

三轴磁强计测量误差修正方法

郝东, 绳涛, 陈小前

(国防科学技术大学 航天与材料工程学院, 长沙 410073)

摘要: 三轴磁强计测量误差修正对卫星姿态确定和控制具有重要意义。文章针对三轴磁强计测量误差的来源进行理论分析, 引入磁场输入引起的常值漂移, 建立了三轴磁强计测量误差修正模型, 并基于该模型在磁环境模拟器中对 Honeywell 公司的三轴磁强计 (HMR2300R) 进行标定。实验结果表明改进模型可以将测量误差控制在 50nT 以内, 满足低成本敏感器在微小卫星姿态确定中的应用要求。

关键词: 三轴磁强计; 修正模型; 常值漂移; 磁环境模拟器

中图分类号: V412.4²; TH762.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2011)05-0463-04

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2011.05.012

0 引言

三轴磁强计是航天器姿态确定与控制中最常用的低成本敏感器^[1-3], 满足一般微小卫星低精度姿态确定的要求, 具有价格低廉、质量轻、体积小、采样电路简单等特点。在轨运行的很多卫星都采用三轴磁强计作为姿态敏感器件, 体现出较好的应用效果^[2, 4-5]。

在使用三轴磁强计之前要先对其进行校正, 目前主要有 FLANN^[6]和正交变换^[7]两种方法。这两种方法在建模过程中都做了 z 轴重合假设和误差角度近似, 引入了模型误差, 降低了校正精度。

本文对三轴磁强计的误差来源进行分析建模, 提出三轴磁强计的常值漂移、三轴不正交及灵敏度不一致的误差修正方法, 使校正之后的三轴磁强计性能更接近于理想三轴正交磁强计。同时, 通过对实验数据的分析发现, 外部磁场会引起三轴磁强计微小的附加常值漂移。本文利用 VMS-12 磁环境模拟器对 HMR2300R 三轴磁强计进行标定。

1 校正模型

实际三轴磁强计测量误差主要是由于 3 个坐标轴不正交^[7]且输出灵敏度不一致、器件电气性能不一致 (常值漂移) 引起的。而且, 常值漂移和传感器内部本身剩磁^[8]的影响等原因使得三轴

磁强计的磁场测量值往往与实际值存在较大的偏差。下面对常值漂移、三轴不正交、三轴灵敏度不一致 3 个方面引起的误差进行建模分析和实验测量。

1.1 常值漂移实验测量

由于磁强计加工工艺和测量电路噪声的影响, 三轴磁强计在没有磁场输入时的三轴输出并不为零。因此, 零磁场条件下, 磁强计输出模型为

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{v}, \quad (1)$$

其中: \mathbf{B}_0 为常值漂移; \mathbf{v} 为观测噪声, 通常认为是高斯白噪声, 服从正态分布 $N(0, \sigma_v^2)$ 。假设磁强计输出数据为 $\mathbf{B}_1, \dots, \mathbf{B}_N$, 则有

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{B}_i = \mathbf{B}_0 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{v}_i. \quad (2)$$

由大数定律可知, 当 $N \rightarrow \infty$ 时, 式(2)可化为

$$\mathbf{B}_0 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{B}_i, \quad (3)$$

即常值漂移的理论公式。

为了验证磁强计常值漂移的物性参数特点, 在磁环境模拟器中产生零磁场, 采样频率 10 Hz, 每次工作时间 2 min, 工作前对三轴磁强计进行断电重启。实验数据求均值以去掉噪声影响, 得常值漂移 \mathbf{B}_0 。图 1 为 x、y、z 3 个方向常值漂移 10 次的实验结果。

收稿日期: 2011-02-24; 修回日期: 2011-04-13

基金项目: 国家自然科学基金 (项目编号: 50975280); 教育部新世纪优秀人才支持计划 (项目编号: NCET-08-0149)

作者简介: 郝东 (1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事微小卫星方面的研究工作。E-mail: haodongnudu@gmail.com。
陈小前 (1975—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事研究领域为飞行器总体设计、多学科优化设计、微小卫星。

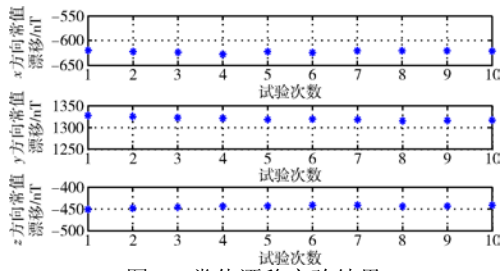


图1 常值漂移实验结果

Fig. 1 Experimental results for constant shift

从图1中可以看出,每次实验的常值漂移基本稳定,可认为常值漂移是固定不变的。将10次实验得到的常值漂移进行数值平均,得到实验标定结果:

$$\mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} -622.69 \\ 1320.20 \\ -444.48 \end{bmatrix} (\text{nT}).$$

1.2 三轴不正交及灵敏度校正建模

由于加工工艺的限制,理想三轴磁强计的3个坐标轴与实际坐标轴并不重合;并且,三轴磁强计的3个坐标轴通常很难完全正交。

理想三轴磁强计的3个磁敏感元件分别安装在 Ox 、 Oy 、 Oz 轴上,磁分量为 $\mathbf{B}_{\text{ideal}} = [B_x \ B_y \ B_z]^T$,实际3个坐标轴为 Ox_1 、 Oy_1 、 Oz_1 ,实际输出3个磁分量为 $\mathbf{B}_1 = [B_{x1} \ B_{y1} \ B_{z1}]^T$ 。理想坐标系与实际坐标系的三轴关系如图2所示。

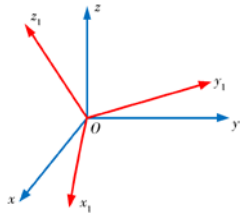


图2 坐标系三轴关系示意图

Fig. 2 The three coordinate axes

将理想坐标系三轴分量转换到实际坐标系三轴分量为

$$\mathbf{B}_1 = A_{1x} \begin{bmatrix} B_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + A_{1y} \begin{bmatrix} 0 \\ B_y \\ 0 \end{bmatrix} + A_{1z} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_z \end{bmatrix} = \mathbf{A}_1 \mathbf{B}_{\text{ideal}}, \quad (4)$$

其中, A_{1x} 、 A_{1y} 、 A_{1z} 分别为 x 、 y 、 z 三轴理想输入值转换到实际坐标系的转换系数; \mathbf{A}_1 为总转换矩阵。

理想情况下,三轴磁强计的3个磁敏感元件及其激励电路的灵敏度应该相同;但是由于制造工艺的差别,3个坐标轴之间的灵敏度存在差异,这种轴向灵敏度的不对称性造成系统测量误差。若三轴

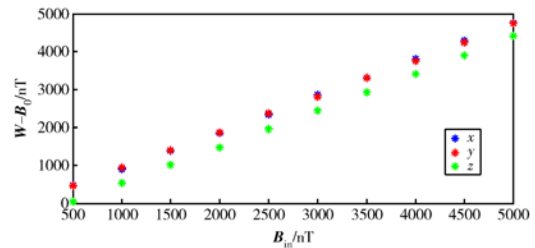
的灵敏度分别为 K_x 、 K_y 、 K_z ,则当存在灵敏度差异时三轴磁强计的3个坐标轴方向的实际测量结果为^[6]

$$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix} \mathbf{B}_1 = \mathbf{A}_2 \mathbf{B}_1, \quad (5)$$

其中 \mathbf{B}_2 为三轴磁强计的实际测量得到的量。

1.3 附加常值漂移建模

通过对实验数据的分析发现,三轴磁强计除了固定常值漂移外,当有磁场输入时,会产生附加常值漂移项。设 \mathbf{W} 为磁强计测量值,以 $(\mathbf{W} - \mathbf{B}_0)$ 为纵坐标,以输入磁场 \mathbf{B}_{in} 作为横坐标,发现其截距并不为零。 $(\mathbf{W} - \mathbf{B}_0)$ 与 \mathbf{B}_{in} 的关系如图3所示。

图3 输出 $(\mathbf{W} - \mathbf{B}_0)$ 与输入 \mathbf{B}_{in} 关系示意图Fig. 3 The relation between output of $(\mathbf{W} - \mathbf{B}_0)$ and input of \mathbf{B}_{in}

对 x 、 y 、 z 3个方向的测量值进行最小二乘拟合,得到零输入时的截距值。若没有附加常值漂移项,该截距应为零。但从后文的实验数据中可以确认截距不为零,因此输入磁场的附加常值漂移项确实存在,只是其量级较小,一般很难发现。将式(4)代入式(5),加上常值漂移项和附加常值漂移项后,得磁强计测量方程:

$$\mathbf{B}_2 = \mathbf{B}_0 + \mathbf{b} \text{sign}(\mathbf{B}_{\text{ideal}}) + \mathbf{A} \mathbf{B}_{\text{ideal}}. \quad (6)$$

式(6)中:矩阵 \mathbf{b} 为磁场输入引起的附加常值漂移项,其具体形式为

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_{xx} + b_{xy} + b_{xz} \\ b_{yx} + b_{yy} + b_{yz} \\ b_{zx} + b_{zy} + b_{zz} \end{bmatrix},$$

其中 b_{ij} 表示 j 轴的输入对 i 轴的附加常值漂移项 ($i, j = x, y, z$);

$$\text{sign}(\mathbf{B}_{\text{ideal}}) = \begin{cases} 1 & \mathbf{B}_{\text{ideal}} \neq \mathbf{0} \\ 0 & \mathbf{B}_{\text{ideal}} = \mathbf{0} \end{cases}.$$

1.4 标定公式推导

已知常值漂移为 \mathbf{B}_0 , 则式(6)变为

$$\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} b_{xx} + b_{xy} + b_{xz} \\ b_{yx} + b_{yy} + b_{yz} \\ b_{zx} + b_{zy} + b_{zz} \end{bmatrix} \text{sign}(\mathbf{B}_{\text{ideal}}) + \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \mathbf{B}_{\text{ideal}} ; \quad (7)$$

当输入为 $\mathbf{B}_x = \begin{bmatrix} B_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, 输出为 $\mathbf{W}_x = \begin{bmatrix} W_{xx} \\ W_{xy} \\ W_{xz} \end{bmatrix}$, 则

$$\begin{bmatrix} W_{xx} - B_{0x} \\ W_{xy} - B_{0y} \\ W_{xz} - B_{0z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{xx} \\ b_{yx} \\ b_{zx} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{11} B_x \\ a_{21} B_x \\ a_{31} B_x \end{bmatrix} ; \quad (8)$$

当输入为 $\mathbf{B}_y = \begin{bmatrix} 0 \\ B_y \\ 0 \end{bmatrix}$, 输出为 $\mathbf{W}_y = \begin{bmatrix} W_{yx} \\ W_{yy} \\ W_{yz} \end{bmatrix}$, 则

$$\begin{bmatrix} W_{yx} - B_{0x} \\ W_{yy} - B_{0y} \\ W_{yz} - B_{0z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{yx} \\ b_{yy} \\ b_{zy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{12} B_y \\ a_{22} B_y \\ a_{32} B_y \end{bmatrix} ; \quad (9)$$

当输入为 $\mathbf{B}_z = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_z \end{bmatrix}$, 输出为 $\mathbf{W}_z = \begin{bmatrix} W_{zx} \\ W_{zy} \\ W_{zz} \end{bmatrix}$, 则

$$\begin{bmatrix} W_{zx} - B_{0x} \\ W_{zy} - B_{0y} \\ W_{zz} - B_{0z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{zx} \\ b_{zy} \\ b_{zz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{13} B_z \\ a_{23} B_z \\ a_{33} B_z \end{bmatrix} . \quad (10)$$

从式(8)~式(10)可知, 只要变化输入的 B_x 、 B_y 、 B_z 值, 测得相对应的输出与输入的关系即可求出附加常值漂移项 \mathbf{b} 和系数矩阵 \mathbf{A} 。

当 3 个方向的输入为 500 nT, 1 000 nT, ……., 5 000 nT 时, 对实验测量数据利用式(8)~式(10)进行分析计算, 采用拟合方法得附加常值漂移项 \mathbf{b} 和系数矩阵 \mathbf{A} 为

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} -10.490 \ 7 \\ -38.492 \ 5 \\ -11.026 \ 1 \end{bmatrix} \text{ (nT)},$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0.959 \ 9 & -0.020 \ 9 & -0.006 \ 5 \\ 0.002 \ 0 & 0.947 \ 6 & -0.004 \ 0 \\ 0.001 \ 1 & 0.056 \ 1 & 0.965 \ 7 \end{bmatrix} .$$

2 磁环境模拟器验证实验

磁环境模拟器用于模拟磁场矢量, 由磁线圈、控制器、控制计算机等组成。实验采用 VMS-12 磁环境模拟器对 HMR2300R 三轴磁强计进行标定, 磁强计采样频率为 10 Hz。

实验分别从 x 、 y 、 z 3 个方向输入 500 nT, 1 000 nT, ……., 5 000 nT 的磁场矢量进行实验, 标定模型如下:

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}_{\text{out}} = \begin{bmatrix} -622.685 \\ 1 \ 320.20 \\ -444.481 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -10.490 \ 7 \\ -38.492 \ 5 \\ -11.026 \ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.959 \ 9 & -0.020 \ 9 & -0.006 \ 5 \\ 0.002 \ 0 & 0.947 \ 6 & -0.004 \ 0 \\ 0.001 \ 1 & 0.056 \ 1 & 0.965 \ 7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}_{\text{in}} . \quad (11)$$

在确定 HMR2300R 三轴磁强计校正模型之后进行验证实验, 实验的输入数据及校正结果如表 1 所示。

表 1 三轴磁强计标定实验结果
Table 1 The calibration results of three-axis magnetometer

真实输入值/nT	修正计算值/nT	误差的模/nT	实际测量值/nT
(1 000, 1 000, 1 000)	(966.8, 967.2, 987.9)	48.2	(2 78.7, 2 234.7, 564.9)
(1 000, 1 000, 2 000)	(971.7, 993.8, 1 984.0)	33.1	(276.4, 2 255.9, 1 528.3)
(1 000, 1 000, 3 000)	(970.3, 981.2, 2 993.0)	35.8	(268.7, 2 240.0, 2 501.7)
(1 000, 1 000, 4 000)	(968.7, 973.8, 4 004.8)	41.1	(260.8, 2 228.8, 3478.7)
(1 000, 2 000, 1 000)	(954.6, 1 996.1, 1 019.3)	49.5	(245.3, 3 209.6, 652.9)
(1 000, 2 000, 2 000)	(954.9, 1 989.6, 2 013.1)	48.1	(239.3, 3 199.4, 1 612.2)
(1 000, 2 000, 3 000)	(954.1, 1 976.0, 2 994.9)	52.0	(232.4, 3 182.6, 2 559.6)
(1 000, 2 000, 4 000)	(1 020.3, 1 966.6, 4 001.8)	39.1	(289.6, 3 169.8, 3 531.5)
(2 000, 3 000, 1 000)	(1 964.6, 3 007.8, 987.8)	38.2	(1 193.9, 4 170.4, 680.3)
(4 000, 3 000, 1 000)	(3 981.9, 2 989.7, 999.5)	20.8	(3 130.6, 4 157.3, 692.8)
(4 000, 3 000, 2 000)	(3 980.9, 2 975.5, 1 998.3)	31.1	(3 123.4, 4 139.7, 1 656.6)
(4 000, 3 000, 3 000)	(3 979.5, 2 965.7, 3 008.3)	40.8	(3 115.7, 4 126.4, 2 631.4)
(4 000, 3 000, 4 000)	(3 979.2, 2 958.9, 4 019.4)	50.0	(3 109.0, 4 115.9, 3 607.5)
(4 000, 4 000, 4 000)	(3 998.2, 3 950.9, 4 017.8)	52.3	(3 106.5, 5 056.0, 3 661.6)

从表1中的实验数据中可以看出,三轴磁强计的输出经过校正模型修正后,单轴测量误差可以控制在50nT以内,精度明显高于直接测量值,达到了一般微小卫星姿态确定的要求,充分体现了本方法的实用性。

3 结束语

本文首先从三轴磁强计测量误差来源进行分析和建模,建立了三轴磁强计的校正模型;针对有磁场输入时产生的附加常值漂移项,进行了实验验证;最后,利用磁环境模拟器进行实验,对三轴磁强计校正模型的相关参数进行确定。

实验结果表明,本方法能有效地将磁场矢量单轴测量误差控制在50nT以内,满足微小卫星的应用要求。

参考文献 (References)

- [1] 黄琳, 荆武兴. 卫星姿态确定与三轴磁强计校正[J]. 宇航学报, 2008, 29(3): 854-859
Huang Lin, Jing Wuxing. Spacecraft attitude determination and three-axis magnetometer calibration[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(3): 854-859
- [2] 朱建丰, 徐世杰. 基于地磁场测量估计卫星姿态的UKF算法[J]. 宇航学报, 2006, 27(6): 1401-1405
Zhu Jianfeng, Xu Shijie. UKF for satellite attitude estimation based on geomagnetic field[J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(6): 1401-1405
- [3] 傅建国, 王孝通, 金良安, 等. 一种基于地球重力场和磁场的姿态估计新算法[J]. 电子学报, 2005, 33(3): 565-570
Fu Jianguo, Wang Xiaotong, Jin Liang'an. A new quaternion based attitude estimation algorithm using the gravitational field and geomagnetic field observation[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(3): 565-570
- [4] 谢祥华. 微小卫星姿态控制系统研究[D]. 南京航空航天大学硕士学位论文, 2007
- [5] 杨艳. 小卫星磁控系统仿真研究[D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心硕士学位论文, 2006
- [6] 吴德会, 黄松岭, 赵伟. 基于FLANN的三轴磁强计误差校正原理[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(3): 449-453
Wu Dehui, Huang Songling, Zhao Wei. Research on correction of tri-axial magnetometer based on FLANN[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(3): 449-453
- [7] 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
Lin Chunsheng, Xiang Qian, Gong Shengguang. Ortho-error analysis and rectification of three-axis magnetometer[J]. Journal of Detection & Control, 2005, 27(2): 9-12
- [8] 黄琳, 荆武兴. 关于剩磁对卫星姿态确定与控制影响的研究[J]. 航空学报, 2006, 27(3): 390-394
Huang Lin, Jing Wuxing. Effects of remanence on attitude determination and control of satellites[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(3): 390-394

The error correction of three-axis magnetometer measurement

Hao Dong, Sheng Tao, Chen Xiaoqian

(College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The error correction of three-axis magnetometer measurement is of great importance to satellite attitude determination and control. In this paper, the error sources of three-axis magnetometer measurement are theoretically analyzed. Considering the case of constant shift caused by the magnetic input, an error correction model is proposed, with which the three-axis magnetometer HMR2300R made by Honeywell is calibrated and tested in a magnetic simulator. The experimental results show that the error of the three-axis magnetometer measurement can be controlled within 50nT with the proposed method, which can meet the application requirements for low cost sensors in attitude determination and control of micro-satellites.

Key words: three-axis magnetometer; error correction model; constant shift; magnetic environment simulator