

直流电法 CT 技术检测林木孔洞结构特征

胡雄武 张平松 于 仲

(安徽理工大学地球与环境学院)

摘要:为尝试应用直流电法 CT 技术检测林木内部孔洞的结构特征,以含有明显孔洞的梧桐树为试验对象。针对该孔洞实际分布特征,分别布置 1 号无孔洞和 2~5 号有孔洞截面,测试时在每个截面表层布置 48 个铜电极,利用并行电法仪器采集全场电位,获得 34 592 电场射线数,将射线数据绑定发射接收电极坐标,进行电阻率反演,进一步获得测试断面电阻率分布图。结果表明:孔洞区域电阻率值比正常树干电阻率值大 2 倍,反演图像清晰,孔洞大小、形态响应特征显著。因此,直流电 CT 技术可以作为检测林木内部孔洞结构特征的一种有效方法。

关键词:孔洞结构特征;直流电 CT 检测技术;电阻率反演

中图分类号: S718 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2012)03-0103-04

HU Xiong-wu; ZHANG Ping-song; YU Zhong. **Testing structure characteristics of forest cellular by direct current CT technology.** *Journal of Beijing Forestry University* (2012) 34(3) 103-106 [Ch, 13 ref.] College of Earth and Environmental Science, Anhui University of Science and Technology, Huainan, 232001, P. R. China.

In order to research the detection results of cellular structure using direct current (DC) CT technology, this paper selects a phoenix tree, which stands inside the Anhui University of Science and Technology campus, as the experimental model. Five tree pseudo-sections were designed by the distribution characteristics of cellular, and the number one had no impact on the cellular, the others were opposite. By arranging the 48 copper electrodes on the tree surface when testing, and collecting 34 592 potential rays on the full field with the instrument of parallel electrical method, and then uniting ray data with supplying electrode coordinates, five colorized contour maps had been established by data inversion of electrical resistivity tomography. The results showed that the resistivity of cellular was more than twice that of the background and readily to be identified from the image of resistivity, and the response effects such as size and morphology were obvious. So it is an effective method to detect the cellular locations inside the forest by DC CT technology.

Key words cellular structure characteristics of forest; direct current CT technology; resistivity inversion

林木健康状况检测是一个新课题,如何获取林木健康信息是当前研究的热点,有学者提出给林木做“心电图”,探究了多种林木结构检测方法。近年来,主要发展的检测方法有应力波检测^[1]、超声波检测^[2]、X 线检测^[3-4]、振动检测^[5]等。其中:应力波、超声波检测和振动检测方法是利用拾取波穿透林木的初至(即首波到时),解析波场传播速度或频谱特征变化来确定林木内部结构特征;X 线检测法是测试射线穿透介质后场强衰减变化情况,用吸收系数表征,评价木材及木质复合材料的密度、含水率变化以及缺陷等。类似方法还有从介质对波场、

放射线场角度获取物性特征(如波速、频率和吸收系数)。因此,上述方法可以统称为“物理检测法”。在检测过程中,受发射和接收系统的限制,对物性数据的采集、处理与成像方面仍存在一些不足之处,如观测数据量少、系统自动化程度低以及对类似孔洞等不良特征成像分辨率相对较差等。

笔者应用直流电法层析成像技术(CT 技术)进行了树木检测。直流电法^[6]在工程检测领域应用广泛,该方法观测系统较为成熟,数据采集智能程度高并具备高精度成像等特点。林木孔洞内包含空气,由于空气介质本身不导电,孔洞区域相对无

收稿日期:2011-08-09

基金项目:安徽理工大学博士研究基金项目。

第一作者:胡雄武,博士生。主要研究方向:工程地球物理探测技术。电话:0554-6668704 Email: huxiongwu1984@126.com 地址:232001 安徽省淮南市安徽理工大学地球与环境学院。

责任作者:张平松,博士,教授。主要研究方向:工程与环境物探。电话:0554-6668704 Email: pszhang@sohu.com 地址:同上。

本刊网址: <http://journal.bjfu.edu.cn>

孔洞缺陷段表现高电阻率值(电导率的倒数,表征介质导电能力的物性参数);因此,林木内部正常介质(树皮、形成层、木质部和髓心的统称,下同)与孔洞之间的明显电性差异为直流电法检测提供良好的测试前提。通过在树干表层布置测试电极,按照一定的数据处理方法,可计算获取树干任一测试截面内部的电阻率分布特征,从而可进一步分析、识别孔洞分布特征。

1 直流电法 CT 技术

1.1 并行数据采集

电场数据采用并行电法采集,包括 AM 法和 ABM 法 2 种方式^[7-8]。与传统电法测试相比,并行电法测试技术先进程度大大提高。在观测系统内一次布置 N 个电极,对于 AM 法采集时,任一电极供电时,其余 $N-1$ 个电极同时采集电位,这样其数据采集效率与串行采集相比至少提高了 $N-1$ 倍。AM 法中 N 个电极遍历供电即可完成测试任务。这样,通过 AM 法或 ABM 法装置自动顺次切换电极,取得大量的电流及电位数据。针对文中所用 AM 法中 Pole-Dipole 装置解编直流电法 CT 技术,给出其数据量^[9]表达式(以射线数 R 计)为

$$R = [N(N-1)(N-2)]/3 \quad (1)$$

除此之外,同其他测试方法(如应力波、超声波和 X 线检测法)相比,该方法大大减少测试工作量,且提高数据之间的同步性,为高精度电阻率成像奠定了基础。

1.2 电阻率成像

由于电极布置环绕树干表层且位于同一平面,因此通过电极供电,其余测量电极进行两两电位差测试,可形成电场观测空间,获得大量射线数据。根据场论,稳定电流场在导电介质中的传播符合一定的物理数学规律,树干截面内电位分布方程^[10]可表示为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -I\delta(x-x_0)\delta(y-y_0)\delta(z-z_0) \quad (2)$$

式中: ρ 为介质电阻率, u 空间任一点处电位, I 为激发电流, δ 为狄拉克函数, x, y, z 为空间任意点坐标。由于树干截面电阻率成像为二维分布,故 z 坐标可不予考虑。通过式(2)求取各布置电极点电位,进一步获得两两测试电极之间的电位差。然后利用电场的反演获取介质电阻率,其反演问题^[11-12]可表示为

$$S(m) = (d_{\text{obs}} - g(m))^T W_d (d_{\text{obs}} - g(m)) \quad (3)$$

式中: m 为反演电阻率参数, $S(m)$ 为残差矩阵, d_{obs}

为实测电位差矩阵, $g(m)$ 为理论电位差矩阵, W_d 为权系数矩阵。反演过程中,需将测试截面划分成有限元网格^[13],给定边界条件与电阻率网格模型参数,并且设置反演终止条件。由于反演数据体巨大且残差矩阵 $S(m)$ 求取网格节点偏导数时受泰勒级数展开式的阶数限定,使得实测与理论数据体之间存在较大的拟合误差。为使模型参数求解趋于稳定收敛过程,设定模型修正参数为 Δm ,其求解算法为

$$(J^T W_d J + \lambda I) \Delta m = J^T W_d (d_{\text{obs}} - g(m)) \quad (4)$$

式中: $J = \partial g(m) / \partial m$ 为灵敏度矩阵或称雅各比矩阵, λ 为阻尼因子。通过多次反演迭代,修改网格单元内电阻率参数,减小实测与理论数据体之间拟合误差,最终求取各网格单元反演电性数据。

并行电法采集数据为测试区域空间电场分布的特征值,含有 0 次场、1 次场和 2 次场电位值,利用电阻率反演软件可计算测试空间电阻率。由于并行电法数据为同步测试,避免了不同时间观测误差的干扰,使得电阻率反演可达到极小拟合差,从而给出高分辨率的反演电阻率图像。

1.3 树干电性异常解释

树木在生长过程中,若无环境及外来因素干扰,树干内部通常无孔洞等异常结构,且树干本身存在一定的含水率,因此其总体导电性均匀,电阻率值大小相近。当树木受病害等不良影响,致树干内部形成孔洞,孔洞内充满空气介质,将导致孔洞与树干内部其余介质形成较大电阻率差异;因此,通过对树干任意截面进行电阻率测试,分析电阻率值差异性可判断林木内部的结构特征,进一步诊断其健康状况。

为能准确识别测试对象,首先针对无病害特征的树干截面,进行直流电 CT,分析其内在电阻率值变化特征,并以该电阻率值作为背景电阻率值。其次,对存在孔洞的树干截面进行检测,获取异常电阻率值,分析其相对背景电阻率值的变化情况,从而判断高阻体孔洞分布特征。再次,对背景截面进行冷着色,对于高阻特征明显区域赋以暖色调。通过冷暖色调的鲜明对比,可准确、清晰识别孔洞平面形态特征;对存在孔洞区域的多个截面,进行追踪测试,可判断孔洞在树干内部的立体分布。

2 树干模型试验

2.1 试验模型

选取安徽理工大学东校区内 1 棵法国梧桐 (*Frimiana simplex*) 为试验模型。由图 1 可见:树干内部存在明显孔洞,孔口周长为 62.8 cm,直径约为

20 cm。借助工具沿该孔口伸入,可知该孔洞沿孔口往上,洞径逐渐缩小,洞深 145 cm,洞体内部截面近似圆形。

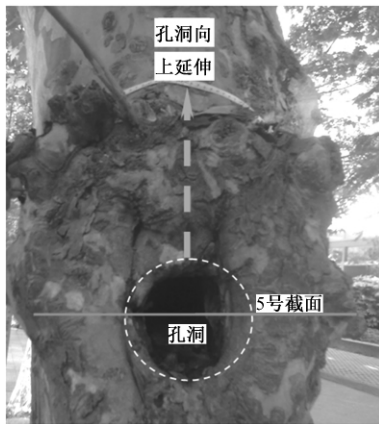


图1 测试模型

Fig. 1 Tree model of detection

为能合理设计测试系统,选取 5 个测试截面,相对孔口、沿孔洞向上延伸方向,布置测试截面依次编号为 5、4、3、2 和 1,其中:5 号截面位于孔口处,即为 0 cm,4、3 和 2 号截面垂直距离孔口分别为 45、90、135 cm,包含孔洞;1 号截面距离孔口 180 cm,不包含孔洞(作为正常截面)。每个截面周长约为 144 cm,为方便后续检测效果评价,将其视为圆形处理,直径约为 45 cm。

2.2 数据观测

为确保成像精度,分别针对每个待测截面,用特制的铜针沿树干表层布置 1 个电极圆环,电极间距为 3 cm(弧长),共 48 个电极(图 2)。具体观测过程如下:

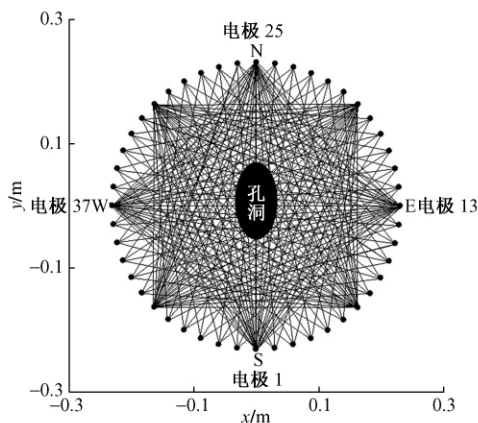


图2 试验模型电位场观测布置图

Fig. 2 Observation of potential field of test model

1) 对每个测试截面进行方位标定,树干四周分别标定为 N、E、S 和 W 点,5 个截面标定方式一致。

2) 在 S 点布置电极 1, E 点布置电极 13, N 点布置电极 25 和 W 点布置电极 37。明确方位与电极顺序,便于数据处理与解释。

3) 按照电极编号从小到大的顺序依次供电,当某一电极供电时,其他 47 个电极同步采集电位,直至 48 个电极全部完成供电,实现全场透视观测。

本试验采用并行电法仪器,应用 AM 法进行数据采集;选取 0.5 s 恒流供电,供电电压为 12 V,10 ms 间隔采样的单正供电方波。采集数据按 Pole-Dipole 装置进行解编,获得单个测试截面实测数据量按式(1)计算为 34 592 条射线数。由于该仪器采集数据具有同时性以及多次覆盖叠加的优势,使得电阻率图像更加真实合理,大大提高了视电阻率的时间分辨能力。

2.3 数据处理与分析

对解编之后的电阻率数据与电极坐标进行相应归位,并按 URF 文件格式进行重组,然后导入电阻率反演软件 AGI(Earth Imager 2D),设置反演参数,开始反演至符合反演迭代条件时,导出模型电阻率数据。数据处理针对 5 个测试截面,导入等值色标,共获得 5 个电阻率分布特征图(图 3)。

图 3a 为无孔洞截面反演电阻率拟断面图。没有孔洞的影响,树干截面内介质本身有一定的含水率,使得截面内介质总体电阻率值较为均匀,分布在 40 ~ 120 $\Omega \cdot m$,平均约为 80 $\Omega \cdot m$,截面基本为冷色,可作为该树干正常背景电阻率值,为高阻孔洞电阻率评价提供依据。

图 3b ~ e 分别为 2 ~ 5 号截面反演电阻率拟断面图。图中可见明显连续的高阻区域(图中用虚线所圈红色区),其电阻率均 $\geq 160 \Omega \cdot m$,为平均背景电阻率值的 2 倍以上。另外,该高阻区主要位于 WS 一侧,从 2 号至 5 号截面,其范围逐步扩大,其方位与标定测试孔洞方位一致,尤其是在 5 号断面中,W 一侧边界主要分布于 -0.14 ~ 0.05 m,推断边界弧长约为 20 cm,与实测孔口直径一致。

因此,综合 1 ~ 5 截面电阻率大小及其分布特征,并与实际孔洞大小、形态和方位进行对比,判定 2 ~ 5 号截面中箭头所指处高阻区域为孔洞影响区,其大小、形态及上下延伸情况与孔洞基本一致。另外,截面内其他近边界处散乱的高阻是树干表皮介质造成的。

3 结论与讨论

1) 对有和无孔洞的 5 个截面进行追踪:无孔洞截面电阻率值均匀且平均为 80 $\Omega \cdot m$,视为正常电阻率值;有孔洞截面存在一个明显且连续的高阻区,电阻率值大于 160 $\Omega \cdot m$,为正常电阻率值的 2 倍。随着测试截面距离孔口越近,高阻范围逐渐扩大,其大小、形态及内部延伸等特征与实际孔洞一致。

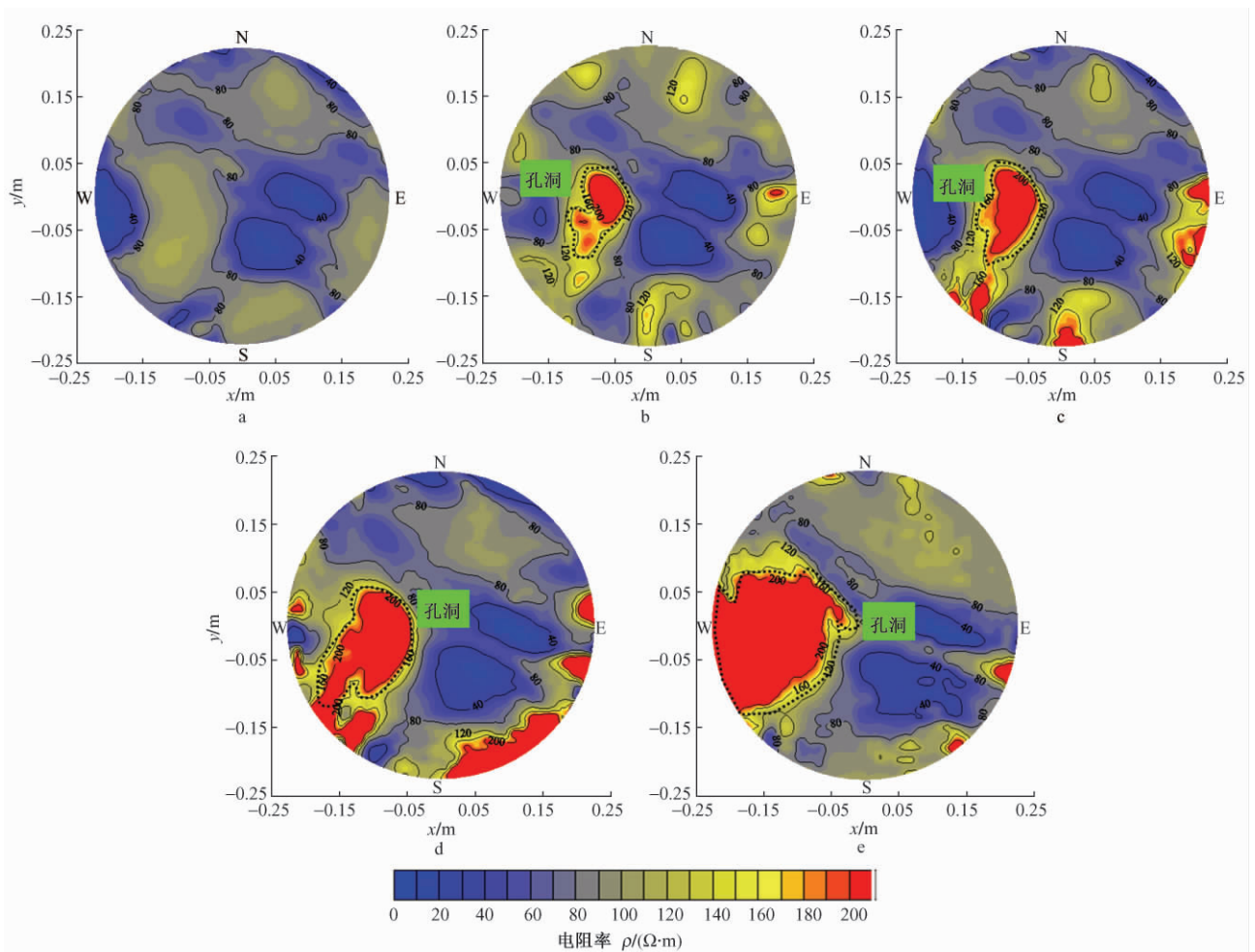


图3 试验模型反演电阻率拟断面图

Fig. 3 Pseudo-section map of resistivity of test model using inversion method

其反演图像清晰,孔洞响应特征显著。

2) 通过分析当前多种林木检测技术,尝试以介质导电性差异为物理测试基础,利用直流电法CT技术,通过并行数据全场观测、反演及成像,直观表达孔洞大小、形态等发育特征,为林木体检提供一种新的方法。

参 考 文 献

- [1] 冯海林,李光辉,方益明,等. 应力波传播模型及其在木材检测中的应用[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(6): 1490-1493.
- [2] 杨慧敏,王立海. 基于超声波频谱分析技术的木材孔洞缺陷无损检测[J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(8): 30-32.
- [3] 王欣,申世杰. 木材无损检测研究概况与发展趋势[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(增刊1): 202-205.
- [4] 戚大伟,牟洪波. 人工神经网络在木材缺陷检测中的应用[J]. 森林工程, 2006, 22(1): 21-23.
- [5] 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.
- [6] 傅良魁. 应用地球物理学电学原理[M]. 北京:地质出版社, 1988: 1-60.
- [7] 刘盛东,张平松. 分布式并行智能电极电位差信号采集方法: 中国, z1200410014020. 0[P]. 2006-07-26.
- [8] 吴荣新,方良成. 采用网络并行电法仪探测采煤工作面无煤区[J]. 安徽理工大学学报:自然科学版, 2007, 5(2): 6-9.
- [9] 胡水根,刘盛东. 电法勘探中并行数据采集与传统数据采集效率的比较研究[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(2): 612-617.
- [10] SHIMA H. 2-D and 3-D resistivity image reconstruction using alpha centers[J]. *Geophysics*, 1992, 57(10): 1270-1281.
- [11] ZHANG J, MACKIE R L, MADDEN T R. Three-dimensional resistivity forward modeling and inversion using conjugate gradients[J]. *Geophysics*, 1995, 60(5): 1313-1325.
- [12] LOKE M H, BARKER R D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion[J]. *Geophysical Prospecting*, 1996, 44: 499-523.
- [13] 任政勇,汤井田. 基于局部加密非结构化网格的三维电阻率法有限元数值模拟[J]. 地球物理学报, 2009, 52(10): 2627-2634.

(责任编辑 李文军)