

# Research and Application of Horizontal Well Trajectory Optimization and Control Technology

Xiang Wang

Fourth Engineering Project Department, Changqing Drilling Corporation, Sinopec Chuanqing Drilling Company, Xi'an, Shaanxi, 710299, China

## Abstract

As oil and gas exploration continues to advance into deeper strata and more complex formations, horizontal wells have gained increasing application in field development due to their advantages of enhanced gas production per well and cost reduction. However, controlling wellbore trajectory during horizontal drilling remains challenging. Complex geological formations, variable rock properties, and dynamic downhole conditions often lead to trajectory deviations from designed paths, resulting in reduced construction efficiency, higher costs, and difficulties in subsequent operations. This study investigates trajectory optimization control technologies for three wellbore sections: straight sections, inclined sections, and horizontal sections. For straight sections, the focus is on optimizing downhole tool combinations and drilling parameters to correct deviations. In inclined sections, the research emphasizes selecting appropriate tools and adjusting drilling speeds to achieve smooth inclination formation without fluctuations. For horizontal sections, the emphasis is on maintaining stable drilling to prevent significant trajectory fluctuations. Additionally, auxiliary friction reduction and resistance mitigation technologies are explored to enhance drilling speed. Through the application of these key technologies, this paper establishes a comprehensive technical framework for horizontal well trajectory optimization and control.

## Keywords

horizontal well; trajectory optimization; control technology

# 水平井轨迹优化与控制技术研究及应用

王翔

中石油川庆钻探公司长庆钻井总公司第四工程项目部, 中国·陕西 西安 710299

## 摘 要

随着油气勘探开发不断向深层、深层以及更难的复杂地层发展, 水平井由于其能够增加单井产气量、减少成本等优点, 在油气田开发过程中得到了越来越广泛的应用。但是在水平井钻井中要控制井眼轨迹非常困难, 如遇到地层岩性变化, 钻具受力情况较为复杂, 出现偏斜几率大, 会使得井眼轨迹偏离设计井眼轨迹, 导致施工效率低、费用高、难以后期施工等问题。本文通过对水平井轨迹优化控制技术的研究, 分别对直井段、造斜段、水平段的轨迹优化控制技术展开分析, 并对不同井段采取不同的轨迹优化控制措施。直井段主要针对如何纠斜打直进行优化, 即优化钻具组合及钻进参数; 造斜段主要探讨如何选择造斜工具、调整钻进速度, 使之能够顺利造斜且无波动产生; 水平段重点研究保持平稳钻进, 确保水平井无大范围轨迹波动问题发生; 并研究辅助减摩降阻提速技术, 降低摩擦阻力, 提高钻速。利用关键技术研究与应用, 形成本文水平井轨迹优化控制的技术体系。

## 关键词

水平井; 轨迹优化; 控制技术

## 1 引言

石油与天然气勘探开发应用中, 在注重用钻井水平井技术来提高油气采收率以及降低开采成本的基础上, 但是, 由于水平井钻井方式比较特殊, 因此其井眼轨迹需要进行不断的优化和控制。这样有利于更好的保证钻井速度, 保证钻井的安全性和油气开采总量。另外, 如在长庆油田井下钻具那么情况下, 受各种因素的影响, 使水平井轨迹控制较难实

现, 并且会给长庆油田的整体发展和有效运营带来严重阻碍。因此, 深入研究水平井轨迹优化与控制技术, 对于提升我国石油钻井技术水平、保障国家能源安全具有重要意义。

## 2 水平井轨迹优化控制技术分析

### 2.1 直井段井眼轨迹优化控制

#### 2.1.1 直井段优化控制

在直井段进行优化时, 需要防斜打直, 因此, 应注重导眼, 换言之, 在直井阶段, 可以通过控制相对较小的井斜, 令产生斜度的点坐标与靶点的坐标最大限度的处于同一直线上, 以降低斜井段扭方位的角度, 导眼是防斜打直的主要

【作者简介】王翔(1984-), 男, 中国安徽砀山人, 本科, 工程师, 从事石油工程研究。

手段,使侧向位移受到限制。对于目标前方距离较近的井,精确控制直井段,将井斜度调小,在造斜点产生反向位移,增加目标前方距离,降低斜井段犬腿度,使井轨迹更平滑,减少施工难度与风险。而对于目标前方距离较大的井,减少大井斜稳段长度,降低控制复杂性和难度,使增斜段井轨更圆滑,避免轨迹波动。优化斜井段井轨时确保圆顺度,才能实现井轨整体优化,提升钻井工程效率与安全性。

### 2.1.2 直井段钻具组合

导眼钻具组合:采用  $\text{Ø}444.5\text{ mm}$  的 PDC 钻头,搭配  $\text{Ø}244.5\text{ mm}$  且弯度为  $1.25^\circ$  的单弯螺杆,其后依次连接浮阀、1 根  $\text{Ø}203\text{ mm}$  的无磁钻铤、无磁悬挂装置、6 根  $\text{Ø}203\text{ mm}$  的螺旋钻铤、型号为  $631 \times 410$  的接头以及  $\text{Ø}127\text{ mm}$  的加重钻杆。

一开直井段钻具组合:选用  $\text{Ø}311.1\text{ mm}$  的 PDC 钻头,配合  $\text{Ø}244.5\text{ mm}$ 、弯度为  $1^\circ$  且螺杆扶正器直径为  $\text{Ø}308\text{ mm}$  的单弯螺杆,接着连接浮阀、 $\text{Ø}300 \sim 308\text{ mm}$  的扶正器、1 根  $\text{Ø}203\text{ mm}$  的无磁钻铤、MWD 悬挂短节、6 根  $\text{Ø}203\text{ mm}$  的螺旋钻铤、 $\text{Ø}203\text{ mm}$  的随钻震击器、30 根  $\text{Ø}127\text{ mm}$  的加重钻杆以及  $\text{Ø}139.7\text{ mm}$  的钻杆。

一开钻具组合需依据直井段井斜控制的实际需求对扶正器尺寸进行调整。螺杆扶正器对应的尾托,应用在目标前位移较大的水平井中,可以起到防倾斜和保护直线的作用;对于目标前位移较小的小三维或水平井,则选用  $300\text{ mm}$  的欠尺寸扶正器,在保证小井倾斜状态的同时,更好地控制侧向位移和反向位移;实际钻探遇到的地层遇到滑动地层后,滑动钻进工艺参数需要经过优化钻探参数和适当调整才能得到控制,这样就有效避免了滑动造成倾斜的问题。

## 2.2 造斜段井眼轨迹优化控制

### 2.2.1 造斜段优化控制

造斜前,斜井段以水平位移构建,以直井段轨迹为基准,精细控制斜率;20 至 30 米稳斜井段,便于入靶前精准调整轨迹。要尽早明确入井工具和钻具造斜能力,依预设造斜率确定单根滑动井段长度,钻进时灵活采用滑动与复合交替作业,避免滑动井段长带来局部全角变化率大、摩阻和扭矩增加等问题,防止增大施工难度。

增斜井段施工,要加强施工团队与地质导向人员沟通,根据地层对比预测目标层变化,及时调整轨迹,避免因造斜率过高导致入靶前轨迹难控。造斜率低时,适当增加增斜滑行井段钻进长度,避免影响入靶目的层顶端 2 至 3 米干沙岩段。目标层垂直厚度 7 至 10 米,通过上部标志层判定目的层变化,提前优化轨迹增斜着舰点,推进中保持井斜  $86^\circ$  左右稳定斜向下探,适时增斜确保入靶,精准进入顶部砂岩层。

### 2.2.2 斜井段钻具组合

使用  $\text{Ø}215.9\text{ mm}$  PDC 钻头钻探复杂地层,配合  $\text{Ø}172\text{ mm}$ 、弯曲角度  $1.5^\circ$  且带  $\text{Ø}210\text{ mm}$  螺扶的单弯螺杆,

增强稳定性和导向性,配置浮阀装置维持钻井液循环和压力平衡。用  $\text{Ø}127\text{ mm}$  无磁承压钻杆保障钻探数据准确, MWD 悬挂短节连接测量仪器实时监测参数。使用  $\text{Ø}127\text{ mm}$  无磁承压钻杆满足高精度需求,用 5 根  $\text{Ø}127\text{ mm}$  加重钻杆增加下压力、提高效率。 $\text{Ø}165\text{ mm}$  随钻震击器解决卡钻问题,配置 1 根  $\text{Ø}127\text{ mm}$  加重钻杆优化力学性能。按需配置若干根  $\text{Ø}127\text{ mm}$  钻杆保证深度和连续性,加入 30 根  $\text{Ø}127\text{ mm}$  加重钻杆增强钻柱重量和稳定性。用  $\text{Ø}127\text{ mm}$  钻杆和  $\text{Ø}139.7\text{ mm}$  钻杆收尾,确保钻柱系统完整和钻探任务完成。斜井段第一道钻进用上述钻具组合造斜,无需倒装。入井钻具倒装长度根据井斜大小和预计井段长度在起钻时精确确定。

## 2.3 水平段井眼轨迹优化控制

### 2.3.1 水平段优化控制

为了确保水平段井眼轨迹的稳定性和平滑性,平滑的轨迹有助于延长井段的长度并减少摩阻和扭矩。为此,应选择单一弯双稳钻具组合,并配备  $\phi 210\text{ mm}$  的扶正器以及尺寸相同的尾扶,以保证在磨鞋卸扣后,钻具组合能保持初始理论状态不变。在钻进过程中,维持恒定的  $60\text{ kN}$  钻压,并结合复合钻进技术,密切监控井斜的变化。当井斜有微小下降时,适当增加钻压;而当井斜略有上升时,则相应减少钻压,通过调整钻压来控制井斜的微小波动,从而实现稳定的钻进。需要注意的是,在一定的控制范围内,不应过度控制斜度或钻进速度,必要时可以采用滑动钻进的方式,通过多次小幅度调整,即“少食多餐”,以防止轨迹发生大幅波动或失去控制。

### 2.3.2 水平段钻具组合

$\text{Ø}215.9\text{ mm}$  PDC 钻头适用于多种地质条件,可高效钻探,搭配  $\text{Ø}172\text{ mm}$  单弯螺杆,其弯曲角度  $1.25^\circ$ ,配  $\text{Ø}210\text{ mm}$  螺扶,确保钻头稳定和导向。配置还包括浮阀,可控制钻井液流动,防井涌井漏; $\text{Ø}208 - 210\text{ mm}$  稳定器保持钻杆稳定,减少振动偏斜;2 根  $\text{Ø}127\text{ mm}$  无磁承压钻杆,抗磁承压能力优异;MWD 悬挂短节测量井底参数,实时提供钻探数据;6 根  $\text{Ø}127\text{ mm}$  加重钻杆增加重量,提高钻进效率; $\text{Ø}165\text{ mm}$  随钻震击器解决卡钻问题; $\text{Ø}127\text{ mm}$  普通钻杆数量按需而定,用“ $\times n$ ”表示;31 根  $\text{Ø}127\text{ mm}$  加重钻杆进一步增加钻进力度;最后用  $\text{Ø}139.7\text{ mm}$  钻杆完成钻探。整套钻具组合设计合理,协同工作确保钻探高效稳定。

水平段钻井初期,采用与螺杆扶正器尺寸匹配的尾托装置,可有效传递钻压、提升机械钻速,通过复合钻进发挥钻井参数作用,提高整体效率。但后期钻孔压力传递困难,受摩阻和扭力限制,复合钻孔无法有效加压,需选尺寸小的尾托装置。

## 2.4 辅助减摩降阻提速技术

水平井钻井过程中摩阻、扭矩变大影响钻井速度,辅助减摩降阻提速技术必不可少。钻具组合使用高性能钻井液润滑剂减小钻具与井壁摩擦系数,或选用螺旋钻杆,利用其

螺旋槽形成螺旋流道,改变钻井液流动状态来减摩擦降阻。

针对钻井工艺,在确定了钻井工艺参数的基础上,通过控制合理的钻进参数来保证钻井质量,根据地层情况及所用钻具组合的不同来确定合适的钻压、转速和排量。在软地层可以适当提高转速,控制钻压,在硬地层加大钻压并合理调整转速。

### 3 水平井轨迹优化控制技术现场应用

#### 3.1 直井段的纠斜打直

直井段纠斜打直需要严格控制井斜角、水平位移。深层水平井造斜点较深,如果直井段井斜角或者水平位移超出允许的偏差范围,在后续造斜、稳斜等作业时将出现很大的难度,甚至导致钻完一口井后无可利用井筒。因此,做好直井段的纠斜打直十分重要。

为了达到目的首先应精心搭配钻具组合,根据地层岩性和钻井液性能选择具有较强的纠斜能力的钻具组合,例如高效的钻头、稳定器等;同时要合理调整钻井参数,控制合理的钻压、转速、泵排量等参数,保证钻进过程中的效果,而且控制钻进过程中要保证地层的特点以及钻具的特点。要防止发生井斜,适当增大钻压和转速、加大排量等措施都可以减缓井斜的发生。

在钻进过程中需要连续测量单点的井下实际井眼轨迹数据,在任何时候都能测得井斜角、水平位移等主要数据,能够反映出实际的井眼轨迹,也是修正井眼轨迹和一些重要参数的直接依据。如果测得的井斜角或水平位移值出现偏离设计轨迹的现象,则要分析其原因并及时采取措施进行纠正,使井眼轨迹控制保持在合适的范围内。

#### 3.2 造斜段和稳斜段的井眼轨迹控制

对于造斜段及稳斜段的井眼轨迹控制来说,如何做好井眼轨迹的精准预测以及全程动态跟踪校正尤为重要。结合直井段的测斜数据,利用专业软件可以计算出井底的实际井斜角与方位角,通过解算即可得出垂深、水平位移等主要参数,为后期井眼轨迹调整提供参考;再根据前期基础数据对靶点的位置进行细致校正,在稳斜段即将结束时,能够尽量做到让井眼轨迹更接近于设计轨迹,避免大量的反复纠偏校正工作。

进入第一造斜段钻进后,实时地进行井下数据监控及数据分析工作对于发现钻井中存在的问题具有十分重要的作用,而基于分析结果可及时计算出当前实钻轨迹与设计轨迹间的偏差值,以便于后续的及时纠偏,并在螺杆钻具能完成定向工作的条件下尽可能缩小造斜段长度,使实钻轨迹尽可能严格沿设计轨迹钻进,从而保证钻井轨迹准确、规范及高效。

在第一稳斜段时采用复合钻进,可进一步改善井眼质量,将复合钻进用于对井壁形状的校正以及破坏岩屑床、保持井眼清洁,并为后续造斜钻进做好准备;当进入第二造斜段后,通过钻井液参数的优化来提升钻井液整体性能,增加携岩能力和润滑性,从而避免出现托压、卡阻等现象发生,并且要合理控制好狗腿度大小,在整个过程中保证井眼轨迹能够实现顺畅地平滑过度。

#### 3.3 水平段的平稳控制

为了能更好的发现储层、合理的开发,在水平段钻进时必须保证钻具的运行平稳、钻入到储层里面,对钻具的状态必须予以精确控制,并且要根据地层情况对钻进模式予以变化。如对中靶以后,即钻头已经成功进入目标储层以后,首先应该使用旋转的钻进方法,这样可以使钻头和井壁之间没有过多的摩擦力,使井眼始终保持规则状,同时旋转所产生的离心力会使岩屑能够顺利排出,不会产生岩屑床,井眼就会保持干净、畅通。

经过一定强度地提高机械钻速来改善钻井速度也是可以的,但必须要保障钻井安全,在操控过程中必须加强对于钻井参数的控制,比如泥浆循环量、泥浆比重、钻压、转速等都必须有所控制,而且应当时刻关注地层的各种特性以及泥浆返出状况、有无突然放空等现象,如果遇到这些情况,应当暂停施工,并立刻查明问题的由来并且做出相应的处理工作,按照具体情况进行钻井液性能的调整、变更钻井参数或者进行短起下钻操作等,保证继续进行钻井作业,并且保障其安全性。

### 4 结语

水平井轨迹优化与控制技术是钻井工程的一项重要组成部分,其技术水平对于油藏开采效率以及油气田开发成本具有重大的影响作用。随着直井段、造斜段以及水平段的轨迹控制技术不断的改进和完善,利用先进的随钻测量和随钻导向等技术手段,在实际的钻井过程中能够确保钻井作业具有良好的质量。而未来随着科学技术的不断发展,该项技术也会被进一步的完善,所以我认为在未来水平井轨迹优化与控制技术一定能在油气勘探开发领域得到更好的使用,从而推动行业发展到更高的阶段。

#### 参考文献

- [1] 李文霞,王居贺,王治国,杨卫星,史玉才. 顺北油气田超深高温水平井井眼轨迹控制技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50 (04): 18-24.
- [2] 和鹏飞. 渤海油田某水平井防碰轨迹控制技术[J]. 钻采工艺, 2019, 42 (03): 108-111.
- [3] 沈国兵,刘明国,晁文学,张金成. 涪陵页岩气田三维水平井井眼轨迹控制技术[J]. 石油钻探技术, 2016, 44 (02): 10-15.