

# 航磁姿态数据收录系统设计

孙肖南, 孙陶, 辛春英, 贾化山

(核工业航测遥感中心, 石家庄 050002)

**摘要:** 随着计算机的发展, 航空磁法测量的磁补偿方式已从手动补偿转变为自动补偿方式, 其磁补偿干扰系数的计算, 也在补偿标定飞行中自动完成, 磁补偿系数的准确程度是由标定飞行所完成动作(摇摆、俯仰、偏航)的准确性来决定, 因而对飞机姿态角度的数据记录和显示, 可以为航磁补偿质量的评价提供一种依据, 还可以在测区做业的数据处理中, 检查航磁探头在测区中工作角度的变化, 排除航磁探头进入到死区内的干扰数据; 因此在航空物探测量中对飞行姿态数据的采集是很有必要的, 该软件应用 C++Builder 编译系统, 实现了在航空磁法测量中对航磁数据、GPS 数据、飞行姿态动作数据的实时采集、记录和显示, 也为补偿软件的开发提供飞行姿态数据的支持。

**关键词:** 航空物探; 姿态监视; 自动补偿

## Design of Air Magnetic Attitude Data Collection System

Sun Xiaonan, Sun Tao, Xin Chunying, Jia Huashan

(Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, China)

**Abstract:** With the development of computer, the method of magnetic compensation in the airborne magnetic survey has been changed from manual compensation to automatic compensation. And the calculation of interference coefficient in magnetic compensation is also done during the compensation calibration flight. Due to the accuracy of the magnetic compensation coefficient is determined by the accuracy of the action (swing, pitch, yaw), the recording and displaying of the aircraft attitude angle data can provide basis for the evaluation of the quality of aircraft magnetic compensation. From the data processing of the survey area, it can check how the working angle of the aerial magnetic probe changes in the measurement area, so we can avoid the interference caused by the aerial magnetic probe in dead zone. Therefore, it is very necessary to collect the flight attitude data during the airborne geophysical survey. This software is based on C++Builder compiler system, it not only lets the real time data collecting, recording and displaying of airborne magnetic data, GPS data and flight attitude motion data during the airborne magnetic survey come true, but also provides support for flight attitude data in the development of compensation software.

**Keywords:** airborne geophysical prospecting; attitude monitoring; automatic compensation

## 0 引言

在目前航空磁法测量普遍采用自动补偿系统, 测区做业前首先要进行磁补偿的标定飞行, 求解补偿的磁干扰系数。标定飞行是飞机按照规定的飞行方式和按照规定的角度让飞机做各种动作(摇摆±10度、俯仰±5度、偏航±5度), 补偿系统根据动作角度所采集的磁场数据, 自动计算出各项磁干扰系数, 包括固定场补偿系数  $i_1, i_2, i_3$  ( $H_{PERM} = i_1 \cos X + i_2 \cos Y + i_3 \cos Z$ ), 感应场补偿系数  $i_4, i_5, i_6, i_7, i_8, i_9$  ( $H_{INO} = i_4 He \cos^2 X + i_5 He \cos X \cos Y + i_6 He \cos X \cos Z + i_7 He \cos^2 Y + i_8 He \cos Y \cos Z + i_9 He \cos^2 Z$ ), 涡流场补偿系数  $i_{10}, i_{11}, i_{12}, i_{13}, i_{14}, i_{15}, i_{16}, i_{17}, i_{18}$  ( $H_{EDDY} = i_{10} He \cos X (\cos X)' + i_{11} He \cos X (\cos Y)' + i_{12} He \cos X (\cos Z)' + i_{13} He \cos Y (\cos X)' + i_{14} He \cos Y (\cos Y)' + i_{15} He \cos Y (\cos Z)' + i_{16} He \cos Z (\cos X)' + i_{17} He \cos Z (\cos Y)' + i_{18} He \cos Z (\cos Z)'$ )。飞机姿态动作的准确程度直接关系到这些磁补偿系数计算的准确性, 影响着测区飞行自动磁补偿的补偿精度和可靠性。而目前只是靠检查补偿后

标准差是否优于±0.08 nT 来评价补偿的质量水平, 并没有有效的方法来监控补偿动作是否符合要求<sup>[5]</sup>, 无法知道飞机完成相应动作的准确性, 难于对标定飞行动作的质量进行客观的评价, 因此设计一套具有飞行姿态角度数据记录和显示的磁场数据收录软件非常必要, 为技术人员评价所完成的补偿标定数据的质量, 增加了一种方法手段, 姿态数据的记录还能够让人们了解到航磁探头在测区中工作角度的变化, 在数据处理中剔除磁探头进入到死区内的数据干扰。也能够为人们开发事后补偿软件的工作中, 提供飞行姿态数据的依据。

设计的软件适用于 Windows 操作系统, 接收航磁设备 AARC500 航磁数据和磁通门数据, GPS 数据, 实时采集飞行姿态(俯仰、摇摆、偏航)角度数据和大气温度、压力数据, 将所接收的数据以数字或图形的方式实时的显示在收录系统屏幕上, 并将所接收和采集的数据记录到相应的数据文件中, 所记录的数据还包括磁总场到各轴分量的夹角数据, 其夹角数据的余弦对应着磁补偿计算公式中的  $\cos X, \cos Y$  和  $\cos Z$  项。

## 1 功能设计

### 1.1 设计结构

系统设计采用上位机和下位机的结合的方式, 设计包括姿态角度数据采集的硬件电路设计、单片机软件编程和收录 GPS 数据、航磁数据、姿态角度数据的界面编程设计。

上位机采用 Windows 操作系统, 应用 C++Builder 编译

收稿日期: 2016-11-28; 修回日期: 2016-12-23。

基金项目: 中国核工业地质局铀矿地质科研项目(201664, 201665)。

作者简介: 孙肖南(1962-), 男, 河北石家庄人, 物探高级工程师, 主要从事航空物探设备的管理维护方向的研究。

系统, 通过三个串口分别接收航磁 AARC 自动补偿仪、GPS 接收机、姿态角数据采集单片机电路发送来的数据, 实时显示所接收到的数据, 并把接收到的数据记录到相应的文件中。下位机采用 32 位单片机 stm32f4 负责读取和计算姿态传感器 MPU-6050 的数据、电子罗盘 HMC5883 的数据、磁总场到三轴分量的夹角数据、雷达高度数据, 同时 stm32 接收 AT89C52 发送来得大气温度和大气压力数据, 并将所接收的数据实时向上位机发送。

## 1.2 单片机硬件电路设计和单片机程序软件编程

### 1.2.1 硬件设计

考虑到飞机的密封环境, 把大气温度和压力的数据采集系统放到机舱外面, 采集机外的大气温度和压力, 通过无线数据发送到机舱内的单片机接收电路。因而硬件电路分为单片机 AT89C52 电路部分和单片机 stm32 电路部分。电路设计如图 1。

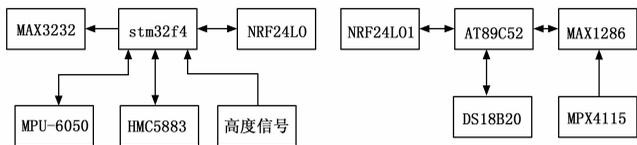


图 1 硬件结构及流程图

以 AT89C52 单片机为核心的电路包括: 温度传感器 DS18B20, 气压力传感器 MPX4115, 12 位串行 A/D 转换器件 MAX1286, 无线数据发送器件 NRF24L01。DS18B20 以单总线的方式进行数据传输, AT89C52 通过 P1 的 5 脚与 DS18B20 的数据引脚进行连接发送命令和接收数据。MPX4115 为模拟电压输出, 经 A/D 转换电路 MAX1286, 以 SPI 串行数据总线的方式接入 AT89C52 单片机 P2 的 0 脚、1 脚、2 脚, AT89C52 模拟 SPI 信号读取气压数据, MPX4115 电压传输函数为  $V_{out} = VS (P \times 0.009 - 0.095)$ 。NRF24L01 为 SPI 总线传输协议, 使用 2.4 GHz 的开放 ISM 频段, AT89C52 单片机通过 P1 的 0、1、2、3、4 脚和 P3 的 2、4 脚连接 NRF24L01, 模拟 SPI 总线信号从 NRF24L01 采用中断的方式向 stm32 单片机发送数据, 传输速率为 2 Mbps。

以 stm32f4 单片机为核心的电路包括: 陀螺仪器件 MPU-6050, 3 轴电子罗盘器件 HMC5883, 无线数据接收器件 NRF24L01, RS232 到 TTL 电平转换元件 MAX3232。MPU-6050 采用 I<sup>2</sup>C 总线数据传输协议方式, stm32f4 单片机 PC 口的 4、5 脚模拟 I<sup>2</sup>C 总线, 通过 `dmp_load_motion_driver_firmware()` 函数, 启用片内 DMP 数字处理器, 采用中断方式, 从 DMP 的 FIFO 缓冲器中读取陀螺仪 MPU-6050 的姿态角度数据。HMC5883 为 I<sup>2</sup>C 总线数据传输协议, stm32 通过 PB 口 4、5 脚模拟 I<sup>2</sup>C 总线的方式读取罗盘数据。stm32 通过 PA 口 2 脚, 采用引脚复用方式接收高度模拟信号的分压信号。stm32 通过 PB 口 10、11、12、13、14、15 脚, 采用 SPI 总线方式从 NRF24L01 接收 AT89C52 单片机发送的数据。stm32 通过 USART1 端口, 经过 MAX3232 电平转换后以每秒 10 次的速率向上位机串口发送所采集的数据。

### 1.2.2 单片机软件设计

单片机软件编程使用单片机 C 语言, 按照相应的协议要求, 编制功能函数, 实现引脚的数据位传送、器件的初始化、数据的采集、处理和发送。

### 1) AT89C52 单片机部分。

该功能通过以下函数实现, 对温度传感器 DS18B20 的初始化函数 `init_18b20()`, 写数据函数 `write_byte_18b20()`, 读数据函数 `read_temperature()`; 对气压传感器 MPX4115 的读取电压值函数 `GetValue1286()`, 气压值转换函数 `Get_Adc1286_Average()`; 对无线通讯元件 NRF24L01 的初始化函数 `init_NRF24L01()`, 发送数据包函数 `NRF24L01_TxPacket()` 和接收数据包函数 `NRF24L01_RxPacket()`。

### 2) stm32f4 单片机部分。

stm32 外部时钟采用为 8 MHz, 通过系统锁相环初始化设置, 生成 168M 的系统时钟和片内外设所需要的时钟。向上位机的数据发送, 启用 DMA 和定时器中断方式, 100 ms 中断一次, 通过串口以 115200 的波特率向上位机发送气压、温度和姿态角度数据。stm32 采用循环方式对 MPU-6050、HMC5883 数据采样并以中断的方式接收 AT89C52 发送的数据。

相关函数有: 对电子陀螺仪元件 MPU6050 的初始化函数 `GPIO_Init_I2C_MPU6050()`, 读取角速度 3 个方向数据值函数 `MPU_Get_Gyroscope()`, 读取加速度 3 个方向数据值函数 `MPU_Get_Accelerometer()`, 读取 dmp 数字处理器计算出的姿态角度 (摇摆、俯仰、偏航) 函数 `mpu_dmp_get_data()`; 对电子罗盘元件 HMC5883 的初始化函数 `Init_HMC5883()`, 读取总线字节数据函数 `RecvByte_I2C()`, 写入总线字节数据函数 `SendByte_I2C()`, 读取磁罗盘角度函数 `Multiple_read_HMC5883()`; 对高度模拟输入的: stm32f4 的 ADC 初始化函数 `Adc_Init_STM32F4()`, 读取高度数据的函数 `Get_godu_STM32F4()`; 对无线通讯元件 NRF24L01 的初始化函数 `NRF24L01_Init()`, 发送数据包函数 `NRF24L01_TxPacket()`, 接收数据包函数 `NRF24L01_RxPacket()`。

## 1.3 收录软件界面设计

### 1.3.1 串口接收及数据格式分析

本设计通过 3 个串口分别接收航空自动补偿仪 AARC500 发送的磁场数据数据, GPS 接收机发送的 GPS 数据和 STM32 单片机发送的飞行姿态等数据。串口数据接收采用中断的方式, 通过相应的中断回调函数, 将数据接收到三个串口的相应数据缓冲区中, 通过数据信号接收标志, 在线内采用同步机制方式对接收的数据进行处理显示和记录。

航空自动补偿仪 AARC 传输内容有: 基点号, 磁通门三轴数据, 补偿前磁场数据, 补偿后磁场数据; GPS 数据传输内容为 GPGGA 格式数据; STM32F4 向上位机传输的内容包括: MPU-6050 三维角速度和加速度数据、姿态角度数据 (俯仰, 摇摆, 偏航), HMC5883 的磁方位角数据、磁总场到  $x$  轴分量、 $y$  轴分量、 $z$  轴分量的夹角数据, 以及大气温度、大气压力和雷达高度数据。

### 1.3.2 设计结构及软件流程

数据收录显示软件采用多窗体设计结构, 每个窗体采用动态分配方式, 进入时自动分配内存空间, 退出时及时释放所占用的内存资源。软件设计结构如图 2。

### 1.3.3 窗体界面设计

#### 1) 主界面。

主界面由类 `class TForm1 : public TForm` 构成, 包含一个

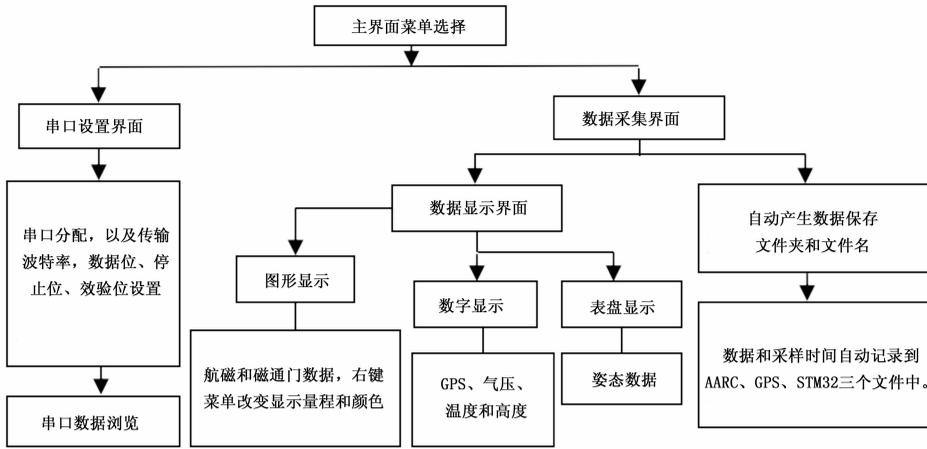


图 2 软件结构及流程图

TMainMenu 组件, 由多个 TMenuItem 组件项、TImage 组件以及相应的事件函数实现相应功能。主要函数有: 保存串口参数函数 jianlisbwj (), 该函数将串口设置参数保存到 cksebeipeizhi.ini 文件中, 读取串口参数函数 dakaisbwj (), 该函数用 cksebeipeizhi.ini 文件中的数据来设置相应的串口。

界面菜单包括: 文件、测量、帮助。文件子项为: 退出。点击该子项后软件退出, 释放所占用的资源。测量子项为: 设置串口、进入测量。点击该子项后, 执行相应窗体生成函数, 系统采用动态内存分配方式分配内存占用空间, 退出各窗体时, 自动释放所占用的内存资源。

### 2) 设置串口界面。

串口设置界面由类: class Tcuankousz : public TForm 构成, 包含 TMemo 组件、TLabel 组件、TComboBox 组件、TRadioGroup 组件、TCheckBox 组件、TButton 组件、以及相应的事件函数完成相应的功能, 退出时自动清理所占用的内存空间。主要功能函数有串口数据浏览按键函数 Button1Click (TObject \* Sender), 单选框设备点击函数 rdsbClick (TObject \* Sender) 以及保存各 TComboBox 组件设置的相应事件函数。

串口设置包括: 串口号、波特率、数据位、停止位、校验位等参数设置, 设置的内容自动记录到动态数组 DynamicArray<cksebei \* > 的 cksebei 指针所指向的数据结构中。

### 3) 工作界面显示。

界面由类 class TForm1 : public TForm 构成, 包含 TShape 组件和 TButton 组件。主要函数如下: 各按键的事件函数, 读取设置参数文件函数 dwjsj (), 创建测量数据记录文件函数 jianliFile (), 保存设置参数文件函数 baocuncansu ()。它可以自动创建两个文件 sjpeizhi.ini 和 szkcs.ini 用以保存界面运行的相关参数。

进入测量界面后, 自动按照串口设置界面中设置的串口参数打开 3 个串口并设置相应的中断函数。建立各显示窗口和窗口数据接收变量, 包括图形曲线显示窗体、数值显示窗体和表盘显示窗体。建立分析串口数据的线程并绘制 3 个红绿闪烁的指示灯指示 3 个串口的活动状况。

Button1Click () 事件函数可以动态生成各显示窗体和接收线程, 包括图形显示窗体 class Thuitu : public TForm, 数字显示窗体 class THC\_SR04 : public TForm, 表盘显示窗体 class Tzhinanzhenk : public TForm, 接收显示记录串口数据的

线程类 class TRS232\_Thread : public TThread。

类 class Thuitu : public TForm 所包含组件有 TStatusBar 组件、TPopUpMenu 组件、TMenuItem 组件、TColorDialog 组件和 TPaintBox 组件。主要函数如下: 改变量程函数 gblc (), 数据显示函数 xsjsj (), TPaintBox 鼠标单击函数 pbOnMouseDown (), 水平绘图和垂直绘图改变时的转换函数 zuobiaozh (), 以及绘图框内鼠标弹出清单的各项 TMenuItem 上的点击函数。

类 class Tzhinanzhenk : public TForm 所包含组件有 TPaintBox 组件和 TLabel 组件。主要函数有数据接收函数 jssshuju () 和表盘绘制函数 PaintBox1Paint ()。

类 class THC\_SR04 : public TForm 包含 TLabel 组件。主要函数有标题输入函数 input\_caption () 和数据输入函数 inputsj ()。

线程类 class TRS232\_Thread : public TThread 主要函数有: 接收 GPS 数据 Read\_gps ()、接收 AARC500 数据 Read\_AARC () 和接收 stm32 数据 Read\_stm32 ()。

## 2 系统测试

### 2.1 操作界面

软件运行在计算机 XP 操作系统上, 启动程序进入操作界面, 主菜单项包括: 文件、测量、帮助。

### 2.2 串口设置界面

点击菜单测量/设置串口, 在显示界面中设置相应接收串口的数据传输参数: 设备名、串口号、波特率、数据位、停止位。点击浏览按钮, 指定串口所输入的数据自动显示到界面内的文本框中, 并不断刷新, 因而能够检查串口所接收的数据。

### 2.3 进入工作界面

点击菜单测量/进入测量, 在显示界面后点击运行按钮, 进入界面后, 软件自动按照所设置的波特率等参数打开 3 个串口, 串口输入的数据实时的显示在各窗口中。界面中, 数字框分别显示气压、温度、高度和 GPS 坐标数据, 图形框分别用数字和曲线的形式显示接收到的数据, 分别为 AARC 补偿仪磁总场补偿前和补偿后的数据图形, 磁通门的三轴分量数据图形, 显示的量程和曲线颜色可由鼠标右键弹出清单来改变, 图形框的大小可通过鼠标在图形框边沿的拉伸而改变, 表盘框用指针和以度为单位数字形式显示姿态角度, 分别为: 磁罗盘方向、俯仰角度、摇摆角度和偏航角度。姿态图形框内显示一个不同颜色的六面立方体, 其六面立方体图形随着姿态角度的变化而发生相应的姿态旋转变化。各窗体可由鼠标任意拖动, 串口的活动状态由相对应的指示灯的红绿闪烁来标明。

图 3 展示了摇摆、俯仰、偏航 15 度动作时, 相应表盘框和姿态图形框显示的图形。

### 2.4 数据文件记录

软件运行后, 点击数据采集运行命令, 自动建立以当前时 (下转第 198 页)

3) 重复读取 Snarfer FIFO 中的内容。

系统总体流程图如图 4 所示。

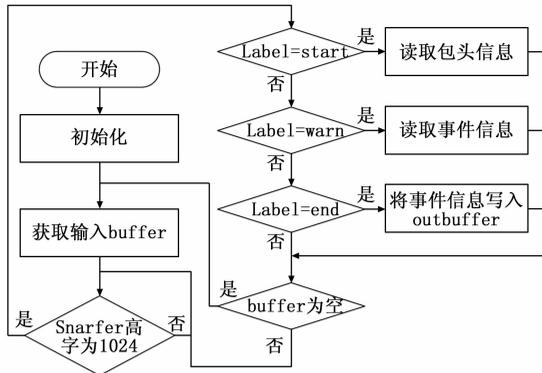


图 6 软件工作流程图

### 4 实验验证

为验证本文方法的可行性与有效性，在实验室环境进行了大量的实验。实验中利用多功能总线信号模拟器模拟多条消息重复型 ARINC429 事件消息包，由 ABM101 总线监听模块进行采集，通过机载嵌入式数据处理模块对 ABM101 的 Snarfer-FIFO 中数据进行处理，并在 Windows 系统上编写了检查软件，对 BCU 输出的 INEA 包内容进行检查，将映射结果进行还原事件信息，与模拟器实际发送的事件消息包内容进行了对比。结果表明，本文所提出的方案可行有效，从 BCU 输出的映射数据能准确还原出消息重复型 ARINC429 消息中的完整的事件信息，且消息参数采样率和 ARINC429 事件消息数据所占的带宽大大减少。

(上接第 194 页)

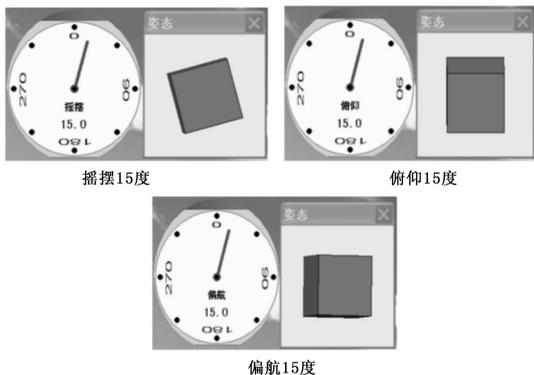


图 3 姿态动作角度显示

间命名的测量数据文件夹，并以当前时间建立三个设备数据记录文件，分别为 GPS 数据文件、AARC 数据文件和 stm32 数据文件，串口所接收的数据实时记录到这三个文件中。文件记录为 ASC II 数据格式，为同步所接收的三个串口数据，每次串口数据的记录，接收时间自动记录到相应的数据文件中，各数据文件的记录格式如图 4。

### 3 结论

本设计采用了软件和硬件方式，实现了 GPS 数据、动作姿态角度数据、航磁数据、高度、大气压力和温度数据的记录

### 5 结论

本文采用嵌入式数据处理模块实现了消息重复型 ARINC429 总线事件消息包机载实时处理，验证了在机载测试采集前端对测试采集数据进行处理的可能性与有效性，为后续其它数据量大、需实时遥测的关键数据的实时地面监控提供了参考解决方案。消息重复型 ARINC429 总线事件消息包机载实时处理，解决了原有机载测试系统事件信息采集、遥测的难题，在保证事件数据不丢失的情况下，降低了安全监控所需的遥测带宽需求，对飞行试验实时监控有一定的促进意义。同时，对于在飞行试验中遇到的一些新的测试需求，采用机载嵌入式数据处理模块对测试采集数据进行处理，能够在一定程度上能够解决一遇到新问题就需研制新的测试设备的尴尬境地，降低了飞行试验机载测试系统的成本和测试系统方案、设备的准备时间。

#### 参考文献:

- [1] 李 榕, 刘卫国, 刘晓剑. 航空用 ARINC429 总线收发系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2005, 13 (9): 970-972.
- [2] 张战平. ARINC429 航空通讯总线设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (8): 2230-2233.
- [3] 李伟英, 吴成富, 王 亮, 等. 基于 RTX 实时环境 ARINC429 航空通信总线驱动设计与实现 [J]. 测控技术, 2011, 30 (1): 79-82.
- [4] 田立强, 曾祥焯, 苏彦莽, 等. 基于 FPGA 的 ARINC429 接口设计 [J]. 测控技术, 2015, 34 (2): 91-94.
- [5] 安春雷, 梁葆华, 张 鹏. 基于嵌入式模块的机载 429 总线数据测试设备开发与应用研究 [J]. 科技传播, 2013 (13): 174-175.

```

GPS 数据文件记录格式:
$GPGGA,030053.10,3807.41517491,N,11430.59391863,E,1,06,2.2,76.293,M,-14.614,M,*77 11:09:47:937
$GPRGA,030053.20,3807.41517934,N,11430.59391671,E,1,06,2.2,76.302,M,-14.614,M,*72 11:09:48:031

STM32 数据文件记录格式:
$xn,22.4,2.2,1017.0,353.4, 6.4,-12.4,-6.9,-0.1238,-0.6489, 0.6764,22.9,131.2, 85.6,138.5 11:09:47:937
$xn,22.4,2.2,1017.0,353.5, 6.4,-12.4,-6.9,-0.1230,-0.6495, 0.6733,22.9,131.4, 85.7,138.3 11:09:48:015

AARC 数据文件记录格式:
#46394329 -01720.60 +31798.41 +42410.64 53406.5895 10695.6617 53406.5895 10695.6617 53405.3334 00000.0000 11:09:47:921
#46394429 -01720.44 +31798.71 +42409.98 53406.4226 10695.7511 53406.4226 10695.7511 53405.1662 00000.0000 11:09:48:031

```

图 4 数据文件记录格式

和显示，完成了数据收录系统的制作。将姿态数据接收到系统中，可有效监控航磁标定飞行过程中俯仰、摇摆、偏航动作的规范性，为数据处理人员评价磁补偿的质量水平提供了一种手段，在数据处理中，通过检查文件记录中飞行姿态的角度数据，可以发现测区中航磁探头进入死区时的记录，剔除探头在死区时的数据干扰。

#### 参考文献:

- [1] 谭浩强, C 程序设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [2] 李幼仪, 甘 志. C++ Builder 高级应用开发指南 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [3] 周海斌, 王安鹏, 牛 韬, 等. C++ Builder 技术大全 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [4] 范逸之, 江文贤, 陈立元. C++ Builder 与 RS-232 串行通信控制 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [5] 王林飞, 薛典军, 段树岭. 航磁软补偿规范性评价 [J]. 物探与化探, 2016, 40 (2): 365-369.