

探地雷达在灰岩地区探测溶洞的应用

GPR Detection in The Application of Limestone Area Karst Cave

胡昌安 徐荣城

Hu Chang'an Xu Rongcheng

(江西省核工业地质局二六三大队, 江西 吉安 331300)

(Jiangxi Province 263 Brigade Nuclear Geological Survey, Jiangxi Ji'an 331300)

摘要:探地雷达作为一种快速高效、高精度的无损检测技术,在勘察中的应用日益成熟。本文以贵州某地区地质勘查为例,介绍探地雷达技术在灰岩地区探测溶洞的应用。

关键词:探地雷达;灰岩地区;溶洞;滤波;信号处理与分析

中图分类号:P61

文献标识码:A

文章编号:1671-4792-(2011)2-0027-03

Abstract: Ground Penetrating Radar as an efficient and high precision nondestructive testing technology, the application of the investigation progressively. Throughing one area of Guizhou as an example, the paper presents the geological exploration ground-penetrating radar technology in the application of detecting karst of limestone area.

Keywords: GPR; The Limestone Area; Cave; Filtering; Signal Processing and Analysis

0 引言

随着高频电子技术和计算机数据处理技术的快速发展,雷达探测技术用于地下勘探得到了快速的发展,探地雷达的实际应用领域也迅速扩大,包括工程地质勘探、岩溶探查、地质构造填图、水文地质调查、地基和道路路基空洞与裂缝调查、城市管线探查、水电大坝裂缝探查、隧道衬砌检测、堤防隐患探查、古墓遗迹探查等。它作为一种快速高效、高精度的无损检测技术,在传统工程勘察中应用日益成熟,主要有水电工程地质调查、岩溶地区溶蚀带和溶洞探查、水电大坝裂缝检测、水电堤防隐患探查、水电隧洞衬砌及围岩检测等。本文主要通过对贵州某地区应用探地雷达探测溶洞为工作实例,介绍探地雷达技术在灰岩地区探测溶洞的应用。

1 探地雷达工作原理

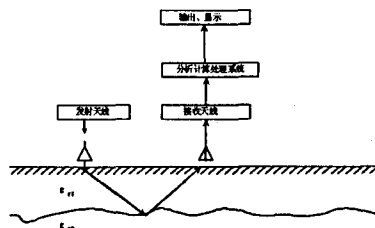
探地雷达是利用高频电磁脉冲波的反射来探测目的体,它通过发射天线向地下或目的体发射高频宽带短脉冲电磁波,经过地下地层或目的体反射后返回地面,被接收天线所接收。电磁波在介质中传播时,其路径、电磁场强度与波形将随所通过介质的电性质及几何形态的变化而变化。因此,根据接收到波的旅行时间、幅度与波形等资料,可探测地下介质或目的体的结构、构造及目的体的埋藏深度等。

探地雷达接收到的信号通过模数转换处理后送到计算机,经过滤波、增益等一系列数据处理后形成雷达探测图像。探地雷达图像是资料解释的基础图件,理论上,只要目的体

与周边介质中存在电性差异,就可以在雷达图像剖面中反映出来,通过同相轴追踪可以测定目的体的反射波旅行时 T 。根据地下介质的电磁波速 V 和反射波旅行时 T ,由公式(1)可计算目的层的深度 $h^{[1]}$:

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{V^2 T^2 - x^2} \quad (1)$$

式(1)中, h 为目的层的深度; x 为发射天线和接收天线间距; V 值为介质中的电磁波速度。图一为探地雷达的工作原理图。



图一 探地雷达工作原理图

探地雷达的工作前提是探测对象与周围介质间存在着明显的电性差异,雷达波在介质中的传播速度 V 与介质的电磁性参数有(2)式近似关系^[2]:

$$V = c / \sqrt{\epsilon_r / \mu_r} \quad (2)$$

式(2)中, V 为介质中的电磁波速度; c 为真空中的光速

(m/ns); ϵ_r 为介质的相对介电常数; μ_r 为介质的导磁率。

雷达波反射脉冲信号的强度,与界面的反射系数和穿透介质的吸收程度有关。垂直界面入射的反射系数 R 的模值与幅角,分别可由(3)和(4)关系式表示^[2]:

$$|R| = \sqrt{(a^2 - b^2)^2 + (2ab \sin \varphi)^2} / (a^2 + b^2 + 2ab \cos \varphi) \quad (3)$$

$$\text{Arg} R = \varphi = \tan^{-1}(\sigma_2 / \omega \epsilon_2) - \tan^{-1}(-\sigma_1 / \omega \epsilon_1) \quad (4)$$

$$\text{式(3)中 } a = \mu_2 \sqrt{\epsilon_2}, b = \mu_1 \sqrt{\epsilon_1}, \varphi = \sqrt{\mu_2 \epsilon_2} \sqrt{1 + (\sigma_2 / \omega \epsilon_2)^2} / \sqrt{\mu_1 \epsilon_1} \sqrt{1 + (\sigma_1 / \omega \epsilon_1)^2}$$

μ 为介质的导磁系数; ϵ 为相对介电常数; σ 为电导率; 下标 1 表示入射介质; 下标 2 表示透射介质。

由关系式可以看出,反射系数与界面两边介质的电磁性质和频率 ω ($=2\pi f$) 有关。当介质的电磁参数差别大时,反射系数也大,因而反射波的能量也大,对于倾斜入射情况,反射系数还与入射角有关。介质的含水量一般也会对 σ 和 ϵ 值有所影响,含水量大, σ 和 ϵ 值也变大,反射系数也相应有所变化。

在不同的介质中,电磁波的吸收程度也有所差异,介质的吸收系数 β 有(5)式关系,

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2 - 1 \right]} \quad (5)$$

当介质的电导率很低时, $\beta \approx \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$, 电磁波的吸收

随 σ 的增大而增大,随 ϵ 的增大而减小;当介质的电导率很高时,吸收系数 β 与 ω 、 σ 有关,而与 ϵ 几乎无关。表一列出常见介质的物理参数^[2-4]。

表一 常见介质的物理参数

介质	电导率/S/m	相对介电常数	速度/(m/ns)	衰减系数/(dB/m)
空气	0	1	0.3	0
淡水	$10^{-4} \sim 3 \times 10^{-2}$	81	0.033	0.1
海水	4	81	0.01	10^3
冰		3.2	0.17	0.01
花岗岩(干)	10^{-8}	5	0.15	0.01~1
花岗岩(湿)	10^{-3}	7	0.1	0.01~1
玄武岩(湿)	10^{-2}	8	0.15	0.01~1
灰岩(干)	10^{-9}	7	0.11	0.4~1
灰岩(湿)	2.5×10^{-2}	8	0.1	0.4~1
砂(干)	$10^{-7} \sim 10^{-3}$	4~6	0.15	0.01
砂(湿)	$10^{-4} \sim 10^{-2}$	30	0.06	0.03~0.3
粘土(湿)	$10^{-1} \sim 1$	8~12	0.06	1~300
页岩(湿)	10^{-1}	7	0.09	1~100
砂岩(湿)	4×10^{-2}	6		
土壤	$1.4 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-2}$	2.6~40	0.13~0.095	20~30
混凝土		6.4	0.12	
沥青		3~5	0.12~0.18	

野外探测中,要充分考虑探地雷达的分辨率问题,所谓探地雷达的分辨率是指雷达对多个目的体的区分或小目的体的识别能力,它一般取决于脉冲的宽度,即与脉冲频带的设计有关,频带越宽,时域脉冲越窄,它在射线方向上的时域空间分辨能力(纵向分辨率)就越强,用(6)式表示其关系^[5]:

$$\frac{1}{\Delta t} \approx B_{\text{eff}} \quad (6)$$

式(6)中 Δt 为分辨界面有效波形之间的时间间隔, B_{eff} 为有效频带宽度。若从波长的角度来考虑,则工作频率越高(即波长短),雷达反射波的脉冲波形就越窄,其分辨率就越高。实际应用中可用 1/4 波长为尺度来表明纵向分辨率,例如对于 50MHz 的天线中心频率,在灰岩地区,波长 $\lambda = 2.0\text{m}$ (以灰岩中电磁波速度 $V=0.10\text{m/ns}$ 计算),其纵向分辨率为 0.5m。探地雷达在水平方向上所能分辨的最小异常体的尺寸称为横向分辨率,它在很大程度上取决于介质的吸收特性。介质吸收越强,目的体中心部位与边缘部位的反射能量相对差别也越大,横向分辨能力也就相对较强。吸收系数 β 和探测深度 h 均较大时,有(7)式关系^[9]:

$$\frac{1}{\Delta x} \approx 1/(3.3\sqrt{h/\beta}) \quad (7)$$

式(7)中 Δx 为目的体横向分辨率。横向分辨率还与地下不同方向上脉冲波能量的分布以及波的散射有关。不同的天线设备、探测目的体的电性参数以及被探测目的体的深度对横向分辨率都会产生影响。

野外探测时,根据探测目的体的不同深度可选择不同中心频率的天线以及不同的测点间距进行探测,表二是瑞典 MALA 探地雷达针对不同目的体尺寸与深度选用不同中心频率的天线所列参考表^[6]。表三为瑞典 MALA 探地雷达对不同天线频率所推荐选用的采样参数^[6]。

表二 MALA 探地雷达不同频率天线探测尺寸与探测深度

天线频率/MHz	目的体尺寸/m	目的体深度范围/m	最大探测深度/m
25	≥ 1.0	5~30	35~60
50	≥ 0.5	5~20	20~30
100	0.1~1.0	2~15	15~25
200	0.05~0.50	1~10	5~15
400	≈ 0.05	1~5	3~10

表三 MALA 探地雷达不同天线频率的采样频率与采样间隔选择

天线频率/MHz	推荐选用的采样频率/MHz	推荐选用的采样间隔/m
25	150~600	0.30~0.75
50	400~800	0.20~0.50
100	800~1800	0.10~0.30
200	1600~3500	0.03~0.10
400	3200~5000	0.02~0.10

2 探地雷达数据处理与解释

探地雷达接收到的信号通过模数转换处理后送到计算机,必须再经过增益、带通滤波、绕射偏移处理和反褶积滤波等一系列数据处理后形成雷达探测图像。

增益可以使经过大地滤波的信号得到恢复或还原,能够增强深部信息。

带通滤波可以滤掉信号中的低频震荡和高频噪声等成分。

绕射偏移处理是用于消除在数据采集过程中引起畸变的二维成像处理方法,这种畸变主要是由于天线具有一定的辐射波束宽度,造成似点状反射体所出现的雷达图像上的双曲线形态,并造成倾斜界面较真实情况更倾斜,偏移处理可以把双曲线两叶上的能量回归到顶点上。偏移处理能够反映倾斜界面的真实情况,对于提高资料的分辨率也有很大作用,它应用于地下介质比较均匀的雷达剖面时,能够有很好的效果,但对于地下介质在垂向和侧向变化较大时,偏移处理的实用价值很有限。

反褶积滤波可以消除天线的多次反射,提高垂向分辨能力。

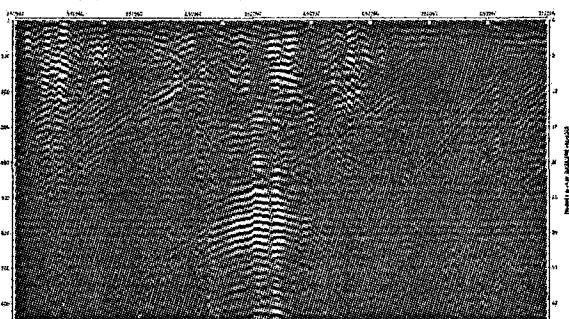
探地雷达图像是资料解释的基础图件,经过处理后的雷达图像,结合单道波形记录,可以识别异常反射,然后进行资料解释。

3 工程实例

在所勘察的地区灰岩非常发育,根据工程需要,要查明地下溶洞的详细情况。

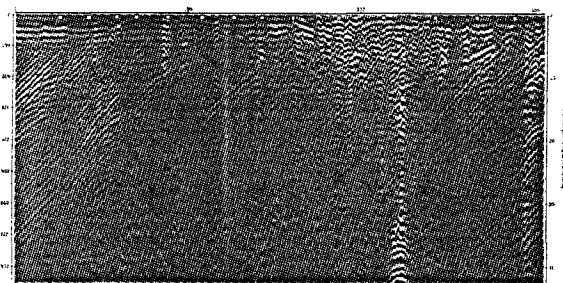
此次探测采用瑞典 MALA 公司生产的探地雷达,天线中心频率为 50MHz,采样频率为 536MHz,道间距为 0.3m,叠加次为 128 次。

图二、图三、图四为 3 条地面测线的雷达剖面。从雷达图像上可以看出,在图二黑色方框所标区域,雷达反射信号较强,且有明显呈多次震荡,可推断该区域有一含水充填型溶洞;在图 3 黑色方框所标区域,雷达反射信号较强,根据图像判断,应为一具有顶底界面的小型空溶洞;在图四黑色方框所标区域,存在两个典型抛物线结构的雷达反射波,可推断该区域为一具有顶底界面的溶洞。

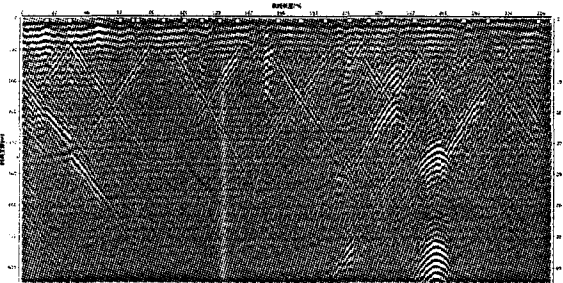


图二 贵州某地应用探地雷达进行地下溶洞探测成果图

一般而言,灰岩地区的地质情况非常复杂,尤其是浅表风化以及溶洞的非规则形态,采用其他应用地球物理勘探方法探测溶洞较为困难。而探地雷达因其发射的电磁波段常



图三 贵州某地应用探地雷达进行地下溶洞探测成果图



图四 贵州某地应用探地雷达进行地下溶洞探测成果图

为几十兆赫兹,在地层介质中雷达波波长一般为 0.1~2.0m,所以探地雷达在探测浅部介质地层时,相对于其它地球物理勘探方法,具有精度高、快速快、无损检测等优点。探地雷达在该地区的探测结果表明,选用合适的天线频率、采样间隔和采样频率,在灰岩地区探测溶洞的效果较好。

参考文献

- [1]李大心.探地雷达方法与应用[M].北京:地质出版社,1994.
- [2]王惠廉,李大心.脉冲时间域探地雷达讲座[J].国外地质勘探技术,1989.
- [3] Thomas J Fenner. Application of subsurface radar (SIR) in limestone.GSSI Inc.,Technical Literature,1985,2-16.
- [4] Davis J L, Annan A P. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy.Geophysical prospecting,1987,37.
- [5] Daniels D J et al..Introduction to subsurface radar.IEE Proceeding,1988,135(4).
- [6] Ramac/gpr operating manual,Version 2.28 1997,8.

作者简介

胡昌安(1962—),汉,男,江西九江人,地质工程师,长期从事地质勘探工作,主要研究方向:地质勘查。