

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.03.013

## 动静态载荷下光纤光栅传感器敏感特性研究

曾捷<sup>1</sup> 王文娟<sup>2</sup> 王博<sup>3</sup> 王鑫伟<sup>1</sup> 张先辉<sup>1</sup> 宋昊<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京, 210016;

2. 北京长城计量测试技术研究所计量与校准技术国防科技重点实验室, 北京, 100095;

3. 中国空间技术研究院北京卫星制造厂, 北京, 100190)

**摘要:**针对航空航天领域板结构动静态载荷监测需求,研究了基于铝合金板结构的光纤光栅(Fiber Bragg grating, FBG)传感器感知特性。从静载监测角度,得到光纤光栅传感器中心波长偏移量与加载距离、载荷大小和加载角度的对应关系。从动载监测角度,分别得到在不同加载距离和不同加载夹角的载荷作用下,光栅中心波长最大峰值幅度和基于小波包分解的能量谱特征随冲击载荷属性变化的响应特性。研究表明在动静态载荷作用下,光纤光栅传感器中心波长偏移量随加载载荷的增大而呈现良好的单调递增关系。此外,光纤光栅传感器还具有较好的载荷-方向敏感特性,传感器响应灵敏度随着加载夹角增大而逐渐提高。这些特性能够为进一步开展基于光纤光栅传感器的板结构动静态载荷辨识与损伤监测提供有益帮助。

**关键词:**光纤光栅传感器;动/静态载荷;敏感特性;板结构

**中图分类号:**TP212;TN913.33

**文献标志码:**A

**文章编号:**1005-2615(2015)03-0397-06

## Sensitivity of Optical FBG Sensor Under Dynamic/Static Load

Zeng Jie<sup>1</sup>, Wang Wenjuan<sup>2</sup>, Wang Bo<sup>3</sup>, Wang Xinwei<sup>1</sup>, Zhang Xianhui<sup>1</sup>, Song Hao<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,

Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Changcheng Institute of Metrology & Measurement of AVIC, Science and Technology on Metrology and Calibration Laboratory, Beijing, 100095, China;

3. Beijing Spacecrafts, China Academy of Space Technology, Beijing, 100190, China)

**Abstract:** For meeting the need of monitoring dynamic/static load of plate structure in the aerospace field, the fiber Bragg grating (FBG) sensing characteristics based on aluminum plate structure are researched. From the perspective of monitoring static load, the relationships between the offset of FBG center wavelength and the loading distance, the loading size and the loading angle are obtained. From the perspective of monitoring dynamic load, under loading with different distance and angles, the response characteristics about the maximum peak amplitude of FBG center wavelength and the eigenvalue of energy spectrum based on wavelet packet decomposition changing with the impact loading are obtained. The results show that under dynamic/static load, FBG center wavelength offset increases with the increase of the load, which shows a good monotone increasing relationship. In addition, FBG shows a good sensitive characteristic of load-direction, and the response sensitivity gradually increases with the

**基金项目:**国家自然科学基金(51275239)资助项目;航天 CAST 创新基金、江苏省产学研联合创新资金(BY2014003-01)资助项目;中国博士后科学基金(20090461116)资助项目;航空科学基金(20125652055)资助项目;博士学科点专项科研基金(20123218110003)资助项目。

**收稿日期:**2014-12-29; **修订日期:**2015-01-27

**通信作者:**曾捷,男,博士,副教授, E-mail: zj2007@nuaa.edu.cn。

increase of loading angle. These features can provide useful help for further study on identifying static and dynamic load as well as monitoring damage of plate structure based on FBG sensors.

**Key words:** fiber bragg grating; dynamic/static load; sensitive features; plate structure

航空航天器和船舶在制造、使用和维护过程中会不可避免地受到各种形式的动静态载荷,而长期受到这种动静态载荷作用则会导致结构的损伤和结构承载性能的下降<sup>[1-2]</sup>。这些损伤的产生机理和发生方式复杂和隐蔽,损坏的类型和程度难以判断。如果不及时发现并采取相应的措施,将导致结构破坏积累,造成巨大的人员伤亡和财产损失。光纤光栅传感器以其体积小、抗电磁干扰、高可靠性、耐腐蚀和易于构建分布式测量网络等优点大量应用于结构损伤监测领域<sup>[3-4]</sup>。

国内外学者已开展了许多关于光纤光栅传感器及其在不同机械结构领域损伤监测方面的研究工作。2007年日本航空宇宙研究所 Takeda 等<sup>[5]</sup>将光纤光栅传感器连同其他传感器埋入复合材料机翼结构组成传感器网络,对机翼疲劳、冲击损伤进行监测。2010年美国国家宇航局在扑食者无人飞行器翼表上,采用分布式光纤传感器实现翼表结构应变监测<sup>[6]</sup>。在国内,2009年南京航空航天大学梁大开等<sup>[7]</sup>采用准分布式光纤光栅传感阵列实现对机翼盒段载荷分布情况的监测。2012年王利恒<sup>[8]</sup>将光纤光栅传感器应用于碳纤维增强复合材料(Carbon fiber reinforced plastics,CFRP)低速冲击测试中,对 CFRP 层合板冲击损伤位置进行了识别。以上研究主要侧重于光纤监测方法的研究,而未开展专门针对光纤光栅传感器敏感特性方面的研究工作。

基于上述分析,本文研究了基于板结构的光纤光栅传感器在不同属性载荷作用下的动静态感知特性,从而为光纤传感器优化布局与特征响应信号选取提供依据。

## 1 光纤光栅传感器感知原理

结构所受应力应变引起的光纤光栅传感器中心波长偏移量  $\Delta\lambda_B$  可由式(1)表示<sup>[9-10]</sup>

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Delta\lambda + 2\Delta n_{\text{eff}}\lambda \quad (1)$$

式中: $\Delta\lambda$  为光栅栅区在应力作用下的弹性变形; $\Delta n_{\text{eff}}$  为弹光效应引起的纤芯有效折射率变化。被测机械结构所受载荷形式不同会导致光纤光栅传感器的  $\Delta\lambda$  和  $\Delta n_{\text{eff}}$  发生相应变化。在温度恒定条件下,传感器反射光谱中心波长发生改变将主要由光栅周期  $\Lambda$  和纤芯有效折射率  $n_{\text{eff}}$  的变化引起。

## 2 试验系统

动静态载荷作用下光纤光栅传感器敏感特性试验系统,如图1所示。试验对象为正方形铝合金板试件,几何尺寸为  $1\ 200\ \text{mm} \times 1\ 200\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$ 。试件采用四边固支方式,其中固支架边框宽度为  $50\ \text{mm}$ 。

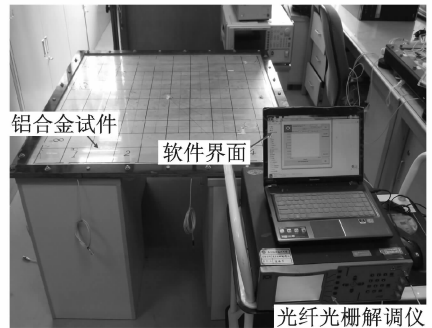


图1 光纤光栅传感器敏感特性试验系统

Fig. 1 Experimental system of response characteristics of FBG sensor

不同加载条件下板结构对应的载荷响应信号由粘贴于铝合金板试件下表面中心位置的光纤光栅传感器感知,所得的反射光谱中心波长偏移信息再由光纤光栅解调仪调制。试验中选择标准砝码进行静态加载,采用冲击能量为  $1\ \text{J}$  的冲击锤模拟低速冲击载荷作用。

由于固支边会对试验结果产生一定的影响,因此在选择划分有效监测区域时,需要使其尽量远离固支边。如图2所示,在铝合金板结构的背面中心位置水平布置一个光纤光栅传感器,再以该板结构的正面中心点作为正方形监测区域的左下角,该正方形有效监测区域面积为  $300\ \text{mm} \times 300\ \text{mm}$ 。将平行于光纤轴向的方向设为  $X$  轴,垂直于光纤轴向的方向设为  $Y$  轴。将该区域沿  $X$  轴与  $Y$  轴划分为6行6列,长宽均为  $50\ \text{mm}$  的单元网格。该图中分别定义沿  $Y$  轴方向加载点及其位置坐标依次为: $a(0\ \text{mm}, 50\ \text{mm})$ 、 $b(0\ \text{mm}, 100\ \text{mm})$ 、 $c(0\ \text{mm}, 150\ \text{mm})$ 、 $d(0\ \text{mm}, 200\ \text{mm})$ 、 $e(0\ \text{mm}, 250\ \text{mm})$ 、 $f(0\ \text{mm}, 300\ \text{mm})$ 。沿  $X$  轴方向加载点及其位置坐标依次为: $g(50\ \text{mm}, 0\ \text{mm})$ 、 $h(100\ \text{mm}, 0\ \text{mm})$ 、 $i(150\ \text{mm}, 0\ \text{mm})$ 、 $j(200\ \text{mm}, 0\ \text{mm})$ 、 $k(250\ \text{mm}, 0\ \text{mm})$ 、 $l(300\ \text{mm}, 0\ \text{mm})$ 。

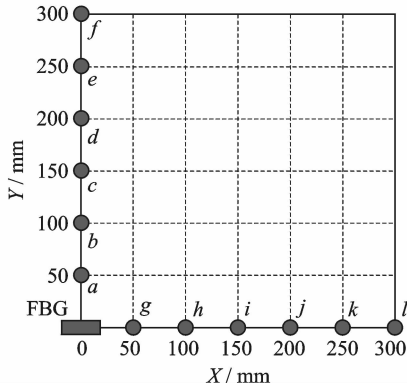


图 2 静载条件下铝合金板加载点位置分布图

Fig. 2 Location figure of loading points of aluminum alloy plate under static load

试验中通过施加不同属性的动静态载荷,详细研究加载距离  $L$  (加载点与传感器间隔)、载荷大小  $F$  以及加载夹角  $\theta$  (加载点与传感器的连线和光纤轴向的夹角) 对光纤光栅传感器敏感特性的影响。

### 3 静载条件下光纤光栅传感器敏感特性

#### 3.1 中心波长偏移量与加载距离关系

静态加载试验中,采用标准砝码进行加载,砝码并不直接接触板面,而是由一个专用静载模具承载,以便模拟集中载荷作用。

沿图 2 中所示  $X$  轴方向,分别对  $g, h, i, j, k$  及  $l$  6 个加载点施加静态载荷。记录下每次加载光纤光栅传感器对应的中心波长偏移量。沿  $Y$  轴方向,按照相同步骤重复以上操作。根据试验结果,得到不同载荷条件下光纤光栅传感器中心波长偏移量与加载距离  $L$  的对应关系曲线,如图 3 所示。

图 3 显示加载载荷分别为 30 N 和 60 N 条件下,光纤光栅传感器中心波长偏移量均随载荷加载

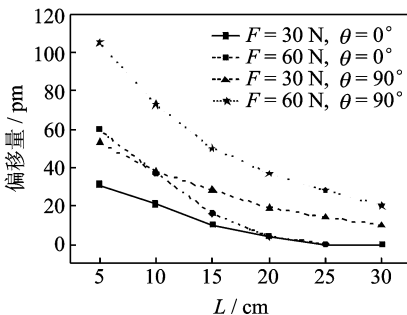


图 3 传感器中心波长偏移量与加载距离对应关系

Fig. 3 Corresponding relationship between sensor center wavelength offset and loading distance

距离  $L$  的增大而呈指数趋势减少,且加载载荷越大,偏移量下降得越快。由于光纤光栅传感器中心波长偏移量随其所受应变增大而增加,而图 3 中随着加载点距离光纤光栅传感器越来越远,则相同载荷所引起的传感器粘贴位置板面的应变幅值将越来越小,这就使得传感器中心波长偏移量呈现逐渐减小趋势。

#### 3.2 中心波长偏移量与载荷大小关系

为考察光纤光栅传感器对载荷大小  $F$  变化的敏感特性,本节分别选择如图 2 所示  $Y$  轴方向  $b(0 \text{ mm}, 100 \text{ mm})$  和  $d(0 \text{ mm}, 200 \text{ mm})$  两个单元节点施加静态载荷。载荷从 0 N 依次加至 60 N,每次加载增加 10 N。加载完毕,再从 60 N 依次递减至 0 N。根据试验结果,得到光纤光栅传感器中心波长偏移量与加/卸载载荷大小对应关系曲线,如图 4 所示。

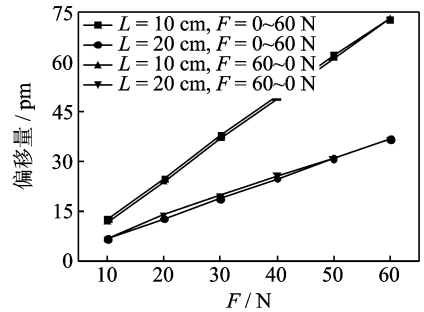


图 4 传感器中心波长偏移量与加/卸载载荷大小对应关系

Fig. 4 Corresponding relationship between sensor center wavelength offset and size of loading/unloading

图 4 显示在加载距离  $L$  分别为 10 cm 与 20 cm 条件下,光纤光栅传感器中心波长偏移量随载荷大小增加而呈现单调递增规律,且具有良好线性度。整个加载和卸载过程光纤光栅传感器中心波长的响应特性呈现出良好重复性。这是由于在加/卸载阶段,粘贴于铝合金板试件下表面的光纤光栅传感器栅区依次处于拉伸或压缩状态,导致传感器中心波长也随之发生递增或递减趋势的变化。

此外,在相同载荷作用下,加载距离为 10 cm 处对应的中心波长偏移量要明显高于加载距离为 20 cm 时对应的偏移量。这是由于随着加载距离增大,载荷造成的传感器所处位置板面形变量呈衰减趋势所致。

#### 3.3 中心波长偏移量与加载夹角关系

为考察光纤光栅传感器对加载夹角  $\theta$  变化的

敏感特性,本节分别选择如图5所示,以传感器所在位置为圆心,以10 cm和20 cm为半径划分两个圆弧,分别按照加载角度为 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 共设置10个加载点。

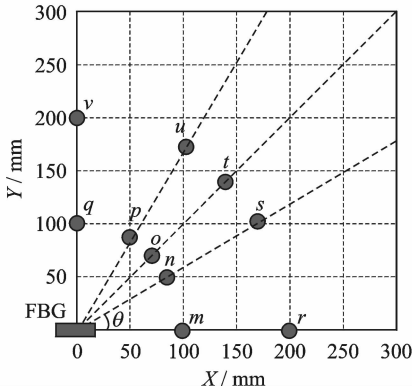


图5 铝合金板加载点位置分布图

Fig. 5 Location figure of loading points of aluminum alloy plate

图6显示在相同载荷作用下,光纤光栅传感器中心波长偏移量随加载夹角 $\theta$ 从 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的增加而逐渐增大。这表明随着加载点与传感器连线和光纤轴向之间夹角 $\theta$ 逐渐增大,相同载荷所引起的光栅栅区周期变化量 $\Delta\lambda$ 也随之增大,进而引起中心波长偏移量 $\Delta\lambda$ 相应变大,使得光纤光栅传感器对来自不同方向的载荷作用表现出不同的敏感特性。如该图中五角星标识双点划线表示加载载荷为60 N,加载距离20 cm时对应的中心波长偏移量与加载夹角 $\theta$ 拟合关系曲线,其斜率约为 $0.36 \text{ pm}/(^\circ)$ 。

当加载点与传感器的连线和光纤轴向夹角为 $90^\circ$ 时,光纤光栅传感器主要受到类似沿轴向的拉伸力或压缩力。而当加载点与传感器的连线和光纤轴向夹角为 $0^\circ$ 时,光纤光栅传感器主要受到剪

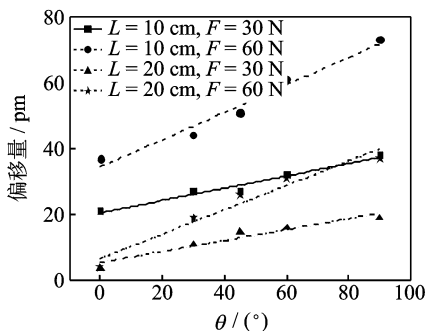


图6 传感器中心波长偏移量与加载夹角关系

Fig. 6 Relationship between sensor center wavelength offset and loading angle

切力作用,这使得光纤光栅传感器具有显著的方向敏感特性。

## 4 冲击条件下光纤光栅传感器敏感特性

### 4.1 中心波长偏移量与加载距离关系

为考察冲击载荷距离变化对光纤光栅传感器响应特性的影响,分别采集如图2所示Y轴方向不同冲击位置 $a(0 \text{ mm}, 50 \text{ mm})$ 、 $b(0 \text{ mm}, 100 \text{ mm})$ 、 $c(0 \text{ mm}, 150 \text{ mm})$ 、 $d(0 \text{ mm}, 200 \text{ mm})$ 、 $e(0 \text{ mm}, 250 \text{ mm})$ 、 $f(0 \text{ mm}, 300 \text{ mm})$ 对应的传感器中心波长偏移量冲击响应信号进行分析。

不同冲击加载点对应的光纤光栅传感器响应信号时频域图,如图7所示。研究发现,随着冲击加载距离 $L$ 增大,光纤光栅传感器中心波长最大偏移量绝对值(定义为最大峰值幅度)大小依次为: $\Delta\lambda_{a\max} > \Delta\lambda_{b\max} > \Delta\lambda_{c\max} > \Delta\lambda_{d\max} > \Delta\lambda_{e\max} > \Delta\lambda_{f\max}$ 。

图7显示铝合金板前两阶固有频率约为15, 70 Hz。由幅频图可以发现,中低频固有频率幅值较高,且随着冲击点至光纤光栅传感器距离增大,中低频固有频率频谱幅值呈逐渐减小趋势,而高频部分变化不明显。

图8给出了光纤光栅传感器中心波长最大峰值幅度与冲击距离 $L$ 之间的对应关系。当冲击距离逐渐增大时,光纤光栅传感器所受应变随之减小,进而导致相应传感器中心波长最大峰值幅度也逐步减小。此外,当冲击距离超过感知阈值时,传感器反射光谱将不再发生变化。这表明冲击点较

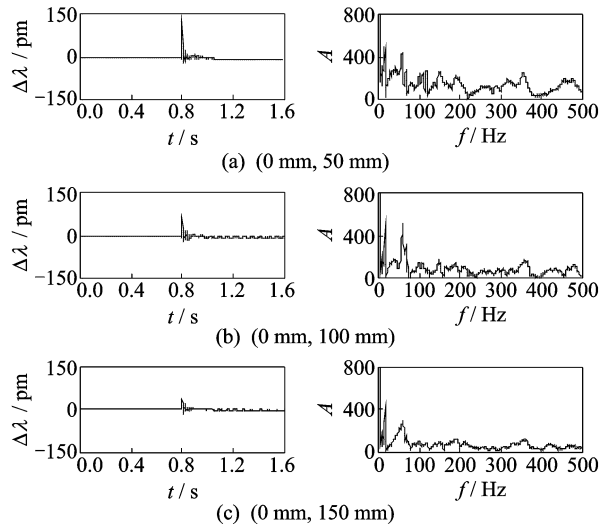


图7 不同冲击加载点对应的传感器响应信号时频图

Fig. 7 Corresponding sensor's response signal time-frequency figure of different impact loading points

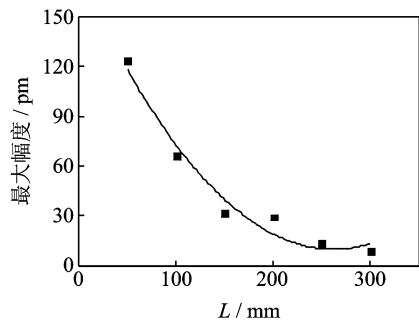


图 8 传感器中心波长最大峰值幅度与冲击距离对应关系  
Fig. 8 Corresponding relationship between the maximum peak amplitude of FBG center wavelength and impact distance

远时, 由于应力衰减造成远处传感器所处位置应变相对较小, 超出了光纤光栅的应变有效感知范围。

基于小波包分解的能量谱特征向量构建原理<sup>[11]</sup>, 选择小波包分解的节点能量作为特征值, 用以评估冲击加载距离对 FBG 中心波长偏移量的影响。将传感器响应信号进行 5 层小波包分解, 选择第 5 层第 1 个节点 (频带范围 0~16.3 Hz) 的能量占总能量的比值定义为节点能量比, 并将其作为距离识别的特征指标。为保证分解效果, 选取“db8”小波基作为小波函数。

利用小波包分解技术提取冲击信号的特征参数, 得到各个冲击点位置节点能量比值与冲击距离  $L$  之间的曲线关系, 如图 9 所示。该曲线显示光纤光栅传感器节点能量比值随冲击点到传感器栅区的距离增大而减小, 这与图 8 所示的光纤光栅传感器中心波长最大峰值幅度随冲击距离变化而改变的规律相一致, 表明该节点能量比值指标同样能够较好地反映出冲击点至光纤光栅传感器栅区距离的情况。

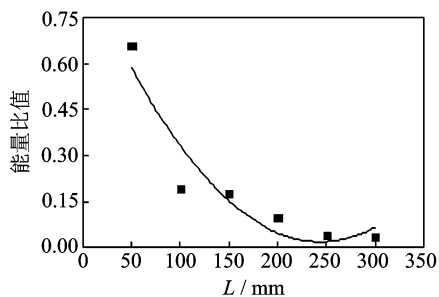


图 9 节点能量比值与冲击加载距离对应关系  
Fig. 9 Corresponding relationship between node power ratio and impact loading distance

### 4.2 中心波长偏移量与加载夹角关系

为考察冲击加载夹角变化对光纤光栅传感器敏感特性的影响, 采集如图 5 所示 10 cm 半径圆弧上加载角度依次为  $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  的 5 个不同位置冲击点  $m(100 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$ 、 $n(86.6 \text{ mm}, 50 \text{ mm})$ 、 $o(70.7 \text{ mm}, 70.7 \text{ mm})$ 、 $p(50 \text{ mm}, 86.6 \text{ mm})$  及  $q(0 \text{ mm}, 100 \text{ mm})$  所对应的传感器响应信号。

不同冲击加载夹角  $\theta$  对应的光纤光栅传感器响应信号时频图, 如图 10 所示。该图显示铝合金板前两阶固有频率仍约为 15, 70 Hz。这是由于铝合金板试件具有各项同性特点, 材料在各方向物理属性相近, 使得不同位置冲击所激发的固有频率阶数相差不大。由幅频图可以发现, 中低频固有频率幅值相对较高。

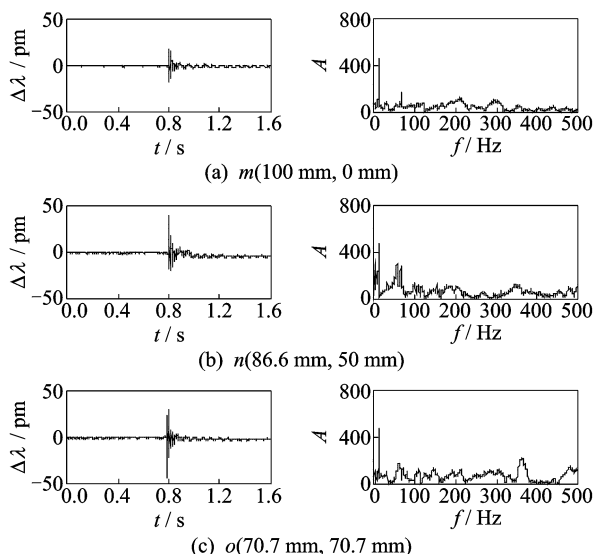


图 10 不同加载夹角对应的传感器冲击响应信号时频图  
Fig. 10 Corresponding sensor's impact response signal time-frequency figure of different loading angles

图 11 显示随着冲击加载夹角  $\theta$  增大, 光纤光栅传感器中心波长最大峰值幅度依次为:  $\Delta\lambda_{q\max} > \Delta\lambda_{p\max} > \Delta\lambda_{o\max} > \Delta\lambda_{n\max} > \Delta\lambda_{m\max}$ , 其变化规律与静载情况类似。

进一步从频域角度研究在加载距离相同而冲击加载夹角不同条件下的传感器响应规律。仍选择第 5 层第 1 个节点 (频带范围 0~16.3 Hz) 的能量占总能量的比值作为距离识别的特征指标。图 12 给出小波包分解之后节点能量比值与冲击加载夹角之间的曲线关系。由该曲线可知, 光纤光栅传感器节点能量比随加载夹角  $\theta$  的增大而呈现逐渐增加趋势。这表明节点能量比值指标能够较好地反映出光纤光栅传感器的方向敏感特性。

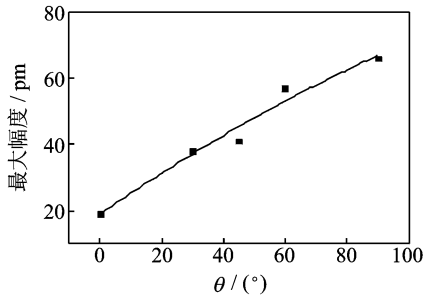


图 11 传感器中心波长最大峰值幅度与加载夹角对应关系  
Fig. 11 Corresponding relationship between the maximum peak amplitude of FBG center wavelength and loading angle

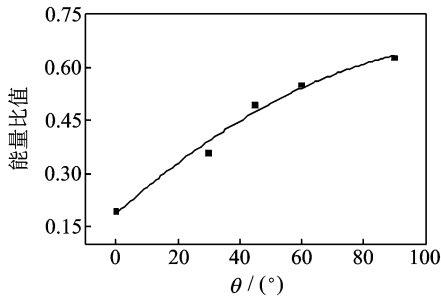


图 12 节点能量比值与冲击加载夹角对应关系  
Fig. 12 Corresponding relationship between node power ratio and impact loading angle

## 5 结 论

本文通过构建基于铝合金板结构试件的光纤光栅传感器敏感特性试验系统,分别从时频域角度研究了传感器特征响应参量与所加载荷属性之间的对应关系,具体如下:

(1) 在相同载荷大小和加载夹角下,光纤光栅传感器中心波长偏移量随加载距离的增大而呈指数趋势减小。

(2) 在相同加载夹角和加载距离下,传感器中心波长偏移量随载荷大小增加而呈单调递增关系。

(3) 在相同加载距离和载荷大小作用下,传感器呈现出良好的载荷-方向敏感特性。光纤光栅传感器最大峰值幅度和节点能量比值随冲击加载夹角  $\theta$  增加而增大,且加载夹角呈  $90^{\circ}$  时传感器中心波长偏移量最大。

### 参考文献:

[1] Wang G, Pran K, Sagvolden G, et al. Ship hull structure monitoring using fiber optic sensors [J]. Smart Material and Structures, 2001(10):472-478.  
[2] Mieloszyk M, Krawczuk M, Zak A, et al. An adaptive wing for a small-aircraft application with a configuration of fiber Bragg grating sensors [J]. Smart

Materials and Structures, 2010(19):1-12.

- [3] 路士增,姜明顺,隋青美,等. 基于小波变换和支持向量多分类机光纤布拉格光栅低速冲击定位系统[J]. 中国激光,2014,41(3):0305006.  
Lu Shizeng, Jiang Mingshun, Sui Qingmei, et al. Identification of impact location by using fiber bragg grating based on wavelet transform and support vector classifiers[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0305006.  
[4] 张晓丽,梁大开,芦吉云,等. 高可靠性光纤布拉格光栅传感器网络设计[J]. 中国激光,2014,41(3): 0305006.  
Zhang Xiaoli, Liang Dakai, Lu Jiyun, et al. A high reliable optic fiber grating sensor network design[J]. Chinese J Lasers, 2011,38(1):0105004.  
[5] Takeda S, Aoki Y, Ishikawa T, et al. Structural health monitoring of composite wing structure during durability test[J]. Composite Structures, 2007, 79 (1): 133-139.  
[6] Fedor Mitschke. Fiber-optic sensors[M]. Germany: [s. n.], 2010:247-256.  
[7] 芦吉云,梁大开,潘晓文. 基于准分布式光纤光栅传感器的机翼盒段载荷监测[J]. 南京航空航天大学学报,2009,41(2):217-221.  
Lu Jiyun, Liang Dakai, Pan Xiaowen. Load measurement of wing box based on distributed fiber bragg grating sensors[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 41(2): 217-221.  
[8] 王利恒. 复合层合板低速冲击应变测试及其状态监测[J]. 压电与声光,2012,34(4):509-514.  
Wang Liheng. Study on low-velocity impact strain measurement of composite laminate plate and its health monitoring using fiber bragg grating sensors [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2012, 34(4): 509-514.  
[9] Lau Kintak, Yuan Libo, Zhou Limin, et al. Strain monitoring in CFRP laminates and concrete beams using FBG sensors[J]. Composite Structures, 2001, 51(1): 9-20.  
[10] 廖延彪,黎敏,阎春生. 现代光信息传感原理[M]. 北京:清华大学出版社,2009,186-191.  
Liao Yanbiao, Li Min, Yan Chunsheng. Principles of contemporary optical information sensing [M]. Beijing: Tsinghua University Press,2009:186-191.  
[11] 刘磊,于淼,杨瑞娟,等. 小波去噪用于光纤拉曼温度传感系统[J]. 中国激光,2013,40(6):0605005.  
Liu Lei, Yu Miao, Yang Ruijuan, et al. Wavelet denoising applied in optical fiber Raman temperature sensor system [J]. Chinese J Laser, 2013, 40(6): 0605005.

