

# 磁力随钻测斜仪轴向磁干扰校正方法

范光第<sup>1</sup>, 蒲文学<sup>1</sup>, 赵国山<sup>1</sup>, 黄根炉<sup>2</sup>

(1. 中石化胜利石油工程有限公司钻井工程技术公司, 山东东营 257064; 2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580)

**摘要:**针对磁力随钻测斜仪在受到轴向磁干扰时会出现方位角测量结果不准确的问题,在介绍磁力随钻测斜仪测量原理的基础上,研究了 Russell 法和短钻铤测量修正法 2 种间接磁干扰校正方法的原理及迭代计算过程,提出了矢量和法和钻具截面法 2 种直接磁干扰校正方法,并对这 4 种方法进行了数据仿真分析。数据仿真结果表明,直接校正方法计算简单,但具有一定的局限性;间接校正方法计算复杂,但具有较好的准确性。在其他井眼参数不变的条件下,方位角偏差随干扰磁场增强而增大;在轴向干扰磁场固定的情况下,方位角偏差随井斜角增大而增大,井斜角相同时,0°~360°范围内方位角偏差先增大后减小,呈现对称性;井眼轨迹接近水平东西方向时,轴向磁干扰的校正效果最差。4 种校正方法均可以降低轴向磁干扰对方位角测量精度的影响,减少无磁钻铤的使用长度,具有较好的现场实用性。

**关键词:**随钻测斜仪;轴向磁干扰;磁干扰校正;方位角

**中图分类号:**P631.8<sup>+</sup>13 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0890(2017)04-0121-06

## Correction Methods for Axial Magnetic Interference of the Magnetic Incliner while Drilling

FAN Guangdi<sup>1</sup>, PU Wenxue<sup>1</sup>, ZHAO Guoshan<sup>1</sup>, HUANG Genlu<sup>2</sup>

(1. Drilling Engineering and Technology Company, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257064, China; 2. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266580, China)

**Abstract:** When the magnetic inclinometer is subjected to axial magnetic interference while drilling, the measured azimuth is inaccurate. To deal with this problem, the measurement principle of magnetic inclinometer while drilling was introduced. Then, the principle and iterative calculation process of two indirect magnetic interference correction methods (i. e., the Russell method and the short drill collar measurement correction method) were analyzed, and two direct magnetic interference correction methods (i. e., vector sum method and drilling tool section method) were proposed. And finally, numerical simulations were performed for these four methods. Results indicated that direct correction methods are simple, but their calculation is limited in several ways. Indirect correction methods are complicated, but their calculation accuracy is higher. Meanwhile, the azimuth deviation increases with the increase of the interference magnetic fields while the other borehole parameters are unchanged. When the axial interference magnetic field is fixed, the azimuth deviation increases when the inclination angle increases. When the inclination angle is the same, the azimuth angle increases first and then decreases in the range of 0°~360°, revealing the symmetry. When the well trajectory is close to horizontal EW orientation, the correction effect of axial magnetic interference is the worst. All the four correction methods can be better applied in field. They can decrease the influence of axial magnetic interference on the measurement accuracy of the azimuth angle and reduce the service length of non-magnetic drill collar.

**Key words:** inclinometer while drilling; axial magnetic interference; magnetic interference correction; azimuth

磁力随钻测斜仪是井眼轨迹控制中最常用的测量仪器,主要用于测量井斜角、方位角等井眼轨迹参数,其测量精度除了与仪器自身的质量有关外,还与地磁场有直接关系<sup>[1-2]</sup>。钻柱磁化等因素引起的轴向磁干扰会导致磁力随钻测斜仪测量的方位角不准确<sup>[3-4]</sup>,容易造成脱靶、井眼交碰等问题。针对该问

**收稿日期:**2017-03-02; **改回日期:**2017-05-08。

**作者简介:**范光第(1984—),男,山东滕州人,2008年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业,2011年获中国石油大学(华东)油气井工程专业硕士学位,工程师,主要从事定向井和水平井现场施工工作。E-mail:fgd841125@163.com。

**基金项目:**国家自然科学基金项目“导向钻井下部钻具运动状态识别的理论及实验研究”(编号:51274234)资助。

题, M. K. Russell 等人<sup>[5]</sup>提出了一种较为准确的间接校正方法, 徐涛、罗武胜等人<sup>[6-7]</sup>对该方法进行了介绍与分析; Sperry-Sun 公司<sup>[8]</sup>的随钻测量软件提供了一种间接校正方法, 即短钻铤测量修正法。笔者分析了 Russell 法和短钻铤测量修正法这 2 种间接校正方法的原理及计算过程, 针对其存在的计算过程较为复杂的问题, 提出了矢量和法和钻具截面法 2 种直接校正方法; 采用数据仿真方法分析了轴向干扰磁场对方位角的影响, 对比了 4 种校正方法的准确性, 评价了其应用效果。

## 1 磁力随钻测斜仪测量原理

目前, 磁力随钻测斜仪主要是通过安装在探管内部的 3 个相互垂直的重力加速度计和 3 个相互垂直的磁通门传感器测量每个方向上的重力分量和地磁场分量, 然后根据测得的分量来计算井斜角、方位角和工具面角等参数。在测量过程中, 地磁场分量最容易受到干扰, 当地磁场受到干扰时, 磁感应强度及磁倾角都可能发生变化, 导致测量的地磁场分量不准确, 进而导致计算的方位角存在偏差<sup>[9-10]</sup>。

为了便于说明, 以井口为原点  $O$ , 建立大地坐标系  $NEV$ , 仪器坐标系为  $XYZ$  (见图 1)。其中  $OZ$  沿探管轴向方向指向探管下部,  $X$  轴、 $Y$  轴在仪器横截面上,  $X$  轴与螺杆弯曲方向一致。重力加速度计和磁通门传感器分布在  $XYZ$  坐标系的 3 个轴上。

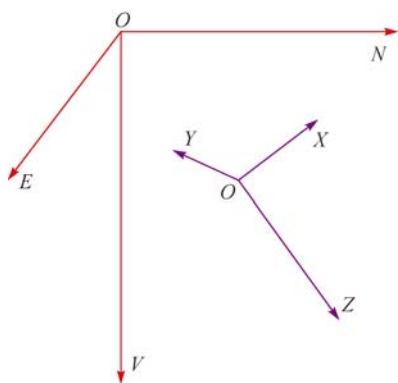


图 1 大地坐标系与仪器坐标系

Fig. 1 Geodetic coordinate system and instrument coordinate system

仪器坐标系通过井斜角、方位角和工具面角等参数可以转换到大地坐标系, 利用这种关系可得:

$$\sin \alpha = \frac{\sqrt{g_x^2 + g_y^2}}{g} \quad (1)$$

$$\cos \alpha = \frac{g_z}{g} \quad (2)$$

$$\sin \phi = \frac{g_y}{g \sin \alpha} \quad (3)$$

$$\cos \phi = -\frac{g_x}{g \sin \alpha} \quad (4)$$

$$\frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \frac{-(B_x \sin \phi + B_y \cos \phi)}{\cos \alpha (B_x \cos \phi - B_y \sin \phi) + B_z \sin \alpha} \quad (5)$$

式中:  $\alpha$  为井斜角, ( $^\circ$ );  $\varphi$  为方位角, ( $^\circ$ );  $\phi$  为高边工具面角, ( $^\circ$ );  $g$  为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $g_x$ 、 $g_y$ 、 $g_z$  为重力加速度分量,  $\text{m/s}^2$ ;  $B_x$ 、 $B_y$  和  $B_z$  为地磁场磁感应强度分量<sup>[3-4]</sup>,  $\mu\text{T}$ 。

实际钻井过程中, 为了防止磁力随钻测斜仪受到干扰, 一般将其放置在不磁钻铤内, 但由于无磁钻铤前后端仍为磁性钻具, 会产生附加的干扰磁场, 如果无磁钻铤的长度不够, 或是无磁钻铤被磁化, 都会导致地磁场磁感应强度分量测量不准确, 使计算得到的方位角偏差较大, 进而影响井眼轨迹控制精度。

## 2 轴向磁干扰的间接校正方法

轴向磁干扰校正的前提是磁力随钻测斜仪径向磁通门传感器测得的地磁场磁感应强度分量  $B_x$ 、 $B_y$  是准确的, 而影响仪器的干扰磁场是沿钻具轴线方向。无磁钻铤前后的钻铤或钻杆不仅轴线对称, 而且相对钻具轴线上的仪器测点较远, 故其造成的干扰磁场为钻具轴线方向。M. K. Russell 等人<sup>[5,11]</sup>研究发现, 当无磁钻铤长度大于 3.05 m 时, 钻具磁化产生的径向磁干扰可以忽略不计。目前, 国外主要有短钻铤测量修正法和 Russell 法 2 种间接轴向磁干扰校正方法, 计算过程中需要进行循环迭代。

### 2.1 短钻铤测量修正法

Sperry-Sun 公司的随钻测量软件提供了一种短钻铤测量修正方法<sup>[8,12]</sup>, 是采用循环迭代的方法来间接校正方位角。其基本原理是: 在没有磁干扰的情况下, 井斜角、方位角可以通过 3 个重力加速度分量和 3 个磁感应强度分量之间的关系计算得到, 同时也可以利用这种关系来反求轴向磁感应强度分量  $B_z$ , 然后再利用计算得到的轴向磁感应强度分量求解方位角, 其基本计算公式为:

$$B_N = B_t \cos \theta \quad (6)$$

$$B_V = B_t \sin \theta \quad (7)$$

$$B_{ZC} = B_N \cos \varphi \sin \alpha + B_V \cos \alpha \quad (8)$$

$$\frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \frac{-(B_X \sin \phi + B_Y \cos \phi)}{\cos \alpha (B_X \cos \phi - B_Y \sin \phi) + B_Z \sin \alpha} \quad (9)$$

式中:  $B_N$  为地磁场的水平分量,  $\mu\text{T}$ ;  $B_V$  为地磁场的垂向分量,  $\mu\text{T}$ ;  $\theta$  为磁倾角, ( $^\circ$ );  $B_t$  为地磁场磁感应强度,  $\mu\text{T}$ ;  $B_Z$  为轴向磁感应强度分量,  $\mu\text{T}$ 。

当存在轴向磁干扰时, 式(8)和式(9)中的  $B_Z$ 、 $\varphi$  都是不准确值, 需要迭代求解, 具体求解过程为:

1) 利用初始测量得到的重力加速度分量和磁感应强度分量求解得到初始方位角  $\varphi$ , 然后依据真实地磁场磁感应强度、磁倾角等参数, 利用式(6)—式(8)计算出  $B_Z$ ;

2) 将计算得到的  $B_Z$  代入式(9)中, 可以计算出新的方位角  $\varphi$ , 然后将新方位角  $\varphi$  代入式(8)中计算出新的  $B_Z$ ;

3) 设置精度值  $\epsilon$ , 如果当前求解出来的  $\varphi$  与上次循环得出的  $\varphi$  相差小于  $\epsilon$ , 循环结束; 如果大于  $\epsilon$ , 继续进行循环求解。

## 2.2 Russell 法

该方法是由 M. K. Russell 等人提出, 它是根据真实地磁场、轴向干扰磁场和实测磁场之间的几何关系及物理意义得出的<sup>[5]</sup>, 其特征在于循环递推, 依次逼近, 收敛于真实方位角<sup>[13-15]</sup>。真实地磁场、轴向干扰磁场和实测磁场分别用  $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{e}$  和  $\mathbf{B}_m$  表示, 三者之间关系为  $\mathbf{e} = \mathbf{B}_m - \mathbf{B}$ , 其关系如图 2 所示。

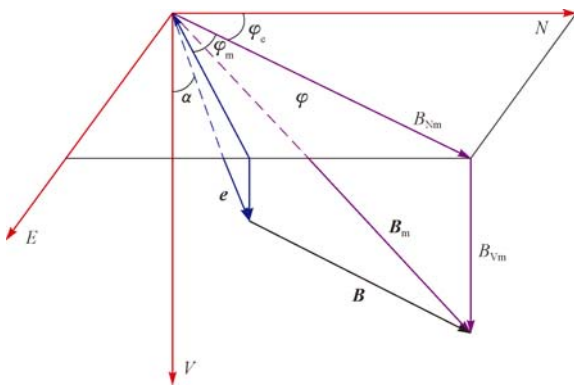


图 2 轴向磁干扰的影响关系

Fig. 2 Influence of axial magnetic interference

由于受到轴向干扰磁场  $\mathbf{e}$  的影响, 导致原始地磁场磁力线发生改变, 而原始磁力线在水平面上的投影是磁北方向  $N$ , 受影响后磁力线在水平面上的投影已不再是磁北方向, 而是图 2 中的  $B_{Nm}$ , 它们之间的角度差为  $\varphi_e$ 。磁力随钻测斜仪测量计算得到的方位角是井眼轴线与原始地磁线在水平面投影(真磁北)之间的夹角, 记为  $\varphi$ ; 受磁干扰后, 得到的

方位角是井眼轴线与受磁干扰后的磁力线在水平面投影之间的夹角, 记为  $\varphi_m$ 。

由于轴向干扰磁场是固定的, 在理论上  $\varphi_e$  与  $\varphi$  都是稳定的唯一值。而在实际测量过程中这 2 个参数都是未知数, 所以需要根据上述原理及相互之间的物理关系寻找  $\varphi_e$  与  $\varphi$  之间的联系, 然后求解。

由图 2 所示的几何关系可知, 轴向干扰磁场  $\mathbf{e}$  可表示为:

$$\mathbf{e} = (B_{Nm} \cos \varphi_e - B_N) \mathbf{U}_N + B_{Nm} \sin \varphi_e \mathbf{U}_E + (B_{Vm} - B_V) \mathbf{U}_V \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{U}_N$ 、 $\mathbf{U}_E$ 、 $\mathbf{U}_V$  分别为北、东、垂向上的单位矢量。

由于干扰磁场  $\mathbf{e}$  沿井眼轴线方向, 所以还可以用真实方位角  $\varphi$  和井斜角  $\alpha$  来表示干扰磁场:

$$\mathbf{e} = e(\sin \alpha \cos \varphi) \mathbf{U}_N + e(\sin \alpha \sin \varphi) \mathbf{U}_E + e \cos \alpha \mathbf{U}_V \quad (11)$$

式中:  $e$  为干扰磁场  $\mathbf{e}$  的模量,  $\mu\text{T}$ 。

由式(10)和式(11), 可得:

$$\frac{\sin \varphi_e}{\cos \varphi_e} = \frac{e \sin \alpha \sin \varphi}{e \sin \alpha \cos \varphi + B_N} \quad (12)$$

由于干扰磁场  $\mathbf{e}$  沿井眼轴线方向, 即仪器坐标系中的  $Z$  轴方向, 所以  $\mathbf{e}$  可以表示为:

$$\mathbf{e} = B_{Zm} - B_Z \quad (13)$$

式中:  $B_{Zm}$  是仪器实测的  $Z$  轴方向磁感应强度分量,  $\mu\text{T}$ ;  $B_Z$  是不存在干扰情况下  $Z$  轴方向磁感应强度分量,  $\mu\text{T}$ 。

最终, 式(12)可以表示为:

$$\frac{\sin \varphi_e}{\cos \varphi_e} = \frac{(B_{Zm} - B_N \cos \varphi \sin \alpha - B_V \cos \alpha) \sin \alpha \sin \varphi}{(B_{Zm} - B_N \cos \varphi \sin \alpha - B_V \cos \alpha) \sin \alpha \cos \varphi + B_N} \quad (14)$$

式(14)中存在未知数  $\varphi$  和  $\varphi_e$ , 采用循环迭代的方法求得  $\varphi$ , 具体计算过程为:

1) 用初始测量得到的  $\varphi_m$  代替  $\varphi$  代入式(14)中, 求出  $\varphi_e$ , 然后根据  $\varphi = \varphi_m + \varphi_e$ , 求出  $\varphi$ ;

2) 将步骤 1) 求得的  $\varphi$  代入到式(14)中, 求解出一个新的  $\varphi_e$ , 然后得出新的  $\varphi$ ;

3) 设置精度值  $\epsilon$ , 如果当前步求解出来的  $\varphi$  与上次循环得出的  $\varphi$  的差小于  $\epsilon$  时, 循环结束; 如果大于  $\epsilon$ , 继续进行循环求解, 直至求得的  $\varphi$  与上次循环得出的  $\varphi$  的差小于  $\epsilon$ 。

## 3 轴向磁干扰的直接校正方法

Russell 法和短钻铤测量修正法 2 种间接校正方法均需要进行循环迭代, 计算过程较为复杂, 为此

笔者提出了矢量和法及钻具截面法这2种计算简单的直接校正方法。

### 3.1 矢量和法

磁力随钻测斜仪测量的3个磁感应强度分量的矢量和就是地磁场,所以矢量和法磁干扰校正方法是利用已知的地磁场磁感应强度  $B_t$  及测量得到的准确的径向磁感应强度分量  $B_x$  和  $B_y$  来计算轴向磁感应强度分量  $B_z$ ,然后利用  $B_z$  来求解真实方位角。基本计算公式为:

$$B_z = \pm \sqrt{B_t^2 - B_x^2 - B_y^2} \quad (15)$$

$$\frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \frac{-(B_x \sin \varphi + B_y \cos \varphi)}{\cos \alpha (B_x \cos \phi - B_y \sin \phi) + B_z \sin \alpha} \quad (16)$$

式中:  $B_t$  为地磁场磁感应强度,  $\mu\text{T}$ 。

首先根据式(15)求得  $B_z$ ,然后利用式(16)得到真实方位角。在实际钻井过程中,如果由于更换钻具组合导致方位角测量不准确,但能够确保已钻井眼轨迹的地磁场磁感应强度、方位角等参数的准确性,可以选择这种校正方法。

这种方法虽然简单,但在计算  $B_z$  时会出现2个值,也就会得到2个方位角,这时需要根据已钻井眼轨迹的方位角进行判断,依次选择与上一测点方位角接近的方位角为正确值。在实际钻井过程中,相邻测点的方位角和井斜角不会相差太大,所以选择接近的方位角为真实方位角是合理的。

### 3.2 钻具截面法

钻具截面法是利用当地磁场参数和测量得到的准确的径向磁感应强度分量,通过方位角建立它们之间的几何关系,然后反求方位角。为了便于说明,建立大地坐标系  $NEV$  和仪器坐标系  $XYZ$  (见图3),  $Z$  轴沿钻柱轴线方向,  $X$  轴与  $Y$  轴沿钻柱径向方向;  $H$  方向为井眼高边方向线,  $R$  为水平面,  $Q$  为钻具(井眼)弯曲铅垂面,  $P$  为钻具(井眼)横截面。

由于受到轴向磁干扰的影响,导致  $B_z$  不准确,所以为了排除  $B_z$  的影响,在  $P$  平面内,将径向磁感应强度分量与磁感应强度向井眼高边方向  $H$  和与之垂直的水平方向分解,建立方程组:

$$\begin{cases} B_N \cos \varphi \cos \alpha - B_V \sin \alpha = B_x \cos \phi - B_y \sin \phi \\ B_N \sin \varphi = -B_x \sin \phi - B_y \cos \phi \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中的  $B_N$ 、 $B_V$  由式(6)、式(7)得到。由

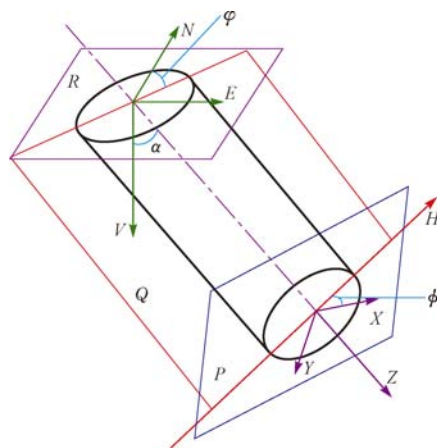


图3 大地坐标系与仪器坐标系

Fig. 3 Geodetic coordinate system and instrument coordinate system

式(17)可以得到:

$$\frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \frac{-(B_x \sin \phi + B_y \cos \phi) \cos \alpha}{B_x \cos \phi - B_y \sin \phi + B_z \sin \alpha} \quad (18)$$

利用地磁场的垂向分量  $B_V$  与径向磁感应强度分量  $B_x$ 、 $B_y$ ,根据式(18)可以得到真实方位角  $\varphi$ 。但从式(18)可以看出,当井斜角为  $90^\circ$  时,由于  $\cos \alpha = 0$ ,所以将无法得到正确的方位角。

## 4 轴向磁干扰的校正仿真

对上述4种磁干扰校正方法编写计算机程序,构造仿真数据来模拟轴向磁干扰及其校正过程。已知  $\epsilon = 0.001^\circ$ ,地磁场磁感应强度  $B = 53.0 \mu\text{T}$ ,磁倾角为  $55^\circ$ 。

取轴向干扰磁场  $e = 10.0 \mu\text{T}$ ,计算不同井斜角、真实方位角时的方位角偏差(指实测方位角与真实方位角之差),结果如图4所示。

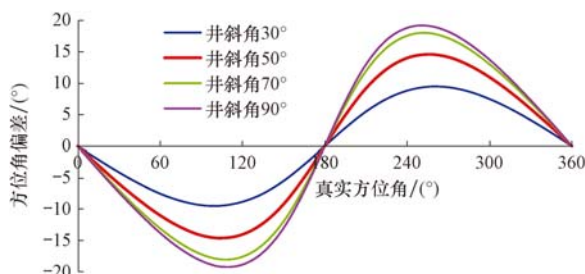


图4 方位角偏差随井斜角、方位角变化的规律

Fig. 4 The variation laws of azimuth deviation with the inclination and azimuth

从图4可以看出,在干扰磁场固定的情况下,



方位角偏差随着井斜角增大而增大。在井斜角一定、真实方位角为 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 时,方位角偏差为负值,即实测方位角小于真实方位角,方位角偏差的绝对值先增大后减小,在真实方位角为 $110^{\circ}$ 左右时,达到最大值;真实方位角为 $180^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 时,方位角偏差为正值,即实测方位角大于真实方位角,方位

角偏差先增大后减小,真实方位角为 $250^{\circ}$ 左右时,达到最大值。

假设真实井斜角为 $50^{\circ}$ 和 $90^{\circ}$ ,真实方位角为 $70^{\circ}$ 和 $230^{\circ}$ ,重力工具面角为 $30^{\circ}$ ,轴向干扰磁场为 $e=5.0\text{ }\mu\text{T}$ ,利用上述 4 种磁干扰校正方法进行校正计算,结果如表 1 所示。

表 1 不同校正方法的方位角校正结果

Table 1 The azimuth correction results of different correction methods

井斜角/ $^{\circ}$	真实方位角/ $^{\circ}$	$B_X/\mu\text{T}$	$B_Y/\mu\text{T}$	校正方位角/ $^{\circ}$			
				矢量和法	钻具截面法	短钻铤法	Russell 法
50	70	-37.297	-11.452	70	147.34	70	70
50	230	-28.036	43.077	230	210.61	230	230
90	70	-51.882	-3.032	70	110	86.72	69.92
90	230	-25.955	41.875	310	230	209.57	230.02

从表 1 可以看出,矢量和法会得到 2 个方位角值,如果能够判断哪个是正确值,其校正结果是比较准确的;在井斜角为 $90^{\circ}$ 时,钻具截面法无法得到正确的方位角;对于上述各种情况,2 种间接校正方法的计算结果均较为准确。

假设井斜角为 $50^{\circ}$ ,方位角为 $70^{\circ}$ ,重力工具面角为 $30^{\circ}$ ,当轴向干扰磁场分别取 $e_1=1.0\text{ }\mu\text{T}$ 、 $e_2=5.0\text{ }\mu\text{T}$ 、 $e_3=10.0\text{ }\mu\text{T}$ 时,应用 Russell 法和短钻铤测量修正法对不同轴向磁干扰情况下的方位角进行了校正,迭代计算结果见图 5。由图 5 可以看出,随着轴向磁干扰增强,实测方位角的偏差增大,迭代次数增多,但经过迭代计算后的方位角都收敛于真实方位角,表明这 2 种间接校正方法都具有较好的稳定性和准确性。

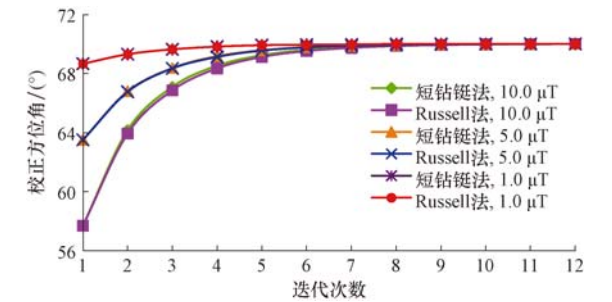


图 5 不同轴向磁干扰下方位角校正的迭代计算结果  
Fig. 5 Iterative calculation of azimuth correction under different axial magnetic interferences

假设井斜角为 $50^{\circ}$ 和 $90^{\circ}$ ,工具面角为 $30^{\circ}$ ,轴向干扰磁场 $e=5.0\text{ }\mu\text{T}$ , $\epsilon=0.001^{\circ}$ ,应用 Russell 法和短钻铤测量修正法对方位角进行校正时,迭代次数与真实方位角的关系曲线如图 6 和图 7 所示。

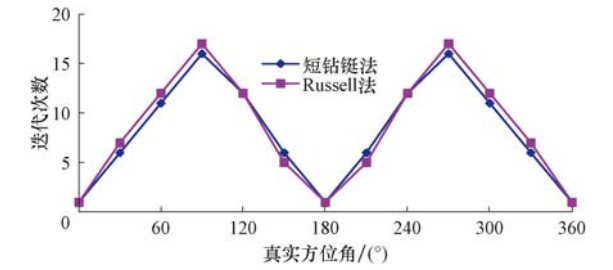


图 6 井斜角 $50^{\circ}$ 时真实方位角与迭代次数的关系  
Fig. 6 Relationship between true azimuth and iteration number for  $50^{\circ}$  inclination

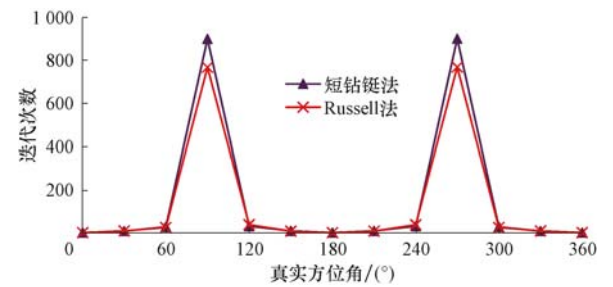


图 7 井斜角 $90^{\circ}$ 时真实方位角与迭代次数的关系  
Fig. 7 Relationship between true azimuth and iteration number for  $90^{\circ}$  inclination

由图 6 和图 7 可以看出,在同一井斜角条件下,真实方位角为 $90^{\circ}$ 和 $270^{\circ}$ 时,达到精度要求所需的迭代次数最多;真实方位角为 $0^{\circ}$ 和 $180^{\circ}$ 时,迭代次数最少,为 1 次。由图 7 可以看出,当井斜角为 $90^{\circ}$ ,真实方位角为 $90^{\circ}$ 和 $270^{\circ}$ 时,所需迭代次数多接近 1 000 次,明显多于其他情况,而且计算结果显示,应用 Russell 法校正后的方位角分别为 $89.16^{\circ}$ 和 $270.84^{\circ}$ ,应用短钻铤测量修正法校正后的方位角分别为 $88.13^{\circ}$ 和 $271.87^{\circ}$ ,校正效果最差。由此可以看

出,在这种情况下,无论从迭代次数还是最终的迭代结果来看,Russell法比短钻铤测量修正法的准确性更高。分析认为,短钻铤测量修正法是直接迭代求取方位角的正切值,并且式(9)中分母为0或者很小,导致迭代次数多、校正效果差;而Russell法是迭代求取方位偏差角的正切值,并且式(14)中分母约为 $B_N$ ,所以校正效果相对较好。但是在其他情况下,这2种校正方法的校正结果基本一致(见图5—图7)。

## 5 结论与建议

1) 轴向磁干扰的4种校正方法各具特点,现场施工过程中,在无磁钻具长度不够或被磁化等情况下,可以根据不同的情况选择不同的校正方法。

2) 井眼轨迹接近水平东西方向时,轴向磁干扰的校正效果最差,所需迭代次数最多。

3) 在不影响径向磁感应强度测量的前提下,可以利用校正方法,减少无磁钻具的使用长度,缩短仪器测点至钻头的距离,降低井斜角等参数的预测难度。

4) 轴向磁干扰校正的前提是随钻测斜仪径向不存在磁干扰,但目前对径向磁干扰的研究较少,建议进一步开展径向磁干扰校正的研究工作。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 石在虹,滕少臣,刘子恒. 国际地磁参考场解算方法及石油工程应用[J]. 石油钻采工艺,2016,38(4):409-414.  
SHI Zaihong, TENG Shaochen, LIU Ziheng. Algorithm for international geomagnetic reference field and its application in petroleum engineering[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(4): 409-414.
- [2] 曹向峰,管志川,王智锋,等. 煤层气连通井导向钻井钻头定位方法[J]. 石油钻采工艺,2016,38(2):151-155.  
CAO Xiangfeng, GUAN Zhichuan, WANG Zhifeng, et al. Drill bit positioning method based on connected well guidance for coalbed methane[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(2): 151-155.
- [3] 乔传尚. YST-48R型MWD仪器的Bt值异常分析与判断[J]. 石油仪器,2011,25(4):23-25.  
QIAO Chuanshang. Measurement and analysis of abnormal Bt value of YST-48R MWD[J]. Petroleum Instruments, 2011, 25(4): 23-25.
- [4] 梁奇敏,何俊才,董文涛,等. “井工厂”作业时直井段防碰设计与控制探讨[J]. 石油钻采工艺,2016,38(3):302-306.  
LIANG Qimin, HE Juncai, DONG Wentao, et al. Anti-collision design and control of vertical section in ‘well plant’ mode[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(3): 302-306.
- [5] RUSSELL M K, RUSSELL A W. Surveying of borehole; US 4163324[P]. 1979-08-07.
- [6] 罗武胜,徐涛,杜列波. 基于加速度计和磁强计的定向钻进姿态测量及方位校正[J]. 国防科技大学学报,2007,29(1):106-110.  
LUO Wusheng, XU Tao, DU Liebo. Directional drilling attitude measurement and azimuth correction with accelerometers and magnetometers[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2007, 29(1): 106-110.
- [7] 徐涛,温东,孙晓磊. 基于加速度计和磁强计的方位测量与校正技术研究[J]. 仪器仪表学报,2009,30(10):2018-2022.  
XU Tao, WEN Dong, SUN Xiaolei. Research on azimuth measurement and correction technique with accelerometer and magnetometer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(10): 2018-2022.
- [8] Sperry-Sun Drilling Services Company. Basic concepts of directional surveying[R]. 1995.
- [9] 张苏,管志川,王建云,等. 邻井套管对井斜方位角的影响[J]. 石油钻探技术,2013,41(6):51-55.  
ZHANG Su, GUAN Zhichuan, WANG Jianyun, et al. Impact of casing on adjacent well azimuth[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(6): 51-55.
- [10] 高德利,刁斌斌. 复杂结构井磁导向钻井技术进展[J]. 石油钻探技术,2016,44(5):1-9.  
GAO Deli, DIAO Binbin. Development of the magnetic guidance drilling technique in complex well engineering[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(5): 1-9.
- [11] 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.
- [12] 王明哲,陆斌,于跃军. Sperry-Sun MWD轴向磁干扰的解决方法及应用[J]. 石油仪器,2008,22(2):47-49.  
WANG Mingzhe, LU Bin, YU Yuejun. Solution to the axial magnetic interference on Sperry-Sun MWD[J]. Petroleum Instruments, 2008, 22(2): 47-49.
- [13] van DONGEN J C M, MAEKIAHO L B. Method for determining the azimuth of a borehole; US 4682421[P]. 1987-07-28.
- [14] 王锐,崔朋波,刘培军. MWD独立误差源的确定分析[J]. 特种油气藏,2011,18(5):120-123.  
WANG Rui, CUI Pengbo, LIU Peijun. Determinative analysis of MWD independent error sources[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2011, 18(5): 120-123.
- [15] 李翠,高德利,刘庆龙,等. 邻井随钻电测测距防碰计算方法研究[J]. 石油钻探技术,2016,44(5):52-59.  
LI Cui, GAO Deli, LIU Qinglong, et al. A method of calculating of avoiding collisions with adjacent wells using electromagnetic ranging surveying while drilling tools[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(5): 52-59.

[编辑 滕春鸣]