本文引用格式: 张帅,鲁猛,麦建聪,等.基于光功率切割算法的级联 FBG 光谱重叠识别研究[J].自动化与信息工程,2022,43(4):7-11.

ZHANG Shuai, LU Meng, MAI Jiancong, et al. Research on spectral overlap recognition of cascaded fiber Bragg grating based on optical power cutting algorithm[J]. Automation & Information Engineering, 2022,43(4):7-11.

基于光功率切割算法的级联 FBG 光谱重叠识别研究*

张帅 鲁猛 麦建聪 朱萍玉

(广州大学机械与电气工程学院,广东 广州 510006)

摘要: 针对级联光纤布拉格光栅 (FBG) 传感器使用时,实际工况不确定应变可能使 2 个中心波长邻近的 FBG 光谱动态重叠,引起测试信号紊乱而无法被商用 FBG 解调设备软件正确解调,导致被测对象的真实应变丢 失或失真问题,提出一种 FBG 光谱光功率切割算法。建立光功率等值线函数模型,搜索等间隔光功率等值线族 与 FBG 光谱的交点,依据交点个数对 2 个具有邻近中心波长的 FBG 光谱重叠状态进行识别。经风电叶片交变载 荷疲劳试验中 2 个级联 FBG 实测数据计算案例表明,本文提出的 FBG 光谱光功率切割算法能有效识别 2 个 FBG 传感器的重叠光谱,为级联 FBG 传感器工程应用自诊断提供了解决方案。

关键词:级联光纤布拉格光栅;光功率等值线;光谱重叠;光功率切割算法

中图分类号: TH212; TH213.3 文献标识码: A 文章编号: 1674-2605(2022)04-0002-05 DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2022.04.002

Research on Spectral Overlap Recognition of Cascaded Fiber Bragg Grating Based on Optical Power Cutting Algorithm

ZHANG Shuai LU Meng MAI Jiancong ZHU Pingyu

(School of Mechanical and Electrical Engineering of Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: When using cascaded fiber Bragg grating (FBG) sensors, the uncertain strain may dynamically overlap the FBG spectra adjacent to two central wavelengths under actual working conditions, causing the test signal to be disordered and unable to be correctly demodulated by the commercial FBG demodulation equipment software, resulting in the loss or distortion of the real strain of the tested object. A FBG spectral optical power cutting algorithm is proposed and an optical power contour function model is established, Search the intersection of the equidistant optical power contour family and the FBG spectrum, and identify the overlapping states of two FBG spectra with adjacent central wavelengths according to the number of intersections. The calculation case of the measured data of two cascaded FBG sensors in the alternating load fatigue test of wind turbine blades shows that the FBG spectral optical power cutting algorithm proposed in this paper can effectively identify the overlapping spectra of two FBG sensors, and provides a solution for the self diagnosis of cascaded FBG sensors in engineering application.

Keywords: cascaded fiber Bragg grating sensors; optical power contour; spectral overlap; optical power cutting algorithm

0 引言

光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)传感器是近年发展起来的一种新型光纤传感器,具有重量轻、体积小、灵敏度高等特点,广泛应用于结构健康监测领域^[1-2]。其主要原理是通过 FBG 传感器反射光谱的中心波长漂移量来反映被测物体的外部环境变

化。目前,针对大型结构的健康监测,大多利用 FBG 传感器复用技术^[3-5],将 FBG 传感器组成传感器网络, 获取结构相关信息。然而,由于光源带宽限制,过多 的 FBG 复用导致反射光谱重叠,使解调设备无法识 别反射光谱的中心波长^[6],进而造成解调设备采集信 号异常,对 FBG 复用技术在实际工程中的应用提出 重大挑战。近年来,解调算法的改进研究备受关注。 文献[7]提出基于狼群算法解调中心波长,并引入学习 因子和变异系数,跳出局部极值以增强全局搜索能力, 对多个 FBG 复用系统进行解调,提高了解调精度。 文献[8]提出人工蜂群(artificial bee colony, ABC)算 法解调中心波长,并在此基础上提出改进 ABC(IABC) 算法,以改善 FBG 漂移后中心波长的解调精度,并 应用于多个 FBG 复用系统。以上研究重点均是面向 多路 FBG 传感器并联复用的解调系统,而在实际风 电叶片交变载荷监测中发现,当单通道级联 FBG 传 感网络中存在 2 个 FBG 传感器初始波长邻近的状况 时,也会出现反射光谱重叠的现象,导致监测系统采 集信号异常,无法反映风电叶片的工作状态。

基于此,本文提出一种 FBG 光谱光功率切割算法,识别具有邻近中心波长的级联 FBG 重叠光谱。

1 光纤光栅应变传感原理

光纤光栅利用紫外激光将入射光的相干光场曝 光到纤芯中,使沿光纤轴线均匀分布的纤芯折射率发 生周期性变化,从而形成永久性空间的相位光栅。光 纤光栅的中心波长 λ_b 取决于有效折射率 n_{eff} 和光栅 周期 Λ,如公式(1)所示。

$$\lambda_b = 2n_{\rm eff}\Lambda \tag{1}$$

当外界温度或应变发生变化时,会引起光栅周期 Λ 和有效折射率 n_{eff} 变化,导致光纤光栅中心波长 λ_b 偏移,如图1所示。



当光纤光栅受到轴向均匀应变时,一方面引起光 栅周期变化: $\Delta A / A = \varepsilon \tag{2}$

另一方面引起有效折射率变化:

$$\Delta n_{\rm eff} = -\frac{n_{\rm eff}^3 \left[P_{12} - v(P_{11} + P_{12}) \right]}{2} \varepsilon$$

式中:

P11——光纤应变分量;

P12——光纤应变张量;

v——泊松比。

上述两方面变化的同时引起光纤光栅波长变化。 由公式(1)可得

$$\Delta \lambda_b = 2n_{\rm eff} \Delta \Lambda + 2\Delta n_{\rm eff} \Lambda \tag{4}$$

将公式(2)和(3)代入公式(4)得

$$\Delta\lambda_{b} = 2n_{\text{eff}}\Lambda\left\{-\frac{1}{2}n_{\text{eff}}^{2}\left[P_{12} - v(P_{11} + P_{12})\right]\right\}\varepsilon + 2n_{\text{eff}}\Lambda\varepsilon$$
(5)

定义有效弹光系数 Pe为

$$P_e = \frac{1}{2} n_{\text{eff}}^2 \left[P_{12} - v(P_{11} + P_{12}) \right]$$
(6)

则公式(5)可简化为

$$\Delta \lambda_{b} = \left(1 - P_{e}\right) \lambda_{b} \varepsilon = K_{\varepsilon} \varepsilon \tag{7}$$

式中:

K_ε——FBG 传感器应变灵敏度系数,该数值大小与光纤材料相关。光纤材料确定后,*K_ε*即为常数。

公式(7)为光纤光栅受轴向均匀应变时波长漂移 量与外界应变关系的表达式,波长漂移量与外界应变 有良好的线性关系。

2 光纤光栅光谱重叠试验及成因分析

FBG 光谱重叠可能发生在单通道级联的 FBG 传 感网络。当级联的 2 个 FBG 传感器中心波长相近时, 小中心波长的 FBG 受拉伸应变作用,而大中心波长 的 FBG 受压缩应变作用,二者的中心波长可能在某 个时刻达到相同,从而产生反射光谱重叠现象,使解 调设备错误识别或无法识别反射光谱的中心波长,给 数据采集带来困扰。图 2 为风电叶片交变载荷疲劳试验中波长邻近的 2 个 FBG 传感器获取的异常数据波形,采样频率为 1 000 Hz。



图 2 FBG 传感器波形失真

由图 2 可以看出,波形严重失真,无法确认传感器好坏或判定传感器信号失真。该应变信号理论为正弦波形,在信号 1/4 周期时间段(32.660~33.040 s)内,对于 FBG#A 传感器,应变值为单调增加,对应传感器的中心波长值也应为单调增加;对于 FBG#B 传感器,应变值为单调减小,对应传感器的中心波长值也应为单调减小,而图 2 中 FBG 传感器波形显示较为紊乱。将 32.750~33.800 s 时间段内的 2 个 FBG 传感器的中心波长值以 0.005 s 的时间间隔列出,如表1 所示。

直
ľ.

时间位	波长/m	m
中J [中J/S -	FBG#A	FBG#B
32.750	1 549.516	1 551.611
32.755	1 549.568	1 551.589
32.760	1 549.624	1 551.571
32.765	1 549.679	1 551.551
32.770	1 549.325	1 549.740
32.775	1 548.400	1 549.787
32.780	1 548.477	1 549.844
32.785	1 548.553	1 549.896
32.790	1 548.627	1 549.950
32.795	1 548.700	1 550.000
32.800	1 548.771	1 550.052

由表1可以看出,FBG 传感器的中心波长值并非 单调增加或减小,而是大小波动。 为了对以上数据出现问题的原因进行细致分析, 设计试验将 2 个中心波长邻近的 FBG 传感器串联在 同一通道中,组成级联 FBG 传感网络。通过模拟风 电叶片交变载荷疲劳试验,使 2 个 FBG 传感器受到 相反的作用力,中心波长小的 FBG#A 传感器受到拉 伸应变,中心波长大的 FBG#B 传感器受到压缩应变, 并记录试验过程中 2 个 FBG 传感器的光谱重叠数据。 FBG#A 和 FBG#B 传感器相关参数如表 2 所示。

	A	
编号	FBG 传感器所在 叶片表面位置	初始中心波长/nm
FBG#A	SS 面	1 562.737
FBG#B	PS 面	1 566.332

首先,将 FBG#A 和 FBG#B 传感器分别布置于 风电叶片的吸力面 SS 面和压力面 PS 面,如图 3 所示。



图 3 FBG 传感器安装示意图

然后,对风电叶片进行交变载荷疲劳试验;最后, 对风电叶片上的2个FBG传感器波长变化进行分析。

结合 2 个 FBG 传感器光谱变化和传感器受力状态,分析 FBG 传感器在 1/2 周期信号内波形变化,信号波形如图 4 所示。



图 4 FBG 传感器 1/2 周期波形变化

风电叶片处于静止状态时,FBG#A和FBG#B传

2022 年 第43 卷 第4期 自动化与信息工程 9

感器的光谱中心波长分别为 λ_{A0} 和 λ_{B0} 。当风电叶片向 一侧运动并使 PS 面受压时,位于 PS 面上的 FBG#B 传感器跟随风电叶片产生压缩形变,导致光纤光栅周 期变小,进而中心波长向左移动。同时,风电叶片的 SS 面被拉伸,位于 SS 面上的 FBG#A 传感器受到拉 伸形变,导致光栅周期增大,进而中心波长向右移动。 当 FBG 传感器中心波长信号位于图 4 所示波形变化 的第 I 阶段时,由于初始中心波长 $\lambda_{A0} < \lambda_{B0}$,对应在光 谱图上, λ_{A0} 和 λ_{B0} 的波峰在波长轴上相向移动至 λ_{A1} 和 λ_{B1} ,两个光谱发生重叠,光谱变化如图 5(a)所示。

随着风电叶片继续运动,FBG#B 传感器继续受 到压缩应变,中心波长继续向波长减小的左侧移动。 FBG#A 传感器受到拉伸应变,中心波长继续向波长 增大的右侧移动。2 个中心波长不断向彼此靠近,波 峰在波长轴上相向移动至 λ_{A2} 和 λ_{B2} 时,光谱发生部 分重叠,光谱变化过程示意图如图 5(b)所示。此过程 FBG 传感器的波形变化过程处于图 4 中的第Ⅱ阶段。 2 个 FBG 传感器光谱重叠后,解调设备无法准确识别 中心波长,故在第Ⅱ阶段 FBG#B 传感器读取了 FBG#A 传感器的中心波长。

当风电叶片向一侧运动到极限位置后,便开始反向运动,FBG#B 传感器所受压缩应变减小,导致光纤光栅周期变大,进而中心波长向右移动。相应地, FBG#A 传感器中心波长向左移动,直至重叠光谱分离为不重叠光谱,FBG 传感器波形变化处于图4中的 第Ⅲ阶段,光谱变化如图5(c)所示。



试验过程记录了单通道级联 FBG 传感网络出现的 2 个 FBG 传感器光谱重叠的数据,利用光谱数据将 FBG 光谱波形重构,如图 6 所示。



3 光功率切割算法及应用

为保证商用 FBG 解调设备软件有效识别光谱重 叠,本文提出一种 FBG 光谱光功率切割算法。该算 法的原理是先建立一条垂直于光谱 Y 轴的光功率等 值线函数模型; 然后,将光功率等值线函数模型在一 定的光功率值区间(光功率切割区间)等间隔取值, 建立光功率等值线族;最后,在光功率切割区间内搜 索水平光功率等值线族与光谱波形之间的交点个数。 由于未重叠和发生重叠后的光谱波形特征不同,所以 交点个数也不同,通过搜索交点个数,实现光谱重叠 识别。

首先,确定光功率等值线族的起始线。光功率等 值线函数值用 y (取值为光功率,使用 dBm 衡量)表 示,根据光谱图中的功率范围,光功率等值线的最大 值 $y_{max} = 0$ dBm。

然后,确定光功率等值线族的终止线。为方便和 有效地处理数据,过滤光谱下面的旁瓣信号,记 y_{min}

= -40 dBm \circ

接着,确定光功率切割区间,即 $\Delta y = y_{max} - y_{min}$ =0-(-40)=40, 平移区间为(-40,0)。

进而,确定从 0~-40 dBm 光功率区间内的光功 率等值线的间隔。以 0.5 dBm 为间隔建立光功率等值 线族,因此光功率等值线族函数模型表示为 $y = -(0+0.5 \times n)$, n 为间隔个数。

最后,搜索光功率等值线函数族 y = -(0+0.5 ×n) 和光谱光功率之间的交点数。



在风电叶片交变载荷疲劳实验中,选取 FBG 传 感器网络获得的一段重叠光谱数据为样本,采用 FBG 光谱光功率切割算法对样本进行处理,搜索样本中 FBG 光谱光功率与 y = -(0+0.5×n)在-10~-40 dBm 范围内的交点个数。由图 7 可知,当等值光功率线做 切割移动时,图 5 中 3 种典型工况的光谱图切割线得 到的交点数分别为 2、3、4 个。对风电叶片试验测得 的数据进行上述切割,并统计交点数,如图 8 所示。



由图 8 可以看出,在-20 ~ -30 dBm 范围内,部 分重叠光谱有 2 个、3 个交点;非重叠光谱信号,由 于 2 个 FBG 传感器的中心波长分离,交点个数保持 稳定的 4 个。因此,通过搜索重叠光谱和非重叠光谱

作者简介:

张帅, 男, 1995年生, 硕士生, 主要研究方向: 测控技术与仪器。 鲁猛, 男, 1993年生, 硕士生, 主要研究方向: 测控技术与仪器。 麦建聪, 男, 1997年生, 硕士生, 主要研究方向: 先进传感技术。

朱萍玉(通信作者),女,1971 年生,博士,教授,主要研究方向:先进传感与检测技术,智能制造与智能维护。 E-mail:pyzhu@gzhu.edu.cn

与光功率线之间的交点个数,可识别光纤光栅的光谱 是否重叠,以此实现对级联 FBG 波长重叠的识别。

4 结论

本文以风电叶片为例,研究 FBG 传感器光谱重 叠产生的原因,提出一种FBG 光谱光功率切割算法, 实现重叠光谱的识别。该算法通过读取和处理风电叶 片的实际光谱数据,可识别多个波长相近的 FBG 传 感器的重叠光谱,在实际工程测量中具有重要意义。

参考文献

- QIU Y, WANG Q B, ZHAO H T, et al. Review on composite structural health monitoring based on fiber bragg grating sensing principle[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science),2013,18(2):129-139.
- [2] CHANG T, LI D, SUI Q, et al. Applications of fiber optic bragg grating sensing technology in a forked tunnel model[C]//International Conference on Automation & Logistics. IEEE, 2007.
- [3] 王祥,金伟明,王建平.基于时分复用的FBG 传感技术研究[J]. 技术与市场,2011,18(4):6-7,9.
- [4] 王明波,惠小强.光纤传感空分复用下多点温度与应力的监测显示[J].现代电子技术,2012,35(23):164-168.
- [5] WANG Y B, FAN X Y, ZHANG L L, et al. The application of genetic and simulated annealing algorithm in FBG sensor network[C]//International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Dalian, China: IEEE, 2008:1-4.
- [6] 夏坤,李志斌,黄启韬,等.基于遗传粒子群算法的 FBG 传感 网重叠光谱的解调研究[J].上海电力大学学报,2020,36(3): 290-293,311.
- [7] 刘邦,曲鸿春,贺开放,等.基于改进狼群算法的光纤测试中光 谱重叠优化研究[J].山东电力高等专科学校学报,2021,24(6):
 1-5.
- [8] 刘雁飞,李志斌.基于人工蜂群优化算法的光谱形复用技术 [J].光通信技术,2021,45(1):52-57.