

双筒支梁结构光纤光栅加速度传感探头的设计

李国利, 刘祥建

(金陵科技学院 机电工程学院, 江苏 南京 211169)

摘要:采用双筒支梁结构设计了一种光纤光栅加速度传感探头, 探头弹性系统由双筒支梁、双光纤光栅、质量块等组成。采用差动补偿法解决了光纤光栅传感器温度与应变交叉敏感问题。该探头结构简单, 线性度好, 一阶谐振频率达到 525 Hz, 不受电磁干扰, 不受光路功率波动和相位噪声影响, 且测量灵敏度是单光纤光栅传感器的 2 倍。

关键词:光纤光栅; 加速度传感器; 双筒支梁; 差动结构; 温度补偿

中图分类号: TN253; TP212

文献标识码: A

Design of Fiber Bragg Grating Acceleration Sensing Probe Based on Dual Simply Supported Beams

LI Guoli, LIU Xiangjian

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: Based on dual simply supported beams structure a fiber Bragg grating acceleration sensing probe was designed. The sensing probe elastic system was composed of dual simply supported beams, dual fiber Bragg gratings and a mass block. The differential structure compensation method was used to solve the problem of temperature and strain cross-sensitivity. This sensing probe was characterized by simple structure and ideal linearity. The first order resonant frequency reached to 525 Hz. It had the ability to resist electromagnetic interference, phase noise and light-path power fluctuation. The measurement sensitivity of this probe was twice as much as single fiber Bragg grating accelerometer.

Key words: fiber Bragg grating; acceleration sensor; dual simply supported beam; differential structure; temperature compensation

0 引言

桥梁、混凝土堤坝和海洋平台等大型工程结构中的微振动检测和结构健康监测都要求对振动加速度进行测量。电磁类加速度传感器已在振动测量中得到了广泛应用, 但其自身存在诸多缺陷, 如电磁干扰和温度噪声不能从根本上消除, 信号间的串扰, 测量探头复杂及电线总体积大, 布置空间易受限制等。近年来, 随着光纤光栅(FBG)传感技术的发展, 光纤光栅在准静态测量工程领域已获得广泛应用^[1-4]。光纤光栅加速度传感器因具有抗电磁干扰, 体积小, 精度高, 光路简单, 检测方法灵活和对光源强度波动不敏感等特点, 在大型工程结构的振动加速度测量中受到广泛关注^[5-9]。

本文设计了一种双光纤光栅加速度传感系统, 提出了一种新颖的基于双筒支梁的光纤光栅加速度传感器探头, 该探头采用差动结构, 线性度良好, 谐

振频率 525 Hz, 不但具有光纤光栅传感器的一般优点, 且能自动消除温度噪声和相位噪声的影响, 测量灵敏度是单光纤光栅传感器的 2 倍。

1 光纤光栅传感原理

光纤轴向应变 ϵ 引起的光纤光栅 Bragg 波长变化公式为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - P_e)\epsilon_z = K_e\epsilon \quad (1)$$

式中: $P_e = n_{\text{eff}}^2 [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})]/2$ 为有效弹光系数, P_{11} 、 P_{12} 均为弹光系数, ν 为光纤泊松比; K_e 为光纤光栅相对波长应变灵敏度系数。可见, $\Delta\lambda_B$ 与 ϵ 成线性关系, 由 $\Delta\lambda_B$ 可方便地求出外界应变 ϵ 。

温度引起的光纤光栅 Bragg 波长变化公式为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (\alpha + \xi)\Delta T = K_T\Delta T \quad (2)$$

式中: $\alpha = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\partial\lambda}{\partial T}$ 为光纤的热膨胀系数; $\xi = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \cdot$

$\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T}$ 为光纤的热光系数; K_T 为光纤光栅相对波长温

收稿日期: 2013-03-18

基金项目: 金陵科技学院青年教师科研基金资助项目 (JIT-B-201220)

作者简介: 李国利 (1973-), 男, 山东滨州人, 副教授, 博士生, 主要从事光纤传感及光电检测技术的研究。E-mail: qdliguoli@126.com。

度灵敏度系数。因此, ΔT 与 $\Delta\lambda_R$ 存在着线性关系, 通过检测波长的移位, 即可确定被测温度变化量。

由上可知, 光栅 Bragg 波长变化与应变和温度的变化关系

$$\Delta\lambda_R/\lambda_R = (\alpha + \xi)\Delta T + (1 - P_e)\epsilon = K_T\Delta T + K_\epsilon\epsilon \quad (3)$$

由式(3)可知, 光栅中心反射波长的变化与加在其上的应变和温度都有关系, 利用光纤光栅进行应变测量必须考虑温度补偿问题。因此, 解决应变和温度交叉敏感问题是光纤光栅应变传感测量技术的关键^[10]。

2 双筒支梁结构光纤光栅加速度传感器探头设计

2.1 双筒支梁结构光纤光栅加速度传感器探头结构

基于双筒支梁结构的光纤光栅加速度传感器探头结构如图1所示。探头主要有惯性质量块、2个弹性矩形筒支梁、壳体、基座和2根参数一致的光纤光栅等组成。两个筒支梁平行安装。惯性质量块采用圆柱形结构, 以减少其对梁弯曲的影响, 提高测量精度。惯性质量块横向垂直筒支梁方向粘贴于两筒支梁间中间位置, 粘贴牢固, 当有加速度时, 确保质量块与上、下筒支梁振动呈一体。FBG₁ 平行筒支梁方向粘贴于上筒支梁上表面中间位置, FBG₂ 平行筒支梁方向粘贴于下筒支梁下表面中间位置, 粘贴时确保两光栅与梁表面粘贴的牢固性和准直性, 且两光栅严格对称。

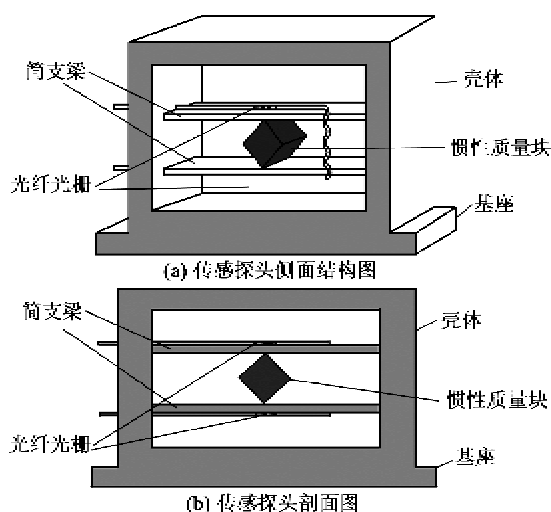


图1 基于双筒支梁结构的光纤光栅加速度传感器探头结构图

2.2 双筒支梁结构光纤光栅加速度传感器探头工作原理

当有加速度时, 惯性质量块上、下振动, 设其振动加速度为 a , 则惯性质量块所受到的惯性力 $F = ma$ 。在 F 作用下, 筒支梁发生弯曲, 其中一光栅受压缩, 另一光栅受拉伸。若筒支梁厚为 h , 长为 L , 宽为 b , 依据材料力学和弹性力学知识结合公式 $F = ma$, 惯性力引起的光纤光栅的应变 ϵ 为

$$\epsilon = \frac{3FL}{bh^2E} = \frac{3Lm}{bh^2E} \cdot a \quad (4)$$

式中 E 为梁的弹性模量。式(4)给出了 ϵ 和 a 的数学关系。因此, 可通过测量 FBG 的瞬时应变而得到外界加速度值。

当光信号通过 FBG₁ 和 FBG₂ 时, 因为它们是完全一致的光纤光栅, 在没有振动信号时, 设 FBG 中心反射波长为 λ_{B1} 。当质量块以 a 振动时, 2 个 FBG 的长度伸长和缩短, 从而使其反射谱发生变化, 中心波长产生漂移。假设外界温度变化为 ΔT , 根据式(3)可知, 2 光纤光栅的中心波长漂移量分别为

$$\Delta\lambda_{B1} = \lambda_{B11} - \lambda_{B1} = \lambda_{B1} [K_T\Delta T + K_\epsilon(-\epsilon)] \quad (5)$$

$$\Delta\lambda_{B2} = \lambda_{B12} - \lambda_{B1} = \lambda_{B1} (K_T\Delta T + K_\epsilon\epsilon) \quad (6)$$

式中: λ_{B11} 为 FBG₁ 受压缩后输出的中心波长; λ_{B12} 为 FBG₂ 受拉伸后输出的中心波长。由式(5)、(6)得到 FBG₁ 和 FBG₂ 的中心波长差为

$$\Delta\lambda_B = \Delta\lambda_{B2} - \Delta\lambda_{B1} = 2\lambda_{B1} K_\epsilon\epsilon \quad (7)$$

根据式(4), 式(7)转化为

$$\Delta\lambda_B = 2\lambda_{B1} K_\epsilon \frac{3Lm}{bh^2E} \cdot a \quad (8)$$

所以通过检测光纤光栅中心波长的漂移量 $\Delta\lambda_B$ 便可检测 a 。

由式(8)可知, 由于采用了差动结构, 该传感探头能很好地对温度进行补偿, 且测量的灵敏度是单光纤光栅的 2 倍。

2.3 有限元分析

双筒支梁结构的光纤光栅加速度传感器探头筒支梁材料选用 45# 钢, 其长、宽、厚为 $160 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 惯性质量块质量为 32 g , 材料为铜。用有限元分析软件 ANSYS 进行分析。当传感探头受到 9.8 m/s^2 加速度时用 ANSYS 软件作静态分析, 可得到传感探头筒支梁的应变情况, 如图 2 所示。由图可知, 筒支梁中间部位应变值较其他部位

大,且较均匀。对传感探头作模态分析,得到系统的一阶弯曲振动频率为 525.51 Hz,传感探头一阶弯曲模态如图 3 所示。图 4 为简支梁上中间位置处竖直方向响应位移对频率的曲线图。

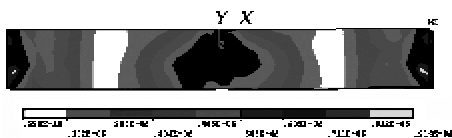


图 2 传感探头静态分析应变分布图

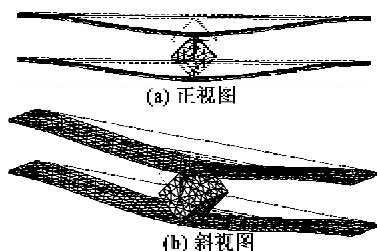


图 3 传感探头一阶弯曲模态示意图

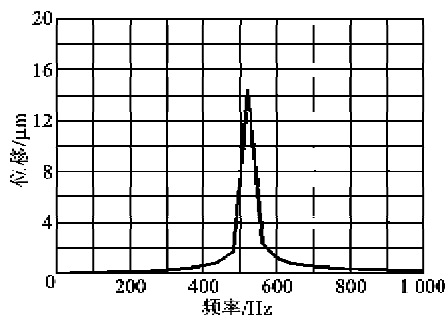


图 4 传感探头简支梁上中间位置竖直方向响应位移对频率的曲线图

3 结束语

本文设计了一种基于双简支梁结构的光纤光栅加速度传感器传感探头,它由双简支梁和质量块组成弹性系统,将双光纤光栅分别粘贴在两简支梁上下表面感测由振动引起的应变,从而检测振动加速度。该传感探头结构简单,线性度良好,能自动补偿温度噪声,谐振频率 525 Hz,测量灵敏度是单光纤光栅传感器的 2 倍,具有很好的工程应用前景。

参考文献:

- [1] 王静,冯德军,隋青美,等.基于拉杆结构的光纤布拉格光栅渗压传感器研究[J].光学学报,2010,30(3):686-691.
WANG Jing, FENG Dejun, SUI Qingmei, et al. Study of optical fiber Bragg grating seepage pressure sensor based on draw-bar structure[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 686-691.
- [2] 禹大宽,乔学光,贾振安,等.应用在油气管线的光纤光栅温度压力传感系统[J].激光技术,2007,31(1):12-

14.

YU Dakuan, QIAO Xueguang, JIA Zhen'an, et al. The fiber Bragg grating temperature and pressure sensing system applied in oil pipeline[J]. Laser Technology, 2007, 31(1): 12-14.

- [3] 王宏亮,黎华春,冯德全,等.高温高压油气井下光纤光栅传感器的应用研究[J].光电子·激光,2011,22(1):16-19.
WANG Hongliang, WU Huochun, FENG Dequan, et al. Research on the FBG sensor used for high temperature-pressure wells[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2011, 22(1): 16-19.
- [4] 蒲利春,朱潞.全息法制作 VLS 光栅及其性能研究[J].重庆理工大学学报:自然科学版,2011,25(10):120-126.
PU Lichun, ZHU Lian. Holography fabrication and research on VLS grating[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2011, 25(10): 120-126.
- [5] 刘波,牛文成,杨亦飞,等.新型光纤光栅加速度传感器的设计与实现[J].仪器仪表学报,2006,27(1):42-44.
LIU Bo, NIU Wencheng, YANG Yifei, et al. A novel fiber Bragg grating accelerometer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(1): 42-44.
- [6] GAGLIARDI G, SALZA M, FERRARO P, et al. Design and test of a laser-based optical-fiber Bragg-grating accelerometer for seismic applications[J]. Measurement Science and Technology, 2008, 19(8): 1-8.
- [7] 李国利,翟力欣,李志全.温度补偿型光纤光栅加速度传感探头结构设计[J].压电与声光,2013,35(4):505-507.
LI Guoli, ZHAI Lixin, LI Zhiquan. Structure design of temperature compensated fiber Bragg grating acceleration sensing probe[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2013, 35(4): 505-507.
- [8] AKIRA M, ISAMU Y. Fiber Bragg grating accelerometer for buildings and civil infrastructures[C]//S. I.; SPIE, 2001, 4330: 479-486.
- [9] 王广龙,冯丽爽,刘惠兰,等.基于 FBG 的新型加速度计研究[J].传感技术学报,2008,21(3):450-453.
WANG Guanglong, FENG Lishuang, LIU Huilan, et al. Study of novel accelerometer based on fiber Bragg grating[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, 21(3): 450-453.
- [10] 毕重颖,雷飞鹏.光纤光栅传感检测中交叉敏感问题的研究[J].光通信技术,2010,34(8):12-15.
BI Chongying, LEI Feipeng. Study on cross-sensitivity in fiber grating sensors and testing[J]. Optical Communication Technology, 2010, 34(8): 12-15.