

文章编号 1004-924X(2017)07-1919-08

十字形磁梯度张量系统的误差校正

迟 铖*, 吕俊伟, 黄婧丽

(海军航空工程学院 控制工程系, 山东 烟台 264001)

摘要:针对十字形磁梯度张量系统中的单磁力仪误差(三轴灵敏度偏差、非正交误差和零点漂移误差)以及磁力仪之间存在的不对正误差,提出了十字形磁梯度张量系统的误差校正方法。首先,建立单磁力仪误差模型,采用基于椭球约束的最小二乘拟合算法对磁力仪的测量数据进行拟合从而得到椭球拟合参数;然后,接着利用 Cholesky 分解得到单磁力仪误差校正矩阵;最后在单磁力仪误差校正的基础上,利用正交 Procrustes 方法对不同磁力仪间的测量数据进行拟合从而得到磁力仪间的不对正误差校正矩阵。对提出的方法进行仿真与实测实验验证,实验结果表明:经过校正,磁梯度张量各分量的最大波动量由 10 049 nT/m 降到 52 nT/m。提出的校正方法可以基本消除十字形磁梯度张量系统的误差,提高测量结果的准确度,且方法操作简单,不需要高精度的三轴无磁转台等设备,具有较高的实用价值。

关键词:磁场测量;椭球拟合;误差校正;磁梯度张量

中图分类号:U666.11;TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172507.1919

Error calibration of cross magnetic gradiometer

CHI Cheng*, LÜ Jun-wei, HUANG Jing-li

(Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University,
Yantai 264001, China)

Corresponding author, E-mail:cheng.chihhu@163.com

Abstract: For the vector magnetometer errors (scale factors, non-orthogonal error, bias) and misalignment error of the cross magnetic gradiometer, an error calibration method was proposed in this paper. Firstly, an error calibration model of the vector magnetometer errors was established, ellipsoid fitting parameters are calculated by the least square algorithm under ellipsoid restriction for fitting the measurement data to an ellipsoid. Then the Cholesky factorization was used to calculate the error calibration matrix of the vector magnetometer errors, and then the misalignment error calibration matrix could be solved by the orthogonal Procrustes method. Finally, simulations and experiments were carried out for verification of the proposed error calibration method. The experiment result shows: after calibration, the maximum fluctuation quantity of all components of the magnetic gradient tensor reduces from 10 049 nT/m to 52 nT/m. The proposed error calibration method can effectively calibrate the cross magnetic gradiometer, and the cross magnetic gradiometer can be calibrated without using high precision tri-axial non-magnetic platform, the proposed method has high

收稿日期:2017-01-19;修订日期:2017-03-06.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2015AA0922)

value for practical application.

Key words: magnetic field measurement; ellipsoid fitting; error calibration; magnetic gradient tensor

1 引言

磁通门磁力仪^[1-3]作为一种低功耗、高精度且廉价的磁场测量仪器,广泛应用于磁性目标探测^[4-5]和地磁导航^[6]等领域。随着磁梯度张量探测技术的发展,基于磁通门磁力仪的磁梯度张量系统^[7]得到了深入的研究,由于受限于磁通门传感器的制造工艺以及系统的机械安装误差等因素,磁梯度张量系统中的单个磁通门磁力仪存在三轴非正交、三轴灵敏度偏差和零点漂移等误差,同时磁力仪之间还存在不对正误差,严重影响了磁梯度张量系统的测量精度。

针对磁通门磁力仪误差校正的研究总体上可以分为矢量校正与标量校正两大类。矢量校正正是利用 3D 亥姆霍兹线圈产生任意强度的外加磁场,然后利用高精度的三轴无磁转台对磁力仪进行校正,该校正过程操作复杂,且需要价格昂贵的校正仪器^[8-9];而标量校正^[10-14]通常是 将磁力仪放置于匀强磁场中,通过改变磁力仪的姿态从而得到多组测量数据来计算校正参数,因其需要的实验条件简单,故而更具实用性。基于标量校正的磁梯度张量系统误差校正方法通常分为两步,首先进行单磁力仪的误差校正,接着进行磁力仪间的不对正误差校正。文献^[10-13]对单磁力仪误差模型进行了简化,并提出了相应的校正算法,但是简化模型会影响校正的精度。文献^[14]提出了一种线性校正方法,但是需要对单磁力仪误差模型中的误差参数进行两次非线性变换,计算过程较复杂。文献^[15]融合了各个磁力仪的误差系数后提出了系统误差综合校正模型,并利用优化算法对校正参数进行计算,但是该方法存在计算量大且容易陷入局部最优解的问题。

针对上述问题,通过对十字形磁梯度张量系统的单磁力仪误差及不对正误差的研究,提出了十字形磁梯度张量系统的误差校正方法。该方法首先采用基于椭球约束的最小二乘拟合算法对单磁力仪误差进行校正;然后利用正交

Procrustes 方法对磁力仪间的不对正误差进行校正;最后分别设计了仿真与实测实验对本文所提出的误差校正方法进行验证。实验结果表明本文提出的误差校正方法可以基本消除十字形磁梯度张量系统的误差,实现对十字形磁梯度张量系统的误差校正。

2 十字形磁梯度张量系统及其误差

2.1 十字形磁梯度张量系统

磁梯度张量系统可分为三角形、十字形、正方形和正六面体等多种结构形式,文献^[16]对不同结构形式的磁梯度张量系统进行仿真比较得到十字形磁梯度张量系统的测量误差最小、结构最优,因此本文设计了十字形磁梯度张量系统,并对其 进行误差校正。

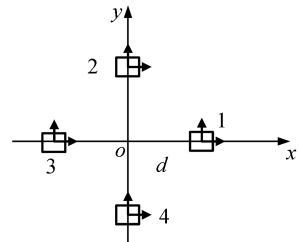


图 1 十字形磁梯度张量系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of cross magnetic gradiometer

如图 1 所示,该系统由四个磁通门磁力仪组成。根据差分方程,通过不同磁力仪的测量值可以求得中心点处的磁梯度张量值:

$$\mathbf{G} = \frac{1}{d} \begin{bmatrix} B_{1x} - B_{3x} & B_{2x} - B_{4x} & B_{1z} - B_{3z} \\ B_{1y} - B_{3y} & B_{2y} - B_{4y} & B_{2z} - B_{4z} \\ B_{1z} - B_{3z} & B_{2z} - B_{4z} & B_{4y} - B_{2y} + B_{3x} - B_{1x} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: B_{1x} 代表标号为 1 的磁力仪测量的 x 轴分量, d 为系统的基线,即同一坐标轴方向上的两个磁力仪之间的距离。由于单磁力仪误差以及磁力仪之间的不对正误差会导致测量的磁场三分量出现偏差,从而影响磁梯度张量的测量值,对定位或者进一步的计算带来误差,因此需要研究对磁梯度张量系统的误差进行校正的方法。

2.2 磁梯度张量系统误差模型

2.2.1 单磁力仪误差模型

单个磁通门磁力仪的误差主要包括非正交误差、三轴灵敏度偏差和零点漂移误差等。非正交误差是指磁力仪的三个坐标轴不是两两完全正交的,实际的三轴坐标系与理想的三轴正交坐标系存在着偏差,如图2所示,图中 OX_0 、 OY_0 、 OZ_0 分别为理想三轴正交坐标系的三个坐标轴。 OX 、 OY 、 OZ 分别为实际磁力仪的三个坐标轴。令 OZ 轴与 OZ_0 轴重合, YOZ 平面与 Y_0OZ_0 平面重合,则 OY 轴与 OY_0 轴夹角为 ψ , OX 轴与 X_0OY_0 平面的夹角为 θ , OX 轴在 X_0OY_0 平面的投影与 OX_0 轴的夹角为 φ 。

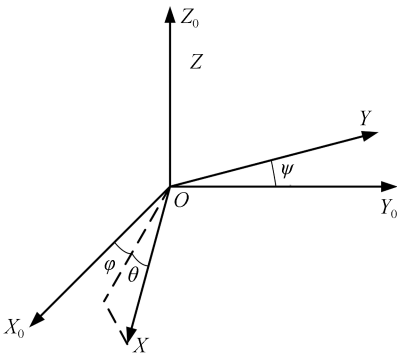


图2 单磁力仪非正交误差示意图

Fig. 2 Schematic diagram of non-orthogonal error

矢量磁力仪的三轴灵敏度不同会导致磁力仪三轴间的灵敏度偏差,假设矢量磁力仪的三个轴 OX 、 OY 、 OZ 的灵敏度分别为 k_x 、 k_y 、 k_z ,假设零点漂移误差为 $\mathbf{b} = [b_x, b_y, b_z]^T$ 。综合考虑单磁力仪非正交误差、三轴灵敏度偏差和零点漂移误差,建立单磁力仪误差模型如式(2):

$$\mathbf{B}_m = \mathbf{S}\mathbf{C}_{\text{NO}}\mathbf{B} + \mathbf{b} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (2)$$

其中: \mathbf{B} 为磁场的实际值, \mathbf{B}_m 为磁力仪的测量值,

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} \text{为三轴灵敏度偏差参数矩阵,}$$

$$\mathbf{C}_{\text{NO}} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi & \cos \theta \sin \varphi & \sin \theta \\ 0 & \cos \psi & \sin \psi \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{为非正交}$$

误差参数矩阵, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为磁力仪的测量噪声。

2.2.2 磁力仪间不对正误差模型

设图1中1号磁力仪为参考磁力仪,参考磁

力仪的理想正交坐标系为 $OX_1Y_1Z_1$,假设 i 号磁力仪的理想正交坐标系为 $OX_iY_iZ_i$,则将参考磁力仪的坐标系按照如下方式旋转得到 i 号磁力仪的坐标系,首先绕 Z_1 轴正方向旋转 α 角得到坐标系 $OX'Y'Z'$,接着绕 X' 轴正方向旋转 β 角得到坐标系 $OX''Y''Z''$,最后绕 Y'' 轴正方向旋转 γ 角得到坐标系 $OX_iY_iZ_i$ 。如图3所示, α 、 β 、 γ 分别为不对正误差角。

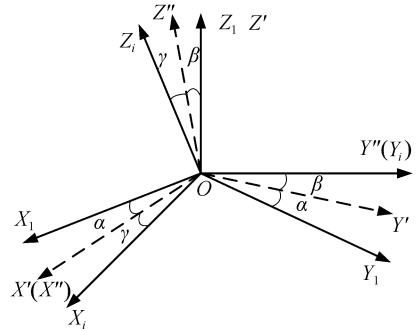


图3 不对正误差角示意图

Fig. 3 Schematic diagram of misalignment angle

参考磁力仪的测量值 $\mathbf{B}_1 = [B_{1x}, B_{1y}, B_{1z}]^T$, i 号磁力仪的测量值 $\mathbf{B}_i = [B_{ix}, B_{iy}, B_{iz}]^T$,则磁力仪之间的不对正误差模型如式(3):

$$\mathbf{B}_i = \mathbf{R}_1\mathbf{R}_2\mathbf{R}_3\mathbf{B}_1, \quad (3)$$

$$\text{其中, } \mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix}, \mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_3 = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{均为坐标转换矩阵。}$$

3 磁梯度张量系统的误差校正方法

3.1 单磁力仪误差校正方法

相对于其它的误差,测量噪声 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 可以近似忽略不计,因此单磁力仪误差模型表达式(2)可以表示为:

$$\mathbf{B}_m = \mathbf{C}\mathbf{B} + \mathbf{b}, \quad (4)$$

其中 $\mathbf{C} = \mathbf{S}\mathbf{C}_{\text{NO}}$ 为误差参数矩阵,单磁力仪误差校正的实质是由磁场的测量值 \mathbf{B}_m 求取磁场的实际值 \mathbf{B} 的过程。对式(4)进行变形得到磁场的实际值与测量值关系如式(5):

$$\mathbf{B} = \mathbf{C}^{-1}(\mathbf{B}_m - \mathbf{b}). \quad (5)$$

由式(5)可知,只要求得单磁力仪误差校正矩阵 C^{-1} 与 b 即可实现对单磁力仪误差的校正。将磁力仪放置于匀强磁场中,旋转磁力仪得到不同姿态下的测量数据满足关系如式(6):

$$B^T B = (B_m - b)^T (C^{-1})^T C^{-1} (B_m - b). \quad (6)$$

令 $A = (C^{-1})^T C^{-1}$, 则式(6)变为:

$$B_m^T A B_m - 2b^T A B_m + b^T A b - B^T B = 0. \quad (7)$$

由式(7)可知磁场实际值 B 的空间分布为一个球面,而磁场测量值 B_m 的空间分布为一个椭球面,将式(7)展开可以得到椭球面的一般方程如式(8):

$$ax^2 + by^2 + cz^2 + 2fyz + 2gxz + 2hxy + 2px + 2qy + 2rz + d = 0, \quad (8)$$

其中 $[x, y, z]^T$ 分别为磁力仪测量的三个分量。将式(8)两边同时除以参数 p 可得:

$$\frac{a}{p}x^2 + \frac{b}{p}y^2 + \frac{c}{p}z^2 + 2\frac{f}{p}yz + 2\frac{g}{p}xz + 2\frac{h}{p}xy + 2\frac{q}{p}y + 2\frac{r}{p}z + \frac{d}{p} = -2x. \quad (9)$$

设有 N 组测量数据 $\{[x_i, y_i, z_i]^T\}_{i=1}^N$, 令 $X_i = [x_i^2, y_i^2, z_i^2, 2y_i z_i, 2x_i z_i, 2x_i y_i, 2y_i, 2z_i, 1]^T$, 参数矩阵 $P = \frac{1}{p}[a, b, c, f, g, h, q, r, d]^T$, 可以得到关于椭球参数的线性方程组:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix} P = [-2x_1 \cdots -2x_N]^T. \quad (10)$$

通过式(10)可以求得 P 的最小二乘解。式(7)中的 A, b 与式(8)中椭球参数的关系如下所示:

$$A = \begin{bmatrix} a & h & g \\ h & b & f \\ g & f & c \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$b = -A^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$b^T A b - B^T B = d. \quad (13)$$

将匀强磁场 B 的值带入到式(13),联立式(11)与式(12),可以求得 A, b 的值。矩阵 A 为对称正定矩阵,本文对矩阵 A 进行 Cholesky 分解得到上三角矩阵 C^{-1} 使得 $(C^{-1})^T C^{-1} = A$, 通过 C^{-1} 与 b 利用式(5)可以实现单磁力仪的校正。

3.2 磁力仪间不对正误差校正方法

由式(3)可知,不对正误差校正问题即是两个

正交坐标系间转换矩阵的求解问题,本文采用正交 Procrustes 方法^[17]计算不对正误差校正矩阵。设十字形磁梯度张量系统在匀强磁场中通过改变姿态得到 $N(N \geq 3)$ 组测量数据,测量数据首先通过式(5)进行单磁力仪误差校正,设 i 号磁力仪经过单磁力仪误差校正之后的测量矩阵为 $M_i = [B_{i1} \cdots B_{iN}]$, 式中 $B_{iN} = [B_{iNx}, B_{iNy}, B_{iNz}]^T$ 表示 i 号磁力仪第 N 次的测量值,参考磁力仪的测量矩阵 $M_1 = [B_{11} \cdots B_{1N}]$, 假定 $M_1 M_i^T$ 非奇异,对 $M_1 M_i^T$ 进行奇异值分解得到 $M_1 M_i^T = U \Sigma V^T$, 则将 i 号磁力仪输出值转换到参考磁力仪坐标系下的输出值的不对正误差校正矩阵需要满足最小二乘表达式如式(14):

$$\min_{R \in \text{正交矩阵}} \sum_{j=1}^N \|B_{1j} - R B_{ij}\|^2. \quad (14)$$

满足上述方程的最优解为 $R = UV^T$ 。通过 R 可将 i 号磁力仪输出值转换到参考磁力仪坐标系下的输出值,从而实现不对正误差的校正。

4 仿真与实测实验

4.1 仿真实验

为验证所提出误差校正方法的有效性设计了仿真实验,将十字形磁梯度张量系统放置于地磁

表 1 磁力仪误差参数

Tab. 1 Error parameters of magnetometer

误差参数	1号磁力仪	2号磁力仪	3号磁力仪	4号磁力仪
k_x	1.013	1.012	1.019	1.015
k_y	0.991	1.015	1.011	1.008
k_z	1.007	0.986	0.982	1.021
ϕ	0.017	0.013	-0.018	-0.016
φ	0.024	0.019	0.025	0.018
θ	-0.021	0.015	0.012	-0.028
b_x	25	-54	-16	45
b_y	85	31	-29	21
b_z	-32	19	55	-37
α	0	-0.023	0.021	-0.038
β	0	0.025	-0.026	-0.028
γ	0	0.028	0.031	0.034

场中,磁力仪的精度为 1 nT,系统基线长度为 0.5 m,设定地磁场的总场强度为 50 000 nT,磁偏角为 -7° ,磁倾角为 55° ,随机改变十字形磁梯度张量系统的姿态,测量 $N=200$ 组数据。十字形磁梯度张量系统的各个磁力仪的误差参数如表 1 所示。

表 1 中不对正误差角与非正交误差角的单位为 rad,零点漂移误差的单位为 nT,灵敏度无量纲。仿真过程中在磁力仪的每一个测量轴上叠加相互独立的高斯白噪声,高斯白噪声的方差为 9 nT^2 ,均值为 0 nT 。

利用所提出的单磁力仪误差校正方法和磁力仪间的不对正误差校正方法,计算得到的误差校正矩阵如表 2 所示,图 4 和图 5(彩图见期刊电子版)分别为磁场总场强度和磁梯度张量各分量误差校正前后对比图。由图 4 可知,未校正之前的磁场总场测量值波动较大,波动量最

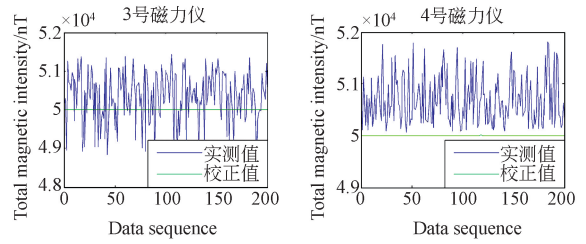


图 4 磁场总场强度校正前后对比图

Fig. 4 Comparison of total magnetic intensity before and after calibration

大可达到 $2\ 600 \text{ nT}$,经过校正之后,磁场总场校正值稳定在 $50\ 000 \text{ nT}$,上下波动在 10 nT 之内。由磁梯度张量的特性可知,在匀强磁场中,磁梯度张量各分量应该为 0 nT/m ,由图 5 可得,磁梯度张量各分量的测量值的波动量最大可以达到 $16\ 000 \text{ nT/m}$,由于磁力仪之间存在不对正误差,单磁力仪误差校正之后的磁梯度张量各分量仍存在较大的误差,经过不对正误差校正之后,磁梯度张量的各分量稳定在 0 nT/m 左右,波动量在 $\pm 30 \text{ nT/m}$ 之间。通过仿真实验证明提出的方法可以有效地校正单磁力仪误差以及不对正误差,实现十字形磁梯度张量系统的误差校正,下面利用提出的校正方法对实际的十字形磁梯度张量系统进行校正。

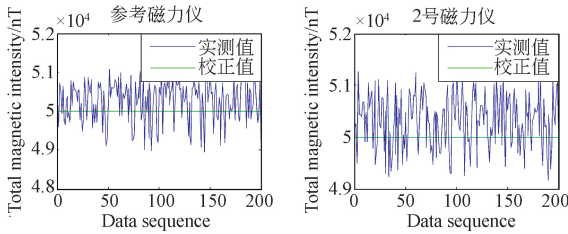


表 2 误差校正矩阵

Tab. 2 Error calibration matrixes

误差校正矩阵	1号磁力仪	2号磁力仪	3号磁力仪	4号磁力仪
C^{-1}	$\begin{bmatrix} 0.9877 & -0.0212 & 0.0213 \\ 0 & 1.0092 & -0.0169 \\ 0 & 0 & 0.9931 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.9884 & -0.0187 & -0.015 \\ 0 & 0.9853 & -0.0131 \\ 0 & 0 & 1.014 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.9817 & -0.0247 & -0.0127 \\ 0 & 0.9893 & 0.0183 \\ 0 & 0 & 1.0183 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.9858 & -0.0179 & 0.0272 \\ 0 & 0.9922 & 0.0157 \\ 0 & 0 & 0.9794 \end{bmatrix}$
b	$\begin{bmatrix} 26.107 \\ 84.437 \\ -32.4425 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -54.1996 \\ 30.7201 \\ 19.1364 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -16.9111 \\ -29.4376 \\ 55.1021 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 45.7411 \\ 21.2188 \\ -37.1252 \end{bmatrix}$
R	$\begin{bmatrix} 0.9994 & 0.023 & 0.0274 \\ -0.0223 & 0.9994 & -0.0257 \\ -0.028 & 0.025 & 0.9993 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.9993 & -0.021 & 0.0304 \\ 0.0202 & 0.9994 & 0.0266 \\ -0.031 & -0.026 & 0.9992 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.9987 & 0.038 & 0.035 \\ -0.0389 & 0.9989 & 0.0266 \\ -0.034 & -0.028 & 0.999 \end{bmatrix}$	

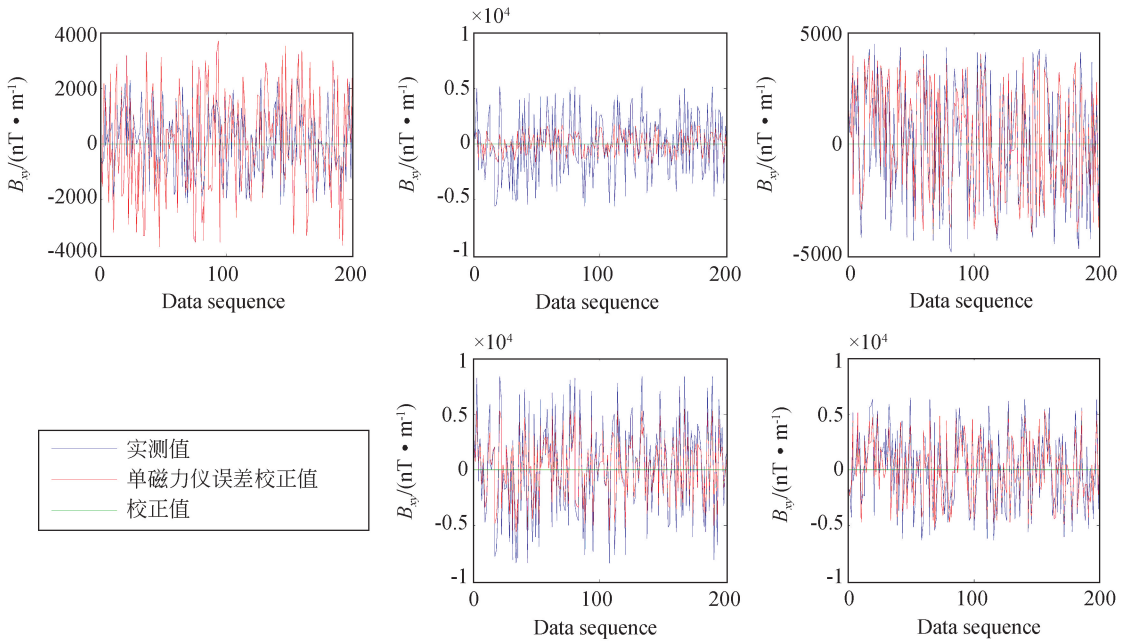


图 5 磁梯度张量各分量校正前后对比图

Fig. 5 Comparison of magnetic gradient tensor components before and after calibration

4.2 实测实验

实测实验选择在外界磁场干扰较小的烟台黑乔山上进行,实验中用于误差校正的十字形磁梯度张量系统如图 6 所示。



图 6 十字形磁梯度张量系统

Fig. 6 Cross magnetic gradiometer

采用分辨率为 0.1 nT、精度为 1 nT 的质子磁力仪检测周边环境的磁场,得到实际的地磁场总场均值为 52 193 nT。改变十字形磁梯度张量系统的姿态,测量 30 组不同姿态下的磁场数据,

利用提出的校正方法对十字形磁梯度张量系统误差进行校正。图 7 与图 8 分别为地磁场总场测量数据与磁梯度张量各分量测量数据校正前后对比图。

分析校正结果可得,未校正之前的地磁场总场测量值波动较大,波动量最大可达到 3 988 nT,经过误差校正之后,最大波动量为 24 nT。由图 8 可得,未校正之前的磁梯度张量各分量的波动量

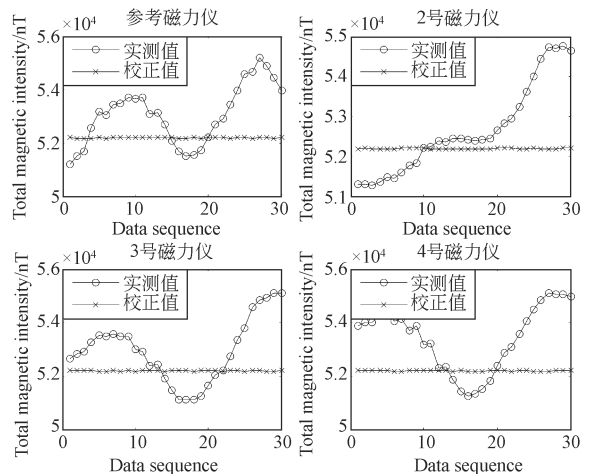


图 7 地磁场总场测量值校正前后对比图

Fig. 7 Comparison of total magnetic intensity before and after calibration

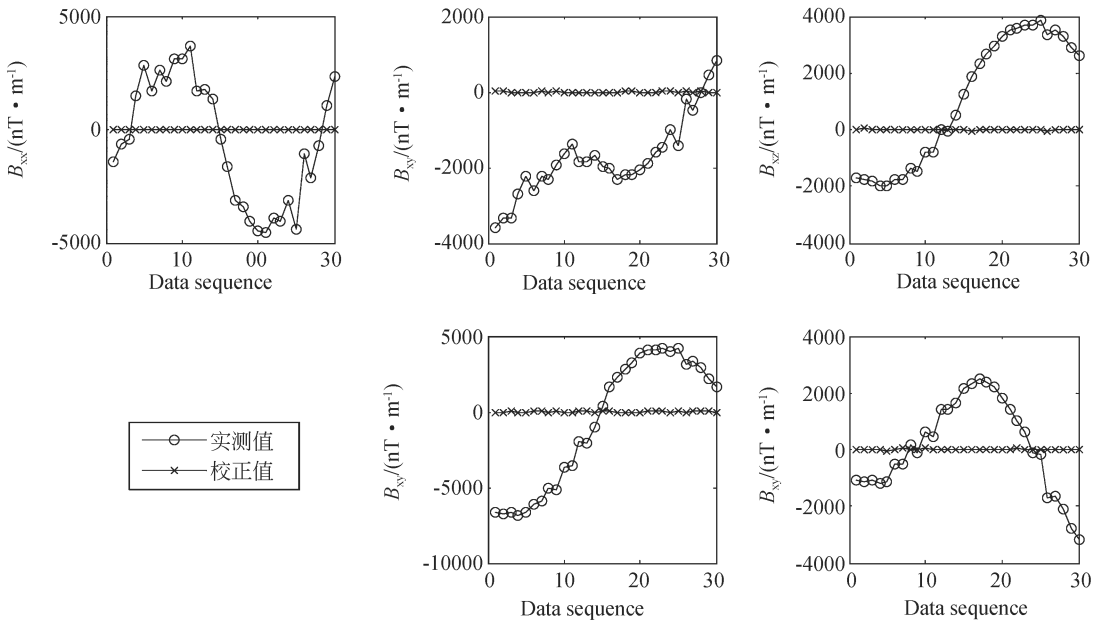


图 8 磁梯度张量各分量校正前后对比图

Fig. 8 Comparison of magnetic gradient tensor components before and after calibration

最大可达到 10049 nT/m, 经过误差校正之后, 各分量的最大波动量为 52 nT/m. 校正前与校正后的磁梯度张量各分量的均方根误差^[14]如表 3 所示。

表 3 磁梯度张量各分量的均方根误差校正前后对比表
Tab. 3 RMSE of magnetic gradient tensor components before and after calibration (nT · m⁻¹)

分量	B_{xx}	B_{xy}	B_{xz}	B_{yy}	B_{yz}
校正前	2 716.1	2 020.4	2 467.5	4 277.7	1 590.2
校正后	15.4	18.1	17.3	16.4	17.3

由表 3 可知, 经过误差校正之后, 磁梯度张量各分量的均方根误差明显减小, 实验证明, 提出的十字形磁梯度张量系统的误差校正方法具有较好的校正效果。

5 结 论

针对影响十字形磁梯度张量系统测量精度的单磁力仪误差(三轴灵敏度偏差、非正交误差、零点漂移误差)以及磁力仪之间存在的不对正误差, 提出了十字形磁梯度张量系统的误差校正方法, 仿真与实测实验分别验证了所提出的校正方法的有效性。实测实验结果表明: 经过校正之后, 地磁场总场测量值的最大波动量由 3 988 nT 降到 24 nT, 磁梯度张量各分量的最大波动量由 10 049 nT/m 降到 52 nT/m, 磁梯度张量各分量的均方根误差最大值由 4 277.7 nT/m 降到 18.1 nT/m. 由实验结果可得, 提出的误差校正方法可以基本消除十字形磁梯度张量系统的误差, 实现对十字形磁梯度张量系统的误差校正, 且该方法校正过程中不需要高精度的三轴无磁转台等校正设备, 校正过程简单, 校正精度高, 具有较高的实际应用价值。

参考文献:

[1] PYLVÄNÄINEN T. Automatic and adaptive calibration of 3D field sensors [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2008, 32(4): 575-587.
[2] 龙亮, 钟少龙, 徐静, 等. 微型光纤磁传感器的设

计与制作 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(9): 2294-2302.
LONG L, ZHONG SH L, XU J, et al.. Design and fabrication of micro fiber-optic magnetic sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9): 2294-2302. (in Chinese)
[3] 陈晨, 秦佳男, 张雪, 等. 用于 SERF 原子磁力仪

- 的DFB激光器温度控制系统[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 1205004.
- CHEN CH, QIN J N, ZHANG X, *et al.*. Temperature controller for DFB laser utilized in SERF atomic magnetometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1205004. (in Chinese)
- [4] LEE K M, LI M. Magnetic tensor sensor for gradient-based localization of ferrous object in geomagnetic field[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2016, 52(8): 4002610.
- [5] 吕俊伟, 迟铖, 于振涛, 等. 磁梯度张量不变量的椭圆误差消除方法研究[J]. 物理学报, 2015, 64(19): 0190701.
- LÜ J W, CHI CH, YU ZH T, *et al.*. Research on the asphericity error elimination of the invariant of magnetic gradient tensor [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(19): 0190701. (in Chinese)
- [6] VASCONCELOS J F, ELKAIM G, SILVESTRE C, *et al.*. Geometric approach to strapdown magnetometer calibration in sensor frame [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(2): 1293-1306.
- [7] SUI Y Y, LI G, WANG S L, *et al.*. Compact fluxgate magnetic full-tensor gradiometer with spherical feedback coil [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(1): 014701.
- [8] PANG H F, PAN M C, WAN C B, *et al.*. Integrated compensation of magnetometer array magnetic distortion field and improvement of magnetic object localization [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(9): 5670-5676.
- [9] AUSTER H U, FORNACON K H, GEORGESCU E, *et al.*. Calibration of flux-gate magnetometers using relative motion [J]. *Measurement Science and Technology*, 2002, 13(7): 1124-1131.
- [10] 张光, 张英堂, 尹刚, 等. 基于线性误差模型的磁张量系统校正[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(3): 1012-1016.
- ZHANG G, ZHANG Y T, YIN G, *et al.*. Calibration method of magnetic tensor system based on linear error model [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2015, 45(3): 1012-1016. (in Chinese)
- [11] 黄玉, 郝燕玲. 基于FLANN和最小二乘的磁梯度计误差校正[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(4): 911-917.
- HUANG Y, HAO Y L. Error correction of magnetic field component gradiometer based on FLANN and least-squares [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(4): 911-917. (in Chinese)
- [12] HUANG Y, SUN F, WU L H. Synchronous correction of two three-axis magnetometers using FLANN [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 179: 312-318.
- [13] 高翔, 严胜刚, 李斌. 三轴磁通门磁梯度仪转向差校正方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6): 1226-1232.
- GAO X, YAN SH G, LI B. Study on the steering differential calibration method for magnetic gradiometer base on tri-axis fluxgate [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(6): 1226-1232. (in Chinese)
- [14] YIN G, ZHANG Y T, FAN H B, *et al.*. Linear calibration method of magnetic gradient tensor system [J]. *Measurement*, 2014, 56: 8-18.
- [15] 于振涛, 吕俊伟, 郭宁, 等. 四面体磁梯度张量系统的误差补偿[J]. 光学精密工程, 2014, 22(10): 2683-2690.
- YU ZH T, LÜ J W, GUO N, *et al.*. Error compensation of tetrahedron magnetic gradiometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(10): 2683-2690. (in Chinese)
- [16] 刘丽敏. 磁通门张量的结构设计、误差分析及水下目标探测[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- LIU L M. *Configuration design, error analysis and underwater target detection of fluxgate tensor magnetometer* [D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [17] 曾占魁, 谷蔷薇, 曹喜滨. 基于正交Procrustes分析的航天器单目视觉相对位姿确定方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(S1): 113-118.
- ZENG ZH K, GU Q W, CAO X B. Relative pose monocular vision determination of spacecraft using orthogonal Procrustes analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S1): 113-118. (in Chinese)

作者简介:



迟铖(1989—),男,山东日照人,博士研究生,2011年于河海大学获得学士学位,2013年于海军潜艇学院获得硕士学位,主要从事磁性目标探测及磁干扰消除方面的研究。E-mail: cheng.chihhu@163.com

导师简介:



吕俊伟(1960—),男,山东牟平人,教授,博士生导师,1985年于吉林工业大学获得硕士学位,2003年于法国第戎大学获得博士学位,主要从事目标识别与智能系统、目标探测与跟踪等方面的研究。E-mail: ljwei369@163.com