

文章编号: 1000-5692(2002)04-0376-06

纤维饱和点以上含水率木材纵向振动特性

关惠元¹, 西野吉彦², 田中千秋³

(1. 南京林业大学 木材工业学院, 江苏 南京 210037; 2. 日本岛根大学 生物资源科学部, 日本 松江 690-8504; 3. 日本岛根大学 综合理工学部, 日本 松江 690-8504)

摘要: 推导出了非均质材料的共振频率理论解析式, 理论分析并用实验验证了木材长度方向的自由水梯度对纵向振动共振频率产生的影响, 得出了影响程度由大到小依次为1次振动模式、2次振动模式和3次振动模式的结果。另外, 原木在堆放6~7个月后, 尽管平均含水率在90%~100%, 但纵向振动弹性模量测定值与生材时相比增加了10%左右, 其原因就是受长度方向的自由水梯度的影响。图9参8

关键词: 原木; 纵向振动; 共振频率; 自由水梯度; 弹性模量

中图分类号: S781.21 **文献标识码:** A

用纵向振动的方法无损地检测木材的弹性模量, 利用木材的强度与弹性模量间的对应关系进行强度分等, 可以实现因材施用, 按质论价, 达到合理使用木材的目的。因此, 无论是在木材加工企业还是流通领域, 它都是一种简便易行而又十分有效的评定木材强度的方法之一^[1~4]。但是, 长期以来人们都借用均质材料的纵向振动公式计算木材的弹性模量, 当预测非均质特别是长度方向上非均质的木材时预测的误差较大^[5,6]。最典型的例子是生材的原木在陆运或是归楞贮存过程中, 在长度方向上会形成较大的自由水梯度, 即形成了较大的密度梯度。为了考察自由水分布引起的密度梯度对弹性模量预测的影响, 根据振动理论推导出了不均质材料的纵向振动共振频率解析式, 按此式分析了木材长度方向的自由水梯度对纵向振动共振频率的影响, 并用小试件进行了模拟试验, 进一步用3 m长的原木进行了试验, 去验证理论分析的结果。

1 长度方向非均质木材杆件的纵向振动共振频率理论解析^[7~9]

材质均匀的细长杆件, 其纵向振动共振频率的解析式如下:

$$F_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

式中: L 是长度, E 是弹性模量, ρ 是密度, n 是振动模式的次数, F_n 是 n 次振动模式的共振频率。但是, 木材是各向异性体, 其材质如弹性模量、强度和密度等都与含水率有着密切的关系。像原木这样大断面的木材, 在储存、运输和流通等过程中, 其两端附近的水分首先蒸发, 在长度方向上形成含水率梯度, 也就形成了密度、弹性模量和强度的梯度。按照均质材料推导出的纵向振动共振频率的解析式就不适用于这种情况的木材。为此, 必须根据振动理论推导出不均质材料的纵向振动共振频率解

收稿日期: 2002-09-02; 修回日期: 2002-09-27

作者简介: 关惠元(1962-), 男, 江苏常熟人, 副教授, 博士, 从事家具设计与制造及家具材料特性的研究。

析式。

敲击 1 根木材让其产生自由振动，构成一个自由振动系。该振动系在任一时刻的振动能量与变形能量的和为常量。振动系在到达最大变形时，变形能量为最大，振动能量为零，相反，振动系在到达位移平衡位置时，振动能量为最大，变形能量为零。因此，最大振动能量 U_{max} 应与最大变形能量 V_{max} 相等。对于纵向振动而言，最大振动能量和最大变形能量分别为：

$$U_{max} = \frac{1}{2} \omega^2 \int_0^L A_x \rho_x q_x^2 dx, \tag{2}$$

$$V_{max} = \frac{1}{2} \int_0^L A_x E_x \left(\frac{dq_x}{dx} \right)^2 dx. \tag{3}$$

式中： ω 是角振动频率 ($\omega_n = 2\pi F_n$)， x 是木材长度方向上的位置， E_x ， ρ_x ， A_x 分别是 x 位置上的弹性模量、密度、断面面积， q_x 是纵向振动固有模式函数。其函数形式为：

$$q_x = \cos \frac{n\pi}{L} x \tag{4}$$

因此， U_{max} 和 V_{max} 可改写成如下形式：

$$U_{max} = \frac{1}{2} \omega_n^2 \int_0^L A_x \rho_x \cos^2 \frac{n\pi}{L} x dx, \tag{5}$$

$$V_{max} = \frac{1}{2} \int_0^L A_x E_x \sin^2 \frac{n\pi}{L} x dx. \tag{6}$$

根据 $U_{max} = V_{max}$ ， $\omega_n = 2\pi F_n$ 可得纵向振动共振频率解析式：

$$F_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{\int_0^L A_x E_x \sin^2 \frac{n\pi}{L} x dx}{\int_0^L A_x \rho_x \cos^2 \frac{n\pi}{L} x dx}}. \tag{7}$$

根据纵向振动原理可知，对于长度尺寸远大于断面尺寸的杆件，纵向振动频率反映的是断面内的平均值，木材断面内的不均质问题在此忽略。另外，为了便于计算机计算，如图 1 所示，沿长度方向把木材分割成 m 个小单元，则式 (7) 可变换成如下形式：

$$F_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m A_i E_i \sin^2 \frac{n\pi}{m} (2i-1)}{\sum_{i=1}^m A_i \rho_i \cos^2 \frac{n\pi}{m} (2i-1)}}. \tag{8}$$

式中： E_i ， ρ_i ， A_i 分别表示第 i 单元元素的弹性模量、密度和断面面积。

2 长度方向上的含水率梯度对纵向振动共振频率影响的分析

为了考察长度方向上的含水率梯度对纵向振动共振频率的影响，假设有 1 根长度为 100 cm，绝干密度为 0.3；自由水存在时的弹性模量为 8 GPa 的杆状木材，并假设该木材在干燥过程中，长度方向上的含水率分布如图 2 所示，由 C_0 逐渐向 C_4 变化。按公式 (8) 分别计算出含水率梯度为 C_0 ， C_1 ， C_2 ， C_3 ， C_4 时的纵向振动 1~4 次振动模式的共振频率 F_1 ， F_2 ， F_3 ， F_4 ，其结果如图 3 所示。

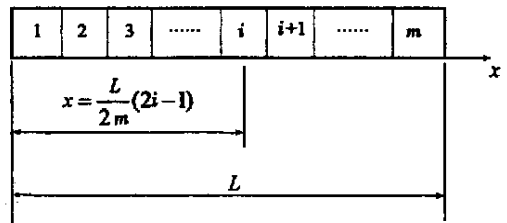


图 1 计算纵向振动共振频率的分割单元

Figure 1 Division elements for calculating longitudinal natural frequencies

如果以 C_0 时的共振频率为基础，则 F_1 ， F_2 ， F_3 ， F_4 都随着含水率梯度的增加而增大。从图中可看出， F_1 的增加率最大， F_4 的增加率最小。这说明长度方向上的含水率梯度对低次振动模式共振频率的影响大于高次振动模式。

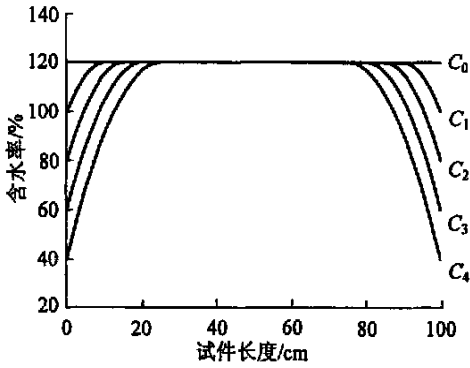


图2 假设的长度方向上的含水率梯度图

Figure 2 Assumed moisture distribution along the length

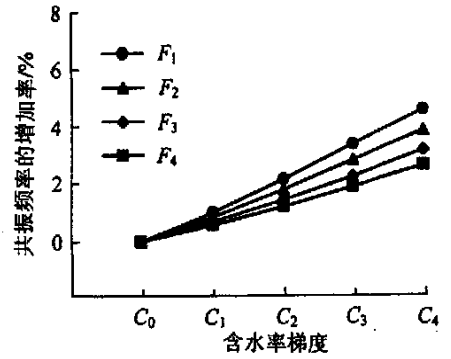
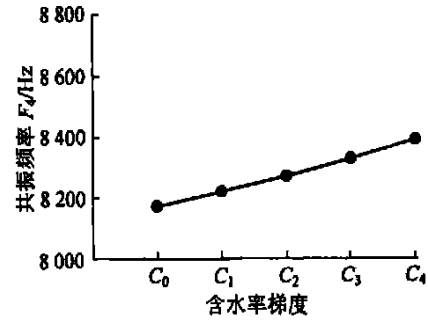
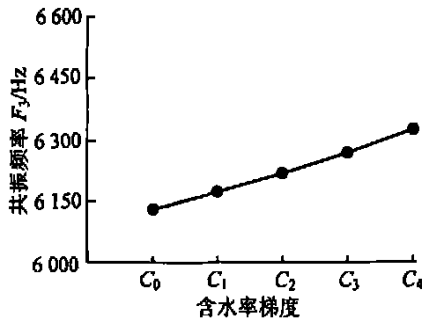
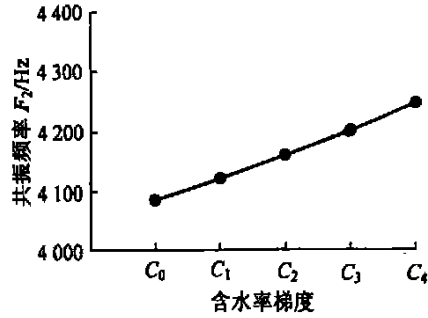
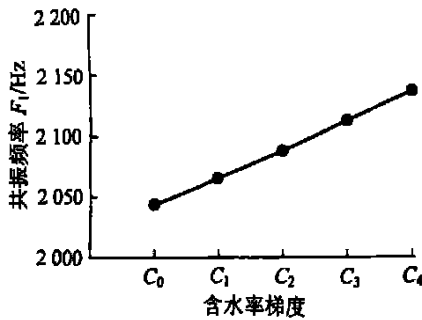


图4 纵向振动共振频率的增加率

Figure 4 Increase ratio of longitudinal vibration frequency

图3 在图2中示出的 C_0 , C_1 , C_2 , C_3 及 C_4 所对应的纵向振动共振频率Figure 3 The natural frequencies in the case of C_0 , C_1 , C_2 , C_3 and C_4 indicated in Figure 2

3 长度方向上的含水率梯度对纵向振动共振频率影响的验证实验

试验材料为水曲柳 *Fraxinus mandshurica*, 初含水率在 110%~130%, 尺寸为 500 mm×20 mm×20 mm (纤维方向×径向×弦向)。把试件分成 2 组, 均放在温度为 20 °C 和相对湿度为 60% 的环境下进行分阶段自然干燥。在干燥过程中, 一组试件不使其产生含水率梯度 (以下简称均匀干燥), 另一组试件让其在长度方向上产生含水率梯度 (以下简称非均匀干燥)。对实验均匀干燥的试件, 在每个干燥阶段结束后, 将试件用塑料薄膜密封, 在温度为 20 °C 和相对湿度为 60% 的环境下放置 10 d, 让试件内部的含水率平衡。平衡后去除塑料薄膜, 测定质量、尺寸和纵向振动共振频率。对实施非均匀干燥的试件, 将试件除 3 端面以外的其他表面用塑料薄膜密封, 让水分只能从端面散发, 在每个干燥阶段结束后去除塑料薄膜, 测定质量、尺寸和纵向振动共振频率, 测定后重复上述操作。纵向振动共振频率用 2 端自由的纵向振动法测定, 测试方法如图 5 所示。测定时用手指夹住木材长度方向的中心处, 用小锤轻轻敲打木材的一头端面, 产生的纵向振动波沿着木材的长度方向传播到木材的另一端并由麦克风接收后转变为电信号。该电信号通过振幅放大器放大后送往振动频率分析仪解析出共振频率。

干燥过程中水曲柳纵向振动共振频率的增加率如图 6 所示。实施均匀干燥的试件，1~3 次振动模式共振频率的增加率基本一致，而实施非均匀干燥的试件，1~3 次振动模式共振频率的增加率不相一致，1 次振动模式共振频率的增加率为最大，3 次振动模式共振频率的增加率为最小。这一结果与理论分析的结果完全相符。

在图 7 中示出了水曲柳纵向振动弹性模量的测定值的 1 例。从图中可以看出在干燥过程中长度方向上有无含水率梯度对水曲柳纵向振动弹性模量的测定值的影响。当长度方向上无含水率梯度时，由 1~3 次振动模式共振频率计算出的弹性模量的测定值不随含水率的变化而变化，这与木材的弹性模量在纤维饱和点以上领域不变的特性相一致。当长度方向上有含水率梯度时，由 1~3 次振动模式共振频率计算出的弹性模量的测定值随平均含水率的减少而增加，由 1 次振动模式共振频率计算出的弹性模量的测定值最大，由 3 次振动模式共振频率计算出的弹性模量的测定值最小，这与木材的固有特性不相符。造成这种影响的原因就是长度方向上有含水率梯度对木材共振频率的影响。

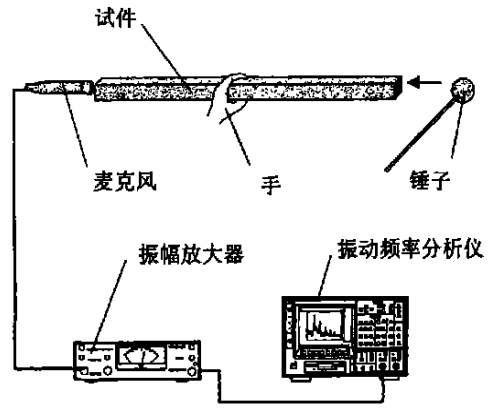


图 5 纵向振动共振频率的测定装置
Figure 5 System of measuring longitudinal natural frequencies

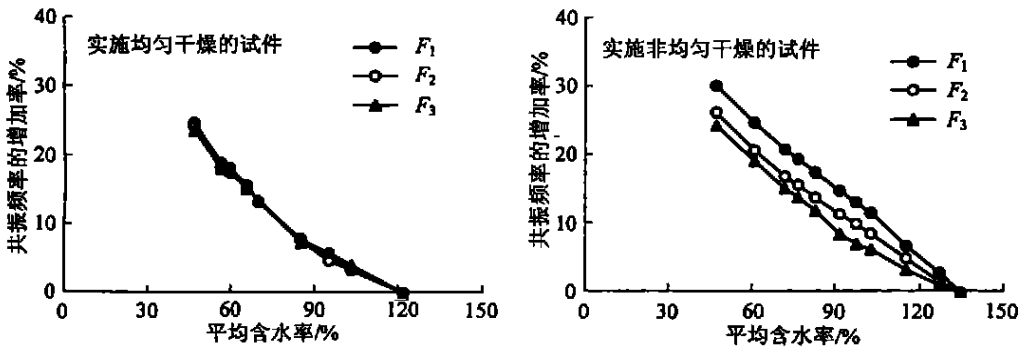


图 6 水曲柳纵向振动共振频率的增加率
Figure 6 Increase ratio of longitudinal vibration frequency of *Fraxinus mandshurica*

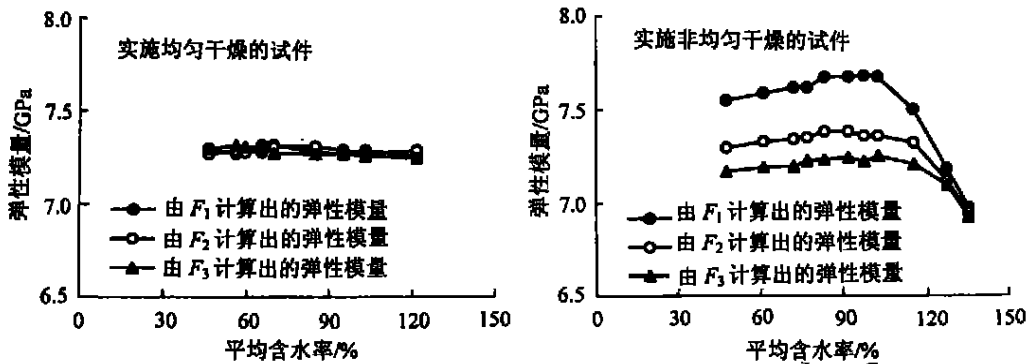


图 7 水曲柳纵向振动弹性模量的测定值
Figure 7 Example with longitudinal vibration elasticity modulus measurement value of *Fraxinus mandshurica*

4 原木存放过程中纵向振动弹性模量

在 3 节中用小试件进行了模拟实验，证实了长度方向上的含水率梯度对纵向振动共振频率及弹性模量的测定值有较大影响这一事实。以下考察原木在存放过程中的纵向振动弹性模量的变化情况。将一批 3 m 长带有树皮的柳杉 *Cryptomeria fortunei* 原木存放在避雨的大棚内进行自然干燥。在造材前，

先在原木的2端截取厚度为20 cm的圆盘各1个,用绝干法测定其含水率,把2个圆盘含水率的平均值作为原木的初含水率。在存放过程中,每隔一段时间测定原木的质量、尺寸和纵向振动共振频率,并计算出弹性模量。图8列举了3根原木在存放过程中的弹性模量变化情况。从图中看出,随着干燥的进行,即使是在纤维饱和点以上含水率领域,弹性模量的测定值与干燥前相比较也呈增加的趋势。造成这种与木材的固有特性不相符合的原因是原木在干燥过程中2端头部的的水分失去速度较中央部位的快,在长度方向上形成了含水率梯度。因此,对于经过一定时期陆运或是归楞贮存的原木,用纵向振动法测定其弹性模量时,应该考虑长度方向上的含水率梯度这一影响因素。如果将造材后还尚未进行干燥的原木测得的弹性模量按1计,那么,原木干燥过程中的弹性模量变化如图9所示,弹性模量测定值的最大误差达到10%左右。根据此次实验,约在存放6~7个月后,因自由水梯度引起的弹性模量测定值的误差达到最大。

5 结论

由振动理论推导出不均质材料的纵向振动共振频率解析可知,木材长度方向的自由水梯度对纵向振动共振频率有显著的影响,其影响程度由大到小依次为1次振动模式、2次振动模式和3次振动模式。振动模式的次数越高影响越小,并通过小试件的模拟和3 m长的原木实验,证实了该理论解析。另外,对于经过一定时期陆运或是归楞贮存的原木,用纵向振动法测定其弹性模量时,因受长度方向上的含水率梯度的影响,弹性模量的测定值会比实际值大。根据此次实验,原木存放约6~7个月后,因自由水梯度引起的弹性模量测定值的误差达到10%左右。

参考文献:

- [1] 渡边治人. 木材应用基础[M]. 张勤丽,译. 上海:上海科学技术出版社, 1985. 265-266.
- [2] 祖父江信夫. 木材的非破壊検査[J]. 木材学会誌, 1993, 39(9): 973-979.
- [3] 荒武志朗. 積重ね状態における丸太の高次固有振動数からの製材品 MORとMOEの推定[J]. 木材学会誌, 1992, 38(11): 995-1001.
- [4] 名波直道. 立木と丸太材の振動によるヤング係数測定[A]. 日本木材学会. 第39回日本木材学会大会要旨集[C]. 1989. 4.
- [5] 関惠元. スギ実大材の天然乾燥過程における動的ヤング率の変化[A]. 日本木材学会. 第50回日本木材学会大会要旨集[C]. 2000. 608.
- [6] 関惠元. 丸太の自然乾燥過程における縦振動特性[A]. 日本木材学会. 第49回日本木材学会大会要旨集[A]. 1999. 77.
- [7] 佐藤秀紀. 機械振動学[M]. 工業調査会, 1995. 155-158.
- [8] 関惠元. 長さ方向に自由水分分布をもつ木材棒の縦振動固有振動数[J]. 木材学会誌, 2000, 46(4): 275-281.
- [8] 関惠元. 天然乾燥過程における針葉樹丸太の縦振動固有振動数[J]. 木材学会誌, 2001, 47(5): 405-411.

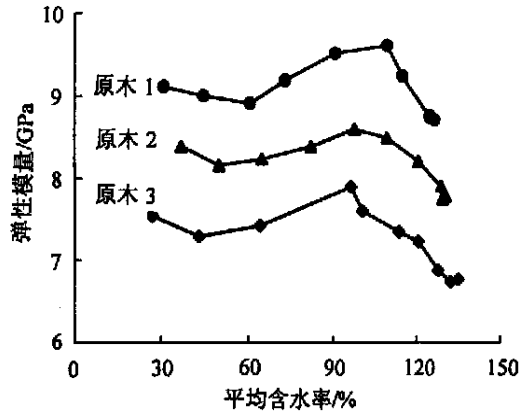


图8 柳杉原木存放过程中纵向振动弹性模量
Figure 8 Longitudinal vibration elasticity modulus *Cryptomeria fortunei* in the process of the storage

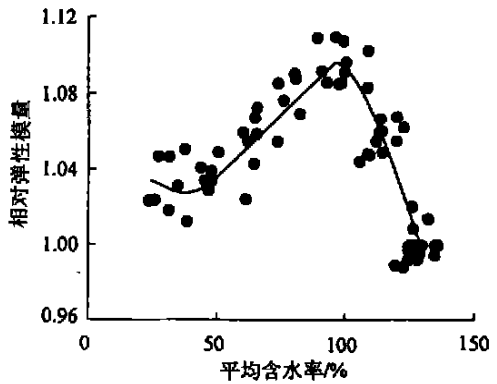


图9 柳杉原木存放过程中纵向振动相对弹性模量
Figure 9 Ratio of longitudinal vibration elasticity modulus *Cryptomeria fortunei* in the process of the storage

Longitudinal vibration properties of wood in moisture content region above the fiber saturation point

GUAN Hui-yuan¹, NISHINO Yoshi-hiko², TANAKA Chi-aki³

(1. Faculty of Wood Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. Faculty of Life and Environmental Science, Shimane University, Matsue 690-8504, Japan; 3. Faculty of Science and Engineering, Shimane University, Matsue 690-8504, Japan)

Abstract: The longitudinal vibration model for wooden heterogeneous material was built in his paper, which was wood for analyzing the effects of free water gradient on longitudinal vibration frequency in its longitudinal direction. The results from experiments showed that this extent were ordered as fundamental, 2nd, and 3rd vibration modes. In addition, the measurement value of elasticity modulus after log storing 6 to 7 months was increased as 10% as that of fresh log, which reason was from free water gradient.

Key words: log; longitudinal vibration; resonant frequency; free water gradient; modulus of elasticity

2003 年《林产化工通讯》征订启事

《林产化工通讯》(双月刊)是国家科委批准面向国内外公开发行的全国林产化工行业惟一的技术类刊物。于 1996 年 7 月入编“中国学术期刊(光盘版)”以来,先后荣获《中国学术期刊(光盘刊)》《中国期刊网》全文收录证书[编号(Q)S207],“中国学术期刊综合评价数据库”来源期刊证书[编号(Z)S207]。CN 32-1328/S, ISSN 1005-3433。

办刊宗旨 坚持为经济建设服务,为基层服务的办刊宗旨。

办刊方针 以刊登新技术、新工艺、新设计、新设备和新材料等为主要内容的办刊方针,突出技术类期刊的特点,注重稿件的时效性。

主要栏目 辟有研究报告、企业纵横、技改园地、开发探索、技术讲座、国外信息和国内简讯等固定栏目,以及专利快递、市场行情和开发指南等小栏目。

读者对象 适于松香、松节油、胶粘剂、制浆造纸、木材热解、活性炭、木材水解、栲胶、紫胶、森林资源、香精香料、日用化工、环保、医药、土产、商业、外贸、商检等部门从事科研、生产、教学和管理等相关人士阅读。

订阅办法 邮局发行,邮发代号 28-205,单月 25 日出版。每册定价 4.50 元,全年 27.00 元。亦可直接向该刊编辑部订阅。

编辑部地址: 210042 南京市锁金五村 16 号,林产化工研究所内。电话:(025)5412131-2205。传真:025-5413445; E-mail: lchg @ chinajournal. net. cn.