

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210203001

基于分布式应变监测的埋地管道悬空识别方法研究*

刘绪都, 冯新, 李明昊, 李昕

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024)

摘要: 埋地管道在地基缺陷或管道泄漏作用下会产生局部悬空, 悬空的发展不仅会威胁管道的安全运行, 还会造成地面沉降、塌陷等地质危害。因此, 提出一种基于分布式应变监测的埋地管道悬空识别方法。首先布设分布式应变传感器获取管道沿途任意位置纵向应变, 然后提取弯曲应变并判断管道悬空状态的出现, 再结合管道弯曲应变建立埋地管道有限元模型, 最后通过遗传算法对管道有限元模型的土体刚度进行修正, 根据修正后的土体刚度变化定量识别管道悬空出现的位置及范围。通过模型试验验证得出识别结果与试验悬空段两侧坡肩位置最大误差不超过0.2 m, 反推出的管道应变峰值和挠度与监测结果相差最大分别为84.1 $\mu\epsilon$ 和3.5 mm, 其对应的相对误差分别为7.7%和9.2%, 试验误差都控制在工程可以接受的范围以内。研究表明: 本方法可以实时监测管道的工作应力, 反推出管道的挠曲变形, 准确判断管道悬空的出现, 精确识别出管道悬空的范围。本方法对管道运行的结构状态评估和悬空灾害识别都具有非常积极的意义。

关键词: 埋地管道; 悬空识别; 分布式应变; 有限元模型修正; 遗传算法

中图分类号: TE832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)05-1076-09

Suspension Identification on Buried Pipeline based on Distributed Strain Monitoring

LIU Xudu, FENG Xin, LI Minghao, LI Xin

(State Key Lab of Coastal & Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Due to foundation defects or pipeline leakage, buried pipelines are prone to be partially suspended. The development of suspended pipelines will not only threaten the safe operation of pipelines, but also cause geological hazards, such as ground subsidence and collapse. Therefore, a suspension identification method of buried pipelines based on distributed strain monitoring is proposed. Firstly, distributed strain sensors are deployed to obtain longitudinal strain distribution along the pipeline, and then the bending strain is calculated and the suspended state of the pipeline is judged. Moreover, a finite element model of the buried pipeline is established based on pipe bending strains, and the soil stiffness of the finite element model is updated using genetic algorithm. Finally, the position and range of

* 收稿日期: 2021-02-03; 修回日期: 2021-04-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0802400)、国家自然科学基金面上项目(52079024)、中央高校基本科研业务费项目(DUT20LAB133)资助

作者简介: 刘绪都(1994—), 男, 博士研究生。主要从事重要管道安全监测技术研究。E-mail: 1939651798@qq.com

通讯作者: 冯新(1970—), 男, 教授, 博导。主要从事结构健康监测与安全评价、基础设施全寿命周期智慧运维、智能感知与大数据分析研究。E-mail: fengxin@dlut.edu.cn

pipeline suspension are quantitatively identified according to the modified soil stiffness. The model test results show that the maximum error between the identification result and the positions of the slope shoulder on both sides of the suspended section in the test does not exceed 0.2 m, and the maximum difference between the peak strain and deflection of the pipeline and the monitoring results is 84.1 $\mu\epsilon$ and 3.5 mm, respectively. The corresponding relative errors are 7.7% and 9.2% respectively, which are within the acceptable range of the project. The proposed method can monitor the working stress of the pipeline in real time, deduce the deflection of the pipeline, judge the occurrence of pipeline suspension, and accurately identify the range of pipeline suspension. This method has very positive significance for the evaluation of structure state and the identification of suspension hazards of pipeline operation.

Keywords: buried pipeline; suspension identification; distributed strain; finite element model modification; genetic algorithm

引言

埋地管道工程作为基础设施建设的重要组成部分,在人民生活和社会生产中起着非常关键的作用,被称为生命线工程^[1]。然而,当地基出现不均匀沉降或管道泄漏时,会导致埋地管道的大范围变形甚至局部悬空,悬空的发展有可能造成地表沉降变形、破裂甚至塌陷等地质灾害^[2]。仅2019年10月到2020年10月,我国至少发生1 000余起地下管线事故,造成105人遇难,234人受伤。因此,进行埋地管道悬空识别方法研究具有十分重要的意义。

目前,对可能威胁管道的地质灾害进行早期阶段监测的方法有GPS测量技术、激光雷达传感技术、无人机遥感技术。GPS测量技术借助于多个接收器,分别在管道周围稳定区和非稳定区设置基准点和变形监测点,监测土壤的位移和变形。虽然GPS测量精度高、速度快、全天候工作,但若周围建筑物较多会影响卫星信号的接收,降低观测精度^[3]。激光雷达传感技术通过激光照射结构上的控制点来测量距离,建立数字高程模型计算管道周围土壤坡度以及管道覆盖深度,确定土壤移动的影响区域。尽管激光测量精度较高,但却受天气条件和植被覆盖影响,且需要进行大量的后处理工作^[4-5]。无人机遥感技术利用无人机的成像传感器提供数字图像数据流,应用自动化技术检测出管道沿线发生变化以及干扰管道的特征,处理观测期间发生的环境差异变化,判断管线是否出现开挖、占压、滑坡等情况。但无人机管道检测系统的应用仍然存在数据和信息处理还未达到可操作的标准,实时判断管

道威胁的能力不足等问题^[6-7]。现有的这些监测方法多局限于对铺设于地表的管道监测潜在的地质灾害,对于具有埋于地下、距离长及分布复杂特点的埋地管道还是无法进行有效的监测。然而,地表出现裂缝、沉降、塌陷等地质灾害的早期阶段是由于地基不均匀沉降或管道泄漏致使管道下部土壤承载力降低,管道逐渐失去支撑而形成悬空,伴随季节变化悬空进一步发展造成的,若能在管道悬空出现的初期进行识别,便能消除威胁埋地管道的地质灾害。但管道悬空的产生和发展比较缓慢,可能出现在管道沿程的任意位置,而且在管道损坏之前没有明显的征兆,现有的监测手段还是很难发现悬空问题。因此,需要一种合适的监测方法对埋地管道悬空出现的位置及范围进行识别。

分布式光纤传感技术作为一种分布式实时监测管道应变及温度变化的传感技术,具有长距离连续监测、抗干扰、耐腐蚀等诸多优点^[8-11]。但附着于管壁的分布式光纤应变测量发生变化是由管道产生的挠曲变形引起的,反映的是管道本身的在位状态信息,根据其结构状态很难直接识别周边土体行为,判别管道悬空的出现,故需要通过分布式应变监测数据建立合适的方法识别管道悬空出现的位置和范围。本文提出一种基于分布式应变监测的埋地管道悬空识别方法,采取合理的管道分布式应变传感器布设技术,利用应变监测数据根据管道悬空特征识别悬空的出现,建立埋地管道有限元模型识别土体刚度,将管道悬空识别问题转化为土体刚度识别问题,实现对管道悬空范围的定量识别,为管道悬空灾害识别提供了有效的监测手段。

1 识别方法

1.1 分布式光纤监测方案

埋地管道在地基缺陷或管道泄漏作用下会导致管道下方土体逐步流失,出现局部悬空的现象。为了简述管-土相互作用,将悬空埋地管道划分为悬空段和两个转换段,简化为一个具有弹性支撑的连续梁,其边界条件(锚固点)为简支的力学模型^[12-13],其附加弯矩分布如图1所示。管道在悬空段中间产生最大正弯矩,向两侧逐步递减,在趋近转换段时转化为负弯矩区,并在靠近坡肩处的起点达到最大负弯矩,形成反弯点,然后负弯矩逐渐减小,至锚固点处则完全消失。若通过监测手段得到埋地管道悬空附加弯矩分布形状的管道应变/应力分布曲线,就可以判断出悬空管道的出现。但要获得埋地管道悬空附加弯矩分布,则需要做到对管道监测段范围内进行分布式应变/应力监测。

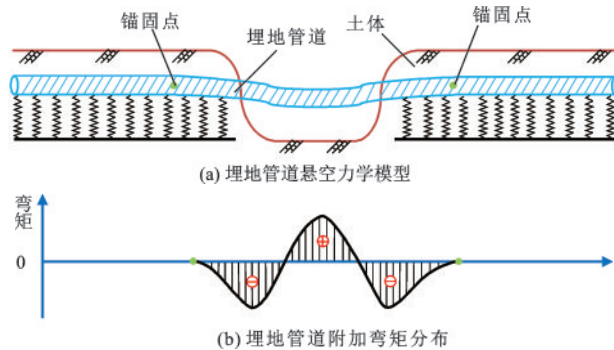


图1 埋地管道悬空力学模型和附加弯矩分布

Fig.1 Diagrams of suspension mechanical model and additional bending moment distribution of the buried pipeline

目前较为成熟的基于 Brillouin 散射原理的分布式光纤应变传感技术,可以实现对管道沿途任意位置进行分布式应变监测。考虑到悬空状态下管道变形响应具有显著的空间三维特性,而 Brillouin 光纤应变传感器仅能获得长度方向一个维度上的响应,因此需要设计合理的传感器布设方式。为了便于传感器布设,可采用沿管道纵向平行布设的方式。根据管道的受力状态可知,所有内外荷载最终都综合体现为弯矩、轴力和内压的方式作用于管道,因此分布式应变传感器测量到的纵向应变是弯曲应变和轴向应变的综合效应。为了从纵向应变中分离出管道的弯曲应变和轴向应变,沿管道截面

的 0°、90°和 270°位置平行布设 3 条 Brillouin 分布式光纤应变传感器,其布设方式如图 2 所示。该布设方法主要应用于新建管道或者有开挖条件的埋设管道。

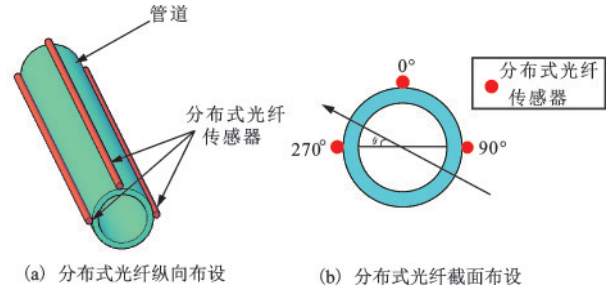


图2 埋地管道分布式光纤传感器布设

Fig.2 Layout diagram of distributed fiber optic sensor for the buried pipeline

根据冯新等^[14-15]提出的从纵向应变数据分离出管道弯曲和轴向应变的方法进行计算,其公式如下:

$$\begin{aligned} \epsilon_b(x) &= \frac{\epsilon_L(x) - \epsilon_R(x)}{2\sin\theta} \\ \epsilon_a(x) &= \frac{\epsilon_L(x) + \epsilon_R(x)}{2} \\ \theta &= \tan^{-1} \frac{\epsilon_L(x) - \epsilon_R(x)}{2\epsilon_L(x) - \epsilon_L(x) - \epsilon_R(x)} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, x 为沿管道纵向的某一任意位置; $\epsilon_L(x)$ 、 $\epsilon_R(x)$ 、 $\epsilon_L(x)$ 分别为管道在 x 处截面 0°、90°和 270°处的光纤实测应变值; θ 为管道中性面偏转角; $\epsilon_b(x)$ 、 $\epsilon_a(x)$ 为管道在 θ 处的弯曲和轴向应变。

当分布式光纤应变传感器获得管道纵向应变数据后,根据式(1)获得管道任意位置的弯曲应变、轴压应变和中性平面的位置。进而将弯曲应变数据根据埋地管道悬空附加弯矩分布特征判断管道悬空状态出现,为接下来进行悬空定量识别提供先验信息。

1.2 悬空定量识别方法

利用上节所述方法将分布式应变传感器布设在埋地管道上,即可通过式(1)实时获得管道弯曲应变。一旦监测得到管道弯曲应变发生改变并出现 1.1 节的分布特征,则可判断管道出现了悬空现象,但是悬空的位置和影响范围仍然无法直接确定。根据管-土相互作用机理可知,管道悬空意味着该段土体支撑作用的丧失,在管-土相互作用模型中

表现为土体刚度的消失,于是管道悬空的识别就可转化为管-土相互作用模型中土体刚度的识别问题。

管-土相互作用分析通常采用 Winkler 地基梁模型。埋地管道由于下部土体的丧失会在自重作用下产生的向下挠曲变形,因此在建立有限元模型时仅考虑竖直面的管-土相互作用即可。根据有限单元法编程建立二维有限元模型,其有限元模型计算流程如图 3 所示。将埋地管道离散成若干个管单元,管道下部的地基土体约束划分为若干个等间距排列、相互独立的土弹簧单元,管道两端采取简支约束,竖向土压力按照《供水排水工程管道结构设计规范》^[16] 计算。埋地管道有限元模型如图 4 所示。

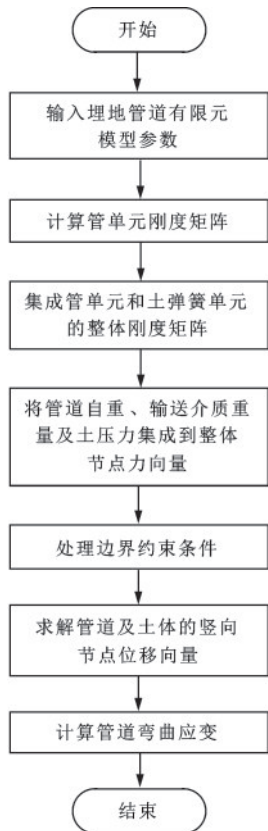


图 3 埋地管道有限元模型计算流程

Fig.3 Flow chart of the finite element model calculation of the buried pipeline

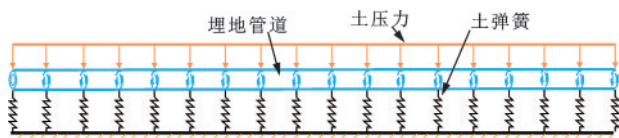


图 4 埋地管道有限元模型

Fig.4 Finite element model of the buried pipeline

采用有限元法离散后的管-土相互作用的 Winkler 地基梁模型的控制方程为:

$$\begin{aligned} [k_{EI}]\{y\} + [k]\{y\} &= [f] \\ \{\epsilon\} &= [B]\{y\} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, k_{EI} 为管道刚度系数矩阵; k 为土弹簧刚度系数矩阵; y 为管道及土体的竖向节点位移向量; f 为竖向节点荷载向量(包括管道自重、输送介质重量及管道上部土压力); B 为应变矩阵; ϵ 为管道弯曲应变。

在已知土体刚度、管道刚度及荷载的情况下,根据式(2)可计算得到管道的竖向位移,进而得出管道的弯曲应变。反之,若已知管道的弯曲应变、管道刚度及荷载,求解土体刚度却是一个非线性反演问题,无法直接得到结果。因此,需要建立一种基于分布式光纤应变监测数据的埋地管道修正有限元模型反演出土体刚度的方法。

以土弹簧刚度为修正项,将管道弯曲应变监测值与有限元模型计算理论值的差值平方和达到最小,作为悬空状态下的埋地管道修正有限元模型的目标函数在最小二乘问题下的解,其函数方程为:

$$\min F(K) = [\{\epsilon\}^e - \{\epsilon\}^p]^T [\{\epsilon\}^e - \{\epsilon\}^p] \quad (3)$$

式中, $K = (k_1 \ k_2 \ \dots \ k_m)$, 是 m 个土弹簧的刚度值; $\{\epsilon\}^e = (\epsilon_1^e \ \epsilon_2^e \ \dots \ \epsilon_n^e)$ 为埋地管道有限元模型的 n 个弯曲应变理论值; $\{\epsilon\}^p = (\epsilon_1^p \ \epsilon_2^p \ \dots \ \epsilon_n^p)$ 为管道的 n 个弯曲应变监测值,根据式(1)确定。实际上,管-土相互作用模型中土体刚度的反演可作为优化问题进行求解,但是反问题通常具有本质的不稳定性困难,因此需要寻求鲁棒性较强的全局优化算法反演土弹簧刚度值。近年来,适合求解优化问题的人工智能方法,如遗传算法^[17-19]等方法发展较快,与传统的优化方法相比,它们一般具有高度的非线性映射、自适应和自组织等功能,在解决局部最优与全局最优等问题中具有明显的优势。但是式(3)的目标函数中反演参数个数较多(通常多达几百甚至成千上万),且反演变量与目标函数间具有强烈的非线性,通过尝试发现,若要直接通过遗传算法求解式(3)通常难以收敛。因此,如何利用遗传算法设计基于分布式应变监测数据的修正有限元模型对土弹簧刚度进行识别是本文研究的难点所在。

为了使目标函数值达到收敛的效果,需要尽量减小反演参数的个数,但又要达到通过土弹簧刚度变化识别悬空范围的目的,则需要结合实际情况悬

空状态下管道土体刚度分布情况进行求解。由于管道悬空是在失去下部土体支撑形成的,则在有限元模型中可视为管道悬空段下部土弹簧刚度值为0。若悬空段有 h 个土弹簧的刚度值为0,而Winkler模型中用于代替地基土体约束的土弹簧是按设置的等间距 d 排列分布,则悬空段的长度 L 为 dh ,这样悬空段长度 L 的定量识别问题就转化为了反演悬空段土弹簧刚度值为0的个数 h 。此时将目标函数式(3)改写为:

$$\min F(h, K^*) = [\{\epsilon\}^e - \{\epsilon\}^p]^T [\{\epsilon\}^e - \{\epsilon\}^p] \quad (4)$$

式中, $K^* = (k_1 \ k_2 \ \dots \ k_s)$,是减去土弹簧刚度值为0的个数 h 后两侧剩余的 S 个土弹簧刚度值。不妨先令两侧的未悬空段土弹簧刚度值 K^* 取同一个变量值 k_0 ,则此时仅存在 h 和 k_0 两个变量。当通过管道弯曲应变监测值判断悬空出现后,通过遗传算法对式(4)求解,得到土弹簧刚度值为0的个数 h 后,就可以初步判断出悬空段长度 L 。由于此时两侧的土弹簧刚度为同一个值,故得到的悬空段长度 L 离实际悬空范围还存在一定的差距,还需要进一步反演出两侧的土弹簧刚度的各个值,通过两侧土弹簧刚度变化识别出最终的悬空位置和范围。

土壤模量沿管道长度是变化的,当土体变松散时,土壤模量也会相应降低,而管道材料模量是不变的,这就会导致较高的管道相对刚度,产生较大的管道弯曲应力^[20]。在管道悬空力学模型中,转换段的弯曲应力越趋近于悬空段时越大,因此可以认为管道越趋近于悬空段时相对刚度越大,也就是说靠近悬空段长度两侧的土弹簧刚度随着管道弯曲应力的增大而逐渐较小,在遗传算法中设计遗传算法,令靠近初始悬空段两侧的土弹簧变量在遗传过程中越趋近于悬空段,土弹簧刚度变量越小的排序方式。此外,离悬空段较远的土弹簧刚度在实际情况中会在一个稳定的范围内波动,则对这类土弹簧变量设置合理的可行解区间即可。于是在得到土弹簧刚度值为0的个数 h 基础上,再对两侧剩余的 S 个土弹簧刚度进行反演,通过遗传算法求解式(4)获得两侧土弹簧刚度值,根据得出的两侧土弹簧刚度变化情况定量识别出埋地管道悬空的位置及范围。

1.3 悬空识别算法流程

土体刚度识别的有限元模型修正问题属于多维、较大空间及高精度数值优化问题,使用二进制

编码会存在明显的缺陷,因此选择实数编码的遗传算法^[21-22]。具体算法识别流程如下:

Step1:沿埋地管道截面的 0° 、 90° 和 270° 位置平行布设3条Brillouin分布式光纤应变传感器,从获取的管道纵向应变监测值提取弯曲应变,按照埋地管道悬空附加弯矩分布特征判别管道悬空状态的出现,并根据弯曲应变左、右两反弯段峰值所在位置之间的中心作为管道悬空段的中心位置,以该位置作为 h 个刚度值为0的土弹簧组成的悬空段中心位置。

Step2:根据埋地管道现场实际勘测试验资料,采用Winkler地基模型建立埋地管道管-土相互作用有限元模型,确定有限元模型中需要修正的土弹簧刚度的数量和取值范围。

Step3:确定遗传算法参数:进化代数 T 和群体大小 W ,进行实数编码基因型数量为 W 、长度为2的土弹簧刚度值为0的个数 h 和两侧土弹簧刚度一致的值 k_0 作为初始种群。

Step4:将每个个体的基因型解码为有限元模型中土弹簧刚度值为0的个数 h 和土弹簧刚度 k_0 的表现型,代入埋地管道有限元模型得到弯曲应变理论值,结合弯曲应变监测值求目标函数式(4)最小值,并计算其对应个体的适应度。

Step5:根据每个个体的适应度,按照一定的方式进行选择操作,将被选中的个体送至配对库中,用以繁殖下一代;按照交叉概率 P_c 从配对库中任选两个个体基因型进行交叉,按照变异概率 P_m 对每个个体基因型实施一定的变异操作,又产生一定数量的新个体。

Step6:将新一代群体内每个个体的基因型解码,计算新一代个体对应的目标函数式(4)最小值,计算其适应度,执行最优个体保存策略。若进化代数小于 T ,则转向Step4;若满足,则输出最优的土弹簧刚度值为0的个数 h 和两侧土弹簧刚度值 k_0 。

Step7:在土弹簧刚度值为0的个数 h 基础上,再次确定有限元模型中两侧未悬空段需要修正的土弹簧刚度 K^* 的数量 S 。遗传算法中进化代数和群体大小仍然设置为 T 和 W ,进行实数编码基因型数量为 W 、长度为 S 的两侧土弹簧刚度作为初始种群。

Step8:将每个个体的基因型解码为有限元模型中两侧未悬空段土弹簧刚度 K^* 的表现型,代入埋地管道有限元模型得到弯曲应变理论值,结合弯曲应

变监测值求目标函数式(4)最小值,并计算其对应个体的适应度。

Step9:根据每个个体的适应度,按照一定的方式进行选择操作,将被选中的个体送至配对库中,用以繁殖下一代;在交叉、变异操作中令靠近悬空段的土弹簧变量按越趋近于悬空段,土弹簧刚度变量越小进行排序,生成新一代个体。

Step10:将新一代群体内每个个体的基因型解码,计算新一个个体对应的目标函数式(4)最小值,计算其适应度,执行最优个体保存策略。若进化代数小于 T ,则转向Step8;若满足,则输出最优的两侧未悬空段土弹簧刚度值 K^* 。

土体刚度反演过程结束,结合Step6输出的土弹簧刚度值为0的最优个数 h 和Step10输出的两侧未悬空段的最优土弹簧刚度值 K^* 即为悬空状态下埋地管道有限元模型的土弹簧刚度修正值,根据修正土弹簧刚度的变化情况就可以定量识别管道悬空的位置和范围。

2 试验验证

2.1 试验装置设计

为了验证本文提出的埋地管道悬空识别方法,开展了埋地管道悬空模型试验。试验在如图5所示的大型试验土箱(长12 m×宽1 m×高1.7 m)内进行,为了模拟管道周围的砂土环境,先在试验箱内铺设厚度为1 m的碎石和土体并进行夯实,然后再接着填充30 cm高的砂土,再将布设好传感器的管道放置到整平的砂床上,最后在管道上部回填7 cm高的砂土。

以某DN450,壁厚20 mm钢管作为模拟对象,采用弹性力-重力相似原理设计模型管道。设计刚

度比尺为 3.077×10^4 ,管长和管径的几何比尺分别为12.5和4.09,选用PPR管作为试验管道,其长度为12 m,外径为110 mm,壁厚为15.1 mm。该管材的弹性模量为800 MPa,密度为 910 kg/m^3 。通过在PPR管内放置钢筋模拟钢管和原油的重力效果。

按照图2的埋地管道监测方法分别在PPR管相应位置纵向布设Brillouin分布式光纤应变传感器,同时为了进行数据比对,在管道底部再增设一条分布式光纤应变传感器,共沿管道纵向布设了4条分布式光纤传感器。此外也在管顶和管底的 $L/6$ 、 $L/3$ 、 $L/2$ 、 $2L/3$ 、 $5L/6$ 处各布置1个电阻丝应变片,与采集到的分布式应变光纤数据进行验证。采用NBX-6050A光纳仪采集分布式光纤传感器数据,该仪器的应变测量精度为 $7.5 \mu\epsilon$,最高空间分辨率为5 cm,最小采样点间隔为1 cm,本次试验中设置空间分辨率为10 cm,采样点间隔为5 cm,选取的光纤传感器为直径0.9 mm的单模光纤,实际工程中需要采用封装保护的单模应变传感光缆。考虑到监测过程中周围环境对光纤的影响,采用环氧树脂将光纤连续粘接于管道外壁进行保护。利用cDAQ多通道数据采集仪采集电阻丝应变片的数据,应变片连接方式为1/4桥接法。此外在这5个控制断面布置轻质刚性标志桩,设置管道变形监测靶点,采用RTS 311L激光全站仪进行测量。

本次试验的目的在于验证算法的可行性,共4种试验工况。在管道处于全埋状态时,以管道中心为对称中心向两侧依次开挖悬空长度2、3、4、5 m的试验工况,其模拟的实际埋地管道长度依次为25、37.5、50、62.5 m。开挖悬空长度2 m时,以管道6 m处为中心,沿着管道用小铲子同时向两侧挖除管道周围各1 m的砂土,间隔一段时间后,从悬空段两端的坡肩处继续同时向两侧各挖除0.5 m的砂土,形成悬空长度3 m的试验工况,悬空4 m和悬空5 m试验工况的挖除方式与悬空3 m相同。

2.2 识别结果分析

试验中,位于管道截面 90° 和 270° 的分布式应变数据分布趋势基本一致,并且数值都在 $\pm 100 \mu\epsilon$ 范围内波动,可认为管道轴向应变较小,管顶和管底测得的分布式应变数据是由弯曲应变主导的,因此直接分析分布式应变数据也可识别管道悬空的

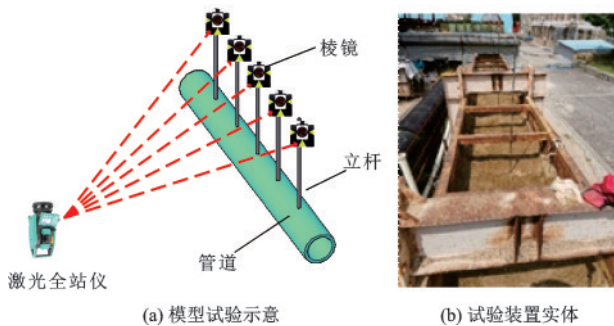


图5 模型试验装置
Fig.5 Model test device

出现。4种工况下的管顶和管底分布式应变监测数据和各控制断面的电阻应变片测量数据如图6所示。对比两者数据,可以看出各个工况控制截面的应变片测量数据与分布式应变数据吻合效果较好,说明分布式光纤传感器可以有效的测量管道纵向应变。

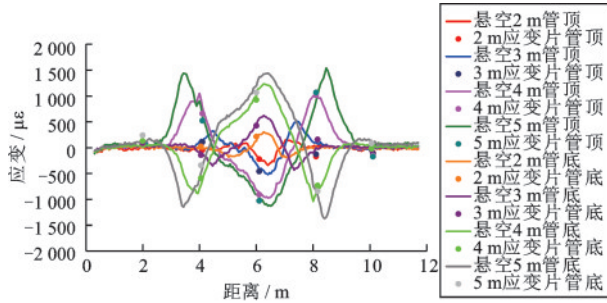


图6 各悬空工况下管道分布式应变监测数据

Fig.6 Distributed strain monitoring data of pipelines under various suspended conditions

从悬空2 m到悬空5 m,分布式光纤采集到的管顶和管底应变数据都出现了明显的悬空特性,即在悬空段都形成正弯矩且峰值不断增大,在悬空段两侧出现负弯矩,负弯矩都呈现出先增加然后减小的趋势,可判断该范围为转换段。各工况下管顶和管底跨中最大应变都较管道开挖悬空段中心约向右偏移0.5 m,这可能与悬空段两侧土体存在非对称性约束、试验误差相关。悬空2 m时(工况1),管顶最大压应变为341.2 $\mu\epsilon$,管底最大拉应变为305.3 $\mu\epsilon$,管道左侧管顶反弯点峰值93.7 $\mu\epsilon$ 出现在5.128 m处且反弯段应变约在4.5 m处趋近于0,管道右侧管顶应变反弯点峰值155.3 $\mu\epsilon$ 位置处在约7.079 m处且反弯段应变约在7.5 m处趋近于0。悬空长度增至3 m和4 m时(工况2和工况3),管顶最大压应变分别为518.8 $\mu\epsilon$ 和970.4 $\mu\epsilon$,在转换段反弯点应变峰值逐渐增加且向两侧不断移动,左侧转换段应变分别约在3.5 m和2.5 m处趋近于0,右侧转换段应变分别约8.5 m和9.5 m处趋近于0。悬空长度达到5 m时(工况4),管顶最大压应变达到了1 127.5 $\mu\epsilon$,管底最大拉应变达到了1 440.6 $\mu\epsilon$,管道左侧管顶反弯点峰值在3.434 m达到1 439.4 $\mu\epsilon$,管道右侧管顶应变反弯点峰值8.414 m处达到1 540.5 $\mu\epsilon$,两侧转换段应变分别约在1.5 m和10.5 m处趋近于0。可以看出,管道处于悬空状态时,会引起管壁出现较大的弯曲应力,对管道的运行存在较大威胁,因此有必要对管道的悬空范围进行识别。当根据管道悬

空附加弯矩分布特征识别悬空出现的影响范围后,再利用本文提出的方法通过分布式光纤应变监测数据建立埋地管道修正有限元模型反演出土体刚度才可定量识别管道悬空。

根据式(1)从4种工况中的纵向应变分离出管道弯曲应变,通过遗传算法对式(4)建立的埋地管道修正有限元模型进行土体刚度反演。反演过程中,遗传算法参数设置群体规模为50,交叉概率为0.8,变异概率为0.05,终止进化代数为500,根据模型管道试验参数建立有限元模型,管长12 m划分为240个单元,管底相邻土弹簧间隔距离为5 cm,将241个土弹簧分为60组,每4个一组,最后5个分为一组,每一组土弹簧刚度同时变化,土弹簧刚度的搜索范围为0~30 000 N/0.2 m。最终的土弹簧刚度反演结果如图7所示。

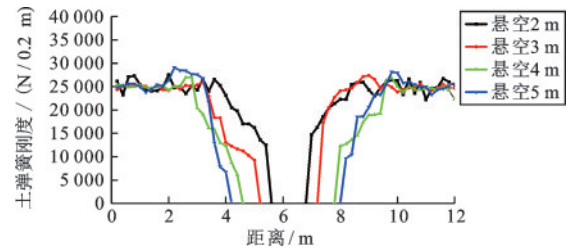


图7 各悬空工况下土弹簧刚度数据

Fig.7 Stiffness data of soil springs under various suspended conditions

图7中各工况下悬空管道两侧土弹簧刚度值越趋近悬空段越小,这与反演的实际情况也是相符的。考虑到实际开挖过程中两侧砂土对管道的约束存在偏差,因此当某处土弹簧刚度值低于两侧正常土弹簧刚度的一半时,也可认为处于悬空范围内。悬空2 m时(工况1),左侧土弹簧刚度从3.8 m处的25 267 N/0.2 m开始下降,在5.2 m处的13 590 N/0.2 m低于左侧正常土弹簧刚度的一半,右侧土弹簧刚度从8.4 m处的25 467 N/0.2 m开始减小,在6.8 m处的0时低于右侧正常土弹簧刚度的一半,则悬空范围为5.2~6.8 m。当悬空长度达到3 m时(工况2),左、右两侧的土弹簧刚度分别从3.2 m处的25 921 N/0.2 m和8.6 m处的25 833 N/0.2 m开始降低,降至两侧正常土弹簧刚度一半的位置分别位于4.4 m和7.4 m处,故悬空范围为4.4~7.4 m。悬空长度增至4 m时(工况3),左侧土弹簧刚度从2.8 m处的27 050 N/0.2 m开始减小,减到低于左侧正常土弹簧刚度一半的位置在3.8 m处

的 13 026 N/0.2 m, 右侧土弹簧刚度从 9.6 m 处的 26 322 N/0.2 m 开始减小, 减到低于右侧正常土弹簧刚度一半的位置在 7.8 处的 0, 则悬空范围为 3.8~7.8 m。悬空 5 m 时(工况 4), 左侧土弹簧刚度从 3.2 m 处的 26 728 N/0.2 m 开始降低, 右侧土弹簧刚度为从 9.6 m 处的 25 403 N/0.2 m 开始降低, 分别在 3.6 m 和 8.4 m 处降到低于两侧正常土弹簧刚度的一半, 故悬空范围为 3.6~8.4 m。如表 1 所示, 4 种工况下左侧和右侧坡肩识别位置与试验悬空段坡肩位置最大误差都不超过 0.2 m, 这可能与试验过程中难以保证两侧土体约束条件完全一致、开挖过程中存在客观扰动相关。

表 1 悬空试验与识别坡肩位置对比表

Table 1 Comparison between the position of the suspension test and the identification of the slope shoulder

工况	试验悬空段坡肩		识别悬空段坡肩	
	左侧	右侧	左侧	右侧
悬空 2 m	5.0	7.0	5.2	6.8
悬空 3 m	4.5	7.5	4.4	7.4
悬空 4 m	4.0	8.0	3.8	7.8
悬空 5 m	3.5	8.5	3.6	8.4

将 4 种工况下提取的弯曲应变监测值与修正后有限元模型计算的弯曲应变理论值绘于图 8(a) 中。从悬空 2 m(工况 1)到悬空 5 m(工况 4), 管道跨中应变反演峰值与弯曲应变结果分别相差 25.1、34.3、84.1、23.0 $\mu\epsilon$, 左反弯点应变峰值分别相差 19.4、9.5、5.8、18.9 $\mu\epsilon$, 右反弯点应变峰值分别相差 5.8、11.3、3.3、61.1 $\mu\epsilon$ 。分析反演结果, 弯曲应变监测值与弯曲应变理论值整体变化趋势基本一致, 说明弯曲应变已达到最佳反演效果。挠度反演结果与全站仪监测数如图 8(b) 所示, 4 种工况下管道反演的挠度在跨中最大, 并在两侧逐渐减小的趋势, 同时也与全站仪监测数据的变化一致。可以发现, 各工况下跨中挠度反演误差最大, 从悬空 2 m 到悬空 5 m, 反演的跨中挠度分别 2.7、7.3、25.4、41.5 mm, 与全站仪的监测结果相比分别相差 1.7、2.3、1.4、3.5 mm, 但其反演误差基本都控制在试验误差允许范围以内。综合 4 种工况的管道弯曲应变和挠度反演结果来看, 土体刚度识别的有限元模型修正问题已达到最优解, 通过修正后的土弹簧刚度值可以定量识别管道悬空位置和范围, 为管道悬空灾害的发展提供了有效的预警方法。

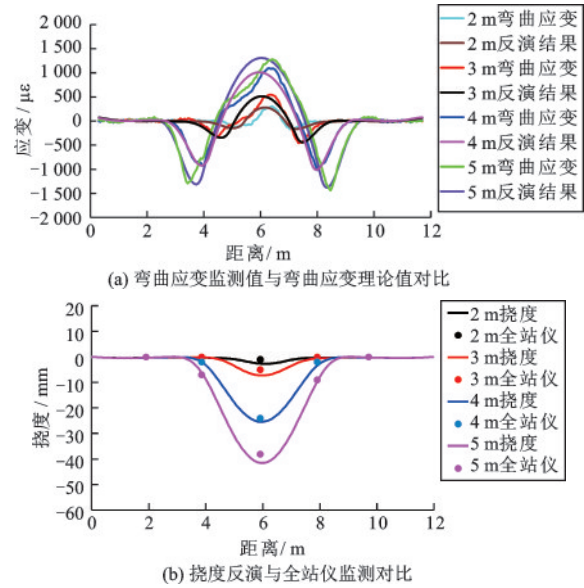


图 8 管道弯曲应变和挠度反演结果

Fig.8 Inversion results of bending strains and deflections of pipeline

3 结 论

(1) 4 种工况下分布式光纤采集到的管顶和管底应变数据都出现了明显的悬空特性, 根据本文提出的方法识别 4 种工况的悬空位置依次为 5.2~6.8 m、4.4~7.4 m、3.8~7.8 m、3.6~8.4 m 处, 与试验悬空段左侧和右侧坡肩位置最大误差不超过 0.2 m, 识别结果表明利用本文方法识别悬空出现的位置和范围是可行的。

(2) 对比管道弯曲应变和挠度反演结果, 4 种工况中管道应变峰值反演误差最大为 84.1 $\mu\epsilon$, 反推出的管道跨中挠度与监测结果相比最大误差为 3.5 mm, 对应的相对误差分别为 7.7% 和 9.2%, 二者误差都控制在工程可以接受的范围以内, 说明利用反演结果可以重构管道挠度曲线。

综上所述, 本文提出的基于分布式光纤应变监测的埋地管道悬空识别方法可以监测管道的工作应力, 反演出管道的挠曲变形, 准确判断管道悬空的出现, 精确识别出管道悬空的位置和范围, 为埋地管道悬空灾害提供了有效的预警方法。

参考文献:

[1] 许利惟, 刘旭, 陈福全. 塌陷作用下埋地悬空管道的力学响应分析[J]. 工程力学, 2018, 35(12): 212-219.

- Xu L W, Liu X, Chen F Q. Mechanical analysis of buried suspended pipeline under the action of collapse[J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(12):212-219. (in Chinese)
- [2] 梁晓斌,梁伟,邓克飞,等.采空区悬空天然气管道应力与应变模拟[J].*油气储运*,2019,38(2):145-150.
Liang X B, Liang W, Deng K F, et al. Simulation on the stress and strain of suspended gas pipelines in goafs [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2019, 38 (2): 145-150. (in Chinese)
- [3] 陈珍,徐景田.忠武输气管道沿线地质灾害监测方法研究[J].*工程勘察*,2010,38(2):79-83.
Chen Z, Xu J T. Monitoring methods study of geological hazards for Zhong-wu gas pipeline[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2010, 38 (2) : 79-83. (in Chinese)
- [4] Moya J M, Sota G M D L. Alternative geohazard risk assessment and monitoring for pipelines with limited access: Amazon jungle example[C]// *Proceedings of the 2014 10th International Pipeline Conference*. Calgary: ASME,2014: V002T06A090.
- [5] Moya J M, Montes E F O, Sota G M D L. Integration of monitoring and inspection systems for geohazard assessment on pipelines that cross amazonian jungles and the andes[C]//*Proceedings of the 2012 9th International Pipeline Conference*. Calgary: ASME,2011:501-509.
- [6] Hausamann D, Zirnig W, Schreier G, et al. Monitoring of gas pipelines-a civil UAV application[J]. *Aircraft Engineering & Aerospace Technology An International Journal*, 2005, 77(5): 352-360.
- [7] 李器宇,张拯宁,柳建斌,等.无人机遥感在油气管道巡检中的应用[J].*红外*,2014,35(3):37-42.
Li Q Y, Zhang Z N, Liu J B, et al. Application of UAV remote sensing in oil and gas pipeline inspection [J]. *Infrared*, 2014, 35(3): 37-42. (in Chinese)
- [8] 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. (in Chinese)
- [9] 冯新,王子豪,龚士林,等.供热管道应力分布式实时监测方法与原型试验[J].*煤气与热力*,2019,39(2):1-7.
Feng X, Wang Z H, Gong S L, et al. Distributed real-time monitoring method and prototype test of heating pipeline stress [J]. *Gas & Heat*, 2019, 39(2) : 1-7. (in Chinese)
- [10] Frings J, Walk T. Distributed fiber optic sensing enhances pipeline safety and security[J]. *Oil Gas European Magazine*, 2011, 37(3):132-136
- [11] Feng X, Wu W J, Li X Y, et al. Experimental investigations on detecting lateral buckling for subsea pipelines with distributed fiber optic sensors[J]. *Smart Structures and Systems*, 2015,15(2):235-248.
- [12] Wang Y, Moore I D. Simplified design equations for joints in buried flexible pipes based on Hetenyi Solutions [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2014, 140(4): 04013020-1-14.
- [13] 赵毅,滕建强,杨耀辉,等.管道悬空灾害的分布式光纤实时监测方法研究[J].*水利与建筑工程学报*,2020,18(1):103-108.
Zhao Y, Teng J Q, Yang Y H, et al. Real-time monitoring of the free-span in buried pipelines using distributed fiber optic sensors [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2020, 18(1) : 103-108. (in Chinese)
- [14] Feng X, Wu W J, Meng D W, et al. Distributed monitoring method for upheaval buckling in subsea pipelines with BOTDA sensors[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2017,20(2):180-190.
- [15] 韩阳,刘洋,冯新,等.3PE防腐管道分布式光纤应变监测试验研究[J].*市政技术*,2018,36(3):194-197.
Han Y, Liu Y, Feng X, et al. Experimental study on distributed fiber strain monitoring of 3PE anti-corrosion pipeline [J]. *Municipal Engineering Technology*, 2018, 36(3) : 194-197. (in Chinese)
- [16] 供水排水工程管道结构设计规范:GB 50332—2002 [S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [17] Moreno Z, Paster A. A genetic algorithm for stochastic inversion in contaminant subsurface hydrology [J]. *Groundwater*, 2019, 57(5): 704-717.
- [18] Yuen S Y, Chow C K. A genetic algorithm that adaptively mutates and never revisits[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*,2009,13(2):454-472.
- [19] Fahim A, Hedar A R. Filter-based genetic algorithm for mixed variable programming [J]. *Numerical Algebra*, 2012,1(1):99-116.
- [20] Liyanage K, Dhar A S. Stresses in cast iron water mains subjected to non-uniform bedding and localised concentrated forces [J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 12(4): 1-9.
- [21] Wang J, Zhang M, Ersoy O K, et al. An improved real-coded genetic algorithm using the heuristical normal distribution and direction-based crossover[J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2019(8):1-17.
- [22] Khasawneh H J, Abo-Hammour Z S, Saaideh M I A, et al. Identification of hysteresis models using real-coded genetic algorithms [J]. *European Physical Journal Plus*, Doi: 10.1140/epjp/i2019-12883-7.

(本文责编:苏泽云)