

# 智能材料与结构中的光纤传感阵列 及其神经网络处理\*

杨建良 向 清 黄德修

(华中理工大学光电子工程系 武汉 430074)

**提要** 提出了一种新颖的、采用周期性对称与不对称刻纹多模光纤组成的传感阵列网络,可用于智能材料与结构的应力、应变等的状态探测或损伤估计。探索采用了人工神经网络技术处理其阵列传感信号,给出了 BP 网与 Kohonen 网的仿真结果。

**关键词** 刻纹光纤, 光纤传感, 智能材料与结构, 人工神经网络

## 1 引 言

在材料与结构内的关键部位埋入光纤传感器或其阵列网络,探测其在使用或运行的动态过程中由于外力、疲劳等产生的变形、裂纹与损伤,也能实时监测其内部应力、应变与温度的变化。这就是近年来在航空航天、造船、建筑等部门得到广泛重视的智能材料与结构<sup>[1]</sup>。其中光纤传感器及阵列的选择与光纤阵列输出的传感信号的处理非常关键。本文提出了一种新颖的、采用周期性对称与不对称刻纹多模光纤组成的传感阵列网络,既可测量材料或结构中应力、应变等量,又可探测其内部损伤。而信号的处理则采用人工神经网络,利用其固有的高度并行性、容错性及自适应自组织等特性<sup>[2]</sup>,实时地处理智能材料与结构中光纤阵列输出的大面积并行分布式传感信号。

## 2 刻纹光纤传感阵列

### 2.1 刻纹光纤传感原理及实验结果

刻纹光纤的结构见图 1,采用氢氟酸对多模光纤包层刻蚀形成,图中 (a) 为单面刻蚀, (b) 为双面不对称刻蚀。 $L_E, L_U, d$  分别为刻蚀段宽度、刻蚀段间隙与刻蚀深度。

刻纹光纤的应变传感机理之一是模体积失配效应。光纤受轴向应力被拉伸时,刻纹段的横截面积较小,将有大的应变,其半径和折射率的变化也必大于非刻纹段的变化,因此刻纹段的模体积变化也一定大于非刻纹段的变化,当不同模体积的两段光纤连接时,必定存在功率损耗,其功率总损耗  $\Delta P/P$  与应变  $\Delta L/L$  的关系为<sup>[3]</sup>

$$\Delta P/P = - NQ[n^2(P_{11} - 2\nu P_{12}) + 1]\Delta L/L \quad (1)$$

\* 国防科技预研基金资助项目。

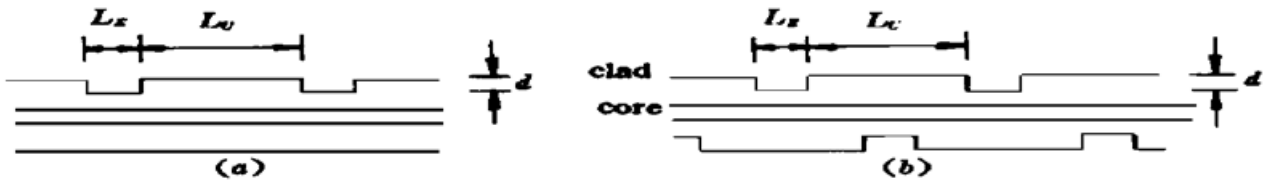


图 1 (a) 单面刻蚀光纤; (b) 双面不对称刻蚀光纤

Fig. 1 (a) Single-surface etched fiber; (b) Double-surface asymmetric etched fiber

式中  $N$  为刻纹数目,  $n$  为纤芯折射率,  $P_{11}$  与  $P_{12}$  为光弹系数,  $\nu$  为泊松比,  $Q$  为由刻纹光纤的几何结构参数决定的几何增强因子,

$$Q = \frac{L(b_U^2 - b_E^2)}{Lb_E^2 + NL_E(b_U^2 - b_E^2)} \quad (2)$$

$L$  为光纤总长,  $L_E$  为每个刻纹段长,  $b_U, b_E$  分别为非刻纹段与刻纹段包层半径。可见当增加刻纹深度( $b_E$  减小) 时,  $Q$  值增大, 即灵敏度增大; 而增大刻纹宽度( $L_E$  增大) 时,  $Q$  值减小, 即光纤灵敏度减小; 而由(1), (2) 式: 当几何结构参数确定后, 传感器灵敏度与  $N$  成正比。即刻纹光纤应变灵敏度随刻纹数目与刻纹深度的增加而增加, 随刻纹宽度的增加而减小。另外, 对于硅基光纤, (1) 式中  $n^2(P_{11} - 2\nu P_{12}) + 1 \approx 1.06$ , 所以刻纹光纤功率损耗与应变基本成线性关系。应变传感机理之二是微弯原理。Vaziri 等人通过有限元分析及实验表明<sup>[4]</sup>, 对于弹性圆柱形或矩形细长杆, 若沿其一侧进行刻蚀处理后, 在轴向应力作用下, 细长杆将产生侧向弯曲, 弯曲周期与刻蚀周期相同, 依此, 对于图 1 所示对光纤包层表面进行单面或双面不对称刻蚀而形成的两类刻纹光纤, 在轴向应力作用下将产生侧向弯曲(见图 2), 此侧向弯曲效应相当于光纤的微弯效应, 但无需传统微弯传感器必需的外加变形装置。

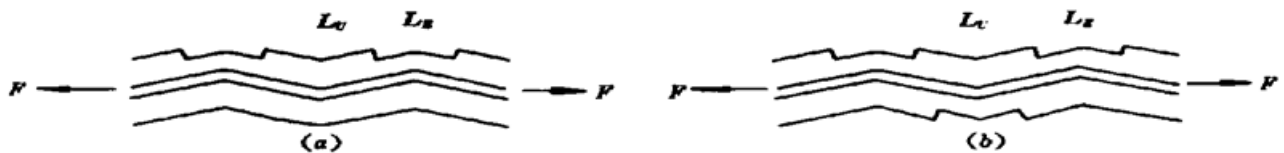


图 2 轴向应力导致刻纹光纤的侧向弯曲

Fig. 2 The lateral bending of etched fibers induced by axial stress

实验中刻纹光纤采用较简单的热刻-酸蚀法工艺形成: 利用热刻法周期性地去掉光纤表面的塑料外套, 浸入氢氟酸溶液中腐蚀其包层, 形成刻纹段, 未热刻部位保留的塑料外套保护光纤免受腐蚀, 形成非刻纹段, 然后去掉表面残余的塑料外套形成刻纹光纤。我们采用 50/125 的多模光纤制作了五根刻纹光纤: 双面不对称 10 对刻纹(见图 1(b), 上下各 10 条共 20 条) 分别腐蚀 20, 30, 40 min 共 3 根; 单面 20 条刻纹(见图 1(a)) 与双面不对称 20 对刻纹腐蚀 30 min 各 1 根, 分别标为 1, 2, 3, 4, 5 号光纤, 对于所有光纤, 刻纹宽度  $L_E = 1$  mm, 刻纹间隙  $L_U = 3$  mm。实验结果见图 3~ 6。

图 3 为结构相同但腐蚀时间不同的 1, 2, 3 号三条光纤的应变特性实验值, 可见传感器的灵敏度随腐蚀时间(刻纹深度) 的增加而增加; 图 4 为腐蚀时间相同但结构(包括单、双面与刻纹数目) 不同的 2, 4, 5 号三条光纤的应变特性实验值, 其中 2, 5 都为双面刻纹, 但后者刻纹数目大于前者, 可见传感器灵敏度随刻纹数目的增加而增加; 而 2, 4 号光纤腐蚀时间与刻纹数目

都相同,但后者刻纹在同一面,在轴向应力作用下虽然微弯幅度可能较前者小,但微弯数目为前者的两倍,故灵敏度较高;图 5 为 5 号光纤的重复性实验曲线,其中△为加应变,○为减应变,可见刻纹光纤应变器的重复性好,无迟滞现象;另外由图 3~ 5 可见:所有光纤的光功率变化与应变基本上成线性关系;这些都与上面的理论分析相符。图 6 为 1, 2, 3 号光纤断裂应变阈值与刻蚀时间的关系曲线,可见光纤断裂阈值随刻蚀时间而变,随着刻蚀时间的增加,光纤断裂阈值下降。

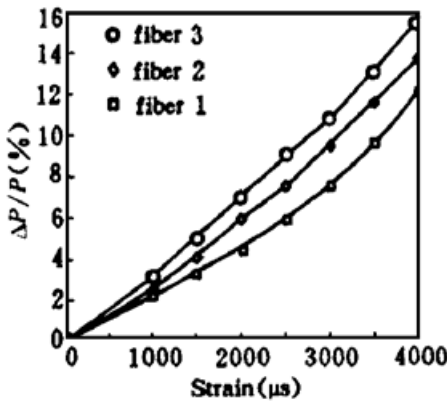


图 3 相同结构但不同刻蚀时间的三条光纤的应变特性

Fig. 3 The strain character of three fibers with similar structure and different etched times

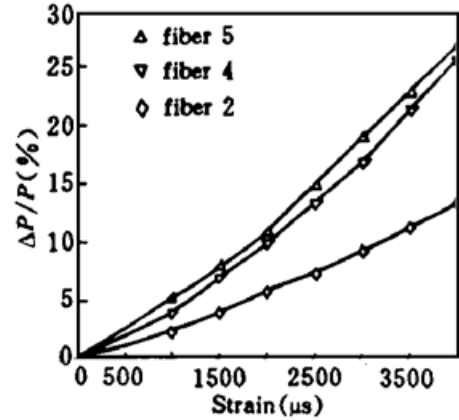


图 4 相同刻蚀时间但不同结构的三条光纤的应变特性

Fig. 4 The strain character of three fibers with similar etched time and different structures

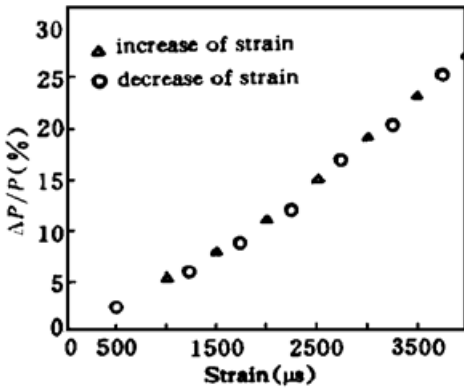


图 5 刻纹光纤应变的重复特性

Fig. 5 The reproducible behavior of a etched fiber

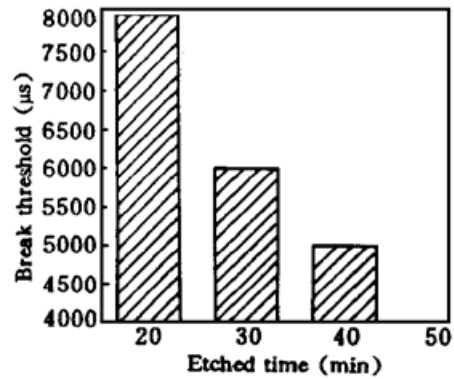


图 6 刻纹光纤应变断裂阈值与刻蚀时间的关系

Fig. 6 The break threshold (strain) of etched fibers VS etching time

### 2.2 刻纹光纤传感阵列

根据前述理论分析与实验,我们设计了如图 7 所示的二维刻纹传感阵列,其中  $x$  与  $y$  方向光纤网分别埋置于相邻的两层复合材料基板之间,目的是避免在同一层中  $x$  与  $y$  方向光纤交叉凸起,在复合材料内造成树脂空洞。该光纤阵列不但可依前述传感原理测量复合材料内部应力与应变,还可用作材料或结构内的损伤探测。如图 7,若输出端光纤 1 与 8 无光输出,则基本可断定光纤 1 与 8 交叉处  $C$  附近材料存在裂纹,精确度则与光纤间的间距有关。为了提高其损伤探测灵敏度,在外力作用下,要求光纤先于或同时与材料发生断裂,而这一点唯有刻纹光纤

可灵活地做到, 因为由图 6 可知, 调节刻蚀时间, 控制刻蚀深度, 可方便地改变光纤的断裂阈值。

在复合材料内采用刻纹光纤网还有如下优点: 刻纹光纤采用光强度检测, 为单端单根形式; 结构简单、测量方便、可靠性高, 且可避免干涉型传感器中隔离参考臂的问题; 刻纹光纤表面凹凸不平, 埋入复合材料内可加强与基质材料的粘结力。

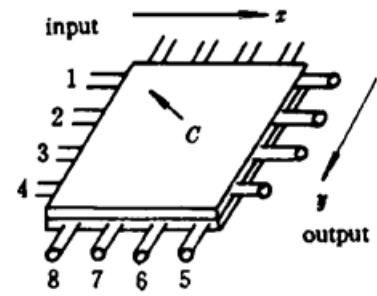


图 7 智能材料与结构中刻纹光纤传感阵列

Fig. 7 Etched optical fiber sensor array in smart material and structure

### 3 阵列传感信号的神经网络处理

传感阵列的输出信号为大面积的并行分布式信号, 用一般的信号处理方法计算量大, 非常困难。而人工神经网络具有高度并行性、容错性及自适应与自组织能力, 将光纤传感阵列输出的光信号作为神经网络的输入, 通过学习, 使传感光纤阵列上受力(损伤)的程度及位置与神经网络的输出模式间建立某种非线性映射关系, 从而可使光纤阵列传感信号得到实时的智能的处理。我们探索采用了两种较常见的神经网络: 一是采用 BP 网络来解决智能材料与结构中受力(或损伤)的定位与程度问题, 即将 BP 网的输出值序列的一部分训练为表征监测量位置的代码, 另一部分训练为对应监测量的大小(程度)。二是采用 Kohonen 网确定材料与结构中损伤的位置, 因为经过训练后的 Kohonen 网的输出可看成是输入样本特征的一种表达, 对于相近的输入, 其输出响应节点在输出平面上也是拓扑相近的。

为实现材料与结构内受力(损伤)的定位, 针对图 7 所示埋入的  $4 \times 4$  光纤传感阵列, 我们采用 C 语言编程设计了  $8 \times 16$  结构的 Kohonen 网络进行了多组仿真实验, 其中输入层节点数 8 为光纤传感信号的输出个数, 输出层节点数 16 为材料或结构内可区别的损伤点区域数目。网络采用变型的有教师指导的算法, 通过输入训练样本进行学习。结果显示: 对于单点损伤探测, 当训练样本达 16 个时; 对于两点损伤探测, 当训练样本达 48 个时, 网络对损伤的定位能力均达 100%。而为同时实现材料与结构内受力(损伤)的程度及位置的测量, 我们采用 C 语言编程设计了  $8 \times 36 \times 6$  结构的 BP 网络进行了多组仿真实验, 输入层节点同前为 8, 隐层节点数根据精度要求取输入样本的四到五倍<sup>[2]</sup>, 此处取 36, 输出层节点数为 6 个, 其中 4 个代码表位置(16 个), 2 个表受力(损伤)程度: 未受力、受力适中、受力达极限、材料损伤等四级。结果显示: 选用 48 个样本训练后, 网络对受力(损伤)的程度与位置的识别率为 85%; 当训练样本达 200 个时, 识别率为 96%。可见神经网络根据光纤传感阵列输出的光信号分布便可实时识别出材料与结构内受力(损伤)的程度及位置, 识别率达 90% 以上, 网络抗干扰能力强。其中 BP 网可同时实现材料与结构内受力(损伤)的程度及位置的测量; 而 Kohonen 网只能指出受力(损伤)的位置。但其定位能力优于 BP 网, BP 网抗干扰能力较 Kohonen 网稍差。

### 参 考 文 献

- 1 R. M. Measure. Advances toward fiber optic based smart structures. *Opt. Engin.*, 1992, **31**(1) : 34~ 47
- 2 周继成. 人工神经网络. 北京: 科学普及出版社, 1990, 4~ 10
- 3 M. Vaziri, C. L. Chen. Etched fibers as strain gauges. *J. Lightwave Technology*, 1992, **LT-10**(6) : 836 ~ 841

- 4 M. Vaziri, C. L. Chen. Optical-fiber strain sensors with asymmetric etched structures. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(31) : 6399~ 6406

## Optical Fiber Sensor Array in Smart Material and Structure and its Neural Network Processing

Yang Jianliang Xiang Qing Huang Dexiu

(*Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074*)

**Abstract** Presented in this work is a novel fiberoptic sensor array which is made of symmetric and asymmetric periodically etched multimode optical fibers. It may be applied to detection of structural states such as stress, strain or damage assessment in smart material and structures. The principle and technology of array sensing signal processing in the artificial neural network are described. The simulation results of BP network and Kohonen network are also given.

**Key words** etched optical fiber, fiberoptic sensing, smart material and structure, artificial neural network