

人工神经网络在超声无损检测中的应用

陈彦华 李明轩

(中国科学院声学研究所 北京 1000800)

1995 年 1 月 11 日收到

摘要 人工神经网络对于超声无损检测的发展具有重要的意义. 本文对国内外人工神经网络在超声无损检测中的应用研究做了较为详细的介绍和分析, 指出人工神经网络是实现超声无损检测量化的有效途径.

关键词 人工神经网络, 超声无损检测

Application of Artificial Neural Network to Ultrasonic Nondestructive Testing

Yanhua Chen, Mingxuan Li

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract Artificial Neural Network helps a lot in the development of ultrasonic nondestructive testing. Some such achievements are reviewed in this paper. It is concluded that artificial neural network is an effective means to quantitative ultrasonic nondestructive testing.

Key words Artificial neural network, Ultrasonic nondestructive testing

1 引言

随着工业技术的发展, 检测技术水平的要求越来越高. 超声无损检测作为一种检测手段, 目前一个重要的前沿课题就是使超声无损检测由定性检测走向定量测量, 即不仅要确定是否有伤, 而且要进一步确定伤的大小、形状、取向、性质等等. 定量超声无损检测的发展具有很重要的意义, 比如在工业应用中, 定量探伤与断裂力学结合可以做出材料寿命预测; 在医疗应用中, 人体异物定量检测、组织定征为疾病的诊断及治疗提供可靠的依据. 因

此, 目前国际上许多人正致力于超声定量无损检测的研究.

发展超声定量无损检测的工作从研究方法看, 大致可分为以下三个方面:

(1) 成像技术的研究

包括 B 扫描、C 扫描、相控阵扫描、超声 CT、合成孔径聚焦成像等等.

(2) 散射、逆散射理论的研究

(3) 信号处理及模式识别技术的应用

声成像技术近年来受到重视并已有较大发展, 其中某些已应用于实际中, 如 B 扫描、C 扫描技术, 许多研究工作者正致力于其他成像

技术的实用研究,但成像设备的复杂性及成像的非实时性是两个主要问题.在散射、逆散射理论研究方面,许多人做了比较深入、细致的工作,但离实际应用还有一定距离.信号处理、模式识别技术的应用为超声无损检测的量化开辟了一条崭新而有效的途径.常见的方法有:频谱分析法、专家系统等.近年来有人将神经网络用于超声定量无损检测,取得了令人鼓舞的进展.以专家系统为主体的模式识别技术在无损检测中的应用比较早,基本思想是利用典型模型,将能提取出的所有与待识别量有关的特征组合成决策条件,对未知信息以应答方式进行识别.人工神经网络与之相比,当待识别量与已知信息间的关系无法用规则表达时,很有优势.因此其应用日益广泛.

2 人工神经网络

人工神经网络是由一些简单的元件及其层次组织的大规模并行联接构造的网络,它致力于按照生物神经系统的同样方式处理真实世界的客观事物^[1],其本质上是一种更为接近于人的认知过程的计算模型.由于它具有高度的容错性、自组织和自学习能力,为解决较为困难的认知任务提供了一种崭新手段.

目前已发展出多种神经网络模型,例如50年代F. Rosenblatt提出的单层感知机,80年代Rumelhart等提出的多层感知机,Hopfield推广前人成果而发展的Hopfield网络,Grossberg的ART网络,80年代初Kohonen提出的自组织特征映射网络等等.在现存的各种网络类型中,多层感知机模型、ART网络、自组织特征映射网络应用比较广泛.在超声无损检测的应用中,从目前已发表的研究成果来看,多采用多层感知机模型.下面着重介绍多层感知机模型.

多层感知机模型图1. 多层感知机包括输入层、隐含层、输出层,其中隐含层可以是一层或多层,每层又由若干神经元组成.各层顺序连接,第K层各神经元的输入仅与第K-1层各神经元的输出相关联.

应用声学

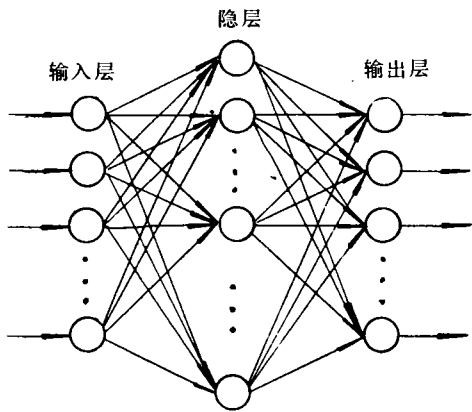


图1 人工神经网络

设第K层中第j个神经元的输入为 $y_i^{(k-1)}$ ($i=1, \dots, N_{k-1}$), 输出为 $y_j^{(k)}$. 输入输出关系为:

$$y_j^{(k)} = f_j^{(k)} \left(\sum_{i=1}^{N_{k-1}} W_{ij}^{(k-1)} y_i^{(k-1)} - \theta_j^{(k)} \right)$$
$$j = 1, 2, \dots, N_k; k = 1, 2, \dots, M.$$

式中 $W_{ij}^{(K-1)}$ 为第K-1层中第i个神经元到第K层第j个神经元的连接权值, $\theta_j^{(k)}$ 为对应神经元的阈值, $f_j^{(k)}$ 为神经元的传递函数,一般每层中各神经元取相同形式, N_k 为第K层神经元的数目, M 表示总层数.一般取神经元的传递函数 $f(x)$ 为Sigmoid函数.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-(x-\theta)}}$$

其中 x 为神经元的输入, θ 为其阈值.

网络的连接权值可通过训练、学习而不断调整,直到逼近或达到最佳效果,训练好的网络就可以用于识别了.

对多层感知机的训练一般采用已成熟的BP算法,即误差信号反向传播算法.其基本思想是使用梯度搜索技术,以期网络的实际输出与期望输出的均方差最小.网络的学习过程是误差边向后传播边修正权值的过程.

详细步骤在有关神经网络的资料中都有介绍^[1, 2],本文就不再赘述了.具体应用中有点需要注意.

(1) 由于BP算法本质上是一种非线性优

化问题,不可避免地会遇到最常见的局部最小化问题,致使问题得不到最优解。

(2) 网络各神经元的个数的选取尚无理论上的依据,是根据经验选取的。

3 人工神经网络用于超声定量无损检测

材料中缺陷的位置、类型、大小、取向、性质等特征的确定,即无损检测的定量化一直是无损检测的一个难题和发展方向,对于超声无损检测也不例外。现有的超声无损检测手段大多停留于确定缺陷的有无、位置。神经网络作为特征识别的一种有效手段,可以用于缺陷的其它特征的识别,而且可以避免目前常规无损检测设备的检测结果对检测人员的实际经验和操作技能的强烈依赖性。

由于各种材料其制作工艺是一定的,因此缺陷的出现并非随机任意的。这样只要针对具体工艺做出材料可能存在的各种缺陷模型,测得超声回波数据,对其进行预处理提取特征量,利用它训练神经网络,网络训练完成后此网络就可以用于对此类材料进行定量无损检测了。

将人工神经网络用于超声定量无损检测,关键在于网络输入信号的选取,即特征量的选取至关重要。目前比较常用的特征量有:信号的幅度谱、相位谱、功率谱密度等。对淹没在噪声中的瞬变信号的检测,常利用信号的 Wigner 变换作为特征量。

将人工神经网络用于超声无损检测的研究工作始于 80 年代,从研究方法来看,有的人以弹性波传播理论为基础,利用神经网络对缺陷分类^[3];有的人在常规检测手段的基础上利用神经网络实现缺陷类型的正确判别^[6, 7]。

从检测对象看,目前的研究主要集中于两类材料的缺陷检测,即金属材料及其构件的缺陷定征,及复合材料的缺陷定征等。

3.1 神经网络用于金属材料及其构件的缺陷定征

Lorenz 等^[5]利用人工神经网络成功地实现

了钢板中缺陷的类型的定征。在厚度为 40 mm 的钢板内做出不同直径的圆柱孔缺陷和不同深度的平底孔缺陷,作为模型。利用一对中心频率为 3 MHz 的横波斜探头在钢板表面扫查。发射、接收斜探头角度为 45°。当此换能器对沿某一方向(设为 x 方向)扫查时,在任一位置,设收到的回波信号为 $g(x, t)$,对 $g(x, t)$ 在时间域加窗后进行时域傅里叶变换,得 $G(x, \omega)$;改变位置按上述步骤得到对应不同位置的 $G(x, \omega)$;在空间域对 $G(x, \omega)$ 进行傅里叶变换得到 $\psi(\nu, \omega)$ 。在时域加窗时要尽可能包括全部缺陷反射回波。这样, $\psi(\nu, \omega)$ 就可以作为神经网络的输入信号了。

$\psi(\nu, \omega)$ 离散、归一化后,作为神经网络的输入信号,利用 BP 算法训练人工神经网络,直到权值基本稳定。此时就可以利用这一神经网络对缺陷进行识别了。对未知类型缺陷进行识别,结果表明,类型判别准确率达到 100%。

对于缺陷形状的判别,还可以采用另外一些特征量。

A. McNab^[8]等利用自动超声无损检测设备对焊缝缺陷进行检测,当换能器阵在缺陷区域扫描时,记录对应最大回波幅度的换能器的位置坐标、回波起始时刻、回波幅度,当整个缺陷区域扫描完毕后根据上述数据计算出:① 焊缝中各缺陷点的坐标,② 对应各缺陷点的超声回波幅度。然后计算每三个点组成的三角形的内角,以不同内角出现的次数经幅度加权后所得的量作为特征量输入人工神经网络。利用上述方法计算出分别对应点状、线状、面状缺陷类型的特征量,训练人工神经网络。训练后对未知缺陷进行识别,类型识别率达 90%。

3.2 人工神经网络用于复合材料缺陷定征

随着技术的发展,各种人工合成新材料的应用日益广泛,其中纤维增强型复合材料以其独特的优点而倍受青睐。但是由于其结构的复杂性,传统的无损检测手段受到了极大的挑战。目前对复合材料无损检测方法的研究已成为国内外的一个热点。

超声用于复合材料缺陷检测,有几个主要因素限制.首先,超声波在复合材料中衰减很大;其次,由于复合材料是一种非均匀介质,结构噪声很大,因此超声用于复合材料缺陷检测时需加大超声功率;为了提高检测精度,超声频率不能太低;同时缺陷特征往往难以直接从时域回波中看到,需要用一定的信号处理手段提取.目前有人将神经网络用于复合材料的超声无损检测,成功地实现了缺陷类型的判别.

复合材料基体裂解、纤维-基底脱粘、纤维断裂、基底多孔性、分层等都会引起复合材料的破坏. J. J. Thomsen 等^[6]针对玻璃钢制作中存在的几种缺陷,利用神经网络实现了对缺陷的判别.选取的样品包括:①适当温度、压力下自然固化而成的无缺陷样品,记为 r ;②固化前在一定区域内塞入聚氟乙烯引起局部脱粘的样品,记为 d ;③某些部位纤维成分明显多于其他部位的样品,记为 f ;④固化时不抽真空而形成多孔基底的样品,记为 p .实验中利用两个换能器一发一收在样品表面采集数据,两换能器间距为43 mm,通过耦合剂与玻璃钢耦合,换能器中心频率为1 MHz,宽带.在任意位置,接收回波信号,计算其功率谱密度,归一化后作为人工神经网络的输入.对于每一种缺陷类型,采集若干信号作为训练样品.神经网络输入单元取21个,取一层隐含层,含5个神经元,输出层含4个神经元,分别对应 r 、 d 、 f 、 p 四种类型.

训练时,增益因子取0.07,平滑因子取0.3,初始权值和门限值取 $[-0.03, 0.03]$ 之间均匀分布的随机数.对网络进行训练直到权值稳定.训练后的人工神经网络用于未知缺陷的类型判别,识别率达90%以上.

复合材料的超声回波信号中噪声干扰很大,如果先利用一定的信号处理手段处理信号,提高信噪比,在此基础上提取特征量,然后利用人工神经网络实现缺陷定征,效果会更好. P. Karpur^[7]利用分裂谱方法处理超声A扫回波信号以提高信噪比,然后计算信号的幅

度谱作为特征量训练人工神经网络.另外,直接选用A扫回波信号计算得到其幅度谱作为神经网络的输入,训练得另一神经网络,对同一未知缺陷,用此两种网络识别,前者的识别准确率明显高于后者.

4 讨论

人工神经网络作为特征识别的有效手段,在超声无损检测中的应用潜力很大.目前常规超声无损检测手段主要是根据反射回波的时域信息进行检测,但是许多情况下缺陷特征并不能直观地反映在时域波形中,更难以实现缺陷检测的定量化.这时就必须利用信号处理手段提取缺陷的特征.人工神经网络与其他信号处理手段相比,有其独特的优点.首先,微机与信息处理技术的迅速发展为人工神经网络在超声无损检测中的应用奠定了基础,只需在常规检测设备的基础上配置一台微机就可实现;其次,由于人工神经网络具有高度的容错性,使得它特别适合于信噪比较差的情况下使用,这样,为强噪声材料缺陷的检测提供了一条有效途径;第三,人工神经网络在关系无法用确定的规则或表达式表示的情况下,很有优势.在定量超声无损检测中,回波中包含有缺陷的大小、形状、类型的信息,但很难推出其确切关系式,则可用人工神经网络实现缺陷定征;第四,人工神经网络一经训练完成,就可以用于识别未知缺陷了,对检测人员的经验和操作技能要求不高.

人工神经网络在超声定量无损检测的应用中具有一定的优势.但是也存在一些问题需要注意.第一,网络训练时间较长;第二,神经元个数的选取无理论依据,完全靠经验选取;第三,在选取特征量时,要以检测物理特性为基础,利用具有典型缺陷的模型,根据理论分析和反复实验确定切实反映缺陷特征的量,作为神经网络的输入信号.

从目前的研究来看,人工神经网络在定量超声无损检测的应用仍处于实验室阶段,有待于进一步向实用化方向发展;而且目前的应用

多局限于对缺陷类型的判别,如何将人工神经网络用于缺陷大小、取向、性质等的判别,实现超声定量无限检测,尚需进行更为深入的研究。

参 考 文 献

- [1] 殷勤业等编译. 模式识别与神经网络, 机械工业出版社, 1992.
- [2] 罗发龙, 李衍达编. 神经网络信号处理, 电子工业出版社, 1993.
- [3] Ogi, T. Notake, M. et al. Review of Progress in QNDE, 1989, 9, 689k 696.
- [4] Yoneyama, M. Watanabe, S. et al. *IEEE Ultrasonic*

Symposium, 1988, 595k 598

- [5] Lorenz, M. T. Wielinga, S. *NDT&E International*, 1993, 26(3), 127k 133.
- [6] Thomsen, J. J. Lund, K. *Materials Evaluation*, 1991, May: 594k 600.
- [7] Karpur, P. *Materials Evaluation*, 1992, June: 793k 797.
- [8] McNad, Dr. A. Iain Dunlop, *British Journal of NDT*, 1991, 33(1), 11k 18
- [9] Kalyanasundaram, P. et al., *British Journal of NDT*, 1991, 33(6): 290k 297.
- [10] 李成林等. 94'北京检测技术交流会论文摘要汇编, 1994, 11.
- [11] 陈积懋, 无损检测, 1991, 13(3): 74k 80.

声学国际标准的新信息

1 ISO(国际标准化组织)和 IEC(国际电子学委员会)最近批准公布的新标准和原标准的修订版。

1.1 ISO:

(1) ISO4869-2: 1994, 护听器——第二部分: 戴着护听器时, 有效 A 计权声压级的估计。

(2) ISO10844: 1994, 声学——对道路车辆辐射噪声的测量路径的规定。

(3) ISO3743-1: 1994, 声学——噪声源的声功率级的测量——在混响场中对较小的、可移动的声源的工程测量法——第一部分: 硬墙测试房间的比较法。

(4) ISO3744: 1994, 声学——用声压级测量噪声源的声功率级在反射面上的理想自由声场中测量的工程法。

(5) IOS389-3: 1994, 声学——听力装置零点的校准——第三部分: 纯音的听阈等效参考级和骨传导振动器。

(6) ISO389-4: 1994, 声学——听力装置零点的校准——第四部分: 窄带掩蔽声的参考级。

(7) ISO7196: 1995, 声学——次声测量的频率计权特性。

(8) ISO TR 11688: 1995, 声学——设计低噪声机器和设备的推荐方法——第一部分: 计划。

1.2 IEC:

(1) IEC118-1: 1995-04, 助听器——用感应线圈输入的助听器。

(2) IEC1265: 1995-04, 电声学——测量飞机噪声的仪器——在鉴定运输机的噪声中, 用于测量 1/3 oct 声压级的系统的特性要求。

(3) IEC1305-1: 1995, 家用高保真放声设备和系

统——测量方法和详细特性说明——第一部分: 普通的。

(4) IEC1305-3: 1995, 家用高保真放声设备和系统——测量方法和详细性说明——第三部分: 放大器。

2 ISO 和 IEC 正在考虑批准的标准草案:

2.1 ISO:

(ISO/DIS 5135: (1995-07-30), 声学——在混响室内测量机尾、机尾部件、减振器和电子管噪声的声功率级的测量(对 ISO5135 1984 年版的修订)

(2) ISO/DIS 6393: (1995-07-16), 声学——地面上移动的机器的表面辐射噪声的测量——静态测量(对 ISO 6393 1985 年版的修订)。

(3) ISO/DIS 6394: (1995-07-16), 声学——地面上移动的机器噪声在驾驶员位置的测量——静态测量(对 ISO 6394 1985 年版的修订)

(4) ISO/DIS 6926: (1995-10-01), 声学——噪声源功率级的测量——参考声源的特性要求和校准(对 ISO 6926 1990 年版的修订)。

(5) ISO/DIS 13473-1: (1995-10-01), 声学——道路构造的表面剖面的特性——第一部分: 主要剖面深度的测量。

2.2 IEC

(1) Draft IEC 1094-3: (1995-07-15), 测试传声器——第三部分: 用互易技术对标准传声器的实验室自由场校准的一次法。

(2) Draft IEC 1094-4: (1995-07-15), 测试传声器——第四部分: 标准传声器的使用说明。

(华东交通大学蔡彪 编译自 *J. Acoust. soc. Am.*, Vol. 98, NO. 3 & No5.)