

基于地层倾斜规律的防斜打直钻井技术研究

李文飞

(胜利石油管理局钻井工艺研究院, 山东 东营 257017)

摘要: 地层自然倾斜、钻具组合、钻井参数是影响钻井井斜方位变化的主要因素。根据地层层面空间网格数据, 建立了地层倾角、倾向的计算方法, 并针对典型防斜打直钻具组合和钻井参数之间的关系进行了力学分析。应用结果表明, 井眼实钻轨迹与设计轨迹基本相同, 形成了利用地层自然倾斜规律, 在钻井自然中靶的同时, 释放钻压提高钻速的防斜打直优快钻井技术, 对于高陡构造油气藏的高效开发具有重要的理论意义和工程实用价值。

关键词: 地层倾角; 地层倾向; 防斜打直; 钻具组合; 钻压; 钻速; 井眼轨迹

中图分类号: TE243 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2012)08-0001-04

Study on Deviation Control Drilling Technology Based on Formation Tilt Law/LI Wen-fei (Drilling Technology Research Institute of Sinopec Shengli Oilfield, Dongying Shandong 257017, China)

Abstract: Formation natural tilt, bottom hole assembly, drilling parameters are the main factors to affect the change trend of inclination orientation of the designed hole track. According to the formation level space grid data, the calculation methods of the formation dip and the dip direction were established; mechanical analysis was made on the relationship between the typical deviation control drilling tool assembly and drilling parameters. The application effects show that the real drilling trajectory is almost the same to the designed one.

Key words: formation dip; formation dip direction; deviation control drilling; bottom hole assembly; bit weight; drilling speed; hole trajectory

井斜的控制是钻井的难题之一, 尤其在大倾角^[1]的地层中钻进时, 井眼倾斜现象较为明显, 常规打直防斜^[2]主要采用“轻压吊打”法, “轻压”即减小钻压, 此项技术虽能够控制井斜, 但也降低了机械钻速。实钻资料表明, 影响井斜的主要因素包括地质因素、钻具组合、钻井参数等。其中地质因素^[3~5]虽不能改变, 但可以将地层倾斜倾向数据与钻具组合、钻井参数的优化计算相结合, 实现钻井防斜打直, 并能够解放钻压提高机械钻速的目的。因此开展相关研究对于大倾角地层的钻井施工具有重要的理论意义和工程实用价值。

1 地层倾角和倾向的计算

不同地层层面网格的水平投影是规则排列的正方形, 网格结点与对应的不同层面网格结点在一条铅垂线上^[6], 只是垂深(或海拔)不一样。图 1 中地层任意一点 $A(N, E, H)$ 在水平面上的投影点 A_1 落在由 a, b, c, d 组成的正方形中, 其中 N, E 为南北坐标, H 为深度。

(1) 在水平投影图上确定 A_1 点所在正方形 4

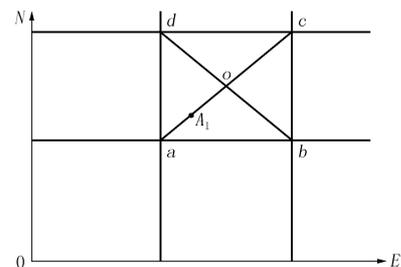


图 1 地层空间网格结点水平投影

个顶点的坐标。在水平投影平面内, 由于网格的间距是一固定值 s , 因此投影平面上各结点的 N, E 坐标为固定值 s 的整数倍^[7]。如图 1 所示, a 点的 N, E 坐标可表示为:

$$N_a = \text{int}(N/s)s \quad (1)$$

$$E_a = \text{int}(E/s)s \quad (2)$$

则 b, c, d 的 N, E 坐标可以表示为:

$$N_b = N_a \quad (3)$$

$$E_b = E_a + s \quad (4)$$

$$N_c = N_a + s \quad (5)$$

$$E_c = E_a + s \quad (6)$$

$$N_d = N_a + s \quad (7)$$

收稿日期: 2012-03-09; 修回日期: 2012-07-02

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2011ZX05022-001)

作者简介: 李文飞(1978-), 男(汉族), 山东菏泽人, 胜利石油管理局钻井工艺研究院工程师, 油气井工程专业, 博士, 从事钻井工程设计研究工作, 山东省东营市东营区北一路 827 号, liwenfei_slyt@sinopec.com。

$$E_d = E_a \quad (8)$$

(2)在水平投影图上确定 A_1 点在正方形中的位置。如图1所示,正方形 $abcd$ 的两条对角线可以将其划分为4个三角片,判断 A_1 点投影^[8]可由式(9)~(12)确定。

A 点投影落在 $\triangle oab$ 中

$$\begin{cases} (N - N_a)/(E - E_a) < 1 \\ (N - N_b)/(E - E_b) > -1 \\ E_a < E < E_b \\ N_a < N < N_a + (1/2)s \end{cases} \quad (9)$$

A 点投影落在 $\triangle obc$ 中

$$\begin{cases} (N - N_c)/(E - E_c) < 1 \\ (N - N_b)/(E - E_b) > -1 \\ E_b < E < E_c \\ N_b < N < N_b + (1/2)s \end{cases} \quad (10)$$

A 点投影落在 $\triangle ocd$ 中

$$\begin{cases} (N - N_c)/(E - E_c) < 1 \\ (N - N_d)/(E - E_d) > -1 \\ E_c < E < E_d \\ N_c < N < N_c + (1/2)s \end{cases} \quad (11)$$

A 点投影落在 $\triangle oda$ 中

$$\begin{cases} (N - N_a)/(E - E_a) < 1 \\ (N - N_d)/(E - E_d) > -1 \\ E_a < E < E_d \\ N_d < N < N_d + (1/2)s \end{cases} \quad (12)$$

(3) A 点投影所在三角片垂直向上形成的棱柱体中任意层面法向量。设 A 点投影所在正方形网格顶点 a, b, c, d 分别对应空间层面网格^[9,10]顶点 i, j, k, l ,则 A 点投影落在不同三角片中时法向量可由式(13)~(16)计算。

A 点投影落在 $\triangle oab$ 中时:

$$\vec{n} = [(H_a - H_d, N_a - N_d, E_a - E_d)(H_b - H_a, N_b - N_a, E_b - E_a) + (H_b - H_a, N_b - N_a, E_b - E_a) \cdot (H_c - H_b, N_c - N_b, E_c - E_b)]/2 \quad (13)$$

A 点投影落在 $\triangle obc$ 中时:

$$\vec{n} = [(H_b - H_a, N_b - N_a, E_b - E_a)(H_c - H_b, N_c - N_b, E_c - E_b) + (H_c - H_b, N_c - N_b, E_c - E_b) \cdot (H_d - H_c, N_d - N_c, E_d - E_c)]/2 \quad (14)$$

A 点投影落在 $\triangle ocd$ 中时:

$$\vec{n} = [(H_c - H_b, N_c - N_b, E_c - E_b)(H_d - H_c, N_d - N_c, E_d - E_c) + (H_d - H_c, N_d - N_c, E_d - E_c) \cdot (H_a - H_d, N_a - N_d, E_a - E_d)]/2 \quad (15)$$

A 点投影落在 $\triangle oda$ 中时:

$$\vec{n} = [(H_d - H_c, N_d - N_c, E_d - E_c)(H_a - H_d, N_a - N_d, E_a - E_d) + (H_a - H_d, N_a - N_d, E_a - E_d) \cdot (H_b - H_a, N_b - N_a, E_b - E_a)]/2 \quad (16)$$

(4) A 点法向量。利用点到平面的距离公式,计算 A 点到各个层面对应三角片的距离,找到离 A 点最近的上、下2个三角片,则 A 点法向量:

$$\vec{n}_A = \frac{d_{\min 1}}{d_{\min 1} + d_{\min 2}} \vec{n}_2 + \frac{d_{\min 2}}{d_{\min 1} + d_{\min 2}} \vec{n}_1 \quad (17)$$

式中: $d_{\min 1}$ —— A 点到最近上层面对应三角片的距离, m;
 $d_{\min 2}$ —— A 点到最近下层面对应三角片的距离, m;
 \vec{n}_1 ——最近上层面对应三角片的法向量; \vec{n}_2 ——最近下层面对应三角片的法向量。

(5) A 点处地层倾角和方位。

地层的倾角 α_d :

$$\alpha_d = \arccos(|H_A|/|\vec{n}_A|) \quad (18)$$

地层的方位角 φ_d :

$$\varphi_d = \begin{cases} \arctan(E_A/N_A) & (N_A > 0) \\ \arctan(E_A/N_A) + \pi & (N_A < 0) \\ \pi/2 & (N_A = 0, E_A \geq 0) \\ 3\pi/2 & (N_A = 0, E_A < 0) \end{cases} \quad (19)$$

2 钻具组合及钻井参数分析

在进行井眼轨迹控制时,常规方法使用单稳定器钻具组合。现以钟摆钻具组合为例,计算分析钻具组合的力学特性。

2.1 钻具组合

(1)钟摆钻具组合: $\varnothing 311.1$ mm 3A + $\varnothing 228.6$ mm DC $\times 3$ 根(25.23 m) + $\varnothing 311$ mm SST(1.68 m) + $\varnothing 228.6$ mm DC 3根(25.65 m) + $\varnothing 203.2$ mm DC 12根(104.44 m) + $\varnothing 127$ mm HWDP $\times 6$ 根(54.96 m) + $\varnothing 127$ mm DP。

(2)柔性钟摆钻具组合: $\varnothing 311.1$ mm 3A + $\varnothing 228.6$ mm DC $\times 2$ 根(16.97 m) + $\varnothing 311$ mm SST(1.68 m) + $\varnothing 177.8$ mm DC(8.88 m) + $\varnothing 228.6$ mm DC 3根(25.65 m) + $\varnothing 203.2$ mm DC 12根(104.44 m) + $\varnothing 127$ mm HWDP $\times 6$ 根(54.96 m) + $\varnothing 127$ mm DP。

(3)单稳定器稳斜钻具组合: $\varnothing 311.1$ mm 钻头(HJ537) + $\varnothing 203$ mm 短钻铤 $\times (1 \sim 3.5$ m) + $\varnothing 311$ mm 稳定器 + $\varnothing 203$ mm 无磁钻铤 $\times 1$ 根 + $\varnothing 203$ mm 钻铤 $\times 11$ 根 + $\varnothing 127$ mm 加重钻杆 $\times 15$ 根 + $\varnothing 127$ mm 钻杆。

2.2 钻井参数分析

2.2.1 钻压 P_B 对钻头侧向力 P_α 的影响

从图 2 可以看出,对于钟摆钻具组合(1),300 kN 钻压是防斜或降斜效果的最优钻压,钻具只有在最优钻压附近工作才能获得较好的效果。

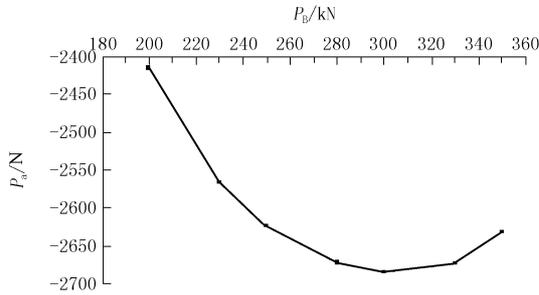


图 2 钻压对钻头侧向力的影响

2.2.2 稳定器外径 D_s 对钻头侧向力 P_α 的影响

从图 3 可以看出,设钻压 300 kN,稳定器外径对钻头侧向力的影响较小,钻头侧向力变化趋势不显著。

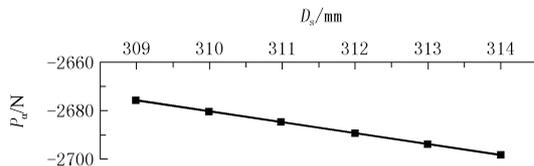


图 3 稳定器外径对钻头侧向力的影响

2.2.3 井斜角 α 对钻头侧向力 P_α 的影响

从图 4 可以看出,设钻压 300 kN,钟摆钻具组合的降斜力随着井斜角的增大而增大。

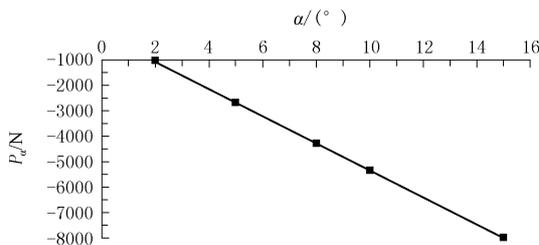


图 4 井斜角对钻头侧向力的影响

2.2.4 第二段钻铤外径 D_{c2} 对钻头侧向力 P_α 的影响

从图 5 可以看出,设钻压为 300 kN,改变第二段钻铤外径,钟摆钻具组合的降斜力随着第二段钻铤外径的减小而增大。

2.2.5 第一个稳定器位置对钻头侧向力 P_α 的影响

从图 6 可以看出,设钻压 250 kN,钻头侧向力随着稳定器安放位置的减小,由负值逐步向正值过渡,即由防斜钻具逐步演变为稳斜和增斜钻具。

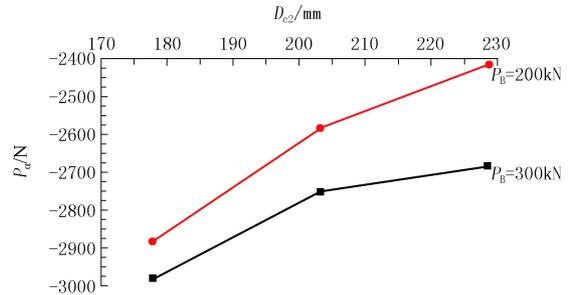


图 5 第二段钻铤外径对钻头侧向力的影响

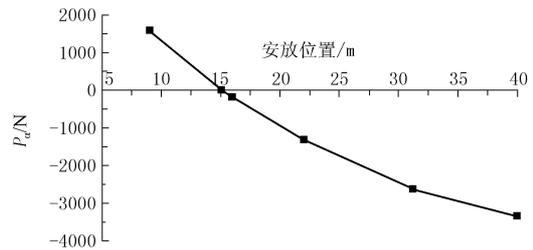


图 6 稳定器安放位置对钻头侧向力的影响

盐家区块位于济阳拗陷东营凹陷北部陡坡带东段北部,呈东西向延伸,区域形态向南倾没。民丰洼陷北部沙三、沙四沉积时期,由陈家庄古高地风化剥蚀的大量碎屑物质,沿陈南大断层下降盘堆积形成了各种扇体,盐家地区沙三、沙四段地层倾角 $5^\circ \sim 22^\circ$ 。

3.2 盐家地区井斜规律分析

盐家区块实钻井井斜曲线如图 7 所示。

通过实钻井资料的统计分析可以看出,井斜在 3000 m 以下均发生明显偏移,有规律的增加或减小,结合地质资料分析,该地区 3000 m 以下地层存在不同程度的倾斜,地层倾斜是造成井眼轨迹发生偏移的重要原因。

3.3 钻井应用分析

基于上述理论研究及邻井井斜规律的统计分析,针对盐 X 井的钻井施工,考虑下部地层自然倾斜特性进行钻井设计。盐 X 井设计井深 3150 m,根据邻井资料分析,1950 m 以深地层与本井所处位置地层倾向较一致。依据地层倾向倾角计算方法分析,下部地层倾角为 15° ,倾向为 185° ,预测结果与实测结果基本一致,验证了计算方法的正确性。根据井底靶点的设计参数,采用反推法由井底计算井眼轨迹至井口,并结合钻具组合的力学性能分析,优化设计了地面井口位置,以利于井眼轨迹自然中靶,根据分析结果,地面井口应向 180° 方向移动 98 m (见图 8),实钻测量轨迹见图 9。

从图 9 中可以看出,下部地层实钻轨迹仍向 0° 方向倾斜,图 8 预测井口向 180° 方向偏移,说明预

3 实例分析

3.1 区域地质

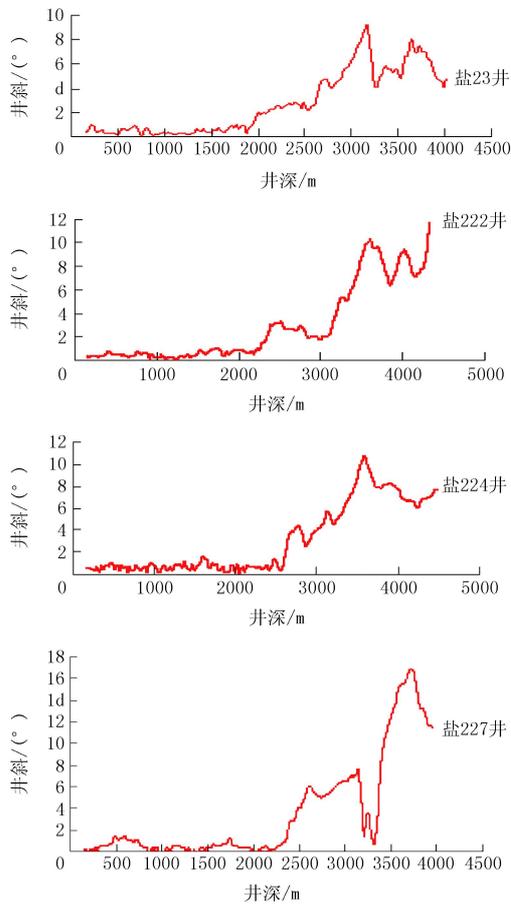


图7 盐家区块实钻井井斜曲线

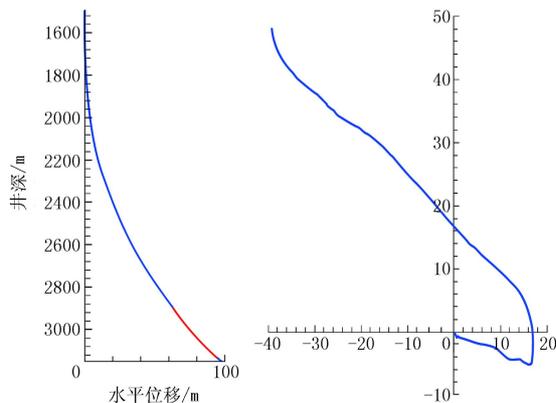


图8 垂直投影图

图9 盐X井实钻轨迹水平投影

测下部地层钻井轨迹与实钻轨迹倾斜趋势相同,井口偏移量计算虽有一定误差,但也能够满足油藏设计基本要求,验证了理论方法的正确性。本井二开下部地层,自井深 2420 m 使用牙轮钻头,并提高了钻压(最高 210 kN),钻压平均比邻井提高了 30~70 kN,从图 10 中可以看出,该井下部井段平均机械钻速为 3.2 m/h,平均机械钻速比邻井提高了 11%~68%,提速效果明显,且井身质量符合设计要求。盐

X 井现场应用结果表明,在高陡构造地区利用地层的倾斜规律,通过优化地面井口位置和井眼轨道设计,使钻井自然中靶,并且释放钻压提高机械钻速是可行的,进一步说明该项技术的合理性,具有重要的推广应用价值。

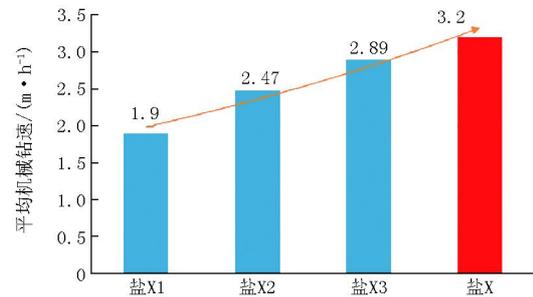


图10 盐X井下部地层平均机械钻速对比

4 结论与建议

(1) 根据获取的各地层层面的空间网格数据,建立了地层倾角、倾向的计算方法,便于工程人员利用地质资料准确计算地层自然倾斜规律;

(2) 推荐了常用防斜打直钻具组合类型,并针对典型钻具组合,分析了钻井参数影响钻具组合力学性能的规律,为防斜钻具组合的优选提供了帮助;

(3) 实例分析表明,利用地层自然倾斜规律,通过优化地面井口位置,在满足井眼轨迹自然中靶的同时,释放钻压提高钻速,该项技术是合理可行的。

参考文献:

- [1] 何世明,夏宇文. 地层倾角对岩石可钻性的影响规律研究[J]. 钻采工艺,1998,21(1):11-15.
- [2] 齐林,王新清,刘修善,等. 岩石可钻性和各向异性实验及结果分析[J]. 大庆石油学院学报,1995,19(4):121-124.
- [3] 张厚美,吴何洪. 岩石力学特性关系的探讨[J]. 中国海上油气(工程),1999,11(3):46-50.
- [4] 熊继有,李井矿,付建红,等. 岩石矿物成分与可钻性关系研究[J]. 西南石油学院学报,2005,27(2):31-33.
- [5] 李士斌,阎铁,韩辉,等. 模拟井底应力条件下的岩石可钻性实验研究[J]. 天然气工业,2003,23(2):64-66.
- [6] 董世明,施太和. 构造应力场对井眼轨迹影响的实验研究[J]. 石油钻采工艺,1995,17(5):50-52.
- [7] 修先民,杨弘. 岩石力学性质及可钻性分级研究[J]. 云南地质,2001,20(3):323-330.
- [8] 罗云,艾池,阎铁,等. 岩石各向异性指数的测试技术和应用[J]. 岩石力学与工程学报,1995,14(1):69-73.
- [9] 周祖辉,尹宏锦. 岩石可钻性各向异性的微钻头试验研究[J]. 华东石油学院学报,1986,10(4).
- [10] 高德利,聂翠平,刘希圣. 钻头各向异性钻井特性的理论分析和试验[J]. 石油大学学报(自然科学版),1991,15(6):28-31.