

文章编号: 1001—1749(2011)03—0291—05

自然邻点插值算法及其在二维不规则数据网格化中的应用

张伟,覃庆炎,简兴祥

(成都理工大学 信息工程学院 四川 成都 610059)

摘要: 由于观测数据的不足,对不规则散点数据的二维插值在地球物理中应用非常广泛。这里研究并实现了自然邻点二维插值算法,并以一个大地电磁测深反演数据为例,验证了该方法的可行性与效果。实际资料试算与成图结果表明,该方法具有精度高、插值效果好、速度快以及便于模拟地形数据等优点。

关键词: 自然邻点; 二维插值; 网格化

中图分类号: P 631 **文献标识码:** A

0 前言

地球物理场在空间上是连续分布的,但由于数据采集技术和工区客观条件上的种种限制,地球物理中所得到的数据都是不规则的散点数据。在对地球物理数据成图解释前,需要对不规则分布的散点数据进行网格化处理,通过插值方法来描述连续地球物理场的分布特征,是地球科学研究中常用的数据处理手段。

目前,普遍使用的网格化方法主要有最小曲率插值法(Minimum Curvature Splines)、Kriging插值法、双线性插值法,以及贝塞尔插值等^[1]。自然邻点插值算法(Natural Neighbor Interpolation, NNI),也被称为Area Stealing插值法,该方法广泛应用在地球物理建模、表面重构、科学计算可视化以及计算流体力学等领域。该方法主要有以下三个特性^[2]:

- (1) 原始点在经过 NNI 插值后,仍然保持不变。
- (2) 插值过程是局部的,待插点的值只受其周围的点(自然邻点)的影响。
- (3) 除了原始点以外,插值函数的一阶导数处处连续。

NNI 所具有的优良特性,使其成为地球物理网格化处理最为合适的一种插值算法之一。作者在对 NNI 算法原理研究的基础上,实现了该插值算法,并将其应用到大地电磁反演数据的实时网格化成图中。实验结果表明,该算法对于横向尺度、纵向尺度,都有比较大的二维数据体网格化插值计算,具有速度快、精度高、运算时间短等优势,可以达到实时网格化成图的要求。

1 自然邻点插值算法原理

1.1 自然邻点

自然邻点插值方法是一种基于 Delaunay 三角网和 Voronoi 图的插值方法。Delaunay 三角网和 Voronoi 图是一种互偶图形,在 Delaunay 三角网中的各个三角形中,对每一边画出其垂直平分线,即可得到 Voronoi 图形,如下页图 1(a) 所示。Voronoi 图是一种常用的非结构化网格,它可将数据点所在的平面,划分成数个多边形,每一个多边形只包含一个数据点。下页图 1(b) 是一个包含六个数据点的 Voronoi 图,该图所剖分的每一个网格单元,被称为 Voronoi Cell。在 Voronoi 图中与每一个节点对应的 Voronoi Cell 具有共同边的邻近节点称为自

基金项目: 国家自然科学基金项目(40839909); 国土资源部公益性行业科研专项经费项目(SinoProbe-02-04-03); 中国地质调查局地质调查工作项目(1212010914049)

收稿日期: 2010-10-19

改回日期: 2011-03-17

然邻点(Natural Neighbors ,NN) ,如图 1(b) 中 ,单元节点 p_4 的自然邻点就是与其具有共同边界的节点 p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_5 、 p_6 。

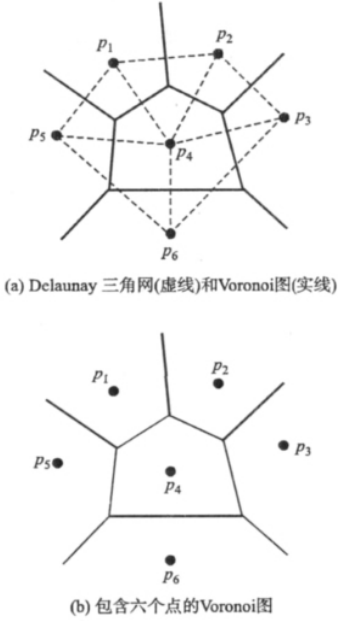


图 1 平面上 Delaunay 三角网和 Voronoi 图
Fig.1 Voronoi diagram and delaunay triangulation

1.2 自然邻点插值

自然邻点插值(NNI) ,是根据各个自然邻点对待插点 x 的贡献率来计算该点的插值结果。设 x 点的自然邻点共有 M 个 ,分别为 p_1 、 p_2 、 \cdots 、 p_M ,可构建如式(1) 所示的插值公式。

$$f(x) = \sum_{i=1}^M w_i f(p_i) \tag{1}$$

其中 $f(x)$ 是待插点 x 处的插值结果; $f(p_i)$ 是自然邻点 p_i 处的值; w_i 代表自然邻点 p_i 所占的权重系数。

权重系数 w_i 是按照如下的思想来确定: 把待插值点 x 作为新节点 ,加入已经生成的 Voronoi 图中(如图 2(a) 所示) ,得到一个与新节点相对应的新 Voronoi 图(如图 2(b) 所示) 。假设待插值点 x 所在 Voronoi Cell(如图 2(b) 1、2、 \cdots 、6 所围成的区域) 的总面积为 S_x ,则新节点所在 Voronoi Cell 将被其自然邻点原有 Voronoi Cells 分割成 M 个部份 ,每个部份的面积分别为 s_1 、 s_2 、 \cdots 、 s_M (如图 2(b) 中 s_1 、 s_2 、 \cdots 、 s_6 所示) ,权重系数由各个部份的面积和总面积相除求得 ,即 $w_i = \frac{s_i}{S_x}$ 。

从以上的讨论可以看出 ,实现 NNI 算法的核心步骤 ,就是如何计算各个自然邻点的权重系数

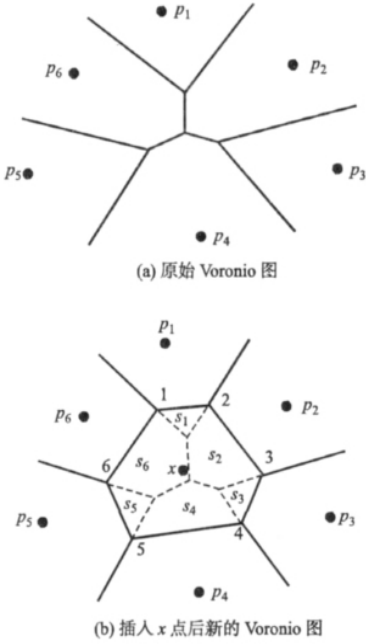


图 2 插入 x 点前、后的 Voronoi 图
Fig.2 Voronoi diagram before and after the insertion of point x

w_i 。但是对一个待插点 x 来说 ,要确定它的各个自然邻点的权重系数 w_i ,就必须计算两次 Voronoi 图(即插入 x 前后的 Voronoi 图) ,该计算量较大。针对这个问题 ,Watson 提出了 Compound Signed Decomposition 法 ,也就是著名的 Watson 算法^[4,5]。该方法无需计算 Voronoi 图 ,而是直接处理外接圆包含待插点 x 的所有 Delaunay 三角形 ,来计算各个自然邻点所占的面积^[5]。作者在本文对 w_i 的计算采用 Watson 算法 ,因此 NNI 插值算法具有较高效率。

2 NNI 插值算法实现

NNI 算法的实现 ,主要包含构建 Delaunay 三角网 ,计算自然邻点的权重系数 ,以及插值三个关键的步骤^[6,7] ,如图 3 所示(见下页) 。

2.1 构建 Delaunay 三角网

如何把一个散点集合剖分成不规则的三角形网格(Triangular Irregular Network ,TIN) ,这就是散点集的三角剖分问题。对于给定的初始点集 P ,有多种三角网剖分方法 ,Delaunay 三角网是在所有 TIN 生成方法中最优的。Delaunay 三角网有以下特性:

- (1) Delaunay 三角网具有唯一性。
- (2) 三角网的外边界构成了点集 P 的凸多边形。

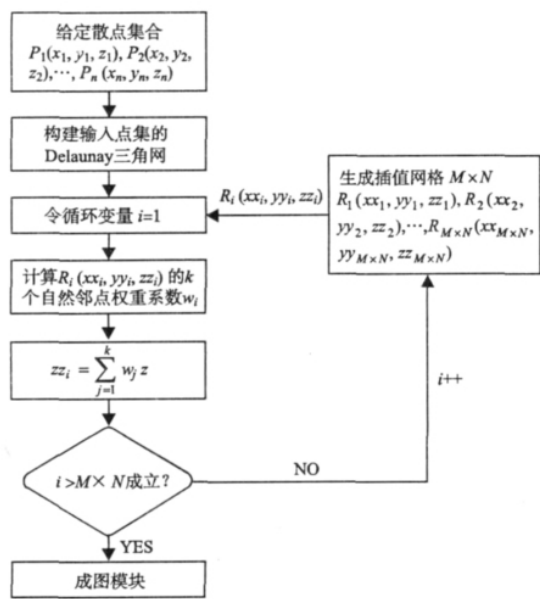


图3 NNI 算法流程图

Fig.3 NNI algorithm flow chart

形“外壳”。

(3) 如果将三角网中的每个三角形的最小角进行升序排列,则 Delaunay 三角网的排列得到的数值最大。从这个意义上讲, Delaunay 三角网是“最接近于规则化”的三角网。

要满足 Delaunay 三角剖分的定义,必须符合两个重要的准则:

(1) 空圆准则。任何一个 Delaunay 三角形外接圆的内部,不能包含其它任何点。

(2) 最大化最小角准则。每二个相邻的三角形构成的凸四边形的对角线,在相互交换后,六个内角的最小角不再增大。

从理论上讲,为了构造 Delaunay 三角网,根据 Lawson 提出的局部优化过程 LOP(Local Optimization Procedure),一般三角网在经过 LOP 处理后,即可确保成为 Delaunay 三角网。如图 4 所示,先求出包含新插入点 p 的外接圆的三角形,这种三角形

被称为影响三角形,删除影响三角形的公共边,将 p 与全部影响三角形的顶点连接,完成 p 点在原 Delaunay 三角形中的插入。

Delaunay 剖分是一种三角剖分的标准,实现它有多种算法。考虑到编码简易性以及算法执行的效率,作者对平面点集的 Delaunay 三角剖分,采用以下的步骤,如图 5 所示(见下页)。

(1) 根据点集的坐标范围,求出点集的凸多边形外壳。

(2) 选择一个点,构造一个初始 Delaunay 三角网。

(3) 从集合中选择一个点,采用局部优化过程修改生成新的 Delaunay 三角网。

(4) 重复步骤(3),直到所有点都计算完。

2.2 计算各个自然邻点的权重系数

计算待插点的各个自然邻点的权重系数 w_i ,就是要计算出 Voronoi 图中待插点从各个自然邻点所“偷”来的各个凸多边形面积的大小 s_i (如图 2 (b) 中的 $s_1、s_2、\cdots、s_6$),从而计算出权重系数 $w_i = \frac{s_i}{S_x}$ 。Watson 提出基于 Compound Signed Decomposition 法,计算各个自然邻点所占的面积,该方法直接利用所有包含待插点的 Delaunay 外接圆的计算来获取^[5]。算法的实现流程见下页图 6 所示。

3 NNI 网格化成图实例

NNI 插值算法所固有的优良特性:

- (1) 经插值运算后,原始点的值仍保持不变。
- (2) 待插点的值,只受其周围的点(自然邻点)的影响。
- (3) 除了原始点以外,插值函数处处连续。

另外,由于 NNI 是用三角形进行剖分并且不进行外插,所以可以很好地模拟具有地形特征的数据。因此,NNI 插值算法具有保真度高、插值光滑,

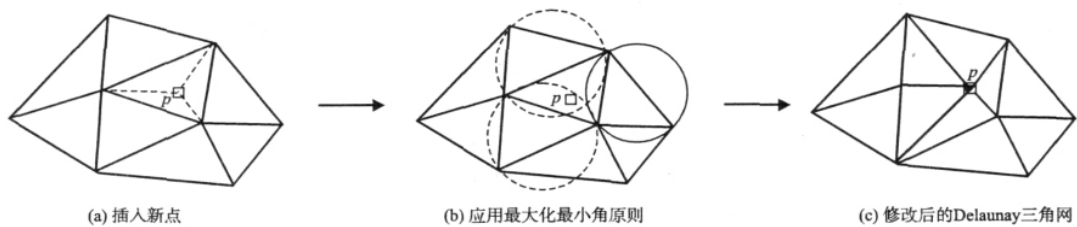


图4 局部优化过程 LOP 方法

Fig.4 LOP method of local optimization process

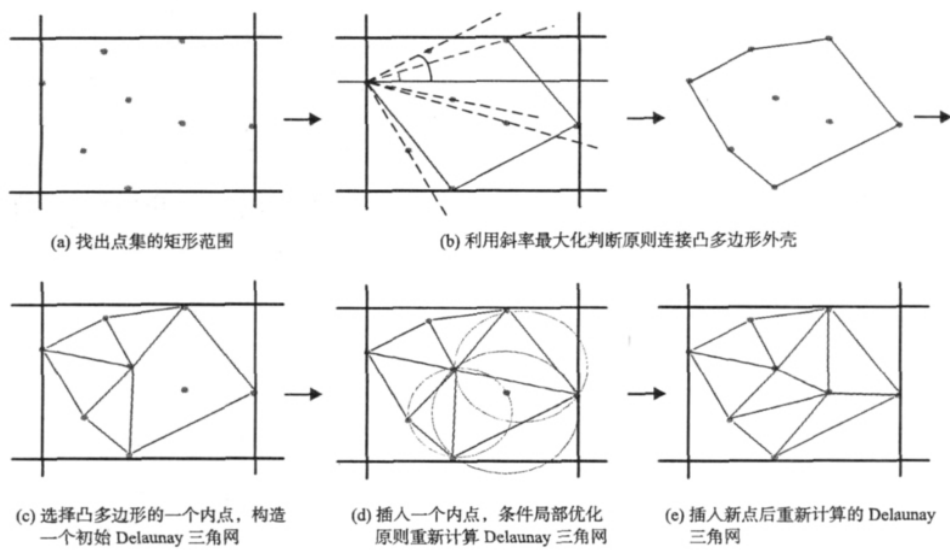


图 5 Delaunay 三角剖分算法

Fig. 5 Delaunay triangulation

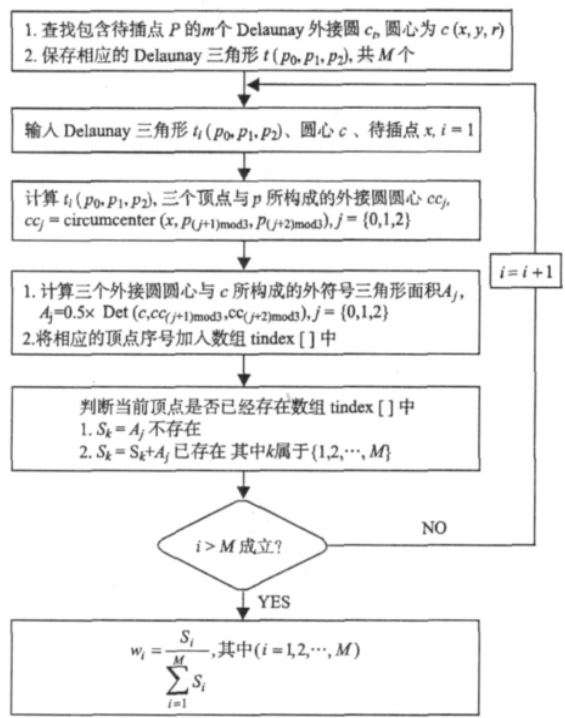


图 6 Watson 算法计算插值权重系数算法流程图

Fig. 6 Watson algorithm to calculate the weight coefficients of interpolation algorithm

以及便于描述带地形特征的数据等天然的优势,是地球物理数据最佳的插值方法之一。在 MT 二维反演数据处理中,需要在每次反演迭代完成后,实时地显示该次迭代结果的反演剖面图和反射系数图,以及拟合模型正演数据等图件,从而实时了解本次迭代的反演结果,误差分布,以及收敛情况。因此,要求数据网格化算法不仅精度高,还得兼顾运算时间。

作者采用 NNI 对每次迭代结果进行二维插值网格化运算,为了验证本算法的可靠性,以及算法的执行效率,作者分别用本文的 NNI 插值算法和商业软件 Surfer8 的 NNI 算法,对一个 MT 二维反演数据网格化处理后成图,结果对比如下页图 7 所示。

从图 7 的对比结果可以看出,作者实现的 NNI 算法与 Surfer NNI 插值结果几乎一致,只有细微的差别。另外一方面,由于作者在本文中实现的算法,在计算待插点的自然邻点权重系数的过程中采用了 Watson 算法,因此在计算效率上要明显高于 Surfer(如表 1 所示),基本上能够满足实时成图的要求。

表 1 NNI 算法与 Surfer NNI 插值效率分析

Tab. 1 NNI interpolation algorithm efficiency analysis

| 插值方法 | 200 行* 200 列 | 300 行* 300 列 | 400 行* 400 列 | 500 行* 500 列 |
|------------|--------------|---------------|--------------|--------------|
| 本文 NNI | 0.11 seconds | 0.172 seconds | 0.25 seconds | 0.37 seconds |
| Surfer NNI | 1.47 seconds | 3.16 seconds | 5.58 seconds | 8.66 seconds |

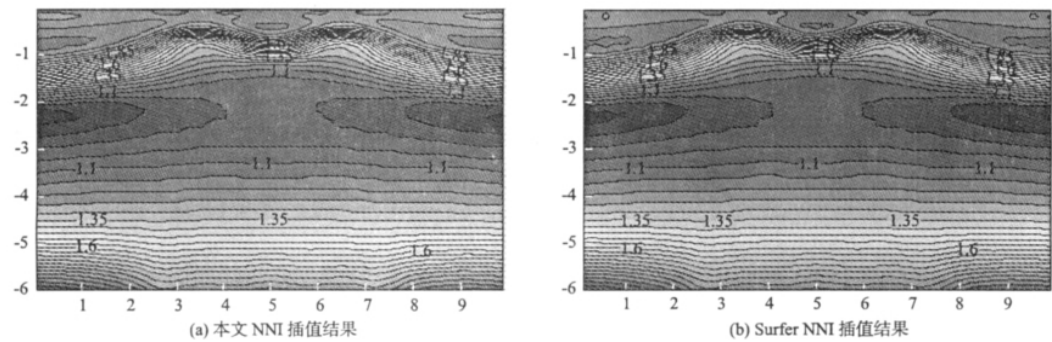


图7 NNI 算法与 Surfer NNI 插值结果对比(网格化采用 200 行* 200 列)
Fig.7 The comparison of this NNI and Surfer's NNI interpolation algorithm (grid of 200 rows* 200 columns)

4 结论

作者在本文实现的 NNI 插值算法 ,计算稳定 ,速度较快 ,网格化精度较高 ,并具有保真度高 ,插值比较光滑 ,以及便于描述带地形特征的数据等优势。适用于地球物理不规则分布数据的快速网格化 ,特别是大规模地球物理不规则分布数据的快速网格化 ,是地球物理数据二维网格化最佳的插值方法之一。

参考文献:

[1] WATSON D F. Contouring: a guide to the analysis and display of spatial data [M]. Pergamon Press ,1992.
[2] SAMBRIDGE M ,BRAUN J ,MCQUEEN H. Geophysical parameterization and interpolation of irregular data using natural neighbors [J]. Geophysical Journal International ,1995 ,122: 837.
[3] SIBSON R. A brief description of natural neighbor interpolation (Chapter 2) . in V [M]. Barnett. Interpreting Multivariate Data. Chichester: John Wiley ,1981.

[4] WATSON D F ,PHILLIP G M. Neighbour based interpolation [J]. Geobyte ,1987 2(2) : 12.
[5] WATSON D F. Computing the n-dimensional Delaunay tessellation with application to Voronoi poly-topes [J]. The Computer Journal ,1981 8(2) : 167.
[6] FAN Q ,EFRAT A ,KOLTUN V , et al. Venkatasubramanian ,Hardware-Assisted Natural Neighbor Interpolation [M]. in Proceedings of ALENEX 2005.
[7] PAVEL ,SKOV. Natural Neighbours interpolation library (DB/OL) . <http://code.google.com/p/nn-c/> , 2009 -05 -13/2009 -07 -16.
[8] 郭良辉 ,孟小红 ,郭志宏 ,等. 地球物理不规则分布数据的空间网格化法 [J]. 物探与化探 ,2005 ,29(5) : 438.
[9] 郭良辉 ,孟小红 ,郭志宏 ,等. 反插值法实现地球物理数据快速网格化 [J]. 地球物理学进展 ,2005 ,20(3) : 671.
[10] 赵文芳. 离散点集 Delaunay 三角网生成算法改进与软件开发 [J]. 测绘工程 ,2003 ,12(4) : 22.

作者简介: 张伟 (1983 -) ,男 ,博士 ,主要研究方向: 地球探测与信息技术。

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