

文章编号: 1001-3806(2010)01-0013-04

## 光纤布里渊与布喇格光栅共线技术的温度互补补偿

何建平<sup>1</sup>, 周智<sup>1\*</sup>, 吴源华<sup>1</sup>, 欧进萍<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 大连理工大学 土木水利学院, 大连 116024)

**摘要:** 为了解决实际工程应用中光纤光栅和分布式布里渊共线技术测试应变的绝对温度补偿方法成本较高、不易布设等问题, 采用光纤布里渊和布喇格光栅共线技术应变感知的温度互补补偿方法, 通过感知探头——双光纤光栅-纤维增强复合智能筋的室内和户外温度补偿试验探讨了该方法的有效性和适用性。结果表明, 该方法可以实现光纤布里渊和光纤光栅的准分布式温度互补补偿, 误差低于8%, 在工程接受范围内。此外, 该技术还能同时给出应变和温度双参量测试结果, 简化了传感系统, 降低了布设成本, 适合实际工程应用。

**关键词:** 激光技术; 温度补偿; 双参量测量; 布喇格光栅; 光纤布里渊传感技术; 纤维增强复合智能筋; 应变测试

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.01.004

### Temperature inter-compensation for single-line optical fiber sensors based on Brillouin and fiber Bragg grating technique

HE Jian-ping<sup>1</sup>, ZHOU Zhi<sup>1</sup>, WU Yuan-hua<sup>1</sup>, OU Jin-ping<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** In order to solve the problems that absolute temperature compensation for strain sensing of single line optical fiber sensors based on Brillouin and fiber Bragg grating encounters, e. g. high cost and difficulty of installation, a novel temperature inter-compensation method was presented. Based on a sensor, i. e. a dual fiber reinforced polymer-fiber Bragg grating rebar, experiments were carried out under room and outdoor environments. The results show that the temperature inter-compensation can be easily realized with a practically acceptable error less than 8%. Moreover this method can also give the dual parameters of strain and temperature values simultaneously. The system based on optical fiber sensors is suitable for practical applications for its simple structure and low cost.

**Key words:** laser technique; temperature compensation; dual parameter measurement; fiber Bragg grating; Brillouin optical sensing technique; smart fiber reinforced polymer rebar; strain sensing

### 引言

光纤传感技术作为现代通信的产物, 是随着光纤及通信技术的发展而逐步发展起来的一门崭新技术。光纤传感器具有抗电磁场干扰、防腐、耐潮湿以及绝对测量等特点, 其中准分布式光纤布喇格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 技术和大规模分布式光纤布里渊监测技术 (Brillouin time domain analysis (reflectometry), BOTDA (R)) 在航空航天、土木、复合材料等领域得到广泛的应用, 成为结构损伤监测的非常有效的两种技术手段<sup>[1-3]</sup>。FBG 和 BOTDA (R) 传感器对温度和

应变都非常敏感, 应变测试需要温度补偿, 消除因环境温度变化导致的不确定性。在众多温度补偿方法中<sup>[4-6]</sup>, 双光纤绝对温度补偿效果最好<sup>[7]</sup>, 不存在光纤应变传感器的温度灵敏度系数受到基体材料调制的问题, 经温度补偿后的应变测试精度高, 得到了很好的应用。但是, 其问题是成本过高, 现场布设较困难, 尤其是对于基于 FBG 和 BOTDA (R) 共线技术的监测系统而言, 一方面, 监测系统中需要额外布设温度补偿 FBG 传感器, 导致系统传感器或传感线路成本过高; 另一方面, 温度补偿用的光纤传感器并不是总能布设到与应变传感器同一个温度场内。如果充分利用一根光纤上的布里渊和光栅信息, 根据其灵敏度系数的差异解耦, 就可以方便地获得准确的温度互补补偿结果, 并同时能给出温度和应变的双参量信息。美国学者 DAVIS 和 KERSEY<sup>[8]</sup> 对利用布里渊传感信号对共线的光纤光栅进行温度补偿研究, 探讨了其可行性, 但是由于其测试系统精度低, 没

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10672048)

作者简介: 何建平 (1976-), 男, 博士研究生, 主要从事布里渊光纤传感技术在土木工程中的应用。

\* 通讯联系人。E-mail: zhouzhi@hit.edu.cn

收稿日期: 2008-11-06; 收到修改稿日期: 2008-12-12

有严格参考对比、探头限于裸纤、缺少系统的试验数据支持等缺点,其研究成果没有得到推广或深入探讨。鉴于此,作者提出基于光纤光栅和布里渊传感共线技术(FBG-BOTDA(R))的应变感知温度互补偿方法,对双光纤纤维增强树脂-光纤光栅复合智能筋(fiber reinforced polymer-fiber Bragg grating, FRP-FBG)进行室内和户外感知试验,并通过与绝对温度补偿的应变结果进行对比,验证该技术方法的有效性,旨在解决 FBG-BOTDA(R)共线技术中因需额外布设温度补偿用传感器和传输线路成本高、布设困难等实际工程问题。

## 1 光纤光栅与布里渊共线技术简介

光纤光栅与布里渊共线技术是将光纤光栅和布里渊测试技术集成在一根传感光纤(optical fiber, OF)上的光纤测试技术,该技术兼顾全尺度、较高精度测试和局部准分布式高精度测试,具有成本低、布设方便、覆盖面广等突出优点,可以为大跨、长距离的重大工程结构提供简易、可靠、低成本的监测手段。其系统由光栅解调仪、布里渊分布式测试仪、耦合器以及共线传感探头等组成,如图1所示。具体工作时,将共线传感探头

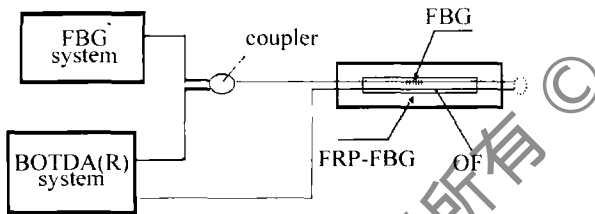


Fig. 1 FBG-BOTDA(R) system

布设到待测试区域,并将 FBG 布设在易损或关键热点应力位置。通过 BOTDA(R) 系统对结构沿传感探头位置的应变进行全尺度监测,实现结构损伤定位和较低精度定量,同时通过 FBG 解调系统对关键位置高精度准确定量测量。在作者实验室,该集成系统包括美国 MOI 公司生产的 SI720 或 SI425,该仪器分辨率可达  $\pm 1\mu\epsilon$ ,采样频率为 10Hz ~ 250Hz;布里渊监测系统为瑞士 Omnisens 公司生产的 DiTeSt STA202,该仪表测量精度为  $\pm 20\mu\epsilon$ 、最小空间分辨率 0.5m、测量距离可达 30km。

## 2 光纤光栅与布里渊应变感知的温度互补偿原理

由光纤光栅和布里渊传感技术的基本原理可知,光纤光栅中心波长和布里渊频移(Brillouin frequency shift, BFS)分别与温度和应变成线性关系,将其写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_B \\ \Delta\nu_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_\epsilon & \alpha_T \\ C_\epsilon & C_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (1)$$

由(1)式可以同时求得施加于 FRP-FBG 上的应变和温度的大小,从而达到其相互之间应变感知互补偿,即:

$$\begin{bmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_\epsilon & \alpha_T \\ C_\epsilon & C_T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_B \\ \Delta\nu_B \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $\alpha_\epsilon, \alpha_T$  分别为应变和温度灵敏度系数;  $\Delta\lambda_B$  为 Bragg 中心波长的漂移量;  $C_\epsilon$  和  $C_T$  分别式布里渊应变和温度灵敏度系数;  $\Delta\nu_B$  布里渊频移增量;  $\Delta\epsilon, \Delta T$  分别为相应的应变和温度增量;  $\alpha_\epsilon \times C_T - \alpha_T \times C_\epsilon \neq 0$ 。

## 3 光纤光栅与布里渊应变感知的温度互补偿试验

选取经过 FRP 封装的含 FBG 的双光纤作为试验对象,如图2所示。为了功能区别,对于 BOTDA 系统,

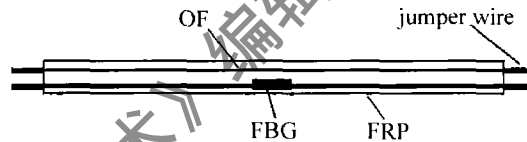


Fig. 2 Dual FRP-FBG smart rebar

命名为 B-OF,其应变和温度灵敏度系数分别约为  $4.5 \times 10^{-2} \text{ MHz}/\mu\epsilon$  和  $1.2 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ <sup>[9]</sup>;对于 FBG 系统,命名为 F-OF,其温度和应变灵敏度系数分别约为  $16 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  和  $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ <sup>[10]</sup>。室内和户外试验中,为了使应变测试温度补偿效果明显,FRP-FBG 智能筋保持零应力状态或恒载。

### 3.1 室内试验及其结果分析

FRP-FBG 智能筋的应变感知温度互补偿试验在试验水槽中进行,试验装置包括:布里渊测试系统 DiTeSt STA202,光纤光栅解调仪 SI720,长为 5m、直径 5mm 的双光纤 FRP-FBG 智能筋、绝对温度补偿用 FBG 温度传感器以及 2m 长水槽,如图3所示。其中

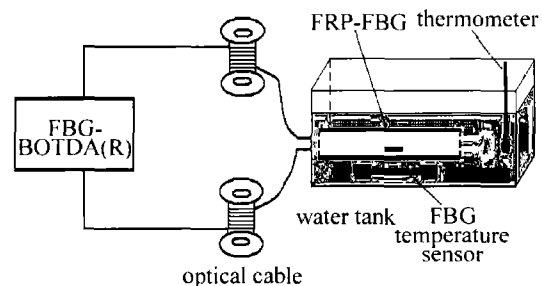


Fig. 3 Test setup

F-OF 和 FBG 温度传感器的初始中心波长分别为 1530nm 和 1540nm。智能筋中部约 1.6m 的长度置于水槽中,且保持恒载(中部应变约  $278\mu\epsilon$ )。B-OF 采用另一段光纤进行绝对温度补偿;F-OF 采用 FBG 温度传感器进行绝对温度补偿。图4为不同温度下 B-OF 布里渊频移的分布情况,图中“FBG”表示 B-OF 中含光栅段的 BFS 分布,“OF”表示不含光栅段的 BFS

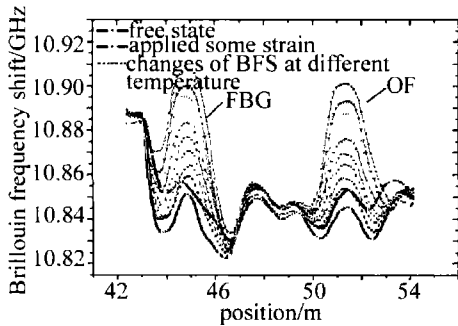


Fig. 4 BFS at different temperature

分布。图5为智能筋中间位置,即光纤光栅所处位置, B-OF 和 F-OF 测试应变经温度补偿后的应变曲线。从

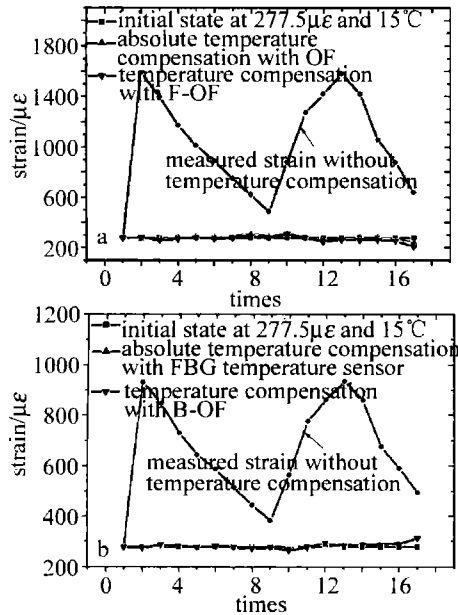


Fig. 5 Temperature compensation for strain measurement of FRP-FBG  
a—comparison of temperature compensation of B-OF b—comparison of temperature compensation of F-OF

图中可以看出,经过温度补偿后的应变曲线基本在初始应变曲线上上下波动,补偿效果明显。对比图 5a 和图 5b 可以看到,未经温度补偿的前提下, B-OF 和 F-OF 测试的应变相差很大,主要原因是对于 FBG 系统而言,温度变化 1℃ 约等于应变变化 16 $\mu\epsilon$  所引起的中心波长变化量;对于 BOTDA(R) 而言,温度变化 1℃ 引起的 BFS 的变化约等于应变变化 29 $\mu\epsilon$  所引起的 BFS 变化量,图中横坐标表示测试顺序。

图6为 B-OF 和 F-OF 经过温度补偿后的应变测试相对误差。从图6可以看出,除少数测试点外经温度互补偿的相对应变误差基本上与经过绝对温度补偿后的相对应变误差一致,补偿效果明显,相对误差基本在 8% 以内,有些测试点误差比较大原因可能是应变测试时,水槽内温度没有完全恒定,而布里渊测试系统的测试时间相对比较长所致。对比图 6a 和图 6b,可以看出 F-OF 应变测试经 B-OF 温度补偿效果要好于 B-OF 应变测试经 F-OF 温度补偿的效果,主要原因是 BOTDA(R) 测试

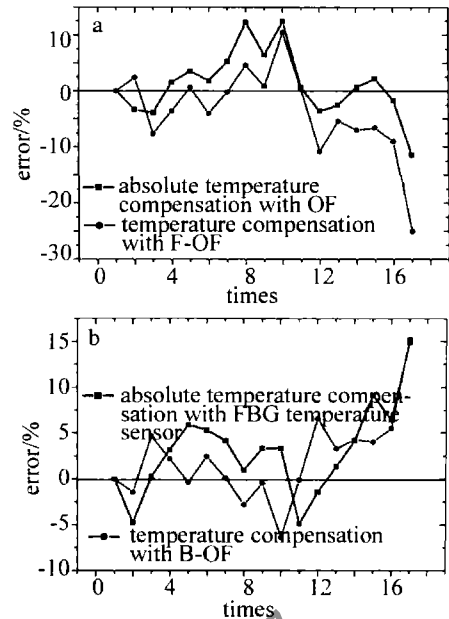


Fig. 6 Relative error of measured strain with temperature compensation  
a—relative error of B-OF b—relative error of F-OF

仪表的精度要低于 FBG 测试仪表的精度。

### 3.2 室外试验及其结果分析

图7为智能筋在户外环境下 BFS 的分布情况,户

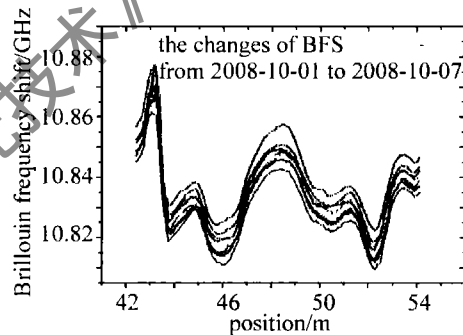


Fig. 7 Change of outdoor BFS

外环境温度早晚温差约为 20℃,智能筋处于自由状态。图8和图9分别为 B-OF 和 F-OF 的应变测试温度补偿对比示意图,以第1次应变测试状态为真值,对

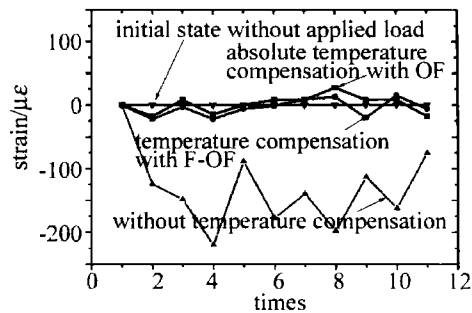


Fig. 8 Temperature compensation of B-OF

其归零。从图8可以看出, B-OF 的两种温度补偿方法均十分有效,补偿后的应变在初始位置上下略有波动,绝对温度补偿效果略好于经 F-OF 的温度补偿效果;图9中 F-OF 测试应变经 B-OF 的温度补偿效果明显好于其绝对温度补偿的效果,原因是绝对温度补偿

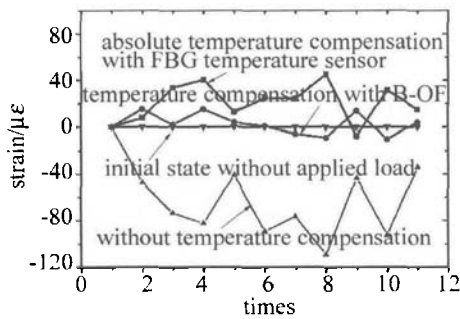


Fig. 9 Temperature compensation of F-OF

用的 T-FBG 远离智能筋中光栅所处的位置,两者之间所处的温度场不尽相同。

图 10 为 B-OF 某两次测试应变经 F-OF 温度补偿后与第 1 次已归零的应变测试数据对比示意图。从图

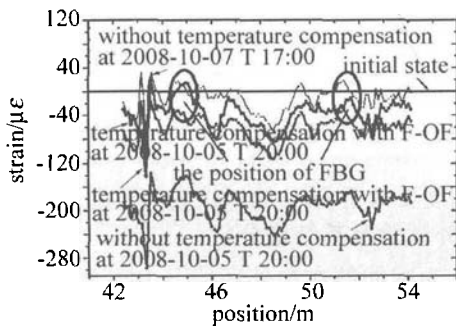


Fig. 10 Strain of B-OF

中可以看出:一方面 B-OF 经过 F-OF 温度补偿后,测试应变的精度大大提高;另一方面可以看到 B-OF 越靠近光栅位置的测试应变经温度补偿后的效果越好,而远离光栅位置的应变补偿效果比较差。其主要原因是整个 FRP-FBG 智能筋所处的温度场是有差异的,特别是在白天,智能筋两端直接被阳光照射,局部温度变化相对比较大。户外试验中,刻意将 FBG 温度传感器搁置在稍微远离 F-PF 的地方是为了模拟实际工程中可能由于绝对温度补偿用 FBG 不能布设在与 F-OF 同一温度场而导致的绝对温度补偿效果差。

## 4 结论

提出基于光纤光栅和布里渊传感共线技术应变测

试的温度互补偿方法,通过智能筋 FRP-FBG 的室内和户外应变感知温度补偿试验,研究探讨了该技术方法的有效性和适用性。试验结果表明,在 FRP-FBG 智能筋光栅位置处或邻近光栅位置,温度补偿效果比较好,补偿后的应变量和经绝对温度补偿应变基本吻合。该方法在一定程度上解决了 FBG-BOTDA (R) 共线技术中绝对温度补偿技术成本高、不易布设等问题,大大节约了基于共线技术监测系统的传感与传输线路极布设成本,适于实际工程应用。

## 参考文献

- [1] ZHOU Zh, OU J P. Various types of optical FBG sensors and their applications of SHM [C]//Proceeding of the 2nd International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructures. London: Taylor & Francis/ Balkema, 2005: 489-498.
- [2] DANIELE I, BRANKO G. Reliability and field testing of distributed strain and temperature sensors [J]. Proc SPIE, 2006, 6167: 1-8.
- [3] ZHAO X F, TIAN Sh Zh, OU J P, et al. Research on strain monitoring of reinforced concrete structure using fiber Bragg grating [J]. Laser Technology, 2003, 27(3): 233-235 (in Chinese).
- [4] YU Q R, BAO X Y, CHEN L. Simultaneous strain and temperature measurement in PM fibers using Brillouin frequency, power, and bandwidth [J]. Proc SPIE, 2004, 5391: 301-307.
- [5] YOSHIYUKI S, HARUYOSHI U, LI Zh X, et al. A system for measuring temperature and strain separately by BOTDR and OTDR [J]. Proc SPIE, 2002, 4920: 274-284.
- [6] KELLIE B, ANTHONY W B, BRUCE G C. Combined Raman and Brillouin scattering sensor for simultaneous high-resolution measurement of temperature and strain [J]. Proc SPIE, 2006, 6167: 1-10.
- [7] ZHOU Zh. R&D of series FBG-based products and their applications in infrastructures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006: 102-103 (in Chinese).
- [8] DAVIS M A, KERSEY A D. Separating the temperature and strain effects on fiber Bragg grating sensors using stimulated Brillouin scattering [J]. Proc SPIE, 1997, 2718: 270-278.
- [9] ZHOU Zh, HE J P, YAN K, et al. Fiber-reinforced polymer-packaged optical fiber sensors based on Brillouin optical time-domain analysis [J]. Opt Engng, 2008, 47(1): 014401-014410.
- [10] ZHANG X Zh. R&D of various FBG sensors for practical application in infrastructures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006: 41-51 (in Chinese).