

张丽霞, 戴苗. 遗传算法在井地磁测反演中的应用 [J]. 华南地震, 2014, 34 (3):52-56. [ZHANG Lixia, DAI Miao. Application of Genetic Algorithm in Magnetic Well-ground Logging Inversion [J]. South china journal of seismology, 2014, 34(3):52-56.]

## 遗传算法在井地磁测反演中的应用

张丽霞<sup>1</sup>, 戴苗<sup>2</sup>

(1. 广州市地震监测中心, 广州 510000; 2. 湖北省地震局, 武汉 430071)

**摘要:** 井地磁测可以提供井及周围一定空间范围内磁性地质体空间分布和空间磁场变化等资料, 是勘探磁铁矿床和含磁性矿物多金属矿床的一种有效的井中物探方法。以板状体模型为研究对象, 利用非线性遗传算法, 对井地单层和多层板状体进行反演试验, 不同模型试算结果表明: 利用遗传算法反演井中磁测资料是可行的, 而且反演结果较稳定, 收敛速度较快。

**关键词:** 遗传算法; 联合反演; 井中磁测

**中图分类号:** P315.721 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2014) 03-0052-05

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2014.03.009

## Application of Genetic Algorithm in Magnetic Well-ground Logging Inversion

ZHANG Lixia<sup>1</sup>, DAI Miao<sup>2</sup>

(1. Earthquake Monitoring Center of Guangzhou, Guangzhou 510000, China; 2. Earthquake Administration of Hubei Province, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Magnetic well-ground logging can provide spatial distribution of geologic body and spatial variation of the magnetic field of a certain space range of the well and its surrounding, which is a kind of effective geophysical methods in borehole for exploration of magnetite and magnetic mineral deposit. Based on the plate model as the research object, the paper does the inversion test by using the nonlinear genetic algorithm inverse monolayer and multilayer plate. The results show that genetic algorithm applying in inversion of magnetic well-ground logging data is feasible, and superior to the conventional non-linear geophysical inversion methods with higher speed and a high precision of inversion.

**Key words:** Genetic algorithm; Joint inversion; Magnetic well logging

### 0 引言

井中磁测和地面磁测作为普查勘探磁性矿体的有效的物探方法, 自上世纪 60 年代以来取得了长足的发展, 解决了大量的地质问题<sup>[1-4]</sup>。80 年代,

现代电子计算技术的发展促进了资料整理和解释由手工向自动化转变, 定性、定量的解释速度和精度获得显著提高<sup>[5-6]</sup>。

井地磁测主要是研究钻孔和地面周围空间磁性体的磁场, 特别是磁性体内磁场的资料, 为较

收稿日期: 2013-12-05

作者简介: 张丽霞 (1978-), 女, 工程师, 主要从事地震监测预测方面的工作和研究。

E-mail: happyzhang783@126.com.

准确的判别异常性质提供更充分的依据。在普查勘探磁体矿中,由于矿体形态和产状的复杂性,钻孔中往往会见不到矿体,形成“漏矿”。井地磁测联合反演可以在一定范围内发现这些盲矿,提高钻孔的见矿率。井中磁测从寻找盲矿到确定矿体的延伸、产状、边界以及通过定量计算确定矿体规模和分布状况等多方面,都取得较好的地质效果,成为找矿中不应缺少的有效手段。

上世纪九十年代德国的KTB钻探项目中,井中磁测工作开展得比较成功,专家学者从仪器的制造到磁测资料的处理和解释都作了一些开创性的工作。YaoguoLi等开展了井中和地面磁测资料的联合反演研究。Joao等开展了有关井中磁测数据的反演技术研究。

但是现在使用中的物探方法技术也还有许多待解决的技术问题。磁法的三维反演技术尚未真正达到实用,磁场的平面数据处理较多地损失了浅部信息(特别是极化处理),高精度重、磁测量均有变物性参数地形改正的技术问题。井中磁测没有可用的高精度磁力仪,特别是三分量磁力仪和高精度井中三分量磁测技术,没有成套的解释软件,更缺少井-地磁场联合解释的一套方法技术和软件。国内,目前该领域研究仅限于野外资料的处理和方法的可靠性验证<sup>[7-9]</sup>,真正涉及资料正反演等相关理论技术的研究屈指可数<sup>[10-13]</sup>。

## 1 井地联合反演磁测原理

为了使地面高精度磁测资料与井中三分量磁测资料结合起来,实现其优势的互补,井地联合反演的目标函数为:

$$\varphi = W_{地} \varphi_{地} + W_{井} \varphi_{井} = W_{地} \frac{\sum_{i=1}^{M_{地}} |T_i^{obs} - T_i^{cal}(\vec{m})|}{M_{地}} + W_{井} \frac{\sum_{j=1}^{M_{井}} |L_j^{obs} - L_j^{cal}(\vec{m})|}{M_{井}} \quad (1)$$

式(1)中,  $W_{地}$  和  $W_{井}$  分别为地面高精度磁测和井中三分量磁测数据的权重系数,取决于两种数据的精度和侧重关系;通常,地面高精度磁测参数  $T$  为总磁异常  $\Delta T$ ,井中三分量磁测参数  $L$  为磁异常  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  分量及  $\Delta T$ ;  $T_i^{obs}$  和  $L_j^{obs}$  分别为地面第  $i$  个观测点上的磁异常  $T$  和井中第  $j$  个三分量异常  $L$  的观测值;  $T_i^{cal}$  和  $L_j^{cal}$  分别为地面第  $i$  个观测点上的磁异常  $T$  和井中第  $j$  个异常  $L$  的理论计算值;  $M_{地}$  和

$M_{井}$  分别为  $T$  和  $L$  的观测点的个数,  $\vec{m}$  为模型参数矢量。

## 2 遗传算法的基本原理

遗传算法是由美国 Michigan 大学的 Holland 教授于 1975 年首先提出的。其基本思想是模拟自然界遗传机制和生物进化论而形成的一种过程搜索最优解的算法。遗传算法<sup>[14]</sup>是模拟生物在自然环境中优胜劣汰、适者生存的遗传和进化过程而形成的一种具有自适应能力的、全局性的概率搜索算法。它是从代表问题可能潜在解集的一个种群开始,首先将表现型映射到基因型即编码,从而将解空间映射到编码空间,每个编码对应问题的一个解,称为染色体或个体。初始种群产生之后,按照适者生存和优胜劣汰的原理,逐代演化产生出越来越好的近似解。在每一代,根据问题域中个体的适应度大小选择个体,并借助自然遗传学的遗传算子进行组合交叉和变异,产生出代表新的解集的种群。这个过程使种群像自然进化一样,后代种群比前代更加适应于环境,末代种群中的最优个体经过解码可以作为问题近似最优解。

图 1 所示遗传算法的基本流程图。图中  $G_{em}$  代表遗传(迭代)的代次,  $M$  表示群体中拥有的个体数目,  $i$  表示已处理个体的累计数,当累计数  $i$  等于总数  $M$ ,说明这一代的个体已全部处理完毕,需要转入下一代的群体。遗传代次  $G_{em}$  标明遗传算法反复执行的次数,亦即标明已产生群体的代次数目。  $P_1$ ,  $P_m$  表示交叉操作和变异操作的概率。总的来说,遗传算法主要执行如下:

- (1) 随机的建立由字符串组成的初始群体。
- (2) 计算各个体的适应值。
- (3) 根据遗传概率,利用下述操作产生新群体。

①复制。将已有的优良个体复制后添入新群体中,删除劣质个体。

②交叉。将选出的两个个体进行交叉,所产生的新个体添入新群体中。

③变异。随机的改变某一个体的某个字符后添入新群体中。

(4) 反复执行(2)、(3)后,一旦达到终止条件,选择最佳个体作为遗传算法的结果。

## 3 井地联合反演

### 3.1 叠加模型的等效性分析

图 2 为 2 层板状体,当两块板作为一个磁性

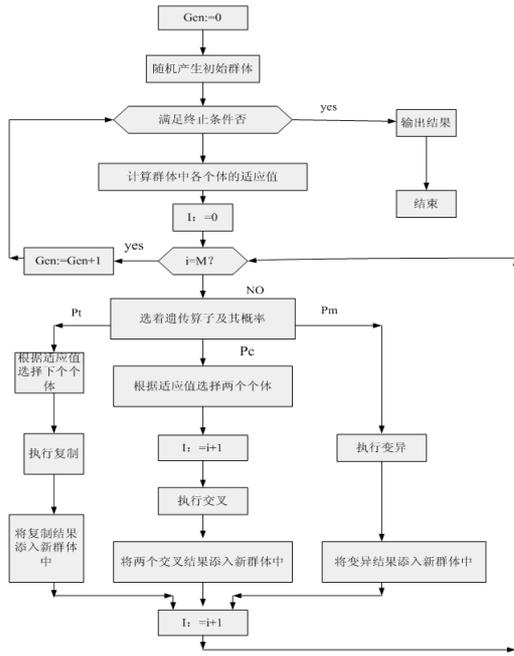


图1 遗传算法流程图

Fig.1 Flowchart of genetic algorithms

体时所产生的磁异常和把每一层板的磁异常叠加所产生的总异常进行比较，得出了等效异常和叠加异常的误差。

由图3可知，井中磁异常等效、叠加模型基本吻合，但是地面磁异常等效、叠加模型有一点误差。由图3c可知井中等效磁异常和叠加磁异常两者之间误差较小，图3d说明地面等效磁异常和叠加磁异常两者之间误差较大，对井中磁场的分析有助于寻找盲矿。

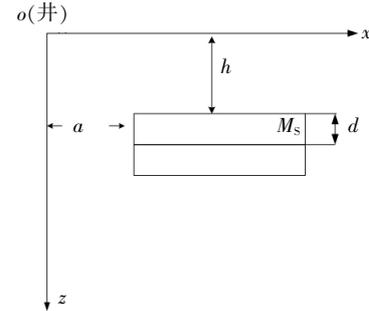
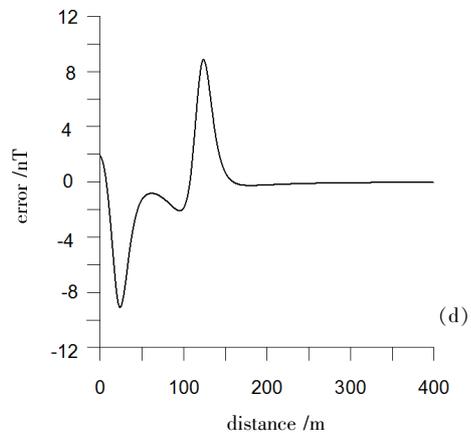
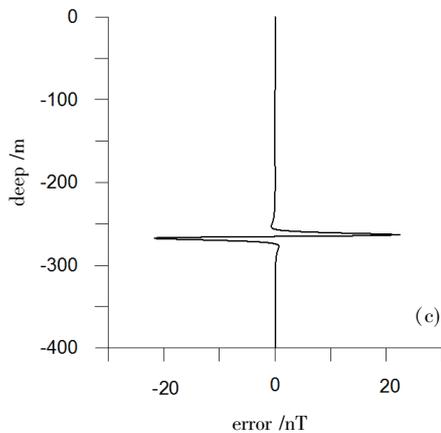
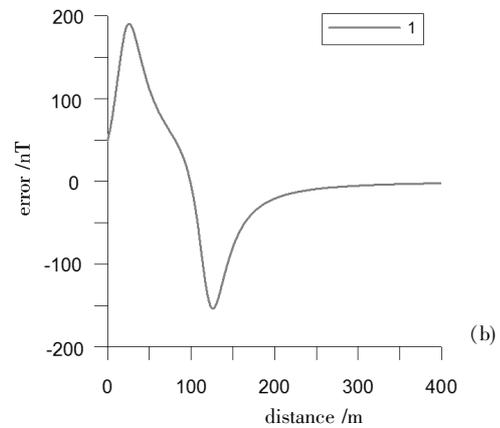
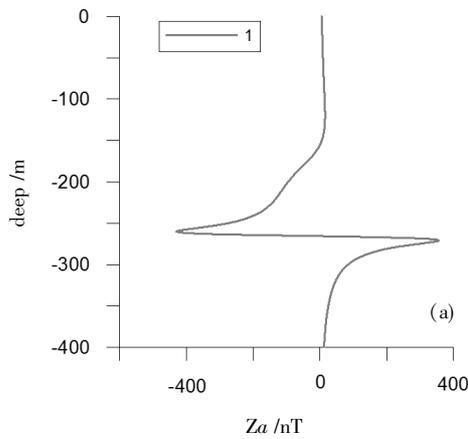


图2 二层板示意图

Fig.2 Schematic diagram of two laminates



(a)2层井中等效、叠加图;(b)2层地面等效、叠加图;(c)2层井中等效、叠加误差图;(d)2层地面等效、叠加图误差图

图3 等效异常与叠加异常

Fig.3 Graphs of equivalent,superpositon and graphs of equivalent,orevlay error

3.2 多层模型井地联合反演

如图4所示,模型板的半长度  $l=25\text{ m}$ ,板的厚度  $d=2\text{ m}$ ,埋深  $h=20\text{ m}$ 。磁化倾角  $I=60^\circ$ ,有效倾角  $i_s=60^\circ$ 。通过反演井中5层板到井的距离参数  $a$ ,给定如表1所示的初始模型,每一层的  $a$  值在给定的条件下反演,反演结果如表2,第一层,第二层,第三层的  $a$  和理论值完全一致,第四层理论值和计算值误差为0.1,第五层理论值和计算值误差为0.2,图5井中  $Za$  的理论值和计算值的模型拟合较好。 $Za$  曲线呈不对称正“S”形,随着井深加大, $Za$  值急剧减小,井深为-250时  $Za$  已经超过于-800 nT。当井的深度达到300 m时, $Za$  值较稳定。地面的磁异常随着距离的增加而增大,在50 m附近达到最大,随后减小接近-200,距离100 m后磁异常之有增大,最后趋于稳定。

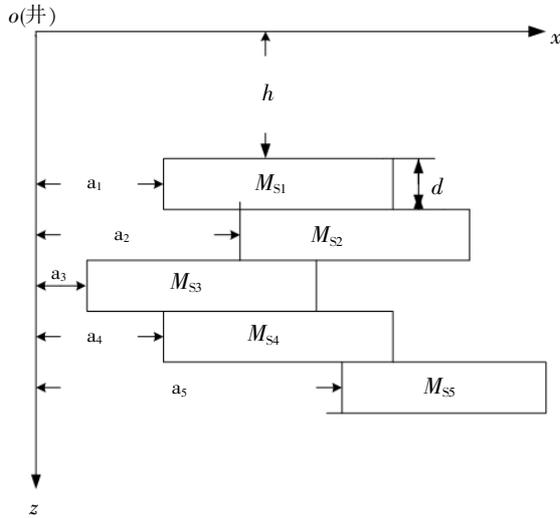


图4 多层板状体图

Fig.4 Sketch map of multilayer plate

表1 所有层的真实模型

Table 1 The true model of all layers

层数	板到井的距离 $a / \text{m}$	磁化强度 $M_s (\text{A/m})$
一层	10	50 000
二层	20	50 000
三层	30	50 000
四层	40	50 000
五层	50	50 000

表2 所有层的初始模型

Table 2 The initial models of all layers

层数	板到井的距离 $a / \text{m}$	磁化强度 $M_s (\text{A/m})$
一层	1~100	50 000~50 000
二层	1~100	50 000~50 000
三层	1~100	50 000~50 000
四层	1~100	50 000~50 000
五层	1~100	50 000~50 000

表3 五层的反演结果

Table 3 The inversion results of five layers

编号	板到井的距离 $a / \text{m}$	磁化强度 $M_s (\text{A/m})$	适应值
1	10.0	50 000	0.204 9
2	20.0	50 000	
3	30.0	50 000	
4	39.9	50 000	
5	50.2	50 000	

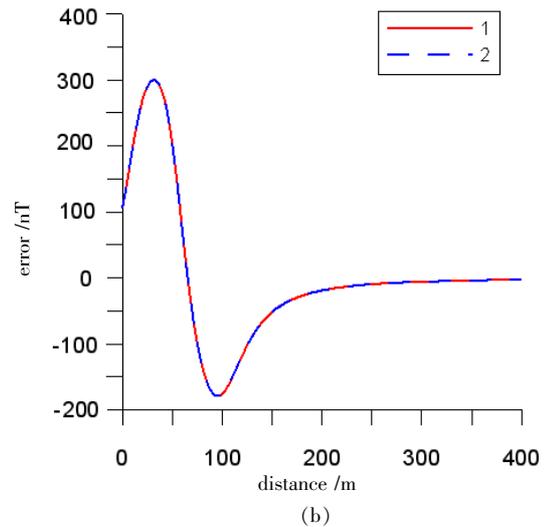
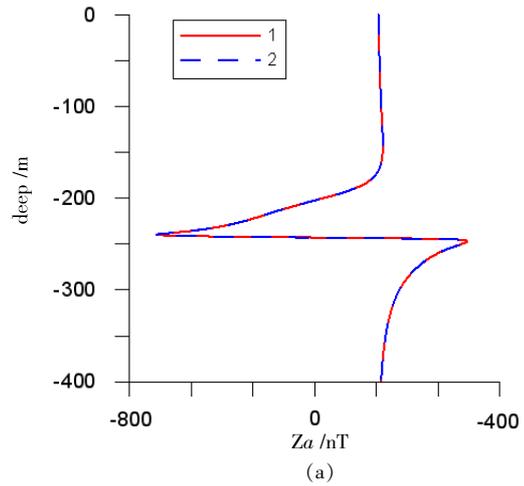


图5 井中(a)和地面(b)多层理论观测数据及其对应的反演结果再正演数据拟合图

Fig.5 The fitting diagram of forward data of multilayer observational data and their corresponding inversion results of well (a) and ground (b)

表4 所有层的初始模型

Table 4 The initial models of all layers

层数	板到井的距离 $a / \text{m}$	磁化强度 $M_s (\text{A/m})$
一层	1~100	30 000~70 000
二层	1~100	30 000~70 000
三层	1~100	30 000~70 000
四层	1~100	30 000~70 000
五层	1~100	30 000~70 000

表5 五层的反演结果

Table 5 The inversion results of five layers

编号	板到井的距离 $a$ /m	磁化强度 $M_s$ (A/m)	适应值
1	10.0	50 007	0.0348
2	20.0	49 865	
3	29.9	49 494	
4	40.0	51 612	
5	50.2	49 020	

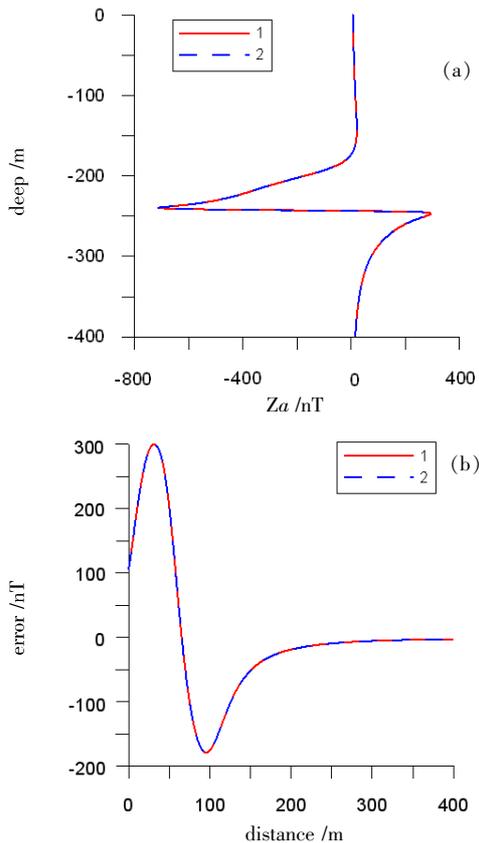


图6 井中(a)和地面(b)理论数据反演板到井的距离、磁化强度拟合图

Fig.6 The fitting diagram of distance from plate to well and magnetization inverted by theoretical data of well(a)and ground(b)

反演板到井的距离  $a$  和场强度  $M_s$  的五层反演结果如表 4 所示。通过反演井中 5 层板到井的距离参数  $a$  和磁化强度  $M_s$ ，给定如表 7 所示的初始模型，每一层的  $a$  值和  $M_s$  在给定的条件下反演，反演结果如表 5，第一层，第二层的  $a$  和理论值完全一致，第三层理论值和计算值误差为 0.1，第四层的  $a$  和理论值完全一致，第五层理论值和计算值误差为 0.2。图 6 井中  $Za$  的理论值和计算值的模型拟合较好。 $Za$  曲线呈不对称正“S”形，随着井深加大， $Za$  值急剧减小，井深为 -250 时  $Za$  已经超过于 -800 nT。当井的深度大到 -300 m 时， $Za$  值较稳定。地面的磁异常随着距离的增加而增大，在 50 m 附近达到最大，随后减小接近 -200，距离 100 m 后磁异常又增大，最后趋于稳定。

## 4 结语

本文利用遗传算法对井地磁测资料进行联合反演，结论如下：

(1) 不同模型试算结果表明，利用遗传算法反演井中磁测资料是可行的，而且反演结果较稳定，收敛速度较快。

(2) 由于实际物探工作中地质等复杂情况，反演难度大，本文的井中的和井地的联合反演都还只是一种理论上的反演，要实现在实际工作中的应用需要进一步的深入研究。

(3) 遗传算法是采用的郭涛算法，在程序的实现中，发现郭涛算法存在一些问题。特别是该方法采用随机的选取，算法的速度不是很满意，这是以后研究的一个较重要的工作。

(4) 在井地联合反演的程序实现中，其均方差的改变不是很好，这在以后的工作中有待进一步研究，如何使反演效果更好。

## 参考文献：

- [1] 许延清, 李舟波, 陆敬安, 等. 科学钻探中的井中磁测[J]. 世界地质, 1998, 17 (2): 59-66.
- [2] 李艳, 康卓, 刘薄. 郭涛算法及应用[J]. 武汉汽车工业大学学报, 2000, 22 (3): 101-104.
- [3] 张胜业, 潘玉玲. 应用物理学原理[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 2004.
- [4] 徐永生. 磁化率测井应用的初步效果[J]. 地质与勘查. 1984 (6): 33-38.
- [5] 余丰. 遗传算法在地学数据分析中的应用研究[D]. 2004.
- [6] 陈超. 物探数据空间分析方法系统与遗传算法应用研究[D]. 2000.
- [7] 刘天成. 井中磁场强度测量的资料整理[J]. 物探与化探, 1981(04): 233-239.
- [8] 古端龙. 在井中磁测工作中利用水平模差找盲矿[J]. 地质科技情报, 1984(02): 137-143.
- [9] 蔡柏林. 井中物探的发展现状和展望[J]. 物探化探译丛, 1992: 101-104.
- [10] 程百军. 井中磁测正演研究及中国大陆科学钻探井中磁测资料处理与解释[D].
- [11] 刘天佑, 刘大为, 詹应林, 等. 磁测资料处理新方法及其在危机矿山挖潜中的应用[J]. 物探与化探, 2006, 30 (5): 377-396.
- [12] 刘天佑, 高文利, 冯杰, 等. 井中三分量磁测的梯度张量欧拉反褶积及应用[J]. 物探与化探, 2013, 37 (4): 633-639.
- [13] 刘天佑, 杨宇山, 媛媛, 等. 重力、地震联合反演方法确定深层油气藏的分布-以锡林凹陷石炭系分布为例[J]. 天然气工业, 2005, 25 (5): 34-36.
- [14] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial systems [M]. Cambridge: MIT Press, 1975.