

钻孔雷达技术的发展和现状

陈建胜, 陈从新

(中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘要 钻孔雷达作为一种井中探地雷达,它向地层发射高频电磁波,利用电磁波在地层中的传播特性来获取地层信息,从而解释地下构造,它具有较高的分辨率和较大的探测范围.本文结合钻孔雷达的历史及发展现状进行了简要阐述,并详细介绍了其测量原理及工程各领域中的应用.本文基本反映了当前国内外钻孔雷达的研究进展情况及其发展趋势,对进一步的研究有重要的指导意义.

关键词 钻孔雷达,探地雷达,地下探测

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2008)05-1634-07

The review of borehole radar technology

CHEN Jian-sheng, CHEN Cong-xin

(Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China)

Abstract As a ground penetrating radar in a well, high frequency electromagnetic wave is sent to the stratum borehole-radar. The transmit characteristics about the electromagnetic wave is used to acquire the stratum information and the structure of the stratum will be explained. High resolution and large detection scale is owned by the borehole-radar. In this paper the history and the development of the borehole radar are simply expounded, and the detail descriptions of the survey principle and the application in all the field of engineering are introduced. In this paper the research status and development trends in the field of borehole-radar in and abroad are basically reflected. It is a significant guidance for the further research of the borehole radar.

Keywords borehole radar, ground penetrating radar (GPR), subsurface investigation

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(GPR)是一种高效的浅层地球物理探测技术,它通过发射高频脉冲电磁波,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地下介质结构和物性特征^[1].由于地面探地雷达的探测范围有限;常规的地球物理测井只对井眼周围有限范围敏感,常由于井眼的布局所限,许多重要的地质特征将被错过^[2].因此人们期望能在井中进行雷达探测,以使探测能覆盖更大的探测范围.钻孔雷达技术是一种井中地球物理方法,它向地层发射高频电磁波,利用电磁波在地层中的传播特性来获取地层信息.从而解释地下构造,它具有较高的分辨率和较

大的探测范围.

1980年开始的国际 STRIPA(International Stripa Project)计划,开发和研究一些能用于高含量核废料的处理和能确定结晶岩石中地下水流特征的技术(Sandberg等),瑞典 RAMAC 钻孔雷达系统则是在该计划下开发完成的.钻孔雷达仪器在井中的探测范围得到较大的扩展,在相对导电的岩石中(200~300Ω·m),探测范围可达 10~20m.除了探测范围之外,雷达可以在每一重要深度进行多次重复测量,通过对探测结果的叠加来提高仪器的信噪比(SNR).实际中,利用宽带的脉冲电磁波可以达到一定的分辨率^[2].STRIPA 研究活动是在瑞典中部的一个废弃的铁矿中进行的,在实验区域进行了单孔和跨孔的水动力测试,钻孔雷达主要用来确定主要裂缝带的位置,它能提供裂缝带宽度和延伸的信

收稿日期 2008-01-10; 修回日期 2008-04-20.

作者简介:陈建胜,男,1983年生,湖南邵阳人,中国科学院武汉岩土力学研究所在读硕士,主要从事岩土工程及工程勘探研究.
(E-mail: jshchen@126.com)

息,雷达所探测到的裂缝带和水流通道之间有很好的相关性. Nickel 等曾在盐丘中进行单孔脉冲雷达的实验,而在跨孔测量时,则使用连续波系统. 美国 Lawrence Livermore 国家实验室的科研小组也开发了利用连续波的井下系统,包括断层、隧道及页岩等层析成像分析. 20 世纪 90 年代后,日本东北大学 Sato M. 等研究开发了极化钻孔雷达系统,能够进行井下的全极化测量. 随之为了克服钻孔雷达单孔测量的方位模糊性,进而有研究者开发了定向钻孔雷达系统,利用同一钻孔即可进行三维测量.

随着社会经济的发展,许多环境问题也日益凸现. 高放射性废料的处置、城市生活及工业垃圾的处理都成为一大技术难题. 现行的主要方法是将其埋置在地下岩层中,而地下水的动力学运动则是污染物的扩散主要机制,确定裂隙带的位置及其运移能力对于污染源从储存场所到生物圈的运移评价是非常重要的. 因此,需要对钻孔雷达技术进行深入研究,使其能更精确地测量地下大范围的、深部岩体完整性,确保储存场所污染物不再向周围扩散. 通过 ISI Web of Science 对近年钻孔雷达方面的文章发表情况的统计表明:对钻孔雷达的研究呈总体上升趋势(见图 1).

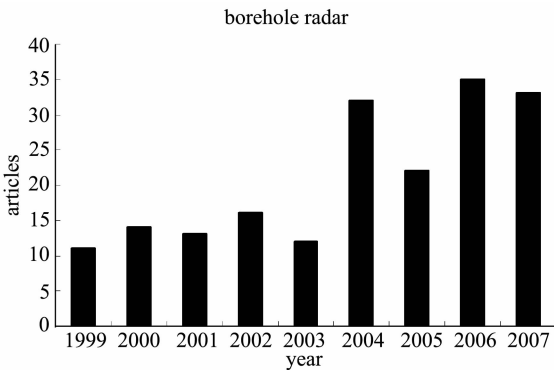


图 1 近年钻孔雷达的研究情况

Fig. 1 The research information of Borehole Radar in the recent years

钻孔雷达一般用于地质调查、工程勘察、环境调查、水电大坝勘察、探测断裂带、空洞探测、喀斯特地区调查和盐层调查等领域.

1 测量原理及测量方式

钻孔雷达与地面雷达的基本原理是一样的,即它包括雷达发射机和接收机,并内置于不同的天线

内. 天线通过光纤与控制单元相连,光纤用来传输触发信号和采集的数据,笔记本用来存储和显示图像(图 2).

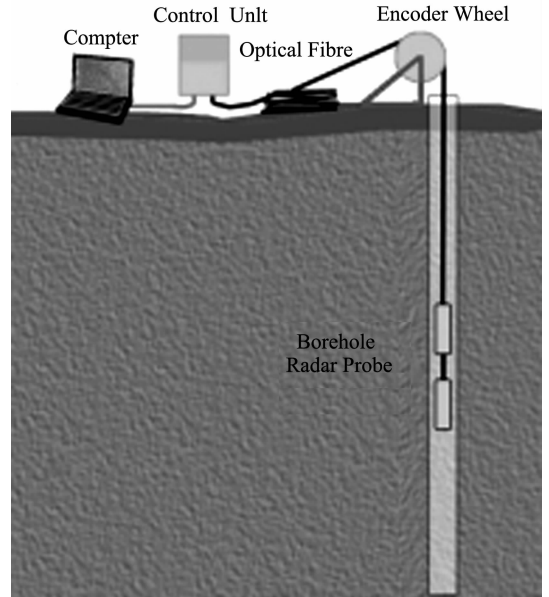


图 2 钻孔雷达测量示意图(RAMAC)

Fig. 2 The sketch map of borehole radar survey(RAMAC)

1.1 钻孔雷达基本原理

钻孔雷达作为一种井中探地雷达,其方法也是建立在地下介质中雷达波传播的基础上它能在岩石中或土壤中穿透一定的距离,频率通常在 $10 \sim 1000$ MHz. 雷达波的传播取决于:介电常数 $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ 、磁导率 $\mu = \mu_r \mu_0$ 、电导率 σ 和角频率 $\omega = 2\pi f$ [2]. 参数 $Q = \omega\epsilon / \sigma$ 决定了某种介质是否支持雷达波的传播,如果某一介质 $Q \ll 1$,电磁波的能量将主要以波的形式传播;若 $Q \ll 1$ 则主要以扩散形式传播. Q 值是雷达波衰减到一定量时,电磁波在介质中传播的波长的度量. 当 $Q \gg 1$,速度 v 和衰减系数 α 关系为

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}},$$

$$\alpha = \frac{\sigma Z_0}{2 \sqrt{\epsilon_r}}.$$

式中 Z_0 自由空间波阻抗 ($Z_0 = 377 \Omega$). 参数 $\delta = \alpha^{-1}$ 称作趋肤深度,它决定了平面波幅度减少到 e^{-1} 时的传播距离,一些参考资料也将其作为雷达的探测深度. 以下是一些常见介质的介电常数(见表 1).

表 1 常见介质介电常数

Table 1 Approximate electromagnetic properties of various materials

Material	Relative Permittivity K	Pulse Velocity m/ns	Conductivity ms/m
Air	1	0.3	0
Fresh water	81	0.033	0.10~30
Sea water	70	0.033	400
Sand(dry)	4~6	0.15~0.12	0.0001~1
Sand(saturated)	25	0.055	0.1~1
Silt(saturated)	10	0.095	1~10
Clay	8~12	0.106~0.087	100~1000
Dry sandy coastal land	10	0.095	2
Fresh water ice	4	0.15	0.1~10
Permafrost	48	0.15~0.106	0.0110
Granite	5	0.134	0.00001
Limestone	79	0.1130.1	0.000001
Dolomite	68	0.1220.106	
Quartz	4	0.15	
Coal	4~5	0.15~0.134	
Concrete	5~10	0.134~0.095	
Asphalt	3~5	0.173~0.134	
Sea ice	4~12	0.15~0.087	
PVC	3	0.173	

在钻孔雷达探测中,精确确定某一目标位置的精度和分辨率是可比的,一般采用半个波长,探测能力取决于目标物体和周围介质之间的电性参数差异及目标的大小.大多数矿物的相对介电常数在 4~7 之间,水约为 81,在很多地质环境中水的存在对周围介质的介电常数会产生很大的影响,因此雷达对含水带相对敏感,可用于确定岩体中水含量及孔隙度.

1.2 钻孔雷达的测量方式

钻孔雷达的测量方式^[1,2]有三种:单孔反射测量、跨孔测量、孔中—地面测量.

1.2.1 单孔反射探测

在反射模式下,雷达发射天线和接收天线以固定的间距下到相同的钻孔中(见图 3).最常用的天线是偶极天线,它可以向 360 度空间辐射和接收反射信号(无方向性).

钻孔雷达数据的解释与地面雷达数据基本一样,只是没有上部空间部分的反射信号.地面雷达接收所有半无限空间的反射信号,而钻孔雷达接收

360 度空间的反射信号.如果使用偶极天线,仅从一个钻孔中得到的数据无法得到反射体的方位,但可以得到反射体的距离,反射体是否是面状的,以及确定平面体和钻孔的夹角.当天线在断裂带反射面的上部时,它对反射面的上部成图,即对钻孔左边部分成图.当天线到达反射面的下部时,对反射面的下部成图,即对钻孔右边部分成图.解释钻孔雷达数据时,必须记住雷达图像是 360 度接收的.点反射体显示的图像为双曲线,同时作为点反射体出现在雷达数据中.解释从单孔中得到的雷达数据时,解释者不能给出反射体的方向,只能得出距钻孔的位置.为了估计反射的方位,需要至少两个钻孔的数据.

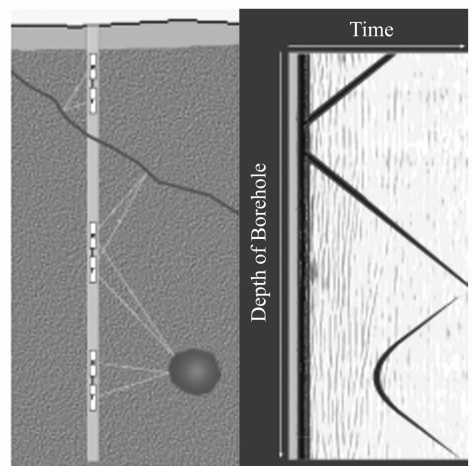


图 3 单孔反射测量及结果

Fig. 3 Single-hole reflection survey and its results

1.2.2 跨孔探测

跨孔探测是在两个钻孔中分别放入发射天线和接收天线进行探测.在跨孔模式下,发射天线和接收天线在不同孔中往下放,为了减少几何位置的影响和其它影响,两个钻孔最好在相同的二维平面中.与偶极反射法相比,跨孔探测需要的时间要长得多,因为需要记录更多的数据.当发射天线固定在一个位置上,接收天线在另一个钻孔中扫描整个长度;然后,发射天线往下移动一步,接收天线再扫描整个长度.该步骤重复进行,直到发射天线覆盖整个钻孔为止(见图 4).

跨孔探测方式也称为层析成像方式.可以用两种记录数据做层析成像:直达波振幅和/或根据直达波到达另一个钻孔中的时间来计算各向同性介质中的到达时间.传输时间层析成像是探测和处理的很好的方法,可以用来确定钻孔中高含水量区域(如充

水的断裂带或熔洞),这是由于传播时间受介电常数影响所致。

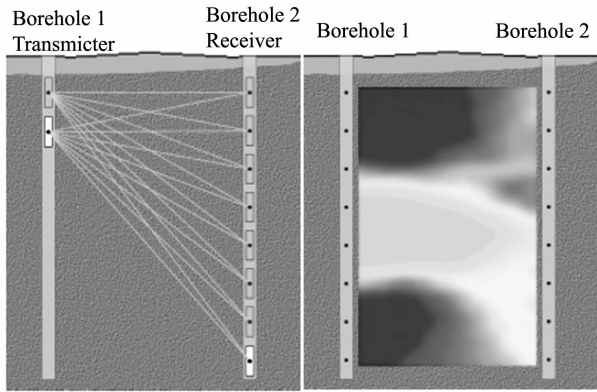


图 4 跨孔反射测量和结果

Fig. 4 The cross-hole survey and its results

1.2.3 地面-孔中探测

标准探地雷达系统可以用于从地面到钻孔中探测,标准地面发射天线放在地面不同位置,孔中的接收天线从钻孔中向下移动(见图 5),这种方式叫做垂直剖面测量(Vertical Radar Profile).可以得到钻孔天线和地面天线之间介质的振幅和速度层析成像图。

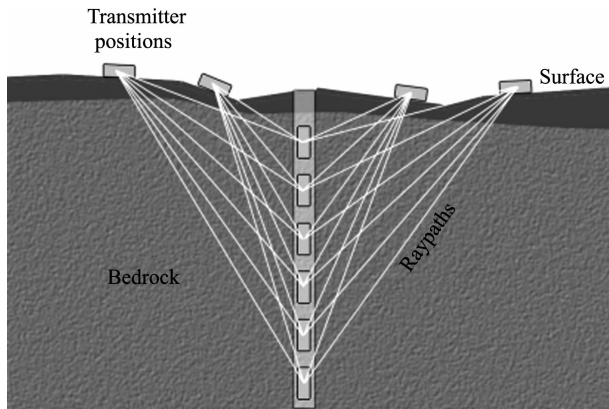


图 5 井地测量示意图

Fig. 5 The sketch map of surface-borehole survey

2 工程研究应用现状

探地雷达在近距离的地球物理探测中取得了许多重要的结果,同时作为一种无损检测技术在隧道、道路、建筑物检测方面扮演着重要的角色^[1]。在诸如能源、军事、考古等众多领域都存在潜在的需求,同时随着工业化的发展,环境问题日益突出,各种具有再次污染性的垃圾填埋及高放射性废料储存的场地

选址要求我们更精确地探测地下水文地质特征和裂隙带的分布情况,因此人们期望能在已有钻孔中突破原有地球物理方法的局限性而实现一种更大范围的探测,研究和应用钻孔雷达技术使得我们可以进行大范围的地下岩层探测并得到可靠的精度。近年来,钻孔雷达技术在工程中的应用越来越普遍,其解决实际问题的优势也愈加明显,钻孔雷达技术的应用研究主要有以下几个方面。

2.1 钻孔雷达的正演模拟技术

钻孔雷达的数值模拟技术是分析探测问题、研究电磁波在地下介质中传播规律的有效手段。到目前为止,探地雷达资料处理和解释的方法大都是借鉴地震波的处理解释方法,但高频脉冲电磁波在介质中的运动学规律与地震波仍存在一定的差异性,雷达波具有高频特征、波长较短、介质吸收强烈、加之受地面干扰大,使得探测剖面较为复杂,数值模拟复杂形体存在时的雷达波场特征,对认识实际的雷达记录,识别目标体有指导意义^[2]。钻孔雷达的模拟技术包括频域模拟、时域模拟、绕射理论、矩量法和离散元方法等,时域有限差分方法(FDTD)则是其中一种有效的电磁波模拟方法^[1]。

在模拟软件方面的研究中,英国爱丁堡大学 Antonis Giannopoulos 博士开发的 GprMax2D V2.0,可以在 Windows™ 或 Linux 系统下的 DOS 环境中运行,采用了 FDTD 和 TLM 方法对电磁波的传播进行模拟,利用该软件可以对介质中目标体的电磁场特性进行模拟^[3]。同时一些商用软件(如 Reflex)也含有模拟模块,对实际探测目标进行建模,输入并运行,将输出结果导出并成像即可以对电磁波的目标特性进行模拟演示。

在工程应用的模拟研究中,Lorrain P. (1991)模拟了孔中电磁波地下裂隙成像^[4];刘四新等对多频电磁波测井进行了数值模拟实验,在其新开发的多频电磁波测井系统中,天线频率范围大约在 40~100 MHz,用时域有限差分法给出各种情况下油水存在时的多频电磁波测井响应,结果表明即使在地层水不导电的情况下,介电常数也可以用来区分油层和水层^[5]。在对井中雷达的数值模拟中,引入了可包含局部小网格的技术,提高了计算精度和效率,同时考虑了发射和接收的偶极子天线的模拟,计算出了充水裂缝和一种矿体的井中雷达信号响应^[6]。Wang DM 等的二维模拟提供了对速率和衰减的分布,以及反射体几何形状的预测评估;对比垂直和水平电场传播的速率显示在上部的 6~7 m 表现出各

向异性,水平极化波的垂直传播速度比垂直极化波的水平传播速度快,这种各向异性特性是由现场岩体节理裂隙随深度变化所引起的;随深度增加深部岩层裂隙未受地面风化影响各向异性将随之消失^[7]. Holliger K 等采用了圆柱坐标系对钻孔雷达进行了三维数值模拟^[8]; Alumbaugh D 等对跨孔雷达测量进行模拟和现场测试评价渗流区的含水量^[9]; Sato M 等对孔中有限自由偶极天线的瞬时辐射进行数值模拟实验,高频情况下,天线在充水钻孔的辐射出现旁瓣,由水和空气对辐射产生的不同影响在天线设计中不容忽视^[10]; Ebihara, S. 利用矩量分析方法预测了幅度和延迟的估计值跟频率的相关性^[11].

2.2 钻孔雷达的反演解释及应用研究

钻孔雷达的反演技术其实就是雷达数据资料的解释和处理. 钻孔雷达是利用地下介质电性参数的差异,根据得到的雷达双程走时剖面图的特征来分析和推断地下介质结构和物性特征. 由于系统因素、地物干扰等影响,通常得到的雷达剖面图是原始信号与系统相关函数的耦合并存在噪声干扰,这就需要利用信号和图像处理等方法去获取真实的原始反射波信息. 近年来,雷达数据信号处理的技术不断提高,主要涉及滤波、卷积、反卷积、偏移等图像处理方法.

在钻孔雷达数据解译软件的方面,国外许多探地雷达生产商或软件公司已开发了相应的后处理软件,如美国 GSSI 公司的 Radan 系列软件、德国的 Reflex 系列软件、韩国的 RADPRO 软件,国内的 LTD 系列雷达也有配套的数据处理软件;其中 RADPRO 的源代码由 Fortran 和 C++ 生成,兼有较好的用户界面和良好的数据处理能力. 目前大多数软件都是二维的图像处理软件,而孔中天线在其周围 360° 接受目标体反射回来的信号,单孔反射测量中的二维图像无法确定地下目标的方位信息,因此需要开发完善的三维雷达数据后处理软件来解决当前的问题,数据处理从二维向三维发展将是软件开发的趋势所在.

在工程应用方面,许多应用研究人员在不同的领域应用中对钻孔雷达资料的后处理技术进行过深入广泛的研究. 王驹、陈伟明等以甘肃北山一号为例做了钻孔雷达在高放废物处置库场址的评价,利用单孔反射法首次获得深达 500m 的钻孔雷达数据,测量证明钻孔雷达在了解岩体内部裂隙和岩体完整性的有效性,对高放废物处置库的场址选址有重要

意义^[12]. 据建明研究了钻孔雷达在厦门翔安海底隧道施工过程中超前地质预报技术中的应用^[13]; 黄家会等分别利用单孔和跨孔测量研究地下深部岩石的特性^[14]; Sato M 等利用钻孔雷达探测地下含水裂隙以及 VRP 技术在仙台城堡探测中的应用,对 VRP 原始数据中进行直达波的去波, f-k 滤波,反射波的 Kirchhoff 偏移,揭示了其古石墙及地层的分布情况^[15]; Binley A 等研究地下水渗流模型及水分的迁移规律^[16]; Bellefleur G 等利用钻孔雷达硫化矿物的大范围测量^[17]; Ernst JR 为了提高雷达层析成像的分辨率,基于 Maxwell 方程组的时域有限差分开发了一套全波(full-waveform)反相系统,其分辨率明显优于射线层析成像^[18,19].

2.3 钻孔雷达的新技术

2.3.1 雷达极化技术

在探地雷达的应用中,地下裂缝的特征和裂缝的渗透率等信息在常规钻孔雷达中很难获得,原因在于它仅能估计裂缝的位置和方位,而不能给出有关物理性质的更详细的性质. 日本学者提出利用极化钻孔雷达技术来解决这些问题,雷达极化是一种新技术,通过利用雷达信号中的极化信息可以了解有关雷达探测目标的更多信息.

Sato M. (1995) 首先提出了利用槽形天线进行跨孔雷达极化测量的概念^[20]. 随后进行了深入的研究的表明,粗面能导致去极化的散射场的发生,裂缝产生的体积散射(Volume Scattering)会产生很强的交叉极化反射;通过对孔中偶极子天线和槽形天线进行不同的组合分别测量来获得全极化雷达信号;极化雷达系统可以建立在网络分析仪之上的步进频率雷达系统,在雷达测量之前,需对信号传输系统进行刻度来获得精确的散射矩阵,交叉极化测量的优点是利用直达信号的减小可以扩大反射测量的动态范围. 结合全极化钻孔雷达、Pauli 和 H-alpha 分解技术来取得地下裂隙的物理特征. 需要进一步的试验来证明雷达极化技术在分析地下目标体物理特征的适用性,为了实现此目标,我们在前述的试验中采用了另外两种分解技术(Durden-Freeman 分解和各向异性极化参数方法)来检验不同极化分解技术的结果. 雷达极化分解的结果很大程度地取决于物理与数学模型,这些技术可以为裂隙特征和裂隙度分级提供可供参考的资料^[21~23].

2.3.2 定向钻孔雷达的发展

常规的钻孔雷达在进行单孔测量时,天线的辐射和接收都是全方位的,因此无法对地质目标的方

位进行精确定位.定向钻孔雷达作为一种单孔三维测量技术主要有两种实现方式:其一为阵列天线接收的方式进行测量,再通过数据处理的方法提取反射体的方位信息;其二为定向发射天线的方式,反射物体的方位位于天线的发射方向^[2].

前联邦德国的地球科学和自然资源研究所(German Federal Institute for Geoscience and Natural Resource)开发出一种非常坚固的定向钻孔雷达系统,主要用于岩盐和盐丘的探测;韩国的地质采矿及材料研究所(KIGMM)针对 RAMAC 和德国的定向钻孔雷达,开发了数据处理方法能计算出反射体的方位角;Ebihara 等也开发研制了类似的钻孔定向雷达接收天线的样机,并利用 MUSIC 算法来处理阵列天线的信号,得出井中周围反射体的三维估计;同时对圆柱形分层媒介中定向钻孔雷达圆弧形偶极子阵列天线的进行过谐振分析^[24~26]. Sato M. 等开发了一种新的使用光电传感器的定向钻孔雷达使得在单孔测量中进行地下目标的三维成像,该系统由一个阵列 4 个偶极天线作为接收器来实现方位的敏感性.把一种适合定向钻孔雷达测量的(DF)算法应用到实际的场地测量,这个算法基于 Adcock DF 天线原理,复杂的信号解析分析,优化,滤波都综合起来提供更精确的预估.这个算法最初在跨孔测量中估算从发射器到接收器(收发间距为 15m)入射波方位中得到验证,在单孔测量论证其对位于距钻孔 5.5 m 处地下隧道的三维定位能力,结果显示其与实际位置很好的一致性^[27~31].

3 结论及展望

目前,探地雷达已经广泛地应用于地质勘探、岩土工程、水文和环境等多个领域,钻孔雷达作为一种井中探地雷达,它可以提供钻孔周围 10~40m 的岩体构造、岩石学和水文地质信息;钻孔雷达作为一种新的地球物理技术,其应用领域不断扩大,取得成果的同时也面临着许多问题,这需要我们进一步进行深入的研究.根据以上的回顾,可以得到如下结论.

(1)钻孔雷达技术弥补了常规地面雷达技术及地质勘探技术的不足,更大范围地提供了地下目标丰富和直观的信息;其主要应用领域有环境评价、工程地质、岩土工程、考古、水文地质和高放射性废料储存场所选址的研究.

(2)雷达成像与数据处理技术的发展很大程度上影响了钻孔雷达资料的解译水平,偏移成像算法有利于探测目标的直观显示,但目前的偏移理论在

雷达资料的处理上还不能得到理想的实际目标物的图像,仍需发展新的归位成像算法,使得地下探测目标的显示直观化;

(3)钻孔雷达的反演技术还不是很成熟,可以进行一些目标体的电磁特性,包括电磁波的目标反射、散射特性的基础理论研究,建立目标体的反演模型,提高雷达资料的解译的理论水平,进而推动其在工程领域的应用;

(4)随着当今科学技术的发展,钻孔雷达的系统设计和雷达资料的后处理技术是钻孔雷达技术的主要发展方向;钻孔雷达技术可以在图像精度、地下目标精确定位、多分辨率成像等方面有所突破.

参 考 文 献 (References):

- [1] David J. Daniels, Ground penetrating radar-2nd edition[M]. The Institution of Electrical Engineers, London, UK, 2004.
- [2] 曾昭发,刘四新,等.探地雷达方法原理及应用[M].北京:科学出版社,2006.
Zeng Z F, Liu S X, *et al.* The theory and application of ground penetrating radar method[M]. Science Press, 2006.
- [3] Antonis Giannopoulos. The Investigation of Transmission-Line Matrix and Finite-Difference Time-Domain Methods for the Forward Problem of Ground Probing Radar[D]. The University of York, UK, 1997.
- [4] Lorrain P. Mapping subsurface fractures by radiofrequency holography-a simulation [J]. Geophysical Journal International, 1991, 106(2):333~339.
- [5] 刘四新,佐藤源之.多频电磁波测井的数值模拟和实验研究[J].测井技术,2003,27(4):278~282.
Liu S X, Sato M. Numerical and Experimental Study on Multi-frequency Electromagnetic Well Logging[J]. Well logging Technology, 2003, 27(4):278~282.
- [6] 刘四新,佐藤源之.时域有限差分法(FDTD)对井中雷达的数值模拟[J].吉林大学学报(地球科学版),2003,33(4):545~550.
Liu S X, Sato M. Numerical simulation for borehole radar by FDTD[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2003, 33(4):545~550.
- [7] Wang D M, McMechan G A. Finite-difference modeling of borehole ground penetrating radar data[J]. Journal of Applied Geophysics, 2002, 49(3):111~127.
- [8] Holliger K, Bergmann T. Numerical modeling of borehole georadar data[J]. Geophysics, 2002, 67(4):1249~1257.
- [9] Alumbaugh D, Chang PY, Paprocki L, *et al.*; Estimating moisture contents in the vadose zone using cross-borehole ground penetrating radar: A study of accuracy and repeatability[J]. Water Resources Research, 2002, 38(12):1309~1316.
- [10] Liu S X, Sato M. Transient radiation from an unloaded, finite dipole antenna in a borehole: Experimental and numerical results[J]. Geophysics, 2005, 70(6):43~51.

- [11] Ebihara S, Hashimoto Y. MoM analysis of dipole antennas in crosshole borehole radar and field experiments[J]. *Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(8): 2435~2450.
- [12] 王驹, 陈伟明, 等. 钻孔雷达在高放废物处置库场址的评价中的应用——以北山1号孔为例[J]. *铀矿地质*, 2005, 21(6): 360~364.
Wang J, Chen W M, *et al.* Application of borehole radar to site characterization of high-level radioactive waste repository—Taking Beishan borehole No. 1 as an example[J]. *Uranium Geology*, 2005, 21(6): 360~364.
- [13] 据建明. 超前地质预报技术在海底隧道施工中的应用[J]. *铁道工程学报*, 2007, 106(7): 76~81.
Ju J M. Application of technologies of geological forecast in advance in construction of submarine tunnel[J]. *Journal of Railway Engineer Society*, 2007, 106(7): 76~81.
- [14] 黄家会, 宋雷, 等. 应用跨孔雷达层析成像技术研究深部岩层特性[J]. *中国矿业大学学报*, 1999, 28(6): 578~591.
Huang J H, Song L, *et al.* Application of crosshole radar tomography in studying characteristics of strata in depths[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*; 1999, 28(6): 578~591.
- [15] Zhou H, Sato M. Application of vertical radar profiling technique to Sendai Castle[J]. *Geophysics*, 2000 65(2): 533~539.
- [16] Binley A, Winship P, Middleton R, *et al.* High-resolution characterization of vadose zone dynamics using cross-borehole radar[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(11): 2639~2652.
- [17] Bellefleur G, Chouteau M. Massive sulphide delineation using borehole radar: tests at the McConnell nickel deposit, Sudbury, Ontario[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2001, 47(1): 45~61.
- [18] Ernst JR, Green AG, Maurer H, *et al.* Application of a new 2D time-domain full-waveform inversion scheme to crosshole radar data[J]. *Geophysics*, 2007, 72(5): 53~64.
- [19] Gloaguen E, Giroux B, Marcotte D, *et al.* Pseudo-full-waveform inversion of borehole GPR data using stochastic tomography[J]. *Geophysics*, 2007, 72(5): 43~51.
- [20] Sato M, Ohkubo T, Niitsuma H. Cross-polarization borehole radar measurements with a slot antenna[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 1995, 33(1-3): 53~61.
- [21] Miwa T, Sato M, Niitsuma H; Enhancement of reflected waves in single-hole polarimetric borehole radar measurement [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2000, 48(9): 1430~1437.
- [22] Sato M, Takeshita M; Estimation of subsurface fracture roughness by polarimetric borehole radar[J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2000, 83(12): 1881~1888.
- [23] Zhao J, Sato M. Consistency analysis of subsurface fracture characterization using different polarimetry techniques by a borehole radar[J]. *Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 4(3): 359~363.
- [24] Ebihara S, Sato M, Niitsuma H. Super-resolution of coherent targets by a dictionary borehole radar[J]. *IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(4): 1725~1732.
- [25] Miwa T, Arai K. Estimation of position and radius of cylindrical targets using MUSIC algorithm in cross-borehole radar [J]. *Electronics and Communications in Japan Part-Communications*, 2006, 89(8): 26~36.
- [26] Ebihara S, Yamamoto T. Resonance analysis of a circular dipole array antenna in cylindrically layered media for directional borehole radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(1): 22~31.
- [27] Sato M, Takayama T. A novel directional borehole radar system using optical electric field sensors[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(8): 2529~2535.
- [28] 毛敏娟, 张寅超, 等. 机载激光雷达对青岛及周边海域的气溶胶探测[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(2): 370~376.
Mao M J, Zhang Y C, *et al.* Detection of aerosol distribution by atmosphere environment airborne lidar over Qingdao and adjacement sea area [J]. *Chinese Journal of Geophysics*; 2007, 50(2): 370~376.
- [29] Takayama T, Sato M. A novel direction-finding algorithm for directional borehole radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*; 2007, 45(8): 2520~2528.
- [30] 王兆磊, 周辉, 等. 用地质雷达数据资料反演二维地下介质的方法[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(3): 897~904.
Wang Z L, Zhou H, *et al.* Inversion of ground-penetrating radar data for 2D electric parameters[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(3): 897~904.
- [31] 詹艳, 王继军. 利用卫星探测研究地下结构[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(3): 702~707.
Zhan y, Wang J J, *et al.* Study on underground structure by using Satellite[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(3): 702~707.