

文章编号:1002-2082(2010)01-0110-04

温度补偿式光纤光栅土压力传感器

胡志新¹, 王震武¹, 马云宾², 张君¹

(1. 长安大学 工程机械学院, 陕西 西安 710064;

2. 中国石油管道研究中心, 河北 廊坊 065000)

摘要: 针对现有土压力传感器无法实现长期、实时监测的要求, 设计了温度补偿式光纤光栅土压力传感器。选用有硬中心的平膜片作弹性元件, 选用灵敏度高、体积小、质量轻、易于波分复用和组成传感网络的光纤光栅作敏感元件; 同时采用了不受力光栅法进行了温度补偿。经实验测试, 该传感器的灵敏度为1.5 nm/MPa; 线性度误差为0.35%; 重复性为0.06%; 迟滞为2.19%; 静态误差为2.21%; 这些指标能够满足实际工程应用要求。

关键词: 光纤光栅; 土压力传感器; 温度补偿

中图分类号: TN253

文献标志码: A

Soil pressure sensor based on temperature compensation FBG

HU Zhi-xin¹, WANG Zhen-wu¹, MA Yun-bin², ZHANG Jun¹

(1. Collge of Constuction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Petrochina Pipeline R&D Center, Langfang 065000, China)

Abstract: Since the present soil pressure sensors cannot be used to realize long term and real time monitoring, a temperature compensation FBG sensor is designed. Flat diaphragm with hard core is selected as elastic element, and a compact FBG with high sensitivity, wave division multiplexing and sensor network features is adopted as sensing element. Grating free of stress is used to compensate temperature. According to experiments and tests, the sensor has sensitivity of 1.5 nm/MPa, linearity error of 0.35%, repetitiveness of 0.06%, delay of 2.19% and static error of 2.21%, which meet the requirements of engineering application.

Key words: FBG; soil pressure sensor; temperature compensation

引言

岩体和土体等固体介质中自由场应力和结构表面压力的变化规律, 是判断岩体和土体是否会因为强度不足或变形过大, 而发生局部或整体的失稳破坏, 或导致与岩土体相依的建筑物丧失稳定性的重要依据。目前常采用电阻应变式土压力传感器和振弦式土压力传感器来测量土压力的变化规律。但是, 这两种传感器在稳定性、耐久性和分布性等方面存在一定的不足, 无法满足长期、实时监测的要

求。针对上述问题, 本文设计了温度补偿式光纤光栅土压力传感器, 该传感器选用有硬中心的平膜片作弹性元件, 将均布压力转化为集中应力, 避免敏感元件直接与介质接触; 选用具有抗电磁干扰、灵敏度高、体积小、质量轻、易于波分复用和组成传感网络等优点的光纤光栅作敏感元件; 同时采用了不受力光栅法进行了温度补偿, 很好地解决了光纤光栅的应变-温度交叉敏感问题。经试验测试, 传感器的各项性能指标均能满足实际工程应用要求。

收稿日期: 2009-09-08; 修回日期: 2009-10-28

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(20090451407)

作者简介: 胡志新(1965—), 男, 陕西临潼人, 博士后, 主要从事测试技术与光纤传感器的研究工作。E-mail: hzx1965@163.com

1 传感器结构与测量原理

1.1 传感器结构

传感器结构如图1所示。结构由承压圆盘1、圆盘盖8和圆腔壳体2构成的壳体三大部分组成。承压圆盘1、圆盘盖8与圆腔壳体3之间采用螺纹连接。圆腔壳体是传感器的弹性元件, 它的结构设计也是传感器的创新之处。在圆腔壳体底端对称开有两个楔形盲孔9, 两个固定柱2楔入两个楔形盲孔9内。固定柱2上部有固性夹板10和缓冲夹板11, 对称的两个固性夹板10用于固定测力光栅6两端, 对称的缓冲夹板11用于固定温度补偿光栅5两端, 测力光栅6和温度补偿光栅5串联, 测力光栅6和温度补偿光栅5串联后两端由光栅端口7与输入输出光纤4连接, 通过光纤光栅解调仪测量出测力光栅6和温度补偿光栅5的波长变化, 两者的温度效应相同, 对于测力光栅, 消除温度变化引起的波长漂移, 就可得到土压力单独引起的波长漂移。

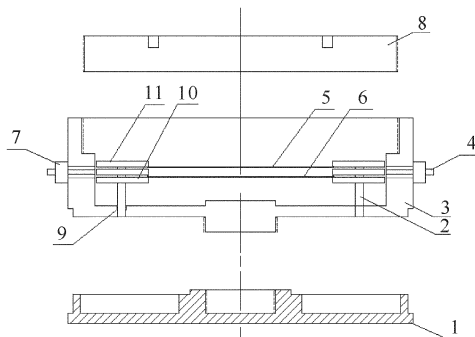


图1 土压力传感器结构图

Fig. 1 The structure chart of earth pressure sensor

1.2 传感器测量原理

有硬中心的平膜片在传感器中有着广泛的应用, 如利用硬中心将均布压力转化为集中应力; 增加有效面积; 在小位移下易产生较高应力; 避免敏感元件直接与介质接触。因此, 本土压力传感器选用有硬中心的平膜片作弹性元件。其结构形式如图2所示。

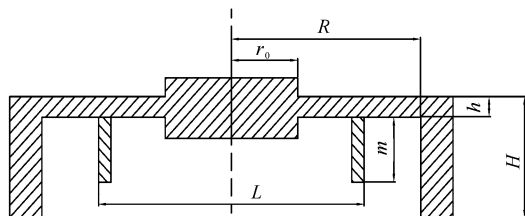


图2 有硬片中心的平膜片

Fig. 2 Film diaphragm with hard center

有硬中心的平膜片的特征方程:

$$\frac{PR^4}{Eh^4} = \frac{1}{A_P} \left(\frac{\omega_0}{h} \right) + B_P \left(\frac{\omega_0}{h} \right)^3 \quad (1)$$

式中:

$$A_P = \frac{3(1-\mu^2)}{16} \left(1 - \frac{r_0^4}{R^4} + 4 \frac{r_0^2}{R^2} \ln \frac{r_0}{R} \right) \quad (2)$$

$$B_P = \frac{\frac{(7-\mu)}{3} \left(1 + \frac{r_0^4}{R^4} + \frac{r_0^2}{R^2} \right) + \frac{(3-\mu)^2}{1+\mu} \frac{r_0^2}{R^2}}{(1-\mu) \left(1 - \frac{r_0^4}{R^4} \right) \left(1 - \frac{r_0^2}{R^2} \right)^2} \quad (3)$$

式中: P 为均布压力 (Pa); h 为膜片厚度 (cm); R 为膜片半径 (cm); r 为膜片任意部位的半径 (cm); μ 为膜片材料的泊松比; E 为膜片材料的弹性模量 (Pa)。

设固定柱之间距离为 L , 固定柱的高度为 m , 承压盘受力后如图3所示发生弯曲变形。固定柱处的挠度为 ω , 则通过计算, 两固定柱之间的距离变化 x 为

$$x = \frac{\omega m}{R - \frac{L}{2}} \quad (4)$$

则光栅的应变量为 $\Delta\epsilon = \frac{2x}{L}$, 又裸光栅的应变灵敏系数约为 $1.1 \times 10^{-12} \text{ m}/\mu\epsilon$, 进而可得到光栅波长漂移量的表达式:

$$\Delta\lambda_B = \frac{2}{L} \frac{200x}{L} \quad (5)$$

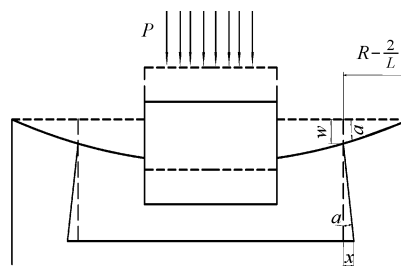


图3 平膜片简化模型受力图

Fig. 3 Simplified model force diagram for flat diaphragm

本传感器中, $R = 50 \text{ mm}$, $r = 20 \text{ mm}$, $h = 10 \text{ mm}$, $L = 69 \text{ mm}$, $m = 20 \text{ mm}$, $E = 210 \text{ GPa}$, $\mu = 0.29$, 将其代入(1)式~(5)式, 得: $A_P = 0.12$, $B_P = 8.55$, 在 1 MPa 压力下, 平膜片的挠度 $\omega \approx 0.1 \text{ mm}$, 进而计算得到传感器的灵敏度为 $4.25 \text{ nm}/\text{MPa}$ 。

1.3 温度补偿原理

不受力光栅温度补偿法是在同一温度场中同时布置两只光纤光栅, 其一为应变光栅, 用于测量被测物的应变, 它同时受温度和应变的影响; 另一个为温度补偿光栅, 布设在与被测物材料一致且不

受力的构件上,用于测量被测物温度,它只受温度影响,这样就保证了两根光纤光栅发生相同的温度效应。假定温度与应变对光纤光栅中心波长的影响相互独立并且是严格线性的,温度与应变共同产生的波长变化可用下式表示:

$$\Delta\lambda_B = \alpha_\varepsilon \cdot \varepsilon + \alpha_T \cdot \Delta T \quad (6)$$

式中: α_ε 为光纤光栅应变的灵敏度系数; α_T 为光纤光栅温度的灵敏度系数; ΔT 为温度变化量; ε 为应变。从(1)式可以看出,应变和温度对波长的作用可以当作是独立、线性叠加的。两根光栅的波长分别为

$$\Delta\lambda_{B1} = \alpha_{\varepsilon 1} \cdot \varepsilon + \alpha_{T1} \cdot \Delta T \quad (7)$$

$$\Delta\lambda_{B2} = \alpha_{\varepsilon 2} \cdot \varepsilon + \alpha_{T2} \cdot \Delta T \quad (8)$$

由上两式可推出:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_{B1} - \Psi \Delta\lambda_{B2}}{\alpha_{\varepsilon 1}} \quad (9)$$

式中 $\Psi = \frac{\alpha_{T1}}{\alpha_{T2}}$ 。如式所示,由于两个光纤光栅处于同一个温度场中,两者发生相同的温度效应,对于应变传感器,消除温度变化引起的波长漂移,就可以得到应变单独引起的波长漂移。

2 实验和结果分析

在土传感器工程应用前必须进行标定,通过室内及室外试验结果,测试传感器的静态和动态性能。依据试验荷载的类型及加载方式的不同,常用的标定方法有气压标定、液体标定(油标)、土介质中标定(砂标)以及现场模拟标定等。本传感器在室内采用油介质进行了标定。

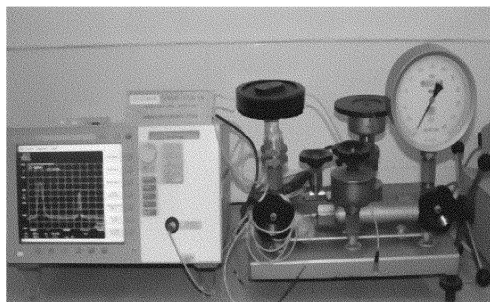


图4 温度补偿光纤光栅土压力传感器静态性能测试图

Fig. 4 Static performance test pattern of temperature compensated fiber Bragg grating pressure sensor earth

光纤光栅中心波长的测量采用美国 Agilent 86142B 频谱分析仪,该仪器具有 10×10^{-12} m 波长准确度、90 dBm 灵敏度和 70 dB 动态范围。标准压力源采用西仪集团有限责任公司生产的 YS-250 活

塞式压力计,该仪器测量范围为 0.5 MPa ~ 25 MPa,准确度等级为 0.05。实验共选取 12 个压力点,从测量下线 0.5 MPa 开始,步长为 0.5 MPa。加压为正行程,降压为反行程,正行程和反行程往返一次为 1 个循环,连续进行 3 个循环。将数据根据压力传感器检定规程(JJG860-94)进行分析,得到传感器的工作直线如图 5 所示。

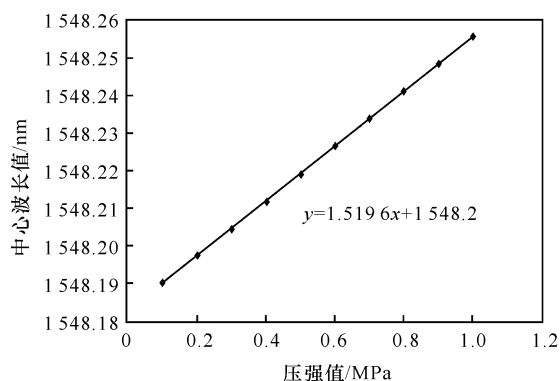


图5 传感器的工作直线

Fig. 5 The straight line of the sensor

由图 5 可以看出,传感器的灵敏度为 1.5 nm/MPa,小于理论值。实验值之所以小于理论值,主要是由以下原因造成的:

1) 未考虑应变传递因子。外力变化最终是通过固定柱拉伸光栅转化为光栅波长漂移的,而固定柱与光纤是通过安特固胶连接在一起的,在外力传递时,胶的性能会影响传递质量。

2) 传感器加工质量影响。在加工过程中,有些部件由于加工难度较大,部件尺寸存在一定误差,这直接影响到传感器的灵敏度。

3 结论

提出了一种光纤光栅土压力传感器的设计结构和温度补偿方法。其优点在于: 1) 传感器的结构和温度补偿方法简单; 2) 很好地解决了光纤光栅交叉敏感问题; 3) 传感器具有很好的线性和重复性,可以广泛应用在多种工业复杂环境下的压力测量。

参考文献:

- [1] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- LIAO Yan-biao. Optical fiber optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. (in Chinese)
- [2] 张志鹏. 光纤传感器原理[M]. 北京: 中国计量出版社, 1991.

- ZHANG Zhi-peng. Optical fiber sensor principle [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1991. (in Chinese)
- [3] KERSEY A D. Multiplexed fiber optic sensors[J]. SPIE,1993,1797:161-185.
- [4] RAO Yun-jiang. Review article: recent progress in application of in-fiber Bragg grating sensors [J]. Optics and Lasers in Engineering, 1999, 9(31):297-324.
- [5] 张劲松,陶智勇,韵湘. 光波分复用技术[M].北京:北京邮电大学出版社,2002.
- ZHANG Jin-song, TAO Zhi-yong, YUN Xiang. Light wavelength division multiplying technology [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2002. (in Chinese)
- [6] 赵勇. 光纤光栅及其传感技术[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
- ZHAO Yong. Fiber grating and sensing technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [7] VENGASARDAR A M, LEMAIRE P J, JUDKINS J B, et al. Long-period fiber gratings as band-rejection filters[J]. Lightwave Technology, 1996,14(1):58-65.