



## 强噪声下三轴磁力计正交及增益 误差校正及其测量实验

武立华, 黄 玉, 赵恩明, 刘志海

(哈尔滨工程大学 理学院 理学之光科技创新中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:**提出了适用于强测量噪声情况下的三轴磁力计正交及增益误差建模及校正方法,详细推导了磁力计测量误差模型,给出了误差参量辨识及校正算法,仿真证明了在强噪声情况下算法仍具有良好的收敛性,给出了不同信噪比条件下误差校正精度与采样点个数的关系,证实了算法能应用在磁力计测量噪声较强场合,并将其实现地磁场强度测量实验,获得了令人满意的结果.

**关键词:**三轴磁力计;误差校正;辨识;最优估计;水下定位

**中图分类号:**TP273

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-4642(2013)10-0030-06

### 1 引 言

磁力计的三轴非正交及轴间增益不一致是影响磁场测量精度的主要因素之一<sup>[1]</sup>,为提高三轴磁力计的测量精度,人们在误差建模与校正方法上进行了一些有益的尝试. Lassahn 等分析了三轴磁传感器的误差,并分别用激光干涉仪及三轴正交励磁线圈对传感器阵列进行了标定实验<sup>[2]</sup>; Krishan 等提出对 4 个旋转航天器上的磁力计阵列进行在轨标定方法,并进行仿真实验<sup>[3]</sup>. 胡海滨等采用共轭次梯度法对三轴磁传感器的非理想正交误差进行了校正<sup>[4]</sup>;林春生等提出了三轴磁力计的正交变换、灵敏度一致性及消除零点漂移的方法并进行了实验验证<sup>[5]</sup>;吴德会等分别提出基于支持向量回归机和基于函数链接神经网络的三轴磁力计误差校正方法,并用实际地磁场数据进行了验证<sup>[6-7]</sup>. 但这些方法未考虑磁力计测量噪声或采用噪声低的磁力计,而且算法较复杂<sup>[8]</sup>. 近年来,温强等提出了基于误差参量最优估计方法的三轴传感器轴间正交误差及增益偏差校正算法<sup>[8]</sup>,但由于文中误差角  $\beta \rightarrow \pi/2$ ,  $\alpha \rightarrow 0$  和  $\gamma \rightarrow 0$ ,待估计的参量  $a_4 = -k_1 \cot \beta \sin \alpha \sin \gamma$  是二阶小量,使在有噪声情况下辨识角度  $\gamma$  的偏差比其他量大上 1 个量级,而且随着噪声的增加,其辨识偏差越大,磁力计校正效果越差,正如文献[9]中提

到的当  $\sigma > 1\%$  时,坐标系变换误差精度得不到保证. 另外,文献[9]中定义的变换误差指标不是直接反映轴间非正交误差角与轴间增益偏差,不便从仿真结果得出误差校正效果. 为此,我们重新建立三轴磁力计的误差模型,避免出现二阶小量的估计参量,提高了强噪声下的误差校正精度. 为直接表达磁力计误差校正效果,重新定义了指标函数,通过仿真评估算法性能,与文献[9]的结果进行对比. 最后,将校正算法应用于地磁场测量实验.

### 2 三轴磁力计误差模型

如图 1 所示,设磁力计的 3 个非正交轴分别为  $OX'$ ,  $OY'$  和  $OZ'$ ,其输出信号分别为  $B'_X$ ,  $B'_Y$  和  $B'_Z$ . 设与磁力计对应的理想正交系三轴分别为  $OX$ ,  $OY$  和  $OZ$  轴,被测磁场在其上的分量分别为  $B_X$ ,  $B_Y$  和  $B_Z$ . 为误差建模的简洁,不妨使

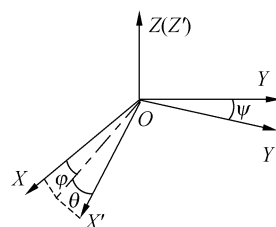


图 1 磁力计轴间非正交示意图

收稿日期:2013-03-21

基金项目:国家自然科学基金(No. 61004130);中国博士后科学基金(No. 2012M511446, No. 2013M530145);中国博士后科学基金(No. 2013T60348);中央高校基础科研业务费资助课题(No. HEUCF2013)

作者简介:武立华(1979—),女,吉林松原人,哈尔滨工程大学理学院讲师,博士,研究方向为地磁定位及磁传感器.

$OZ$  轴与  $OZ'$  轴重合,坐标面  $YOZ$  与  $Y'OZ'$  共面. 设  $OY'$  轴与  $OY$  轴夹角为  $\psi$ ,  $OX'$  轴与  $XOY$  面的夹角为  $\theta$ ,  $OX'$  轴在  $XOY$  面的投影与  $OX$  轴的夹角为  $\varphi$ ,即用  $\theta, \varphi, \psi$  描述磁力计三轴的非正交.

设系数  $k_{XZ}$  和  $k_{YZ}$  分别表示以磁力计的  $Z$  轴增益为标准,磁力计的  $X, Y$  轴的增益偏差. 对各轴增益归一化后,  $X, Y$  和  $Z$  轴的增益分别为  $k'_{XZ} = 1 - k_{XZ}$ ,  $k'_{YZ} = 1 - k_{YZ}$  和 1, 则磁力计的三轴输出分别为

$$\begin{bmatrix} B'_X \\ B'_Y \\ B'_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos \theta \cos \varphi}{k'_{XZ}} & \frac{\cos \theta \sin \varphi}{k'_{XZ}} & \frac{\sin \theta}{k'_{XZ}} \\ 0 & \frac{\cos \psi}{k'_{YZ}} & \frac{\sin \psi}{k'_{YZ}} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_X \\ B_Y \\ B_Z \end{bmatrix}. \quad (1)$$

$$\mathbf{I}^{-1} = \begin{bmatrix} k'_{XZ} \sec \theta \sec \varphi & -k'_{YZ} \tan \varphi \sec \psi & \sec \theta \sec \varphi \sec \psi (\cos \theta \sin \varphi \sin \psi - \sin \theta \cos \psi) \\ 0 & k'_{YZ} \sec \psi & -\tan \psi \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

为简化  $B'$  与  $B$  的关系,避免复杂三角函数计算,令  $q_1 = k'_{XZ} \sec \theta \sec \varphi$ ,  $q_2 = -k'_{YZ} \tan \varphi \sec \psi$ ,  $q_3 = \sec \theta \sec \varphi \sec \psi (\cos \theta \sin \varphi \sin \psi - \sin \theta \cos \psi)$ ,  $q_4 = k'_{YZ} \sec \psi$ ,  $q_5 = -\tan \psi$ . 由于  $\theta, \varphi$  和  $\psi$  都是小角度,且  $k'_{XY}$  和  $k'_{XZ}$  都接近于单位增益,故  $q_2, q_3$  和  $q_5$  均为一阶小量,即矩阵  $\mathbf{I}^{-1}$  中的元素没有二阶小量,因而相比于文献[10],更能精确地辨识矩阵  $\mathbf{I}^{-1}$ ,特别当测量噪声较强时. 由式(4)可得

$$\mathbf{I}^{-1} = \begin{bmatrix} q_1 & q_2 & q_3 \\ 0 & q_4 & q_5 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

由式(3)可知,若能利用  $B'$  求得  $B$ ,再利用  $B$  求磁力计测量轴间非正交与轴间增益偏差关系矩阵  $\mathbf{I}^{-1}$ ,根据  $\mathbf{I}^{-1}$  可由测量数据获得真实磁场,即补偿了磁力计轴间非正交与各轴增益不一致的误差,也实现了磁力计轴间解耦. 另外,由式(5)可知,我们已将轴间非正交误差角  $(\theta, \varphi, \psi)$  与轴间增益偏差  $(k_{XZ}, k_{YZ})$  等误差参数的辨识转化为对  $q_1, q_2, q_3, q_4$  和  $q_5$  的最优估计.

### 3 误差参量辨识及校正方法

为消除或补偿磁力计轴间非正交与各轴增益不一致的误差,可将磁力计实际输出  $B'$  通过校正

由式(1)得

$$B' = \mathbf{I} B, \quad (2)$$

式中,

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} \frac{\cos \theta \cos \varphi}{k'_{XZ}} & \frac{\cos \theta \sin \varphi}{k'_{XZ}} & \frac{\sin \theta}{k'_{XZ}} \\ 0 & \frac{\cos \psi}{k'_{YZ}} & \frac{\sin \psi}{k'_{YZ}} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$B' = [B'_X \ B'_Y \ B'_Z]^T$  为磁力计实测的磁场矢量,  $B = [B_X \ B_Y \ B_Z]^T$  为磁场真实矢量. 由式(2)可得

$$B = \mathbf{I}^{-1} B', \quad (3)$$

模型,如图 2 所示. 若校正模型的传递函数  $g(\cdot)$  恰为  $f(\cdot)$  的逆映射,就能使输出  $\hat{B}$  与待测量  $B$  一致,达到了校正的目的. 这里的  $f(\cdot)$  即为矩阵  $\mathbf{I}$ ,  $g(\cdot)$  为矩阵  $\mathbf{I}$  的逆  $\mathbf{I}^{-1}$ .

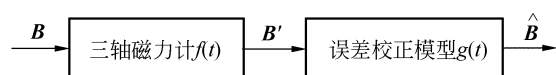


图 2 磁力计误差校正原理示意图

由于地磁场具有稳定性和一定范围内的均匀性,利用不同姿态下地磁场测量数据对磁力计误差参量进行辨识,以此构造误差校正器. 为保证参量辨识与误差校正效果,应使测量数据具有代表性,因此,让磁力计绕三轴各旋转 1 周获取地磁场测量数据. 设磁力计经  $2N$  次测量得到的地磁场向量序列为  $B'^{[1]}, B'^{[2]}, \dots, B'^{[N]}, B'^{[N+1]}, \dots, B'^{[2N]}$ , 将该向量序列任意分成向量数相同的 2 组  $B'_{\text{behind}} = \{B'^{[i]} \mid i = 1, \dots, N\}$  和  $B'_{\text{back}} = \{B'^{[i]} \mid i = 1, \dots, N\}$ . 由于地磁场是恒定的,在不考虑测量误差的情况下,最优的  $q_1, q_2, q_3, q_4$  和  $q_5$  应使经式(3)得到的  $B$  无差别. 即最优参量  $\hat{q}_1, \hat{q}_2, \hat{q}_3, \hat{q}_4$  和  $\hat{q}_5$  应使 2 组测量向量序列  $B'_{\text{behind}}$  和  $B'_{\text{back}}$  中的元素范数差的平方和最小. 于是构造目标函数如

式(6)所示.

$$\phi(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5) =$$

$$\sum_{i=1}^N \left| \left\| \mathbf{I}^{-1} \mathbf{B}_1'^{[i]} \right\|_2^2 - \left\| \mathbf{I}^{-1} \mathbf{B}_2'^{[i]} \right\|_2^2 \right|^2. \quad (6)$$

由多元函数求极值方法,得

$$\begin{bmatrix} \phi'_{q_1} & \phi'_{q_2} & \phi'_{q_3} & \phi'_{q_4} & \phi'_{q_5} \end{bmatrix}^T \Big|_{\hat{q}_1, \hat{q}_2, \hat{q}_3, \hat{q}_4, \hat{q}_5} = 0. \quad (7)$$

式中  $\hat{q}_1, \hat{q}_2, \hat{q}_3, \hat{q}_4$  和  $\hat{q}_5$  为目标函数  $\phi$  最小时所对应的  $q_1, q_2, q_3, q_4$  和  $q_5$ ,  $\phi'_{q_i}$  ( $i=1, \dots, 5$ ) 分别为  $\phi$  对  $q_i$  的偏导数.

由  $q_i$  ( $i=1, \dots, 5$ ) 与待辨识误差参量之间的关系得

$$\begin{bmatrix} \phi'_{k'_{XZ}} \\ \phi'_{k'_{YZ}} \\ \phi'_\theta \\ \phi'_\varphi \\ \phi'_\psi \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \phi'_{q_1} \\ \phi'_{q_2} \\ \phi'_{q_3} \\ \phi'_{q_4} \\ \phi'_{q_5} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

式中,  $\mathbf{A}=[a_{ij}]$  ( $i=1, \dots, 5; j=1, \dots, 5$ ) 为变换矩阵, 其元素分别为:

$$\begin{aligned} a_{11} &= \sec \theta \sec \varphi, a_{12} = 0, \\ a_{13} &= -k'_{XZ} \tan \theta \sec \theta \sec \varphi, \\ a_{14} &= -k'_{XZ} \sec \theta \tan \varphi \sec \varphi, a_{15} = 0; \\ a_{21} &= -\tan \varphi \sec \psi, a_{22} = 0, a_{23} = 0, \end{aligned}$$

$$a_{24} = -k'_{XZ} \sec^2 \varphi \sec \psi, a_{25} = k'_{XZ} \tan \varphi \tan \psi \sec \psi;$$

$$a_{31} = 0, a_{32} = 0, a_{33} = -\sec^2 \theta \sec \varphi,$$

$$a_{34} = \sec^2 \varphi \tan \psi + \tan \theta \tan \varphi \sec \psi, a_{35} = \tan \varphi \sec^2 \psi;$$

$$a_{41} = 0, a_{42} = \sec \psi, a_{43} = 0,$$

$$a_{44} = 0, a_{45} = -k'_{YZ} \tan \psi \sec \psi;$$

$$a_{51} = 0, a_{52} = 0, a_{53} = 0,$$

$$a_{54} = 0, a_{55} = \sec^2 \psi.$$

可以证明, 当  $k'_{XZ}, k'_{YZ}$  在 1 附近变化以及  $\theta, \varphi, \psi$  在 0 附近变化时, 矩阵  $\mathbf{A}$  可逆. 因此, 式(7)与式(9)等价.

$\begin{bmatrix} \phi'_{k'_{XZ}} & \phi'_{k'_{YZ}} & \phi'_\theta & \phi'_\varphi & \phi'_\psi \end{bmatrix}^T \Big|_{\hat{k}'_{XZ}, \hat{k}'_{YZ}, \hat{\theta}, \hat{\varphi}, \hat{\psi}} = 0$ , (9) 式中,  $\hat{k}'_{XZ}, \hat{k}'_{YZ}, \hat{\theta}, \hat{\varphi}$  和  $\hat{\psi}$  分别为参量  $k'_{XZ}, k'_{YZ}, \theta, \varphi$  和  $\psi$  的最优估计值. 这样, 就把对参量  $k'_{XZ}, k'_{YZ}, \theta, \varphi$  和  $\psi$  的估计转化为对参量  $q_1, q_2, q_3, q_4$  和  $q_5$  的估计, 使求解过程得以简化.

设  $\mathbf{B}_1'^{[i]}$  的 3 个分量为  $X_1'^{[i]}, Y_1'^{[i]}$  和  $Z_1'^{[i]}$ ,  $\mathbf{B}_2'^{[i]}$  的 3 个分量为  $X_2'^{[i]}, Y_2'^{[i]}$  和  $Z_2'^{[i]}$ . 令

$$W_{1i} = (X_1'^{[i]})^2 - (X_2'^{[i]})^2,$$

$$W_{2i} = (Y_1'^{[i]})^2 - (Y_2'^{[i]})^2,$$

$$W_{3i} = (Z_1'^{[i]})^2 - (Z_2'^{[i]})^2,$$

$$W_{4i} = 2(X_1'^{[i]} Y_1'^{[i]} - X_2'^{[i]} Y_2'^{[i]}),$$

$$W_{5i} = 2(Y_1'^{[i]} Z_1'^{[i]} - Y_2'^{[i]} Z_2'^{[i]}),$$

$$W_{6i} = 2(X_1'^{[i]} Z_1'^{[i]} - X_2'^{[i]} Z_2'^{[i]}),$$

将式(7)展开得到

$$\phi = \sum_{i=1}^N |W_{1i} q_1^2 + W_{2i} (q_2^2 + q_4^2) + W_{3i} (1 + q_3^2 + q_5^2) + W_{4i} q_1 q_2 + W_{5i} (q_2 q_3 + q_4 q_5) + W_{6i} q_1 q_3|^2, \quad (10)$$

则由式(11)和式(8)得

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N [2W_{1i}^2 q_1^3 + 3W_{1i} W_{4i} q_1^2 q_2 + 3W_{1i} W_{6i} q_1^2 q_3 + (2W_{1i} W_{2i} + W_{4i}^2) q_1 q_2^2 + (2W_{1i} W_{3i} + W_{6i}^2) q_1 q_3^2 + \\ 2W_{1i} W_{2i} q_1 q_4^2 + 2W_{1i} W_{3i} q_1 q_5^2 + 2(W_{1i} W_{5i} + W_{4i} W_{6i}) q_1 q_2 q_3 + 2W_{1i} W_{5i} q_1 q_4 q_5 + 2W_{1i} W_{3i} q_1 + \\ (W_{4i} W_{5i} + W_{2i} W_{6i}) q_2^2 q_3 + (W_{3i} W_{4i} + W_{5i} W_{6i}) q_2 q_3^2 + W_{2i} W_{4i} q_2 q_4^2 + W_{3i} W_{4i} q_2 q_5^2 + \\ W_{4i} W_{5i} q_2 q_4 q_5 + W_{3i} W_{6i} q_3^2 + W_{5i} W_{6i} q_3 q_4 q_5 + W_{3i} W_{6i} q_3 + W_{2i} W_{6i} q_3 q_4^2 + W_{3i} W_{6i} q_3 q_5^2] = 0, \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N [W_{1i} W_{4i} q_1^3 + (2W_{1i} W_{2i} + W_{4i}^2) q_1^2 q_2 + (W_{1i} W_{5i} + W_{4i} W_{6i}) q_1^2 q_3 + 3W_{2i} W_{4i} q_1 q_2^2 + (W_{3i} W_{4i} + W_{5i} W_{6i}) q_1 q_3^2 + \\ W_{2i} W_{4i} q_1 q_4^2 + W_{3i} W_{4i} q_1 q_5^2 + 2(W_{2i} W_{6i} + W_{4i} W_{5i}) q_1 q_2 q_3 + W_{4i} W_{5i} q_1 q_4 q_5 + W_{3i} W_{4i} q_1 + 2W_{2i}^2 q_2^3 + \\ 3W_{2i} W_{5i} q_2^2 q_3 + (2W_{2i} W_{3i} + W_{5i}^2) q_2 q_3^2 + 2W_{2i}^2 q_2 q_4^2 + 2W_{2i} W_{3i} q_2 q_5^2 + 2W_{2i} W_{5i} q_2 q_4 q_5 + \\ W_{3i} W_{5i} q_3^3 + W_{2i} W_{5i} q_3 q_4^2 + W_{3i} W_{5i} q_3 q_5^2 + W_{3i} W_{5i} q_3 + W_{2i}^2 q_3 q_4 q_5] = 0, \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N [W_{1i} W_{6i} q_1^3 + (W_{1i} W_{5i} + W_{4i} W_{6i}) q_1^2 q_2 + (2W_{1i} W_{3i} + W_{6i}^2) q_1^2 q_3 + (W_{2i} W_{6i} + W_{4i} W_{5i}) q_1 q_2^2 + 3W_{3i} W_{6i} q_1 q_3^2 + \\ W_{2i} W_{6i} q_1 q_4^2 + W_{3i} W_{6i} q_1 q_5^2 + 2(W_{3i} W_{4i} + W_{5i} W_{6i}) q_1 q_2 q_3 + W_{5i} W_{6i} q_1 q_4 q_5 + W_{3i} W_{6i} q_1 + W_{2i} W_{5i} q_2^3 + \\ (2W_{2i} W_{3i} + W_{5i}^2) q_2^2 q_3 + 3W_{3i} W_{5i} q_2 q_3^2 + W_{2i} W_{5i} q_2 q_4^2 + W_{3i} W_{5i} q_2 q_5^2 + W_{3i} W_{5i} q_2 q_4 q_5 + W_{3i} W_{5i} q_2 + 2W_{3i}^2 q_3^3 + \end{aligned}$$

$$2W_{2i}W_{3i}q_3q_4^2 + 2W_{3i}W_{5i}q_3q_4q_5 + 2W_{3i}^2q_3q_5^2 + 2W_{3i}^2q_3] = 0, \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^N [2W_{1i}W_{2i}q_1^2q_4 + W_{1i}W_{5i}q_1^2q_5 + 2W_{2i}W_{4i}q_1q_2q_4 + W_{4i}W_{5i}q_1q_2q_5 + 2W_{2i}W_{6i}q_1q_3q_4 + W_{5i}W_{6i}q_1q_3q_5 + 2W_{2i}^2q_2^2q_4 + 2W_{2i}W_{5i}q_2q_3q_4 + W_{2i}W_{5i}q_2^2q_5 + W_{5i}^2q_2q_3q_5 + 2W_{2i}W_{3i}q_2^2q_4 + W_{3i}W_{5i}q_2^2q_5 + 2W_{2i}^2q_4^3 + 3W_{2i}W_{5i}q_4^2q_5 + (2W_{2i}W_{3i} + W_{5i}^2)q_4q_5^2 + 2W_{2i}W_{3i}q_4 + W_{3i}W_{5i}q_5^3 + W_{3i}W_{5i}q_5] = 0, \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^N [W_{1i}W_{5i}q_1^2q_4 + 2W_{1i}W_{3i}q_1^2q_5 + W_{4i}W_{5i}q_1q_2q_4 + 2W_{3i}W_{4i}q_1q_2q_5 + W_{5i}W_{6i}q_1q_3q_4 + 2W_{3i}W_{6i}q_1q_3q_5 + W_{2i}W_{5i}q_2^2q_4 + 2W_{2i}W_{3i}q_2^2q_5 + W_{5i}^2q_2q_3q_4 + 2W_{3i}W_{5i}q_2q_3q_5 + W_{3i}W_{5i}q_2^2q_4 + 2W_{3i}^2q_2^2q_5 + W_{2i}W_{5i}q_4^3 + (2W_{2i}W_{3i} + W_{5i}^2)q_4^2q_5 + 3W_{3i}W_{5i}q_4q_5^2 + W_{3i}W_{5i}q_4 + 2W_{3i}^2q_5^3 + 2W_{3i}^2q_5] = 0. \quad (15)$$

通过求解式(11)~(15)对应的五元三次非线性方程,得出 $\hat{q}_1, \hat{q}_2, \hat{q}_3, \hat{q}_4$ 和 $\hat{q}_5$ ,再由 $q_i (i=1, \dots, 5)$ 的表达式求出轴间非正交误差角 $(\theta, \varphi, \psi)$ 与轴间增益偏差 $(k_{XZ}, k_{YZ})$ .

#### 4 指标函数

文献[13]中定义的变换误差指标为 $J =$

$$J = \sqrt{\left(\frac{\theta - \hat{\theta}}{\theta}\right)^2 + \left(\frac{\varphi - \hat{\varphi}}{\varphi}\right)^2 + \left(\frac{\psi - \hat{\psi}}{\psi}\right)^2 + \left(\frac{k'_{XZ} - \hat{k}'_{XZ}}{k'_{XZ}}\right)^2 + \left(\frac{k'_{YZ} - \hat{k}'_{YZ}}{k'_{YZ}}\right)^2}, \quad (16)$$

式中, $\hat{\theta}, \hat{\varphi}, \hat{\psi}, \hat{k}'_{XZ}$ 和 $\hat{k}'_{YZ}$ 分别为参量 $\theta, \varphi, \psi, k'_{XZ}$ 和 $k'_{YZ}$ 的最优估计值.

#### 5 仿真实验

##### 5.1 磁力计误差校正仿真

选取如下仿真参量:三轴磁力计的误差参量分别为 $\theta = 0.06 \text{ rad}$ ,  $\varphi = 0.08 \text{ rad}$ ,  $\psi = -0.04 \text{ rad}$ ,  $k'_{XZ} = 0.95$ , 及 $k'_{YZ} = 1.05$ ;为计算方便,不妨选取当地地磁场的 $X, Y$ 和 $Z$ 分量分别为 $1, 1$ 和 $\sqrt{2}$ . 磁力计在3个测量轴方向上均匀采样,且假设每个轴的噪声为相互独立的高斯过程,其均值为0,方差为 $\sigma$ . 在磁力计具有不同测量噪声情况下,得到校正效果指标 $J$ 与采样数据点个数 $N$ 之间的关系分别如图3的曲线所示. 图中4条曲线依次代表无噪声,  $\sigma = 10^{-4}$ ,  $\sigma = 10^{-3}$ 及 $\sigma = 10^{-2}$ 时校正指标 $J$ 随采样点数 $N$ 的变化关系. 由此可知,当 $N$ 足够大时,校正效果是可接受的,也说明此算法是收敛的.

为考察磁力计测量噪声对误差校正效果的影响,将图3中的曲线在采样点个数为400以后的部分进行放大,得到的图形如图4所示. 由图4可知,测量噪声方差 $\sigma$ 越大 $J$ 值也呈增长趋势,即

$\sqrt{\sum_{i=1}^5 (a_i - \hat{a}_i)^2}$ , 其中 $\hat{a}_i$ 为对 $a_i$ 的最优估计值.

但由于 $a_i$ 是 $\theta, \varphi, \psi, k'_{XZ}$ 及 $k'_{YZ}$ 的函数,没有直接反映算法对这些误差参量的辨识效果. 为与文献[13]的参量辨识结果进行对比,定义无量纲的算法校正指标 $J$ :

误差校正效果差些.

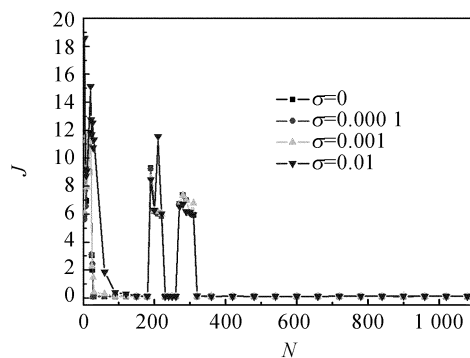


图3 不同测量噪声下的 $J$ 与 $N$ 间的关系

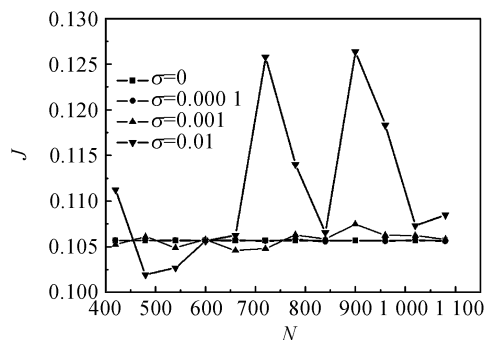


图4 采样点数400以后的局部放大图

为将本文误差建模方法的校正效果与文献[8]进行对比,设定采样点个数  $N=720$ ,得到新旧 2 种方法下  $J$  随  $\sigma$  变化关系图如图 5 所示. 由图 5 可知,在  $\sigma$  很小的情况下文献[8]的方法略好;但当  $\sigma$  增加到 0.03 左右,文献[8]方法的校正有效性急剧恶化,而本文方法的校正效果在  $\sigma$  的一定范围受其影响甚微. 其原因在于,文献[8]中的  $\Gamma^{-1}$  矩阵元素  $a_i$  是二阶小量,在参量辨识时易被较强的测量噪声所淹没,因此  $\Gamma^{-1}$  矩阵元素的辨识误差较大. 而本文中的  $\Gamma^{-1}$  矩阵元素没有二阶及以上的小量. 因此,本文方法更适合于磁力计测量噪声较大情况下的误差校正与补偿,应用范围更广.

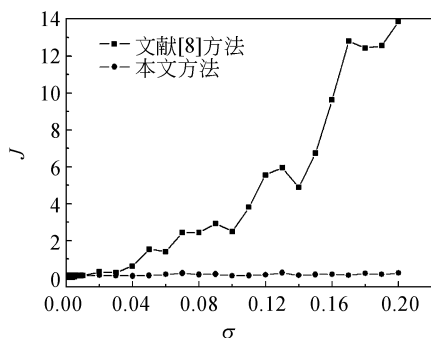


图 5 2 种建模方法下  $J$  随  $\sigma$  变化的对比图

## 5.2 地磁场测量实验

利用三分量磁通门传感器(Mag03-MSB)的误差测试实验进行校正效果的检验,在相对稳定的地磁场环境下,利用无磁转台改变传感器姿态,记录相应的实验数据,以  $10^4$  nT 作为 1 个单位. 以地磁测量数据的强度平均值作为地磁场的参考值,磁力计实验数据经误差校正后,地磁场强度误差校正前后的对比图如图 6 所示. 由图 6 可知,磁力计经正交及增益误差校正后,其磁场测量转

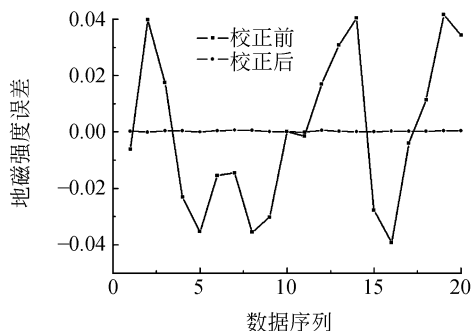


图 6 磁力计校正前后的地磁场测量实验

向差得到了很大程度上的抑制,提高了地磁场强度测量精度.

## 6 结 论

本文建立了三轴磁力计轴间非正交及灵敏度不一致等导致的水下载体磁场定位误差模型,利用不同姿态下地磁场测量数据对磁力计误差参量进行辨识,构造误差校正器. 由  $q_i (i=1, \dots, 5)$  的表达式求出轴间非正交误差角  $(\theta, \varphi, \psi)$  与轴间增益偏差  $(k_{xz}, k_{yz})$ . 根据得到的校正效果指标  $J$  与采样数据点个数  $N$  之间的关系得到:当  $N$  足够大时,校正效果是可接受的. 通过仿真实验考察磁力计测量噪声对误差校正效果的影响,结果发现测量噪声方差  $\sigma$  越大  $J$  值也呈增长趋势,即误差校正效果差些. 通过本文误差建模方法的校正效果与文献[8]进行对比发现:本文方法更适合于磁力计测量噪声较大情况下的误差校正与补偿,应用范围更广.

## 参考文献:

- [1] 黄玉,郝燕玲. 偶极子磁场梯度测量误差对水下载体定位精度影响[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2010,38(9):76-81.
- [2] 万文典,曹大平. 高精度磁力计的数据采集模块设计[J]. 电子技术应用,2012,38(9):42-45.
- [3] Khurana K K, Kepko E L, Kivelson M G, et al. Accurate determination of magnetic field gradients from four-point vector measurements-II: use of natural constraints on vector data obtained from four spinning spacecraft [J]. IEEE Transactions on Magnetism, 1996,32(5):5193-5205.
- [4] Lassahn M P, Trenkler G. Vectorial calibration of 3D magnetic field sensor arrays [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1995, 44(2):460-462.
- [5] 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, 2003,18(1):88-91.
- [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.
- [7] 吴德会. 基于 SVR 的三轴磁通门传感器误差修正研究[J]. 传感器与微系统,2008,27(6):43-46.
- [8] 黄玉林,张俊,张学峰,等. 潜艇水下定位合作声信号的低截获性分析[J]. 应用科技,2012,39(5):45-47,51.

- [9] 吴德会,黄松岭,赵伟. 基于 FLANN 的三轴磁强计误差校正研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(3): 449-453.
- [10] 温强,宋丽梅,黄玉,等. 三轴测量装置正交及增益误差修正算法研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(23): 6542-6544.
- [11] 王易易,柳玥,陆申龙. 测量地磁场水平分量的两种方法[J]. 物理实验, 2000, 20(9): 45-47.

## Correction of ortho-error and gain error for tri-axial magnetometer in strong noise environment and its experiment

WU Li-hua, HUANG Yu, ZHAO En-ming, LIU Zhi-hai

(Science of Optical Science and Technology Innovation Center, College of Science,  
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The errors of tri-axial magnetometer such as non-orthogonality and different sensitivities among three axes were the main factors that would degrade the accuracy of underwater positioning, so it was necessary to correct the errors and compensate the magnetic field measured by the imperfect magnetometer. An error-modeling and correction method for tri-axial magnetometer in strong noise environment was proposed. The error model of magnetometer was deduced in detail, and then the error parameters identification and error correction algorithm were also given. The simulations proved the convergence of the algorithm when the noise in the output of magnetometer was strong. The relation between correction precision and sampling number was given for different signal noise ratio to verify that the method was fit for tri-axial magnetometer with strong noise. This method was used in geomagnetic field measurement experiment and got a satisfactory result.

**Key words:** tri-axial magnetometer; error correction; identification; optimal estimation; underwater positioning

[责任编辑:尹冬梅]

(上接第 29 页)

## Spinning of light plastic bucket near discharging tip

LI Ting-ting, ZHANG Fei

(School of Teacher Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

**Abstract:** To explain the inconsistency of the spinning direction of light plastic bucket near discharging tip, the anomalous movement of the charged particles near the grounding tip was explored using alcohol flame to indicate the moving direction of the charged particles. It was found that discharging phenomenon existed on the grounding tip.

**Key words:** point discharge; grounding; flame tracking

[责任编辑:郭 伟]