

16-20

地质雷达原理及其在水利水电工程中的应用

施逸忠

TV22

(河海大学地质与岩土工程系 南京 210098)

摘要 地质雷达是近期发展较快的一种工程勘察手段。本文较详细地介绍了地质雷达的基本原理和应用中需要考虑的一些特殊问题,简要介绍了地质雷达在水利水电工程勘察中的应用以及在将来工程勘察中的重要地位。

关键词 地质雷达 雷达方程 最大探测距离 色散介质 层析成像技术

早在本世纪初,德国 Leimbach^[1]等人就相继利用连续电磁波及脉冲电磁波信号,对地下埋藏物体进行探测及定位,可以说这就是地质雷达技术的雏型,由此引起了人们对此手段的关注。50年代后,由于第二次世界大战军用探空雷达技术的迅猛进展,促进了探测地下目标物技术的发展。与探空技术相似,地质雷达也是利用高频电磁波的反射波特性探测目标物和某些地质现象,只是它是从地面向地下发射电磁波来实现探测目的,故亦称为探地雷达。

地质雷达是一种非破坏性的探测技术,80年代已开始应用于工程勘察。由于探测分辨率高,抗干扰能力强,现场直接提供实测剖面记录图象,以及具有仪器轻便和工作效率高等优点,在城建、交通、矿山、水利和地质环保等领域的应用中,取得了良好的效果。当前地质雷达由于使用了高频(中心频率达数百兆赫)宽频带短脉冲(脉冲宽度小到1~2 ns)和高速采样技术(采样间隔达0.06 ns),探测的分辨率远远高于其它地球物理探测手段。实践表明,在较大范围探测深度内,可以满足工程勘察的需要。地质雷达技术必将在不久的将来应用在更广泛的勘察技术领域。

1 地质雷达的理论基础^[2~4]

1.1 雷达方程式

如图1所示,靠近地面设置地质雷达,在天线的正下方埋有被探测的目标。当地质雷达发射功率为 P_t 时,其目标物的接收功率 P_r 可近似用雷达方程求之,公式为:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r L_t L_r L_p S_0 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad (1)$$

式中 P_t 和 P_r 分别为发射和接收功率; G_t 和 G_r 分别为发射和接收天线增益; L_t 和 L_r 分别为发射和接收天线与大地的耦合损耗; L_p 为电磁波在地下的传播损耗; S_0 为埋地目标的雷达反射截面; λ 为所用电磁波的波长; R 为天线到目标的距离。

目标的最大探测距离 R_{max} 就是能够得到与接收机内产生的噪声相等的最小可接

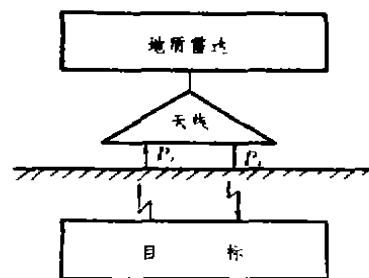


图1 地质雷达和目标

收功率 $P_{\min}$ 的距离, $P_{\min}$ 可用下式求得:

$$P_{\min} = KT_0BF_n \cdot \frac{S}{N} \quad (2)$$

式中 K 为玻尔兹曼常数 ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K); T_0 为雷达接收机的等效噪声温度 (K); B 为雷达接收机的等效噪声宽度 (Hz); S/N 为检测信号需要的信噪比; F_n 为接收机的噪声指数。

假设收发共用天线增益为 G , 则最大探测距离 $R_{\max}$ 可用下式求得:

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t G^2 L_r L_p S_0 \lambda^2}{(4\pi)^3 K T_0 B F_n (S/N)} \right]^{1/4} \quad (3)$$

1.2 电磁波在地下的传播

探讨电磁波在地下的传播, 实际上就是研究电磁波在地下的衰减特点。一般说来, 电磁波在地下的衰减要比自由空间大得多, 相位也要发生变化, 属色散介质, 这种衰减的大小和相位都随频率 ω 的变化而变化。设电磁波在地下的传播距离为 R , 传播常数为 γ , 场强以 $e^{-\gamma R}$ 衰减。

$$\gamma = \alpha + i\beta \quad (4)$$

$$\alpha = \omega \left[\frac{\epsilon_2 \mu_2}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_2}{\omega \epsilon_2} \right)^2} - 1 \right) \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$\beta = \omega \left[\frac{\epsilon_2 \mu_2}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_2}{\omega \epsilon_2} \right)^2} + 1 \right) \right]^{1/2} \quad (6)$$

式中 γ 为传播常数; α 为衰减常数; β 为相移常数; $\sigma_2, \epsilon_2, \mu_2$ 分别为地下的电导率、介电常数和导磁率。

电磁波在地下的传播速度为 V_p , 表达式如下:

$$V_p = \frac{\omega}{\beta} = \sqrt{\frac{2}{\epsilon_2 \mu_2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_2}{\omega \epsilon_2} \right)^2} + 1 \right)}^{-1/2} \quad (7)$$

由式(7)可见, $\epsilon_2, \mu_2, \sigma_2$ 和 ω 的变化, 都将导致 V_p 变化。

1.3 地质雷达设计中几个特殊问题

a. 探测深度。当前, 所探测的地下深度浅到几厘米, 深到数十米。为了满足对极浅层探测的要求, 系统需要几纳秒以下的极

窄脉宽信号, 这点在设计系统时应该予以考虑。

b. 天线。探地雷达天线是面向大地使用, 在设计上自然与面向自由空间所用的天线不同。探地雷达主要采用下列四种天线类型: ①振子天线。总的特点是方向性低, 线性极化的带宽有限。它的优点是体积小、结构简单、能有效地识别平面目标; ②行波天线。通常使用有螺旋型天线, 如介质棒天线。它的优点是宽频带; ③非变频天线。这类天线的阻抗特性和方向图基本上不随频率变化而变化, 能够工作在极宽的频带上; ④孔径天线。典型的天线有喇叭天线, 可用在探测深度较浅的调频连续波探地雷达。

另外, 天线和大地表面的耦合也是一个很重要问题。天线发射的电磁波有一部分在地表被反射, 余下的部分入射到地下。地下构造为层状时, 产生的现象也和表面相同, 如果斜向入射, 就象光线一样, 在路径上产生折射。为了简化起见, 此处只考虑地表面部分, 如图2所示。电磁波在界面上的反射系数 $R_{\text{反}}$ 和透射系数 $T_{\text{透}}$ 的定义如下:

$$R_{\text{反}} = \frac{\text{反射电场}}{\text{入射电场}}$$

$$T_{\text{透}} = \frac{\text{透射电场}}{\text{入射电场}}$$

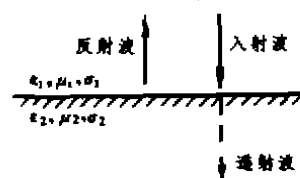


图2 电磁波在界面上的反射和透射

c. 介质。土和水一样, 均属于衰减大的介质, 其性质不仅和降雨等气象条件有关, 也和土的成分、应力等地质条件有关。当地下有局部不均匀介质(如岩石、断层和地层分布等), 尤其是人工掘进作业区所遗留下的各种杂物, 电磁波在这样的介质中传播, 将会造成波形弥散, 难以和埋地目标相区别, 判读起来就非常困难。

除此之外, 电磁波在介质内的传播速

度,要比在自由空间中慢,倘若不知道电磁波在地下的传播速度,就不能准确地确定目标位置。特别在非均匀介质时,更不能得到正确的探测深度,传播速度也会因含水率等的变化而变化,因此也需要考虑因雨和雪等导致含水率改变的情况。

2 地质雷达系统^[2]

迄今为止,已研制出多种体制的探地雷达。比如:①使用窄脉冲(脉冲或单脉冲)来检测延迟时间的脉冲雷达;②使用扫频波检测接收波和基准波的频率差的 FW-CW 雷达;③利用连续波来测相位,改变频率实行多频观测的雷达(脉冲合成、步进 FW 雷达);④由物体和地表面的反射波产生的拍频变化测深度的雷达;⑤为了增大探测深度,发射线性调频脉冲,接收后进行脉冲压缩,再放大信号功率的线性调频雷达也在研究中。另外,还使用连续波从接收反射功率的变化中,观测有无埋地物体的雷达等。以上均是反射回波方式雷达。如果把天线埋入地下,检测透射波的振幅和延迟时间,这就是透射式雷达。一般说来,以高分辨率探测浅地层时,可用基带脉冲(无载波单脉冲波形),探测深地层,则用载波脉冲。这里只介绍具有 VHF 频谱的基带脉冲探地雷达的结构示意图,如图 3 所示

图 3 所示这种雷达是由 6 ns 单脉冲发生器、收发信号分离电路(收发转换开关),加载电阻拓宽频带的平面偶极天线(在 50~500 MHz 内,输入端的驻波比在 2 以下),带灵敏度时间控制电路的接收机,取样器和图象显示器(彩色)构成。

3 地质雷达在水利水电工程中的应用^①

我国水利部、能源部、铁道部和中国地质大学近年来从加拿大、美国、英国及日本等国陆续引进了不同型号的地质雷达,进行了一系列的试验,并逐步扩大到工程应用中。

3.1 地质剖面分层及基岩埋深的探测

地质雷达已广泛应用于确定基岩埋深,上覆层(土壤、第四纪风化层等)出露或基岩风化带划分等方面。如利用加拿大 EKKO 地质雷达系统在湖北黄陂潞水河床进行的基底形态探测,得到了如图 4 所示的剖面图,层次分明,与钻孔资料相吻合。

3.2 堤坝内部空穴和裂缝的探测

地质雷达在堤坝隐患处(裂缝、洞穴)探测、堤坝安全性监测和施工质量监测中,做了大量的工作。如黄委会在黄河大堤上做的内部裂缝与洞穴试验,如图 5 所示。记录中表明了有无裂缝的显著区别,获得了令人满意的结果

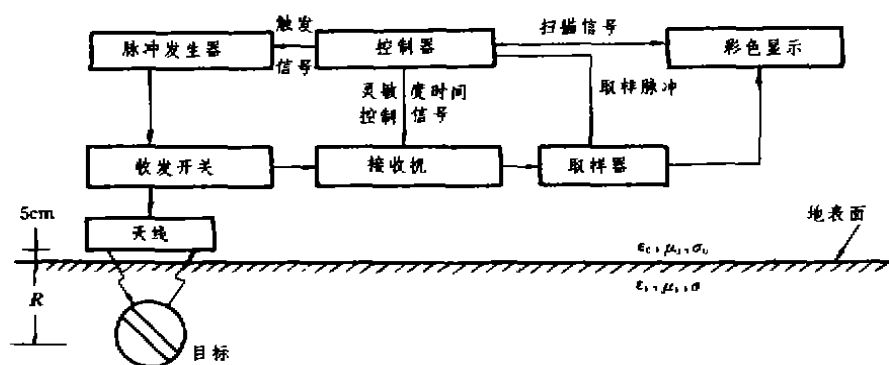


图 3 地质雷达的结构

① 本节内容参考李张明及雷迪有限公司所提供的资料。

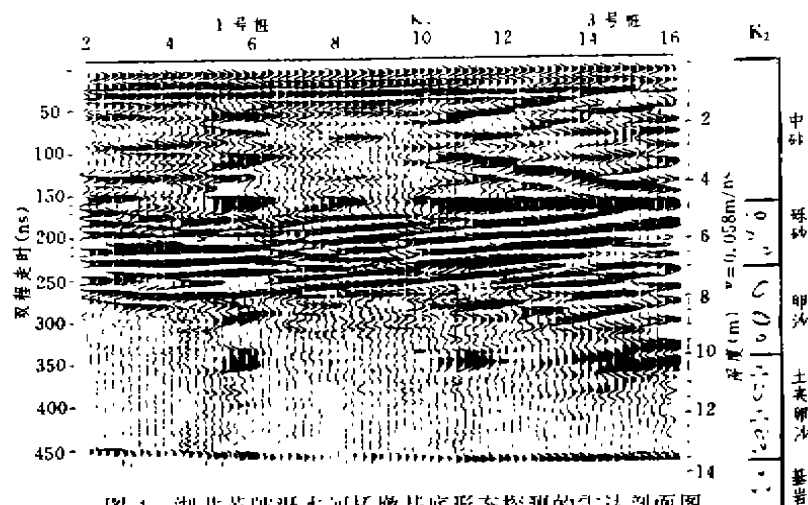


图4 湖北黄陂渭水河桥墩基底形态探测的雷达剖面图

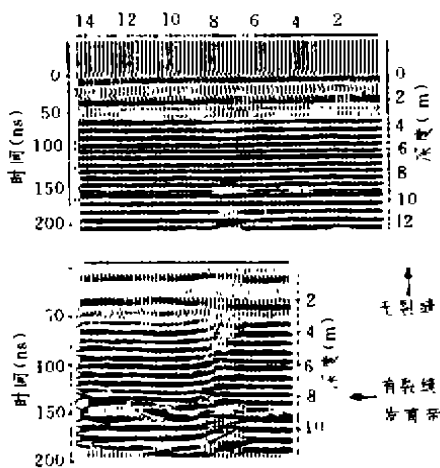


图5 黄河大堤上裂缝探测

3.3 地下岩溶与裂隙探测

贵州乌江东风水电站、天生桥二级水电站以及云南鲁布革水电站等,都分别使用了日本 OYO 公司的 YL-R₂, 美国 SIR-8 型,加拿大 EKKO-IV 地质雷达,展开了岩溶和裂隙的研究,结果表明对于探测灰岩洞

壁 20 m 范围内的岩溶是有效的。1991 年,贵阳勘测设计院进口了一部 SIR-10 型地质雷达,专门用于灰岩洞壁岩溶探测工作。这无疑会大大促进该地区水利水电工程勘探工作的进展。

3.4 地下水资源及水污染范围的检测

在世界范围内,可供使用的纯净地下水资源日益缺乏,因此寻找地下水及划定地下水位越来越引起人们的关注。另外,由于污水的排放,造成可饮用水大量减少,对于水文地质工作者来说,希望采用各种方法对废水排放场地进行调查,并加以圈定污染范围。

图 6 表示某受污染场址得到的雷达断面图,其测线方向与地下水流向垂直。这里的土壤层为粉细砂,测线段大部分基岩埋深在 20 m 左右。雷达记录中的反射波来自覆盖层中的粒径和密度有变化的那些层,反射波减弱或消失的区域指示了受污染的部位,

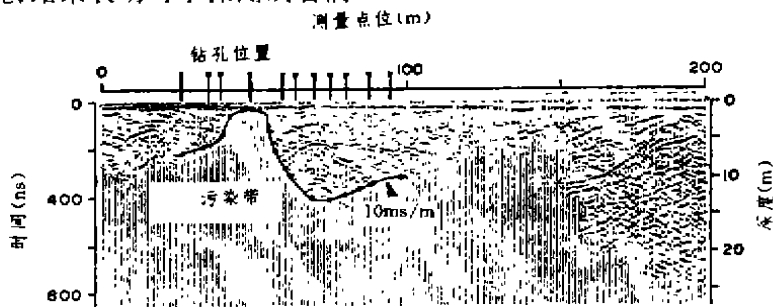
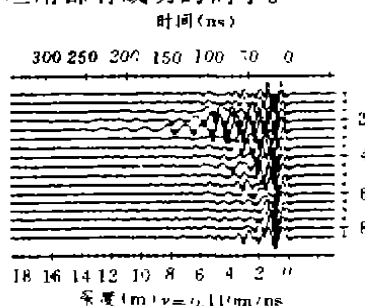


图6 受污染场址的雷达断面图

因为这些部位导电率增大,导致雷达信号的衰减。

测线上打了几眼钻井,并测量了地下水的导电率。剖面图上的黑色实线表示在其之下的土壤层孔隙水导电率大于 10 ms/m 。已知该地区土壤类型基本单一,雷达资料表明污染区在测点 $40 \sim 60 \text{ m}$ 段接近地表,与钻孔资料相符合,在 $110 \sim 150 \text{ m}$ 段,污染区距地表约 6 m 深,而水文地质人员事先并未预料到此区域内已发生污染,因此他们计划在该测线上增加钻孔进行验证,并作导电率的测量。此外,雷达还可用来确定废水贮藏附近最佳监视井位。

地质雷达还在滑坡、风化、地陷勘测和隧道施工中发挥了作用。另外对于隧道围壁的地质隐患、掌子面前方的地质险情探测(见图7),以及护堤抛石层的测量中,地质雷达的应用都有成功的例子。



1-4 广西天生桥引水隧洞掌子面雷达探测图

综上所述,利用地质雷达能对地下目标形状、埋深及材料等特性,作出判断、识别和成像。而在地质雷达基础上发展起来的电磁波层析成像技术和弹性波层析成像技术(CT技术)一样,是当前处在研究前沿的方向性领域,可以预见该技术对勘探地球物理发展有着不可估量的重大价值。

参考文献

- 1 荒井郁男. 地中レーダシステム. 電子通信学会論文誌, 1983, J66-B(6): 703~714
- 2 Clemene, et al. Applicability of radar subsurface profiling in estimating sidewalk undermining.

Transp Res Rec, 1980: 102~110

- 3 方广有等. FD-TD法分析频变媒质中基带脉冲波传播和散射. 电波科学学报, 1994(4): 16~18

(收稿日期: 1995-05-18)

(上接第5页)

- 13 陈正汉. 非饱和土固结的混合物理论——数学模拟、试验研究、边值问题: [博士学位论文]. 西安: 陕西机械学院, 1991
- 14 Gan J K-M, Fredlund D G. Shear strength characteristics of two saprolitic soils from Hong Kong. In: Sino-Canadian Symposium on Unsaturated Soils, Wuhan, 1994. 81~107
- 15 Shen Z J. Reduced suction and simplified consolidation theory for expansive soils. In: Alonso E E, et al eds. First Int Conf on Unsaturated Soils, Paris, 1995, Vol 3: 1321~1328
- 16 Skempton A W. Effective stress in soils, concret and rock. Pore Pressure and Suction, Butterworths, London, 1960
- 17 Cui Y J, et al. An elasto-plastic model for compacted soils. In: Alonso E E, et al eds. First Int Conf on Unsaturated Soils, Paris, 1995, Vol 2: 763~710
- 18 沈珠江. 土体结构性的数学模拟——21世纪土力学的核心问题. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95~97
- 19 沈珠江. 土体变形特性的损伤力学模拟. 见: 第五届全国岩土力学数值分析及解析方法讨论会论文集. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1994. 1~8
- 20 沈珠江. 现代土力学和非饱和土固结理论. 见: 21世纪的岩土力学专题讨论会论文集. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995. 34~40
- 21 Wilson G W, et al. The prediction of evaporative fluxes from unsaturated soil surfaces. In: Alonso E E, et al eds. First Int Conf on Unsaturated Soils, Paris, 1995, Vol 1: 423~429

(收稿日期: 1995-12-18)