

Application Research on Health Monitoring of Long Bridge Based on Distributed Optical Fiber Sensing

Zhangcheng Yang¹, Yafei Feng¹, Weibing Sang¹, Shaoling He¹, Jianchao Zhu²

¹Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou Zhejiang

²Ningbo Communication Construction Engineering Testing Center Co. Ltd., Ningbo Zhejiang

Email: 435386106@qq.com

Received: Apr. 25th, 2020; accepted: May 18th, 2020; published: May 25th, 2020

Abstract

In this paper, the technique of Brillouin optical time domain analysis has been applied to the bridge. By laying optical sensing fiber cables, the total strain distribution along the bridge has been obtained. We also compare the experimental result with traditional sensors by load test and long-term strain monitoring. The result shows that this technique is able to overcome the problem of distributed monitoring of traditional point-based sensors, and predicts the trend of strain evolution, which makes it a highly competitive candidate for future structural healthy monitoring.

Keywords

Brillouin, Distributed, Optical Fiber Sensing, Load Test, Steel Box Beam

基于分布式光纤传感的长大桥健康监测应用研究

杨樟成¹, 冯亚非¹, 桑卫兵¹, 何少灵¹, 朱建朝²

¹杭州应用声学研究所, 浙江 杭州

²宁波市交通建设工程试验检测中心有限公司, 浙江 宁波

Email: 435386106@qq.com

收稿日期: 2020年4月25日; 录用日期: 2020年5月18日; 发布日期: 2020年5月25日

摘要

本文提出采用布里渊光时域分析技术,在某长大桥的行车方向布设传感光缆,通过荷载对比、长期应变监测等试验,实现桥梁纵向整体的线性应变测量。结果证明该技术既突破了传统点式传感器的空间连续监测瓶颈,实现分布式连续应变测量,又能用于桥梁车流荷载信息的监控及趋势预测等,对桥梁等重大结构的健康监测具有重要意义。

关键词

布里渊, 分布式, 光纤传感, 荷载试验, 钢箱梁

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 原理介绍

桥梁是交通设施的重要组成部分,桥梁在使用过程中由于交通负载、地震和风载等各类荷载作用,可能出现一定的疲劳和损伤。由于能够实时提供桥梁安全状态的关键数据,因此桥梁结构健康监测系统显得尤其重要。此外,桥梁结构健康监测系统是交通设施数字化方向的重要组成部分,智慧高速建设促进了桥梁结构健康监测系统的研究和发展。传统桥梁结构健康监测系统所用的应变传感器为振弦应变计等点式传感器,而对于空间跨度大的特大桥,点式传感器无法实现全覆盖监测,存在一定的空间局限性,另外传感器成本高,施工和维护难度大。

近 20 年来分布式光纤传感技术发展迅速,已经被广泛的应用于多个行业,尤其是结构监测领域。布里渊光时域分析技术[1] (Brillouin Optical Time Domain Analysis, 简称 BOTDA)是一种新型光纤传感方法,可用于结构物的应变、温度[2] [3] [4]监测,分布式光纤传感技术不仅可对目标进行空间上的全范围连续监测,还具有抗电磁、抗腐蚀、防水、耐久性、高精度、空间分辨率高、定位精度高、远距离传输等优点。BOTDA 原理如图 1 所示。

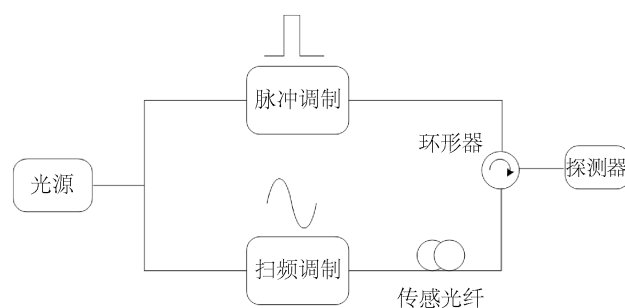


Figure 1. Principle of BOTDA

图 1. BOTDA 原理

从单频窄线宽光源分出两束光,一路调制为脉冲信号光,一路调制为扫频信号光,分别从传感光纤两端射入,然后反射光从环形器输出到探测器,当两路光的频率差落在布里渊光谱内(10 GHz 附近),光

纤中产生受激布里渊效应，能量从泵浦光向探测光发生转移，使探测光的受到增益。因为泵浦光是脉冲调制的，故类似时域反射原理，背向散射的探测光的时域分布反映出光纤各位置点所受布里渊增益的情况；固定泵浦光频率，对探测光频在布里渊光谱进行扫描，即得到光纤各点的布里渊增益谱；增益谱峰处的频移(布里渊频移)与光纤所受应变成正比关系，所以测得光纤各点的布里渊频移值，可由以下公式得到光纤各点所受应变：

$$\Delta\nu_B = C_{11} \times \Delta\varepsilon + C_{12} \Delta T$$

其中 $\Delta\nu_B$ 是布里渊频移变化量， $\Delta\varepsilon$ 是应变变化量， ΔT 是温度变化量， C_{11} 及 C_{12} 分别是布里渊频移应变系数和频移温度系数，因此通过检测布里渊信号的频移值可获得沿光纤分布的温度及应变信息，实现分布式传感。

2. 试验概况

目前，分布式光纤传感技术在中小型桥梁的应用较为成熟[5] [6]，但应用范围有限，推广意义小。本文将分布式光纤传感技术应用于大型桥梁的健康监测中，具有较强的实践意义和推广价值。

所应用的长大桥是某大型千米级斜拉桥，该桥主孔跨度超千米。大桥日均超过 10 万通行量，在大桥结构的承载能力检测中，采用最新的分布式光纤传感技术进行连续分布式监测，在主桥和边跨钢箱梁梁底铺设分布式传感光缆，具体布设如下图 2 所示。

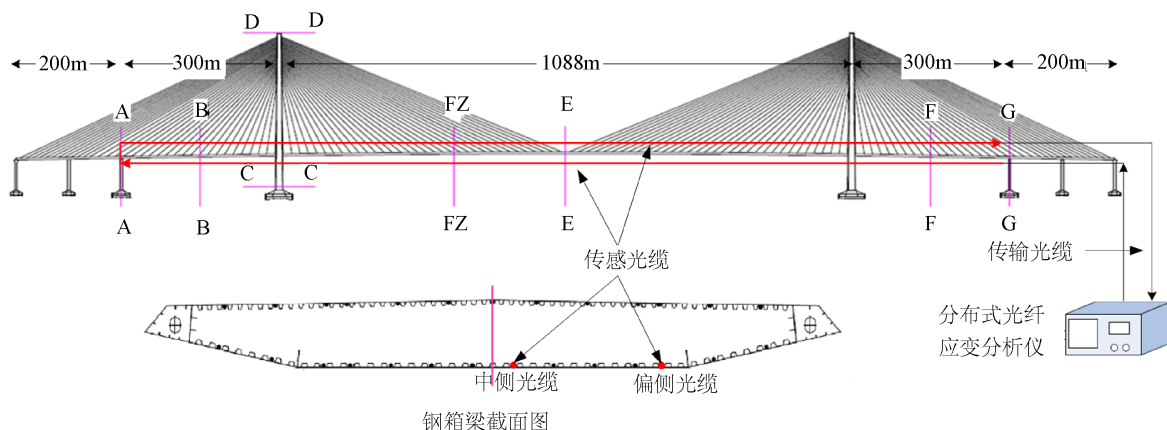


Figure 2. Schematic diagram of distributed optical sensing cable

图 2. 分布式传感光缆布设示意图

图 2 为某大桥的分布式传感光缆布设示意图，图中黑线代表传输光缆，红线代表应变光缆，应变光缆沿钢箱梁梁底部从 G 截面一直铺设到 A 截面，然后折回铺设到 G 截面，再用传输光缆引致大桥桥头，接入分布式光纤应变分析仪中，全长接近 4 km。

3. 测量结果

采用自研的 FS-3000 型分布式光纤应变分析仪，该设备具有操作简便、界面友好、性能稳定等优点，测量距离最远可达 100 km，空间分辨率最小为 0.2 m。通过荷载对比试验验证分布式光纤传感测量的准确性，通过长期监测研究车流量和桥梁应变分布。荷载试验重载车进行加装，测试现场如图 3 所示。

3.1. 静载对比

静载荷之前，桥面清空，测量桥梁初始应变，主要测量工况有：B-B 截面静载、E-E 截面静载、F-F

截面静载、E-E 截面偏载。



Figure 3. Demonstration of load test
图 3. 加载试验图

(1) B-B 截面静载

其中 B-B 截面静载工况分为 B-B 弯矩和 B-B 挠度，B-B 弯矩为 26 辆荷载车荷载于 B 截面位置，B-B 挠度为 40 辆荷载车加载于 B 截面位置，得到两根光缆的应变分布如图 4 所示。

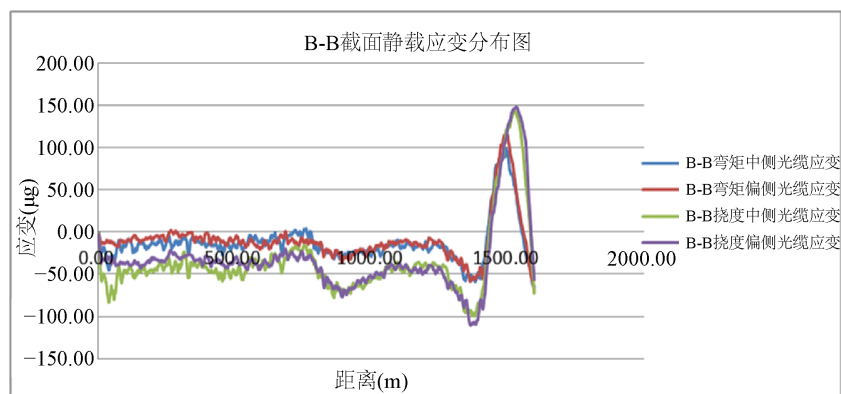


Figure 4. B-B section static load strain distribution
图 4. B-B 截面静载应变分布图

(2) E-E 截面静载应变分布

其中 E-E 截面静载工况分为 E-E 弯矩和 E-E 挠度，E-E 弯矩为 26 辆荷载车荷载于 E 截面位置，其余车辆原地不动，E-E 挠度为 52 辆荷载车加载于 E 截面位置，得到两根光缆的应变分布如下图 5 所示。

(3) F-F 截面应变分布

F-F 截面静载试验工况为 26 辆车前进至 F-F 截面，两根光缆的应变分布如图 6 所示。

(4) E-E 截面偏载

E-E 截面偏载试验工况为 39 辆车偏载于 E-E 截面一侧路面。

从图 7 中可得，偏侧光缆应变最大值大于中侧光缆应变值。

分别选取分布式光纤关键截面应变值测量值与应变片测量值对比，如表 1 所示。

静载试验表明分布式光纤测量的应变值与应变计测量值对比，最大误差在 $5 \mu\epsilon$ 以内，测量准确度高，可以满足实际测量应用。另外，分布式光纤应变监测系统可以有效测量桥梁的整体应变分布，与荷载位置准确对应。

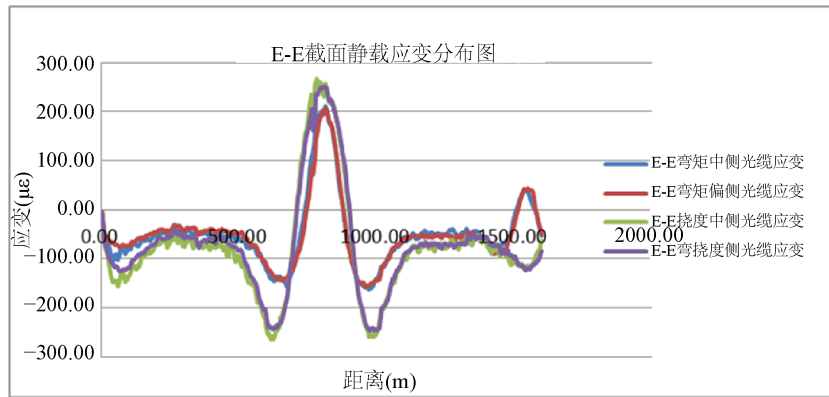


Figure 5. Static load strain distribution of E-E section

图 5. E-E 截面静载应变分布图

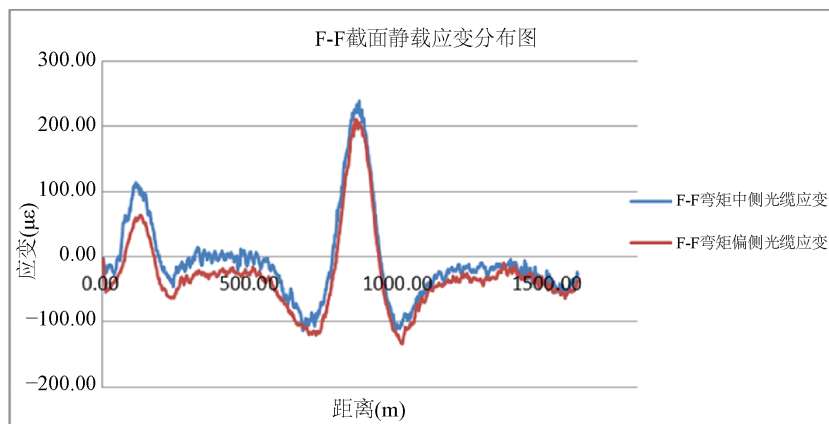


Figure 6. Static load strain distribution of F-F section

图 6. F-F 截面静载应变分布图

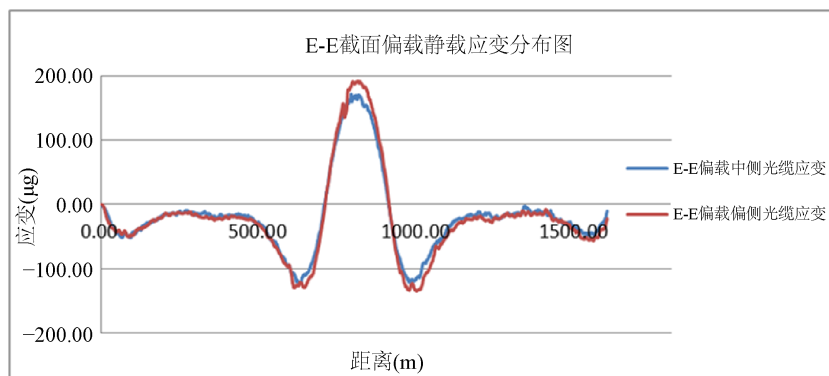


Figure 7. Partial load strain distribution of E-E section

图 7. E-E 截面偏载静载应变分布图

3.2. 荷载应力线

荷载应力线加载如图 8 所示，荷载点从左侧边跨中间位置逐渐移动到右侧边跨中间位置，每到一个荷载位置，进行一次全桥光纤的应变数据采集。

将不同荷载点所测量得到的应变数据进行汇总，如下图 9 所示。

Table 1. Strain comparison of distributed fibers with gauges
表 1. 分布式光纤与应变片测值对比

分布式光纤与应变计应变测值对比												
截面位置	F 截面中侧		E 截面中侧		B 截面中侧		F 截面偏侧		E 截面偏侧		B 截面偏侧	
	光纤 ($\mu\epsilon$)	应变片 ($\mu\epsilon$)	光纤 ($\mu\epsilon$)	应变片 ($\mu\epsilon$)	光纤 ($\mu\epsilon$)	应变片 ($\mu\epsilon$)	光纤 ($\mu\epsilon$)	应变片 ($\mu\epsilon$)	光纤 ($\mu\epsilon$)	应变片 ($\mu\epsilon$)	光纤 ($\mu\epsilon$)	应变片 ($\mu\epsilon$)
工况 2	-15.05	/	-20.29	/	87.56	92.3	-7.11	/	-14.02	/	101.49	98.7
工况 3	-44.73	/	-44.11	/	77.35	78.8	-38.9	/	-45.82	/	85.44	82.6
工况 4-1	-71.34	/	196.3	192.2	-62.96	/	-69.11	/	216.32	216.6	-67.24	/
工况 4-2	-100.3	/	210.47	214.4	-80.13	/	-91.65	/	233.03	232	-83.8	/
工况 5	71.8	73.9	53.68	/	-26.28	/	87.13	87.8	87.58	/	-50.52	/
工况 6	-37.86	/	165.48	162.5	-31.12	/	-37.13	/	189.96	186.6	-32.58	/
最大误差	2.1		4.1		4.74		0.67		3.36		2.84	

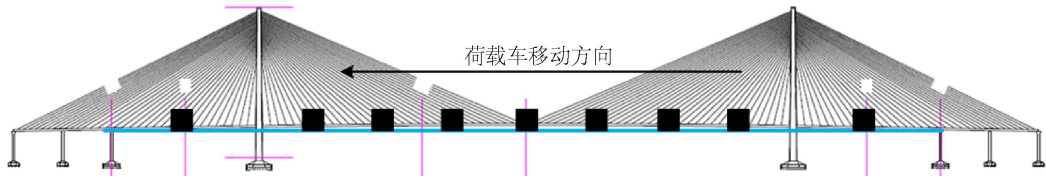


Figure 8. Scheme of load positions
图 8. 某大桥应力线荷载点加载位置图

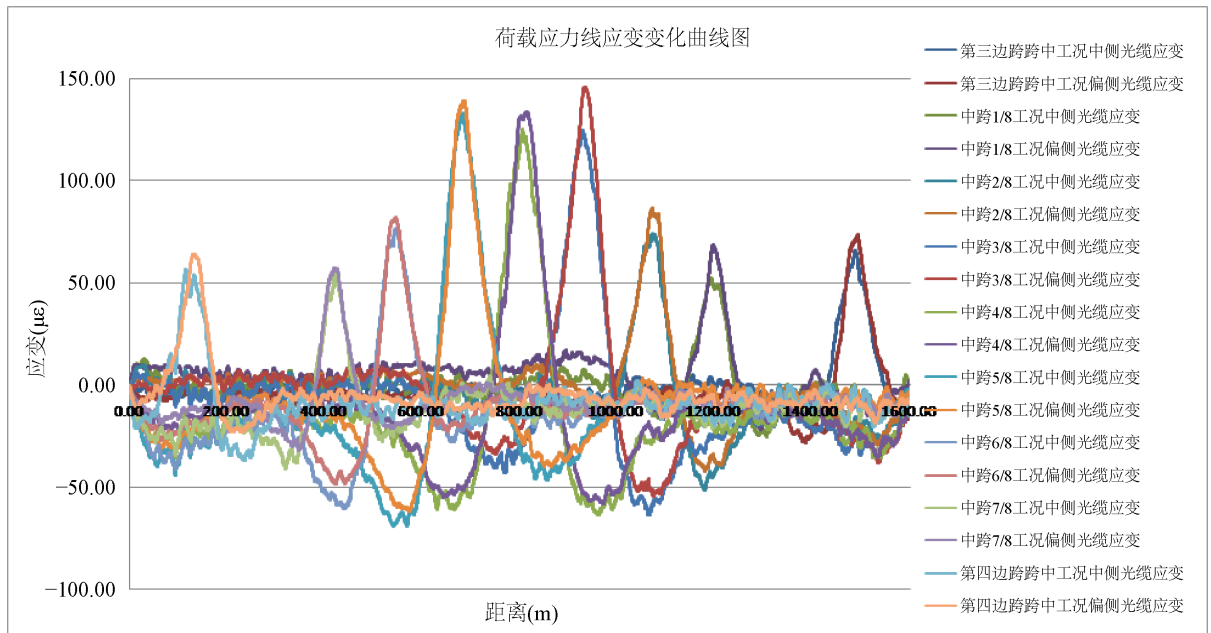


Figure 9. Stress versus different loads
图 9. 荷载应力曲线变化图

通过应力线测试可得:

- (1) 分布式光纤可以给出荷载移动时主梁应力线的分布, 实现全桥的连续应变测量。

(2) 分布式光纤能够定位受力位置，为桥梁结构受力分析和定位受力异常位置提供依据。

3.3. 长期监测

采用分布式光纤对桥梁进行为期 15 天连续监测，测量时间间隔为 30 分钟，总共 720 次测量。中侧光缆和偏侧应变光缆的应变长期变化曲线叠加的效果如图 10 所示。

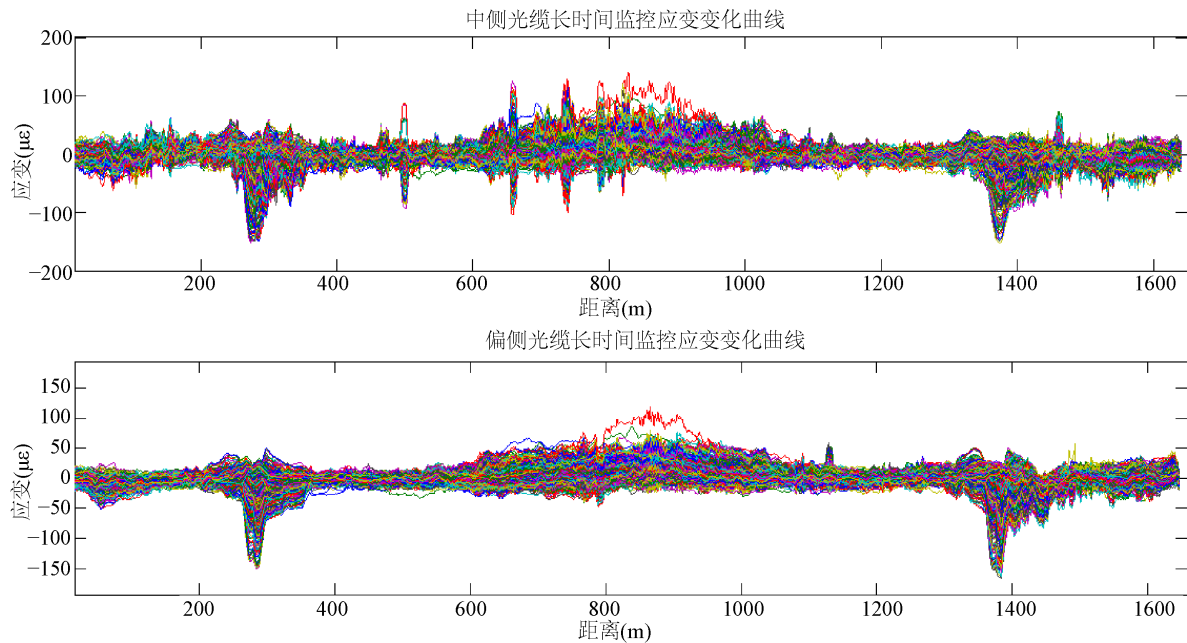


Figure 10. Long-term strain monitoring of distributed optical fibers

图 10. 分布式光纤长时间监控应变变化曲线

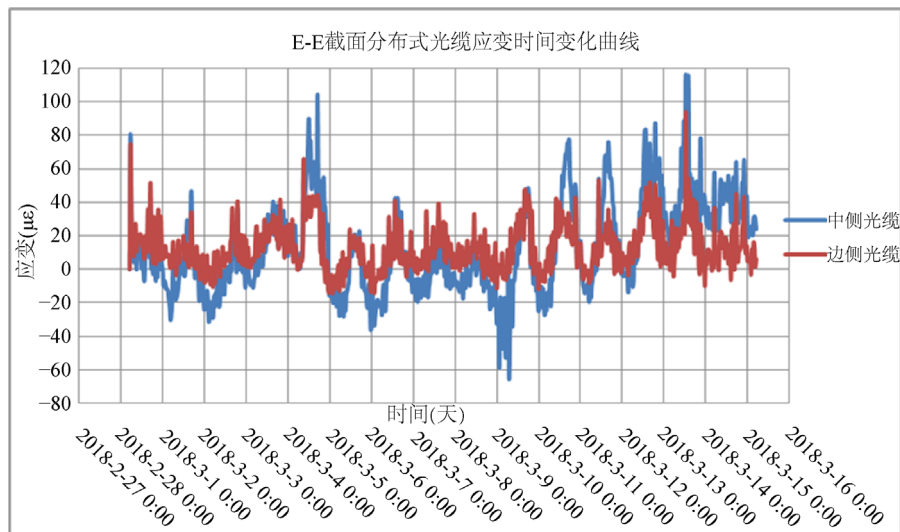


Figure 11. Long time strain monitoring of E section

图 11. E 截面中间光缆长时间监控应变变化曲线

从图中可得，在对全桥进行 15 天连续的应变监控下，中间光缆和偏侧光缆在跨中位置为正向应变，说明跨中位置受车流荷载影响，桥面下压导致光缆正向应变增加；而在左右两侧桥塔位置呈现负向应变，

说明由于大桥桥塔部位受到约束, 在车流荷载的影响, 桥面出现上弓起的现象, 导致光缆受挤压出现负向应变。

对跨中位置(E 截面)的受力状态进行长时间对比分析, 作出受力状态的变化曲线如图 11 所示。

两条光缆 E 截面跨中位置点应变呈现周期有序的应变变化, 应变值均为正向应变。说明桥面在车流荷载, 桥梁底板光缆受拉, 中间光缆应变变化较大, 边侧光缆应变变化较小, 最大应变约为 $100 \mu\epsilon$ 。每天应变最大的时间段为下午三点到六点之间, 符合每天的实际车流量。

4. 总结

本文采用基于布里渊光时域分析的分布式光纤传感技术, 实现了长大桥的连续分布式应变测量。荷载对比试验结果表明, 分布式光纤传感测量误差小于 $5 \mu\epsilon$ 。采用分布式光纤传感对长大桥结构进行长期监测, 即可实现长大桥应变的时间和空间的连续测量, 也可给出车流量的变化状态。该技术不仅可以应用于长大桥健康监测, 还可以用于桥梁超载监控、车流分析等场合, 对智慧交通发展具有重大意义。

参考文献

- [1] Tkach, R.W., Chraplyvy, A.R. and Derosier, R.M. (1986) Spontaneous Brillouin Scattering for Single Model Optical Fiber Characterisation. *Electronics Letters*, **22**, 1011-1013. <https://doi.org/10.1049/el:19860691>
- [2] Bao, X., Web, D.J. and Jackson, D.A. (1994) Combined Distributed Temperature and Strain Sensor Based on Brillouin Loss in an Optical Fiber. *Optical Letters*, **19**, 141-143. <https://doi.org/10.1364/OL.19.000141>
- [3] Bao, X.Y., DeMerchant, M., Brown, A. and Bremner, T. (2001) Tensile and Compressive Strain Measurement in the Lab and Field with He Distributed Brillouin Scattering Sensor. *Journal of Lightwave Technology*, **19**, 1698-1704. <https://doi.org/10.1109/50.964070>
- [4] Brown, A.W., DeMerchant, M.D., Bao, X.Y., et al. (1998) Advances in Distributed Sensing Using Brillouin Scattering. *Smart Structures and Materials*, **1**, 294-300. <https://doi.org/10.1117/12.316985>
- [5] 朱建朝, 李湘云, 冯亚非, 郑欢, 方继伟, 刘胜春. 分布式光纤传感技术在桥梁静载试验中的应用[J]. 交通科技, 2019(2): 36-38+47.
- [6] 魏华, 王劲松, 尚刚, 冯亚非, 郑欢, 刘胜春. 混凝土桥梁预埋分布式传感光缆应变监测研究[J]. 交通科技, 2019(6): 72-75.