

doi:10.11911/syztjs.2024103

引用格式: 刘伟, 付加胜, 郭庆丰, 等. 智能控压钻井关键技术研究进展与展望 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(5): 42–50.

LIU Wei, FU Jiasheng, GUO Qingfeng, et al. Research progress and prospects of key technologies for intelligent managed pressure drilling [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(5): 42–50.

智能控压钻井关键技术研究进展与展望

刘 伟^{1,2}, 付加胜^{1,2}, 郭庆丰^{1,2}, 赵 庆^{1,2}

(1. 中国石油集团工程技术研究院有限公司, 北京 102206; 2. 油气钻完井技术国家工程研究中心, 北京 102206)

摘 要: 随着油气勘探开发快速向深层、深水、非常规等复杂难动用领域发展, 涌、漏、塌、卡等井下风险显著增加, 亟需研发自动化程度更高、且具有智能化操控能力的精细控压钻井技术与装备, 加速由半自动化、自动化到智能化的发展进程, 实现早期精准复杂工况预测, 更快、更准地控制并消除钻井风险。在调研国内外控压钻井技术与装备的智能化发展现状的基础上, 阐述了智能控压在智能控制、数据采集与处理等装备方面, 以及井下复杂深度学习识别方法、智能决策分析软件等关键技术研究进展, 试验初步验证了其显著的技术优势, 但仍有待现场充分验证与完善。建议进一步加速控压钻井技术与智能技术的跨界融合, 建立支撑复杂油气高效勘探开发的智能控压钻井技术体系, 助力我国油气工程技术高水平自立自强。

关键词: 控压钻井; 智能化; 关键技术; 装备; 软件

中图分类号: TE928

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2024)05-0042-09

Research Progress and Prospects of Key Technologies for Intelligent Managed Pressure Drilling

LIU Wei^{1,2}, FU Jiasheng^{1,2}, GUO Qingfeng^{1,2}, ZHAO Qing^{1,2}

(1. CNPC Engineering Technology R & D Company Limited, Beijing, 102206, China; 2. National Engineering Research Center of Oil & Gas Drilling and Completion Technology, Beijing, 102206, China)

Abstract: With the gradual development of oil and gas exploration towards complex and difficult-to-use fields such as deep formation, deep water, and unconventional areas, the underground risks such as “surge, leakage, collapse, and sticking” have significantly increased. It is urgent to further develop precise managed pressure drilling (MPD) technology and equipment with higher automation and intelligent control capabilities, accelerate the development from semi-automation, automation, to intelligence, achieve accurate and early prediction of complex working conditions, and control and eliminate drilling risks faster and more accurately. A detailed investigation on the intelligent development of MPD technology and equipment in China and abroad was conducted, and the research progress of intelligent pressure control in equipment such as intelligent control, data acquisition and processing, as well as key technologies including complex underground deep learning methods and intelligent decision-making analysis software was discussed. Preliminary experimental verification shows the technical advantages of intelligent MPD technology, but it still needs to be fully verified and improved on site. In the future, by accelerating the cross-border integration of MPD technology and intelligent technology, it is expected to establish an intelligent pressure control drilling technology system that supports efficient exploration and development of complex oil and gas and help China's oil and gas engineering technology achieve high-level self-reliance and self-improvement.

Key words: managed pressure drilling; intelligentization; key technologies; equipment; software

收稿日期: 2024-08-22; 改回日期: 2024-09-06。

作者简介: 刘伟 (1977—), 男, 安徽当涂人, 2000 年毕业于江汉石油学院石油工程专业, 2004 年获中国石油大学 (北京) 油气井工程专业硕士学位, 2008 年获中国石油勘探开发研究院油气井工程专业博士学位, 正高级工程师, 主要从事控压钻井技术与装备研发工作。E-mail: liuweidri@cnpc.com.cn。

基金项目: 国家重点研发计划项目“复杂油气钻井智能监控、诊断与决策系统” (编号: 2019YFA0708304) 和中国石油集团关键核心项目“钻完井工程设计与优化决策一体化软件 (SmartDrilling) 研发” (编号: 2020B-4019) 联合资助。

随着油气资源日趋劣质化,勘探开发逐渐向潜力巨大的深部、复杂压力地层发展,但钻井过程中涌、漏、塌、卡频繁,且具有隐蔽性、突发性特征,甚至诱发井喷,带来严重经济损失和环境污染,已成为制约复杂深层油气安全生产的第一要素。精细控压钻井技术是有效解决地层复杂压力系统导致钻井安全问题的变革式技术,能够快速、精准调整井口回压,从而有效控制井筒压力剖面,保障钻井施工安全^[1-6]。随着深井超深井技术发展,对控压钻井技术的软硬件提出了更高的要求。同时,人工智能技术的爆发式发展,迫切需要将人工智能技术引入控压钻井技术,以大幅提高控压钻井技术装备的能力和函数,保障钻井安全。近年来,针对超深井复杂压力地层的更高需求或新特点,国内外开展了控压钻井技术和装备的创新研究,将人工智能技术不断引入到装备与软件中,取得了极大的发展。一方面,国外大型油服公司持续发力,如哈里伯顿、威德福、斯伦贝谢等公司,朝着功能更强大、控制更智能、使用更方便、成本更低廉等多种控压钻井装备方向,开展强力研发并成功研制了新型控压钻井装备与软件,并在现场进行了大量应用,取得了显著的经济效益^[7-16];另一方面,一些创新性企业也针对控压钻井技术开展研发,取得了一定突破,研制了具有一定创新的控压钻井装备与软件^[17-18]。国内同样持续开展了控压钻井装备与软件研发,在装备的智能化等方面持续发力,不断更新迭代,取得了一定的效果^[19-26]。为进一步推动我国智能控压钻井技术的发展,笔者详细阐述了国内外控压钻井技术装备的发展,特别是自动化、智能化方面的发展,并展望了智能化控压钻井技术的发展趋势。

1 智能控压钻井装备研究进展

经过多年持续研究,国内外井筒压力控制技术装备自动化水平已经较高,在装备控制、参数优化、压力控制、远程操作等方面引入了智能方法,从而使控压钻井装备迈入智能化阶段。但是智能化控压还处于攻关验证阶段,尚未大规模应用,更未实现完全的智能控压,亟需进一步攻关突破,从而提升控压钻井装备的智能化水平。

1.1 国外研究现状

1.1.1 哈里伯顿控压钻井装备

哈里伯顿公司的 DAPC 精细控压钻井系统通过测量钻井液循环系统的流量差和压力差,可有效预

防井下溢漏。该系统利用 PWD 实时测量井底压力,利用回压泵和节流阀施加井底回压,利用高精度水力模拟软件设计优化钻井液密度和回压泵及节流阀的相关参数,实现窄安全密度窗口地层的安全钻进。2019 年推出的 Flex™ MPD 智能控压装备分为标准版(Flex MPD)、专业版(Flex Pro MPD)和全功能版(Full MPD)等低中高 3 个级别^[7],采用车载式设计,便于快速运输与安装。标准版提供旋转控制头和节流撬,但无流量监测装置,配置有控制平板,由司钻通过手动控制井口回压,哈里伯顿公司提供远程技术支持;专业版在标准版基础上增加了监测流量的流量撬,可接入第三方数据(如录井数据等),可以采用自动或手动方式控制井口回压,增强了控制操作性能;全功能版在专业版基础上增加了实时水力计算模型和远程监控功能,控制系统的核心是 GB Setpoint™实时水力模拟器。实时水力计算模拟器全面考虑了流体压缩性、抽汲/激动压力,充分利用现场监测参数与第三方参数,实时计算各种工况下的压力,方便施工人员全方位控压。全功能版的智能控压装备可以直接连接到 iCem®服务,提供自动化控压固井技术服务。标准版只支持平板操作控制,专业版支持平板或计算机控制,全功能版支持计算机控制。

哈里伯顿公司的控压钻井装备可以实时感知和监测钻井过程中的各项参数,并通过数据分析和决策支持系统提供相应的数据支持和决策依据。哈里伯顿公司利用控压钻井装备自动采集井底、地面的大量数据,初步建立了地面-井下一体化的智能控压钻井安全与控制理论,进入智能控压钻井初级阶段,效果显著。

阿根廷的 Vaca Muerta 盆地以水平井为主,钻进储层过程中易钻遇天然裂缝,若储层中气体侵入井筒,易导致发生井控事件。因此,考虑采用控压钻井(MPD)技术,以迅速检测溢流和漏失的发生,有效控制循环当量密度(ECD),从而控制溢流和井漏,并降低井下出现复杂的概率和缩短非生产时间^[8]。哈里伯顿公司的 Flex™ MPD 智能控压装备在 Vaca Muerta 盆地得到了广泛应用。该盆地的运营商使用了标准版和专业版的 Flex™ MPD 智能控压装备钻探了 8 口井,但对于邻井数据较少的区块,采用了全功能版的 Flex™ MPD 智能控压装备。

1.1.2 威德福控压钻井装备

威德福公司于 2019 年推出了 Victus™ Intelligent MPD 智能控压装备,其采用了电动节流阀,可更快

地调节控制压力,额定工作压力 34.5 MPa。该设备设计紧凑,安装快速,可集成在钻机上,其控制软件的算法模型经过全球千余口钻井数据的训练。该装备包括 1~4 条通道,以增加冗余,具体可根据用户需求进行定制,一般有 3 个节流通道的和 1 个直流通道的,每个节流通道的都各有 1 个节流阀和质量流量计,用于检测、控制和循环溢流^[9]。安装在节流阀上游的耐高压质量流量计可以在气体含量较高时测量返回钻井液的流量。流量计也可安装在节流阀的下游。如果发生堵塞或其他问题,可以通过智能控制系统进行远程操作,切换节流通道的继续进行控压钻井^[10-11]。

威福德公司的 Victus™ Intelligent MPD 智能控压装备还包括流体检测设备,可实时监测分析流体,可实时监测孔隙压力和地层压力窗口,无需关井;其具有压力动态预测与对比验证功能,可在钻进、接单根、起下钻等工况下,利用 PWD 监测结果自动验证井底压力动态预测结果。

1.1.3 斯伦贝谢控压钻井装备

斯伦贝谢公司于 2016 年推出的@balance 控制钻井系统,具有 i-balance 自动工作模式和 e-balance 半自动工作模式,2 种工作模式可相互切换。i-balance 工作模式提供实时远程、自动化控压钻井。当需要半自动化控制时可选择 e-balance 模式,即设备尽量简化、水力学分析模型实时校正,并可通过人工设备接口(HMI)手动控制节流阀阀位和套压。i-balance 自动工作模式下,利用 VIRTUAL hydraulics 钻井液模拟软件和第三方数据驱动的实时水力模型连续计算井底压力,通过控制节流阀在地面施加井口回压,将目标井底压力保持在设定的范围。钻井作业期间,钻井液通过主节流阀循环;如果钻井液流量更大,可以通过多个节流阀循环。接单根或接立柱时,自动控制器开始关闭主动节流阀,以保持 VIRTUAL hydraulics 软件确定的压力;如果主动节流阀无响应或被堵塞,控制器将自动切换到另一个节流阀并报警。i-balance 自动工作模式下可以根据需要使用 1~3 个节流阀^[12]。

为了将井筒循环完全封闭在控压钻井系统中,斯伦贝谢公司提供了一系列行业领先的压力控制设备。每个硬件组件都经过精心挑选,可与自动到手的各级控制装置进行最优集成。控制装置可以从远程或现场控制台进行操作。在设计阶段,可以选择其他组件来满足高规格需求,如流量计、井涌监测、流体分离、钻井液气液分离器和其他组件等^[13]。

Bakken 盆地采用常规钻井技术钻进较长水平段水平井时,钻井液的排量较大,密度较高,可能会导致井漏、压差卡钻等井下故障。该盆地钻进水平段时,主要以氯化钠盐水为钻井液,一旦井底压力低于地层孔隙压力,气体就会侵入井筒,使氯化钠钻井液起泡,导致井底压力降低。为此,该盆地的 Petro Hunt 地区利用斯伦贝谢的控压钻井装备进行控压钻井试验,第 1 口试验井进入生产段 1 219 m,采用推荐的控压钻井参数进行钻进,结果表明,控压钻井获得成功,钻井周期缩短了一半,水平段长度达到了 2 993 m,而该地区水平段长度平均为 2 636 m。Petro Hunt 地区第 1 口井控压钻井获得成功后,在该地区继续进行控压钻井,并进一步优化参数提高效率。该地区采用控压钻井技术后,降低了钻井液密度,提高了机械钻速,缩短了钻井周期。此外,因为降低了钻井液密度,钻井液排量得以提高,井眼清洁程度得到提高^[14]。

1.1.4 国民油井控压钻井装备

国民油井华高公司 MPowerD 控压钻井系统可使陆地钻机实现基本的井筒压力控制功能,可在钻井期间保持井筒压力恒定,提高井眼稳定性,降低井眼坍塌和压差卡钻的风险,缩短常规及非常规作业时间,降低钻井成本。该系统的节流管汇由压力控制阀、减压阀和旁路管线组成,其他管线和阀门能够与钻机循环系统结合。该系统带有远程接口的遥控面板^[15],允许本地或远程操作,适用于水基钻井液、油基钻井液或合成基钻井液。

该系统可自动或手动控制节流阀,支持双节节流阀工作模式,当主节流阀处于自动模式时,可以手动控制辅助节流阀。在检测到故障或无法通过主节流阀达到设定压力时,该系统可以自动切换节流阀;如果需要,可以在操作过程中将节流阀从一级控制切换为二级控制,以缩短维持目标井筒压力的时间。

保加利亚某油田由于安全密度窗口窄和地层中的许多未知因素,早期无法成功钻至设计完钻井深,使用了 MPowerD 控压钻井系统后,完钻井深超过了设计完钻井深,且顺利完钻^[16]。

1.1.5 其他公司控压钻井装备

加拿大 Oplaenergy 公司是一家小型独立的创新企业,研发的 MPDSmart™智能控压钻井撬具有 2 个节流通道的,配备了 2 个全电动节流阀和 1 个质量流量计,采用了 PLC 控制系统,压力控制精度高,能轻松应对窄安全密度窗口地层钻进和起下钻^[17-18]。该

钻井撬采用了紧凑设计,能够轻松地与钻机集成,只需进行少量或无需进行结构修改;全自动控压钻井的优点使其可以很容易地与钻机集成或独立运行,提高钻井效率,从而缩短与压力相关的非生产时间。MPDSmart™智能控压钻井撬的占地面积小,可减少现场作业人员,节省钻井液费用,提高机械钻速。

MPDSmart™智能控压钻井系统通过非线性闭环控制器进行压力控制,最大限度地缩短反应时间和避免压力超调;内置钻井液流变参数实时计算模型,提高了压力的计算精度与控制的智能化水平。

1.2 国内研究现状

1.2.1 中国石油控压钻井装备

1) 中国石油集团工程研究院有限公司控压钻井装备

中国石油集团工程研究院有限公司从2008年开始进行精细控压钻井技术装备的自主研发,形成了PCDS系列高、中、低端精细控压钻井装备,包括PCDS-I、PCDS-II、PCDS-S、PCDS-S & D及海洋型精细控压钻井装置^[19-22]。主要子系统包括自动节流系统、回压补偿系统和监测与控制软件等,压力控制精度 ± 0.1 MPa,研发形成了多策略、自适应的环空压力闭环监测与优化控制技术,以及井筒压力与流量双目标融合控制的钻井工艺和欠平衡控压

钻井工艺,建立了井筒动态压力实时、快速、精确计算方法,实现了9种工况、4种控制模式和13种复杂条件应急转换的精细压力控制。通过多年攻关,已形成了人工到半自动,再到自动化控压的跨越,形成了钻-测-固-完一体化的精细控压技术与装备,实现了钻完井全过程的压力精确控制,有效降低了井下故障率,保障了井筒完整性。

基于先进的PCDS™精细控压钻井软硬条件,创新搭建了智能化控压钻完井仿真系统,初步形成了集井下地面多源数据管理、物理数字双驱动仿真及实时控制于一体的综合平台,建立了地层压力感知-井筒压力调控-井下地面环境反馈的三层闭环控制模式,为装备运行状态实时监测、井下工况参数超前预测、井筒压力控制参数智能推优奠定了坚实基础,实现了更科学、精确地模拟控压钻完井全过程(见图1),推动了井下复杂预-测-控数字孪生技术快速发展。

为了满足智能控压钻井、超高压井筒压力控制等技术需求,在全尺寸控压钻井压力、流量模拟系统的基础上,控压钻井实验室进一步发展了套压异常升高、恶性溢流、溢漏同存等13种井下复杂的精细模拟与控制功能^[23],初步具备了气液两相复杂动态模拟、智能节流控压调试能力,为智能控压钻井技术发展提供了良好的试验条件。

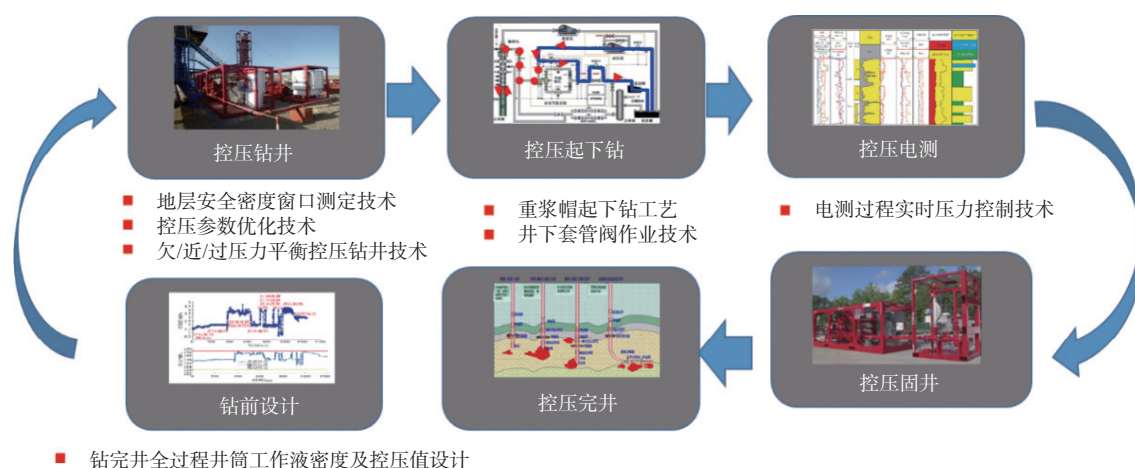


图 1 精细控压钻完井技术

Fig.1 Precise MPD and MPC technology

2) 中国石油其他单位控压钻井装备

中国石油多家钻探工程有限公司也在控压钻井技术与装备方面开展了攻关研究,形成了川庆钻探CQ-MPD、西部钻探XZ-MPD和渤海钻探BH-MPD为代表的系列化控压钻井装备^[24-26],并针对不同作

业区域的钻完井技术难点,研发了多项特色技术,将井筒压力控制技术的应用范围由钻井作业拓展到测井、固井和完井作业。

CQ-MPD控压钻井系统主要包括自动节流控制系统、回压补偿系统、监测与控制系统等^[24]。自动

节流控制系统可以根据需要将自动/手动节流通道的进行多种组合,具有手动控制与自动控制功能,设备承压能力 35 MPa。回压补偿系统主要用在接单根(或立柱)和起下钻时钻井泵停止而不能建立循环情况下,使用该系统实现地面循环、自动补偿减小的循环压耗和起钻时的抽汲压力,确保井口回压达到目标控制值,使井筒压力保持稳定,满足精细控压钻井的技术要求。监测与控制系统主要负责数据的采集与接收、水力参数计算及压力控制等。NP23-P2009 井利用该系统进行精细控压钻井,实测奥陶系潜山储层安全密度窗口为 1.03~1.09 kg/L,钻井液密度 0.93 kg/L, $\phi 152.4$ mm 水平段(5 184~5 452 m 井段)控压钻进 268 m,纯钻时间 82.57 h,平均机械钻速 3.25 m/h,发现油气层 10 层。该井实现了钻井目的,解决了易漏地层因漏失严重无法钻达设计层位的难题,与邻井相比,钻井液漏失量大幅降低,节省了钻井液费用,同时避免了钻井液进入储层,保护了油气层。

西部钻探 XZ-MPD 控压钻井系统主要由钻井参数监测系统、控制系统、地面自动节流控制及回压补偿系统等组成,压力控制精度为 0.35 MPa,能够实现钻进、停泵接单根、控压起下钻、双梯度钻井液帽压力控制及衔接。新疆油田白 28 井利用该系统进行控压钻进,降低了钻井液漏失量,减少了井下故障,机械钻速提高了 30%,钻井成本大幅降低^[25]。

1.2.2 中国石化控压钻井装备

中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院针对控压钻井技术开展了多年持续研发,研制了中国石化第一套精细控压钻井系统,形成了钻进、接立柱、循环、起下钻、下套管和固井等钻完井全过程精细控压工艺,控制压力最高 9.3 MPa,实现了“打得成、打得快、打得省、打得优、打得安全”的提速提效目标,为油气安全绿色开采提供了更高效的技术支持^[27]。

2 智能控压软件研究进展

国内外在研制提升控压钻井装备智能化水平的同时,大力研发智能控压分析软件,将神经网络、最小二乘法等智能方法引入数据分析、参数优化及智能控制等过程,从而提升了控压软件的智能化分析能力。随着人工智能技术的发展,控压分析软件将从目前的初始化智能阶段迈入高级智能阶段,甚至完全智能阶段。

2.1 国外智能控压软件研究进展

2.1.1 哈里伯顿控压钻井软件

哈里伯顿智能感知与监测设备可以实时感知和监测钻井过程中的各项参数,并通过数据分析和决策支持系统提供相应的数据支持和决策依据。控压钻井软件具有以下功能:钻进和接单根时,可以手动或自动定点控制回压;控制节流阀开度;接单根时定时自动开/停泵;控制冗余装置等。专业版及全功能版控压钻井软件支持从钻台进行自动控制,显示参数监测曲线(包括流量监测曲线、第三方实时数据曲线等),考虑抽汲/激动压力控制等,提供以立管压力为控制目标的功能。为了更精确地控制压力,全功能版控压钻井软件针对钻井液注替、控压固井等作业,考虑多种流体的实时瞬态模型,进行井筒流体实时追踪和全井筒 ECD 监测。控压钻井软件除定点压力和立压 2 种监测方法外,还增加了流体体积监测方法。控压钻井软件通过分析钻井液累计流量、溢流量和漏失量,减少了对钻井液罐液面监测的依赖^[7]。控压钻井软件在上述压力计算、流体追踪等过程中大量采用了各种机器学习等智能算法,提高了计算的精度和速度。

控压钻井软件在作业前根据钻井规划和建模提供的基本压力控制,允许用户输入查找表,并根据当前井深和排量在表格信息之间插值,从而快速自动得到控压值;可以通过添加钻机数据和质量流量计,来监测钻井液的流入量和流出量。

Ongc Tripura Asset 某高压高温井的井底温度为 151 °C,完钻井深处井底压力超过 105 MPa,存在不确定的孔隙压力、高度不稳定的地层、压差卡钻的可能性及高压/高温等挑战,采用常规钻井技术难以完成,因此采用哈里伯顿控压钻井设备和配套的控压钻井软件进行控压钻井。钻井过程自动调整钻井液密度和控压值,控制了气侵和水侵,顺利钻至井深 4 840 m,创造了该区块最深钻井和固井纪录^[28]。

Petrolink 联合哈里伯顿推出了 HalVue™,旨在构建行业领先的数据可视化系统。HalVue™由 Petrolink 的通用可视化平台提供支持,可视化一系列数据类型, HalVue™与广泛 HalVue 框架中的计算和智能报警模块紧密集成,优化钻井并降低钻井作业风险。HalVue™实时查看器直观且由用户驱动,是一款高效的实时数据监控应用程序,可提供钻井和地下数据的实时一致视图^[29]。

2.1.2 威德福控压钻井软件

威德福控压钻井智能控制系统的自动控制组件

包括旋转控制头、环形隔离装置、缓冲撬、节流阀和泄压阀等。该系统除了与自动控制组件通信和控制这些组件外,还能够与钻机控制系统通信。该系统具有集成人机界面屏幕的集中式可编程自动化控制器的控制能力。

控压钻井智能控制系统综合了传感技术和数据分析算法,可以实时监测和分析钻井过程中的各种复杂工况参数。控压钻井智能控制系统通过可编程自动化控制器实现了先进的数据分析和水力建模,包括数据采集、信号调理、井筒建模、数据分析与可视化、压力等参数的控制。

作为控压钻井系统的中枢,智能控制系统能在动态井况下快速、精确地控制压力。该系统采用了先进的水力学模型,通过考虑流体和地层的温度、流体的压缩性和井筒岩屑等因素的影响,精确地确定井底实时压力,并在几秒钟内确定从地面施加的回压。该系统使用了一个经过长时间验证的算法模型,利用全球数千口井的钻井数据进行了校准^[10]。该系统利用水力学参数、孔隙压力、裂缝压力、激动压力和抽汲压力等的实时计算模型对边界进行量化,有助于理解实际操作的限制^[30]。

该系统集成了智能控制逻辑和智能工程模块,可以准确地控制井下压力。该系统包括用户界面、集成模型、控制算法、连接优化和检测等模块,能够更有效地执行关键决策,支持施工前设计、作业后分析、实时和压力敏感任务的自动化、评估限制的多个软件引擎,以及在一个地方控制多个组件。该系统与交互式模型以及地面和井下数据测量相结合,在统一的计算系统中使用,以增强钻井性能的实时分析;为其他软件平台应用程序提供了通用的集成接口,可以进行钻前、钻中和钻后分析。该系统在几口陆上高温高压井、深水海上井(自然裂缝地层)和北海窄安全密度窗口井成功应用,在自动精确管理井筒压力方面取得了较好的效果^[31]。

2.1.3 挪威 eDrilling

挪威 eDrilling 公司的钻井全生命周期模拟概念将先进的动态钻井模型和诊断技术与 3D 可视化相结合,形成了“虚拟井眼”,包括规划和设计(WellPlanner)、培训和方案开发(WellSim)、实时监控/操作(WellAhead)、参数优化(wellGuide)、改进 MPD 控制系统(wellBalance)^[32-33]。该软件同时整合了水力学、管柱力学、机械钻速和孔隙压力等多个模块,实现了钻井全生命周期的工况诊断预测及钻井参数优化,通过获取地面和井下实时的钻井数据

和井身结构数据等,实现井眼及钻井过程的实时可视化。以 eDrilling 解决方案为代表的钻井数字孪生技术,目前已经逐渐扩展到钻井全生命周期中,其基本架构可概括为:通过对地面和井下信息及数据的检测或实时监测,结合各类工程模拟技术,优选最优的钻井设计和施工方案,并进行故障诊断、异常情况处理等决策分析。

北海的一口勘探井使用 eDrilling 自动监测软件 wellAhead 提供实时诊断支持。该井钻进 $\phi 215.9$ mm 裸眼井段时,wellAhead 显示,与模型计算的立管压力相比,实时测量的立管压力升高、波动范围在 0.5~1.8 MPa,诊断为当量循环密度(ECD)低于坍塌压力当量密度,存在坍塌风险,给出提高排量、使 ECD 保持在坍塌压力当量密度以上的建议。起钻期间,在没有循环的情况下,诊断出 ECD 低于坍塌压力当量密度,井壁存在坍塌风险。

利用数字孪生技术,可以通过早期风险监测和预测分析来降低钻井成本,使钻井团队能够快速反应并做出有效决策,可以实时模拟多种场景。数字孪生模型根据钻机的实时数据不断更新,其原理是通过人工智能和机器学习监测到异常活动时,提供诊断消息来进行持续优化。分析和预测的主要目标是让人们意识到即将到来的风险,然后进行假设分析以优化运营。人工智能和预测分析为钻井团队在规划和钻井作业期间提供了决策工具。

2.2 国内智能控压软件研究进展

中国石油集团工程研究院有限公司近年来在控压钻井智能分析方面进行了大量的探索,编制了控压钻井计算模拟与控制软件。该软件大量采用人工智能方法,提高了参数的计算精度,缩短了计算时间,提高了工况和复杂的诊断精度和时效。

采用传统经验公式估算钻井液性能参数时,常因粗略估计而导致误差较大,于是采用了幂律函数组合优化算法(PPSO)。该算法整合了最小二乘法和粒子群优化(PSO)算法,首先利用最小二乘法确定初步的拟合曲线,然后通过 PSO 算法细化寻优,精确逼近实际测量值,降低计算误差,提高计算效率。钻井波动压力计算过程中,使用优化播种策略的粒子群算法求得最优解,从而控制算法的循环次数和计算时间,快速计算出波动压力^[34-35]。

针对现有溢流识别模型需要大量标记过的溢流数据,将早期检测溢漏的森林模型扩展为迁移学习模型,以提高泛化能力。将森林模型建立为源域模型,并根据迁移学习算法在最后一层添加级联,并

形成分类模型。在样本量较少的情况下,可以提前 10 min 识别出溢漏,预测准确率为 80.13%,比其他集成学习算法表现更好^[36]。

针对已有溢流漏失识别方法对数据挑剔、模型迁移需要大量标签数据的情况,建立了 CNN-LSTM 融合网络识别模型,并搭建半监督学习模型,以降低模型对标签数据样本的依赖。在有无标签数据数量比 1:5 的情况下,平均教师模型在 200 个标签数据下的效果就与监督学习方法在 1 000 个标签数据下的效果接近^[37]。

基于自注意力机制和时间卷积网络,建立了自监督学习模型,以更好地利用无标签数据样本,为零标签样本下自适应迁移功能提供了可能。自监督学习模型相比其他方法的准确率高,达到了 98.7%^[38]。

3 智能控压钻井技术发展展望

控压钻井装备由自动化控制向智能控制发展过程中,首先,需要强化井下数据获取与井场数据融合分析能力;其次,需要着重打造井筒安全智能控制与支持决策技术,一方面构建控压装备智能操作系统,另一方面打造多井控压作业实时支持与决策系统,实现单井控压单元闭环控制与多井协同优化控制并行发展。

通过攻关解决地质工程多源信息预测识别、地面-井下闭环智能控制、超高压循环节流系统等技术难点,研制自动精细节流控制装备、井下-地面工况监测装置和智能控压工控系统,形成 70 MPa 智能控压钻井成套装备,大幅提升井筒压力控制能力和智能化水平,为万米级复杂超深层油气藏钻完井风险的“精准预测、智能控制”提供技术支撑。

3.1 控压钻井装备的智能化控制

目前,国内外控压钻井装备基本上实现了自动化控制,可以按照设定的压力、流量等目标自动调节控制泵冲、节流阀开度,将井口回压控制在目标压力范围内,以达到精细控制井筒压力的目的,保障钻井安全。以往调节控制井口回压时,一般使用 PID 方法或在 PID 方法基础上进行变化,或者将 PID 方法与试验结果结合,属于自动控制范畴。随着人工智能技术进步,将人工智能方法引入井口回压调节控制中,以提高控制精度,缩短反应时间。

控压钻井装备的健康诊断是智能控压的重要一环,采用人工智能方法可以及时、有效、准确地诊断控压钻井装备的工作状况(节流阀开度偏移诊断与

校正、阀门堵塞诊断、电机模式诊断与应急处理等),保障控压钻井装备安全、有效地工作。

3.2 风险智能识别与可视化诊断

目前,控压钻井风险识别主要依赖地面流量、压力、钻井液罐液面高度等参数的变化特征,对于一些简单工况,通过控压软件建立了一些判断规则,实现了有限风险的自动识别诊断,但判断规则主要依赖现场工程师的经验,且易受仪器测量精度的影响,风险自动识别诊断规则的普适性受限。利用人工智能方法,能够充分利用钻井与地质等大量现场数据进行钻井风险的诊断与预测,提高风险判断的准确性和增大风险预测的提前量,这对于井口回压的控制极为有利,为井筒压力控制和后续相关处置争取更多的时间。

随着井下测量与参数分析技术的发展,充分利用井下测量参数、井下工况原位识别、地面参数测量与智能识别等钻井现场多源数据,结合井筒和参数可视化技术,可以做到风险的可视化诊断,有利于识别诊断方法的推广应用。

3.3 控压模拟系统与远程技术支持

现有控压钻井系统普遍需要配备专业的控压钻井服务队伍,以提高控压钻井的专业性和质量,但同时推高了控压钻井技术的服务费用,限制了控压钻井技术装备的广泛应用。未来,随着控压钻井理念被普遍接受和控压钻井技术使用门槛的降低,可研发与钻机融为一体的控压钻井系统,从而减少甚至不需要控压技术人员的现场支持,通过搭建远程技术支持平台,为现场控压钻井提供全程的技术支持。通过远程技术支持平台,还可以随时进行控压钻井模拟,提前进行控压钻井技术模拟与方案准备,并可在技术支持的任意时刻,结合现场实时数据或设计数据进行控压钻井模拟,为远程技术支持提供方案,保障控压钻完井的安全。

4 结束语

国外油服公司研制了智能控压装备,通过引入神经网络、最小二乘法等智能算法开发了配套的控压钻井软件,具有实时监测、水力参数计算、数据分析和自动控制等功能,能够实现自动化控压钻井分析、决策与控制,进入了智能化初始化阶段。国内也研制了控压钻井装备和配套的控压钻井软件,控压钻井装备实现了自动化,正在进行智能化功能探索研究,并积极探索将智能算法引入控压分析控制

软件,提升控压钻井软件的智能化分析与决策水平。控压钻井技术经过了初始智能化发展,今后要充分利用钻井现场多源数据、地面-井下闭环控制等多种综合手段,增强装备控制、风险识别与可视化诊断、模拟与远程支持等多功能模块的智能程度,继续深化智能化水平,以尽快实现智能化控压钻井,从而高效保障钻井安全。

参 考 文 献

References

- [1] 田野,王成龙,柳亚亚,等.深水钻井中控压响应时间及其影响因素分析[J].石油机械,2023,51(4):61-67.
TIAN Ye, WANG Chenglong, LIU Yaya, et al. Analysis on managed pressure response time and its influential factors in deepwater drilling[J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(4): 61-67.
- [2] 张锐尧,李军,杨宏伟,等.空心球多梯度控压钻井井筒压力控制方法[J].天然气工业,2022,42(11):98-105.
ZHANG Ruiyao, LI Jun, YANG Hongwei, et al. A control method of wellbore pressure during multi-gradient managed pressure drilling based on hollow glass sphere[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(11): 98-105.
- [3] 何保生,张钦岳,冷雪霜.墨西哥超深水盐下钻井技术及实践[J].中国海上油气,2021,33(6):101-109.
HE Baosheng, ZHANG Qinyue, LENG Xueshuang. Ultra deepwater pre-salt drilling technologies and their practices in Mexico[J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(6): 101-109.
- [4] 谭鹏,何思龙,李明印,等.库车坳陷超深层复杂气田钻完井技术[J].石油钻采工艺,2021,43(5):580-585.
TAN Peng, HE Silong, LI Mingyin, et al. Drilling and completion technologies for ultra-deep complex gas field in Kuqu Depression[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(5): 580-585.
- [5] 刘彪,潘丽娟,王沫.顺北油气田二区断控体油气藏井身结构设计及配套技术[J].断块油气田,2023,30(4):692-697.
LIU Biao, PAN Lijuan, WANG Mo. Well structure design and supporting technology of fault-controlled reservoir of No.2 Block in Shunbei Oil-Gas Field[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2023, 30(4): 692-697.
- [6] 刘伟,周英操,石希天,等.塔里木油田库车山前超高压盐层精细控压钻井技术[J].石油钻探技术,2020,48(2):23-28.
LIU Wei, ZHOU Yingcao, SHI Xitian, et al. Precise managed pressure drilling technology for ultra-high pressure brine layer in the Kuqa Piedmont of the Tarim Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(2): 23-28.
- [7] Halliburton. Flex™ MPD[EB/OL]. [2024-08-20]. https://cdn.brandfolder.io/G1R8FA5S/as/q5uwmy-7be7kg-450xeq/Flex_MPD.pdf.
- [8] Halliburton. Implementing a flexible MPD approach in Vaca Muerta[EB/OL]. [2024-08-20]. https://cdn.brandfolder.io/G1R8FA5S/as/cpp4zcxtnfh946wgmvgg7p/Flex_MPD-UBD-HAL-70-71_EnP.pdf.
- [9] Weatherford. Victus™ manifold[EB/OL]. [2024-08-20]. <https://www.weatherford.com/documents/technical-specification-sheet/products-and-services/drilling/victus-manifold/>.
- [10] Weatherford. Victus™ intelligent MPD[EB/OL]. [2024-08-20]. <https://www.weatherford.com/documents/brochure/products-and-services/drilling/victus-intelligent-mpd/>.
- [11] Weatherford. MPD fluid-extraction system[EB/OL]. [2024-08-20]. <https://www.weatherford.com/documents/technical-specification-sheet/products-and-services/drilling/mpd-fluid-extraction-system/>.
- [12] Schlumberger. I-balance[EB/OL]. [2024-08-20]. <https://www.slb.com/-/media/files/mi/product-sheet/i-balance-ps.ashx>.
- [13] Schlumberger. Choke manifolds[EB/OL]. [2024-08-20]. <https://www.slb.com/-/media/files/mi/brochure/choke-manifolds-brochure.ashx>.
- [14] Schlumberger. MPD reduces rig operating days in the Bakken[EB/OL]. [2024-08-20]. <https://www.slb.com/-/media/files/mi/industry-article/2019-0801-ep-mpd-bakken.ashx>.
- [15] NOV. MPowerD choke manifold: 5000S[EB/OL]. [2024-08-20]. <https://www.nov.com/-/media/nov/files/products/wbt/wellsite-services/mpowerd-choke-manifold-5000s/mpowerd-choke-manifold-5000s-spec-sheet.pdf>.
- [16] CORREA L. Industry's first truly integrated MPD control system advances offshore drilling efficiency[EB/OL]. [2024-08-20]. <https://www.nov.com/-/media/nov/files/products/wbt/wellsite-services/mpowerd-managed-pressure-drilling-systems/industry-first-truly-integrated-mpd-control-system-advances-offshore-drilling-efficiency--2021-worl.pdf>.
- [17] Opla Energy. MPDSmart™ manifold[EB/OL]. [2024-08-20]. <https://www.oplaenergy.com/technology-and-solutions/mpd-smart-manifold>.
- [18] MAMMADOV E, HOFFARTH D. Revolutionizing rig integration with next-generation MPD equipment: the pressure management device (PMD)[R]. SPE 214552, 2023.
- [19] 刘伟,周英操,王瑛,等.国产精细控压钻井系列化装备研究与应用[J].石油机械,2017,45(5):28-32.
LIU Wei, ZHOU Yingcao, WANG Ying, et al. Domestic accurate managed pressure drilling series equipment and technology[J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(5): 28-32.
- [20] 付加胜,刘伟,周英操,等.单通道控压钻井装备压力控制方法与应用[J].石油机械,2017,45(1):6-9.
FU Jiasheng, LIU Wei, ZHOU Yingcao, et al. Pressure control method and application of managed pressure drilling equipment with single channel[J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(1): 6-9.
- [21] 周英操,刘伟. PCDS 精细控压钻井技术新进展[J].石油钻探技术,2019,47(3):68-74.
ZHOU Yingcao, LIU Wei. New progress on PCDS precise pressure management drilling technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(3): 68-74.
- [22] 周英操,郭庆丰,蔡骁,等.精细控压钻井技术及装备研究进展[J].钻采工艺,2024,47(4):94-104.
ZHOU Yingcao, GUO Qingfeng, CAI Xiao, et al. Research advance of managed pressure drilling technology and equipment[J]. Drilling & Production Technology, 2024, 47(4): 94-104.
- [23] 刘伟,王瑛,郭庆丰,等.精细控压钻井技术创新与实践[J].石油科技论坛,2016,35(4):32-37.

- LIU Wei, WANG Ying, GUO Qingfeng, et al. Innovation and application of accurate managed pressure drilling technology[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2016, 35(4): 32–37.
- [24] 孙海芳, 冯京海, 肖新宇, 等. 川庆钻探工程公司精细控压钻井系统研发及应用[J]. 钻采工艺, 2012, 35(2): 1–4.
- SUN Haifang, FENG Jinghai, XIAO Xinyu, et al. Development and application of fine managed pressure drilling (MPD) system of CCDCC[J]. Drilling & Production Technology, 2012, 35(2): 1–4.
- [25] 陈若铭, 伊明, 杨刚. 精细控压钻井系统[J]. 石油科技论坛, 2013, 32(3): 55–57.
- CHEN Ruoming, YI Ming, YANG Gang. Precise pressure-controlled drilling system[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2013, 32(3): 55–57.
- [26] 郝凤亮, 徐朝阳, 马金山, 等. 控压钻井自动分流管汇系统设计与数值模拟研究[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(5): 23–29.
- XI Fengliang, XU Chaoyang, MA Jinshan, et al. Design and numerical simulation of an automatic diverter manifold in managed pressure drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(5): 23–29.
- [27] 中国石化报. 中国石化十大石油工程技术公开[EB/OL]. (2024-08-07) [2024-08-07]. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MjM5Nzc2Mzg1NA==&mid=2651437266&idx=1&sn=4f64983cb0473ad13538b90c578b7ff7&chksm=bcd25472a2a7dc4a7be5ec73b4abd970f59a9bd052db1a8aea7c216b5d582c069459c8d7d93&scene=27.
- China Petrochemical News. Top 10 petroleum engineering technologies publicly issued by Sinopec[EB/OL]. (2024-08-07)[2024-08-07]. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MjM5Nzc2Mzg1NA==&mid=2651437266&idx=1&sn=4f64983cb0473ad13538b90c578b7ff7&chksm=bcd25472a2a7dc4a7be5ec73b4abd970f59a9bd052db1a8aea7c216b5d582c069459c8d7d93&scene=27.
- [28] VERMA R, MUTHAMIZHVENDAN V, GANESAN S, et al. Case study: first ever implementation of managed pressure drilling to drill exploratory and near wildcat well at ONGC Tripura Asset[R]. IPTC 22005, 2022.
- [29] Halliburton. HalVue® real-time viewer[EB/OL]. [2024-08-20]. https://cdn.brandfolder.io/VUJJLY3X/at/fjkpmsk85t65zv4wkj95756/HalVue_Real-Time_Data_Viewer_H013581_-_DS.pdf.
- [30] ROSTAMI S A, GUMUS F, SIMPKINS D, et al. New generation of MPD drilling software-from quantifying to control[R]. SPE 181694, 2016.
- [31] ROSTAMI S A. Enhancing MPD functionality: successful application of adaptive intelligent drilling software in deepwater, offshore and onshore operations[R]. SPE 185287, 2017.
- [32] eDrilling. eDrilling products[EB/OL]. [2024-08-20]. <https://www.edrilling.no/products>.
- [33] eDrilling. Facilitating the best state-of-the art preparations and real time support for drilling operations[EB/OL]. [2024-08-20]. <https://www.edrilling.no/Customer%20Success%20Examples/ai-in-wellconstruction>.
- [34] 刘伟, 韩青松, 付加胜, 等. C/S 架构的新型控压钻井计算模拟与控制软件[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2024, 42(4): 637–644.
- LIU Wei, HAN Xiaosong, FU Jiasheng, et al. Novel managed pressure drilling simulation and control software based on C/S architecture[J]. Journal of Jilin University(Information Science Edition), 2024, 42(4): 637–644.
- [35] 付加胜, 刘伟, 邹易, 等. 新型控压钻井计算模型与模拟系统研究[C]//第一届“油气珠峰”论坛暨 2023 年钻井基础理论研讨会论文集. 北京: 石油工业出版社, 2024: 10–22.
- FU Jiasheng, LIU Wei, ZOU Yi, et al. Research on a novel managed pressure drilling calculation model and simulation system[C]//Proceedings of the First “Oil and Gas Mount Everest” Forum and 2023 Drilling Basic Theory Seminar. Beijing, Petroleum Industry Press, 2024: 10–22.
- [36] FU Jiasheng, LIU Wei, ZHENG Xiangyu, et al. Transfer forest: a deep forest model based on transfer learning for early drilling kick detection[J]. Energies, 2023, 16(5): 2100.
- [37] LIU Wei, FU Jiasheng, LIANG Yanchun, et al. A well-overflow prediction algorithm based on semi-supervised learning[J]. Energies, 2022, 15(12): 4324.
- [38] YI Wan, LIU Wei, FU Jiasheng, et al. An improved transformer framework for well-overflow early detection via self-supervised learning[J]. Energies, 2022, 15(23): 8799.

[编辑 刘文臣]