

地质雷达探测岩溶洞穴物理模拟研究

王 亮^{1,2}, 李正文¹, 王绪本¹

(1. 成都理工大学信息工程学院, 成都 610091; 2. 铁道第二勘察设计院, 成都 610031)

摘 要 岩溶分布十分广泛, 地下岩溶洞穴严重威胁着工程建设和人民的生命安全, 了解岩溶地区的地质构造和岩溶发育规律, 准确勘查地下岩溶洞穴, 为各部门的工程设计与施工处理提供可靠的依据显得十分重要。地质雷达是采用高频电磁波、宽频带短脉冲和高速采样技术的一种新型的物探方法。由于该方法具有工作效率高、分辨率高和异常图象直观等突出优点, 因此, 该方法广泛应用于工程勘察中。多年来, 在中国的铁路、公路、电站和机场等工程建设中, 我们应用地质雷达方法作了大量的试验研究和生产工作, 采集到了一些具有代表性的地下溶洞、溶缝和岩溶破碎的雷达图象, 也积累了地质雷达探测地下岩溶洞穴的一些重要经验。本文从地质雷达探测地下岩溶洞穴的基本原理出发, 从理论上对溶洞、溶缝和破碎带等的雷达图象进行模拟计算, 提出了常见的地下岩溶异常的基本雷达图象特征, 再结合典型的地质雷达图象实例, 阐述了地下溶洞的埋深、规模、空间分布形态等判识方法。

关键词 地质雷达, 探测, 岩溶洞穴, 模拟研究

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2008)02-0280-04

A study of Geological Radar to cavern detection and physical analogue

WANG Liang^{1,2}, LI Zheng-wen¹, WANG Xu-ben¹

(1. Chengdu University of Technology College of Information Engineering, Chengdu 610059, China;

2. The Second Survey and Design Institute of China Railways, Chengdu 610031, China)

Abstract The karsts distribute widely, and underground karsts & caverns menace constructions and life of people seriously. It is very important to know geological structure and development regularities of karsts, and survey underground karsts & caves exactly for engineering designing and dealing, so as to provide reliable scientific basis. The geological radar is a new geophysical prospecting equipment, which uses the electromagnetic wave of high frequency, short pulse of wide frequency band or sampling technicality of high rate, due to the technology of geological radar has many virtue such as high efficiency, high resolving power or the image is very clear, therefore, it is wide applied to project prospecting. for a long time past, In the railway, the highway, the hydropower station and the airport etc. build item in china, we had finished. Many tasks of the test study and the produce by the geological radar, had collected some representative GPR images about caverns, corrosion fissures and corrosion zones, also amassed some experiences about that the geological radar detects underground caverns. In this paper, on the basis of analyzing basic principled about that the geological radar detects underground caverns, the writer has done the analog computation about GPR image features of caverns(include corrosion zones) and corrosion fissure in terms of theory, raise the basic features of GPR image about underground caverns, according to typical GPR image features, expounded the key how to determine depth, scale and spatial distribution of cavern.

Keywords geological radar, detection, cavern, physical analogue

收稿日期 2007-02-10; 修回日期 2007-06-26.

作者简介 王亮, 男, 1967年生, 四川射洪县人, 高级工程师, 在铁道第二勘察设计院从事工程物探(尤其是地质雷达方法)的应用研究工作, 现在成都理工大学信息工程学院攻读博士学位. (E-mail: wltsey@126.com)

0 引 言

岩溶地质问题是工程建设中的一大复杂地质难题.在国内外的许多工程建设中,常常因岩溶地质问题让人费心难解.一些岩溶地质灾害给一个国家或一个地区造成重大经济损失,甚至威胁着人民的生命安全.因此,岩溶地质及其勘探技术研究十分重要.许多国家都在花费大量的财力和物力从事岩溶地质与岩溶洞穴勘探的研究工作.至今为止,从已发表的一些文章来看,要么主要体现理论研究,要么主要反映工作成果与经验总结,能将二者紧密结合并以成功实例论证的优秀论文较少.

目前,岩溶地质探测在物探方法中仍然以电法勘探为主^[1~10].从上世纪 90 年代初期开始,在各种工程建设中,我们应用地质雷达方法进行了大量的岩溶地质探测生产和试验研究工作,仅在我国南昆铁路和内昆铁路建设中,我们应用该方法就开展了几百公里的岩溶地质探测,并通过大量的钻探验证,地质雷达探测地下岩溶洞穴定位比较准确,探测深度也满足一般工程建设的需求,野外数据采集效率高,雷达图象中对岩溶异常的分辨率高,因此,该方法探测岩溶地质效果显著.

本文应用数学原理对地下岩溶地质中常见的几种地质体(或异常)进行物理模拟计算,从理论上推导其基本雷达图象特征公式,再结合两幅典型的雷达图象实例分析,帮助读者分析岩溶洞穴雷达图象特征,总结出一些地质雷达探测地下岩溶洞穴的经验 and 异常判识方法,有助于岩溶地质中的物探异常解释.最后,作者向物探工作者指明了应用该方法进行岩溶地质探测应该加强溶洞的充填性质判定、溶洞的底界面以及空间形态分布等方面的研究方向.

1 基本方法原理

地质雷达是利用高频电磁波以宽频带短脉冲的形式,由地表通过发射天线送入地下,经地下目标体反射后返回地面,被接收天线所接收,形成雷达图象.

如图 1 所示:设电磁波在地面 T 处由发射天线向地下发射后,经地面下 h 深处的反射体后(如:溶洞)返回地面被接收天线 R 接收.根据几何关系,电磁波行程时间 t (单位:ns)为:

$$t = \frac{\sqrt{4h^2 + x^2}}{v}, \quad (1)$$

式中: x (单位:m)为发射天线与接收天线之间的距

离, v (单位:m/ns)为电磁波在地下介质中的传播速度.

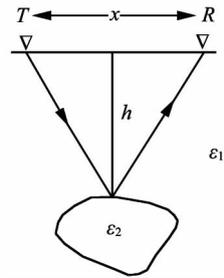


图 1 反射波探测原理示意图

Fig. 1 A sketch map showing mechanism about reflection method

由(1)式可知,当电磁波在地下介质中的传播速度可知时, t 可根据雷达图象确定, x 又为已知,目标体的埋深就可计算.目前,地质雷达探测系统配置的天线有单发射单接收和自发自收两种类型,其工作方式有点测和线测两种方式.采用自发自收天线和连续观测方式可以大大提高工作效率,被广大用户普遍使用.所谓自发自收就是将发射天线和接收天线装配在一起,二者间的距离很小,与探测深度比较,可近似为零,由公式(1)可知地下目标体的埋深为

$$h = \frac{1}{2}vt. \quad (2)$$

由此可见,自发自收采集方式相当于电磁波在地下作垂直反射.

2 岩溶洞穴物理模拟

地下岩溶洞穴的形态非常复杂,常见的有溶洞、溶缝、节理和破碎带等,为了讨论,通常将它们模拟成几何形体,其理论与实际基本接近.

2.1 球状体异常

它可模拟各种等轴状的地下溶洞、破碎带或地质体.

如图 2 所示:设在介电常数为 ϵ_1 的均匀半空间内有一介电常数为 ϵ_2 的球状体,其顶部埋深为 h ,半径为 r .电磁波发射点为 T ,接收点为 R , $TR=d$,其中心点为 C .根据电磁波直线传播原理,由 T 点发射的电磁波经球体界面反射到达 R 点接收,记录点为 C ,设 $CP=y$,则有:

$$(y+r)^2 = x^2 + (h+r)^2,$$

整理后得:

$$-\frac{x^2}{(h+r)^2} + \frac{(y+r)^2}{(h+r)^2} = 1, \quad (3)$$

(3)式为虚实轴相等的双曲线方程,这是地质雷达探测地下溶洞的基本图象特征.

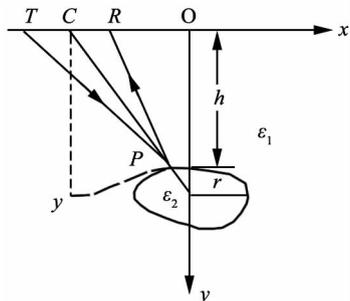


图 2 反射波探测球状体示意图

Fig. 2 A sketch map showing of surveying Balls with reflection method

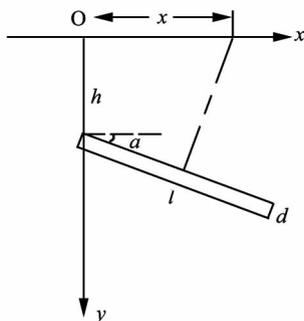


图 3 反射波探测板状体示意图

Fig. 3 A sketch map showing of surveying plates with reflection method

2.2 板状体异常

它可模拟岩溶探测中的溶缝和节理等.

如图 3 所示:设均匀媒质中有一板状不均匀体,倾角为 α ,板厚为 d ,板长为 l ,顶点埋深为 h ,坐标原点在板状体顶点的正上方.对于无限延伸倾斜薄板状体,设 $l \rightarrow \infty, d \ll h$.根据电磁波传播原理和几何关系可推导出:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{x^2}{h^2} + \frac{y^2}{h^2} &= 1 & (x < htg\alpha) \\ y &= xsin\alpha - hcos\alpha & (x \geq htg\alpha) \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

从(4)式可知:无限延伸倾斜薄板状体的雷达图象为一顶端绕射弧与一条接近倾斜薄板状体且近似于平行倾斜薄板状的直线组成.下面讨论两种特殊的板状体.

2.2.1 无限延伸直立薄板状体

当 $\alpha = \frac{\pi}{2}, l \rightarrow \infty, d \ll h$ 时,且 x 方向无变化为零,由(4)式可得

$$-\frac{x^2}{h^2} + \frac{y^2}{h^2} = 1. \quad (5)$$

因此,对于垂直薄板状体,无论是否为无限延伸,其异常曲线形态为一顶端反射形成的双曲线.

2.2.2 水平薄板状体

当 $\alpha = 0, l \rightarrow \infty$ 时,由(4)式可得:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{x^2}{h^2} + \frac{y^2}{h^2} &= 1 & (x < 0) \\ y &= h & (x \geq 0) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

可见,水平薄板状体的地质雷达图象为一起始顶端形成的绕射弧与一条沿板状体且接近板状体的水平直线组成.

2.3 岩层界面异常

对于趋于水平岩层界面,(3)式中的 $r = 0, x \rightarrow 0$,可推导出:

$$y = h. \quad (7)$$

由此可见,水平岩层界面异常是一条与界面深度相关的直线方程,进一步研究可知它是与电磁波在介质中的传播速度和旅行时间有关的直线方程,该方程描述了地质岩层厚度变化规律.

3 雷达图象分析

图 4 为南昆铁路 DK570+780~+850 段路基中线剖面的岩溶探测雷达图象.探测中采用 300MHz 天线,时窗为 $-20 \sim 300$ ns,岩性为白云质灰岩,探测深度可达 15 米左右.从雷达图象上看,顺岩层方向溶缝比较发育,在局部形成了溶洞和破碎带.在 DK570+795、+830、+840 三处有双曲线异常,钻探揭示为溶洞反映,从双曲线顶部可确定溶洞顶板中心位置;在 DK570+825~+845 段中部也存在强反射信号,形成了较模糊的双曲线特征,为岩石严重破碎所致.

图 5 为内昆铁路鲢鱼洞隧道 DIK213+090~+150 段路基中线剖面的岩溶探测雷达图象.探测中采用 100MHz 天线,时窗为 $-20 \sim 650$ ns,岩性为灰岩,探测深度可达 35 米左右.从雷达图象上可知:顺岩层方向溶缝比较发育,存在一组 X 节理,X 节理中心部位岩石破碎,并在 X 节理正下方有一明显双曲线异常,经钻探验证为空溶洞的反映.

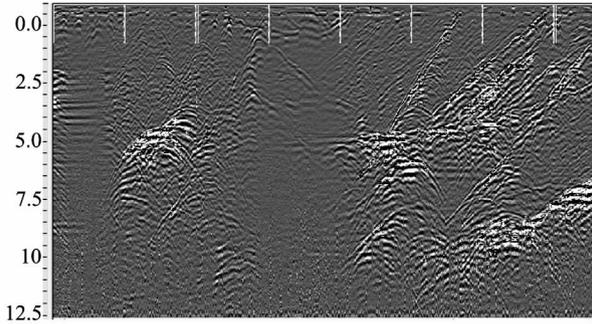


图 4 溶洞、溶缝和破碎带的雷达图象
Fig. 4 GPR map about cavern, corrosion
fissures or corrosion zones

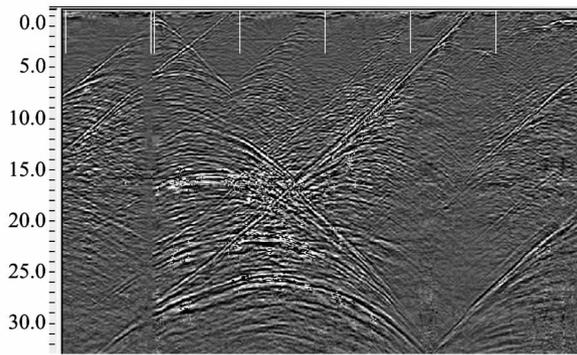


图 5 溶洞和节理的雷达图象
Fig. 5 GPR map about cavern or joint

4 结 论

从地质雷达探测岩溶洞穴的理论研究和实例分析中,可以得出如下结论:

(1) 溶洞在雷达图象上一般呈双曲线特征,其顶板埋深越浅(但不开口),双曲线形态越明显,双曲线顶点对应溶洞的中心位置,其顶板埋深可按公式(2)计算,溶洞的宽度一般可由双曲线顶部的相对平缓段(一般占完整双曲线的 $1/4 \sim 1/3$)估计,也可采用渐近线法或非涅尔带半径法计算。

(2) 对于倾斜溶缝,因溶缝宽度非常小,在其顶端很难形成明显的双曲特征,一般沿溶缝发育方向形成线状强反射信号,根据线形方向可以推测溶缝发育方向.而垂直方向发育的溶缝,从理论上电磁波应在顶端形成双曲线特征,实际中因天线的快速移

动,电磁波在其顶端形成类似点反射,很难形成明显的双曲线图象。

(3) 电磁波在介质中的传播速度是岩溶异常定量解释的重要参数,由于电磁波的传播速度是因介质的不同而变化的,即使是同一岩性的介质,也因其内部结构和含水率等不同,其差异明显.因此,在一个区域进行岩溶地质探测时,利用已知目标体测定该测区岩性的电磁波传播速度是非常必要的工作。

(4) 电磁波在高电阻率的岩石中有较强的穿透能力,采用地质雷达方法探测地下岩溶洞穴效果显著.若有覆盖层时,电磁波的穿透能力将大大削弱,在覆盖层与基岩的接触面上常有沟槽等现象,雷达图象在此处也容易形成双曲线特征.因此,分析雷达图象时,必须对测区的地形、地质以及岩溶发育规律等情况有详细的了解,才会对地质雷达图象合理认识。

(5) 同其它物探方法一样,地质雷达也受地形、地质以及其它干扰的制约,存在探测深度等方面的不足.虽然该方法对岩溶定位较准确,但在判定溶洞的充填性质、溶洞的底界面以及空间形态等方面存在明显不足,还需在以后的研究与生产试验中不断探索和总结。

参 考 文 献 (References):

- [1] 卢明辉,巴晶,杨慧珠. 双层介质分界面上弹性波的反射与透射[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(5): 1439~1445.
- [2] 王友善,魏传根. 电磁测深方法研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(1): 256~263.
- [3] 李才明,王良书,徐鸣洁,刘元生,钟锴,张善法. 基于小波能谱分析的岩溶区探地雷达目标识别[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1499~1504.
- [4] 曾昭发,刘四新,王者江,等. 探地雷达方法原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [5] 李才明,张善法. 电磁波层析成像阻尼因子引入与应用[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(1): 221~224.
- [6] 徐利明,聂在平. 埋地目标体矢量电磁散射的一种快速正演算法[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1): 209~215.
- [7] 袁明德. 浅析探地雷达的分辨率[J]. 物探与化探, 2003, 27(1): 28~32.
- [8] 胡广书. 数字信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [9] 王惠谦. 探地雷达概论[J]. 地球科学, 1993, 18(3): 249~256.
- [10] 朱介寿. 地震学中的计算方法[M]. 北京: 地质出版社, 1988.