

# 探地雷达应用概述

李 嘉<sup>1</sup>, 郭成超<sup>1</sup>, 王复明<sup>1</sup>, 张景伟<sup>2</sup>

(1. 郑州大学环水学院, 郑州 450002; 2. 新开元路桥工程咨询公司, 郑州 450016)

**摘要** 以 ASTM 标准规范为基础对探地雷达(Ground Penetrating Radar 以下简称 GPR)的地下探测方法的应用做了比较系统的概述, 主要内容包括: 部分专业术语的解释; 测试过程中雷达探测深度及其中心频率、垂直分辨率、水平分辨率等的关系, 测试过程中常见的天线移动方式, 以及雷达波速的预测几种方法, 数据显示方式; 雷达数据解释和数据处理的-般过程及方法. 目前我国尚没有关于 GPR 的国家规范或行业标准, 文章对 GPR 的使用及规范的编制具有一定的参考意义.

**关键词** GPR, 地下探测, 测试过程, 数据解释, 数据处理

**中图分类号** P631 **文献标识码** A **文章编号** 1004-2903(2007)02-0629-09

## The summary of the surface ground penetrating radar applied in subsurface investigation

LI Jia<sup>1</sup>, GUO Cheng-chao<sup>1</sup>, WANG Fu-ming<sup>1</sup>, ZHANG Jing-wei<sup>2</sup>

(1. School of Enviroment and Water Conservancy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;

2. New Century Road&Bridge Engineering Consultation Corporation, Zhengzhou 450016, China)

**Abstract** The method of sarface ground penetrating radar (GPR) applied in subsurface investigattion are systemic summarized based on ASTM standard guide. It indudes the oart terminology; the relationship between penetration depth of radar and central frequency, vertical resolution and lateral resolution; the selection of approach in the field procedures; the methool for estimating propagation velocity and velocity sounding; data display and inter pretation methodsfor the assessment of subsurface materials. An overview of the impulse GPR methad is provided in the paper and GPR measurements as described in the paper are used in geologic, engineering, hydrologic and envirmetal application. Since up to now, there isn't any national or vocational standard guide on GPR, the paper can be reference for GPR application and preparation for GPR guode.

**Keywords** Ground Penetrating Radar (GPR), Subsurface Investigation, Procedure, Data Interpretation

## 0 引言

近年来工程地球物理方法和理论不断发展, 应用领域不断扩展. 探地雷达是一种高效的浅层地球物理探测技术, 它通过发射高频电磁脉冲波, 利用地下介质电性参数的差异, 根据回波的振幅、波形和频率等运动学和动力学特征来分析和推断介质结构和物性特征<sup>[1]</sup>. 与探空雷达不同, 探地雷达使用的频率一般低于前者, 其理论研究主要是电磁波在有耗介质中的传播, 由于介质的不均匀性、各向异性、强衰

减性等, 其复杂程度较之探空雷达要大得多. 与传统的地球物理方法相比, 探地雷达具有快速便捷、操作简单、抗干扰和场地适应能力强、探测分辨率高等方面的优势<sup>[2]</sup>, 因而该技术一面世便受到工程物探界的普遍重视. 特别是自 20 世纪 70 年代以来, 随着计算机和微电子技术的飞速发展, 探地雷达无论是在仪器设备, 还是数据处理等方面都得到普遍提高, 其应用范围不断扩大, 已广泛应用于: 石灰岩地区采石场的探测(1971, Takazi; 1973, Kithara;)、淡水和沙漠地区的探测(1974, R. M. Morey; 1976, P. K. Kad-

**收稿日期** 2006-07-10; **修回日期** 2006-08-20.

**基金项目** 国家杰出青年科学基金资助项目(19625205)和河南省杰出人才创新基金-探地雷达关键技术研究(0321000800)联合资助.

**作者简介** 李嘉, 1981 年生, 女, 河南信阳人, 郑州大学环境与水利工程学院, 助教, 硕士. 主要从事岩土工程道路无损检测研究. (E-mail: lijia@zzu.edu.cn)

aba)、工程地质探测(1976, A. P. annan 和 J. L. Davis; 1978, G. R. Ol, L. T. Dolphin)、煤矿井探测(1975, J. C. Cook)、泥炭调查(1982, C. P. F. Ulriken)、放射性废弃物处理调查(1982, D. L. Wright; 1985, O. Olsson)、以及地面和井中雷达用于地质构造填图(1997, M. Serzu<sup>[3]</sup>)、水文地质调查(1996, A. Chanzy<sup>[4]</sup>; 1997, Chieh-HouYang<sup>[5]</sup>)、地基和道路下空洞及裂缝调查、埋设物探测、水坝的缺陷检测、隧道及堤岸探测等. 国内探地雷达主要应用领域有隧道(1998, 隋景峰<sup>[6]</sup>; 2001, 刘敦文等<sup>[7]</sup>; 2004, 何继善, 柳建新<sup>[8]</sup>); 水利工程设施(1997, 赵竹占等<sup>[9]</sup>; 2005, 何开胜, 王国群<sup>[10]</sup>); 混凝土(2000, 李梁等<sup>[11]</sup>; 2004, 魏超, 肖国强, 王法刚<sup>[12]</sup>); 煤矿(1998, 刘传孝等<sup>[13]</sup>); 公路(1996 牛一雄等<sup>[14]</sup>; 1997, 沈飏等<sup>[15]</sup>; 2004 李成香等<sup>[16]</sup>); 岩溶勘察(1994, 王传雷, 祁明松<sup>[17]</sup>; 1995, 李玮, 梁晓园<sup>[18]</sup>; 2005, 葛双成, 邵长云<sup>[19]</sup>; 2006, 李才明, 王良书, 徐鸣洁等<sup>[20]</sup>); 工程地质(1994, 胡晓光<sup>[21]</sup>; 1999, 刘红军, 贾永刚<sup>[22]</sup>); 钻孔雷达(1999, 宋雷, 黄家会<sup>[23]</sup>; 2004, 曹忠权, 谢平, 金花<sup>[24]</sup>; 2006, 刘四新, 曾昭发, 徐波<sup>[25]</sup>); 挡墙病害(2004, 付国强, 彭苏萍<sup>[26]</sup>); 堤坝隐患(2006, 葛双成, 江影, 颜学军<sup>[27]</sup>); 地震预测(2005, 钱家栋, 邓明德, 尹京苑<sup>[28]</sup>等; 2006, 陈颢, 张尉, 陈汉林等<sup>[29]</sup>)等. 此外, 还出现了双域数据处理软件(2005, 梁北援, 郭铁栓, 申旭辉<sup>[30]</sup>), 和新的技术指标标定和评价方法(2005, 郭铁栓, 刘兰波, 张晓东<sup>[31]</sup>). 总之, 探地雷达在我国的工程建设中也充当着重要的角色.

美国材料与试验学会(American Society for Testing and Materials, ASTM)制定了 GPR 地下探测的标准规范(D6432-99), 规范包括 9 个部分. 此规范总结了使用脉冲式探地雷达(GPR)检测的仪器设备、现场测试过程以及评价地下材料的解释方法. GPR 采用高频(10~3000 MHz)电磁波来获取地下信息, 通过探测电磁特性(介电常数, 电导率, 磁导率)的改变而获取岩土材料构成、含水量和天然密度. 获取数据的天线通常放置在地表或钻孔内. 发射天线发射的电磁波在地表下传输, 遇到介电特性突变的界面会发生反射; 接收天线记录选择时段内的反射波. 如果可以预测或测试出电磁波在地下的传播速度, 通过电磁波到达的时间可以计算出反射面的深度. GPR 检测技术适用于地质勘探、工程、水文和环境等方面.

## 1 部分专业术语

### 1.1 带宽 (bandwidth)

定义为天线操作频率的范围, 遵照专门的标准<sup>[32]</sup>. 对雷达天线, 典型的带宽定义为最大功率(中心频率)衰减 3dB(分贝)范围内最高和最低频率之差.

### 1.2 双基模式 (bistatic)

使用天线的模式. 一根天线发射电磁波, 另一根接收反射波. 相对应的是单基模式, 用收发开关控制其发射和接收功能.

### 1.3 耦合 (coupling)

GPR 天线与地面的耦合程度反映了天线向地下传播电磁波的能力. 差的耦合度称为不匹配; 而好的耦合需要天线和地面具有相同的阻抗  $\eta$ .

### 1.4 介电松弛 (dielectric relaxation)

通常用来描述电磁波由于介电常数虚部  $\epsilon''$  引起的衰减特性. 这个词来源于介电常数频率依赖特性的经验公式. 如德拜(Debye)模型.

### 1.5 偶极子天线 (dipole antenna)

偶极子是自然界常见的一种电子模式. 定义为两个相距很近且等值异号的点电荷. 电偶极子是偶极子最常用的一种基本的辐射单元, 它是一个载有时变电流的电流元, 其长度远远小于波长, 当它在中心受激励时, 电流近似等值分布. 场分布与角度无关.

### 1.6 菲涅耳区 (Fresnel zone)

目标区域的反射区. 无线电信号随着它的传播而不断扩散, 包含信号的区域就叫做菲涅耳区. 菲涅耳区是指在视距的路径, 形成一个椭圆的区域, 见图 1.

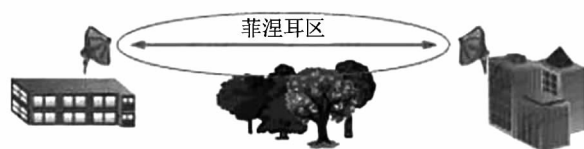


图 1 菲涅耳区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fresnel zone

### 1.7 损耗角正切 (loss tangent)

三种损耗角正切: 电场的、磁场的和电磁场的. 计算公式如下所示:

介电质损耗角正切:

$$\tan \delta_c = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} + \frac{\sigma}{\omega \epsilon'}$$

$$\dot{\epsilon}_c = \epsilon' - j \left( \epsilon'' + \frac{\sigma}{\omega} \right)$$

磁介质损耗角正切:

$$\tan \delta_\mu = \frac{\mu''}{\mu'}$$

$$\tan \delta = \frac{\alpha}{\beta}$$

电磁介质损耗角正切

$$k = \alpha + j\beta$$

## 1.8 传播(propagation)

表面深度定义为波幅衰减为原来 1/e 倍时的距离;传播深度定义为场衰减为原来 1/e 倍时的距离。

## 2 测试过程

### 2.1 探测的可行性

GPR 测试的安排和设计应充分考虑探测目的和现场地质条件。具体需考虑到的因素包括:地质条件、探测深度、目标几何形状、探测目标、基质材料、地下媒质的电磁特性、噪声源(无论是杂波还是系统噪声)以及操作限制等。在探测之前,应尽可能的取得相关的信息,比如现场土的类型、电导率和含水层深度。探测区以前的 GPR 测试数据、钻孔记录、现场地图和航拍照片都是重要的参照依据。

#### 2.1.1 分辨率(Resolution)

探地雷达分辨率是指雷达区分两个在空间上相距很近的目标的能力(也可定义为雷达区分在时间上相距很近的脉冲信号的能力)。分辨率决定了路面雷达分辨最小异常介质的能力和其应用的范围,可分为垂直分辨率和水平分辨率<sup>[33,34]</sup>。

垂直分辨率(Vertical Resolution)

雷达在垂直方向上能够区分一个以上反射界面的能力称为垂直分辨率。

$$(\Delta d)_{\min} = \lambda_m / 2 = \frac{c}{2f_c \sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (1)$$

其中,  $f_c$  为天线中心频率,  $\epsilon_r$  为相对介电常数,  $\mu_r$  为相对磁导率。

由式(1)可知雷达的最小垂直分辨率  $(\Delta d)_{\min}$  和雷达天线的中心频率  $f_c$  成反比。雷达中心频率越高,其分辨率越高。在实际测量时,从分辨率角度考虑,所选雷达天线的频率越高越好,但是中心频率越高其探测深度越小,所以不能无限制地选择高频天线,探测深度和分辨率两者应兼顾。另外,从(1)式还可看出,雷达的最小分辨率和目标所处的周围环

境也有关系。

水平分辨率(Lateral Resolution)

探地雷达在水平方向上所能分辨的最小异常体的尺寸称水平分辨率。

$$H_{\min} = \sqrt{\lambda_m d} = \sqrt{\frac{vd}{f_c \sqrt{\epsilon_r \mu_r}}} \quad (2)$$

其中,  $f_c, \epsilon_r, \mu_r$  意义同上,  $v$  为传播速度,  $d$  为目标深度。

由公式(2)可知,雷达的水平分辨率除了与雷达本身性能(中心频率  $f_c$ )和目标深度  $d$  有关外,还和最高垂直分辨率一样,跟目标周围介质的特性有关。有一点值得说明的是,在实际雷达探测过程中,通过采用适当的数字信号处理或数字图象处理方法可以使雷达对目标的最高分辨能力高于由式(1)和(2)计算出的最小分辨率。

#### 2.1.2 天线中心频率的选择

天线的中心频率的选择主要看探测的深度、空间精度和研究的需要。可携性天线中心频率选择需要兼顾探测深度、分辨率和天线尺寸是否符合场地需要。一般来说,在满足分辨率且场地条件又许可时,应该尽量降低天线中心频率。

如要求的空间分辨率为  $x$ (单位 m),周围环境的相对介电常数为  $\epsilon_r$ ,则天线中心频率可由下式初步选定:

$$f_c = \frac{c}{2x \sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (3)$$

实际测量时,空间分辨率在垂直分辨率和水平分辨率之间该如何取舍,即是以垂直分辨率还是以水平分辨率为控制指标,应视具体的探测目标和探测任务而定。如果探地雷达所要探测的目标为层状目标,目标周围介质的相对介电常数为  $\epsilon_r$ ,要求的垂直分辨率为  $\Delta d \geq \Delta d_{\min}$ ,由公式(1)可初步确定探地雷达的中心频率为:

$$f_c \geq \frac{c}{2\Delta d \sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (4)$$

对于呈水平分布的目标,水平分辨率要求较严格,这时就需要根据所要求的水平分辨率来确定探地雷达的中心频率。为了求得其中心频率,首先应估计一下目标的深度,再根据水平分辨率  $H$  由式(2)得到:

$$f_c \geq \frac{vd}{H^2 \sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (5)$$

根据初选频率,利用探地雷达探测距离方程计算最大探测深度,如果探测最大深度小于实际目标

深度,需降低探地雷达的中心频率以获得适宜的探测深度。

### 2.1.3 预测探测深度

显然,GPR 探测的地下目标体必须在所探测的范围内.因此有效的预测探测深度是保证探测计划正确实施的重要一环.GPR 的探测深度主要由电导率、介电松弛、散射和几何散开、雷达系统的动态范围和噪声源引起的衰减等因素来决定.由电磁理论可知,电磁波在介质中传播时的波长为  $\lambda_m$  [27]:

$$\lambda_m = \frac{c}{f_c \sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (6)$$

其中,  $c$  为电磁波在真空中的传播速度 ( $3 \times 10^8$  m/s);  $f_c$  为脉冲信号的中心频率;  $\epsilon_r$ 、 $\mu_r$  为介质的相对介电常数和磁导率.由公式(6)可看出 GPR 天线的中心频率越高,介质的相对介电常数和磁导率越大,探地雷达所能探测的最大深度越浅。

在工程地质勘察中,若勘察深度在 5~30 m 范围内,则选择低频探测天线,要求探测频率低于 100 MHz;对于浅部工程地质,探测深度在 1~10 m,探测频率可选择 100~300 MHz;对于探测深度在 0.5~3.5 m 的工程、环境以及考古勘察工作,探测频率可选用 300~500 MHz;对于混凝土、桥梁裂缝等厚度在 0~1 m 左右的检测,探测频率一般选用 900 MHz~2 GHz [35].一般介质的介电常数和磁导率范围,探地雷达的探测深度与中心频率之间的对照关系为 [36]:

表 1 不同频率天线的探测深度值

Table 1 Penetrating depth of antenna with different frequency

天线频率	探测深度值
2.5 GHz	30 cm~60 cm
1.0 GHz	60 cm~1.0 m
900 MHz	75 cm~1.5 m
500 MHz	1.5 m~3 m
300 MHz	3 m~6 m
100 MHz	10 m~20 m

### 2.1.4 电磁特性差异的预测

GPR 在进行地下探测时,只有当目标体和周围介质的或者说分层界面介电特性差异足够大时,才有可能被检测到.以下两个步骤可简单预测目标体是否能被检测到:

(1) 能量反射率  $P_r$  至少大于 0.01

$$P_r = \left( \frac{(\sqrt{\epsilon_r, Host} - \sqrt{\epsilon_r, Target})}{(\sqrt{\epsilon_r, Host} + \sqrt{\epsilon_r, Target})} \right)^2 \quad (7)$$

其中,  $\epsilon_r, Host$  为周围介质的相对介电常数,  $\epsilon_r, Target$  为目标体的相对介电常数。

(2) 目标的埋深和最小横向尺寸的比率不超过 10:1 [37]

## 2.2 测试原理

如图 2 所示,发射天线发射的脉冲波向地下传播,碰到介电常数突变的面会发射反射;反射的回波被接收天线接收再传输到控制系统进行数据的储存和显示。

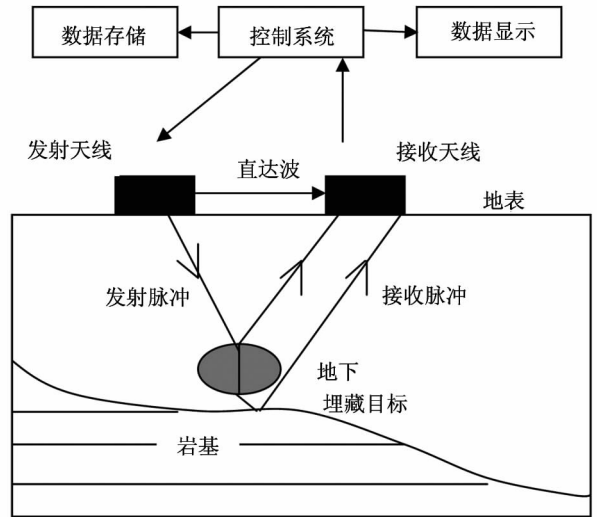


图 2 GPR 系统探测示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a ground-penetrating radar system

当天线移动时,可以接收到连续的雷达反射波瀑布图,典型的三层路面结构雷达反射波瀑布图如图 3 所示.横坐标表示沿路面的距离,纵坐标为深度。

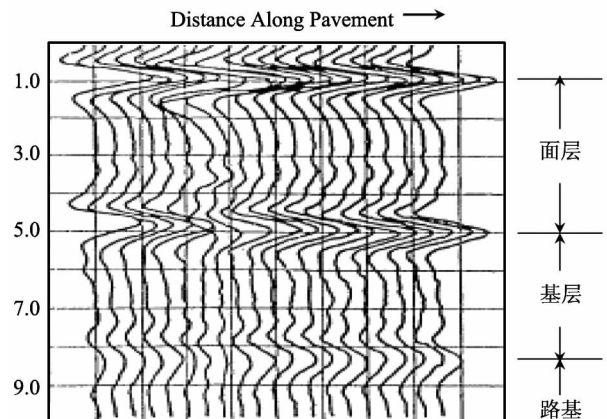


图 3 典型的三层路面结构雷达反射波瀑布图

Fig. 3 Typical waterfall chart of GPR reflected waveforms for three-layer pavement

将图 3 经过迭加处理后的单个雷达轨迹的连续剖面图如图 4 所示,横坐标为波在介质中的传播时间,纵坐标为反射波幅。

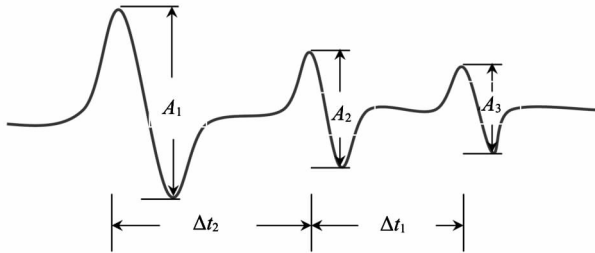


图 4 典型的三层路面结构雷达反射波示意图

Fig. 4 Typical GPR reflected waveform for three-layer pavement

## 2.3 移动天线方法的选择 (Selection of the Approach)

地下埋藏目标特性、现场条件和研究目的决定着移动天线的模式。GPR 进行地下勘测时,通常采用以下所列的前两种模式。由于电磁波在地下的传播形式与地震波十分相似,而且探地雷达数据剖面也类似于反射地震数据剖面<sup>[38]</sup>,因此反射地震数据处理的许多有效技术均可用于探地雷达的数据处理。这两种方法模式属于反射剖面法 (reflection profiling method),其天线间距在移动过程中是不变的(详见图 5)。

第一种模式:拖动天线时一直读数;

第二种模式:在特定点读数;

第三种不太常见模式:搜集 CMP (common midpoint)点数据(详见图 6)。

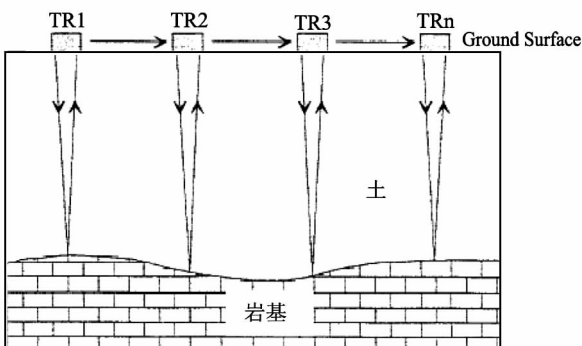


图 5 反射剖面法示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the reflection profiling method

## 2.4 测试参数

如图 4 所示雷达信号图的横向刻度为双程走时。双程走时是雷达回波信号里一个非常重要的信息,由双程走时可在已知速度的基础上确定目标回波的深度。

### 2.4.1 速度预测法

$$(1) \quad v_m = c / \sqrt{\epsilon_r} \quad (8)$$

其中  $\epsilon_r$  为相对介电常数;这里假定磁导率和自由空间一样为 1,且损耗角正切远小于 1。

下表列出了不同材料的相对介电常数和传播速度

表 2 常见介质介电常数

Table 2 Approximate electromagnetic properties of various materials

Material	Relative Permittivity, K	Pulse Velocities, m/Ns	Conductivity, mS/m
Air	1	0.3	0
Fresh water (f,t)	81	0.033	0.10 - 30
Sea water (f,t,s)	70	0.033	400
Sand (dry) (d)	4-6	0.15-0.12	0.0001 - 1
Sand (saturated) (d,w,f)	25	0.055	0.1 - 1
Silt (saturated) (d,w,f)	10	0.095	1 - 10
Clay (saturated) (d,w,f)	8-12	0.106-0.087	100 - 1000
Dry sandy coastal land (d)	10	0.095	2
Fresh water ice (f,t)	4	0.15	0.1 - 10
Permafrost (f,t,p)	4-8	0.15-0.106	0.01 - 10
Granite (dry)	5	0.134	0.00001
Limestone (dry)	7-9	0.113-0.1	0.000001
Dolomite	6-8	0.122-0.106	
Quartz	4	0.15	
Coal (d,w,f, ash content)	4-5	0.15-0.134	
Concrete (w,f, age)	5-10	0.134-0.095	
Asphalt	3-5	0.173-0.134	
Sea ice (s,f,t)	4-12	0.15-0.087	
PVC, epoxy, polyesters vinyls, rubber (f,t)	3	0.173	

(2)如果相对介电常数未知,用已知深度(D)法预测传播速度

$$v_m = (2D)/t \quad (9)$$

### 2.4.2 其他确定方法

如果速度不能如上述预测,可用两种探测法来确定。第一种方法适用于地下分层界面的探测;第二种适用于点反射物的探测。

$$(1) \quad v_m = x / \sqrt{(t_x^2 - t_d^2)} \quad (10)$$

其中,  $x$  为两根天线之间的距离,  $t_x$  为天线间距为  $x$  的双程走时,  $t_d$  为天线间距为 0 的双程走时。

天线的移动也有以下两种模式。一种是两根天线由中心向两侧移动(CMP法),如图 6 所示;另一种是一根天线固定,另一根向一侧移动(广角法),如图 7 所示。

(2)双曲几何法(Hyperbolic Geometry)<sup>[39]</sup>

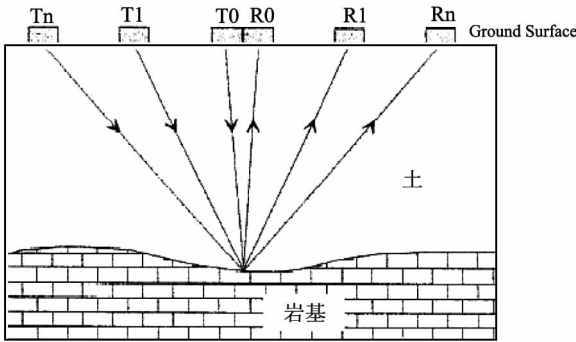


图6 CMP点搜集数据示意图

Fig. 6 Schematic diagram of a common midpoint (CMP) sounding

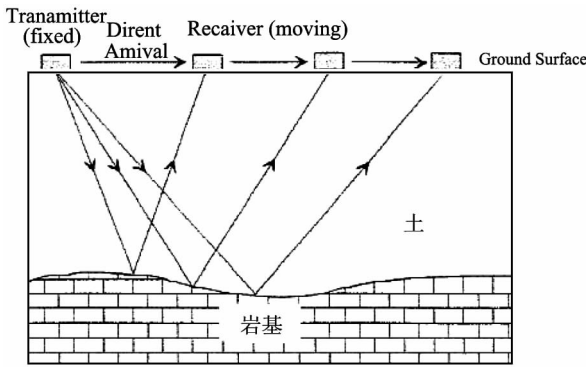


图7 广角法搜集数据示意图

Fig. 7 Schematic diagram showing a wide angle reflection sounding

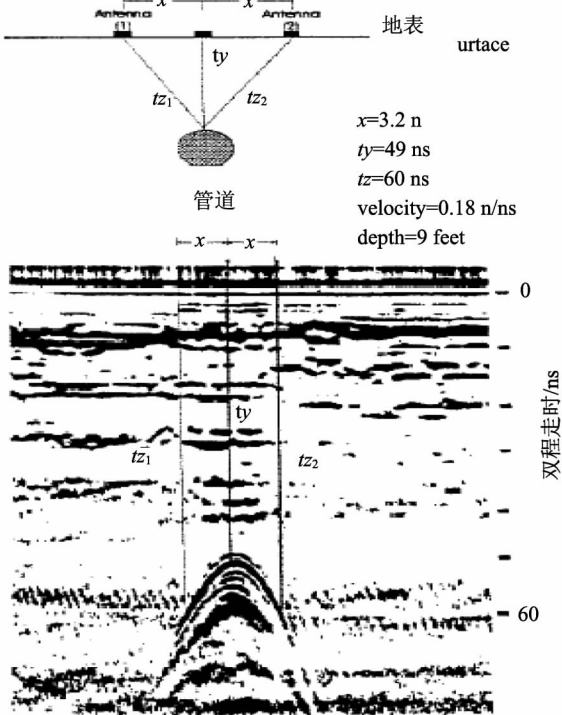


图8 GPR探测管道信号示意图

Fig. 8 Generalized diagram of a pipe signature

$$Depth = x / \sqrt{((t_z/t_y)^2) - 1}$$

$$v = (2/t_y)(x / \sqrt{((t_z/t_y)^2) - 1})$$

其中,  $x$  为天线间距,  $t_z$  为天线在管道斜上方的双程走时,  $t_y$  为天线在管道正上方的双程走时.

图8示例了天线频率为 300 MHz 的 GPR 采用双曲几何法现场探测速度.

### 2.5 数据显示 (data display)

GPR 的数据通过单个雷达轨迹的连续剖面图显示(见图4). 水平轴代表水平距离, 纵轴是双程走时(或深度). 数据通常是波形曲线, 接收到曲线的亮度是和轨迹的波幅成比例. 彩色图形里的黑白显示和灰色刻度成比例(黑色代表亮度最大、白色代表最低, 见图8). 色彩分配的定义和具体的彩色信号的波幅有关.

## 3 雷达数据解释和处理

### 3.1 数据解释

#### 3.1.1 噪声判别(recognition of noise)

连续的水平信号通常代表内部系统噪声、系统故障或是异常水平层, 但也可能是天线与地面耦合不好产生的振荡. 特别是基础、桥支架、树或者高架物会产生杂波, 可能会引起错误的解释.

#### 3.1.2 点反射物识别(point reflector)

点反射的特征曲线是双曲线.

#### 3.1.3 补充数据(complementary data)

地球物理探测、钻孔法探测和非地球物理探测法得到的地质数据都是地下状况解释的有效补充. 最重要的数据是天线的位置和方向. 地球物理探测解释的最大失误, 尤其是对雷达探测来说, 是不知道获取数据时的天线位置.

### 3.2 数据处理 (Data Processing)

#### 3.2.1 滤波(Filtering)

噪声去除一直是 GPR 图象处理中的主要问题之一, 它直接影响到探地雷达探测结果的可靠性和准确度<sup>[40]</sup>. 滤波的作用是去除噪声并准确确定反射物的位置. 过滤过程包括以下内容: 迭加、反褶积、有限或无限脉冲滤波、Hilbert 信号转换、偏移和波谱转换等<sup>[41, 42]</sup>. 偏移和反褶积<sup>[43]</sup>为两大热门技术. 用于雷达数据偏移处理的算法主要有: Kirchhoff 偏移(绕射叠加)<sup>[44]</sup>、F-K 偏移<sup>[45]</sup>、波动方程偏移等, 文献<sup>[46, 47]</sup>概括了这些技术. 文献<sup>[48]</sup>指出了这几种主要偏移法的优缺点: 绕射叠加偏移的特点是可偏移陡倾角, 允许根据地层倾角和相干性进行加权与道切

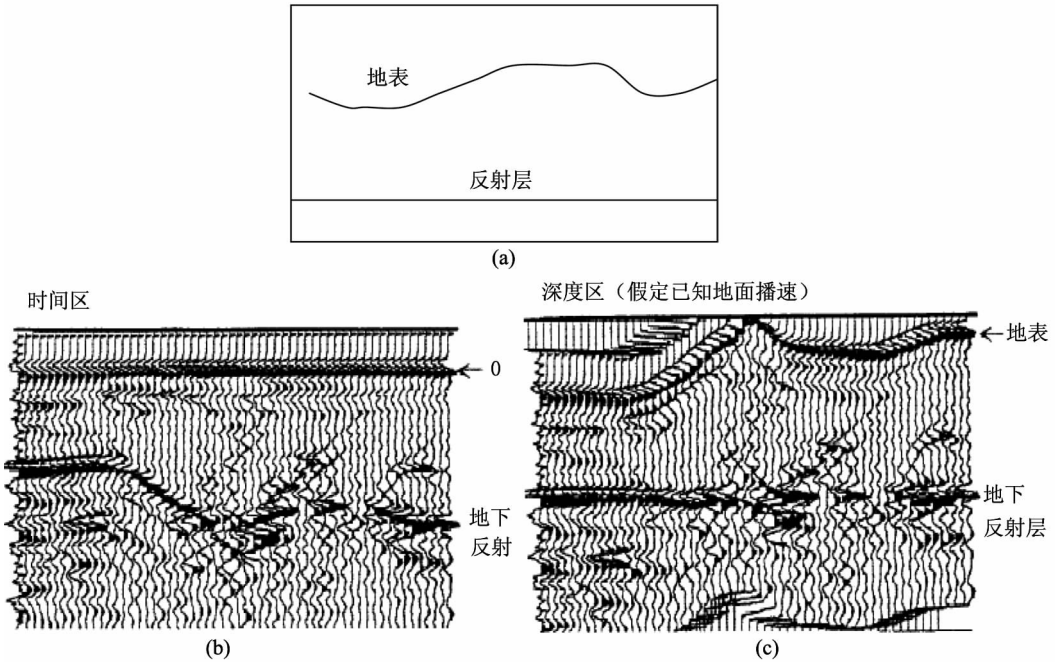


图 9 高程差异对 GPR 数据影响示意图

Fig. 9 Illustration of the effect of elevation changes on GPR data

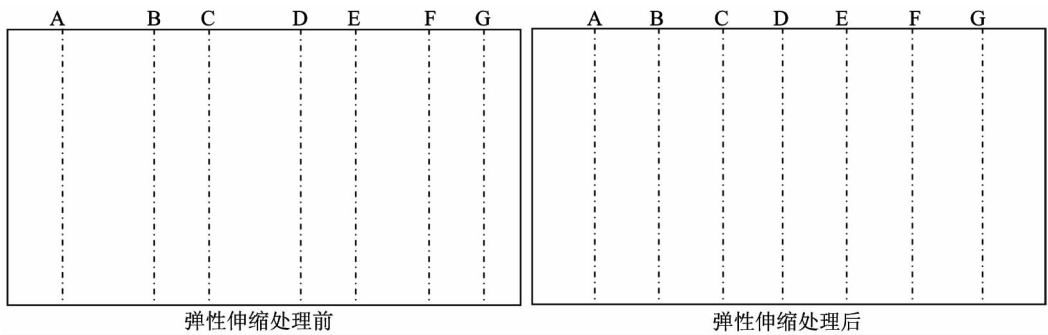


图 10 采用弹性伸缩法处理实际水平间距差异示意图

Fig. 10 Spacing of scans with respect to actual horizontal distance, before and after rubber sheeting

除,偏移孔径可以明显不同,但通常不能适应横向速度变化;Stolt 偏移(F-K)允许偏移的地层倾角较小,很难处理速度的横向变化,由于采用快速 FFT 所以它是一种最经济的偏移方法;波动方程偏移,主要是声波方程偏移,允许偏移的地层倾角最大为 60 度,产生的偏移噪声较小,在低信噪比的地方比较有效,可以适应速度的横向变化.文献<sup>[49]</sup>提出了带衰减项的有限元偏移,此法更符合雷达波的动力学规律.与不带衰减项的偏移相比,其偏移结果使界面更好的归位.反褶积其实是一种特殊的滤波方法,它可以压缩子波,抑制多次反射,从而提高垂直分辨率和同相轴的识别. Turner (1993)<sup>[50]</sup>指出,探地雷达子波为非最小相位.反褶积的算法很多,有:脉冲反褶

积、预测反褶积、递归反褶积、同态反褶积等,其中应用最多的是脉冲反褶积.但 P. Maijla<sup>[51]</sup>指出,当地下介质的复杂性和噪声的影响增加时,反褶积处理的效果并不明显,而且还存在着寻找适当处理参数的问题.文献<sup>[52]</sup>讨论了天线高度和介质介电属性对反褶积效果的影响.文献<sup>[53]</sup>提出一种基于自适应原理的脉冲滤波器,并对常用的 LMS 算法做了改进,仿真结果表明获得了较为理想的脉冲压缩性能.

### 3.2.2 振荡的平均值处理法

地面和天线耦合不好会在信号中产生振荡,采用取所有值平均值方法来消除振荡产生的影响.

### 3.2.3 地表高程差异处理法(见图 9)

有时会出现地表高低起伏不平,而地下反射层

是水平的情况(如图 9a)。这时采用时间迁移量来处理图形。通过已知高程和近地面波速可算得时间迁移量,进而测得反射面深度(如图 9c)。

### 3.2.4 橡皮筋(弹性伸缩)处理法(Rubber Sheetting)(见图 10)

天线拖动的速率不总是匀速的,这就可能造成间距的不均匀性。采用弹性伸缩的办法处理这种情况;宽的间距去除,窄的间距加入临近的数值,所以此法形象的称为橡皮筋处理法。

## 4 结束语

在我国,探地雷达已经广泛地应用于地质勘探、工程、水文和环境等多个领域。文章系统地研究了其测试过程,并基于工程探测的目的讨论了测试参数的选取,而且对数据处理和解释分析作出了相应的规定,这对于探地雷达的应用具有重要的指导意义,对于探地雷达规范的制定具有一定的参考,并将进一步推动探地雷达技术的发展。

**致谢** 在本论文的纂写过程中,蔡迎春老师给予了大力的支持,在此谨表谢意。

## 参 考 文 献 (References):

[1] 朱德兵. 工程地球物理方法技术研究现状综述[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(1): 163~170.

[2] 李金铭, 罗延钟. 电法勘探新进展[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996. 119~130.

[3] Zerzu M, Street P, Lodha G, *et al.* Characterization of a moderately fractured granitic rock using single-hole radar reflection. crosshole radar to mography and ground penetrating radar at AECL' S under ground Research Laboratory [A]. 67th SEGNS5[C], Vol. 6. Pinawa, Manitoba, 1997, 912~915.

[4] Chanzy A, Tarussov A, Judge A, *et al.* Soil water content determination using a digital ground penetrating radar [J]. Soil science society of America journal, 1996, 60(5): 1318~1326.

[5] Chieh H Y, *et al.* Under water profiling by DC tomography and GPR methods[A]. 67th SEGINT[C]. 1997, (6): 654~656.

[6] 隋景峰. 隧道衬砌质量检测新技术[J]. 工程勘察, 1998, (2): 65~67.

[7] 刘敦文, 黄仁东. 应用探地雷达技术检测衬砌质量[J]. 物探与化探, 2001, 25(6): 469~473.

[8] 何继善, 柳建新. 隧道超前探测方法技术与应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2004(8): 293~298.

[9] 赵竹占, 洪永星, 童献平, 等. 探地雷达在崂山外海防浪堤工程质量检测中的应用[J]. 工程勘察, 1997, (1): 70~72.

[10] 何开胜, 王国群. 水库堤坝渗漏的探地雷达探测研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2005(3): 20~24.

[11] 李梁, 兰樟松. 探地雷达在大口径基桩无损检测中的应用[J]. 物探与化探, 2000, 24(6): 474~476.

[12] 魏超, 肖国强, 王法刚. 地质雷达在混凝土质量检测中的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2004, 1(5): 447~451.

[13] 刘传孝, 杨永杰, 蒋金泉. 煤厚探测新方法——探地雷达技术[J]. 山西煤炭, 1998, 18(2): 23~25.

[14] 牛一雄, 苑守成, 武建章. 地质雷达在公路建设中的应用[J]. 物探与化探, 1996, 20(2): 116~123.

[15] 沈飏, 石庆华, 孙忠良. 道路铺砌层中探地雷达波传播的正演模拟及应用[J]. 石油地球物理勘探, 1997, (1): 135~140.

[16] 李成香, 强建科, 王建军. 地质雷达在公路裂缝检测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2004(6): 282~286.

[17] 王传雷, 祁明松. 地下岩溶的地质雷达探测[J]. 地质与勘探, 1994, 30(2): 58~60.

[18] 李玮, 梁晓园. 对地质雷达探测岩溶的方法和实例的探讨[J]. 勘察科学技术, 1998, (2): 61~64.

[19] 葛双成, 邵长云. 岩溶勘察中的探地雷达技术及应用[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(2): 476~481.

Ge S C, Shao C Y. Technique and application of GPR in karst prospecting[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2005, 20(2): 476~481.

[20] 李才明, 王良书, 徐鸣洁, 刘元生, 钟锴, 张善法. 基于小波能谱分析的岩溶区探地雷达目标识别[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1499~1504.

Li C M, Wang L S, Xu M J, Liu Y S, Zhong K, Zhang S F. Objects recognition of ground penetrating radar in karst regions using wavelet energy spectrum analysis[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(5): 1499~1504

[21] 胡晓光. 探地雷达在工程地质勘察中查寻土洞的应用效果[J]. 物探与化探, 1994, 18(6): 473~476.

[22] 刘红军, 贾永刚. 探地雷达在大面积场区岩土工程勘察中应用[J]. 工程勘察, 1999, (2): 69~71.

[23] 宋雷, 黄家会. 钻孔地质雷达工作原理及应用[J]. 物探与化探, 1999, 24(6): 454~458.

[24] 曹忠权, 谢平, 金花. 星载合成孔径雷达遥感技术的地质应用[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(2): 291~295.

[25] 刘四新, 曾昭发, 徐波. 利用钻孔雷达探测地下含水裂缝[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 620~624.

Liu S X, Zeng Z F, Xu B. Subsurface water-filled fractures detection by borehole radar [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006, 21(2): 620~624.

[26] 付国强, 彭苏萍. 探地雷达在挡墙病害检测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2004(2): 86~90.

[27] 葛双成, 江影, 颜学军. 综合物探技术在堤坝隐患探测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 263~272.

Ge S C, Jiang Y, Yan X J. Application of comprehensive geophysical exploration technique to hidden trouble detection of dyke[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006, 21(1): 263~272.

[28] 钱家栋, 邓明德, 尹京苑, 周平, 和雪松, 房宗维, 赵保宗, 刘晓林. 雷达用于地震预测的基础实验研究[J]. 地球物理学报, 2005, 48(5): 1103~1109.



- Qian J D, Deng M D, Yin J Y, Zhuo P, He X S, Fang Z F, Zhao B Z, Liu X L. A basic experimental study of earthquake prediction in terms of radar technology[J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2005, 48(5): 1103~1109.
- [29] 陈颢,张尉,陈汉林等.地震雷达[J].地球物理学进展,2006,21(1):1~5.
- Chen Y, Zhang W, Chen H L, *et al.* Seismic Radar [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006,21(1):1~5.
- [30] 梁北援,郭铁拴,申旭辉.地质雷达双域数据处理软件及其应用[J].地球物理学进展,2005,20(2):443~445.
- Liang B Y, Guo T S, Shen X H. Processing software of double-domain data from Ground Penetrating Radar and its application[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2005, 20(2):443~445.
- [31] 郭铁拴,刘兰波,张晓东.地质雷达技术指标的标定研究[J].地球物理学进展,2005,20(2):454~459.
- Guo T S, Liu L B, Zhang X D. On calibration of the technical parameters of geological radar[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2005,20(2):454~459.
- [32] Cole K S, Cole R H. Dispersion and Adsorption in Dielectrics [J]. Journal of Chemical Physics, 1941, 35: 341
- [33] 李大心.探地雷达方法与应用[M].北京:地质出版社,1994.
- [34] 丁鹭飞,耿富录.雷达原理[M].西安:西安电子科技大学出版社,1995.
- [35] 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.
- [36] 王士恩,柯宇荣,黄浩权. SIR-10H型探地雷达探测方法技术及其初步应用[J].广东水利水电,1999(2):26~30
- [37] 赵永贵.中国工程地球物理研究的进展与未来[J].地球物理学进展,2002,12(2):305~309.
- [38] 王惠灏,李大心.脉冲时间域探地雷达讲座[J].国外地质勘探技术,1989,(10),(11),(12),1990,(1).
- [39] Powers M H, Olhoeft G R. GPRMODV2: One-Dimensional Full Waveform Forward Modeling of Disperse Ground Penetrating Radar, Version 2[R]. Report 95-58, 1995. U. S. Geological Survey Open File, 1995.
- [40] 邹海林,宁书年,邹华胜.采用不同预处理方法的 GPR 图像去噪效果分析[J].地球物理学进展,2005,20(2):469~475.
- [41] Yilma Z O. Seismic Data Processing[J]. SEG Investigations in Geophysics, 1987,(2):526.
- [42] Fisher E, Mcmechan, G. A.. Acquisition and Processing of Wide-Aperture Ground-Penetrating Radar Data[J]. Geophysics, 1992,57(3):495~504.
- [43] Greg T. Subsurface radar propagation deconvolution[J]. Geophysics, 1994,59(2):215~223.
- [44] 邓世坤.克希霍夫积分偏移法在探地雷达图像处理中的应用[J].地球科学——中国地质大学学报,1993,18(3):303~310.
- [45] Loperz S J M, Fortuny G J. 3D radar imaging using range migration techniques [J]. IEEE Trans. on Antennas & Propagation, 2000, 48(5): 728~737.
- [46] Gardner GHF. Migration of seismic data: Geophys[M]. Reprint Series, 4, Soc. Expl. Geophys, 1985.
- [47] Elizabeth F, George A M. Examples of reverse-time migration of single-channel ground-penetrating radar profiles[J]. Geophysics, 1992,57(4):126~130.
- [48] RE 谢里夫, LP 吉尔达特. 勘探地震学[M].北京:石油工业出版社,1999.
- [49] 底青云,许琨.衰减雷达波有限元偏移[J].地球物理学报,2000,43(2):257~263.
- [50] Turner G. The influence of subsurface properties on ground penetrating radar pulses [D]. Ph. D-thesis, Macquarie University, 1993.
- [51] 左峥嵘.国外探地雷达技术新进展[J].地球科学—中国地质大学学报,1993,18(3):315~322.
- [52] Janvander K. Effective Source Wavelet Determination[C]. Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar, 2002.
- [53] 苏畅,徐守义,王承训,等.一种应用于探地雷达信号处理的自适应脉冲压缩滤波器[J].电子学报,1996,24(9):116~124.
- [54] Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation[S]. 1999. D 6432~99.