

文章编号:1001-5132(2007)01-0005-04

光纤 Bragg 光栅传感器在桥梁监测中的应用

应祥岳, 徐铁锋

(宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 论述了采用布拉格光栅对应变进行传感的理论和方法, 得出了布拉格中心波长与应变之间的理论关系式, 并实际监测了宁波市招宝山大桥在车辆载荷下的应变. 监测结果表明: 光纤 Bragg 光栅可以方便地监测大桥的疲劳损伤, 为桥梁结构的健康诊断提供了相应的依据.

关键词: 布拉格光栅; 应变监测; 桥梁监测

中图分类号: TN247; TP212 文献标识码: A

大型的桥梁结构服役期一般长达数十年, 在疲劳、腐蚀与材料老化等不利因素共同作用下, 不可避免地产生损伤积累, 甚至引发突发事件^[1,2]. 因此, 需要对桥梁结构进行长期的健康监测, 实时地把握工程结构的安全状况, 确保桥梁结构的安全、适用与耐久性^[2,3]. 桥梁的健康监测就是利用现场的、无损伤的监测方式获得关键控制截面的应力、变形以及结构的动力特性参数等结构内部信息, 分析包括结构反应在内的各种特征, 以便确定其是否受到损伤, 以及损伤位置和程度等情况, 从而判断其可否继续使用及其剩余寿命^[4].

然而, 传统的传感器在抗电磁场干扰、抗腐蚀、抗潮湿等能力上难以适应桥梁结构恶劣的工作环境, 而近年发展起来的光纤光栅传感元件为桥梁结构智能监测系统的发展提供了基础^[5-7]. 作为传感器的光纤光栅最初应用于航空、航天等军事领域, 它能测量应变、应力、温度、振动、压力等数据的变化. 光纤光栅传感器具有抗电磁干扰、耐久性好、质量轻、体积小、可分布式测量、精度高等优

点^[8]. 1992年Rutger大学的Prohaska等人首次将光纤光栅埋入到土木结构中测量应变. 光纤布拉格光栅传感器在桥梁健康监测系统中的应用已成为近年的研究热点^[9,10].

本文对光纤布拉格光栅的应变和温度传感特性进行研究, 分析布拉格波长变化与应变和温度之间的对应关系, 并将光纤布拉格光栅传感器布设在宁波招宝山大桥上进行桥梁阶段性运营监测.

1 光纤光栅应变和温度传感特性

FBG 光纤在波导介质中的折射率是沿轴向呈周期性变分布, 用宽带光源从光纤 Bragg 光栅的一端入射, 满足布拉格条件波长的光功率在反射谱中形成峰值, 在透射谱中形成中心波长的峰谷. 光栅的中心(Bragg)波长满足(1)式:

$$\lambda = 2n\Lambda, \quad (1)$$

式中, λ 为光栅中心波长; n 为纤芯有效折射率; Λ 为纤芯折射率的调制周期. 其微分形式为:

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{dn}{n} + \frac{d\Lambda}{\Lambda} \quad (2)$$

在线弹性范围内,则为:

$$\frac{d\Lambda}{\Lambda} = d\varepsilon, \quad (3)$$

式中, $d\varepsilon$ 为应变.

假定温度恒定时应变与波长变化的关系式如下^[11]:

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = d\varepsilon - \frac{n^2}{2}[p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]d\varepsilon = K_\varepsilon d\varepsilon, \quad (4)$$

式中, $-(n^2/2)[p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]d\varepsilon = dn/n$, p_{11} 与 p_{12} 为光弹常数; ν 为泊松比; K_ε 为应变灵敏度系数. (4)式表明,应变与光栅中心波长的变化有很好的线性关系.当温度作用在FBG上时,热膨胀效应使光栅周期发生变化,同时,热光效应使得有效折射率发生变化^[11].

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = (\alpha + \frac{1}{n}\zeta)dT = K_T dT, \quad (5)$$

式中, α 为热膨胀系数; ζ 为热光常数; K_T 为温度灵敏度系数.

在温度和应变同时作用下,波长漂移与温度和应变的关系可近似表示为:

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = K_T dT + K_\varepsilon d\varepsilon. \quad (6)$$

从(6)式可以看出,Bragg光栅对温度和应变交叉敏感,即温度和应变同时引起Bragg波长漂移.为实现温度和应变的同时测量,从而实现温度补偿,在实际工程应用中,我们研制1种钢管封装光纤光栅温度传感器,布置在应变传感器附近,该方法适用于桥梁这种温度分布均匀的结构.

2 光纤光栅应变与温度传感器标定

Bragg波长识别系统采用美国 Micron Optics 公司生产的 SI720 解调仪.其波长分辨率为 1 pm,扫描范围为 1 520 ~ 1 570 nm,扫描频率为 0.5 Hz.

2.1 光纤布拉格光栅应变传感器的标定

光纤布拉格光栅应变传感器外形规格如图 1 所示.采用了 FRP 无胶封装技术,克服了传统用胶

粘结开发光纤光栅传感器不可跨越的耐久性问题.可根据要求任意改变标距长度,最小可达 1 ~ 2 cm.

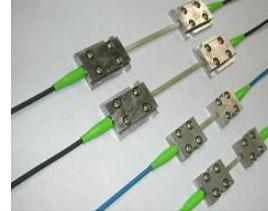


图 1 光纤布拉格光栅应变传感器

为确定FBG应变传感器的应变传感特性,采用等强度梁法,在室温 20 °C左右进行标定实验.由于实验时间很短,此时可不考虑温度的影响.实验结果如图 2 所示.

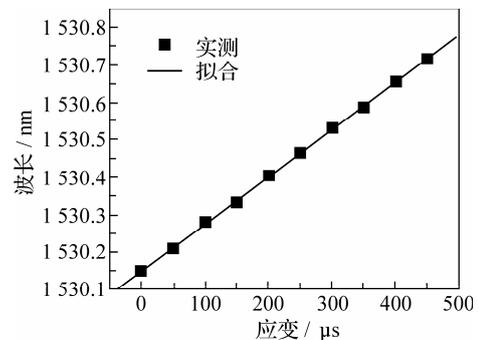


图 2 应变传感器波长与应变关系曲线

为消除温度变化对应变测量带来的影响,需进一步确定 FBG 应变传感器的温度响应特性.采用水浴法进行标定实验,实验结果如图 3 所示.

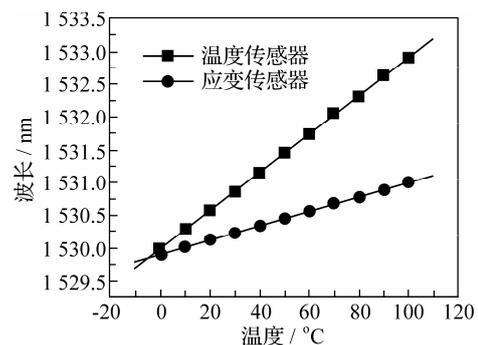


图 3 传感器波长与温度关系曲线

从图 2 和图 3 可以看出,FBG 应变传感器的中心波长与应变和温度存在很好的线性关系.应变与温度共同产生的波长变化可由(7)式表示:

$$\Delta\lambda = 0.00126 + 0.0117T, \quad (7)$$

式中,波长单位为 nm;应变单位为 $\mu\varepsilon$;温度单位为 $^{\circ}\text{C}$.因此,确定了环境温度后,就可以消除温度

变化对应变测量带来的影响。

2.2 光纤布拉格光栅温度传感器的标定

光纤布拉格光栅温度传感器外形规格如图 4 所示。采用外力屏蔽方法研制, 内嵌热良导体, 具有传热快、不受外力影响、耐久性好等优点。特别适于不宜采用电学量温度传感器的温度场。



图 4 光纤布拉格光栅温度传感器

为确定温度传感器的传感特性, 采用水浴法进行标定实验, 实验结果如图 3 所示。从实验结果可以看出, FBG 温度传感器的中心波长与温度存在很好的线性关系, 可由下式表示:

$$\Delta\lambda = 0.029 2T, \quad (8)$$

式中, 波长单位为 nm; 温度单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

3 大桥光纤光栅埋设与监测效果

招宝山大桥由主桥, 东、西引桥, 招宝山隧道 4 部分组成, 全长 2 482 m, 其中主桥为单塔双索面不对称预应力混凝土斜拉桥, 长 568 m, 设 6 车道, 主塔高 148.4 m, 两侧各设 25 对斜拉钢索。通航孔跨径 258 m, 净空高 32 m。其箱梁标准截面为双箱单室开口形。

为使监测结果具有代表性, 对主箱梁右箱室纵向应变和横向应变进行监测。传感器布设位置如图 5 所示。共布设 8 个传感器, 其中 2 个横向布设(图 5 中用横线表示), 6 个纵向布设(图 5 中用圆点

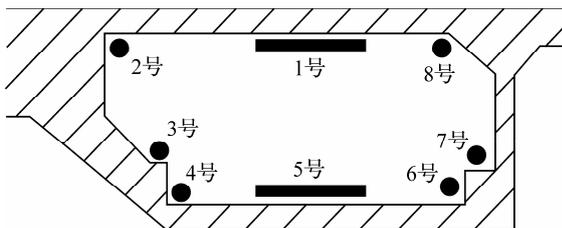


图 5 传感器布置图

表示)。为了消除温度对应变传感器中心波长变化的影响, 在每个应变传感器的相同位置都布设 1 个温度传感器。

图 6 为大桥在车辆载荷下 2 号传感器的应变数据。清楚显示了车辆的流量, 其峰值反映了车辆的载重。而这些监测数据可以进一步分析大桥结构的累积损伤, 判断其整体安全性。

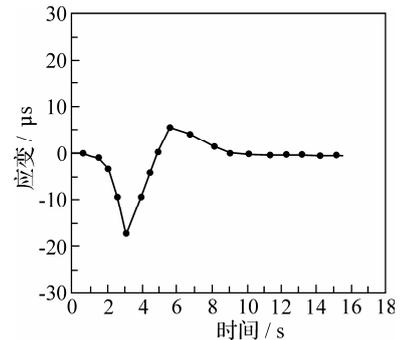


图 6 2 号应变传感器实测的应变曲线

对比各个传感器的记录数据可以得到: 箱形梁中离中心轴同一高度位置的传感器(2 号和 8 号, 3 号和 7 号, 4 号和 6 号)监测结果基本相等, 而上下沿中心轴对称分布的光栅监测结果基本上是大小相等, 符号相反。这是因为箱形梁可以视为简支梁, 箱形梁上下离中心轴同一高度位置的应变相等, 而符号相反。

图 7 则记录了某时段大桥主箱梁内部的温度变化历程数据。

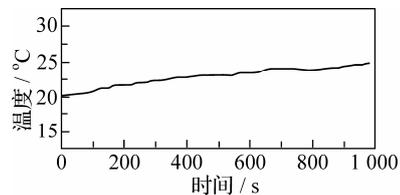


图 7 温度传感器实测的温度曲线

4 结论

结合光纤 Bragg 光栅应变和温度传感的原理分析, 笔者提出一种将光纤 Bragg 光栅传感器用于大桥结构的安全监测方法, 并经过了实测验证。随着实测数据的完善, 将有效地监测大桥结构的变

形,为桥梁结构的健康诊断提供有效依据.

参考文献:

- [1] 欧进萍. 重大工程结构的累积损伤与安全度评定[C]// 走向 21 世纪的中国力学—中国科协第 9 次“青年科学家论坛”报告文集. 北京: 清华大学出版社, 1996:179-189.
- [2] 欧进萍, 关新春. 土木工程中的智能结构体系研究与发展[J]. 地震工程与工程震动, 1999, 19(2):21-28.
- [3] Rao Y J. Recent progress in applications of fiber Bragg grating sensors[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1999, 31:297-324.
- [4] 李宏男, 李东升. 土木工程结构安全性评估、健康监测及诊断述评[J]. 地震工程与工程震动, 2002, 22(3):82-90.
- [5] Frhr P L, Spammer S. Fiber optic sensors in the Waterbun bridge[J]. SPIE, 1998, 3 489:124-128.
- [6] Nellen P M, Bronnimann R. Structurally embedded fiber Bragg gratings: civil engineering applications[J]. SPIE, 1996, 3 860:44-54.
- [7] Tennyson R C, Coroy T, Duck G, et al. Fiber optic sensors in civil engineering structures[J]. J Civ Eng, 2000, 27: 880-889.
- [8] 周智, 田石柱. 光纤布拉格光栅应变与温度传感特性及其实验分析[J]. 功能材料, 2002, 33(5):551-554.
- [9] 张巍, 吕志涛. 光纤传感技术用于桥梁监测[J]. 公路交通科技, 2003(6):54-58.
- [10] 章关永. 光纤传感器技术在桥梁状态监测中的应用[J]. 世界桥梁, 2002(2):49-53.
- [11] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.

Application of FBGs in Bridge Monitoring System

YING Xiang-yue, XU Tie-feng

(The Faculty of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The theory and methods of strain sensing for bridge using FBGS is proposed, and the theoretical relationship between the wavelength of FBGS and strain is also obtained. The theory has been applied to monitoring the process of strain variation of Zhaobaoshan Bridge under traffic load. The results indicate that FBGs can handily measure in bridge's fatigue damage monitoring with satisfying accuracy. This finding is believed to facilitate bridge's structural health diagnosis.

Key words: Bragg grating; strain monitoring; bridge monitoring

CLC number: TN247 ; TP212 **Document code:** A

(责任编辑 章践立)