

基于 LSM303DLHC 的电子罗盘系统的设计

陈伟韬, 章云

(广东工业大学自动化学院, 广州 510006)

摘要: 研究基于 MEMS 三轴加速度传感器和三轴磁强传感器数字集成芯片 LSM303DLHC 和 STM32F103 MCU 的数字电子罗盘测量系统的设计。介绍了基于地磁向量的航向角测量原理及系统的整体框架, 重点阐述了该系统硬件构成、软件设计流程以及传感器测量误差补偿方法。实验表明系统性能稳定, 性价比高, 适合于一般导航应用。

关键词: 电子罗盘; 三轴加速度传感器; 三轴磁强传感器; 误差补偿

中图分类号: TP212

Design of Digital Electronic Compass System Based on LSM303DLHC

CHEN Weitao, ZHANG Yun

(School of Automation, Guangdong University of Technology, GuangZhou 510006)

Abstract: The design and implementation of an electronic compass system based on STM32F103 MCU and system-in-package LSM303DLHC featuring a tri-axial acceleration sensor and a tri-axial magnetic sensor is studied. The principle of heading measurement based on earth's magnetic field and the whole system architecture are given. The system hardware structure, software design process and sensor measurement error compensation methods are mainly presented. The experiment results shows the performance of this cost-effective system is accurate and stable, making it suitable for common navigation field application.

Keywords: digital electronic compass; tri-axial magnetic sensor; tri-axial acceleration sensor; error compensation

0 引言

电子罗盘作为一种重要的导航工具, 能实时提供物体的航向和姿态, 在汽车导航、航天、航海等领域得到了广泛的应用^[1]。随着 MEMS 技术的发展, 基于 MEMS 技术的传感器较传统传感器体积更小、质量轻、功耗更低, 这使得体积微小的电子罗盘测量系统有了更加广泛的应用。

本文设计的电子罗盘系统基于意法半导体公司的 MEMS 数字集成芯片 LSM303DLHC, 该芯片单一模块内集成了三轴加速度传感器和三轴磁强传感器。采用 STM32F103 微处理器采集传感器信号, 经过数据预处理和测量误差补偿后进行姿态解算, 并将得到的航向姿态角通过串口传送到 PC 应用程序进行实时姿态显示。该系统设计结构最大化地减少了外围器件的使用, 结构简单, 降低了成本、体积和功耗。实验表明该电子罗盘系统精度基本上可以达到 $\pm 1^\circ$ 内, 具有较好的使用价值。

1 测量原理

1.1 坐标系和姿态角定义

作者简介: 陈伟韬, (1988-), 男, 硕士研究生, 嵌入式系统, 传感器技术。

通信联系人: 章云, (1963-), 男, 博士生导师, 主要研究方向: 智能控制与信息处理技术; 自动化装备与信息处理技术等。E-mail: yz@gdut.edu.cn

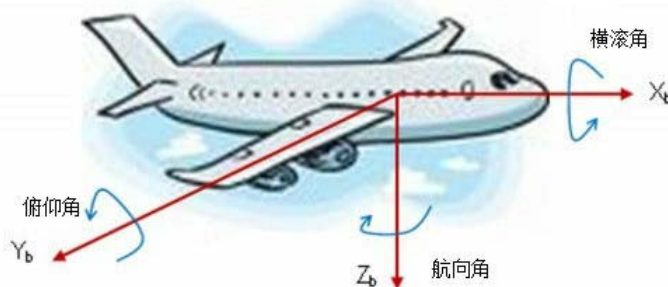


图 1 载体坐标系
Fig.1 Body Coordinate

载体坐标系($OX_bY_bZ_b$): 对于手持设备电子罗盘应用, 常用机体坐标系来定义载体坐标系。坐标原点在载体的质心, OX_b 沿载体纵轴指向前, OY_b 轴沿载体横轴指向右侧, OZ_b 轴根据右手法则确定。

参考坐标系($OXYZ$): 本文选用北东地坐标系(NED)为参考坐标系。坐标原点在载体重心, X 轴指向北, 即 N , Y 轴指向东, 即 E , Z 轴指向地, 即 D 。

姿态角: 载体在空间中的航向和姿态可用载体坐标系相对于参考坐标系的运动来表示, 运动角度称为载体的姿态角。在导航学中常用航向角 ψ 、俯仰角 θ 和横滚角 γ 作为载体的姿态角。同一三维空间矢量在参考坐标系的下的矢量表示 v 跟在任意姿态(γ, θ, ψ) 载体坐标系下的矢量表示 u 之间的转动变化关系可以表示为 $u = T_{(\gamma, \theta, \psi)}v$ 。其中 $T_{(\gamma, \theta, \psi)}$ 为方向余弦矩阵^[2]。

$$T_{(\gamma, \theta, \psi)} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ \sin \gamma \sin \theta \cos \psi - \cos \gamma \sin \psi & \sin \theta \sin \gamma \sin \psi + \cos \gamma \cos \psi & \cos \theta \sin \gamma \\ \sin \theta \cos \gamma \cos \psi + \sin \gamma \sin \psi & \sin \theta \cos \gamma \sin \psi - \sin \gamma \cos \psi & \cos \gamma \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

1.2 测量原理

地磁场磁感应强度约为 $0.5 \sim 0.6\text{Gs}$ ($1\text{Gs} = 10^{-4}\text{T}$), 地磁场矢量 H 可以分解为与地平面平行的水平分量 H_h 和垂直分量 H_v 。水平分量 H_h 总是指向地磁北极, 这是地磁导航的依据。

1.2.1 航向角的计算

电子罗盘上的三轴磁强传感器的测量输出为地磁场矢量在三个测量轴上的分量, 当电子罗盘完全水平放置时, 电子罗盘上的三轴磁强传感器的 X_b 轴测量输出 X_h 和 Y_b 轴的测量输出 Y_h 为地磁场水平分量 H_h 在两轴上的分解。得到了 H_x, H_y 就可由下式计算航向角

$$\psi = \arctan(H_y / H_x) \quad (2)$$

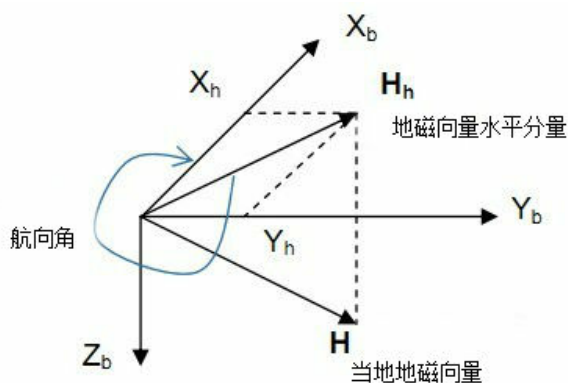


图2 航向角的计算
Fig.2 Heading Calculation

电子罗盘在实际使用过程中，特别是手持设备中，并不能保证电子罗盘完全平行于水平面，故不能直接使用上面的公式进行计算航向角。

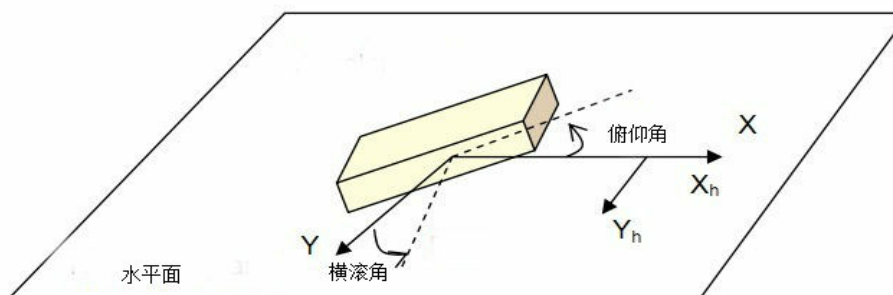


图3 存在倾角情况下的手持设备
Fig.3 Handheld device at a titled position

设当前电子罗盘的横滚角为 γ ，俯仰角为 θ ，航向角为 ψ ，三轴磁强传感器的测量输出为 $M_{(\gamma, \theta, \psi)} = [M_x, M_y, M_z]^T$ ；电子罗盘完全水平放置下具有相同航向角的三轴磁强传感器测量输出为 $M_{(0,0,\psi)} = [M_{Hx}, M_{Hy}, M_{Hz}]^T$ 。根据电子罗盘当前姿态与完全水平放置姿态间的旋转关系，可得

$$\begin{aligned} M_{(\gamma, \theta, \psi)} &= R_\theta R_\gamma M_{(0,0,\psi)} \\ M_{(0,0,\psi)} &= R_\gamma^{-1} R_\theta^{-1} M_{(\gamma, \theta, \psi)} \end{aligned} \quad (3)$$

R_γ, R_θ 对应为横滚角为 γ 和俯仰角为 θ 的旋转转化矩阵，

$$R_\gamma = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad R_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)则可得

$$\begin{aligned} M_{Hx} &= M_x \cos \theta + M_z \sin \theta \\ M_{Hy} &= M_x \sin \gamma \sin \theta + M_y \cos \gamma - M_z \sin \gamma \cos \theta \end{aligned} \quad (5)$$

再将有式(5)计算得到的 M_{Hx}, M_{Hy} 代入到式(2)计算航向角。由于地磁北极与地理北极间存在磁偏角，并不重合，计算得到的并不是指向真北的航向角。通过查表得到当地的磁偏角 β ，从而得到真北航向角。

1.2.2 横滚角和俯仰角的计算

可利用 LSM303DLHC 上的三轴加速度传感器的测量值来计算横滚角和俯仰角。加速度传感器的三轴测量输出值为重力加速度在载体坐标系下的三轴分量大小。当电子罗盘水平放置，载体坐标系的初始姿态与参考坐标系（NED 坐标系）重合时，其三轴的测量输出值为

90 $G_{(0,0,0)} = [0 \ 0 \ 1]^T$ （测量值经过标准归一处理化）。当电子罗盘处于任意姿态时，设其三

轴测量输出值为 $G_{(\gamma,\theta,\psi)} = [G_x \ G_y \ G_z]^T$ ，利用方向余弦矩阵(1)可得

$$G_{(\gamma,\theta,\psi)} = T_{(\gamma,\theta,\psi)} G_{(0,0,0)} \quad (6)$$

根据式（4）可得俯仰角： $\theta = \arcsin(-G_x)$ (7) 横滚角： $\gamma = \arcsin(\frac{G_y}{\cos \theta})$ (8)

2 硬件设计

2.1 系统框架

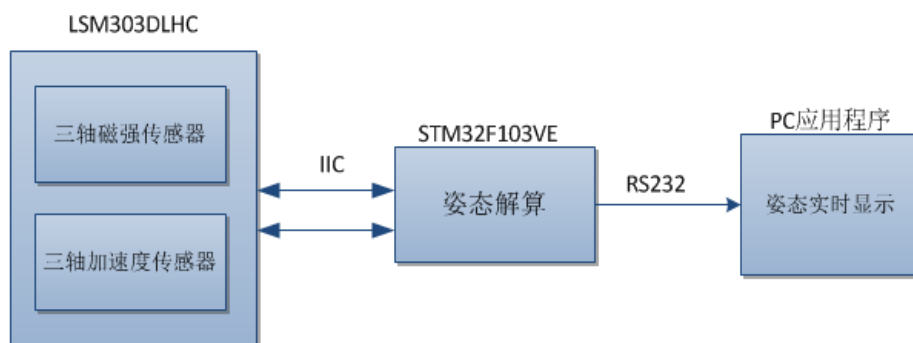


图4 系统结构框图
Fig.4 System architecture

100 电子罗盘系统主要由 LSM303DLHC 芯片作为数据采集模块，片上的三轴加速度传感器和三轴磁强传感器分别作为 I²C 通讯从机，主控制器 STM32F103VE 作为主机通过 I²C 串行通讯接口读取测量数据，对读取的测量数据进行姿态解算处理，并把得到的姿态信息通过 RS232 串行通讯接口传送到上位机应用程序进行姿态实时显示。

2.2 航向姿态测量模块

105 电子罗盘系统的航向姿态测量模块采用了意法半导体（ST）公司推出的 MEMS 数字集成芯片 LSM303DLHC^[3]，单一模块内集成了三轴加速度传感器和三轴磁感应传感器，芯片三维尺寸为 $3 \times 5 \times 1mm$ ；线性加速度的测量范围为 $\pm 2g$ 到 $\pm 16g$ ，磁场强度测量范围从 ± 1.3 到 $\pm 8gauss$ ，两个量程可由用户根据需要选择；片上的磁感应元件采用基于霍尼韦尔的各向异性磁阻（AMR）技术，使得芯片在计算精度和功耗具有很高的优势，芯片对外
110 提供了支持标准（100KHz）和快速模式（400KHz）的 I²C 串行通讯接口。

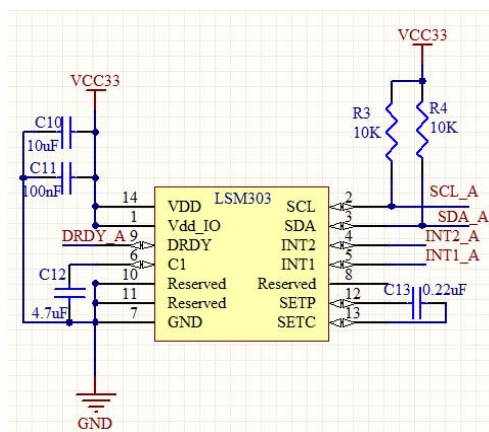


图 5 LSM303DLHC 电路连接图
Fig.5 LSM303DLHC electrical connection

2.3 单片机及其外围电路

本系统采用意法半导体（ST）公司推出的基于 ARM Cortex-M3 内核的 32 位微处理 STM32F103VE^[4]作为系统的控制器。该处理器包含有 512 KB Flash、64 KB RAM 和丰富外设接口，包括 2 个 I2C 总线接口，3 个 SPI 总线接口，5 个 USART 总线接口，高达 80 多个通用 I/O 口等；丰富的外设接口和强大的处理性能便于系统日后功能扩展和升级，同时它支持 JTAG 在线调试，简化了开发和调试过程。

3 传感器测量数据处理

3.1 误差分析

电子罗盘的误差来源主要有：零位误差，即传感器的零点输出不为零引起的误差；灵敏度误差，即传感器的 3 个测量感应轴的灵敏度不同引起的误差；安装误差，即传感器的 3 个测量感应轴分别与载体坐标系 3 个轴不完全平行引起的误差；由于传感器周围的铁磁材料影响而产生的误差^[5,6]。

3.2 加速度传感器测量数据校正

由测量原理可知，电子罗盘航向角度的计算需要利用加速度传感器测量信息进行倾角补偿。倾角补偿的精度直接影响航向角的计算精度。根据以上的误差分析，为加速度传感器测量数据建立相应的校正数学模型。设 $A_N = [A_{Nx}, A_{Ny}, A_{Nz}]$ 为校正后标准归一化向量，

$A_R = [A_{Rx}, A_{Ry}, A_{Rz}]$ 为加速度传感器三轴测量原始输出，则可建立以下的校正模型。

$$A_N = \begin{bmatrix} A_{Nx} \\ A_{Ny} \\ A_{Nz} \end{bmatrix} = M_{3 \times 3} \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{Rx} - A_{OSx} \\ A_{Ry} - A_{OSy} \\ A_{Rz} - A_{OSz} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$= \begin{bmatrix} A_{C11} & A_{C12} & A_{C13} \\ A_{C21} & A_{C22} & A_{C23} \\ A_{C31} & A_{C32} & A_{C33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{Rx} \\ A_{Ry} \\ A_{Rz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{C10} \\ A_{C20} \\ A_{C30} \end{bmatrix}$$

$M_{3 \times 3}$ 为安装误差矩阵，描述传感器测量轴与载体坐标轴不完全平行的安装误差；

$K_i (i = x, y, z)$ 为传感器三轴测量灵敏度; $A_{0si} (i = x, y, z)$ 为传感器三测量轴的零位误差。加速度传感器测量数据校正的目标是为了获得式 (9) 中 12 个从 A_{c10} 到 A_{c33} 的最优参数, 从而可获得加速度传感器在任意姿态下的标准归一化输出。参数的确定利用了 Matlab 软件工具, 通过 serial 函数创建串口通讯对象, 读取记录传感器的三轴测量原始数据。根据选取的多个已知姿态下的三轴测量原始输出和其归一标准化向量, 如当载体坐标系的 Z_b 轴与重力加速度同向平行的时候, 其归一标准化的三轴输出为 $[0 \ 0 \ 1]$, 与重力加速度反向平行时, 其归一标准化的三轴输出为 $[0 \ 0 \ -1]$, 记录下 10s 左右 (可根据传感器测量输出频率自行调整) 的三轴原始测量输出和其对应的归一标准化向量; 利用 Matlab 采集的多个已知姿态下的三轴测量原始数据及其相应的已知归一标准化向量, 根据最小二乘法得出最优参数。

3.3 磁强传感器测量输出校正

理想情况下, 电子罗盘在水平面内 x, y 方向地磁场水平分量输出曲线是圆心在原点的圆, 在实际应用环境中, 电子罗盘受地磁力的同时还受到硬磁干扰和软磁干扰。硬铁干扰在罗盘的输出值上增加了一个定值, 使得罗盘输出曲线图的圆心偏移了。软磁干扰使圆畸变成椭圆^[7]。

3.3.1 误差补偿模型

设电子罗盘在完全水平放置下磁强传感器 x, y 轴的实际输出为 (H_{bx}, H_{by}) , 理想状态下地磁场水平向量在电子罗盘载体坐标系 x, y 方向上的磁场强度 (H_x, H_y) 表示, 则可建立以下的误差补偿模型

$$\begin{bmatrix} H_{bx} \\ H_{by} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x & 0 \\ 0 & K_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \end{bmatrix} \quad (10)$$

对角矩阵使圆变成椭圆, K_x, K_y 分别表示椭圆长短半轴的变化程度; B_x, B_y 表示椭圆圆心偏离原点的偏移量。误差补偿系数的求解采用最小二乘椭圆拟合^[8], 根据实际测量输出拟合求解椭圆方程的参数, 然后根据椭圆方程参数进一步解得误差补偿系数。

平面任意位置椭圆方程式可表示为:

$$H_x^2 + K_1 H_x H_y + K_2 H_y^2 + K_3 H_x + K_4 H_y + K_5 = 0 \quad (11)$$

电子罗盘在硬铁干扰和软铁干扰的影响下, 水平面内 x, y 方向的输出曲线为椭圆曲线, 利用电子罗盘在 x, y 方向的 $N (N \geq 5)$ 个测量点的测量输出数据 $(H_{xi}, H_{yi}) (i = 1, 2, \dots, N)$ 拟合椭圆方程。利用最小二乘法, 即利用所有测量点到理想椭圆的距离的平方和为最小这一准则来确定椭圆方程系数 $K_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ ^[9]。

再由得到的椭圆方程系数得到误差补偿系数:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{K_2}{K_1 - 1}\right) \quad B_x = \frac{-2K_1 K_3 + K_2 K_4}{4K_1 - K_2^2} \quad B_y = \frac{-2K_4 + K_2 K_3}{4K_1 - K_2^2}$$

$$K_x = \sqrt{\frac{2}{1 + K_1 - \frac{K_2}{\sin(2\theta)}}} \quad K_y = \sqrt{\frac{2}{1 + K_1 + \frac{K_2}{\sin(2\theta)}}}$$

4 软件设计

电子罗盘软件设计主要包括单片机对传感器数据采集、数据处理和数据传送程序设计。该部分软件设计采用模块化设计，将实现各个功能模块程序做成子程序，然后再主程序中进行调用。主要的子程序模块包括：航向姿态测量集成芯片的初始配置、片上两种传感器测量数据的采集读取、微处理器对传感器测量数据进行姿态解算、姿态角信息传送到 PC 应用程序进行实时显示。该部分的程序设计采用 Keil mdk 集成开发环境和 ST-link 调试器，程序设计的流程如图 6。

PC 应用程序设计：在 Eclipse 集成开发环境下，采用 java 语言，利用 java 3D API 构建三维物体，利用 javacomm 串口通讯扩展包从串口接收微处理器进行姿态解算后传送的航向姿态角，在应用程序中的串口数据接收事件处理函数内对三维物体的航向姿态进行实时更新。

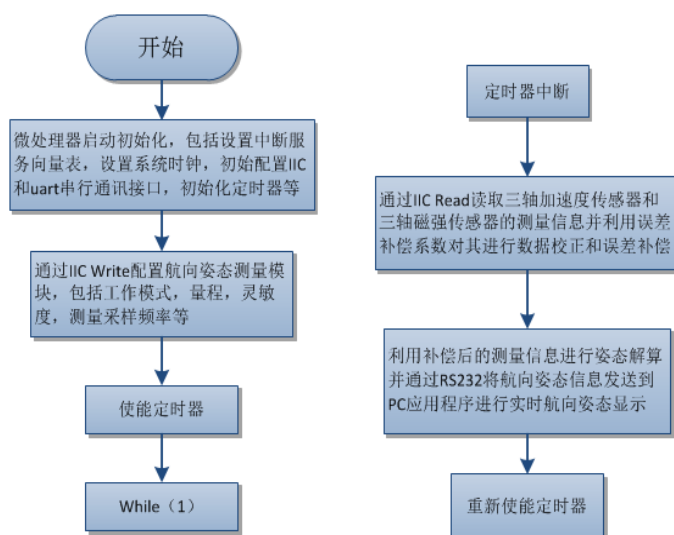


图 6 软件设计流程图
Fig.6 Software design process

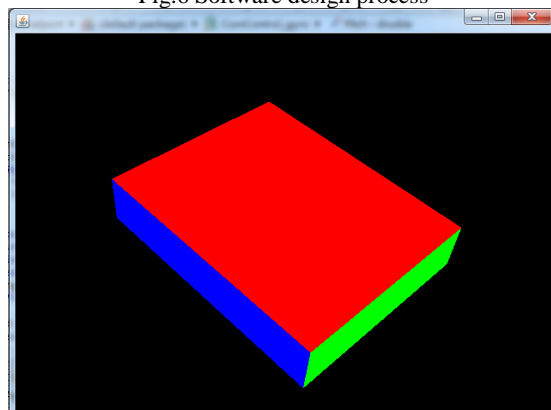


图 7 PC 应用程序界面
Fig.7 PC application interface

5 测试结果与结论

5.1.1 测试结果对比

185 为了检验设计的电子罗盘测量系统的准确性，将电子罗盘测量模块放在转台上，将转台在水平面内360°旋转。电子罗盘在完全水平放置，有俯仰角30°和有横滚角30°三种情况下，每30°作为一个测量点记录测量值。将测得三组数据与真实值进行对比，测量数据结果如表1所示。

表 1 实验数据
Tab.1 Experimental data

理论值/(°)	水平放置/(°)	俯仰角 30°/(°)	横滚角 30°/(°)
0	0.2	0.5	0.4
30	30.1	29.8	30.5
60	59.7	60.4	60.5
90	90.1	89.8	90.4
120	120.4	120.6	120.5
150	150.2	149.5	150.3
180	180.1	180.2	179.6
210	209.8	210.4	210.5
240	240.4	240.5	240.6
270	270.2	269.8	270.4
300	300.5	300.7	300.5
330	330.4	330.6	330.7

5.2 结论

195 本文介绍了基于 ST 公司的 MEMS 数字集成芯片 LSM303DLHC 的数字电子罗盘的系统设计，阐明了基于地磁向量的航向角测量原理以及利用三轴加速度传感器进行倾角补偿的原理，分析了影响电子罗盘测量精度的各种误差来源并给出了相应的补偿校正方法，实验测试结果表明该系统的航向角测量精度在±1°之内，精度达到一般便携式导航设备的要求。该系统结构简单，具有成本低、体积小、功耗低等特点，具有较好的推广利用价值。

[参考文献] (References)

200 [1] 武建军,封维忠,于玮等. 基于 MEMS 三维磁阻传感器的电子指南针的研究[J]. 传感器与微系统, 2011, 30 (8) : 83-85,88.

[2] 高宗余, 李德胜. 多 MEMS 传感器姿态测量系统的研究[J]. 电光与控制, 2010, 17 (3) : 68-70, 97.

[3] ST Inc. LSM303DLHC Datasheet[OL].http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/DM00027543.pdf

205 [4] ST Inc. STM32F103VE Datasheet[OL].http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00191185.pdf

[5] 邵婷婷, 马建仓, 胡士峰等. 电子罗盘的倾斜及罗差补偿算法研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20 (6) : 1335-1337.

[6] 赵忠, 何海涛, 徐晓东等. 基于系统芯片(SoC)的低成本电子罗盘的设计[J]. 测控技术, 2006, 25 (9) : 9-11.

210 [7] 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研究[J]. 传感器技术学报, 2010, 23 (9) : 1285-1288.

[8] 刘诗斌, 冯晓毅, 李宏等. 基于椭圆假设的电子罗盘误差补偿方法[J]. 传感器技术, 2002, 21 (10) : 28-30, 33.

215 [9] 秦勇, 赵杰, 王晓宇等. 基于椭圆拟合误差补偿算法的数字磁罗盘[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39 (2): 489-493.