

Optimization Design and Control Accuracy Enhancement for Horizontal Well Drilling Trajectory

Shiqiang Guo

Fourth Engineering Project Department, Changqing Drilling General Corporation, Sinopec Chuanqing Drilling Company, Xi'an, Shaanxi, 710200, China

Abstract

Horizontal wells are crucial for developing unconventional oil and gas resources such as low-permeability reservoirs, shale gas, and coalbed methane. The rationality and precision of trajectory design directly impact drilling efficiency, reservoir recovery rate, and production benefits. This study conducts in-depth research on core objectives and key parameters of trajectory optimization design, establishing an optimization model based on "reservoir adaptability-mechanical stability-construction economy". By addressing error sources in trajectory control through improved measurement instrument accuracy, optimized drilling tool combinations, and intelligent control algorithms, the method establishes a pathway to enhance control precision. Case studies demonstrate that this approach can improve reservoir drilling feasibility by 8%-12% with control accuracy errors below 0.3, providing technical support for efficient horizontal well drilling.

Keywords

horizontal well; drilling trajectory; optimized design; control accuracy

水平井钻井轨迹优化设计与控制精度提升

郭世强

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 710200

摘要

水平井是低渗油藏、页岩气和煤层气等非常规油气资源开采的关键, 其轨道设计是否合理和精确, 将直接影响到钻井效率、储层可采率和开采效益。本文将对轨道优化设计的核心目标和关键参数进行深入研究, 建立基于“储层适应性-力学稳定-施工经济”的优化模型。同时针对轨迹控制中的误差来源, 通过提高测试仪器的精度、钻具组合机构的优化和智能控制算法的应用, 构建控制精度提升路径。经实例验证, 该方法可提高油藏可钻性8%-12%, 控制精度误差小于 0.3° , 为水平井高效钻进提供技术支持。

关键词

水平井; 钻井轨迹; 优化设计; 控制精度

1 引言

随着石油和天然气资源的勘探与开发向深层和非常规方向发展, 水平井因其具有增大储层接触面积和增加单井产量等优点, 逐渐成为油气开发的主要技术手段。但是, 在水平井施工中, 如果不能充分考虑地层的分布特征和井眼的力学特征, 很容易造成地层可钻率低和井壁坍塌等问题。同时, 由于受测量误差和钻井斜率的波动等因素的影响, 很难实现对地层的精确控制。为此, 研究水平井钻进轨迹的最优设计和精确控制方法, 对于降低钻进成本, 保证开发效益, 具有十分重要的实际意义。

2 水平井钻井轨迹优化设计核心要素与模型构建

2.1 轨迹优化设计的核心目标

轨道优化设计以提高油藏可采性为主要目的, 即保证油藏水平段精确定位在油藏的有效厚度区域, 从而避免轨道偏离造成的产能损失。针对储层较薄或非均质程度较高的油藏, 为了确保有效接触区, 需要将轨道偏移控制在油层厚度的1/3以内。其次, 提高井眼形稳定性, 轨道弯曲度不合理会引起井眼膨胀, 增大钻具摩擦和扭矩, 严重时还会发生卡钻等事故。研究表明, 轨道曲率半径在1200米以下时, 井筒塌陷的危险性比普通轨道提高了30%。最终, 为了降低施工费用, 对轨道进行优化, 需要减小有效井段, 减少钻具损失和钻井液消耗, 并为以后的完井工作创造良好的井眼环境, 解决由于轨迹复杂而造成的完井工具难以入下的问题。

【作者简介】郭世强(1980-), 男, 中国甘肃会宁人, 本科, 工程师, 从事钻井工程研究。

2.2 轨迹优化的关键影响因素

在轨道的优化设计中,需要从地质和工程两方面入手。在地质要素中,油气藏的空间展布规律是其基础,需要利用三维地震资料和相邻井测井资料,查明油气藏顶部厚度、厚度变化及层间分布情况,从而确定出油气藏的水平剖面“靶区”。比如,页岩气藏中往往有大量的天然裂隙发育区,为了提高产能,轨道设计必须尽可能地穿过裂隙区。另外,还需要考虑到地层压力和岩性的差别,对于高压地层,为了防止井漏发生,需要通过降低井筒的扰动来减少井眼的直径。从工程角度来看,钻井工具的成斜率直接影响着井眼轨道的形状,而不同的井眼曲线所对应的井眼曲线也不尽相同,需要依据靶区的位移量和垂直深度来选取与之相匹配的井眼曲线。如果造斜度不够,将造成弹道不能及时进入目标;当造斜率太大时,钻具的磨损将增大。另外,钻井液特性对井眼轨迹的优化也有一定的影响,高密度钻井液虽然可以达到均衡地层压力的目的,但是会增加钻具的摩擦阻力,因此需要在轨迹设计中预留一定的阻力补偿余地;但在低密度条件下,需要通过优化轨道来降低井壁垮塌的危险性。

2.3 多目标优化模型构建

基于上述核心目标与影响因素,本文构建“储层适配性-力学稳定性-施工经济性”多目标优化模型。该模型以储层钻遇率(R)、井眼坍塌风险系数(F)、单位进尺成本(C)为目标函数,以轨迹曲率半径(ρ)、水平段长度(Lh)、造斜率(K)为决策变量,同时满足地质靶区误差($\leq 0.5\text{m}$)、钻具强度(扭矩 $\leq 120\text{kN}\cdot\text{m}$)等约束条件。利用AHP方法对各个指标进行了综合评价,得出了以油藏可钻性最大的权重为0.5,然后是钻孔塌陷风险因子0.3和每一次进尺费用0.2。采用PSO算法对其进行求解,获得了最优的航迹参数组合。同时,对页岩气藏水平井进行了优选,优选前,曲线水平段与油藏有效厚度偏差的比率在15%左右,优化后,偏差率降到了3%;结果表明,该方法是有用的,并径扩大由原来的22%减小到8%,单次进尺费用减少12%。

3 水平井钻井轨迹控制精度误差来源分析

3.1 测量系统误差

作为轨道控制的“眼睛”,测量系统的误差来源主要来源于随钻测量(MWD)仪器的精度和资料解译的偏差。多波时差计的方位角和倾角测量精度会受到磁场和温压等因素的影响,如在高磁地层,磁场扰动会使其方位角测量误差达到 1.5° - 2.0° ,而水平剖面的运动轨迹对方位角的变化非常敏感, 0.5° 的偏差就会造成弹道偏差。另外,MWD仪器的取样间距对观测精度也有很大的影响,如果取样间距太大(大于10米),则会造成轨道偏差的缺失,从而造成航迹控制的延迟。而造成资料解释偏差的主要原因是测量资料的处理方式不当,如在计算井筒轨道坐标时,如果不使用更为精确的极小曲率法,就会造成坐标解算误差的积累。工

程实例表明,曲率半径方法所测得的水平断面末端座标与实际座标误差为1.2米,最小曲率方法测得的误差小于0.3米。

3.2 钻具组合力学误差

钻具组合的力学特性决定了轨迹的实际造斜率与设计造斜率的偏差,是轨迹控制的“执行端”误差。这主要表现在两个方面:一是造斜的波动,二是钻具的阻力力矩。地层岩性改变对造斜率的影响很大,特别是在遇到软硬互层地层时,由于钻进过程中受到的切削力的改变,使其产生的造斜率与设计值有很大差异,如在砂泥岩相间地层,其造斜率的变幅可以达到 $0.5^\circ/30$ - $1.0^\circ/30\text{m}$,大大超出了设计要求。另外,钻具摩擦阻力和转矩等因素会影响其成斜效果,而水平段钻具与井壁的接触面较大,摩擦阻力高达40%-60%,造成钻压力不足、成斜率降低。此外,转矩过大会造成钻具的疲劳破坏,从而影响造斜器的稳定性,并使轨迹偏离更大。

3.3 施工操作误差

在轨道控制中,由于施工作业是“人为因素”,造成这种误差的最大原因是钻压、转速控制及钻井液排量调整不准确。在钻井压力的控制上,如果司钻不能适应地层的变化,就会引起钻压的波动,从而影响到钻井速度;如:钻进压力太大,容易造成“蹩钻”,造斜率急剧上升;压力太小,又会造成“滑钻”,造成造斜率的降低。速度控制不合理也会出现同样的情况,高速钻进虽然可以提高钻进速度,但是会加重钻具的振动,造成井眼轨迹的偏离。在钻井过程中,钻井液的置换作用往往被忽略。钻井液体积太小,不能有效地携岩,而岩屑床的堆积又增加了钻具的摩擦阻力,增加了轨迹的控制难度。实际钻井资料表明,当钻井液的体积变化大于10%时,其轨迹控制误差将增大20%。

4 水平井钻井轨迹控制精度提升技术路径

4.1 高精度测量系统升级与数据处理优化

提高测量精度的关键在于对MWD仪器硬件进行升级和数据处理方式的优化。在仪器的硬件部分,将高精度的加速度计和磁强计整合到一起,使测斜仪的方位角精度达到 $\pm 0.1^\circ$,倾斜度达到 $\pm 0.05^\circ$,并具有较强的抗干扰能力,能够在高磁地层中实现长期的稳定测量。将取样时间压缩到5米以内,可以实时地获取轨道的微小偏差,从而为后续的修正提供必要的技术支持。在数据处理优化方面,将最小曲率法求取井筒轨道坐标,使其更加精确地反映出轨道几何形状,比常规的曲率半径法精度高出60%。通过引入实时资料修正方法,将相邻井的地质资料和随钻地层的评价结果相结合,实现MWD资料的动态修正,进一步减小资料的解释误差。将此方法用于页岩气田,将其轨迹测量的误差由0.8米降低到0.2米,取得了明显的效果。

4.2 钻具组合力学特性优化

作为轨道控制“执行机构”的钻具组合,其力学性能