

TEM 中心回线测深解释新参数 Δn 的数学模型研究

蒋邦远, 张杰

(中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000)

摘 要: 层状大地上中心回线及重叠回线的近区视电阻率公式中, 延时 t 的幂指数 n 以往都当作常数, 实际是一变数。笔者推导证明它的差值 Δn 与视纵向电导 S 的对数差分相当, 因此可以用于直接划分地层的解释。为此做了相当数量的数学模型计算, 结果表明在一定条件下能较好地划分地层, 但观测精度要求很高。

关键词 TEM 中心回线 新参数 Δn 数学模型 差分直接反演划分地层

中图分类号: P631.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2002)06-0478-05

电测深的目的就是划分地层, 因此无需预设各层电阻率值的直接反演法受到解释者的关注。差分是反演方法中的一种, 它最先用于处理电阻率法找水的数据, 虽然这样做并无严格的理论根据, 但实用效果较好, 现已较常用于电阻率测深的反演解释^[1]。而后, 磁大地电流法的电阻率差分^[2]以及长偏移瞬变场法 (LOTEM) 的视纵向电导的标准化导数的应用或介绍常见于杂志^[3], 这就使得磁源 TEM 数据解释者开始探讨将此类方法应用于中心回线法的效果。对它的看法有 3 种: ①没有理论依据, 只是在一定条件下的经验结果; ②认为效果很好, 表现在对曲线的每一个弯曲或峰值都归于一个地层; ③精度要求太高, 无实用价值。笔者试图对此 3 个观点给予粗浅的分析, 以引起同行的注意, 达到正确运用的目的。

1 理论分析

1.1 总纵向电导与水平层状大地界面的联系

俄罗斯著名电法专家 B·A·西道诺夫给出总纵向电导 S 与各层纵向电导的关系式如下^[4]

$$S(h) = \int_0^h \sigma(h) dh = S_1 + S_2 + S_3 + \dots, \quad (1)$$

对于三层大地由 (1) 式可写成:

$$S = h_1/\rho_1 + h_2/\rho_2 + h_3/\rho_3. \quad (2)$$

设有如图 1 所示的三层大地, 按 (2) 式得到 3 条斜率不同的直线, 2 个连接点正对应中间层的上、下界面。显然 S 曲线斜率 dS/dh 为 3 条间断的水平线, 间断点正对应界面, 其特征相当矩形波, 其导数为正、负线性脉冲, 由图 1b、c 可看出, 不论是线性脉冲

或尖脉冲都正对应界面。这就是纵向电导二次导数极值可划分界面的依据。顺便指出有文章提到 S 曲线拐点对应界面的说法是不正确的, 或是 S 定义

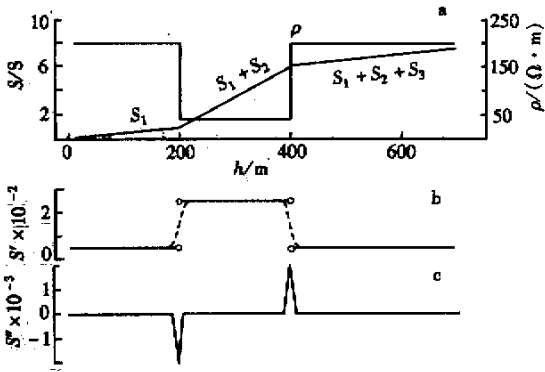


图 1 S 及其导数与中间层界面的关系

不同。1.2 Δn 定义及与层状界面的联系

1.2.1 问题的提出

(1) 式只是理想假设, 在计算上部纵向电导时不考虑下部地层的作用, 计算下部地层纵向电导时又只把上部的当作常数, 这都不符合电磁波传播的严格理论。由实测电动势求 S 的公式有二: 一是由浮动板理论导出的 S_r 式^[5]; 二是先求视电阻率, 再由据烟圈理论导出的 S_r 式求视纵向电导^[6]。

按图 1 数学模型计算的 S_r , 它的一、二次导数示于图 2。对比图 1 和图 2, S_r 和 S 相近, 但一、二次导数曲线都相差较远, 从而正、负峰位置与界面位置相差较远。经分析计算, S_r 和 S_r 对深度 h 或延时 t 求

二次导数都能得到正负峰。因此问题转换为采用 S_r 或 S_r 对 h 还是 t 求 3 次导数的效果最好。

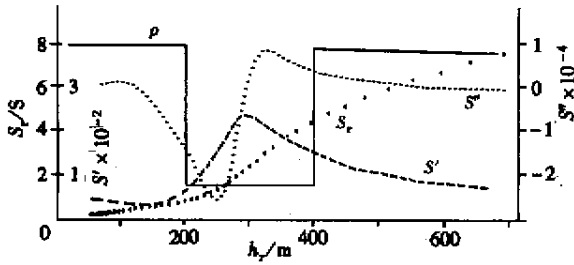


图 2 S_r 及其导数与中间层界面的关系

经过分析计算,最终选定 n 参数的差值 Δn ,理由概括为:①因为延时 t 是对数等间隔,对应的 h 是非等隔的,差分时需要插值;② G 与 t 的关系是非线性的,也不宜对 t 求导;③ S_r 公式适宜薄导电板,不适宜其它电性层;④ Δn 峰值位置比较贴近界面,且适宜各种电性层。

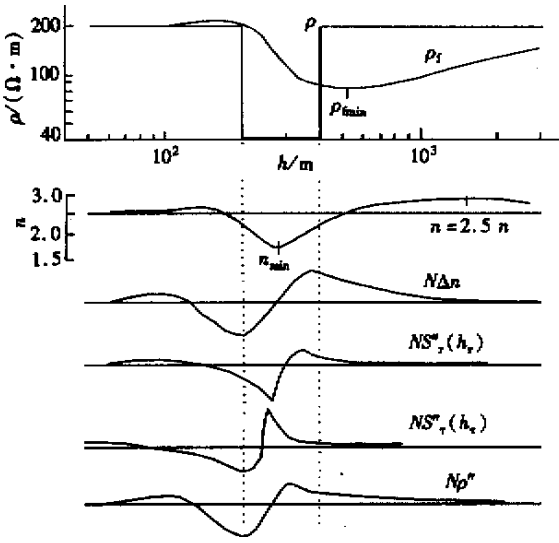


图 3 几种差商曲线与模型界面的对比

图 3 为各种参数二次差分的对比,由图可见归一化 Δn 峰值与界面对应较好,其原因是 n 曲线很好地随 ρ 的变化而变化。此图各参数都归一(N),以便对比。

1.2.2 Δn 定义及与其它参数的联系

层状大地的中心回线响应表达式为

$$\epsilon = I\mu_0^{5/2} A_R b^2 / (20\pi^{3/2} \rho^{3/2} t^{5/2}), \quad (3)$$

式中延时 t 的幂指数 $n = 2.5$, 实际上 n 为变数,反映 ϵ 随 t 变化的斜率,并由下式定义

$$n = \lg \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} / \lg \frac{t_2}{t_1}, \quad (4)$$

式中 t_2 和 t_1 为相邻采样延时, $t_2 > t_1$, ϵ_1, ϵ_2 为 t_1, t_2 延时的瞬变电动势。两斜率之差即为 Δn 。

延时 t 一般是等于或接近对数等间距的,即 $t_2/t_1 \approx k, k$ 为常数,则有

$$\Delta n = \lg \frac{\epsilon_2^2}{\epsilon_1 \epsilon_3} / \lg k. \quad (5)$$

前面提到的由烟圈理论导出的视纵向电导公式为 $S_r = 28.08 \sqrt{t/\rho}$ [6], 对应的视深度表达式为 $h_r = 28.08 \sqrt{t\rho}$, 通过计算,可得

$$\lg S_r'' = \lg \frac{S_r^2}{S_1 S_3} / (\lg k)^2, \quad (6)$$

(6) 式与 (5) 式只差一个常数 $1/\lg k$, 这足以说明 Δn 的意义。

由公式 (3) 和公式 (5) 得到下式

$$\Delta n = \frac{3}{2} \lg \frac{\rho_1 \rho_3}{\rho_2} / \lg k, \quad (7)$$

由全区视电阻率公式求出的视电阻率在此式中仍适用。

2 Δn 曲线的基本特点

2.1 二层曲线

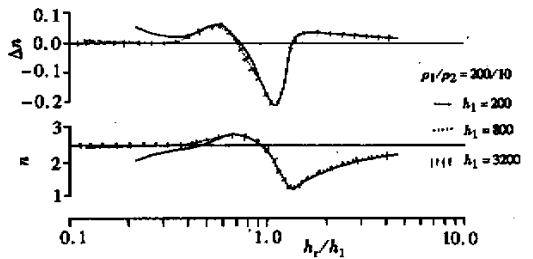


图 4 二层 D 型模型的正演曲线

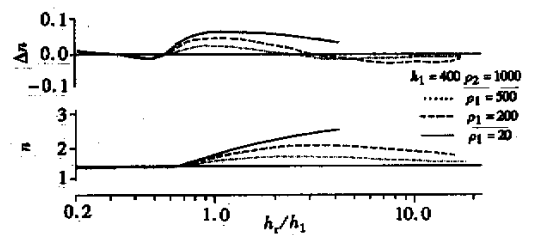


图 5 二层 G 型模型的正演曲线

图 4 为 $\mu_2 < 1$ 的 D 型模型的正演曲线。当 h_1 很深、延时早时, 响应很少受下层影响, 满足近区公式, $n = 2.5$; 当延时增加, 视深度加大, 逐渐受到低阻层的影响, 响应衰减的斜率 n 增大, 出现所谓‘上凸’现象, 而后受低阻影响, 响应衰减变慢, 最后下层影响愈来愈大, 衰减又趋于正常。 n 曲线这种变化含有 5 个特征点, 由浅向深为拐点 1、正极大、拐点 2、负极小和拐点 3, 从而得到, $\langle + \rangle$ 、 $\langle - \rangle$ 、 $\langle + \rangle$ 异常。三峰中 $\langle - \rangle$ 峰最强, 正对界面, 第一正异常大于

第二正异常。异常的特征与幅度只与 ρ_2/ρ_2 有关，而与 h_r/h_1 无关。

G 型($\mu_2 > 1$)模型的地层特征与上面相反, n 曲线特征也相反(图 5), 自然出现的是 $\langle - \rangle$ 、 $\langle + \rangle$ 、 $\langle - \rangle$ 异常, 不过浅部异常很弱可勿略, 深部的负异常位于 $h_r/h_1 \approx 8$ 的地方, 有时会被误认为是另一地层的反应。

Δn 的幅度是 ρ_2/ρ_1 的函数。图 6 中 $\rho_2/\rho_1 = 10$ 处的 $\Delta n_{\max}$ 已达到饱和值的 93%, 与相当的 $\Delta n_{\min}$ 相比只有 0.37 倍。可见高阻层远不如低阻层的容易

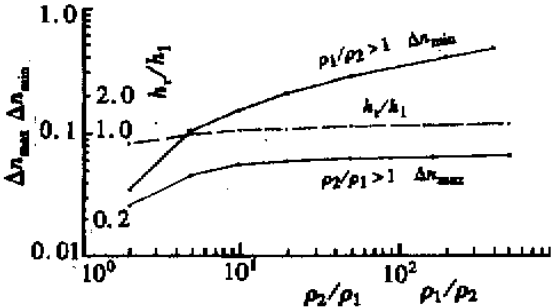


图 6 二层模型 Δn 极值与几种比值的对应关系发现, 而 h_r/h_1 的变化基本稳定。

2.2 三层曲线

三层曲线的基本特点可以看做 2 个二层曲线 Δn 的叠加和连接。

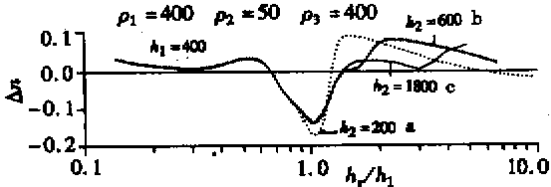


图 7 一、二类 H 型断面 Δn 曲线特征

2.2.1 H 型断面

H 型 Δn 曲线按形态不同可分为 3 类。第一类曲线为负异常圆滑地变到第 2 正异常(图 7 中曲线 a)。当 h_2 可与 h_1 可比时出现。

第二类曲线(图 7 中曲线 b, c)的中间层很厚, 约 $h_2/h_1 \geq 1$, 所以明显地表现为 D 与 G 的 Δn 曲线的连接, 它的上、下界可由 $\Delta n_{\min}$ 和第二 $\Delta n_{\max}$ 的坐标较准确的定出。

第三类曲线为 $S_2/S_1 \geq 2$ 的良导薄层引起, 如图 8 所示曲线 34。曲线 3 与第一类曲线特征相似。随着 S_2/S_1 的增大, $|\Delta n_{\min}|$ 急增, 且曲线“倒转”, 即同

一视深度有 $-\Delta n$ 和 $+\Delta n$ 值, 如图 8 曲线 4。此类曲线无法确定中间层的厚度, 从薄层的定义也无厚度参数, 只有电导参数, 能确定的只是中间层深度, 且误差较大, 约 20%。

图 8 还给出 $S_2/S_1 < 2$ 的 Δn 曲线, 曲线跳跃, 实测数据无法利用, 故未归类, 仅供参考。

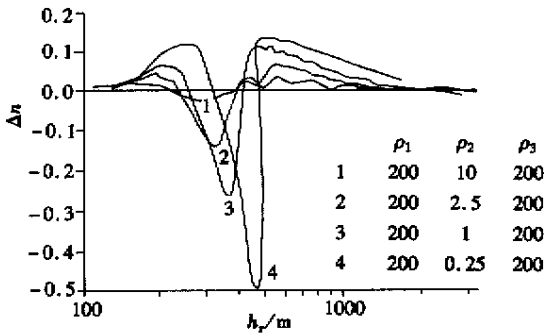


图 8 薄良导体不同 S_2/S_1 的 Δn 曲线

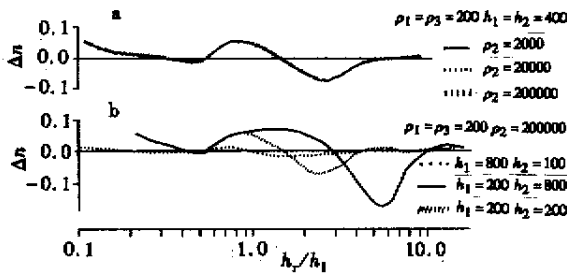


图 9 K 型断面 Δn 曲线

2.2.2 K 型曲线

K 型曲线遵守“H 等值原理”, 影响曲线形态的主要是中间层厚度, 电阻率在很宽的范围内变化, 不影响曲线形态与幅度, 因此图 9 概括了它的基本特征。图 9a 中 ρ_2 变化达 100 倍, ρ_2/ρ_1 达 1 000 倍, 在野外实际几乎是不会出现的。然而 3 种情况的曲线重合, 改变 h_2 , 相当于改变了第一层界面的 $\Delta n_{\max}$ 与第二层界面的第一 $\Delta n_{\max}$ 和 $\Delta n_{\min}$ 的叠加情况。 Δn 曲线的主要特征是, $\langle + \rangle$ 、 $\langle - \rangle$ 峰在相当宽的范围内 ($h_2/h_1 = 0.22$) 近似一个周期的正弦波, 两峰约对边界, 零点约在中间层中部。当 $h_2/h_1 > 2$, 正峰逐渐成为“平台”, 负峰幅度增大, 形状远远偏离正弦波形, 但零点更接近中间层中部, 负峰更接近底界面。但两峰的间距总大于中间层厚度, 故需乘一改正系数 0.40.8。但计算模型少, 提不出如何正确选择具体系数的办法。结论是 K 型曲线定中间层中心位置较难, 定边界欠准。

2.2.3 Q 型和 A 型断面

图 10 是精心设计的 Q、A 模型的计算结果。 Δn 曲线明确有 2 个二层大地 Δn 的叠加连接特征,极值与界面对应很好,而晚期视电阻率 ρ_1 反映较差或全无反映。 Δn 划分界面的能力从模型参数可知主要取决于 h_2 的大小。Q 模型中 $h_2 = 40$ m 时,中间层上界对应的 $\Delta n_{\min}$ 消失,叠加形成的较强 $\Delta n_{\max}$ 也消失,完全是 D 型的 Δn 曲线特征。

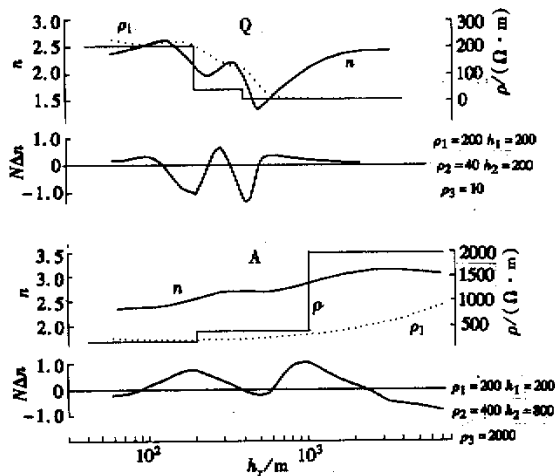


图 10 Q 型和 A 型断面的 Δn 曲线

同样,A 模型中 $h_2/h_1 = 1$ 时,完全是 G 二层模型 Δn 的特征, Δn 的幅值很小,此 2 点使 A 型的界面大多是无法划分的。

图 10 与图 3 一样, Δn 采用归一化,即以延时系列中幅值最大的值除以其他值,这样做有利于比例尺的选择,绘制拟剖面时可避免曲线的交叉或是有用讯号受到压制,利于对比。

2.2.4 HKH 五层曲线

五层曲线的特征是二层和三层曲线的复杂叠加与衔接,尚未着手研究。基本分析认为,可以用二、三层曲线的特征解释多层曲线特征,其深部地层划分的误差较大。

3 观测误差

设电动势 ϵ_1, ϵ_2 和 ϵ_3 的观测精度相等,且处于最不利的条件,即 $\Delta\epsilon_1$ 和 $\Delta\epsilon_3$ 的符号与 $\Delta\epsilon_2$ 相反,则对(5)式微分,取 $k = t_j/t_i = 1.151.25$,整理简化后得

万方数据
$$\frac{4d\epsilon}{\ln k \epsilon} \approx 22 \frac{d\epsilon}{\epsilon} \quad (12)$$

根据相当数量的数学模型计算,当 $k = 1.15$ 时,有意义的最低异常值约 $\Delta n = 0.1$ 。设 $\Delta n/3$ 的值是可信的,则观测的相对误差应当是 $\leq 0.15\%$ 。

现在国内外瞬变电磁仪的观测精度约在 $\pm (2\% \sim 10\%)$ 之间,远低于前述 0.15% 的要求,故需分析经过滤波能达到应用的最低观测精度应为若干。为此设计 2 个误差系列 误差 $\pm 0.5\%, \pm 0.6\%, \pm 0.7\%, \pm 0.8\%, \pm 0.9\%, \pm 1\%$ 和 $0, \pm 1\%, \pm 2\%, \pm 3\%, \pm 4\%, \pm 5\%$,以模彩的方式将误差随机地加在相应延时道的观测值上,而后做滤波处理,结果示于图 11。图中 Δn_0 为未加误差得到的 Δn ; Δn_1 为加第一误差系列后的计算结果; Δn_{i1} 为对 Δn 做滤波后的结果; Δn_{i2} 为第二系列误差经滤波后的结果;图中还给出了地电断面。

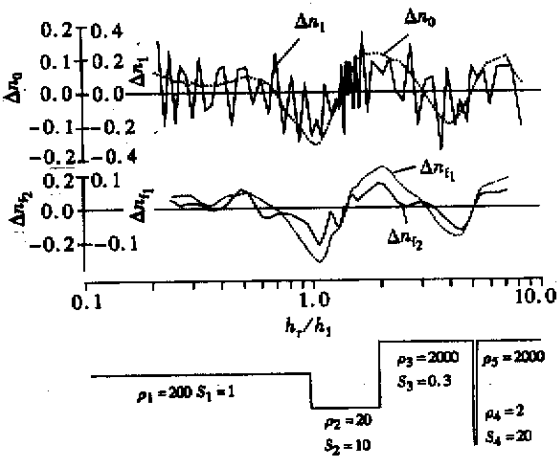


图 11 HK 型断面不同误差的 Δn 曲线及滤波效果对比
由上述曲线的特征可以认为,实测精度达到 2% 的数据可以计算 Δn ,并用于划分界面。

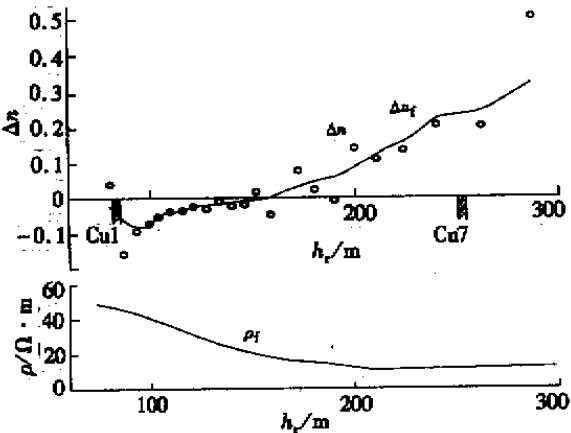


图 12 Δn 数据平滑滤波的效果

图 12 为利用内蒙通榆山 10 线 3700 号点的数据计算的 Δn 和经滤波后的 Δn_f 。该区电磁干扰很弱,观测精度各延时道的平均相对误差为 1%~5%。此点附近的 9301 孔见矿 7 层,82 m 处见第一层,252 m 处见第七层。 Δn 曲线突变点甚多,无法利用。经滤波得到的 Δn_f 曲线已趋圆滑。可以认为 $\pm 2\%$ 的精度是适中的。

Δn_f 曲线无法反映 7 个矿体,但很好地反映了含矿带的顶部与中部位置,底部位置不明确。

4 小结

- (1)视纵向电导及与它有关参数的二次差商的极值与界面之联系是有理论依据的,但不严格。
- (2)离散数据差商曲线的极值与界面的对应关系是近似的 近似程度最好的是 Δn 曲线。
- (3) Δn 曲线划分地层的能力以二层最好,层数愈多愈差 ;导电层最好,高阻层差 ;浅部好、深部差 ;原岩层好,薄层差。
- (4)从理论基础判断,由同一观测值所做的各种计算处理并不会增加新的信息,只是因表现形式不

同而突出某一部分, Δn 曲线突出的是地层划分。

(5)要利用 Δn ,原始数据精度应 $\leq \pm 2\%$ 。

本文部分计算由杜庆丰高工完成 ;与吕国印高工讨论过本文有关内容 ;朱梅生教授级高工阅看了全文,提出有益的意见。在此一并致谢。

今年为中华人民共和国地质部成立 50 周年,特撰此文以为纪念。

参考文献 :

[1] 杜荣光.电阻率测深曲线解释的数值差分法[J].物探与化探,2000,24(6).
[2] 李立.磁大地电流测深曲线的连续模型一维反演程序[J].物探化探计算技术,1986(增刊).
[3] 金祖发,何展翔.用于油气勘探的固定源建场测深法[A].李金铭.电法勘探新进展[C].北京:地质出版社,1996.
[4] 西道诺夫 B A.脉冲感应电法勘探[M].牛之琰,译.中南工业大学电磁法研究组,1991.
[5] 朴化荣.电磁测深原理[M].北京:地质出版社,1990.
[6] 蒋邦远.实用近区磁源瞬变电磁法勘探[M].北京:地质出版社,1998.
[7] 莫承彬,覃佑邦,刘康华.二阶差分法在电阻率测深中的应用[J].物探与化探,1995,19(1).

MATHEMATICAL MODEL FOR INTERPRETATION OF NEW PARAMETER Δn
DEDUCED FROM TEM CENTRAL LOOP SOUNDING

JIANG Bang-yuan, ZHANG Jie

(Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China)

Abstract : In the near-zone apparent resistivity formula of central loop and coincident loop in layered ground, the power n of time-delay t was formerly regarded as a constant. In fact, it is a variable. This paper has proved through inference that its Δn -value is equivalent to the logarithmic difference of apparent longitudinal conductances. Therefore it can be used to interpret the direct division of strata. For this purpose, the authors made quite a lot of mathematical model calculations, and the result shows that under certain circumstances the strata can be rather satisfactorily divided ; nevertheless, the observation precision should be very high.

Key words : central loop TEM ; new parameter Δn ; mathematical model ; division of strata by difference direct inversion

作者简介:蒋邦远(1931 -),男,教授级高工,政府特贴获得者,1952 年毕业于南京大学物理系,退休前任物化探所电法研究室主任,长期从事电磁法研究,现任 863 计划中超导在物探中的应用项目顾问。合译(俄文)、译(英文)、编著书各 1 册,获专利 1 项,发表论文、译文近 40 篇。

上接 474 页

Key words : potential field ; analytical continuation ; principal component analysis

作者简介:陈玉东,男,1989 - 1993 年在莫斯科国立地质勘探学院攻读研究生,获博士学位。1994 - 1996 年在该院继续作研究。1997 年归国至今,在中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院工作,主要从事地球物理数据处理、解释以及数字信号处理的科研与教学。