

# 地质雷达在水利水电工程地质中的应用及探讨

杨连生

( 武汉大学, 湖北 武汉 430072 )

摘 要: 综合介绍了地质雷达测试技术的基本原理、探测方法、数据处理和资料解释原理以及地质雷达技术在水利水电工程地质中的应用, 对应用中存在的问题作了初步探讨。

关键词: 地质雷达; 应用条件; 工程应用

中图分类号: TN959.5; TV5 文献标识码: B 文章编号: 1009 - 0908 ( 2003 ) 01 - 0006 - 04

## Application and Discussion of Ground Penetrating Radar in Water Resources and Hydroelectric Development Engineering Geology

YANG Lian-sheng

(Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

**Abstract:** Application of ground penetrating radar technology in water resources and hydroelectric development engineering geology are described systemtically, including the basic theory, the measuring method, data processing technology, the principle of data explanation, etc. Furthermore, some problems in application are disussed elementally.

**Key words:** Ground Penetrating Radar; conditions of application; engineering application

### 1 概述

地质雷达, 又称探地雷达 ( ground penetrating radar, 简称GPR ), 是一种利用高频电磁脉冲波的反射探测地下目标分布形态及特征的一种物探方法。由于地下介质比空气具有强得多的衰减特性, 加之地下地质情况的复杂性, 电磁波在地下的传播要比空气中的传播复杂得多。故此, 地质雷达的应用初期, 仅限于研究介质相对均匀、对电磁波吸收很弱的冰层、岩盐等介质。上世纪70年代后, 尤其是80年代以来, 随着电子技术、计算机技术和材料工艺的发展以及现代处理技术的不断发展, 地质雷达技术取得了突破性进展, 许多商业化的地质雷达系统先后问世, 其中最具有代表性的有: 美国地球物理探测设备公司 ( GSSI ) 的SIR系列, 微波联合公司的Terrascan MK系列, 日本株式会社 ( ORO公

司) 的GEORADAR系列, 加拿大探头与软件公司 ( SSI ) 的Pucse Ekko系列, 瑞典地质公司 ( SGAB ) 的RAMAC系列。与此同时, 地质雷达的应用范围亦不断扩大, 现今已覆盖了考古、矿产资源勘察、岩土工程及其测试、工程质量无损检测、环境工程、地下管线、埋藏物的探测等诸多领域。

本文仅就地质雷达测试技术在水利水电工程地质中的应用现状、存在的问题作一初步探讨。为讨论问题的方便, 对地质雷达的基本工作原理、测试方法、数据处理技术和资料解释亦作了简单介绍。

### 2 地质雷达基本原理及工作方法

#### 2.1 基本原理

地质雷达是利用高频电磁波 ( 1MHZ~1GHZ ) 以脉冲形式在地面通过发射天线 ( T ) 将信号送入地下, 经存在电性差异的地下介质或目标体返回地面, 再由接收天线 ( R ) 接收电磁波反射信号, 通过对电磁波反射信号的回波走时、幅度、波形等资料的分析, 来了解地下介质或目标体的特征信息的

收稿日期: 2002—10—08

作者简介: 杨连生 ( 1954— ), 男, 湖北武汉人, 副教授, 大学, 主要从事工程地质教学与研究。

方法。如图1所示，置于地面的接收天线R所接收到的脉冲波的行程时间为：

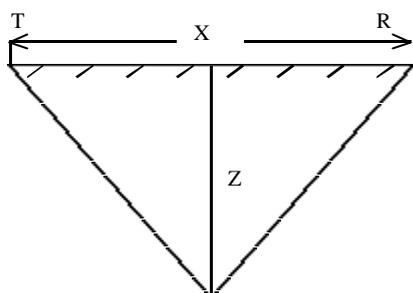


图1 地质雷达工作原理示意图

$$t = \frac{\sqrt{4z^2 + x^2}}{v} \quad (1)$$

式中： $t$ 为电磁波反射信号的双程时间， $z$ 为目标体埋深， $x$ 为天线距， $v$ 为电磁波在介质中的传播速度。

式(1)表明，若已知地下介质波速 $v$ 时，可以据测得的 $t$ 计算出目标体的深度 $z$ 。 $v$ 值可用书籍的资料标定、宽角方式直接测定、理论公式估算等方法获得。

根据电磁波理论，电磁波在地下介质中的传播速度取决于介质的波组抗，而又主要与介质的相对介电常数成比例关系，即  $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_0}}$  当相邻两介质有差异时，这种波阻抗差异可用反射系数 $R_{12}$ 表示，即

$$R_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (2)$$

式中1、2分别表示第一层介质、第二层介质。反射系数直接反映了介质的电性差异。因此，在一定深度范围内，人们可以利用这种差异，采用一定的技术来识别地下介质或目标体的特征信息。

### 2.2 探测方法

地质雷达探测方法以剖面法和宽角法为主，但新近以此为基础，发展了多天线法和透射法。

(1) 剖面法。这是用得较多的一种方法。发射天线(T)和接收天线(R)以固定间隔距离沿测线同步移动进行测量(图1)。这种方法的测量结果是地质雷达时间剖面图象，其横坐标为天线在地表测线上的位置，纵坐标为反射波的双程走时。这种记录可以准确反映正对测线下方地下各个反射面的起伏变化情况。

当地质雷达探测来自地下深部界面的反射波时，会由于信噪比过小而不易识别，这时可采用不同天线距的发射~接收天线在同一测线进行重复测量，尔后所得测点位置(共深点)的信号叠加，此法称为多次覆盖(共深点)方法。

(2) 宽角法。一个天线固定在地面某点上不动，另一个天线沿测线移动，记录地下各个不同层面反射波的双程走时，这种探测方法称为宽角法(见图2。其中D为天线向两侧移动的距离， $t_1$ 、 $t_2$ 分别为天线移动前和移动后，电磁波的单程行进时间，其余符号同前)。它主要用来求取地下介质的电磁波传播速度以及反射面的深度[3]。需要指出的是，这种方法在地下介质相对均匀且反射界面近水平时效果较好。

(3) 透射法。又称井间层析测量，是利用两个井间直达波走时(透射旅行时)和振幅数据构制两孔间电性变化层析图象的一种数据采集和处理方法。此法可用于古建筑、桥梁等状态检测及近距离的孔间观测。

此外，新近发展的多天线法，是多道雷达系统的一种测量方法，利用多天线同时发射或接收，实现多点测量。

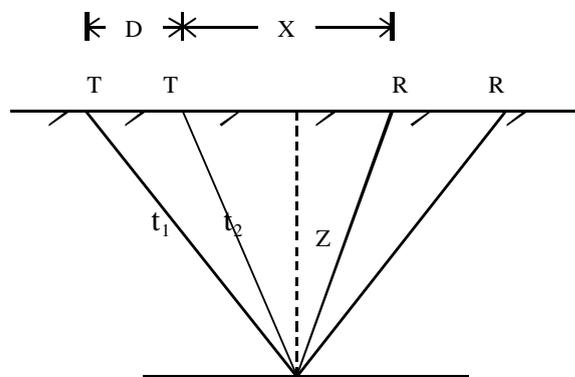


图2 宽角法测试示意图

### 2.3 信息处理

地质雷达信息处理主要包括两方面的内容：即数据处理和图像解释。

地质雷达的数据处理与地震勘探数据处理有许多相同之处，主要有滤波及时频变换处理；自动时变增益或控制增益处理；多次重复测量平均处理；速度分析及雷达合成处理等。此外，反褶积和偏移处理技术近年来进展很快，已取得了一些成果[1]。这些方法主要目的是压制干扰波，以突出有效波，增强深部目标体的雷达图像，反映目标介

质的真实位置与大小等。

图像解释首先是识别目标体的地质雷达图像特征, 然后进行探测资料的解释。识别目标体的地质雷达特征, 一方面有赖于地质雷达图像的正演成果, 另一方面则有赖于实际工作的经验积累。

具体的做法一般是首先在数据处理的基础上, 获取地质雷达图像剖面, 再根据反射波组的波形与强度特征通过同相轴的追踪, 确定反射波组的地质含义, 尔后构筑地质-地球物理解释剖面, 最后依据剖面解释获得整个测区的成果图。

### 3 地质雷达在水利水电工程地质中的应用

#### 3.1 工程地质勘察

地质雷达可以反映、区分地下不同介质层(地层)界面, 计算其深度、厚度及了解地下介质的性质。探测深度一般为50m, 可以满足工程地质勘察的一般要求。目前在工程地质勘察中, 主要是利用地质雷达的快速、高效等特点, 来确定裂隙、断层等地质构造, 探测覆盖层的厚度、基岩埋深, 进行地质剖面分层、岩体的风化分带[2]、岩体完整性的评估[3]。也有人利用地质雷达对古河床进行探测, 并根据地质雷达资料推断出地质剖面[3、4]。地质雷达在岩溶地区的使用效果亦较理想, 它可查明地下溶洞的位置及其分布[5]。

尽管地质雷达有着其独到的优越性, 但根据工程实践, 笔者认为, 在工程地质勘察中, 地质雷达的使用, 最好能辅以钻探、触探等其它勘探手段(包括一些传统的物探方法), 这样除了可以相互印证外, 还可以达到提高勘察质量, 降低成本的目的。

#### 3.2 库、坝区渗漏探测

产生库坝区渗漏的根本原因是库区或坝区存在着渗漏通道。当发生渗漏时, 该地段介质的含水量增大, 电导率也增大, 与未发生渗漏的部位形成明显的电性界面, 在雷达剖面上显示为反射异常, 根据其异常特征, 就可以分析、推断出渗漏通道的所在。薛建等人[6]在吉林用地质雷达进行了渗漏探测, 确认了引起集中渗流的渗漏通道。广东枫树坪水库大坝[7]为解决坝体下游坡反滤层脚的涌水, 应用人工同位素和浅层地震等多种方法对坝体和坝基进行检测未果, 后采用地质雷达探测, 并结合钻孔资料分析, 最终确定了其渗漏通道为一条从库内一直延伸到大坝背水坡坡脚的溶沟。据此对该溶沟进

行处理后, 该坝长达30多年的渗漏第一次得到了完全控制。

#### 3.3 边坡工程

地质雷达在边坡工程中的应用研究, 就笔者目前的了解而言, 大家所作的工作还很有限, 这与边坡稳定性的影响因素之复杂有关。一般, 其影响因素可概括为地质因素(内因)与非地质因素(外因)。而边坡稳定性的分析评价, 离不开这两大基本因素。以目前地质雷达技术水平, 暂只能对地质因素进行一些研究。李大心[8]、姜卫方[9]等利用地质雷达对滑坡的滑体结构、滑体面(带)的特征、滑体形态进行研究, 取得了一些成果。显然, 在边坡稳定性评价中, 地质雷达还只能作一些辅助工作。

#### 3.4 堤防工程

地质雷达在堤防工程中的应用, 归纳起来, 目前更多的是用其进行堤防工程质量的检测(如土堤的密实度、大堤抛石层厚度、护坡质量检测等)和隐患探测(如裂缝、空洞等)。张欣海[10]等人利用地质雷达对海上围堤进行工程地质勘察, 一周内完成了4条围堤的4个纵剖面、46个横剖面的勘探工作, 很快把握了堤基地质结构, 且其解释成果与钻探资料的吻合性较好。

### 4 应用中的几个问题探讨

#### 4.1 地质雷达的应用条件及影响因素

和其它物探技术一样, 地质雷达的探测效果与其应用条件密切相关, 过分夸大它的作用, 将地质雷达探测技术当成无所不能, “包打天下”的利器, 既不现实, 也不合理。

地质雷达应用效果的好坏和适应范围, 首先取决于它的探测深度、分辨率和精度。而影响探测深度、分辨率和精度的因素是探测对象所处环境的电阻率、介电常数、所采用的频率及采样速度等。

研究表明, 高频电磁波在地下介质的传播过程中会发生明显的衰减, 环境电阻率越小, 高频电磁波的衰减越快, 探测深度越小, 反之, 探测深度将较大。工程实践中, 多是依据电阻率的高低来初步判断地质雷达的适用条件。如第四系地层, 其有效探测深度一般不超过30m, 超出此深度, 其应用效果会大打折扣。一般来说, 地质雷达不适合于环境电阻率小于100  $\Omega \cdot m$ 地区的探测, 如粘土、砂质地层及地下咸水的环境, 而在一些干燥的岩层地区,

如干燥的花岗岩、石灰岩等，其探测深度一般较为理想。

由于地质雷达是接收反射波的信息来探测目标体，而反射信号的强弱取决于介电常数的差异。显然，特征参数差别愈大，反射波的能量亦愈大。此外，电磁波在地下介质中的传播速度，也与介质的性质有关。由此不难看出，地质雷达只适用于目标体的物性与周围场地环境物性相差较大的地区，若这个差异较小或没有，则其探测效果要么不明显，要么无功而返。换言之，物性差异是地质雷达应用的先决条件，物性差异愈大，界面反映愈明显，探测效果愈好，反之亦然。

地质雷达的探测频率主要影响到探测深度及其分辨率，就目前的现状而言，无论是仪器的制造者还是使用者，在频率的选择上都会遇到左右为难的境地。一般情况下，人们总是希望目标分辨率越高越好，这就需要提高工作频率，但工作频率越高，探测距离（深度）越小。不言而喻，分辨率的提高，是以牺牲探测距离（深度）为代价的。这种两难的问题，是由地质雷达参数的固有矛盾确定的。这个问题，只有采用突出主要，兼顾次要，综合权衡，满足工程主要要求的原则，来选择合理的仪器工作频率，才能达到地质雷达的最佳使用效果。具体而言，在要求探测距离远，目标分辨率要求不高的情况下，可选择较低的工作频率，如地下洞室掘进前方的溶洞、断层等地质构造；当探测距离要求在数十米以上，目标分辨率在数十厘米左右时，就可考虑选择百兆左右甚至更低的工作频率。

#### 4.2 数据处理的问题

目前在地质雷达数据处理中，不少都是采用现成的石油地震勘探上的处理方法和软件。这种处理方法的主要问题在于：石油地震勘探数据处理方法的应用前提与地质雷达探测中的应用前提不尽一致。在采用该方法处理地质雷达数据时，有时不满足其使用条件。如速度分析和动校正，它的使用是以小偏移距的假设条件为前提，对石油地震勘探来说，这种假设可以成立，因为目标体为地下深部的油气藏。但在地质雷达探测中，探测目标相对较浅，小偏移距的假设通常不能成立，速度分析和校正都存在较大误差，必然影响地质雷达的探测精度。

总的来说，电磁波和弹性波在介质中的传播存在着本质差异，这种差异导致了地震数据处理技术应用到地质雷达数据处理时表现出不准确性和局限

性。

此外，反褶积和偏移技术是当前地质雷达数据处理的两大学科热门课题，尽管有不完善和有争议之处，但笔者认为它们还是有一定的应用及发展潜力的。

地质雷达数据处理将来的发展，除吸收其它地球物理勘探领域中尤其是石油地震勘探中优秀的处理理论、方法和手段外，应研究并开发适合于地质雷达自身特点和处理理论和方法。

#### 4.3 资料解释的问题

鉴于地下目标及目标环境的复杂性，目前国内外在资料解释方面未见有重大突破，多是停留在地质雷达的基本职能上，即对目标体进行测距和定位。至于目标体是何物质？如何将目标反射的电磁信号转换为地质语言？目前的做法还只能结合各种先验资料进行综合分析推断，由此带来的弊病就是资料解释的多解性和复杂性。例如，若不采用综合物探方法实行互补，很难确定目标体的形态及边界情况，这是由于地质雷达只能获得被测目标体的顶板反射波，一般情况下，很难获得目标体的底界反射。这表明此时单凭地质雷达方法自身，是无法解决这一问题的。笔者在本文3.1中也曾指出，地质雷达方法最好与其它传统的勘察手段相结合，以期得出更合理、更客观的地质解释，这是由地质雷达方法自身的适用条件和局限性所决定的。

依笔者之管见，欲突破这一“瓶颈”，除地质雷达系统本身的改进外，很重要的途径是：研究各种目标识别的理论和方法，如相关分析、模糊聚类、模糊信息优化、频谱分析、时域分析等。目的在于最大限度地发掘目标反射信号中所蕴含的各种特征信息，找出与相应地质目标的内在联系，以正确地识别目标，提高解释结果的简捷性和可靠性。这需要不同学科、不同领域的研究人员和工程技术人员协调攻关，使地质雷达技术更加成熟与完善。

#### 5 结语

(1) 地质雷达以其快速、高效、无损等优良特性，很快成为地球物理勘探的重要方法之一，其应用范围已覆盖了诸多工程领域。

(2) 在水利水电工程地质工作中，地质雷达技术已在工程地质勘察、库坝区渗漏、地下洞室、堤防等许多方面得到了应用并取得了一些成果。

(3) 地质雷达方法也有其一（下转第12页）

39.14MPa, 达到设计强度等级的130.5%, 而构件最小强度为27.09MPa, 为设计强度等级的90.3%;

(2) 商业网点楼抽检结果为: 抽检构件中有33.3%的构件强度低于设计强度等级, 构件最大强度为26.14MPa, 达到设计强度等级的104.6%, 而构件最小强度为23.28MPa, 为设计强度等级的93.1%。

(3) 1#车间抽检结果为: 抽检构件中有60.0%的构件强度低于设计强度等级, 构件最大强度为28.34MPa, 达到设计强度等级的113.4%, 而构件最小强度为23.13MPa, 为设计强度等级的92.5%;

(4) 2#车间抽检结果为: 抽检构件中有18.2%的构件强度低于设计强度等级, 构件最大强度为34.20MPa, 达到设计强度等级的136.8%, 而构件最小强度为23.36MPa, 为设计强度等级的93.4%;

(5) 3#车间抽检结果为: 抽检构件中有9.1%的构件强度低于设计强度等级, 构件最大强度为38.45MPa, 达到设计强度等级的128.2%, 而构件最小强度为29.87MPa, 为设计强度等级的99.6%。

综上所述, 虽有部分建筑物现浇混凝土构件的强度低于设计强度指标(个别建筑物还较多, 如1#车间), 但混凝土强度推定值均已达到或超过设计强度指标的90%以上, 再考虑到检测期间建筑物中现浇混凝土构件尚有个别还未达到正常龄期, 其混凝土强度还会随龄期的增长而不断升高, 故判定该批建筑物现浇混凝土构件强度基本满足设计要求, 均评判为合格。

按照设计强度等级标准, 对比所抽检的5座建筑物混凝土构件强度指标可知: 2#、3#车间构件强

度最高, 1#车间构件强度最低, 而公寓楼、商业网点楼构件强度居中。就建筑物结构混凝土相对均质性而言, 商业网点楼结构混凝土最均一, 2#车间结构混凝土均一性相对较差, 而公寓楼和1#、3#车间结构混凝土均一性居中。

## 5 结语

超声回弹综合法利用声速和回弹这两个物理量来推定混凝土强度, 较为全面客观地反映了影响混凝土强度的各种因素, 提高了非破损法检测混凝土强度的精度。这是因为声速主要反映材料的密实度, 而密实度与材料强度有关, 同时, 由于它穿过材料, 因而也反映了材料内部结构的某些信息。回弹值则反映了材料的表面硬度, 而硬度也与强度有关, 因此能确切地反映混凝土表面(深3cm左右)的状态。可见, 超声回弹的综合应用, 能较确切地反映混凝土强度, 可为各类建筑物的结构混凝土质量评价、施工质量监督与管理等提供可靠的科学依据。

## 参考文献:

- [1] 中国建筑科学研究院. 超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程[S] (CECS02:88).
- [2] 吴慧敏. 结构混凝土现场检测技术[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 1988.
- [3] 刘康和. 超声回弹综合法推定混凝土强度的实例[J]. 水电站设计, 1995, 11(2): 86~87.
- [4] 余红发. 混凝土非破损测强技术研究[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1999.
- [5] 国家建筑工程质量监督检验中心. 混凝土无损检测技术[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1996.

(上接第9页) 定的局限性和适用条件, 清醒地认识其局限性和适用条件, 一方面, 可帮助我们更好地使用该方法; 另一方面, 有助于研究解决该方法现存的问题, 使之更加成熟与完善。

## 参考文献:

- [1] 李文忠. F-K偏移技术在地质雷达资料方面的应用[J]. 物探化探计算技术, 1998, 3.
- [2] 施逸忠. 地质雷达原理及其在水利水电工程中的应用[J]. 水利水电科技进展, 1996, 2.
- [3] 田原. 地质雷达在水电工程中的应用[J]. 勘察科技, 1998, .
- [4] 马翔. 探地雷达在水库坝基古河槽中的应用[J]. 工程勘

察, 2001, 1.

- [5] 王传雷等. 地下岩溶的地质雷达探测[J]. 地质与勘探, 1991, 3.
- [6] 薛建等. 地质雷达方法在水坝渗漏检测中的应用[J]. 长春科技大学学报, 2001, 1.
- [7] 徐光新等. 石灰岩地区水库隐患及渗漏通道地质雷达探测研究[J]. 水利水电技术, 1999, 9.
- [8] 李大心等. 探地雷达在滑坡调查中的作用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 4.
- [9] 姜卫方等. 地质雷达在滑坡面调查中的应用[J]. 物探与化探, 2000, 3.
- [10] 张欣海等. 海上围堤的地质雷达勘察[J]. 勘察科学技术, 1999, 2.