

文章编号 1004-924X(2007)11-1731-07

光纤光栅型智能结构损伤识别的小波包分析

王彦, 梁大开, 周兵

(南京航空航天大学 智能材料与结构航空科技重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要: 基于结构振动监测技术, 采用小波包分析方法对采集的结构振动信号进行了小波分解。介绍了小波包分解技术, 提出将小波包能量谱作为损伤指标用以表征结构的损伤状态。在相同损伤位置不同损伤程度、不同损伤位置相同损伤程度的两种情况下对试件进行了六种不同损伤工况的振动信号分析。数据分析结果表明, 结构的损伤将导致结构振动信号小波包分解中特定阶数的能量增加, 而所提出的损伤指标对结构的损伤程度、损伤距离及损伤位置与光栅传感器之间的角度均敏感, 实验中能够识别 12 g 重物且距离光纤光栅传感器 30 cm 的损伤, 表明对智能结构的在线损伤识别是可行的。

关键词: 光纤光栅型智能结构; 损伤识别; 小波包能量谱

中图分类号: TP212.14 ; TP183 **文献标识码:** A

Damage diagnosis for optical fiber grating smart structure based on wavelet packet analysis

WANG Yan, LIANG Da-kai, ZHOU Bing

(*Aeronautical Science Key Laboratory for Smart Materials and Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China*)

Abstract: To realize the damage diagnosis of a optical fiber grating smart structure, the structural dynamic response signal was decomposed with the wavelet analysis method based on the vibration monitor of optical fiber grating smart structure. The wavelet packet decomposition was introduced, and the wavelet packet energy spectrum describing the damage character was used to identify the structural damage status. Then, six different damage circs were studied by experimental laminates, including the different degrees and the same location of structure damage, and different locations and the same degree of structure damage. The results show that the structure damage will lead to the increase of wavelet energy spectrum of some specifically frequency bands of the structure dynamic response signal, and the damage characters are sensitive to the damage degree, damage location and the degree from the damage to the sensor. In the experiment, this method can recognize the damage of 12 g weights and 30 cm from the optical fiber grating sensor, it is feasible to realize the structure on-line damage diagnosis.

Key words: optical fiber grating smart structure; damage diagnosis; wavelet packet energy spectrum

收稿日期: 2007-07-26; 修订日期: 2007-09-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60477031); 国家自然科学基金重点项目(No. 60535020); 江苏省汽车工程重点实验室开放基金资助项目(No. QC200502)

1 引言

结构的安全性和可靠性是保证整个系统正常工作的关键因素,轻微的损伤可以潜在地造成灾难性的事故,比如:螺钉松动、燃料箱开裂等损伤可能引起飞机坠毁,空间航天飞行器爆炸,建筑物和桥梁坍塌等,这些都将造成重大人员伤亡和经济损失。为了避免这种情况,必须对结构的损伤进行识别,当前学术界都在积极地研制结构健康监测和损伤分析的新方法。相对于传统的方法,对这些新监测方法的要求是:(1)把监测系统合成到结构中去,成为智能结构;(2)使在线监测成为可能;(3)数据的分析算法简单;(4)要有损伤定位、损伤量化的能力,甚至能预测和进行简单的加固修补^[1]。目前,光纤智能夹层技术已取得很大进展,光纤光栅智能结构技术已成功应用到机翼盒段上^[2]。

小波分析的概念是法国地质学家 Jean Morlet 于 1981 年提出的,最先将其用于地质数据处理。随后,在诸多科学家的共同努力下,小波分析迅速发展。至今,以解决实际问题出发的小波分析方法,已成为一门辐射多学科的新兴科学,在故障诊断领域显示出其强大的生命力。

小波分析属于时频分析的一种。传统的信号分析是建立在傅里叶(Fourier)变换的基础之上的,但是,Fourier 分析使用的是全局变换,无法表述信号的时频局域性质,而时频局域性质恰恰是非平稳信号最根本和关键的性质。于是,短时傅里叶变换和小波变换应运而生,短时傅里叶变换是一种单分辨率的信号分析方法,使用的是一固定的短时窗函数,而小波变换具有多分辨率分析的特点,在时频两域都具有表征信号局部特征的能力,其在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率,适合于探测正常信号中夹带的瞬态反常现象,所以被誉为分析信号的数字显微镜。

本文针对光纤光栅型智能结构,对采集到的结构振动信号进行小波包分析,将小波包能量变化率作为结构的损伤指标,进行了三种不同程度的损伤及三种不同损伤位置的实验,结果表明,对于将光纤光栅埋入到材料中构成的智能结构,小

波包能量谱的变化率可以识别损伤程度并与损伤位置相关,有一定的敏感性,可作为光纤光栅型智能结构的损伤指标。

2 信号的小波包分解

2.1 小波包分解

小波的多分辨率特性可以对信号进行有效的时频分解,但由于其尺度是二进制变化的,所以在高频段其频率分辨率较差,而在低频段时间分辨率较差,即对信号的频带进行指数等间隔划分(具有等 Q 结构),其在识别包含高频部分的信号时存在一定的困难。它是把信号 s 分解成低频 a_1 和低频 d_1 两部分,在分解过程中,低频 a_1 失去的信息由高频 d_1 捕获。在下一层的分解中,又将 a_1 分解成低频 a_2 和低频 d_2 两部分,低频 a_2 中失去的信息由高频 d_2 捕获,如此类推进行更深层次的分解。而小波包分析是小波变换的补充,是由通常的小波函数进行线性组合而成的可供选择的一系列基函数。它将频带进行多层次划分,对多分辨分析没有细分的高频部分进一步分解,并能够根据被分析信号的特征,自适应地选择相应频带,使之与信号频谱相匹配,从而提高了时频分辨率,因此是一种比小波分析更为精细的分解方法,具有更广泛的应用价值。

对采集到的时域信号 $u(t)$ 可用小波包分解算法^[3-6]:

$$\begin{cases} u_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbf{Z}} h(k) u_n(2t - k) \\ u_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbf{Z}} g(k) u_n(2t - k) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $h(k)$ 、 $g(k)$ 为两尺度序列,可视为正交共轭低通滤波器和高通滤波器,通过小波包分解后可以把信号无泄漏、不重叠地分解到相邻的独立频段上。

2.2 小波包能量谱损伤指标

在一定的振动激励情况下,结构会产生某种振动响应,振动响应取决于结构的固有频率、阻尼、刚度、激励条件。由于结构损伤后其固有频率、阻尼和刚度将发生变化,因此结构损伤后会影 响结构的动态振动响应。对于结构振动测试得到的时域信号,传统的分析方法是通过对 Fourier 分析和数值积分得到结构的频域信息和模态信息,然后再构造出各种损伤指标,如固有频率、结构模

态、模态曲率、模态与频率混合指标等。这些不同损伤指标的结构损伤识别问题已经有较多的研究,并已证明它们能不同程度地解决一些结构损伤问题。

但是,当结构发生微小损伤时,传统的用于结构损伤识别的参数如固有频率和振型等变化极为微小,大多数情况下无法根据这些参数的变化来识别结构的微小损伤或者损伤识别的精度很低,因此,这种通过传统分析方法构造出的损伤指标对微小损伤并不能进行有效判断^[7-9]。而能量谱对结构的微小损伤极为敏感,微小损伤引起结构的质量、刚度和阻尼变化均可引起能量的大幅度变化,因此,本文基于小波包能量谱分析技术,提出了“能量-损伤”的结构损伤识别方法。

本文采用 Daubechies 小波作为结构损伤识别的小波函数。首先对采集到的结构振动信号进行小波包分解,在实验中选择 5 层小波包分解,可得到第 5 层从低频到高频共 32 个频率成分的信号特征;然后,对小波包分解系数重构,根据各频带范围的信号,对第 5 层所有结点分析,可得每个结点的重构系数 $S_{i,j}$ ($i=5, j=0, 1, 2, 3, \dots, 31$); 随之,计算各频带信号的总能量 $E_{5,j}$,则 $E_{5,j}$ 构成小波包能量谱:

$$E_{5,j} = \int |S_{5,j}|^2 dt = \sum_{k=1}^n |x_{j,k}|^2, \quad (2)$$

式中, $x_{j,k}$ ($j=0, 1, 2, 3, \dots, 31, k$ 为采样点数) 为重构信号 $S_{i,j}$ 离散点的幅值。

当结构发生损伤时,对各频带信号的能量将有较大的影响,对这些能量构成的特征向量进行归一化处理,可取特征向量 T 为:

$$T = \frac{E_{5,j}}{\left(\sum_{j=0}^{31} |E_{5,j}|^2\right)^{\frac{1}{2}}}. \quad (3)$$

最后,根据特征向量,对无损伤时的时域振动信号的能量谱特征向量 T 与有损伤时的时域振动信号的能量谱特征向量 T' 相比较,构造损伤指标:

$$I_j = \frac{T_{5,j}'}{T_{5,j}} \quad (j=0, 1, 2, 3, \dots, 31), \quad (4)$$

式中, I_j 为第 j 个特征频带的能量谱变化量, $T_{5,j}$ 和 $T_{5,j}'$ 分别是结构健康状态下和损伤状态下的第 j 个能量谱特征向量。对所监测的结构试件来说,可先采集结构健康状态下的振动信号,并对其进行小波包分析,构建健康状态下的能量谱特征

向量 $T_{5,j}$,以作为今后结构损伤识别的基础。

3 实验研究

3.1 实验系统

实验系统采用基于强度解调的长周期光纤光栅智能结构振动监测系统。该系统由粘贴了光栅的结构试件(Optical Fiber Grating Smart Structure, OFGSS)、激振器、强度解调系统、光源、光电管、放大电路及数据采集系统组成,如图 1 所示。

图 2 为铝板结构试件示意图,采用四边简支结构,尺寸为 (110 mm × 28 mm × 1.5 mm, LY12CZ),光栅横向粘贴于试件中央,长约 6 cm,位置 I、II、III 为实验中模拟的损伤位置。

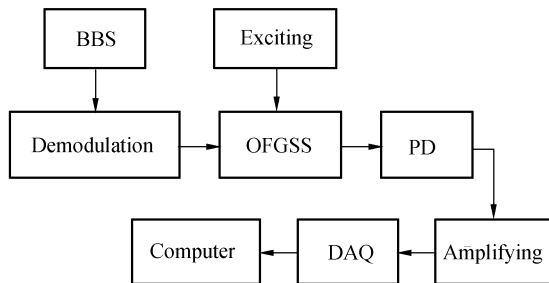


图 1 光纤光栅型智能结构振动监测系统
Fig. 1 Smart structure vibration monitor experimental set-up with optical fiber grating

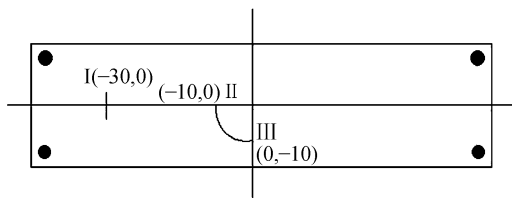


图 2 铝板结构试件图
Fig. 2 Aluminium structure specimens

结构的振动由接触式激振器提供(HEV-50),本文实验采用稳定的频率激振,用于采集时域振动信号的为 NI 公司的 6024E 采集卡,设置采样率为 10 k/s,每次采样 1 000 点,系统软件采用 Labview7.1 和 Matlab6.5 混合编程。

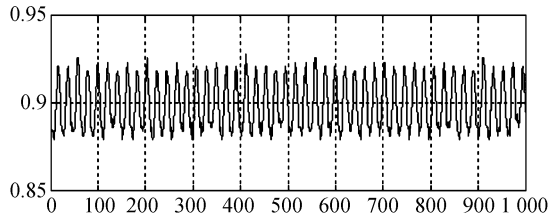
3.2 实验分析

实验采用两种方案对结构损伤进行小波包分析。分别为在结构的同一位置 I 处施加三种程度的损伤,以及在结构的位置 I、II、III 处施加相同

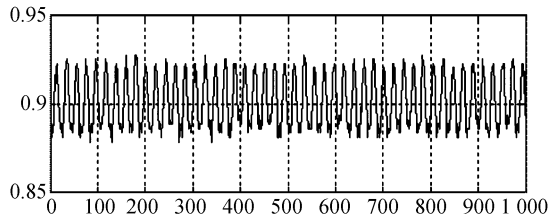
程度的损伤,以分析小波包能量谱的损伤指标对损伤程度、损伤位置的敏感性。

3.2.1 同一位置不同程度的损伤

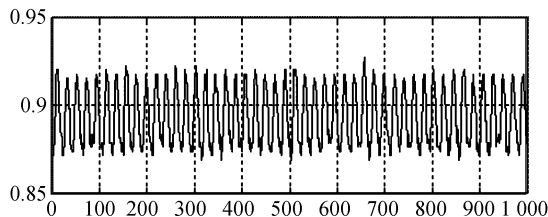
图 3(a)为试件健康状态下的时域振动信号,试件的激振频率为 480 Hz,在试件位置 I 处分别粘贴质量为 12 g、100 g 和 200 g 重物以模拟不同程度损伤,重物大小均为 5 mm×5 mm 圆形,对



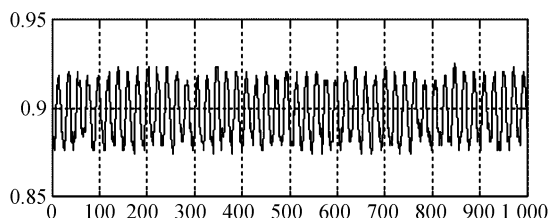
(a)健康状态
(a) Health status



(b)损伤程度 I, 损伤位置 I
(b) Damage degree I, location I



(c)损伤程度 II, 损伤位置 I
(c) Damage degree II, location I

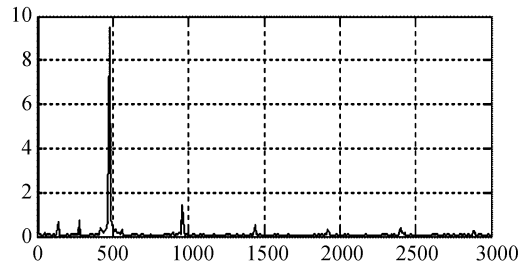


(d)损伤程度 III, 损伤位置 I
(d) Damage degree III, location I

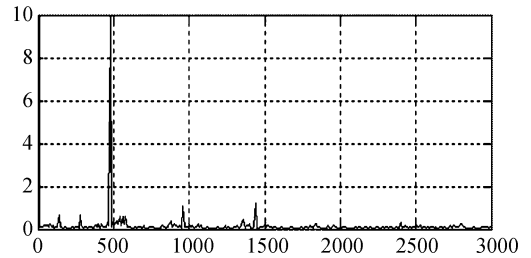
图 3 试件在健康与不同损伤程度下的时域振动信号
Fig. 3 Vibration response signals on health status and different damage degrees

应损伤程度 I、II、III。图 3(b)、(c)、(d)为这三种损伤程度下,在相同激振频率、激振幅值时采样到的时域信号,从时域信号可见,四个信号几乎看不出有差别,也就是说,欲从时域信号分辨试件的损伤是不可行的。

图 4(a)、(b)为对健康信号和损伤程度 III 时的损伤时域信号做 Fourier 变换后的频谱图,由信号的频谱图可见,微小损伤时结构的动态响应信号其频谱几乎不变,可见由信号的频域信息也无法判断结构的损伤。



(a)健康状态信号
(a) FFT of health status

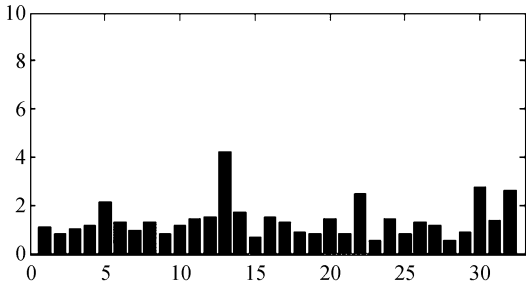


(b)损伤程度 III, 损伤位置 I
(b) FFT of damage degree III, location I

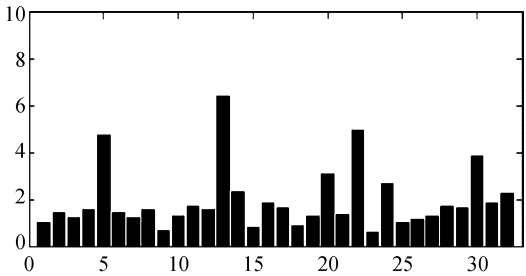
图 4 480 Hz 下试件在健康与损伤状态的时域振动信号频谱图

Fig. 4 FFT of vibration response signals on health status and different damage degrees

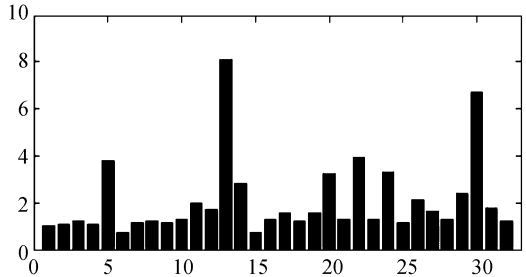
图 5 为根据上述讨论选取的损伤指标小波包能量谱变化量 I_j 图。图 5(a)、(b)、(c)分别对应为结构损伤程度 I、II、III 时的小波包能量谱变化率图。由图可发现,小波包能量谱相同的阶数发生了变化,尤其以第 5、13、20、22 和 30 阶变化最为明显,即这几阶频带内的能量对损伤程度最为敏感,其中第 13、20、30 阶能量谱随着损伤增大(重量越重),其能量谱变化幅度越大。表 1 为选取的这几个阶数下结构的四种状态时的小波包能量值。



(a) 损伤程度 I, 损伤位置 I
(a) Damage degree I, location I



(b) 损伤程度 II, 损伤位置 I
(b) Damage degree II, location I



(c) 损伤程度 III, 损伤位置 I
(c) Damage degree III, location I

图 5 480 Hz 下试件三种损伤程度的小波-能量谱
Fig. 5 Wavelet energy spectra on different damage degrees

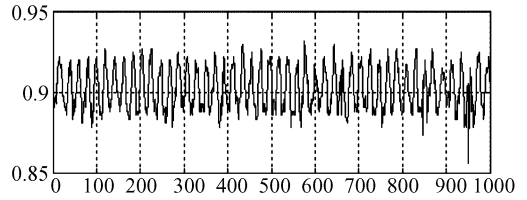
表 1 试件在健康与不同损伤程度下的小波包能量
Tab. 1 Wavelet energy on health status and different damage degrees

小波 阶数	健康 状态	损伤程度 I 位置 I	损伤程度 II 位置 I	损伤程度 III 位置 I
13	0.000 14	0.000 59	0.000 90	0.001 14
20	0.000 05	0.000 07	0.000 15	0.000 16
30	0.000 05	0.000 14	0.000 20	0.000 35

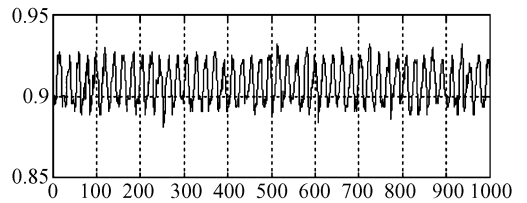
3.2.2 不同位置相同程度的损伤

图 6(a)、(b)分别为在相同激振频率、激振幅

值下,试件位置 II、位置 III 处粘贴 12 g 重物(损伤程度 I)模拟损伤状态时采集的时域振动信号,试件的激振频率为 480 Hz。同样可见,时域信号几乎看不出有差别。



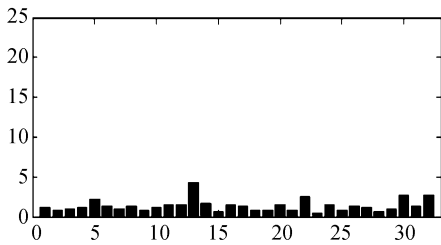
(a) 损伤程度 I, 损伤位置 II
(a) Damage degree I, location II



(b) 损伤程度 I, 损伤位置 III
(b) Damage degree I, location III

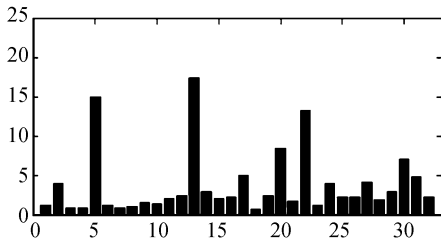
图 6 试件在健康与不同损伤位置下的时域振动信号
Fig. 6 Vibration response signals on health status and different damage locations

同理,计算它们各自的小波包能量谱变化率,如图 7 所示。图 7(a)~(c)分别对应位置 I~III 的小波包能量谱变化率。其中 I 位置离光纤光栅传感器最远,而位置 II、III 距离光栅中心点距离相同,但是与光栅的角度不同。I 和 II 均与光栅平行,II、III 位置分别与光栅方向成 0°和 90°角。从图中可以看出,仍然是小波阶数第 5、13、20、22 和 30 阶数的能量谱变化最大。表 2 为选取的这几阶在三个位置下与健康状态下的小波包能量值。从表 2 中可见,对于相同方向的位置 I 与位置 II,在位置 II 处的各阶小波包能量值比位置 I 处的小波包能量值均大许多,而对于离光栅传感器相同距离的位置 II 和位置 III 来说,位置 III 处的小波包能量值均明显低于位置 II 处的小波包能量值,这与位置 III 和光栅传感器之间垂直有关,表明光栅型智能结构中采用小波包能量谱分析的损伤指标不仅对损伤的距离敏感,同时,也对损伤位置与传感器位置之间的角度敏感。这也说明采用多根光栅传感器共同传感以实现损伤位置的判断是可能的。



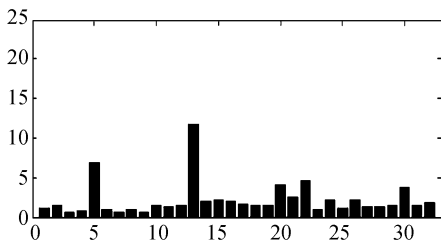
(a) 损伤程度 I, 损伤位置 I

(a) Damage degree I, location I



(b) 损伤程度 I, 损伤位置 II

(b) Damage degree I, location II



(c) 损伤程度 I, 损伤位置 III

(c) Damage degree I, location III

图 7 480 Hz 下试件三个损伤位置的小波-能量谱
Fig. 7 Wavelet energy spectra on different damage locations

表 2 试件在健康与不同损伤位置下的小波包能量

Tab. 2 Wavelet energy on health status and different damage locations

小波阶数	健康状态	损伤程度 I 位置 I	损伤程度 I 位置 II	损伤程度 I 位置 III
5	0.000 16	0.000 33	0.002 36	0.001 08
13	0.000 14	0.000 59	0.002 45	0.001 65
20	0.000 05	0.000 07	0.000 41	0.000 20
22	0.000 07	0.000 16	0.000 87	0.000 30
30	0.000 05	0.000 14	0.000 36	0.000 19

4 结 论

上述分析可知,结构振动信号由不同频率组成,结构损伤后,某些频段的响应信号将衰减或增强,即这些频段的响应能量将变化,因此,可从结构响应信号中提取结构损伤的信息。采用小波包分析方法(WPA)将信号分解成各种频段下的多个子信号,则此结构振动响应信号的能量变化会包含结构损伤的信息。在本文的实验中,结构损伤导致结构振动信号的小波包分解中的第 5、13、20、22、30 阶能量增加,因此,对于光栅型智能结构,采用小波包能量谱分析方法提出的损伤指标对结构的损伤程度、损伤距离及损伤位置与光栅传感器之间的角度均敏感,实验中能够识别 12 g 重物且距离光纤光栅传感器 30 cm 的损伤,这种方法无需对结构建模,方法简单,实验证明是可行的。可见,小波包分析方法不仅是信号处理的一种新方法,而且是提高结构损伤识别精确度的一种有效途径。目前,后续的工作将考虑通过几根光栅传感器的共同作用实现损伤程度、损伤位置的判断。

参考文献:

- [1] 唐守锋,熊克,梁大开,等.用于结构健康监测的智能夹层研究进展[J].实验力学,2005,20(6):226-234.
TANG SH F, XIONG K, LIANG D K, *et al.*. The development of SMART layer used in structural health monitoring[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2005,20(6):226-234. (in Chinese)
- [2] 芦吉云,梁大开,李东升,等.F-P 光纤传感器及光纤 Bragg 光栅传感器应用于光纤智能夹层的研究[J].应用激光,2005,25(3):183-185.
LU J Y, LIANG D K, LI D SH, *et al.*. Study on extrinsic fabry-perot interferometer sensor and fiber bragg grating sensor in the application of fiber smart layer[J]. *Applied Laser*, 2005,25(3):183-185. (in Chinese)
- [3] 徐长发,李国宽.实用小波方法(第二版)[M].武汉:华中科技大学出版社,2003.
XU CH F, LI G K. *Practical Wavelet Method (second edition)* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and

Technology Press,2003. (in Chinese)

- [4] 高印寒,马喜来,何丽桥,等.基于小波包分解的阈值消噪在车载 CAN 总线上的应用[J].光学精密工程,2007,15(3):434-439.
GAO Y H,MA X L,HE L Q, *et al.*. Application of threshold denoising based on wavelet packet decomposition to vehicular CAN-bus[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(3):434-439. (in Chinese)
- [5] 林晓梅,李琳娜,牛刚.基于小波边缘检测的图像去噪方法[J].光学精密工程,2004,12(1):88-93.
LIN X M,LI L N,NIU G. Image denoising based on wavelete detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(1):88-93. (in Chinese)
- [6] 方勇华,孔超,兰天鹤.应用小波变换实现光谱的噪声去除和基线校正[J].光学精密工程,2006,14(6):1088-1092.
FANG Y H,KONG CH,LAN T G. Denoising and baseline correction of spectrum by wavelet transform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(6):1088-1092. (in Chinese)
- [7] 袁慎芳,陶宝祺,朱晓荣,等.应用小波分析及主动监测技术的复合材料损伤监测[J].材料工程,2001,2:43-46.
YUAN SH F,TAO B Q,ZHU X R, *et al.*. Damage self-diagnose of composite material using active monitoring technology and wavelet analysis method[J]. *Journal of Materials Engineering*,2001,2:43-46. (in Chinese)
- [8] 丁幼亮,李爱群.基于振动测试与小波包分析的结构损伤预警[J].力学学报,2006,38(5):639-644.
DING Y L,LI A Q. Structure damage early warning based on vibration testing and wavelet packet analysis[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2006,38(5):639-644. (in Chinese)
- [9] 韩建刚,任伟新,孙增寿.结构损伤识别的小波包分析实验研究[J].振动与冲击,2006,25(1):47-50.
HAN J G,REN W X,SUN Z SH. Damage detection and identification of structures in laboratory based on wavelet packet analysis[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2006,25(1):47-50. (in Chinese)

作者简介:王 彦(1975—),女,浙江庆元人,南京航空航天大学航空宇航学院博士研究生,主要从事智能材料与结构、智能监测与控制方面的研究。E-mail: yanwxyz@sina.com

导师简介:梁大开(1956—),男,江苏南京人,南京航空航天大学教授、博士生导师,主要从事智能材料与结构、自诊断、光纤传感系统、电阻应变传感系统等方面的研究。E-mail: liangdk@nuaa.edu.cn