

电子科技大学

UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA

专业学位硕士学位论文

MASTER THESIS FOR PROFESSIONAL DEGREE



论文题目 基于磁电阻效应的电子罗盘研究

专业学位类别 工程硕士

学 号 201422030635

作者姓名 杨鸿洁

指导教师 唐晓莉 教授

分类号_____密级_____

UDC^{注1}_____

学 位 论 文

基于磁电阻效应的电子罗盘研究

(题名和副题名)

杨鸿洁

(作者姓名)

指导教师

唐晓莉

教 授

电子科技大学

成 都

(姓名、职称、单位名称)

申请学位级别 **硕士** 专业学位类别 **工 程 硕 士**

工程领域名称 **电子与通信工程**

提交论文日期 **2017.3** 论文答辩日期 **2017.5**

学位授予单位和日期 **电子科技大学** **2017 年 6 月**

答辩委员会主席_____

评阅人_____

注 1: 注明《国际十进分类法 UDC》的类号。

THE STUDY OF ELECTRONIC COMPASS BASED ON MAGNETORESISTANCE EFFECT

**A Master Thesis Submitted to
University of Electronic Science and Technology of China**

Discipline: **Master of Engineering**

Author: **Yang Hongjie**

Supervisor: **Prof. Tang Xiaoli**

School: **School of Microelectronics and Solid-State
Electronics**

摘 要

指南针自古以来就是人们导航定向的重要工具。随着科技的发展,电子罗盘逐渐替代传统指南针,广泛应用于航海航天,探险勘测等领域。在各种导航技术蓬勃发展的今天,电子罗盘产品以其独有的优良特性,在导航定向方面仍作为基本的工具被广泛使用。基于这一背景,本文采用各向异性磁阻传感器作为磁敏感元件对电子罗盘系统进行相关的研究。主要研究内容如下:

本文以实现一种小型化,便携化,精度在 3° 以内,可以满足一般民用需求的电子罗盘为研究目标。首先,研究基于电子罗盘测量原理,根据罗盘系统预期性能指标,在硬件上主要开展了方案设计、芯片选型、电路设计、功能验证、参数调整等工作,实现了对电子罗盘航向角计算的必要信息的采集;其次,为匹配硬件的设计,在软件及数据提取上开展了实现软件滤波算法、误差补偿校正算法和航向角计算工作。经过软件滤波算法处理,数据中干扰成分得到抑制,采样曲线平滑。数据补偿算法明显提高了航向角输出精度。最后,研究搭建了基于各向异性传感器的电子罗盘样机,该电子罗盘系统在水平状态下, $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 范围内航向精度测量平均误差为 2° ,在倾角 $\pm 30^{\circ}$ 的范围内,罗盘仍可正常工作并且满足精度要求。

关键词: 磁阻传感器, 电子罗盘, 误差补偿, 椭圆补偿法

ABSTRACT

Since ancient times compass had been an important tool in orientation. With the development of science and technology, the electronic compass gradually replace the traditional compass in navigation, aerospace, exploration and other fields. Today, with the rapid development of all kinds of navigation technology, the electronic compass is still widely used as a basic tool in the field of navigation. Based on this background, this paper uses the AMR sensor as the magnetic sensitive element to study the electronic compass system. The main research contents showed below:

This paper aims to achieve a miniaturization, portable, precision within 3° , to meet the general needs of the electronic compass. Firstly, based on the principle of electronic compass measurement, according to the expected performance index of the compass system, the design of the structure, chip selection, circuit design, function verification and parameter adjustment are carried out in the hardware, which is necessary to calculate the heading angle of the electronic compass. Secondly, in order to match the hardware design, software and data extraction to carry out the implementation of software filtering algorithm, error compensation correction algorithm and heading angle calculation work. After the software filtering algorithm is processed, the interference component in the data is suppressed and the sampling curve is smooth. The data compensation algorithm significantly improves the accuracy of the heading angle output. Finally, an electronic compass prototype based on anisotropic sensor is designed. The electronic compass system has an average error of 2° in the rotation angle range of $0^\circ \sim 360^\circ$, and in the dip angle range of $\pm 30^\circ$, the compass still work and meet the accuracy requirements.

Keywords: Magnetoresistive sensor; Electronic compass; Error compensation; Ellipse compensation method

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 课题研究背景和意义	1
1.2 电子罗盘国内外研究与发展	3
1.3 课题研究目标和主要内容	4
第二章 电子罗盘测量原理	6
2.1 地球磁场简介	6
2.2 电子罗盘测量原理	8
2.2.1 二维系统	8
2.2.2 三维系统	9
2.3 磁场检测方式简介	11
2.4 磁阻传感器分类	13
2.5 本章小结	14
第三章 磁阻电子罗盘系统硬件设计	15
3.1 电子罗盘设计指标	15
3.2 电子罗盘设计方案验证与选择	15
3.3 信息获取模块	16
3.3.1 地磁场感测单元	16
3.3.2 倾角感测单元	22
3.4 信号调理模块	23
3.5 信号处理模块	26
3.5.1 微处理器最小系统	26
3.5.2 微处理器外围电路设计	28
3.6 系统供电设计	30
3.7 PCB 设计小结	31
3.8 本章小结	32
第四章 磁阻电子罗盘系统软件设计与调试	33
4.1 程序框架与开发环境介绍	33
4.1.1 程序框架简介	33
4.1.2 软件开发环境介绍	34
4.2 各模块子程序介绍	35

4.2.1 磁场强度获取模块	35
4.2.2 加速度获取模块	37
4.2.3 置位复位控制	37
4.2.4 输出与外设控制	38
4.2.5 航向解算程序	39
4.3 罗盘系统调试.....	42
4.4 本章小结.....	43
第五章 磁阻电子罗盘系统误差分析与补偿	44
5.1 罗盘测量误差来源分析.....	44
5.2 罗盘误差补偿算法研究.....	45
5.2.1 椭圆法补偿	45
5.2.2 最佳椭圆法补偿	47
5.3 罗盘样机测试结果.....	48
5.3.1 水平测试	48
5.3.2 倾斜测试	52
5.3.3 结果分析	55
5.4 本章小结.....	56
第六章 总结与展望	57
致 谢	58
参考文献	59
攻读硕士学位期间取得的成果	61

第一章 绪论

1.1 课题研究背景和意义

自古以来，定位与定向就是制约人类活动范围的关键因素。伴随着当代科学技术与经济的高度发展，人类探索新世界的脚步不断向前迈进，科幻电影中一些假想成为现实。不断探索未知空间和领域对航向导航技术提出更高的要求。

对于导航技术来说，其中两个最为关键问题就是定位与定向。目前，主要的导航定向手段有以下几种：

(1) 天文导航定向与地文导航定向

在古代人们就懂得利用天体位置来确定方向，特别是在远洋航行上这种方法应用尤为广泛。经过长期的观测，人们发现许多天体其运动具有一定的规律，在某一特定的时期，根据我们与其相对位置便可以确定方位。天文导航^[1]就是基于这一原理来确定方向的。类似的，地文导航也属于自主式导航定向系统。地文导航通过观测陆标与载体的方位、距离和方位差等相对位置关系从而进行定位定向。它们不需要其他地面设备的支持，不受人工或自然形成的电磁场的干扰，隐蔽性好，不向外辐射电磁波，误差不随时间积累。但是这两种导航系统成本较高，而且容易受气候条件的影响。

(2) 无线电导航定向

无线电导航定向技术^[2]是一种精度较高的定向技术，其基本原理是利用接收到的电磁波的振幅、相位、传播时间等量测信息计算出载体相对发射点的方向信息。无线电导航技术的出现是导航定向技术一大进步，然而其缺点也显而易见，即覆盖区域小，电磁波传播过程易受影响等因素。

(3) 卫星导航定向

卫星导航定向技术是对无线电导航定向技术的延伸与发展。原理与无线电导航类似，卫星导航定向技术^[3]是利用卫星发送的信号求解基线的方位角和高度角的一种技术。根据卫星系统的不同，具体的定向技术实现机理也不完全相同。常见的 GPS 系统可以进行载波相位测量，因此基于 GPS 系统的定向技术也相应分为两种。我国自主研发的北斗导航系统也有基于载波相位测量和码测量的数学模型及算法。相比于无线电导航定向，卫星导航定向精度较高。类似无线电导航技术，卫星导航信号同样会受到大气等因素的影响。

(4) 惯性导航定向

惯性导航定向技术^[4]通过感测系统当前加速度值，并将加速度积分得到系统相

对出发的点位移，进而得到系统位置与方向角等信息。惯性导航基本不受外界因素影响，导航精度完全取决于系统本身。但是系统成本较高，由于是通过积分计算来确定航向信息，其误差会随时间积累。因此惯性导航常用于军事领域，并与其他技术组合使用以提高系统的可靠性。

（5）地磁场定向

地磁场是地球周围存在的一种天然磁性现象。早在战国时期，我国劳动人民就发明了指南针用于指示方向。随着磁传感技术和芯片产业的发展，电子罗盘产品已经代替传统指南针广泛应用于各种领域。地磁场定向技术不受地形地貌影响，具有可靠性强，精度高等优点。

综合分析以上定向技术的优缺点，可以看出利用电子罗盘进行导航定向具有以下明显优势：

a) 弥补卫星导航的缺陷

在导航、定位定向、测速等方面卫星导航具有无可比拟的优势，但是其信号也会受到地形、地物的遮挡，造成其精度下降，甚至由于接收不到信号而不能正常工作。目前，对于使用最广泛的 GPS 导航系统也无法克服这一问题，在山谷林区等复杂环境下，其信号易受遮挡导致可靠性大大降低。而且常见的卫星导航系统往往无法确定静止目标的航向信息，而高精度的电子罗盘系统恰好可以弥补这一缺陷。一些发达国家为了增加导航系统的可靠性与准确性，在其重要军事装备上仍加装了电子罗盘辅助导航定向。电子罗盘产品可以有效弥补 GPS 等卫星导航系统的缺陷。即使接收不到相应卫星信号，它也能正常工作，根据当前方向与运动状态估算出载体大致位置方向等信息，在接受到卫星信号后在进行校正，确保实时系统可靠，做到“丢星不丢向”。

b) 替代传统指南针成为特殊领域的必备工具

指南针自发明以来，就成为野外探险和勘测的必备工具。传统指南针在强磁场环境下往往难以正常工作，因此在某些环境下无法发挥重要作用。在这种情况下，由于电子罗盘系统中包含相应的误差补偿算法，可以通过计算抵消外界强磁场的干扰，所以仍能得到正确的方向信息。因此，相比于传统指南针，电子罗盘具有更高的可靠性。

c) 适配性强，组合其他设备拓展更多功能

电子罗盘接口适配性强，可以和多种设备完美结合，以应用于多种不同场景和条件。现在电子罗盘一般结合惯性导航、卫星导航组合形成一种可靠性、准确性更高的组合导航系统。

综合来看，电子罗盘系统不仅具有广阔的市场前景，而且其军事价值也不可

估量。因此研究电子罗盘系统具有十分重要的理论价值和现实意义，本课题研究也正是从这些因素考虑而提出的。

1.2 电子罗盘国内外研究与发展

电子罗盘系统是一种典型的地磁导航设备。随着半导体制造加工技术与集成电路技术的不断发展，电子罗盘的设计制造也达到了一个前所未有的高度。目前，电子罗盘现今已被广泛地应用于各个领域，特别是在各种智能设备中都有其身影。

由于国外磁传感器研究起步较早，相关半导体技术发展成熟，其电子罗盘研究已经比较完善。几家著名的高科技制造企业已经开发了一系列产品和相关解决方案。美国 Honeywell 公司的电子罗盘产品覆盖面广、性能优异。如图 1-1 所示，该公司目前比较主流的产品以下几种：



图 1-1 Honeywell 主流电子罗盘产品

HMC6343 数字罗盘模块是一种带有导航计算固件和磁场校准的全集成模块。该模块集成了三轴磁阻传感器、三轴 MEMS 加速度传感器、相应的模拟电路与数字电路以及微处理器和配套的导航信息解算算法。模块尺寸仅为 $9 \times 9 \times 1.9\text{mm}$ ，并且带有通用异步收发接口，可以适配其他各种设备系统中。HMR3500 数字罗盘模块最突出的特点是其坐标系可由用户自行定义，即该模块可安装于任何方向的系统中。并且该模块还带有软铁和硬铁校准算法以及地球磁场模型，可以选择指示磁北或地北。其方位角测量精度可以达到 1° 以内，具有 0.1° 的分辨率和 0.5° 的重复精度。由于其坐标系可由用户定义，故其工作俯仰角和横滚角可达 $\pm 89^\circ$ ，且可 360° 连续旋转。HMR3000 罗盘模块可测量 $\pm 40^\circ$ 倾角情况下的航向信息，通过全双工 RS232 或半双工 RS485 串口输出，方位角测量精度可达 0.5° 。HMR3300 是一种具有倾角补偿的罗盘模块，可工作在 $\pm 60^\circ$ 的倾角下。水平状态下方向角测量精度可达 $\pm 1^\circ$ ，数据通过 RS232 或 SPI 总线传送。PNI 公司也是业内技术领先的一家电子罗盘生产制造厂家。其产品大致有包括以下几个系列：（1）传统 TCM 罗盘系列，包括 TCM2.5、TCM2.6、TCM3、TCM5 等；（2）TCM-XB

和 TCM-MB 系列,传统 TCM 系列的升级版;(3) SeaTRAX 系列,该系列适用于海上拖缆地震系统;(2) Prime 系列,专为灵活性与适应性而设计,适用于声纳浮标、侧扫声纳、低成本机器人等;(4) TargetPoint DMC 系列,超高精度与可靠性,可靠性级别可以达到军用水平;(5) TRAX AHRS 系列,该系列产品为利用电子罗盘和陀螺仪、加速度计等组成的姿态航向参考系统。PNI 公司的电子罗盘产品,精度高,应用场景丰富,但是价格也相当昂贵。KVH 公司的电子罗盘产品大多采用磁通门传感器作为敏感元件进行设计,其典型的 C100 系列罗盘系统,方位角测量精度可达到 0.5° 以内。

相比之下国内的电子罗盘发展与国外还有一定差距,并未有集成度较高的芯片级产品问世。国内的一些电子罗盘生产厂家有深圳瑞芬科技有限公司、南京觉微电子科技有限公司、宁波麦思电子科技有限公司等。一般国内常见生产的产品也是利用一些国外的传感器芯片进行板级设计并进行校准。在板级罗盘设计制造上,国内发展水平已经取得一定进展。南京觉微电子科技的 HCS-V1.1 的电子罗盘在倾角 $\pm 30^{\circ}$ 内航向精度可达 0.5° ,其性能已经满足大多应用需求。由于我国的相关研究进行的较晚,在此技术领域上与发达国家仍有一定差距。从核心部件传感器芯片上来说,我国虽然目前有能力设计制造出满足性能要求的类似芯片,但是外国公司在专利上处于优势地位,磁传感技术已经发展了近半个世纪,想要跨过国外专利技术另辟蹊径,并没有想象中那么简单。从集成度上考虑,我国半导体产业起步较晚,生产商用高集成度的罗盘系统仍有难度,市场份额上来看国外大公司已经占据大半,国内企业想涉足这一领域资金技术都是制约因素。从研究角度来说,由于芯片流片的成本较高国内有能力进行芯片级研究的高校及单位并不多。国内电子罗盘研究始于 20 世纪末,目前国内的一些研究主要集中在板级罗盘的研制,罗盘的校准方法以及具体环境下的罗盘应用,如无人机的飞行控制系统,智能机器人等方面。进入 21 世纪以来,电子罗盘的相关研究也不断增多,并且取得了一定成果。

1.3 课题研究目标和主要内容

本课题的研究目标是结合国内外电子罗盘研究的相关技术,以磁阻传感器、加速度传感器为敏感元件设计一种航向精度、灵敏度、体积与成本综合考虑的电子罗盘系统。使其能满足小型化,低成本的一般应用要求。

本论文章节安排及其主要内容如下:

第一章绪论部分。这一部分结合国内外相关研究资料了解电子罗盘的发展现状,分析发展趋势,根据实际情况,确定课题研究的目标。

第二章介绍了电子罗盘的工作原理。这一章首先介绍了地磁学的理论研究，包括长期观测发现的现象以及总结的相关规律。然后结合地磁导航原理讲述了电子罗盘解算方向角的数学模型和相关公式，主要分二维和三维的情况分别进行阐述。最后介绍了罗盘磁敏感器件的分类并着重对磁阻传感器的分类与特点进行介绍。

第三章主要内容是系统硬件部分相关设计的介绍。根据第二章中的测量原理首先大致描述了硬件系统的整体框架与相关指标。之后各小节分模块讲解具体设计实现的细节与思路。

第四章是罗盘系统软件部分相关设计的介绍。首先介绍程序整体结构及程序流程，然后分别介绍系统各个模块软件的设计与实现。其中航向解算部分重点介绍了常用的软件滤波算法，并通过对比分析，确定合适的滤波算法。

第五章为系统误差分析和校正以及实测结果分析。这一章从罗盘误差产生的原因开始分析，针对不同的误差提出相应的解决方法进行校正与补偿。最后对实际校正过的结果进行分析，评价罗盘性能，提出改进思路。

第六章为全文工作总结和展望。

第二章 电子罗盘测量原理

本章主要介绍实现电子罗盘系统的相关理论依据。首先介绍与电子罗盘系统相关的地磁学研究与发展，包括地磁模型，地磁场的分布与地磁要素等。然后，介绍根据地磁模型解算方向角的基本原理。最后，介绍不同磁敏感元件检测方式以及磁阻传感器的分类。

2.1 地球磁场简介

地磁场是地球四周天然存在的一种磁场。根据历史记载，地磁现象最早是由我国古代劳动人民在长期的实践中发现并实际应用。早在战国时期，人们根据地磁现象制成了司南用于确定方向。进入二十世纪以来，人类踏入太空研究，地磁场观测也摆脱地面束缚，人们开始站在地球以外认识、观测地磁场^[5]。

随着地磁学研究发现的不断深入，人们从最初对地磁场的感性认识到后来的理性认识，再到后来人们使用量化的信息来描述地磁场。正是地磁观测所得的量化参数给地磁定向提供了足够的信息。

地磁研究中常用地磁场强度 T 及其分量来描述地磁场特征。以观测点为原点建立如图 2-1 所示的坐标系。其中， X 轴正方向为地理子午线正北方向， Y 轴正方向沿纬度线正东方向， Z 轴正方向垂直向下。

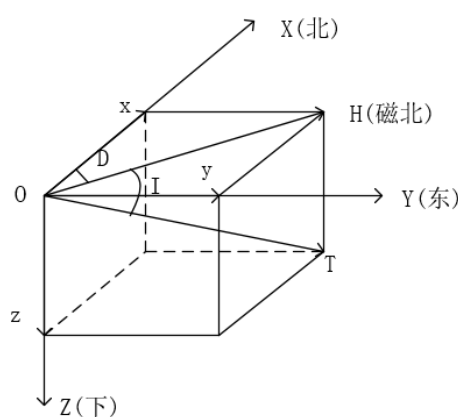


图 2-1 地磁要素图

我们把这些来描述地磁场特征的参量信息称为地磁要素^[6]。如上图所示，这些地磁要素分别是地磁场总强度 T ，水平分量 x ，垂直分量 z 、磁倾角 D 、磁偏角 I 、东向分量 y 、北向分量 x 。地磁场总强度 T 在 X 轴方向上分量称为北向强度，在 Y

轴上的分量称为东向强度，在 Z 轴上的分量称为垂直强度。地磁场强度 T 投影在水平面 OXY 上的分量称为水平强度 H 。地理子午线与磁子午线的夹角 D 称为磁偏角，并规定水平强度 H 偏向东时磁偏角为正，偏向西时磁偏角为负。地磁场强度 T 与水平面间的夹角 I ，称为磁倾角。并对磁倾角的正负作如下规定，在北半球时，地磁场强度 T 指向地平面之下磁倾角 I 为正，否则为负；在南半球时， T 指向地平面之下磁倾角 I 为正，否则为负。这七个参量中只有三个是独立的。这七个地磁要素间关系可表示如下：

$$\begin{cases} H = T \cos I, z = T \sin I, I = \tan^{-1} \frac{z}{H} \\ x = H \cos D, y = H \sin D, D = \tan^{-1} \frac{y}{x} \\ T^2 = H^2 + z^2 = x^2 + y^2 + z^2 \end{cases} \quad (2-1)$$

通过观测地磁要素，我们不仅可以清楚地了解地磁场的分布规律以便深入研究地磁场，并且地磁要素是地磁导航定向所必需的参数。长期的地磁观测发现，地磁场并不是恒定不变的。一般将地磁场划分为稳定磁场与变化磁场两部分。一般变化磁场强度较弱，即在磁暴条件下最大也只有地球稳定磁场总强度的百分之二到百分之四，一般情况在百分之一以下。总磁场可以表示为

$$T = T_0 + \Delta T \quad (2-2)$$

地球稳定磁场主要起源于地球内部，变化磁场起源于地球外部的各种电流体系，地球变化磁场的内源部分也是由外源部分感应产生的。影响地磁场变化的因素较多，分析其原因也较为复杂，在研究地磁场导航定向时，将地球表面的一个较小范围内的磁场看作稳定场模型，这为地磁定向提供了可能。

长期地磁观测发现地球表面的地磁场分布具有以显著下特点^[7]：

- (1) 地球具有两个磁极，地磁极点与地理上的极点并不重合。地磁南极与地理北极靠近，其位置在 $75^\circ \text{ N } 105^\circ \text{ W}$ 附近。地磁北极靠近地理南极，其位置大约在 $67^\circ \text{ S } 143^\circ \text{ E}$ 附近。
- (2) 当处在地球磁极点时，地磁场水平分量强度为零，垂直分量大小最大。在除极点附近外任何地方，水平分量方向均指向北。垂直分量在北半球时垂直水平面指向下，在南半球时则垂直向上。在地磁极点上，磁倾角为 $\pm 90^\circ$ ，磁偏角无确定值。
- (3) 在两极处的地磁场总磁场强度最大，其大小约为 $0.6\text{-}0.7 \text{ guass}$ ，赤道处的总磁场强度最小，约为 $0.3\text{-}0.4 \text{ guass}$ ，只有磁极处地磁场强度的一半。

综上所述，通过长期的地磁场研究与观测得到地磁场参数信息为地磁导航定向提供了充足的信息，经过相应的计算便可以解出航向角信息。

2.2 电子罗盘测量原理

电子罗盘系统通过感测地磁场强度来解算方向角。一般来说电子罗盘系统包含一个三轴磁传感器来感测地磁场强度，磁传感器三个轴互相正交构成直角坐标系。通过测量地磁场在罗盘坐标系下三个方向上的分量计算出磁北与罗盘坐标系的交角，在加减相应的磁偏角可得出系统的方位角信息。根据罗盘相对地磁坐标系姿态的不同，具体求解过程分二维系统和三维系统来进行分析，下面分别对这两种情况进行介绍。

2.2.1 二维系统

二维系统是罗盘导向的最基本情况，三维罗盘的实现也是通过转换到二维坐标系下实现的。在二维罗盘系统中，不考虑其他因素的影响，假设罗盘始终保持水平。如图 2-2 所示，在载体坐标系中，OXY 平面与水平面平行，Z 轴垂直地面，X 轴与载体前进方向一致，Y 轴横向指向载体侧面。

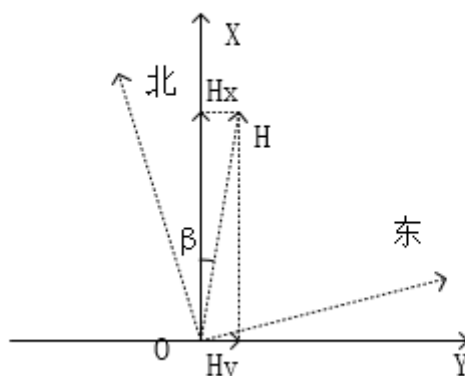


图 2-2 载体坐标系

图中 H 为地磁场水平分量，根据上一小节中相关知识点介绍，地磁场水平分量 H 始终指向地磁南极。载体前进方向与地磁南极的夹角为 β ，我们称之为地磁航向角， α 为地理航向角即载体前进方向与地北的夹角称。在二维罗盘系统中，通过测量罗盘 X 轴与 Y 轴的输出 H_x 与 H_y 可将地磁航向角^[8]表示为：

$$\beta = \tan^{-1} \frac{H_y}{H_x} \quad (2-3)$$

使用高灵敏度磁传感器作为敏感元件感测地磁场时，传感器输出电压信号与磁感应强度呈线性关系。则

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x V'_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y V'_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z V'_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

其中, $K_i(i=x,y,z)$ 为传感器灵敏度系数, $V'_i(i=x,y,z)$ 为传感器工作电压。若不考虑传感器安装环境中其他因素的影响, 并假定三个坐标轴上传感器灵敏度系数与工作电压都相同, 则磁航向角可以表示为 $\beta = \tan^{-1} V_y/V_x$ 。而磁偏角 γ 可以通过查找相应的地磁偏角统计表得到, 则实际的地理航向角 α 应为 $\beta \pm \gamma$ 。

二维系统是一种研究罗盘基本原理的理想系统, 实际使用中罗盘姿态往往并非总是水平。一般二维罗盘系统中必须使用机械万向节来保持罗盘水平, 具体实现较为复杂, 使系统体积增加, 相比较之下, 三维罗盘系统更具优势。三维罗盘通过增加倾角测量计算罗盘姿态角, 通过坐标变换将三维罗盘中三轴磁场投影在水平面上, 从而转化为二维系统来计算方向角。

2.2.2 三维系统

在三维系统中, 罗盘与水平面呈一定倾斜角度。一般用姿态角来描述载体的倾斜状态, 姿态角一般包括航向角、俯仰角和横滚角。以载体重心为原点建立与载体固连的载体坐标系, 其中载体前进方向为 X 轴, 载体横向垂直前进方向为 Y 轴, Z 轴垂直 OXY 平面向下。俯仰角是载体坐标系中 X 轴与水平面的夹角, 横滚角是载体坐标系中 Y 轴与水平面间夹角。如图 2-3 所示, 俯仰角为 α , 横滚角为 β 。

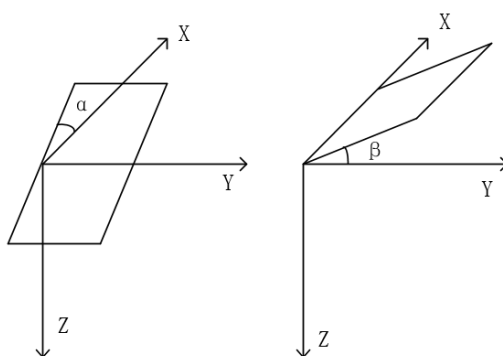


图 2-3 俯仰角横滚角定义

将载体每个时刻都看作稳态或者暂稳态系统, 认为载体只受重力作用, 通过重力加速度在载体坐标系各轴的分量来求解载体姿态角。假设载体姿态如图 2-4 所示。O'X'Y'Z' 坐标系为地面观测坐标系, 相对于地球表面不动。X' 轴指向正北方向, Y' 轴指向正东方向, Z' 轴指向地心,。oxyz 为载体坐标系, x 指向载体前进

方向。

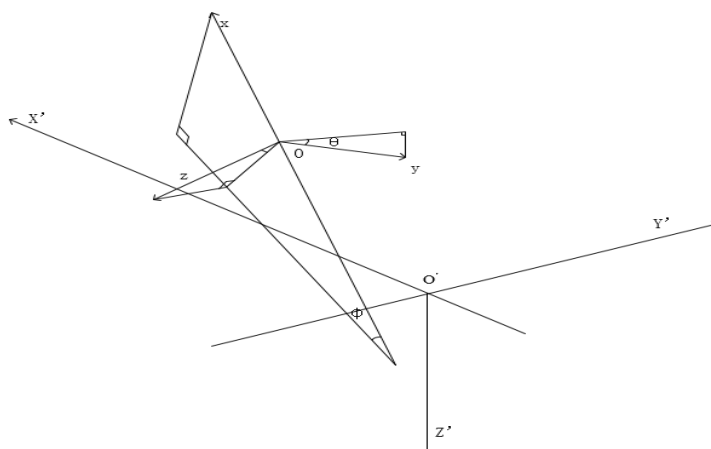


图 2-4 载体姿态解算

载体坐标系中 X 、 Y 、 Z 三轴加速度分量分别为 A_x 、 A_y 、 A_z ，则载体俯仰角 ϕ 和横滚角 θ 表示为^[9]：

$$\begin{cases} \phi = \tan^{-1} \frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}} \\ \theta = \tan^{-1} \frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}} \end{cases} \quad (2-5)$$

如图 2-4 所示，通过加速度传感器计算出载体相应俯仰角 ϕ 和横滚角 θ 。磁传感器测得载体坐标系下，三轴磁感应强度分别为 $H_x H_y H_z$ ，在水平坐标系下 XY 方向磁感应强度分别为 $H'_x H'_y$ ，载体的姿态变化通过载体分别绕地面坐标系下坐标轴旋转^[10]实现，绕 $O'Y'$ 轴旋转的旋转矩阵为

$$R(\phi, Y) = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

绕 $O'X'$ 轴旋转的旋转矩阵为

$$R(\theta, X) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

则姿态矩阵为

$$R_{\theta} = R(\phi, Y)R(\theta, X) = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \sin \theta & -\sin \phi \cos \theta \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \phi & -\cos \phi \sin \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

载体坐标系下，三轴磁感应强度分量可通过下面的矩阵变换转换到水平坐标系下：

$$\begin{bmatrix} H'_x \\ H'_y \\ H'_z \end{bmatrix} = R_{\Theta} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

水平坐标系下磁感应强度为^[11]

$$\begin{cases} H'_x = H_x \cos \phi + H_y \sin \theta \sin \phi - H_z \cos \theta \sin \phi \\ H'_y = H_y \cos \theta + H_z \sin \theta \end{cases} \quad (2-10)$$

再由(2-3)式可计算出载体航向角。

考虑到反正切函数的值域 $\beta \in [0^\circ, 180^\circ]$ ，为了能在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的范围内表示航向角我们做以下变换

$$\beta = \begin{cases} \tan^{-1} \frac{H'_y}{H'_x} (H'_x > 0, H'_y > 0) \\ 180^\circ + \tan^{-1} \frac{H'_y}{H'_x} (H'_x < 0) \\ 360^\circ + \tan^{-1} \frac{H'_y}{H'_x} (H'_x > 0, H'_y < 0) \end{cases} \quad (2-11)$$

再根据相关资料确定当地地磁偏角值，将上式计算所得结果加上相应位置的地磁偏角即可。

2.3 磁场检测方式简介

目前，电子罗盘系统品种各异，其磁敏感元件也各具不尽相同。一般来说，按照感测原理不同可划分为以下几种。

(1) 磁通门传感器式

磁通门传感器基本结构如下图所示。其基本组成单元由磁芯及线圈构成。其中磁芯一般采用软磁材料来制作并且材料的磁导率有一定要求。而磁芯外的线圈包含两组，激励线圈用于产生交变磁场，感应线圈由于感测外磁场。

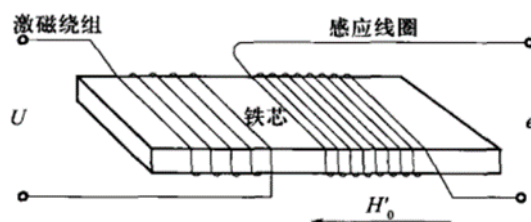


图 2-5 磁通门基本原理图

我们可以将磁通门传感器的结构看成是一个特殊的变压器。在激励线圈两端输入交变电流，在交变磁场的作用下，磁芯周期性地被磁化至饱和与非饱和，若施加外磁场作用，感应线圈输出信号将受到其调制作用，通过检测感应线圈相应的输出信号变化可实现对外磁场的测量。磁通门传感器自 1935 年发明以来，现已广泛地应用于各种弱磁场检测领域。经过多年的发展其性能得到不断改善与提高，现今仍是最基本的弱磁场检测手段之一。在电子罗盘系统中采用磁通门传感器作为磁敏感元件，成本低廉，技术成熟，系统可靠。但是磁通门传感器所需外围电路设计繁琐，并且功耗体积难以降低，难以实现小型化。

(2) 霍尔效应传感器式

1879 年，霍尔在研究金属导电机理时发现电流垂直于外磁场通过金属导体时，载流子受洛伦兹力影响，会在垂直于电流和磁场的方向会产生一个电势差。霍尔电动势的大小与材料的霍尔系数 R 、电流 I 和磁场 B 成正比并且与薄片厚度 d 反比。虽然霍尔效应^[12]发现较早，但是金属导体霍尔系数比较低，霍尔电动势变化微乎其微。因此霍尔效应传感器的实用性并不高，直至 20 世纪 50 年代末，半导体材料的发展有所突破，出现了一些电子迁移率非常大的新材料之后，霍尔传感器才真正用于磁场测量。相比于导体材料，半导体中载流子数量较少，相同电流下载流子速度也就更快，因此受到洛伦兹力也就更大，所以半导体材料的霍尔系数更大。霍尔效应传感器结构简单，重量轻，体积小，使用寿命长，应用广泛。但是霍尔效应传感器输出信号线性度差，且随温度影响较大，常用于对精度不做严格要求的场合。

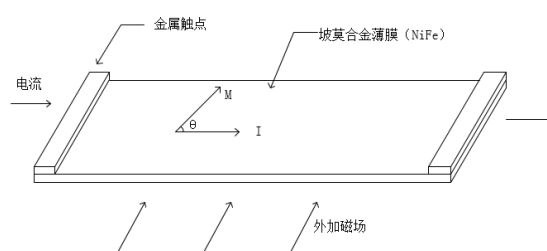


图 2-6 霍尔效应原理示意图

(3) 磁阻效应传感器式

在外界磁场发生变化时，某些磁性材料的电阻会发生相应的变化，这一效应称为磁电阻效应。从微观机制上来讲，磁电阻效应是载流子受洛伦兹力影响产生的。自磁电阻效应发现以来便不断地进行相关的应用研究，现已广泛应用于各个领域。与其他类型的磁传感器相比，磁阻传感器^[13]在检测微小磁场信号方面具有

明显优势。并且在一定磁场强度范围内，磁阻传感器输出具有良好的线性度。因此，采用磁阻传感器作为电子罗盘的敏感元件，保证了系统精度和小型化要求。

2.4 磁阻传感器分类

上一小节中已简要介绍了磁电阻效应与磁阻传感器，本小节主要介绍磁阻效应的分类及特点。磁性材料的磁电阻效应可以分为正常磁电阻效应和异常磁电阻效应。正常磁电阻效应由磁场直接引起的磁性材料的很小的、正的磁电阻变化。异常磁电阻效应又分为各向异性磁电阻、巨磁电阻、隧穿磁电阻和庞磁电阻。根据磁阻传感器的工作原理不同我们将其划分为不同种类，其中常用的有以下几种：

(1) 各向异性磁阻 (Anisotropic Magneto-Resistance) 传感器

铁磁金属及其合金中，当所加外部磁场与内部磁化方向一致时，电阻随外加磁场的变化很小几乎可以忽略，当所加外部磁场方向与内部磁化方向呈一定角度时，材料的电阻值将发生变化，这就是强磁金属的各向异性磁阻效应^[14]。利用 AMR 效应制作的传感器灵敏度大约为霍尔效应传感器的一百倍左右，因此在弱磁场检测方面 AMR 传感器具有很大优势。上世纪 70 年代，人们开始利用磁性材料的各向异性磁电阻效应来制作磁传感器。经过多年的发展 AMR 传感器现已广泛应用于电力、交通、导航等许多不同领域。

(2) 巨磁电阻效应 (Giant Magneto-Resistance) 传感器

巨磁电阻效应^[15]发现于上世纪 80 年代，巨磁电阻效应一经发现，其极高的电阻变化率就引起了外界的重视。利用 GMR 技术制作的传感器灵敏度可以达到 AMR 传感器的两倍以上。GMR 效应的研究及商业化应用的发展脚步非常迅速，现今，在一些技术领域 GMR 器件已经替代 AMR 器件。虽然 GMR 传感器具有很高的灵敏度与分辨率，但是其制造工艺复杂，与其他传感器相比成本较高，因此在某些领域，GMR 传感器并不受欢迎。

(3) 隧道巨磁电阻效应 (Tunneling Magneto-Resistance) 传感器

隧道巨磁电阻效应^[16]的多层膜结构类似于巨磁电阻效应，但是机理并不相同。巨磁电阻效应是由于自旋相关散射产生，隧道巨磁电阻效应是由于自旋相关的隧穿效应。早在 1975 年，Julliere 就在 Co / Ge / Fe 磁性隧道结中观察到了 TMR 效应，但在当时并未引起人们的重视。1988 年，GMR 效应的发现引起了人们的广泛关注。GMR 效应的相关研究迅速发展，随之也引起人们对 TMR 效应的重视。1995 年，Miyazaki 等人测试发现 Fe/Al₂O₃/Fe 的三明治结构中的磁隧道电导变化率在室温下可达 15.6%。2000 年人们观测到电导变化率达 50% 的 TMR 效应。2001 年 Butler、张晓光等理论预言在完全结晶的隧道结 Fe(100) / MgO(100) / Fe(100) 中磁电阻比

率可以达到 1000%。由于 TMR 效应具有更高的磁电阻变化率，将 TMR 效应用于制作磁阻传感器，可以获得更高的灵敏度，感测更微弱磁场变化。TMR 传感器体积小、可靠性高、响应范围宽，在自动化技术、家用电器、商标识别、卫星定位、导航系统等领域以及精密测量技术有广泛的应用前景。

综合以上介绍可以看出，从灵敏度上来看 TMR 传感器灵敏度最高，GMR 传感器次之，AMR 灵敏度相比最差。但考虑制造成本及应用环境，在电子罗盘的应用背景下，AMR 传感器性能完全可以达到要求，并且成本明显低于其他两种传感器。

2.5 本章小结

本章主要包含四个方面的内容。第一部分介绍了与地磁场定向技术相关的地磁场研究的一些重要结论和发现。在这里重点介绍了地磁要素、地磁场的大体分布等与地磁定向相关的知识。通过对地磁场的简单描述，阐明了地磁场参量等用于表征地磁场的基本信息。根据这些信息对电子罗盘测量原理有大体的把握与认识。第二部分介绍电子罗盘系统的具体工作原理。先从最基本二维空间体系下讲述测向原理。之后拓展到三维空间中介绍罗盘测向原理。第三部分介绍了磁传感器的分类及相关的特点。这里根据工作原理不同，将其划分为三类。针对不同种类的传感器，分别介绍了相关的应用场景以及性能特点，并结合相关资料分析应用于电子罗盘中的优缺点。第四部分介绍了磁阻传感器的分类、发展以及优缺点。根据原理不同将其划分为不同的类别。并分别从灵敏度、线性度、成本、系统复杂度考虑，本课题采用 AMR 磁阻传感器来构建罗盘系统。

第三章 磁阻电子罗盘系统硬件设计

根据上一章中对电子罗盘工作原理的介绍，课题研究的基本框架已经确定。本章根据课题相关技术指标要求，确定罗盘系统硬件部分的整体方案以及各个子模块的结构。并分别在各小节内详细描述各模块的功能、设计思路与相关的技术细节等内容。

3.1 电子罗盘设计指标

电子罗盘的性能指标包括多个方面，针对不同应用环境，评价标准也不相同。就罗盘输出航向精度来看，目前市面常见的电子罗盘产品根据其航向精度大致分为四个级别^[17]。第一个级别，罗盘航向角误差控制在 $\pm 0.5^\circ$ 以内，达到军用标准。满足这一级别标准的罗盘系统常用于航空航天、海洋探测等高技术领域，这类罗盘不仅精度要求高，而且其持续工作的稳定性也比较强。第二个级别，罗盘精度在 $\pm 1^\circ$ 左右。在这一精度级别的罗盘系统常用于汽车导航、声纳浮标、机器人等方面。第三个级别，罗盘精度达到 $\pm 3^\circ$ 。这种罗盘航向精度较差，主要用于手机等智能系统的导航定位、船舶导航等精度要求较低的民用领域。最后一个级别的罗盘系统精度在 $\pm 5^\circ$ 左右，一般用于家用电子产品。本课题研究考虑成本、应用范围等因素，拟实现在姿态角 $\pm 30^\circ$ 的范围内，航向精度达到 $\pm 3^\circ$ 左右，航向角输出范围 $0^\circ \sim 360^\circ$ ，航向角姿态角等信息通过屏幕显示输出，设备另外配有串口，数据可以通过串口输出。

3.2 电子罗盘设计方案验证与选择

本课题研究整体设计思路如下：利用一个双轴磁阻传感器和一个单轴磁阻传感器组成一个三轴磁场感测单元以测量三轴地磁场强度分量。使用三轴加速度传感器感测三轴重力加速度分量，通过(2-5)式计算出载体姿态角。根据(2-10)式将三轴地磁场强度分量利用坐标变换将其转换至水平坐标系下，再由(2-11)式计算出航向角。

本课题研究设计之初拟定了两种设计方案，现分别介绍如下。方案一是利用微处理器内置 AD 转换器来获取放大后的磁阻传感器输出信号。采用此设计方案可以简化电路设计，缩小电路板整体面积，降低成本。本课题实际采用内置 12 位 A/D 转换的 ATmel Xmega128A4U 芯片进行验证，发现实际效果并不理想，输出航向角误差较大。综合分析考虑，误差可能来源于使用内置 A/D 转换器，而微处理

器内数字电路复杂，其中的高频数字信号可能会对 A/D 转换器精度造成影响，因此最终舍弃了此方案。方案二也是本文最终采用的方案，即在方案一的基础上改用高精度 A/D 转换芯片而不使用内置模数转换，其他部分设计基本不变。方案二系统框架图如 3-1 所示。

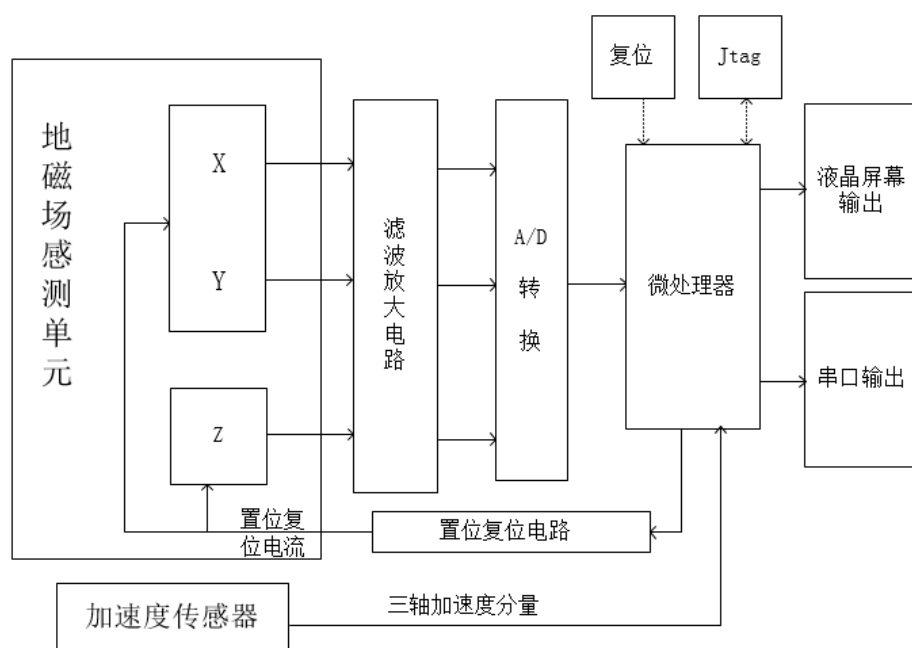


图 3-1 电子罗盘系统方案框架图

根据功能的不同，可将整个系统划分为以下几个模块：由地磁感测单元和加速度传感器组成的信息获取模块，滤波放大和 A/D 转换构成的信号调理模块，微处理器构成信息处理模块，最后是串口和液晶屏幕组成的输出模块。每个模块的相关内容将在后面几个小结中分别介绍。

3.3 信息获取模块

根据第二章的介绍，电子罗盘系统的实现需要采集三轴磁场分量以及三轴加速度分量，故罗盘系统信息获取模块的主要组成部分就是磁场检测单元和加速度测量单元。下面分别介绍一下这两个单元的设计。

3.3.1 地磁场感测单元

电子罗盘中主流的磁场敏感元件在第二章中已经详细介绍过，这里就不过多描述。通过第二章的对比分析我们可以发现磁阻传感器在电子罗盘的设计实现上

具有其他传感器无法比拟的优势。在磁阻传感器中，又分为多种，其中从灵敏度上来说，TMR 传感器灵敏度最高，AMR 传感器结构简单，成本低。由第二章可知，地磁场强度在 $0.3\sim 0.70e$ 范围内，使用 AMR 传感器便可满足要求。在这种情况下，考虑到成本因素，本课题研究采用 Honeywell 公司生产的 AMR 传感器来构建地磁场感测单元。Honeywell 公司生产的磁阻传感器产品种类繁多，出于成本考虑，这里采用一个双轴磁阻传感器 HMC1022 与一个单轴磁阻传感器 HMC1021 来构成一个三轴传感单元。

Honeywell 公司 HMC102X 系列^[18]各向异性磁电阻传感器内部通过磁阻惠斯通电桥来感测磁场强度。当电桥外加电压时，传感器便可以将敏感轴方向磁场变化转化为相应电桥差分电压输出。其电桥结构如下图所。

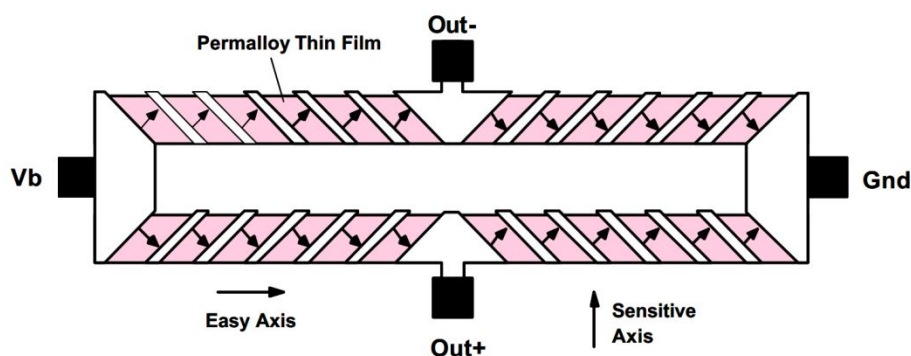


图 3-2 磁阻惠斯通电桥原理

磁阻传感器的是由镍铁薄膜沉积在硅缓冲层上组成的，镍铁薄膜形成一个电阻带。若在电桥的敏感轴方向上施加一个偏置磁场，四个电阻带的磁化方向将会朝着电流流向转动，电阻发生改变。如图 3-2 所示，电桥相对臂上的电阻变化一致，因此电桥的将会产生输出电压差，感测出外加磁场值的变化。因为电桥输出只与一个方向有关，所以这种结构只能测量一个方向上的磁场变化。我们可以将额外的电桥结构放置在与一个这种电桥结构正交的位置上来达到测量两轴或三轴磁场变化的目的。

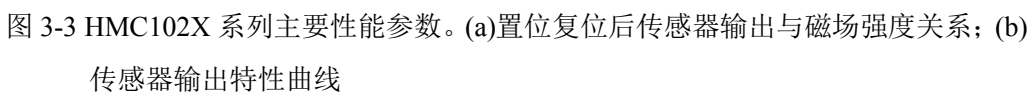
影响 AMR 传感器使用的一个关键问题是其翻转效应。AMR 传感器在使用前其镍铁薄膜已经进行了磁化，如果外加了一个强度很大的反向磁场，则很可能影响材料初始磁化状态，降低传感器性能。在极端情况下，薄膜的磁化方向可能会发生翻转。Honeywell 公司发明了一种专利技术来解决此问题。他们在硅基片上制作了一个置位复位电流带，通过置位复位电流带产生的磁场来将材料恢复到初始磁化状态，该电流带的电阻非常小，大约只有 5Ω 左右。置位复位电流虽然持续时间很短，只维持 1-2 毫妙，但强度却能达到 $1\sim 1.5A$ 之高。这种解决方案对驱动电

路的要求比较高，如果集成入微系统之中，这样强度的脉冲电流将会对系统中的微处理器等其它电路的可靠性造成影响。

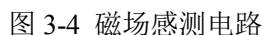
表 3-1 HMC102X 系列主要性能参数

特性	条件	最小值	典型值	最大值	单位
电桥工作电压	参考到地的电压		2	25	Volts
桥路电阻	电桥电流=5mA	800	1100	1300	Ω
工作温度	HMC1021S,1021Z,1022	-55		150	$^{\circ}\text{C}$
存储温度		-55		175	$^{\circ}\text{C}$
磁场范围	满量程 (FS)	-6		+6	gauss
线性误差	$\pm 3\text{gauss}$ 间扫描三次		0.08		%FS
重复误差	$\pm 3\text{gauss}$ 间扫描三次		0.08		%FS
电桥偏置	Offset = (OUT +) - (OUT -) 外加电场 0gauss, 施加置位脉冲之后, 电桥电压 5V	-10	± 2.5	11.25	mV
灵敏度	置位复位电流=0.5A	0.8	1.0	1.25	mV/V/gauss
噪声密度	电桥电压 5V 噪声 1Hz		48		nV / $\sqrt{\text{Hz}}$
分辨率	带宽=10Hz, 电桥电压=5V		85		μgauss
置位复位电流带电阻	S/R+与 S/R-引脚间电阻	5.5	7.7	9	Ω
置位复位电流带电流	2 μs 电流脉冲 1%占空比	0.5	0.5	4.0	Amp
置位复位电流带电阻温度系数	-40 $^{\circ}\text{C}$ ~125 $^{\circ}\text{C}$		0.37		%/ $^{\circ}\text{C}$

HMC102X 系列的一些主要性能参数如下图所示。



磁场感测部分电路原理图如下所示。



19

以分别过滤到高频和低频干扰信号。根据芯片手册，传感器置位复位输入引脚无正负之分，其内部是一个金属电阻带。这里将 S/R-接地，通过 S/R+控制置位复位电流脉冲。传感器输出差分信号将通过信号调理单元进行处理并传给微处理器系统。

如前文所述，当外磁场强度超过 10guass 时，器件的初始磁化状态可能发生改变，使器件性能变差。Honeywell 公司在传感器内部设置了相应的置位复位电流带来改善器件性能。磁阻传感器的温度漂移、非线性误差、交叉轴效应等问题是影响 AMR 传感器性能的重要因素，利用 Honeywell 公司这一专利技术可有效解决这些问题。根据不同的使用情况，置位复位电路有多种实现方案。本方案置位复位电流带的外部驱动电路设计如下：

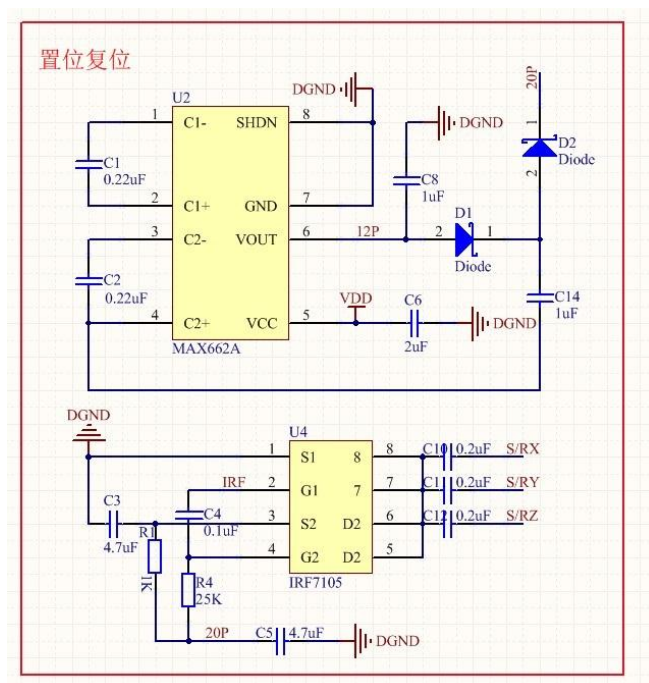


图 3-5 置位复位电路

置位复位电流强度根据应用场景所需要磁阻传感器的最小分辨率来决定。置位复位电流越大,器件的最小分辨率越高,其最大值不能超过 4Amp。置位复位驱动电路应该放置在磁阻传感器附近并且接地良好。根据表 3-1 可知,磁阻传感器工作温度 $-25^{\circ}\text{C}\sim 85^{\circ}\text{C}$,室温下最大电阻 9 欧姆,典型值为 7.7 欧姆,最小值 5.5 欧姆。置位复位电流带所允许通过电流范围为 0.5 安培到 4 安培之间。本文采用 MAX662A 及其外围电路产生 20V 电压供 IRF7105 用于在微处理器控制下产生置位复位电流脉冲。根据相关计算,20V 电压完全可以使置位复位电流带工作在正常范围内。

根据相关电路知识，我们可以得到：

$$I_t = Ie^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3-1)$$

其中 $\tau = RC$ ， R 取传感器电流带电阻典型值 7.7Ω 。由上图可知，磁阻传感器所要求脉冲时间常数为 $2\mu s$ 。根据时间常数定义，计算可得所需电容为 $0.27\mu F$ 。考虑到实际电路中的一些影响因素，为了保护传感器芯片，应当适当留有余量，所以本文选用 $0.22\mu F$ 电容，防止芯片发生损坏。

下图为置位复位电路在 Proteus 8 下仿真结果。

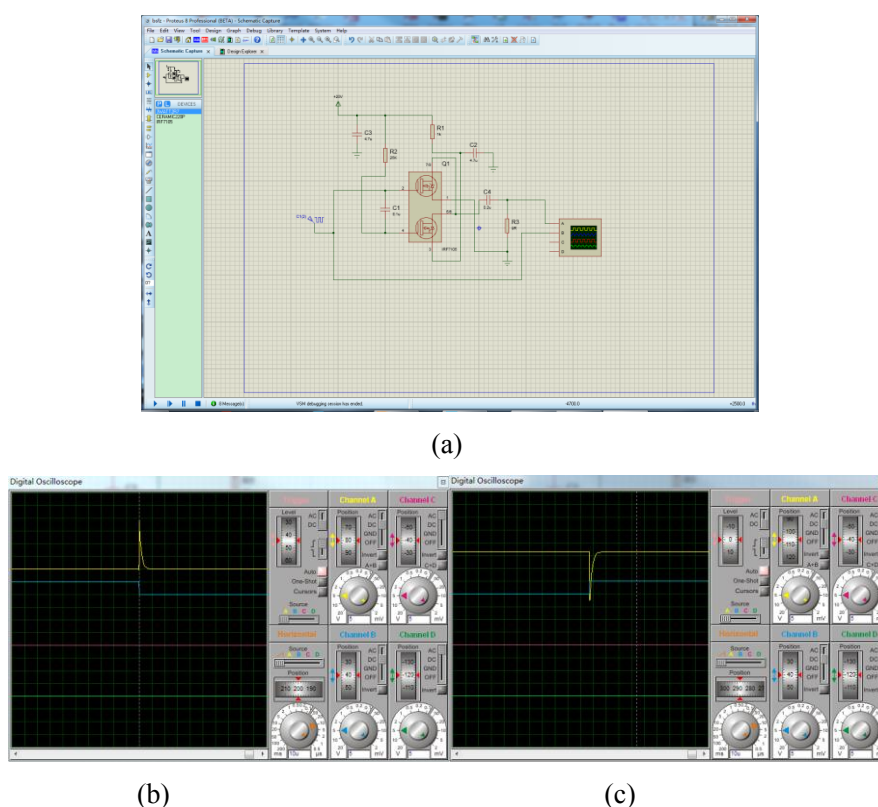


图 3-9 置位复位电路仿真结果。(a)置位复位电路仿真原理图；(b)置位脉冲；(c)复位脉冲

在图 3-9 中，(a)为仿真电路原理图，电路输入信号为一方波信号，模拟微处理器控制的时钟信号，输出脉冲信号如(b)、(c)所示。(b)为正向脉冲仿真效果图，其中纵向一格表示 $5V$ 电压，横向一格表示 $10\mu s$ 。图中黄色曲线为产生的脉冲信号，蓝色曲线为控制信号。图(c)中为反向脉冲仿真效果图，其单位与图(b)中单位相同。可以看出在控制信号作用下电路可以正反向输出时间常数为 $2\mu s$ 的 $\pm 20V$ 电压脉冲。

3.3.2 倾角感测单元

对于倾角感测单元,本文选用亚德诺半导体公司的加速度传感器 ADXL345 作为感测元件。ADXL345^[19]是一款低功耗小型化的三轴加速度感测元件,非常适合在小型移动设备中使用。该元件分辨率高达 3.9mg/LSB,用于倾斜检测时可以测量出小于 1.0° 的倾角变化。ADXL345 可通过 SPI 或 IIC 数据接口与微处理器通信,本课题采用 IIC 接口与微处理器通信。具体电路设计如下:

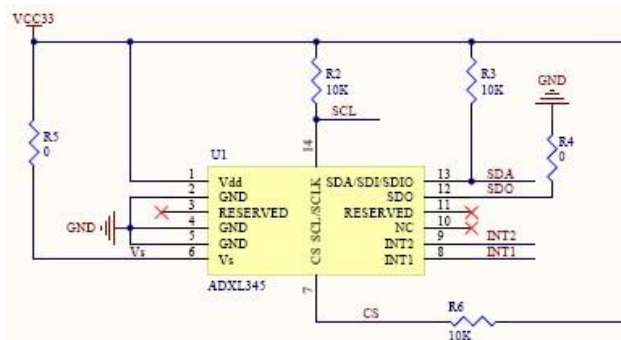


图 3-10 倾角检测单元设计

由于 ADXL345 可直接通过 IIC 操作并输出数据,该模块相关电路比较简单。ADXL345 工作在 IIC 模式需将芯片 7 脚 CS 上拉到电源。IIC 模式下,数据线 SDA 与时钟线 SCL 也需要接上拉电阻才能正常通信。

3.4 信号调理模块

磁场强度和电桥电压决定磁阻传感器的输出信号的强弱,根据表 3-1 可知,HMC102X 系列传感器电桥偏置最大为 11.25mV,最小偏置-10mV。传感器灵敏度的典型值大小为 1mV/V/gauss,最大值为 1.25mV/V/gauss。地磁场强度最大约为 0.7gauss。代入下式计算

$$V_{out} \leq 11.25\text{mV} + 1.25\text{mV/V/gauss} \times 5\text{V} \times 0.7\text{gauss} = 15.625\text{mV} \quad (3-2)$$

$$V_{out} \geq -10\text{mV} - 1.25\text{mV/V/gauss} \times 5\text{V} \times 0.7\text{gauss} = -14.375\text{mV} \quad (3-3)$$

考虑到芯片的失调电压,取最大范围 $\pm 20\text{mV}$,理论上讲传感器输出信号不会超过此范围。传感器直接输出信号较小,难以直接测量,因此设计了相应的调理电路对信号进行处理。根据芯片的输出范围,本文设计了两种方案来进行信号调理。

第一种方案采用 AD623 放大电路对信号进行放大,TLC2543 将放大后的信号进行 A/D 转换,传输至微处理器。第二种方案将磁阻传感器输出信号通过 AD7795 进行采集放大 A/D 转换后传输至微处理器。下面分别介绍这两种方案。

本文设计的 AD623 放大电路如图 3-11 所示。

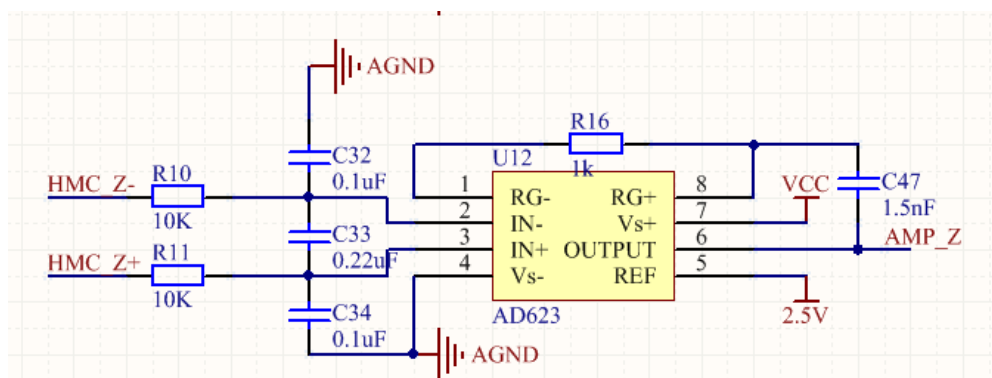


图 3-11 AD623 放大电路

图中以 Z 轴输出差分信号为例进行放大。传感器输出信号由于系统噪声等因素的干扰而包含许多噪声，需要对传感器输出信号进行滤波。如果输入信号信噪比较小，此时直接进行放大，那么高频干扰就被放大，再对其进行滤波噪声信号不易衰减，以至于最后采集到的信号无法正常使用。如果输入信号信噪比较大，则可以先进行放大，再进行滤波。传感器输出电压很小，仅为 mV 级别，系统噪声干扰相比信号不可忽略，所以先进行滤波处理。考虑到电路的复杂程度，我们设计了 RC 低通滤波电路对信号进行滤波处理，其结构如下：

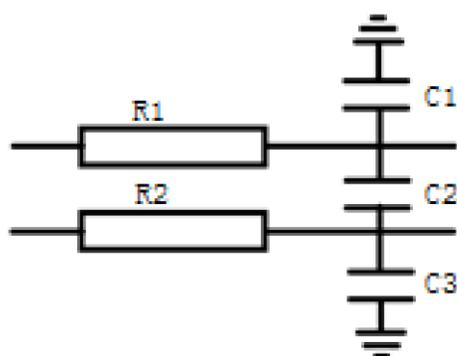


图 3-12 RC 滤波电路

其截止频率计算如下：

$$\begin{cases} C' = \frac{C_1 \times C_3}{C_1 + C_3} \\ C = C_2 + C' \\ f = \frac{1}{2 \times \pi \times (R_1 + R_2) \times C} \end{cases} \quad (3-4)$$

本文所选用磁阻传感器输出带宽可达 5MHZ,考虑实际使用情况，在电子罗盘系统中，样本有效信号输出频率最高有 100HZ。本文实际对比了多种参数，最终将截止频率设为 30HZ。经过滤波电路处理后，信号需经过放大电路放大才能正常

使用。本文采用 AD623 仪表放大器来搭建合适放大电路。AD623^[20]简单易用，仅通过一只外接电阻来调节放大倍数，即可实现 1-1000 倍的增益选择。该放大器还具有很高的共模抑制比，对电源噪声及电源谐波有很好的抑制作用，并且可以通过+5V 单电源供电，大大简化了系统复杂度。综合以上因素，本文采用 AD623 设计放大电路。根据芯片手册，AD623 放大倍数由下式决定：

$$G = \frac{100K}{R_G} + 1 \quad (3-5)$$

根据前文分析，磁阻传感器的输出范围为 $-20\text{mV} \sim +20\text{mV}$ ，放大器电源电压+5V 偏置参考电压+2.5V。根据芯片手册，+5V 单电源供电时 AD623 的输出范围 $0.01 \sim 4.85\text{V}$ ，设置放大电路的放大倍数为 80 倍。则传感器信号经放大后输出应为

$$V_{out} = 2.5\text{V} + (\pm 20\text{mV}) \times 80 \quad (3-6)$$

可见放大输出信号在仪表放大器的有效输出范围，并留有一定余量，考虑在存在外磁场影响的情况下，可以通过软件校正来解得正确的航向角。在放大电路之后可设计相应的滤波电路，本文考虑到系统设计的复杂程度，只在放大电路前对信号进行滤波处理。

传感器信号经过滤波电路、放大电路处理之后，仍然为模拟信号，无法传输至微处理器直接进行处理，需要经过 A/D 转换将模拟信号转换为数字信号后传送到微处理器芯片。经放大电路处理之后，系统具有三路单端磁场信号，因此这里需要一个至少 3 路的单端输入模数转换器。根据设计要求，本罗盘精度应达到 3° 以内，分辨率 1° ，所以应选择 9 位以上的 A/D 转换芯片。综合以上各点，本文采用 TLC2543 作为 A/D 转换芯片。TLC2543 是 TI 公司生产的 12 位串行 A/D 转换芯片，该转换芯片使用逐次逼近技术进行转换，广泛使用于仪器仪表中。TLC2543 芯片通过 SPI 总线与微处理器芯片进行通信。具体电路与原理图如下。

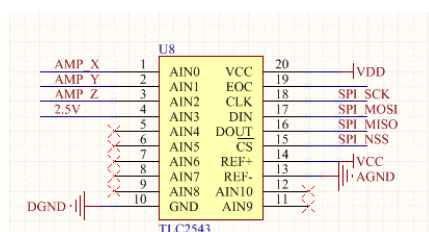


图 3-13 TLC2543 电路设计

TLC2543 电路设计在原理上比较简单，在 PCB 布局设计上，有几点需要注意。模数转换器既有模拟部分又有数字部分，在每个模拟电源输入端建议用一个 $0.1\mu\text{F}$ 的陶瓷电容并联一个 $10\mu\text{F}$ 的钽电容连接到地^[21]，用作去耦电容以减少电源噪声的影响。使用 TLC2543 时要注意模拟信号和数字信号的隔离问题，模拟信号线

不能平行于数字信号线特别是时钟信号线，也不能在 TLC2543 芯片下方走数字信号线。

第二种方案采用 AD7795 芯片作为一个完整的模拟前端。AD7795^[22]是一个低功耗模数转换芯片，内置 $\Sigma-\Delta$ 调制器、缓冲器、基准电压源、仪表放大器和片内数字滤波，可将磁阻传感器的输出信号直接输入。

AD7795 具有 6 路差分输入，可以被配置为缓冲或无缓冲模式。使用该芯片可以使用 1.17V 内部基准电压源或外部基准电压源工作。芯片的输出速率是用户可编程的。内置数字滤波器以实现常模抑制。当更新速率为 16.7Hz 或更低时，50Hz/60Hz 同时抑制效果最佳。AD7795 芯片内集成低噪声可编程增益仪表放大器，可通过配置内部寄存器实现 1-128 倍增益。采用该芯片大大简化了电路设计的复杂度，从而减少引入过多线路噪声的可能性。由于其低功耗、低噪声的特性，使 AD7795 尤其适合应用于传感器测量等高精度应用。其电路设计具体如下图所示。

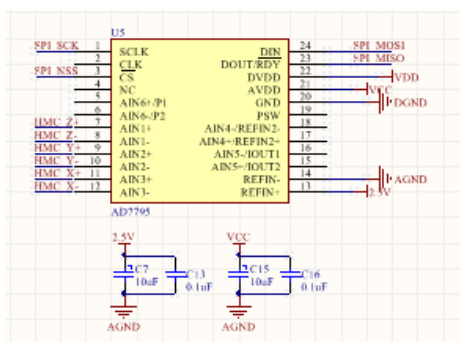


图 3-14 AD7795 电路设计

最终经过实际对比分析发现，在满足精度要求的情况下，采用第二种方案线路设计简单，可有效降低系统体积。

3.5 信号处理模块

3.5.1 微处理器最小系统

信号处理模块是将采集到的各种信息综合处理并进行航向角解算以及显示输出的模块。该模块的核心是微处理器及其相关外围电路系统，本课题所选用微处理器为 STM32F103RCT6，其整体系统结构如下图所示。

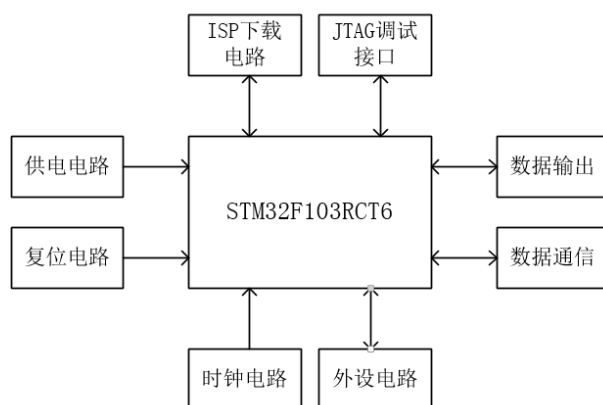


图 3-15 微处理器系统结构

STM32F103 系列^[23]采用 ARM 32 位 CortexTM-M3 内核设计,最高工作频率 75MHz。本课题采用其中的 STM32F103RCT6 芯片,该芯片为此系列中的大容量产品,封装形式为 LQFP64。这款芯片外设资源相当丰富,封装形式为该系列中较小的一款,满足系统的整体小型化的设计要求。其最小系统设计如图 3-16 所示,左下角为启动模式选择电路,选择模式如下表所示

表 3-2 启动模式选择

BOOT0	BOOT1	启动模式	说明
0	X	用户闪存存储器	用户闪存存储器,即 FLASH 启动
1	0	系统存储器	系统存储器启动,用于串口下载
1	1	SRAM 启动	SRAM 启动,用于在 SRAM 中调试代码

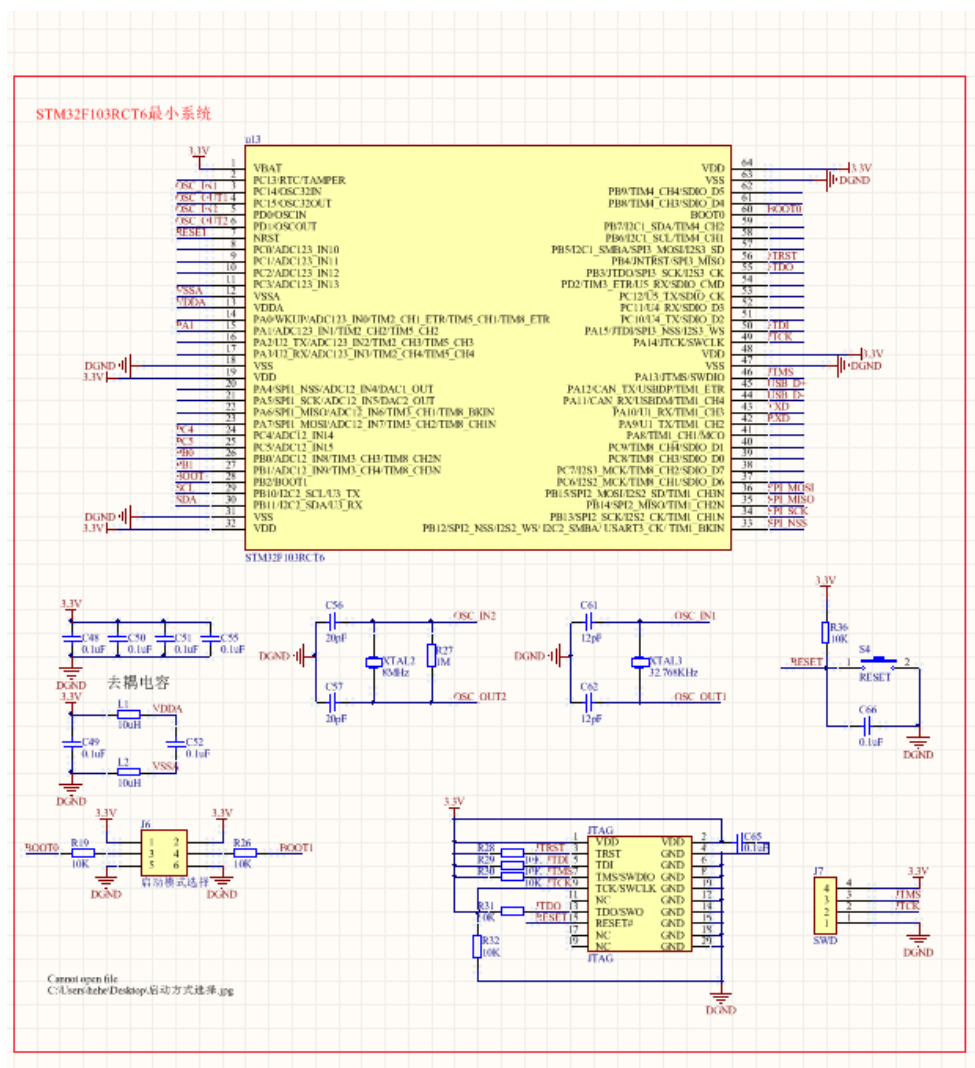


图 3-16 STM32 最小系统设计

3.5.2 微处理器外围电路设计

STM32 最小系统保证了微处理器正常工作的基本要求。为了实现系统功能，其外围电路也是必不可少的，包括串口输出，ISP 下载，屏幕显示，按键与 LED 指示灯等。下面分别介绍一下相关设计。

(1) 串口输出与 ISP 下载设计。

串口输出设计采用 CH340G 芯片实现 USB 转串口，完成 PC 与罗盘系统的通信。具体电路设计如图 3-17 所示。

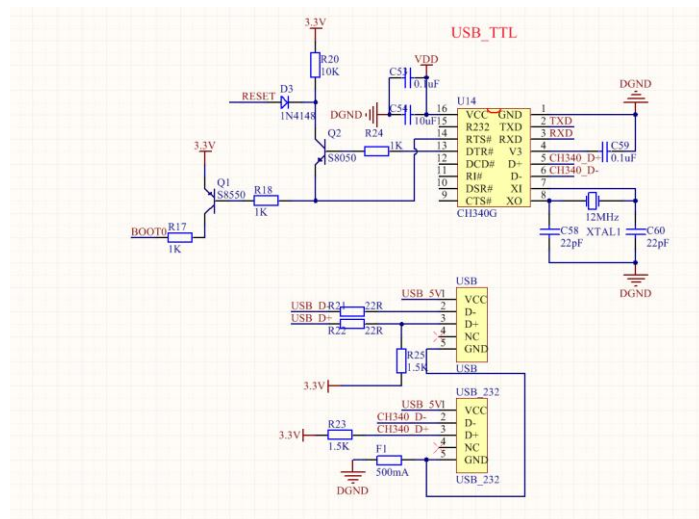


图 3-17 串口输出与 ISP 下载电路设计

下载电路需与 MUCISP 软件配合使用, MUCISP 软件通过控制 CH340G 的 DTR#与 RTS#引脚的电位控制开关三极管 Q1Q2 以控制微处理器 Reset 和 BOOT0 引脚电位来进行程序下载。下载电路参考文献[24]设计, 实际应用中可不设计相关下载电路, 考虑到微处理器与 PC 通信也要使用 CH340G 芯片, 这里为方便调试故将下载电路也一同实现。

(2) 按键与 LED 指示灯

如图 3-18 所示, 电路按键与 LED 指示灯设计如下。

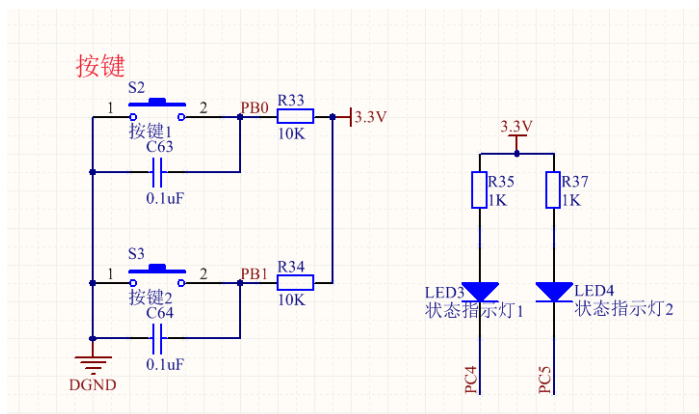


图 3-18 按键与 LED 指示灯电路设计

按键通过微处理器 PB0、PB1 控制，主要用于人机交互，按键通过并联一个 0.1uF 电容实现硬件消抖，LED 指示灯通过微处理器 PC4、PC5 控制。

(3) 置位复位控制

置位复位所需方波信号为 5V,微处理器工作电压 3.3V,直接输出的方波信号,不能直接控制置位复位电路正常工作,这里设计一个电平转换电路,如图 3-19 所

示。

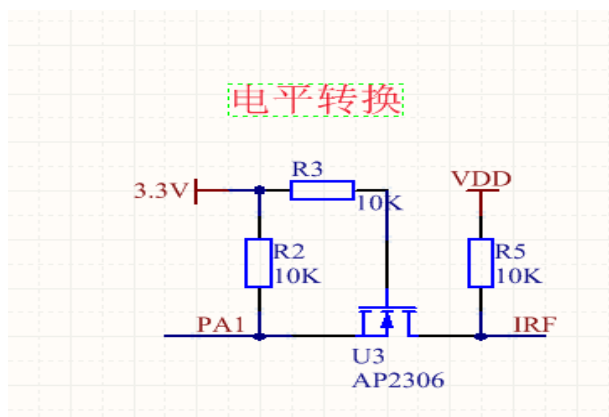


图 3-19 电平转换电路

3.6 系统供电设计

根据之前的设计要求，罗盘系统所需电压有+5V，+3.3V，+2.5V 三种，系统整体输入设计两种方式，一种通过直流电源供电，一种采用电池供电。直流电源主要用于实验测试，电池供电主要出于系统便携性考虑。

不同电压的供电电路设计如下：

(1) 5V 供电

系统中模拟电路供电需要 5V 供电，为减少电源噪声对模拟信号干扰，本文选用 LM1085-5 低压差线性稳压器来提供+5V 电压，其输入电压调节率可达 0.015%，在实际工程中应用广泛。其具体电路设计如下。

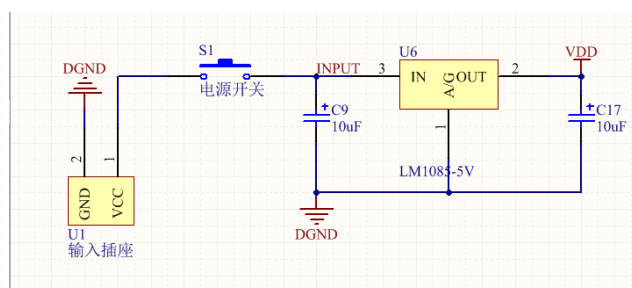


图 3-20 5V 供电电路

(2) 2.5V 和 3.3V 供电

2.5V 电源主要用于提供放大电路及 A/D 芯片基准电压，电路中数字芯片均采用 3.3V 供电，本文 2.5V 和 3.3V 供电均采用 ASM1117 实现，具体电路设计如下。

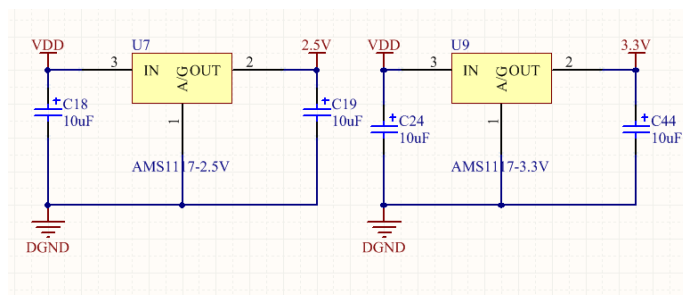


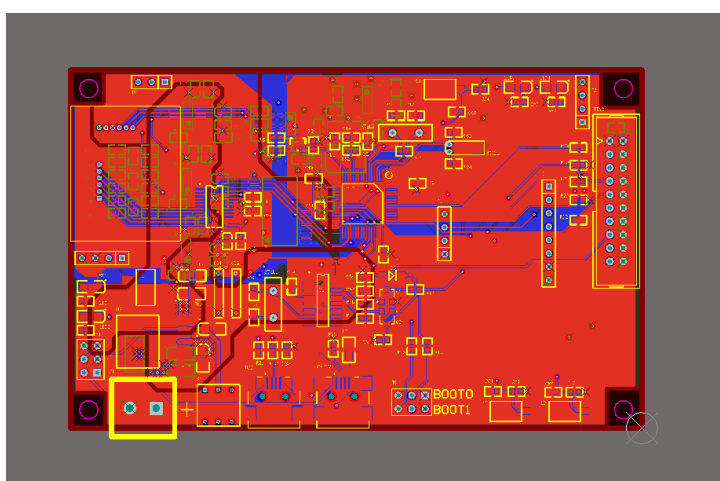
图 3-21 2.5V 和 3.3V 供电电路

3.7 PCB 设计小结

本文设计罗盘系统包含数字部分和模拟部分，数字电路中状态转换时将会产生一个尖峰脉冲，对模拟电路部分产生干扰。一般采取以下措施来抑制这种干扰。首先数字电路与模拟电路供电都来自于 LM1085 低压差线性稳压器，通过一个零欧电阻将模拟部分供电与数字供电相隔离，以减少数字信号的干扰。在芯片模拟电源输入引脚附近并联一组去耦电容，一般取 $0.1\mu\text{F}$ 的陶瓷电容和 $10\mu\text{F}$ 的钽电容并联组合使用。系统模拟器件和数字器件的地线回路必须分开^[25]，防止数字电路中噪声通过模拟地引入，对模拟信号产生串扰。类似地模拟地与数字地通过零欧电阻进行隔离。由于地线回路一般都具有一定阻抗，因此地线要尽可能使用地平面，以减小阻抗。最终电路设计如下图所示。



(a)



(b)

图 3-22 电子罗盘样品。(a)电子罗盘样机；(b)绘制 PCB 图

3.8 本章小结

本章对电子罗盘系统中硬件部分进行了相关描述，主要包括性能参数的提出，整体设计框架的确定，以及方案的选择。然后分模块介绍相关电路设计思路，包括参数计算与确定，电路模拟仿真结果，芯片手册的关键参数性能介绍分析。最后总结 PCB 印制电路设计的重难点，以及实物样品展示。

第四章 磁阻电子罗盘系统软件设计与调试

在上一章所实现的电子罗盘硬件基础上，本章完成相应电子罗盘系统软件功能的实现。

4.1 程序框架与开发环境介绍

4.1.1 程序框架简介

电子罗盘系统软件的主要功能包括两个方面。一是实现对外部硬件电路的控制，包括采集传感器输出信号，控制置位复位电路产生脉冲，控制相应外设或者从其获得控制信号。另一个方面是进行数据处理，包括软件滤波、姿态解算和误差补偿算法的实现。按功能模块划分，程序结构可表示如下。

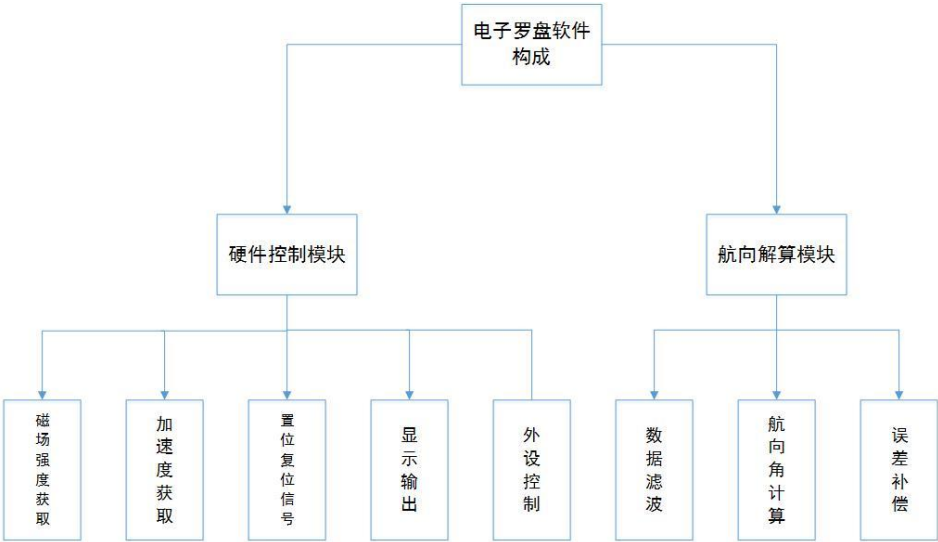


图 4-1 程序结构示意图

电子罗盘程序中各模块分别实现不同的功能，而主程序负责统筹大局，实现对子程序的调用以及对子程序返回信息进行相关处理，主程序流程图可表示如下。

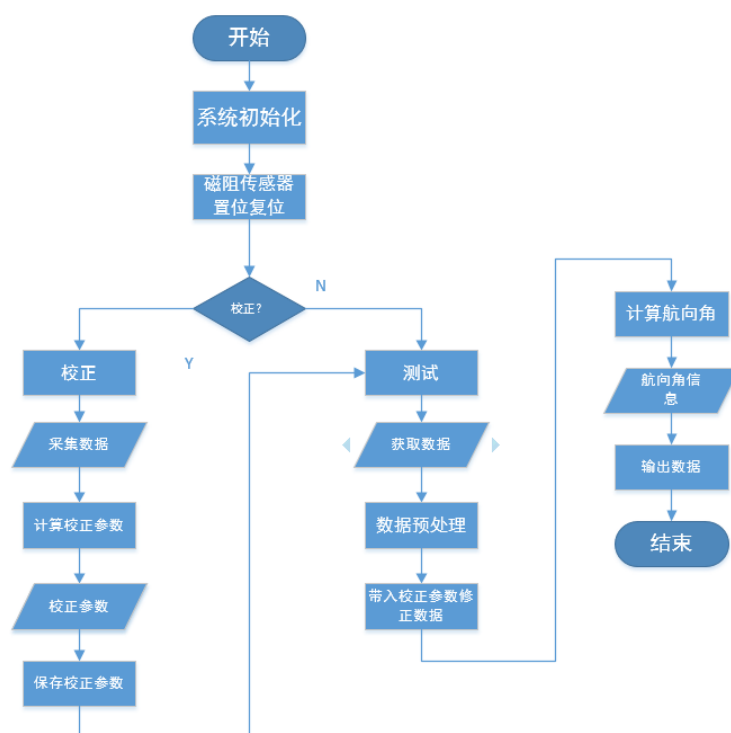


图 4-2 主程序流程图

如图所示，系统上电之后首先完成相应初始化工作，包括系统时钟、IO 端口、SPI 总线、IIC 总线、串口、定时器、中断控制器、中断使能等相关工作。初始化之后，首先对磁阻传感器进行置位复位。在完成相应的置位复位工作之后，由用户选择是否对罗盘系统进行校准，校准后将校正参数保存至系统中，如果系统没有经过校准，则校正参数默认为零。然后进入罗盘方位角测算程序。在测算程序中，首先读取磁阻传感器及加速度数据，然后通过软件滤波对数据实现预处理。经过软件滤波后带入校正参数对数据进行校正，补偿系统误差，用补偿后的数据进行计算，求解方位角信息。最后根据需求选择数据输出方式。

4.1.2 软件开发环境介绍

根据上一章介绍，本文中微处理器芯片采用 STM32 系列，该系列芯片基于 ARM Cortex-M3 内核设计。适用于 STM32 系列芯片的开发环境主要有 Keil MDK 和 IAR Embedded Workbench 两种，本文软件开发在 MDK 5 环境下实现。首先简要介绍一下 MDK 5 开发环境^[26]。MDK 全称 RealView Microcontroller Development Kit，自诞生至今 MDK 已经广泛地应用于各种嵌入式系统开发。对于 ARM 处理器来说，MDK 是一套功能完备，性能优越的开发工具。MDK 5 由 MDK Core 和 Software Packs 两个部分组成，其结构如下图所示。

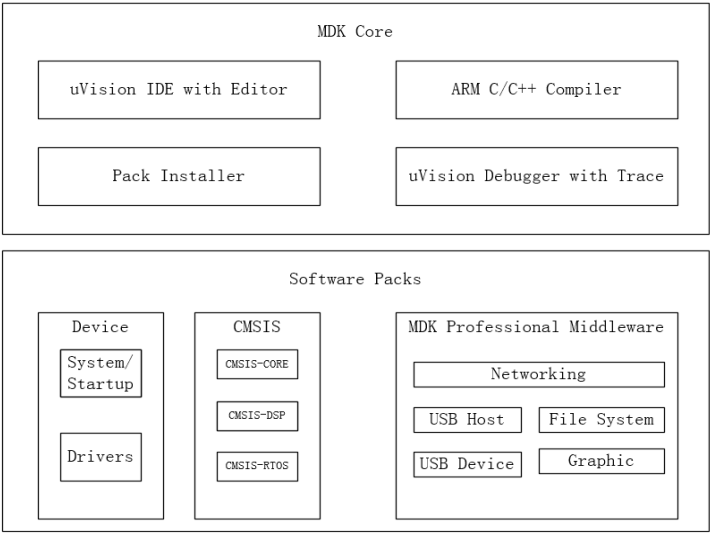


图 4-3 MDK 5 组成

可以看出 MDK Core 包括编辑器，编译器，包安装器，调试跟踪器。Software Packs 用于芯片支持和中间件管理。即使用 MDK 5 开发工具进行软件开发时,要根据不同的芯片安装相应的设备驱动、CMSIS 组件等支持包。

意法半导体公司为 STM32 系列提供了相应的库函数来简化开发，实际开发中可以通过使用库函数和寄存器直接操作两种方式进行开发，其本质上是类似的。不管采用哪种方式开发了解底层寄存器原理和底层操作都是必须的。只有对 STM32 相关知识有比较深入的理解，这样在开发过程中方可得心应手游刃有余。这样在底层代码配置出了问题需要调试的情况下，才能快速定位问题所在，快速解决问题。采用操作寄存器的方式可以加深对基本操作以及相关寄存器的配置的理解方便进行调试，而且使用寄存器操作，程序将会比库函数实现更加高效，因此本文采用操作寄存器的方式开发整体程序。

4.2 各模块子程序介绍

4.2.1 磁场强度获取模块

磁场强度获取模块主要控制从磁阻传感器获取相应的三轴磁场强度信号，其主要包括通过 SPI 总线读取模数转换器取得磁阻传感器磁场强度数据。根据第三章介绍本文分别使用了 TLC2543 和 AD7795 进行 A/D 转换。因此软件也分别根据两种芯片分别实现了控制与读取功能。

TLC2543 芯片通信使用的引脚有 CS、CLOCK、DIN、DOUT。片选引脚 CS

下降沿使能芯片，此后可一直保持低电平至此次传输结束。数据输入端口 DIN 在时钟信号 CLOCK 上升沿输入，数据输出端 DOUT 在时钟信号 CLOCK 下降沿写入。TLC2543 可以通过 8 个、12 个或者 16 个时钟周期实现 12 位数据传输。其工作流程简述如下。首先在 8 个、12 个或者 16 个时钟周期内，向其写入 8 位控制字，其中两位决定时钟长度，在最后一个时钟周期的下降沿启动模数转换，经过一段转换时间后，在随后的传输时序里，DOUT 输出转换结果。

在片选信号的控制下，使用 16 个时钟周期数据传输的时序图如下。

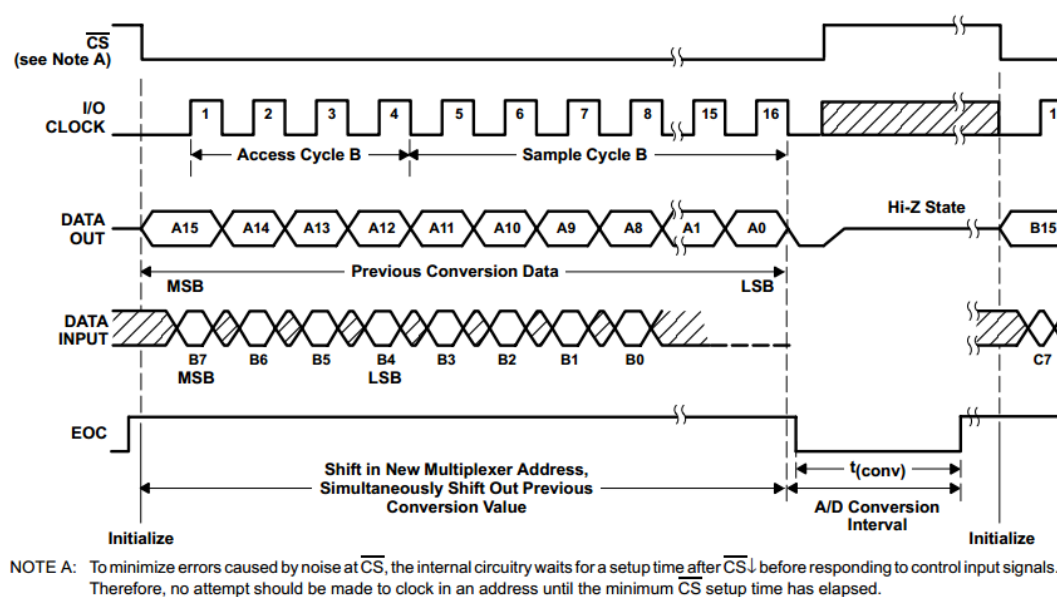


图 4-4 TLC2543 时序图

结合上图，简单描述 TLC2543 芯片的工作时序。上电时 EOC 与 CS 引脚为高电平，拉低 CS 使能芯片通信引脚，前次转换结果的最高位从 DOUT 输出。将控制字最高位送到 DIN 引脚，在 1.425us 之后拉高时钟信号，在时钟信号的上升沿 DIN 上的数据被移入输入寄存器。在第 8 个时钟上升沿，控制字的最后一位被移入输入寄存器，此后输入引脚 DIN 无效。在第 11 个时钟下降沿上次转换结果最后一位被输出，此时数据传输已经全部完成。在最后一个时钟下降时，EOC 下降，本次设置的 AD 转换启动，此时使 CS 上升。转换完成后 EOC 上升。本文根据上述时序设计了相应的通信程序，由于 SPI 总线是全双工通信，所以第一次取得数据为上次转换结果，应丢弃第一次采样数据。

AD7795 类似地与 TLC2543 使用 SPI 总线与微处理器进行通信，这里就不在详细进行介绍。本文参考其芯片手册，将其具体工作模式设置如下，禁用偏置电压发生器，使能熔断电流，双极性模式，64 倍增益，使用外部基准电压源等。根据芯片手册可知，在数据读取时，只有先写入读取数据寄存器的控制字之后芯片

才会输出相应的转换结果，因此虽然是全双工通信，但不同于 TLC2543 可能会取得上次采样结果的情况。单次转换的时序如下图所示。

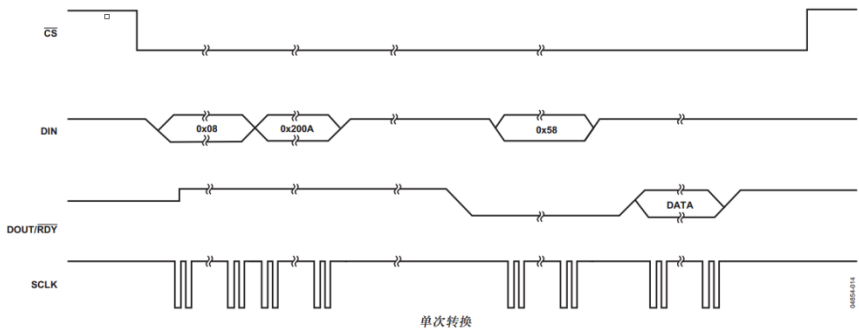


图 4-5 AD7795 单次转换时序图

4.2.2 加速度获取模块

本文采用 ADXL345 感测倾角变化，ADXL345 可采用 SPI 模式或者 IIC 模式与主机通信。本文选用 IIC 模式控制其与微处理器进行通信。器件的 7 位 IIC 地址通过 ALT ADDRESS 引脚控制，本文设计将 ALT ADDRESS 引脚接地，其设备地址为 0x53,加上读写位，其写入地址为 0xA6,读取地址 0xA7。出于精度考虑我们将芯片数据输出速率设置为 50Hz。芯片的工作时序如下图所示。

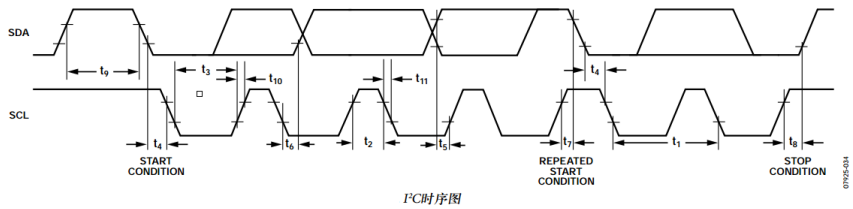


图 4-6 ADXL345 时序图

STM32 芯片中包含对 IIC 的硬件支持可通过相关寄存器设定直接使用。本文设计考虑到网上的建议，采用 IO 模拟 IIC 通信协议，实现与 IIC 设备的通讯。使用模拟 IIC 通信可以控制电平保持时间，便于调试。但是所有操作都有自己来完成，就是代码相对繁琐复杂，工作量大。具体设计基于上图时序实现，能正常的设置芯片工作模式并读取加速度数据。

4.2.3 置位复位控制

置位复位程序主要用于产生一个方波信号控制相应的置位复位电路产生相应的脉冲。考虑系统体积与便携性，系统提供电池供电的解决方案，因此这里采用

低功耗设计。即在系统上电时产生置位复位脉冲，根据实际情况，每隔一定间隔提供一个置位复位信号。这种情况下相应的系统流程如下。

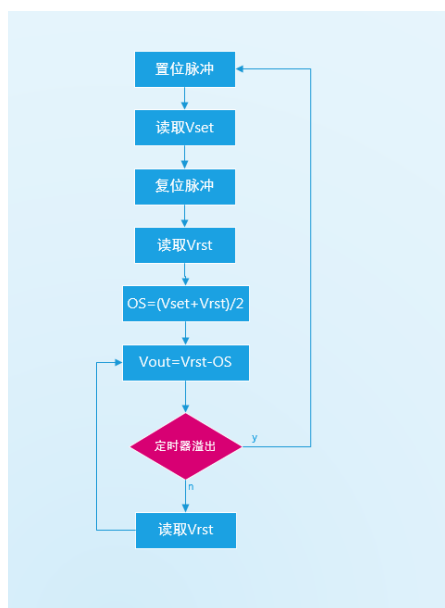


图 4-7 置位复位程序流程图

根据上图，置位复位程序主要由定时器实现，设定一定时间间隔给系统定时提供一个置位复位控制信号以校准磁阻传感器，本文设定每个 10min 进行一次置位复位。

4.2.4 输出与外设控制

本罗盘系统设计通过液晶屏幕输出，并且在调试过程中，串口输出信息也是一种非常重要的调试手段。液晶屏幕默认速率 9600bps，无奇偶校验，8 位数据位，1 位停止位，我们采用默认设置。为了兼容串口屏幕，串口打印我们采用相同配置参数。相应初始化的设置只需把相应使用的微处理串口初始化为相应配置即可。在使用串口通信时，为了调试方便我们需要格式化输出。由于 C 语言基本库函数 `printf` 包含相当完整的格式控制，而 `printf` 函数输出指向 `fputc` 函数，因此我们只需在 `fputc` 中将输出重定向到串口，这样便可以使用 `printf` 函数控制输出格式极大地方便了相关调试工作。

外设控制主要是按键与指示灯的控制。按键控制可以通过将 IO 设置为输入判断其状态实现，本文通过外部中断实现。STM32 的每个 IO 端口都可以作为中断输入^[27]，把 IO 端口作为外部中断输入。指示灯控制相对简单，主要功能实现在校准时指示校准状态。

4.2.5 航向解算程序

如前文所述, 本罗盘导航系统航线解算包括三个子模块, 即数据滤波、航向计算和误差补偿。航向计算原理在第二章中已经进行过介绍, 这里根据相关的计算公式实现具体计算, 就不详细介绍。误差补偿分析本文将其放在第五章中重点介绍。这里我们重点介绍一下数据滤波的相关软件设计。

虽然我们在相关硬件设计上已经考虑了噪声的影响, 并设计了相关的滤波电路对信号进行处理, 但实际电路情况受到各种因素影响, 通过滤波电路只能在一定程度上抑制噪声信号, 所以软件滤波是数据处理前必须要进行的操作。目前来讲, 常用的滤波算法^[28]有多种, 分别介绍如下。

1. 限幅滤波算法

限幅滤波算法需要根据经验确定一个阈值, 如果本次采样与上次采样结果之间偏差超过这一阈值, 则本次采样无效, 将上次采样值代替本次采样结果。这种滤波算法适用于消除偶然因素引起的脉冲扰动, 但是平滑度较差, 对于周期性信号扰动并不能起到有效的抑制作用。

2. 中位值滤波算法

中位值滤波算法基本原理是连续采样 N 次, 把 N 次采样的结果按照从小到大或者从大到小的顺序排列, 取中间值为本次操作有效值。中位值滤波算法也适合用于消除非周期性脉冲扰动。由于需要使用排序算法, 对实时性要求较高的场合并不适用。

3. 算术平均滤波算法

算术平均滤波即将连续 N 次采样结果的算术平均值作为本次采样的结果。算术平均滤波。算术平均滤波适用于信号在某一定值附近上下波动的情况, 其缺点也很明显, 即 RAM 资源占用较多, 实时性较差。

4. 中位值平均滤波算法

中位值平均滤波又称为防脉冲干扰平均滤波, 此方法将 N 个采样值进行排序然后将除去最大值和最小值后的样本进行算数平均。此方法结合了中位值滤波与算数平均滤波的优点, 对偶然性扰动和在一定范围内跳动的干扰信号均有不错的抑制效果。

5. 递推平均滤波算法

将 N 个连续采样值保存在一个队列中, 每次将第一个数据出队, 将本次采样值入队, 然后对队列中数据进行算数平均。此算法对周期性的噪声干扰有良好的抑制作用。

6. IIR 和 FIR 数字滤波

IIR 和 FIR 是两种常用的数字滤波器。数字滤波器^[29]是将输入序列通过一定的运算变换成输出序列，不同的运算方法决定滤波器的实现结构不同。IIR-Infinite impulse response 无限冲击响应，FIR-Finite impulse response 有限冲激响应。IIR 滤波器也可称为递归滤波器，IIR 差分方程的输出不仅和当前输入值、以前的输入值并且还跟以前的输出值有关，也就是说其差分方程有递归性。其公式如下所示：

$$y_i = \sum_{k=0}^N b_k x_{i-k} - \sum_{k=1}^M a_k y_{i-k} \quad (4-1)$$

其中 x 是输入序列， y 是滤波后的输出序列， a_k 、 b_k 是滤波器系数， N 是滤波器的阶数

FIR 滤波器又叫非递归滤波器，FIR 的差分方程的输出值只于当前输入和以前的输入值有关。其公式如下所示：

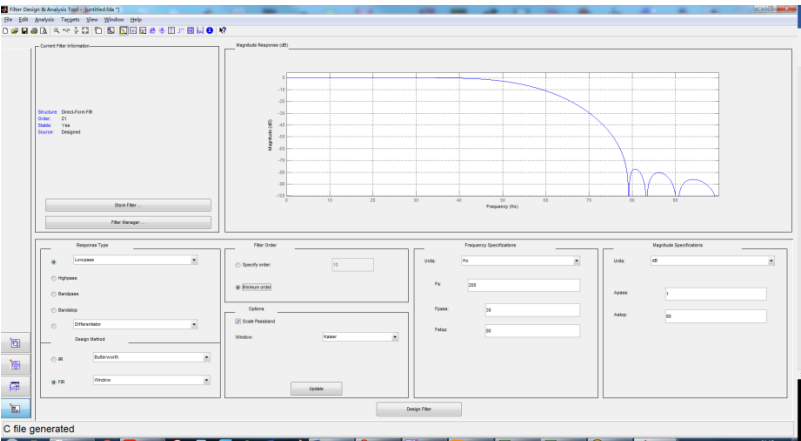
$$y_i = \sum_{k=0}^{n-1} h_k x_{i-k} \quad (4-2)$$

其中 x 是输入序列， y 是滤波后的输出序列， h 是 FIR 滤波器系数。

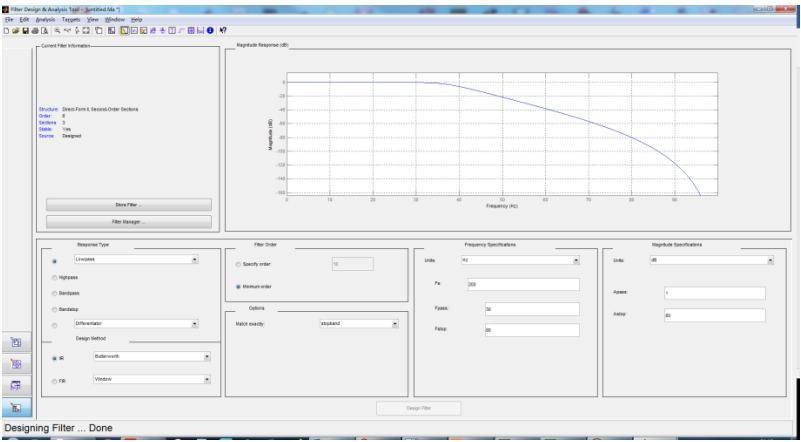
滤波器对频率的选择性是评价其性能的一个重要指标。在实现相同的频率选择性水平时，FIR 滤波器往往需要比 IIR 滤波器高得多的阶数，一般来说 FIR 滤波器所需阶数可达 IIR 的五到十倍。对于数字滤波器来说，其输出与之前的输入输出存在一定关系，其阶数越大，所需状态就越多，存储器的开销就越大。从这点来看 IIR 传输时延更小，处理更高效，资源花费也更少。考虑影响滤波器的另一个重要因素即线性相位。由于一个正弦信号通过一个系统其信号会发生相位滞后，而相位的落后幅度与其频率有关。由于一个信号还可以分解为多个正弦信号，线性相位指的就是各正弦信号通过系统的时间相同。一般来说，FIR 滤波器具有严格的线性相位而 IIR 滤波器非线性严重，必须采用全通网络进行相位校正，大大降低了系统稳定性。

从结构上考虑，采用递归结构实现的 IIR 滤波器在数据运算过程中存在对序列的舍入处理，这会引入相应的寄生振荡。而 FIR 滤波器采用非递归结构实现，其运算精度无论在理论上还是实际运用中都相当稳定，误差也相对较小。此外，FIR 滤波器可以采用快速付里叶变换算法，在相同阶数的条件下，运算速度要快得多。

如下图所示，在 Matlab 下 FIR 滤波器^[30]和 IIR 滤波器^[31]的设计分别如下：



(a)



(b)

图 4-7 数字滤波器设计。(a)FIR 滤波器设计；(b)IIR 滤波器设计

如图所示，本文使用 MATLAB 的滤波器设计工具分别设计了 IIR 和 FIR 两种数字低通滤波器。本文参数设定如下，采样频率 200Hz，上限截止频率 80Hz，下限截止频率 50Hz。对于 FIR 滤波器本文使用卡塞尔窗设计，最后滤波器阶数为 20 阶。IIR 滤波器采用巴特沃斯滤波器设计，最后设计出的滤波器阶数为 5 阶。对比两种方法的幅频特性曲线，发现 FIR 滤波器性能更符合本课题的需求。使用 MATLAB 将相应的系数矩阵导出，本文参考文献[32]用 C 语言设计实现最终的滤波程序。

综上所述，本文综合比较几种滤波算法，最终将中位值平均滤波算法、递推平均滤波算法、数字滤波等三种方法纳入考虑，并分别实现，将处理过的数据结果进行比较，发现采用中位值滤波即可取得不错的效果。对比曲线绘制如下。

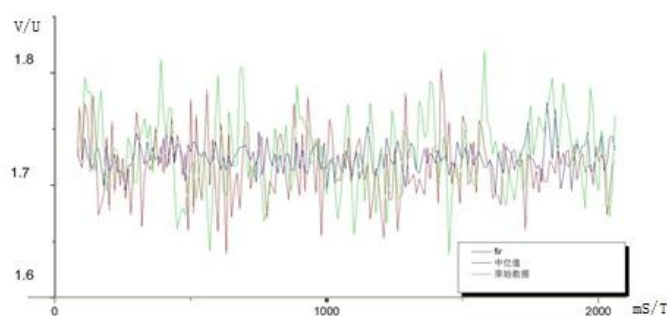


图 4-8 滤波算法效果对比

上图中纵坐标表示放大电路输出电压值，横坐标为时间，单位为毫秒。绿色曲线为原始数据，红色曲线为 FIR 滤波后输出的数据，蓝色曲线为中位值平均滤波算法处理后的数据。从曲线可以明显看出中位值平均滤波算法曲线平滑，尖峰明显被削减。说明电路偶然因素引起的尖峰脉冲和在某一值附近的周期噪声干扰都受到了明显抑制。

4.3 罗盘系统调试

本节内容主要讲述了系统调试中的一些问题及相关解决方法。电子罗盘研制过程中的一个关键问题就是调试，调试不仅决定了系统功能能否正常实现，更重要的是调试并修改硬件及软件的相关参数设置直接影响罗盘最终的性能。调试工作耗时耗力，本文参考文献[33]进行调试。调试主要分两步进行，首先是功能验证，其次是性能调整。调试工作每一步的进行都需要软硬件相互配合，在实际调试中，硬件问题并不易直接发现，有些比较隐蔽的问题需要反复排查。往往需要先检查软件的每一行代码，确定软件代码无误，再对硬件进行检查分析。下面按实际操作流程简述一下相关调试工作。

首先在完成硬件设计时，应反复检查电路原理图和 PCB 设计，确定无误后交给厂家生产。由于罗盘研制规模较小，电路焊接需要手工焊接，因此出现问题的几率较大，因此在此部分调试花费时间较多。本文在焊接过程中分模块进行，边焊接边检查，首先对供电模块进行焊接检查，然后对其他模块以此进行焊接检测。检查一般先观察电路有无明显虚焊、少焊、错焊等问题，然后上电检查各部分输入输出电压是否正常。若出现问题，则先确认原理图设计是否存在缺陷，若无缺陷，则确定问题可能出现在那些元件上，逐步缩小检查范围，最终锁定问题。软件开发工作在电路板焊接之前应在开发板上进行验证调试，在确定基本无误后待样板完成后，下再进样板进行调试。在软件调试工作中往往可以发现一些难以检查出的硬件问题。

4.4 本章小结

本章主要对系统整体软件设计和相关调试工作进行了介绍。首先，介绍了软件设计的整体框架及结构，给出系统程序主体部分的流程图。然后根据不同的模块分别介绍了每个模块的基本功能，针对不同模块本文从不同角度介绍了软件开发的重点和相关设计依据和设计思路。最后对调试工作进行介绍主要是一些相关经验的总结与介绍。

第五章 磁阻电子罗盘系统误差分析与补偿

电子罗盘适用于多种系统，在不同系统中，工作环境千变万化，不能保证罗盘不受任何外部因素影响。在各种因素的影响下，罗盘系统的输出波动较大，甚至难以正常工作。因此在本章中主要对可能影响电子罗盘精度的因素进行讨论，分析电子罗盘误差产生原因。针对罗盘系统的自差，简要介绍相关的误差补偿方法的原理及特性，最终提出本文的补偿方案。

5.1 罗盘测量误差来源分析

电子罗盘系统测量方向角主要根据地磁场水平分量指向地磁南极这一基本原理实现，然而地磁场强度最大仅有 0.7 高斯，极易受到干扰。电子罗盘样机在实测时，航向测量精度波动比较大，因此对测量结果进行误差补偿是提高罗盘性能的关键所在。

造成电子罗盘系统测量误差的影响因素有很多，从其来源来讲，主要可分为系统本身的误差、环境因素造成的误差两个方面。系统本身误差主要是指罗盘系统在制造安装时本身就已经存在的误差。主要包括电路中元件制造时参数上的误差，如磁阻传感器的输出非线性因素，放大电路三路放大倍数间存在偏差，模数转换时的零位误差等；罗盘安装时产生的误差，比如电路板焊接时温度过高对芯片造成损伤，Z 轴方向上的磁阻传感器并不垂直于 XY 平面，罗盘固定位置本身存在一定倾角，载体前进方向与罗盘 X 轴方向并不平行等。这些误差是罗盘系统本身存在的误差，而环境因素造成的误差也包含两个方面，一个是偶然因素引起的误差，如电路中电压波动造成输出变化，温度、湿度、震动、冲击对芯片和电路的影响，系统环境磁场的偶然变化，这些因素的影响可以通过一些技术手段对其进行抑制，如增加滤波电路、软件滤波算法、增加测试次数等；另一个方面的误差，是系统环境中比较固定的因素造成的影响，如罗盘安装环境中铁磁材料磁化造成误差。这种由载体磁场产生的影响称为自差。

根据罗盘误差作用项不同，可将其分为以下 5 种^[34]。1、磁偏角误差。由于地北和磁北间存在一个夹角，所以计算所得的方向需通过补偿相应的磁偏角实现。一般可通过查找地磁模型将地磁偏角写入系统进行补偿实现。2、量化误差。一般是测量值的跳变等，一般由前文所提到的电压波动，温度变化等因素造成。这种误差可通过电路设计、软件滤波等措施进行抑制。3、标度因数误差。一般来讲，地磁场强度在传感器三轴上的分量与我们实际测量结果存在一个比例系数，我们

设计罗盘时一般将三轴的比例系数基本保持一致。实际使用中各轴比例系数上存在一定偏差。并且磁场强度为零时罗盘采样值并不为零即罗盘存在零位误差。比例系数误差和零位误差统称为标度因数误差。这种误差的影响可以通过归一化比例因数来消除。4、磁场分量耦合误差。这种误差是由于传感器三轴没有相互正交而是存在一定夹角而造成的。这种情况下三轴磁场强度校正关系可表示为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} H_{xm} + b_1 H_{ym} + b_2 H_{zm} \\ H_{ym} + b_3 H_{xm} + b_4 H_{zm} \\ H_{zm} + b_5 H_{xm} + b_6 H_{ym} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & b_1 & b_2 \\ b_3 & 1 & b_4 \\ b_5 & b_6 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{xm} \\ H_{ym} \\ H_{zm} \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} H_{xm} \\ H_{ym} \\ H_{zm} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5-1)$$

上式中 $H_x H_y H_z$ 分别表示校准后的磁场强度, $H_{xm} H_{ym} H_{zm}$ 表示实际测得的磁场强度。一般来说, 组装过程中通过机械手段保证其正交的情况下, 其误差可以忽略。5、自差。如前文所述, 自差是罗盘工作环境中的磁性材料产生的磁场所造成的。

对于自差来讲, 对其造成影响的载体磁场包括软铁磁场与硬铁磁场两部分。软铁磁场由载体上软铁材料产生, 是影响自差的因素中比较难处理的一部分, 主要因为其磁场方向和强度不固定, 随时间和环境而变化。因此难以通过计算补偿, 实际使用中主要通过将罗盘安装在远离软铁磁材料的位置来减少其影响。硬铁磁场^[35]是载体上大小和方向固定的磁场, 它不随载体姿态与纬度而变化。因此硬铁磁场可以通过误差补偿对其进行校正。

5.2 罗盘误差补偿算法研究

根据前文分析, 我们可以看出在罗盘系统中对其精度影响较大的因素是罗盘系统的自差、标度误差和量化误差。对于量化误差, 本文已经在软件和硬件两方面进行优化处理。硬件上本文设置相应的滤波电路, 使用高精度放大器和模数转换器等方式, 软件上比较分析最终选定合适的滤波算法进行处理。本小节只针对自差和标度误差的校准补偿进行相关的分析和讨论。

5.2.1 椭圆法补偿

在不受地磁场以外其他外界磁场干扰的理想条件下, 并假设电子罗盘各轴标度系数严格一致。将电子罗盘保持水平姿态旋转一周, 以 x 轴 y 轴输出值为坐标绘制在直角坐标系上, 形成的曲线为一个坐标在原点的圆。如图 5-1 所示, 当外界

施加一个稳定磁场时，曲线的圆点将会发生偏移^[36]，并且半径可能会发生改变。

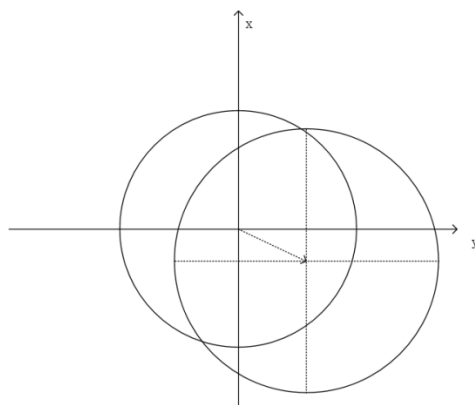


图 5-1 外加磁场时水平磁场强度理论值示意图

再考虑电子罗盘系统的标度误差，实际情况下所绘制成的曲线将在图 5-1 所示的圆的基础上拉伸从而形成一个中心偏移的椭圆，如图 5-2 所示。

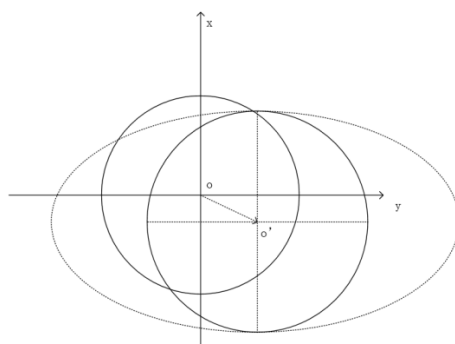


图 5-2 外加磁场与标度误差作用下水平磁场强度理论值示意图

上图所示的曲线与实际情况比较接近，对于这种情况，我们可以求出椭圆圆心和标度系数进行补偿，将椭圆变换成圆。设我们采集到的 x 轴 y 轴上的输出为 A_x 和 A_y ，补偿后的值为 A'_x 和 A'_y ，则补偿关系可表示为：

$$\begin{cases} A'_x = A_x \times A_{xsf} + A_{xoff} \\ A'_y = A_y \times A_{ysf} + A_{yoff} \end{cases} \quad (5-2)$$

其中 A_{xsf} 和 A_{ysf} 为标度系数， A_{xoff} 和 A_{yoff} 为圆心偏移量。在实际操作过程中，一般通过将罗盘系统水平旋转一周，采集 x 轴与 y 轴上的输出值，并计算出最大值和最小值，则标度系数和偏移量可表示为：

$$\begin{cases} A_{xsf} = \max(1, \frac{A_{ymax} - A_{ymin}}{A_{xmax} - A_{xmin}}) \\ A_{ysf} = \max(1, \frac{A_{xmax} - A_{xmin}}{A_{ymax} - A_{ymin}}) \\ A_{xoff} = (\frac{A_{xmax} - A_{xmin}}{2} - A_{xmax})A_{xsf} \\ A_{yoff} = (\frac{A_{ymax} - A_{ymin}}{2} - A_{ymax})A_{ysf} \end{cases} \quad (5-3)$$

5.2.2 最佳椭圆法补偿

根据上文所述在硬铁磁场和标度误差的影响下，罗盘的输出曲线会发生偏移，利用上文所述方法可以在一定程度上对误差造成的影响进行补偿校正。然而实际情况要复杂的多，由于软铁磁场的影响，罗盘 x 轴 y 轴输出曲线与上一节中的情况并不一致。由于软铁磁场随时间、纬度等因素变化，罗盘实际测量 x 轴 y 轴所得的值的分布近似椭圆，但椭圆长轴短轴并不与坐标系重合，而是存在一个夹角。因此在考虑软铁磁场的作用下，上一小节中所述的方法并不能很好地对罗盘输出进行校正。图 5-3 为软铁磁场作用下，水平磁场强度理论值示意图

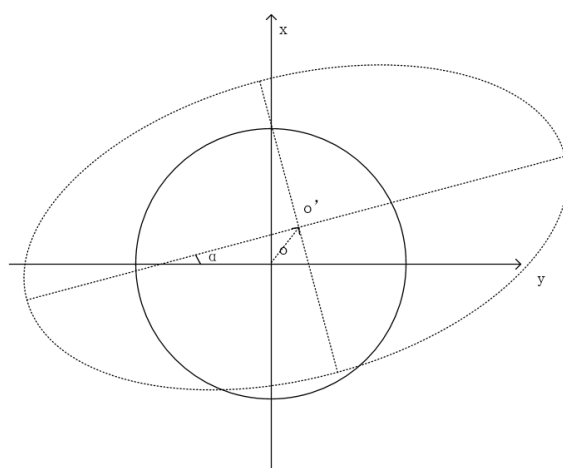


图 5-3 软铁磁场作用下水平磁场强度理论值示意图

如图所示，曲线在软铁磁场、硬铁磁场和标度误差多种因素作用下，由理论上的圆畸变为图中的椭圆。通过最小二乘法可以求出椭圆的方程，椭圆的标准方程可表示如下：

$$x^2 + Axy + By^2 + Cx + Dy + E = 0 \quad (5-4)$$

平面中的椭圆方程又可表示如下：

$$\frac{[(x-x_0) \cos \alpha + (y-y_0) \sin \alpha]^2}{a^2} + \frac{[-(x-x_0) \sin \alpha + (y-y_0) \cos \alpha]^2}{b^2} = 1 \quad (5-5)$$

其中， (x_0, y_0) 表示椭圆中心， a 表示椭圆长轴半径， b 表示椭圆，如图 5-3 所示

α 为椭圆长轴与 y 轴方向的夹角。将(5-4)式做如下变换可转换为椭圆标准方程^[37]:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{2BC-AD}{A^2-4B} \\ y_0 = \frac{2D-AD}{A^2-4B} \\ a = \sqrt{\frac{2(ACD-BC^2-D^2+4BE-A^2E)}{(A^2-4B)(B-\sqrt{A^2-(1-B)^2+1})}} \\ b = \sqrt{\frac{2(ACD-BC^2-D^2+4BE-A^2E)}{(A^2-4B)(B+\sqrt{A^2-(1-B)^2+1})}} \\ \alpha = \tan^{-1} \sqrt{\frac{a^2-b^2B}{a^2B-b^2}} \end{cases} \quad (5-6)$$

由于(5-4)表示的椭圆方程，结构复杂，很难直接进行计算。根据最小二乘法^[38,39]我们很容易可以求得椭圆标准方程。将标准方程中参数代入上式可得椭圆的位置参量。圆坐标与椭圆坐标间变换可表示如下：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{x_{sf}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{y_{sf}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (5-7)$$

式中 (x, y) 为椭圆坐标 (x', y') 为圆坐标， x_{sf} 和 y_{sf} 可表示如下：

$$\begin{cases} x_{sf} = \max(1, \frac{b}{a}) \\ y_{sf} = \max(1, \frac{a}{b}) \end{cases} \quad (5-8)$$

根据上述原理，我们可以采用以下方法对罗盘系统进行校准^[40]。首先将罗盘系统水平旋转一周，然后每隔 15° 采集一次罗盘 x 轴 y 轴数据，根据最小二乘法解得椭圆方程参数，带入(5-7)和(5-8)式解得相应 x' ， y' 代入(2-7)可计算出相应的航向角结果。

5.3 罗盘样机测试结果

在完成电子罗盘系统的相应软硬件设计后，本文对电子罗盘系统的航向角输出精度进行测试。本文设计测试方案如下：首先设计相应的转台用于固定电子罗盘，并在固定转台上标定正北方向与相应的角度值。我们将罗盘固定于转台之上，分别测试在不同情况下电子罗盘的输出数据。在测试时，设置电子罗盘样机数据从串口输出至 PC 机，然后将采集到的数据进行处理与分析。本文分别测试了电子罗盘在不同条件下输出情况，分别介绍如下。

5.3.1 水平测试

首先，我们在水平状态下测试电子罗盘系统输出航向角的精度。我们将转台

放置在较空旷的实验室环境下，远离各种电子设备，以避免外界磁场干扰。将罗盘固定于转台之上，保持转台水平，测量罗盘系统的航向精度。这里每隔 30 度进行一次测试，每次测试测量至少 7 个数据。将结果除去一个最大值和一个最小值之后记录下来，可以得到未进行补偿时航向角测试结果如下表所示。

表 5-1 补偿前罗盘测试数据

(单位：度)

参考角度	测试 1	测试 2	测试 3	测试 4	测试 5	均值	误差
0	356.17	356.17	354.76	354.76	354.76	355.324	-5.24
30	13.80	13.80	13.80	13.80	13.44	13.728	-16.56
60	57.18	57.18	57.18	57.29	57.29	57.224	-2.71
90	87.25	87.25	87.80	87.80	87.80	87.58	-2.2
120	125.84	125.84	125.84	124.53	124.53	125.316	4.53
150	170.25	170.25	170.25	168.86	168.86	169.694	18.86
180	190.44	190.44	190.44	190.57	190.57	190.492	10.57
210	210.92	210.92	210.92	210.97	210.97	210.94	0.97
240	250.73	250.73	250.98	250.98	250.91	250.866	10.91
270	269.19	269.19	269.19	269.31	269.08	269.192	-0.92
300	309.32	309.32	308.58	308.58	309.35	309.03	9.35
330	327.69	327.69	327.69	327.72	327.72	327.702	-2.28

把上一步测试中用于计算航向角信息的 x 轴 y 轴磁场采样信息进行分析，将所得磁场数据绘制成散点图，所得图形如下所示。

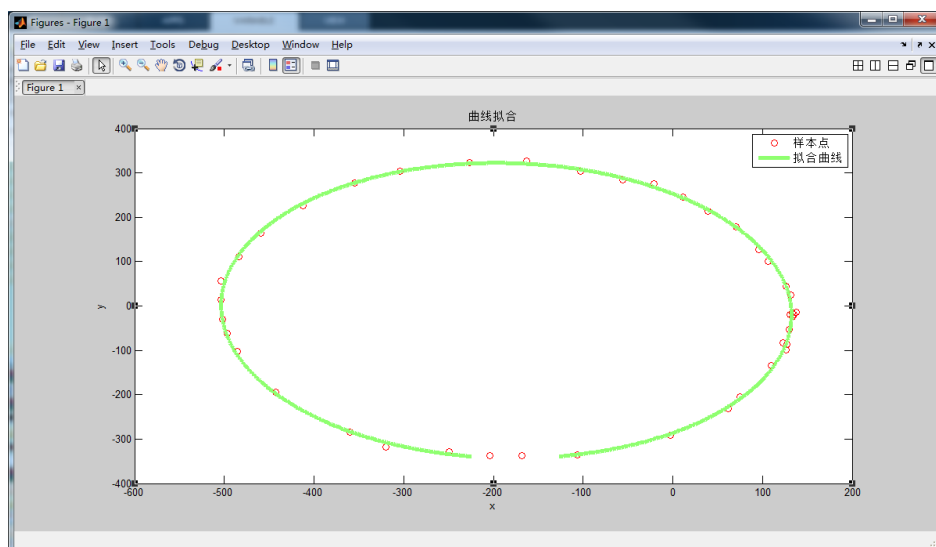


图 5-4 原始样本散点图与椭圆拟合曲线

在上图中，红色圆圈为采集到的原始数据，其中横坐标为 x 轴 AD 采样值，纵坐标为 y 轴 AD 采样值。将上述采样数据进行最佳椭圆拟合，即通过最小二乘法拟合椭圆曲线，将拟合参数输出后绘制出的拟合曲线如上图中绿色曲线所示。可以看出，使用最小二乘法拟合椭圆线，得到的椭圆曲与原始数据拟合度较高。其中拟合曲线椭圆参数如下表所示。

表 5-2 椭圆拟合参数表

长轴	短轴	x 轴偏移	y 轴偏移	旋转角
334.45947960	316.11640500	-185.54920131	-10.216832752	1.8814093905

根据拟合参数，可通过相应矩阵变换将椭圆变换为圆。将进行变换之后的数据输出，绘制于同一坐标系下，具体图形如图 5-5 所示。

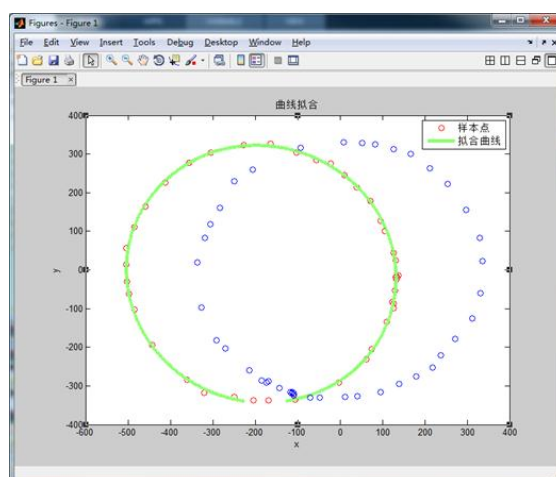


图 5-5 最佳椭圆补偿后样本散点图

在上图中, 红色圆圈为原始采样值, 绿色曲线为椭圆拟合曲线, 转换后的值为蓝色圆圈。可以看出, 矫正后数据所绘图形中心明显位于原点附近, 校正后数值与正圆曲线仍有一定差距。主要原因是由于系统中存在各种干扰因素, AD 采样数据并不直接分布在椭圆曲线上, 所以校正输出值仍有一定误差。如果能将采样数据严格映射到椭圆曲线上, 在进行校准则结果将准确很多。但目前仍没有较好的办法解决这一问题。将采用最佳椭圆补偿算法校正后的数据进行航向角计算其结果输出如下表所示。

表 5-3 补偿后罗盘测试数据

(单位: 度)

参考角度	测试 1	测试 2	测试 3	测试 4	测试 5	均值	误差
0	356.7	356.7	356.5	356.5	356.5	356.58	-3.42
30	26.5	26.5	26.5	26.3	26.2	26.4	-3.6
60	62.1	62.1	62.1	63.5	63.5	62.66	2.66
90	87.5	87.5	87.5	87.5	87.5	87.5	-2.5
120	119.2	119.2	119.2	118.5	118.5	118.92	-1.08
150	153.9	153.9	153.9	148.1	148.1	151.58	1.58
180	181.5	181.5	181.5	181.4	181.4	181.46	1.46
210	209.7	209.7	209.7	208.9	208.9	209.38	-0.62
240	241.9	241.9	243.0	243.0	239.7	241.9	1.9
270	267.2	267.2	267.2	268.5	268.1	267.64	-2.36
300	299.9	299.9	298.9	298.9	303.5	300.22	0.22
330	331.5	331.5	331.5	332.6	332.6	331.94	1.94

分析以上数据可以看出, 在未进行误差校正时, 罗盘输出航向角数据在几个点上比较准确, 而在其他方向上误差较大。误差最大可达 18 度以上, 难以正常使用。在使用最佳椭圆补偿算法进行校准后, 罗盘输出精度有较大提高, 最大误差为 3.6°, 平均误差 1.9°, 基本满足设计指标要求。上表中测试数据并未考虑地磁偏角的影响。由于在实际测试中无法得出较为准确的地磁偏角值, 本文参考相关资料得出, 在成都市地磁偏角为 1 度偏西。故将表中数据增加 1° 后为磁偏角补偿后的结果, 如表 5-4 所示。

表 5-4 磁偏角补偿后的罗盘输出

(单位: 度)

参考角度	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
实测角度	357.58	27.4	63.66	88.5	119.92	152.58	182.46	210.38	242.9	268.64	301.22	332.94
误差	-2.42	-2.6	3.66	-1.5	-0.08	2.58	2.46	0.38	2.9	-1.36	1.22	2.94
平均误差	± 2.0											

从上表数据来看, 水平状态下, 电子罗盘样机输出比较稳定, 在个别方向上误差较大, 最大误差 3.6° , 平均误差 2° , 航向角精度基本满足设计要求。

5.3.2 倾斜测试

首先, 我们需要在水平状态下对倾角值进行零位补偿。具体操作如下, 将罗盘至于水平面上, 旋转一周将罗盘倾角数据输出并记录, 分析数据计算倾角校正。由于数据较多, 这里就不详细列出。根据相关数据, 在水平情况下传感器输出存在一定误差, 经过多组数据分析计算, 在水平状态下, 横滚角误差 $+0.3^\circ$, 俯仰角误差为 $+3^\circ$ 。在实际使用时, 我们将计算出的倾角值减去上述误差为实际倾角值。

本文下列实验测试在罗盘俯仰角为 0° , 横滚角为 30° 的状态下进行。具体操作与前文类似, 我们保持罗盘姿态角不变, 将罗盘旋转一周每隔 30° 采集一组数据。我们得到罗盘俯仰角为 0.5° , 横滚角 33.2° , 根据水平情况下校准数据, 实际横滚角与俯仰角分别应为 30.2° 与 0.2° 。把倾角值带入公式对 AD 采样值进行倾角补偿, 所得数据绘制图形如下所示。

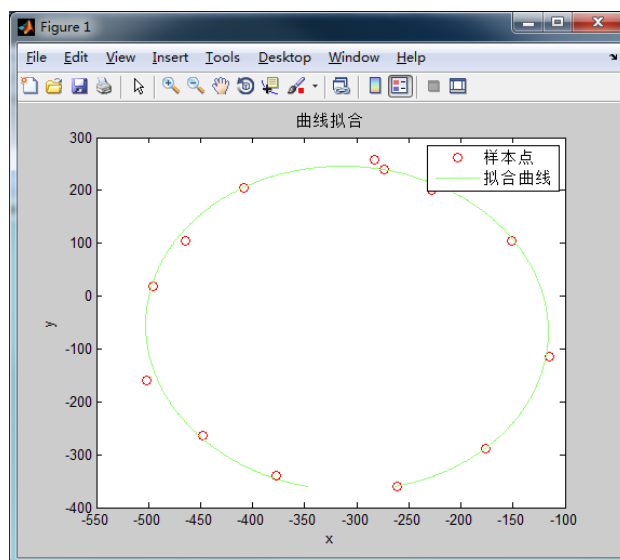


图 5-6 倾角补偿后样本散点图与拟合结果曲线

上图中红色圆圈为样本数据进行倾角补偿后的计算值，红色曲线为椭圆拟合后的曲线，椭圆拟合参数如下。

表 5-6 椭圆拟合参数表

长轴	短轴	x 轴偏移	y 轴偏移	旋转角
306.6696	193.0893	-309.3336	-61.5721	1.5880

类似地，我们将经过补偿算法校正后的样本值与未进行校正的样本值绘制在同一坐标系中，如下图所示。

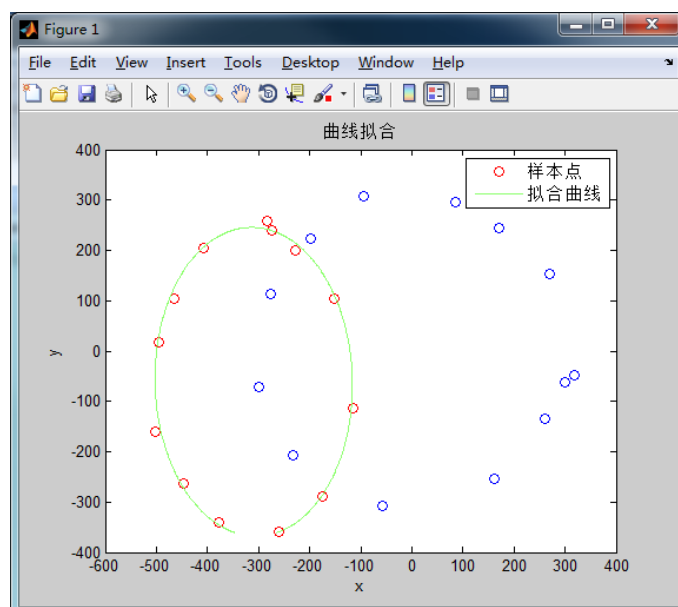


图 5-7 校正后样本数据散点图

上图中蓝色圆圈为校正后样本点。从图形上看，最佳椭圆误差补偿算法可以基本将椭圆补偿为圆，在极个别点上存在误差，这是由于原始样本数据并未完全与椭圆曲线吻合。分析相关原因可能是由于倾角计算存在误差，倾角补偿后，磁阻传感器误差与倾角误差积累，使数据误差增大。经过补偿后航向角最终输出结果如下表所示。

表 5-7 补偿后罗盘测试数据

(单位：度)

参考角度	测试 1	测试 2	测试 3	测试 4	测试 5	均值	误差
0	356.6	356.6	358.2	358.2	355.8	357.08	-2.92
30	32.9	32.9	34.1	34.1	26.2	32.04	2.04
60	60.5	60.5	62.1	63.5	63.5	62.02	2.02
90	87.5	87.5	86.8	88.7	88.7	87.84	-2.16
120	117.2	117.2	118.8	118.5	118.5	118.04	-1.96
150	153.9	153.9	155.2	155.1	148.1	153.24	3.24
180	182.5	181.5	182.5	181.4	181.4	181.86	1.86
210	208.7	208.7	209.4	207.9	207.9	208.52	-1.48
240	242.6	242.6	243.0	243.0	238.7	241.98	1.98
270	267.4	267.4	269.1	268.3	268.3	268.1	-1.9
300	297.6	297.6	298.9	298.9	301.2	298.84	-1.16
330	331.7	331.5	331.5	331.7	331.7	331.62	1.62

将上表中数据进行地磁偏角补偿后，其数据如下表所示。

表 5-8 进行磁偏角校正后的罗盘输出

(单位：度)

参考角度	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
实测角度	358.08	33.04	63.02	88.84	119.04	154.24	182.86	209.52	242.98	269.1	399.84	332.62
误差	-1.92	-1.04	3.02	-1.16	-0.96	4.24	2.86	-0.48	2.98	-0.9	2.16	2.62
平均误差	±4.3											

对以上数据进行分析可知,电子罗盘系统在存在倾角的状态下,数据波动较大。这是因为倾角补偿和磁场强度信息误差叠加使误差增大,从而数据误差增加,波动幅度增大。数据平均水平整体满足要求,说明罗盘直接采集数据基本正确。数据在正常值基础上波动,说明系统中仍存在周期性干扰。从而罗盘硬件部分设计性能仍有待提高。总的来说,电子罗盘系统输出数据在一定程度上满足设计要求,在一些角度上罗盘输出精度较高。但是在存在姿态倾角的情况下,输出数据波动较大,虽然总体平均水平满足要求,但是性能还与水平测试存在一定差距。在实际测试中,本文还测试了俯仰角横滚角分别为 $\pm 30^\circ$ 以及倾角超过 30° 的情况,在倾角超过 30° 时,数据波动幅度较大,难以确定有效航向。在其他姿态角较小的情况下,罗盘系统输出较为稳定,航向角精度也能达到预期水平,这里就不列出详细数据。

5.3.3 结果分析

综合来看,罗盘样机航向角精度还可以进一步提高,这里针对上述测试结果中看出的问题进行总结。

1) 量化误差的处理总结

本课题研究对于量化误差的处理通过使用高精度低噪声的放大电路与AD转换、设计相应的滤波电路以及相关软件算法实现。通过以上步骤,大部分噪声得到了有效抑制,但是再存在倾角的情况下,由于噪声的累加,输出变得不稳定。根据相关电路设计,在以下几点上可以对电路进行改进。一是电源模块,模拟电路对噪声比较敏感,对于模拟供电和基准电压源的选择,可以使用噪声更小的电源处理方案,进一步减少误差影响。二是优化精简结构,由于是电子罗盘样机在设计时,为验证可行性设计了多种解决方案,增加了系统复杂性提高了引入噪声的可能。

2) 标度误差

对于标度误差,理论上讲可以通过椭圆误差补偿法进行补偿,因此本研究并未单独进行标度误差的修正。如果先对标度误差进行校正,有可能可以进一步提高系统精度。对于倾角感测单元来说,本文简单的进行了水平倾角补偿,效果有待提高。

3) 自差

罗盘自差是影响相对较大的一个因素,本文采用椭圆误差补偿法进行处理。对于自差的处理方法有很多种,如最小二乘误差补偿法,基于神经网络的误差补偿算法,基于遗传算法的误差补偿等。本文考虑数据处理的复杂性与系统实时性

考虑了最小二乘误差补偿法和椭圆误差补偿法，由于最小二乘法模型较为复杂，且只是单纯从数学角度将真实航向角带入计算模型参数的最小二乘解来进行补偿，因此本文并未选用此方法进行补偿。也正是由于本研究未实际将所有算法进行实际比较，不能将实际效果进行比较。从最终椭圆误差补偿补偿效果来看，该方法简单有效，但是精度仍有提高空间。因此从算法上来说，可尝试对比多种算法选择最优化方案。

5.4 本章小结

本章内容大致分为三个部分。第一部分总两个方面分析了电子罗盘系统的误差来源。这里首先根据误差来源是自身还是外界干扰将误差进行归类描述，其次根据误差影响具体数据项的不同在进行划分并进行分析。综合来看，影响罗盘精度的主要影响因素是自差、标度误差和量化误差。第二部分内容根据误差分析介绍了相应的误差处理算法。本文查阅相关文献选择采用椭圆误差补偿法对误差进行处理。这一部分主要包含了椭圆误差补偿法的相应原理。第三部分主要是电子罗盘样机的性能测试与相关的数据分析。

第六章 总结与展望

随着时代的发展,电子罗盘越来越成为现代导航系统中必不可少的组成单元。不论是是在军事领域,还是民用领域,都可以见到它的身影。随之而来,对其各方面的要求也越来越高。根据应用领域需求不同,对产品指标的要求也不尽相同。目前国外磁传感技术较为领先,相关的应用研究也比较全面深入。而国内的相关产业和研究受制于半导体产业的发展,据国外先进水平仍有一定差距。在这种背景下,本文基于磁阻传感器对电子罗盘应用展开相关研究。

在设计上,本文参考国内外设计方案,采用 AMR 传感器作为敏感元件设计实现了电子罗盘样机的研制。在硬件设计上,课题研究借鉴前人经验,并结合实际情况提出自己的改进方案,综合设计实现了小型化,便携化的要求。本文设计罗盘样机可选电池、电源供电,屏幕、串口输出,兼顾不同需求。硬件上采用高精度 AD 转换器及放大芯片,并设计滤波电路改善电路整体性能。软件上设计了相应的算法对实际误差进行补偿,在测试中取得了良好的效果。

在实际航向角精度测试中,本文所制电子罗盘样机水平放置时,在 0° - 360° 范围内旋转,其航向角精度可达 2° 左右。在倾角小于 30° 的情况下,罗盘航向角精度略有下降,仍可到 5° 以内,满足一般精度要求的应用。电子罗盘样品经测试具有较为可靠的精度及稳定性,并且成本低,功耗小,体积小,可应用于多种不同环境。

由于实验条件等客观因素的影响,本研究实现的罗盘样机在性能上还有一定提升空间。主要可以通过以下手段实现:

- (1) 改进电路设计,使用高精度基准电压源提供基准电压。电源噪声的影响对于模拟电路影响较大,本文所用基准电压源噪声对放大器件来说仍有一定影响。
- (2) 精简电路设计,由于本方案是验证性设计,故有些模块采用多种方案。在以后设计中可使用一种方案,简化电路结构,减少噪声引入。
- (3) 使用多通道放大电路,提高三轴采样值比例系数的一致性。本文所用放大器件为三个分立器件,比例系数并不能完全一致。
- (4) 实现其他误差补偿算法并分别进行测试分析,选择最优解。本文在分析基本原理后,仅实现了椭圆补偿算法,效果可以达到指标要求。在后续工作中可以实现更多算法,并进行实际对比分析选择最优方案。
- (5) 使用前对罗盘进行定标,校准零位误差,提高系统精度。

致 谢

转眼之间,三年的研究生生活即将结束。在这三年中,我学到了很多东西,不仅仅是专业知识和研究经验的积累,更重要的是经过这三年的磨练使自己慢慢成熟了起来。这一切都离不开导师和朋友的帮助,在这里我要向他们表示衷心的感谢。

首先,我要感谢我的导师唐晓莉教授。我能进入到电子科大这么一所优秀的学校进行学习要感谢唐老师的知遇之恩。进入研究生之后,从课程学习到课题研究,唐老师在各个方面都给予我很大的帮助。唐老师是良师亦是益友,在我实验态度不端正时,唐老师的批评与指摘,使我意识到自己的错误。在我遇到问题时,唐老师认真的态度睿智的思维,帮助我打开思路。在课题研究上,唐老师给了我宝贵的意见与帮助,并不遗余力地为我提供课题所需的实验设备,帮助我的课题研究顺利进行。另外,唐老师亲力亲为一丝不苟的科研态度,对我的科研和为人处世都有很大的影响。在这里,再次向唐老师表达我深深的谢意。

其次,我要感谢课题组组长张怀武老师。如果不是张老师屡次百忙之中抽出时间召集我们开会督促我们实验,如果不是张老师早出晚归以身作则的科研精神的感召,课题组大部分同学怎会取得今天的成绩。所以真的很幸运能在张老师课题组中学习与研究,再次感谢张老师对我们的关心与帮助。同时感谢课题组的苏桦老师、钟智勇老师等给予的指导与帮助。

此外,我也要感谢课题组的马国坤、解飞、郭鑫、赵珍祥、邹志理等师兄,以及同学好友刘如、杜翔裕、余尤、杨小东、陈敏、史中伟、刘洋、黄海明、李德船、涂翔宇、林通、刘强、郑华溢、王轩、霍振选、邓迅、张钰瑛、胡诗锦、甘功文、王伟等,正是因为他们帮助,我才能在这个团队中更快地成长。无论在学习、科研还是生活中,大家都相互帮助,让这个团队更加有凝聚力。

最后,我要感谢我的父母及家人。是他们在挫折中给我鼓励,是他们在沮丧时给我安慰,是他们在成功时给我赞许与警醒,是他们在迷惘时给我方向,在此向我的家人表示感谢。

参考文献

- [1] 王安国.现代天文导航及其关键技术[J].电子学报,2007,35(12): 2347-2353
- [2] 湛君.无线电定向系统的设计与实现[D].北京:北京邮电大学,2009, 1-5
- [3] 崔建勇.基于卫星导航系统的定向技术研究[D].郑州:解放军信息工程大学, 2008, 1-10
- [4] 张炎华,王立端,战兴群,et al.惯性导航技术的新进展及发展趋势[J].中国造船,2008,49(s1): 134-144
- [5] 徐文耀.地磁学发展史的启示[J].自然杂志,2006,28(6): 349-352
- [6] 杨云涛,石志勇,关贞珍,李豫泽.地磁场在导航定位系统中的应用[J].中国惯性技术学报,2007,(06): 686-692
- [7] 杨晓东,王炜.地磁导航原理[M].北京:国防工业出版社,2009, 5-7
- [8] 王琪.基于隧道磁阻传感器的电子罗盘设计[D].太原:中北大学,2015, 13-14
- [9] Fisher CJ. Using an accelerometer for inclination sensing[EB/OL]. <http://www.analog.com/>, July 16, 2015
- [10] Bresciani T. Modelling, identification and control of a quadrotor helicopter[J]. 2008
- [11] Caruso MJ, Smith CH, Bratland T, et al. A new perspective on magnetic field sensing[J]. Sensors, 1998, (15)
- [12] 张会云.霍尔效应的发展及应用[J].纺织高校基础科学学报,2002,15(1): 75-79
- [13] 王国余,张欣,景亮.新型磁阻传感器在地磁场测量中的应用[J].传感器与微系统,2002,21(10):43-45
- [14] 陈雁.各向异性磁电阻传感器的研究[D].北京:中国科学院研究生院(电子学研究所),2006, 11-12
- [15] 艾春鹏.基于 gmr 的地磁定向方法研究[D].哈尔滨:黑龙江大学,2011, 3-4
- [16] 吕华,刘明峰,曹江伟,白建民,魏福林,杨正,王建国.隧道磁电阻(TMR)磁传感器的特性与应用[J].磁性材料及器件,2012,(03): 1-4+15
- [17] 邵婷婷.倾斜补偿电子罗盘设计[D].西安:西北工业大学,2007, 10
- [18] Honeywell. 1- and 2-axis magnetic sensors[EB/OL]. <https://www.honeywell.com>, May 9, 2015
- [19] 王伟,曲凯.基于 adxl345 的初始姿态测量系统[J].中小企业管理与科技旬刊,2012,(4): 311-312
- [20] 刘高明.单电源、电源限输出仪表放大器 ad623 及其应用[J].电测与仪表, 1999,(1): 44-46
- [21] 贾晓华.信号噪声干扰处理的两种方法[J].工业控制计算机, 2008,21(3): 74-75

- [22] ANALOG DEVICES. 6 通道、低噪声、低功耗、16 位 $\sigma - \delta$ 型 adc, 内置片内仪表放大器和基准电压源[EB/OL]. <http://www.analog.com/>, June 15, 2016
- [23] STMicroelectronics. Stm32f103xc,stm32f103xd,stm32f103xe[EB/OL]. <http://www.st.com/>, November 26,2015
- [24] 关于CH340在STM32实现一键下载电路的研究[EB/OL]. http://www.360doc.com/content/14/0921/11/14951572_411210231.shtml, 2014年9月21日
- [25] 王萍.浅谈 pcb 电磁兼容设计[J].电子质量, 2010,(10): 73-75
- [26] changeyourmind. Keil mdk v5简介及初次体验[EB/OL]. <http://blog.csdn.net/changyourmind/article/details/52200340>,2016年8月13日
- [27] 齐健.在 STM32 开发板实现外部中断功能[J].科教导刊:电子版,2014(13): 143-143
- [28] 朱恒军,王发智,姚仲敏.基于单片机的数字滤波算法分析与实现[J].齐齐哈尔大学学报(自然科学版),2008,24(6): 53-54
- [29] SanjitK.Mitra,米特拉,Mitra,et al.数字信号处理:基于计算机的方法[M].(余翔宇)北京:电子工业出版社, 2012, 347-374
- [30] 刘万松.基于 dsp 的 fir 数字滤波器的设计[D].贵阳:贵州大学, 2008, 11-33
- [31] 耶晓东.基于 matlab 的 iir 数字滤波器设计及 dsp 实现[J].电子设计工程, 2011,19(9): 175-177
- [32] zhoufan900428.[数字信号处理]单位冲击响应与频响以及 fir 实现代码(c 语言)[EB/OL]. <http://blog.csdn.net/zhoufan900428/article/details/8988740>,2013 年 5 月 29 日
- [33] 职燕,蒋存波,徐健,吕鑫,李耀奇.嵌入式系统硬件调试方法的研究与设计[J].电测与仪表,2006,(04): 49-51.
- [34] 戴磊,齐俊桐,吴冲,et al.旋翼飞行机器人磁罗盘误差分析及校准[J].机器人, 2012,34(4): 418-423.
- [35] 杨培科.基于 SOPC 的磁阻电子罗盘的设计实现及其误差补偿[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010, 47-48
- [36] Caruso MJ. Applications of magnetoresistive sensors in navigation systems[J]. Sensors and Actuators, SAE SP-1220, 1997: 15-21
- [37] 邹乐强.最小二乘法原理及其简单应用[J].科技信息,2010, 02(23): 282-283
- [38] 刘志平,石林英.最小二乘法原理及其 MATLAB 实现[J].中国西部科技,2008,7(17): 33-34
- [39] 刘书桂,李蓬,那永林.基于最小二乘原理的平面任意位置椭圆的评价[J].计量学报, 2002,23(4): 245-247
- [40] 秦勇,赵杰,王晓宇.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,(02): 489-493

攻读硕士学位期间取得的成果

- [1] 唐晓莉,杨鸿洁,苏桦,钟智勇,张怀武.一种调节巨磁电阻薄膜线性区域的方法[P].中国专利,发明专利,201610173054.7,2016.03.23



专业学位硕士学位论文

MASTER THESIS FOR PROFESSIONAL DEGREE