

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2019107

基于混合模拟退火算法的阵列侧向测井 实时反演研究

冯 进¹, 倪小威², 杨 清¹, 管 耀¹, 刘迪仁^{3,4}

(1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司研究院, 广东深圳 518054; 2. 中国石油塔里木油田分公司油气田产能建设事业部, 新疆库尔勒 841000; 3. 油气资源与勘探技术教育部重点实验室(长江大学), 湖北武汉 430100; 4. 长江大学地球物理与石油资源学院, 湖北武汉 430100)

摘 要: 测井资料现场实时反演是判断测井质量及进行精细评价的基础。为保证反演速度的同时, 进一步提高反演精度, 结合模拟退火算法和马奎特算法, 提出了混合模拟退火算法, 用以对阵列侧向测井资料进行 3 参数(地层电阻率、冲洗带半径和冲洗带电阻率)混合反演。研究发现, 初始值的选择对混合反演速度具有明显的影响, 引入基于电阻率幅度差信息的冲洗带半径初始值选取策略, 能够避免反演结果陷入局部最小值, 加快反演速度。实例计算结果表明, 混合反演算法的反演速度满足实时反演要求, 且反演精度相较传统马奎特算法有明显提高; 反演结果与试油结果一致, 验证了混合反演算法的适用性。混合模拟退火算法为现场阵列侧向测井资料的反演处理提供了新的技术。

关键词: 阵列侧向测井; 模拟退火算法; 实时反演; 马奎特算法; 混合反演; 反演速度; 幅度差; 电阻率

中图分类号: TE132.1⁺4

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2019)05-0121-06

Research on Array Lateral Logging Real-Time Inversions Based on Hybrid Simulated Annealing Algorithms

FENG Jin¹, NI Xiaowei², YANG Qing¹, GUAN Yao¹, LIU Diren^{3,4}

(1. Research Institute of Shenzhen Branch, CNOOC (China) Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518054, China; 2. Oil and Gas Field Productivity Construction Division, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang, 841000, China; 3. MOE Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources(Yangtze University), Wuhan, Hubei, 430100, China; 4. College of Geophysics and Oil Resources, Yangtze University, Wuhan, Hubei, 430100, China)

Abstract: The real-time inversion of logging data is the basis for judging the field logging quality on-site and the subsequent detailed evaluations. By using the simulated annealing algorithm and Marquette algorithm, the hybrid inversion of three parameters (formation resistivity, radius of flushing zone and flushing zone resistivity) was carried out with the array lateral logging data, so as to further improve the inversion accuracy while ensuring the inversion speed of the conventional real-time inversion methods. The research showed that the selection of initial value had a clear effect on the results of hybrid inversion. A strategy for selecting the initial value of the radius of flushing zone can avoid the inversion result falling into the local minimum based on the resistivity amplitude difference. Further, it can speed up the inversion. The example application results indicated that the inversion speed of hybrid inversion algorithm could meet the real-time inversion requirements. The research also found that the inversion accuracy was higher than that of the traditional Marquette algorithm significantly. Remarkably, the inversion results were consistent with the test results, which verified the applicability of hybrid inversion algorithm. The hybrid simulated annealing algorithm has provided new idea and technical support for the inversion processing of field array lateral logging data.

Key words: array laterolog logging; simulated annealing algorithm; real-time inversion; Marquette algorithm; hybrid inversion; inversion speed; amplitude difference; resistivity

电阻率测井资料往往受钻井液侵入和井眼、围岩等环境因素的影响, 不能准确反映钻井液侵入剖面信息, 故需要对其进行反演或校正处理^[1-6]。早期为解决电阻率失真问题, 油田现场多采用图版校正法^[7]。这种方法操作比较简便, 但需要多次进行插值处理, 且无法反映全部地层情况, 准确性和普适性都较低^[8]。

随着计算机技术的发展, 线性反演技术被引入

收稿日期: 2019-03-21; 改回日期: 2019-08-25。

作者简介: 冯进(1972—), 男, 山西太原人, 1994年毕业于江汉石油学院地球探测与信息技术专业, 1997年获石油大学(北京)地球探测与信息技术专业硕士学位, 高级工程师, 主要从事石油地球物理测井方面的研究工作。E-mail: fengjin@cnooc.com.cn。

通信作者: 刘迪仁, liudr666@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项“南海东部海域勘探新领域及关键技术”(编号: 2016ZX05024-004)和国家重点研发计划项目“地下及井中地球物理勘探技术与装备”(编号: 2018YFC0603300)资助。

电测井资料处理^[9-10]。其中,马奎特算法是一种线性反演算法,其收敛速度极快,有利于测井资料的实时反演,但在实际应用中其反演结果受初始值影响极大,若初始值设置不合理,很难准确反演出地层的真实电阻率值^[11]。为了提高反演精度,针对同时存在多种电测井资料的油井,提出了联合反演的技术思路,通过增加反演过程中的地层信息来提高反演精度,此类方法具备一定的理论可行性^[12],但实际上极少有油井进行2种以上不同原理的电测井作业,因此其普适性并不高。阵列型电测井仪器(如阵列侧向测井仪器、阵列感应测井仪器)的探测深度深、分辨率高^[13-14],能够提供多条测井信息,可以很好地解决联合反演时存在的问题。随着反演技术的进一步发展,非线性反演算法被引入测井反演领域^[15-20]。模拟退火算法是一种典型的非线性反演算法,具备较强的全局搜索能力,在计算时间充足的情况下基本上能找到全局最优解;但模拟退火算法在处理复杂的非线性优化问题时收敛速度过慢,难以满足测井资料的实时反演需求。

为解决传统模拟退火算法与马奎特算法存在的问题,笔者将2种反演方法结合,提出了混合模拟退火算法:利用幅度差法优化了模拟退火算法的初始值选择,然后利用退火策略进行了迭代,最后将迭代过一定次数的结果作为马奎特算法的初始值,利用马奎特算法进行迭代寻优。混合模拟退火算法既保留了模拟退火算法的全局寻优能力,也很好地利用了马奎特算法的后期收敛能力,不仅能满足实时反演的要求,而且还可以进一步提高反演精度。

1 阵列侧向测井反演模型

实际测井过程中,阵列侧向测井仪器可获得由浅至深的4条视电阻率曲线MLR1、MLR2、MLR3和MLR4。视电阻率响应可以认为是冲洗带半径 r_{xo} 、冲洗带电阻率 R_{xo} 、地层电阻率 R_t 、井眼和围岩等地层参数的非线性函数^[21-23]。实时反演过程中,井眼校正时忽略围岩的影响,故视电阻率可以被认为三参数(冲洗带半径 r_{xo} 、冲洗带电阻率 R_{xo} 和地层电阻率 R_t)的非线性函数。阵列侧向测井仪器在水平层状介质中的电阻率反演模型可表示为:

$$\begin{cases} \min f(X) = \sum_{j=1}^N (y_j - \Phi_j(X))^2 \\ X = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_M) \\ x_i = (r_{xo,i}, R_{xo,i}, R_{t,i}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f(X)$ 为待求目标函数; x_i 表示待求模型参数; i 为反演种群规模; y_j 为第 j 种测井方法的实际测井数据; Φ_j 为第 j 种测井方法的正演响应算子,可通过模式匹配法或者有限元法得到。其中, $j=1,2,3,4$,分别对应MLR1,MLR2,MLR3和MLR4(下同)。

2 混合模拟退火算法

2.1 模拟退火算法原理及步骤

模拟退火算法是在金属退火机制上演化而成的一种非线性反演算法,从概率意义上来说,模拟退火算法总能找到全局最小点^[24]。其控制因素主要分为搜索空间 Ω 、能量函数 $f(x)$ 、状态转移规则 p 和冷却进度表 $T(x)$ 等4类。

模拟退火算法的一般步骤是:首先随机给定初始解,然后借助控制参数产生的一系列Mapkob链、新解产生装置和接受准则,重复“产生新解—计算适应度函数—判断是否接受新解—接受/抛弃新解”的步骤,不断进行迭代,直到目标函数适应度达到最小。

2.1.1 初始值的选取

选取的初始值是否合适会直接影响模拟退火算法的收敛速度^[25]。初始值若偏离真实值较小,模拟退火时只需进行少数迭代即可寻找到最优解;若初始值偏离真实值过大,模拟退火算法迭代次数会明显增加。为此,引入基于电阻率幅度差信息的冲洗带半径初始值选取策略,定义幅度差系数 $s_1 \sim s_6$:

$$s_1 = \frac{2(M_4 - M_1)}{M_4 + M_1} \quad (2)$$

$$s_2 = \frac{2(M_4 - M_2)}{M_4 + M_2} \quad (3)$$

$$s_3 = \frac{2(M_4 - M_3)}{M_4 + M_3} \quad (4)$$

$$s_4 = \frac{2(M_3 - M_1)}{M_3 + M_1} \quad (5)$$

$$s_5 = \frac{2(M_3 - M_2)}{M_3 + M_2} \quad (6)$$

$$s_6 = \frac{2(M_2 - M_1)}{M_2 + M_1} \quad (7)$$

式中: M_j 为视电阻率; s_1 为MLR4与MLR1的幅度差系数; s_2 为MLR4与MLR2的幅度差系数; s_3 为MLR4与MLR3的幅度差系数; s_4 为MLR3与MLR1的幅度差系数; s_5 为MLR3与MLR2的幅度差系数; s_6 为MLR2与MLR1的幅度差系数。

利用有限元法计算得到的 $s_1 \sim s_6$ 随冲洗带半径的变化关系如图 1 所示。

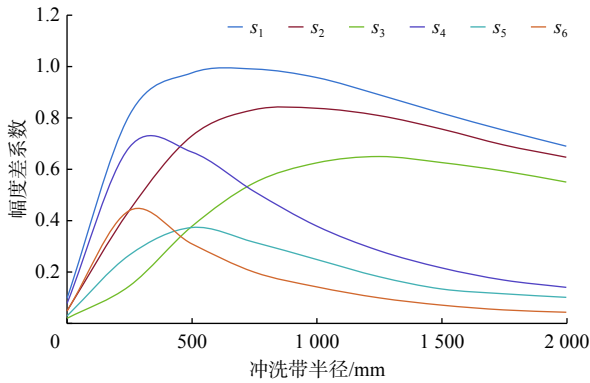


图 1 幅度差系数随冲洗带半径的变化关系

Fig. 1 The relationship between the coefficient of amplitude difference and with the radius of the flushing zone

基于图 1 分析冲洗带半径 r_{x0} 与 s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 和 s_6 的多元回归关系, 得到 r_{x0} 的回归关系式:

$$r_{x0} = 925.41 s_1 + 1004.04 s_2 - 1835.46 s_3 - 1295.69 s_4 - 221.40 s_5 + 70.02 s_6 + 1.39 \quad (8)$$

将冲洗带半径多元回归结果与理论计算值进行相关性分析, 可以看出 R^2 高达 0.984 4, 说明了多元回归的准确性 (见图 2)。

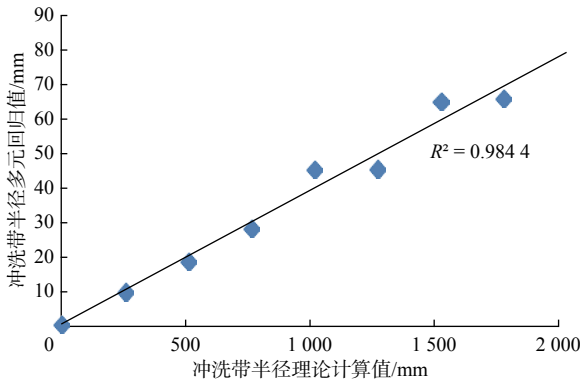


图 2 多元回归结果与理论值相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis between the multiple regression results of flushing zone radius and the theoretical values

对于冲洗带电阻率及地层电阻率, 分别将微球聚焦测井结果 RMSF 及 MLR4 作为其初始值。

2.1.2 新解的求取

在初始值的基础上进行新解的求取, r_{x0}, R_{x0} 和 R_t 分别按照以下公式进行迭代更新:

$$T_k = 0.99^k T_0 \quad (9)$$

$$R_{tnew} = R_t + T_k \cdot \text{sign}(\text{rand} - 0.5) \cdot \left(1 + \frac{1}{T_k}\right)^{\|2(\text{rand}-1)-1\|} \cdot (R_{tmax} - R_{tmin}) \quad (10)$$

$$R_{xonew} = R_{x0} + T_k \cdot \text{sign}(\text{rand} - 0.5) \cdot \left(1 + \frac{1}{T_k}\right)^{\|2(\text{rand}-1)-1\|} \cdot (R_{xomax} - R_{xomin}) \quad (11)$$

$$r_{xonew} = r_{x0} + T_k \cdot \text{sign}(\text{rand} - 0.5) \cdot \left(1 + \frac{1}{T_k}\right)^{\|2(\text{rand}-1)-1\|} \cdot (r_{xomax} - r_{xomin}) \quad (12)$$

式中: T_k 为退火温度; T_0 为初始温度, 一般数值较大; k 为迭代次数; R_{tnew} 为地层电阻率新解, $\Omega \cdot m$; R_{xonew} 为冲洗带电阻率新解, $\Omega \cdot m$; r_{xonew} 为冲洗带半径新解, mm; R_{tmax}, R_{tmin} 为地层电阻率的最大、最小值, $\Omega \cdot m$; R_{xomax}, R_{xomin} 为冲洗带电阻率的最大、最小值, $\Omega \cdot m$; r_{xomax}, r_{xomin} 为冲洗带半径的最大、最小值, mm; rand 为 0 到 1 之间的随机数; $\text{sign}(x)$ 为符号函数, 当 x 大于等于 0 时为 +1, 当 x 小于 0 时为 -1。

2.1.3 接受准则

采用 Metropolis 准则, 判断是否接受模拟退火算法产生的新解^[26]:

$$p(T_k) = \begin{cases} 1 & f(B) < f(A) \\ \exp\left(-\frac{f(B) - f(A)}{T_k}\right) & f(B) \geq f(A) \end{cases} \quad (13)$$

式中: $p(T_k)$ 为接受新解的概率; $f(A), f(B)$ 分别为原始解、新解对应的系统能量 (即适应度)。

若新解对应的系统能量 $f(B)$ 小于前一状态系统能量 $f(A)$, 则直接接受新解; 反之, 若新解系统能量 $f(B)$ 大于或者等于前一状态系统能量 $f(A)$, 则以 $\exp\left(-\frac{f(B) - f(A)}{T_k}\right)$ 的概率接受新解; 接受的新解作为下一次迭代的初始值。

2.1.4 终止条件

采用温度终止准则^[27], 若系统温度大于预先设定的系统最低温度, 则继续进行迭代; 若系统温度小于或等于系统最低温度, 则算法终止。

2.2 混合模拟退火算法

采用模拟退火算法对式 (1) 进行求解, 迭代若干次 (一般 15 次左右), 将迭代后的新解作为初始值, 利用马奎特算法进行反演处理, 即可得到三参数反演结果。

将利用模拟退火算法得到的初始值带入正演模

型,将阵列侧向测井响应在该初始值附近线性化:

$$M_{ja} = M_{ja}^0 + \sum_{g=1}^3 \frac{\partial M_{ja}}{\partial P_g} \delta P_g \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (14)$$

其中 $P_1 = r_{x\text{onew}}, P_2 = R_{x\text{onew}}, P_3 = R_{t\text{new}}$ (15)

式中: M_{ja} 为视电阻率响应, $\Omega \cdot \text{m}$ 。

视电阻率拟值矩阵和测井数据矩阵分别表示为:

$$\mathbf{R} = (M_{1a}, M_{2a}, M_{3a}, M_{4a})^T \quad (16)$$

$$\mathbf{R}' = (M_{1a}', M_{2a}', M_{3a}', M_{4a}')^T \quad (17)$$

矩阵方程可以表示为:

$$\Delta \mathbf{R} = \mathbf{R}' - \mathbf{R} = [\mathbf{J}] \Delta \mathbf{P} \quad (18)$$

式中: $\Delta \mathbf{P}$ 为未知参量矩阵; $[\mathbf{J}]$ 为 Jacobi 矩阵。

式(18)采用阻尼最小二乘法进行求解,即可实现三参数反演。混合模拟退火算法的基本步骤为:

- 1) 设定初始温度、最低温度和退火因子等参数数值;
- 2) 基于电阻率幅度差信息策略生成初始值,并计算初始值对应的适应度;
- 3) 将初始值代入式(9)—式(12),进行模拟退火操作,利用 Metropolis 准则判断是否进行个体更新;
- 4) 利用模拟退火算法迭代一定的代数(具体根据实际问题而定),将新解作为初始值代入马奎特算法;
- 5) 当迭代次数达到最大值或者适应度值小于预先设定的阈值时,将此时的新解作为反演结果输出;若不满足收敛条件,则跳转至步骤2)重新进行初始计算。

3 混合模拟退火算法准确性评价

算法的性能评价主要包括寻优成功率、收敛平均代数、平均最优适应度和最优个体进化曲线等方面^[28-29]。马奎特算法、模拟退火算法和混合模拟退火算法的寻优成功率、收敛平均代数及平均最优适应度的对比分析如表1所示,混合模拟退火算法反演时长与仪器测量时长的对比结果如表2所示。

表1 3种算法的性能对比

Table 1 Comparison of the performances with three algorithms

算法	寻优成功率, %	最优适应度	收敛平均代数
混合模拟退火算法	90	0.004 526	45
模拟退火算法	95	0.003 443	104
马奎特算法	56	0.010 742	10

表2 混合模拟退火算法反演时长与仪器测量时长对比

Table 2 Comparison of the inversion time of hybrid simulated annealing algorithm with the instrument measurement time

井号	处理层段/ m	反演时长/ s	单点反演时长/ s	仪器单点测量 时长/s
W1P-3	1 980~2 010	60	0.200 0	
W1P-7	780~820	82	0.205 0	0.500
W1P-9	980~1 020	87	0.217 5	

从表1可知,混合模拟退火算法寻优成功率远高于马奎特算法,且收敛速度远高于模拟退火算法,不仅很好地兼顾了马奎特算法、模拟退火算法的优点,而且避免了二者的缺点。从表2可以看出,混合模拟退火算法的反演速度快于仪器测量速度,满足实时反演的要求。

3种算法的最优个体进化曲线如图3所示。从图3可以看出,混合模拟退火算法较模拟退火算法及马奎特算法的初始适应度更小,说明基于电阻率幅度差信息的初始值优化策略的有效性。混合模拟退火算法适应度小于0.005,反演精度高。

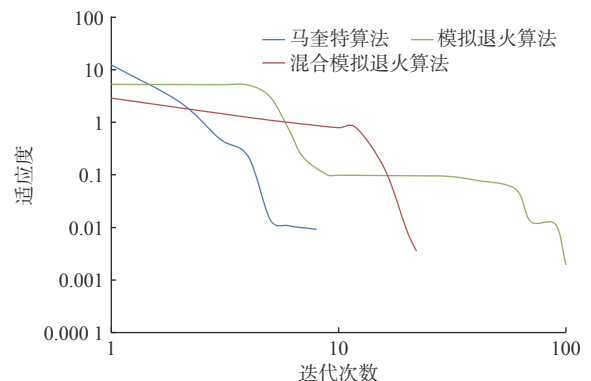


图3 算法最优个体进化曲线

Fig.3 Optimal individual evolution curve with three algorithms

4 应用实例

选取 W1P-7 井 1 880.00~2 020.00 m 层段进行反演处理,处理结果如图4所示。W1P-7 井岩电参数 $a=1, b=1, m=1.72, n=1.87$ 。图4中:第一道为岩性曲线道;第二道为电阻率资料道,其中 RMSF 为微球型聚焦测井视电阻率,MLR1C—MLR4C 为阵列侧向测井经过井眼校正之后的视电阻率曲线。从岩性曲线道可以看出,1 982.00~1 992.00 m 层段的伽马曲线表现出明显的砂岩特征;同时,该层段的电阻率曲线也表现出明显的幅度差特征,可以确定

1 982.00~1 992.00 m 层段为渗透层。第三道为反演电阻率道, 第四道为根据电阻率反演结果计算的含水饱和度。根据计算的含水饱和度, 可以非常直观地显示出在处理层段的顶部、底部分别存在一油层和一水层, 分别命名为 W1 层和 W2 层。根据试油资料, 井深 1 990.00 m 处累计泵抽 0.83 h, 泵抽地层流体达 24.49 L, 流体性质为油, 证明 W1 层为油层; 井深 2 002.01 m 处累计泵抽 2.70 h, 泵抽地层流体达 83.86 L, 流体性质为地层水, 证明 W2 层为水层。试油结果与反演处理结果一致, 表明了混合模拟退火算法的正确性与实用性。

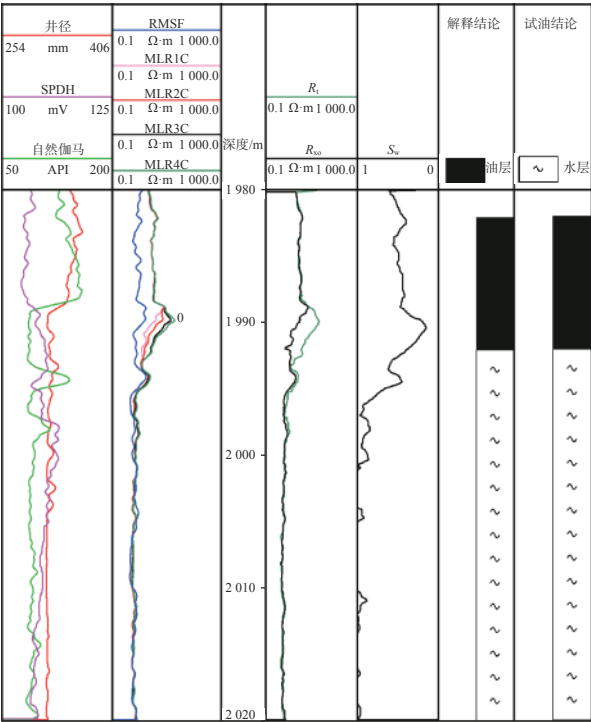


图 4 W1P-7 井反演处理结果
Fig. 4 Inversion processing results of Well W1P-7

5 结论与建议

1) 提出基于电阻率幅度差信息初始值选取策略的混合模拟退火反演算法, 理论模型与实际资料验证表明, 该算法不仅保存了传统实时反演方法的速度优势(单点反演耗时仅需 0.2 s 左右), 还进一步提高了反演精度, 同时三参数反演结果与试油结果相匹配。

2) 以往电阻率测井反演算法往往以单一算法为主, 算法收敛性和寻优能力不能同时得到保证, 混合模拟退火算法兼顾了收敛速度和寻优能力, 反演精度更高。

3) 本文的研究有一定局限性, 冲洗带半径初值生成公式只适用于单一阵列侧向测井仪器, 实际应用中应根据阵列侧向测井仪器种类结合本文方法重新生成初始值公式。此外, 支持向量机、差分进化算法等非线性反演算法比模拟退火算法的寻优能力更强, 建议进一步研究此类算法与线性反演算法的混合反演应用, 以得到更好的反演效果。

参 考 文 献
References

[1] 谭茂金, 高杰, 邹友龙, 等. 盐水泥浆条件下定向井双侧向测井环境校正方法研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(4): 1422-1432.
TAN Maojin, GAO Jie, ZOU Youlong, et al. Environment correction method of dual laterolog in directional well[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(4): 1422-1432.

[2] 杨震, 杨锦舟, 韩来聚. 随钻电磁波电阻率测井实时井眼影响校正[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(5): 625-629.
YANG Zhen, YANG Jinzhou, HAN Laiju. A real-time borehole correction of electromagnetic wave resistivity logging while drilling[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(5): 625-629.

[3] 朱天竹, 杨守文, 白彦, 等. 利用 2.5 维数值模式匹配算法高效高精度建立垂直井眼中多分量阵列感应井眼校正库[J]. 地球物理学报, 2017, 60(3): 1221-1233.
ZHU Tianzhu, YANG Shouwen, BAI Yan, et al. Efficient and high-precision establishment of borehole correction database for multicomponent array induction logging in vertical boreholes by a 2.5D NMM algorithm[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(3): 1221-1233.

[4] 邓少贵, 李竹强, 李智强. 水平井双侧向测井响应及层厚/围岩影响快速校正[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(6): 725-729.
DENG Shaogui, LI Zhuqiang, LI Zhiqiang. Response of dual laterolog and fast correction for layer thickness and shoulder bed in horizontal wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(6): 725-729.

[5] 张冲, 毛志强, 孙中春, 等. 玛河气田盐水泥浆侵入条件下双侧向测井电阻率校正方法[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(5): 757-761.
ZHANG Chong, MAO Zhiqiang, SUN Zhongchun, et al. Dual laterolog resistivity correction method under the conditions of salt mud invasion for Mahe Gas Field[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(5): 757-761.

[6] 范翔宇, 夏宏泉, 陈平, 等. 测井计算钻井泥浆侵入深度的新方法研究[J]. 天然气工业, 2004, 24(5): 68-70.
FAN Xiangyu, XIA Hongquan, CHEN Ping, et al. New method of calculating drilling mud invasion depth by logs[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(5): 68-70.

[7] FRENKEL M A. Real-time interpretation technology for new multi-laterolog array logging tool[R]. SPE 102772, 2006.

[8] 王才经. 三侧向测井电阻率反演[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1989, 13(4): 75-81.
WANG Caijing. Formation resistivity reversion for laterolog 3[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Natural Science Edition), 1989, 13(4): 75-81.

- [9] 倪小威, 冯加明, 徐观佑, 等. 仪器偏心情况下阵列侧向测井校正图版研制 [J]. 断块油气田, 2018, 25(4): 469–472.
NI Xiaowei, FENG Jiaming, XU Guanyou, et al. Development of borehole correction plates for array lateral logging under instrumental eccentricity condition[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2018, 25(4): 469–472.
- [10] 冯周, 李宁, 武宏亮, 等. 缝洞储集层测井最优化处理 [J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(2): 176–181.
FENG Zhou, LI Ning, WU Hongliang, et al. Logging optimization processing method for fractured-vuggy reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(2): 176–181.
- [11] 顿月芹, 袁建生. 阵列侧向电法测井的快速反演 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(11): 1871–1875.
DUN Yueqin, YUAN Jiansheng. Fast inversion of array lateral electric-logging[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2009, 49(11): 1871–1875.
- [12] 蔡军, 张恒荣, 曾少军, 等. 随钻电磁波电阻率测井联合反演方法及其应用 [J]. 石油学报, 2016, 37(3): 371–381.
CAI Jun, ZHANG Hengrong, ZENG Shaojun, et al. Joint inversion method of electromagnetic wave resistivity logging while drilling and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(3): 371–381.
- [13] SMITS J W, DUBOURG I, LULING M G, et al. Improved resistivity interpretation utilizing a new array laterolog tool and associated inversion processing[R]. SPE 49328, 1998.
- [14] 冯加明, 刘迪仁, 倪小威, 等. 定向井阵列侧向测井层厚-围岩影响分析及快速校正 [J]. 断块油气田, 2018, 25(5): 593–597, 625.
FENG Jiaming, LIU Diren, NI Xiaowei, et al. Impact analysis and rapid correction of layer thickness-shoulder bed for response of array lateral logging in directional wells[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2018, 25(5): 593–597, 625.
- [15] 李智强, 范宜仁, 邓少贵, 等. 基于改进差分进化算法的阵列侧向测井反演 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(5): 1199–1204.
LI Zhiqiang, FAN Yiren, DENG Shaogui, et al. Inversion of array laterolog by improved difference evolution[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2010, 40(5): 1199–1204.
- [16] 潘克家, 汤井田, 杜华坤, 等. 轴对称地层中高分辨率阵列侧向测井信赖域反演法 [J]. 地球物理学报, 2016, 59(8): 3110–3120.
PAN Kejia, TANG Jingtian, DU Huakun, et al. Trust region inversion algorithm of high-resolution array lateral logging in axisymmetric formation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(8): 3110–3120.
- [17] 王才志, 石广仁, 张丽君. 基于极快速模拟退火算法的地层横波各向异性反演 [J]. 石油学报, 2007, 28(1): 67–72.
WANG Caizhi, SHI Guangren, ZHANG Lijun. Computing method of shear wave anisotropy of formation based on very fast simulated reannealing[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(1): 67–72.
- [18] 刘财, 符伟, 郭智奇, 等. 基于贝叶斯框架的各向异性页岩储层岩石物理反演技术 [J]. 地球物理学报, 2018, 61(6): 2589–2600.
LIU Cai, FU Wei, GUO Zhiqi, et al. Rock physics inversion for anisotropic shale reservoirs based on Bayesian scheme[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(6): 2589–2600.
- [19] 吴大奎, 李亚林, 伍志明, 等. 地震、测井资料联合反演的神经网络算法研究 [J]. 天然气工业, 2004, 24(3): 55–57.
WU Dakui, LI Yalin, WU Zhiming, et al. Research on the neural network algorithm of joint inversion of seismic and log data[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(3): 55–57.
- [20] 刘丽丽, 邢光龙. 基于支持向量机的电磁波传播测井反演参数约束条件提取方法 [J]. 测井技术, 2008, 32(3): 215–219.
LIU Lili, XING Guanglong. Constraint extraction of inversion parameters based on support machine vector for electromagnetic propagation logging[J]. Well Logging Technology, 2008, 32(3): 215–219.
- [21] 汪宏年, 陶宏根, 其木苏荣, 等. 水平层状介质中双侧向资料的全参数正则化迭代反演与应用 [J]. 地球物理学报, 2002, 45(增刊 1): 387–399.
WANG Hongnian, TAO Honggen, CHIMED Surong, et al. Regularized entire-parameter iterative inversion of dual-laterolog in horizontally stratified media and its application[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(supplement 1): 387–399.
- [22] 倪小威, 徐观佑, 敖旋峰, 等. 阵列侧向测井曲线极化角影响因素研究 [J]. 石油钻探技术, 2018, 46(2): 120–126.
NI Xiaowei, XU Guanyou, AO Xuanfeng, et al. The influencing factors on the polarizing angle of array laterolog curves[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(2): 120–126.
- [23] 倪小威, 徐思慧, 别康, 等. 不同井眼偏心距下水平井阵列侧向测井围岩校正研究 [J]. 石油钻探技术, 2018, 46(4): 121–126.
NI Xiaowei, XU Sihui, BIE Kang, et al. Surrounding rock influence correction for array laterolog responses with borehole eccentricities in horizontal wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(4): 121–126.
- [24] 余昭平, 燕善俊, 张文政, 等. 基于模拟退火算法的 DES 最佳线性逼近 [J]. 计算机工程, 2006, 32(16): 158–159.
YU Zhaoping, YAN Shanjun, ZHANG Wenzheng, et al. Best linear approximations of DES based on simulate annealing algorithms[J]. Computer Engineering, 2006, 32(16): 158–159.
- [25] 王杜娟, 刘锋, 王延章. 恶化效应下加工时间可控的新工件到达干扰管理 [J]. 系统管理学报, 2016, 25(5): 895–906, 913.
WANG Dujuan, LIU Feng, WANG Yanzhang. Disruption management for new jobs arrivals with deteriorating effect and controllable processing times[J]. Journal of Systems & Management, 2016, 25(5): 895–906, 913.
- [26] 王璞, 吴国忱, 李伟. 基于改进模拟退火算法的横波速度求取 [J]. 断块油气田, 2015, 22(3): 330–333.
WANG Pu, WU Guochen, LI Wei. Shear-wave velocity prediction based on revised and simulated annealing algorithm[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2015, 22(3): 330–333.
- [27] 顾元宪, 项宝卫, 赵国忠. 一种改进的连续变量全局优化模拟退火算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(4): 103–109.
GU Yuanxian, XIANG Baowei, ZHAO Guozhong. An improved simulated annealing algorithm for global optimization problems with continuous variables[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2005, 25(4): 103–109.
- [28] 冯思臣, 王绪本, 阮帅. 一维大地电磁测深几种反演算法的比较研究 [J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(5): 594–599.
FENG Sichen, WANG Xuben, RUAN Shuai. Comparison among several inversion algorithms of 1D MT[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2004, 39(5): 594–599.
- [29] 汪勇, 金菲, 张瑞军. 引导函数支配的进化模糊聚类算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(2): 302–307.
WANG Yong, JIN Fei, ZHANG Ruijun. Evolutionary fuzzy clustering algorithm dominated by guided function[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2011, 31(2): 302–307.