

# 基于最小二乘的地磁场测量误差补偿技术

杨宾峰<sup>1</sup>, 樊博宇<sup>2</sup>, 胥俊敏<sup>1</sup>, 李 驰<sup>1</sup>, 曹海霞<sup>1</sup>, 张 辉<sup>3</sup>

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077; 2. 电子信息控制重点实验室, 成都, 610036;  
3. 空军工程大学科研部, 西安, 710051)

**摘要** 地磁导航中获取地磁场的精确测量值是进行地磁匹配导航的前提和基础。针对实际地磁测量中磁力仪易受环境磁场干扰带来的影响补偿效果的问题, 首先分析了软磁误差以及硬磁误差对磁场测量的影响效果, 建立了地磁测量误差的参数化模型。采用 ANSYS 仿真软件, 通过 3 对内径不同的亥姆霍兹线圈产生了 3 个方向的匀强磁场, 从而实现了地磁场的模拟。在此基础上, 将磁力仪和干扰源建到仿真模型中, 通过 360° 旋转磁力仪分别得到了有干扰和无干扰时的三维磁场值, 然后采用最小二乘法对模型参数进行了估计, 最终实现了对磁场测量误差的补偿。仿真结果表明: 该方法简单易行, 简化了参数的求解过程, 具有较高的误差补偿能力, 地磁测量误差可以从 20 000 多纳特减少到几个纳特。

**关键词** 地磁导航; 地磁场测量; 最小二乘法; 误差补偿

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.06.007

**中图分类号** V249.32 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)06-0034-06

## Research on Error Compensation in Geomagnetic Field Measurement Based on Least Squares

YANG Bin Feng<sup>1</sup>, FAN Boyu<sup>2</sup>, XU Junmin<sup>1</sup>, LI Chi<sup>1</sup>, CAO Haixia<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>3</sup>

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;  
2. Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory, Chengdu 610036, China;  
3. Department of Scientific Research, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** The accurate geomagnetic field value is a prerequisite and foundation for the geomagnetic navigation. To solve this problem caused by magnetometer in actual magnetic field measurement influenced by environmental magnetic field, the influence of hard iron and soft iron errors on magnetic measurement is analyzed and the parameterized geomagnetic measurement compensation model is constructed firstly. The geomagnetic field is simulated by using three pairs of Helmholtz coils to generate uniform magnetic field with the software of ANSYS. By setting the different parameters of interference source and rotating the magnetometers in 360 degrees in the simulation model, the three dimensional magnetic field values with and without interference are got. Those parameters of the model are estimated using least squares based algorithm and geomagnetic measurement errors are calibrated. The simulation results show that this compensation method is simple, and easy to use, and has higher error compensation ability, and geomagnetic measurement errors can be reduced from 20 000 nT to several nanoteslas.

**Key words:** geomagnetic navigation; geomagnetic field measurement; least squares; error compensation

**收稿日期:** 2016-10-31

**基金项目:** 国家自然科学基金(51377172; 51577191); 电子信息控制重点实验室基金; 陕西省自然科学基金(2015JM5147)

**作者简介:** 杨宾峰(1976—), 男, 陕西户县人, 副教授, 主要从事电磁检测以及地磁导航技术研究. E-mail: bf\_yang@163.com

**引用格式:** 杨宾峰, 樊博宇, 胥俊敏, 等. 基于最小二乘的地磁场测量误差补偿技术 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(6): 34-39. YANG Bin Feng, FAN Boyu, XU Junmin, et al. Research on Error Compensation in Geomagnetic Field Measurement Based on Least Squares [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(6): 34-39.

地磁场是地球的固有资源,为航空、航天、航海提供了天然的坐标系,利用地磁场进行飞行器导航具有无源、无辐射、抗干扰的特点,因此在国内外导航领域的研究中逐渐成为研究热点<sup>[1-3]</sup>。地磁导航的原理是通过地磁传感器获取的实时地磁数据与存储在计算机中的地磁基准图进行匹配来定位。由于地磁场是矢量场,在地球近地空间内任意一点的地磁矢量都不同于其它地点的矢量,且与该地点的经纬度存在相互对应,因此,理论上只要确定该点的地磁场矢量即可实现全球定位。

地磁导航中,实现地磁场测量的三轴磁力仪(Three-axis Magnetometer, TAM)会受到很多误差源的影响<sup>[4-7]</sup>,这些误差源主要分为 2 类:一类是传感器自身结构和材料等引起的误差,如非正交误差、刻度误差以及零偏误差等,这类误差称为仪表误差;另一类误差源是载体干扰磁场,通常包括硬磁误差(Hard Iron Errors)和软磁误差(Soft Iron Errors),其中,硬磁误差主要由载体上铁磁性物质的剩磁所产生。软磁误差主要由载体上的软磁性材料在地磁场中被磁化而产生。仪表误差可以通过磁力仪的标定来进行消除,本文只讨论载体干扰磁场的补偿问题。

对于载体干扰磁场的补偿,常用的方法有卡尔曼滤波法、椭圆约束法等。卡尔曼滤波法,包括无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filter, UKF)和扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF),需要对所建立的模型参数方程进行线性化处理,从而估计模型中的未知参数<sup>[8-9]</sup>,估计过程需要反复进行直到达到收敛条件。但这种方法对初始参数的选择很敏感,参数选取不当可能导致滤波发散。椭圆约束法基于这样的假定,当磁力仪受到各种误差的影响时,硬磁误差以及磁力仪的零偏误差将会使得圆心产生偏移,同时刻度因子误差以及软磁误差将会使得圆变成椭圆,因此,磁力仪的输出轨迹将被约束在这个椭圆上,然后,根据椭圆参数与载体磁场系数之间的关系来获得干扰磁场<sup>[10-11]</sup>。这种方法要求磁力仪所采集的数据必须能够拟合出一个椭圆,算法复杂,从而限制了其在实际中的应用。

国内的相关学者也对地磁测量误差问题进行了研究<sup>[12-14]</sup>,对于测量误差的补偿,国内研究中也采用了与国外相类似的求解方法,例如,基于椭圆约束的求解方法<sup>[15]</sup>以及卡尔曼滤波法<sup>[16]</sup>等。但以上这些研究中所采用的方法与国外基本相同,因此,也都存在着与国外研究相类似的问题难以解决。

近年来,几种存在闭合解形式的磁力仪标定方法相继被提出,其通过引入中间变量,将非线性的观测方程转换为线性矩阵形式,这样就可以采用标准

的最小二乘方法以及其相关改进算法进行求解,其目的就是减少计算量且无需提供初始值。本文采用最小二乘算法对模型参数进行了估计,该算法简单,实时性高,地磁测量误差可从补偿前的 20 000 多纳特减少到几个纳特,测量精度明显得到提高。

## 1 载体干扰磁场分析

对于安装在导航载体上进行磁场测量的磁力仪而言,载体的硬磁误差和软磁误差对磁力仪测量结果的影响最大<sup>[17-18]</sup>。硬磁误差主要由载体上的铁磁性物质的剩磁所产生,常见的硬磁材料有永磁体和高碳钢等,由于硬磁材料具有高的矫顽力,其一经磁化所产生的磁场随时间的变化很慢,由于磁力仪通常捷联于载体,令载体坐标系和磁力仪坐标系重合,因此不论载体姿态如何变化,硬磁误差在磁力仪 3 个轴上的投影分量是固定不变的<sup>[19]</sup>,通常用  $\mathbf{H}_h$  来表示硬磁误差。

$$\mathbf{H}_h = [H_{hx} \ H_{hy} \ H_{hz}]^T \quad (1)$$

软磁误差是由载体的软磁材料被地磁场磁化而产生的,由于软磁材料的矫顽力较低,因此其会随着地磁场大小以及载体的姿态的变化而变化,通常用  $\mathbf{H}_s$  来表示软磁误差。

$$\mathbf{H}_s = \mathbf{D}\mathbf{H}_e = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} \mathbf{H}_e \quad (2)$$

式中: $\mathbf{D}$  为感应磁场系数矩阵,当载体一定时,该矩阵中的元素为常数; $\mathbf{H}_e$  为当地地磁场的真实值。

综合分析载体硬磁误差和软磁误差的影响,磁力仪进行地磁场测量时的输出可以表示为:

$$\mathbf{H}_m = \mathbf{H}_e + \mathbf{H}_h + \mathbf{H}_s \quad (3)$$

将式(1)和式(2)代入式(3),有如下公式成立:

$$\mathbf{H}_m = (\mathbf{I}_{3 \times 3} + \mathbf{D})\mathbf{H}_e + \mathbf{H}_h = \mathbf{K}\mathbf{H}_e = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 & K_3 \\ K_4 & K_5 & K_6 \\ K_7 & K_8 & K_9 \end{bmatrix} \mathbf{H}_e + \begin{bmatrix} H_{hx} \\ H_{hy} \\ H_{hz} \end{bmatrix} \quad (4)$$

从式(4)可以看出,为了从磁力仪的测量值得到真实地磁场值,需要求解系数矩阵中的 9 个参数以及硬磁误差的 3 个参数,因此,需要至少需要得到磁力仪在 4 种姿态下的测量结果,才能得到以上 12 个误差补偿系数。

## 2 基于最小二乘的补偿模型参数估计

为了求解式(4)中的 12 个未知参数,可以将其进行变形简化为  $\mathbf{A}\mathbf{X}=\mathbf{B}$  的形式。这时可以采用最

小二乘法进行参数的估计<sup>[20]</sup>,其解为  $\mathbf{X}_{LS} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}$ 。其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & H_{ex} & 0 & 0 & H_{ey} & 0 & 0 & H_{ez} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & H_{ex} & 0 & 0 & H_{ey} & 0 & 0 & H_{ez} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & H_{ex} & 0 & 0 & H_{ey} & 0 & 0 & H_{ez} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{X} = [H_{hx} \ H_{hy} \ H_{hz} \ k_1 \ k_4 \ k_7 \ k_2 \ k_5 \ k_8 \ k_3 \ k_6 \ k_9]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{b} = [H_{mx} \ H_{my} \ H_{mz}]^T \quad (7)$$

式中: $H_{ex}$ 、 $H_{ey}$ 、 $H_{ez}$ 代表没有受到干扰时地磁场的测量值; $H_{mx}$ 、 $H_{my}$ 、 $H_{mz}$ 代表受到干扰时地磁场的测量值。

### 3 地磁场模拟

根据以上对地磁场测量中误差补偿技术的分析可知,为了求取补偿模型中的参数,需要得到不同姿态下磁力仪的测试结果,实际中,通常采用试验的方法,将磁力仪放置于空旷的场地进行地磁场的测试,但测试结果容易受到周围环境的干扰。一个可替代的方案就是用亥姆霍兹线圈来产生模拟的地磁场,然后将其放置于磁屏蔽筒内以屏蔽周围磁场的干扰,但这种实验方法成本较高。本文采用仿真的方法建立地磁场的模型,然后给模型中增加硬磁性和软磁性材料来模拟干扰源,这样可精确获得只由干扰引起的磁场变化,从而提高补偿参数的估计精度。

亥姆霍兹线圈可以在其轴线中间区域产生匀强磁场,为了产生3个方向的地磁场,这就需要3对亥姆霍兹线圈,本文采用大型有限元仿真软件 ANSYS 来进行地磁场的仿真建模,结果见图1。

兹线圈的仿真参数见表1。

表1 亥姆霍兹线圈参数

Tab. 1 The parameters of the Helmholtz coils

	内环(Y向)	中环(X向)	外环(Z向)
线圈内径/mm	180	230	280
线圈外径/mm	190	240	290
匝数	100	100	100
电流/A	0.05	0.05	0.05

图2为仿真得到的3对亥姆霍兹线圈中心轴线附近的磁场分布,从图中可以看出,3对线圈轴线中心附近的磁场基本保持不变,为一个匀强场,仿真模型中的磁力仪和干扰源刚好位于该区域内,因此,本文所建立的地磁场仿真模型是完全可以用来模拟地磁场的。

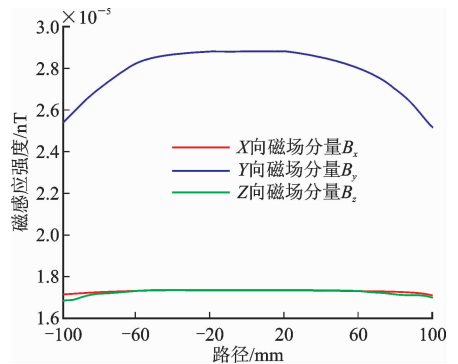


图2 3组亥姆霍兹线圈产生的磁场分布图

Fig. 2 The magnetic field distribution of three pairs of Helmholtz coils on the axis

### 4 补偿算法的仿真分析

在仿真中,为了获得磁力仪受到干扰时在不同姿态下的地磁场测量数据,我们保持亥姆霍兹线圈不动,将磁力仪沿中心点进行旋转,每隔 $10^\circ$ 进行一次仿真,共进行了36次仿真计算。仿真中干扰源采用的是铁块,其相对磁导率为100,电阻率为 $2.65 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ,尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。

图3为有干扰存在时磁力仪测量得到的地磁场的X、Y、Z3个方向的分量,图4为磁力仪测得的地磁场总场值。从图中可以看出,由于干扰源的存在,地磁场的测量值受到了很大的干扰,随着磁力仪旋转姿态的变化,地磁场测量值的总场值也发生了较

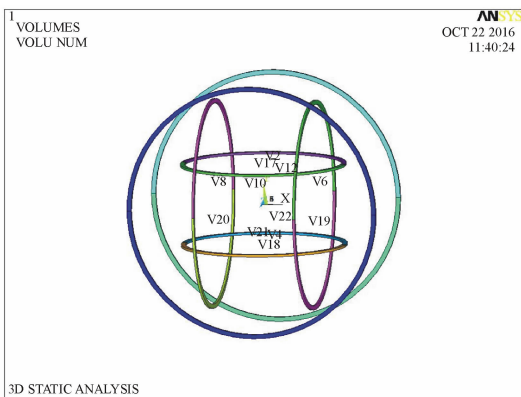


图1 亥姆霍兹线圈模拟地磁场的仿真模型

Fig. 1 The geomagnetic field simulation model by Helmholtz coils

图中,内环用来产生地磁场的Y向分量,中环用于产生地磁场的X向分量,外环用于产生地磁场的Z向分量。磁力仪位于整个模型的中心位置,用来测量地磁场3个方向的分量,在磁力仪的底部,仿真建立了一个金属板材,用来模拟干扰源。亥姆霍

大的变化,其变化幅度可以达到接近 16 000 nT,这对于地磁导航中地磁场的精确测量来讲是不能接受的误差。

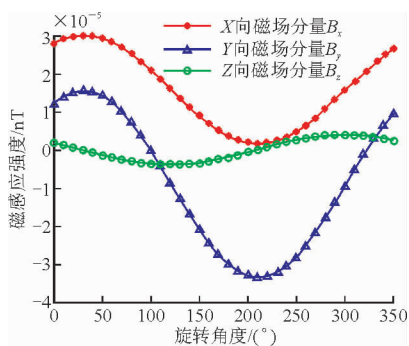


图 3 不同姿态下地磁场三分量的测量值

Fig. 3 The measured value of the geomagnetic field component

为了对载体干扰磁场进行补偿,根据式(5)和式(7)可知,需要得到至少 4 个转动姿态下有干扰源存

在以及没有干扰源时的地磁场测量值,因此,让磁力仪每转动 60°分别进行 2 次仿真,此时,将模型中的干扰源分别赋于铁磁材料和空气特性,这样可以得到 6 组有、无干扰时的测量数据,如表 2 所示,表中,  $H_{ex}$ 、 $H_{ey}$ 、 $H_{ez}$  为无干扰时磁力仪的测量值,  $H_{mx}$ 、 $H_{my}$ 、 $H_{mz}$  为有干扰存在时磁力仪的测量值。

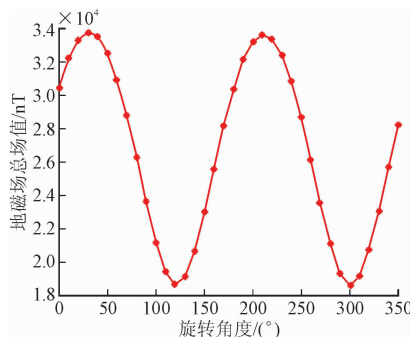


图 4 地磁场的总场值

Fig. 4 The total value of geomagnetic field

表 2 有、无干扰时磁力仪的地磁场测量值

Tab. 2 The measured value of geomagnetic field with and without errors

	转动角度/(°)					
	0	60	120	180	240	300
$H_{ex}$ /nT	3 315	3 336	1 868	434	405	1 846
$H_{ey}$ /nT	1 405	1 460	-1 048	-3 577	-3 630	-1 137
$H_{ez}$ /nT	1 736	-1 617	-3 333	-1 732	1 625	3 360
$H_{mx}$ /nT	27 919	28 210	16 032	3 581	3 317	15 496
$H_{my}$ /nT	11 943	12 413	-8 607	30 055	-30 566	9 507
$H_{mz}$ /nT	1 916	-2 024	-3 959	-1 951	1 984	3 922

得到以上测量值之后,就可以采用最小二乘法求解式(6)中的 12 个参数,其中:

$$K = \begin{bmatrix} -3.6073 & 6.9694 & 0.0013526 \\ -4.613 & 11.099 & -0.001984 \\ 1.172 & -0.71669 & 1.1716 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} H_{hx} \\ H_{hy} \\ H_{hz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 30077 \\ 11624 \\ -2994 \end{bmatrix}$$

然后,就可以对受到干扰的地磁场测量值进行补偿,图 5 为补偿前后磁力仪测量值的三维轨迹,从图中可以看出,当测量时存在干扰没有补偿时,磁力仪的测量值的轨迹严重偏离未受干扰的地磁场真实值。当补偿之后,校正后的地磁场测量值轨迹基本与地磁场真实值的轨迹相重合,说明本文所采用补偿方法可以很好的对受到干扰的地磁场进行补偿。为了更清楚地说明问题,图 6 给出了磁力仪测量值补偿前后的二维轨迹,从图中可以明显看出,没有受到干扰时,磁力仪在转动时的测量值轨迹是一个圆,

该圆的半径就是地磁场的总场值。而当磁力仪受到干扰时,其测量值的轨迹变成一个椭圆,而且椭圆的中心偏离圆心,这就表明磁力仪同时受到了硬磁干扰和软磁干扰。校正补偿之后的磁力仪测量值的轨迹又变成圆,而且基本与未受干扰的地磁场真实值相同。补偿结果与前面的理论分析相一致,也验证了本文所采用方法的正确性。

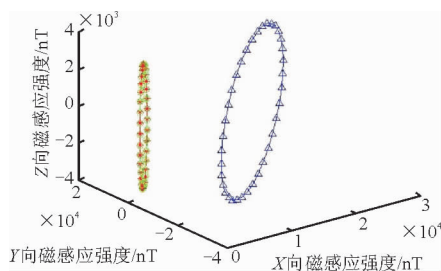


图 5 磁力仪测量结果补偿前后的三维轨迹

Fig. 5 3D locus of magnetometer

图 7 为补偿前后地磁场测量的总场值,从图中可以看出,没有补偿之前,地磁测量中存在的干扰使

得磁力仪的测量结果误差很大,其随着磁力仪的姿态的变化而发生剧烈的变化,无法稳定在地磁场的真实值上。但是经过校正之后,地磁场的测量值与真实值基本重合,不管磁力仪如何转动,其姿态如何变化,磁力仪的测量值都稳定在地磁场的真实值上,补偿效果非常明显。

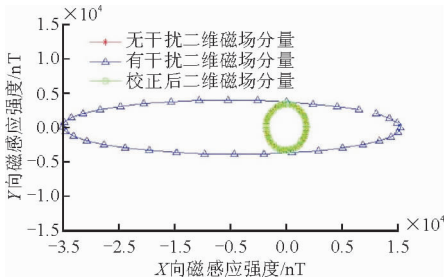


图6 磁力仪测量结果补偿前后的二维轨迹  
Fig. 6 2D locus of magnetometer

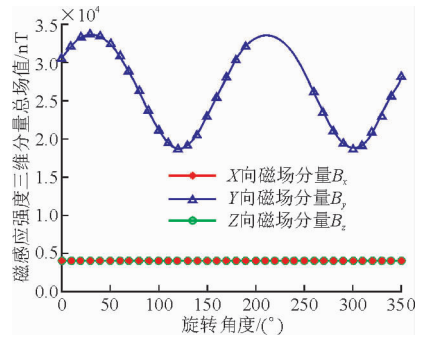


图7 地磁场测量误差补偿前后的对比

Fig. 7 Comparison of geomagnetic field measurement results with and without error compensation

为了进一步通过数据来进行定量分析补偿的效果,取其中的6组数据加以分析,其结果如表3所示。

表3 误差分析

Tab. 3 Errors analysis

	转动角度/(°)					
	180	190	290	300	310	320
无干扰时总场值/nT	3 998.7	3 999.5	4 000.1	3 999.2	3 998.8	3 999.4
有干扰时总场值/nT	30 331.0	32 094.0	19 346.0	18 598.0	19 123.0	20 731.0
校正后总场值/nT	3 996.6	3 999.8	3 997.0	3 996.8	3 999.2	4 000.6
校正前误差/nT	26 332.3	28 094.5	15 345.9	14 598.8	15 124.2	16 731.6
校正后误差/nT	-2.1	0.3	-3.1	-2.4	0.4	1.2

从表3可以看出,对磁力仪的测量数据进行补偿之后,地磁测量误差可以从20 000多纳特减少到几个纳特,测量精度明显得到提高。

## 5 结语

针对磁力仪容易受到载体磁场干扰带来的测量误差问题,本文在分析了载体干扰中常见的硬磁误差和软磁误差的基础上,得到了对磁力仪测量数据进行补偿的算法,然后,采用ANSYS软件建立了地磁场的仿真模型,基于最小二乘法对补偿模型中的参数进行了估计。仿真结果表明,本文中的算法简单易行,补偿精度高,论文的研究可为地磁导航中地磁场的精确测量以及地磁匹配奠定基础。

## 参考文献(References):

- [1] MOHAMADABADI K, COILLOT C, HILLION M. New Compensation Method for Cross-Axis Effect for Three-Axis AMR Sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(4): 1355-1361.
- [2] LEINWEBER H K, RUSSELL C T, TORKAR K. In-Flight Calibration of the Spin Axis Offset of a

Fluxgate Magnetometer with an Electron Drift Instrument [J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23: 1-13.

- [3] ZHANG Q, LI J, CHEN D X, et al. Method and Experiment for Compensating the Interferential Magnetic Field in Underwater Vehicle [J]. Measurement, 2014, 47: 651-657.
- [4] PANG H F, LUO S T, ZHANG Q, et al. Calibration of a Fluxgate Magnetometer Array and Its Application in Magnetic Object Localization [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24: 1-8.
- [5] WANG X L, ZHANG Q, LI H N. An Autonomous Navigation Scheme Based on Starlight, Geomagnetic and Gyros with Information Fusion for Small Satellites [J]. Acta Astronautica, 2014, 94: 708-717.
- [6] PANG H F, ZHANG Q, LI J, et al. Improvement of Vector Compensation Method for Vehicle Magnetic Distortion Field [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2014, 353: 1-5.
- [7] WU Z T, WU Y X, HU X P, et al. Calibration of Three-Axis Magnetometer Using Stretching Particle Swarm Optimization Algorithm [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(2): 281-292.

- [8] BERAVS T, BEGUS S, PODOBNIK J, et al. Magnetometer Calibration Using Kalman Filter Covariance Matrix for Online Estimation of Magnetic Field Orientation [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(8): 2013-2020.
- [9] CHEON Y J. Fast Convergence of Orbit Determination Using Geomagnetic Field Measurement in Target Pointing Satellite [J]. Aerospace Science and Technology, 2013, 30: 315-322.
- [10] GHANBARPOUR H A, POURTAKDOUST S H, SAMANI M. A New Non-Linear Algorithm for Complete Pre-Flight Calibration of Magnetometers in the Geomagnetic Field Domain [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2009, 223: 729-739.
- [11] ZHANG X J, LI X S, FENG Y B. Comparison of Three Kinds of Compensation Algorithms Based on Magnetic Sensors [C]//The 11th IEEE International Conference on Electronic measurement & Instruments, 2013: 675-678.
- [12] 于振涛, 吕俊伟, 稽绍康. 基于椭球约束的载体三维磁场补偿方法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(6): 731-734.  
YU Z T, LYU J W, JI S K. A Compensation Method for the Vehicle 3D Magnetic Field Based on Ellipsoid Constraint [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(6): 731-734. (in Chinese)
- [13] 吕志峰, 贺浩, 张金生, 等. 仿真地磁的磁场模拟装置 [J]. 电光与控制, 2014, 21(6): 76-80.  
LYU Z F, HE H, ZHANG J S, WANG Shicheng, et al. A Magnetic Field Generating Device Used for Simulation of Magnetic Field [J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(6): 76-80. (in Chinese)
- [14] 卢兆兴, 王仕成, 张金生, 等. 磁通门传感器在低空亚音速飞行器上应用的响应频率分析 [J]. 电光与控制, 2014, 21(1): 59-62.  
LU Z X, WANG S C, ZHANG J S, et al. Response Frequency Analysis of Fluxgate Sensor Applied to the Subsonic Low Altitude Aircraft [J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(1): 59-62. (in Chinese)
- [15] 黄学功, 王灵. 地磁信号检测系统误差分析与补偿方法研究 [J]. 兵工学报, 2011, 32(1): 33-36.  
HUANG X G, WANG J. Error Analysis and Compensation Methods for Geomagnetic Signal Detection System [J]. ACTA Armamentarii, 2011, 32(1): 33-36. (in Chinese)
- [16] HAN K, WANG H, XIANG T, et al. Magnetometer Compensation Scheme and Experimental Results on ZDPS-1A Pico-Satellite [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25: 430-436.
- [17] WU Z T, HU X P, WU M P, et al. Attitude-Independent Magnetometer Calibration for Marine Magnetic Surveys: Regularization Issue [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2013, 10: 1-9.
- [18] 吴志添, 武元新, 胡小平, 等. 基于总体最小二乘的捷联三轴磁力仪标定与地磁场测量误差补偿 [J]. 兵工学报, 2012, 33(10): 1202-1209.  
WU Z T, WU Y X, HU X P, et al. Calibration of Strapdown Three-Axis Magnetometer Measurement Error Compensation of Geomagnetic Field Based on Total Least Squares [J]. ACTA Armamentarii, 2012, 33(10): 1202-1209. (in Chinese)
- [19] 李季, 潘孟春, 罗诗途, 等. 半参数模型在载体干扰磁场补偿中的应用研究 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(9): 2147-2151.  
LI J, PAN M C, LUO S T, et al. Study on The Application of Semi-Parametric Model in Vehicle Interferential Magnetic Field Compensation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(9): 2147-2151. (in Chinese)
- [20] 赵国荣, 稽绍康, 杨飞, 等. 磁场信号检测误差分析及补偿算法 [J]. 系统仿真技术, 2012, 8(2): 153-157.  
ZHAO G R, JI S K, YANG F, et al. Magnetic Signal Detection Error Analysis and Compensation Algorithm [J]. System Simulation Technology, 2012, 8(2): 153-157. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)