刘柏宇,赵乘程.ADS项目场地稳定性评价中高密度电阻率法的综合应用[J].地震工程学报,2020,42(6):1715-1722.doi:10. 3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1715

LIU Baiyu,ZHAO Chengcheng.Application of High-density Resistivity Method in Evaluation of Stability of ADS Facility Site [J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(6):1715-1722.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1715

# ADS 项目场地稳定性评价中高密度 电阻率法的综合应用

### 刘柏宇1,赵乘程2

(1. 中国科学院近代物理研究所,甘肃 兰州 730000; 2.甘肃省地震局,甘肃 兰州 730000)

摘要:以高密度电阻率法为主,综合其他方法对"十二五"国家大科学装置项目——ADS项目的场 地稳定性进行评价。ADS项目场址位于广东省惠州市惠东县,通过在场区布设多条高密度电法剖 面,进行二维反演后绘制电阻率剖面图,结合已有的钻孔和地质资料对其下断层的分布特征进行推 断解释,查明场区内的断层产状、风化层厚度、水文地质条件等;并对厂址附近断层在未来地震作用 下可能放大震害的问题进行研究,为拟建场区装置的设计和修建提供相关的技术支持。这项综合 手段的评估研究可为同类国家重大项目选址时提供参考。

关键词:高密度电阻率法;地质勘查;装置场地;安全评价

 中图分类号: P631
 文献标志码:A
 文章编号: 1000-0844(2020)06-1715-08

 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1715

## Application of High-density Resistivity Method in Evaluation of Stability of ADS Facility Site

LIU Baiyu<sup>1</sup>, ZHAO Chengcheng<sup>2</sup>

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China;
 2. Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: In recent years, the high-density resistivity method has been widely used in geological exploration and the evaluation of the stability of important project sites. In this paper, the high-density resistivity method and other methods were adopted to evaluate the seismic stability of the ADS facility site, a large-scale scientific facility project in China. This ADS facility is located in Huidong County, Huizhou City, Guangdong Province. Several high-density electrical profiles were developed for the site area, and resistivity profiles were drawn after two-dimensional inversion. Combined with the existing borehole and geological data, the distribution characteristics of the underlying faults were inferred and interpreted, followed by the investigation of the fault occurrence, thickness of the weathering layer, and hydrogeological conditions. To provide technical

收稿日期:2019-12-01

基金项目:兰州重离子加速器运行维护任务(Y9HIRLL100)

第一作者简介:刘柏宇(1987-),男,硕士,工程师,主要从事重大工程项目基础建设和管理方面的工作。

E-mail:187308229@qq.com。

support for the design and construction of devices at the proposed site, we also studied the possible earthquake damage amplification of the faults near the site from future earthquake action. This comprehensive evaluation method can serve as a reference framework for the selection of similar sites for major national projects.

Keywords: high-density resistivity method; geological exploration; facility site; safety evaluation

#### 0 引言

高密度电阻率法又称电阻率层析成像(Resistivity Tomography)或简称电成像(Electrical Imaging),是 20 世纪 80 年代从美国和日本发展起来的 一种新型的电阻率方法[1]。该方法兼具电剖面与电 测深的特点,在水文地质和工程地质方面已得到广 泛应用[2]。如底青云等[3-7]研究了高密度电阻率法 在防波堤工程、地下水资源、堤坝勘察和隧洞勘察中 的应用;黄晓容[8]采用矿井高密度电阻率法对同华 煤矿扩区充水岩溶裂隙进行探测,以排除煤矿突水 隐患,介绍了矿井高密度电阻率法的基本原理。冷 元宝等<sup>[9]</sup>简要总结了包括高密度电阻率法在内的我 国堤防隐患无损探测技术概况,并对近年来在此领 域内取得的主要进展进行了回顾与总结。马文涛 等[10]针对传统铁路路基岩溶注浆检测方法的偶然 性和局限性,结合云桂铁路珠琳段岩溶注浆检测,分 析了高密度电法的工作原理及流程。宋文鹏等[11] 利用高密度电法对白云西矿采场地下水的空间分布 状态、含水层发育规律进行了详细勘探,为采场地下 水的防治与开发利用提供了科学依据。吴小洁 等[12]在海南五指山地区开展可控源音频大地电磁 测深、高密度电法、激电测深等综合电法勘探工作, 圈定了区内构造破碎带,对其进行了富水性评价。 肖乐乐等[13]从电法超前探测技术的应用原理、实施 方法等方面分别阐述了二维直流电法、瞬变电磁法、 三维高密度法等超前探测方法的优缺点和在实际应 用中的适用条件,认为将瞬变电磁法和三维高密度 法综合应用于巷道前方构造富水区探测具有互补性 强、精度高等特点。杨阳等[14]采用高密度电法结合 现场检查资料,对霍林河水库土石坝的渗漏情况进 行检测,并于第二年对防渗处理后的渗流情况进行 了再次检测,通过对比表明防渗处理工程起到了有 效的防渗效果。

但从目前对高密度电阻率探测技术的应用情况来看,大多数研究只是将该方法进行了特例的应用,对方法的具体利用和应用效果缺乏综合的分析和评价,使用该方法进行场地地震稳定性评价的研究较少,对探测结果的解释也存在偏差。基于此,本

文拟以一"十二五"国家大科学装置项目——ADS 项目场地的稳定性评价为例,介绍高密度电阻率法 对具体工程场地地质勘查的检测效果,分析工程概 况、剖面布设、参数选择和勘探结果,在整理分析测 量数据的基础上对现场地质异常特征的推断分析进 行详细描述;并对厂址附近断层在未来地震作用下 可能放大震害的问题进行研究,以期为拟建场区装 置的设计和修建提供相关的技术支持。

#### 1 高密度电阻率法概述

#### 1.1 工作原理与方法

高密度电阻率法是在常规直流电阻率法勘探的 基础上发展起来的一种多电极测量的电法勘查系 统。它是一种集测深和电剖面法于一体的多装置、 多极距的组合方法,包括现场采集数据和后期处理 资料两部分工作。使用该方法现场采集数据时仅需 在有适当间距的测点处布置测量电极,之后用智能 电缆将这些电极连接到电极转换多路开关上,通过 电极转换开关将测量的信号传送到采集仪内,同时 将测量结果按顺序输入到随机的存储器中,之后回 放到微片机上,对采集的资料按照已经设定好的程 序进行数据的处理工作,从而显示出现场被测区域 地表电阻率断面的分布形态以及各种物理解释的结 果(图 1)。



Fig.1 Acquisition system of field data

使用高密度电阻率法进行现场采集时采用的装置是根据供电电极 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub> 和测量电极 P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>的相对位置关系确定的。通常采用的装置形式有温纳装置

 $(C_1P_1P_2C_2, C_1P_1 = P_1P_2 = P_2C_2)$ 、施龙贝格装置  $(C_1P_1P_2C_2)$ 、微分装置 $(C_1P_1C_2P_2)$ 、偶极装置  $(C_1C_2P_1P_2)$ 、二极装置形式 $(C_1P_1, C_2 \to \infty, P_2 \to \infty)$ 、三极装置形式 $(C_1P_1P_2, C_2 \to \infty)$ 或 $P_1P_2C_2, C_1 \to \infty$ )等<sup>[15]</sup>。

现场采集所得的数据必须进行处理分析后才能 使用。数据处理流程见图 2。



#### 图 2 高密度电阻率法数据处理流程图

Fig.2 Flow chart of data processing of high-density resistivity method

#### 1.2 相比其他电法的优点

高密度电阻率法是由常规电阻率法发展而来 的,其原理与常规电阻率法相同,都是以探测目标的 电性差异为基础,通过人工向探测目标施加直流电 流,利用电法仪器观测其电场分布,进而通过观测和 研究地下稳定电场的分布规律来分析目标体的空间 分布情况,并通过电阻率来表征地层地质导电性。 但是与常规电法相比,高密度电阻率法还有以下几 个优点:

(1)可一次性完成电极布设,减少因电极设置 引起的故障和干扰,为野外数据的快速、自动采集奠 定基础;

(2)能进行多种排列方式的扫描测量,可以获得较丰富的关于地电断面结构特征的地球物理信息;

(3) 能自动进行野外数据采集,提高采集速度;

(4)可在现场进行数据实时处理,对采集资料的 质量进行实时监控,并得出电阻率成像的反演结果。

综上所述,高密度电阻率法改变了电法勘探传 统的工作模式,减轻了劳动强度,提高了资料采集的 质量,在电极布设和观测形式上有所改进,使电法勘 探的智能化程度大大提高<sup>[16]</sup>。同时其采集的大量 数据为高精度资料处理解释以及电阻率层析成像研 究提供了前提,从而为高精度小目标件的浅层勘探 提供了可靠的保证。

#### 2 场地测试布设介绍

#### 2.1 项目场地的地质及水文概况

加速器驱动次临界嬗变系统(Accelerator Driven Sub-critical System,简称 ADS)是由中国科学院近代

物理研究所承担、国家"十二·五"重大科技基础设施 建设经费支持的大科学装置项目。项目场地位于广 东省惠州市惠东县黄埠镇东头村附近(N22°42′38″, E115°0′19″)。场地抗震设防烈度为VI度,设计基本地 震加速度值为 0.1g,反应谱特征周期T<sub>g</sub>=0.35 s。

依据已有的地质资料,场地区域构造的位置属 于粤北坳陷,位于粤北及湘中南,东面以瑞金河源断 裂带为界,西面紧邻大瑶山、粤西隆起,东面和北面 接赣中南隆起。该处地质构造以印支运动形成的褶 皱构造为特征,次级褶曲发育,展布方向以 NNE 向 为主,也有 SN、NW、NE 向,伴有走向逆断层。场地 区域内分布有第四纪地层、晚侏罗世~早白垩世南 山村组地层。剥蚀的丘陵区第四系为冲洪积地层, 基岩为火山碎屑岩和火山熔岩。

ADS场地的东、北两侧临山,西、南两侧临海, 场地地势总体上呈现东高西低和北高南低的态势, 其地貌类型主要为丘陵剥蚀地貌和海岸地貌。场区 南侧及东南侧临海,由天然分水岭形成了一个完整 的水文地质单元,水文地质条件较简单。地下水类 型包括第四系孔隙水和块状基岩裂隙水,孔隙水主 要赋存于第四系洪冲积砂层中,含水量贫乏~中等; 块状基岩裂隙水主要分布于南山村组流纹质熔结凝 灰岩或凝灰熔岩中,地下水赋存在风化裂隙及构造 带中,裂隙水多以下降泉形式出露,总体含水量贫 乏。由中国科学院地质与地球物理研究所提供的初 勘资料可见,场址区及其周围 2 km 范围内无明显 的滑坡、崩塌、地面塌陷、地裂缝、地面沉降、泥石流、 潜在不稳定边坡、危岩体等地质灾害及冲沟、岩溶、 洪水、特殊土等不良地质现象,属地质灾害及不良物 理地质现象不发育的场地。

#### 2.2 测线与电极布设

本研究中的地质勘查工作根据《DL/T 5010-2005 水电水利工程物探规程》<sup>[17]</sup>执行。数据采集采 用意大利 PASI 地震电法仪和国内 GeoPen 公司生 产的 E60BN 型高密度电法仪,两台手持 GPS 定位 (亚米级 MAPMOBILE6 和集思宝 MAP60)用于野 外现场测线的布置,现场采用手持 GPS 和罗盘进行 测点定位和标记。

在南区和北区装置场地共布设 32 个电极,设置 的电极距分别为 5 m 和 6 m,采用"单极-单极"的排 列方式进行滚动勘探布置。依据电极排列方式和 点电源电场分布规律,可达到近 150 m 的勘探深 度。在东部和西部排渣区采用"偶极-偶极"的电极 排列方式,共 56 个电极,以 6 m 的电极距可达到近 70 m 的勘探深度。

对装置场地一共设计了 24 条测线(图 3),设计 的物探深度最高为 100 m,具体布置如下:

(1)在 ADS 南区装置场地共布置了 7 条测线, 总长度约为 4 780 m。近南北向的 3 条测线分别为 A、G、H,近东西向的 4 条测线分别为 C、D、E、F。 其中测线 A 还穿过了 ADS 南区以南的规划区。

(2)在 ADS 北区装置场地共布置了 11 条测线,总长度约为 5 700 m。近南北向的 7 条测线分别为 I、J、L、M、N 测线,近东西向的 4 条测线分别为 O、P、Q 和 R 测线,以及在修改坐标后进行了重测的 NI 和 NJ 测线。

(3) 在东部和西部排渣堆放区域共布置了 6 条 测线,东部区为U、W11、W12 测线,西部区为 NEW1、 NEW2、NEW3 测线,总长度约为 4 460 m。



图 3 场地测线布置图



#### 3 数据处理及剖面解释

由于场地布置电极的接地电阻较大、现场地形 地势起伏以及噪声等多种影响因素,对现场测量的 数据产生了很大干扰。为了使测得的数据更具可信 性,需要对其进行处理,以剔除干扰项,使测得的数 据值更准确。

#### 3.1 数据处理

在现场实际工作中,当所要布设的电极位置确 定后,如果某个电极接触不良,会直接对供电的电流 大小产生影响,从而产生读数不稳定和不正常的虚 假和异常情况,并对最后测得的电位差的精度产生 影响。表现在数据上,就是出现很多突变点和虚假 点,测得的数值变化较大,和邻近的电阻率值相比存 在十倍甚至更大的差距,从而使所测电阻率剖面图 产生不正常的虚假和异常情况。因此在现场实际工 作中,要首先对测得的数据进行突变点和虚假点的 剔除,从而减小误差,使得数据结果更具可信度。

然后对校正过的高密度电测数据进行数据格式 转换,最后利用 Excel 进行长剖面数据拼和、测深点 高程赋入后形成需要的数据格式,具体为:

(1) 原始数据网格化:采用局部最优线性无偏估计法,即克里格法,利用 Surfer 软件对电测量数据进行网格化,网格大小约为 20 m×15 m。

(2) 反演处理:首先采用有限元法正演,然后采 用瑞典 Res2dinv 自动迭代反演程序,利用光滑约束 最小二乘法反演技术进行反演,并且在反演过程中 约束了已知地层电阻率范围。迭代次数 2~5 次, *RMS*<15。

对区内已取得的电测资料进行系统的数据处理后,结合水文地质资料、钻探成果进行解释,解释依据是查阅大量资料和结合以往工作成果。因篇幅所限,下文仅对南区的7条测线进行电阻率剖面解释。

#### 3.2 反演电阻率剖面解释

图 4 为 ADS 项目南区 7 条测线的高密度电阻 率法剖面解释。以电阻率值作为地层划分参考,电 阻率值小于几百 Ω•m 的为风化层;电阻率值为几 千 Ω•m 的为弱风化层,以及部分泥、页岩夹层;电 阻率大于 105 Ω•m 的为较完整的火山碎屑岩或凝 灰岩。由于地层水含量对电阻率的影响较明显,当 电阻率垂向剖面从浅到深为高阻-低阻-高阻的变化 规律时,浅部高阻层解释为包气带。

从图 4 可见, ADS 项目场地南区南北向的 3 条 剖面中, 剖面 A 的方向为 NNW, 剖面长度为 1 260 m, 北部约 700 m 位于南区场地范围内, 勘查深度约 为 80 m, 剖面风化层的厚度变化较大, 为 10~30 m, 普遍存在包气带; 在剖面南端探测到 2 条断层: F<sub>9</sub>和 F<sub>10</sub>。剖面 G 位于南区的西部, 方向近 NNW, 长度为 576 m, 勘查深度约为 80 m, 剖面风化层的 厚度为 10~20 m, 从南向北逐渐减薄, 解释为电阻 率火山碎屑岩中存在较低电阻率的泥页岩夹层。剖 面 H 位于南区的东部, 方向近 NNW, 长度为 380 m, 勘查深度约 150 m, 剖面风化层的厚度约 20 m, 分布较为均匀, 包气带不明显。





Fig.4 Profile interpretation of seven surveying lines in the southern part of site

南区近东西向的 4 条剖面(*C*、*D*、*E*和*F*)间的 距离为 100 m 左右。由于现场地形的起伏较大,各 电阻率剖面与近南北向各剖面相比,其风化层的厚 度变化较为明显,具体为:剖面 *C*的长度为 576 m, 勘查深度为 150 m,在距离剖面西端约 240 m 处存 在一条断层带 F<sub>8</sub>,其宽度约为 10 m,剖面风化层的 厚度从西向东逐渐减薄,普遍存在包气带。剖面 D 的长度为 700 m,勘查深度为 150 m,剖面风化层的 厚度为 10~50 m,在西部和东部各存在一个风化场 陷,剖面中部山顶处风化层的厚度最薄。剖面 E 的 长度为 580 m,勘查深度为 150 m,剖面存在两个风 化坳陷,该处风化层的厚度达 50 m,其他部位的风 化层厚度约为 20 m。剖面 F 位于南区最北部的位 置,剖面长度为 620 m,在西部、中部和中东部存在 三处明显的风化坳陷,勘查深度达 50 m,中东部的 风化坳陷与断层  $F_7$  有关,其他部位的风化层厚度约 为 20 m。

总体而言,ADS项目场地南区在剖面 A、C 和 F 处都存在断层,在其他剖面则未勘查到断层,据此 推测这4条断层没有穿过南区区域,仅在场地的边 缘处分布。

#### 4 场地稳定性评价结论

除南区外,同样使用高密度电阻率法对其他三 个区域的工程地质情况进行了勘查,得到的项目场 地稳定性评价结论如下:

(1) ADS 项目场区构造主要表现为断裂与褶 皱,除受周边板块运动的影响外,还受到该区域大地 构造演化的历史制约。场区附近发育了几条大断 裂,其对工程影响最大的为从石翁山水库到大坑口 村的一条大断裂,在断裂的东侧露头可见断层面、滑 动面和压扭面等特征。从场地地质情况来看,断裂、 节理、裂隙发育及其方向具有明显的规律性,由此表 明场地内受力情况与区域受力情况相同,即受到 NNW-SSE方向的挤压应力。正是在这种挤压应力 影响下,场区内隆起形成了山脉,但现阶段隆升的速 度较慢,构造运动逐渐趋于稳定,对场地稳定性的影 响可以忽略不计。

(2)场地南区和北区风化层厚度的变化较大, 从 10~50 m 不等;东部和西部排渣区风化层的厚 度较为稳定,为 20~30 m。北区在断层附近存在风 化层厚度较大的坳陷带,其中可能包括强风化和中 风化的地层,且其边缘可能是小断层影响带。风化 层较厚部位的上部普通存在包气带。

(3) ADS 裝置整个场地内共存在 14 条断层: 其中南区存在 4 条断层,北区存在 6 条断层,东部 排渣区存在 1 条断层,西部排渣区存在 3 条断层。 各断层的构造特征列于表 1。各个区域内断层的 产状是根据相邻正交的两组二维勘查剖面的低电 阻率带推测得到,可能会与实际揭露时有所差异。 这些断裂的长度从几十米到几百米不等,但绝大部 分都在 1 km 以内,并且只在浅部出现,以压扭性为 主,向深部闭合。因此该场地在发生远震时由于断 层引起的地震强度激励不会太大,但普遍存在的包 气带和强风化点仍需注意。此外在开挖卸荷的作 用下,部分断裂段可能会张开,影响地基的均匀性 和边坡的稳定性,因此类似这样的局部地区应予以 重视。

表 1 ADS场地断层构造特征

Table 1	Tectonic	characteristics	of	ruptures	in	the	ADS	sit
I ubic I	rectonic	chui acter istres	<b>U</b> 1	i uptui co		une	1100	510

编号	性质产状	特征	所在区域					
$F_1$	正断层,推测产状为 SE∠70°	破碎影响带宽度大于 50 m,延伸长度约 300 m						
$F_2$	正断层,推测产状为 SE∠70°	破碎影响带宽度约 100 m,延伸长度约 400 m						
$F_3$	正断层,推测产状为 SE∠70°	破碎影响带宽度大于 50 m,延伸长度约 600 m						
$F_4$	正断层,推测产状为 NEE∠70°	破碎影响带宽度小于 50 m,延伸长度约 500 m	ADS JUK					
$F_5$	正断层,推测产状为 SW ∠70°	破碎影响带宽度小于 50 m,延伸长度约 400 m						
$F_6$	正断层,推测产状为 SW∠80°,走向 NW	破碎影响带宽度大于 50 m,延伸长度约 200 m						
$F_7$	正断层,推测产状为 SW∠70°,与 F <sub>6</sub> 相连,走向 NW	破碎影响带宽度约 50 m,延伸长度约 300 m						
$F_8$	正断层,推测产状直立∠90°,走向近 SN	破碎影响带宽度小于 50 m,延伸长度不大于 200 m	ADS卤区					
$F_9$	正断层,推测产状直立/90°,走向近 NNE	破碎影响带宽度小于 50 m,延伸长度约 700 m	AD3 H E					
$F_{10} \\$	正断层,推测产状直立/90°,走向近 NNE	破碎影响带宽度小于 50 m,延伸长度约 600 m						
$F_{11}$	正断层,推测产状为 SE∠80°,与 F₃ 相连	破碎影响带宽度约 50 m,延伸长度大于 1000 m						
$F_{12}$	逆断层,推测产状为 NNW∠80°	破碎影响带宽度小于 50 m,近东西向延伸,延伸长度约 700 m	西部排渣区					
$F_{13}$	平移断层,推测产状直立/90°,走向近 NNW	破碎影响带宽度小于 50 m,近东西向延伸,延伸长度约 500 m						
$F_{14}$	逆断层,推测产状为 NNW∠80°	破碎影响带宽度约 50 m,延伸长度大于 500 m	东部排渣区					

(4)从历史地震及邻近地震影响场分析,对场 区造成很大破坏的可能性不大。据地震危险性分析,场区地震基本烈度为 VI 度,其上覆松散层较 厚,易于柔塑变形,虽有放大作用,但抗震设计足以 抵御这些放大作用,因此发生地震的结构风险不大。

#### 5 结论和建议

本研究采用高密度电阻率法,综合已有的地质 和水文资料对 ADS 项目位于广东省惠州市装置场 地的稳定性情况进行调查,得出如下结论: (1)高密度电阻率 CT 在场地评价中具有明显的优势:野外作业时间短,采集数据信息量大,数据处理结果以图像的形势表现,直观且易于解释,并且对电性差异大的地质体有很好的分辨率。

(2)施工前如果能以其他方法(如钻探手段配合)准确定位剖面位置和方向,则能更好地对物探结果与钻孔资料进行对比,从而取得更好的勘察结果。

(3) 这次测距的网格大小为 20 m×15 m,如能 加密则评价效果更好。

(4)着重对断层的地震效应进行了评价,认为 其在 VI 度区影响不大,但局部点仍需加以重视。

该方法可作为类似国家重大工程项目选址时对 场地安全性评价的参考,但还需进一步研究。

致谢:感谢郭安宁研究员和柳煜高级工程师对 本文提出的宝贵修改意见!

参考文献(References)

[1] 张赛珍,王庆乙,罗延钟.中国电法勘探发展概况[J].地球物理 学报,1994,37(增刊1):408-424.

ZHANG Saizhen, WANG Qingyi, LUO Yanzhong. An Overview on the Development of the Electrical Prospecting Method in China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994, 37 (Supp1); 408-424.

[2] 何继善.电法勘探的发展和展望[J].地球物理学报,1997,40 (增刊1):308-316.

HE Jishan.Development and Prospect of Electrical Prospecting Method[J].Chinese Journal of Geophysics, 1997, 40(Supp1): 308-316.

- [3] 底青云,王妙月,严寿民,等.高密度电阻率法在珠海某防波堤 工程中的应用[J].地球物理学进展,1997,12(2):79-88.
  DI Qingyun,WANG Miaoyue,YAN Shoumin, et al. The Application of the High Density Resistivity Method for the Seawaveproof Dam in Zhuhai-harbour [J]. Progress in Geophysics, 1997,12(2):79-88.
- [4] 底青云,石昆法,王妙月,等.CSAMT 法和高密度电法探测地 下水资源[J].地球物理学进展,2001,16(3):53-57,127.
  DI Qingyun, SHI Kunfa, WANG Miaoyue, et al. Water Resources Exploration with CSAMT and High Density Electric Resistivity Method[J].Progress in Geophysics, 2001,16(3): 53-57,127.
- [5] 底青云,王妙月,许琨,等.电阻率成像在堤坝勘察中的应用 [J].工程地质学报,2002,10(1):74-77.

DI Qingyun, WANG Miaoyue, XU Kun, et al. The Application to Dam Exploration with Electical Resistivity Tomography[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(1):74-77.

[6] 底青云,王妙月.煤层上覆地层含水不均匀性电法探测的可能 性[J].地球物理学进展,2003,18(4):707-710. DI Qingyun, WANG Miaoyue. Prospecting Possibility with Electric Method for Thin Water-bearing Rock Layer Upper the Coal Layers[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(4):707-710.

[7] 底青云,伍法权,王光杰,等.地球物理综合勘探技术在南水北 调西线工程深埋长隧洞勘察中的应用[J].岩石力学与工程学 报,2005,24(20):3631-3638.

DI Qingyun, WU Faquan, WANG Guangjie, et al. Geophysical Exploration over Long Deep Tunnel for West Route of Southto-north Water Transfer Project [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3631-3638.

- [8] 黄晓容.矿井高密度电法在充水岩溶裂隙探测中的应用[J].矿 业安全与环保,2014,41(5);56-58,68.
   HUANG Xiaorong. Application of Mine High-density Resistivity Method in Detection of Water-filled Karst Fissures[J].Mining Safety & Environmental Protection,2014,41(5):56-58,68.
- [9] 冷元宝,黄建通,张震夏,等.堤坝隐患探测技术研究进展[J].
   地球物理学进展,2003,18(3):370-379.
   LENG Yuanbao, HUANG Jiantong, ZHANG Zhenxia, et al.

Research Progress in Scatheless Detection of Hidden Troubles in Embankments[J].Progress in Geophysics,2003,18(3):370-379.

- [10] 马文涛,文江泉,高密度电法在云桂铁路路基岩溶注浆检测的应用[J].铁道标准设计,2015(4):35-37.
   MA Wentao, WEN Jiangquan. Application of High Density Resistivity in Testing Karst Grouting in Yun-Gui Railway Subgrade[J].Railway Standard Design,2015(4):35-37.
- [11] 宋文鹏,杜文秀.高密度电法在白云西矿地下水勘探中的应用
   [J].矿业工程,2015,13(3):12-14.
   SONG Wenpeng, DU Wenxiu. Application of High-density
   Resistivity Method in Groundwater Exploration of Baiyun
   Western Mine[J].Mining Engineering,2015,13(3):12-14.
- [12] 吴小洁,张前,陈长亮,等.综合电法勘探在五指山地区找热矿水中的应用[J].工程地球物理学报,2015,12(3):348-353.
  WU Xiaojie,ZHANG Qian,CHEN Changliang,et al. The Application of Comprehensive Electrical Prospecting to Exploration of Thermal Mineral Water in Wuzhishan Area[J].Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2015, 12(3): 348-353.
- [13] 肖乐乐,魏久传,牛超,等.掘进巷道构造富水性电法探测综合应用研究[J].煤矿开采,2015,20(3):21-24.
  XIAO Lele, WEI Jiuchuan, NIU Chao, et al. Comprehensive Application of Electrical Surveying Watery Property of Tectonic in Driving Roadway[J].Coal Mining Technology,2015, 20(3):21-24.
- [14] 杨阳,徐海峰,李卓,等.霍林河水库渗漏检测与防渗效果分析
  [J].三峡大学学报(自然科学版),2015,37(3):11-14.
  YANG Yang,XU Haifeng,LI Zhuo, et al. Huolinhe Reservoir Seepage Detection and Anti-seepage Effectiveness Analysis
  [J].Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences),2015,37(3):11-14.

- [15] 郭秀军,贾永刚,黄潇雨,等.利用高密度电阻率法确定滑坡面研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(10):1662-1669.
   GUO Xiujun,JIA Yonggang,HUANG Xiaoyu,et al.Application of Multi-electrodes Electrical Method to Detection of Slide-face Position[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(10):1662-1669.
- [16] 杨振威,严加永,刘彦,等.高密度电阻率法研究进展[J].地质 与勘探,2012,48(5):969-978.

YANG Zhenwei, YAN Jiayong, LIU Yan, et al. Research Progresses of the High-density Resistivity Method[J]. Geology and Prospecting, 2012, 48(5):969-978.

[17] 水电水利工程物探规程:DL/T 5010-2005[S].北京:中国电力 出版社,2005.

> Code for Engineering Geophysical Exploration of Hydropower and Water Resources: DL/T 5010-2005[S].Beijing: China Electric Power Press, 2005.

\*\*\*\*

(上接第1640页)

- [14] 郭慧,江娃利,谢新生.山西交城断裂北端及中段3个大型探 槽全新世断错现象分析[J].地震地质,2012,34(1):76-92.
   GUO Hui,JIANG Wali,XIE Xinsheng. Analysis of Holocene Faulting Phenomena Revealed in the Three Trenches along the Northern and Central Jiaocheng Fault, Shanxi[J]. Seismology and Geology,2012,34(1):76-92.
- [15] 李自红,曾金艳,冉洪流.交城断裂带北段最大潜在地震发震 概率评估[J].震灾防御技术,2014,9(4):770-781.

LI Zihong, ZENG Jinyan, RAN Hongliu, Occurrence Probability Evaluation of the Largest Potential Earthquake along Northern Segment of Jiaocheng Fault Zone[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2014, 9(4):770-781.

- [16] 卢寿德,高孟潭,陈国星,等.GB17741-2005《工程场地地震安全 性评价》宣贯教材[A].北京:中国标准出版社,2006,93-107.
  LU Shoude,GAO Mengtan,CHEN Guoxing, et al.GB17741-2005 < Evaluation of Seismic Safety for Engineering Sites > Publicity Textbook[A]. Beijing: Standards Press of China, 2006,93-107.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑边坡工程技术规范: GB50330-2013[S].北京:中国建筑工业出版,2013,1-26.
   Ministry of Housing and Urban-Rural Department of the people's Republic of China. Technical Code for Building Slope Engineering: GB50330-2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2013,1-26.