

文章编号: 1000-8241(2021)10-1145-10

# 基于同轴电缆法布里-珀罗传感器的跨断层管道应变监测

孙梦<sup>1</sup> 焦彤<sup>1</sup> 修林鹏<sup>1</sup> 周智<sup>1,2</sup> 白石<sup>3</sup> 马文龙<sup>3</sup>1. 大连理工大学建设工程学部·海岸和近海工程国家重点实验室; 2. 海南大学土木建筑工程学院;  
3. 智性纤维复合加固南通有限公司

**摘要:** 在断层、地面不均匀沉降等极端地质灾害的影响下,管道极易产生较大变形,现有的应变传感技术因量程不足难以实现大应变监测。为此,提出将同轴电缆法布里-珀罗干涉(Coaxial Cable Fabry-Perot Interferometer, CCFPI)传感器应用于跨断层管道的大应变监测。介绍了CCFPI传感器的传感原理及制作方法;借助自制的跨断层埋地管道试验装置,研究了CCFPI传感器匹配埋地管道的封装与布设方法;通过跨断层埋地管道模拟试验,验证将CCFPI传感器应用于跨断层埋地管道大应变监测的合理性与有效性。结果表明:在断层位移量小于165 mm时,CCFPI传感器与光纤传感器监测应变值吻合较好;在断层位移量达到165 mm以上时,光纤因超出量程而断裂,而CCFPI传感器可继续监测管道应变;在300 mm的断层位移量下,CCFPI传感器测得0.081 36的应变,证实了将CCFPI传感器应用于跨断层埋地管道大应变监测的合理性与可靠性。(图17,参21)

**关键词:** CCFPI传感器;跨断层埋地管道;大变形;应变监测;光纤传感器

中图分类号: TE832

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.10.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Strain monitoring of crossing-fault pipelines with coaxial cable Fabry-Perot interferometer sensors

SUN Meng<sup>1</sup>, JIAO Tong<sup>1</sup>, XIU Linpeng<sup>1</sup>, ZHOU Zhi<sup>1,2</sup>, BAI Shi<sup>3</sup>, MA Wenlong<sup>3</sup>

1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology//State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University; 3. Zhixing FRP Reinforcement Nantong Co. Ltd.

**Abstract:** Affected by the extreme geological hazards such as the fault and uneven ground settlement, pipelines are prone to produce large deformations. However, the large strain monitoring cannot be achieved with the existing strain sensing technology due to its insufficient measuring range. Thus, the method of monitoring the large strain of crossing-fault pipelines with Coaxial Cable Fabry-Perot Interferometer (CCFPI) sensors was proposed herein. Definitely, the sensing principle and manufacturing method of CCFPI sensors were briefly introduced, and with the help of a self-made buried crossing-fault pipeline test device, the packaging and deployment methods of CCFPI sensors to match the buried pipelines were studied. Additionally, the rationality and effectiveness of applying CCFPI sensors to the large strain monitoring of buried crossing-fault pipelines was verified through the simulation test. The research results show that the measured strain value of the CCFPI sensor and the optical fiber sensor agrees well when the fault displacement is less than 165 mm. However, when the fault displacement is greater than 165 mm, the fiber breaks due to out-of-range, but the CCFPI sensor can monitor the strain of the pipeline continuously, and a strain of 0.081 36 is measured by the CCFPI sensor at a fault displacement of 300 mm, which verifies the rationality and reliability of applying the CCFPI sensors to large strain monitoring of buried crossing-fault pipelines. (17 Figures, 21 References)

**Key words:** Coaxial Cable Fabry-Perot Interferometer (CCFPI) sensors, buried crossing-fault pipelines, large deformation, strain monitoring, optical fiber sensor

埋地管道已经成为城市生命线工程的重要组成部分,担负着油气输送和城市供水的重要任务。大量震害经验表明,埋地管道易在地震中遭受破坏,给地震应急和震后恢复带来极大困难,并造成重大的经济损失与人员伤亡。其中,对埋地管道影响最大的是断层引起的地表破裂<sup>[1]</sup>。长距离油气管道所跨地域广阔,不可避免穿越活动断层区域,当断层两侧突发大的差异运动时,管道会受到拉伸、压缩、剪切及弯曲等作用<sup>[2]</sup>,在断层、地面不均匀沉降等极端地质灾害下,极易产生较大的变形<sup>[3-4]</sup>,进而以屈曲失稳或断裂等形式破坏。因此,对跨断层的埋地管道进行变形监测显得尤为重要。基于应力、应变状态的管道监测方法是评估埋地管道结构状态的重要手段之一。为提高管道在遭受纵向大应变时的抗应变能力,大变形管道钢成为目前输油管道的主导材料之一<sup>[5-6]</sup>,其均匀延伸率一般在10%以上<sup>[7]</sup>,进入塑性后会产生较大变形。而现有的管道应变监测技术(应变片、振弦式传感器、光纤传感器)因自身量程限制(一般低于2%),难以实现管道大变形监测<sup>[8]</sup>,为解决此问题,亟需大量程、大标距的分布式监测传感器。

近年来,具有超大应变量程的同轴电缆传感器应运而生,有望解决跨断层埋地管道大应变监测难题。同轴电缆是一种广泛应用于通信领域信号传输的同轴传输线,与光纤同为电磁波传输介质,且具有相同的波导机制,即光纤中传播的光波与同轴电缆中传播的微波均为电磁波,两者的区别仅在于电磁波频段不同,但同轴电缆的延伸率远远大于光纤。李渊等<sup>[9-10]</sup>将光纤传感器的一些感知机理应用于同轴电缆上,先后研发出类比光纤布拉格光栅的同轴电缆布拉格电栅传感器与类比光纤法布里-珀罗干涉的同轴电缆法布里-珀罗干涉(Coaxial Cable Fabry-Perot Interferometer, CCFPI)传感器<sup>[11-14]</sup>。该同轴电缆传感器保留了光纤传感器的优良感知性能,弥补了光纤传感器应变量程的不足,且应变量程可达15%以上。目前,同轴电缆传感器已从机理研究走向了工程应用研究。刘嘉<sup>[12]</sup>聚焦CCFPI传感器的性能分析、选型制作、优化设计及应用测试,通过对CCFPI传感性能的试验研究及其土木工程应用的初步探索,提供了一种有效的结构大应变监测手段。Jiao等<sup>[15-16]</sup>基于CCFPI传感器研发出集监测与受力于一体的智能钢绞线,并尝试将CCFPI传感器用于混凝土梁的变形全过程监测。

Cheng<sup>[17]</sup>提出了一种基于级联同轴电缆F-P干涉仪的分布式扭转传感器,该传感器具有分布式磁场传感应用的潜力。Zhu等<sup>[18-19]</sup>将CCFPI传感器应用于悬臂梁杆的三维变形监测,并通过重构CCFPI传感器,实现了厘米级的位移测量。

在此,从跨断层埋地管道对大应变监测的需求出发,探索CCFPI传感器的适用性。通过自制的跨断层埋地管道试验装置,模拟实际工程中跨断层管道的受力状态,将CCFPI传感器应用于跨断层埋地管道的应变监测,从多角度验证了CCFPI传感器监测跨断层埋地管道大变形的合理性和有效性。

## 1 CCFPI传感器的工作原理

### 1.1 感知机理

同轴电缆是波导结构,由一个圆柱形的内部导体和一个空心的外导体组成,二者同轴心布置并由管状绝缘介质层隔开(图1)。这种结构形成了一个封闭的屏蔽层,使电缆不受电磁干扰。由于集肤效应,电磁波沿着内外导体表面传播。根据传输线理论,特征阻抗是导波的电压与电流之比,可以基于分布式参数电路模型采用下式表示<sup>[15]</sup>:

$$Z_0 = \frac{U}{I} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln(D_o/D_i) \quad (1)$$

式中: $Z_0$ 为特征阻抗, $\Omega$ ;  $U$ 为入射电压,V;  $I$ 为入射电流,A;  $\epsilon_r$ 为绝缘子的相对介电常数; $D_o$ 、 $D_i$ 分别为绝缘层的外径、内径,mm。

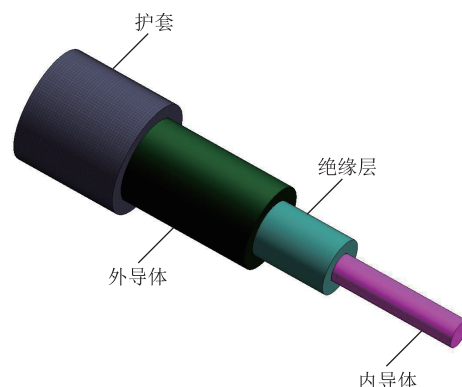


图1 同轴电缆结构模型示意图

对于理想的同轴电缆,其特征阻抗是恒定(50  $\Omega$  或 70  $\Omega$ )且均匀的,因此,基本不会反射电磁波。典型的CCFPI传感器(图2)包含沿电缆一定间隔分布的 $N$ 个( $N \geq 2$ )阻抗不连续点,以用作部分电磁波反射

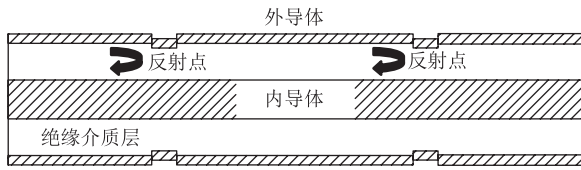


图2 CCFPI传感器结构示意图

点。其中,任意两个反射点组成了同轴电缆法布里-珀罗(F-P)传感单元。当从反射点反射的两个波相遇时将产生干涉信号  $V$ ,由此产生的干涉频谱(图3)可以表示为<sup>[20]</sup>:

$$V = 2\Gamma(f)e^{-\alpha z} \cos\left(2\pi f \frac{2d\sqrt{\epsilon_r}}{c}\right) \cos\left[2\pi f\left(t + \frac{2d\sqrt{\epsilon_r}}{c}\right)\right] \quad (2)$$

式中:  $\Gamma(f)$  为反射波的振幅系数, dB;  $f$  为微波频率, Hz;  $\alpha$  为传播损耗系数, dB/m;  $z$  为电缆方向;  $d$  为反射点之间的距离, mm;  $c$  为真空中的光速, m/s;  $t$  为时间, ns。

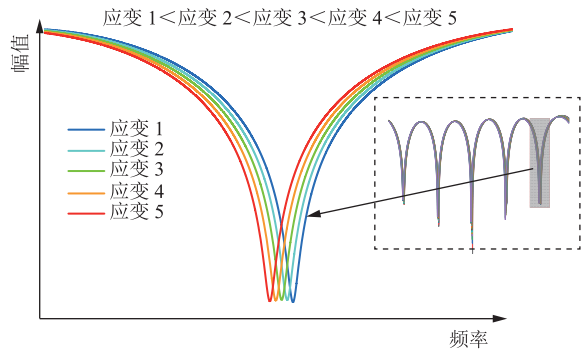


图3 CCFPI传感器在不同应变变量下的干涉频谱示意图

在干涉频谱中,谐振频率与时间延迟  $\tau$  有关,  $\tau$  取决于两个主要因素:反射点之间的距离和绝缘介质层的相对介电常数。第  $N$  个谐振峰的频率  $f_N$  可从式(2)推导出:

$$f_N = \frac{N}{\tau} = \frac{Nc}{2d\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

在应变感测应用中,所施加的应变将改变反射点之间的距离,并且由于光弹性效应,还可以改变绝缘体的相对介电常数。它们之间的关系可以表示为:

$$\begin{cases} A = \frac{\Delta d}{d} \\ \frac{\Delta \epsilon_r}{\epsilon_r} = -P_{\text{eff}} A \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $A$  为施加的应变;  $\Delta d$  为反射点间距的变化量, mm;  $\Delta \epsilon_r$  为绝缘子的相对介电常数的变化量;  $P_{\text{eff}}$  为同轴电缆介电材料的有效普克尔斯系数。

由应变引起的  $\Delta d$  和  $\Delta \epsilon_r$  将引起谐振频率偏移。

第  $N$  个共振频率偏移  $\Delta f_N$  为:

$$\Delta f_N = \frac{\partial f_N}{\partial d} \Delta d + \frac{\partial f_N}{\partial \epsilon_r} \Delta \epsilon_r \quad (5)$$

由式(4)、式(5)可知,应变与共振频率偏移的关系为<sup>[16]</sup>:

$$\frac{\Delta f_N}{f_N} = \left(\frac{P_{\text{eff}}}{2} - 1\right) A \quad (6)$$

通过使用矢量网络分析仪测量第  $N$  个谐振频率偏移(图3),可以根据校准后的式(6)计算应变。此外,式(4)中相对介电常数变化一般对谐振频率的影响较小,当对测量精度要求不严格时,可以忽略该因素的影响,此时式(6)可简化为式(7),可直接测量相对频移得到应变值。

$$\frac{\Delta f_N}{f_N} = -A \quad (7)$$

### 1.2 制作方法

制作 CCFPI 传感器的关键在于如何沿电缆制作反射点(阻抗不连续点),由式(1)可知改变电缆绝缘介质的相对介电常数或电缆几何形状均可引起阻抗不连续性。目前,可以采用3种方法制作阻抗不连续点:①钻孔法<sup>[9]</sup>,沿同轴电缆纵向钻孔,钻孔处的绝缘介质材料变成空气,进而改变同轴电缆的特征阻抗;②变形控制法<sup>[9]</sup>,利用机械工具对同轴电缆外径施压,改变同轴电缆的外直径,进而改变施压处同轴电缆的特征阻抗;③空腔反射法,将同轴电缆中的传输介质替换为空气,形成空腔,通过改变空腔的电容来达到同轴电缆阻抗不连续的目的,可将谐振空腔反射点等间距串联,形成周期性的阻抗不连续点,从而实现分布式监测。

试验采用第3种方法制作 CCFPI 传感器,在同轴电缆上串联电容加载同轴谐振空腔,根据特征阻抗的定义(式1),空腔处同轴电缆的绝缘介质由聚四氟乙烯变为谐振空腔内的空气,引起同轴电缆局部特征阻抗改变,进而形成反射点。谐振空腔与同轴电缆采用焊接工艺连接,通过内导体的焊接来保证传感器完整的信号传输(图4)。此外,谐振空腔还有连接作用,腔体的输入、输出端口按照同轴电缆的尺寸结构进行设计,即同轴电缆横穿过同轴谐振腔。同轴电缆内导体

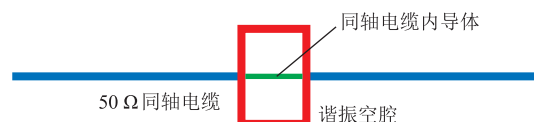


图4 谐振空腔与同轴电缆结构示意图



的传输特性并未因此而发生破坏,仅是绝缘介质由空气取代了聚四氟乙烯,由同轴腔体取代了同轴电缆外导体。

通过在同轴电缆上串联传感单元来实现分布式测量,考虑到同轴电缆本身具有衰减特性,限制了反射点的数量,因此,最终制作了具有4个传感单元(其中1个传感单元用于温度补偿)、总长度10.8 m的CCFPI传感器(图5)。其中,每个传感单元长度为1.2 m,采用环氧树脂胶对反射点进行保护。

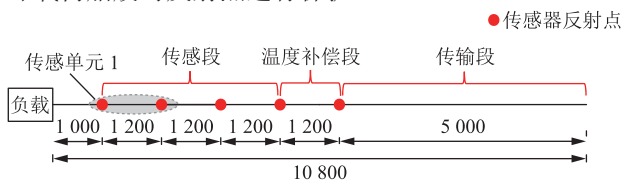


图5 CCFPI传感器结构尺寸图(mm)

## 2 试验模型设计

考虑到埋地管道处于半无限土体域中,跨度很大,在实验室中只能截取一部分进行试验研究。试验选取高密度聚乙烯(High-Density Polyethylene, HDPE)管作为模型管道,将模型管道埋设于盛装原状土的模型土箱中,通过合理选择管道模型及断层体模型,模拟实际工程中跨断层管道的受力状态。

### 2.1 试验装置

试验采用4 m×1.5 m×1.5 m的土箱(图6),土箱装置包括固定模型箱和错动模型箱,两者中间有断缝,模型箱两端预留孔洞用于铺设管道。其中,模型箱为可拆卸装置,固定模型箱固定于长方体基座上,错动模型箱能够在千斤顶竖向加载过程中与固定模型箱产生相对错动,由此实现断层模拟。试验选用长度5 m、管径315 mm、壁厚12.1 mm的HDPE管道,管道在布设完CCFPI传感器与光纤传感器后穿入模型箱预

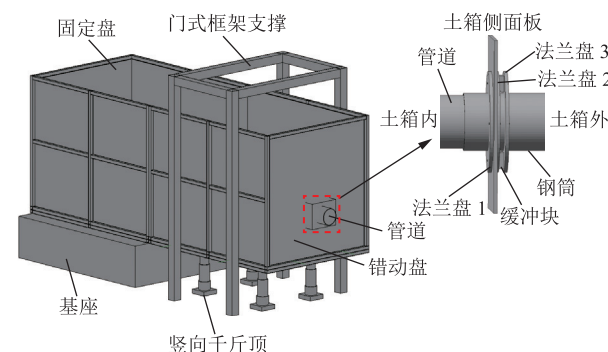


图6 基于CCFPI的跨断层管道应变监测试验用土箱装置示意图

留孔进行管道安装,其中箱体内管道长度为4 m,箱体两端管道总长1 m,管底到土体上表面的垂直距离为1.1 m。为准确模拟实际管道受力状态,在管道端部设置缓冲装置(图6中放大部分),使得管道在断层错动作用下可沿轴向可控伸缩,更加真实地模拟远断层处的轴向小变形段管道。此外,为防止错动模型箱上下错动过程中发生左右倾覆,在错动模型箱位置处设置门式框架侧向支撑,门式框架锚固在地沟梁中(图7)。

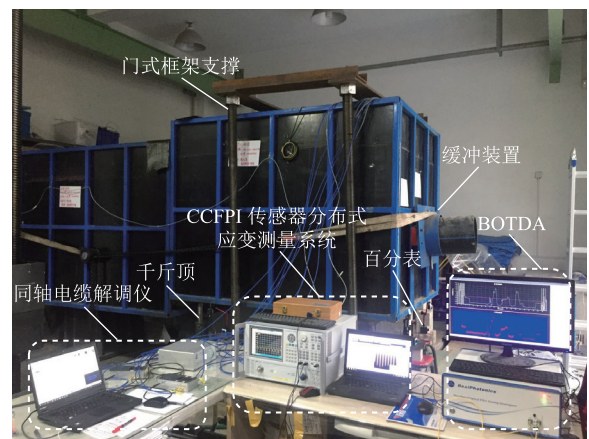


图7 基于CCFPI的跨断层管道应变监测试验装置实物图

### 2.2 传感器的封装保护与布设

将CCFPI传感器和分布式光纤传感器布设于管道相应位置上,测量跨断层管道的应变状态。为全面测量管道应变状态,沿管道上侧壁、右侧壁、下侧壁母线各布设4根CCFPI传感器,共计12根,为便于叙述,上侧、右侧、下侧的CCFPI传感器分别命名为TFP、RFP、BFP,各位置传感器编号均按照顺时针依次编号,每根传感器具有3个应变传感单元与1个温度补偿单元,传感单元由前向后依次命名,例如RFP-4-1表示右侧第4根CCFPI传感器上的第1个传感单元。受限于传感器1.2 m的空间分辨率,为监测管道更多位置的应变状态,将每侧的4根传感器均错位并排布设,反射点间距(传感标距)为1.2 m,卡固点间距(电缆变形段)为0.8 m。为与CCFPI传感器分析对比,将一根35 m的紧包光纤布设在管道的上侧壁、右侧壁及下侧壁母线位置,形成一个完整的回路,并分别用TOF、ROF、BOF表示(图8)。

#### 2.2.1 CCFPI传感器

为保护CCFPI传感器,并保证传感器与管道的变形协调,采用如下所示的封装与布设方式(图9):①采用焊锡焊接的方式,在CCFPI传感器对应的卡固点位

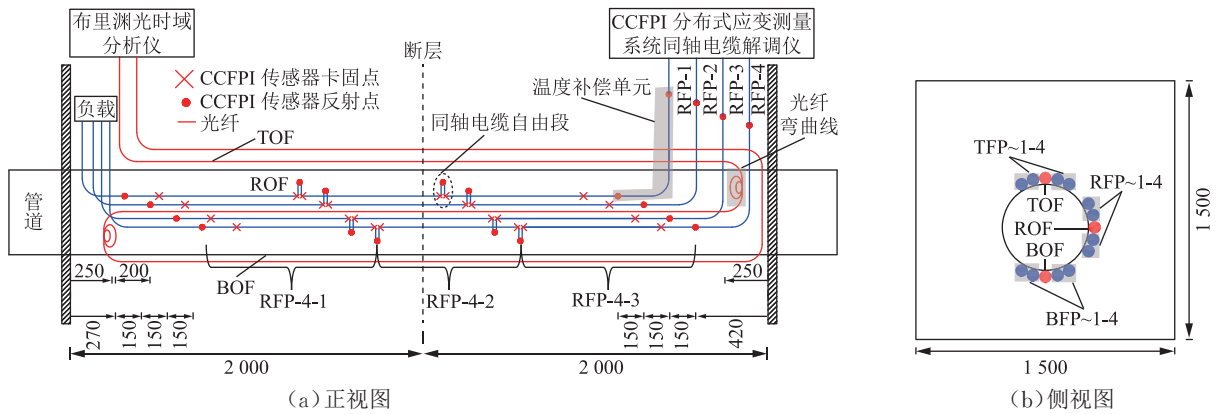


图 8 CCFPI 传感器和分布式光纤传感器管道布设尺寸图(mm)

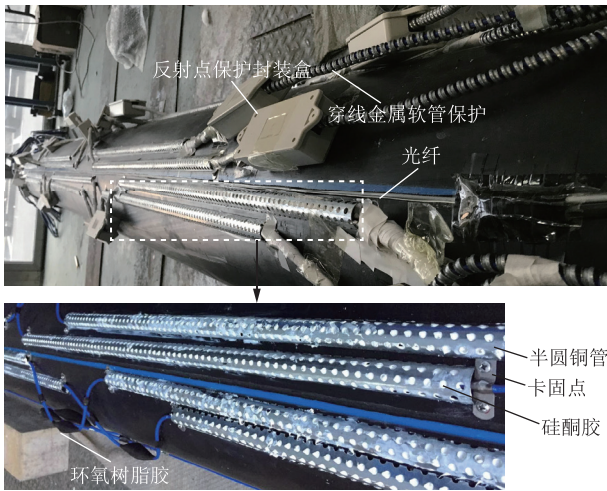


图 9 CCFPI 传感器布设实物图

置焊接卡箍。②根据传感器的布设位置,用电钻在管道的相应位置打孔,用力拉直电缆,使得电缆与管道外壁紧密接触,将传感器上的焊接卡固点用螺丝紧固于管道上,实现传感器与管道的初步协同变形。③在管道埋设过程中,土体不可避免地会对布设于管道表面的CCFPI 传感器产生挤压冲击等作用,引起电缆一系列的阻抗扰动,表现为反射点之间的电缆时域传输信号的基底噪声变大,影响传感器应变监测精度。因此,必须对反射点之间的电缆进行保护。采用半圆铜管和硅酮胶将传感器的传感段紧密粘贴于管道外壁,半圆铜管起硬支撑作用,保护电缆不受冲击挤压,硅酮胶固化后具有较强的黏结强度,也具有一定大变形能力,既可以保证电缆和管道有效黏结,使两者协同变形,又不束缚电缆的变形能力。④为保护传输段的电缆免受土体挤压,采用环氧布和穿线金属软管对其进行封装保护;CCFPI 反射点脆弱,复杂的土体环境易改变其阻抗值,产生干扰信号影响应变监测精度,因此,先后采用环氧树脂胶和专用封装盒对 CCFPI 反射点进行封装保护,以免受潮和被土体挤压。

为验证上述传感器封装布设方法的有效性,对比 RFP-2 传感器在原始、布设后、装箱后、填土后及土体沉积两天后的时域信号(图 10)、时域幅值(图 11)、频域信号(图 12)。在时域信号图中,6 个峰值点位置依次对应传感器上的 5 个反射点和负载,不同试验过程对应的峰值点位置(反射点位置)不产生变化,且反射点间传感段的电缆信号变化微小;在时域幅值变化曲线中,6 个峰值点的幅值在不同试验过程中浮动微小;在频域信号图中,传感器在不同试验过程中基本不产生频移。由此可知,传感器的封装保护措施有效,可使其免受外界环境的影响。

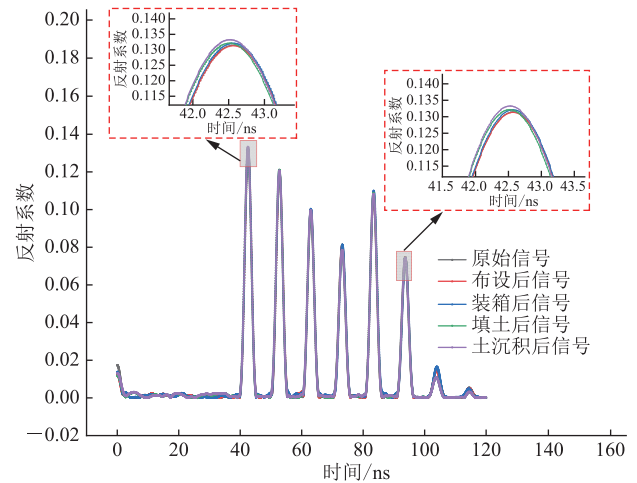


图 10 不同试验过程对应的 RFP-2 传感器时域信号曲线

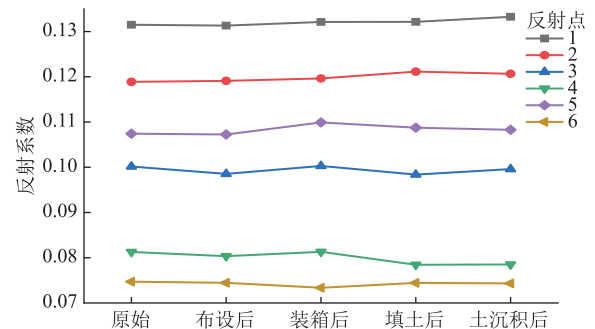


图 11 不同试验过程对应的 RFP-2 传感器时域幅值变化曲线

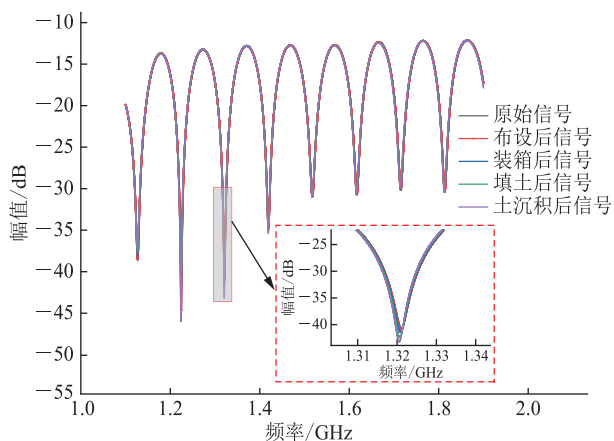


图12 不同试验过程对应的RFP-2传感器频域信号曲线

### 2.2.2 分布式光纤传感器

为保护光纤并确保其更好地与管道协同变形,在光纤布设位置刻槽,将光纤埋设于槽中。分布式光纤由管道上侧壁母线位置开始布设,在管端U形弯曲之后,绕至管道右侧壁母线位置,最后U形弯曲绕至管道下侧壁母线位置(图8),各侧光纤布设的起始点均距离土箱内边界25 cm,具体布设过程为:①在布设之前,截取聚氨酯管封装保护传输段光纤;②为保证与管道的协同变形,对光纤进行预拉伸,施加一定的预拉伸力于光纤上,并将其临时用胶粘贴于管道两侧的卡箍点上;③将传感部分的光纤粘贴埋设进用酒精棉清洁后的管道上侧壁刻槽中;④待胶干后,将临时粘贴在管道两侧卡箍点的光纤取下,以同样的布设方式完成管道右侧壁及下侧壁的光纤布设;⑤待传感段光纤全部粘贴进槽之后,将搅拌均匀的环氧树脂灌注于刻槽中,并粘贴环氧布,以保护光纤。

### 2.3 应变测量与荷载加载

采用华滋奔腾(苏州)安监仪器有限公司研制的HZJT-FB-II型分布式同轴电缆应力应变传感器解调仪解算传感器应变,应变测量精度为 $30 \times 10^{-6}$ ,分辨率为 $100 \times 10^{-6}$ ,测量时间为10 s。由于该解调仪只能输出应变结果,无法采集传感器后台时域与频域信号,同时采用自研的CCFPI传感器分布式应变测量系统<sup>[14]</sup>实时自动记录传感器的时域、频域信号,测试过程中分布式应变测量系统的扫频范围设置为1.1~1.9 GHz,扫频步长为0.01 MHz,频带宽为15 kHz。采用鞍山睿科光电技术有限公司研发的RP1000Z型号布里渊光时域分析仪(Brillouin Optical Time Domain Analyzer, BOTDA)采集分布式光纤传感器的布里渊频谱。该BOTDA应变测量

精度为 $\pm 10 \times 10^{-6}$ ,空间分辨率为150 mm,采样分辨率为25 mm。由4个总出力为50 t的千斤顶提供使断层体产生位错的外力,由安装在错动盘下方的4个百分表控制断层体的位移。利用竖向千斤顶对错动盘施加荷载使之产生竖向位移,加载位移从0以15 mm的步长加载到300 mm,共加载20个荷载步位移;施加完每一荷载步之后,等待5 min使数据基本稳定后,采集各个传感器的信号。

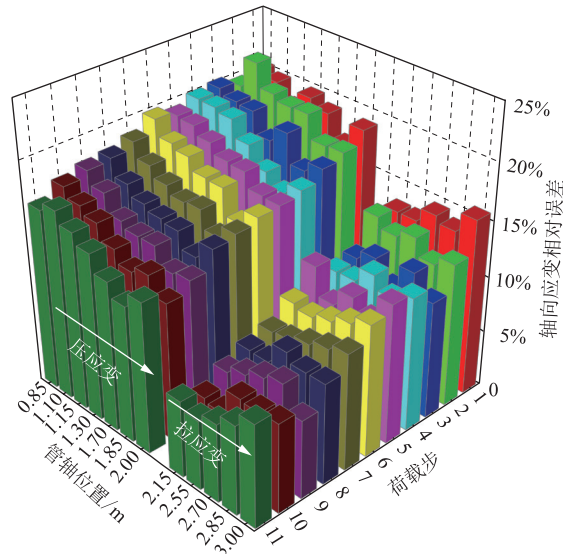
## 3 试验结果

CCFPI传感器所测数据为一个传感单元内的平均应变,默认为传感单元中点处的应变,每根传感器有3个应变传感单元,即对应于管轴3个测点处的应变,由此可知,12根CCFPI传感器可分别监测管道上侧、右侧、下侧各12个测点处的应变,因每侧4根CCFPI传感器均沿侧壁母线布设,且每根传感器之间的布设距离相对于管轴截面尺寸较小,所以认为每侧的4根传感器即12个测点均位于管轴每侧壁母线位置处。以 $TFP_x$ 、 $RFP_x$ 、 $BFP_x$ 和 $TOF_x$ 、 $ROF_x$ 、 $BOF_x$ 分别表示 $x$ 荷载步下管道上侧、右侧、下侧CCFPI传感器和光纤传感器的监测应变。

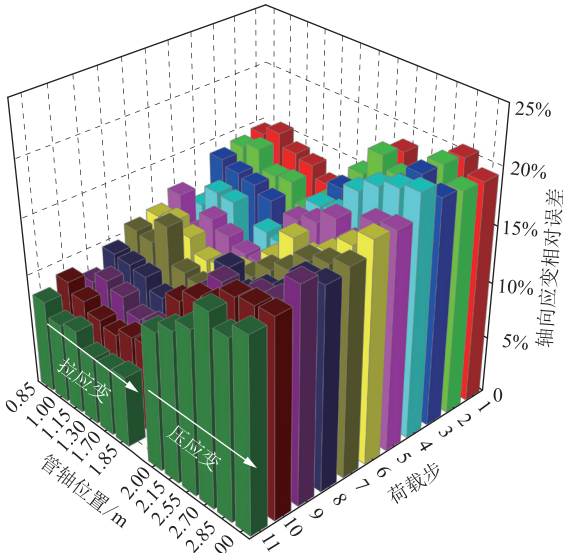
### 3.1 CCFPI传感器应变监测误差

为考察CCFPI传感器拉压应变监测的准确性和可靠性,需对其进行误差分析。光纤传感器是目前应用比较成熟的传感技术,在其监测范围内,以光纤所测应变为基准,分析CCFPI传感器应变监测的相对误差(图13),考虑到应变监测范围较广,相对误差难以衡量其误差范围,需进一步分析其绝对误差(图14)。随千斤顶施加的荷载步位移增大,断层错动量增大,CCFPI传感器监测到的应变值也相应增大。拉应变相对误差呈现出随应变值增大而减小的趋势,在第1~6荷载步时,少数相对误差为10%~15%,由仪器测量的应变值范围为 $244 \times 10^{-6} \sim 8916 \times 10^{-6}$ ,虽然相对误差偏大,但仍处于小应变监测范围内;在第7~11荷载步时,拉应变相对误差基本为6%~10%,吻合较好;绝对误差为 $28 \times 10^{-6} \sim 806 \times 10^{-6}$ ,且应变值越小绝对误差值越小,绝对误差数值相对于应变数值较小,在误差允许的范围之内。综上,光纤监测结果与CCFPI传感器监测拉应变变化趋势一致,验证了CCFPI传感器拉应变监测的可靠性。压应变相对误差为13%~20%,

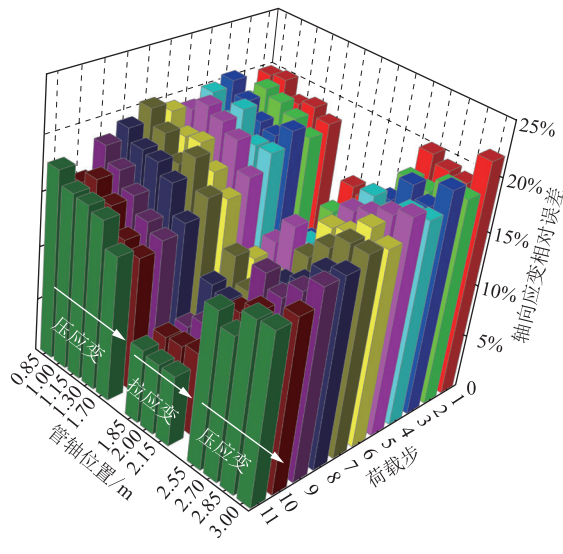




(a) TFP



(b) BFP



(c) RFP

图 13 CCFPI 传感器监测应变的相对误差三维柱状图

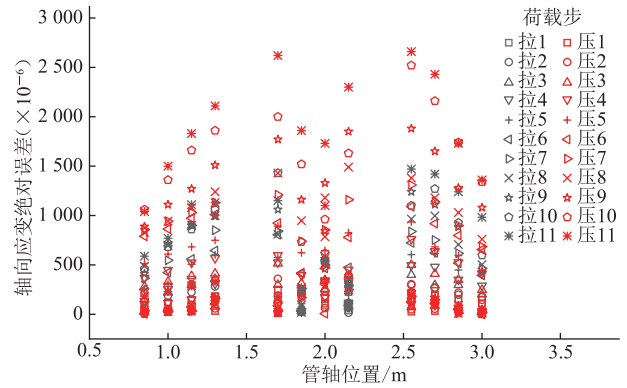


图 14 CCFPI 传感器监测应变的绝对误差分布散点图

虽然相对误差偏大,但应变监测范围( $22 \times 10^{-6} \sim 17\ 065 \times 10^{-6}$ )较广,且相对误差呈现出随应变值增大而减小的趋势;绝对误差大部分在  $1\ 500 \times 10^{-6}$  以下,少部分超出  $1\ 500 \times 10^{-6}$ ,绝对误差较大值分布于大应变监测范围内,与大应变数值相比偏小。虽然 CCFPI 传感器监测压应变的误差偏大,但其与光纤传感器监测压应变变化趋势一致,可将其用于压应变区域的低精度监测。

压应变误差数值偏大的原因有两方面:①利用硅酮胶将传感段电缆粘贴于管道外壁时,胶与电缆之间存在空隙,导致受压时电缆与管道的协同变形较弱,不能准确监测压应变数值,而采用卡固点将电缆卡固于管道上的方式可使管道在受拉时将拉应变传递给电缆,因而对拉应变监测影响较小;②布设传感段的电缆时,手动预拉伸电缆,电缆的预拉伸量较小,不能准确监测压应变数值。为此,提出以下改进措施:利用硅酮胶粘贴传感电缆时,做到紧密粘贴无空隙,使传感电缆与管道更好地协同变形,或将表面粘贴布设改为刻槽半埋入式布设;在预拉伸传感段电缆时,以拉力计拉伸替代手动拉伸,提高拉伸准确度。

### 3.2 跨断层埋地管道在不同断层量下的应变分布

借助 CCFPI 传感器和光纤传感器分析跨断层埋地管道在不同断层量下的应变分布趋势(图 15)。随着千斤顶施加荷载步位移,断层错动量增大,CCFPI 传感器和光纤传感器监测到的应变相应增大,且 CCFPI 传感器所测应变分布趋势与光纤吻合较好。由不同错动量下管道上侧应变沿管轴的分布(图 15a)可知,错动盘管道以受拉为主,而固定盘管道以受压为主,且断层两侧管道轴向应变近似呈中心对称分布;管道下侧应变分布(图 15b)与之相反,错动盘管道的应变状态以受压为主,固定盘管道的应变状态以受拉为

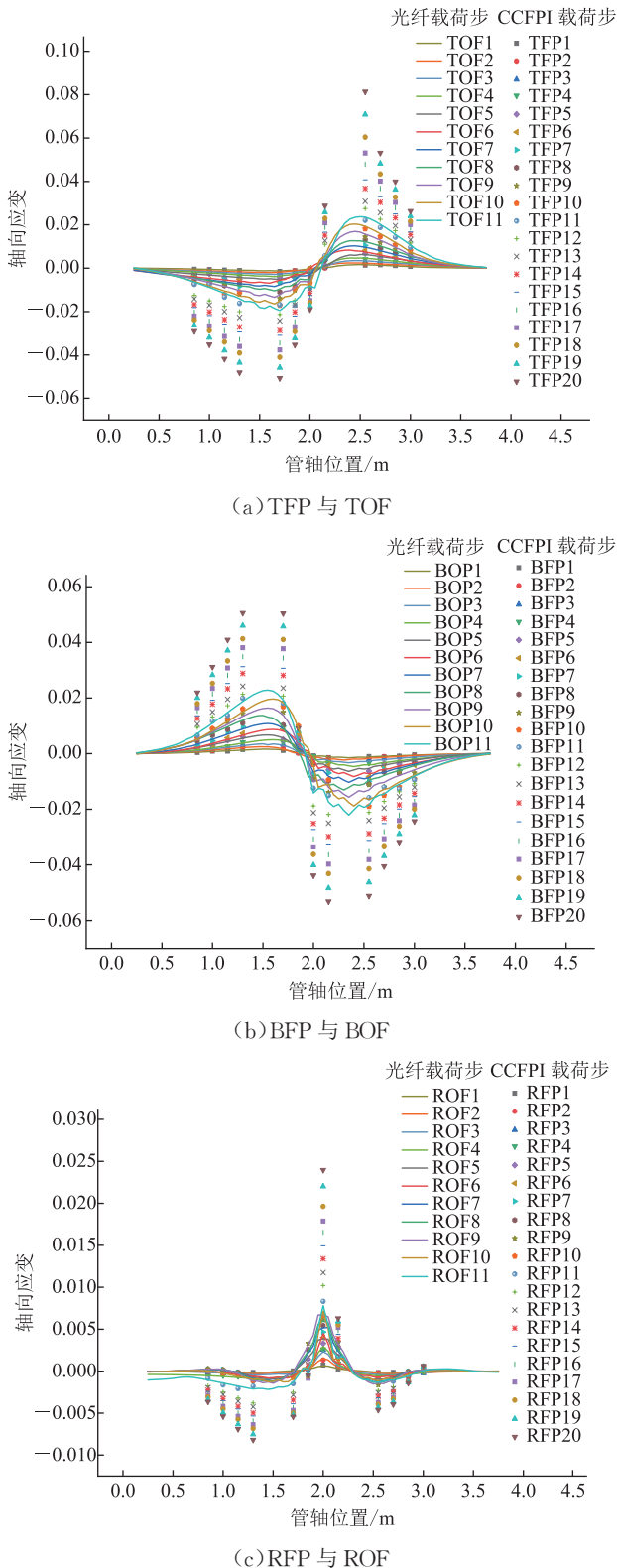


图15 CCFPI传感器与光纤传感器在管道不同位置所测应变沿管轴分布图

主,断层两侧管道轴向应变近似呈中心对称分布;管道右侧面应变(图15c)近似呈现出轴向对称分布趋势,在断层位置处应变迅速达到极值,且表现为受拉状态,在距离断层大约0.5 m位置处,达到压应变的极值,且

压应变峰值远小于拉应变。管道上、下侧拉压应变最大值并非出现在断层处,而是在距离断层大约0.4 m的位置处,离断层较远测点处管道的轴向应变相对较小。在断层错动量达到165 mm(即第11个荷载步)时,光纤所测管道最大轴向拉应变为0.023 73,随后光纤断裂,CCFPI传感器继续监测管道的轴向应变。在光纤监测范围内,CCFPI传感器和光纤传感器所测应变基本符合埋地管道在不同断层量下的应变分布趋势,进一步证明了CCFPI传感器应变监测的可靠性,且在第12荷载步后,CCFPI传感器所测应变依然遵循以上分布趋势。

为了进一步分析在不同断层量下,跨断层埋地管道应变沿管轴的分布趋势,绘制多个荷载步下TFP、BFP和TOF、BOF所测应变沿管轴的分布图(图16),管道上、下侧拉压应变的峰值点出现于管轴同一截面位置处,距离断层约0.4 m;随断层量的增加,管轴同一截面位置处上、下侧应变同步增大且所受应变相反;管道上、下侧拉、压应变近似呈现轴向对称分布趋势;随着远离断层应变逐渐减小并趋近于0。这与以往研究成果<sup>[8,21]</sup>相吻合,定性说明了CCFPI传感器应变监测的可靠性。

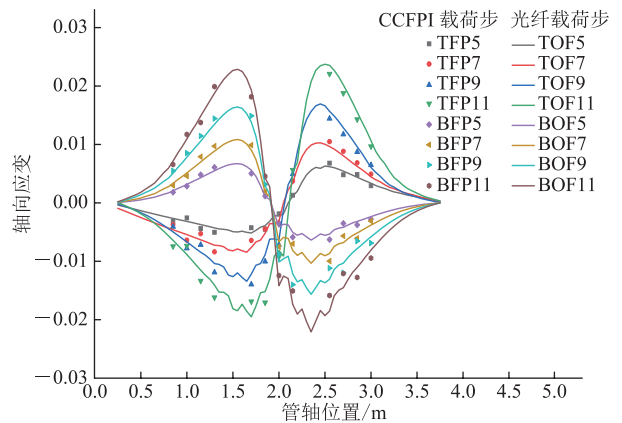


图16 管道上、下侧CCFPI传感器与光纤传感器所测应变沿管轴分布图

### 3.3 大应变监测可靠性验证

在光纤监测范围内,CCFPI传感器的应变监测是可靠、合理的,虽然其所测应变在12荷载步后依然遵循跨断层埋地管道在不同断层量下的分布趋势,但由此并不能完全确定CCFPI传感器大应变监测的可靠性,仍需进一步的分析证明。将管轴2.55 m处TFP和TOF所测应变随断层量的分布曲线与ANSYS模拟所得应变曲线进行对比(图17),结果表明三者的变化趋势一致,再次证明CCFPI传感器和光纤传感器在跨断层埋地管道应变监测中的可靠性。在第11荷



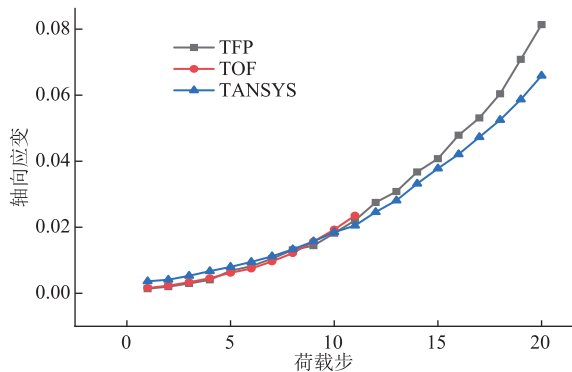


图 17 管轴 2.55 m 处 TFP、TOF 及 ANSYS 模拟应变随荷载步变化曲线

载步时,管道轴向应变达到 0.023 73,随后光纤断裂,CCFPI 传感器继续监测,在第 20 荷载步,即断层位移量达到 0.3 m 时,应变达到 0.081 36。在第 12 荷载步后,虽然 CCFPI 传感器应变监测数值与 ANSYS 模拟结果出现偏差,但其应变分布曲线与 ANSYS 模拟所得应变曲线趋势基本一致,考虑到 ANSYS 模拟所用模型假设偏于理想,边界条件与实际相比有所简化,致使试验监测值与模拟结果相差偏大,模拟结果偏于理想化,结果可定性说明 CCFPI 传感器大应变监测具有可靠性。

## 4 结论

针对跨断层埋地管道对大应变监测的实际需求,提出将 CCFPI 传感器应用于跨断层埋地管道的大应变监测之中。设计制作了中间有断缝的土箱装置,以模拟实际工程中的断层错动,通过布设于管道上侧、右侧及下侧的 CCFPI 传感器和光纤传感器监测埋地管道对断层错动的应变反应状态,多角度证明了将 CCFPI 传感器用于跨断层埋地管道大应变监测的合理性和可靠性。

(1) 以光纤传感器监测应变为基准,在其监测范围内,随着断层错动量增大,CCFPI 传感器应变监测值也相应增大。拉应变相对误差随应变值的增大而减小,绝对误差较应变值本身较小,在误差允许范围内,证明了 CCFPI 传感器监测拉应变的可靠性;压应变误差偏大,但根据应变监测结果,CCFPI 传感器和光纤传感器监测压应变变化趋势一致,故可将 CCFPI 传感器用于压应变区域的低精度监测。

(2) 根据 CCFPI 传感器和光纤传感器所测应变可知:管轴不同测点的轴向应变随断层量的增大而增大;

管道上、下侧应变沿管轴近似呈轴向对称分布,应变峰值同步出现于管轴同一位置,即断层两侧约 0.4 m 处;近断层处管道轴向应变较大,远断层处则相对较小;错动盘管道上侧应变状态以受拉为主,而固定盘管道上侧应变状态以受压为主,下侧应变分布与之相反;右侧应变沿管轴呈轴向对称分布,拉应变峰值出现于断层位置处。

(3) 在光纤断裂前(应变达到 0.023 73),CCFPI 传感器所测应变值与光纤吻合较好;光纤断裂后,CCFPI 传感器测量值依然遵循跨断层埋地管道应变在不同断层量下的分布趋势。结合光纤传感器监测定量分析、ANSYS 模拟定性分析及以往的研究成果,多角度验证了 CCFPI 传感器用于跨断层埋地管道大应变监测的可靠性,故可将其应用于地震、断层等极端自然灾害下管道的大变形监测之中。

## 参考文献:

- [1] 侯忠良. 地下管线抗震[M]. 北京: 学术书刊出版社, 1990: 390-400.  
HOU Z L. Seismic resistance of underground pipelines[M]. Beijing: Academic Books and Periodicals Publishing House, 1990: 390-400.
- [2] LIANG J, JIA W, HOU Z L. Seismic responses of pipelines laid through alluvial valleys[C]. San Francisco: 4th us conference on Lifeline Earthquake Engineering, 1995: 328-335.
- [3] 董飞飞, 曾希, 徐晋东, 杜国锋. 跨断层长输管道受力性能的影响因素分析[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(5): 169-174.  
DONG F F, ZENG X, XU J D, DU G F. Analysis of influencing factors on mechanical behavior of long-distance pipeline across faults[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2018, 35(5): 169-174.
- [4] 丰晓红. 跨断层埋地输气管道断层错动反应分析方法研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2012.  
FENG X H. Research on fault response analysis method of cross-fault buried gas pipeline[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012.
- [5] 李为卫, 韩林生, 陈宏远, 秦长毅, 许晓锋. 基于应变设计管道用钢管技术标准的发展[J]. 石油管材与仪器, 2019, 5(4): 78-83.  
LI W W, HAN L S, CHEN H Y, QIN C Y, XU X F. Technical standards of steel pipe for pipeline based on strain design[J]. Petroleum Instruments, 2019, 5(4): 78-83.
- [6] 朱丽霞, 武刚, 李丽锋, 罗金恒, 田野, 徐春燕, 等. X80 管线钢在

- 管道凹陷状态下的应变演变特征[J]. 天然气工业, 2019, 39(7): 113-119.
- ZHU L X, WU G, LI L F, LUO J H, TIAN Y, XU C Y, et al. Strain evolution characteristics of X80 line pipes with plain dents[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(7): 113-119.
- [7] 董瑾. 基于应变设计的管线钢管变形行为研究述评[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2019, 34(4): 96-102.
- DONG J. Comment on studies of deformation behavior of pipeline steel based on strain design[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2019, 34(4): 96-102.
- [8] NI P, MOORE I D, TAKE W A. Distributed fibre optic sensing of strains on buried full-scale PVC pipelines crossing a normal fault[J]. Géotechnique, 2018, 68(1): 1-17.
- [9] 李渊. 同轴电缆布拉格电栅[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- LI Y. Coaxial cable Bragg grating[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [10] 李鹏. 同轴电缆布拉格电栅传感器的原理与应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- LI P. Theory and application study of coaxial cable Bragg grating sensors[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [11] 周智, 焦彤, 刘嘉. 同轴电缆法布里-珀罗传感器的性能测试与分析[J]. 仪表技术与传感器, 2017(6): 1-6.
- ZHOU Z, JIAO T, LIU J. Analysis and performance test of coaxial cable Fabry-Perot sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2017(6): 1-6.
- [12] 刘嘉. 同轴电缆法布里-珀罗传感器性能及应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- LIU J. Performance and application research of the coaxial cable Fabry-Perot sensor[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [13] 刘嘉, 焦彤, 周智, 肖海. 钳压法制作的同轴电缆法布里-珀罗传感器[J]. 中国测试, 2017, 43(9): 88-93, 117.
- LIU J, JIAO T, ZHOU Z, XIAO H. Coaxial cable Fabry-Perot sensor fabricated by clamping method[J]. China Measurement & Testing Technology, 2017, 43(9): 88-93, 117.
- [14] 焦彤, 周智, 肖海, 范明海. 同轴电缆 F-P 干涉传感器分布式应变测量[J]. 仪表技术与传感器, 2018(12): 30-37.
- JIAO T, ZHOU Z, XIAO H, FAN M H. Distributed strain measurement of coaxial cable F-P interferometric sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(12): 30-37.
- [15] JIAO T, ZHOU Z, LIU J, XIAO H, OU J P. Large strain-tolerated smart steel strand with built in coaxial cable Fabry-Perot interferometer[J]. Measurement, 2020, 151: 107019.
- [16] JIAO T, ZHOU Z, XIAO H. Investigation into coaxial cable Fabry-Perot interferometers for strain measurement and crack detection in RC structures[J]. Measurement, 2019, 147: 106873.
- [17] CHENG B K. Coaxial cable sensors based on Fabry-Perot interferometers and their applications in distributed sensing[D]. Clemson: Clemson University, 2017.
- [18] ZHU C, CHEN Y Z, ZHUANG Y Y, HUANG J. A centimeter-range displacement sensor based on a hollow coaxial cable Fabry-Perot resonator[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(11): 4436-4442.
- [19] CHENG B K, ZHU W G, LIU J, YUAN L, XIAO H. 3D beam shape estimation based on distributed coaxial cable interferometric sensor[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(3): 035017.
- [20] HUANG J, WANG T, HUA L, FAN J, XIAO H, LUO M. A coaxial cable Fabry-Perot interferometer for sensing applications[J]. Sensors, 2013, 13(11): 15252-15260.
- [21] 田江平, 张东山, 雷震, 刘晓锋, 杜国锋. 斜滑断层作用下埋地管道的力学性能试验研究[J]. 石油机械, 2019, 47(9): 123-131.
- TIAN J P, ZHANG D S, LEI Z, LIU X F, DU G F. Experimental study on mechanical properties of buried pipeline under oblique slip fault[J]. Petroleum machinery, 2019, 47(9): 123-131.

(收稿日期: 2020-04-11; 修回日期: 2021-09-03; 编辑: 王雪莉)

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目“同轴电缆分布式 F-P 大应变传感器研制与应用研究”, 61675038; 中央高校基本科研业务费资助项目“强震下结构大变形破损监测仪研制与开发”, DUT18LAB24; “十三·五”国家重点研发计划“物理和信息融合的智能防灾减灾结构系统”, 2018YFC0705606。

**作者简介:** 孙梦, 女, 1995 年生, 在读硕士生, 2017 年毕业于青岛理工大学土木工程专业, 现主要从事结构工程专业结构健康监测方向的研究工作。地址: 辽宁省大连市甘井子区凌云路 2 号大连理工大学, 116024。电话: 18242079316。Email: sunmeng5521@163.com

**通信作者:** 周智, 男, 1973 年生, 教授, 博士生导师, 2003 年毕业于哈尔滨工业大学工程力学专业, 现主要从事高性能传感器网络与结构健康监测、纤维增强树脂材料制品与海洋土木工程结构方向的研究工作。地址: 海南省海口市美兰区人民大道 58 号海南大学, 570228。电话: 18089849955。Email: zhizhou@hainanu.edu.cn