

文章编号: 2095-4980(2014)05-0779-04

## 振动环境下微小间隙的光栅测量法

李春枝<sup>1</sup>, 陈颖<sup>1</sup>, 农绍宁<sup>1</sup>, 刘斌<sup>2</sup>

(1.中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621999; 2.合肥正阳科技公司, 安徽 合肥 230000)

**摘要:** 为测量振动环境下层间结构内部微小间隙的相对变化, 设计了一种用于狭小空间内的平直光栅传感器。根据指定应用条件研究设计光栅传感基片的封装方案及其主要技术指标, 并制作出平直光栅传感器。该传感器测量范围 0.5 mm~0.8 mm, 标定指标良好。通过试验应用证明, 采用光栅传感器可实现振动环境下微小间隙的直接测量, 且不用破坏原结构, 与传统方法相比, 数据真实可信, 满足测量精确度  $\mu\text{m}$  量级要求。

**关键词:** 光栅测量; 微小间隙; 振动; 传感器

**中图分类号:** TN959.6; TB123 **文献标识码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201405.0779

## Tiny clearance measurements by fiber grating sensor under vibration environment

LI Chun-zhi<sup>1</sup>, CHEN Ying<sup>1</sup>, NONG Shao-ning<sup>1</sup>, LIU Bin<sup>2</sup>

(1.Institute of System Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China;

2.High-tech Zone, Hefei Photoelectric Technology Limited, Hefei Anhui 230000, China)

**Abstract:** A new flat fiber grating sensor used in narrow space is designed for measuring dynamic tiny clearance under vibration environment. According to given application conditions, substrate encapsulation scheme and its main technical indicators of the grating sensor are designed, and the measurement range is from 0.5 mm to 0.8 mm with good calibration data. The experiment results show that the grating sensor can realize the tiny clearance measuring under vibration environment without damaging the original structure; and it can provide authentic data with the precision scale of  $\mu\text{m}$ , which is superior to traditional methods.

**Key words:** fiber Bragg grating; tiny clearance; vibration; sensor

机械、机电及武器装备在工作状态下通常需要对内部微小间隙变化进行监测, 以保证其正常运作。传统测位移法有三坐标测量机、激光三角形法、电荷耦合元件(Charge-Coupled Device, CCD)摄像检测法等, 这些测试手段主要应用于被测结构外部形状及曲面检测, 其构建方法复杂, 安装空间大, 在特定使用条件下受到限制。对于微小间隙测量, 由于不能对原结构作任何改动或破坏, 因此采用普通传感器如电涡流传感器等难以完成。近年来国内外研究学者提出多种用于解决封闭或狭小空间内的应变、温度测量技术方法<sup>[1-5]</sup>, 认为光纤光栅集敏感元件和信号传输于一体, 光栅传感结构简单, 体积小, 外形柔软可变, 适用于埋入微小间隙内部完成测量, 因而光纤光栅传感技术研究受到越来越多的重视和关注。吴付岗<sup>[6]</sup>等提出了一种用于测量层间间隙的光栅传感器, 但只能实现静态环境下的间隙位移测量, 对动态环境如振动过程中测量微小间隙的动态测量方法未作明确阐述。由于光纤光栅(FBG)是对某个波长进行反射, 在设计光栅传感测量方法时需考虑特殊应用背景和 FBG 性能指标。从光纤光栅研究文献<sup>[7-9]</sup>中发现, 影响光栅传感动态测量的精确度和可靠性主要因素包括基片结构设计以及在基片上封装光栅的开槽深度设计等, 这些参数互相关联, 是光栅传感设计与应用的关键所在。

### 1 光栅传感测量

要测量振动环境下微小间隙的动态变化, 需设计合适的光栅传感器。本文采用一种特殊航空铝的金属材料

收稿日期: 2013-10-29; 修回日期: 2014-01-07

基金项目: 国防科工局技术基础科研资助项目(H112012A002)

作为基片来封装光栅传感器。其测量动态间隙的基本原理是当外部作用使基片发生弯曲时，基片所受到的弯曲应力会使基片上的光栅产生应变，即将光栅径向向压力转化为光栅的轴向应变，从而导致光栅波长的偏移，通过解调基片上下表面 2 个光栅的波长差值即可得到结构层间动态间隙的变化值。

### 1.1 传感基片厚度、宽度设计

本次设计光栅传感器的测量范围是 0.5 mm~0.8 mm，最初设计留有余量，传感器测量范围要大于 0.45 mm~0.85 mm。图 1 中凹柱面的半径为  $r_1$ ，凸柱面的半径为  $r_2$ ，设凸凹柱面刚开始与基片同时接触时的柱面层间间隙为  $Y$ ，弹片的长度为  $2L$ ，弹片的厚度为  $H$ 。

### 1.2 传感基片长度设计

如图 1 所示，基片长度  $2L$  与凹柱面半径  $r_1$  之间的关系为：

$$2L = 2\sqrt{r_1^2 - [r_1 - (Y - H)]^2} \quad (1)$$

为了能测量 0.85 mm 的最大间隙，凸凹柱面刚开始与基片同时接触时的层间间隙  $Y$  应比 0.85 mm 稍微大一些，取为 1 mm，综合式(1)和被测间隙大小设计基片长度为 26 mm。

### 1.3 传感基片开槽深度设计

基片开槽深度设计如图 2 所示。考虑裸光栅光纤直径为 0.125 mm，光栅轴线离开基片中性层的距离为：

$$d = \frac{H}{2} - a + r = 0.2 - a + 0.0625 = 0.2625 - a \quad (2)$$

通过研究发现，封装光栅入基片时，光栅的轴线离开基片中性层距离越大，则当基片发生弯曲时，光栅的应变就越大，即光栅测量的灵敏度就越高。

在光栅应变计算中，将光栅基片简化为简支梁模型，根据材料力学知识可知，当载荷  $P$  位于梁中点时的弯矩为：

$$M = \frac{P \cdot 2L}{4} \quad (3)$$

距离简支梁中性层  $d$  处的光栅的应变为：

$$\varepsilon = \frac{M}{EI} d \quad (4)$$

式中： $E$  和  $I$  分别为梁的杨氏模量和惯性矩， $M$  为梁的弯矩。

简支梁中点处形心的挠度(即弯曲程度)为：

$$y = \frac{P \cdot (2L)^3}{48EI} \quad (5)$$

联合式(2)~式(5)，可得光栅的应变为：

$$\varepsilon = \frac{3y \cdot d}{L^2} = \frac{3y \cdot (0.2625 - a)}{12.85^2} \quad (6)$$

由上式可知，挠度  $y$  越大，光栅应变变量就越大；开槽深度  $a$  越大，光栅应变变量越小。当凸凹柱面刚与基片接触时，挠度  $y=0$ ，则光栅应变为零；假设光栅紧贴基片表面封装，开槽深度  $a$  最小为 0.125 mm，在 0.5 mm~0.8 mm 量程内，光栅应变为  $749 \mu\varepsilon$ ，对应光栅波长约为 899 pm。此设计虽然在一定程度上使基片微型化，但降低了光栅传感器使用可靠性。综合考虑基片设计尺寸见图 3。

本文设计传感基片与以往设计的基片相比具有以下优点：1) 基于开槽深度为 0.18 mm 的设计，在封装时可将带有涂覆层的光纤光栅通过处理后埋入基片，它能避免因只封装玻璃纤维纤芯，其纤芯非常细，使用时易折断而导致光路不通等问题，从而提高光栅传感可靠性；2) 在基片两侧有独特的安装小块设计以便于固定在曲面凸起部位，这在一定程度上解决了在使用中因基片发生脱落或移位而影响测量精确度问题。

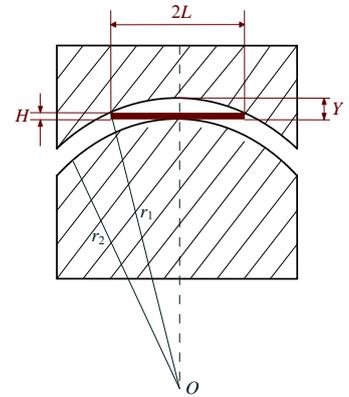


Fig.1 Schematic of clearance measuring  
图 1 基片测量间隙示意

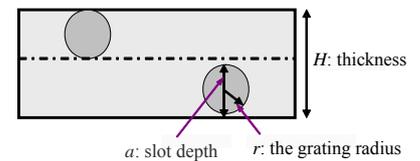


Fig.2 Slot depth of substrate  
图 2 基片开槽深度设计

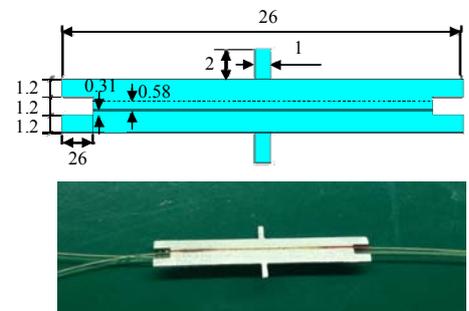


Fig.3 Flat-beam-based FBG  
图 3 平直光栅传感器

## 2 试验应用

### 2.1 标定方法

试验前采用特定标定装置对光栅传感器进行标定，标定装置由 3 个数字千分表、2 个半球凹凸柱面及升降平台组成，见图 4。标定时，首先将光栅传感器放置在凸柱面顶部，用快干胶将基片两侧的小块轻微固定在凸柱面上，再把凸柱面放入标定装置的凹槽中，并调整好凹凸柱面相对位置。在测量范围内选取不同测量点，测试出标准间隙，即凹凸柱面完全接触时千分表的数值减去初始测试时 3 个数字千分表读数的平均值，然后确定与解调波长的对应关系，得到一组光栅波长差值与标定间隙值之间的对应关系<sup>[8]</sup>，如表 1 所示。标准间隙与波长差拟合曲线如图 5 所示。

表 1 传感器标准间隙和波长差对应关系

Table1 Relationship between standard gap and difference wavelength of two FBGs

standard gap/ $\mu\text{m}$	890.3	860.0	829.3	797.7	768.7	738.7	709.3	678.3	649.0	615.7	589.0	559.0	526.7	496.7	484.3
difference wavelength /nm	2.181	2.342	2.522	2.712	2.867	3.027	3.192	3.360	3.519	3.693	3.829	3.949	4.077	4.191	4.230

### 2.2 振动试验

试验前将夹具固定在振动台上，安装装置的下件，再将光栅传感器固定在下件中部凸起面，然后安装上件，如图 6 所示，另外在装置中部安装电涡流位移计。光栅传感器通过光纤 FC/PC 跳线与光栅解调仪相连，再经 USB 接口与计算机进行通信和信号采集。振动试验加载提供从 10 Hz~300 Hz 范围内不同正弦信号的单频激励，试验时采集不同激励下的数据进行动态间隙分析。

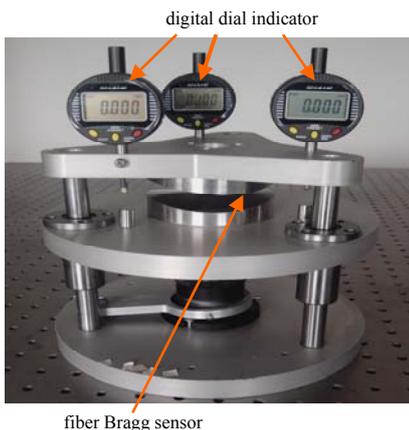


Fig.4 Arched-beam-based FBG  
图 4 标定装置

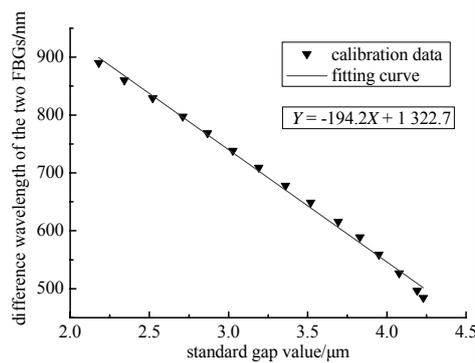


Fig.5 Fitting curve of calibration  
图 5 标准间隙与波长差拟合曲线

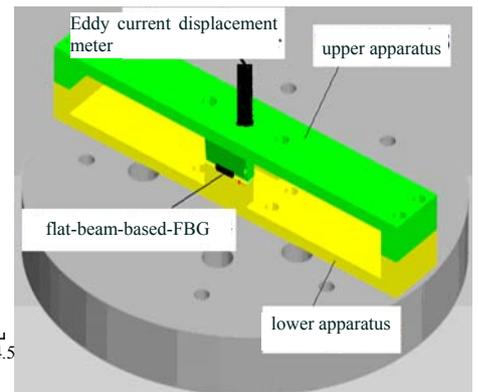


Fig.6 Experimental apparatus  
图 6 试验模拟装置

### 2.3 结果分析

图 7 分别表示了激励频率为 60 Hz,120 Hz，解调频率为 3 kHz 时所得间隙曲线。在正弦激励加载时，激励频率越低，采用解调频率越高，所得结果更精确反映间隙位移的相对变化。从数据看，使用研制光栅传感测量层间间隙的测试方法可行。总体上说，间隙变化与加载量级以及激励频率有关，数据在一定程度上真实反映被测量的层间间隙动态变化过程。

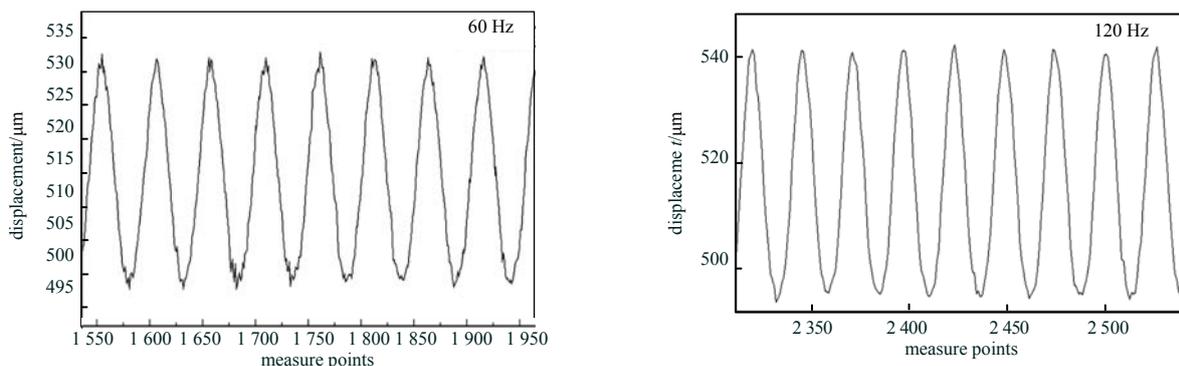


Fig.7 Clearance with excitation frequencies of 60 Hz and 120 Hz at demodulation frequency 3 000 Hz  
图 7 激励频率 60 Hz, 120 Hz 在解调频率 3 kHz 的间隙曲线

## 2.4 比对验证

为校核光栅传感器测得值是否准确, 与同精确度等级的电涡流传感器进行比对。试验中涡流传感器用以测量上下件中部间隙变化, 电涡流传感器测量精确度为  $5\ \mu\text{m}\sim 10\ \mu\text{m}$ 。从表 2 看出采用 2 种方法得到结果基本一致, 测量间隙值亦基本接近, 二者相对偏差在 7% 以内, 说明在相同测量精确度等级的要求下, 光栅传感测量动态间隙的方法可行, 测试结果真实可信。

表 2 光栅传感与涡流传感测试间隙数据  
Table 2 Clearance by FBG sensor & eddy current displacement meter under sinusoidal excitation

sinusoidal excitation/Hz	FBG sensor/ $\mu\text{m}$	eddy current displacement meter/ $\mu\text{m}$	relative deviation/(%)
10	530.5	505	5.0
60	526.6	501	5.1
120	539.3	507	6.4
240	540.1	511	5.7
300	530.8	503	5.3

## 3 结论

文中针对振动过程中微小动态间隙的光栅传感测量方法进行了分析, 设计了光栅传感结构的基片封装方案及其主要技术指标, 并研制了动态光栅传感器; 利用所研制光栅传感测量模拟装置上下件相对间隙, 并与涡流传感器进行比对。结果表明: 采用光栅传感器实现狭小空间内动态间隙位移的直接测量方法合理可行, 与传统方法相比数据真实可信。本文阐述了传感器参数设计与性能指标匹配关系, 在克服传统测量手段由于测量空间或环节等限制所带来的技术难题等方面, 具有积极的工程参考价值。

### 参考文献:

- [1] June J, Nam H, Lee J H, et al. Simultaneous measurement of strain and temperature using a single fiber Bragg grating written in an erbium:ytterbium-doped fiber[J]. Applied Optics, 2000,39(7):118-120.
- [2] 吴朝霞, 吴飞. 光纤光栅传感原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2011. (WU Chao-xia, WU Fei. The Principle and Application of Fiber Grating Sensing[M]. Beijing:National Defence Industry Press, 2011.)
- [3] 冯艳. 金属化保护的光纤布拉格光栅温度传感模型[J]. 光学学报, 2009,29(2):336-341. (FENG Yan. Metal protection of fiber Bragg grating temperature sensing model[J]. Journal of Optics, 2009,29(2):336-341.)
- [4] 周开明, 王艳. 一种宽频带小型化光纤电场测量[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2010,8(2):30-32. (ZHOU Kai-ming, WANG Yan. A wideband miniaturization of optical fiber electric field measurement[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information, 2010,8(2):30-32.)
- [5] SHEN R S, ZHANG J, WANG Y. Study on high-temperature and high-pressure measurement by using metal-coated FBG[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2008,50(5):1138-1140.
- [6] 吴付岗, 姜德生. 窄间隙条件下基于光纤 Bragg 光栅的曲面位移测量[J]. 机械工程学报, 2007,43(7):231-234. (WU Fu-gang, JIANG De-sheng. Narrow clearance based on the surface of optical fiber Bragg grating displacement measurement[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007,43(7):231-234.)
- [7] XIA Hai-yun, WANG Chao. Ultra fast and precise interrogation of fiber Bragg grating sensor based on wavelength-to-time mapping incorporating higher order dispersion[J]. Journal of Light Wave Technology, 2010,28(3):252-261.
- [8] 张自嘉. 光纤光栅理论基础与传感技术[M]. 北京:科学出版社, 2009. (ZHANG Zi-jia. Fiber Bragg Grating Theory Foundation and Sensing Technology[M]. Beijing:Science Press, 2009.)
- [9] 孙丽. 光纤光栅传感应用问题解析[M]. 北京:科学出版社, 2012. (SUN Li. Application Problems Analysis of Fiber Grating Sensing[M]. Beijing:Science Press, 2012.)

### 作者简介:



李春枝(1972-), 女, 四川省绵阳市人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为动态测试技术. email: liczz@sina.cn.

陈颖(1975-), 女, 重庆市人, 硕士, 教授, 主要研究方向为结构力学.

农绍宁(1975-), 男, 广西壮族自治区南宁市人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为仿真计算.

刘斌(1976-), 男, 湖南省湘潭市人, 博士, 主要研究方向为光学测试.