

一种基于椭球假设的地磁传感器误差补偿方法

许 杨, 石志勇, 杨云涛, 李茂林

(军械工程学院 火炮工程系, 河北 石家庄 050003)

摘 要: 为了提高地磁总场的测量精度,在现阶段关于磁罗盘普遍采用椭圆假设补偿方法的基础上,分析地磁干扰特性,采用一种基于椭球模型假设理论的误差补偿模型补偿磁干扰环境下的地磁总场。根据此理论,用 FM300 地磁测量仪,并结合无磁转台进行了补偿实验。实验结果表明,该方法能有效提高地磁总场的测量精度,解决了地磁传感器不同姿态测量某点误差较大的缺陷,利用此方法能够有效简化操作,缩短测算时间。

关键词: 椭球拟合; 磁传感器; 误差补偿; 地磁干扰

中图分类号: TN919-34

文献标识码: A

文章编号: 1004-373X(2010)24-0176-04

Geomagnetic Sensor Error Compensation Method Based on Ellipsoid Assumption

XU- Yang, SHI Zhi-yong, YANG Yun-tao, LI Mao-lin

(Artillery Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: On the basis of ellipsoid assumption compensation widely used by magnetic compass at the present stage, the characteristic of magnetic interference is analyzed for the sake of improving the measurement accuracy of geomagnetic total field. A error compensation model based on ellipsoid model assumption theory is adopted to compensate the geomagnetic total field in the magnetic interference environment. According to this theory, a compensation experiment was carried out with FM300 geomagnetic measurement instrument and antimagnetic turntable. The result shows that this method can effectively improve the measurement accuracy of geomagnetic total field, solve the problem of the much more measuring error of the geomagnetic sensor in different attitudes, simplify the operation process, and shorten the period of measurement and calculation.

Keywords: ellipsoid fitting; magnetic sensor; error compensation; geomagnetic interference

0 引言

地磁导航技术是目前国内外新兴的导航技术,具有被动接收、隐蔽性好,误差不随时间积累等优点;可以提供全天时、全天候、全地域的导航定位及姿态信息,而且地磁传感器体积小,价格便宜,能耗低,易于集成^[1],因此在国内外导航技术中逐渐成为研究的热点,近年来得到了广泛的重视。

制约地磁导航技术发展的因素主要有 3 方面:地磁图构建、地磁匹配算法和地磁测量技术。地磁图构建的难点在于如何根据有限的地磁测量数据,准确推算更大范围的地磁分布规律;地磁匹配算法的技术难点在于提高算法的实时性和鲁棒性,保证匹配精度,目前许多学者致力于这 2 方面的研究,并取得了一定的研究成果^[2];地磁测量技术的主要难点在于如何消除载体磁场的影响,目前关于地磁补偿技术的研究主要集中在利用

地磁定向领域,常用方法有自差补偿法、基于 Tolles-Lawson 方程的磁补偿方法、基于椭圆假设的磁补偿方法等^[3]。地磁匹配导航所用匹配参数主要是地磁总场,要实现地磁匹配必须实时测量载体所在位置的地磁总场^[4],分析上述补偿方法,它们仅补偿了地磁在水平方向的 2 个分量,如何快速准确地测量载体所在位置的地磁总场是需要进一步研究的问题。在此基于椭球假设原理,设计了地磁总场测量误差补偿方法。实验证明,该方法可以有效地提高地磁测量精度。

1 椭球假设

关于干扰地磁测量误差补偿模型的研究,可以将干扰因素分为软磁材料和硬磁材料。软磁材料能够用相对较低的磁场强度磁化,当外磁场移走后保持相对弱的剩磁,这种材料被环境磁场磁化后产生的感应磁场将影响其周围磁场。硬磁材料是在经受外磁场后能保持大量剩磁的磁性材料,相当于永久磁铁,它的磁场强度可以认为是不变的,不会随着载体姿态或位置的变化而改变,故称为固有磁场。在传感器周围可能有许多硬磁材料,它们产生的磁场大小和方向都不相同。由于地磁传

收稿日期:2010-07-26

基金项目:惯性、重力、地磁匹配导航技术(51309060301)

传感器的体积很小,可以认为这些硬磁材料所产生的合成磁场在传感器所在位置是均匀的。此时,传感器所测出的磁场分量,不仅含有地磁场在传感器 3 个轴上的分量,也包含了硬磁材料和软磁材料所产生的合成磁场在传感器 3 个轴上的分量^[5]。

对于某点干扰磁场的状态,现在普遍采用一种假设,即在无干扰的磁场状态下,某点地磁总场的顶点是随着传感器姿态的变化画出一个圆球^[6]。对于一个姿态全方位变化的载体,当存在硬磁效应时,其干扰效果相当于在传感器三轴增加一个固定的差值,使球体模型整体产生了一个偏置,原点发生偏移;当存在软磁效应时,在不同姿态下感应磁场大小不同,因此球体模型发生形变,近似为一个椭球,即该感应磁场对地磁测量的影响可以认为是传感器测出的 3 个分量的合成向量顶点在空间画出的一个椭球面。这就是椭球假设理论^[7]。

将总场模量进行正交分解得到三维坐标系下顶点坐标,顶点坐标表达式为^[8]:

$$F_x = a \cos \theta \sin \phi, F_y = a \cos \theta \cos \phi, F_z = a \sin \theta \quad (1)$$

式中: a 为磁总场强度; θ 为转动状态水平面与初始状态水平面夹角; ϕ 为水平面转动角度。

设无载体干扰时传感器测得的总场顶点坐标为 F_{mx}, F_{my}, F_{mz} , 存在载体干扰时传感器测得的总场顶点坐标为 F_x, F_y, F_z , 假设椭球原理可以用式(2)来描述^[9]:

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = K G Q \begin{pmatrix} F_{mx} \\ F_{my} \\ F_{mz} \end{pmatrix} + F \quad (2)$$

式中:

$$K = \begin{pmatrix} 1/k_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/k_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/k_3 \end{pmatrix}; G = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}; Q = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; F = \begin{pmatrix} F_{cx} \\ F_{cy} \\ F_{cz} \end{pmatrix}$$

F_{cx}, F_{cy}, F_{cz} 是与硬磁场有关的参数; θ, ϕ 为载体姿态角; k_1, k_2, k_3 是与软磁场有关的参数。矩阵 K 使得球体

$$\begin{aligned} & (k_1^2 \cos^2 \theta + k_2^2 \cos^2 \theta \sin^2 \phi + k_3^2 \sin^2 \theta \sin^2 \phi) F_x^2 + (k_1^2 \sin^2 \theta + k_2^2 \cos^2 \theta \cos^2 \phi + k_3^2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi) F_y^2 + \\ & (k_2^2 \sin^2 \theta + k_3^2 \cos^2 \theta) F_z^2 + (2k_1^2 \cos \theta \sin \theta + 2k_2^2 \cos^2 \theta \sin \theta \cos \phi + 2k_3^2 \sin^2 \theta \sin \theta \cos \phi) F_x F_y + \\ & (2k_2^2 \cos \theta \cos \theta \sin \theta + 2k_3^2 \sin \theta \cos \theta \cos \phi) F_x F_z + (2k_2^2 \cos \theta \sin \theta \sin \phi + 2k_3^2 \sin \theta \sin \theta \cos \phi) F_y F_z + \\ & (2k_1 \cos \theta f_{gx} + 2k_2 \cos \theta \sin \theta F_{gy} + 2k_3 \sin \theta \sin \theta f_{gz}) F_x + (2k_1 \sin \theta F_{gx} + 2k_2 \cos \theta \cos \theta F_{gy} + \\ & 2k_3 \sin \theta \cos \theta F_{gz}) F_y + (2k_2 \sin \theta F_{gy} + 2k_3 \cos \theta F_{gz}) F_z + F_{gx}^2 + F_{gy}^2 + F_{gz}^2 - R^2 = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

对应式(4)可列出方程关系式为:

变形成椭球体,矩阵 R, Q 使得球体在原坐标系中分别沿水平面和 z 轴旋转,矩阵 F 使得球体的中心发生位移。

2 基于椭球假设的误差方法

依据椭球假设理论^[10],将式(2)逆推如下:

$$\begin{pmatrix} F_{mx} \\ F_{my} \\ F_{mz} \end{pmatrix} = K G Q \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} + F \quad (3)$$

式中:

$$K = \begin{pmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{pmatrix}; G = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}; Q = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; F = K G Q \begin{pmatrix} F_{cx} \\ F_{cy} \\ F_{cz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{gx} \\ F_{gy} \\ F_{gz} \end{pmatrix}$$

式中: θ, ϕ 为与载体姿态角有关的参数。

矩阵 K 使得椭球体变形成球体,矩阵 G, Q 使得椭球体在原坐标系中分别沿水平面和 z 轴旋转,矩阵 F 使得椭球体的中心发生位移。

通过实际测量的数据可以确定椭球方程。由于传感器在不同姿态测量的总场顶点都在椭球体的面上,所以设某姿态下测得的总场坐标为 F_x, F_y, F_z ; 则其满足椭球的一般方程:

$$C_1 F_x^2 + C_2 F_y^2 + C_3 F_z^2 + C_4 F_x F_y + C_5 F_y F_z + C_6 F_x F_z + C_7 F_x + C_8 F_y + C_9 F_z = 1 \quad (4)$$

式中: C_1, C_2, \dots, C_9 均为待定参数。当测得不同姿态下 9 组上述磁场坐标参数,就可以通过式(4)求出这些待定参数,从而求出椭球体的参数方程。根据式(3)可以得到:

$$F_{mx} = k_1 \cos \theta F_x + k_1 \sin \theta F_y + F_{gx} \quad (5)$$

$$F_{my} = k_2 \cos \theta \sin \phi F_x + k_2 \cos \theta \cos \phi F_y + k_2 \sin \theta F_z + F_{gy} \quad (6)$$

$$F_{mz} = k_3 \sin \theta \sin \phi F_x + k_3 \sin \theta \cos \phi F_y + k_3 \cos \theta F_z + F_{gz} \quad (7)$$

根据球的定义, F_{mx}, F_{my}, F_{mz} 可满足:

$$F_{mx}^2 + F_{my}^2 + F_{mz}^2 = R^2 \quad (8)$$

将式(5)~式(7)带入式(8),经过化简得到方程:

$$\begin{aligned} (R^2 - F_{gx}^2 - F_{gy}^2 - F_{gz}^2) C_1 &= k_1^2 \cos^2 \sin^2 + k_2^2 \cos^2 \sin^2 + k_3^2 \sin^2 \sin^2 (R^2 - F_{gx}^2 - F_{gy}^2 - F_{gz}^2) C_2 = k_1^2 \sin^2 + \\ k_2^2 \cos^2 \cos^2 + k_3^2 \sin^2 \cos^2 (R^2 - F_{gx}^2 - F_{gy}^2 - F_{gz}^2) C_3 &= k_2^2 \sin^2 + k_3^2 \cos^2 (R^2 - F_{gx}^2 - F_{gy}^2 - F_{gz}^2) C_4 = \\ 2k_1^2 \cos \sin + 2k_2^2 \cos^2 \sin \cos + 2k_3^2 \sin^2 \sin \cos (R^2 - F_{gx}^2 - F_{gy}^2 - F_{gz}^2) C_5 &= 2k_2^2 \cos \cos \sin + \\ 2k_3^2 \sin \cos \cos (R^2 - F_{gx}^2 - F_{gy}^2 - F_{gz}^2) C_6 &= 2k_2^2 \cos \sin \sin + 2k_3^2 \sin \sin \cos (R^2 - F_{gx}^2 - F_{gy}^2 - F_{gz}^2) \\ C_7 &= 2k_1 \cos F_{gx} + 2k_2 \cos r \sin F_{gy} + 2k_3 \sin r \sin F_{gz} (R^2 - F_{gx}^2 - F_{gy}^2 - F_{gz}^2) C_8 = 2k_1 \sin F_{gx} + \\ 2k_2 \cos \cos F_{gy} + 2k_3 \sin \cos F_{gz} (R^2 - F_{gx}^2 - F_{gy}^2 - F_{gz}^2) C_9 &= 2k_2 \sin F_{gy} + 2k_3 \cos F_{gz} \end{aligned} \tag{10}$$

上面 9 个方程组成的方程组有 $R, F_{gx}, F_{gy}, F_{gz}$, , k_1, k_2, k_3 一共 9 个未知参数,可据此求出补偿后的球体模型,球体半径 R 为要求的总磁场强度。

模型成功将椭球模型还原到球体模型,获得了很好的效果。

(6) 取有铁块干扰参数重复上步计算,结果如表 3,表 4 所示。

3 实 验

为了验证上述方法的有效性,采用自行研制的三轴转台和 FVM-400 型三轴磁通门磁力仪进行了实验,如图 1 所示。

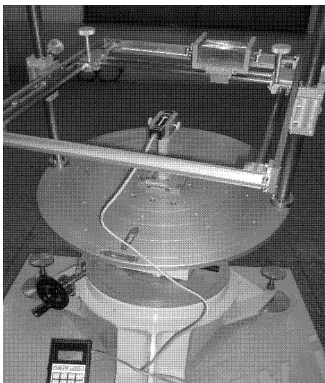


图 1 地磁测量实验装置

通过该转台可以模拟载体在实际环境中的姿态变化,实现载体在水平 360 左右和前后各正负 60 的姿态变化。

实际应用中的具体补偿方法为:

- (1) 将无磁转台状态归零,记录状态参数。
- (2) 将磁力仪安装在转台工作面的中心,并调节三轴使转台工作面处于 18 种以上姿态位置,分别记录不同姿态下的姿态角和地磁总场参数。
- (3) 将一铁块作为干扰源安装在转台传感器探头上,调节转台重复上一步的 18 种姿态,分别记录这些姿态的姿态角和地磁总场参数。
- (4) 根据式(1)将测得的总场顶点正交分解得到三维坐标系的顶点坐标。
- (5) 分为 2 组取 9 种不同姿态参数带入式(4)求得椭球模型参数。

根据椭球参数对应式(10)求得 2 个补偿后的磁场强度为 R, R 。第 1 组无铁块干扰参数如表 1 所示。

第 2 组无铁块干扰参数如表 2 所示。

从表 2 两组数据的最终补偿结果 $R = 46\ 522\ \text{nt}$, $R = 46\ 520\ \text{nt}$ (相差 2 nt 属于正常误差)可以看出,该

表 1 第 1 组无铁块干扰参数

$\varphi / (^{\circ})$	$\theta / (^{\circ})$	总场 / nt	R / nt
0	0	46 470	46522
45	15	46 593	
90	0	46 610	
135	35	46 613	
180	0	46 499	
225	15	46 486	
270	35	46 434	
315	0	46 435	
345	25	46 384	

表 2 第 2 组无铁块干扰参数

$\varphi / (^{\circ})$	$\theta / (^{\circ})$	总场 / nt	R / nt
0	20	46 396	46 520
30	45	46 400	
60	30	46 495	
90	40	46 544	
120	10	46 579	
150	35	46 548	
180	25	46 522	
210	15	46 510	
230	5	46 475	

表 3 第 1 组有铁块干扰参数

$\varphi / (^{\circ})$	$\theta / (^{\circ})$	总场 / nt	R / nt
0	0	46 365	46 245
45	15	46 831	
90	0	47 076	
135	35	46 198	
180	0	46 162	
225	15	45 836	
270	35	46 027	
315	0	46 071	
345	25	46 105	

表 4 第 2 组有铁块干扰参数

$\varphi / (^{\circ})$	$\theta / (^{\circ})$	总场 / nt	R / nt
0	20	46 276	46 299
30	45	46 375	
60	30	46 818	
90	40	46 634	
120	10	46 787	
150	35	46 020	
180	25	45 856	
210	15	45 831	
230	5	45 866	

由表 3、表 4 两组数据可知,误差为 50 nt,相对总

场强度较小,属可接受范围。用球体模型得到验证,取两种状态平均值计算自差 = 249 nt。

(7) 重复步骤(2)和(3),选择 9 种以上姿态分别测量未安装铁块和安装铁块的姿态角和总场参数。计算验证结果表明,为了印证实验结果的准确性,在该实验点重新在全姿态条件下均匀的测量了 10 组姿态参数同此实验数据对比,其结果见表 5。从表 5 可以看出,相对于原状态不同姿态铁块干扰后误差最大达520 nt,通过此方法校对后误差减小到 25 nt,极大地提高了传感器测量的准确性。在此提供了一个可靠的误差补偿方法,其运算结果稳定且均值平稳,有着相当好的补偿效果。如采用更高精度的传感器结果还可进一步提高。更为重要的是该方法计算量小,仅通过传感器本身的数据就可以完成运算,对设备的要求较小,因此有很强的实用性。

表 5 实验数据对比结果

/(°)	/(°)	未安装铁块总场/nt	未安装铁块校正总场/nt	安装铁块后总场/nt	安装铁块后校正总场/nt	自差补偿总场/nt	校正前误差/nt	校正后误差/nt
15	3	46 489		46 513			24	
55	15	46 524			46914			390
95	27	46 569		46 810			241	
135	39	46 573		46 162			- 411	
175	9	46 506	46 523	46 079	46 299	46 274	- 427	25
215	51	46 603		46 083			- 520	
255	33	46 581		46 025			- 561	
295	45	46 555		46 071			- 484	
335	21	46 399		46 068			- 311	

4 结 语

在此结合传感器误差产生原理,研究了基于椭球体拟合的智能自差校对方法。其中,主要研究了椭球体自差模型的产生机理,并推导了自差补偿公式,通过由球

到椭球在坐标系的映射方法,提高了传感器自差校对后的测量精度。该方法不需要复杂的操作和对专业设备的依赖,只需要依赖传感器不同姿态测试数据之间的相互关系就可以完成传感器的自差校对。实验表明,该方法在需要高精度传感器测量数据时消除载体自差和干扰误差方面有很高的应用价值和前景。

参 考 文 献

[1] GOLDENBERG F. Geomagnetic navigation beyond the magnetic compass [C]. 2006 IEEE/ION position, Location and Navigation Symposium. IEEE/ION, 2006: 684-694.

[2] 杨云涛,石志勇,关贞珍,等. 地磁场在导航定位系统中的应用[J]. 中国惯性技术学报,2007,15(6):686-692.

[3] 张晓明,赵剡. 一种快速载体磁场补偿方法研究[J]. 中北大学学报,2009,30(3):286-291.

[4] 张学孚,陆怡良. 磁通门技术[M]. 北京:国防工业出版社,1995.

[5] 杨新勇,黄圣国. 磁航向测量系统误差修正方法研究[J]. 仪器仪表学报,2004,25(4):466-468.

[6] 王维,张英堂,罗鸿飞. 椭圆拟合在某新型磁定向系统罗差补偿中的应用研究[J]. 军械工程学院学报,2009,21(3):51-54.

[7] 刘诗斌. 无人机磁航向测量的自动罗差补偿研究[J]. 航空学报,2007,28(2):411-414.

[8] 黄汛,高启孝,周山. 基于 GPS 辅助以实现捷联式数字磁罗经自动消差的研究[J]. 中国惯性技术学报,2004,12(5):31-35.

[9] YANG Yur-tao, SHI Zhi-yong, GUAN Zhen-zhen. Research of the magnetic disturbances compensation algorithm based on uniform design[J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(5): 13-17.

[10] 丁士俊,畅开娜,高琐义. 独立网椭球变换与坐标转换的研究[J]. 测绘通报,2008(8):4-6,35.

作者简介: 许 杨 男,1984 年出生,硕士研究生。主要从事信号处理、智能导航定位的研究。
石志勇 男,1965 年出生,副教授。主要从事现代检测、智能车辆、导航定位的研究。

(上接第 175 页)

[9] BHATTACHARYA Prabir. On the Dempster-Shafer evidence theory and non-hierarchical aggregation of belief structures[J]. IEEE Transactions on System Man and Cybernetics Part A: System and Humans, 2000, 30(5): 526-536.

[10] KUMAR Manish, GARG Devendra P, ZACHERY Randy A. A method for judicious fusion of inconsistent multiple sensor data [J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(5): 723-733.

作者简介: 赵 英 男,1966 年出生,教授,博士。主要研究方向为分布式系统、网格计算、计算机网络。
陈淑娟 女,1983 年出生,研究生。主要研究方向为计算机网络。

论文发表、论文降重、论文润色请扫码



免费论文查重，传递门 >> <http://free.paperyy.com>

阅读此文的还阅读了：

- [1. 基于椭球假设的 MIMU 现场标定方法](#)
- [2. 试验机传感器误差补偿系统与智能化](#)
- [3. 基于地磁传感器的计转数引信可行性研究](#)
- [4. 基于地磁传感器的计转数引信可行性研究](#)
- [5. 基于椭球假设的三轴电子罗盘罗差补偿研究](#)
- [6. 地磁台基线值分析](#)
- [7. 基于椭球拟合的三轴磁传感器误差补偿方法](#)
- [8. 锻压机械打击力测量误差的加速度补偿](#)
- [9. 基于椭球拟合的三轴磁传感器快速标定补偿方法](#)
- [10. 基于地磁传感器的弹体姿态角测量方法研究](#)
- [11. 基于椭球拟合的三轴加速度计 误差补偿方法](#)
- [12. 基于椭圆假设的单对磁编码器误差补偿方法](#)
- [13. 传感器测量误差补偿方法](#)
- [14. HMR3000数字罗经模块在地效益船上的应用](#)
- [15. 基于椭球假设的三轴电子罗盘罗差补偿研究](#)