

## 磁力仪三轴非正交的转动补偿方法\*

贾文抖<sup>1</sup>, 林春生<sup>1</sup>, 孙玉绘<sup>1</sup>, 赵鹤达<sup>1</sup>, 翟国君<sup>2</sup>

(1. 海军工程大学兵器工程系, 湖北武汉 430033; 2. 海军海洋测绘研究所, 天津 300061)

**摘要:**为解决磁力仪三轴非正交的问题,建立了三轴磁力仪误差补偿模型,提出了基于旋转数据正弦曲线拟合的方法,对三轴磁力仪的非正交性进行标定。利用正弦曲线的初始相位角求解标定参数,实现了对三轴磁力仪的非正交标定及输出补偿。结果表明:该方法对磁力仪非正交参数的求解精度高,标定后的磁力仪的磁测准确性改善明显;该方法不需要利用高精度光泵磁强计测量磁场的强度,为三轴磁力仪的非正交参数标定提供了一个新的有效的途径。

**关键词:**三轴磁力仪;补偿;非正交;曲线拟合

**中图分类号:**V 241.62 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2018)01-157-04

## Rotating compensation method of non-orthogonal tri-axial magnetometer

JIA Wendou<sup>1</sup>, LIN Chunsheng<sup>1</sup>, SUN Yuhui<sup>1</sup>, ZHAO Heda<sup>1</sup>, ZHAI Guojun<sup>2</sup>

(1. Department of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Naval Institute of Hydrographic Surveying and Charting, Tianjin 300061, China)

**Abstract:** For the sake of tri-axial magnetometer calibration, an error compensation model of tri-axial magnetometer was established. The sine curve fitting method was proposed to calibrate the tri-axial magnetometer based on spin data. The calibration of tri-axial magnetometer could be implemented by calculating the calibration parameters using the initial phase angles of the sine curves. The results indicate that it has high precision to calculate the calibration parameters of tri-axial magnetometer, and the measurement accuracy of calibrated magnetometer is improved significantly. It dose not require high-precision optical pumping magnetometer to measure the magnetic field intensity, thus it puts forward an effective way for calibrating tri-axial magnetometer.

**Key words:** tri-axial magnetometer; compensation; non-orthogonal; curve fitting

三轴磁力仪常被用来进行载体姿态确定<sup>[1]</sup>、磁性目标探测<sup>[2]</sup>等,但受到加工工艺和安装工艺的限制,磁力仪的三个敏感轴不能严格正交,进行磁场测量时会产生非正交误差,影响磁场测量的准确性<sup>[3-4]</sup>。例如,在大地背景磁场环境下,如果磁力仪三轴正交误差大于 $0.5^\circ$ ,非正交所带来的磁场测量误差将达数百纳特。为提高三轴磁力仪的磁场测量准确性,有必要对其三轴的非正交性进行分析并加以补偿。

为补偿三轴磁力仪的敏感轴非正交所带来的磁测误差,周建军等<sup>[5]</sup>利用蚁群算法对三轴非正交度进行了计算,该模型在标准磁场偏差不大时,可以稳定收敛,且能达到较高精度;胡海滨等<sup>[6]</sup>利用了共轭次梯度的方法对非理想正交磁力仪三

轴的非正交角度进行了标定:这两种方法都需要进行迭代计算,计算结果易受到初始值的影响。在借助外界的标准磁场的前提下,殷勤等<sup>[7]</sup>提出了以误差校正矩阵为基础的快速校正算法,对三轴非正交做了校正,使得计算量变小;王一等<sup>[8]</sup>利用非线性最小二乘优化方法求解三轴非正交角与磁总场误差关系模型,完成磁力仪的校正与补偿。

考虑用于提供参考磁场强度的光泵磁强计与待标定磁力仪之间性能的差异,提出一种不需要借助光泵磁强计提供磁场强度的磁力仪旋转标定方法,仅需确定三轴输出的正弦曲线表达式,利用初相角即可计算非正交角度,实现对磁力仪非正交参数的标定和三轴数据补偿的目的。

\* 收稿日期:2016-10-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41374018,41476087);国家重大科研装备研制基金资助项目(ZDYZ2012-1)

作者简介:贾文抖(1990—),男,河南夏邑人,博士研究生,E-mail:jjawd163@163.com;

林春生(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:lcs\_and\_zh@163.com

### 1 磁力仪三轴非正交模型

图 1 为磁力仪三轴的空间指向示意图。 $X_m, Y_m, Z_m$  是磁通门的三个轴, 建立直角坐标系  $O_{-}XYZ$ ,  $X$  轴与磁通门的  $X_m$  轴重合,  $OY$  轴在  $O_{-}X_mY_m$  面内且与  $Y_m$  轴的夹角为  $\alpha$ , 设  $Z_m$  轴在  $O_{-}XY$  面上的投影与  $X$  轴的夹角为  $\beta$ ,  $Z$  轴与  $Z_m$  轴的夹角为  $\gamma$ ,  $X(X_m)$  轴与  $Z_m$  轴的夹角为  $\varphi$ ,  $Y_m$  轴与  $Z_m$  轴的夹角为  $\eta$ 。

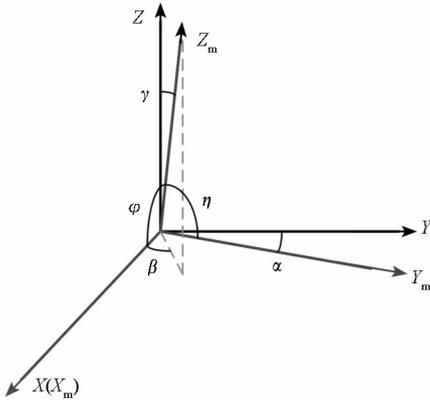


图 1 磁力仪三轴的空间指向示意图  
Fig. 1 Spatial Direction Schematics of tri-axial Magnetometer

假设地磁场环境为  $B$ , 理想情况下的三轴输出为  $[B_x, B_y, B_z]$ , 在只考虑磁力仪三轴不正交影响的情况下, 实际三轴的输出为:

$$\begin{bmatrix} B_{x_m} \\ B_{y_m} \\ B_{z_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ \cos\beta\sin\gamma & \sin\beta\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $\alpha, \beta, \gamma$  三个参数是描述磁力仪三轴不正交的参数。

根据式(1)可以得到:

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ \cos\beta\sin\gamma & \sin\beta\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} B_{x_m} \\ B_{y_m} \\ B_{z_m} \end{bmatrix} \quad (2)$$

校正三轴磁力仪需求出  $\alpha, \beta, \gamma$  三个参数, 在获得补偿参数  $\alpha, \beta, \gamma$  后, 利用式(2)可实现对磁力仪三轴输出的补偿。

### 2 非校正参数的求解

将三轴磁力仪固定在无磁旋转平台上, 使  $O_{-}X_mY_m$  平行于水平面, 在均匀的背景磁场环境中, 转动旋转平台, 三轴输出记为  $[B_{x_m}, B_{y_m}, B_{z_m}]$ 。

磁场在水平面上的投影为  $B_{xy} = B\cos I$  ( $B$  是

磁场强度大小,  $I$  是地磁倾角), 在磁力仪三轴正交的理想情况下,  $x$  轴、 $y$  轴的输出  $[B_{x_m}, B_{y_m}]$  满足曲线

$$\begin{cases} B_{x_m} = B_{xy} \sin(\theta + \theta_{x0}) \\ B_{y_m} = B_{xy} \sin(\theta + \theta_{y0}) \end{cases} \quad (3)$$

$\theta$  是转过的角度,  $X_m, Y_m$  两轴的夹角可通过初始相位角  $\theta_{x0}, \theta_{y0}$  之间的差值计算出来,  $X_m, Y_m$  两轴正交时有  $|\theta_{x0} - \theta_{y0}| = 90^\circ$ 。

对于三轴非正交的磁力仪而言, 非正交角为:

$$\alpha = 90 - |\theta_{y0} - \theta_{x0}| \quad (4)$$

同样,  $\beta$  角可以根据  $[B_{x_m}, B_{z_m}]$  输出拟合曲线的初始相位角  $\theta_{x0}, \theta_{z0}$  计算得到。若  $Z_m$  轴同时垂直于  $X_m$  轴和  $Y_m$  轴,  $Z_m$  轴的输出  $B_{z_m}$  保持不变, 此时  $\beta = \gamma = 0$ 。若  $B_{z_m}$  的大小随转动发生变换, 此时  $Z_m$  轴与  $X_m$  轴和  $Y_m$  轴构成的平面是不垂直的, 则

$$\begin{aligned} B_{z_m} &= (B_x \cos\beta + B_y \sin\beta) \sin\gamma + B_z \cos\gamma \\ &= [B_{xy} \sin(\theta + \theta_{x0}) \cos\beta + B_{xy} \cos(\theta + \theta_{x0}) \sin\beta] \sin\gamma + B_z \cos\gamma \\ &= B_{xy} \sin(\theta + \theta_{x0} + \beta) \sin\gamma + C \\ &= A \sin(\theta + \theta_{z0}) + C \end{aligned} \quad (5)$$

由图 1 可知,  $B_{z_m}$  在  $O_{-}X_mY_m$  面上的投影  $B_{z_m,xy} = B_{z_m} \sin\gamma$  相当于只对  $B_{z_m}$  的大小做压缩变化, 不改变其初相位角的大小, 故有  $Z_m$  轴在  $O_{-}X_mY_m$  面上的投影与  $X$  轴的夹角

$$\beta = |\theta_{z0} - \theta_{x0}| \quad (6)$$

根据拟合出的曲线可以得到  $C = B_z \cos\gamma$ 。

根据式(2), 可以计算出补偿后的  $B_x$  和  $B_y$ 。

$$\begin{cases} B_x = B_{x_m} \\ B_y = (B_{y_m} - B_{x_m} \sin\alpha) / \cos\alpha \end{cases} \quad (7)$$

根据式(1), 可得

$$B_{z_m} = B_x \cos\beta \sin\gamma + B_y \sin\beta \sin\gamma + B_z \cos\gamma \quad (8)$$

此时只有一个未知数  $\gamma$ , 将  $B_z \cos\gamma$  的值代入式(8)可以计算出  $\gamma$ 。

$$\gamma = \arcsin[(B_{z_m} - B_z \cos\gamma) / (B_x \cos\beta + B_y \sin\beta)] \quad (9)$$

此时,  $\alpha, \beta, \gamma$  三个参数已知, 可得

$$B_z = (B_{z_m} - B_x \cos\beta \sin\gamma - B_y \sin\beta \sin\gamma) / \cos\gamma \quad (10)$$

$$\varphi = \arccos(\cos\beta \sin\gamma) \quad (11)$$

$$\eta = \arccos[\cos(90 - \alpha - \beta) \cdot \sin\gamma] \quad (12)$$

### 3 数值试验

设置仿真参数磁力仪三轴的非正交参数  $\alpha = 1.5^\circ, \beta = 32.5^\circ, \gamma = 1.7^\circ; B = 52\ 000\ \text{nT}, I = 47^\circ$ 。计算的  $\varphi = 88.566^\circ, \eta = 89.050^\circ$ 。

### 3.1 非正交参数的求解

将磁力仪固定在水平旋转平台上,转动旋转平台,记录磁力仪三轴的输出数据,并将三轴数据分别拟合成  $A\sin(Bw + C) + D$  的曲线形式,利用曲线方程参数进行非正交角度的求解。磁力仪三轴测量数据及其拟合曲线如图 2 所示。

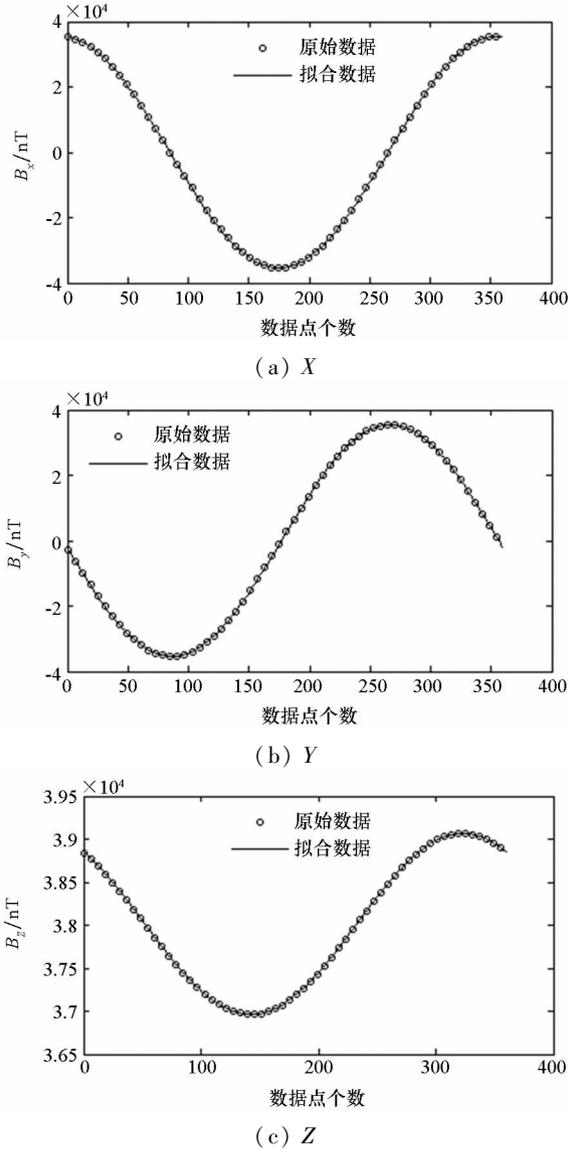


图 2 三轴测量数据拟合曲线图

Fig. 2 Fitting curve on the outputs of three-axis

三轴输出拟合曲线方程分别为:

$$B_{xm} = 35\ 463.9\sin(t + 91)$$

$$B_{ym} = 35\ 463.9\sin(t + 179.5)$$

$$B_{zm} = 10\ 520.8\sin(t + 123.5) + 38\ 013.7$$

根据式(4)、式(6)和式(9)可计算得到磁力仪三轴非正交的标定参数  $\alpha = 1.5^\circ, \beta = 32.5^\circ, \gamma = 1.7^\circ$ 。

### 3.2 磁力仪三轴数据补偿

利用式(7)和式(10)对测得的磁场三分量进行补偿,得到补偿后的三分量  $B_x, B_y$  和  $B_z$ 。考虑

实测数据中不可避免地包含随机测量噪声,在仿真数据中添加不同水平的测量噪声用以模拟实测数据,再利用实测数据进行标定参数的求解,所得结果见表 1。并利用均方差  $\sigma$  描述补偿后磁场强度与真实磁场强度之间的偏差。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [\sqrt{(B_{xk})^2 + (B_{yk})^2 + (B_{zk})^2} - B]^2} \quad (13)$$

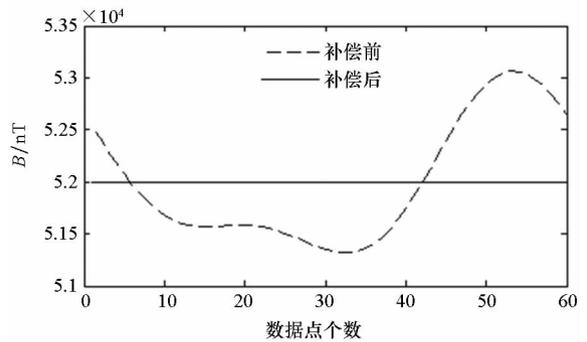
表 1 不同大小的测量噪声所对应的标定参数的值

Tab. 1 Values of calibration parameters under different levels of noise

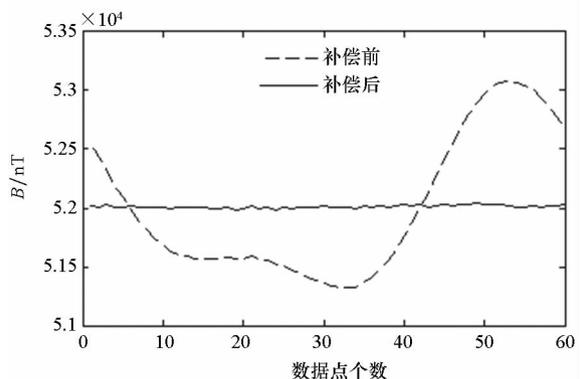
噪声/ nT	$\alpha /$ ( $^\circ$ )	$\beta /$ ( $^\circ$ )	$\gamma /$ ( $^\circ$ )	$\varphi /$ ( $^\circ$ )	$\eta /$ ( $^\circ$ )	$\sigma$
0	1.500	32.500	1.700	88.566	89.050	0.000
30	1.500	32.599	1.713	88.557	89.040	15.729
50	1.500	32.258	1.485	88.744	89.175	23.986
100	1.500	32.160	1.528	88.707	89.153	52.452

从表 1 可看出,测量数据中的噪声水平不超过 100 nT 时,计算得到的三轴非正交参数受测量噪声的影响不大,其中  $\alpha$  角没有变化, $\beta$  和  $\gamma$  角的变化最大不超过  $0.35^\circ$ ,三轴夹角的计算误差不超过  $0.2^\circ$ ;补偿后的磁场强度的均方差在测量噪声强度以下。

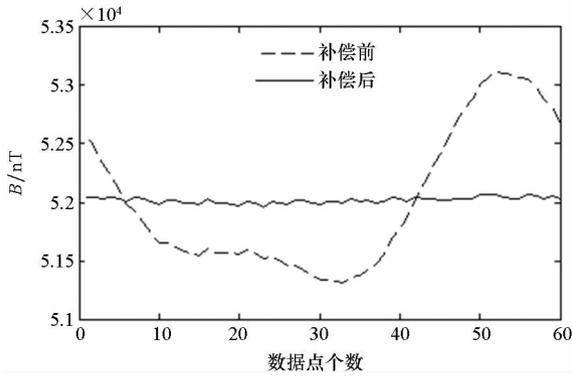
测量噪声不同时,补偿前后计算得到的磁场强度如图 3 所示。



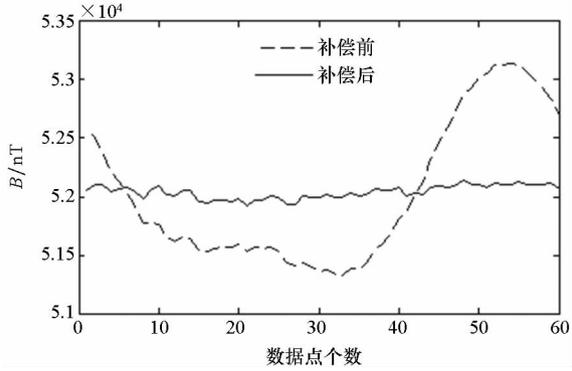
(a) 0 nT



(b) 30 nT



(c) 50 nT



(d) 100 nT

图 3 测量噪声不同时补偿前后计算得到的磁场强度  
Fig. 3 Magnetic-field intensity calculated before and after calibration with the measurement noise

在图 3 中,虚线是利用直接测得的数据计算得到的磁场强度的曲线,可以看出直接利用磁测数据计算得到的磁场强度变化很大;实线是利用式(7)和式(10)补偿后的磁场三分量计算得到的磁场强度。受测量噪声的影响,补偿后磁场强度与补偿前相比变化幅度明显减小,且补偿前后的拟合曲线都出现了不同程度的波动。

### 4 结论

提出的三轴转动数据正弦曲线拟合的方法解决了磁力仪三轴非正交标定的问题,实现了磁力仪三轴正交性校正和三分量数据的补偿。实验结果表明,利用该方法补偿后的磁力仪性能改善明显,可以将上千纳特的磁测偏差补偿到几十甚至几纳特以下;在所考虑范围内,磁测噪声的大小对非正交角的求解精度影响较小,且能够将补偿后的磁场强度与真实磁场强度之间的差值补偿到噪声水平以下。

与其他方法相比,该方法不需要另外借助高精度光泵磁强计测量磁场总强度,且整个过程无

须复杂的迭代过程。最后需要说明的是:在获取磁力仪旋转的三分量数据时,不限定旋转面平行于水平面,当与水平面具有一定夹角时亦可以实现。

### 参考文献 (References)

[1] 龙达峰,刘俊,张晓明,等. 地磁导航中磁测姿态解算误差分析[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(6): 204-209.  
LONG Dafeng, LIU Jun, ZHANG Xiaoming, et al. Error analysis of magnetic attitude measurement system on geomagnetic navigation [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(6): 204-209. (in Chinese)

[2] 李华,李庆民. 基于舰船磁场模型的离线磁定位研究[J]. 海军工程大学学报, 2007, 19(3): 90-93, 103.  
LI Hua, LI Qingmin. Study on offline magnetic localization methods based on warship's magnetic model [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2007, 19(3): 90-93, 103. (in Chinese)

[3] 林春生,向前,龚沈光. 三轴磁强计正交误差分析与校正[J]. 探测与控制学报, 2005, 27(2): 9-12.  
LIN Chunsheng, XIANG Qian, GONG Shenguang. Ortho-error analysis and rectification of three-axis magnetometer [J]. Journal of Detection & Control, 2005, 27(2): 9-12. (in Chinese)

[4] Pang H F, Li J, Chen D X, et al. Calibration of three-axis fluxgate magnetometers with nonlinear least square method [J]. Measurement, 2013, 46(4): 1600-1606.

[5] 周建军,林春生,张坚. 基于蚁群算法对三轴磁强计非正交度的修正[J]. 舰船科学技术, 2011, 33(2): 108-111.  
ZHOU Jianjun, LIN Chunsheng, ZHANG Jian. Correction of non-orthonormality of three-axis manetometer based on ACO arithmetic [J]. Ship Science and Technology, 2011, 33(2): 108-111. (in Chinese)

[6] 胡海滨,林春生,龚沈光. 基于共轭次梯度法的非理想正交三轴磁传感器的修正[J]. 数据采集与处理, 2003(1): 88-91.  
HU Haibin, LIN Chunsheng, GONG Shenguang. Correction of incompletely orthogonal three axial magnetic sensor by conjugated approximate gradient algorithm [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2003(1): 88-91. (in Chinese)

[7] 殷勤,陈彬,汪莹,等. 电磁跟踪系统磁传感器三轴非理想正交的快速校正算法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(8): 1698-1702.  
YIN Qin, CHEN Bin, WANG Ying, et al. Fast calibration arithmetic for incompletely orthogonal three-axis magnetic sensor of electromagnetic tracking system [J]. System Engineering and Electronics, 2011, 33(8): 1698-1702. (in Chinese)

[8] 王一,宗发保,赵瑜,等. 三分量磁通门传感器的三轴正交校正与测量[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2015, 46(2): 232-237.  
WANG Yi, ZONG Fabao, ZHAO Yu, et al. Calibration and measurement on the orthogonal three-axes of three-components magnetic flux-gate sensor [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2015, 46(2): 232-237. (in Chinese)