

超高阻盐膏层随钻电磁中继传输特性研究

陈晓晖, 高炳堂, 宋朝晖

(中国石油化工工程技术研发院, 北京 100101)

摘要:为解决超高阻盐膏层随钻电磁信号由于急速衰减易导致传输中断的问题,建立了超高阻盐膏层电磁中继转发模型,运用空间和阶次分别细化的自适应HP有限元算法,获得了超高阻地层环境下不同频率载波电磁中继信号衰减速度和传输距离的关系,形成了电磁中继器安装位置的预测方法,与常规有限元算法相比,该方法具有收敛速度和计算精度方面的优势。伊朗 AGHA JARI 区块 AJ214 井现场试验证明,应用所建模型计算的盐膏层电磁信号衰减速度与实际应用效果相符,中继器安装位置的预测准确率超过 90%。研究表明,利用建立的传输模型可以准确预测中继器安装位置,充分发挥中继器转发能力,确保电磁信号可以在超高阻盐膏层连续传输,为电磁随钻测量技术的现场应用提供了理论参考。

关键词:随钻测井; 电磁中继传输; 超高阻; 盐膏层; 自适应; 有限元法

中图分类号: TE927 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2018)03-0114-06

Research on Downhole Electromagnetic Repeater Transmission Characteristics in Ultra High Resistivity Gypsum-Salt Layers

CHEN Xiaohui, GAO Bingtang, SONG Zhaohui

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China)

Abstract: In order to solve the problem that electromagnetic telemetry signal easily interrupts transmission in ultra high resistivity gypsum-salt layer due to fast attenuation, an adaptive HP finite element method (FEM), which could automatically select space or order thinning, was used to simulate the electromagnetic relay in ultra high resistivity gypsum-salt layers. The falling velocity and transmission distance of electromagnetic signals in ultra-high resistivity gypsum-salt layer under different carrier frequencies were obtained. A prediction method of relay installation position was formed, and compared with conventional finite element calculation. It had advantages in convergence rate and calculation accuracy. The algorithm was verified correct in Well AJ214 of AGHA JARI Block, Iran. The calculation result of signal attenuation rate tallied well with the practical application, and the prediction accuracy of repeaters' installation position was over 90%. The research showed that the transmission model could accurately predict the installation position of repeaters, and ensure the continuous transmission of electromagnetic signals across the ultra high resistivity gypsum-salt layer. The model can serve as a theoretical reference and foundation for EM-MWD applications.

Key words: logging while drilling; electromagnetic repeat transmission; ultra high resistivity; gypsum-salt layer; adaptive; finite element method

在含超高阻盐膏层钻井时,由于采用了随钻防漏堵漏技术,脉冲随钻测量仪(MWD)无法正常工作^[1-4],而地层电阻率过高会导致电磁信号急速衰减,常规电磁 MWD 发出的信号无法通过盐膏层^[5-8],定向作业面临缺乏随钻测量手段的难题^[9]。井下电磁中继器可以随钻实时对电磁 MWD 发出的信号进行无线转发,从而增强地面接收到的电磁

信号强度,使电磁 MWD 传输距离满足需求。因

收稿日期:2017-12-19; 改回日期:2018-04-28。

作者简介:陈晓晖(1983—),女,山东东营人,2005 年毕业于中国石油大学(北京)电子信息工程专业,2010 年获中国石油大学(北京)机械电子工程专业博士学位,高级工程师,主要从事井下随钻测控仪器方面的研究工作。E-mail: cxh.sripe@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“低渗透储层高精度随钻成像技术研究”(编号:2016ZX05021-002)资助。

此,准确分析超高阻盐膏层中电磁中继信号的衰减特性和预判电磁中继器的安装位置,能够确保电磁 MWD 信号在盐膏层中连续传输,为钻进盐膏层提供有效的随钻测量手段。电磁中继技术作为一项全新的技术,目前国内仅有中国石油化工工程技术研究院研制出了成熟产品^[10];而在超高阻盐膏层电磁中继传输特性分析和电磁中继器安装位置预测方面,目前尚无相关研究工作的报道。

笔者针对超高阻盐膏层随钻中继转发时井下地层环境复杂^[11]、存在多个电磁发射器等难点,采用同时细化空间和阶次的自适应 HP 有限元算法,对含有超高阻盐膏层施工井的电磁信号的传输和中继转发过程进行了模拟,迭代求解得到了信号传输时地层模型中的电场分布情况,最终获得了施工井中不同频率载波条件下电磁信号衰减速度和传输距离之间的关系,并以此为依据预测了电磁中继器的安装位置。现场试验证明,该算法具有较高的预测精度,能够提高电磁 MWD 的现场应用效果。

1 中继传输模型的建立及求解

1.1 有限元模型的建立

井下电磁中继传输特性求解的基础是准确建立有限元模型,首先按实际的地层情况构建不均匀地层条件下的有限元几何模型(见图 1)。模型应按照实际钻井环境建立,电磁 MWD 和电磁中继器的

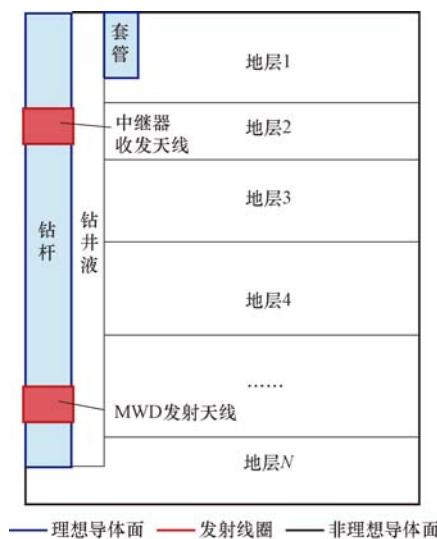


图 1 井下电磁中继转发初始几何模型

Fig. 1 Downhole initial mesh model of electromagnetic relay while drilling

天线结构与实际使用的钻杆耦合式天线一致,模型由水平地层构成,地层数量、各地层电阻率取值、钻杆和钻井液等介质各参数值均根据实钻井的工程、地质参数设置。

由于电磁 MWD 和电磁中继器使用的都是几十到几十赫兹的超低频信号,该信号是由施加在钻杆耦合天线绝缘段两极的交变电流激励感生的,其本质是对井下时谐电场强度分布情况的求解,因此对时谐麦克斯韦方程进行化简并积分,可以得到电磁传输波动方程:

$$\int_{\Omega} \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{E} \right) \cdot \mathbf{F} d\mathbf{x} = \int_{\Omega} \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{E}) (\nabla \times \mathbf{F}) d\mathbf{x} - \int_{\partial\Omega} \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times (n \times \mathbf{E}) \right) \cdot \mathbf{F} dS \quad (1)$$

式中: Ω 为模型求解域; μ 为传输信道(例如钻杆、地层等介质)的磁导率, H/m ; \mathbf{E} 为所求电场强度, V/m ; \mathbf{F} 为取梯度后的 Lobatto 试函数。

根据求解域中存在介质的种类,求解域中主要包含 3 种边界条件:理想导体面、地层各分层、钻井液等非理想导体面和发射天线。理想导体是指电磁传输过程中不会发生损耗的介质,例如钻杆等,其表面边界条件 Γ_p 为:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0 \quad (2)$$

式中: \mathbf{n} 为边界的外法向单位矢量。

地层各分层、钻井液等非理想导体,2 个介质的分界面处为阻抗边界条件 Γ_1 为:

$$\mathbf{n} \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{E}) = j \sqrt{-\mu(2\pi f\sigma + 4j\pi^2 f^2 \epsilon)} \lambda \mathbf{E} \quad (3)$$

式中: j 为虚数单位; f 为电磁信号载波频率, Hz ; σ 为传输介质的电导率, S/m ; ϵ 为传输介质的相对介电常数; λ 为非理想导体的阻抗, Ω 。

发射天线作为单独的激励介质其边界条件 Γ_A 为:

$$\mathbf{n} \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{E}) = -2\pi j f J^{\text{imp}} \quad (4)$$

式中: J^{imp} 是施加在发射天线两极的激励电流密度, A/m^2 。

$$J^{\text{imp}}(a) = I \delta(x - r) \delta(y) \quad (5)$$

式中: r 为天线半径, m ; I 为天线两极施加的激励电流强度, A ; δ 为狄拉克函数,其数学表达式为 $\int \delta(x - r_i) \delta(y) dx dy = 1$ 。

式(1)中加入上述边界条件进行约束后,可获得电场强度的有限元求解变分方程:

$$\begin{aligned}
 & \int_{\Omega} \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{E}) \cdot (\nabla \times \mathbf{F}) d\mathbf{x} - \\
 & \int_{\Omega} (4\pi^2 f^2 \epsilon - 2\pi j f \sigma) \mathbf{E} \cdot \mathbf{F} d\mathbf{x} - \\
 & \int_{\Gamma_1} j \sqrt{-\mu(2\pi f \sigma + 4\pi^2 j f^2 \epsilon)} \lambda \mathbf{E}_T \cdot \mathbf{F}_T dS = \\
 & - 2\pi j f \int_{\Omega} \mathbf{J}^{imp} \cdot \mathbf{F} d\mathbf{x} + \int_{\Gamma_A} \mathbf{J}^{imp} \cdot \mathbf{F}_T dS \quad (6)
 \end{aligned}$$

式中: \mathbf{E}_T 为电场强度 \mathbf{E} 边界方向上的切向分量, V/m; \mathbf{F}_T 为试函数 \mathbf{F} 边界方向上的切向分量。

根据求解出的电场强度, 即可计算出地面接收电极接收到的电压信号强度:

$$V = \oint \mathbf{E}(l) dl \quad (7)$$

式中: V 为地面接收电极上接收到的信号电压, V; l 为接收电极半径, m。

同理, 可获得电磁中继器的有限元数学模型。根据电磁 MWD 和电磁中继器的工作原理, 任意时刻内有且只有一种仪器的天线在发射电磁信号, 因此模型中电磁 MWD 和电磁中继器的感生电场求解实际是 2 个互不干涉的过程。

1.2 模型求解

对有限元模型进行求解时, 首先需要针对模型构建自适应 HP 有限元计算方法细化策略, 即根据地层有限元模型的实际情况和要求的求解精度自动选择下一步的细化和计算对象, 其他区域维持不变。通过对模型各网格的误差分析, 将常规的全局计算缩小为针对局部单元网格的计算, 电场变化比较平缓的区域, 选择使用 H 细化方式缩小网格尺寸; 电场变化剧烈的区域, 使用 P 细化增加网格形函数阶次, 从而降低计算复杂度和缩短计算时间。与传输线矩阵、常规有限元等全域计算的算法^[12-18]相比, 自适应 HP 有限元算法的收敛速度和求解精度更高, 具体细化策略如下:

1) 设求解的最大误差容许范围 $\Delta e_r > 0$, 将初始求解域 $\Omega_{H,P}$ 中所有网格进行 H 细化和多项式阶次 P 加 1, 此时求解域 Ω_{ref} 变为:

$$\Omega_{ref} = \Omega_{H/2, P+1} \quad (8)$$

求解可得电场强度的参考解 \mathbf{E}_{ref} 。

2) 初始网格中选择网格 K 细化成 4 个子单元 $K_i (1 \leq i \leq 4)$, 此时子单元计算误差 e_{ri} 为:

$$e_{ri} = |\mathbf{E}_{ref}| - |\mathbf{E}_i| \quad (9)$$

式中: \mathbf{E}_i 为每个子单元求解得到的电场强度 \mathbf{E} 的近似解, V/m。

则细化后网格的全局误差 e_r 为:

$$e_r = \sum_{i=1}^n e_{ri} \quad (10)$$

3) 如 $e_r \leq \Delta e_r$, 则计算完成; 否则, 将所有细化单元按误差递减顺序加入序列 L 中。

4) 在序列 L 中选择误差最大的单元作为下一次计算的初始网格, 继续从步骤 2) 开始计算, 直至 $e_r \leq \Delta e_r$, 此时各子单元求解得到的电场强度即为子单元所在地层位置处电场强度的最终解。

求解实钻井所建模型时, 首先根据实钻井的钻井工程设计方案和地质设计方案对所建模型中井深、井径、钻井液介质和地层电阻率等参数进行设置, 在已建几何模型中分别输入每个地层对应的电阻和深度; 然后, 电磁 MWD 发射天线从模型左上角开始下移来模拟实际钻进过程, 每下移一次使用自适应 HP 有限元细化策略求解当前地面接收电极所在子单元的电压强度, 并代入式(7)计算出电极接收到的地面信号强度。由于实际工作时电磁中继器和地面接收装置的接收灵敏度分别为 -100 dBV 和 -120 dBV, 考虑现场安全, 当地面信号强度低于 -90 dBV 时在模型左上角加入电磁中继器, 然后继续下移计算地面信号电压。若钻头还未到达完钻深度时, 电磁中继器发射信号的地面信号强度低于 -120 dBV, 表明电磁 MWD 系统的传输距离无法满足该井需要; 否则, 表明该井适合使用电磁 MWD, 地面信号强度为 -90 dBV 时的井深即为电磁中继器的安装位置。

2 超高阻盐膏层中继衰减特性分析

以伊朗阿瓦兹 AGHA JARI 区块 AJ214 井为例, 对所建模型进行仿真计算和结果分析。该井设计井深 2 855.00 m, 采用欠平衡钻井技术钻进, 钻井液中氮气含量达 20% ~ 25%, 普通脉冲 MWD 无法工作; 同时该井存在超高阻盐膏层, 电磁信号衰减严重, 需要安装电磁中继器确保信号传输连续。AJ214 井是 AGHA JARI 区块应用电磁随钻测量技术的第一口试验井, 无相关历史经验数据可借鉴。

根据地质设计方案, AJ214 井的地层电阻率及分层情况见图 2, 蓝线为 AJ214 井钻遇地层的实际电阻率, 通过拟合计算, 根据地层电阻率将地层划分为 16 层(图 2 中红线所示), 其中大部分地层电阻率为 100~1 000 $\Omega \cdot m$, 适宜电磁信号传输; 超高阻盐

膏层主要分布在 1 691.00~2 300.00 m 井段, 电阻率高达 $1.0 \times 10^4 \sim 5.0 \times 10^5 \Omega \cdot \text{m}$ 。

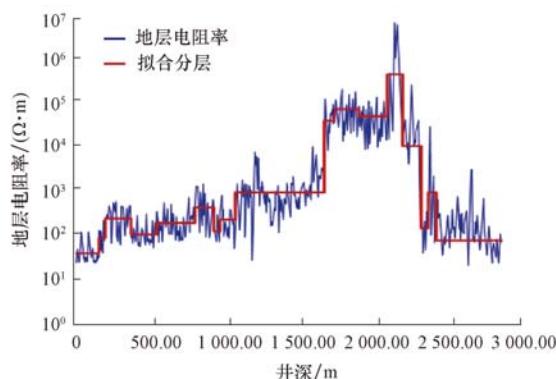


图 2 AJ214 井地层电阻率分层情况

Fig. 2 Formation resistivity of Well AJ214

使用 5 种较常用频率的载波, 对所建模型进行仿真计算, 得到了该井在地面接收到的电磁 MWD 和电磁中继器信号强度与井深之间的关系曲线, 见图 3 和图 4。

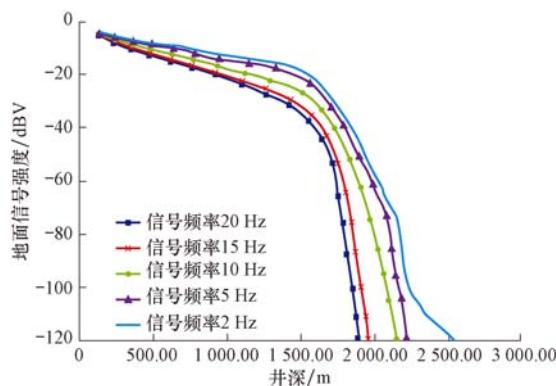


图 3 地面接收到的电磁 MWD 信号强度与井深的关系

Fig. 3 Relationship curves between surface EM-MWD signal intensity and well depth

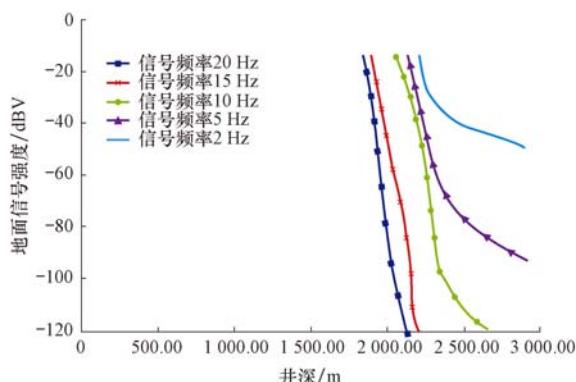


图 4 地面接收到的电磁中继器信号强度与井深的关系

Fig. 4 Relationship curves between surface Repeater signal intensity and well depth

从图 3 可以看出, AJ214 井中不加装电磁中继器时, 电磁 MWD 信号频率分别为 2, 5, 10, 15 和 20 Hz 的传输距离分别为 2 540.00, 2 227.00, 2 160.00, 1 980.00 和 1 900.00 m, 说明在地层电阻率和其他参数都相同的环境中, 信号载波频率越低, 衰减速度越慢, 地层穿透性也越强, 这与现场应用数据所显示的规律相一致。同时, 结合图 2 和图 3 可以看出, 电磁信号在地层电阻率适宜的 0~1 700.00 m 井段衰减比较缓慢, 进入井深 1 700.00 m 以深超高阻盐膏层后电磁信号迅速衰减。该井设计井深为 2 855.00 m, 因此只依靠电磁 MWD 传输频率为 2~20 Hz 的信号都无法成功传送至地面。

从图 4 可以看出, 加装电磁中继器进行信号转发后, 地面信号幅度会增强, 此时由于 2 120.00~2 220.00 m 井段盐膏层 $5.0 \times 10^5 \Omega \cdot \text{m}$ 超高电阻率的衰减影响, 10, 15 和 20 Hz 信号的传输距离分别为 2 700.00, 2 190.00 和 2 117.00 m, 无法成功传送至地面; 5 和 2 Hz 信号的有效传输距离均超过设计井深 2 855.00 m, 但 5 Hz 信号在井底时, 地面接收到的信号强度仅有 -91.2 dBV , 非常微弱, 为保证施工质量, 推荐使用 2 Hz 信号进行传输, 此时电磁中继器安装位置与电磁 MWD 的距离大约为 2 200.00 m。

仿真分析结果表明, 超高阻盐膏层会导致电磁 MWD 和电磁中继器发出的信号产生断崖式衰减, 加装电磁中继器是确保超高阻地区电磁随钻测量系统顺利应用的必要手段。为验证算法效率, 采用经典有限元算法重新计算图 1 中的模型, 并获得了自适应 HP 有限元算法和经典有限元算法求解效率的对比曲线(见图 5), 可以看出自适应 HP 有限元算法的计算误差收敛至 0.01% 时的收敛时间为 128 s, 而经典有限元算法耗时 387 s 才能收敛至计算误差

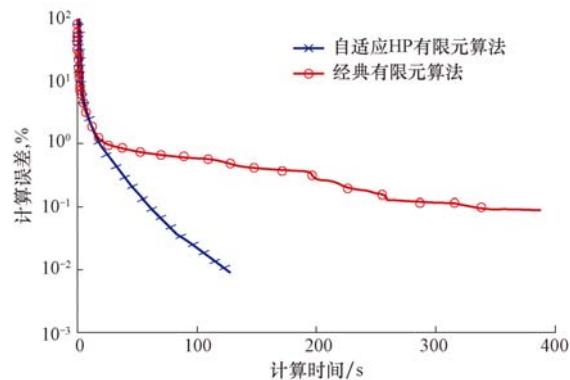


图 5 2 种有限元算法的计算效率对比

Fig. 5 Correlation curve for two finite element algorithms' computational efficiency

0.09%，且精度无法进一步提高。因此，计算精度要求较高时，自适应 HP 有限元算法具有明显优势。

3 现场试验

AJ214 井实际施工前期，地面接收到的电磁 MWD 信号一直处于一个正常衰减的过程，0~1 700.00 m 低电阻率井段的地面信号幅度从-2~0 dBV 缓慢衰减至约-10~-8 dBV；进入井深 1 700.00 m 以深盐膏层后，地面信号幅度锐减至约-70~-60 dBV，但地面接收机仍能正常接收信号；由于电磁信号衰减严重，钻至井深 2 123.00 m 时，在距离电磁 MWD 2 107.00 m 处加装电磁中继器，此时地面可同时接收到电磁中继器和电磁 MWD 信号；钻至井深 2 700.00 m 时，接收不到电磁 MWD 信号；钻至井深 2 856.00 m 完钻时，地面接收到的电磁中继器信号强度约为-53 dBV，整个施工过程中数据传输连续，仪器工作稳定，满足现场定向施工要求。仪器实际应用效果和仿真结果基本一致，电磁 MWD 传输距离预测准确率超过 90%。

4 结 论

1) 超高阻盐膏层会导致电磁 MWD 和电磁中继器的发射信号产生-50 dBV 以上的断崖式衰减。在合适位置加装电磁中继器是确保井下电磁信号连续传输、解决超高阻盐膏层地区电磁 MWD 传输问题的必要手段。

2) 利用基于局部求解域的有限元迭代网格模型和自适应 HP 有限元计算方法，分析随钻电磁中继衰减特性，从而预测井下电磁中继器的安装位置，预测结果与实际工况相符，能够满足现场施工前对电磁随钻测量可行性应用评价和电磁中继器安装位置预判的需求。

3) 与经典有限元算法相比，自适应 HP 有限元算法在收敛速度和求解精度两方面都具有较大的优势。

参 考 文 献

References

- [1] 闫宏亮,石文龙,李琳.随钻测量信息传输方式的发展现状综述研究[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2015,17(6):69-72,83.
YAN Hongliang, SHI Wenlong, LI Lin. Research on the status and future of the MWD data transmission [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2015, 17(6): 69-72, 83.
- [2] 袁鹏斌,余荣华,欧阳志英.无线随钻测量信息传输的现状与问题[J].焊管,2010,33(10):65-69.
YUAN Pengbin, YU Ronghua, OUYANG Zhiying, et al. The current status and problems of wireless signal transmission in measurement while drilling [J]. Welded Pipe and Tube, 2010, 33(10): 65-69.
- [3] 马哲,杨锦舟,赵金海.无线随钻测量技术的应用现状与发展趋势[J].石油钻探技术,2007,35(6):112-115.
MA Zhe, YANG Jinzhou, ZHAO Jinhai, et al. Status quo and development trend of MWD technique [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(6): 112-115.
- [4] 汤明,何世明,邢景宝,等.大牛地气田 DP14 水平井氮气泡沫钻井实践与认识[J].天然气工业,2010,30(3):74-76.
TANG Ming, HE Shiming, XING Jingbao, et al. Practices and knowledge from nitrogen foam drilling at the Well DP-14 in the Daniudi Gas Field [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(3): 74-76.
- [5] 呼石磊,鄂泰宁,李晓.地层对电磁随钻测量信号的影响研究[J].煤炭科学技术,2011,39(9):114-117.
HU Shilei, YAN Taining, LI Xiao. Study on strata affected to electromagnetic with drilling measuring signal [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(9): 114-117.
- [6] 刘修善,侯绪田,涂玉林,等.电磁随钻测量技术现状及发展趋势[J].石油钻探技术,2006,34(5):4-9.
LIU Xiushan, HOU Xutian, TU Yulin, et al. Developments of electromagnetic measurement while drilling [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(5): 4-9.
- [7] 李林,弓志谦,王磊,等.扩展 EM-MWD 传输深度及提高可靠性的方法与对策[J].钻采工艺,2010,33(4):25-27,38.
LI Lin, GONG Zhiquan, WANG Lei, et al. Methods of improving EM-MWD transmissive depth and reliability [J]. Drilling & Production Technology, 2010, 33(4): 25-27, 38.
- [8] 邵养涛,姚爱国,张明光.电磁波随钻遥测技术在钻井中的应用与发展[J].煤田地质与勘探,2007,35(3):77-80.
SHAO Yangtao, YAO Aiguo, ZHANG Mingguang. Application and development of electro-magnetic telemetry in drilling operation [J]. Coal Geology & Exploration, 2007, 35(3): 77-80.
- [9] 胡长翠,张明友,张琴,等.井下测试数据无线传输技术探讨[J].钻采工艺,2011,34(1):48-51.
HU Changcui, ZHANG Mingyou, ZHANG Qin, et al. Research on wireless telemetry technology of downhole test data [J]. Drilling & Production Technology, 2011, 34(1): 48-51.
- [10] 胡越发,杨春国,高炳堂.井下电磁中继传输技术研究及应用[J].科技导报,2015,33(15):66-71.
HU Yuefa, YANG Chunguo, GAO Bingtang. Research and application of downhole electromagnetic relay transmission technology [J]. Science & Technology Review, 2015, 33(15): 66-71.
- [11] 郑俊华,宗艳波,钱德儒,等.井下环境模拟试验装置研制[J].

- 科学技术与工程,2017,17(8):21-25.
- ZHENG Junhua, ZONG Yanbo, QIAN Deru, et al. Development of downhole environment simulation test equipment[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(8): 21-25.
- [12] 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.
- [13] 李翠,高德利,刘庆龙,等.邻井随钻电磁测距防碰计算方法研究[J].石油钻探技术,2016,44(5):52-59.
- LI Cui, GAO Deli, LIU Qinglong, et al. A method of calculating of avoiding collisions with adjacent wells using electromagnetic ranging surveying while drilling tools[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(5): 52-59.
- [14] 解茜草,赵志峰.随钻电磁波测井响应时域有限差分数值模拟[J].计量与测试技术,2014,41(8):1-3.
- XIE Xiciao, ZHAO Zhifeng. A study on modeling of electromagnetic wave propagation resistivity logging tool based on the FDTD method[J]. Metrology & Measurement Technique, 2014, 41(8): 1-3.
- [15] 陈晓晖,刘得军,刘得芳,等.随钻电阻率测量系统响应模拟算法探讨[J].电子测量技术,2009,32(6):21-26.
- CHEN Xiaohui, LIU Dejun, LIU Defang, et al. Discussion on methods of simulation for resistivity logging-while-drilling (LWD) measurements[J]. Electronic Measurement Technology, 2009, 32(6): 21-26.
- [16] 胡松,王晓畅,孔强夫.水平井随钻电磁波电阻率数值模拟[J].科学技术与工程,2017,17(14):59-66.
- HU Song, WANG Xiaochang, KONG Qiangfu. Numerical simulation of LWD resistivity in horizontal wells[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(14): 59-66.
- [17] 杨震,肖红兵,李翠.随钻方位电磁波仪器测量精度对电阻率及界面预测影响分析[J].石油钻探技术,2017,45(4):115-120.
- YANG Zhen, XIAO Hongbing, LI Cui. Impacts of accuracy of azimuthal electromagnetic logging-while-drilling on resistivity and interface prediction[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(4): 115-120.
- [18] 倪卫宁,张晓彬,万勇,等.随钻方位电磁波电阻率测井仪分段组合线圈系设计[J].石油钻探技术,2017,45(2):115-120.
- NI Weining, ZHANG Xiaobin, WAN Yong, et al. The design of the coil system in LWD tools based on azimuthal electromagnetic-wave resistivity combined with sections[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(2): 115-120.

[编辑 滕春鸣]

中国石化华东油气分公司在吉沟等区块取得勘探新突破

近日,中国石化华东油气分公司在苏北油田吉沟等区块取得勘探新突破,至此,在溱潼凹陷吉沟、陈8区块已发现并落实开发储量达 470.0×10^4 t,预计可建产能 7.0×10^4 t以上。

为了在溱潼凹陷西部斜坡带寻找更多类似成藏模式的构造-岩性油藏,从地质、地震等方面进行了综合分析,认为西斜坡阜三段具备形成构造-岩性复合型圈闭的有利条件。通过进一步分析沉积构造,优选岩性圈闭发育区10个。在此基础上利用储层正演、地质统计学反演等技术,预测了单砂层展布规律,优选出有利目标,部署探井4口,并成功发现陈8、吉2区块。

为更好地精细化描述地层构造和储层,进行了精细构造解释、沉积相、储层预测等研究。研究发现,吉沟区块储层为砂泥薄互层,砂体薄,平面展布不稳定,很难确定油藏边界。为了深入认识阜三段油气成藏规律,通过精细构造解释、储层砂体精细描述,“滚评建”一体化部署开发井,分批次实施,第一批次先实施滚动勘探井吉X井,钻遇油层近14.00 m,新发现含油层系2个,每层系试油均获产约10.0 t/d,地质储量从最初的 100.0×10^4 t增加到 350.0×10^4 t以上;第二批实施吉X井区,最终预计吉沟区块可建产 5.0×10^4 t以上。同时,评价井陈8-1井钻遇油层5层,预计可建产能 1.5×10^4 t。

另外,通过深入研究各油藏的特点,有针对性地设置个性化方案。在编制吉沟区块开发方案时按照不同井距,分别设置五点、七点、九点井网,进行对比,最后考虑经济效益选定最优开发方案。陈8区块则根据油藏构造特征,尽量利用天然能量,在保证地层能量的前提下减少注水井数量,以取得更好的经济效益。

[供稿 石钻]