

讨论与建议

小波分析与人工神经网络在木质材料无损检测中的应用

孙建平,王逢瑚,于海鹏

(东北林业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 介绍了小波变换和人工神经网络在无损检测中的工作原理,分析了小波变换处理非平稳信号提取特征值、人工神经网络进行模式识别的优点,并提出小波、人工神经网络以及松散型和紧致型小波神经网络在木质材料的无损检测中的应用。

关键词: 小波变换; 人工神经网络; 无损检测; 木质材料

中图分类号: TP183, S781.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8654(2004)05-0024-03

Non-destructive Test for Wood Materials Based on Wavelet and Artificial Neural Network

SUN Jian-ping, WANG Feng-hu, YU Hai-peng

(Material Science and Engineering College, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: The principles of wavelet transmission and the application of artificial neural network in non-destruction testing(NDT)were reviewed and presented in this paper. Two types of wavelet and artificial neural network methods of NDT for wood materials were studied: laxation and densification. The advantages of wavelet transmission in getting eigenvalue and the merits of artificial neural network in realizing pattern recognition were described.

Key words: Wavelet transform; Artificial neural network; Non-destructive test (NDT); Wood materials

1 木质复合材料无损检测的现状

无损检测(NDT),又称非破坏性检测,是利用材料的不同物理学或化学性质,在不破坏目标物体内外部及外观结构与特性的前提下,对目标物体相关特性(如形状、位移、应力、光学特性、流体性质、力学性质等)进行测试与检验,包括对各种缺陷的测量^[1]。无损检测技术已广泛应用于各种新型材料的检测,包括正处于发展阶段的木质复合材料。

木质复合材料是木材与其它非木材的材料复合而成的多相固体材料,与木材相比具有许多优良性能,可按照人们的意愿和用途改良天然木材固有的缺

点或赋予木材新的功能,提高木材的使用价值,实现木材的优化利用。木材和木质复合材料统称为木质材料。对木质材料进行准确、快速的力学性能和缺陷的无损检测是检验产品质量、保证产品使用安全、延长产品寿命的必要的技术手段,对木质材料的研究和生产来说具有重要的现实意义。

无损检测的难点是精确定量分析。用数学模型或数学模拟定量分析,对木质材料的研究和生产有着特殊的含义,因为材料的定量分析与先进的在线测试技术相结合可以实现在线产品质量的实时监测。为此,国内外学者在无损检测信号的采集方法和信号处理方法方面进行了大量研究,我国从 20 世纪 70 年代就开始对应用 X 射线检测木材缺陷进行初步研究^[2,3],到 80 年代主要利用木材的声学性质^[4,5]和 FFT 分析

方法^[6]对木材的力学强度进行研究。在人造板的无损检测研究方面,主要利用应力波检测技术对胶合板、刨花板和中密度纤维板的剪切弹性模量和抗弯弹性模量进行了研究^[7,8];王克奇等^[9]对中密度纤维板和刨花板的表面缺陷自动检测进行了研究。美国、德国、日本等国家从 20 世纪 60 年代起已利用超声波、声发射、扫描、核磁共振等技术对中密度纤维板、刨花板等人造板的力学性能进行无损检测^[10,11];学者小玉泰义^[12,13]用小波变换分析对具有节子缺陷木材的声信号进行了研究。

从文献看,国内外现有的无损检测研究主要集中在木质材料的弹性模量和表面缺陷,而对木质材料,特别是结构用材的内部缺陷检测和评估还未见报道;信号分析手段也主要是采用快速傅立叶变换(FFT)。而对材料进行无损检测的过程实际上是信号的采集和信号的处理过程,能否正确、有效地处理信号直接影响到检测结果的准确性。FFT 通过积分变换把信号从时域转到频域进行研究,这对平稳的周期信号特别实用;而对非周期的、突变的信号,傅立叶变换则不能反映原信号的突变特征,特别是在时域没有任何分辨率时,大大影响了材料无损检测结果的准确性。木质材料内部缺陷的检测主要是对突变信号特别是对突变点进行分析,对时变的非周期信号傅立叶变换显得力不从心。而小波分析能对信号进行时频分析,能提取出信号在不同的频段内的特征,再利用神经网络强大的模式识别和拟合功能对特征信号进行分析处理。所以,利用小波和神经网络研究木质材料内部缺陷及缺陷对整个材料物理力学性能的影响是一种有效的方法。国外利用小波处理信号研究木质材料的无损检测尚属起步阶段,而国内则属空白。

2 小波分析理论

小波分析^[14]是傅立叶分析发展史上里程碑式的进展,早期以信号处理为基础的材料的无损检测也大多以傅立叶变换为基础,但傅立叶变换只能获得信号的整体频谱而不能进行局部分析。20 世纪 80 年代出现了一种既保持傅立叶变换的优点,又可弥补其不足的新时频分析方法—小波变换,它优于傅立叶变换之处是在时域和频域同时具有良好的局部化性质。

小波函数是由小波母函数 $\phi(t)$ 经过伸缩和平移而产生的一族函数 $\phi_{(a,b)}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}}\phi\left(\frac{t-b}{a}\right)$, 变动参数 a 和 b 可以衍生出一族小波函数; a 的变动使函数

伸缩,形成不同“级”的小波, b 的变动使函数移位,形成不同“位”的小波。与信号的傅立叶变换所不同的是小波变换是将信号 $f(t)$ 与小波函数进行内积运算,与信号进行内积运算的是一组相互正交的小波函数而不是正弦函数,对任意信号 $f(t) \in L^2(R)$,小波变换表示为:

$$W_{(a,b)}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{\phi(a,b)} dt = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\phi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt$$

由此可知,小波变换与傅立叶变换相比,其再生核函数不再是单一的正弦函数,而且小波函数具有可改变的尺度伸缩和位置平移参数。小波分析的一个重要特点,是对信号有自适应分析的能力,当尺度变大时,时窗变宽对应的频窗变窄,正好对应信号变化缓慢低频的成分;当尺度变小时,时窗变窄对应的频窗变宽,正好对应信号变化迅速的高频成分。小波还具有信号的奇性定位以及信号的时-频局部化分析能力。

由于小波分析的众多优点,其必将成为木质材料无损检测中信号处理的工具。例如,在缺陷有无进行检测时,可以利用小波把缺陷信号分解到不同的频段,根据各频段的信号特征可以判断是否存在缺陷;还可以利用小波分析的分频特性,提取缺陷主要的特征频段信号,通过相关分析方法求出信号到达两个传感器的时间差,便可以实现对木质复合材料内部缺陷的定位检测。但要实时动态的识别缺陷的种类,则要结合人工神经网络的模式识别功能。

3 人工神经网络

人工神经网络^[15](ANN)以计算机仿真的方法从系统结构上模拟人脑,以神经元节点模拟神经细胞体,以神经元节点间的连接强度模拟树突和轴突,用作用函数模拟突触的作用。基于人脑神经系统结构和功能模拟基础的人工神经网络具有非线性的映射能力,是模式识别的有力工具。而木质材料的物理力学性能和产生缺陷的因素很多,要准确地描述各个影响因子之间复杂的非线性关系,应用一个结构为三层的人工神经网络可以任意逼近复杂的非线性关系,所以人工神经网络是木质材料无损检测的一个有用手段。

材料的无损检测,包括物理力学性能检测和缺陷检测,都可视为是所有影响因子所构成的集合与力学参数和缺陷种类集合之间的一种因果关系。人工神经网络是一种从输入集合到输出集合的非线性映射,无

损检测的缺陷分类问题可以作为从缺陷特征空间到类别空间之间的映射,即实现特征向量空间 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 到 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ 缺陷类别空间的映射 $F, F: X \rightarrow Y$ 。通常情况下映射关系 F 是未知的,但人工神经网络可以通过学习输入的样本集,实现输入到输出的这种映射关系。这种映射关系不用数学关系式表达,是通过权值矩阵的空间分布表达特定的映射关系,而且每一个输出神经元的值 y_i 可以用以下公式进行计算:

$$y_i = f \left\{ \sum_k \omega_{ik} f \left(\sum_j \omega_{kj} x_j \right) \right\},$$

式中: ω_{kj} 为从第 j 个输入神经元到第 k 个隐含神经元之间的权重; ω_{ik} 为从第 k 个隐含神经元到第 i 个输出神经元之间的权重; f 为传递函数,在非线性逼近中常使用 sigmoid 函数 $f(x) = 1/(1 + e^{-x})$ 。 m 个输出节点中哪个输出值最大,就判定缺陷属于哪一类。

人工神经网络的结构具有并行、分布的特点,信息的储存是通过大量神经细胞单元的分布来实现的,具有高容错能力、快速推理能力和强大的联想功能,因而在木质材料的无损检测领域中将有广泛的应用。例如,在对木质材料内部缺陷种类和材料强度进行检测时,通过小波把信号分解到各频段,利用信号在各频段所占的能量值以及木质材料的参数如密度、尺寸等作为人工神经网络的输入,对缺陷种类进行识别以及对材料的弹性模量、屈服强度进行拟合。

4 小波-神经网络

小波神经网络将成为无损检测领域的一种新的检测方式。1992 年 Q Zhang^[16]明确提出了小波网络的概念和算法,其思想是用小波元代替神经元,即用小波函数代替 Sigmoid 函数作激活函数,通过仿射变换,建立起小波变换与网络系数之间的连接,并应用于逼近能量有限空间 $L^2(R)$ 中的函数 $f(x)$ 。小波神经网络结合了小波变换良好的时频局域化性质及神经网络的功能,因而具有较强的逼近能力和容错能力,已经开始有效地应用于信号处理、数据压缩、模式识别和故障诊断领域。

小波神经网络主要有以下两种途径形成:一种是松散型结合,即小波分析作为神经网络的前置处理手段,通过对信号进行小波变换提取信号有用的信息,为神经网络提供输入特征训练样本。另一种是紧致型结合,小波和神经网络直接融合,用小波函数或尺度函数形成神经元对信号进行分析处理。

小波神经网络主要有以下特点:小波神经元及整个结构的确定有可靠的理论依据,隐层的数目和隐层神经元数目的确定有规律可循;小波神经网络的工作原理为“黑箱”模型;小波神经网络有很强的自适应能力。所以,小波神经网络在木质材料的无损检测中有很好的应用前景。例如,木质复合材料物理力学性能的无损检测就是一种非线性关系问题,用小波神经网络对采集的信号进行分析处理便可以实现这种非线性的目标拟合。

5 展望

无损检测技术是一种多学科交叉的工程技术,在很大程度上也可以认为是一种信息技术。结合木质材料独特的性质和木质材料无损检测研究现状,今后木质材料无损检测的研究将主要集中在如下方面:

1) 小波分析用于木质材料无损检测的信号分析。从木质材料无损检测方法的研究来看,如何对无损检测信号进行处理显得更为重要。所以,在材料的无损检测信号处理方面将使用新的技术—小波分析,这也是提取信号特征值分析技术的发展趋势。

2) 人工神经网络用于木质材料的无损检测。人工神经网络作为特征识别的有效手段,在木质材料无损检测中的应用将有很大的潜力。由于人工神经网络具有高度的容错性,因此特别适合在信号较差的情况下使用,这样为强噪声条件下木质材料在线检测材料缺陷提供了一条有效途径。另外,人工神经网络通过对大量样本的学习不断地调整权值及阈值,从而掌握蕴含于样本集中的难以用解析式表达的知识,网络通过对权值的调整,记录所学过的样本,当再输入新的样本时便可以实现模式识别和目标拟合。所以,神经网络在无法用确定的规则或表达式表示的情况下很有优势。

3) 小波神经网络用于木质材料的无损检测。小波神经网络模型作为神经网络模型的一个分支,不仅具备了小波分析处理非平稳信号的能力,同时也完全继承了神经网络的自学习、自适应、高容错等特性。正因为如此,把小波神经网络技术用于木质材料的无损检测时,只要提供完备的神经网络学习集,即把所有影响检测目标的因素按照一定的方式组合成样本集,作为网络的输入训练网络使小波神经网络收敛,从而使小波神经网络具备模式识别能力,以此来实现样本集所覆盖空间下的实时在线的无损检测。

(下转第 33 页)

产生弯曲屈服。

由于两排桩的入土深度均未达到原设计要求,其防护作用与原有设计要求有一定差距,而从当时挖至 -4.5 m 标高的土质来看,土质黏性很好,大部分地方挖至 -5.5 m 也未见地下水的迹象,考虑到这些地质条件的优势,对原设计方案作出如下更改:

(1) 维持第二排桩的施工方法,在离第二排桩水平位置 1.2 m ,标高 -4.9 m 处继续压入第三排槽钢桩,槽钢桩压入土的长度控制在 3.5 m ;

(2) 考虑旧车间是独立基础,受基坑开挖影响的是位于轴线 21,22,23 上的旧车间基础,而位于轴线 20,24 上的旧车间基础在新基坑边线外,开挖基坑对其影响较小,不用加固。所以确定在第二排槽钢间隙的每个独立基础方向位置,压进三根直径为 $\Phi 75\times 4$ 的钢管桩,以重点保护旧厂房砖柱和基础。由于钢管具有各向抵抗刚度一致的特点,采用原来方法压桩,入土深度顺利达到 4.7 m ;

(3) 用角钢 $\angle 50\times 5$ 把钢管桩、槽钢桩纵横连成一体,并充分利用旧车间远端柱子,用多根圆钢作拉索把整体防护桩与旧车间远端柱子相连,使该连接结构对防护桩桩头产生约束作用,从而把桩的悬臂梁式受力状态改变成简支梁式,大大减少了防护桩受土层压力而产生最大的倾覆弯矩(理想状态下仅为原来的 40%),提高了桩的防护能力,由此形成了一个整体防护体系。

均匀黏性土中防护桩背土压力强度为:

$$q=\nu Htg^2(45-\theta/2)-2ctg^2(45-\theta/2)$$

悬臂梁式受力状态时弯矩: $M=1/6qH^2$

简支梁式受力状态时弯矩: $M=1/15qH^2$

式中: c —土的内聚力; θ —土的内摩擦角; ν —土的容重; H —土的深度。

(上接第 26 页)

参考文献:

- [1] 李坚. 木材科学新篇[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1993.
- [2] 许文台. X 射线检测木材实验报告[J]. 森林工程通讯, 1979(2): 23-25.
- [3] 青郁, 刘自强, 崔光兴, 等. 木材内腐 X 光电视检测研究[J]. 东北林业大学学报, 1983(4): 18-20.
- [4] 史伯章. 木材声速的研究[J]. 南京林产工业学院学报, 1983, (3): 6-12.
- [5] 戴澄月, 刘一星, 丁汉喜, 等. 木材强度超声波检测的研究[J]. 东北林业大学学报, 1987, 15(2): 82-96.
- [6] 赵学增, 刘一星, 李坚, 等. 用 FFT 方法分析木材的打击音响快速测定木材弹性常数的研究[J]. 东北林业大学学报, 1988, 增刊: 29-35.
- [7] 王志同, 曹志强, 袁卫国. 用振动应力波非破损检测技术检测中密度纤维板弹性模量的研究(续)[J]. 木材工业, 1995, 9(6): 21-25.
- [8] 胡英成. 利用振动法对人造板动态弹性模量进行无损检测的研究

通过上述措施,解决了防护桩未能达到设计入土深度的问题,经后续施工事实证明,这些措施是正确的。实际施工时,由于标高测量的误差,实际开挖深度达到 -7.2 m ,比原设计低了 0.4 m ,但热压机基坑支护起到了很好安全保护基坑和旧车间的作用。

3.2 施工监测

由于热压机基坑毗邻旧车间很近,虽然采取上述防护措施,但在施工开挖期间,仍需对相邻基坑的旧车间独立基础边、车间墙体、砖柱设置多个观测点,设专人进行严格的变形观察,每隔 1 h 观察一次。从检测结果来看,所有这些地方在施工过程中没出现有危险的位移,旧车间楼板,砖墙原有裂缝也没有明显开展现象,没有发现影响施工安全的不利因素。

4 结语

该工程热压机基坑支护设计和施工能取得成功,同时取得较好的经济效益,关键在于根据现场实际施工情况不断修正原有设计方案,从试压松木桩,到改压槽钢桩,用钢管桩加强,及至最后把防护桩与旧车间远端柱连结在一起的全过程,真正做到动态设计和信息化施工结合,体现了充分利用现有条件,具体问题具体分析,找出简便又可行的解决方法。既节约资金,又减少施工时间,实现了缩短工期目标和降低工程成本的双赢效果。

参考文献:

- [1] DBJ/T 15-20-97. 建筑基坑支护工程技术规程[S].
- [2] 陈仁朋, 陈云敏, 蔡袁强. 粉砂性土体中基坑开挖工程实践[J]. 建筑结构学报, 2001(4): 90-95.
- [3] GB 5007-2002. 建筑地基基础设计规范[S].
- [C]. 东北林业大学硕士学位论文, 1997.
- [9] 王克奇, 于龙梅, 白景峰, 等. 人造板表面缺陷的自动检测[J]. 林业机械, 1995, 5: 37-38.
- [10] 高燕秋, 王兆伍, 张齐生. TMJ-A 人造板弹性模量无损检测显示机的误差因素分析[J]. 木材工业, 2002, 16(5): 24-26.
- [11] 王立海, 杨学春, 徐凯宏. 木材缺陷检测技术研究现状[J]. 林业科技, 2002, 27(3): 35-38.
- [12] 小玉泰义, 章忠. 利用小波分析评价木材的性能(第 1 报)[J]. 木材学会志, 2000, 46(3): 197-202.
- [13] 小玉泰义, 章忠, 川点洋昭. 利用小波分析评价木材的性能(第 2 报)[J]. 木材学会志, 2001, 47(6): 473-478.
- [14] 刘贵忠, 邵双亮. 小波分析及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1992.
- [15] 虞和济, 陈长征, 张省, 等. 基于神经网络的智能诊断[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [16] Zhang Q, Benveniste A. Wavelet Networks[J]. IEEE Trans, On Neural Networks, 1992, 3(6): 889-898.