

文章编号: 1001—1749(2011)03—0314—04

长断面高密度电阻率数据处理解释

席景昌¹, 刘海飞², 张赛民³

(1. 山西省地球物理化学勘查院, 山西 运城 044000;

2. 中南大学 信息物理工程学院, 长沙 410083;

3. 桂林工学院 广西地质工程中心重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了提高同一测线多个相邻断面的高密度电阻率数据处理解释的效率, 这里通过将多个相邻的数据断面进行数据拼接、二维插值及反演处理, 最终输出整个断面的电阻率二维反演数据文件, 并采用 Surfer 软件绘图, 使得数据分析和解释方便快捷, 工作效率大大提高。通过对实测数据进行处理, 验证了编制的处理软件可以在实际中推广使用。

关键词: 高密度电阻率数据; 数据拼接; 二维插值; 二维反演

中图分类号: P 631.3⁺22 **文献标识码:** A

0 前言

高密度电阻率法是二十世纪八十年代日本地球物理工作者为适应山地物探的需要, 提出的一种成本低、效率高、信息丰富、解释方便且分辨力强的勘探方法。近几年, 该方法已经被广泛地应用于隧道洞身病害探测、建筑物基础检测、堤坝管涌探测、高速公路岩溶勘查、煤田采空区, 以及地下古墓探测等方面, 并且取得了良好的应用效果^[1~5]。而且随着计算机的迅速发展, 以及电阻率数值模拟和反演方法取得实质性突破, 更加证实了该方法的实用性和有效性^[6~9]。

考虑到高密度电阻率法在高速公路和铁路路基勘查过程中, 经常会遇到测线较长(几百米至几公里)的情况, 需要进行多个断面滚动连续测量, 这样将导致相邻数据断面有重叠部份和数据空缺区。因此, 在进行反演处理之前, 必须先做预处理, 如果进行人工处理, 工作量较大, 并且效率低。针对这个问题, 作者开展了长断面高密度电阻率数据处理工作。首先, 对同一测线上多个数据断面进行

拼接、二维插值, 使之成为一个长数据断面; 然后对其进行二维反演处理, 输出结果采用 Surfer 软件绘图, 方便快捷, 工作效率大大提高; 最后, 通过对实测数据进行处理, 验证了本方法的可行性。

1 数据拼接

数据拼接主要是针对两相邻数据断面重叠的部份进行处理。在实际工作中, 经常会遇到在长剖面测量中两相邻断面有数据重叠的部份, 如图1所示。为能够对长断面数据进行解释, 还要避免在重叠区域因处理不当压制异常成份, 或造成伪异常, 故先对重叠区数据取平均值, 并沿剖面方向进行五

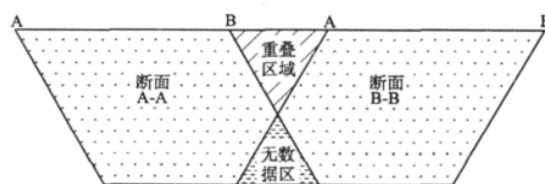


图1 两相邻数据断面衔接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of conjugation of two adjoining data section

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(200805331083); 广西地质工程中心重点实验室开放基金项目(桂科能07109011-K020)

收稿日期: 2010-11-10

改回日期: 2011-04-15

点三次平滑,使两相邻数据断面在重叠区能够平滑过渡。

2 二维插值

在实际工作当中,由于观测装置的特点,两相邻数据断面不能完全衔接,形成数据空缺区,如图 1 所示。为便于对整个长断面高密度电阻率数据进行二维反演,故对数据空缺区进行二维插值,使其形成完整的数据体。

作者所选用的插值算法为趋势面拟合加残差叠加算法^[10],其算法描述与实现过程如下:

(1) 首先构造一个由二元四次方程组成的四次趋势面,其形式为

$$\begin{aligned} f(x,y) = & a_{00} + a_{10}x + a_{11}y + a_{20}x^2 + a_{21}xy + \\ & a_{22}y^2 + a_{30}x^3 + a_{31}x^2y + a_{32}xy^2 + a_{33}y^3 + \\ & a_{40}x^4 + a_{41}x^3y + a_{42}x^2y^2 + a_{43}xy^3 + \\ & a_{44}y^4 \end{aligned} \quad (1)$$

若有 m 个已知测量值 $f(x_i,y_i)$, 其中 $i=1,2,\cdots,m$, 拟合一个四次趋势面(应有 $m \geq 15$), 可将 m 个测量值代入式(1)中,即得到由 m 个线性方程组成的一个线性方程组:

$$\begin{aligned} f(x_i,y_i) = & \sum_{k=0}^4 \sum_{j=0}^k a_{kj} \cdot x_i^{k-j} \cdot y_i^j \quad (2) \\ (i = & 1,2,\cdots,m) \end{aligned}$$

用矩阵和向量来记号,式(2)可写成:

$$D_{m \times 15} \cdot A_{15 \times 1} = F_{m \times 1} \quad (3)$$

其中 D 为一个 $m \times 15$ 阶矩阵; A 为一个待求的 15 维向量; F 为一个已知测量值向量:

$$D = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2 & x_1^3 & x_1^2y_1 & x_1y_1^2 & y_1^3 & x_1^4 & x_1^3y_1 & x_1^2y_1^2 & x_1y_1^3 & y_1^4 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_i & y_i & x_i^2 & x_iy_i & y_i^2 & x_i^3 & x_i^2y_i & x_iy_i^2 & y_i^3 & x_i^4 & x_i^3y_i & x_i^2y_i^2 & x_iy_i^3 & y_i^4 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_m & y_m & x_m^2 & x_my_m & y_m^2 & x_m^3 & x_m^2y_m & x_my_m^2 & y_m^3 & x_m^4 & x_m^3y_m & x_m^2y_m^2 & x_my_m^3 & y_m^4 \end{bmatrix}_{m \times 15}$$

$$A = [a_{00} \ a_{10} \ a_{11} \ a_{20} \ a_{21} \ a_{22} \ a_{30} \ a_{31} \ a_{32} \ a_{33} \ a_{40} \ a_{41} \ a_{42} \ a_{43} \ a_{44}]_{1 \times 15}^T$$

$$F = [f(x_1,y_1), f(x_2,y_2), \cdots, f(x_m,y_m)]_{1 \times m}^T$$

由于方程个数 m 大于未知数个数 15, 所以称式(3)为超定方程组,要对其进行求解,必须将其转换为法方程

$$D_{15 \times m}^T D_{m \times 15} \cdot A_{15 \times 1} = D_{15 \times m}^T F_{m \times 1} \quad (4)$$

由式(4)所组成的方程组为线性代数方程组,

根据方程组的特点,可选用全选主元高斯消去法对其进行求解。在求出趋势面系数向量 $A_{15 \times 1}$ 后,将其代入式(2)中,求出趋势面 $f(x,y)$ 。

在实际计算过程中,为防止数据溢出, x_i, y_i 分别用 $x_i^* = x_i - \bar{x}, y_i^* = y_i - \bar{y}, i=1,2,\cdots,m$ 代替原来的坐标值。其中 $\bar{x} = \sum_{j=1}^{k_1} \frac{x_j}{k_1}, \bar{y} = \sum_{j=1}^{k_2} \frac{y_j}{k_2}, k_1, k_2$ 分别为横向坐标和纵向坐标的个数。

(2) 求出已知点的实测值 $f(x_i,y_i)$ 与拟合值 $g(x_i,y_i)$ 的残差 $z(x_i,y_i)$, 即:

$$\begin{aligned} z(x_i,y_i) = & f(x_i,y_i) - g(x_i,y_i) \quad (5) \\ (i = & 1,2,\cdots,m) \end{aligned}$$

(3) 利用按方位取点加权法,将残差作加权处理,分配到待插值的网格节点上。按方位取点加权法是以待查网格点为中心,把区域分成若干个象限,从每个象限内取一点作加权平均。欲求某个网格点 (i,j) 的函数值时,则以 (i,j) 为原点将平面分成四个基本象限,再把每个象限分成 n_0 等份,这样就把全平面分成 $4n_0$ 等份,如图 2 所示(见下页)。作者选用按 8 方位取点加权法,即 $n_0=2$, 将 8 方位距离 (i,j) 最近点的残差 $z(x_i,y_j)$ 作加权处理,分配到待插的网格点 (x_j,y_j) 上,可求得 $t(x_j,y_j)$ 。

$$\begin{aligned} \text{当 } d_{ij} = & 0 \text{ 时:} \\ t(x_i,y_j) = & z(x_i,y_j) \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{当 } d_{ij} \neq & 0 \text{ 时:} \\ t(x_i,y_j) = & \sum_{k=1}^8 [z(x_i,y_j) \cdot \\ & (1/d_{ij}) / \sum_{i=1}^8 (1/d_{ij})] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_{ij} = & [(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2]^{1/2} \\ (i = & 1,2,\cdots,8) \end{aligned}$$

(4) 将网格点上的趋势面拟合值 $g(x_j,y_j)$ 和残差 $t(x_j,y_j)$ 相加,作为网格点上的内插值,得

$$f(x_j,y_j) = g(x_j,y_j) + t(x_j,y_j) \quad (7)$$

通过上述四步,即可完成对图 1 无数据区的二维插值处理。

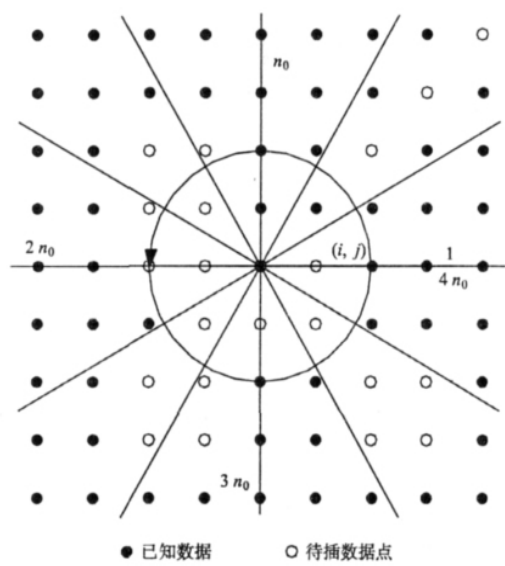


图2 按方位取点法示意图

Fig.2 Schematic diagram of searching data points on orientation

3 电阻率二维反演

用三角形网格对视电阻率反演所用的二维地电模型进行剖分,并假设各网格单元上电导率参数双线性变化。若网格大小事先设定,则需反演的参数仅为各网格节点上的电阻率。考虑到电阻率值变化范围较大,为了提高反演的稳定性,视电阻率和电阻率参数应使用对数值。这样,加入先验信息的最小二乘反问题可以表示为求最佳模型参数修正量,使目标函数 φ 达到极小^[8]。式(8)右端第一项为通常的最小二乘法,第二项为先验信息项。

$$\varphi = \| \Delta d - A \Delta m \|^2 + \lambda \| C (m - m_b + \Delta m) \|^2 \tag{8}$$

其中 Δd 为数据残差矢量,其值等于实测视电阻率的对数值与模拟的视电阻率的对数值之差($\Delta d_i = \ln \rho_{ai} - \ln \rho_{ci}$, $i = 1, 2, \dots, n$); m 为预测模型参数矢量($m_j = \ln \rho_j$, $j = 1, 2, \dots, m$); m_b 为基本模型参数矢量($m_{bj} = \ln \rho_{bj}$, $j = 1, 2, \dots, m$); A 为偏导数矩阵($a_{ij} = \frac{\partial \ln \rho_{ci}}{\partial \ln \rho_j}$); C 为光滑度矩阵; λ 为阻尼因子。

对式(8)中的 Δm 求导,并令其等于零,可得线性方程组:

$$(A^T A + \lambda C^T C) \Delta m = A^T \Delta d + \lambda C^T C (m_b - m) \tag{9}$$

将从方程组(9)中得到的模型修改量,加到预

测模型参数矢量中,便可得到新的预测模型参数矢量。重复这个过程,直至实测数据和模拟数据之间的平均均方误差满足要求。其中平均均方误差 rms 定义为

$$rms = \sqrt{\frac{\Delta d^T \Delta d}{n}}$$

4 实测数据反演

本例为湖北某地高密度电阻率法勘查裂隙发育带实例,测线长约 600 m,采用温纳装置进行测量,点距 5 m,完成三个排列,每排列 60 根电极,每次移动重复 30 根电极,即相邻排列重复 30 根电极。在处理前,首先将野外同一条测线多个相邻断面的高密度电阻率数据从仪器传入电脑,并将其合并为一个指定格式的文本数据文件,启动程序读取数据,便可自动完成数据拼接、二维插值及反演处理。输出的拼接和反演结果文件,可用 Surfer 软件成图,方便快捷。

图 3(a) (见下页) 为拼接及插值后的实测视电阻率断面图(纵坐标为视深度 $AB/2$,横坐标为点号);图 3(b) (见下页) 为电阻率二维反演断面图(纵坐标为高程,横坐标为点号)。根据电阻率反演结果,在点号 900 ~ 1 000 之间有一低阻条带,推断为裂隙发育带充填水或泥的反映,见图 3(b) 中左侧粗实线圈定区域。在垂直该异常带方向上有一出水泉点,其距离异常带约 50 m,高程比异常带位置低 25 m,长年有水流出,推测与该裂隙带是连通的。对于图 3(b) 中右侧的低阻异常,是近期结束的施工钻孔因填充有泥浆及泥水向四周扩散所引起的低阻异常。在实测视电阻率拟断面图 3(a) 上,也可以看出该漏斗状低阻异常的存在,但由于电法勘探体积效应的影响,使得异常形态与实际情况偏差较大,而反演断面则能更好地反映该钻孔充填泥浆后的真实异常形态,这也进一步验证了反演结果的可靠性。

5 结论

通过将连续观测的多个高密度电阻率断面进行数据拼接、插值及反演处理,处理结果采用 Surfer 软件成图,可方便地对多个数据断面进行分析解释,处理效率大大提高,编制的处理软件可以在实际中推广使用。

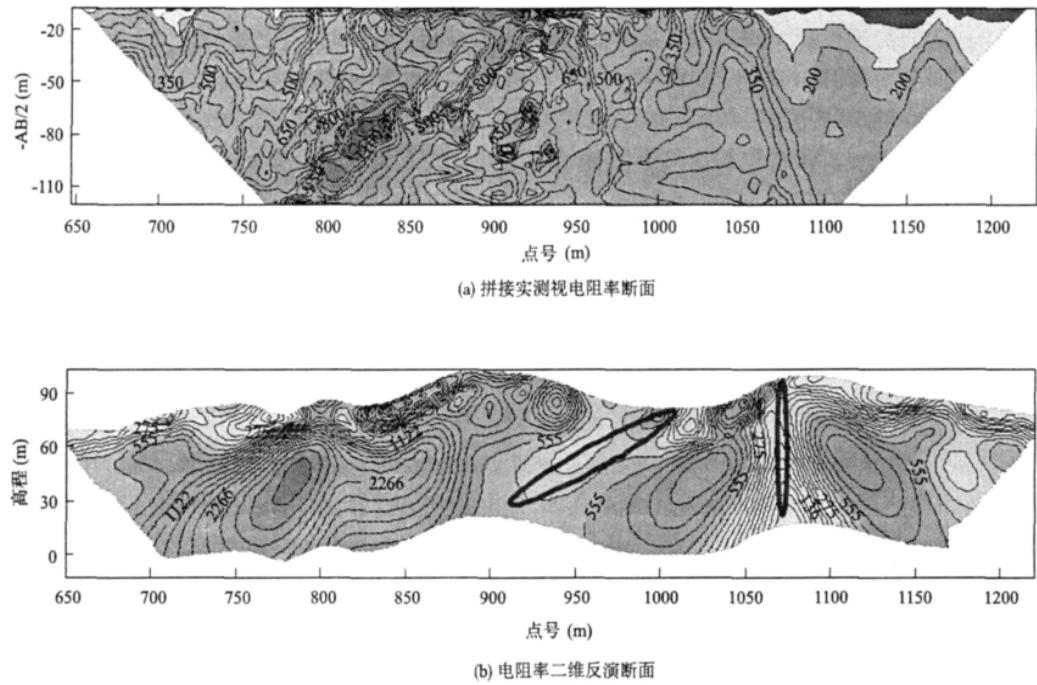


图 3 长断面高密度电阻率数据处理结果

Fig. 3 The processing result of HD resistivity data of long-range section

参考文献：

[1] 罗有春, 邹俊, 王怀昆, 等. 高密度电阻率法在防空洞探测中的应用[J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2008, 22(2): 127.

[2] 贾正元. 高密度电阻率法在环境工程地球物理勘探中的应用[J]. 中国西部科技, 2008, 7(16): 1.

[3] 邓居智, 刘庆成, 莫撼. 高密度电阻率法在探测水坝隐患中的应用[J]. 华东地质学院学报, 2001, 24(4): 282.

[4] 朱自强, 戴亦军. 高密度电阻率法在高速公路岩溶探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2004, 1(4): 309.

[5] 苏永军, 王绪本, 罗建群. 高密度电阻率法在三星堆壕沟考古中的应用[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 268.

[6] 罗延钟, 张桂青. 电子计算机在电法勘探中的应用[M]. 武汉: 地质学院出版社, 1987.

[7] 阮百尧. 三角单元剖分电导率分块连续变化点源二维电场有限元数值模拟[J]. 广西科学, 2001, 8(1): 1.

[8] 阮百尧, 村上裕, 徐世浙. 电阻率/激发极化法数据的二维反演程序[J]. 物探化探计算技术, 1999, 21(2): 116.

[9] TRIPP A C, HOHMANN G W, SWIFT C M. Two-dimensional resistivity inversion[J]. Geophysics, 1984, 49(10): 1708.

[10] 柳建新, 刘海飞. 倾角扫描多剖面互相关分析及应用效果[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(1): 161.

作者简介: 席景昌(1972 -), 男, 本科, 主要从事地震勘探、电法勘探工作。

OF IP METHOD

ZHANG Wei, LIU Jian-xin, LIU Hai-fei (School of Info-Physics and Geometrics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China). *COMPUTING TECHNIQUES FOR GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION*, 2011, 33(3): 309

In practice of mineral exploration and engineering detection, it is typically carried out with no or incomplete prior information. For central gradient array of IP method, it is commonly the case that it is difficult to guarantee anomalous body in the middle of electrodes and that the observation data are affected and deteriorated. Therefore, it is necessary to study the electrode effect on observation data for IP method. This paper studies anomaly curve for IP method with different position between the model and supply electrodes, using experimental research method. The results provide some guidance for practical application and improve the efficiency in implementation of central gradient array of IP method.

Key words: IP method; central gradient array; physical simulation

PROCESSING AND INTERPRETATION OF HIGH DENSITY RESISTIVITY DATA FOR LONG-RANGE SECTION

XI Jing-chang¹, LIU Hai-fei², ZHANG Sai-min³ (1. Shanxi Province Geophysical and Geochemical Exploration Institute, Yuncheng 044000, China; 2. School of Info-Physics and Geometrics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 3. Key Laboratory of Geological Engineering Centre of Guangxi Province, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China). *COMPUTING TECHNIQUES FOR GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION*, 2011, 33(3): 314

In order to enhance the processing and interpretation efficiency with high density data of many adjacent sections on the same measuring line, this paper processes the multi-adjacent data sections through the data merging, 2D interpolation and inversion processing, at last the resistivity 2D inversion data of global section is output to file, and the map is drawn by Surfer software, which make data analysis and interpretation be convenient and prompt. The working efficiency is greatly improved. Through processing the practical data, it is verified that the processing software can be widely used to the practice.

Key words: high density resistivity data; data merging; 2D interpolation; 2D inversion

VOXLER-AIDED 3D-INTERPRETATION OF ELECTRIC SOUNDING DATA IN PINGGU BASIN

GUO Gao-xuan (Hydrogeology and Engineering Geology Team of Beijing, Beijing 100195, China). *COMPUTING TECHNIQUES FOR GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION*, 2011, 33(3): 318

As an important geophysical detection method, electric sounding have been used widely in hydrogeo-

logical, engineering geological, environmental and mineral resources work. However, the traditional data processing method, such as cross-section method, transaction method and section lining method belong to two-dimension manner. In this paper, the main three method and their merits and drawbacks are presented by using the electric sounding data within Pinggu basin. Secondly, the introduction of software Voxler, which is used in this paper, is presented simply. In the end, a sample of 3D model based on all the data of Pinggu region is given. The application results show this interpretation method can characterize the underground geologic body very well. The outcome of the Voxler, which are excellent complement to traditional 2D-data processing methods, can help geologists enhance the studying resolution of subsurface within the working area greatly.

Key words: electric sounding; geologic body; 3D model; voxler

STUDIES ON THE CHARACTERISTICS OF CHANGXING FORMATION ORGANIC REEF-SHOAL COMPLEX IN TONGJIANG TIECHANGHE, SICHUAN BASIN

LIN Jie, WU Xi-chun, LIU Shu-gen, et al. (State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China). *COMPUTING TECHNIQUES FOR GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION*, 2011, 33(3): 323

The Tiechanghe organic reefs developed in the upper permian Changxing formation are another important representative of platform edge reefs in north-east Sichuan basin. By studying the measurement of 4 outcrops and their detailed indoor examining, this paper finds that the reefs here are not just some isolated reefs like Linchang, and Jiaoshutang, but a united Changxing reef-shoal complex. The Changxing formation is mainly made up by platform edge reefs and platform edge shallow shoal facies, and three upwards vertical cycles reef-shoal complex. The main reef-building organism of the organic reefs is sponge, taking a percentage of about 20% ~ 50%, and fringing reef organism are algae, foraminifer, fusulinida and other categories. Reservoir lithology is mainly made of reef limestones and bioclastic grainstones, with low level dolomitization. Holes are rich, but many were filled with calcite crystals.

Key words: Tongjiang county; Tiechanghe; Changxing formation; sedimentary facies; organic reef-shoal; Puguang gas field

APPLICATION OF RESERVOIR MODELING TO COMPLICATED FAULT BLOCK RESERVOIRS—TAKING LIUXI OILFIELD FOR AN EXAMPLE

GAN Lin^{1,2}, DONG Wei^{1,2}, XIONG Jun^{1,2}, et al. (1. College of energy resources, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan, 610059, China; 2. State key laboratory of oil and gas reservoir geology