◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2020025

基于拟牛顿法的随钻方位电磁波电阻率仪器响应实时反演与现场试验

杨 震， 于其蛟， 马清明

（中石化胜利石油工程有限公司随钻测控技术中心，山东东营 257064）

摘 要：为了利用随钻方位电磁波电阻率仪器的测量数据确定地层界面方位和距离，给地质导向提供决策依据，须采用准确可靠的反演方法。针对随钻方位电磁波电阻率仪器，建立了地质导向应用模型并模拟了其响应特征，研究了拟牛顿反演算法和流程，反演过程中只需要较小的计算量就可以得到 Jacobian 矩阵，大大提高了反演速度；并利用单界面和双界面地层的反演理论模型，验证了该算法的正确性和准确度。在胜利油田草 XX 井的现场试验结果表明，实时反演结果与方位电磁波电阻率成像显示及后期完井录井结果一致。该反演方法能满足利用方位电磁波电阻率进行地质导向的要求，为方位电磁波电阻率实时地质导向提供了一种高效、准确的计算方法。

关键词：随钻方位电磁波；电阻率测井；地质导向；拟牛顿法；实时；反演；边界距离

中图分类号：P631.8^{+}13 **文献标志码：**A **文章编号：**1001–0890（2020）03–0120–07

Real Time Inversion and Field Test of LWD Azimuthal Electromagnetic Waves Based on Quasi-Newton Method

YANG Zhen, YU Qijiao, MA Qingming

(*MWD & LWD Technology Center, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong,* 257064*, China*)

Abstract: In order to determine the formation interface azimuth and distance by using the data measured by LWD azimuthal electromagnetic wave resistivity logging instrument using the quasi-Newton inversion algorithm. The objective was provide a decision-making basis for geosteering, an accurate and reliable inversion method must be used. For the LWD azimuthal electromagnetic wave resistivity logging instrument, an application model of geological guidance has been established and simulated its response characteristics. By studying the quasi-Newton inversion algorithm and process, the Jacobian matrix was obtained with less calculation cost in the inversion process, which greatly speeds up the inversion. At the same time, the correctness and accuracy of this algorithm were verified by using the theoretical inversion model including both single interface and a double interface strata model. The field test of Well Cao-XX in Shengli Oilfield showed that the real-time inversion results were consistent with the imaging display of azimuthal electromagnetic wave resistivity and also with the drilling/completion/logging results in later stages. This inversion method can meet the requirements of real time geo-steering by efficient and accurate calculation of azimuthal electromagnetic wave resistivity.

Key words: azimuthal electromagnetic logging while drilling; resistivity logging; geosteering; quasi-Newton method; real time; inversion; distance to interface

地质导向技术可以根据实时随钻测量结果调整井眼轨迹，提高水平井在复杂油藏中的储层钻遇率，最大限度地增加单井控制储量，提高钻井效率，降低成本[1]。随钻方位电磁波电阻率仪器的探测深度较深，同时测量结果能反映地层界面或油水界面的方位信息，在地质导向技术中占据重要的主导地位。随钻方位电磁波电阻率仪器可以提供多频、多线圈距及多分量的测量数据，但方位电磁波电阻率测量仪器不宜直接用于地质导向，需通过实时反演得到界面距离、方位等信息[2–3]，为地质导向决策提供依据。20 世纪 90 年代以来，复杂井眼环境下三维电磁场正反演快速发展[4–6]，主要采用有限差分

收稿日期：2019–01–31；**改回日期：**2020–04–22。

作者简介：杨震（1982—），男，山东莱芜人，2004 年毕业于石油大学（华东）勘查技术与工程专业，2009 年获中国石油大学（华东）地质资源与地质工程专业博士学位，高级工程师，主要从事随钻电测井方法及仪器设计研究。E-mail: stingsyzh@126.com。

基金项目：国家科技重大专项“低渗透油气藏高效开发钻完井技术”之课题“低渗透油气深层高温高压随钻测控技术”（编号：2016ZX05021-001）和国家重点研发计划项目“深海关键技术与装备”（编号：2016YFC0302802）联合资助。

法、有限元法等网格剖分方法，但由于计算时效难以满足现场要求，国外现场应用较为成熟的软件模块仍以简化的层状横向均匀一维地层模型为主[7–8]。

目前，通常采用梯度下降法和高斯牛顿法对电测井资料进行反演。梯度下降法收敛时存在浮动，不够稳定，在最优解附近波动时难以判断是否收敛；高斯牛顿法收敛速度快，但每一步迭代都需要求解目标函数的 Jacobian 矩阵，计算量大。为此，笔者基于拟牛顿法对随钻方位电磁波电阻率仪器响应理论模型进行反演计算，并对实际测量数据进行实时反演，降低了 Jacobian 矩阵的计算次数，提高了反演速度并降低了对初值的依赖性。现场试验实时反演计算得到的井眼与地层的相对位置关系，能够为随钻方位电磁波电阻率仪器提供更精准的地质导向。

1　随钻方位电磁波电阻率仪器响应特征

1.1　随钻方位电磁波电阻率仪器的工作原理

为了满足对日益复杂的油藏地质导向要求，各大油田技术服务公司先后推出了具有方位分辨功能的随钻方位电磁波电阻率仪器[9–14]，虽然其天线排布、反演算法和结果显示不同，但基本原理都是利用了磁场交叉耦合分量的方位性和边界响应特性，通过反演成像实现油藏边界实时可视化三维地质导向。

中石化随钻测控技术中心研发的随钻方位电磁波电阻率仪器（azimuthal multi-propagation resistivity, AMR），在原来的电磁波电阻率仪器基础上增加了横向天线 Rc[15–16]（见图 1），轴向发射天线与横向接收天线彼此垂直，可以测量 zx 或 zy 方向的分量，且 2 种仪器都采用补偿测量方式。AMR 仪器有 400 kHz 和 2 MHz 2 个工作频率，发射天线 T1 和 T2、T3 和 T4 分别关于轴向接收天线 R1 和 R2 对称，可以提供 8 条对称补偿的电磁波电阻率曲线；发射天线 T5 和 T2 关于横向接收天线 Rc 对称，可以提供 2 条对称补偿的定向电动势曲线。利用 AMR 仪器横向天线测量得到的电动势信号与电磁波电阻率结合，通过实时反演进行地质导向。

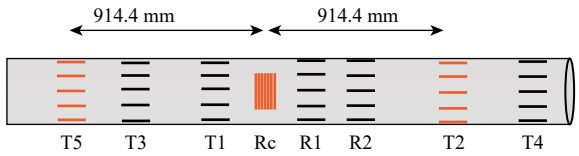


图 1　AMR 仪器结构示意

Fig.1　Structure sketch of AMR instrument

1.2　TI 地层模型

随钻测量受井眼影响较小，忽略井眼影响，地层模型可以采用一维 TI（transversely isotropic）介质模型。成熟的随钻方位电磁波电阻率地质导向软件基本采用单界面或双界面模型[17]，反演主要得到界面两侧原状地层电阻率及井眼距界面距离等。图 2 所示为双界面三层模型（图 2 中：Z_1，Z_2 分别为界面位置，m；H_{up}，H_{down} 分别为仪器到上、下界面的距离，m；R_{up} 为上地层电阻率，Ω·m；R_{mid} 为指中间地层电阻率，Ω·m；R_{down} 为下地层电阻率，Ω·m），该模型也可以简化为单界面双层模型。在该地层模型条件下，可采用层状介质地层中电磁场积分解析解导出快速计算随钻方位电磁波电阻率仪器响应[18–22]，具体方法不再赘述。

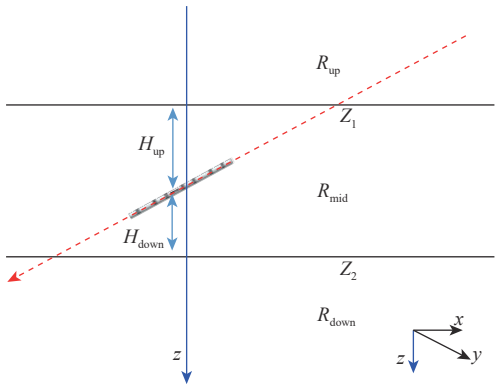


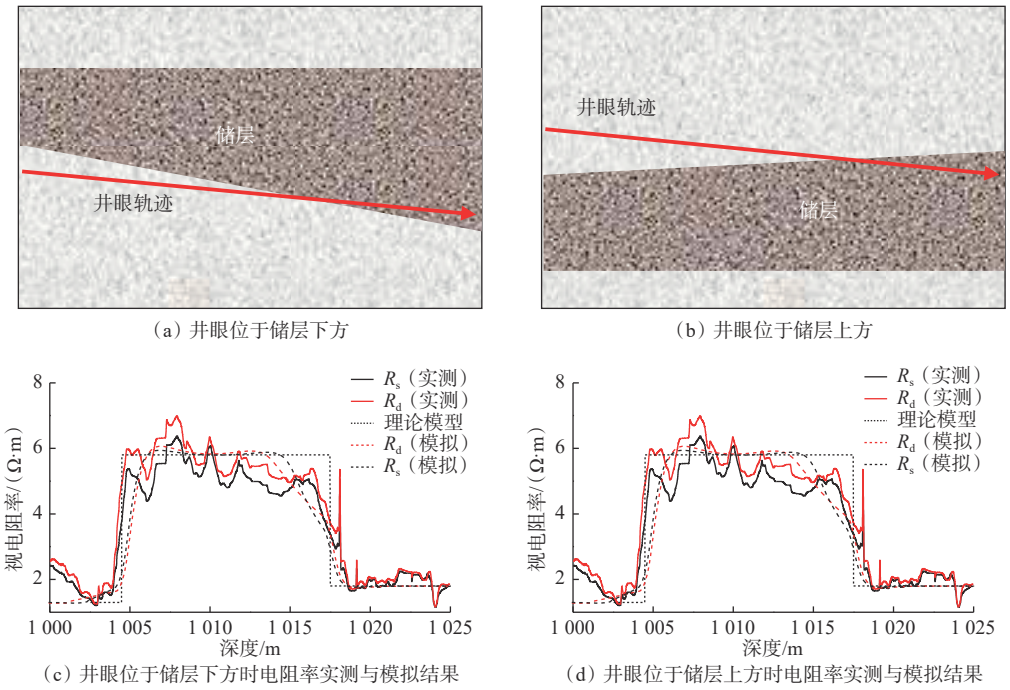
图 2　层状地层模型示意

Fig.2　Schematic map of layered strata

1.3　随钻方位电磁波响应模拟

常规电磁波电阻率是探测范围内地层电阻率的综合反映，没有方位性，因此反映不了界面与井眼的相对位置关系。图 3 所示为胜利油田草 XX 井一段实际地层模型响应模拟及测量结果（图 3 中：R_d，R_s 分别为深、浅相位电阻率，Ω·m），其中图 3（a）和图 3（b）为井眼轨迹与储层的相对位置关系，井眼分别从储层下方和储层上方穿过界面进入目的层，中间目的层位电阻率约为 5.8 Ω·m，垂直深度约为 4 m，井斜角约 75°，上地层电阻率约 1.2 Ω·m，下地层电阻率 1.8 Ω·m。2 种地层模型的电磁波电阻率响应是完全相同的（见图 3（c）和图 3（d）），理论模拟结果与实际测量曲线吻合，即只通过电阻率信息很难确定井眼轨迹与目的层的相对位置关系，因此只利用电磁波电阻率很难为井眼轨迹调整提供依据。

对如图 3 所示的地层模型进行定向电动势响应模拟，结果表明，这 2 种地层模型所对应的定向电动势信号的响应则完全不同（见图 4（a）和 4（b），其中，U_{zx} 为定向电动势，mV），图 4（a）的模拟曲线与实测

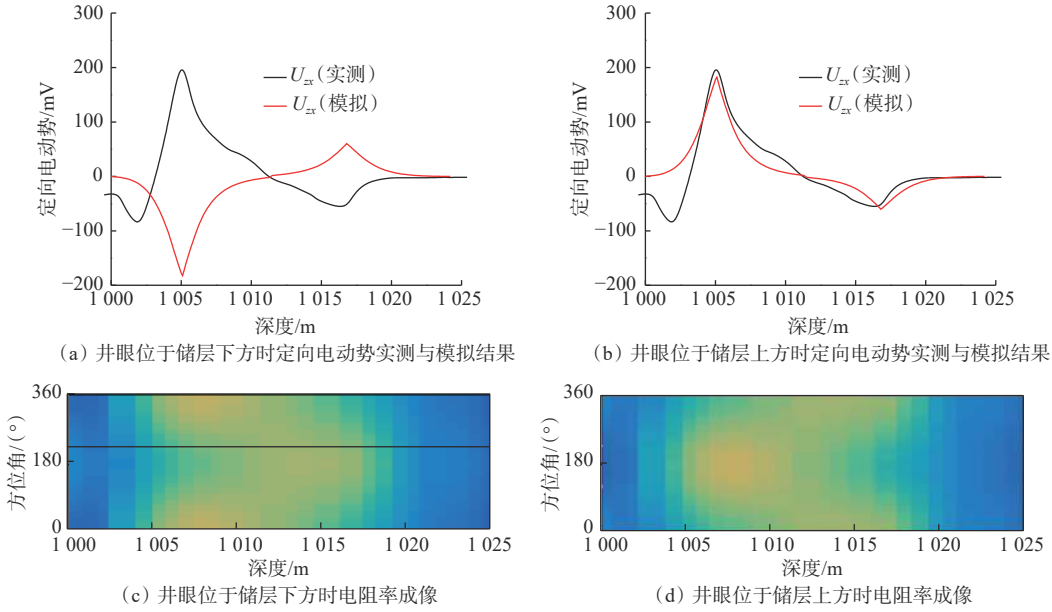


（a）井眼位于储层下方　（b）井眼位于储层上方

（c）井眼位于储层下方时电阻率实测与模拟结果　（d）井眼位于储层上方时电阻率实测与模拟结果

图 3　随钻电磁波电阻率响应模拟

Fig.3　Simulation of LWD electromagnetic wave resistivity response



（a）井眼位于储层下方时定向电动势实测与模拟结果　（b）井眼位于储层上方时定向电动势实测与模拟结果

（c）井眼位于储层下方时电阻率成像　（d）井眼位于储层上方时电阻率成像

图 4　随钻方位电磁波响应模拟

Fig.4　Simulation of LWD azimuthal electromagnetic wave response

曲线不吻合，图 4(b)的模拟曲线与实测曲线吻合，说明图 3(b)模型中井眼与储层的相对位置是合理的，即井眼从目的层上界面进入目的层。图 4(c)和 4(d)为利用电磁波电阻率与定向电动势信号合成的方位电阻率成像，可以更加直观地表明井眼与储层的相对位置。成像图中方位角 0°和 360°为仪器高边，180°为仪器低边。图 4(c)成像显示边界附近高边电阻率大于低边电阻率，说明高阻目的层位于井眼上方；图 4(d)成像显示边界附近低边电阻率大于高边电阻率，说明高阻目的层位于井眼下方。对于方位电磁波仪器响应来说，电导性地层和电阻性地层的相对位置及对比度关系决定了定向电动势的符号和幅度，定向电动势信号在界面处幅度最大，电导性地层位于电阻性地层上方时，定向电动势信号为正，反之为负[23]。定向电动势信号的幅度与界面两侧介质的电导率差有关，电导率差越大，定向电动势信号幅度越大。从图 4 可以

看出，基于定向电动势信号方位响应特性及与界面距离的响应关系，利用随钻方位电磁波电阻率仪器测量得到的地层电阻率和定向电动势信号进行联合反演，可以确定井眼与储层的相对位置。

2　基于拟牛顿法的反演算法

通常随钻电磁波测井都是将接收天线测量的电压直接转换成地层电阻率或电导率[24]，但在利用随钻电磁波测井资料进行地质导向过程中，需要井眼轨迹与地层的相对位置等信息（例如界面距离、界面方位、相对井斜角等），这些信息不能从所测量的物理量中直接得出，而是必须通过地层模型和反演算法来提取到。

将测井数据表示为向量形式，地层参数与仪器响应可以表示为[25–27]：

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{q}) \tag{1}$$

$$\boldsymbol{\Phi} = (\boldsymbol{y}-\boldsymbol{f})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{y}-\boldsymbol{f}) \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{q}$为地层参数矩阵（包含地层电阻率、界面距离等）；$\boldsymbol{y}$为随钻方位仪器响应值；$\boldsymbol{f}$为仪器响应函数；$\boldsymbol{\Phi}$为目标函数。

反演的过程就是通过逐次修正$\boldsymbol{q}$来实现$\boldsymbol{\Phi}$最小化的过程。反演算法流程如图 5 所示。

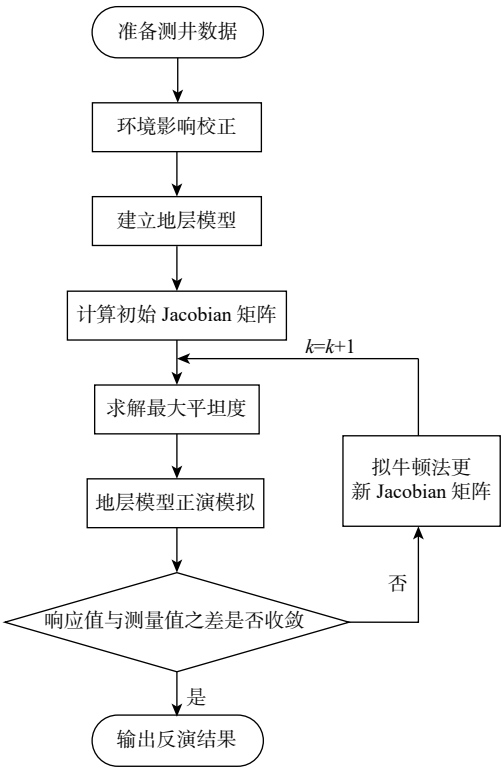


图 5　拟牛顿反演算法流程

Fig.5　Algorithm flow of quasi-Newton inversion

通过响应模拟不断调整参数使仪器响应值与实测值逐渐吻合。反演过程就是不断调整模型参数的过程，可以表示为：

$$\boldsymbol{q}^{k+1} = \boldsymbol{q}^{k} + \boldsymbol{x}^{k} \tag{3}$$

式中：k 为迭代的次数；$\boldsymbol{x}$为最小二乘法求得的方程解。

$$\boldsymbol{x}^{k} = [(\boldsymbol{B}^{k})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}^{k} + \alpha^{2}\boldsymbol{I} + \lambda^{2}\boldsymbol{I}]^{-1}[(\boldsymbol{B}^{k})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{b}^{k} - \alpha^{2}\boldsymbol{q}^{k}] \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{B}$为利用拟牛顿法得到的 Jacobian 矩阵；$\boldsymbol{b}$为测量值与仪器响应模拟结果的差值；$\boldsymbol{I}$为单位矩阵；α为熵权重系数；λ为阻尼因子。

反演过程中计算量最大的部分是 Jacobian 矩阵的计算，如果减少 Jacobian 矩阵的计算次数，则可以大大加快反演速度。采用拟牛顿法则只需要在反演过程开始计算一次 Jacobian 矩阵，在接下来的迭代反演过程中则只需要较少的计算量来更新得到新的 Jacobian 矩阵，因此大大缩短了反演时间，提高了反演速度，从而可以实现地质导向过程中的实时反演。

$$\boldsymbol{J}^{k+1}\boldsymbol{x}^{k} = \boldsymbol{y}^{k} \tag{5}$$

其中

$$\boldsymbol{x}^{k} = \boldsymbol{q}^{k+1} - \boldsymbol{q}^{k} \tag{6}$$

Broyden 引入了一个满足拟牛顿条件方程的矩阵$\boldsymbol{B}^{k+1}$：

$$\boldsymbol{B}^{k+1}\boldsymbol{x}^{k} = \boldsymbol{y}^{k} \tag{7}$$

注意，对于$M\times N$矩阵$\boldsymbol{B}^{k+1}$，拟牛顿条件只能提供 N 个方程，不能唯一确定更新矩阵$\boldsymbol{U}^{k}$。由文献 [28] 可知，可以通过增加一个一阶矩阵来满足拟牛顿条件，即 Broyden 的改进型：

$$\boldsymbol{B}^{k+1} = \boldsymbol{B}^{k} + [\boldsymbol{y}^{k} - \boldsymbol{B}^{k}\boldsymbol{x}^{k}]\frac{[\boldsymbol{x}^{k}]^{\mathrm{T}}}{[\boldsymbol{x}^{k}]^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{x}^{k}]} \tag{8}$$

通过初始矩阵$\boldsymbol{B}^{0} = \boldsymbol{J}^{0}$，利用式（8）来逐次逼近代替 Jacobian 矩阵。

对如图 2 所示的理论地层模型分别进行单界面和双界面反演。单界面地层模型的上下地层电阻率分别为 1 Ω·m 和 10 Ω·m，仪器位于界面下方 0.40 m 处，分别采用牛顿法和拟牛顿法对 2 条电阻率曲线和 2 条定向电动势信号曲线进行反演，以反演出上、下地层电阻率和界面距离。设定的反演初始值相同（上地层电阻率为 2 Ω·m，下地层电阻率为 8 Ω·m，界面距离为 1.00 m），最小误差度相同，反演结果见表 1。由表 1 可知，在同样收敛条件下，拟牛顿法比普通牛顿法迭代次数更少，同时避免了每次迭代都计算 Jacobian 矩阵，因此反演时间大为缩短。

表 1　单界面反演结果

Table 1　Inversion results of single interface model

反演方法	上地层反演电阻率/(Ω·m)	下地层反演电阻率/(Ω·m)	界面距离/m	迭代次数
牛顿法	1.05	10.12	0.43	12
拟牛顿法	1.03	10.08	0.41	6

双界面模型的地层电阻率分别为 1, 10 和 1 Ω·m, 层厚 6.00 m, 逐点反演结果如图 6 所示。结果表明, 界面附近反演结果的精度较高, 远离界面时反演结果的精度降低, 这是由于随着仪器远离界面, 定向电动势信号变小, 导致信噪比变差。反演结果验证了采用拟牛顿法反演单界面模型和双界面模型的正确性和可靠性。正演模拟表明, 电阻率对比度小于 10∶1 时, 双界面模型可以认为是 2 个单界面模型, 在该模型中利用单界面模型和双界面模型的反演结果差别不大, 因此单界面模型能满足大部分地质导向要求。

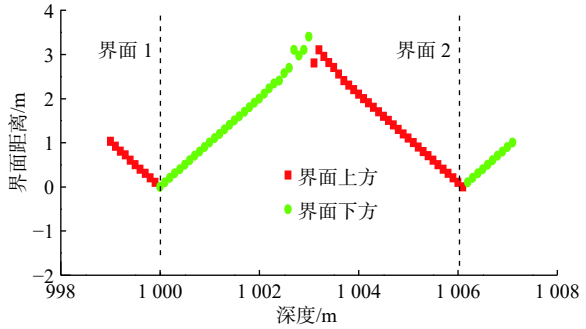


图 6　双界面反演结果示意

Fig.6　Inversion results of double interfaces model

3　现场试验

随钻方位电磁波电阻率仪器研制成功后进行了多井次试验, 分别测试了不同的性能指标。从仪器响应特点来看, 方位电磁波电阻率边界探测信号适用于大斜度井或水平井中测量, 并且要求仪器在测量过程中旋转。

草 XX 井为胜利油田的一口水平井, 造斜段为 910.00～1 260.00 m。在该井的 900.00～1 300.00 m 井段进行了随钻方位电磁波电阻率仪器现场试验, 钻进过程中实时得到了自然伽马曲线、2 条相位电阻率曲线和 2 个频率的定向电动势曲线(见图 7), 其中, 1 005.00～1 017.40 m 井段为草 XX 井的一个标志性地层, 由邻井资料可知该地层电阻率约为 5.8 Ω·m, 厚度约为 5.00 m, 井斜角约为 75°, 上地层电阻率约为 1.2 Ω·m, 下地层电阻率约为 1.8 Ω·m。

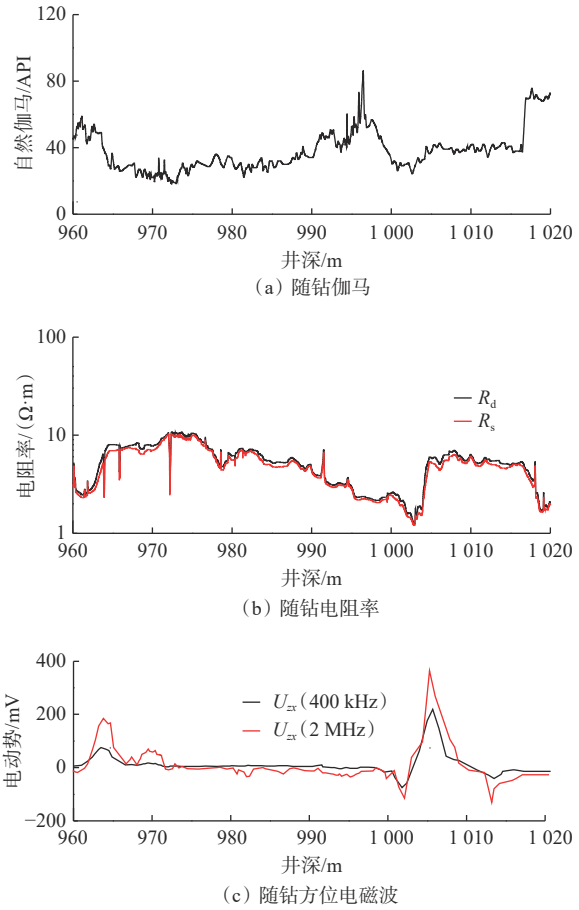


图 7　草 XX 井随钻伽马、电阻率及方位电磁波响应曲线

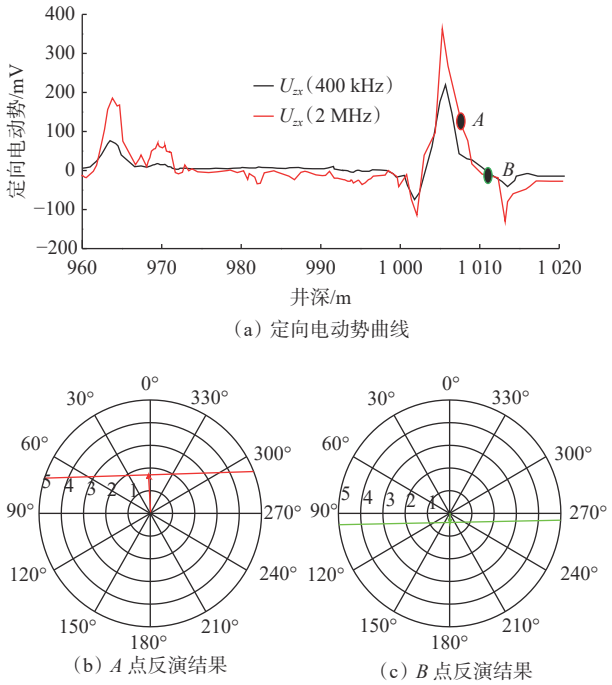
Fig. 7　LWD Gamma, Resistivity and azimuthal electromagnetic wave response curves in Well Cao-XX

钻进过程中利用上文所述反演算法实时反演界面两侧的电阻率及其与界面的距离, 正常钻井过程中不需要进行实时反演, 只有钻至目的层界面附近或需要进行地质导向时才启动反演程序。钻至井深 1 005.00 m 附近时实时反演程序启动, 钻进过程中逐点实时反演该层段随钻方位电阻率, 反演采用单界面模型, 实时反演得到测量点与界面的相对位置及其与界面的距离(见图 8)。

反演结果表明, 测量点 *A* 距离上界面约 1.60 m, 测量点 *B* 距离下界面约 0.40 m。对该井段进行方位电阻率成像, 可以看出, 仪器从上界面进入目的层, 穿行 14.00 m 后从下界面穿出目的层; 后期完井录井资料也验证了该结果的正确性。地质导向过程中实时反演界面距离, 可以实时调整钻头钻进方向, 使地质导向更加准确高效。

4　结论与建议

1)随钻方位电磁波电阻率测量结果具备方位特



(a) 定向电动势曲线

(b) A 点反演结果　　(c) B 点反演结果

图 8　草 XX 井界面距离实时反演示意

Fig. 8　Schematic map of the interface distance real time inversion in Well Cao-XX

性，利用其进行地质导向时，通过反演得到地层界面的方位及距离，判断和预测井眼与界面的相对位置。

2）采用拟牛顿法大大减少了反演过程中计算 Jacobian 矩阵的次数，加快了反演迭代收敛速度，反演结果满足随钻实时要求，通过理论模拟验证了基于拟牛顿法反演方法的有效性和准确性。

3）随钻方位电磁波电阻率实时反演主要采用单界面或双界面模型，进行地质导向时可实时反演得到界面距离，方位电阻率成像结果和后期完井录井资料验证了反演结果的准确性。建议进一步研究多界面模型反演方法和应用，提高复杂地层模型的适应性，并研究非旋转状态下的数据采集和处理方法。

参　考　文　献

References

[1] 高永德，陈鸣，蔡建荣，等. 基于地层边界探测的主动型地质导向技术在南海西部复杂油层中的应用 [J]. 中国海上油气，2014，26(5)：63–69.
GAO Yongde, CHEN Ming, CAI Jianrong, et al. An application of the active geosteering technique based on stratigraphic-boundary detection in complex reservoirs in the western South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2014, 26(5): 63–69.

[2] WANG Hanming, BARBER T, MORRISS C, et al. Triaxial induction logging: theory, modeling, inversion and interpretation[R]. SPE 103897, 2006.

[3] FANG Sheng, MERCHANT G A, HART E, et al. Determination of structural dip and azimuthal from LWD azimuthal propagation resistivity measurements in anisotropic formations[R]. SPE 116123, 2008.

[4] RABINOVICH M, LE Fei, LOFTS J, et al. Deep? How deep and what? The vagaries and myths of “look around” deep-resistivity measurements while drilling[R]. SPWLA-2011-NNN, 2011.

[5] BITTAR M S, KLEIN J D, RANDY B, et al. A new azimuthal deep-reading resistivity tool for geosteering and advanced formation evaluation[J]. SPE Reservoir evaluation &engineering, 2009, 12(2): 270–279.

[6] 朱庚雪，刘得军，张颖颖，等. 基于 hp-FEM 的随钻电磁波测井仪器响应正演分析 [J]. 石油钻探技术，2015，43(2)：63–70.
ZHU Gengxue, LIU Dejun, ZHANG Yingying, et al. Forward modeling of responses of an ELWD tool based on hp-FEM[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(2): 63–70.

[7] PARDO D, TORRES-VERDIN C. Fast 1D inversion of logging-while-drilling resistivity measurements for improved estimation of formation resistivity in high-angle and horizontal wells[J]. Geophysics, 2015, 80(2): E111–E124.

[8] 冯进，倪小威，杨清，等. 基于混合模拟退火算法的阵列侧向测井实时反演研究 [J]. 石油钻探技术，2019，47(5)：121–126.
FENG Jin, NI Xiaowei, YANG Qing, et al. Research on array lateral logging real-time inversions based on hybrid simulated annealing algorithms[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(5): 121–126.

[9] LI Qiming, OMERAGIC D, CHOU L, et al. New directional electromagnetic tool for proactive geosteering and accurate formation evaluation while drilling[R]. SPWLA-2005-UU, 2005.

[10] OMERAGIC D, LI Qiming, CHOU L, et al. Deep directional electromagnetic measurement for optimal placement[R]. SPE 97045, 2005.

[11] CHEMALI R E, CAIRNS P G, WANG T, et al. Method for signal enhancement in azimuthal propagation resistivity while drilling: US7375530B2[P]. 2008-05-20.

[12] WANG T, CHEMALI R E. Method of generating a deep resistivity image in LWD measurement: US7483793B2[P]. 2009-01-27.

[13] KENNEDY W D, CORLEY B, PAINCHAUD S, et al. Geosteering using deep resistivity image from azimuthal and multiple propagation resistivity[R]. SPWLA-2009-64467, 2009.

[14] SEIFERT D, CHEMALI R, BITTAR M, et al. The link between resistivity contrast and successful geosteering[R]. SPWLA-2011-VVV, 2011.

[15] 杨震，杨锦舟，韩来聚. 随钻方位电磁波电阻率成像模拟及应用 [J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2013，43(6)：2035–2043.
YANG Zhen, YANG Jinzhou, HAN Laiju. Numerical simulation and application of azimuthal propagation resistivity imaging while drilling[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2013, 43(6): 2035–2043.

[16] 杨震，杨锦舟，韩来聚. 随钻方位电磁波仪器补偿测量方法研究 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版)，2015，39(3)：62–69.
YANG Zhen, YANG Jinzhou, HAN Laiju. Research on azimuthal electromagnetic tool while drilling measuring method of compensation[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(3): 62–69.

[17] ZHANG Zhiyi, GONGUET C, RAJAN V, et al. Directional LWD resistivity tools and their business impacts[R]. SPWLA -2008-FFFF.

2008.

[18] 肖加奇, 张庚骥. 水平井和大斜度井中的感应测井响应计算 [J]. 地球物理学报, 1995, 38(3): 396–404.
XIAO Jiaqi, ZHANG Gengji. Computation of induction logging response in horizontal and highly-deviated wells[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1995, 38(3): 396–404.

[19] 张辉, 李桐林, 董瑞霞, 等. 利用高斯求积和连分式展开计算电磁张量格林函数积分 [J]. 地球物理学进展, 2005, 20(3): 667–670.
ZHANG Hui, LI Tonglin, DONG Ruixia, et al. Computation of Green's tensor integrals for electromagnetic problem using Gaussian quadrature and continued fraction[J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(3): 667–670.

[20] 孙向阳, 聂在平, 赵延文, 等. 用矢量有限元方法模拟随钻测井仪在倾斜各向异性地层中的电磁响应 [J]. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1600–1607.
SUN Xiangyang, NIE Zaiping, ZHAO Yanwen, et al. The electromagnetic modeling of logging-while-drilling tool in tilted anisotropic formations using vector finite element method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(5): 1600–1607.

[21] 王昌学, 周灿灿, 储昭坦, 等. 电性各向异性地层频率域电磁响应模拟 [J]. 地球物理学报, 2006, 49(6): 1873–1883.
WANG Changxue, ZHOU Cancan, CHU Zhaotan, et al. Modeling of electromagnetic responses in frequency domain to electrical anisotropic formations[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(6): 1873–1883.

[22] 肖加奇, 张国艳, 洪德成, 等. 层状各向异性地层中三维感应测井响应快速计算及资料处理 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(2): 696–706.
XIAO Jiaqi, ZHANG Guoyan, HONG Decheng, et al. Fast forward modeling and data processing of 3D induction logging tool in layered anisotropic formation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(2): 696–706.

[23] SEIFERT D, CHEMALI R, BITTAR M. The link between resistivity contrast and successful geosteering[R]. SPWLA -2011-VV, 2011.

[24] 李勇华, 杨锦舟, 杨震, 等. 随钻电阻率地层边界响应特征分析及应用 [J]. 石油钻探技术, 2016, 44(6): 111–116.
LI Yonghua, YANG Jinzhou, YANG Zhen, et al. The analysis and application of formation interface response characteristics of the resistivity LWD tool[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(6): 111–116.

[25] 冯进, 张中庆, 罗虎. 随钻电磁波电阻率和电缆电阻率测井联合反演及应用 [J]. 测井技术, 2015, 39(1): 21–26.
FENG Jin, ZHANG Zhongqing, LUO Hu. Joint inversion of electromagnetic logging while drilling and wire line resistivity logging and its application l[J]. Well Logging Technology, 2015, 39(1): 21–26.

[26] 杨震, 文艺, 肖红兵. 随钻方位电磁波仪器探测电阻率各向异性新方法 [J]. 石油钻探技术, 2016, 44(3): 115–120.
YANG Zhen, WEN Yi, XIAO Hongbing. A new method of detecting while drilling resistivity anisotropy with azimuthal electromagnetic wave tools[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(3): 115–120.

[27] 杨锦舟. 随钻方位电磁波仪器界面预测影响因素分析 [J]. 测井技术, 2014, 38(1): 39–45,50.
YANG Jinzhou. Analysis on the affecting factors of prediction interface with azimuthal LWD electromagnetic tool[J]. Well Logging Technology, 2014, 38(1): 39–45,50.

[28] MARTINEZ J M. Practical quasi-Newton method for solving nonlinear systems[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2000, 124(1/2): 97–121.

[编辑　滕春鸣]