

复杂地层井眼轨迹控制方法研究

李前锋¹, 潘德元²

(1. 中石化经纬有限公司 地质测控技术研究院, 山东 青岛 266000;

2. 中国地质调查局 长沙自然资源综合调查中心, 长沙 410600)

摘要:川西凹陷中江回龙构造地区地层压力系统复杂, 气层多且薄, 同时存在岩石可钻性差、砂泥岩互层频繁以及地层倾角大等因素, 在直井段井斜和方位控制难度大, 钻进效率低, 斜井段着陆难度大, 需要多次进行轨迹调整, 使得该地区水平施工和井眼轨迹控制困难。根据该地区地质构造特征, 结合井眼轨迹的影响因素, 深入分析钻井施工和轨迹控制的问题和难点, 从井下钻具组合优选、剖面优化设计、造斜段控制等方面进行井眼轨迹控制方法研究。通过在该区块施工的钻井, 总结出具有可行性的井眼轨迹控制方法, 为该区块水平评价井优、快钻进提供技术参考。

关键词:预弯曲钻具组合; 轨迹控制; 水平井; 斜坡带

中图分类号: TE243 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2022)08-0324-05

中江回龙构造带由中江构造和回龙构造组成, 呈东西向鼻状结构, 为一斜坡带上, 其构造分区情况如图 1^[1-3]所示, 由于该构造地层特点, 钻井工程中井眼轨迹难度大, 直井段井斜和方位控制难度大, 钻进效率低, 斜井段着陆难度大, 使得该地区水平施工和井眼轨迹控制困难^[4-6]。本文对该构造带部署的水平井轨迹控制技术进行深入分析, 并以江沙 320HF 井和江沙 320-1HF 井为例, 结合地质环境特征, 总结钻井施工及井眼轨迹控制的影响因素和规律, 最终得到适合该地区的井眼轨迹控制方法。

1 地质特征及钻进控制难点

1.1 地质特征

中江回龙构造区钻遇地层有剑门关组、蓬莱组、遂宁组、沙溪庙组等, 部署的水平评价井钻井目的主要是评价储层发育情况及其物性特征, 并建成气流井。

江沙 320HF 井设计为水平井, 在直导眼钻完测试后接通知完钻, 根据实钻地层情况, 主要岩性为各类砂泥岩互层, 软硬变化频繁, 蓬莱组、遂宁组和沙溪庙组之间呈整合接触, 地层倾角较稳定^[1], 见表 1。同时该构造带位于中江斜坡带上, 断裂与褶皱发育, 地层侧向应力较为集中, 岩石可钻性差。

岩性特征: 剑门关组地层较疏松, 胶结性较差, 易发生垮塌及井漏; 蓬莱组、遂宁组以泥岩为主夹少量砂岩, 大段软泥岩易水化膨胀, 造浆厉害, 容易造成钻头泥包, 硬脆性泥岩稳定性差, 易垮塌。

同时由于地质构造运动作用下, 地层裂缝较发育, 钻遇地层压力高。由于在江沙 320HF 井实际钻进中, 在进入蓬莱组后钻井液比重逐渐上升至 1.55~1.95 g/cm³。

1.2 地层造斜特点

在钻进过程中, 受地层各向异性和产状特征的影响, 钻头各部位受到地层的反作用力以及切削的速度是存在差异的。在井眼低边处钻头受到的地层反作用力要大于高边处的反作用力, 在软硬层交界处, 软地层侧的钻头切削速度要大于硬地层侧^[7]。因此, 易导致井斜产生的主要地质因素是钻遇地层产状的结构特征和岩性的交互变化。中江回龙构造区浅部地层岩性软硬交替变化频繁, 地层倾角较大, 因此在钻进过程中井斜增大趋势较明显, 同时眼轴线指向较稳定, 易使位移超标。

在江沙 320HF 直导眼钻进过程中, 一开井段 (209~2 250 m) 的方位较稳定, 如图 2 所示, 受地层产状影响, 在 209~1 250 m 井段, 地层为剑门关组和蓬莱组, 岩性硬度相对较低, 井眼各个测点的方位由 210°逐渐降低到 160°, 变化趋势非常稳定。在进入遂宁组和沙溪庙组后, 地层硬度相对提高, 导致井眼轴线指向呈现小范围波动, 波动区间为 150°~180°。一开完钻时井底闭合距 30 m, 闭合方位为 185°。根据图 1 的构造分区可发现方位的稳定方向基本与地层倾向一致。

收稿日期: 2022-03-29

作者简介: 李前锋 (1979—), 男, 陕西乾县人, 中石化经纬有限公司地质测控技术研究院, 高级工程师, 研究方向为石油水平井钻进工艺研究及现场施工; 通信作者潘德元 (1982—), 男, 江西婺源人, 中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心, 工程师, 研究方向为钻进工艺。

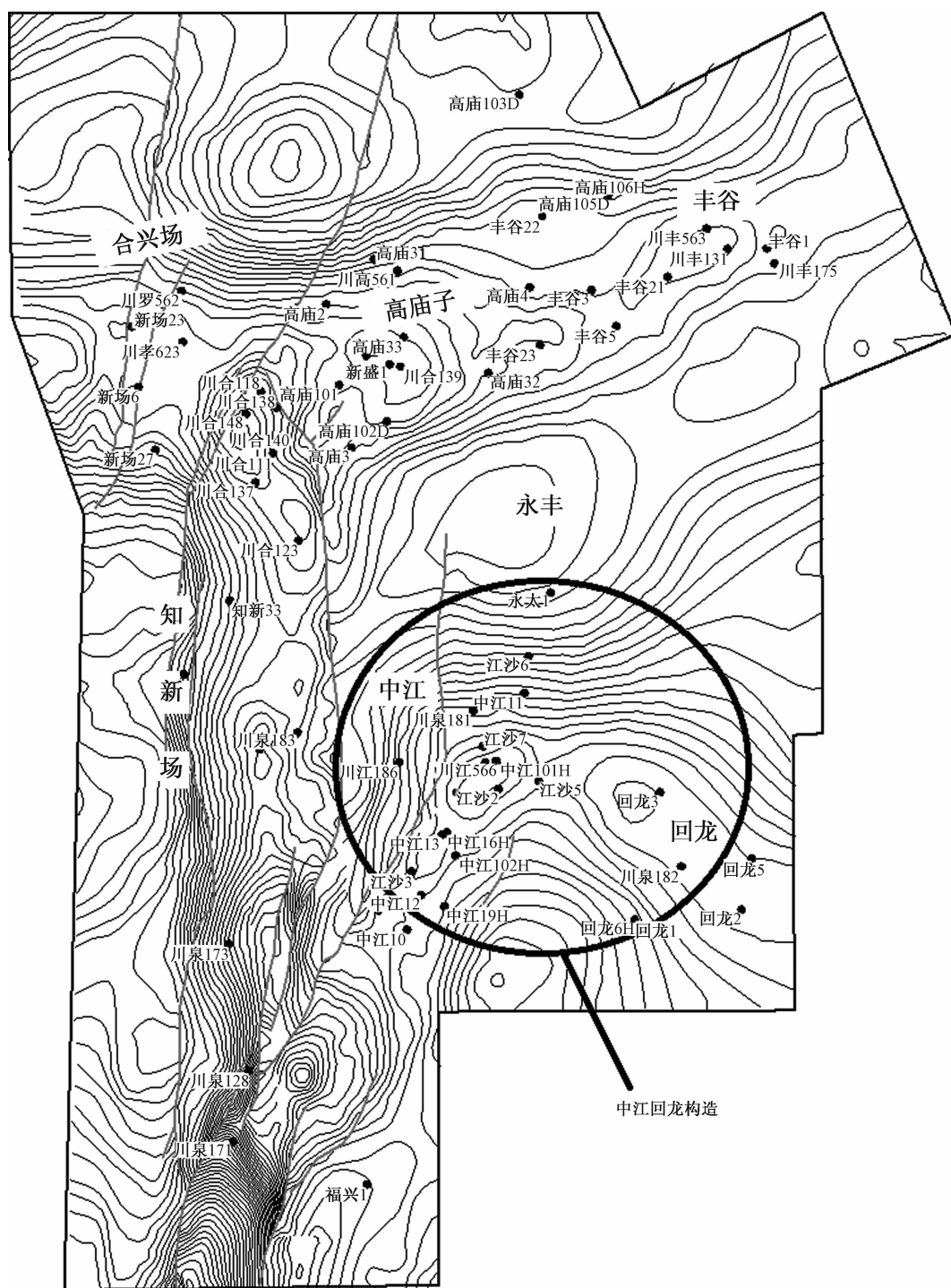


图 1 川西凹陷构造分区

表 1 320HF 实钻地层简况

地层	垂深/m	垂厚/m	岩性简述
第四系 Q	5.00	5.00	褐黄色种植土及黄色黏土层。与下伏地层呈角度不整合接触
剑门关组 K_{1j}	324.00	319.00	棕灰、浅灰色(含砾)中粒岩屑砂岩、细粒岩屑砂岩、褐灰色粉砂岩与棕红色泥岩不等厚互层。与下伏地层呈平行不整合接触
蓬莱组 J_3p	1 264.00	940.00	棕色、棕褐色、褐棕色、紫棕色泥岩、粉砂质泥岩与褐灰色、绿灰色细粒岩屑砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩略等厚互层,底部为褐灰色细粒岩屑砂岩与棕褐色泥岩等厚互层。与下伏地层呈整合接触
遂宁组 J_3sn	1 663.00	399.00	棕、棕红色泥岩、粉砂质泥岩与褐灰色粉砂岩、泥质粉砂岩、细粒岩屑砂岩不等厚互层。与下伏地层呈整合接触

续表 1

地层	垂深/m	垂厚/m	岩性简述
上沙溪庙组 J _{2s}	2 548.00	885.00	棕褐色泥岩、粉砂质泥岩与浅绿灰、绿灰色、褐灰色泥质粉砂岩、粉砂岩、细粒岩屑砂岩略等厚互层,底部为浅绿灰色细粒岩屑砂岩。与下伏地层呈整合接触
下沙溪庙组 J _{2x}	2 749.00	201.00	顶部为灰黑色页岩;上部为褐灰色、绿灰色细粒岩屑砂岩、粉砂岩与棕、紫棕色泥岩、粉砂质泥岩略等厚互层;下部为浅灰、灰白色中粒岩屑长石砂岩、细、中粒长石(富)岩屑砂岩夹棕、紫棕色泥岩

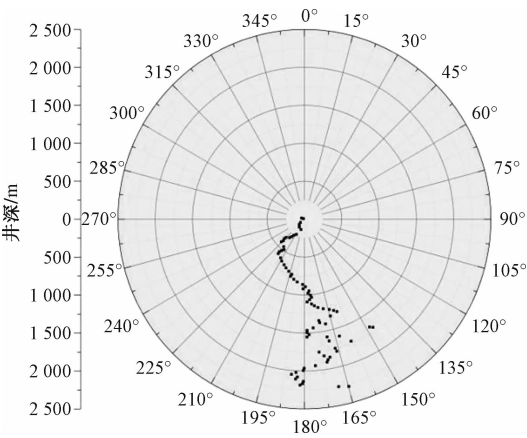


图 2 江沙 320HF 井直导眼方位分布

1.3 地质特点及难点分析

该区块地层压力高,钻井液比重达到 1.55~1.95 g/cm³,造成泵压偏高,对排量提升难度大,钻井效率较低,同时高泵压增加了井控工作的难度,也影响了井眼轨迹控制的实施。

地层倾角大,井斜和方位控制难度大,使得水平井的井眼轨迹调整难度增大,同时软硬互层的影响,在常规钻井技术时易使形成键槽。

1.4 影响井眼轨迹控制的因素分析

影响井眼轨迹控制的主要因素有地层特点、钻具组合结构、钻进参数、实钻井眼轨迹及其与设计轨迹的误差等。地层特点是客观因素,应该充分收集相关地质资料及临井施工资料,制定相应的技术措施。钻具组合结构应根据相应的井段要求,对其力学模型进行力学分析,从而掌握钻头的钻进趋势,通过调整钻具结构达到轨迹控制的目的。钻井操作参数主要包括钻压和转速,通过调整钻压和改变钻进方式控制井眼轨迹。实钻井眼轨迹通常与设计存在一定的误差,特别是在造斜点及着陆点位置,需要根据实际中存在的误差对井眼轨迹进行调整设计。

2 井眼轨迹控制方法

2.1 直井段井眼轨迹的影响

直井段实钻井眼轨迹与设计轨迹存在图 3 所示的几种情况:①实钻轨迹超前,引起造斜点产生正

位移,缩短了靶前位移,若按原设计要求施工就容易造成脱靶,若要能顺利中靶则需比原设计小的造斜率;②实钻轨迹符合设计轨迹,为理想的位置,按原设计要求施工即可;③实钻轨迹滞后,引起造斜点产生负位移,加长了靶前位移,需要增加造斜井段的长度和更高的造斜率;④实钻轨迹较原设计位置偏左或偏右,则实际造斜点处的方位偏离了原设计方位,需要将二维的设计井调整为三维,在施工需要扭方位^[5]。

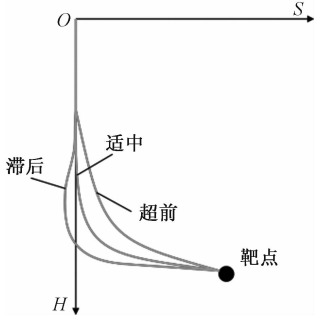


图 3 造斜点位置示意图

2.2 预弯曲钻具组合

预弯曲钻具组合通常是指在近钻头位置安装带有扶正器的预弯曲短节。狄勤丰等^[8]通过建立预弯曲钻具组合的动力学模型进行了仿真模拟,该种组合是利用旋转钻进时钻具在井眼中的涡动,在钻头上形成规律性的侧向冲击载荷,且对井眼低边的冲击载荷最大,这种动态冲击载荷的不均衡性使钻具组合具有较好的防斜能力。同时能够释放钻压,较常规的塔式钻具、钟摆钻具等能有效钻进效率^[8-13]。

在江沙 320HF 井使用塔式钟摆钻具+PDC 钻头+螺杆钻进,采用低压吊打技术,为有效控制井斜,采用低压吊打钻进工艺,钻压控制在 40~80 kN,转速为 80~100 r/min,一开井段(209~2 250 m)最大井斜为 1.09°,整个井段平均钻速为 6.65 m/h。

在江沙 320-1HF 井中现场采用预弯曲钻具+随钻测量(MWD)技术:φ311.2 mm PDC×0.37 m+

$\phi 216\text{ mm } 1^\circ$ 螺杆 $\times 9.02\text{ m} + \phi 203\text{ mm}$ 钻铤 $\times 4.50\text{ m} + \phi 308\text{ mm}$ 扶正器 $\times 0.67\text{ m} +$ 钻具止回阀 $\times 0.54\text{ m} +$ 悬挂短节 $\times 0.87\text{ m} + \phi 203\text{ mm}$ 无磁钻铤 $\times 9.28\text{ m} + \phi 203\text{ mm}$ 钻铤 $\times 70.47\text{ m} + 631 \times 410 \times 0.46\text{ m} + \phi 177.8\text{ mm}$ 钻铤 $\times 82.21\text{ m} +$ 旁通阀 $411 \times 520 \times 0.46\text{ m} + \phi 139.7\text{ mm}$ 加重钻杆 $\times 73.60\text{ m} + \phi 139.7\text{ mm}$ 钻杆。

在钻进参数方面,钻压较江沙 320HF 井在相同地层中提高了 40~60 kN,一开井段(206~2 300 m)平均机械钻速达到了 10.59 m/h,较江沙 320HF 井提高 59%。测多点显示直井段在井深 1 000.19 m 井斜最大,为 1.49°,井身质量符合设计要求。

2.3 直井段轨迹控制技术

在江沙 320-1HF 井在钻进过程中采用 MWD 随钻测量仪跟踪监测井眼质量参数,发现在 200~1 200 m 井段受地层倾角影响,井眼方位稳定在 150°~180°,与江沙 320HF 井情况基本相同,且在井深 1 287.95 m 时井底位移达到 22.05 m,闭合方位为 165.46°,与设计闭合方位为 68.86°相差较大,易造成造斜点较原设计轨迹位置滞后,不利于造斜钻进。因此本井根据 MWD 随钻测量仪跟踪监测数据,在井深 1 287 m 后调整钻具组合工具面,采用滑动钻进控制井斜和方位,提前拉开防碰间距并把井斜和水平位移控制在设计范围之内。

因此,为保障造斜段井眼轨迹平滑,良好地完成中靶要求,需要在直井段钻进中对井眼轨迹的优化控制。在一般钻进过程中,直井段钻进时井眼轴线的指向是不确定的,井底位移在小范围内波动,但是在一些高陡易斜区块,钻进过程中受地层造斜力的影响,井眼轴线的指向较稳定,即使井斜很小,也会引起井底位移朝着指向方位一直增大,对于丛式井的防碰控制以及后期的斜井段轨道设计造成较大影响,不利于控制全角变化率和斜井段井眼轨迹。在此提出应用预弯曲钻具防斜钻进,同时通过

改变钻进方式控制井身轨迹的技术方法,减小起下钻进频次,提高钻进效率。

2.4 造斜段轨迹控制

造斜段又称为着陆段,是指从造斜点到靶点井段的控制过程,通常采用直-增-稳-增-平的五段制剖面。

在江沙 320-1HF 井中,造斜点位于上沙溪庙组,由于地层硬度大,可钻性较差,增斜较困难,需要采用较大角度的单弯螺杆,同时由于地层倾角影响,造斜点产生了相应的负位移,造斜时工具面需要逆时针调整一个小角度。造斜钻具组合: $\phi 215.9\text{ mm}$ PDC+5LZ165 $\times 7$ -D 1.5°W 212+回压阀+411 $\times 4$ A10 无磁变扣+ $\phi 165\text{ mm}$ 无磁钻铤+4A11 $\times 410$ 无磁变扣+MWD 悬挂短节+ $\phi 127$ 加重钻杆 20 柱+旁通阀+411 $\times 520 + 139.7\text{ mm}$ 钻杆。

在开始造斜时采用控时钻进,根据返出新岩屑含量以及计算夹壁墙厚度,开始逐渐加压滑动增斜钻进。以滑动钻进为主,复合钻进为辅,全程采用单弯螺杆+MWD 仪器监测。钻进过程中需要加强短起下钻作业,以便对井底岩屑有效清洁,确保井壁光滑。

在即将着陆时,由于储层薄且多,在实际的施工中为寻找主油气层进行了数次轨迹调整,加大了轨迹控制难度。

2.5 水平段轨迹控制

在水平段钻进时,由于钻具受重力与下井壁接触,具有较大的轴向和径向摩擦力,从而增加上下提放的载荷,易产生阻卡等井下复杂事故,因此在钻具选择上选用柔性的倒装钻具组合,有利于钻压的有效传递,并减少井下复杂情况的发生^[14-16]。

由于钻具倒装后柔性增大,工具面控制十分困难,因此需要全程配合 MWD 无线随钻仪跟踪监测,采用控压技术进行水平段的穿越,根据油气显示不断进行轨迹的调整,如图 4 所示。

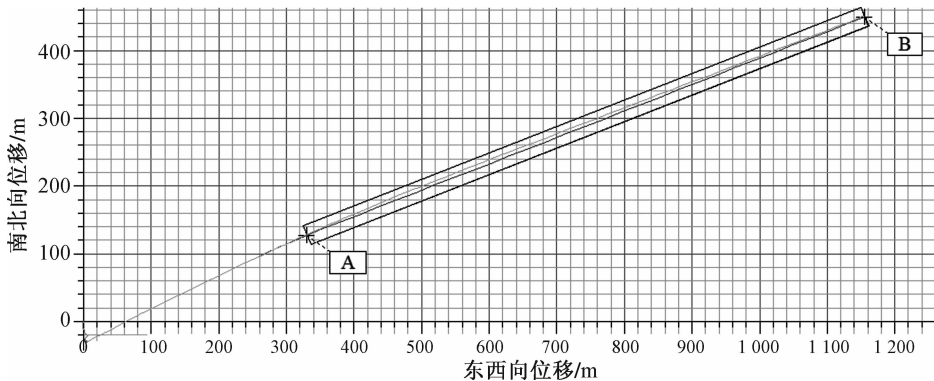


图 4 江沙 320-1HF 井水平投影示意图

本井段采用的钻具组合： $\phi 215.9$ mm PDC+5LZ172 $\times$ 7-D 1.25°W 208+ $\phi 210$ 尾扶+回压阀+411 $\times$ 4A10 无磁变扣+ $\phi 127$ mm 无磁承压钻杆+4A11 $\times$ 410 无磁变扣+MWD 悬挂短节+ $\phi 127$ 加重钻杆 1 根+ $\phi 127$ 钻杆 33 柱+ $\phi 127$ 加重钻杆 59 根+旁通阀+411 $\times$ 520+139.7 mm 钻杆。

3 结论与建议

1)预弯曲钻具组合在中江回龙构造地区得到了很好的应用,该种钻具组合具有良好的防斜效果,能够适用于高陡及软硬互层等易斜地层,同时比塔式、钟摆等防斜钻具组合能够有效释放钻压,进一步提高机械钻速。采用预弯曲钻具组合+MWD 随钻测量仪技术,通过调整钻具的工具面和改变钻进方式,对轨迹进行优化控制,可避免中途起下钻更换钻具组合,理论上可实现直井段一趟钻技术。

2)水平井的井眼轨迹设计应优选剖面、优化钻具结构,制定合理有效的钻井参数,应用相应的摩阻和扭矩的理论分析和评价模式,最大限度地降低摩阻及扭矩,及时预测井下复杂情况,避免卡钻、断钻具等恶性事故发生。

3)总结了在中江回龙构造区块合理的井眼轨迹控制方法。直井段采用预弯曲钻具组合+MWD 随钻测量仪技术,保障井眼质量及偏移程度;造斜井段宜采用滑动钻进为主的钻井方式,根据造斜点位置合理扭转工具面,在着落进靶时应加强监测,以便根据储层情况调整轨迹;水平井段采用倒装钻具组合复合钻进为主,加强监测,微调勤调,控压钻进以便控制工具面。

参考文献

[1] 柳杨杰. 川西坳陷东坡沙溪庙组天然气优势运移通道研

究[D]. 荆州:长江大学,2017.
[2] 肖富森,韦腾强,王小娟,等. 四川盆地川中-川西地区沙溪庙组层序地层特征[J]. 天然气地球科学,2020,31(9):1216-1224.
[3] 张小菊. 川西东坡沙溪庙组哈题构型与气水分布研究[D]. 成都:成都理工大学,2017.
[4] 魏殿举. 川西地区中浅水平井钻井难点与对策[J]. 钻采工艺,2015,38(2):105-107.
[5] 范翔宇,魏祥高,周跃云,等. 川东北元坝陆相地层水平井井眼轨迹控制方法研究[J], 钻采工艺,2014,37(6):30-34.
[6] 陈业鹏. 低压裂缝性火山岩水平井提速难点及对策[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(5):32-35,45.
[7] 高德利. 易斜地层防斜打快钻井理论与技术探讨[J]. 石油钻探技术,2005,33(5):16-19
[8] 狄勤丰,朱卫平,姚建林,等. 预弯曲动力学防斜打快钻具组合动力学模型[J]. 石油学报,2007,28(6):118-121.
[9] 胥思平,狄勤丰,张新旭,等. 预弯曲动力学防斜快钻技术的试验研究[J]. 天然气工业,2006,26(3):59-61.
[10] 汝大军,李立昌,陆红,等. 预弯曲钻具组合特性分析及其应用[J]. 石油钻采工艺,2003,25(4):14-16.
[11] 曹建. 复合钻进方式在井斜控制中的理论研究和应用[D]. 西安:西安石油大学,2011
[12] 王怡,陈小锋,孙连忠,等. 预弯曲钻具组合在软硬交错地层的应用[J]. 科学技术与工程,2019,19(21):136-140.
[13] 邓柯,张宇,王怡. 预弯曲动力学防斜技术在空气钻井中的应用[J]. 钻采工艺,2017,40(3):4-5.
[14] 王汉卿,胡大梁,黄河淳,等. 川西气田雷口坡组气藏超深大斜度井钻井关键技术[J]. 断块油气田,2020,27(4):513-516.
[15] 李永耀,李国荣,罗红芳,等. 延长陆相页岩气水平井提速技术研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(3):9-15.
[16] 王彦祺,龙志平. 隆页 2HF 页岩气水平井钻井技术研究与实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(7):30-33.

Study on Well Trajectory Control Method in Complex Formation

LI Qianfeng¹, PAN Deyuan²

(1. Geological Measurement and Control Technology Research Institute, Sinopec Jingwei Co., Ltd., Qingdao Shandong 266000, China;
2. Changsha Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Changsha 410600, China)

Abstract: The Zhongjiang-Huilong structural area in the western depression of the Sichuan have are many difficult factors for drilling engineer, including complex formation pressure system, thin gas layers, poor rock drillability, frequent sand-shale interbeds, large formation inclination angle, and so on. In the vertical section, it is difficult to control the deviation and azimuth, and the drilling efficiency is low. Also it is difficult to land in horizontal section from the inclined shaft section with multiple trajectory adjustments. According to the geological structure characteristics and the wellbore trajectory influencing factors, the wellbore trajectory control method is studied from the aspects of bottom hole assembly, wellbore structure design. Through the well in this block, a feasible well trajectory control method is summarized, which provides technical reference for the optimal and fast drilling of horizontal evaluation wells in this block.
Keywords: the prebent bottom hole assembly; trajectory control; horizontal well; slope belt