doi: 10.11720/wtyht.2021.1346

范祥泰,张志厚,苏建坤,等.改进电测深法探测山区深埋隧道隐伏构造[J].物探与化探,2021,45(3):793-799. http://doi.org/10.11720/ wtyht.2021.1346

Fan X T, Zhang Z H, Su J K, et al. Improved electric sounding method for detecting concealed structures in deep-buried tunnels in mountainous areas [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(3):793-799. http://doi.org/10.11720/wtyht. 2021.1346

改进电测深法探测山区深埋隧道隐伏构造

范祥泰1,张志厚1,苏建坤2,丁可2,廖晓龙1,石泽玉1,刘鹏飞1

(1. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院,四川 成都 611756; 2. 云南航天工程物探检测股份 有限公司,云南 昆明 650217)

摘要:隧道上方存在的隐伏构造在施工过程中极易诱发隧道地质灾害。在传统电测深法中引入正交投影法的地 形校正技术和多电极一次布极的高供电电压技术,将其用于长大深埋隧道隐伏构造的探测,勘探成果充分反映了 隐伏构造的空间展布形态,并与钻探成果表现出较好的一致性。此次研究表明:改进电测深法能有效探测出沿测 线剖面地质体电阻率的变化情况,准确识别隐伏构造的规模及位置,为隧道安全施工与隧道地质灾害防治提供了 依据。

关键词: 电测深法;深埋隧道;隐伏构造;工程勘探

中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2021)03-0793-07

0 引言

隐伏构造在隧道施工过程中具有较强的致灾 性,需要选择合适的物探方法进行勘察。目前,高密 度电阻率法^[1-2]、电阻率联合剖面法^[3]、瞬变电磁 法^[4]、CSAMT^[5-7]、探地雷达^[1,8]、电阻率测深^[9]等地 球物理勘探方法已广泛应用于工程前期隐伏构造勘 察工作并取得了较好的应用效果[10-13]。但是,每种 物探方法都有一定的局限性:仪器装备易限制高密 度电法的探测深度而使其难以满足工程建设的需 求^[14], 地形和不均匀体会导致 CSAMT 曲线发生一 定程度的畸变[15],探地雷达的抗干扰能力较弱[16] 且勘探深度小,瞬变电磁法对积水采空区反应明显 但对高阻采空区反应相对较弱[17]等,因此,这些方 法都难以适应复杂艰险山区长大深埋隧道隐伏构造 的探测。而直流电测深法在探测基岩埋深、划分松 散沉积层、测定潜水面深度和含水层分布等方面具 有较好的应用效果,相比其他物探方法,该方法具有 抗干扰能力较强、技术灵活可靠、经济高效的特点, 在钻探施工不便以及难以通过地面地质调查确定地 下地质体的地区具有较广泛的应用^[18],已有的数值 模拟方法表明直流电测深法对高、低阻目标层均具 有较高的分辨能力^[19]。

云南省临沧市凤庆县在建云凤高速公路安石隧 道发生涌水突泥事故,通过对事故原因调查,发现地 下隐伏构造为此次事故的直接原因,因此需要迅速 查明工区范围内隐伏构造的空间位置及展布情况。 针对安石隧道具有长大深埋、地表起伏大、地下水发 育、岩性复杂、植被覆盖度广等地质特点,选用了改 进电测深法进行勘探,在传统电测深法的基础上引 入正交投影法的地形校正技术和多电极一次布极的 高供电电压技术^[20],取得了较好的效果。

1 地质背景

安石隧道位于凤庆县凤山镇安石村—勐佑镇中 和村,为分离式特长隧道。隧址区在区域构造上位

收稿日期: 2020-07-02; 修回日期: 2021-03-11

基金项目:四川省科技厅科技计划项目(2019YFG0460,2019YFG0001,2020YFG0303);国家自然科学基金资助项目(41672295);国家重点研发 计划项目(2018YFC1505401)

第一作者:范祥泰(1996-),男,西南交通大学硕士研究生,主要研究方向为工程地球物理勘探。Email:2716764067@qq.com

通讯作者:张忠厚代563-),男,副教授,主要从事地球物理正反演研究及教学工作。Email:logicprimer@swjtu.edu.cn

于前奧陶系变质岩岩体与燕山早期花岗岩岩体接触 区带内(图1),隧道轴线上无区域性断裂、褶皱分 布。隧道左线全长5338m,最大埋深约453.11m; 右线全长5263m,最大埋深约449.81m。



图 1 安石隧道区域地质构造 Fig. 1 Regional geological structure of Anshi tunnel

本次物探工作的测区范围为安石隧道某工段, 测区属低中山地貌,地形起伏较大,如图2所示。山 体自然坡度14°~31°,植被较发育,进、出口均处于 山前斜坡地带。依据现场地质勘察,隧道内掌子面 前方围岩为前奥陶系石英片岩、二云石英片岩、云母 片岩,呈互层状或渐变过渡状赋存。岩体破碎呈碎 裂状结构,岩石矿物定向排列,片理发育,受构造挤 压作用明显。岩性主要呈现中风化状态,少量呈现 全、强风化状态。岩层整体属较软岩。



图 2 测区地形地貌 Fig-P数雅pography of the survey area

隧址区岩体风化破碎程度与富水性不一,遇水 软化及力学强度差异明显,软硬相间,具有明显的电 阻率值差异;挤压剪切破碎带岩体松散破碎含水,与 周围岩体也存在明显电性差异(表1),因此有利于 电测深法开展工作。

表1 测区岩样电阻率统计

Table 1 Resistivity of rock samples in the measurement area

岩样类别	电阻率/(Ω・m)
含砾粉质黏土	3000~5000
石英片岩	1300~2400
中风化石英片岩	1200~1800
强风化石英片岩	800~1100
富水区	400~1200
破碎带	400~800

2 电测深法的改进

2.1 地形改正

直流电测深法简称电测深法,其物性基础为地 下岩土体的电性差异,目前的电测深法主要用于水 平地面勘察^[21]。传统电测深法在起伏陡峭的山地 上进行勘探时,地形因素常使观测结果产生畸变,导 致虚假异常掩盖了地质体的真实异常。为使勘探结 果更接近地下真实情况,必须进行地形影响校正。 当前已有多种方法用于地形校正,其中 Res2dinv 二 维反演软件和正演模拟法是目前普遍采用的地形校 正方法^[22]。然而这两种方法均存在一个明显的缺 点,忽视了起伏地形条件下测深点反映的是地表法 线方向上与电极距对应深度的地质情况,仍将 MN 中点垂直向下延伸探测深度 L 的点 D'作为视电阻 率的测深点,如图 3 所示。因此地形校正后的结果 仍有很大误差,不能够准确反映出地下真实情况。



图 3 传统电测深法在斜坡上探测示意 Fig. 3 Schematic diagram of traditional electric sounding method on slope detection

本文采用正交投影法确定与勘探深度 L 对应的 测深点 D 的坐标。如图 4 所示,在起伏地表确定一 条测线并在该测线所在的剖面建立 x—y 直角坐标 系,其中 x 轴在水平方向,远离起点方向为正; y 轴 在深度方向,向上为正。从测线起点开始,等间距布 置 n 个电极,将第1、2、3、4 号电极视为A、M、N、B 电 极,坐标如图中所示。其中,线段 MN 的中点为 O 点,以 O 点为起点向下作线段 MN 的垂线,长度即探 测深度为 L,终点为测深点 D。



图 4 基于正交投影法的地形校正示意

Fig. 4 Terrain correction sketch based on orthogonal projection method

过 M 点向下作垂线,与过 N 点作的水平线相 交于点 V,设 ΔMNV 为 θ ,则:

$$\begin{aligned}
\cos\theta &= \frac{x_3 - x_2}{\sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2}},\\
\sin\theta &= \frac{y_2 - y_3}{\sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2}} \circ
\end{aligned}$$

过 O 点向下作垂线,与过 D 点作的水平线相交于点 W,有:

$$\angle DOW = \angle MNV = \theta_{c}$$

由于 O 点为线段 MN 的中点:

$$\begin{cases} x = (x_2 + x_3)/2 , \\ y = (y_2 + y_3)/2 , \end{cases}$$
的坐标及其对应的视电阻率 ρ_s

为

$$\begin{cases} x' = x - L\sin\theta ,\\ y' = y - L\cos\theta ,\\ \rho_s = K \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I} ,\\ K = \frac{2\pi}{\frac{1}{L_{AM}} - \frac{1}{L_{AN}} - \frac{1}{L_{BM}} + \frac{1}{L_{BN}}} \circ$$

式中:K 为装置系数, L_{AM} 、 L_{AN} 、 L_{BM} 和 L_{BN} 分别代表 AM、AN、BM、BN 的距离, ΔU_{MN} 代表 MN 间的电压,I代表 AB 间的电流强度。

2.2 跑极效率

则测深点 D

传统电测深法存在跑极造成的数据采集效率低下的问题。为了提高跑极效率,引入了多电极一次 布极技术并利用程控电极转换开关和微机工程电测 仪实现跑极有数据采集的自动化,如图 5 所示。测 量装置为温纳装置,电极间距为6m,AB最大为960 m,MN最小为6m,最大为20倍的等间隔间距(120 m)。测量单元在第一个测深点完成探测后通过多 路电极转换器顺次向后移动,从而完成第一层所有 测深点数据的采集。之后通过多路电极转换器改变 测量单元的电极间距来加大探测深度,完成下一层 测深点探测。重复以上步骤即可得到整个测线剖面 上测深点的坐标以及视电阻率值。



Fig. 5 Electrode arrangement

实际工作时,为了提高地下电流场的电流密度 从而获得更高的信噪比,采用向地下供较高的供电 电压的方法,电流从直流电瓶流出后经过升压装置, 其供电电压最高可达1200V。为了提高探测深度, 使用该方法应尽可能提高单排列长度,其单排列长 度可达4km。

3 野外探测与分析

根据设计,安石隧道凤庆侧由大里程向小里程 方向开挖。在进行探测时,左线隧道出口端从 ZK43 +603 开挖至 ZK42+976.6,已开挖 626.4 m;右线隧 道出口端从 YK43+593 开挖至 YK42+951.6m,已开 挖 641.4 m。

3.1 测线布置

为了查明隧道掌子面前方及上方是否存在隐伏 构造,如图 6 所示,在 YK42+410~YK43+210 地表 沿右幅轴线布置测线 L1,点距 6 m,测线总长 960 m; 在 ZK42+560~ZK43+350 地表沿左幅轴线布置测线 L2,点距 6 m,测线总长 960 m;在 YK42+870 位置垂 直隧道轴线布置测线 L3,点距 6 m,测线总长 960 m。 这种方式布置测线,可以通过两种角度的探测结果 对比来确定地下各地质体的空间展布状态,为地质 推断提供更合理的物探依据。

3.2 物探成果

野外数据采集完成后,先利用正交投影法对其进行地形校正,然后采用 Res2dinv 软件对改正后的



图 6 测线与钻孔布置示意

Fig. 6 Schematic diagram of measuring line and drilling arrangement

数据进行反演^[23],得到3条测线的电测深法反演电 阻率断面(图7~图9)。总体上看,地表至地下20m 左右电阻率逐渐升高,电阻率等值线基本平行于地 形线,因此该范围内无隐伏构造发育,为地表第四系 覆盖区和不同程度的风化基岩的综合反映;深度20 m以下,电阻率曲线不平行、不光滑,多处呈现圈闭 状,数值变化较大,可能有隐伏构造发育。

从L1线的反演剖面(图7)可以看出,地表20m 以下,YK42+450~YK43+200范围电阻率的分布总 体表现为"低阻—局部高阻—低阻—局部高阻—低 阻"。图中①、②、③、④号低阻区的电阻率等值线 闭合,形状为方形或半圆形,说明这些区域储水较 多,推断为富水区。I号、II号低阻带的电阻率小于 800 Ω · m,电阻率等值线闭合,呈条带状,展布方向 与隧道开挖方向斜交。 I 号低阻异常带位于 YK42 +840 上方,宽约6m,长约270m; II 号低阻异常带位 于 YK42+950 上方,长约250m,宽约8m,从图上可 以看出 II 号低阻异常带仍具有一定的延伸性。推断 这两处低阻异常带基岩裂隙水发育,贯通性良好,破 碎程度较大,可能为破碎带。由于隧道已开挖至 II 号低阻异常带范围内,因此要高度关注,必要时可对 其采取适当的工程措施。

从L2线的反演剖面(图8)可以看出,地表20m 以下,ZK42+600~ZK43+350范围的电阻率总体特 征为"低—局部高—低—局部高—低"。①、②号低 阻区电阻率等值线闭合,形状为方形或半圆形,说明 这些区域储水能力较强,推断为富水区。Ⅲ号低阻 异常区电阻率等值线闭合,呈条带状,电阻率小于 1000Ω·m。该低阻异常带位于两个局部高阻体中 间,长约180m,平均宽约60m,推断该处基岩裂隙 水发育,破碎程度较大,贯通性较好,可能为破碎带。 由于该区域与其他富水区相连,且隧道已开挖至该 范围内,因此要对Ⅲ号低阻异常带予以高度的关注。

从L3线的反演断面(图9)可以看出,地下20m 以下,电阻率总体分布特征为"高—局部低—高— 局部低—高—低—高",其中3个低阻区的电阻率 等值线闭合,因此推断这些区域为层间破碎区,岩体 破碎,富含地下水。从图中还可以看出,隧道左幅与 隧道右幅的上方分别存在一个低阻富水区,这与平 行于隧道轴线的L1、L2线的探测结果一致。

3.3 钻探验证

由图 7、图 8 可知,地下发育有 3 条低阻带且贯 通性较好,其中 I 号低阻带下方被圈闭,最低处为







1860 m, 而隧道高程在 1820 m 左右, 因此 I 号低阻 带不具有同隧道轴线相交的趋势, 对隧道施工造成 危险的可能性较小。 II 号低阻带下方未被圈闭, 且 已探明的最低处电阻率较低, 具有进一步向下延伸 的趋势; III 号低阻带与隧道轴线斜交, 因此 II 号、III 号低阻带对隧道施工造成危险的可能性较大。为了 对物探结果尤其是 II 号、III 号低阻带的存在性进行 验证且不对隧道造成破坏和影响, 将 ZK1 布设于 YK42+952 左 13 m, ZK2 布设于 YK42+870 左 13 m (如图 6 所示)。将物探成果与钻探成果进行对比, 结果见表 2。

物探推断的富水区域或低阻破碎区域与钻探的 破碎带或岩心破碎区域相对应。其中,ZK1深度 136~176、176~252、133~251 m分别对应推断的Ⅱ 号、Ⅲ号低阻破碎带区域,ZK1在206~240.5 m时取 得的岩心结果为中风化石英片岩,岩心破碎,钻探到 165.1~166.7数据~206、240.5~252 m时取得的岩 心结果为破碎带。沿 ZK2 方向地下 58~104、51~ 112 m 分别为推断的 II 号、III 号低阻破碎带区域, ZK2 钻探到 53.6~103.4 m 时取得的岩心结果为破 碎带。综合分析来自 II 号、III 号低阻异常带的钻探 成果,发现其岩性主要为石英片岩、云母片岩,破碎 呈土状、碎块状、松散饱水,岩质松软,遇水软化泥 化,富水性强。因此这两条破碎带均由构造挤压剪 切破坏引起,为构造挤压剪切破碎带。

物探成果与钻探成果的对比结果表明了改进电 测深法可以充分反映隐伏构造的空间展布形态,并 与钻探成果表现出较好的一致性,说明该方法可以 有效探测山区深埋隧道隐伏构造。

4 结论

本次勘察工作发现并证实了隧道前方与上方存 在II号、III号构造挤压剪切破碎带,破碎带岩性松散

表 2 安石隧道改进电测深法解释成果与钻孔成果对比

Table 2 The comparison between the results of improved electrical sounding method

and the drilling results of the Anshi Tunnel

钻孔	物探推断结果(右幅)		物探推断结果(左幅)		钻探结果	
1 号钻孔 (隧道埋深 243~251 m)	47~116 m	电阻率较低,岩体 破碎,为富水区域	46~108 m	电阻率较低,岩体 破碎,为富水区域	43. 3~85. 7 m	中风化石英片 岩,岩心破碎
	136~176 m	电阻率较低,岩体		电阻率低,为低阻 破碎带区域	165. 1~166. 3 m	破碎带
	100 1701	破碎,为富水区域			175~206 m	破碎带
	176~252 m	电阻率低,为低阻 破碎带区域	133~251 m		206~240.5 m	中风化石英片 岩,岩心破碎
					240. $5 \sim 252 \text{ m}$	破碎带
2 号钻孔 (隧道埋深 280~288 m)	$58 \sim 104 \mathrm{~m}$	电阻率低,为低阻 破碎带区域	51~112 m	电阻率低,为低阻 破碎带区域	53. 6~103. 4 m	破碎带
			112~152 m	电阻率较低,岩体 破碎,为富水区域	103. 4~153. 5 m	中风化石英片 岩,岩心破碎
			290~301 m	电阻率较低,岩体 破碎,为富水区域	297. 5~301. 2 m	中风化石英片 岩,岩心破碎

饱水,岩质松软,遇水软化泥化,富水性强,且隧道已 经开挖到该区域,因此要对这两处构造挤压剪切破 碎带予以高度关注。本次物探工作为隧道安全施工 提供了有力保障。

改进电测深法能有效探测出沿测线剖面地质体 电阻率的变化情况,能根据地下介质的电性异常特 征准确识别出隐伏构造的规模及位置,对隧道安全 施工起到有效的指导作用。该方法提高了传统电测 深法的精度和数据采集效率,相比传统的高密度电 阻率法,其采集数据的信噪比更高,探测深度更大, 更加适合探测山区深埋隧道隐伏构造。

参考文献(References):

- 张合,扈本娜,刘国辉.综合物探方法探测城市隐伏活动断层的研究[J].工程地球物理学报,2012,9(6):776-780.
 Zhang H, Hu B N, Liu G H. Research of integrated geophysical exploration method in detecting urban buried active faults [J].
 Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2012, 9(6): 776-780.
- [2] 王晓龙,程志平,邱尚文.物探方法在探测隐伏断层中的应用
 [J].工程地球物理学报,2013,10(2):161-164.
 Wang X L, Cheng Z P, Qiu S W. The application of geophysical method to exploring concealed fault[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10(2): 161-164.
- [3] 刘明辉,薛建,王者江,等.工程场地隐伏断裂的探测与地震活动性评价[J].物探与化探,2018,42(4):839-845.
 Liu M H, Xue J, Wang Z J, et al. The detection of buried faults

in engineering sites and the evaluation of seismic activity[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(4): 839-845.

[4] 余中元,杨金山,刘双,等.地球物理方法在城市活断层探测中的应用研究——以哈尔滨城市活断层探测项目为例[J].工程地球物理学报,2008,5(4):428-434.

Yu Z Y, Yang J S, Liu S, et al. Application of geophysical methods to urban active faults detection[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2008,5(4): 428-434.

[5] 夏训银,李毅,王身龙,等. CSAMT 在城市隐伏断层探测中的应 用[J].物探与化探, 2013,37(4):687-691.

Xia X Y, Li Y, Wang S L, et al. The application of CSAMT exploration to detecting urban concealed faults[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(4): 687-691.

- [6] 雷晓东,李巧灵,李晨,等.北京平原区西北部隐伏岩体的空间 分布特征[J].物探与化探,2018,42(6):1125-1133.
 Lei X D, Li Q L, Li C, et al. Spatial distribution characteristics of several plutons in northwest Beijing plain[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018,42(6):1125-1133.
- [7] 李帝铨,底青云,王光杰,等. CSAMT 探测断层在北京新区规划中的应用[J]. 地球物理学进展, 2008,23(6):1963-1969.
 Li D Q, Di Q Y, Wang G J, et al. Fault detection by CSAMT and its application to new district planning in Beijing[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(6): 1963-1969.
- [8] 张虎生,兰樟松,张炎孙,等. 地质雷达在瑞金沙州坝岩溶塌陷 调查中的应用效果[J]. 物探与化探,2000,24(6):459-463.
 Zhang H S, Lan Z S, Zhang Y S, et al. The application of geophysical radar to the investigation of Shazhouba Karst Collapse in Ruijin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2000,24 (6): 459-463.
- [9] 胡清龙,杨威,苏永军.大地电磁测深法在水电工程勘察中的应用[J].工程地球物理学报,2018,15(3):383-390.
 Hu Q L, Yang W, Su Y J. The application of magnetotelluric method to the investigation of hydropower engineering[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2018, 15(3): 383-390.
- [10] 密士文,王翔,周厚侠. 高密度电法在某公路路基下隐伏岩溶 探测中的应用[J]. 山东国土资源, 2015,31(1):62-64.
 Mi S W, Wang X, Zhou H X. Application of high density resistivity for underground karst detection[J]. Shandong Land and Resources, 2015,31(1): 62-64.
- [11] 谭儒蛟,胡瑞林,徐文杰,等. 金沙江龙蟠变形体隐伏构造 CSAMT 探测与解译[J]. 地球物理学进展,2007,22(1):283-288.

Tan R J, Hu R L, Xu W J, et al. CSAMT exploration and geological interpretation of perdue tectonic structures of Longpan deformation slope in Jinsha River[J]. Progress in Geophysics, 2007,22 (1): 283 – 288.

[12] 李远强. 探地雷达探测地裂缝的几个实例[J]. 物探与化探,

2012,36(4):143-146.

Li Y Q. Waveform characteristics of GPR ground fissure exploration [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36 (4): 143-146.

[13] 郭安民,潘利询. 工作面隐伏突水构造瞬变电磁响应特征研究
 [J]. 工程地球物理学报, 2010,7(3):318-322.
 Guo A M, Pan L X. Research on the transient electromagnetic response characteristics of concealed water-inrush structure[J]. Chi-

nese Journal of Engineering Geophysics, 2010, 7(3): 318-322. [14] 田玉民, 史殿胜. 一种加大探测深度的高密度电法测量装置及

- 应用[J]. 工程地球物理学报,2008,5(6):701-704. Tian Y M, Shi D S. On high-density resistivity system in the investigation of deeper structure[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2008,5(6):701-704.
- [15] 马婵华,鲁霞,赵玉红,等.关于 CSAMT 法若干个问题的探讨
 [J].工程地球物理学报, 2013,10(5):661-665.
 Ma C H, Lu X, Zhao Y H. Discussion of several issues about CSAMT method[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10(5): 661-665.
- [16] 刘斌,李术才,李树忱,等.复信号分析技术在地质雷达预报岩 溶裂隙水中的应用研究[J].岩土力学,2009,30(7):322-327.

Liu B, Li S C, Li S C, et al. Study of application of complex signal analysis to predicting karst-fractured ground water with GPR [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(7): 322-327.

[17] 覃庆炎. 瞬变电磁法在积水采空区探测中的应用[J]. 煤炭科 学技术,2014,42(8):109-112.

Qin Q Y. Application of transient electromagnetic method for water accumulated goaf in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2014,42(8): 109-112.

[18] 田少兵,李向前,尚通晓,等.直流电测深法在沿海平原区地质

填图中的应用——以苏北盆地连云港灌云地区为例[J].物探 与化探,2019,43(4):783-793.

Tian S B, Li X Q, Shang T X, et al. The application of directcurrent sounding method in the coastal plains: A case study of Guanyun area in Lianyungang [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019,43(4): 783 – 793.

- [19] 杨云见,何展翔,王绪本,等. 直流电测深法与中心回线瞬变电磁法联合反演[J]. 物探与化探, 2008,32(4):442-444.
 Yang Y J, He Z X, Wang X B, et al. A discussion on the inversion of combined vertical electrical sounding and central-loop TEM data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2008, 32 (4): 442-444.
- [20] 苏建坤,刘浩,李万宝,等. 基于山区地形校正的大功率电测深 方法及系统[P]. 中国专利, 201910203071.4, 2019-06-11.
 Su J K, Liu H, Li W B, et al. High-power electric sounding method and system based on mountain terrain correction[P]. China Patent, 201910203071.4, 2019-06-11.
- [21] 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京:地质出版社,2005.
 Li J M. Geoelectric field and electrical exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.
- [22] 熊勇. 高密度电法勘探中地形影响校正方法探讨[J]. 人民长 江,2014,45(14):47-48,55.
 Xiong Y. Discussion on correction method for topographic influence in high-density electrical prospecting [J]. Yangtze River, 2014,45(14):47-48,55.
- [23] 刘迁,陈建国,张焱孙. RES2DINV 在江西清江盆地常规电测深 数据反演中的应用[J]. 地球物理学进展,2018,33(6):2416-2427.

Liu Q, Chen J G, Zhang Y S. Application of RES2DINV in the inversion of conventional electrical sounding data in Qingjiang basin, Jiangxi province[J]. Progress in Geophysics, 2018,33(6): 2416-2427.

Improved electric sounding method for detecting concealed structures in deep-buried tunnels in mountainous areas

FAN Xiang-Tai¹, ZHANG Zhi-Hou¹, SU Jian-Kun², DING Ke², LIAO Xiao-Long¹, SHI Ze-Yu¹, LIU Peng-Fei¹

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 2. Yunnan Aerospace Engineering Geophysical Detecting Co., Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: The concealed structure existing above the tunnel is very likely to induce tunnel geological disasters during construction. This paper introduces terrain correction technology based on orthogonal projection method and high power supply voltage technology with multiple electrodes laid at once into the traditional electrical sounding method to improve it. In addition, the improved electrical sounding method is applied to the detection of the concealed structures of long and deep buried tunnel. The exploration results fully reflect the spatial distribution of concealed structures and show good consistency with the drilling results. This study shows that the improved electrical sounding method can effectively detect the change of resistivity of geological bodies along the survey line profile, and can accurately identify the scale and location of concealed structures, thus providing a basis for tunnel safety construction and tunnel geological disaster prevention.

Key words: electrical sounding method; deep-buried tunnels; concealed structure; engineering exploration