

基于方位角测量误差分析的钻具磁化磁场 实验研究

姜天杰¹, 菅光霄¹, 刘峰², 秦璐¹, 高名浩¹, 王姣姣¹, 孟庆威¹

(1. 中海油田服务股份有限公司油田技术研究院, 河北 三河 065201; 2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459)

摘要: 方位角作为表征井眼轨迹的主要参数, 在常规的MWD随钻测斜中其测量值由于受复杂地磁环境及干扰磁场的影响而产生误差。针对底部钻具组合磁化磁场对方位角测量的影响, 利用磁力仪对不同钻具端部磁化磁场进行了实验测试。通过数据拟合, 得出不同钻具端部磁化磁极强度值, 根据磁场叠加原理, 进一步对具体钻具组合在测点处产生的干扰磁场进行计算, 量化分析钻具磁化磁场对方位角测量精度的影响。研究结果表明: 钻具端部磁化磁场强度在钻具轴线方向上随距离的增加而呈指数形式迅速衰减, 最终趋近于零。与常规的随钻方位角测量间接修正相比, 通过钻具磁化磁场的实验测试可实现对钻具磁干扰对方位角测量影响的直接校正。

关键词: 方位角测量; 钻具磁干扰; 磁极强度; 误差校正

中图分类号: TE243; P634.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)04-0054-07

Experiment study on the magnetized magnetic field of drilling tools based on azimuth measurement error analysis

JIANG Tianjie¹, JIAN Guangxiao¹, LIU Feng², QIN Lu¹, GAO Minghao¹, WANG Jiaojiao¹, MENG Qingwei¹

(1. Well-Tech Department, China Oilfield Services Limited, Sanhe Hebei 065201, China; 2. CNOOC (China) Limited Tianjin Branch, Tianjin 300459, China)

Abstract: Azimuth is a key parameter in well trajectory description, but the conventional measurement with MWD usually exists errors because of the complex geomagnetic field and magnetic field interference. To investigate the impact of bottom hole assembly(BHA) magnetic field interference on azimuth measurement, the interference magnetic field of different drilling tools were measured with a portable magnetometer. On the basis of the interference magnetic field experiment measurement, magnetic pole strength of different drilling tools can be acquired through the data fitting method. With the magnetic pole strength, the interference magnetic field strength can be calculated using the superposition principle, and the azimuth error induced by the interference magnetic field was quantitatively analyzed. According to the experiment results, the interference magnetic field strength along the drilling tool axis exponentially decreases with the added distance and finally goes to zero. Compared to the traditional methods, azimuth error correction using the magnetic pole strengths of drilling tools in this study is more direct and convenient.

Key words: azimuth measurement; magnetic interference of drilling tools; magnetic pole strength; error correction

0 引言

钻井工程中, 井眼轨迹参数的精确测量是轨迹

预测与控制技术的关键。井眼轨迹不确定性研究表明, 方位角作为井眼轨迹三大基本参数之一, 其

收稿日期: 2025-04-14; 修回日期: 2025-06-03 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.04.007

基金项目: 中国海洋石油集团有限公司重点攻关项目“中国海油旋转导向谱系化技术与产业化研究”(编号: KJGG-2022-1402)

第一作者: 姜天杰, 男, 汉族, 1979年生, 工程师, 硕士, 从事随钻测井和旋转导向钻井仪器的研发工作, 河北省三河市燕郊经济技术开发区海油大街201号, jiangtj@cosl.com.cn。

引用格式: 姜天杰, 菅光霄, 刘峰, 等. 基于方位角测量误差分析的钻具磁化磁场实验研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(4): 54-60.

JIANG Tianjie, JIAN Guangxiao, LIU Feng, et al. Experiment study on the magnetized magnetic field of drilling tools based on azimuth measurement error analysis[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(4): 54-60.

测量误差对井眼轨迹精度影响最大^[1]。测井常用的磁力随钻测斜仪,其原理主要是利用井下3个重力加速度计和3个磁通门传感器测得3个方向上的重力加速度分量和地磁场分量,计算得到方位角等井眼轨迹参数^[2-3]。方位角测量误差主要来自地磁场及测点周围干扰磁场的影响,其中干扰磁场主要表现为钻具磁化磁场影响^[4-5]。为提高方位角测量精度,通常使用无磁钻具来降低铁磁钻具磁干扰的影响^[6-8]。而对已有钻具磁干扰所导致的方位角测量误差校正,主要包括径向磁干扰校正^[9]和包括短钻铤法^[10]、Russell法^[6]、矢量和法、钻具截面法^[11]等方法的轴向磁干扰校正,以及多站分析法^[12-16]等。由于上述方法均需借助现场高精度的地磁场测量数据,无法直接量化钻具磁干扰的影响。

研究钻具磁化磁场对方位角测量的影响,最直接的方法是明确钻具磁化磁场的大小及影响范围。当前国外仅有Oddvar Lotsberg测出了41种钻具组合的磁极强度,平均均方根为 $369 \mu\text{Wb}^{[7]}$ 。Anne Hokmes通过分析78次MWD测量偏差,认为钻具法向磁干扰是一个附属产品且均方根值为 $57 \text{ nT}^{[17]}$ 。国内孟卓然^[18]通过模拟BHA磁化影响,提出了一种判断BHA轴向磁化组件磁极强度的方法。由于钻具磁化受地磁场及钻具本身材料及尺寸等因素影响,磁化磁场强度具有很强的复杂性和不确定性。同时,当前随着井眼轨迹控制及导向技术的发展,钻井工程中常用的钻具组合优化设计^[19-22]也使得底部钻具组合越来越复杂。国外井眼测量精度行业指导委员会(ISCWSA)中以Oddvar Lotsberg和Anne Hokmes等学者为代表所给出的钻具磁极强度推荐值已无法满足国内行业需求。

本文通过实验对不同钻具部件轴向磁场进行测试,利用测试数据表征钻具轴向磁化磁场分布和影响范围,并得出钻具磁化端部磁极强度值,为底部钻具组合无磁钻具长度的精确计算及量化分析钻具轴向磁干扰对方位角测量影响提供理论依据。

1 实验设备及方法

1.1 实验仪器及钻具设备

磁场测试主要采用美国MEDA FVM-400型手持式三轴磁通门计,具体参数见表1。在直角坐标系模式下,测试数据显示磁场矢量的3个分量,在极坐标系模式下,测试结果显示磁场矢量的大小和方

向。实验测试钻具主要来自中海油某作业基地 $6\frac{3}{4} \text{ in}$ ($1 \text{ in}=25.4 \text{ mm}$,下同)旋转导向钻具,包括钻头、扶正器、马达、钻杆及接头等。实验测试过程中其它辅助设备包括以色列DUMA公司的EAC-1012型标准版激光自准直仪,以及手持GPS、卷尺、水平仪、游标卡尺、照相机等。其中激光自准仪用于磁场测量过程中钻具与磁力仪探头的同轴度,手持GPS用来标注测试场地经纬度和高程。

表1 FVM-400磁通门计性能参数
Table 1 Performance parameters of FVM-400 fluxgate meter

测量参数	量 程	分辨率	精 度
X、Y、Z轴磁场分量	$\pm 100000 \text{ nT}$	1 nT	$\pm(\text{读数的} 0.25\% + 5 \text{ nT})$
磁场矢量大小	173205 nT	1 nT	$\pm(\text{读数的} 0.25\% + 5 \text{ nT})$
磁偏角	$\pm 180^\circ$	0.1°	1°
磁倾角	$\pm 90^\circ$	0.1°	1°

1.2 实验测试方法及要点

实验场地要求平整、开阔且周围无铁磁材料等磁场干扰,位于新疆某作业基地内(图1)。钻具磁化磁场测试之前先对所选场地进行地磁场测试,以场地中心为圆点,向东西南北四个方向延伸,每隔3 m选取一个测点(图2),通过多个测点对比分析地磁场变化和稳定性。



图1 实验测试场地

Fig.1 Experimental test site

钻具磁化磁场测试过程中,将钻具沿场地中心轴线放置,为了能够在钻具磁化磁场影响显著区域内获得足够密集的数据,方便准确刻画磁场分布特征和变化规律,在钻具端部沿钻具轴线方向5 m距

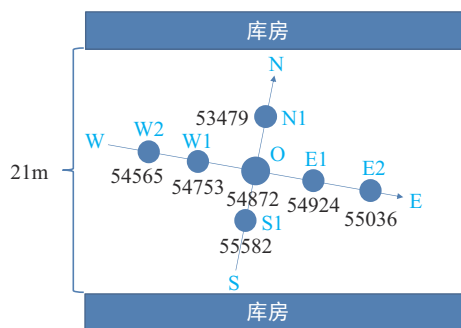


图2 场地地磁场测试测点布置

Fig.2 Layout of geomagnetic field test points at the site

离范围内按照间隔0.2 m布置测点(图3)。测试过程中保证钻具轴线与磁力仪探头轴线高度重合,减小由于轴线不重合导致的径向磁干扰对轴向磁化磁场测量值的影响。利用FVM-400型磁通门计分别测量钻具存在时和移除后各测点处钻具轴向上磁场分量,二者之差即为测点处钻具轴向磁化磁场大小。通过不同测点处磁场强度值及其与钻具端部距离拟合,得出钻具磁化端部磁极强度值。



图3 钻具磁化磁场测试实验布置

Fig.3 Experimental arrangement of drilling tool magnetization magnetic field test

2 实验结果与分析

2.1 实验场地地磁场测试结果

根据三轴磁通门计在测点处的读数 B_x , B_y 和 B_z , 由公式 $B_{\text{total}} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$ 求出测点处地磁场总场强的大小, 利用实验数据所得到的场地内不同测点处地磁场强度值见图4。

为验证测点地磁场测试数据的准确性及实验

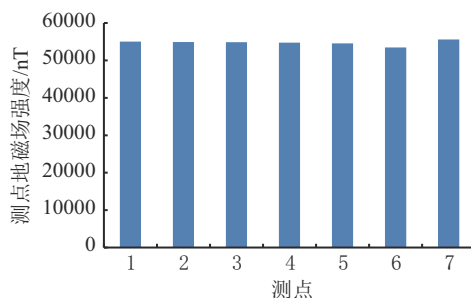


图4 实验场地内地磁场测量结果

Fig.4 Measurement results of the magnetic field in the interior of the experimental site

测试场地地磁场的稳定性, 利用手持GPS测得实验场地经度 84.3°E , 纬度 41.77°N , 海拔 970 m。根据实验场地大地坐标信息, 通过美国国家海洋和大气管理局在线查询网站^[23]可查询到当地的地磁场信息(图5)。将实验测得的数据与查询数据对比发现: 与查询的磁场强度值 56098.3 nT 相比, 实测数据存在一定偏差, 误差在 1000 nT 以内, 主要原因在于测点与查询点间大地坐标的微小差异所致。测点间对比发现磁场强度值有小幅波动, 但变化不大, 地磁场相对稳定, 所选场地可作为实验场地。

Magnetic Field						
Model Used:	WMM-2020					
Latitude:	41.77° N					
Longitude:	84.3° E					
Elevation:	970.0 m Mean Sea Level					
Date	Declination (+ E - W)	Inclination (+ D - U)	Horizontal Intensity	North Comp (+ N - S)	East Comp (+ E - W)	Vertical Comp (+ D - U)
2021-12-22	3.0359°	62.7018°	25,727.9 nT	25,691.8 nT	1,362.6 nT	49,850.7 nT
Change/year	0.0243°/yr	0.0841°/yr	-31.5 nT/yr	-30.9 nT/yr	-12.6 nT/yr	118.7 nT/yr
Uncertainty	0.34°	0.21°	128 nT	131 nT	94 nT	157 nT
						145 nT

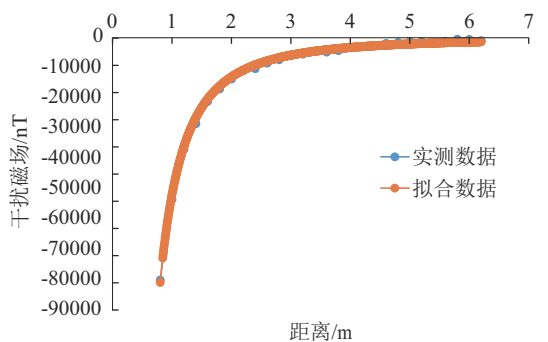
图5 实验场地地磁场信息在线查询数据

Fig.5 Online query data of geomagnetic field information at the experimental site

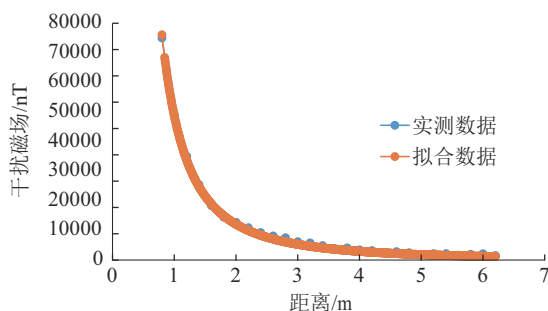
2.2 钻具轴向磁化磁场测试结果

根据现场钻具情况, 对钻具规格及参数进行了测量和搜集整理。具体包括不同尺寸PDC钻头、接头、扶正器、浮阀、钻杆、钻铤及马达等, 主要以 $6\frac{3}{4}$ in 钻具为主。测试包括单根钻具端部轴向磁化磁场强度及钻具组合端部轴向磁化磁场强度, 以及钻具间磁化磁场相互作用。以加重钻杆为例, 单根钻杆及两根钻杆组合后端部轴向磁化磁场测试结果见图6。根据测点处轴向磁场强度及测点与端部距离, 拟合得出长度为 9.6 m 的 5 in 加重钻杆单根公、母扣端磁化磁场强度分别为 648.934、612.645 μWb , 而两根钻杆组合后公、母扣端磁化磁场强度分别为 653.978、653.246 μWb , 与单根钻杆相差不

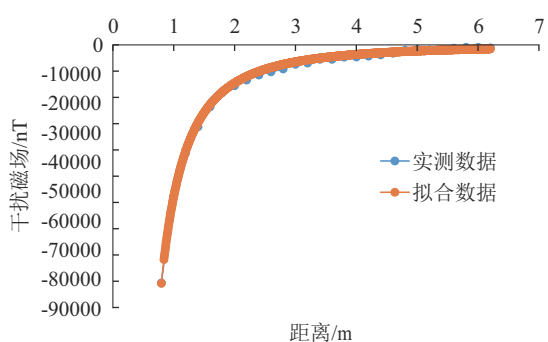
大。单根钻具端部轴向磁化磁场强度随着距离的增加迅速衰减,端部轴向磁化磁场的影响范围多在几米内。



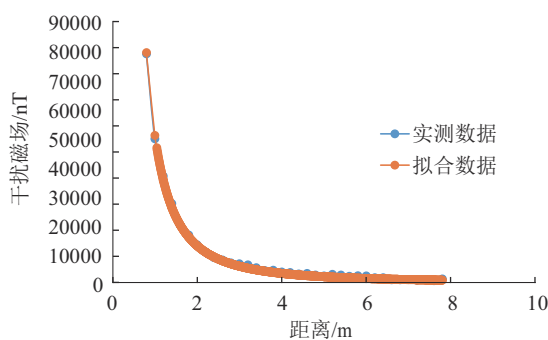
(a) 5in单根加重钻杆公扣端



(b) 5in单根加重钻杆母扣端



(c) 2根5in加重钻杆组合后公扣端



(d) 2根5in加重钻杆组合后母扣端

图6 钻杆端部轴向磁化磁场强度测试结果

Fig.6 Results of axial magnetization magnetic field strength at the end of drill pipe

2.3 钻具磁化磁极强度

在钻具端部轴向磁化磁场测量的基础上,根据磁场理论中距离磁极距离为 r 处的磁场强度等于磁极处场强与半径为 r 的球体表面积之商^[7],通过数学拟合可得出钻具磁化磁极强度。

$$B(r) = P / (4\pi r^2) \quad (1)$$

式中: B ——距离磁极距离为 r 处磁场强度,T; P ——磁极强度,Wb; r ——距离,m。

测试部分钻具磁化磁极强度拟合值见表2。

表2 钻具磁化磁极强度

Table 2 Magnetized pole strength of drilling tools

钻具名称	规格	磁极强度/ μ Wb
钻头	12 $\frac{1}{4}$ in 牙轮	1.471
	8 $\frac{1}{2}$ in PDC	2.249
	6 in 长 PDC	3.459
接头	6 $\frac{3}{4}$ in 公母接头	1.443
	6 $\frac{3}{4}$ in 双母接头	6.373
	6 $\frac{3}{4}$ in 双公接头	3.003
扶正器	6 $\frac{3}{4}$ in	1.598
浮阀	6 $\frac{3}{4}$ in	2.858
马达	6 $\frac{3}{4}$ in	101.760
	4 $\frac{3}{4}$ in	13.141
震击器	6 $\frac{3}{4}$ in	42.976
钻杆	5 in	365.439
加重钻杆	5 in	537.412
钻铤	8 in	153.489

3 钻具磁干扰方位角误差分析实例

通过钻具轴向磁化磁场测量对钻具磁极强度进行标定后,根据地磁场方向确定钻具磁化磁场方向。在北半球,钻具上端为正磁极,下端为负磁极^[24]。已知钻具磁化磁极强度及方向,MWD测斜过程中无弯接头情况下钻具磁化磁场在测点处所产生的轴向磁干扰大小可表示为^[7]:

$$\Delta B_z(z) = \frac{|P_U|}{4\pi(L-z)^2} + \frac{|P_L|}{4\pi z^2} - \frac{|P_{Bit}|}{4\pi(z+L_{Bit})^2} \quad (2)$$

式中: $\Delta B_z(z)$ ——距离无磁钻铤下端为 z 处的干扰磁场强度,T; P_U ——无磁钻铤上端磁极强度; P_L ——无磁钻铤下端磁极强度,Wb; P_{Bit} ——钻头处磁极强度,Wb; L ——无磁钻铤长度,m; z ——磁通门传感器距无磁钻铤下端的距离,m; L_{Bit} ——无磁钻铤以下钻具组合长度,m。

由钻具磁化磁场所引起的方位角测量误差： $|B|$ ——当地地磁场强度。

$$\Delta\varphi=\frac{180\sin\alpha\sin\varphi\Delta B_z}{\pi\cos(Dip)|B|}\tag{3}$$

以新疆某实验井为例,井眼所在位置地磁场强度为 53819 nT,磁倾角为 58.36°,井深 1848.16~

式 中： $\Delta\varphi$ ——方位角误差； α ——井斜角； φ ——方位角； ΔB_z ——干扰磁场强度； Dip ——当地磁倾角；2400.86 m测段MWD测井数据如表3所示。

表 3 实例井测井数据
Table 3 Example well logging data

井深/m	$G_x/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	$G_y/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	$G_z/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	B_x/nT	B_y/nT	B_z/nT	井斜角/(°)	方位角/(°)
1848.16	−1.51170	7.52162	6.09420	8855	22452	48417	51.54	332.62
1867.21	−1.39055	−7.60590	6.02573	−16739	−18081	48045	52.07	332.25
1886.38	−7.42155	2.74423	5.77817	−16196	20538	47188	53.86	331.32
1905.38	7.01597	−4.06631	5.50954	13939	−24223	46246	55.81	330.46
1924.59	−8.18003	−1.22727	5.24617	−27279	10226	45332	57.62	330.12
1943.80	−1.35368	−8.26957	5.08289	−18424	−23851	44675	58.76	329.62
1962.92	−2.65469	8.05362	4.90907	5427	30821	44075	59.93	328.68
1982.10	−8.15369	2.84431	4.62464	−22423	23851	42818	61.83	327.81
2001.32	7.32147	−4.78792	4.42975	16939	−29450	42047	63.14	327.16
2020.49	−8.22743	−3.08660	4.32967	−34334	4113	41418	63.77	325.99
2039.63	−8.60668	−2.42293	4.00837	−35534	6941	40019	65.85	325.00
2058.68	9.07019	0.38451	3.69761	34649	−15139	38676	67.84	324.20
2077.90	−0.32657	−9.15447	3.49218	−17596	−34049	37991	69.13	324.74
2097.03	6.06260	6.97383	3.26569	35563	16196	37362	70.54	325.26
2117.75	8.89637	2.86538	2.95492	39676	−3513	36563	72.46	326.91
2117.70	−9.32829	0.27916	2.98126	−35906	16625	36677	72.28	326.92
2136.38	−5.47793	−7.67964	2.65996	−34020	−21823	35648	74.25	328.09
2154.64	2.09110	9.23875	2.51774	22966	33935	35191	75.12	328.37
2173.21	−9.31249	1.99629	2.30705	−34849	22509	34392	76.38	328.81
2192.72	−4.36128	8.54347	1.98575	−5370	42075	33335	78.30	329.70
2212.02	7.33200	−6.28382	1.70659	22109	−37134	32392	79.98	330.86
2231.16	8.64881	−4.41922	1.31681	31421	−31250	30878	82.28	331.51
2250.15	−9.75494	0.00000	0.91123	−43247	13254	29279	84.66	332.19
2269.37	−8.04308	5.52534	0.86383	−28650	34934	29393	84.94	333.71
2288.49	8.02201	−5.56221	0.88490	28707	−34820	29621	84.82	334.40
2307.62	−1.27467	9.67593	0.85856	6370	44646	29564	84.97	334.66
2326.79	−9.66012	−1.41689	0.79535	−44903	5656	29336	85.34	334.76
2345.95	−5.34099	−8.19056	0.68474	−34306	−30078	28736	85.99	334.32
2364.91	8.69622	−4.47716	0.64787	33706	−30878	28679	86.21	334.93
2384.38	−6.33123	7.43735	0.74795	−19367	40990	29221	85.62	335.38
2400.86	−4.60357	−8.60668	0.92177	−30735	−32563	30050	84.61	335.57

测段钻井过程中所用钻具组合为：8½ inPDC 钻头×0.28 m+6¾ in 井下动力钻具×7.52 m+6¾ in 井下仪器×4.94 m+6¾ in 无磁钻具（内置 MWD 测斜工具）×6.66 m（传感器距下端 1.342 m）+6¾ in 非磁接头×0.81 m+6¾ in 无磁钻铤×9.27 m+6¾ in 非磁接头×0.7 m+震击器×2.06

m+5 in 钻杆。根据钻具磁化磁极强度标定值及钻具组合长度,可求得MWD传感器处钻具轴向磁化干扰磁场大小为95.41 nT。根据轴向干扰磁场与方位角测量误差间关系式,可实现对MWD方位角测量过程中钻具磁干扰所导致误差的直接校正,校正结果与常规的钻具轴向磁干扰短钻铤测量修正法^[6]对比见图7。由图7可见,本研究中利用实验测得的钻具磁化磁极强度对方位角测量误差直接进行校正与传统的短钻铤校正法校正结果具有很好的一致性,且比传统方法更为直接,计算过程更为简便。存在微小偏差的主要原因在于磁场测量过程中的操作误差及测量精度。在钻前对钻具磁化磁极强度值进行标定后测井过程中可快速实现对方位角测量钻具磁化干扰误差分析及校正,与传统短钻铤测量修正方法的循环迭代求解相比更为简单方便。

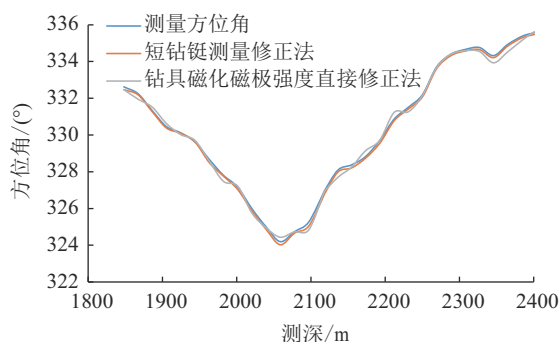


图7 方位角测量钻具磁化磁极强度直接修正法与短钻铤测量修正法对比

Fig.7 Comparison between direct correction method of magnetization and magnetic pole intensity of azimuth measurement drilling tool and the correction method of short drill collar measurement

4 结论与建议

(1)通过对钻具磁化端部轴向磁场的测量,利用数学拟合的方法实现了对铁磁钻具磁化磁极强度的标定。钻具端部轴向磁场随距离的增加而迅速衰减,磁化磁场强度与钻具材料、尺寸等因素有关。

(2)根据钻具磁化磁极强度,可实现MWD方位角测量钻具磁化轴向磁干扰的直接误差分析与校正,通过实例验证其校正结果与传统校正方法具有很好的一致性。与传统的方位角测量轴向磁干扰误差校正方法相比,通过钻具磁化磁极强度直接校

正更为简单方便。

(3)利用钻具磁化磁极强度对方位角测量钻具磁化轴向磁干扰误差进行直接校正,需要对钻具磁化磁场进行精确测量。实验过程中受钻具轴线对齐、周围环境磁干扰等因素影响,实验测量值难免存在偏差,后续将进一步提升实验数据测量精度。

(4)钻井过程中钻具种类繁多,要实现通过钻具磁化磁极强度对方位角测量轴向磁干扰误差校正,需对所有铁磁钻具进行精确测量并建立数据库。同时随着导向钻井技术的发展,底部钻具组合复杂程度增加,钻具磁化磁场测量过程中应考虑钻具组合的不同情况。后续研究将进一步扩大钻具测量范围,增加钻具组合复杂程度。

参考文献(References):

- [1] 许昊东,黄根炉,张然,等.磁力随钻测量磁干扰校正方法研究[J].石油钻探技术,2014,42(2):102-106.
XU Haodong, HUANG Genlu, ZHANG Ran, et al. Method of magnetic interference correction in survey with magnetic MWD [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(2):102-106.
- [2] 徐涛.水平定向钻进随钻测量方法及定位技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2006.
XU Tao. Research on MWD surveying method and locating technique of horizontal directional drilling [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [3] 杨全进,蒋海旭,左信.一种用于井下钻具旋转中动态方位测量的新方法[J].石油钻采工艺,2014,36(1):40-43.
YANG Quanjing, JIANG Haixu, ZUO Xin. A new solution for dynamic direction measurement while down-hole drill string rotating [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014, 36(1): 40-43.
- [4] 于瑞丰,刁斌斌,高德利.考虑磁方位校正的井眼轨迹测量误差计算[J].石油钻探技术,2023,51(6):25-31.
YU Ruifeng, DIAO Binbin, GAO Deli. Calculation for well-bore trajectory measurement error incorporating magnetic azimuth correction [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(6):25-31.
- [5] Kabirzadeh H, Rangelova E, Lee G H, et al. Dynamic error analysis of measurement while drilling using variable geomagnetic In-Field referencing [J]. SPE Journal, 2018, 23(6): 2327-2338.
- [6] RUSSELL M K, RUSSELL A W. Surveying of boreholes; US 4163324[P]. 1979-08-07.
- [7] Grindrod S J, Wolff J M. Calculation of NMDC length required for various latitudes developed from field measurements of drill string magnetization [C]//Paper presented at the IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans, Louisiana, 1983; SPE-11382-MS.
- [8] 蒲文学,范光第,朱建建,等.磁性随钻测斜仪所需无磁钻具长度及影响因素研究[J].石油钻探技术,2022,50(4):129-134.

- PU Wenxue, FAN Guangdi, ZHU Jianjian, et al. Research on the length of Non-Magnetic drilling tools for magnetic inclinometer while drilling and its influence factors[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(4):129-134.
- [9] Dongenvon, Johannes C M, Maekiaho Leo B. Method for determining the azimuth of a borehole: US 4682421[P]. 1987-07-28.
- [10] Sperry-Sun Drilling Services Company. Basic concepts of directional surveying[R]. 1995.
- [11] 范光第, 蒲文学, 赵国山, 等. 磁力随钻测斜仪轴向磁干扰校正方法[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(4):121-126.
- FAN Guangdi, PU Wenxue, ZHAO Guoshan, et al. Correction methods for axial magnetic interference of the magnetic inclinometer while drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(4):121-126.
- [12] Jamieson A, Knight S. Introduction to Wellbore Positioning [M]. Scotland: University of the Highlands and Islands Press, 2017.
- [13] Brooks A G. Method of correcting axial and transverse error components in magnetometer readings during wellbore survey operations: US US5623407[P]. 1997-04-22.
- [14] Brooks A G. Method for magnetic survey calibration and estimation of uncertainty: US 6179067[P]. 2001-01-30.
- [15] Brooks A G. Multi-Station analysis of magnetic surveys: WO/2010/096653[P]. 2010-08-26.
- [16] 刘建光, 底青云, 张文秀. 基于多测点分析法的水平井高精度磁方位校正方法[J]. 地球物理学报, 2019, 62(7):2759-2766.
- LIU Jianguang, DE Qingyun, ZHANG Wenxiu. High precision magnetic azimuth correction of horizontal well by multi-station analysis [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(7):2759-2766.
- [17] Williamson H S. Accuracy prediction for directional measurement while drilling[J]. SPE Drilling & Completion, 2000, 15(4):221-233.
- [18] 孟卓然. BHA 轴向磁干扰对方位测量误差的影响——基于人工磁场模拟方法[J]. 石油学报, 2020, 41(8):1011-1018.
- MENG Zhuoran. Effect of BHA axial magnetic interference on the azimuth measurement error: a simulation method based on artificial magnetic field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(8):1011-1018.
- [19] 王廷, 王英杰, 马能量, 等. 准噶尔盆地玛湖地区防斜钻具组合优化设计[J]. 新疆石油天然气, 2022, 18(3):44-53.
- WANG Ting, WANG Yingjie, MA Nengliang, et al. Optimal design of Anti-Inclination Bottom hole assembly in Mahu area, Junggar basin[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2022, 18(3):44-53.
- [20] 董志辉, 杨泽宁. 车排子超浅水平井一趟钻螺杆钻具设计及应用[J]. 新疆石油天然气, 2022, 18(4):33-37.
- DONG Zhihui, YANG Zening. Design of one-trip PDM for the ultra-shallow horizontal well in Block Chepaizi and its application[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2022, 18(4):33-37.
- [21] 闫家, 刘蓓, 曹龙龙, 等. 下扬子地区页岩气地质调查皖望地3井钻井设计与施工技术[J]. 钻探工程, 2023, 50(3):74-82.
- YAN Jia, LIU Bei, CAO Longlong, et al. Drilling design and construction technology of shale gas geological survey Well Wanwangdi-3 in the Lower Yangtze Block[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3):74-82.
- [22] 汤凤林, 赵荣欣, ЖСмаШов H, 等. 小尺寸涡轮钻具的研发及其在地质勘探定向孔钻进中的应用[J]. 钻探工程, 2025, 52(1):16-23.
- TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, ЖСмаШов H, et al. Development of small-sized turbo drill and its use in drilling of directional geological exploration holes [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1):16-23.
- [23] <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#migrfwmm>.
- [24] 许昊东. 井眼轨迹校正方法研究及误差椭圆计算[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.
- XU Haodong. Research on the correction methods of Borehole Trajectory and calculation of error ellipsoid[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2014.

(编辑 王跃伟)