

地球物理测井技术在油气勘探中的应用现状与创新发展的

李鸿鹏

中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司 天津 300459

摘要：地球物理测井技术是油气勘探的重要手段，目前已形成包含电法、声波、放射性等分支的常规技术体系，通过多参数融合实现储层评价、岩性识别等功能，在常规油气藏勘探中发挥关键作用。随着勘探向深层、非常规领域推进，面对复杂地质条件，该技术正朝着智能化、多学科融合及绿色高效方向创新。本文阐述应用现状，分析技术瓶颈，并从多维度提出应对策略，为油气勘探的可持续发展提供参考。

关键词：地球物理测井技术；油气勘探；智能化创新；复杂地质挑战

引言：在全球油气勘探不断向深层、非常规领域拓展的趋势下，地球物理测井技术作为获取地层信息的关键手段，其地位愈发重要。深层储层的极端环境，以及非常规储层的复杂特性，对测井仪器性能和数据解释精度提出了更高要求。尽管常规技术体系在油气勘探中已有广泛应用，但在应对复杂地质条件时仍显不足^[1]。而新兴的智能化、多学科融合等创新方向虽前景广阔，却在实际应用中面临诸多挑战。因此，深入研究测井技术的应用与发展，对攻克勘探难题、提升油气工业效益意义重大。

1 地球物理测井技术应用现状

1.1 常规测井技术体系

经过长期实践积累，地球物理测井已构建起覆盖多维度地层信息采集的常规技术体系，核心包括电法、声波、放射性、核测井及地层测试技术等分支。电法测井通过施加人工电场或利用天然电场响应，获取地层电阻率、介电特性等参数，其中阵列感应测井能有效识别薄互层储层流体性质，侧向测井在高阻围岩环境中对原状地层电阻率的精准测量优势显著。声波测井借助不同频率声波在岩层中的传播时差与衰减特征，不仅可计算孔隙度、渗透率等储层物性参数，还能通过横纵波速度比分析地层岩石力学状态，为水力压裂方案设计提供关键力学参数^[2]。放射性测井则依托地层天然放射性元素衰变规律，结合中子-伽马测井组合，实现岩性识别、泥质含量定量计算及地层元素成分分析，成为复杂碎屑岩储层评价的重要依据。

1.2 关键技术应用场景

在油气勘探实践中，地球物理测井技术的应用场景随勘探目标和地质条件的差异呈现显著针对性。在常规砂岩油气藏勘探中，电法测井与声波测井构成核心技术组合：通过阵列感应测井识别薄互层储层的油水界面，

利用声波时差曲线精确计算孔隙度，结合自然伽马测井划分岩性，形成从储层识别到储量评估的完整评价链条。针对复杂碳酸盐岩油气藏，放射性测井与核测井技术发挥关键作用：中子-伽马测井组合有效区分致密灰岩与缝洞发育带，密度测井结合声波速度参数反演储层孔隙连通性，为缝洞型油藏的储量计算和开发井位部署提供依据^[3]。

在太古界潜山裂缝储层勘探领域，测井技术的应用场景向“超高清成像+多参数耦合反演”方向深度聚焦。太古界变质岩潜山储层以深变质片麻岩、混合岩、花岗岩为主，储集空间以构造裂缝、溶蚀孔洞及片理缝为主，具有岩性复杂、储层非均质性强、裂缝尺度跨微米-厘米级的显著特征。电成像测井（如微电阻率扫描成像FMI）与超声成像测井（如UBI）通过高分辨率，可清晰识别高角度裂缝、网状缝及充填物产状，结合阵列感应测井的电阻率各向异性参数，建立裂缝有效性定量评价模型；中子-密度-声波测井三联组合，通过孔隙度反演与矿物成分计算，有效划分致密基底与裂缝发育带，为潜山储层纵向分段提供测井分级标准。

2 地球物理测井技术创新发展

2.1 智能化与数字化转型

随着勘探对象复杂度提升与海量数据处理需求激增，地球物理测井正加速向智能化、数字化方向转型。在数据采集环节，基于物联网（IoT）的井下传感器阵列实现了测井数据的实时传输与云端存储，替代传统电缆传输模式，显著提升数据时效性；同时，自适应测井系统通过内置算法自动调整采集参数，可针对复杂地层动态优化测量精度。在数据处理与解释层面，人工智能（AI）技术深度介入：机器学习算法能够自动识别测井曲线异常特征，快速提取储层参数，其效率较传统人工解释提升数倍；深度学习模型通过构建地质知识库，可

实现测井相自动划分与沉积环境反演，为区域地质建模提供更精准的数据支撑^[4]。

2.2 多学科融合与技术突破

面对复杂地质条件下的油气勘探难题，地球物理测井技术正通过与地质学、岩石力学、计算机科学等多学科深度融合实现技术突破。在地质建模方面，将测井数据与地震资料、岩心分析成果相结合，利用地质统计学方法构建精细化三维地质模型，有效解决了单一测井数据在区域预测中的局限性。例如，通过融合测井地层对比与地震反演技术，可更准确识别隐蔽油气藏的空间展布。

在岩石物理研究领域，结合材料科学与实验岩石力学，建立测井响应与岩石微观结构的定量关系，显著提升了储层参数解释精度。同时，计算机科学的介入催生了测井数据可视化分析技术，通过虚拟现实（VR）与增强现实（AR）技术，地质人员能够直观分析复杂地层结构，辅助制定勘探方案。多学科的交叉融合打破了传统测井技术的应用边界，为攻克深层、非常规油气藏勘探难题提供了新的技术路径。

2.3 绿色与高效技术创新

在“双碳”目标与降本增效需求的双重驱动下，地球物理测井技术正朝着绿色化、高效化方向加速革新。一方面，通过研发低能耗、低污染的测井装备，降低勘探作业对环境的影响：新型电池驱动测井仪器取代传统柴油发电机，减少了野外作业的碳排放；无放射源核测井技术利用可控中子源替代放射性同位素，显著降低辐射风险与环保处理成本。另一方面，高效集成化技术成为主流发展方向，如多参数组合测井仪可一次下井完成多种物理参数测量，大幅缩短作业时间；基于大数据分析的快速解释系统，将储层评价周期从数天压缩至数小时，显著提升勘探效率。

3 地球物理测井技术发展面临的挑战与应对策略

3.1 复杂地质环境带来的技术挑战

随着全球油气勘探向深层、非常规领域持续推进，复杂地质环境对测井技术的适应性提出了严峻考验。深层油气藏普遍处于高温（ $> 150^{\circ}\text{C}$ ）、高压（ $> 100\text{MPa}$ ）环境，传统测井仪器的电子元件稳定性与数据传输可靠性面临挑战，例如高温下传感器精度漂移导致电阻率、声波时差等基础参数测量误差扩大，影响储层物性评价的准确性。非常规储层如页岩气、致密油藏具有强非均质性与各向异性特征，储层厚度薄（单砂体厚度 $< 5\text{m}$ ）、矿物组分复杂（黏土矿物含量 $> 30\%$ ），现有高分辨率测井技术在识别纳米级孔隙结构、定量评价有机质成熟度（TOC）与地应力分布时，仍存在多参数耦合

解释模型不完善、纵向分辨率不足（常规阵列感应测井分辨率约 0.6m ）等问题。此外，复杂碳酸盐岩储层的缝洞系统空间分布无规律，盐膏层、火成岩等特殊岩性地层的测井响应特征重叠度高，导致岩性识别准确率下降（常规放射性测井在复杂岩性区识别误差达15%以上），储层有效性评价依赖经验参数，难以建立普适性解释标准。这些地质复杂性使得测井数据的地层针对性减弱，多源数据（地震、岩心、测井）融合时存在尺度不匹配、参数敏感性差异等问题，制约了从单井评价到区域地质建模的精度提升。

3.2 数据处理与解释的难题

随着测井技术精细化发展，数据处理与解释环节在效率、精度与适用性方面的矛盾日益凸显。太古界潜山裂缝储层勘探中，单井数据规模较传统储层显著增大，元素俘获测井可提供多种造岩矿物浓度数据，成像测井单井图像数据量庞大，参数种类繁杂程度与数据体量对人工解释形成挑战——传统人工处理太古界变质岩储层矿物成分时，需融合多类测井数据及岩心分析资料，解释流程耗时较长且矿物含量反演误差较大。多源数据融合存在技术瓶颈，测井数据厘米级纵向分辨率与地震资料米级横向分辨率在太古界裂缝网络空间展布刻画上存在显著尺度差异，岩心分析数据与测井参数的量纲不统一导致多学科数据整合时出现矿物成分匹配偏差，制约区域裂缝发育模型精度。复杂地质条件下解释模型的普适性问题突出，太古界深变质岩储层因矿物组合差异，传统孔隙度-渗透率转换模型在裂缝型储层中适用性降低，各向异性显著的构造裂缝带使基于均质地层假设的电阻率解释模型难以准确识别流体性质。随钻测井对实时解释的高效性要求与太古界高温高压环境下井下高性能计算模块应用受限之间存在矛盾，复杂变质岩段裂缝有效性实时识别符合率难以满足勘探决策需求。这些问题本质上反映数据处理技术迭代滞后于勘探需求，需从算法优化、标准统一与硬件升级等方面寻求突破。另一方面，多源数据融合存在技术壁垒，测井数据的纵向分辨率达厘米级（如成像测井），而地震资料横向分辨率为米级，二者在储层空间展布刻画上存在“点-面”脱节，加之岩心分析、录井数据的格式不统一，导致多学科数据整合时出现参数逻辑冲突，区域地质建模精度下降。此外，复杂地质条件下的解释模型面临“普适性”困境：深层高温高压储层因矿物热导率变化，传统电阻率模型计算含油饱和度时误差超过15%；非常规储层的各向异性特征使基于均质性假设的渗透率公式失效，需针对性建模。

3.3 人才培养与技术普及的困境

在技术快速迭代的行业背景下,人才知识结构与技术应用需求的不匹配问题日益凸显。传统人才培养体系长期聚焦常规测井技术的原理阐释与经验分析,对智能化、多学科融合等前沿领域的教学内容覆盖不足,导致从业人员在面对新型测井装备与数字化解释工具时,普遍存在技术理解偏差与操作效能瓶颈。许多基层单位的培训体系未能及时跟进技术变革,专业技能更新滞后于现场实际需求,造成新技术落地时的执行断层。

技术普及层面同样面临现实挑战。受地域发展水平与企业规模差异影响,智能化测井系统、绿色环保装备等新技术在应用推广中呈现显著的不均衡性。大型油气企业凭借资源优势,已逐步试点智能测井平台,但中小型勘探单位受制于设备采购成本、维护难度及配套技术支持的匮乏,仍依赖传统测井手段,新技术渗透率较低。此外,行业内缺乏统一的技术标准化培训框架与经验共享机制,不同单位在同类地质条件下的技术应用标准与解释规范存在差异,制约了技术整体效能的发挥与行业协同进步。这些问题本质上反映了技术创新与人力资源储备、产业生态建设之间的协同缺口,需要系统性解决方案。

3.4 应对策略

针对当前技术发展面临的多重挑战,需从技术研发、数据治理、人才培养与产业协同四维度系统施策。在技术攻坚层面,加大耐高温高压传感器、纳米级分辨率测井仪器的研发投入,结合岩石物理实验构建深层及非常规储层专属解释模型,突破复杂地质环境的适应性瓶颈;数据处理领域,依托人工智能优化多参数耦合算法,建立跨学科数据标准化接口,推动测井、地震、

岩心数据的无缝融合,提升区域建模精度;人才培养方面,构建“高校基础教育+企业实操培训+行业认证”的立体化体系,重点强化智能化工具应用与多学科协同能力,同时通过技术帮扶、共享平台促进中小单位的技术普及;产业生态建设上,加快绿色装备标准化进程,推广低成本、易维护的集成化测井技术,形成“技术创新—应用反馈—迭代优化”的良性循环。通过多管齐下,推动测井技术在复杂勘探场景中的效能提升与可持续发展。

结论:地球物理测井技术经过长期发展,已建立起覆盖油气勘探开发全流程的技术体系,在常规油气藏评价中成果斐然。智能化、绿色化与多学科融合的创新探索,正推动其向综合性地质解决方案转变。尽管在应对复杂地质环境、优化数据处理及人才培养等方面仍存在问题,但通过加强技术研发、改进解释模型、完善人才培养体系等措施,有望提升复杂条件下的勘探精度与效率。未来,测井技术需进一步深化跨学科协同,加速绿色技术发展,持续为全球油气资源开发提供有力支持。

参考文献

- [1]桑向阳,王海军,吴敏杰,等.智能开采工作面煤岩层地球物理测井对比技术[J].煤炭技术,2023,42(8):108-112.
- [2]冯恒,安娅菲,张益胜,等.石窟岩体裂隙渗流网络地球物理地—井—崖差分高精度探测技术研究[J].石窟与土遗址保护研究,2023,2(4):4-15.
- [3]张斯琪,曾周末,李健,等.套管井固井质量声学检测技术现状与展望[J].仪器仪表学报,2024,45(6):2-28.
- [4]李毛飞,姜志海,刘树才,等.矿井瞬变电磁透视探测技术响应特征研究与应用[J].煤炭学报,2024,49(4):1976-1988.