

连续管钻具导向分析与姿态调节研究

谭鈔月*, 杨佳, 魏炯宇, 李洪杉, 王淇霖, 李航宇, 樊迦密, 秦武, 刘馨蔓

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年7月8日; 录用日期: 2025年8月13日; 发布日期: 2025年9月25日

摘要

连续管导向钻井技术因其成本低、自动化程度高、作业效率高及环境友好等优势, 已成为非常规油气藏开发的重要手段。本文分析了连续管导向钻井钻具的组成结构与工作原理, 探讨了导向机构的类型、驱动方式及其对井眼轨迹控制精度的影响。此外分析了井下力学环境、钻具力学行为及控制方法对姿态调节的影响, 指出传统PID控制方法在复杂工况下的局限性, 而智能优化控制方法则显著提升了系统的响应速度与控制精度。总结了智能控制算法与井下实时监测技术的融合, 以期为连续管导向钻井系统的优化设计与智能控制提供理论支撑与技术参考。

关键词

连续管钻井, 导向机构, 姿态调节, 智能控制

Research on Steering Behavior Analysis and Attitude Adjustment of Coiled Tubing Drilling Assemblies

Chaoyue Tan*, Jia Yang, Jiongyu Wei, Hongshan Li, Qilin Wang, Hangyu Li, Jiami Fan, Wu Qin, Xinman Liu

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

Received: Jul. 8th, 2025; accepted: Aug. 13th, 2025; published: Sep. 25th, 2025

Abstract

Coiled tubing directional drilling technology has become a critical technology for developing

*通讯作者。

文章引用: 谭鈔月, 杨佳, 魏炯宇, 李洪杉, 王淇霖, 李航宇, 樊迦密, 秦武, 刘馨蔓. 连续管钻具导向分析与姿态调节研究[J]. 矿山工程, 2025, 13(5): 1067-1077. DOI: 10.12677/me.2025.135121

unconventional reservoirs, leveraging advantages of low cost, high automation, operational efficiency, and environmental friendliness. This paper analyzes the composition and working principles of coiled tubing drilling assemblies, examining the types and drive modes of steering mechanisms and their impacts on directional accuracy. Furthermore, it investigates the influences of downhole mechanical environments, drilling tool behaviors, and control methods on attitude control, highlighting the limitations of traditional PID control under complex downhole conditions. By contrast, intelligent optimization-based control methods significantly enhance system response rates and control accuracy. The integration of intelligent control algorithms with real-time downhole monitoring technologies is presented to provide theoretical and technical support for optimizing the design and intelligent operation of coiled tubing directional drilling systems.

Keywords

Coiled Tubing Drilling, Steering Mechanism, Attitude Adjustment, Intelligent Control

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

随着油气资源开发逐步进入中后期,薄油层、低渗透油藏等非常规资源成为重要的接替领域。传统钻井技术在应对复杂地质条件、降低作业成本及提高采收率方面面临诸多挑战。连续管导向钻井技术因其作业效率高、成本低、自动化程度高及对环境影响小等优势,已在美国阿拉斯加、加拿大阿尔伯塔等地广泛应用,成为现代钻井技术的重要发展方向。然而,国内在该领域尚处于起步阶段,尤其是井下导向工具的研发与应用仍存在技术瓶颈。

连续管导向钻井系统的核心在于井下导向钻具的设计与控制,其性能直接决定了井眼轨迹的精度与钻井效率。当前主流导向机构包括电动式、液压式、电液复合式、肋式等,各具特点,适用于不同工况。此外,井下复杂力学环境与钻具的柔性特征对姿态控制提出了更高要求,传统控制方法难以满足高精度需求,智能控制策略逐渐成为研究热点。

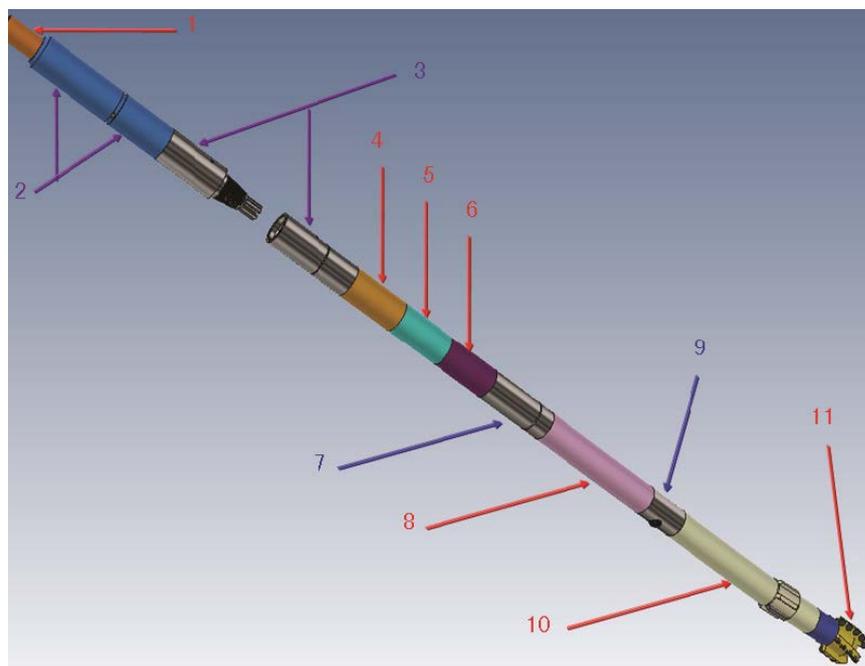
2. 连续管导向钻井钻具组成与工作原理

2.1. 连续管钻井钻具发展现状

我国多数油田已步入勘探开发中后期,薄油层、低渗透油区等非常规油气藏成为资源接替主力区块。老油区资源挖潜面临提高单井产量、提升采收率、降低综合成本等难题。连续管钻井技术因成本低、自动化程度高、作业效率高且环境污染小等优势,已在美国阿拉斯加 Prudhoe Bay 油田、加拿大阿尔伯塔省等区域广泛应用于浅直井、小井眼加深井、侧钻井及欠平衡井作业,代表现代钻井技术重要发展方向,对国内老油田稳产增效意义重大。国内近几年已经开展连续管钻井工具及工艺方面的研究,但目前尚无大规模现场应用,仅处于现场试验阶段[1]。井下工具作为连续管钻井技术核心组成部分,其技术突破对行业发展至关重要。

2.2. 钻具组成及工作原理

连续管导向钻井钻具主要由连续管连接器,螺杆钻具,柔性钻具,定向器和钻头组成(如图 1)。各部分协调工作,紧密配合,共同高效完成钻井工作。



1——连续管；2——连接器；3——非旋转接头；4——安全丢手接头；5——单流阀接头；6——循环阀接头；7——定向器；8——随钻测量工具；9——弯接头；10——马达；11——钻头。

Figure 1. Drilling tool composition structure diagram

图 1. 钻具组成结构图

2.2.1. 连续管连接器

连续管连接器用于连接连续管与底部钻具组合，可承受大拉伸和扭转载荷。该连接器结构与规格多样，其中卡瓦式、平头螺钉/凹穴式、压接式为常用类型。卡瓦式连接器通过特殊设计的卡瓦结构，从外部抱紧连续管，利用卡瓦与管壁间的摩擦力传递载荷；平头螺钉/凹穴式连接器则依靠螺钉与凹穴的精准配合，实现轴向与扭矩的稳定传输；压接式连接器通过对连续管端部施加压力使其变形，与连接件紧密贴合形成牢固连接，三种类型均能保障连续管与底部钻具组合在复杂井下工况下的可靠连接。

2.2.2. 螺杆钻具

螺杆钻具是旋转冲击复合钻具的动力源，其选择依据是螺杆钻具输出的扭矩及其转速，螺杆钻具输出的扭矩与 F 产生扭矩相平衡，因此有如下的平衡关系式：

$$M_{\text{输}} = Fr$$

式中： r 为圆柱凸轮动力转换体中径， m ； $M_{\text{输}}$ 为螺杆钻具输出的扭矩。

螺杆钻具通过弯壳体或偏心垫块等机械结构，使钻头轴线与井眼轴线形成偏角，利用钻井液驱动时地层反力改变钻进方向，配合稳定器控制造斜率，实现定向钻井。在非均质岩层以及高倾角地层时，螺杆钻具导向机构可以及时调整钻头的方向，从而保证钻头沿着指定的方向持续钻进。在欠平衡钻井中，螺杆导向机构可以配合旋转防喷器，进行边喷边钻。这些情况都能够有效的避免因复杂环境而造成的损失。

2.2.3. 柔性钻具

柔性钻具由多个短节通过铰接方式连接而成，具有良好的弯曲性能，能适应小曲率半径井段。各短节之间的连接结构按照所规定的一定角度的转动，使钻具整体可灵活弯曲。在钻井过程中，柔性钻具在

钻压和扭矩作用下，紧贴井壁沿预定轨迹前进。通过控制短节长度和短节间的弯角，可以调节钻具的造斜能力，满足不同曲率半径分支井眼的钻井需求。在超短半径水平井钻井中，柔性钻具可实现快速造斜，有效缩短造斜半径，增大泄油面积，提高油气开采效率。

2.2.4. 定向器

定向器主要由控制电机和多级减速器两部分组成。控制电机的输出一般为高速，小扭矩，可用于井下高温，高压环境中的环境，可以控制电机的扭矩再 $1 \text{ n}\cdot\text{m}$ 以内。电机通过地面控制系统发送的指令，进行精确地实时调整定位器的工具面角度。而通过控制工具面角度从而控制井眼的轨迹。电子控制系统能够精确地实时控制井斜角，方位等参数来精确调整钻具的方向。

2.2.5. 钻头

钻头作为直接破碎岩石的关键部件，需依地层特性与钻井工艺选择。主要有 PDC，牙轮等类型，连续管导向钻井中，PDC 钻头以聚晶金刚石复合片为切削刃，适合软至中硬地层，在页岩气等软地层中破岩快、效率高；牙轮钻头通过牙轮滚动切削，钻进时，钻压使牙轮齿压入岩石，同时钻头旋转带动牙轮滚动，对岩石产生冲击和碾压作用，使岩石发生脆性破裂。主要适用于花岗岩，石灰岩等较硬的地层，其结构可以承受较大压力和扭矩，能够通过连续滚动实现高效破除坚硬的岩石。合理选钻头需考量地层硬度、研磨性等，对提升钻井效率、控制成本意义重大。

2.2.6. 综合对比与应用场景

各种钻具组件的造斜率，工作温度，工作压力，功耗范围的综合对比(见表 1)。

Table 1. Comparison of coiled tubing component parameter

表 1. 连续管各组件参数对比

组件	造斜率范围($^{\circ}$ /30 米)	工作温度 ($^{\circ}\text{C}$)	工作压力 (MPa)	功耗范围(kW)	典型应用场景
连续管	8.3~83	120~200	10~150	50~200	超短半径侧钻、欠平衡钻井
螺杆钻具	5.4~29.7 (单弯)	120~180	1.4~4.8	6~33	定向井、水平井
柔性钻具	9.5~95	120~150	30~70	10~50	超短半径水平井、分支井
定向器	9~120	120~180	10~50	1~5	井眼轨迹控制、多分支定向
PDC 钻头	7~15	120~150	30~50	20~80	软至中硬地层、快速钻进
牙轮钻头	5~8	150~200	30~50	30~100	硬地层、研磨性地层

3. 连续管导向钻井工具导向分析

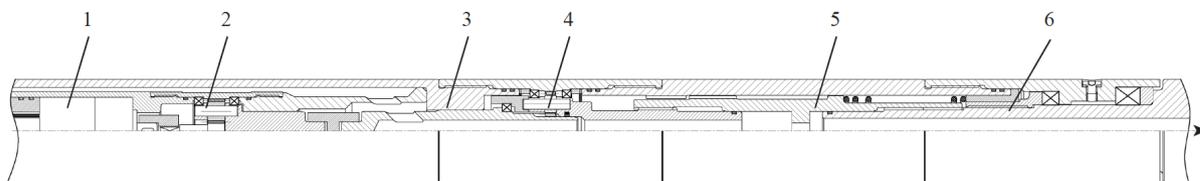
3.1. 导向机构类型与工作原理

连续管导向钻井工具导向功能的实现，关键在于导向机构的设计与驱动方式。结合现有的研究成果，导向机构可依据动力源与结构特征划分为以下主要类型，其工作原理主要围绕通过执行机构产生定向偏置力或扭矩，实现井眼轨迹精准调控展开。

3.1.1. 电动式导向机构

电动式导向机构将电能作为动力源，借助电机驱动传动系统来实现导向动作。朱玉杰等[2]研发的连续管钻井电动定向器极具代表性，它采用齿轮传动设计，电机输出的扭矩经过齿轮减速后传递到导向执行部件，凭借齿轮啮合的精准传动特性来控制导向机构的偏置角度，进而实现井眼轨迹的定向调整(如图

2)。这类机构的核心优势在于传动精度高、响应速度快，在对导向精度要求苛刻的钻井场景中表现卓越。



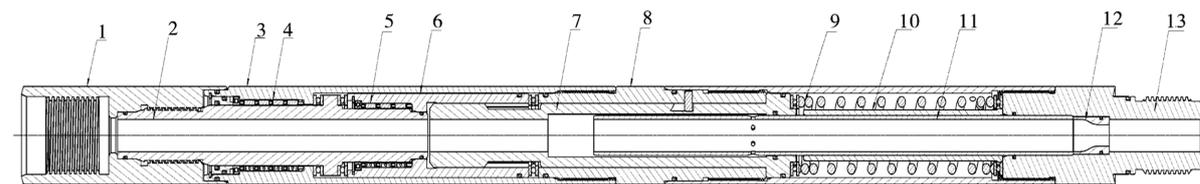
1——减速电机；2——中间级行星减速器；3——空心轴；4——输出级行星减速器；5——模式转换机构；6——输出轴。

Figure 2. Structural diagram of electric steering tool for coiled tubing drilling

图 2. 连续管钻井电动定向器结构图

3.1.2. 液压式导向机构

液压式导向机构借助液压力驱动执行机构产生偏置位移。苗芷芄等[3]针对液压定向器开展的设计与试验研究显示，此类机构借助液压泵输出高压油液，推动活塞或液压缸伸缩，进而带动导向部件产生径向偏置，以形成导向力。图 3 为液压定向器结构图。



1——上接头；2——离合器轴；3——离合器套；4——上单向轴承；5——下单向轴承；6——花键套；7——花键轴；8——转位接头；9——弹簧；10——转角控制套；11——芯管；12——喷嘴；13——下接头。

Figure 3. Hydraulic steering tool structural diagram for coiled tubing drilling

图 3. 连续管钻井液压定向器结构图

其工作原理的关键在于液压系统的压力调节机制，通过精准控制油液的流量和压力，能够实现偏置位移的连续可调，适用于高压、大负载的井下复杂环境。

3.1.3. 电液复合式导向机构

电液复合式导向机构将电力控制的精准性与液压驱动的强劲动力性相融合，是当前研究的主流方向。以电液双螺旋传动定向器、新型电液定向装置为代表的研究成果，充分证实了此类机构在提高导向精度和响应速度方面的显著优势。

电液双螺旋传动定向器采用机电液一体化设计，通过伺服电机精确控制双螺旋传动机构的转速与转向，同步调节液压系统压力[4]。该装置利用双螺旋结构的协同运动，可实现导向部件的微米级精准偏置，兼具电动控制的高精度与液压驱动的大扭矩优势。在复杂地层条件下，电液复合式导向机构通过电信号实时调整液压力输出，能够快速适应井下压力、岩性变化，有效避免因动力不足或控制失准导致的导向偏差，为复杂井眼轨迹的精确控制提供了可靠的技术支撑。

新型电液定向装置以电信号作为指令源，液压系统作为动力执行单元，通过电液伺服阀对液压执行元件实施闭环控制[5]。凭借先进的控制机制，该装置可实现工具面角度的毫秒级动态调节，与传统导向系统相比，它的导向响应速度提升幅度超 30%。

3.1.4. 肋式导向机构

肋式定向器的执行机构由多组肋板组成，通过精准调控肋板的径向伸出长度，形成非对称支撑力[6]。

该机构利用井壁反作用力实现导向功能，其核心工作机制在于“偏置位移优化”，即依据不同井段的地质条件和轨迹要求，精确计算肋板伸出量，使导向力与井眼轨迹控制需求高度匹配。这一特性使其在水平井、侧钻井等复杂井眼轨迹控制中展现出显著优势。

3.1.5. 侧钻专用导向机构

侧钻井下定向器是专门为小井眼、高曲率侧钻工况设计的，采用了高度集成化的紧凑结构布局，其结构示意图如图4。侧钻井下定向器的核心导向机制基于偏心垫块非对称式排列，通过产生可控侧向力，配合连续管柔性变形特性，实现精准轨迹转向。该设计有效突破了传统导向机构在侧钻井狭小空间内的应用瓶颈，显著提升了复杂井眼轨迹控制的灵活性与可靠性[7]。

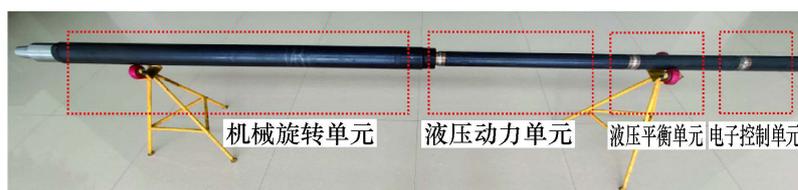


Figure 4. Structural diagram of downhole orientator for coiled tubing sidetracking
图4. 连续管侧钻井下定向器结构图

3.2. 井下导向影响因素

3.2.1. 导向机构自身参数及控制特性

在偏置位移精度方面，肋式定向器执行机构的偏置位移精度是决定导向力稳定性的关键指标，位移偏差超出允许阈值极易引发钻井轨迹偏离设计路径，直接影响作业精准度。在传动结构误差方面，电动定向器传动系统中的齿轮传动间隙、双螺旋传动螺距误差等参数，会显著降低导向机构的动作精度，导致工具面角度失控，干扰钻井轨迹的精确控制[8]。

工具面角度的精准稳定控制是保障导向钻井轨迹精度的核心要素[9]。在井下复杂工况下，机械振动、钻井液高速冲刷等扰动因素极易引发工具面角度漂移，若未能及时实施有效调控，将直接导致井眼轨迹偏离设计路径。研究表明，若液压系统压力不足或电动机构输出扭矩受限会直接引发导向失效；反之，若控制参数设置过大，不仅会造成导向机构异常磨损，还会大幅缩短其使用寿命。

3.2.2. 井下力学环境

根据钻具组合力学性能研究， $\Phi 73$ mm 导向钻具组合的刚度、强度及屈曲特性与导向力传递效率呈现显著相关性[10]。当钻具刚度低于临界值时，在井下复杂应力环境中易发生塑性形变，致使导向控制精度劣化，直接影响定向钻井的造斜精度，难以实现设计的井眼轨迹目标。

从井壁作用力来看，导向器力学分析表明，井眼尺寸变化及井壁岩石力学性质差异会导致导向机构与井壁接触力分布不均[11]。井眼扩径或缩径时，导向机构会产生不规则侧向力；不同层位岩石力学参数差异会改变接触刚度与应力分布状态。在水平井段，这种非均匀受力易引发“托压”效应，即导向机构遇井壁凹凸或力学突变层位时，钻柱与井壁摩擦力骤增，导致钻头钻压传递受阻。“托压”还会造成工具面失控、钻头偏离轨迹，还因钻压波动降低破岩效率，严重影响导向钻井精度[12]。

随着下井深度增加，连续管的自重和摩阻力逐渐增大，易产生轴向伸缩与径向弯曲，导致导向机构的实际偏置量与设计值出现偏差[13]。同时，连续管的柔性特征虽为转向提供了便利，但过度弯曲会造成导向力传递滞后，这一现象在大位移井中表现得尤为显著，需通过优化管柱刚度来缓解[14]。此外，连续管在长期服役过程中，其材料性能会因疲劳、腐蚀等因素发生退化，导致管体强度下降和弹性模量改变。

这些性能变化会进一步影响连续管在井下的力学行为，加剧导向控制的复杂性，使得导向精度的保障面临更大挑战。

3.2.3. 钻具力学行为影响

$\Phi 73$ mm 导向钻具组合的力学性能会决定导向力传递效率，刚度低于临界值时易变形，影响定向精度。连续管的柔性特征虽便于转向，但过度弯曲会导致导向力传递滞后，尤其在大位移井中显著；而其材料性能退化会改变力学行为，进一步增加导向控制难度，与井下力学环境共同作用，影响导向精度的稳定性。

4. 连续管导向钻井工具姿态调节研究

4.1. 姿态调节目标及核心挑战

连续管钻井姿态调节旨在精准控制钻具轨迹，使钻头按预定路径钻进，提高钻井效率与准确性，降低成本并减少对地层的不必要扰动。然而，实现这一目标面临诸多核心挑战。连续管自身刚度低，在井下易受复杂地层力作用发生变形，导致姿态难以稳定控制。此外，井下环境复杂，高温、高压以及地层特性的多变，增加了测量与调节姿态的难度，对姿态参数的精确测量与实时调控提出了严峻挑战。

4.1.1. 姿态调节的目标

姿态调节的核心目标是确保钻具沿着预定的井眼轨迹精确钻进，在实际钻井作业中，井眼轨迹通常根据油藏的地质构造、开采需求等因素进行精心设计，其包含了特定的井斜角和方位角要求。方位角 ϕ 、井斜角 θ 、工具面向角 γ 共同组成钻具姿态角(如图 5)。井斜角决定了钻具在垂直方向上的倾斜程度，而方位角则确定了钻具在水平面上的方向。通过精确控制这两个角度，钻具能够准确地到达目标油层位置，提高油层的钻遇率，从而提升油气开采效率[15]。

在定向井中，需要按照设计要求逐渐改变井斜角和方位角，使井眼轨迹能够准确地穿越目标地层区域。精确的姿态调节还能提高钻井的效率，减少不必要的钻进时间和成本消耗，如果钻具姿态控制不准确，导致井眼轨迹偏离预定路径，可能需要进行额外的修正钻进操作，这不仅会增加钻井时间，还可能导致钻井成本大幅上升。

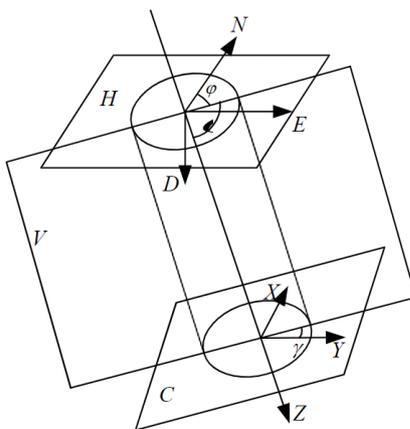


Figure 5. Drilling tool attitude angle
图 5. 钻具姿态角

4.1.2. 姿态调节核心挑战

地质条件的复杂性是连续管导向钻井工具姿态调节面临的首要挑战。地层岩性的变化、地质构造的

多样性以及地层压力的不确定性,都会对钻具的姿态产生显著影响。在不同的岩性地层中,岩石的硬度、脆性等力学性质差异较大,这会导致钻具在钻进过程中受到的阻力和扭矩发生变化,从而使钻具的姿态不稳定。在硬质地层中,钻具需要的钻压可达 20~30 kN,扭矩达 15~25 kN·m,钻具需要更大的钻压和扭矩来破碎岩石,这可能会引起钻具的振动和弯曲,进而影响其姿态;而在软质地层中,钻具所需钻压仅为 5~10 kN,扭矩 5~10 kN·m,钻具容易发生偏斜,难以保持预定的井眼轨迹。

在钻进过程中,钻具与井壁间的摩擦及碰撞,亦是影响姿态稳定性的关键因素,因其具有较大柔性,与井壁的接触面积较大,极易产生较大摩擦力。此摩擦力不仅会消耗能量,致使钻进效率降低,而且会对钻具施加侧向力,使得钻具发生弯曲与扭转,进而改变其姿态[16]。钻具与井壁间的碰撞亦可能引发钻具姿态的瞬间变化。当钻具于井眼内遭遇不规则井壁或障碍物时,便会发生碰撞,该碰撞力有可能使钻具的井斜角和方位角突然改变,为姿态调节带来极大困难。

在连续管导向钻井系统中,需要实时获取井下钻具的姿态信息,并根据这些信息及时调整控制参数,以实现钻具姿态的精确控制。由于井下环境复杂,信号传输面临诸多困难,导致从井下传感器采集数据到地面控制系统接收到数据并做出响应的过程中存在一定的延迟[17]。这种延迟会使控制系统无法及时根据实际姿态调整控制策略,导致姿态调节的滞后性。当钻具姿态发生突然变化时,由于信号传输延迟,控制系统可能无法及时做出反应,使得钻具姿态偏离预定轨迹的程度进一步加大。

4.2. 姿态调节控制方法

4.2.1. 传统控制方法

PID 控制作为一种经典的传统控制方法,在连续管导向钻井工具姿态调节中有着广泛的应用,PID 控制通过比例(P)、积分(I)、微分(D)三个环节对控制对象进行调节(如图 6)。其控制原理是根据设定值与实际测量值之间的偏差,通过比例环节对偏差进行即时响应,根据偏差的大小输出相应的控制量;积分环节对偏差进行累积,以消除系统的稳态误差;微分环节则根据偏差的变化率来预测偏差的变化趋势,提前调整控制量,从而提高系统的响应速度和稳定性。其数学表达式为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

式中: $u(t)$ 为控制器的输出信号; $e(t)$ 为误差; K_p 为比例系数; K_i 为积分系数; K_d 为微分系数。

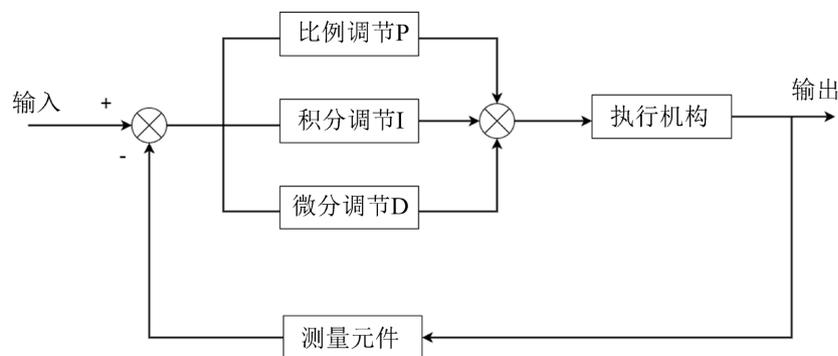


Figure 6. Schematic diagram of PID controller
图 6. PID 控制器原理图

PID 控制方法具有结构简单、易于实现、鲁棒性较强等优点,在一些工况相对稳定、干扰较小的钻井环境中,能够较好地实现对钻具姿态的基本控制。在钻进过程中,通过安装在钻具上的传感器实时测量

井斜角和方位角,将测量值与预设的井眼轨迹参数进行比较,得到偏差值。控制系统根据这个偏差值,按照PID控制算法计算出相应的控制信号,通过调节钻井液的流量、压力等参数,改变钻具的受力状态,从而实现对钻具姿态的调整[18]。在井斜角控制方面,如果实际井斜角小于设定值,PID控制器会根据偏差计算出增加钻井液流量或改变钻井液流向的控制信号,使钻具受到向上的力,逐渐增大井斜角,直至达到设定值。

然而,PID控制也存在明显的局限性,它需要精确的数学模型来确定控制参数,而连续管导向钻井系统具有高度的非线性和不确定性,难以建立精确的数学模型,这就导致PID控制在复杂工况下的控制效果不佳。在复杂地层条件下,采用传统PID控制的井眼轨迹偏差可达 $0.5^{\circ}\sim 1.5^{\circ}$,远高于智能控制方法的 $0.1^{\circ}\sim 0.3^{\circ}$ 。PID控制对参数变化较为敏感,当钻井过程中出现地质条件变化、钻具磨损等情况时,其控制性能会显著下降,难以满足高精度的姿态调节要求。

4.2.2. 智能优化控制方法

基于模糊逻辑的智能控制方法近年来在连续管导向钻井工具姿态调节中得到了越来越多的应用。模糊控制不需要建立精确的数学模型,而是通过模拟人类的思维方式,将操作人员的经验和知识转化为模糊控制规则。它将输入变量模糊化,根据预设的模糊控制规则进行模糊推理,最后将推理结果解模糊化,得到具体的控制量输出。

在钻具井斜角出现偏差的情况下,模糊控制器把井斜角偏差及偏差变化率转化为模糊语言变量,随后依据预先制定的模糊控制规则,借助模糊推理计算得出相应的控制量。最终将模糊控制量解模糊化,使其转变为实际的控制信号,以此用于调节钻具姿态[19]。在地质条件复杂多变、钻具与井壁相互作用复杂的情形下,该控制方式能够较好地实现对钻具姿态的精准控制,进而提升钻井的准确性与效率。

自适应控制也是一种有效的智能控制方法,它能够根据系统运行过程中的实时信息,自动调整控制参数,以适应系统特性和环境的变化。自适应控制方法通过在线辨识系统模型参数,根据参数的变化动态调整控制器的参数,使控制系统始终保持良好的性能。其数学原理基于李雅普诺夫稳定性理论,通过设计合适的自适应律,保证系统的稳定性和收敛性。在钻进过程中,当地质条件发生变化导致钻具受力改变时,自适应控制器能够迅速检测到这些变化,并自动调整控制参数,通过改变钻井液的流量和压力等参数,以维持钻具的稳定姿态。自适应控制能够提高系统对复杂工况的适应能力,减少人工干预,提高钻井作业的自动化水平和效率。

4.2.3. 多种控制方法的融合策略

将多种控制方法融合应用于连续管导向钻井工具的姿态调节,可充分彰显各种控制方法的优势,有效弥补单一控制方法的缺陷,进而提升姿态调节的性能与可靠性。模糊-PID控制融合策略作为一种常见的融合控制方法,其将模糊控制的灵活性与适应性,以及PID控制的精确性有机结合(如图7)。在此融合策略下,当系统偏差处于较大状态时,主要采用模糊控制,借助模糊控制对大偏差能够快速响应的特性,促使系统迅速趋近设定值;当系统偏差较小时,则切换至PID控制,利用PID控制在小偏差范围内控制精度高的优势,达成对系统的精确控制。经由这种融合控制策略,在复杂地质条件下,有效地提升了钻具姿态调节的精度与稳定性,减小了井眼轨迹的偏差,进而提高了钻井效率与质量。

而神经网络凭借其强大的学习能力,能够对钻井过程中的各类数据展开学习与分析,从而为自适应控制提供精准的系统模型和参数估计[20]。神经网络具有非线性映射能力,其结构包含输入层、隐含层和输出层,通过反向传播算法调整网络权重,实现对输入输出关系的逼近。自适应控制则依据神经网络的学习成果,实时调整控制参数,以契合系统的动态变化。在实际应用场景中,神经网络通过对海量钻井数据的深度学习,构建起地质条件、钻井参数与钻具姿态之间的关系模型。自适应控制基于此模型,实

时监测系统的运行状况，一旦察觉系统参数出现变动，便自动调节控制参数，确保钻具姿态维持稳定。这种融合控制策略充分发挥了神经网络和自适应控制的优势，显著提升了系统对复杂多变工况的适应能力，实现了对连续管导向钻井工具姿态的高效、精确控制。多种控制方法的融合策略为连续管导向钻井工具姿态调节提供了更为有效的解决方案，能够在复杂的钻井环境中达成更稳定、更精准的姿态控制，具备广阔的应用前景。

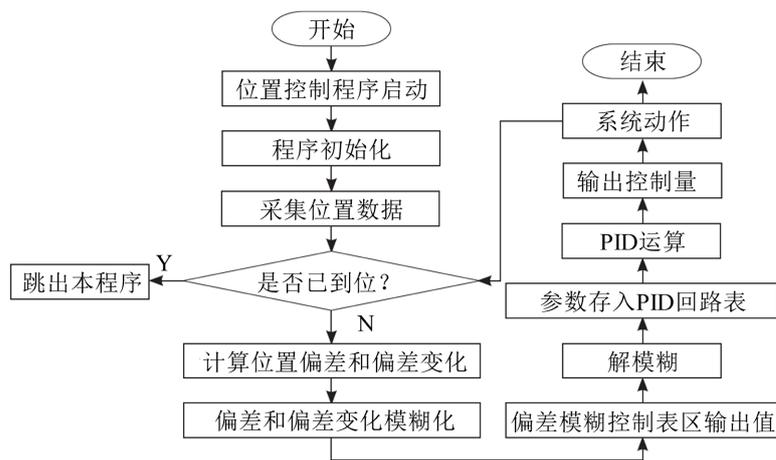


Figure 7. Fuzzy PID control schematic
图 7. 模糊 PID 控制流程

5. 结束语

本文认为，当前制约连续管导向钻井精度的瓶颈已从导向工具的硬件设计转向井下 - 地面系统的协同控制与实时建模的滞后，智能控制算法的潜力远未被充分挖掘。连续管导向钻井技术凭借其成本低、自动化程度高、作业效率高及环境友好等显著优势，已成为非常规油气藏开发的重要发展方向，通过连续管钻井加强地质导向侧钻，实现了对未波及石油储量的开采，显著提升了作业效率与产量。

在井下力学环境中，连续管力学行为复杂，从连续梁柱模型来看，连续管可视为受轴向压力、钻井液压力与井壁摩擦力等作用的细长梁，轴向压力超临界值时会屈曲。 $\Phi 73\text{ mm}$ 导向钻具组合在复杂应力下，刚度不足易塑性形变，降低导向控制与定向钻井造斜精度。在控制算法领域，传统 PID 控制凭借比例、积分、微分三环节调节控制对象，依设定值与实际值偏差实现控制。但连续管导向钻井系统的非线性与不确定性，导致 PID 在复杂工况下控制失效、参数敏感。智能优化控制虽能基于经验规则实现钻具精准控向，但其在井下实时监测融合及应用深度上仍存提升空间。

未来，随着材料科学、电子信息技术和控制理论不断发展，连续管导向钻井技术有望在智能控制、复杂工况适应性等方面取得更大突破。一方面，需进一步优化智能控制算法，深入研究其与井下实时监测技术的融合机制，实现对井下 - 地面系统的协同控制与实时建模，提高导向精度；另一方面，在硬件设计上，应基于对井下力学环境的深入理解，研发更适应复杂工况的导向工具，突破当前技术瓶颈，为油气资源的高效开发提供更有力的技术支撑。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.

- [3] 苗芷芑, 万教育, 徐华冬, 等. 连续管钻井液压定向器的设计与室内试验评价[J]. 石油管材与仪器, 2021, 7(4): 5-8.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 李猛, 贺会群, 张云飞, 等. 连续管钻井定向器技术现状与发展建议[J]. 石油机械, 2015, 43(1): 32-37.
- [9] 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.
- [10] 王统帅. $\Phi 73$ mm 导向钻具组合的力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2021.
- [11] 刘菲, 吕维平, 段文益. 连续油管导向器结构形式及受力分析[J]. 石油矿场机械, 2017, 46(5): 29-33.
- [12] 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.
- [13] 李虎. 连续管井下作业下井深度影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- [14] 杨泽宁. 几种新型连续管钻井技术[J]. 西部探矿工程, 2014, 26(10): 88-91.
- [15] 谭钞月, 李猛, 李杰, 樊迦密, 罗金涛, 潘星. 连续管导向钻井控制系统与工作状态研究[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(1): 40-49.
- [16] 李猛, 贺会群, 张云飞. 连续管钻井电液定向器工具面角度调整分析[J]. 石油机械, 2016, 44(5): 1-7.
- [17] 胡亮, 高德利. 连续管钻定向井工具面角调整方法研究[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(2): 50-53.
- [18] 汪跃龙, 王海皎, 康思民, 等. 导向钻井稳定控制平台的反馈线性化控制[J]. 石油学报, 2014, 35(5): 952-957.
- [19] 陈苏, 贾建波, 卓晴, 等. 旋转导向钻井系统 Fuzzy-PID 控制算法[J]. 自动化与仪表, 2015, 30(7): 40-44.
- [20] 杨金显, 刘鹏威. 基于小波神经网络修正自适应滤波的钻具姿态解算研究[J]. 制造业自动化, 2023, 45(1): 156-160.