

文章编号: 1674—8247(2024)04—0063—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.04.012

艰险山区阵列式三维音频大地电磁勘探方法与应用

赵思为 金俊俊 赵文龙

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:艰险山区是铁路工程勘探领域的重难点。地球物理方法具有设备轻便、施工效率高、成果直观的特点,适合艰险山区的探测工作。大跨度硐室横向范围宽,单条物探测线难以满足勘探精度要求。为此,本文介绍了适用于艰险山区大跨度硐室勘察的阵列式三维音频大地电磁勘探方法,该方法测线布置综合考虑了隧道埋深、硐室跨度,以及测点分布均匀性和边缘效应对探测精度的影响,有效提高了外业资料质量,通过联合反演构建了详实的地下三维视电阻率数据体,可直观反映地下地质体异常空间展布情况。研究成果有效揭示了破碎富水岩体地下空间赋存形态,为隧道施工设计提供了参考。

关键词:大跨度硐室;音频大地电磁法;阵列式三维测线;铁路隧道勘察

中图分类号:P631.3⁺25

文献标志码:A

An Array-based 3D Audio-frequency Geophysical Exploration Method and Its Application in Challenging Mountainous Areas

ZHAO Siwei JIN Junjun ZHAO Wenlong

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Exploration in challenging mountainous areas, as recognized for its significant difficulty, is always taken as an important subject in railway engineering. Geophysical methods, characterized by portability, high operational efficiency, and intuitive data representation, are applicable to investigations in such difficult terrains. Large-span chambers, with their extensive lateral extents, cannot be adequately surveyed by a single geophysical profile line, demanding higher precision approaches. This paper presented an array-based 3D audio-frequency magnetotelluric exploration method tailored for investigating large-span chambers in challenging mountainous areas. The profile line layout comprehensively considers tunnel depth, chamber span, uniformity of measurement point distribution, and the impact of edge effects on exploration accuracy, thereby significantly enhancing the quality of field data. Through joint inversion, a detailed 3D apparent resistivity database was constructed, visually illustrating the spatial distribution of underground geological anomalies. The study outcomes effectively reveal the morphology of fractured and water-rich rock masses beneath the surface, providing valuable references for tunnel construction designs.

Key words: large-span chambers; audio-frequency magnetotelluric method; array-based 3D profile lines; railway tunnel exploration

目前,铁路车站采取较密的浅孔钻探来确保地质勘察精度,场地开阔的城市地形给钻探提供了有利

条件,艰险山区地形和地质条件均较城市地区复杂多变,钻探勘察条件极为困难^[1]。艰险山区隧道一般采

收稿日期:2023-08-30

作者简介:赵思为(1982-),男,高级工程师。

引文格式:赵思为,金俊俊,赵文龙. 艰险山区阵列式三维音频大地电磁勘探方法与应用[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(4):63-68.

ZHAO Siwei, JIN Junjun, ZHAO Wenlong. An Array-based 3D Audio-frequency Geophysical Exploration Method and Its Application in Challenging Mountainous Areas[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(4):63-68.

用地面物探进行控制性剖面勘察,利用形成的二维物探电性剖面来判译地质条件^[2-3]。地质体以三维形态赋存,在地下硐室施工过程中,往往由于断层、蚀变带、岩溶管道或溶蚀裂隙等复杂地质体的空间展布不清,导致硐室施工揭示地质体情况与原设计变化较大^[4]。例如断层是由宽度、走向、倾向及倾角等多维度参数确定,硐室尤其是大跨度硐室与断层相交时,会在同一掌子面上不同部位、不同程度地揭示断层,设计仅依据地质剖面上标识的二维断层构造,施工过程中往往会遭遇掌子面揭示断层不准确的问题,断层突涌水或塌方可能会给硐室施工带来较大的危害^[5]。为此,采用三维物探方法探明地质体结构的空间展布是十分必要的。

国外在矿产资源勘察领域较早地采用区域重磁三维反演和可视化技术^[6],阵列式电磁探测系统在探矿领域也有所应用。国内在矿产资源勘察行业一般采用三维反射地震和航磁来查明目标矿体的空间分布^[7-8]。铁路行业勘察尚未形成地面物探的三维勘察体系,主要原因在于铁路勘察限定在以线位为中心的条带范围,对于小跨度单线隧道硐室,单条二维测线已满足生产需求。然而,对于大跨度硐室或双线分修的双洞隧道,勘探横向范围需求已超出单条测线覆盖的有效范围,因此有必要采用三维测线。在物探方法选择方面,需要综合考虑地形地质条件、方法适用性和工作效率。航空电磁探测施工效率高,但勘探精度较低;三维反射地震需要钻探炮孔安置炸药震源,施工效率低,勘探成本大,且山区地形面临着严重的静校正问题;高密度电法、瞬变电磁法等也面临勘探深度不足等问题。综上所述,音频大地电磁法则具有勘探深度大、施工效率高、成果直观等特点,可适用于山区复杂地形大埋深隧道探测工作。通过布设阵列式三维音频大地电磁勘探测线,构建地下三维视电阻率数据体,有助于实现地下地质体空间结构的准确划分,为地下大跨度硐室设计提供更为详实、可靠的地质资料。

1 原理与方法

1.1 音频大地电磁法探测原理

音频大地电磁法是以天然电磁场为场源来研究地球内部电性构造的一种重要地球物理手段。电磁法勘探是以地壳中岩矿石之间的电磁性质(如导电性、导磁性、介电性)差异为基础。场源发出的电磁场信号经各种媒介到达地质体后会产生感应信号,这些包含地质体感应信号的电磁波会被已布置好的接收

器接收,通过观测分析接收到的电磁信号在时间和空间上的变化及分布规律,可用于查明地质构造以及解决相关地质问题^[9]。

1.2 数据处理

音频大地电磁法数据处理是指从原始时间序列逐步计算得到视电阻率、相位等参数的过程^[10]。由于原始数据是在时间域进行采集,得到的是电磁场信号随时间变化的序列,需要先将电磁场时间序列转换到频率域,再进行功率谱和互功率谱的计算,之后根据物理模型计算大地电磁阻抗,最终经过反演获得视电阻率随深度变化曲线。数据处理流程如图1所示。

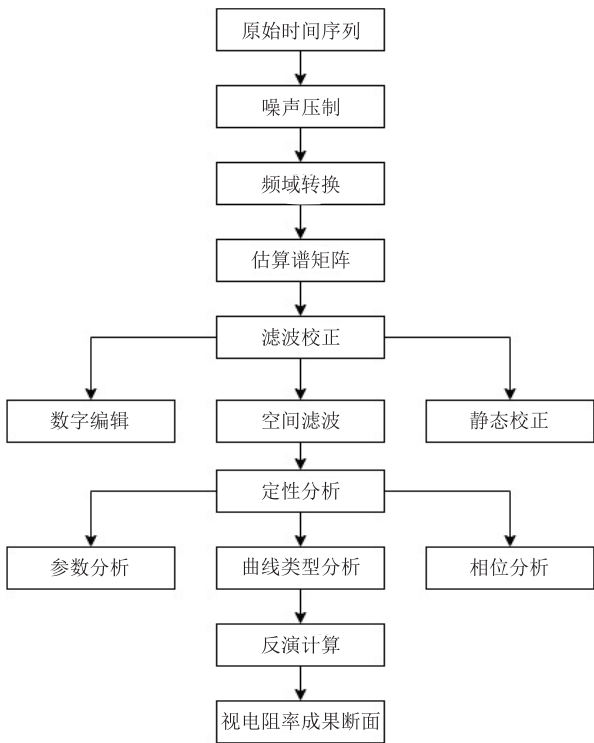


图1 音频大地电磁数据处理流程图

1.3 阵列式三维测线布设方法

针对艰险山区地下大跨度硐室勘察的阵列式三维音频大地电磁法勘探测线包括中央测线、左侧线组和右测线组。中央测线布置于硐室中线的位置;左测线组和右测线组,沿线路方向分别布置于中央测线的左侧和右侧,左测线组和右测线组中各测线相对于中央测线对称布置;测点沿测线以相同的间距布置于测线上;中央测线、左测线组和右测线组中,各测线之间的测线间距相同,各测线的测线长度为硐室长度与硐室两端向外延伸段长度之和。

阵列式三维音频大地电磁法勘探测线布设示意图如图2所示。由图2可知,1测线、2测线为左测线组

2条测线,3测线为中央测线,4测线、5测线为右测线组2条测线。6为测点,d1为测点间距,d2为测线间距。A为硐室轮廓线,d0为硐室宽度,L0为硐室长度,L1为延伸段。

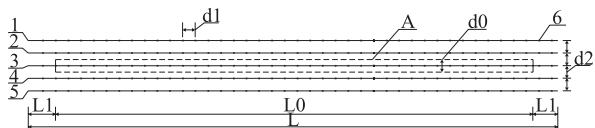


图2 阵列式三维音频大地电磁法勘察测线布设示意图

阵列式三维测线间距与硐室宽度保持一致,纵向上测点间距也与硐室宽度保持一致,以确保测点空间采样精度满足硐室结构尺寸要求和测点分布的均匀性,后者有利于降低测点空间分布不均匀性引起的电阻率反演差异。测线延伸长度为2倍硐室宽度的距离,以避免边界效应对硐室边缘数据反演质量的影响。

上述由5条测线组成的阵列式三维测线可用于联合反演地下地质体三维视电阻率,并且充分考虑测点分布均匀性和探测边界效应的影响。反演得到的三维视电阻率数据体可任意提取视电阻率切片,三维数据体能够更加准确、直观地反映地下地质体空间形态。

2 工程应用

2.1 地质概况

西南山区某隧道位处构造剥蚀高山地貌,地形起伏大。隧址区主要出露岩性为上覆第四系更新统冰水堆积层,以碎石土、块石土为主,岩土破碎,呈砂土状及碎块状,下伏基岩为新近系细粒-粗粒黑云母二长花岗岩。隧道整体处于松潘-甘孜褶皱带,SN向川滇构造带和NW向鲜水河构造带,在区域内形成中国西部著名的“Y”字型构造格局。隧址区大地构造背景处在“Y”字型构造三岔口交接部位的NW侧,总体构造格架受NW向鲜水河构造带控制。

隧道施工开挖揭示该隧道整体以弱风化为主,主节理裂隙较发育,局部裂隙发育较密集且含水。为此,需要进一步查明隧道前方裂隙涌水、破碎通道,避免隧道开挖发生突涌水事故。针对隧道硐室跨度大的情况,需在地表布设阵列式三维勘探测线,以查明地下含水裂隙通道空间展布情况,为隧道设计、施工提供地质资料支撑。

2.2 地球物理特征

地球物理探测方法是以研究探测对象的某一物性为基础的,当探测对象与周围介质存在明显的物性

差异时,才能使用适当的物探方法将其区分。音频大地电磁法通过观测天然电磁波引起的地下岩体电磁场响应特征获取地下岩体视电阻率分布规律,并通过分析视电阻率差异划分地层岩性、地质构造以及评价岩体完整性。岩体电阻率与矿物成分、岩体结构和含水情况等有关。一般而言,岩体越破碎、含水性越高,岩体电阻率越低,不同岩性也因内部矿物组分、孔隙度、结构强度不同,导致同一地质构造背景下的电阻率存在差异。

需要注意的是,与室内岩心测试不同,音频大地电磁法在复杂的起伏地表实施测量,地下岩体存在极大的不均匀性,地表接地条件也可能迥然不同。根据探测深度要求,所采用的测量参数也存在差异,由此导致计算得到的物理参数与室内测试结果无法在统一的标准下对比,甚至于不同地形地质构造背景下的探测结果也存在较大差异。因此,音频大地电磁法观测得到的电阻率为视电阻率,即一定空间范围内地下地质体本身的电阻率,叠加地形、测量参数、接地条件和环境干扰等因素影响的综合结果。而地下地质体的电阻率变化特征才是探测的目标,因此在外业采集和数据处理中需要尽可能消除其他因素的影响。

2.3 资料解释原则

音频大地电磁法资料解释以反演视电阻率数据体为主要依据,综合地质调绘、钻探等资料共同分析。这是因为视电阻率与岩性、岩体结构、含水性等因素均有关联,不存在一一对应的关系,仅依靠视电阻率无法唯一确定地下地质体性质,即物探资料的多解性问题。充分结合先验地质资料信息能有效提高物探解译精度。通过可借助钻孔标定确定不同岩性视电阻率值域范围,或不同含水情况和完整程度所对应的视电阻率值域分布特征。本次测区基岩为花岗岩,岩性分布较为单一,视电阻率异常主要受岩体结构和含水性影响。通过对工区反演视电阻率统计分析,将视电阻率小于25%分位数的区域判释为物探V类异常,对应极破碎、极软弱岩或富水岩体;将视电阻率值位于25%~50%分位数的区域判释为物探IV类异常,对应破碎、软弱或含水岩体;将视电阻率大于50%分位数的区域判释为物探III类异常,对应较破碎或含水岩体。

2.4 资料解译

阵列式三维音频大地电磁法勘探反演视电阻率数据体和切片如图3所示。相较于常规二维测线,三维测线可构建视电阻率数据体,基于三维数据体可获得任意高程视电阻率水平切片和任意里程视电阻率

竖直切片,可直观地观察地下物探异常空间展布情况,为隧道施工设计提供更为丰富、详实的数据支撑。

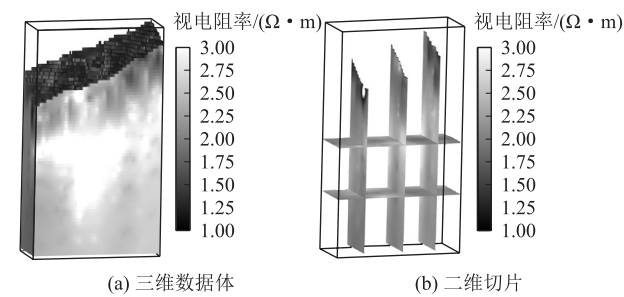


图3 三维反演视电阻率图

测区反演视电阻率水平切片如图4所示。为分析隧道洞身竖直方向视电阻率低阻异常空间变化情况,分别在结构底板下方100 m、50 m、结构底板位置、结构底板上方50 m和结构底板上方100 m等埋深位置提取视电阻率水平切片图。沿参考坐标 x 轴方向

40~50 m范围和80~100 m范围存在两处低阻异常,在水平方向上两处低阻异常均向参考坐标 y 轴负方向延伸,在竖向上两处低阻异常随埋深增大平面范围成扩散趋势。

测区反演视电阻率竖向切片如图5所示。为分析隧道轴线横向视电阻率低阻异常空间变化情况,分别在隧道中轴线左侧100 m、50 m、中轴线、隧道中轴线右侧50 m、100 m位置提取视电阻率竖向切片图。在隧道中轴线及左侧视电阻率切片图中可见两处低阻条带,并且随埋深增大低阻条带成扩散趋势,与图水平切片图相对应。通过对比发现,低阻异常呈现出向隧道左侧发育的趋势,在隧道右侧低阻异常范围逐渐缩小,推测与山体右高左低有关。

根据地质资料测区基岩为花岗岩,故反演视电阻率低阻异常主要与岩体破碎和含水有关,因此探测低阻异常带推测为导含水裂隙带。

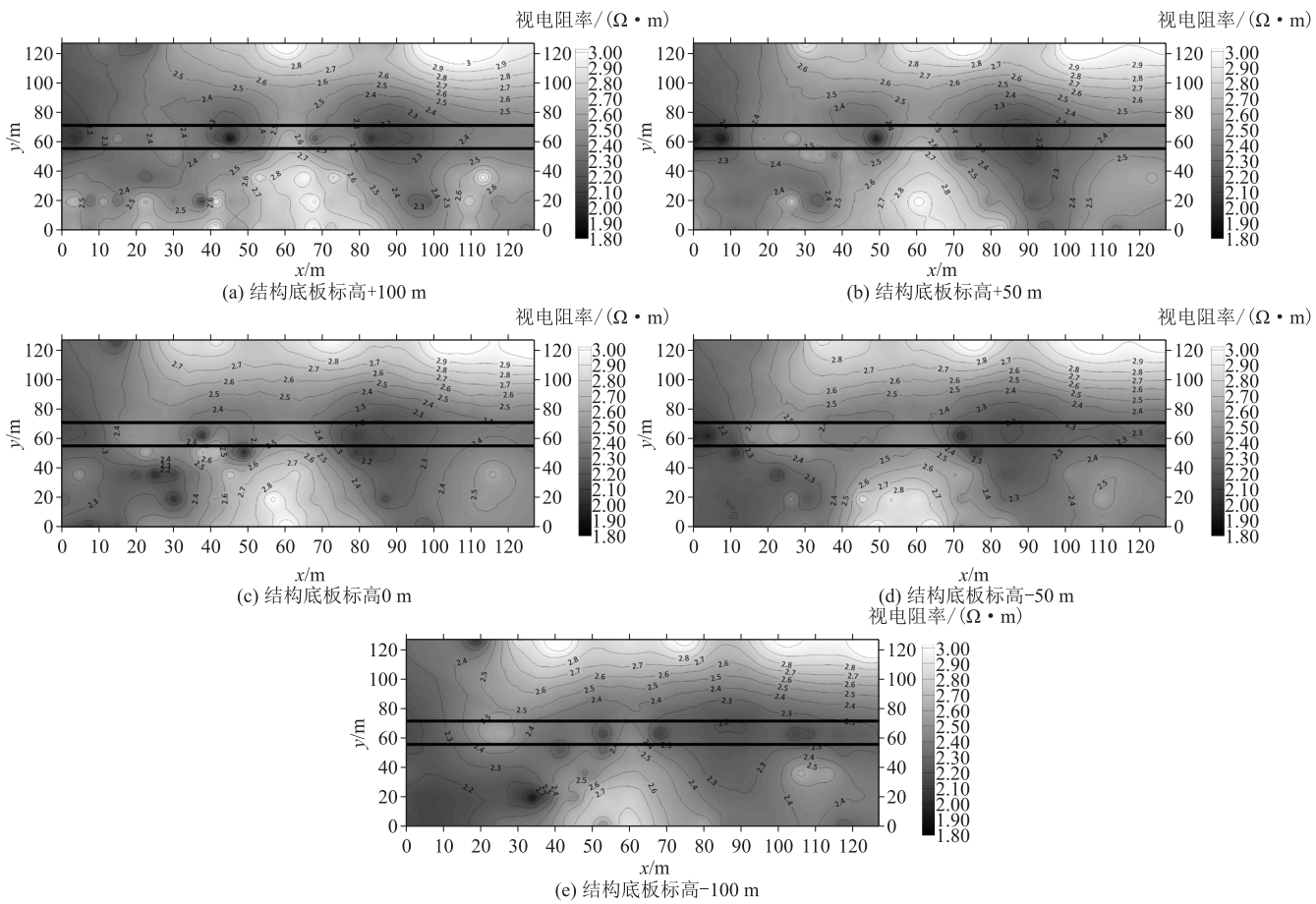


图4 反演视电阻率水平切片图

2.5 隧道开挖验证

隧道开挖至参考坐标 x 轴80~100 m低阻异常附近掌子面揭示:节理裂隙发育密集,围岩极破碎,存在

强风化夹全风化花岗岩,围岩稳定性较差,塌方风险较高。拱顶多处呈股状出水,局部呈线状出水,与探测结果相吻合。

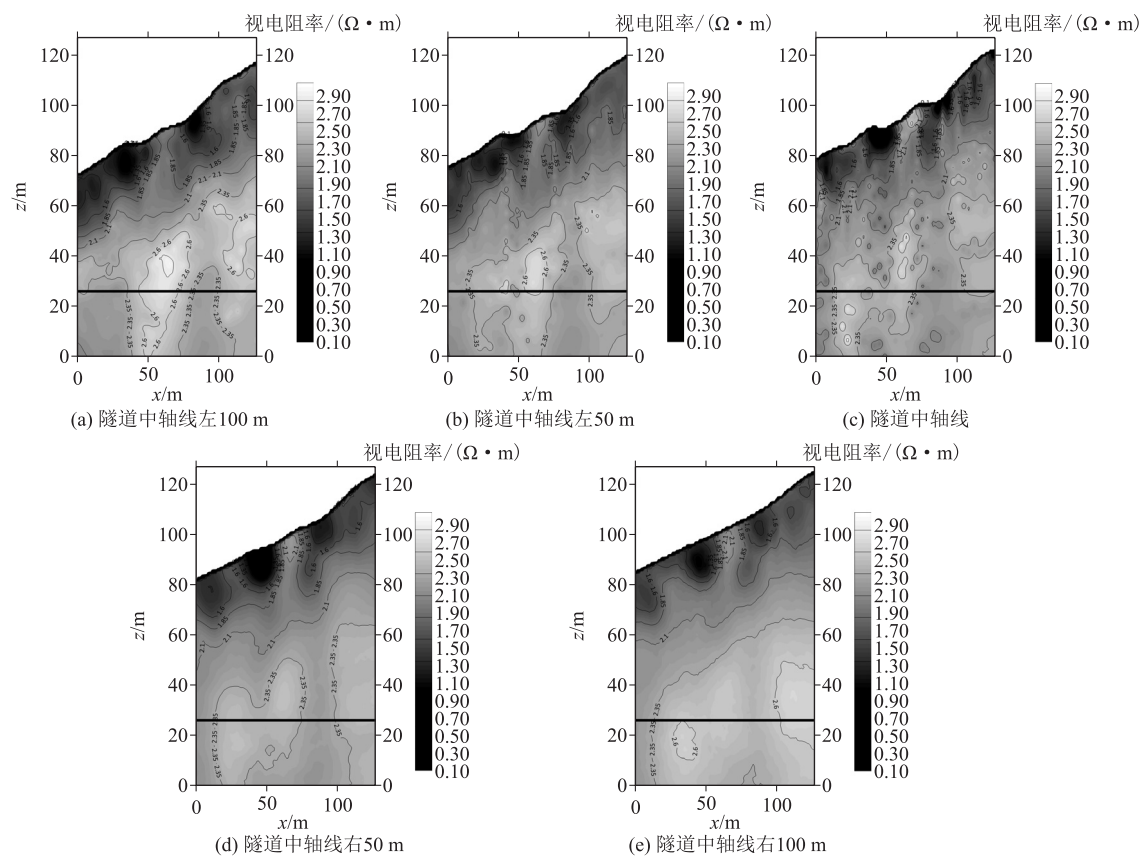


图5 反演视电阻率竖向切片图

3 结论

本文系统论述了阵列式三维音频大地电磁勘探方法在艰险山区大埋深、大跨度硐室隧道围岩勘察中的应用,并综合后续隧道开挖资料进行了验证分析,得到主要结论如下:

(1)阵列式三维音频大地电磁法测线及测点布置综合考虑了隧道埋深、硐室跨度、测点均匀性影响以及边缘效应等多种因素和条件,通过合理的测线参数设置,提高了音频大地电磁法野外数据采集质量和探测精度。工程案例实际开挖揭示与探测结果一致,验证了该方法的可靠性。

(2)相较于传统二维测线探测,三维探测能够提供丰富的地下空间三维视电阻率数据体,可实现任意视电阻率切片的提取。三维探测更符合实际地质情况,能够更加直观地反映地下地质体异常在空间的展布情况,为隧道施工设计提供更为坚实、可靠的参考资料。

(3)由于地质构造的复杂性,常规二维探测已无法满足勘探精度要求,未来需要进一步探索综合物探方法的三维探测,更加深入理解地质发育规律,以提高艰险山区大埋深隧道勘察设计精度。

参考文献:

[1] 陈明浩,李东. 遂渝铁路二线复杂隧道工程地质勘察分析研究[J]. 路基工程, 2009(3): 177-178.
CHEN Minghao, LI Dong. Analysis and Research on Engineering Geological Survey of Complex Tunnel in Suining-Chongqing Railway Second Line [J]. Subgrade Engineering, 2009(3): 177-178.

[2] 李坚. 铁路隧道物探模式探讨[J]. 铁道工程学报, 2013, 30(2): 63-68, 103.
LI Jian. Discussion of Geophysical Exploration Pattern for the Railway Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, 30(2): 63-68, 103.

[3] 蔡盛,陈洪杰. 综合物探技术在深埋隧道勘探中的应用[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(S1): 127-130.
CAI Sheng, CHEN Hongjie. Application of Comprehensive Geophysical Prospecting Technology in Deep-buried Tunnel Exploration [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(S1): 127-130.

[4] 邹远华,王朋,周航,等. 藏东南某隧道水文地质特征及突涌水危险性评价[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(2): 37-42.
ZOU Yuanhua, WANG Peng, ZHOU Hang, et al. Hydrogeological Characteristics of a Tunnel in Southeastern Tibet and Risk Assessment of Water Burst [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(2): 37-42.

[5] 朱廷宇,王唤龙. TBM 穿越富水构造风化破碎带脱困处理方案研究[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(4): 103-110.

ZHU Tingyu, WANG Huanlong. Countermeasures of Jammed TBM in Shattered Weathered Zone of Water-rich Structure [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(4): 103 – 110.

[6] 任政勇,柳建新,岳国璇,等. 重力与磁法在有色金属矿产勘探中的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(1): 240 – 260.

REN Zhengyong, LIU Jianxin, YUE Guoxuan, et al. Research Progress of Gravity and Magnetic Method in Nonferrous Metal Minerals Exploration [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(1): 240 – 260.

[7] 陈同俊,崔若飞,郎玉泉,等. 煤田采区三维地震精细构造解释方法[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 573 – 578.

CHEN Tongjun, CUI Ruofei, LANG Yuquan, et al. Detail Structural Interpretation Methods of Coal 3D Seismic [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(2): 573 – 578.

[8] 丁志强,李飞,袁桂琴. 矿产普查中航空电磁异常的查证综合解

释[J]. 桂林理工大学学报, 2018, 38(4): 726 – 731.

DING Zhiqiang, LI Fei, YUAN Guiqin. Comprehensive Interpretation of Airborne Electromagnetic Anomaly Verification in Mineral Prospecting [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2018, 38(4): 726 – 731.

[9] 何继善. 大深度高精度广域电磁勘探理论与技术[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1809 – 1816.

HE Jishan. Theory and Technology of Wide Field Electromagnetic Method [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1809 – 1816.

[10] 张弛. 大地电磁数据质量评价与阻抗估计[D]. 长沙: 中南大学, 2013.

ZHANG Chi. Magnetotelluric Data Quality Assessment and Impedance Estimation [D]. Changsha: Central South University, 2013.

(上接第13页)

[8] 郭肖亭,王文廉,葛双超,等. 误差理论在科技论文数据处理与分析中的应用[J]. 电气电子教学学报, 2021, 43(3): 100 – 101, 112.

GUO Xiaoting, WANG Wenlian, GE Shuangchao, et al. Application of Error Theory in Data Processing and Analysis of Scientific Papers [J]. Journal of Electrical & Electronic Education, 2021, 43(3): 100 – 101, 112.

[9] 李准,张穷. 浮动平均值在大变形隧道定额测定与分析中的应用[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(1): 60 – 63.

LI Zhun, ZHANG Qiong. Application of Floating Average Value in Quota Determination and Analysis of Large Deformation Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(1): 60 – 63.

[10] 王璐. 基于卡尔曼滤波的三维点云编码优化及后处理算法研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.

WANG Lu. Kalman Filter-based Coding Optimization and Post-processing for 3D Point Cloud [D]. Jinan: Shandong University, 2022.

[11] 吴炜. 铁路岩溶隧道旋挖钻孔单价分析研究[J]. 铁路工程技术与经济, 2022, 37(6): 8 – 13.

WU Wei. Analysis and Research on Unit Price of Rotary Drilling in Railway Karst Tunnel [J]. Railway Engineering Technology and Economy, 2022, 37(6): 8 – 13.

[12] 李芳,卢鑫垚,陈龙,等. 基于 Matlab 和 Excel 的误差理论教学软件设计[J]. 电脑知识与技术, 2021, 17(7): 66 – 67, 70.

LI Fang, LU Xinyao, CHEN Long, et al. Design of Error Theory Teaching Software Based on Matlab and Excel [J]. Computer Knowledge and Technology, 2021, 17(7): 66 – 67, 70.

[13] 颜欢,李准. 基于成渝客运专线新红岩隧道的数码电子雷管爆破定额测定与费用分析[J]. 铁路工程技术与经济, 2018, 33(4): 28 – 32.

YAN Huan, LI Zhun. Quota Determination and Cost Analysis of Digital Electronic Detonator Blasting of the New Hongyan Tunnel in Chengdu-Chongqing Passenger Dedicated Line [J]. Railway Engineering Technology and Economy, 2018, 33(4): 28 – 32.

[14] 汤杰,李准. 引孔型塑料排水板施工定额测定及单价分析[J]. 铁路工程技术与经济, 2019, 34(4): 28 – 32.

TANG Jie, LI Zhun. Construction Quota Determination and Unit Price Analysis of Orifice Plastic Drainage Plate [J]. Railway Engineering Technology and Economy, 2019, 34(4): 28 – 32.