

文章编号: 1001—1749(2011)03—0300—04

Guptasarma 线性滤波算法在 CSAMT 一维正演中的应用

尤 淼¹, 王绪本¹, 周茂林²

(1. 成都理工大学 信息工程学院, 成都 610059;

2. 中油集团川庆钻探工程公司 地球物理勘探公司, 成都 610213)

摘 要: CSAMT 法一维正演问题, 其核心运算是汉克尔变换的求解, 目前主要使用数值滤波方法进行求解, 求解过程中使用给定长度的滤波系数进行累加运算。滤波系数的选取影响着正演计算的精度和速度。这里使用 GuptaSarma 线性滤波系数, 并给出具体实现方法。经过正演模型验证, 发现这套方案可以在较短的滤波系数长度基础上, 与正演模型拟合良好。这为下一步的反演或拟二维正演工作, 打下良好的基础。

关键词: CSAMT; 一维正演; 快速汉克尔变换; 数值滤波

中图分类号: P 631.3⁺25 **文献标识码:** A

0 前言

可控源音频大地电磁法(CSAMT)是一种频率域电磁法,使用地面偶极子或水平回线作为人工场源。多年来 CSAMT 法已经发展为一种强有力的勘探工具,应用于寻找矿产、地热、地下构造和地下水等^[1]。由于使用的是人工场源,因此存在其自身的特点和问题需要解决,如静态效应、近场效应等。CSAMT 法一维正演问题,其核心运算是汉克尔变换的求解,目前主要使用数值滤波方法进行求解,在求解过程中,使用给定长度的滤波系数进行累加运算。因此滤波系数的选取,影响着正演计算的精度和速度。Anderson^[2]提出一套 283 点滤波系数方案,对于这套滤波系数,殷长春等^[3,4]进行了任意角度 CSAMT 一维正演计算。作者在本文选取一套新的滤波系数,它是 GuptaSarma^[5]提出的 61 点和 47 点滤波系数,经过模型验证,使用这套较短的滤波系数在计算速度提高的同时,可以获得良好的正演结果。同时,对瞬变电磁、直流电法等正演问题,这套滤波系数方案同样适用。

1 CSAMT 法基本原理

1.1 布极方式

地电模型如图 1 所示,各向同性水平层状介

质,发射偶极走向 x 轴和接收偶极 $m \sim n$ 平行,其偶极中心 o 与 $m \sim n$ 中点连线为收发距 r ,且 r 与偶极走向 x 轴角度为 θ 。在电偶极走向 x 轴上,接地导线长度为 dL ,电流强度为 I ,则其电极距强度为 $M_e = IdL$ 。

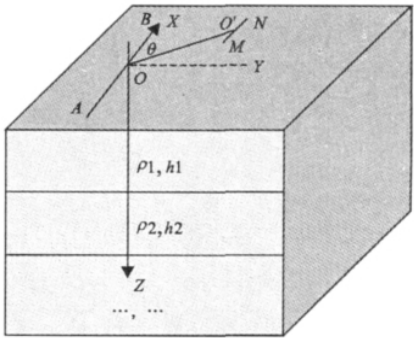


图 1 CSAMT 布极方式

Fig. 1 The approach of planting poles of CSAMT method

1.2 CSAMT 一维正演

当电场强度 E 和磁场强度 H 取谐变形式时,经过傅里叶变换,频率域 MAXWELL 方程为式(1)。

$$\begin{aligned} \nabla \times H &= (\sigma - i\omega\epsilon) E + J' \\ \nabla \times E &= i\omega\mu H + i\omega\mu M' \\ \nabla \cdot E &= 0 \\ \nabla \cdot H &= 0 \end{aligned} \tag{1}$$

基金项目: 国家“863”重点项目(2007AA060601)

收稿日期: 2010-11-24

改回日期: 2011-03-28

其中 H 为磁场强度; E 为电场强度; σ 为直流电导率; μ 为磁导率; $\omega = 2\pi f$ 为角频率; J 为外加源电流密度; M' 为外加源等效磁化强度。

当只存在电性源 J ($M' = 0$) 时, 经过一系列推导过程^[8], 得到准静态条件下(忽略位移电流), 直角坐标系地表任意角度方向上的电磁场分量表达式 E_x 、 H_y :

$$\begin{aligned} E_x = & \sin^2 \theta \cdot \frac{Idl \cdot i\omega\mu_0}{2\pi} \int_0^\infty \frac{m}{m + n_1/R^*} \cdot \\ & J_0(mr) dm - \cos^2 \theta \cdot \frac{idl}{2\pi} \int_0^\infty \frac{n_1 \cdot m}{R^*} \cdot \\ & J_0(mr) dm + \frac{Idl \cdot i\omega\mu_0}{2\pi r} (1 - 2\sin^2 \theta) \cdot \\ & \int_0^\infty \frac{1}{m + n_1/R^*} \cdot J_1(mr) dm + \frac{Idl}{2\pi} \cdot \\ & (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta \cdot \frac{\rho_1}{r}) \cdot \int_0^\infty \frac{n_1}{R^*} J_1(mr) dm \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} H_y = & -\frac{Idl}{2\pi} \cdot \int_0^\infty \left(\frac{n_1}{R^*} - \frac{m}{m + n_1/R^*} \right) \cdot \\ & J_0(mr) dm + (1 - 2\sin^2 \theta) \cdot \frac{Idl}{2\pi r} \cdot \\ & \int_0^\infty \frac{m}{m + n_1/R^*} \cdot J_1(mr) dm \end{aligned} \quad (3)$$

其中 I 为发射端电流强度; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m 为真空磁导率; $\omega = 2\pi f$ 为角频率; θ 为偶极方向与偶极中心到测点连线的夹角; $J_i(mr)$ ($i = 0, 1$) 是以 mr 为自变量的 0、1 阶贝赛尔函数; ρ_i 为第 i 层电阻率值; h_i 为第 i 层的厚度; $n_i = \sqrt{m^2 - i\omega\mu_0/\rho_i}$, $k_i^2 = -i\omega\mu_0/\rho_i$; R_1^* 和 \bar{R}_1^* 为二个联系各层电性参数的函数:

$$\begin{aligned} R_i^* = & \operatorname{cth} \left(n_i h_i + \operatorname{arcth} \frac{n_i}{n_{i+1}} \cdot R_{i+1}^* \right) \\ \bar{R}_i^* = & \operatorname{cth} \left(n_i h_i + \operatorname{arcth} \frac{n_i}{n_{i+1}} \cdot \frac{\rho_i}{\rho_{i+1}} \cdot R_{i+1}^* \right) \\ (i = & 1, 2, \dots, N-1), R_N^* = 1, \bar{R}_N^* = 1 \end{aligned} \quad (4)$$

对于均匀半空间模型, R_1^* 和 \bar{R}_1^* 均为 1; 对于多层模型, R_1^* 和 \bar{R}_1^* 由各层电参数自下而上推得。分别计算电场和磁场水平分量, 使用卡尼亚视电阻率公式(5), 即可求得不同频率范围的视电阻率值。

$$\rho_\omega = \frac{1}{\mu_0 \omega} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (5)$$

2 Guptasarma 线性滤波算法

在电磁场表达式中, 存在形如 $F(r)$ 的积分, 称为汉克尔积分:

$$F(r) = \int_0^\infty f(m) J_i(mr) dm \quad (i = 0, 1)$$

其中, 汉克尔积分的核函数 $J_i(mr)$ 为 0 阶 ($i = 0$) 或 1 阶 ($i = 1$) 贝赛尔函数, 对此可使用数值滤波方法进行计算。作者在本文中, 采用 Guptasarma 和 Singh^[5] 给出的 61 点汉克尔 J_0 变换线性滤波器和 47 点汉克尔 J_1 变换线性滤波器进行计算。正演结果表明, 这套滤波系数方案具有良好的计算精度和计算速度。

使用这套滤波系数, 首先需要使用公式(6), 将汉克尔积分离散化

$$F(r) = \frac{\sum_{i=1}^n f(10^{[a+(i-1)s]}/r) C_i}{r} \quad (6)$$

其中 n 为积分区间的长度; C_i 为滤波系数。

对于 J_0 : $a = -5.082\,5$, $s = 1.166\,383\,038\,62\text{e} - 01$, 使用 61 点滤波系数(见下页表 1)。

对于 J_1 : $a = -3.050\,781\,875\,95$, $s = 1.105\,990\,100\,95\text{e} - 1$, 使用 47 点滤波系数(见下页表 2)。

3 模型对比

基于图 1 布极方式, 作者分别取均匀半空间, H 型、A 型、K 型一维地电模型。各模型分别取收发距为 6 km 和 14 km 的曲线进行对比, 频率范围取 $f = 2^{-2}$ Hz $\sim 2^{17}$ Hz。采用 FORTRAN 语言编写程序, 正演结果曲线均采用双对数坐标系表示。

3.1 均匀半空间

均匀半空间模型, 电阻率 ρ 为 $1\,000\,\Omega \cdot \text{m}$ 。模型层厚度为 ∞ , 如下页图 2 所示。曲线在高频部份均与模型初始值吻合, 但在进入低频部份后, 出现明显的近场效应, 曲线出现了假值, 并且收发距 2 km 的曲线首先进入近场区 (10^3 Hz), 收发距 8 km 的曲线后进入 (10^2 Hz)。收发距越大, 近场效应越不明显。正演程序使用主频 2.2 GHz 处理器运行十次, 平均计算时间为 0.21 s。

3.2 H 型

三层电阻率模型, 第一层厚度 $h_1 = 500$ m, 电阻率 ρ_1 为 $1\,000\,\Omega \cdot \text{m}$; 第二层厚度 $h_2 = 500$ m, 电阻率 ρ_2 为 $50\,\Omega \cdot \text{m}$; 第三层厚度 $h_3 = \infty$, 电阻率 ρ_3 为 $1\,000\,\Omega \cdot \text{m}$ 。如下页图 3 所示, 曲线在高频部份均与模型初始值拟合较好, 在进入低频部份时出现明显的近场效应, 曲线出现假值。二条曲线在大约 $f = 10$ Hz 处开始先后进入近区, 正演程序

表 1 含零阶贝赛尔函数积分的 61 点滤波系数
Tab. 1 61 filter coefficients of J0

3.30220475766e-4 ,	-1.18223623458e-3 ,	2.01879495264e-3 ,
-2.13218719891e-3 ,	1.60839063172e-3 ,	-9.09156346708e-4 ,
4.37889252738e-4 ,	-1.55298878782e-4 ,	7.98411962729e-5 ,
4.37268394072e-6 ,	3.94253441247e-5 ,	4.02675924344e-5 ,
5.66053344653e-5 ,	7.25774926389e-5 ,	9.54412535465e-5 ,
1.24699163157e-4 ,	1.63262166579e-4 ,	2.13477133718e-4 ,
2.79304232173e-4 ,	3.65312787897e-4 ,	4.77899413107e-4 ,
6.25100170825e-4 ,	8.17726956451e-4 ,	1.06961339341e-3 ,
1.39920928148e-3 ,	1.83020380399e-3 ,	2.39417015791e-3 ,
3.13158560774e-3 ,	4.09654426763e-3 ,	5.35807925630e-3 ,
7.00889482693e-3 ,	9.16637526490e-3 ,	1.19891721272e-2 ,
1.56755740646e-2 ,	2.04953856060e-2 ,	2.67778388247e-2 ,
3.49719672729e-2 ,	4.55975312615e-2 ,	5.93498881451e-2 ,
7.69179091244e-2 ,	9.91094769804e-2 ,	1.26166963993e-1 ,
1.57616825575e-1 ,	1.89707800260e-1 ,	2.13804195282e-1 ,
2.08669340316e-1 ,	1.40250562745e-1 ,	-3.65385242807e-2 ,
-2.98004010732e-1 ,	-4.21898149249e-1 ,	5.94373771266e-2 ,
5.29621428353e-1 ,	-4.41362405166e-1 ,	1.90355040550e-1 ,
-6.19966386785e-2 ,	1.87255115744e-2 ,	-5.68736766738e-3 ,
1.68263510609e-3 ,	-4.38587145792e-4 ,	8.59117336292e-5 ,
-9.15853765160e-6 ,		

表 2 含零阶贝赛尔函数积分的 47 点滤波系数
Tab. 2 47 filter coefficients of J1

3.17926147465e-6 ,	-9.73811660718e-6 ,	1.64866227408e-5 ,
-1.81501261160e-5 ,	1.87556556369e-5 ,	-1.46550406038e-5 ,
1.53799733803e-5 ,	-6.95628273934e-6 ,	1.41881555665e-5 ,
3.41445665537e-6 ,	2.13941715512e-5 ,	2.34962369042e-5 ,
4.84340283290e-5 ,	7.33732978590e-5 ,	1.27703784430e-4 ,
2.08120025730e-4 ,	3.49803898913e-4 ,	5.79107814687e-4 ,
9.65887918451e-4 ,	1.60401273703e-3 ,	2.66903777685e-3 ,
4.43111590040e-3 ,	7.35631696247e-3 ,	1.21782796293e-2 ,
2.01097829218e-2 ,	3.30096953061e-2 ,	5.37143591532e-2 ,
8.60516613299e-2 ,	1.34267607144e-1 ,	2.00125033067e-1 ,
2.74027505792e-1 ,	3.18168749246e-1 ,	2.41655667461e-1 ,
-5.40549161658e-2 ,	-4.46912952135e-1 ,	-1.92231885629e-1 ,
5.52376753950e-1 ,	-3.57429049025e-1 ,	1.41510519002e-1 ,
-4.61421935309e-2 ,	1.48273761923e-2 ,	-5.07479209193e-3 ,
1.83829713749e-3 ,	-6.67742804324e-4 ,	2.21277518118e-4 ,
-5.66248732755e-5 ,	7.88229202853e-6 ,	

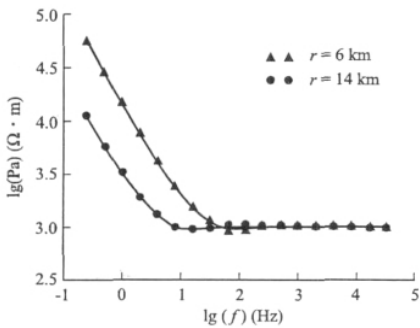


图 2 均匀半空间不同收发距视电阻率
Fig. 2 Apparent resistivity of different transceive distance in half-space

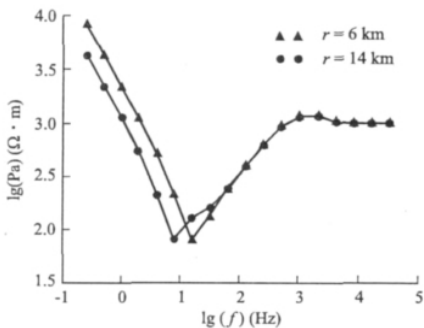


图 3 H 型断面不同收发距视电阻率
Fig. 3 Apparent resistivity of different transceive distance with H type section

使用主频 2.2 GHz 处理器运行十次 ,平均计算时间为 0.31 s。

3.3 A 型

三层电阻率模型: 第一层厚度 $h_1 = 500\text{ m}$,电阻率 ρ_1 为 $200\text{ }\Omega\cdot\text{m}$; 第二层厚度 $h_2 = 500\text{ m}$,电阻率 ρ_2 为 $500\text{ }\Omega\cdot\text{m}$; 第三层厚度 $h_3 = \infty$,电阻率 ρ_3 为 $1\,000\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 。如图 4 所示 , $r = 2\text{ km}$ 曲线在 $f = 100\text{ Hz}$ 左右开始进入近区场 , $r = 8\text{ km}$ 曲线在 $f = 10\text{ Hz}$ 左右开始进入近区场。因此 ,低频区正演结果已不能反映初始模型真实值。正演程序使用主频 2.2 GHz 处理器运行十次 ,平均计算时间为 0.34 s。

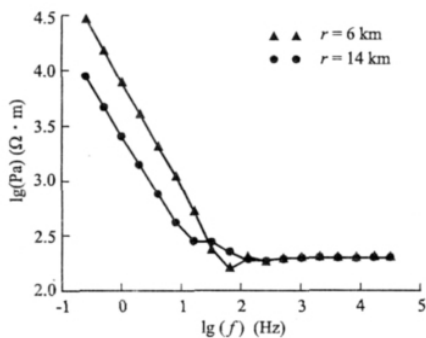


图 4 A 型断面不同收发距视电阻率
Fig. 4 Apparent resistivity of different transceive distance with A type section

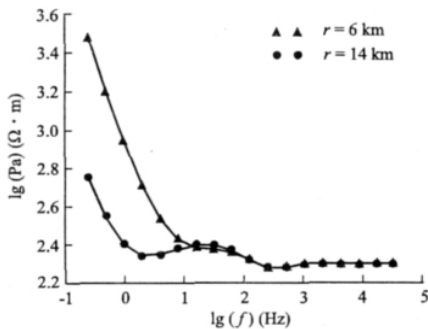


图 5 K 型断面不同收发距视电阻率
Fig. 5 Apparent resistivity of different transceive distance with K type

3.4 K 型

三层电阻率模型 ,第一层厚度 $h_1 = 500\text{ m}$,电阻率 ρ_1 为 $200\text{ }\Omega\cdot\text{m}$; 第二层厚度 $h_2 = 1\,000\text{ m}$,电阻率 ρ_2 为 $500\text{ }\Omega\cdot\text{m}$; 第三层厚度 $h_3 = \infty$,电阻率 ρ_3 为 $200\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 。如图 5 所示 ,曲线在高频部份均与模型初始值拟合较好 ,在 $f = 10\text{ Hz}$ 以上的频率 ,二曲线均能反映 K 型模型的初始值。但进入近场区以后 ,均存在明显的假值。正演程序使用主频 2.2 GHz 处理器运行十次 ,平均计算时间为

0.36 s。

4 结论

(1) CSAMT 一维正演中使用 Guptasarma 滤波系数 ,可以取得良好的计算精度和速度。在使用较短的滤波系数基础上 ,正演结果与模型基本吻合 ,为进一步做反演成像提供了条件。

(2) 各模型在高频部份不同收发距的曲线 ,均与模型初始值拟合较好 ,对于模型有较好的反映。在进入低频部份后 ,仍存在明显的近场效应。

(3) 可以看出均匀半空间 ,H 型、A 型曲线形态较好。而 K 型和 Q 型 ,曲线有一定的趋势 ,但与初始模型仍不够拟合。同时由于人工场源的特点 ,各曲线在小于 10Hz 的低频部份 ,均会出现明显的近场效应 ,已经无法正确反映地下形态。但进入近场区的先后 ,与收发距 r 有关 , r 越大 ,越晚进入近场区。因此在野外施工中 ,应该选用合适的收发距。

参考文献:

[1] PARTHA S ,ROUTH ,DOUGLAS W ,et al. Inversion of controlled source audio-frequency magnetotellurics data for a horizontally layered earth [J]. Geophysics ,1999 ,64 (6) : 1689.

[2] ANDERSON W L. Computer program numerical integration of related Hankel transforms of orders and 1 by adaptive digital filtering [J]. Geophysics ,1979 ,44: 1287.

[3] 殷长春. 可控源音频磁大地电流法一维正演及精度评价 [J]. 长春地质学院学报 ,1994 ,10(4) : 438.

[4] 殷长春. 任意角度频率测深正演计算及应用 [J]. 物探化探计算技术 ,1991 ,13(2) : 129.

[5] GUPTASARMA D ,SINGH B. New digital linear filters for Hankel J_0 and J_1 transforms [J]. Geophysical Prospecting ,1997 ,45: 745.

[6] GUPTASARMA D. Optimization of short digital linear filters for increased accuracy [J]. Geophysical Prospecting ,1982 ,30: 501.

[7] 阮百尧. 均匀水平大地上频率域垂直磁偶源电磁场数值滤波解法 [J]. 桂林工学院学报 ,2005 ,25(1) : 14.

[8] A. A. 考夫曼 ,G. V. 凯勒. 频率域与时间域电磁测深 [M]. 王建谋 ,译. 北京: 地质出版社 ,1987.

[9] 彭国伦. Fortran 95 程序设计 [M]. (第一版) . 北京: 中国电力出版社 ,2002.

[10] 徐士良. 计算机常用算法 [M]. (第二版) . 北京: 清华大学出版社 ,1995.

作者简介: 尤森 (1984 -) ,男 ,河南驻马店人 ,硕士 ,研究方向为地球物理反演与成像。

tif programming is extremely basic and tedious, while Qt has the characteristics of highly object-oriented and modularization which make the developers easier and programming efficiency higher. Design and development of common processing module integration framework is not only suitable for the migration module integration, but also for others. So the processing module interface style, the operation and the workflow control should be consistent. The main function of the integrated interface includes job deck editing, job submission, job deletion, job monitoring and some auxiliary functions. After we abstract processing module parameters highly, the module additions and modifications become very simple by using the resource file approach and module registration. We do not need to compile the control interface repeatedly, so the system's transplant and the maintenance are very convenient.

Key words: migration system; resource file; job manage; integration interface; modul register

NATURAL NEIGHBOUR INTERPOLATION AND ITS APPLICATION TO 2D GRID OF IRREGULAR DATA

ZHANG Wei, QIN Qing-yan, JIAN Xing-xiang (College of Information and Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China). *COMPUTING TECHNIQUES FOR GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION*, 2011, 33(3): 291

As the observation data is insufficient, two-dimensional interpolation of irregular discrete data is widely used in geophysics. In this paper, we researched and implemented a two-dimensional interpolation of Natural Neighbour algorithm, which will be applied to the MT 2D inversion real-time imaging. Example results show that the method has high accuracy, effective, fast and easy simulation of the data with terrain.

Key words: natural neighbours; 2D interpolation; data gridding

RESEARCH AND IMPLEMENTATION OF GIS-BASED LONG-PERIOD MAGNETOTELLURIC VISUALIZATION DATA MANAGEMENT PLATFORM

QIN Qing-yan, ZHANG Wei, WANG Xi-chong (College of information Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China). *COMPUTING TECHNIQUES FOR GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION*, 2011, 33(3): 296

The paper proposes a method which applies database and GIS technology on the visual management of LMT data contrary to the shortcomings of traditional information management methods, which integrates survey sounding location with different spatial data sources such as administrative areas information, traffic information, digital elevation and tectonic information. The paper introduces the principle and process of the platform's implement, and also describes the

realization of survey points' plane projection and survey line's straight fitting. Application results show that the platform not only effectively manages data in simple and graphical ways, but also provides necessary information for the field production and data's qualitative processing and interpretation.

Key words: long-period MT; GIS; survey line projection; geological background

GUPTASARMA LINEAR FILTERING ALGORITHM IN CSAMT ONE-DIMENSIONAL FORWARD MODELING

YOU Miao¹, WANG Xu-ben¹, ZHOU Mao-lin² (1. College of Information and Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Chuanqing Drilling Engineering Company Limited Geophysical prospecting Company, Chengdu 610213, China). *COMPUTING TECHNIQUES FOR GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION*, 2011, 33(3): 300

The basis of One dimension CSAMT forward problem is the Hankel transformation. Now the main solution to this problem is numerical filtering method, which runs the process of solving the given length of filter coefficients for additive operations. Therefore, the selected filter coefficients affect the precision and speed of the forward calculation. In this paper we use the Guptasarma linear filter coefficients and implement the algorithm. It's verified by the models that it fits well with the forward models with a relatively short length of filter coefficients, which makes a good basis of the next work in inversion or quasi two - dimensional problem.

Key words: CSAMT; one-dimensional forward calculation; fast hankel transformation; numerical filtering

DETERMINATION OF THE SPACE TREND FOR DEPTH ORE BODY BY THE ULTRA-HIGH DENSITY RESISTIVITY

MAO Hong-jiang^{1,2} (1. Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China; 2. Team 606 of Metallurgy and Geological Exploration bureau, Pengzhou Sichuan 611930, China). *COMPUTING TECHNIQUES FOR GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION*, 2011, 33(3): 304

Ultra-high density resistivity method is a new geophysical method, the method is convenient, fast, effective, large data amount and so on. Because of the complex geologic structure and the surface topography, ore body space trend and connection is difficult to be determined. By using the well to well ultra-high density resistivity method, we have obtained the expectation result.

Key words: ultra-high density resistivity method; determination of depth ore body space trend; data excavate; repeat demonstrate; mine connection

EXPERIMENTAL STUDY ON THE IMPACTS OF ELECTRODE POSITION ON ANOMALY CURVES FOR CENTRAL GRADIENT ARRAY