

光纤光栅传感器在桥梁应变测量中交叉敏感问题的研究

摘要：本文从理论上介绍了布喇格光栅传感器传感原理及交叉敏感问题的物理机制，并针对桥梁结构这一复杂环境的内部应变，提出了一种解决交叉敏感问题的新颖方案。

关键词：桥梁；光纤光栅；交叉敏感；应力应变；温度

中图分类号：TP212.14 文献标识码：A 文章编号：1006-883X(2006)03-0009-003

耿伟霞 王天滑 王亚民 ◀◀

一、引言

桥梁是土木工程中重要的一类，其安全性和耐久性日益受到人们的关注。及时正确把握桥梁内部的应力应变，可实现对桥梁结构健康状况的长期实时监测，并为将来对其损伤状况的评估提供依据。光纤光栅传感器克服了传统电类器件的缺陷^[1]，以其监测精度高、重复性好和长期稳定性，为桥梁结构监测提供了良好的技术手段。从1993年加拿大多伦多大学的研究者率先在卡尔加里的贝丁顿特雷尔桥上布置光纤传感器进行桥梁监测至今^[2]，光纤光栅传感技术已广泛应用在桥梁等重大土木工程的监测中。国内目前也已开始在桥梁监测中应用光纤光栅传感技术，如海口世纪大桥、巴东长江大桥等。

但是光纤光栅传感器对温度和应变都是敏感的，即温度、应力均能引起布拉喇光栅中心波长的漂移，这就是交叉敏感。在进行应变测量时，很多情况下往往是忽略了温度的影响，但是在精确的测量中，需采用有效手段来解决这个问题。

二、光纤 Bragg 光栅传感原理^{[2][3]}

布喇格光栅是光纤纤芯折射率受到周期性调制的光栅。通常的光会全部穿过布喇格光栅而不受影响，只有满足布喇格条件的光在布喇格光栅处反射后会再返回到原来的方向。由耦合模理论(CMT)^[2]可知，光纤布喇格光栅(FBG)的 Bragg 波长为： $\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda$ (1)

式中， λ_B —布喇格波长； Λ —为光栅周期； n_{eff} —光纤模式的有效折射率。

由(1)式可以看出，Bragg 波长 λ_B 随 n_{eff} 和 Λ 的改变而改变。由于应变(应力)和温度的变化都将导致 n_{eff} 和 Λ 发生改变，所以 FBG 对于应变和温度都是敏感的。假设应变和温度分别引起 Bragg 波长的变化是相互独立的，则两者同时变化时，Bragg 波长的变化可以表示为：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_\varepsilon \varepsilon + K_T \Delta T \quad (2)$$

式中， K_ε —Bragg 波长的应变灵敏度系数； ε —轴向应变；

K_T —Bragg 波长的温度灵敏度系数； ΔT —温度的变化量。

由(2)式可知，当温度和应变同时发生变化时，FBG 本身无法分辨出两者分别引起的 Bragg 波长变化。

因此，测量其中一个量时，必然会受到另一个量的影响，同样也无法实现应变和温度的同时测量。由此可见，要精确测量应变，必须解决应变、温度交叉敏感问题。

三、应变及温度交叉敏感问题解决方案

消除或区分应变及温度交叉敏感的方案很多^{[4][5][6]}，目前主要有三类：双波长矩阵法、双参量矩阵法和温度补偿法。

本文基于双波长矩阵法，结合桥梁内部结构的实际应用情况，提出一种新的分布式双光栅网络区分测量桥梁内部温度和应变方案。该方案的基本思想是：通过两个光栅测量桥梁内某点的温度和应变，其中一个光栅通过封装只感受温度变化，而另一个光栅同时感受该点的温度和应变变化，建立方程，求出应变。

1、光栅网络布置

光栅网络具体布置如图 1 所示。在一根光纤上相隔足够长的距离制作若干对传感用的 FBG 预埋于桥梁梁体混凝土内部。由于一对传感 FBG 在一根光纤上相隔足够长的距离，所以，可以通过光纤的弯曲将它们并列放在一起而不会影响光信号的传输。这样做一方面可以避免在一根光纤上制作两个极难制作的非常靠近的 FBG；另一方面，可以保证两个传感 FBG 尽可能接近实际情况，每一对光栅对应布置于平面上比较靠近的位置，使之可以反映同一点的应变和温度值。

2、封装原理及方法

现以一对光栅（光栅 1 和光栅 2）为例来说明它们的封装和传感情况。其中光栅 1 是一裸光栅，在梁体混凝土内部同时感受温度和应变；光栅 2 通过封装屏蔽掉应变影响

只感受梁体内温度变化，具体做法如图 2。

在低于使用温度的环境下，用一根细铝管将光栅 2 套住，光纤光栅拉直置于管子的中心轴线，两端用环氧树脂与管壁牢牢粘接，而后铝管两端各套上一个端帽，并在铝管表面涂上一层润滑剂，使其不能与周围混凝土粘结，这样铝管可以自由的伸长或缩短，其轴向变形不受限制。

经过以上封装，当铝管周围混凝土温度改变时，铝管的温度也会随之改变导致管子伸长或缩短，因光栅两头用环氧树脂与管子的两头牢固粘结，则管子会将轴向应变传给其内光栅，使光栅因温度变化产生应变，从而测得温度；而当管子周围混凝土发生应力应变时，因铝管的屏蔽作用，应力应变并不能传给光栅 2。

综上所述，光栅 2 作为温度传感器在桥梁内部只感受温度改变，不能感受应力应变。并且铝的线膨胀系数较大，感知温度的改变很敏感，有效地提高了光栅的测量精度。

3、应变计算

这样通过 FBG1 和 FBG2，温度和应力应变就可以区分开来并实现同时测量。在应变和温度同时变化的情况下，两个不同 Bragg 波长的变化可以表示为：

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \\ \lambda_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\varepsilon 1} & K_{T1} \\ 0 & K_{T2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中， $\Delta\lambda_{B1}$ —传感器 FBG1 布喇格波长漂移量；

$\Delta\lambda_{B2}$ —传感器 FBG2 布喇格波长漂移量；

$K_{\varepsilon 1}$ 和 $K_{\varepsilon 2}$ —传感 FBG1 和 FBG2 的应变灵敏系数(采用该方案可认为 $K_{\varepsilon 2} = 0$)；

K_{T1} 和 K_{T2} —传感 FBG1 和 FBG2 的温度灵敏系数。

根据以上矩阵可以方便的求得被测温度变化量和应力应变分别为：

$$\Delta T = \frac{\Delta\lambda_{B2}}{K_{T2}\lambda_{B2}} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{K_{\varepsilon 1}} \left(\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} - \frac{K_{T1}}{K_{T2}} \cdot \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} \right) \quad (5)$$

这种方案只需要一个光耦合器、一套布喇格波长移动检测及数据处理系统，特别适用于将许多 FBG 传感器串联复用组成分布式检测网络系统。另外，传感器结构实现起来容易，成本较低，因而易于实用化。

四、实验分析

这里取矩形截面预应力混凝土简支梁为实验梁，梁截面尺寸及计算跨径如图 3。

实验梁预制时将上述光栅网络对称布置在梁内距底面 5cm 的水平面内(以下称测试高度)，沿梁纵向共布置了

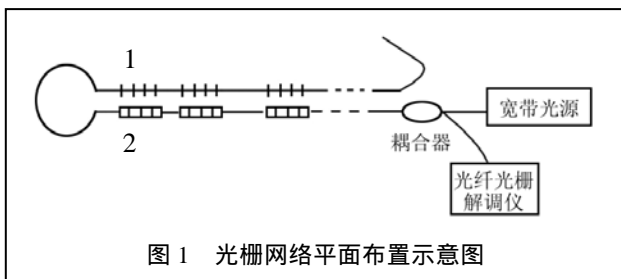


图 1 光栅网络平面布置示意图

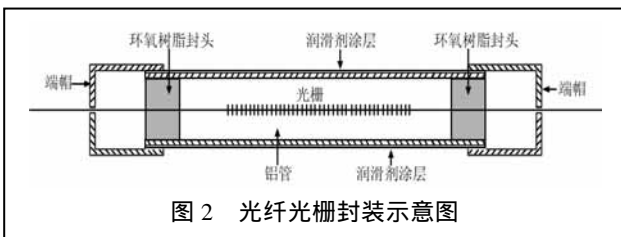


图 2 光纤光栅封装示意图

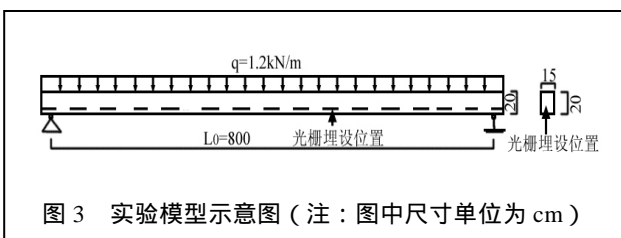


图 3 实验模型示意图(注：图中尺寸单位为 cm)

7 对光栅,各光栅在往试验梁里埋设时先对其初始 Bragg 波长进行了标定,在试验梁体混凝土达到设计强度后,使之形成简支体系,梁顶铺设一层铁块产生 1.2kN/m 的均布荷载来模拟使用荷载并测出此时各光栅的 Bragg 波长。利用桥梁结构分析软件“桥梁博士”计算出实验梁在测试高度处的理论应力应变值。实验数据见表 1。

各光栅应变分布曲线如图 4。从图中可以看出,当温度有改变时,普通光栅测出的应力应变值与实际值有较大的差别。增加一个温度传感光栅,将普通光栅测得的应变值进行温度修正,修正后的应变值与实际值符合得较好。

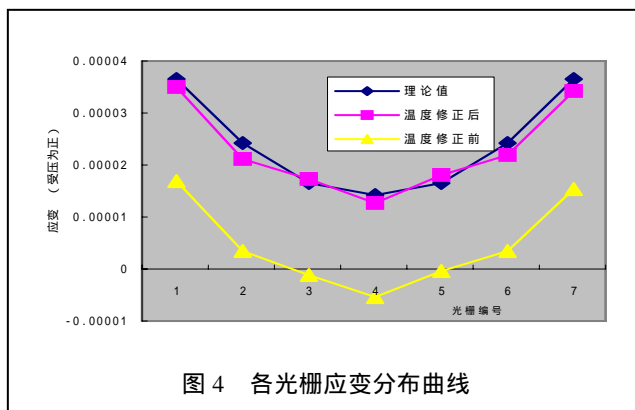


图 4 各光栅应变分布曲线

五、结束语

光纤光栅用于监测桥梁内部结构变形有着广阔的应用前景。它把原本没有生命的桥梁赋予感知与自诊断能力,对于桥梁施工和使用阶段的监测具有重大意义。合理的解决温度和应变的交叉敏感问题,剔除温度效应,是 FBG 传感器实用化的关键。随着 FBG 应用领域的进一步扩展,相信在未来几年中会研究开发出更多精度高、结构更简单、成本更低的实用的解决方案,进一步促进 FBG 传感器在桥梁结构监测技术中的应用。

参考文献:

[1] 梁磊,姜德生,周雪芳等. 光纤 Bragg 光栅传感技术在桥梁预应力监测中的应用研究[J], 北京工商大学学报(自然科学版),2003,21(2):50-52.

[2] Maaskant R,Alavie T,Measures M R,et al.Fibre-optic Bragg Grating Sensors for Bridge Monitoring[J].Cement and Concrete Composites,1997,19:21 - 33.

[3] 廖延彪.光纤光学[M].北京:清华大学出版社,2000.

[4] 王目光,李唐军,卓 锋等. 应变和温度同时测量光纤光栅传感器的研究[J]. 传感器技术.2001,20(9):10-15.

[5] 毕卫红,李 卫,傅广为. 分布式光纤光栅实现应变和温度的同时测量. 光电子·激光[J].2003,14(8):827-829.

[6] 李国利,李志全. 光纤光栅应变传感测量中的温度补偿问题[J]. 激光与光电子学进展.2005,42 (4) : 25-28.

Research Of Strain Monitoring And Temperature Influence In Bridge Structure Based On Fiber Grating Sensor

Abstract: The paper describes the physical mechanics of the fiber Bragg grating (FBG),and a new scheme for the cross-sensitivity problem in bridge monitoring is proposed.

Keywords: bridge; fiber Bragg grating; cross-sensitivity; strain ;temperature

作者简介:

耿伟霞,西安科技大学在读研究生,主要从事光纤光栅的研究工作。

联系电话: 029-88040321

E-mail: gengweixia@163.com

王天滑,西安市中交通设计一所助理工程师,主要从事桥梁结构的设计和研究工作。联系电话: 013488326675

王亚民,西安科技大学通信学院教授,研究方向为电子科技与技术。

本文编辑: 陈明 读者服务卡编号 002

表 1 实验数据及计算结果

光栅编号	位置	初始波长 (nm)	形成简支并施加 1.2kN/m 的均布荷载			理论 $\epsilon \times 10^{-5}$ (受压为正)
			测试波长(nm)	$T()$	实测 $\epsilon \times 10^{-5}$ (受压为正)	
1	1/8 计算	1526.752	1526.732	2.38	温度修正前	3.6439
	1' 跨径	1542.924	1543.012		温度修正后	
2	1/4 计算	1528.941	1528.937	2.27	温度修正前	2.40488
	2' 跨径	1545.269	1545.353		温度修正后	
3	3/8 计算	1531.115	1531.116	2.18	温度修正前	1.66341
	3' 跨径	1547.653	1547.734		温度修正后	
4	1/2 计算	1533.456	1533.463	2.41	温度修正前	1.41951
	4' 跨径	1549.893	1549.982		温度修正后	
5	5/8 计算	1535.988	1535.989	2.33	温度修正前	1.66341
	5' 跨径	1552.246	1552.332		温度修正后	
6	3/4 计算	1538.321	1538.317	2.15	温度修正前	2.40488
	6' 跨径	1554.691	1554.771		温度修正后	
7	7/8 计算	1540.767	1540.748	2.44	温度修正前	3.6439
	7' 跨径	1556.972	1557.063		温度修正后	

注: 编号为 n 的光栅为温度传感用的封装光栅。