

# 基于光纤布拉格光栅的翼型悬臂板荷载监测

江中华, 黄国君\*

(中国科学院力学研究所工程科学部, 北京 100190)

**摘要:**采用光纤布拉格光栅(FBG)传感器作为荷载监测的应变传感器,建立实时、在位荷载识别的有效算法。基于一种图形化编程语言 Labview 8.0 在动态光纤光栅解调仪(sm130-700, MOI)软件平台上开发了在线荷载监测系统,并应用于翼型悬臂板的荷载监测实验。结果表明,该在线荷载监测系统能够高精度地识别荷载的位置和荷载大小,且有较好的容错性。

**关键词:**悬臂板;荷载监测;光纤布拉格光栅传感器

中图分类号:O348

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2008)S1-0721-05

## Investigation of Load Monitoring for Pterygoid Cantilever Plate Based on Fiber Bragg Gratings

J IANG Zhong-hua, HUANG Guo-jun\*

(Division of Engineering Sciences, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** By using Fiber Bragg Gratings (FBG) sensors as strain sensors and developing an effective algorithm of the real-time and in-situ loading recognition, an online load monitoring (OLM) system has been developed. The system was integrated into the software platform of a dynamic FBG wavelength demodulator (sm130-700, MOI) based on a graphical programming language, Labview 8.0, and then applied to a pterygoid cantilever to carry out the load recognition experiment. The experimental results indicate that the present OLM system is capable of identifying both the location and magnitude of load with a high precision and has the satisfactory fault-tolerance.

**Key words:** cantilever plate; load monitoring; Fiber Bragg Gratings sensor

结构健康监测(SHM)技术兴起于航天领域,20世纪80年代开始广泛应用于土木工程、机械等领域。SHM最初是进行结构的荷载监

测<sup>[1]</sup>,逐渐向结构损伤诊断(损伤部位识别和损伤程度估计等)、结构剩余寿命的预估等方面发展<sup>[2-3]</sup>,所以,结构荷载监测是SHM的一个技

收稿日期:2008-08-15;修回日期:2008-10-25

基金项目:“863”计划海洋技术领域专题课题(2008AA09Z312);国家自然科学基金资助项目(10532070, 10772184);中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助

作者简介:江中华(1982—),男,江西鹰潭人,硕士研究生,工程力学专业

\*通信作者:黄国君(1962—),男,副研究员,博士,ghuang@imech.ac.cn

术基础。另外,一些结构损伤识别问题可转化为结构荷载识别问题<sup>[4]</sup>,因此,结构荷载识别成为结构损伤识别的一个间接手段。研究结构荷载监测对于促进 SHM 的发展具有重要的学术和实际意义。

SHM 实现的一个技术挑战是高性能和高可靠性的传感器。目前,光纤传感器和微机械系统(MEMS)传感器被认为是最有前途的 SHM 传感器,其中,国内外对光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Gratings, FBG)传感器的研究最为活跃<sup>[5-6]</sup>。与传统的传感器相比,FBG 的优点表现在:测量精度高(1 微应变);单条光纤可串联多个传感器,减少布线;波长传感、受电磁场干扰小;耐水、耐腐蚀,可在更复杂、更恶劣的测量环境工作;体积小、重量轻;寿命长(光栅不退化时间大于 20 年)<sup>[7]</sup>。FBG 的基本传感特性是应变和温度传感,也可以开发其它传感器,如压力、位移、加速度等 FBG 系列传感器<sup>[8]</sup>。

作为 FBG 传感器在 SHM 中应用的系列研究,本文将介绍基于 FBG 应变传感器对翼型悬臂板进行荷载监测的实验研究,以模拟飞机机翼的荷载监测,开发荷载监测的软硬件系统,建立 SHM 技术的在线演示平台。

## 1 荷载识别的目标

本工作的荷载监测为集中荷载的位置和大小的在线识别,目前用于单个荷载的荷载识别,可推广到多个荷载的识别系统。荷载识别的精度主要取决于识别指标对荷载变化的敏感程度和传感器布置的空间密度。本工作将翼型悬臂板划分为若干小区,试图将荷载位置识别精度

控制在小区范围内。

## 2 实验系统

### 2.1 结构属性

实验中采用翼型悬臂板为结构对象(图 1),板材为铝合金,板长 1.640 m,板宽 0.500 m,板厚 0.006 m。平面板划分成 5 个大区,第 1 大区划分为  $6 \times 3 = 18$  个小区,其它每个大区划分成  $4 \times 3 = 12$  个小区。

### 2.2 传感器布置

悬臂板表面铺设 3 条光纤,每条光纤两端均设置传输信号的法兰盘接口,悬臂板末端附近的法兰盘接口为备用接口。每条光纤中串联 5 只 FBG 传感器,传感器间相距约 0.3 m。FBG 传感器用北京化工厂生产的 SH-1 型号 502 胶粘贴在悬臂板的表面,每个大区靠近固支端的一边布设 3 只传感器,负责采集荷载作用在本大区时的应变信号。

### 2.3 FBG 波长解调仪器

采用美国 Micron Optics 公司生产的 sm130 便携式动态光纤光栅解调仪测量 FBG 传感器的波长值。该解调仪使用了 Micron Optics 专利技术校正波长扫描激光器,具有高功率快扫描功能(最高可达 1 kHz),通过 4 个探测器可同时测量 4 个通道光纤的反射光信号,1 根光纤上可以接入多个传感器,分辨率小于 1 pm(1 pm 波长变化相当于 0.8 单位微应变变化)。解调仪采用标准以太网接口,并可配置无线模块,便于 TCP/IP 远程控制。

### 2.4 样本数据库的建立

样本数据库分为以下 5 大区。

第 1 大区:以 1.0 kg 的标准砝码依次作用

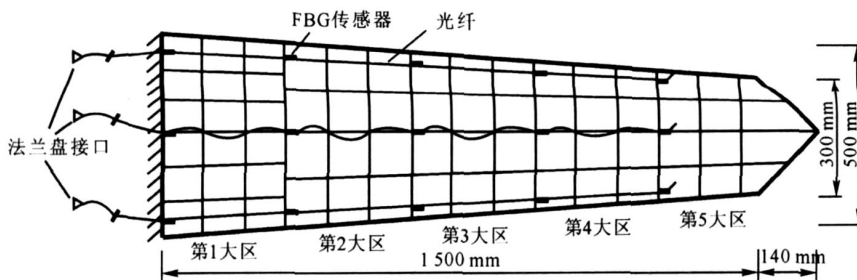


图 1 平面板分区和 FBG 传感器布置图

Fig. 1 Partition of plate and layout of FBG sensors

在各小区中心部位,测量该大区对应的 3 只 FBG 传感器的波长变化信号  $[ \lambda_{j1}^*, \lambda_{j2}^*, \lambda_{j3}^* ] (j = 1, 18)$ , 将获取的波长变化信号转变为应变信号  $[ \varepsilon_{j1}^*, \varepsilon_{j2}^*, \varepsilon_{j3}^* ] (j = 1, 18)$ 。

第 2 ~ 5 大区:以 1.0 kg 的标准砝码依次作用在各小区中心部位,测量该大区对应的 3 只 FBG 传感器的波长变化信号  $[ \lambda_{j1}^*, \lambda_{j2}^*, \lambda_{j3}^* ] (j = 1, 12)$ , 将获取的波长变化信号转变为应变信号  $[ \varepsilon_{j1}^*, \varepsilon_{j2}^*, \varepsilon_{j3}^* ] (j = 1, 18)$ 。

以上 5 个大区共 66 个小区的应变信号合在一起,形成了  $66 \times 3$  的矩阵,即为应变信号样本数据库  $[ \varepsilon^* ]_{66 \times 3}$ 。

## 2.5 荷载识别算法

### 1) 荷载位置识别

为提高识别精度,采用多层次识别思想,即先判断荷载所在大区,然后再进一步判断荷载所在小区。

基于悬臂板的结构特性可知:当在板上任意位置加载时,接近板根部的应变变化总是大于远离板根部的应变变化,而在加载点与悬臂板末端之间的区域几乎不产生应变,由此,可迅速识别大区的位置。当未知荷载作用时,将 15 个 FBG 光栅的波长变化信号按照所属大区 and 光栅间相对位置组成 5 行 3 列的矩阵  $[ \varepsilon ]_{5 \times 3}$ , 并转化成相应的应变值  $[ \varepsilon ]_{5 \times 3}$ 。考虑到环境噪声的影响导致的应变微小变化可能造成的误判,可设置一定的应变阈值  $\varepsilon = (3 \sim 5) \times 10^{-6}$ , 当  $[ \varepsilon ]_{5 \times 3}$  中某元素的应变值小于该阈值,就可认为该元素对应的 FBG 及该处结构的应变为零。这样,从板根部的 FBG 开始搜索,当首次搜索到某一行 3 个 FBG 中第 2 个 FBG 的应变  $\varepsilon_2$  ( $i$  为区号) 小于阈值,即可判断该行所对应大区的上一大区为荷载作用的大区。具体识别过程如下:初始化计数器  $i = 1$ ,先判断第 1 大区所属的测点采集的应变是否大于阈值,若否,远离板根部的其他测点采集的应变也不可能会大于阈值,因此,可判断没有未知荷载作用;若是,计数器自动递增到 2,判断第 2 大区所属的测点采集的变化是否大于阈值,若否,则未知荷载作用在第 1 大区;若是,计数器继续自动递增到 3,重复如上所述的类似过程直至未知荷载加载的大区号  $i$  识别出来。

进一步从样本数据库  $[ \varepsilon^* ]_{66 \times 3}$  中提取该大

区所属的样本矩阵  $[ \varepsilon^* ]_{12 \times 3}$  (第 2 ~ 5 大区) 或  $[ \varepsilon^* ]_{18 \times 3}$  (第 1 大区),将代表每个小区加载的每行样本数据  $( \varepsilon_{j1}^*, \varepsilon_{j2}^*, \varepsilon_{j3}^* )$  和未知荷载的应变向量  $( \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3 )$  单位化,并求二者的差模,差模的大小反映了未知荷载的位置和建立样本数据库时作用的标准荷载位置的相关程度,最小的差模对应的小区就是最可能的未知荷载作用小区,这样荷载的位置可确定下来。

### 2) 荷载大小识别

在小变形假设条件下可认为结构的响应与荷载大小具有线性关系,因此,作用于同一小区的荷载在测点产生的应变与该荷载大小近似成正比。为了尽量减少小区中不同位置加载时,在某个测点应变信号的差别太大带来的影响,采用 3 个测点计算值的平均值,所以,未知荷载的应变向量  $( \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3 )$  和 1.0 kg 标准砝码对应的应变向量  $( \varepsilon_{j1}^*, \varepsilon_{j2}^*, \varepsilon_{j3}^* )$  中相应元素的比值的平均即可作为未知荷载大小与 1.0 kg 标准砝码的比值。

### 3) 荷载识别程序框图

综合以上荷载位置和大小识别的算法,可给出在线识别荷载的程序框图如图 2 所示。

## 2.6 荷载在线识别系统

基于 FBG 波长解调系统的数据采集软件平台和图 2 所示的荷载识别流程,采用图形化编程软件 Labview 开发了荷载在线识别系统,它具有即时显示未知荷载的位置(图形化)和大小的功能,系统界面如图 3 所示。

## 3 结果与分析

荷载识别实验按照如图 4 所示的两种工况进行。工况一,砝码加载在每个小区的内切圆以内;工况二,砝码加载在每个小区的外接圆以内。两种工况的砝码加载区域参见图 4,每个小区中砝码按照图中所示各加载 1 次。荷载位置成功识别的标准是识别系统判断砝码所在小区是砝码实际加载的小区,否则认为识别失败;荷载大小识别效果则是识别系统计算出的荷载大小和荷载实际大小的误差,误差越小,识别效果越好。

第 1 大区中 18 个小区,因此工况一和工况二均需要加载砝码 72 次;其他大区中各有 12 个小区,两种工况下均需要加载砝码 48 次。各种工况的加载次数统计列于表 1。

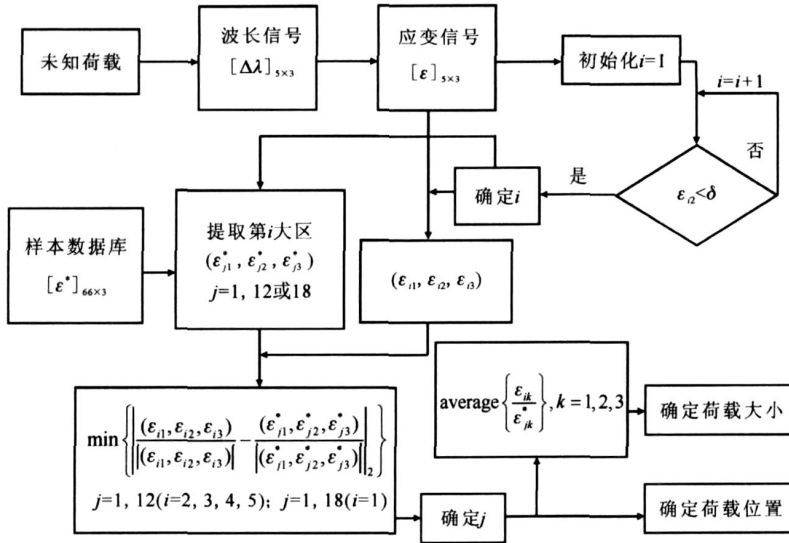


图 2 荷载在线识别系统流程框图

Fig. 2 Procedure plot of online load identification system

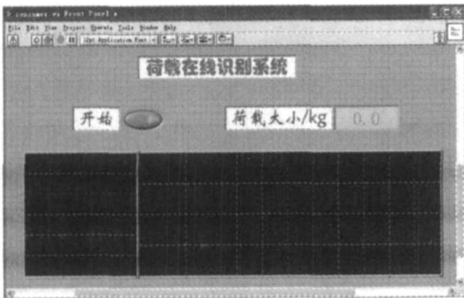


图 3 荷载在线识别系统界面

Fig. 3 Interface of online load identification system

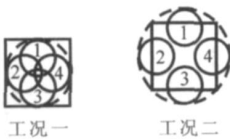


图 4 荷载识别实验的两种工况

Fig. 4 Two loading cases of load identification experiment

表 1 各工况加载次数统计

Table 1 Statistics of loading cases

工况	各区加载次数				
	第 1 大区	第 2 大区	第 3 大区	第 4 大区	第 5 大区
工况一	18 × 4 = 72	12 × 4 = 48	12 × 4 = 48	12 × 4 = 48	12 × 4 = 48
工况二	18 × 4 = 72	12 × 4 = 48	12 × 4 = 48	12 × 4 = 48	12 × 4 = 48

对每个大区,定义荷载位置识别成功率  $A$  为识别成功的次数占荷载加载的总次数百分比;定义荷载大小识别误差率  $B$  为每次荷载加载时荷载识别值和实际值的误差率的平均值。结果如图 5、6 所示。

从图 5、6 可看出,当未知荷载范围限定在小区内切圆中时(工况一),每个大区中的荷载位置识别成功率均接近 100%,荷载大小识别误差率均能控制在 10% 以下,识别效果较为理想;当未知荷载范围限定在小区外接圆中时(工况二),每个大区中的荷载位置识别成功率相比工况一有所下降,不过大部分大区也能达到 90% 以上,荷载大小识别误差率和工况一相差不大,均在 10% 以下。大区之间无论是荷载位置识别成功率还是荷载大小识别误差率均没有明显的差别,说明传感器的布设比较合理。此外,实验还表明:当荷载作用在相邻的小区之间的区域时,系统亦能将荷载位置识别结果限定在正确的小区范围中,荷载大小的识别结果也较为理想,说明识别系统具有很好的容错性。

以上结果表明,本识别系统能够成功的识别荷载所在位置和荷载大小。应用线性叠加原理,该系统还可方便地扩展到多点荷载识别。至此,应用 3 根 FBG 串赋予了翼型悬臂板“感知”受力的功能,FBG 串在物理上起到神经网络的作用,这为进一步建立损伤的在线识别系

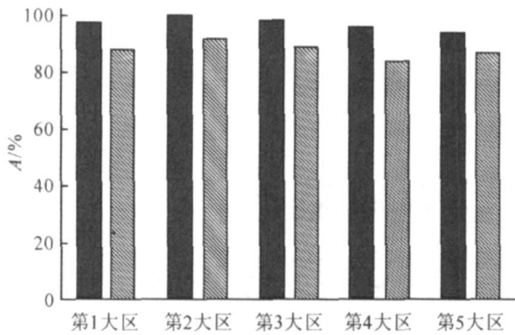


图5 在线荷载位置识别实验结果

Fig. 5 Experimental results of in-situ load location identification  
深色阴影——工况一;浅色阴影——工况二

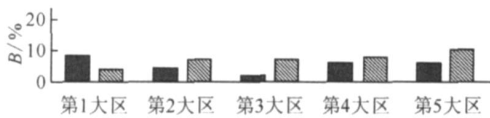


图6 在线荷载大小识别实验结果

Fig. 6 Experimental results of in-situ load magnitude identification  
深色阴影——工况一;浅色阴影——工况二

统奠定了良好的技术基础。该系统可以现场演示,相关的视频资料已录制完毕。

与此同时,还应用应变片建立了上述荷载识别系统,结果显示,无论是荷载位置还是荷载大小的识别精度都大大低于基于FBG的荷载识别系统,且由于布线太多(每个应变片有2根导线)显得系统繁杂。

#### 4 结语

本研究建立了1个基于FBG的翼型悬臂板在线荷载识别系统,取得了较为满意的识别效果。FBG在SHM中的特点在该系统中得到了充分体现,如传感精度高、准分布测量,以及“传”与“感”的结合导致布线少、体积小、重量轻和安装方便,从而对结构特性影响小等。

荷载识别的精度一方面取决于传感器的测量精度,另一方面也取决于传感器系统的布设密度和方式以及识别算法的先进性。若要想进一步提高荷载识别空间率,需要增加传感器布置的密度,并需要对传感器的布置进一步优化,

但这将增加传感器的数量,势必受到成本要求的制约,而传感器系统的优化布置则是目前结构健康监测领域的一个热点。

#### 参考文献:

- [1] CHANG F K. A summary report of the 2nd workshop on structural health monitoring [C]// Proceedings of the 3rd International Workshop on Structural Health Monitoring, the Demands and Challenges. US: Stanford University, 2001.
- [2] RYTTER A, KRAWCZU K M, KIRKEGAARD P H. Experimental and numerical study of damaged cantilever [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 126(1): 60-65.
- [3] SOHN H, FARRAR C R. Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals [J]. Smart Materials and Structures, 2001, 10: 446-451.
- [4] CHANG F K, MARKMILLER J F C. A new look in design of intelligent structures with SHM [C]// Camera-Ready Guidelines for Proceedings of the 3rd European Workshop on Structural Health Monitoring. Spain: [s. n.], 2006.
- [5] 黄国君,殷昀毓,戴锋. 光纤布拉格光栅传感器在海洋平台监测中的应用研究 [J]. 中国造船, 2003, 44(增刊): 453-461.  
HUANG Guojun, YIN Yunguo, DAI Feng. Application of the sensing system of Fiber Bragg Gratings to the monitoring of offshore platforms [J]. Ship Building of China, 2003, 44(Suppl.): 453-461 (in Chinese).
- [6] TAKEDA N. Towards damage and structural health monitoring of aerospace composite structures using optical fiber sensors [C]// Camera-Ready Guidelines for Proceedings of the 3rd European Workshop on Structural Health Monitoring. Spain: [s. n.], 2006.
- [7] OTHONO A. Fiber Bragg Gratings [J]. Rev Sci Instrum, 1997, 68 (12): 4 309-4 321.
- [8] 戴锋,黄国君. 一种布拉格光纤光栅加速度传感器 [J]. 激光杂志, 2005, 26(1): 26-27.  
DAI Feng, HUANG Guojun. An acceleration sensor based on Fiber Bragg Gratings [J]. Laser Journal, 2005, 26(1): 26-27 (in Chinese).