

# 连续管导向钻井控制系统与工作状态研究

谭钞月, 李猛, 李杰, 樊迦密, 罗金涛, 潘星

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2024年12月12日; 录用日期: 2025年2月24日; 发布日期: 2025年3月11日

---

## 摘要

为了提升连续管导向钻井技术在深层油气层作业中的效率与安全性, 对连续管导向钻井控制系统与工作状态进行了研究。总结了连续管导向钻井工具的地面闭环控制系统和井下闭环控制系统的研究现状, 并分析了双闭环通讯系统的工作特点。基于此, 深入探讨了连续管导向钻井系统的三种工作状态及其转换机制, 并研究了这些工作状态与电机同步策略的结合应用。同时提出了针对现有系统优化与改进的建议, 以提高系统的响应速度和作业精度。开展了钻具轨迹自动修正系统, 分析了针对深层油气层和复杂作业环境下控制能力精细化的挑战, 以期为该领域的技术进步和应用提供指导。

---

## 关键词

连续管钻井, 控制系统, 工作状态, 发展建议

---

# Research on Control System and Working Status of Coiled Tubing Drilling

Chaoyue Tan, Meng Li, Jie Li, Jiami Fan, Jintao Luo, Xing Pan

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

Received: Dec. 12<sup>th</sup>, 2024; accepted: Feb. 24<sup>th</sup>, 2025; published: Mar. 11<sup>th</sup>, 2025

---

## Abstract

In order to improve the efficiency and safety of coiled tubing drilling technology in deep oil and gas reservoir operations, a study was conducted on the control system and working status of coiled tubing drilling, summarized the research status of ground closed-loop control system and downhole closed-loop control system for continuous tube guided drilling tools, and analyzed the working characteristics of the dual closed-loop communication system. Based on this, the three working states and their transition mechanisms of the coiled tubing drilling system were deeply explored, and the combined application of these working states and motor synchronization strategy was

studied. At the same time, suggestions were put forward for optimizing and improving the existing system to enhance its response speed and operational accuracy. We have developed an automatic correction system for drilling tool trajectories and analyzed the challenges of refining control capabilities for deep oil and gas reservoirs and complex operating environments, in order to provide guidance for technological progress and applications in this field.

## Keywords

**Coiled Tubing Drilling, Control System, Work Status, Development Suggestions**

Copyright © 2025 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

随着全球油气资源开发向深层、复杂地层的不断深入，连续管导向钻井技术因其独特的优势而受到广泛关注。连续管钻井技术自 20 世纪 90 年代初在国外取得试验成功以来，已经逐渐应用于老井加深、开窗侧钻斜井或水平井、欠平衡钻井、微小井眼钻井等多种复杂钻井作业中[1]。与传统钻井完井技术相比，连续管作业设备体积小、操作简便、自动化程度高、动迁性能好；连续管无接头、无变径、强度大、承压高，能够动态密封和在井内连续起下，极大缩短了作业周期，减轻了劳动强度，降低了开采成本。

连续管导向钻井的电驱定向系统是实现高效钻井的关键技术之一。早期的钻井液脉冲系统定向效率低、精度低，而电驱定向系统通过人为发送定向指令，实现了边钻边调，所钻井眼轨迹光滑的目标。随着配套技术的进步，第二代连续管电驱定向系统将信息控制单元集成化，开发了闭环控制系统，实现了连续管定向钻井自适应调整工具面，大大提高了定向效率，并成功应用，取得巨大经济效益[2]。本文通过深入研究连续管导向钻井控制系统的组成及其工作状态，探讨三种工作状态特点及其转换机制，以及电机同步策略的应用，进而提出优化与改进建议。同时，针对未来连续管导向技术的发展方向，本文将探讨完善现有双闭环通讯系统工作、开展钻具轨迹自动修正系统，以及针对深层油气层、复杂作业控制能力精细化的挑战，以期为连续管导向钻井技术的进一步发展提供参考。

## 2. 连续管导向钻井工具控制系统组成

### 2.1. 地面闭环控制系统研究现状

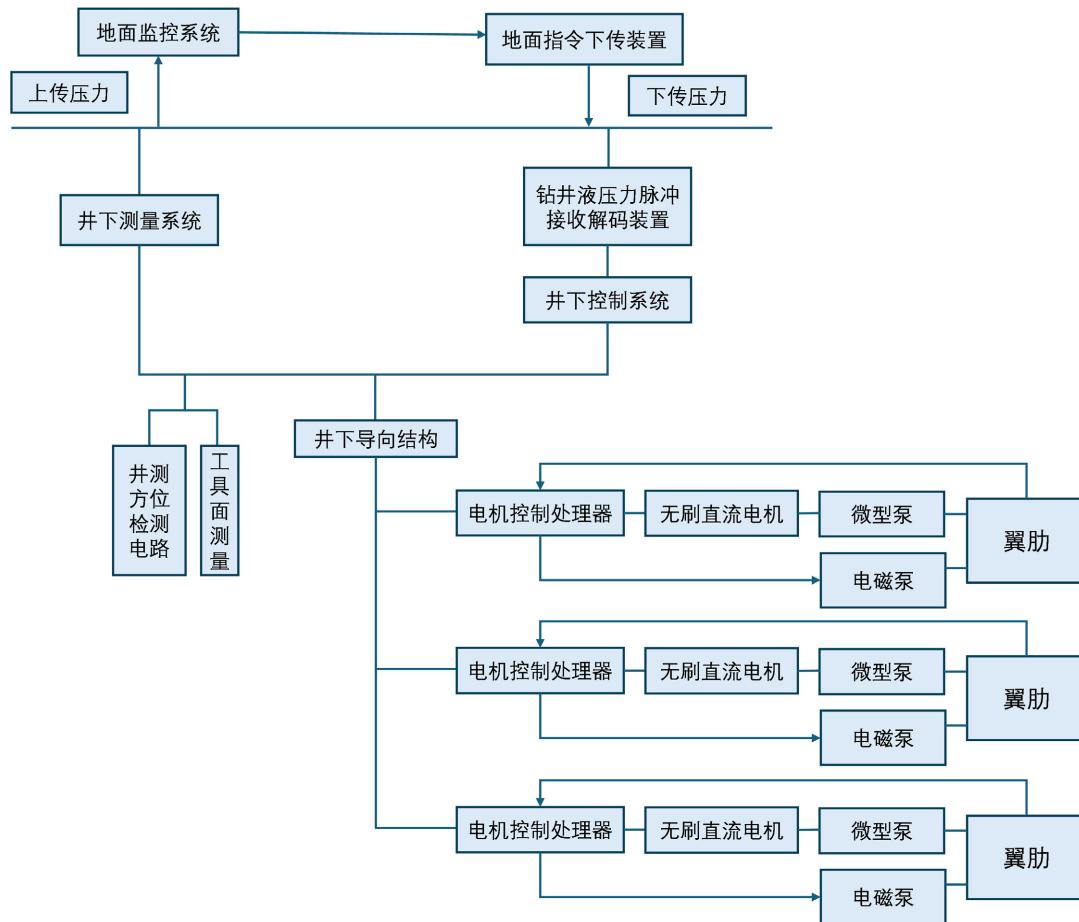
连续管导向钻井地面闭环控制系统在精度、稳定性方面不断提升，通过先进传感器和控制算法来更准确控制钻井方向和参数。智能化水平也在提高，实现自动监测、诊断和调整。同时注重系统可靠性和耐用性，也在探索与其他相关技术融合协同发展，但仍面临一些挑战，如提高适应性、降低成本等。

#### 2.1.1. 地面闭环控制系统

地面角度控制系统的的主要工作是实时监控和报告钻具在井下的载荷状态，并清楚显示钻具的钻进过程，对钻具在井底所处钻压转速，钻井液流量等数据进行收集与比对。如果钻具并未按照预设轨迹进行钻进，而是偏离了钻具的预设轨迹，位于地面的操作员将及时进行调整，利用通讯系统将新的预设轨迹对下井下传输。利用井下微处理器对钻具进行控制，使其保持在预设轨迹上。地面监控系统为勘探人员提供了一个直观，实时有效的工具。

### 2.1.2. 控制原理

连续管导向钻井工具地面监测和控制系统(简称 TMCS 系统)的组成及功能如图 1 所示。系统能够对地面和井下 2 部分进行监测和控制, 可以实现钻井轨迹控制[3]。



**Figure 1.** Composition and functions of TMCS system  
**图 1.** TMCS 系统的组成和功能

### 2.1.3. 面临的挑战

地面闭环控制系统当今面临着诸多挑战，在数据传输方面，要确保信号的稳定和及时传输，避免延迟或丢失数据，否则会严重影响控制的精准性和实时性；同时面对复杂多变的地质环境，系统需要具备强大的适应性和调整能力，不同的地质条件可能导致参数的急剧变化，而系统必须能够快速准确地做出反应和调整。再者，工作环境往往较为恶劣，如高温、高压、高湿度以及强烈的振动等，这些都可能对系统的硬件设施造成损害，降低其性能甚至导致故障，需要采取有效的防护和维护措施。

## 2.2. 井底闭环控制系统研究现状

目前连续管导向钻井井底闭环控制系统的研究正逐渐深入，研究主要集中在不断优化控制算法，以实现更精准的井底导向控制；其次加强对各种传感器的应用和研发，提高对井底状况的实时感知能力，致力于提高系统的响应速度和稳定性，在应对复杂多变的井下环境同时探索新的控制策略和技术，以提升钻井效率和安全性。

### 2.2.1. 井下闭环控制系统

井下闭环控制系统主要分为两大部分，一部分是随钻测量系统，用于对钻具的井眼轨迹和地质进行测量，方便进行实时调整，记录井底环境，对井壁质量评估等。另一部分是旋转导向钻井工具偏置机构中的控制系统部分，主要根据控制指令调整钻具的钻进方向。在此系统中涉及到较为复杂的交叉融合领域，非线性影响因素较多，偏置机构的稳定性控制对整个钻具的工作性能有很大的影响。井下控制系统通过内部数据传输处理，形成了一种相互影响，相互反馈的闭环体系。

### 2.2.2. 井下闭环控制系统的发展

井下闭环控制系统正在飞速的发展，在传感器技术上，不断追求更高的精度和可靠性，用于实时监测井下的各种关键参数，如井眼轨迹、地层特性等，为控制系统提供准确的数据基础。同时，一些新型传感器的研发也在持续进行，以适应更复杂的井下环境。

对于控制算法的研究也日益深入，多种先进的控制策略被应用于井下闭环控制系统，以实现对钻井方向和参数的精确控制。例如，基于模型预测控制等算法，可以根据实时数据和预设目标进行动态调整，提高系统的响应速度和控制精度。同时井下通信技术也在不断改进和发展，以保障井下和地面之间数据的稳定、快速传输，确保地面操作人员能及时了解井下状况并做出准确决策。并且井下闭环控制系统能够根据历史数据和实时情况进行自我学习和优化，不断提升自身的性能和适应性。

在有了长足进步的情况下，井下高温、高压等极端环境对系统硬件和软件的稳定性和耐久性提出了很高的要求，复杂的地层条件增加了控制的难度，数据传输的实时性和准确性还需要进一步提升。

研究人员正不断努力，通过技术创新和跨学科合作来攻克这些难题，进一步推动连续管导向钻井中井下闭环控制系统的发展，以实现更高效、更安全、更智能的钻井作业。

## 2.3. 双闭环通讯系统工作特点

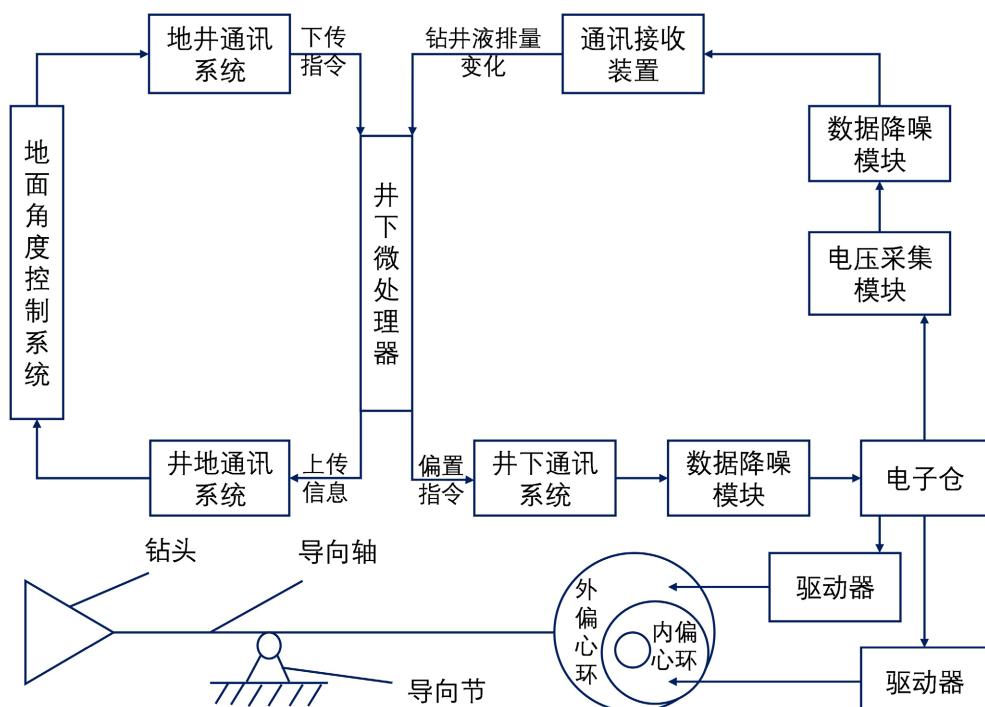


Figure 2. Block diagram of dual closed-loop communication system

图2. 双闭环通讯系统框图

通过内外两个闭环的相互作用和反馈调节，及时应对各种干扰和变化，保障通讯的持续稳定进行。具有较强的自适应能力，可以根据实际情况自动调整工作状态和参数[4]。该系统在精度方面表现较好，能够准确地传输和处理信息。同时，它还能实现对通讯过程的有效监控和管理，及时发现和解决问题。其控制过程较为精细和复杂，以确保通讯质量和性能达到较高水平。图 2 为双闭环通讯系统框图。

### 2.3.1. 安全保护

双闭环通讯系统对比常规系统具有更加安全的保护措施。

**急停保护：**控制箱和驱动箱均配备有急停按钮，当设备或控制系统运行中出现异常情况时，操作者可以立即按下急停按钮，以实现急停保护。

**缺相保护：**当作为动力电源的三相交流电源发生缺相，系统会立即发出警报并停止控制系统的运行，以保护驱动设备。

**防电击保护：**当控制系统漏电，将立即切断供电电源，以保护人身安全。

**过流保护：**通过限制开关管的最大电流(或平均电流)，可以实现过流保护功能，保护系统免受电流过大的损害。

### 2.3.2. 快速响应与稳定性

控制系统的架构可划分为 4 个层次：信息层、控制层、执行层、采集层[5]。信息层通过 HMI 实现，负责向操作人员提供系统状态信息和用户交互界面；控制层基于 PLC 算法实现，负责处理信息层输入的指令，并生成相应的控制信号；执行层由伺服驱动器和伺服电机组成，根据控制层的信号驱动机械设备进行精确运动；采集层包括伺服电机编码器、激光测距传感器和非接触传感器，负责实时监测和反馈系统状态。信息层、控制层和执行层之间的数据交互通过工业以太网通信技术实现，确保了数据传输的高速性和可靠性[6]。采集层的数据反馈则采用模拟量信号，以实现对系统状态的精确监测。

### 2.3.3. 可扩展性与灵活性

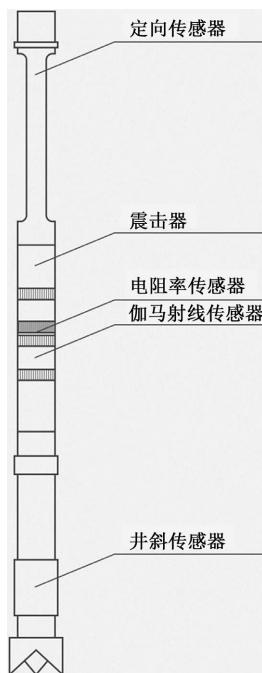
双闭环通讯系统可以根据实际需求，通过增加控制回路的数量或添加新的控制策略，实现对更大系统规模或更多功能的控制。这使得系统具有较好的可扩展性和适应性。且双闭环通讯系统可以根据不同的应用场景和控制需求，选择不同的控制策略。例如，可以采用 PID 控制、模糊控制、自适应控制等不同的控制算法，以适应不同的控制需求。同时，系统还可以根据实际运行情况，灵活调整控制参数，以达到最佳的控制效果。

## 3. 连续管导向钻井系统工作状态研究

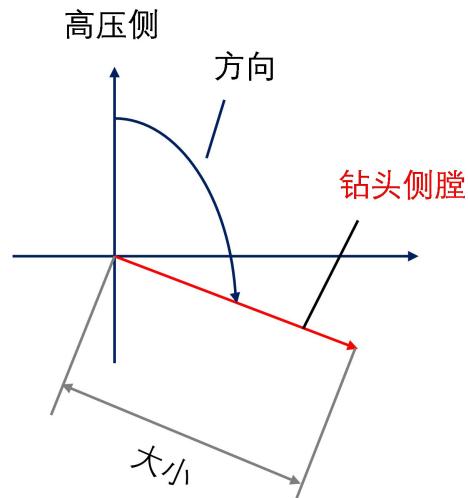
### 3.1. 系统构成及现有系统研究应用

导向技术是在钻柱旋转钻进时，可随钻实时完成导向功能[7]。连续管导向钻井系统主要由连续管钻机、循环系统、井控系统、辅助设备以及井下钻具组合(BHA)等硬件系统和连续管钻井工艺、专用软件等软件系统构成。这些部分共同协作，不需要起下钻就可以改变钻具的组合，一套钻具组合就可以完成造斜，增斜，降斜，稳斜的施工，可以很好的解决卡钻、托压、携岩、井底清洁问题。

导向钻井系统按其井下工具系统的工作方式可分为四种：静态偏置推靠式、静态偏置指向式、动态偏置推靠式、动态偏置指向式。目前静态偏置推靠式、静态偏置指向式、动态偏置推靠式均已实现商业化。以 Baker Hughes 公司 AutoTrakRCLS 静态推靠式旋转导向系统为例。AutoTrak 系统，又称为 RCLS (旋转闭环钻井系统)，其结构图如图 3，工具的心轴外部有一个非旋转外套，外套装 3 翼肋与液压系统连接。当控制器发出调控指令 3 翼肋行程取相应值使芯轴相对于井眼轴线发生定向偏移，产生导向合力和工具面使钻头朝目标方向钻进。图 4 为 AutoTrak 工作原理图。



**Figure 3.** Schematic diagram of AutoTrak structure  
**图 3.** AutoTrak 结构简图



**Figure 4.** AutoTrak working principle diagram  
**图 4.** AutoTrak 工作原理图

### 3.2. 工作状态特点及故障监测

导向钻具在钻进时，可能会出现三种不同的工作状态，且这三种工作状态可以相互转换，操作人员可以根据不同环境做出相应的调整。

**稳斜状态：**钻具的导向角与预设轨迹相一致时，无需改变钻头方向，确保两个偏心环所构成的偏心矢量在目标位置处，内外偏心环的偏心距达到预设值。在钻进过程中，随钻测量系统将进行实时测量，保持与地面控制系统实时通讯，保证钻具按照井眼轨迹实时钻进，如有偏离及时做出调整。

**直线状态：**钻井工具在保持直线状态进行钻进时，此时导向轴应与旋转外套保持平行，此时内外偏

心环的偏心距达到最小，并保持相对位置不变化。此时仍需进行实时通讯保证钻进为直线，并收集井底地质环境方便随时改变钻具工作状态。

造斜状态：当钻井工具需要进行调节或者钻头钻进轨迹与预期不符时，地面控制系统发出调节指令，通过钻井液将偏置指令传达井底电子仓内，电子仓接收后，驱动偏心电机，通过调整偏心电机速度差，使内外偏心环所形成的偏心矢量进行改变，调节钻头的钻进角度直至与预设目标一致，停止调整，将状态转变为稳斜状态。

七十年代到后期，综合录井系统在法国 Geoservice 公司问世，但由于这款系统用于故障诊断的方法是基于较为简单的超阀值报警，所以在智能化方面并没有较大的提升[8]，八十年代后期，随着随钻测量(MWD, Measure While Drilling)和随钻测井(Logging While Drilling)技术的发展，井底所用的检测传感器，如加速度计传感器，磁通门传感器等，开始被更多的关注研究[9]，目前，国内井场应用最广泛的故障检测方法依旧是参数阀值报警和人工经验诊断，除此之外就是引进综合录井系统[10]。21 世纪后很多专家将人工智能融入到钻井工程故障监测中，将多种算法进行融合，取长补短。目前对于井下工具，尤其是导向钻井工具的工作状态监测和自主故障诊断正处于研究起步阶段，其原因是导向钻井工具尚处于研究发展阶段，井下实验资料少，同时由于工具系统的复杂性也很难开展监测。因此开展导向钻井工具工作状态监测及自主故障诊断对于协助连续管导向钻井系统工作具有重大意义。未来可根据连续管导向钻具在钻进中出现的三种不同工作状态，引入人工智能进行故障监测。

### 3.3. 优化与改进建议

无论旋转导向钻井工具处于何种工作状态，时刻需要工具实时监控，保证钻具按照预设井眼轨迹进行调整，并且三种工作状态实时调整。当出现与预设轨迹不同时，需人为进行修正，未来将开展钻具轨迹自动修正系统。同时研发全电动驱动的导向模块，可以提高操作效率和井位放置的精确性，电气化可以带来双向旋转、独立于钻井液循环的无限旋转控制等优势。在位置偏差耦合控制器中使用模糊 PI 控制算法增强系统的鲁棒性。因此，控制系统的精度与钻井工具的稳定性十分重要，在实际钻探过程中需要进一步提高系统的抗扰动能力，提高系统的稳定性。

## 4. 未来连续管导向技术的发展方向

未来连续管导向钻井技术将呈现智能化、信息化、集成化发展态势。智能算法助力钻井参数自动优化，信息化实现数据高效整合与共享。它与多种技术集成，适应复杂地质。新材料应用提升连续管性能，制造工艺改进降低成本。其应用前景广阔，可用于复杂地质、老油田二次开发及海上油气田。不过，当前仍面临挑战，极端条件下技术稳定性待增强，成本控制不易，且跨学科专业人才匮乏。需各方协同努力，推动该技术进一步发展完善。

### 4.1. 完善现有双闭环通讯系统工作

双闭环通讯系统是连续管导向钻井的信息传输“桥梁”，完善该系统对提高钻井作业的可靠性和效率意义重大[11]。从硬件设施优化来看，井下通讯模块的改进是关键。采用新型的耐高温、高压且抗干扰能力强的电子元件，如特制的陶瓷电容、金属膜电阻等，可保障在深层油气层恶劣环境下电路的稳定运行。同时，优化信号传输线路布局，减少线路长度与节点数量，降低信号传输损耗与故障点。例如，运用多层电路板设计，将信号传输线路分层布局，避免不同线路间的电磁干扰。另外，开发高增益、方向性强的井下天线，增强信号的发射与接收能力，确保信号在复杂地层结构中的有效传输。

软件算法升级方面，通过研发智能自适应通讯协议，该协议能根据井下环境变化自动调整通讯参数，如在信号干扰严重时，自动切换到抗干扰能力强的频段或调制方式。例如，当检测到地层中的电磁噪声

增大时，通讯协议从常规的调幅(AM)调制切换到调频(FM)调制，以提高信号的抗干扰性。同时，采用数据压缩与解压技术，减少数据传输量，提高传输速度。对井下传感器采集的大量重复或冗余数据进行实时压缩，在地面接收端再进行解压还原，既节省了传输带宽，又保证了数据的完整性。

为验证双闭环通讯系统的优化效果，可构建井下模拟实验环境。模拟深层油气层的高温、高压、高湿度以及强电磁干扰等条件，测试通讯系统的数据传输准确性、实时性与稳定性。例如，设置温度为200℃、压力为150 MPa、相对湿度为90%且施加不同强度电磁干扰的实验环境，检测通讯系统在不同工况下的数据误码率。若优化前误码率为 $10^{-3}$ ，优化后误码率降低至 $10^{-6}$ 以下，则表明系统性能得到显著提升，可满足深层油气层钻井作业对通讯系统的严格要求。

## 4.2. 开展钻具轨迹自动修正系统

钻具轨迹自动修正系统是实现连续管精准导向的核心保障，有助于提升钻井作业的智能化水平与成功率。多传感器融合技术的深入应用是基础。除了惯性测量单元(IMU)、地磁传感器和激光测距传感器外，可融合声波传感器。声波传感器能够探测地层内部结构与岩石特性，为钻具轨迹修正提供更全面的地层信息[12]。通过扩展卡尔曼滤波算法对多传感器数据进行融合处理，该算法能够处理非线性系统问题，有效融合不同传感器的数据，提高钻具位置与姿态信息的精度。例如，在复杂地层过渡区域，声波传感器可提前探测到地层变化，结合其他传感器数据，使钻具轨迹修正系统提前做出响应，避免因地层突然变化导致的轨迹偏差。

基于融合数据构建的钻具轨迹预测模型可采用深度学习算法。如长短期记忆网络(LSTM)，它能够学习时间序列数据中的长期依赖关系，对钻具轨迹的变化趋势进行更精准地预测。以大量历史钻井数据和实时传感器数据作为训练样本，训练LSTM模型预测钻具在不同地层条件下的轨迹走向。例如，在钻进过程中，模型根据前20米的钻具姿态变化、地层参数等数据，预测接下来10米钻具的轨迹偏差范围。

图5为HC-SR04型超声波传感器。



**Figure 5.** HC-SR04 ultrasonic sensor  
图5.HC-SR04型超声波传感器

当预测到轨迹偏差时，自动修正系统的控制算法采用模型预测控制(MPC)与模糊逻辑控制相结合的方式。MPC算法根据预测模型计算出未来多步的控制序列，使钻具轨迹逐步逼近预设轨迹。模糊逻辑控制则根据经验规则对MPC算法的控制参数进行实时调整，增强系统的适应性与鲁棒性。例如，当遇到地层软硬交替频繁的情况时，模糊逻辑控制根据地层硬度变化调整MPC算法中的权重系数，确保钻具轨迹修正的及时性与准确性。

在实际钻井现场进行钻具轨迹自动修正系统的验证试验。选择具有代表性的复杂地层区域，对比使用自动修正系统前后的钻具轨迹精度与钻井效率[13]。例如，在某深层油气层试验井中，未使用该系统时，

井眼轨迹偏差可能达到 $\pm 1.5^\circ$ ，且因频繁调整钻具导致钻进速度缓慢，日进尺仅为50米左右。使用自动修正系统后，井眼轨迹偏差控制在 $\pm 0.3^\circ$ 以内，日进尺提高到80米以上，显著提升了钻井质量与效率。

### 4.3. 针对深层油气层、复杂作业，控制能力精细化的挑战

深层油气层的特殊地质条件与复杂作业要求促使连续管导向钻井控制能力向精细化方向发展。在高性能传感器与执行机构研发方面，对于传感器，除了采用耐高温高压材料如碳化硅(SiC)外，还可探索金刚石基传感器材料。金刚石具有极高的硬度、化学稳定性和热导率，能够在极端环境下准确测量地层参数。例如，金刚石压力传感器可在深层油气层超高压环境下精确测量地层压力变化，为钻井控制提供可靠依据。对于执行机构，研发电磁驱动的导向系统，利用电磁力实现钻头的快速、精准转向。电磁驱动系统具有响应速度快、控制精度高的特点，能够满足复杂作业对钻具导向的严格要求。

建立精细化控制模型时，除了考虑地层的各向异性和非线性力学特性以及钻井液与地层的相互作用外，还应纳入地震波对地层和钻具的影响。在地震活动频繁的区域，地震波可能导致地层应力瞬间变化，影响钻具的稳定性。通过建立包含地震波因素的耦合动力学模型，采用多物理场仿真软件进行模拟分析，如 COMSOL Multiphysics。基于该模型开发的控制算法采用自适应鲁棒控制策略，根据地层和环境变化实时调整控制参数，确保钻具在复杂工况下的稳定运行。

在实际应用中，通过多口试验井的数据采集与分析对控制模型和算法进行优化。例如，在不同地震活动强度的区域开展试验井作业，收集地震波数据、地层参数、钻具响应数据等，对模型中的地震波影响参数进行辨识与修正。同时，根据试验结果对电磁驱动执行机构的控制参数进行优化，提高其在不同工况下的响应速度和控制精度，从而实现连续管导向钻井在深层油气层复杂作业环境下控制能力的精细化提升。

## 5. 结束语

目前，能源的需求日益增长，高效、环保的钻井技术成为油气勘探开发的关键，通过对连续管导向钻井技术的理论分析和实验验证，该技术在复杂地层条件下具有显著的优势。控制系统的优化设计，结合先进的传感器技术和实时数据处理算法，使得钻井过程更加精确和可控。通过对工作状态的研究，更好地预测和应对钻井过程中可能出现的问题，提高作业的安全性和可靠性。

在未来的研究中，我们将继续探索更高效的控制系统算法，以及更先进的传感器技术，进一步提升连续管导向钻井的性能。随着更多研究者的加入和更多技术的突破，连续管导向钻井技术必将在未来的能源开发中扮演更加重要的角色。

## 基金项目

重庆科技大学创新训练项目“连续管导向钻井中控制电机的驱动系统研究”(项目编号：2004098)。

## 参考文献

- [1] 贺会群,熊革,刘寿军,张士彬,杨高,康树国. 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.
- [2] 李猛,苏堪华,贺会群,郭晓乐. 连续管钻井电驱定向系统及关键工具技术现状[C]//2017年油气钻井基础理论研究与前沿技术开发新进展学术研讨会. 北京:石油工业出版社, 2017: 532-540.
- [3] 张玺亮,党瑞荣,马认琦. 旋转导向钻井工具地面监测和控制系统研究[J]. 石油机械, 2015, 43(5): 6-8.
- [4] 李俊岭. 旋转导向钻井工具双偏心环电机控制研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2022.
- [5] 赵旭东,邓皓,姚雪软. 双位置闭环高精度、大惯量控制系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2017, 36(4): 21-24, 50.

- 
- [6] 谢俊, 陈凯旋, 岳东, 等. 基于多智能体系统一致性算法的电力系统分布式经济调度策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 112-117.
  - [7] 耿立勇, 苑塔亮. 旋转导向钻井技术在 HD10-1-H2 井的应用[J]. 江汉石油职工大学学报, 2020, 33(1): 55-57, 86.
  - [8] 高岩, 李国华, 刘其春, 李春山. 国内外综合录井仪联机系现状与发展[J]. 石油钻探技术, 1994, 22(1): 40-42.
  - [9] 苏义脑, 窦修荣. 随钻测量、随钻测井与录井工具[J]. 石油钻采工艺, 2005, 27(1): 74-78, 85.
  - [10] 吴秦英. 导向钻井工具工作状态监测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2020.
  - [11] 陈立平, 张云清, 任卫群, 等. 机械系统动力学分析及 ADAMS 应用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
  - [12] 刘文庆, 崔学政, 张富强. 钻杆自动排放系统的发展及典型结构[J]. 石油矿场机械, 2007, 36(11): 74-77.
  - [13] 谭湘敏, 赵冬斌, 易建强, 等. 全方位移动机械手运动控制I——建模与控制[J]. 机械工程学报, 2009, 45(1): 35-41.