

连续管钻井定向器定向技术研究进展

朱俊鑫, 张露西, 韩明家, 谢莹娜, 况梅, 潘家宏, 杨帅彤, 李猛

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年8月18日; 录用日期: 2026年9月14日; 发布日期: 2026年9月23日

摘要

连续管钻井技术是开发深层及非常规油气资源的重要手段, 但管柱无法旋转的特性使其井下定向钻进面临严峻挑战。本文从定向器执行机构的结构与驱动、运动学与动力学建模、轨迹跟踪控制策略、参数优化与验证方法四个层面, 系统梳理了连续管钻井定向器定向技术的研究进展。综述表明, 定向器驱动方式正从液控式向电液控式和电控式方向演进; 建模方法已从确定性几何描述拓展至考虑多源参数不确定性的概率统计分析; 控制策略正从依赖人工经验向智能闭环控制方向发展。然而, 当前研究在建模-控制一体化、多目标优化稳定性约束以及井下复杂工况验证等方面仍存在明显不足。本文旨在为该领域后续研究及工程应用提供参考。

关键词

连续管钻井, 定向器, 轨迹控制, 工具面控制

Research Progress on Orientation Technology of Orientators for Coiled Tubing Drilling

Junxin Zhu, Luxi Zhang, Mingjia Han, Yingna Xie, Mei Kuang, Jiahong Pan, Shuaitong Yang, Meng Li

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

Received: August 18, 2026; accepted: September 14, 2026; published: September 23, 2026

Abstract

Coiled tubing drilling serves as a vital technology for the exploitation of deep and unconventional oil and gas resources. However, the inherent non-rotatable property of coiled tubing strings creates formidable obstacles for downhole directional drilling operations. This paper systematically reviews

文章引用: 朱俊鑫, 张露西, 韩明家, 谢莹娜, 况梅, 潘家宏, 杨帅彤, 李猛. 连续管钻井定向器定向技术研究进展[J]. 矿山工程, 2026, 14(5): 1383-1392. DOI: 10.12677/me.2026.145137

the research progress of orientation technologies for coiled tubing drilling orientators from four dimensions: the structural design and driving modes of orientator actuators, kinematic and dynamic modeling, trajectory tracking control strategies, and parameter optimization and verification methodologies. The review reveals three developmental trends: the driving schemes of orientators are evolving from purely hydraulic control to electro-hydraulic control and full electric control; modeling approaches have expanded from deterministic geometric characterization to probabilistic statistical analysis that accounts for multi-source parametric uncertainties; control strategies are transitioning from manual experience-dependent adjustment to intelligent closed-loop control. Nevertheless, existing research still suffers from conspicuous limitations, including insufficient integration of modeling and control, incomplete stability constraints for multi-objective optimization, and inadequate experimental validation under complex downhole operating conditions. This paper intends to offer theoretical and practical references for follow-up research and field engineering applications within this discipline.

Keywords

Coiled Tubing Drilling, Orientator, Trajectory Control, Tool Face Control

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

随着常规油气资源减少, 深层及非常规油气藏开发对钻井技术提出更高要求。连续管钻井因效率高、占地小、可欠平衡作业等优势, 成为国际公认的前沿技术。然而, 受下入方式限制, 连续管无法在井内旋转, 导致定向困难, 严重制约其推广。不同于常规旋转钻井, 连续管只能依靠定向器调整工具面来实现井下定向, 由此面临工具面调整难、井下参数不确定导致控制精度下降、狭小空间限制执行机构设计等独特挑战。近年来, 国内外围绕连续管钻井定向器的结构设计、运动学建模、轨迹控制及参数优化开展了大量研究并取得重要进展。本文从执行机构结构与驱动、运动学与动力学建模、轨迹跟踪控制策略及参数优化与验证方法四个层面, 系统综述连续管钻井定向器定向技术的研究进展, 分析技术瓶颈并展望发展方向, 以期为该领域深入研究与工程应用提供参考。

2. 连续管钻井定向器定向核心技术研究进展

连续管钻井定向器定向技术是实现井下轨迹控制的核心技术体系, 主要用于克服连续管无法旋转所带来的工具面调整难题, 保障井眼轨迹的精确控制。根据研究侧重不同, 该领域的技术内容可分为定向器执行机构的结构与驱动技术、运动学与动力学建模方法、轨迹跟踪控制策略以及参数优化与验证方法四个方面, 各方面所解决的关键问题与研究手段各有侧重, 相互之间构成从硬件设计到控制实现再到性能验证的完整技术链条。下面将从这四个层面, 系统综述连续管钻井定向器定向技术的研究进展。

2.1. 定向器执行机构结构与驱动技术

定向器执行机构是连续管钻井定向技术的物理载体, 其结构与驱动方式决定了定向作业的精度、响应速度及环境适应性。从技术演进脉络来看, 定向器驱动方式经历了从液控式到电液控式、再到当前电控式的发展历程如图 1。

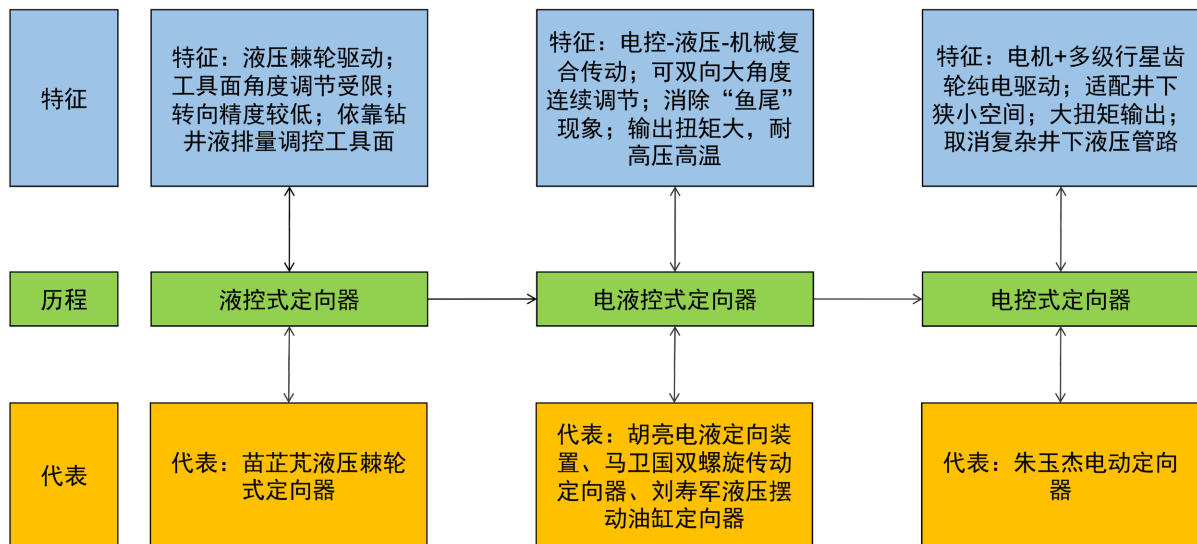


Figure 1. Block diagram of the evolution of coiled tubing drilling orientator technology
图 1. 连续管钻井定向器技术演进框图

为突破连续管无法旋转所导致的定向难题，学者们围绕定向器执行机构开展了大量研究。胡亮等[1]设计了电液定向装置，通过电控-液压-机械传动方式调整工具面，建立液压驱动系统动态特性模型，为机械传动与液压系统的优化提供了理论依据。在此基础上，苗芷芃等[2]针对液压棘轮式定向器转向精度低且角度不可调的缺陷，研制了转角可调范围 5° 到 30° 的新型液压定向器，地面测试表明该工具能根据排量变化实现工具面角的有效调整。为进一步提升调整精度与效率，马卫国等[3]设计了电液双螺旋传动定向器，可在 0° 到 360° 范围内逆时针调整工具面，推导出活塞位移与工具面角度的函数关系，实现了连续双向定向并消除了“鱼尾”现象。与此同时，朱玉杰等[4]针对狭小空间与大扭矩需求的矛盾，开发了基于大扭矩电机与多级行星齿轮减速器的电动定向器，实际承载能力超过 $800\text{ N}\cdot\text{m}$ 、瞬时可达 $1260\text{ N}\cdot\text{m}$ 。上述研究实现了从液控式向电液控式、电控式的技术跨越，为后续控制策略研究奠定了基础。

在有缆连续管钻井系统方面，刘寿军等[5]分析了有缆连续管钻井系统在侧钻水平井中的应用现状及其关键工具发挥的重要作用，介绍了有缆钻井系统在套管开窗和地层水平钻进中的典型应用实例。基于液压摆动油缸原理，研究者设计了可连续旋转、精度高且结构简单的连续管侧钻井下定向器，最大工作扭矩达 $1500\text{ N}\cdot\text{m}$ ，可实现 $\pm 200^{\circ}$ 双向旋转调整工具面角，满足井温 120°C 、压差 35 MPa 以内的施工井况。室内试验及现场2井次应用表明，该旋转定向装置实现了对井眼轨迹的实时测量以及工具面的有效调整。研究者进一步指出，定向工具发展历程以及有缆连续管钻井系统在老井欠平衡钻井作业中发挥着重要作用，连续管直径并非限制国内侧钻水平井发展的决定因素，应当加快开发侧钻水平井的有缆连续管钻井系统。贺会群[6]系统总结了连续管钻井技术的系统构成和技术特点，认为此项技术的最佳应用点是应用欠平衡工艺实施老井加深和过油管侧钻。研究分析归纳了连续管钻机的典型结构型式，指出连续管钻机的种类繁多、个性化特征鲜明，完全采用连续管钻井技术钻新井时钻深会受到很大限制，但采用连续管钻井技术和欠平衡工艺进行老井重入加深、老井重入钻水平井和过油管侧钻将在油田增产、难动用储量开采等方面发挥积极作用，为定向器技术的工程应用提供了装备基础。

定向器执行机构正朝着高精度电驱动、高稳定性电液驱动与大扭矩液压驱动等多元化方向并行发展如表1。然而，当前研究仍集中于静力学设计与结构参数优化层面，对执行机构在动态工况下的响应特性关注不足，这为后续控制策略的研究留下了空间。

Table 1. Comparison table of technical parameters for coiled tubing drilling orientators for different drive configurations
表 1. 不同驱动形式连续管钻井定向器技术参数对比表

类型	代表文献	输出扭矩	调节范围	耐温能力	优缺点
液控式	苗芷芄等[2]新型液 压定向器	/	5°~30°	/	优点：可根据排量变化实现工具面 角有效调整；缺点：早期液压棘轮式 定向器转向精度低、角度不可调
液控式	刘寿军等[5]液压摆 动油缸式定向器	最大 1500 N·m	±200°双向旋转	120℃	优点：可连续旋转、精度高、结构简 单，可实现工具面有效调整；缺点： 需配套有缆连续管钻井系统，应用 场景有一定限制
电液控式	胡亮等[1]电液定向 装置	/	/	/	优点：采用电控-液压-机械传动方 式，为机械传动与液压系统优化 提供理论依据；缺点：未解决角度连 续可调、精度提升的核心痛点
电液控式	马卫国等[3]电液双 螺旋传动定向器	/	0°~360°逆时针 连续调整	/	优点：可实现连续双向定向，消除 “鱼尾”现象，推导了活塞位移与 工具面角度的函数关系，提升了调 整精度与效率；缺点：无明确耐温、 扭矩参数披露
电控式	朱玉杰等[4]电动定 向器	承载超 800 N·m， 瞬时 1260 N·m	/	/	优点：解决了狭小空间与大扭矩需 求的矛盾，承载能力强；缺点：未披 露工具面调节范围、耐温能力参数

2.2. 定向器执行机构运动学与动力学建模方法

定向器执行机构的精确建模是实现高精度轨迹控制的理论基础。由于连续管钻井过程中井下参数存在一定的不确定性，建立能够准确描述定向器运动学与动力学行为的数学模型，对于控制策略的设计与优化至关重要。

在连续管钻井定向器的运动学与动力学建模方面，学者们围绕工具面调整精度与轨迹控制有效性开展了系统研究。李猛等[7]应用空间圆弧轨迹矢量描述方法，建立了滑动螺母位移与工具面角度的函数模型，揭示了 0°到 360°范围内二者呈“折线”关系的运动规律。在此基础上，进一步以圆弧扭方位计算模式为理论基础，建立了工具面角度计算模型及液压缸控制数学模型，为实时精确摆正工具面提供了理论依据[8]。面向肋式定向器，邢志晟等[9]结合最小能量原则建立了偏置位移矢量模型，提出了分位移矢量计算方法，并建立了纠偏过程中“定向模式”及“保持模式”的肋位移控制方案。与此同时，房军等[10]提出了可控偏心垫块方法，采用纵横弯曲连续梁法建立了 BHA 导向性能力学模型，揭示了偏心位移与钻头井斜力、方位力之间的线性关系。针对纠偏轨迹设计，Li 等[11]基于微分几何原理构建了三段式纠偏轨道模型，建立了肋位移矢量控制方案，现场试验验证了“定向钻进模式”与“保持钻进模式”的可行性。进一步考虑井下参数不确定性，王维等[12]基于纵横弯曲梁理论构建了 BHA 三维受力模型，结合概率统计方法建立了助力矢量置信区间模型，揭示了钻压与 1#肋工具面角的随机性是影响控制精度的主要因素。上述研究实现了从确定性几何建模向不确定性概率分析的拓展，为轨迹控制提供了理论基础。

Li 等[13]针对井下参数不确定性，基于纵横弯曲梁原理构建了连续管钻井 BHA 三维力学模型，分析了定向器肋出力方向与工具面角的空间几何关系，建立了综合导向合力矢量模型。应用最小能量原则探

究了各肋出力的传统控制方案并揭示了其复杂变化规律。通过统计分析获得肋出力二维随机变量的概率密度函数和累积概率函数，构建了置信区间模型。现场验证结果表明，钻压和1#肋工具面角的随机性是影响出力控制不确定性的主要因素，当肋出力矢量超出不确定性置信区间时，实际井眼轨迹显著偏离设计轨迹；反之，两者误差显著减小。Li 等[14]考虑到井下多源参数的随机性，提出了基于不确定性分析的定向载荷预测方法。基于梁柱理论引入概率统计理论，统计了主要参数的分布形式，推导了连续管钻井中泵停和泵开状态下定向载荷预测模型的概率密度函数和累积概率函数。研究发现对数正态分布与定向载荷概率函数具有更好的相关性。现场试验结果表明，钻压、钻柱与井壁/套管间摩阻系数以及工具面角的随机性是影响连续管钻井定向载荷不确定性的主要因素。采用不确定性方法预测的定向载荷并非单一曲线或单一值，而是具有一定置信水平的区间，区间宽度由参数信息的精度和准确度决定如表 2。

Table 2. Comparison table of orientator dynamics modeling methods
表 2. 定向器动力学建模方法对比表

建模方法	理论基础	适用条件	局限性	代表文献
确定性几何模型	空间圆弧轨迹矢量描述方法；最小能量原则；微分几何原理	参数确定、工况理想的条件下，用于描述工具面角与机构位移的几何关系、纠偏轨迹设计	未考虑井下参数随机性，无法反映实际钻井中钻压波动、摩阻变化等因素对建模精度的影响；模型保真度有限	李猛等[7] [8]；邢志晟等[9]
纵横弯曲梁模型	纵横弯曲连续梁理论；BHA 三维受力分析	用于分析定向器肋出力与钻头侧向力的关系，适用于导向能力评估与偏心位移控制	仍属于确定性建模范畴，对钻压、摩阻系数等参数的随机波动缺乏概率化描述	房军等[10]；Li 等[11]
概率统计不确定性模型	纵横弯曲梁理论；概率统计方法(概率密度函数、累积概率函数、置信区间)；梁柱理论	适用于井下多源参数随机性显著(如钻压波动、摩阻变化、工具面角偏差)的工况，用于定向载荷区间预测与助力矢量可靠性评估	计算复杂度较高；模型精度受参数先验分布准确性影响；与控制器的集成尚未形成统一框架	王维等[12]；Li 等[13] [14]

然而，当前建模工作与控制器设计之间存在一定程度的脱节——运动学建模追求几何关系的精确描述，动力学建模关注受力分析与参数不确定性，但二者尚未形成面向控制器设计的统一建模框架。如何在模型保真度与控制器可行性之间取得平衡，仍是亟待解决的问题。

2.3. 定向器轨迹跟踪控制策略

轨迹跟踪控制是实现定向器精确导向的核心环节，由于连续管钻井过程中存在管柱柔性变形、井下振动、液压迟滞等多源干扰，常规控制方法难以满足高精度轨迹跟踪的要求。

在轨迹跟踪控制方面，学者们围绕工具面角偏差修正与钻进参数自动控制开展了深入研究。Hu 等[15]针对连续管钻具组合只能以固定角度单向增量旋转的特点，提出了双圆弧定向设计模型，通过数值迭代法求解轨道约束方程组以获得符合现场条件的唯一真解，避免了传统调整钻压方法对工程师经验的依赖，为自动化钻井奠定了基础。在此基础上，刘清友等[16]以钻井机器人为对象，建立了钻柱动力学模型及钻压钻速控制数学模型，揭示了钻井液排量与钻压钻速之间的线性关系，并指出通过调节节流阀流通面积和溢流阀调定压力可实现钻压钻速的无级调节；三参数控制方法的结合为不同井下工况下的钻井参数优

化提供了灵活方案，结合井下随钻测量数据即可实现闭环控制和自动钻进。进一步地，刘清友等[17]将井下机器人分为牵引机器人与钻井机器人两大类，系统阐述了支撑机构、驱动系统、控制系统和能源供给系统等关键技术，指出伸缩式智能控制钻井机器人是主要发展方向，并提出了智能闭环钻井技术等应用构想，如表 3 为轨迹跟踪控制的智能化发展指明了方向。

Table 3. Comparison table of mainstream trajectory tracking control strategies
表 3. 主流轨迹跟踪控制策略对比表

控制策略类型	核心原理	适用工况	优势	现存局限	代表研究学者
双圆弧定向设计模型	通过数值迭代法求解轨道约束方程组，获得符合现场条件的唯一真解	连续管钻具组合以固定角度单向增量旋转的定向钻进工况	避免传统调整钻压方法对工程师经验的依赖；为自动化钻井奠定理论基础	属于开环设计方法，未考虑钻进过程中的实时干扰与参数变化；计算实时性有待提升	Hu 等[15]
钻井机器人参数控制模型	建立钻柱动力学模型与钻压钻速控制模型，通过调节节流阀和溢流阀实现参数无级调节	具备随钻测量条件的连续管钻井作业，适用于需要实时调节钻压钻速的场景	揭示了钻井液排量与钻压钻速的线性关系；可实现闭环控制和自动钻进；三参数控制方法灵活可组合	对传感器精度依赖较高；高温高压环境下控制稳定性尚未充分验证；多源干扰耦合条件下的鲁棒性不足	刘清友等[16]
智能闭环钻井控制架构	构建伸缩式智能控制钻井机器人系统，实现自感知-自决策-自适应钻进	复杂地层、深层非常规油气藏等对智能化水平要求高的钻井场景	融合牵引机器人与钻井机器人功能；具备全流程智能闭环能力；代表技术发展方向	井下能源供给与高温高压适应性仍需突破；通信实时性与控制算法计算资源受限	刘清友等[17]

尽管智能控制方法展现出了良好的应用前景，但当前控制策略研究仍面临若干挑战：井下高温高压环境对传感器精度和控制器稳定性的影响尚缺乏系统评估；多源干扰耦合条件下的鲁棒控制设计仍不够完善；控制算法的实时性与计算资源受限之间的矛盾尚未得到有效解决。

2.4. 定向器参数优化与验证方法

控制器参数的合理整定与性能的有效验证，是定向器控制技术从理论走向工程应用的关键环节。

在参数优化方面，学者们围绕定向器设计参数计算、钻头破岩参数优化及系统级验证开展了研究。Li 等[18]针对液压缸工作压力计算中扭矩参数的随机性，基于不确定性分析理论建立了压力设计新方法，采用蒙特卡洛方法获得了工作压力随累积概率变化的区间(3.93 到 11.71 MPa)，克服了传统单值计算的不足。Hu 等[15]进一步考虑了零钻压、泥浆粘滞力及动静态摩擦关系，提出了定向器扭矩和摩阻计算方法，为液压定向器设计与选型提供了更精确的受力分析依据。在钻头参数优化方面，况雨春等[19]建立了 PDC 切削齿比压理论，通过全尺寸钻头-岩石相互作用模型验证了钝角齿 PDC 钻头最高降扭 35.35%的效果；杨高[20]则通过系列破岩试验揭示了宽刃齿钻头最高降扭 37.64%的机理，证实了个性化钻头在低钻压工况下的适应性。在系统级验证方面，贺会群等[21]依托国家科技重大专项，系统集成电液控定向工具等关键技术，配套了两种 BHA 组合，12 口井的现场试验最大进尺 802 m、最大水平位移 414.50 m，为定向器技术的工程可行性提供了有力支撑。

除上述参数优化外，减摩降阻与智能预测作为定向器高效工作的辅助支撑技术也取得了积极进展。

陈朝伟等[22]系统综述了连续管钻井减摩技术，指出摩阻较大限制了连续管钻井的应用范围，避免管柱屈曲和减小摩擦系数是减摩降阻的核心思路，牵引器和振动减摩器是较为理想的减摩工具，为定向器摩阻控制提供了参考。在钻井参数智能预测方面，Zhang 等[23]基于 GAN-LSTM 方法对循环压力、井口压力等关键参数进行了预测，预测精度约 90%，比单一 GAN 和 LSTM 方法提高约 17%，为钻井参数的精准调控提供了数据支撑。Zhang 等[24]建立了轴向振动减摩工具的波动力学模型，引入库仑摩擦项求解波动方程，揭示了垂直端轴向力减小主要受频率、振幅、安装位置和摩阻系数影响，明确了振动减摩工具的作用机理。上述研究表明，参数优化已从单点突破向“工具设计 - 钻头匹配 - 系统集成 - 智能预测”的立体化方向演进如表 4。

Table 4. Summary table of orientator parameter optimization and verification methods
表 4. 定向器参数优化及验证手段汇总表

优化类别	技术手段	关键指标	验证方式	文献来源
液压缸压力参数计算	基于不确定性分析理论的压力设计方法；蒙特卡洛模拟；考虑零钻压、泥浆粘滞力及动静态摩擦的扭矩与摩阻计算	工作压力区间 3.93~11.71 MPa (随累积概率变化)；扭矩与摩阻精确取值	概率统计分析与蒙特卡洛数值模拟	Li 等[18]；Hu 等[19]
钻头降扭优化	PDC 切削齿比压理论；全尺寸钻头 - 岩石相互作用模型；个性化 PDC 钻头设计	钝角齿 PDC 钻头最高降扭 35.35%；宽刃齿钻头最高降扭 37.64%	全尺寸钻头 - 岩石仿真；系列破岩试验	况雨春等[20]；杨高[21]
减摩降阻工具	牵引器与振动减摩器选型；轴向振动减摩工具波动力学模型；引入库仑摩擦项求解波动方程	垂直端轴向力减小；主控因素为频率、振幅、安装位置、摩阻系数	理论建模与机理分析；系统文献综述	陈朝伟等[23]；Zhang 等[25]
数据驱动参数预测	GAN-LSTM 混合深度学习模型	循环压力、井口压力预测精度约 90%；较单一 GAN 或 LSTM 提高约 17%	现场数据驱动力的预测精度对比验证	Zhang 等[24]
现场 BHA 试验	电液控定向工具系统集成；配套两种 BHA 组合	12 口井现场试验；最大进尺 802 m；最大水平位移 414.50 m	多井次现场试验与工程应用验证	贺会群等[22]

然而，当前验证方法仍存在不足：多数验证采用简化干扰模型，与井下多源干扰(振动、压力波动、钻柱耦合振动同时存在且统计特性复杂)的实际情况存在差距。未来需要构建更接近实际井下工况的综合测试平台，建立标准化的控制器性能评价体系。

当前定向器控制技术的验证手段可划分为数值模拟、室内台架试验与现场试验三个层次。数值模拟可在低成本下系统评估控制器对单一参数扰动的鲁棒性，但对多源干扰耦合等复杂工况的保真度有限；室内台架试验能验证执行机构动态响应与硬件在环性能，但难以同时复现井下多源干扰共存的真实环境；现场试验虽最能反映实际工况，但成本高昂且工况不可控。三种验证平台各有所长却也各有局限，任何单一平台均无法完全还原井下复杂条件，这正是当前验证方法的核心短板。后续研究应着力构建三者相互衔接、逐层递进的多层次综合验证体系，通过层级间的数据交互与模型修正，逐步缩小实验室与井下环境的验证差距。

3. 连续管钻井定向器定向技术面临的挑战与发展趋势

在技术持续发展的同时,连续管钻井定向器定向技术也面临多重瓶颈。高温高压及强扰动环境下控制系统的稳定性是首要挑战,深井、超深井中传感器精度衰减与液压系统参数漂移问题突出,国内在工具面控制精度、高温耐受性及通信实时性方面与国外先进水平仍有差距,刘寿军等指出应加快有缆连续管钻井系统研发以提升实时控制能力。与此同时,多源非线性与滞后约束下的模型-控制适配问题亦亟待破解,现有运动学建模与动力学建模各有侧重,但尚未形成面向控制器设计的统一框架;加之现有参数优化多针对单一性能指标,闭环系统稳定性约束的缺失使控制器在全工况下的可靠性难以保证。

在验证体系与智能化发展方面,实验室理想工况与井下实际环境之间的验证差距同样不容忽视,贺会群等虽通过 12 口井的现场试验积累了宝贵经验,但多源干扰耦合的复杂条件仍需更系统的测试平台加以复现。面向未来,智能化与自适应控制技术的融合被视为突破上述瓶颈的关键路径。刘清友等指出以专家数据库结合井下随钻测量数据可实现闭环自动钻进,刘清友等进一步提出伸缩式智能控制钻井机器人是主要发展方向;苏新亮等[25]亦认为微小井眼连续油管钻井技术具有广阔前景。综上,后续研究应着力构建自感知-自决策-自适应的闭环控制架构,推动定向技术向智能化、模块化及超深井应用方向迈进如图 2。

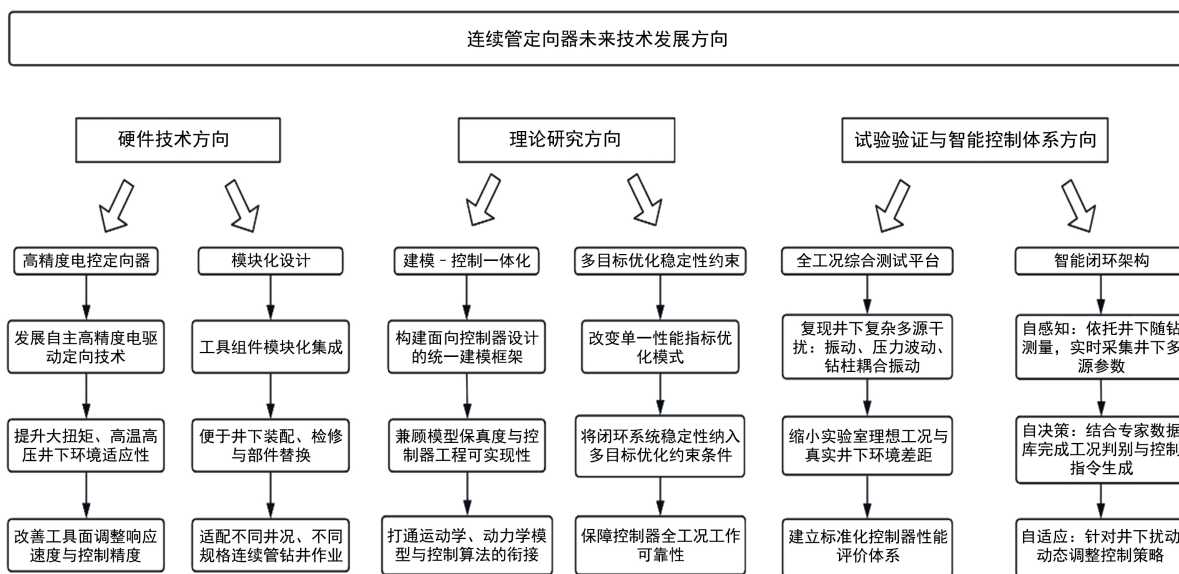


Figure 2. Mind map for future technological development directions of coiled tubing orientator

图 2. 连续管定向器未来技术发展方向思维导图

4. 结论

连续管钻井定向器作为实现井眼轨迹控制的核心工具,其技术水平直接决定了连续管钻井的定向能力。本文从定向器执行机构结构与驱动技术、运动学与动力学建模方法、轨迹跟踪控制策略以及参数优化与验证方法四个层面,系统综述了连续管钻井定向器定向技术的研究进展。研究表明,定向器执行机构正从液控式向电液控式、电控式演进;运动学建模已形成以空间几何方法和偏置位移矢量理论为代表的技术体系;动力学建模正向考虑多源参数不确定性的方向发展;轨迹跟踪控制正在从传统经验方法向双圆弧定向设计模型和基于钻井机器人的闭环控制等智能化方向迈进;参数优化与验证已初步建立了室内试验与现场应用相结合的范式。然而,当前研究在高温高压适应性、建模-控制一体化、多目标优化

稳定性约束以及验证工况还原度等方面仍存在明显不足。未来应重点发展自主高精度电驱动定向技术,推进智能化、模块化设计,构建从高保真建模到鲁棒控制、从智能多目标优化到全工况综合验证的一体化技术路线,为深层及复杂地层连续管钻井提供可靠的技术支撑。

基于上述分析,本文提出一个整合“建模-控制-验证”的闭环研究框架:在建模层,构建面向控制器设计的统一状态空间模型,将运动学几何关系与动力学受力分析纳入同一数学框架,并以概率统计方法量化钻压、摩阻、工具面角等多源参数的不确定性;在控制层,设计融合鲁棒与自适应机制的轨迹跟踪控制器,将闭环系统稳定性约束显式写入优化目标,同时纳入执行机构物理约束(如扭矩限幅、响应延迟),确保控制指令在实际硬件能力内可执行;在验证层,构建“数值仿真-室内台架-现场试验”三位一体的多层次验证体系,各层分别承担参数空间全覆盖测试、硬件在环性能验证及工程实效检验功能。三个层级通过双向反馈回路形成持续迭代:现场实测数据修正不确定性模型的先验分布,台架辨识的未建模动态增广状态空间模型,控制敏感性分析反过来指导建模层优先降低关键参数的不确定性,最终实现模型不断逼近真实系统、控制策略持续适配工况变化的自进化闭环,从根本上解决当前建模-控制脱节、多目标优化缺乏稳定性约束以及验证工况还原度不足的系统性问题。

参考文献

- [1] 胡亮, 阮臣良, 崔晓杰, 等. 新型连续管钻井用电液定向装置的研制[J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(6): 728-733.
- [2] 苗芷芃, 夏宏南, 南丽华, 等. 连续管钻井液压定向器的研制[J]. 石油机械, 2019, 47(6): 22-27.
- [3] 马卫国, 王力, 王程飞. 连续管钻井电液双螺旋传动定向器的设计[J]. 石油机械, 2020, 48(4): 37-42.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 贺会群. 连续管钻井技术与装备[J]. 石油机械, 2009, 37(7): 1-6+94.
- [7] 李猛, 贺会群, 辛永安, 等. 连续管钻井电液定向装置工具面调整方法[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(6): 48-54.
- [8] 李猛, 贺会群, 苏堪华, 等. 连续管定向工具工作原理及工具面角度调整分析[J]. 钻采工艺, 2017, 40(1): 7-10+5.
- [9] 邢志晟, 孔璐琳, 祝传增, 等. 连续管钻井肋式定向器执行机构偏置位移优化[J]. 石油机械, 2023, 51(2): 26-32.
- [10] 房军, 韩晓菲, 王宴滨, 等. 连续管可控偏心垫块 BHA 滑动钻进导向性能分析[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(1): 44-48.
- [11] Li, M., Su, K.H., Hu, S.L., et al. (2019) Displacement Vectors Control Method for Orienter Ribs during Path Correction in Coiled Tubing Drilling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, **233**, 3531-3546. <https://doi.org/10.1177/0954406218819036>
- [12] 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.
- [13] Li, M., Zou, W.B., Su, K.H., et al. (2024) Uncertainty Analysis Method for the Output Force Vector Control on the Rib of the Orienter in Coiled Tubing Drilling. *Geoenery Science and Engineering*, **234**, Article 212604. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212604>
- [14] Li, M., Hu, S., Su, K., Wan, L., Guo, X., He, H., et al. (2020) Orientation Load Prediction Method Based on Randomness/Stochasticity of Multi-Source Parameters in Coiled Tubing Drilling. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **189**, Article 107017. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107017>
- [15] Hu, L. and Gao, D.L. (2014) Calculation Methods of Orienter Torque and Drag in Coiled Tubing Drilling. *Advanced Materials Research*, **1065**, 2049-2052. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1065-1069.2049>
- [16] 刘清友, 刘文全, 朱海燕, 等. 钻井机器人的连续油管钻压和钻速控制模型[J]. 石油学报, 2019, 40(10): 1255-1262.
- [17] 刘清友, 董润, 耿凯, 等. 井下机器人研究进展与应用展望[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 50-55.
- [18] Li, M., Su, K.H., Wan, L.F., et al. (2019) Uncertainty Analysis for Hydraulic Cylinder Pressure Calculation of Orienter in Coiled Tubing Drilling. *Journal of Engineering Research*, **7**, 1-16. [https://doi.org/10.1016/s2307-1877\(25\)00807-7](https://doi.org/10.1016/s2307-1877(25)00807-7)
- [19] 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.

- [20] 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.
- [21] 贺会群, 熊革, 刘寿军, 等. 我国连续管钻井技术的十年攻关与实践[J]. 石油机械, 2019, 47(7): 1-8.
- [22] 陈朝伟, 周英操, 申瑞臣, 等. 连续管钻井减摩技术综述[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(1): 29-31.
- [23] Zhang, W.X., Bai, K., Zhan, C., *et al.* (2023) Parameter Prediction of Coiled Tubing Drilling Based on GAN-LSTM. *Scientific Reports*, **13**, Article No. 10875. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37960-x>
- [24] Zhang, W.P., Shi, H.Z., Li, G.S., *et al.* (2019) Mechanism Analysis of Friction Reduction in Coiled Tubing Drilling with Axial Vibratory Tool. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **175**, 324-337. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.12.055>
- [25] 苏新亮, 李根生, 沈忠厚, 等. 连续油管钻井技术研究与应用进展[J]. 天然气工业, 2008(8): 55-57+66+140.