

# 一种悬臂梁式光纤光栅振动传感器研究

贾振安,张星,李康,樊庆康

(西安石油大学理学院光电油气测井与检测教育部重点实验室,陕西西安710065)

**摘要:**针对悬臂梁式振动传感器进行了研究,主要阐述了传感器的工作原理与理论分析,并对传感器的幅频特性和灵敏度进行了实验研究。实验结果表明,振动传感器的固有频率为90 Hz,传感器的灵敏度高达121 pm/g ( $g=9.8 \text{ m/s}^2$  为重力加速度),平坦区域为10~50 Hz,振动传感器在低频范围内具有较好的频率响应。最后对传感器的悬臂梁进行了疲劳分析与优化改进,使悬臂梁的疲劳寿命提高了150%。

**关键词:**悬臂梁;光纤光栅;固有频率;灵敏度;疲劳分析;优化设计

**中图分类号:**TN253;TM2 **文献标识码:**A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2019.01.006

## Study on a Cantilever Beam FBG Vibration Sensor

JIA Zhen'an, ZHANG Xing, LI Kang, FAN Qingqiang

(Key Laboratory of Photoelectric Gas-Oil Logging and Detecting, Ministry of Education, School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The cantilever beam vibration sensors are studied in this paper. It mainly expounds the working principle and theoretical analysis of the sensor are described, and the experimental study on the amplitude frequency characteristics and sensitivity of the sensor has been carried out. The experimental results show that the natural frequency of the vibration sensor is 90 Hz, the sensitivity of the sensor is as high as 121 pm/g ( $g=9.8 \text{ m/s}^2$ , which is the acceleration of gravity), and the flat area is 10 to 50 Hz. The vibration sensor has good frequency response in low frequency range. Finally, the fatigue analysis and optimization of the cantilever beam of the sensor are carried out, and the fatigue life of cantilever beam is increased by 150%.

**Key words:** cantilever beam; fiber Bragg grating; natural frequency; sensitivity; fatigue analysis; design optimization

## 0 引言

近年来,光纤光栅传感器凭借自身的优点被学者们大量的研究,并应用于多个领域。光纤光栅传感器具有抗电磁干扰能力强,灵敏度高,电绝缘性好,安全可靠及耐腐蚀等优点<sup>[1]</sup>,且在振动领域的发展非常迅速。

目前,光纤光栅振动传感器在扩大传感器频率使用范围上做了大量的研究,如2012年,刘钦朋、乔学光等提出的两点封装加速度传感器<sup>[2]</sup>的固有频率为250 Hz,灵敏度为41.2 pm/g ( $g=9.8 \text{ m/s}^2$ );2010年,李学成、刘肃等提出的双膜片结构振动传感器<sup>[3]</sup>的固有频率为900 Hz,而灵敏度只有24.3 pm/g;2016年,张芸山提出的柔性铰链结构的二维加速度

振动传感器<sup>[4]</sup>的固有频率为1060 Hz,其灵敏度仅为12.0 pm/g。近年来,低频信号的检测获得了大量的关注,如桥梁、道路等的振动频率<sup>[5]</sup>一般为5~10 Hz,在工程地震中的振动频率为2~50 Hz,所以,在频域要求不宽的情况下,灵敏度变得尤为重要,提高传感器的灵敏度成为了一个重要的研究方向。

本文提出的悬臂梁式振动传感器灵敏度高达121 pm/g,更接近传感器在实际环境中使用时的灵敏度要求。

## 1 传感器的结构与工作原理

光纤光栅振动加速度传感器主要由光纤光栅、悬臂梁、质量块、固定支座组成。为了避免光纤光栅出现啁啾现象,悬臂梁采用等腰三角形。振动传感

收稿日期:2018-04-22

基金项目:陕西省教育厅重点实验室科研计划基金资助项目(17JS105);陕西省“13115”科技创新工程重大科技专项基金资助项目(2009ZDKG-42)

作者简介:贾振安(1959-),男,陕西人,教授,硕士生导师,硕士,主要从事光纤传感、光纤通信和光电子学等领域的教学与研究工作。

器结构示意图如图1所示。

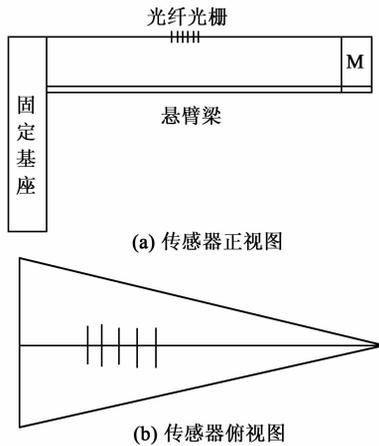


图1 振动传感器示意图

振动加速度传感器以光纤光栅为传感元件,将机械振动信号转化为光波信号。当振动传感器受到竖直方向上的振动信号激励时,质量块在惯性力作用下引起悬臂梁自由端上下运动,当悬臂梁在质量块的带动下产生应变时,光纤光栅将会被拉伸,光纤光栅的中心波长将会发生漂移,因此,我们只要测量光纤光栅中心波长的漂移量,就可以检测到外界环境的加速度信号值。

## 2 振动传感器的理论分析

当振动传感器在竖直方向上振动时<sup>[4]</sup>,由牛顿定律可得

$$a = \frac{F}{M_{\text{eff}}} = \frac{K_{\text{eff}} \Delta L}{M_{\text{eff}}} \quad (1)$$

式中: $a$ 为加速度; $F$ 为力; $\Delta L$ 为光纤光栅的变化量; $M_{\text{eff}}$ 为传感系统的等效质量; $K_{\text{eff}}$ 为传感系统的等效刚度。 $M_{\text{eff}}$ <sup>[6]</sup>, $K_{\text{eff}}$ <sup>[7]</sup>的计算式分别为

$$M_{\text{eff}} = m + \frac{33}{140} m_1 \quad (2)$$

$$K_{\text{eff}} = \frac{bh^3 E}{6L^3} \quad (3)$$

式中: $m_1$ 为悬臂梁的质量; $m$ 为质量块的质量; $b$ 为悬臂梁的底边宽度; $L$ 为悬臂梁的长度; $h$ 为悬臂梁的厚度; $E$ 为弹性模量。

光纤光栅的轴向应变为

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (4)$$

当作用在光纤光栅中心波长的漂移量满足:

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B (1 - P_e) \varepsilon \quad (5)$$

式中: $\lambda_B$ 为光纤光栅的中心波长; $P_e$ 为光纤的有效弹光系数。

传感器的灵敏度为

$$S = \frac{\Delta \lambda_B}{a} = \frac{\lambda_B (1 - P_e) M_{\text{eff}}}{K_{\text{eff}} L} \quad (6)$$

传感器的固有频率为

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\text{eff}}}{M_{\text{eff}}}} \quad (7)$$

## 3 振动传感器的幅频响应特性研究

本次实验所用振动传感器的结构参数为: $L=60 \text{ mm}$ , $b=10 \text{ mm}$ , $h=1 \text{ mm}$ , $m_1=8.01 \text{ g}$ ,封装后的 $\lambda_B=1540.462 \text{ nm}$ ,悬臂梁的弹性模量 $E_1=2.0 \times 10^{11} \text{ Pa}$ ,光纤光栅的弹性模量 $E_2=0.73 \text{ Pa}$ 。

实验中,加速度值为 $0.5 \text{ g}$ ,振动台产生 $10 \sim 200 \text{ Hz}$ 的激励,每间隔 $10 \text{ Hz}$ 改变一次输出频率,在接近传感器的固有频率时,每间隔 $2 \text{ Hz}$ 改变一次输出频率,在电脑上保存中心波长变化的数据,图2为根据这些数据画成的幅频响应曲线图。

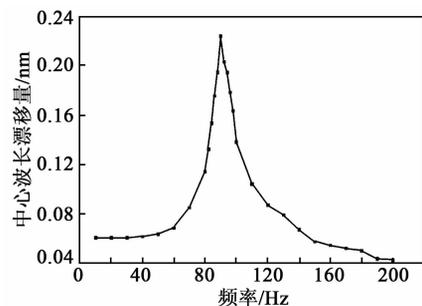


图2 传感器的幅频响应曲线图

图3为振动传感器加速度响应曲线图。由图可知,振动传感器固有频率为 $90 \text{ Hz}$ ,平坦区域在 $10 \sim 50 \text{ Hz}$ 。这表明振动传感器在低频范围内具有较好的频率响应,且可以在低频段范围使用。

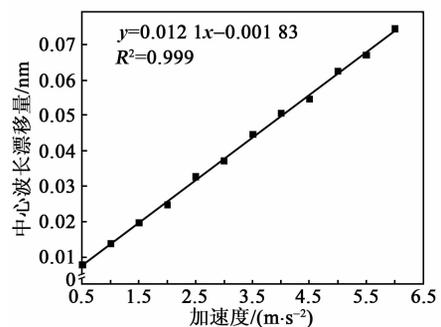


图3 振动传感器加速度响应曲线图

## 4 振动传感器的灵敏度特性研究

实验中,设定振动台振动频率为 $30 \text{ Hz}$ ,测量加速度值在 $0.5 \sim 6 \text{ m/s}^2$ 内的中心波长变化值,每间隔 $0.5 \text{ m/s}^2$ 改变1次加速度值,记录波长变化数据

(见图 3)。由图 3 可知,振动传感器的灵敏度为 121 pm/g,加速度和中心波长的变化量具有很好的线性关系,线性度高达 99.9%。

### 5 基于 Workbench 的传感器悬臂梁疲劳仿真实验

本次仿真实验所采用悬臂梁尺寸与实验中的一致,密度为  $7\ 850\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为  $2.0 \times 10^{11}$ ,泊松比为 0.3。根据实际情形,对悬臂梁的一端添加固定约束及对悬臂梁产生应变的面施加 10 N 的载荷。最终求解结果如图 4~6 所示。

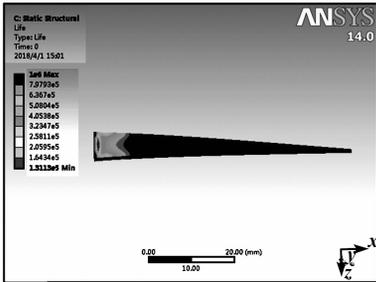


图 4 疲劳寿命图

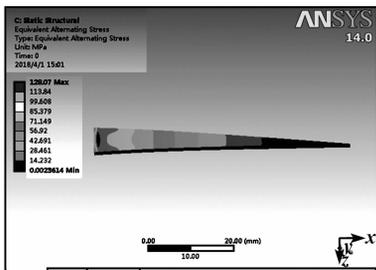


图 5 等效交变应力图

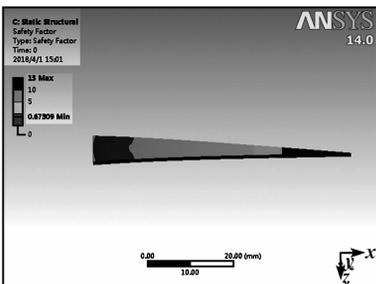


图 6 疲劳安全系数图

### 6 疲劳结果分析

从图 4 中可看出,悬臂梁的最小寿命为 131 130 min,在理想环境下,悬臂梁至少在 131 130 min 后才会出现损伤;由图 5 可知,在悬臂梁的固定端一侧受到的应力最大,最大值为 128.07 MPa,应力分布不够均匀,在固定端一侧易产生裂纹或断裂;由图 6 可知,悬臂梁的疲劳安全系数值为 0.673 09,小于 1,而比值大于 1 才能满足设计要求,所以,悬

臂梁易产生损伤。

### 7 改进方案

由疲劳分析结果可知,传感器悬臂梁的应力分布不够均匀,疲劳安全系数也较小,因此,为了使悬臂梁的使用寿命能够有所增长,在悬臂梁结构参数不变的情况下,对悬臂梁的长和宽进行优化改进。我们选用 ANSYS Workbench 的优化设计模块对悬臂梁进行了优化,优化后的悬臂梁两条边长为 11 mm 和 54.187 mm,即悬臂梁的长为 53.907 mm,底边宽为 11 mm。

### 8 改进结果与分析

从优化设计模块中得到了优化的悬臂梁尺寸后,我们用新尺寸对悬臂梁重新建立模型,进行疲劳分析,得到的结果如图 7~9 所示。

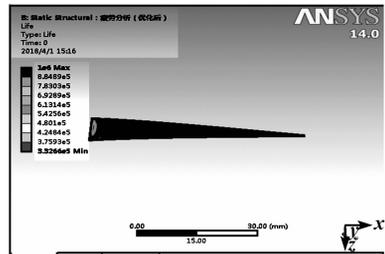


图 7 疲劳寿命图

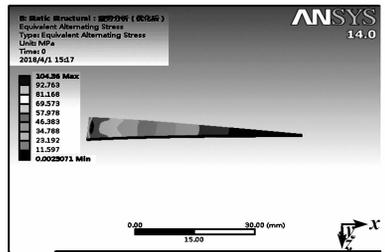


图 8 等效交变应力图

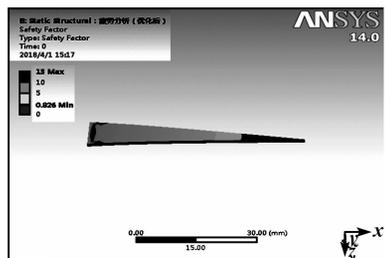


图 9 疲劳安全系数图

从图 7 中可看出,悬臂梁的最小寿命为 332 660 min,即悬臂梁在 332 660 min 后才会出现损伤。优化尺寸后的悬臂梁疲劳寿命比优化前的寿命提高 150%;由图 8 可知,悬臂梁的固定端处应力最大,最大应力值为 104.36 MPa。优化后的最大应力值比之前减小了 18.5%;由图 9 可知,悬臂梁的

疲劳安全系数最小值为 0.836, 优化后的最小安全系数值比之前提高了 22.7%。从仿真分析的结果来看, 经过对传感器悬臂梁尺寸进行优化后, 悬臂梁的疲劳寿命有增加。

## 9 结束语

本文通过实验研究了振动传感器的幅频响应特性和加速度响应特性, 实验结果表明, 固有频率为 90 Hz, 灵敏度为 121 pm/g。对传感器进行了疲劳分析与优化改进, 使悬臂梁的疲劳寿命提高了 150%。在实际制作传感器时, 应先进行优化改进, 这样不仅可以提高传感器的疲劳寿命, 还可以针对传感器的灵敏度和固有频率的范围进行控制。

## 参考文献:

- [1] 张发祥, 张晓磊, 王路杰, 等. 高灵敏度大带宽光纤光栅微地震检波器研究[J]. 光电子·激光, 2014, 6(25): 1086-1090.
- [2] 刘钦朋, 乔学光, 傅海威, 等. 两点封装的光纤布喇格加速度传感器设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 2110-2115.
- [3] LI Xuecheng, LIU Su, ZHANG Wentao, et al. Study on low frequency characteristic of double diaphragm fiber Bragg grating geophone[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2010, 21(4): 529-532.
- [4] 张芸山. 微地震中光纤振动传感技术研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2016.
- [5] 周浩强. 光纤光栅振动加速度传感器的优化设计及振动体的振动模态分析[D]. 西安: 西安石油大学, 2013.
- [6] 罗小东, 乔学光, 贾振安, 等. 低频光纤布喇格光栅振动加速度传感器研究[J]. 仪表技术与传感器, 2013(12): 7-9.
- [7] 董柯, 戴玉堂, 殷广林, 等. 基于对称铰链的中低频光纤加速度传感器及其优化设计[J]. 光电子·激光, 2017, 28(1): 6-11.

## 撤回声明

原已刊于《压电与声光》2010年32卷第6期稿件: 一种高楼救生器的研究, 作者: 张蕊华, 陈海初, 刘述亮, 所在页码: 1002-1004。因文章测试数据有误, 应全体作者的要求撤稿。同时, 该文在中国知网、万方数据、维普资讯等网络出版平台发布的全文也从各数据库中予以撤除。

特此告知并诚挚地向读者致歉。

《压电与声光》编辑部  
2019年01月03日

## Retraction Statement

The manuscript, "Study of High-rise Lifesaver", originally published on "Piezoelectric and Acousto-Optics, 2010, vol. 32, no. 6, Authors: Zhang Ruihua, Chen Haichu, Liu Shuliang, and pp: 1002-1004, was retracted at the request of all authors due to the incorrect test data. At the same time, the full text of the article published on the online publishing platforms such as CNKI, WANFANG Data, and VIP Information was also removed from each database.

Hereby inform and sincerely apologize to the readers.

Editorial Department of Piezoelectricity & Acousto-optics  
January 03, 2019