

自动化钻井设备在石油钻井工程中的应用

甘永正

中石化海洋石油工程有限公司 上海 200120

摘要: 本文围绕自动化钻井设备架构、设备类型与运行原理展开研究,剖析其在陆地常规井、深井、页岩油地层及海上钻井工程、配套施工环节的落地应用,结合油田实际案例验证设备可提升钻井效率、压缩施工工期、降低人工与施工成本、筑牢钻井安全防线。同时指出极端工况适配差、运维成本高、国产化短板、故障自主处置弱等现存问题,提出硬件优化、人才培育、技术攻坚、标准统一优化策略,并展望 AI 融合、无人化、绿色低碳钻井未来发展方向。

关键词: 自动化钻井设备; 石油钻井工程; 应用

引言: 当下我国油气勘探开发逐步走向深井、超深井、海上及致密油气复杂地层,传统人工钻井作业效率偏低、操作误差大、井下风险防控滞后、人力成本居高不下,难以适配现代化钻井施工需求。自动化钻井设备依托智能感知、闭环控制、远程调度技术,破解传统施工痛点。基于此本文梳理自动化钻井设备核心体系与工作机理,结合多工况工程应用剖析应用价值,查摆行业现存短板并给出优化方案,助力石油钻井行业智能化转型升级。

1 自动化钻井设备核心类型及工作原理

1.1 自动化钻井设备核心架构组成

(1) 智能感知监测模块组成与功能: 该模块主要由井下与地面两类传感器组成,包括随钻测量(MWD)传感器、随钻测井(LWD)传感器、井口应变传感器及泥浆性能传感器。其核心功能是实现对钻压、扭矩、井斜、方位、地层伽马值、井底压力及泥浆流量等关键参数的实时采集与动态监测,为自动化控制提供数据基础。(2) 自动控制执行模块硬件构成: 主要包括 PLC 控制器、液压执行单元、伺服电机、变频驱动器以及末端执行机构(如自动钻机顶驱、铁钻工、自动猫道等)。该模块接收中央指令,通过闭环控制算法驱动硬件动作,实现钻柱自动给进、管柱自动排放、扭矩精准施加等操作^[1]。(3) 数据传输与后台调度控制系统: 采用有线(如钻杆内嵌电缆)与无线(如泥浆脉冲、电磁波)结合的混合通信方式,构建从井下至地面的高速数据链路。后台依托 SCADA 系统与钻井专家控制平台,具备数据处理、存储、决策及远程调度功能,实现对多井场设备的协同管理。

1.2 石油工程主流自动化钻井设备分类

(1) 自动化钻机与智能井控设备: 包括全自动顶部驱动钻机、管柱自动化处理系统及智能防喷器(BOP)。后者配备压力自检与自动关断功能,可响应紧急工况。(2) 自动管柱处理、自动泥浆调配设备: 管柱处理设备涵盖自动猫道、铁钻工、排管机及立柱装卸机器人; 泥浆调配设备则包括自动配浆系统、密度粘度闭环调节装置及智能固控设备。(3) 随钻测量自动化井下配套设备: 包括旋转导向系统(RSS)、随钻测井仪、随钻压力测量仪及井下振动监测工具。该类设备用于实现井眼轨迹主动控制和地层特性实时评价。

1.3 自动化钻井设备基础工作原理

(1) 地层参数实时采集与解析: 通过 LWD/MWD 传感器获取伽马、电阻率等参数,经编码压缩后由泥浆脉冲传输至地面解调,生成实时地层评价曲线。(2) 闭环调速纠偏控制: 基于井斜与设计轨道偏差,采用 PID 或模型预测控制算法,驱动旋转导向工具动作; 同时根据钻头扭矩与机械钻速调节顶驱转速和下放速度,实现秒级闭环调节。(3) 井下风险预警与调控: 利用压力、温度等特征参数建立卡钻、井漏等阈值模型,超限时分级触发预警或自动应急调控(如提钻、调节排量、智能 BOP 关断),并上传至远程控制中心,实现主动防控。

2 自动化钻井设备在石油钻井工程中的实际应用

2.1 常规陆地石油钻井工程应用

(1) 表层井段自动化匀速钻井施工应用: 在表层井段(通常为 0-500 米)钻进中,自动化钻机通过预设钻压与转速的上限及下限,结合实时钻速反馈,由变频驱动系统自动调节顶驱输出与绞车下放速度,维持机械钻

速恒定。该应用有效避免了人工操作时因钻压突变导致的井壁失稳或钻头早期损坏,同时防止表层套管下入困难,为一开作业提供了平稳、高效的施工保障。(2)井眼轨迹智能把控、定向钻井应用落地:采用旋转导向系统(RSS)配合随钻测量工具,系统每秒钟采集井斜、方位及工具面角等参数,与设计轨道进行对比。当偏差超出设定阈值(如井斜偏差 $\pm 0.2^\circ$)时,控制算法自动指令导向翼肋动作,实现闭环纠偏。该技术已广泛应用于常规定向井与水平井,使井眼轨迹中靶率提升至95%以上,显著降低了滑动钻进摩阻与起下钻风险^[2]。(3)陆地钻井工序一体化自动化作业流程:依托钻井集成控制系统(如钻机自动化管家平台),将起下钻、接单根、滑动钻进、旋转钻进、循环泥浆等核心工序编组为自动执行序列。司钻仅需在中央控制室下达“接单根”或“起钻”指令,系统便自动协调顶驱、铁钻工、猫道及绞车的动作时序,实现了从钻台到管场的一键式操作,工序间等待时间缩短约30%。

2.2 复杂工况石油钻井工程专项应用

(1)深井、超深井工况下自动化设备适配应用:针对深井(>4500米)及超深井(>6000米)的高温(>150℃)、高压(>100MPa)环境,采用耐高温电子元器件与金属密封结构的随钻测量工具,并配置自动控压钻井系统。该系统实时监测井底当量循环密度,自动调节节流阀开度以维持井底压力在安全窗口内,同时通过自动优化钻具组合与钻井参数,有效降低了深井段卡钻与井漏风险,单井事故处理时间平均减少40%。(2)页岩油、致密油复杂地层钻井配套应用:在长水平段(>1500米)页岩油水平井施工中,应用自动化井眼清洁系统与高造斜率旋转导向工具。系统通过环空岩屑浓度监测传感器实时判断岩屑床厚度,自动调整泥浆排量、转盘转速及往复划眼参数,确保井眼清洁。结合近钻头地质导向模块,实时识别伽马与电阻率变化,引导钻头精准穿行优质储层,储层钻遇率可由传统模式的75%提升至90%以上。(3)海洋平台海上石油钻井自动化成套设备应用:海洋平台普遍集成全自动化管柱处理系统(含自动排管机、铁钻工及天车防撞系统)、智能防喷器组及远程井控平台。借助海上光纤通信链路,陆地专家中心可对平台钻井参数进行远程实时诊断与优化。当发生井涌预兆时,系统可在3秒内自动完成关井程序并通知平台人员,大幅提升了海上钻井的本质安全水平^[3]。

2.3 配套辅助施工环节应用落地

(1)钻井液自动配比、循环净化自动化控制:设置在线粘度密度计与pH传感器,实时检测泥浆性能参

数,通过PLC控制自动加药系统精准投加聚合物与加重剂,维持流变性能稳定。循环净化环节,利用液位传感器与流量计监控泥浆池变化,自动启停振动筛、除砂器与离心机,实现从配浆到回注的全闭环调控,泥浆性能达标率提高至98%。(2)钻杆自动装卸、拆装智能化作业应用:由自动猫道、铁钻工与钻台机械手协同工作。视觉识别系统对钻杆接头进行定位与型号识别,机械手按设定路径抓取钻杆并送至井口,铁钻工根据扭矩曲线自动完成上扣或卸扣。整个过程无需人工扶管,上扣扭矩精度控制在 $\pm 3\%$ 以内,杜绝了丝扣错扣或损伤问题,单根连接时间由人工操作的3分钟缩短至1.5分钟^[4]。(3)钻井全过程能耗、施工参数自动监测管控:建立钻井能耗管理系统,实时采集顶驱、泥浆泵、绞车及辅助设备的瞬时功率、累计电耗及燃油消耗数据。结合钻进参数(钻压、转速、排量)自动推荐最优设备组合(如单泵或双泵运行),并通过智能电表按工序统计单耗,为节能考核与参数优化提供数据支撑,综合能耗可降低8%-12%。

2.4 工程应用案例成效分析

(1)国内陆上油田自动化钻井项目案例概况:以新疆玛湖油田某井为例,部署一套7000米全自动化钻机及配套管柱处理系统,完钻井深5260米,水平段长1800米。井场定员由常规18人减至6人,其中钻台面实现无人化操作,仅保留中央控制室工程师与巡检人员。(2)自动化设备应用工期、成本、安全指标优化数据:相较于邻井传统钻井,该井机械钻速提升26%(由7.2m/h提升至9.1m/h),完井周期由52天缩短至41天(缩短21%);单井综合成本降低15%(主要为人工、泥浆材料及风险处置费用);井身质量合格率100%,未发生卡钻、井漏及井控事件,隐患违章数量下降80%。(3)相较于传统人工钻井工艺应用优势对比:自动化钻井显著降低了人为操作失误与疲劳作业风险,关键动作重复定位精度高;实现全天候连续作业,避免交接班效率损失;实时数据驱动的决策系统可提前10-30分钟预警井下异常,采取主动调控;同时大幅改善了钻井工人的工作环境,将重体力作业转移至机械臂,对行业安全文化与用工模式产生了深远影响。

3 自动化钻井设备在石油钻井工程中应用现存问题、优化策略及发展展望

3.1 自动化钻井设备工程应用现存问题

(1)极端地层工况设备适配性不足,故障率偏高:在高温(>150℃)、高压(>100MPa)及高含硫等极端地层中,电子元器件与密封件易老化失效,导致随钻

测量工具、旋转导向系统等核心设备平均无故障时间明显缩短,井下停工频次增加。(2)设备运维成本高、专业运维技术人员短缺:自动化设备依赖高精度液压、电气及控制元件,维修备件价格昂贵且更换周期短;同时,同时精通钻井工艺与自动化技术的复合型运维人才匮乏,多数井场依靠厂家外援,响应不及时。(3)国产化核心零部件技术短板、设备兼容性较差:国内在高温传感器、井下处理器、高可靠性执行电机等核心部件上仍依赖进口,自主产品性能稳定性不足;不同厂商设备之间的通信协议与接口标准不统一,导致系统集成困难、数据孤岛现象突出。(4)井下突发故障自主处置能力有待提升:当前自动化系统对于钻头断裂、井下钻具落井等复杂突发故障,缺乏自主识别与应急处理逻辑,仍需人工介入判断,降低了全自动流程的闭环可靠性。

3.2 自动化钻井设备工程应用优化策略

(1)优化设备硬件结构,提升复杂工况抗干扰能力:采用耐高温陶瓷基电路板与金属封装传感器,加强井下工具的隔热与抗震设计;在液压系统中增加冗余密封与自清洁过滤装置,提高设备在恶劣环境下的连续运行时长。(2)搭建一体化运维体系,完善岗位人才培养机制:建立基于物联网的远程预测性维护平台,实时监测设备健康状态,提前预警部件失效;同时与职业院校合作开设“智能钻井技术”定向班,培养懂机械、电气、软件的复合型运维工程师。(3)突破国产化核心部件技术,统一设备行业适配标准:加大对高温加速度计、井下闭环控制芯片等关键部件的研发投入,设立国家专项攻关计划;推动行业协会制定统一的自动化钻井设备通信协议与数据接口标准,实现不同厂商设备的即插即用与数据互通^[5]。

3.3 石油钻井自动化设备行业发展展望

(1)AI人工智能+钻井设备深度融合发展方向:未来自动化钻井将嵌入地质模型实时更新与机器学习算

法,实现钻井参数的自我优化与钻头寿命预测;通过强化学习训练智能控制模型,使系统自主选择最优钻进策略,大幅降低人为干预需求。(2)无人化、一体化智能钻井成套装备研发趋势:集成管柱处理、井下导向、泥浆循环及井控功能于一体的无人钻机将成为主流,地面与井下全流程实现“黑灯作业”,仅保留远程监控中心,单井场作业人员可压缩至2-3人。(3)绿色低碳型自动化钻井设备研发应用前景:采用电驱替代柴油机驱动,结合储能与能量回收技术,降低碳排放;开发自动泥浆减量化处理装置与钻屑在线回注系统,配合新能源供电方案,推动钻井作业向低能耗、低排放的绿色模式转型。

结束语

综上,自动化钻井设备全面优化石油钻井施工流程,兼顾施工效率、工程质量、作业安全与成本管控,适配多元复杂钻井工况,是油气钻井行业智能化转型核心支撑。现阶段行业仍面临工况适配、技术、人才与系统兼容多重难题,需落地硬件改良、国产化攻关、人才培养、体系搭建优化举措。后续依托人工智能、新能源技术赋能,打造无人化绿色智能钻井装备,能够进一步推动石油钻井行业高质、安全、低碳长效发展。

参考文献

- [1] 吴佳楠. 石油钻井自动化设备控制系统优化与工程应用研究 [J]. 石化技术, 2024, 31(11): 201-202.
- [2] 陈亮. 智能化自动化钻井设备降低石油钻井施工风险的应用路径 [J]. 西部探矿工程, 2023, 35(9): 78-79.
- [3] 李根生. 智能自动化钻井装备技术进展与油田工程应用展望 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 35-42.
- [4] 王磊. 石油钻井自动化设备应用难点及工况适配优化策略 [J]. 石油机械, 2025, 53(2): 112-117.
- [5] 刘阳. 深井石油钻井自动化装备应用及钻井效率、安全管控分析 [J]. 断块油气田, 2023, 30(6): 87-89.