

3D 定向钻孔雷达系统及应用

王正成, 侯胜利

(中国地质大学 地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 3D 定向钻孔雷达系统能够对钻孔四周进行高精度三维成像, 在单个钻孔中即可完成目标体距离、方位的探测, 相对 2D 钻孔雷达具有探测精度高、速度快、深度大的优点。笔者对 3D 定向钻孔雷达系统的工作和成像原理、技术规格进行了详细说明, 并结合现场数据说明了其实际应用效果。

关键词: 3D 定向钻孔雷达; 共深度扫描; 共角度扫描

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2007)01-0086-04

在反射模式下, 2D 钻孔雷达发射天线和接收天线以固定的间距下放到同一钻孔中, 天线是偶极的, 它向 360° 空间辐射和接收反射信号(无方向性), 因此, 使用偶极天线, 仅从 1 个钻孔中得到的数据无法得到反射体的方位。目标物在雷达数据上显示图形为双曲线, 其位置是双曲线的顶点处, 因为 2D 钻孔雷达数据 360° 接收信号, 所以从单孔中得到的雷达数据不能给出目标物的方位, 只能得出距钻孔的位置。为了估计反射的方位, 至少需要 2 个钻孔的数据。在工程现场, 往往由于地面存在建筑物等障碍或其他环境因素, 仅能够在单个钻孔中进行测量, 因此, 3D 定向钻孔雷达系统是技术上的重大突破, 为很多工程提供了全新的解决方法。

1 工作原理

3D 定向钻孔雷达系统能够通过单个钻孔进行数据采集来完成四周高精度的三维成像工作, 判明目标物距钻孔的距离和方位, 是 2D 钻孔雷达技术上的重大突破。该系统通过天线发射机向地下发

射中心频率在 100 MHz 左右的电磁波, 当发射的电磁波遇到足够大的材料参数差异(目标物)时, 一部分电磁波被反射回来并由天线接收机接收, 其余电磁波继续向更远处传播, 然后由下一个材料边界反射回来。通过在钻井中缓慢地旋转天线并提升系统, 就可以获得以螺旋状采集的钻孔四周高精度图像。系统精确测量雷达波发射和接收的时间间隔, 当已知雷达波在地下的传播速度时, 利用传播时间就能够换算出目标物距钻孔的距离和方位。图 1 为定向天线信号探测区域示意, 探测区域在角方向上较宽($70^\circ \sim 90^\circ$), 而在钻孔方向上较窄($10^\circ \sim 15^\circ$)。

3D 定向钻孔雷达通过电力与数据传输电缆和地面控制台相连, 启动系统并校准后, 将 3D 定向钻孔雷达放至钻孔的最底部。当向上拖动以一定速度旋转的天线模块时, 数据采集即以螺旋状开始采集, 同时, 雷达和方位信息传输到控制台并保存起来。当测量工作结束后, 雷达数据和方位数据即进行整合, 处理完成后就可得到钻孔四周的三维图像。

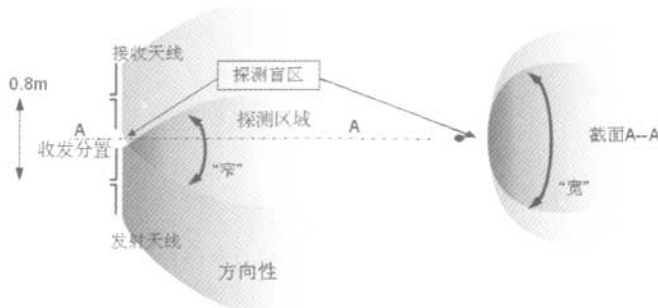


图 1 定向天线信号探测区域示意

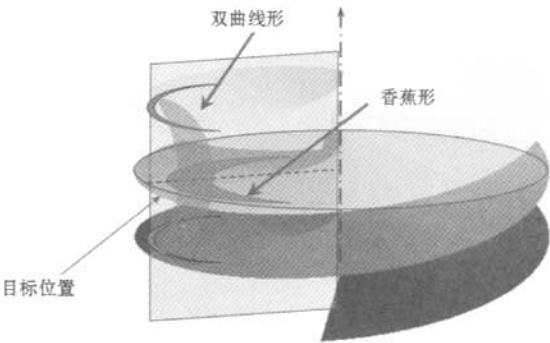


图2 目标物在共角度和共深度扫描中成像示意

最终定义 2 种 2D 平面来查看数据——共深度扫描和共角度扫描,共深度扫描中所有轨迹都有相同的深度,共角度扫描中所有轨迹都具有相同的角度。当 3D 定向钻孔雷达在钻孔中垂直提升并“通过”目标物时,目标物与钻孔之间的距离首先减少,随后再增加,因此,目标物在共角度扫描图像中的反射会是双曲线的形状。当 3D 定向钻孔雷达旋转并水平通过物体时,目标物与钻孔之间的距离保持不变,而雷达波的强度在改变。当天线辐射波束水平通过目标物时,其强度先增加,随后再减少,这就导致了共角度扫描图形上出现“香蕉”的形状,目标物位于该模式的中间位置,如图 2 所示。

相对介电常数 ϵ_r 是决定雷达波是否被反射的重要参数。介质的电导率决定雷达波在介质中的传播距离。介质的电导率越高,发射的电磁波能量被吸收得也就越多,信号也就越弱。表 1 中列出了典型介质中 ϵ_r 、电导率 σ 、电磁波速 v 和衰减系数 A 的数值。3D 定向钻孔雷达的发射能量很强,穿透深度最大可达 15 m。衰减系数随电导率的增大和介电常数的减小而增大。 σ 小时, A 与频率 f 的关系不明显; σ 大时, A 与 ϵ 关系不明显。

表1 几种典型介质的电磁特性参数

材料	ϵ_r	$\sigma/(\text{mS/m})$	$v/(\text{m/ns})$	$A/(\text{dB/m})$
空气	1	0	0.3	0
水	80	0.5	0.033	0.1
水(含盐)	80	3000	0.01	1000
沙子(干燥)	3~5	0.01	0.15	0.01
沙子(饱和的)	20~30	0.1~1.0	0.06	0.03~0.3
淤泥	5~30	1~100	0.09	1~100
黏土	5~40	2~1000	0.07	1~100

当 $\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \ll 1$ 时, $A \approx \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ 。衰减系数与 f 无关,而

与 σ 成正比,与 $\sqrt{\epsilon}$ 成反比。当 $\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \gg 1$ 时, $A \approx \sqrt{\frac{\sigma\mu\omega}{2}}$ 。

衰减系数与 σf 有关,但与 ϵ 无关。可见在高导电介质中或使用高频时, A 值将增大。其中 μ 为介质的磁

导率,角频率 ω 与 f 的关系为 $\omega = 2\pi f$ 。

2 系统组成及技术规格

3D 定向钻孔雷达包括 4 个主要部分:定位单元、雷达单元、电缆(电力供应和数据传输)、操作和处理软件。定位单元包含 1 个控制单元、1 个旋转雷达单元的电动机和几个确定系统在钻孔中位置的传感器,其中传感器有磁力计、加速度计、光纤陀螺仪传感器和 1 个角度编码器。这个单元是整套系统的外壳,它经过特殊设计,用来保护雷达单元,避免受到钻孔内机械和环境状况的损害。定位单元和雷达单元之间有经过特殊设计的连接,允许雷达单元旋转时进行高速数据传输和电力供应。雷达单元内嵌在 3D 定向钻孔雷达系统内并在其中旋转。它包含 2 个定向天线,天线后面的反射体限定了雷达方面敏感度和能量波束。雷达控制单元,发射机和接收机电子部件全部位于雷达单元内,采集的模拟信

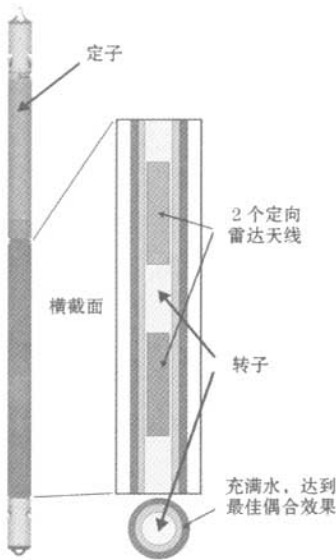


图3 3D 定向钻孔雷达系统组成

号在井下由 1 个非常快速的 A/D 转换器数字化。系统通过电缆与地面设备相连,电缆供应电力并允许高速数据传输。3D 定向钻孔雷达提供用户订制设计的操作和处理软件 Dafos,它也能够用于其他包含多个传感器的地球物理设备。根据不同的应用,通常还需要三角架、绞车、地面设备(DC 电源,计算机等)等附件来协助整套系统工作。图 3 为 3D 定向钻孔雷达系统组成。

3D 定向钻孔雷达的技术规格为:长度 4.2 m,直径 16 cm,重量 250 kg,源信号为脉冲(高达 850 V),中心频率 100 MHz,带宽 100 MHz,发射机与接收机之间的动态范围为 120 dB,通常穿透深度 5 ~ 15 m,角度精度 $1^{\circ} \sim 30^{\circ}$,轴向精度 1 ~ 30 cm,分辨率高(能够探测到 5 m 远处 100 mm 的物体),电导率范围在 100 MHz 或更低时为 20 mS/m,天线安装要求收发分置(2 个天线),天线类型为屏蔽偶极子(定向的),工作温度 $0^{\circ} \sim 60^{\circ}$,最大工作压力 1 500 kPa(充满水的垂直钻井中 150 m 深),通常电力消耗 60 W,材料为 RVS316(非磁性)和合成材料。

3 应用

3D 定向钻孔雷达是传统探地雷达技术上的一个重大突破,其应用不仅仅局限于钻孔地下测量,而且能够与地下建筑设备进行集成使用,例如喷浆设备和隧道钻孔机器等。3D 定向钻孔雷达另外一个强有力的应用就是作为数据记录工具探查油气层特性。作为非震工具,它能够在现有的数据记录技术中添加很多有用信息。由于定向雷达信号的穿透性强,分辨率高,因此能够查明储层最初几米的信息和构建钻孔周围十分详细的 3D 图像。

假设电磁波以角度 α 入射到坐标原点,可以把信号分解为 2 个分量,即 $x(t)$ 和 $y(t)$,那么,入射信

号可以表示成 2 个相互正交天线的矢量和:

$$s_i = x_i \cos \alpha_i + y_i \sin \alpha_i, \quad i = 1, 2, \dots, n。$$

n 为取样数。计算反射体的方位等价于发现反射体的入射角 α_i ,这时给出上面方程的最大幅值。通过求解方程,可得到一系列随取样数而变化的入射角 α_i ,也就是入射角的 1 个时间序列。来自定向天线的信号具有较低的信噪比,在 1 个给定的时间窗口求取入射角度,将会给出更可靠的结果。问题变为求取下列方程的入射角

$$Q(\alpha_i) = \sum_{i=1}^{i_2} s_i^2 = \sum_{i=1}^{i_2} (x_i \cos \alpha_i + y_i \sin \alpha_i)^2 \approx \text{MAX},$$

对上式方程求 α_i 的微分得

$$\tan \alpha_i = [(\sum x_i^2 - \sum y_i^2) \pm \sqrt{(\sum x_i^2 - \sum y_i^2)^2 + 4(\sum x_i y_i)^2}] / 2 \sum x_i y_i,$$

由于方程求得的 2 个 α_i 都可能是入射角,分别对应入射波的最大和最小能量,我们选取 $Q(\alpha_i)$ 的最大值。

图 4 是某现场实测的 3D 钻孔雷达数据。在共角度扫描中,全部数据都有同样的测量角度, x 轴是目标物距钻孔的半径距离, y 轴是目标物在水面下的深度位置。半径距离是根据水的相对介电常数和记录的发射-接收时间换算过来的。从图像上可以看出,目标物深度在水面下 6.5 m,距钻孔的半径距离为 10.5 m。目标物反射波形类似于表面探地雷达的双曲线反射模式。这个结果表明,当 3D 定向钻孔雷达在钻孔中垂直提升并“通过”目标物时,目标物与钻孔之间的距离首先减少,随后再增加。

而在同一测量的共深度扫描中,所有数据都在同一测量深度,即水面下 6.5 m。 R 轴为目标物到钻孔的距离,角度轴为目标物相对磁北极的角度。图像显示目标物在相对磁北极的 330° 位置,距钻孔

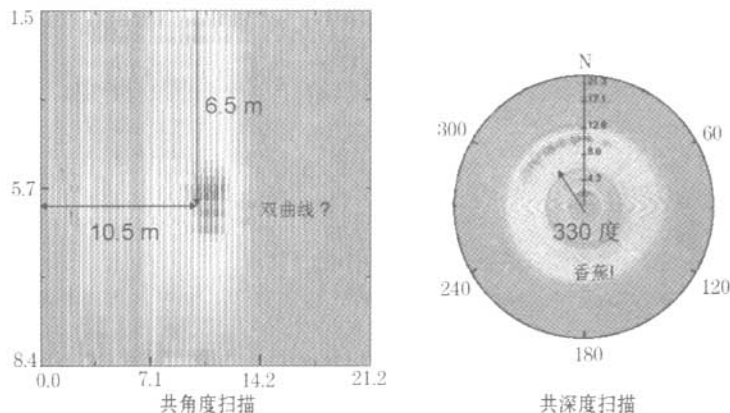


图 4 3D 定向钻孔雷达实测数据

的半径距离为 10.5 m。在共深度扫描中,不能看到双曲线反射模式,图形上出现的是“香蕉”模式,目标物位于该模式的中间位置。从图上可明显看到,目标物反射波形在图上出现的角度并不仅仅是 330° ,而是在 $300^\circ \sim 360^\circ$ 的一个范围内。这是因为 3D 定向钻孔雷达发射的信号波束具有 $70^\circ \sim 90^\circ$ 的宽度,发射信号的能量密度在波束中间位置最强的缘故。

4 结语

3D 定向钻孔雷达能够在单个钻孔中,复杂的现场条件下,例如深度要求大,有障碍物或地下存在建筑物时,成功探测目标物的深度和方位位置。通常在角度方向上能够达到 10° 的精度,深度方向上达到 20 cm 的精度。在保证穿透深度和精度的条件下,仪器下一步的发展要减小其尺寸、重量和电力消

耗,争取将控制设备的处理和操作系统部分内嵌在 3D 定向钻孔雷达的井下部分中。

参考文献:

- [1] Van Dongen K W A. A directional borehole radar system for subsurface imaging[D]. Delft University of Technology Laboratory of Electromagnetic Research, 2002.
- [2] Van Waard R, Van der Baan S, Van Dongen K. Experimental data of a directional borehole radar system for UXO detection[R]. Tenth International conference on Ground Penetrating Radar, Netherlands, 2004.
- [3] Van Donger K W A, Van Waard R, Van der baan S, et al. A directional borehole radar system[J]. Subsurface Sensing Techn. and Appl. An Int. Journ., 2002, 3(4):327.
- [4] 曾昭发,刘四新,王者江,等. 探地雷达方法原理及应用[M]. 北京:科学出版社,2006.

THE 3D BOREHOLE DIRECTIONAL RADAR SYSTEM AND ITS APPLICATION

WANG Zheng-cheng, HOU Sheng-li

(Geo-detection Laboratory, Ministry of Education, China University of Geoscience, Beijing 100083, China)

Abstract: The 3D directional borehole radar system can perform 3D mapping for the surroundings of a borehole with high resolution. The detection of the distance from the borehole and the angle in relation to the magnetic North can be completed in a single borehole. The system has many advantages over the 2D borehole radar in such aspects as high resolution, rapidness and great penetrating depth. The authors deal with the working and imaging principles and technical specifications of the 3D directional borehole radar in details and, combined with field data, show its true application results.

Key words: 3D directional borehole radar; common depth scan, common angle scan; Beijing area

作者简介: 王正成(1977—),男,中国地质大学(北京)研究生,主要从事无损检测和工程物探工作,公开发表论文数篇。