

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.03.006

# 基于 MEMS 传感器的高精度电子罗盘研究<sup>\*</sup>

葛海浪, 余 勃, 陶 迁

(宿迁学院 机电工程学院, 江苏 宿迁 223800)

**摘要:**针对电子罗盘易受到干扰和成本高等问题,对电子罗盘结构、倾角补偿、误差分析、误差校正等方面进行了研究,对电子罗盘在实际应用中的误差来源和校正算法进行了归纳,提出了基于 STM32 ARM Cortex-M3 内核单片机以及 MEMS 传感器构建电子罗盘系统,开展了电子罗盘的误差分析,提出了电子罗盘误差模型,提出用卡尔曼滤波算法对磁阻传感器和加速度计进行了数据融合与滤波,在利用加速度计计算倾角的基础上对电子罗盘进行了倾角补偿,利用 Matlab 处理上位机采集到的电子罗盘数据,进行了电子罗盘的输出角度和精度试验。研究结果表明,该电子罗盘可获得高精度的静态姿态角。

**关键词:**微机电系统;磁阻传感器;电子罗盘;加速度计

中图分类号:TH7

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)03-0276-04

## High precision electronic compass based on MEMS sensor

GE Hai-lang, SHE Bo, TAO Qian

(Institute of Electromechanical Engineering, Suqian College, Suqian 223800, China)

**Abstract:** Aiming at realizing electronic compass vulnerable to interference and high cost, electronic compass structure, tilt compensation, error analysis and correction were researched, inductive error sources and correction algorithms of electronic compass, and the electronic compass system based on STM32 ARM Cortex-M3 and MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) sensor was proposed. After the analysis of electronic compass error sources, the electronic compass error model was established. Kalman filtering algorithms was presented to collecting and integration of magnetoresistive sensor and accelerometer data. On the basis of accelerometer tilt data compensated the electronic compass, use MATLAB handle electronic compass from PC, the attitude angle and precision of electronic compass were tested. The results indicate that electronic compass have high-precision and static attitude angle.

**Key words:** micro-electric-mechanical system; magnetoresistive sensor; electronic compass; accelerometer

## 0 引 言

在机器人、航海和航空航天等领域中,都需要导航系统为其导航,导航系统中最重要的就是航向的获得,而传统的罗盘具有体积大、结构复杂、安装不便等诸多缺点,使传统的惯性导航系统无法得到广泛应用。而随着微机电系统(MEMS)技术的快速发展,MEMS器件的制造工艺不断成熟,使 MEMS 传感器的制造成本不断降低。基于 MEMS 传感器设计的电子罗盘具有

高精度、低成本、结构简单等特点,因此其被广泛应用于军用民用领域<sup>[1]</sup>。

利用 MEMS 三轴加速度计 SCA3100 和三轴磁阻传感器 HMC5883L,本研究以单片机 STM32 作为主控芯片构建电子罗盘<sup>[2]</sup>,提出用卡尔曼滤波算法对磁阻传感器和加速度计进行数据融合与滤波,构建电子罗盘误差模型,在倾角补偿的基础上以获得较高的航向精度。

收稿日期:2015-11-25

基金项目:江苏省高校品牌专业建设资助项目(PPY2015C252)

作者简介:葛海浪(1989-),男,江苏宿迁人,研究生,助教,主要从事机电与传感器方面的研究。E-mail:727380309@qq.com

## 1 硬件设计

电子罗盘系统由三轴磁阻传感器和三轴加速度计以及主控芯片组成。电子罗盘实物图如图 1 所示。载体水平放置时,只需要磁阻传感器在水平面的两轴分量即可计算得出航向角,但是在实际应用过程中,载体不可能一直保持水平状态,因此需要三轴加速度计对电子罗盘进行倾角补偿;本研究根据三轴加速度计的三轴分量化算得到载体倾斜角,利用倾斜角对三轴磁阻传感器的测量值进行倾斜补偿。

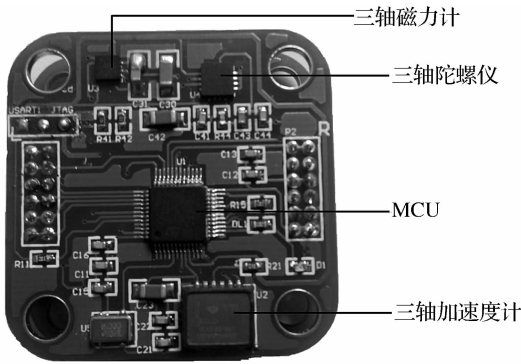


图 1 电子罗盘实物图

电子罗盘系统通过 I2C 串行通讯接口读取 MEMS 传感器数据,微处理器对采集的传感器数据进行融合和解算,建立电子罗盘误差模型。通过串口把解算出的姿态角传输到上位机进行显示,电子罗盘系统框架如图 2 所示。

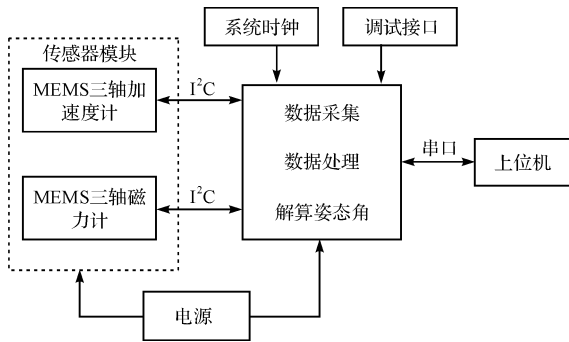


图 2 电子罗盘系统框架

## 2 测姿原理及误差模型

### 2.1 测姿原理

电子罗盘水平放置时,电子罗盘的三轴磁阻传感器

的  $X, Y$  轴测量输出为地磁场水平分量在  $H_H$  在两轴的分解。通过两轴的数据  $H_x$  和  $H_y$  即可计算航向角<sup>[3,4]</sup>:

$$\psi = \arctan\left(\frac{H_y}{H_x}\right) \quad (1)$$

在应用过程中,电子罗盘很多时候都不是水平放置的,为减小倾斜带来的误差必须用倾角补偿算法,设电子罗盘所在载体坐标系下俯仰角为  $\theta$ ,横滚角为  $\gamma$ ,偏航角为  $\psi$ ,则三轴磁阻传感器在任意姿态下的测量输出为  $\mathbf{H}_{(\gamma, \theta, \psi)} = [H_x, H_y, H_z]^T$ ,电子罗盘在水平放置情况下 ( $\theta = 0, \gamma = 0$ ) 磁阻传感器的输出为  $\mathbf{H}_{(0,0,\psi)} = [H_{Hx}, H_{Hy}, H_{Hz}]^T$ ,电子罗盘在完全水平状态下的测量值只要经过两次旋转即可得任意姿态下的测量输出,用公式表示为:

$$\mathbf{H}_{(\gamma, \theta, \psi)} = \mathbf{R}_\theta \mathbf{R}_\gamma \mathbf{H}_{(0,0,\psi)} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{R}_\theta, \mathbf{R}_\gamma$ —俯仰角  $\theta$  和横滚角  $\gamma$  的旋转转化矩阵。

$$\mathbf{R}_\theta = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_\gamma = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & \sin\gamma \\ 0 & -\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \quad (4)$$

对式(2)进行变换,即可得:

$$\mathbf{H}_{(0,0,\psi)} = \mathbf{R}_\gamma^{-1} \mathbf{R}_\theta^{-1} \mathbf{H}_{(\gamma, \theta, \psi)} \quad (5)$$

将式(3,4)代入式(5)可化简得到:

$$\mathbf{H}_{Hx} = \mathbf{H}_x \cos\theta + \mathbf{H}_z \sin\theta \quad (6)$$

$$\mathbf{H}_{Hy} = \mathbf{H}_x \sin\gamma \sin\theta + \mathbf{H}_y \cos\gamma - \mathbf{H}_z \sin\gamma \cos\theta \quad (7)$$

把解算出的  $\mathbf{H}_{Hx}, \mathbf{H}_{Hy}$  代入式(1)中,即可解算出航向角<sup>[5]</sup>。

电子罗盘倾角补偿过程中必须解算电子罗盘的倾斜角<sup>[6]</sup>,倾角由三轴加速度计解算得出。三轴加速度计的输出为重力加速度在载体坐标系下的三轴分量,电子罗盘水平放置,并且让载体坐标系与参考坐标系(NED坐标系)刚好重合,这时三轴加速度计的输出为:  $\mathbf{A}_{(0,0,0)} = [0 \ 0 \ g]^T$ 。设电子罗盘处于任意状态时,三轴加速度计输出值为:  $\mathbf{A}_{(x,y,z)} = [A_x \ A_y \ A_z]^T$ ,根据  $\mathbf{A}_{(0,0,0)}$  经过三次旋转即可得  $\mathbf{A}_{(x,y,z)}$ ,由此可推导出:

$$\mathbf{A}_{(x,y,z)} = \mathbf{T}_{(\gamma, \theta, \psi)} \mathbf{A}_{(0,0,0)} \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{T}_{(\gamma, \theta, \psi)}$ —完成从载体坐标系向参考坐标系变换的方向余弦矩阵。

$$\mathbf{T}_{(x,y,z)} = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \cos\theta\sin\psi & -\sin\theta \\ \sin\gamma\sin\theta\cos\psi - \cos\gamma\sin\psi & \sin\theta\sin\gamma\sin\psi + \cos\gamma\cos\psi & \cos\theta\sin\gamma \\ \sin\theta\cos\gamma\cos\psi + \sin\gamma\sin\psi & \sin\theta\cos\gamma\sin\psi - \sin\gamma\cos\psi & \cos\gamma\cos\theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

由式(8)可得:

$$\theta = \arcsin(A_x/g) \quad (10)$$

$$\gamma = \arcsin(A_y/g) \quad (11)$$

式中: $g$ —当地的重力加速度。

## 2.2 电子罗盘的误差模型

电子罗盘的主要误差来自磁阻传感器,①磁传感器本身存在的误差影响;②磁传感器周围的铁性物质也会对传感器由干扰<sup>[7]</sup>,铁性物质的干扰分为硬铁干扰和软铁干扰。

在没有任何干扰的情况下,电子罗盘旋转一周,磁阻传感器的测量输出曲线应该是一个标准圆形且圆心无偏移。硬铁干扰一般产生于永久磁铁,这些干扰会很稳定地存在,当存在硬铁干扰时,电子罗盘输出的曲线圆心会被移动。软铁干扰来源于地球磁场和罗盘附近磁性材料的相互作用,其干扰程度与罗盘的方向有关<sup>[8]</sup>。

要获得高精度航向角,必须进行补偿,针对不同的干扰,采取不同的误差补偿方式,如果干扰源是硬铁干扰,则采取零位修正方式补偿:

$$X_{\text{mid}} = (X_{\text{max}} + X_{\text{min}})/2 \quad (12)$$

$$Y_{\text{mid}} = (Y_{\text{max}} + Y_{\text{min}})/2 \quad (13)$$

修正后的输出值可得:

$$X_{\text{cor1}} = X_{\text{act}} - X_{\text{mid}} \quad (14)$$

$$Y_{\text{cor1}} = Y_{\text{act}} - Y_{\text{mid}} \quad (15)$$

对于软铁干扰,则采取倍数补偿,以  $X$  轴为参考轴,设常数  $k$  为系数<sup>[9]</sup>:

$$k = (X_{\text{max}} - X_{\text{min}})/(Y_{\text{max}} - Y_{\text{min}}) \quad (16)$$

修正后的输出为:

$$X_{\text{cor2}} = X_{\text{act}} \quad (17)$$

$$Y_{\text{cor2}} = kY_{\text{act}} \quad (18)$$

如果同时存在硬铁干扰和软铁干扰,则修正后的输出为:

$$X_{\text{cor}} = X_{\text{act}} - X_{\text{mid}} \quad (19)$$

$$X_{\text{cor}} = k(Y_{\text{act}} - Y_{\text{mid}}) \quad (20)$$

$Z$  轴与  $X$  轴和  $Y$  轴垂直正交,不会影响  $X$  轴和  $Y$  轴的测量。

## 3 实验与分析

本研究根据电子罗盘的误差模型,把电子罗盘旋转一周,采集电子罗盘  $X$ 、 $Y$  轴数据并用 Matlab 显示。如图 3 所示。

消除电子罗盘的干扰,用误差模型对电子罗盘进行补偿后电子罗盘的输出航向角如图 4 所示。

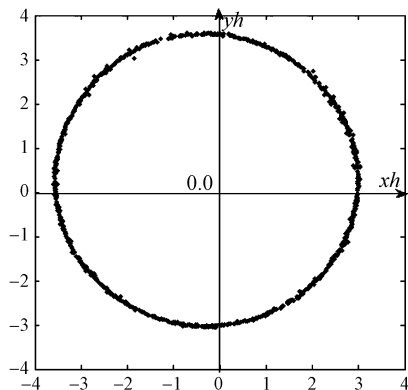


图 3 电子罗盘  $X$ 、 $Y$  轴数据

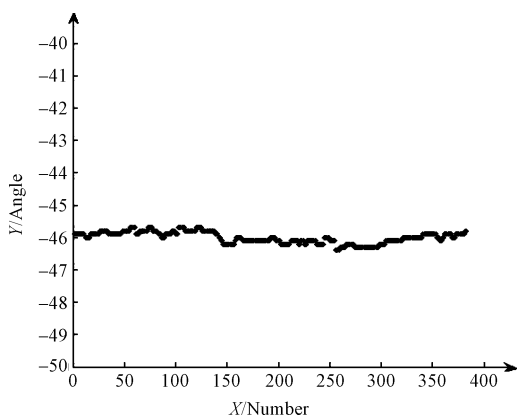


图 4 电子罗盘航向角

本研究用 VC++ 编写了电子罗盘的显示界面,其中左边、中间、右边指针分别表示俯仰角、横滚角和航向角。姿态角三维显示如图 5 所示。

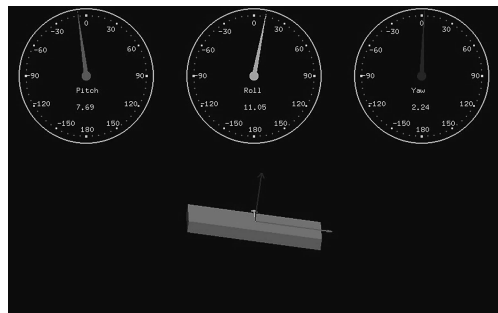


图 5 姿态角三维显示

## 4 结束语

由于易受到干扰,电子罗盘的输出一般都有误差,如图 3 所示,电子罗盘旋转一周后的数据圆心不在生存原点,需要进行误差补偿,补偿后电子罗盘的航向角如图 4 所示,航向可达到  $0.5^\circ$  的静态精度。

本研究将 MEMS 传感器应用到罗盘中设计并制作电子罗盘,提出电子罗盘误差模型,用卡尔曼滤波算法对磁阻传感器和加速度计进行数据融合与滤波,在利用加速度计计算倾角的基础上对电子罗盘进行倾角补偿,用 VC++ 编写电子罗盘的上位机显示界面,进行电子

罗盘的输出角度和精度实验,结果表明该电子罗盘获得精度优于 $0.5^\circ$ 的静态姿态角,相对传统的电子罗盘具有明显优势,使用了 MEMS 技术的高精度电子罗盘在航空航天、车辆导航、机器人等领域具有广泛应用。

## 参考文献(References):

- [1] 王立冬,贾英江,磁阻罗盘及其在车辆导航中的应用[J]. 测控技术,2000,19(2):10-12.
- [2] 王 琪,李孟委,王增跃,等. 基于隧道磁阻传感器的三维电子罗盘设计[J],传感技术学报,2015,28(6):895-899
- [3] 杜 英,李 杰,孔祥雷,等. 无航向基准条件下电子罗盘的误差补偿方法[J] 传感技术学报,2010,23(9):1285-1288.
- [4] BON NET S, BASSOMPIERRE C, GODIN C, et al. Calibration Methods for Inertial and Magnetic Sensors[J]. **Sensors and Actuators A:Physical**,209,156(2):302-311.

- [5] FANG J, SUN H, GAO J, et al. A Novel Calibration Method of Magnetic Compass Based on Ellipsoid Fitting[J]. **Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on**,2011,60(6):2053-2061
- [6] 王 君,罗 冰. 基于磁阻传感器的带倾斜补偿的电子罗盘的研制[J]. 河南大学学报:自然科学版,2009,39(3):244-246.
- [7] XI SHENG-LI, DONG Hua-jiang, XIONG Ying-shu, et al. Development of Electronic Compass for Indoor Mobile Robot [J]. **Advanced Electrical and Electronics Engineering**, 2011,87(2):121-128.
- [8] 陈 瑜,张铁民,彭孝东. 一种磁阻式电子罗盘测试和标定方法研究[J]. 传感技术学报,2014,27(5):622-626
- [9] 李 智,李 翔. 基于椭圆假设的三轴电子罗盘罗差补偿研究[J]. 仪器仪表学报. 2011,32(10):2210-2215.

[编辑:李 辉]

## 本文引用格式:

葛海浪,余 勃,陶 迁. 基于 MEMS 传感器的高精度电子罗盘研究[J]. 机电工程,2016,33(3):276-276.

GE Hai-lang, SHE Bo, TAO Qian. High precision electronic compass based on MEMS sensor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(3):276-279.

《机电工程》杂志:<http://www.meem.com.cn>

(上接第 258 页)

## 参考文献(References):

- [1] 刘献礼,岳彩旭. 绿色切削技术的研究进展与发展趋势[J]. 航空制造技术,2010(11):26-30.
- [2] 韩荣第. 切削难加工材料的新型绿色高效冷却润滑技术[J]. 航空制造技术,2009(13):44-47.
- [3] WEINERT K, INASAKI I, SUTHERLAND J. W, et al. Dry machining and minimum quantity lubrication[J]. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**,2004,53(2):511-537.
- [4] WILLIAMS J A, TABOR D. The role of lubricants in machining[J]. **Wear**,1977,43(3):275-292.
- [5] 陈志刚,周金木,吴春笃. 高压脉冲负电晕荷电喷雾试验研究[J]. 高电压技术,2007,33(2):128-131.
- [6] 闻建龙,王 静,王志强,宋晓宁. 高压静电雾化喷浆脱硫实验[J]. 高电压技术,2008,34(10):2167-2171.
- [7] 汪朝晖,廖振方,高全杰,王家青. 静电喷涂中油液的电晕荷电及雾化试验研究[J]. 高电压技术,2009,35(3):636-640.
- [8] 罗宏昌,等. 静电实用技术手册[M]. 上海:上海科学普及出版社,1990.
- [9] 茹 煜,金 兰,周宏平,舒朝然. 基于圆锥管状电极的高压静电场对雾滴荷电的影响[J]. 高电压技术,2014,40(9):2721-2727.

- [10] 黄水泉,李中亚,姚伟强,等. 荷电植物油的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报,2014,34(4):371-378.
- [11] 孔 魁,胡志强,姚伟强,等. 静电微量润滑油滴的粒径分布特性研究[J]. 机电工程,2013,30(12):1474-1476.
- [12] 李鹏来. 精矫移动式辊盒齿轮箱稀油调滑系统改造[J]. 液压气动与密封,2014(9):47-49.
- [13] 高全杰,夏志勇,汪朝晖,等. 多针电极喷雾刀梁静电场特性与雾化效果研究[J]. 农业机械学报,2014,45(4):110-116.
- [14] 杨超珍,吴春笃,陈翠英. 环形电极感应充电机理及其应用研究[J]. 高压电技术,2004,30(5):9-11.
- [15] 陈志刚,周金木,吴春笃,等. 负高压电晕荷电喷雾沉积特性[J]. 高电压技术,2008,34(11):2440-2446.
- [16] JAWOREK A, KRUPA A. Studies of the corona discharge in end spraying[J]. **Journal of Electrostatics**,1997,40/41(2):173-178.
- [17] 朱益民,孔祥鹏. 多针对板电晕放电伏安特性研究[J]. 高电压技术,2006,32(1):57-59.
- [18] MOON J D, LEE D H, KANG T G, et al. Acapacitive type of electrostatic spraying nozzle[J]. **Journal of Electrostatics**,2003,57(2):363-37.

[编辑:李 辉]