



■ 树木健康度评估专题

- ☐ 树木雷达技术评估树木健康度
- ☐ 应力波断层成像技术评估树木健康度
- ☐ 电阻断面成像技术评估树木健康度
- ☐ 微钻阻力技术评估树木健康度
- ☐ 几种树木健康度评估方法比较

■ 前言

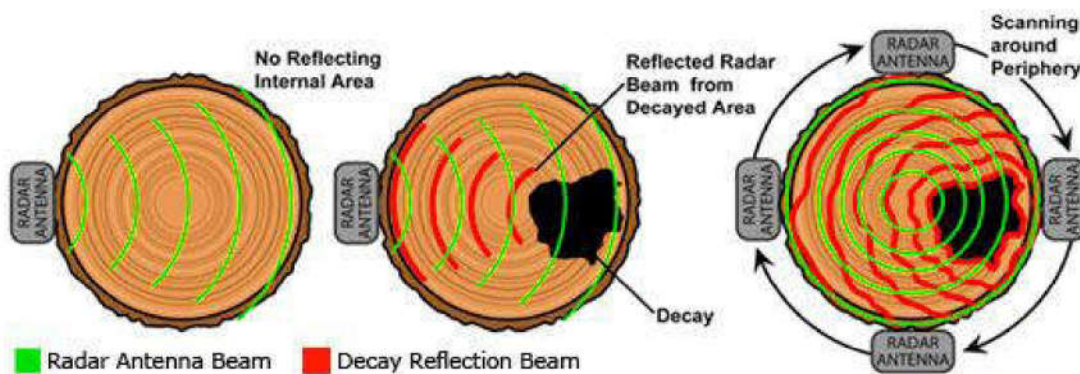
森林是自然界给予我们的一笔巨大而珍贵的“绿色财富”。和人类一样，树木也有不同的健康状况，倘若不及时对树木进行健康诊断，一些树木将会死去，不但对名贵树种和古树带来威胁，还可能对人类带来生命或财产的损失。

树木腐朽是树木管理与经营中的主要内容之一，因为腐朽直接降低树干、树枝的机械强度。理论上讲，当树木出现腐朽的情况时就应看作具有构成对人群与财产安全的潜在威胁，但显然并非所有腐朽的树木都必然构成对安全的威胁，重要的是确认哪些部位的腐朽、到什么程度、如何控制和消除导致腐朽的因素。因此，了解树木腐朽的发生原因、过程，作出科学的诊断和合理的评价是十分重要的。

树木腐朽由多种原因导致，主要包括立木腐朽病、虫害以及树种、寿命等。传统方法通过观测和评测树干和树冠的外观特征来估计树木内部的腐朽情况。例如在树干或树枝上有空洞、树皮脱落、伤口、裂纹、蜂窝、鸟巢、折断的树枝、残桩等，基本能指示树木内部可能出现腐朽。即使伤口的表面具有较好的愈合，也许内部仍可能有腐朽部分，因此通过外表观测来诊断有时是十分困难的，有的树木内部腐朽已十分严重，但生长依然正常。通过仪器检测树木腐朽可以避免这些问题，常见的树木健康评估技术主要有雷达、应力波、电阻及微钻阻力等方法，几种技术适用条件有所不同，需根据实际情况选择适当的方法。本文将分别介绍这些仪器的原理及应用案例，希望能对您的科研及应用有所帮助。

TreeRadar 树木雷达测量技术

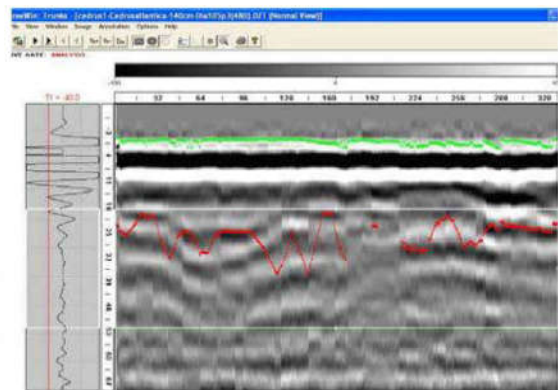
地质雷达 (Ground Penetrating Radar, GPR) 作为一种较新的地球物理方法, 其实际应用范围正在迅速扩大, 已经覆盖了考古、矿产资源勘查、道路检测、岩土工程测试、工程质量无损检测、环境工程、刑事侦查、军事应用等诸多领域。地质雷达检测是根据射频脉冲的传播、反射和衍射, 它对于木材的电导率和电容率是非常灵敏的。对于检测物质的初步调查, 雷达波的频率采用 1000~1500MHz。通常地面穿透性雷达测量使用小型偶极天线单反射波形来完成的, 对于木材腐朽检测, 使用的单天线为 1500MHz, 这种检测技术已经应用于原木和树木的缺陷检测。研究表明, 由于信号会受到树木的密度和湿度等因素的影响, 在对图像的解释方面有一定的困难。



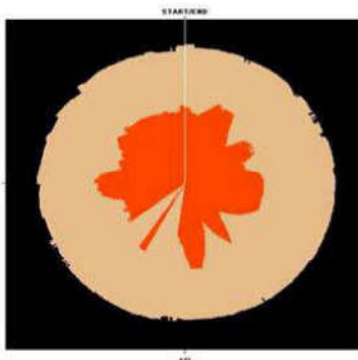
树木雷达装置图像系统可以产生高分辨率和非破坏式的树干内部结构和根部结构图像, 这种图像填补了定量分析树木健康和树木结构完整性的空白。树木雷达装置系统显示树木和根部结构系统图像是一种新的和独创的应用地面渗透雷达技术。这种创新检测系统提供树干覆盖范围的 100% 数据图像, 显示 360° 的立体木材结构图。

TRU System 装置是由 TreeRadar 公司开发生产的, 此树木雷达图像可以提供由于受到腐朽引起的木材结构完整性受损的树干腐朽内部信息和确定危险树木, 它可以显示树干内部缺陷和腐朽程度, 甚至是很难检测的早期阶段; 同时, 可以看清地表以下树根结构的深度、形

状和大小的树根结构图, 而且该检测是快速、便携式及无损检测。



TreeWin 软件示意图



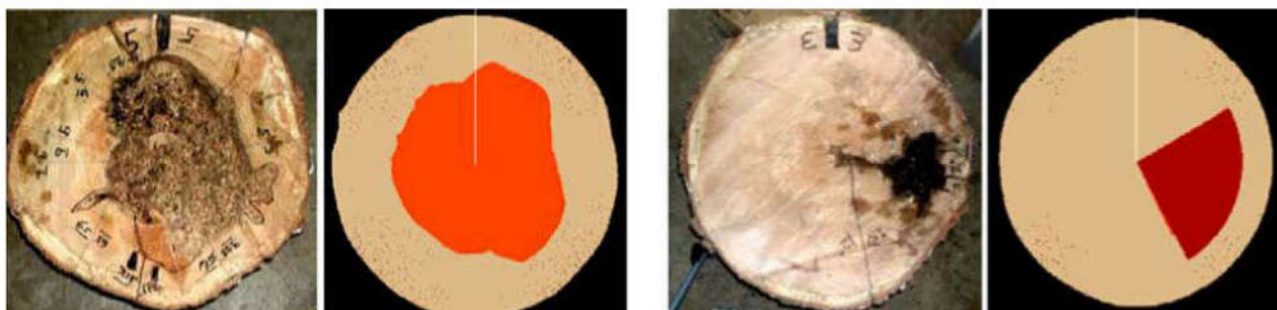
树木雷达装置由便携式的电池电源采集系统和特殊的雷达天线组成! 该检测系统关键的功能是它自带的软件模块 TreeWin, 这个后处理数据分析包以数字波形的方式读出现场测量值, 并能将数据变成树干内部的截面图如上图所示, 绿线代表树皮的位置, 红线表示树木内缺陷的大小。

■系统特点:

- ◆ 无损检测，不会伤害检测对象，也不会对环境有任何不利影响；
- ◆ 数分钟内即可完成设置，对树干做 360° 扫描只需 1 分钟；
- ◆ 供电电池可使用 4 至 6 个小时；
- ◆ 树干无需前处理。通常在多个高度进行全周扫描，以准确判断树干内部不同高度的空洞和腐朽情况；
- ◆ 地下根系扫描需 30 至 60 分钟，可显示根的位置与深度，根系密度；
- ◆ 数据采集器和天线可分别放在两个便携箱中，方便携带。

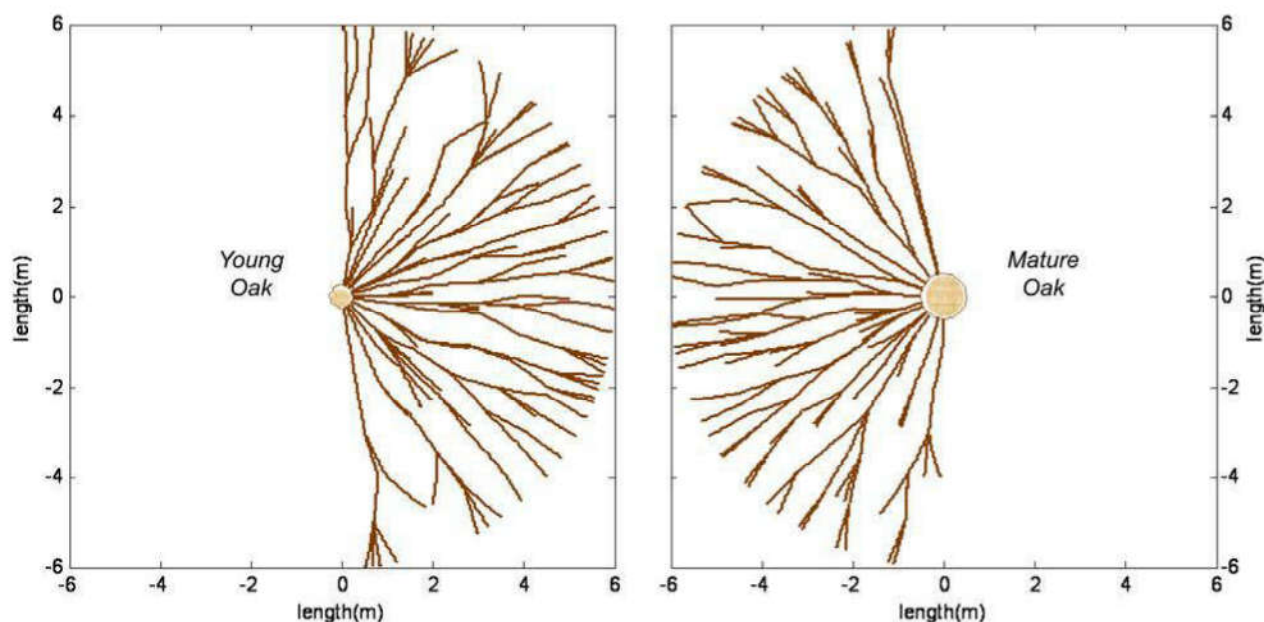
■树干检测

- ◆ 无损伤检测；
- ◆ 携带方便，由电池供电；
- ◆ 设置简单，易于使用；
- ◆ 检测速度快，1 分钟左右即可完成一次 360° 扫描；
- ◆ 分辨率高，扫描间隔 5mm，可生成各高度层上的断面图像（近似一个雷达电锯）；
- ◆ 可有效检测出树木内部的空洞和腐朽。



■根系检测

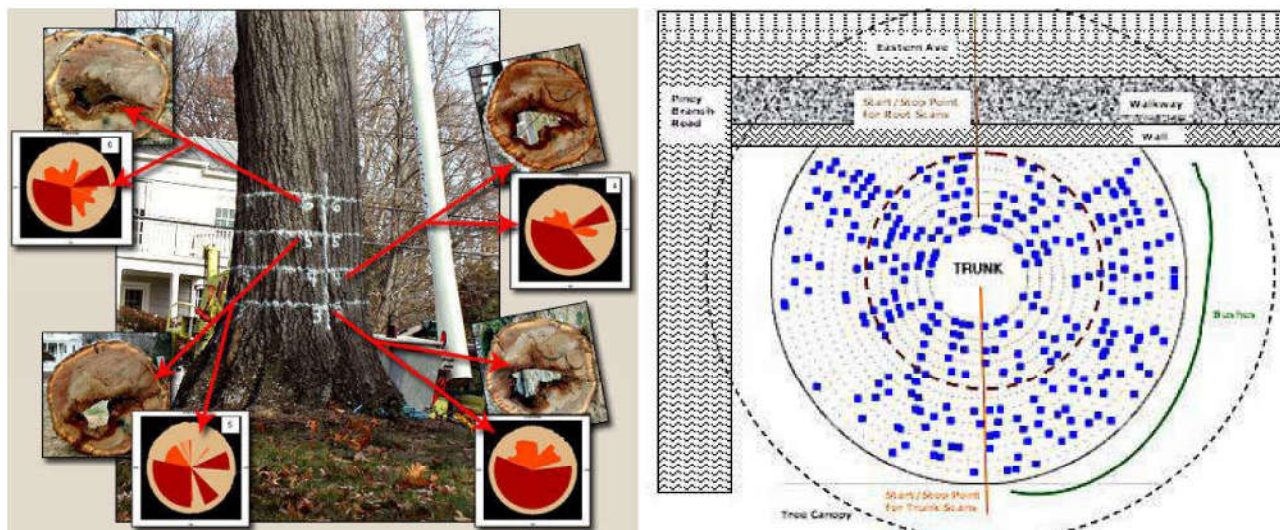
- ◆ 无损检测；
- ◆ 携带方便，由电池供电；
- ◆ 设置简单，易于使用；
- ◆ 检测速度快，30 至 60 分钟即可完成全范围扫描；
- ◆ 检测深度 1 米；
- ◆ 可穿透沥青、水泥等坚固地面；
- ◆ 可生成高分辨率根系分布图像；
- ◆ 通常以树木为圆心，在多个同心圆上进行全周或半周扫描，也可按直线进行扫描。



■ TreeRader 应用案例

对华盛顿特区古树树干及根系的雷达扫描

2005 年 12 月 1 日对一棵 200 年古树 4 个不同高度树干进行检测，结果表明：树干根部腐朽程度较高，横截面验证及检测数据显示腐朽主要分布于树干南侧，且距表皮大约 0~3 英寸。同时对树干周围根系进行探测，靠近墙壁的根系密度较低，相反的一侧根系密度较高。



■ TreeRader 参考文献

- [1] Butnor J R, Pruyn M L, Shaw D C, et al. Detecting defects in conifers with ground penetrating radar: applications and challenges[J]. Forest Pathology. 2009, 39(5): 309-322.
- [2] Butnor J R, Barton C, Day F P, et al. Using Ground-Penetrating Radar to Detect Tree Roots and Estimate Biomass[J]. Measuring Roots. 2011: 213-245.

应力波树木断层成像技术

应力波在腐朽的树干中传播比在健康的树干中时间要长。通过测定围绕在树干上的一系列检测点发射信号到相应的点接受信号所需的时间，这样应力的相对速度就能计算出来，通过软件生成树木横截面的二维或三维图像，并根据图像的颜色判别树木内部是否存在腐朽。

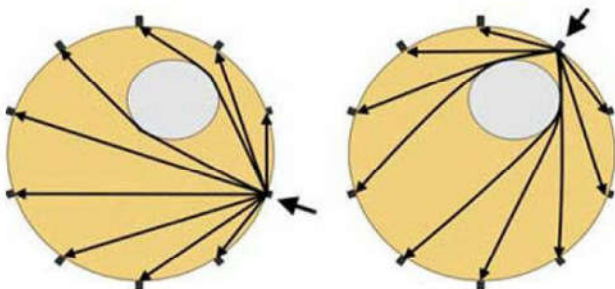
应力波断层成像技术能够很好地反应木材内部腐朽情况，通过图像能观测到腐朽存在的部位、面积和大小。其缺点是：容易把细小开裂指示为小面积腐朽；严重腐朽和空洞的颜色区别不大，还需要借助其他检测方法来进行进一步确认。常见的应力波断层成像仪主要有两种：ARGUS 生产的 PiCUS 和 RINNTECH 生产的 ARBOTOM。



PiCUS 应力波断层成像仪

系统组成

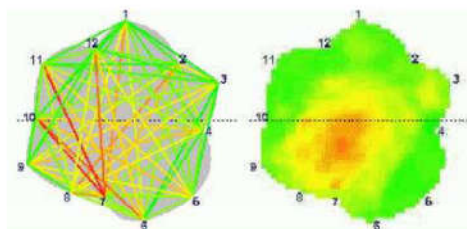
- ◆ 传感器根据配置不同 5~20 个
- ◆ 传感器连接电缆
- ◆ 可充电电源
- ◆ 测量及数据分析软件
- ◆ 有线或无线敲击锤
- ◆ 电子测距仪（可选）
- ◆ 铁钉、卷尺、便携箱等附件
- ◆ 需配合笔记本电脑使用



ARBOTOM 应力波断层成像仪

系统组成

- ◆ 传感器：根据树木大小，数量不限
 - 一维：2 个传感器
 - 二维：3 个传感器，推荐 6~10 个
 - 三维：8 个传感器，推荐 10~20 个
- ◆ 传感器连接电缆（最长 20 米）
- ◆ 可充电电池
- ◆ 应用软件
- ◆ 2D/3D（二维 / 三维）扫描和图形软件
- ◆ 铁钉、敲击锤、便携箱等附件
- ◆ 需配合笔记本电脑使用



■ 应力波树木断层成像技术应用案例

基于 PiCUS 应力波断面成像仪评估白橡和山胡桃树干腐朽程度

PiCUS 应力波断面成像仪是无损测量树干腐朽程度的仪器。试验中使用 PiCUS 测量了 13 棵白橡和山胡桃的 27 个横断面，使用软件绘制而未断面图像，评估树干腐朽程度，并截取树木断面进行验证。结果表明：27 个测量断面中 10 个断面验证没有腐朽，PiCUS 同样没检测出；剩余 17 测量断面中，PiCUS 测量腐朽程度小于实际验证结果，但差别较小（总面积的 5%）；在预测腐朽位置时，平均总面积 3% 的树干截面 PiCUS 图像显示有腐朽而实际验证没有腐朽，总面积 8% 的树干界面 PiCUS 图像显示没有腐朽而实际验证有腐朽。

Table 1. Area and location of decay determined by Picus or visual examination and a comparison of the two measurements on all trees in the study.

Species	ID	Section	No. of Picus sensors	Average diameter (cm)	Percentage decay		Difference	Percentage of total area		Percentage accuracy ^a
					Picus evaluation	Visual evaluation		False positives ^b	False negatives ^c	
White oak	1	Bottom	10	48	23%	28%	5%	5%	10%	85%
White oak	1	Middle	10	42	0%	0%	0%	0%	0%	100%
White oak	1	Top	10	40	0%	0%	0%	0%	0%	100%
White oak	2	Bottom	10	36	36%	35%	-1%	11%	9%	79%
White oak	2	Top	10	27	0%	0%	0%	0%	0%	100%
White oak	3	Bottom	10	49	9%	12%	3%	1%	4%	95%
White oak	3	Top	10	44	0%	0%	0%	0%	0%	100%
White oak	4	Bottom	10	46	0%	0%	0%	0%	0%	100%
White oak	4	Top	10	38	0%	0%	0%	0%	0%	100%
White oak	5	Bottom	10	28	0%	0%	0%	0%	0%	100%
White oak	5	Top	10	25	0%	0%	0%	0%	0%	100%
White oak	6	Bottom	10	41	10%	12%	2%	3%	4%	93%
White oak	7	Bottom	10	36	3%	0%	-3%	3%	0%	97%
White oak	7	Top	10	27	0%	0%	0%	0%	0%	100%
White oak	8	Bottom	10	35	26%	35%	9%	3%	15%	82%
White oak	9	Bottom	10	49	16%	36%	20%	2%	21%	77%
White oak	9	Top	10	37	26%	28%	2%	4%	5%	91%
Hickory spp.	10	Bottom	10	40	7%	16%	9%	2%	9%	89%
Hickory spp.	10	Middle	9	33	0%	1%	1%	0%	1%	99%
Hickory spp.	10	Top	9	29	0%	0%	0%	0%	0%	100%
Hickory spp.	11	Bottom	10	36	2%	14%	12%	0%	10%	90%
Hickory spp.	11	Middle	8	31	4%	12%	8%	2%	7%	92%
Hickory spp.	11	Top	8	31	9%	10%	1%	2%	3%	95%
Hickory spp.	12	Bottom	8	32	30%	30%	0%	5%	2%	93%
Hickory spp.	12	Middle	8	27	18%	23%	5%	4%	9%	87%
Hickory spp.	12	Top	8	27	17%	24%	7%	2%	12%	86%
White oak	13	Bottom	8	30	37%	45%	8%	5%	14%	80%

^aFalse positive area was where Picus detected decay, but none was present.

^bFalse negative area was where Picus did not detect decay, but decay was present.

^cAccuracy was calculated by dividing the area where both Picus and the visual examination of photographs showed decay by the total cross-sectional area.

■ PiCUS Sonic Tomograph 参考文献

- [1] Brazee N J, Marra R E, Göcke L, et al. Non-destructive assessment of internal decay in three hardwood species of northeastern North America using sonic and electrical impedance tomography[J]. Forestry. 2011, 84(1): 33-40.
- [2] Gilbert E A, Smiley E T. Picus Sonic Tomography for the Quantification of Decay in White Oak (*Quercus alba*) and Hickory (*Carya* spp.)[J]. Journal of Arboriculture. 2004, 30(5): 277-281.
- [3] Johnstone D, Tausz M, Moore G, et al. Quantifying Wood Decay in Sydney Bluegum (*Eucalyptus saligna*) Trees[J]. Journal of Arboriculture. 2010, 36(6): 243-252.
- [4] Nicolotti G, Socco L V, Martinis R, et al. Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees[J]. Journal of Arboriculture. 2003, 29(2): 66-78.

基于应力波断面成像技术的胡杨树干强度降低和风险评估

应力波断面成像技术常用于树木采伐或立木健康无损诊断。在本研究中，使用该项技术测量15个胡杨断面，在二维断面图像中评估强度降低和风险。结果表明：应力波断面成像可以准确的定位和估计树干腐朽和空心面积，实际验证结果和应力波断面成像测量结果呈显著的对数回归相关（ $r=0.9679$ ），该回归函数可以有效的改善应力波断面成像仪评估树干腐朽的精度。强度评估使用Wagner、Coder 和 Mattheck 公式计算，上述3个公式可以有效的进行树干强度估计，应力波断面成像估算的强度降低与实际验证值存在显著的相关性（ $P<0.05$ ）。总之，试验提供了一种树木健康度无损检测的方法。

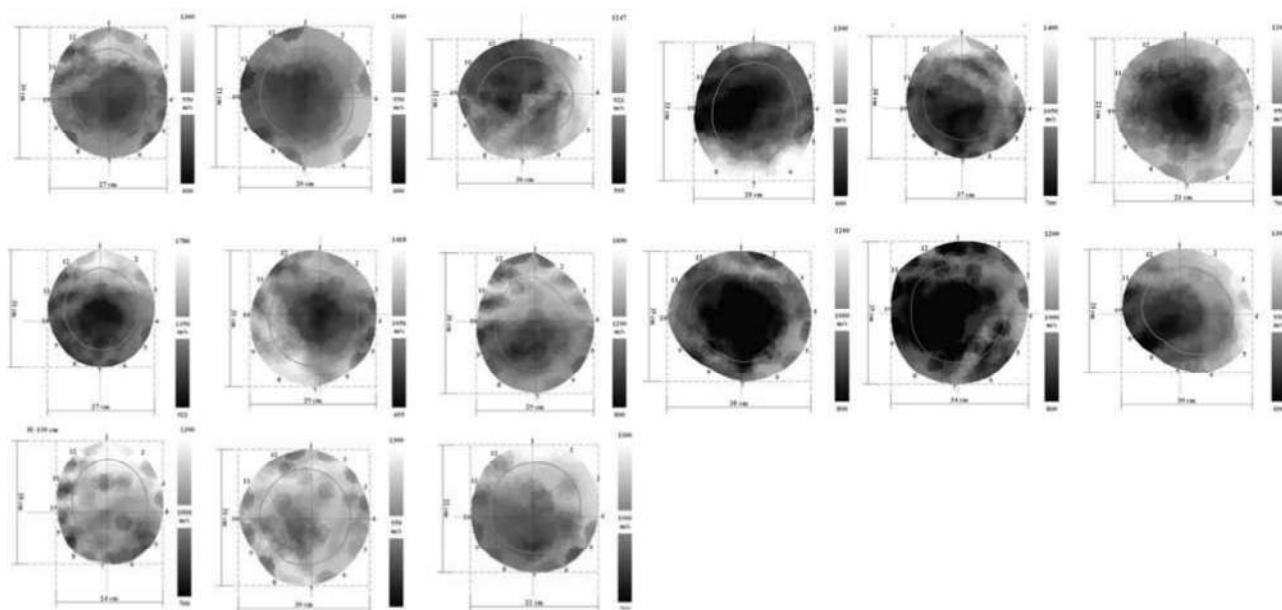
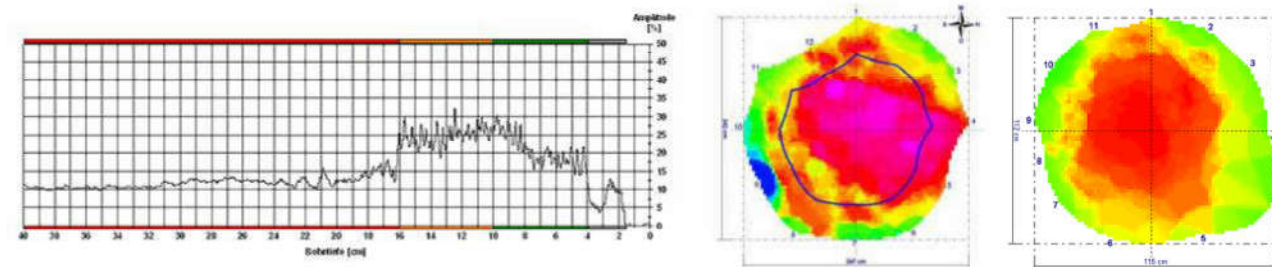


Figure 2. Two-dimensional tomograms from disks 1 to 15. Gray line in tomogram is hazard assessment at 0.3 threshold ($t/R = 0.3$) from the Mattheck equation (Mattheck and Breloer 1994).

■ ARBOTOM 参考文献

- [1] Mariño R, Fernández M, Fernández-Rodríguez C, et al. Detection of pith location in chestnut lumber (*Castanea sativa*; Mill.) by means of acoustic tomography and longitudinal stress-wave velocity[J]. European Journal of Wood and Wood Products. 2010, 68(2): 197-206.
- [2] Wang L, Xu H, Zhou C, et al. Effect of sensor quantity on measurement accuracy of log inner defects by using stress wave[J]. Journal of Forestry Research. 2007, 18(3): 221-225.
- [3] Liang S, Fu F. Strength Loss and Hazard Assessment of Euphrates Poplar Using Stress Wave Tomography[J]. Wood and Fiber Science. 2012, 44(1): 1-9.



树木电阻断面成像技术

电阻断层成像是一种无损评估木材的方法，可以得到一个树干的电阻图。真菌引起的木材腐朽能够改变木材的电特性，因为它改变了木材的水分和密度。早在 1987 年，Shortle 就论证了由于树木腐朽的地方真菌增加，同时流动的水分也增加，这些都导致了电阻率的增加，这个研究为电阻率检测法奠定了理论基础。电阻成像检测法就是根据木材腐朽阻抗的不同检测木材内部腐朽的。由于对应于某种腐朽的阻抗的变化在一个很大的范围，所以断层扫描的过程变得非常复杂。

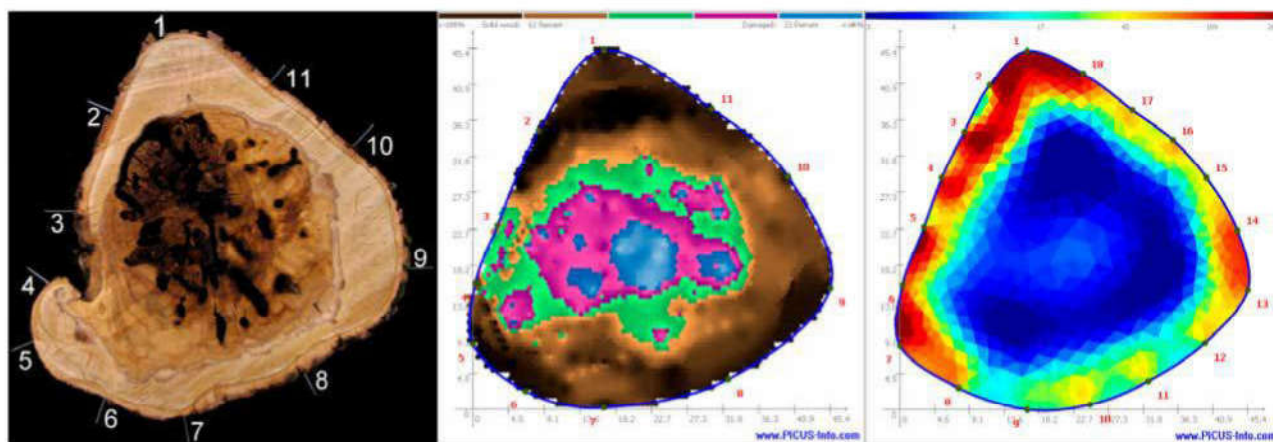


PiCUS TreeTronic 电阻断面成像仪通过检测树木区域的电流或电阻计算并绘制相应的相对电阻图，该图象表示树木的电阻变化，简称 EIT (Electrical Impedance Tomogram)。根据不同材质对应不同的电阻值，确定木材缺陷情况。由于电阻成像检测法是根据木材腐朽阻抗的不同检测木材内部腐朽的，而对应于某种腐朽的阻抗的变化在一个很大的范围，所以断层扫描的过程变得非常复杂。与超声断层检测仪 (SoT) 结合使用时，EIT 可提供更多信息，如分析损伤类型，发现空洞和感染病害的树木。

■ 树木电阻断层成像技术应用案例

基于应力波和电阻断面成像评估阔叶树内部腐朽程度

应力波 (SoT) 和电阻 (EIT) 断面成像技术常被用于树木内部腐朽的检测与量化。本研究中分别使用应力波和电阻断面成像仪对 9 棵树木的 22 个断面进行测量，并从 8 棵树中截取 19 个解析圆盘作为验证。结果表明：SoT 和 EIT 可以较为精准的评估树木内部腐朽程度，二者结合使用时，可以显著提高测量精度。



■ PiCUS TreeTronic 参考文献

[1] Brazee N J, Marra R E, Göcke L, et al. Non-destructive assessment of internal decay in three hardwood species of northeastern North America using sonic and electrical impedance tomography[J]. Forestry. 2011, 84(1): 33-40.

微钻阻力测量技术

微钻阻力测量技术的原理是采用直径 3mm 以下的钻针，在电机驱动情况下，使用均匀速度加力使钻针穿入树干内部，测定仪就采用携带的记录纸或计算机中记录钻针根据树干密度分布不同而产生的阻力曲线，其中阻力大小和进入深度直接相关。根据阻抗曲线可以判断木材内部具体部位的早晚材密度、应力木、年轮密度以及空洞、腐朽等情况，为判断树木内部腐朽、虫蛀、白蚁危害程度提供有效可靠的依据。常见微钻阻力仪有两种，分别由德国 Rinntech 公司和美国 IML 公司生产。

■ Rinntech Resistograph

■ 优点：

- ◆ 快速侦测树木和木材内部状况
- ◆ 容易操作，探头自动刺入，速度可控
- ◆ 高精度，高分辨率
- ◆ 1: 1 尺寸的纸带图形输出
- ◆ 刺入探针很细，对树木基本没有损坏

■ 技术规格：

- ◆ 微型探针直径：1.5mm
- ◆ 探测深度：45cm（可订制 100cm）
- ◆ 刺入速度：50cm/ 分钟（可自动调整速度）
- ◆ 分辨率：0.1 或 0.01mm
- ◆ 探测管直径：75mm
- ◆ 重量：3Kg
- ◆ 数据存储，并可下载到电脑上进行分析
- ◆ DECOM 分析软件：可选专业版和科学版



■ IML Resistograph

■ 特点：

- ◆ 探针无线缆，便于操作
- ◆ 测量结果：曲线实时显示在蜡质纸带上
- ◆ 45 度适配器（可选）：可转动，用于杆、运动场木质设备、桥梁木质等检测
- ◆ 蓝牙单元（可选）：用于数据下载

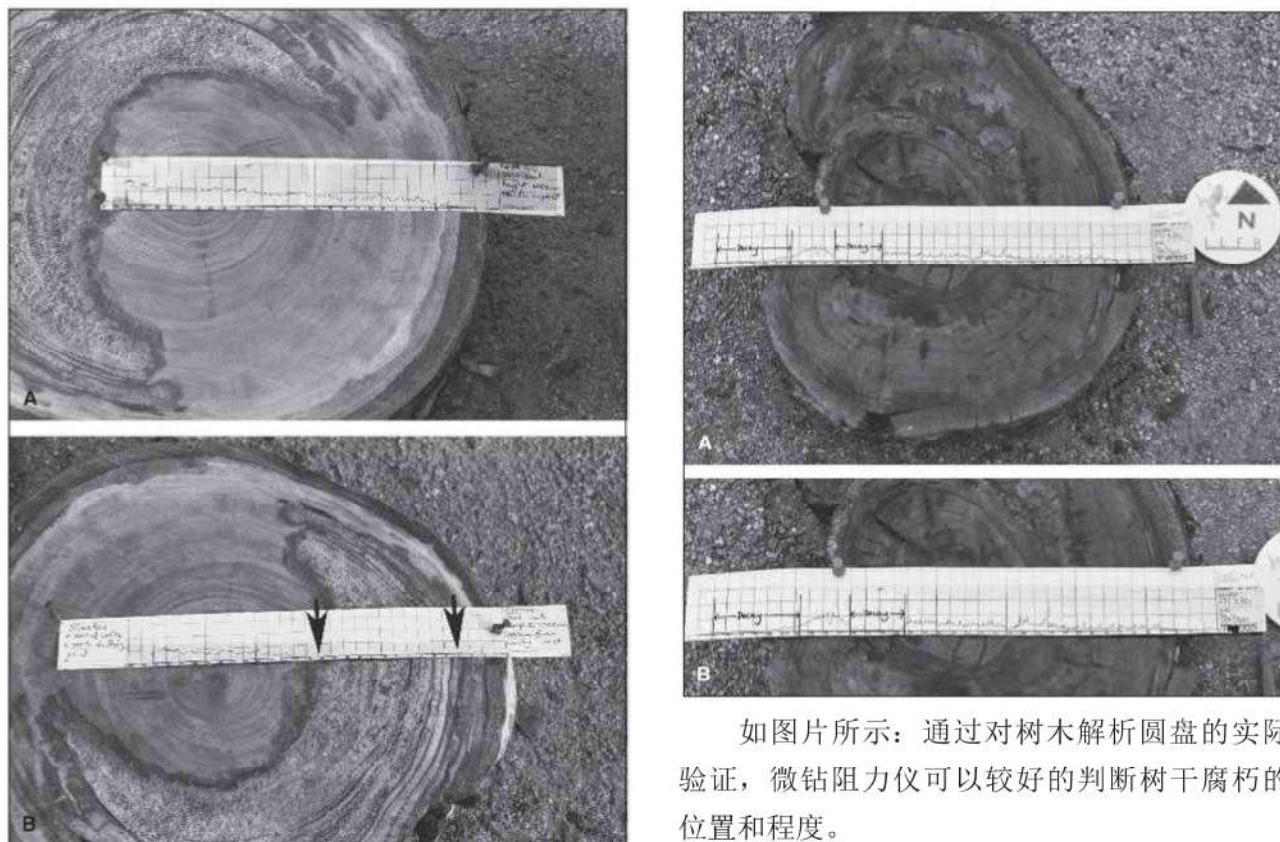
■ 技术规格：

- ◆ 探测深度：28、38、49cm（其他深度可选）
- ◆ 分辨率：0.1cm
- ◆ 钻针：一个钻针能用 100-150 次
- ◆ 钻头转进速度：0-55cm/ 分钟
- ◆ 数据输出格式：ASCII、MST 或 FMF
- ◆ 存储容量：20M，可扩展至 45 或 98M
- ◆ 软件功能：绘制曲线，内部空洞、年轮分析

■ 树木电阻断层成像技术应用案例

基于专家系统和微钻阻力预测桉树腐朽状况

树木腐朽状况评估是树木培育中的基础工作。在本研究中，使用便携式树木微钻阻力仪较好的测量了桉树树干中存在的腐朽位置及程度。并通过计算，得出了桉树树干断面中腐朽的面积，将树木微钻阻力仪测量的数据导入到专家系统中，可以为以后的树木管理工作提供数据基础。



如图片所示：通过对树木解析圆盘的实际验证，微钻阻力仪可以较好的判断树干腐朽的位置和程度。

■ 微钻阻力仪参考文献

- [1] Luley C J, Nowak D J, Greenfield E J, et al. Frequency and severity of trunk decay in street tree maples in four New York cities[J]. Journal of Arboriculture. 2009, 35(2): 94.
- [2] Feio A O, Lourenço P B, Machado J S. Non-Destructive Evaluation of the Mechanical Behavior of Chestnut Wood in Tension and Compression Parallel to Grain[J]. International Journal of Architectural Heritage. 2007, 1(3): 272-292.
- [3] Lin C, Tsai M, Wang S. Nondestructive evaluation techniques for assessing dynamic modulus of elasticity of moso bamboo (*Phyllosachys edulis*) lamina[J]. Journal of Wood Science. 2006, 52(4): 342.
- [4] Johnstone D M, Ades P K, Moore G M, et al. Predicting wood decay in eucalypts using an expert system and the IML-Resistograph drill[J]. Arboriculture and Urban Forestry. 2007, 33(2): 76-82.
- [5] Isik F, Li B. Rapid assessment of wood density of live trees using the Resistograph for selection in tree improvement programs[J]. Canadian Journal of Forest Research. 2003, 33(12): 2426-2435.
- [6] Rinn F, Schweingruber F H, Sch A R E. RESISTOGRAPH and X-Ray Density Charts of Wood. Comparative Evaluation of Drill-Resistance Profiles and X-Ray Density Charts of Different Wood Species[J]. Holzforschung. 1996, 50(4): 303-311.

几种常见树木健康度检测仪器比较

仪器类型	树木雷达	应力波断面成像仪		电阻断面成像仪	微钻阻力测量仪	
	TreeRadar	PiCUS	ARBOTOM	PiCUS	Rinntech	IML
便携性	中	好	好	好	好	好
野外操作性	好	好	好	好	好	好
快速测量	1 分钟 / 断层	10 分钟 / 断层	10 分钟 / 断层	3 分钟 / 断层	1 分钟 / 测量	1 分钟 / 测量
数据采集	野外专用电脑	笔记本电脑	笔记本电脑	笔记本电脑	存储器 / 打印	存储器 / 打印
数据类型	二 / 三维图像	二 / 三维图像	二 / 三维图像	二 / 三维图像	曲线	曲线
结果解释难度	中	中	中	中	好	好
耗材	无	无	无	无	钻针 / 打印纸	钻针 / 打印纸
其他功能	根系扫描	无	无	无	年轮分析	年轮分析
技术新颖程度	高	中	中	中	低	低
无损测量	是	需安装铁钉	需安装铁钉	需安装铁钉	3mm 圆孔	3mm 圆孔

點將集團销售及技术服务网络



上海技术服务中心

地址：上海松江车墩涇亭路188号财富兴园42号楼
邮编：201611
电话：021-37620451/37620452/37620453/37620454/37620455
传真：021-37620450
电子信箱：Shanghai@Dianjiangtech.com

北京技术服务中心

地址：北京市海淀区知春路甲48号盈都大厦C座4单元11F
邮编：100098
电话：010-58733448/58733447/58733442/58732269
传真：010-58731059
电子信箱：Beijing@Dianjiangtech.com

昆明技术服务中心

地址：云南省昆明市高新区海源中路1666号汇金大厦B座1815室
邮编：650106
电话：0871-68215582/66377295/15308891524/13099969882
传真：0871-68215582
电子信箱：Kunming@Dianjiangtech.com

合肥技术服务中心

地址：安徽省合肥市瑶海区铜陵路桥中天左岸写字楼B座1306室
邮编：230011
电话：0551-63656691/63656250/63656260/18130065080
传真：0551-63656697
电子信箱：Hefei@Dianjiangtech.com