一种 AMR 磁罗盘的误差建模与校准方法

孙宏伟 房建成

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对传统磁罗盘硬磁校准时容易受到外界干扰,标定校准为相对值的问题,详细分析了 AMR(Anisotropic Magneto Resistance,各向异性磁阻效应)磁罗盘的系统误差并建立其误差模型,提出了标量校准方法用于磁罗盘的硬磁标定校准.与传统方法相比,该方法不需要确切的航向参考值,利用任意多位置下的大量测试数据通过迭代求取校准参数的最优解,通过施加约束避免校准过程中磁干扰的影响,并且校准值为绝对矢量.经过硬磁校准,磁罗盘航向精度提高 7 倍.实验结果验证了该方法的有效性和实用性.

关 键 词: 磁罗盘; 标量校准; 硬磁误差

中图分类号: V 341.611

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)01-0104-04

Error modeling and calibration method of AMR compass

Sun Hongwei Fang Jiancheng

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: During the hard magnetism calibration process of compass by traditional methods, the compass was always disturbed and the calibration parameters were relative values. Considering these problems, the errors of anisotropic magneto resistance (AMR) compass were analyzed, the error model of compass was established and a method called scalar calibration was used to calibrate the compass. Compared with the traditional calibration methods of compass, the scalar calibration method didn't need the reference of head direction. During the calibration of the compass by this method, a great volume test data of any different positions was used to estimate the optimal parameters by iteration. So this method could reduce magnetism disturbance influences through exerting the restraint and the calibration value is the absolute vectors. By the hard magnetism calibration, the precision of compass was improved by 7 times. The experimental result proves the validity and usability of this method.

Key words: compass; scalar calibration; the hard magnetism errors

磁罗盘作为一种航向测量装置被广泛应用于战术导弹、微小型飞行器、车辆、轮船以及各种消费类导航产品中.与其它导航方式相比,磁罗盘具有成本低、输出连续、不受天气影响等特点,微小型磁罗盘的校准技术成为研究的热点.

磁罗盘的误差主要包括硬磁误差、软磁干扰以及姿态误差造成的航向影响.在传统的罗盘校准过程中,将零偏、标度因数非线性以及正交误差等固有的误差归为硬磁误差.多采用无磁转台在水平面内旋转一周或转动多个已知位置,通过对辨识的最大、最小值求取均值和比例的方法来获得零偏和标度因数实现误差的标定补偿[1~2].但是这种校准方法要求测量值均匀分布,而且校准结果为相对量,易受外界干扰.本文将文献[3]在惯性测量单元的标定中使用的标量校准方法用于磁罗盘的校准,利用大量观测数据进行迭代求取误差参数的最优解,可以克服传统方法的不足.

本文对磁罗盘系统的误差来源进行分析,建

收稿日期: 2008-02-28

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(6 7 3 6 0 2 5)

作者简介: 孙宏伟(1982—),男,山东青州人,博士生,hongweisun@aspe.buaa.edu.cn.

立其误差模型,并采用标量校准方法进行标定校准,充分利用多位置大数据量的优势,迭代求取误差系数的最优解. 由于磁场矢量与重力矢量均为定值,通过在参数求解时施加约束来避免校准过程中磁干扰的影响,精确估计磁罗盘每个轴向的绝对矢量值.

1　磁罗盘误差分析及建模

1.1　磁罗盘误差分析

传感器自身的交叉耦合误差、零偏、标度因数误差以及非正交误差、不对准误差都是影响磁罗盘航向解算的重要因素.

1) AMR 磁传感器除对轴向外加磁场敏感外,也受到磁传感器铍莫合金带平面内垂直于敏感轴方向磁场的影响而改变灵敏度,存在交叉耦合误差. AMR 磁传感器在对地球磁场进行测量时,交叉耦合误差可达 1.1×10^{-6} T,引起 $\pm2.4°$ 的航向误差[4]. 3 轴磁传感器彼此垂直安装,则 3 个传感器的输出将彼此耦合,x 向传感器的输出取决于 y 向磁场(假设它与 z 向磁场无关,因为其方向与极不敏感的薄膜平面垂直),y 向传感器的输出取决于 x 向磁场,z 向传感器的输出取决于 y 向磁场[5]. 每只磁传感器交叉耦合效应建模为

$$V=\frac{\alpha\cdot H}{H_{\mathrm{s}}+H_{\mathrm{ca}}} \tag{1}$$

式中,V 为磁传感器输出电压;α 为系数,与各向异性磁阻 $\Delta\rho/\rho$(ρ 为磁密度)恒成正比;H_{s} 为磁场比例常数;H_{ca} 为垂直轴方向上的外加磁场强度;H 为敏感方向上的外加磁场强度.

2) 磁传感器和加速度计的输出电压与所输入的物理量成正比关系,由于微加工工艺的原因不可能保证所有的传感器与标称值完全一致,主要反映在零偏 $\boldsymbol{b}_k=[b_{kx}\quad b_{ky}\quad b_{kz}]^{\mathrm{T}}$ 和标度因数 $\boldsymbol{S}_k=[s_{kx}\quad s_{ky}\quad s_{kz}]$ 上(k 为传感器类型,$k=1,2$ 分别表示加速度计、磁传感器).

3) 磁罗盘要求 3 只加速度计和 3 只磁传感器彼此正交安装,而且每个测量轴分别与磁罗盘的安装坐标轴(载体系 $Oxyz$)平行. 实际上,3 个坐标轴完全正交是非常困难的,坐标轴与 $Oxyz$ 平行也很难实现,因此存在非正交误差和对准误差.

正交矩阵 $\boldsymbol{T}_k$ 将正交的传感器参考坐标系 $Ox_{kc}y_{kc}z_{kc}$ 转换到非正交系 $Ox_{ko}y_{ko}z_{ko}$,如图 1 所示. 采用式(2)进行 Gram-Schmidt 正交化构造 $\boldsymbol{T}_k$,当误差角 $\alpha_k,\beta_k,\gamma_k\approx90°$ 时,$\boldsymbol{T}_k$ 可表示为式(3).

$$\left.\begin{aligned}x_{kc}&=x_{ko}\\ y_{kc}&=z_{kc}\times x_{ko}\\ z_{kc}&=\frac{x_{ko}\times y_{ko}}{|x_{ko}\times y_{ko}|}\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{T}_k=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ \cos\alpha_k & \sin\alpha_k & 0\\ \cos\beta_k & \cos\gamma_k & \sqrt{1-\cos^2\beta_k-\cos^2\gamma_k}\end{bmatrix}_{\alpha_k,\beta_k,\gamma_k\approx90°}\approx\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ \cos\alpha_k & 1 & 0\\ \cos\beta_k & \cos\gamma_k & 1\end{bmatrix} \tag{3}$$

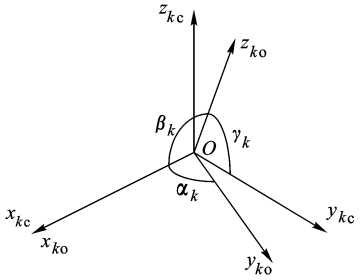

图 1　磁罗盘坐标轴正交化

对准矩阵 $\boldsymbol{M}_k$ 是欧拉角参数化的旋转矩阵,将 $Oxyz$ 转换到 $Ox_{kc}y_{kc}z_{kc}$. 如式(4)所示,其中 $[\phi_k\quad\theta_k\quad\psi_k]^{\mathrm{T}}$ 为 $Oxyz$ 与 $Ox_{kc}y_{kc}z_{kc}$ 之间的 3 个夹角.

$$\boldsymbol{M}_k=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\phi_k & \sin\phi_k\\ 0 & -\sin\phi_k & \cos\phi_k\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\cos\theta_k & 0 & -\sin\theta_k\\ 0 & 1 & 0\\ \sin\theta_k & 0 & \cos\theta_k\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\cos\psi_k & \sin\psi_k & 0\\ -\sin\psi_k & \cos\psi_k & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{4}$$

1.2　磁罗盘误差建模

磁罗盘建立误差模型如图 2 所示,其中

$$\boldsymbol{u}_k=[u_{kx}\quad u_{ky}\quad u_{kz}]^{\mathrm{T}}$$
$$\boldsymbol{y}_k=[y_{kx}\quad y_{ky}\quad y_{kz}]^{\mathrm{T}}$$
$$\boldsymbol{v}_k=[v_{kx}\quad v_{ky}\quad v_{kz}]$$

分别为输入量、输出电压值以及传感器噪声.

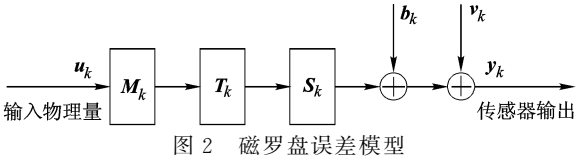

图 2　磁罗盘误差模型

由于采用复位置位技术去除零偏时也一并将

交叉耦合误差也消除掉了,因此在进行误差建模时将交叉耦合误差归入零偏误差.从误差模型中可以看出共有24个参数需要进行标定校准.这些参数可以分为两组:一组为机械参数(正交误差和对准误差)独立于温度和时间因素;另一组为电参数如零偏等受外界环境影响需要在每次启动前进行校准.当磁罗盘的24个误差参数确定后,实际的物理量 $\boldsymbol{u}_k$ 可以表示为

$$\boldsymbol{u}_k = \boldsymbol{M}_k^{-1}\boldsymbol{T}_k^{-1}\boldsymbol{S}_k^{-1}(\boldsymbol{y}_k - \boldsymbol{b}_k - \boldsymbol{v}_k) \tag{5}$$

2 磁罗盘的校准

2.1 交叉耦合效应补偿

交叉耦合效应可以通过硬件复位置位电路来抑制:通过给复位置位电路的偏置电流带施加电流($20\,\mu s$,3 A),可以起到施加相应磁场的效果,复位的时候施加相应的正向脉冲,得到传感器的输出 $y_{2\,\mathrm{res}}$,置位的时候施加反向脉冲,得到传感器输出 $y_{2\,\mathrm{set}}$[6].通过式(6)可以估计出当前的共模误差 D 包括零偏和交叉耦合误差,同时置位复位电路对由温度变化引起的零偏有很好的抑制效果[7]:

$$D = \frac{y_{2\,\mathrm{res}} - y_{2\,\mathrm{set}}}{2} \tag{6}$$

2.2 标量校准方法

标量校准的思想在于:在没有外界干扰的情况下,重力加速度矢量值 $\|\boldsymbol{a}_n\|$ 和地球磁场矢量值 $\|\boldsymbol{m}_n\|$ 为固定值,分别为 g(地球重力加速度 $g\approx 9.8\,\mathrm{m/s^2}$)和 4.8×10^{-6} T(磁场矢量会根据所在地的不同而有差异),矢量值与磁罗盘的放置位置没有关系.只要传感器3轴正交,则3轴测量值的矢量和固定,与 $\boldsymbol{M}_k$ 没有关系,因此采用标量校准方法无法获取 $\boldsymbol{M}_k$ 信息.$\boldsymbol{S}_k$,$\boldsymbol{b}_k$ 和正交误差(α_k,β_k,γ_k)都可以通过该方法进行校准,设校准参量为 $\boldsymbol{p}=[\boldsymbol{S}_k \quad \boldsymbol{b}_k \quad \alpha_k \quad \beta_k \quad \gamma_k]^{\mathrm{T}}$,则传感器的输出 $\boldsymbol{y}_k$ 与传感器的测量值 $\boldsymbol{u}_k$ 之间的关系可以表示为 $\boldsymbol{u}_k = h(\boldsymbol{y}_k,\boldsymbol{p})$.因此磁罗盘3轴输出平方和 $\sum_{j=x,y,z} u_{kj}^2$ 与当地矢量($\|\boldsymbol{a}_n\|$,$\|\boldsymbol{m}_n\|$ 记为 Q_k)平方的差应该为0,是参量 $\boldsymbol{p}$ 的价值函数:

$$L(\boldsymbol{p}) = \sum_{i=0}^{M-1}\Big(\sum_{j=x,y,z} u_{kij}^2 - Q_k^2\Big) \tag{7}$$

式中,u_{kij} 为第 i 个位置第 j 个轴向传感器的输入物理量.校准的过程就是要实现 $L(\boldsymbol{p})$ 的最小化即 $\hat{\boldsymbol{p}} = \arg\min\{L(\boldsymbol{p})\}$.

9个未知参数需要至少9个等式来确定,在这里未知数的求取转化为优化处理问题.优化的过程为将磁罗盘放置在至少9个不同的位置来采集数据,在每一个位置保持磁罗盘静止放置,降低传感器的输出噪声.本文采用约束 Newton 最优化方法来实现价值函数 $L(\boldsymbol{p})$ 的最小化,如式(8)所示:

$$\hat{\boldsymbol{p}}_{k+1} = \hat{\boldsymbol{p}}_k - \left[\frac{\mathrm{d}L(\boldsymbol{p})}{\mathrm{d}\boldsymbol{p}}\right]^{-1}\boldsymbol{L}(\boldsymbol{p})\,|_{\boldsymbol{p}=\hat{\boldsymbol{p}}_k} \tag{8}$$

式(8)的价值函数可能有许多最优点,为了确保递归到最优的参数,要求 $\boldsymbol{p}$ 的初始值根据传感器参数手册来确定:

$$\hat{\boldsymbol{p}}_0 = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^{\mathrm{T}}$$

2.3 对准误差补偿

文献[8]采用无磁位置转台实现 $\boldsymbol{M}_k$ 的校正,将磁罗盘平放在转台上,通过安装基准保证磁罗盘的3个轴向与转台轴向平行.然后分别沿 x 轴向和 z 轴向转动,由于转台精度非常高,所以重力矢量和磁场矢量在每个转动位置的投影 u_k 可以精确的计算出来.因此根据求取的前18个参数及式(5),取

$$\boldsymbol{N}_k = \boldsymbol{S}_k\boldsymbol{T}_k$$

$$\boldsymbol{Z}_k = (\boldsymbol{y}_k - \boldsymbol{b}_k)\boldsymbol{u}_k^{-1}$$

则

$$\boldsymbol{M}_k = (\boldsymbol{N}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{N}_k)^{-1}\boldsymbol{N}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Z}_k \tag{9}$$

由于磁罗盘安放在一个具有高加工精度的立方体中,所以利用立方体的6个面可以实现24个位置的放置,省去无磁转台,但是该校准方法需要有北向基准.$\boldsymbol{M}_k$ 一共只有6个未知参数角,3个位置就可以解算出来.在校准过程中,如图3所示采用了6个位置利用式(9)进行 $\boldsymbol{M}_k$ 的估计.

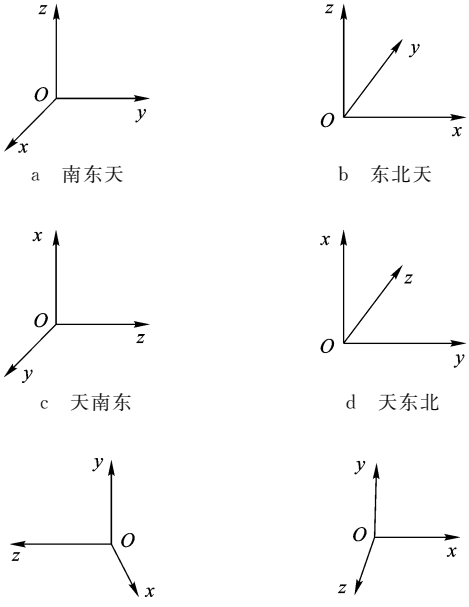

图3 对准误差校正6位置

3　实验验证

当所有的 24 个未知参数都确定时,磁罗盘就可以进行定姿定向. 为了验证磁罗盘 MMC(Micro Magnetic Campass)的性能,分别进行了水平和倾斜两种情况下的航向测试.

1) 水平情况多位置测试:将 MMC 与 Honeywell 公司的 HMR3000 磁罗盘水平放置在转台上,以转台的转动角度为基准,分别测试 MMC 与 HMR3000 在水平情况下的航向误差,共计测试 8 个角度. 如图 4 HMR3000 的误差>2°,经过校准的 MMC 误差仅为 0.8°,未校准 MMC 误差为 6°.

2) 倾斜情况多位置测试:调整转台使横向姿态角分别为 0°,10°,20°,30°,测试 MMC 倾斜情况下的航向误差. 在 MMC 姿态精度优于 1°的情况下,从图 5 可以看出倾角 30°时的航向误差最大,最大误差为 1.3°.

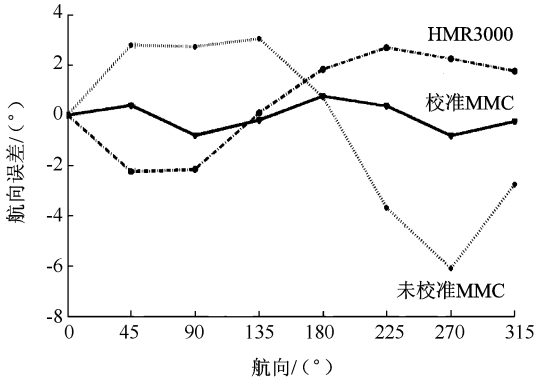

图 4　磁罗盘多位置测试曲线

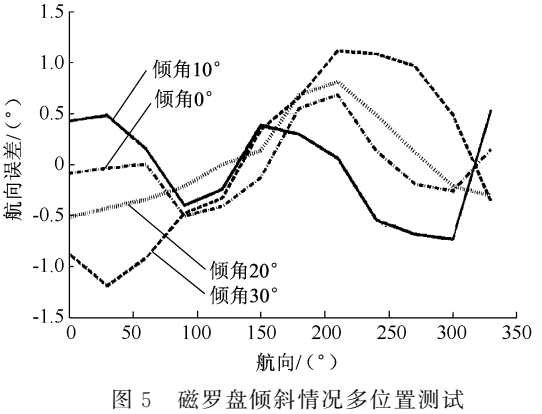

图 5　磁罗盘倾斜情况多位置测试

4　结 束 语

通过对磁罗盘进行详细地误差分析,建立其误差模型,并提出标量校准方法用于磁罗盘的硬磁误差校准. 该方法利用大量的观测数据进行迭代求取误差参数的最优解,通过重力矢量和磁场矢量为定值对求解过程进行约束,降低了校准过程中外界干扰磁场的影响. 与 Honeywell 公司的同类型磁罗盘(HMR3000)进行对比实验,验证了方法的实用性,实验结果显示:MMC 误差为 0.8°,HMR3000 误差>2°.

参考文献 (References)

[1] Caruso M J, Caruso M J. Applications of magnetic sensors for low cost compass systems[C]// Position Location and Navigation Symposium. USA:[s. n.], 2000: 177－184

[2] 袁智荣. 三轴磁航向传感器的全姿态误差补偿[J]. 传感器技术,2003,23(9):34－36
Yuan Zhirong. All status error compensation about three axis magnetic heading sensor[J]. Journal of Transducer Technology, 2003,23(9):34－36(in Chinese)

[3] Isaac Skog, Peter Handel. Calibration of a mems inertial measurement[C]// XVII Imeko World Congress. Brazil: [s. n.],2006:17－22

[4] Ripka P, Billingsley W S. Crossfield effect at fluxgate[J]. Sensors and Actuators, 2000,81(1－3):176－179

[5] Kubik J, Vcelak J, Ripka P. On cross-axis effect of the anisotropic magnetoresistive sensors[J]. Sensors and Actuators, 2006,129(1－2):15－19

[6] Vcelak J, Ripka P, Platil A, et al. Errors of AMR compass and methods of their compensation[J]. Sensor and Actuators, 2006,129(1－2):53－57

[7] Vopalensky M, Ripka P, Platil A. Precise magnetic sensors [J]. Sensors and Actuators, 2003,106(1－3):38－42

[8] Vcelak J, Ripka P, Kubk J, et al. AMR navigation systems and methods of their calibration[J]. Sensors and Actuators, 2005(123/124): 122－128

(责任编辑:刘登敏)