

郭文波, 宋建平, 李 貅等. 层状介质井中电测数值计算及其应用研究. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1561~1566

Guo W B Song J P, Li X, et al. Numerical calculation of borehole electrical survey in layered media and its applications. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(5): 1561~1566

# 层状介质井中电测数值计算及其应用研究

郭文波<sup>1,2</sup>, 宋建平<sup>1</sup>, 李 貅<sup>1,3</sup>, 薛国强<sup>4</sup>, 樊金生<sup>2</sup>

1 西安交通大学电信学院, 西安 710049

2 西北有色地质勘查局物化探总队, 西安 710068

3 长安大学地质与测绘工程学院, 西安 710054

4 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

**摘 要** 采用 Gauss-Laguerre 求积公式对层状介质井中电测地—井方式的  $\Delta V_1$  (电位梯度)、 $\rho_a$  参数进行了理论计算. 大量的正演数据揭示在层状介质情况下, 井中电测地—井方式观测可以获得台阶异常, 与相应的地电层相对应; 低阻覆盖层和中间低阻层对井中电测影响很大, 厚层覆盖区对地—井方式观测不利; 水槽模拟和应用实例表明, 分析实测资料时, 要考虑层状介质  $\Delta V_1$ 、 $\rho_a$  的正常场特征, 对实测数据进行正常场改正, 分析正常场改正后的  $\Delta V''_1$  异常效果较好.

**关键词** 层状介质, 井中电测, 地—井方式, 数值计算

文章编号 0001-5733(2006)05-1561-06 中图分类号 P631 收稿日期 2005-12-29, 2006-05-12 收修定稿

## Numerical calculation of borehole electrical survey in layered media and its applications

GUO Wen-Bo<sup>1,2</sup>, SONG Jian-Ping<sup>1</sup>, LI Xiu<sup>1,3</sup>, XUE Guo-Qiang<sup>4</sup>, FAN Jin-Sheng<sup>2</sup>

1 School of Electronic & Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

2 Geophysical and Geochemical Exploration Party, Northwest Bureau of Geological Exploration for Non-ferrous Metals, CNNG, Xi'an 710068, China

3 School of Geology and Survey, Chang'an University, Xi'an 710054, China

4 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

**Abstract** The integral formula of Gauss-Laguerre has been employed to theoretically calculate  $\Delta V_1$  (potential gradient) and  $\rho_a$  of the surface-borehole method of borehole electric exploration. Lots of forward calculation data show that the survey of surface-borehole method can obtain step-anomalies under the layered media condition, which correspond to geo-electric layers. Over-burden low resistivity layers and sandwich low resistivity layers have large influence on borehole electric survey results. Heavy overburden is harmful to this kind of the working method. When interpreting field data, the normal field feature of  $\Delta V_1$  and  $\rho_a$  must be considered. Analysis of the abnormal field  $\Delta V''_1$  from the corrected normal field can achieve good effects.

**Keywords** Layered media, Borehole IP method, Surface-borehole method, Numerical calculation

基金项目 国家 973 项目(2002CB412702), 中国博士后基金(2005038388)资助.

作者简介 郭文波, 男, 1966 年生, 1988 年毕业于桂林冶金地质学院, 2000 年获长安大学地球探测与信息技术专业硕士学位, 现在为西安交通大学电信学院在读博士, 主要从事电磁法勘探的解释理论与应用研究. E-mail: guowenbo2003@tom.com

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

# 1 引言

井中电测较地面电法具有观测信号强、勘探深度大、分辨能力高、异常解释精度高等优点,在解决深部地质问题、探测井(坑)旁或井底盲矿等方面明显优于传统的地面物探<sup>[1,2]</sup>,因此在我国新一轮地质找矿及危机矿山攻深找盲工作中越来越受到地质工作者的重视。

目前的金属矿井电测工作中,人们对一次场电位梯度  $\Delta V_1$  的研究少于对极化率(充电率)的研究。 $\Delta V_1$  是一个反映灵敏的、十分有用的参数,但是在实际工作中,由于地质情况的复杂性,诸如介质不均匀、各向异性等,往往观测到的是附加各种效应的物探异常,致使  $\Delta V_1$  曲线严重畸变,有时会掩盖有用信息,给解释工作带来许多干扰因素<sup>[2,3]</sup>。多年来,广大物探人员做了各种努力,探索解释金属物探井中电测异常的解释方法。物理模拟往往由于模拟条件与野外实际情况不同而不能反映客观实际。在数值计算方面,国内外有关地面电法探测和电法测井方面的研究较多<sup>[4~11]</sup>,对电阻率、复电阻率测井方法技术的研究和应用较广泛,而对金属矿区地下物探井中电测方面的报道较少<sup>[2,13]</sup>,井中电测数值模拟方面的报道更少。因此金属矿区井中电测的异常解释仍然停留在经验性判断与定性解释推断阶段。

本文将点电源场层状介质理论应用于井中电测资料解释之中,通过对层状介质情况下地一井方式观测  $\Delta V_1$ 、 $\rho_a$  参数的数值计算,详细分析了层状介质的异常特征及其对井中电测的影响。

## 2 水平层状介质地一井方式的数值计算

### 2.1 正演理论

图1所示为水平多层介质示意图。设供电点位于地面  $A(I)$ , ZK 为钻孔及位置。 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{n-1}$ ;  $h_1, h_2, \dots, h_{n-1}$  分别为第一层、第二层、...、第  $n-1$  层介质的电阻率和厚度,  $H_1, H_2, \dots, H_{n-1}$  表示每层底界面到地面的距离,  $M$  点为钻孔中的观测点。则各层中电位通解有如下形式<sup>[4,12]</sup>:

$$V_i(r, z) = \frac{I}{2\pi} \int_0^\infty (A_i e^{-\lambda z} + B_i e^{\lambda z}) J_0(\lambda r) d\lambda, \quad (1)$$

式中  $I$  为电流,  $A_i, B_i$  为待定系数,  $J_0(\lambda r)$  为零阶贝

塞尔函数,  $\lambda$  为积分变量,  $r$  为观测点至点电源的水平距离,  $z$  为观测点的深度。

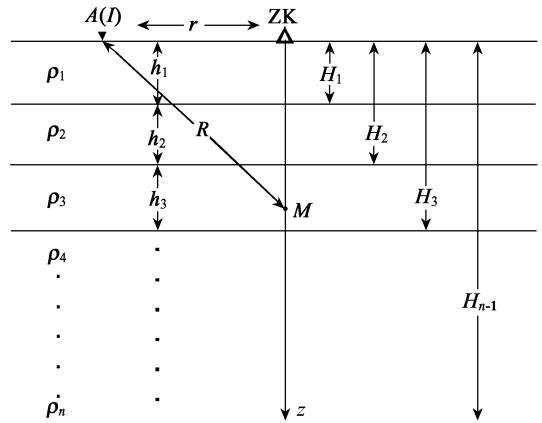


图1 水平层状介质地一井方式示意图

Fig. 1 Sketch of the surface-borehole method horizontal layered media

第一层中附加一个点电源电位,应用 Leibniz 积分公式:

$$\frac{I\rho_1}{2\pi R} = \frac{I\rho_1}{2\pi} \int_0^\infty J_0(\lambda r) e^{-\lambda z} d\lambda, \quad (2)$$

式中  $\rho_1$  为第一层介质电阻率,  $R = \sqrt{r^2 + z^2}$ 。则第一层中电位通解可表示为

$$V_1(r, z) = \frac{I}{2\pi} \int_0^\infty (\rho_1 e^{-\lambda z} + A_i e^{-\lambda z} + B_i e^{\lambda z}) \times J_0(\lambda r) d\lambda. \quad (3)$$

利用在界面处电位连续、电流密度法向分量连续的条件可推导出如下求解系数  $A_i, B_i$  的递推公式:

$$\left\{ \begin{aligned} T_n &= \rho_n \\ T_i &= \rho_i \frac{(T_{i+1} + \rho_i) + (T_{i-1} - \rho_i) e^{-2\lambda h_i}}{(T_{i+1} + \rho_i) - (T_{i-1} - \rho_i) e^{-2\lambda h_i}} \\ &\quad (i = n-1, n-2, \dots, 3, 2, 1) \\ A_i &= \frac{T_i - \rho_i}{2} \\ A_i &= A_{i-1} \frac{T_i + \rho_i}{T_i + \rho_{i-1}} \\ &\quad (\text{当 } i = 2 \text{ 时, } A_{i-1} = A_1 + \rho_1) \\ &\quad (i = 3, 4, \dots, n) \\ B_i &= A_i \frac{T_i - \rho_i}{T_i + \rho_i} e^{-2\lambda h_i} \\ &\quad (i = 1, 2, 3, \dots, n-1), \end{aligned} \right. \quad (4)$$

其中  $T_n, T_i$  为第  $n$  层、第  $i$  层表面的电阻率转换函数。由(4)式求出  $A_i, B_i$  后代入(1)、(3)式可求得井

中电测地一井方式观测层中的电位值.

### 2.2 $\Delta V_1$ 、 $\rho_a$ 的数值计算方法

公式(1)、(3)为含零阶贝塞尔函数  $J_0(\lambda r)$  的无穷区间的积分. 对于无穷区域的数值积分, 采用 Gauss-Laguerre 求积公式<sup>[14]</sup>:

$$\int_0^\infty F(\xi) d\xi = \sum_{m=1}^M W_m e^{\xi} F(\xi_m), \quad (5)$$

式中  $\xi_m$  为 Laguerre 多项式的根,  $W_m$  为求积系数.

公式(1)中令  $\xi = \lambda r$ , 则  $d\xi = r d\lambda$ , 则电位通解有如下形式:

$$V_i(r, z) = \frac{1}{2\pi r} \sum_{m=1}^M [A_i e^{-\xi_m(z/r)} + B_i e^{\xi_m(z/r)}] \times J_0(\xi_m) W_m e^{\xi_m}. \quad (6)$$

公式(6)即为水平层状介质地一井方式观测各层中电位近似积分的表达式, 据此可以计算出层状介质情况下的电位分布, 由下式:

$$\rho_a = 2\pi \cdot \frac{AM \cdot AN}{AN - AM} \cdot \frac{\Delta V_1}{I} \quad (7)$$

计算可得地一井方式观测的视电阻率  $\rho_a$  参数.

## 3 水平层状介质井中电测的正演计算及其应用研究<sup>[3, 4]</sup>

### 3.1 水平层状介质地一井方式 $\Delta V_1$ 、 $\rho_a$ 理论曲线特征

图2为均匀介质条件下地一井方式数值计算的  $\Delta V_1$  曲线, 图中显示:

- (1)地一井方式  $\Delta V_1$  正常场幅值随  $r$  的增大迅速减小.
- (2)地一井方式  $\Delta V_1$  正常场在一定深度存在一个极值, 出现极值的位置  $H$  与  $r$  之间的关系为  $H = (\sqrt{2}b)r$ .
- (3)在近地表部位, 由于钻孔与等位线相切, 故  $\Delta V_1 \rightarrow 0$ , 随着深度的增加, 出现  $\Delta V_{1max}$ , 随后  $\Delta V_1$  趋向平稳.

图3为水平多层介质数值计算  $\Delta V_1$ 、 $\rho_a$  的理论曲线(模型参数见图示), 其特征为: (1) $\Delta V_1$  在近井口段出现均匀介质地一井方式正常场特征  $\Delta V_1 \rightarrow 0$ . (2) $\Delta V_1$ 、 $\rho_a$  曲线穿过地下层界面部位形成台阶异常, 对应高、低阻层. 如图3a中  $\Delta V_1$  曲线在100 m深处急剧下降, 形成明显的台阶异常, 表明该井段存在岩性分界面, 且下层介质电阻率小于上覆介质电阻率; 图3b中  $\Delta V_1$ 、 $\rho_a$  曲线在200至250 m井段出现

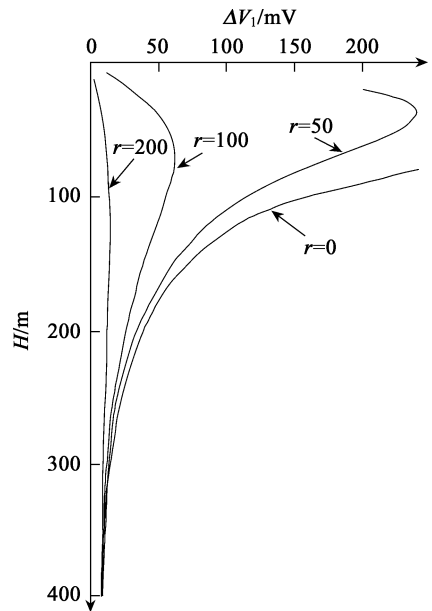


图2 均匀介质条件下地一井方式  $\Delta V_1$  曲线  
 $r$  为点电源至井口距离,  $\rho = 1000 \Omega_m$ .

Fig. 2  $\Delta V_1$  curve in uniform earth media by the surface-borehole method

明显的低阻异常, 表明该井段对应岩性电阻率较低; 图3c中  $\Delta V_1$ 、 $\rho_a$  曲线在100~150 m、150~200 m井段分别对应明显的高值和低值异常, 预示100~150 m对应井段岩性为高阻, 150~200 m对应井段岩性为低阻.  $\Delta V_1$ 、 $\rho_a$  曲线清楚地反映了对应层状介质的地电特征. (3)  $\rho_a$  理论值与对应层介质的真实电阻率值接近, 近井口井段视电阻率趋于第一层介质电阻率. 图3(b, c)中  $\rho_a$  曲线近井口井段电阻率值分别近似等于对应的第一层电阻率值  $200\Omega_m$  和  $100\Omega_m$ ; 深部井段视电阻率趋于最下层介质电阻率值, 但有低阻层存在时, 下层介质对应井段的电阻率  $\rho_a$  理论值严重失真于对应层的真实电阻率值. 产生这种现象的原因是因为上覆介质电阻率较低, 吸引电流致使该层中电流线方向平行于层面, 导致下覆地层中电流密度减小, 因此该层中观测的视电阻率小于其真电阻率. 如图3b中  $\rho_a$  曲线250 m以下、图3c中  $\rho_a$  曲线200 m以下电阻率值由于上覆低阻层的影响明显低于对应层的真电阻率值.

### 3.2 低阻覆盖层对井中电测的影响

#### 3.2.1 覆盖层电阻率对井中电测的影响

覆盖层对井中电测地一井方式观测影响很大. 覆盖层电阻率变化对地一井方式  $\rho_a$ 、 $\Delta V_1$  的影响曲线表明, 随着异常电阻率比值  $\mu_{12}$  ( $\mu_{12} = \rho_2/\rho_1$ ) 增大, 由层状介质引起的台阶异常  $\Delta V_1$ 、 $\rho_a$  幅值明显

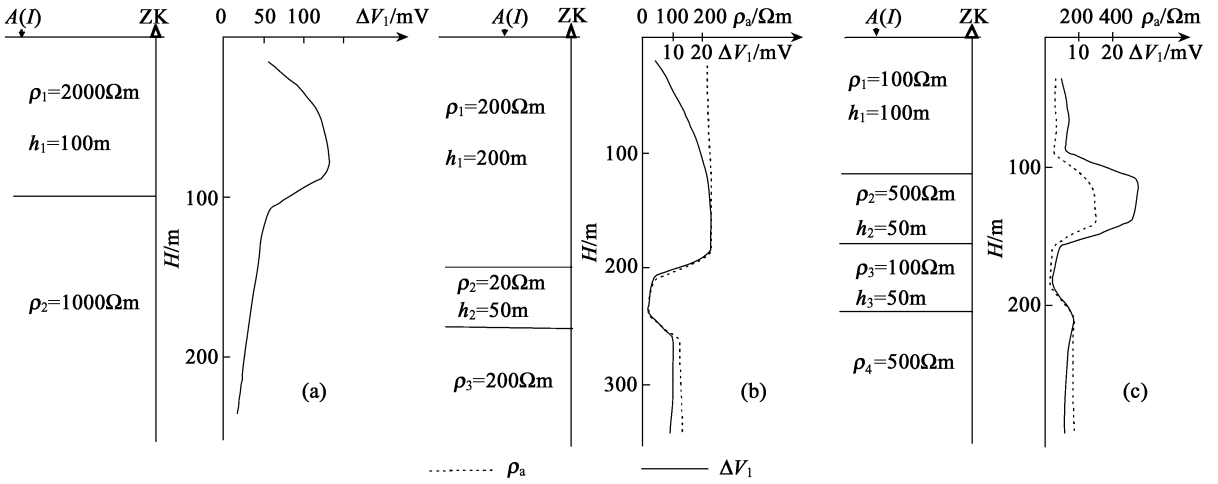


图 3 水平层状介质地—井方式数值计算理论曲线

(a) 二层介质  $\Delta V_1$  理论曲线; (b) 三层介质  $\rho_a, \Delta V_1$  理论曲线; (c) 四层介质  $\rho_a, \Delta V_1$  理论曲线.

Fig. 3 Surface-borehole variant theoretical curve in uniform horizontal layered media

(a)  $\Delta V_1$  theoretical curve of two-layer media; (b)  $\rho_a, \Delta V_1$  theoretical curves of three-layer media; (c)  $\rho_a, \Delta V_1$  theoretical curve four-layer media.

减少;覆盖层电阻率  $\rho_1$  与下层介质电阻率差值越小,地—井方式观测  $\rho_a$  值越接近于真实电阻率值; $\rho_1$  相对下层介质电阻率越低,即覆盖层电阻率越低,井中电测地—井方式观测信号越小,即  $\Delta V_1$  幅值越小,地—井方式观测的  $\rho_a$  值与对应层真实电阻率值相差越大.

阻率  $\rho_1$  相对于下层介质电阻率  $\rho_2$  越大,穿过界面的电流密度越大,地—井方式观测到的  $\Delta V_1$  就越大.这说明低阻覆盖层对电流的屏蔽作用很强.正是由于覆盖层的影响,地—井方式观测的  $\rho_a$  值往往会严重失真于对应层电阻率真实值,这也使得实际工作中发现的电测井  $\rho_a$  值与地—井方式观测的  $\rho_a$  值相差甚大的现象得以理论上的解释.

图 4 为覆盖层对地下穿过界面的电流密度影响的关系曲线.计算模型为二层地电结构模型,  $\mu_{12} = \rho_2 / \rho_1$ .结果表明:第二层介质的电流密度( $j$ )的大小取决于第一层电阻率的大小.第一层电阻率  $\rho_1$  相对于下层介质电阻率  $\rho_2$  越低,穿过界面的电流密度越小,这样地—井方式观测的  $\Delta V_1$  就越小;第一层电

### 3.2.2 覆盖层厚度对井中电测的影响

图 5 为改变覆盖层厚度得到的地—井方式  $\rho_a$

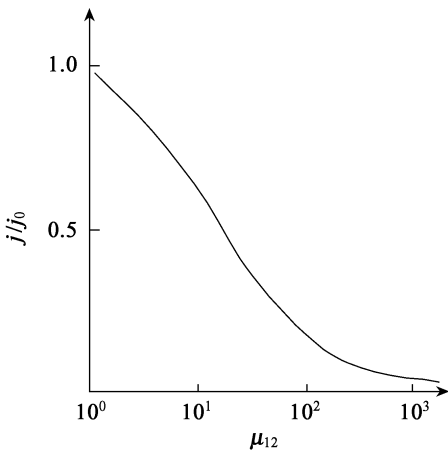


图 4 覆盖层对穿过界面电流密度的影响

$j_0$  为均匀介质电流密度

Fig. 4 Effect of overburden on current density through interface

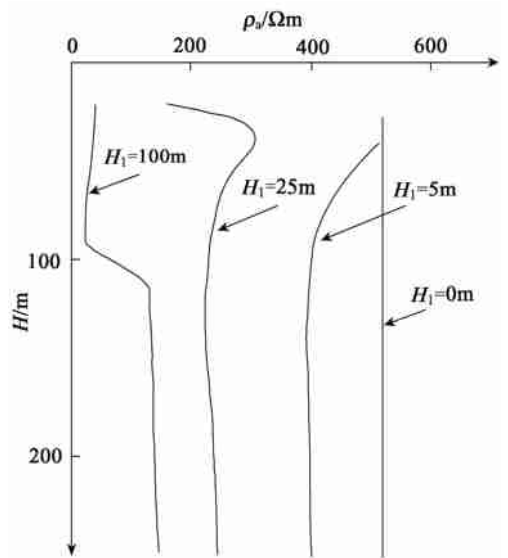


图 5 覆盖层厚度对地—井方式  $\rho_a$  的影响

Fig. 5 Effect of overburden thickness on  $\rho_a$  by the surface-borehole method

理论曲线. 模型为二层地电结构(模型参数见图示). 图示可以看出, 覆盖层厚度为 0 时, 地—井方式观测  $\rho_a$  值与对应层真实电阻率值一致. 随着覆盖层厚度的增大, 地—井方式观测  $\rho_a$  值明显低于对应层真实电阻率值. 覆盖层厚度为 100 m 时,  $\rho_a$  值与对应层真实值相差最大. 这表明: 随着覆盖层厚度的增大, 其影响程度越严重, 地—井方式观测  $\rho_a$  值与对应层真实电阻率值相差越大; 覆盖层厚度越薄, 影响程度越小,  $\rho_a$  值越接近于对应层的电阻率真实值. 因此, 厚层覆盖区对金属矿区井中电测地—井方式观测是极为不利的.

### 3.3 实例分析

根据 3.1、3.2 节的讨论, 在分析井中电测地—井方式实测  $\Delta V_1$ 、 $\rho_a$  值时, 要注意: (1)  $\Delta V_1$  正常场存在极值, 有时会掩盖有用信息, 对于  $\Delta V_1$  出现的极值应在排除正常场特征之后再分析地质原因. (2) 层状介质地—井方式观测  $\Delta V_1$ 、 $\rho_a$  曲线在穿过地下层界面部位形成台阶异常, 这种由层状介质引起的台阶异常有时会掩盖金属矿区井中电测的有用信息, 故在实际工作中, 可以模拟实际条件用正演计算除去背景场, 然后分析剩余异常, 效果会更好.

图 6 为水槽模拟倾斜铜板地—井方式观测的  $\Delta V_1$  曲线图. 图中  $\Delta V''_1$  为实测  $\Delta V_1$  值减去正常场

$\Delta V'_1$  理论值后得到的异常曲线. 图示可见在铜板对应部位  $\Delta V''_1$  有明显的异常反映, 较  $\Delta V_1$  能更准确、更直观地确定异常源的空间位置及规模.

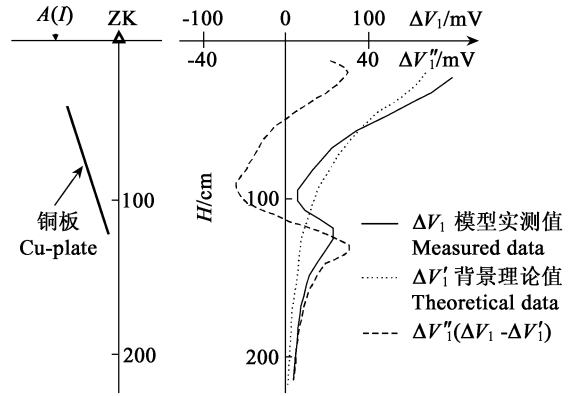


图 6 水槽模拟倾斜铜板地—井方式观测  $\Delta V_1$  曲线  
Fig. 6  $\Delta V_1$  curve by the surface-borehole method in pool simulation with Cu-plate

图 7 为根据上述思路对陕西某铜矿区 ZK504 孔实测资料进行处理的结果. 其中  $A_1$ 、 $A_3$  为置于地面相对于井口不同方位处的供电电极,  $r_1$ 、 $r_3$  分别为供电电极  $A_1$ 、 $A_3$  至井口的水平距离,  $\Delta v_1$  为电位梯度  $\Delta V_1$  对电流( $I$ )和测量极距( $MN$ )归一后的值. 图示可以清楚地看出,  $A_1$ 、 $A_3$  方位层状介质引起的台阶

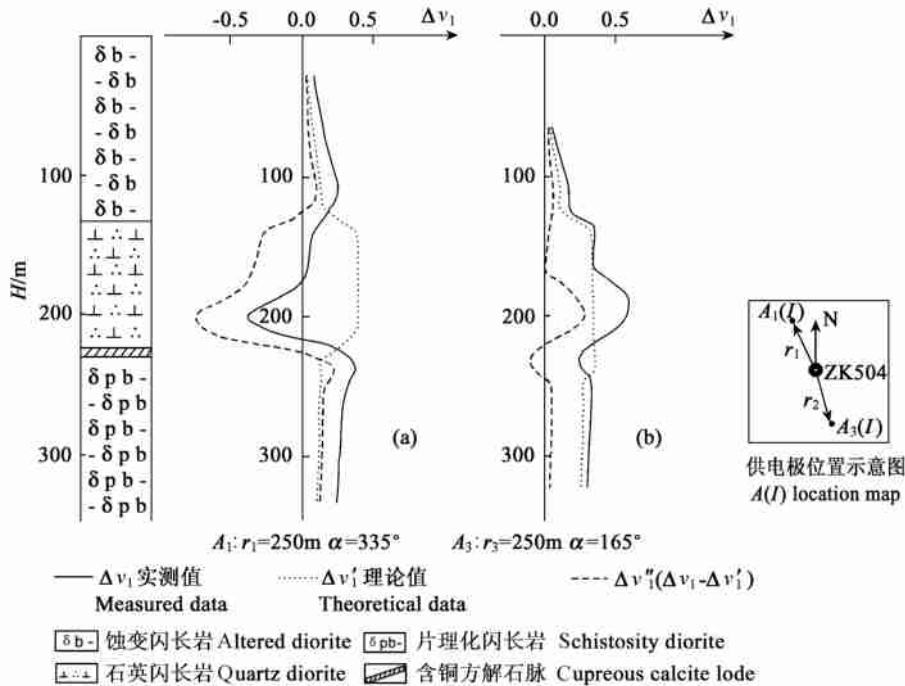


图 7 陕西某铜矿区 ZK504 孔地—井方式  $\Delta V_1$  结果  
Fig. 7  $\Delta V_1$  curve by the surface-borehole method in ZK504

of Shanxi Province a copper ore mine

异常被改正后,  $\Delta V''_1$  ( $\Delta V_1$  实测值 -  $\Delta V'_1$  理论值) 异常相对清晰明显. 在钻孔见矿部位  $A_1$ 、 $A_3$  方位  $\Delta V''_1$  异常曲线均有过零点对应.  $A_1$  方位  $\Delta V''_1$  异常曲线呈相对的“S”型(图 7a),  $A_3$  方位  $\Delta V''_1$  异常曲线呈相对的反“S”型(图 7b), 且  $A_1$  方位  $\Delta V''_1$  异常规模大, 幅值强. 预示  $A_1$  方位有一定规模的良好导体存在. 随后的钻探结果证实了这一推断.

## 4 结 语

数值模拟和物理模拟是应用地球物理方法研究的重要手段, 可以帮助了解地电模型与地球物理场之间的物理过程与映射关系, 同时有助于正确认识不同地质条件下物理场的分布特征, 这对地球物理工作者客观正确地分析、解释异常是十分有益的. 本文通过水平层状介质井中电测地—井方式  $\Delta V_1$ 、 $\rho_a$  参数的数值计算, 对层状介质情况下地—井方式观测引起的  $\Delta V_1$ 、 $\rho_a$  异常曲线特征有了明确的认识, 并对覆盖层对井中电测地—井方式观测的影响进行了讨论. 提出了分析金属矿区井中电测地—井方式观测  $\Delta V_1$ 、 $\rho_a$  异常时要考虑层状介质正常场特征. 水槽模拟和应用实例表明, 对实测资料进行正常场改正, 可以突出矿化体引起的异常, 使物探解释推断更准确、客观.

## 参考文献(References)

- [ 1 ] 蔡柏林. 钻孔地球物理勘探. 北京: 地质出版社, 1986  
Cai B L. Borehole Geophysics Prospecting (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1986
- [ 2 ] 温少光. 井中激发激化法在峰崖寻找铅锌矿的应用. 地质与勘探, 1982, 17(4): 46~51  
Wen S G. The application of borehole IP method to detecting Pb-Zn deposits in Fengya. *Geology and Prospecting* (in Chinese), 1982, 17(4): 46~51
- [ 3 ] 郭文波. 层状介质对井中电测的影响. 西北金属矿产地质, 1992, (2): 72~79  
Guo W B. Layered media influence on borehole electric exploration. *Northwest Mineral Resources and Geology* (in Chinese), 1992, (2): 72~79
- [ 4 ] 葛为中. 层状介质点源场正演解析及其应用. 地球物理学报,

1994, 37(增II): 534~541

Ge W Z. The forward solution of the electrical field due to a point source in layered media and its applications. *Chinese J. Geophys.* (*Acta Geophysica Sinica*) (in Chinese), 1994 37(Suppl. II): 534~541

- [ 5 ] 陈序三, 赵文杰, 朱留方. 复电阻率测井方法及其应用. 测井技术, 2001, 25(5): 327~331  
Chen X S, Zhao W J, Zhu L F. Complex resistivity logging and its applications. *Well Logging Technology* (in Chinese), 2001, 25(5): 327~331
- [ 6 ] 杨 . 方位梯度电极系的正反演. 地球物理学报, 1999, 42(4): 564~571  
Yang W. Forward and inversion of azimuthal lateral sonde. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1999, 42(4): 564~571
- [ 7 ] Alumbaugh D L, Morrison H F. Theoretical and practical considerations for crosswell electromagnetic tomography assuming a cylindrical geometry. *Geophysics*, 1995, 60(3): 846~870
- [ 8 ] 谭廷栋. 当今测井技术的前沿. 国外测井技术, 1992, 7(4): 302~310  
Tan T D. The leading edge of today's well loggings. *Journal of Foreign Well Loggings* (in Chinese), 1992, 7(4): 302~310
- [ 9 ] 张庚骥, 汪涵明, 汪功礼. 成层介质中交流电测井响应. 地球物理学报, 1995, 38(6): 840~849  
Zhang G J, Wang H M, Wang G L. A. C. logging response in stratified media. *Chinese J. Geophys* (in Chinese), 1995, 38(6): 840~849
- [ 10 ] 熊 彬, 阮百尧. 电位双二次变化二维地电断面电阻率测深有限元数值模拟. 地球物理学报, 2002, 45(3): 285~294  
Xiong B, Ruan B Y. A numerical simulation of 2-D geoelectric section with biquadratic change of potential for resistivity sounding by the finite element method. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, 45(3): 285~294
- [ 11 ] Waxman M H, Smits L JM. Electrical conductivities in oil bearing shaly sands. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1968, 107~122
- [ 12 ] 傅良魁. 电法勘探教程. 北京: 地质出版社, 1983  
Fu L K. Electrical Prospecting Course (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1983
- [ 13 ] 郭文波, 樊金生. 小秦岭金矿区井中电测方法技术应用研究. 见: 地球物理年刊. 西安: 西安地图出版社, 1996 95  
Guo W B, Fan J S. Method of borehole electric exploration for Au in Xiaoling Mountains. In: Annual of the Chinese Geophysical Society (in Chinese). Xi'an: Xi'an Cartographic Publishing House, 1996 95
- [ 14 ] 王立秋, 魏焕彩, 周学圣. 工程数值分析. 济南: 山东大学出版社, 2002  
Wang L Q, Wei H C, Zhou X S. Engineering Numerical Analysis (in Chinese). Jinan: Shandong University Press, 2002

(本文编辑 汪海英)