第 38 卷 第 1 期	中国岩溶	Vol. 38 No. 1
2019年2月	CARSOLOGICA SINICA	Feb. 2019

贾龙,蒙彦,潘宗源,等.钻孔雷达反射成像在岩溶发育场地探测中的应用[J].中国岩溶,2019,38(1):124-129. DOI:10.11932/karst20190114

# 钻孔雷达反射成像在岩溶发育场地探测中的应用

#### 贾龙,蒙彦,潘宗源,殷仁朝

(中国地质科学院岩溶地质研究所/中国地质调查局岩溶塌陷防治重点实验室,广西桂林 541004)

**摘 要:**我国岩溶区分布广泛,且复杂的岩溶现象对建筑安全、地基稳定以及场地勘察有较大影响。钻孔雷达 作为一种井中地球物理方法,可以利用地下介质的物性差异查明岩溶发育的情况,弥补常规勘察手段在探测 岩溶发育场地中存在的不足。依据钻孔雷达单孔反射信号的同相轴特征、反射波首波走时和反射波的衰减等 特征,可判断钻孔周边未揭露溶洞和裂隙的分布,确定钻探揭露溶洞的水平方向直径以及岩石完整性,从而达 到查明各种岩溶形态的规模、空间密度及其分布规律的目的,为工民建各项工程建设的设计和施工提供准确 详尽的地质资料,确保工程的稳定性。

关键词:岩溶探测;地质雷达;钻孔雷达;反射成像

**中图分类号:**P631.3; P642.25 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2019)01-0124-06 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



#### 0 前 言

我国可溶性碳酸盐岩分布面积达 3.44×10° km², 占国土面积的 1/3 以上<sup>[1]</sup>,岩溶发育且分布广泛。由 于可溶性碳酸盐岩的溶蚀作用,可形成溶沟、溶槽、鹰 嘴岩、溶洞、地下河等一系列岩溶现象。这些岩溶现 象的突出特点之一就是基岩岩面起伏变化剧烈,对建 筑场地安全和地基稳定有较大影响。常规勘察方法 主要是利用钻探查明场地地质条件,直接获得深部地 层的可靠地质信息,而实际工程中钻探的数量和布局 往往有所限制,尤其在复杂岩溶地质条件下一些重要 的地质特征有可能被钻探错过。钻孔雷达技术[2]作 为一种井中地球物理方法,探头通过钻孔直接进入地 下深部,可利用地下介质的物性差异,提供钻孔周围 一定范围的反射雷达时域波形剖面影像,从而有效的 扩大探测范围,查明钻孔周围一定范围的地层结构、 岩体构造和岩溶发育情况,弥补实际工程中钻探的数 量和布局的不足[3]。

由于钻孔雷达具有探测直观、方便的优点,在国 内外已被广泛应用于水文地质与工程地质等相关领 域。从九十年代起,钻孔雷达被引入国内,主要被用 于探测深部的断层、裂隙及破碎带等不良地质 体<sup>[4-5]</sup>。国外利用钻孔雷达技术方法较早,除探测不 良地质体外,还尝试用于岩体完整性和地下工程质量 的评价工作<sup>[6-8]</sup>。本文给出一项单孔雷达反射成像 对岩溶场地进行探测的实例,探讨该方法对岩溶场地 评价的应用。

# 1 钻孔雷达反射成像探测原理

利用钻孔雷达反射成像探测,雷达的发射天线和 接收天线以固定间距在同一钻孔中同时移动,见图 1。发射的雷达波每遇到一个界面就发生反射和折 射,入射波能量即被分成两部分,一部分经折射继续 向下传播,另一部分经反射掉头向上,变成反射波。

收稿日期:2018-04-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目:土洞气体运移机理及对岩溶塌陷指征作用研究(41877300),红层溶蚀对岩溶塌陷的作用机制研究 (41402284),充水矿山疏干区岩溶系统水气压力突变及其诱发岩溶地面塌陷的机理研究(41472298);中国地质调查项目:渝中湘南岩溶塌陷 区综合地质调查

第一作者简介:贾 龙(1985-),男,助理研究员,研究方向岩溶工程地质。E-mail:jialong@karst.ac.cn。

上一界面的折射波就是下一界面的入射波,因而入射 波的能量不断减少,同时每一界面都会发生反射,产 生反射波。界面两边的能量总和保持不变,入射部分 的能量与透过界面的能量之差,即为反射波的能量。 在雷达记录中记录了反映不同路径上行到接收天线 的反射波。



#### 图 1 钻孔雷达反射信号的走时及振幅示意图



单孔雷达接收全空间的反射雷达波信号。因此 单个钻孔的雷达无法判断反射体的方位,只能得到距 钻孔一定距离的反射体。

# 1.1 岩溶形态确定

钻孔雷达反射信号剖面中,同一连续界面的反射 信号形成同相轴。根据雷达反射波同相轴的错动和 缺失,可推断地质雷达图像中的地质异常体。①当地 质界面(断层、溶隙等)位于钻孔旁侧时,如图 2 中溶 隙 a,单孔雷达反射波振幅明显增强,而且同相轴发 生畸变,呈一条斜线,如图 2 中线状反射 A。斜线和 钻孔的夹角由地质界面与钻孔的夹角决定。②当钻 孔穿过地质界面(断层、溶隙等)时,反射特征为折线, 如图 2 中线状反射 B,钻孔与地质界面的交点就是折 线的拐折点。③钻孔旁侧溶洞的反射波同相轴发生 畸变呈双曲线术,如图 2 中双曲线异常 C。④当地层 破碎,裂隙比较密集时,图 2 中 e 所示,同相轴会出现 杂乱的情况,图 2 中 E 所示。依据钻孔雷达图像中 同相轴形态、走时可以推断出钻孔周边溶洞的大小位 置和岩溶裂隙的分布情况<sup>[9]</sup>。

岩溶形态与钻孔距离,可根据介质中传播速度与 反射波走时来计算。电磁波在介质中的传播速度可 由如下公式(1)计算:

$$V = C \sqrt{\varepsilon_r} \tag{1}$$

式中:V 是介质中雷达信号的速度, $C=3 \times 10^8$  m · s<sup>-1</sup>=0.3 m · ns<sup>-1</sup>(光速), $\epsilon$ ,为相对介电常数(空气为1,纯水为81,湿黏土为15)。由于反射信号是双程走时,因此岩溶形态(如溶隙,溶洞洞壁等)距钻孔的距离 R 的计算公式(2)为:

$$R = \frac{t}{2} \times V = \frac{tC}{2} \tag{2}$$

式中:t为雷达波的走时(ns)。

# 1.2 揭露溶洞的直径确定

雷达反射信号的首波,是指雷达信号发出后遇到 首个物性差异界面反射回来的回波。对于钻孔雷达 天线(固定天线距),反射信号首波指示钻孔孔壁或溶 洞洞壁。因此可以利用钻孔反射信号首波的走时与 电磁波速度的乘积来计算钻孔揭露溶洞的水平直径 大小,参见公式(2)。结合钻探揭露的溶洞洞高,可以 较为准确地确定溶洞的形态。



图 2 单孔雷达反射原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of single-hole radar reflection principle



#### 1.3 岩石完整性确定

钻孔雷达探测中,雷达信号波的衰减是富水裂隙 区的重要迹象,因为高导电性的含水结构,显著增大 了对电磁波得吸收。由于破碎带的散射和吸收作用, 从更远的部位反射回来的后续波能量变弱,信号表现 为平静区。因此,可以通过反射波的强度衰减,来判 断岩溶区岩石的破碎程度。瞬时振幅是反射强度的 量度,正比于该时刻地质雷达信号总能量的平方 根<sup>[10]</sup>。本文利用钻孔雷达波在一定走时范围内采样 点振幅的均值,来表征对应深度的岩石破碎情况。如 发射天线在特定深度 h 时,走时大于 100 ns 的反射 波采样点振幅均值,可以表征钻孔周边 0~100 ns 范 围内(钻孔周边灰岩中大约 0~5 m 范围内)岩石的 破碎程度。走时大于 100 ns 采样点振幅均值越小, 表征 0~100 ns 范围内雷达波衰减越大,钻孔周边 5m 范围内岩石越破碎。深度 h 采样点振幅的均值 计算公式(3)如下:

$$\overline{E}_h = \left(\sum d_i\right)/n \tag{3}$$

式中:d<sub>i</sub>一各个采样点振幅的绝对值;i一采样点编 号;h一探测深度;n一参与计算的采样点总数。

# 1.4 多孔测量和综合解释

由于单孔雷达接收全空间的反射雷达波信号,利 用单个钻孔的数据很难确定反射体的方位,而只能确 定反射体的距离。多孔测量可以在一定条件下,确定 反射体的方位,辅助解释钻孔剖面信息。此外,还应 结合已知地质、钻探和其它探测资料,对获得的雷达 资料进行综合的地质解释。

# 2 实 例

测区位于广东省广州市花都区某建筑场地,属丘陵平原地貌,场地地形平坦。测区的覆盖层为第四系全新统(Q<sub>4</sub>),土层以粘土为主,局部有砂层。土层厚度为17~22 m。下伏基岩为石炭系石磴子组灰岩(C<sub>1</sub>s)。地层的电性参数见表1。探测时地下水稳定水位埋深约3 m。利用勘探钻孔,开展钻孔雷达的反射成像方式探测,揭露钻遇溶洞大小(主要指水平方向洞径)以及钻孔周围范围内岩溶发育情况,为工程施工设计提供基础资料。以单孔反射方式,共测量6个钻孔。钻孔位置分布和钻孔信息见如图3 和图4中 ZK1~ZK6。

表 1 研究区地下介质的电性参数

 Table 1
 Electrical parameters of underground

 media in the study area

incula in the study area				
介质	相对介电常数	电导率/	传播速度/	
		$\mathrm{ms} \cdot \mathrm{m}^{-1}$	${ m m} \cdot { m ns}^{-1}$	
空气	1	0	0.3	
淡水	81	0.5	0.03	
石灰岩	7	0.18	0.10	
饱和黏土	15	800	0.05	



Fig. 4 Histogram of boreholes ZK1-ZK6:钻孔编号

本次测量使用仪器为瑞典 MALA 公司生产的 雷达系统。该系统包括主机 ProEx、100MHz 钻孔雷 达天线、专用光缆和测距轮,以及采集软件 Ground-Vision2。对测得的雷达资料进行地质解释首先需要 数据处理,然后进行地质解释和分析。数据处理主要 包括增强有效信息,抑制随机噪声,压制非目的体的 杂乱回波,提高图像的信噪比和分辨率等。数据处理 通过 ReflexW 软件完成,包括以下步骤:①一维滤 波:去直流漂移;②静校正:重新标定零线;③增益:自 动增益(AGC);⑥一维滤波:巴特沃斯带通滤波;⑤ 二维滤波:抽取平均道;⑥二维滤波:滑动平均。

地质解释和分析主要依据地质雷达图像和雷达 波数据,并结合已知的地质、钻探资料进行综合解释 分析。解释结果如下:

(1)确定揭露溶洞的直径。钻探揭露的溶洞在地 质雷达剖面相应位置均有显示。读取溶洞位置的反 射首波走时,根据公式2可计算出溶洞直径。结合钻 探探测的溶洞高度,即可得到溶洞的具体形态,见图 5,图 6 中地质剖面图 I 和 II 。如钻孔 ZK1,钻孔揭露 两处溶洞 C1 和 C2,分别高 3.26 m 和 4.55 m。根据反 射波走时计算出溶洞 C1 为椭圆形,最大水平直径约为 2 m;溶洞 C2,为串珠型,最大水平直径约为 3.6 m。 (2)钻孔周边岩溶形态。对原始数据按步骤①至 ⑥进行处理后,单孔雷达在基岩中显示出高分辨率的 探测结果,见图 5 中 ZK1-ZK6 雷达图像。其中钻 孔 ZK1和 ZK2 雷达图像中的双曲线反射 H1和 H2, 表明在钻孔 ZK1和 ZK2 间存在溶洞,其顶部埋深约 27 m。经过后期勘察,证实存在高约 7 m 的半充填 溶洞。ZK1 雷达图像存在线状反射,见图 5 中 F1,表 明 ZK1 附近存在裂隙。

(3)钻孔周边岩石完整性判断。对原始雷达资料,只进行以下步骤,①去直流漂移,②重新标定零线。然后读取反射波采样点的振幅。利用公式3,绘

制各钻孔走时大于 100 ns 采样点的振幅均值曲线  $\overline{E}_{h}$ ,见图 5 中 ZK1-ZK6 曲线。其振幅均值大小,可 以表征 0~100 ns 范围(以钻孔为中心、以 5 m 为半 径)的灰岩完整性和富水性。当 $\overline{E}_{h}$  值越大,半径 5 m 外后续波能量越大,半径 5 m 内岩溶越完整。当 $\overline{E}_{h}$ 值越小,半径 5 m 外后续波能量越小,半径 5 m 内岩 溶越破碎。本次测量结果表明:钻孔 ZK5 和钻孔 ZK6 的灰岩段 $\overline{E}_{h}$  值都较小,推断周边岩溶裂隙十分 发育。同理分析,在钻孔 ZK1-ZK4 的局部范围,岩 石破碎(图 5,图 6)。



Fig. 5 Radar reflection images and interpretations of geological sections for boreholes ZK1-ZK3



图 6 ZK4-ZK6 钻孔雷达反射图像及解释地质剖面图 Fig. 6 Radar reflection images and interpretations of geological sections for boreholes ZK4-ZK6

(4)根据综合钻探和钻孔雷达探测结果,可绘制 地质剖面,见图 5,图 6 中地质剖面图 I 和 II 。在 ZK1-ZK3 区域范围内溶洞较为发育,除了钻孔揭露 的溶洞外,在 ZK1 和 ZK2 之间发育高约 7 m 的溶 洞。大于 100 ns 采样点的振幅均值  $\overline{E}_h$ ,表明 K2 钻 孔底部岩层较为完整。在 ZK4-ZK6 区域范围内溶 洞规模较小,周边无较大溶洞存在。依据雷达反射图 像和  $\overline{E}_h$  值曲线,可推断除 ZK4 底部岩层较为完整 外,ZK5 和 ZK6 周边岩性较为破碎。

# 3 讨 论

在进行钻孔雷达时间剖面解释之前,首先要充分 掌握场地地质资料,特别是钻探资料,掌握所测钻孔 揭露的土层性质及厚度,溶洞及其特性(如溶洞是否 充填,充填物状态及电性特征),以此标定雷达异常, 从已知到未知合理推断雷达剖面。雷达剖面与钻探 信息有出入时,要及时查明分析原因。如 ZK4 的钻 孔地质雷达反射图中溶洞 C7(洞高 4.6 m,最大水平 直径 2.4 m)和 C8(洞高 1.8 m,最大水平直径 2 m), 在钻探成果并未完全显示。以工程基础稳定性为前 提和保守原则,建议以钻孔雷达探测结果为主要依 据,判断地层结构。

在钻孔雷达探测中,人工解释主要依据雷达反射 剖面中反射信号形成的同相轴形态,它是识别地质异 常体最主要的特征。钻孔雷达的探头深入地下,其受 到的场地干扰较小,有利用识别异常体。其解释的难 点在于,单孔雷达接收钻孔周边全空间的反射雷达波 信号,各类信息可能会交叠在一起,给解释带来困难。 除了经过数据处理,增强有效信息,压制非目的体的 杂乱回波外,还可通过加载不同的色板,调整对比度 等方法处理图像,综合分析判断。此外,溶洞充填物 会影响同相轴的形态,如 H1 显示的双曲线下半部并 不明显,判断原因为溶洞内半充填物吸收了雷达波能 量,降低了有效反射信号。

利用钻孔首波走时来计算钻孔揭露的溶洞直径, 实践证明是完全可行的。需要注意的是,充水、充泥 的溶洞应采用不同的传播速度计算,参见公式(1)。 利用反射波采样点振幅均值  $E_h$  判断钻孔周边 的完整性,主要根据雷达波在富水带,岩层破碎带内 会产生绕射、散射等现象,使雷达波能量衰减,振幅相 应减弱。该方法定性地判断岩溶发育的情况,应结合 雷达波走时剖面综合解释。

# 4 结 论

(1)钻孔地质雷达,可置于钻孔中来探测地下各 种岩溶形态的规模及其空间分布,弥补了地面雷达探 测深度较浅和工程地质钻探孔布置数量有限的不足。 在单孔雷达反射图像上灰岩中的溶洞和裂隙特征明 显,前者呈现双曲线反射,后者呈现线状反射,易于识 别。尽管单孔雷达存在探测解释结果的方位不确定 性,但可以利用多个单孔雷达反射测量,来判断探测 目标的方位与空间展布情况。

(2)利用钻孔雷达首波走时来计算钻孔揭露的溶 洞水平方向扩展的直径,从而可以结合钻孔资料来准 确刻画揭露溶洞形态;利用一定反射波采样点振幅均 值 Ē,曲线,可表征钻孔雷达信号探测远端岩体时的反 射能量,由此判断钻孔周边岩石的完整性和富水性。

(3)岩溶破碎带和富水带是影响钻孔雷达探测距离的主要因素。钻孔雷达图像解释主要的干扰在于地下介质电性参数的不均一性和全空间反射雷达波信号的叠加。在开展井中地质雷达探测时,地下水,场地干扰等因素可能会造成目标体实际深度与实际

情况存在不同程度地差异,在雷达图像解释过程中应 结合其他勘探资料给予修正,使其不影响该方法在工 程物探中的应用。

#### 参考文献

- [1] 李大通,罗雁.中国碳酸盐岩分布面积测量[J].中国岩溶, 1983(2):147-150.
- [2] 陈建胜,陈从新.钻孔雷达技术的发展和现状[J].地球物理学进展,2008,23(5):1634-1640.
- [3] 刘四新,曾昭发,徐波.钻孔雷达探测地下裂缝[J].吉林大学 学报(地球科学版),2005(s1):128-131.
- [4] 李华,王东辉,焦彦杰,等.钻孔地质雷达技术在水文与工程地 质中的应用分析[J].工程勘察,2011,39(6):85-89.
- [5] 黄家会,宋雷,陈先德,等.地下深部灰岩岩石特性的单孔雷达 反射研究[J].水文地质工程地质,1999(6):57-59.
- [6] Giroux B, Gloaguen E, Chouteau M. Geotechnical application of borehole GPR - a case history[C]// Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar. IEEE, 2004;249-252.
- [7] Kim J H, Park S G, Yi M J, et al. Borehole radar investigations for locating ice ring formed by cryogenic condition in an underground cavern[J]. Journal of Applied Geophysics, 2007, 62(3):204-214.
- [8] Olsson O, Falk L, Forslund O, et al. Borehole Radar Applied To The Characterization Of Hydraulically Conductive Fracture Zones In Crystalline Rock1[J]. Geophysical Prospecting, 2010, 40(2):109-142.
- [9] 钟声,王川婴,吴立新,等.点状不良地质体钻孔雷达响应特征:围 岩及充填效应正演分析[J]. 岩土力学,2012,33(4):1191-1195.
- [10] 谢雄耀,万明浩.复信号分析技术在地质雷达信号处理中的应 用[J].物探化探计算技术,2000,22(2):108-112.

# Study on application of borehole radar reflection imaging in the detection of karst area

JIA Long , MENG Yan , PAN Zongyuan, YIN Renchao

(Institute of Karst Geology, CAGS/Key Larboratory of Karst Collapse Prevention, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract** Karst area are widely distributed in China, and complex karst phenomena have great influence on the safety of building site and foundation stability and site survey. As a geophysical method in the well, borehole radar can make use of the difference of physical properties of underground media to find out the situation of karst development, and make up for the shortcomings of the conventional survey methods in detecting karst development sites. The characteristics of the homogenous axis of the single-hole radar reflection signal, the travel time of first arrival wave of the reflected wave and the attenuation of the reflection wave, can be used to determine the distribution of uncovered karst caves and fissures around the borehole. This technique method can also be applied to identifying the diameter of karst caves in horizontal direction and intact rocks surrounding the caves. Borehole radar detection can find out the size, density and spatial distribution of various karst forms, so as to provide accurate and detailed geological data for the design and construction of various engineering construction projects, and to ensure the stability of the projects.

Key words karst detection, ground penetrating radar, borehole radar, reflection imaging

(编辑 张玲)