

三分量磁通门传感器校正的循环优化算法

周超焯¹, 金际航^{2,3}, 李宏武¹, 张博², 闫辉³

(1. 92678 部队, 天津 300220; 2. 海军海洋测绘研究所, 天津 300061;

3. 海军工程大学 电气与信息工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 由于制造工艺的原因, 三分量磁通门传感器存在固有的零位误差、标度误差和正交误差。介绍了三分量磁通门传感器固有误差的特点, 及其数学描述方法。提出了一种循环优化算法, 将优化算法引入全部固有误差的校正, 采用循环计算的思想提高了解算误差校正参数的准确度。解决了由于测量数据中三种固有误差的同时存在, 难于准确求算每种校正参数的问题。应用表明, 循环优化算法大大提高了三分量磁通门传感器的校正效果。

关键词: 磁通门传感器; 零偏; 标度系数; 正交校正

中图分类号: TP212.13

文献标识码: B

文章编号: 1671-3044(2010)04-0063-04

1 引言

三分量磁通门传感器是磁场测量中使用广泛的测磁仪器, 适用于地磁场观测、船磁检测、地质勘探、水下目标探测等各种领域。三分量磁通门传感器由三个正交放置的磁通门作为敏感元件构成测量坐标系^[1], 由每个敏感元件分别输出磁场矢量在传感器测量坐标系下的三个组成分量。理想情况下, 三个敏感元件具有空间三轴正交、对磁场相同的灵敏度、无剩磁等物理特性。实际上, 由于制造工艺和材质的原因, 三分量磁通门传感器普遍存在着固有的零位误差、标度误差和正交误差^[2]。

经验表明, 标度系数的差异造成的测量误差约有数十纳特, 零位误差在一百纳特左右。在地磁场背景场下, 如果三分量磁通门传感器的正交误差大于 0.5° , 经过计算可知由三轴不正交所带来的磁场测量误差将达数百纳特^[3]。因此, 三分量磁通门传感器在使用前必须进行固有误差的校正^[4-6]。对三分量磁传感器的校正经常采用旋转法^[7], 即在均匀外磁场中, 保持传感器在特定姿态下绕固定轴旋转, 建立以校正参数为变量、传感器输出分量和姿态角为系数的方程组, 求解校正参数。此外还有专门针对正交误差校正的优化算法^[3], 以正交校正参数为变量建立目标函数, 优化求函数极值得到校正参数。针对标度误差和零位误差的“椭球拟合”算法^[8], 根据输出磁场三个分量空间轨迹的几何特点求算校正参数。

本文在文献[7]、[8]的基础上, 分析了零位误差、标度误差和正交误差对传感器输出造成的影响,

将文献[3]提出的优化校正算法引入到全部固有误差的校正。应用过程中发现, 由于零位误差、标度误差和正交误差在测量数据中同时存在, 使每一种误差校正参数的求算都受到其他两种误差的干扰, 结果不够精确。为了消除多种误差同时存在对校正效果的不利影响, 进一步改善校正效果, 提出循环优化求算误差校正参数的方法。

2 三分量磁通门传感器误差模型

在环境磁场为零的条件下, 三分量磁通门传感器输出应该为零, 但由于制造磁传感器所用材质或其他原因, 使其输出不为零, 这种现象称作零偏, 由零偏所造成的传感器误差称为零位误差。零位误差附加于磁传感器的三个分量之上, 其大小一般不随磁传感器姿态的改变而变化。具有零位误差的磁传感器输出与真实外磁场之间的关系可表示为:

$$AB = B_M - Z_p \quad (1)$$

式中, A 为地理坐标系到理想正交的传感器测量坐标系的旋转矩阵^[7]; B 为实际的外磁场向量; B_M 为磁传感器输出向量; Z_p 为零位误差向量。

理想情况下, 三分量磁传感器在三个方向上的敏感元件, 应该具有完全相同的灵敏度, 即在相同强度的磁场下输出值相同。实际上, 磁敏感元件的灵敏度不可能完全相同, 这就造成了标度误差。存在标度误差的磁传感器, 其输出与真实外磁场之间的关系可表示为:

$$AB = S_p B_M \quad (2)$$

式中, S_p 为对角型的标度误差矩阵。

收稿日期: 2010-02-28; 修回日期: 2010-03-15

作者简介: 周超焯(1984-), 男, 福建莆田人, 助理工程师, 主要从事海洋测量与导航技术研究。

三分量磁通门传感器内部由三个铁芯及绕在铁芯上的螺线管作为其对三维磁场的敏感元件,三个敏感元件确定了一个测量坐标系。定义正交误差:三分量磁通门传感器坐标系与理想正交坐标系分别为 $o-xyz$ 、 $o-x_1y_1z_1$; oz 与 oz_1 重合,坐标平面 yoz 与 y_1oz_1 重合; ox 轴与 x_1oy_1 平面的夹角为 α , oy 轴与 oy_1 轴夹角为 β , ox 轴在平面 x_1oy_1 上的投影与 ox_1 的夹角为 γ ,称 α 、 β 、 γ 为正交误差角。存在正交误差的三分量磁通门传感器的输出可表示为:

$$AB = O_p B_M \quad (3)$$

式中, O_p 为正交误差矩阵。

当同时考虑零位误差、标度误差和正交误差时,磁传感器输出与真实外磁场之间的关系可用线性方程表示为^[7]:

$$AB = O_p S_p (B_M - Z_p) \quad (4)$$

式中,正交误差矩阵 O_p 、标度误差矩阵 S_p 、零位误差向量 Z_p 可分别表示为:

$$O_p = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \gamma & -\sin \alpha \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1},$$

$$S_p = \begin{bmatrix} 1+s_x & & \\ & 1+s_y & \\ & & 1+s_z \end{bmatrix}^{-1}, Z_p = \begin{bmatrix} z_x \\ z_y \\ z_z \end{bmatrix}$$

三分量磁传感器的校正,就是要求出传感器固有的零位误差、标度误差和正交误差角,将它们作为误差校正参数,利用式(4)对传感器输出进行校正,得到真实外磁场向量在传感器坐标系下的输出分量。校正参数一经求出,即可视为不变常数,可以长期使用。

3 固有误差对传感器输出的影响

在三分量磁通门传感器不存在固有误差的理想情况下,磁传感器输出为真实外磁场在传感器测量坐标系下的向量值:

$$B_M = AB$$

当旋转矩阵 A 任意取值时,对上式两端同时取向量的模,则磁传感器各输出分量应满足:

$$B_{Mx}^2 + B_{My}^2 + B_{Mz}^2 = T^2 \quad (5)$$

T 为磁场总量,均匀外磁场中为一常数。式(5)表示坐标在原点,半径为 T 的标准球面,即传感器输出的磁场总量为不变的常数。

当同时考虑零位误差、标度误差时,参照式(5)有:

$$\left(\frac{B_{Mx}-z_x}{1+s_x}\right)^2 + \left(\frac{B_{My}-z_y}{1+s_y}\right)^2 + \left(\frac{B_{Mz}-z_z}{1+s_z}\right)^2 = T^2 \quad (6)$$

式(6)表示中心在 (z_x, z_y, z_z) , 轴半径分别为 $(1+s_x)T$ 、 $(1+s_y)T$ 和 $(1+s_z)T$ 的椭球面^[2]。其中,零位误差导致球面中心偏离原点,标度误差导致球面的变形,即从标准球面变为椭球面。磁传感器输出的三个分量折算成的磁场总量为该椭球面上的点到坐标原点的距离。可见,由于零位误差和标度误差的存在,磁传感器输出的磁场总强度随着磁传感器姿态的改变而改变。

当仅考虑正交误差给三分量磁通门传感器带来的影响时,由式(3)可得:

$$B_M = O_p^{-1} AB$$

匀强磁场中,三轴理想正交的三分量磁通门传感器,其输出的总量磁场强度与传感器姿态无关。而非理想正交的磁传感器,其输出的磁场总量是姿态角的函数,即随着 A 的不同取值,上式右侧向量的模将发生变化。磁传感器输出的三个分量满足:

$$B_{B_{Mx}}^2 + B_{B_{My}}^2 + B_{B_{Mz}}^2 = T^2(A) \quad (7)$$

式(7)表示一个半径随传感器姿态变化的变形球面。因此,正交误差也导致了传感器输出总量随姿态的变化。

4 循环优化算法原理

由于三分量磁通门传感器的零位误差、标度误差和正交误差都导致磁传感器输出的磁场总量随传感器放置姿态的变化而变化,因此文献[3]提出的优化校正算法适用于全部固有误差的求算。为了求取零位误差、标度误差和正交误差校正参数,在不同的传感器姿态下记录传感器 N 个输出 $B_M^{[1]}$, $B_M^{[2]}$, $\dots$, $B_M^{[N]}$, 由式(4)可得 N 个经过误差校正的输出为 $B_1^{[1]}$, $B_1^{[2]}$, $\dots$, $B_1^{[N]}$, 其中 $B_1 = O_p S_p (B_M - Z_p)$ 。这样 B_1 可以看作 $z_x, z_y, z_z, s_x, s_y, s_z, \alpha, \beta, \gamma$ 9 个误差校正参数的函数。当磁传感器处于匀强磁场时, B_1 的模,即外磁场的总强度恒定不变。换句话讲,零位误差、标度误差和正交误差校正参数应使 $|B_1^{[1]}|$, $|B_1^{[2]}|$, $\dots$, $|B_1^{[N]}|$ 间的差别最小。因此,固有误差校正参数的求算可以归结为下面的最优化问题:

$$X_{opt} = \min[f(X)] = \min\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|B_1^{[i]}| - |\bar{B}_1|)^2\right] \quad (8)$$

式中,

$$X = (z_x, z_y, z_z, s_x, s_y, s_z, \alpha, \beta, \gamma), |\bar{B}_1| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |B_1^{[i]}|$$

当目标函数 $f(X) \rightarrow 0$ 时,有 $|B_1^{[i]}| \rightarrow |\bar{B}_1|$, 此时 $|B_1^{[1]}|$, $|B_1^{[2]}|$, $\dots$, $|B_1^{[N]}|$ 都相等,它们都等于磁传感器所在位置的磁场总强度。

在实际应用中,通过式(8)求零位误差、标度系数误差和正交误差校正参数时,如果 9 个参数同时求解效果往往不好,原因在于这些参数的单位和数量级不统一,因此按照共轭梯度法进行优化运算时,优化算法的迭代终止条件很难折中选择,使得算法经常不收敛。因此,零位、标度系数和正交误差校正参数宜分别求算,这时目标函数仍然不变,只是在求一种误差校正参数时,其他两种误差校正参数全部设为零即可。

在分别求三种误差校正参数时,由于测量数据中同时包含了三种误差,每一种误差校正参数的单独计算,又受到其他两种误差的干扰而得不到准确结果。要得到仅含某一种误差的磁场测量数据,在实际中是无法实现的。为了解决这一问题,采用如图 1 所示的循环优化计算方案。

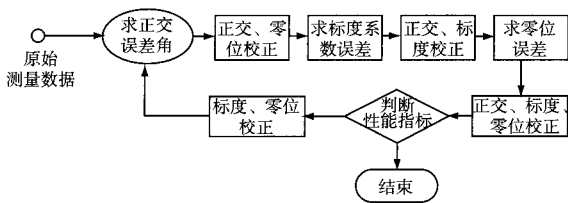


图 1 零位误差、标度误差和正交误差校正参数的循环优化计算方案

根据这一方案,采用含有全部误差的测量数据,①计算正交误差角的初值;②将正交误差角作为正交校正参数,对测量数据进行正交校正;③利用经过正交校正的数据求算标度误差;④对测量数据进行正交、标度误差校正;⑤利用经过正交、标度校正的数据求零位误差;⑥对测量数据进行正交、标度和零位误差校正;⑦判断校正效果是否满足预定指标,如果满足指标,则存储全部误差校正参数;⑧如果不满足预定指标,对测量数据进行标度和零位校正,利用经过标度和零位校正的数据重新求算正交误差角;⑨重复全部过程,直到指标达到要求。误差校正效果的指标的选择可以根据实际需要确定,如可以采用经误差校正的测量数据的总量磁场的最大值与最小值之差,或均方差等。值得指出的是,循环计算指的是图 2 中的整个过程的循环,而并非单独求每种误差校正参数的优化算法中的迭代过程,循环过程中的每一次校正都是对原始测量数据的校正。

5 校正算法的应用

对式(8)的最优化问题,采用共轭梯度优化方法^[9]。具体步骤为:

(1) 给定:初始点 X_0 , 迭代终止条件 ε ;

(2) $k=0$ 时,求取目标函数的梯度 $\nabla f(X_k)$, 令 $S_k = -\nabla f(X_k)$;

(3) 选取迭代步长 $p_k = a/(k+1)$, 其中 a 为可选常数;

(4) 取新的迭代点 $X_{k+1} = X_k + S_k p_k$;

(5) 判断 $|\nabla f(X_{k+1})| \leq \varepsilon$, 如果满足条件则终止迭代,取 X_{k+1} 为优化结果。如果不满足条件,进行步骤(6);

(6) 计算 $v_k = |\nabla f(X_{k+1})|^2 / |\nabla f(X_k)|^2$, 新的迭代方向 $S_{k+1} = -\nabla f(X_{k+1}) + v_k S_k$, 并令 $k = k+1$, 重复步骤(3)~(5)。

应用循环优化算法,对某三分量磁通门传感器进行了校正,该传感器的分辨率为 1 nT。用于校正的数据来源于实验室内相对“安静”的地磁场,忽略地磁场的时变和空间分布的不均匀等因素影响。图 2 给出了对该三分量磁通门传感器零位误差、标度误差和正交误差校正效果。其中,(a)为循环优化过程中,每次循环计算得到的校正参数对测量数据的校正结果,总共进行 7 次循环;(b)为 1 次校正结果,7 次循环优化校正结果与原始测量数据的对比情况。

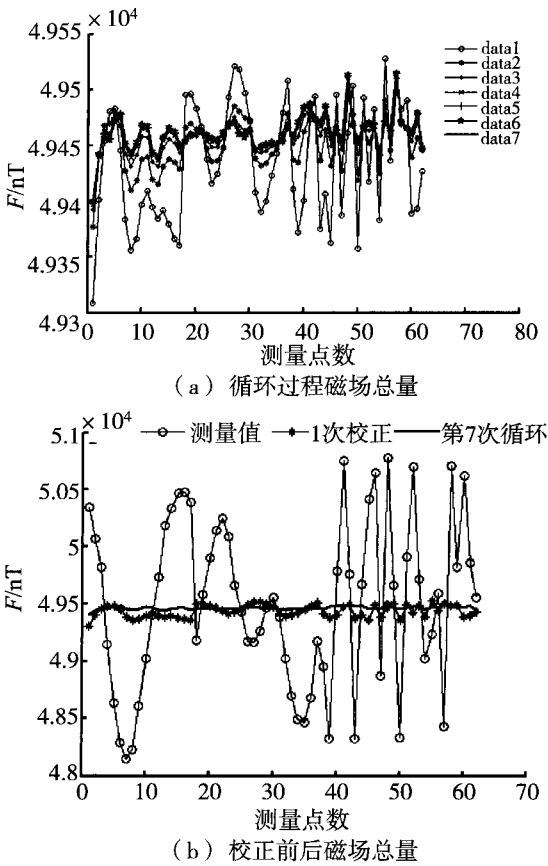


图 2 三分量磁通门传感器零位误差、标度误差和正交误差校正效果

从图中可见,每次循环优化,磁场测量值校正结果折算成总量后,其幅值波动情况都较前一次减小,经过7次循环优化校正后,磁场总量的波动幅度趋于稳定不变。经过循环优化的第7次校正结果较通常进行的1次校正结果相比,其总量磁场的波动幅度明显减小,减小幅度大约为70%。磁场测量值及循环优化过程中各次校正数据的统计指标如表1所示。校正参数的最终结果为 $z_x = -71.55\text{nT}$ 、 $z_y = 188.13\text{nT}$ 、 $z_z = 116.29\text{nT}$ 、 $s_x = 0.0072$ 、 $s_y = -0.0024$ 、 $s_z = -0.0049$ 、 $\alpha = -2.34^\circ$ 、 $\beta = 1.29^\circ$ 、 $\gamma = -0.27^\circ$ 。

表1 磁场总量数据统计指标 单位:nT

	最大值	最小值	平均值	均方差	波动范围
测量值	50776	48147	49506	744.38	2629.30
1次校正	49528	49303	49434	53.06	219.55
2次循环	49510	49377	49451	23.93	132.94
3次循环	49513	49392	49458	17.61	120.42
4次循环	49514	49397	49461	16.51	116.73
5次循环	49514	49399	49462	16.34	115.60
6次循环	49515	49399	49462	16.30	115.13
7次循环	49515	49400	49462	16.29	115.08

从表1可见,性能指标趋于稳定后,仍存在剩余误差,究其原因可归结为:一方面,有限长度的一组测量数据不可能完全反应三分量磁传感器全部姿态下的输出总量;另一方面,测量数据中含有其他性质的误差,如:外磁场的时变和传感器温漂等。

6 结束语

三分量磁通门传感器的校正,是进行三分量磁场测量工作的必要前期准备。循环优化算法包含了优化和循环计算两种解决问题的思想。优化算法,建立在对三分量磁通门传感器的三种固有误差特点分析的基础之上,利用固有误差都造成磁传感器输出总量在一定范围内波动的现象,建立能够反映磁场总量波动幅度的目标函数,采用优化求极值方法求算校正参数,保证了校正参数的最优性;循环算法以提高三分量磁通门传感器的校正效果为目的,在查明测量数据中三种固有误差的同时存在,且影响单独求算每种误差校正参数准确性的前提下,采用循环计算的方式,保证

了校正参数的准确性。

在循环优化算法的应用中,应尽可能多地采集测量数据,以全面反映三分量磁传感器在各种姿态下输出总量的波动情况。一组有效的测量数据,经过几次循环优化计算后,校正参数和校正结果的磁场总量数据统计指标即趋于稳定。最终的校正参数不可能完全消除磁场总量的波动,如果要进一步提高校正效果,则需采取措施保证外磁场的均匀和时不变,并滤除传感器温漂等影响。

参考文献:

- [1] M P Lassahn, G. Trenkler. Vectorial Calibration of 3D Magnetic Field Sensor Arrays [J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Apr. 1995, 44 (2): 360 ~ 362.
- [2] D G Egziabhe, G H Elkaim, J D Powell, et al. A non-linear two-step estimation algorithm for calibrating solid-state strapdown magnetometers [A]. The International Conference on Integrated Navigation Systems [C]. Peterburg Russia; 2001.
- [3] 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, 13(1): 88 ~ 91.
- [4] D G Egziabhe. Magnetometer autocalibration leveraging measurement locus constraints [J]. Journal of Aircraft, 2007, 44(4): 1361 ~ 1368.
- [5] J M G Merayo, F Primdahl, P Brauer, et al. The orthogonalization of magnetic systems [J]. Sensors and Actuators A, 2001, 89: 185 ~ 196.
- [6] J M G Merayo, P Brauer, F Primdahl, et al. Scalar calibration of vector magnetometers [J]. Measurement Science and Technology, 2000, 11: 120 ~ 132.
- [7] H U Auster, K H Fornacon, E Georgescu, et al. Calibration of flux-gate magnetometers using relative motion [J]. Measurement Science and Technology, 2002, 13: 1124 ~ 1131.
- [8] T Pyhäläinen. Automatic and adaptive calibration of 3D field sensors [J]. Applied Mathematical Modeling, 2008, 32: 575 ~ 587.
- [9] 赵松年,佟杰新,卢秀春,等. 现代设计方法 [M]. 北京:机械工业出版社, 1996. 47 ~ 50.

(下转第72页)

