

Analysis of the Impact of Magnetic Declination Changes on Wellbore Target Accuracy and Countermeasures — A Case Study of the Ordos Basin

Peizhang Han¹ Zhonghua Wang¹ Zhongcai Miao² Mingming Chu²

1.China Petroleum Chuanqing Drilling Engineering Company Changqing Drilling Corporation, xi'an, Shaanxi, 710018, China

2.China Petroleum Changqing Oilfield Sulige Gas Field Development Branch, xi'an, Shaanxi, 710018, China

Abstract

The oil and gas reservoirs in the Ordos Basin exhibit the typical 'three-low' characteristics, and their economically efficient development highly depends on accurately hitting the reservoirs during drilling. Wellbore trajectory control is key to ensuring drilling accuracy, while magnetic declination, as a parameter that varies with the Earth's magnetic field, directly affects the precision of wellbore orientation calculations. Analysis shows that the cumulative change in magnetic declination in this area over the past nearly 40 years averages 2°. If historical data were used to design the trajectory, it would result in the actual wellbore deviating from the target, potentially causing a missed target or wellbore collision incidents. Therefore, this paper proposes a real-time magnetic declination correction method based on the International Geomagnetic Reference Field (IGRF) and World Magnetic Model (WMM), which can accurately calculate trajectories, effectively ensure target accuracy, and mitigate collision risks, providing important technical support for high-precision drilling operations in the basin.

Keywords

magnetic declination; wellbore targeting accuracy; International Geomagnetic Reference Field (IGRF) model; World Magnetic Model (WMM)

磁偏角变化对井眼中靶精度的影响分析及对策——以鄂尔多斯盆地为例

韩佩章¹ 王中华¹ 苗忠才² 楚明明²

1. 中国石油川庆钻探工程公司长庆钻井总公司, 中国·陕西 西安 710018

2. 中国石油长庆油田苏里格气田开发分公司, 中国·陕西 西安 710018

摘要

鄂尔多斯盆地油气藏具有典型的“三低”特征, 其经济有效开发高度依赖于精准钻遇储层。井眼轨迹控制是保障钻遇精度的关键, 而磁偏角作为随地磁场变化的参数, 直接影响井眼方位的计算精度。分析表明, 该区域近40年磁偏角累积变化平均达2°, 若沿用历史数据设计轨迹, 将导致实际井眼偏离目标, 甚至引发脱靶或井眼相碰事故。为此, 本文提出基于国际地磁参考场(IGRF)和世界地磁(WMM)模型的实时磁偏角校正方法, 可准确计算轨迹, 有效保障中靶精度并规避防碰风险, 为盆地高精度钻井作业提供重要技术支撑^[1]。

关键词

磁偏角; 井眼中靶精度; 国际地磁参考场(IGRF)模型; 世界地磁(WMM)模型

1 引言

鄂尔多斯盆地油气资源的成功开发离不开优质储层的钻遇与体积压裂技术的结合。要实现“少打井、打高产井”的目标, 核心是成功打出精准钻遇目的储层的直/定向井以及长距离、高精度地穿行于厚度仅2-5米的优质储层“甜点”水平井。所以钻井施工过程中的井眼轨迹的精确控制, 尤其

是中靶精度, 直接决定了单井最终可采储量(EUR)和经济效益。如何实现井眼轨迹的精确控制, 这就必须提到常用的可以连续监测钻井轨迹、及时纠偏的仪器——无线随钻测斜仪(MWD), 但其测量方位角是基于磁力计工具, 直接测量的是磁北方位, 而非地理真北方位。而磁偏角的准确性, 就成为影响中靶精度的关键性因素之一。

地磁场是一个动态场, 存在长期变化。鄂尔多斯盆地自上世纪七、八十年代大规模勘探开发以来, 许多早期的地质设计资料所采用的磁偏角数据已过时。然而, 在现场作业

【作者简介】韩佩章(1981-), 男, 中国河北赵县人, 本科, 工程师, 从事天然气钻井工程管理及钻井工艺技术研究。

中，这一隐蔽的系统性误差极易被忽略。若在钻井施工过程中错误地使用了过期的磁偏角值，是否对井眼中靶精度构成影响？又应该采取何种对策消除影响？这是本文旨在分析解答的主要问题。

2 磁偏角长期变化分析

2.1 磁偏角的定义

地球磁北（罗盘所指的北极）与地理真北（地图上的北极）方向之间的夹角^[2]。

2.2 地磁长期变化机理

地球磁场主要由地核外层的液态铁镍流体的对流运动产生。这些流体运动非常不稳定，会导致主磁场的方向和强度发生缓慢、持续的长期变化，这就导致了磁场强度、磁倾角、磁偏角随着地球磁场的变化不断变化。这种变化具有全球性和持续性，其变化速率（年变率）因地域而异^[3]。

2.3 地磁偏角变化

以鄂尔多斯盆地部分区域的油气勘探开发为例，近40年间地磁场确实发生了可探测的变化。这些变化主要是由地球主磁场的长期变化和局部的地壳磁场变化共同作用的结果。总的来说，鄂尔多斯盆地北部的磁场呈现出系统性、大范围的西向漂移的趋势。

在鄂尔多斯盆地代表性的区块筛选了12口井，根据1986年地形图所读磁偏角以及2025年IGRF国际地磁参考场模型计算的磁偏角，对区域的磁偏角变化情况进行计算

表 1

鄂尔多斯盆地	1986年地形图所读磁偏角(度)	IGRF国际地磁参考场(2025年)模型磁偏角(度)	磁偏角40年间累积变化量(度)
S*-14C1	-2.63	-4.68	-2.05
T*-2C3	-2.63	-4.54	-1.91
S*-47C5	-2.63	-4.58	-1.95
S*-46c2	-2.63	-4.57	-1.94
E*-54C1	-2.63	-4.64	-2.01
S*-36c6	-2.9	-4.74	-1.84
S*-41C3	-2.9	-4.71	-1.81
Y*-62C4	-2.9	-5.06	-2.16
Ji*-55C	-2.57	-5.43	-2.86
M*-22C	-3.68	-5.38	-1.7
H*-35X	-2.79	-5.01	-2.22
Q*-32H	-3.27	-4.96	-1.69
平均	-2.85	-4.86	-2.01

2.4 年均变化率

近四十年间鄂尔多斯盆地的磁偏角发生了显著改变，大约每年0.05°的速度西偏，累计西偏了2度左右。若在2025年的设计中错误使用1986年的磁偏角数据，将直接引入2度左右的系统性方位误差。

3 磁偏角误差对中靶精度的影响

3.1 方法一：理论误差计算法

3.1.1 建立理论模型

首先建立理论的中靶半径偏差的定量模型，绘制定向井三维投影坐标，以1986版磁偏角校正后的方位，绘制一条参考轨迹，再以2025版磁偏角校正后的方位，绘制一条偏差轨迹，方位角误差（磁偏角误差） $\Delta D=2$ 度，并进行水平投影。

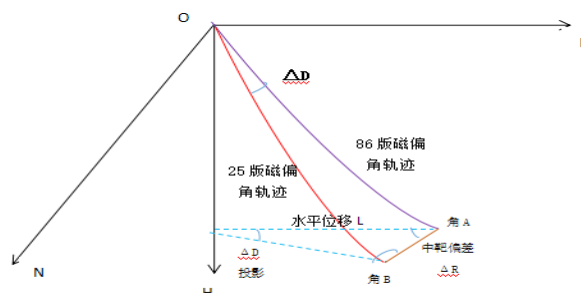


图 1

3.1.2 推导偏差公式

根据上图并眼轨迹水平投影的三角函数近似关系，以 ΔD 投影= ΔD ，约等于2度为例，角A \approx 角B=89度，近似直角，由此可以参照直角三角形的函数公式来简化求取中靶半径偏差 ΔR ，列出以下计算中靶偏差的公式：

$$\text{中靶半径偏差} (\Delta R) \approx L \times \sin(\Delta D)$$

ΔR : 中靶半径偏差 (米)；

L: 从井口到靶点的总水平位移 (米)；

ΔD : 磁偏角误差 (度)。

3.1.3 中靶半径偏差的计算

以磁偏角误差 $\Delta D=2$ 度计算，根据上述公式计算分析水平位移L每增加500米，中靶半径偏差情况

表 2

总水平位移 L (m)	磁偏角误差 ΔD (度)	中靶半径偏差 ΔR (m)
500	2	17
1000	2	35
1500	2	52
2000	2	70
2500	2	87

由上表计算结果可以看出，在磁偏角误差 ΔD 一定的情况下，中靶半径偏差(ΔR)和水平位移L成正比，即使看似微小的磁偏角历史误差，在较长水平位移的放大作用下，中靶半径偏差的也足以导致井眼轨迹脱靶。

3.2 方法二：全井眼轨迹对比法

3.2.1 井眼轨迹计算

选择一口水平井，水平段长2000米，通过水平井软件

对整个井眼轨迹计算（最小曲率法），并进行系统性评价。

使用 1986 年的磁偏角校正后的数据，输入软件，计算出的井眼轨迹作为基准轨迹，投影图中此轨迹为红色。

使用 2025 年正确的磁偏角校正的测量数据，输入软件，计算出的井眼轨迹为实钻轨迹，投影图中此轨迹显示为蓝色。方位角误差（磁偏角误差） $\Delta D=2$ 度。

3.2.2 量化关键参数

通过水平井软件计算，对两条轨迹进行防碰扫描，并导出相关数据见表 3。

从表 3 可以看出，在方位角误差（磁偏角误差） $\Delta D=2$ 度时，随着水平位移的增加，两条井眼轨迹偏移就越大，井

眼轨迹还没有入窗，偏差已经大于水平段质量标准要求，当水平段达到 2000 米时，井底的中靶偏差已达到了 93 米，远远大于 20 米的质量要求，严重脱离靶区。同时与方法一中的理论计算对比，中靶偏差同样与水平位移 L 成正比，偏差程度基本保持一致，也印证了方法一算法的可行性。

3.2.3 可视化对比

分别在水平投影图和三维立体图上，叠加两条轨迹，结合上表的数据，可以明显看出，两条轨迹随着水平位移的增加逐步开始分离。若错误的使用了 1986 年的磁偏角，看似井眼轨迹控制在靶区内，但用 2025 年的磁偏角进行修正后，几乎整个水平段的井眼轨迹都脱离了靶区。

表 3

井深	井斜	86 版磁偏角修正方位	25 版磁偏角修正方位	水平段长	总水平位移	软件计算靶点偏移	理论近似计算偏移	水平井段横偏移质量标准
0.00	0.00	189.15	187.15	0	0	0.00	/	
1000.00	0.66	308.03	306.03	0	16	0.58	/	
1500.00	0.75	203.05	201.06	0	14	0.75	/	
2100.00	1.12	111.97	109.97	0	18	0.64	/	造斜点
2500.00	10.17	182.03	180.02	0	55	2.26	/	
3000.00	27.48	222.50	220.71	0	138	5.34	/	
3470.00	80.35	220.64	218.62	0	500	17.47	17	
3640.00	88.36	222.33	220.26	0	670	23.31	/	入窗点
3970.00	89.94	222.15	220.01	330	1000	34.84	35	$\leq 10m$
4480.00	89.88	221.74	219.70	840	1500	52.64	52	$\leq 15m$
4970.00	90.08	223.88	222.01	1330	2000	69.65	70	$\leq 20m$
5470.00	88.49	222.74	220.75	1830	2500	87.15	87	$\leq 20m$
5640.00	89.98	223.20	221.20	2000	2666	93.09	/	$\leq 20m$

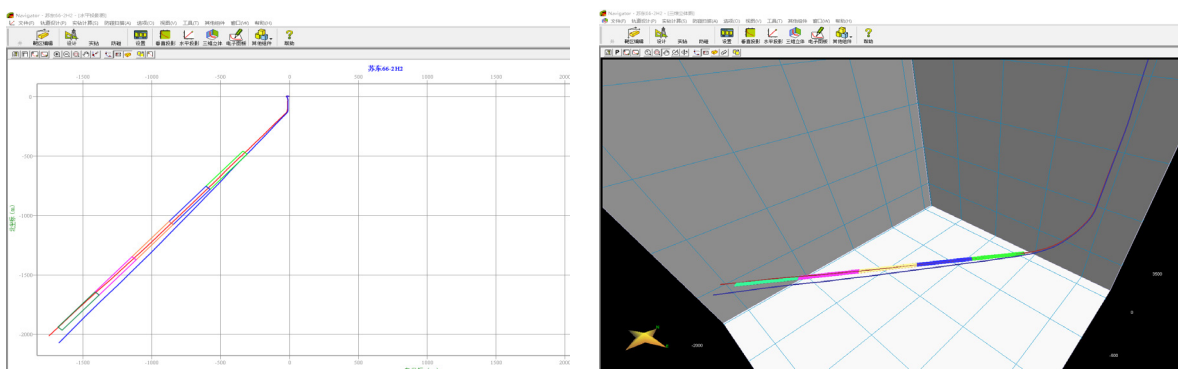


图 2

4 应对策略

针对上述磁偏角误差对中靶精度的影响分析的结果和鄂尔多斯盆地油气井大井丛密集开发 40 年的现状，新部署井，尤其属于加密井或老井场开窗侧钻井时，会面临两个难题，一是邻井井眼轨迹因使用非当时开发年份的磁偏角数据，与真实的井眼轨迹有误差，两井相碰的风险大大提高；二是周围的邻井套管会产生强烈的磁干扰现象，使常规无线随钻测斜仪 MWD 测出的磁方位数据失真，井眼轨迹产生

偏差，导致真实轨迹脱靶。为了鄂尔多斯盆地油气开发过程中，降低两井相碰的风险，提高井眼轨迹的中靶精度，提出以下几方面的应对措施。

4.1 核心对策：从设计源头把关，新部署井采用最新的磁偏角数据

4.1.1 获取磁偏角方法

最新的磁偏角数据可以通过两种方式获得，一是现场测量方法：将指北的参考方向（真北方向）与磁针指北的方向（磁北方向）进行对比，其夹角即为磁偏角；二是地磁

参考场模型法,是使用已知的地磁参考场模型值进行计算获得,它的精度取决于参考场模型的准确性。

现场测量方法有太阳方位角法、陀螺经纬仪法、差分GPS法测量精度高,但缺点也比较明显,需要依赖高精度仪器、天气以及专业操作,而对于井眼轨迹控制来说,选用地磁参考场模型法获取的磁偏角数值,完全能够满足井眼中靶精度要求,而只需要基于GPS测量的井口坐标,应用最新的国际地磁参考场(IGRF)模型或世界地磁(WMM)模型计算出该井理论的磁偏角数据,不仅方便,同时也能满足现场定向测量需要。

4.1.2 从设计源头把关磁偏角

修订设计管理规定,明确要求在地质设计时,应采用通过单井复测的坐标,使用最新地磁参考场模型计算,获取的单井磁偏角数据,同时做工程设计时,严格按照地质设计给定的磁偏角进行井眼轨迹设计。

4.1.3 建立可追溯的数据管理模式

修改完井资料和电子数据库模板,应明确记录所使用的磁偏角值、数据来源、模型版本和计算日期,确保全过程可追溯、可复核。

4.2 关键对策

关注高风险井,通过修正老井数据和使用陀螺仪控制风险在丛式井密集区域部署加密井或老井侧钻井时,有两种必须要做的措施来降低防碰风险和规避地磁干扰:一是在丛式井密集区域部署加密井时,应对周围老井数据进行反向修正;二是使用陀螺测斜仪进行测量,直接测量真北方位,从根本上规避磁偏角和地磁干扰问题,保障井眼轨迹绝对精度。

4.2.1 修正老井数据

修正老井数据的关键有以下几点需要注意:一是找出老井井眼轨迹实钻数据和连斜数据,对照设计给定的磁偏角 D_1 ,换算成当时实测的磁方位;二是根据老井复测坐标,使用钻井施工时期的地磁参考场模型获取当时的磁偏角 D_2 ;三是应用获取的磁偏角 D_2 和原始的磁方位进行换算,计算出老井实钻轨迹的真方位;四是通过换算后的方位,计算出

真实的井眼轨迹。通过修正老井数据,可以校核老井真实靶点,为区域开发查漏补缺提供数据支撑,同时可以减少因为井眼轨迹的不确定性,引发的防碰风险。

4.2.2 配套无线陀螺测斜仪

陀螺测斜仪主要在老井侧钻井和磁干扰较大的井使用,从根本上规避老井套管、井下钻具以及其他各类的地磁干扰问题。但目前鄂尔多斯盆地油气开发过程中,经常用到的是有线陀螺测斜仪,需要有有线车配合作业,大大降低了现场施工效率。为了提高加密井、老井侧钻井以及需要用到陀螺测斜仪校准井眼轨迹井的施工效率,还需要及时配备无线陀螺测斜仪。

5 结语

对于井眼中靶精度,磁偏角的长期变化,是一个非常重要的影响因素。尤其对于油气开发历史长的鄂尔多斯盆,其影响尤为突出。

根据磁偏角变化分析,近四十年间鄂尔多斯盆地的磁偏角发生了显著改变,若使用错误的历史磁偏角数据,可引入 2° 左右的系统性方位误差,进而使井眼轨迹随水平位移的增加,会产生数十米甚至近百米的偏差,不仅增加了防碰风险,更严重的是影响了油气藏开发精准度。

为了消除这一风险,必须实时更新磁偏角数据,应用最新的国际地磁参考场(IGRF)模型或世界地磁(WMM)模型进行磁偏角校正。并在丛式井密集区域和磁干扰区积极应用老井轨迹反向修正和陀螺测斜技术,通过管理和技术双重手段,方能有效消除磁偏角误差带来的防碰风险和提高井眼中靶精度,以保障鄂尔多斯盆地油气藏的精准开发。

参考文献

- [1] 刘太满,李根奎.磁偏角在油田定向井中应用研究初探[J].西部探矿工程,2006,(S1):376-378.
- [2] 丁建平,丁慧.磁偏角对斜井校正处理的影响[J].北京石油化工学院学报,2022,30(01):26-30.DOI:10.19770/j.cnki.issn.1008-2565.2022.01.004.
- [3] 郭凤霞,张义军,言穆弘.地磁场长期变化特征及机理分析[J].地球物理学报,2007,(06):1649-1657.