

文章编号: 0253-2239(2003)03-0293-04

用于机械振动实时监测的光纤光栅有源传感装置*

余有龙¹ 耿淑伟² 谭华耀³

1 黑龙江大学光纤技术研究所, 哈尔滨 150080
2 哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨 150008
3 香港理工大学电机工程系, 香港

摘要: 把一对中心反射波长分别为 1562.11 nm 和 1562.71 nm 的光纤光栅粘贴在均质、等厚、等腰三角形悬臂梁上下表面作为环形腔光纤激光器端镜, 当机械振动激励自由端时, 通过观测激光输出脉冲, 对施加于自由端的机械振动的频率进行了实时监测; 观察两光栅波长漂移量差值的变化, 可在 0~6.1 mm 的范围内判断所测振动的振幅。低于 100 Hz 时, 实验结果与实际值基本吻合。

关键词: 传感器技术; 光纤光栅; 机械振动; 悬臂梁; 光纤激光器; 线性腔

中图分类号: TP212.1 文献标识码: A

1 引 言

本征型、波长编码的光纤光栅传感器可用来对应变、温度直接进行监测^[1,2], 位移、力、电磁场等物理量若借助某种装置能引起布拉格波长漂移, 光纤光栅也可对其进行感测^[3,4]。机械振动是常见的物理量, 目前主要用电驱式振动仪对其检测, 该设备使用时产生很强的电磁场^[5], 它与环境电磁场一起对金属导线中传输的感测信号构成干扰, 从而引起很强的噪音^[6]。若光纤光栅被用来监测机械振动^[7], 感测信号在光纤中传输, 则不会产生电磁场, 传感结果免受环境电磁场以及传输损耗的影响, 还可用在一些特殊场合(如煤气旁、矿井下, 油田以及油罐周围)对振动进行安全监测, 加上光纤光栅具有很高的传感精度, 因而引起人们的关注。Beadle^[8]利用所测振动直接拉伸光纤光栅所在的光纤, 虽达到监测目的, 但受限于光栅的应变承受能力, 该方法只适合监测微机械振动, 且无源感测的信噪比不高, 因此有必要发展能监测较大振幅的有源光纤光栅振动传感器。

本文报道用于机械振动监测的一种有源传感装置, 它基于线性腔光纤激光器结构, 用沿轴向分别贴于等腰三角形均质等厚悬臂梁上、下表面的光栅对作端镜, 通过观测激光输出, 对作用于自由端的激励

源的机械振动进行监测。

2 工作原理

频率和振幅是表征振动的两个重要物理量, 对于机械振动, 某种装置若能提供上述两物理量的信息, 就说它可用来监测该类振动。

调节均质、等厚、等腰三角形悬臂梁自由端 Q 的挠度可对沿其轴向粘贴的光纤光栅的布拉格反射波长进行无啁啾线性调节, 不计梁的重量, 且不考虑 Q 偏离平衡位置 $[\omega(L)]$ 对观察点 N 弯矩的影响, 则布拉格波长的相对漂移可表示为^[9]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{(1-P_e)h}{L^2}\omega(L), \quad (1)$$

其中 λ_B 为布拉格反射波长, P_e 为有效弹光系数, h 、 L 分别为梁体的厚度和长度。对于沿轴向分贴于梁上、下表面的匹配光栅对, $\omega(L) \neq 0$ 时, 一光栅受拉应力作用, 而另一光栅则受压应力作用, 两光栅波长漂移的方向相反, 差值为

$$\Delta\lambda_{B12} = \frac{2(1-P_e)h}{L^2}\omega(L)\lambda_B. \quad (2)$$

若该光栅对用来构成一线性腔掺铒光纤激光器的端镜, 当抽运源功率足以克服腔中传输损耗以及端面的反射损耗, 且 $\omega(L) = 0$ 时, 则该装置将辐射 λ_B 波长的激光; 激光强度随 $\omega(L)$ 的增加而减小以至为零。若 $\omega(L)$ 的变化源于机械震动, 受其激励, 一个振动周期将产生一个激光脉冲输出, 因此脉冲频率将是被测振动频率的度量。

* 黑龙江省杰出青年科学基金、国家自然科学基金委员会与中国节能投资公司联合研究基金(60177029)资助课题。

E-mail: youlongyu@163.com

收稿日期: 2002-03-06; 收到修改稿日期: 2002-04-18

从(2)式不难看出,光栅间波长漂移差值的最大值($\Delta\lambda_{\max}$)将是被测振动振幅 Ω 的量度,两者关系为

$$\Omega = \frac{L^2}{4(1-P_e)h\lambda_B} \Delta\lambda_{\max} \quad (3)$$

3 实验结果

为监测机械振动,设计图1(a)所示的实验装置,有机玻璃制成的重量约为8g的等腰三角形悬臂梁的厚度为2mm,轴向长度以及底边长度分别为115mm和7.7mm,如图1(b)所示。充当线性腔端镜的带宽约为0.20nm的光栅对(FBG₁、FBG₂)的反射率和栅长分别为97%和10mm,两者

沿轴向分别被刚性地粘贴于梁的上、下表面,其中间位置位于与底边相距17mm的N点,考虑梁的实际重量不为零,选择FBG₁和FBG₂的中心波长分别为1562.11nm和1562.71nm。抽运光源是阈值电流为38mA、功率达100mW的半导体激光器,其工作波长为1480nm,其输出经波分复用耦合进入长度为25m吸收为30.3dB的掺铒光纤;腔中其它光纤长度为12m。隔离器用于阻隔回光,增加激光器工作的稳定性;探测器将光信号变为电信号,与示波器一起来监测激光输出强度的变化;光谱仪用来观测上、下光栅的反射谱、透射谱以及激光光谱;低通滤波器的频率设置为100Hz,用于滤除高频噪音。

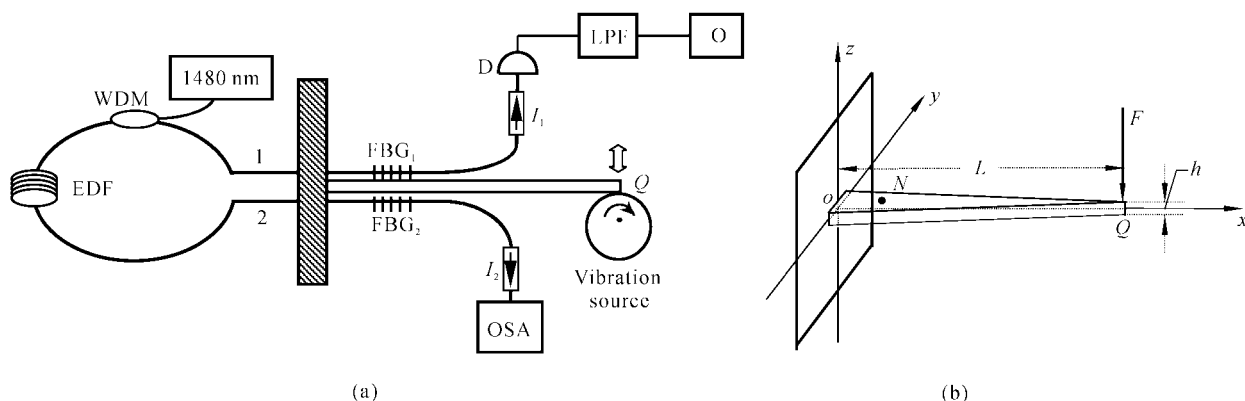


Fig.1 Experimental set-up for mechanical vibration monitoring. (a) Experimental set-up; (b) Schematic diagram of the employed cantilever beam. FBG_i ($i=1,2$): fiber Bragg grating; I_i ($i=1,2$): isolator; OSA: optical spectrum analyser; WDM: 1480/1550 WDM coupler; EDF: Erbium-doped fiber; LPF: low-pass filter; D: detector; O: Oscilloscope

所测机械振动为作用于Q、受直流电机驱动的偏心转子提供的简谐振动。受其激励,梁自由端向平衡位置的上方发生周期性偏离。Q处于平衡位置,抽运光功率高于34mW(对应工作电流为214mA)时,光谱仪显示有1562.41nm的激光输出,如图2谱a所示;低于34mW时,光谱仪观测到

的是FBG₂的透射谱,如图2谱b所示,这表明光纤激光器的阈值功率 $I_{th}=34$ mW。保持抽运光输出为40.7mW不变,激光输出达3.4mW,偏离平衡位置,输出光强迅速削弱,以至为零。实际上Q处平衡位置时,受梁本身重量的调节,FBG₁和FBG₂分别处于拉伸和压缩状态,两者布拉格波长相等均为1562.41nm,其反射率仍维持在97%,以至谐振腔中形成共振,产生激光。自由端偏离平衡位置时,变化的应力使得两者的反射波长失配,导致阈值增加,以至腔中振荡遭到破坏。

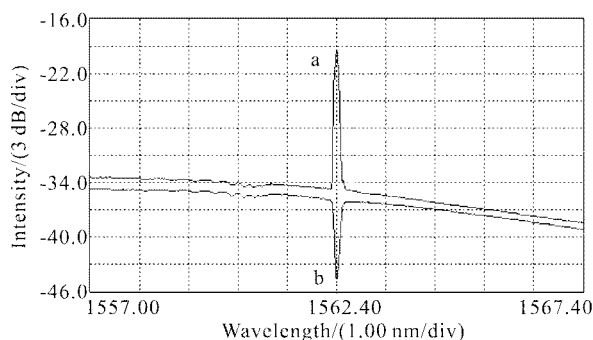


Fig.2 Output spectrum of the system. a: Pumping power is greater than the value of threshold; b: Pumping power is less than the value of threshold

待测振动的频率是通过改变转子驱动电压的大小来调节的,为确定所测振动频率与激光脉冲频率间的联系,引入一垂直于偏心转子所在面紧贴Q照射的标定光束,梁处平衡位置时透过光强最大,而有较大偏离时,透过光最弱为0。显然,透过光强的变化与转子提供的振动同频,但相位差为 180° 。设置偏心转子的初相位为 $3\pi/2$ 、频率为60Hz,用Tektronix TDS714L型示波器记录的激光输出信号

和标定光信号分别见图 3 中的曲线 a 和曲线 b 所示, 两者同频, 这表明激光器输出脉冲的频率是所测振动频率的量度, 从而证实该装置可用于实时监测机械振动的频率。曲线 a 还反映了输出信号的信噪比高于 15 dB。光栅与梁间的刚性粘贴决定此装置不适于高频监测, 低于 90 Hz 时所测频率与实际值一致, 高于 100 Hz 时, 该装置就不适于监测该类振动了。

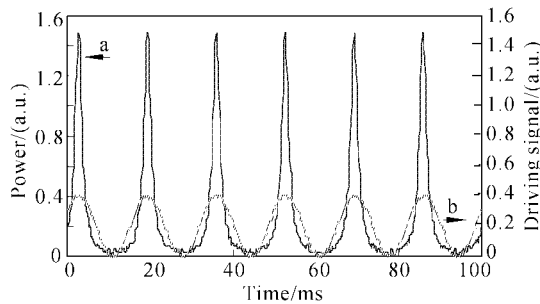


Fig. 3 a: Output of the fiber laser; b: Transmitted signal of the sample beam

实验中还观测到感测结果不受缓变温度的影响, 此乃两光栅温漂一致, 相互补偿所致。当 $I > I_{th}$ 时, 随着抽运光强度的增加, 激光器输出的峰值功率呈增强趋势; 同一抽运光强度时, 输出功率与梁偏离平衡位置的程度有关。图 4 为 Q 偏移不大的三个位置记录的激光输出谱, 偏移较大时没有激光输出, 观察到的只是 FBG₁ 的反射谱和 FBG₂ 透射谱的叠加。激励源提供振幅为 5 mm 的振动作用于自由端时, 光谱仪观测到 $\Delta\lambda_{max}$ 为 3.642 nm, 硅纤的 P_c 值为 0.22^[9], 由 (3) 式判断所测振动的振幅为 4.94 mm, 误差约为 1%, 可见两者非常吻合。激励振幅太大会损伤光栅, 本装置可在 0~6.1 mm 范围内对光栅进行无损操作, 对应 $\Delta\lambda_{max}$ 的变化范围是 0~4.5 nm。所用光谱仪的分辨率为 0.1 nm, 它决定了本装置的振幅分辨率达 0.14 mm。

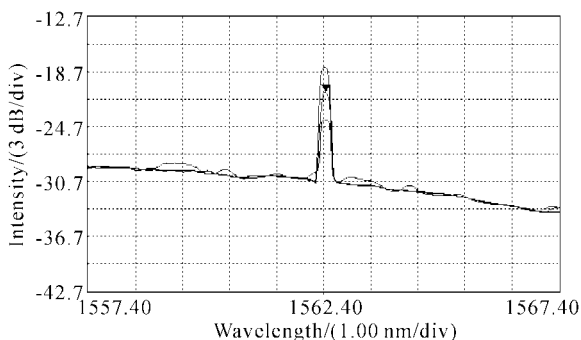


Fig. 4 Output spectrum for different deflected position of Q, during vibrating

选取窄带光栅和合适的抽运光功率, 有利于提高装置的灵敏度, 一般来说高于阈值太多的抽运光将削弱装置的灵敏度。

实际上梁处平衡状态时两光栅的布拉格反射波长即便有少许差异, 只要振动过程中两者反射谱出现交叠, 且能形成激光输出, 该装置仍可用于机械振动的监测, 只不过所测振动频率为输出脉冲频率之半, 且所测振幅值也需作适当修正。

结论 沿轴向粘贴于等腰三角形悬臂梁上、下表面的波长接近的光纤光栅对, 充当线性腔光纤激光器端镜, 机械振动激励自由端时, 观测激光输出可判断待测振动的频率和振幅。低于 100 Hz 时, 所测结果与实际值非常吻合。该有源振动传感装置工作稳定, 传感结果免受温度波动的影响, 可用于实时监测桥梁和其它设施的机械振动状况, 具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Volanthen M, Geiger H, Cole M J *et al.*. Measurement of arbitrary strain profiles within fiber gratings. *Electron. Lett.*, 1996, **23**(11):1028~1029
- 2 Ball G A, Morey W W, Cheo P K. Fiber laser source/analyzer for Bragg grating sensor array interrogation. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(4):700~703
- 3 Yu Youlong, Tam Hwayaw, Liu Zhiguo *et al.*. Passive temperature compensation technique for fiber Bragg grating displacement sensor. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(25):2224~2226
- 4 Yu Youlong, Ye Hongan, Liu Zhiguo *et al.*. Fiber Bragg grating current sensor. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(5):536~538
- 5 Kamiya M, Ikeda H. New type of optical WDM signal transmission system and its application. *Proc. ISIE '95, IEEE*, 1995, **1**:157~160
- 6 Kamiya M, Ikeda H. Transmission of both forced and natural vibration data using optical WDM signal transmission system. *Proc. IAS '96, IEEE*, 1996, **3**:1645~1652
- 7 Liu Yunqi. Research on Bragg and long-period fiber gratings and their sensing properties. [Ph. D Dissertation] Tianjin: Nankai University, 2000. 83~86
- 8 Beadle B M, Weis R S. Longitudinal vibrations of a silica fiber segment characterized using a fiber Bragg grating. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1998, **45**(5):1100~1104
- 9 Yu Youlong, Liu Zhiguo, Dong Xiaoyi *et al.*. No-chirped linearly tuning technique for fiber Bragg grating with a cantilever beam. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(7):873~876

A Novel Active Fiber Bragg Grating Sensor System for Monitoring Mechanical Vibration in Real-Time

Yu Youlong¹ Geng Shuwei² Tam Hwayaw³

1 *Research Institute of Fiber Optics, Heilongjiang University, Harbin 150080*
2 *School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150008*
3 *Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong SAR*

(Received 6 March 2002; revised 18 April 2002)

Abstract: A pair of fiber Bragg gratings with the wavelengths of 1562.11 nm and 1562.71 nm, respectively, are used as the end reflectors of a constructed linear cavity fiber laser. They are epoxied onto the upper and lower surfaces of an employed uniform density and thickness isosceles triangle cantilever beam axially. As a strain agent, the beam makes the wavelength-shifts of both gratings be changeable, and therefore lead the laser producing pulses. The real-time measurements of the frequency of the mechanical vibration applied on the free end of the beam are demonstrated by observing the pulses. Within the range of 0~6.1 mm, the amplitude of the vibration can be estimated by observing the wavelength-shift-difference between two gratings. The measured results have been demonstrated to be in good agreement with the actual values under the frequency of 100 Hz.

Key words: sensor technique; fiber Bragg grating; mechanical vibration; cantilever beam; fiber laser; linear cavity