



木竹功能材料科学技术丛书

立木危险性评价 与修复技术

傅 峰 梁善庆 林兰英 著
张齐生 主审



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

木竹功能材料科学技术丛书

立木危险性评价与修复技术

傅 峰 梁善庆 林兰英 著

张齐生 主审

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以立木内部缺陷无损检测与评价为主题,以立木缺陷可视化无损诊断、危险性评价及修复技术为重点,系统阐述了立木缺陷诊断及原理、应力波断层成像数学理论及传播规律、树干内部缺陷诊断彩色二维和三维图像构建方法;探究了基于缺陷可视化诊断技术的树干危险性评价理论及模型;详细叙述了应力波断层成像技术应用于胡杨、泡桐、古树国槐和油松诊断与评价实例及树干缺陷修复技术,具有科学的理论知识和丰富的应用实例。

本书可为林业高等院校、林业科研单位、城市绿化单位及公园景区等从事木材科学与技术、森林工程、城市园林管理的研究工作人员和相关专业师生提供科学技术参考。

图书在版编目(CIP)数据

立木危险性评价与修复技术/傅峰,梁善庆,林兰英著.—北京:科学出版社,2017.6

(木竹功能材料科学技术丛书)

ISBN 978-7-03-053097-4

I. ①立… II. ①傅… ②梁… ③林… III. ①立木-缺陷检测
IV. ①S758.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 125418 号

责任编辑:张会格 / 责任校对:李 影
责任印制:张 倩 / 封面设计:刘新新

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017 年 6 月第一次印刷 印张:10 3/4

字数:255 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

立木树干内部存在腐朽、空洞、开裂等缺陷,严重影响木材质量,从而导致利用价值降低,同时城市绿化树、古树等存在的内部缺陷使树干易于折断或倒塌,造成景观和文化上的双重损失,因此采用无损检测技术对树干内部缺陷进行诊断与评价,具有现实必要性。采用无损检测技术对立木树干缺陷诊断研究,包括射线、超声波、应力波、电阻抗、微波等方法。然而传统检测结果仅局限于数据分析,无法对树干内部缺陷进行直观诊断与评价。随着成像技术的发展,射线断层成像、超声断层成像、应力波断层成像、电阻(或电容)断层成像、雷达成像等技术逐渐被引入到立木缺陷检测中,使缺陷诊断能以二维或三维图像方式显示,不再局限于数据表达方式。

采用图像直观诊断方式对立木内部腐朽、开裂诊断研究较少,尤其是采用先进的断层成像技术对树干内部缺陷进行诊断与评价。断层成像技术的应用为缺陷诊断提供了直观的诊断依据,与传统的木材缺陷检测技术相比是一次技术的跃进。基于应力波图像重构技术诊断木材内部缺陷是近年来国际上的一个新的研究热点和攻关方向。国内许多科研院所的科研人员也在这一领域开展了广泛深入的研究,并取得了较好成果,但综合目前国内外的研究现状,该技术在应用中还存在诸多问题。本书作者从2005年开展树干内部缺陷诊断技术研究,主要是基于应力波无损检测技术进行理论探讨、波传播轨迹分析、缺陷图像构建、测试验证、树干缺陷诊断及危险性评价,形成了较为系统的诊断与评价技术研究体系。

由于立木内部结构的特殊性,采用无损检测技术诊断内部缺陷,需要一定的理论基础借鉴和参考,所以作者有志于撰写本书。全书共有八部分内容,第一、二章介绍了现今应用于立木无损检测技术种类,重点阐述基于应力波无损检测技术及其断层成像原理。第三章阐述应力波在木材内部传播规律及波前形态模拟,在第四章中阐述应力波断层成像技术原理及缺陷诊断方法,并在第五章分析了缺陷诊断的影响因素。第六、七章为树干危险性评价及健康状况诊断,主要对泡桐、古树国槐和油松进行树干内部缺陷诊断与评价,第八章为古树名木的修复技术。

本书的完成,感谢全书参考文献的所有作者,为本书提供翔实的资料。撰写本书,反复审核,尽量减少不妥,鉴于作者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请读者提出宝贵意见。

作 者

2016年10月25日

目 录

前言	
第一章 立木无损检测技术及现状	1
第一节 立木内部缺陷无损检测技术	2
一、木材阻力仪	2
二、超声波无损检测技术	3
三、电阻断层成像技术	5
四、地质雷达检测技术	6
五、应力波无损检测技术	7
第二节 应力波无损检测技术原理及现状	10
一、应力波基础理论概述	10
二、国外研究现状	12
三、国内研究现状	15
第三节 立木无损检测问题及趋势	16
主要参考文献	17
第二章 应力波断层成像原理及算法概述	20
第一节 断层成像的数学理论	20
一、Radon 变换及其逆变换	20
二、傅里叶变换	21
第二节 断层成像图像重构算法	22
一、线性反投影算法	22
二、代数重构算法	23
三、同步迭代代数重构算法	25
四、Landweber 迭代算法	25
第三节 应力波断层成像图像重构步骤	26
主要参考文献	27
第三章 树干内部应力波传播轨迹	28
第一节 射线追踪概述	28
一、惠更斯原理	29
二、费马原理	30
三、互换原理	30
第二节 树干断面应力波传播规律	31
一、不同角度传播规律	31

二、不同空洞直径传播规律.....	33
三、髓心到树皮传播规律.....	38
四、不同年龄传播规律.....	39
第三节 应力波传播轨迹.....	41
一、胡杨树干断面应力波波前模拟.....	41
二、杨树树干断面应力波波前模拟.....	45
第四节 单路径应力波快速检测.....	52
一、单路径应力波立木检测与评价.....	52
二、不同高度单路径应力波检测与评价.....	53
三、单路径应力波圆盘检测与评价.....	56
四、单路径应力波多点检测与评价.....	58
主要参考文献	59
第四章 应力波断层成像技术诊断缺陷.....	61
第一节 应力波断层成像基本理论.....	61
一、波动方程原理.....	62
二、成像区域网格剖分及理论走时计算.....	62
第二节 应力波断层二维图像检测.....	64
一、ARBOTOM [®] 测试方法.....	64
二、SoT 系统测试方法	67
第三节 胡杨缺陷 ARBOTOM [®] 断层成像诊断.....	70
一、二维断层成像.....	70
二、三维断层成像.....	75
三、多路径传播诊断.....	77
第四节 杨树缺陷 SoT 系统断层成像.....	81
一、断层成像不同程度图像重构.....	81
二、二维断层成像.....	81
主要参考文献	84
第五章 树干缺陷诊断准确率影响因素.....	86
第一节 含水率影响.....	86
第二节 传感器数量影响.....	89
第三节 传感器空间分布影响.....	93
第四节 应力波断层图像与硬度关系.....	98
一、硬度二维图像与断层图像比较.....	99
二、硬度三维图像.....	102
主要参考文献	103
第六章 树干缺陷危险性评价.....	105
第一节 检测缺陷面积与实际缺陷面积关系模型.....	105

一、模型引入.....	105
二、模型应用.....	106
第二节 树干强度损失及理论.....	107
一、树干强度损失及计算理论.....	107
二、树干强度损失模型.....	110
第三节 危险性评价.....	112
一、断层图像危险性评价.....	112
二、Wagener、Coder 和 Mattheck 模型评价.....	112
主要参考文献	115
第七章 树干健康状况诊断与评价.....	117
第一节 泡桐立木缺陷诊断与评价.....	118
一、检测方法.....	118
二、健康断面诊断.....	119
三、小面积或轻度腐朽诊断.....	121
四、严重腐朽诊断.....	121
五、树干断面波速规律与诊断.....	124
第二节 古树树干健康状况诊断与评价.....	128
一、检测方法.....	128
二、古树国槐断层成像诊断.....	129
三、古树油松断层成像诊断.....	140
主要参考文献	144
第八章 古树名木的修复技术.....	145
第一节 我国古树名木的现状.....	145
一、我国古树名木资源及保护现状.....	145
二、古树名木生长衰退的原因.....	146
三、古树名木主要复壮修复措施.....	147
四、古树名木保护和复壮的意义.....	150
第二节 古树名木的修复技术.....	151
一、古树树洞的类型及成因.....	151
二、古树树洞的修补原则.....	152
三、古树树洞的修补技术.....	152
四、古树树洞的修补材料.....	154
第三节 古树名木修复效果评价.....	156
一、材料和方法.....	156
二、不同程度断层成像图像重构.....	157
三、修复前和修复后断层图像对比.....	159
主要参考文献	160

第一章 立木无损检测技术及现状

我国 2014 年森林面积已达 2.08 亿 hm^2 ，森林覆盖率 21.63%，森林蓄积 151.37 亿 m^3 。人工林面积 0.69 亿 hm^2 ，蓄积 24.83 亿 m^3 ，人工林面积居世界第一。但林分结构主要以纯林为主，由于树种结构单一等原因，林木重大病虫害常年暴发成灾，在天然林中由于人为干预过多，大部分天然林退化为次生林，林分抗逆和抵御能力变差，造成树干内部存在不同的缺陷。古树名木是人类历史的文化遗产，堪称“活的文物”、“国之瑰宝”。根据《全国古树名木普查建档技术规定》，古树是指树龄在 100 年以上（含 100 年）的树木，凡树龄在 500 年以上的树木为一级古树，300~499 年为二级古树。名木是指珍贵稀有的、具有重要历史文化价值、纪念意义及科研价值的树木^[1]。我国是文明古国，历史上存留下来的古树名木众多，古树名木多是树龄较大的过熟林木，在漫长岁月中饱经沧桑，生势已趋衰弱。几乎所有古树名木都有不同程度的损伤，主要有枯枝腐朽、空心、断裂等，这些危害侵蚀着古树名木，造成无可挽回的极大损失。世界上许多国家已开始了对古树名木^[2,3]、城市景观树的检测^[4]、保护和修复等研究工作^[5]，我国历史悠久、地域广阔，需要保护和修复的古树名木种类和数量众多。

无损检测，又称为非破坏性检测，是利用材料的不同物理力学或化学性质，在不破坏目标物体内部及外观结构与特性的前提下，对目标物体相关特性（如形状、位移、应力、光学特性、流体性质、力学性质等）进行测试与检验，包括对各种缺陷的测量，并由无损探伤经无损检测、定量检测、材料的无损表征进展到了无损评价。经过近 70 年的发展，无损检测技术如今已涉及木材领域的各个方面，如活立木性质检测与评价、原木分等与锯解、板材性质评价与分等、人造板及新型木基复合材料性质评价、古树名木诊断、古建筑评价等。采用无损检测技术对立木树干缺陷诊断研究包括射线、超声波、应力波、电阻抗等方法。基于应力波研发的成像技术是通过采集波传播时间根据一定的图像重构算法对树干断面进行图像重构，能直观诊断内部腐朽、开裂和空洞等缺陷情况。国外研究应用应力波断层成像技术对立木内部缺陷诊断与评价已经取得较多成果，并相继开发了仪器应用于实际检测中，但在缺陷检测中还存在检测精度不够、缺陷种类判别困难及腐朽程度不易区分等诸多问题。为此国外研究者对图像重构算法进行改进的同时采用不同的检测方式相结合来提高诊断准确性。我国在诊断立木内部缺陷研究上起步较晚，近年研究中取得了一定成果，但与德国、美国、匈牙利等掌握立木树干缺陷诊断关键技术国家还存在明显差距。传统检测结果仅局限于数据分析，无法对树干内部缺陷进行直观诊断与评价，随着成像技术的发展，射线断层成像、超声断层成像、应力波断层成像、电阻（或电容）断层成像、雷达成像等技术逐渐被引入到立木缺陷检测中，使缺陷诊断能以二维或三维图像方式显示，不再局限于数据表达方式。因此，研究能够以图像显示树干内部缺陷是林业研究者关注的热点之一。

第一节 立木内部缺陷无损检测技术

一、木材阻力仪

阻力仪(resistograph)是通过电子传感器控制钻针测量立木或木材的钻入阻抗,利用软件快捷和精确地探测木材的内部结构,如腐朽或空洞情况、材质状况、生长状况等。主要应用于行道树、公园古树和森林危险立木的检测,立木或木材腐朽和木质缺陷的发现,树木年生长率的测量,树木或木材的木质评价,木制建筑及立柱等状态检测和年轮学研究等。一般情况针孔直径为1.5~3mm,属于微创伤检测方法。

采用阻力仪对树干内部缺陷进行诊断,根据阻力波峰的高低变化来评价木材缺陷情况,该检测方法操作简单、结果准确,适合野外立木检测使用。1996年 Rinn 等研发阻力仪设备用于研究木材内部特性,该设备能满足立木、结构材、木质电杆等野外检测与评价工作^[6]。此后,开发的阻力仪主要包括 Sibert DDD 200、RESISTOGRAPH 和 DENSITOMAT-400 三种设备及其后续改进型号,前两种设备比较类似,钻孔直径在1.5mm左右,钻深范围30~150cm。DENSITOMAT-400设备与前两种相比具有更快的钻速,但在单位长度(钻深)所记录的数据较少,其钻孔直径为1.27mm,可钻深20~40cm^[7]。通过检测树干的力学性能与阻力仪结果比较发现,阻抗值大于树根实际强度,径向阻抗曲线与断裂强度存在差异,说明仅使用断裂强度与阻抗曲线进行对比还不能够准确数量化分析阻抗变化,但也有研究认为径向断裂韧性与阻抗曲线存在高的相关性^[8]。阻力仪不仅能检测腐朽的存在,还可用于预测腐朽拓展区,然而利用阻力仪检测后在树干留下的钻孔使部分研究者认为腐朽菌易于侵入木材内部,加快木材腐朽出现和扩展。根据研究提出的疑问,2006年 Werber 对3种树种被阻力仪检测8~10年后遗留钻孔是否造成木材腐朽菌加快进入木材内部做了详细研究分析。结果发现树干内部腐朽菌有部分进入钻孔内部,但由于木材自愈作用使腐朽菌进入程度不深,没有对木材引起更严重的腐朽,此外也发现外部腐朽菌并未进入钻孔内部,说明阻力仪可用于立木内部缺陷检测,尽管属于微创伤检测方式,但是所留下的钻孔对立木健康无危害。

为了了解和验证木材腐朽检测结果的准确性,部分研究者对阻力仪的阻抗曲线与木材密度相关性进行对比分析,在研究橡树和榆树阻抗曲线和密度间关系中发现,健康材橡树阻抗钻深与密度符合程度为85.5%,榆树为100%^[9]。由于阻抗曲线与密度变化具有高度相关性,用于检测木材腐朽可提供准确的评价结果。在阻抗曲线振幅与密度存在相关性研究中,同一家系火炬松的研究结果认为阻抗曲线振幅与密度存在密切相关,家系间相关系数达0.92,说明阻力仪能够快速评价树木家系中密度值,据此选择树木进行改良培养^[10]。在仪器开发方面,德国 IML 根据树干直径大小主要生产3种型号阻力仪,分别为 IML-RESISTOGRAPH F300S/400S/500S。德国 Rinntech 公司生产的阻力仪分别为 RESISTOGRAPH[®] 4303-P/4453-P/4453-S 3种型号(图1-1和图1-2)。

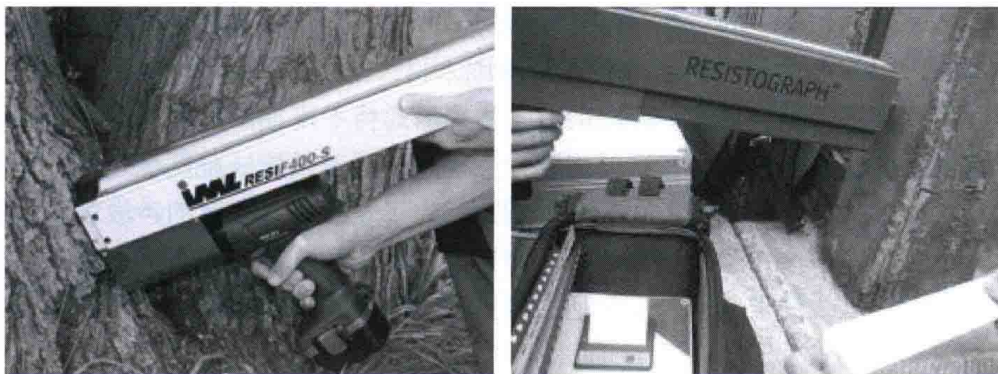


图 1-1 德国 F400S 型和德国 RESISTOGRAPH® 阻力仪

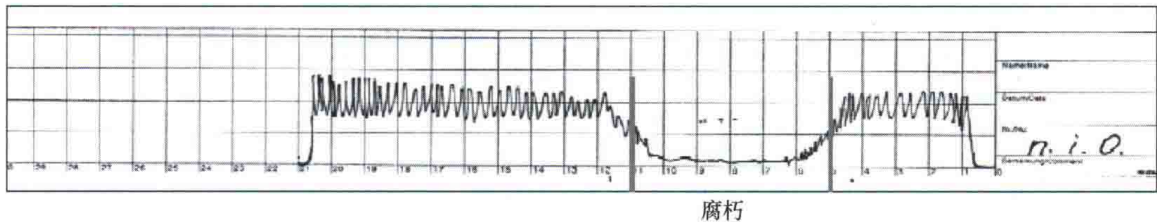


图 1-2 阻力仪检测结果示意图

二、超声波无损检测技术

超声计算机断层成像技术 (ultrasonic-computed tomography) 始于 20 世纪 70 年代后期, 这一技术的早期完全是模仿 X 射线断层成像技术, 即假设超声波和 X 射线一样, 在物体内部是直线传播的, 然后利用发射器到接收器之间的时间延迟或振幅衰减来重构物体内部的声速 (折射系数) 或吸收特性参数^[11]。木材的变异性、各向异性和非均质性增加了信号提取、识别、图像重构准确性的难度, 使超声断层成像运用到木材检测成为一个具有挑战性的研究领域。声波在树干断面传播规律以及声波与树干模型成像原理的研究给木材研究者提供基础数据, 通过波速检测或使用声波信号可对木材腐朽进行检测与评价。

1999 年超声波断层成像技术被用于木材缺陷检测中^[12], 研究人员把 Prony 演算和傅里叶变换方法成功应用于低频率脉冲震动条件下立木腐朽诊断研究中, 并使用多传感器检测冷杉立木内部腐朽。在引入模态分析结合离散傅里叶转换方法对木材声波共振频率进行分析发现, 频谱均趋于正弦曲线, 在健康立木中通过敲击共振获得相同的频谱结果, 然而腐朽立木时域低于健康立木且频谱随腐朽程度不同存在差异。但研究认为健康立木分析结果还存在较大的离散性, 使健康与腐朽立木时域部分重叠, 因此还需引入更多的参数去进一步区分健康与腐朽立木^[13]。采用超声波断层成像技术对城市景观树进行检测, 依据成像结果对树干内部缺陷进行可视化识别, 对立木的危险性及稳定性进行了评价, 研究认为木材的机械性能可以使用声波层析成像技术准确定位立木腐朽部位、判断其面积大小和形状, 同时发现传感器与树干部位的连接、木材各向异性、声波衰减和传感器空间分布都对检测结果产生影响^[14]。对受白腐菌感染的立木进行检测, 结果表明, 通过使用频率为 1MHz 的传感器接收检测信号能够取得立木内部腐朽二维和三维图像。

尽管超声波断层成像能够对立木缺陷有效诊断,但其影响因素较多导致结果不确定性以及缺陷信息分辨率低等^[15]。在研究健康与缺陷木材内部超声波传播规律以及木材纹理、波形对检测结果的影响基础上,采用 1MHz 传感器对树干内部不同方向超声波传播时间重构二维图像方法进行研究,尝试使用不同频率超声波来重构缺陷图像^[16]。超声波在木材内部传播涉及声波的折射、散射和衰减问题,为了发展简单有效的声波成像重构运算方法,通过收集超声波在木材传播过程中声阻抗、声速和衰减作为重构参数对木材内部缺陷成像分析,以线性理论作为变换所取得图像的效果不明显,建议使用非线性理论对声波参数进行重构变换^[17],超声波断层成像检测木材腐朽及断层图像如图 1-3 所示。

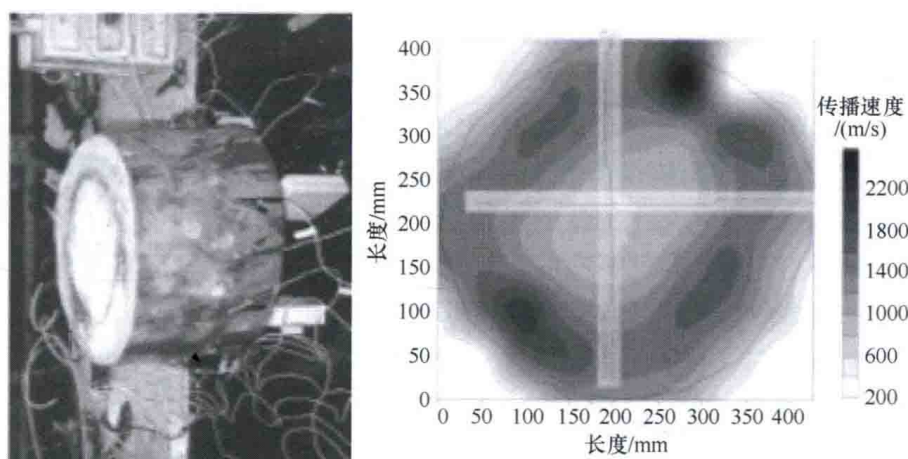


图 1-3 超声波断层成像检测缺陷及断层图像

国外研究者对超声波断层成像技术在立木内部检测中的研究不断深入,从波速与缺陷关系到成像算法改进,不断积累立木检测基础数据和可视化方法。应用范围有人工林、城市景观树、大径级原木及古建筑,在研究的同时不断改善和提高该技术的准确性。

采用声波对木材内部腐朽或空洞的研究与评价研究已经得到我国林业研究人员的关注。在超声波技术检测研究方面,研究人员使用 HSC-4 型超声波检测仪对大兴安岭采伐的针叶材进行检测,发现声速、振幅、频率能够反映木材内部缺陷存在部位,认为木材密度、孔洞大小及数量对超声波和应力波的传播参数和动态弹性模量都有一定的影响,两种波都可用来判断木材内部缺陷和对木材性质进行评价。但是,通过对比研究发现,超声波和应力波在对木材内部缺陷检测时,两种波检测的灵敏度和准确度存在差异^[18, 19]。超声波检测探头的直径、使用的频率以及耦合剂对木材缺陷检测准确性都具有显著影响,同时研究认为缩小超声探头直径和选用适当频率的超声探头可提高对缺陷检测的准确性,使用橡胶垫作为耦合剂在检测中能取得良好效果。超声波功率谱在不同孔径空洞的木材试件中谱峰位置和谱峰高度与木材空洞大小之间存在相关关系。对于超声波的传播而言,木材与相邻空洞之间的声阻抗差异不同,从而导致超声波的散射情况不尽相同,并出现不同情况的干涉,通过分析超声功率谱变化情况可以实现对木材内部空洞缺陷无损检测^[20]。使用多通道超声波断面影响技术,评价柳杉内部不同大小空洞,探讨不同路径波速和相对速度损失率与空洞直径间的关系,结果显示径向方向空洞直径残余比值与波速有高度相关性,决定系数可达 0.94。多通道超声波断面影像技术评估人造孔洞发现

在孔洞与断面比值为 2.7% 以上时, 都能显示出孔洞的位置和腐朽程度^[21]。

如何改进成像结果, 与实际树木断面缺陷情况更趋于一致是现今研究者努力的方向, 通过研究木材断面性质来分析波速变化或对比成像结果已开展研究。木材内部腐朽后使密度或硬度值变化, 声波在断面传播时间的快慢与密度存在关系, 但与硬度值关系不明显, 在成像与木材性质之间建立相关性还需深入研究。

三、电阻断层成像技术

20 世纪 80 年代中期形成和发展起来的电阻断层成像技术属于过程层析技术的一种, 是以两相流或多相流为主要对象的过程参数二维或三维分布状况的在线实时监测技术。电阻断层成像技术 (electrical resistance tomography, ERT) 是电阻抗断层成像技术 (electrical impedance tomography, EIT) 的一种简化^[22]。ERT 技术的物理基础是不同的电介质具有不同的电导率分布, 判断出场内的电导率分布便可知电介质的分布情况, 其图像重构是由测量到的边界电压重构出对象内部电阻率分布的过程, 是最终实现 ERT 技术可视化测量的过程。目前, 主要是二维图像重构, 但是已经出现了三维的图像重构算法。对于三维 ERT 的成像, 由于涉及更多的测量和更大的灵敏度矩阵, 因此在成像模型和成像算法的选择上更具有挑战性。

ERT 技术与传统的过程参数检测方法相比具有诸多突出优点^[23]。

- (1) 能提供在线连续的二维或三维可视化信息。
- (2) 可提取大量被测对象的特征参数。
- (3) 多点、界面分布式、非侵入式、无放射性测量, 不破坏、不干扰物场。
- (4) 结构简单, 成本低。

采用电阻仪对立木缺陷研究可追溯至 1972 年, 电阻仪检测立木变色和腐朽发现脉冲电流与立木内部含水率和矿物成分间存在相关性, 在纤维饱和点之下, 木材阻抗主要与含水率有关, 而在纤维饱和点之上, 阻抗主要与钾和钙离子浓度有关。1974 年 Shigo 采用 Shigometer 设备对树干内部腐朽进行研究, Shigometer 设备的钻条为两条外包绝缘体的铜线缠在一起, 直径 2.4mm, 设备还包括安培显示计。当钻条进入木材内部后, 由于木材内部腐朽导致电阻变化, 通过显示仪记录阻抗大小来对腐朽情况进行判断。木材变色或腐朽后引起电阻变化, 但由于腐朽情况复杂且腐朽种类不一致增加了研究的困难性, 木材腐朽前与腐朽后电阻间的变化程度和相关性是识别立木内部腐朽的关键, 通过研究健康材与腐朽材阻抗变化情况能够对腐朽是否存在及腐朽程度进行诊断^[24]。

木材腐朽影响了木材内部含水率和密度的变化从而改变了木材的电阻性质, 因此电阻被认为是能够检测木材腐朽的参数之一。据此通过实验室与野外实验相结合采用多电极检测方法检测木材腐朽, 研究发现电阻断层成像能够对立木腐朽定位, 但也存在缺点, 如电极接触点连接不稳定影响结果稳定性, 电极位置需要准确地连接。对于接触点的不稳定性可通过检测电容率来代替电阻率, 然而电容敏感程度低于电阻, 为了克服这些缺点可找其他功耗因素作为参数并提高仪器的硬件和软件条件。把四点阻抗法应用于立木腐朽检测中, 当低频交流电通过树干时测量检测点间的感应电压变化, 并计算通过树干区域有效电阻率来对内部缺陷进行评价, 通过四点阻抗法检测 300 多株云杉立木内部腐

朽结果认为此方法能够对立木腐朽准确评价。其计算公式如下^[25]:

$$\rho = \frac{\Delta V A}{I l}$$

式中， ρ 为有效电阻率； ΔV 为电压差异值； I 为电流； l 为检测点间距离； A 为电流通过树干的断面面积。

然而研究者同时指出四点阻抗法不能提供腐朽部位、大小、形状信息，为了实现腐朽检测结果的可视化，ERT 被引入到立木缺陷识别研究与应用中。德国 Argus Electronic GmbH 生产了电阻树木断面画像装置 (PiCUS TreeTronic) 能够通过彩色二维图像显示树干内部缺陷信息，成像方法与其他断层成像技术类似，但使用的是电阻值来进行图像重构 (图 1-4)。采用多频复电阻率法 (complex resistivity, CR) 测量立木内部电阻率变化情况，使用频域范围在 1kHz 到 1MHz 对比纵向、径向和弦向电阻变化情况，分析不同频率范围与木材各向异性间的关系，发现纵向电阻值低于径向和弦向，木材的各向异性不仅影响电阻值，也对相位存在影响。在研究电阻在木材内部变化情况基础上，进一步通过计算机可视化对立木内部缺陷进行图像重构，取得了良好效果^[26]。多频复电阻率仪装置见图 1-5。

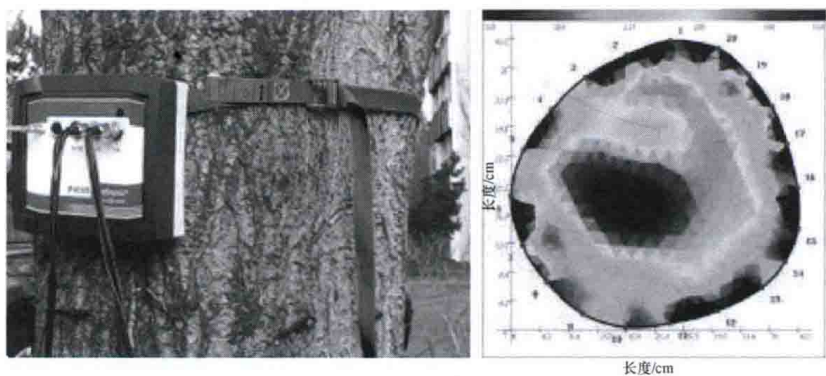


图 1-4 德国 Argus Electronic GmbH 生产的电阻树木断面画像装置

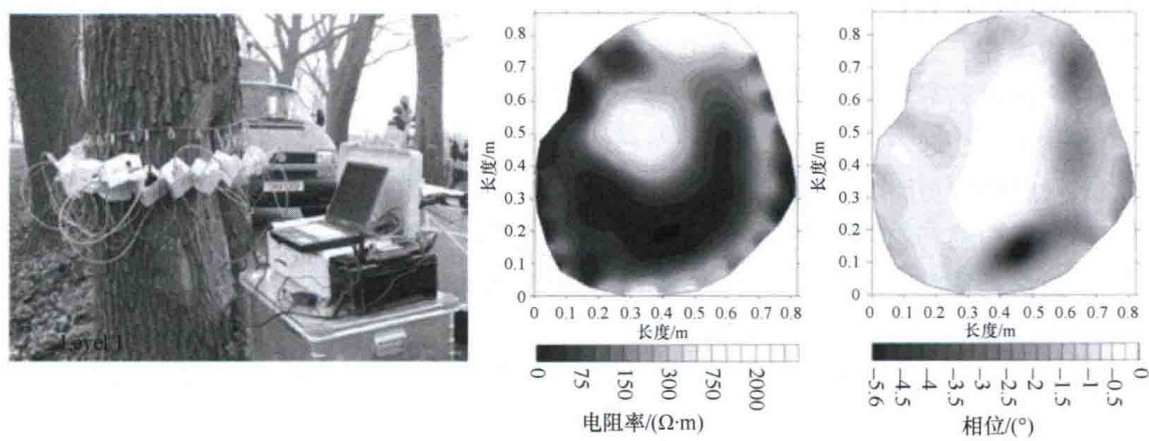


图 1-5 德国 BAM 生产的多频复电阻率仪

四、地质雷达检测技术

地质雷达或探地雷达 (ground penetration radar, GPR) 是一种用于地表下结构和埋

设物探测的高分辨率表层穿透雷达。它利用电磁波对地表或建筑物的穿透能力，从地表向地下发射某种形式的电磁波，电磁波在地下介质特性变化的界面发生反射，通过接收反射回波信号，根据时延、形状及其频谱特性等参数解释目标深度、介质结构及性质。在对回波数据处理的基础上，应用数字图像的恢复与重构技术，对目标进行成像处理，从而达到对目标真实和直观的重现。探地雷达技术在国外起步较早。1904 年德国人 Hulsmeye 首次尝试用电磁波信号来探测远距离地面物体。1910 年，Leimbach 和 Lowy 在德国申请了利用电磁波来探测埋藏物体方法的专利。1926 年，Hulsenbech 指出介电常数不同的介质交界面会产生电磁波反射，该结论成为探地雷达研究领域内的一条基本理论根据。20 世纪 70 年代以来，由于高速脉冲形成技术、取样接收技术及计算机技术的飞速发展，探地雷达技术得到迅速发展。

在立木检测研究中，由于地质雷达电磁波对木材的电导和电容性质较为灵敏，研究者把该技术应用到立木树根及树干内部状态检测研究。雷达波在健康树干断面传播没有形成反射波，当腐朽或空洞存在时雷达波遇到腐朽区域时被反射，雷达波在树干内部传播情况如图 1-6 所示。1989 年 Miller 等研究使用单天线（频率 1500MHz）对立木缺陷研究，2002 年 Mucciardi 申请了采用雷达信号检测立木内部腐朽的专利，使用频率在 500~1500MHz 采集通过立木的脉冲雷达信号进行傅里叶变换后对内部腐朽进行评价。采用频率 1500MHz 能够检测埋地深 50cm 直径为 0.5cm 的树根状况^[27]。由于 GPR 检测具有好的重复性以及结合图像重构技术，树根内部结构图像可提供定性和定量分析，除能够完成立木树干内部缺陷诊断外，对地下部分木材缺陷也能够检测^[28, 29]。

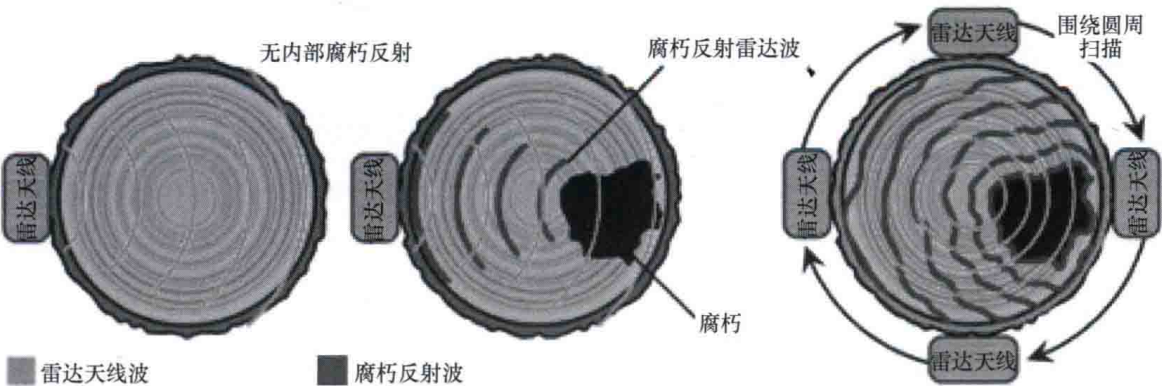


图 1-6 雷达波在健康与腐朽树干内部传播

根据树干和树根检测部位不同，研发的相应仪器主要有美国的 Tru System 树木雷达检测仪（图 1-7）和 GSSI 探地雷达树根三维成像仪（图 1-8），能够探测树干内部缺陷及地下树根分布和缺陷状态。

五、应力波无损检测技术

应力波从 20 世纪 50 年代就应用于木材性能评价中，由于应力波在木材中传播时若遇到腐朽、空洞、裂纹等界面不连续处就会发生反射、折射、散射和模式转换，因此具有对缺陷高度的敏感性。采用应力波检测立木缺陷主要分为两种检测方式。一是采用单

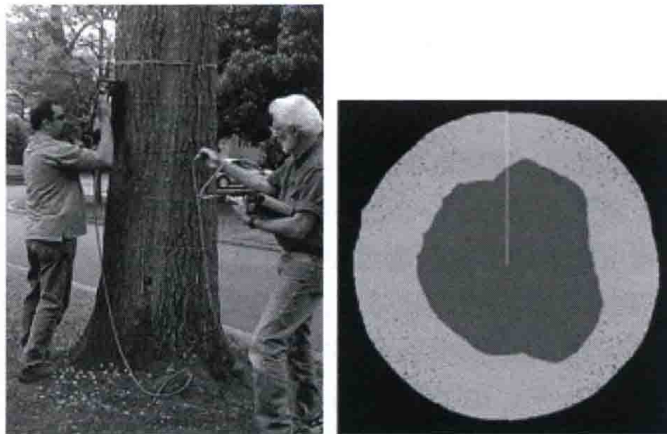


图 1-7 美国 Tru System 树木雷达检测仪及缺陷评价图

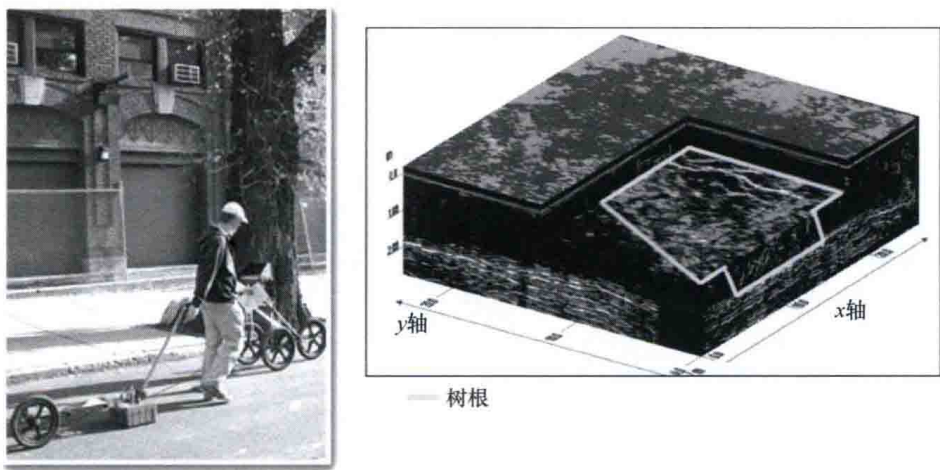


图 1-8 美国 GSSI 探地雷达树根三维成像仪及评价图

路径检测方式，使用激发和接收两个传感器检测应力波传播时间，通过传播时间或波速变化对木材缺陷进行诊断。通过大量工作及数据积累，研究者总结了单路径快速检测立木腐朽的经验公式、原理及现有设备。除了总结经验公式及介绍现有设备外，在立木性质评价中开发出新的检测仪器，如 ST300 检测仪。二是采用多路径检测方式。经过对应力波在木材中传播机制以及声波与立木性质的相关关系的大量研究，开发了应力波断层成像检测技术，此技术主要应用于立木、原木和大结构材缺陷检测与评价，能够检测木材内部开裂、空洞、腐朽等缺陷。通过采集应力波在木材内部断面不同方向的传播时间，经矩阵计算、重构把数据转换成图像形式，提供木材内部断面二维或三维图像直观地显示内部缺陷情况，应力波断层成像技术在美国、德国、匈牙利等国家已经得到研究和应用。

由于单路径检测方式存在检测区域小，缺陷位置、大小、程度等信息无法获得等缺点，国外研究人员在 1998 年开发应力波断层成像检测设备，用于立木内部缺陷可视化诊断，但使用不同数量传感器检测立木内部腐朽所得图像与实际缺陷存在差别，采用健康材应力波传播速度作为参考波速时，需考虑不同传播方向波速大小的区别。使用应力波断层成像技术对城市景观树的开裂、腐朽和空洞进行研究，结果表明，此项技术能够

快速地对树干缺陷进行有效判断，然而传感器的安装位置不准确，检测结果偏差会增大。在研究和讨论应力波断面成像技术的原理及计算方法上，通过研究人工模拟圆盘空洞的大小结果，认为图像质量受设备频率、传感器数量和数据矩阵变换方法的影响，当使用传感器为 32 个，波长为 5mm 时，能够准确检测直径为 25mm 的圆形空洞^[30]。断层成像最后使用彩色图像对缺陷进行识别，不同颜色代表木材区域波速传播情况，同一树干断面健康与腐朽间过渡程度越明显，图像颜色越能准确区分，对于腐朽诊断图像颜色变化的判断至关重要。研究发现断层图像颜色的分布与断面密度图像分布存在密切相关性，木材含水率与图像准确性也存在相关性。除了在实验应用中研究和改进检测结果外，部分研究者通过引入非线性传播理论来改进应力波断层成像结果。

应力波技术在木材中的应用发展至今，研究者根据不同需要研究和生产了许多种类的检测仪器，如 Fibre-gen ST300、Fakopp TreeSonic、TreeSonic Tude、Fakopp Resonance Log Grader (RLG)、Fibre-gen HM200、Sylvatest Ultrasonic 等。这些仪器主要用于原木或立木材性的评价，具有方便快捷、成本低、实用性强等特点。应力波断层成像技术在国外应用范围较广，包括天然林、人工林、珍贵树种、古树等。该技术使立木内部缺陷诊断实现了可视化，但缺陷可视化还面临许多问题，如检测结果与实际缺陷面积还存在误差、开裂大小的定位不准确、小面积腐朽和早期腐朽难识别等。为提高检测准确性，除改进仪器的软件和硬件、减少检测影响因子外，可与其他检测技术相结合来提高结果准确性。例如，使用目视观测法、应力波断层成像检测和树木阻力仪相结合对红松立木内部腐朽进行评价取得了良好效果。

现今投入市场的应力波断层成像设备主要有 3 种产品。

(1) 德国 Argus Electronic GmbH 生产的应力波树木断层成像诊断装置 (PiCUS Sonic Tomography)，该装置配备 12~24 个传感器，通过敲击锤激发应力波在树干内部传播，接收传感器接收传播时间，并通过矩阵转换和图像重构最终以图像形式显示树干内部缺陷状态 (图 1-9)。

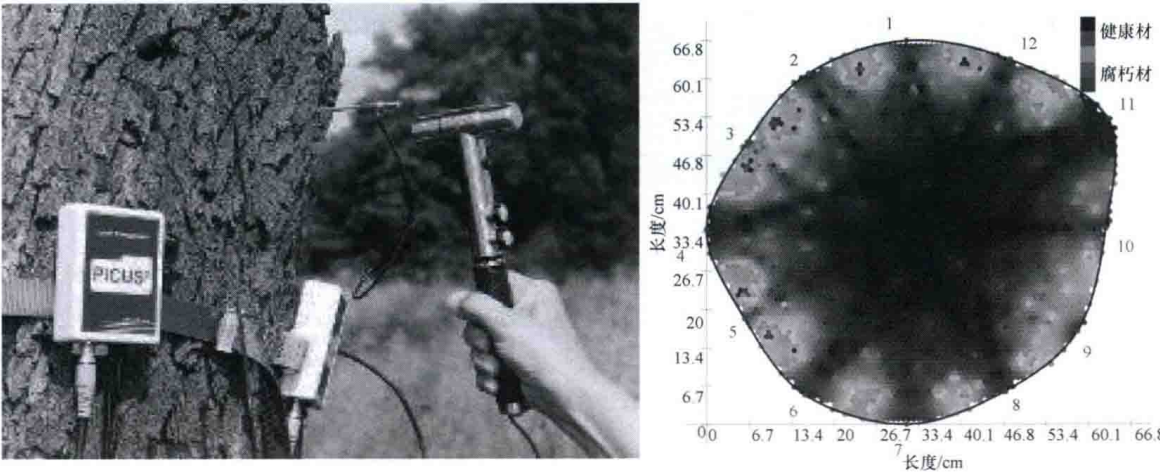


图 1-9 德国 Argus Electronic GmbH 应力波树木断层成像诊断装置

(2) 德国 Rinntech 公司开发的 ARBOTOM[®]脉冲式树木断层成像仪，是一款新型的脉冲式树木断层成像仪，利用多功能传感器发送并接收应力波信号，通过图像重构把受

损或者空洞部分通过图像显示出来。可测量树木内部腐朽、空洞和开裂等，此外可通过 Arboradix 模块探测受损树根状态（图 1-10）。

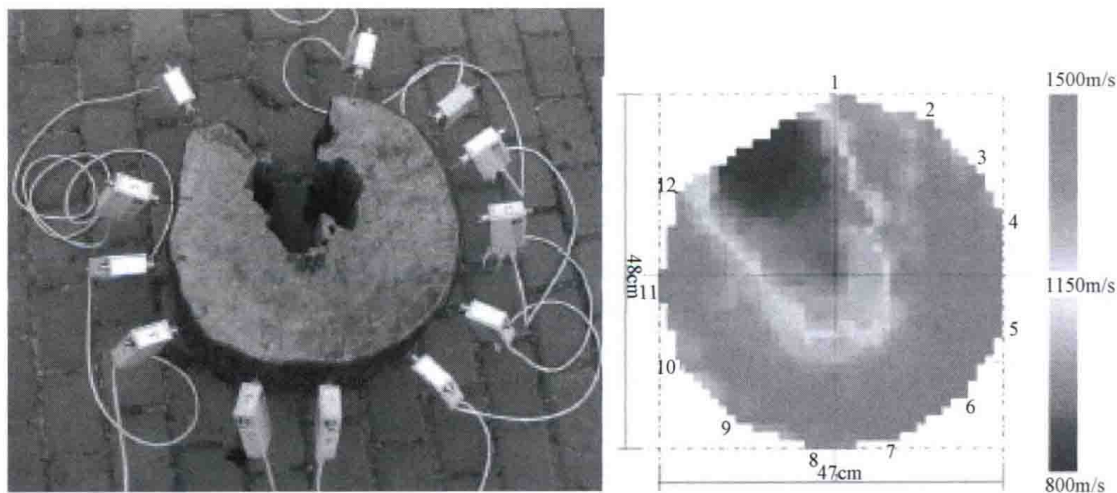


图 1-10 德国 ARBOTOM®脉冲式树木断层成像仪

（3）匈牙利 Fakopp 公司生产的 Fakopp 2D 应力波检测仪（Fakopp Acoustic Tomograph），与 PiCUS Sonic Tomography 和 ARBOTOM®原理类似，配备多通道传感器能够对内部缺陷进行二维和三维诊断，适用于立木检测工作（图 1-11）。

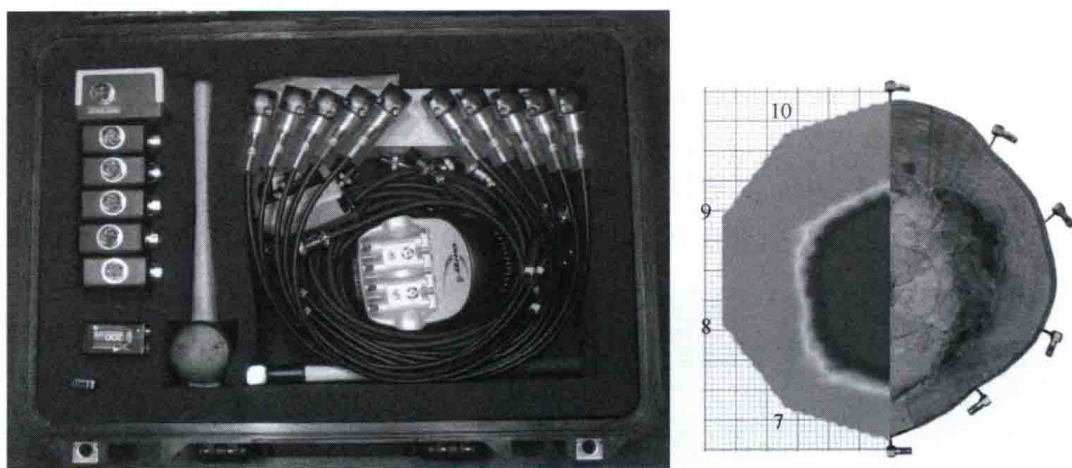


图 1-11 匈牙利 Fakopp 2D 应力波检测仪

第二节 应力波无损检测技术原理及现状

一、应力波基础理论概述

应力和应变扰动的传播形式，在可变形固体介质中机械扰动表现为质点速度变化和相应的应力、应变状态变化。应力、应变状态的变化以波的方式传播，称为应力波。通常将扰动区域与未扰动区域的界面称为波阵面，波阵面的传播速度称为波速。地震波、固体中的声波和超声波等都是常见的应力波。应力波的研究同地震、爆炸和高速碰撞等动载荷条