◀钻井技术与装备▶

随钻电磁波电阻率探边分析与实时反演方法研究

艾维平[1] 谢 夏[1] 毛为民[1] 王 鹏[1] 张 邈[2]
（1. 中国石油集团工程技术研究院有限公司 2. 大庆油田有限责任公司第二采油厂第六作业区）

艾维平，谢夏，毛为民，等. 随钻电磁波电阻率探边分析与实时反演方法研究［J］. 石油机械，2026，54（9）：63-71.

Ai Weiping，Xie Xia，Mao Weimin，et al. A real-time boundary-detection inversion method based on LWD electromagnetic wave resistivity［J］. China Petroleum Machinery，2026，54（9）：63-71.

摘要：水平井钻井中，随钻电磁波电阻率测井作为地质导向的核心技术，其对井眼轨迹精准控制及储层边界实时识别的能力直接影响油气开发效益。该技术测量的幅度比、相位差视电阻率信号，传统上仅用于表征地层电阻率，而这两类信号在邻近地层界面时呈现的“犄角”特征中还蕴含着界面距离信息。现有研究尚未充分挖掘这两类信号的探边能力，为弥补该研究空白，开展水平井随钻电磁波电阻率测井视电阻率信号的探边反演方法研究。基于电阻率测量原理定义视电阻率信号的探边能力，构建不同单界面模型中的电阻率信号探边 Picasso 图版；在此基础上，建立单界面反演模型，分析模型初值迭代规律并验证反演准确性；通过不同层厚模型的反演结果验证电阻率探边反演的适用性，并将其应用于实际水平井资料解释中。反演验证结果表明：重构响应与实测曲线符合度良好，在有效探边距离内参数精度满足需求；该方法在层厚 1 m 以上的地层中反演效果优异，结合实际井应用案例，证实方法的可行性与稳定性；所提出的电阻率信号探边反演方法，实现了厚层中地层电阻率与界面距离的快速、准确提取，结合先验信息，在无方位信号条件下可提供准确的界面位置。研究结果可为水平井地质导向提供可靠的技术手段，具有显著的工程应用价值。

关键词：随钻电磁波电阻率测井；水平井；探边反演；界面距离；地质导向
中图分类号：TE142/TE227/P631 **文献标识码：**A DOI：10. 12473/CPM. 202603072

A Real-Time Boundary-Detection Inversion Method Based on LWD Electromagnetic Wave Resistivity

Ai Weiping[1] Xie Xia[1] Mao Weimin[1] Wang Peng[1] Zhang Miao[2]
（1. *CNPC Engineering Technology R & D Company Limited*；2. *No.* 6 *Operation Zone*，*No.* 2 *Oil Production Plant*，*CNPC Daqing Oilfield Company Limited*）

Abstract：In horizontal drilling，electromagnetic wave resistivity logging-while-drilling（LWD）serves as a core technology for geosteering. Its efficacy in precise wellbore trajectory control and real-time reservoir boundary detection can directly affect the benefits of petroleum development. Traditionally，amplitude ratio and phase difference signals of apparent resistivity were measured with instruments to represent formation resistivity. However，the distinct "horn" anomalies proximate to bed boundaries encapsulate critical information about boundary distance. The boundary-detection potential inherent in these signals remains inadequately harnessed. To bridge this gap，this study introduces a real-time boundary-detection inversion method based on apparent resistivity signals derived from electromagnetic wave resistivity LWD in horizontal well. Firstly，the boundary-detection potential of apparent resistivity signals was defined in accordance with fundamental resistivity measurement principles，and the Picasso

© Editorial Office of *China Petroleum Machinery*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

charts for resistivity signal-based boundary detection were prepared for diverse single-boundary models. Subsequently, a single-boundary inversion model for resistivity signal-based boundary detection was established, the iteration behaviors of model' initial values were analyzed, and the inversion fidelity was rigorously validated. Finally, the robustness of the proposed method was validated across stratigraphic models of varying thicknesses and further corroborated through field data interpretation. Validation results demonstrate a high-fidelity reconstruction of measured signals, confirming that parameter accuracy satisfies operational requirements within the effective detection range. Applicability analysis reveals superior performance in formations exceeding 1 m in thickness. Field case studies substantiate both the feasibility and stability of the method. Crucially, the proposed method facilitates the rapid and precise extraction of formation resistivity and boundary distances in thick formations. By integrating prior geological information, it delivers accurate boundary positioning even in the absence of azimuthal measurements. This research provides a robust technical solution for geosteering operations in horizontal wells, demonstrating significant engineering utility.

Keywords: electromagnetic wave resistivity logging-while-drilling; horizontal well; boundary-detection inversion; boundary positioning; geosteering

0　引　言

水平井钻进过程中，钻井轨迹控制与储层边界识别直接决定油气开发的经济效益。水平井的核心价值在于最大化储层有效穿行长度，及时掌握储层钻遇情况。随钻电磁波电阻率测井作为水平井地质导向与地层评价的关键技术，有别于传统测井的钻后测量，可在钻井过程中实时获取地层电阻率数据[1-3]。该技术通过发射不同频率的电磁波并测量其传播特性，其探测深度与水平井储层边界识别需求高度匹配[4-6]。由于储层与非储层通常存在明显的电阻率差异（例如致密砂岩与泥岩围岩之间），该技术能有效识别岩性界面，为判断储层有效性及实时调整井眼轨迹提供关键依据[7-10]。

随钻电磁波电阻率测井的响应包括幅度比和相位两差种视电阻率信号。两者传统应用于划分储层纵向分层、判断储层流体类型等[11-12]。视电阻率信号本身缺乏对地层界面的方位敏感性，在仪器远离界面时与地层实际电阻率基本吻合，可较准确表征仪器所在层的电阻率。在界面附近，由于电磁波传播路径受上下围岩电性差异影响，视电阻率信号会发生急剧变化，出现典型的“犄角”现象[13-14]。该特性虽对精确表征地层实际电阻率产生干扰，却能反映出信号对界面距离的敏感性，为基于电阻率反演进行储层边界探测奠定了物理基础[15-17]。然而，现有研究与应用中，幅度比、相位差视电阻率信号的探边能力尚未得到充分挖掘，仍存在多方面技术瓶颈，具体表现如下：一是信号本身不具备方位信息，无法直接判定地层界面位于仪器的上方、下方或侧方[18-20]；二是信号响应与界面距离呈非线性关系，难以通过简单的观测值直接定量地计算出精确距离[8, 10, 12]；三是不同地层模型（如层厚、围岩电阻率对比度）下信号的探边灵敏度差异显著，其有效探测范围和适用条件尚未得到系统研究[4, 6-7]；四是在无方位信息的情况下，如何有效结合邻井资料和钻前地质模型等先验信息对界面位置进行准确定位和实时判别，仍是随钻测井资料解释面临的关键难题，制约着地质导向决策的精准性与时效性[15, 18-19]。

针对上述问题，笔者基于中国石油集团工程技术研究院有限公司研发的ø171.45 mm（6.75 in）随钻电磁波电阻率仪器，利用视电阻率信号实现地层界面和电阻率的快速提取。明确了视电阻率信号探边能力的定义及不同电阻率模型的探边能力，建立了单界面反演模型与初值生成方法，分析迭代规律并验证反演的准确性与适用性，最终快速、准确地提取 1 口井的地层界面与电阻率信息。研究结果可为水平井地质导向提供可靠的技术手段。

1　随钻电磁波电阻率测井响应探边性能

1.1　命名规则

为便于表述，笔者对仪器输出曲线采用统一的 4 位字母代号：首位 R 表示视电阻率（Ω·m），无 R 表示原始测量信号或其净值（幅度比，dB；相位差，(°)）；第 2 位表示信号类型，A 为幅度

比、P 为相位差；第 3 位表示源距，S 为短源距 495.3 mm（19.5 in），L 为长源距 1 054.1 mm（41.5 in）；第 4 位表示频率，H 为高频 2 MHz、M 为低频 400 kHz。例如，RPSH 表示短源距、2 MHz 的相位差视电阻率，ALM 表示长源距、400 kHz 的幅度比净值。

1.2　电阻率测量原理

笔者以自研仪器为例介绍电阻率测量原理。该仪器的电阻率探测模式采用四发双收轴向对称天线设计，测量双频率下不同源距的幅度比、相位差信号。具体计算公式如下：

$$A_{\mathrm{tt}} = 20\lg\frac{\mathrm{sqrt}([\mathrm{Re}(V_1)]^2+[\mathrm{Im}(V_1)]^2)}{\mathrm{sqrt}([\mathrm{Re}(V_2)]^2+[\mathrm{Im}(V_2)]^2)} \tag{1}$$

$$P_{\mathrm{s}} = \arctan^{-1}\frac{\mathrm{Im}(V_2)}{\mathrm{Re}(V_2)} - \arctan^{-1}\frac{\mathrm{Im}(V_1)}{\mathrm{Re}(V_1)} \tag{2}$$

式中：A_{tt}为幅度比信号，dB；P_{s}为相位差信号，(°)；V_1和V_2分别为不同接收线圈的电动势信号，V。在均匀各向同性介质假设下，幅度比、相位差信号与介质电阻率一一对应；依据该刻度关系，可将实测的幅度比、相位差信号分别折算为幅度比视电阻率与相位差视电阻率，二者统称视电阻率。

幅度比、相位差视电阻率信号对界面方位不敏感，主要用于表征地层电阻率R_{es}信息。图 1 为随钻电磁波电阻率测井单界面模型及视电阻率响应示意图。模型上层电阻率R_1=2 Ω·m，下层电阻率R_2=20 Ω·m，井斜角 89°。

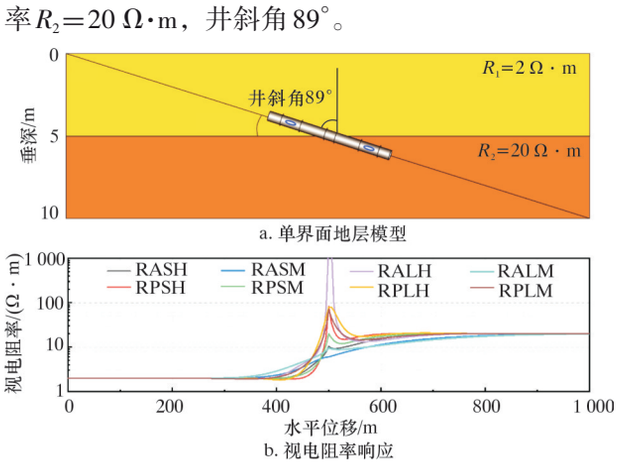


图 1　随钻电磁波电阻率测井单界面模型及视电阻率响应示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the single-boundary model and apparent resistivity response for electromagnetic wave resistivity logging while drilling

由图 1 可知，该仪器在低阻-高阻地层界面附近的响应特征存在明显差异。远离界面的视电阻率值与地层实际电阻率相符；而在界面附近视电阻率急剧变化，出现异常的“犄角”。这说明幅度比和相位差视电阻率信号不仅能够反映地层电阻率信息，还具备界面探测能力。地层中部的基值可用于表征地层电阻率，近界面处信号变化可显示与地层界面的相对距离。

1.3　探边能力定义

基于仪器靠近界面时的响应变化特征，仪器的探边能力可用幅度比、相位差信号与地层中部基值之差（即净值）来定义。具体公式如下：

$$A_{\mathrm{tt,\,net}} = A_{\mathrm{tt}} - A_{\mathrm{tt,\,base}} \tag{3}$$

$$P_{\mathrm{s,\,net}} = P_{\mathrm{s}} - P_{\mathrm{s,\,base}} \tag{4}$$

式中：$A_{\mathrm{tt,\,net}}$为幅度比净值响应，dB；$P_{\mathrm{s,\,net}}$为相位差净值响应，(°)；$A_{\mathrm{tt,\,base}}$、$P_{\mathrm{s,\,base}}$为地层中部的信号基值，单位分别为 dB 和(°)。

基于图 1a 模型，计算得到如图 2 所示的单界面幅度比、相位差净值响应曲线。图 2 中实线为原始净值响应，虚线则为取负后的净值响应，水平虚线为探边判别阈值（幅度比取 0.02、0.04 dB，相位差取 0.05°、0.10°）。仪器远离界面时，净值趋近于 0；随着仪器接近地层界面，净值幅值增大。根据幅度比、相位差的阈值分析，幅度比信号的探边距离小于相位差信号的探边距离，两者在高电阻率地层中的探边距离大于低电阻率地层的探边距离。该结果表明：幅度比、相位差净值信号的大小可反映仪器与界面的距离，具备地层界面探测能力。

然而，净值信号无法识别方位，具有较强非线性，需利用上一计算窗口的结果及先验信息，根据横向连续性判断仪器是否为同一地层。通过定义与计算信号基值，可提取电阻率信号中的响应变化并将其转化为探边灵敏度指标。该方法剥离了地层背景电阻率的影响，为定量分析探边距离与反演界面位置提供理论依据。

1.4　探边 Picasso 图版

为定量刻画电阻率信号在不同对比度模型中的探边能力，改变单界面模型上下地层电阻率，以幅度比 0.02 dB、相位差阈值 0.05°为阈值，获得不同频率、源距下的探边 Picasso 图版（见图 3）。定义k为仪器层电阻率R_{t}与围岩层电阻率R_{s}之比。地层对比度约束为 1∶50、电阻率约束为 0.1~1 000 Ω·m，最优的高频长源距相位差信号的探边距离可达 3 m 以上。由图 3 可知：相同源距和频率条件下，相位差信号的探边距离比幅度比信号更远、盲区更小；长源距信号的探边能力强于短源距信号；高低频信号的最大探边距离差异较小。

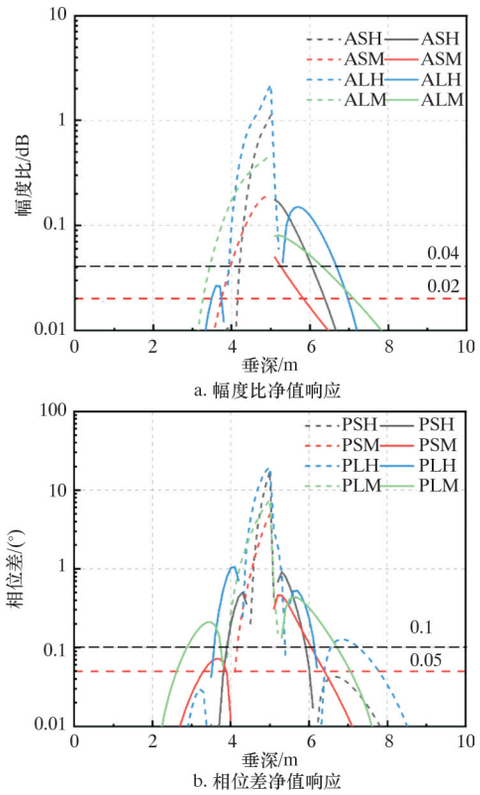


图 2　单界面模型幅度比与相位差净值响应曲线

Fig. 2　Amplitude-ratio and net-phase-difference response curves of the single-boundary model

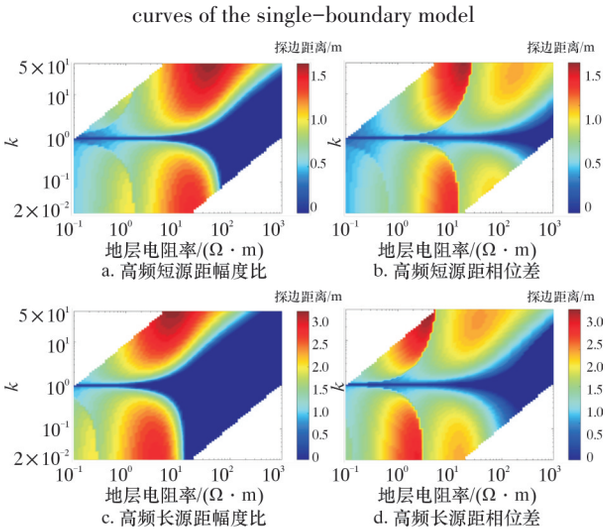


图 3　仪器典型响应探边 Picasso 图版

Fig. 3　Picasso charts for boundary detection based on typical responses

该图版对应理想条件下的最大探边距离，但实际测井中须考虑噪声干扰，应进一步提高探边阈值以确保结果可靠性。在噪声影响下，以幅度比 0. 04 dB、相位差 0. 1°为阈值，获得考虑噪声干扰的探边图版（见图 4）。由图 4 可知，短源距信号的有效探边距离不足 1. 5 m，长源距信号有效探边距离不足 2. 5 m；在常见的地层模型中，长源距信号探边距离在 1~2 m 范围内。

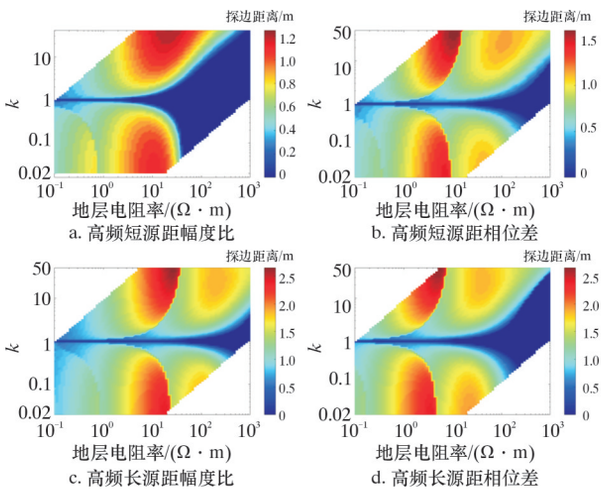


图 4　考虑噪声干扰的探边 Picasso 图版

Fig. 4　Picasso charts for boundary detection considering noise interference

2　随钻电磁波电阻率测井反演方法

2. 1　单界面探边反演模型

由于探边距离限制，随钻电磁波电阻率测井通常采用图 5 所示单界面模型。图 5a 对应仪器首次进入靶层且位于界面下方的反演模型，图 5b 对应仪器临近下界面的反演模型。单界面反演参数包括：仪器层电阻率 R_t、围岩电阻率 R_s、界面距离 D_{tb}。模型选取的核心是根据靶层厚度与仪器深度的相对关系，动态匹配反演场景。仪器刚进入靶层时，利用先验信息设定界面处于仪器上方，采用图 5a 所示模型；根据邻井资料的靶层厚度，当仪器距上界面超过靶层½厚度时，以下界面为反演目标，约束界面位置始终处于仪器下方，并切换为图 5b 所示模型。

2. 2　模型初值与迭代

初值的合理性直接影响迭代速度与反演精度，需结合先验信息与测井实际场景有针对性地设定。由于高频短源距相位差视电阻率探测的径向深度更浅，视电阻率与仪器层电阻率接近。选取 R_t 的初值时，以视电阻率 R_a 为基准，结合邻井层位电阻率上下浮动，设定 3 个初值，分别为 0. 8R_a、R_a、1. 2R_a，覆盖仪器层电阻率的可能波动范围。

对于 R_s 的初值，若此时为图 5a 中仪器刚穿越上界面的模型，则围岩电阻率可以先前所测围岩处的视电阻率大小作为初值；若为图 5b 中仪器远离上界面的模型，可基于地层对比度约束生成 4 个初值，分别取 R_a/8、R_a/2、2R_a、8R_a，以覆盖 1∶8 对比度范围。

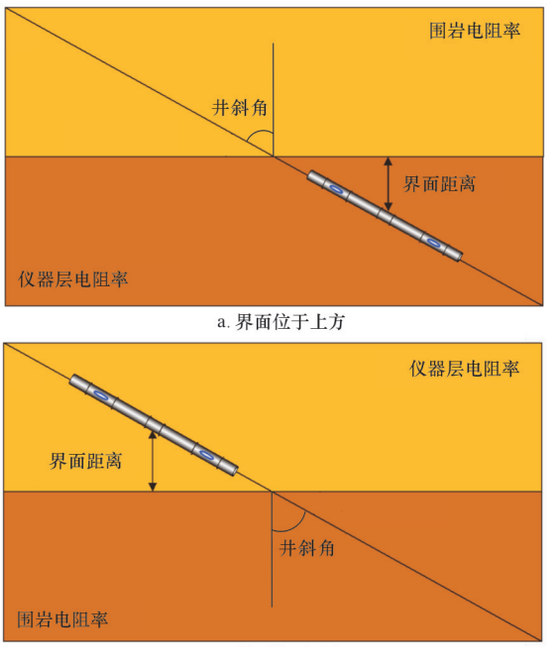


图 5　水平层状单界面反演模型

Fig. 5　Horizontal layered single-boundary inversion model

D_{tb}的初值则结合钻前设计的靶层厚度与仪器实时地层垂深估算。结合图 4 中探边 Picasso 图版，将仪器层与R_s投影至图版上，基于投影点的探边距离约束，生成 4 个初值。若最大探边距离为D_{max}，4 个初值分别为 0.1D_{max}、0.4D_{max}、0.7D_{max}、D_{max}。所有参数随机组合后，生成 3×4×4 个初值的地层模型进行迭代。反演初值选取流程如图 6 所示。

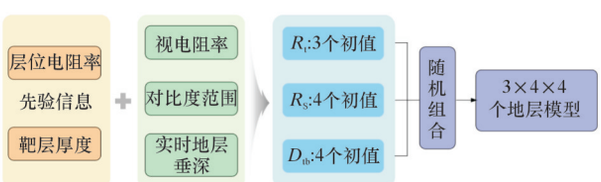


图 6　反演初值选取流程图

Fig. 6　Workflow of initial value selection for inversion

基于上述初值模型，采用 Levenberg-Marquardt（L-M）算法进行反演。反演输入曲线为 8 条幅度比、相位差视电阻率曲线。仪器水平放置于界面上方或下方固定距离处，将此时探测到的响应作为实测响应d_{obs}，仅改变仪器层电阻率大小R_t及界面距离D_{tb}计算模拟响应$d_{sim}(\boldsymbol{m})$，其中模型参数向量$\boldsymbol{m}=[R_t, R_s, D_{tb}]^T$。

目标函数定义为实测与模拟响应的加权最小二乘误差，并附加正则化项：

$$\phi(\boldsymbol{m})=\frac{1}{2}\left\|\boldsymbol{W}_d(d_{sim}(\boldsymbol{m})-d_{obs})\right\|^2+\lambda\cdot\phi_{reg}(\boldsymbol{m}) \quad (5)$$

式中：$\phi(\boldsymbol{m})$为目标函数；$\boldsymbol{m}$为模型参数向量；$\boldsymbol{W}_d$为加权矩阵；$\phi_{reg}(\boldsymbol{m})$为正则化项；$\lambda$为正则化参数（阻尼因子）。

正则化项在数据信息不足或模型参数敏感度差异较大时，约束参数变化幅度不偏离初值过远，从而抑制反演多解性。输入曲线取以 10 为底的对数处理，权重系数为：

$$\boldsymbol{W}_i=\frac{1}{\max(d_i)} \quad (6)$$

式中：$\boldsymbol{W}_i$为不同类型的加权矩阵；d_i为不同类型的响应。

为对比不同输入数据对目标函数收敛性的影响，基于模拟与实测响应的拟合误差绘制了如图 7 所示的误差分布图。由于式（6）已用各类响应的最大值对残差进行归一化，ε为相对于该类响应最大值的相对拟合误差；为便于显示其数量级差异，图 7 色带给出的是ε的常用对数 lgε。图 7a 和图 7b 分别以原始视电阻率和幅度比、相位差作为输入；图 7c 和 7d 则分别采用取对数后的对应信号作为输入。选取 2 个初始模型，利用 L-M 算法进行反演迭代。由图 7 可知：当输入为原始视电阻率或对数化后的幅度比与相位差时，反演均能收敛至全局最优解附近；而输入为对数视电阻率时，一个初值落入局部极小值；仅使用原始幅度比与相位差时，2 个初值均陷入局部极小值。

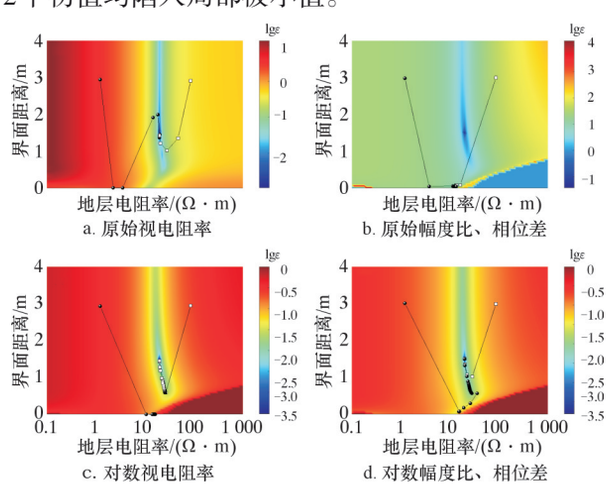


图 7　误差函数分布热力图

Fig. 7　Heatmap of error function distribution

结果验证了电阻率信号反演界面距离的可行性。目标函数对地层电阻率的敏感性强于界面距离，误差分布在等地层电阻率方向呈低谷，说明该区域梯度以水平为主，但对界面距离仍保持敏感。视电阻率原始信号作为输入时，界面距离敏感性最强，误差梯度更平滑，可快速收敛至全局最优解。

2.3　反演准确性验证

为系统验证电阻率信号反演界面的准确性与

可靠性，基于图 1 与图 5 开展反演，结果如图 8 所示。图 8a 中实线为仪器实测响应、虚线为反演重构响应。图 8b 和图 8c 中实线分别对应不同地层垂深位置的实际地层电阻率与界面距离，散点则为两参数反演结果。由图 8 可知，重构曲线与实测曲线符合度良好且误差控制精度较高，仪器层电阻率反演结果与实际电阻率接近重合。由于仪器探测范围有限，远离界面处的围岩电阻率及界面距离反演结果与实际值有一定偏差。总体而言，该电阻率反演方法可精准表征地层参数，局部偏差未影响方法整体的有效性与实用性。

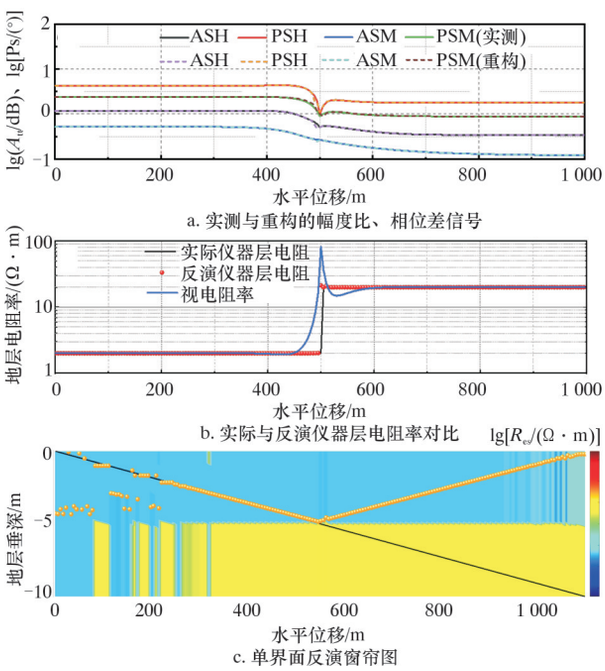


图 8　反演输入信号与结果

Fig. 8　Input signals and results of inversion

由图 4 可知，仪器最大探边距离约为 2.5 m。据此将探测范围划分为 3 个区域：近界面区（$|D_{tb}|\leqslant$ 1.5 m）、远界面区（1.5 m$<|D_{tb}|\leqslant$2.5 m）和探测盲区（$|D_{tb}|>$2.5 m）。分别统计各区域内 R_t、R_s 及 D_{tb} 反演结果的平均误差、均方根误差和最大绝对误差，结果如表 1~表 3 所示。由表 1~表 3 可知，D_{tb} 反演误差随界面距离增大而递增，这是因为仪器远离界面时探测曲线对界面位置的敏感度下降，定位能力减弱。R_t 反演误差在远界面区最小，探测盲区次之，近界面区最大。原因在于：近界面处围岩影响显著，电阻率响应呈现非线性畸变，增加了反演难度；而在探测盲区，由于仪器无法有效感知界面，围岩电阻率难以准确约束，间接干扰了仪器层电阻率的反演精度。R_s 反演误差以近界面区最小，远界面区次之，探测盲区最大。这是因为在探测盲区内曲线对围岩电阻率几乎无敏感信息，反演结果可靠性低；近界面区虽然存在非线性响应，但主要影响对象为仪器层电阻率，对围岩电阻率的干扰相对较弱。综上所述，在仪器有效探边距离（≤2.5 m）范围内，各参数反演精度良好，能够满足地质导向工程需求。

表 1　近界面区误差统计

Table 1　Statistics of errors in near-boundary zone

参数	平均误差	均方根误差	最大绝对误差
D_{tb}/m	−0.002 39	0.018 27	0.142 56
R_t/(Ω·m)	0.332 94	2.482 80	19.369 30
R_s/(Ω·m)	−0.307 64	2.313 53	19.066 19

表 2　远界面区误差统计

Table 2　Statistics of errors in far-boundary zone

参数	平均误差	均方根误差	最大绝对误差
D_{tb}/m	−0.103 87	0.646 42	4.088 25
R_t/(Ω·m)	−9.864 48e−05	1.842 44e−04	7.121 00e−04
R_s/(Ω·m)	−0.971 66	2.008 13	6.233 72

表 3　探测盲区误差统计

Table 3　Statistics of errors in blind zone

参数	平均误差	均方根误差	最大绝对误差
D_{tb}/m	−1.173 77	2.483 08	9.689 62
R_t/(Ω·m)	5.765 16e−04	1.941 94e−03	7.769 96e−03
R_s/(Ω·m)	−4.196 16	10.505 29	51.931 04

3　反演方法适用性及应用实例

3.1　反演适用性分析

为验证电阻率探边方法在不同地层模型中的适用性，该研究基于不同中间层厚（1、2、3 m）双界面模型开展模拟与反演试验（上、中、下电阻率固定为 2、20、4 Ω·m），界面距离的反演结果如图 9 所示。由图 9 可知，在层厚小于 1 m 的模型中，仪器响应受到两侧围岩干扰，等效后单界面反演的界面距离与实际界面位置有所偏差；在厚层中探边反演具有良好的适用性。

图 10 为 3 种层厚模型的电阻率反演结果。由图 10 可知，仪器层电阻率反演结果在层厚超过 1 m 时与实际电阻率符合良好，层厚小于 1 m 及界面附近受界面效应影响存在偏差，但不影响实际应用。

3.2　实际井应用

选取某水平井水平位移 700~900 m 井段资料开展探边反演验证。据邻井资料，该井靶层为低电阻率地层，电阻率 1~3 Ω·m；上、下围岩为高

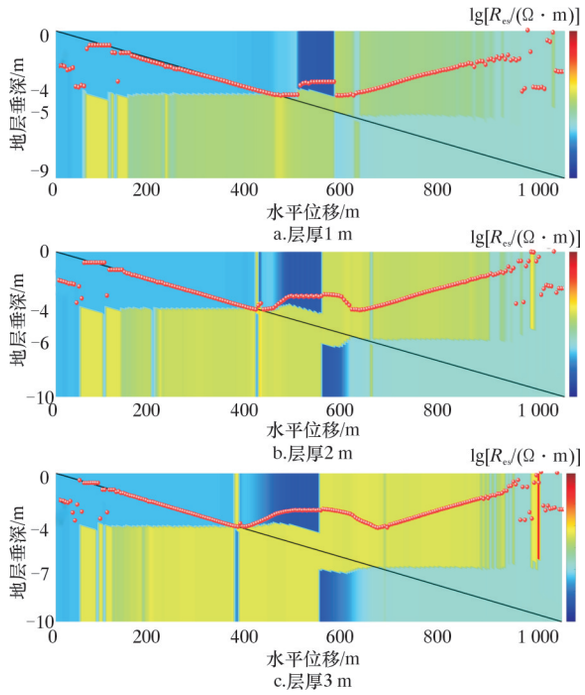


图 9　不同层厚地层模型界面距离反演结果

Fig. 9　Boundary distance inversion results of stratigraphic models of varying thicknesses

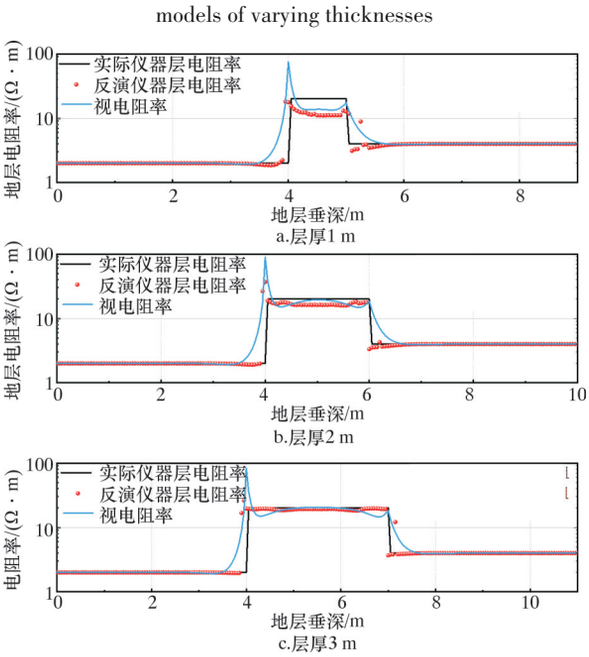


图 10　不同层厚地层模型电阻率反演结果

Fig. 10　Resistivity inversion results of stratigraphic models of varying thicknesses

电阻率地层，电阻率 10 ~ 100 Ω·m。将仪器所在地层电阻率映射至该地层模型的视电阻率探边版图中（见图 3），该对比度条件下最大探边距离约 2 m。

以 4 条相位差视电阻率曲线（RPSH、RPSM、RPLH、RPLM）作为输入进行反演，结果如图 11 所示。由图 11 可知，界面附近视电阻率急剧变化并出现“犄角”，重构与实测的拟合差相对较大，其余地层反演结果稳定性良好。

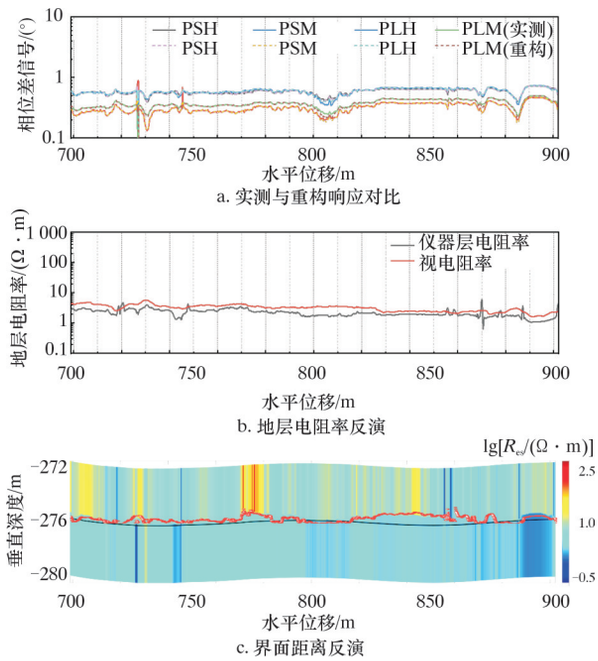


图 11　实际井资料反演结果

Fig. 11　Inversion results using actual well data

4　结　论

（1）基于随钻电磁波电阻率仪器幅度比、相位差信号的净值定义探边能力，构建单界面 Picasso 图版。理想条件下，高频长源距相位差信号的探边距离可达 3 m 以上；考虑噪声干扰后，短、长源距信号的有效探边距离分别不足 1.5 和 2.5 m。

（2）构建单界面反演模型，结合先验信息设置多组初值，采用 L-M 算法进行迭代寻优，验证显示重构与实测响应符合度高，仪器层电阻率反演值接近实际值。

（3）通过模拟模型与实际井验证了视电阻率探边反演方法的适用性，表明该方法可在厚层中准确提供地层电阻率与界面距离。

参　考　文　献

[1]　杨沁润，谭茂金，李桂山，等. 大斜度井和水平井井地三维电阻率数值模拟和联合反演［J］. 地球物理学报，2020，63（12）：4540-4552.
Yang Qinrun，Tan Maojin，Li Guishan，et al. Numerical simulation and joint inversion of three-dimensional borehole-to-surface resistivity of high deviated or horizontal wells［J］. Chinese Journal of Geophys-

ics，2020，63（12）：4540-4552.

[2] 王磊，范宜仁，操应长，等. 大斜度井/水平井随钻方位电磁波测井资料实时反演方法［J］. 地球物理学报，2020，63（4）：1715-1724.
Wang Lei，Fan Yiren，Cao Yingchang，et al. Real-time inversion of logging-while-drilling azimuthal electromagnetic measurements acquired in high-angle and horizontal wells ［J］. Chinese Journal of Geophysics，2020，63（4）：1715-1724.

[3] 岳喜洲，刘天淋，李国玉，等. 随钻方位电磁波测井响应快速正演方法与地质导向应用［J］. 地球物理学报，2022，65（5）：1909-1920.
Yue Xizhou，Liu Tianlin，Li Guoyu，et al. An analytically fast forward method of LWD azimuthal electromagnetic measurement and its geo-steering application ［J］. Chinese Journal of Geophysics，2022，65（5）：1909-1920.

[4] 张盼，邓少贵，胡旭飞，等. 超深随钻方位电磁波测井探测特性及参数敏感性分析［J］. 地球物理学报，2021，64（6）：2210-2219.
Zhang Pan，Deng Shaogui，Hu Xufei，et al. Detection performance and sensitivity of logging-while-drilling extra-deep azimuthal resistivity measurement ［J］. Chinese Journal of Geophysics，2021，64（6）：2210-2219.

[5] 李星翰，张文秀，陈鹏，等. 随钻方位电磁波电阻率测井数据精度分析及实时反演成像［J］. 地球物理学报，2023，66（9）：3990-3998.
Li Xinghan，Zhang Wenxiu，Chen Peng，et al. Accuracy analysis and real-time inversion and imaging logging while drilling azimuth electromagnetic wave resistivity measurements ［J］. Chinese Journal of Geophysics，2023，66（9）：3990-3998.

[6] 刘英明，王磊，王才志，等. 页岩油储层水平井随钻电磁波电阻率测井资料校正方法［J］. Applied Geophysics，2023，20（1）：9-19.
Liu Yingming，Wang Lei，Wang Caizhi，et al. Corrections of logging-while-drilling electromagnetic resistivity logging data acquired from the horizontal well for the shale oil reservoir ［J］. Applied Geophysics，2023，20（1）：9-19.

[7] 牒勇，朱军，杨善森，等. 随钻电磁波电阻率前探测特性分析［J］. 测井技术，2021，45（3）：273-279.
Die Yong，Zhu Jun，Yang Shansen，et al. Analysis of looking ahead characteristics of electromagnetic propagation resistivity while drilling ［J］. Well Logging Technology，2021，45（3）：273-279.

[8] Wang Lei，Wu Zhenguan，Fan Yiren，et al. Fast anisotropic resistivities inversion of logging-while-drilling resistivity measurements in high-angle and horizontal wells ［J］. Applied Geophysics，2020，17（3）：390-400.

[9] 唐海全，肖红兵，李翠，等. 基于随钻测井的地层界面识别方法［J］. 天然气勘探与开发，2016，39（4）：8-12.
Tang Haiquan，Xiao Hongbing，Li Cui，et al. Methods to identify formation boundary based on logging-while-drilling ［J］. Natural Gas Exploration and Development，2016，39（4）：8-12.

[10] 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.

[11] 刘阳，王健，徐德龙. 基于物理信息神经网络的随钻电磁波电阻率测井响应模拟［J］. 测井技术，2023，47（6）：653-661.
Liu Yang，Wang Jian，Xu Delong. Simulation of electromagnetic wave resistivity logging response while drilling based on physical information neural network ［J］. Well Logging Technology，2023，47（6）：653-661.

[12] Bell C，Hampson J，Eadsforth P，et al. Navigating and imaging in complex geology with azimuthal propagation resistivity while drilling ［C］//The SPE Annual Technical Conference and Exhibition，San Antonio，Texas，2006：SPE-102637-MS.

[13] Bittar M，Klein J，Beste R，et al. A new azimuthal deep-reading resistivity tool for geosteering and advanced formation evaluation ［C］//SPE Annual Technical Conference and Exhibition （ATCE），Anaheim，California，2007：1-9.

[14] Li Hu，Wang Hua. Investigation of eccentricity effects and depth of investigation of azimuthal resistivity LWD tools using 3D finite difference method ［J］. Journal of Petroleum Science and Engineering，2016，143：211-225.

[15] Liang Pengfei，Di Qingyun，Chen Wenxuan，et al. An EM LWD tool for deep reading looking-ahead ［J］. IEEE Access，2023，11：142601-142610.

[16] Li Qiming，Omeragic D，Chou L，et al. New directional electromagnetic tool for proactive geosteering and accurate formation evaluation while drilling ［C］//SPWLA 46th Annual Logging Symposium，New Orleans，Louisiana，USA：SPW LA，2005：SPWLA-2005-UU.

[17] Hu Song，Li Jun，Guo Hongbo，et al. Analysis and application of the response characteristics of DLL and LWD resistivity in horizontal well [J]. Applied Geophysics，2017，14（3）：351-362.

[18] Omeragic D，Habashy T，Esmersoy C，et al. Real-time interpretation of formation structure from directional EM measurements [C]//SPWLA 47th Annual Logging Symposium，Veracruz，Mexico：SPWLA，2006：SPWLA-2006-SSS.

[19] Pardo D，Torres-Verdín 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.

[20] Liu Ranming，Zhang Wenxiu，Chen Wenxuan，et al. Factors and detection capability of look-ahead logging while drilling （LWD） tools [J]. Petroleum Science，2025，22（2）：850-867.

[21] Wang Lei，Fan Yiren. Fast inversion of logging-while-drilling azimuthal resistivity measurements for geosteering and formation evaluation [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering，2019，176：342-351.

第一作者简介：艾维平，高级工程师，生于1977年，2007年毕业于兰州理工大学应用材料加工工程专业，获硕士学位，现从事随钻信息测量与导向控制方面的研发工作。地址：（102206）北京市昌平区。电话：（010）80162173。email：awpdri@cnpc.com.cn。

通信作者：谢　夏，工程师。email：xiexiadr@cnpc.com.cn。

修改回稿日期：2026-03-09

（本文编辑　刘海森）

下期部分文章预告（以实际刊出为准）

直旋混合射流喷嘴的射流特性及破岩效果研究…… 付悦，王明，盖志亮，等
万米钻机连续旋转智能铁钻工适应性技术研究…… 石宪峰，张增年，朱再思，等
长水平段连续管动态冲砂工具及试验研究…… 刘彦平，祝叶，廖丽，等
信息化连续管光电测井技术与应用…… 牛步能，费世祥，姜龙，等
基于着色法的PDC钻头切削面积计算方法研究…… 邓秀丽，周春晓，任海涛，等
深水水下井口动态稳定性分析…… 张恒，李彦伟，隋乐，等
多平台协同防喷器系统虚实融合平台开发…… 方立，程雨旺，王智徽，等
基于有限监测数据的深水钻井隔水管系统状态预测方法…… 盛磊祥，贾国乐，金学义，等
机理与数据驱动的深海钻井液举升泵布放位置评估…… 秦如雷，谢文卫，高洁云，等
油气井下泄漏定位方法研究现状及发展趋势…… 胡科铭，孙秉才，樊建春，等
利用低熔点合金层提高井筒密封完整性数值模拟研究…… 席岩，宁惠令，李军，等
基于FAHP和CRITIC法的老井转注井井筒完整性评价方法…… 吴庆瑶，连威，李军，等
气液混输液用液驱压缩机流动特性模拟研究…… 任永苍，李亚军，曾胜，等
连续管气液两相流动态演化特征分析及模型验证…… 郝智彤，刘凤霞，刘致良，等
基于姿态估计的作业机系统轨迹识别与工况分析…… 王利君，张德君，李赓，等
钢制B型套筒多层多道焊接路径自动规划技术及装备研究…… 占传熙，明廷宏，王继坤，等
连续管无限极关滑固井套底封压裂工具研制及应用…… 杨敏杰，徐传友，王浩，等
连续管作业随车起重机带载伸缩能力提升研究…… 颜家福，方怡红，张富强，等
考虑复杂流动机理的盖层CO_2泄露风险评价…… 张建宁，姚楠
含杂质CO_2管道裂纹扩展驱动力模型建立及验证…… 陈兵，张轩畅，齐文娇，等