

文章编号:1004-4213(2010)01-0033-4

# 基于光纤光栅传感的管道滑坡监测方法研究\*

胡志新<sup>1</sup>, 马云宾<sup>2</sup>, 谭东杰<sup>2</sup>, 陈朋超<sup>2</sup>, 李俊<sup>2</sup>

(1 长安大学 工程机械学院, 西安 710064)

(2 中国石油管道研究中心, 河北 廊坊 065000)

**摘要:**针对铺设在滑坡体内的管道,提出了基于光纤光栅传感的管道滑坡监测方法.阐述了已知管道上三点应力求最大应力的方法.采用温度自补偿式光纤光栅应变传感器监测管体应力,对传感器测量的 5.12 汶川地震后管体应力数据进行分析.结果表明:地震对滑坡有显著影响,发生了浅层滑动面的较大位移;管体的应力都有显著增长,但总应力水平还低于预警阈值,尚处于安全状态.

**关键词:**光纤光栅;管道滑坡监测;管体应力;二郎庙滑坡

中图分类号:TP212.14

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103901.0033

## 0 引言

长距离输油或输气管道输送距离可达数千公里,穿越众多地质地貌单元,在山区铺设的管道有可能在活动滑坡体内通过,管道的安全运营受到严重威胁.2007 年的调查显示:威胁管道安全的地质灾害有 530 处之多<sup>[1-2]</sup>.面对众多的管道滑坡灾害,我国管道运营公司采取了积极的工程治理措施:采用电阻式应变计、振弦式应变计来监测管道应变;但传统的管道应变监测传感器耐腐蚀、抗干扰的性能较差,稳定性也难以达到要求.针对上述情况,本文提出了一种基于光纤光栅传感的管道滑坡监测方法.选用具有灵敏度高、易于波分复用、耐腐蚀、尺寸小、重量轻等优点的光纤光栅传感器监测管道应力<sup>[3-8]</sup>,并给出了管道最大应力的计算方法.详细介绍了传感器的现场安装过程,通过该监测方法测量的 5.12 汶川地震后二郎庙滑坡的变化数据分析,验证了本监测方法的可行性.

## 1 光纤光栅对温度和应变的传感原理

自从 1989 年美国的 Morey 等人首次进行光纤光栅的应变与温度传感器研究以来,世界各国都对其十分关注并开展了广泛的应用研究,在短短 10 多年的时间里光纤光栅已成为传感领域发展最快的技术<sup>[9-12]</sup>.光纤光栅可用于应力、温度、压力等物理量的测量,其基本原理如图 1.

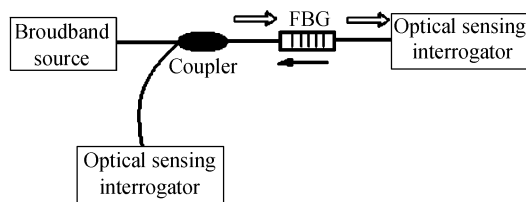


图 1 光纤布喇格光栅反射和透射传感原理  
Fig. 1 Schematic diagram of fiber bragg grating-based sensor principle with reflection or transmission detection options

当一束宽带光  $\lambda$  经过光纤光栅时,光纤光栅会将相位匹配的单色光  $\lambda_B$  反射回来,而其余波长的光将透射出去.被反射的波长  $\lambda_B$  满足

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中: $\lambda_B$  为布喇格波长; $n_{\text{eff}}$  为光纤传播模式的有效折射率; $\Lambda$  为光栅栅距.

式(1)称为布喇格条件,满足布喇格条件的入射光会被反射,其余的光则被透射.

由式(1)可以看出,反射光的中心波长为  $\lambda_B$  的光信号,跟光栅栅距  $\Lambda$ ,纤芯的有效折射率  $n_{\text{eff}}$  有关,所以当外界的被测量温度和应力引起光纤光栅的折射率等参量改变时,会导致反射中心波长发生变化.也就是说光纤光栅反射中心波长的变化反映了外界被测信息的变化情况.

## 2 管体应力监测方法

根据力学知识,若已知管道半径和三个相隔  $90^\circ$  圆弧位置  $A, B, C$  处的单轴纵向应变,就可以计算出圆周任意一点的纵向应变.所有绕圆周的纵向应变均位于通过管道的一个平面,其定义为

$$mx + ny + pz = 1 \quad (2)$$

式中: $x$  和  $y$  是圆周上任意一点的坐标; $z$  是点  $(x,$

\* 国家自然科学基金重点项目(60534050)资助

Tel:029-87758038

Email:hzz1965@chd.edu.cn

收稿日期:2008-12-17

修回日期:2009-02-24

$y$ )的纵向应变; $m, n, p$ 是任意常量;被测点  $A, B, C$ 给出了边界条件:

在  $x = -r$  处,  $y = 0, z = A$ ; 在  $x = 0$  处,  $y = r, z = B$ ; 在  $x = r$  处,  $y = 0, z = C$ .

并且,因为管道是圆形的,  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ , 利用边界条件,可估计常量  $m, n, p$  的值为

$$-mr + pA = 1, nr + pB = 1, mr + pC = 1 \quad (3)$$

根据式(3)可得

$$p = \frac{2}{A+C}, m = \frac{1}{r} \left( \frac{2A}{A+C} - 1 \right),$$

$$n = \frac{1}{r} \left( 1 - \frac{2B}{A+C} \right) \quad (4)$$

经过推算,可得  $z$  的表达式

$$z = \frac{A+C}{2} + \left( \frac{C-A}{2} \right) \left( \frac{x}{r} \right) - \left( \frac{A+C-2B}{2} \right) \left( \frac{y}{r} \right) \quad (5)$$

由式(5)可知,如果已知  $A, B, C$  三点的应变值,就可计算出任意一点  $(x, y)$  的应变  $z$ . 根据公式求  $x$  的导数,即可得到最大或最小应变的位置点,整理得

$$x = \frac{(C-A)r}{\sqrt{2A^2 + 2C^2 + 4B^2 - 4AB - 4BC}},$$

$$y = \pm r \sqrt{1 - \left( \frac{x}{r} \right)^2} \quad (6)$$

用于管体应力监测的传感器为温度自补偿式光纤光栅传感器,将该传感器粘贴于管体试件,根据实验结果拟合得到该传感器粘贴于管体后的应变敏感系数  $\phi = 1.089 \text{ pm}/\mu\epsilon$ . 设  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  三个位置点传感器波长变化分别为  $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \Delta\lambda_3$ , 则三位置点的应变值分别为:  $\Delta\lambda_1/\phi, \Delta\lambda_2/\phi, \Delta\lambda_3/\phi$ . 根据式(7),最大应变的位置点的坐标值  $x, y$  分别为

$$x = [(\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_3)r] / (2\Delta\lambda_1^2 + 2\Delta\lambda_3^2 + 4\Delta\lambda_2^2 - 4\Delta\lambda_1\Delta\lambda_2 - 4\Delta\lambda_2\Delta\lambda_3)^{1/2}$$

$$y = \pm r [(\Delta\lambda_1^2 + \Delta\lambda_3^2 + 4\Delta\lambda_2^2 + 2\Delta\lambda_1\Delta\lambda_3 - 4\Delta\lambda_1\Delta\lambda_2 - 4\Delta\lambda_2\Delta\lambda_3) / (2\Delta\lambda_1^2 + 2\Delta\lambda_3^2 + 4\Delta\lambda_2^2 - 4\Delta\lambda_1\Delta\lambda_2 - 4\Delta\lambda_2\Delta\lambda_3)]^{1/2} \quad (7)$$

进而根据式(6)和胡克定律,可得到管体截面的最大应力  $\sigma$

$$\sigma = E \{ (\Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_3) / 2\phi + [(\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_3)^2] / 2\phi (2\Delta\lambda_1^2 + 2\Delta\lambda_3^2 + 4\Delta\lambda_2^2 - 4\Delta\lambda_1\Delta\lambda_2 - 4\Delta\lambda_2\Delta\lambda_3)^{1/2} + [(\Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_3 - 2\Delta\lambda_2)] / 2\phi [(2\Delta\lambda_1^2 + \Delta\lambda_3^2 + 4\Delta\lambda_2^2 + 2\Delta\lambda_1\Delta\lambda_3 - 4\Delta\lambda_1\Delta\lambda_2 - 4\Delta\lambda_2\Delta\lambda_3) / (2\Delta\lambda_1^2 + 2\Delta\lambda_3^2 + 4\Delta\lambda_2^2 - 4\Delta\lambda_1\Delta\lambda_2 - 4\Delta\lambda_2\Delta\lambda_3)]^{1/2} \} \times 10^{-6} \text{ (MPa)} \quad (8)$$

基于此理论,将光纤光栅传感器安装在如图2位置,即可监测管道的应力的变化了.

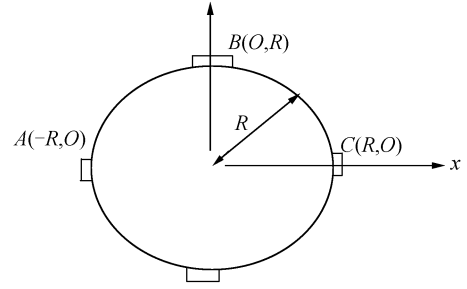


图2 坐标图

Fig. 2 Coordinate diagram

### 3 二郎庙滑坡现场实验及数据分析

广元至成都输油管道二郎庙段是中国石油管道公司运营的兰成渝管线的一部分. 该段管道受地质滑坡威胁已久,已有报道滑坡造成管道开裂而导致石油泄漏的事件发生. 因此,选取二郎庙段滑坡进行试验.

#### 3.1 管道应变传感器的安装

根据管体应力监测方法的叙述,选取八个测试点,将光纤光栅应变传感器粘贴于如图3位置. 施工顺序为:1)挖出管道,开挖  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  见方的工作坑;2)确定三个传感器的安装位置;3)剥离防腐层,剥离层为环状,宽约  $10 \text{ cm}$ ;4)粘贴传感器:用工具清除贴片处的漆层、锈层等污垢,然后用挫刀或砂轮打平,再用零号砂纸在试件表面打成  $45^\circ$  的斜纹,保证表面平整、无锈、无浮浆;在试件上画出测点的纵横中心线,粘贴传感器;5)光纤光栅解调仪检验传感器的可用性,如发生损坏则重新粘贴;6)防腐层修复,采用冷缠带方法修复,修复技术标准按《埋地钢质管道外防腐层修复技术规范(SYT5918-2004)》执行.

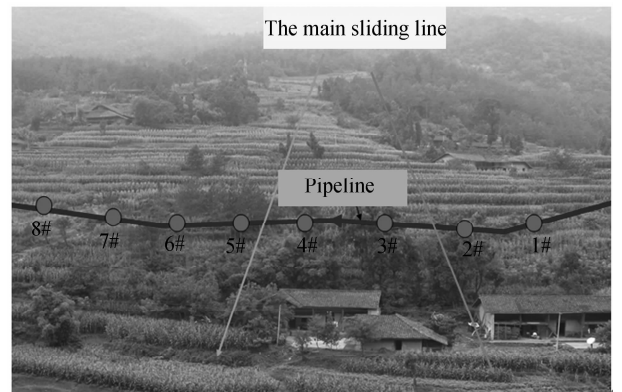


图3 管体应力监测传感器的空间布置

Fig. 3 Layout of sensors monitoring pipeline strain

#### 3.2 数据分析

自2008年1月25日传感器安装完成后,每个月采集数据一次. 5月12日在四川汶川发生了

8.0级大地震,5月25日及时采集了震后传感器数据.对每一个测试点的数据按照式(12)计算出最大应力,对八个测试点的最大应力采取线性拟合方法绘出整段管体的应力曲线,如图4.

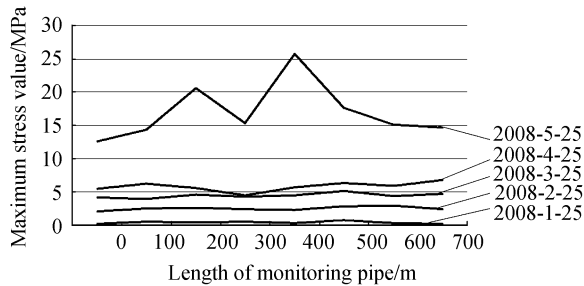


图4 地震前后管体最大应力变化曲线

Fig.4 Curves of maximum strains for the pipeline before and after the earthquake

根据图4可得:

1)地震前滑坡在整体缓慢蠕变,地震对滑坡有显著影响,发生了浅层滑动面的较大位移.

2)震后管体的应力有显著增长,震后八个测试点的管体最大应力为25.7 MPa,二郎庙滑坡兰成渝管道可接受应力阈值为80 MPa,一旦管体应力超过了这个范围,则认为管道是不安全的.可知,管道目前的应力变化在安全范围内.

3)3#、5#测试点的管体应力相对变化更为明显,说明滑坡体在整体移动的同时,局部也在相对运动,且主滑线方向运动更为明显.

## 4 结论

针对管道滑坡监测目前存在的问题,提出了基于光纤光栅传感的管道滑坡监测方法.采用温度自补偿式光纤光栅应变传感器监测管体应力,阐述了已知圆周上三点应变求最大应变的原理,并对5.12汶川地震传感器测量的数据进行了分析,得到:1)地震对滑坡有显著影响,发生了浅层滑动面的较大位移;2)管体的应力都有显著增长,但总应力水平还低于预警阈值,尚处于安全状态;3)滑坡体在整体运动的同时,局部也在相对运动,并在主滑线方向运动更为明显.

### 参考文献

[1] ZHANG Zhao-hui, GENG Yan-feng, LIAO Ming-ya. The supervision of breakage for the oil and gas pipelines [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2001, **22**(3): 373-378.

- 张朝晖,耿艳峰,廖明燕. 油气管道的破坏监测[J]. *仪器仪表学报*, 2001, **22**(3): 373-378.
- [2] CHEN Hua-bo, TU Ya-qing. Summary of leak detection methods for oil pipeline [J]. *Pipeline Technique and Equipment*, 2000, **1**: 38-41.  
陈华波,涂亚庆. 输油管道泄漏检测方法综述[J]. *管道技术设备*, 2000, **1**: 38-41.
- [3] ZHAO Yong. Optical fiber gratings and sensing technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 4-28.  
赵勇. 光纤光栅及其传感技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 4-28.
- [4] LI Yan, XU Xiao-feng, KANG Zhi-hui, et al. Interrogation technique for diametric load on fiber bragg gratin [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 717-720.  
李岩,徐晓峰,康智慧,等. 光纤光栅径向受力检测技术[J]. *光子学报*, 2008, **37**(4): 717-720.
- [5] LI Qing-bin, LI Guang, WANG Guang-lun. Effect of the plastic coating on strain measurement of concrete by fiber optic sensor [J]. *Measurement*, 2003, **34**: 215-227.
- [6] CASAS J R, CRUZ P J S, ASCE M. Fiber optic sensors for bridge monitoring [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2003, **8**(6): 362-373.
- [7] LI Hong-Nan, LI Dong-Sheng, SONG Gang-Bing. Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering [J]. *An International Journal, Engineering Structures*, 2004, **26**(11): 1647-1657.
- [8] HU Zhi-xin, ZHU Jun, ZHANG Ling. A new type of fibergrating pressure sensing system with high accuracy [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 719-711.  
胡志新,朱军,张陵. 新型高准确度光纤光栅压力传感系统[J]. *光子学报*, 2006, **35**(5): 709-711.
- [9] LI Qing-bin, LI Guang, YUAN Li-bo. Calibration of embedded fiber optic sensor in concrete under biaxial compression [J]. *Measurement*, 2004, **35**: 303-310.
- [10] HU Zhi-xin, ZHU Jun, ZHANG Ling, et al. A method to eliminating the stress delay from fiber grating pressure sensors [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1329-1332.  
胡志新,朱军,张陵,等. 光纤光栅压力传感器中应力迟滞的消除方法[J]. *光子学报*, 2006, **35**(9): 1329-1332.
- [11] NELLEN PH M, MAURON P, FRANK A, et al. Reliability of fiber Bragg grating based sensors for downhole applications [J]. *Sensors and Actuators; A*, 2003, **103**: 364-376.
- [12] MOYO P, BROWNJOHN J M W, SURESH R, et al. Development of fiber Bragg grating sensors for monitoring civil infrastructure [J]. *Engineering Structures*, 2005, **27**: 1828-1834.

## Oil Pipeline Sliding Monitoring System Based on Fiber Bragg Grating Sensor

HU Zhi-xin<sup>1</sup>, MA Yun-bin<sup>1</sup>, TAN Dong-jie<sup>2</sup>, CHEN Peng-chao<sup>2</sup>, LI Jun<sup>2</sup>

(1 *Construction Machinery School, Chang'an University, Xi'an 710064, China*)

(2 *PetroChina Pipeline R&D Center, Langfang, Hebei 065000, China*)

**Abstract:** In view of pipelines laid in landslide mass, a security monitoring system is proposed. A method for evaluating maximum strain value based on strains of three points on the pipeline is presented. Temperature compensated FBG strain sensors are used in monitoring the strains of pipeline. The strain data of pipeline measured by sensors after 5. 12 Wenchuan Earthquake is analyzed. The analysis results show that the earthquake has remarkable impact on landslide, which is proved by large displacement of shallow sliding plane. Strains of the pipeline increase obviously but the total value is less than pre-warning threshold, therefore, the pipeline is under security condition.

**Key words:** Fiber Bragg Grating (FBG); Pipeline sliding monitoring; Pipeline strain; Erlangmiao landslide



**HU Zhi-xin** is studying for his Ph. D. degree at Xi'an Jiaotong University and works as a teacher at Chang'an University. His research interests focus on some testing and fiber sensing technology.