◀专题论文▶

页岩气随钻导向钻井技术发展现状与趋势*

刘 伟[1,2] 唐晓明[3] 房 超[1,2] 刘永辉[1,2]
（1. 油气钻完井技术国家工程研究中心 2. 中国石油集团工程技术研究院有限公司
3. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司）

刘伟，唐晓明，房超，等. 页岩气随钻导向钻井技术发展现状与趋势［J］. 石油机械，2025，53（10）：8-16.

Liu Wei，Tang Xiaoming，Fang Chao，et al. Current status and trend of geo-steering drilling technology for shale gas reservoir［J］. China Petroleum Machinery，2025，53（10）：8-16.

摘要：页岩气资源对保障国家能源安全及实现“双碳”目标具有战略意义，而我国页岩气储层普遍具有低孔隙度、低渗透率、非均质性强等特点，钻井过程中面临井眼轨迹控制难、储层钻遇率低等挑战。通过攻关随钻导向钻井技术，实时获取伽马、电阻率等随钻参数，快速迭代更新地质模型，动态调整井眼轨迹，大幅提高了浅层页岩气优质储层钻遇率和单井产量，形成了页岩气高效开发的核心技术。对比分析了随钻测量/井、地质导向分析决策、定向轨迹高效控制三大导向钻井核心要素的国内外技术差距，针对深层页岩气给随钻导向钻井技术带来的新挑战，明确了要进一步攻关极限测传技术、开展多学科一体化协同作业、研发高效旋转导向工具和发挥智能化大数据优势四大方向。研究结果对推动随钻导向钻井技术发展具有重要借鉴意义。

关键词：页岩气；随钻导向钻井技术；随钻测量/井；高效传输；地质导向决策；多学科协同；智能分析

中图分类号：TB927 **文献标识码：**A DOI：10.12473/CPM.202503107

Current Status and Trend of Geo-Steering Drilling Technology for Shale Gas Reservoir

Liu Wei[1,2] Tang Xiaoming[3] Fang Chao[1,2] Liu Yonghui[1,2]
（1. *National Engineering Research Center of Oil & Gas Drilling and Completion Technology*；2. *CNPC Engineering Technology R & D Company Limited*；3. *CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited*）

Abstract: Shale gas resources are strategically vital for ensuring national energy security and achieving the “carbon peak and carbon neutrality” goals. However, shale gas reservoirs in China are generally characterized by low porosity, low permeability and strong heterogeneity, making drilling facing challenges such as difficult control of wellbore trajectory and low encountering rate of reservoirs. Through the research of geo-steering drilling technology, the drilling parameters such as gamma and resistivity are obtained in real time, the geological model is updated iteratively and quickly, and the wellbore trajectory is dynamically adjusted, which greatly improves the encountering rate and single well production of high-quality shallow shale gas reservoirs, and this technology has become the core technology for efficient development of shale gas reservoirs. The technical gaps between China and other countries in the three core elements of geo-steering drilling, namely MWD/LWD, geo-steering analysis and

* 基金项目：中国石油天然气集团有限公司前瞻性基础性技术攻关项目“复杂油气钻完井基础理论与新技术新方法研究”（2024DJ100）。

decision-making, and efficient control of directional trajectory, were compared and analyzed. To address the new challenges brought by deep shale gas to geo-steering drilling technology, the four directions were clarified: (1) further studying the extreme measurement and transmission technology; (2) carrying out multidisciplinary integrated collaborative operation; (3) developing efficient rotary steering tool; and (4) giving full play to the advantages of intelligent Big Data. The research results have important reference significance for promoting the development of geo-steering drilling technology.

Keywords: shale gas; guided drilling technology while drilling; MWD/LWD; efficient transmission; geo-steering decision-making; multidisciplinary collaboration; intelligent analysis

0　引　言

页岩气作为低碳化石能源，在全球能源转型中承担着重要角色。美国“页岩革命”重塑了全球能源格局，2022 年页岩气占美国天然气总产量的 75%，助力其实现能源独立。中国页岩气技术可采资源量达 21.8 万亿 m^3，居世界首位；主要赋存于四川盆地及其周缘；2024 年产量突破 250 亿 m^3，占国产天然气总量的 10.1%，开发潜力巨大。核心区块中，长宁–威远国家级示范区实现 3 500 m 以浅商业化开发，涪陵页岩气田累计产气超 600 亿 m^3；4 500 m 以深超深层开发技术正加速攻关，未来有望解锁万亿立方米级资源。

美国作为页岩气开发最早、最成功的国家，其页岩气资源具有埋深浅、横向连续性好等特点；2000 年以前采用直井组+压裂开采技术进行开发；2002 年后，随着水平井钻井技术的应用，旋转导向、地质导向等先进技术集成推广，大幅提高了产量和开发效益[1]。我国川渝地区页岩气储层经多期构造调整，地层岩石非均质性显著，有机质丰度、孔隙度（≤6%）及渗透率（≤0.001 mD）空间差异大，导致甜点区预测精度低，勘探开发靶区筛选困难[2]。通过技术攻关，形成了埋深 3 500 m 以深页岩气配套导向钻井技术[3]。但我国页岩气储层甜点分布的高度不确定性、3 500 m 以深页岩气地质工程条件复杂性，导致轨迹调整滞后、钻井效率有待提升[4]。

随钻地质导向钻井技术通过实时获取岩性、电阻率、伽马值等地层参数和井斜方位等工程参数，动态调整待钻地质模型，优化井眼轨迹与储层甜点钻遇关系，实现优质储层钻遇目标[5]。该技术的发展和应用，助力浅层页岩气水平井优质储层钻遇率从 70% 提升至 90% 以上，显著减少轨迹调整次数与无效钻进，整体效率提升 20% 以上；深层页岩气优质储层钻遇率普遍在 80% 以下，早期实施的多口水平井因储层厚度薄，受断层切割后断块发育，构造变化大，挠曲段数较浅层提高 46.67%，地层倾角变化最大达 20.5°，轨迹调整次数增加 41.58%，对随钻测量范围、数据质量和综合判断决策提出极高要求，平均钻遇率仅 58.8%；后期试用随钻成像等新技术，部分井达到 90% 以上，但距形成规模效益还存在较大差距[6-7]。提高储层钻遇率将节约无效进尺投入，提高单井产量，直接提升开发效益。

笔者以页岩气为切入点，梳理了随钻地质导向钻井技术最新进展；针对深层页岩气勘探开发目标，指出当前该技术存在的挑战，并分析了下步攻关方向和发展趋势。

1　随钻导向钻井技术关键装备发展现状

1.1　随钻测量/井

随钻测量/井技术为钻井提供实时、准确井下信息，随钻测量（MWD）获取工程参数，随钻测井（LWD）获取地质参数，对于确保钻井轨迹和地质导向至关重要。

1.1.1　随钻测量

随钻测量技术主要包含钻井液脉冲、电磁波和有缆钻杆等传输方式。

（1）钻井液脉冲传输。钻井液脉冲在钻井液中传输稳定性较好，作为井下测量数据的主要传输方式。

国外[8]代表性的钻井液脉冲传输产品有斯伦贝谢 Slimpulse 系列、哈里伯顿 Solar175 系列和贝克休斯 NaviTrak 系列，耐温 150 ℃、传输速率 10 bit/s，技术成熟，迭代升级了 200 ℃/207 MPa 高温高压脉冲随钻测量仪。同时，各家公司掌握着连续波脉波高速传输技术，斯伦贝谢 PowerPulse 传输速率最高 16 bit/s；贝克休斯 aXcelerate 系统传输速率为 20 bit/s，最高可达到 40 bit/s。

国内[9]中国石油集团工程技术研究院有限公司（简称中石油工程院）、中石化胜利定向井公司、中海油田服务有限公司（简称中海油服）等公司开发了不同系列产品，但传输速率在5 bit/s以下，普遍抗温能力为150 ℃，少量可达到175 ℃。

（2）电磁波传输。电磁波传输速率高且可连续获得数据，但信号传输易受不明噪声和强磁干扰，尤其是深度增大后造成电磁波过快衰减，限制了其的应用。

国外[10]电磁波传输产品中斯伦贝谢E-PulseXR系列耐温150 ℃，耐压137 MPa，最大传输速率12 bit/s；威德福TrendSET系列耐温150 ℃，耐压138 MPa，最大传输速率12 bit/s；国民油井华高BlackStar系列耐温150 ℃，耐压137 MPa，测量信号的最大传输速率6 bit/s。

国内电磁波传输产品中[11]中石油工程院DREMWD系统可实现耐压100 MPa；中国石油集团川庆钻探工程有限公司CQ-EMWD系列耐温150 ℃，耐压110 MPa，信号最大传输速率与国外相当（10~11 bit/s）。

（3）有缆钻杆传输。国内外多家公司探索通过有缆钻杆的方式提高数据传输效率[12]。目前，国外国民油井华高公司IntelliPipe产品理论传输速率1~2 Mibit/s，实际应用57 Kibit/s；国内中石油工程院InforPipe产品，现场试验最大传输速率100 Kibit/s。

由此可见，钻进液脉冲传输仍是主流方式，电磁波传输适用于中浅层低干扰场景，而有缆钻杆传输受限于技术成熟度暂未规模化应用（见表1）。

表1　随钻测量技术类型特点

Table 1　Types and characteristics of MWD technologies

技术类型	核心优势	主要短板	适用场景
钻进液脉冲传输	稳定、耐高温	速率低、依赖钻井液、需停泵	常规、深层页岩气井
电磁波传输	连续传输、速率较高	衰减快、抗干扰差	浅中层水平井、低干扰环境
有缆钻杆传输	超高速率、实时性强	可靠性低、成本高	大容量数据快速传输

1.1.2　随钻测井

随钻测井技术由常规电阻率、自然伽马等测井发展为随钻成像测井、随钻电磁波远探、前探测井等。页岩气当前以常规随钻测井为主，部分井应用随钻成像测井。

（1）常规随钻测井。20世纪90年代初期，斯伦贝谢、哈里伯顿、贝克休斯等公司相继研制出能够测量深（浅）电阻率、自然伽马的随钻测井工具及配套解释软件[13-14]。国内在自然伽马、电阻率等常规随钻测井技术方面，形成了自主知识产权产品，整体效果与国外接近[15]。

（2）随钻成像测井。成像测井根据测量方式的不同，主要有伽马成像、电阻率成像和声波成像等[16-18]。

伽马成像用于识别地层界面。国外斯伦贝谢IPZIG与哈里伯顿AGR近钻头伽马成像实现8扇区实时测量、16扇区数据存储，IPZIG、AGR距钻头分别0.42、0.45 m。国内中石油工程院升级CGDS近钻头地质导向，实现实时2扇区、存储16扇区成像，距钻头2.7 m。

电阻率成像能够评价地层构造、识别断层和裂缝。国外斯伦贝谢第三代MicroScope和MicroScopeHD成像电极测量范围0.1~1 000.0 Ω·m，128扇区成像，分辨率10.0 mm；贝克休斯StarTrak实现120扇区成像，分辨率12.7 mm。国内中油测井公司RIT具有近钻头测量功能，最小测量范围0.2 Ω·m，分辨率10.0 mm。

声波成像可以进行井壁裂缝识别、井眼几何形态评价和原始地应力分析[15]。国外斯伦贝谢TerraSphere集超声和电阻率测量于一体，可用于油基钻井液，实现耐温150 ℃、耐压140 MPa、256扇区成像，分辨率达5.0 mm；贝克休斯ImagerTrak和哈里伯顿PixStar与TerraSphere达到同等水平。国内中油测井、中国科学院和中石油工程院研发仪器实现了随钻方位井径测量，其中中石油工程院仪器可实现36扇区成像，井径识别精度达2.5 mm。

（3）随钻远探、前探测井。随着方位电磁波电阻率测井技术发展，催生了随钻远探、前探测井技术，有助于及时识别前方“甜点”及储层边界，更好地引导钻头钻达“甜点”，提高储层钻遇率[19]。

远探测方面，国外斯伦贝谢PeriScope随钻方位电磁波电阻率测井仪提供30条不同探测深度测井曲线，实现井周深探测。GeoSphere油藏随钻测绘技术能够揭示距离井眼45 m地层流体性质，耐温150 ℃、耐压172 MPa，井下工作时间360 h；哈里伯顿EarthStar超深油藏探测技术远探距离61 m，耐温150 ℃；贝克休斯VisiTrack油藏导向分析技术

远探距离 45.7 m，耐温 150 ℃、耐压 200 MPa。国内中海油服随钻方位电磁波电阻率仪器 DWPR 远探测距离达到 6.8 m，中石油长城钻探 GW-LWD（BWR）随钻测井系统远探距离 2.2 m，耐温 150 ℃、耐压 140 MPa，井下工作时间可达 300 h。

前探测方面，国外斯伦贝谢研发的 IriSphere 随钻前视技术将电磁技术用于监测钻头前方 30 m 地层电阻率。国内尚未见相关仪器报道。

由此可见，常规测井聚焦基础参数，成像测井提供“可视化”支撑，远探与前探测井助力提前调整轨迹，提升储层钻遇率。国外优势明显，国内正逐步缩小差距（见表 2）。

表 2　随钻测井技术国内外差距

Table 2　Gaps of LWD technologies

技术分类	测量参数	国内外主要差距
常规测井	深（浅）电阻率、自然伽马等	技术相对成熟，国内产品整体效果与国外接近
成像测井	井周自然伽马	国内工具在分扇区数、距钻头距离存在差距
	侧向电阻率	国外工具如 MicroScope、AFR 提供高分辨率电阻率成像；国内工具如 RIT 适用于中高阻储层，图像分辨率 10.0 mm，最大探测深度 50 cm
	超声波	国外工具如 TerraSphere 集超声和电阻率测量于一体；国内技术实现随钻方位井径测量功能，但无法实现高分辨率随钻井眼成像
远探测井	方位电磁波电阻率	国外工具如 PeriScope、GeoSphere 提供远探测能力，国内工具如 DWPR 远探测距离达到 6.8 m
前探测井	钻头前方电磁波电阻率	国外技术如 IriSphere 处于领先地位，国内尚无相关仪器报道

1.2　地质导向分析决策

针对页岩气，形成了以三维地质模型为基础，依托随钻多源数据判断储层展布，实时进行轨迹与储层评估，确保轨迹在优质储层内穿行的地质导向钻井方法[20]。

1.2.1　导向控制关键方法

构建精细三维地质模型，对比 TOC、孔隙度等静态参数确定宏观地质“甜点”，统计钻时差异确定工程施工“甜点”，结合脆性矿物含量、产气量确定工程改造“甜点”，综合确定三维地质模型下优质“甜点”层。在此基础上构建过实钻井和参考井二维地质模型，基于地层真厚度转换和参考井测井值，构建实钻井轨迹周缘地层属性模拟曲线，通过对比随钻曲线与模型沿轨迹反演曲线值及连续多点曲线形态变化，识别地层倾角，评估构建地质模型与实际地质模型符合度，做出地质模型更新或轨迹调整判断。

依托不同随钻数据，从不同角度做出判断。常规随钻测井重点关注：①标志层、轨迹临近着陆点井段及水平段 2 条对比曲线拟合情况。②当目的层倾角与水平段井斜一致时，随钻测井曲线和模拟曲线较为平缓；当两者存在角差时，2 条曲线波动明显，反映地层变化。③根据参考井钻遇目的层上下界面曲线特征，判定实钻井轨迹是否进入或钻出储层。随钻成像测井重点关注：①随钻伽马成像下穿地层界面呈现出“哭脸”特征，上穿地层界面呈现出“笑脸”特征；②随钻电阻率成像裂缝和溶孔等暗色区发育程度为优质“甜点”判断提供依据；③随钻声波成像判断薄层和储集空间分布，指导优质“甜点”决策。

1.2.2　导向软件

地质导向软件是构建地质模型、高效进行随钻数据分析的载体，随着测量数据类型不断丰富、测量范围不断扩大，软件分析功能显著提升[21]。

20 世纪 90 年代末期，国外在近钻头方位性测量伽马和电阻率等数据支持下，地质导向软件实现分辨钻遇地层、井周断裂功能。进入 21 世纪，地质导向软件分析随钻高分辨率伽马、电阻率成像、井径向探测等数据，构建更加准确的井周三维地层模型，帮助导向工程师实时定量判断与储层边界距离，大大提高轨迹控制水平和储层钻遇率。斯伦贝谢 Petrel 平台 Geosteering 模块[22]，以建模-实时数据与导向交互-模型更新的方法实现地质导向；哈里伯顿 RoxC 软件[23]，快速反演高分辨率的三维储层地质形态，可视化呈现井周的储层边界及油藏边界；贝克休斯 RNS 软件[24]兼顾设计轨迹与定向工具的匹配性，钻中实现距储层顶底边界距离和视倾角实时计算，帮助导向工程师提前进行钻进决策。

国内地质导向软件具备随钻伽马、电阻率、成像分析功能，获取远探前探测量数据较少，在随钻测量数据沿轨迹三维地质体建模分析方面与国外存在一定差距。如中石油工程院、中石化胜利油田等地质导向软件主要在二维地质模型下，对比沿井轨迹模拟测井数据和随钻实测数据拟合

率，进行地质导向。

1.2.3　智能导向辅助决策方法

随着对导向时效性、精准性要求不断提高，地层多参数智能分析方法快速发展。

国外[25]在建立智能地层岩性识别基础上，发展了智能导向决策方法。斯伦贝谢基于岩性分析与近钻头连续测量，开发了导向与井眼轨迹智能控制算法，分析导向目标后对钻井参数进行智能调控；哈里伯顿通过定向工具面的实时定位，做出轨迹智能调控参数建议。

国内通过机器学习算法进行地层岩性反演与识别，建立岩性自动描述方案[26]，对导向施工决策样本进行神经网络训练，构建智能决策判断方法[27]。在传统机械钻速方程和智能钻参优化方法的基础上，探索建立闭环控制的测量，分析导向钻井方法[28]。

由此可见，国内在三维模型动态更新、远探前探数据分析及自主决策算法成熟度等方面与国外还存在一定差距（见表3），制约国内地质导向分析向“智能化”跨越。

表3　国内外地质导向决策技术对比

Table 3　Comparison of geo-steering decision-making technologies

技术方向	国内现状	国际前沿技术	主要差距
三维地质建模	基于地震、测井数据构建三维框架模型，依赖二维模型拟合随钻数据	高分辨率三维建模（如井周69 m径向探测），支持实时反演与动态更新	国内控制仍以二维为主，三维地质模型解释精度低
导向软件功能	支持伽马、电阻率分析，模拟二维模型数据对比	集成成像、多井数据分析，实时构建三维储层模型，智能生成钻进指令	缺乏三维实时反演与多源数据融合能力
探测数据反演	远探/前探工具研发滞后，依赖近钻头测量	高精度随钻成像（如电阻率成像）、大范围径向探测（69 m）	国内受限于探测工具，缺少远探、前探数据，制约了井周立体模型反演
智能决策	初步实现岩性识别与参数优化，依赖人工干预	初步实现部分环节智能辅助决策，向全流程自动化闭环控制发展	未形成“测量-分析-控制”闭环，决策时效性不足

1.3　钻井轨迹控制

北美页岩气水平井以旋转导向钻井方式为主，推动单一井段“一趟钻”成为常态，高造斜率旋转导向（每30 m造斜率15°~18°）实现二开甚至三开“一趟钻”，同时探索大弯角螺杆、短弯螺杆、新型导向马达定向钻井方式。

国内页岩气水平井采用旋转导向/MWD+螺杆、旋转导向+LWD、旋转导向+MWD这3种轨迹控制方式。“旋转导向+螺杆”是深层页岩气常用钻具组合，部分井段仍采用“近钻头伽马+螺杆”的常规滑动钻进模式。如泸州区块造斜初期使用弯螺杆钻具造斜，随后改用旋转导向，后期因井底温度太高，使用弯螺杆（+MWD/GR）控制井眼轨迹。长宁深层和大足区块上部采用弯螺杆（+MWD/GR）定向增斜，水平段使用旋转导向钻进。

1.3.1　螺杆定向工具

弯螺杆在定向段钻进过程中逐渐表现出造斜率不足、定向托压轨迹延伸受限等问题。

国外斯伦贝谢DynaForce DTX系列对硬地层和多夹层地层具有较好定向能力，其创新设计高扭矩传输驱动轴，可大幅提升机械钻速；哈里伯顿的GeoForce Xl可增加65%扭矩，为进尺和机械钻速提供保障。

国内中石油北京石油机械有限公司等突破了等壁厚定子设计、耐高温橡胶配方、长寿命密封传动轴等关键技术，其研发的高性能长寿命螺杆钻具耐温175 ℃，输出扭矩较常规螺杆提升50%，在油基钻井液中工作时长达到500 h。

1.3.2　旋转导向工具

旋转导向具有较强的造斜能力和较高的导向精度，在复杂地层条件下保持轨迹稳定[29]。目前，川渝页岩气旋转导向年累计施工700余趟钻，平均单趟进尺658.35 m，平均机械钻速8.98 m/h。

按照工作原理旋转导向分为推靠式、指向式和混合式。国外以斯伦贝谢PowerDrive、贝克休斯AutoTrak和哈里伯顿Geo-Pilot系列旋转导向最具代表性。斯伦贝谢同时具备推靠式、指向式、混合式3种作业方式旋转导向工具，通过全旋转技术钻出更为光滑的轨迹，造斜率可达每30 m 18°，工作温度可达200 ℃，在川渝页岩气应用自身故障率最低；贝克休斯旋转导向主打推靠式，造斜率可达每30 m 15°，工作温度可达175 ℃，现场应用总故障率最低；哈里伯顿旋转导向工具主打指向式，与有相同保径钻头建立自对中，大大减轻钻头振动，延长钻头寿命，但在川渝页岩气整体应用数量远低于斯伦贝谢和贝克休斯产品。

国内旋转导向工具取得快速发展，成功研发推靠式作业工具，最大造斜率每30 m 15°，工作温度175 ℃。其中，中石油川庆钻探CGsteer在页岩气年施工40趟钻以上，平均单趟进尺369.59 m，平均机械钻速6.42 m/h；中国海油“璇玑”系统、中国科学院研发CAS-RSS系统在海上实现了储层

钻遇率100%的突破，但在陆地页岩气领域应用较少；采用“静态推靠”原理和高精度测控单元，支持在狭窄空间内灵活调整轨迹，在页岩气现场试验与应用井次较少。

1.4　智能导向钻井系统

智能导向钻井系统以精准测量、快速传输、高效定向工具为依托，以导向决策分析方法为核心，通过与钻机建立连接，实现对钻进方向的智能调控。目前国内外对该系统的研究均处于起步阶段，距离规模化应用还有一段距离。

国外斯伦贝谢自主定向钻井系统[30]，通过对地层、井下工具动态参数智能学习，构建适用于定向工具的数学导向模型，根据导向目标和工具实钻表现给出最佳导向指令。该指令可接入钻机控制系统，实现完全自主模式下运行。该系统在二叠纪盆地应用14口井，自主定向与人为控制相比，机械钻速提高8%~39%，其中10口井在高转速、强振动环境下保障了轨迹平滑。贝克休斯[31]以旋转导向工具为基础，将随钻测井系统、井下闭环控制系统、地面指令下传系统、钻机地面控制系统等硬件集成为一体，引入人工智能算法辅助地质导向模型重构，实现地质导向模型自动更新下的三维井眼轨迹闭环控制。

国内，中国科学院[32]围绕智能导向钻井技术体系构建旋转导向（钻）、地质导向（测）、高速传输（传）、地面控制（控）四大子系统，初步实现了“钻-测-传-控”一体化智能导钻系统的集成总装，已进入系统实钻联调测试阶段。中石油工程院与宝石机械共同开展智能钻井控制系统攻关，拟通过为自动化钻机植入智能分析大脑，实现不同钻井目标的参数智能调控。

2　随钻导向钻井技术存在的挑战

随着向川渝深层页岩迈进的脚步加快，钻井年占比数逐年提升，2024年深层页岩气井数64口，占总数的29.63%。极端温压条件（最高167 ℃、最大106 MPa）对随钻测量/井、定向工具的耐压性、耐温性提出更大挑战，微幅构造、断裂发育、优质储层薄（小于1.5 m）且强非均质性等复杂多变地质条件给导向分析带来极大难度[33]。

2.1　井深和垂深增加，随钻数据准确测量与高效传输难度大

井深增加导致测量设备耐受性、数据精度及传输质量面临严峻挑战。井下温度超150 ℃引发元件失效及传感器温漂，高压振动加剧设备损耗，川渝地区垂深逾4 000 m时故障率激增2~3倍；温压增大导致岩石物性复杂化，岩性差异导致信号反射/吸收特征多变，数据归位与解释困难，影响地层真实性判识；数据传输距离增加引发信号衰减，井下电磁干扰与振动进一步劣化传输质量，导致数据失真；传统钻井液脉冲传输难以满足海量数据实时上传需求，制约随钻导向决策精度与钻井效能。

2.2　优质储层厚度小、微幅构造发育，导向决策难度大

深层页岩气龙马溪组目标靶体薄（其中龙一$_1^1$小层1.5 m）、地层褶皱断裂发育显著影响导向精度。薄储层导致轨迹稳定性控制难度陡增，地层倾角高频变化使水平段初始模型误差达15%~30%，轨迹调整频次增加引发平滑度劣化；强非均质性储层脆性指数、含气量等参数横向梯度变化＞30%，需融合伽马、电阻率及井周成像等多源信息实时建模；微幅褶皱与小尺度断层引发近钻头地层突变，传统经验导向难以同步解析地质/工程参数耦合关系，决策滞后导致优质储层钻遇率下降12%~18%。

2.3　定向钻井工具可靠性、稳定性、经济性不足

高温工况下工具可靠性骤降，150 ℃井底循环温度引发电子元件故障率较浅层增加2~4倍，密封系统寿命缩短40%~60%，导致单井旋转导向失效起下钻达5趟以上，井下持续作业时间缩短65%以上；薄储层钻探需求与工具精度矛盾凸显，现有零长工具误差累计效应影响薄层穿行精度，需研发超短零长导向系统；多物理场耦合设计缺陷导致高温-振动-压力复合工况下工具失效率激增，典型表现为信号传输失真率超基准工况3~5倍；仍然面临着旋转导向工具费用高、经济性不足的问题。

2.4　工序协同配合和作业效率优化提升难题

地面人工决策链存在延时，导致轨迹调整滞后于地层突变速率。主要存在以下几方面原因：井下数据传输带宽不足，导致井下数据滞留，形成决策盲区；单学科专业人员决策存在局限性，与不同专业人员反复沟通确认延长了决策周期；缺少机理模型约束和人为监督判断，智能算法与模型适应性不足，模型可靠性有待提升；现场地质/工程数据通信协议、格式存在差异，各施工作业方数据、决策结果传导不够流畅，导致工序衔接耗时占比超高，工序切换依赖人工经验，割裂了“感知-决策-执行”系统闭环流转。

3　随钻导向钻井技术攻关方向与发展趋势

3.1　极限测传技术创新

极限测传技术创新是提升随钻导向钻井效能的关键突破点。需构建多模态传感阵列，集成声/电等传感技术，井周360°实现5 m内三维地质参数原位感知，重点突破175 ℃/170 MPa工况下传感器温漂补偿算法，不断提升地层压力/岩性识别精度；攻关多通道联合接力传输、随钻大容量数据微芯片携带传输、有缆高速通路传输等技术，使得高分辨率测量/井数据能够实时上传至地面系统，为随钻导向决策提供及时判断依据。

3.2　多学科一体化协同

地质–地球物理–工程–数据科学交叉融合是破解复杂储层导向难题的关键。需建立多源异构数据融合平台，集成地质构造预测、地球物理井震反演、工程参数优化及大数据分析四大模块，构建更好的构造地层、储层分布及流体特性精确三维地质模型，开发地质–工程双“甜点”耦合算法，为建立多学科协同决策机制、随钻导向决策提供科学依据。

3.3　高效旋转导向工具研发

研发高效旋转导向工具将进一步提升复杂地层井眼轨迹控制精度。通过优化结构，缩短推靠点与钻头的距离，集成高精度惯性测量单元，提升轨迹控制能力；开发多物理场耦合的紧凑型结构，嵌入自适应智能决策算法，为实现井下闭环控制与自调节创造条件；研制耐175 ℃/170 MPa的耐高温高压复合材料，确保极端工况下工具可靠性；简化旋转导向工具结构，促进研制成本和应用成本进一步降低。

3.4　智能化大数据深度赋能

智能方法与大数据技术深度融合驱动随钻地质导向钻井技术升级。基于“端边云”协同架构，底层通过传感器与边缘计算单元实时处理数据，云端集成地质与工程数据库的多模态融合平台；采用卷积神经网络、长短期记忆网络等方法快速解析地质参数（岩性/孔渗/含气量），进行构造地层超前预测，提高三维地质模型分辨率和储层边界识别精度；建立地面–井下数据高效流转、深度强化学习智能分析决策算法与轨迹自动调控闭环导向技术，实现轨迹的高效、精准、闭环控制。

4　结论与认识

（1）技术发展仍存在较大挑战。随钻导向钻井技术在随钻测量与传输、导向分析决策、定向工具等方面都取得了显著进展，在地质模型构建与迭代重构、导向决策与轨迹实时调控等方面已形成较为成熟的体系，与国外差距不断缩小。但在深层页岩气强非均质性地层、多变构造地应力条件等复杂地质条件下，随钻测量精确性、导向决策可靠性和轨迹控制有效性仍面临难题。

（2）多技术融合优势需进一步凸显。地震、测井、录井等多源资料与地质（力）学模型等融合应用，将极大地优化随钻地质导向钻井过程。但多源数据的标准化与技术高效融合还有待提升，积极加强多学科协同，将推动随钻导向钻井助力页岩气高效开发迈上新高度。

（3）智能化是随钻导向未来发展趋势。随着大数据分析和机器学习技术的应用，构建地质与工程参数智能分析模型，必将催生更精准导向判断、更智能决策支持和更高效轨迹控制，有助于进一步提升页岩气建产效率和开采成效。

参　考　文　献

[1] JAMES G S. 北美页岩气资源及开采［M］. 白振瑞，胡风涛，译. 北京：中国石化出版社，2015.
JAMES G S. Shale gas production processes［M］. BAI Z R, HU F T, Translated. Beijing: China Petrochemical Press, 2015.

[2] 汪海阁，乔磊，杨雄，等. 中石油页岩油气工程技术现状及发展建议［J］. 石油学报，2024，45（10）：1552–1564.
WANG H G, QIAO L, YANG X, et al. Current status and development recommendations for CNPC’s shale oil and gas engineering technology［J］. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45（10）: 1552–1564.

[3] 毕开原. 我国页岩气钻完井关键技术现状及发展趋势［J］. 石油机械，2024，52（11）：12–20，28.
BI K Y. Current status and trend of key technologies for shale gas well drilling and completion in China［J］. China Petroleum Machinery, 2024, 52（11）: 12–20, 28.

[4] 余朝毅. 四川盆地深层页岩气钻井关键技术新进展及发展展望［J］. 天然气工业，2024，44（3）：1–9.
SHE C Y. New progress and development prospect of key technologies for drilling of deep shale gas wells in the Sichuan basin［J］. Natural Gas Industry, 2024, 44

(3)：1-9.

[5] 石晶穗萃，何英，吴宗蔚，等. CQ-IGS水平井一体化地质导向技术：以在长宁—威远国家级页岩气示范区的应用为例［J］. 天然气工业，2020，40（5）：43-49.
SHI J S C，HE Y，WU Z W，et al. Integrated geosteering technology for CQ-IGS horizontal wells and its application in the Changning-Weiyuan national shale gas demonstration area［J］. Natural Gas Industry，2020，40（5）：43-49.

[6] 何骁，李武广，党录瑞，等. 深层页岩气开发关键技术难点与攻关方向［J］. 天然气工业，2021，41（1）：118-124.
HE X，LI W G，DANG L R，et al. Key technological challenges and research directions of deep shale gas development［J］. Natural Gas Industry，2021，41（1）：118-124.

[7] 郭彤楼. 深层页岩气勘探开发进展与攻关方向［J］. 油气藏评价与开发，2021，11（1）：1-6.
GUO T L. Progress and research direction of deep shale gas exploration and development［J］. Reservoir Evaluation and Development，2021，11（1）：1-6.

[8] 王延文，叶海超. 随钻测控技术现状及发展趋势［J］. 石油钻探技术，2024，52（1）：122-129.
WANG Y W，YE H C. Current status and development trend of measurement&control while drilling technology［J］. Petroleum Drilling Techniques，2024，52（1）：122-129.

[9] 吴东华. 随钻测量随钻测井技术现状及研究［J］. 化工管理，2023（4）：79-82，88.
WU D H. Present situation and research of MWD/LWD［J］. Chemical Enterprise Management，2023（4）：79-82，88.

[10] 李宸晓，庞东晓，周长虹，等. 浅述电磁波随钻测量系统现状［J］. 中国石油和化工标准与质量，2024，44（2）：146-149.
LI C X，PANG D X，ZHOU C H，et al. Brief introduction to the current situation of electromagnetic wave measurement while drilling system［J］. China Petroleum and Chemical Standard and Quality，2024，44（2）：146-149.

[11] 贾梦之，耿艳峰，闫宏亮，等. 高速泥浆脉冲数据传输技术综述［J］. 仪器仪表学报，2018，39（12）：160-170.
JIA M Z，GENG Y F，YAN H L，et al. Review of high-speed mud pulse telemetry technology［J］. Chinese Journal of Scientific Instrument，2018，39（12）：160-170.

[12] 苏义脑，窦修荣，高文凯，等. 油气井随钻测量技术发展思考与展望［J］. 石油科学通报，2023，8（5）：535-554.
SU Y N，DOU X R，GAO W K，et al. Discussion and prospects of the development on measurement while drilling technology in oil and gas wells［J］. Petroleum Science Bulletin，2023，8（5）：535-554.

[13] ANDREASSEN E，BLIKRA H，HJELLE A，et al. Rotary steerable system improves reservoir drilling efficiency and wellbore placement in the Statfjord Field：IADC/SPE drilling conference［C］//The IADC/SPE Drilling Conference. Dallas，Texas：SPE，1998：SPE 39329-MS.

[14] BONNER S，FREDETTE M，LOVELL J，et al. Resistivity while drilling-Images from the string［J］. Oilfield Review，1996，8（1）：4-19.

[15] 陈鸣，孙殿强，谢献辉，等. 随钻声波测井技术进展及展望［J］. 世界石油工业，2023，30（3）：32-41.
CHEN M，SUN D Q，XIE X H，et al. Progress and prospect of acoustic logging while drilling technologies［J］. World Petroleum Industry，2023，30（3）：32-41.

[16] ORTENZI L，DUBOURG I，VAN OS R，et al. New azimuthal resistivity and high-resolution imager facilitates formation evaluation and well placement of horizontal slim boreholes［J］. Petrophysics，2011，53（3）：197-207.

[17] PRAMMER M，MORYS M，KNIZHNIK S，et al. Field testing of an advanced LWD imaging resistivity tool［C］//The SPWLA 48th Annual Logging Symposium. Austin，Texas：SPWLA，2007：SPWLA 2007-AA.

[18] RITTER R N，GOREK M，FULDA C，et al. High resolution visualization of near wellbore geology using while-drilling electrical images［C］//SPWLA 45th Annual Logging Symposium. Noordwijk，Netherlands：SPWLA，2004：SPWLA-2004-PP.

[19] 刘乃震，王忠，刘策. 随钻电磁波传播方位电阻率仪地质导向关键技术［J］. 地球物理学报，2015，58（5）：1767-1775.
LIU N Z，WANG Z，LIU C. Theories and key techniques of directional electromagnetic propagation resistivity tool for geosteering applications while drilling［J］. Chinese Journal of Geophysics，2015，58（5）：1767-1775.

[20] 刘清友，朱海燕，陈鹏举. 地质工程一体化钻井技术研究进展及攻关方向：以四川盆地深层页岩气储层为例［J］. 天然气工业，2021，41（1）：178-188.
LIU Q Y，ZHU H Y，CHEN P J. Research progress and direction of geology-engineering integrated drilling

technology: a case study on the deep shale gas reservoirs in the Sichuan basin [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41 (1): 178-188.

[21] 房超，项德贵，赵庆，等. 地质导向软件发展现状、趋势及国产化建议 [J]. 石油钻采工艺，2020，42 (4)：385-392.
FANG C，XIANG D G，ZHAO Q，et al. Development status and trend of geosteering software and the suggestions for its localization [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42 (4): 385-392.

[22] ARATA F，GANGEMI G，MELE M，et al. High-resolution reservoir mapping: from ultradeep geosteering tools to real-time updating of reservoir models [C]// Abu Dhabi International Petroleum Exhibition&Conference. Abu Dhabi，UAE：SPE，2016：SPE 183133-MS.

[23] PARKER T. New ultra-deep resistivity service identifies bypassed oil in mature North sea field [J]. Offshore, 2019, 5: 1-2.

[24] NDOKWU C, OKOWI V, FOEKEMA N, et al. The use of reservoir navigation service RNS with VisiTrak geospatial navigation and MCWD inversion analysis service in Nigeria on a deepwater project: geosteering in thin, faulted, and heterogeneous reservoir [C]//The SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. Lagos, Nigeria: SPE, 2017: SPE 189101-MS.

[25] KULLAWAN K, BRATVOLD R B, BICKEL J E. Sequential geosteering decisions for optimization of real-time well placement [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 165: 90-104.

[26] 底青云，李守定，付长民，等. 基于云端大数据的智能导向钻井技术方法 [J]. 工程地质学报，2021，29 (1)：162-170.
DI Q Y, LI S D, FU C M, et al. Intelligent steering drilling technology method based on cloud big data [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29 (1): 162-170.

[27] 林昕，苑仁国，韩雪银，等. 随钻地质导向智能决策的实现与应用 [J]. 石油钻采工艺，2020，42 (1)：1-5.
LIN X, YUAN R G, HAN X Y, et al. Realization and application of the intelligent geosteering decision making while drilling [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42 (1): 1-5.

[28] 吴思源，李守定，陈冬，等. 大闭环伺服控制随钻智能导向钻井方法 [J]. 地球物理学报，2021，64 (11)：4215-4226.
WU S Y，LI S D，CHEN D，et al. An intelligent-while-drilling steering method of global closed-loop servo control [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64 (11): 4215-4226.

[29] 苏义脑，窦修荣，高文凯，等. 旋转导向系统研究现状与发展趋势 [J]. 钻采工艺，2024，47 (3)：1-8.
SU Y N，DOU X R，GAO W K，et al. Research status and development trends of rotary steerable system [J]. Drilling & Production Technology, 2024, 47 (3): 1-8.

[30] CARPENTER C. Autonomous directional drilling achieved with industry 4.0 platform [J]. Journal of Petroleum Technology Journal of Petroleum Technology, 2023, 75 (2): 62-64.

[31] MACPHERSON J, Knight S, HUGHES B, et al. Automation of di-rectional drilling system with remote supervisory control allowsmile-a-day wells to be achieved in Appalachian basin [J]. Drilling Contractor, 2018, 5 (74): 32-37.

[32] 李根生，宋先知，田守嶒. 智能钻井技术研究现状及发展趋势 [J]. 石油钻探技术，2020，48 (1)：1-8.
LI G S, SONG X Z, TIAN S C. Intelligent drilling technology research status and development trends [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48 (1): 1-8.

[33] 贾利春，李枝林，张继川，等. 川南海相深层页岩气水平井钻井关键技术与实践 [J]. 石油钻采工艺，2022，44 (2)：145-152.
JIA L C, LI Z L, ZHANG J C, et al. Key technology and practice of horizontal drilling for marine deep shale gas in southern Sichuan basin [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44 (2): 145-152.

第一作者简介：刘 伟，教授级高级工程师，生于1977年，2008年毕业于中国石油勘探开发研究院油气井工程专业，获博士学位，现从事控压钻井技术与装备研发、钻井轨迹控制与提速等方面研究工作。地址：(102206) 北京市昌平区。电话：(010) 80162211。email：liuweidri@cnpc.com.cn。

通信作者：房 超。email：fangchaodr@cnpc.com.cn。

收稿日期：2025-03-28　　**修改稿收到日期：**2025-06-25

（本文编辑　刘 锋）