

基于高密度直流电法的五点三次平滑法与五点直线滑动平均法去噪方法的对比研究

路天昊^{1,2}

¹中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 河北 廊坊

²中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京

收稿日期: 2023年7月30日; 录用日期: 2023年9月6日; 发布日期: 2023年9月14日

摘要

高密度电阻率法作为电法勘探的一种方法, 其布设方式简单, 仪器易于操作, 成本低, 解释简便等优点, 在水文地质勘探以及工程地质勘探等方面有着广泛的应用, 获得了显著的效果。然而在高密度电阻率法野外采集数据的过程中, 由于仪器设备、人为操作以及工区环境噪音等众多因素, 造成获得的数据中含有各种噪音, 使得通过反演获得的电性结构模型与实际的地下结构有着很大的偏差。因此本次研究以在内蒙古自治区呼伦贝尔市扎兰屯市大河湾镇附近采集的高密度电阻率数据为例, 由于浅部含有的随机噪音较多, 因此通过MATLAB编写五点三次平滑法和五点直线滑动平均法的程序, 并利用程序对采集到的原始数据进行去噪, 然后采用RES2DINV软件对两种去噪方法获得的数据以及原始数据分别进行反演, 并与原始数据反演结果进行对比。结果表明经过五点三次平滑法去噪获得的数据能够有效地消除干扰, 使获得的电性结构模型在水平方向上的分层更加清晰连贯, 并且总体上不会改变电阻率的分布特征, 有助于自然资源地表基质垂向结构特征的研究。

关键词

高密度电阻率法, 随机噪音, 五点三次平滑法, 五点直线滑动平均法

Comparative Study on Denoising Methods of 5.3 Smoothing Method and Linear Moving Average Method Based on High Density Current Method

Tianhao Lu^{1,2}

¹Langfang Comprehensive Investigation Center of Natural Resources, China Geological Survey, Langfang Hebei

²School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing

文章引用: 路天昊. 基于高密度直流电法的五点三次平滑法与五点直线滑动平均法去噪方法的对比研究[J]. 自然科学, 2023, 11(5): 854-863. DOI: 10.12677/ojns.2023.115102

Abstract

As a method of electrical prospecting, the high-density resistivity method has the advantages of simple layout, easy operation of instruments, low cost, and easy interpretation. It has been widely used in hydrogeological prospecting and engineering geological prospecting, significant effect. However, in the process of collecting data in the field by the high-density resistivity method, due to many factors such as equipment, human operation, and environmental noise in the work area, the obtained data contains various noises, which makes the electrical structure model obtained by inversion different from the actual one. The underground structure has a large deviation. Therefore, this study takes the high-density resistivity data collected near Dahewan Town, Zhalantun City, Hulunbeier City, Inner Mongolia Autonomous Region as an example. Since the shallow part contains more random noise, the five-point cubic smoothing method and the five-point smoothing method are written by MATLAB. The program of the point-line moving average method, and use the program to denoise the collected original data, and then use the RES2DINV software to invert the data obtained by the two denoising methods and the original data respectively, and compare with the original data inversion results. Compared. The results show that the data obtained by denoising the five-point cubic smoothing method can effectively eliminate the interference, making the layering of the obtained electrical structure model clearer and coherent in the horizontal direction, and the distribution characteristics of the resistivity will not be changed in general. Contribute to the study of the vertical structure characteristics of the surface matrix of natural resources.

Keywords

High-Density Resistivity Method, Random Noise, Five-Point Cubic Smoothing Method, Five-Point Linear Moving Average Method

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高密度直流电阻率法又叫做电阻率层析成像(Resistivity Tomography)或者电成像(Electrical Imaging), 该方法是 20 世纪 80 年代从美国和日本发展起来的一种直流电阻率法。高密度直流电阻率法实际上是一种具有多种排列的常规直流电阻率电法勘探方法, 它的基本原理和常规电阻率法相同, 是以地下介质的导电性差异为基础, 通过观测和研究人工建立的地下稳定电流场的分布来查明地下地质构造和寻找地下电性异常体(风化层、岩溶、滑坡体、断层、基岩面等)的一类电法勘探方法。其优势在于可以一次性布设大量测点, 在野外测量时, 只需把所有电极布设到相应的测点上, 利用相应的采集仪器快速和自动采集数据, 并且完成数据采集后还可以在野外进行数据的实时处理, 保证了采集资料的高质量。该方法大大提高了电法勘探的工作效率, 降低了野外工作的强度, 提高了野外采集数据的质量。并且采集的大量高质量数据还有利于后期的处理解释以及电阻率层析成像的研究, 提升了高精度、小目标体的浅层勘探的准确性。因为高密度电阻率法是采用的大量电极进行地电信号的测量, 在利用高密度电阻率法进行测量时, 通过电极之间的不同组合可以采集不同深度的地电信号, 使得在利用该方法测量时可以像地震勘探

那样,采取全范围覆盖式的数据采集[1][2][3][4]。

在利用高密度电阻率法进行野外数据采集时,由于存在大量的仪器、人为操作和工区各种干扰等引起的采集数据噪音,造成数据中往往有很多的误差。对这些噪音数据如果不加以处理而是直接参与到数据反演中,得到的电性结构模型很可能是不可靠的,在解释过程中会对真实存在的异常造成误判,甚至会直接产生假异常,从而对真实异常的判断造成影响。在现存的高密度数据处理软件当中运用较多的为 RES2DINV 软件,其数据处理一般是通过手动剔除飞点后直接参与反演,没有对随机噪音数据进行平滑处理。而随机噪音的干扰主要是会造成同一采集层视电阻率曲线的不光滑,容易造成反演结果在水平层位上的不连贯[5][6]。因此本文研究的目的是对比五点三次平滑法和五点直线滑动平均法对于数据平滑效果的差异。首先对原始数据中含有的随机噪音分别使用五点三次平滑法和直线滑动法进行平滑处理,然后对比两种方法处理过的数据以及原始数据的反演结果。结果表明五点三次平滑法能够有效地压制随机噪音,且总体上不改变电性结构特征,而且在水平方向上的分层更加连贯清晰,便于后期的解释。

2. 工作区概况及野外工作内容

工作区位于内蒙古呼伦贝尔市扎兰屯市大河湾镇暖泉村附近,地势平坦,由于距离住户比较近,而且周围还有电线杆,因此对于采集到的数据可能会造成影响。本次高密度电阻率法的采集仪器为中地装(重庆)地质仪器有限公司生产的 DUK-4 高密度电法系统(如图 1),可观测视电阻率和视极化率等参数并实时形成 2D/3D 断面,具有数据密度高、观测精度高、施工效率高等特点,可广泛应用于岩溶、采空区、考古、人防工程勘察;水利水电、公路、铁路、桥梁等基础勘察;金属与非金属矿产及地下水资源勘查;滑坡、塌陷、堤防隐患等灾害地质体勘察及土壤污染范围调查等领域。经过装置试验后根据项目的目的,对比不同的装置测量结果,最终测量装置选择分层性较好的温纳装置,电极距为 5 米,电极数为 200 个。本文的研究内容主要是通过对采集的数据分别进行五点三次平滑法和五点直线滑动平均法处理,然后进行反演,将两种平滑后的数据的反演结果进行对比,来分析五点三次平滑法的优势。



Figure 1. DUK-4 high-density electrical mainframe used to collect data

图 1. 采集数据所用的 DUK-4 高密度电法主机

3. 数据采集与处理分析

3.1. 高密度电阻率法原理

高密度电阻率法与常规电阻率法相比较,其优势在于 1) 所有电极布设是一次完成的,一方面可以减少因电极布设而引起的故障和干扰等影响,另一方面还能够实现野外数据的快速和自动采集测量,大大节省了时间和工作成本。2) 用于野外采集数据的仪器可以实现自动化或半自动化,不仅大大减少了测量时间(每个测点大约需要 2 s 到 4 s),而且还能避免由于人工操作所引起的测量误差。3) 在完成采集后可以先对数据进行剔除电阻率异常值,平滑电阻率曲线等预处理,并显示预处理之后的曲线形态,从而提高反演结果的准确性。4) 与传统的电阻率法相比,野外采集数据的成本低,工作效率高,能够获得丰富的地下信息以及便于后期对于结果进行解释[7]。

在众多高密度电法的观测装置中,根据电极的布置方式可分为三种观测方式:二个电极观测(二极装置)、三个电极观测(三极法)和四个电极观测(四极法)。在实际工作中,两极装置要跑两个无穷远极,实际中采用不多;三极法中有正向三极和反向三极,实际工作中经常采用。在四个电极的观测方式中,使用较多的是对称四极装置和偶极-偶极装置[4]。

四极观测方式,一般是通过两个供电电极(A 和 B)向地下供入电流(I),在两个测量电极(M 和 N)间测量它们的电位差(ΔU_{MN}),则视电阻率和电位差满足下面的公式:

$$\rho_s = K \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad (1)$$

其中, K 是与四个电极排列方式有关的装置系数。根据地表基质调查项目的安排,此次运用高密度直流电阻率法的最终目的是探明地表基质垂向空间结构,通过装置实验最终选择分层效果较好的温纳装置进行测量。该装置的工作与数据采集示意图如图 2 所示[4]:

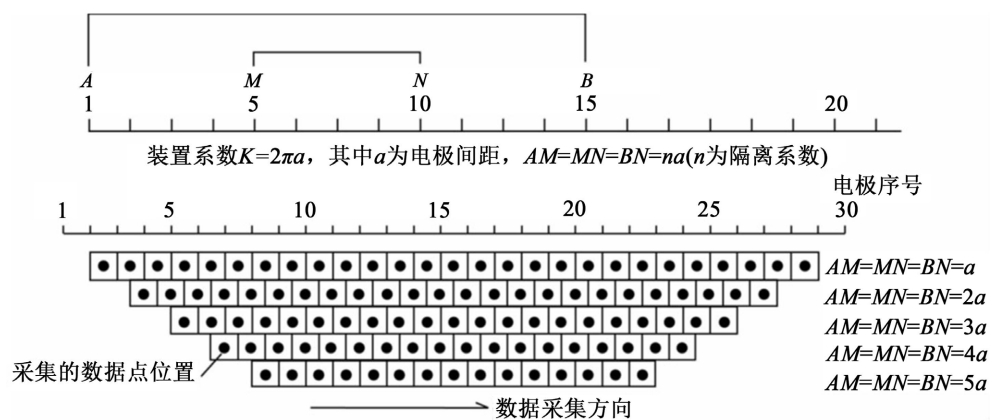


Figure 2. Schematic diagram of operation and data acquisition of Wenner device
图 2. 温纳装置工作与数据采集示意图

3.2. 高密度电阻率法噪音类型及来源

首先,在进行实测数据的去噪处理前需要知道数据中包含噪音的类型。利奕年等[8]指出野外数据采集过程中,根据产生误差的原因可以分为过失误差和偶然误差两种。过失误差的产生是由于人为错误和工作区外界干扰造成的,其特点是量值较大,并具有突变性。它所造成的视电阻率值与正常值有很大的差异,使得高密度的数据曲线有很强的不连续性,因此也可称为飞点噪音。如果不进行处理,将会造成反演得到的电性结构模型局部有假的异常区,影响对于真实的地质异常的判断。偶然误差产生的原因是

布极以及人为观测不准确造成的。其特点是具有随机性并且产生的误差比较小,造成视电阻率值在小范围内的波动,使得同一地层测出的视电阻率曲线不光滑。田必林[6]指出处理时可以通过 B_i 值的范围来判定误差的类型,当测得的 B_i 值小于 0.25 或大于 4.0 以上时可判定噪音为称为飞点噪音,当 B_i 值介于 0.25 和 4.0 之间时可判定噪音为随机噪音。 B_i 值可用下面的公式进行计算:

$$B_i = \rho_{s(i+1)} / \rho_{s(i)} \quad (2)$$

其中 ρ_s 为实测电阻率。

3.2.1. 飞点噪音

同正常的高密度电阻率曲线相比,飞点噪音对于数据的影响较大,在曲线图上易于发现,其典型特征是向上或向下的尖刺状,比较容易识别。飞点噪音产生的原因较多,在进行数据去噪时会经常遇到,通常情况下这种数据会对反演结果造成较大误差,是不可用的。如果将含有飞点噪音的数据直接参与反演,会导致局部等值线异常密集的结果,其在反演结果上表现为突变的电阻率异常曲线[6] [8]。从图 3 中红色圆圈圈出的部分可以看出该电阻率曲线有着明显的飞点噪音。对于飞点噪音在处理过程中一般可直接剔除,也可进行插值,主要的插值方法有很多种,比如数据比插值法等。

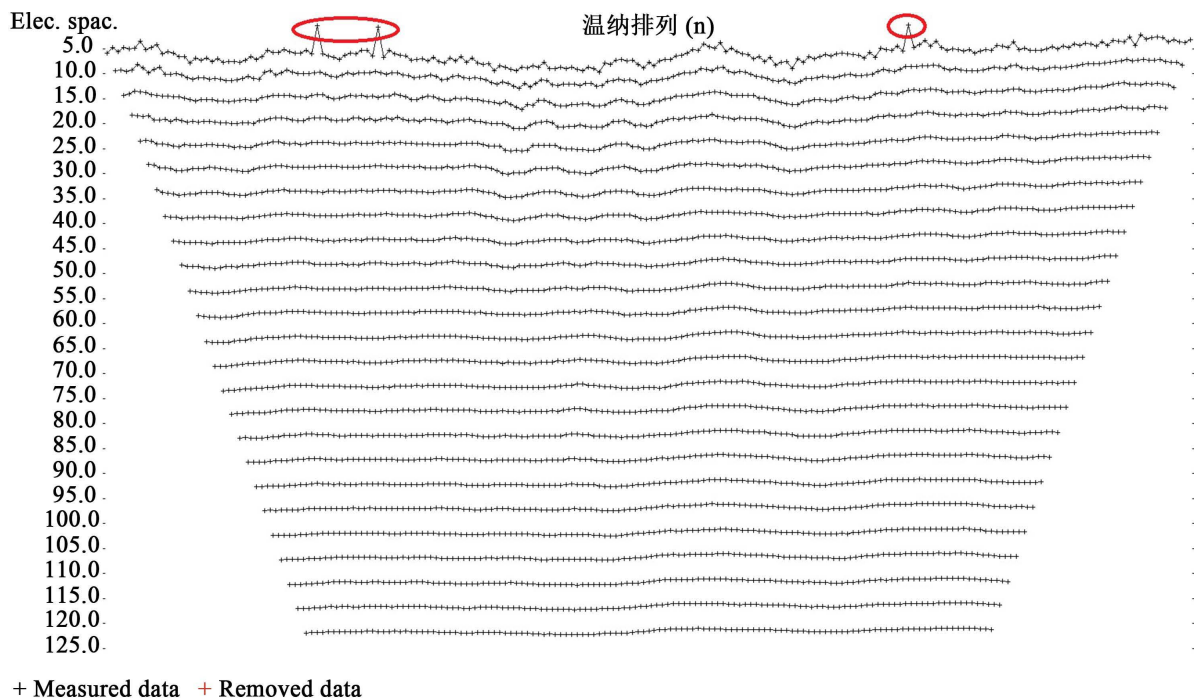


Figure 3. Contains high-density data of flying point noise and random noise, in which the red circle is flying point noise
图 3. 含有飞点噪音和随机噪音的高密度数据,其中红色圆圈部分为飞点噪音

3.2.2. 随机噪音

在高密度电阻率法曲线图上随机噪音的特征是呈上下错动的锯齿状特征,其特点是具有随机性,相对于飞点噪音来说一般情况下量值较小,通常压制其对数据的影响而采用的方法是对数据做适当的平滑处理。通过这种方法处理的数据与原始电阻率曲线的变化形态相差不大。目前在数据处理中使用较多的平滑方法有最小二乘法、五点三次平滑法、三次样条平滑法、滑动平均法等[6]。同样在图 3 中可以看出浅部的视电阻率曲线局部呈现锯齿状,表明存在随机噪音。

因此本次研究决定采用五点三次平滑和五点直线滑动平均的方法分别对其进行处理, 然后对比反演结果, 分析其差异性。从原始高密度电阻率曲线图(图 4)中可以看出除了前六层之外, 其余部分曲线较平滑, 并且从图 4 中还可以看出前六层不存在误差较大的飞点噪音, 因此本次研究没有进行数据剔除, 只针对前六层的数据直接进行平滑, 其余部分曲线变化幅度不大, 故不作处理。

3.3. 误差处理方法

3.3.1. 五点直线滑动平均法

五点直线滑动平均法主要根据某点邻近的采样点的电阻率值来对该点进行修正, 从而达到对数据进行去噪的目的。可以对邻近点作简单的平均, 也可根据需要对邻近点进行加权平均[9]。一般取 5 个邻近的数据点, 其基本计算公式为[9]:

$$\begin{aligned}
 y_1 &= \frac{1}{5}(3x_1 + 2x_2 + x_3 - x_4) \\
 y_2 &= \frac{1}{10}(4x_1 + 3x_2 + 2x_3 + x_4) \\
 y_i &= \frac{1}{5}(x_{i-2} + x_{i-1} + x_i + x_{i+1} + x_{i+2}) \\
 y_{m-1} &= \frac{1}{10}(x_{m-3} + 2x_{m-2} + 3x_{m-1} + 4x_m) \\
 y_m &= \frac{1}{5}(-x_{m-3} + x_{m-2} + 2x_{m-1} + 3x_m)
 \end{aligned} \tag{3}$$

式中 $i = 3, 4, \dots, m-2$ 。 x 为平滑之前的电阻率值, y 为平滑后的电阻率值。

3.3.2. 五点三次平滑法

五点三次平滑法的原理是利用多项式最小二乘法来逼近采样点, 是对离散数据进行三次最小二乘多项式平滑, 在等间距数值的基础上对数据进行处理的一种方法[9] [10] [11], 其计算公式为[9]:

$$\begin{aligned}
 y_1 &= \frac{1}{70}[69x_1 + 4(x_2 + x_4) - 6x_3 - x_5] \\
 y_2 &= \frac{1}{35}[2(x_1 + x_5) + 27x_2 + 12x_3 - 8x_4] \\
 y_i &= \frac{1}{35}[-3(x_{i-2} + x_{i+2}) + 12(x_{i-1} + x_{i+1}) + 17x_i] \\
 y_{m-1} &= \frac{1}{35}[2(x_{m-4} + x_m) - 8x_{m-3} + 12x_{m-2} + 27x_{m-1}] \\
 y_m &= \frac{1}{70}[-x_{m-4} + 4(x_{m-3} + x_{m-1}) - 6x_{m-2} + 69x_m]
 \end{aligned} \tag{4}$$

式中 $i = 3, 4, \dots, m-2$ 。 x 为平滑之前的电阻率值, y 为平滑后的电阻率值。

3.4. 编程实现及结果分析

五点直线滑动平均法和五点三次平滑法的程序是通过 MATLAB 进行实现的。图 4 为原始高密度电阻率曲线图, 图 5 为采用五点三次平滑法处理后的高密度电阻率曲线图, 红色圆圈部分为数据异常部分。图 6 为采用五点直线滑动平均法的高密度电阻率曲线图。从图中可以看出, 虽然五点三次平滑和五点直线滑动平均法平滑后的曲线均较原始曲线平滑很多, 但是经过五点直线滑动平均法处理过曲线图其曲线形态过于平滑, 曲线形态不明显, 相对而言, 经过五点三次平滑法平滑后的曲线较平滑, 而且较五点直

线滑动平均法相比曲线特征明显，跟原始数据的电阻率曲线形态特征相接近。本次平滑处理的两种方法迭代次数为 20 次。田必林[6]等指出在数据处理过程中进行的迭代次数越高，经过处理得到的数据就越平滑，但是过高的迭代次数虽然能让数据变得更加平滑，会影响反演结果的准确性，因此在进行平滑时要根据已知的地质资料进行分析，选取合适的迭代次数，避免得到错误的结论。

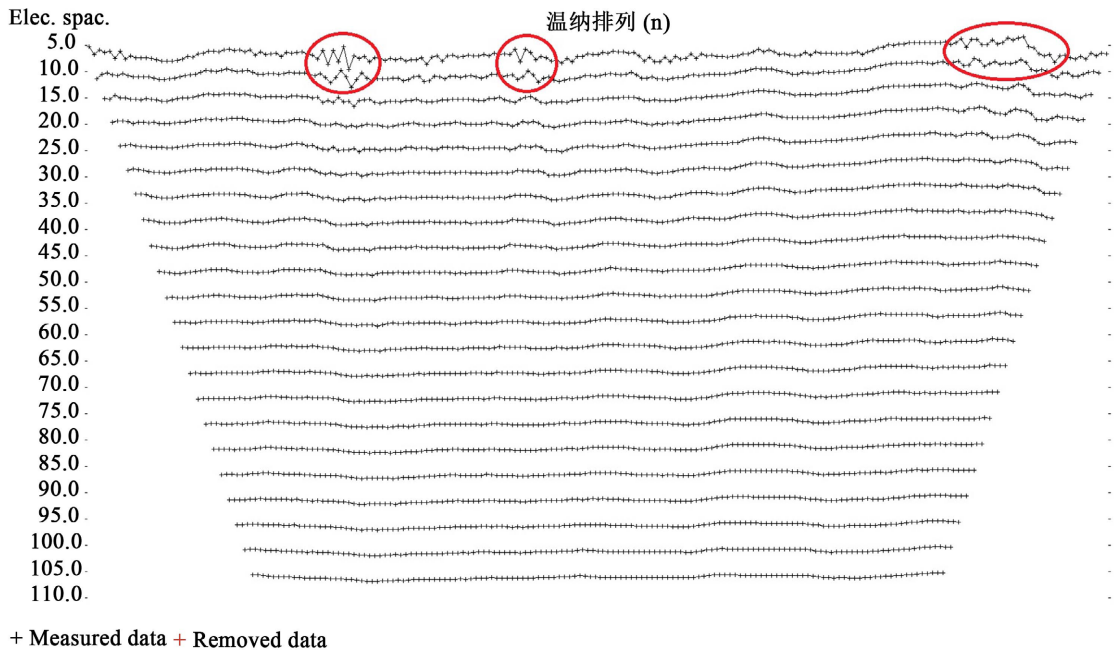


Figure 4. Original high density resistivity curve
图 4. 原始高密度电阻率曲线图

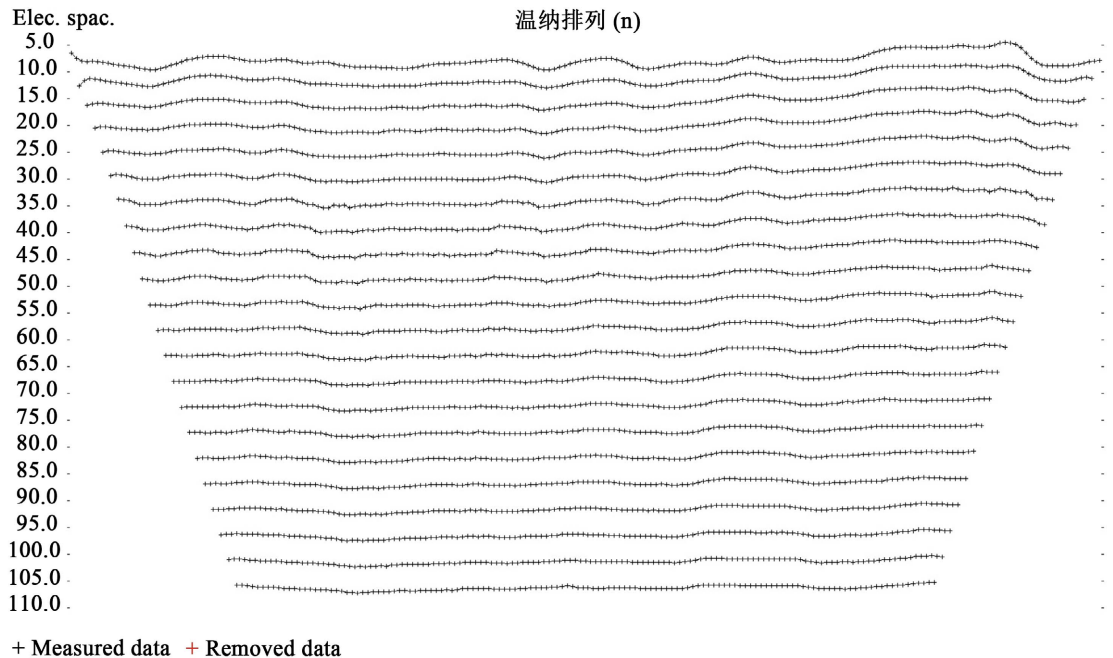


Figure 5. Resistivity curve processed by 5.3 smoothing method
图 5. 经过五点三次平滑法处理的电阻率曲线图

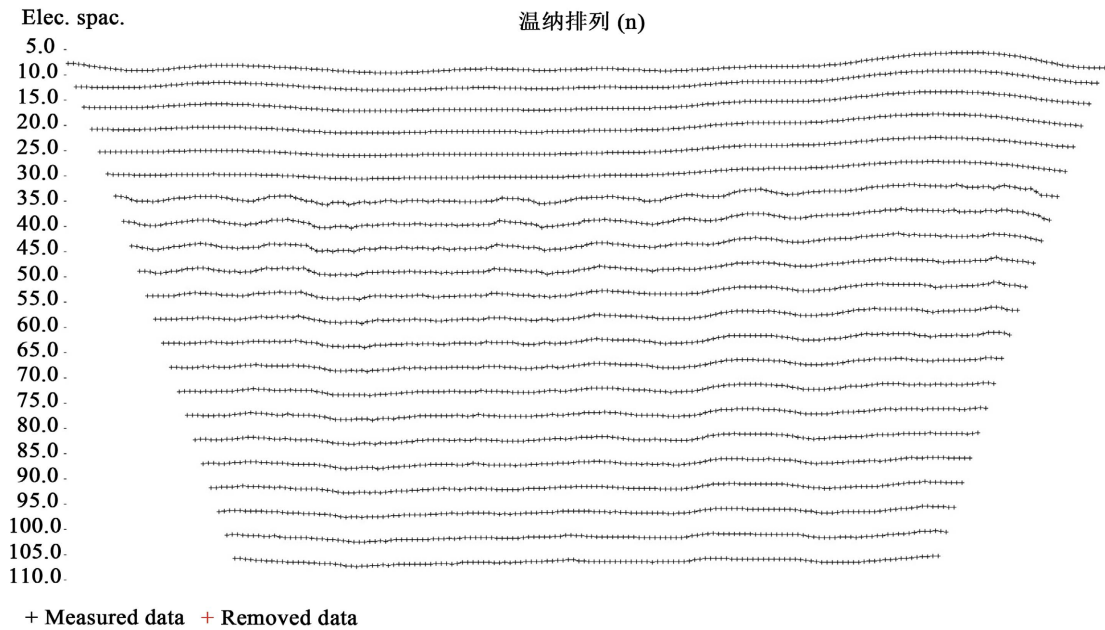


Figure 6. Resistivity curve processed by five-point linear moving average method
图 6. 经过五点直线滑动平均法处理的电阻率曲线图

针对上述原始电阻率数据和利用两种平滑方法处理的电阻率数据分别进行了二维反演，分别得到了相对应的反演结果图。反演使用软件为 RES2DINV 软件，迭代次数均为 4 次，拟合误差相接近且均小于 3%。

图 7~9 分别为原始电阻率数据反演结果图，经过五点三次平滑法处理的反演结果图和经过五点直线滑动平均法处理的反演结果图。从图中可知，6 米以上的浅层电阻率值较低，并且浅层部分大概 640 米处有高阻异常体。

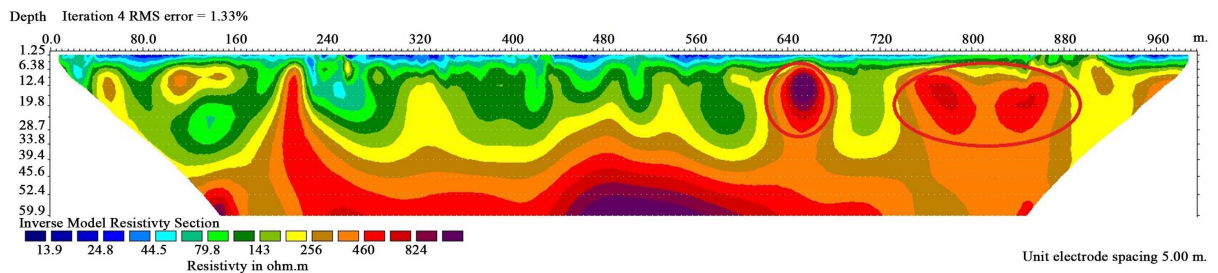


Figure 7. Inversion result chart of original data
图 7. 原始数据反演结果图

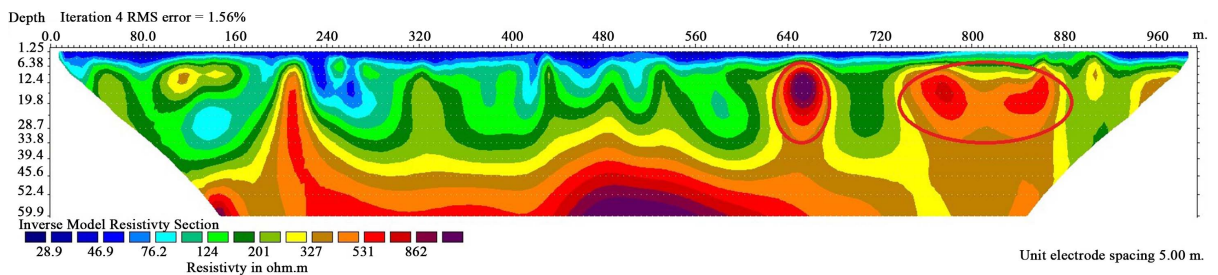


Figure 8. Inversion results processed by 5.3 smoothing method
图 8. 经过五点三次平滑法处理的反演结果图

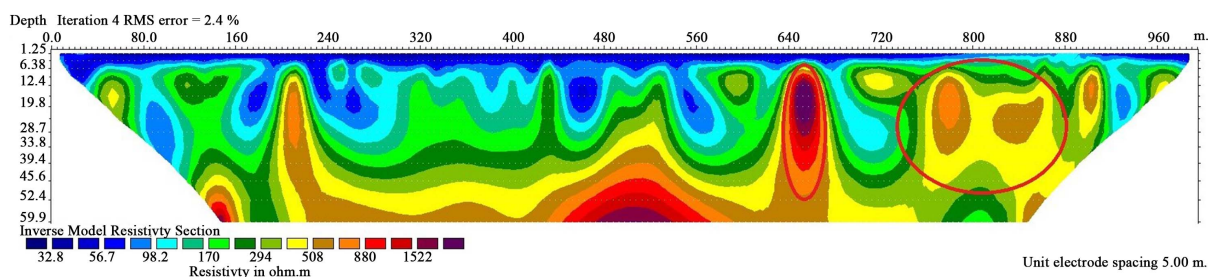


Figure 9. Inversion results processed by five-point linear moving average method

图 9. 经过五点直线滑动平均法处理的反演结果图

通过对比三种反演成果图可以看出，经过五点三次平滑法处理后的数据反演结果同原始电阻率数据反演结果对比，可以看出黑色粗线圈出的电性异常结构没有太大改变，视电阻率的变化规律和异常体的分布相差不大。五点三次平滑的反演结果更加平滑。同理从黑色粗线圈出的电性异常结构可以看出经过五点直线滑动平均法处理后的数据反演对于电阻率的分布有着明显的改变，与原始电阻率数据的反演结果有着明显的不同，异常体的分布发生了较大改变。

由图 4 红线圈出的部分可以看出浅部由于随机噪音的存在而造成视电阻率值在局部出现了呈现锯齿状的波动，因而在反演结果图中可以看出浅部的层位在水平方向上不连贯，通过对比反演结果说明五点三次平滑法对数据中含有的随机噪音影响起到了一定的压制作用，使得浅部低阻区的层位连续性较好，整体分层效果较明显，便于分析地表基质在垂向空间结构的分布特征。

4. 结论

1) 在野外采集数据过程中，由于工区以及人为各种因素的影响，高密度电阻率法数据不可避免会存在各种各样的噪音，在反演之前对数据进行噪音分析和选择合适平滑方法的预处理可以减少因噪音干扰而造成反演结果的不准确，是使得反演结果更加可靠的有效手段。

2) 高密度电阻率法数据经过剔除飞点数据和运用适当的平滑方法进行预处理之后，总体上不会改变电阻率的变化特征以及异常体的分布，并且可以较好地压制浅部由于存在误差的数据而引起水平方向上层位的不连贯，使反演结果呈现的水平分层更加连贯清晰，便于后期的解释，有助于利用物探方法分析地表基质垂向空间分布特征。

3) 对实测数据进行平滑的预处理工作在很大程度上依赖于处理人员的经验和知识，人为操作对于结果产生的影响很大。在平滑过程中除了要选择适当的平滑方法之外，平滑的程度也会影响反演结果的可靠性。平滑不足也可能无法压制在采集数据中受到的干扰，使其反演结果仍然受到影响，得出的地电模型依然是不可靠的。然而过度的平滑虽然能有效地去除干扰，使得电阻率曲线平滑很多，但是这种做法也有可能改变反演模型的电性结构，使得异常体的分布发生改变，而且还会造成一些小的异常消失，使得最终的反演结果与已知的先验信息不符。因此在进行平滑处理时要根据数据的特点以及先验信息选择合适的平滑方法进行适当的平滑，避免平滑之后产生更大的误差。

参考文献

- [1] 张静, 胡尊平, 陶鹏飞, 等. 高密度电阻率法特点及在地质灾害中的应用实例[J]. 西部探矿工程, 2022, 34(9): 138-143.
- [2] 朱咸智, 王闻文, 张振宇, 等. 高密度电阻率法在查明滑坡覆盖层厚度中的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2010, 36(7): 37-38.

-
- [3] 徐方全, 董延朋, 秦月涛. 高密度电阻率法在堤防隐患探测中的应用[J]. 地质装备, 2006, 7(4): 29-31.
- [4] 马凤山, 底青云, 李克蓬, 等. 高密度电阻率法在海底金矿含水构造探测中的应用[J]. 地球物理学报, 2016, 59(12): 4432-4438.
- [5] 李进, 王小明, 谭磊. 不同数据处理方法在高密度电法水库渗漏成像中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2022, 19(2): 141-148.
- [6] 田必林. 高密度电阻率法数据平滑处理的分析研究[J]. 工程地球物理学报, 2022, 19(5): 708-715.
- [7] 董浩斌, 王传雷. 高密度电法的发展与应用[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 171-176.
- [8] 利奕年, 罗延钟. 高密度电法视电阻率数据预处理算法[J]. 物探化探计算技术, 2006, 28(4): 328-331+285.
- [9] 孙苗钟. 基于 MATLAB 的振动信号平滑处理方法[J]. 电子测量技术, 2007, 158(6): 55-57.
<https://doi.org/10.19651/j.cnki.emt.2007.06.017>
- [10] 肖立波, 任建亭, 杨海峰. 振动信号预处理方法研究及其 MATLAB 实现[J]. 计算机仿真, 2010, 27(8): 330-333+337.
- [11] 金铮, 张行南, 夏达忠, 等. 基于多种平滑算法的三峡水库反推入库流量消噪[J]. 中国农村水利水电, 2022, 473(3): 48-53.