

分类号: \_\_\_\_\_

密级: \_\_\_\_\_

UD C : \_\_\_\_\_

编号: \_\_\_\_\_

## 专业学位硕士学位论文

# 9 轴电子罗盘设计

硕 士 研 究 生 : 李金城

指 导 教 师 : 耿 涛 教 授

校 外 导 师 : 韩 玥 高级工程师

学 科 、 专 业 : 工程硕士

哈尔滨工程大学

2023 年 6 月

分类号：\_\_\_\_\_

密级：\_\_\_\_\_

U D C : \_\_\_\_\_

编号：\_\_\_\_\_

## 专业学位硕士学位论文

# 9 轴电子罗盘设计

(☒产品研发 ☐工程规划 ☐工程设计 ☐应用研究)

硕 士 研 究 生 : 李金城

指 导 教 师 : 耿涛 教授

校 外 导 师 : 韩玥 高级工程师

专 业 类 别 : 电子信息

所 在 学 院 : 烟台研究院

论文提交日期 : 2023 年 4 月

论文答辩日期 : 2023 年 5 月

学位授予单位 : 哈尔滨工程大学

Classified Index:

U.D.C:

A Thesis for the Degree of Master of Engineering

## Design of 9-axis electronic compass

**Candidate:** Li Jincheng

**Supervisor:** Prof.Geng Tao

**Associate Supervisor:** SN ENGR.Han Yue

**Professional Category:** Electronic Information

**College:** Yantai Research Institute

**Date of Submission:** April, 2023

**Date of Oral Examination:** M a y , 2023

**University:** Harbin Engineering University

## 摘 要

电子罗盘作为姿态传感器，具有精度高、体积小、功耗低等特点，被广泛应用于导弹控制、航海、航天等军事领域，随着科技的进步，电子罗盘的成本逐渐降低，在车载导航、矿井探查等民用领域的应用不断扩大，如今无人机、平衡车、智能手机等一系列智能产品都集成了电子罗盘，电子罗盘的应用已深入人们的生活。一直以来国内电子罗盘产品的设计主要依靠进口地磁传感器、加速度传感器等芯片，不仅价格高昂，在一些高端产品上，芯片的使用也会受到限制，推进产品的国产化率是目前电子罗盘的一个趋势。传统的使用 3 轴地磁传感器和 3 轴加速度传感器设计的电子罗盘主要应用于测量静态载体的姿态，由于加速度传感器的动态性能差，使得这种 6 轴电子罗盘不适合动态载体的姿态测量。基于上述问题，本文提出设计一款应用国产 3 轴地磁传感器、3 轴加速度传感器并结合 3 轴陀螺仪传感器的 9 轴电子罗盘，并具备高精度、低成本、易携带等特点。本文的主要研究工作如下：

（1）使用地磁传感器、加速度传感器和陀螺仪传感器作为电子罗盘的数据采集模块，并加入电源模块、微控制模块和显示模块完成电子罗盘硬件电路的全部功能，使用 Cadence 软件进行电路原理和 PCB 设计，最后为了便于罗盘的安装使用，使用 Solidworks 软件为电子罗盘设计封装外壳。

（2）电子罗盘下位机软件使用 Keil uVision5 开发平台进行开发，基于旋转矩阵和四元数的方位角解算原理，并结合卡尔曼滤波和平面圆周校准的计算方法，实现了数据采集、数据滤波、地磁数据的误差补偿、方位角解算、数据输出的功能。最后设计了人机交互界面，实现了显示三个方位角数据和传感器数据的功能。

（3）使用三轴转台测试电子罗盘的精度，静态测量结果显示，横滚角的测量误差小于  $0.5^{\circ}$ ，俯仰角的测量误差小于  $0.6^{\circ}$ ，航向角的测量误差小于  $0.7^{\circ}$ 。动态测量结果显示，三个方位角的测量误差均小于  $0.8^{\circ}$ ，得出电子罗盘精度满足设计需求。将电子罗盘固定，根据输出方位角的抖动幅度衡量电子罗盘的输出稳定性，根据电子罗盘在 60 秒内方位角抖动范围小于  $0.05^{\circ}$  得出电子罗盘具有良好的输出稳定性。使用高低温箱为电子罗盘提供不同的环境温度，对电子罗盘进行精度测试，得出在  $-20^{\circ}\text{C}$  到  $40^{\circ}\text{C}$  的温度环境下，电子罗盘可以实现测量误差在  $1^{\circ}$  以内。

**关键词：**电子罗盘；姿态测量；磁阻传感器；加速度传感器；陀螺仪传感器

## ABSTRACT

As a posture sensor, electronic compass has the characteristics of high accuracy, small volume, and low power consumption. It is widely used in military fields such as missile control, navigation, aerospace, and other military fields. With the advancement of science and technology, the cost of electronic compass has gradually decreased, and the application of civilian fields in automotive navigation and mining exploration has continued to expand. Today, a series of smart products such as unmanned aerial vehicles, balance cars, and smartphones have integrated electronic compass, and the application of electronic compass has penetrated into people's lives. The design of domestic electronic compass products has always relied mainly on imported geomagnetic sensors, acceleration sensors, and other chips. Not only is the price high, but also the use of chips will be limited in some high-end products. Promoting the localization rate of electronic compass products is a current trend. The traditional electronic compass designed using 3-axis geomagnetic sensors and 3-axis acceleration sensors is mainly used to measure the attitude of static carriers. Due to the poor dynamic performance of acceleration sensors, this 6-axis electronic compass is not suitable for the attitude measurement of dynamic carriers. Based on the above issues, this paper proposes to design a 9-axis electronic compass using a domestic 3-axis geomagnetic sensor, a 3-axis acceleration sensor, and a 3-axis gyroscope sensor, which is characterized by high accuracy, low cost, and portability. The design of domestic electronic compass products has always rely on imported geomagnetic sensors, acceleration sensors and other chips. Not only is the price high, but the use of chips will also be limited in some high -end products. Promoting the domestic rate of electronic compass products is currently a trend of the current trend. The electronic compass designed by the traditional 3 -axis graphic sensor and the 3 -axis acceleration sensor is mainly used in the posture of measured the static carrier. Due to the poor dynamic performance of the acceleration sensor, this 6 -axis electronic compass is not suitable for the gesture measurement of the dynamic carrier. Based on the above problems, this paper proposes a 9 -axis electronic compass that applies a domestic 3 -axis magnetic sensor, a 3 -axis acceleration sensor and combined with the 3 -axis gyroscope sensor, and has the characteristics of high accuracy, low cost, and easy carrying. The main research work of this article is as follows:

(1) Use the magnetic sensor, acceleration sensor and gyroscope sensor as the data collection module of the electronic compass, and add the power module, microcontroller module and display module to complete the entire function of the electronic compass hardware circuit. Use Cadence software for circuit principles and PCB design, and finally, in order to facilitate the installation and use of the compass, use Solidworks software to design a packaging shell for the electronic compass.

(2) Electronic compass lower machine software uses the Keiluvision5 development platform for development, azimuth calculation principle based on rotation matrix and quaternion and combines the calculation method of the Kalman filtering and planar circumferential calibration, implemented functions such as data acquisition, data filtering, error compensation for geomagnetic data, azimuth calculation, and data output. Finally, a human-machine interaction interface was designed to achieve the function of displaying three azimuth data and sensor data.

(3) The accuracy of the electronic compass was tested using a three-axis turntable. The static measurement results showed that the measurement error of the roll angle was less than  $0.5^{\circ}$ , the measurement error of the pitch angle was less than  $0.6^{\circ}$ , and the measurement error of the heading angle was less than  $0.7^{\circ}$ . The dynamic measurement results show that the measurement errors of the three azimuth angles are all less than  $0.8^{\circ}$ , indicating that the accuracy of the electronic compass meets the design requirements. Fix the electronic compass and measure its output stability based on the amplitude of output azimuth jitter. According to the range of azimuth jitter of the electronic compass within 60 seconds that is less than  $0.05^{\circ}$ , it is concluded that the electronic compass has good output stability. Using a high and low temperature box to provide different environmental temperatures for the electronic compass, the accuracy of the electronic compass was tested, and it was found that the electronic compass can achieve measurement errors within  $1^{\circ}\text{C}$  in temperature environments ranging from  $-20^{\circ}\text{C}$  to  $40^{\circ}\text{C}$ .

**Key words:** Electronic compass, Attitude measurement, Magnetic resistance sensor, Acceleration sensor, Gyroscope sensor

# 目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研发产品的背景及必要性 .....	1
1.2 电子罗盘的研究发展和国内外研究现状 .....	2
1.2.1 电子罗盘研发和应用的技术现状.....	2
1.2.2 国内外电子罗盘研发和应用发展趋势 .....	4
1.3 主要研究内容.....	8
第 2 章 电子罗盘设计方案与理论依据 .....	9
2.1 电子罗盘方案设计.....	9
2.2 地磁场概述与传感工作原理 .....	10
2.2.1 地磁场概述.....	10
2.2.2 各向异性磁阻传感器简介.....	11
2.2.3 加速度传感器与陀螺仪传感器简介.....	12
2.3 方位角解算原理.....	13
2.3.1 静态方位角解算原理.....	14
2.3.2 动态方位角解算原理.....	17
2.4 本章小结.....	20
第 3 章 电子罗盘硬件设计 .....	21
3.1 电路原理设计.....	21
3.1.1 电源模块设计.....	22
3.1.2 数据采集模块设计 .....	23
3.1.3 微控制模块设计 .....	25
3.1.4 显示模块设计.....	27
3.2 硬件 PCB 设计 .....	29
3.3 电子罗盘封装设计.....	30
3.4 本章小结.....	31
第 4 章 电子罗盘软件设计 .....	33
4.1 软件架构设计.....	33
4.2 子系统设计.....	34
4.2.1 初始化配置.....	35
4.2.2 数据采集.....	36
4.2.3 数据滤波.....	37
4.2.4 空间校准 .....	40
4.2.5 地磁数据校准.....	41
4.2.6 方位角解算.....	44

4.2.7 串口输出 .....	44
4.3 本章小结 .....	45
第 5 章 电子罗盘性能研究 .....	47
5.1 电子罗盘精度研究 .....	47
5.1.1 电子罗盘静态精度研究 .....	47
5.1.2 电子罗盘动态精度研究 .....	51
5.2 电子罗盘稳定性研究 .....	52
5.3 电子罗盘温度性能研究 .....	53
5.4 本章小结 .....	54
结论 .....	55
参考文献 .....	57



## 第1章 绪论

### 1.1 研发产品的背景及必要性

姿态测量一直以来都是各国研究的重点，用于姿态测量的电子罗盘在军事领域、民用领域都有重要的应用。军事领域上，电子罗盘可以为无人机、无人船提供载体的实时姿态信息，利用导航技术测算距离、规避障碍；电子罗盘应用到水下机器人上，可以在探索未知海域或环境恶劣的水下环境时为机器人提供准确的姿态信息，及时调整机器人姿态，预防事故；电子罗盘在导弹发射、导弹控制领域也有重要的应用，曾有西方国家预测，精确制导会成为未来战争中的重要因素<sup>[1,2]</sup>。

在民用生活领域，姿态测量也有着重要的应用，如车载导航、矿井探查、水上搜救、情报搜集等<sup>[3]</sup>，汽车在一些陌生的路段或陌生的城市行驶时，可以使用电子罗盘帮助导航；在一些探矿工作、水上救援、森林搜救的工作中，电子罗盘都能发挥作用，特别是在没有卫星信号或卫星信号不稳定的时候，可以作为卫星定位的辅助工具<sup>[4]</sup>。在科技快速发展的今天，随着微机电系统和集成电路技术的发展，用于姿态测量的电子罗盘向着微小型发展，智能手机、手表、夜视仪等小型智能设备中都集成了电子罗盘，特别是无人机、平衡车、机器人等产品出现后，电子罗盘有了更广阔的使用领域，如图 1.1 所示的电子罗盘的应用示例，可见，电子罗盘的应用已深入人们的生活。



图 1.1 电子罗盘应用示例

传统电子罗盘在设计上使用的是 3 轴加速度传感器和 3 轴地磁传感器的组合，通过加速度传感器采集的数据计算俯仰角和横滚角信息，通过地磁传感器采集的数据计算航向角信息。由于加速度传感器具有较好的静态性能，这种 6 轴电子罗盘主要应用在静态载体或动态较少的载体上，如智能手机、夜视仪等设备，但随着无人机、平衡车这些处于持续运动状态的载体出现后，对电子罗盘有了更高的要求，为了弥补加速度传

传感器在运动状态时测量存在偏差、方位角输出实时性较差的问题，使用3轴陀螺仪传感器作为电子罗盘的补充，实现电子罗盘测量动态载体的姿态信息<sup>[5,6]</sup>。

随着新材料、新原理、新工艺的出现，用于测量姿态信息的电子罗盘向着低成本、小型化、低功耗、高精度等方向发展。地磁传感器的研发先后经历了基于霍尔效应的磁场检测、基于磁通门法的磁场检测、基于磁电阻效应的磁场检测的发展过程，如今磁阻效应的传感器以其体积小易携带，不受温度影响等优势被广泛应用于罗盘定位等领域。然而地磁传感器一直以来都存在易受环境干扰的缺陷，为实现方位角的精确解算，需要对地磁传感器数据进行误差补偿，提出在9轴电子罗盘的设计中使用平面圆周校准的误差补偿方法实现对地磁传感器数据补偿<sup>[7,8]</sup>。

由于国内集成电路、半导体等领域的发展要晚于国外，国外电子罗盘的研制要比国内成熟很多，过去很长一段时间国内的电子罗盘都需要使用进口产品或依靠国外进口传感器芯片进行设计，如今传感器成为国家数字化竞争力的重要产品之一，各领域数字化转型的进程与传感器的发展息息相关，为了避免产品在生产制造过程中由于进口芯片而受到影响，电子罗盘的设计趋于国产化已成为必然，必须承认，我国的传感器在创新能力、市场供给能力方面依旧存在缺陷，尤其在中高端市场，短期内难以得到根本转变，但近几年国内半导体行业的快速发展，在国内高校和科技企业的共同努力下，传感器研发具有一定的进展，尤其是地磁传感器、惯性测量模块的发展，使电子罗盘的国产化成为可能。

根据以上背景，在课题的设计中，电子罗盘的核心器件使用国产加速度传感器、地磁传感器和陀螺仪传感器进行设计，从民用角度出发，实现电子罗盘测量误差在 $1^\circ$ 以内的精度测量，同时具有良好稳定性和温度性能。

## 1.2 电子罗盘的研究发展和国内外研究现状

### 1.2.1 电子罗盘研发和应用的技术现状

电子罗盘实现姿态测量依靠地磁传感器和惯性测量模块，这两种传感器的研发进展决定电子罗盘的各项性能。电子罗盘的关键元器件之一是地磁传感器，地磁传感器一直以来在军事、交通、医疗等领域都有广泛的应用，发展十分迅速，地磁传感器本质是感受环境的地磁信息，将地磁信号转化并输出成易接收的信号，根据测量原理可以将主要分为磁通门传感器<sup>[9]</sup>、霍尔传感器<sup>[10]</sup>和磁阻传感器<sup>[11]</sup>。根据地磁传感器的研究，几种常见地磁传感器原理与应用如表 1.1 所示。

表 1.1 常见地磁传感器原理与应用

传感器类型	磁通门传感器	霍尔传感器	各向异性磁阻传感器	巨磁磁阻传感器	隧道磁阻传感器
原理	电磁感应定律	霍尔效应	各向异性磁阻效应	金属多层膜	磁性隧道结
常见应用	磁通门高斯计	磁场测量、电流传感器	罗盘定位、车辆检测	高密度磁读头	磁性随机存取内存

使用法拉第电磁感应定律制成的磁通门传感器具有分辨率高、测量磁场范围宽、可靠等优点，但是由于传感器体积相对较大、电路复杂等缺陷限制了磁通门传感器的应用，目前这类传感器主要应用在军事、工业等精度要求较高的领域。

霍尔效应原理出现的时间较早，但直到半导体的快速发展，霍尔效应在传感器上才有了实际的应用，目前霍尔传感器的技术相对成熟，有着结构简单、易携带、寿命长等优点，但是由于霍尔传感器温度误差高，对环境的温度变化敏感，不适合在户外使用，因此难以应用于电子罗盘的设计。

磁阻传感器的原理是利用特定的材料和结构制成磁阻，利用磁阻通过惠通斯电桥的电路结构实现测量环境磁场的目的，根据磁阻制造原理的不同可以将磁阻传感器主要分为各向异性磁阻传感器、巨磁磁阻传感器、隧道磁阻传感器三类。

其中利用金属多层膜结构的巨磁磁阻传感器和利用磁性隧道结制成的隧道磁阻传感器在多项性能上都优于各向异性磁阻传感器，但是由于材料昂贵、结构复杂，制作工艺相对困难等原因，导致两种磁阻传感器制作成本高难以实现量产。目前应用于电子罗盘设计的地磁传感器以各向异性磁阻传感器为主。

电子罗盘的另一关键器件是惯性测量模块，包含加速度传感器和陀螺仪传感器。惯性测量技术的发展与数百年的物理、数学、机械等理论的发展密切相关，惯性测量技术以牛顿的经典力学、万有引力作为依据。加速度传感器在汽车、航天、导弹等领域都有重要的应用，加速度传感器的新原理、新结构一直以来都是各国研究重点。在微机电系统的发展下，MEMS 加速度传感器具有低功耗、小型化、低成本、能够批量生产等优点，如今加速度传感器的种类多种多样，根据原理可以分为热式加速度传感器、电容式加速度传感器等<sup>[12]</sup>。

欧拉提出的刚体转动理论为陀螺仪提供了理论支撑，目前陀螺仪在航空航天、煤矿、地铁等多个领域都有应用，与国外相比，我国在陀螺仪的研究晚了半个多世纪，最早以美国为首的一些科技强国开始了陀螺仪的研究，并应用到航天领域，经过多年的发展，陀螺仪实现了从单自由度到三自由度的发展，也出现了光纤陀螺仪、激光陀

螺仪等多种类型，其中近几年最受关注的是微机电陀螺仪，其具有体积小、价格低、重量轻、能批量生产等优势，广泛应用于惯性导航、姿态感知、平台稳定、状态检测等消费电子领域，随着性能的提高，MEMS 陀螺仪逐渐应用于航空航天等军事领域<sup>[13]</sup>。

### 1.2.2 国内外电子罗盘研发和应用发展趋势

电子罗盘的性能主要取决于相关传感器的技术水平，目前美国、德国、日本的传感器在发展规模和技术水平上处于全球领先水平，早期地磁传感器的研究和生产都来源于国外，其中美国的KVH公司、Honeywell公司和PNI公司最早进入磁传感器领域，随后日本、瑞士等国家也开始进入磁传感器领域的研究。其中KVH公司生产的电子罗盘主要应用于军事领域，其生产的C100型号罗盘曾称为精度最高的电子罗盘<sup>[14]</sup>。PNI生产电子罗盘主要应用于汽车导航等领域，TCM系列是其具有代表的产品，PNI公司还生产了磁场测量专用驱动芯片用来配合地磁传感器进行磁场测量<sup>[15]</sup>。

Honeywell公司开启了单片集成磁传感器的研究，先后完成了磁阻传感器从单分量到三分量的研究，Honeywell公司生产的地磁传感器在精度、灵敏度都处于领先地位，早期Honeywell的地磁传感器有HMC1021、HMC1022等产品，芯片内部的磁耦合带技术是Honeywell公司的专利技术，使用惠通斯电桥的电路结构进行地磁场测量。

如今，Honeywell公司HMC5883L型号的各向异性磁阻传感器，其实物图如图1.2所示，是一块贴片型芯片模块，应用了霍尼韦尔公司最新的专利技术，与老一代磁阻传感器相比，芯片内部具有放大器、数据校准、模数转换等功能，是如今国内最常使用的进口地磁传感器芯片，在很多电子罗盘的设计中可以见到<sup>[16]</sup>。



图 1.2 Honeywell 公司 HMC5883L 型号 3 轴地磁传感器

Honeywell公司同时专注于航空航天领域的电子罗盘产品研究，如图1.3为该公司生产的电子罗盘产品模块，型号分别为HMR3300和HMR3500。其中HMR3300是使用

了3轴加速度计与3轴地磁传感器组成的6轴电子罗盘，HMR3500在HMR3300的基础上内置了地磁场模型并使用磁场校准算法，可以实现航向、俯仰和滚转角测量误差在 $1^\circ$ 以内的高精度测量<sup>[17,18]</sup>。

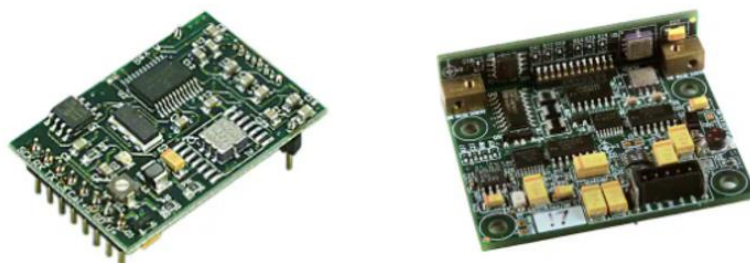


图 1.3 Honeywell 公司电子罗盘模块实物图

电子罗盘设计中使用的另一核心器件是惯性测量模块，最早研制、生产惯性测量模块的公司也都是国外的公司，主要有瑞士的意法半导体公司、美国的霍尼韦尔公司、和 InvenSense 等。其中 InvenSense 公司生产的 MPU-6000(6050)型号芯片，首次将3轴加速度传感器和3轴陀螺仪传感器相结合，如图1.4所示，其广泛应用于智能手机、手持游戏产品、可携式导航设备等消费电子领域。目前依旧是应用最广泛惯性测量模块之一<sup>[19]</sup>。

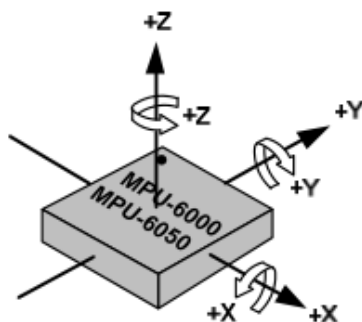


图 1.4 InvenSense 公司 MPU-6000(6050)型号 6 轴惯性测量单元

瑞士的意法半导体公司生产了如图1.5所示的 LSM303DLHC 型号芯片，同时集成了3轴加速度传感器和3轴地磁传感器，解决了两个传感器独立使用时测量轴可能不正交的问题，传感器内部采用霍尼韦尔公司的各向异性磁阻技术，加入模数转换单元、置位复位电路等实现地磁场、加速度数据的精准采集，传统的6轴电子罗盘的设计常会使用到 LSM303DLHC 传感器芯片<sup>[20]</sup>。

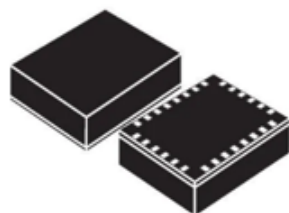


图 1.5 意法半导体公司 LSM303DLHC 型号地磁模块

国内在传感器领域的研究落后于国外，但在科技竞争激烈的今天，中国开始重视集成电路方向的研究，在传感器领域有了快速的发展。在传感器研究上，国内高校和研究所做出了重大贡献，如清华大学精密仪器系、北京信息科技大学等在惯性传感器取得了重要成果，杭州电子科技大学材料与环境工程学院主要研究磁性传感器、磁性逻辑器件等方向，在姿态测量、惯性导航等方向取得了重要成果。

国内很多半导体公司也发展迅速，无锡的美新半导体公司专注于 6 轴惯性测量单元、地磁传感器等产品的研制，目前技术水平在国内处于领先地位。应用市场聚焦智能手机、智能穿戴、物联网、汽车电子等多种领域。如图 1.6 是美新具有代表性的几种 3 轴地磁传感器芯片，型号依次为 MMC5633NJL、MMC5603NJ、MMC3630KJ 和 MMC5983MA。

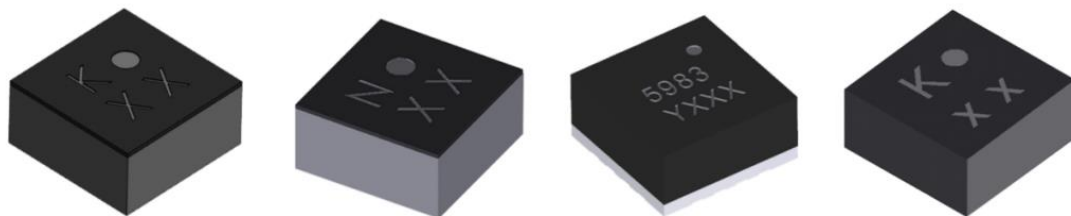


图 1.6 美新 3 轴地磁传感器芯片

如图 1.7 为美新 6 轴惯性传感器 MIC62100AL，集成了 3 轴加速度传感器和 3 轴陀螺仪，支持体感互动系统，感应灵敏。



图 1.7 美新 6 轴惯性传感器芯片



上海矽睿科技股份有限公司专注于高质量传感器产品的设计、制造。主要产品为 6 轴惯性测量单元、加速度传感器、磁性传感器芯片等产品，广泛应用于智能制造，通信导航等多种领域。如图 1.8 为矽睿公司生产的 QMC5883L 型号 3 轴地磁传感器芯片，这款传感器采用第三代各向异性磁阻技术。

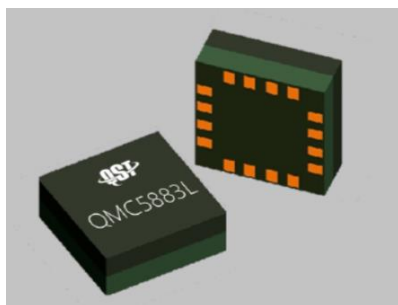


图 1.8 矽睿 QMC5883L 型号 3 轴磁传感器芯片

QMC5883L 在功能上具备高精度、低功耗、高可靠性等特点，可以实现引脚对引脚的形式替代霍尼韦尔公司生产的 HMC5883L 型号芯片。表 1.2 为两块 3 轴地磁传感器芯片参数对比。

表 1.2 国内外 3 轴地磁传感器参数对比表

传感器名称	量程(gauss)	封装尺寸(mm <sup>3</sup> )	工作温度(°C)
HMC5883L	$\pm 0.88 \sim \pm 8.1$	$3 \times 3 \times 0.9$	$-30^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$
QMC5883L	$\pm 2, \pm 8$	$3 \times 3 \times 0.9$	$-40^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$

矽睿公司生产的 6 轴惯性测量单元曾获“中国半导体创新产品和技术”等殊荣，集成了惯性传感器数据预处理引擎，可到达国际主流品牌同等性能与可靠性，在 2022 年，其生产的 6 轴惯性测量单元 QMI8658 系列获得“中国芯”技术创新产品奖，如图 1.9 为矽睿 6 轴惯性测量传感器 QMI8658C 的实物图。表 1.3 为 QMI8658C 芯片与 MPU6050 芯片参数对比。

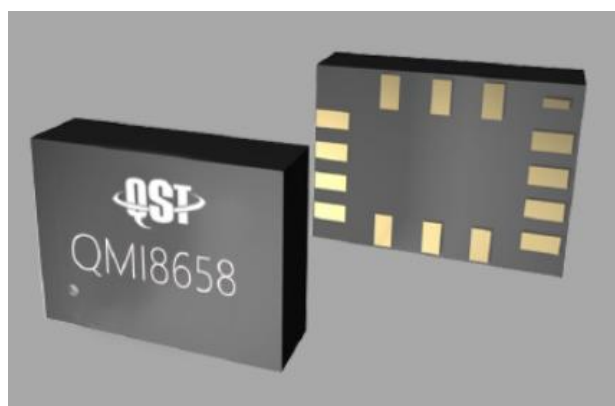


图 1.9 矽睿 QMI8658C 型号 6 轴惯性测量传感器芯片

表 1.3 国内外 6 轴惯性测量传感器参数对比表

传感器名称	加速度计量程(g)	陀螺仪量程( $^{\circ}$ /s)	封装尺寸(mm <sup>3</sup> )	工作温度( $^{\circ}$ C)
MPU6050	$\pm 2$ 、 $\pm 4$ 、 $\pm 8$ 、 $\pm 16$	$\pm 250$ 、 $\pm 500$ 、 $\pm 1000$ 、 $\pm 2000$	$4 \times 4 \times 0.9$	$-40^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$
QMI8658C	$\pm 2$ 、 $\pm 4$ 、 $\pm 8$ 、 $\pm 16$	$\pm 16 \sim \pm 2048$	$2.5 \times 3 \times 0.86$	$-40^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$

课题中电子罗盘的设计选用矽睿科技的 3 轴地磁传感器 QMC5883L 和 6 轴惯性测量单元 QMI8658C，使用国产传感器不仅意味着更低成本，本身也具有重要的意义。

### 1.3 主要研究内容

课题使用国产的 3 轴地磁传感器和 6 轴惯性测量传感器，结合电子罗盘相关的理论，设计一款满足民用精度要求，具有良好稳定性和温度性能的电子罗盘。

论文的结构和章节主要内容如下：

第 1 章绪论。提出课题的研究背景，分别分析电子罗盘两个核心器件地磁传感器和惯性测量传感器的发展历史、国内外发展现状，根据研究背景提出电子罗盘模组设计的意义和目标。

第 2 章为电子罗盘的设计方案和理论依据。首先提出电子罗盘的设计思路，介绍了电子罗盘的相关原理，推导了旋转矩阵和四元数两种方位角解算原理，为电子罗盘的方位角解算提供了理论基础。

第 3 章为电子罗盘的硬件设计，包括硬件电路设计、PCB 设计和罗盘封装外壳设计。硬件电路设计中提出电子罗盘的硬件模块功能图，对每个模块进行元器件选型和电路设计，并进行相关说明。PCB 根据电路原理进行设计。最后针对罗盘电路板尺寸进行封装外壳设计。

第 4 章为电子罗盘的软件设计，包括下位机软件 and 上位机界面两个部分。下位机程序实现数据采集、数据滤波、误差补偿、方位角解算等功能。上位机实现显示方位角和传感器数据的功能。

第 5 章为电子罗盘的实验结果分析，包括精度测试、稳定性测试和温度测试三个部分。



## 第2章 电子罗盘设计方案与理论依据

### 2.1 电子罗盘方案设计

电子罗盘的设计思路如图 2.1 所示,由理论、硬件设计、软件设计和性能测试四个部分组成电子罗盘的设计方案。

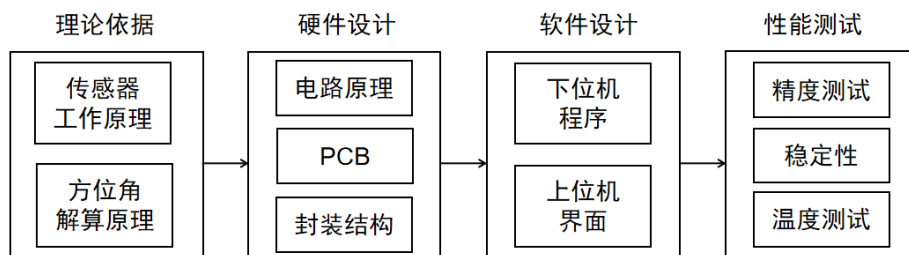


图 2.1 电子罗盘设计思路模型图

电子罗盘的理论依据主要包括传感器的工作原理和方位角解算原理两部分,通过电子罗盘的技术现状了解到设计电子罗盘所使用的核心器件为 3 轴加速度传感器、3 轴地磁传感器和 3 轴陀螺仪传感器,所以需要对三个传感器有一定了解,为实现测量静态和动态的方位角,需要清楚两种情况下的方位角解算的计算方法。

硬件设计方案包括电子罗盘的电路原理、PCB 设计和封装外壳设计。根据电子罗盘设计所使用的核心器件,为实现方位角解算功能,还需要搭配相关元器件,包括电源转换芯片、微控制单元芯片等,将电路按照功能进行模块划分,对每个模块进行元器件选型和电路设计。根据电路原理图并遵循 PCB 设计流程和注意事项进行 PCB 设计。为了便于电子罗盘的使用和安装,并提供一定防护作用,为电子罗盘设计封装外壳,封装选取合适的材料,根据电路板实际尺寸进行设计。

软件设计包括上位机和下位机两部分,为实现方位角解算功能,下位机程序应包含数据采集、数据滤波、数据补偿、方位角解算、数据输出等功能,上位机负责将解算的方位角数据和采集的传感器数据进行显示。

最后需要对电子罗盘进行性能测试,包括精度测试、稳定性测试和温度测试。精度测试中分别测试电子罗盘在静态和动态下方位角的输出精度,衡量电子罗盘是否满足精度需求。稳定性测试为测试电子罗盘输出数据的抖动幅度,以此判断电子罗盘的输出稳定性能。温度测试为测试电子罗盘在不同温度下的输出精度,衡量电子罗盘受温度干扰的情况,以此判断设计的电子罗盘能否满足民用温度需求。

## 2.2 地磁场概述与传感工作原理

### 2.2.1 地磁场概述

地磁场指地球存在的磁性现象，地磁场示意图如图 2.2 所示，地磁场可以看作是磁偶极，一极在地理北极附近，一极在地理南极附近，磁轴与地球自转轴有约为  $11.5^\circ$  的夹角。数百万年以来，地磁场的磁极曾发生过多次翻转，自六十多万年前至今，地磁场一直维持着地磁南极在地理北极附近，地磁北极在地理南极附近，这也称为正向期。

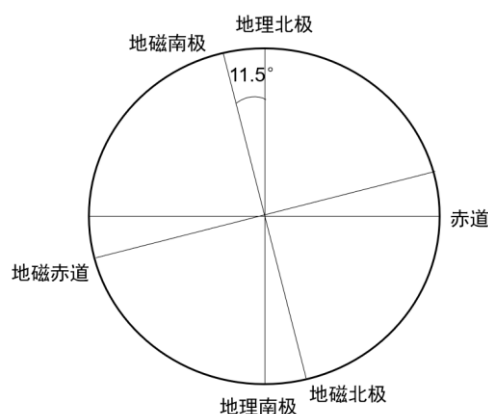


图 2.2 地磁场示意图

地磁场中来自于地球内部的、占据地磁场的主要部分的磁场称为基本磁场，一直以来利用地磁场进行罗盘定位都是依据地磁场中的基本磁场。另一部分源于固体地球外部，包括地球表面具有磁性的岩石产生的磁场等各种可能在短期变化的磁场，将其统称为变化磁场，有平静变化磁场和干扰变化磁场两种类型区分，由于变化磁场比较微弱，在地磁场测量中常常可以忽略，于是测量地磁场时可以直接将地磁场看作稳定场。地磁场的强度大约 0.5 高斯左右，属于弱磁场。地磁场在空间中具有方向，针对某一地点的地磁场可以进行分解，地磁场空间分解如图 2.3 所示<sup>[21]</sup>。

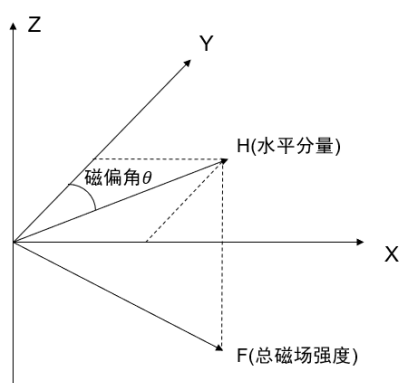


图 2.3 地磁场分解图

地磁场可以分解为水平分量和垂直分量，水平分量可以分解为指向地磁北极的分量和指向东的分量，其中将水平方向指向东方向的分量设置为 X 轴，北方向的分量设置为 Y 轴，垂直方向的分量设置为 Z 轴。地磁传感器 3 个轴采集的数据分别与地磁场分解图中的三个分量相互对应。求解分布示意图中磁偏角的过程就是求解航向角的过程，如式 (2-1)。其中  $H$  为地磁场在水平方向的分量， $H_x$  为地磁场水平分量在 X 轴的投影， $H_y$  为地磁场水平分量在 Y 轴的投影<sup>[22]</sup>。

$$\theta = \arctan \left( \frac{H_x}{H_y} \right) \quad (2-1)$$

### 2.2.2 各向异性磁阻传感器简介

制造各向异性磁阻的原材料是坡莫合金，这种合金利用一种半导体工艺制成，具有晶体结构，能灵敏感知外界磁场变化，并按照规律进行输出<sup>[23,24]</sup>。感受到外界磁场发生变化时，磁阻阻值随之变化，磁阻阻值的变化与磁阻受电流方向和受磁场方向的夹角有关，当夹角为  $90^\circ$  时，磁阻阻值最小，当电流方向和磁场方向平行时，磁阻阻值达到最大，当夹角为  $\theta$  时，各向异性磁阻的阻值如式 (2-2) 所示。

$$R = R_{\min} + (R_{\max} - R_{\min}) \cos^2 \theta \quad (2-2)$$

磁阻内部电路使用惠斯通电桥的电路结构，可以精确测量阻值的变化，惠斯通电桥电路如图 2.4 所示，为了避免其他因素对电路产生干扰，电路中四个电阻使用相同的磁阻元件，磁阻的内部制成磁化轴方向与电流流向成  $45^\circ$  夹角，经实验验证，所受电流方向和受磁场方向的夹角为  $45^\circ$  时，惠斯通桥式电路的输出电压与外加磁场成线性关系。

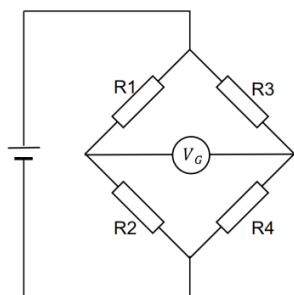


图 2.4 惠斯通电桥电路结构示意图

在没有外加磁场的情况下，电桥处于平衡状态，输出电压两端的压降相同，当外界磁场变化时，处于相同位置的磁阻变化相同，即  $R1$ 、 $R4$  具有相同的磁化现象， $R2$ 、 $R3$  具有相同的磁化现象，此时电桥不再平衡， $R1$ 、 $R4$  的电流方向与磁化方向的夹角增大，电阻减小为  $\Delta R$ ； $R2$ 、 $R3$  的电流方向与磁化方向的夹角减小，电阻增大为  $\Delta R$ 。

电桥的输出电压可以有如式（2-3）的表示，其中 $V_b$ 表示电桥的工作电压， $R$ 是磁阻的阻值，磁阻的相对变化与磁场强度成正比。

$$U = V_b \times \frac{\Delta R}{R} \quad (2-3)$$

### 2.2.3 加速度传感器与陀螺仪传感器简介

使用的6轴惯性测量单元内部集成了3轴加速度传感器和3轴陀螺仪传感器。其中微机电加速度传感器是一种基于微机电技术制造的小型传感器，用于测量物体的加速度或震动。其原理基于牛顿第二定律，通过测量物体的加速度来计算物体所受力的的大小。微机电加速度传感器内部结构一般如图2.5所示，通常由微小的质量块、弹簧和电极组成，当物体加速度发生变化时，质量块会受到作用力，并产生相应的位移。位移被转换成电信号，并通过电路处理和放大，最终输出表示加速度大小的数字信号<sup>[25]</sup>。

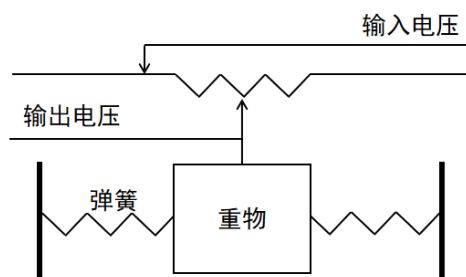


图 2.5 加速度传感器原理图

传统的陀螺仪常采用机械式的结构，如图2.6所示，由旋转轴、平衡环和旋转轮组成。当陀螺仪受到外部力的作用时，旋转轮便会发生转动和震荡，通过测量旋转轮的转动和震荡角度，就可以得到外部作用力矩的信息。传统陀螺仪对材料和制造工艺的要求很高，成本较高，而且尺寸较大，应用范围受到限制。

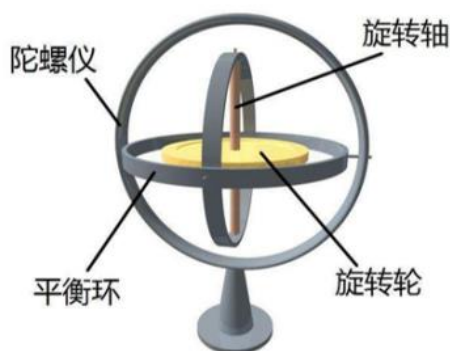


图 2.6 陀螺仪结构图

传统陀螺仪的可旋转结构并不适合微机电陀螺仪传感器，微机电陀螺仪使用的是科里奥利力来实现转动。科里奥利力是指物体在径向运动时所受到的切向力，因此必须设计成使物体能够做径向运动的结构。如果没有径向运动，科里奥利力便不会产生。微机电陀螺仪传感器的结构一般如图 2.7 所示，内部设有两个电容板，通过加入振荡电压使物体做径向运动，并通过电容变化测量由于科里奥利力引起的电容变化。由于科里奥利力与角速度成正比，通过测量电容变化就能得到角速度信息。利用振动物体传感角速度的概念，微机电陀螺仪传感器在不需设置旋转结构的情况下，可以实现传感器的批量生产，并降低生产成本。

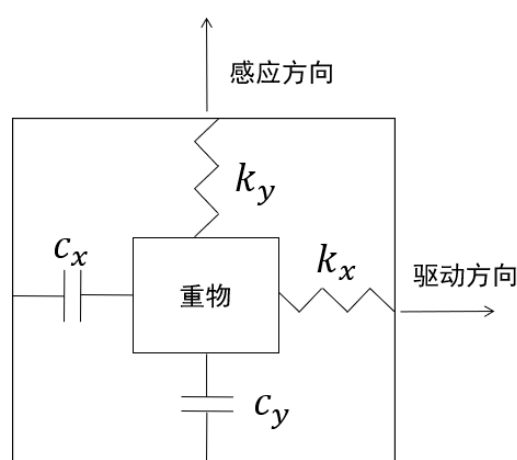


图 2.7 MEMS 陀螺仪结构图

## 2.3 方位角解算原理

坐标系变换是指物体在不同的坐标系之间进行相互转换的过程，通常用于研究物体在不同坐标系下的运动状态和位置。坐标系变换过程中，需要将一个坐标系下的点的坐标通过一定的数学方法转换成另一个坐标系下的坐标<sup>[26,27]</sup>。

变换前后的坐标系根据右手定则来规定坐标轴的正方向和旋转方向的正方向，将变换前后的坐标系分别命名为地理坐标系与载体坐标系，方位角描述的姿态信息是载体从地理坐标系到载体坐标系相对位置关系，方位角计算的前提是物体初始位置的载体坐标系与地理坐标系三个轴完全重合。

地理坐标系的坐标轴根据地理位置来规定，三个轴分别对应地理北、地理东和垂直地面的方向，并构成右手坐标系。载体坐标系的坐标轴是根据载体的运动方向和运动姿态来规定的。通常情况下，载体坐标系的三个坐标轴分别为 X 轴、Y 轴和 Z 轴，

以飞机为例，假设飞机以前进方向为  $Y$  轴，围绕  $Y$  轴旋转的角度称为横滚角，规定右翼向下左翼向上的运动为正方向，右翼向上左翼向下的运动为负方向，取值为  $-180^\circ$  到  $180^\circ$ ；以右翼为  $X$  轴，围绕  $X$  轴的旋转称为俯仰运动，向上运动为仰，向下运动为俯，取值从  $-90^\circ$  到  $90^\circ$ ；以天顶方向为  $Z$  轴，围绕  $Z$  轴旋转的角度称为航向角，顺时针运动为正方向，取值从  $0^\circ$  到  $360^\circ$ 。

载体坐标系反映了载体的实时姿态，地理坐标系作为载体坐标系的实时参考。姿态解算实质上就是载体坐标系到地理坐标系之间的转换关系，通过已知的初始姿态，求解未知的实时姿态。欧拉角用来描述刚体旋转，提出地理坐标系绕固定旋转轴进行三次基本旋转可以变换到载体坐标系，旋转的角度便称为欧拉角，所以求解载体俯仰、横滚、航向三个方位角的过程就是求解欧拉角的过程。

由于线性变换不满足乘法交换律，旋转矩阵与三次基本旋转的顺序相关，不同的旋转顺序会得到不同的旋转矩阵。三次旋转要求每一次旋转的旋转轴要不同于上一次旋转的旋转轴，根据旋转次序的顺序的不同共有 12 种情况，其中有 6 种旋转只使用到了两个转轴，称为经典欧拉角。有 6 种旋转使用到了三个转轴，称为泰特布莱恩角，为了便于理解，同时可以与俯仰、偏航、横滚三个运动过程相互对应，解算过程常使用泰特布莱恩角<sup>[28,29]</sup>。

### 2.3.1 静态方位角解算原理

前文提出用方位角来描述载体的姿态变换<sup>[30-35]</sup>，可以有坐标系旋转载体静止和载体旋转坐标系静止两种理解方式，当看作是坐标系旋转时，有如图 2.8 所示的二维坐标变换示意图。

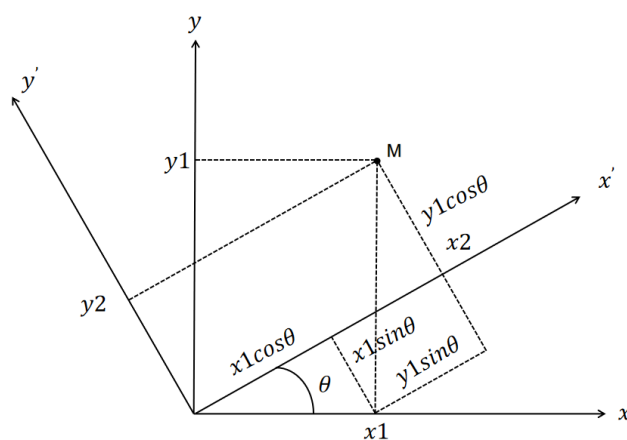


图 2.8 二维坐标系下的坐标变换示意图

二维平面下进行坐标变换，点  $M$  在两个坐标系下的坐标分别为  $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ ，新坐标系为起始坐标系逆时针旋转  $\theta$  获得的，则两点的坐标存在关系如下关系：

$$x_2 = x_1 \cos \theta + y_1 \sin \theta \quad (2-4)$$

$$y_2 = y_1 \cos \theta - x_1 \sin \theta \quad (2-5)$$

用矩阵表示如式 (2-6)，说明物体在初始坐标系下的坐标，经过旋转矩阵的变换可以得到新的坐标系下的坐标。

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} \quad (2-6)$$

将矩阵  $\begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$  称为旋转矩阵。同理，当看作是物体旋转，坐标系静止时，

则可以看作物体顺时针旋转  $\theta$ ，此时旋转矩阵为  $\begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$ 。

将旋转矩阵从二维平面坐标系扩展到三维空间坐标系，那么载体绕  $X$  轴旋转，俯仰角  $\alpha$  的旋转矩阵为  $\mathbf{RX}$ ，载体绕  $Y$  轴旋转，横滚角  $\beta$  的旋转矩阵为  $\mathbf{RY}$ ，载体绕  $Z$  轴旋转，航向角  $\theta$  的旋转矩阵为  $\mathbf{RZ}$ ，三个旋转矩阵表示如下：

$$\mathbf{RX} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (2-7)$$

$$\mathbf{RY} = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \quad (2-8)$$

$$\mathbf{RZ} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2-9)$$

当选用  $Z$ - $X$ - $Y$  的旋转顺序时，计算得旋转矩阵如式 (2-10) 所示。

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \beta \cos \theta + \sin \alpha \sin \beta \sin \theta & \sin \alpha \sin \beta \cos \theta - \cos \beta \sin \theta & \cos \alpha \sin \beta \\ \cos \alpha \sin \theta & \cos \alpha \cos \theta & -\sin \alpha \\ \sin \alpha \cos \beta \sin \theta - \sin \beta \cos \theta & \sin \beta \sin \theta + \sin \alpha \cos \beta \cos \theta & \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix} \quad (2-10)$$

通过旋转矩阵，利用加速度传感器的数据计算载体俯仰角和滚转角，其中  $g$  代表重力加速度  $A_x$ 、 $A_y$ 、 $A_z$  分别代表加速度传感器的三个轴采集的数据。

$$\begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix} = \mathbf{R} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix} \quad (2-11)$$

$$\begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -g \cos \alpha \sin \beta \\ g \sin \alpha \\ -g \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix} \quad (2-12)$$

计算横滚角  $\beta$ ：

$$\beta = \arctan \left( \frac{A_x}{A_z} \right) \quad (2-13)$$

计算俯仰角  $\alpha$ ：

$$\alpha = \arctan \left( \frac{A_y}{\left( A_x^2 + A_z^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (2-14)$$

利用旋转矩阵将地磁传感器数据投影到 X-Y 轴。其中  $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$  分别表示地磁传感器三个轴采集的数据， $M_{hx}$ 、 $M_{hy}$ 、 $M_{hz}$  表示地磁传感器三个轴的数据先后绕 X 轴和 Y 轴的旋转顺序，在 X-Y 平面的投影数据，地磁的投影数据计算如下：

$$\begin{pmatrix} M_{hx} \\ M_{hy} \\ M_{hz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} \quad (2-15)$$

$$\begin{pmatrix} M_{hx} \\ M_{hy} \\ M_{hz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha \sin \beta \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ -\sin \beta & \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} \quad (2-16)$$

计算得到地磁数据在 X-Y 平面的分量如下：

$$M_{hx} = M_x \cos \beta + M_y \sin \alpha \sin \beta + M_z \cos \alpha \sin \beta \quad (2-17)$$

$$M_{hy} = M_y \cos \alpha - M_z \sin \alpha \quad (2-18)$$

计算航向角  $\theta$ ：

$$\theta = \arctan \left( \frac{M_x \cos \beta + M_y \sin \alpha \sin \beta + M_z \cos \alpha \sin \beta}{M_y \cos \alpha - M_z \sin \alpha} \right) \quad (2-19)$$

为了使航向角实现上文提到的  $0^\circ$  到  $360^\circ$  输出，需要将航向角计算公式进行细分。



当  $M_{hx} > 0$ ,  $M_{hy} > 0$  时:

$$\theta = \arctan\left(\frac{M_{hx}}{M_{hy}}\right) \times \frac{180}{\pi} \quad (2-20)$$

当  $M_{hy} < 0$  时:

$$\theta = 180 + \arctan\left(\frac{M_{hx}}{M_{hy}}\right) \times \frac{180}{\pi} \quad (2-21)$$

当  $M_{hx} < 0$ ,  $M_{hy} > 0$  时:

$$\theta = 360 + \arctan\left(\frac{M_{hx}}{M_{hy}}\right) \times \frac{180}{\pi} \quad (2-22)$$

当  $M_{hx} = 0$ ,  $M_{hy} > 0$  时:

$$\theta = 0 \quad (2-23)$$

当  $M_{hx} = 0$ ,  $M_{hy} < 0$  时:

$$\theta = 180 \quad (2-24)$$

当  $M_{hx} > 0$ ,  $M_{hy} = 0$  时:

$$\theta = 90 \quad (2-25)$$

当  $M_{hx} < 0$ ,  $M_{hy} = 0$  时:

$$\theta = 270 \quad (2-26)$$

根据地磁场概述可知, 地磁南北极与地理南北极之间存在大小约为  $11.5^\circ$  的夹角, 由于地磁传感器计算的偏航角是以地磁北极作为标准, 求得的偏航角与真实偏航角还存在偏差, 还需要进行夹角的补偿运算, 公式如下:

$$\theta' = \theta \pm 11.5 \quad (2-27)$$

### 2.3.2 动态方位角解算原理

在研究中发现, 加速度传感器在动态测量方面的性能较差, 不适用于动态载体的姿态测量。此外, 在使用加速度计进行方位角解算时, 应用的旋转矩阵的计算原理需要进行大量的三角计算, 这会降低单片机的运算效率, 不利于实时解算方位角。使用陀螺仪数据利用四元数的计算原理可以更准确地计算动态载体的姿态信息。

欧拉角的表示方法还存在歧义问题, 给定欧拉角可以很容易地确定旋转方向, 但在给定一个方向时很难反推得到对应的欧拉角, 因为同一个旋转方向可以用至少两种

不同的欧拉角进行表示。因此，在没有其他条件约束的情况下，无法确定哪种欧拉角表述更为准确。为了避免这种歧义，提出了一种轴角表示方法。与欧拉角的三次旋转不同，轴角表示方法是通过找到旋转轴，绕旋转轴旋转一定角度以获得目标方向。具体做法为：以坐标原点为一角，在三轴上建立一个立方体，通过该立方体的对角线即得到旋转轴，利用右手定则规定旋转方向的正方向。轴角的表示方式含有 4 个参数：其中 3 个参数表示旋转轴，1 个参数表示旋转角度。

引入四元数的概念来更方便地计算轴角表述的方向变换<sup>[36-39]</sup>。四元数的概念最早是由爱尔兰数学家汉密尔顿在 1843 年提出的。四元数由一个实部和三个虚部组成，其标准形式表示如式（2-28）所示。

$$q = q_0 + q_1i + q_2j + q_3k \quad (2-28)$$

其中  $i$ 、 $j$ 、 $k$  既是虚数单位，又是两两正交的单位向量，即存在如下关系：

$$i^2 = j^2 = k^2 = -1 \quad (2-29)$$

$$ij = k, ji = -k \quad (2-30)$$

$$jk = i, kj = -i \quad (2-31)$$

$$ki = j, ik = -j \quad (2-32)$$

四元数的几何意义如式（2-33）表示。

$$q = \cos \frac{\theta}{2} + (li + mj + nk) \sin \frac{\theta}{2} \quad (2-33)$$

利用罗德里格旋转原理得到空间中向量绕旋转轴旋转固定角度的计算公式，将旋转过程与四元数建立联系。得到旋转过程的旋转矩阵：

$$\mathbf{R} = \mathbf{I} + 2\mathbf{J}\cos \frac{\theta}{2} + 2\mathbf{K} \quad (2-34)$$

其中矩阵  $\mathbf{I}$ 、 $\mathbf{J}$ 、 $\mathbf{K}$  的表示如下：

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2-35)$$

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} 0 & -n\sin \frac{\theta}{2} & m\sin \frac{\theta}{2} \\ n\sin \frac{\theta}{2} & 0 & -l\sin \frac{\theta}{2} \\ -m\sin \frac{\theta}{2} & l\sin \frac{\theta}{2} & 0 \end{pmatrix} \quad (2-36)$$

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} -(m^2 + n^2)\sin^2 \frac{\theta}{2} & l m \sin^2 \frac{\theta}{2} & n l \sin^2 \frac{\theta}{2} \\ l m \sin^2 \frac{\theta}{2} & -(l^2 + n^2)\sin^2 \frac{\theta}{2} & m n \sin^2 \frac{\theta}{2} \\ n l \sin^2 \frac{\theta}{2} & m n \sin^2 \frac{\theta}{2} & -(m^2 + l^2)\sin^2 \frac{\theta}{2} \end{pmatrix} \quad (2-37)$$

将四元数几何意义中四个参数带入，用四元数表示旋转矩阵为：

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_3 q_2 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_3 q_2 + q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{pmatrix} \quad (2-38)$$

解得欧拉角：

$$\alpha = \arctan \frac{2(q_0 q_1 + q_2 q_3)}{1 - 2(q_1^2 + q_2^2)} \quad (2-39)$$

$$\beta = \arcsin(2(q_0 q_2 - q_1 q_3)) \quad (2-40)$$

$$\theta = \arctan \frac{2(q_0 q_3 + q_1 q_2)}{1 - 2(q_2^2 + q_3^2)} \quad (2-41)$$

载体每一时刻的姿态对应唯一的一组四元数，若要实时获取姿态信息，就需要实时更新四元数，于是需要构建四元数的关于时间的微分方程，利用一阶龙格库塔法求解微分方程。其中  $w_x$ 、 $w_y$ 、 $w_z$  分别代表载体陀螺仪的三个轴的角速度值。

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & -w_x & -w_y & -w_z \\ w_x & 0 & w_z & -w_y \\ w_y & -w_z & 0 & w_x \\ w_z & w_y & -w_x & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} \quad (2-42)$$

将矩阵记为：

$$\mathbf{R}_b = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & -w_x & -w_y & -w_z \\ w_x & 0 & w_z & -w_y \\ w_y & -w_z & 0 & w_x \\ w_z & w_y & -w_x & 0 \end{pmatrix} \quad (2-43)$$

已知微分方程为：

$$\frac{dQ}{dt} = \mathbf{R}_b Q \quad (2-44)$$

其解可以写为：

$$Q[t + \Delta t] = Q[t] + \Delta t R_b[t] Q[t] \quad (2-45)$$

将参数代入得：

$$\begin{pmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix}_{t+\Delta t} = \begin{pmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix}_t = \frac{1}{2} \Delta t \begin{pmatrix} 0 & -w_x & -w_y & -w_z \\ w_x & 0 & w_z & -w_y \\ w_y & -w_z & 0 & w_x \\ w_z & w_y & -w_x & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix}_t \quad (2-46)$$

利用上一时刻的四元数通过迭代，可以根据以下公式求解更新四元数参数：

$$q_0 = q_0 + \frac{1}{2} \Delta t (-\omega_x q_1 - \omega_y q_2 - \omega_z q_3) \quad (2-47)$$

$$q_1 = q_1 + \frac{1}{2} \Delta t (-\omega_x q_0 - \omega_y q_3 - \omega_z q_2) \quad (2-48)$$

$$q_2 = q_2 + \frac{1}{2} \Delta t (-\omega_x q_3 - \omega_y q_0 - \omega_z q_1) \quad (2-49)$$

$$q_3 = q_3 + \frac{1}{2} \Delta t (-\omega_x q_2 - \omega_y q_1 - \omega_z q_0) \quad (2-50)$$

## 2.4 本章小结

本章首先提出电子罗盘的整体设计方案，然后对电子罗盘应用的理论知识进行简要介绍，包括地磁场概述、各向异性磁阻传感器原理以及微机电加速度传感器和微机电陀螺仪传感器的相关原理。方位角解算部分，提出静态载体使用旋转矩阵的计算原理，利用3轴地磁传感器数据和3轴加速度传感器数据进行方位角计算；动态载体使用四元数的计算原理，利用3轴陀螺仪传感器数据进行方位角计算，并对两个计算原理进行推导。

## 第3章 电子罗盘硬件设计

电子罗盘的硬件设计包括电路原理设计、PCB 设计和封装外壳设计三个部分。一直以来军品的电子罗盘对精度、使用温度都有着较高的要求，导致军用电子罗盘在设计上对元器件选择有着较高的要求，成本也比较高。课题设计的电子罗盘定位在民用产品，在满足需求的前提下以降低成本为首要目标，同时为推进电子罗盘的国产化率，使用国产传感器作为电子罗盘方位角解算的核心器件，为弥补传统电子罗盘动态性能差的问题，额外使用到陀螺仪传感器，电路原理就围绕传感器芯片及微控制芯片进行设计；为实现小型化易携带的目标，对 PCB 板进行合理布局，减小尺寸，根据电路原理图进行 PCB 设计；最后为了电子罗盘的使用方便，根据尺寸进行封装外壳设计。

### 3.1 电路原理设计

电路原理图使用 Cadence 软件进行设计，根据电子罗盘的技术现状和方位角测算原理可知，为实现静态与动态的方位角解算，使用的核心器件为 3 轴地磁传感器、3 轴加速度传感器和 3 轴陀螺仪传感器，为了检测电子罗盘使用温度以及高度信息，电子罗盘的设计中还使用到温度气压传感器。为实现数据的处理、解算功能、数据传输等功能，需要使用微控制单元模块。根据传感器和微控制单元模块的供电需求需要使用到电源转换芯片。电子罗盘硬件设计模块分工如图 3.1 所示，根据功能将硬件电路分为电源模块、信号采集模块、微控制模块和显示模块四个部分。

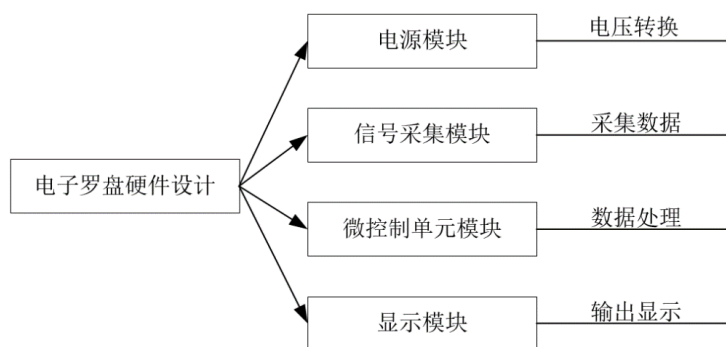


图 3.1 电子罗盘硬件设计模块图

硬件设计结构框架如图 3.2 所示，3 轴地磁传感器采集到 3 个地磁场分量数据，6 轴惯性测量单元采集到的 3 个加速度分量数据和 3 个陀螺仪分量数据，9 个数据通过 I2C 总线传递到微控制单元 STM32F103C8T6 中，单片机先对 9 个数据进行处理，再通过方

位角解算原理进行解算，最后得到俯仰、航向和横滚三个方位角信息，通过串口传递给上位机，数据在上位机进行显示。温压传感器采集的数据传递到单片机后，经过处理，直接传递到上位机进行显示。

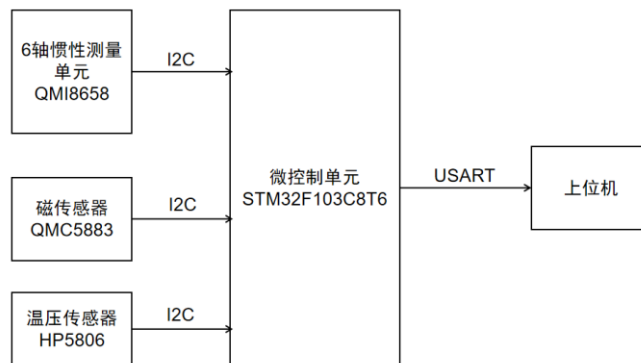


图 3.2 电子罗盘硬件结构框架

在硬件电路的设计中，除了每个模块的核心芯片需要进行选型，基础元器件的选型也很重要，电阻、电容、电感的选取除了注意阻值、容值、电感值以外，电阻还需注意误差精度和额定功率，注意额定功率防止电阻被烧毁；电容应选取击穿电压大于板子工作电压的型号以防止电容失效；电感需要注意最大工作电流，电流过大会导致电感感值下降引起电感失效。在电路设计中 USART 接口处使用了 TSD 防护二极管，这个器件在选取时需注意被保护的器件的正常工作电压要小于 ESD 保护二极管最大反向工作电压，否则二极管被击穿不会有信号输出。

### 3.1.1 电源模块设计

电子罗盘的设计中，电路供电如图 3.3 所示，使用笔记本电脑的 USB 接口提供的 5V 电压进行供电，由于电子罗盘中需要供电的芯片有 3 轴地磁传感器、6 轴惯性测量传感器、温压传感器和 STM32 单片机，均使用 3.3V 电压，所以需要进行电压转换处理。

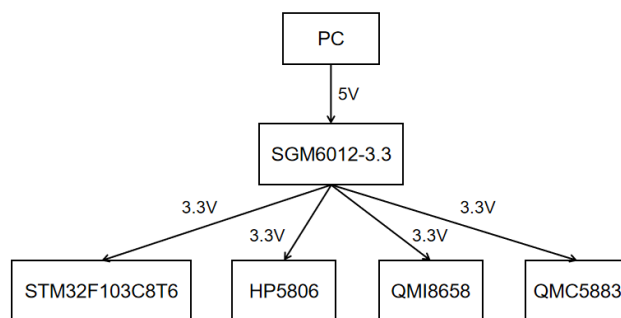


图 3.3 电子罗盘硬件电路供电

通过分析电路设计中常使用的两种电压变换芯片，DC-DC 变换器和低压降稳压器的主要差异如表 3.1 所示。电子罗盘设计中的电压变换是从 5V 到 3.3V 的小压差降压转换，两种电压变换芯片均可以满足，考虑到纹波噪声对传感器有较大的影响，为了获得输出稳定的电压，选用低压降稳压器类型的芯片。在芯片选型上，使用圣邦微公司 SGM6012 型号芯片。选取其中的 SGM6012-3.3 类型即可满足设计中电压变换需求。

表 3.1 DC-DC 变换器与低压降稳压器对比表

差异	LDO	DC-DC
输出电压	一般固定	可以调节
输入输出电压差	压差小	压差范围较大
最大输出电流	一般小于 1A	2A、3A 可以很大
纹波噪声	比较好	比较差
效率	一般低于 DC-DC	80%-90%
特点	只能降压	既可升压也能降压

电压转换的电路图如图 3.4 所示，芯片的五个引脚分别为输入 VIN、输出 VOUT、地 GND、输入使能控制 RUN 和开关节点 SW 构成，输入使能控制端与输入端连接保证芯片处于工作状态，开关节点引脚经过电感与输出端连接，输入输出端使用的接地电容用来防止信号传输噪声影响电路性能，同时防止芯片本身受到干扰。由于传感器和单片机内部电路采用分区供电的形式，因此在电压转换过程中使用了 2 块低压降稳压器，将输入系统的主电压 main power 转换成 D3.3V 和 A3.3V 作为区分。

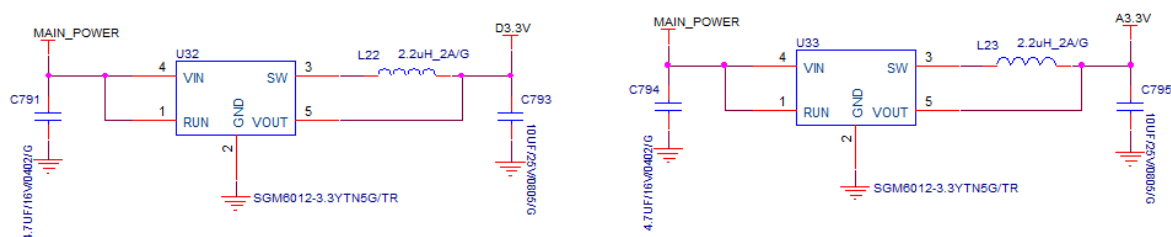


图 3.4 电子罗盘电压转换电路图

### 3.1.2 数据采集模块设计

在数据采集模块中，3 轴地磁传感器、6 轴惯性测量传感器和温压传感器的电路连接如下图所示，传感器内部电路采用分区供电模式，根据需求使用降压芯片输出的电

压为传感器芯片供电并配置大小合适的滤波电容，将三个传感器的 SDA、SCL 引脚接到单片机同一条 I2C 总线上。

根据上文介绍，3 轴地磁传感器选用国产矽睿公司 QMC5883L 型号芯片，其是以 Honeywell 公司的各向异性磁阻技术为理论依据研发的高精度磁传感器，具有低噪声、高精度、低功耗等优点。参考推荐电路接线图，选用双电源模式，接线图如图 3.5 所示。

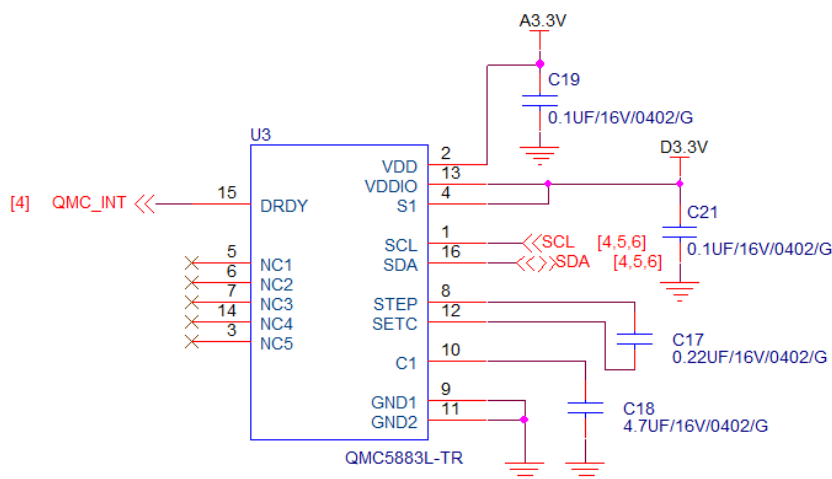


图 3.5 地磁传感器接线图

6 轴惯性测量单元选用的是国产矽睿公司 QMI8658C 型号芯片，其集成了 3 轴加速度传感器和 3 轴陀螺仪传感器的 6 轴传感器芯片，其具有 3 路磁场数据、3 路角速度数据、4 路四元数数据等多组数据输出，参考推荐电路接线图，选用 I2C 接线模式，接线图如图 3.6 所示。

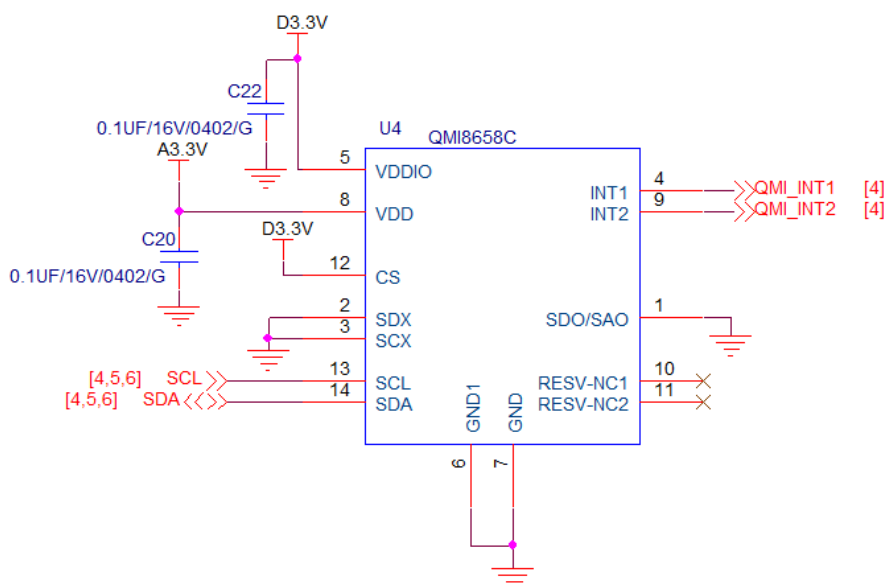


图 3.6 惯性测量模块接线图



为了测量环境温度和载体高度信息，使用到温压传感器芯片，芯片选用华普微电子的 HP5806 型号芯片，作为一款小型数字气压计，具备高精度和低功耗等特性，可以实现 1mbar、0.5℃的精度测量，压力传感元件基于电容原理，可以保证温度变化时气压传感的高精度测量。根据应用电路示例，电路接线如图 3.7 所示。

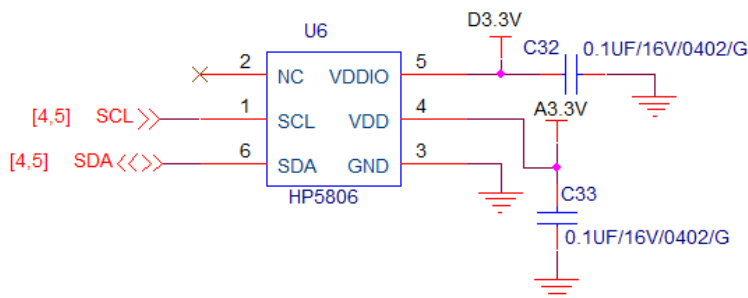


图 3.7 温压传感器接线图

3 个传感器芯片与 STM32 通过 I2C 总线进行通信，I2C 总线（Inter IC BUS）有两根通信线，分别是串行时钟线 SCL（Serial Clock）和串行数据线 SDA（Serial Data）。SCL 串行时钟实现了同步时序，降低对硬件的依赖，同步时序稳定性也高于异步时序，一根数据线将全双工变为半双工，数据线兼具发送和接收的功能，最大化利用资源，I2C 总线支持挂载多设备，设计中使用一主多从的模式，电子罗盘 I2C 硬件电路模型如图 3.8 所示。所有设备的 SDA 与 SCL 采用外置的弱上拉电阻并结合开漏输出的电路结构。

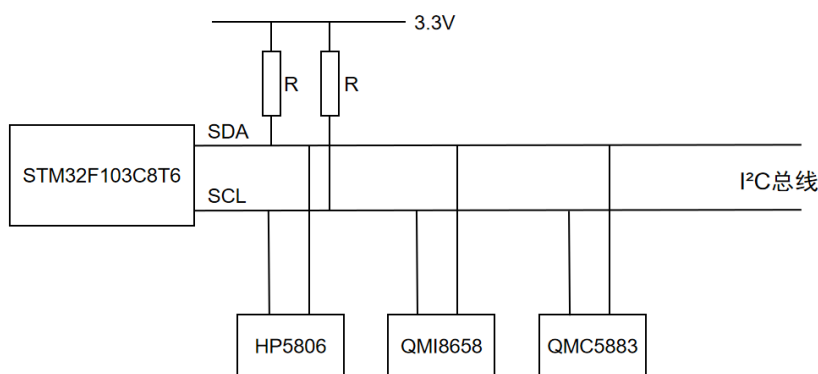


图 3.8 电子罗盘 I2C 硬件电路模型图

### 3.1.3 微控制模块设计

微控制模块是电子罗盘系统的核心部分，微控制模块负责接收传感器数据、数据滤波、地磁数据校准、方位角解算等多项任务，在硬件芯片选择上，既要在数据解算

上具有较快的运算能力，芯片资源上也要做到合理使用，不浪费引脚资源，于是芯片选取意法半导体公司 STM32F103C8T6 型号芯片。

STM32F103C8T6 使用的是 Cortex-M3 的内核，主频 72MHz，标准供电 3.3V，具有 48 个引脚，根据功能可以将 48 个引脚分为电源引脚、最小系统引脚和 IO 功能引脚，电子罗盘中的 STM32F103C8T6 具体的电路接线如图 3.9 所示。

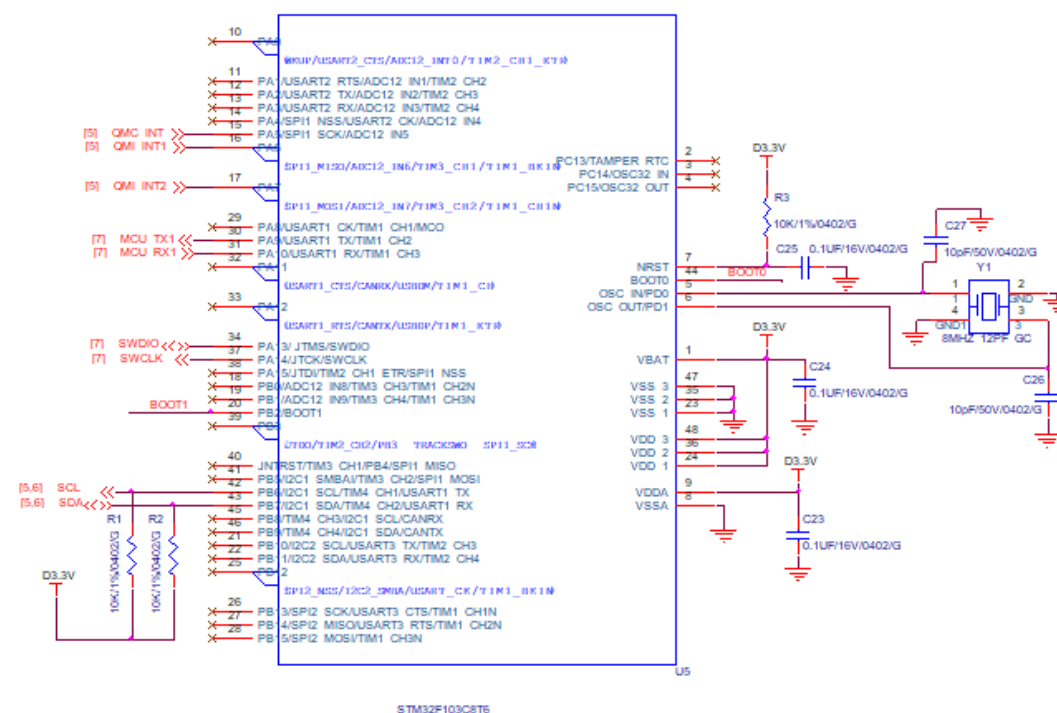


图 3.9 STM32F103C8T6 电路接线图

电源引脚中 1 引脚是备用电源供电引脚，直接连接 3.3V 电压，当系统电源断电时，备用电源可以为内部 RTC 时钟和备份寄存器供电。其余电源引脚均为供电引脚，STM32 内部采用分区供电方式供电，其中 VSS 为负极直接接地，VDD 为正极接 3.3V 电压。VDD 电源引脚都需要使用合适的接地电容。

最小系统配置可以分为系统晶振、复位、启动配置、下载调试四个部分，其中单片机的 5、6 引脚为系统主晶振引脚，需要外接一个 8MHz 无源晶振，再为无源晶振外加两个大小为 10pF 的起振电容；单片机的 7 引脚为系统复位引脚，N 代表低电平复位；单片机的 20、44 引脚为启动配置引脚，根据不同情况可以配置为三种不同的启动模式，接线如图 3.10 所示，电路原理图中不焊接的元器件使用 DNP 进行标记，表示此时电阻 R8、R9 没焊接到电路板上，此时启动模式选择引脚 BOOT1，BOOT0 为低电平状态，之后若需要改变启动模式，可以焊上电阻 R8、R9 则可以将启动模式选择引脚改为高电平，此时代表内置 SRAM 被选为启动区域，使用这个模式用来程序调试。其他引脚为

IO 功能引脚，通过与传感器芯片配置完成功能，其中单片机的 42、42 引脚用作 I2C 通信，单片机的 30、31 引脚用作 USART 串口功能。

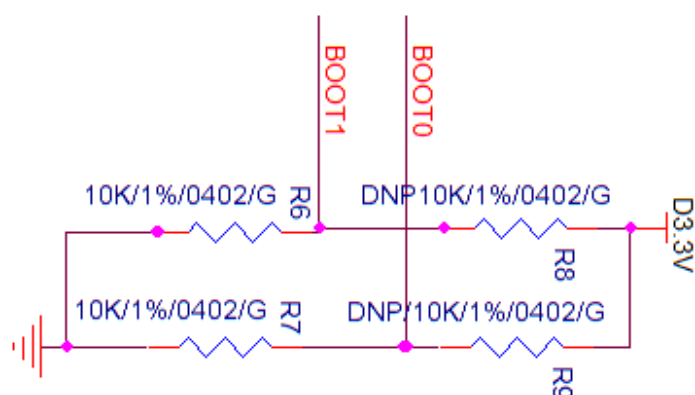


图 3.10 启动配置接线图

单片机的 34、37 引脚为 SWD 调试引脚，用来调试程序和下载程序，与 JTAG 调试接口使用 5 个引脚相比，SWD 可以节省引脚资源，而且在 PCB 设计时，还可以降低布线难度，所以本系统采用 SWD 这种的调试方式，其接口电路如图 3.11 所示，4 个引脚分别为 SWDIO 数据线、SWCLK 时钟线、GND 地线和 D3.3V 电源线，调试时使用 STLINK 调试器对系统下载程序。

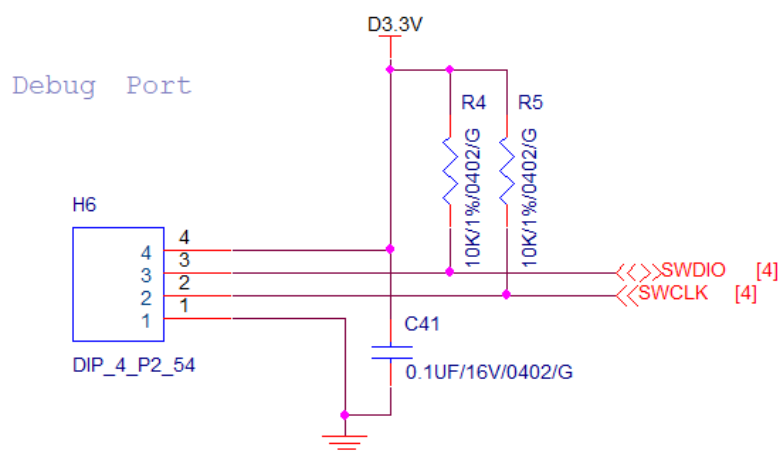


图 3.11 下载调试接线图

### 3.1.4 显示模块设计

通过串口可以实现单片机与电脑互相通信，需要使用如图 3.12 的 USB 转串口模块，将串口协议转为 USB 协议，USB 口直接与电脑相连，另一端的串口引脚通过杜邦线与电子罗盘通信口相连。

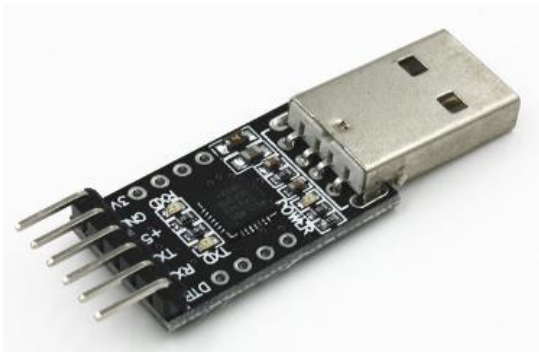


图 3.12 USB 转串口模块

串口通信接线如图 3.13 所示，电子罗盘发送端 TX 与 USB 转串口模块接收端 RX 相连，电子罗盘接收端 TX 与 USB 转串口模块发送端 RX 相连。电子罗盘也是使用这个模块的 VCC 进行供电。

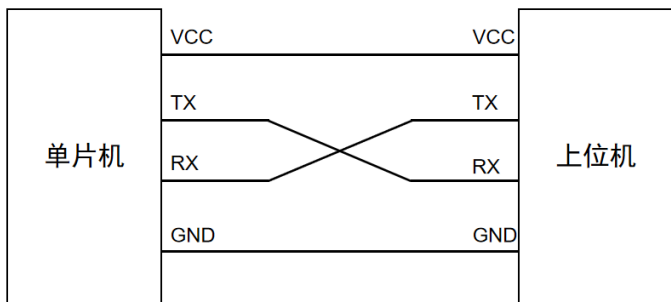


图 3.13 串口通信接线图

电子罗盘输出端口的硬件电路如图 3.14 所示，输出信号通过 USART 串口传送给电脑，由于电路板连接器接线处易产生静电放电现象，对电路板具有潜在危害，需要对输出的 TX、RX 信号进行 ESD 防护，使用的瞬变电压消除器 TVS 管是一种有效放电器件，通过放电器件可以对电路板进行有效的静电防护。

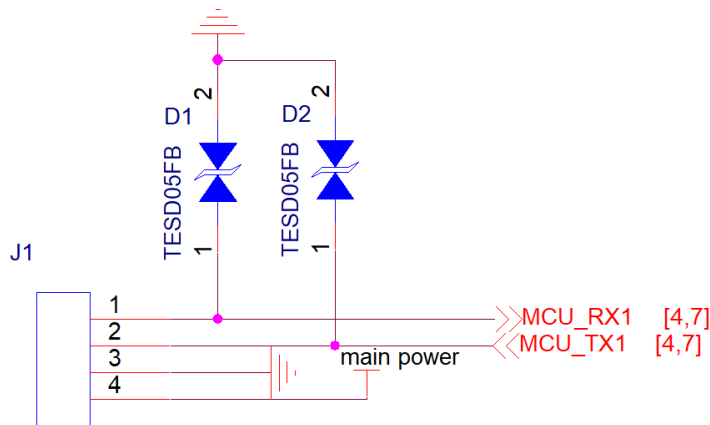


图 3.14 串口电路接线图

## 3.2 硬件 PCB 设计

PCB 设计使用 Cadence 软件内部的 PCB Editor 软件进行设计, PCB 的设计流程如图 3.15 所示。

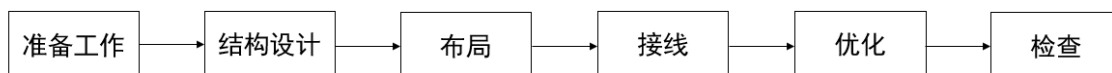


图 3.15 PCB 设计流程图

准备工作主要为准备元器件封装, 传感器的封装根据芯片手册上的尺寸封装说明进行建立, 流程包括建立焊盘、添加焊盘、设置单位、计算焊盘位置并放置焊盘、按顺序绘制实体层丝印层装配层、添加 1 引脚标识、设置 place bound 区域、添加原件高度、添加丝印位号等信息。设计中电阻、电容使用 0402 和 0603 两种型号, 这些常用器件直接使用封装库里的封装, 传感器封装需要根据流程参考说明重新绘制, 如图 3.16 所示分别为 3 轴地磁传感器和 6 轴惯性测量传感器的 PCB 封装。

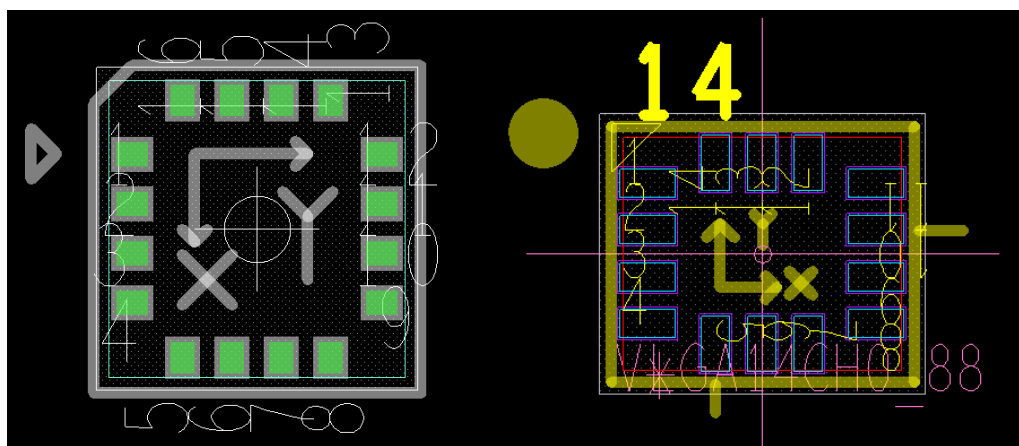


图 3.16 芯片 PCB 封装图

PCB 结构设计应首先确定电路板尺寸, 为实现电子罗盘小型化的目标, 电路板采用  $30 \times 35\text{mm}$  的尺寸, 在电路板上规划出布局布线区域, 并在电路板的四个角分别设置四个半径为  $2\text{mm}$  的圆形孔用于安装固定。

PCB 布局前必须确保原理图正确, 在布局时应注意元器件的放置方式, 以确保安装的可行性和便利性。为了便于布线, 将同一个功能模块的元器件尽量摆放在相近的位置, 设计中电阻、电容多以 0402 型号为主, 为了使板面整洁、布线有条理, 将电阻、电容以平行、垂直方向排布。传感器芯片不要靠近板子边缘摆放, 其中地磁传感器易受干扰, 在摆放过程应远离电源、金属孔等, 元器件摆放分布平衡, 尽量布满整个电

电路板。需要注意设计中各元器件特别是传感器芯片的尺寸，保证布局时各器件之间的相对距离，为布线留有空间。

接线过程直接影响电路板的功能。为确保电路板的电气性能，需首先布电源线和地线，电源线、地线和信号线宽需要单独设置，原则上信号线的线宽应不低于 5mil，设计中使用 6mil 的信号线宽，根据电子罗盘内部电流大小设置电源线宽，设计中使用 12mil 的电源线宽，地线直接使用 30mil 的线宽。布线尽可能使用 45°折线，避免使用 90°折线以防产生高频信号的干扰。

完成布局、布线后，需要进行相应检查。检查焊盘间距，由于两个传感器芯片焊盘是新建的，应注意焊盘的尺寸，检查器件轮廓丝印，由于轮廓丝印会比器件实际尺寸大一些，避免相邻器件的轮廓丝印没有相互覆盖，检查线宽大小并优化布线。

如图 3.17 为电子罗盘 PCB 设计图和电子罗盘的实物图，根据 PCB 设计图可以查看电路板安装孔、元器件摆放相对位置、走线和铺铜的区域。

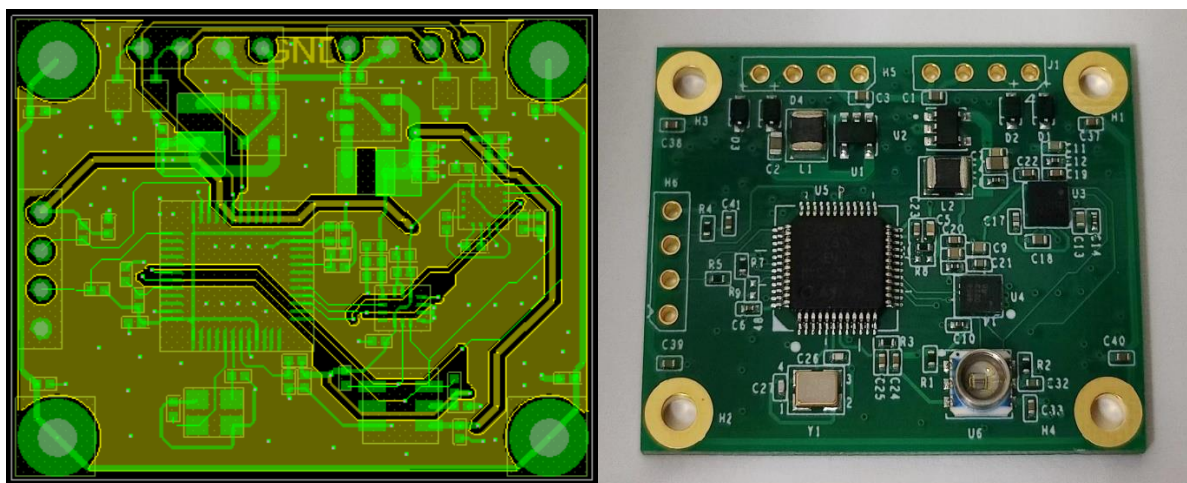


图 3.17 PCB 设计图与电子罗盘实物图

### 3.3 电子罗盘封装设计

为了便于安装使用，并为电子罗盘提供防护，使用 solidworks 软件为电子罗盘进行封装设计，封装的直观图如图 3.18 所示，根据电子罗盘板子的尺寸将封装设计为长 46.7mm、宽 40mm、高 15mm 的长方体外壳。在板子的串口输出方向设计了一个长 15mm、宽 6mm 的长方形走线孔。由于电子罗盘的设计中使用到地磁传感器，易受金属材料的干扰，于是选用电木材质进行封装设计，电木材料具有很好的绝缘性且价格低廉、易于机械加工，常用于电路板的封装设计。



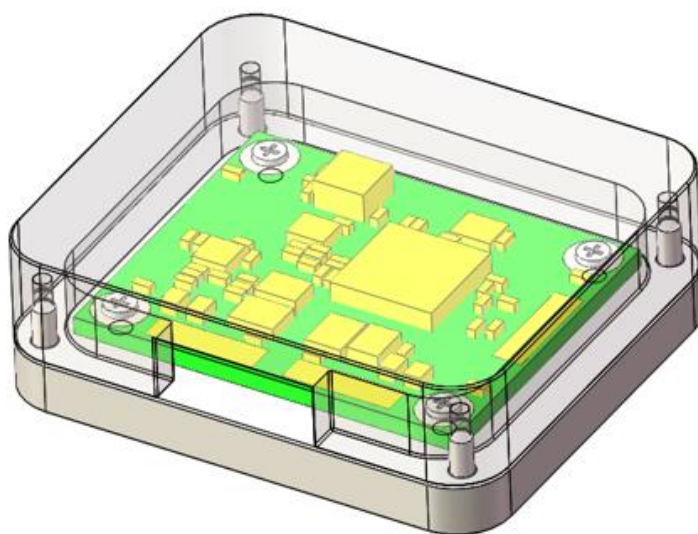


图 3.18 电子罗盘封装透视图

电子罗盘封装的安装方式如图 3.19 所示，利用电子罗盘预留的四个安装孔，使用四颗螺钉固定到封装底座上，封装的上壳与底座也依靠四颗螺钉进行固定。

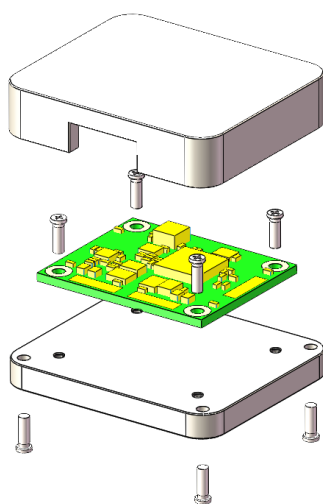


图 3.19 电子罗盘安装图

## 3.4 本章小结

本章是电子罗盘模组设计中硬件设计部分，包括电路原理设计、PCB 设计和封装外壳设计。电路原理部分提出电路设计的整体框架，根据功能将硬件电路进行模块划分，包括电源模块、数据采集模块、微控制模块和显示模块；根据电路原理进行相应的 PCB 设计；最后根据电路板尺寸为电子罗盘设计封装外壳。





## 第4章 电子罗盘软件设计

根据元器件选型可知微控制模块使用意法半导体公司的 STM32F103C8T6 型号芯片，这个型号是主流系列 STM32F1，内核为 ARM Cortex-M3。软件使用 C 语言进行编写，使用 Keil uVision5 软件进行开发，其具有一个集成开发环境，可以实现工程管理、编译、仿真、调试等多种功能。

与 51 单片机相比，STM32 系列作为一款 ARM 内核的芯片，功能更加强大，结构更复杂，寄存器数量更多，继续使用寄存器开发已经不现实，本课题使用库函数的开发模式，使用库函数开发省去了配置寄存器的操作，增强了程序的可读性，提高了开发效率。

### 4.1 软件架构设计

根据软件需要实现的功能可以将软件分为如图 4.1 的功能结构。根据功能可以分为数据控制和数据计算两个部分，其中数据控制包括接收传感器采集的数据和向上位机传输数据两个部分，数据计算包括对传感器的数据进行滤波、对地磁传感器数据进行误差补偿和方位角解算三个部分。

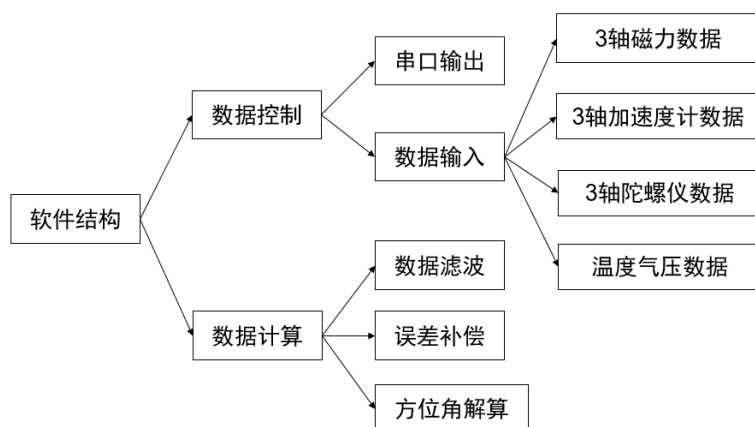


图 4.1 电子罗盘软件功能结构图

在软件编写前需要进行一些准备工作，软件使用 Keil uVision5 开发软件，使用库函数的形式开发，新建工程选择单片机型号后，需要添加一些必要文件，工程架构如图 4.2 所示，为工程添加启动文件、外核寄存器描述文件、内核寄存器描述文件、系统时钟文件、库函数文件等，将这些必要文件分别添加到对应的模块中，这样就建立了基于库函数的工程。

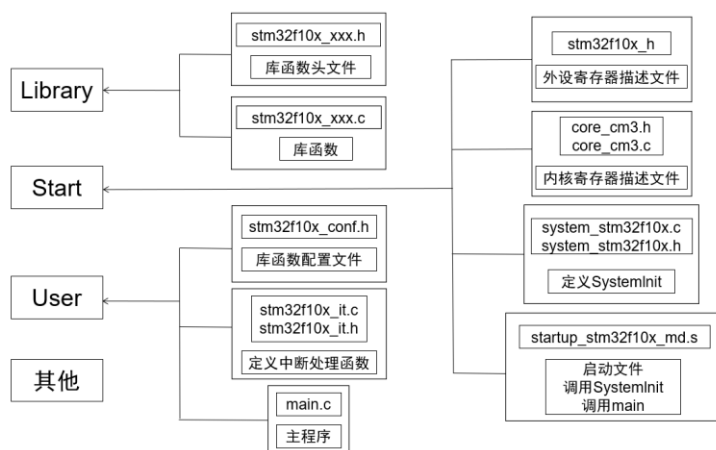


图 4.2 软件工程架构图

与软件工程架构相对应，为相应模块添加必要文件后，以 User 中的主函数 main.c 为程序主线，新建 system 模块，添加延时函数 Delay，新建 hardware 模块，添加配置 USART 串口相关配置 Serial.c 文件、温压传感器相关配置 HP5806.c 文件、惯性测量模块相关配置 QMI8658.c 文件、磁传感器相关配置 QMC5883.c 文件、方位角解算 IMU.c 文件、进行卡尔曼滤波 Kalman.c 文件。

## 4.2 子系统设计

电子罗盘软件流程图如图 4.3 所示。

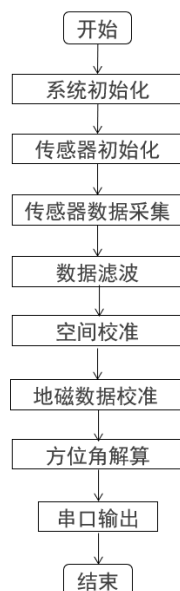


图 4.3 电子罗盘软件流程图

电子罗盘通过串口转 USB 模块与电脑相连，使用 Keiluvision5 软件将程序下载进单片机后，系统进入初始化配置，包括 I2C 总线、USART 串口、时钟等，传感器进行

相关寄存器配置,之后传感器开始采集数据,数据通过 I2C 总线传递给单片机,数据在单片机内先后进行数据滤波和地磁数据误差补偿后,使用处理后的数据进行方位角解算,最后将得到的方位角数据和传感器采集到的数据通过 USART 串口传递给上位机。

### 4.2.1 初始化配置

软件最先进行模块初始化配置,包括开启时钟,使用结构体变量进行 GPIO 引脚、USART 串口和 I2C 总线初始化配置。根据 STM32 系统结构,使用的 GPIOA、GPIOB 和 USART1 均为 APB2 总线的设备,需开启 APB2 时钟,I2C1 为 APB1 总线设备,需开启 APB1 时钟。

STM32 使用到 GPIO 引脚有 USART 串口发送接收引脚 PA9、PA10,I2C 总线的时钟和数据引脚 PB6、PB7,分别将串口发送引脚 PA9 配置为复用推挽输出模式,串口接收引脚 PA10 配置为上拉输入模式,I2C 总线的时钟和数据引脚 PB6、PB7 配置为复用开漏输出模式。

地磁传感器传输的 3 轴磁力数据是由高、低位两个字节组成的 16 位数据。使用时需要进行以下寄存器的配置。控制寄存器 1 位于地址 09H,它负责配置操作模式、输出数据更新率、传感器的磁场测量量程和过采样率四个部分。配置操作模式寄存器可以将传感器配置为待机和连续测量模式,设计中使用连续测量模式,即将 MODE 寄存器配置为 01。输出数据速率可以配置为 10Hz、50Hz、100Hz 和 200Hz 四种数据更新频率。为了降低电子罗盘功耗选取 10Hz 的配置频率,即将 ODR 寄存器配置为 00。磁场测量量程有 $\pm 2$ 高斯和 $\pm 8$ 高斯两个量程,由于测量的地磁场为弱磁场,为了获得更高的灵敏度,将 RNG 寄存器量程配置为 $\pm 2$ 高斯,即配置为 00。过采样率寄存器用于控制内部数字滤波器的带宽,可以选择 64、128、256 或 512 四种过采样率,过采样率越大,滤波器带宽越小,带内噪声越小,功耗就越高。为了降低电子罗盘功耗将 OSR 寄存器配置为 11。于是将控制寄存器 1 配置为 0xC1。

温度气压传感器传输的温度和气压数据都是由高、中、低位三个字节组成的 24 位数据。使用时需要进行以下寄存器的配置。压力配置寄存器地址为 0x06,负责控制压力测量速率和分辨率,分辨率配置越高,测量时间越长,精度越高。将其配置为每秒进行一次测量,过采样率为单次,将寄存器配置为 0x00。温度配置寄存器地址为 0x07,负责控制温度测量速率和分辨率,原理与压力配置寄存器相同,温度测量选择为内部传感器,测量速率和分辨率配置为每秒进行一次测量,过采样率为单次,将寄存器配置为 0x00。工作模式和状态寄存器地址为 0x08,将其配置为压力和温度连续测量模式,

即将寄存器配置为 0x07。FIFO 配置寄存器负责配置中断、测量数据移位和 FIFO 启用的配置，由于过采样配置小于 8，温度和压力的结果位偏移设置为无偏移，FIFO 的启用配置设置为不启用，即将寄存器配置为 0x00。

6 轴惯性测量传感器输出的数据中需要使用到的有 3 轴加速度输出、3 轴角速度输出和四元数输出。这些数据都是由高、低位两个字节组成的 16 位数据。6 轴惯性测量内部寄存器较多，根据使用进行相应的寄存器配置。串口和传感器启用寄存器地址为 0x02，使用 I2C 接口读取小端数据，且地址不自动递增，使用内部 2MHz 振荡器。将该寄存器配置为 0x40。加速度计配置寄存器用来配置加速度计输出数据速率和量程，寄存器地址为 0x03，选择启用加速度计的自检模式，由于加速度计测量的载体为静态载体，最大测量值为一个重力加速度，所以选取最小量程  $\pm 2g$ ，加速度计输出数据速率设置为正常模式下的 500Hz，将该寄存器配置为 0x84。陀螺仪配置寄存器用来配置陀螺仪的输出数据速率和量程，寄存器地址为 0x04，和加速度计配置寄存器配置相似，启用陀螺仪的自检模式，陀螺仪量程选择 256dps，陀螺仪输出数据速率设置为正常模式下的 470Hz，将该寄存器配置为 0xC4。传感器数据处理配置寄存器，地址为 0x06，将其配置为开启加速度计和陀螺仪低通滤波器模式，将该寄存器配置为 0x11。姿态引擎 ODR 和按需运动寄存器，地址为 0x07，禁用按需运动模式，姿态发动机输出数据速率选择 8Hz 模式，将该寄存器配置为 0x03。启用传感器和配置数据读取寄存器，地址为 0x08，禁用同步时钟，陀螺仪采用全模式状态，禁用方向和速度增量计算，开启加速度计和陀螺仪使能，将该寄存器配置为 0x03。

根据电子罗盘实际使用情况，需要考虑到传感器轴向匹配问题，这是指在多传感器系统中，由于传感器安装位置或姿态的不同，导致传感器之间的测量数据存在轴向不一致的情况。在这里使用坐标变换的方法解决电子罗盘轴向匹配问题。对于安装位置不同的传感器，可以通过坐标变换来将数据转换到相同的坐标系中。通过旋转以使不同传感器之间的坐标轴对齐。通过坐标变换，可以将不同传感器的测量数据对齐到相同的轴向，从而消除轴向不一致性。也可以使用这种方法改变电子罗盘的正方向。

#### 4.2.2 数据采集

I2C 时序基本单元如图 4.4 所示。一个完整的 I2C 总线时序由起始条件、终止条件，发送、接收字节，发送、接收应答 6 个部分组成。每一个传感器芯片具有唯一的地址，程序上 STM32 单片机通过地址码进行选址实现对每个传感器器件的控制，使每个器件之间相互独立。

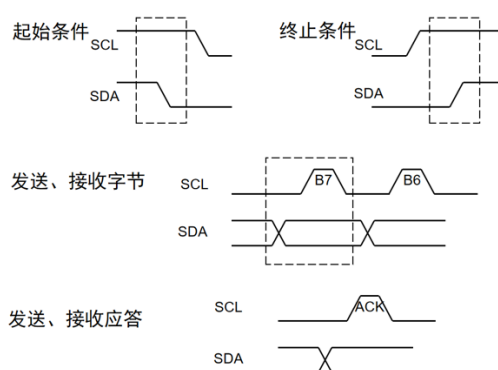


图 4.4 I2C 总线时序图

三个传感器芯片与 STM32 单片机通过 I2C 进行通信，I2C 总线作为近些年电子通信领域的新型总线标准，具有接口少、控制简单、通信效率高等优势。所有使用 I2C 总线的设备的时钟线 SCL 连在一起，数据线 SDA 连在一起。为了避免出现电源短路的问题，所有设备的 SDA 与 SCL 硬件上采用外置的弱上拉电阻并结合开漏输出的电路结构。

在电路设计中使用引脚 PB6、PB7 的引脚复用功能，使用单片机资源中的 I2C1，由于硬件 I2C 执行效率更高、通信速率快，程序上使用 I2C 硬件收发电路，可以由硬件自动执行 I2C 时序单元。通过配置结构体变量，将模式配置成 I2C 模式，时钟速度使用标准速度，配置为 50KHz，响应为 7 位地址，开启应答，设置占空比配置为 2，自身地址设置为 0x00。使用软件执行对应事件实现如图 4.5 的发送序列和图 4.6 的接收序列。

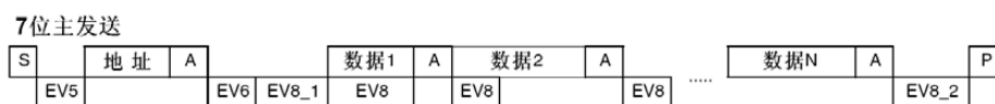


图 4.5 主机发送序列图

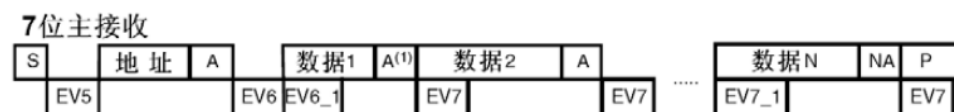


图 4.6 主机接收序列图

### 4.2.3 数据滤波

电子罗盘使用到的传感器有 6 轴惯性测量单元、3 轴地磁传感器和温压传感器，如今半导体的技术相对成熟，传感器内部集成了数模转换和数字滤波的功能，但传感器在数据采集过程难免会受到各种噪声干扰，所以在软件程序上还需要对传感器数据进行滤波处理，将含噪声的数据进行处理得到相对真实值。电子罗盘的设计中提出使用卡尔曼滤波算法对数据进行滤波<sup>[40-43]</sup>。

传感器数据会受到噪声干扰导致输出偏离真实值，利用卡尔曼滤波对数据进行处理，其思路是利用前一个时刻的估计和当前时刻的测量值，去估计当前时刻的真实值。虽然这两个值自身都存在误差，但通过一定比例可以实现相对真实的估计，卡尔曼增益系数就是这个比例系数，利用估计与测量值，实现估计值的方差最小，得到最优估计值。

卡尔曼滤波本质是优化估计算法，结合已知信息估计最优位置，卡尔曼滤波首先在预测阶段，预测状态估计值和其协方差得到先验估计值和先验协方差矩阵，其中协方差矩阵就是其方差，用来预测状态中噪声导致的不确定性。预测后需要根据观测值来修正卡尔曼增益系数，利用修正后的系数再去估计下一状态，再基于预测值更新参数，将先验估计值和先验协方差矩阵带入求得后验估计值和后验协方差矩阵。循环这个过程便得到最优值。

滤波过程的流程图如图 4.7 所示。第一步先验估计，根据上一时刻传感器数据的状态估计当前时刻传感器数据的状态量；第二步计算先验协方差矩阵，根据上一时刻的协方差计算当前时刻协方差，此时的协方差数据是先验的；第三步更新增益系数，根据第二步计算得到的先验的协方差数据求解增益系数；第四步后验估计，利用更新的增益系数求得最优估计值；第五步，计算后验协方差矩阵，利用更新的增益系数求得当前状态的后验协方差矩阵，为下一次循环做准备，此时完成一次迭代过程。这个过程不断循环直到滤波结束<sup>[44-47]</sup>。

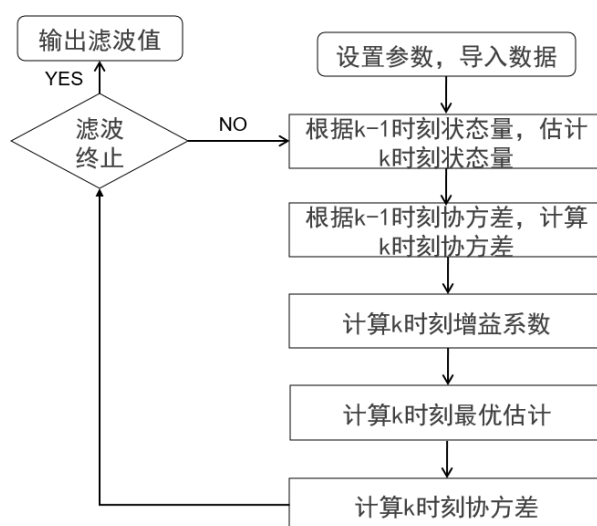


图 4.7 卡尔曼滤波流程图

卡尔曼滤波算法就是引入了卡尔曼增益系数，这个系数是一个权重项，利用估计值与测量值，让最优估计值的方差更小，通过不断迭代更新系数得到不确定性最小的

数值。其中，参数  $K$  取值介于 0 与 1 之间， $K$  越接近 1 说明测量值权重越大， $K$  越接近 0 说明估计值权重越大。

$$\text{输出值} = \text{估计值} + K(\text{测量值} - \text{估计值}) \quad (4-1)$$

为了获得估计值，可以将系统用状态方程的形式进行描述， $\hat{X}(k)^-$  表示传感器在当前时刻的估计量，属于先验估计， $\hat{X}(k-1)$  是上一时刻的估计量，属于后验估计， $U(k)$  表示系统得控制矩阵， $Y(k)$  表示当前时刻传感器的测量值， $A$ 、 $B$  均表示系数矩阵，矩阵  $C$  是测量值和真实状态之间的状态转移矩阵，状态方程表示如下：

$$\hat{X}(k)^- = A\hat{X}(k-1) + BU(k) \quad (4-2)$$

$$Y(k) = C\hat{X}(k)^- \quad (4-3)$$

在真实环境中，任何状态都会受外部环境的影响，无论是估计值还是测量值，都具有噪声，通常呈高斯分布，为了更接近真实环境，在系统中引入高斯噪声  $W(k)$  和  $V(k)$ ，其中估计噪声  $W$  和测量噪声  $V$  的方差分别为  $Q$  和  $R$ ，状态方程更新如下：

$$\hat{X}(k)^- = A\hat{X}(k-1) + BU(k) + W(k) \quad (4-4)$$

$$Y(k) = C\hat{X}(k) + V(k) \quad (4-5)$$

为了得到估计值的不确定性，衡量数据中噪声成分的多少，引入了协方差矩阵的概念，其中  $P(k)^-$  表示在当前时刻的先验估计协方差矩阵， $P(k-1)$  表示上一时刻的后验估计协方差矩阵，先验估计的协方差矩阵如下：

$$P(k)^- = AP(k-1)A^T + Q \quad (4-6)$$

由于  $AP(k-1)A^T$  来自上一时刻的估计，本身就含有噪声，在新时刻估计中加入新的估计噪声矩阵  $Q$ ，得到了估计值的不确定性。而测量值的不确定性通过观测噪声的方差  $R$  表示。卡尔曼滤波系数  $K$ ，融合了先验的状态估计值  $\hat{X}(k)^-$  和测量值  $Y(k)$ ，使最终的结果中包含估计噪声和测量噪声的成分最少，卡尔曼滤波系数可以进行如下推导：

$$K = \frac{P(k)^- C^T}{CP(k)^- C^T + R} \quad (4-7)$$

卡尔曼滤波最终输出为：

$$\hat{X}(k) = \hat{X}(k)^- + K(Y(k) - C\hat{X}(k)^-) \quad (4-8)$$

将当前时刻的先验估计量带入得：

$$\hat{X}(k) = A\hat{X}(k-1) + BU(k) + K(Y(k) - C(A\hat{X}(k-1) + BU(k))) \quad (4-9)$$

利用更新后的卡尔曼增益求得后验估计的协方差矩阵，为下一时刻滤波做准备：

$$P(k) = (I - KC)P(k)^- \quad (4-10)$$

此时完成了一次卡尔曼滤波过程，循环这个过程直到得到真实值。

## 4.2.4 空间校准

电子罗盘在静态条件下方位角解算使用的是地磁传感器的数据和加速度传感器的数据，这就要求两个传感器的坐标轴要重合，在 PCB 设计中对两个传感器的正方向做出规定，但实际芯片焊接过程不可避免产生偏差，最终会导致解算的方位角数据存在误差。

为解决传感器的同轴问题，使用粒子群算法，这种优化算法是根据鸟群觅食行为的启发而提出的。它通过模拟鸟群在搜索食物时的合作与竞争关系，来解决优化问题。在粒子群算法中，问题被表示为一个多维空间中的搜索空间。算法通过维护一群称为粒子的解决方案来进行搜索。每个粒子代表了一个解决方案，并且在搜索过程中可以自主地移动和调整自己的位置。粒子的移动是根据其自身历史最优位置和整个群体历史最优位置来确定的。每个粒子根据自身历史最优位置和整个群体历史最优位置计算速度，并根据速度更新其位置。通过不断迭代更新，粒子群逐渐收敛于最优解。在粒子算法中，粒子之间可以通过共享信息进行合作。每个粒子通过比较自身的解决方案与其邻居粒子的解决方案，可以借鉴其邻居的经验，并根据其邻居的表现来调整自己的解决方案。使用粒子群算法进行空间校准的过程如图 4.8 所示。

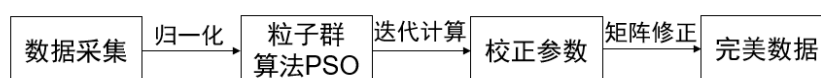


图 4.8 空间校准过程图

粒子群算法的计算过程如下，第一步初始化粒子群，随机生成一定数量的粒子，并为每个粒子随机初始化位置和速度。每个粒子的位置代表一个解决方案；第二步评估适应度，对于每个粒子，根据其位置计算适应度值，即目标函数的取值。适应度的值被用于评估解决方案的好坏；第三步更新个体最优解，对于每个粒子，根据其当前位置和历史最优位置，更新个体最优解。如果当前位置的适应度值优于个体最优解的适应度值，则更新个体最优解；第四步更新群体最优解，根据所有粒子的个体最优解，



选择适应度值最好的解作为群体最优解。即从所有个体最优解中选择最优的解；第五步更新速度和位置：对于每个粒子，根据其当前速度、个体最优解和群体最优解，计算新的速度和位置。速度的更新考虑了粒子的历史速度、个体最优解的影响和群体最优解的影响。位置的更新基于当前位置和新的速度；第六步检查停止条件，检查是否满足停止条件，例如达到最大迭代次数或适应度值足够接近最优解。循环这个迭代过程直到满足停止条件。在整个计算过程中，粒子之间会通过比较个体最优解和群体最优解来进行合作和信息交流，以便更好地探索搜索空间并找到最优解。通过不断迭代更新粒子的速度和位置，粒子群算法逐渐收敛于最优解。

粒子群算法中的校正参数包括粒子数量、最大迭代次数、加速系数、速度限制和邻域拓扑结构，其中粒子数量表示粒子群中粒子的数量，粒子数量的选择会影响算法的搜索能力和收敛速度；最大迭代次数是指定算法运行的最大迭代次数。通过限制迭代次数，可以控制算法的运行时间和收敛性；加速系数用于控制粒子速度的加速度。在粒子群算法中，通常会使用两个加速系数，分别表示粒子的个体经验和群体经验对速度的影响；速度限制用于限制粒子速度的上下界。通过设置速度限制，可以避免粒子在搜索过程中的过度移动，从而保持搜索的平衡性。速度限制可以根据问题的特性和搜索空间进行调整；邻域拓扑结构用于定义粒子之间的邻居关系。粒子群算法中的邻域通常是基于粒子之间的距离或索引来确定的。邻域拓扑结构的选择会影响粒子之间的信息共享和合作程度，从而影响算法的搜索性能。

这些校正参数的选择需要根据具体问题的特点和算法的需求进行调整和优化。在应用粒子群算法时，需要进行参数调优和实验验证，以获得更好的性能和结果。通过矩阵修正即可得到完美数据，在实际使用过程，用户操作电子罗盘分别绕着 XYZ 轴旋转一圈，即可完成校准操作。

#### 4.2.5 地磁数据校准

根据地磁场概述可知地磁场大小约为 0.4 到 0.6 高斯，属于弱磁场，环境中的任何磁干扰都会影响地磁传感器的数据，若直接使用地磁数据进行方位角解算，会出现误差。所以地磁传感器采集的数据在进行滤波后还需要进行误差补偿处理。

经过分析电子罗盘受到的磁场干扰，根据特性可以分为两大类，一类是硬磁类干扰，来源于使用环境永久磁铁等物体产生的大小方向基本不变的磁场，属于一种固定干扰，相当于给电子罗盘的输出加上了一个大小方向固定的值，会导致电子罗盘的输出曲线的零点发生偏移，所以这种硬磁干扰也称为零点漂移。另一类是软磁类干扰，

这类干扰是由环境周围的易被磁场影响而具有磁性的软磁性材料产生的，软磁干扰的大小和方向与环境的复杂程度有关，也会随着电子罗盘的运动而变化<sup>[48-50]</sup>。磁干扰根据使用环境的变化而变化，所以在不同的环境使用电子罗盘时，都需要对罗盘重新进行误差补偿。

针对电子罗盘在实际使用中会受到硬磁和软磁的干扰，导致地磁传感器采集到的数据不准的问题，提出使用平面圆周校准的方法对地磁传感器进行误差补偿。

将电子罗盘绕着 Z 轴旋转一周，若没有外界磁场干扰，地磁传感器测得的磁场矢量在 XY 平面的投影的形状应该是一个圆心在原点的圆形。硬磁类干扰是大小方向基本不变化的磁场干扰，电子罗盘在硬磁干扰的作用下，零点会发生偏移，导致圆心不在坐标原点，如图 4.9 所示<sup>[51-55]</sup>。

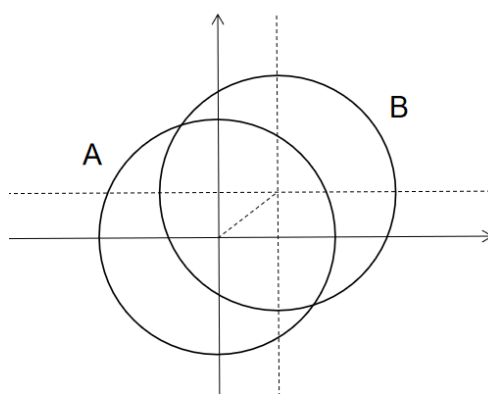


图 4.9 地磁数据在硬磁干扰下水平投影输出示意图

软磁干扰是环境周围的易被磁场影响而具有磁性的软磁性材料产生的，是一种综合磁场，软磁干扰对载体的作用是随机的。电子罗盘在软磁干扰的作用下，原本投影形成的圆形可以近似看作一个椭圆，如图 4.10 所示。

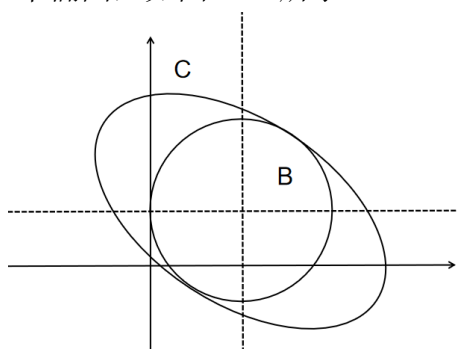


图 4.10 地磁数据在软磁干扰下磁场水平投影输出示意图

对地磁传感器进行误差补偿的过程，就是将磁场在水平面投影形成的偏离原心的椭圆变回为圆心在原点的正圆的过程<sup>[56-60]</sup>。

设三维空间中地磁传感器测得的磁场矢量构成的椭球的球心坐标为  $(Mx1, My1, Mz1)$ ，将电子罗盘绕 Z 轴旋转一周，记 X 轴坐标的最大值，最小值分别为  $Mx_{\max}$ 、 $Mx_{\min}$ ，记 Y 轴坐标的最大值，最小值分别为  $My_{\max}$ 、 $My_{\min}$ ，再将电子罗盘绕 X 轴旋转一周，记 Z 轴坐标的最大值，最小值分别为  $Mz_{\max}$ 、 $Mz_{\min}$ 。可以根据下述公式计算出三个轴的偏移校准量。

$$Mx1 = \frac{Mx_{\max} + Mx_{\min}}{2} \quad (4-11)$$

$$My1 = \frac{My_{\max} + My_{\min}}{2} \quad (4-12)$$

$$Mz1 = \frac{Mz_{\max} + Mz_{\min}}{2} \quad (4-13)$$

则可以根据如下公式表示对地磁数据进行硬磁补偿过程，其中  $(Mx, My, Mz)$  表示地磁传感器测得的真实数据， $(mx, my, mz)$  表示经过硬磁补偿的数据。

$$mx = Mx - Mx1 \quad (4-14)$$

$$my = My - My1 \quad (4-15)$$

$$mz = Mz - Mz1 \quad (4-16)$$

设三个轴的灵敏系数分别为  $X_{en}$ 、 $Y_{en}$ 、 $Z_{en}$ 。根据三个轴的最大值与最小值的差值得到三个灵敏系数关系如下：

$$X_{en} (Mx_{\max} - Mx_{\min}) = Y_{en} (My_{\max} - My_{\min}) = Z_{en} (Mz_{\max} - Mz_{\min}) \quad (4-17)$$

令  $X_{en} = 1$ ，分别对比  $X_{en}$  与  $\frac{My_{\max} - My_{\min}}{Mx_{\max} - Mx_{\min}}$  及  $\frac{Mz_{\max} - Mz_{\min}}{Mx_{\max} - Mx_{\min}}$  的大小，取三个值中的

最大值作为 X 轴灵敏系数  $X_{en}$  的值。

令  $Y_{en} = 1$ ，对比  $Y_{en}$  与  $\frac{Mx_{\max} - Mx_{\min}}{My_{\max} - My_{\min}}$  及  $\frac{Mz_{\max} - Mz_{\min}}{My_{\max} - My_{\min}}$  的大小，取三个值中最大值作

为 Y 轴灵敏系数  $Y_{en}$  的值。

令  $Z_{en} = 1$ ，对比  $Z_{en}$  与  $\frac{Mx_{\max} - Mx_{\min}}{Mz_{\max} - Mz_{\min}}$  及  $\frac{My_{\max} - My_{\min}}{Mz_{\max} - Mz_{\min}}$  的大小，取三个值中最大值作

为 Z 轴灵敏系数  $Z_{en}$  的值。

则地磁传感器数据的补偿的公式如下，使用三个轴的灵敏度与偏移校准量将数据围成的圆心偏移的椭球形校准回圆心在原点的球形，其中  $Hx$ 、 $Hy$ 、 $Hz$  分别为消除

了硬磁、软磁干扰的地磁传感器数据。

$$H_x = X_{en}(M_x - M_{x1}) \quad (4-18)$$

$$H_y = Y_{en}(M_y - M_{y1}) \quad (4-19)$$

$$H_z = Z_{en}(M_z - M_{z1}) \quad (4-20)$$

## 4.2.6 方位角解算

分别使用旋转矩阵和四元数的计算方法实现载体静态和动态的方位角解算，在使用陀螺仪数据进行方位角解算时，由于陀螺仪测量的数据是载体的角速度值，需要通过一次积分运算才能得到角度，于是使用单片机中的定时器来实现。

定时器根据类型可以分为基本定时器、通用定时器和高级定时器。使用的单片机芯片上有一个高级定时器 TIM1 和三个通用定时器 TIM2、TIM3 和 TIM4 的资源。选用通用定时器即可满足需求，三个通用定时器均是 APB1 总线上的设备，其基本结构如图 4.11 所示。

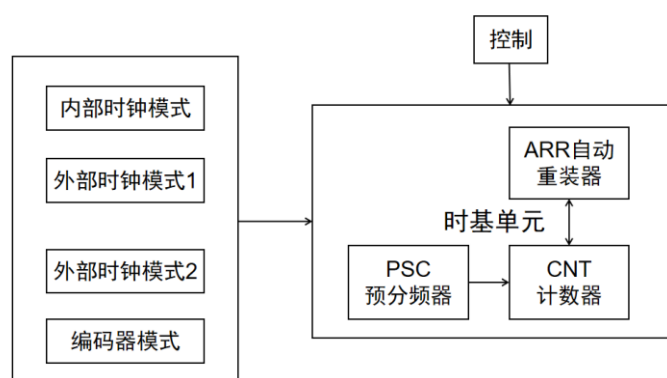


图 4.11 通用定时器基本结构

时钟模式选择使用内部时钟，在对时基单元进行相关配置时，将计数器模式选择为向上计数的模式，时钟分频选择为 1 分频，ARR 自动重装器和 PSC 预分频器选择的范围从 0 到 65535，为了实现较高的频率计较多的数，可以将 PSC 预分频器的值设置的低一些，ARR 自动重装器的值设置高一些，定时器的结构体变量就配置完成。

## 4.2.7 串口输出

STM32F103C8T6 型号共有 USART1、USART2、USART3 三个独立的 USART 外设，设计中使用的 USART1，是 APB2 总线上的设备，USART 发送数据基本结构如图 4.12 所示，发送移位寄存器从低位向高位移动，先发送低位数据，接收移位寄存器从高位向低位移动，先接收高位数据。

配置结构体变量，其中波特率由波特率寄存器 BRR 里的 DIV 确定，设置波特率为 9600，单片机内部自动计算 9600 对应的分频系数，并写入 BRR 寄存器，模式设置为发送接收模式，设置无校验位，停止位字长为 1，不使用硬件流控制，字长为 8 个字节。最后使能 USART1，串口初始化配置就完成。

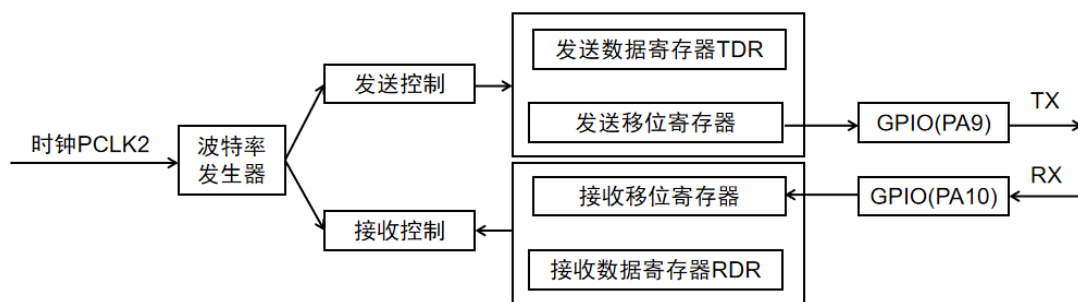


图 4.12 串口基本结构图

使用易语言平台设计上位机界面，实现显示俯仰角、横滚角和航向角三个方位角信息，并显示传感器采集的数据，上位机软件如图 4.13 所示。

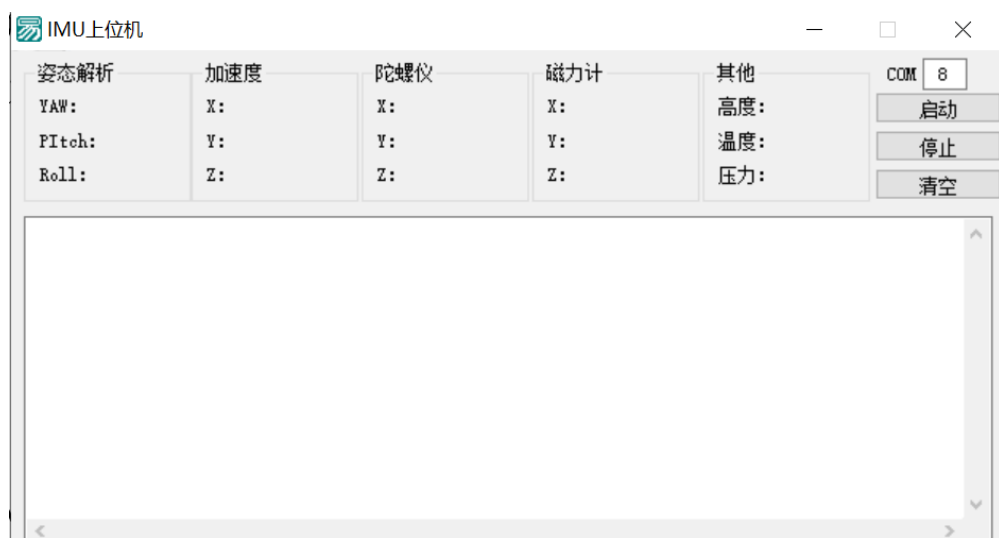


图 4.13 上位机软件操作界面

根据上位机界面可以看到方位角数据显示在姿态解析处，三个方位角依次为偏航角 YAW，俯仰角 Pitch，横滚角 Roll，传感器数据依次显示在对应区域，稳压传感器的温度、气压数据，以及通过计算得到的载体高度信息显示在其他位置，最后上位机设置有端口号、启动、停止和清空按键，可以实时显示电子罗盘数据信息。

### 4.3 本章小结

本章是电子罗盘的软件架构设计，使用 Keiluvision5 开发平台编写下位机程序，根

据电子罗盘的软件流程图依次实现系统初始化、数据采集、数据滤波、地磁数据的误差补偿、方位角解算和数据输出。在数据滤波的过程使用卡尔曼滤波的方法对传感器数据进行处理，考虑到地磁传感器易受干扰的特性，提出使用平面圆周校准的方法对地磁传感器数据进行补偿，方位角解算部分使用理论部分介绍的旋转矩阵和四元数的计算方法，数据输出部分设计上位机界面可以显示方位角数据和传感器数据。

## 第5章 电子罗盘性能研究

电子罗盘在硬、软件设计后，最后需要对成品电子罗盘进行性能测试，主要包括精度测试、稳定性测试和温度测试，测试中主要使用如图 5.1 所示的 3 轴测试转台。在精度测试中，通过进行多次测试，利用测试数据计算每组方位角的均方根误差，使用均方根误差来衡量测量值与真实值之间的偏差；稳定性测试中，将电子罗盘固定，根据方位角输出的抖动范围衡量电子罗盘的稳定性；温度测试中，通过改变电子罗盘的环境温度，测试电子罗盘在不同温度下的精度输出，以此衡量电子罗盘的温度性能。

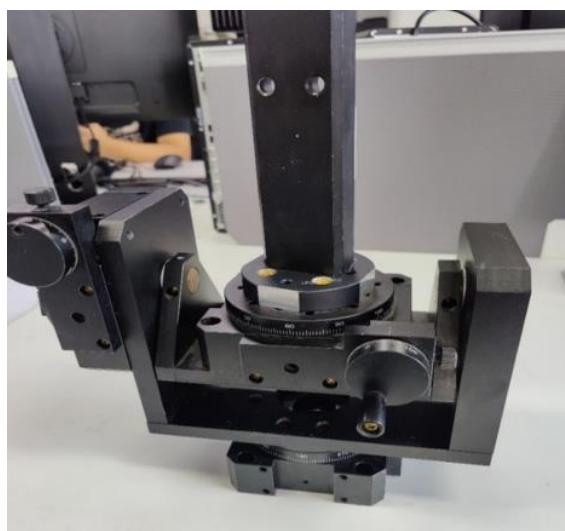


图 5.1 三维测试转台

### 5.1 电子罗盘精度研究

在电子罗盘的精度测试中，使用工装将电子罗盘固定在转台上，通过转动转台的三个转轴可以定量改变电子罗盘姿态，3 个转轴分别对应电子罗盘的俯仰、横滚和航向轴。进行精度测试时，考虑到电子罗盘产品常应用于户外，于是选取户外场所作为测试地点来更接近真实使用场景。

分别测试电子罗盘的静态测量精度和动态测量精度，测试时使用 12 位置法，根据方位角的取值范围，航向角和横滚角每隔  $30^\circ$  进行一次取值，俯仰角每隔  $15^\circ$  进行一次取值。

#### 5.1.1 电子罗盘静态精度研究

固定转台的俯仰轴和航向轴，根据横滚角的取值范围从  $-180^\circ$  到  $180^\circ$ ，将转台的横

滚轴转动  $360^\circ$ ，每隔  $30^\circ$  进行一次记录，共取 12 个数据，记录上位机读取的数据和转台上的刻度，将数据绘制成如图 5.2 的横滚角误差曲线图。根据误差曲线可以看出，横滚具有较好输出的精度，基本可以实现测量误差在  $0.5^\circ$  以内。

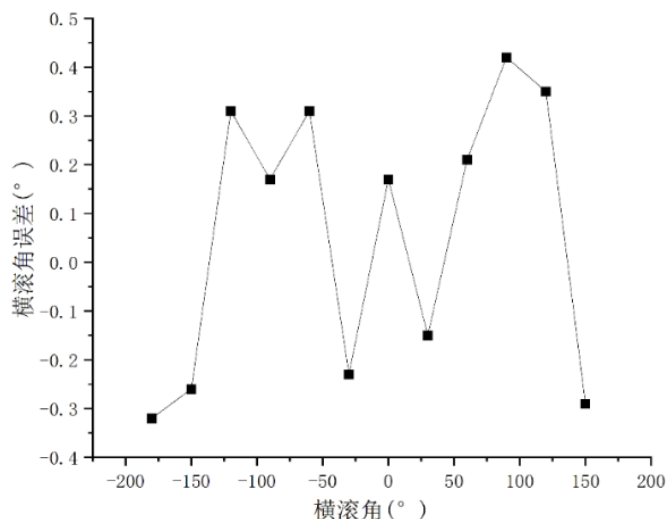


图 5.2 横滚角静态测量误差曲线图

固定转台的横滚轴和航向轴，根据俯仰角取值范围从  $-90^\circ$  到  $90^\circ$ ，将转台的俯仰轴转动  $180^\circ$ ，每隔  $15^\circ$  进行一次记录，共取 12 个数据，记录上位机读取的数据和转台上的刻度，将数据绘制成如图 5.3 的俯仰角误差曲线。根据图中误差可以看出，俯仰角虽然在接近  $90^\circ$  时，测量误差略有提升，但依旧具有较好的精度，基本可以实现测量误差在  $0.6^\circ$  以内。

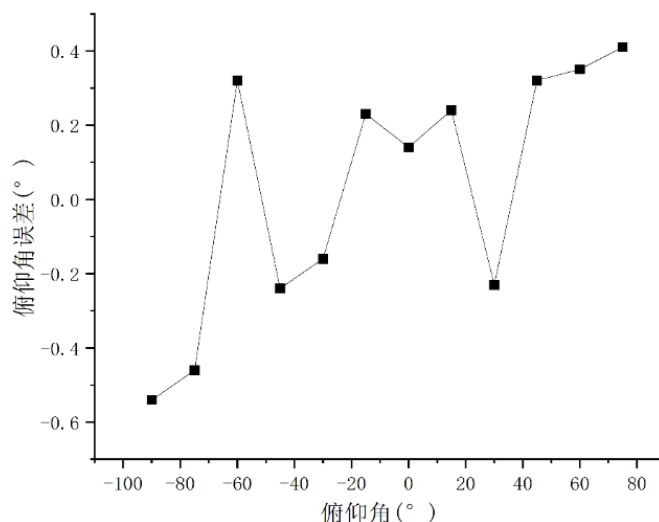


图 5.3 俯仰角静态测量误差曲线图

固定转台的俯仰轴和横滚轴，根据航向角取值范围从  $0^\circ$  到  $360^\circ$ ，将转台的航向轴转动  $360^\circ$ ，每隔  $30^\circ$  进行一次记录，共取 12 个数据，记录上位机读取的数据和转台上的刻度。由于航向角是根据地磁传感器的数据进行解算，在上文中已知地磁传感器易



受到磁干扰，于是分别记录误差补偿前后的航向角数据如表 5.1 所示。

表 5.1 误差补偿前后航向角测量数据

单位: °

参考	未补偿的数据	误差	补偿后的数据	误差
0	355.62	-4.38	0.49	0.49
30	17.54	-12.46	29.38	-0.62
60	53.24	-6.76	60.58	0.58
90	84.38	-5.62	89.57	-0.43
120	124.37	4.37	120.26	0.26
150	161.55	11.55	150.33	0.33
180	188.67	8.67	179.35	-0.65
210	213.26	3.26	210.42	0.42
240	247.64	7.64	239.64	-0.36
270	271.56	1.56	269.43	-0.57
300	308.92	-1.08	300.34	0.34
330	327.47	-2.53	330.44	0.44

根据补偿前后的数据对比可知，所选的户外测试环境存在磁干扰，可能来源于手机、笔记本电脑等电子设备，在经过误差补偿处理后，航向角测量误差有明显降低，将补偿后的数据绘制成如图 5.4 的航向角误差曲线。根据图中测量误差可以看出，航向角可以实现测量误差在  $0.7^{\circ}$  以内。

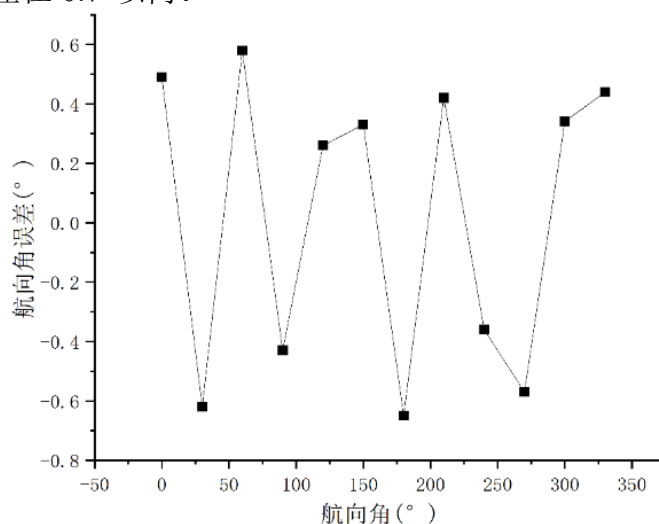


图 5.4 航向角静态测量误差曲线图

由于测量误差满足正太分布的规律，为科学评价电子罗盘的测量精度，使用均方误差来衡量测量值与真实值之间的偏差，计算过程如式 (5-1) 所示。

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - X_{真})^2}{N}} \quad (5-1)$$

其中  $X_i$  表示每次测试的测试值,  $X_{真}$  表示每次测试对应的真实值,  $N$  代表测量次数, 重复进行上述实验 20 次, 分别计算俯仰角、横滚角、偏航角在 12 位置下的均方根误差值, 并绘制成 5.2 所示的静态均方误差表。

表 5.2 电子罗盘静态方位角均方根误差

单位: °

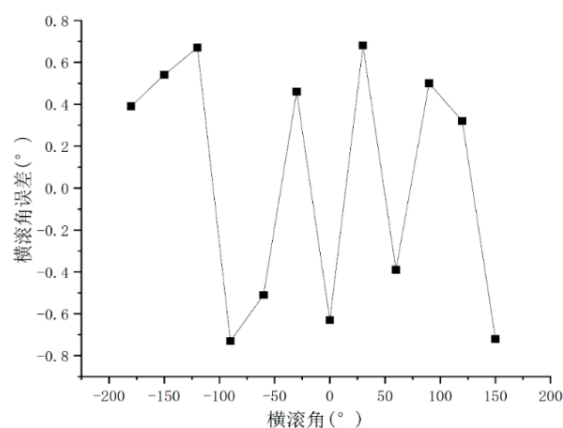
参考	航向角均方根误差	参考	横滚角均方根误差	参考	俯仰角均方根误差
0	0.2084	-180	0.1326	-90	0.1773
30	0.1959	-150	0.1402	-75	0.1503
60	0.2132	-120	0.1173	-60	0.1426
90	0.1846	-90	0.1354	-45	0.1392
120	0.2273	-60	0.1294	-30	0.1392
150	0.2065	-30	0.1342	-15	0.1406
180	0.1985	0	0.1427	0	0.1285
210	0.1943	30	0.1261	15	0.1321
240	0.2142	60	0.1305	30	0.1364
270	0.2086	90	0.1447	45	0.1277
300	0.2265	120	0.1529	60	0.1463
330	0.2087	150	0.1308	75	0.1659

通过分析方位角静态测试的均方根误差数据, 根据 3 倍标准差的原则, 航向角的测试误差有超过 99.7% 的概率小于 0.7°, 横滚角的测试误差有超过 99.7% 的概率小于 0.5°, 俯仰角测试误差有超过 99.7% 的概率小于 0.6°。航向角的测量误差略高于俯仰角和横滚角的测量误差。

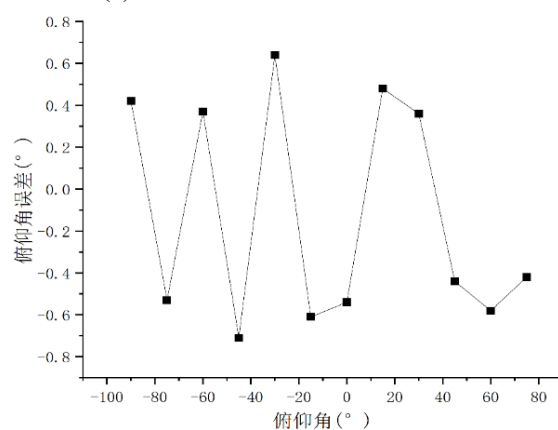
通过分析可知, 电子罗盘的静态测量时使用加速度传感器数据计算俯仰角和横滚角, 使用地磁传感器数据计算航向角, 传感器本身不可避免会存在一定误差, 测量使用的三轴转台的精度也存在一定偏差; 而且要求两个传感器两个轴正交度在 0.1° 以内, 三轴相交度在 1mm 以内即可认为装置测试值是真实值, 但是安装误差依旧存在; 由于选择在户外进行测试, 难以保证转台的水平放置, 以及环境干扰等因素, 导致方位角测量结果存在误差。与加速度传感器相比地磁传感器更容易受到干扰, 导致航向角测量误差略高于横滚角和俯仰角。根据测量结果可以得出电子罗盘静态测量误差满足设计需求。

## 5.1.2 电子罗盘动态精度研究

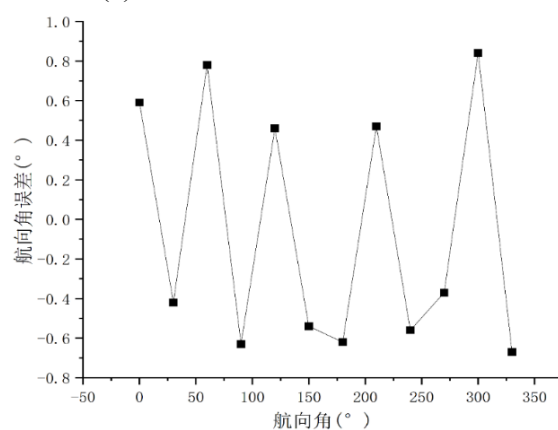
与电子罗盘静态精度测试相似，分别转动转台的横滚轴、俯仰轴和航向轴，根据方位角的取值范围，使用 12 位置法，对电子罗盘进行取值，电子罗盘动态测量误差曲线如图 5.5 所示。



(a) 横滚角动态测量误差曲线图



(b) 俯仰角动态测量误差曲线图



(c) 航向角角动态测量误差曲线图

图 5.5 电子罗盘动态测量误差曲线图

根据电子罗盘动态测量数据曲线图可以看出，俯仰角和横滚角的动态测量误差略高于静态测量，但测量误差基本都在  $0.8^\circ$  以内。同样重复进行上述实验 20 次，分别计算俯仰角、横滚角、偏航角在 12 位置下的均方根误差值，并绘制成 5.3 所示的动态均方误差表。

表 5.3 电子罗盘静态方位角均方根误差

单位： $^\circ$ 

参考	航向角均方根误差	参考	横滚角均方根误差	参考	俯仰角均方根误差
0	0.2404	-180	0.2466	-90	0.2475
30	0.2475	-150	0.2374	-75	0.2384
60	0.2602	-120	0.2562	-60	0.2451
90	0.2577	-90	0.2386	-45	0.2394
120	0.2549	-60	0.2431	-30	0.2564
150	0.2437	-30	0.2552	-15	0.2521
180	0.2554	0	0.2436	0	0.2461
210	0.2378	30	0.2505	15	0.2445
240	0.2492	60	0.2542	30	0.2535
270	0.2386	90	0.2376	45	0.2461
300	0.2554	120	0.2482	60	0.2447
330	0.2438	150	0.2395	75	0.2539

通过分析方位角动态测试的均方根误差数据，根据 3 倍标准差的原则，航向角、横滚角和俯仰角测试误差均有超过 99.7% 的概率小于  $0.8^\circ$ 。除了静态测量时分析的误差来源之外，陀螺仪传感器还会受到偏置不稳定性的影响，由于器件固有的不足、噪声等因素，导致传感器初始零点会随时间偏移，导致方位角的动态测量精度略高于静态测量，但根据测量结果可以得出电子罗盘动态测量误差满足设计需求。

## 5.2 电子罗盘稳定性研究

为了衡量电子罗盘静态测量的输出稳定性，对电子罗盘进行稳定性测试，为了便于记录数据，调整电子罗盘的位置，测试俯仰角、横滚角、航向角在  $0^\circ$  时的测量结果，观察 60 秒内三个方位角的输出数据，每隔 1 秒进行一次记录，将数据绘制成如图 5.6 的电子罗盘方位角输出图。

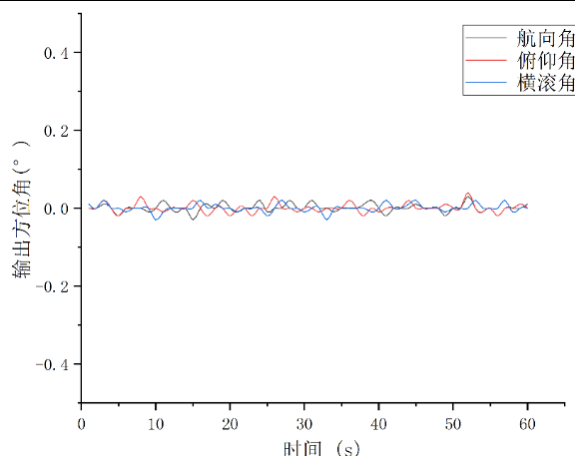


图 5.6 电子罗盘方位角输出

根据输出的方位角数据的抖动范围来衡量输出稳定性。根据图中数据所示，电子罗盘三个方位角的抖动范围都在  $0.05^{\circ}$  以内，证实电子罗盘具有良好的输出稳定性。

### 5.3 电子罗盘温度性能研究

考虑到民用电子罗盘的使用温度一般在  $-20^{\circ}\text{C}$  到  $40^{\circ}\text{C}$  之间，需要对电子罗盘进行温度测试，使用如图 5.7 的高低温箱为电子罗盘提供不同的温度环境，每隔  $10^{\circ}\text{C}$  进行一次测试。进行测试时，先将高低温箱调至  $-20^{\circ}\text{C}$  进行低温测试，测试结束后再逐渐调高温度，每  $10^{\circ}\text{C}$  进行一次取值，直到  $40^{\circ}\text{C}$  的实验结束，将高低温箱调回常温  $25^{\circ}\text{C}$ ，等温箱温度恒定后，关闭高低温箱。



图 5.7 高低温箱实物图

为了便于测量,测试在不同温度下,电子罗盘输出的俯仰角、横滚角、偏航角在  $0^\circ$  时的精度变化,电子罗盘静态和动态测量误差曲线如图 5.8 所示。

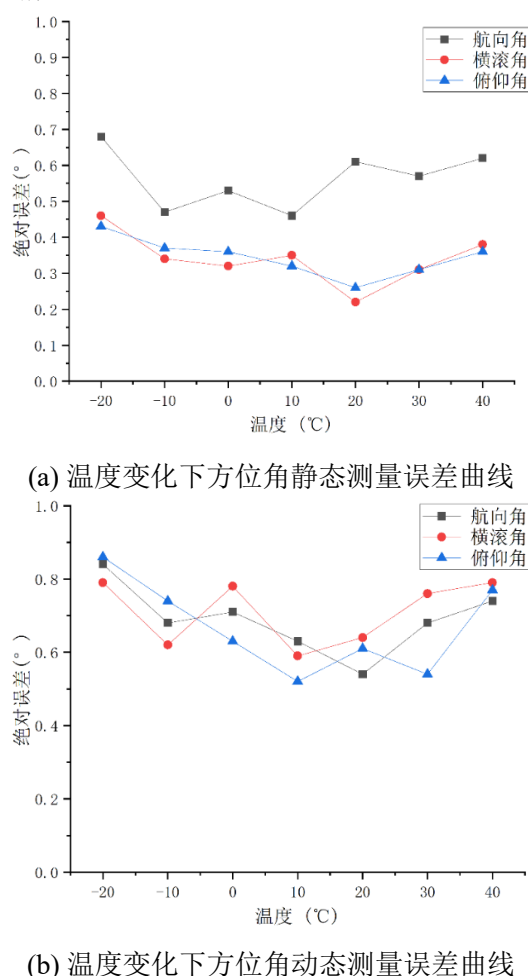


图 5.8 温度变化下电子罗盘静态输出误差

根据  $-20^\circ\text{C}$  到  $40^\circ\text{C}$  电子罗盘的输出误差曲线图可以看出,温度对电子罗盘的方位角有一定影响,但影响不剧烈,考虑到使用的传感器的工作温度范围远大于  $-20^\circ\text{C}$  到  $40^\circ\text{C}$ ,在这个温度范围内变化,不会对方位角的测量精度产生明显的影响,得出设计的电子罗盘在  $-20^\circ\text{C}$  到  $40^\circ\text{C}$  的温度下满足使用需求。

## 5.4 本章小结

本章为衡量电子罗盘的性能,分别进行精度测试、稳定性测试和温度测试。根据精度测试结果,电子罗盘在静态和动态的测量误差均小于  $1^\circ$ ,得出电子罗盘的精度满足设计需求;根据稳定性测试中电子罗盘在 1 分钟内方位角的抖动范围在  $0.05^\circ$  以内,得出电子罗盘具有良好的输出稳定性;温度测试中改变电子罗盘的环境温度,根据其在  $-20^\circ\text{C}$  到  $40^\circ\text{C}$  条件下可以实现测量误差在  $1^\circ$  以内,得出电子罗盘具有良好的温度性能。

## 结 论

用于姿态测量的电子罗盘广泛应用于车辆驾驶、弹道控制、航海航天等领域，如今电子罗盘已成为人们生活中不可缺少的一部分，虽然国内对电子罗盘的研究起步较晚，但在高校和科技企业共同努力下，国产的电子罗盘核心器件在研发上有了重大突破，基于这个背景，提出设计出一款使用国产传感器器件，能够解决传统电子罗盘动态性能差的9轴电子罗盘。设计中选用国产传感器芯片作为核心器件，以实现载体在静态和动态条件下的姿态测量为目标，以电子罗盘的研究现状和方位角解算原理作为理论依据，将电子罗盘的设计中主要工作总结如下：

（1）分析电子罗盘系统的每个模块功能，对每个模块进行元器件选型，进行电路原理和 PCB 设计，最后根据电路板尺寸为电子罗盘进行封装设计。

（2）对电子罗盘系统进行软件编写，以旋转矩阵和四元数两种方位角解算原理作为理论依据，并使用卡尔曼滤波和平面圆周校准的计算方法，使系统实现数据采集、数据滤波、误差补偿、方位角解算等功能，最后为电子罗盘设计上位机界面，能够实现显示方位角和传感器数据的功能。

（3）对电子罗盘进行性能测试。精度测试表明，电子罗盘在静态和动态下的姿态测量都可以实现测量误差在  $1^\circ$  以内。稳定性测试表明，电子罗盘输出的三个方位角在 1 分钟内抖动范围在  $0.05^\circ$  以内，得出电子罗盘输出相对稳定。温度测试表明，电子罗盘在  $-20^\circ\text{C}$  到  $40^\circ\text{C}$  的温度范围内，可以实现测量误差在  $1^\circ$  以内。

在未来，集成电路领域继续发展，随着新材料的出现、新工艺的引入，地磁传感器和惯性传感器会继续向着高精度、低功耗、小型化、多参数测量的方向发展，并不断拓展应用领域。我国在传感器领域也会实现质的飞跃，实现产品全国产业化指日可待。





## 参考文献

- [1] R Sun, Q Cheng, D Xue, et al. GNSS Electronic Compass Road Segment Information Fusion for Vehicle-to-Vehicle Collision Avoidance Application[J]. Sensors, 2017, 17(12):272-274.
- [2] Q Song, J Feng, X Zhang, et al. Obtaining the real time yaw angle using electronic compass in quadrotor systems[C]. International Conference on System Science and Engineering, 2012:238-242.
- [3] X Li, Q Wang, X Zhang, Application of Electronic Compass and Vision-Based Camera in Robot Navigation and Map Building[C]. International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, 2013: 546-549.
- [4] 林亚坤. 基于 GMR 传感器的姿态测量系统设计[D]. 杭州电子科技大学,2014:30-33.
- [5] 秦赓. 基于磁阻传感器的弹体姿态测量系统误差补偿研究[D]. 南京理工大学,2019:17-22.
- [6] 张晓肖. 基于磁阻传感器的姿态测量系统研究[D]. 西安电子科技大学,2019:30-33.
- [7] W Chen, T Zhang. An indoor mobile robot navigation technique using odometry and electronic compass[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2017, 14(3):764-769.
- [8] D Li, Research on Applications of LBS Based on Electronic Compass Assisted GPS[C]. International Symposium on Information Engineering and Electronic Commerce. 2009: 599-602.
- [9] Q Jiang, J Li, Y Du, et al. The attitude-measuring and positioning system based on GPS and electronic compass[C]. International Conference on Information Science and Engineering. 2010: 1589-1592.
- [10] X Han, X Zhang, Y Liu. Improving GNSS Navigation and Control with Electronic Compass in Unmanned System[J]. Journal of Advanced Computatioanl Intelligence and Intelligent Informatics, 2019, 23(3): 427-436.
- [11] H. Pan, L. Yao, S. He, et al. Single-chip integrated 3-D Hall sensor[C] International

- Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, 2013: 252-255.
- [12] Y Gao, Z Li, Y Li, et al. The design of high precision three axis fluxgate magnetometer[C]. Information Technology and Mechatronics Engineering Conference, 2017: 249-253.
- [13] J S Hwang, H S Park, D S Shim, et al. Electronic compass using two-axis micro fluxgate sensing element[C]. International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2003: 1618-1621.
- [14] M. Li, V T Rouf, M. J. Thompson, et al. Three-axis lorentz-force magnetic sensor for electronic compass applications[J], Journal of Microelectromechanical Systems, 2012, 21(4): 1002-1010.
- [15] 刘耀波. 基于 PNI 磁传感器的低功耗电子罗盘研究[J]. 电子测量技术, 2020,43(12): 158-162.
- [16] 孙军亮. 基于单片机的二维电子罗盘设计[J]. 信息与电脑, 2022,34(03):17-20.
- [17] 王华豫, 郭新伦. 基于 HMC1022 的电子罗盘设计[J]. 中国新通信, 2019,21(12): 52.
- [18] 白雪, 姜庆, 刘有彬, 张志红, 彭根斋. 基于磁电阻传感器的电子罗盘研制[J]. 磁性材料及器件, 2022,53(03):86-91.
- [19] 于靖, 卜雄洙, 叶健. 带倾斜修正的电子磁罗盘倾角测量误差补偿算法[J]. 中国惯性技术学报, 2013,21(06): 721-725.
- [20] 张玮, 王冬青. 三维磁阻式电子罗盘的设计与实现[J]. 工业控制计算机, 2014,27(03): 119-120.
- [21] 胡雄, 汪超, 唐刚. 基于 STM32 的六自由度平台的姿态测量系统设计[J]. 东华大学学报, 2016,42(04):597-603.
- [22] 樊依林, 刘耀波, 范涛, 汲方林. 基于 LSM303DLH 的电子罗盘设计[J]. 电子设计工程, 2021,29(17): 55-58.
- [23] 陈敏, 唐晓莉. 基于磁电阻效应的高精度电子罗盘设计[J]. 磁性材料及器件, 2020,51(02): 20-23+69.
- [24] 黄少楚, 冯晓明, 卢丽卿, 谭诗谣, 陈嘉华, 曾育锋. 基于各向异性磁阻传感器灵敏度与分辨率的探讨[J]. 大学物理实验, 2018,31(04):9-12.

- [25] 胡超, 艾国祥, 庞峰, 李圣明, 马利华. 一种提高电子罗盘航向和姿态测量精度的新方法[J]. 上海交通大学学报, 2015,49(02):158-163+168.
- [26] 燕斌. MEMS 加速度传感器在矿用随钻轨迹测量系统中的误差校正[J]. 煤田地质与勘探, 2017,45(04):144-148.
- [27] 罗远云, 艾菊梅. 基于电子罗盘航向角修正的行人航迹推算方法研究[J]. 智能计算机与应用, 2020,10(07): 117-121+125.
- [28] F. Jun, N. Zhiwen, L. Bao. Research on control algorithm of strong magnetic interference compensation for MEMS electronic compass[J]. Measurement, 2023, 207: 167-175.
- [29] W. Ruoyin, H. Xueliang, L. Jiacheng. Accurate Offset Angle Detection Strategy for Wireless Charging Coils Based on Electronic Compasses[J]. IEEE ACCESS, 2021, 9: 255-263.
- [30] R. A. Miptahudin, M. A. Risnandar, W. S. M. Sanjaya. Qibla Direction Correction Test using a Digital Compass and Arduino Microcontroller[J]. International Journal of Recent Technology and Engineering, 2019, 8: 217-226.
- [31] W. S. M. Sanjaya, D. Anggraeni, F. I. Nurrahman. Qibla Finder and Sholat Times Based on Digital Compass, GPS and Microprocessor[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 288(1): 429-440.
- [32] 井中武, 林新华, 林威, 周子栋, 张瑞. 三维电子罗盘温度补偿方法研究[J]. 导航与控制, 2022,21(Z1):102-108.
- [33] 景希, 高国伟. 基于六轴 MEMS 器件姿态测量系统[J]. 计算机测量与控制, 2021,29(06):55-59+135.
- [34] 郑传尧. 浅析 IIC 及其在电子罗盘上的应用[J]. 电脑知识与技术, 2019,15(03): 218-220.
- [35] 郭新伦, 王华豫. 浅析电子罗盘原理与误差分析[J]. 数字通信世界, 2019(07):151.
- [36] C. Hu, S. Song, X. Wang. A novel positioning and orientation system based on three-axis magnetic coils[J]. Transactions on Magnetics, 2012, 48(7):2211-2219.
- [37] 陆聪, 张北伟. 基于 STM32 三轴云台控制系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2019,38(09): 75-78.
- [38] R. Wang, X. Huang. Multi-degree of Freedom Accurate Offset Angle Measurement for

- Coils Based on 3D Electronic Compasses[J], *Sensors Journal*, 2021, 21(19): 22038-22046.
- [39] A. Baschiroto, A. Cabrini, E. Dallago, et al. Development and analysis of a PCB vector 2-D magnetic field sensor system for electronic compasses[J]. *Sensors Journal*, 2006, 6(2):365-371.
- [40] P. Wattanayotin, C. Puttharugsa, S. Khemmani. Investigation of the rolling motion of a hollow cylinder using a smartphone's digital compass[J]. *Physics Education*, 2017, 52(4): 169-178.
- [41] X. Zhu, T. Zhao, D. Cheng. A three-step calibration method for tri-axial field sensors in a 3D magnetic digital compass[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(5): 636-647.
- [42] 邓川, 张徐毓, 国林旗. 一种基于多冗余的电子罗盘新型校准方法[J]. *中国集成电路*, 2020, 29(Z1): 31-36+64.
- [43] J. Fu, Z. Ning, Y. Chang. Active compensation method for strong magnetic interference of MEMS electronic compass[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 48860-48872.
- [44] S. Tingting, F. Yanhu, Z. Yongbo, et al. Research on Error Compensation algorithm of Magneto-resistive Electronic Compass[C]. *International Conference on Electronic Measurement and Instruments*. 2011, 4: 291-293.
- [45] X. Zhang, L. Xiao, C. Zou, et al. A novel calibration method of electronic compass based on multi-redundancy[C]. *International Conference on Real-time Computing and Robotics*. 2017: 156-161.
- [46] Q. Zhang, L. Lei, J. Fan, et al. Autocalibration of a magnetic compass without heading reference[J]. *The 2nd Conference on Environmental Science and Information Application Technology*. 2010, 2: 422-425.
- [47] M. Liu, L. Guo, L. Xiao, et al. Towards better accuracy calibration method for electronic compass based on spatial interpolation algorithm[C]. *International Conference on Robotics and Biomimetics*. 2017: 879-882.
- [48] Z. Li, X. Li, Y. Wang. A calibration method for magnetic sensors and accelerometer in tilt-compensated digital compass[C]. *International Conference on Electronic Measurement*

- and Instruments. 2009: 868-871.
- [49] K. Mohamadabadi, C. Coillot, M. Hillion. New Compensation Method for Cross-Axis Effect for Three-Axis AMR Sensors[J]. Sensors Journal, 2012, 13(4): 1355-1362.
- [50] 韩颖. 新息自适应卡尔曼滤波算法在 MEMS 陀螺仪噪声抑制中的应用[C]. 第十九届中国航空测控技术年会论文集, 2022:77-81.
- [51] 任其亮, 程昊东. 针对小车状态感知的卡尔曼滤波多传感器融合算法[J]. 重庆理工大学学报, 2022,36(11):176-182.
- [52] 李蓉, 张一帆, 杨薇薇. 基于最小二乘法和卡尔曼滤波算法的平面电子罗盘误差补偿方法研究[J]. 宿州学院学报, 2019,34(11):77-81.
- [53] S. Zhang, G. Chang, C. Chen, et al. GNSS attitude estimation based on adaptive Kalman filtering using phase measurement[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2020, 14(5): 747-754.
- [54] 邱丹, 倪玲. 磁航向系统中电子罗盘的误差补偿算法研究[J]. 电子制作, 2021(21):57-60+42.
- [55] 周阳. 电子罗盘消除固定位置变磁场干扰方法[J]. 粘接, 2021,47(08):158-161.
- [56] 李翔, 刘晓琴. 电子罗盘动态航向误差校正研究[J]. 现代电子技术, 2020,43(24): 52-54+59.
- [57] 蒋贤志. 数字电子罗盘误差分析及校正技术研究[J]. 现代雷达, 2005(06):39-41+44.
- [58] 朱建良, 王兴全, 吴盘龙, 薄煜明, 张捷. 基于椭球曲面拟合的三维磁罗盘误差补偿算法[J]. 中国惯性技术学报, 2012,20(05):562-566.
- [59] Y. Wan, H. Li, Y. Jin, et al. A fast magnetic deviation calibration algorithm for tri-axial electronic compass[C]. International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems. 2016: 131-134.
- [60] M. M. Kamal, I. Khan, S. K. Haider. Compensation of magnetic sensor with electric compass[C] International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies. 2017: 467-470.