

# Crack Damage Recognition of Cantilever Beam Based on Fiber Bragg Grating Sensing Array and BP Neural Network Algorithm

Pei Luo

The Optical Fiber Sensing Technology National Engineering Laboratory, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei

Email: [luopei@whut.edu.cn](mailto:luopei@whut.edu.cn)

Received: Dec. 16<sup>th</sup>, 2016; accepted: Jan. 6<sup>th</sup>, 2017; published: Jan. 9<sup>th</sup>, 2017

Copyright © 2017 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

The sensing theory of fiber Bragg grating strain sensing array and the BP neural network algorithm have been introduced in this paper. The strain changes of fiber Bragg grating sensing array measuring metal cantilever beam under the status of damaged and undamaged have been studied. Taking changes of strain as input data of neural network, the damage recognition of metal cantilever beam has been carried on using BP neural network algorithm through training and studying the neural network. The realistic output of Bp network is very near to the anticipant output. It indicates that the damage recognition of metal cantilever beam can be realized using fiber Bragg grating sensing array and BP neural network algorithm.

## Keywords

Fiber Bragg Grating Sensing Array, Cantilever Beam, Cracks, Damage Recognition, BP Neural Network

---

# 基于光纤光栅传感阵列和BP神经网络的悬臂梁裂缝损伤识别

罗 裴

武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉

Email: [luopei@whut.edu.cn](mailto:luopei@whut.edu.cn)

收稿日期：2016年12月16日；录用日期：2017年1月6日；发布日期：2017年1月9日

## 摘要

本文介绍了光纤光栅应变传感阵列的传感原理和BP神经网络算法，实验研究了光纤光栅传感阵列检测金属悬臂梁在受力状况下有损和无损情况的应变变化，以悬臂梁应变的变化量作为神经网络的输入数据，利用BP神经网络算法对金属悬臂梁的损伤进行损伤识别。通过网络的学习和训练，BP神经网络的实际输出和期望输出十分接近，由此说明，光纤光栅传感阵列结合BP神经网络可实现金属悬臂梁的裂缝损伤识别。

## 关键词

光纤光栅传感阵列，悬臂梁，裂缝，损伤识别，BP神经网络

## 1. 引言

在工程应用中，裂缝的识别与检测对于保证构件的正常使用具有十分重要的意义[1]。工程结构，尤其是钢结构在社会生活中扮演着重要角色[2]，一旦结构受到损伤而没有得到及时发现和处理，会造成结构失效，从而造成巨大的生命和财产损失。因此，工程结构的无损检测备受研究人员的关注。作为一种基本的工程结构，梁的损伤检测问题引起了研究人员的广泛关注[3]。

无论是梁或是板，裂缝对各阶频率降低的影响程度与裂缝位置关系很大，因此，可以根据各阶频率变化的特征判断裂缝产生的部位及其大小。李晓飞[4]等研究了含横向裂纹悬臂梁的损伤检测方法。沈亚鹏[5]等采用弹性铰模型研究有裂纹悬臂梁的横向振动，分析裂纹深度、裂纹在梁上不同部位对各阶频率降低的影响。张炜[6]等研究了多种边界条件下含任意数目裂纹梁的振动分析。以上研究均研究了损伤对梁结构的频率变化的影响，并且采用电类传感器作为信号的采集工具。众所周知，微小损伤对结构的频率影响非常小，必须要采用高精度和高灵敏度的传感器才能采集到有用信息，而电类传感器在损伤检测过程中存在的不可克服的缺点是只能进行单点测量，不能形成网络，且受电磁干扰严重；而光纤光栅作为一种新型的传感技术，优点在于测量精度高、抗电磁干扰，特别是应用波分复用技术，可形成光纤光栅传感网络[7][8]。可见，光纤光栅传感技术具有电类传感器不可替代的优点。本文利用光纤光栅具有分布式测量的优点，应用光纤光栅应变传感阵列对金属悬臂梁进行多点实时测量。研究发现，光纤光栅应变传感阵列可以非常灵敏地检测到悬臂梁损伤处的应变变化，且能实现对结构的全局检测，因此，光纤光栅应变传感阵列是结构损伤检测中的一种新技术，具有很大的应用潜力。BP神经网络在结构损伤识别领域应用非常广泛，是研究人员研究结构损伤识别的常用工具，本文以金属悬臂梁为研究对象，以光纤光栅传感阵列为数据采集工具，以BP神经网络为损伤识别手段，对金属悬臂梁裂缝损伤进行智能识别。

## 2. 光纤光栅的传感原理

光纤光栅的反射或透射波长光谱主要取决于光栅周期改变量  $\Delta\Lambda$  和反向耦合模的有效折射率  $n_{eff}$ ，任何使这两个参量发生改变的物理过程都将引起光栅波长的漂移，它们与波长改变量  $\Delta\lambda_B$  之间存在的关系式如下：

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

由上式可知，无论是对光栅进行拉伸还是压缩，均会导致光栅周期 $\Lambda$ 发生变化。而分布式传感是在一

根或多根光纤上写入多个光纤光栅，并利用复用技术实现对多点待测传感量的分布式传感，在系统末端通过解调复用测量。图 1 是光纤光栅分布传感系统的原理图。假设准分布的多个光纤光栅通过不同光纤光栅的反射光波长为  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$  与待测结构沿光纤光栅阵列各测量点  $1, 2, \dots, n$  相对应，其基本工作原理是用它们分别感应待测结构沿线分布各点的应力应变，并使它们的反射光波长发生改变，通过检测光栅波长的改变，从而获得整个待测结构的应力应变分布状况。

### 3. BP 神经网络算法

BP 算法[9][10]是目前最常用的算法之一。它是 1985 年提出的一种监控式学习方法，BP 神经网络的学习采用误差反向传播算法(Back Propagation, 简称 BP 算法)，其主要思想是把整个学习过程分为四个部分：一是输入模式对  $(A_k = (a_1^k, a_2^k, \dots, a_n^k), Y_k = (y_1^k, y_2^k, \dots, y_q^k))$  从输入层经隐含层传向输出层的“模式顺传播”过程；二是网络的希望输出  $(Y_k = (y_1^k, y_2^k, \dots, y_q^k))$  与实际输出  $(\{C_j^k\})$  之差的误差信号  $(\{\delta_j^k\})$  由输出层经隐含层向输入层逐层修正连接权的“误差逆传播”过程；三是由“模式顺传播”和“模式逆传播”的反复交替进行的网络“记忆训练”过程；四是网络趋向收敛即网络的全局误差(E)趋向极小值的“学习收敛”过程，当网络全局误差 E 小于预先设定的极小值，网络收敛。只有 BP 神经网络在学习训练后实现收敛，才能说明所建立的神经网络模型是有效的。

要使神经网络顺利收敛，必须输入数据可靠，而且精确度要高，此外，神经网络的学习速率和神经元个数对神经网络的收敛也会产生影响，采用光纤光栅传感阵列采集应变数据作为神经网络的输入数据的主要原因是裂缝是一种很小的损伤，微小裂缝对结构参数影响很小，需要高精度的检测工具才能分辨，而光纤光栅就具有这种优点，且光纤光栅能实现全局测量，因此是微小损伤检测的首选传感工具。可见，将光纤光栅应变传感阵列应用于神经网络中的损伤识别是神经网络收敛的重要依据，具有十分重要的应用前景。

## 4. 金属悬臂梁裂缝损伤数据的实验测试和数据分析

### 4.1. 金属悬臂梁损伤检测的实验装置的搭建

光纤光栅应变传感阵列检测金属悬臂梁的损伤是在等截面悬臂梁上进行的，悬臂梁的基本尺寸如下：长 400 mm，宽 70 mm，高 1.7 mm，悬臂梁板的材料为不锈钢，弹性模量为  $E = 196 \text{ Gpa}$ ，光纤光栅应变传感阵列的试验装置图如图 2 所示，在悬臂梁上粘贴 15 个光栅，这 15 个光栅分三列粘贴，每列 5 个光栅，三列是并排的。悬臂梁的损伤通过线切割技术进行预制，悬臂梁损伤的预制情况如下：第一条裂纹距离悬臂梁固定端 60 mm，裂纹长度为 30 mm，第二条裂纹距离悬臂梁固定端 100 mm，裂纹长度为 30 mm，第三条裂纹距离悬臂梁固定端 140 mm，裂纹长度为 30 mm。

### 4.2. 实验数据的采集

将光纤光栅传感阵列粘贴在悬臂梁上之后，把悬臂梁静置 24 小时。在试验前，要对悬臂梁进行预拉伸，即在悬臂梁的自由端施加载荷，并达到一定重量，但必须在悬臂梁的弹性范围内，重复几次。预拉伸后，开始在悬臂梁自由端添加载荷进行实验，并采集数据。悬臂梁的自由端施加载荷是通过添加砝码来实现的，砝码的质量是 0.5 kg。为了进行损伤识别，必须记录悬臂梁未受损伤，此外还要记录悬臂梁在一个损伤、两个损伤、三个损伤时的数据，这些数据必须经过多次测量，取平均值，作为神经网络的输入数据，各种情况的光栅数据归一化如下表 1。

### 4.3. 金属悬臂梁损伤识别的 BP 神经网络的实现

根据金属悬臂梁损伤实验的基本情况，建立 BP 神经网络模型如下：15 个光纤光栅的传感数据作为

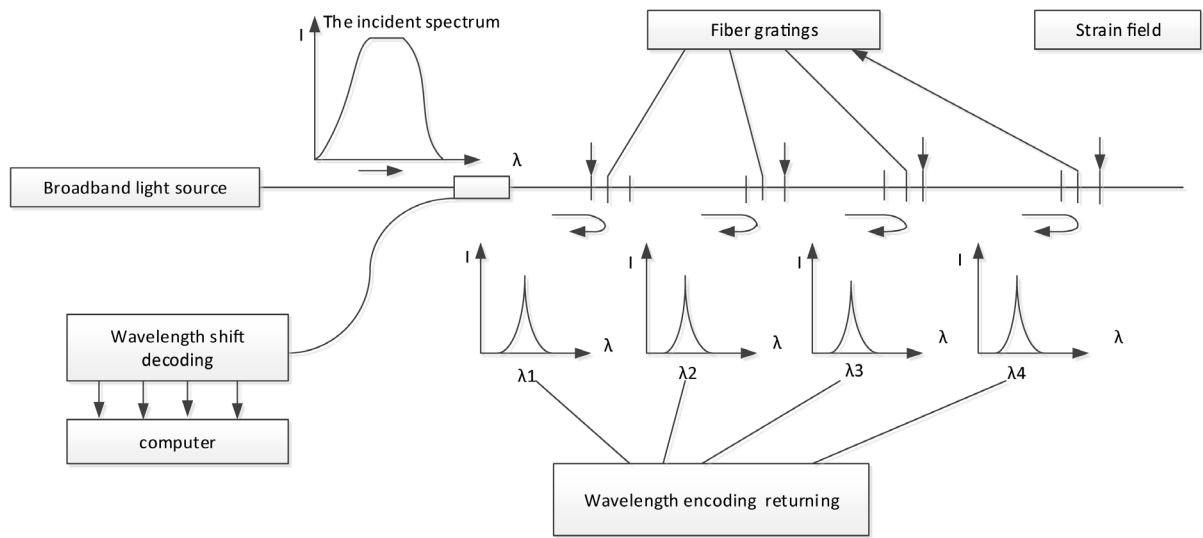


Figure 1. Sensing schematic of distributed fiber Bragg grating

图 1. 分布式光纤光栅传感原理图

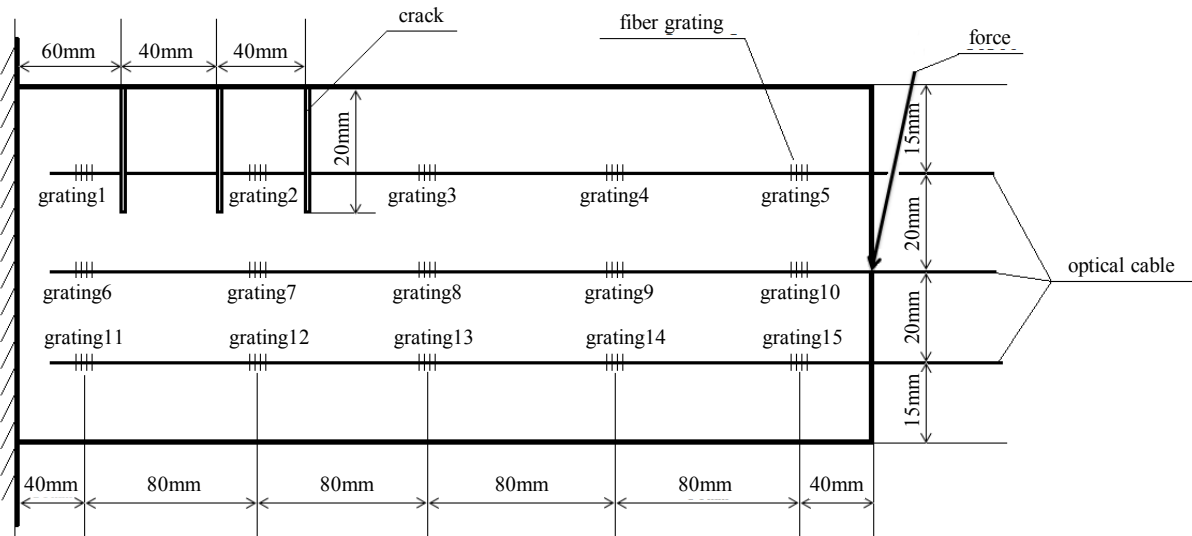


Figure 2. Experiment chart of fiber Bragg grating sensing array

图 2. 光纤光栅传感阵列实验图

网络输入，采集 40 组数据，前 35 组数据作为网络的训练数据，后 5 组作为网络的测试数据，故网络的输入神经元为 15，隐含层神经元为 20，输出层神经元为 4，1000 代表金属悬臂梁无损伤，0100 代表金属悬臂梁有一个损伤，0010 代表金属悬臂梁有 2 个损伤，0001 代表金属悬臂梁有 3 个损伤，故神经网络的模型为 15-20-4。网络采用的 BP 神经网络，输入到隐含层神经元函数为 sigmoid 函数，隐含层到输出层神经元函数为线性函数。网络的训练步数为 500，网络的学习速率为 0.85，网络的收敛误差为  $1e-5$ 。网络收敛后，得到的期望输出和实际输出如表 2。

由表 2 可以看出，网络的实际输出与期望输出很接近，说明该网络能够识别金属悬臂梁的裂缝损伤。

### 5. 结论

光纤光栅是近二十年来应用最为广泛的新型传感器，光纤光栅传感器也得到了国内外研究者的广

**Table 1.** Normalized data of fiber Bragg grating sensing array detecting strain of cantilever beam under different damage status  
**表 1.** 悬臂梁不同损伤状况的光纤光栅传感阵列检测应变的归一化数据

光栅编号	损伤类型	无损伤	一个损伤	两个损伤	三个损伤
	光栅 1		0.639309	0.460043	0.317495
光栅 2		0.477322	0.302376	0.179266	0.12311
光栅 3		0.339093	0.326134	0.349892	0.336933
光栅 4		0.179266	0.172786	0.168467	0.164147
光栅 5		0.00432	0.00432	0.006479	0.00216
光栅 6		0.632829	0.678186	0.641469	0.691145
光栅 7		0.466523	0.419006	0.332613	0.328294
光栅 8		0.328294	0.304536	0.306695	0.354212
光栅 9		0.174946	0.164147	0.161987	0.155508
光栅 10		0.00216	0	0.00216	0.008639
光栅 11		0.63067	0.717063	0.730022	1
光栅 12		0.483801	0.462203	0.568035	0.673866
光栅 13		0.336933	0.306695	0.37149	0.362851
光栅 14		0.170626	0.168467	0.177106	0.161987
光栅 15		0.00432	0.00216	0.00432	0.00216

**Table 2.** Comparison of anticipant output and realistic output  
**表 2.** 期望输出与实际输出的比较

损伤类型	实际输出				期望输出
无损伤	0.9983	0.0015	0.0021	0.0021	1000
一个损伤	-0.0012	1.0054	-0.0020	0.0002	0100
两个损伤	0.0018	-0.0013	0.9967	0.0034	0010
三个损伤	0.0039	0.0086	0.0018	1.0021	0001

泛关注。本文采用光纤光栅应变传感阵列检测金属悬臂梁结构的损伤，发现光纤光栅应变传感阵列可以非常灵敏地检测到金属梁结构的不同损伤，说明光纤光栅具有多点成网的优势，且能实现结构的全局测量，克服了传统电传感器的单点测量的缺点。采用 BP 神经网络算法，建立 BP 神经网络模型，以光纤光栅应变传感阵列检测到的数据作为输入数据，实现了悬臂梁的裂缝损伤识别。可见，采用光纤光栅传感阵列和 BP 神经网络可以实现悬臂梁的裂缝损伤识别，是光纤光栅应变传感阵列的一个新的应用领域。

## 基金项目

国家自然科学基金青年基金(51308428)。

## 参考文献 (References)

- [1] 宋启根. 带裂缝梁和板的应力分析[J]. 上海力学, 1985(3): 17-26.
- [2] 裴强, 丁英哲. 低温下钢结构裂缝损伤识别方法(II)[J]. 低温建筑技术, 2005(4): 100-101.

- 
- [3] 王术新, 姜哲. 裂缝悬臂梁的振动特性及其裂缝参数识别[J]. 振动与冲击, 2003, 22(3): 83-87.
- [4] 李晓飞, 余音. 含横向裂纹悬臂梁的损伤检测[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(6): 735-739.
- [5] 沈亚鹏, 唐照千. 裂纹对悬臂梁板振动频谱的影响[J]. 固体力学学报, 1982(2): 247-251.
- [6] 张炜, 毛崎波, 聂彦平. 含任意数目裂纹梁的振动分析[J]. 机械设计与制造, 2012(10): 228-230.
- [7] 詹亚歌, 吴华, 裴金诚, 杨熙春, 薛绍林. 高精度准分布式光纤光栅传感系统的研究[J]. 光电子·激光, 2008, 19(6): 758-762.
- [8] 田石柱, 曹长城, 王大鹏. 光纤光栅传感器监测混凝土简支梁裂缝的实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 1-5.
- [9] 禹建丽, 卞帅. 基于 BP 神经网络的变压器故障诊断模型[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(6): 1343-1349.
- [10] 唐立力, 吕福起. 基于遗传算法的 BP 神经网络滚动轴承故障诊断[J]. 机械设计与制造工程, 2015, 44(3): 65-68.

**期刊投稿者将享受如下服务:**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [jsta@hanspub.org](mailto:jsta@hanspub.org)