

DOI: 10.11720/wtyht.2014.3.21

徐志敏, 咎崇信, 肖晓, 等. 角域地形点源电场解析计算及其在电阻率法地改中的应用[J]. 物探与化探, 2014, 38(3): 534-538. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2014.3.21>

Xu Zhimin, Zan Chongxin, Xiao Xiao, et al. The analytical calculation of the angle domain topographic point-source electric field and its application to high density resistivity method for topographic correction[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(3): 534-538. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2014.3.21>

角域地形点源电场解析计算 及其在电阻率法地改中的应用

徐志敏¹, 咎崇信¹, 肖晓², 李晋², 辛会翠²

(1. 西北综合勘察设计院, 陕西 西安 710003; 2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 通过角域叠加的方法获得由纯地形引起的视电阻率异常, 采用比值法对边坡地形条件下的高密度电阻率法测量数据进行地形校正, 并结合测区钻孔地质剖面分析地改效果。结果表明: 角域地形改正的方法是有效的, 地改后的反演断面与实际的地质情况更加接近, 效果较好。

关键词: 高密度电阻率法; 地形校正; 角域; 边坡

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2014)03-0534-05

在起伏地形进行电法测量时, 得到的数据将不可避免受到地形起伏的影响, 视电阻率将产生畸变, 从而掩盖有用地质体信息, 呈现假地质体异常, 使人们不能作出正确的推断解释, 降低了电法解释精度, 甚至导致错误的解释, 因而, 进行地形改正是提高起伏地形电法勘探地质效果的一个关键^[1-2]。地形改正一般采用“比值法”, 即用实测视电阻率除以“地形校正因子(地形模型视电阻率/地形模型电阻率)”, 从而得到改正后或平地形下的视电阻率。精度较高的是有限元法, 其次是有限差分法、边界单元法、角域法等^[3-5]。有限元法计算量大, 一般在运用中不可能划分太多单元格, 因而也导致精度降低, 特别是如果要进行三维地改时, 其速度和效果更成问题。角域法相对精度低, 但优点是计算速度快, 适合工程勘探的要求。

小砭沟位于延安市枣园镇, 交通较为便利, 面积约为 65 万 m², 共建房屋 200 栋。区内滑坡地质灾害较多, 基岩面起伏, 地质结构复杂, 不良地质体的成因、分布、性状具有相当的随机性, 对工程的影响也具有相当的不确定性, 并且隐伏于地下不易查明。因此, 在前期勘察基础上, 需采用地球物理勘探进一

步查明滑坡体的饱和带和基岩层的分布情况, 为处治设计和施工提供工程地质依据。

区内地貌单元属黄土冲沟地貌, 四周属黄土梁峁与冲沟相间地貌, 地形影响严重。本次物探工作采用重庆地质仪器厂的 DUK-2A 高密度电阻率法测量系统, 数据采集采用温纳装置, 电极数 60, 点距 5 m, 拟采用角域地改方法进行地形校正, 并结合钻孔资料分析地改效果。

1 角域地形改正方法

借助数学公式解析点源条件下单元角域地形的电源畸变电场, 采用 Fortran 语言编写有关程序, 并计算边坡地形上的纯地形异常视电阻率值。进行角域地形改正基本思想为^[6]: ①通过数学方法求取简单角域地形的电位公式, 进而求取视电阻率畸变值; ②通过组合叠加得复杂角域地形上的视电阻率畸变值, 得到纯地形影响; ③利用比值法进行地形改正。

1.1 角域条件下点电源的电位解析解

所谓角域^[7], 是指由两个半无限大平面所限的二度区域, 在区域中充满电阻率为 ρ 的均匀且各向同性导电介质。两半平面之张角 ϕ 即为角域之顶

角。两侧面与水平面之夹角为侧面之倾角,分别用 β 和 α 表示左右两侧面之倾角,规定斜坡在水平轴下面,坡角取负值,在上面取正值。则

$$\left. \begin{aligned} 0 < \phi < \pi, \\ \phi + \alpha + \beta = \pi. \end{aligned} \right\} \tag{1}$$

显然,当 $\phi < \pi$ 时,角域即为坡长无限之二度山脊;当 $\phi > \pi$ 时,角域即为坡长无限之二度山谷。角域是二度地形的基本单元,在电阻率法的地形改正中很有用处。

现有一角域二度体,角域的张角为 ϕ ,在角域以下有一电阻率为 ρ 的均匀介质,地面以上为空气,电阻率为无穷大。在地面的 A 点有一电流强度为 I 的点电源供电, A 到坐标原点的距离为 r_0 。为了求出电位的分布,首先建立坐标系,将 x 轴取为过供电点 A 而垂直于地形两斜面的交线, x 轴与地形两侧面交线的交点为 O , y 轴取为过 O 点而垂直于地形的水平面, z 轴为地形两侧面的交线。坐标轴正向如图 1 所示。

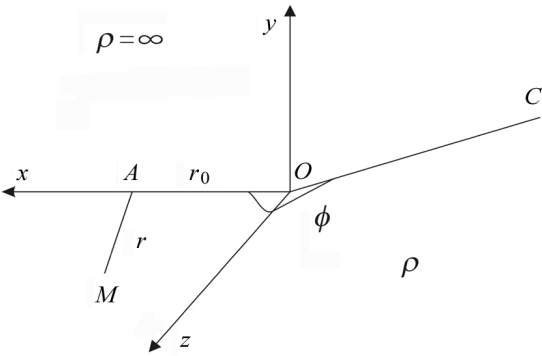


图 1 坐标系示意

这样,角域地形上 M 点电位解析解为

$$U(r, \theta, z) = \frac{\rho I}{\pi \phi \sqrt{r r_0}} \left[\frac{1}{2} Q_{-\frac{1}{2}}(\xi) + \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \cos \frac{m \pi (\phi - \theta)}{\phi} Q_{\frac{m \pi}{\phi} - \frac{1}{2}}(\xi) \right], \tag{2}$$

式中, $\xi = (r^2 + r_0^2 + z^2) / (2 r r_0)$, $Q_\gamma(\xi)$ 为第二类勒让德函数。式(2)本身不完整,存在以下问题:

第一, $Q_\gamma(1)$ 不存在,故在此时解有奇异性,不能用式(2)计算,使用

$$U = \frac{\rho I}{\pi \phi r_0} \left\{ \frac{\pi}{4} + \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \left[\varphi \left(m + \frac{1}{2} \right) - \varphi \left(\frac{m \pi}{\phi} + \frac{1}{2} \right) \right] \right\}, \tag{3}$$

$\varphi(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\ln n - \frac{1}{x} - \frac{1}{x+1} - \frac{1}{x+2} - \dots - \frac{1}{x+n} \right)$ 计算。

第二,电极在角域顶点时,电位公式为

$$U = \frac{\pi}{\phi} U_0 = \frac{\pi}{\phi} \frac{I \rho}{2 \pi R} = \frac{I \rho}{2 \phi \sqrt{r^2 + z^2}}. \tag{4}$$

当测量电极 M 在顶点时,由电极互换原理得

$$U = \frac{I \rho}{2 \phi \sqrt{r_0^2 + z^2}}. \tag{5}$$

角域地形点电源电场电位由式(2)~式(5)这几个电位公式及其附属公式计算。

为了突出地形影响,用 U/U_0 表示电位畸变值 $U(\tau)$ (U_0 为背景场),在讨论 $z=0$ 时,电位畸变值是非常方便的。将式(2)除以 $U_0 = I \rho_0 / (2 \pi |r - r_0|)$ 后,得到

$$U(\tau) = \frac{2 |1 - \tau|}{\phi \sqrt{t}} \left[\frac{1}{2} Q_{-\frac{1}{2}}(\xi) + \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{\tau}{t} \right)^m Q_{\frac{m \pi}{\phi} - \frac{1}{2}}(\xi) \right], \tag{6}$$
$$\tau = \frac{r_\rho}{r_c}, t = |\tau|, \xi = \frac{1 + t^2}{2t}.$$

根据电极互换原理,有 $U(\tau) = U(1/\tau)$,在计算 $U(\tau)$ 时只考虑 $-1 \leq \tau < 1$ 的情况^[6]。

1.2 角域地形的组合叠加公式

实际地形是连绵起伏的。实践表明,可像图 2 那样用以折代曲的办法^[5]拟合连续起伏的二度地形。将各个角域 $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$ 的异常相乘叠加起来,得到实际地形异常的近似值。无论地形形态如何,地形异常主要发生在坡度改变点及其附近,因此可以把角域看作二度地形的最基本单元^[8]。

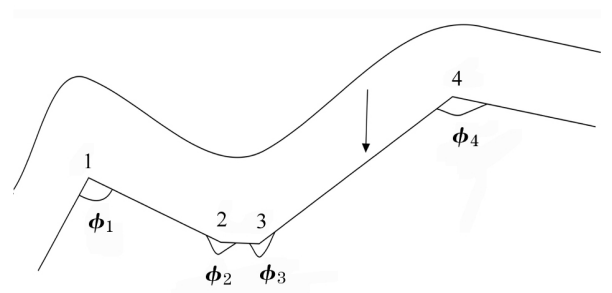


图 2 地形的简化

当几个角域上供电电极、测量电极的实际水平位置相互对齐后,复合地形上点源场的视电阻率畸变值可以由乘积叠加公式

$$\frac{\rho_s}{\rho} \approx \left(\frac{\rho_s}{\rho} \right)_1 \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho} \right)_2 \frac{1}{\cos \beta_2} \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho} \right)_3 \frac{1}{\cos \beta_3} \dots \left(\frac{\rho_s}{\rho} \right)_n \frac{1}{\cos \beta_n} \tag{7}$$

决定。其中, ρ_s/ρ 是连续有限地形上某一点的地形

异常值, $(\rho_s/\rho)_1 \cdots (\rho_s/\rho)_n$ 是各个角域在相应点的地形异常值; $\beta_1 \cdots \beta_n$ 为各角域在相应点的坡度, 根据这种组合叠加的方法可以得到各种复杂地形的视电阻率异常, 得到纯地形影响。

1.3 纯地形异常的计算

当在地形起伏的斜坡上进行测量时, 由于观测点不在水平位置, 使地下电场的分布发生了变化, 与水平地面情况相比, 此时测得的电阻率包含了地形异常和有用异常。而仍按里程计算电阻率, 此时所得到的电阻率值不再等于正常值, 而是 $\rho_s = \rho \cdot \cos\alpha$ 。

简单角域地形上的视电阻率的曲线特征为^[8]: 山脊情况下, 在角域顶点附近表现为低阻异常, 然后向两侧形成两个倾斜柱状的高阻异常, 最后向两边

影响逐渐减小; 山谷情况下, 角域顶点附近表现为高阻异常, 紧靠两边形成低阻异常, 然后异常逐渐减小, 即所谓的“镜像异常”现象。

图 3 为测区 01 线高密度温纳装置纯地形异常电阻率剖面, 地表电阻率取 $100 \Omega \cdot m$ 。从图中可以看出, 起伏地形对地下电性结构有着极大的影响, 在起伏地形位置, 均有电性的变化, 进而影响周围及深部的电性结构。

2 角域地形改正实例

对图 3 给出的电阻率剖面, 利用比值法进行校正, 并应用 RES2DINV 反演软件对地改之后的数据进行反演。图 4 为角域地形改正前、后的反演断面 (由于斜坡起伏地形的影响, 剖面的水平长度实际为

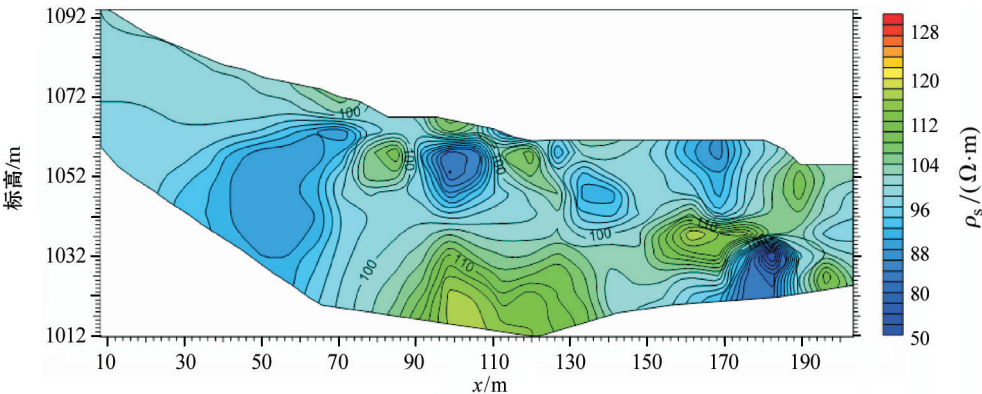


图 3 01 线高密度温纳装置纯地形异常电阻率剖面

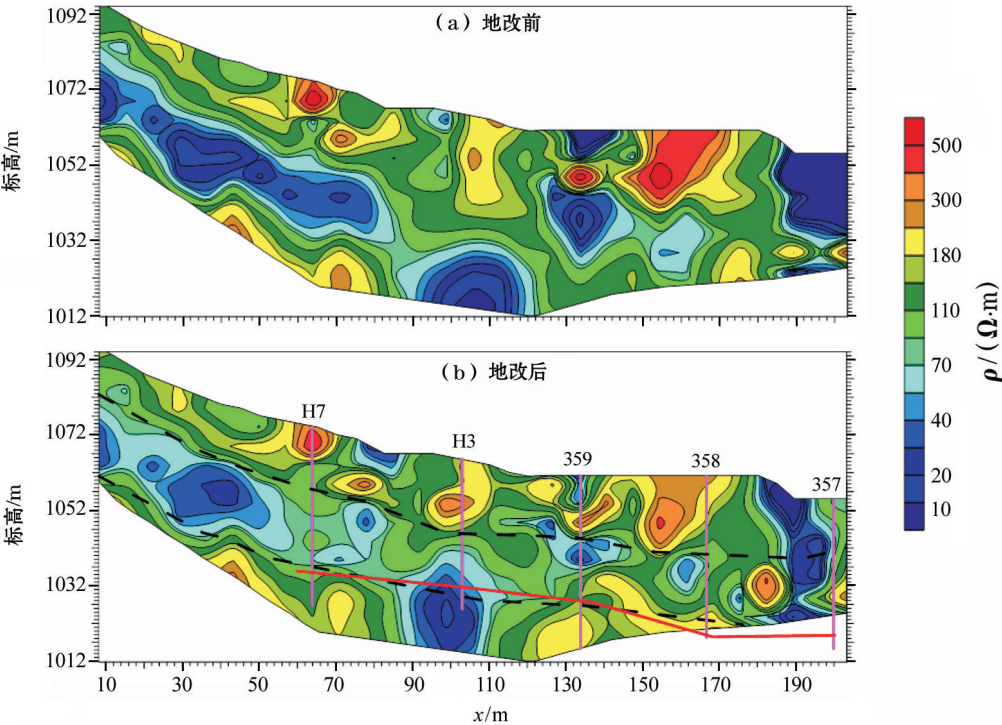
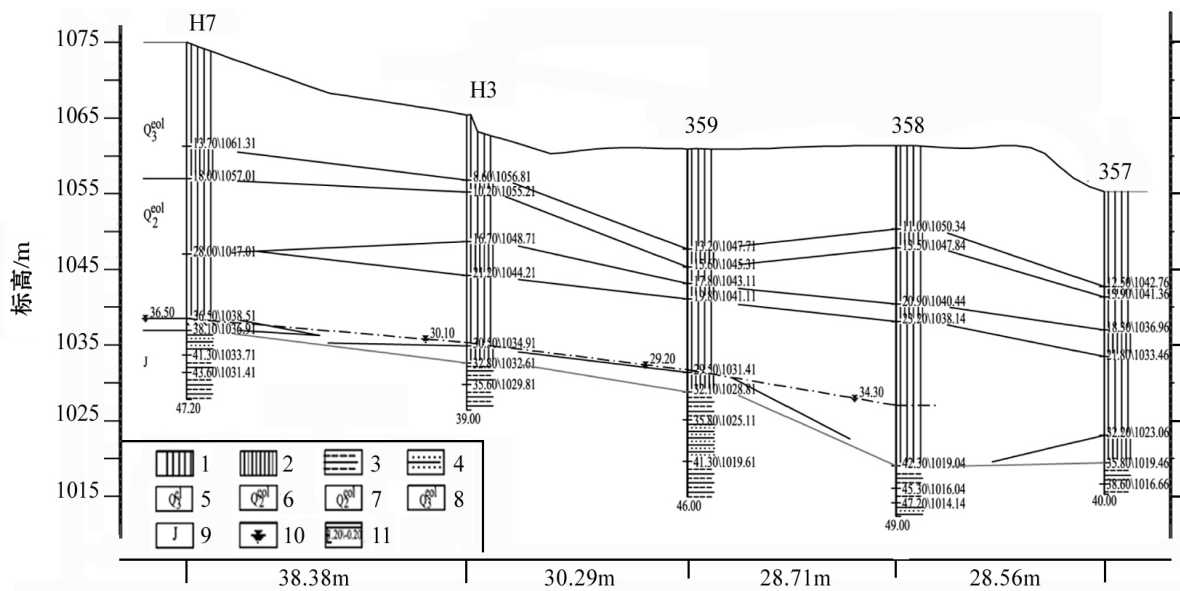


图 4 01 线角域地改前 (a)、后 (b) 的电阻率反演断面



1—黄土;2—古土壤;3—泥岩;4—砂岩;5—第四纪晚更新世残积;6—第四纪晚更新世风积;7—第四纪中更新世残积;8—第四纪中更新世风积;9—侏罗纪;10—地下水位线

图 5 01 线钻孔地质剖面

195 m)。

从图 4a 中可以看出,近地表局部存在高阻异常,约为 500~2 000 Ω·m。当含水少时,第四纪全新世坡洪积黄土和第四纪晚更新世、中更新世风积黄土、古土壤的视电阻率会较大,但根据测区物性参数可知,电阻率范围约为 100~500 Ω·m,因此剖面中的高阻异常为虚假异常。图中里程 85~115 m 底部的低阻异常、里程 120~140 m 表层和中间层的低阻异常和 180~195 m 的表层低阻异常范围较大,其中里程 180~195 m 存在较大的地形起伏,地形影响在所难免,其余两处的低阻异常的成因有待进一步分析。

图 4b 中的地层分界线是依据电性差异划分的,大致分为三层。浅层为相对高阻特征,电阻率约为 100~500 Ω·m,推测为第四系黄土覆盖层,厚度 15~20 m;中间层为相对低阻特征,电阻率约为 10~100 Ω·m,推测为饱和带;底层为相对高阻特征,电阻率约为 150~300 Ω·m,推测为基岩。

图 5 给出了 01 线钻孔地质剖面。根据图 4b 给出的反演断面,结合图 5 作综合分析。

(1)01 线近地表局部存在高阻异常得到了有效的压制,里程 180~195 m 处低阻异常范围有所减小,但仍然偏大。后经钻孔揭露证明,该处黄土沉积中存在两层相对较完整连续的古土壤,而古土壤相对于黄土来说隔水性能较好,局部在一段时期内存在上层滞水,从而造成局部的低阻异常。

(2)中间层表现相对低阻特征,里程 80~120 m 和 160~180 m 分布有两个相对高阻区域。推测其

形成原因,其一,由岩土体局部存在的密实程度的差异和土层中钙质含量的不同所造成;其二,在 H3 钻孔北侧附近垂直于测线的方向上存在一冲沟陡坎,形成地下水排泄方向、水力坡度、赋水程度的差异,从而造成局部的高阻区域。

(3)底层里程 90~115 m 存在低阻半闭合区域,将基岩左右分割,推测此处含有裂隙,充填泥质矿物且含水较大造成;同时在 H3 钻孔北侧附近垂直于测线的方向上的冲沟陡坎,也可能造成垂直于测线的方向上的电性差异,从而相互叠加造成。

3 结语

(1)边坡起伏地形会引起假异常,掩盖地下介质所引起的真异常,影响高密度探测结果的解释。

(2)理论推导证明,通过角域地形的组合叠加,可以有效地计算纯地形引起的异常,进而应用“比值法”对地形影响进行改正。

(3)小砭沟高密度探测资料表明,边坡地形影响了高密度资料的解释结果;结合钻孔地质资料分析表明,经过角域地改后的高密度剖面与实际地质剖面基本吻合,证明角域地改在边坡起伏地形高密度探测中的应用是有效的。

以上讨论针对的是常规电法地改,因此该方法也可运用于其他电法勘探的地改中,同时也可以运用在其他物探工程应用中。

参考文献:

[1] 简兴祥,王绪本,杨利容,等.高密度电阻率法地形影响校正

[J].物探化探计算技术,2008,30(4):303-307.

[2] 王广仓,董延朋.高密度电阻率法数据的地形改正[J].地质装备,2008,9(3):35-33.

[3] 黄兰珍,田宪漠,寸树苍.点源场电阻率法二维地形改正的边界元法[J].物探化探计算技术,1986,8(3):201-207.

[4] 吴小平.起伏地形条件下电阻率/激发极化三维正、反演[D].合肥:中国科技大学,2001.

[5] 杨华,李金铭.起伏地形对近矿围岩充电法影响规律的数值模拟研究[J].物探与化探,1999,23(3):202-210.

[6] 汤井田,辛会翠,王冉.点电源下复杂角域地形影响及校正[J].吉林大学学报:地球科学版,2012,42(1):254-261.

[7] 李金铭.地电场与电法勘探[M].北京:地质出版社,2005.

[8] 中南矿冶学院物探教研室.金属矿电法勘探[M].北京:冶金工业出版社,1980.

[9] 汤洪志,刘庆成,龚育龄.边界单元法在高密度电阻率法二维地形改正中的应用效果[J].物探与化探,2001,25(6):457-459.

The analytical calculation of the angle domain topographic point-source electric field and its application to high density resistivity method for topographic correction

Xu Zhimin¹, Zan Chongxin¹, Xiao Xiao², Li Jin², Xin Huicui²

(1. Northwest Research Institute of Engineering Investigations and Design, Xi'an 710003, China; 2. College of Geosciences and info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: With the angle domain overlay method, the apparent resistivity anomaly produced on pure landform was obtained; by adopting the ratio method, topographic correction was made for high density resistivity measuring data under the condition of slope topography; in combination with the drill hole geological sections in the surveying area, the effects of the topographic correction were analyzed. The results show that the method of angle domain topographic correction is effective, as is shown by the facts that the inverse sectional drawing after the topographic correction is closer to the practical geological situation, and the effects are fairly satisfactory.

Key words: high-density resistivity method; angle domain; topographic correction; slope

作者简介: 徐志敏(1986-),男,吉林省吉林市人,硕士研究生,主要研究方向为电磁法、电法数据处理与干扰噪声研究。