

# 基于神经网络的智能复合材料损伤评估系统

陶云刚 陶宝祺

(南京航空航天大学测试工程系, 南京, 210016)

## SMART COMPOSITE DAMAGE ASSESSMENT SYSTEM BASED ON THE NEURAL NETWORK

Tao Yungang, Tao Baoqi

(Department of Test Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016)

**摘要** 介绍了一种复合材料损伤评估的新系统。该系统由埋入光纤传感器阵列、形状记忆合金丝和 Kohonen 自组织神经网络处理器组成。由埋入光纤传感器阵列实现对材料损伤的检测, 神经网络由 TMS320C25 高速并行处理器和 IBM PC / 386 组成的高速并行分布处理器进行模拟, 实现传感器输出信号的实时处理, 并产生相应的控制信号激励形状记忆合金丝(SMA), 以改变材料的应力状态, 延缓材料的破坏。

**关键词** 神经网络, 复合材料, 破坏程度评估

**中图分类号** V241.06, TP206.3

**Abstract** A novel approach is introduced for composite damage assessment. The system consists of an embedded fiberoptic sensor array, Shape Memory Alloy (SMA) and Kohonen Self-Organizing Maps(SOM) neural network processor. The fiberoptic sensor array embedded in the composite structure can be used to detect the damages in the composite. The neural network is simulated by high speed Parallel Distributed Processing (PDP) which consists of TMS320C25 high speed processor and IBM PC / 386 computer, deals with the output signals of sensors on time, and controls and actuates the shape memory alloy wires to change the strain state of the composite. So that, the damage of composite will be delayed.

**Key words** neural nets, composites, damage assessment

复合材料在力学行为、破损、失效方面比金属材料复杂得多, 例如在冲击的情况下复合材料的外表是正常的, 但内部损伤可能很大。对存在缺陷尚无有效手段进行检查, 对材料的无损检测和监测就更困难, 从而限制了复合材料的使用范围<sup>[1]</sup>。智能复合材料就是在处理器控制下埋入光纤传感器阵列和形状记忆合金丝构成的。形状记忆合金丝作为致动元件改变复合材料的机械性能, 在智能复合材料中所用的处理器必须处理光纤传感器的输出信号并产生相应的控制信号激励记忆合金丝, 而传感器和激励可以分布在很大的范围内, 可由几十个或上千个分散单元组成, 必须经过大量的计算及花费一定的时间。人工神经网络能提供一个完整的并行计算机构, 可以实时对多输入多输出进行处理, 并通过训练来学习正确的逻辑。在训练结束后, 能对没有训练的输入信号做出正确的判断。本文采用 Kohonen 自组织神经网络来实现智能复合材料的处理器, 由光纤传感器输入信号, 神经网络的输出信号是形状记忆合金丝的控制信号, 实现智能复合材料的损伤评估。

1993年3月29日收到, 1993年8月30日收到修改稿

国家自然科学基金资助课题

# 1 自组织特征映射网络及其改进学习算法

## 1.1 Kohonen 自组织特征映射网络及算法

自组织特征映射原理可概述为：假设一个统计样本序列  $X = X(t) \in R^k$  及一组不同的权矢量  $\{W_j = W_j(t) \in R^k, j = 1, 2, \dots, N\}$ ,  $W_j$  以某种方式初始化, 如基于某种距离测度  $d(Z, W_j)$ ,  $Z$  能在每个顺次的时刻  $t$  与所有的  $W_j$  进行比较, 则距  $X$  最近的  $W_j$  就是  $X$  的响应或匹配, 记  $W_c = W_c(t)$

$$\text{即 } W_c: d(X, W_c) \leq d(X, W_j), j = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

考虑到区域相关性, 对  $W_c$  及其邻近的权矢量朝着接近  $X$  的方向进行调整, 其余的权矢量不变, 则不同的权矢量就可以调整到与输入模式相匹配的不同的区域。

Kohonen 自组织特征映射神经网络的结构如图 1(a)所示, 它是一个两层网络, 输出节点在输出平面上按顺序排列, 每个输出节点都有一个拓扑邻域, 每个输出节点与其邻域内的其它节点相连, 这种节点邻域的表达如图 1(b)所示。它的学习过程可以是监督的或

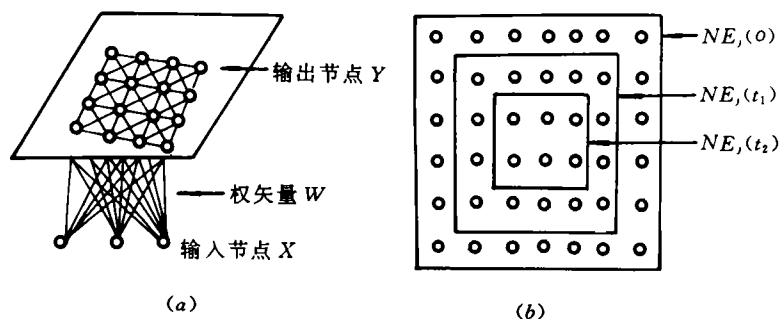


图 1 Kohonen 自组织特征映射网络结构

者是非监督的。通常监督网络用在具有人工定义簇的模式分类场合, 如用于判断复合材料的损伤位置; 非监督网络通常适用于具有自然形成簇的统计分析场合, 如用于确定复合材料中最大应变值。在训练期间, 神经网络采用竞争自学规则, 给予网络中每个神经元一个小的随机权值, 通过比较权值和输入矢量之间的 Euclidean 距离来响应特殊的输入模式, 即

$$\|X - W_c\| = \min \|X - W\| \quad (2)$$

这里  $X$  和  $W$  分别代表输入和权矢量,  $W_c$  是获胜元件的权矢量。仅获胜元件改变它的权值, 并取决于它在网络中的位置。如果获胜元件位于期望的簇以内, 这意味着输入模式和正确类一致, 通过增加部分输入与权矢量的差值, 使获胜元件的权矢量接近输入矢量, 其学习规则为

$$W_c(t + 1) = W_c(t) + a(t)[X(t) - W_c(t)] \quad (3)$$

其中  $a(t)$  是随时间减小的学习率 ( $0 < a(t) < 1$ )。如获胜元件位于期望的簇以外, 这意味着输入模式落入错误类别, 通过减掉部分差值使获胜元件的权矢量远离输入矢量, 其学习规则为

$$W_c(t + 1) = W_c(t) - a(t)[X(t) - W_c(t)] \quad (4)$$

从网络的观点出发, 训练过程可以认为是获胜元件绕网络运动的过程。经过足够的训练后, 单个输入模式的每个获胜元件稳定在期望的簇以内, 并且相对输入集而言, 整个网络的权矢量处于最佳。不足的是标准学习算法需长时间的训练过程, 特别是期望簇很多时, 匹配于期望簇的特定的输入模式的初始概率较小。

## 1.2 改进的学习算法

对神经细胞的研究表明, 各种神经细胞之间具有一种相互作用的反馈结构。最邻近的细胞相互激励, 较远的细胞相互抑制, 更远一些的又有微弱的激励作用。在自组织特征映射神经网络中, 响应节点邻域内的各节点具有相同或相近的特征。然而, 这些节点不一定属于同一类; 特别是当输入模式类别很多时, 对节点权的调整更应当反映出分类上的不同<sup>(2)</sup>。为此, 采用了两种不同大小的增益因子的改进算法

$$W_j(t+1) = \begin{cases} W_j(t) + a_1(t)[X(t) - W_j(t)]; & j = c \\ W_j(t) + a_2(t)[X(t) - W_j(t)]; & j \in NE_c(t), j \neq c \\ W_j(t); & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $a_1(t)$ ,  $a_2(t)$ 分别为不同的增益因子。 $a_1(t)$ 保证响应节点的稳定调整; 在初始调整阶段,  $a_1(t) < a_2(t)$ 使调整能快速进行; 在精细调整阶段,  $a_1(t) > a_2(t)$ , 以保持不同类的特征。

## 2 基于 SOM 网络的损伤评估系统

在进行损伤评估时, 希望能快速确定机械结构如飞机的机翼中损伤出现的位置及其严重性并进行控制。采用了如图 2 所示的实验系统。复合材料试验件, 由玻璃纤维复合材料板制成, 安装在可以改变多种支承形式的支架上, 在板的中心面  $1\text{m} \times 1\text{m}$  处沿  $x$  方向和  $y$  方向等间隔各埋入 10 根光纤。离中面等高  $1.5\text{mm}$  的两个平面内各埋入 4 个单元的形状记忆合金丝, 其中每格尺寸为  $0.1 \times 0.1\text{m}^2$ , 位置与光纤平行和匹配。

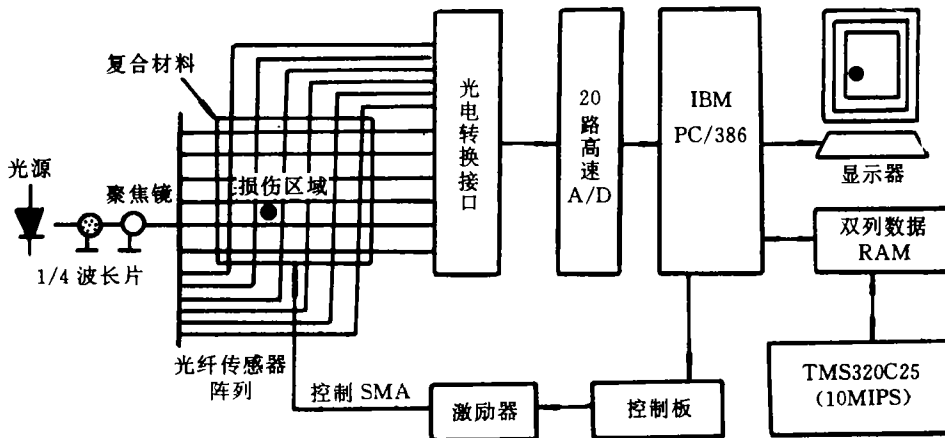


图2 基于 SOM 网络的损伤评估系统

来自激光二极管的光, 通过一个星型耦合器耦合二维光纤应变传感器阵列, 每根光纤传感器的输出光强是其光通道上应变分布的函数, 由于疲劳或外部原因引起的损伤会引起

材料的物理位移, 并导致一种与损伤位置有关的特殊的应变分布。埋设的光纤传感器阵列能检测出应变分布, 并输出一个与其相对应的光强分布, 经过光电转换接口, 作为神经网络处理器的输入, 经过事先训练的监督 Kohonen 神经网络能确定损伤出现的位置及严重性。损伤点被显示在 386 计算机的显示屏上, 它在显示屏上的位置与它在机翼上的位置相对应, 同时产生相应的激励信号, 自动改变其中几根记忆合金丝的状态, 使损伤处处于压应力状态, 以延缓材料的破坏。

神经网络由 TMS320C25 高速并行处理器和 IBM PC / 386 组成的高速并行分布处理器进行模拟, TMS320C25 内部结构为 32 位, 每秒钟可执行多达一千万条指令 (10MIPS), 具有在多处理器之间进行同步的能力, 并有支持多处理器共享全局的存贮器。它和 IBM PC / 386 之间采用了双端口 RAM 技术和双列数据存贮区, 这样使主机与从机高速并行地处理数据, 通过合理而精巧的软件设计, 使数据分成两部分, 用两个处理器分别处理。双列存贮区可使 TMS320C25 的快速处理数据的优点得以充分发挥, 而让有较强控制总线能力的 PC 机与慢速的 I/O 设备进行数据交换与传送。如来自光电接口的 20 路信号, 由 PC 控制经 20 路 12 位 200KHz 的 A/D 转换器采集, 其数据作为神经网络的输入; 而完成神经网络处理的各种运算则由 TMS320C25 完成, 最后激励形状记忆合金丝的控制信号由 PC 通过测控板发出, 并在 PC 机显示屏上显示相应损伤位置。

### 3 仿真实验

在复合材料试验板中埋入 20 根光纤, 配置  $64(8 \times 8)$  个神经元簇, 每个神经元簇代表神经网络中的一个损伤点。对应于 64 个局部损伤位置, 准备了 64 组训练数据, 它们之中的每一组是代表光纤阵列传感器的输出应变值。神经网络处理器是 20 个输入 64 个输出的系统。训练时每组数据随机地送入神经网络。训练开始时学习率取 0.05, 经过 2 048 次迭代, 学习率降为 0.04。开始时, 没有输入匹配于所期望的簇, 这里由于起始权值是随机的, 经过 900 次迭代后, 匹配的输入数据迅速增加; 经 2 048 次迭代后, 所有输入数据都匹配于期望簇, 此时权值最佳, 训练也就结束。

本文只对一处有损伤的场合进行了模拟, 但这种损伤估计方法同样可以被用于多损伤检测。在某一多损伤探测情况下, 对每一种应变分布模式, 多簇 Kohonen 神经网络将指示损伤位置。文献[3]进行了计算分析实验。

### 参 考 文 献

- 1 Grossman B, Gao X, Thursby M. Composite damage assessment employing an optical neural network processor and an embedded fiberoptic sensor array, SPIE fiber optic smart structure and skin 1991; 1588(4): 64—75
- 2 禹宏涛, 蔡德钧. 一种用于图象编码的神经网络及其改进算法. 信号处理, 1992; (9): 176—182
- 3 Grossman B, Caimi F. Smart structures and fiber optic sensor research at florida institute of technology—1990 SPIE Fiber optic smart structures and skins, 1990; 1370(4): 69—83