

# 一种布拉格光纤光栅加速度传感器

戴 锋, 黄国君

(中国科学院力学研究所工程科学部, 北京 100080)

**提要:** 本文介绍了一种基于布拉格光纤光栅 (FBG) 的加速度传感器设计。为了克服等截面悬臂梁的局限性, 该设计采用等强度悬臂梁的形式。结果表明: 该种光纤加速度传感器具有良好的稳定性和较高的分辨率 (0.005g), 适合海洋平台等大型工程结构的加速度测量。

**关键词:** 加速度传感器; 布拉格光纤光栅; 等强度悬臂梁

**中图分类号:**                   **文献标识码:** A                   **文章编号:** 0253 - 2743(2005)01 - 0026 - 02

## An acceleration sensor based on Fiber Bragg Gratings

DAI Feng, HUANG Guo - jun

(Division of Engineering Science, Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** A novel design of the acceleration sensor based on Fiber Bragg Gratings (FBG) is presented. The FBG was glued on the surfaces of a triangle cantilever beam of constant bending rigidity to avoid the inhomogeneity of the longitudinal strain present in a uniform cantilever beam. The test result indicated that it behaves well with high stability and high resolution up to 0.005g and thus is suitable to the application to the acceleration measurement for large engineering structures, such as offshore platforms.

**Key words:** acceleration sensor, Fiber Bragg Grating, triangle cantilever beam

### 1 引言

布拉格光纤光栅 (FBG) 由于其优越的性能, 除了广泛应用于通讯领域以外, 近几年来在传感领域也受到越来越多的关注。传统的电测加速度传感器基于电阻、压电、压阻、电容等原理工作, 容易受到电磁场的干扰。另外, 一个传感器对应一个通道, 使得测点多时布线众多。开发基于 FBG 的光学加速度传感器, 可以避免电磁场的干扰, 并且能够远距离传输信号而无需额外的信号放大装置, 测量精度高。同时, FBG 系统因其具有的独特的波分复用能力, 可大大减少布线的工作。对于工程结构的安全监测, 往往需要测量多个物理量 (如应变、加速度、温度等), 基于 FBG 可以开发多种物理量的传感器, 从而可实现同一传感系统和仪器多物理量的测量, 充分发挥 FBG 传感系统测点多、测量信息大的优点, 这在工程应用中具有特殊的实际价值。本文介绍的 FBG 加速度传感器是针对海洋平台加速度测量的特点设计的, 海洋平台加速度频率较低 (< 10Hz), 但是对灵敏度的要求却比较高<sup>[1]</sup>。将它与我们已开发的 FBG 应变、温度和压力传感器<sup>[2-3]</sup>一起组成光纤传感器网络, 可实现海洋平台监测的光纤一体化。

### 2 测量原理

#### 2.1 FBG 的传感原理<sup>[4]</sup>

FBG 对满足以下 Bragg 定理的光波波长进行反射:

$$\lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda \quad (1)$$

式中:  $n_{eff}$  为有效折射系数;  $\Lambda$  为光栅间距。当 FBG 产生轴向应变  $\epsilon$  时,  $\Lambda$  以及  $n_{eff}$  将发生变化, 从而引起  $\lambda_B$  的平移, 平移量  $\Delta\lambda_B$  为:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1 - P_e) \epsilon \quad (2)$$

式中:  $P_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]$  为有效弹光常数, 其中  $p_{11}$  和  $p_{12}$  为弹光张量分量 (Pockel 系数),  $\nu$  为光纤材料的泊松比。因此可定义应变敏感系数

$$K = \frac{1}{\lambda_B (1 - P_e)} \quad (3)$$

从而

$$\Delta\lambda_B = K \lambda_B \epsilon \quad (4)$$

另外, 环境温度发生变化  $\Delta T$  时, 由于热膨胀和热光效应, 也将引起  $\lambda_B$  和  $n_{eff}$  的变化, 相应的  $\lambda_B$  平移为:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (\alpha + \beta) \Delta T \quad (5)$$

式中:  $\alpha$  为热膨胀系数,  $\beta = \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T}$  为热光系数。因此类似地可以定义温度敏感系数

$$K_T = \frac{1}{\lambda_B (\alpha + \beta)} \quad (6)$$

从而

$$\Delta\lambda_B = K_T \lambda_B \Delta T \quad (7)$$

由 (4) 和 (7) 式可知: 可通过光学装置检测出  $\lambda_B$  后获得应变和温度变化的信息。

#### 2.2 加速度传感器的工作原理

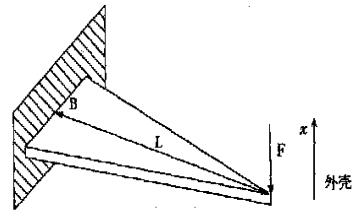


图 1 等强度梁受力示意图

等截面悬臂梁在荷载作用下梁的表面应变沿轴向是非均匀分布的, 容易导致粘在表面上的光栅的输出光谱展宽、畸变, 严重时甚至导致光栅啾啾化或波峰的劈裂, 从而使加速度的测量误差增加, 在结构上使用等强度悬臂梁的形式能有效避免这种情况发生。

对于图 1 所示的等强度悬臂梁, 当梁的三角形顶端受到力  $F$  作用时, 梁的上下两个表面处的轴向应变是均匀分布的, 其大小为<sup>[5]</sup>:

$$\epsilon = \frac{6FL}{EBt^2} \quad (8)$$

式中:  $E$  为悬臂梁材料的杨氏模量,  $L$  为悬臂梁的总长度,  $B$  为悬臂梁的底部宽度,  $t$  为梁的厚度。忽略悬臂梁自重的影响, 根据等强度悬臂梁端部的挠度公式可以得到梁的等效弹簧刚度为:

$$K = \frac{EBt^3}{6L^3} \quad (9)$$

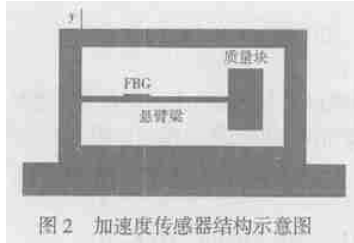


图2 加速度传感器结构示意图

图2表示等强度梁加速度计的结构示意图, 图中  $x$  为空间固定坐标,  $y$  为外壳的随体坐标, 当结构随支座处在振动情况下时, 质量块与外壳产生  $y$  的相对位移, 于是在  $y$  坐标系下忽略阻尼时, 质量块的运动方程为:

$$M \ddot{y} + Ky = -Ma_g \quad (10)$$

式中:  $M$  为质量块的质量,  $a_g$  为外壳随支座运动在  $x$  坐标系中的加速度, 所以,  $-Ma_g$  表示  $y$  坐标系中的惯性力。等式两边同除以  $M$  可得:

$$\ddot{y} + \omega_0^2 y = -a_g \quad (11)$$

其中  $\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{M}}$  为悬臂梁-质量块系统的固有频率。

设支座简谐运动的频率为  $\omega$ , 于是其运动的复表示为:

$$x_g = X_g e^{i\omega t} \Rightarrow a_g = -X_g \omega^2 e^{i\omega t} \quad (12)$$

式中  $X_g$  表示位移振幅, 于是  $X_g \omega^2$  为加速度振幅, 记为  $A_g$ 。设端部质量块的位移振幅为  $Y$ , 则其运动可表示为:

$$y = Y e^{i\omega t} \quad (13)$$

将(12)和(13)式代入(11)式, 不难得到:

$$Y = \frac{1}{-1 + (\omega/\omega_0)^2} \frac{A_g}{2} \quad (14)$$

它表示质量块的位移振幅  $Y$  与支座加速度振幅之间的关系, 当支座频率远较固有频率低时,  $1 - (\omega/\omega_0)^2 \approx 1$ , 于是可得:

$$Y \approx \frac{A_g}{2} \quad (15)$$

即质量块的位移振幅与所测的支座加速度振幅成正比, 与支座振动频率无关。将  $F = KY$  带入(8)式并联立(4)、(15)式

和  $\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{M}}$  可得到加速度振幅  $A_g$  与光纤波长变化振幅  $B$  的关系:

$$A_g = \frac{K EBt^2}{6ML} \cdot B = K_a \cdot B \quad (16)$$

这里

$$K_a = \frac{K EBt^2}{6ML} \quad (17)$$

为加速度灵敏系数。

### 3 加速度传感器的制作与实验系统

试验中制作的等强度悬臂梁为钢质, 长度  $L = 60\text{mm}$ , 底部宽度  $B = 30\text{mm}$ , 厚度  $t = 1\text{mm}$ , 杨氏模量  $E = 208\text{GPa}$ 。梁端质量块的质量  $M = 0.29\text{Kg}$ 。由此得到固有频率  $\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{M}}$  的设计值为  $20.5\text{Hz}$ 。

为了采集到 FBG 的波长数据, 采用 MOI 公司提供的 FBG

- SLI 系统作为波长解调设备, 该设备拥有 4 通道, 每个通道能以  $108\text{Hz}$  的采样率同时测量 64 个 FBG, 设备检测波长的分辨率为  $1\text{pm}$ , 精度为  $5\text{pm}$ 。根据我们的实验结果<sup>[2]</sup>。光栅直接粘贴在钢结构上时, 若胶底层很薄, 其应变敏感系数可达到相应的理论值:  $K = 0.83\mu\text{m}/\text{pm}$ 。由此, 根据解调仪的分辨率和(17)式, 可得到加速度测量灵敏系数的设计值为:  $K_a = \frac{5}{1000}\text{g}/\text{pm}$ 。FBG-SLI 的加速度测量系统较传统的应变式加速度测量系统在精度和稳定性上有较大的优势。

加速度测量系统如图3所示, 采用重力分解法<sup>[6]</sup>进行标定。

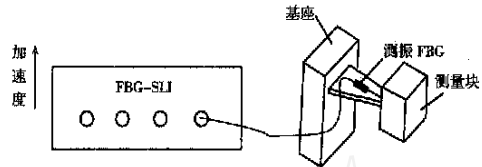


图3 基于FBG-SLI的加速度测量系统

### 4 实验结果与讨论

经过标定实验, 本 FBG 加速度计的灵敏系数为  $\frac{5}{1000}\text{g}/\text{pm}$ ; 固有频率为  $18.0\text{Hz}$ , 与设计值较为接近, 说明我们的设计和制备工艺是合理的。

为了传感器能长时间使用, 消除粘贴不牢固带来的漂移, 需要使用环氧型粘合剂将光纤光栅粘贴到悬臂梁的表面, 并且加温直至粘合剂固化。

FBG 不仅对变形敏感, 同时对温度也相当敏感, 一般来说需要另外的 FBG 进行温度补偿。但由于温度的变化相对于结构振动是一个缓慢的过程, 只影响 FBG 的加速度计测量信号的静态部分, 它完全可由数据处理过程中的傅立叶变换消除掉。因此, 本 FBG 加速度计未使用另一根用于温度补偿的 FBG。

### 5 结论

本文中设计的加速度传感器制作工艺简单, 通过等强度悬臂梁的设计方法避免了 FBG 中反射峰被展宽的缺点, 保证了传感器的精度, 并且传感器性能稳定。与 MOI 公司提供的波长解调仪所组成的加速度传感系统能达到较高的分辨率, 非常适合大型建筑物、海洋平台等环境下的结构加速度监测。与现有 FBG 的应变和温度等物理量测量的系统组合成传感网络, 可实现多个物理量的综合测量, 具有很好的工程应用前景。

#### 参考文献

- [1] 申仲翰, 赵强. 11-4 平台应变和加速度监测数据处理与结构分析, 中国科学院力学研究所研究报告, IMCAS STR-96030, 1996.
- [2] 黄国君, 殷昀毓, 戴锋, 阎常珍. 光纤布拉格光栅应变传感器的灵敏性及疲劳可靠性研究[J]. 激光杂志, 2003, 24(6): 45-47.
- [3] 黄国君, 殷昀毓, 戴锋. 光纤布拉格光栅传感系统在海洋平台监测中的应用研究[J]. 中国造船, 2003, 44, 增刊: 453-461.
- [4] Othono A. Fiber Bragg gratings[J]. Rev. Sci. Instrum., 1997, 68(12): 4309-4321.
- [5] 戴少度, 材料力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994, 40-42.
- [6] 单轴摆式伺服线加速度计试验方法[S], GB1037-90, 1995.