

用于树干内部缺陷筛查的应力波临界波速确定研究

徐鹏飞^{1,2}, 管成^{1,2}, 张厚江^{1,2*}, 宋海欧³, 袁江玉⁴, 段超⁵, 郭旺^{1,2}

(1. 北京林业大学 工学院, 北京 100083; 2. 木材无损检测国际联合研究所, 北京林业大学, 北京 100083;

3. 北京市古代建筑研究所, 北京 100050; 4. 北京市昌平区十三陵特区办事处, 北京 102213;

5. 北京市天坛公园管理处, 北京 100061)

摘要: 古树和部分城市大树的树干内部, 经常有空洞、腐朽等影响树木健康和安全性的缺陷存在。以筛查古树和城市大树树干内部缺陷为目标, 测定了北京地区几种常见树种的古树和城市大树健康树干的多个径向应力波波速, 对每个树种的应力波波速测量值进行了正态统计分析, 基于 95% 置信水平原则确定了用于判别树干内部是否存在缺陷的应力波临界波速值, 进而形成了用于树干内部缺陷筛查的应力波临界波速的确定方法。结果表明, 北京地区 8 种常见古树及城市大树油松、白皮松、侧柏、桧柏、刺槐、英桐、美桐和银杏的树干径向应力波临界波速值分别为 1 225、1 394、1 620、1 864、2 055、1 639、1 485、1 728 m·s⁻¹。树干内部缺陷筛查验证性试验表明, 形成的应力波临界波速确定方法是可行的。

关键词: 树干内部缺陷; 缺陷筛查; 应力波; 临界波速

中图分类号: S781.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2022)01-0222-08

Determination of the Stress Wave Threshold Velocity for Screening Trunk Internal Defects

XU Peng-fei^{1,2}, GUAN Cheng^{1,2}, ZHANG Hou-jiang^{1,2*}, SONG Hai-ou³, YUAN Jiang-yu⁴,
DUAN Chao⁵, GUO Wang^{1,2}

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Joint International Research Institute of Wood Nondestructive Testing and Evaluation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

3. Beijing Institute of Ancient Architecture, Beijing 100050, China; 4. Administration Office of the Ming Tombs in Changping District, Beijing 102213, China; 5. Administration Office of the Temple of Heaven Park, Beijing 100061, China)

Abstract: There are often hollows, decay and other defects inside the trunks of ancient and some large urban trees, which may compromise their health and safety. The purpose of this study was to develop a method to screen the internal defects in trunks of ancient trees and large urban trees. Multiple radial stress wave velocities were measured in the healthy trunks of several common tree species occurring in Beijing. These stress wave velocity measurements were subjected to normal statistical analysis to identify the stress wave threshold velocity for determining the presence of defects inside tree trunk based on the 95% confidence principle. Eventually, the method of determining stress wave threshold velocity for trunk internal defect screening was summarized and developed. Radial stress wave threshold velocities of 8 common ancient trees and large urban trees in Beijing were obtained as well. These velocities were 1 225, 1 394, 1 620, 1 864, 2 055, 1 639, 1 485, and 1 728 m·s⁻¹ for *Pinus tabulaeformis*, *P. bungeana*, *Platycladus orientalis*, *Sabina chinensis*, *Robinia pseudoacacia*, *Platanus × acerifolia*, *P. occidentalis*, and *Ginkgo biloba*, respectively. The verification test

收稿日期: 2021-02-02 **修回日期:** 2021-03-30

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金(2021ZY71); 北京市文物局 2018 年课题: 北京文化遗产保护实践探索研究(一)——树木对文物建筑保存状态影响研究(一期); 北京市公园管理中心科技课题(zx2020002)。

第一作者: 徐鹏飞, 博士生。研究方向: 树木无损检测。E-mail: xupengfei_nick@foxmail.com

*** 通信作者:** 张厚江, 教授。研究方向: 木材无损检测。E-mail: hjzhang6@bjfu.edu.cn

showed that the critical wave velocity determination method developed in this paper was feasible.

Key words: trunk defect; defect screening; stress wave; threshold velocity

树干是树木的重要组成部分。树干存在有空洞、腐朽等缺陷的古树和城市大树在极端天气下极容易折断,从而给周围生命、财产造成严重伤害。树干缺陷分为表面缺陷和内部缺陷 2 种,内部缺陷因其隐藏在树干内部,位置、形状、尺寸等均难以探测,一直是树木健康状况诊断的难点。

迄今为止,在国内外学者和相关从业人员的共同努力下,形成了较为统一的树干内部缺陷检测流程。该流程将树干内部缺陷的检测大体分成 2 个步骤:第一步是缺陷筛查,即利用便捷方法和操作者经验初步判断树干内部是否存在缺陷及缺陷的位置,采用方法主要包括观察法、敲击法、应力波波速法等,特点是快捷、简便,对树干几乎无伤害;第二步是通过仪器确认缺陷的存在并检测缺陷的形状和尺寸等精确信息,采用的主要方法有微钻阻力法^[1]、应力波断层成像法^[2]和电阻断层成像法^[3]等,特点是操作较复杂,对树干有微小的伤害。观察法和敲击法虽然是最简单、便捷的方法,但两者均过于依赖操作者的经验和个人判断,误判、漏判现象严重。

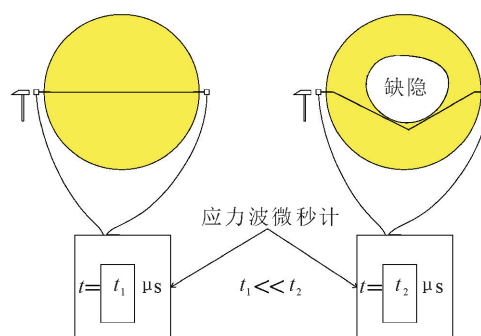
近年来,利用树干径向应力波波速变化筛查树干内部缺陷是一个新的发展方向^[4]。1993 年,有研究者依据树干径向应力波波速判断活立木的树干内部缺陷,并测量了 20 种健康树木的树干径向应力波波速^[5];针对真菌感染的树木,R. J. Ross *et al*^[6]研究了真菌感染对树木应力波速的影响;F. Divós *et al*^[7]根据相关检测,给出了 10 种树木野外检测的应力波速参考值。国内学者对应力波在树干内部的传播做了大量的理论和试验工作,杨学春等^[8]研究了应力波在杨树和落叶松原木中的传播速度,高珊等^[9]研究了温度对应力波传播速度的影响,刘丰禄等^[10]详细诠释了应力波在活立木中的传播机制,这些研究为利用应力波波速检测树干缺陷打下了坚实基础。但国内的运用主要集中在应力波断层成像的检测研究^[11-13],而缺乏对利用应力波波速筛查树干内部缺陷的研究。

利用应力波波速筛查树干内部缺陷的重要前提是预先知道区分健康树干和缺陷树干的临界应力波波速值,但如何确定临界波速值,一直缺乏科学合理的方法。本研究以筛查树干内部缺陷为目标,设计树干径向应力波波速检测试验,对北京市常见 8 个树种的古树和城市大树进行应力波波速测量,获得可用于筛查这 8 种树木树干内部缺陷的临界应力波波速值,并进行树干内部缺陷筛查验证性试验。以

期形成应力波临界波速的确定方法,为提高树干内部缺陷筛查的精确性,以及国内常见树种的古树及城市大树临界应力波速值的积累做出贡献。

1 树干内部缺陷应力波筛查原理

应力波是指固体介质受机械冲击后,局部质点速度变化而形成应力、应变状态变化,且这种状态变化向外传播而形成的波。其在介质内部的传播速度与实际路径长度有很大关系^[14]。由图 1 可见,树干内部无空洞、腐朽等缺陷,则两传感器间应力波传播路径为直线,传播所用时间短;树干内部存在空洞、腐朽等缺陷,则两传感器间实际应力波传播路径为曲线,传播所用时间相对加长^[15]。如果能事先知道应力波在健康树干中的传播速度,且将两传感器间直线距离用于计算应力波的速度,则检测发现某个树干的应力波波速明显低于健康树干的波速,便说明该被测树干内部存在缺陷。由于两点间应力波传播时间、波速计算非常简便,所以这种方法适于树干内部缺陷的筛查。不同树种的材性不同,不同树种的健康树干应力波传播速度应当不同。



注: t 表示传播时间, t_1 为应力波在无缺陷树干中的传播时间, t_2 为应力波在有缺陷树干中的传播时间。

图 1 树干内部缺陷对应力波传播路径的影响

Fig. 1 Effect of internal trunk defects on stress wave propagation path

2 材料与方方法

2.1 材料

检测地点位于北京十三陵永陵和北京林业大学校园。北京十三陵永陵坐落于北京市昌平区天寿山麓,是保存完好的明朝皇陵建筑,其内生长有大量古树,以侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、白皮松(*Pinus bungeana*)为主,这些也是北京市范围内常见的古树树种;北京林业大学位于北京市海淀区,有赖于学校的林业特色,校区内

种植有多种常见的城市大树,包括桧柏(*Sabina chinensis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、英桐(*Platanus × acerifolia*)、美桐(*Platanus occidentalis*)、银杏(*Ginkgo biloba*)等。随机选取 25 棵树木,在十三陵永陵选取了树干内部无缺陷的油松、侧柏、白皮松各 3 棵和树干内部有缺陷的油松 1 棵;在北京林业大学选取了桧柏、刺槐、英桐、美桐、银杏各 3 棵,这些树木内部均无缺陷。树干内部是否存在缺陷按 2.2.1 所述方法检测确定,被测树木的详细信息见表 1。

表 1 被测树木信息

Table 1 Information of the tested trees

树种	内部缺陷	棵数	地点	备注
油松	否	3	北京十三陵	临界波速确定
白皮松	否	3	北京十三陵	
侧柏	否	3	北京十三陵	
桧柏	否	3	北京林业大学	
刺槐	否	3	北京林业大学	
英桐	否	3	北京林业大学	
美桐	否	3	北京林业大学	
银杏	否	3	北京林业大学	
油松	是	1	北京十三陵	验证

2.2 方法

2.2.1 树干内部缺陷检测 采用视觉观察、敲击和微钻阻力的复合方法确定被选树木的树干内部缺陷情况。通过视觉观察和小锤敲击,大体推测树干内部健康状况;采用德国 RINNTECH 公司产的微钻阻力仪(型号 RESISTOGRAPH® 650-EA)检测树干内部缺陷具体情况。微钻阻力仪检测方式见图 2,所用仪器量程 50 cm,分辨率 0.02 mm,输出信号直接反映木材的密度情况,可有效测量树干内部微钻路径上缺陷存在的位置和尺寸^[16]。在具体检测过程中,钻探路径选取东西、南北这 2 条相互垂直路径。对于树干直径小于 50 cm 的树木,采用两针钻探法确定树干内部缺陷情况——分别由南向北、东向西的两针钻透树干;对于树干直径大于 50 cm 的树木,采用四针针钻探法确定树干内部缺陷情况——分别由南向北、东向西、北向南、西向东的四针钻入树干,具体钻探深度由实际情况决定,只需保证两两相对的实际钻探路径存在一定的重合,也就是相对的两针钻探深度的和必须大于路径所在处的树干直径,以此来保证能完整的检验出路径上的缺陷情况。

2.2.2 树干径向应力波波速检测

2.2.2.1 应力波临界波速确定试验 为获取足够有用数据,试验过程中每个树种选择 3 棵树为检测对象,对每一棵树均测量了距地面 0.7 m 和 1.2 m

的 2 个截面的相关数据。在被测树木的测量截面处用皮尺测量周长,随后将其 12 等分,依次从正北顺时针标记为 1、2、…、6、1'、2'、…、6',检测路径为 1-1'、2-2'、…、6-6' (图 3a),即 1 个测量截面可获得 6 个应力波波速数据,一棵树可获得 12 个波速数据,3 棵树可以获得 36 个波速数据。采用德国 Argus PiCUS Calliper 树木测径仪测量每条路径的直线长度(图 3b),以符号 $L(\text{mm})$ 表示路径直线长度,记录测量值。

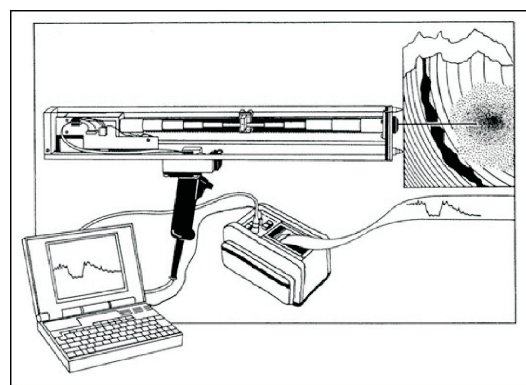


图 2 微钻阻力仪树干内部缺陷检测示意

Fig. 2 Diagrammatic sketch of non-destructive testing of internal defects in tree trunks with resistograph

本研究采用由匈牙利生产的 Fakopp 应力波微秒计进行应力波传播时间检测。该微秒计由 1 个手持的信号处理盒和 2 个由电缆连接的传感器组成。在传感器上有类似于钉子的锥形结构,可以方便地钉入树干木质部(图 4a)。在这 2 个传感器中,带红色标记的电缆连接的是发射传感器,另一条电缆连接的是接收传感器。当进行野外试验时,发射传感器以钉入的方式固定于树干上前述路径的发射端,即 1、2、…、6 处;相应地接收传感器以同样的方式安装于相应路径的另一端,即 1'、2'、…、6' 处。然后用小锤敲击发射传感器,应力波信号穿透树干经接收传感器传入信号处理盒处理,并将传播时间显示于信号处理盒的屏幕上。记录每条路径上的应力波传播时间,以 $T(\mu\text{s})$ 表示。图 4b 为实际野外检测情形。

根据前述 2 项检测结果,可计算出应力波在对应路径中的波速:

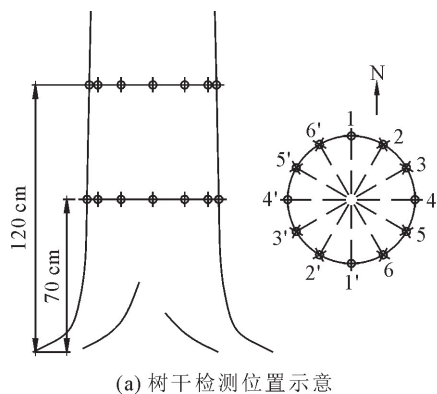
$$v_s = \frac{L}{T} \times 1000 \quad (1)$$

式中: v_s 是应力波波速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; L 是应力波路径直线长度, mm ; T 是应力波在对应路径上的传播时间, μs 。

2.2.2.2 树干内部缺陷筛查验证性试验 在应力波临界波速试验完成且得到被测树种临界波速值后,选取 1 棵典型的树干内部存在缺陷的油松进行

树干内部缺陷应力波筛查验证性试验。波速检测前采用微钻阻力仪从东南西北 4 个方向确定树干空洞具体情况,微钻阻力仪检测路径为高度 120 cm 处互相垂直的东西和南北 2 条路径。波速检测路径为图

3a 所示的距地面 120 cm 的 6 条路径。采用树木测径仪测量路径长度,采用应力波微秒计测量应力波在对应路径上的传播时间,波速计算方法与公式(1)相同。



(a) 树干检测位置示意



(b) 实际路径长度测量

图 3 树干检测位置及实际路径长度测量

Fig. 3 Detection position on trunk and measurement of path length



(a) FAKOPP 应力波微秒计



(b) 现场检测

图 4 树干径向应力波速检测

Fig. 4 Detection of radial stress wave velocity of tree trunk

2.2.3 应力波临界波速确定

2.2.3.1 试验数据的正态分布检验 从理论上来说,同一树种无缺陷树干的径向应力波波速,在立地条件、密度、含水率等因素的差异作用下,其一批试验数据值应近似符合正态分布。对每个树种的应力波波速测量数据利用 SPSS 软件进行 Kolomogorov-Simimov(K-S)正态分布检验,K-S 检验是一种分布拟合优度的检验,其方法是将一个变量的累积分布函数与特定分布(在此是被检测数据与正态分布)进行比较。通常而言,在显著性水平 0.05 的基础上,考察统计推断是否相同。在本研究中,如果 K-S 检验结果 $\text{sig.} \leq 0.05$,说明该数据与假设(正态分布)之间差异显著,则该树种试验数据不符合正态分布,应当增加应力波测量数据,直到 K-S 检验结果 $\text{sig.} > 0.05$ 为止。若检验结果 $\text{sig.} > 0.05$,说明该数据与假设(正态分布)之间不具有显著差异,则该树种试验数据符合正态分布^[17]。

2.2.3.2 临界波速的确定 利用 Excel 2019 对每个树种绘制出波速试验数据的直方图和正态分布曲线图。根据正态分布的特点,可取波速正态分布的

置信水平为 0.95 的单侧置信下限波速值为临界波速(图 5)。该值既可以避免随机因素的主要干扰又不至于太小而失去筛查的能力。实际检测过程中,可以据此值对树干内部缺陷进行筛查,当实际测量应力波波速小于该值时,可判断被测树木树干内部存在缺陷。

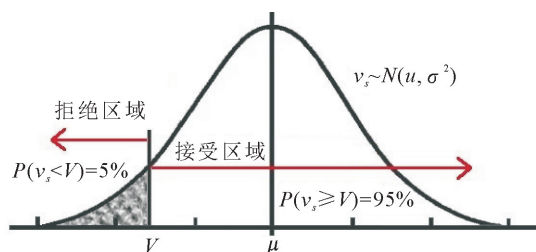


图 5 正态分布单侧置信度下限原理

Fig. 5 The confidence interval estimation at 95% confidence

由图 5 可见,当置信水平 $1 - \alpha = 0.95$ 时,可求得唯一存在的 V 使得概率 $P\{v_s > V\} = 0.95$, V 为临界应力波速,可以根据以下公式确定:

$$V = u - Z_{\alpha} \sigma \quad (2)$$

式中: Z_{α} 是分位点,由标准正态分布表查得 $Z_{\alpha} = 1.65$; u 是波速平均值; σ 是标准差。

3 结果与分析

3.1 应力波传播波速检测结果

表 2 为所有健康树干径向应力波波速检测和统计结果,列出了波速的最大值、最小值、平均值、标准差。可以看出,树干径向应力波波速平均值最大达到 $2\,197\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,树种为刺槐;平均值最小为 $1\,476\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,树种为油松。后者近乎只有前者的 $2/3$ 且这两者差异达到 $721\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,这充分说明不同树种间的木材属性存在差异而且树干径向应力波波速能够真实反映这个差异^[18-19]。例如,油松和白皮松同属松属,平均波速差距只有 $57\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;英桐和美桐同属悬铃木属,平均波速差距在 $116\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;侧柏和桧柏同属柏科,前者为侧柏属,后者为圆柏属,平均波速差距为 $200\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

表 2 健康树干径向应力波波速检测结果

Table 2 Results of radial stress wave velocity detection in healthy tree trunks

树种	数据量	树干径向应力波波速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)			标准差	K-S 检验结果 (Sig.)
		最大值	最小值	平均值		
油松	36	1 746	1 086	1 476	152	0.170
侧柏	36	2 110	1 547	1 822	122	0.200
美桐	36	1 812	1 422	1 652	101	0.069
桧柏	36	2 185	1 805	2 022	96	0.200
银杏	36	2 110	1 715	1 875	89	0.078
刺槐	36	2 390	2 010	2 197	85	0.200
白皮松	36	1 724	1 416	1 533	84	0.200
英桐	36	1 935	1 629	1 768	78	0.200

理论上来说,树干内部木材材质差异越高,径向应力波波速的标准差越大。油松的标准差最大达到

表 3 树干径向应力波临界波速

Table 3 Radial stress wave threshold velocities of different species

($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

树种	油松	白皮松	美桐	侧柏	英桐	银杏	桧柏	刺槐
临界波速	1 225	1 394	1 485	1 620	1 639	1 728	1 864	2 055

从表 3 中可以看出,各个树种的临界应力波速存在很大的差异。这 8 种树木的临界应力波速的最大值为 $2\,055\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最小为 $1\,225\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,树种分别为刺槐和油松。极差超过最小值的 $1/2$,超过最大值的 $1/3$ 。根据排序结果,临界波速的排序与平均值的排序有着相似的顺序。

本研究的临界应力波波速确定方法,检测试验选取合适的径向检测路径,并采用树木测径仪和应力波微秒计分别测量对应的路径长度和应力波传播时间,根据公式(1)计算路径上的应力波波速,试验中对同一树种树木应尽量获得多的波速数据。波速

152,英桐的标准差最小,为 78,后者约等于前者的 $1/2$,这充分说明不同树种的木材材质差异明显。标准差由大到小的顺序为:油松、侧柏、美桐、桧柏、银杏、刺槐、白皮松、英桐。这个排列顺序,与实际树木树干产生空洞的频率有着惊人的相似性:油松检测过程中经常发现树干内部存在空洞,而白皮松很少发现树干空洞。这种相似性可以从树干空洞逐渐产生的过程上来解释,不均匀的树干材质可以看作是空洞的诱因和早期发展,而空洞是一种极端的材质不均匀形式。根据同行的一项对北京市古树的调查研究,油松树洞产生的频率远大于侧柏和白皮松^[20],这能很好地佐证本研究的推论。依据此推论,随着更深入的研究,未来有望能解决“应力波波速无法检测早期或是尺寸很小的树干内部缺陷”^[21-22]的问题。

3.2 应力波临界波速的确定

试验数据的正态分布检验结果见表 2。被测 8 个树种的试验波速数据的 K-S 检验结果(Sig.)均大于 0.05,说明这 8 个树种的试验数据均符合正态分布,可以用来进行应力波临界波速的确定。

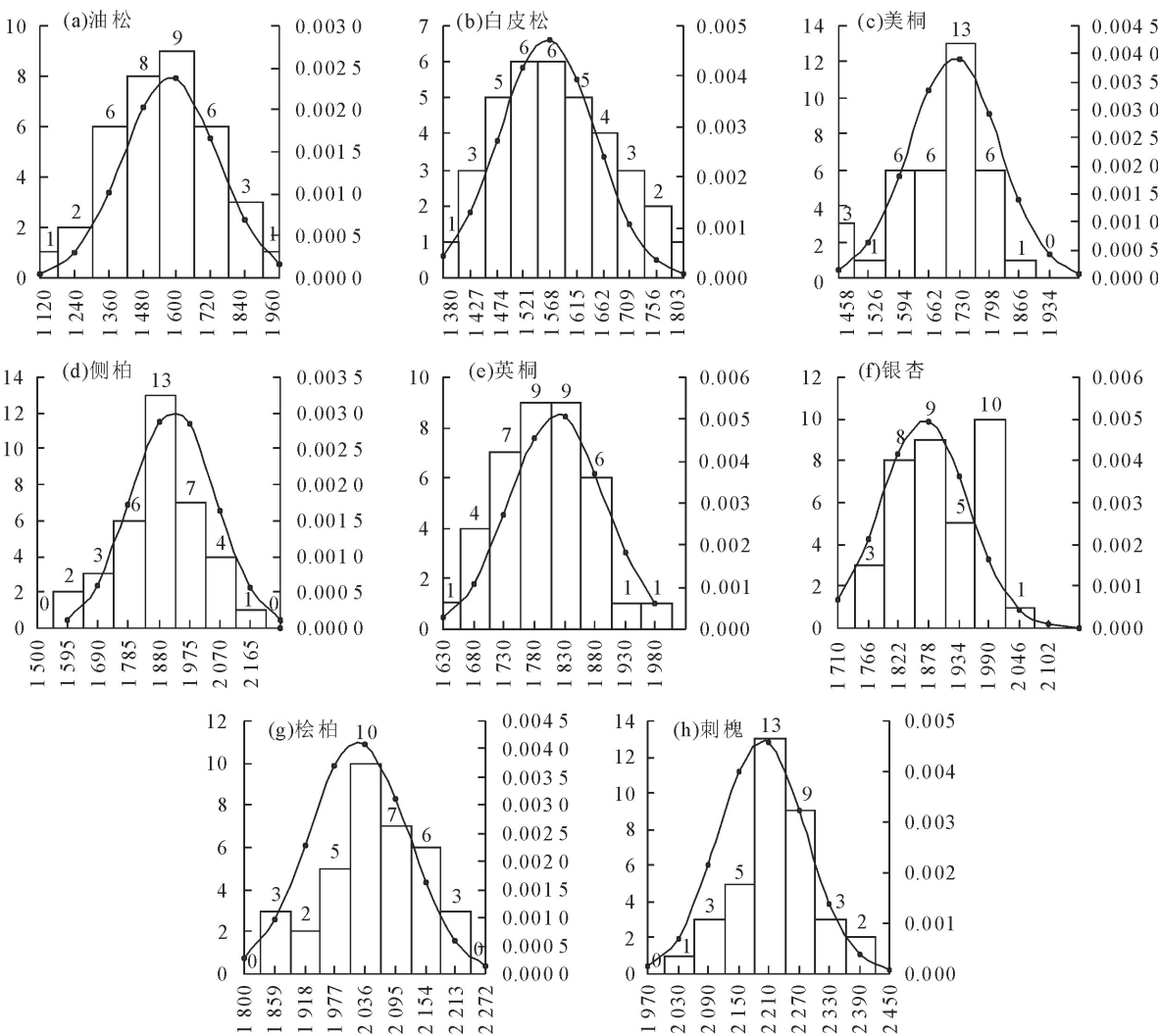
根据数据的平均值和标准差,选择合适的组距绘制波速-频数直方图和波速-概率密度曲线图。前者绘制于主坐标轴(左侧坐标轴),用于描述数据的正态分布的趋势;后者绘制于次坐标轴(右侧坐标轴)是为该组数据的正态分布曲线,可以直观观察正态分布的具体情况。详细的树干径向应力波波速正态分布见图 6。

根据图 6 中树干径向应力波波速正态分布的特点,结合前述公式(2),求得所测树种的应力波临界波速,并根据数值大小进行了排序(表 3)。

正态分布统计分析:首先检验获得的树干径向应力波波速数据的正态分布性,在通过正态分布检验后计算平均值和标准差,选取合适组距并计算频数和概率密度,根据组距、频数和概率密度三者之间的相互关系,绘制树干径向应力波波速直方图和正态分布图,根据公式(2)获得用于树干缺陷筛查的树干径向应力波临界波速值。

3.3 临界波速的树干内部缺陷筛查验证

选取 1 棵较为典型的树干内部有缺陷的油松,其内部是自然形成的腐朽和孔洞缺陷。微钻阻力仪检测结果见图 7。



注:图中所有横坐标均为树干径向应力波波速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;左侧纵坐标为频数;右侧纵坐标为概率密度。

图 6 不同树种树干径向应力波波速分布

Fig. 6 Distributions of radial stress wave velocities of different tree species

图 8 中分别标记出了对应检测路径上的腐朽和空洞内部缺陷,可以看出,在从北向南的检测路径上,一直到超出仪器量程(50 cm)的范围内树干均没有腐朽或者空洞;在从西向东的检测路径上,树干在表面以下 12 cm 处开始出现腐朽,在表面以下 30 cm 处已经存在空洞;在从南向北的检测路径上,树干在表面以下 6 cm 处已经存在空洞;在从东向西的检测路径上,树干在表面以下 6 cm 处已经存在空洞。检测表明树干内部存在 1 个占横截面积近 50%的空洞,该空洞位置偏向南方(图 8)。随后对此棵油松进行了 6 个不同方位路径的应力波波速检测,其检测结果见表 4。

在前述的检测研究中,得出了油松的树干径向应力波临界波速值为 $1\,225\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从表 4 中可以看出,这棵树干内部有缺陷的油松的树干径向应力波波速最大值为 $631\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最小值为 $442\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对比可以看出,验证性试验测得的也就是树干

内部存在缺陷的油松的树干径向应力波波速明显小于油松,即使是最大值也远远小于临界波速值。这项验证试验可以充分说明树干径向应力波临界波速值用于树干内部缺陷的筛查是有效的。

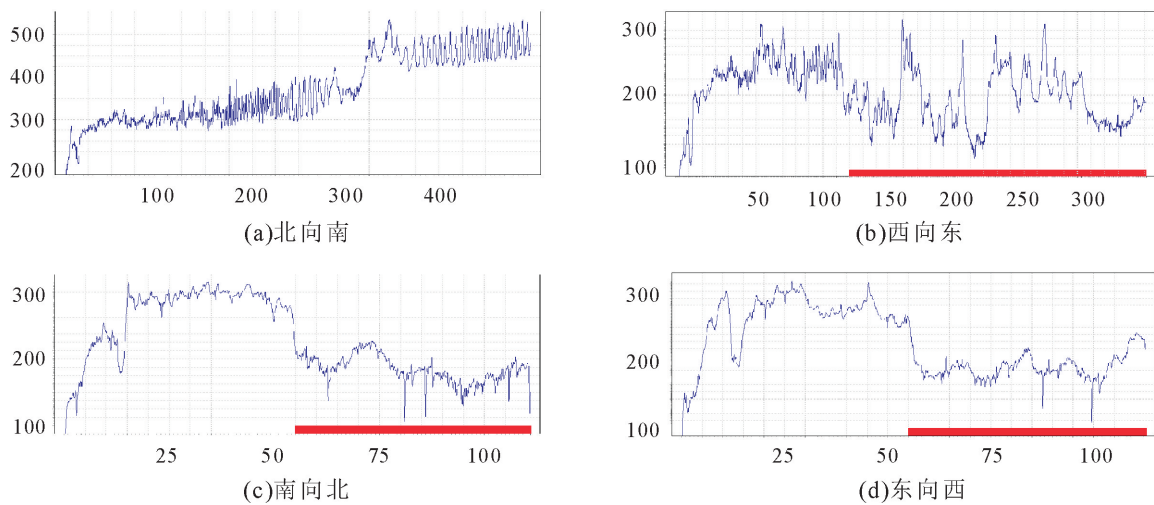
表 4 应力波波速检测结果

Table 4 Measurement of stress wave velocities

路径 编号	路径长度 /mm	传播时间 / μs	波速 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	备注
1—1'	791	1 791	442	所有路径上的应 力波波速均小于 临界波速($1\,225\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)
2—2'	789	1 512	522	
3—3'	759	1 318	576	
4—4'	791	1 618	489	
5—5'	796	1 275	624	
6—6'	784	1 243	631	

4 结论

以筛查树干内部缺陷为目标,设计了树干径向应力波波速检测试验,对北京市常见的8个树种的



注:横坐标为微钻阻力仪钻入树干深度,mm;纵坐标为钻针受到的阻力,rel。

图7 4个方向上的微钻阻力曲线(红色标记为缺陷)

Fig. 7 Resistograph profiles in four directions (defects are marked in red)

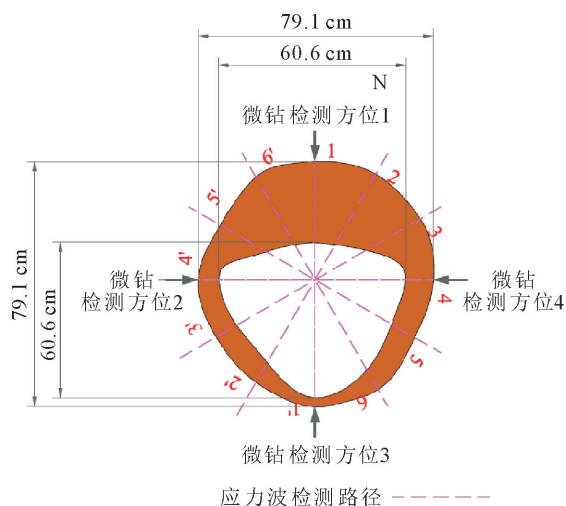


图8 微钻阻力、应力波检测位置以及树干内部缺陷

Fig. 8 Detection locations of resistograph and stress wave as well as trunk internal defect

古树和城市大树进行了应力波波速测量,形成了树干径向应力波临界波速确定方法,获得了可用于筛查这8种树木树干内部缺陷的临界应力波波速值,并进行了树干内部缺陷筛查验证性试验。

树干径向应力波波速足量数据采集、正态分布检验和95%置信水平统计分析相结合的方法,可用于确定树干内部缺陷筛查的应力波临界波速值。

不同树种用于树干内部缺陷筛查的应力波临界波速不相同,油松、白皮松、侧柏、桧柏、刺槐、英桐、美桐和银杏的应力波临界波速值分别为1 225、1 394、1 620、1 864、2 055、1 639、1 485、1 728 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

树干内部缺陷筛查验证性试验结果表明,本研究形成的应力波临界波速确定方法是可行的,获得

的临界波速值可以用于古树和城市大树树干内部缺陷的快速筛查。

参考文献:

- [1] RINN F. Key to evaluating drilling resistance profiles[J]. Western Arborist Fall, 2015, 31(3): 14-19.
- [2] RUDNICKI M, WANG X P, ROSS R J, *et al.* Measuring wood quality in standing trees-a review[R]. Madison, WI: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Prod Lab, 2017: 1-11.
- [3] 时小龙,王立海,徐华东,等. 基于阻抗仪和ERT技术的红松内部腐朽定量检测[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(9): 102-111.
- [4] SHI X L, WANG L H, XU H D, *et al.* Quantitative characterization of decay detection in standing trees of Korean pine based on Resistograph and ERT[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(9): 102-111. (in Chinese)
- [5] 管珣,赵茂程. 北美基于应力波技术的木材测试及应力分等的研究进展[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(2): 178-181.
- [6] GUAN X, ZHAO M C. Advances in the researches of the wood quality testing and stress grading based on the acoustic technology in north America[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(2): 178-181. (in Chinese)
- [7] MATTHECK C G, BETHGE K A. Detection of decay in trees with Metriguard stress wave timer[J]. Journal of Arboriculture, 1993, 19(6): 374-374.
- [8] ROSS R J, WARD J C, TENWOLDE A. Stress wave nondestructive evaluation of wetwood[J]. Forest Products Journal, 1994, 44(7): 79-83.
- [9] DIVOS F, SZALAI L. Tree evaluation by acoustic tomography [C]. University of California, Berkeley: Proceedings of the 13th International Symposium on Nondestructive testing of Wood 2002: 251-256.
- [10] 杨学春,罗菊英. 杨树与落叶松原木中应力波的不同传播速度[J]. 林业科学, 2011, 47(5): 96-100.

- YANG X C, LUO J Y. Different propagation velocity of stress wave in poplar and larch logs [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(5): 96-100. (in Chinese)
- [9] 高珊, 王立海, 王洋. 东北林区十个树种冻结活立木中应力波传播速度试验研究[J]. *森林工程*, 2013, 29(4): 47-52.
- GAO S, WANG L H, WANG Y. Experimental study on stress wave propagation velocity in frozen standing trees of 10 species in northeast china[J]. *Forest Engineering*, 2013, 29(4): 47-52. (in Chinese)
- [10] 刘丰禄, 姜芳, 王喜平, 等. 应力波在落叶松活立木中传播二维模拟研究[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(4): 201-205.
- LIUF L, JIANG F, WANG X P, *et al.* Stress wave propagation in larch plantation trees; numerical simulation[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(4): 201-205. (in Chinese)
- [11] 何宇航, 陈恩, 王弘历, 等. 断层扫描法在木材无损检测的研究进展[J]. *木工机床*, 2020(1): 13-16.
- HE Y H, CHEN S, WANG H L, *et al.* The research and development of fault scanning in wood nondestructive testing [J]. *Woodworking Machinery*, 2020(1): 13-16. (in Chinese)
- [12] 吴福社. 树木无损检测方法和安全性评估初探[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2011.
- [13] 吴福社, 吴貽军, 邵卓平. 应力波仪和阻力仪用于雪松立木内部材性检测的研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2011, 38(1): 127-130.
- WU F S, WU Y J, SHAO Z P. Determination of cedar sample interior characteristics based on stress wave and resistograph [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2011, 38(1): 127-130. (in Chinese)
- [14] 徐华东, 王立海. 空洞对木材中应力波传播路径的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2014, 42(4): 82-84, 88.
- XU H D, WANG L H. Effects of cavity on propagation path of stress wave in wood[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2014, 42(4): 82-84, 88. (in Chinese)
- [15] WANG X P, DIVOS F, PILON C, *et al.* Assessment of decay in standing timber using stress wave timing nondestructive-evaluation tools-A guide for use and interpretation[R]. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Prod Lab, 2004: 1-12.
- [16] RINN F. Intact-decay transitions in profiles of density-calibratable resistance drilling devices using long thin needles[J]. *Arboricultural Journal*, 2016, 38(4): 204-217.
- [17] 张文彤, 邱春伟. SPSS 统计分析基础教程[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2011: 236-237.
- [18] ROSS R J. Nondestructive evaluation of wood[M]. Washington: U. S. Government Printing Office, 2015.
- [19] WANG X P, ROSS R J, MCCLELLAN M, *et al.* Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method [J]. *Wood and Fiber Science*, 2007, 33(4): 522-533.
- [20] 陈峻崎. 北京市古树健康评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [21] WU X, LI G H, JIAO Z, *et al.* Reliability of acoustic tomography and ground-penetrating radar for tree decay detection [J]. *Applications in Plant Sciences*, 2018, 6(10): e1187.
- [22] LI G H, WENG X, DU X C, *et al.* Stress wave velocity patterns in the longitudinal-radial plane of trees for defect diagnosis[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 124: 23-28.

(上接第 124 页)

- [30] 张晓平, 方炎明, 黄绍辉. 杂种鹅掌楸扦插生根过程中内源激素的变化[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2004, 28(3): 79-82.
- ZHANG X P, FANG Y M, HUANG S H. The endogenous hormone's variation during the adventitious roots formation of hybrid tuliptrees by cutting[J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science*, 2004, 28(3): 79-82. (in Chinese)
- [31] WEI K, RUAN L, WANG L, *et al.* Auxin-induced adventitious root formation in nodal cuttings of *Camellia sinensis* [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, 20(19): 4817.
- [32] 詹亚光, 杨传平. 白桦插穗生根的内源激素和营养物质[J]. *东北林业大学学报*, 2001, 29(4): 1-4.
- ZHAN Y G, YANG C P. Endogenous hormones and nutritive material in softwood cuttings of *Betula platyphylla* during rooting[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2001, 29(4): 1-4. (in Chinese)
- [33] 敖红, 王崑, 冯玉龙. 长白落叶松插穗的内源激素水平及其与扦插生根的关系[J]. *植物研究*, 2002, 22(2): 190-195.
- [34] 王青, 张捷, 仲崇禄, 等. 麻楝扦插生根进程中内源激素和营养物质含量的变化[J]. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40(4): 111-119.
- WANG Q, ZHANG J, ZHONG C L, *et al.* Variation of endogenesis hormone and nutritive matter concentration in *Chukrasia tabularis* cuttings during rooting[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2020, 40(4): 111-119. (in Chinese)
- [35] 王艳晶, 彭祚登. 不同生根促进剂对国槐嫩枝扦插生根过程中内源激素变化的影响[J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(5): 109-114.
- WANG Y J, PENG Z D. Effects of different rooting accelerators on the changes of endogenous hormones in *Sophora japonica* during softwood-cutting rooting process[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, 32(5): 109-114. (in Chinese)
- [36] 胡涛, 曹钰, 张鸽香. 美国流苏嫩枝扦插及生根内源激素含量的变化[J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(2): 109-115.
- HU T, CAO Y, ZHANG G X. Softwood cutting of *Chionanthus virginicus* and changes of endogenous hormone content during rooting period[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(2): 109-115. (in Chinese)