

# 十二位置标定法在钻孔测斜仪校正中的应用

李忠, 李扬, 赵燕来

(中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川成都 611734)

**摘要:**磁性钻孔测斜仪所使用的磁传感器和加速度传感器由于自身特性的差异以及生产装配的原因,给传感器输出带来了误差,造成测斜仪顶角和方位角计算出现偏差。为此采用了一种十二位置标定方法,依靠垂直方向的地磁场分量和重力加速度,对磁传感器和加速度传感器的三轴零位偏差、灵敏度误差和安装误差进行了校正。校正前后的对比实验显示:测斜仪顶角均方误差由 $0.5^\circ$ 减小为 $0.06^\circ$ ,方位角均方误差由校正前的 $21.75^\circ$ 减小到 $0.82^\circ$ ,表明该方法校正效果明显,可以满足测斜仪工程化应用的要求。

**关键词:**磁传感器;加速度传感器;误差校正;十二位置标定法;钻孔测斜仪

**中图分类号:**P634.7 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)05-0076-07

## Application of the twelve-position calibration method for the borehole inclinometer

LI Zhong, LI Yang, ZHAO Yanlai

(Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

**Abstract:** The magnetic sensor and the acceleration sensor used in the magnetic borehole inclinometer bring errors to the output of the sensors due to their own difference in characteristics and their production and assembly, resulting in the deviation in the calculation of the drift angle and azimuth of the inclinometer. Therefore, the twelve-position calibration method is adopted to correct the three axis zero position deviation, sensitivity error and installation error of the magnetic sensor and the acceleration sensor according to the geomagnetic component and gravitational acceleration in the vertical direction. The comparison experiment before and after correction shows that the mean square error of the drift angle of the inclinometer is reduced from  $0.5^\circ$  to  $0.06^\circ$ , the mean square error of the azimuth is reduced from  $21.75^\circ$  to  $0.82^\circ$ . It demonstrates that the correction method is effective and can meet the requirements of the engineering application of the inclinometer.

**Key words:** magnetic sensor; acceleration sensor; error calibration; twelve-position calibration method; borehole inclinometer

## 0 引言

钻孔测斜仪是用来测量钻孔顶角和方位角的专用仪器。根据方位角测量原理的不同,常用钻孔测斜仪主要有磁性测斜仪和陀螺测斜仪2类。磁性测斜仪是利用地磁场定向原理实现方位角的测量,适用于非磁性矿区和不受磁性干扰的钻孔;而陀螺

测斜仪则是利用陀螺仪的定轴性,通过惯性定向原理来测量钻孔的方位角,主要用于磁性矿区和受磁性干扰的钻孔测量<sup>[1]</sup>。

磁性测斜仪测量方位角所用磁传感器在使用环境中容易受到各类铁磁干扰(软磁干扰和硬磁干扰),加之本身制造特性的差异、生产装配的误差以

收稿日期:2020-04-22;修回日期:2021-02-08 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.05.011

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“怒江流域泸水-芒市段灾害地质调查”(编号:DD20190643)

作者简介:李忠,男,汉族,1972年生,教授级高级工程师,探矿工程专业,硕士,主要从事钻探器具及地质灾害监测仪器的研究和开发工作,四川省成都市郫都区红光镇港华路139号,379292752@qq.com。

引用格式:李忠,李扬,赵燕来.十二位置标定法在钻孔测斜仪校正中的应用[J].钻探工程,2021,48(5):76-82.

LI Zhong, LI Yang, ZHAO Yanlai. Application of the twelve-position calibration method for the borehole inclinometer[J]. Drilling Engineering, 2021,48(5):76-82.

及后期安装的误差等因素,将会对传感器的测量结果造成极大的偏差<sup>[2]</sup>,从而影响到测斜仪方位角测量的准确度;磁性测斜仪测量钻孔顶角所用加速度传感器与磁传感器一样,由于制造、安装工艺的限制也会存在一定误差<sup>[3-4]</sup>,会对顶角和方位角的测量造成偏差。因此测斜仪在生产制造过程中,必须采取有效措施和方法来消除这些干扰引起的偏差。

目前用于磁传感器校正的主要方法有十二位置标定法<sup>[5-6]</sup>、神经网络法<sup>[7]</sup>、最佳椭圆拟合法<sup>[8-9]</sup>、最小二乘拟合法<sup>[10-11]</sup>、椭球拟合法<sup>[12-13]</sup>等等。其中,采用椭球拟合法的磁传感器误差校准方法应用较为广泛,该方法使用最小二乘法来直接评估各误差系数,并根据这些误差系数对三轴磁传感器的误差进行校正。该方法在标定过程中不需要其他的辅助方向参考设备,也不需要复杂的迭代计算,标定流程相对比较简单,但是需要采集大量磁传感器输出数据才能确保获得标定参数的较优解。用于加速度传感器标定的方法有很多,但其原理大多是相似的,最常用的一种是多位置标定方法,该方法通过加速度传感器的输出与已知既定姿态的重力矢量投影分量相比较来求解标定参数<sup>[14]</sup>,除多位置标定方法外,也有采用椭球拟合法进行三轴加速度计的误差补偿<sup>[15]</sup>。

笔者在分析多种校正方法的基础上,结合自身实验室条件(具备准确的航向基准和可以三轴翻转的校验台)以及工程化应用的考虑,选择十二位置标定法对所研发的测斜仪的传感器进行了校正,取得了满意的效果。

## 1 测斜仪测量原理

测斜仪测量单元由三轴加速度传感器和三轴磁传感器构成,形成双三轴(X、Y、Z)系统,如图1所示,传感器三轴之间相互正交,加速度传感器和磁传感器的各轴分别平行,Z轴指向仪器轴线下, X、Y轴位于垂直于仪器轴线的平面内, X、Y、Z轴分别对应北、东、地,符合三维坐标系的右手定则<sup>[16]</sup>。

钻孔顶角( $\theta$ )和方位角( $\alpha$ )的计算公式如式(1)、式(2):

$$\theta = \arctan \sqrt{\frac{a_x^2 + a_y^2}{a_z^2}} \quad (1)$$

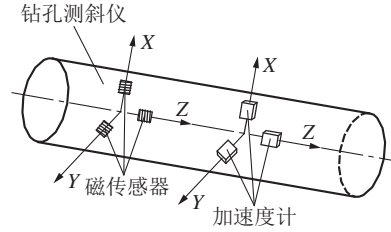


图1 测斜仪传感器安装示意

Fig.1 Installation diagram of the inclinometer

$$\alpha = \arctan \left( \frac{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} (H_x a_y - H_y a_x)}{a_z (H_x a_x + H_y a_y) - H_z (a_x^2 + a_y^2)} \right) \quad (2)$$

式中: $a_x$ ——X轴加速度传感器输出; $a_y$ ——Y轴加速度传感器输出; $a_z$ ——Z轴加速度传感器输出; $H_x$ ——X轴磁传感器输出; $H_y$ ——Y轴磁传感器输出; $H_z$ ——Z轴磁传感器输出。

## 2 测斜仪误差模型

由公式(1)和公式(2)可以看出,测斜仪顶角计算依据的是三轴加速度传感器的测量值,方位角的计算需要依据三轴加速度传感器和三轴磁传感器的测量值。如果三轴加速度传感器和三轴磁传感器的输出值存在误差,则会造成测斜仪顶角、方位角的计算出现偏差。测斜仪误差的根源就在于三轴加速度传感器和三轴磁传感器的误差。为了进行误差的校正,必须要知道传感器误差的数学模型。

### 2.1 磁传感器误差模型

测斜仪所用三轴磁传感器由于受自身制造工艺影响,不可避免会存在零点偏移误差、灵敏度误差和三轴不正交误差。零点偏移误差是由于传感器、模拟电路和A/D转换的零点不为零而产生的。灵敏度误差是由于三轴磁传感器各轴的灵敏度不同、测量信号的放大电路特性不完全相同而引起的标度系数不一致而造成的测量误差。三轴不正交误差是由于三轴的传感器是分离元件,在后期电路板的焊接加工中,难以确保其3个磁传感器的测量轴两两完全正交,焊接完成后的磁传感器的3个轴系也会与电路板的安装框架以及测斜仪外管之间的轴系存在一定偏差。同时三轴的磁传感器与三轴的加速度传感器的轴系之间也难以确保其轴系间的相互平行,也会造成一些误差。这些误差均称为安装误差。上述3种误差一般都是采用式(3)所示的泊松方程来

表示:

$$\begin{aligned} H_x &= K_x(M_x + e_{yx}M_y + e_{zx}M_z) + B_x \\ H_y &= K_y(e_{xy}M_x + M_y + e_{zy}M_z) + B_y \\ H_z &= K_z(e_{xz}M_x + e_{yz}M_y + M_z) + B_z \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $H_x, H_y, H_z$ ——带有误差的三轴磁传感器的输出值; $M_x, M_y, M_z$ ——理论输出的三轴磁传感器值; $K_x, K_y, K_z$ ——三轴磁传感器的标度系数; $B_x, B_y, B_z$ ——三轴磁传感器的零位偏差值; $e_{yx}, e_{zx}$ ——Y轴、Z轴磁传感器相对于X轴磁传感器的安装误差; $e_{xy}, e_{zy}$ ——X轴、Z轴磁传感器相对于Y轴磁传感器的安装误差; $e_{xz}, e_{yz}$ ——X轴、Y轴磁传感器相对于Z轴磁传感器的安装误差。

## 2.2 加速度传感器误差模型

三轴加速度传感器与磁传感器一样,由于制造工艺的限制也存在零点偏移误差、灵敏度误差和三轴不正交误差。零点偏移误差指无重力加速度输入时,因制造误差加速度传感器也会有一定非零伏的输出电压。灵敏度误差是当被测重力加速度在X、Y和Z轴的分量相等时,三轴加速度传感器灵敏度(标度系数)不一致,输出和标称值之间会出现偏差。本测斜仪所用加速度传感器是三轴一体的,其三轴之间的正交性应该比较好,按理不需要考虑三轴不正交误差。但即便是经过厂商精密加工,其敏感轴通常也会偏离正交坐标系微小的角度。更为主要的是在传感器焊接过程中,无法保证完成后的电路板的3个轴系会与电路板的安装框架以及测斜仪外管之间的轴系保持完全的一致。同时与三轴的磁传感器之间也难以确保两者轴系间的相互平行。这些误差均被认为是三轴不正交误差,需要进行校正。

三轴加速度传感器的这3种误差的模型与三轴磁传感器误差的模型公式相同,均以泊松方程来表示,如式(4):

$$\begin{aligned} a_x &= k_x(G_x + f_{yx}G_y + f_{zx}G_z) + g_x \\ a_y &= k_y(f_{xy}G_x + G_y + f_{zy}G_z) + g_y \\ a_z &= k_z(f_{xz}G_x + f_{yz}G_y + G_z) + g_z \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $a_x, a_y, a_z$ ——带有误差的三轴加速度传感器的输出值; $G_x, G_y, G_z$ ——理论输出的三轴加速度传感器值; $k_x, k_y, k_z$ ——三轴加速度传感器的标度系数; $g_x, g_y, g_z$ ——三轴加速度传感器的零位偏差值; $f_{yx}, f_{zx}$ ——Y轴、Z轴加速度传感器相对于X轴加速度传感器的安装误差; $f_{xy}, f_{zy}$ ——X轴、Z轴加速度传感器相对于Y轴加速度传感器的安装误差; $f_{xz}, f_{yz}$ ——X

轴、Y轴加速度传感器相对于Z轴加速度传感器的安装误差。

## 3 十二位置标定方法<sup>[5]</sup>

测斜仪误差的校正就是通过一定方法分别求解出式(3)和式(4)中的12个系数,利用这12个系数和传感器输出值,反算出没有误差的理想 $M_x, M_y, M_z, G_x, G_y$ 和 $G_z$ 值,然后利用这6个数值作为磁传感器和加速度传感器的输出数值,代入式(1)和式(2)进行计算,得到校正后的顶角和方位角数值。

为了求解上述误差系数,本项目采用了一种十二位置的校正方法。该方法不要求绝对水平,也无需确定真正的磁北方向,可以利用三轴无磁转台或者铝制六面体完成。该方法主要根据各个位置下的地磁场的垂直分量或者北向分量来得到磁传感器的误差系数。成都地区磁倾角为 $45.1^\circ$ ,地磁场的垂直分量较北向分量略大,故采用垂直分量作为传感器校正的基准,在北半球垂直分量指向地为正。同时利用铅垂方向的重力加速度作为加速度传感器误差系数求解的基准,重力加速度指向地为正,两者的校正可以同步完成。

校正是在三轴无磁测斜仪校验台上进行的,以磁北作为北向的基准。假定地磁场在北东地方向的磁场分量分别为 $M_n, M_e, M_d$ ,重力加速度在北东地方向的分量为 $g_n, g_e, g_d$ ,测斜仪翻转次序如表1所示。

由于三轴加速度传感器与三轴磁传感器的误差模型一样,其校正方法和校正公式也是一样的,此处仅以三轴磁传感器的校正给出计算公式。加速度传感器的校正参照磁传感器的方法和计算公式即可完成。

由1、2、3、4位置的数据,可以得到磁传感器的 $B_x, K_x, e_{xy}$ 和 $e_{xz}$ ,其公式如下:

$$B_x = (H_{x1} + H_{x2} + H_{x3} + H_{x4})/4 \quad (5)$$

$$K_x = (H_{x1} + H_{x2} - H_{x3} - H_{x4})/(4M_d) \quad (6)$$

$$e_{xy} = (H_{y1} + H_{y2} - H_{y3} - H_{y4})/(4M_dK_y) \quad (7)$$

$$e_{xz} = (H_{z1} + H_{z2} - H_{z3} - H_{z4})/(4M_dK_z) \quad (8)$$

由5、6、7、8位置的数据,可以得到磁传感器的 $B_y, K_y, e_{yx}$ 和 $e_{yz}$ ,其公式如下:

$$B_y = (H_{y5} + H_{y6} + H_{y7} + H_{y8})/4 \quad (9)$$

$$K_y = (H_{y5} + H_{y6} - H_{y7} - H_{y8})/(4M_d) \quad (10)$$

表1 十二位置校正翻滚次序  
Table 1 Twelve-position roll order

位置	测斜仪坐标系			三轴磁传感器分量			三轴加速度传感器分量		
	X	Y	Z	$M_x$	$M_y$	$M_z$	$G_x$	$G_y$	$G_z$
1	地	西	北	$M_d$	$-M_c$	$M_n$	$g_d$	$-g_c$	$g_n$
2	地	东	南	$M_d$	$M_c$	$-M_n$	$g_d$	$g_c$	$-g_n$
3	天	东	北	$-M_d$	$M_c$	$M_n$	$-g_d$	$g_c$	$g_n$
4	天	西	南	$-M_d$	$-M_c$	$-M_n$	$-g_d$	$-g_c$	$-g_n$
5	东	地	北	$M_c$	$M_d$	$M_n$	$g_c$	$g_d$	$g_n$
6	西	地	南	$-M_c$	$M_d$	$-M_n$	$-g_c$	$g_d$	$-g_n$
7	东	天	南	$M_c$	$-M_d$	$-M_n$	$g_c$	$-g_d$	$-g_n$
8	西	天	北	$-M_c$	$-M_d$	$M_n$	$-g_c$	$-g_d$	$g_n$
9	北	东	地	$M_n$	$M_c$	$M_d$	$g_n$	$g_c$	$g_d$
10	南	西	地	$-M_n$	$-M_c$	$M_d$	$-g_n$	$-g_c$	$g_d$
11	南	东	天	$-M_n$	$M_c$	$-M_d$	$-g_n$	$g_c$	$-g_d$
12	北	西	天	$M_n$	$-M_c$	$-M_d$	$g_n$	$-g_c$	$-g_d$

$$e_{yx} = (H_{x5} + H_{x6} - H_{x7} - H_{x8}) / (4M_d K_x) \quad (11)$$

$$e_{yz} = (H_{z5} + H_{z6} - H_{z7} - H_{z8}) / (4M_d K_z) \quad (12)$$

由9、10、11、12位置的数据,可以得到磁传感器的  $B_z$ 、 $K_z$ 、 $e_{zx}$  和  $e_{zy}$ ,其公式如下:

$$B_z = (H_{z9} + H_{z10} + H_{z11} + H_{z12}) / 4 \quad (13)$$

$$K_z = (H_{z9} + H_{z10} - H_{z11} - H_{z12}) / (4M_d) \quad (14)$$

$$e_{zx} = (H_{x9} + H_{x10} - H_{x11} - H_{x12}) / (4M_d K_x) \quad (15)$$

$$e_{zy} = (H_{y9} + H_{y10} - H_{y11} - H_{y12}) / (4M_d K_y) \quad (16)$$

上述公式中  $M_d$  无需知道精确的值,可假定为一常数,常数的大小对测斜仪方位角的计算没有任何影响,  $H_{x1-12}$ 、 $H_{y1-12}$ 、 $H_{z1-12}$  分别为各翻滚位置下的 X 轴、Y 轴、Z 轴的输出值,根据式(5)~(16),即可得到三轴磁传感器的零位、标度系数和安装误差系数。公式的详细推导可参见文献[5]的介绍。

在得到上述系数后,再根据式(3)进行反算,求解出无误差输出的传感器数值  $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$ ,其计算公式如下:

$$M_x = A_1 H_x + B_1 H_y + C_1 H_z + D_1 \quad (17)$$

$$M_y = A_2 H_x + B_2 H_y + C_2 H_z + D_2 \quad (18)$$

$$M_z = A_3 H_x + B_3 H_y + C_3 H_z + D_3 \quad (19)$$

其中:

$$A_1 = (e_{zy} e_{yz} - 1) / (K_x T) \quad (20)$$

$$B_1 = (e_{yx} - e_{zx} e_{yz}) / (K_y T) \quad (21)$$

$$C_1 = (e_{zx} - e_{yx} e_{zy}) / (K_z T) \quad (22)$$

$$D_1 = [(1 - e_{zy} e_{yz}) B_x / K_x + (e_{zx} e_{yz} - e_{yx}) B_y / K_y + (e_{yx} e_{zy} - e_{zx}) B_z / K_z] / T \quad (23)$$

$$A_2 = (e_{xy} - e_{zy} e_{xz}) / (K_x T) \quad (24)$$

$$B_2 = (e_{zx} e_{xz} - 1) / (K_y T) \quad (25)$$

$$C_2 = (e_{zy} - e_{zx} e_{xy}) / (K_z T) \quad (26)$$

$$D_2 = [(e_{zy} e_{xz} - e_{xy}) B_x / K_x + (1 - e_{zx} e_{xz}) B_y / K_y + (e_{zx} e_{xy} - e_{zy}) B_z / K_z] / T \quad (27)$$

$$A_3 = (e_{xz} - e_{xy} e_{yz}) / (K_x T) \quad (28)$$

$$B_3 = (e_{yz} - e_{yx} e_{xz}) / (K_y T) \quad (29)$$

$$C_3 = (e_{yx} e_{xy} - 1) / (K_z T) \quad (30)$$

$$D_3 = [(e_{xy} e_{yz} - e_{xz}) B_x / K_x + (e_{yx} e_{xz} - e_{yz}) B_y / K_y + (1 - e_{yx} e_{xy}) B_z / K_z] / T \quad (31)$$

$$T = e_{yx} e_{xy} + e_{zx} e_{xz} + e_{zy} e_{yz} - e_{yx} e_{zy} e_{xz} - e_{zx} e_{xy} e_{yz} - 1 \quad (32)$$

利用上述式(17)~(19)计算得到的三轴磁传感器数值,再加上经过同样方法计算得到的三轴加速度传感器的数值,代入(1)和式(2)计算得到校正后的顶角和方位角值,即完成了测斜仪的校正。

## 4 校正实验及效果

### 4.1 校正模型数据

将测斜仪装夹在三轴无磁校验台上,调整其坐标系各轴与表1中各位置翻滚的轴系关系一致,采集当前位置的磁传感器和加速度传感器的输出值,完成后得到12个位置的采样数据。按照上述公式计算,得到测斜仪磁传感器和加速度传感器的误差参数如表2所示。

根据得到的传感器误差系数,进行反算,可得到传感器各轴校正计算的系数如表3所示。

表2 测斜仪传感器误差标定参数  
Table 2 Error calibration parameters of the inclinometer sensor

传感器名称	传感轴	零位偏差	标度系数	安装误差	
磁传感器	X轴	-188.795	0.9514	0.0312	0.0306
	Y轴	129.94	0.9716	-0.0076	0.0399
	Z轴	-314.095	0.9067	0.0062	-0.0566
加速度传感器	X轴	-17.5863	0.9998	0.0046	-0.0013
	Y轴	-46.3725	0.9977	-0.0074	-0.0606
	Z轴	-6.8975	0.9977	0.0019	0.0585

注:表中数值为A/D转换后的数值。



表3 传感器校正系数

Table 3 Sensor correction factors

传感器名称	传感器轴	校正系数			
		$A_i$	$B_i$	$C_i$	$D_i$
磁传感器	X轴	1.051	0.0081	-0.0063	195
	Y轴	-0.0345	1.0266	0.0625	-120
	Z轴	-0.0308	-0.0412	1.1006	345
加速度传感器	X轴	1.0002	0.0072	-0.0023	18
	Y轴	-0.0047	0.9987	-0.0584	46
	Z轴	0.001	0.0605	0.9988	10

#### 4.2 磁传感器圆周试验

在取得校正系数后,将测斜仪分别以X、Y、Z轴朝上,在水平面内旋转1周,采集三轴磁传感器输出数值,分别做出校正前后磁传感器测量磁场的二维平面曲线(如图2所示)。由图2可以看出,磁传感器在校正前,其圆周并不圆,呈一定的椭圆形状,而且其中心点并不在原点,有不同程度的偏离,校正后成为了一个中心在原点的标准圆形,而且3个圆周在校正后也高度重合,表明三轴磁传感器的校正取得了较好的效果。

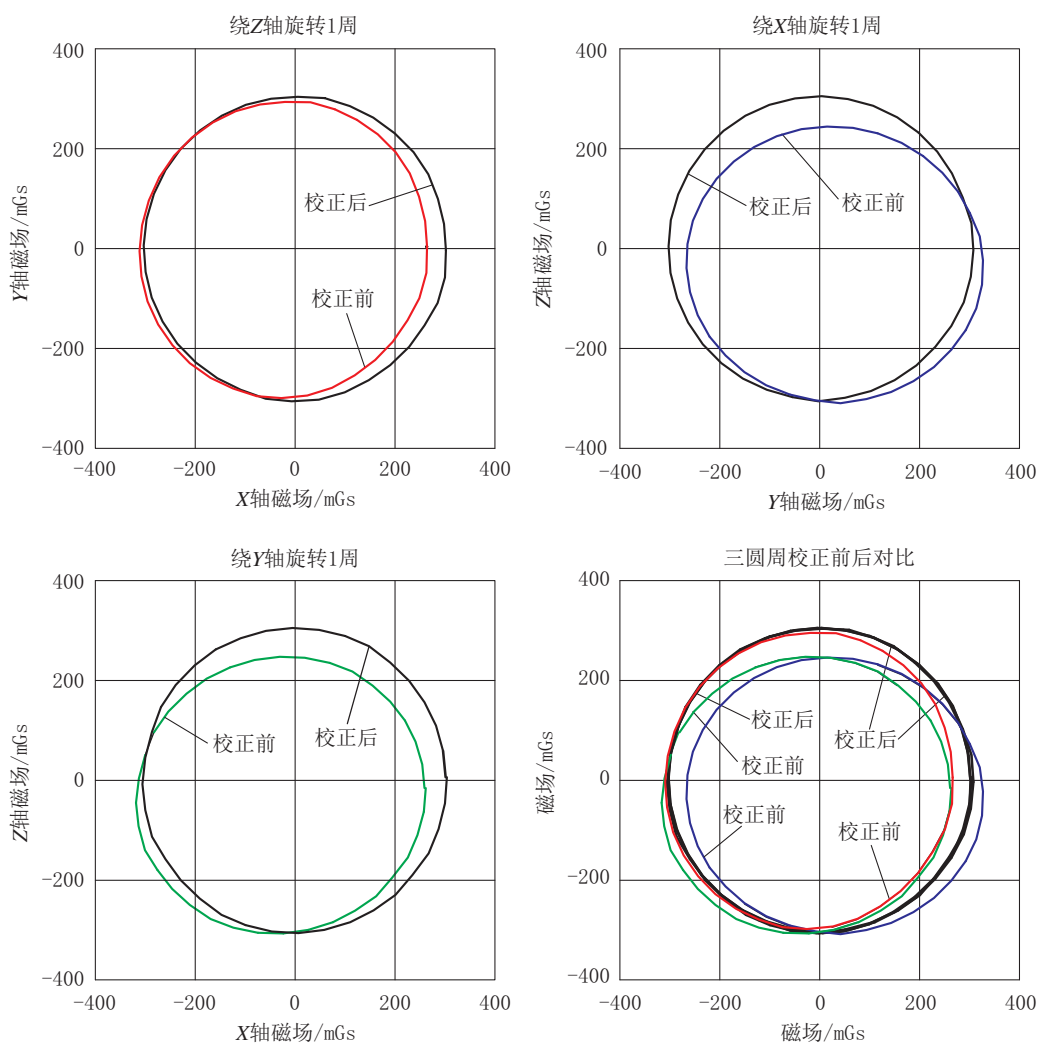


图2 三轴磁传感器校正前后水平圆周实验二维图

Fig.2 Two dimensional diagram of horizontal circle experiment of the three axis magnetic sensor before and after correction

#### 4.3 顶角校正效果

为了验证加速度传感器校正前后对顶角计算的效果,通过校验台分别设置了多个顶角位置,采集了

相应位置校正前后的数据进行了顶角的计算,得到顶角校正前后数据如表4所示。从表4可以看出在校正前顶角最大偏差为 $0.57^\circ$ ,均方误差为 $0.5^\circ$ 左右,

而校正后的最大偏差为0.09°,均方误差为0.06°,说明加速度传感器的校正对顶角的计算具有良好的效果。

**表4 校正前后顶角误差对比**  
**Table 4 Comparison of borehole drift angle errors before and after correction** (°)

校正状态	顶 角										均方误差	
	2	5	10	20	30	40	50	60	70	80		90
校正前	-0.41	-0.43	-0.5	-0.56	-0.51	-0.5	-0.56	-0.57	-0.54	-0.54	-0.47	0.51
校正后	-0.01	0.05	0.01	-0.02	0.06	0.09	0.05	0.05	0.07	0.06	0.09	0.06

4.4 方位角校正效果

为了验证经过磁传感器和加速度传感器的上述校正对最终的方位角计算的效果,通过在校验台上分别设置不同的顶角和方位角位置,采集传感器的输出数值,得到了校正前后的方位角计算结果如表

5所示。从表5可以看出方位角偏差在校正前后有较大的差异,校正前方位角的最大绝对偏差达到30.06°,均方误差21.75°,而校正后的方位角最大绝对偏差为1.06°,最大均方误差为0.82°,该校正效果可以满足该测斜仪的使用要求。

**表5 校正前后方位角误差对比**  
**Table 5 Comparison of azimuth errors before and after correction** (°)

顶角	校正状态	方 位 角						均方误差
		0	60	120	180	240	300	
2	校正前	30.06	24.37	17.23	16.39	16.13	22.71	21.75
	校正后	-0.85	-1.06	-0.78	0.43	0.84	0.33	0.76
5	校正前	17.41	11.60	4.44	2.84	1.91	9.10	9.59
	校正后	-0.04	-0.47	0.04	0.63	0.51	0.47	0.43
10	校正前	13.72	8.42	1.42	-0.79	-1.58	5.04	6.95
	校正后	0.16	-0.09	0.17	0.48	0.81	0.40	0.43
20	校正前	11.39	7.00	0.85	-2.06	-3.92	2.60	5.86
	校正后	0.07	-0.01	0.35	0.52	0.71	0.42	0.42
30	校正前	10.23	6.94	1.31	-2.28	-5.06	1.30	5.58
	校正后	0.11	0.22	0.36	0.54	0.67	0.41	0.43
40	校正前	9.36	7.02	2.04	-2.25	-5.78	0.39	5.47
	校正后	0.17	0.21	0.44	0.65	0.67	0.48	0.48
50	校正前	8.65	7.32	2.69	-2.34	-6.19	-0.32	5.47
	校正后	0.29	0.31	0.46	0.63	0.77	0.56	0.53
60	校正前	7.90	7.70	3.46	-2.38	-6.56	-0.88	5.52
	校正后	0.31	0.48	0.78	0.73	0.72	0.65	0.63
70	校正前	7.32	8.05	3.64	-2.58	-6.58	-1.26	5.53
	校正后	0.44	0.58	0.67	0.77	0.82	0.73	0.68
80	校正前	6.70	8.23	3.71	-2.85	-6.31	-1.41	5.42
	校正后	0.50	0.65	0.76	0.84	0.98	0.80	0.77
90	校正前	6.18	8.24	3.40	-3.28	-5.86	-1.30	5.24
	校正后	0.60	0.79	0.82	0.85	1.00	0.83	0.82

## 5 结论

十二位置标定法具有校正工作量小,操作简单,计算简便,校正效果明显的特点。可以有效地校正三轴磁传感器和三轴加速度传感器的零位偏差、灵敏度误差以及三轴的不正交误差。通过室内对比实验,测斜仪顶角的均方误差由校正前的 $0.5^\circ$ 下降为 $0.06^\circ$ ,方位角均方误差由校正前的 $21.75^\circ$ 下降为 $0.82^\circ$ ,该校正结果能够满足测斜仪的使用要求。利用该校正方法,对生产的10多套测斜仪进行了校正,都取得了满意的校正效果,表明该方法适合钻孔测斜仪的校正。

## 参考文献(References):

- [1] 王达,何远信,等.地质钻探手册[M].长沙:中南大学出版社,2014.  
WANG Da, HE Yuanxin, et al. Geological drilling handbook [M]. Changsha: Central South University Press, 2014.
- [2] 陈雷,卞鸿巍,王荣颖,等.三轴磁传感器误差分析与校准[J].舰船电子工程,2017,37(1):41-44,126.  
CHEN Lei, BIAN Hongwei, WANG Rongying, et al. Three-axis magnetic sensor error analysis and calibration [J]. Ship Electronic Engineering, 2017, 37(1): 41-44, 126.
- [3] 刘一鸣,李杰,刘秀锋,等.一种加速度计的标定补偿方法研究[J].传感技术学报,2016,29(12):1846-1852.  
LIU Yiming, LI Jie, LIU Xiufeng, et al. A study on calibration-compensation method for accelerometer [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(12): 1846-1852.
- [4] 刘宇,余跃,路永乐,等.MEMS加速度计混合误差标定补偿方案[J].压电与声光,2018,40(4):589-593.  
LIU Yu, YU Yue, LU Yongle, et al. A mixing error calibration and compensation scheme for MEMS accelerometer [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2018, 40(4): 589-593.
- [5] 郭鹏飞,任章,邱海韬,等.一种十二位置不对北的磁罗盘标定方法[J].中国惯性技术学报,2007,15(5):598-601.  
GUO Pengfei, REN Zhang, QIU Haitao, et al. Twelve-position calibrating method without north reference for magnetic compass [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(5): 598-601.
- [6] 梁佩雷,许江宁,程章.一种用于个人导航系统的低精度MEMS器件标定方法[J].舰船电子工程,2017,37(8):43-47.  
LIANG Peilei, XU Jiangning, CHENG Zhang. Calibration method of low-precision MEMS in personal navigation system [J]. Ship Electronic Engineering, 2017, 37(8): 43-47.
- [7] 王璐,赵忠,邵玉梅,等.磁罗盘误差分析及补偿[J].传感技术学报,2007,20(2):439-441.  
WANG Lu, ZHAO Zhong, SHAO Yumei, et al. To analyze and compensate errors of magnetic compass [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(2): 439-441.
- [8] 李冰,雷泷杰,陈超.基于椭圆拟合的双轴磁传感器标定方法[J].探测与控制学报,2020,42(3):20-23.  
LI Bing, LEI Longjie, CHEN Chao. A calibration method of bi-axial magnetic sensor based on ellipse fitting [J]. Journal of Detection & Control, 2020, 42(3): 20-23.
- [9] 朱兴乐.三分量磁传感器的水平姿态校正方法[J].舰船电子工程,2019,39(8):64-67,95.  
ZHU Xingle. Method for horizontal attitude correction of triaxial fluxgate magnetometer [J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(8): 64-67, 95.
- [10] 刘建敬,陈丽,汪冬瑾,等.三轴磁传感器的校正方法[J].现代电子技术,2018,41(9):179-181,186.  
LIU Jianjing, CHEN Li, WANG Dongjin, et al. Correction method of 3-axis magnetic sensor [J]. Modern Electronics Technique, 2018, 41(9): 179-181, 186.
- [11] 刘耀波.基于PNI磁传感器的低功耗电子罗盘研究[J].电子测量技术,2020,43(12):158-162.  
LIU Yaobo. Research on low power electronic compass based on PNI magnetic sensor [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(12): 158-162.
- [12] 孙倩,付虹.椭圆拟合的电子罗盘磁差补偿[J].传感器与微系统,2016,35(9):39-41,45.  
SUN Qian, FU Hong. Research on magnetic variation compensation of electronic compass based on ellipsoid fitting [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(9): 39-41, 45.
- [13] 王庆宾,张晓明.三轴磁传感器快速标定方法研究[J].中国测试,2017,43(7):35-39.  
WANG Qingbin, ZHANG Xiaoming. Research of fast calibration method of three-axis magnetic sensor [J]. China Measurement & Test, 2017, 43(7): 35-39.
- [14] 高可.磁感式电子罗盘的研制及标定方法研究[D].合肥:中国科学技术大学,2016.  
GAO Ke. Research of magneto-inductive electronic compass and calibration method [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
- [15] 张海鹰,何波贤,郑铁山,等.基于椭圆拟合的三轴加速度计误差补偿方法[J].传感器世界,2015,21(6):7-10.  
ZHANG Haiying, HE Boxian, ZHENG Tieshan, et al. Error compensation method for triaxial accelerometers based on ellipsoid fitting [J]. Sensor World, 2015, 21(6): 7-10.
- [16] 樊依林.基于磁感式传感器的随钻测斜仪的研究[J].工业仪表与自动化装置,2018(3):112-115.  
FAN Yilin. Study of inclinometer while drilling based on magnetic sensor [J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2018(3): 112-115.

(编辑 荐华)