

Application of GPR Detection Technology under the Adverse Geological Conditions

—The Practice of Karst Cavities Treatment in RMCOP Project, Sultanate of Oman

Rui Liu^{1*}, Guangsheng Yang², Xinghua Huang², De Li²

¹China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd., Langfang Hebei

²China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd. International, Langfang Hebei

Email: *cppeliurui@cnpc.com.cn

Received: May 11th, 2020; accepted: Jun. 8th, 2020; published: Jun. 15th, 2020

Abstract

This document introduces the geological radar detection principle, methods and interpretation. Based on practice at Ras Markaz Crude Oil Park Project in Sultanate of Oman, where Ground Penetrating Radar is used to detect the underground karst cavities, this paper points out its role in dealing with the adverse geological conditions, and demonstrates that the Ground Penetrating Radar detection method is highly efficient, accurate, and costless.

Keywords

GPR, Karst Cavity, Oil & Gas Project

*通信作者。

地质雷达探测技术在不良地质处理中的应用

——阿曼拉斯玛卡兹原油储罐工程地下喀斯特岩溶空洞解决方案

刘蕊^{1*}, 杨光升², 黄兴华², 李德²

¹中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊

²中国石油管道局工程有限公司国际事业部, 河北 廊坊

Email: *cppeiliurui@cnpc.com.cn

收稿日期: 2020年5月11日; 录用日期: 2020年6月8日; 发布日期: 2020年6月15日

摘要

本文介绍了地质雷达的探测原理、探测流程和解释方法, 并以阿曼拉斯玛卡兹原油储罐工程中使用地质雷达探测地下岩溶空洞的实例, 指出其在不良地质条件处理中发挥的作用, 表明了地质雷达探测效率高、准确率高、经济性高等优点。

关键词

地质雷达, 喀斯特溶洞, 油气工程

Copyright © 2020 by author(s), Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地质雷达(Ground Penetrating Radar, 简称 GPR), 又叫探地雷达, 是一种快速无损的地球物理探测技术, 最早在 1910 年由德国科学家提出利用电磁波探测地下目标体分布特征的概念理论, 直到 1970 年美国地球物理探测设备公司(Geophysical Survey System Inc., 简称 GSSI)生产出第一台商业性质的地质雷达。近些年来, 地质雷达探测技术在探测方法和仪器研制等方面有了较大的发展, 其探测范围、成像分辨率、探测准确度等不断扩大和提高, 已广泛应用于岩土工程勘察、工程质量无损检测、水文地质调查、城市地下管网普查、文物及考古探测等众多领域, 取得了显著的质量效果和经济效益。本文以中国石油管道局工程有限公司在阿曼拉斯玛卡兹原油储罐工程中进行地下岩溶空洞勘察和处理为例, 阐述了地质雷达在油气工程建设中应用的优点。

2. 地质雷达探测技术介绍

2.1. 探测原理

地质雷达探测是以地下不同介质的介电常数差异为基础的一种回声测深方法。它通过发射天线向地下发射电磁波, 主频为数十兆赫至数百以至千兆赫, 电磁波在地下介质中传播时遇到存在电性差异的介质分界面时会发生反射, 反射波传回地表后被接收天线所接收, 并将其传入主机进行记录和显示, 根据

接收到的电磁波波形、振幅强度、几何形态和时间变化等特征, 经过分析处理和反演解释, 推断探测区域范围内的结构、构造和异常体的分布情况。

雷达天线包括发射天线和接收天线, 当发射的电磁波在传播过程中遇到电性差异的不同介质发生反射时, 其反射强度由如下公式[1]计算:

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_2} + \sqrt{\varepsilon_1}} \quad (1)$$

其中, R 为电磁波反射系数, ε_1 和 ε_2 为两种介质的相对介电常数。探测深度由如下两个公式[2]确定:

$$H = \frac{vt}{2}, v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2), (3)$$

c 为真空中的光速, t 为雷达反射波的双程传播时间。 v 为电磁波在介质中的传播速度, 主要取决于介质的相对介电常数。相对介电常数 ε_r 是介质的介电常数与空气介电常数的比值, 范围为 1 (空气) 至 81 (水)。工程勘察中常见介质的相对介电常数见表 1。

Table 1. The relative permittivity of common media

表 1. 常见介质的相对介电常数

介质类型	相对介电常数	介质类型	相对介电常数
空气	1	水	81
灰岩	4~18	花岗岩	4~7
页岩	5~15	粉质黏土	6
玄武岩	8~9	石灰岩	4~18
砂岩	6	土壤和沉积物	4~30

通过对反射波的检测、分析, 就可确定地下不同介质的空间位置、结构、形态和埋藏深度, 可以提前发现隐伏在地下的危险空洞隐患, 提前预警, 在灾难发生前及时采取措施维修处治。

2.2. 应用范围

由于地层对电磁波的衰减随工作频率的升高而增大, 因此低频段多用于探测衰减较大的地下目标或远距离目标, 高频段多用于探测衰减较小的地层、浅部或表面勘测。中间频段既有较大的探测距离又兼顾了分辨率, 所以多用于普查勘探, 而高频段和低频段仪器多用于详查、精查勘探或针对性较强的探测。

同时, 由于雷达波对物体的电磁特性敏感, 因此其主要用途在于探测结构组成、内部缺陷等, 例如可采用雷达波技术探查地下管线、电缆、光纤等分布情况, 也可探测地面下的孔洞和浅层的地层结构, 以及探测混凝土结构中的孔洞和裂缝等缺陷损伤的位置和范围, 多用于质量验收和日常维护等。

2.3. 工作流程

通常, 地质雷达的工作流程分如下 5 步: 1) 对目标体特征与所处环境进行分析, 建立测区坐标, 布置测网; 2) 选择测量参数, 包括设置天线中心频率、采样率等; 3) 建立测区目标体的地质雷达图像特征; 4) 确定地层的电磁波速度; 5) 完成实地测量, 整理报告[3]。

2.4. GRP 数据收集和处理

地质雷达涉及大量信息的收集, 但并非所有收集到的信息都具有工程意义。数据分析前先要了解被

调查地层的主要介质情况并确定其基本条件特征，然后识别其内部结构和条件的变化，有条件的话还要与其他区域调查的类似结构进行比较，从而才能够绘制出准确的重要特征。

通过组合分析地质雷达数据中下面三个主要变量，可以确定地下介质的分布情况：

- 从介质内部和分界面反射的信号振幅、相位和速度，可获得介质材料类型的信息；
- 从收集到的信号的连续性可分析出介质形状；
- 从电磁波通过介质的传播时间可获得介质层厚度或深度信息。

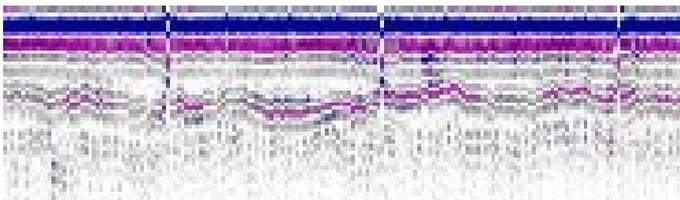
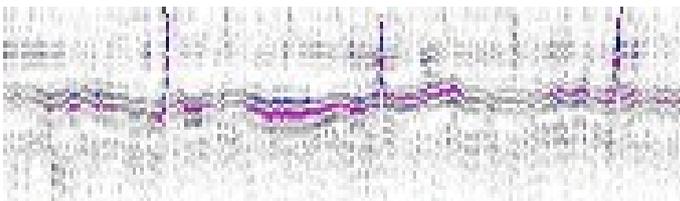
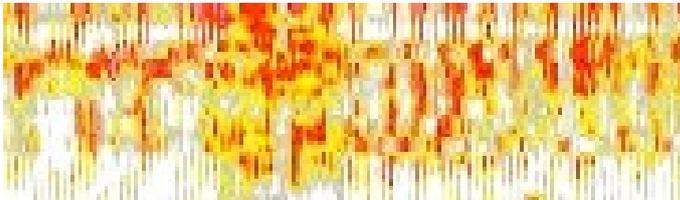
GRP 数据处理旨在优化数据资料、突出目标体、最大限度地减少外界干扰，为进一步解释提供清晰可辨的图像，经处理后的雷达反射波剖面图可进一步用于地质现象解释。

对所记录下来数据分析处理主要有下表 2 所示的几个阶段：

- 初始校正
- 信号修复
- 动态修正
- 噪点消除
- 绘制频谱图

Table 2. The phases of GRP data analysis

表 2. GRP 数据处理阶段示例

处理阶段	示例解释
1	初始校正。 修正了地面上方发射天线到地面的距离的影响以及地面湿度的微小变化所带来的影响。
2	信号修复。 为了易于比较，需保持每条测线的信号振幅相同，但有时一些信号太大而无法被记录。通过这种信号修复调整可以重塑过度增益信号，使其控制在可操作的阈值之内。
3	动态修正。 修正了天线发射器和接收器之间的距离影响。
4	噪点消除。 消除系统的噪点。
处理前	
处理后	
5	绘制频谱图。 所有的 GPR 剖面都在空间上予以重新定位，使每条轨迹都有一个对应的 X, Y 坐标。这样，可以根据接收的信号分析出详细的特征(如介质分层或空洞)，并以全面的空间位置信息表示。
	

3. 工程实例

3.1. 项目概况

阿曼拉斯玛卡兹原油储罐项目的建设场区位于阿曼中部省的东南部，东临阿拉伯海，属于海岸阶地地貌。临近海岸线附近存在明显的陡崖，海拔相对于高程基准面约 105 m。罐区及主要建筑单体均位于阶地上部，地表可见孤立的溶蚀和风蚀残丘，属于典型的喀斯特地形，如下图 1 所示。喀斯特地形区域沉积岩(通常是石灰岩、白云岩或大理石)在地下水的作用下溶解，易形成地下洞穴和裂隙等，大的空洞可能导致突然灾难性的地面破坏，也可能造成渐进的地面沉降，对于工程建设来说是重大安全风险和质量隐患。

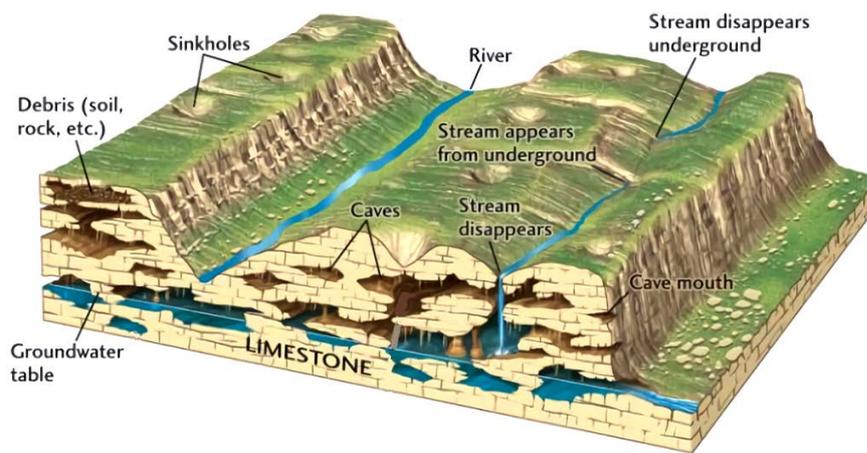


Figure 1. Typical drawing of karst topography
图 1. 阿曼现场喀斯特地形典型图

在工程前期利用钻孔方式进行地质勘察时，钻孔过程中有不同程度的钻杆突然快速下落以及钻孔泥浆丢失现象，证实了部分地下洞穴或裂隙的存在，但由于岩溶分布没有规律，钻探布孔较难掌握，且受钻探工作量和成本的制约，单靠钻探这种单一手段探测地下岩溶情况，从效率和经济上都难尽人意。考虑到地下可能会有更多的溶洞(尤其是隐伏溶洞)会引起设施坍塌或地基沉降，遂决定采用地质雷达物探技术进行溶洞探测，以快速有效地查明岩溶发育带，较准确地判断岩溶空洞的规模和分布情况，并采取相应的处理措施。

根据本工程关键设施的坐标位置，共测绘出分散分布的 14 处主要位置，共约 43,565 m² 的面积大小，采用地质雷达对其进行浅层地表下可能存在的空洞进行探测和记录。

3.2. 现场探测

3.2.1. 探测设备选择

采用美国地球物理探测设备公司(GSSI)所生产的仪器，型号为 SIR3000 数字雷达探测仪，工作主频为 200 MHz，时窗宽度为 100 ns，有效探测深度为 8 m。主要配件由笔记本电脑、控制面板、发射机、发射天线、接收天线、接收机、电缆及附件等。

3.2.2. 探测准备及测线布置

地质雷达探测前必须首先建立测区坐标系统，以确定测线的平面位置，其测网和测线布置应符合以下原则：

- 根据现场地形地物条件情况,使空气中反射波尽量不影响要探测的目标;
- 在探测之前,首先要对所探目标区域的基本情况充分调查,对目标区域附近的地下埋设物(如电缆、管线、暗沟等)也要有较全面的了解,以便于与雷达探测的结果对比,以排除其他因素产生的影响;
- 应尽量避免高压电线、变电站等高频电磁干扰较大的区域;
- 对于未知探测目标走向,可采用布置正交的网格测线,测线间距由所需探测对象的大小而定;
- 根据分辨率要求确定测线或测网的密度;
- 如已知探测目标的走向,可采用测线垂直目标体的长轴的探测方式。

3.2.3. GPR 现场操作

本工程现场进行雷达探测时,场地完成回填并已平整至设计标高,上部覆盖层已挖除,地面较平整,这为雷达探测提供了有利条件。

因为雷达探测其剖面时速度有所变化,为确保采样的一致性,选择用图 2 所示的测量轮车模式来控制采集地质雷达数据的速度,此举也可实时定位所探测到的信号特征。测量轮车在测量开始前进需行校准。

雷达设备以每米 20 次扫描的速度工作,以确保在较短的测量长度内也能提供足够的密度。



Figure 2. GPR field operation
图 2. 地质雷达探测现场操作

传感器(包括天线发射机和接收机)在地面上以受控的速度通过。短脉冲的无线电能量被传输到地面以下并在介质分界面处反射,如遇到空洞等异常,信号将被接收器检测并记录。这种方式的采样非常迅速,收集到的数据实际上是一个连续的截面图,能够快速评估地下介质的大致厚度和状况。

3.3. GPR 结果释义及影响效果因素分析

经过地质雷达对整个场地共 14 处区域进行测量,详细记录了测量范围内地下介质的详情,包括各异常点的坐标、深度等。受篇幅所限,本文仅以第 11 处位置的测量数据为例进行分析,数据分析详见图 3 所示。

地下介质介电常数与周围岩土层差异较大时,雷达波反射强烈,特征明显,易于识别。地质雷达在探测到地下空洞时,由于介质为空气,反射波形态垂向分辨性好,雷达图像在空洞上下表面特征显示较为明显。为了更直观的确定不良地质条件的位置,地质雷达数据处理时对高振幅反射信号的位置进行更加突出的显示。所以,当发现反射振幅显著增加的区域可以被解读为该处地面以下可能有空洞或有介质

材料的明显变化。这些点在图 3 中以网纹线形式标示了出来，不同的颜色和图案类型标示该异常点的不同深度。

需要注意，标记为黑色网格线的这些高振幅反射区域，根据分析并不是由于空洞原因，而是其他因素造成的。这主要因为地质雷达技术所基于的电磁波理论实际上比较复杂，实际探测中会受到介质性质、目标体性质和尺寸、探测环境、仪器性能和技术经验等因素的影响，尤其是当岩体本身不均匀性比较严重或结构面较发育，以及探测环境受干扰较大时，会严重影响其探测效果的准确性。

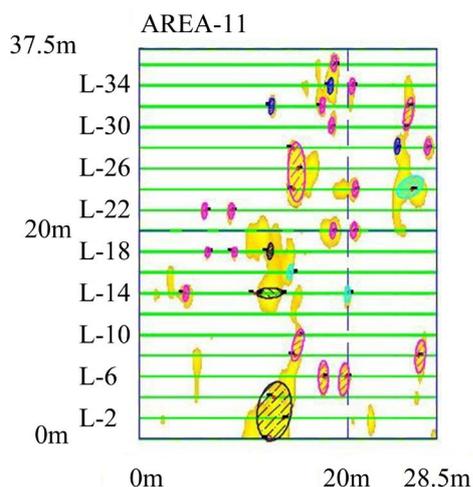


Figure 3. GRP data analysis figure

图 3. 地质雷达数据分析图

上图 3 给出了该探测区域(第 11 区)地质雷达显示异常的一个例子，其反射振幅的深度可按不同颜色分类如下：

- 深度小于 2 米(洋红色)
- 深度 2~3 米(深蓝色)
- 深度 3 至 4 米(浅蓝色)
- 深度 4~5 米(青色)
- 深度大于 5 米(黑色)

下图 4 给出了一个高振幅反射数据的例子，表明可能有空洞存在，或者地下介质层完整性较低。

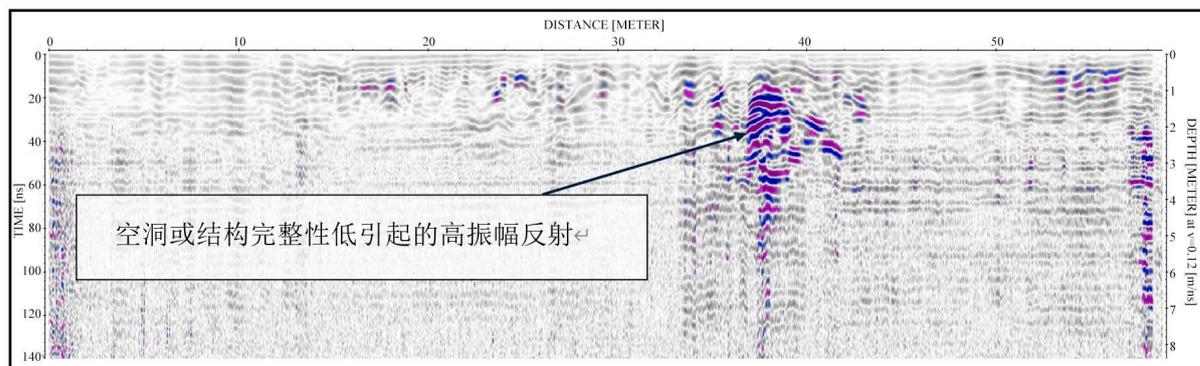


Figure 4. Example of high amplitude reflection due to voiding

图 4. 空洞原因引起的高辐射反射示例图

在分析地质雷达异常特征时,需排除因近地表介质不均匀产生的“假异常”。如当近地表介质疏松、孔隙较大或含有其他积杂物时,会引起雷达电磁波的散射,使图像信号变乱。在这些情况下,要想准确分辨出目标点是否真正异常,需对异常点逐个分析筛选,确定每个异常点的地质含义,对情况复杂的地段,要采用多次重复探测、调试多种参数、平移探测剖面等手段,进一步确认是否属于空洞。下图5给出了此类高振幅反射的例子,是由明显的岩体不均匀性造成的,而非空洞。

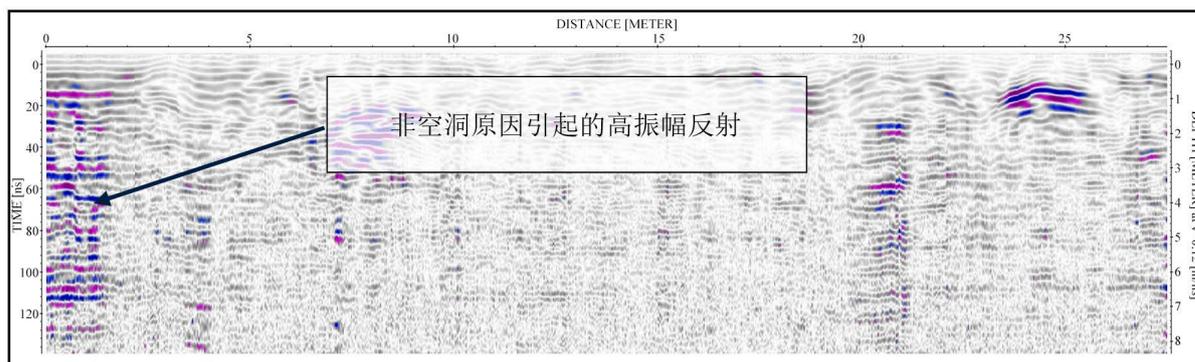


Figure 5. Example of high amplitude reflection due to factors other than voiding

图 5. 非空洞原因引起的高辐射反射示例图

3.4. 开挖验证及处理措施

根据探测报告中确定的异常位置和深度,可选择部分典型的区域进行开挖或钻孔验证。经现场开挖发现,雷达探测的结果与现场实际情况基本符合。经挖掘后发现岩溶空洞稳定性较好,洞内无滴水、漏水,洞体比较干燥,无近期崩塌痕迹,底板表面无大块崩塌物。如图6所示。



Figure 6. GRP result verification through excavation

图 6. 现场开挖验证 GRP 探测结果

通常油气工程建设中常见的对于在岩溶地区施工进行地基处理所采用的处理措施主要有填充法、跨越法、注浆法、褥垫层法和桩基穿越法等。结合本项目现场实际情况,主要适用于填充法和注浆法进行处理。详细的处理方法不在本文的讨论范围。

4. 结论

1) 通过上述利用地质雷达进行地下溶洞勘察的介绍可知,作为一种先进的探测手段,地质雷达方法采用的全方位无损探测是普通钻孔物探的有力补充,运用地质雷达进行地下溶洞勘察不仅工作方法简便、

灵活，且图像直观，效果比较理想。

2) 地质雷达具有浅层探测的优势，分辨率较高，在探测现场即可以对探测成果进行初步的分析，便于及时验证。对作业场地条件要求也不高，既可以点测，又可以连续测量。

3) 数据在后期处理时，需要充分考虑探测区域的地质环境因素，以便做出正确的解读。

4) 地质雷达探测只作为勘察的一种方法，有条件的话，应以其他手段为辅，多手段、多方法的有效配合，才有可能最大程度地提高准确度和精确度。

参考文献

- [1] 戴前伟, 吕绍林, 肖彬. 地质雷达的应用条件探讨[J]. 物探与化探, 2000, 24(2): 157-160.
- [2] 莫洪斌, 周在杞. 微波检测技术的发展[J]. 无损检测, 2009, 31(4): 288-293.
- [3] 李昊佳. 探地雷达工作原理初探[J]. 中国新技术新产品, 2017(4): 127-128.