

责任编辑:李佳欣
电话:59963261
邮箱:
jjx@sinopec.com
审校:张春燕
版式设计:王强

阅读提示

钻完井工程的智能化,不是某一环节的单独突破,而是全链条的系统进化。本版专题聚焦智能钻完井全链条技术突破:感知与传输环节,经纬公司打通信息孤岛,让信息快速流通,指令精准下达;决策环节,工程院用数智技术实现“谋定而后动”和自主决策;执行环节,石化机械用“一键钻机”解放人力,全景呈现智能化如何重塑每一米进尺。



周“油”列国
油事精彩

专家视点

感知、决策、控制三线并进 智能化重塑钻井协作逻辑

石油工程技术研究院数智技术专家 张洪宝

钻井工程的智能化转型已成为必然趋势,各企业争相布局相关技术研究。其本质是通过信息技术与钻井工程技术的深度融合,降低风险、提高效率。它既是生产力的进步,也是生产关系的变革——不仅改变着钻井方式,更重塑着人与设备、决策与执行之间的协作关系。

就现状而言,各企业的研发侧各有不同:有的主攻钻机自主控制,有的着力于决策软件,有的则聚焦统一数据平台下的协作流程。但整体路线基本上是沿着感知、决策、控制三条主线,把原本孤立的环节串联成一条不断自我优化的数据闭环。

信息感知与传输是智能化的基础。信息是智能的来源,信息感知是对井下与地面状态的精确掌握,相当于为智能钻井绘制一张高清图。技术发展聚焦三个方向:提高地面—井下信息传输带宽和速率,打通数据通道;扩展井下和地面信息测量维度,如研发带传感器的智能钻头、钻井液性能监测;推动地面与井下、地质与工程信息融合,构建一体化数字模型。

设计与决策是智能钻井的大脑。这一环节决定着钻井方案与钻井参数:超前聚焦工程设计,钻进中则围绕参数优化、井筒风险防控、井眼轨迹导向控制展开决策。其发展趋势可概括为三点:以大数据驱动钻井设计,实现设计快速生成以提升效率;通过钻井过程数字孪生,以超前模拟智能优化和风险规避;推动人工智能、工程理论与规则经验的深度融合,确保决策科学可靠。

自主控制是效率提升的关键。人工控制依赖经验,响应速度终归有限。技术演进有三个方向:提高钻机自动化程度,逐步走向少人、无人作业;推动决策软件与钻机设备深度融合,分场景逐步实现闭环,先攻克相对简单的钻进场景,再逐步扩展至定向、起下钻乃至复杂工况处置;借助闭环控制减轻工人的负担,增强系统对地层和施工变化的适应能力。这一转变带来的效率提升十分直观,依靠人工判断,系统响应往往需要数分钟,而闭环控制可将其压缩至秒级。

归根结底,地质工程一体化、设计施工一体化、信息装备一体化,是智能钻井发展的趋势。当感知、决策、控制相互衔接、循环反馈,信息得以快速流动,复杂系统的不确定性便被层层化解,学习曲线随之加速构建。

感知与传输

上传下达,超级“对讲机”打通信息孤岛

经纬公司三大核心技术赋能钻井“自动驾驶”

□赵春国 渠玉兵 邵云丽

近日,经纬公司应用 Idrilling 应龙科学钻井系统 1.0,成功助力西南工区超深水平井元坝 272-4 井提前 82.39 天完钻,不仅工期较设计缩短 34.47%,而且一举刷新工区钻井施工周期最短、平均机械转速最高等 11 项钻井纪录,为超深井安全高效钻进提供了保障。

这是经纬公司开展核心技术自主创新的生动缩影。该公司以地质测控技术研究院为主导,以智能化提升为重点,精心打造三大核心技术:“智能对讲机”——“经纬东方”全温域 MWD(随钻测量)探管研发应用;“自动驾驶仪”——“经纬视界”AMR(随钻方位电阻率)边界探测仪器;“自动驾驶系统”——Idrilling 应龙科学钻井系统 1.0,让科学钻井的梦想变成了现实。

成为不可替代的“超级对讲机”。

高温环境下,传感器精度漂移、电路稳定性不足,抗振性能不达标,处处都是拦路虎。王义峰和同事从零开始,从核心元器件选型到电路设计、从结构优化到高温老化试验,每一个环节都反复打磨。

井下情况复杂多变,信号传输一旦中断或者失真,智能钻井作业就会变成“瞎子聋子”。团队反复优化编码解码算法,让信号在不同泥浆脉冲环境中都能保持稳定,把误码率降到行业最低水平,真正实现了“上传清晰、下达准确”的超级对讲功能。

截至目前,从西北超深井到南海相的高温探井、从常规开发井到重点风险探井,“经纬东方”全温域 MWD 探管已在几百口井现场应用。

“自动驾驶”精准找到油气藏

今年 3 月,经纬公司在胜利工区草 20-11-侧平 111 井采用“随钻方位电阻率边界探测仪器+地质导向技术”联合作业模式钻进,最终储层段长 252 米;按岩屑录井及气测录井数据统计,砂岩储层钻遇率 91%,大幅超出预期。

“经纬视界”AMR 边界探测仪器主要用于水平井钻进过程中的地层边界识别和轨迹导向。该仪器可在钻进过程中获取方位电阻率、边界成像和探边响应等资料,“自动驾驶”帮助现场判断井眼与储层顶、底界面的相对

连通地上地下的“超级对讲机”

“高温探管长期依赖进口,随时面临‘卡脖子’风险。从 150 摄氏度、175 摄氏度再到 200 摄氏度,我们自主研发的全系列 MWD 探管,填补了国内空白,实现了 100% 国产化。”经纬公司专家王义峰说。

在经纬公司智能钻井作业的“武器库”里,有一款如同井下智能对讲机的核心装备——全温域系列随钻测量探管,它一头连着近万米的地下钻头,一头连着地面指挥,精准上传并下实时参数,准确下达作业调控指令,

智能决策

谋定而后动,数字模拟让钻井决策告别“拍脑袋”

工程院智能钻井技术支持全场景自主决策

□张洪宝 卞晓冰 袁多方 方春飞

在地下数千米的深处,地层像一座被层层封存的迷宫,构造、压力、岩性都隐藏在天然的不确定性中。而石油勘探开发的第一步,恰恰要在这座看不见的迷宫里精准凿出一条通道。

钻井工程正是这样一项在未知中前行的事业。它高投资、高风险,每一个决策的试错成本都极其高昂——方案一旦脱离实际,轻则成本飙升,重则引发井下事故。长期以来,钻完井优化遵循着一条艰难的路径:施工、获取信息、总结规律、调整方案、再施工,在一次迭代中逼近最优解。工程师始终怀有一个梦想:能否构建一个“模拟器”,在真正动工之前先把整个过程在计算机中预演一遍,把方案的合理性想清楚,把潜在的风险看明白,做到“谋定而后动”。

如今,随着人工智能、大数据等新一代信息技术快速发展,以及与钻完井工程理论深度融合,这一“超前模拟”的构想正逐步成为现实。工程院研发出石工卓灵系列智能技术,贯穿设计、钻井、固井、压裂全链条,为钻完井工程的持续优化按下加速键。

一键设计:让钻井方案高效生成

钻井设计的起点,是对地下地质的认识。地层有无断层、是否存在高压、岩石软硬如何,这些因素是钻井优化的理论基石——看得越准,设计才能越科学,钻井才能越安全高效。

工程院 GeoDril 系统通过钻井地质异常

体的定量物探表征、多源数据耦合的地质风险预测,以及待钻地层地震速度和成像模型的快速修正,让工程师可以更快、更准地解读前方地层。在此基础上形成的随钻超前预测技术,如同为钻头装上了一双“透视眼”——尚未钻达的地层提前便能预知。团队还构建了地层与井筒之间高达 10000:1 的网格构建机制,使数千米深井的井筒状态得以连续刻画和超前预测,为构建“数字井筒”奠定了理论根基。

最具突破意义的是“一键式”自动钻井设计的实现。系统突破了复杂井眼轨道计算、关键参数智能设计、最优邻井样本智能优选、多智能体协同智能生成方案等关键技术,构建了“一键式”自动设计工作模式,实现了开发井设计方案一键生成。如今,开发井的“一键式”设计初稿仅需 10 分钟即可生成,资深工程师数天的工作量被大幅缩减。

闭环钻进:从人工控制到智能自控

设计敲定后便是钻进。施工中能够实时掌控关键的钻井参数——钻压、转速、排量、定向工具面、钻井液性能等。钻井是一项复杂的系统工程,牵一发而动全身,某个参数的微调往往会对整个系统产生连锁反应。

工程院的答案是让 AI 与物理模型协同,通过 27 种技术指标构建钻井数字孪生,超前模拟钻井参数对系统的影响,反馈指导施工优化。DrilAgent 系统依托区域地质与工程大数据,深入挖掘可控变量与钻井表现之间的内在关联,从而超前预测不同参数组合对机械转速、钻具运动状态、井筒流动状态、井眼轨迹的



经纬公司西南测控公司员工正在使用 Idrilling 应龙科学钻井系统 1.0 优化工艺参数,提升钻井时效。
邵晓玲 摄

位置,施工效率明显提升。

“在薄油层、边底水油藏、断块油藏和非均质储层中,储层厚度变化快,地层边界起伏明显,水平井轨迹稍有偏差就可能钻出有利储层。应用该仪器后,现场可以结合方位伽马、地震剖面、录井显示和 AMR 边界探测仪器探边结果,综合判断并眼轨迹变化,及时提出导向建议,从而精准找到油气层。”地质测控技术研究院副院长杨震说。

去年至今,AMR 边界探测仪器在各工区累计施工 50 余口井,储层钻遇率等指标提升明显,获得甲方好评。

“自动驾驶”助力钻井“四提”

截至今年 5 月,江汉油田红星区块红页 3-5HF、3-6HF 等井日均产气量超过 6 万立方米。

值得一提的是,经纬公司利用 Idrilling 应龙科学钻井系统 1.0,针对红星区块目的层漏垮同层、安全密度窗口窄、页岩硅质及碳酸盐矿物含量高、岩性非均质性及研磨性强等难点,形成了“钻井优化+三压力解释+岩石组分分析”联合技术,在区块提速、故障复杂预控方面取得较好效果,助力钻井创红星区块日进尺最高、机械转速最快等纪录。

为解决传统钻井现场感知弱、优化效率低、控制协同不足等问题,在石油工程公司统一协调下,经纬公司、胜利石油工程等单位以工程问题为导向,以技术创新为引擎,以安全增效为标尺,历经数年集智聚力、实践论证,自主研发了 Idrilling 应龙科学钻井系统 1.0,并成功入选 2025 年全国油气勘探开发十大标志性成果。

“我们综合录井+井下随钻工具参数+云平台计算,提供钻作业现场和后方指挥精准的决策依据,从而推动从经验钻到科学钻井的进步。”经纬公司专家陈禹禹说。

截至目前,该系统在各工区累计推广应用到 614 口井,累计打破指标纪录 30 余项。其中,今年以来施工 178 口井,应用井段平均机械转速提升 19.75%、平均钻井周期缩短 12.1%。

智能固井

让每道封堵恰到好处

钻井之后,固井是保障井筒长期安全的关键工序,要求水泥浆精准填充于套管与地层之间,稍有差池便可埋下隐患。为确保万无一失,基于 CemAgent 系统在施工前先行模拟:借助井筒水力学模型,推演注替过程中压力变化,评估各种井下工况对套管强度的考验,所有模拟结果都将用来指导固井施工设计。当方案在智能固井设计与中控系统完成优化后,可自动生成并下施工指令,实现现场全设备统一协同调度;包括具备远程操控与自动混浆的 2500 吨固井车、自动供灰、自动供水及自动高压管汇闸阀等配套系统,保障供灰、供水与注浆作业精准流畅运行,将作业人员从高风险工况中彻底解放,真正实现本质安全。

智能压裂

从设计到调控的全程优化

压裂是让油气流出来的关键一环。它通过高压流体将致密岩层压开,形成纵横交错的裂缝网络,建立起油气在地下流动通道,其效果直接关系一口井的最终产量。

工程院打造的 FracAgent 智能压裂决策系统,涵盖数据治理、缝网优化、段簇优化、泵序优化等工作场景,融合大数据与数字孪生技术,通过超前模拟的代理模型替代传统针对单井的复杂模拟计算,借助 AI 算法开展多目标寻优。将数据驱动与规则约束相融合,实现压裂方案一键式生成,人工时效提升 80% 以上。

在施工现场,系统对施工净压力和多簇裂缝的实时扩展状态同步计算,开展多簇均衡性评价,实现对施工压力的超前预测和异常诊断,并将决策参数量化后与压裂机组实时联动调控。这份预见能力背后是扎实的科学研究:基于现场压后取芯的认识,团队构建了基于边界元法的多簇裂缝扩展模型,充分考虑天然裂缝、非均匀应力场、摩擦等因素影响,实现裂缝扩展的实时模拟。在施工压力预测上,系统采用神经网络、高斯过程回归等算法,超前 5 分钟预测精度超过 90%;对最棘手的水泥浆流变,依托 GRU(门控循环单元)深度学习算法与滑动窗口等技术,实现预测精度超 90%,使可能造成重大损失的井下事故提前化解。

从“一键式”钻井设计的运筹帷幄到智能钻井优化的随机应变、从固井决策的精打细算到压裂调控的料敌于先,这一系列智能技术共同勾勒出钻完井工程的崭新图景。其核心是用数字模拟与智能优化,把曾经只能“边干边看”的过程转变为“先看后干”的从容:在施工真正开始之前,整个钻完井过程已在计算机中预演完毕,风险被提前规避,储层钻遇率得以提升,压裂效果更有保障。

自动执行

解放双手,司钻从“扛钻杆”到“按按钮”

石化机械 5G 智能操控实现钻台无人化

□卢鹏

石化机械研制的新一代 7000 米自动化钻机,通过 5G 网络,司钻不需要再登上几米高的钻井平台,坐在距离钻机 500 米外的一体化控制室里,用操作摇杆和按钮就能完成整套钻井作业。

这套自动化钻机,采用信息化、人工智能等先进技术,是以机器人为核心的管柱自动化处理设备,配套集封闭循环、二级固控、在线监测、自动配箱、快速清罐等功能于一体的钻井液自动循环系统和全自动井控系统。具备离线建立柱、自动起下钻、自动下套管和自动配浆等功能,可以完成钻井全工况,全流程自动化作业,程序化施工、钻井液自动混配、性能参数自动调控、一键自动关井,实现了钻井远程控制。

从地面到钻台再到数十米高的二层台,全流程由机器接管,在所有的关键环节都会布置传感器和摄像头,把工程、装备、视频数据全部汇集起来,传输到一体化控制室的远程决策中心。如果说摄像头是眼睛,传感器就是神经,智能决策平台就是大脑,眼睛采集实况,神经实时采集钻压、扭矩、转速等海量数据,大脑则用 AI 算法在几秒内生成液压和电机的精确动作——该转几圈、该用多大力、该停在哪里。司钻操控摇杆和按钮,将精确指令从控制室发出,指挥动力猫道、铁钻工、排管机械手这些自动化设备。地面上的动力猫道把钻杆稳稳抓起、精准举升到钻台;机器视觉技术精准识别钻杆接箍高度并自动调节,自动完成钻杆的上扣与卸扣,钻杆对扣精准率达到 99.5% 以上。按下送钻键,钻头破土

而入;下达起钻指令,钻具自动起出井口,二层的自动排管装置把起出的钻杆一根根抓取、排放整齐。整个系统整合了 11 种设备的超 360 个动作,从建立根到起下钻再到甩钻全面自动化,实现了“一键多能、多键协作”,司钻从过去的“凭经验、凭感觉”变成了“看数据、看流程”。

夜深了,钻机还在作业,面对着数据屏幕,司钻渐渐乏了,上眼皮和下眼皮开始打架,一个提示声音在司钻耳边响起:“您现在正处于疲劳工作状态,请换班休息”。

新型自动钻机不仅实现了地面管区钻台、二层台等危险区域无人化,集成控制系统还采集各类数据 1300 多项,可实现智能感知、多参数智能送钻和语音识别播报。

采用 AI 机器视觉技术和空间矢量技术,将人员纳入空间安全管理系统,实现工作流程设计提醒、电子围栏、主动防护,一旦发现设备碰撞、人员安全劳保穿戴不规范、人员误入危险区域,马上语音播报提醒,最大限度保障人员和设备安全。

设备坏了怎么办?现在不需要维修人员从百里甚至千里之外赶过来。接入了物联网技术的自动化钻机,把电控系统的运行数据实时传到云端,大数据分析可以线上判断设备异常,实现状态实时监控、故障主动发现,能在 10 秒内识别轴承磨损、密封失效等 30 多种异常,就像给钻机配了一个 24 小时在线的“全科医生”。

从“工人扛钻杆、司钻凭手感”到“按键操作、机器自动执行”,自动化钻机改变的不仅是工作方式,还提升了石油钻采效率,保障了员工生命安全。



石化机械研制的 7000 米自动化钻机服务胜利油田页岩油开发。沈玉梅 摄