilon_{n上} + 1)}{\epsilon_{n上} - \epsilon_{n下}}$ 和 $\theta_n =$

$\frac{(\epsilon_{n上} - \epsilon_{n下})l}{2r}$ 代入式(4)可得:

表1 BOTDA与BOFDA技术对比情况

| 参数名称                       | 参数值       |           |
|----------------------------|-----------|-----------|
|                            | BOTDA技术   | BOFDA技术   |
| 回路探测距离/km                  | 60        | 50        |
| 应变测试精度/ $\mu\epsilon$      | $\pm 25$  | $\pm 1$   |
| 重复精度/ $\mu\epsilon$        | $\pm 50$  | $\pm 2$   |
| 温度测试精度/ $^{\circ}\text{C}$ | $\pm 1$   | $\pm 0.1$ |
| 空间分辨率/m                    | 0.1       | 0.2       |
| 动态范围/dB                    | $\geq 20$ | $\geq 20$ |

表2 fTB-2505设备参数表

| 参数名称                       | 参数值       |
|----------------------------|-----------|
| 光纤类型                       | 单模光纤      |
| 回路探测距离/km                  | 50        |
| 空间分辨率/m                    | 0.2@2 km  |
| 采样分辨率/m                    | 0.05      |
| 应变测试精度/ $\mu\epsilon$      | 2         |
| 温度测试精度/ $^{\circ}\text{C}$ | 0.1       |
| 测量时间/min                   | 1@2 km    |
| 动态范围/dB                    | $\geq 20$ |
| 工作温度/ $^{\circ}\text{C}$   | 5~40      |

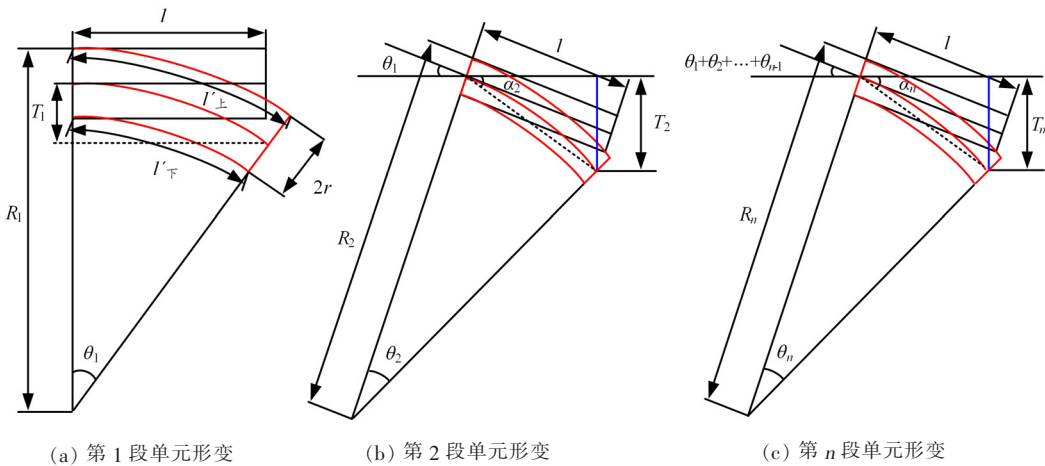


图2 管道分段变形示意图

$$T_n = 2 \times \frac{2r(\varepsilon_{n+1})}{\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_{n-1}} \sin \left( \frac{(\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_{n-1})l}{4r} \right) \times \sin \left[ \frac{(\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_{n-1})l}{4r} + \sum_{m=1}^{n-1} \frac{(\varepsilon_{m+1} - \varepsilon_{m-1})l}{2r} \right] \quad (5)$$

联立式(1)~式(5),最后可以得出管道受弯后末端中心轴线的挠度  $W$  为:

$$W = \sum_{m=1}^n T_m \quad (6)$$

### 3 管道弯曲变形模拟及测试结果分析

为验证管道弯曲变形监测方法的有效性,本文设计了一种管道变形模拟装置,如图3所示。玻璃纤维基带应变光缆沿 PE 管管壁胶粘敷设在管道上表面和下表面,管道直径为 7.5 cm,贴附在管道表面的光纤长度为 4 m,管道两端采用管道对接机夹持固定,管道中间采用三轴位移平台夹持,通过位移平台可以给管道施加位移量,使光纤与 PE 管道协同变形。光纤末端连接 BOFDA 设备,通过监测光纤反射光中的布里渊频移量可以得到管壁上光纤的应变值,再采用共轭梁重构算法反演出管道弯曲的挠度,实现管道弯曲变形监测。实物装置如图4所示。

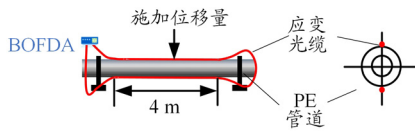


图3 应变光缆敷设示意图

通过位移平台将管道垂直向下分别施加 10 mm、20 mm 和 30 mm 的位移,BOFDA 的空间分辨率为 20 cm,管道上、下表面上应变光缆测得的应变曲线如图5所示。上表面应变值朝负方向增长达到最大值,说明产生了收缩变形;下表面应变值朝正方向增长达到最大

值,说明产生了拉伸变形。下表面的应变值大于上表面的应变值,通过应变值变化方向和应变值大小,可判断出管道弯曲方向,即向下弯曲。图5中4个标号位置1、2、3、4是由于管道两端固定后产生了与中心位置相反的拉伸或压缩变形,使整体应变曲线呈现墨西哥帽的形状。

将应变光缆测得的应变值作为管道上、下表面的应变值代入式(6),可计算得到管道上人为施加的挠度值,反演结果如表3所示。上、下表面中心处的应变值随着管道上施加挠度的增大基本保持线性关系,反演得到的挠度值接近真实值,其误差在 0.4 cm 以下。由于位移平台的精度为 0.1 cm,该误差值在可接受范围之内。管道弯曲变形后反演得到的形状如图6所示,其中水平 2 个轴坐标值是管道上采样的 50 个点,

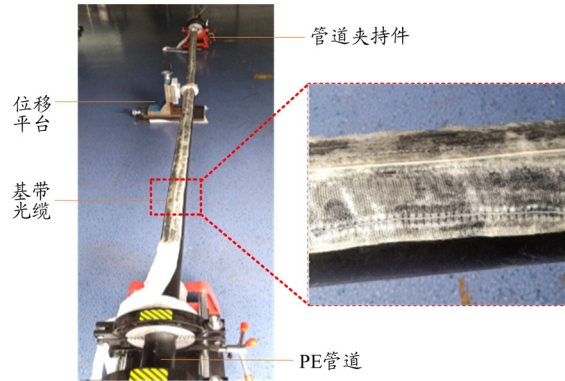


图4 管道试验装置实物图

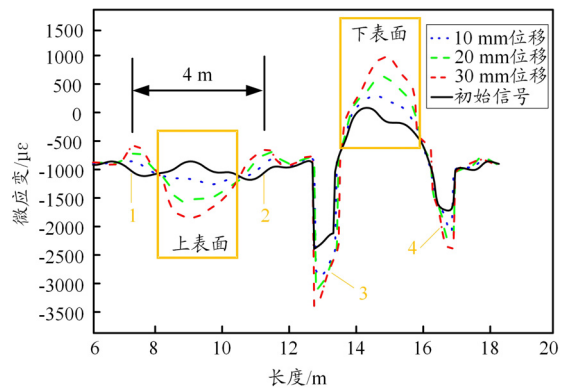
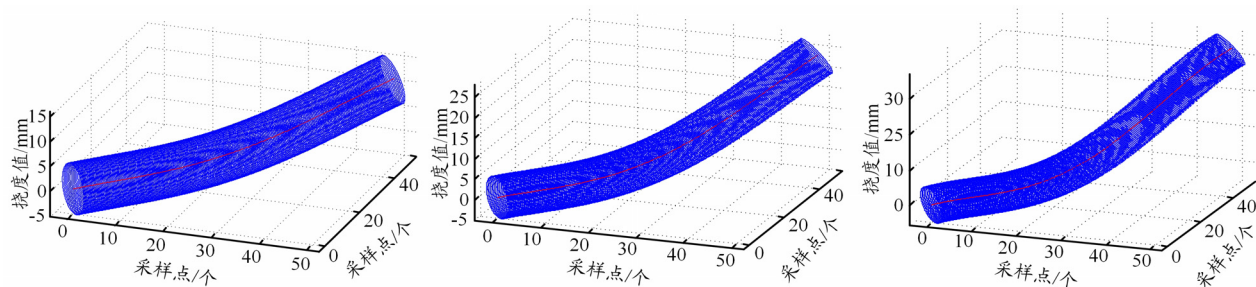


图5 管道弯曲变形后的应变分布



(a) 施加 10 mm 挠度时下管道弯曲

(b) 施加 20 mm 挠度时下管道弯曲

(c) 施加 30 mm 挠度时下管道弯曲

图 6 不同挠度下管道弯曲反演图

表 3 管道弯曲应变和挠度值

| 参数名称                   | 参数值        |            |            |
|------------------------|------------|------------|------------|
|                        | 施加挠度=10 mm | 施加挠度=20 mm | 施加挠度=30 mm |
| 上表面中心应变/ $\mu\epsilon$ | 312        | 667        | 982        |
| 下表面中心应变/ $\mu\epsilon$ | 378        | 769        | 1133       |
| 反演挠度/mm                | 11.3       | 23.3       | 32.5       |
| 误差/mm                  | 1.3        | 3.3        | 2.5        |

纵坐标值为管道反演的挠度值。从图 6 可以看出,随着施加给管道的力度增强,管道弯曲变形量也随之增加。后期可为管道弯曲变形设置预警值,保障管道的安全运行。

## 4 结束语

本文提出了一种基于分布式光纤应变传感的管道微弯变形检测的方法,用于埋地管道的形态重构。通过玻璃纤维基带应变光缆粘贴于 PE 管道表面的方式,采用高精度布里渊频谱测量设备 BOFDA 来测得管道表面弯曲产生的应变,从而计算得到管道变形方向和挠度。实验验证了利用共轭梁法反演 PE 管道形变量的可行性和准确性,为该方法在智慧管道工程中的应用提供了理论支撑。

## 参考文献:

- [1] DATTA S, SARKAR S. A review on different pipeline fault detection methods [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 41: 97-106.
- [2] 何亚莹. 长输管道分布式应力监测与健康诊断方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- [3] REN L, JIANG T, JIA Z, et al. Pipeline corrosion and leakage monitoring based on the distributed optical fiber sensing technology [J]. Measurement, 2018, 122: 57-65.
- [4] WONG L, CHIU W K, KODIKARA J. Using distributed optical fibre sensor to enhance structural health monitoring of a pipeline subjected to hydraulic transient excitation [J]. Structural Health Monitoring, 2018, 17(2): 298-312.
- [5] HUANG X, WANG Y, SUN Y, et al. Research on horizontal displacement monitoring of deep soil based on a distributed optical fibre sensor[J]. Journal of Modern Optics, 2018, 65(2): 158-165.
- [6] 王飞, 丁克勤, 李德桥. 基于 PPP-BOTDA 分布式光纤传感技术的管道健康监测应用研究[J]. 光学仪器, 2011, 33(5): 30-33.
- [7] 张旭苹. 全分布式光纤传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [8] 王传琦, 王晓峰, 伍历文, 等. 紧包光纤的布里渊频移和应变测量研究[J]. 光通信技术, 2018, 42(4): 37-39.
- [9] 贾振安, 王虎, 乔学光, 等. 基于分布式光纤布里渊散射的油气管道应力监测研究[J]. 光电子激光, 2012, 23(3): 534-537.
- [10] 王兴, 施斌, 魏广庆, 等. 土木与岩土工程监测新技术——BOFDA 的性能与特点[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(6): 61-66.