

智能连续管钻井前沿技术研究现状与发展方向分析

张琪兰, 王域峰, 陈浩楠, 殷梓涛, 龙彦君, 邹佳宜, 吴明远

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年2月4日; 录用日期: 2026年2月26日; 发布日期: 2026年3月16日

摘要

智能连续管钻井(ICTD)是传统连续管钻井技术与信息化、智能化深度融合的产物,旨在应对深部、复杂油气资源开发对钻井精度、效率与安全性的更高要求。本文梳理国内外连续管钻井技术现状,指出我国市场规模领先,但核心工具、软件及系统集成存在代差。构建ICTD前沿体系(智能地面/井下工具、高速传输、数字孪生、智能决策),总结老井侧钻及超常井工艺进展。针对工具依赖进口、软件生态薄弱、体系化不足等瓶颈,提出攻关高速传输与旋转导向,构建自主软件与数字孪生平台,推动标准协同创新,拓展非常规及新能源应用。研究认为,坚持核心自主化、软件国产化、体系标准化,是实现技术高端跨越、支撑能源安全的关键。

关键词

智能连续管钻井, 旋转导向系统, 数字孪生, 井下高速传输, 老井侧钻, 超深井, 自主化, 国产化

Frontier Technologies of Intelligent Coiled Tubing Drilling (ICTD): Current Status and Future Development Trends

Qilan Zhang, Yufeng Wang, Haonan Chen, Zitao Yin, Yanjun Long, Jiayi Zou, Mingyuan Wu

College of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: February 4, 2026; accepted: February 26, 2026; published: March 16, 2026

Abstract

Intelligent Coiled Tubing Drilling (ICTD) is the product of a deep integration between traditional

文章引用: 张琪兰, 王域峰, 陈浩楠, 殷梓涛, 龙彦君, 邹佳宜, 吴明远. 智能连续管钻井前沿技术研究现状与发展方向分析[J]. 石油天然气学报, 2026, 48(1): 145-155. DOI: 10.12677/jogt.2026.481017

coiled tubing drilling technology and information technology and intelligentization. It aims to meet the higher demands for drilling precision, efficiency, and safety in the development of deep and complex oil and gas resources. This paper reviews the current status of coiled tubing drilling technology both domestically and internationally, pointing out that while China leads in market scale, there is a technological generation gap in core tools, software, and system integration. It constructs a cutting-edge ICTD system (including intelligent surface/subsurface tools, high-speed transmission, digital twins, and intelligent decision-making) and summarizes the progress in technologies such as re-entry drilling and ultra-extreme well processes. Addressing bottlenecks like reliance on imported tools, weak software ecosystems, and lack of systematic integration, the paper proposes key breakthroughs in high-speed transmission and rotary steering, the construction of autonomous software and digital twin platforms, the promotion of collaborative standardization, and the expansion of applications in unconventional resources and new energy sources. The research concludes that adhering to core technology self-development, domestic software solutions, and systematic standardization is crucial for achieving a leapfrog in high-end technology and supporting national energy security.

Keywords

Intelligent Coiled Tubing Drilling (ICTD), Rotary Steerable System (RSS), Digital Twin, Downhole High-Speed Data Transmission, Well Sidetracking, Ultra-Deep Well, Localization, Indigenization

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

连续管钻井(Coiled Tubing Drilling, CTD)技术因其作业高效、安全性高、占地面积小及适应带压作业等独特优势,已成为油气田开发,尤其是老井挖潜、非常规资源高效动用等领域不可或缺的关键技术之一。随着油气开采向深部、低渗透、复杂构造等挑战性领域延伸,钻井技术的精度、效率、安全性与经济性面临更高要求。传统 CTD 技术与信息化、自动化、人工智能深度融合,正加速向智能连续管钻井(ICTD)演进,旨在构建具备全面感知、实时分析、自主决策与精准执行能力的智能化系统,以提升复杂工况下的作业能力与经济效益[1] [2]。

国际上,以北美和欧洲为代表的先进地区,凭借其成熟的技术体系、强烈的市场驱动和持续的研发投入,已在智能地面装备、一体化井下工具、高速信息传输及数字孪生等 ICTD 核心技术领域取得领先地位,实现了从“高效作业”向“智能解决方案”的跨越[3]。相比之下,我国连续管技术在国家重大专项与市场需求的驱动下,虽在常规装备国产化与市场规模上取得了长足进步,形成了全球最大的连续管作业市场,但在代表技术高端的核心智能工具、专用软件及系统集成方面,仍面临严峻的“卡脖子”挑战和明显的代际差距[3]。当前,我国 ICTD 技术正处于从“规模应用”向“高端智能”转型的关键攻坚期,系统梳理技术前沿、明晰发展差距、规划突破路径,对于实现技术自立自强、支撑我国复杂油气资源安全高效开发具有重大的战略与现实意义。

本文旨在对智能连续管钻井的前沿技术体系与发展方向进行系统性分析。首先,综述国内外连续管钻井技术的发展现状,通过对比揭示核心差距;其次,深入解析由智能地面设备系统、智能井下工具系统及核心支撑技术构成的 ICTD 前沿技术体系;进而,探讨该体系在老井侧钻、超深/非常规井作业等关键场景中的应用与工艺进展;最后,基于我国技术发展面临的瓶颈,提出未来的重点攻关方向与发展建

议, 以期为我国智能连续管钻井技术的创新研究与产业升级提供参考。

2. 连续管钻井技术发展现状

连续管钻井(Coiled Tubing Drilling, CTD)技术作为一种高效、安全的特殊钻井工艺, 自上世纪后期进入油气工程领域以来, 经历了从辅助作业到主体技术、从常规钻井向智能钻井的变革。其发展脉络在全球范围内呈现“需求牵引、技术驱动”的特点, 但不同国家和地区基于资源、市场和政策的差异, 有着不同的发展方向, 形成了当前“总体趋同、局部差异”的竞争格局。

2.1. 国外连续管发展现状

以北美和欧洲为代表的国外 CTD 技术, 已有数十年发展历程, 其技术体系成熟, 应用场景广泛, 正向着智能化、高端化的方向发展。其发展呈现出以下特点:

技术演进方向清晰, 智能化特征显著。CTD 技术源于油田修井作业, 逐步拓展至钻井领域。当前, 国际顶尖油服公司(如斯伦贝谢、贝克休斯、哈里伯顿)及专业装备制造商(如国民油井海德瑞)正推动技术向“装备高端化、作业智能化、应用多元化”方向发展[3]。地面装备高度集成自动控制、传感与数据采集系统, 实现了“自动司钻”与闭环作业; 井下工具则形成了如 CoilTrak、VIPER 等高度集成的一体化智能钻具组合, 工具串长度可控制在 20 米以内, 集成了高速数据传输、随钻测井和精准导向功能[2]。

与清晰的技术演进相匹配的, 是其成熟的市场应用与强烈的经济性驱动。北美地区依靠其丰富的非常规油气资源, 将 CTD 技术发展为工厂化钻井、老井重入和欠平衡钻井的主流技术之一, 注重技术的实用性与经济性[4]。欧洲则在严苛的环保法规和高成本作业环境下, 聚焦于技术的安全性、可靠性与先进性, 在深水 CTD、自动化系统及尖端井下工具(如旋转导向系统 RSS)研发方面保持领先。

在坚实的技术与市场基础之上, 国外技术研发已不局限于传统的油气领域, 正积极探索在深水、超深井、地热以及枯竭油田精细化挖潜等复杂场景的应用。其技术储备雄厚, 在高速泥浆脉冲遥测(传输速率超 12 bps)、高造斜率旋转导向、耐高温大功率井下动力工具等核心领域已形成产业化优势。

2.2. 国内连续管发展现状

我国连续管技术在国家油气重大专项和非常规油气开发市场需求的强力驱动下, 实现了从技术引进、消化吸收到自主创新的跨越式发展, 目前正处于从“规模应用”向“高端智能”攻坚的关键转型期[2][3]。

在技术产业化与市场规模方面, 我国成就显著。以宝鸡石油钢管、江汉机械研究所、四川宏华等为代表的单位, 已实现常规连续管装备(如作业机、注入头、滚筒)的国产化与系列化, 产品主要性能达到国际先进水平, 并在国内形成了全球最大的连续管作业市场规模, 广泛应用于老井侧钻、钻塞、冲砂洗井等作业。

然而, 在核心技术自主与高端应用方面, 仍存在明显短板。国内 CTD 技术整体仍处于科研攻关与现场试验阶段。高端井下工具, 尤其是智能定向钻井系统, 严重依赖进口或处于“攒配”状态, 工具串冗长(常超过 120 米), 在通过性、可靠性和作业效率上与国外一体化短粗组合存在“代差”[3]。核心瓶颈体现在: 高速可靠的井下信息传输技术(泥浆脉冲)尚未突破; 适用于连续管的小尺寸、高造斜率旋转导向系统缺失; 集成化近钻头工程参数随钻测量工具不足。这使得国内作业仍以传统的“弯外壳螺杆 + 滑动钻进”为主, 难以实现高效的复合钻进与闭环控制。

2.3. 技术对比与差距分析

综上所述, 国内外 CTD 技术在发展阶段、技术重心和市场形态上均存在显著差异。为清晰呈现核心差距, 以下表 1 从四个关键维度进行系统对比:

Table 1. Comparison of core technology development levels in coiled tubing drilling (CTD) at home and abroad
表 1. 国内外连续管钻井(CTD)核心技术发展水平对比

对比维度	国外水平	国内水平	核心差距
装备体系	谱系化、智能化、专用化	基础装备国产化，型号单一	系列化与智能化不足
工具系统	一体化、短尺寸、高集成	组合冗长，高端依赖进口	集成度与可靠性代差
工艺软件	先进工艺成熟，专用软件齐全	借鉴常规工艺，专用软件缺失	缺乏专用设计与仿真工具
应用水平	大规模工业化，覆盖复杂场景	以中低难度作业为主，处于推广期	应用广度与深度有限

通过对比可见，我国 CTD 技术虽在市场规模和基础装备上奠定了坚实基础，但在以智能工具、专用软件为核心的“技术赋能”层面仍面临严峻挑战。未来的发展关键在于突破核心工具的系统性研发，并构建与之匹配的工艺与软件生态，从而实现从“规模应用”到“技术引领”的根本性跨越。

3. 智能连续管钻井前沿技术体系

智能连续管钻井(Intelligent Coiled Tubing Drilling, ICTD)技术体系的构建，旨在通过信息技术、自动化技术与传统钻井工程的融合，实现对钻井过程的全面感知、实时分析、自主决策与精准执行。该体系可解构为三个相互支撑、协同运作的层次：智能地面设备系统、智能井下工具系统及核心智能支撑技术。这一体系是响应高效、安全、经济开发复杂油气资源需求的必然产物，也是当前技术竞争的制高点。

3.1. 智能地面设备系统

智能地面设备是 ICTD 体系的地面控制单元与执行单元，其核心特征是高密度集成、全流程自动化与远程集中控制。该系统正从传统的机械化操作向数字化、网络化、智能化方向发展。

集成化智能钻机与“自动司钻”系统：构成智能控制的核心。现代连续管钻机已演变为高度集成的数字化工作平台。其核心是集成了可编程逻辑控制器(PLC)、工业计算机和数据采集与监视控制(SCADA)系统的中央控制室。通过安装在注入头、滚筒、泵组、防喷器组等关键部位的众多传感器(如压力、张力、位移、转速、温度传感器)，系统可实时采集作业全过程数据。“自动司钻”系统基于这些实时数据与预设的钻井参数模型(如最优钻压-钻速曲线)，通过闭环控制算法自动调节注入头的推拉速度与作用力、钻井泵的排量等关键参数，实现恒钻压、恒机械钻速等自动化钻进模式，极大减少人工干预，提升作业一致性、安全性与效率[1][5]。

在此智能化控制基础上，智能地面系统也集成了针对连续管特性的管柱自动化处理与健康管理工作。针对连续管特有的疲劳问题，智能地面系统集成了两大关键功能。一是智能排管与防碰撞系统，通过视觉识别或编码器定位，控制排管器引导连续管在滚筒上实现均匀、紧密地缠绕，避免乱管和局部应力集中。二是全生命周期疲劳管理，基于连续管的材质、作业历史(起下次数、弯曲半径、内压载荷等)，通过内置的疲劳预测模型(如基于人工神经网络的预测软件)实时计算并累计管柱的疲劳损伤，预测剩余寿命，为管柱的科学使用、更换决策提供量化依据，杜绝超寿命服役带来的断管风险[1][3]。

同时，一体化井控与安全监控系统构成了智能地面设备不可或缺的安全闭环。智能井控系统 will 将防喷器组、节流管汇、压井管汇的状态监控与动作控制集成于同一界面。系统能实时监测井口压力、返出流量等关键安全参数，一旦检测到异常(如压力骤升、溢流迹象)，可自动或经人工确认后启动预编程的关井程序，实现快速、可靠的应急响应。结合视频监控、气体检测与环境传感器，构成了覆盖作业现场全方位、多层级的主动安全防护网络[6]。

3.2. 智能井下工具系统

智能井下工具是 ICTD 体系的井下信息获取与动作执行单元,其发展正朝着集成化、短尺寸、高可靠和自适应方向突破,旨在解决传统连续管钻井在信息获取、导向控制和动力传递等方面的固有瓶颈。这三者构成了一个从“感知”到“控制”再到“执行”的完整能力链条。

高速信息感知与传输系统。这是实现井下智能化的前提。核心工具是高性能随钻测量(MWD)与随钻测井(LWD)系统。当前前沿集中于提升系统的耐温耐压能力(如 $>175^{\circ}\text{C}/140\text{ MPa}$)、测量精度与数据传输速率。国外先进的泥浆脉冲遥测系统传输速率已达 12 bps 以上,支持更多工程参数(近钻头钻压、扭矩、振动)和地质参数(伽马、电阻率)的实时上传[7]。同时,有缆连续管系统通过嵌入连续管内部的电缆或光纤,提供了近乎实时、高速率(兆比特级)的双向数据传输通道,为高清成像测井、随钻地震和复杂井下工具的精确控制提供了可能[2] [8]。可靠、高速的信息流,构成了后续一切智能控制与决策的数据基础。

基于实时获取的井下信息,自适应导向与精准轨迹控制系统得以发挥作用,成为提升钻井效率与储层钻遇率的关键。技术前沿体现为:小尺寸高造斜率旋转导向系统(RSS)。与传统的“弯外壳螺杆+滑动导向”模式相比,RSS 能够在钻柱连续旋转状态下实现井眼轨迹的连续、平滑、精准控制,显著提高机械钻速、延长水平段长度并改善井眼质量。适用于连续管的小尺寸(如 $\Phi 73\text{ mm}$ 以下)、高造斜率 RSS 是国际顶尖油服公司的核心技术,国内尚属空白[3] [9]。智能导向执行机构:集成传感器与微处理器,能根据地层反力、工具面指令自动调节导向力矢量,提高导向效率与稳定性[10] [11]。所以说导向系统是智能钻井实现轨迹精准控制的核心环节。

而为了确保导向指令能够有效执行,并克服连续管自身摩阻大、加压难的物理局限,高效动力与辅助推进系统提供了至关重要的机械保障。为解决连续管摩阻大、加压难的问题,智能井下动力工具在向大功率、耐高温、长寿命发展。大扭矩耐高温螺杆钻具和高效涡轮钻具是主要动力源,后者适用于高温深井[12]。智能牵引器(或爬行器)作为革命性辅助工具,能主动提供额外的轴向推力,有效克服长水平段或大位移井中的巨大摩阻,确保管柱和工具串能够抵达预定深度,极大扩展了连续管的作业半径[13] [14]。先进的牵引器已具备自主感知井壁条件、调节夹持力与推进力的初步智能[15]。动力与推进系统最终将控制指令转化为有效的机械破岩与管柱推进动作,是完成作业任务的直接保障。

3.3. 核心支撑技术

核心支撑技术是连接智能地面与井下系统、驱动整个 ICTD 体系运行的关键算法与数据基础,其智能化水平直接决定了整个体系的上限。

井下信息高速可靠传输技术。这是制约国内 ICTD 发展的最大瓶颈。前沿研究聚焦于新一代高速泥浆脉冲遥测,通过优化编码方式、信号调制与解码算法提升速率与抗干扰能力;电磁波随钻测量技术,作为泥浆脉冲的补充,在特定地层条件下提供另一种传输路径;光纤随钻测量技术,通过集成于连续管或特殊钻具中的光纤,实现超高速率、低延迟的数据传输,是未来实现海量井下数据实时回传的重要方向[16] [17]。

在解决了信息传输问题的基础上,数字孪生与钻井智能决策技术构成了核心智能的进阶层。基于物理模型、实时数据与人工智能算法,构建井筒-管柱-工具系统的数字孪生体。该孪生体能够实时模拟和预测钻井过程,包括管柱力学行为、摩阻扭矩、水力参数、工具性能及地层响应等。在此基础上,智能决策系统利用机器学习、优化算法对实时数据与模拟结果进行分析,实现钻井参数的自主优化、机械钻速的智能预测、井下复杂情况(如卡钻、井漏)的早期预警与处理方案推荐,从而形成“感知-分析-决策-执行-优化”的闭环智能钻井流程[18] [19]。

为了将上述的技术能力整合并付诸工程实践,一体化软件平台与云边协同技术提供了必要的系统性框架。将分散的设计、模拟、监控、分析软件模块集成于统一的智能钻井软件平台,实现数据流、业务流的无缝衔接。结合“云-边-端”协同架构:云端平台负责海量历史数据存储、宏观模型训练与远程专家支持;井场边缘服务器负责实时数据处理、快速模拟与本地智能控制;井下端设备负责数据采集与即时响应。这种架构既保证了核心算法的强大算力,又满足了井下控制的低延迟要求,是实现远程作业支持、多井协同优化的技术基础[16]。

体系特征总结:智能连续管钻井前沿技术体系呈现出鲜明的“感-传-知-控”一体化特征。通过智能地面系统实现集中监控与自动执行,通过智能井下系统实现精准感知与动态操作,再通过核心支撑技术实现数据贯通与智能决策,三者共同构成了一个能够自适应复杂工况、不断优化作业性能的有机整体。这一体系的成熟与普及,正是将连续管钻井从一种高效作业手段,升级为一种智能化油气开发解决方案的标志。

4. 关键技术应用与工艺进展

智能连续管钻井前沿技术体系的建立,其价值在于解决传统钻完井作业中的瓶颈问题,并拓展工程能力的边界。当前,其关键技术正从理论研究和室内试验,快速走向现场实践,在老油田挖潜、深层非常规资源开发及智能化施工等核心领域展现出显著优势与潜力。

4.1. 老井侧钻

老井侧钻是连续管技术具有经济优势的应用场景之一。其核心理念是利用连续管无需接单根、带压作业能力强、占地面积小的特点,通过原井筒进行开窗或裸眼侧钻,快速、低成本地构建新的泄油通道。

智能化工艺的融合正在提升该技术的精准度和效率。传统侧钻主要依赖于经验导向,而当前前沿工艺强调:

精准开窗与轨迹控制,通过采用一体化智能侧钻工具串,集成高性能随钻测量(MWD)和地质导向(LWD),实时监测井斜、方位及地层伽马值,确保精准开窗并引导钻头在目标储层中穿行[20]。国内在马5斜-1井等实践中已验证连续管裸眼侧钻技术的可行性,但整体上仍大量使用常规钻具组合,智能化水平有待提高。

在实现精准轨迹控制的同时,高效破岩与环空清洁是保障侧钻作业连续、安全进行的关键配套环节。针对小井环空间隙小、岩屑携带困难的特点,应用低扭矩、高机械钻速的个性化PDC钻头(如针对地层优化的切削结构),配合优化的钻井液流变学参数和井筒水力参数,有效解决卡钻风险[21][22]。同时,集成井下液压或机械式震击器、水力振荡器等减阻工具,已成为应对水平段摩阻的常规手段[23][24]。

基于前述核心与配套技术的进步,工艺集成与优化成为提升侧钻整体经济效益的重要发展方向。发展趋势是形成标准化的“连续管开窗+小井眼定向钻进+完井”一体化作业流程。例如,采用连续管输送可回收式斜向器进行开窗,随后下入连续管可钻桥塞进行分段完井,大幅减少动用大型钻机的时间和费用,特别适用于城区、滩海等受限区域的老井改造[25]。

4.2. 超深/非常规井作业:拓展工程能力边界 10

在超深井、页岩气超长水平段等极端工况下,智能连续管技术正成为突破常规作业极限的核心手段。

超深井桥塞与复杂处理。在超过6000米的页岩气井中进行压裂后桥塞钻磨,面临高温(>150℃)、高压、管柱摩阻大、井筒清洁难等挑战。前沿应用采用大直径高强度连续管(如CT150钢级,强度超1100MPa)搭配大功率耐高温螺杆钻具,提升管柱下入能力和动力工具可靠性[1][26]。工艺上,创新采用“单趟多塞”钻磨模式,结合精细化的钻井液性能实时调整与排量控制,创造了国内6811米连续管钻塞最深

施工纪录，证明了其在超深井复杂处理中的技术能力。

在克服超深井作业挑战的同时，针对水平段超过 2000 米的超长水平井，其作业辅助技术也面临着不同的难题。在水平段超过 2000 米的井中，连续管自身重量难以有效传递至钻头，需要智能牵引器(爬行者)提供额外推力。新一代牵引器具备自适应井壁条件、调节夹持力的功能，能有效保障工具串抵达井底[14]。同时，连续管与柔性钻具组合相结合的超短半径钻井技术，为实现老井筒周围剩余油的高精度挖潜提供了新路径[6]。

进一步地，在确保工具能够抵达目标位置的基础上，非常规储层高效改造技术则聚焦于提升储层动用效率与作业经济性。连续管技术在压裂作业中扮演着“高效物流”和“精准定位”的角色。通过连续管进行底封拖动分段压裂，可实现一趟管柱多段作业，单段作业时间可缩短至 1.5~2 小时，效率提升显著。此外，连续管也是输送可溶桥塞、进行超临界 CO₂ 喷射钻井等前沿改造技术的理想管柱[27] [28]。

4.3. 智能化工艺

智能化工艺是智能连续管钻井技术体系落地的集中体现(表 2)，其核心是数据流与工作流的深度融合。

Table 2. Typical intelligent process features and applications of intelligent coiled tubing drilling

表 2. 智能连续管钻井典型智能化工艺特征与应用

工艺环节	核心技术	核心功能	典型场景
智能导向	旋转导向(RSS) + 地质导向	旋转状态精准控轨，提高钻遇率	薄储层、复杂构造水平井
参数优化	近钻头测量 + 智能决策	动态优化参数，实现高效钻进	工厂化钻井，“自动司钻”
风险预警	数字孪生 + 数据分析	预测风险，智能处置	复杂结构井风险管控
远程作业	云边协同 + 高速传输	远程监控与专家支持	偏远地区、恶劣环境钻井

4.4. 应用案例剖析

(1) 中石化江汉石油工程公司侧钻实践：在马 5 斜 - 1 井成功实施连续油管裸眼侧钻，完成了从开窗到水平段钻进的全过程，取得了控压钻井、超薄水泥塞侧钻等多项技术成果。该案例表明，我国已掌握连续管侧钻的核心工艺，但工具组合的集成度和智能化水平与国外顶尖技术相比仍有提升空间。

(2) 超深页岩气井桥塞的突破：在四川泸 211 井(井深 6880 米)成功进行深度达 6811 米的桥塞钻磨作业。该案例综合运用了高强度连续管、耐高温钻磨工具和优化的钻井液工艺，突破了超深、高温带来的技术瓶颈，为同类资源的有效开发提供了技术范本。

总结而言，智能连续管钻井的关键技术应用正沿着“提升常规作业效率→攻克极端工况难题→实现工艺流程智能化”的路径深化发展。国内已在规模化应用和特定复杂作业中取得突破性进展，但在以高精度旋转导向、井下参数实时闭环调控、全流程数字孪生为代表的尖端智能化工艺方面，仍处于追赶和试验阶段。未来，工艺技术的突破将与智能工具系统的研发相辅相成，共同推动连续管钻井从一种特种作业手段，向主力智能化钻井方式演进。

5. 我国智能连续管钻井的挑战与发展方向

我国智能连续管钻井(ICTD)技术虽在市场规模与应用广度上取得了进步，但通过对发展现状、技术体系与应用工艺的分析可知，其整体水平与国际领先水平仍存在系统性差距。当前正处于从“规模应用”向“高端智能”转型的攻坚期，既面临严峻挑战，也拥有在特定领域实现跨越式发展的战略机遇。明确瓶颈所在并规划清晰的发展方向，对于推动我国 CTD 技术自立自强、支撑复杂油气资源高效开发至关重要。

5.1. 技术瓶颈与挑战

我国 ICTD 技术的发展,其瓶颈呈现出由表及里、层层制约的特征。最直接的表现是核心智能工具的“卡脖子”问题,其背后则显现出专用软件与数字生态的基础性薄弱,而更深层次的制约则源于技术体系化与标准化建设的滞后。

核心智能工具自主化水平低,构成最直接的发展障碍。这集中体现在三个关键环节,首先,井下信息传输是瓶颈中的瓶颈。高速、高可靠的泥浆脉冲遥测技术尚未突破,数据传输速率和稳定性低于国外先进水平(8~12 bps 及以上),导致随钻测井、高清成像等大数据应用难以实时化,使闭环智能控制缺乏数据基础[2] [3]。其次,高端执行工具依赖进口。适用于连续管的小尺寸、高造斜率旋转导向系统(RSS)缺失,使得国内作业停留在效率较为低下的“弯外壳螺杆 + 滑动钻进”模式[9];同时,耐高温大扭矩螺杆/涡轮钻具、大推力智能牵引器等关键工具在可靠性与寿命上存在差距[1] [12]。

更深一层看,工具层面的短板存在于专用软件与数字生态的基础性薄弱。硬件工具的自主创新离不开强大的“软实力”支撑,而我国在此领域存在空白。一方面,核心工程软件缺失。国内严重缺乏连续管钻井专用的设计、仿真、优化及管柱疲劳寿命管理等软件,导致作业设计长期依赖经验和常规钻井软件,缺乏精准的理论指导与前瞻性风险预测能力[3]。另一方面,智能决策系统尚处萌芽。尽管在机器学习预测钻速等方面已有探索[15] [19],但能融合地质、工程、工具数据,实现全流程实时仿真与自主决策的一体化智能系统尚存在不足之处[16]。

上述技术要素“碎片化”的根源,可以归结为技术体系化与标准化建设的系统性滞后。这导致了创新链条的脱节与低效。在系统集成层面,由于缺乏统一的数据接口、控制协议与机械规格标准,不同单位研发的设备与工具难以像国外 CoilTrak 系统那样高度集成、协同作业[2]。在创新基础层面,对连续管疲劳机理、工具-地层动态作用等基础科学问题研究不足,同时缺乏国家级综合试验平台,使得新产品从实验室到现场应用的路径长、风险高,制约了技术的快速迭代。

5.2. 未来发展方向与攻关重点

为突破上述瓶颈,实现 ICTD 技术的自主可控与高质量发展,可以从攻克具体硬件瓶颈,到构建配套软件生态,再到优化创新体系,并最终拓展应用价值的方向进行努力。

实施核心智能工具攻关工程,打破国外垄断。这是解决当前最紧迫“卡脖子”问题的首要任务。需集中优势资源,优先突破最具战略性的关键技术:首要目标是突破高速井下信息传输,设立专项攻关新一代高速泥浆脉冲遥测技术,并同步探索电磁波、光纤等替代传输技术的工程化应用,以实现稳定、可靠的 12 bps 以上传输能力,打通智能钻井的数据通道[17]。与此同时,研发小尺寸高造斜率旋转导向系统(RSS),将其作为首要任务,联合产学研力量攻克导向机构、测量短节和闭环控制算法,研制出适用于 $\Phi 73$ mm 及以下连续管的国产 RSS 样机并开展试验[10]。同时,还需提升高端执行工具的可靠性,发展耐 200℃ 以上高温的动力钻具和大吨位智能牵引器,并通过强化关键部件的测试来保障其使用寿命,以满足超深井和非常规资源开发的需求。

在全力突破核心工具的同时,构建自主可控的软件与数字生态也具有同等重要的战略地位。硬件能力的释放离不开强大软件的支撑。一方面,开发国产专用工程软件套件,研发涵盖连续管钻井设计、力学分析、水力计算、疲劳管理、轨迹控制的专业化软件,形成自主知识产权体系。另一方面,需建设智能钻井数字孪生平台,整合地质建模、钻井仿真、实时数据与 AI 算法,构建“井筒-管柱-工具”系统的数字孪生体,重点开发基于机器学习的参数优化与风险预警模块,推动作业从“经验驱动”向“数据与模型驱动”的根本转变[18] [29]。

为实现上述工具与软件技术的有效整合与产业化应用,需要同步推动技术体系化、标准化与协同创新。这涉及创新环境的构建。首先要制定统一的技术标准与接口规范,由行业主导联合主要厂商,制定地面与井下装备的数据通信、机械接口、安全控制等标准,以促进装备互联互通和系统集成[30]。其次,要打造产学研用协同创新平台,建设具备全尺寸、全流程试验能力的国家级 ICTD 研发与试验中心,鼓励组建创新联合体,围绕共同目标开展从基础研究到现场试验的全链条合作,以加速创新成果的转化[1][3]。

在夯实核心技术基础与创新体系之后,拓展应用领域与探索前沿交叉将成为驱动技术持续发展与价值最大化的关键。这标志着技术成熟后的自然延伸。应积极拓展非常规与新能源应用,将 ICTD 技术应用于煤层气开发、干热岩地热钻井、地下储气库建设与维护等新兴领域,开辟新的市场空间。同时,主动探索前沿交叉技术,研究连续管技术与超临界 CO₂ 钻井、等离子体破岩等前沿方向的结合点,储备颠覆性技术,以抢占未来技术制高点[31][32]。

总之,我国智能连续管钻井技术的发展,必须坚持“核心工具自主化、软件生态国产化、技术体系标准化、应用场景多元化”的战略方针。唯有通过持之以恒的系统性创新与产业协同,方能将市场规模优势转化为技术领先优势,最终实现从技术跟跑、并跑到领跑的历史性跨越,为我国能源安全与工程技术进步提供坚实支撑。

6. 结论

智能连续管钻井(ICTD)作为传统钻井技术向数字化、智能化演进的重要分支,正改变着复杂油气资源开发的作业模式与经济范式。本文通过系统梳理其技术发展现状、前沿技术体系、关键应用工艺,并结合我国实际剖析了面临的挑战,旨在为 ICTD 技术的持续创新与产业升级提供清晰的认知框架与发展思路。通过对智能连续管钻井技术的全景式分析,可以得出以下核心结论:

(1) 技术发展呈现“应用牵引”与“智能驱动”的双轨特征。全球范围内,北美以市场规模和经济性驱动技术快速迭代,欧洲则以高端装备和安全性引领技术创新。我国通过国家战略与市场需求的结合,实现了在常规装备和规模化应用上的后发追赶,建立了全球最大的作业市场,但在代表技术制高点的核心智能工具与软件生态上,仍与国际顶尖水平存在系统性、代际性差距。

(2) 前沿技术体系已形成“感-传-知-控”一体化架构。现代 ICTD 技术已超越单一工具革新,发展成为由智能地面设备(指挥中枢)、智能井下工具(感知执行末端)和核心支撑技术(数据与决策大脑)构成的复杂系统。其中,高速信息传输、旋转导向系统(RSS)、数字孪生与智能决策等技术的成熟度,直接决定了整个系统的智能化水平与应用边界[17][18]。

(3) 技术价值在老井挖潜与极端工况作业中凸显。ICTD 技术在老井侧钻、超深页岩气井钻塞、超长水平段辅助钻进等场景中,展现出高效、安全、经济的独特优势。国内已在上述领域取得多项突破性应用纪录,证明了技术的可行性。然而,这些应用多数仍建立在解决“有无”问题或依托高强度材料的基础上,在工艺智能化、精细化层面,如基于实时地质模型的自动导向、钻井参数的自主闭环优化等方面,仍有巨大提升空间[6]。

(4) 我国发展的核心瓶颈在于自主创新链的薄弱环节。当前,制约我国 ICTD 迈向高端的关键,并非单一设备,而在于核心智能工具(如高速 MWD、小尺寸 RSS)、专用工业软件(设计、仿真、决策)以及技术标准与体系集成能力的缺失。这些瓶颈相互关联,导致国产化工具“不好用、不配套”,难以形成高效协同的整体解决方案[2][3]。

要突破上述瓶颈,需锚定智能化与集成化方向,走出一条符合国情的跨越路径。未来技术将向全流程自主决策与装备深度一体化方向发展。对我国而言,首要任务是集中攻克核心智能工具与专用软件,

构建自主的数据通道与决策核心[17][18]。进而推动技术体系化与标准化,通过统一标准与协同创新,打造集成高效的国产化系统[21][30]。最终实现应用场景的极限拓展与绿色转型,从深层非常规油气向地热、深海等新的领域发展,并通过电驱化与精准化实现可持续发展[31][33]。因此,将市场应用优势通过“核心工具自主化、软件生态国产化、技术体系标准化”的系统性攻关,转化为技术定义与产业引领优势,从而不仅满足国内能源安全需求,更能在全球工程技术竞争中占据主动。

参考文献

- [1] 李寅,尹方雷,白冬青.连续管钻井技术研究进展及应用[J].焊管,2023,46(7):71-75.
- [2] 刘寿军,于东兵,王刚庆,等.有缆连续管钻井系统在侧钻水平井中的应用现状[J].石油机械,2018,46(10):1-5.
- [3] 张帅,张燕萍,郭慧娟.国内外连续管钻井技术发展现状[J].石油矿场机械,2019,48(6):77-82.
- [4] 张富强,刘寿军,段文益,等.国外连续管钻井系统发展与应用[J].石油矿场机械,2017,46(6):11-15.
- [5] 杨传书,张好林,肖莉.自动化钻井关键技术进展与发展趋势[J].石油机械,2017,45(5):10-17.
- [6] 武晓光,黄中伟,李根生,等.“连续管+柔性钻具”超短半径水平井钻井技术与现场试验[J].石油钻探技术,2022,50(6):56-63.
- [7] 龚建凯.连续管开窗工艺技术辽河油田侧钻井中的应用[J].钻采工艺,2020,43(4):121-124.
- [8] 宿振国.敷缆复合材料连续管结构设计性能评测研究[D]:[硕士学位论文].青岛:中国石油大学(华东),2014.
- [9] 吴怡,庞照宇,宋先知,等.中国海油海上智能钻井导航系统关键技术进展与发展思考[J].石油钻探技术,2025,53(5):1-12.
- [10] 王维,卓然,苗强,等.连续管钻井定向器助力矢量控制不确定性分析方法[J].石油机械,2025,53(8):1-10.
- [11] 朱玉杰,胡亮,贾朋.连续管钻井电动定向器齿轮传动设计与试验[J].石油钻探技术,2025,53(2):97-106.
- [12] 汪皖.连续管钻井井下双马达旋转管柱钻井系统研究[D]:[硕士学位论文].荆州:长江大学,2019.
- [13] 李猛,贺会群,辛永安,等.基于概率理论的连续管钻井调整工具体扭预测方法研究[J].长江大学学报(自然科学版),2016,13(10):61-71,4.
- [14] 许冲.液控液驱连续管钻井牵引器设计研究[D]:[硕士学位论文].青岛:中国石油大学(华东),2016.
- [15] 白佳帅,钟尹明,王立伟,等.机理-数据融合的造斜率智能预测方法[J].石油机械,2025,53(5):1-9.
- [16] 李昌盛,张乐,孙华凯,等.基于云边协同的钻井智能分析决策系统[J/OL].石油钻探技术:1-15.
<https://link.cnki.net/urlid/11.1763.TE.20251110.1530.002>,2026-01-16.
- [17] 靳军宝,郑玉荣,付爽,等.全球智能钻井关键技术发展态势分析[J].现代化工,2025,45(S2):12-16,25.
- [18] 王敏生,孙旭东,张洪宝,等.智能钻井的井场-后方决策闭环设计与应用[J].石油钻探技术,2025,53(4):15-23.
- [19] 刘庆山,刘坤,于骁逸,等.基于人工智能的地质工程一体化钻井优化系统构建与应用[J].录井工程,2025,36(2):1-6.
- [20] 杨育升.连续管侧钻井下定向器的研制及应用[J].石油机械,2022,50(8):40-45.
- [21] 况雨春,陈亚轩,杨高,等.连续管钻井低扭矩钻头破岩机制及仿真[J].中国石油大学学报(自然科学版),2025,49(6):107-115.
- [22] 杨高.连续管钻井个性化PDC钻头降扭机理及试验研究[J].石油机械,2024,52(4):33-40.
- [23] 苗芷芑,王洪涛,李俊胜,等.连续管钻井震击工具的研制及室内试验评价[J].辽宁化工,2021,50(4):566-568.
- [24] 苗芷芑,夏宏南,童启金,等.连续管钻井震击工具的设计及研究[J].石油机械,2019,47(5):56-60.
- [25] 董方平,吴永兴,乔志才,等.新型连续管侧钻装备可行性研究[J].石化技术,2023,30(1):115-117.
- [26] 汪海涛,张鹏,罗源,等.钻井用大直径高强度连续管性能分析[J].焊管,2020,43(2):22-26.
- [27] 贾涛,张燕萍,吴千里.连续管侧钻技术的研究及现场试验[J].石油机械,2017,45(7):30-33.
- [28] 张琳,胥豪,牛洪波,等.超临界二氧化碳钻井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(4):10-13.
- [29] 查文勇.基于数据驱动的油气钻井作业参数优化决策研究[D]:[硕士学位论文].成都:电子科技大学,2025.

-
- [30] 宋殿光, 张德军, 马慧斌, 等. 油气钻井智能装备现状及发展趋势[J]. 石油管材与仪器, 2025, 11(5): 1-13.
- [31] 王敏生, 光新军. 高压水射流钻完井技术进展及发展思考[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(5): 173-179, 185.
- [32] 光新军, 王敏生, 皮光林. 超高压水射流钻井技术现状及发展建议[J]. 钻采工艺, 2017, 40(1): 37-40, 7.
- [33] 于东兵, 黄名召, 刘寿军, 等. 连续管钻井系统海洋应用现状[J]. 辽宁化工, 2019, 48(4): 342-345.