

北美基于应力波技术的木材测试及应力分等的研究进展

管 珣, 赵茂程*

(南京林业大学 机电工程学院; 江苏 南京 210037)

摘 要:阐述了北美木材刚度应力分等的研究, 简要分析了应用应力波技术对原木、活立木和单板的应力分等的应用情况, 介绍了基于应力波技术的应力分等的经济性研究。为在我国推广基于应力波的应力分等技术提供了参考。

关键词:北美; 应力波技术; 木材刚度检测; 应力分等; 研究进展

中图分类号: TU531.16 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-7461(2013)02-0178-04

Advances in the Researches of the Wood Quality Testing and Stress Grading Based on the Acoustic Technology in North America

GUAN Xun, ZHAO Mao-cheng*

(Institute of Mechatronics Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, jiangsu 210037, China)

Abstract: Advances in the researches of the stress grading of timber rigidity in North America were reviewed. Applications of stress wave technology on the gradings of logs, standing trees, and veneer were discussed. Researche in the economic feasibility of the technology were introduced. The objective of this paper was to provide useful guidance to the application for stress grading based on the acoustic technology in China's wood industry.

Key words: North America; stress wave technique; rigidity of wood detection; stress grading; research progress

无损检测(NDT), 又称无损探伤, 是指在不损伤被检测对象的条件下, 利用材料内部结构异常或缺陷存在所引起的对热、声、光、电、磁等物理量的变化, 来探测各种工程材料、零部件、结构件等内部和表面缺陷。多年来已经证实对木材产品的刚度和强度的无损检测是有效的, 并且已逐步商业化^[1-2]。

传统的林产品、原木或树木质量的好坏都是通过人工视觉(或触觉)来确定, 如节子、裂缝、每英寸年轮数、密度。并以此结果对木材进行分等。而视觉(或触觉)对木质刚度和强度分等往往是令人质疑的, 因为其不能对木质特性作精确的测量。机械应力分等技术(MSR)早在上世纪 60 年代已开始商用^[1]。MSR 可无损地检测木材的刚度, 并使用一种预定的阈值来定义一系列的强度等级, 通过应力分等使得木材分等更细化、更灵活, 好于目测分等。

Spelter(1996)认为, 随着无损检测的发展以及客户对木材质量的不同要求, 工厂更希望通过无损检测来获得额外的收益^[3]。另外, R. J. Ross^[4-5]等, X. Wang^[6-7]等, X. Wang^[5]等通过试验研究, 也表明木材的材质等级和应力波速度有很高的相关性。应用木材应力分等技术, 可以减少木材检测损耗, 获得额外的经济收益。

1 基于应力波测试技术的原木机械应力分等研究

在评价原木刚度时, 通常是将原木放置在静态抗弯测试仪器中, 读取并记录负载和相应的弯度, 以计算出弹性模量(MOE)。尽管这种“静态抗弯”MOE被认为是一个可靠的测量, 但测量速度较慢、设备昂贵且不便携带, 并且是一种有损的检测。动

收稿日期: 2012-06-30 修回日期: 2012-11-12

基金项目: 国家林业局“948”项目(2010-4-08)。

作者简介: 管珣, 男, 在读博士, 主要研究方向: 无损检测。E-mail: qpmz23@vip.sina.com

*通信作者: 赵茂程, 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 机电一体化。E-mail: mczhao@njfu.edu.cn

态 MOE 方程如下:

$$E_d = \frac{\rho V^2}{g} \tag{1}$$

式中: E_d 为动态弹性模量 (Pa); ρ 为密度 (kg/m^3); g 为重力加速度 ($9.8 \text{ m}/\text{s}^2$); V 为通过材料介质的应力波波速 (m/s)。

实际上,材料的密度通常也是被看作相对不变的,因此应力波速度能够被用来作为动态 MOE 的直接指示。研究发现动态 MOE 与静态 MOE 有很好的相关性^[6]。

R. J. Ross. 等人 (1997—2004) 分别以冷杉、云杉、花旗松、北美西部黄松等原木以及相应的单板为样本,应用应力波测试技术进行动态弹性模量的研究。结果表明,大多的树木原木与单板之间的动态弹性模量具有显著的相关性,只有冷杉相关性不明显^[8-10]。

研究人员已经开发出无损检测技术来测试原木刚度,以进一步对原木刚度等级进行分类,如匈牙利产的 Fakopp 应力波测定仪^[11]、Director HM-200TM 等。其中,Director HM-200TM 仪器,是一种基于纵向共振法的原木应力波测试仪^[12-13]。其操作原理如图 1,用锤子敲击发出应力波信号,应力波信号沿原木纵向每秒钟来回数百次,探头获取应力波信号;仪器软件通过对获得的信号进行分析,从而得到的是加权平均波速。

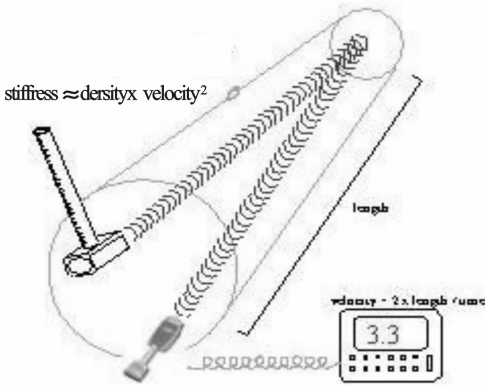


图 1 Director HM-200TM 仪器的操作原理

Fig. 1 Principle of operation for director HM-200TM

结果表明,使用 Director HM-200TM 对原木进行检测,可以使厂家对原木进行有效的分类和匹配,满足客户对原木不同刚度及强度的要求^[14]。为无损检测提供了新的可靠的、灵活的方法。

Dzhamal Amishev 和 Glen E. Murphy (2009) 利用 Director HM-200TM 测试了美国 Oregon 西部林龄相近的 7 处花旗松次龄林林分的原木,发现林分水平的林内原木的声波测量值及动态弹性模量值与 G_1/G_2 的胶合板等级的出材率有很好的相关性(相关系

数 R^2 分别为 0.91 和 0.82)。应力波试验的初步结果显示木材分等可能使道松胶合板等级出材率更高。初步的试验力图处理一系列有关在林内环境使用应力波技术的可行性问题^[15]。证实了 R. L. Dickson^[16] (2004) 等认为的基于应力波测试木材刚度技术的木材分等,已被很多公司使用,以期提高出材率。

2 基于应力波测试技术的活立木的机械应力分等研究

为了提高林产品买卖者的生产调度和市场调整,研究人员应用 NDT 技术来测试活立木应力,获得木材立木时的刚度性能。

X. Wang^[17-18] (2001) 等人对 38~70 a 的美国西部铁杉和美国西加云杉进行试验,发现应力波动态 MOE 与静态 MOE 有中度的相关性 ($r=0.66$) ; M. Lindstro^[19] (2004) 等人通过对 3a 的辐射松进行试验,得到了更高的相关性 ($r=0.89$) ; J. T. Eckard^[20] (2007) 以 8 a 的火炬松做试验,得到应力波速度的平方与静态 MOE 的中度表型的相关性 ($r=0.67$) ; D. Auty and A. Achim^[21] (2008) 通过对 45~72 a 的欧洲赤松进行试验,发现应力波速度与静态 MOE 具有相关性 ($r=0.73$) ; C. A. Raymond^[22] (2008) 等人通过对 28~43 a 的辐射松进行试验,得到静态 MOE 与立木动态 MOE 的相关系数为 0.79。

Director ST-300TM 是最新的用于评价立木刚度的测试仪器。其操作原理如图 2,通过敲击发射探针将应力波传播于树干之内。接收探针收集波信号,并确定应力波从发射探针到接收探针之间的“飞行时间”(传播时间);并通过无线通信发送到 PDA,通过 PDA 计算出应力波速。

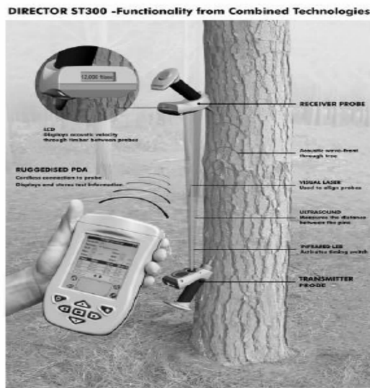


图 2 Director ST-300TM 操作原理

Fig. 2 Principle of operation for director ST-300TM

X. Wang^[23] (2004) 等使用 Director ST-300TM 和 Director HM-200TM 分别测试原木和活立木,发

现两者的应力波速之间具有明显的相关性。

B. K. Carter^[10] (2005) 等人通过试验表明, Director ST-300TM 能够提供树木底部大约 1.3 m 距离之间的硬度的预测。为评价成熟林分提供了新的方法, 并对森林培育有潜在的辅助作用。

R. M. Christian^[24] (2009) 等人使用 TreeSonic tool 来测量立木的声波速度, 使用 Director HM-200TM 测量同一树木砍伐后形成的原木的应力波速。发现立木的声波速度与原木的声波速度有很强的偏相关性。

通过学者对活立木的研究, 为评价在林分状态时, 不同等级出材率提供了新的方法; 同时, 为了提高高等级木材的出材率, 该方法也为森林培育阶段提供了参考信息。

3 基于应力波测试技术的单板刚度的机械应力分等

单板层积材 (LVL) 是一种典型的工程木结构产品, 这种产品的所有单板都是一个方向的, 由于这种单向结构, LVL 能够制成在某一方向上具有特别高刚度和强度的终端产品。在工程上得到广泛应用, 例如: 楼地板搁栅、工字木和厚木板的法兰^[25]。

利用单板等级分类来控制单板层积材 (LVL) 产品刚度的波动性显得越发重要。关键是如何使用应力波方法来确定单板的分类区域, 使高刚度的单板材生产高等级的 LVL, 低等级的单板材再结合外观分等用作其他低等级用途的材料。

现在单板的应力分等被广泛地使用, C. B. Dai and J. Wang^[26] (2000)、B. J. Wang and C. Dai^[27] (2001) 等应用超声波传播时间法 (等于应力波传播时间) (UPT 法) 分别建立 UPT 等级阈值将单板进行分级。B. J. Wang and C. Dai^[28] 将单板分等的观测法、UPT 法 (图 3)、MOE 法做了比较, 并借助计算机模拟程序 Veneer Grading Optimizer (VGader (VGader[®]) (图 4) 软件对单板进行优化分等。

4 基于应力波测试技术的原木刚度机械应力分等的经济性研究

因为应力波波速和衰减与相应的 LVL 的机械特性有较强的相关性, 北美制材业已经利用应力波技术进行木材评价, 也被用来进行单板分等。

但是, D. W. Green and R. Ross^[29] (1997)、S. A. Willits^[30] 等 (1997) 认为关于木材特性和价格之间的影响关系的研究较少。A. Jappinen^[31] (2000)、A. C. Matheson^[32] (2002) 的研究表明, 尽管木材生产者已经根据木材内外在特性对原木进

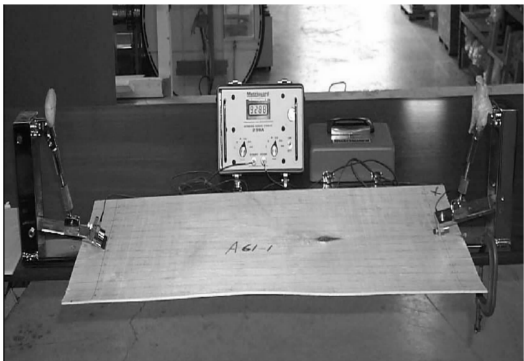


图 3 便携应力波计时器测量单板应力波传播时间

Fig. 3 Portable stress wave meter testing stress wave propagation time of veneer

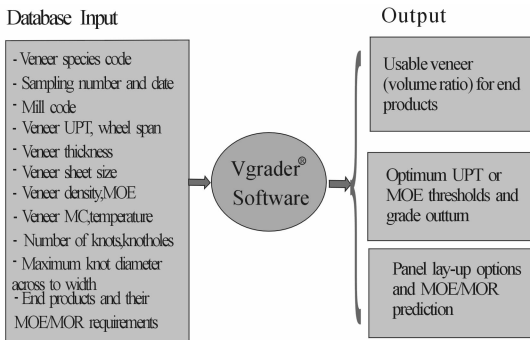


图 4 VGader 软件的输入和输出

Fig. 4 Input and output of VGader

行分类, 但没有证据表明市场为具有较高木材特性的原木付额外的费用。P. H. Lane^[33] 等 (1973)、T. D. Fahey^[34] (1974)、T. D. Fahey and S. Willits^[35] (1991) 只综合性地研究了道格拉斯松的单板收益; Acuna and Murphy (2007) 分析和估计了市场愿意付给不同密度的锯材原木和纸浆原木的额外价格^[36]。Dzhamal Amishev Glen E. Murphy^[37] (2009) 研究了通过应力波技术对道格拉斯松进行刚度分等来评估加工单板的道格拉斯松的原木的均衡价格。

5 结语

应力波技术是一种准确、便携、快捷的无损检测方法, 北美利用应力波技术对原木或单板进行应力分等的技术已经日趋成熟, 而且已经开发了精确、便携的应力波测试仪器, 并与木材机械应力标准相结合对木材材质进行测试和分等。北美已具有较完善的木材机械应力标准。如: 在美国, 规格材分等依据 ASTM D 的相关标准; 在加拿大, 规格材分等则是依照 NLGA^[38-40]。

因此, 加快发展应力波测试技术 (包括: 应力波在诸如原木这种非均匀介质中传播理论的研究, 便携式应力波测试仪器的研制等), 同时制订和完善合

适的木材机械应力分等标准,对提高我国木材的无损检测水平,减少检测损耗具有重要意义。

参考文献:

- [1] LINDA S B, DONALD A D. Mechanically graded lumber: the grading agency perspective[C]. Wood Design Focus, 1997 : 3-6.
- [2] 朱晓冬,王逢瑚,曹军,等.基于虚拟仪器的木材振动无损检测系统研究[J].西北林学院学报 2010,25(5):182-186.
ZHU X D, WANG F H, CAO J, *et al.* Nondestructive test system for wood vibration based on virtual instrument[J]. Journal of Northwest Forestry University 2010, 25(5): 182-186. (in Chinese)
- [3] SPELTER H, WANG R, INCE P. Economic feasibility of products from inland west small-Diameter timber[M]. FPL-GTR-92. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI, 1996:17.
- [4] ROSS R J, MCDONALD K A, GREEN D W, *et al.* Relationship between log and lumber modulus of elasticity[J]. Forest Prod. J. ,1997,47(2):89-92.
- [5] ROSS R J, CARTER P. Assessment of standing tree quality-from baseline research to field equipment[C]//Forest Products Soc. Annual Meeting-Tech. Forum, Grand Rapids, Michigan, 2004.
- [6] WANG X, ROSS R J, MCCLELLAN M. Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method[J]. Wood and Fiber Sci. ,2001,33:522-533.
- [7] WANG X P, ROSS R J, CARTER P. Acoustic evaluation of wood quality in standing trees. Part I. Acoustic wave behavior [J]. Wood and Fiber Sci. ,2007,39(1):28-38.
- [8] ROSS R J, WARD J C, TENWOLDE A. Stress wave nondestructive evaluation of wet wood[J]. Forest Products Journal, 1994,44 (718) :79-83.
- [9] ROSS J R, YANG V W, ILLWAN B L, *et al.* Relationship between stress wave transmission time and bending strength of deteriorated oriented strand board [J]. Forest Products Journal, 2003,53 (3):33-35.
- [10] BRASHAW B K, WANG X P, ROSS R J, *et al.* Relationship between stress wave velocities of green and dry veneer[J]. Forest Products Journal, 2004,55 (6):85-89.
- [11] 段新芳,王平,周冠武,等.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 X F, WANG P, ZHOU G W, *et al.* Nondestructive evaluation of dynamic MOE of ancient wooden structure members by stress wave method[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(1): 112-114. (in Chinese)
- [12] WANG X, ROSS R J, MATTSON J A, *et al.* Nondestructive evaluation techniques for assessing modulus of elasticity and stiffness of small-diameter logs[J]. Forest Prod. J. ,2002,52 (2):79-85.
- [13] WANG X, ROSS R J, GREEN D W, *et al.* Stress wave sorting of red maple logs for structural quality[J]. Wood Sci. Tech. ,2004,37:531-537.
- [14] CARTER P, BRIGGS D, ROSS R J, *et al.* Acoustic testing to enhance western forest values and meet customer wood quality needs[C]. PNW-GTR-642, Productivity of Western Forests: A Forest Products Focus. USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, Oregon, 2005: 121-129.
- [15] AMISHEV D, MURPHY G E. Estimating breakeven prices for Douglas-fir veneer quality logs from stiffness graded stands using acoustic tools[J]. Forest Prod. J. ,2009,59(4):45-52.
- [16] DICKSON R L, MATHESON A C, JOE B, *et al.* Acoustic segregation of *Pinus radiata* logs for sawmilling[J]. New Zealand J. of Forestry Sci. ,2004,34(2):175-189.
- [17] WANG X, ROSS R J, MCCLELLAN M, *et al.* Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method [J]. Wood & Fiber Science, 2001,33(4):522-533.
- [18] WANG X, ROSS R J, PUNCHES J, *et al.* Evaluation of small-diameter timber for value-added manufacturing-A stress wave approach [C]//Proceedings. The Second International Precision Forestry Symposium; Seattle, WA. Seattle, WA: College of Forest Resources, University of Washington, 2003: 91-96.
- [19] LINDSTROM H, HARRIS P, SORENSSON C T, *et al.* Stiffness and wood variation of 3-year old *Pinus radiata* clones [J]. Wood Sci. Technol, 2004,38:579-597.
- [20] ECKARD J T. Rapid screening for solid wood quality traits in clones of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) by indirect measurements[D]. Master's thesis, Department of Forestry and Environmental Resources, North Carolina State University, Raleigh, N. C. 2007.
- [21] AUTY D, ACHIM A. Published by NRC research press tree acoustic assessment and timber quality in Scots pine and the practical implications for assessing timber quality from naturally regenerated stands[J]. Forestry, 2008, 81(4):475-487. doi:10.1093/forestry/cpn015.
- [22] RAYMOND C A, JOE B, ANDERSON D W, *et al.* Effect of thinning on relationships between three measures of wood stiffness in *Pinus radiata*: standing trees vs. logs vs. short clear specimens[J]. Can. J. For. Res. , 2008, 38: 2870-2879. doi:10.1139/X08-124.
- [23] WANG X, ROSS R J, CARTER P. Assessment of standing tree quality-From baseline research to field equipment[C]//Forest Products Society 2004 Annual Meeting-Technical Forum, Grand Rapids, USA Michigan; 2004:27-30.
- [24] CHRISTIAN R, LAURENCE M, SCHIMLECK R, *et al.* Relationships between acoustic variables and different measures of stiffness in standing *Pinus taeda* trees [J]. Can. J. For. Res. ,2009,39:1421-1429.
- [25] RISI. North American wood panels forecast[M]. Bedford, MA, 2002.
- [26] DAI C, WANG B J. Veneer grading strategy for plywood/LVL products[J]. Forintek Canada Corp, 2000:39.
- [27] WANG B J, DAI C. Establishing procedures to optimize mill on-line veneer stress grading [J]. Forintek Canada Corp, 2001:16.