

# 基于磁电阻效应的高精度电子罗盘设计

陈 敏, 唐晓莉

(电子科技大学 电子科学与工程学院, 四川成都 610054)

**摘 要:** 为解决磁通门传感器式电子罗盘不便携带和霍尔效应传感器式电子罗盘精度易受影响的问题, 采用基于磁电阻传感器和三轴加速度计的 LSD303DLH 芯片作为数据采集模块, 以 STM32F7 作为微控制单元, 设计利用电子罗盘测定方位角的系统, 由样机进行测试与实验验证。实验结果证明测量稳定, 且在附加 10 倍地磁场大小的外加磁场下仍能稳定测量, 且测量误差均在  $1^\circ$  范围内, 实现了系统便携化、输出信号精度高的目标。

**关键词:** 电子罗盘; 磁电阻传感器; 误差补偿

中图分类号: TP212.13

文献标识码: A

文章编号: 1001-3830(2020)02-0020-04

DOI: 10.19594/j.cnki.09.19701.2020.02.005

## Design of high precision electronic compass based on magnetoresistance effect

CHEN Min, TANG Xiao-li

*School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*

**Abstract:** In order to solve the problem that the fluxgate sensor-based electronic compass is difficult to travel conveniently and the Hall effect sensor-based electronic compass is vulnerable to impact on its accuracy, the system uses LSD303DLH chip based on magnetoresistive sensor and three-axis accelerometer as data acquisition module, STM32F7 as micro-control unit, a system for measuring azimuth angle by electronic compass was designed, which is tested and experimented by prototype. The experimental results show that the system is stable, and can be measured stably in an external magnetic field of 10 times that of the geomagnetic field. The measurement errors are all within  $1^\circ$  range, thus realizing the goal of portable system and high accuracy of output signal.

**Key words:** electronic compass; magnetoresistance sensor; error compensation

### 1 引言

人类对于生活品质的追求和对探索自然的渴望等多方面需求日益提升, 人们不断探寻更便携、更精准的导航仪器。与传统的无线电导航、GPS 导航、惯性导航相比, 电子罗盘避免了电磁波传播过程易受影响的问题和 GPS 导航中卫星信号丢失而导致的无法正常使用的问題<sup>[1-2]</sup>, 其系统成本更低、能耗更低、更加便携。目前, 常用的磁电阻传感器为巨磁电阻传感器、各向异性磁电阻传感器、隧道巨磁电阻传感器, 其中巨磁电阻传感器的材料复杂, 制作所需要的工艺也比较复杂, 成本较高<sup>[3]</sup>, 隧道巨磁电阻为多层膜结构, 应用在电子罗盘中技术难度高, 而各向异性磁电阻传感器的最佳应用磁场范围为以地磁场为中心的周围磁场<sup>[4]</sup>, 工艺相对简单, 成本相

对更低, 更贴合本研究所需的磁场应用范围, 利于提升测量精度。因此, 结合现有的电子罗盘设计器件和相关技术, 本研究提出了一种基于各向异性磁电阻传感器的电子罗盘, 以磁电阻传感器作为地磁场的感测材料, 针对电子罗盘实际使用过程中所存在的一定角度姿势方向倾斜, 本研究加入了三轴加速度计以加速度计作为倾斜姿态的感测元件, 实现对电子罗盘的倾角进行描述, 实现满足民用条件下的高精度、抗干扰、稳定输出的高性价比的电子罗盘。

### 2 电子罗盘测磁场定角度原理

地磁场是一个偶极磁场<sup>[5]</sup>, 有两个磁极: 磁北极和磁南极。磁强被用于描述磁场的大小, 地磁场的

收稿日期: 2019-01-19 修回日期: 2019-08-09

通讯作者: 陈 敏 E-mail: chenmin\_uestc@163.com

磁强大小为 0.6~0.7 G，在不同位置即不同的经纬度，磁感应强度的大小不同，尤其在南北磁极的位置上，其磁场强度很高，大约是赤道磁强的两倍。电子罗盘主要是利用磁电阻效应，磁电阻传感器中的磁性材料在遇到外加磁场时，材料电阻的大小会随着磁场的变化而变化，电阻的大小变量也就是磁电阻，而地磁场是个随地理位置变化的磁场，且其大小分为两个部分，一个部分为稳定场，另一个部分为变化场，由于变化场的大小相比较稳定场数值较小，因此在地磁定向中可将地磁场视为稳定场，这是地磁定向的基础。三轴磁电阻传感器可测量地磁的三轴磁场分量变化量，结合三轴加速度分量来确定前进的方位角，从而实现电子罗盘导航。

地磁的水平方向的分量  $M$  始终指向地磁北极，在二维坐标系下，假设电子罗盘处于水平状态，罗盘的方位角指的是罗盘的前进方向  $x$  轴与地磁北极之间的夹角  $\psi$ ，如图 1 所示， $y$  轴垂直于前进方向。

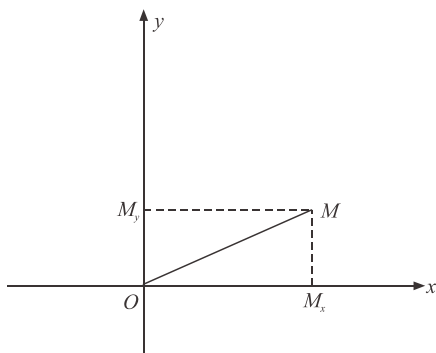


图 1 二维坐标系下方位角示意图

由图 1 可得：

$$M_x = M \cdot \cos \psi \quad (1)$$

$$M_y = M \cdot \sin \psi$$

即可推出<sup>[6-7]</sup>

$$\tan \psi = \frac{M \cdot \sin \psi}{M \cdot \cos \psi} = \frac{M_y}{M_x} \quad (2)$$

$$\psi = \arctan \frac{M \cdot \sin \psi}{M \cdot \cos \psi} \quad (3)$$

方位角的范围在 0~360°，得

$$\psi = \begin{cases} 90^\circ & (M_x=0, M_y < 0) \\ 270^\circ & (M_x=0, M_y > 0) \\ 180^\circ - [\arctan(M_y/M_x)] \cdot (180^\circ/\pi) & (M_x < 0) \\ -[\arctan(M_y/M_x)] \cdot (180^\circ/\pi) & (M_x > 0, M_y < 0) \\ 360^\circ - [\arctan(M_y/M_x)] \cdot (180^\circ/\pi) & (M_x > 0, M_y > 0) \end{cases} \quad (4)$$

而实际上的北极方向与地磁北极之前存在一个

夹角，即磁倾角  $D$ <sup>[8]</sup>，磁北极偏东时磁倾角为正，磁北极偏西时磁倾角为负，在计算时，需要对磁倾角进行方位角的加减运算：

$$\alpha = \psi \pm D \quad (5)$$

但在实际的测量过程中，电子罗盘并非始终处于二维状态，罗盘所处平面并非是一个完全水平面，此时则采用三维坐标系下的角度计算方式，可以借助对于罗盘放置斜态的描述来确认方位角，该描述主要是姿势角，其中包含了横向倾角  $\alpha$  和俯仰角  $\beta$ ，在本系统中使用三轴加速度计在三维立体坐标系中各轴的分量来计算  $\alpha$  和  $\beta$ 。横向倾角指当以  $x$  轴为中心使三轴坐标系转动角度  $\alpha$ ，俯仰角指当以  $y$  轴为中心使三轴坐标系转动角度  $\beta$ ，使得罗盘的倾斜水平面与水平面重合，在三轴坐标系中有加速度的三个方向分量，计算出  $\alpha$  和  $\beta$  分别<sup>[9]</sup>为：

$$\begin{cases} \alpha = \cot \frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}} \\ \beta = \cot \frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}} \end{cases} \quad (6)$$

式中， $A$  为三维状态下的磁场强度测量值。通过磁传感器测出三维立体坐标系下的地磁场强度分量，经过载体的姿势转化，将三维立体坐标转化为二维水平坐标系下，以  $y$  轴为中心使三轴坐标系转动角度  $\beta$ ，得矩阵  $R_1$ ：

$$R_1 = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

以  $x$  轴为中心使三轴坐标系转动角度  $\alpha$ ，得矩阵  $R_2$ ：

$$R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (8)$$

则旋转矩阵为

$$R = R_1 \cdot R_2 \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \sin \alpha & -\sin \beta \cos \alpha \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ \sin \beta & -\cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (9)$$

最终可得水平坐标系下的磁感应强度

$$\begin{cases} M'_x = M_x \cos \beta + M_y \sin \alpha \sin \beta - M_z \cos \alpha \sin \beta \\ M'_y = M_y \cos \alpha + M_z \sin \alpha \end{cases} \quad (10)$$

将变换后得水平坐标系下的  $M'_x$ 、 $M'_y$  代入(4)式就可以计算出方位角。

### 3 系统设计

系统通过对地球磁场和倾角的感测，由上述的电子罗盘测磁场定角度原理，地磁传感器测出地磁场三轴立体坐标系下的地磁强度分量，获取磁场大小的量化数据，三轴加速度计获得旋转矩阵，实现坐标系从三轴立体坐标转化到平面坐标，转化后的地磁强度分量和旋转矩阵信息汇总即可计算出方位角，实现电子罗盘的方位角输出功能。系统设计框架如图 3 所示。

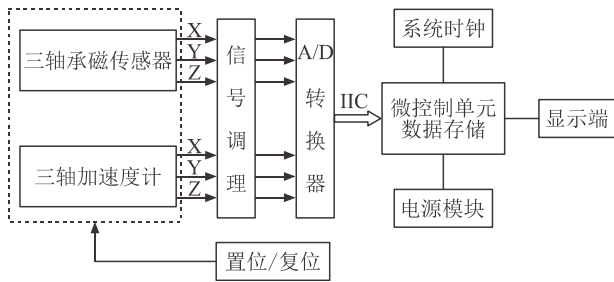


图 3 系统设计框架

本系统硬件设计以数据采集模块、主机为主要模块，数据采集模块主要功能为通过地磁传感器和三轴加速度计获得横向倾角  $\alpha$ 、俯仰角  $\beta$  和地磁强度分量信息，主机主要功能为对地磁强度分量和旋转矩阵的数据处理，并生成方位角数据。

基于地磁场的方位角三维状态下的解算原理，电子罗盘的硬件电路采用了芯片 LSM303DLH<sup>[10-11]</sup> 作为信号采集模块，将三轴磁电阻传感器与三轴加速度计集成为单一模块，采用 LCC 封装，与数据处理相连的数据传输接口为支持标准模式(100 kHz)和快速模式(400 kHz)的 I<sup>2</sup>C 接口，实现数据的稳定且快速传输，实现地磁场、加速度变量的敏感采集。在外围电路的保护上，加入置位复位电路，防止在干扰磁场下的磁场极化翻转，

数据采集模块，包括磁电阻传感器与三轴加速度计。本系统基于芯片，磁电阻传感器利用磁电阻效应探测地磁场的微变化，获得三轴地磁强度分量，此三轴磁电阻传感器在 20 G 以内的磁场环境下实现稳定测量和相同的灵敏度，实现地磁场测量线性度的提高，采用基于 Honeywell 的各向异性磁电阻 (AMR) 技术，分辨率可达到 8 mG，12 位的模-数转换器确保了其对磁场强度的精准测量。三轴加速度计采集三轴重力加速度分量，获得电子罗盘的横向倾角  $\alpha$ 、俯仰角  $\beta$ ，使用 12 位的模数转换器，实现

测量精度为  $10^{-3}g$ ，此三轴线性加速度计测量范围在低功耗模式下可以运行，并且具有休眠、唤醒模式，极大地降低了模块功耗，加速度计集成 6 轴的方向检测，其中两路可实现编程控制中断接口，实现电子罗盘的小型化。

主机包括：电源模块、微控制单元、数据存储模块、数据显示模块、人机交互模块。

电源模块用于为探头和主机内各个模块和单元供电，电压选用 3.3 V，由于数据采集模块中 Vdd\_dig\_M 所需电压为 1.8 V，利用 TXS0108E 进行电压转换，满足各部分的电压要求。

微控制单元的芯片采用的是意法半导体(ST)公司 STM32F7，采用 Corex M7 作为芯片内核，对于 0 等待周期的实现是基于两种机制，一种是 ST ART Accelerator，另一种是一级高速缓存，拥有大容量 SRAM 和多个逻辑单元，完全满足本系统的控制方案编程需求。其完成数据采集的频率控制，处理三轴地磁强度分量与三轴加速度分量，计算出方位角，误差校正后将方位角数据罗盘信息传输到数据显示模块。

数据存储模块接收三轴磁场分量和三轴重力加速度分量数据，通过 I<sup>2</sup>C 数据接口传输至微控制单元。数据显示模块，采用 4.3 寸的电容触摸屏，可以实现 5 点同时触摸，与微控制单元相连，按照程序协议频率发送数据，即时显示方位角与方向信息。人机交互模块，包括触摸交互与按键交互。触摸交互置于触摸显示屏，可根据使用者的需要进行显示的控制；按键交互置于外部上表面壳体，控制测量过程的开始、中断、停止，选择性进行测量过程，节约能耗。

本系统的软件控制设计采用的是 Keil MDK 开发环境，以 C 语言为主要的程序编写语言，其主要功能，一是控制硬件电路的采集频率与复位，二是控制数据处理模块的算法处理采集的数据信息，其结构如图 4 所示，流程如图 5 所示。

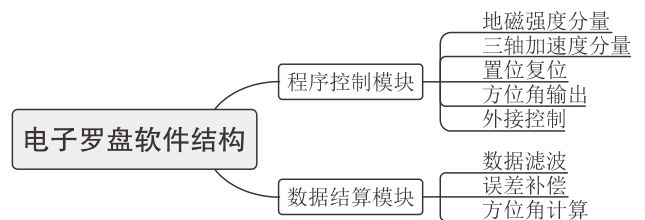


图 4 电子罗盘软件结构

本系统的软件控制设计主要包含两大部分，一是程序控制模块，二是数据解算模块。其中程序控制模块包括地磁强度分量采集、三轴加速度分量采集、置位复位、方位角输出、外接控制；数据解算模块包括数据滤波、方位角计算、误差补偿。两个模版对应运行相应的程序完成功能，以 `mian.c` 主程序为中心线，依照图 5 所示的流程完成流水线工作，

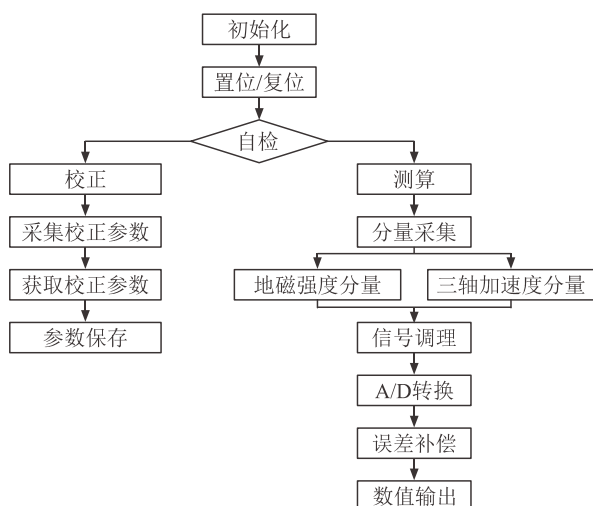


图 5 电子罗盘软件流程

电子罗盘采用 USB 接口连接电源，电源接通之后系统开始各项初始化(时钟、串口、SPI 总线、I<sup>2</sup>C 总线、中断控制、LED、LCD 等)，进入电子罗盘的自检工作，如需进行校正，则采集校准数据并进行保存，获取校正参数，否则进入测算流程，由数据采集模块完成地磁强度分量和三轴加速度分量的采集，经过信号调理之后进入 AD 转换，通过 I<sup>2</sup>C 进入微控制单元，将获取的校正参数代入，实现数据的

误差补偿，完成对三轴地磁强度分量与三轴加速度分量的解算，获得方位角的数值信息，最后传输到数据显示模块进行数据显示。本研究的电子罗盘样机如如图 6 所示。



图 6 电子罗盘样机

## 4 实验验证

在方位角的验证实验中，先将转台处于水平放置，不加磁场，将本系统电子罗盘进行转动，完成数据采集模块的校正，获得相关校正参数。

第一组数据为不加磁场，仅使罗盘处于自然状态下的地磁场作用，在非水平放置的前提下，随机加以姿态倾斜，以 30°为步长进行分段测试，每个测试点数据输出 8 个点，表 1 为电子罗盘所测方位角数据与标准转台数据的对比，

表 1 电子罗盘所测方位角数据与标准转台数据的对比值

(°)

标准值	平均值	测试值 1	测试值 2	测试值 3	测试值 4	测试值 5	测试值 6	测试值 7	测试值 8
0	360.00	359.47	360.02	0.47	359.23	0.01	360.13	0.05	0.67
30	30.15	29.56	28.97	31.04	30.74	28.78	30.32	31.06	30.77
60	60.04	61.07	59.43	58.78	60.78	58.56	59.78	60.58	61.32
90	90.72	90.56	89.72	91.04	89.93	90.64	91.54	90.83	91.47
120	120.24	119.78	120.26	121.31	119.43	120.35	119.45	120.32	121.04
150	150.06	149.46	148.76	150.03	151.02	150.69	149.74	150.33	150.48
180	180.02	180.36	179.62	180.13	179.45	180.24	179.63	181.07	179.62
210	209.80	209.43	210.02	209.78	208.97	209.56	210.13	210.57	209.93
240	240.31	240.79	239.75	241.43	240.78	239.93	239.46	239.98	240.36
270	270.49	270.12	270.48	271.07	269.96	271.09	270.01	271.18	269.98
300	300.36	300.01	301.38	299.54	299.78	300.76	301.41	300.45	299.57
330	330.29	330.43	329.71	331.04	330.76	329.83	330.28	329.29	330.96

可以发现，本系统所测方位角的数据稳定，误差均值在 1°，实现本系统基础测量便携化、精度较

高的设计目标。

(下转 69 页)