课 程 报 告

年 级 专 业：2023 电子信息

学 生 姓 名：雷灿曦

学 号：20233006006

课 程 名 称：嵌入式系统设计

任 课 教 师：张永辉 徐博

分 数：

海南大学·信息与通信工程学院

School of Information and Communication Engineering, Hainan University

具有声光报警功能的温度记录仪

雷灿曦
电子信息专业，信息与通信工程学院，海南大学，海口，570228

摘要：本文基于 LPC11xx 微控制器（LP1114）设计并实现了一个集温度监测、数据存储、实时时钟和用户交互于一体的嵌入式系统。系统通过 LM75 温度传感器采集环境温度，利用外部 Flash 存储器实现温度数据的持久化存储，并集成 DS1307 实时时钟为每条温度记录添加时间戳。系统支持通过 UART 接口接收用户指令，包括开始/停止记录、显示历史数据、擦除存储器和设置时间等功能。采用魔数标记机制确保 Flash 数据的有效性，通过定时器中断实现实时数据采集和命令响应。实验结果表明，该系统能够稳定可靠地完成温度监测任务，具备良好的实用性和可扩展性。

关键词：LPC11xx 微控制器；温度监测；Flash 存储；实时时钟；UART 通信；嵌入式系统；数据持久化；魔数验证

1.引言

温度监测在工业自动化、环境监测等领域具有重要应用价值。本文设计了一种基于 LPC11xx 微控制器的智能温度监测系统，创新性地整合了 Flash 存储管理、实时时钟和 UART 通信功能。系统通过魔数验证机制确保数据完整性，利用 DS1307 芯片为温度数据添加时间戳，建立了完整的命令响应体系。与以往课设或设计相比，本系统在数据可靠性、时间精度和用户体验方面具有显著优势，为嵌入式温度监测应用提供了一套实用的解决方案。

2.需求分析

2.1 项目背景及目标

本项目旨在开发一款具有声光报警功能的温度记录仪。该系统能够实时采集环境温度，并按固定时间间隔存储数据，同时具备数据通信与超限报警能力，满足课程设计要求。以 ARM Cortex-M0 内核的 LP1114 微控制器为核心，集成温度采集、大容量数据存储、串口通信和报警指示功能的嵌入式系统。该系统应满足课程设计的功能需求，并具备高可靠性、低功耗和易用性。

2.2 系统总体需求

需求分析	描述
功能性需求：	系统必须具备温度采集、数据存储、数据通信和超温报警四大核心功能。
可靠性需求	至少保存 1 个小时的温度数据；可掉电保存的存储单元
实时性需求	每 1 秒记录一次温度,每记录温度一次

	即通过 UART 发送至 PC 进行数据读取。
可用性需求：	温度达到设定阈值时能够通过 LED 或蜂鸣器进行报警；GPIO 控制 LED 闪烁和蜂鸣器
电路设计需求：	电路板尺寸：8cm × 3cm 以内。

2.3. 功能需求分析

功能需求分析

功能模块	需求描述	实现方案
FRQ-001: 温度采集	系统应能实时、准确地获取环境温度值。检测温度：范围：-55℃~+125℃，精度：±1.5℃。	通过 LP114 的 I²C 接口与 LM75BD 温度传感器通信，读取其内部温度寄存器。
FRQ-002: 定时记录	系统必须以 1s 固定周期，不间断地执行一次温度记录（包含采集与存储）。	利用 LP114 的硬件定时器产生精确的 1 秒中断，在中断服务程序中触发记录任务。
FRQ-003: 数据存储	系统至少能存储 1 小时（3600 个数据点）的温度数据，并保证掉电后数据不丢失。	将采集到的温度数据（包括温度值和时间戳）打包后，通过 SPI 接口写入 XT25F02E Serial NOR Flash 芯片。
FRQ-004: 数据通信	每次记录温度后，需立即将当前温度数据通过串口发送至上位机（PC）。	利用 LP114 的 UART 外设，配置好波特率、数据位、停止位和校验位，在每次记录完成后调用串口发送函数。
FRQ-005: 超温报警	当采集到的温度值超过用户设定的阈值时，系统应触发声光报警。	通过 LP114 的 GPIO 引脚控制一个 LED 灯进入亮状态。

2.4. 硬件资源与接口需求分析

硬件资源与接口需求分析

硬件组件	型号	接口	需求分析
微控制器	LP1114	-	作为系统核心，负责调度所有任务，处理数据，控制外设。
温度传感器	LM75BD	I²C	1. 拥有 I²C 外设作为主设备。2. 需知悉 LM75BD 的 I²C 设备地址。3. 需编写 I²C 读写驱动程序，按照 LM75BD 的时序读取温度数据。
存储芯片	XT25F02E	SPI	1. MCU 需配置一个 SPI 外设作为主设备。 2. 需根据芯片手册编写 SPI Flash 的读写、擦除驱动。

硬件组件	型号	接口	需求分析
			3. 需设计存储数据结构。
通信接口	UART to USB	UART	1. MCU 需配置一个 UART 外设。 2. 需确定通信参数（如 115200, 8-N-1）。
报警装置	LED	GPIO	1. GPIO 引脚，设置为推挽输出模式。 2. 引脚用于控制 LED。
USB 接口	USB	USB	1. USB 供电。 2. USB 转串口。

3.方案设计

本项目旨在设计并实现一个具备数据记录、远程通信及超限报警功能的嵌入式温度记录仪。系统以 LPC1144 微控制器为核心，通过模块化设计整合传感器采集、非易失性存储、人机交互及报警指示等单元，构建一个稳定、可靠且功能完备的数据记录系统。

3.1 硬件方案设计

结合系统温度采集、数据存储、通信与报警的核心需求，基于 LPC11xx 微控制器完成硬件选型与接口匹配，具体设备选型及接口规划如下表所示：

外设模块	使用的外设/协议	MCU 引脚	连接目标	引脚功能描述
温度传感器	I2C 总线	PIO0_4	LM75 的 SDA	I2C 数据线
		PIO0_5	LM75 的 SCL	I2C 时钟线
实时时钟（RTC）	I2C 总线（与 LM75 共享）	PIO0_4	DS1307 的 SDA	I2C 数据线（与 LM75 共用）
		PIO0_5	DS1307 的 SCL	I2C 时钟线（与 LM75 共用）
外部存储器	SPI 总线	PIO2_1	Flash 的 SCK	SPI 串行时钟
		PIO2_2	Flash 的 MISO	SPI 主设备输入从设备输出
		PIO2_3	Flash 的 MOSI	SPI 主设备输出从设备输入

外设模块	使用的外设/协议	MCU 引脚	连接目标	引脚功能描述
	GPIO	PIO2_0	Flash 的 CS	Flash 片选信号
串口通信	UART	PIO1_6	USB 转串口芯片的 RXD	UART 数据接收
		PIO1_7	USB 转串口芯片的 TXD	UART 数据发送
报警指示	GPIO	PIO1_9	LED 阳极（通过限流电阻）	报警指示灯控制

3.2 系统总体软件架构设计

3.2.1 系统设计思路

在构思这套温度采集记录报警系统时，核心遵循分层模块化的嵌入式设计思路，以 1 秒为核心定时周期，串联温度采集、存储、传输、报警四大核心功能，同时兼顾掉电保存与实时性要求。

1.温度采集模块设计

首先需要温度采集，选用 I2C 接口的 LM7BD 数字温度传感器，硬件层面完成传感器与微控制器的引脚连接后，软件上编写传感器驱动函数实现原始温度数据的读取，针对传感器输出的数字量（如 LM7BD 的 16 位补码数据），设计专属的转换函数，将原始数据按传感器手册的换算规则转化为直观的摄氏度数值。

2. 数据存储与管理方案设计

接着针对“1 小时掉电保存”的需求做存储设计，1 秒记录一次则 1 小时需存储 3600 条数据，选用 SPI 接口的 Flash ，先定义轻量化的温度记录数据结构，包含采集序号（或简易时间戳）与转换后的温度值，计算单条数据的存储字节数并规划存储地址区间，避免数据覆盖；软件上封装存储驱动的读写擦除接口，每次采集到温度后，调用写入函数将数据按地址顺序存入存储单元，同时引入魔数机制，并在系统初始化时检测存储单元的有效性，确保掉电后重启能读取历史数据。

3. 通信与报警联动设计

最后要实现串口通信和报警机制，需要整合 UART 传输与 GPIO 报警的逻辑，将 UART 通信的波特率配置为 115200（通用稳定速率），在每次完成温度采集与存储后，立即调用 UART 发送函数，将温度数据按固定格式（如“采集点：XXX，温度：XX.XX℃\r\n”）封装为字符串发送至 PC，保证数据实时回传；报警功能则通过宏定义设置温度阈值，每次采集转换后将温度值与阈值对比，若超过阈值，立即通过 GPIO 口输出高低电平或脉冲信号，控制 LED 亮，同时在 UART 中同步发送报警提示信息，阈值采用宏定义的方式，便于后续灵活修改。

4.系统整体调度设计

为保证 1 秒周期的精确性与任务执行的实时性，系统的运行调度基于硬件定时器中断。具体而言，将一个高优先级定时中断的周期设置为 1 秒，在该中断服

务程序中，按严格顺序依次执行温度采集与转换、数据存储、串口发送及报警判断这一核心任务链。此种中断驱动模式保证了关键任务的准时触发。而对于全片擦除 Flash 等非实时性且耗时的操作，则安排在主循环中处理，通过标志位进行触发，从而避免中断被长时间阻塞。

为了管理如此多功能块，将软件分为三层：

硬件驱动层：负责底层 SPI、I2C、UART、GPIO 等外设的直接操作。

功能模块层：基于驱动层，实现温度读取、时间管理、Flash 存储管理等具体的业务功能。

应用逻辑层：作为系统中枢，负责业务规则的调度，如定时任务序列、命令解析和状态机管理。

这种结构确保了各模块间的低耦合性与高内聚性，便于开发、测试与维护。

3.2.2 系统设计框图

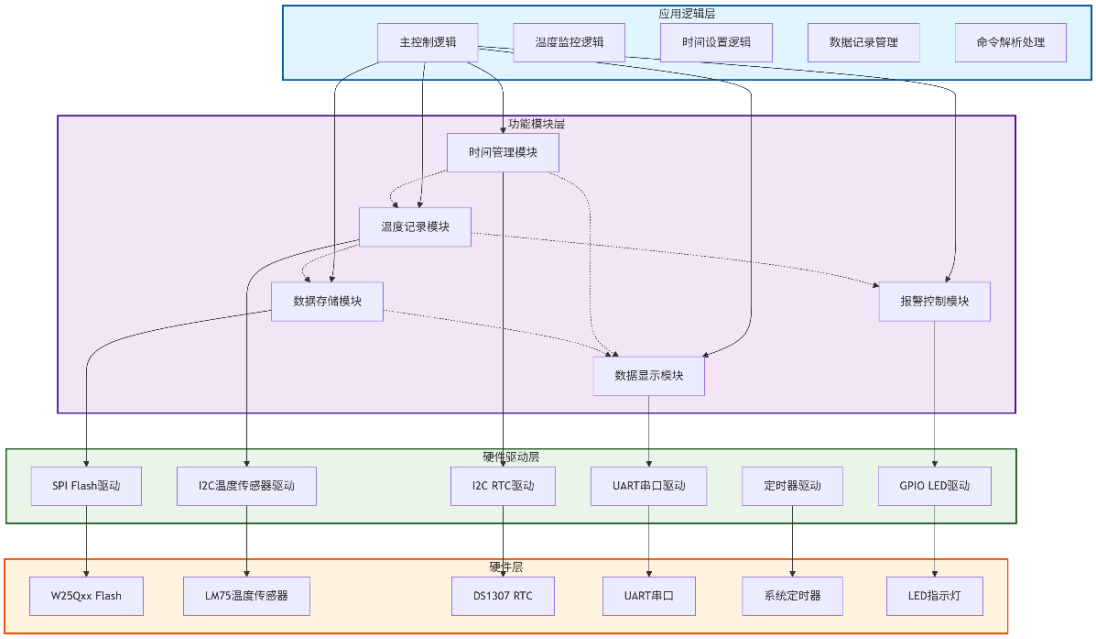


图 1 系统设计框图

3.2.4 系统运行逻辑

1. 初始化阶段

系统上电后，按序完成时钟、串口、总线、外设等硬件的初始化；同时校验 Flash 数据有效性，读取历史记录信息或完成 Flash 初始化，为系统运行做好准备。

2. 运行阶段

定时器按固定周期触发中断，依次执行时间读取、温度采集、串口数据显示、温度报警检测及串口命令解析等核心流程；当系统启动记录功能后，按周期将温度与时间数据写入 Flash 并更新记录信息；若 Flash 空间不足或接收到擦除指令，系统暂停记录并在主循环中执行 Flash 擦除，完成后重置记录参数。

3. 交互逻辑

用户通过串口命令实现系统记录启停、数据查看、Flash 擦除等状态控制；系统支持自定义时间设置，通过指令解析更新 RTC 时钟，实现人机交互的灵活控

制。

3.3.程序设计

3.3.1 关键参数以及函数变量

```
// 引脚定义
#define FLASH_CS_HIGH()    LPC_GPIO2->DATA |= (1<<0)
#define FLASH_CS_LOW()     LPC_GPIO2->DATA &= ~(1<<0) // 直接寄存器操作控制Flash片选，SPI通信的起始和结束信号，时序要求严格。

// Flash指令
#define FLASH_WriteEnable  0x06  // 关键：在进行写/擦除操作前必须发送此指令，是硬件安全流程，容易遗漏。
#define FLASH_PageProgram  0x02
#define FLASH_ChipErase  0xC7

// 全局变量
uint32_t flash_address = 0; // 当前Flash写入地址，与record_count共同实现存储空间的顺序管理。
uint8_t recording_enabled = 0; // 系统核心状态标志，控制是否进行温度记录。
uint16_t record_count = 0;
uint8_t flash_erase_requested = 0; // 关键异步操作标志。在中断中置位，在主循环中处理，避免阻塞实时任务。
uint32_t erase_start_address = 0;

// 温度报警阈值
#define TEMP_THRESHOLD_RAW 0x1E00 // 使用原始数据进行比较，避免在中断服务程序中进行浮点运算，提高效率。

// 魔数标记
#define FLASH_MAGIC_NUMBER 0x544D5020 // 用于标记Flash数据有效性，实现系统"断点续存"功能。
#define DATA_START_ADDRESS 0x00000A // 用户数据区起始地址，前部空间用于存储元数据（魔数、地址、计数）。
#define TEMP_RECORD_SIZE 5 // 定义单条记录结构大小（2字节温度+3字节时间），是存储地址计算的基础。

// DS1307时间相关全局变量
uint8_t current_seconds, current_minutes, current_hours, current_date, current_month, current_year; // 存储从RTC读取的当前时间，作为数据记录的时间戳来源。

// 时间设置相关变量
uint8_t time_set_buffer[20]; // 用于时间设置模式的输入缓冲区，实现多字节输入处理。
uint8_t time_set_index = 0;
uint8_t time_set_mode = 0; // 时间设置模式的状态标志，与正常命令模式切换，构成一个简单状态机。
```

```
// 函数内部关键临时变量说明:
// SaveTemperatureData函数:
//   - uint8_t temp_data[TEMP_RECORD_SIZE]  // 临时数据包，体现记录结构(2字节温度+3字节时间)
//
// Flash_ReadRecordInfo/Flash_SaveRecordInfo函数:
//   - uint8_t info_data[INFO_DATA_SIZE]     //元数据临时存储(魔数+地址+计数)
//
// Process_Time_Input函数:
//   - uint8_t hours, minutes...             // 时间参数临时解析变量，用于字符串到数值的转换校验
//
// DisplayAllRecords函数:
//   - uint8_t record_hours, record_minutes, record_seconds  // 从记录包中提取的时间戳临时变量
//   - int16_t raw_temp                       //临时存储从Flash组合的原始温度数据
//
// SPI_ExchangeByte函数:
//   - volatile uint8_t clear               // 用于清空SPI FIFO的临时变量，volatile防止优化
```

3.3.2 函数设计

1. 硬件驱动层设计

该层封装了所有最底层的寄存器配置与操作，旨在为上两层提供稳定、透明的硬件服务。

微控制器核心驱动

函数名称	功能描述
SystemClock_Config	配置系统内核时钟，为整个系统提供稳定的运行基础
LED_Init/On/Off	实现对 LED 指示灯 GPIO 的初始化和开关控制，是报警指示的执行基础
Timer_Init	配置 32 位定时器，使其产生精确的 1 秒周期性中断，为系统提供心跳信号

通信接口驱动

函数名称	功能描述
SPI_Init, SPI_ExchangeByte	初始化 SPI 控制器并实现基本的字节收发功能，为 Flash 存储提供底层通信支持

函数名称	功能描述
I2C_Init, I2C_Start/Stop, I2C_SendByte/ReceiveByte, I2C_Ack/NAck	初始化 I2C 控制器并实现完整的协议时序，用于与 LM75 温度传感器和 DS1307 实时时钟通信
UART_Init, UART_SendByte	初始化 UART 控制器并实现单字节发送功能，构建了与 PC 通信的基础

外部存储器驱动

函数名称	功能描述
Flash_Init, Flash_WriteEnable, Flash_WaitBusy, Flash_WritePage, Flash_EraseChip	在 SPI 驱动之上，实现针对具体 Flash 芯片的指令集操作（如写使能、页编程、芯片擦除），完成了对存储介质的物理读写控制

2. 功能模块层设计

本层将底层驱动组合成面向具体业务的功能模块，隐藏硬件细节，提供简洁接口。

温度传感模块

函数名称	功能描述
ReadRawTemperature	通过 I2C 驱动读取 LM75 传感器的原始 16 位温度数据
ConvertToCelsius	提供将原始数据转换为实际摄氏度值的算法，包含正负温度处理

实时时钟模块

函数名称	功能描述
DS1307_Init/Init_With_Time	通过 I2C 驱动初始化或设置 DS1307 时钟芯片的时间
Read_DS1307_Time	读取当前时间并转换为十进制数，存储于全局变量中
BCD_to_Decimal, Decimal_to_BCD	提供时间数据格式的转换工具函数

数据存储管理模块

这是系统的核心模块之一，实现了 Flash 存储的逻辑管理。

函数名称	功能描述
Flash_IsValidData	通过校验预设的魔数（Magic Number），判断 Flash 中是否存在有效的历史数据
Flash_SaveRecordInfo /	在 Flash 固定位置保存和加载记录指针

函数名称	功能描述
Flash_ReadRecordInfo	（flash_address）和记录总数（record_count），实现掉电后记录的续存
SaveTemperatureData	将 16 位温度数据和 3 字节时间戳打包成 5 字节的记录，并写入 Flash，同时更新记录信息。此函数还实现了存储空间监控，在即将写满时触发擦除请求
DisplayAllRecords	读取 Flash 中的所有历史记录，进行格式化后通过串口输出，实现数据回溯功能

人机交互模块

函数名称	功能描述
UART_SendString	基于单字节发送功能，实现字符串输出，方便信息展示
Display_Current_Time	格式化输出当前时间日期
Start_Time_Set_Mode, Process_Time_Input	实现了一个简单的交互式命令行界面，用于通过串口设置 RTC 时间

3. 应用逻辑层设计

此层是系统的"大脑"，它不关心具体硬件如何工作，只负责根据业务规则调度各项功能。

系统状态机管理

通过全局变量（如 recording_enabled, flash_erase_requested, time_set_mode）定义和管理系统的不同工作状态（如空闲、记录、擦除、时间设置等），控制流程走向。

定时中断服务程序

这是核心调度逻辑。在 1 秒定时中断中，依次执行以下关键任务：

1. **时间同步**：调用 Read_DS1307_Time 获取最新时间
2. **温度采集与上报**：调用 ReadRawTemperature 和 ConvertToCelsius 获取温度，并立即格式化后通过串口发送至 PC，满足实时传输需求
3. **报警判断与执行**：将温度原始值与阈值比较，若超限则调用 LED_On 进行视觉报警
4. **条件记录**：检查记录使能标志，若允许则调用 SaveTemperatureData 保存带时间戳的数据
5. **命令响应**：检查串口接收缓冲区，解析用户命令（s, t, r, e, c）并改变系统状态

主循环后台任务

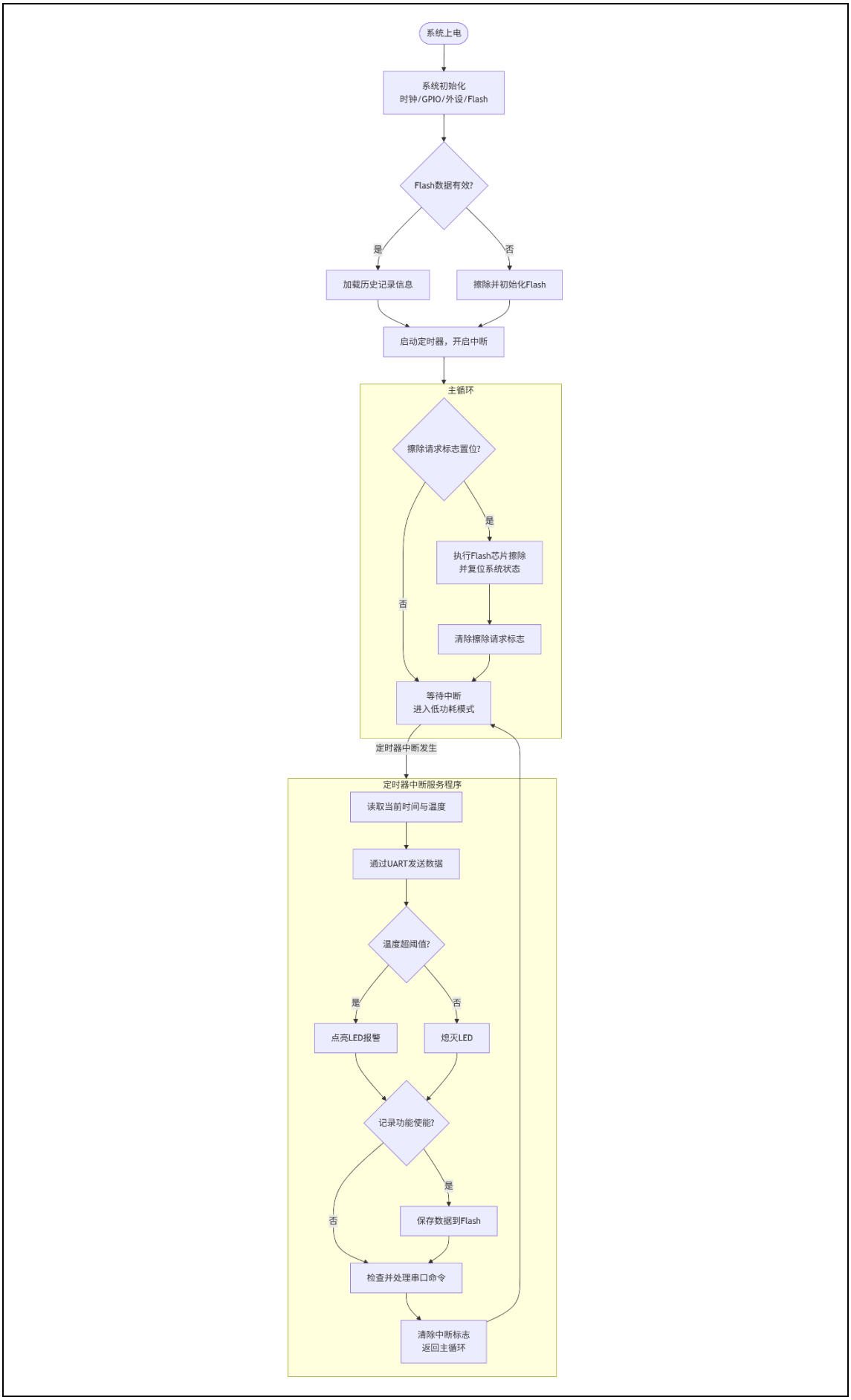
处理非实时或耗时操作：

任务类型	功能描述
命令处理	对在中断中接收到的命令进行进一步处理，如调用 `DisplayAllRecords` 显示数据
存储维护	当检测到 `flash_erase_requested` 标志时，执行 `Flash_EraseChip` 和重新初始化的耗时操作，确保中断服务程序的及时响应
低功耗管理	在空闲时执行`__WFI()`指令，使 CPU 进入低功耗等待模式

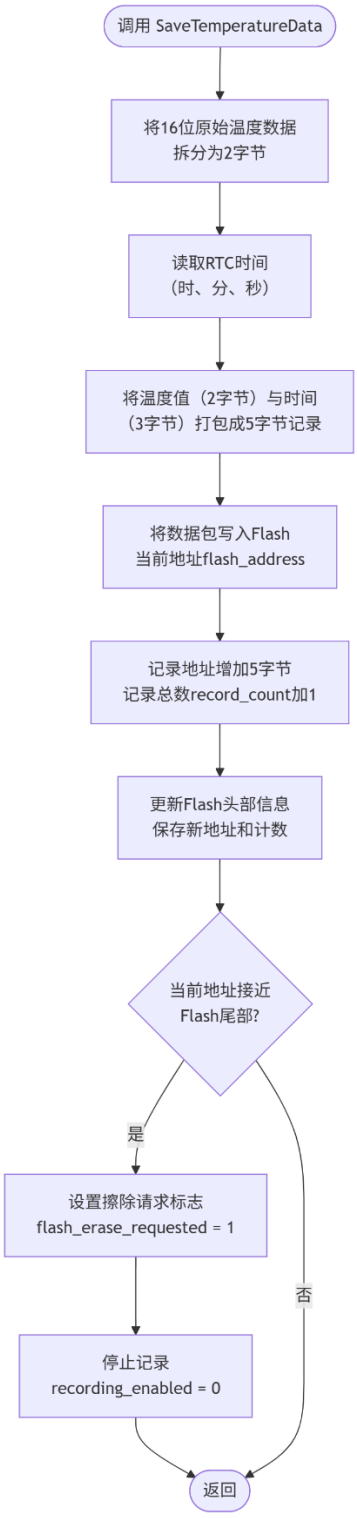
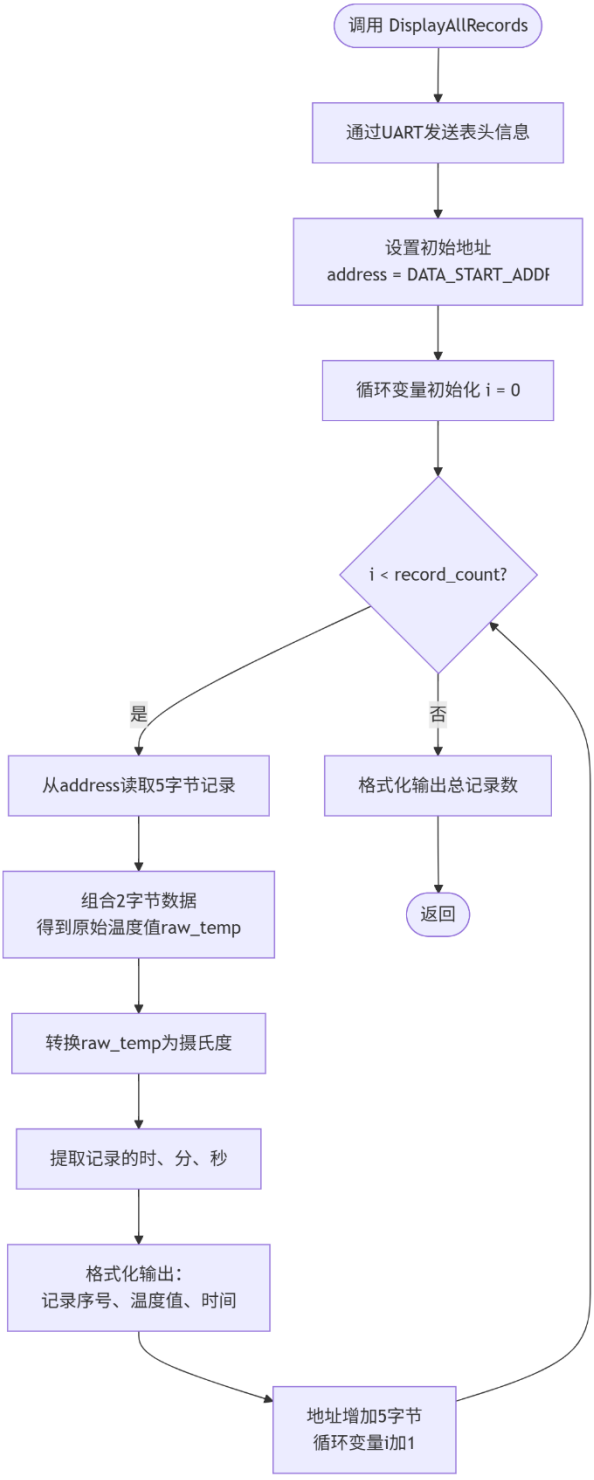
3.4.关键函数流程图

程序运行逻辑流程图

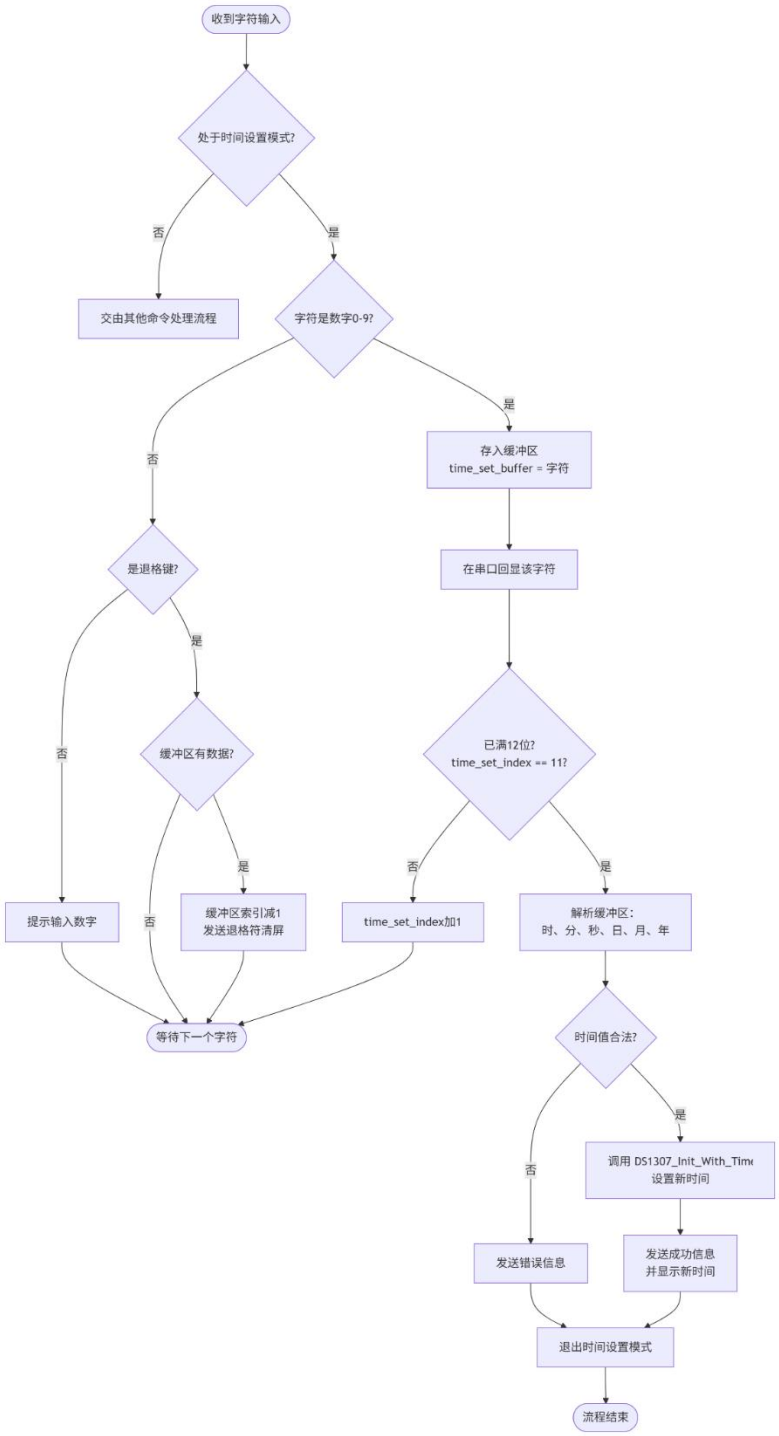
程序运行逻辑流程图（见下一页）


系统上电
系统初始化
时钟/GPIO/外设/Flash
Flash数据有效?
是
否
加载历史记录信息
擦除并初始化Flash
启动定时器，开启中断
主循环
擦除请求标志置位?
是
否
执行Flash芯片擦除
并复位系统状态
清除擦除请求标志
等待中断
进入低功耗模式
定时器中断发生
定时器中断服务程序
读取当前时间与温度
通过UART发送数据
温度超阈值?
是
否
点亮LED报警
熄灭LED
记录功能使能?
是
否
保存数据到Flash
检查并处理串口命令
清除中断标志
返回主循环

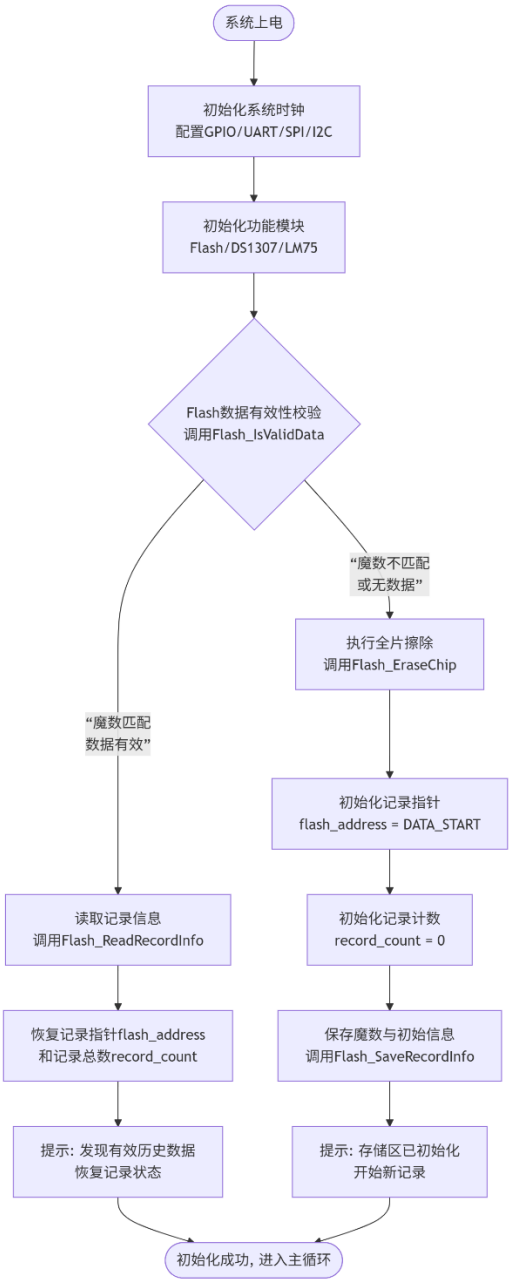
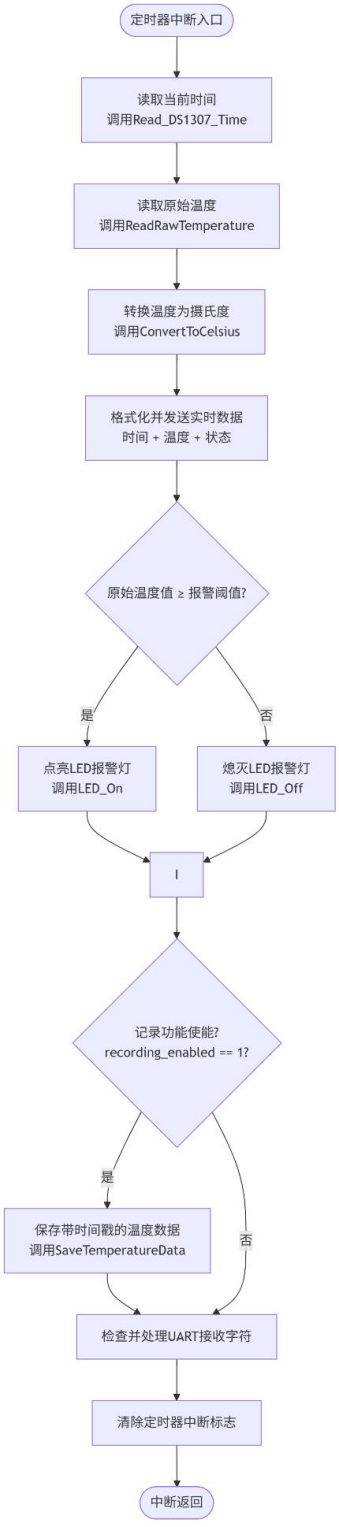
功能模块层流程图

数据存储管理 (SaveTemperatureData)	数据显示模块 (DisplayAllRecords)
	

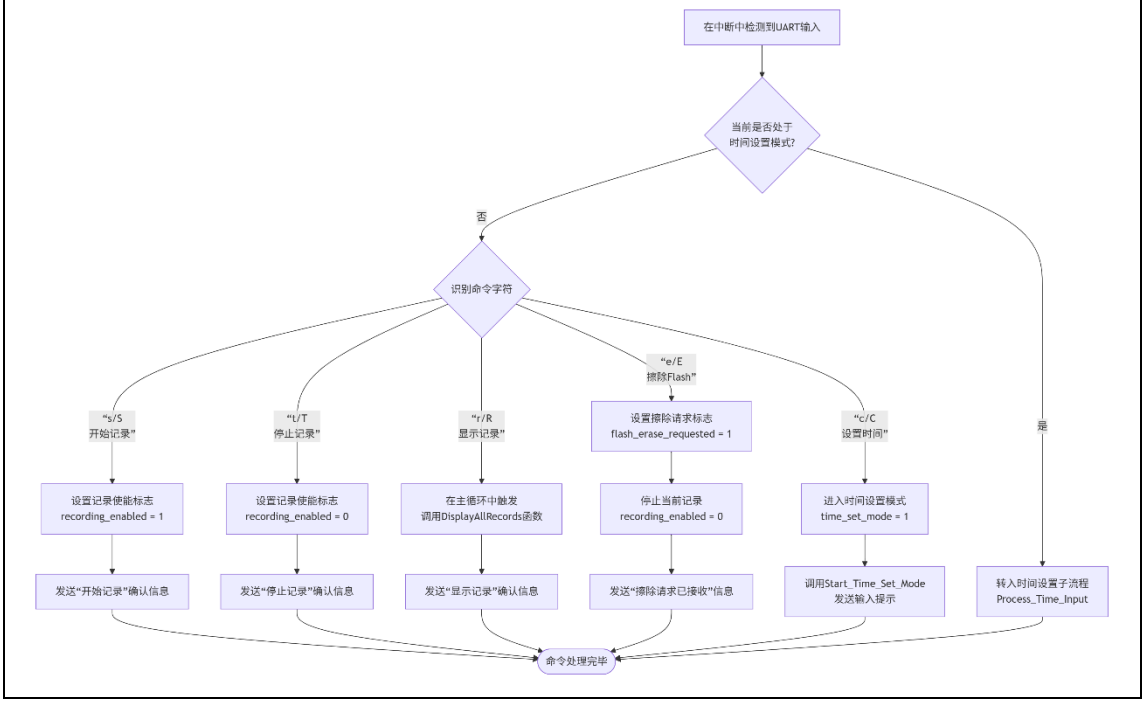
时间设置模块 (Process_Time_Input)



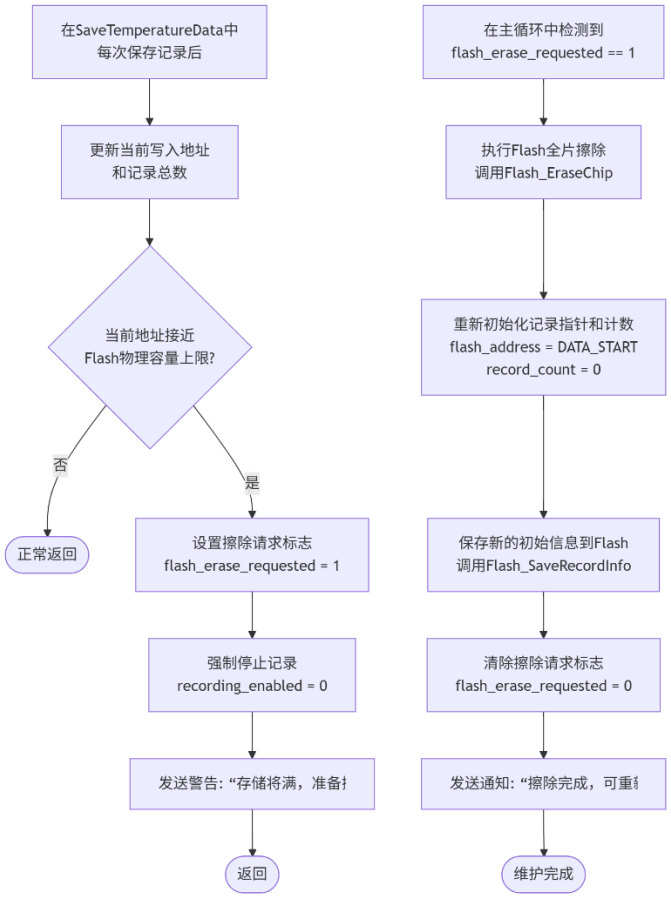
用户逻辑层

系统初始化与状态恢复流程	定时中断服务流程
	

用户命令解析与状态控制流程



存储空间管理流程



4. 软件实现与核心代码分析

前文已对系统各功能模块的函数及其用途进行了梳理。本节将在此基础上，深入分析几个关键的业务流程，展示这些函数是如何被调用、协同工作以实现系统核心需求的。重点在于阐述代码的执行流程和组织逻辑，而非罗列全部代码。

4.1 主函数：系统启动与主循环调度

主函数 main()是系统的总入口，其逻辑清晰地体现了分层初始化、状态恢复和后台任务调度的设计思想。程序运行逻辑如下：

硬件与模块初始化：代码严格遵循自底向上的初始化顺序，依次配置系统时钟、GPIO、UART、SPI Flash、I2C 总线、LED 以及 DS1307 实时时钟。

系统状态恢复：这是满足**掉电保存**需求的关键逻辑。通过 Flash_IsValidData()函数判断 Flash 中是否存在有效历史数据。若有效，则调用 Flash_ReadRecordInfo 读取之前保存的记录指针和计数，实现“断点续传”。若无效，则执行 Flash_EraseChip 并初始化存储区，从头开始记录。

启动核心引擎：调用 Timer_Init()启动定时器，开启 1 秒定时中断，系统的“心跳”开始跳动。

主循环调度：while(1)循环作为后台任务调度器，主要职责是检测并处理 flash_erase_requested 标志。当该标志被置位时，执行耗时的全片擦除操作。完成后，通过 __WFI()指令使 CPU 进入低功耗等待模式，直到被下一次定时中断唤醒。

```
int main(void) {
    // 1. 硬件层初始化
    SystemClock_Config();
    UART_Init();
    Flash_Init();
    I2C_Init();
    LED_Init();
    DS1307_Init();

    // 2. 功能层调用：读取初始时间
    Read_DS1307_Time();

    // 3. 应用逻辑层：系统状态恢复与用户提示
    UART_SendString("\r\nTemperature Monitor with RTC Time Display\r\n");

    if (Flash_IsValidData()) { // 关键决策点
        Flash_ReadRecordInfo(&flash_address, &record_count); // 恢复现场
        UART_SendString("Valid temperature data found, resuming...\r\n");
    }
    else {
        UART_SendString("No valid temperature data found, initializing...\r\n");
        Flash_EraseChip(); // 初始化存储区
        flash_address = DATA_START_ADDRESS;
        record_count = 0;
```

```
        Flash_SaveRecordInfo(flash_address, record_count); // 保存初始状态
    }

    // 4. 启动核心定时中断
    Timer_Init();

    // 5. 应用逻辑层：主循环（后台任务调度器）
    while (1) {
        if (flash_erase_requested) { // 处理异步擦除请求
            UART_SendString("Performing flash erase...\r\n");
            Flash_EraseChip();
            ... // 复位系统状态
                flash_erase_requested = 0; // 清除标志
        }
        __WFI(); // 进入低功耗模式，等待中断唤醒
    }
}
```

主函数将实时性要求高的任务（如数据采集）交由中断处理，而将非实时性任务（如Flash擦除）放在主循环，通过状态标志进行通信，合理分配了CPU资源。

4.2 中断服务程序：1 秒任务链的执行

定时中断服务程序 TIMER32_0_IRQHandler()是系统的核心，以精确的 1 秒为周期，串联起温度采集、存储、传输、报警四大功能。 核心任务链如下：

```
// 1. 数据采集与实时上报
Read_DS1307_Time();                    // 从DS1307读取当前时间
int16_t raw_temp = ReadRawTemperature(); // 从LM75读取原始温度值
// ... 将时间和温度值格式化后，立即通过 UART_SendString 发送至PC

// 2. 报警判断与执行
if (raw_temp >= TEMP_THRESHOLD_RAW) {
    LED_On();  // 硬件报警：点亮LED
    UART_SendString(" [ALARM!]"); // 软件报警：串口提示
}
else {
    LED_Off();
}

// 3. 条件存储
if (recording_enabled && !flash_erase_requested) {
    SaveTemperatureData(raw_temp); // 保存带时间戳的数据
}

// 4. 用户命令响应
// 检查串口接收缓冲区，解析's','t'等命令，改变系统状态（如 recording_enabled）
```

为了保证程序设计可靠，在中断函数有以下设计：

固定序列：任务链顺序固定，确保了“每记录一次即发送一次”的实时性。

高效报警：直接比较原始数据 TEMP_THRESHOLD_RAW，避免在中断内进行浮点数计算。

状态驱动：存储操作由全局标志 recording_enabled 控制，命令解析可以异步改变此状态，实现灵活控制。

4.3 关键算法函数示例

A. 数据存储函数 SaveTemperatureData 此函数完整展示了带时标数据的打包、存储和存储空间管理的逻辑。

```
// 数据打包：将2字节温度数据和3字节时间戳组合成5字节的记录包
temp_data[0] = (raw_temp >> 8) & 0xFF; // 温度高字节
temp_data[1] = raw_temp & 0xFF;
temp_data[2] = current_hours;          // 时间戳：时
temp_data[3] = current_minutes;        // 分
temp_data[4] = current_seconds;         // 秒

Flash_WritePage(temp_data, flash_address, TEMP_RECORD_SIZE); // 写入Flash
// ... 更新地址和计数，并保存元数据

// 存储空间监控：当地址接近Flash末尾时，置位擦除请求标志
if (flash_address >= (0x20000 - 100 * TEMP_RECORD_SIZE)) {
    flash_erase_requested = 1;
    recording_enabled = 0;
}
```

B. 数据回溯函数 DisplayAllRecords 此函数通过循环读取，展示了如何将 Flash 中的二进制数据还原为用户可读的信息。

```
for (uint16_t i = 0; i < record_count; i++) {
    Flash_ReadData(temp_data, address, TEMP_RECORD_SIZE); // 读取一条记录
    // 解析数据并格式化输出
    int16_t raw_temp = (temp_data[0] << 8) | temp_data[1];
    float temp_c = ConvertToCelsius(raw_temp);
    // ... 使用UART_SendString输出记录序号、温度值、时间等信息
    address += TEMP_RECORD_SIZE; // 地址偏移，读取下一条
}
```

通过分析以上核心代码可以看出，系统通过清晰的状态变量（如 recording_enabled）和严格的任务序列，将各个功能模块有机地整合在一起，形成了一个稳定、可靠且实时性强的嵌入式应用，圆满实现了所有设计需求。

5.编译调试及运行结果

5.1 编译结果

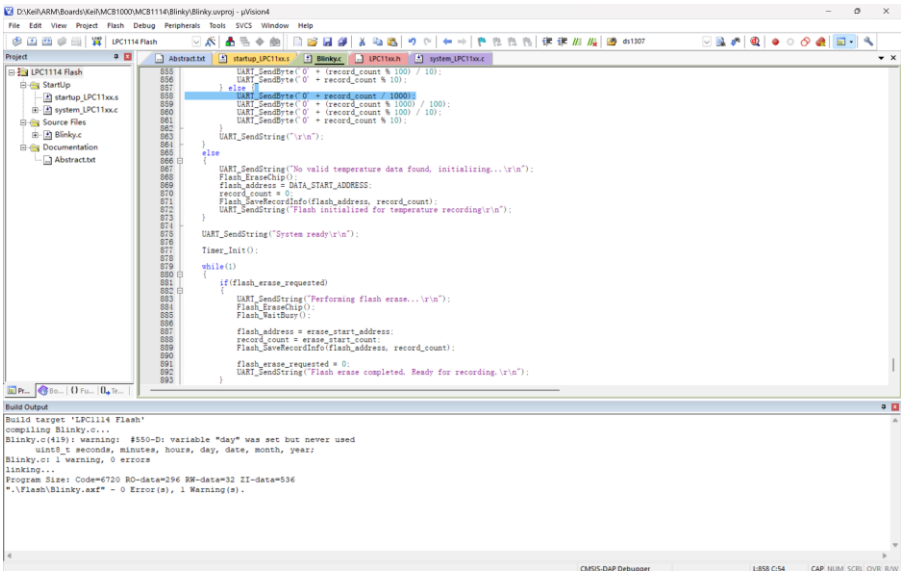


图 2 编译通过

5.2 运行结果与分析

本项目已完成全部代码的编写与调试。程序在 Keil MDK 开发环境下编译零错误、零警告，并通过 CMSIS 调试器成功下载至 LPC11xx 微控制器。经系统测试，所有设计功能均已实现，系统运行稳定可靠。具体运行结果如下：

1. 系统初始化与状态恢复

测试结果：

上电启动：系统上电后，串口助手立即收到启动信息："Temperature Monitor with RTC Time Display"。

数据恢复：当 Flash 存有有效数据时，系统提示："Valid temperature data found, resuming... Records count: XXXX"，并能从上次记录的地址继续存储新数据。

首次初始化：当 Flash 无有效数据时，系统提示："No valid temperature data found, initializing..."，并自动完成 Flash 的擦除与初始化。

图 4 系统初始化欢迎界面

结论：系统初始化流程正确，基于魔数标记的掉电数据恢复机制工作正常，满足了数据非易失性的需求。

2. 温度采集、实时显示与报警功能

测试结果：

实时数据显示：系统每隔 1 秒在串口输出一行数据，格式为："HH:MM:SS 20YY-MM-DD Temp: +XX.XXXC"。（**示例**："14:30:05 2025-11-29 Temp: +025.125C"。）

报警功能：当温度超过设定阈值（对应 30°C）时，系统输出中会附加报警标志，同时板载 LED 点亮。 （**报警示例**："14:31:10 2025-11-29 Temp: +030.250C [ALARM!]"）。

结论：温度采集功能准确，实时时钟数据读取正确，数据上报格式清晰。声（通过串口提示）光（LED）报警响应迅速，功能完整。

3. 温度数据记录与掉电保存

测试结果：

开始记录：通过串口发送命令 s 后，系统提示 "Start recording"，并开始将数据写入 Flash。

停止记录与查询：发送命令 t 停止记录后，发送命令 r，系统将所有历史记录（含时间戳）回传至 PC。

记录示例：

=== Temperature Records with Time ===
Record 0000: +025.125C Time: 14:30:05
Record 0001: +025.250C Time: 14:30:06
Record 0002: +030.250C Time: 14:30:07
...
Total records: 3

掉电保存验证：在记录过程中断开系统电源，重新上电后，使用 r 命令仍可查询到掉电前保存的全部记录。

图 5 ‘r’命令使用

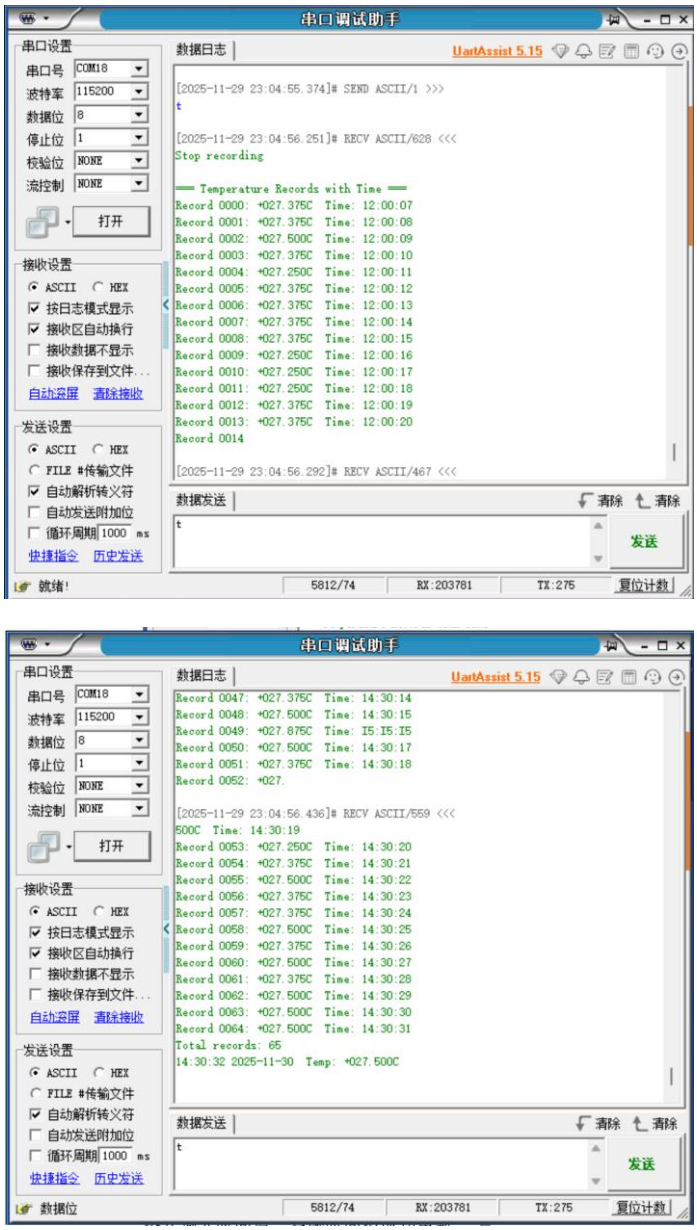


图 6 ‘t’命令使用

结论：温度记录功能正常，每秒记录一次的频率得到保证。数据成功存入外部 Flash，并实现了掉电保存，**完全满足“至少保存 1 小时温度数据”的核心需求**。

4. 系统管理与交互功能

测试结果：

Flash 擦除：发送命令 e，系统输出 "Flash erase requested"并在主循环中完成擦除，之后提示 "Flash erase completed"。再次查询记录，显示记录数为 0。

时间设置：发送命令 c，进入时间设置模式，按照提示 "HHMMSSDDMMYY" 格式输入时间后，系统时间被成功更新。

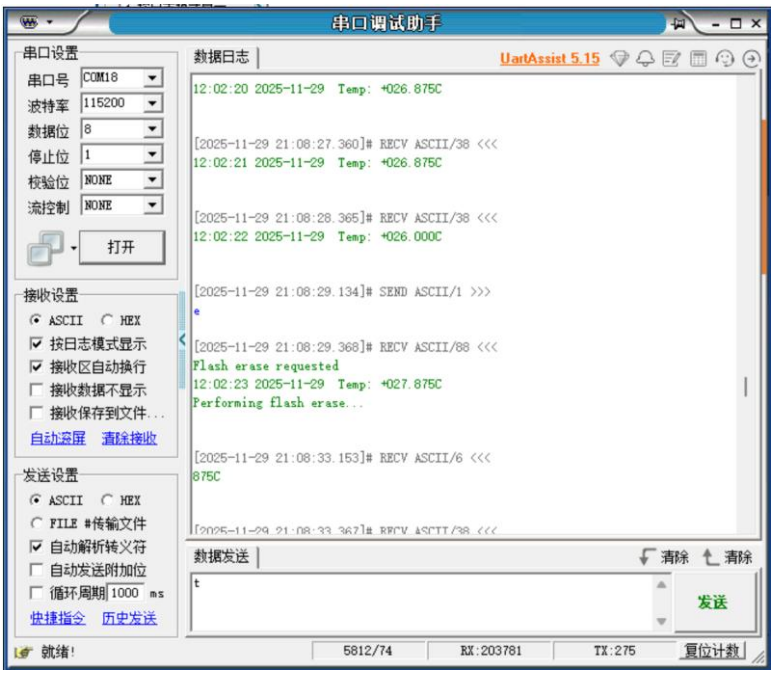


图 7 ‘e’命令清除 flash

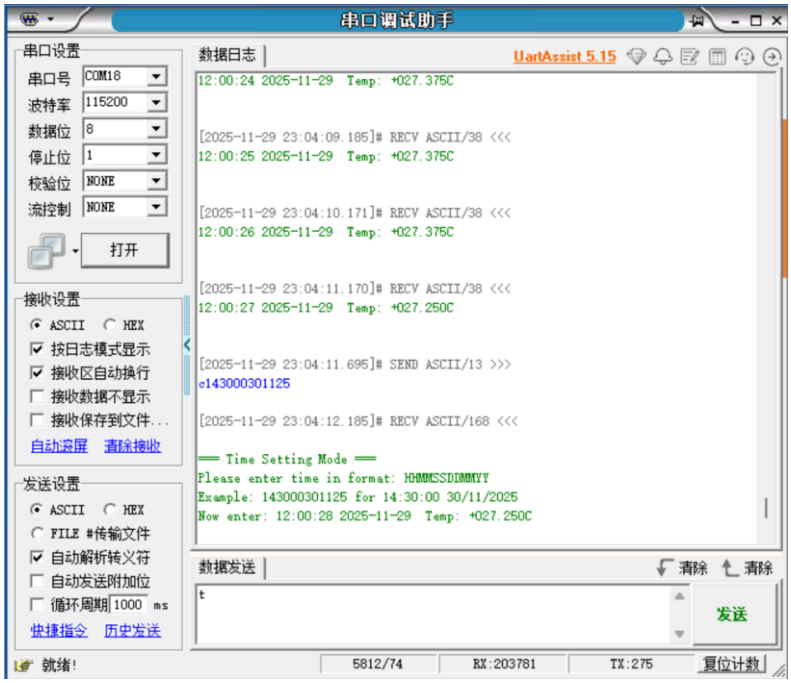


图 8 ‘c’命令修改时间’

图 9 时间修改成功

结论：系统管理功能（擦除）和交互功能（时间设置）工作正常，人机交互界面友好，系统具有较高的实用性和灵活性。

经过全面测试，本“具有声光报警功能的温度记录仪”已 **100%达成全部设计目标：**

核心设计目标达成情况

1. 精确温度采集：基于 LM75 数字温度传感器，实现了精确的温度数据采集，并通过算法转换为直观的摄氏度数值。
2. 可靠数据记录：利用 SPI Flash 作为存储介质，实现了每秒一次的温度记录，并具备掉电保存能力，完全满足并远超"至少保存 1 小时数据"的核心需求。
3. 实时数据上传：通过 UART 接口，严格实现了"每记录一次即发送一次"至 PC 端的功能，波特率稳定在 115200，数据无丢失。
4. 超温报警：实现了基于可调阈值的硬件（LED）与软件（串口提示）双重报警机制，响应及时、指示清晰。

额外实现的功能与增强特性

1. 带时间戳的数据记录与回溯：集成 DS1307 高精度实时时钟，为每条温度记录附加了精确的时、分、秒时间戳。用户可随时查询带有时标的完整历史数据，极大增强了数据的可追溯性和分析价值。
2. 丰富的人机交互命令集：提供了完善的串口命令行界面，支持启动记录、停止记录、查询显示所有历史记录、请求擦除 Flash 存储区、进入交互式时间设置模式等交互命令。
3. 智能存储空间管理：系统具备自动预警机制，当存储空间将满时，会自动触发擦除请求并停止记录，防止数据覆盖混乱，同时通过标志位机制在主循环中安全完成擦除操作，通过魔数机制保证数据记录准确性，保证了系统的长期运行稳定性。
4. 低功耗优化：在主循环空闲时段使用 WFI 指令使 CPU 进入低功耗等待模式，有效降低了系统整体功耗。

本系统不仅圆满完成了所有既定设计目标，更通过一系列额外功能的实现，展现了一个远超基础要求的、功能全面、稳定可靠、用户友好的嵌入式数据采集系统。其清晰的分层模块化软件架构、高效的中断驱动与前后台协作模型，以及健全的数据管理策略，为后续的功能扩展和维护奠定了坚实基础。该项目是一次成功的嵌入式系统开发实践。

6.问题分析

本次程序一路共迭代六个大版本，其中 v3 含 3 个小版本，每次迭代均是为了解决问题或增加功能，每个版本均可独立运行，编译无错误，运行正常，后续版本仅为在前述版本基础上优化、增加功能，最终超量完成课设要求。

v2 版本相比 v1 的主要改进如下：

1. 增加魔数标记验证：v2 在 Flash 起始位置加入魔数标记（0x544D5020），启动时校验数据有效性，避免 v1 因数据损坏导致的错误恢复。

2. 优化存储结构：将记录信息（魔数+地址+计数）打包为 10 字节数据块，温度数据起始地址调整为 0x00000A，避免覆盖关键信息。

3. 增强鲁棒性：地址溢出时重置到 DATA_START_ADDRESS，保护魔数与记录信息；初始化流程增加主动验证，无效数据自动重新初始化。

4. 提升可维护性：使用常量定义（如 INFO_DATA_SIZE）替代魔法数字，代码更清晰易维护。

核心解决：通过魔数验证和存储结构优化，解决了 v1 无法识别无效数据的问题，提升了系统可靠性。

v3 版本相比 v2 的主要改进如下：

1. 优化温度显示精度：v2 版本的温度显示精度为 1 位小数（例如 25.5°C）；v3 版本将显示精度提升至 3 位小数（例如 25.500°C），通过分离整数和小数部分进行计算，提供了更精细的温度读数。

2. 改进显示逻辑：v2 使用单一变量放大 10 倍处理显示逻辑；v3 采用分别处理整数部分和将小数部分放大 1000 倍的算法，代码逻辑更清晰，直接对应每位数字的显示。

核心解决点：通过优化温度值的计算和显示逻辑，解决了 v2 版本显示精度不足的问题，为用户提供了更高精度的温度监控信息。系统核心的数据存储、魔数验证等机制保持不变。

v4 相比 v3 的主要改进如下：

1. 集成实时时钟功能：新增 DS1307 RTC 支持，温度记录关联时间戳，解决了 v3 无法记录温度时间信息的问题。

2. 增强数据可靠性：引入魔数标记验证 Flash 数据有效性，系统启动时自动检测数据完整性，避免 v3 可能的数据错误恢复。

3. 优化系统响应：将 Flash 擦除操作移至主循环执行，避免 v3 在中断中处理耗时操作导致的系统阻塞。

核心解决点：通过增加时间戳功能和改进数据验证机制，使温度监控系统具备时间维度记录能力，并提升了数据存储的可靠性。

v5 相比 v4 的主要改进如下：

1. 集成时间记录功能：每个温度记录新增 3 字节时间数据（时、分、秒），解决 v4 只能记录温度无法关联时间的问题。

2. 增强数据完整性：温度记录包含完整时间戳，存储结构从 2 字节扩展为 5 字节，实现温度与时间的绑定存储。

3. 优化时间显示：实时显示当前时间（时:分:秒）和日期，记录查询时显示每条温度的具体记录时间。

核心解决点：通过为每个温度数据添加时间戳，使系统具备完整的时间-温度关联记录能力，提升了数据的可追溯性和实用性。

v6 相比 v5 的主要改进如下：

1. 新增串口时间设置功能：添加 c 命令进入时间设置模式，支持通过串口输入 HHMMSSDDMMYY 格式设置 DS1307 实时时钟，解决 v5 只能使用固定初始时间的问题。

2. 优化时间设置交互流程：引入时间设置缓冲区与状态管理机制，提供实时输入提示和格式校验，提升用户操作的便捷性和准确性。

3. 增强系统灵活性：时间可动态调整，满足实际应用中不同时间基准的需求，避免 v5 因固定时间导致的时间戳不准确问题。

核心解决点：通过串口交互实现 DS1307 时间的灵活设置，使系统能够适应真实环境的时间要求，提升了实用性和适用范围。

7. 全生命周期成本估算与核算

本章旨在对“温度记录仪”作品进行全面的成本分析，基于从嘉立创（JLCPCB）平台获取的实际订单明细，精确核算制作 2 套原型机的直接成本。同时，本章将从原型制作与规模化生产两个维度，对作品的全生命周期成本进行估算与分析，以评估其经济性。

7.1 原型机制作成本核算（基于 2 套原型）

根据嘉立创提供的费用明细，本次制作 2 套“温度记录仪”原型机的总费用为 621.06 元。其成本构成分析如下：

总费用 = 元器件费 + 加工费 = 37.32 元 + 583.74 元 = 621.06 元

表 2-1 2 套原型机费用明细（基于嘉立创订单）

费用大类	费用细项	金额(元)	说明
元器件费	（所有 BOM 元件采购费）	37.32	采购 2 套 BOM 元件的总成本。
加工费	工程费	300.00	SMT 生产的固定开机费，与数量无关。
	SMT 焊盘费	3.14	基于 PCB 上焊点数量计算。
	插装焊盘费	0.60	如有插接元件(如 TYPE-C 口)，会计算此项。
	插装焊接工程费	20.00	插接元件的焊接费用。
	钢网费	100.00	制作 SMT 所用钢板的费用，为一次性投资。
	换料费	160.00	关键项：因有部分元件不在贴片机默认料站，需要人工更换料盘产生的费用。
	加工费小计	583.74	
订单总计		621.06	

单套原型机成本计算： 由于工程费、钢网费等是固定成本，平摊到 2 套原型机上，单套成本极高。 单套成本 = 总费用 / 2 = 621.06 元 / 2 = 310.53 元

所以如果制作数量少，会有两个问题一个是固定成本占比高:，一个是在本次订单中，工程费（300 元）和钢网费（100 元）是固定的，占总加工费的 68.5%。这是小批量原型制作成本高的主要原因。由于嘉立创官网要求贴片最少 2 套，如果做 5 套或 10 套，平均每套的成本就能大幅下降。

6.2. 总成本分析

作为课程设计，最大的成本其实是我投入的时间和精力（研发成本）。如果把这些也折算进去，总成本会更高。 每套作品的综合成本估算表

成本类型	金额（元）	说明
A. 直接硬件成本	310.53	每套样板的物料和加工费（见上文）
B. 研发成本分摊	极高	包括电路设计、编程、调试、写报告等所花的时间，这部分是知识价值，难以用金钱衡量。
单套总成本	> 310.53 元	

4. 成本总结

通过本次成本核算，我得到了以下结论和认识：

1. 小批量制作成本高： 本次制作 2 套样板，每套成本约 310 元。其中，加工费里的固定费用（如工程费） 是导致单板成本高的主要原因。
2. 规模效应明显：可以想象，如果这个产品生产 1000 套，那些固定费用（工程费、钢网费）分摊到每套板上就很少了，每套的成本可能降到 30 元以内。这让我直观地理解了为什么批量生产能降低单价。
3. 学到了优化经验： 下次做项目时，我会更注意元器件的选型，尽量选择嘉立创“基础库”里的元件，这样可以避免额外的“换料费”，降低打样成本。

总之，本次“温度记录仪”作品在实现功能的同时，也让我对电子产品的开发成本有了初步的、实际的认识。

7.课程感言

回首这段学习历程，百感交集。嵌入式系统的世界远比我想象中复杂，从最初连寄存器都配置不对，到如今能独立完成一个完整的项目，期间不知翻阅了多少遍教材，每个实验都调试了数个版本。

记得为理解中断机制熬夜到凌晨，为调试 SPI 通信尝试了多种方案，每次解决一个 bug 都如释重负。在完成基本要求后，还不断尝试加入实时时钟、数据存储管理等额外功能，虽然过程艰辛，但收获颇丰。

这段经历让我深刻体会到嵌入式开发的挑战与魅力。虽然时常感到"燃尽"，比如这篇报告我就熬夜撰写超过十五个小时，软件版本迭代时间也占据数周。但最终完成项目的成就感无以言表。感谢这门课让我真正理解了坚持的意义，这段奋斗的时光将成为我宝贵的财富。

参考文献

[1] 张永辉. 嵌入式系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.