doi:10.11887/j.cn.201906009 http://journal.nudt.edu.cn

三轴磁强计晃动对测量结果的影响分析及校正*

林朋飞,林春生,张 宁,贾文抖
(海军工程大学 兵器工程学院,湖北 武汉 430033)

摘 要:三轴磁强计的主要误差有零偏误差、灵敏度误差以及三轴非正交误差。通过在三轴正交坐标体系下对传感器的三轴非正交误差进行分析,建立了传感器误差模型,分析了误差对传感器晃动所产生的影响。晃动1°产生的误差最大可达109.5 nT,晃动误差随着晃动角度的增加而增加。为控制晃动误差,通过对误差模型分析建立误差校正模型,并通过非线性曲线拟合对校正模型参数准确估计,将估计参数代入校正模型,可以实现对传感器输出校正,使其输出误差大大减小,晃动1°产生的误差范围可控制在0.03 nT以内。这表明该校正方法有效地降低了晃动对传感器输出产生的影响。

关键词:三轴磁强计;晃动;三轴非正交误差;零偏误差;灵敏度;校正
中图分类号:TH 762.3 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2019)06-058-05

Analysis of the influence and calibration of tri-axial magnetometer shaking on measurement

LIN Pengfei, *LIN Chunsheng*, *ZHANG Ning*, *JIA Wendou*
(Department of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The main errors of tri-axial magnetometer include scale deviation error, sensitivity error and tri-axial non-orthogonal error. The non-orthogonal error of the sensor was analyzed under tri-axial orthogonal coordinate system. The sensor error model was established, and the influence of error on the shaking of the sensor was analyzed. Shake 1° to produce the error up to 109.5 nT, the error increases with the increase of the shaking angle. To control the shaking error, the calibration model was established, and through the nonlinear curve fitting to estimate the model parameters of the calibration model accurately. After compensation, the sensor output error was greatly reduced, and the shaking error can be controlled below 0.03 nT, which shows that this method can effectively reduce the influence of shaking on sensor output.

Keywords: tri-axial magnetometer; shaking; tri-axial non-orthogonal; scale deviation; sensitivity; calibration

地球具有稳定的磁场即地磁场,地磁场平均大小约为5×10^4 nT。地磁场能够使空间中的磁性物质感应生成磁场,测量和分析空间中磁场分布是目标识别的重要手段。三轴磁强计能够高精度地测量空间中的微弱磁场,是测量空间测磁的有力工具。理想的磁强计三轴正交,但受到生产工艺水平的影响,磁强计的三轴并非严格正交,这直接影响到所测磁场数据,此外还存在零点漂移、传感器内部剩磁等多方面的问题,都会使传感器的输出产生误差[1]。

文献[2]基于高斯迭代法对磁强计进行校正,提高了磁强计的测量精度。文献[3]建立了磁强计的自身误差和软硬磁干扰误差模型,提出了基于空间地磁矢量不变的椭球拟合校准方法,减小磁强计的测量误差,文献[4]提出了无迹卡尔曼滤波磁强计模型参数估计方法,对磁强计的总量及分量误差进行校正,提高了磁强计的测量精度。文献[5]提出了共轭梯度优化的方法求解优化参数,修正三轴非正交所带来的误差,提高了磁强计的性能。这些方法都是针对静止情况下的磁强计,没有分析磁强计晃动对测量结果产生的影响,静止情况下的分析对实际应用意义有限。

本文分析了传感器产生的零偏误差、灵敏度误差以及三轴非正交误差,并建立三轴磁强计的误差模型和误差校正模型,分别分析了校正前和校正后三轴磁强计晃动对传感器输出产生的影响。校正后晃动对传感器的输出影响大大减小,使得传感器的测量结果更加准确。

* **收稿日期**:2018-07-06
作者简介:林朋飞(1991—),女,山东利津人,博士研究生,E-mail:xiaoatai1991@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　三轴磁强计误差模型

三轴磁强计的误差主要有零点漂移误差、三轴灵敏度误差及三轴非正交引起的误差[2]。

1.1　由传感器三轴非正交引起的误差

磁强计三轴坐标系如图 1 所示。其中 $oxyz$ 为正交坐标系，z_1 与 z 轴重合，y_1oz 与 yoz 共面，y_1 与 y 的夹角为 α，x_1 与 xoz 的夹角为 β，与 xoy 的夹角为 γ，与 x 轴的夹角为 σ。

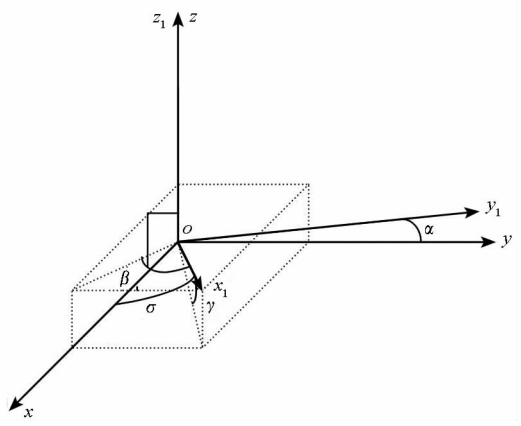


图 1　三轴磁强计坐标系

Fig. 1　Coordinate system of triaxial magnetometer

在上面假设条件下，三轴磁强计的输出为：

$$\begin{cases} B_{x_1} = B_x\cos\sigma + B_y\sin\beta + B_z\sin\gamma \\ B_{y_1} = B_y\cos\alpha + B_z\sin\alpha \\ B_{z_1} = B_z \end{cases} \tag{1}$$

由于 $\alpha,\beta,\gamma,\sigma$ 很小，则式(1)可以化简为：

$$\begin{cases} B_{x_1} = B_x + B_y\beta + B_z\gamma \\ B_{y_1} = B_y + B_z\alpha \\ B_{z_1} = B_z \end{cases} \tag{2}$$

可表示为：

$$\begin{pmatrix} B_{x_1} \\ B_{y_1} \\ B_{z_1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \beta & \gamma \\ 0 & 1 & \alpha \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} \tag{3}$$

1.2　传感器的误差分析

除传感器三轴非正交会造成输出误差外，灵敏度误差和零点偏移误差也会影响传感器的输出[3]。则在三轴非正交，灵敏度误差以及零点偏移误差影响下，传感器的输出可以表示为：

$$\begin{pmatrix} Y_x \\ Y_y \\ Y_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & \beta & \gamma \\ 0 & 1 & \alpha \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Q_x \\ Q_y \\ Q_z \end{pmatrix} \tag{4}$$

简写为 $\boldsymbol{B}_1 = \boldsymbol{C}\cdot\boldsymbol{P}\cdot\boldsymbol{B} + \boldsymbol{Q}$。

其中，$\boldsymbol{C} = \begin{pmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{pmatrix}$ 为灵敏度矩阵；$P = \begin{pmatrix} 1 & \beta & \gamma \\ 0 & 1 & \alpha \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ 为从正交到非正交的转换矩阵；$\boldsymbol{Q} = \begin{pmatrix} Q_x \\ Q_y \\ Q_z \end{pmatrix}$ 为零点偏移误差矩阵；$\boldsymbol{B} = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix}$ 为三轴正交时传感器理想输出值；$\boldsymbol{B}_1 = \begin{pmatrix} Y_x \\ Y_y \\ Y_z \end{pmatrix}$ 为传感器实际输出值。

将参数代入式(4)得到传感器实际计算值，即含有零点漂移误差、三轴灵敏度误差及三轴非正交误差的值。

2　实验仿真

设进行校正前非正交三轴磁强计的夹角为 $\alpha = 1.35°$、$\beta = 2.05°$、$\gamma = 1.07°$，三轴灵敏度系数为 $k_x = 0.912$、$k_y = 1.122$、$k_z = 1.109$，三轴零偏误差为 $Q_x = 147$ nT、$Q_y = 99.7$ nT、$Q_z = 119.7$ nT，其中地磁场强度为 $B = 5\times10^4$ nT，地磁倾角 $I = 43°$。

2.1　传感器转动角度对其输出的影响

仿真传感器在稳定的地磁场中的输出。设地磁场 B 在 xoy 平面的投影与 x 轴之间的夹角为 ϕ，地磁测量示意图如图 2 所示，则传感器在没有误差干扰的情况下理想输出值为：

$$\begin{cases} B_x = B\cos I\cos\phi \\ B_y = B\cos I\sin\phi \\ B_z = B\sin I \end{cases} \tag{5}$$

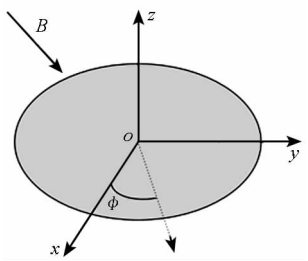


图 2　地磁场测量示意图

Fig. 2　Schematic diagram of geomagnetic measurement

仿真中，假设地磁场在 xoy 上的投影与传感器的 x 轴夹角初始角度为 1°，转动传感器使角度 ϕ 依次增加 1°、2°、5°，仿真三轴磁强计的输出值[4]。传感器输出的计算值和理想值如图 3 所示。

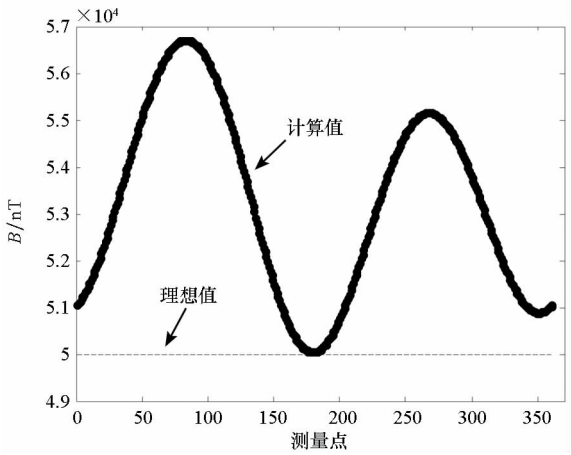
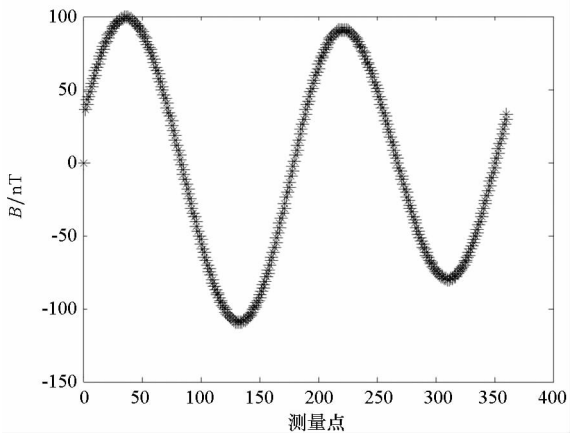


图3 传感器输出的计算值和理想值

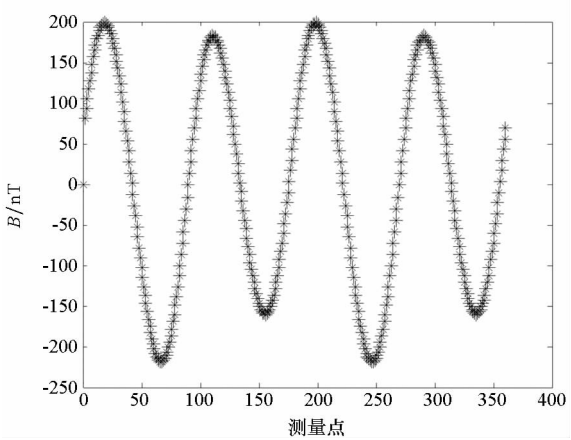
Fig. 3 Calculated value and ideal value of sensor output

由图3可以看到,传感器的计算输出值范围为50 030 ~ 56 660 nT,与理想值 $B = 50\ 000$ nT 相比,误差范围为 30 ~ 6660 nT。传感器分别晃动1°,2°,5°时,传感器的误差范围如图4所示。



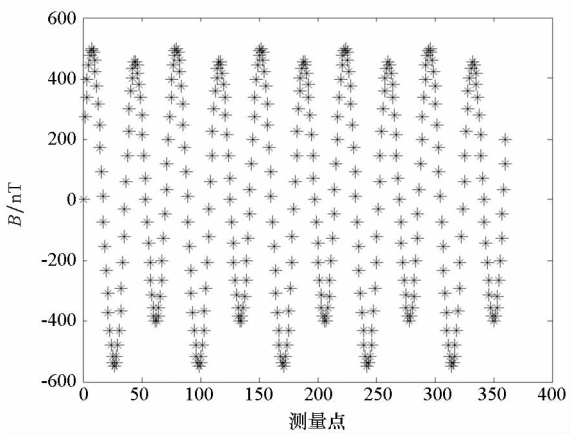
(a) 晃动1°传感器的误差范围

(a) Sensor error range of shaking 1°



(b) 晃动2°传感器的误差范围

(b) Sensor error range of shaking 2°



(c) 晃动5°传感器的误差范围

(c) Sensor error range of shaking 5°

图4 分别晃动1°,2°,5°传感器的误差范围

Fig. 4 Sensor error range of shaking 1 °, 2 °, 5 °

图4(a)表示传感器按照1°间隔转动时,即传感器晃动范围为1°以内时的晃动误差,其产生的误差范围可以用相邻两个测量的差值表示即可,可以看出其产生的误差可达109.5 nT。

由图4(b)可以看出,当传感器晃动范围为2°以内时,其产生的误差可达219 nT。在图4(c)中,当传感器晃动范围为5°以内时,其产生的误差为546.9 nT。

2.2 校正后传感器晃动幅度对误差范围的影响

由在三轴非正交、灵敏度误差以及零点偏移误差影响下,传感器的输出表达式(4)可以推出校正模型如式(6)所示。

$$\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_x & \beta/k_y & (\gamma - \alpha \cdot \beta)/k_z \\ 0 & 1/k_y & \alpha/k_z \\ 0 & 0 & 1/k_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Y_x - Q_x \\ Y_y - Q_y \\ Y_z - Q_z \end{pmatrix} \tag{6}$$

根据式(6)对传感器实际测量值进行补偿,再通过非线性曲线拟合估计参数,代入校正模型[5-6],便可分析晃动对传感器输出的影响。

三轴磁强计的零偏误差可以用零偏标定装置测量,即可得 $Q_x = 147$ nT、$Q_y = 99.7$ nT、$Q_z = 119.7$ nT。通过非线性曲线拟合估计非正交误差参数以及灵敏度参数。将实验仿真中的输入输出作为拟合对象,传感器的拟合结果如表1所示,参数估计值与实际值基本一致。

将参数估计的结果带入传感器的校正模型。得到校正后的输出值[7]。校正前后和理想值如图5所示。

表 1　参数的给定值和估计值

Tab. 1　Given values and estimates of the parameters

参数	给定值	估计值
α	0.023 562(1.35°)	0.023 56
β	0.035 779(2.05°)	0.035 78
γ	0.018 675(1.07°)	0.018 68
K_x	0.912	0.912
K_y	1.122	1.122
K_z	1.109	1.109 01
Q_x	147	147
Q_y	99.7	99.7
Q_z	119.7	119.5

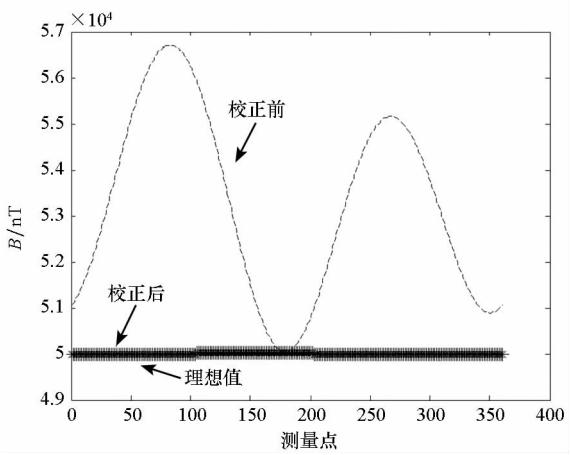


图 5　校正后和校正前磁场比较

Fig. 5　Comparison of magnetic post-calibration and pre-calibration

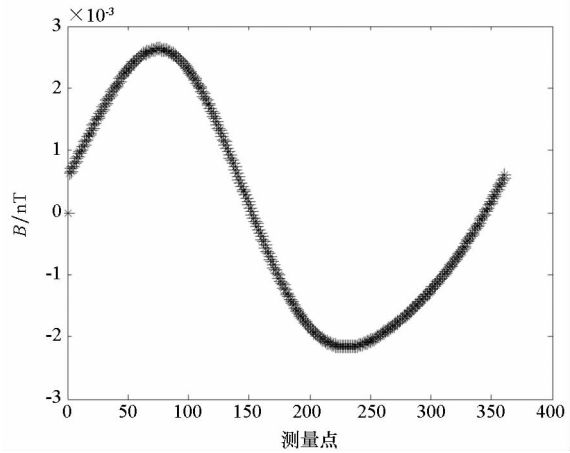
由图 5 可以看到,校正前传感器的计算输出值范围为 50 030 ~ 56 660 nT,与理想值 B = 50 000 nT相比,误差可达 6660 nT。而校正后数值与理想值基本重合,误差范围在 0.3 nT 以内。

假设传感器分别按照间隔 1°、2°、5° 晃动[8-9]。计算晃动误差,其产生的误差范围可以用相邻两个测量值之差值表示,如图 6 所示。

由图 6(a)可以看到,当传感器按照 1°间隔转动时,即传感器晃动范围为 1°以内,其产生的误差在 0.003 nT 以内,误差很小,可以忽略。由图 6(b)可知,当传感器晃动范围为 2°以内,其产生的误差范围为 0.006 nT 以内,误差很小,可以忽略。由图 6(c)可以看到,当传感器晃动范围为 5°以内,其产生的误差在 0.015 nT 以内,误差依旧很小。以上分析可知,校正效果很理想,大大减小了晃动对输出的影响。

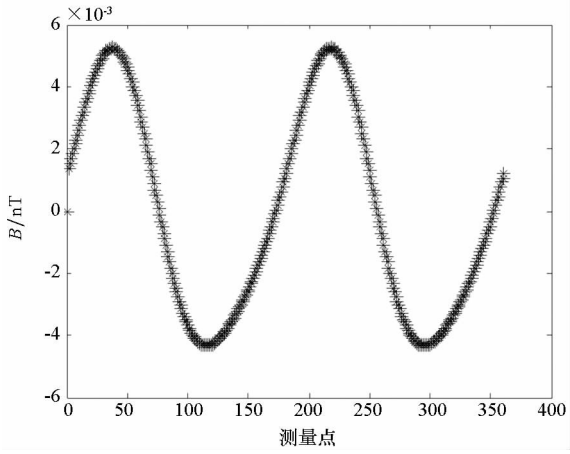
2.3　校正后传感器动态晃动对误差范围的影响

仿真中,假设地磁场在 xoy 上的投影与传感器



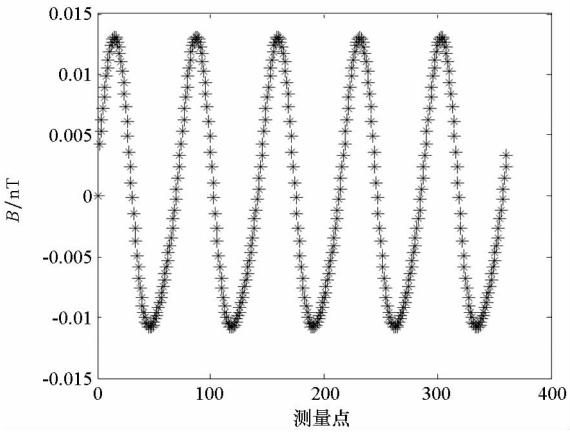
(a) 校正后晃动 1°传感器的误差

(a) Sensor error of shaking 1° after calibration



(b) 校正后晃动 2°传感器的误差

(b) Sensor error of shaking 2° after calibration



(c) 校正后晃动 5°传感器的误差

(c) Sensor error of shaking 5° after calibration

图 6　校正后分别晃动 1°,2°,5° 传感器的误差

Fig. 6　Sensor error of shaking 1°,2°,5° after calibration

的 x 轴夹角初始角度依旧为 1°(初始相位角不同所测数值不同,但是都可以反映传感器的校正效果),使传感器在 1° ~2°之间来回动态晃动,得到校

正前与校正后的输出值[10],如图 7 和图 8 所示。

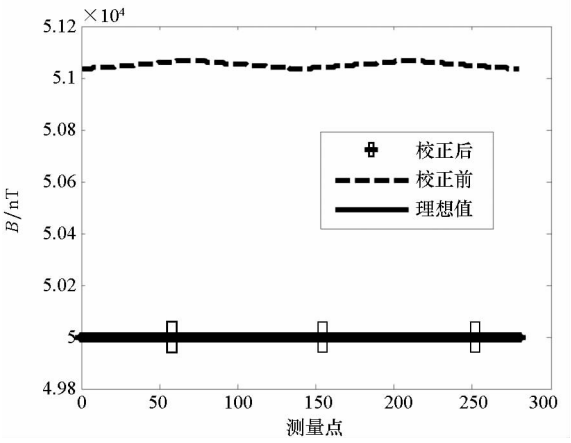


图 7 校正后和校正前磁场比较

Fig. 7 Comparison of magnetic post-calibration and pre-calibration

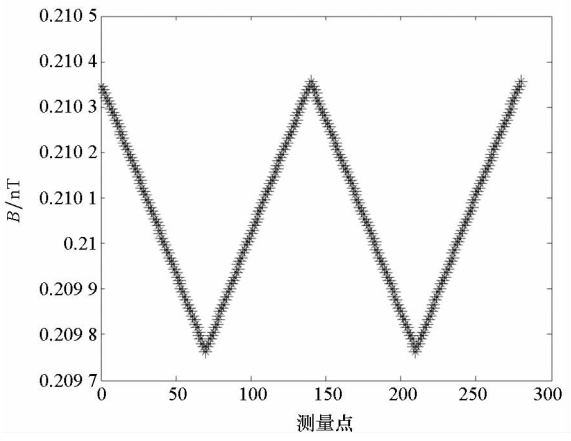


图 8 校正后传感器 1°范围内动态晃动输出误差

Fig. 8 Sensor error of dynamic shaking within the scope of 1°after calibration

由图 7、图 8 可以看到,校正前传感器的计算输出值范围为 51 030 ~ 51 070 nT,与理想值 B = 50 000 nT相比,误差可达 1070 nT。而校正后数值与理想值基本重合,误差范围在 0.3 nT 以内。此校正方法对在一定角度内动态晃动的校正同样有效。

3 结论

本文主要对三轴磁强计进行了校正,分析比较了校正前后晃动对磁强计产生的误差影响,校正后的误差降低到 0.3 nT,大大减小了晃动对传感器造成的误差影响。由于环境噪声等其他因素影响,在今后的研究中,可以通过实测试验,进一步对输出进行补偿。该方法简单,可靠性高,大大减小了三轴磁强计的输出误差,在轴频检测、航空测磁、物探等方面都有广阔的应用前景。

参考文献(References)

[1] Wu P L, Zhang Q Y, Chen L Z, et al. Study of calibration of three-axis fluxgate magnetometers on unmanned helicopter[C]// Proceedings of International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2017.

[2] 庞鸿锋, 潘孟春, 王伟, 等. 基于高斯牛顿迭代算法的三轴磁强计校正[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(7): 67 - 72.
PANG Hongfeng, PAN Mengchun, WANG Wei, et al. Error calibration of three axis magnetometer based on Gauss-Newton iteration algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(7): 67 - 72. (in Chinese)

[3] 黄学功, 王炅. 地磁信号检测系统误差分析与补偿方法研究[J]. 兵工学报, 2011, 32(1): 33 - 36.
HUANG Xuegong, WANG Jiong. Error analysis and compensation methods for geomagnetic signal detection system[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(1): 33 - 36. (in Chinese)

[4] 庞鸿锋, 潘孟春, 陈棣湘, 等. 基于无迹卡尔曼滤波和设备的三轴磁强计校正[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(8): 1800 - 1805.
PANG Hongfeng, PAN Mengchun, CHEN Dixiang, et al. Error calibration of three axis magnetometer based on UKF and equipment [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(8): 1800 - 1805. (in Chinese)

[5] 闫辉, 肖昌汉, 张朝阳. 三分量磁通门传感器水平修正方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2006, 20(6): 90 - 93.
YAN Hui, XIAO Changhan, ZHANG Zhaoyang. Horizontal calibration to triaxial fluxgate magnetometer [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2006, 20(6): 90 - 93. (in Chinese)

[6] 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)

[7] 林春生, 周建军, 杨振宇. 一种基于总强度监测的三轴线圈磁场发生器精确校准方法[J]. 海军工程大学学报, 2013, 25(5): 1 - 5, 10.
LIN Chunsheng, ZHOU Jianjun, YANG Zhenyu. An accurate method of calibrating three-axis-coil magnetic field generator by monitoring magnetic field intensity [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2013, 25(5): 1 - 5, 10. (in Chinese)

[8] 毛伟, 林春生, 庞学亮. 基于三轴磁强计的姿态控制设计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(3): 544 - 547.
MAO Wei, LIN Chunsheng, PANG Xueliang. Design of attitude control based on the three-axis magnetometer [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(3): 544 - 547. (in Chinese)

[9] 高翔, 严胜刚, 李斌. 基于最小二乘的磁通门梯度仪转向差校正方法[J]. 西北工业大学学报, 2016, 34(5): 837 - 842.
GAO Xiang, YAN Shenggang, LI Bin. Error calibration method for magnetic gradiometer base on least square[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2016, 34(5): 837 - 842. (in Chinese)

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