

地面坍塌隐患检测中三维地质雷达数据处理及隐患识别研究

杨帆¹, 贾辉²

(1. 中国冶金地质总局西北地质勘查院, 西安 710119;

2. 北京市勘察设计研究院有限公司, 北京 100038)

摘要: 三维地质雷达作为一种高效、无损的检测技术, 已广泛应用于城市道路地下病害或坍塌隐患检测中。与传统的二维地质雷达相比, 三维地质雷达在隐患识别、数据融合、工作效率等方面具有突出优势, 逐渐成为城市道路地面坍塌隐患检测的主要方法。笔者总结了三维地质雷达的技术优势, 通过对三维地质雷达数据处理的总结研究, 提炼出了一套系统的数据处理流程, 通过对不同隐患的三维地质雷达图谱特征进行分析研究, 总结出了不同类型隐患的识别特征及判定依据, 为城市道路地面坍塌隐患三维地质雷达检测数据的处理及隐患的识别提供参考。

关键词: 地面坍塌隐患; 三维地质雷达; 数据处理; 隐患识别

中图分类号: P631.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.06.12

0 引言

随着城市建设的不断发展, 地下空间的利用越来越广泛, 伴随而来的与人类活动关系密切的“城市地面坍塌”现象发生频率也越来越高。地面坍塌隐患具有隐蔽性、突发性, 一旦发生地面坍塌事故, 将可能造成局部的人员伤亡和经济损失^[1]。北京、深圳、兰州等各大城市由于地下工程施工密集、基础设施老化导致的安全风险交织错杂, 导致地面坍塌事故屡有发生。因此有必要定期开展城市地面坍塌隐患检测, 尽早发现隐患、及时消除隐患, 最大限度地防范地面坍塌事故发生, 保障市民生命财产安全。

目前, 在城市地面坍塌隐患探测中采用的工程物探方法主要有浅层地震法^[2]、瞬变电磁法^[3]、高密度电法^[4]以及地质雷达法^[5-7]。其中浅层地震法和瞬变电磁法受城市干扰(震源干扰、电磁干扰)影响较大, 高密度电法因电极布设的局限性, 难以适用于

沥青或水泥道路, 且上述三种方法对道路浅部异常体的分辨能力相对较弱。三维地质雷达具有检测效率高、数据融合能力强、隐患识别直观、定位明确等特点, 现被广泛应用于沥青路面厚度检测^[8]、市政管线渗漏探测^[9]和道路塌陷空洞探测^[10]等领域, 该技术能够实现实时三维显示, 大幅度提升了城市道路检测的效率^[11]。笔者主要针对三维地质雷达数据处理及隐患识别进行研究, 提出一套系统的数据处理流程, 并分析总结不同类型隐患图谱特征及判定依据。

1 三维地质雷达方法及优势

1.1 三维地质雷达工作原理

三维地质雷达是利用超高频脉冲电磁波探测地下介质分布特征的一种地球物理方法^[12], 其工作原理主要通过发射天线(T)发射高频宽带(200 MHz~1 300 MHz)电磁波, 再通过接收天线(R)接收地下

介质的反射电磁波,最后将反射电磁波通过数字电路转换成数字信号记录到存储设备上,组成雷达剖面图像^[13],如图1所示,A-scan为单通道波形图、B-scan为二维剖面图、C-scan为多个二维剖面图共同形成的三维图^[14-15]。通过对雷达图谱的判别可确定道路下方目标体(地层、管涵、井室、隐患体:空洞、脱空、疏松体、富水体等)的分布特征,包括目标体的空间位置、埋藏深度、结构及形态。

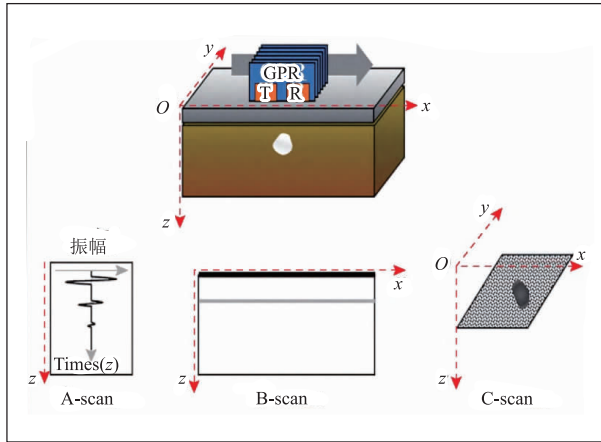


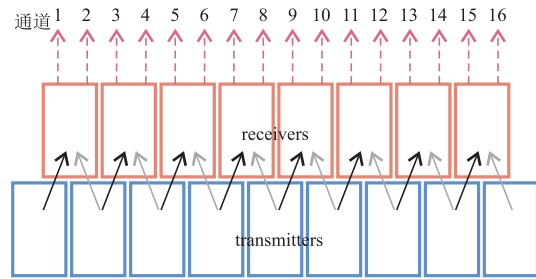
图1 三维地质雷达工作原理图^[14]

Fig. 1 Working mechanism of 3D geological radar

1.2 三维地质雷达技术优势

三维地质雷达与二维地质雷达技术的主要区别在于三维地质雷达采用了阵列天线技术(图2),可采集到高密度、无缝拼接的海量雷达数据,从而更完整地展示地下信息;三维阵列天线频率范围为200 MHz~1 300 MHz,其中高频天线对超浅层地质体能做到高分辨率探测,低频天线可使探测达到一定的深度;同时在检测工作中,三维地质雷达会通过带基站动态GPS对阵列天线进行实时、高精度的定位,保证了雷达数据的准确定位;另外三维地质雷达仪器的轻便化设计,可采用多种(车载、手推)搭载形式开展雷达数据采集,做到高效探测。

在三维地质雷达数据处理中,可进行三维偏移,建立三维数据体,并对三维数据体进行不同深度水平切片展示,这是三维雷达数据与二维雷达数据最重要也是最关键的区别,通过对不同深度水平切片分析,依据切片上电磁波能量的分布特征,可以判断异常的位置、纵向及横向分布范围、异常的类型等,图3分别为深度0.35 m、1 m、2.5 m的水平切片,其中深度1 m的水平切片清晰反映了过路管涵的位置及分布。



标准16通道阵列天线
双稳态,固定偏移距
9个发射天线,8个接收天线

图2 三维地质雷达天线阵列

Fig. 2 Antenna array of 3D geological radar

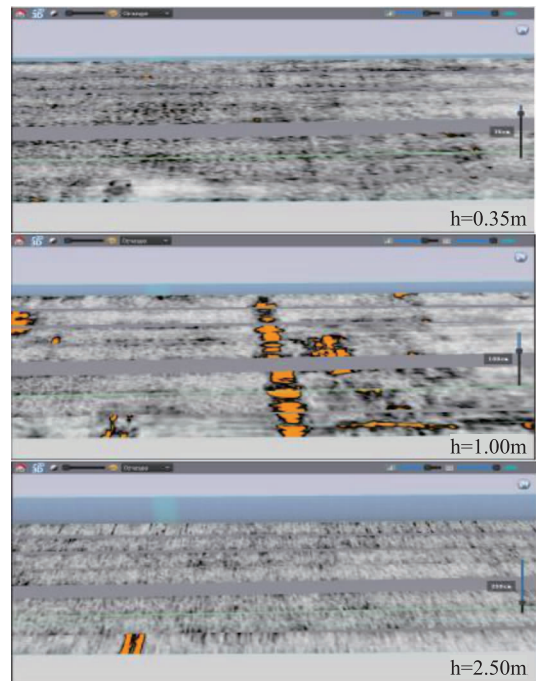


图3 不同深度三维数据切片图

Fig. 3 3D slice map of data at different depths

2 三维地质雷达数据处理

经过对大量三维地质雷达数据进行处理,笔者总结出如图4所示的数据处理流程,共分为四步:滤波处理、时间转换、去除背景、平滑增益。

1) 滤波处理

三维地质雷达在成像过程中因仪器本身和外部因素的干扰,为压制背景噪音和固定频段的随机干扰,提取有效雷达信号,需对原始数据进行滤除处理。常用的滤波类型有带通滤波、中值滤波,中值滤波主要消除地质雷达数据中的尖峰脉冲干扰,而带

通滤波除滤去高频和低频噪声外,还会做频率扫描,检查图像分辨率和信噪比的情况,相对滤波效果较好。图 5 为三维地质雷达原始数据,对其进行滤波处理滤除背景噪音和固定频段的干扰异常(图 6)。

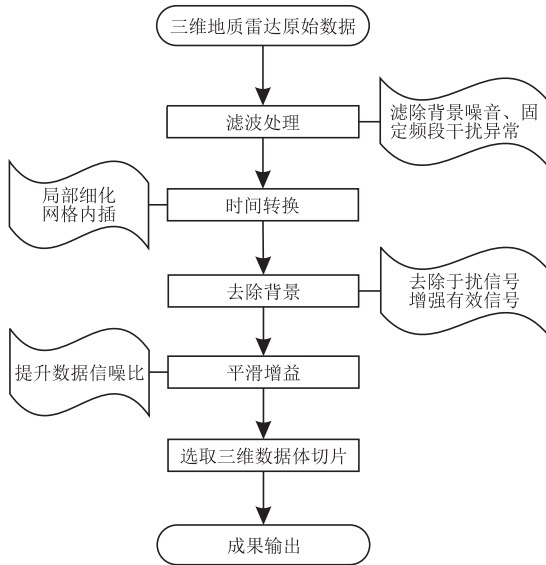


图 4 三维地质雷达数据处理流程

Fig. 4 Data processing process of 3 D geological radar

$$|H(f)| = \begin{cases} 1 & f_1 \leq f \leq f_h \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $|H(f)|$ 为振幅谱, f 为频率。

2) 时间转换

时间转换主要包含信号线性变换处理及插值处理,在对雷达信号初步滤波之后进一步局部细化数据分块内插到矩形网格中,图 7 为时间转换后三维地质雷达数据图谱。

3) 去除背景

三维地质雷达在探测过程中部分信号会传输到空气中,受控制器、馈线、天线等反馈的信号影响,对有用信号产生强烈的干扰,为消除这些共有部分,提取出反映地层结构变换的有效反射信号,需进行雷达数据背景去除处理。主要采用的方法有移动平均

法和整体平均法,三维地质雷达数据量大、包含信息杂多,为使数据处理简便化、避免复杂信号的影响,通常采用移动平均法来滤除背景信号。该方法的移动时窗 N 由用户定义,第 n 道对应的时窗范围为 $n-N \sim n+N$,每道的每个采样点 t 都减去其对应的时窗范围 $n-N \sim n+N$ 内道采样点 t 的平均值。图 8 是经移动平均法去除背景处理后的三维图谱。

$$X'(n,t) = X(n,t) - \frac{1}{2 * N + 1} \sum_{k=n-N}^{n+N} X(k,t) \quad (2)$$

其中 $X(n,t)$ 是未经过背景处理的数据, $X'(n,t)$ 是经移动平均法去除背景处理后的数据, N 为单道采样点的个数, n 是道数, t 是时间, k 是窗口宽度。

4) 平滑增益

电磁波在介质传播过程中会持续衰减,使得雷达信号强度逐渐变弱,为补偿后续信号幅值,突出异常反应,有必要对雷达数据进行增益处理。雷达数据增益的选择主要是根据主观要求和经验,增益处理方式的合适与否会影响到地质雷达剖面图像的质量。常用的三维地质雷达数据增益方式有自动增益补偿(AGC)、球面波指数增益补偿(SEC)、用户定义等几种。AGC 增益方式主要在不考虑雷达信号幅值的保真度时,来分析地下介质的水平连续性;SEC 增益方式是根据雷达波在地下介质传播的衰减特性进行信号幅值补偿,主要参数有衰减系数和增益最大值,衰减系数可根据作业地质条件而定,增益最大值与信噪比有关,取值范围为 $50 \sim 2\,000$,在雷达数据增益处理中,通常采用小衰减系数、大增益最大值来突出深部异常反应。图 9 是经 SEC 增益方式后的三维地质雷达数据图谱可全面、清晰地呈现出深部信息。

通过对上述处理流程后的三维数据体进行针对性的切割,可得到地下异常体或目标体的轮廓、位置等多种地下信息,取得可靠的检测成果。如图 10 为三维地质雷达数据切片分析图,可明显地识别管涵、地面井及隐患。

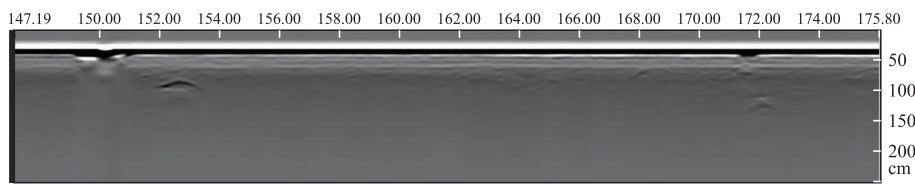


图 5 三维地质雷达原始数据图谱

Fig. 5 Original data map of 3D geological radar

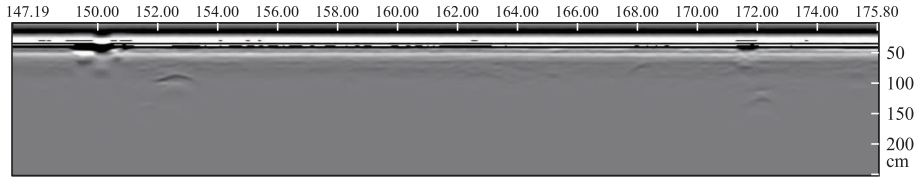


图 6 滤波处理后三维地质雷达数据图谱
Fig. 6 3D geological radar data map after filtering processing

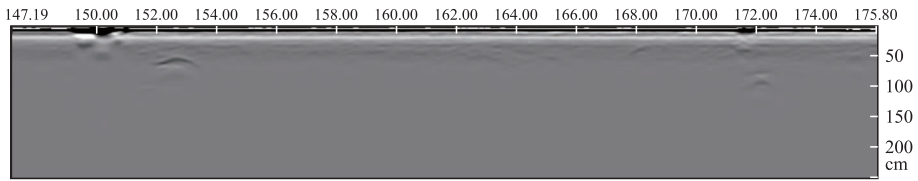


图 7 时间转换后三维地质雷达数据图谱
Fig. 7 3D geological radar data map time-transformed

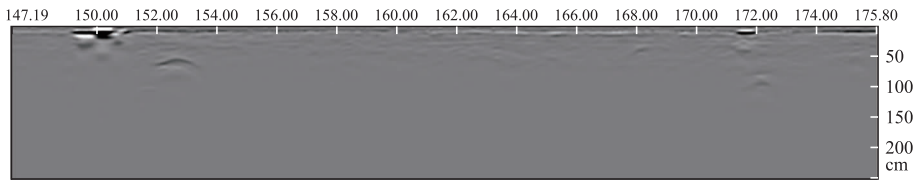


图 8 去除背景后三维地质雷达数据图谱
Fig. 8 3D geological radar data map after background removal

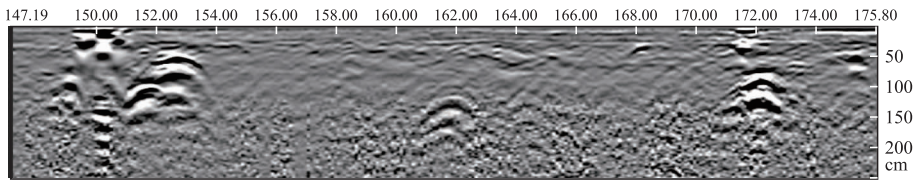


图 9 平滑增益后三维地质雷达数据图谱
Fig. 9 3D geological radar data map after smoothing gain

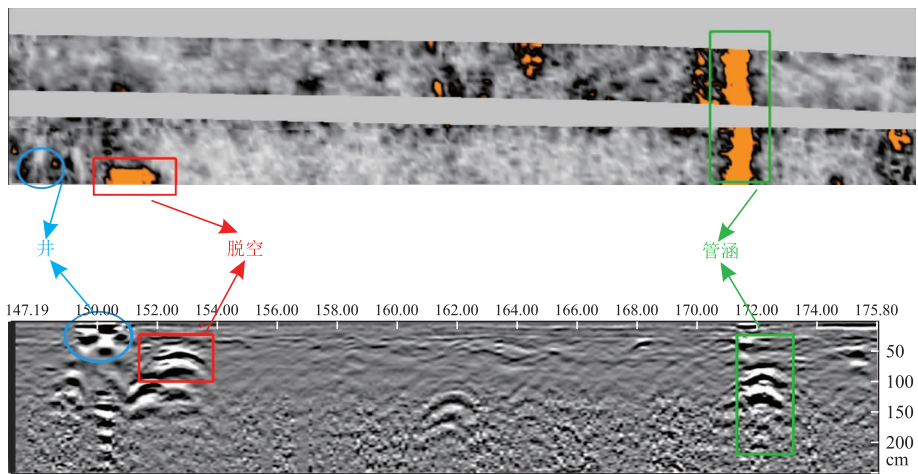


图 10 三维地质雷达数据切片分析图
Fig. 10 Slice analysis map of 3D geological radar data

3 三维地质雷达图谱识别

3.1 隐患分布及成因分析

对深圳、北京等各大城市发生的地面坍塌及其影响范围进行分析发现,地面坍塌主要发生在绿化带两侧道路、公交站旁以及地下管网密集等区域。主要塌陷原因可概括为:①绿化带两侧道路由于长期渗水,使道路下方土层含水量增大,再经长期冲刷,致使土层流失形成道路坍塌;②公交站旁道路由于大量车辆长期、反复对路面试压、震动,使土层失去固结应力、沥青层失去支撑力,从而形成道路坍塌;③地下管网密集路段,管网系统的长期运行,部分管道会出现结构性缺陷,影响管网周边土层,逐渐发展成为道路隐患;④部分路段的地下施工由于施工不当亦会造成路面塌陷。

3.2 识别基本原则

城市地面坍塌隐患的类型主要包括空洞、脱空、疏松体、富水体等^[16],影响隐患严重程度的要素主要包括隐患的平面范围、纵向延伸、隐患顶部埋深和净深等,这些因素对其所引发的地面坍塌和危害程

度具有不同的影响。隐患类型主要依据雷达图谱中反射波的振幅、反射波的频谱特性、反射波同相轴形态特征以及是否存在多次波、绕射波以及三维水平切片特征等进行判定。

3.3 典型地下构筑物、坍塌隐患识别方法及案例分析

1) 地下管线/管涵图谱分析

地下管线/管涵与周边土体的介电常数、电磁波传播波速存在明显的差异,可根据雷达图谱中反射波组形成的同相轴来获取地下管线/管涵空间位置。地下管线/管涵的图谱特征一般表现为:圆形管线图谱特征为伞状向下开口的抛物线;管涵或方沟图谱特征为中部平板状反射界面、两端为半支下开口的抛物线;金属管线图谱表现为全反射波,波形为反向,振幅较强;非金属管线图谱特征为上界面反射波振幅较大;三维水平切片图像横穿多个车道或整条道路,边界清晰且图像内部色系单一。图 11 为两条过路砼管,纵剖面表现为伞状向下开口的抛物线且反射波振幅较强,横剖面呈现出平板状强反射界面,三维水平切片图像横穿整条道路且边界清晰、内部色系单一等特征均符合非金属圆形管的信号特征。

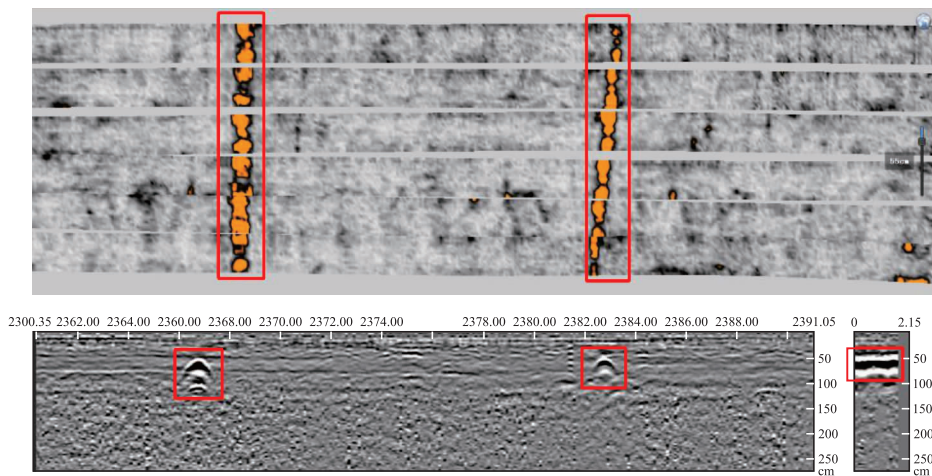


图 11 三维地质雷达地下管线图谱

Fig. 11 Underground pipelines map of 3D geological radar

2) 空洞/脱空隐患图谱分析

典型空洞异常体图谱特征一般表现为反射波信号能量强、频率、振幅、相位变化异常明显;异常顶部的反射波组表现为倒悬双曲线形态;下部多次反射波明显,边界存在明显的绕射现象;三维水平切片图像整体形状与隐患体的形状相似、边界清晰且图像内部色系单一,随着时间、深度的变大,图像

内部逐渐呈少量的雪花状。图 12 为一处经验证顶部埋深 0.7 m、净深 1 m 的空洞,从剖面图上看异常整体振幅非常强,边界位置存在明显的双曲线形态、内部有多次反射波且在异常边界存在明显的绕射波,且在三维水平图像整体形状与隐患体的形状相似、边界清晰、内部色系单一等特征均符合空洞的信号特征。

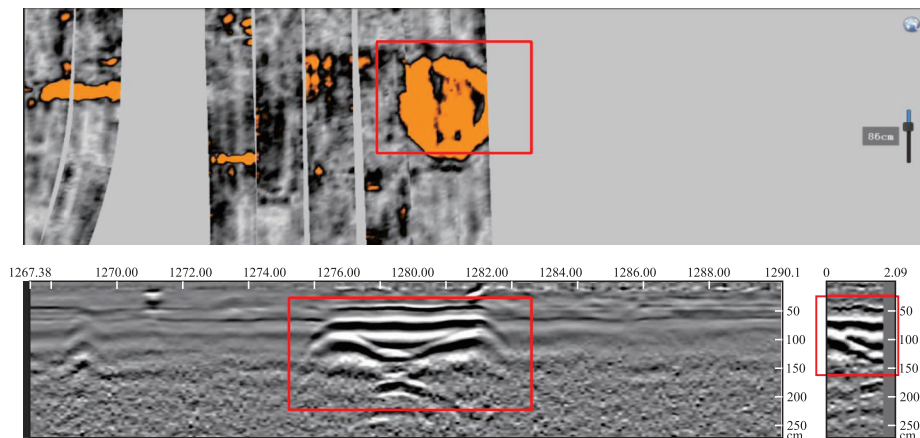


图 12 三维地质雷达空洞图谱

Fig. 12 Cavity map of 3D geological radar

3) 疏松体隐患图谱分析

道路基层或土体层若出现局部密实不均必然会导致介电常数的不同,当电磁波在该目标体上发生反射时,雷达系统可接收到相应的雷达剖面图像。疏松体图谱特征一般表现为:异常的边界处有连续的反射波同相轴中断或弯曲;介电常数小于周边土

体;频率高于背景场,整体振幅较强;异常内部波形结构杂乱;三维水平切片图像内部呈雪花状等。图 13 为一处经验证的疏松体,从剖面图上看其同相轴不连续、反射波较多、在边界出现弯曲,内部波形较为杂乱,整体上振幅较强,且三维水平切片图像内部呈雪花状。

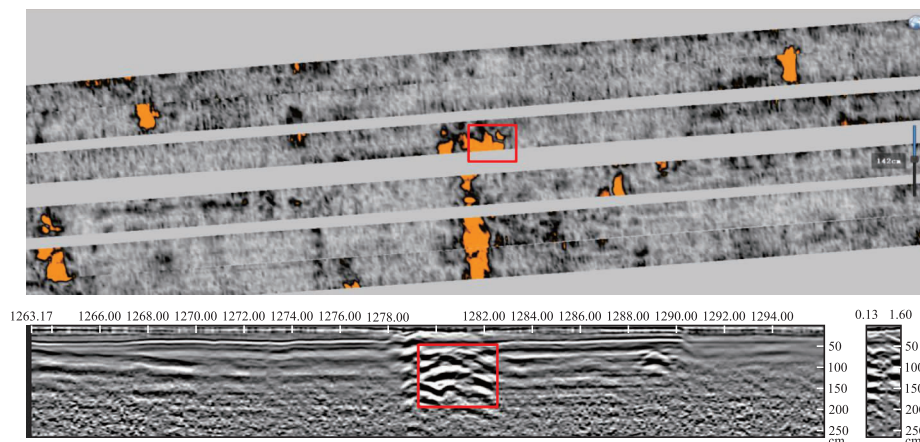


图 13 三维地质雷达土体疏松图谱

Fig. 13 Loosely infilled cavity map of 3D geological radar

4) 富水体隐患图谱分析

富水体相对周边土体均匀性较差、含水量高、灵敏度较高,相对介电常数大于周边土体,含水量越大,相对介电常数差异越大。富水体图谱特征通常表现为:顶面反射波较强;下部信号衰减明显且反射波不明显;频率低于背景场;三维水平切片图像呈闭合状且色系单一等。图 14 为一处经验证的富水体,从剖面图上看异常整体振幅较强,顶面呈现微弱的双曲线形态,在绿色框内异常信号衰减

明显且在底部反射波较弱,在异常边界处有微弱的绕射波存在,并在三维水平切片上呈现出色系单一、闭合的图像。

3.4 小结

地面坍塌隐患的识别主要根据对应雷达图谱中反射波的振幅强弱、频谱特性、同相轴形态特征以及是否存在多次波、绕射波,三维水平切片上判别时主要依据其图像内部色系、形状等特征进行判定。其中疏松体通常表现为顶部同相轴不连续、反射波较

多、在边界出现弯曲、内部波形较为杂乱且三维水平切片图像内部呈雪花状等特征;富水体通常表现为顶面反射波较强、下部信号衰减明显、反射波不明显、频率低于背景场及三维水平切片图像色系单一、呈闭合形状等特征;地下空洞及脱空通常表现为顶

部存在明显的双曲线形态、内部有多次反射波、在异常边界存在明显的绕射波且异常信号能量很强、频率高于背景场、三维水平切片图像整体形状与隐患体的形状相似、边界清晰、图像内部色系单一,随着时间、深度的变大,图像内部逐渐呈少量的雪花状等特征。

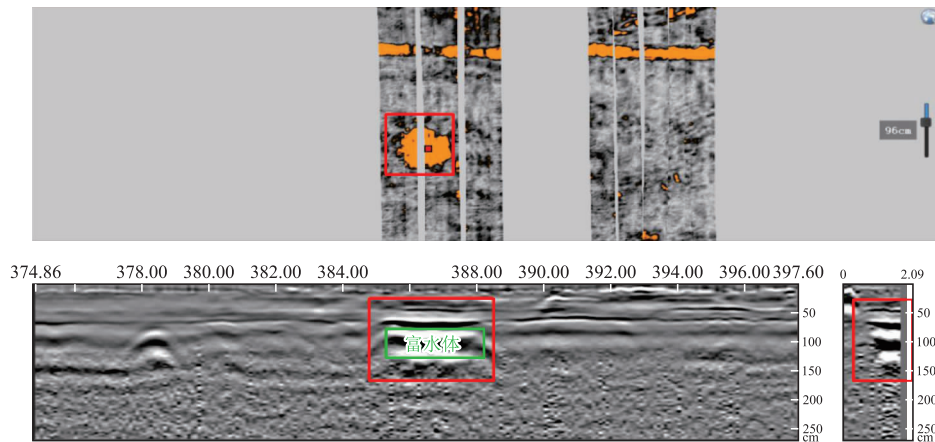


图 14 三维地质雷达富水体图谱

Fig. 14 Water-rich cavity map of 3D geological radar

4 结论与展望

4.1 结论

1)三维地质雷达可通过带基站动态 GPS 对阵列天线进行实时、高精度的定位,保证了雷达数据的准确定位;其次三维地质雷达仪器的轻便化设计,可采用多种(车载、手推)搭载形式开展雷达数据采集,做到外业的高效探测。

2)在三维地质雷达数据处理中,可进行三维偏移,建立三维数据体,并对三维数据体进行不同深度水平切片展示,从而实现道路塌陷隐患及地下构筑物的三维可视化和定量化,对目标体的位置反映更直观、解译更准确,大大地克服了二维雷达探测的局限性,并可根据隐患的分布位置、形态及大小评估其风险程度。

3)通过对三维地质雷达数据处理方法的研究,提炼出了较为系统的数据处理流程。经过处理后的三维雷达剖面可清晰地展示地下异常体或目标体的轮廓、位置等多种特征信息。

4)通过对三维地质雷达不同隐患图谱特征的识别进行分析研究,总结出了典型地下构筑物及典型坍塌隐患的图谱特征及其判定依据。

4.2 展望

目前,三维地质雷达检测技术以检测效率高、精度高、无损等优势成为城市地面坍塌隐患检测的重要手段。由于各大城市地面塌陷事故频发,三维地质雷达检测对未来城市地面坍塌防治工作十分重要。为进一步提高城市地面坍塌隐患检测效果,未来可从以下几个方面进行探索研究:

1)三维地质雷达系统基本都是车载方式开展检测工作,适用于隐患快速普查,但用于单点隐患复核验证工作时显得有点笨重。便携式二维地质雷达可方便地搭配不同频率的天线,实现对深浅部的隐患检测,具有灵活、有效深度深的优点,可充分结合两种方法的优势,实现地面坍塌隐患的检测整体工作。

2)地面坍塌隐患有多种类型,目前主要是人为来判读,不同隐患类型、规模以及周边环境增加了隐患识别的难度和复杂性,内业处理数据量相对较大,为进一步提高隐患判读效率,可建立三维雷达数据识别算法,进一步研究地面坍塌隐患的三维信号特征及形态特征,从而快速、有效识别不同类型的隐患。

3)针对城市道路地下复杂的管网结构、发生地面塌陷区域路段及地下施工资料不完整等问题,可通过雷达检测数据建立城市地面坍塌隐患检测三维信息管理系统,实现城市道路地下三维空间管理,做到提前预警,减少地面塌陷等事故的发生。

参考文献:

- [1] 乔旭. 基于雷达图像道路地下病害识别技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017.
QIAO X. Research on road underground disease identification technology based on radar image[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2017. (In Chinese)
- [2] 张凯, 汪青松. 浅层地震反射波法在塌陷勘察中的超前预报[J]. 物探与化探, 2010, 34(1): 85—88.
ZHANG K, WANG Q S. The shallow seismic reflection survey in the prediction of the collapse[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(1): 85—88. (In Chinese)
- [3] 赖刘保, 陈昌彦, 张辉, 等. 浅层瞬变电磁法在城市道路地下病害检测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(6): 2743—2746.
LAI L B, CHEN C Y, ZHANG H, et al. Application of shallow transient electromagnetic method in the detection of city road disease[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(6): 2743—2746. (In Chinese)
- [4] 王建军, 强建科, 李成香, 等. 高密度电法在地面塌陷勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2005, 2(3): 232—234.
WANG J J, QIANG J K, LI C X, et al. The application of high density resistivity method to ground subsidence[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2005, 2(3): 232—234. (In Chinese)
- [5] 肖敏, 陈昌彦, 贾辉, 等. 金属管线对探地雷达探测道路地下病害的干扰[J]. 物探与化探, 2016, 40(5): 1046—1050.
XIAO M, CHEN C Y, JIA H, et al. The study of the interference region around metal pipeline in underground disease detection of urban road[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(5): 1046—1050. (In Chinese)
- [6] 蔡文龙, 周凯, 王罡. 基于探地雷达的沥青路面结构内部隐性病害定量化识别方法研究[J]. 物探化探计算技术, 2022, 44(5): 597—604.
CAI W L, ZHOU K, WANG G. Study on the quantitative identification method of asphalt pavement structure based on ground penetrating radar[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 44(5): 597—604. (In Chinese)
- [7] 杨超. 综合物探方法在城市道路典型障碍物定位研究中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2024, 46(2): 215—223.
YANG C. Application of comprehensive geophysical method in the positioning of typical obstacles in urban roads[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 46(2): 215—223. (In Chinese)
- [8] 罗传熙, 张肖宁, 虞将苗, 等. 基于三维探地雷达对沥青路面厚度检测影响因素分析[J]. 公路, 2021, 66(1): 95—99.
LUO C X, ZHANG X N, YU J M, et al. Analysis on influencing factors of asphalt pavement thickness detection based on 3D ground penetrating radar[J]. Highway, 2021, 66(1): 95—99. (In Chinese)
- [9] 胡群芳, 郑泽昊, 刘海, 等. 三维探地雷达在城市市政管线渗漏探测中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(7): 972—981.
HU Q F, ZHENG Z H, LIU H, et al. Application of 3D ground penetrating radar to leakage detection of urban underground pipes[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(7): 972—981. (In Chinese)
- [10] 王洪华, 龚俊波, 王敏玲, 等. 三维探地雷达技术在道路塌陷空洞探测中的应用[J]. CT理论与应用研究, 2018, 27(5): 609—616.
WANG H H, GONG J B, WANG M L, et al. The application of three dimensional ground penetrating radar for detecting road collapse[J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2018, 27(5): 609—616. (In Chinese)
- [11] 魏克森, 陈凯, 韩文扬, 等. 基于三维探地雷达技术的路面病害分析和控制对策[J]. 黑龙江交通科技, 2021, 44(4): 1—3.
WEI K S, CHEN K, HAN W Y, et al. Pavement disease analysis and control countermeasures based on 3D ground penetrating radar technology[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2021, 44(4): 1—3. (In Chinese)
- [12] HARRY M J. Ground Penetrating Radar: Theory and Application[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2009.
- [13] 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.
ZENG Z F, LIU S X, WANG Z J, et al. Principle and application of ground penetrating radar method[M]. Beijing: Science Press, 2006. (In Chinese)
- [14] KANG M S, KIM N, LEE J J, et al. Deep learning—based automated underground cavity detection using three-dimensional ground penetrating radar[J]. Structural Health Monitoring, 2020, 19(1): 173—185.
- [15] 张小密. 三维探地雷达在高速公路检测中成像技术研究

- 究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- ZHANG X M. Research on imaging technology of three-dimensional ground penetrating radar in expressway detection [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (In Chinese)
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市地下病害体综合探测与风险评估技术标准: JGJ/T 437—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018. (In Chinese)

Research on the data processing and risk identification of three dimensional geological radar in ground collapse risk detection

YANG Fan¹, JIA Hui²

- (1. Northwest Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Xi'an 710119, China;
2. Beijing Geotechnical Institute Engineering Consultant Ltd., Beijing 100038, China)

Abstract: As an efficient, nondestructive detection technology, three-dimensional geological radars has been widely used to detect underground disasters or collapse risks of urban roads. Compared with the traditional two-dimensional geological radar, three-dimensional geological radars has outstanding advantages in risk identification, data fusion, work efficiency, and other aspects and have gradually become the primary method of urban roads ground collapse risk detection. This article summarizes the advantages of three-dimensional geological radar technology through the summary of three-dimensional geological radar data processing, extracts a system of data processing process, through the analysis of different three-dimensional geological radar profile, summarizes the different types of risk identification characteristics and determination basis, for urban road ground collapse risk three-dimensional geological radar detection data processing and risk identification provide reference basis.

Keywords: ground collapse risk; three-dimensional geological radar; data processing; risk identification