

地质雷达信号多属性处理与解释技术在露天矿边坡滑体精细探测中的应用

何滔^{1,2}, 赵永岗³, 高玉璞³, 郑有伟⁴, 闫成祥¹

(1. 内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院, 包头 014010;

2. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;

3. 包钢(集团)公司 白云鄂博铁矿, 包头 014080;

4. 成都理工大学 地球物理学院, 成都 610059)

摘要: 边坡问题是露天矿山当前面临的一个重要安全问题, 但地质雷达数据中大量隐藏信息未被充分利用与挖掘是制约地质雷达应用于边坡滑体精细探测效果的重要因素。针对该问题, 笔者根据研究区露天边坡滑体特点将多属性分析技术引入地质雷达解释分析中, 优选并提取了振幅属性、瞬时属性、频率属性等多种属性对边坡岩土体结构和地下水进行了精细分析, 最后分别与高密度电法反演剖面及水文孔进行了验证对比。实践证明, 地质雷达信号多属性处理与解释成果反映的信息准确丰富, 在露天矿边坡滑体探测中切实有效, 可为后续露天矿边坡滑体治理提供准确可靠的依据。

关键词: 地质雷达; 属性分析; 露天矿; 边坡; 滑体

中图分类号: P 631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.05.11

0 引言

隐蔽地质灾害是露天矿山当前面临的一个重要问题, 主要包括边坡滑坡、崩塌、泥石流、采空区、地面塌陷、地裂缝等^[1-3]。在众多隐蔽地质灾害源中, 边坡问题是露天矿山的关键地质灾害隐患^[4]。

近年来, 具备高效率、高分辨率、高抗干扰性的地质雷达法在矿山边坡地质灾害隐患探测中取得了良好效果^[5-8]。在此基础上, 国内不少专家学者相继开展了针对地质雷达应用于矿山边坡滑体的实践探索。崔杰等^[9]采用地质雷达与物理模拟分析了采空区边坡变形破裂演化机制。赵自豪等^[10]利用

地震法、地质雷达法和高密度电法等综合物探技术, 结合灰色模糊评判方法, 对露天矿边坡进行了全面评估, 以确定其稳定性。辛保泉等^[11]运用地质雷达探测了矿山边坡体内部缺陷并结合数值模拟分析了岩性劣化对露天矿山边坡稳定性的响应规律。孙光林等^[12]采用地质雷达技术和数值模拟方法对南芬露天铁矿浅层滑坡体发育特征进行了综合研究。上述研究表明地质雷达在露天矿山边坡地质灾害中具有广阔的应用前景, 但笔者通过对现有地质雷达在露天矿山边坡的应用中发现, 目前地质雷达法解释多依赖经验, 主观性较强, 而隐藏在地质雷达数据的大量信息未被充分利用与挖掘, 制约了地质雷达在边坡滑体精细探测中的应用效果^[13]。为提高地质

收稿日期: 2023-06-08

基金项目: 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费(2023QNJS098); 内蒙古自治区自然科学基金(2024QN04025)

第一作者: 何滔(1988—), 男, 博士, 讲师, 主要从事矿山工程物探与三维地质建模研究, E-mail: hetao-yuan@163.com。

雷达数据解释准确度和有效性,亟需一种能对地质雷达数据进行充分挖掘和分析的方法以获取边坡滑体更多有用信息,为后续露天矿山边坡的防治提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于包头市白云鄂博矿区,区内地质构造复杂,边坡工程地质问题突出。最近几年,由于开采深度和开采力度的加大,露天矿山发生了多起边坡地质灾害。部分边坡地质灾害发生在采场固定的斜坡路的下方,对生产造成了直接影响,同时也威胁着生产作业的安全。

经现场勘察初步发现,矿区边坡地质灾害存在第四系土层厚度大、变化快,地下水赋存复杂的特征。目前对于该类型边坡地质灾害的勘察面临三大难题:一是土体较厚,局部达五十余米;二是不良岩土体分层,尤其是强弱风化岩体界线对于后期边坡治理十分重要;三是地下水位的赋存变化。对于第一个问题,本次研究采用加拿大 pluseEKKO 12.5 Mhz 低频地质雷达天线与 1 000 V 发射机,可有效弥补常规地质雷达探测深度不足的缺陷;对于后两者问题,笔者结合现场工程地质测绘和水文孔,对地质雷达属性进行了优选,最终选择振幅属性、瞬时属性和频率属性这三大类属性应用于边坡滑体中的效果进行了探讨。

2 地质雷达多属性分析方法

地质雷达属性是基于地震属性理论,从地质雷达数据中提取相关的几何学、运动学和统计学特征,用来表征地下目标体的结构和物理性质^[13]。多属性分析可以挖掘地质雷达中的隐藏信息,增强异常体的显示效果,有助于识别异常体,其重要性已得到众多学者的认可。由于地质雷达属性种类较多,下面仅对本次研究中所使用的振幅属性、瞬时属性与频率属性原理作简要介绍。

2.1 振幅属性

振幅属性分析是从信号能量和相位变化的角度来分析地下介质波形的变化和能量的分布^[14]。振幅属性常用于检测因岩性、流体性质或孔隙度差异引起的振幅横向变化^[15]。振幅属性分类较多,常用的有均方根振幅、平均振幅、总振幅、弧长和反射强度等。下面对本次研究使用的均方根振幅和梯度均方根振幅原理进行介绍。

均方根振幅是通过求取振幅平方的平均值再开

方计算的,对于振幅差异较大变化较为敏感,常用于岩土体的非均质性变化分析^[16],十分适合于本次边坡隐蔽地质灾害源不良岩土体结构的探测。梯度均方根振幅是对均方根振幅求取梯度实现的,主要适用于物性差异较大的界面探测。均方根振幅计算公式如下:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2} \quad (1)$$

式中, a 为信号某一时刻振幅值, N 为定义时窗内采样点数。

2.2 瞬时属性

瞬时振幅是表征一定时间内信号的振幅大小及衰减吸收情况,即反映信号能量的量度^[17]。因此瞬时振幅也可用于突出地下地质体岩性特征的变化。瞬时相位是表征信号连续性的情况,与振幅强度无关,可用于探测地质体分层或灾害异常体。瞬时频率是表征单位时间内相位的变化率,主要用于信号吸收衰减情况的探测^[18]。

设原始地质雷达记录为 $x(t)$,经过希尔伯特变换后结果为 $y(t)$ 。通过复地震道分析技术,可以得到瞬时属性:

$$\text{瞬时振幅: } \bar{A}_i(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)}; \quad (2)$$

$$\text{瞬时相位: } \varphi(t) = \arctan\left(\frac{y(t)}{x(t)}\right); \quad (3)$$

$$\text{瞬时频率: } \omega(t) = \frac{d\varphi}{dt}; \quad (4)$$

2.3 频率属性

由于水的介电常数相较岩土体大得多,且岩土体受地下水的影响其电性特征存在明显的差异。当地质雷达电磁波在穿过地下水位面时高频成分常常被吸收,而低频成分相对丰富。因此,地质雷达电磁波在边坡滑体地下水富集区域传播时主频明显降低,可通过将某一时窗内的电磁波信号变换到傅里叶域计算电磁波的瞬时频率、最大频谱振幅、中间频率、平均频率与超主频频谱面积等频率属性可以用来帮助判断滑体地下水的赋存状态(图 1)。

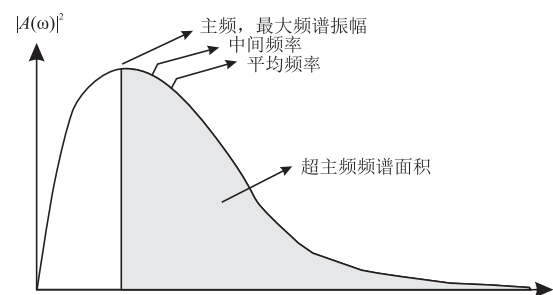


图 1 频率属性分析示意图

Fig. 1 Schematic diagram of frequency attribute analysis

3 实例研究

3.1 实例 1

该边坡滑体位于东采场南帮,东西长约 100 m, 高程 1 608 m~1 584 m。边坡失稳后,矿方对 1 608 m 以上边坡进行了部分削方(图 2)。据现场踏勘发现,此边坡失稳为第四系土层沿基岩面形成的滑塌破坏,后续边坡治理亟需查明第四系厚度及强弱风化岩体界线。

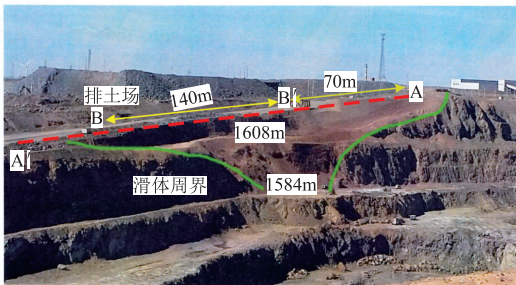


图 2 物探测线布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of geophysical line

本次在边坡上方沿运输公路布置了多条地质雷达测线和高密度电法测线。其中高密度电法 A—A'测线长度 295 m,地质雷达 B—B'测线位于 A—A'测线中间区域,长度 140 m。地质雷达采用 12.5 MHz 低频天线,移动间距 2 m。经过处理分析后,该剖面在深度 35 m 之上反射同相轴连续稳定,

反射波振幅能量强,初步推断为第四系土层,但第四系和下覆基岩界面不是很清晰,局部异常特征不明显,强弱风化基岩界面基本无法识别(图 3 (a))。

为了挖掘更多地质雷达信息以进一步查明不良岩土体结构特征,对地质雷达数据进行了多种属性分析测试,最终优选并提取了均方根振幅属性、瞬时振幅属性、超主频频谱面积属性作为本次研究的重点。图 3 (b)为提取的均方根振幅属性,从中可以看到该剖面自上而下整体上可分为三部分:①上部同相轴依稀可辨且分层连续性较好,推断为第四系土层;②中部反射波形比较破碎零散成团,均一性和连续性都很差,且横向上呈现凹陷处分布较厚,平坦处较薄的变化趋势,可能为强风化基岩差异风化所致;③下部反射波形局部完整性较好,未看见明显异常反射,推测为弱风化—未风化基岩。从横向上对比可以看到该剖面第四系土层在中间有两处明显凹陷,分别位于横向桩号 100 m~130 m 之间和 155 m~195 m 之间,且左侧凹陷相较于右侧凹陷更为稳定,连续性更好。图 3 (c)和图 3 (d)分别为提取的瞬时振幅属性和超主频频谱面积属性。对比图 3 (c)和图 3 (d)可以看出瞬时振幅属性分辨率相对更高,反映的细节更加丰富;超主频频谱面积属性则对边坡土体破碎松动所引起的异常刻画十分清晰。综合分析来看,右侧凹陷区域错动明显,表明土体十分松散,左右两侧发育错动裂缝。而左侧虽然凹陷较大,但第四系沉积稳定,连续性相对较好。后经现场工程地质测绘发现,右侧凹陷为已滑坡

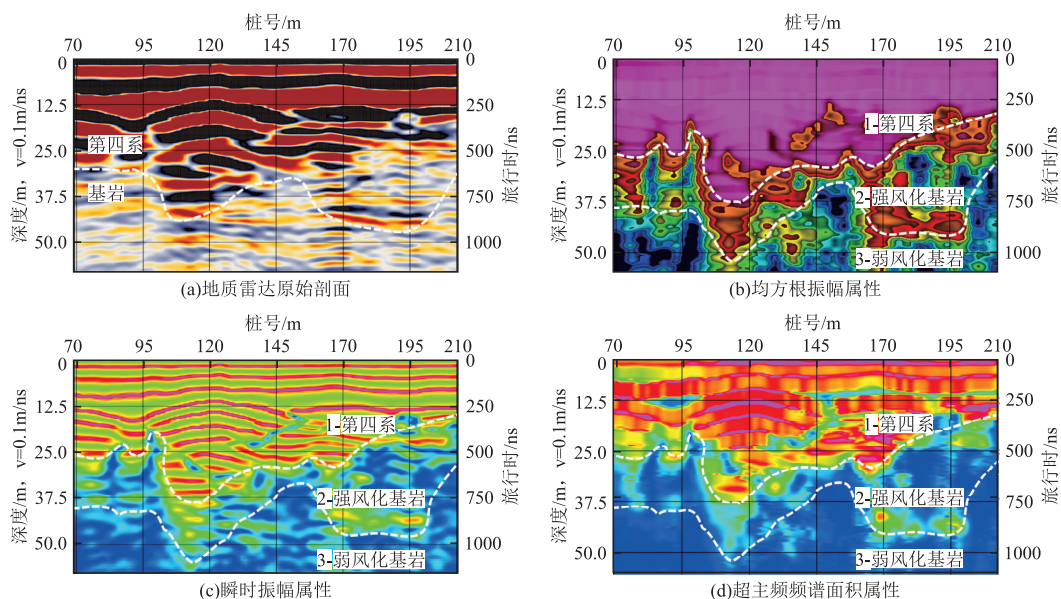


图 3 地质雷达属性分析剖面

Fig. 3 GPR attribute analysis profile

不稳定区域,而左侧凹陷暂呈稳定状态。最终与同位置的高密度电法数据进行了对比验证,地质雷达属性分析提取的岩土体分层与高密度电法

总体趋势基本一致(图 4),但地质雷达提取的多属性信息反映的细节更加丰富准确,且其分辨率相对更高。

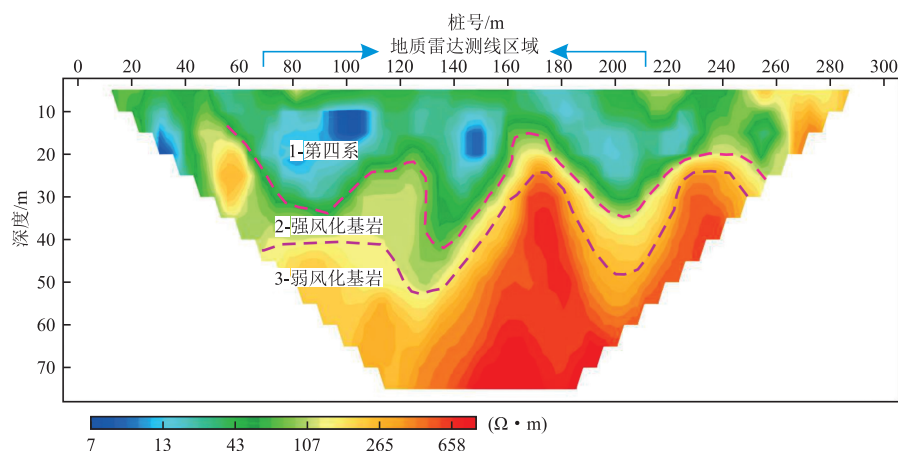


图 4 高密度电法反演剖面

Fig. 4 High density electrical method profile

3.2 实例 2

该研究实例位于矿区北帮,东西宽度大约是 200 m,海拔高度介于 1 575 m~1 608 m 之间(图 5)。边坡最初形成于 2011 年,受西采场排水的影响,当时于 1 596 m~1 608 m 段产生滑坡,后扩帮开采至 1 575 m,滑坡体剪出口随之延伸至 1 575 m。根据现场勘察发现该边坡的破坏是由于受地下水的影 响,导致第四系土体的抗剪强度降低,最终引发了圆弧形滑坡。因此后续边坡滑体治理须查清地下水赋存情况,尤其是地下水位的变化。地下水位面上下岩土体受地下水的影响,其介电性质差异明显,为本次地下水位探测提供了良好的地球物理基础。

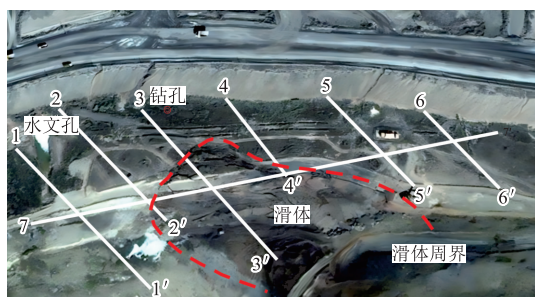


图 5 北帮边坡现状及物探测线布置示意

Fig. 5 Schematic diagram of North slope present condition and geophysical line

针对此问题,根据施工条件在边坡滑体上方布置了 7 条物探测线。下面以临近水文孔的 2—2' 测线为例对地质雷达属性分析作具体介绍。经过去噪和增益处理分析后,该剖面在 600 ns 处存在一明显同相轴,反射振幅强,波形连续稳定,相位发生明显倒转,初步推测为地下水位面(图 6(a))。在地下水位面之下,由于岩土体介电常数受地下水的影响,上下界面物性差异性十分明显,对其求取梯度均方根振幅以增强地下水位面信息。从图 6 (b) 可以看出,在 600 ns 附近存在向矿坑内倾斜同相轴,此处梯度均方根振幅变化最为明显,可能为地下水受矿坑疏干排水影响,地下水梯度变化所形成的浸润线,但受地下水衰减作用的影响,深部信号较弱。笔者在此基础上又提取了瞬时相位属性信息,瞬时相位可表征地质雷达电磁波信号连续性的情况,能增强深部弱信号,具有极高的分辨率。从图 6(c) 可以看出瞬时相位属性清晰地反映了地下水位面的变化,同时深部弱信号得到了有效增强,细节更加清晰。图 6 (d) 为提取的最大频谱振幅属性,从中可以看到地下水位面之上岩土体未见明显异常反射,均一性较好,反射振幅弱,为较为稳定均一的砂砾层。地下水位面之下反射信号较为杂乱,连续性差。后通过临近测线水文孔地下水位观测,此处地下水位在 25 m 左右,与地质雷达探测情况基本吻合。

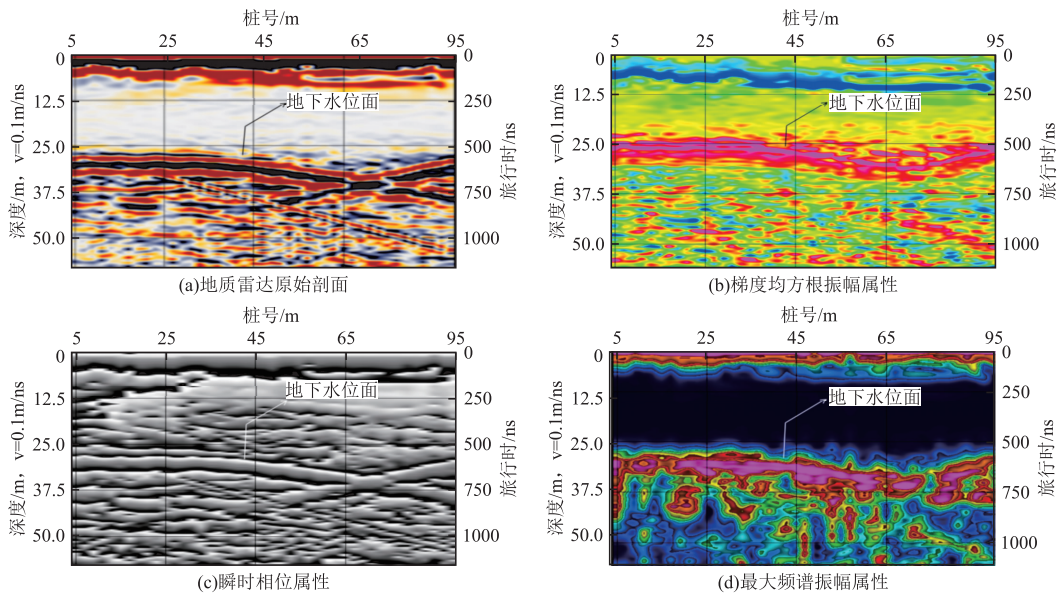


图6 地质雷达属性分析剖面
Fig. 6 GPR attribute analysis profile

4 结论

为解决边坡滑体地质雷达探测中大量隐藏信息未被充分利用这一现实问题,提出将多属性分析技术应用于地质雷达精细探测中,从边坡滑体岩土体分层和地下水赋存分布两大方面开展细致研究,取得了以下几点认识:

1)均方根振幅对于边坡隐蔽地质滑体岩土体结构分析较为直观准确,但纵向分辨率较差,而瞬时振幅属性分辨率较高,可清晰反映边坡岩土体的分层和区域异常;超主频频谱面积属性对于边坡岩土体破坏或岩体的差异性风化等所引起的异常比较敏感。

2)该区域地下水水位面在地质雷达剖面常呈反射振幅强、连续稳定的同相轴,且具极性反转现象。梯度均方根振幅可有效区分地下水水位面,瞬时相位属性分辨率较高,同时也可有效增强深部弱信号,弥补由于地下水水位面造成的信号衰减。

3)多属性处理可有效提取地质雷达隐藏信息,经高密度电法和水文孔验证分析,地质雷达信号多属性处理与解释成果反映的露天矿山边坡滑体特征准确可靠,包含信息丰富。

参考文献:

[1] 陈毓. 抚顺西露天矿采空区北部区域地质灾害风险评估与适应性评价研究[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48

(3): 106—111.

CHEN Y. Study on risk assessment and adaptability evaluation of regional geological hazards in the northern part of goaf in Fushun west surface mine[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(3): 106—111. (In Chinese)

[2] 陈铁力. 辽宁省梨树沟煤矿矿山地质环境治理恢复应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.

CHEN T L. The application research on restoration of mine geological environment of Liaoning lishugou coal mines[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (In Chinese)

[3] 张鹏飞. 石拐煤矿区矿山地质环境保护与治理研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2013.

ZHANG P F. Study on protection and treatment of mine geological environment in Shiguai coal mine area [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2013. (In Chinese)

[4] 杨勇. 基于高密度电阻率法的露天矿山滑坡体探测应用研究[J]. 世界有色金属, 2022(13): 223—225.

YANG Y. Research on the application of high density resistivity method in the detection of open pit mine landslide[J]. World Nonferrous Metals, 2022(13): 223—225. (In Chinese)

[5] 姜卫方, 万明浩, 赵永辉, 等. 地质雷达在滑坡面调查中的应用及效果分析[J]. 物探与化探, 2000, 24(3): 230—232.

JIANG W F, WAN M H, ZHAO Y H, et al. The application of gpr to the investigation of landslide surface

- and its effect[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2000, 24(3): 230—232. (In Chinese)
- [6] 王春辉, 查恩来, 田运涛, 等. 低频地质雷达新技术在滑坡勘查中的试验研究[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(2): 1057—1063.
WANG C H, ZHA E L, TIAN Y T, et al. Experiment of Low — frequency GPR New Technique in Landslide investigation[J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(2): 1057—1063. (In Chinese)
- [7] 李华, 王东辉. 不同物理和几何参数条件下滑坡要素的地质雷达探测响应研究[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(4): 1057—1064.
LI H, WANG D H. GPR responses on different physical and geometrical parameters of landslide factors [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(4): 1057—1064. (In Chinese)
- [8] 曹创华, 邓专, 康方平, 等. 地球物理信息在湘潭锰矿地质灾害评价中的作用[J]. *物探与化探*, 2018, 42(3): 631—639.
CAO C H, DENG Z, KANG F P, et al. The evaluation of geological hazard of Xiangtan manganese ore deposit based on geophysical information [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(3): 631—639. (In Chinese)
- [9] 崔杰, 王兰生, 王卫, 等. 采空区边坡变形破裂演化机制研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2008, 25(4): 409—414.
CUI J, WANG L S, WANG W, et al. Deformation and fracturing mechanism of goaf slope[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2008, 25(4): 409—414. (In Chinese)
- [10] 赵自豪, 吴兵, 任玉辉. 基于综合物探的露天矿高边坡滑坡风险评估[J]. *金属矿山*, 2014(10): 148—151.
ZHAO Z H, WU B, REN Y H. Open—pit slope landslide risk assessment based on comprehensive geophysical prospecting method[J]. *Metal Mine*, 2014(10): 148—151. (In Chinese)
- [11] 辛保泉, 谭钦文, 谢羽佳, 等. 岩性劣化对露天矿山边坡稳定性的响应规律[J]. *金属矿山*, 2015(4): 157—161.
XIN B Q, TAN Q W, XIE Y J, et al. Response law of lithology deterioration on slope stability of open — pit mines[J]. *Metal Mine*, 2015(4): 157—161. (In Chinese)
- [12] 孙光林, 胡江春, 边亚东, 等. 露天矿边坡浅层滑面无损探测技术研究及应用[J]. *金属矿山*, 2018(4): 58—62.
SUN G L, HU J C, BIAN Y D, et al. Research and application of open pit slope shallow surface nondestructive detection technology[J]. *Metal Mine*, 2018(4): 58—62. (In Chinese)
- [13] 赵文轲. 探地雷达属性技术及其在考古调查中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
ZHAO W K. The study of ground penetrating radar attribute technology for archaeological prospection [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (In Chinese)
- [14] 曾昭发, 田钢, 薛建, 等. 基于小波变换的地质雷达数据成像和自动解释[C]//1999年中国地球物理学会年刊——中国地球物理学会第十五届年会论文集, 合肥, 1999: 174.
ZENG Z F, TIAN G, XUE J, et al. Imaging and automatic interpretation of GPR data based on wavelet transform [C] // 1999 Annual Journal of the Chinese Geophysical Society—Proceedings of the 15th Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society, Hefei, 1999: 174. (In Chinese)
- [15] 杨硕, 冯亚琴, 肖冬生, 等. GeoEast解释系统在吐哈盆地台北凹陷西部的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2014, 49(增刊1): 126—136.
YANG S, FENG Y Q, XIAO D S, et al. Applications of GeoEast interpretation sub—system in West Taibei Depression, Tuha Basin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2014, 49(Suppl 1): 126—136. (In Chinese)
- [16] 朱沛成. 探地雷达属性分析技术及其在隧道地质预报中的应用研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
ZHU P C. The study of ground penetrating radar attribute analysis technology for tunnel geological prediction [D]. Nanning: Guangxi University, 2017. (In Chinese)
- [17] 石瑛, 王赞, 芦俊. 煤田地震多属性分析技术的应用[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(12): 1397—1402.
SHI Y, WANG Y, LU J. Application of seismic multi—attribute analysis technique in coal field[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(12): 1397—1402. (In Chinese)
- [18] 王晋国, 廖祖文, 魏俊波, 等. 瞬时属性估计器在探地雷达数据处理中的应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2005, 33(5): 72—75.
WANG J G, LIAO Z W, WEI J B, et al. Instantaneous attributes estimator using in ground penetrating radar data[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2005, 33(5): 72—75. (In Chinese)

Application of GPR multi-attribute processing and interpretation technology in the fine detection of landslides on open-pit mines

HE Tao^{1,2}, ZHAO Yonggang³, GAO Yupu³, ZHENG Youwei⁴, Yan Chengxiang¹

(1. Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2. China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

3. Baotou Iron and Steel Company, Baotou 014080, China;

4. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The slope problem is an important safety issue in open pit mines, but the large amount of hidden information in GPR data is not fully utilized and exploited, which is an important factor limiting the effect of GPR application in the fine detection of slope slides. To address this problem, this paper introduces multi-attribute analysis technology into GPR interpretation and analysis according to the characteristics of open-air slope slides in the study area, preferably extracting various attributes such as amplitude attribute, instantaneous attribute, and frequency attribute for refined analysis of slope geotechnical structure and groundwater, and finally verifying and comparing with high-density electrical inversion profiles and hydrological holes respectively. It has been proved that the multi-attribute processing and interpretation of GPR signals reflect accurate and rich information. It is practical and effective in open pit slope slide detection and can provide an accurate and reliable basis for subsequent open pit slope slide management.

Keywords: GPR; attribute analysis; open-pit mine; slope; geological disaster