

# 连续管钻井定向器执行机构运动轨迹跟踪及测试

魏炯宇, 杨佳, 余志洋, 王域峰, 李洪杉, 杨昕宸, 樊迦密, 贺欣怡

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7日; 录用日期: 2025年8月18日; 发布日期: 2025年9月23日

## 摘要

连续管钻井(CTD)技术以其高效、灵活、成本低的优势在复杂油气藏开发中应用日益广泛。定向器执行机构作为CTD实现精确井眼轨迹控制的核心部件, 其运动轨迹跟踪精度直接影响钻井效率和工程质量。本文针对连续管钻井定向器执行机构的运动轨迹跟踪问题, 深入分析其结构原理与动力学特性, 设计一种基于自适应模糊PID控制器的轨迹跟踪策略, 并搭建室内模拟测试平台进行性能验证。测试结果表明, 所提出的控制方法能有效克服井下复杂扰动, 显著提升轨迹跟踪精度和系统鲁棒性, 为连续管钻井精准导向提供了可靠的技术支撑。

## 关键词

连续管钻井, 定向器执行机构, 运动轨迹跟踪, 自适应模糊PID控制

# Motion Trajectory Tracking and Testing of the Actuator of the Coiled Tubing Drilling Steering Tool

Jiongyu Wei, Jia Yang, Zhiyang Yu, Yufeng Wang, Hongshan Li, Xinchun Yang, Jiami Fan, Xinyi He

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

Received: Jul. 7<sup>th</sup>, 2025; accepted: Aug. 18<sup>th</sup>, 2025; published: Sep. 23<sup>rd</sup>, 2025

## Abstract

Coiled Tubing Drilling (CTD) technology is increasingly employed in the development of complex

文章引用: 魏炯宇, 杨佳, 余志洋, 王域峰, 李洪杉, 杨昕宸, 樊迦密, 贺欣怡. 连续管钻井定向器执行机构运动轨迹跟踪及测试[J]. 矿山工程, 2025, 13(5): 1037-1043. DOI: 10.12677/me.2025.135118

hydrocarbon reservoirs due to its advantages of high efficiency, operational flexibility, and cost-effectiveness. The steering tool actuator, serving as the core component for achieving precise wellbore trajectory control in CTD, directly influences drilling efficiency and project quality through its motion trajectory tracking accuracy. This paper addresses the motion trajectory tracking problem of the CTD steering tool actuator. It conducts an in-depth analysis of its structural principles and dynamic characteristics, proposes a trajectory tracking strategy based on an adaptive fuzzy PID controller, and establishes a laboratory-simulated testing platform for performance validation. Test results demonstrate that the proposed control method effectively overcomes complex downhole disturbances, significantly enhances trajectory tracking accuracy and system robustness, thereby providing reliable technical support for precise steering in coiled tubing drilling operations.

## Keywords

Coiled Tubing Drilling, Steering Tool Actuator, Motion Trajectory Tracking, Adaptive Fuzzy PID 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

随着非常规油气资源开发的深入,连续管钻井技术因其无需接单根、作业效率高、对储层伤害小等优点,在水平井、多分支井、老井侧钻等领域发挥着不可替代的作用[1]-[3]。定向器执行机构是实现CTD定向钻进的关键设备,通常安装于井下钻具组合(BHA)中,通过精确控制其内部导向块的径向位移或偏置角度,产生可控的侧向力,从而改变钻头前进方向,实现井眼轨迹的实时调整[4][5]。

执行机构能否精确、快速、稳定地跟踪预设的位移或角度指令,直接决定井眼轨迹的控制精度和钻井作业效率。然而,井下环境极其复杂,执行机构在运行过程中面临着高温、高压、强振动、泥浆冲蚀、负载突变、摩擦非线性以及信号传输延迟等多重干扰,给高精度运动轨迹跟踪带来了严峻挑战。因此,深入研究定向器执行机构的运动轨迹跟踪控制方法并对其进行有效测试,对于提升连续管钻井技术水平具有重要意义[6]-[8]。

## 2. 定向器执行机构结构与工作原理

定向器执行机构是实现连续管钻井精准轨迹控制的核心功能单元(图1)。该机构的核心组件包括一个具备耐高压高温特性的动力单元,通常选用无刷直流电机或液压马达,负责为整个执行机构提供必需的驱动力。该动力经传动机构滚珠丝杠螺母副、行星齿轮减速与偏心凸轮机构的组合或液压缸等,高效、精确地转换为导向块所需的直线位移或特定偏置角度。作为直接与井壁接触并产生导向所需侧向力的关键执行部件,导向块输出的位移量或偏置角度构成系统最终的控制目标变量[9]。

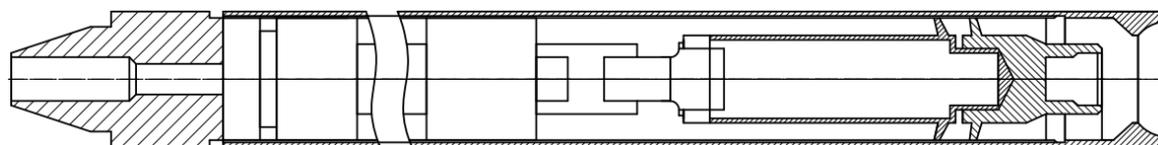


Figure 1. Schematic diagram of the coiled tubing drilling directional tool

图1. 连续管钻井定向器结构图

执行机构在实际井下作业中也面临显著的动态非线性和外部扰动挑战[10]。动态非线性主要体现在传动机构(齿轮副、丝杠螺母副、液压阀)普遍存在的死区现象,其源于制造间隙和机械磨损,导致小指令输入时无响应,进而影响控制精度。同时,导向块与井壁间强烈的库仑摩擦,其大小与运动方向相反且与速度无关,易引发低速运动时的黏滞-滑移现象,造成运动不平稳及精确控制困难。在液压驱动形式中,系统固有的流量-压力非线性及可能的滞环特性,以及大负载下传动链柔性可能引入的结构谐振,构成重要的非线性因素。外部扰动则主要来自井壁不规则性和地层变化引起的导向块接触力随机波动,钻井液流对执行机构壳体的不均衡冲击,以及井下高温导致材料热膨胀和润滑性能变化。这些综合的非线性因素与强外部扰动,会显著削弱开环控制的精度与鲁棒性,甚至可能导致系统失稳。

因此,为实现对导向块运动状态的高精度、高鲁棒性闭环控制,位置或角度传感器被部署以实时监测其实际位置或偏置角度,形成控制系统不可或缺的反馈环节。控制电路模块承担着接收地面控制指令、实时处理传感器反馈信号、并据此生成精确驱动信号以操控动力单元动作的核心任务。控制律设计需针对性处理上述死区、摩擦非线性及扰动特性,例如采用自适应控制补偿死区和摩擦变化、鲁棒控制抑制扰动、或利用观测器估计未建模动态。最终,一个坚固的密封承压壳体将上述所有精密核心部件封装在内,有效隔绝井下极端恶劣环境(高压、高温、钻井液腐蚀),确保整个执行机构在严苛工况下的长期可靠运行[11]。

### 3. 运动轨迹跟踪控制策略设计

针对连续管钻井定向器执行机构在复杂井下工况下面临的模型不确定性、强非线性和时变干扰,设计一种自适应模糊 PID 控制策略(图 2),旨在提升运动轨迹跟踪的精度、响应速度和鲁棒性。

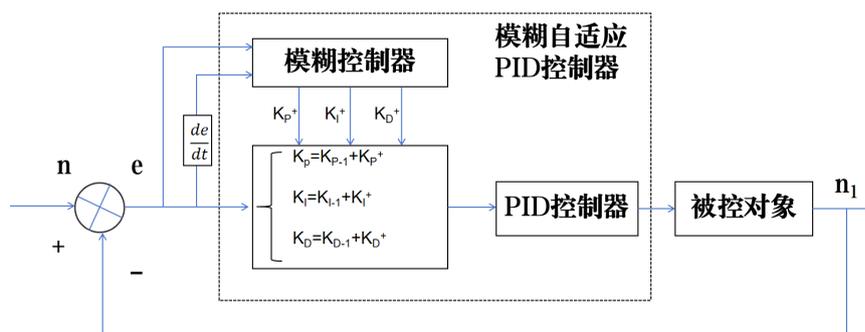


Figure 2. Schematic of the fuzzy adaptive PID controller  
图 2. 模糊自适应 PID 控制器

融合经典 PID 控制与模糊逻辑自适应机制,利用比例(P)、积分(I)、微分(D)环节的组合效应,为系统提供基本的轨迹跟踪能力和一定的抗干扰能力。为克服固定参数 PID 控制器在复杂非线性时变环境下性能下降的缺陷,引入模糊逻辑适应机制。设计一个模糊推理系统,实时在线分析轨迹跟踪误差  $e(t)$  及其变化率  $ec(t)$ ,并据此动态调整 PID 控制器的关键参数——比例系数  $K_p$ 、积分系数  $K_i$  和微分系数  $K_d$ 。其核心在于,模糊规则库设计基于执行机构动力学特性与典型干扰特性的深入理解,使控制器参数智能跟随系统状态变化,以应对井下复杂工况挑战[12] [13]。

模糊 PID 控制器的具体设计步骤如下进行:

(1) 输入输出变量定义:模糊推理系统的输入变量选定为轨迹跟踪误差  $e(t)$  和误差变化率  $ec(t)$ ,输出变量则设定为 PID 三个参数的调整量,即  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$  和  $\Delta K_d$ 。

再对输入变量  $e$ 、 $ec$  以及输出变量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  各自的论域进行合理划分。为每个变量定义一组

具有明确语义的模糊子集，将这些模糊子集选择合适的隶属函数，用以量化描述变量属于某个模糊子集的程度(表 1)。

**Table 1.** Membership functions and universes of discourse for the input variables

**表 1.** 输入变量的模糊隶属函数及其论域

模糊子集	隶属函数类型	参数(a, b, c, d)	论域范围
NB	梯形	(-6, -6, -4, -4)	[-6, -4]
NM	三角形	(-6, -4, -2)	[-6, -2]
NS	三角形	(-4, -2, 0)	[-4, 0]
ZO	三角形	(-2, 0, 2)	[-2, 2]
PS	三角形	(0, 2, 4)	[0, 4]
PM	三角形	(2, 4, 6)	[2, 6]
PB	梯形	(4, 6, 6, 6)	[4, 6]

(2) 模糊规则库构建：基于对系统特性的深入分析和专家经验，建立描述输入模糊变量(e, ec)与输出模糊变量( $\Delta K_p$ ,  $\Delta K_i$ ,  $\Delta K_d$ )之间因果关系的模糊规则集合。每条规则采用“IF (条件) THEN (结论)”的形式，描述当误差很大且误差快速增大时，需要大幅度增强比例作用以加速响应，同时减弱积分作用以防止超调，并适当增强微分作用以抑制误差增大的趋势。另一条规则“若误差 e 为零(ZO)且误差变化率 ec 为零(ZO)，则  $\Delta K_p$  为零(ZO)， $\Delta K_i$  为零(ZO)， $\Delta K_d$  为零(ZO)”则表示当系统已接近目标状态时，保持当前 PID 参数不变(表 2)。

**Table 2.** Membership functions and universes of discourse for the output variables

**表 2.** 输出变量的模糊隶属函数及其论域

子集	$\Delta K_p$ ([-3, 3])	$\Delta K_i/\Delta K_d$ ([-0.3, 0.3])
NB	(-3, -3, -2)	(-0.3, -0.3, -0.2)
NM	(-3, -2, -1)	(-0.3, -0.2, -0.1)
NS	(-2, -1, 0)	(-0.2, -0.1, 0)
ZO	(-1, 0, 1)	(-0.1, 0, 0.1)
PS	(0, 1, 2)	(0, 0.1, 0.2)
PM	(1, 2, 3)	(0.1, 0.2, 0.3)
PB	(2, 3, 3)	(0.2, 0.3, 0.3)

(3) 模糊推理与解模糊化：在控制器运行时，采用 Mamdani 等模糊推理方法，根据当前时刻的输入值  $e(t)$  和  $ec(t)$  激活相应的模糊规则，并通过模糊逻辑运算得到输出变量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的模糊集合。应用重心法(Centroid)等解模糊化方法，将这些模糊输出集合转化为精确的数值  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ 。

模糊规则库设计依据：模糊 PID 控制器规则库的构建植根于经典控制理论、系统动态特性分析及工程实践经验。比例增益调整遵循误差较大时增强响应速度、误差较小时抑制超调的原则；积分增益调节在持续小误差工况下强化稳态精度，面对大误差或快速瞬态过程则削弱积分作用以规避参数饱和；微分增益配置针对误差变化率特性，高变化率阶段增强阻尼效应，稳态阶段降低噪声敏感性。规则设计的本质是基于误差与误差变化率构成的相平面实施分区控制：系统远离平衡点时侧重快速纠偏能力，过渡阶

段强化微分抑制超调，稳定区域维持参数鲁棒性，特殊工况需增强微分平滑过渡。专家经验将参数整定知识形式化为规则映射，典型策略包括大误差域强化比例控制、设定点邻域增强微分抑振、小误差持续区谨慎提升积分精度，并针对被控对象特性协调微分与积分作用。设计过程需满足完备性、一致性、交互性及简洁性四项基本原则，确保控制器在动态响应与稳态精度间实现最优平衡[14] [15]。

参数在线调整：将解模糊化得到的参数调整量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  分别叠加到 PID 控制器预先设定的初始参数  $K_{p0}$ 、 $K_{i0}$ 、 $K_{d0}$  上，即可得到当前时刻作用于系统的实时优化 PID 参数：

$$K_p(t) = K_{p0} + \Delta K_p$$

$$K_i(t) = K_{i0} + \Delta K_i$$

$$K_d(t) = K_{d0} + \Delta K_d$$

最终控制律定义施加给动力单元的控制量  $u(t)$ 。该控制量由实时调整后的 PID 参数计算得出，其表达式为：

$$u(t) = K_p(t) \cdot e(t) + K_i(t) \cdot \int_0^t e(t) dt + K_d(t) \cdot (dec(t)/dt)$$

其中， $e(t) = r(t) - y(t)$  代表轨迹跟踪误差， $r(t)$  是期望的目标轨迹指令， $y(t)$  是传感器反馈的实际输出值。该控制律综合比例控制的快速性、积分控制的稳态精度消除能力以及微分控制的预测阻尼作用，并通过模糊逻辑实现了参数的在线自适应优化。

## 4. 测试系统搭建与实验验证

### 4.1. 测试平台搭建

为科学评估自适应模糊 PID 控制策略在实际工况下的性能表现，研究搭建一套室内模拟测试平台(图 3)。该平台聚焦井下关键环境因素复现，为执行机构样机提供全面、可控的性能验证环境。



Figure 3. Indoor simulation test platform  
图 3. 室内模拟测试平台

测试平台核心为被测定向器执行机构样机，集成驱动电机、精密传动机构、导向块以及高精度位移传感器。配备液压伺服加载装置，可施加阶跃、斜坡、正弦等多种形式的负载扰动，模拟井下导向块承受的实际井壁反作用力。振动模拟台用于复现井下钻具典型振动谱环境，考虑极端工况影响，平台可扩展集成高温高压试验舱。控制系统硬件由工业控制计算机(IPC)、高速数据采集卡(DAQ)及电机驱动器组成。软件层面，基于 LabVIEW 或 Simulink Real-Time 环境开发的控制程序，实现自适应模糊 PID 算法与传统

PID 算法并行部署、实时数据采集、轨迹指令发送、运行状态监控及数据存储分析功能。测量系统通过 LVDT 获取导向块位移，力传感器监测负载力变化，电流/电压传感器记录电机工作状态。

## 4.2. 测试内容与方法

为量化阶跃指令下执行机构的稳态精度并分析其动态响应特性，考察无负载与典型恒定负载下的性能差异，搭建测试平台，按以下流程开展测试：先完成设备集成与校准，设定采集参数；分别在无负载与施加恒定负载条件下，于执行机构工作行程内选取 3~5 个位置点，稳定后发送阶跃指令，DAQ 同步记录指令与位移数据；最终通过数据处理提取目标位置、负载大小、环境温度等参数，计算上升时间、调节时间、超调量及稳态误差，开展均值/标准差统计、位置/负载关联趋势分析；可视化呈现关键指标数据表、典型响应对比曲线、稳态误差-负载/位置关系曲线，系统评估控制性能。

## 4.3. 传统 PID 控制器参数整定

进行性能对比，采用传统 PID 控制器参数通过经典的 Ziegler-Nichols (ZN) 阶跃响应法进行整定。首先断开控制器反馈，向执行机构施加阶跃输入，记录其开环阶跃响应曲线；根据响应曲线辨识出系统的近似一阶滞后加纯延迟模型参数(延迟时间  $L$ 、时间常数  $T$ )；随后依据 ZN 法整定规则计算出比例增益  $K_p$ 、积分时间  $T_i$  和微分时间  $T_d$  的初始参数值[16][17]。通过闭环阶跃响应微调，最终确定一组使系统在无负载条件下达到稳定、响应迅速且无明显振荡的 PID 参数( $K_p = X.X_s$ ,  $K_i = Y.Y_s$ ,  $K_d = Z.Z_s$ )。

ZN 法是工业界广泛认可且应用成熟的 PID 参数工程整定方法，其理论基础清晰，操作性强；整定过程基于执行机构的实际开环动态特性，确保参数与受控对象的匹配性；最终参数在无负载条件下验证了良好的稳定性和动态性能，为后续对比自适应模糊 PID 的性能提升提供了公平、可靠的参照基准。

## 4.4. 测试结果与分析

对实验数据分析表明，自适应模糊 PID 控制器相较于传统 PID 控制器，在阶跃响应中性能显著提升。上升时间由 350 ms 缩短至 280 ms，调节时间由 800 ms 减少至 500 ms，超调量从 15.2% 大幅降低至 5.8%，稳态误差由 0.08 mm 减小到 0.02 mm (表 3)。这一结果充分验证自适应模糊 PID 在提高响应速度和稳态精度方面的有效性。

Table 3. Experimental data

表 3. 实验数据

控制器类型	上升时间(ms)	调节时间(ms)	超调量(%)	稳态误差(mm)
传统 PID	350	800	15.2	0.08
自适应模糊 PID	280	500	5.8	0.02

## 5. 结论

(1) 针对井下强非线性、时变干扰工况，自适应模糊 PID 策略通过实时优化 PID 参数，有效提升动态跟踪、响应速度、稳态精度及抗干扰性能，为井下高精度轨迹跟踪提供可靠技术路径。

(2) 搭建室内模拟测试平台，复现井下负载、振动等环境，构建逼真可控实验环境；测试数据全面客观，验证自适应模糊 PID 较传统方法优势，确认算法合理性及平台可靠性。

(3) 高精度轨迹跟踪是连续管钻井井眼控制前提，开发的高性能自适应模糊 PID 算法提升定向器执行机构控制性能，增强复杂结构井轨迹控制，支撑精准地质导向，推动技术在复杂油气藏开发应用。

## 参考文献

- [1] 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研究与现场试验[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(6): 56-63.
- [2] 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.
- [3] 程载斌, 姜伟, 蒋世全, 高宝奎. 旋转导向系统三翼肋偏置位移矢量控制方案[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 676-679, 683.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 冯定, 王鹏, 张红, 施雷, 洪腾蛟, 苗恩铭, 涂忆柳. 旋转导向工具研究现状及发展趋势[J]. 石油机械, 2021, 49(7): 8-15.
- [8] 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.
- [9] 刘琦. 推靠式连续管电液定向器执行机构控制系统研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆科技学院, 2023.
- [10] 马昌昌. 无缆井眼随钻轨迹测量系统研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [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/OL]. 石油钻探技术, 1-16. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1763.TE.20250321.1147.004.html>, 2025-07-02.
- [12] 谭金龙, 陈军, 赵启, 等. 基于改进型双重深度确定性策略梯度与自适应分布式模型预测控制融合的电网侧储能系统协同优化方法[J/OL]. 储能科学与技术, 1-11. <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0473>, 2025-07-13.
- [13] 鲁港, 王刚, 邢玉德, 孙忠国, 张芳芳. 定向井钻井空间圆弧轨道计算的两个问题[J]. 石油地质与工程, 2006, 20(6): 53-55.
- [14] 顾乐成, 魏秦文, 王灶红, 梅丹阳, 丁森林. 定向钻复合扩孔器运动仿真分析[J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2024(11): 42-53.
- [15] 苗芷芃, 万教育, 徐华冬, 张瑞平, 王洪涛, 李俊胜, 张兴龙. 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.
- [16] 唐军, 张皓, 陈伟军. 基于分数阶PID控制器的多模型神经网络控制策略[J]. 计算技术与自动化, 2025, 44(2): 99-105.
- [17] 杨辰. 静态扭矩标定试验台的控制系统设计[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2025.