

**本科毕业设计（论文）**

题 目

学院名称 计算机科学与技术学院

专业名称 物 联 网 工 程

年级班级

学生姓名

指导教师

2020年06月

**摘要**

顶板离层仪是一种监测顶板岩层移动的专用监测仪器，是煤矿安全生产的重要基础设施，能有效的防止顶板坍落事故的发生，确保煤矿安全生产。但是随着矿山信息化的不断发展，传统顶板离层仪功能单一，满足不了信息化发展的要求。

本文采用STM32F103RCT6作为主控芯片，设计了一款功能强大、功耗极低的顶板离层位移传感器。在设计过程中采用了模块化的设计方法，其中，顶板离层位移传感器硬件部分主要包括MCU、电源模块、EEPROM、FLASH、蓝牙模块以及LED数码管显示模块，软件部分主要包括主程序、各模块驱动程序、数据采集存储程序、蓝牙通讯传输数据程序以及低功耗控制程序。

**关键词：**STM32；顶板离层位移传感器；低功耗

Abstract

The roof separation monitoring system is of great significance to the production of coal mines. It not only ensures the safety of workers, but also guarantees the safety of coal mine production.

The top plate separator is not only a special monitoring instrument for monitoring the displacement of roof strata, but also an important infrastructure for safety production of coal mine, which can effectively prevent roof collapse accidents, making sure the safety production of coal mine. However, with the development of mine informatization, the traditional top plate separator cannot meet the requirement of informatization development with its single function. In this paper, STM32F103RCT6 is used as the main control chip to design a well functioned roof separation displacement sensor with low power dissipation. The modular design method is used in the design process. The hardware part of the roof separator displacement sensor mainly includes MCU, power module, EEPROM, FLASH, Bluetooth-module and LED digital tube display module. The software part mainly includes main routine, various module drivers, data acquisition and shortage procedures, Bluetooth communication data transfer program and low power control program.

**Key words:** STM32; Roof separator displacement sensor; Low power.

目录

[1 绪论](#_Toc8086_WPSOffice_Level1) [1](#_Toc8086_WPSOffice_Level1)

[1.1顶板离层](#_Toc18918_WPSOffice_Level2) [1](#_Toc18918_WPSOffice_Level2)

[1.2顶板离层仪的现状](#_Toc11439_WPSOffice_Level2) [1](#_Toc11439_WPSOffice_Level2)

[1.3课题研究意义](#_Toc30454_WPSOffice_Level2) [1](#_Toc30454_WPSOffice_Level2)

[1.4课题研究内容](#_Toc13805_WPSOffice_Level2) [1](#_Toc13805_WPSOffice_Level2)

[2 方案设计](#_Toc18918_WPSOffice_Level1) [3](#_Toc18918_WPSOffice_Level1)

[2.1整体方案设计](#_Toc32407_WPSOffice_Level2) [3](#_Toc32407_WPSOffice_Level2)

[2.2主控芯片的选择](#_Toc14108_WPSOffice_Level2) [3](#_Toc14108_WPSOffice_Level2)

[2.3 STM32F103简介](#_Toc11378_WPSOffice_Level2) [4](#_Toc11378_WPSOffice_Level2)

[2.4 STM32F103芯片的优势](#_Toc11370_WPSOffice_Level2) [4](#_Toc11370_WPSOffice_Level2)

[3 电路设计](#_Toc11439_WPSOffice_Level1) [7](#_Toc11439_WPSOffice_Level1)

[3.1单片机最小系统](#_Toc5765_WPSOffice_Level2) [7](#_Toc5765_WPSOffice_Level2)

[3.1.1 STM32主控芯片电路](#_Toc11439_WPSOffice_Level3) [7](#_Toc11439_WPSOffice_Level3)

[3.1.2复位电路](#_Toc13805_WPSOffice_Level3) [8](#_Toc13805_WPSOffice_Level3)

[3.1.3晶振电路](#_Toc14108_WPSOffice_Level3) [9](#_Toc14108_WPSOffice_Level3)

[3.1.4 BOOT启动电路](#_Toc11370_WPSOffice_Level3) [10](#_Toc11370_WPSOffice_Level3)

[3.1.5 SWD下载电路](#_Toc5765_WPSOffice_Level3) [10](#_Toc5765_WPSOffice_Level3)

[3.2电源电路设计](#_Toc15453_WPSOffice_Level2) [11](#_Toc15453_WPSOffice_Level2)

[3.2.1电缆电路](#_Toc29252_WPSOffice_Level3) [12](#_Toc29252_WPSOffice_Level3)

[3.2.2电池升压/充电电路](#_Toc2323_WPSOffice_Level3) [13](#_Toc2323_WPSOffice_Level3)

[3.2.3 稳压3.3V电路](#_Toc24662_WPSOffice_Level3) [16](#_Toc24662_WPSOffice_Level3)

[3.3采集电路设计](#_Toc30668_WPSOffice_Level2) [17](#_Toc30668_WPSOffice_Level2)

[图3.3.1电位器实物图](#_Toc25830_WPSOffice_Level3) [18](#_Toc25830_WPSOffice_Level3)

[图3.3.2 AD采集电路](#_Toc21835_WPSOffice_Level3) [18](#_Toc21835_WPSOffice_Level3)

[3.4存储电路设计](#_Toc29252_WPSOffice_Level2) [18](#_Toc29252_WPSOffice_Level2)

[3.5唤醒电路设计](#_Toc8576_WPSOffice_Level2) [20](#_Toc8576_WPSOffice_Level2)

[3.6数码管电路设计](#_Toc2323_WPSOffice_Level2) [21](#_Toc2323_WPSOffice_Level2)

[3.6蓝牙通讯电路设计](#_Toc16114_WPSOffice_Level2) [23](#_Toc16114_WPSOffice_Level2)

[4 软件设计](#_Toc30454_WPSOffice_Level1) [25](#_Toc30454_WPSOffice_Level1)

[4.1 软件整体设计](#_Toc12863_WPSOffice_Level2) [25](#_Toc12863_WPSOffice_Level2)

[4.2 初始化程序](#_Toc18823_WPSOffice_Level2) [28](#_Toc18823_WPSOffice_Level2)

[4.2 数据采集程序](#_Toc24662_WPSOffice_Level2) [29](#_Toc24662_WPSOffice_Level2)

[4.3 数据存储程序](#_Toc13673_WPSOffice_Level2) [31](#_Toc13673_WPSOffice_Level2)

[4.4 数码管显示程序](#_Toc7006_WPSOffice_Level2) [33](#_Toc7006_WPSOffice_Level2)

[4.5 蓝牙通信程序](#_Toc25830_WPSOffice_Level2) [34](#_Toc25830_WPSOffice_Level2)

[5 电路调试与功能测试](#_Toc13805_WPSOffice_Level1) [37](#_Toc13805_WPSOffice_Level1)

[5.1电源电路调试](#_Toc21835_WPSOffice_Level2) [37](#_Toc21835_WPSOffice_Level2)

[5.2 STM32最小系统测试](#_Toc8081_WPSOffice_Level2) [38](#_Toc8081_WPSOffice_Level2)

[5.3数码管显示测试](#_Toc9997_WPSOffice_Level2) [39](#_Toc9997_WPSOffice_Level2)

[5.4蓝牙通信测试](#_Toc29601_WPSOffice_Level2) [39](#_Toc29601_WPSOffice_Level2)

[5.5低功耗测试](#_Toc25337_WPSOffice_Level2) [40](#_Toc25337_WPSOffice_Level2)

[6 总结与展望](#_Toc32407_WPSOffice_Level1) [43](#_Toc32407_WPSOffice_Level1)

[6.1总结](#_Toc23337_WPSOffice_Level2) [43](#_Toc23337_WPSOffice_Level2)

[6.2展望](#_Toc4000_WPSOffice_Level2) [43](#_Toc4000_WPSOffice_Level2)

[致谢](#_Toc14108_WPSOffice_Level1) [45](#_Toc14108_WPSOffice_Level1)

[参考文献](#_Toc11378_WPSOffice_Level1) [47](#_Toc11378_WPSOffice_Level1)

[附录](#_Toc11370_WPSOffice_Level1) [49](#_Toc11370_WPSOffice_Level1)

1 绪论

## 1.1顶板离层

顶板离层是一种巷道围岩发生变形或被破坏的形式，通常煤层上部直接顶是厚约为0.5～3米左右的易与上部岩层离层的岩层，其上部岩层被称为硬岩层。下部软岩层可能是一个整层，也可能是几个分层组成的分层组。软岩层与硬岩层只是一个形象的说法，实际上是指采动后，下部岩层因[岩石强度](https://www.baidu.com/s?wd=%E5%B2%A9%E7%9F%B3%E5%BC%BA%E5%BA%A6&tn=SE_PcZhidaonwhc_ngpagmjz&rsv_dl=gh_pc_zhidao" \t "https://zhidao.baidu.com/question/_blank)低或因分层薄，其挠度比上部岩层大，向下弯曲得多，而上下部岩层间又没有多大的粘接力。因此，下部岩层与上部岩层形成了离层。近几年来，发生的[冒顶事故](https://www.baidu.com/s?wd=%E5%86%92%E9%A1%B6%E4%BA%8B%E6%95%85&tn=SE_PcZhidaonwhc_ngpagmjz&rsv_dl=gh_pc_zhidao" \t "https://zhidao.baidu.com/question/_blank)，顶板离层[冒顶事故](https://www.baidu.com/s?wd=%E5%86%92%E9%A1%B6%E4%BA%8B%E6%95%85&tn=SE_PcZhidaonwhc_ngpagmjz&rsv_dl=gh_pc_zhidao" \t "https://zhidao.baidu.com/question/_blank)占有相当比重。冒顶事故不但影响煤矿的正常生产，而且会造成人员伤亡及设备损坏。

## 1.2顶板离层仪的现状

目前在煤矿中使用的是结构简单的机械式巷道顶板离层指示仪，并靠人定时观察测量顶板离层状况。机械式顶板离层仪通常分为两种，一种是LBY型号是T型的，还一种是ZKBY型托盘型的。机械式顶板离层仪的基点锚爪通过细钢丝和刻度尺相连，将深基点放置在顶板上部硬岩层中，作为观察顶板离层的一个参考点，浅基点则放置在锚杆顶部位置以观察锚杆控制范围的顶板离层下沉情况。顶板离层仪上的读数就是巷道顶板相对于深基点的离层位移量。

## 1.3课题研究意义

对于锚杆支护巷道来说，最大的安全隐患便是顶板离层。当顶板离层超过一定范围，就说明了顶板处于不稳定的状态，如果不及时采取支护措施，便会发生冒顶等恶性顶板事故。据统计 , 我国煤矿顶板冒落造成的人员伤亡事故约占事故总数的三分之一左右。目前在煤矿中使用的结构简单的机械式巷道顶板离层指示仪采用人工定时观察测量顶板离层状况的方法，而且不能实现顶板离层的位移数据记录与分析。因此，设计并实现一种新型顶板离层仪，从而记录顶板离层的位移数据，对于阻止顶板失稳，避免突发性破坏的事故发生具有重要意义。

## 1.4课题研究内容

本文从实际需求出发，设计一款经济实用且低功耗稳定工作的顶板离层位移传感器即新型顶板离层仪。首先要了解顶板离层仪的工作原理和在国内外的发展历程，从工作原理出发分析顶板离层仪存在的优缺点；然后依照本课题要实现的功能，从实现功能的可行性、可能性和使用方便性等方面进行考虑，进行整体设计方案的选择和论证。再依照模块化思想的设计原则，将整个硬件设计方案分解为STM32最小系统、显示模块、位移数据采集模块、数据/参数存储模块、蓝牙通讯模块以及电源模块等多个模块进行单独设计，最后进行整合，完成课题的硬件部分设计。同时要对软件开发平台进行认真地了解，同样采用模块化的思想，编写各个模块的软件程序，实现相应模块的预期功能。最后进行软硬件部分之间的测试和实验，如果发现存在问题，就及时地解决问题，不断地完善软件的程序设计和硬件电路设计。最终完成整个课题的设计工作。

2 方案设计

## 2.1整体方案设计

本文设计的顶板离层位移传感器的硬件，在整体结构上主要由STM32单片机最小系统、电源模块、位移数据采集模块、LED数码管显示模块、蓝牙通讯模块、光照、按键唤醒模块以及EEPROM、FLASH存储模块组成。其中系统的总体结构框图，如图 2-1 所示。



图2-1 系统整体结构框图

## 2.2主控芯片的选择

本文在设计顶板离层位移传感器的过程中，确定主控芯片时，有两种芯片被仔细考虑了很久。

其一是NORDIC的nRF52832，它是一款功能强大，高度灵活的超低功耗多协议SoC蓝牙单芯片，嵌入式2.4GHz收发器，非常适合ble蓝牙低功耗的无线应用。它具有非常多的令人眼前一亮的参数，例如最突出的极低的功耗，在活跃状态下发射功率高达4dBm的情况下发送数据的功耗却低至7.7mA。此外它拥有Cortex-M4F的内核，能够更强大的运算能力以及浮点运算的技术。现在很多的穿戴设备或者工业化设备需要内置非常复杂的算法，所以需要MCU有更快的运行速度。这颗Cortex-M4F的内核运行主频64Mhz，比其他厂家的芯片提高了很多。并且nRF52832有512KB的Flash和64KB的RAM，这也超出其他厂家的芯片一大截。额外的Flash和RAM空间也意味着nRF52832可以支持多协议，并且在运行时自动切换。

除了这些十分出色的参数，nRF52832还有许多丰富的外设/接口，3个主/从SPI、2个IIC接口、1个UART、3个PWM、12位精度的ADC以及RTC。这些丰富的外设资源及其强大的功耗控制使其完全满足顶板离层位移传感器的开发

其二是STM32F103RCT6，它是意法半导体公司推出的一款以Cortex-M3为内核的32位的高性能ARM微控制器。Cortex-M3处理器是由ARM公司设计的首款基于ARMv7-M体系结构的32位标准处理器，它不仅具有低功耗、少门数等优点，而且还具有短中断延迟、低调试成本等众多优点，使它在众多的处理器中脱颖而出。STM32F103系列是增强型系列，工作频率设定在72MHZ，其带有更多片内RAM和更丰富的外设资源。

经过仔细的考虑，最终选用了STM32F103RCT6。因为它的资料特别多，开发教程也非常完善，并且本人具有相关开发经验。而nRF52832虽然从性能上更适合顶板离层位移传感器的开发，但是本人缺乏SOC片上系统的开发经验，并且nRF52832的开发还需要花费很多时间去了解Nordic提供的SDK开发包以及相关开发资料，从开发周期上来看，选择nRF52832不太合适，故最终选择了更熟悉的STM32F103RCT6。

## 2.3 STM32F103简介

基于ARM7和ARM9内核进行设计是微控制器发展的一个典型趋势，2006年第一个基于ARMCortex-M3内核的微控制器STM32由意法半导体（STMicroelectr，简称ST)出品。Cortex系列主要有3个不同的分支，分别是A分支,R分支,M分支。STM32隶属于M分支，属于微控制器系列产品，同时在结构组成上STM32也分为基本型和增强型两个不同的版本。其中STM32的基本型外挂的设备数目少，最高只能承受36MHz的时钟频率,而增强型的STM32拥有完整的外部设备，同时CPU可以在最高72MHz的时钟频率下运行。

## 2.4 STM32F103芯片的优势

最初研制STM32系列的微控制器就是以提高系统的性能和降低工作时的功率损耗为目标的，STM32的出现是微控制器领域的一个新的飞跃，与以往的微控制器相比较，具有突出的优越性。

（1）精密性。STM32是比较高端的一种微控制器，集中分布着完备的外设，布局精巧，器件放置紧密且不失独特性。比如STM32具有两个12位高精度的ADC转换器，并且在一定的条件下可以实现同时工作，衍生出多种转换模式，功能强大。

（2）可靠性。STM32的外设布局越来越精密，但是对于可靠性的要求并没有因此降低。为了在外挂的器件越来越多的情况下，依旧能够保持高可靠性，STM32配备充足的硬件电路，主要包括低电压监测器、时钟管理器和看门狗等。比如时钟管理系统负责监测外部时钟的工作，一旦外部时钟源发生问题，系统就会自动将内部振荡器切换为主时钟源。

（3）安全性。信息时代，最为激烈的就是信息竞争，确保信息在传递过程中的保密性，是实现信息安全的必要步骤。一旦数据中包含的信息泄露，整个信息的传递就没有继续下去的意义。STM32可以通过锁定Flash引脚来确保信息不会泄露和被窃取，一旦出现想要获取芯片内部信息的行为，引脚状态就会被拉高，STM32会自动清除芯片内部信息。从而最终确保信息的安全性。

（4）在线调试。STM32支持Thumb-2指令，可以在C语言环境下完成软件的编译、仿真和调试。在软件平台上编写的程序可以通过下载口，下载到STM32芯片内部，进行在线调试，方便实时发现错误并进行及时的修改，实用性强。

3 电路设计

在本顶板离层位移传感器的设计中使用了许多模块电路和外围元器件，主要有以下内容：微控制器STM32F103RCT6以及最小系统电路、SWD下载接口电路、电源电路、LED数码管显示模块、双电位器采集电路、EEPROM存储器AT24C256、FLASH存储器W25Q128、蓝牙通讯HC05模块。下面将对这些模块电路分别介绍。

## 3.1单片机最小系统

单片机最小系统，或者称为最小应用系统，是指用最少的元件组成的单片机可以工作的系统。对STM32F1系列单片机来说，最小系统一般应该包括：单片机、晶振电路、复位电路。

## 3.1.1 STM32主控芯片电路

STM32F103RCT6采用LQFP64封装，共有64个引脚，拥有5个USART、3个SPI、3个ADC、2个IIC、许多个GPIO等丰富的外设资源。本文设计中分别使用了1个串口、1个SPI、一个IIC、2个ADC供蓝牙模块HC05、FLASH存储器W25Q128、EEPROM存储器AT24C256、以及电位器采集电路使用。具体电路如图3.1.1所示。

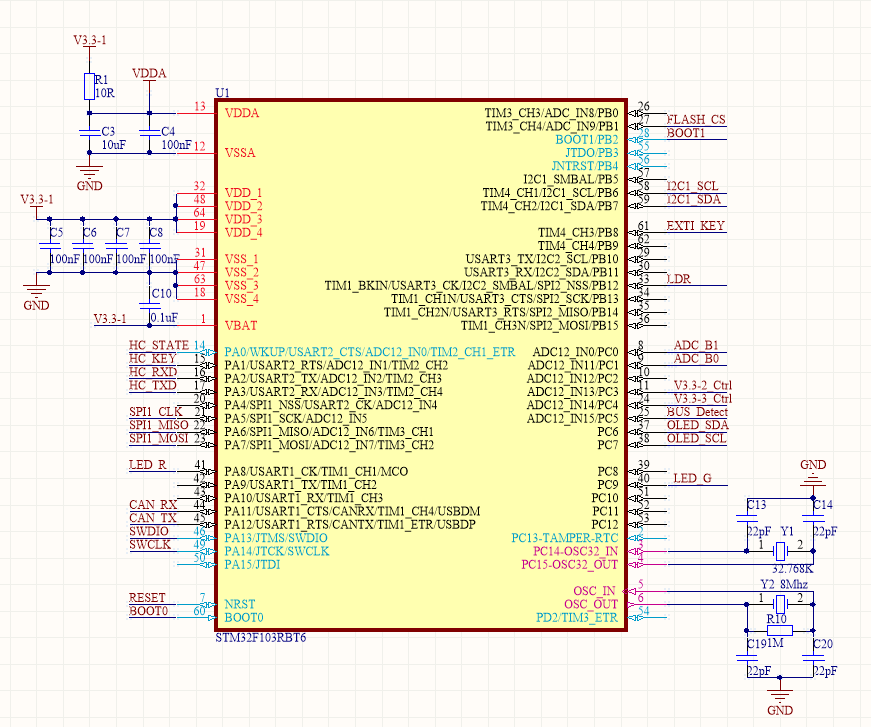


图3-1 STM32主控芯片电路

## 3.1.2复位电路

无论是在单片机刚开始接上电源时，还是运行过程中发生故障都需要复位。复位电路用于将单片机内部各电路的状态恢复到一个确定的初始值，并从这个状态开始工作。STM32F103RCT6为低电平复位，复位电路RESET端连接主芯片第7脚复位管脚．当上电一瞬间， C34相当于通路接地，芯片自动复位，之后V3.3-1稳定，C34相当于断路，复位端RESET一直为高电平。当开关按下时电容被放电、RESET也与地相接被拉到低电平，而且由于电容的充电，会保持一段时间的低电平来使单片机复位。具体复位电路如图3-2所示。

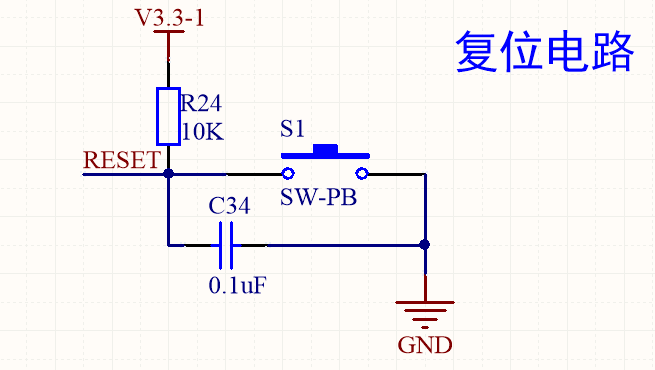


图3-2 复位电路

3.1.3晶振电路

单片机系统里都有晶振，在单片机系统里晶振作用非常大，全称叫晶体振荡器，结合单片机内部电路产生单片机所需的时钟频率，单片机晶振提供的时钟频率越高，那么单片机运行速度就越快，单片接的一切指令的执行都是建立在单片机晶振提供的时钟频率。

晶振通常与锁相环电路配合使用，以提供系统所需的时钟频率。如果不同子系统需要不同频率的时钟信号，可以用与同一个晶振相连的不同锁相环来提供。

本课题使用的STM32 芯片自身具有内部 RC振荡器即内部晶振，为芯片提供时钟基准，本课题中采用的STM32F103RCT6属于F1系列中的增强型，可以在 72MHz 的时钟下运行。但是内部 RC 振荡器的 不足之处是：准确性不够，而且稳定性不好，所以一般在设计中通常使用外部的晶振时钟源。通常情况下，外部时钟源可以分为高速外部振荡器(HSE)、低速外部振荡器(LSE)。在本课题中，主控芯片选择外接晶振电路，并同时使用了高速外部振荡器和低速外部振荡器。高速外部振荡器Y2是1个8MHz的无源晶振，从STM32的 OSC\_IN 和 OSC\_OUT引脚进入，并且搭配22pF的谐振电容C19、C20，通常与锁相环电路PLL配合使用，为以提供系统所需的时钟频率。而低速外部振荡器Y1是1个32.768Khz，从STM32的 OSC32\_IN 和 OSC32\_OUT引脚进入，同样搭配22pF的谐振电容C13、C14，通常为STM32的RTC、看门狗提供时钟来源。具体晶振电路如图3.3所示。

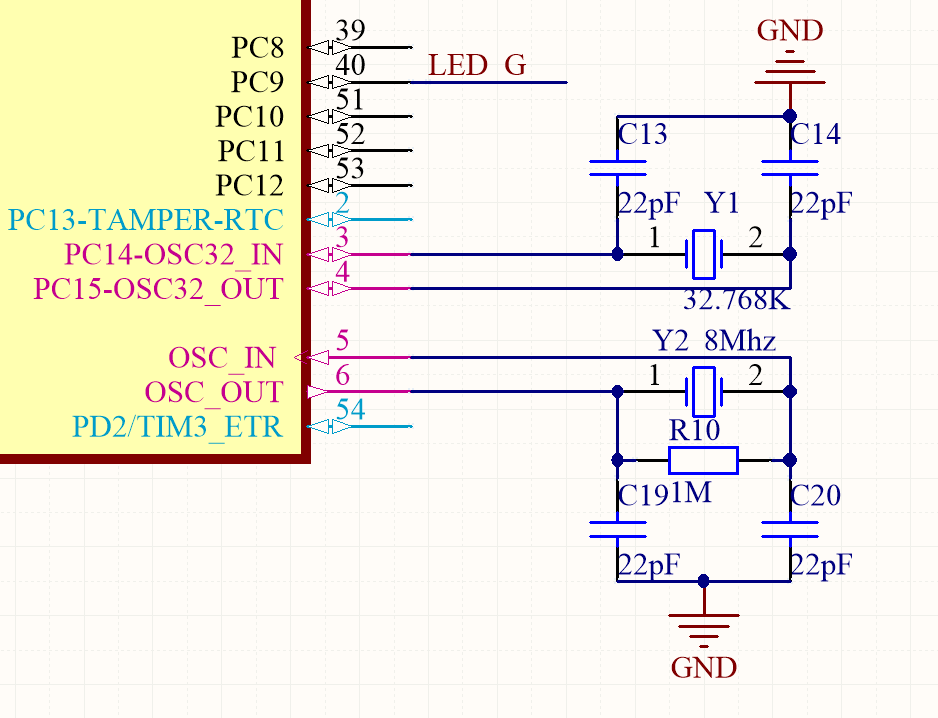


图3-3 晶振电路

3.1.4 BOOT启动电路

Cortex-M3内核的单片机有3种启动方式，所以STM32F103RCT6的启动方式同样有三种，详情如表3-1所示。

表3-1 BOOT选择说明

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 启动模式选择引脚 | | 启动模式 | 说明 |
| BOOT1 | BOOT0 |
| X | 0 | 从用户闪存启动 | 正常工作模式 |
| 0 | 1 | 从系统存储器启动 | 可用于ISP下载模式 |
| 1 | 1 | 从内置SRAM启动 | 用于调试，SRAM掉电数据丢失 |

3.1.5 SWD下载电路

单片机最核心的内容还是程序，当电路板制作完成并完成焊接工作后，就该将程序下载至芯片中。STM32支持的在线仿真调试和下载方式有两种，分别是JTAG和SWD模式。JTAG模式需要使用到5个引脚，而SWD模式只需要2个引脚。为了节省资源，本设计使用SWD模式下载。具体电路如图3-5所示。

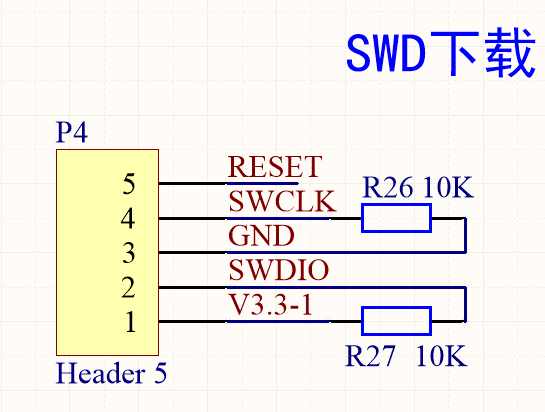


图3-5 SWD下载电路

## 3.2电源电路设计

顶板离层位移传感器被设计在矿井下使用，属于特殊的使用场景，所以其电源电路根据矿井的特殊环境特殊设计。顶板离层位移传感器的电源输入源有两个，其一是矿井下的电缆，其二为3.7V锂电池。特殊的电源电路设计，使其能在所有的使用需求下使用，无论是只使用电缆还是只使用电池，或者是使用电缆并且挂载电池用做备份电源，或者是只使用电池并且当电池电量耗尽时使用电缆充电的情景下，它都能够胜任。根据电源输入源的不同，电路有三种不同的工作模式，具体如下所示。

（1）只使用电缆作为电源输入源，电缆从LT1129-5输入，降压至5V后经过BAT54C输出后分别给TPS62125以及2个RT9193供电，然后都输出3.3V分别供STM32最小系统、采集电路和FLASH和EEPROM存储电路、蓝牙模块和数码管显示模块使用，并且为了实现低功耗的功能需求选用了RT9193，RT9193能被单片机控制是否使能输出3.3V从而控制电路的通断。

（2）只使用电池作为电源输入源，3.7V锂电池经过TP5400将电压升压至5V然后经过BAT54C输出，其他都与只使用电缆供电相同。

（3）同时使用电池与电缆，电缆被LT1129-5降压至5V后，同时输出至TP5400与BAT54C。TP5400此时作为锂电池充电芯片，为3.7V锂电池充电直到电池充满电，当有5V电路输入TP5400时，TP5400不会将3.7V锂电池升压输出5V。经过BTA54C的电路与上面描述相同。具体电源电路框图如图3-2所示。

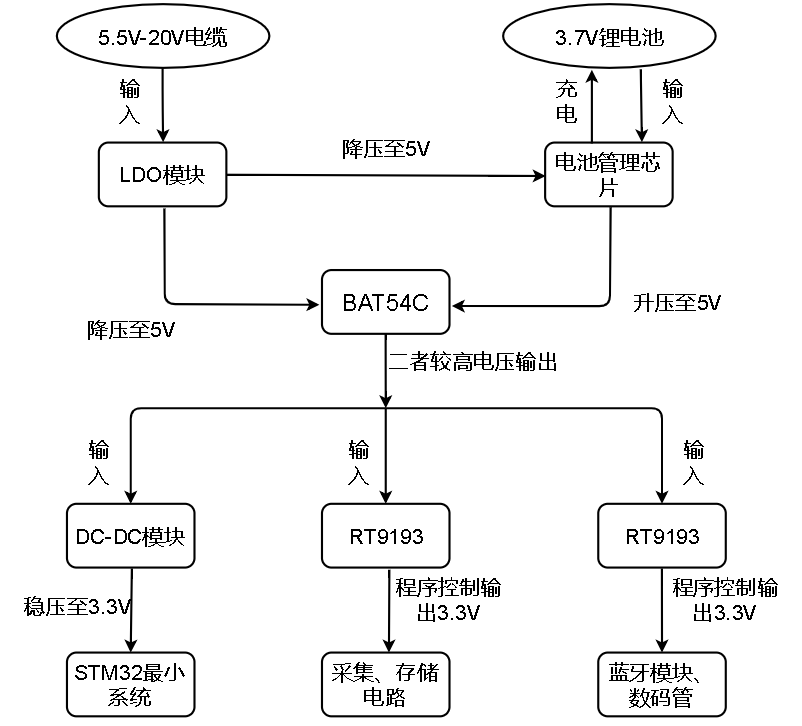


图3-6 电源电路框图

## 3.2.1电缆电路

在合适的条件下位移传感器可以利用LT1129-5使用电缆供电， LT1129-5是具有关断功能的微功耗低压输出稳压器。输入电压范围为5.5V-20V， 能够提供700mA的输出电流，稳定输出5V电路。LT1129-5部分电路具体原理图见图3.7

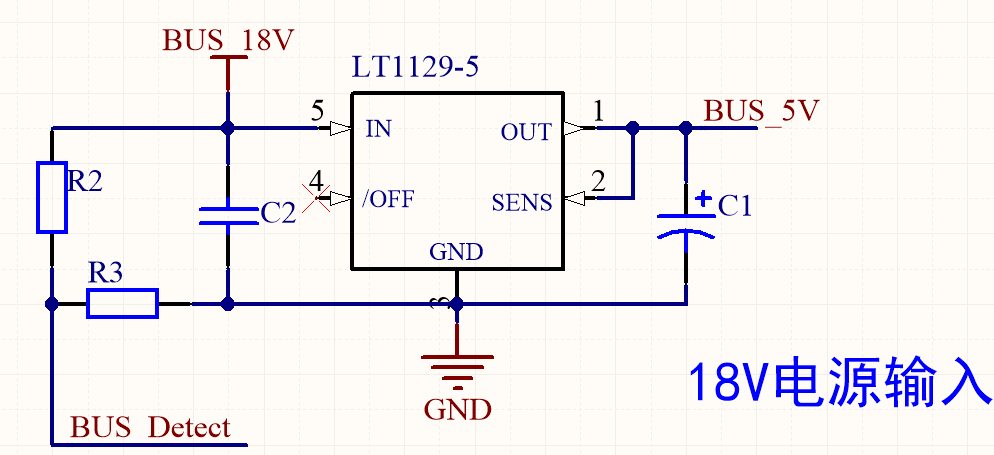


图3-7 LT1129-5电路原理图

## 3.2.2电池升压/充电电路

在设计顶板离层位移传感器的电池部分电路时，曾选用过其他方案，而非电源电路框图中所用的TP5400。之前使用的是FP6715作为电池升压电路模块，电池充电模块使用TP4057。

FP6715是一款高效率的电流模式PWM升压型DC / DC转换器，输入范围2.5V-5.5V，具有高达93%的转换效率，能够稳定升压输出5V，最高可达2.5A的电流。

TP4057一款完整的单节锂离子电池充电器，带电池正负极反接保护，采用恒定电流/恒定电压线性控制。充电电压固定于4.2V,充电电流最大500mA并且可以根据PROG引脚的电阻大小设定充电电流大小。3.7V锂电池的满电电压为4.2V,当锂电池达到满电电压时,充电电流将降低到设置电流的1/10,这时将自动停止充电。当输入电压被拿掉的时候,TP4057进入一个低电流状态。具体的最初的电池升压电路和电池充电电路设计如图3.2.2和图3.2.3所示。

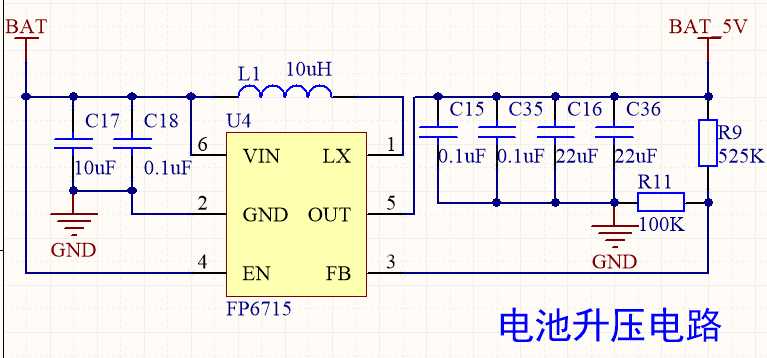


图3-8 初版电池升压电路

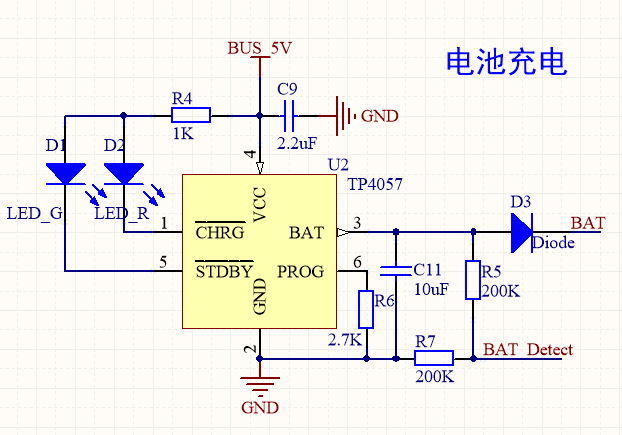


图3-8 初版电池充电电路

最终放弃了FP6715+TP4057的电池部分电路设计的原因主要是FP6715的静态电流太大，大约有50多uA，即便FP6715拥有2.5A的电流，93%的转换效率。但是对于低功耗产品而言，50多uA的静态电流是致命的缺陷。随后对电池部分电路设计中的IC重新进行了选型，最终才选用了电池升压、充电二合一的TP5400，并且TP5400的转换效率同样很高，升压效率高达90%，最重要的是TP5400的静态电流小于10uA,后经实际测量大概在6.5uA。再结合实际生产的成本与供货量问题，显然TP5400的性价比更高，并且销量远高于FP6715和TP4057。所以最终选用了TP5400。

TP5400是一款采用恒定电流/恒定电压对单节锂离子电池充电和升压放电控制器。它能够提供1000mA的充电电流（借助一个热设计良好的PCB布局）。升压电路内置了NMOS功率管，外部仅需一个电感和肖特基二极管及少量电容即可完成5V升压输出。当升压输出引脚端接入负载时，TP5400可提供一个5V的稳压源，驱动能力达1A，并且静态电流小于10uA。

TP5400的充电电流可以自行设定大小，采用一个连接在PROG引脚与地之间的电阻器来设定的。设定电阻器和充电电流采用下列近似公式来计算根据需要的充电电流来确定电阻器阻值，公式 R = 1100 / Ibat 。

TP5400具有极强的电池保护功能，电池充电时，如果电池正极电压低于2.9V，则充电器进入涓流预充电模式。在该模式中，TP5400提供一个恒流电流1/5的设定充电电流，以便将电流电压提升至一个安全的电压，从而实现满电流充电。当电池正极电压升至2.9V以上时，充电器进入恒定电流模式，此时向电池提供恒定的充电电流。当电池正极电压达到最终浮充电压（4.2V）时，TP5400进入恒定电压模式，且充电电流开始减小。当充电电流降至设定值的1/5，充电循环结束。而电池升压输出模式中，当锂电池电压低至3V时，TP5400会自动关断升压。当锂电池恢复至3.3V以上后，停机状态取消，升压恢复工作。

TP5400有两个漏极开路状态指示输出端，CHRG和STDBY。当充电器处于充电状态时，CHRG被拉到低电平，在其它状态，CHRG处于高阻态。当电池没有接到充电器时，CHRG输出脉冲信号表示没有安装电池。当电池连接端BAT管脚的外接电容为10uF时CHRG闪烁周期约0.5-2秒。具体指示灯状态见表3-2

表3-2 指示灯状态表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 充电状态 | 红灯 CHRG | 绿灯 STDBY |
| 正在充电状态 | 亮 | 灭 |
| 电池充满状态 | 灭 | 亮 |
| 无电池状态 | 闪烁 | 亮 |
| 升压工作时 | 灭 | 灭 |

本课题在设计TP5400的电路时，结合顶板离层位移传感器实际使用场景以及矿井这种特殊的环境所要求的本安认证要求以及低功耗使用时长要求，最终选用了3000mAh的3.7V有本安认证的锂电池，并且稍微限制了充电电流大小，根据公式计算出电阻阻值约为1500欧姆。具体电路如图3.9所示。

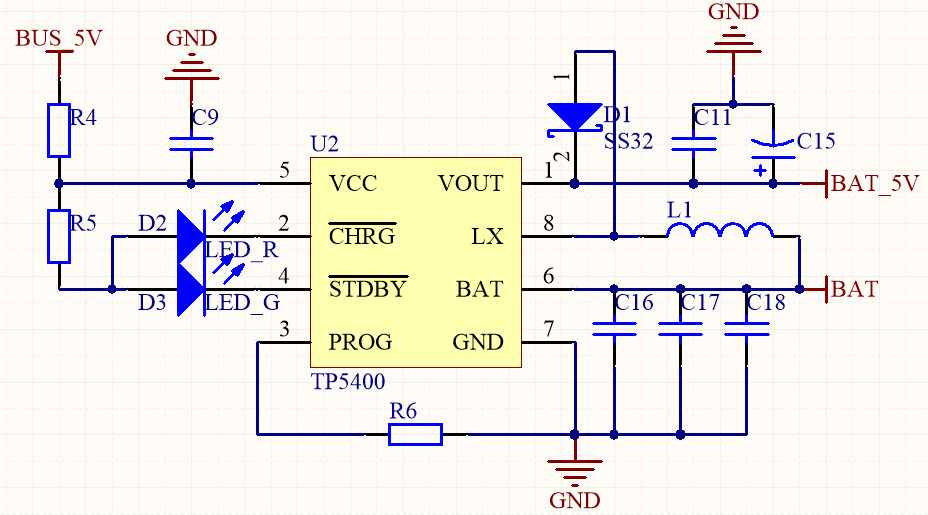


图3-9 电池升压充电二合一电路

## 3.2.3 稳压3.3V电路

无论采用何种供电方式，都会输出5V电路，而STM32单片机、FLASH存储器、蓝牙模块等都需要3.3V左右的工作电压。所以还需要将5V电路降压至3.3V。并且为了低功耗功能，本文在设计此部分电路时，将3.3V的电路分成了三部分。分别给单片机最小系统、采集和存储部分电路、显示和蓝牙通讯部分电路供电。其中单片机需要一直工作，无论单片机处于何种模式或状态，都要确保其供电正常，所以需要非常低的静态电流的电源芯片。而其他两部分的电路则略有不同，这两部分的电路应当是仅在需要的时候能有就行，所以需要有使能控制引脚并且非使能状态静态电流小的电源芯片。最后根据需求，选定了TPS62125和RT9193。

TPS62125是一款高效率的同步降压转换器，专门针对低功耗和超低功耗应用进行了优化，可以提供高达300mA的输出电流，拥有3V-17V的宽输入电压和1.2V-10V的可调输出电压，可以支持1-4节锂电池的供电应用场景，拥有极低的静态电流13uA。从参数上看TPS62125能够完美的满足顶板离层位移传感器的低功耗需求。本文在设计此部分电路时需要3.3V的输出电压，而输出电压由外部反馈分压器调节，并由以下公式计算输出电压。所以本文设计中的R7和R11分别为1.8MΩ和576KΩ，V3.3-1为STM32F103RCT6提供3.3V的电源电压。具体电路如图3.2.5所示。

公式：VOUT = VREF\_FB ´ ( 1 + ( R7 / R11 ) ) ,VREF\_FB = 0.8v

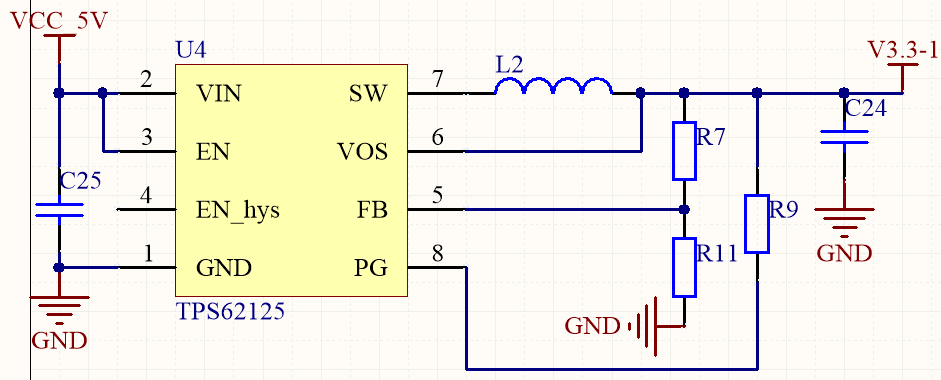


图3-10TPS62125电路

RT9193专为便携式RF和无线应用而设计，具有苛刻的性能和空间要求。其性能针对电池供电系统进行了优化，可提供超低噪声和低静态电流，在截止模式下消耗小于0.01uA并且从截止模式切换至工作模式的唤醒时间小于50us。这些优秀的功能和参数满足了本文设计中有关3.3V电路的开关控制和低功耗需求。有关此部分电路设计，有一点需要注意，就是RT9193的EN引脚需要接一个100KΩ的下拉电阻连接到GND。U7和U9分别为数码管和蓝牙模块HC05、FLASH存储器W25Q128和EEPROM存储器AT24C256提供电源输入，并且分别由V3.3-2\_CTRL和V3.3-3\_CTRL控制使能，具体电路设计见图3.2.6所示。

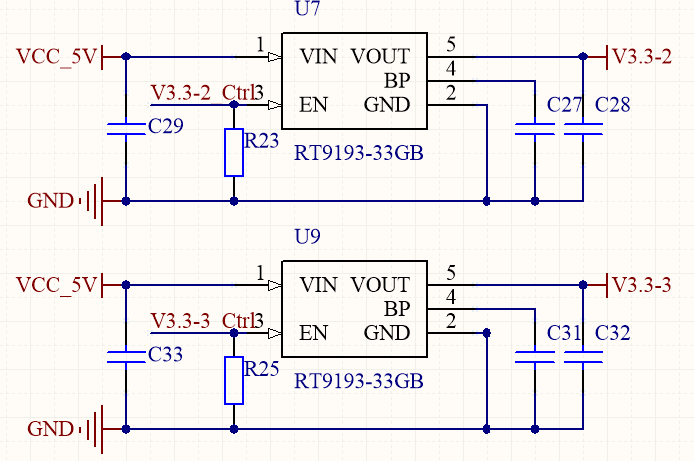


图3-11 RT9193电路

## 3.3采集电路设计

本文中设计的采集电路部分主要分为电位器和AD采集电路，电位器采用两个10K的电位器并联并分别采集深基点和浅基点的数据，电位器的转轴套上一个圆环，钢索绕圆环一圈后打入基点岩石内部，当基点发生位移就会拉动钢索从而旋转电位器转轴，最终导致电位的变化。采用这样的方式就能使用ADC来采集位移数据了。电位器具体实物如图3.12所示。



图3-12电位器实物图

AD采集电路设计成无源低通滤波电路，用于滤去整流输出电压中的纹波，且结构简单，易于设计。电抗元件组成，负载电阻两端并联电容器组合而成的滤波电路。具体电路如图3.13所示。

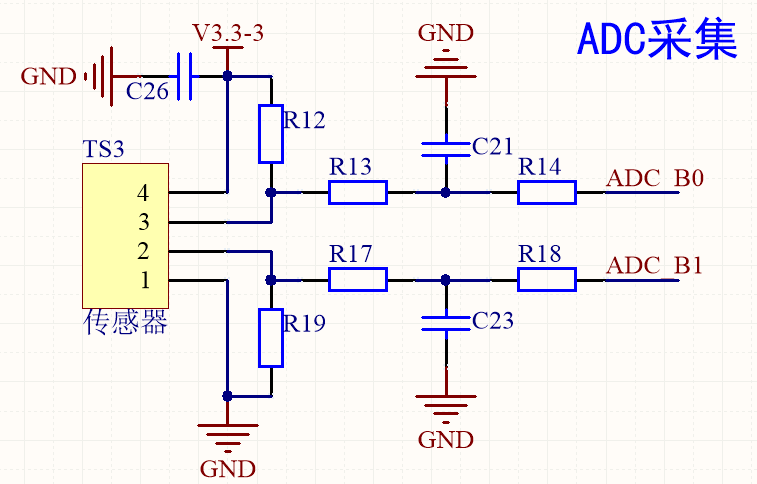


图3-13 AD采集电路

## 3.4存储电路设计

本文在设计顶板离层位移传感器的存储部分电路时，同时使用了FLASH存储器和EEPROM存储器。FLASH存储器W25Q128用来存储采集到的数据，EEPROM存储器AT24C256则用来存储顶板离层位移传感器设备的设备ID、采集周期、FLASH存储写地址和FLASH存储读地址、容差值等设备参数。

EEPROM的全称是“电可擦除可编程只读存储器，即Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory。是相对于紫外擦除的rom来讲的。但是今天已经存在多种EEPROM的变种，变成了一类存储器的统称。本文设计中使用的EEPROM存储器是AT24C256，拥有32KB的大容量存储空间和极高的可靠性，其擦写次数高达100万次，数据能够存储100年，兼容所有IIC通信协议，可通过IIC与MCU通信。但是电路复杂/成本也高。因此目前的EEPROM都是几十千字节到几百千字节的，绝少有超过512K的，所以用EEPROM存储设备参数而不是采集数据。AT24C256的电路设计比较简单，仅需注意IIC总线需要接上拉电阻。具体电路设计如图3.14所示。

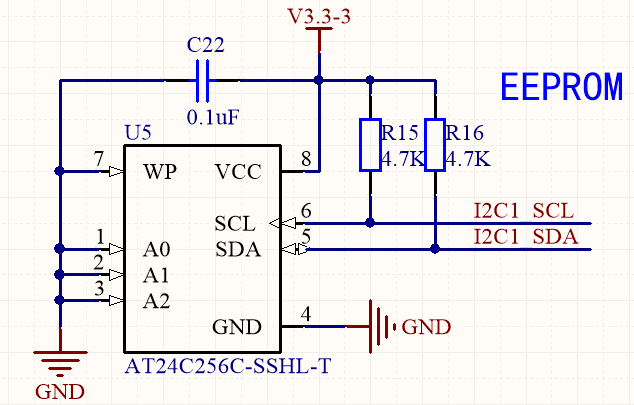


图3-14 EEPROM电路

Flash属于广义的EEPROM，因为它也是电擦除的ROM。但是为了区别于一般的按字节为单位的擦写的EEPROM，我们都叫它Flash。两者的主要区别是FLASH按扇区操作，EEPROM则按字节操作，二者寻址方法不同，存储单元的结构也不同，FLASH的电路结构较简单，同样容量占芯片面积较小，成本自然比EEPROM低，所以本文在设计存储电路时使用了FLASH作为数据存储器。W25Q128具有16MB的超大存储空间，至少能够存储顶板离层位移传感器2年内采集到的数据。数据能够保存超过20年，拥有10万次的擦写寿命。W25Q128兼容SPI以及QPI通讯协议，本文在设计中使用的是SPI通讯协议，需要使用到CS、MOSI、MISO、CLK四根线，具体电路图如图3-15所示。

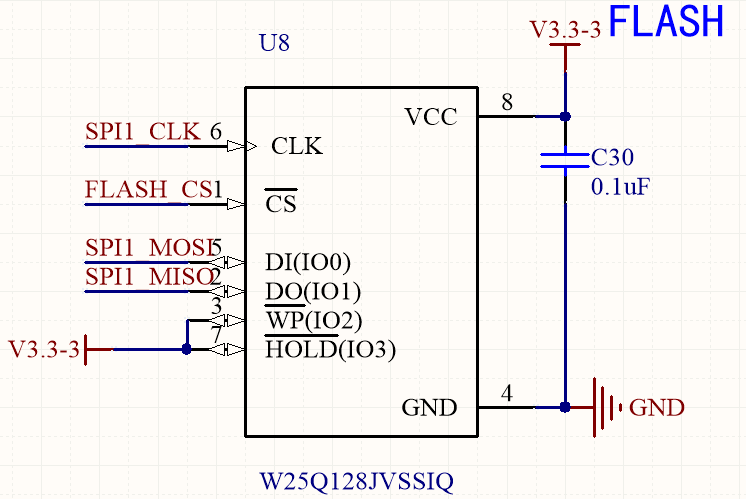


图3-15FLASH存储器W25Q128电路

## 3.5唤醒电路设计

顶板离层位移传感器设计定位于低功耗产品，所以顶板离层位移传感器大部分时间处于休眠状态，仅当需要的时候才唤醒设备工作。有关采集存储部分设计不需要外部触发，能够通过内部RTC唤醒设备，而顶板离层位移传感器上传数据至手机或者数码管显示当前数据的时间是不确定的，所以需要外部触发设备进行相应的操作，故需要设计外部中断电路来唤醒设备并进行相应的操作。

本文设计的唤醒方式有两种，其一是光敏二极管感受到光照变化。顶板离层位移传感器的工作环境是煤矿等矿井中，一般此类环境都是黑暗条件，矿井下的工作人员一般都携带照明设备，所以采用光照唤醒设备的方式非常合适使用场景。光敏二极管也叫[光电二极管](https://baike.baidu.com/item/%E5%85%89%E7%94%B5%E4%BA%8C%E6%9E%81%E7%AE%A1" \t "https://baike.baidu.com/item/%E5%85%89%E6%95%8F%E4%BA%8C%E6%9E%81%E7%AE%A1/_blank)。光敏二极管与[半导体二极管](https://baike.baidu.com/item/%E5%8D%8A%E5%AF%BC%E4%BD%93%E4%BA%8C%E6%9E%81%E7%AE%A1" \t "https://baike.baidu.com/item/%E5%85%89%E6%95%8F%E4%BA%8C%E6%9E%81%E7%AE%A1/_blank)在结构上是类似的,其管芯是一个具有光敏特征的PN结，具有[单向导电性](https://baike.baidu.com/item/%E5%8D%95%E5%90%91%E5%AF%BC%E7%94%B5%E6%80%A7" \t "https://baike.baidu.com/item/%E5%85%89%E6%95%8F%E4%BA%8C%E6%9E%81%E7%AE%A1/_blank)，因此工作时需加上[反向电压](https://baike.baidu.com/item/%E5%8F%8D%E5%90%91%E7%94%B5%E5%8E%8B" \t "https://baike.baidu.com/item/%E5%85%89%E6%95%8F%E4%BA%8C%E6%9E%81%E7%AE%A1/_blank)。无光照时，有很小的饱和反向漏电流，即[暗电流](https://baike.baidu.com/item/%E6%9A%97%E7%94%B5%E6%B5%81" \t "https://baike.baidu.com/item/%E5%85%89%E6%95%8F%E4%BA%8C%E6%9E%81%E7%AE%A1/_blank)，此时光敏二极管截止。当受到光照时,饱和反向漏电流大大增加，形成[光电流](https://baike.baidu.com/item/%E5%85%89%E7%94%B5%E6%B5%81" \t "https://baike.baidu.com/item/%E5%85%89%E6%95%8F%E4%BA%8C%E6%9E%81%E7%AE%A1/_blank),它随入射光强度的变化而变化。本文设计将光敏二极管负极通过100KΩ的上拉电阻与V3.3-1相连，当设备处于黑暗环境下光敏二极管截止,LDR处于高电平，当光敏二极管收到光照时，二极管导通则LDR会被拉到低电平产生下降沿，STM32则检测此引脚的下降沿从而产生中断，唤醒设备。具体光照唤醒电路如图3.16所示。

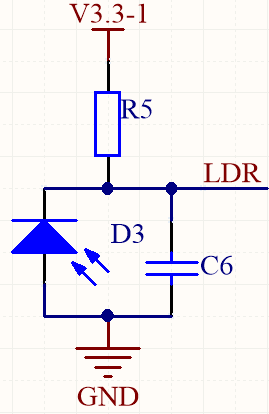


图3-16 光照唤醒电路

其二是实体按键被按下，原理与光照唤醒类似，都是检测上升沿或者下降沿。当按键被按下时，EXTI\_KEY引脚被拉高至高电平，产生上升沿从而产生中断，唤醒设备进行相应的工作。具体电路图如图3-16所示。

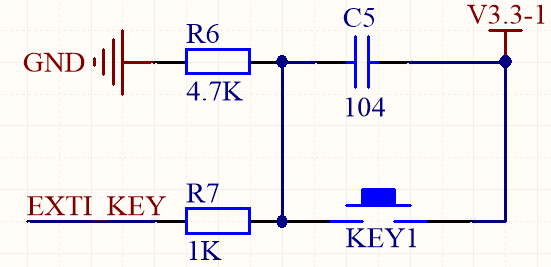


图3-17 外部按键唤醒电路

## 3.6数码管电路设计

由于矿井的特殊环境，以及顶板离层位移传感器安装位置距离地面较远，使用LCD屏幕可能存在看不清楚的问题，所以本文在设计显示模块的时候，选用了4位0.4英寸的数码管，超大的数码管极大的增强了顶板离层位移传感器的可视范围，即便距离顶板离层位移传感器3或4米都能看清设备显示内容。

本课题在设计此部分电路时，采用了四位共阳极数码管与TM1637搭配使用的方式，而非使用很多个引脚单独的去控制每一个数码管的每一个段码，这样需要使用到非常多的IO引脚，多达40个，将会造成巨大的IO资源浪费，同时每一位数码管都一直亮着会增大功耗。为了避免这些问题，本课题采用了动态显示驱动，动态驱动是将所有数码管的8个显示笔划"a,b,c,d,e,f,g,dp"的同名端连在一起，另外为每个数码管的公共极COM增加位选通控制电路，位选通由各自独立的I/O线控制，当单片机输出字形码时，所有数码管都接收到相同的字形码，但究竟是哪个数码管会显示出字形，取决于单片机对位选通COM端电路的控制，所以我们只要将需要显示的数码管的选通控制打开，该位就显示出字形，没有选通的数码管就不会亮。通过分时轮流控制各个数码管的的COM端，就使各个数码管轮流受控显示。在轮流显示过程中，每位数码管的点亮时间为1～2ms，由于人的视觉暂留现象及发光二极管的[余辉效应](https://baike.baidu.com/item/%E4%BD%99%E8%BE%89%E6%95%88%E5%BA%94" \t "https://baike.baidu.com/item/%E6%95%B0%E7%A0%81%E7%AE%A1/_blank)，尽管实际上各位数码管并非同时点亮，但只要扫描的速度足够快，给人的印象就是一组稳定的显示数据，不会有闪烁感，动态显示的效果和静态显示是一样的，能够节省大量的I/O端口，而且功耗更低。

TM1637是一种带键盘扫描接口的LED（发光二极管显示器）驱动控制专用芯片，能够非常简单的实现数码管动态显示驱动，最多可显示6位的共阳极数码管,通过IIC协议与MCU通信。MCU仅需通过DIO向TM1637发送要显示的内容，TM1637就能驱动数码管显示相应的内容。具体电路如图3.5.1与3.5.2所示。

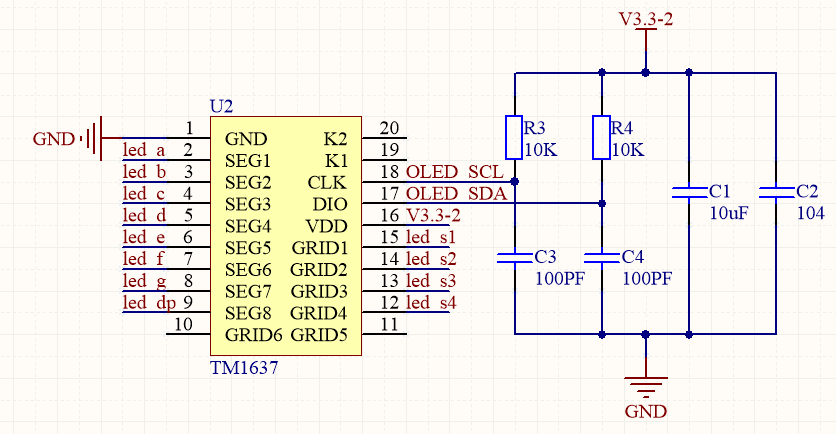


图3-18TM1637电路

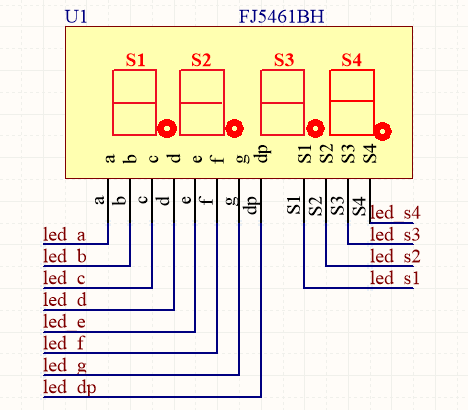


图3-19 四位共阳极数码管

## 3.6蓝牙通讯电路设计

本课题采用了蓝牙点对点的方式实现数据上传与设备参数设定，采用广州汇承的HC-05作为蓝牙通讯模块。HC-05 蓝牙串口通信模块，是基于 Bluetooth Specification V2.0 带 EDR 蓝牙协议的数传模块。无线工作频段为 2.4GHz ISM，调制方式是 GFSK。模块最大发射功率为 4dBm，接收灵敏度-85dBm，板载 PCB 天线，可以实现 10 米距离通信。

使用HC-05最大的便利之处就是不用去了解蓝牙协议，不需要花费大量时间和精力去移植蓝牙协议栈，仅需使用AT指令对蓝牙模块进行参数设置。将HC05当做无线串口使用，仅需使用串口给HC-05发送数据，HC-05就自动将数据以无线电波的方式发送到空中，手机内的蓝牙或其他设备就能收到数据。同样的HC-05也能自动的获取无线电波的数据然后发送给MCU的串口。并且HC-05板载了陶瓷天线，不需要再外接天线。

本课题中为了产品的可靠性，有关HC-05的电路设计根据汇承的文档自行设计了HC-05的外围电路，而非采用带有底板的6引脚直插式HC-05。其中HC\_KEY为带下拉的AT指令控制，HC\_STATE则用来指示蓝牙是否连接，D4则用来指示当前蓝牙模块工作情况，蓝牙未连接时，若HC-05未记录从机地址D4快闪；若HC-05记录从机地址D4慢闪。蓝牙连接后D4 两闪一停。 具体电路图如图3.6.1所示。

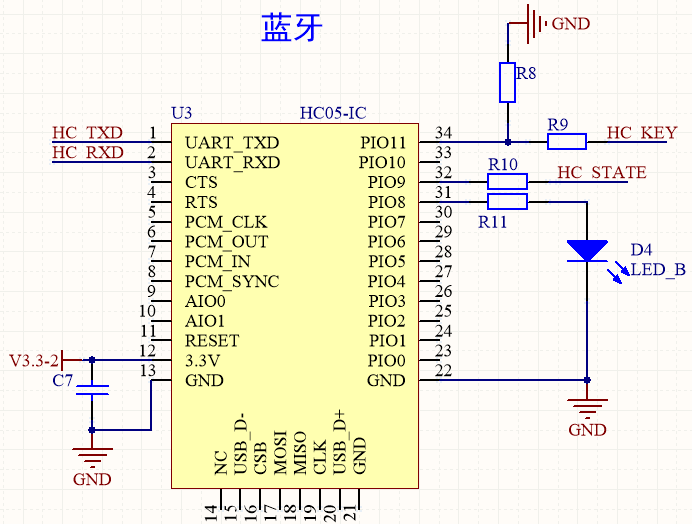


图3.19 蓝牙HC-05电路

4 软件设计

## 4.1 软件整体设计

在微控制器发展迅速的年代，高级的微控制器可能拥有数百上千个寄存器，而单片机程序设计的本质就是操作寄存器。面对数量极为庞大的寄存器，任何一个工程师都难以了如指掌所有的寄存器。不过ST首创地对STM32的开发者们提供了标准外设库，标准外设库（Standard Peripherals Library）是对STM32芯片的一个完整的封装，包括所有标准器件外设的器件驱动器。这应该是目前使用最多的ST库，几乎全部使用C语言实现。标准外设库大大减少了开发者的开发时间和难度，使开发者们不需要花费大量精力去研究MCU的寄存器。为了降低开发难度和成本，本课题采用的软件编程就是采用了校准外设库进行编程。

本课题中为了产品的稳定性、程序的健壮性，程序设计主要分为两部分，其一是各底层驱动和各功能模块的设计。主要包括主程序、初始化程序、数码管显示程序、蓝牙通信程序、数据采集程序、数据存储程序以及外部中断程序。其中初始化程序包括MCU各外设配置驱动程序以及各功能模块完好验证，例如检查微处理器RCC时钟寄存器的状态寄存器是否正常来检测外部32.768kHz的低速晶振是否起振或者读取EEPROM、FLASH的ID来检测EEPROM和FLASH是否正常工作。蓝牙通信程序主要分为数据上传和设备参数读取/设定；其二是设备的各任务切换程序。具体软件整体功能设计框图如图4.1所示。

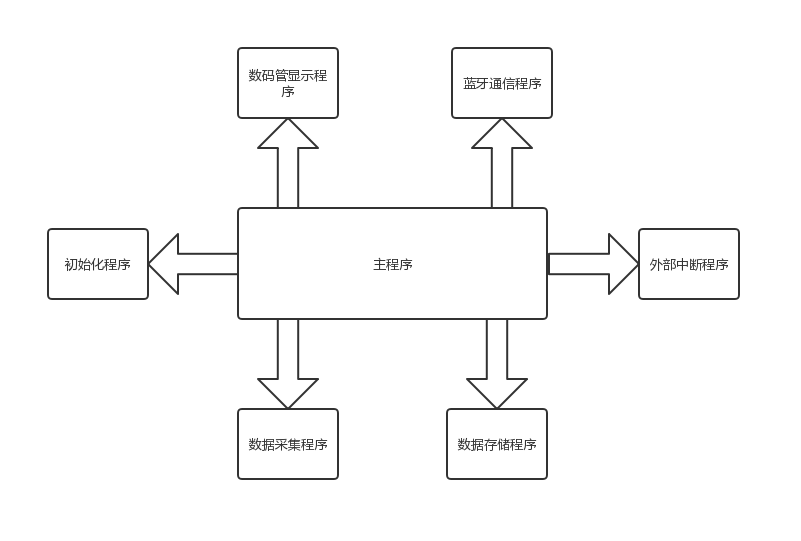
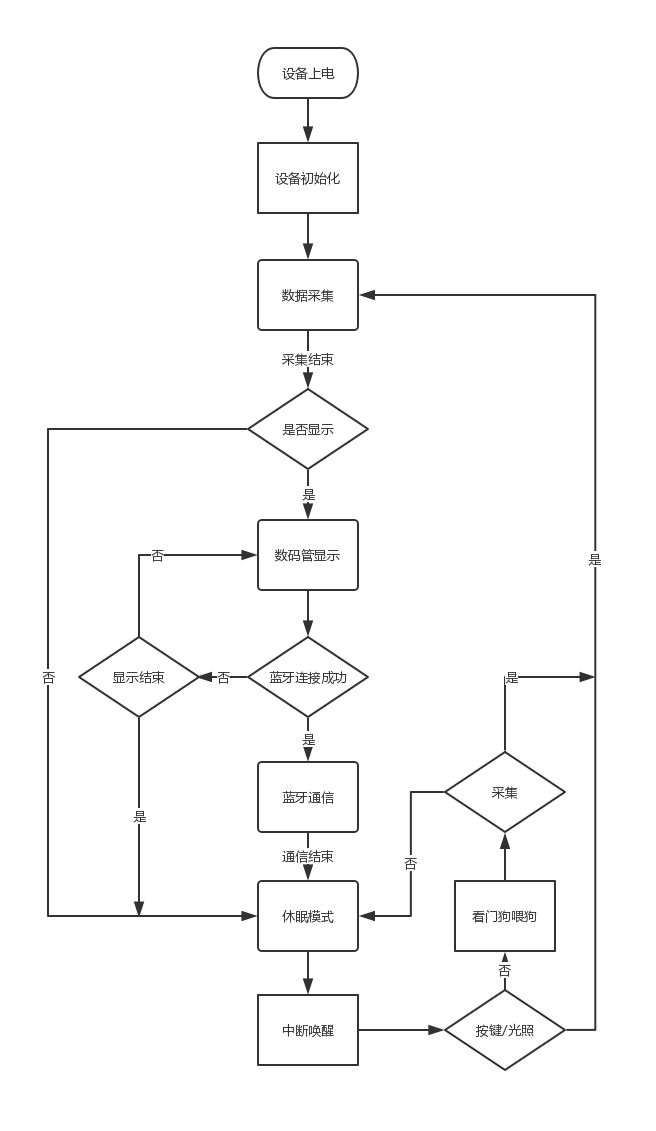


图4.1 程序功能框图

本课题在设计程序执行流程的过程中，采用了与嵌入式多任务系统类似的前后台系统，通过标志位表示各任务执行状态，利用中断服务程序来改变各标志位的状态，从而实现任务的切换。

设备主要的任务有四个，分别是数据采集、数码管显示、蓝牙通信、休眠。当设备上电后将会进行设备初始化，初始化完成后将会采集数据，采集完成后将进入休眠模式，直到有中断将设备唤醒。若是闹钟中断唤醒，则判断是否达到采集周期需要进行采集操作。若没达到采集周期则进行看门狗喂狗，完成喂狗后继续休眠；若达到采集周期则进行采集，采集完成后继续休眠。若是人为的按键或光照外部中断唤醒，则进行采集，采集完成后将采集到的的数据用数码管持续显示并等待蓝牙连接。若在等待期间蓝牙连接上了则进入通信模式，根据APP操作的不同，设备数据上传或对设备进行参数设定，完成通信后设备继续休眠；若蓝牙未连接则在数码管达到显示结束时间后，设备继续休眠。具体流程图如图4.2所示

 图4.2 程序流程图

## 4.2 初始化程序

初始化程序主要包括MCU的各部分外设的配置，需要开启相应的外设时钟、配置外设的IO引脚模式、以及外设各部分参数配置。驱动蓝牙模块HC05的UART配置成波特率115200、数据位8位、1位停止位、无校验、开启发送和接收模式，相应的GPIO引脚TXD、RXD分别设置成复用推挽输出和上拉输入。驱动FLASH存储器W25Q128的SPI配置成主机模式、双线全双工、时钟极性高、时钟相位偶数边沿采集、片选信号软件控制、时钟分频4即SPI速度16M、数据高位先行，相应的GPIO引脚都是复用推挽输出。驱动EEPROM和数码管的GPIO都配置成开漏输出、数据采集所用的ADC、定时器。其中EEPROM和数码管都是使用软件模拟IIC通信协议，没有用到MCU的IIC外设。

配置完MCU的外设以及GPIO后，需要检查外部低速时钟源是否起振，FLASH存储器和EEPROM存储器是否能够正常通信并读取相应的ID。最后从EEPROM内读取出设备相关参数。

具体代码如下所示。

void Init(void)

{

delay\_Config(); //初始化延时函数

USART2\_Config(115200); //初始化串口为115200

LED\_Config(); //初始化LED

KEY\_Config(); //初始化按键

LDR\_Config(); //初始化光敏电阻

HC05\_Config(); //初始化蓝牙连接指示引脚

Power\_Config(); //初始化电源控制

Power3\_Ctrl(ON); //开启V3.3-3并等待稳定

delay\_ms(120);

SPI\_Flash\_Config(); //初始化SPI FLASH

AT24CXX\_Init(); //IIC初始化

Data\_ADC\_Config(); //初始化压力检测ADC

TIM2\_Config(59999,35999); //初始化定时器TIM2定时时间30s

while(RTC\_Config()) //RTC初始化 ，一定要初始化成功

{

u2\_printf("\r\n RTC ERROR \r\n");

delay\_ms(800);

u2\_printf("\r\n RTC Trying...\r\n");

}

while(SPI\_Flash\_ReadID()!=W25Q128) //检测不到W25Q64

{

u2\_printf("\r\n 25Q128 Check Failed!");

delay\_ms(500);

u2\_printf("\r\n Please Check!\r\n");

delay\_ms(500);

}

while(AT24CXX\_Check()) //检测不到24c02

{

u2\_printf("\r\n24C02 Check Failed!\r\n");

delay\_ms(500);

u2\_printf("\r\nPlease Check! \r\n");

delay\_ms(500);

}

}

## 4.2 数据采集程序

数据采集是顶板离层位移传感器非常重要的功能，需要将顶板离层位移情况通过STM32内部ADC采集，并将其转换为位移量。本课题中所使用的STM32F103RCT6具有3个12位精度的ADC，其中ADC1和ADC2具有16个采集通道，功能十分强大。本课题设计中使用的是ADC1的通道10和通道11，为确保采集数据准确，采样时间设置成最长的239.5个采集周期，并为了提高设备运行效率，ADC时钟设置成6分频即12Mhz，故采集一次的时间约为20us。此外,ADC采集模式配置成连续采集并且使能了DMA传输，每次ADC采集完成都会触发DMA传输请求，后台将自动的将ADC数据寄存器内的采集数据搬运到指定的内存中。在每次需要使用数据时直接从内存里读取就能获得最新采集到的数据。

在获得ADC采集到的数据后还需要将数据转换成位移量。本课题使用的ADC精度为12位，采集到的数值范围为0-4096，而顶板离层位移传感器的位移量程是0-610mm。此处就需要进行单位转换。ADC采集到的数值与电位器的阻值即电位器转动圈数有关，而电位器上套的圆环周长为61mm，故获得电位器转动圈数与ADC采集数值的关系就能换算ADC数值与顶板离层位移量。本课题在进行此部分转换时进行了大量数据测试，最终近似的获得了ADC采集的数值与电位器转动圈数的曲线如图4.2.1所示。

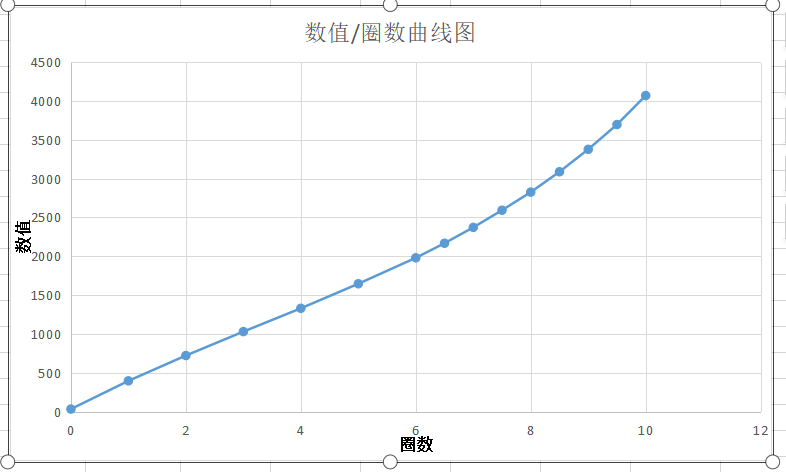


图4.3 电位器圈数/ADC采集数值曲线图

由曲线图可知电位器转动圈数与ADC采集到的数值并非线性关系，所以本课题在进行此部分转换时将曲线分成许多小段，换算成近似相等的线性关系，即将此曲线进行微分，从而获得转换关系。

数据采集程序的采集完成后应当将数据进行存储，但是由于FLASH的擦写寿命为10万次，所以为了设备的使用年限，不能每次采集后都将数据存储起来。而是每次采集后将数据换算成毫米单位的位移量后，再与上次所采集到的数据的位移量进行比较，若是两者差的绝对值大于设备参数所设定的容差值才会进行存储。具体流程图如图4.4所示。

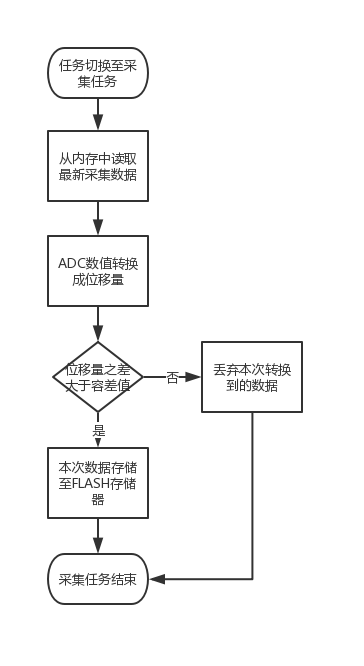


图4.4 采集流程图

## 4.3 数据存储程序

本课题中数据存储在外部FLASH存储器W25Q128中，它采用SPI通信协议与MCU进行通信。SPI协议是由摩托罗拉公司提出的通讯协议(SerialPeripheralInterface)，即串行外围设备接口，是一种高速全双工的通信总线。它被广泛地使用在ADC、LCD等设备与MCU间，要求通讯速率较高的场合。

SPI 通讯使用 3 条总线及片选线， 3 条总线分别为 SCK、 MOSI、 MISO，片选线为 SS，它们的作用介绍如下[2]：

（1）SS( Slave Select)：从设备选择信号线，常称为片选信号线，也称为 NSS。每个从设备都有独立的这一条 NSS 信号线，SPI 协议中没有设备地址，它使用 NSS 信号线来寻址，当主机要选择从设备时，把该从设备的 NSS 信号线设置为低电平，该从设备即被选中，即片选有效，接着主机开始与被选中的从设备进行 SPI通讯。所以 SPI通讯以 NSS 线置低电平为开始信号，以 NSS 线被拉高作为结束信号。

（2）SCK (Serial Clock)：时钟信号线，用于通讯数据同步。

（3）MOSI (Master Output，Slave Input)：主设备输出/从设备输入引脚，即这条线上数据的方向为主机到从机。

(4) MISO(Master Input，Slave Output)：主设备输入/从设备输出引脚，即在这条线上数据的方向为从机到主机。

向FLASH写数据之前，需要先使能写操作，通过数据手册中提供的命令向FLASH发送Write Enable 命令。由于FLASH的存储特性，原来是“0”的数据不能直接改写成“1”，所以在写入数据之前必须对存储器目标地址进行擦除操作。具体擦写过程如图4.5所示。

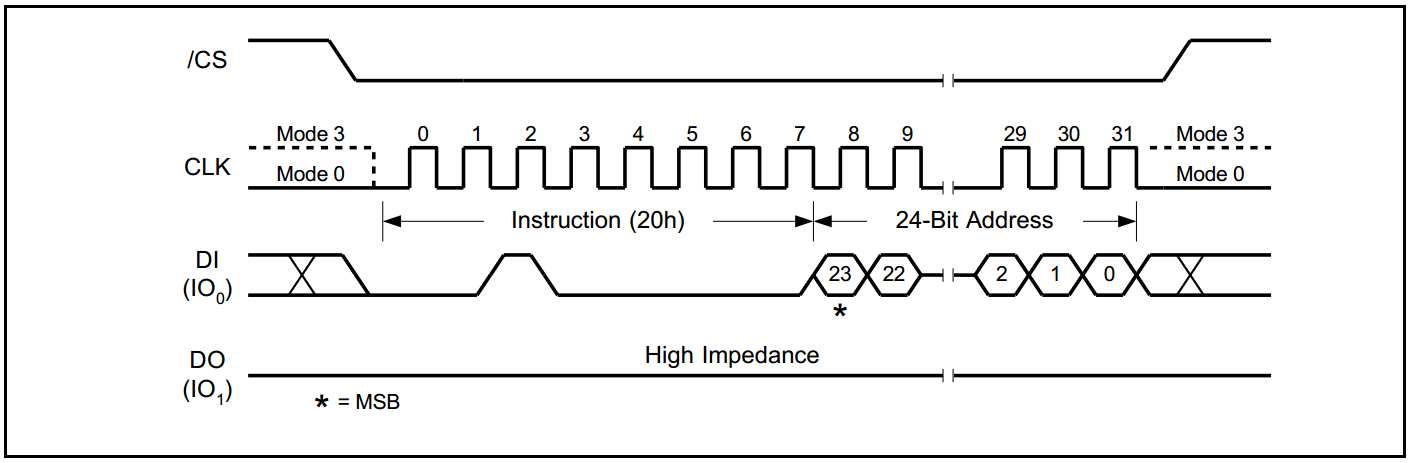


图4.5 FLASH擦写过程图

在完成目标扇区擦写过程后，才能写入数据。W25Q128支持页写入方式可以一次最多写入256个字节的数据。具体写入过程如图4.6所示。

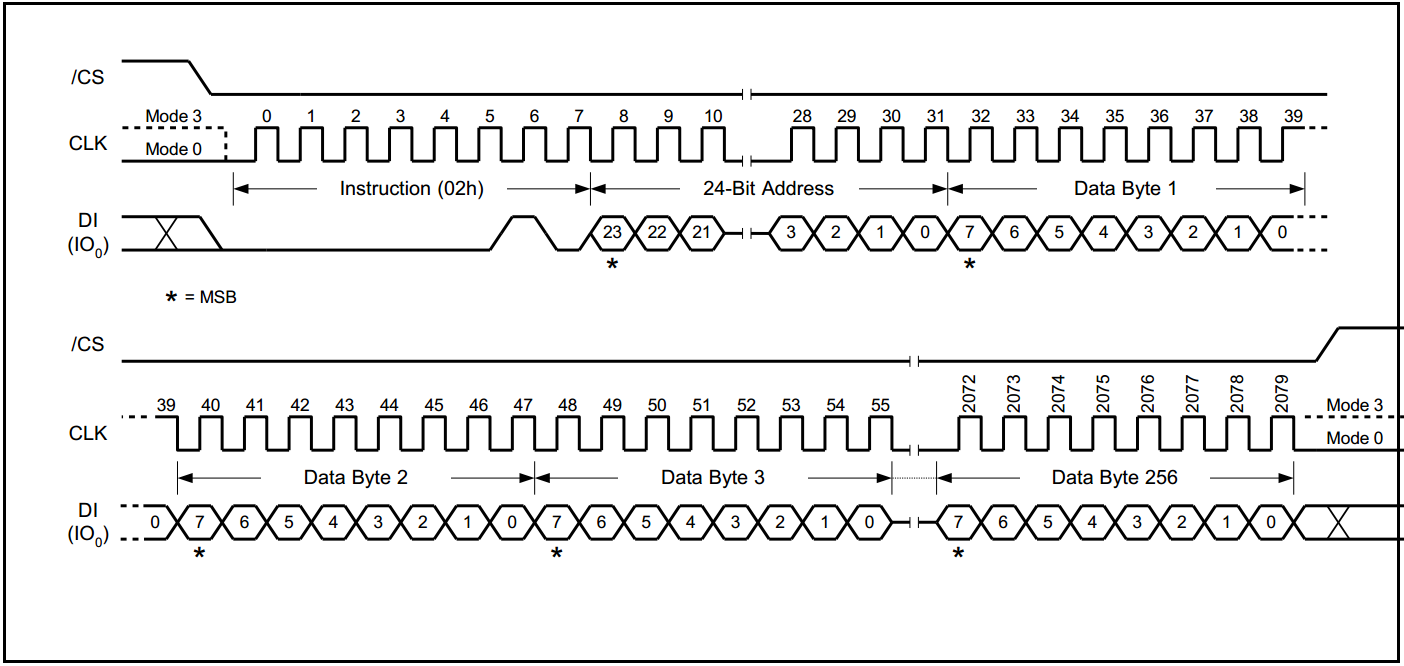


图4.6 页写入过程图

为了防止设备数据存储完所有FLASH存储空间，本课题设计了防溢出设计。没有采用FAT文件系统存储每天的数据，而是按地址存储，并且在EEPROM内存储了当前FLASH写到的地址，每次存储新的数据都会更新EEPROM内的FLASH写地址。此外还在每次上传数据时更新EEPROM内的FLASH读地址，并且检测FLASH写地址是否已超出设定的FLASH溢出阈值，若超过则将设备存储相关参数都初始化为出厂设置。从而实现即增长设备使用年限又保证了数据不丢失。具体代码如下所示：

if(Write\_Addr >= FLASH\_SIZE) //已经超过内存阈值

{

Write\_Addr = Write\_BeginAddr;

Read\_Addr = Write\_BeginAddr;

GlobalCount = 0;

G\_NumOfFrame = 0;

G\_NumOfSingle = 0;

AT24CXX\_Write(Write\_Addr\_Addr,(u8\*)&Write\_Addr,4);

AT24CXX\_Write(Read\_Addr\_Addr,(u8\*)&Read\_Addr,4);

AT24CXX\_Write(GlobalCount\_Addr,(u8\*)&GlobalCount,4);

}

## 4.4 数码管显示程序

数码管显示程序主要是驱动TM1637，它是数码管显示专用驱动芯片。采用类似IIC的通信协议与MCU通信。显示数码管有两种模式，一种是写SRAM数据固定地址模式，另一种是写SRAM数据地址自动加1模式。本课题设计使用的是第二种，开始通信后，先发送命令设置芯片模式为数码管显示写SRAM数据地址加1模式，随后在发送要写的地址，然后紧跟着要显示的4位数码管的每一位数据。具体驱动流程如图4.7所示。

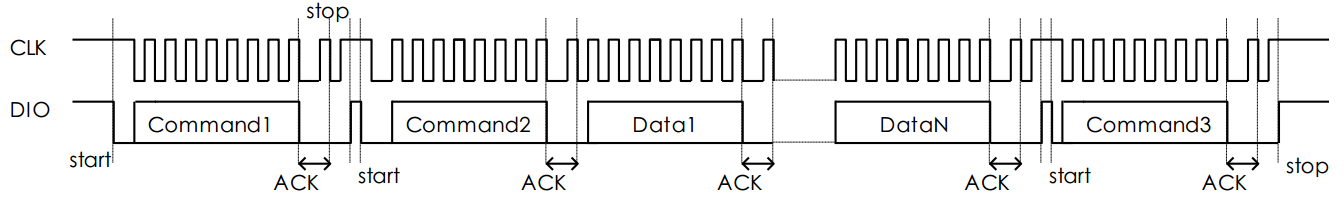


图4.7 数码管显示驱动程序图

数码管显示驱动程序如下所示：

static void TM1637\_NixieTubeDisplay(u8 seg0, u8 seg1, u8 seg2, u8 seg3)

{

delay\_ms(5);

TM1637\_Start();

TM1637\_WriteByte(0x40);//0x40则采用显示地址自加1模式

TM1637\_Ack();

TM1637\_Stop();

TM1637\_Start();

TM1637\_WriteByte(0xC0);//0X00地址开始显示

TM1637\_Ack();

TM1637\_WriteByte(NumDis[seg0]);//显示到第1位数码管（最高位）

TM1637\_Ack();

TM1637\_WriteByte(NumDis[seg1]);//显示到第2位数码管

TM1637\_Ack();

TM1637\_WriteByte(NumDis[seg2]);//显示到第3位数码管

TM1637\_Ack();

TM1637\_WriteByte(NumDis[seg3]);//显示到第4位数码管

TM1637\_Ack();

TM1637\_Stop();

TM1637\_Start();

TM1637\_WriteByte(0x8f);//开显示，且最大亮度

TM1637\_Ack();

TM1637\_Stop();

}

## 4.5 蓝牙通信程序

蓝牙通信程序分为两部分，其一是数据上传，其二是设备参数设定。当顶板离层位移传感器检测到按键被按下或者光照环境从暗变亮后，设备将会被唤醒，在显示完当前数据后会一直等待蓝牙被连接，等待30秒。若蓝牙在等待期间被连接上了则数码管显示FFFF表示正在通信，此后一直等待手机APP发送命令。根据命令类型不同，设备进行不同的操作。

若解析命令类型为上传数据，将进入数据上传流程。为了保证数据传输完整性，防止通信失败导致数据丢失，本课题采用了消息应答机制，在每上传一帧数据后，都会等待APP确认收到数据，也就是APP每收到一帧数据都会给顶板离层位移传感器发送消息，告知设备数据发送成功。设备获得发送数据成功确认后才会发送下一帧数据。直到发送完所有数据后，设备将发送指令告知APP所有数据已发送结束，APP收到后将断开蓝牙连接，随后设备进入休眠模式。若是未获得消息应答则一直等待消息确认，等待超时后APP断开蓝牙，认定本次通信失败，进入休眠模式。在下次上传数据的时候将会重新发送本次应该发送的数据以及新采集到的数据。

若解析命令类型为设置参数，将进入参数设置流程。设备将主动发送当前所有的设备参数至APP，APP收到当前设备参数后会将所有参数显示在文本框中，并且可以一次性修改所有的设备参数。修改参数后APP发送所有的新的设备参数给设备，设备解析获得新的设备参数，设置完新的设备参数后向APP发送设置成功的指令，随后等待APP断开蓝牙。蓝牙断开后设备进入休眠模式，本次参数设置成功。

具体流程图如图4.8所示

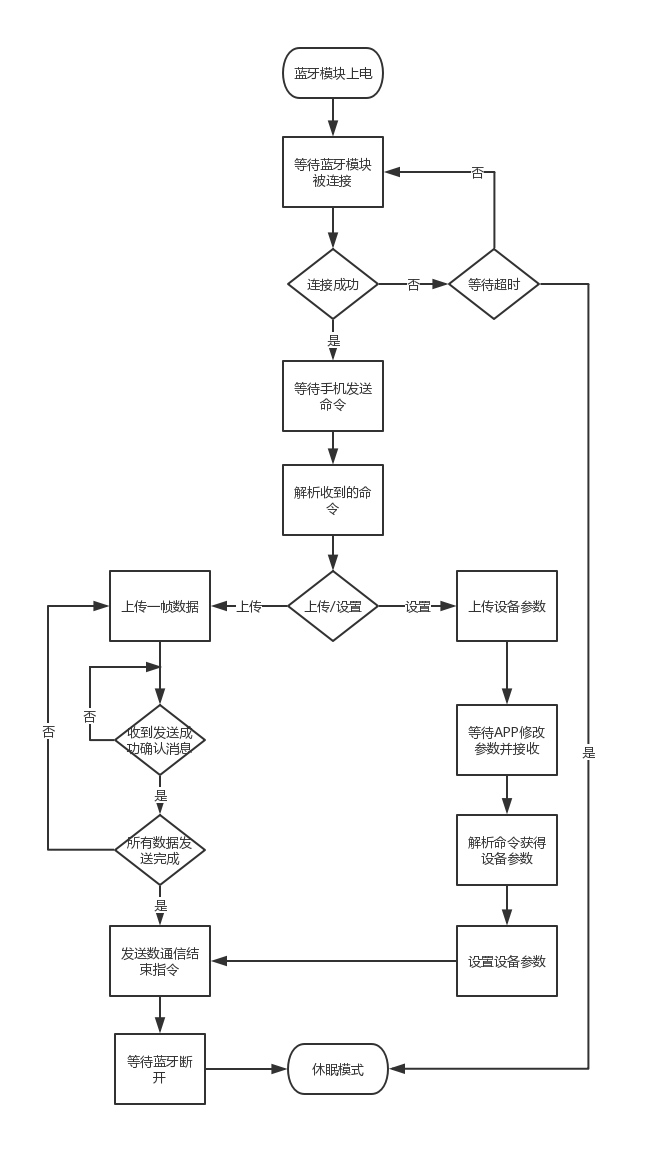


图4.8通信流程图

5 电路调试与功能测试

本章节主要介绍电路焊接调试，对电路设计进行验证以及软件设计的各功能测试。电路调试主要包括测试各功能模块是否正常工作，电源模块输出电压是否正确，功能模块是否有焊接错误，是否有焊接失误导致短路，电阻或电容的大小调试等。功能测试则主要包括程序上需要实现的功能是否呈现正确实验结果，验证设备能够正常的进行数据采集、数据存储、数据上传、参数设定、数码管显示数据、功耗控制以及程序运行流程与预期相同。

## 5.1电源电路调试

电路调试应当从拿到PCB板开始，首先需要大致观察板子有没有明显的裂痕、短路、开路等现象，以防万一可以检查一下电源和地之间的阻值是否足够大。其次就是焊接元器件了，焊接应当按照模块功能一部分一部分的焊接，每焊接一部分就进行一次测试，这样能很容易的找出电路故障原因。若是一次性都焊接上再测试，很可能会出现故障后找不到原因。

一般焊接先从电源模块开始，本课题中先焊接LT1129-5模块及其外围电路。焊接完成后使用可调压稳压电源输入电压18V、过流保护300mA的电源，再用万用表测量LT1192-5的输出电压，测量结果如图5.1.1所示输入18V输出4.85V。再用同样的方法调试TPS62125，测量结果为3.3V。RT9193电路设计成需要程序控制使能，故在验证最小系统后再测试。最终成功验证了RT9193的控制使能功能和输出电压3.3V正确，如图5.1.2所示。TP5400则略有不同，它是电池升压/充电二合一模块，需要分别测试。先按照测试LT1129-5的方法使用可调压稳压电源来模拟电池作为电源输入3.9V、过流保护300mA电源，测量升压输出电压为5V，验证了电池升压功能正常。然后缓慢降低输入电压至3V后再测量升压输出电压，测量结果为0V，验证了模块低压保护功能正常。最后在真正的插上电池，LT1129-5输入18V电源，观察TP5400的指示灯状态来查看电池充电状态。指示灯状态与预期相同，电池刚充电时电压为3.7V亮红灯，当只亮绿灯时，测量电池电压为4.2V，验证了模块充电功能正常。



图5.1 LT1129-5调试图



图5.2 RT9193调试图

## 5.2 STM32最小系统测试

在完成电源电路调试后，就可以焊接STM32最小系统的电路了。验证STM32最小系统的最简单的方法就是烧写程序到MCU中。若是能够正常下载程序则说明STM32最小系统工作正常。本课题使用的是Keil V5和CMSIS-DAP下载器，采用SWD下载的方式给MCU烧写程序，烧写成功的日志记录如下内容：

Erase Done.

Programming Done.

Verify OK.

Application running ...

Flash Load finished at 23:04:22

并且在程序烧写后可以用万用表测量RT9193的输出电压，测量结果为3.3V。能够证明程序运行正常，STM32最小系统工作正常。

## 5.3数码管显示测试

为了降低功耗设备大部分时间处于休眠模式，只有需要查看数据或上传数据时才会进入显示模式，进入显示模式需要人为的唤醒设备，唤醒条件为外部光照环境变亮或者按键被按下。当设备被唤醒后数码管会显示当前设备的ID、深基点数据和浅基点数据。不过由于数码管只有4位，不能同时显示所有内容，所以采用了轮流显示的方法显示所有内容。分别先后显示ID为F101、深基地数据60毫米和浅基点数据84毫米各3秒钟，显示完成后等待蓝牙被连接，一直显示----。具体显示如图5.3-5.6所示。

|  |  |
| --- | --- |
| F101 | 060 |
| 图5.3 显示ID | 图5.4 显示深基点数据 |
| 084 | ---- |
| 图5.5 显示浅基点数据 | 图5.6等待蓝牙连接 |

## 5.4蓝牙通信测试

当顶板离层位移传感器处于显示模式时，设备的蓝牙模块将会被打开，配套的手机APP将能够搜索到处于显示模式的设备，如图5.4.1所示。当APP点击搜索到的设备，其蓝牙将被手机APP连接上，设备进入通信模式，数码管显示FFFF如图5.4.2所示。之后APP就能接收设备的数据或者设置设备的参数了，具体接收数据和设备参数设置图如图5.4.3和5.4.4所示。

|  |  |
| --- | --- |
| 扫描设备 | ffff |
| 图5-7扫描设备 | 图5-8设备通信状态图 |
| 数据上传结果 | 参数设置 |
| 图5-9 数据上传图 | 图5-10设备参数设置图 |

## 5.5低功耗测试

低功耗是顶板离层位移传感器的核心关键点之一，故低功耗测试也是非常重要的。低功耗测试主要是测量顶板离层位移传感器的整个设备的工作电流大小。工作电流的消耗由两部分组成，一部分是硬件上的消耗，例如TP5400的升压电路，就会产生静态电流。另一部分是软件上的消耗，例如STM32开启ADC外设及其时钟，每开启一个ADC进行采集就会导致MCU多消耗大约2mA的电流。所以降低功耗就得从硬件入手，其次才是程序控制MCU做低功耗处理，否则若硬件的功耗很高，无论程序再怎么优化都不可能降到很低。

低功耗测试从PCB焊接就开始了，根据电源的输入，分别测试电池升压电路，5V降到3.3V电路。最初测量的是FP6715，当PCB只焊接了FP6715及其外围电路，测量出PCB的整体工作电流为54uA,随后焊接上1个RT9193及其外围电路后，测量出工作电流约288uA。由此可得到采用FP6715和RT9193的硬件电路的最小功耗就是288uA，假如采用3000mAh的电池，即便设备永远都不唤醒，顶多工作1年。但是1年达不到煤矿开采完毕的时间要求，所以最终放弃了此硬件电路设计，重新进行了电源电路的选型及设计。

在重新设计电源电路后，采用了TP5400和TPS62125的组合。并且根据测试，TP5400及其外围电路所产生的功耗大约为6.7uA，再焊接上TPS62125及其外围电路后，测量出功耗为48uA。

此外就是程序上调试低功耗，本课题中采用的方法主要就是使设备最大时间内都处于休眠状态以及控制两路3.3V的电路通断。STM32具有几种低功耗模式，本课题中使用的是停止模式，在停止模式下只有RTC和独立看门狗还处于运行状态，其他的由PLL、HSE所驱动的时钟都被停止，故相应的外设也被停止。此处需要注意一个非常重要的地方，在停止模式下，如果在进入该模式前ADC和DAC没有被关闭，那么这些外设仍然消耗电流。[3]

在低功耗调试过程中，由于没有注意到这一点而导致设备运行程序后，即便进入了停止模式也没有如官方文档所描述的那样，MCU只消耗大约15uA的电流。根据测量结果，设备在处于停止模式即休眠模式下的消耗电流大约2.5mA。这远远超出了官方文档所给出的数据。最终在仔细查阅了参考手册才找到这句话，这句话的提示了开发者需要在进入停止模式之前单独的关闭ADC而不是简单地认为ADC的时钟被停止了所以ADC也就被停止了。最终在进入停止模式之前单独的关闭了ADC，再测量设备功耗结果如图5.5.1所示为66.3uA。使用3000mAh的电池能够待机5年左右，正常工作1-2年，能够满足开采周期的要求。

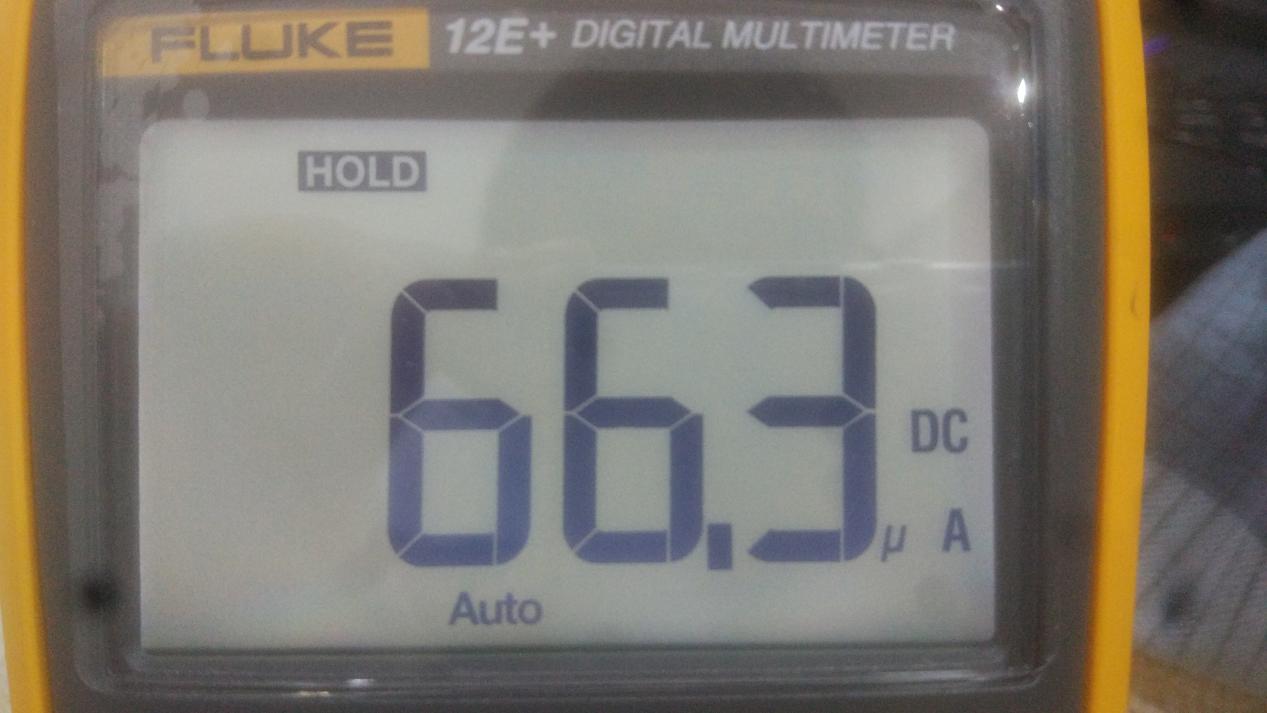


图5.11 待机模式功耗图

6 总结与展望

## 6.1总结

设计顶板离层监测系统中位移传感器的这一课题，具有真正的现实意义和价值。顶板离层监测系统能够有效的有效的防止顶板坍落事故的发生，确保煤矿安全生产。作为监测系统中的数据来源的顶板离层位移传感器，其作用和重要性更是显而易见。本文针对产品功能需求以及产品实际应用场景进行的产品设计，完成了预期的顶板离层位移传感器的功能，现将设计过程中的主要工作做出以下总结：

（1）根据产品功能需求，对产品进行整体规划。按照模块化的思路将所有功能分成一个又一个的模块，如何实现数据采集、数据存储、数据显示、数据上传等功能，同时还要考虑人机交互便捷、产品功耗等问题。

（2）对产品所使用到的模块、芯片进行选型。包括主控MCU、电源芯片、蓝牙模块、显示模块等。选型原则有以下几点：满足功能需求、降低成本、供货稳定。

（3）设计产品的硬件。根据选型的芯片绘制芯片的封装，绘制产品硬件的原理图。生成PCB后对元器件进行布局设计，根据产品外壳来布局。最终完成PCB layout后生成gerber文件发给板厂打样。

（4）使用Keil 5 MDK编写基于STM32F103的程序，包括所有芯片或模块的底层驱动程序和设备运行流程切换程序。程序整体设计成类似于操作系统的程序，设备上电后进行设备初始化，初始化后就进入不同的模式也就类似于不同的任务。通过中断服务函数来改变任务运行标志位从而切换当前任务。

（5）优化调试顶板离层位移传感器。调整部分细节上的参数，例如数码管轮流显示数据，每个数据显示多久。优化设备参数设置流程，更改为一次性读出所有参数并且一次性设置所有参数，使得人机交互更加便捷。

## 6.2展望

本设备能够实现顶板离层数据的采集、存储、显示、上传等功能。适用于大部分煤矿的使用场景，设备内置看门狗，即便在易受干扰的煤矿中也能够稳定运行。功耗很低，可待机使用5年。采用蓝牙无线通信，实测有效通信距离大约5米左右。但是当回过头来再看，本设计还有很多地方能够做的更好更完善，还有以下方面可以改进：

（1）数据上传的方式。本文中有关数据上传的方式是类似于人工巡点的方式，煤矿工作人员手持安装了配套APP的手机，到一个个顶板离层位移传感器的安装位置。使用光照唤醒设备后连接设备再接收设备存储的数据。这种方式存在数据汇总时延较长、采集数据麻烦等缺点。在后续设计中可以使用lora通信的方式上传数据至网关，再由网关转发数据至lora sever以实现数据实时上传。并且可以使用LoraWAN标准协议，利用ADR机制，使节点即顶板离层位移传感器能够根据使用环境优化数据发送速率，同时发送需要应答消息的数据，确保数据不会丢失。

（2）设备的低功耗。目前设备的整体功耗约66uA，相较之前版本的300uA来说算是比较低了。但是作者在完成设计后发现有更优的方案来降低功耗。当前使用的是3.7V可充电的锂电池，它具有自放电率较高、电压随电池容量改变等缺点。当前使用的3.7V锂电池和TP5400加TPS62125的组合供电方式产生了48uA的功耗，但若是换成3.6V锂电池和TPS706的组合供电方式只会产生不到2uA的硬件功耗。同时目前使用的STM32F103RCT6虽然也具有低功耗模式但是其功耗远远高于STM32L系列的微处理器。STM32L系列的微处理器的同样的低功耗模式功耗低至nA级别。故在后续设计可以改用3.6V锂电池和TPS706的组合供电方式，并且更换功耗更低的STM32L系列。

致谢

历时三个月终于完成了这篇论文，同时四年的大学学习生活也将划上一个句号。在这段充满奋斗的历程中，给我的学生生涯带来了无数的激情和收获。在论文的写作过程中遇到了无数的困难和障碍，都是在老师和与我共事的搭档的帮助下度过的。

在值此论文即将付梓之际，我要向我的导师，XXX老师致以诚挚的谢意。从我上大学以来就以他严肃的科学态度，一丝不苟的学术精神，求同存异的工作作风激励着我。论文写作过程中，没有她对我进行了不厌其烦的指导和帮助，无私的为我进行论文的修改和改进，就没有我这篇论文的最终完成。

其次我要感谢与我共事的搭档，我们一起完成了顶板离层监测系统，系统的开发由我们分工完成。我负责系统中所有的硬件部分的东西，她负责系统中所有软件部分的东西。我设计顶板离层位移传感器用来采集数据，她则设计了配套的APP和上位机软件。在系统的开发过程中，我们相互合作，共同商议数据上传的格式，一起调试优化，遇到问题共同商量解决，最终才完成了整套系统。

最后我需要谢谢我的父母，是他们含辛茹苦将我培育成人，给了我他们能够给的最好的培养条件，没有他们辛勤付出就没有我的现在。至此将我最真挚的感谢献给我的父母！

参考文献

[1]阎学文,低功耗顶板离层仪研究[J]. 振动、测试与诊断,2008（12）：P404-P407

[2]王云海,顶板离层仪的工作原理及应用研究[J],煤炭与化工,2013（7）：P100-P101

[3]卢喜山,智能型顶板离层仪的研制与应用[J],煤炭工程,2006：P92-P94.

[4]Weston, G.F. (1968), Cold Cathode Glow Discharge Tubes, London: ILIFFE Books Ltd, LCCN 68-135075, Dewey 621.381/51, LCC TK7871.73.W44.

[5]刘火良;杨森，STM32库开发实战指南：基于STM32F103（第2版）[M]．机械工业出版社，2017：P248-P249

[6]姚文祥,ARM Cortex-M3与Cortex-M4权威指南(第3版)[M]．清华大学出版社，2015（11）.P239-P255

[7] 郭书军，王玉花．ARM Cortex-M3系统设计与实现.STM32基础篇[M]．北京：电子工业出版社，2014，P25-P47

[8]卢有亮.嵌入式实时操作系统μC/OS原理与实践（第2版）,电子工业出版社,2014(4),P5-P35

[9] 张爱英，刘皓东，郭相参，陈弦．顶板离层监测在巷道支护中的应用[J]．煤矿安全，2009，40(09)：P64-P65

[10]周立功.ARM嵌入式系统基础教程[M].北京：北京航空航天大学出版社，2005.

[11] 黄辛超.基于嵌入式系统的便携式数据采集系统的设计[D].上海交通大学：电子信息与电气工程学院,2010,17-25.

[12][侯殿有](http://www.dangdang.com/author/%BA%EE%B5%EE%D3%D0_1" \t "http://product.dangdang.com/_blank).嵌入式系统开发基础——基于ARM9微处理器C语言程序设计.北京：[清华大学出版社](http://www.dangdang.com/publish/%C7%E5%BB%AA%B4%F3%D1%A7%B3%F6%B0%E6%C9%E7_1" \t "http://product.dangdang.com/_blank)，2011.

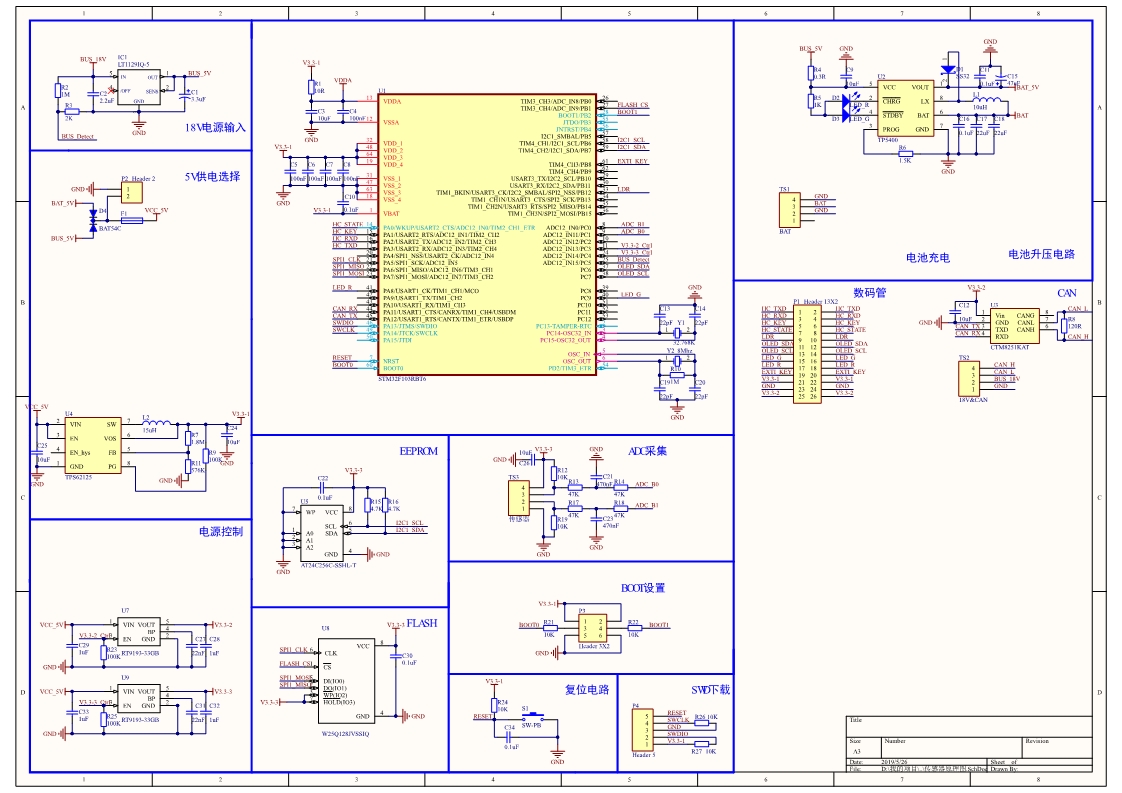
[13] 李亚君．本安型顶板离层位移传感器在煤矿矿井中的应用[J]．山西科技，2015，30(01)：P154-P155

[14] 陈娟，赵耀江．近十年来我国煤矿事故统计分析及启示[J]．煤炭工程，2012(03)：P13-P139

[15]李宁.基于MDK的STM32处理器开发应用[M].北京：北京航空航天大学出版社,2008.

附录

顶板离层位移传感器原理图：



位移传感器PCB：

