

文章编号 1004-924X(2017)04-0857-10

5 MN 光纤布拉格光栅力值传感器

高 潮¹, 刘 邦^{1*}, 郭永彩¹, 朱正伟^{2*}

- (1. 重庆大学 光电工程学院 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030;
2. 重庆大学 土木工程学院 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:针对山体滑坡中大力值监测的应用需求,提出了基于光纤 Bragg 光栅(FBG)的 5 MN 力值传感器。该传感器采用 8 根 FBG 构成 4 组光栅偶对圆柱弹性体的应变进行采集,光栅偶能有效地补偿温度对 FBG 尺寸的影响。通过 ANSYS 数值模拟计算并优化了圆柱弹性体的结构尺寸,并按照国家规程进行了传感器检定实验。实验结果表明,该传感器的直径为 124 mm,长度为 302 mm,应力测量范围为 500~5 000 kN,综合精度为 1%,最大力值对应的波长变化为 2 567 pm,灵敏度为 2 kN/pm。该传感器除具有光栅传感的基本特点以外还具有结构简单、量程大、精度高等优点,不仅适用于滑坡力值监测,还适用于建筑、化工、煤矿、军事等领域的力值监测。

关键词:纤维光学;力值传感器;光纤布拉格光栅;弹性体;健康监测

中图分类号: TN253; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172504.0857

Five MN force sensor based on fiber Bragg grating

GAO Chao¹, LIU Bang^{1*}, GUO Yong-cai¹, ZHU Zheng-wei^{2*}

- (1. *Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of the Education Ministry, College of Opto-electronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030;*
2. *Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, College of Civil Engineering of Chongqing University, Chongqing 400045*)
** Corresponding author, E-mail: 28374643@qq.com; zqi90999@126.com*

Abstract: In view of the increasing demand for strong force value monitoring in landslide, a 5 MN force sensor based on Fiber Bragg Grating(FBG) was proposed. The sensor adopted 8 FBGs to compose 4 group of grating pair for cylindrical elastic strain collection. The grating pair can effectively compensate the effect of temperature on the size of FBG. The dimension of the cylindrical elastomer was determined and optimized via ANSYS numerical simulation. Then the force sensor was tested according to the national regulations. The experimental results show that the sensor with diameter of 124 mm and length of 302 mm, can provide a measurement range of 500—5000 kN and an overall accuracy of 1%. In addition, the wavelength variation corresponding to the maximum force value is 2 567 pm and the sensitivity is 2 kN/pm. The sensor is characterized by simple structure, large measuring range and high precision besides basic characteristics of the grating sensing. The sensor can be

收稿日期:2016-10-31;修订日期:2016-12-06.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51178488, No. 51478066)

applied to force monitoring not only in landslide, but also in construction, chemical industry, coal mine, military and other fields.

Key words: fiber optics; force sensor; fiber Bragg grating(FBG); elastomer; health monitoring

1 引言

力值测量在国民经济生活生产中是一种常见的检测项目,例如弹簧吊钩秤,其原理即是利用弹簧拉力测试物体的重力,再根据重力与质量的关系换算出物体的质量。传统的电测式传感器以电阻应变片为核心,广泛应用于称量、荷载、拉拔测试、试验机检定等项目;而在煤矿、油井、气田、岩土工程等场合则需要将传感器进行防爆、防锈、防腐、防水等处理。然而,这种传感器在长久使用中存在安全隐患且价格昂贵。近年来,以光纤光栅的核心研发的各种传感器以其独特的优点向传统的电测传感器提出挑战^[1-2],并逐步成为军事、航空、民用工程健康监测等领域的研究热点^[3-7]。

在实际工程应用中由,光纤 Bragg 光栅构成的力值传感器主要在 500 kN 以下^[8-9],500 kN 以上的力值传感器^[10]鲜有报道,同时作为标准测力仪进行的大力值传感器研究更少。本文从滑坡监测的实际应用需求出发,设计、制作并分析了基于光纤 Bragg 光栅的 5 MN 力值传感器。

2 5 MN 力值传感器的设计

2.1 传感器应用背景

滑坡是地球上广泛存在的一种自然灾害,每年造成世界人民的财产损失数以亿计^[11-12]。对于滑坡的机理研究和预测报警一直是科技工作者们不懈努力的方向^[13-15]。为便于研究,这里将滑坡模型简化,如图 1 所示。

滑坡模型中抗滑力的一般表达式为:

$$\sigma = G \cos \alpha \tan \varphi + c, \quad (1)$$

式中: σ 为瞬时抗滑力, φ 为滑面岩土的内摩擦角, c 为滑面岩土的内聚力, G 为滑体重力, α 为滑面倾角。令 σ_c 为 σ 的流变下限值, σ_∞ 为 σ 的长期抗剪强度值, σ_f 为 σ 的峰值抗剪强度值。当 $G \sin \alpha \geq \sigma_c$ 时^[16],斜坡可能出现缓慢蠕滑变形,即稳定型滑坡;当 $\sigma_\infty < G \sin \alpha < \sigma_f$ 时,斜坡变形会随时间延续而不断增长,进入加速变形阶段并最终失稳

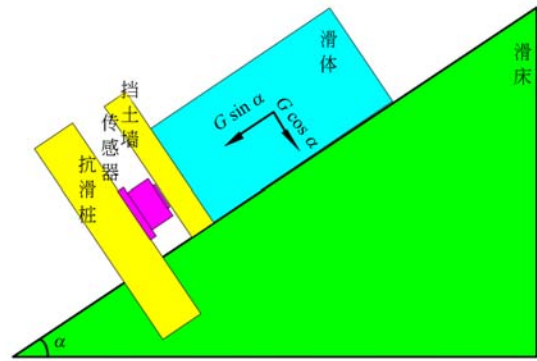


图 1 滑坡简化模型

Fig. 1 The simplification model of landslide

破坏,即形成渐变型滑坡;当 $G \sin \alpha \gg \sigma_\infty$,尤其是 $G \sin \alpha \geq \sigma_f$ 时,滑坡变形直接进入加速变形阶段,形成突发型滑坡。大量研究表明,滑坡体之所以表现出复杂的多样性,即 φ, c 随滑体变形而变化,表现出率相关性^[17]。由 φ, c 所决定的 $\sigma_c, \sigma_\infty, \sigma_f$ 的大小也将随时间和变形量的变化而变化,总体呈减小趋势。滑体以纯土为例,试验研究表明,一类土的剪应力与剪切位移表现出应力软化特性,本构关系为:

$$\sigma = E_c \frac{u}{h} e^{-u/u_1}, \quad (2)$$

式中: σ 为瞬时抗滑力即剪应力, E_c 为剪切模量, h 为滑移带厚度, u 为剪切位移, u_1 为峰值剪应力所对应的位移。

在自身重力或其他外界因素的影响下,一个斜坡究竟会不会产生变形,以及发生何种形式和趋势的变形(逐渐稳定、渐变还是突发)?传统的滑坡稳定性评价方法和仅靠一段时间的变形监测资料都很难解决和回答这一问题。很显然,通过式(1)与式(2)不能求解出瞬时值 φ, c 。而通过测力传感器监测挡墙所受的剩余下滑力则能得到力值 y 为:

$$y = G \sin \alpha - \sigma. \quad (3)$$

联立式(1)、式(2)和式(3)求解可得到瞬时 φ, c ,进一步可以分析滑坡状态。

大型滑坡的坡体质量达几百吨甚至数千吨。抗滑桩^[18-20]和挡墙的安全性也受到严峻的挑战,

利用力值传感器监测抗滑桩和挡墙的受力状态不仅能对坡体的变形状态提供监测数据,同时能为抗滑桩的安全使用提供保障。限于工作进度,本文只对力值传感器的设计进行了探索。

2.2 传感器原理

常用的应变式力值传感器结构简单、测量精度高、使用方便。一般小力值应变型传感器主要采用弯曲型结构进行应变传感,通常设计成如 S 型等的剪切型结构。但是,当载荷超过 90 718 kg (200 000 磅)时,则采用柱式结构^[21]。柱式弹性体力值传感器如图 2 所示,当受力压缩后,根据弹性力学,其纵向应变为:

$$\epsilon_v = -\frac{4F}{\pi ED^2}, \quad (4)$$

式中: ϵ_v 为纵向应变, F 为压力大小, E 为弹性模量, D 为横截面直径。

横向应变为:

$$\epsilon_h = -\mu\epsilon_v = \frac{4\mu F}{\pi ED^2}, \quad (5)$$

式中: ϵ_h 为横向应变, μ 为泊松比。

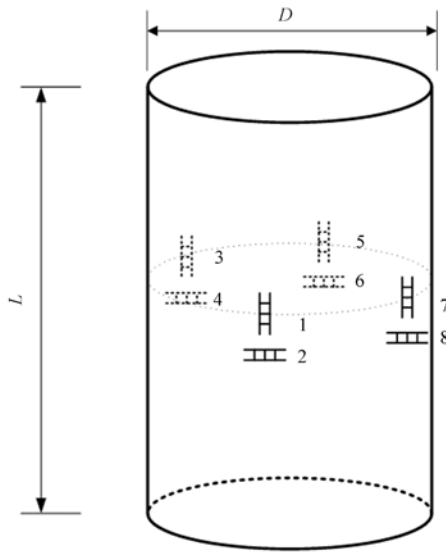


图 2 传感器弹性体及光栅粘贴方式

Fig. 2 Scheme of sensor elastomer and grating bonding location

光纤光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 具有类似电阻应变片的作用,但它具有电阻应变片无法比拟的诸多优点。根据光纤模式耦合理论,中心 Bragg 波长为:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (6)$$

式中: n_{eff} 为纤芯的有效折射率, Λ 为光栅周期。

FBG 受到轴向应力或者温度变化的影响时,其几何尺寸会发生变化,并引起有效折射率和光栅周期常数的变化,进而改变 Bragg 波长^[22],即有:

$$\Delta\lambda_B = 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \epsilon} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial \epsilon}\right)\Delta\epsilon + 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right)\Delta T, \quad (7)$$

式中: $\Delta\epsilon$ 为应变变化, ΔT 为温度变化。等式右边第一项为应变引起的波长变化,第二项为温度引起的波长变化。

在温度变化范围较小的情况下,若采用两根结构相近、温度灵敏度系数相同的 FBG 沿柱式弹性体纵轴线和横轴线粘贴,则前一根光栅受压,后一根光栅受拉。此时因压力 F 引起的应力变化量 ϵ_v 和 ϵ_h 的符号相反,而温度变化符号相同。根据式 (7),两根光栅的波长作差值以后可以抵消温度的影响,FBG 的波长变化差只与外界作用力 F 有关。

温度补偿后,只考虑应变作用时,设初始时光栅所处的应变场应变为 ϵ_0 ,对 $\lambda_B(\epsilon)$ 进行泰勒展开,保留到二次项,则有:

$$\lambda_B(\epsilon) = \lambda_B(\epsilon_0) + \frac{d\lambda_B(\epsilon)}{d\epsilon} \cdot \Delta\epsilon + \frac{1}{2} \frac{d^2\lambda_B(\epsilon)}{d\epsilon^2} \cdot \Delta\epsilon^2, \quad (8)$$

式中: $\Delta\epsilon = \epsilon - \epsilon_0$,则 $\Delta\lambda_B = \lambda_B(\epsilon) - \lambda_B(\epsilon_0)$,即:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\lambda_B(\epsilon) - \lambda_B(\epsilon_0)}{\lambda_B(\epsilon_0)} = \frac{1}{\lambda_B} \cdot \frac{d\lambda_B(\epsilon)}{d\epsilon} \cdot \Delta\epsilon + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\lambda_B} \cdot \frac{d^2\lambda_B(\epsilon)}{d\epsilon^2} \cdot \Delta\epsilon^2. \quad (9)$$

由式(6)取自然对数并对 ϵ 求导得:

$$\frac{1}{\lambda_B} \cdot \frac{d\lambda_B}{d\epsilon} = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \cdot \frac{dn_{\text{eff}}}{d\epsilon} + \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{d\Lambda}{d\epsilon}. \quad (10)$$

式中: $\frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{d\Lambda}{d\epsilon} = 1$,设 $\frac{1}{n_{\text{eff}}} \cdot \frac{dn_{\text{eff}}}{d\epsilon} = -P_e$,则:

$$\frac{1}{\lambda_B} \cdot \frac{d^2\lambda_B}{d\epsilon^2} = -\frac{dP_e}{d\epsilon} + (1 - P_e)^2. \quad (11)$$

由式(9)、式(10)和式(11)可得:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\Delta\epsilon + \frac{1}{2} \cdot \left[(1 - P_e)^2 - \frac{dP_e}{d\epsilon} \right] \Delta\epsilon^2. \quad (12)$$

通常,在小应变时只考虑一次项的影响,即 FBG 的波长变化与应变呈线性关系;但当应变超过 1% 以后,二次项则不能忽略,因此在实验中必须考虑传感器的非线性响应。如图 2 所示,在圆柱弹性体外侧的中心部位粘贴 1~8 组 FBG,FBG 以横竖两根为一组构成光栅偶并且互相垂直,根据式(4)、式(5)和式(12)可建立光栅波长与外加荷载力的关系,外加荷载力 F 为输入,FBG 偶波长的变化差值

作为输出 y , 则:

$$y = (1 - P_e) (1 + \mu) \frac{4}{\pi E D^2} \cdot F + \frac{1}{2} \cdot \left[(1 - P_e)^2 \frac{dP_e^2}{d\epsilon} \right] (1 - \mu^2) \frac{16}{\pi^2 E^2 D^4} \cdot F^2. \quad (13)$$

2.3 传感器的结构设计

力值传感器要求应变计(在本文中为 FBG)粘贴在应变足够大的区域, 并且在该区域内应变要尽可能均匀。由式(4)可以看出, 传感器的应变输出与弹性体直径的平方成反比。但直径过小, 在受到较大压力后, 柱式弹性体的中部会呈现向外凸出的趋势, 甚至其应力超过需用应力, 使得弹性体发生崩塌, 因此传感器的最大应力必须满足:

$$\frac{4F_{\max}}{\pi D^2} < [\sigma], \quad (14)$$

式中: F_{\max} 为最大承受荷载, $[\sigma]$ 为材料的许用应力。

力值传感器设计材料为 42crmo 钢, 其许用应力为 1.09×10^9 Pa, 所以 $D > 76.4$ mm。

设定最大载荷时其应变不小于 $2000 \mu\epsilon$, 根据式(4)则有:

$$\frac{4F_{\max}}{\pi E D^2} > 2000 \times 10^{-6}. \quad (15)$$

取弹性模量 $E = 2.1 \times 10^{11}$ Pa, 则 $D < 124$ mm。

弹性体过高, 则稳定性变差。根据杆件的稳定性理论有:

$$\frac{\pi^2 \gamma EI}{L^2} > F_{\max}, \quad (16)$$

式中: γ 为弹性体的约束系数, 取值为 2, E 为弹性模量, I 为截面对中性轴的惯性矩, L 为长度。则 $L < 196.7 D^2$, 对于最大 $D = 124$ mm, $L < 302$ mm。

对于圆柱式弹性体而言, FBG 的黏粘区域至少需要 30 mm 的空间, 因此 $L > 30$ mm。若高度过小, 圆柱体中位线附近向外凸起的程度越大, 圆柱体表面应变分布的不均匀度将增加, 应变不均匀性直接影响 FBG 的反射波长, 从而产生啁啾变化, 进而影响传感器的输出线性度。

定义局部应变的最大差值与局部应变的平均值之比为应变不均匀度^[23], 即:

$$f_s = \frac{(\epsilon - \epsilon_N)_{\max}}{\epsilon_N} \times 100\%, \quad (17)$$

式中: f_s 为应变不均匀度, ϵ_N 为应变平均值, ϵ 为应变。

根据力值传感器的要求, 应变不均匀度一般不超过 0.1%。

2.4 传感器结构优化

根据 2.3 节的分析, 弹性体的结构尺寸可转化为对目标函数在约束变量下的寻优问题, 即:

$$\text{目标函数: } \min f_s(L, D) = \frac{(\epsilon - \epsilon_N)_{\max}}{\epsilon_N} \times 100\%, \quad (18)$$

约束条件: $76 \text{ mm} < D < 124 \text{ mm};$

$$30 \text{ mm} < L < 196.7 D^2.$$

由于圆柱体的局部应变难以用数学解析式表达, 因此这里利用 ANSYS 将圆柱体划分为网格, 通过数值模拟求出其应变的不均匀度。其设置参数如表 1 所示

表 1 圆柱弹性体的 ANSYS 参数选取

Tab.1 ANSYS parameters of cylindrical elastomer

有限元类型	单元长度 /m	弹性模量/Pa	密度 /(kg · m ⁻³)	最大荷载 /N
3D 实体	0.005	2.1×10^{11}	7.85×10^{11}	5×10^6

网格划分如图 3 所示, 其初始值高度 L 为 200 mm, 直径 D 为 100 mm。然后对圆柱体施加 5 MN 的面均匀载荷, 在圆柱体侧表面中心部位垂直距离为 30 mm 的区间里提取等间隔的 6 个结点的弹性应变。通过改变 L 和 D 求得这 6 个点的应变不均匀度, 如表 2 所示。



图 3 弹性体网格划分

Fig.3 Mesh generation of elastomer

表2 数值模拟的应变不均匀度

Tab.2 Strain inhomogeneity in numerical simulation

(%)

D/mm	L/mm							
	30	70	113	145	180	220	263	302
124	25.06	13.62	8.03	5.51	1.75	0.38	0.09	0.05
116	45.31	13.52	10.19	5.52	2.04	0.45	0.08	—
106	50.13	14.58	9.23	5.77	0.74	0.37	—	—
96	33.33	13.87	8.44	3.13	0.44	—	—	—
86	42.11	9.74	4.25	1.13	—	—	—	—
76	28.46	14.78	6.21	—	—	—	—	—

从表2中可以看出,高度 L 相同时,应变不均匀度 f_s 随直径 D 的变化不明显;直径 D 相同时,应变不均匀度随 L 的增大逐渐减小。受杆件稳定条件的影响,长度不能无限增加。直径增大,弹性体的长径比增大,但受输出灵敏度的影响,其最大直径也不能无限增大。

由数值模拟可知,直径为76 mm时单元应变约为 $5\ 000\ \mu\epsilon$,但是此时应变不均匀度很大,受稳定性影响弹性体长度不能超过113 mm。直径为124 mm时,其单元应变约为 $2\ 000\ \mu\epsilon$,并且高度为302 mm时,应变不均匀度为0.05%,因此在设定目标情况下寻找到了最优的直径和长度。综上,实验选用直径为124 mm,长度为302 mm的弹性体,在满足稳定性和灵敏度条件的情况下使局部应变的不均匀度最小。

3 传感器的制作与检定

3.1 传感器的制作

首先选用42crmo材料进行淬火锻打调质到洛氏硬度为 37° 左右的弹性体,然后加工成直径为124 mm,长度为302 mm的弹性体,最后将弹性体进行发黑处理。将弹性体表面4等分并划线,在弹性体表面中位线处 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 的位置与纵轴线方向成 45° 进行交叉打磨,将FBG的粘贴区域打磨成 R_a 为 $5\ \mu\text{m}$ 的圆形,并用丙酮进行清洗。在恒温恒湿条件下使用中航电测生产的专用贴片AB胶进行FBG粘贴。在纵轴线方向和横轴线方向粘贴4组FBG。传感器制作如图4所示。用专用橡胶夹紧固粘贴好的FBG,放入恒温加热箱中每隔10 min升温 5°C ,至到 125°C ,再恒温5 h进行前固化。然后取下橡胶夹每隔10 min升温 5°C ,至到 165°C ,再恒温24 h进

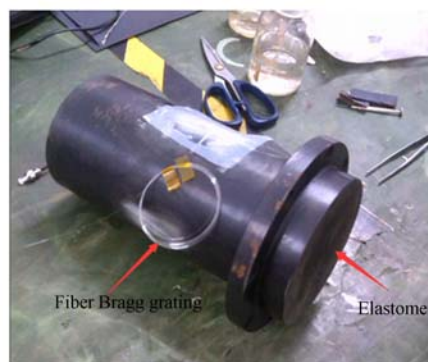


图4 FBG力值传感器的制作

Fig.4 Fabrication of FBG force sensor

行后固化。最后,用704硅橡胶对FBG粘贴处进行防护处理。

3.2 传感器检定

实验所用传感光栅选择北京长飞优创通信技术有限公司生产的反射中心波长为 $1\ 550\ \text{nm}$ 的FBG,其反射半高宽度仅为 $0.2\ \text{nm}$,3 dB分辨率带宽为 $0.08\ \text{nm}$ 。光栅解调仪采用武汉欧迪电子有限公司生产的C波段解调仪,其测量波段为 $1\ 500\sim 1\ 600\ \text{nm}$,分辨力为 $0.001\ \text{nm}$ 。标定设备选用四川航天计量测试研究所的500吨标准测力机,其标准不确定度为0.05%。实验温度为 20°C ,湿度为68%RH,依据国家规程对FBG力值传感器进行检定,如图5所示。

实验以500 kN为步长递增施加荷载,同时采集4组8根FBG的波长数据,结果如图6所示。由图6可以看出,竖光栅的波长变化最大值约为 $-1.94\ \text{nm}$,横光栅的波长变化最大值约为 $0.65\ \text{nm}$,验证了泊松比为0.3的关系。根据文献[24],利用环氧树脂类的黏结剂对光栅进行粘贴,其应变传递效率约为0.88,而根据理论计算光栅的波长变化与应变对应系数为 $1.2\ \text{pm}/\mu\epsilon$,



图 5 传感器检定

Fig. 5 Sensor calibration

即弹性体的 $1 \mu\epsilon$ 应变对应光栅产生约为 1.05 pm 的波长变化。1.3 节的设计表明,弹性体在 5 MN 的作用力下应产生 $2000 \mu\epsilon$ 的应变,理论上可得到约为 2.1 nm 的光栅输出。实验结果与理论大体相符,但实验数据偏低,其原因是 FBG 光栅本身具有的涂敷层降低了应变的传递效率。

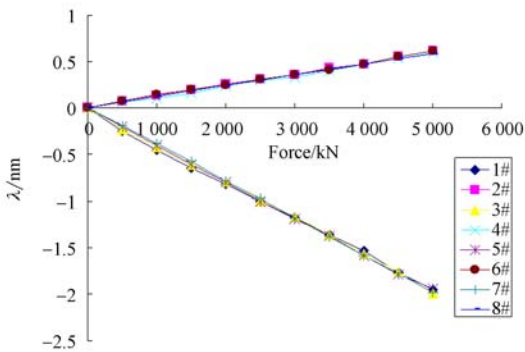


图 6 8 根 FBG 波长与力值的关系

Fig. 6 Corresponding relationship between wavelength and force value of 8 FBGs

为验证 FBG 自身涂敷层对实验结果的影响,用光纤剥线钳将光栅的外涂敷层去掉,只留 $125 \mu\text{m}$ 的裸光栅进行粘贴。由于光栅在去掉涂敷层以后直径非常小,极易断裂,不便粘贴和施压,因此实验只选取了一对 FBG 剥离以后构成光栅偶进行同等条件测试,实验结果如图 7 所示。

对比图 6 和图 7 可以发现,光栅在去掉涂敷层以后粘贴在弹性体上,其波长输出范围增大;竖光栅的最大输出波长变化为 2.09 nm ,与理论计算值 2.10 nm 相符合,由此证明光栅自身涂敷层会降低应变传递效率。但光栅去掉涂敷层以后极

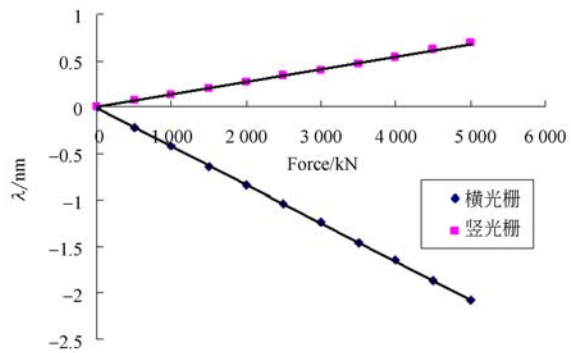


图 7 裸光栅波长与力值的对应关系

Fig. 7 Corresponding relationship between wavelength of bare grating and force value

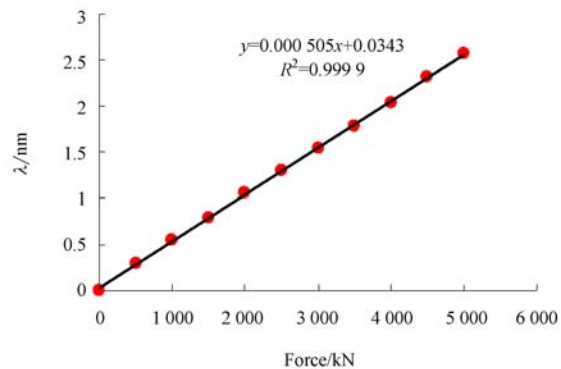


图 8 光栅合成波长随力值的变化关系

Fig. 8 Relationship between grating synthesis wavelength and force value

其脆弱,粘贴成功率下降,从制作成本考虑仍然使用带有涂敷层的光栅进行实验。

将图 6 中每组光栅中的两个 FBG 作差并取平均值,得到波长变化与力值的关系,如图 8 所示。由图 8 可以看出,经过差值和平均以后波长与力值呈良好的线性关系。最大载荷为 5000 kN 时输出波长为 2.567 nm ,线性拟合方程为:

$$y=0.000\ 505x+0.0343. \quad (19)$$

由式(12)可知,当弹性体具有较大的应变时,由应变引起的光栅波长变化二次项不能忽略,因此对图 8 中数据进行二次项拟合,得到的传感方程为:

$$y=-4 \times 10^{-10} x^2+0.000\ 505x+0.034. \quad (20)$$

对传感器进行重复实验 3 次并测试回程误差,得到的检定测试结果如表 3 和表 4 所示。

表3 FBG 力值传感器的检定数据

Tab. 3 Calibration data of FBG force sensor

(nm)

标准测力 机示值/kN	进程示值 1	回程示值 1	进程示值 2	回程示值 2	进程示值 3	回程示值 3	进程平均值	回程平均值
0	0	0.004	0	0.003	0	0.003	0	—
500	0.288	0.290	0.288	0.289	0.290	0.291	0.288	0.290
1000	0.543	0.547	0.543	0.548	0.544	0.549	0.543	0.545
1500	0.792	0.798	0.795	0.801	0.799	0.806	0.795	0.802
2000	1.049	1.057	1.053	1.059	1.054	1.063	1.052	1.060
2500	1.294	1.303	1.300	1.310	1.303	1.313	1.298	1.309
3000	1.532	1.544	1.536	1.541	1.539	1.552	1.536	1.546
3500	1.781	1.795	1.784	1.801	1.785	1.801	1.783	1.799
4000	2.035	2.053	2.044	2.053	2.048	2.057	2.041	2.054
4500	2.308	2.329	2.317	2.327	2.325	2.336	2.316	2.331
5000	2.561	—	2.566	—	2.575	—	2.567	0.350

表4 FBG 力值传感器的误差数据

Tab. 4 Error data of FBG force sensor

标准测力 机示值/kN	进程平均 示值/nm	回程平均 示值/nm	线性拟合 值/nm	线性拟合 误差/%	二次拟合 值/nm	二次拟合 误差/%	回程误差 /%	重复性 误差/%
0	0	0.003	0	0	0	0	—	0
500	0.288	0.290	0.287	0.35	0.287	0.35	0.69	0.69
1000	0.543	0.545	0.539	0.74	0.539	0.74	0.37	0.37
1500	0.795	0.802	0.792	0.38	0.791	0.51	0.88	0.88
2000	1.052	1.060	1.044	0.77	1.043	0.86	0.76	0.47
2500	1.298	1.309	1.297	0.07	1.295	0.23	0.85	0.61
3000	1.536	1.546	1.549	-0.84	1.546	-0.64	0.65	0.38
3500	1.783	1.799	1.801	-0.99	1.797	-0.78	0.89	0.45
4000	2.041	2.054	2.054	-0.63	2.048	-0.34	0.64	0.63
4500	2.316	2.331	2.307	0.39	2.301	0.65	0.65	0.74
5000	2.567	0.35	2.559	0.31	2.549	0.71	—	0.55

从表3、表4中可以看出,拟合值误差、回程误差、重复性误差均不超过1%。在3500 kN 检定,线性拟合值最大,为-0.99%;在2000 kN 检定,二次拟合函数最大,为0.86%。由表4可知,采用二次函数拟合后传感器的误差绝对值分布为0.23%~0.86%,相较于线性拟合误差的绝对值分布0.07%~0.99%有很大提高。因此,采用二次函数拟合更能准确反映该传感器的响应曲线。实验测量表明,在设计大力值传感器时必须考虑应变引起的二次非线性项。在检测及标定传感器响应函数时应进行非线性修正。实验中回零误差为0.21% FS,温度漂移约为0.02% FS/°C,完全满足国家规程JJG445-2000对1级测力仪的要求。

4 讨论

本文研究的基于FBG的5 MN力值传感器采用4组光栅偶粘贴在弹性体的表面测试应变,可以通过光栅偶反射光的波长差测量施加在弹性体上的力。该传感器采用4组光栅偶波长数据取平均的方式有效地避免了随机误差。同时利用光栅偶的互补特性有效地降低了温度对传感器的影响。单根光栅的最大输出波长变化为1.94 nm,而光栅偶的最大输出波长变化为2.567 nm。光栅偶波长差的方式增大了传感器的分度值。

目前,在实际应用中多以小力值FBG传感器为研究对象,主要针对岩土、电力、工厂的特殊问

题提出解决方案,很少按照传感器制作流程以及国家计量规程对传感器进行制作和测试。表 5 所示为几种 FBG 力值传感器的对比,从表 5 中可以看出本文提出的 5 MN 力值传感器各方面的指标均有所提高。

表 5 光栅力值传感器对比

Tab. 5 Contrast of grating force sensors

FBG 力值 传感器	测量范围 /kN	波长最大 变化值/pm	综合误差 /%
文献 8(2010)	5~50	2 496	1.2
文献 9(2012)	6.5~76.4	1 090	2.7
文献 10(2015)	300~3600	未介绍	3.4
本文	500~5000	2 567	1.0

本文仅采用 FBG 光栅和分辨率为 1 pm 的波长解调仪,因此标定精度仅为 1 级。提高 FBG 的质量,例如减小反射波长 3 dB 带宽,可进一步提高传感器的稳定性;同时,若光栅解调仪在波长解析精度上能够提高一个数量级,FBG 力值传感器在力值测量领域会产生质的飞跃。目前,虽然 FBG 力值传感器的精度和成熟度与现有的基于

应变电阻式力值传感器相比差距仍然很大;但是 FBG 力值传感器具有抗电磁干扰、耐腐蚀、防水、响应快、可波分复用等应变电阻式传感器无可比拟的特点,因此光纤传感器的发展潜力巨大,应用前景广阔。本文设计的这种大力值 FBG 传感器不局限于滑坡监测,经优化后有望用于建筑、化工、航天、军事等领域。

5 结 论

本文提出了一种基于 FBG 的 5 MN 力值传感器。在圆柱弹性体的四周均布粘贴 4 组光栅偶以抵消温度的影响,用 ANSYS 对传感器尺寸进行优化,并按照标准传感器制作流程制作了传感器。运用标准测力机按照国家检定规程对该传感器进行检定,实验结果表明,该传感器满足 1 级工作测力仪的要求,其最小测量值为 500 kN,最大测量值为 5 000 kN,对应波长的最大变化量为 2 567 pm,灵敏度为 2 kN/pm。该力值传感器可用于野外边坡的抗滑力监测等大力值测量场合。

参考文献:

- [1] 高潮,刘 邦,郭永彩,等. 面向边坡滑移的剪切位移传感装置[J]. 光子学报, 2015,44(3):0306002. GAO CH, LIU B, GUO Y C, *et al.*. Study on optical fiber Bragg grating sensor using cantilever beam of qual strength for slope sliding displacement monitoring[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(3):0306002. (in Chinese)
- [2] 吴晶,吴晗平,黄俊斌,等. 光纤光栅传感信号解调技术研究进展[J]. 中国光学, 2014,7(4):519-531. WU J, WU H P, HUANG J B, *et al.*. Research progress of fiber grating sensing signal demodulation technology [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 519-531. (in Chinese)
- [3] 施斌,徐学军,王 镒,等. 隧道健康诊断 BOTDR 分布式光纤应变监测技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005,24(15):2622-2688. SHI B, XU X J, WANG D, *et al.*. Study on Botdr-based distributed optical fiber strain measurement for tunnel health diagnosis[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(15): 2622-2688. (in Chinese)
- [4] ZHU H H, SHI B, ZHANG J, *et al.*. Distributed fiber optic monitoring and stability analysis of a model slope under Surcharge loading[J]. *Journal of Mountain Science*, 2014, 11(4):979-989.
- [5] 吴入军,郑百林,贺鹏飞,等. 埋入式光纤布拉格光栅传感器封装结构对测量应变的影响[J]. 光学精密工程, 2014,22(1):24-30. WU R J, ZHENG B L, HE P F, *et al.*. Influence of package structure of embedded fiber Prague grating sensor on measuring strain [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1):24-30. (in Chinese)
- [6] 吴晶,吴晗平,黄俊斌,等. 用于船舶结构监测的大量程光纤布拉格光栅应变传感器[J]. 光学精密工程, 2014,22(2):311-317. WU J, WU H P, HUANG J B, *et al.*. Large range optical fiber Prague grating strain sensor for ship structure monitoring [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2):311-317. (in Chinese)
- [7] 徐国权,熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. 中国光学, 2013,6(3):306-317.

- XU G Q, XIONG D Y. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering[J]. *Chinese Optics*, 2013,6(3):306-317. (in Chinese)
- [8] 柴敬,赵文华,李毅,等. 光纤光栅检测的锚杆拉拔实验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2012,41(5):719-724.
- CHAI J, ZHAO W H, LI Y, *et al.*. Pull out tests of fiber Bragg grating sensor fitted bolts[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2012,41(5):719-724. (in Chinese)
- [9] 蒋建,李成榕,马国民,等. 架空输电线路覆冰监测用FBG拉力传感器的研制[J]. *高电压技术*, 2010,36(12):3028-3034.
- JIANG J, LI CH R, MA G M, *et al.*. Development of FBG tension sensor applied to ice monitoring of overhead transmission lines[J]. *High Voltage Engineering*, 2010,36(12):3028-3034. (in Chinese)
- [10] 桂贵,齐舒. 穿心式测力环弹性体的结构优化设计[J]. *土木工程与管理学报*, 2015,32(1):42-47.
- GUI G, QI SH. Structure optimization design of the feed through measuring ring elastomer [J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2015,32(1):42-47. (in Chinese)
- [11] 刘邦,刘京诚,朱正伟. 光纤传感技术在山体滑坡的应用[J]. *压电与声光*, 2012,34(1):27-32.
- LIU B, LIU J CH, ZHU ZH W. Application of optical fiber sensing technology to landslides [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2012,34(1):27-32. (in Chinese)
- [12] 朱正伟,刘东燕,袁侨英,等. 光电技术在边坡稳定监测中的应用[J]. *压电与声光*. 2009,31(1):112-114,118.
- ZHU ZH W, LIU D Y, YUAN Q Y, *et al.*. Application of electro-optic technology to the slope stability monitoring[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2009,31(1):112-114,118. (in Chinese)
- [13] ZHU ZH W, LIU D Y, YUAN Q Y, *et al.*. A novel distributed optic fiber transducer for landslides monitoring[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011,49:1019-1024.
- [14] ZHU ZH W, YUAN Q Y, LIU D Y, *et al.*. A third-generation optical fiber transducer for landslide monitoring[J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2014,13(4):939-946.
- [15] ZHU Z W, YUAN Q Y, LIU D Y, *et al.*. New improvement of the combined optical fiber transducer for landslide monitoring[J]. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2014,14(8):2079-2088.
- [16] 许强. 滑坡的变形破坏行为与内在机理[J]. *工程地质学报*, 2012,20(2):145-151.
- XU Q. Theoretical studies on prediction of landslides using slope deformation process data [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012,20(2):145-151. (in Chinese)
- [17] 武明鑫,张楚汉,王进廷,等. 基于细观颗粒元的混凝土弯曲试验模拟与率效应[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2014,54(8):999-1005.
- WU M X, ZHANG CH H, WANG J T, *et al.*. Simulations of concrete bending and rate effects based on meso-scaled particle elements[J]. *Journal of Tsinghua University: Sci & Technol.*, 2014,54(8):999-1005. (in Chinese)
- [18] 张爱军,莫海鸿,朱珍德,等. 被动桩与土相互作用解析计算研究[J]. *岩土工程学报*, 2011,33(S2):120-127.
- ZHANG A J, MO H H, ZHU ZH D, *et al.*. Analytical solution to interaction between passive piles and soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011,33(S2):120-127. (in Chinese)
- [19] 胡新丽. 三峡水库水位波动条件下滑坡抗滑工程效果的数值研究[J]. *岩土力学*, 2006,27(12):2234-2238.
- HU X L. Numerical simulation of effectiveness of anti-slide piles construction for landslide in Three Gorges Reservoir area under water-level fluctuation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006,27(12):2234-2238. (in Chinese)
- [20] 蒋鑫,梁多伟,刘晋南,等. 碎石桩与抗滑桩联合加固斜坡软弱地基路堤的工作机理分析[J]. *铁道学报*, 2015,37(12):81-87.
- JIANG X, LIANG D W, LIU J N, *et al.*. Working mechanism of embankment over sloped weak ground reinforced by combination of gravel piles and slide-resistant piles[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2015,37(12):81-87. (in Chinese)
- [21] 理查德·富兰克林. 应变式称重传感器的设计与计算[C]. 第六届全国称重技术研讨会, 2007.
- FRANKLIN R. Design and calculation of stress sensor [C]. *The Sixth National Symposium on*

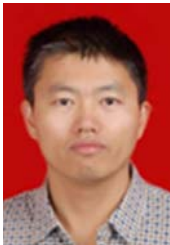
- Weighting Technology*, 2007. (in Chinese)
- [22] 乔学光, 贾振安, 傅海威, 等. 光纤光栅温度传感理论与实验[J]. 物理学报, 2004, 53(2): 494-497.
QIAO X G, JIA ZH A, FU H W, *et al.*. Theory and experiment about in-fiber Bragg grating temperature sensing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(2): 494-497. (in Chinese)
- [23] 王龙山, 张惠新, 魏福玉, 等. 高精度柱式称重传感器弹性体的计算机辅助优化设计[J]. 吉林工业大学学报, 1991(4): 45-51.
WANG L SH, ZHANG H X, WEI F Y, *et al.*. The computer aided optimizing design for the elastomer in high precision cylindric load cell [J]. *Journal of Jilin University of Technology*, 1991 (4): 45-51. (in Chinese)
- [24] 吴俊, 陈伟民, 章鹏, 等. 粘接层弹性模量对光纤 Bragg 光栅传感器应变传递性能的影响[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2941-2946.
WU J, CHEN W M, ZHANG P, *et al.*. Influence of bond layer characteristics on strain sensing properties of FBG sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2941-2946. (in Chinese)

作者简介:



高 潮(1959—), 男, 山西柳林人, 教授, 博士生导师, 1982 年于东南大学获得学士学位, 1988 年、2004 年于重庆大学分别获得硕士和博士学位, 主要从事信息处理技术、测控技术与仪器等方面的研究。E-mail: brightlishi @ gmail.comgaoc@cqu.edu.cn

通讯作者:



朱正伟(1975—), 男, 重庆合川人, 博士, 研究员, 2005 年、2011 年于重庆大学分别获得硕士和博士学位, 主要从事边坡工程、光电技术在土木工程的应用研究。E-mail: zqiqo999@126.com

通讯作者:



刘 邦(1983—), 男, 四川南充人, 博士研究生, 2005 年于中国计量学院获得学士学位, 2011 年于重庆大学获得硕士学位, 主要从事光纤传感技术的研究。E-mail: 28374643@qq.com