

基于 D 型光纤 Bragg 光栅的加速度传感器

陈郑斌 董小鹏 周金龙 厦门大学光波技术研究所 361005

摘要:本文介绍了一种新型的基于 D 型光纤 Bragg 光栅(D-FBG)测量加速度信号的方案,并对测量系统进行了理论分析和实验测量。该加速度传感器具有尺寸小、质量轻、结构简单、灵敏度高优点,可用于测量低频振动(0.1 Hz 数量级)和小幅值的加速度信号。试验数据表明基于该方案的测量灵敏度可达到 $563.67\mu\text{e}/\text{g}$,最小分辨力为 $1.15 \times 10^{-3}\text{g}$ 。

关键词:加速度, D 型光纤, FBG

0.引言

近年来,光纤传感器由于其本质安全、不受电磁干扰、灵敏度高、质量轻、体积小、易于复用、可远距离遥测、能嵌入工程结构等特点越来越受到人们的关注。目前,在对于光纤加速度计的报道中,主要有以下几种类型:强度调制型、相位调制型、波长调制型和偏振态调制型。光纤 Bragg 光栅(FBG)可以将特定波长的正向传输模的功率部分或者全部转移到反向传输模,从而改变入射光的光谱。光学特性表现为一个反射式的光学滤波器。由于 FBG 中心波长的变化受其轴向拉伸或者压缩应力影响,基于 FBG 的加速度传感器引起了人们极大的兴趣。Todd 等人在两端固定的上、下两块平行矩形平板的中间放置一个质量块,下方的矩形平板底部粘有 FBG,利用质量块的惯性带动平板弯曲实现加速度测量;Mita 设计了一个由 FBG、“L”型支架、球形重物和弹簧组成的传感系统,将外界的加速度振动信号转换为对 FBG 的轴向拉伸或压缩,从而实现加速度测量;T. A. Berkoff 等人设计了一个单自由度振荡系统,FBG 被植入一层柔性材料中,利用振动产生的应力使 FBG 的中心波长发生改变。

普通的光纤 Bragg 光栅用来测量加速度等振动信息通常都需要将光栅粘贴在类似弹性梁这种用来产生应变的结构之上。因为胶水的蠕变、光纤与结构的材料性能差异等因素,测得的弯曲信息会有较大的误差;而且传感头的尺寸较大,灵敏度也不高。D 型光纤 Bragg 光栅由于其结构的非圆对称性,在选择合适的参数下具有比常规 Bragg 光纤光栅高 80 倍左右的弯曲灵敏度。D-FBG 对弯曲敏感是其本征特性,不需要任何的附加结构或者封装,因此相比常规 Bragg 光栅具有高灵敏度、传感头尺寸小、结构简单的优点。

1.理论分析

D 型光纤,指光纤横截面形状像字母 D 的光纤。由于其结构具有非圆对称性,所以外界与光纤的相互作用比普通单模光纤强。这使得 D 型光纤可以应用于能量耦合、折射率传感、弯曲传感等许多场合。图 1 是我们实验室与上海大学上海市特种光纤重点实验室合作、设计并制作的一种 D 形光纤的截面电镜扫描图,其直径为 $127\mu\text{m}$,高度为 $81.1\mu\text{m}$ 。

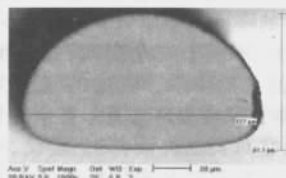


图 1 D 形光纤截面电镜扫描图

D-FBG 能被用于测量应变、温度、弯曲等参量。当外界环境参数改变时,光栅的中心波长也将发生漂移。Bragg 波长漂移主要由下式决定:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\epsilon_z + \lambda_B(1 + \xi)\Delta T \quad (1)$$

其中, P_e 是弹光系数,是热光系数。

测量系统如图 2 所示,整个系统由以下几部分组成:窄带光源、传感头、3dB 耦合器和信号处理电路。在实际测量中,窄带光源发出的信号光经 3dB 耦合器进入传感头,当传感头检测到外部加速度信号,会将外部振动信号转换成变化的光强信号并经 3dB 耦合器进入信号处理电路,最终可以获得包含加速度信息的电信号。



图 2 测量系统原理图

图 3 传感头内部结构图

在传感系统的设计中,传感头的设计是整个系统的重点。传感头设计得好坏,直接关系到整个测量系统的灵敏度、测量范围、工作稳定性和适用场合。传感头的内部结构如图 3 所示,传感头的设计采用悬臂梁结构,在一段长为 $L=26\text{mm}$ 的 D 型光纤上刻有长度为 $l=10\text{mm}$ 的 Bragg 光栅,光纤一端固定在铝盒上,一端粘贴质量为 $m=0.05\text{g}$ 的空心圆柱型质量块。质量块被夹在两个小圆柱之间,其作用是用以限制光纤的横向振荡。当传感头检测到外部振动信号,由于质量块的惯性作用,会驱动 D 型光纤在竖直方向振动。D 型光纤弯曲使得在光栅处产生应变,从而导致 D-FBG 反射光的中心波长发生漂移。

若加速度 a 作用于传感头,D 型光纤发生弯曲,其曲率方程可以表示为:

$$f(x) = -\frac{Px^2}{6EI_z}(3L-x) \quad (2)$$

其中, P 是自由端的载荷; E 是光纤的弹性模量; I_z 为梁的横截面图形对中性轴的惯性矩,代入实验中使用 D 型光纤的参数,计算得出 $I_z=3.925854 \times 10^{-18}$ 。在发生微弯的情况下,梁弯曲的曲率 $\rho(x)$ 可以近似表示成:

$$\frac{1}{\rho(x)} = \frac{d^2 f}{dx^2} = \frac{P(x-L)}{EI_z} \quad (3)$$

在光栅处,由弯曲导致的纤芯平均应变量为:

$$\epsilon = K_b \cdot \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

K_b 是 D 型光纤弯曲灵敏度,忽略在弯曲的过程中产生的非均匀应变,并且近似 $(x=l/2)$ 处的曲率为光栅的曲率,可以得到光栅纤芯轴向平均应变的表达式:

$$|\epsilon| = \frac{K_b m(L-l/2)}{EI_z} a \quad (5)$$

综合考虑以上各式,在忽略温度影响的条件下,光栅中心波长的相对漂移量和加速度的关系式可以表示为:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} = \frac{K_z K_b m(L-l/2)}{EI_z} a \quad (6)$$

k_z 为应变灵敏度, 对于石英光纤 $k_z=0.784$ 。令 $K=0.784 \cdot k_b$, 代入实验数据: $K=1.4 \times 10^{-5} \text{m}$, $\lambda_B=1548.85 \text{nm}$ 。可以计算出系统的理论灵敏度值为: $611.86 \mu\text{e/g}$ 。

谐振频率可以用来衡量传感器的频率响应度。本文利用 ANSYS 软件对基于悬臂梁结构传感头的谐振频率进行仿真。为建立的三维坐标系传感头模型图, 图中的星号为质量块, 直线为悬臂梁。梁的横截面尺寸以及惯性矩均以实际使用的 D 型光纤的参数 ($E=7.27 \times 10^{10} \text{Pa}$, $\rho=2.32 \times 10^3 \text{kg/m}^3$, $I_z=3.925854 \times 10^{-18}$, 泊松比为 0.16) 为准。根据软件仿真, 可以得到传感头的第一阶谐振频率为 4.9618Hz。

光栅的中心波长漂移可以使用边缘滤波法解调。在本实验中, 利用的是 D-FBG 光谱上升沿的线性部分。图 4 所示为 D-FBG 光谱图和窄带激光光谱图。根据试验测量数据, D-FBG 的中心波长为 1548.94nm, 并且在 1548.75nm 到 1548.94nm 之间具有较好的线性度。可将窄带激光所发出信号光的中心波长设定在 1548.85nm, 也就是 D-FBG 光谱上升沿的中点。当外界的加速度振动信号导致光栅的中心波长发生漂移时, 而窄带光源的中心波长和光功率是固定的, 实现了光电检测电路对窄带光源中心波长 L 处光功率的检测。只要光栅中心波长的漂移处于光谱上升沿的线性范围之内 (1548.75nm 到 1548.94nm), 就能得到线性度较好的光强信号。

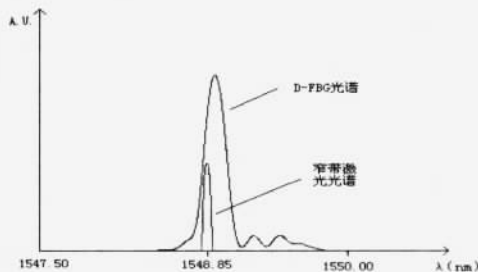


图 4 边缘滤波法解调示意图

2. 实验结果与讨论

我们采用自行设计的单摆, 将传感头放置于单摆上, 利用重力加速度对传感器进行标定。如图 5 所示为实验设计的单摆, 摆长 $L_a=1.39 \text{m}$, 摆锤质量 $m_p=1.105 \text{kg}$ 。单摆的谐振频率理论值由下式计算得到:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_a/g}} \quad (7)$$

代入数据计算可得 $f_s=0.43 \text{Hz}$ 。为测量单摆运动的轨迹, 我们在单摆支架的顶端放置一个照明投射用的光源, 当给单摆施加一个起始的角度 θ , 可以测得摆锤的投影点与静止时投影点之间的距离 S_a , 则端点上摆锤的加速度 a 可以计算为 $a=g\sin[\arctan(S_a/L_a)]$ 。



图 5 单摆标定加速度计

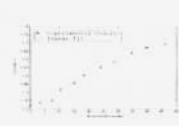


图 6 加速度值与电压值拟合曲线

在室温为 19℃ 时, 将窄带激光的中心波长和功率分别设置为 1548.85nm 和 0.6mW。对单摆施加了角度 $\theta=2.7^\circ$ 。测量之前对 D-FBG 的弯曲方向进行了校准, 使得其弯曲方向垂直于 D-FBG 的侧平面, 这样做的目的是使 D-FBG 弯曲灵敏度最大。在对所有的参数进行设置之后, 得到了输出电压值与加速度值之间的关系。图 6 为所测得的输出电压值和加速度值的拟合曲

线。从拟合所得的曲线可以看出, 加速度值和测量得到的电压值具有较好的线性度。试验结果证明, 利用 D-FBG 对加速度进行测量, 是切实可行的。在我们的试验中, D-FBG 的自由端所粘贴的质量块 m 只有 0.05g, 可以通过增加质量块 m 的质量来提高系统的灵敏度; 也可以通过选择适当的梁长即 D 型光纤的长度 L 来提高系统的灵敏度。以上方法可以提高系统的灵敏度, 但是这对系统的谐振频率有一定的影响。在实际的工程设计中, 可根据实际情况进行选择。

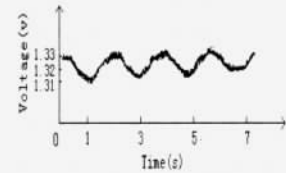
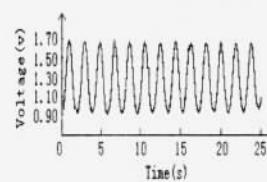


图 7 传感器输出电压波形 图 8 最小分辨力电压输出波形

图 7 是单摆刚开始振动时 ($a=40 \times 10^{-3} \text{g}$) 的电压输出波形, 所得到的曲线是一个较好的正弦波。电压的峰值和频率信息分别包含了加速度的幅值和振动的频率信息。图 8 为传感器在最小分辨力时的电压输出波形, 此时单摆的加速度值为 $a=1.15 \times 10^{-3} \text{g}$ 。试验数据表明, 传感器的测量灵敏度达到 $563.67 \mu\text{e/g}$, 最小分辨力为 $1.15 \times 10^{-3} \text{g}$ 。理论分析和实际测量结果较为一致, 约有 7.8% 的误差。

3. 结论

本文提出了一种新型的基于 D-FBG 的加速度测量方案, 并对此作了理论分析和试验测量。由于 D-FBG 比普通 FBG 具有更高的弯曲灵敏度, 所以可以利用 D-FBG 实现对加速度的高灵敏度测量, 此外悬臂梁自由端的质量块直接粘贴在 D 型光纤上, 这样增加了梁的机械弯曲效应, 并克服了可能产生的啁啾现象和由于胶水蠕变带来的影响。试验结果表明, 传感器的测量灵敏度达到 $563.67 \mu\text{e/g}$, 与理论分析值较为一致, 最小分辨力可以达到 $1.15 \times 10^{-3} \text{g}$ 。总的来说, 基于 D-FBG 的加速度传感器可以实现低频率和小幅值的加速度测量。同时具有尺寸小、质量轻、结构简单等优点, 具有一定的使用价值。

参考文献

- [1] Todd, M. D., Johnson, G. A., and Althouse, B. A., etc., "Flexural beam-based fiber Bragg grating Accelerometers," *Photon. Technol. Lett. IEEE*. 10(11), 1605-1607 (1998)
- [2] Mita, A., "Fiber Bragg Grating-Based Acceleration Sensors for Civil and Building Structures," *International Workshop on Present and Future in Health Monitoring*. Germany: Bauhaus-University Weimar, 1-7 (2000)
- [3] Berkoff, T. A., Kersey, A. D., "Experimental demonstration of a fiber Bragg grating accelerometer," *Photon. Technol. Lett. IEEE*. 8(12), 1677-1679 (1996)
- [4] 周金龙, 董小鹏, 石志东, "D 形光纤 Bragg 光栅弯曲灵敏度的理论和实验研究," *光子学报*. 35, 1734-1737 (2006)