

试油过程中地层流体性质识别的关键技术探讨

马超

青海油田井下作业公司试油大队

DOI:10.12238/etd.v6i6.16799

[摘要] 地层流体性质识别是油气勘探开发的核心环节,直接影响储量评估精度与开发方案制定。本文系统梳理试油过程中流体识别的技术体系,从传统测井解释、地层测试技术、核磁共振分析到智能算法应用,结合青海油田“人脸识别”测井技术、渤海钻探智能降维技术等创新案例,揭示多技术融合在复杂储层中的应用价值。研究表明,智能算法与动态测试技术的结合可显著提升低阻、致密等复杂储层的识别准确率,为非常规油气开发提供关键技术支撑。

[关键词] 试油过程; 地层流体识别; 测井技术; 地层测试; 智能算法

中图分类号: TE12 文献标识码: A

Discussion on Key Technologies for Identification of Formation Fluid Properties During Well Testing

Chao Ma

Well Testing Team, Downhole Operations Company, Qinghai Oilfield

[Abstract] The identification of formation fluid properties is a core process in oil and gas exploration and development, directly influencing the accuracy of reserve assessment and the formulation of development plans. This paper systematically reviews the technical system for fluid identification during drill stem testing, covering traditional log interpretation, formation testing techniques, nuclear magnetic resonance analysis, and the application of intelligent algorithms. Innovative cases, such as the "facial recognition" logging technology in the Qinghai Oilfield and the intelligent dimensionality reduction technology from Bohai Drilling, are integrated to demonstrate the application value of multi-technology integration in complex reservoirs. Research indicates that the combination of intelligent algorithms and dynamic testing techniques can significantly improve the identification accuracy of complex reservoirs, such as low-resistivity and tight formations, providing critical technical support for unconventional oil and gas development.

[Key words] well testing process; formation fluid identification; logging technology; formation testing; intelligent algorithms

引言

试油作为油气勘探开发的“临门一脚”,其核心目标在于通过射孔、诱喷、测试等工艺获取地层流体的真实物性参数。在油气开发实践中,试油环节的流体性质识别准确率直接关系到开发决策的科学性。据统计,全球约35%的试油失败案例源于流体性质误判,导致储量评估偏差超20%。以柴达木盆地英西区块为例,传统测井解释方法下,流体性质识别符合率仅64%,直接影响开发方案的经济性评估。而青海油田通过创新测井技术,将识别准确率提升至80%,年增储量超500万吨,这一实践充分印证了试油过程中流体识别技术的重要性。本文聚焦试油环节中流体识别的技术突破,从测井曲线响应机理、动态测试方法到智能算法应用,系统分析关键技术的创新路径与实践效果,为复杂储层开

发提供技术参考。

1 传统测井技术的局限性及突破方向

1.1 常规测井曲线的响应特征与误判风险

常规测井通过电阻率、声波时差、中子密度等曲线组合识别流体性质,其理论基础源于阿尔奇公式($R_t = a \cdot \Phi^{-m} \cdot S_w^{-n}$)。然而,在低阻油层、致密砂岩等复杂储层中,该公式面临三大挑战:

(1) 附加导电性干扰:伊利石、蒙脱石等黏土矿物通过表面导电降低地层电阻率,导致油层电阻率与水层交叉。例如,双河油田IX油组低阻油层电阻率仅 $32 \Omega \cdot m$,低于正常油层下限 $34 \Omega \cdot m$ 。

(2) 高束缚水饱和度:致密砂岩中微孔隙占比超60%,束缚水饱和度达45%以上,掩盖油气信号。小城子气田致密砂岩储层含气饱和度下限仅55%,远低于常规砂岩的70%^[1]。(3) 钻井液侵入

效应: 深井中钻井液滤液侵入深度可达3m, 改变近井地带电阻率分布。

1. 2测井曲线优化与组合解释技术

针对上述问题, 行业开发出系列优化技术: (1) 电阻率-孔隙度交会图版法: 通过建立 R_t 与 Φ 的二维关系, 区分油水层。在塔里木盆地砂砾岩储层中, 该方法使油层识别准确率提升至82%。(2) 全微分识别流体法: 对阿尔奇公式进行微分处理, 提取电阻率对孔隙度的敏感系数。渤海油田应用表明, 该方法对薄互层的分辨率达0.5m。(3) 动态径向电阻率比较: 通过浅侧向(0.3m探测深度)与深侧向(2m探测深度)电阻率差异, 识别泥浆侵入影响。柴达木盆地实践显示, 当 ΔR_t (深-浅) $>5 \Omega \cdot m$ 时, 流体识别准确率提高30%。

2 地层动态测试技术的创新应用

2.1 电缆地层测试器(MDT)的精准取样技术

斯伦贝谢MDT模块化动态测试器通过多级封隔器实现定点取样, 其技术优势体现在实时压力监测、光学流体分析与大体积取样三大方面。首先, MDT配备的高精度石英压力计(精度0.5psi)可连续记录地层压力恢复曲线, 为渗透率计算提供关键数据^[2]。在渤海湾稠油油藏的实践中, 通过压力瞬态分析成功确定了地层渗透率的空间分布, 指导了后续开发方案的优化。其次, 光学流体分析模块集成紫外荧光与近红外光谱技术, 实现了油、气、水三相的实时识别。塔里木深层凝析气藏的测试表明, 该方法对轻烃组分的识别误差小于5%, 显著提高了流体性质的判断精度。此外, MDT可选配6gal大体积取样筒, 满足非常规储层评价需求。四川页岩气井的应用显示, 大体积取样可准确获取游离气与吸附气的比例, 为页岩气经济性评估提供了可靠依据。MDT技术通过动态测试与实时分析的结合, 实现了地层流体性质的精准刻画。

2.2 套管井地层测试器(CWFT)的射孔-测试一体化

哈里伯顿CWFT通过射孔弹建立井筒-地层连通通道, 其技术突破集中在智能射孔控制、动态压力管理与多级预测试三大领域。智能射孔控制系统采用液压推靠与电子点火技术, 射孔深度可达15cm, 显著提高了射孔成功率^[3]。长庆油田致密气井的实践表明, CWFT的射孔成功率提升至98%, 为后续测试提供了可靠的通道。动态压力管理模块通过平衡阀自动调节井筒压力, 有效防止了地层污染。新疆玛湖油田的应用显示, 该方法使试油周期缩短40%, 大幅提高了开发效率。多级预测试功能支持1-22mL可变预测试体积, 适应不同渗透率地层的测试需求。鄂尔多斯盆地低渗储层的测试表明, 小体积预测试可提高薄层识别精度, 为致密气开发提供了技术保障。CWFT技术通过射孔与测试的一体化设计, 实现了地层流体性质的快速、准确评价。

3 核磁共振与成像测井的物理响应解析

3.1 核磁共振测井(NMR)的流体识别机理

核磁共振测井通过氢原子核的弛豫特性区分流体类型, 其核心参数包括T2谱分布、扩散系数(D)与束缚水体积(BVI)。T2谱分布通过横向弛豫时间区分油、气、水, 其截止值分别为

100ms(油)、10ms(气)、3ms(水)。松辽盆地致密油藏的实践显示, T2谱分析使含油饱和度计算误差从15%降至5%, 显著提高了储量评估的准确性。扩散系数(D)通过分子运动特性区分流体, 气体的D值是水的10倍, 油的D值是水的2倍。四川盆地页岩气井的测试表明, D值分析可准确识别游离气与吸附气, 为页岩气开发提供了关键参数。束缚水体积(BVI)通过T2截止值划分可动流体与束缚流体, 塔里木深层碳酸盐岩储层的应用显示, BVI与含油性呈负相关($R^2=0.85$), 为储层有效性评价提供了定量依据。NMR技术通过多参数综合分析, 实现了复杂储层流体性质的精准识别。

3.2 电成像测井的孔隙结构刻画

电成像测井通过360°井壁成像实现孔隙结构可视化, 其技术优势体现在孔隙类型识别、裂缝参数定量与沉积微相分析三大方面。孔隙类型识别功能可区分溶蚀孔、粒间孔、裂缝等类型, 柴达木盆地英西区块的实践发现, 晶间孔占比达65%, 这一发现指导了水平井轨迹的优化设计。裂缝参数定量模块通过图像处理技术计算裂缝宽度、走向与密度, 鄂尔多斯盆地致密砂岩的测试显示, 裂缝密度与试油产量呈正相关($R^2=0.78$), 为裂缝性储层开发提供了定量依据。沉积微相分析功能结合成像模式识别沉积构造, 渤海湾浅海相储层的实践表明, 该方法使砂体预测符合率提升至90%, 为沉积相研究提供了直观证据。电成像测井通过高分辨率成像技术, 实现了孔隙结构的精细刻画, 为储层评价提供了可视化手段。

4 智能算法在流体识别中的突破性应用

4.1 支持向量机(SVM)的分类模型构建

针对低阻油层识别难题, 行业通过支持向量机(SVM)构建了高精度分类模型。该模型的核心在于特征参数优选、训练样本库建设与动态优化机制。首先, 通过主成分分析从电阻率、声波时差、中子密度、自然伽马等8项参数中提取关键特征, 降低了数据维度。其次, 以试油证实层位为标签, 构建包含500个样本的训练集, 确保了模型的代表性。大庆油田的实践表明, 该方法对低阻油层的识别准确率达88%, 显著优于传统方法。此外, 通过粒子群算法动态调整SVM核函数参数, 适应不同地质条件。长庆油田致密气藏的应用显示, 优化后模型使误判率降低25%, 体现了智能算法的适应性优势。SVM模型通过机器学习与地质规律的结合, 实现了复杂储层流体性质的高效识别。

4.2 深度学习网络的图像识别技术

渤海钻探研发的宏程序解释平台集成卷积神经网络(CNN), 实现了测井图像的智能解析。该平台通过数据预处理、网络架构设计与实时解释能力三大技术突破, 提升了图像识别效率。首先, 采用小波变换去除噪声, 增强曲线特征, 海南福山油田的应用显示, 该方法使图像信噪比提升3倍, 为后续分析提供了高质量数据。其次, 设计ResNet-50网络架构, 包含50个卷积层与全连接层, 实现了薄互层的高分辨率识别。塔里木盆地超深井的测试表明, 该网络对0.3m厚度薄层的识别效果显著, 为精细开发提供了技术支持。此外, 通过GPU加速实现实时解释, 3分钟内完成8

小时传统分析工作量,效率提升16倍。深度学习技术通过模拟人类视觉机制,实现了测井图像的自动化、智能化解析,为大规模数据处理提供了高效解决方案。

5 多技术融合的实践案例分析

5.1 青海油田“人脸识别”测井技术体系

青海油田针对柴达木盆地高温、高压、高盐的复杂环境,开发了“人脸识别”测井技术体系,其核心在于电成像孔隙分析与氯盐检测含油指数两大创新。电成像孔隙分析通过连续“彩色拍照”识别0.1mm级微裂缝,结合图像分割算法计算孔隙度分布。英西区块的实践显示,该方法使储量评估误差从25%降至8%,显著提高了开发决策的科学性^[4]。氯盐检测含油指数则利用岩性扫描测井的氯元素含量构建数学模型,测试表明,该指数与试油产量呈线性相关($R^2=0.92$),为含油性评价提供了定量指标。这两项技术的融合应用,实现了储层微观结构与宏观性质的关联分析,为复杂储层开发提供了全面技术支撑。

5.2 渤海钻探智能降维技术体系

渤海钻探研发的“参数耦合-智能降维”技术体系通过数据清洗、特征提取与模型训练三大步骤,实现了高效解释。首先,采用孤立森林算法剔除异常值,数据利用率提升至95%,确保了分析数据的可靠性。其次,通过t-SNE降维将20维参数压缩至3维,保留90%信息量,降低了数据复杂度^[5]。最后,集成XGBoost与LightGBM算法构建ensemble模型,在38口井的验证中,解释符合率达92.3%,较传统方法提升15个百分点。该技术体系通过数据挖掘与机器学习的结合,实现了多参数的协同分析,为复杂储层评价提供了智能化解决方案。

6 技术发展趋势与挑战

6.1 技术融合方向

未来技术发展将呈现测井-地质-工程一体化、智能硬件升级与云平台计算三大趋势。测井-地质-工程一体化通过数字孪生技术实现实时数据融合,斯伦贝谢Delfi平台已在北海油田实现测井解释与钻井决策的联动,显著提高了开发效率。智能硬件升级方面,中石油正在攻关的“地眼”系统将集成激光诱导击穿

光谱(LIBS)技术,耐高温200℃、耐压200MPa的智能测井仪可满足超深井需求。云平台计算通过构建区域测井数据库,实现模型共享与协同分析,壳牌OpenTect平台已支持全球10万口井数据协同,为大规模开发提供了技术保障。这些趋势表明,技术融合将成为未来发展的核心方向。

6.2 关键挑战

当前技术仍面临超深井测井精度、非常规储层评价与数据安全三大挑战。超深井中,仪器耐压与信号传输的矛盾突出,塔里木油田超深井测试显示,深度每增加1km,信号衰减达30%,限制了深部资源开发。非常规储层中,页岩气纳米孔隙流体识别技术尚未突破,美国能源部资助的“纳米测井”项目正在研发飞秒激光探测技术,以期实现纳米级流体识别。数据安全方面,智能算法依赖大量敏感数据,需构建区块链加密体系,挪威国家石油公司已试点应用同态加密技术保护测井数据,为数据安全提供了解决方案。这些挑战的解决,将推动流体识别技术向更高精度、更高效率的方向发展。

7 结语

试油过程中的地层流体识别技术正经历从经验判断到智能解析的变革。青海油田的“人脸识别”测井、渤海钻探的智能降维技术等创新实践表明,多技术融合是突破复杂储层评价瓶颈的关键路径。未来,随着智能硬件升级与云平台计算的发展,流体识别技术将向更高精度、更高效率的方向演进,为全球油气开发提供核心支撑。通过持续技术创新与跨学科融合,流体识别技术将在保障能源安全、推动绿色发展中发挥更大作用。

[参考文献]

- [1]程东风,等.致密砂岩储层流体性质识别技术研究——以小城子气田为例[J].石油勘探与开发,2023.
- [2]斯伦贝谢.MDT模块化动态测试器技术手册[M].2024.
- [3]哈里伯顿.CWFT套管井地层测试器操作指南[M].2023.
- [4]青海油田.柴达木盆地英西区块试油技术突破[R].2020.
- [5]渤海钻探第一录井公司.储层流体性质快速识别技术成果报告[R].2025.