

基于边缘滤波和阻尼衰减的 FBG 板材冲击能测量研究

周建明,陶维俱,胡君辉,范金英,曾志明,秦子雄*

(广西师范大学 物理科学与技术学院,广西 桂林 541004)

摘要:为了探究光纤布喇格光栅(FBG)传感器对冲击能的新型实时解调方法,利用 FBG 边缘滤波法原理,对板材进行了冲击能大小的测量研究。对于小质量小球冲击铝板过程,实验采用 FBG 光谱右边缘移动滤波解调;对于大质量小球冲击亚克力(PMMA)板和铝板过程,提出了一种基于阻尼衰减原理的新型解调方法。实验结果表明:冲击能较小时,直接利用峰值大小解调,拟合度达到 0.988,最高灵敏度为 0.0007476 v/g;冲击能较大时,采用包络峰值衰减 10%时所对应的时间长度解调,PMMA 板和铝板的拟合度分别为 0.94、0.89。

关键词:光纤布喇格光栅;冲击能;解调;阻尼

中图分类号:TN247 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2020)03-0022-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.03.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on impact energy measurement of FBG plate based on edge filtering and damping attenuation

ZHOU Jianming, TAO Weiju, HU Junhui, FAN Jinying, ZENG Zhiming, QIN Zixiong*

(School of Physical Science and Technology, University of Guangxi Normal University, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: In order to explore a new real-time demodulation method of impact energy for fiber Bragg grating (FBG) sensor, the impact energy of sheet metal is measured by FBG edge filtering method. For the impact process of low quality sphere acting on a aluminium plate, the right edge moving filter demodulation method of FBG spectrum is used in the experiment. For the impact process of high quality sphere acting on acrylic (PMMA) and aluminium plate, a new demodulation method based on damping attenuation principle is proposed. The experiment results show that the peak value can be directly used as the demodulation basis for a weak impact energy signal, and its goodness of fit is 0.988, sensitivity is 0.0007476 v/g. For a stronger impact energy, the linear fitness of PMMA plate and aluminium plate is 0.94 and 0.89 respectively when using the time length corresponding to the peak attenuation of 10% as the demodulation.

Key words: fiber Bragg grating; impact energy; demodulation; damping

0 引言

光纤布喇格光栅(FBG)作为一种 21 世纪的新型光纤传感器,以其尺寸小、灵敏度高、抗电磁干扰能力强和能运用于各种特殊环境等优点,在传感领域受到

大量的应用。对于 FBG 传感器的研究,主要集中在应力^[1]、温度^[2]、湿度^[3]、振动^[4]、低速冲击信号定位^[5,6]及解调算法^[7]等方面。武汉邮电科学院的罗进等人^[8]利用 FBG 边缘滤波法成功解调出 0~4.7 g 范围内的振动加速度,拟合度达到 0.9752。南京航空航天大学的陆观等人^[9]试验得出光纤光栅可用于监测冲击信号,能够对复合材料结构低速冲击进行能级判定。

目前,国内对于 FBG 直接测量冲击能的研究较少,而传统的 FBG 冲击能测量方法多数为利用光谱仪^[10,11]测量中心波长漂移量。但该方法解调频率低,较难具备实时性,且一旦冲击信号能量过大,超出 FBG 的漂移极限就面临着难以解调的问题。为此,本文设计 2 种不需要用光谱仪实时测量 FBG 中心波长就可以解

收稿日期:2019-08-16。

基金项目:国家自然科学基金(61565002)资助;广西重点研发计划项目(AB18221033、AB17129027)资助。

作者简介:周建明(1993-),男,广西桂林人,硕士研究生,现就读于广西师范大学物理科学与技术学院光学专业。参加并获得“2018 第四届中国互联网+创新创业大赛广西区铜奖”。,研究方向有光纤光栅传感器、模间干涉传感器和特种光纤的设计与传感。已发表一篇 EI 检索会议论文。

* 通信作者:秦子雄(E-mail: zixiongqin@163.com)。



调出低速冲击能大小的方法,为不同大小冲击能的分段解调和材料粘弹性判别提供一种新思路。

1 基本原理

1.1 边缘滤波法解调原理

根据 FBG 的边缘滤波解调技术^[12],边缘滤波法解调原理如图 1 所示。光源发出的光被布喇格光纤光栅 (FBG) 反射回耦合器后,一束光直接通过光电探测器 (PIN) 变成电信号,得出:

$$I_R(\lambda_B) = I_0 R \frac{\sqrt{\pi}}{2} \Delta \lambda \quad (1)$$

其中, I_R 为 PIN 实际接收的电流, λ_B 为 FBG 的中心波长, I_0 为环形器输出的光强, R 为 FBG 的反射率, $\Delta \lambda$ 为 FBG 反射谱谱宽。

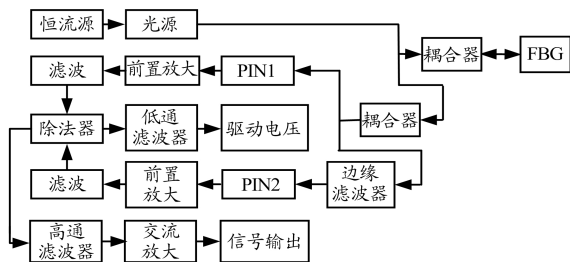


图 1 边缘滤波法解调原理图

另一束光通过边缘滤波器,再经过光电放大、滤波后输出。其中,该线性滤波器光谱透过率函数为:

$$F(\lambda) = A(\lambda - \lambda_0) \quad (2)$$

其中, A 为滤波器斜率, λ 为输入滤波器的波长, λ_0 为滤波器截止波长。

由于冲击产生的振动声发射 (AE) 信号复杂多样,其传播过程中受材料特性影响,不同频率波长之间会发生耦合,难以解调。本文利用 FBG 自身反射谱边沿作为边缘滤波器,振动信号用于 FBG 在示波器上显示出不同电压峰值的波形,信号峰会迅速衰减,分段研究峰值大小和峰值衰减的时长能否用于冲击能解调。

实验用的窄线宽激光器中心波长为 1550.32 nm, 3 dB 带宽为 0.1 nm。FBG 反射谱如图 2 所示,其中心

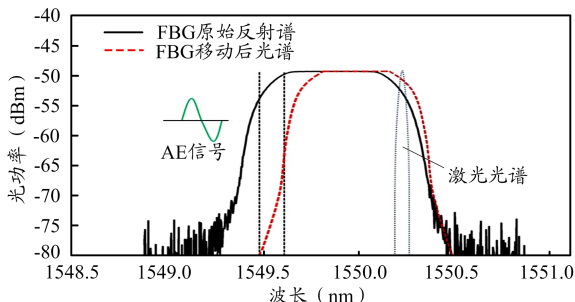


图 2 FBG 反射谱

波长为 1549.86 nm, 3 dB 带宽约为 0.8 nm。如果激光器和 FBG 的带宽相差很小,那么理论上衰减实验可以测量的范围就将变小。本文利用 FBG 右边沿作为移动的边沿滤波器,不同大小的冲击信号经过板材作用于 FBG 引起其中心波长发生漂移。当冲击能量越大,对板材作用的应力越大,产生的应力波作用于 FBG 反射回来的光功率越大,即示波器接收到的电压峰值越大。冲击能量会被板材吸收,即冲击能量越大,振动信号衰减的时间就越长,以此作为解调依据。

1.2 阻尼衰减的原理

随着冲击波信号传播的路径增长,受到信号的多路径传播,以及阻尼和材料自身固有特性的影响,振动信号会不断地衰减。而衰减的过程复杂,是综合因素的结果,可以用阻尼运动质点运动方程来解释^[13,14]为:

$$x = Be^{-U} \cos(k+T) \quad (3)$$

其中, B 和 T 是待定常数,与初始状态相关; U 为阻尼因数; k 为包含的两因子,即能量会随时间逐渐衰减。

图 3 为阻尼振动能量的

衰减图^[14]。可以看出,振动能量的衰减在 10%~30% 范围内可以近似地看为是与时间的线性关系。实际工程测量中,当板材种类尺寸确定时,振动冲击能的衰减随时间有一定线性关系。

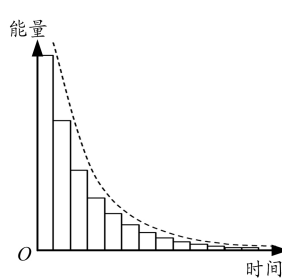


图 3 阻尼振动能量衰减图

2 验证实验

2.1 较小冲击能实验过程

较小冲击实验采用 6080 铝板的尺寸为 1200 mm×60 mm×4 mm, FBG 粘贴位置距离左端面为 10 cm, 质量为 1.41 g、2.1 g、2.97 g、4.11 g、5.40 g、7.07 g、10.00 g 和 16.32 g 的小球分别从 10 cm、15 cm、20 cm、25 cm 和 30 cm 高处释放, 冲击位置位于板材正中央。实验温度均控制在 25℃。同时, 本文还做了一组木板 10 cm 高同种情况的对比实验。2 种板材冲击实验示意图如图 4 所示。由于亚克力 (PMMA) 板对于振动阻碍过大, 在该实验条件下不会有电压峰出现, 所以未能得到有效数据; 而铝板的耦合效果明显, 当冲击能较小时, 仍有较好的电压信号峰出现。

当冲击能量较小时, FBG 接收冲击能后中心波长的移动较小, 激光器的中心波长始终在 FBG 反射光谱的右边沿 (图 2), 所以结果只会出现一个最大峰值, 本文以此得出数据结果拟合图。

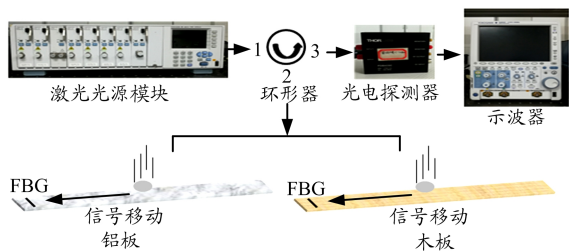


图4 采用铝板和木板的冲击实验示意图

2.2 较大冲击能衰减解调实验过程

衰减实验采用的PMMA板和6080铝板的尺寸均为600 mm×60 mm×10 mm,FBG粘贴位置距离左端面10 cm。质量为10 g、20 g、40 g、50 g、66.6 g、80 g和90 g的小球分别从10 cm高处释放,冲击位置位于板材正中央。实验温度均控制在25℃。

2种板材冲击实验示意图如图5所示。光源发出的连续激光通过环行器到FBG。FBG接收冲击信号产生的应力波后,中心波长发生漂移,将变化的探测光反射回环行器2端口,从环行器3端口输出到光电探测器上。最后利用示波器采集数据,采样点数为125 k。FBG的振动会改变中心波长,导致其边沿位置发生变化。因为光功率的变化,所以产生了高低起伏的电压峰,且振动波在板材中传播有复杂的耦合现象,不是单一频率的波。为了能整体分析该冲击振动现象,本文通过Matlab从复杂无规则波形中取峰,绘制包络曲线,读取电压峰值数据和计算振动衰减时间。

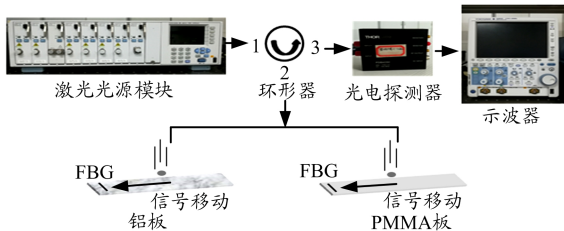
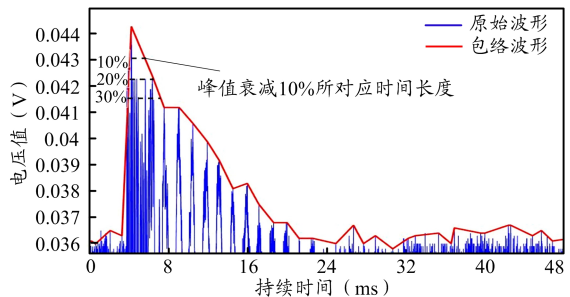


图5 采用铝板和PMMA板的冲击实验示意图

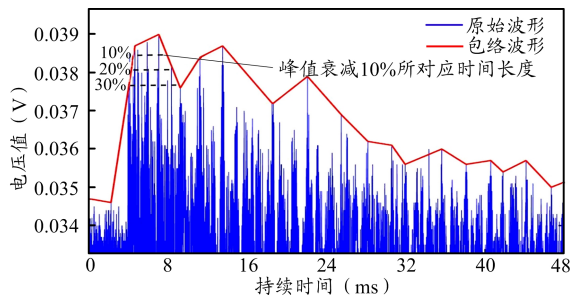
本文取峰和绘制包络线的基本程序逻辑如下: d 为步长,例如,当 $d=500$ 时,即每500个点读取一个最大值作为包络线的绘制点。而 d 的选取,是取前3个最强尖峰宽的平均点数。经过多次实验分析发现,2种材料 d 的取值取决于材料的粘弹性,即与杨氏模量和阻尼系数相关。具有粘弹性的材料,振动能量能被迅速吸收,振动波长耦合现象不明显,即PMMA板直接取 $d=180$ 较为合适。而金属类非粘弹性材料振动发生后,波的耦合现象非常明显,衰落较慢,因此取原始读数160的3倍,即 $d=480$ 较为合适。最后绘制包络线,

对包络波形衰减时间的长度进行分析和拟合计算。

10 g小球冲击PMMA板和铝板绘制出的包络曲线示例如图6所示。振动持续时间从上至下,依次取最大峰值衰减10%、20%和30%对应的时间长度。分别对其它质量小球按同样的步骤取时间长度,并做线性拟合,得出电压峰值衰减时间、质量图像,分析其拟合度。



(a) PMMA板



(b) 铝板

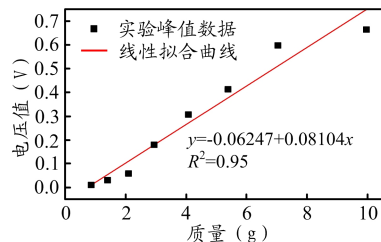
图6 10 g小球冲击PMMA板和铝板得到的波形图

3 实验结果分析

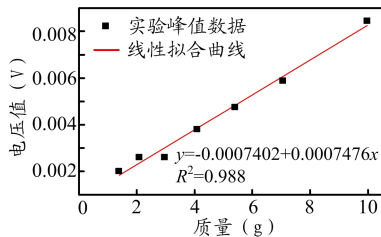
3.1 较小冲击对比分析

本实验结果中的能量计算公式均为 $E=mgh$,其中 E 为能量, m 为小球质量, g 取当地纬度海拔修正后的 9.788 ms^{-2} , h 为下落高度。

图7分别为小球从10 cm高下落,木板和铝板冲击能实验的电压峰值质量拟合对比图。可以看出,拟合度分别为0.95、0.988,灵敏度



(a) 木板



(b) 铝板

图7 不同板材冲击信号电压峰值图

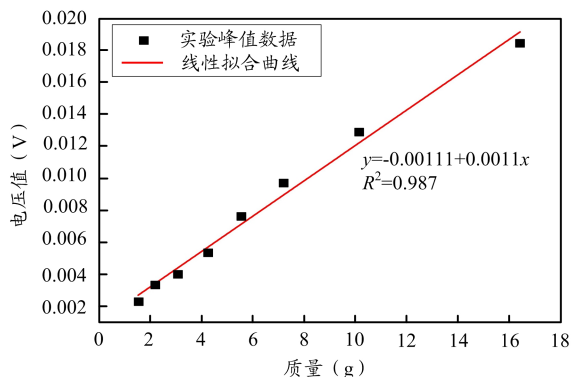
分别为 0.08104 v/g、0.0007476 v/g。当冲击能量较小,采用最大电压峰值解调时,6080 铝板的拟合度可接近 0.99,平均相对误差 5.87%,且铝板的解调准确性、灵敏度明显高于木板。分析原因可能是实验室所用木板质地不均匀,且表面较粗糙,导致了准确性不如工业铝板。

3.2 较小冲击铝板分析

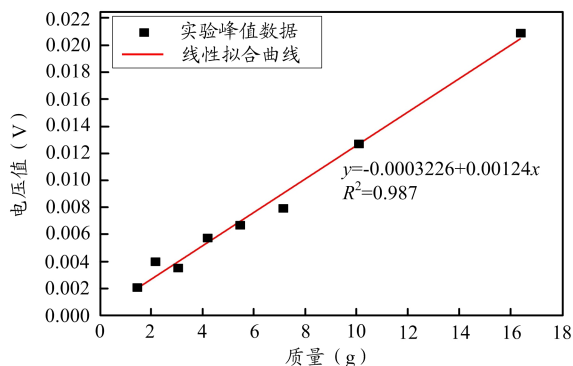
图 8 为在高度为 15 cm、20 cm、25 cm 和 30 cm 下落的电压峰值质量拟合图。线性拟合度分别为 0.987、0.987、0.962、0.927,最高灵敏度为 0.0011 v/g,其余灵敏度如图中拟合公式所示。从各图的数据拟合来看,当冲击能量大于图 8(d) 10 g 对应的点,即 $E=mgh$,能量大于 0.02936 J 左右时,二次拟合函数开始趋于平缓,而线性拟合函数的拟合度开始变差。表 1 给出了线性拟合度和部分二次拟合度及平均相对误差的计算结果。结果证明:随着冲击的增大,FBG 中心波长的移动逐渐接近 FBG 的 3 dB 带宽非线性区域,反射回来的光强不再是线性增加。

3.2.1 粘弹性的判别

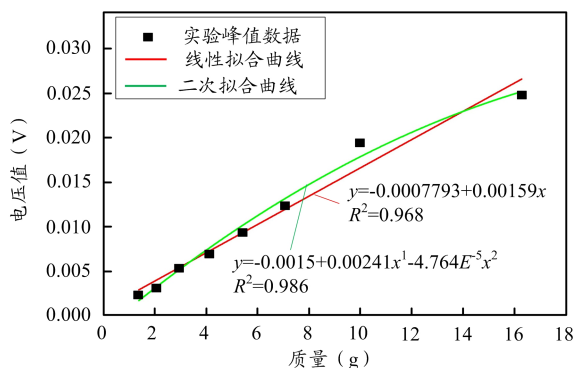
不同质量小球冲击板材的包络峰值衰减 10% 对应的时间长度如表 2 所示。由表 2 和图 6 可以看出,具有粘弹性的材料,在相同冲击下衰减 10% 对应的时间长度具有明显差别。铝板的时间长度是粘弹性材料



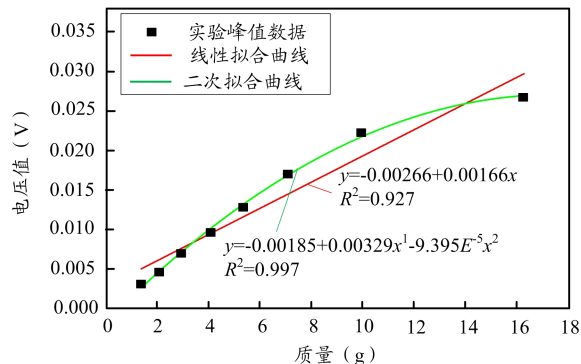
(a) 15 cm 高处



(b) 20 cm 高处



(c) 25 cm 高处



(d) 30 cm 高处

图 8 从不同高处下落,铝板的冲击信号电压峰值图

表 1 铝板冲击误差分析表

高度 (cm)	线性 拟合度	平均 相对误差	高度 (cm)	二次 拟合度	平均 相对误差
10	0.988	5.87%	10	None	None
15	0.987	7.62%	15	None	None
20	0.987	8.49%	20	None	None
25	0.968	9.72%	25	0.986	7.82%
30	0.927	19.4%	30	0.997	3.31%

PMMA 板的 2~3 倍。因此,当用铝板作为标准时,由该现象可知,在相同冲击下,时间长度为铝板一半以下的材料具有粘弹性,且时间长度越短其粘弹性越强。

3.2.2 衰减时长-能量拟合结果

不同质量小球从 10 cm 高下落,冲击 PMMA 板的峰值衰减时间-质量拟合图如图 9 所示。铝板的拟合得到相同的结果,如图 10 所示。结合图 6、图 9 和图 10 可以看出,随着衰减的增大,耦合现象越来越明显,拟合效果越来越差。在本实验条件下,可以得出,10% 峰值衰减的拟合为较优解。同时,PMMA 板的拟合效果较优于铝板。分析原因是具有粘弹性的 PMMA 阻尼系数较大、衰减迅速和耦合情况较弱,而铝板的振动波耦合效果明显,不利于取包络峰,造成其误差较大,拟合度远不如粘性材料 PMMA。

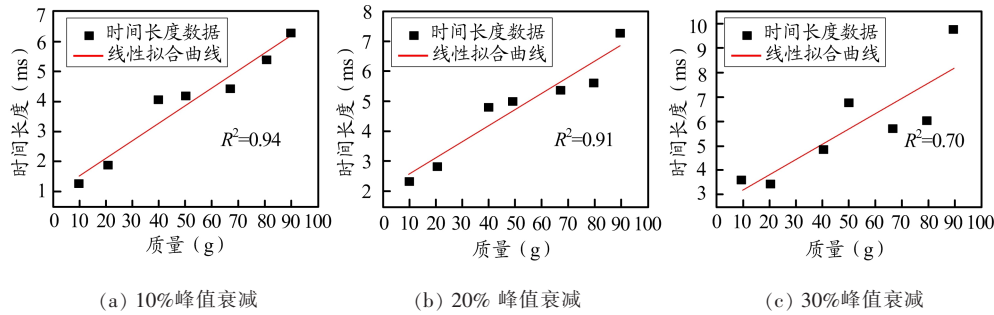


图9 从10 cm高处下落,PMMA板冲击信号振动持续时间图

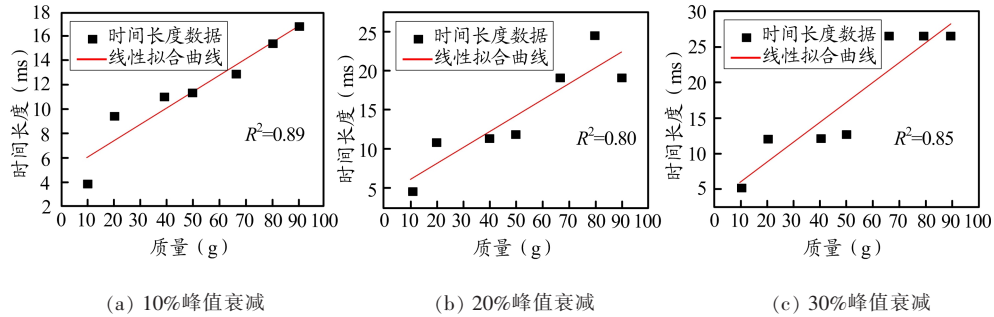


图10 从10 cm高处下落,铝板冲击信号振动持续时间图

表2 不同质量小球冲击板材的包络峰值衰减10%对应时间长度

质量(g)	材料	长度(ms)
10	PMMA 板	1.20
	铝板	3.92
20	PMMA 板	1.92
	铝板	9.36
40	PMMA 板	4.00
	铝板	10.96
50	PMMA 板	4.16
	铝板	11.36
67	PMMA 板	4.40
	铝板	12.96
80	PMMA 板	5.44
	铝板	15.36
90	PMMA 板	6.24
	铝板	16.80

4 结束语

在本实验条件下可以得出结论,FBG 反射光谱边缘滤波可用于高灵敏度的较小冲击能解调,而用阻尼衰减时间作为较大冲击能解调的方法具有可行性,且操作方便简单。衰减时间的长度还可用于判断板材的粘弹性。关于冲击能测量的研究还有许多不完善之处,比如 FBG 和激光器中心波长的选取、冲击点的位置

置和板材的形状种类等都需要进一步深入研究分析。但从目前的实验结果看,基于边缘滤波法和阻尼衰减的冲击能分段解调方法是一种潜在的 FBG 应用于实际冲击能检测的新型解调思路。

参考文献:

- [1] JIN Jing, LIN Song, YE Xiang-yu, et al. FBG sensor network for pressure localization of spacecraft structure based on distance discriminant analysis [J]. Optik, 2014, 125: 404–408.
- [2] KUANG Yi, GUO Yong-xing, XIONG Li, et al. Packaging and temperature compensation of fiber Bragg grating for strain sensing: A Survey [J]. Photonic Sensors, 2018, 8(4): 320–331.
- [3] MICHELE C, ROSARIA D A, ANDREA P, et al. Polymer-coated FBG humidity sensors for monitoring cultural heritage stone artworks [J]. Measurement, 2018, 125: 325–329.
- [4] 郑艳,余有龙,梅钰洁,等. 基于光纤光栅传感的金属薄板超声探测 [J]. 光子学报, 2016, 45(5): 0506003-1–0506003-4.
- [5] 金靖,叶向宇,林松,等. 基于 FBG 传感器网络的结构应力定位 [J]. 传感器与微系统, 2013, 32(7): 39–41.
- [6] SAI Yao-zhang, JIANG Ming-shun, SUI Qing-mei, et al. Multi-source acoustic emission localization technology research based on FBG sensing network and time reversal focusing imaging [J]. Optik, 2016, 127: 493–498.
- [7] 张法业,姜明顺,隋青美,等. 基于光纤光栅的冲击激励声发射响应机理与定位方法研究 [J]. 物理学报, 2017, 66(7): 074210-1–074210-9.
- [8] 罗进,江山,熊岩. 基于边缘滤波法的光纤光栅振动传感器解调技术 [J]. 激光技术, 2013, 37(4): 469–472.
- [9] 陆观,梁大开,曾捷,等. 基于光纤光栅传感器的复合材料层合板冲击能量研究 [J]. 振动与冲击, 2011, 30(6): 261–264.
- [10] KERSEY A D, BERKOFF T A, MOREY W W. High-resolution fiber grating based strain sensors with interferometric wavelength shift detection [J]. Electronics Letter, 1992, 28(3): 236–238.
- [11] SANO Y, YOSHINO T. Fast optical wavelength interrogator employing array waveguide grating for distributed fiber Bragg grating sensors [J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(1): 132–139.
- [12] KERSEY A D, BERKOFF T A, MOREY W W. Multiplexed fiber Bragg grating strain sensors system with a fiber Fary-Perot wavelength filter [J]. Opt Letter, 1993, 18(16): 1370–1372.
- [13] 漆安镇,杜婵英. 普通物理学教程力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.
- [14] 张伟蓉. 阻尼振动及受迫振动系统的能量分析 [J]. 广州师院学报, 1998, 19(7): 57–64.