

木材无损检测技术研究历史、现状和展望

杨洋, 申世杰

北京林业大学木材科学与工程教育部重点实验室, 北京 100083

摘要 无损检测是以不损害被检验对象的使用性能为前提,应用多种物理原理和化学现象,对材料进行有效检测。它具有检测时间短、方法简便、稳定性高、不破坏木材使用性能、适于连续化生产等特点,已经广泛应用于木材科学和工程领域。通过无损检测研究木材的力学性能,并对木材进行力学强度分等,不仅能了解不同无损检测在力学性能测试中的表现,还能在木材利用率、生产成本和生产效率上带来显著提升,具有重要的理论意义和经济价值。本文介绍了国内外常用木材无损检测技术的基本原理、特点和仪器设备,概述了发展历史和研究现状,从试验研究、仪器开发和实际应用3个方面展望了未来研究方向和工作重点。

关键词 无损检测;木材;目视检测;应力波;振动法;超声波

中图分类号 S781.2, TS6

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)14-0113-05

History, Present State and Future of Non-destructive Testing for Wood

YANG Yang, SHEN Shijie

Key Laboratory of Wood Science and Engineering, Ministry of Education; Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract The Non-Destructive Testing (NDT), that does not damage the tested object and influence its performance, is an effective method, where various physical principles and chemical phenomena are involved. Its advantages include short measuring time, simple method, high stability, no destruction and capability of working in continuous production. It has been widely used in the field of wood science and engineering. In this paper, the mechanical properties of wood are studied by non-destructive testing and the wood is graded by wood strength. Different non-destructive testing methods are compared in the tests of mechanical properties, and their importance is shown in wood utilization, production costs and production efficiency. An review of the history, the present state, and the future development of NDT is given.

Keywords nondestructive test; wood; visual inspection; stress wave; vibration; ultrasonic wave

1 无损检测概述

无损检测 (Non-Destructive Testing, NDT) 又称非破坏性检测,是利用材料的不同物理力学或化学性质在不破坏目标物体内部和外观结构与特性的前提下,对物体相关特性(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,尤其是对各种缺陷进行测量,借以评价其连续性、完整性、安全可靠性及某些物理性能^[1]。无损检测的最大特点是既不破坏材料的原有特性,又能在短时间内连续获得检测

结果。在连续生产线上在线检测,操作人员可根据反馈的数据,及时调整工艺参数,提高了产品质量和生产效率。

木材作为一种 4R 型 (Reduce, Reuse, Recycle, Remanufacture) 天然生物材料,具有形状不规则性、变异性和物理力学性能各向异性的特点,对木材及其制品的无损检测有其独特性,也存在许多困难。尽管如此,经过近半个世纪的发展,目前应用到木材性质检测的无损检测技术已达数十种,广泛应用于木材分等、含水率测定、木材干燥应力在线监测、立木

收稿日期: 2010-04-12

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD18B0705)

作者简介: 杨洋, 硕士研究生, 研究方向为木材无损检测, 电子信箱: leven-e@163.com; 申世杰(通信作者), 教授, 研究方向为工程木质材料, 电子信箱: shijies@263.net

品质评价、木结构建筑现场评估以及林木育种等诸多方面^[2-7]。

2 常用的木材无损检测技术

2.1 目视检测

2.1.1 基本原理和意义

目视检测是使用最早、最简单的木材无损检测方法,是依据目测分等规则,通过肉眼观测方式,对木材表面各种影响强度或相关性能的缺陷进行评估,从而实现了对木材的评价。目视检测的最后结果,通常是可用和不可用两类,或属于某一等级的范围。该方法需要操作人员有丰富的经验,得出的结论亦具有主观性。此外,由于木材内部的情况无法通过肉眼观测直接做出判断,所以必须与其他无损检测方法结合使用。

作为木材分等体系中的一种重要方法,目视检测的意义不仅在于能对木材进行预分等,提高生产效率和产品质量,准确的目测分等结果更能为机械分等提供理论依据。因此,直到今天,目视检测依然是一种不可缺少、最常用的木材无损检测方法,是世界各地进行木材无损检测的基础。

2.1.2 国内外进展

国外早期的木材目视检测相关研究主要集中在探究各种木质材料缺陷对力学性能的影响上,包括对斜纹理、腐朽和节子等缺陷的考查,其中又以研究节子对木材强度的影响为主。早在1972年就有学者就木材单节对拉伸强度的影响做了研究。随后,日本 Hatayama 和 Naka 分别研究了节子直径与拉伸强度和弯曲强度的关系。研究表明,节子是影响木材强度最重要的因素之一。近几年,国外研究人员基于人工智能成功开发了以目视检测为原理的对木材缺陷进行检测的自动化系统,并逐渐走向应用^[8-9]。

相比国外系统深入的研究,国内在目视检测方面的研究较少,并且主要侧重于对目测分等规则的考查和目测分等的实际应用。2007年以后,一系列研究工作相继展开。郭伟^[10]、姜万里^[11]等分别采用北美国锯材分等委员会标准(National Lumber Grades Authority, NLGA)中“轻型木框架结构用规格材”目测分等规则和中国 GB 50005—2003《木结构设计规范》规格材目测分等规则对杉木和落叶松进行了目测分等,研究了各等级木材的最大降等缺陷。龙超等^[12]就中国与加拿大规格材目测分等规则进行了比较,较为全面地分析了两者的异同,为中国规格材目测分等规则的修订与完善提供了参考依据。安源等^[13]在无损检测技术评估北美黄衫规格材性质的研究中讨论了节子对规格材强度的影响,比较并分析了规格材破坏模式与各自测降等缺陷特征之间的关系,初步建立了各自测等级的强度特征值之间的关系。

2.2 应力波检测

2.2.1 基本原理和特点

木材中应力波传播是直接和木材物理和力学性能有关的动态过程。应力波法检测木质材料的原理是利用木质材料受撞击后,在其内部产生机械波的传播,并根据木质材料的

弹性模量 E 、应力波速度 C 和木质材料密度 ρ 之间存在的关系: $E=C^2\rho$, 通过测量应力波传播速度确定木质材料的弹性模量,最终估算出木质材料的力学强度。

应力波检测法属于机械波行为,对人体无危害。该方法不受被测木材形状和尺寸的限制,在传感器和被测木材之间不须用耦合剂,且携带方便,被广泛应用于立木品质评价、木结构建筑部件现场检测及各种木制品的力学性能评估。

2.2.2 仪器装置与设备

该测试方法的基本装置包括冲击锤、传感器、计时器、显示器和数据分析仪。因检测环境和技术条件的不同,具体仪器各有差异。现在用于工业上的仪器大都由两个部件构成:一是作为发射信号的装置,另一部分是接收信号后处理并直接显示所测参数值的装置。

目前,世界上应用较多的用于木材无损检测的应力波仪器有美国 Metriguard 公司生产的便携式应力波计时器 Metriguard Model 239A Stress Wave Timer,德国 IML 公司生产的电子锤(electronic hammer),匈牙利 Fakopp Enterprise 生产的 Fakopp Microsecond Timer,瑞士 Sandes SA 公司生产的 Sylvatest, Sylvatest Duo,以及德国 Frank Rinn 公司研制的 Arbotom 等^[11]。

2.2.3 国内外进展

早在1950年,国际上就开始研究利用应力波技术评价木材性质。20世纪60年代,国外科研人员发现由于木材缺陷的存在影响到木材强度,冲击波的传播时间会受到影响,通过检测时间的差别可以判断材料的性质。但由于受材料尺寸和当时度量技术条件的限制,这个时间差值很难检测。此外,弹性模量值与速度的具体关系也无法得知。直到1988年,在 Ross 和 Pellerin 的研究中,木材的弹性模量、应力波速度和木质材料密度三者之间的关系才被明确为 $E=C^2\rho/g$ 。从此,通过测量应力波速度确定木材的弹性模量,进而对木材性质的评价得以实现。

此后的数年,国外学者利用统计分析的方法,通过对大量的木材进行无损检测试验,统计和分析各种测量参数,评价木材弹性模量、拉伸强度等物理力学性质,进一步验证了应力波方法在木材缺陷检测的可行性,并探索了其在木材无损检测领域的应用^[14-16]。

1995年,王志同等^[17-18]利用应力波无损检测技术检测中密度纤维板的弹性模量,这是国内首次报道采用应力波方法检测木质材料。结果表明,应力波无损检测法测定的中密度纤维板弯曲弹性模量有足够精确的保证,测试数据具有较高的精度与重复精度,从而为实现中国中密度纤维板生产线产品质量的在线自动化控制奠定了基础。

近年来,许多学者进行了大量基于应力波法的木材无损检测研究,在应力波传播模型建立和应力波信号采集系统的开发等方面取得了一定的成果^[19-21],在实际应用方面更为突出。尚大军等^[22]基于应力波检测方法,利用 Pilodyn 检测设备对西藏部分古建筑腐朽和虫蛀木构件进行了现场无损检测,

通过对木构件腐朽和虫蛀程度的定量、定性对比,论证了应力波检测法用于古建筑木构件的腐朽和虫蛀程度检测的可行性。同年,段新芳等^[23]就应力波技术检测古建筑木构件残余弹性模量进行了初步研究,结果表明应力波无损检测可以有效地测定残余木构件的力学强度,且不同种类木构件弹性模量保持率与其承重作用大小相关。朱景乐等^[7]概述了应力波设备 Pilodyn 在林木遗传改良应用中的研究进展,肯定了应力波无损检测在林木材性改良选择中的重要作用。李华等^[24]创新地将三维应力波断层扫描仪和阻力仪联合应用于古建筑木结构的勘查中,得到了更为准确的评价结果。

2.3 振动法检测

2.3.1 基本原理和特点

振动测试的基本原理是利用传感器(拾音器)、放大器以及显示、记录、分析等仪器设备,测量物体在外界激励下的动态响应,其目的是了解测试对象的动态特性,如固有频率、固有振型、阻尼等特性参数,从而为测试对象的更好应用提供服务。

由于利用振动法检测木质材料具有试验装置简单、方便适用、数据可靠、精度较高、检测对象尺寸范围较大的特点,被广泛用于原木、锯材及集成材制品的强度分等和力学性能检测。随着微电子技术和计算机技术的迅速发展及其在电子测量技术领域的应用,振动法不断得以发展和完善。

2.3.2 仪器装置与设备

该测试方法的基本装置由脉冲锤、加速度传感器、阻抗变换器(测量减幅率)、测振仪、数据采集器、示波器和计算机组成。实际测试中,各类型的装置因条件不一而有所不同。比较常用的商业化振动检测仪器是美国 Metriguard 公司生产的横向振动弹性模量计算机,它可以用电脑操作来确定试样材料的性能,且具有体积小、重量轻、通用性强、在机械应力分等成材生产中准确性高等特点。

2.3.3 国内外进展

20 世纪 50 年代起,开始了木质材料振动性能和力学性质关系研究。比较典型的成果是 Pellerin 和 Logan^[25]根据材料振动时对数衰减和动态弹性模量的比值关系,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(1977 年取得美国专利)。

20 世纪末,在大量实验室研究成果的基础上,基于振动法的木材无损检测技术开始逐渐应用于实际的生产生活中,大量应用于木结构的实地评估。2005 年,王喜平等^[26]利用振动方法对单跨木桥刚度进行了测试,结果显示,受迫振动方法有可能快速评价木桥上部建筑的刚度,进而从实验角度验证了振动波法在木建筑结构系统检测的可行性。2009 年,Brashaw 等^[27]在此基础上完成了基于弯曲振动技术快速检测木桥的第二阶段实验性研究,进一步证实了由受迫振动系统产生的受迫振动是一种对木桥内部健康状况快速评价的有效方法。此外,Green 等^[28]运用振动法建立了振动与弹性模量、抗弯强度、硬度的相关关系,探讨了采用振动法对针叶树材

原木分等的机制。

中国利用振动法对木材进行无损检测始于 20 世纪 80 年代。早期的研究大多是采用不同的振动理论和振动方法来测定木材的动态弹性模量。进入 21 世纪后,振动法得到了更为广泛深入的研究。2005 年,张厚江等^[29]利用振动法测定了楸木的弹性模量,发现横向振动方式可以有效测得试件的固有频率数值,效果较好;而纵向振动不能测得试件的固有频率,不适合用作木材弹性模量的测量。同年,中国林业科学研究院木材工业研究所和加拿大国家林产品研究院合作,探讨利用横向振动方法预测大尺寸板材抗弯弹性性质的可行性^[30]。研究表明,横向振动方法能够快速准确地预测大尺寸规格材的静态抗弯弹性性质,是一种具有发展潜力的无损检测评估技术。2009 年,朱晓冬等^[31]基于振动模态分析,对落叶松节子的定位检测进行研究和分析,结果表明在实验室条件下此方法不但能有效检测是否存在节子,还能判断其具体存在的位置。

除基础性研究外,基于振动理论木材无损检测系统的研发也是近年来国内研究的一个方向。王朝志^[32]对基于简支梁振动原理的木材无损检测技术与应力分等技术做了相关的研究,初步开发了应用于板材的无损检测系统,经试验测试取得了较好的效果。经过进一步完善和试验,该系统可以应用于实际生产。

2.4 超声波检测

2.4.1 基本原理和特点

超声波是指频率高于 20kHz、人耳不能听到的机械波。检测的基本原理是利用超声波产生声脉冲从一端进入被检测材料,经过穿透、反射、衰减,再被另一端的传感器收集,通过提取不同信号参数并进行处理,实现对材料性质的预测。不同的超声波参数,如传播时间、传播速度、能量峰值和频率,可用于检测板材的表面缺陷、结构材腐朽以及弹性模量等,也可用于评价木制品的开裂和老化。

由于仅需从任意一侧接触被测木材,超声波法可用于各种几何形式的木质材料检测,且操作简单、方便、快捷,可用于现场检测。但在实际应用时,由于要求输出和记录超声波的传感器必须与被测材料直接并良好地接触,一般需要耦合剂的介入,因此是否对被测样品产生微小破坏,主要看耦合剂的类型。除此之外,由于超声波本身频率的局限性,其对木材各种缺陷的敏感度也不尽相同,这些缺点在一定程度上影响了该方法的准确度和使用范围。

2.4.2 仪器装置与设备

实验室条件下,超声波检测仪器的基本装置主要包括:信号发射器、加速器、信号接收器和计时器等。只要测得传播所需时间,计算出速度,利用公式 $E=\rho c^2$ 即可算出木质材料的弹性模量,获得力学性能指标。目前,市面上常见的超声波测定仪有瑞士生产的 Sylvatest、Sylvatest Duo 和 PUNDIT (Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester),美国的 Metriguard, 欧洲的 CBS-CBT 公司和德国的 Rinntech

公司也有相关仪器的生产。

2.4.3 国内外进展

国外利用超声波对木材进行无损检测的研究始于 20 世纪 60 年代。1965 年伯梅斯特报道了超声波的纵向传播速度与不同种类木材的物理学、形态学和力学性质之间的关系,随后,超声脉冲传播速度和木材强度间的关系也得到了研究。

1981 年, Dunlop 率先利用超声脉冲法对电杆的腐朽劣化进行了检测,标志了超声波技术逐渐从试验研究转向实际应用,他提出了根据检测电杆声共振性变化可以测定木材的腐朽程度。随后日本学者 Massmi Noguchi 进行了相似的研究。20 世纪 90 年代,更为先进的超声波图像技术被开发出来,并逐渐为业内学者所接受。比较典型的一个例子是,德国学者应用 0.5MHz 超声波对 187mm 厚的中密度纤维板试件进行检测研究,得到木材缺陷位置的超声波图像,通过对图像进行分析取得较好的检测效果,提高了锯材的出材率。最近,超声波技术已成功用于立木材性以及工程建筑中木质部件质量的评估^[33-34]。

中国从 20 世纪 80 年代开始对木材的超声波检测技术进行研究,在木材顺纹抗压弹性模量和抗弯弹性模量与超声波参数之间的相关关系等方面取得了一定的进展。2000 年以后,有关超声波技术的应用报道开始增多。李华和刘秀英^[35]用超声波检测仪对大钟寺博物馆钟架进行了无损检测,通过测定钟架木材的弹性模量,对钟架木结构力学强度的变化做出评估,为超声波应用于古建筑木结构的无损检测提供了科学依据。肖江等^[36]利用超声波的纵波传播法对木材的弹性模量进行无损检测,并提出了一种用数字处理芯片(DSP)进行木材强度测定的方法,初步研制了一套数字化检测系统,经测试证明,该系统除具有测量速度快、信号稳定和工作可靠等特点外,还具有很强的抗干扰能力。

3 木材无损检测技术发展方向

3.1 试验研究方面

继续探寻木材无损检测的新原理和新方法,提高木材无损检测技术的先进性和实用性,仍将是今后很长一段时间国内外木材无损检测领域主要的研究方向。

据新近的文献记载,日本研究人员^[37]通过测量木材生长初期晚材管胞 S2 层微纤丝倾角预测木材的弹性模量的方法,成功实现了对树木质量的早期评价。可见,木材无损检测相关研究已逐渐从宏观检测向微观层面检测延伸。因此,利用无损检测技术(如 X 射线衍射、近红外光谱预测法)测定木材内部的显微结构,并通过分析其成分和结构的变化预测木材力学性能必将成为未来的研究热点之一。

3.2 仪器开发方面

由于木材结构的复杂性和木材分布的地域性,大量的工作仍将致力于便携、准确、快速、廉价的无损检测仪器的研制,以及基于电子计算机技术的自动化系统的开发。随着计

算机技术、传感技术和电子测量技术等高新技术在木材加工工业应用的不断深入,以及人工智能、专家系统、神经网络等算法的引入,无损检测仪器将不断向便携式、数字化和智能化发展。

3.3 实际应用方面

目前人们已经能够对各种木质材料、木质产品和立木的相关性能和品质进行科学的评价,初步实现了对木结构建筑健康状况的有效评估。相关的研究和技术的成熟,因此,进一步探求无损检测技术在木材领域的潜在应用将是以后发展的方向。例如在林木育种方面,可以试图联合运用无损检测技术与基因技术来探求实现材性育种的可能。

参考文献 (References)

- [1] 张壁光. 木材科学与技术研究进展 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004: 64-75.
Zhang Biguang. Research progress on wood science and technology[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004: 64-75.
- [2] Ross R J, Zerbe J I, Wang X, et al. Stress wave nondestructive evaluation of Douglas-fir peeler cores[J]. *Forest Products Journal*, 2005, 55(3): 90-94.
- [3] 司慧, 鹿振友, 王立昌. 含水率对落叶松材动态弹性模量的影响[J]. 木材加工机械, 2007(1): 16-19.
Si Hui, Lu Zhenyou, Wang Lichang. *Wood Processing Machinery*, 2007 (1): 16-19.
- [4] 安磊, 高建民, 胡传坤. 非接触式无损检测木材干燥应力的方法[J]. 广东林业科技, 2007, 23(2): 63-66.
An Lei, Gao Jianmin, Hu Chuankun. *Guangdong Forestry Science and Technology*, 2007, 23(2): 63-66.
- [5] 苏娟, 张厚江, 王喜平. 应力波评价活立木材质的研究与进展[J]. 林业机械与木工设备, 2008, 36(8): 40-43.
Su Juan, Zhang Houjiang, Wang Xiping. *Forestry Machinery & Wood-working Equipment*, 2008, 36(8): 40-43.
- [6] Ross R J, Pellerin R F. Nondestructive testing for assessing wood members in structures: A review[M]. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1994.
- [7] 朱景乐, 王军辉, 张守攻. Pilodyn 在林木遗传改良应用中的研究进展[J]. 浙江林学院学报, 2008, 25(5): 661-665.
Zhu Jingle, Wang Junhui, Zhang Shougong. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2008, 25(5): 661-665.
- [8] Patricio M Á, Maravall D. Automatic visual inspection of wooden pallets [C]//Proceedings of the 16th International Conference on Developments in Applied Artificial Intelligence. Springer Verlag Inc, 2003.
- [9] Ruz G A, Estevez P, Ramirez P, et al. Automated visual inspection system for wood defect classification using computational intelligence techniques [J]. *International Journal of Systems Science*, 2009, 40(2): 163-172.
- [10] 郭伟, 任海青, 殷亚方. 人工林杉木规格材目测分等研究[C]//2007 年中国木材标准化研讨会论文集. 北京, 2007.
Guo Wei, Ren Haiqing, Yin Yafang. Study on visual grading of dimension lumbers of Chinese fir plantation[C]//Proceedings of the 2007 Forum on Standardization of Chinese Wood. Beijing, 2007.
- [11] 姜万里, 任海青, 江京辉, 等. 落叶松规格材目测分等的研究[J]. 木材

- 工业, 2010, 24(2): 1-4.
- Lou Wanli, Ren Haiqing, Jiang Jinghui, *et al. China Wood Industry*, 2010, 24(2): 1-4.
- [12] 龙超, 吕建雄, 任海青, 等. 中国与加拿大规格材目测分等规则的比较[J]. 木材工业, 2008, 22(4): 23-25.
- Long Chao, Lu Jianxiong, Ren Haiqing, *et al. China Wood Industry*, 2008, 22(4): 23-25.
- [13] 安源, 殷亚方, 王喜平, 等. 无损检测技术评估规格材的性质[J]. 木材工业, 2009, 23(4): 5-8.
- An Yuan, Yin Yafang, Wang Xiping, *et al. China Wood Industry*, 2009, 23(4): 5-8.
- [14] Ross R. J, Zerbe J I, Wang X P, *et al. Stress wave nondestructive evaluation of Douglas-fir peeler cores [J]. Forest Products Journal*, 2005, 55(3): 38-43.
- [15] Wacker J P, Wang X, Ross R J, *et al. Condition assessment of historic wood vessels [C]//Proceedings of the 15th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Duluth, Minnesota, 2007: 223-226.*
- [16] Wang, X. Effects of size and moisture on stress wave E-rating of structural lumber [C]//Proceedings of the 10th World Conference on Timber Engineering. Miyazaki, Japan, 2008: 9.
- [17] 王志同, 曹志强, 袁卫国. 用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[J]. 木材工业, 1995, 9(5): 17-21.
- Wang Zhitong, Cao Zhiqiang, Yuan Weiguo. *China Wood Industry*, 1995, 9(5): 17-21.
- [18] 王志同, 曹志强, 袁卫国. 用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.
- Wang Zhitong, Cao Zhiqiang, Yuan Weiguo. *China Wood Industry*, 1995, 9(6): 21-25.
- [19] 杨学春, 王立海. 原木内部腐朽应力波二维图像的获取与分析[J]. 林业科学, 2007, 43(11): 93-97.
- Yang Xuechun, Wang Lihai. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(11): 93-97.
- [20] 司慧. 落叶松动态特性及其影响因素的研究[D]. 北京: 北京林业大学材料科学与技术学院, 2007.
- Si Hui. The Study on the dynamic characteristics and influencing factors in larch wood [D]. Beijing: College of Materials Science and Technology, Beijing Forestry University, 2007.
- [21] 冯国红, 王立海, 杨慧敏, 等. 应力波木材无损检测信号采集系统[J]. 森林工程, 2008, 24(2): 22-24, 87.
- Feng Guohong, Wang Lihai, Yang Huimin, *et al. Forest Engineering*, 2008, 24(2): 22-24, 87.
- [22] 尚大军, 段新芳, 杨中平, 等. 西藏部分古建筑腐朽与虫蛀木构件的Pilodyn无损检测研究[J]. 林业科技, 2007, 32(5): 53-55.
- Shang Dajun, Duan Xinfang, Yang Zhongping, *et al. Forestry Science & Technology*, 2007, 32(5): 53-55.
- [23] 段新芳, 王平, 周冠武. 应力波技术检测古建筑木构件残余弹性模量的初步研究[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(1): 112-114.
- Duan Xinfang, Wang Ping, Zhou Guanwu. *The Journal of Northwest Forestry University*, 2007, 22(1): 112-114.
- [24] 李华, 刘秀英, 陈允适. 古建筑木结构的无损检测新技术 [J]. 木材工业, 2009, 23(2): 37-39, 42.
- Li Hua, Liu Xiuying, Chen Yunshi. *China Wood Industry*, 2009, 23(2): 37-39, 42.
- [25] 胡英成, 顾继友, 王逢瑚. 木材及人造板物理力学性能无损检测技术研究的发展与展望[J]. 世界林业研究, 2002, 15(4): 39-46.
- Hu Yingcheng, Gu Jiyou Wang Fenghu. *World Forestry Research*, 2002, 15(4): 39-46.
- [26] Wang X, Wacker J P, Morison A M, *et al. Nondestructive assessment of single-span timber bridge using a vibration-Based method[R]. Res Paper FPL-RP-627, Forestry Production Laboratory, United States Department of Agriculture, 2005.*
- [27] Brashaw B, Vatalaro R, Wang X, *et al. Development of flexural vibration inspection techniques to rapidly assess the structural health of rural bridge systems-phase II[C]//Proceedings of the 16th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. China, 2009.*
- [28] Green W D, Gorman M T, Evans W J, *et al. Mechanical grading of round timber beams [J]. Journal of Materials Civil Engineering*, 2006(1): 1-10.
- [29] 张厚江, 申世杰, 崔英颖, 等. 振动方式测定木材弹性模量基本方法的研究[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(6): 91-94.
- Zhang Houjiang, Shen Shijie, Cui Yingying, *et al. Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(6): 91-94.
- [30] 殷亚方, 吕建雄, 倪春, 等. 横向振动方法评估大尺寸规格材静态抗弯弹性性质[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(5): 107-110.
- Yin Yafang, Lu Jianxiong, Ni Chun, *et al. Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(5): 107-110.
- [31] 朱晓冬, 曹军, 王逢瑚. 基于振动模态分析的落叶松节子定位的无损检测[J]. 林业科学, 2009, 45(5): 169-172.
- Zhu Xiaodong, Cao Jun, Wang Fenghu. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(5): 169-172.
- [32] 王朝志. 基于简支梁振动原理的板材检测系统的研究与应用 [D]. 北京: 北京林业大学工学院, 2007.
- Wang Chaozhi. Study and application for lumber testing system based on simply supported beam vibration principle [D]. Beijing: School of Technology, Beijing Forestry University, 2007.
- [33] Dzbeński W, Wiktorski T. Ultrasonic evaluation of mechanical properties of wood in standing trees[C]//Proceedings of the COST E 53 Conference: Quality Control for Wood and Wood Products. Warsaw, 2007.
- [34] Agrawal G H, Choudhari N K. Ultrasonic NDT for evaluation of wood quality in engineering structure[C]//Proceedings of the 16th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium. China, 2009.
- [35] 李华, 刘秀英. 大钟寺博物馆钟架的超声波无损检测 [J]. 木材工业, 2003, 17(2): 33-36.
- Li Hua, Liu Xiuying. *China Wood Industry*, 2003, 17(2): 33-36.
- [36] 肖江, 杨建华, 黄娜. 基于 DSP 的木材强度超声波检测系统研究[J]. 林业机械与木工设备, 2008, 36(1): 27-28, 37.
- Xiao Jiang, Yang Jianhua, Huang Na. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 2008, 36(1): 27-28, 37.
- [33] Ishidoh M, Ishiguri F, Iizuka K. The evaluation of modulus of elasticity at an early stage of growth in Sugi (*Cryptomeria japonica*) wood using S2 microfibril angle of latewood tracheids as a wood quality indicator[J]. *Journal of the Japan Wood Research Society*, 2009, 55(1): 10-17.

(责任编辑 朱宇)