

基于磁异常反演的磁航向误差实时补偿方法

尹 刚¹ 张英堂¹ 石志勇¹ 李志宁¹

1 军械工程学院七系, 河北 石家庄, 050003

摘 要:针对磁航向估计受浅场磁异常干扰的问题,提出了一种基于磁异常反演的磁航向误差实时补偿方法。该方法首先利用设计的新磁传感器阵列测量磁异常源产生的磁梯度张量数据,然后联合位置、磁矩及磁标量信息进行浅场磁异常三维磁矢量的单点反演,最后在背景地磁矢量场准确估计的基础上完成磁航向误差的实时补偿。实验结果表明,该方法可实现存在浅场地磁异常情况下的磁航向准确估计。

关键词:磁传感器阵列;磁异常反演;磁航向估计;补偿;磁偶极子

中图法分类号:P229.2; U666.1 **文献标志码:**A

利用地磁场方向的稳定性,通过测量传感器轴线与地磁场水平分量间的夹角实现载体航向的准确估计,是地磁定向导航及航位推算导航的基础,因此,基于磁传感器的航向估计技术得到了较为广泛的关注^[1, 2]。现有的电子磁罗盘在无地磁异常干扰的情况下定向精度可达到 $\pm 0.5^\circ$,但随着人类活动的加剧,建筑物、电缆及地下掩埋物等多种人工磁源逐渐增多,导致地球浅场磁异常的加剧,使得经过罗差校正的磁罗盘在磁异常干扰条件下的定向误差^[3]达到数 10° ,严重影响了其在导航中的应用。因此,本文针对存在浅场地磁异常情况下的磁航向估计问题进行研究,设计了新的传感器阵列结构,提出了基于磁异常反演的磁航向误差实时补偿方法,以提高磁航向技术在实际应用中的鲁棒性。

1 磁传感器阵列设计及磁航向扰动探测

1.1 磁传感器阵列设计

浅场磁异常叠加在背景地磁场上,要实现精确的磁航向估计,必须对浅场磁异常进行有效分离。基于磁传感器测量得到的标量及矢量数据均为两种场的叠加,无法实现较好的分离^[4],而背景地磁场在小范围内可认为是匀强磁场,即地磁梯度场较小且可忽略不计^[5, 6],因此,利用传感器测量得到的磁梯度场可认为仅是浅场磁干扰源产生的异常梯度场,进而可实现背景地磁场和浅场磁

异常在梯度测量上的分离。但由于磁航向估计技术是基于磁矢量信息的,必须利用浅场磁异常的梯度场反演得到其产生的磁矢量场,因此,为实现浅场磁异常梯度场的测量和矢量场的准确反演,本文设计了如图 1 所示的磁传感器阵列结构。该传感器阵列由 5 个三轴磁通门传感器构成,相同轴上两个传感器间的基线距离为 d ,外围的 4 个传感器可构建平面十字形磁梯度张量系统用于测量多个不同方向的梯度场,进而得到磁梯度张量矩阵用于浅场磁异常源的反演。

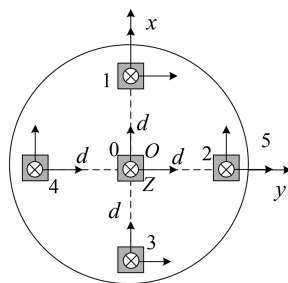


图 1 传感器阵列结构示意图

Fig. 1 Sketch Map of the Magnetometers Array

由于地磁场及浅场异常场可看作无源的静磁场,因此,磁感应强度的散度和旋度为零,磁梯度张量的 9 个分量中仅有 5 个分量是独立的。建立如图 1 所示的右手坐标系用于磁场建模,则由外围的 4 个传感器测量得到的磁梯度张量矩阵为:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xz} \\ B_{yx} & B_{yy} & B_{yz} \\ B_{zx} & B_{zy} & B_{zz} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} \frac{B_{1x}-B_{3x}}{2d} & \frac{B_{2x}-B_{4x}}{2d} & \frac{B_{1z}-B_{3z}}{2d} \\ \frac{B_{1y}-B_{3y}}{2d} & \frac{B_{2y}-B_{4y}}{2d} & \frac{B_{2z}-B_{4z}}{2d} \\ \frac{B_{1z}-B_{3z}}{2d} & \frac{B_{2z}-B_{4z}}{2d} & -\frac{B_{1x}-B_{3x}}{2d}-\frac{B_{2y}-B_{4y}}{2d} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, B_{ij} 表示第 i 个传感器在 j 方向上的磁场矢量值, $i=1,2,3,4, j=x,y,z$; B_{pq} 表示不同方向的磁场梯度值, $p,q=x,y,z$ 。

值得注意的是,在传感器阵列构建并将其安装在载体上的过程中,传感器阵列自身的误差以及载体中铁磁材料引起的磁干扰将会严重影响磁航向的估计,在实际使用前,必须将此两种磁干扰有效消除和补偿。而本文主要针对已经完成上述两种磁干扰补偿的系统在实际应用中受到外部浅场磁异常目标干扰进而影响磁航向估计的问题进行研究,利用磁异常反演的方法补偿浅场磁异常引起的磁航向估计误差,最终实现较为准确的磁航向估计。

1.2 磁航向扰动探测

载体航向估计时,磁传感器与载体捷联在一起,故载体坐标系和传感器坐标系一致,本文建立的右手坐标系如图 2 所示。假设无浅场磁异常存在时,三轴磁传感器测得的水平方向上的两个磁场分量分别为 H_y 和 H_x ,测量点处地磁场的磁偏角、磁倾角及总场值分别为 D 、 I 和 F ,则载体的磁航向可由式(2)估计得到:

$$\varphi = \varphi_m \pm D = \tan^{-1}\left(\frac{H_y}{H_x}\right) \pm D \quad (2)$$

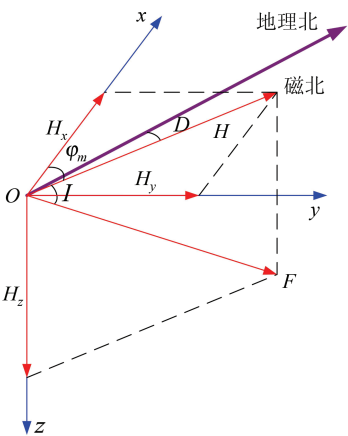


图 2 地磁矢量以及其和地理北的关系
Fig. 2 Magnetic Field Components and Their Relationship with True North

由图 2 可知,浅场磁源的存在将影响地磁场水平方向的磁矢量扰动,进而引起磁航向估计的

误差,但并不是所有的浅场磁异常都会改变磁航向,且磁异常较小的情况下也可能引起较大的磁航向误差,因此,必须构建磁航向扰动探测器,准确判断磁航向变化是由于载体自身的运动扰动还是由于浅场磁异常引起的。

浅场磁异常源引起不同方向上梯度测量值的变化,原则上可根据传感器阵列测量得到的梯度值判断是否有磁异常源的存在,但由于载体在运动过程中姿态的变化对测得的梯度值具有一定的影响^[7],因此,直接采用梯度值进行磁异常源是否存在的判断具有一定的非鲁棒性。磁梯度张量的张量不变量是由不同方向的梯度分量组合得到的,不受载体姿态变化的影响,因此,本文将其用于磁异常源是否存在的判断。

磁梯度张量存在多个张量不变量可用于磁异常探测,考虑磁航向估计对实时性的要求,选择 I_1 和 I_2 作为判断因子,其数学表达式分别为:

$$\begin{cases} I_1 = B_{xx}B_{yy} + B_{yy}B_{zz} + B_{xx}B_{zz} - B_{xy}^2 - B_{yz}^2 - B_{xz}^2 \\ I_2 = B_{xx}(B_{yy}B_{zz} - B_{yz}^2) + B_{xy}(B_{yz}B_{xz} - B_{xy}B_{zz}) + B_{xz}(B_{xy}B_{yz} - B_{xz}B_{yy}) \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知,相比于 I_1 ,不变量 I_2 随着距离的增大衰减更快,对于同时存在多个磁异常源的复杂情况,其优先描述浅部源的特性。

若磁传感器阵列测得的地磁场不存在浅场磁异常,则可直接利用式(2)进行磁航向的计算,若存在磁异常,需要进一步判断该异常是否引起磁航向的扰动,比如水平方向的两个磁矢量值等比例放大或缩小将不影响磁航向的计算。利用零号传感器测得的地磁场 7 要素中的总场 F 、水平分量 H 、竖直分量 H_z 和磁倾角 I 进行磁异常是否影响磁航向的联合判断。若磁异常对磁航向没有干扰或干扰极小,则直接利用零号传感器的测量值进行磁航向计算,若磁异常对磁航向的计算产生干扰,则利用传感器阵列测得的磁梯度张量值进行磁异常的反演,利用反演得到的传感器阵列中心点 O 位置处的磁矢量值补偿零号传感器测得的磁矢量值,进而在背景地磁场准确测量的情况下实现磁航向的准确估计。磁航向扰动探测流程如图 3 所示。

2 磁异常反演及航向误差实时补偿

由于磁航向估计利用磁矢量信息进行载体运动方向的估计,因此,需要利用传感器阵列测量得

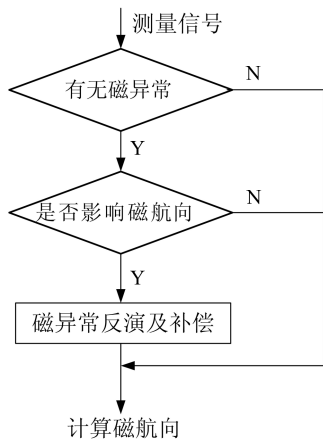


图 3 磁航向扰动探测流程图
Fig. 3 Flowchart of Magnetic Heading Perturbation Detection

到的浅层磁异常源的磁梯度张量数据反演其在测量中心点产生的磁矢量值,然后将零号传感器的测量值减去磁异常源产生的磁矢量值,即为背景地磁场的磁矢量值,进而可实现较为精确的磁航向估计。

在磁异常反演中,当探测距离大于 2.5 倍磁性物体长度时,可将磁性目标简化为磁偶极子模型,并由 6 个未知量描述,即磁性目标的三维位置和三维磁矩^[8]。因此,要实现磁航向估计的实时误差补偿,必须实现磁异常的实时反演,即在单个测点上实时地完成磁偶极子位置及磁矩的反演。

目前,基于单点磁梯度张量数据的磁偶极子定位方法受到了较多关注,其中,Nara^[9, 10]提出了联合单点测量的磁梯度张量及磁矢量数据进行磁偶极子定位的方法,但在地磁背景下无法获得磁偶极子的磁矢量信息;Roy^[11]为克服背景地磁场的影响,提出了基于张量不变量的单点定位算法,但该算法需要较为复杂的磁梯度张量测量系统。Frahm^[12]基于单点磁梯度张量数据的特征分析,实现了磁偶极子单位位置向量及单位磁矩向量的计算,但该方法估计得到 4 个不同的解且无法实现磁偶极子磁矢量信息的计算,本文在此方法基础上,联合位置、磁矩及磁梯度张量系统中包含的多点磁标量信息构建非线性方程组,在消除三个虚假解的同时,解算磁偶极子的磁矩模及测量点与磁性目标间的距离,进而实现磁矢量信息的正确反演。

假设 Frahm 方法得到的 4 个解的单位位置向量及磁矩向量为 $\hat{r}_k, \hat{m}_k, k=1, 2, 3, 4$ 。若测量点与磁偶极子间的真实距离为 R ,磁偶极子的真实磁矩模为 M ,则磁偶极子的磁矩矢量及测点相

对于磁偶极子的位置矢量分别为 $m_k=M \cdot \hat{m}_k=(m_{kx}, m_{ky}, m_{kz})$ 和 $r_k=R \cdot \hat{r}_k=(r_{kx}, r_{ky}, r_{kz})$ 。

由传感器的阵列结构可知,针对不同的解,外围的 4 个传感器相对于磁偶极子的位置矢量可分别表示为:

$$\begin{cases} r_{k1}=(r_{kx}+d, r_{ky}, r_{kz}) \\ r_{k2}=(r_{kx}, r_{ky}+d, r_{kz}) \\ r_{k3}=(r_{kx}-d, r_{ky}, r_{kz}) \\ r_{k4}=(r_{kx}, r_{ky}-d, r_{kz}) \end{cases} \quad (4)$$

则传感器与磁偶极子之间的距离可表示为 $R_{kl}=\|r_{kl}\|, l=1, 2, 3, 4$ 。

设 4 个传感器测得的磁场总场值分别为 $F_{1ce}, F_{2ce}, F_{3ce}$ 和 F_{4ce} ,则由磁偶极子产生的磁场总场正演公式可得以下非线性方程组:

$$\begin{cases} \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M}{R_1^3} \sqrt{3 \left(\frac{m_k \cdot r_{k1}}{M \cdot R_1} \right)^2 + 1} + F = F_{1ce} \\ \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M}{R_2^3} \sqrt{3 \left(\frac{m_k \cdot r_{k2}}{M \cdot R_2} \right)^2 + 1} + F = F_{2ce} \\ \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M}{R_3^3} \sqrt{3 \left(\frac{m_k \cdot r_{k3}}{M \cdot R_3} \right)^2 + 1} + F = F_{3ce} \\ \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M}{R_4^3} \sqrt{3 \left(\frac{m_k \cdot r_{k4}}{M \cdot R_4} \right)^2 + 1} + F = F_{4ce} \end{cases} \quad (5)$$

式中,仅存在 R, M 和 F 3 个未知变量,求解方程即可得到磁偶极子的位置和磁矩矢量 r_k, m_k 。

根据磁偶极子的磁梯度张量正演公式,计算 4 个不同的磁偶极子在测量点产生的磁梯度张量值,并将其与真实值相比较即可实现虚假解的去除和磁性目标的单点磁梯度张量定位及磁矩反演,进而完成磁异常的三分量磁矢量反演计算。

假设反演得到磁偶极子的磁矩为 m_0 ,相对于测量中心点的位置为 r_0 ,则其在测量中心点 O 处产生的三分量磁矢量值为:

$$B_d = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3(m_0 \cdot r_0) \cdot r_0 - m_0 \cdot R^2}{R^5} \quad (6)$$

补偿得到的背景地磁场的三分量值为:

$$B_e = B_0 - B_d \quad (7)$$

式中, B_0 为零号传感器测得的三分量磁矢量值。

则在存在影响磁航向估计的磁异常场的情况下,真实磁航向可利用式(7)中反演得到的背景地磁场的三分量值进行计算。

3 实验与分析

为验证本文提出的磁航向误差补偿方法的可行性,采用 5 个三轴磁通门传感器构建传感器阵列,在地面上放置永磁体模拟浅场磁异常进行磁

航向实验,如图 4 所示。为详细分析磁航向估计中磁异常反演的正确性,实验采用单点测量的方式进行,实验人员手持传感器阵列且距离地面约 50 cm,在测量曲线上每隔 10 cm 进行一次数据采集。



图 4 磁航向补偿实验测试图
Fig. 4 Test Figure of Magnetic Heading Compensation Experiment

在永磁体左右两侧各选取一条测线进行磁航向的计算,测量得到的张量不变量及补偿前后的方位角如图 5、图 6 所示。

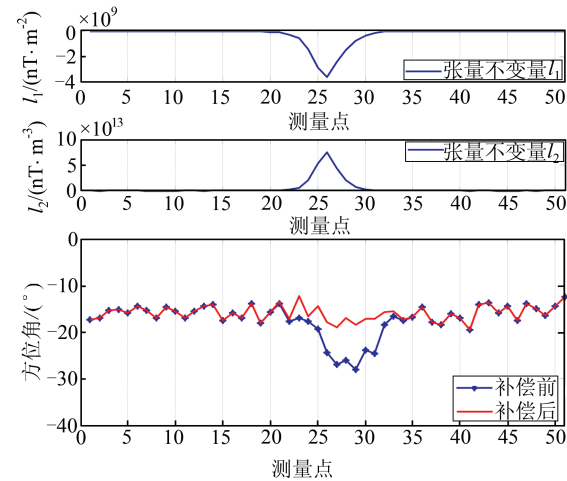


图 5 张量不变量及补偿前后的方位角(测线 1)
Fig. 5 Tensor Invariants and Heading Angle Before and After Compensation (the First Measurement Line)

由图 5、图 6 可知,磁梯度张量的张量不变量 I_1 和 I_2 可实现磁异常源是否存在的准确判断。实验所用永磁体的磁矢量场与地磁矢量场间存在较大的方向偏差,因此,在传感器阵列距离永磁体较近时,产生了 $10\sim 20^\circ$ 左右的磁航向估计误差。在利用磁传感器阵列测得的磁梯度张量数据进行磁异常源产生的磁矢量场反演的基础上,进行了磁航向计算的补偿,从补偿结果可以看出,论文所

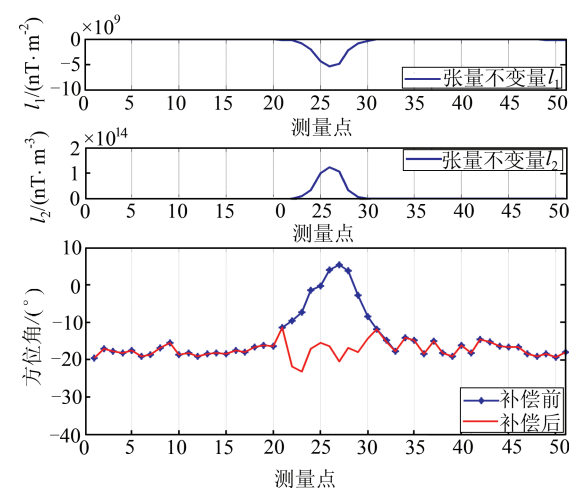


图 6 张量不变量及补偿前后的方位角(测线 2)
Fig. 6 Tensor Invariants and Heading Angle Before and After Compensation (the Second Measurement Line)

提算法可实现浅场磁异常源引起的磁航向误差的补偿。补偿后得到的磁航向方位角仍存在一定的波动,这是由于实验人员手持传感器阵列无法一直保持水平姿态及方向不变而导致的。

4 结 语

本文针对由地磁矢量信息进行磁航向估计时易受浅场磁异常源干扰的问题,设计了传感器阵列结构,通过测量磁异常源产生的磁梯度场进而反演其产生的磁异常矢量场,在此基础上计算得到较为准确的背景地磁矢量场,实现磁航向误差的实时补偿。实验结果表明,利用磁梯度张量的单点反演方法可有效消除磁异常目标引起的磁航向误差,具有较高的补偿精度。

参 考 文 献

[1] Zheng Hui, Wang Yong, Wang Hubiao, et al. Simulation Research of Earth's Gravity and Geomagnetism Potential Field Aided Underwater Navigation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(10): 1 198-1 202(郑晖,王勇,王虎彪,等.地球重磁位场辅助水下潜艇导航仿真研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2012,37(10): 1 198-1 202)

[2] Shi Zhiyong, Wang Huaiguang, Lv You. Design of a Three Detectors Fluxgate Sensor [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2005, 18(2): 433-435 (石志勇,王怀光,吕游.一种三探头磁通门传感器的设计[J].传感技术学报,2005,18(2): 433-435)

[3] Afzal M H, Renaudin V, Lachapelle G. Assessment

of Indoor Magnetic Field Anomalies Using Multiple Magnetometers[C]. Proceedings of ION GNSS10, Portland, OR, USA,2010

[4] Huang Yu, Hao Yanling. Method of Separating Dipole Magnetic Anomaly from Geomagnetic Field and Application in Underwater Vehicle Localization[C]. Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Information and Automation, Harbin, China, 2010

[5] Schmidt P, Clark D, Leslie K, et al. GETMAG-A SQUID Magnetic Tensor Gradiometer for Mineral and Oil Exploration[J]. *Exploration Geophysics*, 2004, 35: 297-305

[6] Zhao Jianhu, Wang Shengping, Wang Aixue. Study on the Selection of the Geomagnetic Adaptable Matching Area Based on the Geomagnetic Co-occurrence Matrix [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(4): 446-449 (赵建虎, 王胜平, 王爱学. 基于地磁共生矩阵的水下地磁导航适配区选择[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(4): 446-449)

[7] Bian Guanglang, Zhai Guojun, Huang Motao, et al. Transformation of Multi-objects Magnetic Anomaly Components with Geomagnetic Effect [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(8): 914-918(卞光浪, 翟国君, 黄谟涛, 等. 顾及地磁背景场的多目标磁异常分量换算方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(8): 914-918)

[8] Bian Guanglang, Zhai Guojun, Huang Motao, et al. Inversion of the Parameters of 3D Magnetic Body with Its Magnetic Profile Lines [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(1): 91-95(卞光浪, 翟国君, 黄谟涛, 等. 顾及地磁背景场的多目标磁异常分量换算方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(1): 91-95)

[9] Nara T, Suzuki S, Ando S. A Closed-Form Formula for Magnetic Dipole Localization by Measurement of Its Magnetic Field and Spatial Gradients [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, 42(10): 3 291-3 293

[10] Nara T, Ito W. Moore-Penrose Generalized Inverse of the Gradient Tensor in Euler's Equation for Locating a Magnetic Dipole[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(17E504): 1-3

[11] Wiegert R F. Magnetic STAR Technology for Real-Time Localization and Classification of Unexploded Ordnance and Buried Mines [C]. Proceedings of SPIE 2009, Bellingham, 2009

[12] GameyT J, Battelle O R O. Development and Evaluation of an Airborne Superconducting Quantum Interference Device-Based Magnetic Gradiometer Tensor System for Detection, Characterization and Mapping of Unexploded Ordnance [R]. SERDP Project MM-1316, Marine,2008

Real-time Compensation Method of Magnetic Heading Perturbations Based on Magnetic Anomaly Inversion

Yin Gang¹ Zhang Yingtang¹ Shi Zhiyong¹ Li Zhining¹

¹ The Seventh Department, Mechanical Engineering College, Shijiazhuang 050003, China

Abstract: In order to eliminate magnetic heading perturbations coming from the near-field magnetic anomaly, a real-time compensation method is proposed based on magnetic anomaly inversion. Magnetic gradient tensor data arisen near-field ferromagnetic targets was measured by the designed magnetometer array. Then position, magnetic moment, and magnetic scalar values were combined to calculate magnetic vectors of the ferromagnetic targets. Real-time compensation was achieved.

Key words: magnetometers array; magnetic anomaly inversion; magnetic heading estimation; compensation; magnetic dipole

First author: Yin Gang, PhD, specializes in magnetic survey and magnetic anomaly detection. E-mail: gang.gang88@163.com