

文章编号: 1000-7598-(2008)12-3307-05

甚高频电磁波多参数层析成像技术及其应用研究

谭捍华^{1, 2}, 黄家会³, 罗 强⁴, 柳治国²

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 贵州省交通规划勘察设计研究院, 贵阳 550001;
3. 中国矿业大学 建筑工程学院, 徐州 221116; 4. 贵州省交通厅, 贵阳 550003)

摘 要: 电磁波速度或衰减层析成像技术单独用于岩溶勘察存在多解性缺陷, 降低了应用的准确性。基于电阻率和相对介电常数直接反映溶洞与周围介质存在的电性差异, 以电磁波速度和衰减层析成像理论为基础, 提出了电阻率和相对介电常数层析成像理论, 并应用于实例工程。通过对其电磁波速度、衰减、相对介电常数、电阻率 4 参数层析成像结果进行对比分析和钻探验证, 证明了基于电磁波的电阻率和相对介电常数层析成像技术是可行的, 形成了电磁波速度、衰减、相对介电常数、电阻率多参数层析成像综合分析方法, 提高了电磁波层析成像技术探测溶洞及其充填情况的准确性。

关 键 词: 电磁波; 层析成像; 速度; 衰减; 相对介电常数; 电阻率

中图分类号: P 631.3+25

文献标识码: A

Research on very-high frequency electromagnetic wave multi-parameter tomography technology and its application

TAN Han-hua^{1, 2}, HUANG Jia-hui², LUO Qiang³, LIU Zhi-guo²

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045 China; 2. Guizhou Provincial Institute of Planning, Prospecting and Designing of Communications Infrastructures, Guiyang 550001, China; 3. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;
4. Guizhou Provincial Department of Communications, Guiyang 550003, China)

Abstract: Applying electromagnetic wave velocity singly for karst survey, there are limitations because of multiple solutions, and so does attenuation tomography technology. And the veracity is reduced. Based on the electric differences between karst cave and ambient medium, which are directly reflected by resistivity and relative dielectric constant, theories of resistivity and relative dielectric constant tomography are put forward, depending on the theories of electromagnetic wave velocity and attenuation tomography. Furthermore, it is applied to project. It is proved that the technology, relying on resistivity of electromagnetic wave and tomography of relative dielectric constant, is doable by analyzing four parameters, such as electromagnetic wave velocity, attenuation, relative dielectric constant and resistivity. A method of multi-parameter tomography compositive analysis is formed. As a result, the veracity of applying tomography by electromagnetic wave for detecting karst cave and it's filling increases.

Key words: electromagnetic wave ; tomography imaging; velocity; attenuation; relative dielectric constant; resistivity

1 引 言

地球物理层析成像技术是工程地质勘察中解决复杂地质问题的有效手段^[1]。根据场源不同, 主要有弹性波层析成像和电磁波层析成像。裸露岩溶区钻孔一般漏水严重, 采用弹性波层析成像技术时, 耦合问题非常突出, 且不易解决, 常导致施工成本急剧上升。因此, 对于大型工程地基隐伏岩溶的探测, 近些年来采用了电磁波层析成像技术^[2, 3]。

目前, 电磁波层析成像基本采用电磁波速度和电磁波衰减系数两个参数。由于岩溶的形态及充填情况十分复杂, 使得单一的电磁波层析成像技术对岩溶的解释可能存在遗漏, 降低了电磁波层析成像技术用于工程勘察的准确性。

岩溶地区的溶洞与周围介质在孔隙度、含水率等方面存在明显差异, 电磁波对此类问题最为敏感。电磁波的传播与介质的电性质有关, 描述电性质的参数主要有介电常数和电阻率^[2, 4-6]。水的相对介电

收稿日期: 2007-09-28

基金项目: 西部交通建设科技项目 (No.200231800018)。

作者简介: 谭捍华, 男, 1972 年生, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事公路工程勘察、设计及研究工作。E-mail: thh@gzjtsj.com.cn

常数为 81, 明显有别于其他介质, 同时水的含量对介质的导电性影响明显^[7]。因此, 在岩溶地区, 除采用电磁波速度和衰减层析成像外, 还可进行介质电阻率和相对介电常数层析成像, 用电磁波速度、衰减以及介质电阻率和相对介电常数多参数异常分布综合推断是否存在溶洞、破碎带及溶洞充填情况等, 克服了常规的电磁波层析成像技术的不足, 可大大提高岩溶探测的准确性。

2 理论基础

一般而言, 电磁波的频率越高, 其分辨率越高; 频率越低, 其分辨率越低。在电磁波层析成像技术中提高天线的频率是提高分辨率最有效途径之一^[8, 9]。对大型工程地基隐伏岩溶的探测而言, 探测对象尺寸一般较小, 对探测精度的要求往往很高。目前地面地质雷达天线频率已高达 1 200 MHz, 钻孔地质雷达天线频率高达 100 MHz, 故选择频率在 60 MHz 以上的甚高频电磁波来研究多参数电磁波层析成像技术。

电磁波在岩石中的传播主要受介电常数、电阻率和电磁波频率等因素影响, 其能量衰减的余切, 也称为品质因子, 可表示为

$$Q = \omega \varepsilon \rho \quad (1)$$

式中: ω 为电磁波的角频率; ε 为介质的介电常数; ρ 为介质的电阻率。

Q 是一个重要参数, 它确定了何种介质可以使用甚高频方法。对于 $Q \gg 1$ 的介质, 电磁波可在其中有效传播, 因而可以使用甚高频方法。如果 $Q \ll 1$, 则电磁波不能在其中有效传播, 因而不能使用甚高频方法。

由有耗介质电磁波理论, 可得

$$v = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0}} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{v \mu_0}{2 \rho} \quad (3)$$

式中: $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m, 为真空的绝对介电常数; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m, 为真空的磁导率; α 为电磁波衰减系数; v 为电磁波速度; ε_r 为相对介电常数。

在电磁波速度和衰减层析成像中, 已知电磁波速度和衰减层析成像问题可用以下曲线积分描述:

$$d_i = \int_{T_i(m)} m(x) dx \quad (4)$$

式中: d_i 为第 i 条射线的测量参数; $m(x)$ 为介质的

物性分布函数; x 为空间坐标; $T_i(m)$ 是一条与 $m(x)$ 相关的曲线, 因此, 该问题是一个非线性问题。如果以两条线之间的直线段 $L(i)$ 代替 $T_i(m)$, 则该问题成为一个线性问题, 从而可以将两钻孔间的平面分为若干个像元, 曲线积分可转化为沿 $L(i)$ 方向的积分, 分配到各像元中去求解, 则式 (4) 转化为^[10]

$$d_i = \sum_{j=1} G_{ij} b_j \quad (5)$$

式中: G_{ij} 为第 i 条射线 $L(i)$ 在第 j 个像元的长度 (m); b_j 为第 j 个像元的衰减因子 α_j (dB) 或慢度因子 s_j (ns/m)。

将式 (2) 代入式 (5), 得

$$d_i = \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \sum_{j=1} G_{ij} \sqrt{\varepsilon_j} \quad (6)$$

由于 d_i 和 G_{ij} 已知, ε_0 和 μ_0 为常数, 故可求解出 ε_j 。式 (6) 为相对介电常数层析成像数学表达式。

将式 (3) 代入式 (5), 得

$$d_i = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \sum_{j=1} G_{ij} \frac{1}{\rho_j \sqrt{\varepsilon_j}} \quad (7)$$

d_i , G_{ij} , ε_j 已知, ε_0 和 μ_0 为常数, 故可求解出 ρ_j 。式 (7) 为电阻率层析成像数学表达式。

3 实现方法

电磁波速度和衰减层析成像的测量参数 d_i 可以是直达波的振幅或走时, 分别对应于衰减因子和慢度因子。式 (5) 中, G_{ij} , d_i 已知, b_j 未知。显然, 通过编制软件, 可以求得 b_j , 即通过编制层析成像反演程序, 可以求得电磁波速度和衰减层析成像结果。一般来说, 仪器设备开发商都会提供电磁波速度和衰减层析成像软件。

电阻率和相对介电常数层析成像的原始数据为电磁波的走时和衰减。走时的定义和计算方法单一明确, 但衰减的定义和计算方法有差别, 可利用设备商提供的有关计算软件。电磁波的走时和衰减数据得到后, 编制计算机程序, 将电磁波的走时数据处理成无具体物理意义的参数 m_i , 将电磁波的衰减数据处理成无具体物理意义的参数 n_i 。

令 $\sqrt{\varepsilon_j} = x_j$, $d_i / \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} = m_i$, 则式 (6) 可变换为

$$m_i = \sum_{j=1} G_{ij} x_j \quad (8)$$

式中: m_i , G_{ij} 已知, 故可求得 x_j , 由 x_j 可换算求得 ε_j :

$$\varepsilon_{ij} = x_j^2 \quad (9)$$

同理, 令 $1/\rho_j \sqrt{\varepsilon_{ij}} = y_j$, $2d_i \sqrt{\varepsilon_0} / \sqrt{\mu_0} = n_i$, 则式 (7) 可变换为

$$n_i = \sum_{j=1} G_{ij} y_j \quad (10)$$

式中: n_i , G_{ij} 已知, 故可求得 y_j , 由 y_j 可换算求得 ρ_j :

$$\rho_j = 1/y_j \sqrt{\varepsilon_{ij}} \quad (11)$$

根据式 (8) 和式 (10), 利用仪器设备开发商提供的层析成像软件就可以进行反演计算, 实现电阻率和相对介电常数层析成像。通过电磁波速度层析成像、电磁波衰减层析成像、电阻率层析成像和相对介电常数层析成像 2 个或多个结果的综合判断来推断异常性质, 就形成了甚高频电磁波多参数层析成像技术, 可用来勘察溶洞及其充填物情况。由于所需要的基础数据均为电磁波的走时和振幅, 所以并不需要增加勘察工作的野外工作量。在选择参数进行综合判断时, 要避免同时只选择速度、相对介电常数或衰减、电阻率 2 个参数。

4 工程应用

平寨特大桥位于贵州镇宁至胜境关高速公路第 16 合同段, 为 130 m+3×235 m+130 m 预应力混凝土连续钢构桥, 桥面宽 24.5 m, 设计时速 80 km/h。初勘资料表明, 桥区内有几个桥位下溶洞发育, 仅靠钻孔资料无法查清溶洞空间分布规律, 影响桥基稳定性评价, 详勘时在异常地段采用甚高频电磁波多参数层析成像技术对溶洞空间分布规律进行勘察。

4.1 地质背景

桥位区地势起伏较大, 受构造侵蚀、溶蚀作用强烈, 形成孤峰、溶蚀洼地地形。桥位附近海拔高程为 940~1 200 m, 相对高差为 260 m。桥位建设段横跨陡坡地带及山间沟谷。海拔高程在 950~1 085 m, 相对高差为 135 m。两岸基岩裸露, 植被稀疏, 中部沟谷宽缓, 为第四系残坡积所覆盖。桥区内溶沟、溶槽、落水洞发育, 溶蚀深度较大。桥位区的地貌类型属构造剥蚀的中低山峰丛地貌。桥区地层主要由上覆第四系残坡积层 Q^{el+dl} 亚黏土、冲洪积层 Q^{al+pl} 卵石土及下伏三迭系中统关岭组 T_{2g} 灰岩、白云岩、白云质灰岩、泥质灰岩组成。

4.2 现场测试方案

应用具体场地位于平寨特大桥 k70+246.8 m 的

桥墩处, 钻孔编号为 ZK26 和 ZK24, 这 2 个钻孔的有关参数见表 1。利用瑞典 MALA GeoScience 公司生产的钻孔地质雷达 (Ramac Borehole Radar), 采用跨孔层析成像观测方式, 可以得到在不同深度点发射、不同深度点接收的电磁波, 每一个深度点发射、一个深度点接收的电磁波称为一道。对接收到的每一道电磁波, 可以计算出其走时和衰减, 这些走时和衰减数据就构成了电阻率和相对介电常数层析成像反演计算所需的原始数据。

表 1 ZK26 和 ZK24 钻孔参数

Table 1 Drilling parameters of ZK26 and ZK24

孔号	孔口标高 / m	基岩面深度 / m	水位 / m	孔深 / m
ZK26	1 010.37	0	干孔	30.80
ZK24	1 012.50	0	干孔	35.90

具体测试时, 发射天线先固定不动, 接收天线按 0.2 m 间距向上或向下移动, 直到接收不到信号为止。然后发射天线按 1 m 间距向上或向下移动后再固定, 接收天线按 0.2 m 间距向上或向下移动, 直到接收不到信号为止。依此类推, 直到进入土层和强风化带。改变发射和接收天线位置, 直到均接收不到信号为止。

试验利用的天线频率为 100 MHz, 采样频率均为 520 MHz 左右, 叠加次数均为 32, 采样点数均为 512。

4.3 资料解释与成果分析

利用相关处理软件, 对获得的原始数据进行处理, 得到电磁波速度和衰减层析成像结果见图 1 和图 2, 得到相对介电常数和介质电阻率层析成像结果见图 3 和图 4。在电磁波速度 CT 图 (图 1) 上有一个显著电磁波高速度区, 该区在电磁波衰减 CT 图 (图 2) 上表现为低衰减, 可以初步推定为空洞区。

为了确认该异常的性质, 分析研究相对介电常数 CT 图 (图 3) 和电阻率 CT 图 (图 4)。在相对介电常数 CT 图上, 该异常表现为相对介电常数很小, 仅有 2 左右, 可以非常肯定为空洞, 因为一般岩石的相对介电常数均在 7~9, 只有空气的相对介电常数小。在电阻率 CT 图上, 该异常表现为高阻, 这显然也是空气的特征。具体解释结果见图 5。ZK24, ZK26 孔连线上 (图 5), 施工有 ZK25 孔, ZK25 孔在标高 1 004.23~992.53 m 处见到一无充填的空溶洞, 其揭示资料溶洞与物探解释基本吻合。

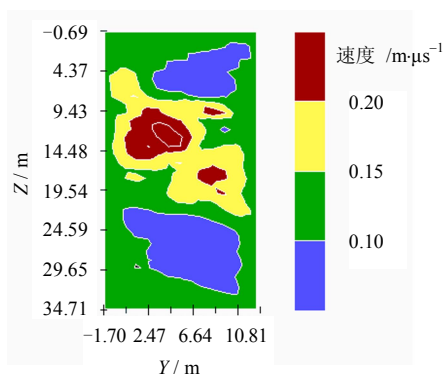


图1 电磁波速度 CT 图

Fig.1 CT picture of electromagnetic wave velocity

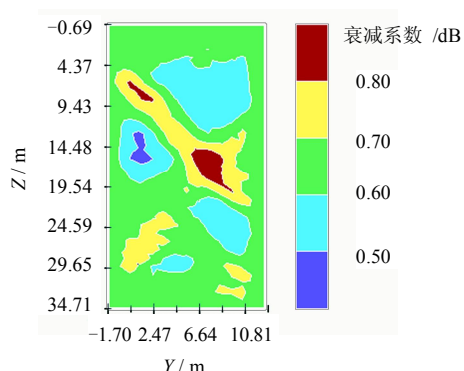


图2 电磁波衰减 CT 图

Fig.2 CT picture of electromagnetic wave attenuation

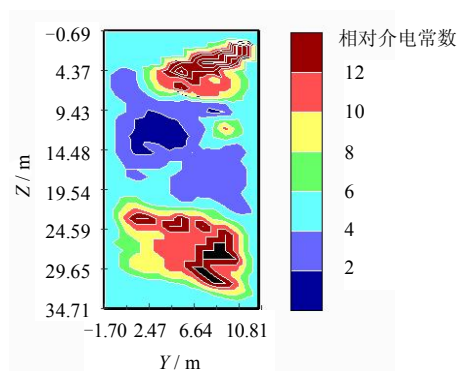


图3 相对介电常数 CT 图

Fig.3 CT picture of relative dielectric constant

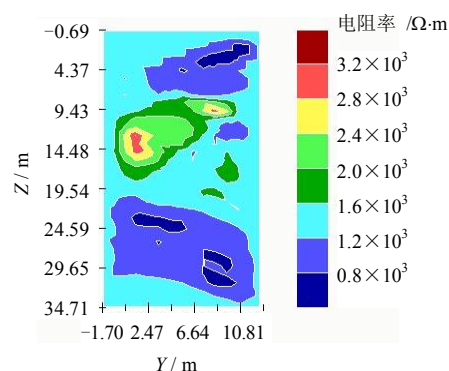


图4 电阻率 CT 图

Fig.4 CT picture of electric resistivity

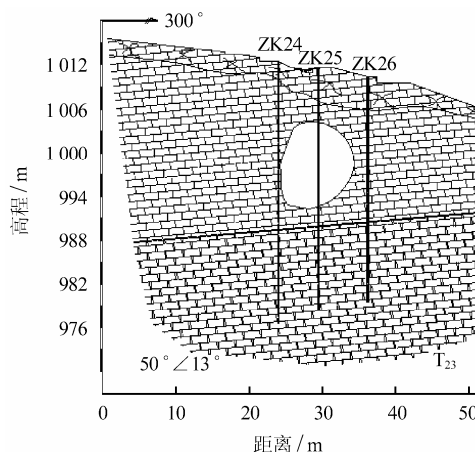


图5 地质解释剖面图

Fig.5 Section plan geology interpreter

5 结 语

甚高频电磁波多参数层析成像技术以电磁波的走时和振幅为原始数据,在不增加野外勘察工作的情况下,通过编制相应软件,除可进行电磁波速度 CT、电磁波衰减 CT 外,还可进行相对介电常数 CT 和电阻率 CT,这 4 个结果可相互验证,但由于电磁波速度与相对介电常数相关,电磁波衰减与电阻率相关,从而要根据不同情况选择 2 个不相关或多个参数综合判断溶洞及充填情况,这样结果比较准确可靠。

由于层析成像解释结果的可靠性与射线分布的密度直接有关,故如果异常位于射线密集区,其被探测到的可能性要大;反之,被探测到的可能性要小,甚至探测不到。本文图件中间部分的解释结果符合实际的,而上下两端的解释结果存在误差,因此,应用电磁波层析成像技术需引起注意。

参 考 文 献

- [1] 黄家会. 甚高频电磁波层析成像及在岩土工程中的应用研究[博士学位论文D]. 徐州: 中国矿业大学, 2003.
 - [2] 孙忠第. 高等级公路下伏空洞勘探、危害程度评价及处治研究报告集[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
 - [3] 曹获. 层析成像二阶段射线追踪技术在工程中的应用[J]. 岩土力学, 2005, (7): 1 157—1 161.
- CAO Huo. Application of computerized tomography two-phase ray tracing technique to civil engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005(7): 1 157—1 161.