

# 光纤智能材料在振动传感器中的应用\*

胡军<sup>1</sup>, 徐镭<sup>2</sup>, 宁强<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室 武汉, 430070) (2. 武汉理工光科股份有限公司 武汉, 430070)

**摘要** 针对传统振动传感器不适应大规模组网监测及振动信号的无中继远距离传输的问题,设计研制了一种新型的基于光信号并适宜信号远传的匹配滤波光纤光栅振动传感器。该传感器结构简单,匹配滤波环节少,生产简便。实验室性能测试结果表明,传感器响应频率与测试频率一致,信噪比高,满足桥梁低频响应的检测要求。实桥监测结果验证了其信号远距离传输的可靠性及对结构低阶频率的良好识别效果。

**关键词** 光纤光栅; 智能材料; 匹配滤波; 振动传感器; 动力特性

**中图分类号** TU317

## 1 问题的引出

智能材料是一种新型功能材料<sup>[1]</sup>,比较常见的智能材料有形状记忆合金、压电材料、电磁流变液以及光纤智能材料等。其中,光纤智能材料与结构由于采用光作为信号检测和传输媒介,具有抗干扰能力强、数字量检测、传输距离远以及组网容量大等独特的优点,是目前桥梁结构健康安全监测研究和应用的热点<sup>[2]</sup>。

光纤光栅是一种典型的波长调制型光纤无源器件<sup>[3]</sup>,能够直接感知外界温度和应力的变化,在传感领域得到了广泛的应用<sup>[4-5]</sup>。频率是反映桥梁结构整体状态的重要结构动力特性参量,频率及其组合指标不仅可用来分析评估桥梁的营运状态,而且可以用来验证设计假定和设计理论<sup>[6]</sup>。

现有的光纤光栅振动传感器主要有波长检测型<sup>[7-8]</sup>和光强检测型<sup>[9-12]</sup>两类。波长检测型光纤光栅振动传感器主要包括悬臂结构<sup>[7]</sup>和桥式结构<sup>[8]</sup>,如图1所示。悬臂结构较桥式结构传感及制作工艺更简单,前者主要适于检测中低频振动信号,后者则适于检测中高频振动信号。

光强检测型光纤光栅振动传感器采用匹配滤波原理,如图2所示,主要有反射型<sup>[9-10]</sup>和透射型<sup>[11-12]</sup>两类。该传感器原理虽在波分复用应用中有一定的技术局限,但显著降低了波长调制解调的实施成本,更利于工程化推广应用。

综合考虑桥梁健康状态动力特性监测的精度、

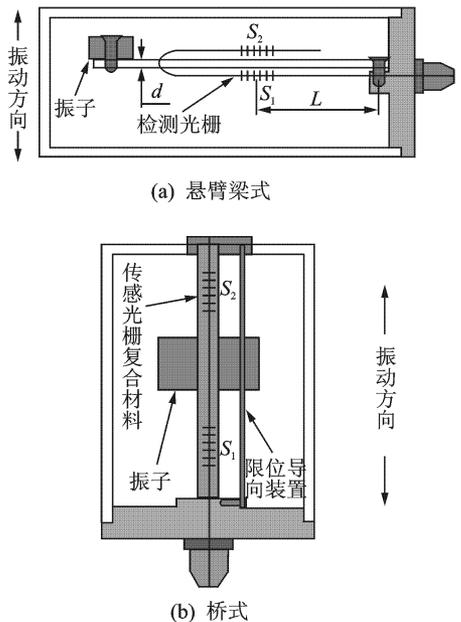


图1 波长检测型光纤光栅振动传感器

长期稳定性、远距离信号传输和实施经济性等各种需求,笔者开发设计了一种新型匹配滤波光纤光栅振动传感器。

## 2 新型匹配滤波光纤光栅振动传感器

### 2.1 传感器结构

如图3所示,传感器包括主梁、振子、辅梁、传感光栅、匹配光栅、辅梁扰度调节装置、护套和光纤连

\* 收稿日期:2012-04-26;修改稿收到日期:2012-06-30

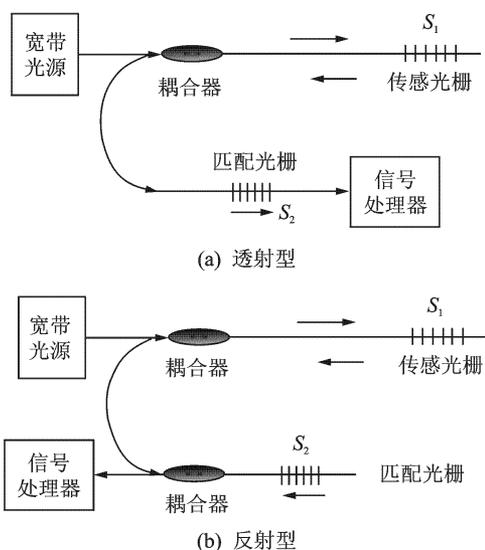


图2 光强检测型振动传感器检测原理图

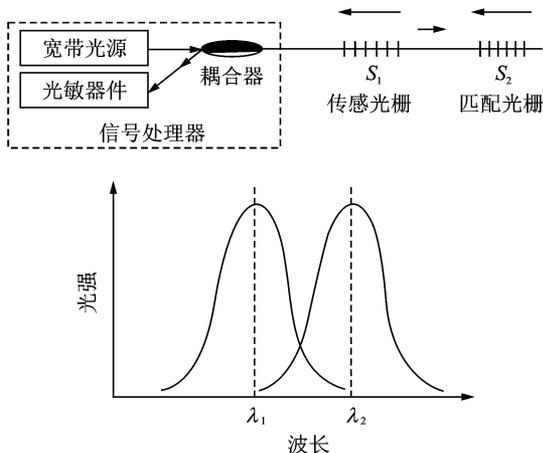


图4 匹配滤波光纤振动传感器检测原理图

接器等构件。其结构借鉴了光强检测型光纤光栅振动传感器的悬臂构造<sup>[12]</sup>,并在其基础上进行了优化。

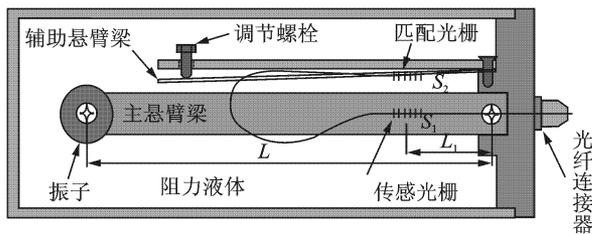


图3 新型匹配滤波光纤振动传感器结构图

主悬臂梁与振子组成一个受迫振动体系,传感光栅粘贴在主梁上。当振动体系在环境激励的作用下产生振动时,传感光栅中心波长随悬臂变形产生周期性拉压应变,匹配光栅粘贴在辅助悬臂梁上,通过辅梁挠度调节螺栓改变匹配光栅的波长,完成与传感光栅的波长匹配。

### 2.2 传感原理

宽带光源发出的光经光纤耦合器传播到传感光栅1,经光栅1滤波后传播到匹配光栅2,匹配光栅2的反射光和传感光栅1的反射光经过光纤耦合器进入信号处理器,如图4所示。信号处理器光敏器件接受的光强为两个光栅反射谱之和。

通过辅梁挠度调节装置调整匹配光栅2的波长,使之与传感光栅1的波长匹配,匹配条件满足

$$\lambda_2 = \lambda_1 + |\Delta\lambda_1|_{\max}$$

因此,λ<sub>2</sub>的大小是由光栅1在受迫振动时产生

的波长变化量Δλ<sub>1</sub>和λ<sub>1</sub>确定。传感器制作时,Δλ<sub>1</sub>的大小通过图3中L<sub>1</sub>的尺寸来调节,主要目的是满足两个光栅的波长差最大时,其反射谱基本分开,且不会跨越λ<sub>2</sub>。

当主梁在环境激励的作用下产生振动时,传感光栅1的中心波长在λ<sub>1</sub>和λ<sub>2</sub>之间变化。达到最大值时,两个光栅的反射光谱将重合,重合时匹配光栅的反射光谱由于传感光栅1的滤波作用而消失,此时匹配光栅的反射光强为最小值;相反,当传感光栅1的中心波长达到最小值时,匹配光栅的反射光强为最大值。这样就实现了光纤光栅波长信号到光强信号的调制,传感器把环境振动频谱转换为光强的变化频谱,实现对被测对象振动参数的检测。

结构设计时,辅梁变形方向与振动方向垂直,且有调节螺母固定,保证其波长不受环境振动的影响。同时,由于两个光栅的光学特性相近,工作环境相同,并粘贴在同种材料上,当温度变化时,两个光栅的谐振波长将同步变化;因此,温度变化不会影响传感器的工作状况。另外,为了克服主悬臂梁自身的谐振,在传感器内部加入了阻尼液。

### 2.3 传感器制作流程

传感器制作主要有3个步骤:首先,主梁和辅梁上光栅进行粘贴;其次,传感器进行组装;最后,传感器进行测试封装。其中,光纤光栅的制备和其在悬臂梁上的安装最为关键。根据传感器的调制原理可知,传感光栅和匹配光栅串联在同一根光路上,所以光栅生产时,最佳方案是把两个光栅按设计的间距制作在一起,且其波长差满足波长调制的要求,但其制作工艺要求较高。如果传感器的外形尺寸允许,也可用两个单光栅进行串接,缺点是会给传感器制造一

个损耗点。

光栅粘贴时,首先采用如图5所示的固定夹具把两种梁临时固定在一起,一端通过光纤跳线与光谱仪相连,以便能实时监测光栅的波长。首先粘贴主梁光栅,粘贴时需注意控制 $\Delta\lambda_1$ 。主梁光栅粘好后,再进行辅梁光栅的粘贴,通过适量拉伸,控制两个光栅的波长差在可调制的范围内。粘贴好光栅的悬臂梁通过热处理后就可以使用了。

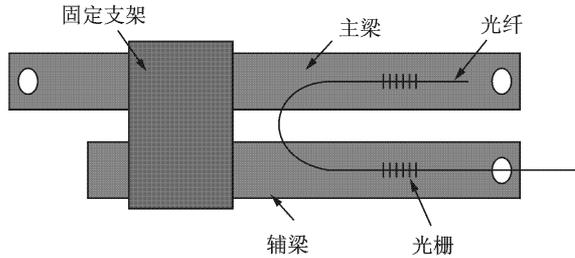


图5 主梁和辅梁上光纤光栅的粘贴

传感器各机械组件安装完成后,封装阻尼介质前需先进行传感器光栅的匹配调试,得到较理想的性能参数后,才能进行阻尼液的灌装和传感器的封装。图6是封装好的光纤光栅振动传感器实物照片。

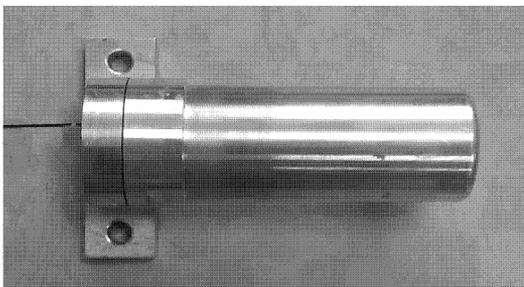


图6 光纤光栅振动传感器实物照片

### 3 性能测试

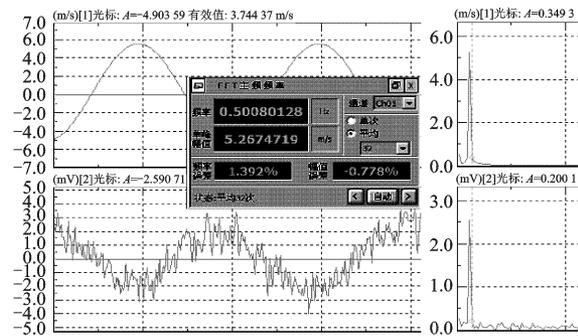
为了检验传感器的低频响应灵敏度及其结果的一致性,依次选择0.5,1和2 Hz作为标定频率进行测试,测试结果如表1所示。

表1 测试结果

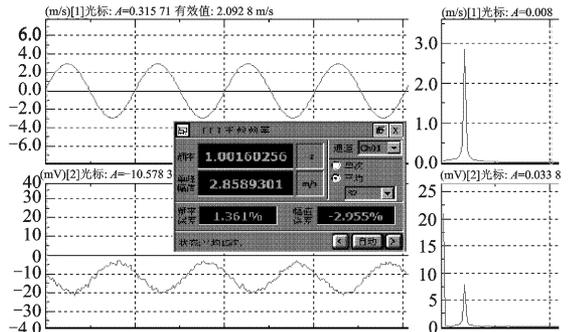
测试频率/ Hz	实测频率/ Hz	灵敏度/ ( $\text{mV} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})^{-1}$ )
0.5	0.5	2.58
1.0	1.0	7.98
2.0	2.0	17.61

图7显示了各测试条件下的波形和频谱。每幅图的上方为测试输出波形和频谱,下方为光纤光栅振动信号处理器检测到的传感器的波形和频谱。各

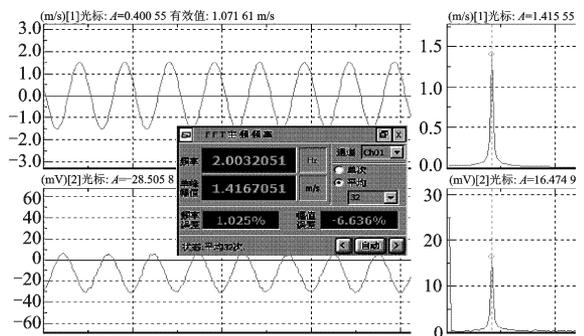
图中间标题框最上一栏为检测频率,中间栏为单幅幅值,最下一栏为频率和幅值误差。



(a)  $f=0.5$  Hz时的波形和频谱



(b)  $f=1$  Hz时的波形和频谱



(c)  $f=2$  Hz时的波形和频谱

图7 传感器测试波形和频谱图

由测试结果可以看出,光纤光栅振动传感器具有很好的低频响应性能,所测频率与测试频率大小一致,波形变化趋势也与测试波形相符。随着测试频率的降低,噪声对波形的影响越发明显,传感器的灵敏度也随之降低,但对频率的检测没有影响,仍保持了较高的信噪比,可以有效用于桥梁低频信号的检测。

### 4 实桥应用

以荆岳大桥健康监测系统的动力特性监测为例,该桥共布置82个动力特性监测点,其中主塔上有32个测点,主梁上有50个测点,测点布置如图8所示。

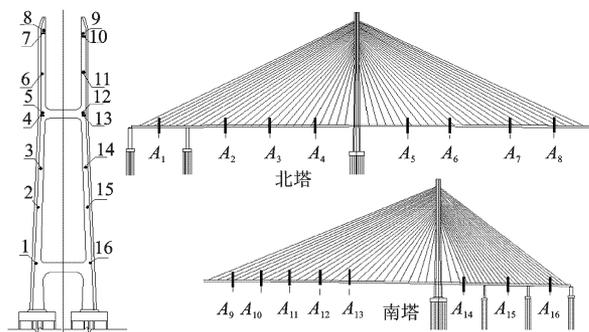


图8 动力特性监测布点方案

检测信号通过3 km 主传输光缆传回监控中心,信号处理器和计算机系统实时获取检测数据,经FFT 频谱分析,最终获得桥梁的振动频率参数。图9 为传感器实域检测信号,图10 为该桥梁主梁1 阶侧弯频谱分析结果。

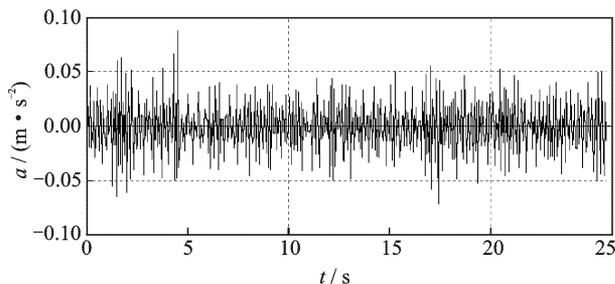


图9 传感器实域检测数据

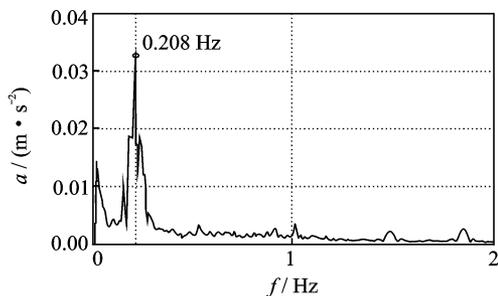


图10 频谱分析结果

表2 列举了结构的部分模态分析结果,可以看出,实测值与理论值有较好的一一对应关系,表明该检测技术实现了预期的结果,能够为桥梁结构的动力特性检测提供可靠的实测依据。

表2 模态分析结果

阶次	计算频率/ Hz	实测频率/ Hz	振型特点
1	0.210 3	0.208	主梁1阶侧弯
2	0.231 2	0.231	北主塔侧弯
3	0.243 6	0.265	主梁竖弯
4	0.281 0	0.286	南主塔侧弯

## 5 结束语

笔者设计研制了一种新型的匹配滤波光纤光栅振动传感器,其结构简单,匹配滤波环节少,便于生产。实验室性能测试结果表明,传感器响应频率与测试频率一致,且有较高的信噪比,满足桥梁低频信号的检测需求。实桥应用结果表明,该传感器信号远传效果佳,检测结果与理论计算相符性好。

## 参 考 文 献

- [1] 姜德生, Richard O C. 智能材料、器件、结构与应用[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2000: 1-11.  
Jiang Desheng, Richard O C. Smart materials devices structures and their applications[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2000: 1-11. (In Chinese)
- [2] 赵勇. 光纤光栅及其传感技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 196-199.  
Zhao Yong. Optical fiber grating and sensing technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007: 196-199. (In Chinese)
- [3] 李宏男, 任亮. 结构健康监测光纤光栅传感技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 5-9.  
Li Hongnan, Ren Liang. Structural health monitoring of fiber grating sensing technology [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2008: 5-9. (In Chinese)
- [4] 孙丽, 梁德志, 李宏男. 用FBG 传感器监测框架-剪力墙结构裂缝[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(5): 496-499.  
Sun Li, Liang Dezhi, Li Hongnan. Monitoring of cracks in frame-shear wall structure using fiber bragg grating sensors [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(5): 496-499. (in Chinese)
- [5] 白生宝, 肖迎春, 黄博, 等. 基于FBG 传感器的冲击损伤定位[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(4): 479-483.  
Bai Shengbao, Xiao Yingchun, Huang Bo, et al. Damage detection based on fiber bragg grating sensor [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(4): 479-483. (in Chinese)
- [6] 陈常松, 田仲初, 郑方泔, 等. 大跨度混凝土斜拉桥模态试验技术研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(10): 72-76.  
Chen Changsong, Tian Zhongchu, Zheng Wangan, et al. A study on the modal experiment technique of

long span cable-stayed bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(10):72-76. (in Chinese)

- [7] 厉善元,蒋冬青,梁磊. 新型光纤光栅加速度传感器动态特性的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(12): 117-120.

Li Shanyuan, Jiang Dongqing, Liang Lei. Research on dynamic characteristic of fiber bragg grating accelerometer [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(12):117-120. (in Chinese)

- [8] 李志全,朱丹丹,吴飞,等. 内含光纤 Bragg 光栅的微型振动加速度测量探头设计及其理论分析[J]. 传感技术学报, 2004, 3(1):122-124.

Li Zhiquan, Zhu Dandan, Wu Fei, et al. The design of micro-vibrational acceleration measuring probe based on FBG and theoretic analysis [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2004, 3(1): 122-124. (in Chinese)

- [9] 许兆文,盛秋琴,施可彬,等. 光纤光栅振动传感实验研究[J]. 南开大学学报, 2001, 34(2):97-81.

Xu Zhaowen, Sheng Qiuqin, Shi Kebin, et al. The study on fibre grating vibration sensor[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis, 2001, 34(2): 97-81. (in Chinese)

- [10] 夏秀兰,童峥嵘,盛秋琴,等. 光纤光栅应变传感的研究[J]. 天津大学学报, 2002, 35(4):473-476.

Xia Xiulan, Tong Zhengrong, Sheng Qiuqing, et al. Study on the fiber bragg grating strain sensors[J].

Journal of Tianjin University, 2002, 35(4): 473-476. (in Chinese)

- [11] 张东生,李微,郭丹,等. 基于光纤光栅振动传感器的桥梁索力实时监测[J]. 传感技术学报, 2007, 20(12): 2720-2723.

Zhang Dongsheng, Li Wei, Guo Dan, et al. Real-time monitor system of bridge-cable force based on FBG vibration sensor and its application[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(12):2720-2723. (in Chinese)

- [12] 张东生,郭丹,罗裴,等. 基于匹配滤波解调的光纤光栅振动传感器研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(2):311-313.

Zhang Dongsheng, Guo Dan, Luo Pei, et al. Researches on fiber grating vibration sensor based on matching filtering demodulation[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(2):311-313. (in Chinese)



第一作者简介:胡军,男,1966年9月生,高级工程师。主要研究方向为光纤Bragg光栅传感器。曾发表《光纤光栅在桥梁预应力索索力监测中的应用》(《武汉理工大学学报》2011年第33卷第10期)等论文。

E-mail:hujun@wri.com.cn

(第 32 卷卷终)

## 欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊入选 EI Compendex 数据库收录期刊和中文核心期刊,为双月刊,每逢双月末出版,每本定价 20 元,全年 120 元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址:南京市御道街 29 号 邮政编码:210016

电话:(025)84893332

传真:(025)84893332 E-mail:qchen@nuaa.edu.cn

网址:http://zdc.nuaa.edu.cn