

放大自发辐射解调的光纤光栅振动传感系统时域建模研究

邵军^{1,2}, 刘君华¹, 乔学光², 贾振安², 葛鹏²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 西安石油大学光电油气测井与检测教育部重点实验室, 710065, 西安)

摘要: 将放大自发辐射(ASE)光源的线性区间作为边缘滤波器的解调技术予以推广, 将其由温度、应变的静态解调扩展应用至光纤光栅振动传感器的动态解调. 首先建立了基于 ASE 光源解调的光纤光栅振动传感测量系统, 提出位移负阶跃响应测试法并利用其得到了该系统的时域信号, 并且由非线性直接拟合法获得该系统的动态参数, 所得动态参数与有限元仿真结果相近. 研究表明: ASE 光源进行动态解调方案简单可行, 位移负阶跃响应测试法获得动态时域信号不需要专门的激励设备, 易于实现, 与传统求取动态参数的方法相比, 非线性拟合法求取动态参数更为简便.

关键词: 光纤光栅; 振动加速度传感器; ASE 光源; 时域建模; 负阶跃响应; 非线性直接拟合法

中图分类号: TP212.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)04-0043-05

Time Domain Modeling of Fiber Bragg Gratings Vibration Acceleration Sensor Based on Amplified Spontaneous Emission Light Source

SHAO Jun^{1,2}, LIU Junhua¹, QIAO Xueguang², JIA Zhen'an², GE Peng²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. The Ministry of Education Key Laboratory of Photoelectric Oil & Gas Logging and Detecting, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: The demodulating technique of amplified spontaneous emission (ASE) is extended to fiber Bragg gratings vibration acceleration sensor and so this technique for the static demodulation of temperature or strain can be applied to dynamical demodulation of vibration acceleration. The measure system of fiber Bragg gratings vibration acceleration sensor based on ASE is constructed. The dynamical time domain signal of this system is obtained by negative step response of setting initial displacement. The dynamic parameters by nonlinear direct fitting coincide well with ones from finite element method. The results demonstrate that the dynamical demodulation project of ASE is simple, this modeling method of negative step response does not need special excitation equipment, and the method of nonlinear direct fitting for getting the dynamical parameters is more conveniently than the traditional methods.

Keywords: fiber grating; vibration acceleration sensor; amplified spontaneous emission light source; time domain modeling; negative step response; nonlinear direct fitting

光纤光栅传感器由于抗电磁干扰、耐腐蚀、质量轻、易于重复使用等优点, 得到了广泛的关注^[1-4]. 目前, 光纤光栅温度、应变传感器的研究趋于成熟, 而

光纤光栅振动传感器的研究还处在起步阶段, 对其研究集中在理论分析^[5-6]和扫频法^[7]频域建模两个方面. 限制其发展的因素有二: ①扫频法需要激振设

备提供稳定的宽频带正弦波,还要有高精度检测设备,满足这些要求的设备价格较贵;②光纤光栅传感器是波长调制型传感器,振动信号又是动态信号,因此需要可以检测动态信号并易于实现的波长相调装置.文献[8]利用振动台获得弹性元件的冲击响应,但是获得冲击响应仍需要特殊的激振设备.

本文将放大自发辐射(ASE)光源的线性区间作为边缘滤波器用于光纤光栅传感器的静态解调推广应用至动态信号检测.文献[9-10]利用 ASE 光源对静态的应变和温度进行检测,收到了好的效果.由于这一解调方法不需要扫描装置,响应速度快,更适于动态检测,因此本文利用 ASE 光源检测光纤光栅振动传感器信号.

本文提出位移负阶跃响应测试法,对基于 ASE 光源解调的光纤光栅振动传感测量系统在时域建模.这一方法无需专门的激励设备,可以节约测试时间与费用.与有限元仿真分析得到的动态参数比较可知,位移负阶跃响应测试法和非线性直接拟合法对基于 ASE 光源解调的光纤光栅振动传感系统求动态参数,建立传感器动态模型是有效的.

1 等强度梁光纤光栅振动加速度传感系统

1.1 传感器的输入与输出关系

光纤光栅振动加速度传感器属于结构型传感器,其组成如图 1 所示.当振动加速度信号作用在弹性元件上时,弹性元件的多个参量同时发生变化,如弹性元件的位移、应变、应力等.光纤光栅将弹性元件的应变转换为光纤光栅波长的变化.

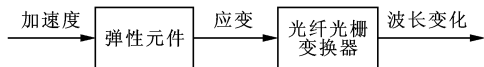


图 1 光纤光栅振动加速度传感器组成框图

本文传感器的弹性元件是等强度梁,图 2 是其结构示意图.光纤光栅粘于等强度梁的上表面,传感器固定在被测振动体上,振动信号的方向与 z 轴平行,当振动信号频率远小于传感器弹性元件固有频率时,有^[11]

$$\epsilon(x) = \frac{6L}{Ebh^2}Ma \quad (1)$$

式中: ϵ 为梁轴向应变; E 为梁的弹性模量; L 为梁的总长; b 是梁端部的宽度; h 是梁的厚度; M 是系统的等效质量,包括附加质量和梁的等效质量.

对于粘贴在等强度梁上的光纤光栅,其峰值波长偏移量为^[12]

$$\Delta\lambda = \lambda_{B0}(1 - p_e)\epsilon \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda = \lambda_B - \lambda_{B0}$, λ_{B0} 为环境温度下的峰值波长, λ_B 是由于外界被测量引起光纤光栅波长偏移后的峰值波长; p_e 为光纤的有效弹光系数.

将式(1)代入式(2),可得

$$\Delta\lambda = \lambda_{B0}(1 - p_e) \frac{6L}{Ebh^2}Ma \quad (3)$$

式(3)是等强度梁光纤光栅振动加速度传感器的输入 a 与输出 $\Delta\lambda$ 的关系.

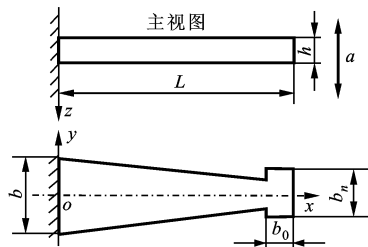


图 2 等强度梁结构示意图

1.2 $\Delta\lambda$ 的检测原理

将光纤光栅波长的变化测量出来,这一过程就是光纤光栅波长信号的解调.本文利用 ASE 光源的线性区间解调光纤光栅波长信号.由图 3 可见,在波长为 1 525.3~1 531.3 nm、1 532.4~1 537.75 nm、1 563.95~1 571.05 nm、1 571.05~1 581.7 nm 的区间,光谱功率与波长可以近似用线性关系描述.利用这个特点,把 ASE 光源作为边缘滤波器将光纤光栅波长的变化转换为光强.

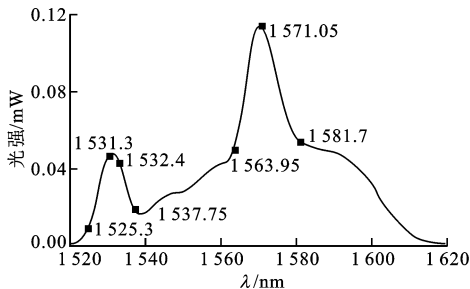


图 3 ASE 光源光谱图

当外界被测量变化时,由于传感器工作在 ASE 光源的线性区间,则 $\Delta\lambda$ 与其反射光强变化量 ΔI 之间的关系为^[10]

$$\Delta I(\Delta\lambda) = kR_B(\pi/\alpha)^{1/2} \Delta\lambda \quad (4)$$

式中: k 为与光源线性区间斜率、耦合器插入损耗等有关的参数; R_B 为光纤光栅的峰值反射率; $\alpha =$

$4\ln 2/\Delta\lambda_{\text{B}}^2$ 为常数, $\Delta\lambda_{\text{B}}$ 为光纤光栅的半峰全宽.

将式(3)代入式(4),可得

$$\Delta I(\Delta\lambda) = kR_{\text{B}}(\pi/\alpha)^{1/2}\lambda_{\text{B}0}(1 - p_{\text{c}})\frac{6L}{Eb h^2}Ma$$

(5)

由式(5)可见,加速度和反射光强成正比,利用光电探测器探测光强,就可实现振动加速度的测量.这种解调方法不需要扫描装置,故响应速度更快,应用于动态测量比其他解调方法更具优势.

2 仿真建模分析

仿真建模的步骤分两个:一是利用有限元对弹性元件进行模态分析和瞬态分析,以获取传感器的动态特性与位移负阶跃响应曲线;二是对由瞬态分析得到的位移负阶跃响应曲线采用非线性直接拟合法求取动态参数,建立仿真分析动态模型.

2.1 弹性元件的有限元分析

经过有限元划分后,弹性元件有限元模型各节点的运动方程为^[13]

$$\mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{C}\dot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{K}\boldsymbol{\delta} = \mathbf{P}(t)$$

(6)

式中: $\mathbf{M}$ 为质量矩阵; $\mathbf{C}$ 为阻尼矩阵; $\mathbf{K}$ 为刚度矩阵; $\mathbf{P}(t)$ 为动力载荷向量; $\boldsymbol{\delta}$ 、 $\dot{\boldsymbol{\delta}}$ 、 $\ddot{\boldsymbol{\delta}}$ 分别为节点的位移、速度和加速度.

2.1.1 模态分析 通过有限元模态分析,可以得到弹性元件的动态特性.与简化的质量-弹簧系统相比,模态分析更接近于弹性元件的实际动态特性.在式(6)中,若无外力作用,并略去阻尼,则可得到弹性元件无阻尼自由振动方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{K}\boldsymbol{\delta} = \mathbf{0}$$

(7)

设弹性元件作如下的简谐运动

$$\boldsymbol{\delta} = \boldsymbol{\delta}_0 \cos \omega t$$

(8)

将式(8)代入式(7),得

$$\mathbf{K}\boldsymbol{\delta}_0 - \omega^2 \mathbf{M}\boldsymbol{\delta}_0 = \mathbf{0}$$

(9)

求取式(9)的特征值就可获得弹性元件的固有频率.对于图 2 的等强度梁,其基本参数如表 1 所示.对其进行模态分析时计算特征值的方法选为子空间迭代法,固有频率范围为 0~2 kHz,得到该梁的前 5 阶模态频率如表 2 所示.通过模态分析可知,一阶振型是沿 z 轴的上下运动,与图 2 设定的加速度方向一致,这正是本文传感器弹性元件的运动方式.

2.1.2 瞬态分析 有限元的瞬态分析是用于确定承受任意随时间变化载荷的结构的动力学响应.按

表 1 等强度梁的基本参数

L / mm	b / mm	h / mm	E / GPa	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^3$	附加质量/ g
76	20	0.3	135	8 230	1.223

表 2 等强度梁的前 5 阶模态频率

模态阶数	1	2	3	4	5
频率/Hz	24.608	192.70	573.16	578.85	1 165.1

照负阶跃响应测试法的要求,在梁自由端沿 z 轴方向施加一个初始位移,而后迅速撤除外力,得到梁的负阶跃响应.确定该动力学响应是一个二阶常系数微分方程组的初值问题,即

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{C}\dot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{K}\boldsymbol{\delta} &= \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\delta} &= \boldsymbol{\delta}(0) \\ \dot{\boldsymbol{\delta}} &= \mathbf{0} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

瞬态分析就是对式(10)求解的过程,具体步骤如下:设定梁自由端节点 304 初始位移为 3.2×10^{-4} m,自由振动时间为 0.1 s,阻尼比 $\zeta=0.068$.利用有限元瞬态分析得到的位移负阶跃响应曲线如图 4 所示.由图 4 可见,此时弹性元件自由端沿 z 轴的位移逐渐减小,呈现衰减振荡趋势.节点 304 沿 z 轴的位移有一些小的起伏,这是因为输入的阶跃信号含有高频信息,引起梁高阶模态振动,也就是说该传感器可以在低于梁一阶固有频率范围内使用,这与 1.1 节中振动信号的频率小于传感器弹性元件固有频率是吻合的.节点 304 在 x 和 y 方向上的位移很小,说明 z 轴的位移对另两个方向影响很小.因此,以该等强度梁作为弹性元件的传感器在 z 轴方向上可以用二阶系统表示.

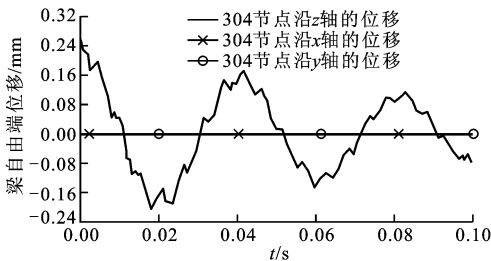


图 4 负阶跃响应仿真特性($\zeta=0.068$)

2.2 非线性直接拟合法求取动态参数

根据图 4 曲线的形状,按二阶系统对负阶跃响

应曲线进行拟合,设一般方程为^[14]

$$z = ae^{(-\zeta \times 2\pi\omega_n t)} \sin(2\pi(1 - \zeta^2)^{1/2} \omega_n t + c) + b \quad (11)$$

式中: z 表示等强度梁自由端沿 z 轴的位移; t 表示时间; ω_n 为系统固有频率; b 、 c 为常数.将图4所示的沿 z 轴位移数据利用式(11)拟合,得到拟合方程为

$$y = 0.000\ 23 \times e^{(-0.065 \times 2\pi \times 24.6t)} \sin(2\pi(1 - 0.065^2)^{1/2} 24.6t + 1.5) + 8.08 \times 10^{-8} \quad (12)$$

式(12)的拟合度为0.96.

对比式(11)和式(12)可以知道,该二阶系统固有频率 ω_n 为24.6 Hz,与有限元模态分析的一阶模态频率24.608 Hz很接近,阻尼比 $\zeta=0.065$ 与设定值0.068相近.根据动态参数 ω_n 和 ζ ,就可写出该传感器在时域、频域和复频域中的动态模型表达式.

通过对瞬态分析得到的负阶跃响应曲线进行非线性直接拟合,可以得到以下结论:①通过拟合方程得到的动态参数与有限元的仿真结果相符,说明该传感器系统可以表示为二阶系统;②通过对负阶跃响应曲线求取系统的动态参数,表明本文提出的非线性直接拟合法是可行的,与传统方法相比,中间步骤少,方便易行,更加简捷.

3 实验建模

3.1 $\Delta\lambda$ 的检测装置

依据1.2节ASE光源的检测原理,搭建检测平台如图5所示.ASE光源发出的光通过耦合器入射到光纤光栅振动加速度传感器上,满足Bragg条件的光反射,由光电探测器接收,经过数据采集模块到达计算机,利用Labview实现数据的显示与处理.

3.2 时域实验建模结果

在等强度梁的自由端施加沿 z 轴方向的作用力使其产生初始位移,然后将作用力迅速撤除使其自由振动,利用图5的实验装置得到传感器的位移负阶跃响应,如图6所示.利用式(11)对实验测得的负阶跃响应进行非线性直接拟合,得到的拟合结果如图6所示,拟合方程为

$$y = 0.009\ 8 \times e^{(-0.003\ 9 \times 2\pi \times 24.33t)} \sin(2\pi(1 - 0.039^2)^{1/2} 24.33t - 3.049) - 8.44 \times 10^{-5} \quad (13)$$

式(13)的拟合度为0.97.对比式(13)与式(11)可以得到该传感器的阻尼比实测值 $\zeta=0.003\ 9$,固有频率是24.33 Hz,与有限元模态分析的一阶模态频率24.608 Hz接近.至此,通过时域信号就建立了该传

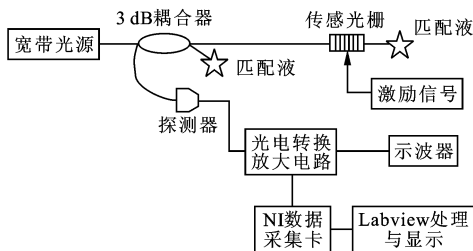


图5 ASE光源解调实验装置图

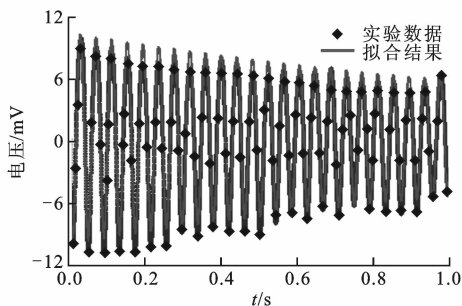


图6 光纤光栅振动加速度传感器信号拟合结果

传感器的动态模型.

4 结 论

(1)本文将ASE解调技术由静态解调推广至动态解调,将原来的温度、应变测量扩展到振动加速度的测量,拓宽了该技术的应用范围.

(2)在对基于ASE光源解调的光纤光栅振动加速度传感系统进行时域建模时,提出了位移负阶跃响应测试法,该方法不需要专门的激励设备,易于操作.

(3)在求取模型的动态参数时,提出了非线性直接拟合法,相比传统方法,更为简便.

(4)通过本文的研究表明,利用位移负阶跃响应测试法和非线性直接拟合法,对基于ASE光源解调的光纤光栅振动传感测量系统进行动态时域建模是行之有效的.

参考文献:

- [1] 王目光,魏淮,童治,等. 利用双周期光纤光栅实现应变和温度同时测量[J]. 光学学报, 2002, 22(07): 867-869.
- WANG Muguang, WEI Huai, TONG Zhi, et al. Simultaneous measurement of strain and temperature using a single dual-period fiber grating[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(7): 867-869.
- [2] 张祝林,杨振坤,伍辉华,等. 双光纤布拉格光栅温度

- 和应变传感研究[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(6): 607-610.
- ZHANG Zhulin, YANG Zhenkun, WU Huihua, et al. Temperature and strain-sensed researches of double fiber Bragg gratings[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(6): 607-610.
- [3] 傅海威, 乔学光, 贾振安, 等. 一种新颖的温度压强同时区分测量的光纤 Bragg 光栅传感器[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(11): 1149-1154.
- FU Haiwei, QIAO Xueguang, JIA Zhen'an, et al. A novel in-fiber Bragg grating sensor for temperature and pressure simultaneous measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(11): 1149-1154.
- [4] OH S, HAN W, PAEK U, et al. Discrimination of temperature and strain with a single FBG based on the birefringence effect[J]. Optics Express, 2004, 12(4): 724-729.
- [5] TODD M D, JOHNSON G A, ALTHOUSE B A, et al. Flexural beam-based fiber Bragg grating accelerometers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(11): 1605-1607.
- [6] 刘惠兰, 冯丽爽, 滕莉, 等. 差动式光纤 Bragg 光栅加速度计传感头设计与仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(11): 1369-1372.
- LIU Huilan, FENG Lishuang, TENG Li, et al. Design and simulation of sensor of differential fiber Bragg grating accelerometer[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(11): 1369-1372.
- [7] BERKOFF T A, KERSEY A D, INC S, et al. Experimental demonstration of a fiber Bragg grating accelerometer[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(12): 1677-1679.
- [8] 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.
- [9] 肖孟本, 熊燕玲, 赵洪, 等. 基于 ASE 光源解调的光纤光栅应变传感器[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2006, 11(1): 30-32.
- XIAO Mengben, XIONG Yanling, ZHAO Hong. A fiber Bragg grating strain sensor based on ASE light source demodulation technology[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2006, 11(1): 30-32.
- [10] 张剑, 赵洪, 熊燕玲, 等. 应用放大自发辐射光源解调光纤光栅传感器[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(1): 102-105.
- ZHANG Jian, ZHAO Hong, XIONG Yanling, et al. A FBG sensor demodulation method based on an amplified spontaneous emission light source[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(1): 102-105.
- [11] 樊尚春. 传感器技术及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004: 163.
- [12] 邵军, 刘君华, 乔学光, 等. 基于弹簧管悬臂梁的 FBG 压力传感的研究[J]. 光电子·激光, 2006, 17(7): 807-809.
- SHAO Jun, LIU Junhua, QIAO Xueguang. Study on fiber Bragg gratings pressure sensor based on bourdon and cantilever beam of uniform strength[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2006, 17(7): 807-809.
- [13] 赵汝嘉. 机械结构有限元分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990: 200.
- [14] 黄鸿, 陈杰. 传感器与检测技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 333.
- [本刊相关文献链接]
- 降低多传感器交叉敏感的法方程组方法. 西安交通大学学报, 2009, 43(6): 57-61.
- ZnO 薄膜声表面波型 SF₆ 气体传感器的研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(4): 445-449.
- 光源调制全光纤电流互感器的研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(4): 436-439.
- 谱域光学相干层析成像系统的实验研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(7): 815-817.
- 电动车用无刷直流电机无位置传感器控制研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(5): 597-601.

(编辑 杜秀杰)