

探地雷达及其应用

刘 康 和

摘 要 探地雷达是近年来发展起来的一种物探新技术新方法,已在许多领域得到应用,并取得了良好的应用效果。文章概述了探地雷达的基本原理、野外观测方式和应用中的某些局限性,最后给出了雷达探测的一个实例。

关键词 探地雷达 地球物理勘探 应用

探地雷达 (GPR) 作为近年发展起来的物探技术新方法,以其高精度、高效率、高分辨率、快速经济、灵活方便、剖面直观等优点,受到工程技术人员的青睐。在铁道、水利水电、地矿、冶金等勘察领域得到愈来愈广泛的应用,其探测效果显著。目前我国使用 GPR 是由不同国家设计制造,但其工作原理、勘察效果及其数据处理大同小异。

1 GPR 基本原理

雷达波属高频电磁波的范畴,其原理基于物理学中电磁波反射理论,工作过程如图 1 所示,即由发射天线 (T) 发射高频电磁波,当它遇到地下地质体或介质分界面时发生反射,并返回地面,被放置在地表的接收天线 (R) 接收,由主机记录,根据反射电磁波的特征,达到了解地表以下地质体特征的有关信息,求得地质体或介质分界面的位置和埋深。

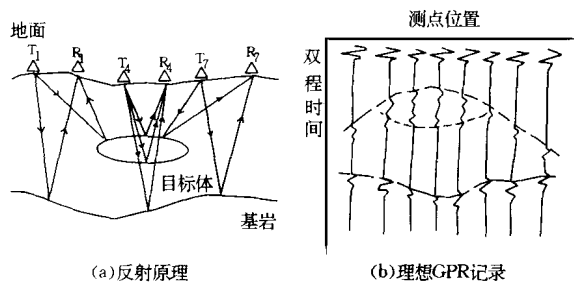


图 1 GPR 剖面法记录示意图

雷达波在界面上的反射和透射遵循 Snell 定理。实际观测时由于发射天线与接收天线的距离很近 ($\leq 2\text{ m}$), 所以其电场方向通常垂直于入射平面, 并近似看法向入射, 故反射系数 γ 为:

$$\gamma = \frac{Z_2 \cos \theta_1 - Z_1 \cos \theta_2}{Z_2 \cos \theta_1 + Z_1 \cos \theta_2}, \quad Z = \frac{\omega \mu}{K}$$

式中: θ_1 、 θ_2 分别为入射角和折射角; Z_1 、 Z_2 为上、下层介质的波阻抗; ω 为圆频率; μ 为导磁率; K 为波数。

对于雷达波常用频率范围 (25~900 MHz), 一般认为电导率 $\sigma < \omega \epsilon$, 因而反射系数 γ 可简写成:

$$\gamma = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}$$

式中: ϵ_1 、 ϵ_2 分别为上、下层介质的相对介电常数。

应用雷达记录的反射时间可求得目的层深度 (H), 即

$$H = \frac{1}{2} t_R \cdot V = \frac{t_R \cdot C}{2 \sqrt{\epsilon_r}}$$

式中: t_R 为目的层雷达波的反射时间; C 为 GPR 波在真空中的传播速度 ($300\text{ m}/\mu\text{s}$); V 为目的层以上介质雷达波速值; ϵ_r 为目的层以上介质相对介电常数均值。

表 1 列出了常见介质的相对介电常数及雷达波速等电磁参数。

表 1 常见介质的电磁参数

介 质	相对介电常数 ϵ_r	电磁波速 V (m/ μs)	电导率 σ (s/m)	衰减系数 α (dB/m)
空气	1	300	0	0
纯水	81	33	0.1~0.3	0.1
海水	81	10	400	103
灰岩	7~16	75~113	0.001~2.5	0.4~1.0
花岗岩	5~7	113~134	0.001~1	0.01~1
片岩	5~15	77~134	5~10	1~100
混凝土	4~10	95~150	1~5	
黏土	4~16	74~150	10~100	1~300
砂	4~30	55~150	0.1~7	0.01~0.3
淤泥	9~23	63~100		
碎(堆)石	9~25	60~100		
沥青	3~5	120~180		
玄武岩	8	110	10	

2 探测方法及资料处理

根据研究内容及探测目的的不同,其探地雷达的观测方法 (即发射天线与接收天线的相对位置和移动关系) 也不相同, 通常可采用如图 2 所示的 4 种观测方式。由图 2 可见: (a) 剖面法类似于单次覆盖的地震反射法; (b) 穿透法类似于无线电波透射法; (c) 广角法类似于折射地震法; (d) 共中心点法类似于多次覆盖地震反射法。

实际工作中,以剖面法最为常见。其仪器工作参数的选取原则一般为: 先由已知地层求出待测目标体以上地层的平均雷达波速 (可按图 2 中 (b)、(d) 两法求得), 然后根据所要勘察的目标深度和分辨率 (其纵向分辨率为波长的 1/2) 选择天线主频及雷达工作时段。

雷达资料的处理与地震勘探数据处理基本相同, 主要有 ①滤波及时频变换处理; ②自动时变增益或控制增益处理; ③多次重复测量平均处理; ④速度分析及雷达合成处理等。

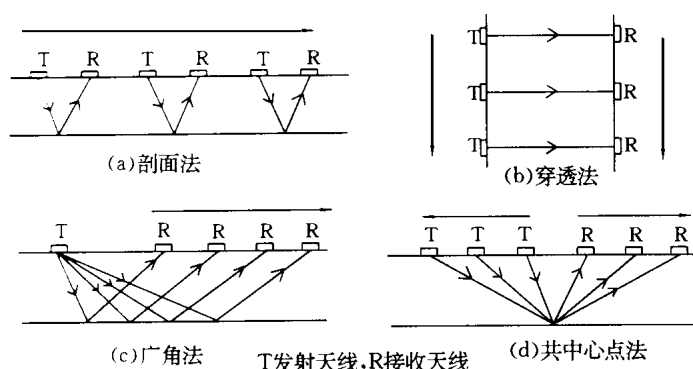


图2 探地雷达观测方式示意图

3 应用及实例

探地雷达的应用是多方面的,按其探测深度一般可分为:

①浅部应用:中心主频大于1 000 MHz,探测深度小于0.5 m,主要用于公路路面、机场跑道、墙厚及墙内空洞和隐藏物的探测等;②中深度应用:中心主频100~900 MHz,探测深度0.5~8 m,主要用于地下管线、地下空洞、考古研究、混凝土质量检测等;③大深度应用:中心主频小于100 MHz,探测深度10~50 m,主要用于岩土工程勘察,以探明地下岩溶洞穴、堤坝隐患、地基勘察、岩土层划分、基岩埋深及其构造破碎带的分布形态等。

此外,GPR也已应用于航空、卫星测量及一些特殊领域,可以推定,随着人们对GPR研究的不断深入,它的应用范围也将进一步拓宽。

探地雷达在水利水电工程建设中以大、中深度的应用为主,以查明地下地质结构,进行岩土分层,探测坝体隐患等岩土工程勘察项目为主,发挥着愈来愈大的作用。天津院于1997年1月引进瑞典ABEM公司生产的RAMAC探地雷达,自开箱验机至今已在多个工程中得到应用,均取得了良好的应用效果和经济效益。如在岳城水库主坝散浸的探测中,选用100 MHz和50 MHz的天线进行施工测量,取得了详细的雷达图像。由于同一介质在含水和干燥时的电导率不同,故对雷达波的吸收衰减亦不相同,用介质含水比干燥时对雷达波的吸收衰减相对强烈的特点,来判定坝体含水量相对较大的地段。图3为主坝下游高程133 m处平行坝线的1条雷达剖面,起始桩号为2+900,终止桩号为3+500,测线长600 m。图中清晰地反映出坝体土层的分布形态、成层分布规律和坝体含水量相对大的坝段。其中坝体土层深7 m后出现变化,即3+155~3+300桩号段同一层面略有升高,而3+300~3+500桩号段同一层面稍降低外,其余均较平坦一致。根据同一介质饱水与干燥时对雷达波能量吸收衰减的差异判定出坝体含水量相对较大地段为:2+980~3+100和3+170~3+300两桩号段,其顶部埋深约5~6 m。由雷达探测结果综合分析后认为:坝体内不存在渗漏通道,其含水量的大小只与大气中水、降雨量及坝体土的密实度有关,而与库水或水位的高低无水力联系。此结论与其它勘察方法所得结论基本吻合,为评价

坝体散浸及今后处理方案的选择提供了科学依据。

4 探地雷达的局限性

尽管GPR在工程勘察领域有着广泛的应用,且探测效果也很显著,但由于雷达波的频率极高,因此在地层中其能量的吸收衰减也很大,加之仪器性能所限,雷达的勘探深度较浅,对于第四系地层来说,其有效探测深度一般不足30 m,而对于电阻率较高(电导率很低)的岩石层来说,其探测深度相对大些,对于电阻率很低(电导率很高)的地层其探测深度很浅,其次,GPR图像一般不能确定地下目标体(2度或3度体)的横向尺寸,如管径大小、球状体或空洞的直径及范围较小的沟槽宽度等。另外,由于地层岩性的不均匀性及其组成的复杂性,使得雷达波速的测试计算尚有一定困难,有时只能采用表1中的经验值进行埋深计算,将会产生一定的误差,也是今后加强研究的基础资料之一。

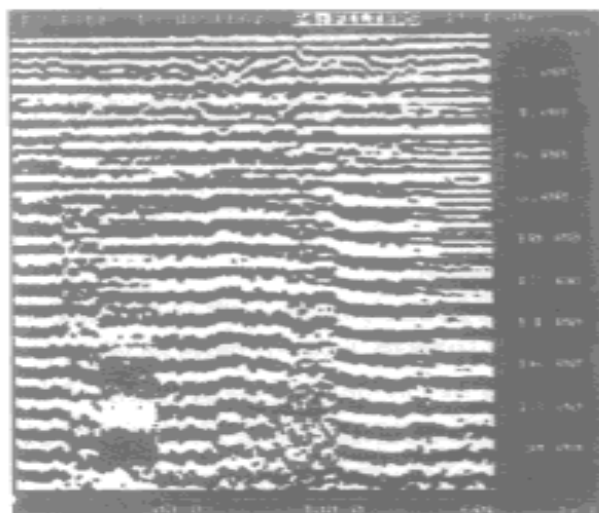


图3 主坝下游133 m处平行坝线雷达剖面

总之,任何一种物探方法都不是万能的,有一定的条件性和局限性,正确认识和使用这些物探技术(包括探地雷达技术),使其更有效地解决岩土工程勘察中的有关技术问题,充分发挥其有效作用,更好地为工程建设服务。

参 考 文 献

- 1 刘康和译.应用地质雷达探测灰岩洞穴.人民长江,1993(11)
- 2 (佚名).水利水电工程勘测设计专业综述II 勘测.工程物探部分.成都:电子科技大学出版社,1993.7
- 3 洪代玲译.隧道衬砌无损检测技术的发展.世界隧道,1997,1

作者简介

刘康和 男 高级工程师 水利部天津水利水电勘测设计研究院 天津 300222

(收稿日期 1998-06-25)