

# 露天矿边坡高密度电法勘探的数据前处理及应用

赵自豪\*, 李鹏慧

(内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院, 内蒙古自治区 包头市 014010)

**摘要:** 高密度电法部分重叠勘探获得的测线数据是独立的、各测线数据之间缺乏一致性。为了保证获得最小二乘意义上的物探反演结果, 需要将这些数据校正后连接起来。为此, 本文对获得的岩石视电阻率数据进行了可靠性分析, 通过畸点剔除、分组有序聚类、最小二乘法误差校正等技术对原始数据进行了变换。通过数据映射、相对坐标变换和加权平均等方法对重叠部分进行了数据处理和拼接。最后, 以某露天矿为例, 对原始独立断面数据、处理并拼接后的长断面数据, 分别通过 Res2div 软件反演获得了物探成果图, 对物探成果图之间、物探成果图与矿山现有地质资料进行了对比, 证明经过数据处理、拼接和反演后的物探成果更准确, 更具可读性。从而证明了本文方法的有效性, 并提高了物探成果的准确性, 为露天矿边坡稳定性评估提供了技术支持。

**关键词:** 露天矿边坡; 高密度电法; 分组有序聚类; 最小二乘法; MATLAB

**中图分类号:** TD15      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2019)03-0053-07

## Research on Datum Pre-processing and Application Effect of ERI in Slope of Open Mine

Zhao Zihao, Li Penghui

(School of Mine and Coal, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

**Abstract:** The data of the survey lines obtained from overlapped ERI exploration is independent and lack consistence between related data. To ensure the inversion results are optimal in means of least-squares, these data should be connected after being corrected. For this reason, this paper analyzes the reliability of apparent resistivity of obtained datum, applies a series of operations such as anomalous datum erasing, orderly grouping cluster, and least-square error correction to transfer the original data. After that, the overlapped part of these data are processed and connected with operations such as datum mapping, relative coordinate transformation and weighted average. At last, take some open pit mine as an example, the data of some original independent sections and the data of long sections being disposed and connected are inversed with a software named Res2div, respectively producing the resultant map of geographical exploration of both of them. These figures are contrasted with one another's and the existing geological data, the resultant map of geographical exploration of long section figures derived from data processing, connecting, and reversing can be proved more accurate and readable. Therefore, this paper draws a conclusion that this method is evaluable, with it, the accuracy of geographical exploration is improved, the technical support about slope stability assessment of open pit mine is provided.

**Keywords:** Slope of open mine; ERI; group orderly cluster; least-squares; MATLAB

我国金属和非金属矿山的开采以露天开采为主,占这类矿山总数的80%以上.而滑坡事故严重地威胁着露天矿的安全生产,据国家安监局统计,因为边坡滑塌造成的人员伤亡占矿山事故总数的40%以上.近年来,中国露天矿边坡事故频发,安全形势严峻.国家安监局要求,边坡高度200 m以上的露天矿山高陡边坡、堆置高度200 m以上的排土场、三等及以上等级的尾矿库,必须进行在线监测、定期进行稳定性分析.以高密度电法为主的物探法,在探明边坡内地质灾害源分布,为露天矿边坡稳定性评估提供技术支持等方面,发挥了重要的作用<sup>[1-5]</sup>.同时,该方法在尾矿堆坝、滑坡体、路堑和自然边坡等的地质勘查方面也有所应用,并且取得了很好的效果.

目前,为了提高高密度电法勘探反演成果的精确度,在事前的数据处理、事中的反演方法优化和事后的反演成果精确解读等方面,国内外做了很多的研究.Andy Anderson Bery等人采用不同的高密度电法装置形式,对同一地区进行了探测,采用多数据联合反演的方法,提高了反演地质成果的精度<sup>[6]</sup>.纪宏金、沈雁鸿等提出了高密度电法探测数据在畸点去除、分组有序聚类基础上的重叠测线校正和连接技术,保证了数据的一致性和连续性<sup>[7,8]</sup>.薛园兵等人利用了有限元法进行了山谷、山脊等地形的模拟,讨论了不同地形对剖面视电阻率的影响,并提出了利用保角变换、比值法等各种不同的方法对地形进行校正的方法,并给出了3D有限元算法<sup>[9]</sup>.张桃荣等人在传统方法的基础上,提出了Delaunay三角化算法,使地形影响的去除和实际地形的模拟更加灵活<sup>[10]</sup>.郑明新等人在反演的过程中,利用了Ansys有限元模拟软件,对各种探测装置进行了正演模拟,从理论上分析出了空洞等地质体对反演结果的影响程度<sup>[11]</sup>.Vladimír Chalupa等人则采用了多种地球物理勘探手段,对同一边坡进行了综合物探,各种方法互相对照,提高了目标地质体的辨识度<sup>[12]</sup>.

以高密度电法中常用的温纳法为例,获得的地质剖面为倒三角形,越往深部数据越少.在工程实践中,为了克服这一缺陷,多个不同的测线往往进行部分重叠排列,以期获得某一深度内的连续数据.理论上,重叠部分的数据由于是测量的同一个区域的视电阻率,地质情况完全相同,数据也应该完全相同.但在实际测量中,由于仪器误差、外界干扰以及其他一些随机因素的影响下,两者之间存在不可消除的误差,因此需要对数据进行校正,目标是让误差达到极小.校正后的数据仍旧不会完全相同,并且存在不同区域探测次数不同的问题,因此存在连接方法的选择问题.纪宏金、沈雁鸿等人针对这些问题提出了一套解决方法,但在分组有序聚类的分组选取原则、数据连接时二次以上的多次重叠区的数据处理等问题未提及或未做深入探讨<sup>[7,8]</sup>.本文拟针对这些问题,在纪宏金等人的研究基础上,对测线数据的分组校正,连接和反演进行深入探讨,并展示在露天矿边坡物探中的使用效果.

## 1 方法原理

### 1.1 分组有序聚类

高密度电法勘探时,浅部数据噪声大,电阻率的变化也大,反应表层的地电情况.深部数据则相反.对边坡的力学分析表明,在坡顶、坡面和坡脚部位受力状态存在显著差别,由此引起的边坡内破碎带分布具有对应关系.因此,对数据的校正需要分组进行.

此处勘探数据层位关系的顺序是不能打乱的,分组时必须在保证层位顺序基础上结合聚类分析进行.常用的分组有序聚类算法是Fisher法,其分组原则是:组内数据的离差平方和尽可能小,组与组之间的离差平方和尽可能大<sup>[13-15]</sup>.该方法的步骤如下:

#### 1.1.1 求取每层数据的离差平方和

用 $L_1, L_2, \dots, L_k$ 表示每一层的数据.用 $\mathbf{R}_{(i)}^{(l)}$ 表示 $L_l$ 中的第 $i$ 个数据,此处, $\mathbf{R}_{(i)}^{(l)}$ 可以表征多维向量,本文中仅用来表征视电阻率. $n_l$ 表示 $L_l$ 中的数据个数, $\bar{\mathbf{R}}^{(l)}$ 是 $L_l$ 的重心,在本次勘测中,重心取该行数据的中位数. $L_l$ 中数据的离差平方和为

$$S_l = \sum_{i=1}^{n_l} (\mathbf{R}_{(i)}^{(l)} - \bar{\mathbf{R}}^{(l)}) (\mathbf{R}_{(i)}^{(l)} - \bar{\mathbf{R}}^{(l)})^T. \quad (1)$$

1.1.2 计算最小损失函数矩阵

将  $k$  层数据根据离差平方和进行有序样品聚类,按从浅到深进行分组,很显然,最少分成一个组,最大可以分成  $k$  个分组,设某一分组  $G$  包含从  $i$  到  $j$  层数据.

用  $D(i,j)$  表示这一分组的直径,  $\bar{S}_G$  为该分组的离差平方和的均值,有

$$D(i,j) = \sum_{t=i}^j (S_t - \bar{S}_G)(S_t - \bar{S}_G)^T. \tag{2}$$

用  $b(n,k)$  表示将  $n$  个有序样品分为  $k$  类的某一种分法,  $L[b(n,k)]$  表示该分类的损失函数,记  $P(n,k)$  为是  $L[b(n,k)]$  达极小的分类法.根据 Fisher 算法,有

$$\begin{cases} L[b(n,2)] = \min_{2 \leq j \leq n} \{D(1,j-1) + D(j,n)\}; \\ L[b(n,k)] = \min_{k \leq j \leq n} \{L[P(j-1,k-1)] + D(j,n)\}. \end{cases} \tag{3}$$

根据式(1)~式(3),计算出针对  $k$  个不同层深的均值和方差进行不同分组的最小损失函数矩阵.

1.1.3 根据损失函数变化趋势图确定分组个数

画出损失函数  $L[P(1,k)]$  随  $k$  变化的趋势图,典型的变化趋势图如图 1 所示.

从图 1 可以看出,损失函数拐点位于 4~6 处.根据尽量少分组的原则,此处一般取 4,即分为 4 类为最优.

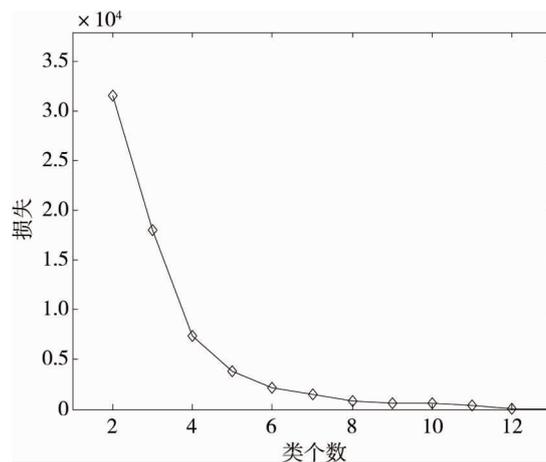


图 1 损失函数变化趋势

1.1.4 根据最小损失函数矩阵确定分点

查上面计算出的最小损失函数矩阵可以获得相应的分点,假如  $k=14$ ,分点为(3,5,11).即可得出对应的 4 个分组,分别为:  $\{L_1 \sim L_2\}, \{L_3 \sim L_4\}, \{L_5 \sim L_{10}\}, \{L_{11} \sim L_{14}\}$ .

1.2 最小二乘法分组校正

假定某两个排列重叠部分的视电阻数据集分别  $R_i$  和  $R'_i$ , 以  $R_i$  为基准,则两者之间存在如下关系:

$$R_i = a_i R'_i + b_i, i = 1, 2, \dots, l. \tag{4}$$

式中:  $a_i, b_i$  为待定值,分别称为系统的放大系数和基台系数.若将重叠部分的电阻率数据的方差和均值分别标记为  $SR_i, MR_i$ , 则

$$SR_i = a_i SR'_i, i = 1, 2, \dots, l. \tag{5}$$

$$MR_i = a_i MR'_i + b_i, i = 1, 2, \dots, l. \tag{6}$$

以相邻的 4 个剖面最小二乘法分组误差校正为例.由于这 4 个相邻的测线依次直线排开,可以把重叠部分编号为 1,2,3.对以上 3 个重叠部分根据有序聚类原理进行分组,假定分组情况为(4,3,3),即重叠 1 分为 4 组,重叠 2 分为 3 组,重叠 3 分为 3 组.以第一条测线为基准测线,以记号  $SR_{ij}, SR'_{ij}$  表示第  $i$  个重叠

区域的第  $j$  组的两条测线上的数据的电阻率的标差,构建如下向量和矩阵:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= (a_1, a_2, a_3)^T; \\ \mathbf{C} &= (-SR_{11}, -SR_{12}, -SR_{13}, -SR_{14}, 0, \dots, 0)^T; \\ \mathbf{K}_1 &= \begin{bmatrix} -SR'_{11} & 0 & 0 \\ -SR'_{12} & 0 & 0 \\ -SR'_{13} & 0 & 0 \\ -SR'_{14} & 0 & 0 \\ SR_{21} & -SR'_{21} & 0 \\ SR_{22} & -SR'_{22} & 0 \\ SR_{23} & -SR'_{23} & 0 \\ 0 & SR_{31} & -SR'_{31} \\ 0 & SR_{32} & -SR'_{32} \\ 0 & SR_{33} & -SR'_{33} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

经整理,可得到如下形式的方程组:

$$\mathbf{K}_1 \mathbf{A} - \mathbf{C} = \mathbf{E}. \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{A}$  为放大系数矩阵,此处为待求解向量;  $\mathbf{K}_1$  为 10 行 3 列矩阵;  $\mathbf{C}$  为 10 阶常向量;  $\mathbf{E}$  为误差向量.这是一组超定方程,可以按最小二乘法准则,求取使  $\mathbf{E}$  达到最小时  $\mathbf{A}$  的值,即

$\mathbf{Q} = \mathbf{E}^T \mathbf{E} = (\mathbf{K}_1 \mathbf{A} - \mathbf{C})^T (\mathbf{K}_1 \mathbf{A} - \mathbf{C})$  达到极小.令  $\partial \mathbf{Q} / \partial \mathbf{A} = 0$ , 得方程组:

$$\mathbf{K}_1^T \mathbf{K}_1 \mathbf{A} = \mathbf{K}_1^T \mathbf{C}. \quad (8)$$

其解为

$$\mathbf{A} = (\mathbf{K}_1^T \mathbf{K}_1)^{-1} \mathbf{K}_1^T \mathbf{C}. \quad (9)$$

同理,构建如下向量和矩阵:

$$\mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} -MR'_1 & 0 & 0 \\ MR_2 & -MR'_2 & 0 \\ 0 & MR_3 & -MR'_3 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{P} = (-MR_1, 0, 0)^T;$$

$$\mathbf{B} = (b_1, b_2, b_3)^T;$$

经整理,可得如下形式的方程组:

$$\mathbf{K}_2 \mathbf{A} - \mathbf{P} - \mathbf{B} = \mathbf{F}. \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{B}$  为基台系数矩阵,此处为待求解向量;  $\mathbf{K}_2$  为 3 行 3 列矩阵;  $\mathbf{P}$  为 3 阶常向量;  $\mathbf{F}$  为误差向量.这是一组适定方程,取  $\mathbf{F} = 0$ , 则可以求出  $\mathbf{B}$  的解为

$$\mathbf{B} = \mathbf{K}_2 \mathbf{A} - \mathbf{P}. \quad (10)$$

将 4 条测线中的第 2~4 条所有数据按式(4)换算,即完成了测线的校正工作.当测线数量大于 4 时,可以利用同样的原理构建方程,求解放大系数和基台系数,并进行校正<sup>[7,8]</sup>.另外也可以指定任何一条测线做基准测线,原理和方法不再赘述.

### 1.3 数据拼接

为了获得长测线的连续电阻率分布图,需要将各个子剖面连接起来,常用的方法有两种.一种是先用各测线的数据分别反演出地电模型的电阻率分布,然后用数据连接软件进行连接.另外一种是将各测线的数据连接,然后将连接起来的数据进行整体反演,获得总体地电模型的电阻率分布.从反演原理上分析可知,第二种方法获得的结果精度更高,可信度更好.本次数据处理采用了第二种方法.

以第一剖面的第一个电极所在位置为原点,将所有剖面数据的位置投射到  $ij$  坐标体系.用  $F_n$  表示重叠次数为  $n$  的区域,  $n = 1 \sim 4$ ,  $i$  表示每一个数据的空间位置,  $R_n(i)$  表示在位置  $i$  处第  $n$  个重叠剖面上的对应数据.则数据拼接的计算公式为

$$R(i) = \frac{1}{n} \sum_{1}^n R_n(i), i \in F_n. \quad (11)$$

#### 1.4 实施步骤

本文中有序聚类、分组误差校正和数据连接部分在 MATLAB 软件中进行.反演采用了 Res2dinv 软件.主要工作和流程如下:

- 1) 使用 MATLAB 编程的方式将 Duk\_2b 的文件格式转换为 Res2dinv 支持的格式.
- 2) 将数据映射到 MATLAB 矩阵,具体映射规则如下:

$$\begin{cases} M_c = \frac{R_x}{l}; \\ M_R = \frac{2R_y}{l}. \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $M_c$  和  $M_R$  分别代表 MATLAB 中矩阵的列和行;  $R_x$  和  $R_y$  分别代表温纳法测量数据的横坐标和纵坐标;  $l$  为相邻电极的间距,一般取整数.

3) 取出相邻两个断面的重叠部分.将相邻断面的 MATLAB 矩阵,根据相对位置,在矩阵左侧或右侧增加  $n$  列的全 0 数据,其中  $n$  等于 2 倍的每次移动的电极个数.取修改后的矩阵的交集.

4) 以第一个断面为基准断面,取其交集部分的非零数据,按行求取均值和方差.根据均值和方差构成的矩阵,进行分组有序聚类.

5) 根据分组结果,求出每组的方差和整体的均值,构建相应的矩阵.根据最小二乘法求解放大系数和基台系数,然后进行各断面的校正.

6) 数据的合并.对校正后的断面数据,以第一个断面为基准,进行左侧或(和)右侧加 0 操作后,根据重叠区数据的处理规则,求取数据的合集.

7) 将数据的合集、并集等相关数据按照第二步的映射规则写回 Res2dinv 数据文件,在 Res2dinv 软件里面进行反演.直观观察数据处理效果<sup>[16]</sup>.

## 2 工程应用

### 2.1 工程概况

某露天矿为磁铁矿、赤铁矿并伴有多种稀土元素的国有大型露天金属矿.边坡台阶高度为 16 m,每 4 个台阶进行并段,并段后保留有清扫平台,上下两平台高差为 64 m.该矿断裂系统十分发育,局部富水性好,自 2010 年至今,矿坑南帮及西南帮多次发生滑坡,对矿山的安全生产构成了巨大的威胁.

为了搞清楚边坡内的构造、水、裂隙等情况,对该矿进行了以地质雷达和高密度电法为主的综合物探.由于露天矿一侧为高边坡,一侧为矿坑的地形特殊性,测线只能沿清扫平台布置.

高密度电法测量时选用了重庆地质仪器厂生产的 DUK-2B 系统,具体测量参数如表 1 所示.

表 1 高密度电法测量参数

参数名称	参数取值	参数名称	参数取值
电极总数 $n$	60	电极间距 $l$	5 m
最小隔离系数	1	最大隔离系数	19
测量方法	温纳/微分	测线重叠程度	3/4

由于台阶高度为 64 m,采用 3/4 测线重叠测量,理论上全覆盖深度为 70 m,达到了勘测的要求.在数据处理时,为了简化数据处理流程,舍弃了 70 m 以下的的数据.

在本次勘察中,每条测线对应的断面有 570 个数据,位于 19 个不同的层深,每层的数据从上到下逐渐减少.以温纳法为例,由于高密度电法的勘探原理所限,每一条测线获得的最大地电断面为倒三角形,其长度: $L=(n-4)l$ ,高度: $h=(n/3-1)l$ ( $n$  为电极总数; $l$  为相邻电极的间距).所以为了获得探测区域的连续数据,需要根据探测深度,以相邻测线重叠排列的形式进行测量,常用的重叠形式有 1/2 重叠和 3/4 重叠,本次勘探采用 3/4 重叠,覆盖次数如图 2.在实际施工中,由于总电极 为 60 个,每条新测线在上一条测线的基础上,前移 15 个电极.两相邻测线重叠区域有 315 个数据,位于 14 个不同的层深.

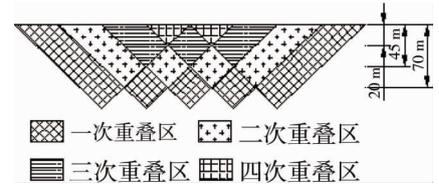


图 2 测线特征

在本次测量中,舍弃了 70 m 以下的的数据,所以不存在 70 m 以下相邻三角区域之间的空白区的填补问题.如图 2 所示,由于采用了 3/4 重叠的测量方式,每一条长测线均存在无重叠、两剖面重叠等四种情况.

### 2.2 校正效果分析

为了直观的对比较正效果,取断面 88 和断面 90、校正后的断面 90 重叠部分的数据,单独在 Res2dinv 中进行反演.得到的图像如图 3 所示,图 3 中,色标反映的是反演出来的岩石的电阻率,颜色的深浅程度代表电阻率的高低,黑色部分电阻率最高,白色部分电阻率最低,具体数据不再赘述.整体来看,3 个子图中,电阻率的整体变化趋势是一致的,说明虽然存在误差,但均能整体反应地电分布的概貌.比较断面 88 部分和断面 90 部分,由于色标不一致,同一种颜色所代表的反演电阻,电阻率数值相差约 20%左右.比较左右两侧高阻区的梯度,可以看出断面 88 部分的明显小于断面 90 部分.这与 MATLAB 计算过程中发现的方差和均值的变化趋势一致.对比断面 90 部分和校正的断面 90 部分,发现校正后的数据色标数有一定程度减少,校正后的断面 90 部分图像上高阻区的梯度减小,其整体形状与断面 88 部分更加靠近.

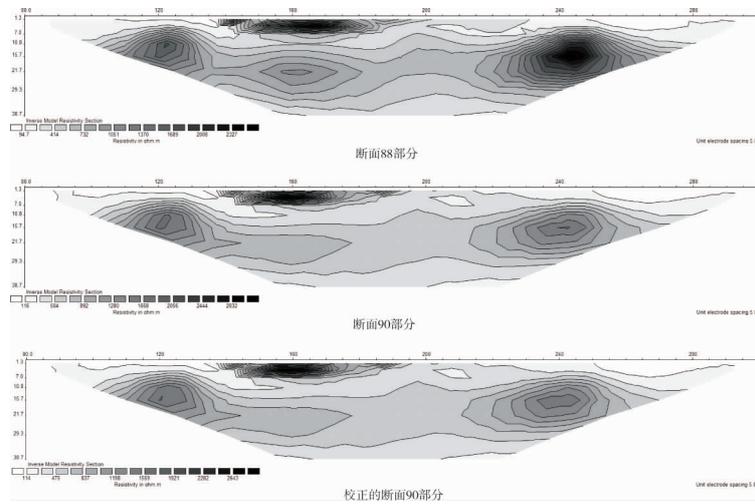


图 3 重叠部分反演图的对比

### 2.3 数据整体反演分析

为了消除由于色标不一致带来的图形理解误区,取断面 88 和 90 按前述方法进行拼接后反演,并同各独立断面的反演图进行比较,如图 4 所示.图中黑线隔出来的较大区域是对应的重叠部分.由于两个断面进行了连接后的反演,根据软件使用最小二乘反演的相关数学理论,其结果并非两个断面的简单叠加.可以看出,两断面连接后的反演图相对于断面 88 部分和断面 90 部分而言,原来独立断面的高阻区被削弱,在原来相对电阻比较低的地方出现了一个新的高阻区,整体反演误差下降了约 20%.通过现场采样和地调,并结合矿山原有的地质资料,可知,两断面所在区域均为白云岩,由于曾经为运输道路,有铁矿粉等低阻矿物被撒布在道路表面.在风化、车辆碾压、降雨等的作用下,道路有裂隙产生,导致矿粉、黏土等逐渐深入到裂隙内部,产生左右两侧类似于含水断层的电阻特征.由于温纳法对裂隙和断层不敏感、通过对比微分法断面和现场的踏勘资料,确定了这些裂隙的存在.

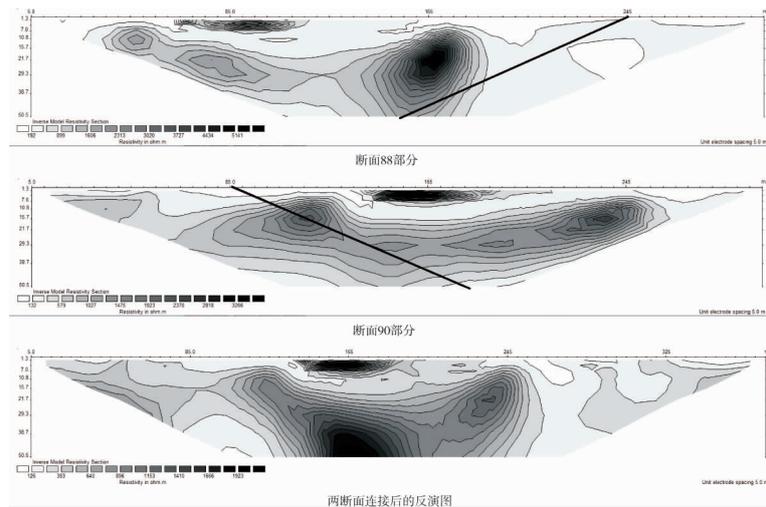


图4 数据拼接前后反演图的对比

### 3 结论

1) 分组有序聚类基础上的最小二乘法校正,能够在兼顾不同层深数据基础上达到数据的相似度整体最优,同边坡受力分析的分布结果高度契合,有利于实现物探数据同边坡安全评估的对接。

2) 数据连接后的联合反演,能够消除单独反演时由于色标不一致而造成的认知误差,能够从总体上提供更加详实直观的地电断面信息。

3) 数据的联合反演,使反演程序能够在更大的范围内实现反演结果的最优化,最大程度地减少了虚假异常的存在,使结果更加可靠。

### 参考文献:

- [1] 蒋权.基于 Slide 的某露天矿边坡整治及其稳定分析[J].矿业工程研究,2017,32(1):44-49.
- [2] 杨天鸿,张锋春,于庆磊,等.露天矿高陡边坡稳定性研究现状及发展趋势[J].岩石力学,2011,32(5):1437-1438.
- [3] 温学飞,何滔,孟海东,等.基于综合物探法的矿山土质滑坡滑动面探测[J].物探化探计算技术,2018,40(4):479-486.
- [4] 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,2014,1(10):148-151.
- [5] 尹兵祥,徐凯军,刘展.高密度电阻率法勘察技术及其应用[J].内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版),2016,45(3):338-343.
- [6] Bery A A, Saad R, Hidayah I N E, et al. Enhancement in resistivity resolution based on the data sets amalgamation technique at Bukit Bunuh, Perak, Malaysia[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2015, 23(1): 012009.
- [7] 纪宏金,时艳香,代永刚,等.基于边界极限原理的多图幅系统误差校正方法[J].物探化探计算技术,2005,1(2):154-155.
- [8] 沈鸿雁,李庆春.高密度电阻率法勘探长测线多排列数据连接处理[J].地球物理学进展,2008,23(6):1970-1974.
- [9] 薛园兵,李京谋,李桐林,等.带地形三维复电阻率正演研究[J].地球物理学进展,2017,32(2):781-785.
- [10] 张桃荣,雷宛,丁尚见,等.非结构化网格剖分技术在起伏地形下直流电阻率法反演成像中的应用[J].勘察科学技术,2019(2):61-64.
- [11] 郑明新,张永伟,陈养强,等.基于数值模拟的地下空洞高密度电法分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2014,29(3):33-36.
- [12] Chalupa V, Pánek T, Táborský P, et al. Deep-seated gravitational slope deformations controlled by the structure of flysch nappe outliers: Insights from large-scale electrical resistivity tomography survey and LiDAR mapping[J]. Geomorphology, 2018, 321: 174-187.
- [13] 余翔,白友良,李成,等.多维有序聚类法在地质数据分类中的应用[J].计算机应用,2015,35(s1):152-155.
- [14] Hazreek Z A M, Nizam Z M, Aziman M, et al. Mapping on Slope Seepage Problem using Electrical Resistivity Imaging (ERI)[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2018, 995(1): 012091.
- [15] 任雪松,于秀林.多元统计分析[M].北京:中国统计出版社,2011.
- [16] Clever Moler.Experiments with Matlab[M].北京:北京航空航天大学出版社,2015.