

# 旋转导向工具RSS与传统定向钻井工具泥浆马达的优选

尹彦文

中国石化中原石油工程公司钻井一公司, 河南 濮阳

收稿日期: 2025年6月10日; 录用日期: 2025年7月12日; 发布日期: 2025年7月29日

## 摘要

定向钻井技术是油气勘探开发的关键技术, 尤其近年在页岩油气等非常规资源开发中应用更为广泛。旋转导向工具RSS和传统的定向工具泥浆马达作为定向钻井技术的主要工具, 正确地选择定向工具不仅关系到定向井成本, 甚至关系到施工的成败。文章对旋转导向工具RSS和传统定向工具的特点进行分析, 并根据这两种工具在施工过程中所产生的费用建立起实用的模型, 为这两种工具的选择提供参考和技术依据。

## 关键词

旋转导向, 定向钻井, 非常规资源, 泥浆马达, 成本, 优选

## Optimization of Rotary Steerable System (RSS) vs. Traditional Directional Drilling Tool Mud Motor

Yanwen Yin

No. 1 Drilling Company, Sinopec Zhongyuan Petroleum Engineering Company, Puyang Henan

Received: Jun. 10<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jul. 12<sup>th</sup>, 2025; published: Jul. 29<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Directional drilling technology is a key technology for oil and gas exploration and development, especially with its increasingly widespread application in recent years in the development of unconventional resources such as shale oil and gas. The Rotary Steerable System (RSS) and the traditional

directional tool, the mud motor, are the primary tools for directional drilling technology. The correct selection of the directional tool not only impacts the cost of directional wells but can even determine the success or failure of the operation. This article analyzes the characteristics of the RSS and the traditional mud motor tool. Based on the costs generated during the construction process using these two tools, a practical model is developed to provide a reference and a technical basis for selecting between them.

## Keywords

Rotary Steerable, Directional Drilling, Unconventional Resources, Mud Motor, Cost, Optimization

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

近年来随着石油勘探开发的难度增大、环境保护要求变高，国家政策大力支持非常规资源开发。国务院印发的《2024~2025 年节能降碳行动方案》提出，要优化油气消费结构，合理调控石油消费，推广先进生物液体燃料、可持续航空燃料。加快页岩油(气)、煤层气、致密油(气)等非常规油气资源规模化开发。“双碳”目标下，加快非常规天然气产业高质量发展，对增加清洁能源供应、助力“双碳”目标实现以及保障能源安全具有重要意义[1]。而定向井技术是非常规资源开发的关键技术。旋转导向技术在国内外油气开发中已经得到广泛应用，美国在页岩油气开发中应用比例达到 95%以上，助力美国页岩油气水平井水平段长度突破 8000 米，我国长宁 - 威远国家级页岩气开发示范区页岩气水平井造斜段应用旋转导向钻井技术，与常规钻井技术相比，钻进效率提高了 3~5 倍；新疆玛湖油田油井造斜段应用旋转导向钻井技术钻进，钻进效率提高了 3.53 倍[2]。旋转导向工具 RSS 因为其工作原理和设计，在施工中展现出巨大优势：连续旋转钻进的同时进行定向，避免了泥浆马达定因滑动定向而降低钻速，可以实现井眼轨迹精准控制，能及早应对储层变化及时做出调整，能实现薄层、夹层等特殊油层开发，可使钻压等钻井参数能有效传到井底、机械钻速高、井眼净化好、摩阻扭矩小、水平段钻得更长、井眼轨迹光滑、减少起下钻和通井时间、井下事故复杂少、下套管、完井的作业顺利、有利于增产等。尽管旋转导向系统(RSS)相比传统定向工具泥浆马达具备诸多优势，由于其昂贵的使用维护成本，旋转导向工具 RSS 本质是“为精度付费”的技术，在实际定向钻井工程中，要综合考虑钻井的成本，在选择定向工具上需严格评估投入产出比，所以需要研究各自的特点以及使用成本，进行多方面的综合性评估，从而作出合理的选择。

## 2. 旋转导向工具 RSS 的分类

旋转导向工具 RSS 主要基于以下几个核心维度，不同维度决定了其工作原理、性能特点和适用场景。

### 2.1. 按导向机制分类(最核心分类)

#### 2.1.1. 推靠式系统(Push-the-Bit)

原理：在钻头后方伸出液压推靠块抵住井壁，产生反作用力迫使钻头偏转。

特点：局部造斜能力强，适合中高造斜率需求。结构相对简单，但井眼质量略逊于指向式(可能出现微小突变)。

代表技术：斯伦贝谢 Power Drive Orbit，贝克休斯 AutoTrak，中海油 Welleader，璇玑，中国石油川庆钻探公司 CG STEER，中石化的 SINOMACS ATS 和龙旋导 LWD-旋转导向工具 RSS 均属于推靠式[3]。

### 2.1.2. 指向式系统(Point-the-Bit)

原理：通过内部机构(如可调弯外壳或导向轴)直接改变钻头轴线的方向，使钻头朝目标方向钻进。

特点：井眼轨迹平滑，狗腿度分布均匀，钻头受力均衡。延伸能力(水平段长度)强，适合长水平段、软硬地层。

代表技术：斯伦贝谢 PowerDrive Xceed、哈里伯顿 Geo-Pilot(导向轴指向)，中海油璇玑。

### 2.1.3. 混合式系统(Hybrid System)

原理：结合指向式和推靠式双重机制(如先调整钻头指向，再辅助推靠力)。

特点：兼顾轨迹平滑性与高造斜能力，适应复杂地质条件。技术复杂度高，代表前沿发展方向。

代表技术：斯伦贝谢 Power Drive Archer (指向 + 推靠混合)。

## 2.2. 其他方式分类

### 2.2.1. 按结构形式

不旋转套结构：工作稳定可靠，测量与控制难度小，易实现。

全旋转套结构：井下工作环境适应性强，有利于清洁井眼，需要精确同步控制，实现难度较大，在井眼扩大和软地层也可使用。

### 2.2.2. 按照测量控制平台进行分类[4]

静态：支撑于井壁、不随钻柱旋转的测控机构；测量、控制过程均处于相对稳定状态，控制运算相对简单。

动态：稳定平台与钻柱保持同速率反方向转动，从而与大地保持相对静止，实现测量和控制；控制需精确同步，难度较大。

捷联式：靠高灵敏度和宽频带传感器配合复杂的控制运算实现其测控功能；技术较先进，但不太成熟可靠，应用较少。

### 2.2.3. 按执行动作实现方式分类

液压系统推靠井壁；分时接触(拍打)井壁；液压系统内推导向轴；偏心环组合控制导向。

### 2.2.4. 按轴动力源驱动方式分类

井下发电机、蓄电池驱动；高压钻井液驱动(钻柱内外压差)；复合驱动及其它方式驱动。

## 3. 旋转导向工具与传统定向工具的优选

### 3.1. 根据旋转导向工具的原理和特点选择时需要考虑的因素

#### 3.1.1. 设备特点

旋转导向工具 RSS 主要依靠钻柱的转速进行钻进，对转速要求比较高，一般需要配合顶驱设备使用，传统泥浆马达是依赖泥浆的井下液压动力驱动钻头旋转，可以在没有顶驱设备实现功能。当然泥浆马达对泥浆泵要求较高，这可能限制泥浆泵缸套尺寸，从而影响井眼清洁效果。

除了对动力设备要求，旋转导向工具 RSS 对钻头的要求也比较严格，泥浆马达在扭矩，转速组合方面具有更广的选择范围，使得钻头选型比旋转导向工具 RSS 更灵活。某些地层需特定类型钻头钻进，可能不能满足旋转导向工具 RSS 对钻头的要求，此类情况下就需要选择泥浆马达。

### 3.1.2. 钻井参数与定向性能

钻进过程中,不同钻井参数直接影响定向性能,比如钻压对旋转导向工具 RSS 和对泥浆马达的造斜能力影响是不同的。使用泥浆马达时,更高钻压有助于提升造斜率,但推靠式旋转导向工具 RSS 则相反,施加高钻压会缩短钻头侧向切削时间,从而降低造斜率。泥浆马达的机械结构虽在滑动钻进时具备造斜率优势,但是在此过程中机械转钻速也降低。

就钻进性能而言,旋转导向工具 RSS 在定向作业(增斜、降斜或扭方位)时的瞬时机械钻速通常高于泥浆马达。尽管旋转导向工具 RSS 在定向段通常更快,但在稳斜段未必如此。泥浆马达凭借其设计的额外井下转速优势,提高机械钻速。因此,平均机械钻速的对比取决于定向段与总进尺的比例。

### 3.1.3. 井眼质量

井眼质量是钻井成功的关键指标,它影响可钻深度、钻进速率、钻具寿命,以及下套管、测井和完井作业。旋转导向工具 RSS 钻井会产生较低井眼曲折度(即与设计轨道的偏离),减少了摩阻,增加了水平段可钻长度。此外,旋转导向工具 RSS 的持续旋转可显著提升井眼清洗程度,从而降低了卡钻风险。但若旋转导向工具 RSS 卡钻落井没有成功打捞,其高昂成本将导致更严重的损失。

### 3.1.4. 钻井力学与动力学

振动是定向钻井工具需要考虑的重要问题,主要包括:横向振动,轴向振动,黏滑振动。轴向振动在浅层更显著,可能损坏地面设备,可通过钻头上方的减震器缓解。横向振动危害最大,易导致钻具扭断。黏滑振动则会损坏井下传感器和钻具。泥浆马达在旋转钻进时能隔离钻头振动向上传递,滑动阶段则完全避免扭振。振动对泥浆马达主要产生机械影响,对旋转导向工具可能产生机械和液压部件影响或损坏。某些情况下,降低地表转速可缓解井下横向振动,此时泥浆马达优于旋转导向工具 RSS [5]。研究也表明横向振动超过 5 g 均方根会显著增加扭断风险,转速是影响应力的关键因素,泥浆马达限制转速以避免应力集中,因此,泥浆马达的钻柱应力小于旋转导向工具 RSS,但旋转导向工具 RSS 能形成更光滑的井眼,降低摩阻,并且避免了滑动定向从而降低螺旋屈曲风险[6]。此外 BHA 设计对振动倾向的影响不亚于导向工具的选择。为避免井下复杂,在使用定向工具时候需要充分考虑振动带来的问题。

### 3.1.5. 井设计与地质环境

长水平段钻井通常优选旋转导向工具 RSS,因其具有更好的重量传递特性。若需精确地质导向,泥浆马达调整轨迹耗时较长而不受青睐。旋转导向工具 RSS 更能较迅速地调整和控制井眼轨迹,实现更可靠的井眼定位。当然推靠式旋转导向工具 RSS 在以下情况并非最佳选择:地层易冲蚀,地层松软,地层抗压强度高或过低。此时,指向式旋转导向工具 RSS 因对冲蚀不敏感且能实现目标更具优势。

### 3.1.6. 特殊应用

在套管钻井等特殊作业中,由于小尺寸泥浆马达底部钻具组合的定向能力受限,旋转导向系统(RSS)可能更适用于小井眼环境。泥浆马达在裸眼侧钻中效率更高。

## 3.2. 从经济成本上进行优选

在定向钻井作业过程中,每日消耗成本包含钻机费用、泥浆服务费、录井服务费、设备租赁费、定向钻井服务费、待机费及人员成本等。由于旋转导向工具 RSS 可以有效减少滑动定向时间,提高钻井效率,井眼净化好,摩阻扭矩小,降低通井次数,减少井下事故,轨迹控制精确,井眼轨迹更加平滑等优点,可以有效地降低某些环节的费用,但是由于旋转导向工具 RSS 的使用费用也比较高,一般是传统泥浆马达日费的 5 倍多[7]。在对定向钻井成本计算方面,目前还很少有将旋转导向工具 RSS 和泥浆马达的

优缺点对作业时效影响的成本计算模型。在选择定向工具时大多只考虑到定向钻进阶段产生的费用，或者笼统地将整口井施工产生的总费用做对比。单只考虑定向钻进这一段作业产生的成本而忽略井眼情况对作业时效的影响，这会导致结果片面性。当然整个钻井周期除了定向钻进，还有非定向钻进，固井，电测等等作业，如果笼统地统计整个钻井周期成本也会导致结果偏离实际。我们可以从组合定向工具开始到成功下入该井段套管这段时间来综合考虑钻井成本。在这个施工周期，影响钻井的成本因素包括纯钻进，通井，下套管，起甩定向工具作业费用。综合上文提到的钻机每日消耗成本，我们可以用以下模型来计算选择不同的定向工具带来的钻井成本，其主要包含以下 4 个公式。

$$T = T_d + T_t + T_{ml} + T_c \quad (1)$$

$$C_s = R_s \times T \quad (2)$$

$$C_t = C_f + R_d \times (T_d + T_t + T_{ml}) \quad (3)$$

$$C = C_t + C_s \quad (4)$$

这里的  $T$  是指从开始组合定向仪器到套管顺利下到仪器所钻至井深的总时间， $T_d$  是使用定向工具钻进时间， $T_t$  是起下钻时间  $T_t$ ， $T_{ml}$  是组合与甩定向工具时间， $T_c$  是指下套管时间(包括下套管工具的安装时间)，单位均为小时。 $C$  是指的总成本， $C_t$  是定向工具的成本， $C_s$  是钻机租赁费用与第三方服务费用之和。 $C_f$  是指定向工具基本费用(包括最低基础租赁费和动迁费用)， $R_d$  是指定向工具的日费率。 $R_s$  是指钻机每日租赁费与第三方服务费用之和。

下面以某定向井井眼施工为例来验证说明，该井位目标总斜深为 3477 米，其定向工具收费情况：旋转导向工具 RSS 基础费用为 10,000 美金，日费率为 27,020 美金，纯钻进时间为 2.18 天，传统泥浆马达定向工具基础费用为 930 美元，日费为 5022 美元，纯钻进时间为 8.43 天，该井队第三方服务日费为 49,841 美元[8]。以沙特某区域施工现场多口井正常作业过程中统计计算起下 RSS 工具需要 10 小时，起下传统定向工具泥浆马达需要 12 个小时，组合甩传统定向工具泥浆马达需要 3 小时，组合和拆甩旋转导向工具 RSS 时间 5 小时，假设使用旋转导向工具 RSS 不需要通井，使用传统泥浆马达需要再下通井钻具需要 15 小时，两种方式下套管时间均为 24 小时。旋转导向工具 RSS 成本计算：

$C_f = 10,000$  美元  $R_d = 27,020$  美元， $T_d = 2.18 \times 24 = 52.32$  小时， $T_t = 10$  小时， $T_{ml} = 5$  小时， $T_c = 24$  小时(无通井需求)， $R_s = 49,841$  美元/天；

总时间  $T = 52.32 + 10 + 5 + 24 = 91.32$  小时，折合天数  $= 91.32/24 = 3.805$  天；

定向工具成本： $C_t = 10,000 + 27,020 \times (52.32 + 10 + 5)/24 = 85,791$  美元；

服务成本： $C_s = 49,841 \times 3.805 = 189,680$  美元；

总成本： $C = 85,791 + 189,680 = 275,471$   $C = 85,791 + 189,680 = 275,471$  美元；

传统定向工具泥浆马达成本计算：

$C_f = 930$  美元  $R_d = 5022$  美元， $T_d = 8.43 \times 24 = 202.32$  小时  $T_t = 12$  小时， $T_{ml} = 3$  小时， $T_c = 24$  小时，通井时间  $= 15$  小时， $R_s = 49,841$  美元/天；

总时间  $T = 202.32 + 12 + 3 + 24 + 15 = 256.32$  小时，折合天数  $= 256.32/24 = 10.68$  天；

定向工具成本： $C_t = 930 + 5022 \times (202.32 + 12 + 3)/24 = 46432$  美元；

服务成本： $C_s = 49,841 \times 10.68 = 532,302$  美元；

总成本： $C = 46,432 + 532,302 = 578,734$  美元；

通过以上分析该施工井位定向钻井阶段所采用旋转导向 RSS 技术所花费成本约为使用传统泥浆马达定向成本的 47.6%，大大地节约了钻井成本，且降低了井下风险，所以该井位优先选用旋转导向工具 RSS 钻进。

通过以上公式可以分析，钻井成本受到多方面因素影响，除了定向工具的费用，日常的钻机租赁费

用, 第三方服务费也大大影响了钻井成本。旋转导向技术在节省定向钻进时间的同时也减少了第三方服务费用和钻机租赁费用, 当然如果节省的费用无法弥补其昂贵的使用费用, 在满足正常施工的情况下就可以选择传统的定向工具泥浆马达。例如在荣威页岩气田某井位, 前三开 215.9 mm 井眼井身结构结合仪器厂家技术服务费用与螺杆、钻头的费用, 以及使用旋转导向工具 RSS 的成本, 最终单井施工时旋转导向的综合收费为地质导向工具的 3.5 倍。结合该井位已完钻井的实际提前完钻日数综合考虑井队日费成本, 节约的日费成本并不足以抵扣旋转导向的昂贵费用[9]。其中主要因素就是旋转导向工具 RSS 所带来的经济优势不足以抵扣其自身的使用费用。

为了使模型更准确和具有预测性, 可以将总时间  $T$  的各个组成部分  $T_d$ ,  $T_t$ ,  $T_{ml}$ ,  $T_c$  分解为更细化的函数, 考虑井眼质量、工具特性、钻井参数、人员操作效率等因素的影响, 可以将成本模型做一下改进:

$$\text{定向钻进时间 } T_d = \frac{D}{ROP} + t_{\text{corr}}(D_h, DLS) \quad (5)$$

其中:  $D$ -目标井段长度, 单位米(m);  $T_{\text{corr}}(D_h, DLS)$ -纠偏时间函数, 与井眼尺寸, 狗腿度相关, 单位小时(h), 可根据历史数据做统计分析得到相关性函数;  $ROP$ -机械钻速, 单位米/小时(m/h);  $D_h$ -井眼尺寸, 单位毫米(mm),  $DLS$  狗腿度, 单位度/30 米(°/30m)。目前机械钻速  $ROP$  计算可以采用修正杨格模式

$$ROP = K_R (W - M)n^\lambda \frac{1}{1 + C_2 h} C_p C_h \quad (6)$$

其中  $W$ -钻压, 单位千牛(KN);  $M$ -门限钻压, 单位千牛(KN);  $n$ -转速, 单位转/分钟(r/min);  $\lambda$ -转速指数;  $C_2$ -牙齿磨损系数;  $C_h$ -水力净化系数;  $C_p$ -压差影响系数,  $h$ -牙齿相对磨损高度;  $K_R$ -地层可钻系数, 与地层岩石机械性质、钻头类型以及钻井液性能有关。

$T_{\text{corr}}(D_h, DLS)$ -纠偏时间可以根据工具操作特性和历史数据综合分析获得。

旋转导向工具 RSS 与泥浆马达导致的起下钻时间不同的主要原因是由起下钻井段长度, 次数, 井眼摩阻, 清洗效果, 人员操作技能以及上卸扣时间决定的, 可以表示为:

$$T_t = N_t \frac{D}{v_t(\eta_f, \eta_c, \eta_o)} + T_j \quad (7)$$

其中  $N_t$ -起下钻次数;  $D$ -目标井段长度, 单位米(m);  $v_t(\eta_f, \eta_c, \eta_o)$ -起下钻速率, 单位米/每小时(m/h), 与井下摩阻系数  $\eta_f$ , 井眼清洗系数  $\eta_c$ , 井队人员操作系数  $\eta_o$  相关,  $T_j$ -上卸扣时间, 单位小时。

井下摩阻系数可以由常用的钻柱摩阻模型 Johancsik 模型和 Aadnoy 3D 组合模型计算得出[10]。井眼清洗系数  $\eta_c$  可以由斜井井眼清洗模型[11]计算得出。人员操作系数  $\eta_o$  可以根据历史数据统计得来。

拆装定向工具的时间  $T_{ml}$  与工具尺寸, 工具数量, 人员操作能力相关, 可以表示为:

$$T_{ml} = f(N_t, T_s, \eta_o) \quad (8)$$

其中  $N_t$ -工具数量;  $T_s$ -工具尺寸, 单位毫米(mm),  $\eta_o$ -人员操作能力系数, 这  $f(N_t, T_s, \eta_o)$ , 这几个参数都从历史数据统计获得。

旋转导向工具 RSS 与泥浆马达使得下套管时间不同主要是由井段长度, 井眼摩阻, 清洗效果, 人员操作技能以及上卸扣时间决定的, 可以表示为:

$$\text{下套管时间 } T_c = T_p + \frac{D}{v_c(\eta_f, \eta_c, \eta_o)} + T_{cj} \quad (9)$$

其中  $T_p$  为准备下套管工具时间, 单位小时(h);  $D$ -目标井段长度, 单位米(m); 函数  $v_c(\eta_f, \eta_c, \eta_o)$ -纯下套管时间, 单位小时(h), 与井下摩阻系数  $\eta_f$ , 井眼清洗系数  $\eta_c$ , 井队人员操作系数  $\eta_o$  相关;  $T_{cj}$  为上卸扣时

间，以上参数和起下钻参数获得方式一致。

将以上公式 5、7、8、9 带入之前的公式 1，即可计算出总时间  $T$ ，根据公式 2 即可得到  $C_s$  钻机租赁费用与第三方服务费用之和，将公司 5，7，8 带入公式 3 即可得到定向工具的成本  $C_t$ ，再根据公式 4 即可计算出总成本：

$$C = C_f + R_d \times \left( \frac{D}{K_R (W-M) n^\lambda \frac{1}{1+C_2 h} C_p C_h} + t_{\text{corr}}(D_h, DLS) + N_t \frac{D}{v_t(\eta_f, \eta_c, \eta_o)} + T_j + f(N_t, T_s, \eta_o) \right) + R_s \times \left( \frac{D}{K_R (W-M) n^\lambda \frac{1}{1+C_2 h} C_p C_h} + t_{\text{corr}}(D_h, DLS) + N_t \frac{D}{v_t(\eta_f, \eta_c, \eta_o)} + T_j + f(N_t, T_s, \eta_o) + T_p + \frac{D}{v_c(\eta_f, \eta_c, \eta_o)} + T_{c_j} \right) \quad (10)$$

#### 4. 结论与建议

通过旋转导向工具 RSS 与传统的泥浆马达的性能以及其适用性分析，需要综合考虑实际钻井施工中不同的设备特点，钻井参数与定向性能，钻井力学和动力学，井眼质量要求，钻柱应力分析，可以优先选择适合作业条件和工艺的定向工具。除此之外根据对比旋转导向工具 RSS 的优点，综合考虑其影响钻井成本的因素，包括纯钻进时间、组合甩仪器时间、钻进后井眼规则情况影响的起下钻时效、通井时间、以及后续的下套管时间，建立起这几个主要因素产生的成本模型，通过该模型可以用于计算对比旋转导向工具 RSS 与传统泥浆马达的综合成本，为选择使用定向工具提供了一种优选方法。其中的变量可以根据历史井位数据作参考。在选择定向工具的时候，往往需要将各种因素放在一个系统来统一看待，除了以上因素还要考虑到井下复杂情况，例如卡钻事故导致定向仪器落井所带来损失风险，当然除了短期的成本，选择正确使用定向工具对油气藏后期产量的影响也是需要考虑的，因为钻井工程绝对不是一个简单的单元，提高钻井效率，降低安全风险，节约钻井成本，创造更大的效益，永远是一个永恒的话题。为了更加准确地选择定向工具，必须要有一个更加完善地模型，将所有影响因子都充分考虑，这就需要有一个更庞大的模型和数据处理系统。目前大数据，机器学习和人工智能技术正在飞速发展，通过这些技术，建立起更精确的优选模型，来指导我们在实际生产过程中更方便，更准确地选择定向工具。

#### 参考文献

- [1] 渠沛然. 致密气跻身我国天然气供应主力[N]. 中国能源报, 2024-06-10(008).
- [2] 秦永和, 杨建勇, 房平亮, 等. 大力发展旋转导向钻井 促进非常规油气革命[J]. 石油科技论坛, 2025, 44(1): 43-50, 85.
- [3] 秦永和. 滑动导向与旋转导向钻井技术进展及发展对策[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(6): 1-9.
- [4] 苏义脑, 窦修荣, 高文凯, 等. 旋转导向系统研究现状与发展趋势[J]. 钻采工艺, 2024, 47(3): 1-8.
- [5] Raap, C., Craig, A. and Perez, D. (2011) Understanding and Eliminating Drill String Twist-Offs by the Collection of High Frequency Dynamics Data. *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*, Muscat, 24-26 October 2011, SPE-148445-MS. <https://doi.org/10.2118/148445-MS>.
- [6] Nour, M., Elsayed, S.K. and Mahmoud, O. (2024) A Supervised Machine Learning Model to Select a Cost-Effective Directional Drilling Tool. *Nature Scientific Reports*, **14**, Article No. 26624. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76910-z>
- [7] Askari, H., Tookallo, K. and Sayadi, M.R. (2025) Comparison of Mud Motor and the Rotary Steerable System (RSS) as Two Main Directional Drilling Methods. *Petroleum and Chemical Industry International*, **8**, 1-10.
- [8] Wardana, R.S. and Andoni, B. (2019) Performance Comparison Analysis between RSS and Conventional Mud Motor in MAVVAR Field. *PETRO: Jurnal Ilmiah Teknik Perminyakan*, **8**, 113-117. <https://doi.org/10.25105/petro.v8i3.5513>

- 
- [9] 罗翰. 威荣页岩气田水平井地质导向技术及应用[J]. 西部探矿工程, 2024, 36(4): 61-65.
- [10] 吴泽兵, 郭龙龙, 潘玉杰. 水平井钻井过程中井底钻压预测及应用[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(1): 9-13.
- [11] 王丹辉, 宋洵成. 斜井井眼清洗模型[J]. 石油钻探技术, 2003(2): 9-10.