



孙建平 王逢瑚 编著

基于信号处理的 木质材料定量无损检测技术



东北林业大学出版社

宇宙五感检测技术

東北林業大學出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

基于信号处理的木质材料定量无损检测技术/孙建平, 王逢瑚编著. —哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2007.6

ISBN 978-7-81131-034-4

I. 基… II. ①孙… ②王… III. 木材—无损检验 IV. TS612

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 097305 号

责任编辑: 郑国光

封面设计: 彭 宇



NEFUP

基于信号处理的木质材料定量无损检测技术

Jiyu Xinhao Chuli De Muzhi Cailiao Dingliang Wusun Jiance Jishu

孙建平 王逢瑚 编著

东北林业大学出版社出版发行

(哈尔滨市和兴路 26 号)

黑龙江省教育厅印刷厂印装

开本 850 × 1168 1/32 印张 8.375 字数 200 千字

2007 年 6 月第 1 版 2007 年 6 月第 1 次印刷

印数 1—1 000 册

ISBN 978-7-81131-034-4

TS·21 定价: 26.00 元

前 言

我国森林资源匮乏，可利用的木材资源也日渐减少。木材由于具有强度高、可生物降解、舒适的视觉和触觉效果、隔音、隔热等优点而被广泛地应用；由于环境压力，我国已全面启动了天然林保护工程，木材产量大幅度调减，因此我国木质材料的供需矛盾特别突出。

如何充分、有效、合理地利用现有木材资源，在我国经济的快速发展对木材的需求量越来越大的今天，显得尤为重要。为了提高木质材料的生产质量以及正确使用木质材料，就必须掌握其物理力学性能的检测机理以及实时在线无损检测技术。木质材料无损检测是一门新兴的综合性技术，它不仅涉及多学科交叉，还与计算机技术以及现代信号处理技术紧密相关。无损检测技术的最大优点是不会破坏材料的原有特性，而且能在短时间内获得结果，实现在线的、自动的材质性能检测。这样有利于生产的连续性和生产效率的提高。同时通过对木质材料无损检测技术的研究，并进一步将其应用于实际生产，可以节约原材料，保证产品质量安全可靠。所以，无损检测技术是实现木质材料质量控制、使生产向自动化方向发展的重要手段。而且木质材料的定性检测逐渐发展到定量检测，使更多先进的信号处理和分析手段应用到木质材料的无损检测中，这些都将是木质材料无损检测发展的必然趋势。

为了对木质材料缺陷和力学性能进行动态的、定量的检测，本书从信号分析的方式入手，利用时域信号波形分析法、频谱分析技术、小波分析技术、人工神经网络分析技术，对木质材料振动信号、声发射信号以及材料设计参数进行了分析处理；对木质

材料的静态缺陷进行分类、定位和定量无损检测,对受力条件下材料内部动态缺陷的状态进行监控,对木塑复合材料的力学性能参数进行预测以及对工艺参数进行优化设计。

本书的研究成果是在作者的导师王逢瑚教授悉心指导下完成的,导师对本书的出版给予了极大的支持和帮助,在此表示衷心的感谢!在研究过程中,得到了国家自然科学基金“基于小波、人工神经网络的木质复合材料振动法无损检测机理研究”项目的资助。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏和不当之处,恳请专家、师长和同仁批评指正!

编 者

2007年5月

目 录

1 木质材料无损检测现状	(1)
1.1 国外木质材料无损检测技术进展	(2)
1.2 声发射及其在木质材料检测中的应用	(6)
1.3 小波和神经网络在无损检测中应用现状	(8)
1.4 木质材料无损检测研究的问题和趋势	(9)
2 信号与信号处理	(12)
2.1 信 号	(12)
2.2 数字信号处理方法	(29)
3 基于 MATLAB 的信号处理	(55)
3.1 MATLAB 简介	(55)
3.2 MATLAB 基础	(60)
3.3 MATLAB 信号处理与工具箱	(86)
4 木质材料缺陷的自动分类识别	(125)
4.1 试验材料和方法	(125)
4.2 缺陷信号处理与分析	(127)
4.3 本章小结	(154)
5 木质材料缺陷的定位研究	(156)
5.1 试验材料和方法	(156)
5.2 信号处理与缺陷定位分析	(157)
5.3 本章小结	(197)
6 木质材料缺陷定量无损检测	(199)
6.1 实验材料和方法	(199)
6.2 基于神经网络的孔洞缺陷的定量研究	(207)
6.3 本章小结	(220)

7 木塑复合材料性能预测	(222)
7.1 试验材料、方法与设备	(222)
7.2 木塑复合板材的神经网络优化设计	(225)
7.3 本章小结	(237)
8 受力木质材料动态检测	(239)
8.1 声发射技术原理	(239)
8.2 木材断裂缺陷的动态检测	(245)
8.3 本章小结	(252)
参考文献.....	(253)

1 木质材料无损检测现状

木材由于具有强重比大、可生物降解、舒适的视觉和触觉效果、隔音、隔热等优点而被广泛地应用到人们的日常生活中。而且，作为钢材、木材、塑料、水泥四大建筑材料之一的木材，是唯一可再生材料。但是由于经济的快速发展，人们生活水平的不断提高，对木材的需求量越来越大，而我国可利用的森林资源已日渐减少；同时由于环境压力我国已全面启动了天然林保护工程，木材产量大幅度调减。因此，目前我国木质材料的供需矛盾特别突出。

“九五”期间，我国在木质材料方面的研究和生产取得重大进展，这将是高效利用木材资源、缓解我国木材资源日益缺乏的有效的手段。从广义上讲，采用传统胶合工艺制成的木质产品如中密度纤维板、刨花板、胶合板等都可看做是木质复合材料，甚至可以说木材就是一种完美的复合材料。但为了区别，木质复合材料定义为木材与其他一种或多种非木质材料复合而成的多相固体材料。木质复合材料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，从而提高木材使用价值，实现低质材的优化利用。因此在人类面临资源和环境挑战的 21 世纪，研制开发多种新型的木质复合材料，对充分利用现有木材资源，保护生态环境和促进社会持续发展均有重要意义。而且木质复合材料的发展不是孤立的，而是与其他材料协调发展、是与整个材料科学发展密切相关的。可以说材料科学的发展促进了木质材料科学的发展，现代复合材料科学的进步推动了木质复合材料科学的进步；复合材料是材料科学发展的方向，同样，木质复合材料也将是木质材料发展的方向。有专家预测，木质复合材料将是

21 世纪人类普遍关注、不断创新和发展的主题之一。

为了提高木质材料的生产质量以及正确使用木质材料,就必须掌握其物理力学性能的检测机理以及实时在线检测技术。虽然采用传统的破损检测方法所测得的结果准确,但是经过破损后的试件通常不再具有实用价值,造成极大的浪费;更重要的是这种检测方法耗时长、检测条件苛刻,不适合实时在线的快速检测,这就大大制约了木质材料快速、连续的现代化生产;而对木质材料进行非破坏的无损检测技术是实现其性能快速、准确检测的有效方法。木质材料无损检测是一门新兴的综合性技术,它不仅涉及多学科交叉,还与计算机技术以及现代信号处理技术紧密相关。无损检测技术的最大优点是不会破坏材料的原有特性,而且能在短时间内获得结果,实现在线的、自动的材质性能检测。这样有利于生产的连续性和生产效率的提高,同时通过对木质材料无损检测技术的研究,并进一步将其应用于实际生产,可以节约原材料,保证产品质量安全可靠。所以,无损检测技术是实现木质材料质量控制、使生产向自动化方向发展的重要手段。

1.1 国外木质材料无损检测技术进展

关于木质材料振动特性,国外在这方面的研究比较早。在 1921 年, Timoshenko 就提出了考虑剪切力和回转惯性力影响的振动方程。1931 年, Goens 推导出梁在两端自由条件下,考虑剪切力和回转惯性力的振动方程的解。1951 年, Mindlin 将 Timoshenko 理论加以扩展。Leissa 在 1969 年的论文中详细地论述了关于板的振动理论。Hearmon 整理已有的木材弹性模量测定方法,并进行了板振动实验。另外, Hearmon 根据 Timoshenko 理论,讨论了梁的振动实验用于木材的合理性。1961 年,日本京都大学农学部田茂、山田正、铃木正治研究了动态弹性模量和含水率之间的关系。九州大学农学部松本采用振动法研究了正常木材与应压木的

动态弹性模量和振动衰减率。Suzuki 研究了吸湿和温度对动态弹性模量和对数衰减率的影响。1965 年,京都大学农学部铃木正治、中户莞二、香川久太郎研究了木材的动态弹性模量的频率依存性以及蠕变的关系。

自 20 世纪 70 年代以后,随着科学技术的进步,木材无损检测的研究也取得了很大的进展。特别是日本和欧美的学者,对木质材料的无损检测进行了大量的基础性研究。1975 年,日本高知大学农学部中山义雄利用振动法对木梁进行无损检测。Pellerin 和 Logan 研究设计了木材横向振动弹性模量计算机 (Transverse Vibration E - Computer); 简称 E - 计算机。E - 计算机已为美国木材生产及科研单位广泛采用。由 E - 计算机测定的弹性模量与静态弯曲条件下测得的弹性模量非常接近,它们的相关系数为 0.96 ~ 0.99。Paschalis 在 1978 年用共振法和超声波法确定了木材的强度特性与其结构特点的关系,并指出在测定弹性模量时,共振法和超声波法具有同等作用。1980 年学者铃木正治研究了随着水分变化动态抗弯弹性模量的降低值与密度之间的关系。1985 年, Nakao 等根据高次扭转振动特性对木材的正交各向异性剪切弹性模量的测定方法进行了研究。1988 年, Sobue 针对实际构造用材的抗弯弹性模量 E 和剪切弹性模量 G 的问题进行了研究。通过敲击试件一端激发弯曲扭转复合振动,试件另一端的加速度传感器采集振动信号,通过计算从复合信号取出弯曲振动和扭曲振动的信号,并将采集的信号输入 FFT 分析仪,即可求得瞬时的共振频率,并同时确定 E 和 G 。

20 世纪 90 年代以后,随着科学技术尤其是电子计算机技术和信号处理技术的迅速发展,木质材料无损检测研究进入了一个新的阶段。1990 年,日本学者铃木弘志、佐佐木荣一采用超声脉冲法,对日本柳杉和柳桉木材试样的波速进行测定,分析波速与纤维倾斜角以及试样尺寸之间的关系。小玉泰义研究用小锤敲击原木时产生的弹性波传递速度来推测材料的抗弯弹性模量。祖

父江信夫在 1991 年开发了用计算机和 A/D 转换器的弹性模量自动测试系统。通过敲击试件端面引起过渡的纵向共振,用传声器和加速度传感器检测振动,然后根据试件尺寸、质量、固有频率,依据纵向振动理论计算出了弹性模量。1993 年,名波直道探讨了利用应力波测定立木材质。研究发现应力波传播速率可代替抗弯弹性模量作为立木材质的一个新的指标。1997 年, Niemz、Kucera 和 Pohler 研究了 13 个树种的声传播速度及动态弹性模量,并通过测定声传播速度和共振频率确定其静态弹性模量。2000 年,小玉泰义利用连续小波变换分析处理利用敲击木材所获得的声信号,对气干木材的节子缺陷进行检测。研究发现,当有节子缺陷时,声信号的共振频率降低,声信号共振的持续时间缩短。第二年,他利用小波变换研究声信号的共振频率与弹性模量和节子的尺寸之间的定量关系。2001 年,外崎真理雄等利用纵向振动及弯曲振动对板材内不均质性评价进行了研究。2003 年,长尾博文等研究了基于树干内的杨氏模量来推测木材制品强度的可能性。2004 年, Jose' 等利用声-超声扫描技术对松木节子的自动检测进行了研究。Chuanshuang Hu 等在 2004 年利用 CCD 照相采集图像数据,研究了日本雪松板材死节和活节的分类和定位。

在对木材无损检测技术进行系统研究的同时,学者们把目光又投向了应用越来越广泛的人造板领域。1977 年, Narayanamurti 等对三层胶合板的无损检测进行了研究。1980 年, Dunlop 根据波束通过材料传播时间的长短,测定了刨花板幅面宽度的声速。然后利用通过刨花板的声速与强度的关系,预测刨花板的力学性质。1989 年, Greubel 应用超声波技术检测了声波在工业刨花板内的传播,结果发现刨花板的横向抗拉强度与声波传播速度有明显的相关性。1992~1994 年,董玉库、中尾哲也等人对刨花板、中密度纤维板等厚度方向非均质材料的抗弯弹性模量和剪切弹性模量从理论解析及试验验证两方面进行了深入研究。Shyamasunder 等在 1994 年研究了声波法在胶合板弹性模量和刚性

模量无损检测中的应用。Greubul 和 Wissing 在 1995 年应用弯曲振动法测量了单层和三层实验室刨花板和工业制造刨花板的抗弯弹性模量和剪切弹性模量。1996 年, Niemz 和 Poblete 研究了刨花板的声传输速度。发现抗弯强度和抗弯弹性模量与声传输速度之间有着密切相关性。2002 年, 日本学者中尾哲也等通过测定单板的动态杨氏模量来预测单板层积材 (Laminated Veneer Lumber LVL) 的杨氏模量。Takuya 等在 2004 年利用图像处理技术分析了定向刨花板的弯曲性能与刨花的形状、大小以及分布的关系。

我国在木质材料无损检测方面的研究起步较晚。1983 年, 学者史伯章等采用脉冲声波法研究木材的声速与木材力学强度的关系。戴澄月等在 1987 年采用超声脉冲首波等幅法测试了四种无疵气干材的顺纹和横纹超声速度及超声弹性模量。1988 年, 学者赵学增等利用 Timoshenko 挠性振动理论和计算机技术研究了木材抗弯弹性模量和剪切弹性模量的快速测定方法, 并用一元和二元回归分析这两种超声参数与木材顺纹抗压强度和抗弯强度的相关性。在人造板无损检测方面, 王志同等在 1995 年研究了用应力波无损检测技术检测中密度纤维板弹性模量的方法; 王克奇等研究了人造板表面缺陷的自动检测。1997 年, 王执煜等用超声波检测仪检测了胶合板“鼓泡”缺陷。1998 年, 孙吉男等用超声波探测了红栎木材的蜂窝和浅裂; 邓志刚等研究了板材缺陷的微波检测方法; 邱树清研究了电阻式带全自动补偿木材含水率的检测。2000 年, 撒潮等研究了单板含水率环形表面电阻检测法。2001 年, 胡英成等利用弯曲振动、纵波传播、纵波共振等试验方法对刨花板、胶合板的动态弹性模量和剪切模量进行了无损检测。2003~2005 年, 胡英成等对木塑复合层压板、单板贴面中密度纤维板和单板贴面刨花板等木质材料的振动特性的无损检测进行了研究。

1.2 声发射及其在木质材料检测中的应用

声发射 (Acoustic Emission, 简称 AE) 可以定义为物体或材料内部迅速释放能量而产生瞬态弹性波的一种物理现象, 而 AE 信号则表示一个或多个 AE 事件经传感器接收并经系统处理后以某种形式出现的电信号。用仪器探测、记录和分析声发射信号以及利用声发射信号推断声发射源的技术称为声发射检测技术。声发射技术的研究工作最早是德国人 Kaiser 于 1950 ~ 1953 年开始进行的, 他观察到金属锌、铜、铝及铅都有声发射现象, 并且发现了声发射的不可逆性。20 世纪 60 年代, 美国的 Schofield 对声发射现象进行了广泛的研究, 认为声发射源来自材料的内部机制, 并发现声发射连续信号对应变速率敏感。Dunegan 等人对声发射检测技术做了开拓性的研究, 他们把声发射实验频率从原来声频范围提高到 100 kHz ~ 1 MHz, 为声发射从实验室走向生产实践创造了条件。声发射作为一种动态的无损检测技术已经广泛应用到航空航天、材料科学、压力容器等领域, 并取得了很好的检测效果。由于声发射技术具有动态监测材料在受力条件下应力状态变化的特点, 因此这种检测技术也已经用于对木质材料物理力学性能进行非破坏的无损检测与评估。

①由于声发射现象对缺陷形成过程有很强的敏感性, 及其具有动态检测材料强度和评估材料使用寿命的独特功能, 声发射检测技术已成功地运用到木质材料的研究和生产中。

②近 20 年来, 国内外的木材科学工作者在这方面做了大量的研究工作, 从文献看主要集中在当外部条件 (受力, 温度) 改变时, 利用声发射研究木质材料物理力学性能, 以及将声发射技术用于木质材料的生产和加工过程中。Ansell 在 1982 年研究三种针叶材的拉伸变化, 发现 AE 和应变曲线的形状受早材和晚材比率变化的影响; 1983 年 Niemz 等指出不同的木质复合材料在不同

的应力载荷和加载速率下产生不同的声发射；Sato 等在 1984 年进一步研究了木材在拉伸过程中的声发射行为。随着声发射技术的不断发展，利用声发射技术对木质材料的研究对象和研究内容也在不断扩大，例如在 1986 年 Beall.Fc 利用声发射技术研究了刨花板回弹过程；Suzuki 和 Schniewind 在 1987 年利用声发射研究了胶和木材的断裂韧性，发现断裂韧性与单位断裂面积声发射的累计计数呈线性关系；Rich 和 Skaar 在 1990 年研究了红橡木圆片在受横向弯曲应力时表面的声发射，发现了湿材与干材的不同；在 1992 年 Niemi 和 Luhmann 研究声发射与不同载荷条件和木材材质的关系，但没有发现 AE 参数与木材强度之间存在相关性，因为所测得的声发射具有高度的散射性。Beall 在 1994 年研究证明了木材蠕变破坏中的声发射模式与第一、第二和第三次蠕变破坏有很好的相关性，木材在蠕变过程中的声发射随蠕变不同的阶段而发生变化，并通过最大幅值和事件的持续时间表现出来。我国学者曹平祥在 1995 年把声发射技术用于对木材切屑过程的研究。1996 年 Schniewind 等人研究在不同含水率和不同温度条件下采集断裂模式 I 和混合模式检测的声发射信号，研究显示混合模式检测的声发射活动更高，声发射信号与木材破裂的相关性很小。Aicher 和 Dill - Langer 在 1998 年把声发射用于胶和层积材在垂直纹理拉伸载荷条件下的裂纹扩展定位研究。J. Raczkowski 和 S. E. Stanzl - Tschegg 等人在 1999 年分别深入地研究了受真菌感染和受 SO_2 污染的木材在受力过程中的声发射现象。2000 年，A. Reiterer 等人研究两种针叶材和三种阔叶材在模式 I 断裂破坏过程，并跟踪它的声发射活动；研究发现破坏过程的不同可以通过声发射事件的累计计数和幅值来研究。同年 G. Cyra 和 C. Tanaka 进一步研究了在木材的切削过程中木材纹理方向和倾角与声发射的关系。S. Aicher 在 2001 年通过声发射分析技术研究了云杉在垂直纤维方向拉伸载荷条件下的破坏演化过程，研究表明当载荷低于最终载荷的 50% 时，很少有声发射事件发生，随着

载荷的增加,声发射主要同因材料的各向异性和载荷而产生的局部应力增加相关联;在载荷达到最终载荷的 80% ~ 90% 时,有明显的局部破裂。根据声发射事件率和整体应变之间的相关性就可以跟踪材料的破坏,所以参数声发射率增加可以标识明显的破坏。同一年,我国学者谢力生通过桦木干燥过程中 AE 频度和 AE 频度的增加率研究预测木材开裂的有效信息。周兆兵等在 2002 年利用小波分析技术检测声发射信号奇异性原理,分析奇异性指数和刀具磨损的对应关系,并提出了声发射检测木工刀具磨损的实验模型。

1.3 小波和神经网络在无损检测中应用现状

在国内木质材料无损检测缓慢发展的同时,在其他行业,如航天材料、建筑、电力等领域的无损检测由于引入新的信号处理技术而得到快速的发展,特别是小波和人工神经网络的应用。吴耀军等在 1998 年借助小波函数良好的时频带通性,利用 B 样条小波级数展开提取信号特征,从模式识别的角度对复合材料中无损、较轻断丝、断丝、脱层等损伤类型自动诊断问题进行了研究。卢超等在 2001 年用超声检测法采集高温合金材料的非稳态信号,并用小波变换对信号进行特征分析,提取各级小波分解信号的能量分布特征,最后将这些特征输入人工神经网络进行训练和分类。王健等在 2001 年采用多分辨小波变换提取了信号的 5 个特征,实现了特征空间的降维处理;并采用 BP 型反向传播神经网络构成智能化模式分类器,研究了网络模型的学习效果和与复合材料主要损伤机制有关的六类声发射信号的识别能力。2002 年毛鹏等研究了小波神经网络在高压输电线路距离保护中正确、快速地识别系统振荡和各种故障中的情况应用。张大海等在 2003 年对小波神经网络和 BP 神经网络的结构和算法进行分析,并利用这两种神经网络对实际电力负荷预测算例进行对比研究。

2004 年, 聂学军等研究利用径向基函数 (RBF) 神经网络对大坝安全进行自动故障监测, 实现故障的在线诊断和实时隔离。

与此同时, 多种先进的信号分析技术以相结合的方式正逐渐应用到工程领域的无损检测。例如, 崔若飞、许东将分形技术和人工神经网络技术用于检测地质构造非常复杂的断层研究。方雨佳等在 2000 年将小波包分解在不同频带反映斜轴泵工作状况的振动特征信息作为故障样本, 研究人工神经网络结合小波分析对斜轴泵进行故障诊断的无损检测方法; 蔡棋瑛、林建华利用小波变换的极值点诊断桩身的缺陷位置, 以及利用小波包分析和神经网络技术诊断桩身缺损程度。2004 年, 蒋晓辉、刘昌明利用小波分析和 RBF 神经网络的非线性功能研究了黄河三门峡站年径流预测问题。谢建宏等在 2004 年利用小波神经网络对光纤智能复合材料损伤定位的仿真进行了研究。

1.4 木质材料无损检测研究的问题和趋势

1.4.1 存在的问题

通过对木质材料无损检测研究进展的综述可以看出, 无损检测技术是随着新型材料的发展而不断发展的, 是在吸收其他学科研究成果的基础上逐步发展和完善的。通过以上回顾可以发现以下几点问题:

(1) 研究对象主要集中在实体木材和人造板 (胶合板、刨花板和中密度纤维板), 而对其他木质复合材料研究较少, 如对木塑复合材料、单板层积材等木质复合材料的无损检测研究的报道较少;

(2) 木质材料无损检测信号的获取主要通过敲击采集材料的振动信号, 而很少利用其他信号如超声波信号、声发射信号对木质材料的性能和缺陷检测进行研究;

(3) 研究内容主要集中在木质材料的弹性模量和材料缺陷的定性检测, 而对木质材料缺陷定量检测研究较少;

(4) 对木质材料无损检测信号处理方法主要集中在信号的时域波形分析和快速傅里叶变换, 而很少利用先进的信号处理技术如小波和人工神经网络分析处理无损检测信号;

(5) 对木质材料缺陷的研究主要集中在静态缺陷, 如节子、腐朽等, 而对动态缺陷, 特别是在受载荷条件下木质材料内部缺陷的动态演变过程和受力条件下结构材料的安全性实时监控的研究较少;

(6) 对木质材料的力学性能检测研究较多, 而对木质材料特别是木质复合材料力学性能的动态预测和力学性能的优化设计研究较少。

1.4.2 趋 势

随着木材资源的逐渐匮乏和对木质材料的研究不断加强, 以及木质材料生产技术的不断提高, 木质材料将在人们的日常生活中发挥越来越重要的作用。因此, 对木质材料的性能进行快速准确的检测显得尤为迫切和重要, 而且无损检测技术在木材科学领域将得到更广泛的应用。例如, 木质材料无损检测的对象将更为广泛, 材料的定性检测逐渐发展到定量检测, 更多先进的信号处理和分析手段将应用到木质材料的无损检测中, 这些都将是木质材料无损检测发展的必然趋势。所以, 今后应在以下几个方面加强研究:

(1) 木质材料物理力学性能和缺陷检测原理的研究将是必要的, 因为这对木质材料性能的优化设计和预测以及快速准确的检测起重要的指导作用。

(2) 木质材料无损检测的定量研究, 例如材料力学性能大小的自动预测和确定, 材料缺陷的自动分类、缺陷的定位和缺陷大小的检测。这些将是木质材料无损检测研究的重点和难点。