

引用本文: 唐杰, 邵国霞. 一种面向结构沉降的改进型 FBG 传感器[J]. 光通信技术, 2024, 48(4): 36-41.

一种面向结构沉降的改进型 FBG 传感器

唐杰¹, 邵国霞²

(1. 河南工业职业技术学院 建筑工程学院, 河南 南阳 473000; 2. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610000)

摘要: 为了提高光纤布喇格光栅(FBG)型沉降传感器的灵敏度, 降低在沉降过程中由于倾斜与温漂所造成的测量偏差, 设计了一种面向结构沉降的改进型 FBG 传感器。该传感器将传统悬臂结构改为直拉结构, 减少因沉降倾斜导致的测量误差; 通过精确计算 2 组 FBG 的波长偏移量的比值, 实现对沉降量的准确测量。测试结果表明: 该传感器的应变响应量为 $5.2 \times 10^{-5} \text{ } \varepsilon/\text{N}$, 在 0~50 mm 内波长偏移量与沉降量成线性关系, 其偏差均值优于 0.69 mm, 灵敏度均值为 107.45 pm/mm; 测试结果波动均低于 1.0%, 明显优于传统 FBG 传感器结构, 验证了其具有更好的抗干扰能力。

关键词: 沉降检测; 光纤布喇格光栅; 差分比值计算; 倾斜干扰; 温漂干扰

中图分类号: TP212; TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)04-0036-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.04.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Improved FBG sensor for structural settlement

TANG Jie¹, SHAO Guoxia²

(1. Architectural Engineering Institute, Henan Polytechnic Institute, Nanyang Henan 473000, China;

2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610000, China)

Abstract: In order to improve the sensitivity of fiber Bragg grating(FBG) type settlement sensors and reduce measurement deviations caused by tilt and temperature drift during the settlement process, an improved FBG sensor for structural settlement was designed. This sensor replaces the traditional cantilever structure with a straight pull structure to reduce measurement errors caused by settlement and tilt. By accurately calculating the ratio of wavelength offsets between two sets of FBGs, accurate measurement of settlement can be achieved. The test results show that the strain response of the sensor is $5.2 \times 10^{-5} \text{ } \varepsilon/\text{N}$, and there is a linear relationship between wavelength shift and settlement within 0~50 mm. The average deviation is better than 0.69 mm, and the average sensitivity is 107.45 pm/mm. The fluctuation of the test results is below 1.0%, which is significantly better than the traditional FBG sensor structure, verifying its better anti-interference ability.

Key words: settlement detection, fiber Bragg grating, calculation of differential ratio, tilt interference, temperature drift interference

0 引言

沉降问题是工程建设过程中必须重视的安全因素,尤其在高层建筑或地基土体承受能力较弱的环境中,容易产生不均匀沉降^[1-2]。光纤布喇格光栅(FBG)传

感器^[3]一般通过金属管封装的形式来实现沉降检测。BURSI O S 等人^[4]在监测地铁隧道结构时,采用了多 FBG 组网技术来获取钢筋混凝土结构的应力场分布。METJE N 等人^[5]设计的基于 FBG 传感器的隧道位移形变监测实验,其相对误差控制在 2.4%以内。王菀等人^[6]采用布里渊光时域反射对隧道内应变场测试,构建了监测力学模型和解算方程,完成了传感器的制作与标定。SOGA K 等人^[7]采用预埋技术将 FBG 预制在聚氯乙烯(PVC)管结构中,利用该结构测得的沉降数据与水准仪的测试数据接近。MOHAMAD H 等人^[8]采用光纤感知方法,获取了伦敦隧道中管片接缝位置的变形数据。魏纲等人^[9]采用 FBG 对海底沉管隧道进行监测,

收稿日期: 2024-01-26。

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(172102210390)资助。

作者简介: 唐杰(1983—),男,四川崇州人,本科,讲师,主要研究方向是土木工程施工技术、工程管理、建筑结构。负责了国家级、省部级项目 6 项,荣获国家级教学成果奖 1 项,省级教学科学研究奖 1 项,省级信息化教学成果奖 1 项。



并通过修正模型成功将测试误差缩减至 0.8%~2.0%。何涛等人^[10]通过 FBG 对地铁盾构结构进行监测, 其应变响应误差均值为 $\pm 30 \mu\epsilon$ 。马豪豪等人^[11]设计了一种便于固定在隧道中的封装结构, 其灵敏度为 $0.0117 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。吴静红等人^[12]在京雄铁路隧道中铺设光纤传感网络后, 沉降监测的效果显著。丁勇等人^[13]在隧道沉降检测中, 运用了 FBG 沉降管技术精准地捕捉到 0.5 nm 的波长偏移响应, 从而确保沉降检测的精度达到甚至优于 2 mm 的级别。高秀青等人^[14]在实验中运用了 6 组 FBG 沉降管, 成功实现了优于 0.5 mm 的沉降精度。但是, 上述文献传感器的灵敏度普遍不高, 且 FBG 金属沉降管结构限制了其应用范围。故本文设计一种面向结构沉降的改进型 FBG 传感器, 旨在提高沉降监测灵敏度。

1 传感器结构设计

1.1 传统结构问题分析

在传统沉降监测中, 当 FBG 传感器被固定于侧壁且其伸出长度已知时, 测试结构可等效为悬臂梁结构。目标位置沉降时, 水位变化导致浮力改变, 从而引起悬臂梁应力变化。在利用 FBG 线性变化关系计算 2 次应力差值, 并解算沉降量 h 的过程中, 需要特别考虑的 2 个潜在问题: 1) 实际沉降过程往往伴随着倾斜, 这种倾斜可能导致浮力不完全作用于悬臂梁的拉伸方向, 从而引入测量误差。2) 罐体传感结构中的液体会随着时间的推移逐渐蒸发, 液面的降低会导致测试结果产生漂移误差。

1.2 改进型 FBG 沉降传感结构设计

为了抑制在传统结构中存在的 2 个潜在问题对传感结构造成的干扰, 本文设计一种面向结构沉降改进型 FBG 传感器, 其工作原理图如图 1 所示。图 1 中, 测试位置用于检测是否存在沉降的地点。标定位置指那些无重型建筑等易造成沉降因素、开阔且沉降过程可忽略不计的区域, 这些区域被用来作为参照, 以标

定测试位置的沉降程度。图中, R 表示漂浮罐体的直径, L 表示漂浮罐体的高度, h 表示液位到测量筒底的高度, h_0 表示未发生沉降时 2 个漂浮罐体初始状态液位, h_1 和 h_2 表示发生沉降后 2 个漂浮罐体的实际液位高度。本文将悬臂梁结构改为直拉结构, 在漂浮罐体的上下位置均安装 FBG 应变传感器, 同时在测试位置与标定位置上均采用此种结构设计。在传统结构中, 沉降量一旦引发液位变动, 浮力作用便随之变化, 进而导致 FBG 的响应波长发生相应调整; 当沉降过程发生倾斜时, 若悬臂梁结构的施力方向不垂直于悬臂梁本身, 则会产生测量误差。而在本文设计的结构中, 浮力测试方法是通过比较 FBG_1 和 FBG_2 的波长偏移量比值来完成的。因此, 当结构体发生偏移时, 任意角度对 FBG_1 和 FBG_2 产生的影响是相同的。通过比值计算, 可以有效地消除这种影响, 从而解决由此产生的实际误差问题。

由于 FBG_1 和 FBG_2 所在漂浮罐体与 FBG_3 和 FBG_4 所在漂浮罐体材质相同且相互连通, 无论是蒸发还是其它环境因素导致的液位变化都是同步的。因此, 通过计算 FBG_1 和 FBG_2 的差值与 FBG_3 和 FBG_4 的差值之间的比值, 可以有效地消除由液位变化引起的漂移误差。

2 理论模型

对于 4 个 FBG 而言, 其应变与波长偏移的函数关系^[15]有

$$\Delta\lambda_B = [(1-P_\epsilon)\epsilon + (1-P_T)T] \lambda_B \quad (1)$$

其中, ϵ 和 T 分别表示影响波长变化的应变变量与温度量, P_ϵ 和 P_T 分别表示 FBG 对温度、应变的响应系数, λ_B 表示初始中心波长。为了解决在长期沉降监测中由温度引起的交叉敏感问题^[16], 本文利用不受外应力影响的温度标定 FBG, 以精确获取测试位置的温度波长数据, 式(1)中的 T 可以视为一个常系数。故有

$$\Delta\lambda_B / \lambda_B = (1-P_\epsilon)\epsilon + C_T \quad (2)$$

其中, C_T 为温度补偿系数。由此对改进型 FBG 传感器结构内的液位进行分析。

由于等效应力 F_0 和应变 ϵ 之前存在线性关系, 设其线性系数为 k_f , 则

$$\epsilon = k_f F_0 \quad (3)$$

设漂浮罐体的内部液体密度是 ρ , 质量是 M , 重力加速度是 g , 水位介于 L 之间时, F_0 为

$$F_0 = \pi (R/2)^2 h_0 \rho g - Mg \quad (4)$$

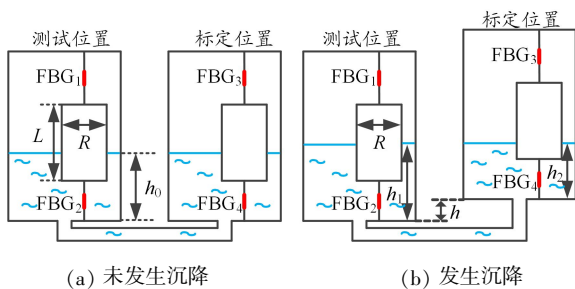


图 1 改进型 FBG 沉降传感器工作原理图

唐杰, 邵国霞: 一种面向结构沉降的改进型 FBG 传感器

故将式(3)和式(4)代入式(2), 则浮力波长偏移的函数关系为

$$\Delta\lambda_B = \left\{ (1-P_\varepsilon) k_f \left[\pi (R/2)^2 h_0 \rho g - Mg \right] + C_T \right\} \lambda_B \quad (5)$$

由式(5)可知, 原本与应变 ε 相关的函数 $\Delta\lambda_B$ 转变为与液位 h_0 相关的函数, 从而实现了波长偏移量与沉降量之间的函数对应关系。

此时的 λ_1 和 λ_2 为初始波长。FBG₁ 和 FBG₂ 的波长偏移量随液位变化而变化, 且这 2 组偏移量的大小相同, 但方向相反。发生沉降后 FBG 的 4 个位置的波长发生偏移, 偏移量为

$$\begin{cases} \Delta\lambda_{B1} = \left\{ (1-P_\varepsilon) k_f \left[\pi (R/2)^2 (h_1 - h_0) \rho g - Mg \right] + C_T \right\} \lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} = \left\{ (1-P_\varepsilon) k_f \left[\pi (R/2)^2 (h_1 - h_0) \rho g - Mg \right] + C_T \right\} \lambda_{B2} \\ \Delta\lambda_{B3} = \left\{ (1-P_\varepsilon) k_f \left[\pi (R/2)^2 (h_0 - h_2) \rho g - Mg \right] + C_T \right\} \lambda_{B3} \\ \Delta\lambda_{B4} = \left\{ (1-P_\varepsilon) k_f \left[\pi (R/2)^2 (h_1 - h_0) \rho g - Mg \right] + C_T \right\} \lambda_{B4} \end{cases} \quad (6)$$

由于 2 个漂浮罐体相互连通, FBG₁ 和 FBG₂ 的浮力增量与 FBG₃ 和 FBG₄ 的浮力减量相等, 这些变化均源于沉降引起的液位变化, 即漂浮罐体的体积变化, 而该体积变化量可以通过 h 计算得出。

与传统结构相比, 改进型 FBG 传感器采用了一种独特的定标方法, 即通过计算 2 组偏移量的差值来提高测试灵敏度, 同时利用另外 2 组偏移量的比值来消除同比干扰。则对标系数 K 的表达式为

$$K = \frac{\Delta\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2}}{\Delta\lambda_{B3} - \Delta\lambda_{B4}} \quad (7)$$

再将标定后的对标系数代入沉降量线性函数模型, 则有

$$D_s = aK + b \quad (8)$$

其中, a 和 b 分别表示对标系数关于沉降量的线性拟合斜率与偏移补偿值。

3 仿真和实验分析

3.1 仿真分析

为深入理解和模拟分析沉降时的响应过程, 本文在 ANSYS 软件中采用等比例、同材质结构模型, 精确模拟应力场的分布情况。改进型 FBG 传感器结构体外罐体的直径为 20 cm, 高为 50 cm; 漂浮罐体的直径为 10 cm, 高为 20 cm。根据式(3)计算可知两者等效应力分别为 0.05 N 和 0.1 N。沿漂浮轴向沉降量分别设置为 5 cm 和 10 cm。由此对改进型 FBG 传感器所在拉绳上的应力场进行仿真分析, 其结构如图 2 所示。改进

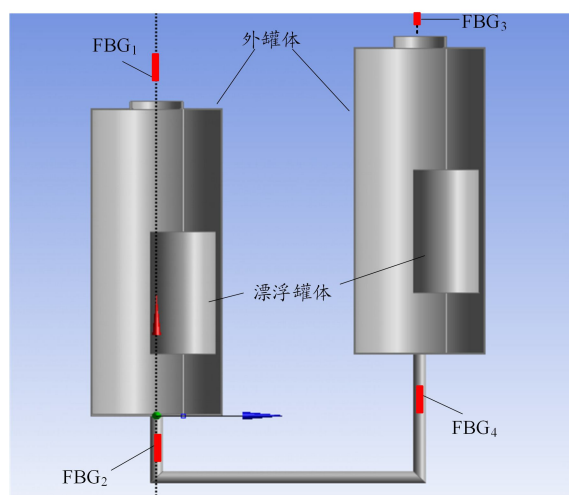


图2 结构设计

型FBG 沉降传感器结构由 2 个相同漂浮罐体组成, 中间连通, 管内分别内置 1 个空心浮漂。初始状态时, 2 个漂浮罐体等高, 内部水位线位于漂浮罐体中间位置, 当测试位置沉降时因液位改变使 FBG 波长发生偏移。本文从 ANSYS 软件中测得的应力场分布结果可知, 当等效应力 $F_0=0.05$ N 时, 连接绳上颜色均匀过渡, 没有突变与阶跃, 因此连接绳上的应力分布基本均匀, 最大应变响应量为 $2.2659 \times 10^{-6} \varepsilon/N$, FBG 传感器在中间位置, 应变响应量大约为 $1.2 \times 10^{-6} \sim 2.2 \times 10^{-6} \varepsilon/N$; 当等效应力 $F_0=0.1$ N 时, 连接绳上颜色分布基本均匀, 最大应变响应量为 $4.5317 \times 10^{-6} \varepsilon/N$, FBG 传感器在中间位置, 应变响应量大约为 $2.0 \times 10^{-6} \sim 4.0 \times 10^{-6} \varepsilon/N$ 。因此, 2 次测试结果的应力响应区间均在 FBG 可识别范围内。

采用 FBG₁ 和 FBG₂、FBG₃ 和 FBG₄ 这 2 组传感器的差分技术, 可以获得大约 2 倍于等效应力的应力变化响应。随后, 本文通过计算这 2 组数据的波长偏移值比值, 消除倾斜、液位偏移等干扰因素。同时, 在进行不同浮力测试时, 对比仿真过程中 2 组不同的等效应力值, 并据此计算出差分比值的测试范围。基于测试范围的均值点得知, 在 0.05 N 的应力作用下, 差分应变响应量为 $3.4 \times 10^{-6} \varepsilon/N$, 而在 0.1 N 的应力作用下, 差分应变响应量为 $6.0 \times 10^{-6} \varepsilon/N$ 。基于这些数据, 可以进一步计算出改进型 FBG 传感器的应变响应量为 $5.2 \times 10^{-5} \varepsilon/N$ 。

3.2 实验分析

在实验室环境中, 本文将改进型 FBG 沉降传感系统安装于稳定的光学平台上。系统的一侧固定不动, 用以模拟标准位置; 另一侧连接至可灵活上下调节的 HYHTZ210 型 Z 轴升降台, 使用刻度尺记录高度变化

值。在测试过程中,每隔一定高度记录 4 个 FBG 的波长偏移量,测试结果得出,其最小测量精度高达 1.0 mm,确保了测量的精准度,从而实现一维位移的精确控制。测试过程中的实验系统架构如图 3 所示。

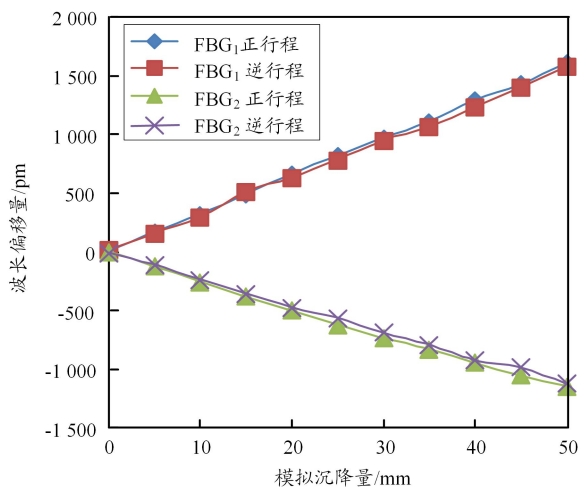
3.2.1 模拟沉降测试

Z 轴升降台每次变化 5.0 mm, $h \in [0, 50.0 \text{ mm}]$, 测试过程中分别对正行程(拉伸)与逆行程(压缩)进行波长偏移测试,得到的 FBG 波长偏移量与模拟沉降量的变化曲线如图 4 所示。

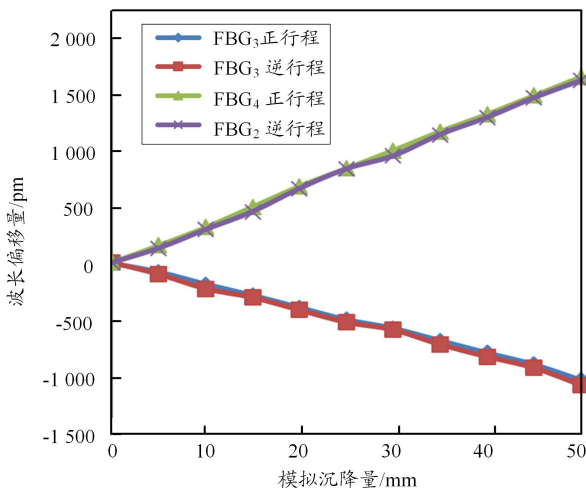
从图 4(a)可以看出,FBG₁ 和 FBG₂ 随着模拟沉降量的变化,波长偏移量呈线性变化,正行程与逆行程基本吻合。FBG₁ 受拉伸作用,波长偏移量与模拟沉降量呈正相关;FBG₂ 受挤压作用,波长偏移量与模拟沉降量呈负相关。正行程和逆行程的线性度分别是 0.998 7 和 0.998 6; 正相关的拟合曲线斜率为 30.922, 负相关的拟合曲线斜率为 -22.116。相比之下,正相关下的敏感度更高。这是因为拉伸作用时浮力完全作用于 FBG 结构上,而压缩作用时,由于结构体的弯曲,导致存在非 FBG 轴向分量的应力损失。

从图 4(b)可以看出,FBG₃ 和 FBG₄ 的波长偏移曲线与 FBG₁ 和 FBG₂ 的刚好相反,线性度的测试结果分别为 0.998 9 和 0.997 4,同样符合线性变化关系。正相关的拟合曲线斜率为 33.122, 负相关的拟合曲线斜率为 -21.285,与上一组(FBG₁、FBG₂)的变化趋势基本一致。理论上,对本系统的 2 组 FBG 测试数据(FBG₁ 与 FBG₂、FBG₃ 与 FBG₄)进行差分处理,可以获得更高的测试精度,这主要基于它们之间的波长偏移量响应差。此外,差分计算能够有效抑制倾斜干扰和温漂干扰,因为这 2 种干扰会同时影响每一对 FBG 测试组。通过差分计算得到改进型 FBG 传感器的测量位置与

实际标尺位置的偏差均值为 0.69 mm, 满足沉降测试中小于 1.0 mm 的精度要求。



(a) FBG₁ 和 FBG₂ 的正行程与逆行程



(b) FBG₃ 和 FBG₄ 的正行程与逆行程

图 4 传感器中 4 个 FBG 的响应曲线

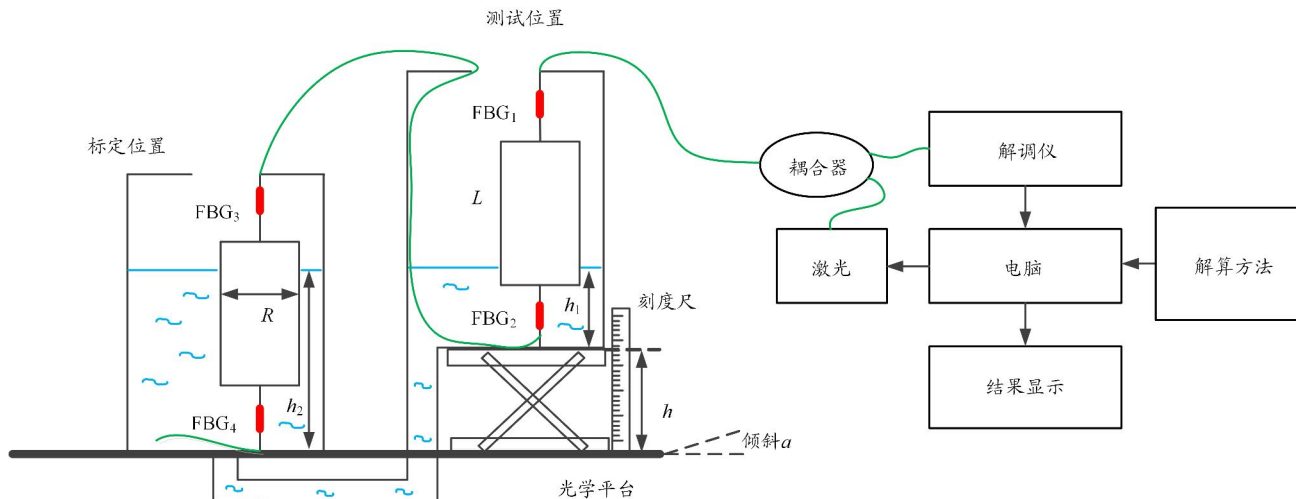


图 3 实验系统架构图

唐杰, 邵国霞: 一种面向结构沉降的改进型 FBG 传感器

3.2.2 灵敏度及稳定性分析

在不考虑温度漂移和其它潜在干扰因素的前提下, 改进型 FBG 传感器的灵敏度取决于 4 个 FBG 的精确测试数据。根据 4 个 FBG 的测试结果, 可以获得 2 个漂浮罐体波长偏移量的差值, 分别是 $\Delta_1 = O_{\text{FBG}_1} - O_{\text{FBG}_2} = 53.038 \text{ pm/mm}$ 和 $\Delta_2 = O_{\text{FBG}_3} - O_{\text{FBG}_4} = -54.407 \text{ pm/mm}$ 。其中, $O_{\text{FBG}_1} \sim O_{\text{FBG}_4}$ 分别表示各 FBG 的波长偏移量。传感器的综合灵敏度可以通过求解 2 个漂浮罐体同一时刻的 2 组波长偏移量的差进行求解, 即 $W = \Delta_1 - \Delta_2$, 其计算均值为 107.445 pm/mm , 比传统 FBG 的 30.922 pm/mm 提高了近 3 倍。将每次测试结果与真实值作差并除以真实值, 然后计算这些结果的平均值, 得到的平均值波动小于 1.0%。

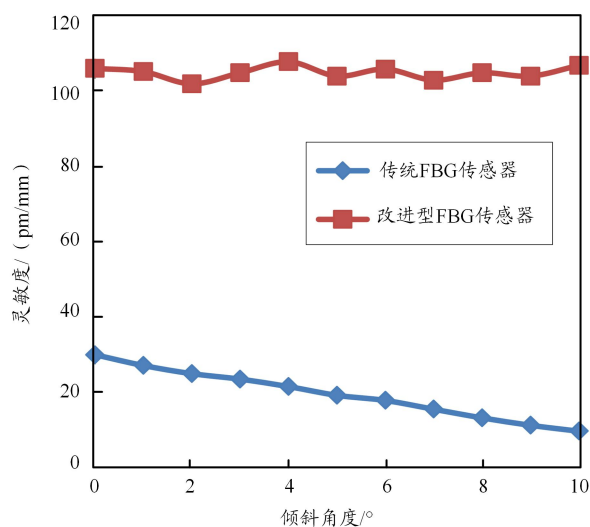
为了验证系统的稳定性, 本文对正行程和逆行程上每个点都测试 3 次求平均值, 然后计算这些点在正逆行程中的差值的绝对值, 最后再对这些绝对值求取平均值。这个平均值从物理意义上可以表征测试系统正向递增和逆向递减过程中 2 次统计结果的差值, 由此分析系统测试数据的稳定性与波动程度。经计算, FBG_1 和 FBG_2 的平均值为 29.572 pm/mm , FBG_3 和 FBG_4 的平均值为 25.364 pm/mm 。在整个模拟沉降与波长偏移的实验过程中, 所提传感器的测试数据相近, 因此其具有较好的稳定性。

3.2.3 倾斜干扰与温漂测试

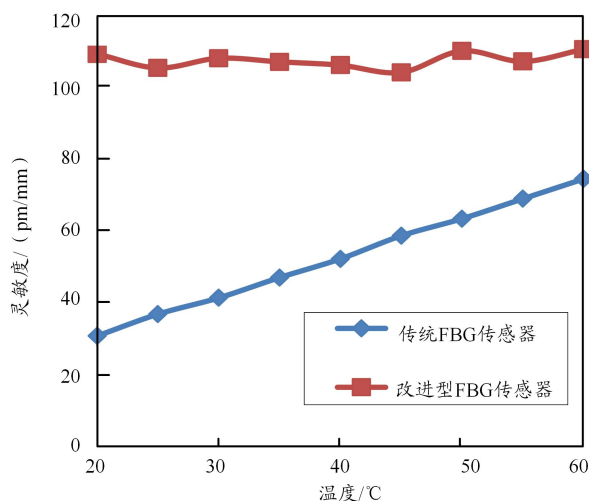
为了验证改进型 FBG 传感器对倾斜与温漂的抑制作用, 本文分别对其进行了倾斜干扰测试与温漂测试。在倾斜干扰测试中, 设置 $0^\circ \sim 10^\circ$ 的倾斜角 α 增量变化, 每次递增 1° 。在温漂测试中, 设置温度 T 为 $20 \sim 60^\circ\text{C}$ 的增量变化, 每次递增 5°C 。改进型 FBG 传感器与传统 FBG 传感器的倾斜角度与温漂测试结果如图 5 所示。

由图 5(a) 可知, 随着倾斜角度的增加, 传统 FBG 传感器的灵敏度从 30.92 pm/mm 下降至 9.67 pm/mm , 降幅明显。这是因为倾斜角度越大, 在非光纤光栅轴向的分量越大, 相同浮力下对 FBG 的应力分量越小。而改进型 FBG 的灵敏度仅有小幅波动, 在整个角度变化范围内的灵敏度均值为 106.32 pm/mm , 振幅基本一致。这是因为差分后采用了 2 组结构的波长偏移比值, 故在比例计算过程中抵消了倾斜分量的干扰。

由图 5(b) 可知, 随着温度的升高, 传统 FBG 传感器的灵敏度从 30.92 pm/mm 增长至 73.25 pm/mm , 显著增大。然而, 这种对温度的高灵敏度也意味着它更容易受到温度漂移的干扰; 而改进型 FBG 传感器的灵敏度



(a) 倾斜角度与灵敏度的关系



(b) 温度变化与灵敏度的关系

图 5 2 种传感器的干涉测试

基本不受温度增加影响。尽管温度升高会导致波长偏移增加, 即波长偏移的绝对值变大, 但得益于改进型 FBG 采用 2 次测试结果的比值这一方法, 使其能够成功地消除了波长偏移量中的等比例放大部分。

4 结束语

本文针对建筑物沉降过程中易受倾斜及温漂干扰的问题, 提出了一种面向结构沉降的改进型 FBG 传感器结构。该传感器通过差分计算提高了响应能力, 并利用比值求解方法有效抑制了倾斜和温漂的干扰。在实验中, 采用精密升降台模拟沉降变化, 成功获得了优质的线性拟合曲线, 在倾斜与温漂实验中验证了改进型 FBG 传感器几乎不受倾斜角度与温度漂移的影响。因此, 该传感器比传统传感器具有更高的实用价值。

参考文献:

- [1] 张萌, 温添, 陆键, 等. 基于沉降点占比的非错台型桥头沉降检测方法[J]. 公路交通科技, 2022, 39(6): 82-90.
- [2] 孙丽, 王兴业, 李闯, 等. 基于等强度梁的新型双光纤光栅静力水准仪[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 50-58.
- [3] 刘强, 李斌雯, 孙宇丹, 等. 基于长周期光纤光栅的 FBG 解调方法[J]. 应用光学, 2022, 43(1): 160-166.
- [4] BURSI O S, TONDINI N, FASSIN M, et al. Structural monitoring for the cyclic behaviour of concrete tunnel lining sections using FBG sensors[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2016, 23(4): 749-763.
- [5] METJE N, CHAPMAN D N, ROGERS C D, et al. Optical fibre sensors for remote monitoring of tunnel displacements-prototype tests in the laboratory[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21: 3-4.
- [6] 王菀, 干昆蓉, 施斌, 等. 一种基于布里渊光时域反射的土质隧道分布式光纤传感应用技术[J]. 隧道建设, 2013, 33(2): 110-115.
- [7] SOGA K, AMATYA B, WRIGHT P, et al. Optical fibre strain measurement for tunnel lining monitoring[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering, 2010, 163(3): 119-130.
- [8] MOHAMAD H, BENNETT P J, SOGA K, et al. Monitoring tunnel deformation induced by close-proximity bored tunneling using distributed optical fiber strain measurements[EB/OL]. [2024-01-26]. <https://www.mendeley.com/catalogue/6f32b92c-cc3c-315d-87ce-0c68108da8a5/>.
- [9] 魏纲, 苏勤卫, 邢建见, 等. 基于光纤光栅技术的海底沉管隧道管段应变研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 499-506.
- [10] 何涛, 赵鸣, 谢强, 等. 光纤光栅传感器用于盾构隧道施工的监测[J]. 地下空间与工程学报, 2008(1): 157-161.
- [11] 马豪豪, 刘保健, 翁效林, 等. 光纤 Bragg 光栅传感技术在隧道模型试验中应用[J]. 岩土力学, 2012, 33(S2): 185-190.
- [12] 吴静红, 叶少敏, 张继清, 等. 基于光纤光栅监测技术的京雄高铁大断面隧道结构健康监测[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 113-121.
- [13] 丁勇, 王平, 何宁, 等. FBG 分布式沉降管在盾构隧道沉降监测中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(5): 1320-1325.
- [14] 高秀青, 白建明. 光信息传感技术的建筑物沉降监测[J]. 激光杂志, 2020, 41(10): 87-91.
- [15] 彭星玲, 茶映鹏, 叶建雄, 等. 基于 FBG 的悬臂梁式微力与微位移传感单元[J]. 激光与红外, 2022, 52(6): 870-874.
- [16] 冯雨钦, 王佩, 刘泽华, 等. 二维分布式光纤形状传感应变传递研究[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(5): 31-35.