

# 地质雷达在工程勘察中的应用及效果评估

周忠国

云南省设计院集团勘察院有限公司

DOI:10.12238/gmsm.v7i4.1783

**[摘要]** 随着城市化进程的加速,地下空间的开发利用变得日益重要,对工程勘察的技术要求也随之提高。传统的地质勘探方法在探测深度、精度和效率上存在局限,无法满足现代工程需求。地质雷达作为一种无损检测技术,因其高分辨率、快速响应和非侵入性的特点,近年来在工程勘察领域得到了广泛应用。然而,尽管地质雷达技术的优势明显,其在实际应用中仍面临数据解析复杂、环境干扰大等问题,需要深入研究和优化。本文旨在探讨地质雷达在工程勘察中的具体应用及其效果,为地质雷达技术的进一步发展提供理论支持和实践指导。

**[关键词]** 地质雷达; 工程勘察; 应用; 效果评估

中图分类号: TN95 文献标识码: A

Application and effectiveness evaluation of ground penetrating radar in engineering exploration

Zhongguo Zhou

Yunnan Design Institute Group Survey Institute Co., Ltd

**[Abstract]** With the acceleration of urbanization, the development and utilization of underground space has become increasingly important, and the technical requirements for engineering surveying have also increased. Traditional geological exploration methods have limitations in depth, accuracy, and efficiency, and cannot meet the needs of modern engineering. Geological radar, as a non-destructive testing technology, has been widely used in the field of engineering exploration in recent years due to its high resolution, fast response, and non-invasive characteristics. However, despite the obvious advantages of ground penetrating radar technology, it still faces problems such as complex data analysis and significant environmental interference in practical applications, which require in-depth research and optimization. This article aims to explore the specific application and effectiveness of ground penetrating radar in engineering exploration, providing theoretical support and practical guidance for the further development of ground penetrating radar technology.

**[Key words]** Ground penetrating radar; Engineering survey; Application; Effect evaluation

## 引言

地质雷达作为一种非破坏性的地球物理探测技术,近年来在工程勘察领域得到了广泛应用。随着科技的进步,其高分辨率、快速响应以及对地下结构无损探测的能力,使得地质雷达成为解决复杂地质问题的重要工具。对地质雷达数据的处理与解析方法进行评估,建立一套科学的效果评估指标体系,有助于进一步优化技术应用。

## 1 地质雷达技术原理

地质雷达是一种利用高频电磁波在地层中传播并反射的物理现象,探测地下结构的技术。其基本工作原理是发射高频率(通常在100MHz至2GHz之间)的电磁脉冲,这些脉冲在地下介质中传播,遇到不同电导率或介电常数的界面时,会产生反

射。接收器捕获这些反射信号,通过记录和分析回波的时间延迟、振幅变化和极化特性,推断出地下目标的位置、形状、大小以及性质。

电磁波在地下的传播速度,取决于介质的介电常数,使得地质雷达区分不同类型的地质构造。时间延迟信息可转换为深度信息,而信号的衰减则与地下材料的电磁特性相关,可用于识别不同的地质单元。通过复杂的信号处理技术,如滤波、动态范围调整和图像重建,提高地质雷达图像的分辨率和清晰度,从而提供详细的地下结构信息。电磁波的反射系数及穿透介质时的衰减系数,与介质的介电常数、电导率、导磁系数等相关,例如空气、水、土壤、灰岩、花岗岩的相对介电常数分别为1~81、2~15、7~8、5~7,它们的电导率(mS/m)分别为0.1~30、0.14~

50、10~6~25、10~5~1。此外,三维数据采集和处理技术的发展,使地质雷达在工程勘察中,能更准确地描绘地下三维空间分布情况。地质雷达的技术原理如图1所示:

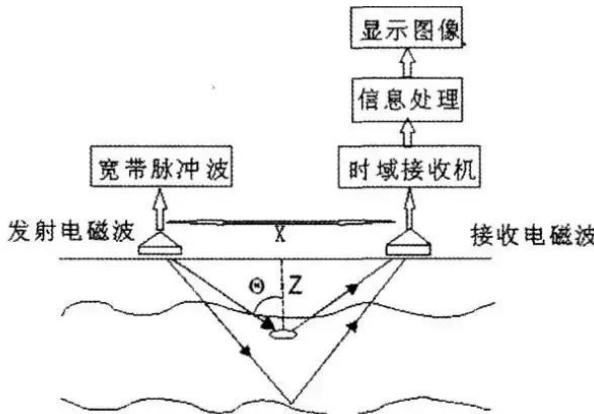


图1 地质雷达技术原理

## 2 地质雷达在工程勘察中的应用

### 2.1 岩土工程勘察

岩土工程勘察是地质雷达技术的重要应用场景之一。通过发射高频电磁波并接收反射信号,地质雷达可无损地探测地表以下的地质结构,为岩土工程的设计和施工提供关键信息。在岩土工程勘察领域,地质雷达能反映地下不同层位的分布、厚度以及含水层的状态,对于识别潜在的不稳定区域和地质隐患具有显著优势。例如,在基础设计阶段,地质雷达可用于识别地下断层、软弱夹层、溶洞或人工填土,这些因素可能影响建筑物的稳定性。在施工过程中,地质雷达技术能实时监测基坑开挖过程中的岩土变形,及时发现潜在的滑坡风险。此外,对于隧道掘进,地质雷达可预判前方的地质条件,避免遇到不可预见的地质复杂性,如岩爆或突水事件,从而提高施工安全性和效率。对比传统钻探和物探方法,地质雷达在时间和成本效益上显示出优越性,其非侵入性特点减少了对现场环境的影响。然而,数据解释的复杂性和对操作者经验的依赖,也是需要进一步研究和改进的方向。

### 2.2 地下水资源调查

地质雷达系统通常在10~1000MHz的频率范围内工作,其中心频率约为100MHz的雷达系统在测距、分辨率和系统轻便性方面表现较好。地质雷达的观测数据可以存储在数字磁带记录器上,并通过微处理器或便携式微机进行数据处理和显示,以实现实时的断面图像显示和打印。在地下水资源调查中,地质雷达能够识别含水层的位置和性质。例如,通过分析雷达图像,研究人员可以确定地下水位的深度和变化趋势。此外,地质雷达图像还可以揭示地下水流动路径,帮助工程师评估水资源的分布和可利用性。在实际应用中,地质雷达探测到的地下水位平均深度可能在15米左右,而在干旱季节,这一深度可能增加到20米。地质雷达在地下水资源调查中的应用还包括划分地层、查明断层破碎带、滑坡面、岩溶、土洞、地下硐室和地下管线,以及水文地质调查。然而,在低电阻率区,如湿润的土壤或地下水丰富的地

区,地质雷达的探测深度可能会受到限制。

### 2.3 矿产资源勘探

地质雷达(GPR)在矿产资源勘探中的应用,主要利用其对地下介质电性差异的高敏感性来识别矿体。GPR通过发射特定频率的电磁波,这些波在地下传播并在遇到不同介质时产生反射。根据斯涅尔定律:

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

其中 $n_1$ 和 $n_2$ 分别是两种介质的折射率, $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 分别是入射角和折射角,可以确定波在界面上的反射和折射行为。当电磁波遇到矿体与围岩的界面时,由于两者电性参数的差异,会产生显著的反射信号。通过测量反射信号的到达时间和波速,可以计算矿体的深度,具体公式如下:

$$d = \frac{ct}{2}$$

其中 $d$ 是矿体深度, $c$ 是电磁波在地下介质中的传播速度, $t$ 是反射信号的旅行时间。

地质雷达勘探的分辨率取决于使用的频率,高频率提供更高的分辨率但较小的穿透深度,而低频率则提供更大的穿透深度但较低的分辨率。在矿产资源勘探中,地质雷达通常与地质、地球物理和地球化学方法相结合,以提高勘探的准确性和效率。例如,一项勘探任务可能使用中心频率为100MHz的GPR系统,该系统在提供足够分辨率的同时,也能保持较佳的穿透能力,从而有效识别地下的矿产资源分布。

### 2.4 土体特性分析

地质雷达在工程勘察中发挥了关键作用。通过发射高频电磁波并接收反射信号,地质雷达能够准确揭示地下不同土层的分布、厚度、孔隙率、含水量以及潜在的不均匀性。例如,利用雷达回波的时差( $\Delta t$ )和幅度(A),可以推断出土层的电磁参数(如介电常数 $\epsilon$ )和电导率( $\sigma$ ),进而评估土体的稳定性和承载能力,具体公式如下:

$$\epsilon = \frac{c \cdot \Delta t}{2d}$$

$$\sigma = \frac{cA}{4\pi d}$$

其中, $c$ 是电磁波在空气中的传播速度, $d$ 是波传播路径的长度。

在软土地区,地质雷达能够精准识别软弱夹层,预测地面沉降和建筑物基础的潜在问题,为工程设计提供重要参考。此外,对于受污染的土壤,雷达图像中的异常特征能够直观地指示污染物的存在和分布情况,为环境修复工作提供了关键数据。在冻土区,地质雷达数据则可帮助识别冰楔和冻胀现象,为冻土工程设计提供必要依据。

### 2.5 考古学研究

地质雷达在考古学领域的应用日益广泛,因其非破坏性和高精度的特点,成为考古发掘的重要辅助工具。通过发射高频电

磁波并接收反射信号,地质雷达可以揭示地表下的人工结构和文物分布,帮助考古学家识别墓葬、古代建筑遗址以及隐藏的文物。在考古现场,地质雷达可探测到不同密度和导电性的土壤层,这些变化与人类活动有关。例如,识别埋藏的墓室、窖藏、城墙或道路的边界,甚至区分不同年代的沉积层,为确定遗址的年代顺序提供依据。在一些案例中,地质雷达成功揭示了因自然侵蚀或人为活动而被掩盖的古代遗迹,如意大利庞贝古城的地下结构和埃及的未发掘陵墓。此外,地质雷达还能用于监测考古挖掘过程中的稳定性,确保在不损害文物的情况下安全进行发掘工作。例如,在对古代水道或隧道的探索中,地质雷达可以预判潜在的坍塌风险,指导考古人员制定安全的发掘方案。

### 3 地质雷达在工程勘察中的应用效果评估

#### 3.1 高分辨率与探测深度

高分辨率意味着GPR能够区分地下相近的多个目标,而探测深度则指GPR信号能够穿透的最大深度。在实际应用中,这两个参数往往需要根据具体的地质条件和勘探目标进行权衡。根据地质雷达的原理,其分辨率主要由天线频率决定。高频信号提供较高的分辨率,但穿透深度有限;低频信号则相反。例如,使用中心频率为1GHz的天线可能具有较高的分辨率,但穿透深度可能只有几米,适合于浅层结构的精细探测。而使用中心频率为100MHz的天线,虽然分辨率较低,但穿透深度可达数十米,适用于深层结构的探测。

在评估GPR的应用效果时,通常会结合具体的地质雷达图像和数据。例如,一项工程勘察可能使用频率为500MHz的GPR系统,在干燥的砂岩地层中,探测深度可达20米,而在湿润的粘土地层中,由于电磁波衰减较快,探测深度可能降至5米。此外,通过分析GPR图像上的反射波形和振幅,可以评估地下结构的连续性和完整性,如图中显示的反射波形突变可能指示地下存在裂隙带。

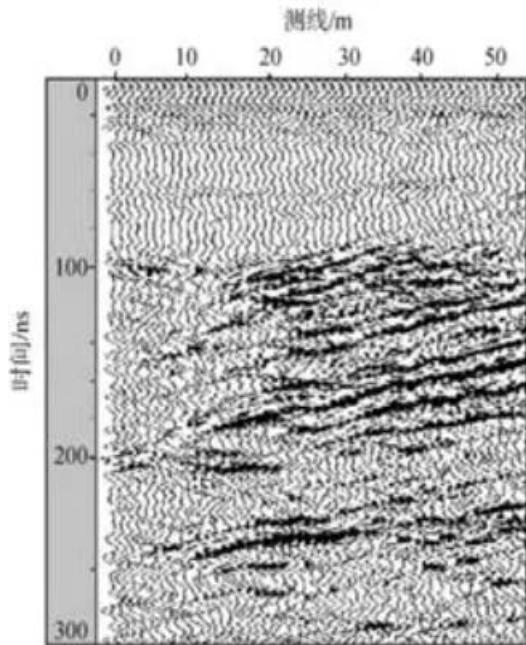


图2 裂隙带地质雷达图像

#### 3.2 快速与实时性

传统的地质勘探方法耗时较长,而地质雷达可实现在短时间内覆盖大面积的探测区域,极大提高了工作效率。例如,在城市地下管线探测中,地质雷达可在几小时内完成对大面积区域的扫描,实时生成二维或三维图像,迅速定位目标物体的位置、形状和深度,为工程决策提供及时信息。在施工监控中,地质雷达的实时性尤为重要。通过连续的雷达扫描,实时监测地下结构的变化,如隧道掘进过程中的岩体移动、地面沉降等,及时预警潜在的安全风险,确保施工安全,具体而言如下表所示。

表1 地质雷达应用场景性能指标

应用场景	探测速度(平方公里/小时)	探测深度(米)	分辨率(厘米)	实时性
城市管线探测	5	10	2	高
隧道施工监控	2	20	1	极高
地质灾害预警	3	15	5	中

#### 3.3 非破坏性

传统的地质勘探方法,如钻孔取样或开挖,会对地表和地下结构造成不可逆的影响,甚至引发安全风险。而地质雷达发射高频电磁波,并接收反射信号来探测地下结构,整个过程无需直接接触地层,因此不会对探测区域产生任何物理损害。非破坏性特性使得地质雷达在诸如历史遗迹保护、重要基础设施周边的勘察以及环境敏感区的地质调查中尤为适用。例如,在考古研究中,地质雷达可无损地揭示地下文物和古代建筑的分布,避免了因挖掘导致的文物破坏。在城市更新项目中,非破坏性探测能够准确识别地下管线和设施的位置,减少施工过程中意外破坏的风险,确保公共设施的安全运行。同时,非破坏性也意味着地质雷达,能在不影响现有建筑物稳定性的情况下,开展深入的地下结构检测,为建筑安全评估和维护提供有力支持。尽管地质雷达的非破坏性带来了诸多益处,但其数据解释的复杂性和对操作者专业知识的要求较高,是当前技术应用中需要进一步改进和优化的地方。未来的研究应更专注于提高数据处理的自动化程度,以便更准确、更快速地解析地下信息,同时降低对专业技能的依赖,进一步推广地质雷达在工程勘察中的广泛应用。

#### 3.4 多功能性

地质雷达技术在工程勘察中的多功能性,体现在其广泛的应用领域和适应各种复杂地质条件的能力。除常规的岩土工程勘察、地下水资源调查和矿产资源勘探,地质雷达还可用于考古学研究、环境监测、城市基础设施检测等多个方面。例如,在考古发掘中,地质雷达能够无损地探测地下文物分布,为遗址保护提供关键信息;在环境监测中,追踪地下水污染扩散,评估污染物的层次和范围;在城市基础设施检测中,地质雷达有效地识别地下管道、电缆的位置和状态,避免施工中意外损坏。地质雷达技术的多功能性,使地质雷达成为现代工程勘察不可或缺的工

具, 极大提高了工作效率和准确性。

#### 4 结束语

地质雷达作为一种非破坏性的高精度探测工具, 其在岩土工程、地下水资源调查、矿产资源勘探、土体特性分析以及考古学研究等多个领域, 展现了显著的优势。通过深入分析地质雷达的工作原理, 发现其高分辨率、快速实时性、非破坏性和多功能等应用效果, 极大提升了工程勘察的效率和准确性。总之, 地质雷达在工程勘察领域的应用已经取得了显著成果, 但仍有提升空间。未来的研究应着重于技术创新, 提高数据处理能力, 以及开发更为适应不同工程场景的应用策略, 以充分发挥地质雷达的潜力, 更好地服务于各类工程项目的规划与安全。

#### [参考文献]

[1]黎阳曦, 王兴翔, 周尚. 地质雷达在岩溶地区岩土工程勘

察中的应用[J]. 环球市场, 2019, (27): 380.

[2]陈昌彦, 张在明, 张彦峰, 等. 地质雷达技术在复杂工程地质条件下的岩土工程勘察中的应用[J]. 工程地质学报, 2004, 12(z1): 401–405.

[3]惠文林. 浅析地质雷达在工程勘察中的应用[J]. 世界有色金属, 2020, (3): 215, 217.

[4]朱斌, 徐为海. 地质雷达在岩土工程勘察中的应用[J]. 城市地理, 2017, (8): 102.

[5]荆智辉. 地质雷达技术在岩土工程勘察中的应用[J]. 工程技术研究, 2019, 4(12): 83–84.

#### 作者简介:

周忠国(1986--), 男, 汉族, 云南昭通人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 工程勘察。