

基于长标距光纤布拉格光栅阵列动态响应的参数识别

王大鹏^{1,2}, 庞香润¹, 田石柱^{1,2}

¹苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215011;

²江苏省结构工程重点实验室, 江苏 苏州 215011

摘要 研究了长标距光纤布拉格光栅(FBG)传感技术,利用链式阵列方法采集梁的动态响应,实现了车速、频率和振型等动态参数的识别。对单个FBG施加预应力并将其封装成传感器,以扩展其标距测量范围。将跨度为4 m的T型钢筋混凝土梁等分为8个单元,在每个单元安装标距为500 mm且与中性轴平行的传感器,实现了对梁的整体监测。采用配重小车进行移动加载实验,基于时差定位法的原理分析中心波长时程曲线,以确定小车位置及所处时刻,从而实现了车速的识别。采用激振器激励,以使梁产生自由振动。利用长标距FBG传感器以及梁顶部布置的压电式加速度计采集梁的动态响应信号,通过频域分析得到频率和振型。结果表明:采用链式阵列方法可以实现频率和振型识别,振型识别阶数与单个传感器的标距长度有关。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 长标距; 阵列; 挠度; 曲率

中图分类号 TP212.9 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.070602

Parametric Identification of Dynamic Response Based on Long-Gauge Fiber Bragg Grating Arrays

Wang Dapeng^{1,2}, Pang Xiangrun¹, Tian Shizhu^{1,2}

¹College of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215011, China;

²Key Laboratory of Jiangsu Province on Structural Engineering, Suzhou, Jiangsu 215011, China

Abstract A long-gauge fiber Bragg grating (FBG) sensing technology is studied, and a chain array method is used to acquire dynamic response of beam. The identification of dynamic parameters of vehicle speed, frequency and vibration mode are realized. A single FBG is applied to pre-stressing, and then encapsulated to form a sensor. The measuring range of gauge is enlarged. A T-shaped reinforced concrete beam with the span of 4 m is equally divided into 8 cells. Sensors with length of 500 mm parallel to the natural axis, and they are independently installed in each cell, which can realize the overall monitoring of beam. The moving load testing is carried out when we use wheeled machine with additional weight. The location and passing time of the wheeled machine are determined when we analyze the time history curve of central wavelength based on the principle of time difference location method, and then the velocity identification is realized. The free vibration of the beam is excited by a vibration exciter. The dynamic response signal is acquired by long-gauge FBG sensors and piezoelectric accelerometers installed on the top of beam. Frequency and vibration mode are obtained by frequency-domain analyzing. The results show that the identification of frequency and vibration mode is achieved by chain array method, and the order of vibration mode identification depends on the gauge length of single sensor.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; long-gauge; array; deflection; curvature

OCIS codes 060.3735; 060.4258; 060.2370

收稿日期: 2017-01-22; **收到修改稿日期:** 2017-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(51308369)、建设部科研开发项目(2012-K8-18)、江苏省高校优秀中青年骨干教师境外研修计划

作者简介: 王大鹏(1979—),男,博士,副教授,主要从事桥梁结构健康监测方面的研究。

E-mail: wangdapeng@usts.edu.cn

1 引言

光纤布拉格光栅 (FBG) 传感器已经成为结构健康监测首选的智能传感手段。虽然 FBG 传感技术已被广泛应用于众多结构的健康监测中,但是也出现了很多突出的问题,比如点式或者小标距 FBG 光栅传感器测量的长度受限、无法大量分布、分布位置依靠预测且对未覆盖区域无法感应等,从而可能导致整体监测结果失真。为了解决上述问题,近年来出现了长标距 FBG 应变传感技术,通过增大 FBG 感应范围,并用测量标距范围内的平均应变来反映结构特征信息。Glišić等^[1]通过对放在不同结构中的光栅以及同一结构中不同数量、不同测量长度的光栅进行对比分析,发现对于分布式长标距光栅传感器,通过选择合适的测量长度,可以获取结构局部范围内的应变信息,并且可以进行动态测量,从而得到平均应变时程曲线和结构整体监测所需的结构模态信息^[2];同时分析了传感器标距引起的测量误差,为传感器标距的选择提出了指导性建议^[3]。Sigurdardottir等^[4]应用动态长标距 FBG 传感技术对美国韦恩和新泽西州之间的 US202/NJ23 高速公路桥进行了健康状况评估,应用离散式长标距 FBG 传感技术和分布式布里渊光时域传感技术,对美国普林斯顿大学校园内施工阶段和早期使用阶段的人行桥的桥梁性能进行了监测;此外,他和合作者还应用分布式长标距 FBG 传感技术对遭受地震的地下管线进行了健康状况评估^[5]。Li等^[6]利用分布式长标距 FBG 传感阵列进行了钢筋混凝土梁的裂缝监测和钢梁损伤识别研究,发展了分布式长标距光纤传感技术,探索了从分布式应变中提取结构模态参数的方法,发展了基于宏应变模态的损伤识别方法^[7]。洪万等^[8-9]研究了结构健康监测系统,开发了相应的软件,并对分布式长标距光纤传感技术在高耸建筑结构健康监测的应用进行了研究。Xu^[10]提出一种基于光纤的分布式应变测量技术,通过神经网络数值模拟验证了该技术的可靠性。

长标距 FBG 传感技术使用数量较少的传感器组成阵列,可对结构整体进行监测。链式阵列方法^[2]则适合于以受弯为主的结构或构件的监测,尤其对于桥梁等长距离结构,该方法可以实现对挠度、裂缝和动力特性等诸多参数的监测,从而满足结构长期健康监测的要求。本文在前期相关研究成果^[11-14]的基础上,开展了静力作用下的结构挠度、弯曲裂缝和斜裂缝等参数的监测研究;将开发的长标距 FBG 传感技术和链式阵列方法应用于动态参数的监测,证明了所提方法的有效性。

2 基本原理

2.1 长标距 FBG 传感技术

如图 1 所示,长标距 FBG 传感器中的光纤部分仅在两端固定于待测结构上,两处固定点之间(预设标距)的传感器部分由于施加了预应力而处于悬空拉直状态,以传感器标距部分覆盖待测区域,因此所测得的应变为预设标距范围内的平均应变。

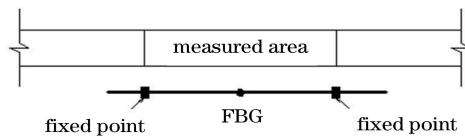


图 1 长标距 FBG 传感器示意图

Fig. 1 Schematic of long-gauge FBG sensor

2.2 长标距 FBG 传感器的链式阵列

如图 2 所示,将跨度为 4 m 的 T 型钢筋混凝土梁等分为 8 个单元,梁内每个单元的钢筋上分别安装标距为 500 mm 的 FBG 传感器,以构成链式阵列,记为 C_N (N 为单元号)。同时在梁顶部每个单元中心布置一个压电式加速度计。

2.3 时程信号分析方法

车速识别应用时差分析法,由于每个单元的中心波长在小车经过时达到最大值,通过分析传感器之间的距离以及各个中心波长达到最大值的时间差可以得到车速。采用对时程信号进行傅里叶变换等多种方法得到频率。通过自功率谱和互功率谱的函数相关性得到振型的具体步骤为:1) 以单元 1 传感器所测时程信号作为基准信号来进行自功率谱密度计算,得到各阶频率峰值;2) 将其他传感器所测时程信号均与单元 1 信号进行互功率谱密度计算,得到各阶频率的相干系数;3) 对相干系数进行归一化,得到振型关系曲线。

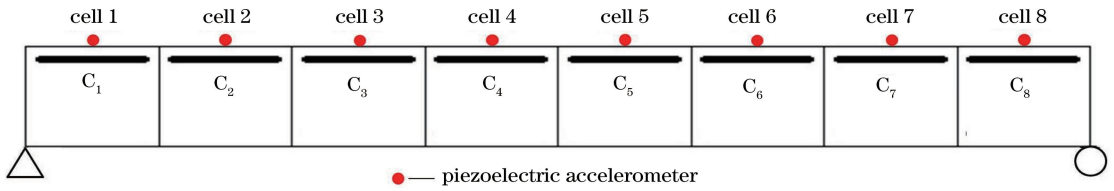


图 2 长标距 FBG 传感器链式阵列示意图

Fig. 2 Schematic of chain array of long-gauge FBG sensor

3 实验结果

3.1 车速识别结果

梁截面配筋情况及长标距传感器位置示意图如图 3 所示, 布设时先用速干胶粘住传感器的一端, 对传感器施加预应力后, 再粘贴传感器的另一端。移动荷载小车的质量为 230 kg, 沿梁长度方向两侧布置钢轨, 以保证小车直线安全行驶。

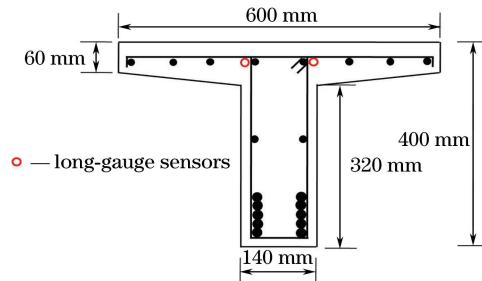


图 3 传感器位置示意图

Fig. 3 Location schematic of sensor

单元 3、5 的采集中心波长时程曲线如图 4 所示。采用高斯拟合后, 得到两条曲线的最大值所处时刻分别为 4.19 s 和 3.71 s, 时间差为 0.48 s, 两个单元的中心距离为 1 m, 因此这段距离的平均车速为 2.08 m/s。

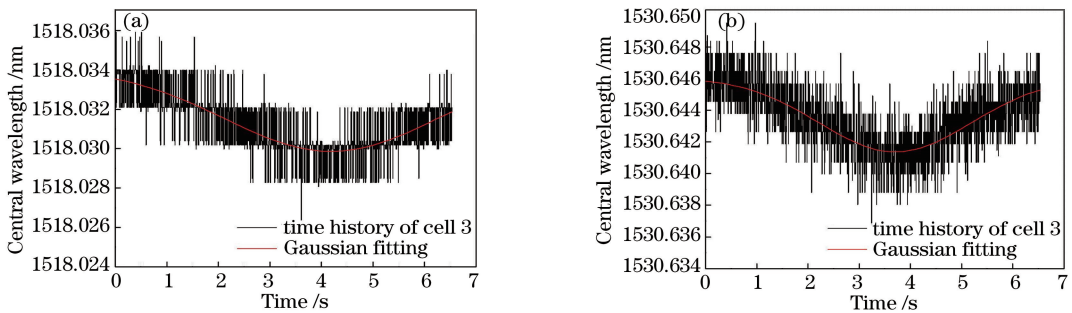


图 4 中心波长时程曲线。(a)单元 3;(b)单元 5

Fig. 4 Time history curves of central wavelength. (a) Cell 3; (b) cell 5

3.2 频率和振型识别结果

梁中间部位采用激振器激励, 以使梁产生竖向振动。利用长标距 FBG 传感器和压电式加速度计分别采集梁的动态响应信号。分析两种传感器信号数据, 得到梁的前 3 阶频率如表 1 所示, 通过频谱分析得到的前 3 阶振型如图 5 所示。

表 1 频率识别结果

Table 1 Results of frequency identification

| Sensor | 1 st order /Hz | 2 nd order /Hz | 3 rd order /Hz |
|---------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Long-gauge | 6.53 | 9.94 | 19.92 |
| Accelerometer | 6.64 | 10.16 | 20.31 |

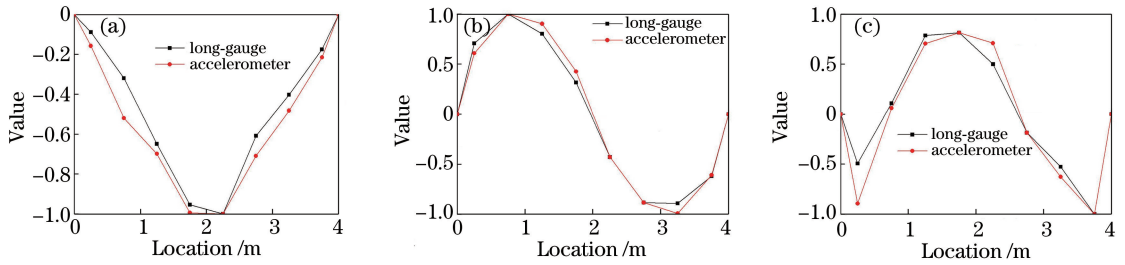


图 5 振型识别结果。(a)第 1 阶;(b)第 2 阶;(c)第 3 阶

Fig. 5 Results of vibration mode identification. (a) 1st order; (b) 2nd order; (c) 3rd order

4 分析与讨论

从表 1 可以看出,长标距 FBG 传感器和加速度传感器对前 3 阶频率识别结果相差不大。结果说明长标距 FBG 传感器的链式阵列方法可以用来进行动态测试及参数识别。由于梁的截面较大、刚度相对较大,同时受激振器的功率和激振频率范围的限制,梁自身振动的幅度不大,因此利用所采集的数据无法完成更高阶频率识别。事实上,实验过程中将梁沿长度方向等分为 8 个单元,传感器数量的限制也导致无法确定高阶振型曲线中转折点的位置,故识别高阶振型的难度很大。

5 结 论

长标距 FBG 传感器可以用于动态信号采集,采用链式阵列分布可以完成对车速、频率和振型等动态参数的识别。将长标距 FBG 传感器的频率和振型识别结果与加速度传感器进行对比,发现识别效果大致相同。根据高阶振型识别要求,选择和确定相对较小的标距长度,以保证有足够数量传感器来识别振型曲线中转折点的位置。实验中采用的是统一标距长度,然而在实际工程中可能需要根据结构特点选择不同标距长度并将其进行组合,因此有待进一步研究标距长度对动态信号分析的影响程度。

参 考 文 献

- [1] Glišić B, Inaudi D. Fibre optic methods for structural health monitoring[M]. Chichester: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [2] Glišić B. Fibre optic sensors and behaviour in concrete at early age[D]. Lausanne: Swiss Federal Institute of Technology, 2000.
- [3] Glisic B. Influence of the gauge length on the accuracy of long-gauge sensors employed in monitoring of prismatic beams [J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(3): 035206.
- [4] Sigurdardottir D H, Hwang T, Glisic B. In-service assessment of the US202/NJ23 bridge health condition using dynamic long-gauge fiber-optic sensors[C]. 5th European Conference on Structural Control, 2012: # 088.
- [5] Glisic B, Yao Y. Fiber optic method for health assessment of pipelines subjected to earthquake-induced ground movement[J]. Structural Health Monitoring, 2012, 11(6): 696-711.
- [6] Li S Z, Wu Z S. Development of distributed long-gauge fiber optic sensing system for structural health monitoring[J]. Structural Health Monitoring, 2007, 6(2): 133-143.
- [7] Li S Z, Wu Z S. A non-baseline algorithm for damage locating in flexural structures using dynamic distributed macro-strain responses[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2007, 36(9): 1109-1125.
- [8] Hong Wan. Study on the structural health monitoring system based on distributed long-gage FBG sensing technologies and software development[D]. Nanjing: Southeast University, 2014.
洪 万. 基于分布式长标距 FBG 传感技术的结构健康监测研究及软件开发[D]. 南京: 东南大学, 2014.
- [9] Huang Lei. High-rise structure health monitoring study based on distributed long-gage FBG sensing technology[D]. Nanjing: Southeast University, 2012.
黄 磊. 基于分布式长标距 FBG 传感的高耸结构健康监测研究[D]. 南京: 东南大学, 2012.

- [10] Xu B. Element level parametric identification using axial macro-strain time series[C]. WSEAS Transactions on Information Science and Applications, 2006, 3(7): 1260-1265.
- [11] Tian Shizhu, Cao Changcheng, Wang Dapeng. Experimental study on fiber grating sensor monitoring the crack of concrete[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0114001.
田石柱, 曹长城, 王大鹏. 光纤光栅传感器监测混凝土简支梁裂缝的实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0114001.
- [12] Tian Shizhu, Zhang Guoqing, Wang Dapeng. Study on strain transfer mechanism of surface fiber Bragg grating sensor [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0805005.
田石柱, 张国庆, 王大鹏. 表面式光纤布拉格光栅传感器应变传递机理的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0805005.
- [13] Tian Shizhu, Wen Ke, Wang Dapeng. Study on damage location of steel beam based on long-gage fiber grating sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(4): 040603.
田石柱, 温 科, 王大鹏. 基于长标距光纤光栅传感器的钢梁损伤定位研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(4): 040603.
- [14] Tian Shizhu, Wen Ke, Wang Dapeng. Study on damage detection based on long-gage fiber Bragg grating sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 010604.
田石柱, 温 科, 王大鹏. 基于长标距 FBG 传感器宏应变技术的损伤识别研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 010604.