

武汉理工大学毕业设计（论文）

配电变压器智能监控系统设计

学院（系）: 信息工程学院

专业班级: 电信 1806 班

学生姓名: 金煜航

指导教师: 王克浩

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包括任何其他个人或集体已经发表或撰写的作品。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：

年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保障、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关学位论文管理部门或机构递交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权省级优秀学士论文评选机构将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于 1、保密 ，在 年解密后适用本授权书

2、不保密 。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名： 年 月 日

导师签名： 年 月 日

摘要

配电变压器是配电网实现电能传输的重要设备，主要起到电压转换的作用。而配电变压器一旦发生故障，往往会造成变压器下游供电区域停电，影响变压器下游区域的用电安全。对配电变压器的运行状态进行实时监测并进行联网监控，能有效预警变压器故障的发生，保障配电网的稳定运行。

本文根据配电变压器的工作任务和工作环境，设计了一种配电变压器智能监控系统。本设计主要完成了下列工作：

(1) 分析配电变压器在工作时主要的运行参数和其工作场合需要检测的环境参数，确定本智能监控系统需要检测的参数种类和内容。同时，根据配电变压器的工作环境，确定本智能监控系统的主要通信方式。

(2) 根据已知需求，比较现有的硬件方案，合理设计了配电变压器智能监控系统的硬件电路。本智能监控系统采用 STM32F407ZET6 微控制器，采用电压互感器和电流互感器对目标配电变压器的电压与电流进行转换，并采用 ADE7878 电能计量芯片进行电能参数计量。系统采用 SHT31 温湿度传感器实现了配电变压器工作环境参数获取，并使用 LAN8720A 和 YED-C724 模组实现了基于以太网和 4G LTE 的数据上传。

(3) 根据硬件电路和系统的目标功能，设计编写了配电变压器智能监控系统软件。软件主要包括了配电变压器采集端的嵌入式软件和服务器端的数据可视化软件。采集端的嵌入式软件使用 FreeRTOS 实时操作系统，对参数采集、处理、存储和传输任务进行调度。服务器端的数据可视化软件使用 Python 编写，提供基于 Web 界面的配电变压器监控数据展示。

本设计综合运用了传感器技术、通信技术和数据可视化技术，实现了配电变压器工作状态和工作环境的多个状态参数的采集、处理、存储、传输和可视化。这为预防配电变压器故障和保障配电网稳定运行提供了一种解决方案。

关键词： 配电变压器；智能监控；数据可视化

Abstract

Distribution transformer is an important equipment for power transmission in distribution network, which plays the role of voltage conversion. Once a distribution transformer fails, it will often cause power outages in the power supply area downstream of the transformer, which contributes to the potential of great economic losses. Real-time monitoring of the operation status of distribution transformers can provide early warnings for possible transformer failures and help make distribution networks more stable.

According to the task and working environment of the distribution transformer, the design proposes an intelligent monitoring system scheme for the distribution transformer. This design mainly focus on the following points:

(1) Analyze the operating and environmental parameters of the distribution transformer that need to be detected in the workplace. Determine the communication method of the system according to the working environment of the distribution transformer.

(2) Design the hardware circuit of the system according to the known requirements. The system uses STM32F407ZET6 as the micro controller, uses the ADE7878 energy metering chip to cooperate with the voltage and current transformers to realize the acquisition of the working condition parameters of the distribution transformer, uses the SHT31 sensor to obtain the working environment parameters of the distribution transformer, and uses the LAN8720A and YED-C724 module to upload data over Ethernet and 4G LTE.

(3) Design and realize the software of the system according to the hardware circuit and the target function of the system. The software mainly includes embedded software on the acquisition side of distribution transformers and data visualization software on the server side. The embedded software at the data acquisition side is based on the FreeRTOS real-time operating system which is running parameter acquisition, processing, storage and transmission tasks. The data visualization software on the server side is coded in Python and provides Web data visualization.

The design comprehensively uses sensor technology, communication technology and data visualization technology to realize the collection, processing, storage, transmission and visualization of multiple parameters of the working state and working environment of the distribution transformer, which provides a solution for preventing the failure of distribution transformers and ensuring the stable operation of the distribution network.

Key Words: Distribution transformer; Intelligent monitoring; Data visualization

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 设计的目的及意义	1
1.2 国内外研究现状	1
1.2.1 国内研究现状	1
1.2.2 国外研究现状	2
1.3 章节安排	2
第 2 章 配电变压器智能监控系统整体方案设计	3
2.1 配电变压器智能监控系统需求分析	3
2.1.1 配电变压器电能参数监控	3
2.1.2 配电变压器环境参数监控	3
2.1.3 配电变压器系统本地显示	4
2.1.4 配电变压器参数远程监控	4
2.1.5 配电变压器监控数据存储	4
2.2 配电变压器智能监控系统方案设计	4
2.2.1 系统整体组成	4
2.2.2 硬件方案设计	5
2.2.3 软件方案设计	5
第 3 章 配电变压器智能监控系统硬件设计	7
3.1 硬件整体框图	7
3.2 电源子系统系统硬件设计	7
3.2.1 AC-DC 电路设计	7
3.2.2 低压差稳压器 (LDO) 电路设计	8
3.3 微控制器子系统硬件设计	9
3.3.1 微控制器选型	9
3.3.2 微控制器子系统电路设计	9
3.4 电能参数子系统硬件设计	11
3.4.1 电能计量芯片电路设计	11
3.4.2 电压采集电路设计	12
3.4.3 电流采集电路设计	13
3.5 环境参数子系统硬件设计	14
3.5.1 环境参数传感器选型	14
3.5.2 温湿度传感器电路设计	15

3.6 存储子系统硬件设计	15
3.6.1 串行 Flash 存储电路设计	15
3.6.2 Micro SD 卡存储电路设计	16
3.7 网络子系统硬件设计	16
3.7.1 以太网 PHY 电路设计	16
3.7.2 LTE 模组电路设计	17
3.8 用户交互子系统硬件设计	17
3.8.1 轻触按键电路设计	17
3.8.2 蜂鸣器驱动电路设计	18
3.8.3 屏幕显示电路设计	19
3.8.4 串口-USB 转换电路设计	19
3.8.5 LED 驱动电路设计	20
3.9 印刷电路板 (PCB) 布局	20
第 4 章 配电变压器智能监控系统软件设计	22
4.1 配电变压器智能监控终端初始化软件设计	22
4.1.1 电能计量芯片配置软件设计	22
4.1.2 串口屏配置软件设计	24
4.1.3 终端初始化自检软件设计	25
4.2 配电变压器智能监控系统终端操作系统任务设计	30
4.2.1 电能参数获取任务设计	30
4.2.2 电能参数处理任务设计	31
4.2.3 环境参数获取任务设计	34
4.2.4 Micro SD 存储任务设计	34
4.2.5 LTE 模组任务设计	35
4.2.6 以太网传输任务设计	36
4.2.7 SPI Flash 存储任务设计	36
4.2.8 屏幕显示任务设计	37
4.2.9 独立看门狗 (IWDG) 任务设计	38
4.2.10 按键任务设计	38
4.2.11 LED 任务设计	39
4.3 配电变压器智能监控系统服务端软件设计	40
4.3.1 UDP 数据接收线程设计	40
4.3.2 HTML 图表生成线程设计	40
4.3.3 Web 服务框架线程设计	41

第 5 章 系统测试与实验	43
5.1 测试环境	43
5.1.1 配电变压器智能监控终端测试环境	43
5.1.2 配电变压器服务端软件测试环境	43
5.2 配电变压器智能监控终端测试	44
5.2.1 终端自检与基础测试	44
5.2.2 三相电压监控测试	49
5.2.3 电压电流监控测试	51
5.2.4 功率与电能监控测试	55
5.3 配电变压器智能监控系统服务端测试	58
5.3.1 数据接收线程测试	58
5.3.2 HTML 图表生成线程测试	60
5.3.3 Web 服务框架线程测试	60
5.4 测试结论	61
第 6 章 总结与展望	62
6.1 工作内容总结	62
6.2 改进与展望	62
参考文献	63
附录 A 配电变压器智能监控系统终端硬件原理图	64
附录 B 配电变压器智能监控系统终端 PCB 示意图	70
致 谢	72

第 1 章 绪论

1.1 设计的目的及意义

本设计的目的是实现一种由微处理器 (MCU) 控制的配电变压器智能监测系统，在使用三相多功能电能计量芯片实现对变压器运行参数获取的同时，将相关数据通过以太网或 LTE 传输至云端，并实现数据的可视化。

设计主要着重实现以下几个目标：① 使用三相多功能电能计量芯片实现配电变压器运行时各相电压、电流与相位信息的获取；② 使用温湿度传感器实现配电变压器工作环境状态的监测；③ 使用图形化界面 (GUI) 实现测量数据的本地实时显示；④ 使用以太网或 4G LTE 实现有线或无线方式的配电变压器工作状态的实时上传；⑤ 使用 Web 实现配电变压器工作状态的跨平台云端可视化及故障预警。

本设计的主要意义在于，设计能通过实时采集配电变压器的工况数据和环境数据并进行基于 Web 的可视化显示，能够有效降低日常维护的成本。同时，本设计能够为配电变压器的寿命预测模型提供基础数据，从而为变压器失效提供早期预警。另外，配电变压器作为配电网中的重要组成部分，本设计所采集的以电压电流为代表的工况数据在一定程度上也反映了该变压器所在区域的负载情况，能为当地电力基础设施的调整提供一定的参考。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国内研究现状

有关配电变压器的监控系统，目前国内外均有相关研究，且都有了较为成熟的解决方案。华北电力大学在 2017 年进行了相关的研究^[1]，该系统使用电压互感器和电流互感器对目标配电变压器的电压与电流波形进行采集，使用 TMS320F2812 的片上模数转换器 (ADC) 进行模数转换，并将数字化后的电能参数使用 DSP 进行处理和分析。但该系统侧重于理论和可行性研究，在具体电路设计和实验结果上较少涉及。且该系统使用 GPRS 作为通信方式，不适用于当下 GSM 大规模退网^[2]的网络环境。天津大学在 2014 年的研究^[3]同样使用电压互感器和电流互感器对目标配电变压器的电能参数进行检测，并使用独立模数转换器 (ADC)、复杂可编程逻辑器件 (CPLD)、ARM 微处理器和数字信号处理器 (DSP) 结合的方案实现对电能参数的获取与分析，且通过了实验验证。但随着集成高速 ADC 和具备特定算法 DSP 的三相电专用监测芯片的出现，此方案在系统集成度和实现成本上具有改进的空间。

1.2.2 国外研究现状

相比于国内，国外在配电变压器智能监控系统相关方面有更多的研究，也有更高的产品化水平。美国的 Westinghouse 公司作为配电变压器智能监控系统的先驱，早在 20 世纪 50 年代提出了变压器的智能检测概念。1974 年，加拿大 SYPROTEC 公司推出 HYDRAN201R 型在线变压器故障监测系统，是国际上最早的变压器故障在线监测系统^[4]。在欧洲，法国电力设备巨头 ALSTOM 也开发了类似的配电变压器智能监控系统，且采用了模块化设计。该系统能够对配电变压器的相电压、电流等参数进行实时监控，且具备对采集的参数存储、显示和传输的功能，实现配电变压器的远程监控^[5]。

1.3 章节安排

第一章主要介绍了配电变压器智能监控系统设计的目的和意义，并对国内外相关研究现状进行了一定的对比分析，最后对本设计论文的章节设置进行了安排。

第二章主要对配电变压器智能监控系统进行了需求分析，并提出了本文所述智能监控系统的整体架构与软硬件方案。

第三章给出了系统的硬件框图，并对电源、微控制器系统、电能参数、环境参数、存储、网络和用户交互子系统的硬件电路进行设计与分析。

第四章从配电变压器智能监控终端初始化软件设计、终端实时操作系统任务设计和配电变压器智能监控系统服务端软件设计三个方面对整个系统的软件逻辑和相关的参数配置进行了详细的介绍。

第五章从配电变压器智能监控终端的嵌入式软硬件测试和配电变压器智能监控系统服务端的软件测试两个方面，对本文设计实现的系统进行了全面的测试与介绍，是系统功能实现的直观展示。

第六章总结了本文在配电变压器智能监控系统设计上完成的主要工作，并根据第五章的测试结果，为系统的进一步研究与功能优化给出了方向。

第2章 配电变压器智能监控系统整体方案设计

本章首先对配电变压器智能监控系统进行需求分析，得出系统需要实现的主要功能及其在应用上的意义。随后，本章将阐述根据需求分析所设计的系统方案。

2.1 配电变压器智能监控系统需求分析

2.1.1 配电变压器电能参数监控

配电变压器是在配电网中进行电压转换的设备，对其进行电能参数监控应当是配电变压器智能监控系统的基本功能。同时，由于当前的居民用电通常是以单相接入的负载为主，且负载大小和特性随时间变化较大，容易出现配电变压器三相负载不平衡的工况。而在三相不平衡的工况下，配电变压器会出现损耗电能增加、产生零序电流和配变出力减少的问题^[6]。因此，有必要对配电变压器的以下电能参数进行实时监控。

(1) 三相电压监控

对配电变压器的三相电压进行实时监控，能够获得配电变压器下游电路的瞬时电压并计算其有效值，可用于监测配电网的电压波动情况。

(2) 三相电流监控

对配电变压器的三相电流进行实时监控，能够获得配电变压器下游电路的瞬时电流并计算其有效值，可用于监测配电网的负载电流波动情况。

(3) 三相功率监控

对配电变压器的三相有功功率和无功功率进行实时监控，能够获得配电变压器输出各相的负载功率，可用于监测配电网的负载情况，并检测配电变压器是否处于三相负载不平衡的工况。另外，三相有功功率和无功功率数据可用于计算功率因数，为功率因数补偿提供一定的参考。

(4) 三相电能计量

对配电变压器的三相有功电能和无功电能进行计量，能够获得配电变压器下游负载的电能使用情况，并可用作配电变压器使用寿命参考指标。

2.1.2 配电变压器环境参数监控

配电变压器在工作过程中会发热。油浸式变压器绕组温升上限为65°C，顶层油温上限为55°C，如果温度过高，变压器绝缘材料会劣化，使得变压器绝缘性能降低^[6]。同时，高湿度的环境会降低空气的绝缘性能^[7]，并使变压器箱壁锈蚀，降低设备的性能和使用寿命^[6]。因此，有必要对配电变压器的温湿度环境参数进行监控。

(1) 环境温度监控

对配电变压器的环境温度进行实时测量，可以结合变压器电能计量数据获得配电变压器工况与工作温升之间的关系，并为变压器油的更换提供参考。

(2) 环境湿度监控

对配电变压器的环境湿度进行实时测量，可以为变压器油的更换与设备腐蚀维护提供参考。

2.1.3 配电变压器系统本地显示

配电变压器智能监控系统在获取配电变压器的电能参数和环境参数后，有必要通过屏幕对参数进行实时的显示，以便于维护人员实地获取变压器的实时数据，简化日常巡查时的参数测量步骤。同时，屏幕能够显示系统的工作状态，便于维护人员快速定位系统故障。

2.1.4 配电变压器参数远程监控

由于配电变压器广泛分布于配电网的各个节点，频繁的维护是不切实际的。配电变压器智能监控系统有必要将实时采集的数据通过网络发送至服务器，以提供配电变压器电能参数和环境参数的远程监控功能。同时，为了便于维护人员灵活查看配电变压器的工作状况，系统的远程监控功能应尽可能满足跨平台要求。

2.1.5 配电变压器监控数据存储

配电变压器智能监控系统在提供本地实时显示和远程监控功能的同时，也应具备本地数据存储的功能。该功能一方面能够避免网络故障导致的监控数据丢失，另一方面也作为系统日志，为系统维护人员排除故障提供帮助。

2.2 配电变压器智能监控系统方案设计

2.2.1 系统整体组成

配电变压器智能监控系统整体组成如图2.1所示，分为配电变压器监控终端和配电变压器监控服务端两个部分。配电变压器监控终端安装于配电变压器机箱中，实时采集变压器的电能参数和环境参数，并经由以太网或4G LTE（视安装环境而定）上传至网络。配电变压器监控服务端作为程序安装在远程服务器中，通过网络接收配电变压器监控终端上传的参数并以Web界面展示。系统工作时，用户可通过计算机或移动设备打开服务端网页，查看对应的实时数据和近期的数据统计信息。

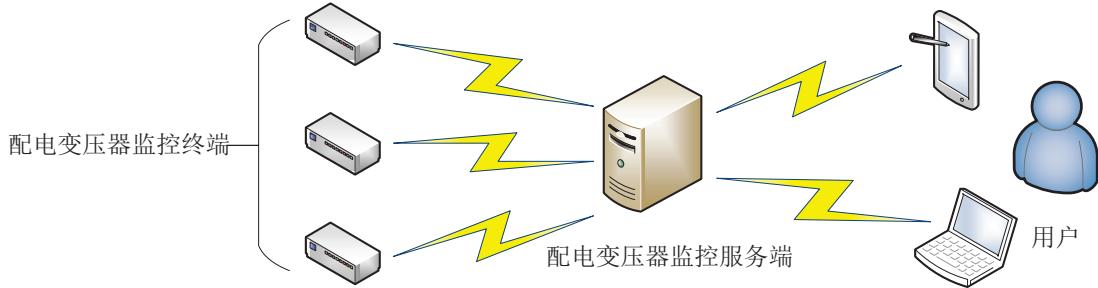


图 2.1 系统整体组成示意图

2.2.2 硬件方案设计

本设计的硬件方案存在于配电变压器监控终端中，服务端为纯软件设计。配电变压器监控终端使用基于 ARM Cortex-M4F 内核的 STM32F407ZET6 芯片作为微控制器，使用集成谐波和基波信息的多相多功能电能计量芯片 ADE7878 采集配电变压器的各相参数，并配合 SHT31 温湿度传感器实现工作环境监测。同时，设计将使用 LAN8720A PHY 芯片提供基于以太网的数据传输接口，并使用 YED-C724 模组实现基于 LTE 网络的无线数据传输。监控终端具备扩展 SRAM、SPI Flash 用于扩展程序运行空间和系统重要参数保存，同时提供 Micro SD 卡插槽用于本地数据记录、参数与固件更新。

2.2.3 软件方案设计

本设计的软件方案由两个部分组成，分别为配电变压器监控终端的嵌入式软件部分和服务端的数据可视化软件部分。

(1) 嵌入式软件部分

本设计的嵌入式软件部分如图2.2所示，基于 ARM CMSIS 和意法半导体提供的硬件抽象层 (HAL) 接口，并在系统层使用 FreeRTOS 实时操作系统用于任务调度，FatFs 用于 Micro SD 卡文件管理，lwIP 用于 TCP/IP 协议栈实现。嵌入式软件在应用层构建了多个任务，用于实现参数测量、数据传输、状态显示和日志保存等功能。

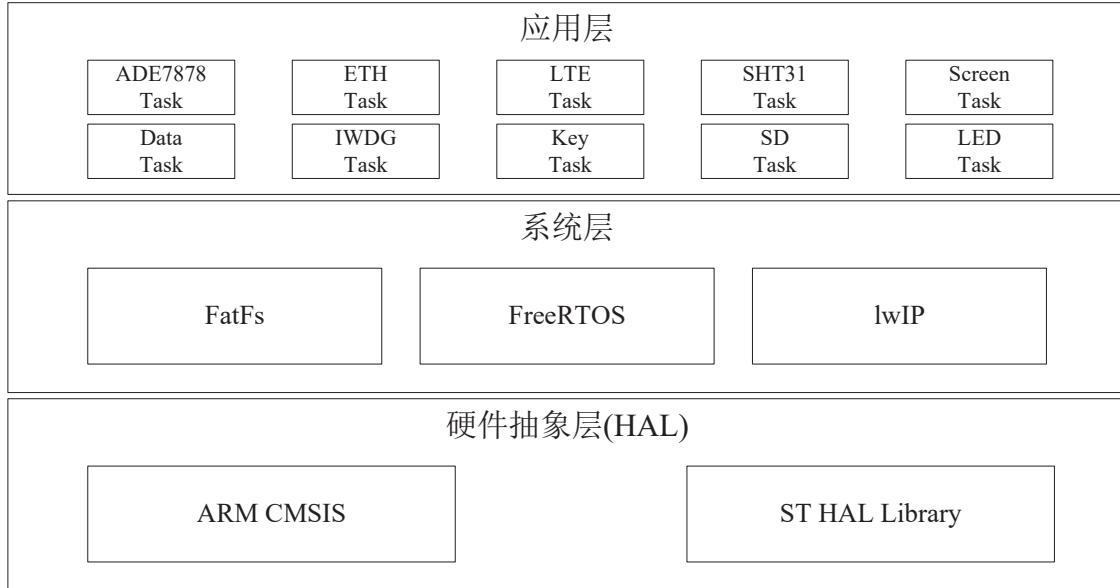


图 2.2 嵌入式软件组成示意图

(2) 数据可视化软件部分

本设计的数据可视化软件部分如图2.3所示，分为数据接收线程、HTML 图表生成线程和 Web 服务框架生成线程。数据接收线程使用 UDP 协议接收来自配电变压器监控终端发送的数据，并使用正则表达式对接收的数据进行解析。HTML 图表生成线程使用 PyEcharts 动态可视化库^[8]，将解析后的数据生成多个 HTML 图表页面。Web 服务框架线程通过运行轻量化 Web 服务框架 Flask^[9]，将 HTML 图表页面渲染至服务器指定接口，实现网页展示的功能。

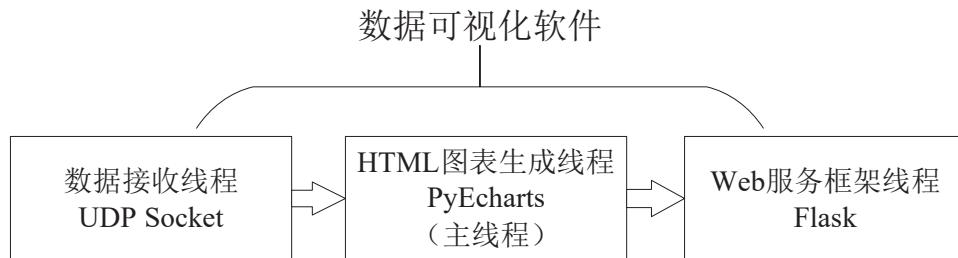


图 2.3 数据可视化软件组成示意图

第3章 配电变压器智能监控系统硬件设计

本章将对配电变压器智能监控系统的硬件设计做详细介绍。

3.1 硬件整体框图

本系统的硬件整体框图如图3.1所示。

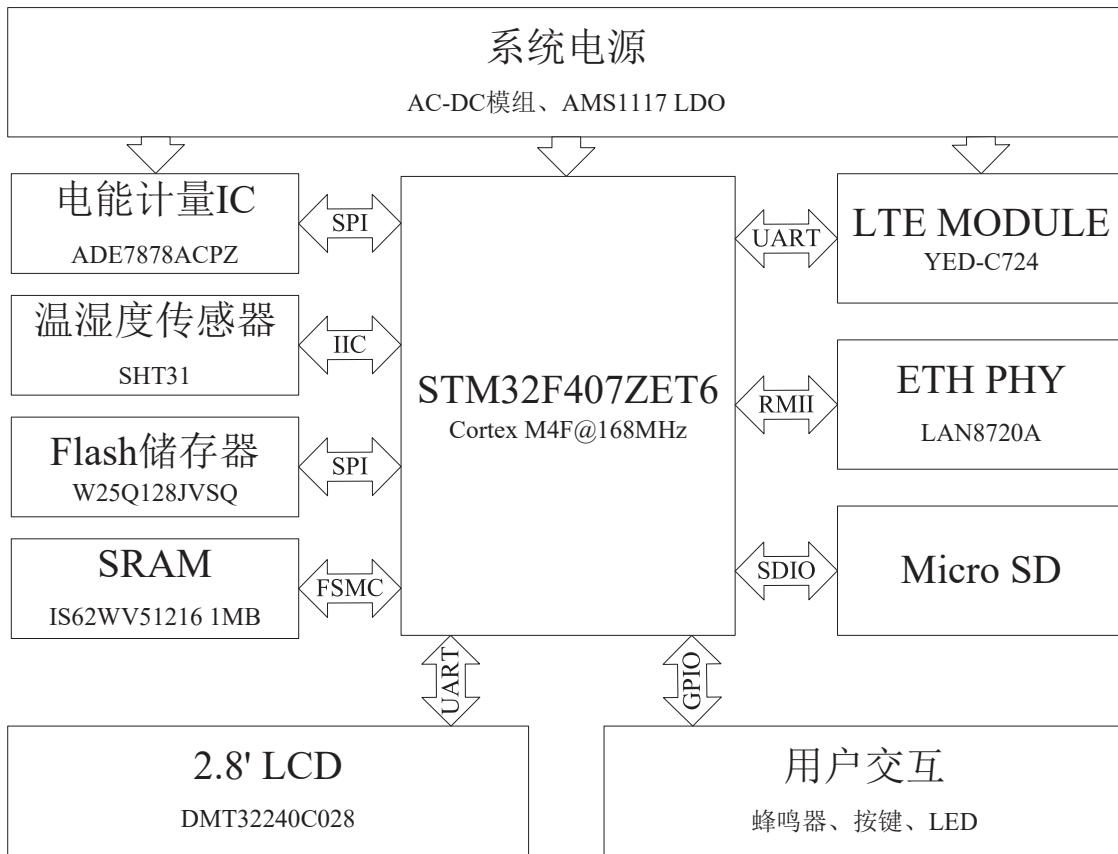


图 3.1 硬件整体框图

3.2 电源子系统系统硬件设计

3.2.1 AC-DC 电路设计

由于本系统的监控终端工作于配电变压器机箱中，因此设计为从外部交流电源取电，对应的交流-直流(AC-DC)转换电路如图3.2所示。电路使用 AM21 AC-DC 模组，从 A 相取电并作为 5V 电源为系统其他部分供电，最大功率 20W。电路中的 C76 和 C77 电容用于电源滤波。

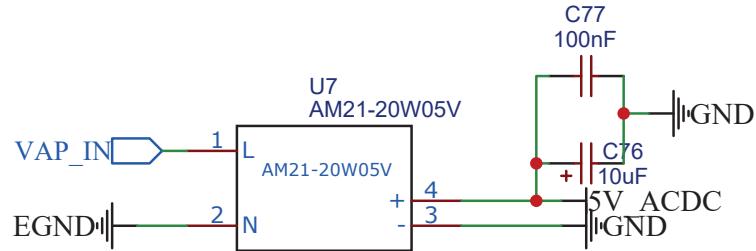


图 3.2 AC-DC 电路

3.2.2 低压差稳压器 (LDO) 电路设计

由于监控终端的微控制器、电能计量 IC 与温湿度传感器等部件要求 3.3V 供电，因此需要设计低压差稳压电路将 AC-DC 电路提供的 5V 电源转换为 3.3V 使用。低压差稳压器 (LDO) 电路设计如图3.3所示，该电路采用 AMS1117-3.3 LDO 芯片，产生 3 路独立的 3.3V 电源，分别用于微控制器子系统及其外设、以太网 PHY 和 LTE 模组供电。AMS1117 的输出电容 C19、C21、C28 均使用钽电容，利用其 ESR 抑制可能的自激振荡^[10]。

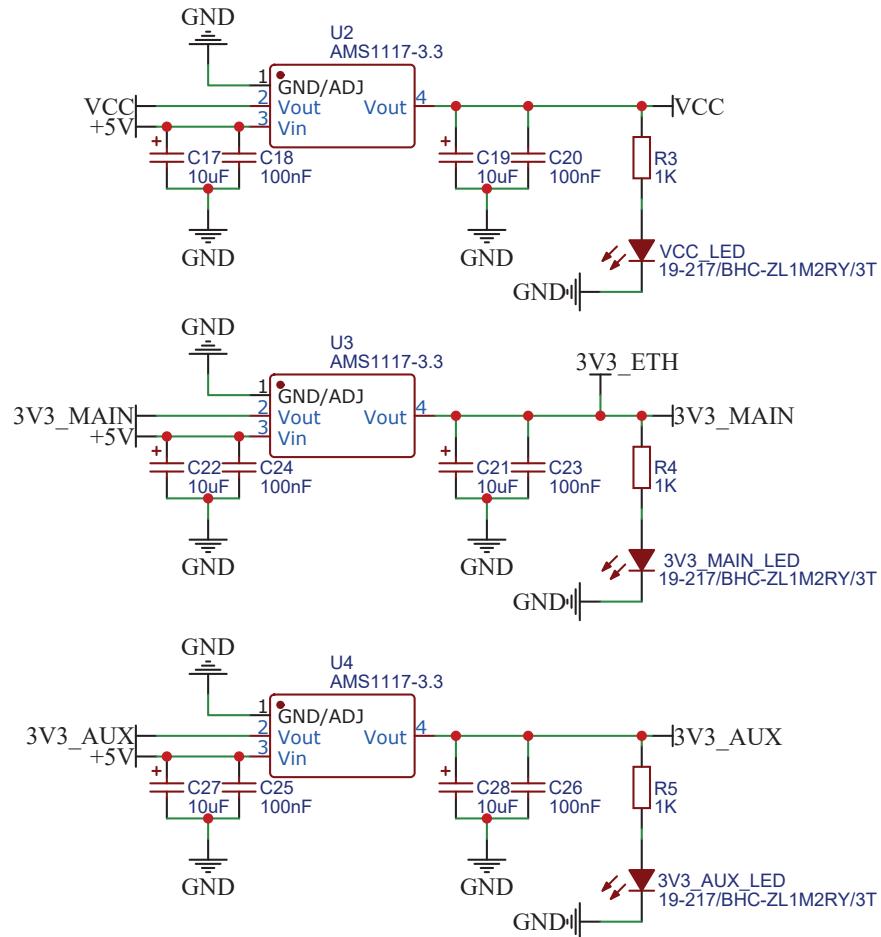


图 3.3 低压差稳压器 (LDO) 电路

3.3 微控制器子系统硬件设计

3.3.1 微控制器选型

方案一：采用常见的 STM32F103ZET6 微控制器作为设计的主控芯片。该芯片使用 ARM Cortex-M3 架构，以 LQFP-144 封装，片上拥有 512KB 的 ROM 和 64KB 的 RAM，并具备最高 72MHz 的运行频率。但该微控制器一方面片上 RAM 较少，另一方面主频较低且不具备浮点计算单元，不能较好地满足监控终端程序的资源需求。

方案二：采用 STM32F407ZET6 微控制器作为设计的主控芯片。该芯片使用 ARM Cortex-M4F 架构，以 LQFP-144 封装，片上拥有 512KB 的 ROM 和 192KB 的 RAM，具备最高 168MHz 的运行频率。该微控制器一方面提供的资源与监控终端程序所需相近，另一方面，该微控制器带有单精度浮点运算单元，能够对从电能计量 IC 和温湿度传感器中采集的浮点数据进行加速计算，提高系统的实时性。

总结：综合比较上述 2 种方案，STM32F407ZET6 微控制器能够良好满足设计所需的资源需求，因此选用方案二。

3.3.2 微控制器子系统电路设计

(1) 微控制器电源电路设计

微控制器子系统的电源部分电路如图3.4所示。STM32F407ZET6 的每一个数字电源 (VDD) 引脚均与 100nF 的去耦电容相连以减少电源纹波对芯片的影响^[11]，并在模拟电源 (VDDA) 和电压参考 (VREF) 引脚使用电阻 R1 与电容 C1、C2 构建 RC 低通滤波器，进一步滤除芯片工作时带来的数字电源噪声。该低通滤波器的截止频率计算公式如(3.1)，即：

$$f_{cutoff} = \frac{1}{2\pi R_1(C_1 + C_2)} = 1575.8Hz \quad (3.1)$$

另外，由于监控终端在实际使用中采用网络授时方式，且不需要使用电池为 RTC 在系统断开电源时供电，本电路将 STM32F407ZET6 的 VBAT 引脚连接至 3.3V 数字电源^[11]。

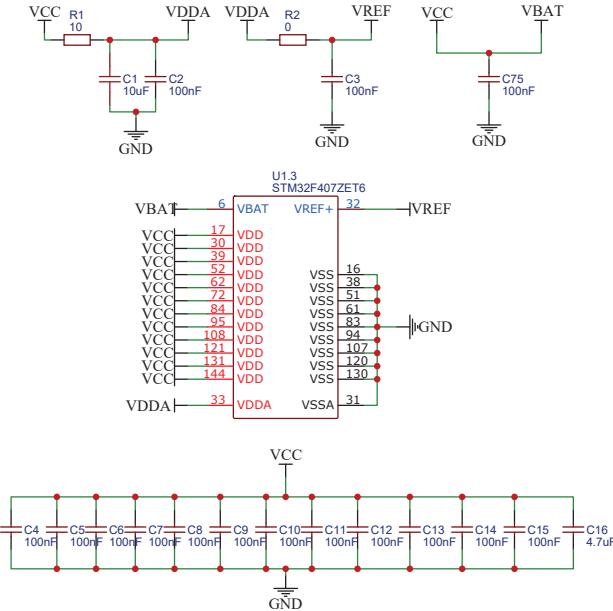


图 3.4 微控制器电源电路

(2) 微控制器核心电路设计

微控制器子系统的核心部分电路设计如图3.5所示。该部分电路包括了复位电路、启动选择电路和晶体振荡器电路等使 STM32F407ZET6 微控制器正确运行的必要外部电路。其中，复位电路通过 RESET 按键控制 STM32F407ZET6 芯片的 NRST 引脚，用于在按下时复位微控制器。微控制器的 BOOT0 和 BOOT1 引脚与启动选择电路相连，默认设置为从主 Flash 启动微控制器^[11]，并可通过按下对应的按钮改变微控制器的启动方式。晶体振荡器电路使用频率为 16MHz 和 32.768KHz 的晶体，分别为微控制器提供 HSE 和 LSE 时钟源。

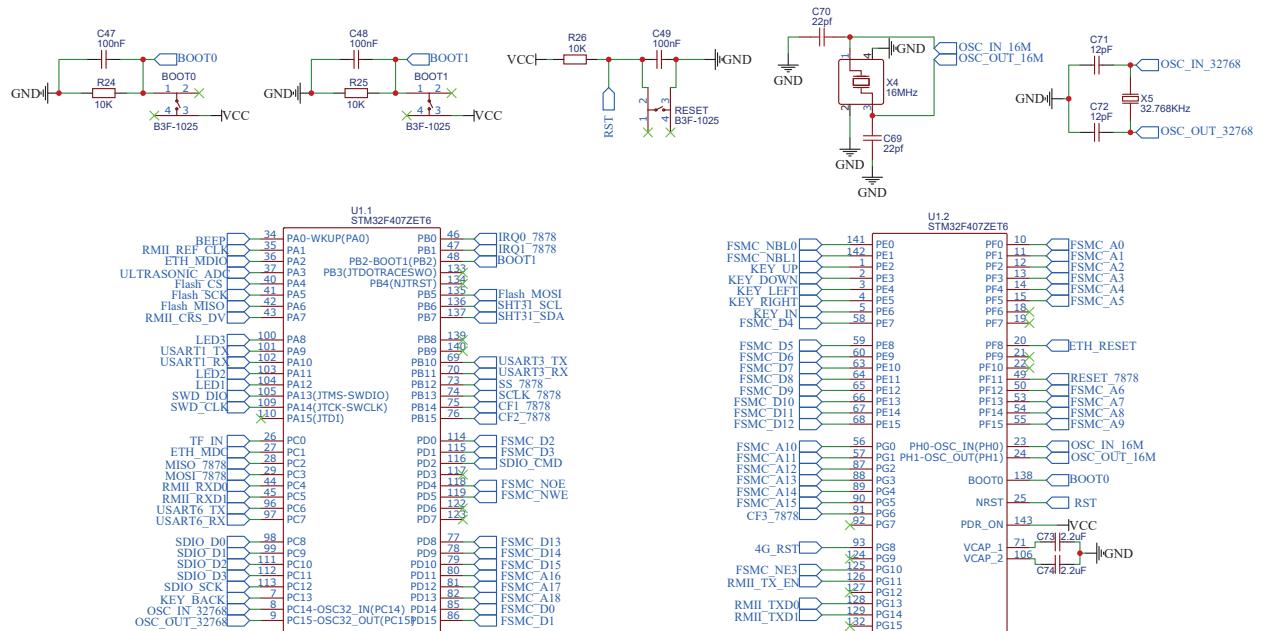


图 3.5 微控制器核心电路

(3) 扩展 SRAM 电路设计

微控制器子系统的扩展 SRAM 部分电路设计如图3.6所示。该部分电路主要实现了微控制器 STM32F407ZET6 与扩展 SRAM 芯片 IS62WV51216 之间的连接。其中，电容 C33、C34 作为去耦电容连接于 SRAM 芯片的电源端，电阻 R6 用于上拉 SRAM 的片选引脚。SRAM 的其余引脚均与微控制器 STM32F407ZET6 的 FSMC 接口相连^[11]，用于在系统工作时为微控制器提供额外的 1MB 内存。

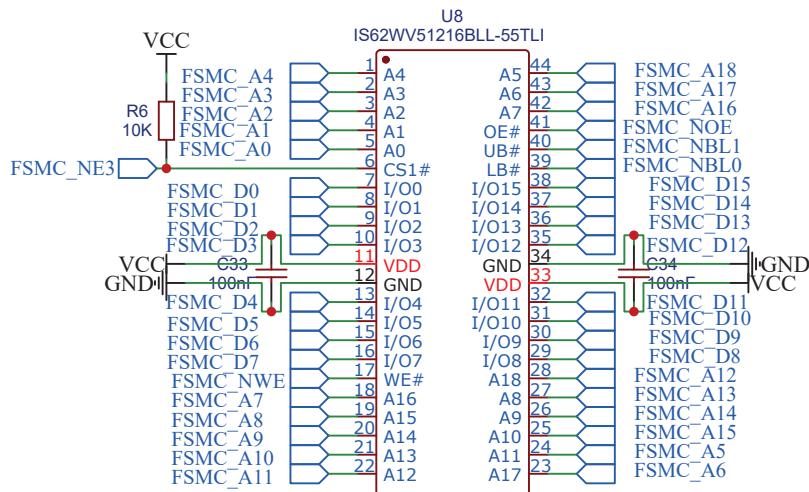


图 3.6 扩展 SRAM 电路

3.4 电能参数子系统硬件设计

3.4.1 电能计量芯片电路设计

电能参数子系统的电能计量芯片部分电路设计如图3.7所示。该部分电路主要实现了电能计量芯片 ADE7878 的基本外围器件配置和芯片与微控制器之间的连接。其中，电容 C53、C54 与电容 C55、C56 分别作为 ADE7878 数字电源与模拟电源的去耦电容，频率为 16.384MHz 的有源晶振 X3 向 ADE7878 提供时钟信号。同时，ADE7878 的 IxP、IxN 引脚接收来自外部电路由电流转换得到的差分电压信号，VxP、VxN 引脚接收来自外部电路由电压转换得到的差分电压信号，并在采样和计算后通过 SPI 接口传输至 STM32F407ZET6 微控制器^[12]。ADE7878 的 IRQx 引脚和 CFx 引脚与 STM32F407ZET6 的 GPIO 相连接，用于触发中断与频率输出。

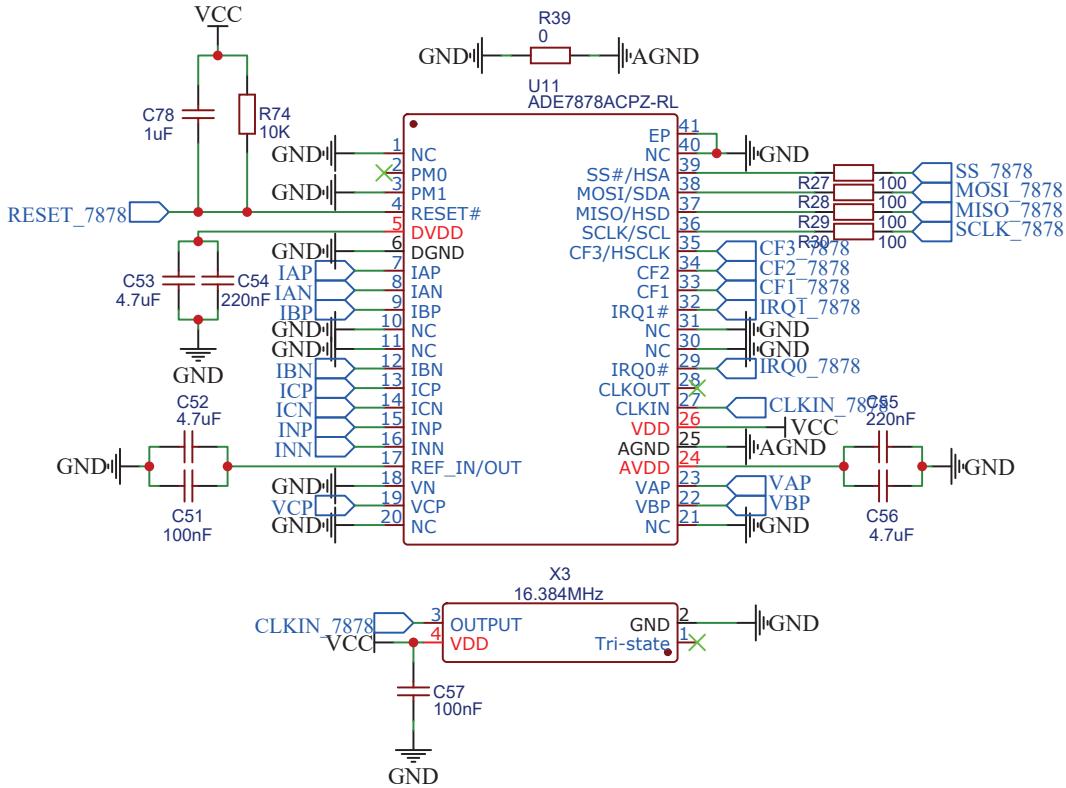


图 3.7 电能计量芯片电路

3.4.2 电压采集电路设计

电能参数子系统的电压采集部分电路设计如图3.8所示。该部分电路主要实现了将监控终端输入的外部三相交流电压转换为 ADE7878 电能计量芯片所能测量的差分电压信号。其中，3 组变比为 1:1 的电压互感器 ZMPT107 的初级侧分别接收来自 A 相、B 相和 C 相的电压，经过电阻产生初级侧电流并感应至电压互感器的次级侧。次级侧的感应电流经过电阻 R47、R48 和 R49 转换为电压信号，并通过 VAP、VBP、VCP 送入 ADE7878 电能计量芯片的电压测量端。考虑到初级侧具有较高的电压，即使在小电流的情况下依然能使电阻产生较大的热功率，为了满足电阻的热耗散功率限制，电路在电压互感器的初级侧采用了电阻 2 并 2 串的设计，每相等效电阻 200KΩ。

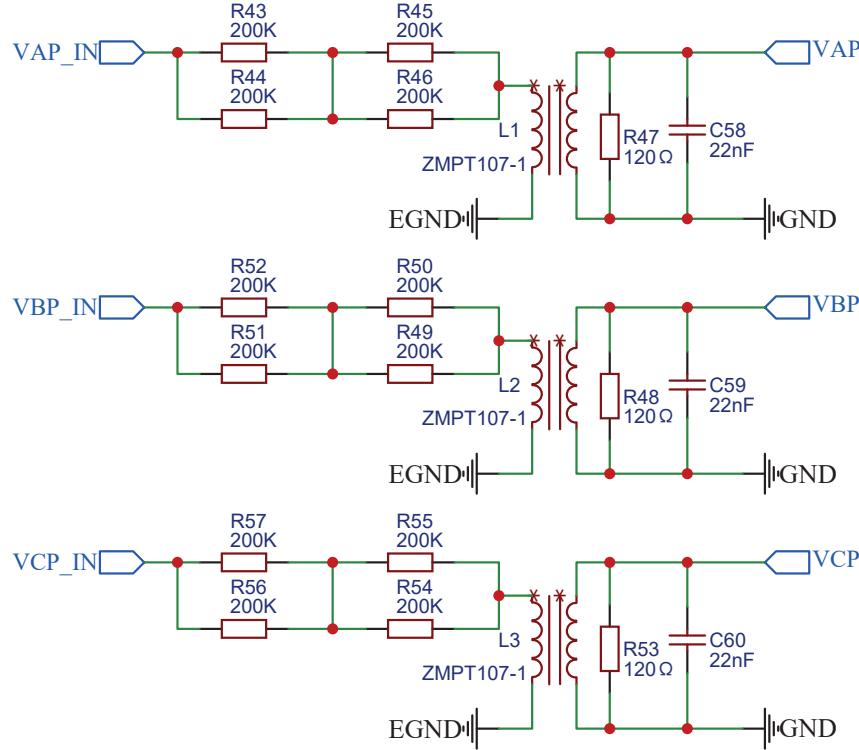


图 3.8 电压采集电路

根据以上设计，可以计算电压采集电路部分的相关参数。由于电压互感器 ZMPT107 的变比为 1:1， VxP 和 VxP_IN 的计算公式如(3.2)，即：

$$VxP = \frac{VxP_IN \times 120}{200 \times 10^3} \quad (3.2)$$

由于 ADE7878 电能计量芯片的 VxP 端最大峰值电压为 500mV^[12]，则有计算公式如(3.3)，即：

$$VxP_IN_{max} = \frac{200 \times 10^3 \times VxP_IN}{120} = 833.3V \quad (3.3)$$

可知本电路外部三相交流峰值电压为 833.3V。

3.4.3 电流采集电路设计

电能参数子系统的电流采集部分电路设计如图3.9所示。该部分电路主要实现了将监控终端输入的四线电流转换为 ADE7878 电能计量芯片所能测量的差分电压信号。其中，4 组变比为 2A/2mA 的电流互感器 HCT226 的初级侧分别感应来自 A、B、C 和 N 相线的电流，并感应至电流互感器的次级侧。次级侧的感应电流经过精度为 0.01% 的精密电阻 RJ711 转换为电压信号，并通过 IxP 和 IxN 端送入 ADE7878 电能计量芯片的电流测量端。

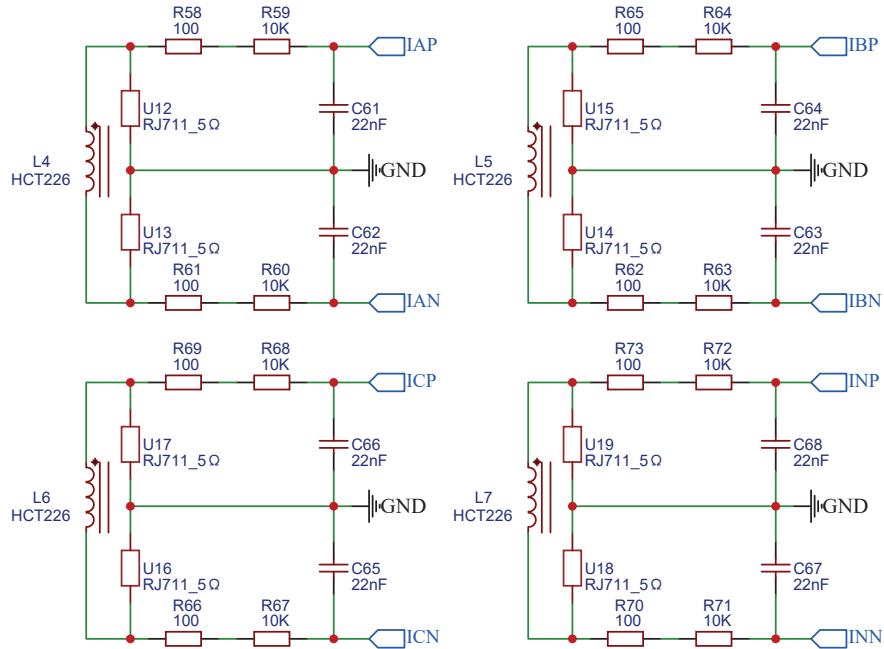


图 3.9 电流采集电路

根据以上设计，可以计算电流采集部分的相关参数。由于电流互感器 HCT226 的变比为 2A/2mA， V_{Ix} 和 I_{x_IN} 的计算公式如(3.4)，即：

$$V_{Ix} = \frac{I_{x_IN} \times 10}{1 \times 10^3} \quad (3.4)$$

由于 ADE7878 电能计量芯片的 I_{xP} 、 I_{xN} 端最大峰值电压为 $\pm 500mV$ ，则有计算公式如(3.5)，即：

$$I_{x_IN_{max}} = 500 \times 10^{-3} \times 100 = 50A \quad (3.5)$$

可知本电路所能检测的最大电流峰值为 50A。

3.5 环境参数子系统硬件设计

3.5.1 环境参数传感器选型

方案一：采用 DALLAS 公司的 DS18B20 作为设计的环境参数传感器。该传感器为温度传感器，采用 1-Wire 接口，测温精度为 $\pm 0.5^\circ C$ 。该传感器具有 I/O 口占用少、测温范围广和功耗低的优势，但其不具备湿度测量功能。

方案二：采用 Sensirion 公司的 SHT31 作为设计的环境参数传感器。该传感器为温湿度传感器，采用 IIC 接口，测温精度 $\pm 0.2^\circ C$ 。该传感器虽然采用 3 线 IIC 接口，占用 I/O 口相对较多，但其具备更高的精度，且能够对环境湿度进行测量。

总结：综合比较上述 2 种方案，SHT31 温湿度传感器更能符合本设计的功能需求，选择方案二。

3.5.2 温湿度传感器电路设计

环境参数子系统的温湿度传感器电路设计如图3.10所示。该部分电路主要实现了 SHT31 温湿度传感器的必要外围器件配置和与 STM32F407ZET6 微控制器的连接。其中，电容 C50 作为去耦电容，用于减少电源纹波对 SHT31 器件的工作影响。电阻 R34、R35 分别将器件的 SDA 与 SCL 引脚上拉至 3.3V 电源，以满足 IIC 接口的工作要求。另外，SHT31 的 ADDR 引脚被外部拉低至地，这将器件的 IIC 地址设置为 0x44^[13]。

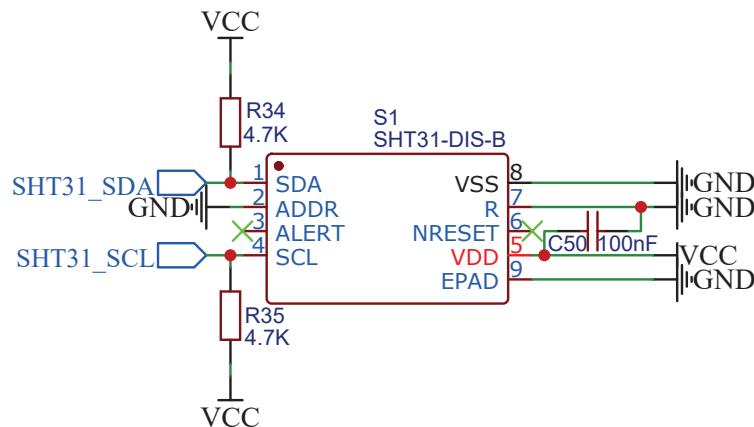


图 3.10 温湿度传感器电路

3.6 存储子系统硬件设计

3.6.1 串行 Flash 存储电路设计

存储子系统的串行 Flash 存储电路设计如图3.11所示。该部分电路主要实现了 SPI Flash W25Q128JVSI 的必要外围器件配置和与 STM32F407ZET6 微控制器的连接。其中，电容 C32 用作去耦电容，减少电源纹波对器件的工作影响。W25Q128JVSI 的 CS、DO、DI 与 CLK 引脚构成的 SPI 接口与微控制器相连，提供 16MB 的存储空间。

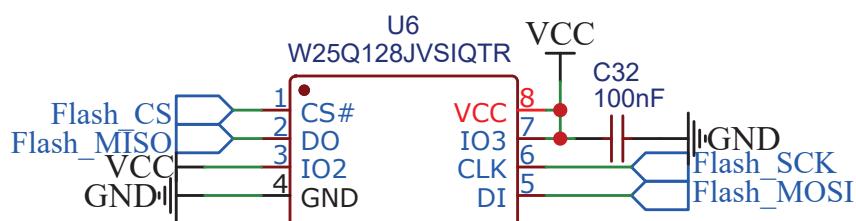


图 3.11 串行 Flash 存储电路

3.6.2 Micro SD 卡存储电路设计

存储子系统的 Micro SD 卡存储电路设计如图3.12所示。该部分电路主要实现了 SDIO 接口的必要外围器件配置和 Micro SD 卡与 STM32F407ZET6 微控制器的连接。其中 R7-R10 为上拉电阻，根据 SDIO 接口的定义将 SDIO 数据线上拉至 3.3V 电源。电阻 R12 连接 SD 卡槽的 CD 口，上拉 CD 引脚至 3.3V 电源，用于检测 Micro SD 卡是否插入。当电路工作时，微控制器通过 SDIO 接口与 Micro SD 卡进行通信，CD 引脚因内部电路连接接地，指示 Micro SD 卡已经插入。

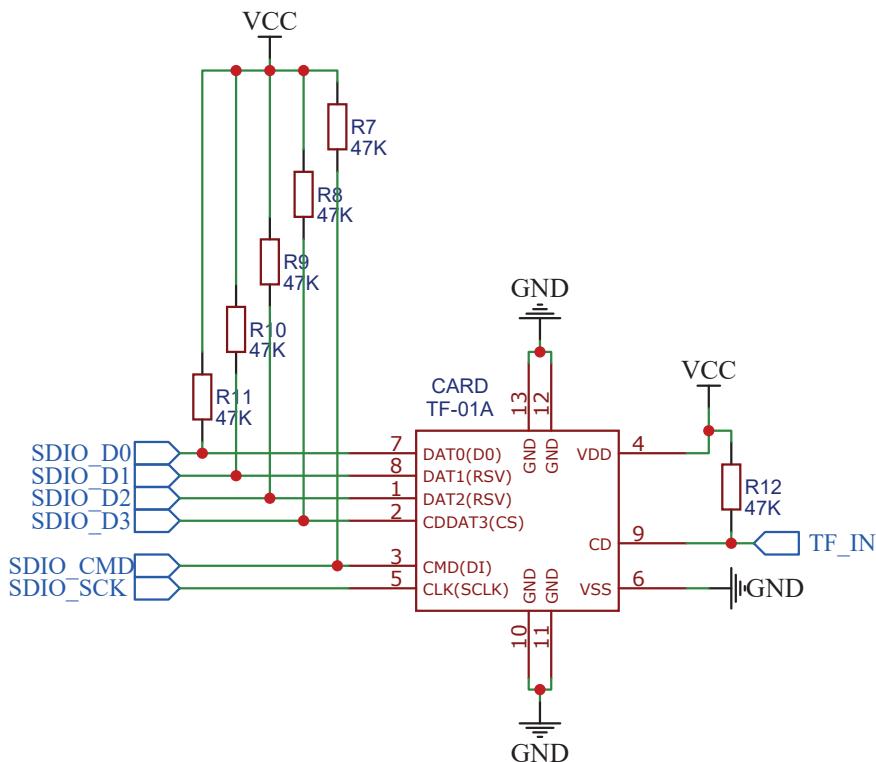


图 3.12 Micro SD 卡存储电路

3.7 网络子系统硬件设计

3.7.1 以太网 PHY 电路设计

网络子系统的以太网 PHY 电路设计如图3.13所示。该部分电路主要实现了 100M 以太网 PHY LAN8720A 的必要外围器件以及与 STM32F407ZET6 微控制器的 RMII 接口连接。其中，频率为 25MHz 的晶体 X1 与电容 C35、C36 连接于 LAN8720A 的 XTAL1 和 XTAL2 引脚，为芯片提供时钟信号。同时，LAN8720A 的 nINTSEL 被电阻 R14 拉低至地，用于激活芯片内部的锁相环 (PLL)^[14]，将时钟信号由 25MHz 倍频至 50MHz 以满足 RMII 接口的时钟要求。电阻 R17-R20 将 2 组差分信号线 TPTX 和 TPRX 上拉至 3.3V 电源，以满足 RJ45 接口的定义。以太网 PHY 的 RMII 端口均与 STM32F407ZET6 微控制器相连。

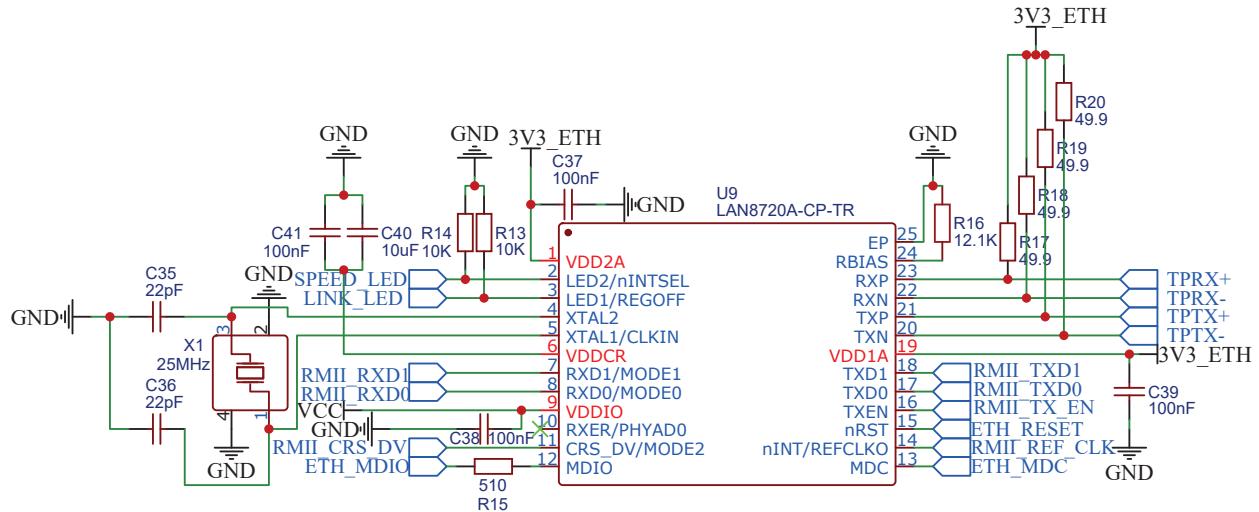


图 3.13 以太网 PHY 电路

3.7.2 LTE 模组电路设计

网络子系统的 LTE 模组电路设计如图3.14所示。该部分电路主要实现了 LTE Cat1 模组 YED-C724 的主要外围电路以及与 STM32F407ZET6 微控制器的串口连接。其中，模组的 TXD 与 RXD 引脚与微控制器的串口 3(USART3) 相连，提供基于串口的 LTE 网络通信功能。为了便于模组的在板固件升级，监控终端引出了 LTE 模组的 USB 接口。

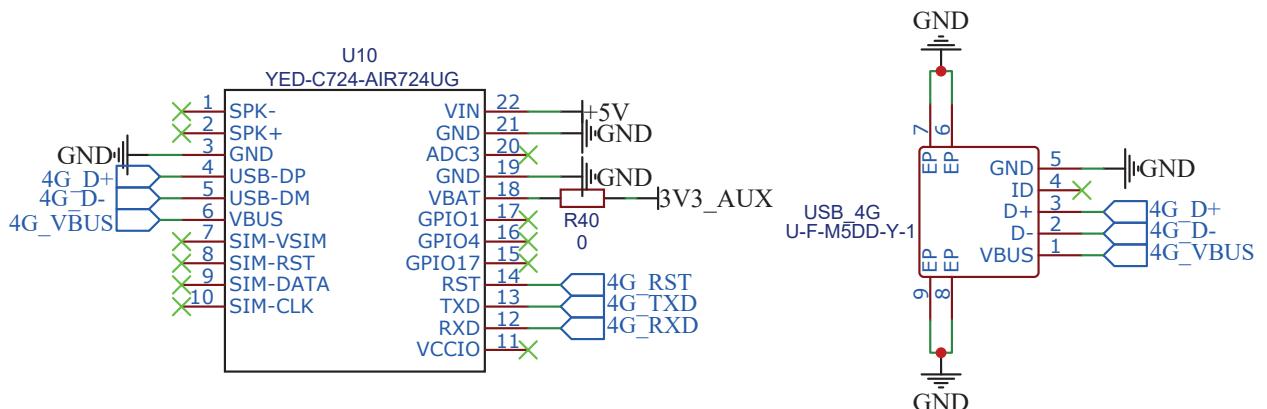


图 3.14 LTE 模组电路

3.8 用户交互子系统硬件设计

3.8.1 轻触按键电路设计

用户交互子系统的轻触按键电路设计如图3.15所示。该部分电路主要实现了轻触按键与 STM32F407ZET6 微控制器的连接功能，所有按键均与微控制器的 GPIO 引脚相连。工作时，微控制器与轻触按键相连的 GPIO 引脚被设置为上拉输入模式，当按键被按下时，

GPIO 引脚会被外部电路拉低。电路未对轻触按键做防抖动设计，防抖动逻辑由微控制器软件实现。

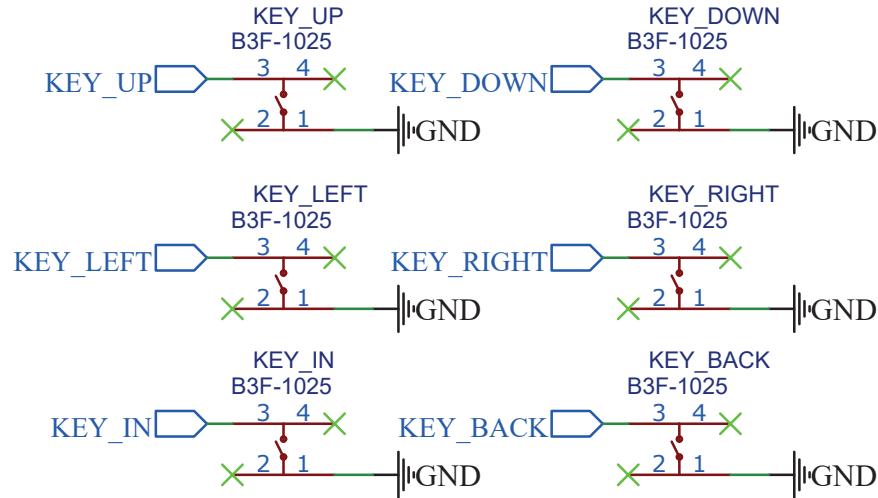


图 3.15 轻触按键电路

3.8.2 蜂鸣器驱动电路设计

用户交互子系统的蜂鸣器驱动电路设计如图3.16所示。该部分电路主要实现了有源蜂鸣器的驱动电路以及与 STM32F407ZET6 微控制器的连接。其中，电阻 R31、R32 与 NPN 三极管 Q1 构成蜂鸣器驱动电路，用于将来自微控制器的 I/O 引脚电平转换为三极管的导通状态。续流二极管 D1 与蜂鸣器并联，用于防止作为感性负载的蜂鸣器在断电时产生高电压损坏器件。

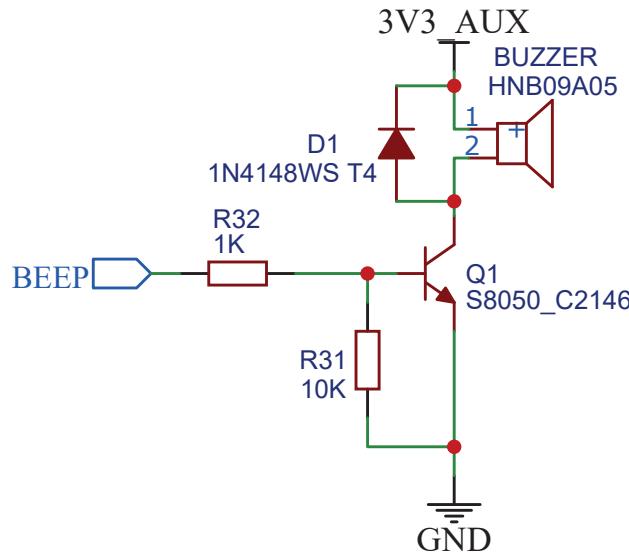


图 3.16 蜂鸣器驱动电路

3.8.3 屏幕显示电路设计

用户交互子系统的屏幕显示电路设计如图3.17所示。该部分电路主要实现了微控制器与2.8寸串口屏DMT32240C028的连接。其中，串口屏的RX2、TX2引脚与微控制器的串口6(USART6)相连，用于微控制器向串口屏发送显示数据。同时，微控制器的串口3(USART3)与串口屏的RX4、TX4引脚相连，提供串口屏系统配置功能，并可通过外部跳线修改连接对象（串口屏或LTE模组）。

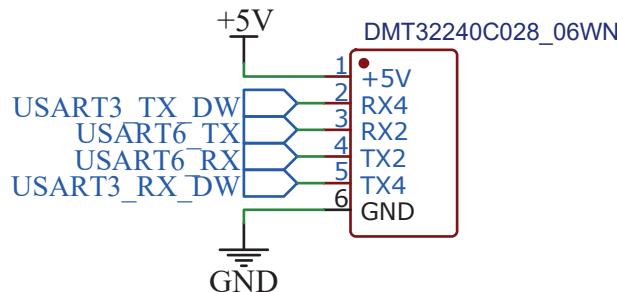


图 3.17 屏幕显示电路

3.8.4 串口-USB 转换电路设计

用户交互子系统的串口-USB 转换电路设计如图3.18所示。该部分电路主要实现了串口-USB 转换芯片 CH340G 的外围电路及与 STM32F407ZET6 微控制器的连接，用于在开发和调试中的串口状态输出。其中，频率为 12MHz 的晶体 X2 与电容 C30、C31 为 CH340G 提供时钟信号，去耦电容 C29 用于滤除来自电源的纹波。CH340G 的 TXD、RXD 引脚与微控制器的串口 1(USART1) 相连，差分信号引脚 UD+、UD- 则与 Micro USB 母座相连。另外串口 USB 母座提供了额外的 5V 输入通道，用于监控终端在开发和调试过程中 AC 端子未连接时的电源输入。

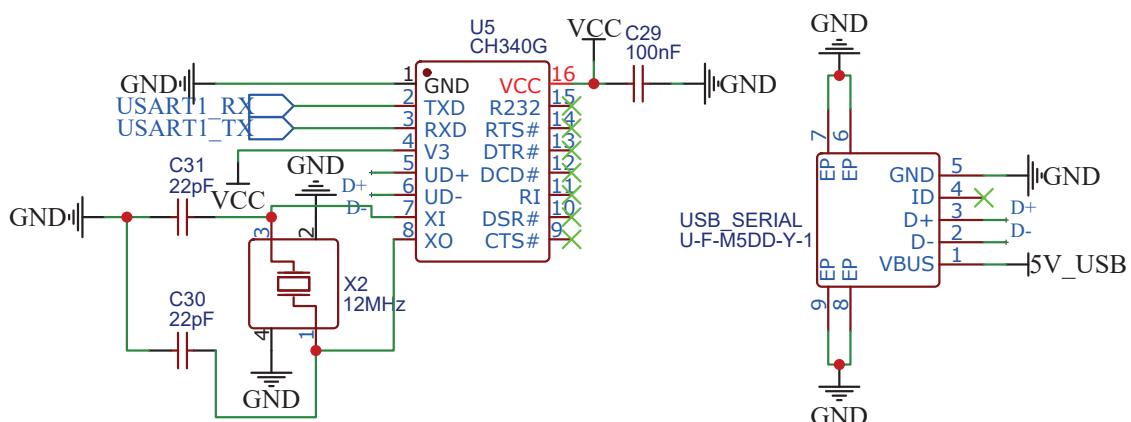


图 3.18 串口-USB 转换电路

3.8.5 LED 驱动电路设计

用户交互子系统的 LED 电路设计如图3.19所示。该部分电路主要实现了微控制器对 LED 的驱动。其中，R36、R37 和 R38 用于在二极管点亮时进行限流，防止二极管电流过大而烧毁。在功能上，3 路 LED 连接至微控制器的 I/O 引脚，由微控制器分别进行系统错误/正常工作/Micro SD 卡读写的状态指示。

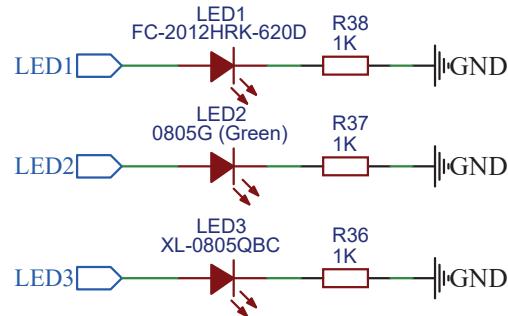


图 3.19 LED 驱动电路

3.9 印刷电路板 (PCB) 布局

本系统的监控终端印刷电路板 (PCB) 顶层布局如图3.20所示。

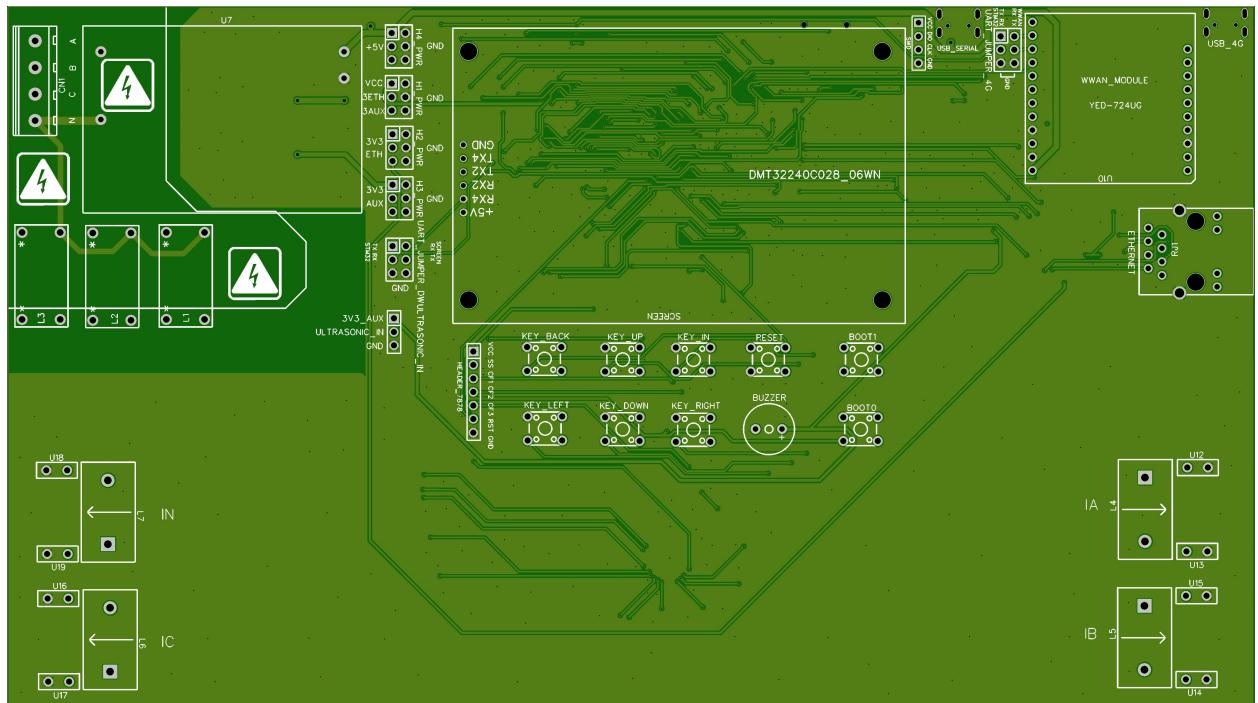


图 3.20 PCB 顶层布局示意图

本系统的监控终端印刷电路板 (PCB) 底层使用表面贴装技术 (SMT) 加工，其布局与贴装器件如图3.21所示。

武汉理工大学毕业设计（论文）

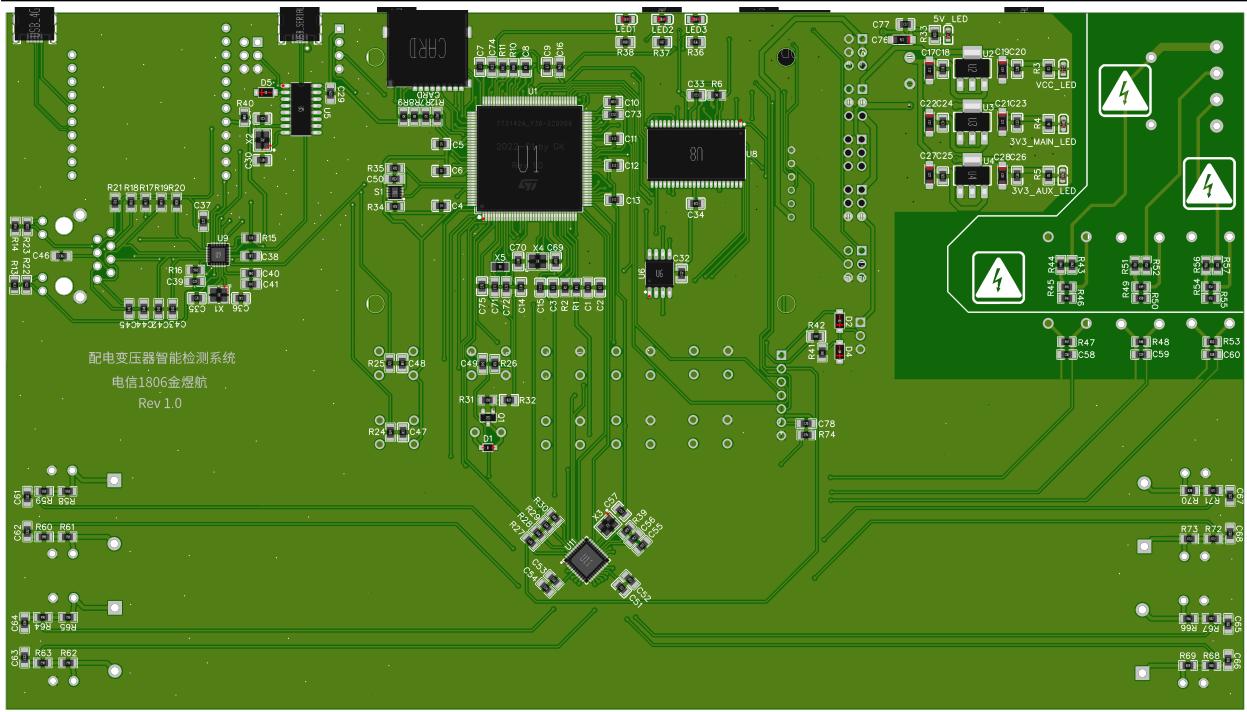


图 3.21 PCB 底层布局与贴装器件示意图

第4章 配电变压器智能监控系统软件设计

本章将对配电变压器智能监控系统的软件设计做详细介绍。

4.1 配电变压器智能监控终端初始化软件设计

本节将介绍配电变压器智能监控终端的参数配置程序和初始化过程中的自检逻辑。

4.1.1 电能计量芯片配置软件设计

配电变压器智能监控终端的电能计量芯片配置软件设计流程如图4.1所示，主要用于对ADE7878电能计量芯片进行初始化以及测量相关的寄存器配置。

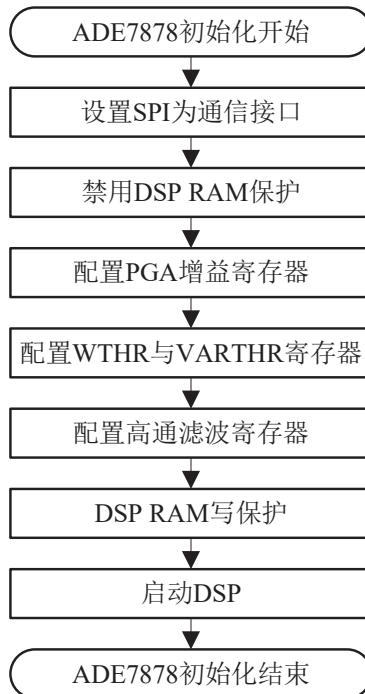


图4.1 电能计量芯片配置软件流程图

为了能够正常使用ADE7878的所有功能并达到最大采样速率，软件需要将电能计量芯片设置为PSM0正常电源模式。在本设计中，由于只需使用PSM0模式，因此在硬件设计上将PM1引脚外部接地^[12]（见图3.7）。

由于ADE7878支持IIC、SPI与HSDC接口通信，因此在芯片上电后需要对通信接口进行选择。软件按照芯片要求^[12]，通过对芯片的SS引脚执行从高到低电平的3次切换，并通过SPI接口对内部CONFIG寄存器进行任意内容的写操作完成ADE7878 SPI通信方式的锁定。

在对 ADE7878 的内部寄存器进行设置前，需要对其内部 DSP RAM 解除保护。软件按照芯片要求^[12]，通过对 ADE7878 的内部寄存器地址 0xE7FE 内写入 0xAD，内部寄存器地址 0xE7E3 内写入 0x00 实现解除保护的操作。

根据 ADE7878 芯片要求^[12]，在芯片开始采样电能参数之前需要先对内部增益放大器的放大倍率进行设置。由于本设计不需要使用该放大器进行额外的增益获取，因此软件向 ADE7878 内部的 GAIN 寄存器中写入 0x00，即增益为 1。

为了能使 ADE7878 电能计量芯片能够准确统计被测电路的有功电能和无功电能，软件需要对芯片的 WTHR 和 VARTHr 寄存器进行配置。WTHR 寄存器的值与 VARTHr 寄存器的值相同^[12]，计算公式如(4.1)，即：

$$WTHR = VARTHr = \frac{P_{MAX} \times f_s \times 3600 \times 10^n}{V_{FS} \times I_{FS}} \quad (4.1)$$

其中 $P_{MAX}=33516139$ ，为 ADE7878 ADC 输入满量程时计算出的瞬时功率^[12]。 $f_s=8\text{kHz}$ ，为 ADE7878 DSP 计算瞬时功率的频率。 V_{FS} 和 I_{FS} 分别为 ADE7878 ADC 输入满量程时相电压和电流的有效值。 n 决定 ADE7878 的电能寄存器 xWATTHR 和 xVARTTHR 中 1LSB 代表的 10^nWh 或 10^nVARh 电能，在本设计中取 $n = -2$ ，即 0.01Wh/LSB 或 0.01VARh/LSB 。由公式(3.5)和(3.3)可知， I_{FS} 与 V_{FS} 的计算公式如(4.2)和(4.3)，即：

$$I_{FS} = \frac{I \times IN_{max}}{\sqrt{2}} = 35.36A \quad (4.2)$$

$$V_{FS} = \frac{V \times P \times IN_{max}}{\sqrt{2}} = 589.26V \quad (4.3)$$

则可 WTHR 寄存器值的计算公式如(4.4)，即：

$$WTHR = VARTHr = \frac{33516139 \times 8000 \times 3600 \times 10^{-2}}{589.26 \times 35.36} = 463262614 \quad (4.4)$$

根据器件要求^[12]，软件根据 WTHR 和 VARTHr 的值生成用于放入 2 个 32 位寄存器 WTHR0/VARTHr0 和 WTHR1/VARTHr1 的设置值，分别为 0x009CD396、0x0000001B。

在完成 WTHR 与 VARTHr 值的配置后，软件需要开启 ADE7878 内部的高通滤波器，用于消除芯片在采样通道上的 ADC 直流失调^[12]以提高测量精度。根据芯片要求，软件通过 SPI 接口向 ADE7878 的 HPFDIS 寄存器内写入 0x00000000，开启所有通道的高通滤波器。由于该寄存器为 ADE7878 寄存器配置中的最后一个，因此需要向该寄存器连续写入 3 次以保证写入数据的正确性^[12]。

在配置完成 ADE7878 的所有设置寄存器后，为了确保 ADE7878 内部 DSP RAM 数据的完整性，需要对 ADE7878 的 DSP RAM 写保护。根据芯片要求^[12]，软件向 ADE7878 的内部寄存器地址 0xE7FE 内写入 0xAD，内部寄存器地址 0xE7E3 内写入 0x80 实现写保护的操作。

在完成对 ADE7878 的所有寄存器设置后，需要启动 ADE7878 电能计量芯片的 DSP，开始对被测电路的电能参数采集和计算工作。根据芯片要求^[12]，软件向 ADE7878 的 RUN 寄存器写入 0x0001，实现 ADE7878 内部 DSP 启动。

4.1.2 串口屏配置软件设计

为了减少图形界面对智能监控终端微控制器的计算压力，智能监控终端采用 2.8 英寸串口屏 DMT32240C028 用于本地参数和状态显示。该串口屏使用预先配置的图片模板实现图形界面绘制，并采用自定义参数 Label 地址的方式实现微控制器数据的上传与显示。根据本设计分析得到的需求，智能监控终端的串口屏将被配置 3 个界面：LOGO 界面、电压/电流参数显示界面、功率/电能参数显示界面。

如图4.2所示，LOGO 界面作为终端启动时的初始界面，用于显示终端的基本信息。

配电变压器智能监控系统

电信1806 金煜航



图 4.2 串口屏 LOGO 界面示意图

如图4.3所示，电压/电流参数显示界面用于显示智能监控终端实时检测的电压与电流参数。

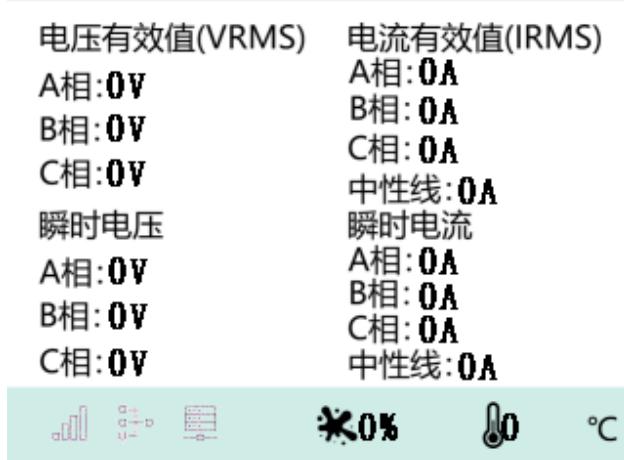


图 4.3 串口屏电压/电流参数显示界面示意图

如图4.4所示，功率/电能参数显示界面用于显示智能监控终端实时检测的瞬时功率与电能累计参数。



图 4.4 串口屏功率/电能参数显示界面示意图

另外，在电压/电流参数显示界面与功率/电能参数显示界面中，提供智能监控终端环境参数、网络状态和服务器通信状态的显示。

由于串口屏采用自定义参数 Label 地址的方式实现微控制器数据的上传与显示，为了使微控制器能够正确上传数据至对应的 Label，需要对串口屏配置软件进行参数 Label 地址的预定义，如表4.1所示：

表 4.1 串口屏 Label 地址定义

Label 参数	地址
湿度参数	0x8000
温度参数	0x8100
LTE 状态	0x1000
ETH 状态	0x1100
服务器通信状态	0x1200
电压/电流参数	0x4000-0x4D00
功率/电能参数	0x6000-0x6C00

4.1.3 终端初始化自检软件设计

为了确保智能监控终端在启动后能够正确运行，并定位可能的失效器件，终端在上电启动时会首先进行初始化自检。终端初始化自检软件的运行流程如图4.5所示：

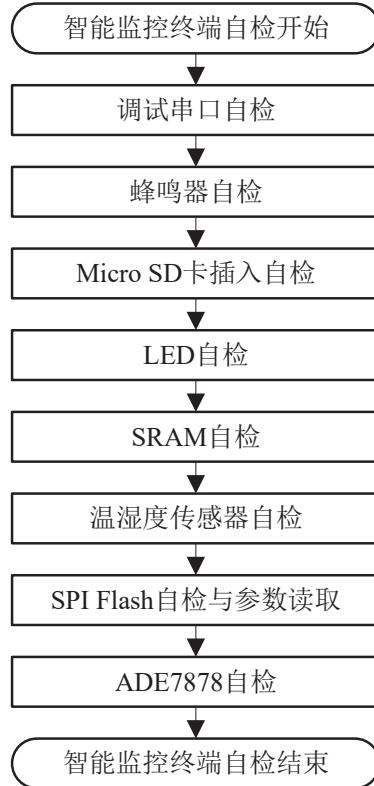


图 4.5 终端初始化自检软件流程图

(1) 调试串口自检

本部分软件主要用于检查智能监控终端用于状态输出和软件调试的串口 1(USART1)是否能够正常工作并向外输出数据。调试串口的波特率设置为 115200，且按照 UTF-8 编码进行字符输出。若调试串口工作正常，与监控终端相连的上位机将能够在串口调试助手中获取监控终端的软件标题、作者、软件版本、编译时间、微控制器工作频率等信息以及常用于软件测试的字符串“Hello World!。”。

(2) 蜂鸣器自检

本部分软件主要用于检查智能监控终端板载的蜂鸣器是否能够正常工作。若蜂鸣器工作正常，蜂鸣器将工作 300ms，产生对应的测试蜂鸣音。同时，调试串口将同步打印蜂鸣器在自检测试时的工作状态。

(3) Micro SD 卡插入自检

本部分软件主要用于检查智能监控终端板载的 Micro SD 卡槽能否正常工作，并正确插入了 Micro SD 卡。如电路3.12所示，当 Micro SD 卡槽无故障且正确插入 Micro SD 卡时，CD 引脚会被外部拉低而使微控制器在对应引脚检测到低电平，软件将根据这一原理进行 Micro SD 卡插入检测。若 Micro SD 卡正常插入，调试串口将打印“Micro SD card detected!”的提示，反之将打印“Micro SD card missing!”的警告。

(4) LED 自检

本部分软件主要用于检查智能监控终端板载的 LED 是否正常工作。若 LED 工作正常，位于板上的 3 颗 LED 将同步点亮 1s 后熄灭。同时，调试串口也将同步打印 LED 在自检测试时的工作状态。

(5) SRAM 自检

本部分软件用于检查智能监控终端板载的 SRAM 是否正常工作并配置正确。自检流程如图4.6所示。

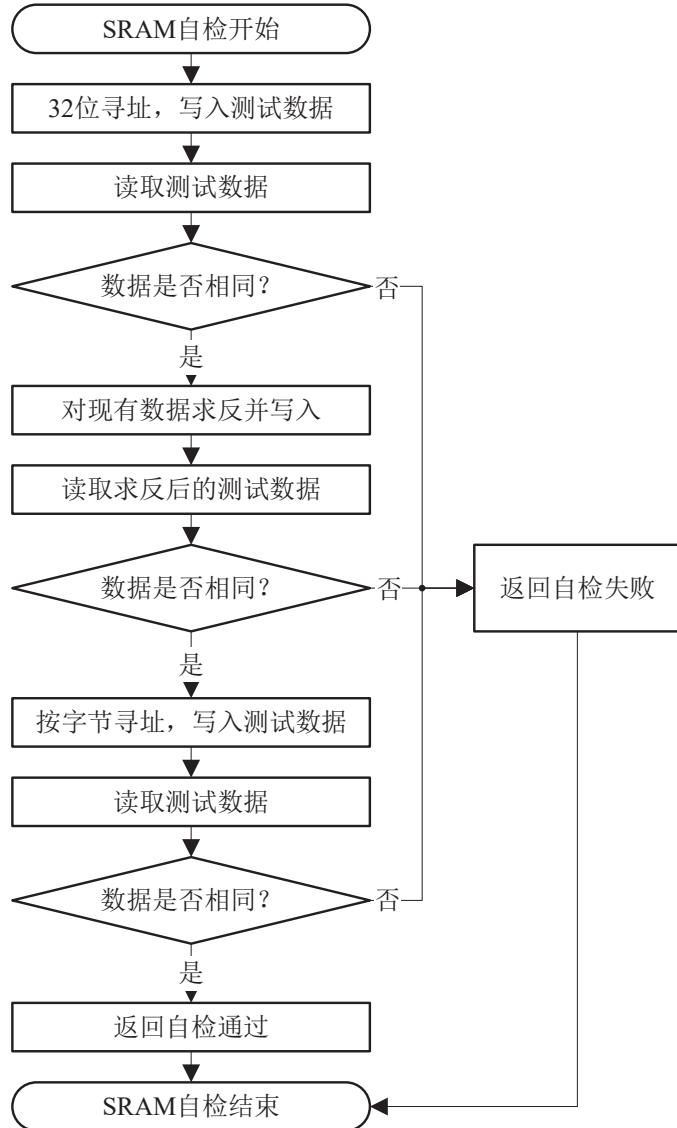


图 4.6 SRAM 自检软件流程图

为了充分检查 SRAM 中是否存在错误，且微控制器能以正确的时序对其进行读写，SRAM 自检软件进行了 3 个阶段的测试：32 位数据校验、数据求反校验、8 位数据校验。在 32 位数据校验测试阶段中，微控制器将按照 4 字节（32 位）的步长遍历 SRAM 的所有地址，并在每 4 节对应的地址中写入一个 32 位长的测试数据用于读取和校验。在数据求反校验测试阶段中，微控制器将对前一阶段的数据进行求反写入 SRAM 中，并再次进行读取和

校验。在 8 位数据校验测试阶段中，微控制器将按照字节（8 位）的顺序遍历 SRAM 的所有地址，并在每一字节的地址中写入 8 位测试数据用于读取和校验，该阶段主要用于测试 SRAM FSMC 接口的 NBL0 和 NBL1 线是否正确连接。若 SRAM 工作正常，则调试串口将打印“SRAM Test success!”的提示，反之将打印“SRAM Test fail!”的警告并进入系统错误状态（红色 LED 快闪），并阻止智能检测终端进一步启动。

(6) 温湿度传感器自检

本部分软件用于检查智能监控终端板载的温湿度传感器 SHT31 是否正常工作并配置正确。自检软件将尝试读取来自 SHT31 的环境温度与湿度，并在调试串口中进行打印。若温湿度传感器 SHT31 工作正常，将能在调试串口中查看到以摄氏度（°C）为单位的温度值和湿度百分比。

(7) SPI Flash 自检与参数读取

本部分软件用于检查智能监控终端板载的 SPI Flash W25Q128JVSI 是否正常工作并配置正确，同时读取 SPI Flash 中写入的远程服务器 IP 地址和端口号。自检流程如图4.7所示。

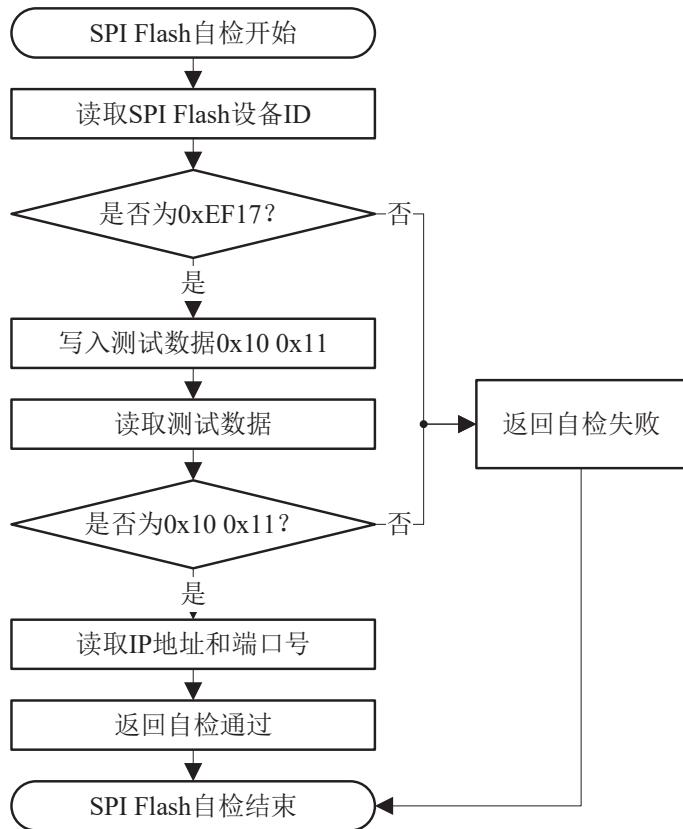


图 4.7 SPI Flash 自检软件流程图

为了充分检查 SPI Flash 的工作状态与数据传输的完整性，软件使用了检查 SPI Flash 设备 ID 和读写测试数据的方法进行自检。首先，软件通过 SPI 发送读取器件 ID 命令，获取了 SPI Flash 的器件 ID。W25Q128JVSI 的正确器件 ID 为 0xEF17^[15]，软件将比较读取的

器件 ID 与正确器件 ID。在完成器件 ID 检验后，软件将向 SPI Flash 的测试存储地址中写入测试数据 0x10 0x11 并进行读取和校验，实现数据传输完整性测试。若 SPI Flash 正常工作，调试串口将打印 SPI Flash 的器件 ID 与测试数据内容。

由于智能监控终端将 SPI Flash 用于网络传输目标服务器 IP 和端口号的存储，软件将在完成自检后立即访问服务器参数存储地址，读取目标服务器的 IP 和端口号用于后续网络相关软件的初始化工作。

(8) ADE7878 自检

本部分软件用于检查智能监控终端的电能计量 IC ADE7878 是否正常工作并与微控制器建立了正确的 SPI 连接，自检流程如图4.8所示。

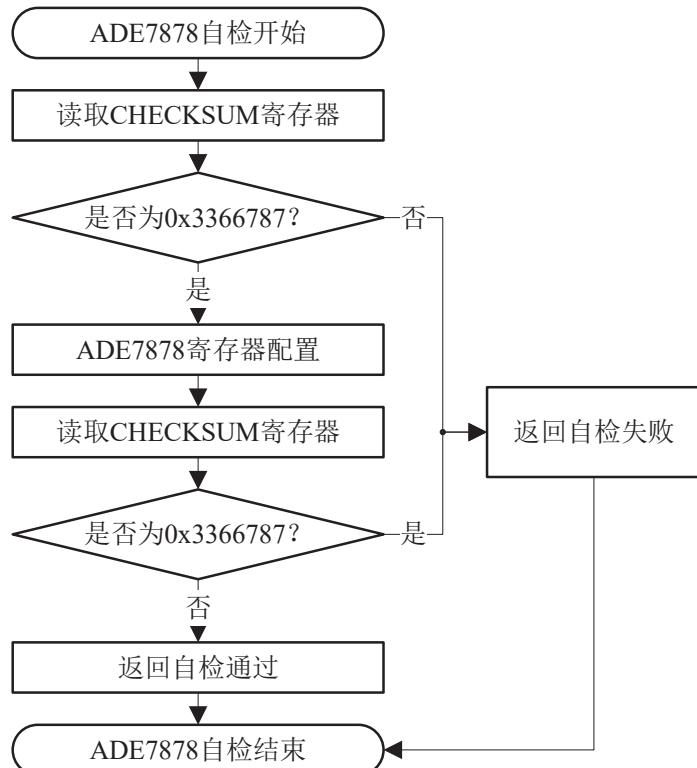


图 4.8 ADE7878 自检软件流程图

软件在仅选定 SPI 作为 ADE7878 传输接口，未配置 ADE7878 寄存器的情况下读取器件的 CHECKSUM 寄存器，并与器件的默认 CHECKSUM 寄存器值 0x33666787^[12]进行比较。在完成 ADE7878 内部寄存器配置并启动 DSP 后，软件将再次读取 CHECKSUM 寄存器值。此时由于 ADE7878 内部寄存器已经发生修改，CHECKSUM 寄存器值将与默认值不同。若 ADE7878 正常工作，调试串口将输出 1 次默认 CHECKSUM 寄存器值和 1 次不同于默认值 0x3366787 的 CHECKSUM 寄存器值。

4.2 配电变压器智能监控系统终端操作系统任务设计

本节将介绍配电变压器智能监控终端在进入 FreeRTOS 实时操作系统后各任务程序的实现逻辑。

4.2.1 电能参数获取任务设计

本任务主要用于实现 STM32F407ZET6 微控制器从电能计量芯片 ADE7878 中读取实时电能参数的功能，在 FreeRTOS 中命名为 ade7878_task。本任务的工作流程如图4.9所示。

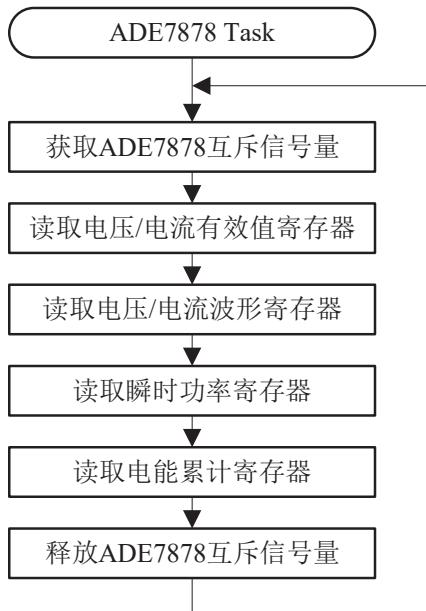


图 4.9 电能参数获取任务流程图

由于本任务需要向程序中的全局变量进行写入操作，且存在其他任务对全局变量的读写过程，因此本任务使用互斥信号量 (Mutex) 实现在执行时对 ADE7878 寄存器数据存储变量的独占访问。

任务在运行时，首先获取 ADE7878 互斥信号量，确保任务对相关全局变量的独占性。任务程序随后读取 ADE7878 的电压/电流有效值寄存器 xVRMS 和 xIRMS，并将其结果保存于对应的全局变量中。任务程序同样读取了 ADE7878 的电压/电流波形寄存器 xVWAVE 和 xIWAVE，以便在串口屏中进行实时显示。另外，任务程序将读取 ADE7878 的瞬时功率寄存器 xWATT 和 xVAR，实现对目标变压器的实时有功/无功功率监控。在对功率数据获取的同时，任务程序也会通过读取 ADE7878 电能累计寄存器 xWATTHR 和 xVARHR 的方式获得目标变压器在一段时间内的有功/无功电能累计信息。任务程序在获得来自 ADE7878 的所有电能寄存器参数并写入程序全局变量后会释放 ADE7878 互斥信号量，以供其他任务使用本任务涉及的所有全局变量。

4.2.2 电能参数处理任务设计

本任务程序主要用于实现对电能参数获取任务获得的 ADE7878 各电能寄存器数据的处理功能，即将 ADE7878 的寄存器数据转换为对应的实际电能参数。本任务在 FreeRTOS 中命名为 data_task，流程如图4.10所示。

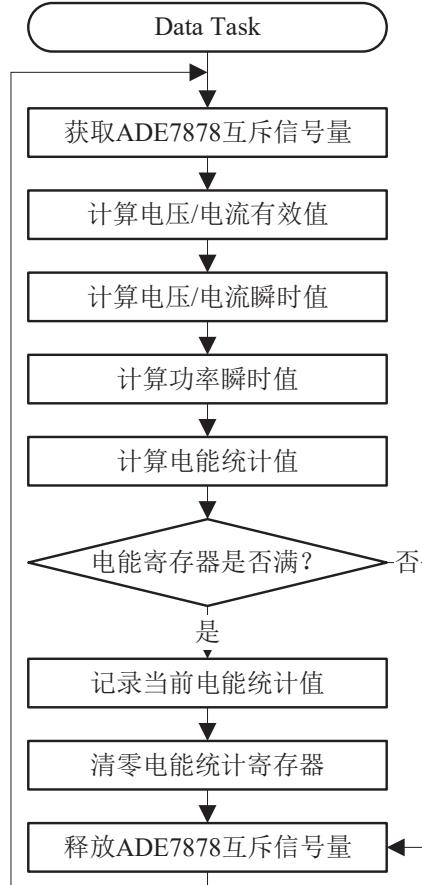


图 4.10 电能参数处理任务流程图

由于本任务需要读写程序中存储 ADE7878 寄存器参数的全局变量，且存在其他任务对全局变量的读写过程，因此本任务使用互斥信号量实现在执行时对全局变量的独占访问。

任务在运行时，首先获取 ADE7878 互斥信号量，保证任务对寄存器参数全局变量的独占性。随后，任务将进行电能参数由寄存器值至数值的转换。

对于电压有效值寄存器值至数值的转换，计算公式^[12]如(4.5)，即：

$$vrms_x = xVRMSReg[3] + xVRMSReg[2] \times 256 + xVRMSReg[1] \times 65536 \quad (4.5)$$

对于电压有效数值，根据电路图3.8，使用公式(4.6)将其转换为以 V 为单位的电压有效值，计算公式如(4.6)，即：

$$VRMS_x = \frac{vrms_x \times 0.5 \times 200000}{4191910 \times \sqrt{2} \times 120} \quad (4.6)$$

其中 4191910 为 ADE7878 电压通道 ADC 满量程正弦波信号的等效有效值^[12]。

对于电流有效值寄存器值至数值的转换，计算公式^[12]如(4.7)，即：

$$irms_x = xIRMSReg[3] + xIRMSReg[2] \times 256 + xIRMSReg[1] \times 65536 \quad (4.7)$$

对于电流有效数值，根据电路图3.9，使用公式(4.8)将其转换为以 A 为单位的电流有效值，计算公式如(4.8)，即：

$$IRMS_x = \frac{irms_x \times 100}{4191910 \times \sqrt{2}} \quad (4.8)$$

其中 4191910 为 ADE7878 电流通道 ADC 满量程正弦波信号的等效有效值^[12]。

对于电压瞬时值寄存器值至数值的转换，有以下公式^[12]：

当瞬时电压 >0V，即 VxWVReg[1]<0x80 时，计算公式如(4.9)，即：

$$vwave_x = VxWVReg[3] + VxWVReg[2] \times 256 + VxWVReg[1] \times 65536 \quad (4.9)$$

当瞬时电压 ≤0V，即 VxWVReg[1]≥0x80 时，计算公式如(4.10)，即：

$$\begin{aligned} vwave_x = & - (16777216 - VxWVReg[1] \times 65536 \\ & - VxWVReg[2] \times 256 - VxWVReg[3]) \end{aligned} \quad (4.10)$$

对于瞬时电压数值，根据电路图3.8，使用公式(4.11)将其转换为以 V 为单位的电压瞬时值，计算公式如(4.11)，即：

$$VWAVE_x = \frac{vwave_x \times 0.5 \times 200000}{5928256 \times 120} \quad (4.11)$$

其中 5928256 为 ADE7878 电压通道 ADC 额定满量程模拟输入信号时的输出值^[12]。

对于电流瞬时值寄存器值至数值的转换，有以下公式^[12]：

当瞬时电流 >0A，即 IxWVReg[1]<0x80 时，计算公式如(4.12)，即：

$$iwave_x = IxWVReg[3] + IxWVReg[2] \times 256 + IxWVReg[1] \times 65536 \quad (4.12)$$

当瞬时电流 ≤0A，即 IxWVReg[1]≥0x80 时，计算公式如(4.13)，即：

$$\begin{aligned} iwave_x = & - (16777216 - IxWVReg[1] \times 65536 \\ & - IxWVReg[2] \times 256 - IxWVReg[3]) \end{aligned} \quad (4.13)$$

对于瞬时电流数值，根据电路图3.9，使用公式(4.14)将其转换为以 A 为单位的电流瞬时值，计算公式如(4.14)，即：

$$IWAVE_x = \frac{iwave_x \times 100}{5928256} \quad (4.14)$$

其中 5928256 为 ADE7878 电流通道 ADC 额定满量程模拟输入信号时的输出值^[12]。

对于有功功率寄存器值至数值的转换，有以下公式^[12]：

当瞬时有功功率 >0W，即 xWATTReg[1]<0x80 时，计算公式如(4.15)，即：

$$watt_x = xWATTReg[3] + xWATTReg[2] \times 256 + xWATTReg[1] \times 65536 \quad (4.15)$$

当瞬时有功功率 $\leq 0W$, 即 $xWATTReg[1] \geq 0x80$ 时, 计算公式如(4.16), 即:

$$watt_x = -(16777216 - xWATTReg[1] \times 65536 - xWATTReg[2] \times 256 - xWATTReg[3]) \quad (4.16)$$

对于瞬时有功功率数值, 根据电路图3.8与3.9, 使用公式(4.17)将其转换为以 W 为单位的有功功率瞬时值, 计算公式如(4.17), 即:

$$WATT_x = \frac{watt_x \times 125000 \times 16}{33516139 \times 3} \quad (4.17)$$

其中 33516139 为 PMAX, 即 ADE7878 ADC 输入为满量程的一相中计算出的瞬时有功功率^[12]。

对于无功功率寄存器值至数值的转换, 有以下公式^[12]:

当瞬时无功功率 $> 0VAR$, 即 $xVARReg[1] < 0x80$ 时, 计算公式如(4.18), 即:

$$var_x = xVARReg[3] + xVARReg[2] \times 256 + xVARReg[1] \times 65536 \quad (4.18)$$

当瞬时无功功率 $\leq 0VAR$, 即 $xVARReg[1] \geq 0x80$ 时, 计算公式如(4.19), 即:

$$var_x = -(16777216 - xVARReg[1] \times 65536 - xVARReg[2] \times 256 - xVARReg[3]) \quad (4.19)$$

对于瞬时无功功率数值, 根据电路图3.8与3.9, 使用公式(4.20)将其转换为以 VAR 为单位的无功功率瞬时值, 计算公式如(4.20), 即:

$$VAR_x = \frac{var_x \times 125000 \times 16}{33516139 \times 3} \quad (4.20)$$

其中 33516139 为 PMAX, 即 ADE7878 ADC 输入为满量程的一相中计算出的瞬时无功功率^[12]。

对于有功电能寄存器值至以 Wh 为单位的有功电能值的转换, 计算公式^[12]如(4.21), 即:

$$WATTHR_x = (xWATTHRReg[3] + xWATTHRReg[2] \times 256 + xWATTHRReg[1] \times 65536 + xWATTHRReg[0] \times 16777216) \times 0.01 \quad (4.21)$$

对于无功电能寄存器值至以 VARh 为单位的有功电能值的转换, 计算公式^[12]如(4.22), 即:

$$VARHR_x = (xVARHRRReg[3] + xVARHRRReg[2] \times 256 + xVARHRRReg[1] \times 65536 + xVARHRRReg[0] \times 16777216) \times 0.01 \quad (4.22)$$

由于 ADE7878 的电能统计寄存器为 48 位寄存器, 在长期使用的情况下有溢出的可能性, 任务程序会在对 ADE7878 寄存器数据转换完毕后启动对电能寄存器的满值检测。当检测到 ADE7878 的电能统计寄存器达到上限阈值时, 任务程序会主动清零电能统计寄存器, 避免溢出导致可能的错误。

4.2.3 环境参数获取任务设计

本任务程序主要用于实现对来自 SHT31 温湿度传感器的环境参数获取功能，在 FreeRTOS 中命名为 sht31_task。任务的工作流程如图4.11所示。

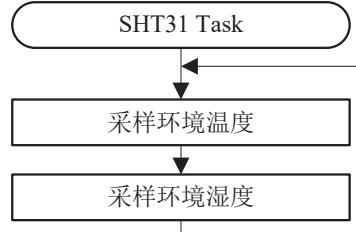


图 4.11 环境参数获取任务流程图

任务程序通过不断读取 SHT31 传感器，获得配电变压器智能监控终端的环境参数。

4.2.4 Micro SD 存储任务设计

本任务程序主要用于实现 Micro SD 卡的服务器 IP 参数读取和监控终端参数离线记录功能，在 FreeRTOS 中命名为 sd_task。任务的工作流程如图4.12所示。

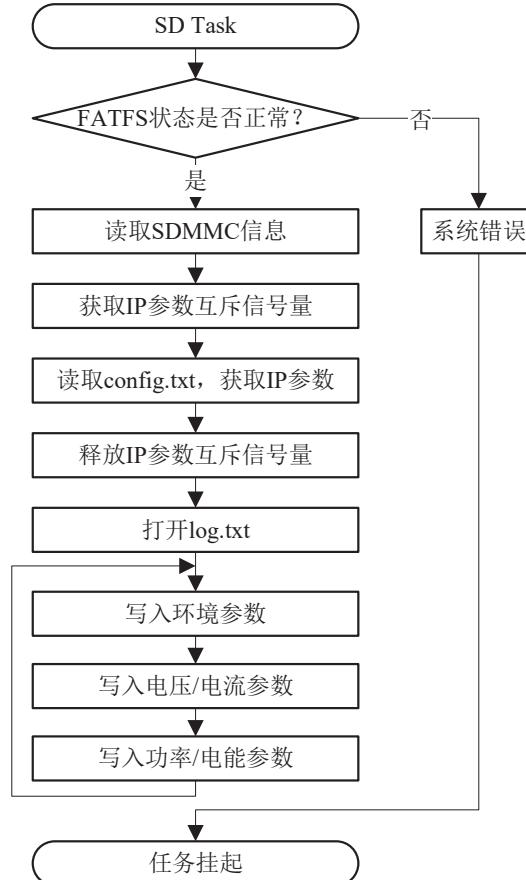


图 4.12 Micro SD 存储任务流程图

由于本任务需要读写程序中存储目标服务器 IP 参数的全局变量，且存在其他任务对全局变量的读写过程，因此本任务使用互斥信号量实现在执行时对全局变量的独占访问。

任务在运行时，程序首先会调用 FatFs API 在 Micro SD 卡中创建名为 FATFS_Test.txt 的测试文件，进行读写测试以检查 FatFs 的工作状态。若 FatFs 工作正常，任务程序将读取目标 Micro SD 卡的基本信息，并在调试串口中打印。在读取 Micro SD 卡中保存的目标服务器 IP 参数文件 config.txt 前，任务程序会获取 IP 参数互斥信号量，并在读取完成后释放该信号量。完成目标服务器 IP 参数的读取之后，任务程序将打开 Micro SD 卡中的文件 log.txt，循环记录智能监控终端所采集的实时参数。

4.2.5 LTE 模组任务设计

本任务程序主要用于实现 LTE 模组的初始化、网络时间获取与 UDP 数据透传功能，在 FreeRTOS 中命名为 lte_task。任务的工作流程如图4.13所示。

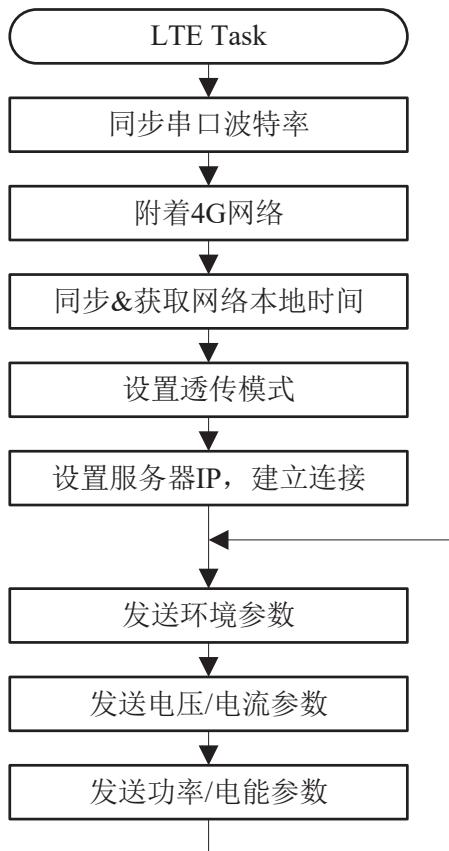


图 4.13 LTE 模组任务流程图

任务在运行时，程序首先会多次发送 AT 指令，以便 YED-C724 模组能够自动匹配串口波特率，建立与 STM32F407ZET6 微控制器的连接。在建立串口连接后，任务程序将通过 AT 指令使模组进行 SIM 卡注册与 LTE 网络的附着，实现对运营商网络的接入。由于运营商在设备接入网络时会下发本地时间，任务程序将读取该时间进行本地时间校准，并写

入微控制器的 RTC 中。在网络时间获取完毕后，任务程序将下发 AT 命令设置模组进入透明传输模式，同时读取来自 SPI Flash 中的目标服务器 IP 参数，建立与目标服务器的 UDP 连接。在随后的循环中，LTE 模组将接收来自任务程序发送的智能监控终端参数，并将参数发送至目标服务器的指定端口。

4.2.6 以太网传输任务设计

本任务程序主要用于实现以太网的 UDP 数据传输功能，在 FreeRTOS 中命名为 eth_task。任务的工作流程如图4.14所示。

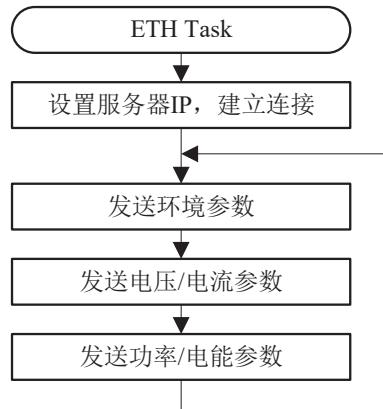


图 4.14 以太网传输任务流程图

任务在运行时，程序读取来自 SPI Flash 中的目标服务器 IP 参数，并调用 lwIP 提供的 API 与服务器建立 UDP 连接。在随后的循环中，任务程序将循环发送智能监控终端参数至目标服务器的指定端口中。

4.2.7 SPI Flash 存储任务设计

本任务程序主要用于实现更新 SPI Flash 存储器内参数的功能，在 FreeRTOS 中命名为 flash_task。任务的工作流程如图4.15所示。

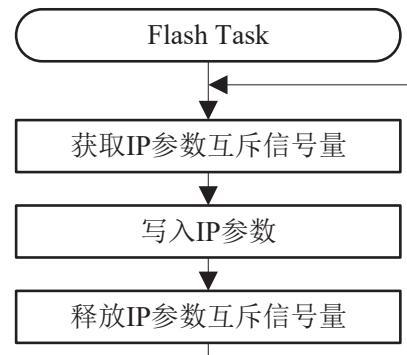


图 4.15 SPI Flash 存储任务流程图

任务在运行时，程序首先获取 IP 参数互斥信号量，实现对 IP 参数相关全局变量的独占。随后，程序将由 Micro SD 卡读取的 IP 参数写入 SPI Flash 存储器，实现参数更新。在完成参数更新后，任务程序释放 IP 参数互斥信号量。

4.2.8 屏幕显示任务设计

本任务程序主要用于实现串口屏的实时参数与状态显示功能，在 FreeRTOS 中命名为 screen_task。任务的工作流程如图4.16所示。

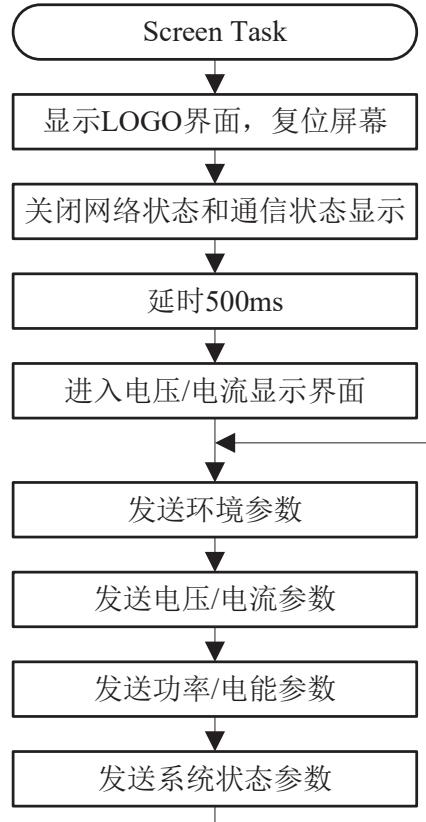


图 4.16 屏幕显示任务流程图

任务在运行时，程序首先通过串口发送显示 LOGO 界面命令，使串口屏在智能监控终端启动后处于页面复位的状态。任务程序随后向串口屏发送关闭网络状态和通信状态显示命令，复位串口屏的系统状态显示内容，并使用非阻塞性延时函数 osDelay() 延时 500ms 以等待 FreeRTOS 其余任务启动完成。完成延时等待后，任务程序将向串口屏发送显示电压/电流界面命令，使串口屏进入参数显示状态。最后，任务程序进入参数发送循环，不断通过串口向串口屏发送智能监控终端运行时的参数和状态信息，实现实时屏幕显示功能。

4.2.9 独立看门狗 (IWDG) 任务设计

本任务程序主要用于实现启用 STM32F407ZET6 微控制器内置的独立看门狗 (IWDG) 并进行定时刷新，使智能监控终端在异常工作状态下自动复位的功能。任务在 FreeRTOS 中命名为 iwdg_task，工作流程如图4.17所示。

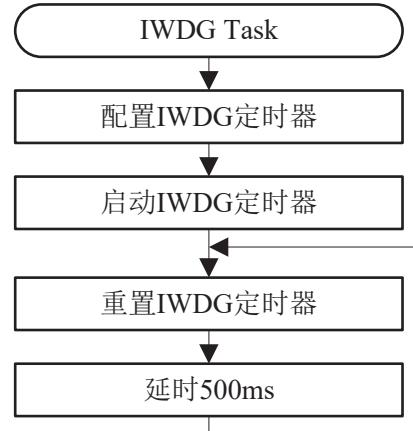


图 4.17 独立看门狗 (IWDG) 任务流程图

任务在运行时，程序首先对微控制器的独立看门狗进行参数配置，确定看门狗的超时时间。STM32F407ZET6 微控制器的看门狗超时时间计算公式^[11]如(4.23)，即：

$$T_{out} = \frac{2^{prer+1} \times (reload + 1)}{32 \times 10^3} \quad (4.23)$$

其中 $prer$ 为独立看门狗时钟信号预分频系数， $reload$ 为独立看门狗定时器的重装载计数值。本任务程序设定 $prer = 2$, $reload = 4095$ ，则独立看门狗的超时时间公式如(4.24)，即：

$$T_{out} = \frac{2^{2+1} \times (4095 + 1)}{32 \times 10^3} = 1.024s \quad (4.24)$$

在完成独立看门狗定时器超时时间的配置后，任务程序将启动独立看门狗，并按照 500ms 的间隔循环重置独立看门狗的定时器。若系统工作异常，iwdg_task 任务程序无法重置独立看门狗定时器，微控制器将自动进行复位操作。

4.2.10 按键任务设计

本任务程序主要用于实现智能监控终端对使用者按键操作的检测与相应功能。任务在 FreeRTOS 中命名为 key_task，工作流程如图4.18所示。

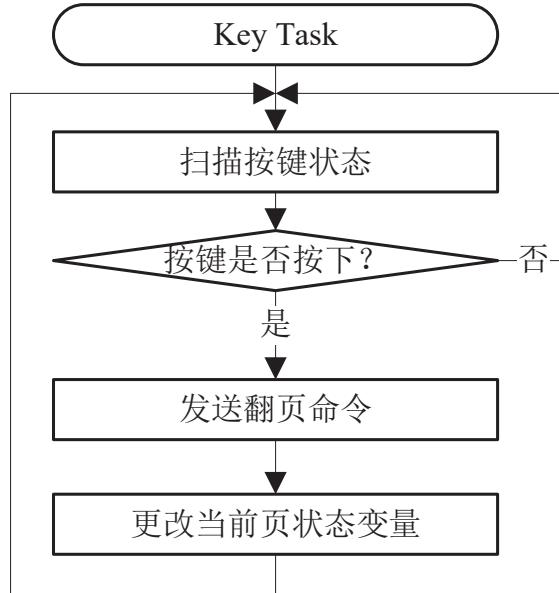


图 4.18 按键任务流程图

任务在运行时，程序将不断扫描独立按键的状态，并在检测到按键按下时，触发按键对应的翻页操作。程序在通过串口向串口屏发送翻页命令的同时，修改当前页的状态变量，以便实现循环翻页的功能。

4.2.11 LED 任务设计

本任务程序主要用于实现智能监控终端的工作状态指示功能。任务在 FreeRTOS 中命名为 led_task，工作流程如图4.19所示。

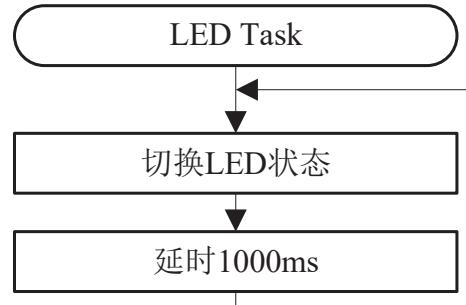


图 4.19 LED 任务流程图

任务在运行时，程序将按照 500ms 的间隔控制板上绿色 LED 对应的微控制器 I/O 引脚电平翻转，实现 LED 慢闪烁的功能。若系统处于工作异常的情况下，本任务可通过 LED 状态指示系统是否发生全局阻塞性故障。

4.3 配电变压器智能监控系统服务端软件设计

配电变压器智能监控系统的服务端软件由 UDP 数据接收线程、HTML 图表生成线程和 Web 服务框架线程组成，使用 Python 实现。本节将详细介绍配电变压器智能监控系统服务端的软件实现逻辑。

4.3.1 UDP 数据接收线程设计

本线程主要通过 UDP Socket 实现接收来自监控终端发送的各类参数的功能，流程如图4.20所示。

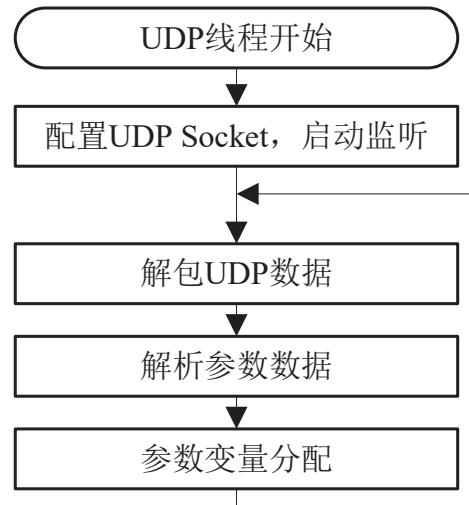


图 4.20 UDP 数据接收线程流程图

线程程序在运行时，首先将根据预定的端口号配置 UDP Socket，并在启动对端口的监听以获得来自监控终端的数据。由于 UDP 数据包中包含数据内容和发送方 IP 等信息，线程程序将对收到的 UDP 数据包进行解包，提取数据包中字符串格式的数据内容。在获得数据内容字符串后，线程程序将使用正则表达式匹配字符串中的类别部分和数值部分，进行参数数据的解析。最后，线程程序将根据获得的数据类别，对服务端软件对应的数据存储字典进行赋值操作，实现参数变量的分配。

4.3.2 HTML 图表生成线程设计

本线程主要通过使用 PyEcharts 软件包绘制图表并组合布局生成 HTML，实现对来自监控终端数据的可视化功能，流程如图4.21所示。

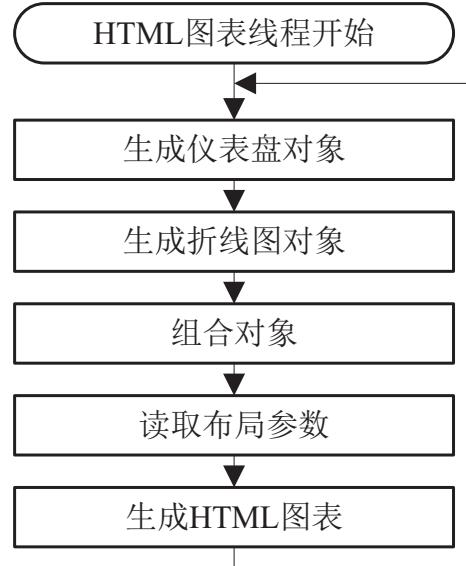


图 4.21 HTML 图表生成线程流程图

线程程序在运行时，不断读取来自服务端软件内部数据存储字典中的监控终端参数，并根据参数生成用于可视化实时数据的仪表盘对象和历史数据统计的折线图对象。随后，线程程序根据数据展示的需要，将仪表盘对象和折线图对象进行组合，生成未经页面布局设置的组合对象图表 HTML 页面。线程最后将读取预先设置的布局参数 json 文件，生成完成对象组合布局的 HTML 图表并保存至服务器硬盘中。

4.3.3 Web 服务框架线程设计

本线程主要通过使用轻量级 Web 应用框架 Flask，对 HTML 图表生成线程保存的 HTML 页面进行动态解析与渲染，实现服务端软件对外 Web 服务的功能，流程如图4.22所示。

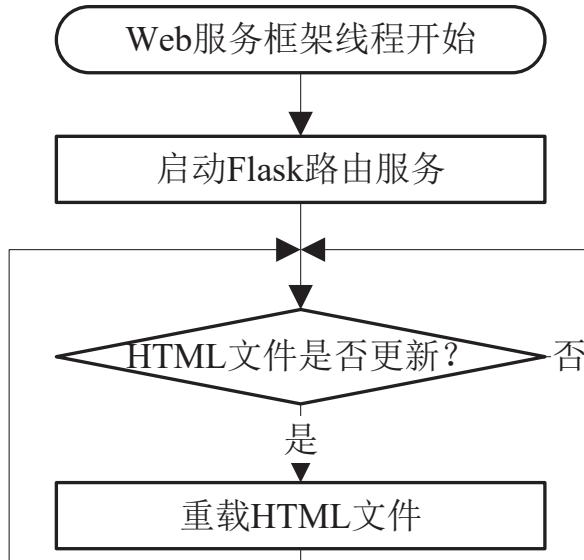


图 4.22 Web 服务框架线程流程图

线程程序在运行时，首先根据服务端网页与 HTML 文件之间的对应关系设置 Flask 路由表，并在预定的端口启动 Flask 路由服务。随后，线程程序将循环检测用于渲染的 HTML 文件是否发生更新，若存在 HTML 图表生成线程保存的新版 HTML 文件，线程程序将自动重载 HTML 文件，以便 Flask 渲染最新的数据页面。

第 5 章 系统测试与实验

本章将对配电变压器智能监控系统的测试实验结果进行详细介绍。

5.1 测试环境

5.1.1 配电变压器智能监控终端测试环境

为了对配电变压器智能监控终端进行较为全面的测试，测试环境分为 2 个部分：

(1) 终端自检测试环境

在配电变压器智能监控终端的自检测试中，终端将使用经由 Keil 编译后生成的固件，版本号为 1.3。同时，智能监控终端的调试串口波特率设置为 115200bps。另外，在测试过程中，智能监控终端将插入一张容量为 16GB 的 Micro SDHC 存储卡。

(2) 终端参数测试环境

在配电变压器智能监控终端的参数测试环境中，终端将使用经由 Keil 编译后生成的固件，版本号为 1.3。同时，在三相电压检测实验环境中，配电变压器智能监控终端将测量来自三相调压器的电压。在功率电能检测实验环境中，配电变压器智能监控终端将测量来自正点原子 DS100mini 发生的模拟信号。

5.1.2 配电变压器服务端软件测试环境

为了对配电变压器智能监控系统服务端软件进行较为全面的测试，测试环境分为 2 个部分：

(1) 服务端软件运行环境

在测试中，配电变压器智能监控系统服务端使用阿里云 ECS 服务器，硬件运行环境如表5.1所示。

表 5.1 服务端硬件运行环境

硬件	参数
CPU	1-Core vCPU
RAM	2GB
公网带宽	1Mbps

在测试中，配电变压器智能监控系统服务端的软件运行环境如表5.2所示。

表 5.2 服务端软件运行环境

软件	参数
操作系统	Ubuntu20.04 64 位
Python 版本	3.8.10
Flask 版本	2.1.1
PyEcharts 版本	1.9.1

(2) Web 页面测试环境

在测试中，用于浏览的 Web 页面测试环境如表5.3所示。

表 5.3 Web 页面测试环境

内容	参数
操作系统	Windows11 21H2 64 位
浏览器 1	Microsoft Edge 101.0.1210.39
浏览器 2	Mozilla Firefox 100.0

5.2 配电变压器智能监控终端测试

5.2.1 终端自检与基础测试

本节将对配电变压器智能监控终端启动和自检过程中的行为进行测试和分析，并判断终端行为是否与设计预期相符。由于配电变压器智能监控终端在启动过程中产生的串口调试输出内容较多，本部分测试内容将分多项进行。

(1) 调试串口测试

配电变压器智能监控终端在启动和自检的过程中，调试串口测试结果如图5.1所示。

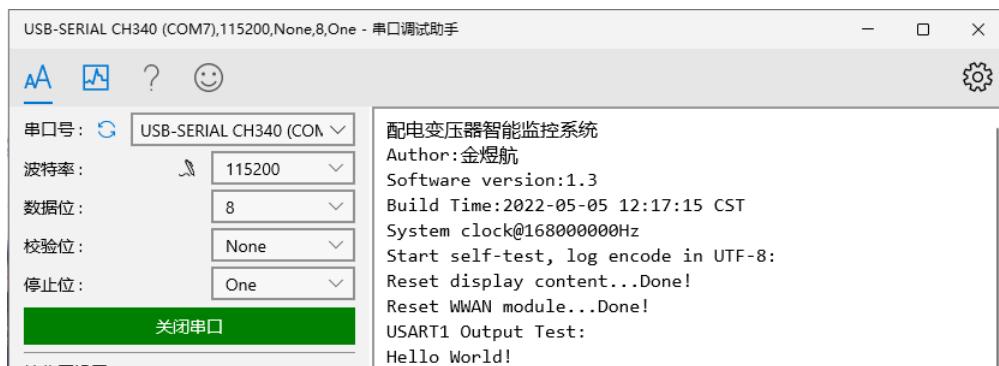


图 5.1 调试串口测试结果示意图

由图5.1可见，串口调试助手在 115200bps 的波特率上能够正确获得来自调试串口输出的终端状态，并完整接收测试输出字符串“Hello World!”。调试串口的工作结果符合设计预期。

(2) 蜂鸣器、Micro SD 卡与 LED 测试

配电变压器智能监控终端在启动过程中，会对蜂鸣器与 LED 进行功能性自检，并报告 Micro SD 卡的插入情况。调试串口输出如图5.2所示。

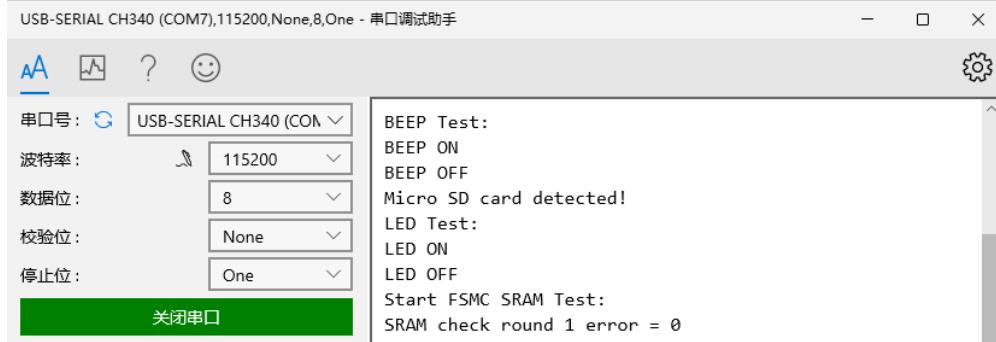


图 5.2 蜂鸣器、Micro SD 卡与 LED 自检串口输出示意图

由图5.2可见，串口调试助手完整接收了终端在进行蜂鸣器和 LED 功能性测试的调试输出，并得到了 Micro SD 卡正确插入状态反馈。在测试中，蜂鸣器能够正确发声，3 组 LED 被正确点亮，如图5.3所示。显然，蜂鸣器、Micro SD 卡与 LED 能够通过自检测试，符合设计预期。

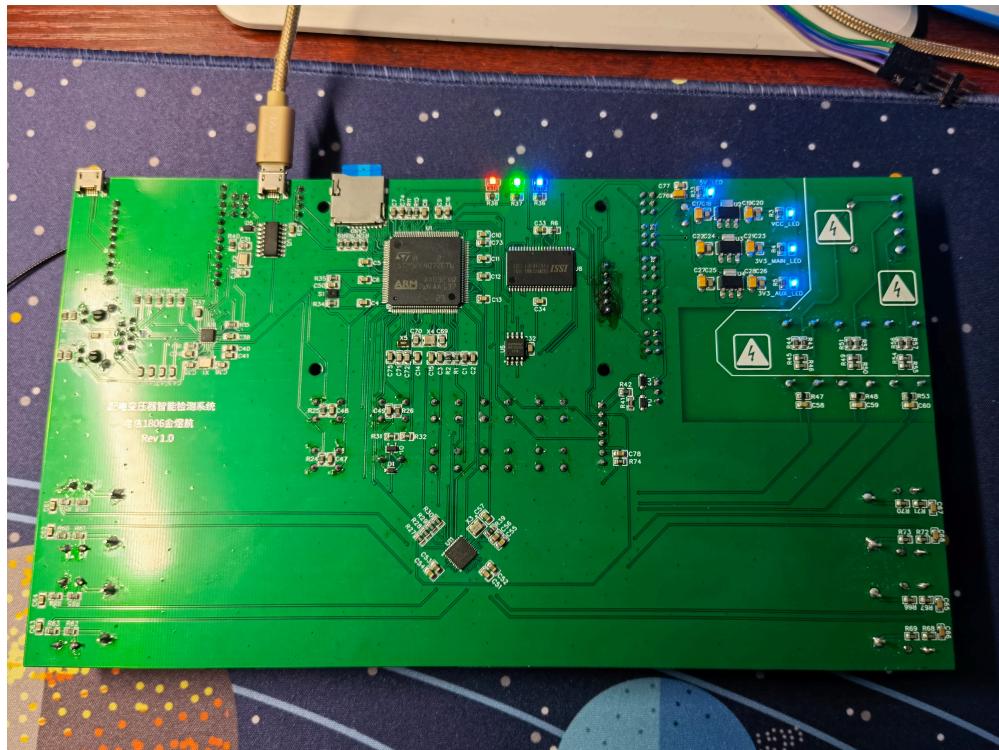


图 5.3 LED 功能性测试结果示意图

(3) SRAM 与温湿度传感器测试

配电变压器智能监控终端在启动过程中，会对 SRAM 和温湿度传感器 SHT31 进行自检并产生对应的调试串口输出，如图5.4所示。

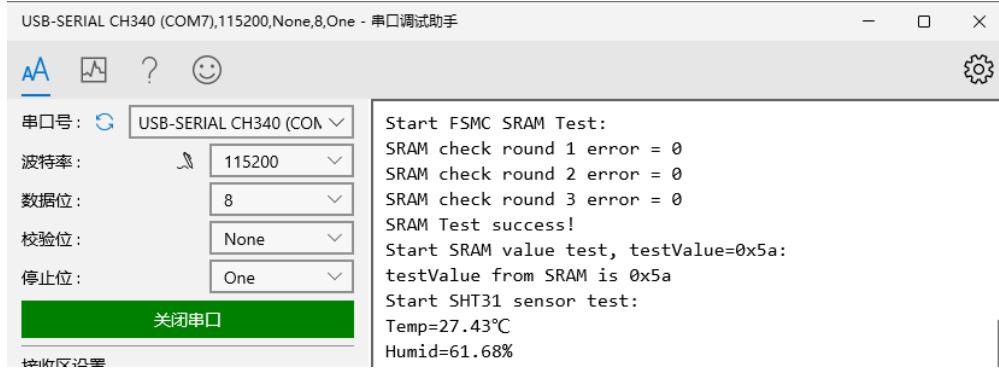


图 5.4 SRAM 与温湿度传感器自检串口输出示意图

由图5.4可见，串口调试助手显示的内容表示微控制器 STM32F407ZET6 能够正确地通过 FSMC 接口驱动 SRAM，并成功通过 3 轮数据正确性校验。同时，智能监控终端的 SHT31 温湿度传感器能够正确获得所处的环境温湿度数据。测试结果符合设计预期。

(4) 串行 Flash 与电能计量 IC 测试

配电变压器智能监控终端在启动过程中，会对串行 SPI Flash 存储器与电能计量芯片 ADE7878 进行自检并产生对应的调试串口输出，如图5.5所示。

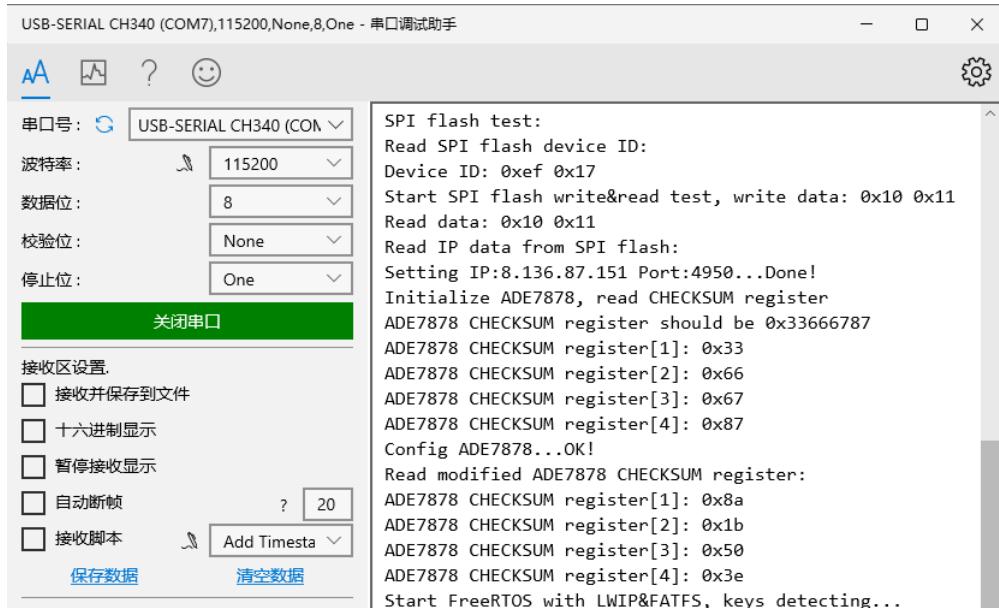


图 5.5 串行 Flash 与电能计量芯片自检串口输出示意图

由图5.5可见，串口调试助手显示的内容表示智能监控终端的 SPI Flash 存储器 W25Q128JVSI 能够正确读取器件 ID，并完成读写测试。同时，对 ADE7878 的 CHECKSUM 寄存器的首次

读取结果表明微控制器能够正确与电能计量 IC 建立 SPI 接口连接^[12]，而 CHEKCSUM 寄存器的第二次读取结果则表明配置参数被正确写入 ADE7878 的设置寄存器中。测试结果符合设计预期。

(5) FatFs 文件系统测试

配电变压器智能监控终端在完成基本自检并启动 FreeRTOS 实时操作系统后，任务 sd_task 会对终端所使用的 FatFs 文件系统进行基本的读写测试，同时获取 FatFs 文件系统所管理的 Micro SD 卡的基本信息，并产生对应的调试串口输出，如图5.6所示。

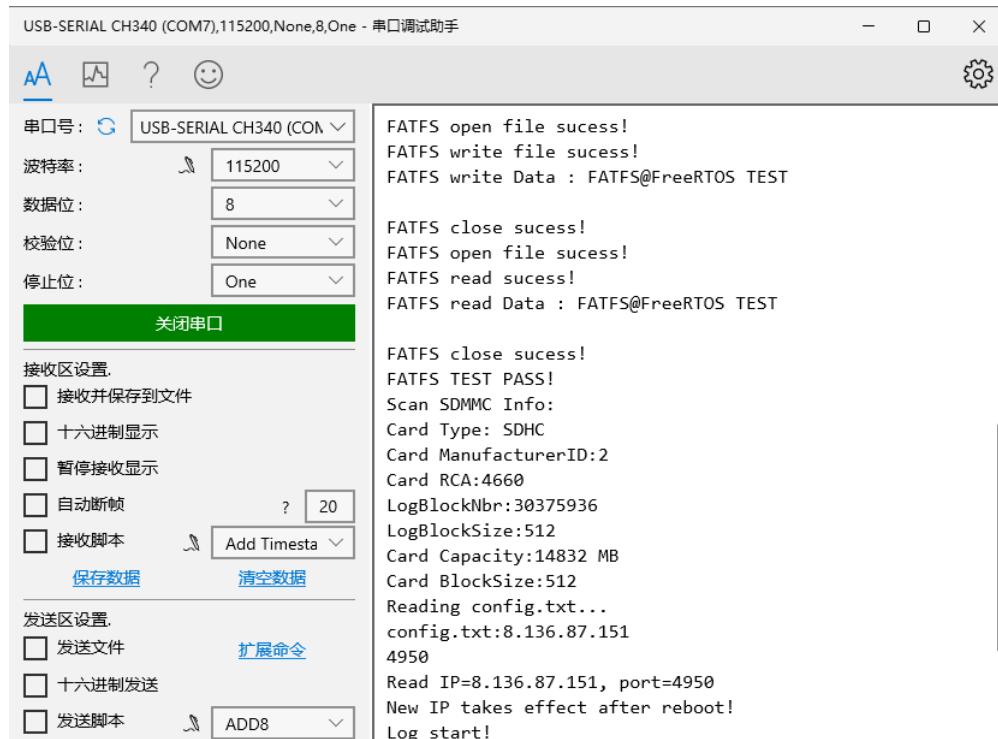


图 5.6 FatFs 测试串口输出示意图

由图5.6可见，串口调试助手显示的内容表示智能监控终端的 FatFs 能够正确通过文件读写测试，并获得了 Micro SD 卡的正确信息。同时，从调试串口的输出中可以得知，任务 sd_task 在完成测试后正确读取了存放有目标服务器 IP 地址和端口的文件 config.txt，并开始对智能监控终端的参数和状态进行记录。

另外，在对 FatFs 文件系统的测试过程中，智能监控终端板上的蓝色 Micro SD 卡读写指示灯被同时点亮，如图5.7所示。测试结果符合设计预期。

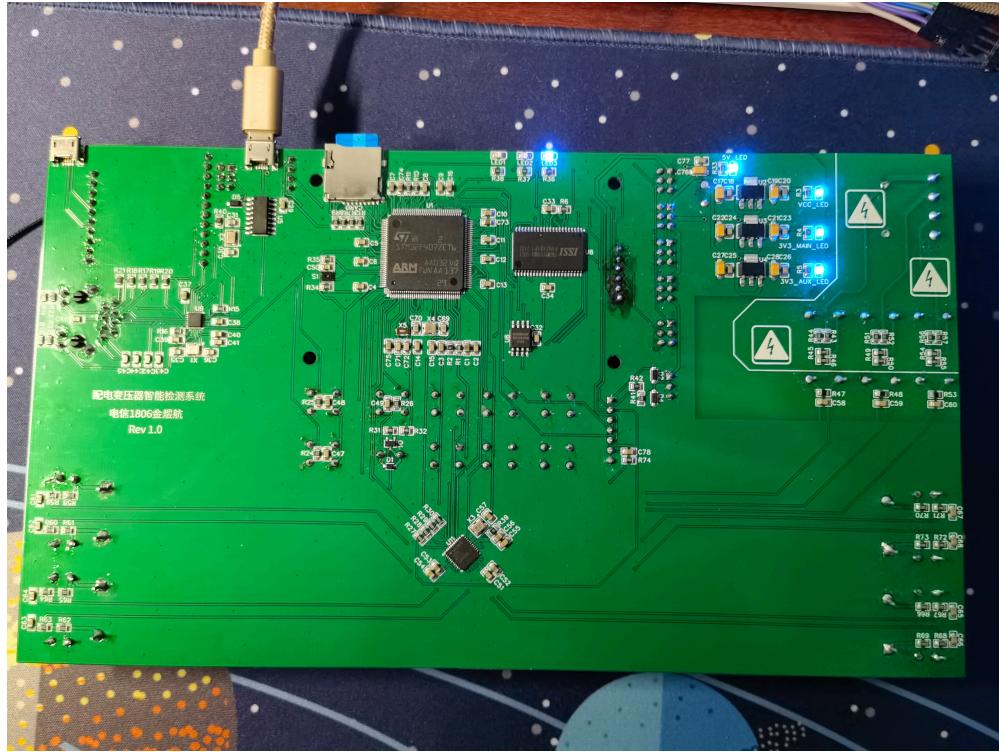


图 5.7 Micro SD 卡读写指示灯测试示意图

(6) 以太网连通性测试

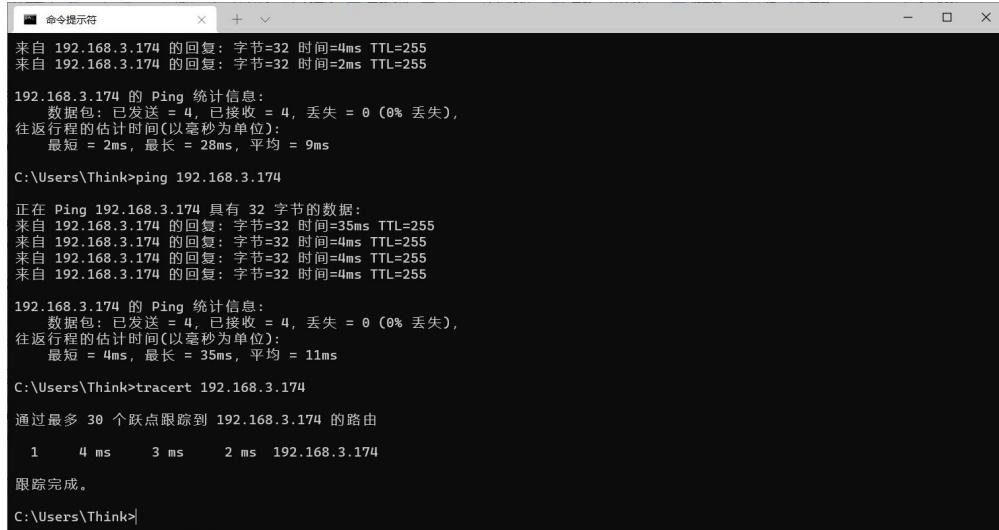
配电变压器智能监控终端在完成基本自检并启动 FreeRTOS 实时操作系统后，任务 main_task 会调用 lwIP API，进行终端的以太网连接。

为了测试终端的以太网连通性，首先对其 lwIP 的 DHCP IP 地址获取功能进行测试。在智能监控终端进入 FreeRTOS 操作系统，绿色状态指示灯慢闪后，打开与监控终端相连的路由器后台管理界面，可见终端在网络中的信息如图 5.8 所示。



图 5.8 终端路由器后台信息示意图

由图5.8可见，智能监控终端能够通过 DHCP 功能自动获取网络中的 IP 地址。在验证 DHCP 功能后，测试使用另一台计算机在同一局域网下对智能监控终端 IP 发送 ICMP 报文，测试智能监控终端的网络可达性。测试结果如图5.9所示。



```

命令提示符

来自 192.168.3.174 的回复: 字节=32 时间=4ms TTL=255
来自 192.168.3.174 的回复: 字节=32 时间=2ms TTL=255

192.168.3.174 的 Ping 统计信息:
    数据包: 已发送 = 4, 已接收 = 4, 丢失 = 0 (0% 丢失),
    往返行程的估计时间(以毫秒为单位):
        最短 = 2ms, 最长 = 28ms, 平均 = 9ms

C:\Users\Think>ping 192.168.3.174

正在 Ping 192.168.3.174 具有 32 字节的数据:
来自 192.168.3.174 的回复: 字节=32 时间=35ms TTL=255
来自 192.168.3.174 的回复: 字节=32 时间=4ms TTL=255
来自 192.168.3.174 的回复: 字节=32 时间=4ms TTL=255
来自 192.168.3.174 的回复: 字节=32 时间=4ms TTL=255

192.168.3.174 的 Ping 统计信息:
    数据包: 已发送 = 4, 已接收 = 4, 丢失 = 0 (0% 丢失),
    往返行程的估计时间(以毫秒为单位):
        最短 = 4ms, 最长 = 35ms, 平均 = 11ms

C:\Users\Think>tracert 192.168.3.174

通过最多 30 个跃点跟踪到 192.168.3.174 的路由

  1     4 ms      3 ms      2 ms  192.168.3.174

跟踪完成。

C:\Users\Think>

```

图 5.9 智能监控终端以太网可达性测试示意图

由图5.9可见，智能监控终端通过了以太网可达性测试。

经过 2 个阶段的以太网连通性测试，可以确定智能监控终端以太网相关的软硬件工作状态符合设计预期。

(7) LTE 模组测试

配电变压器智能监控终端在完成基本自检并启动 FreeRTOS 实时操作系统后，任务 lte_task 会对 LTE 模组进行初始化操作，以建立网络连接并获取本地时间。测试结果如图5.10所示。



图 5.10 LTE 模组测试串口输出示意图

由图5.10可知，智能监控终端板载的 LTE 模组成功初始化，并向微控制器提供了本地时间信息。测试结果符合设计预期。

5.2.2 三相电压监控测试

配电变压器智能监控系统的核心功能是对目标变压器进行电能参数上的监控。本节将对配电变压器智能监控终端进行三相电压监控测试。在本测试中，配电变压器智能监控终

端将接受来自三相调压器产生的外部电压输入。测试通过观察智能监控终端的示数及其变化评估功能是否与设计预期相符。

首先，将配电变压器智能监控终端的电压输入接线端子与三相调压器的电压输出端相连，此时三相调压器未输出测试电压，监控终端读数如图5.11所示。

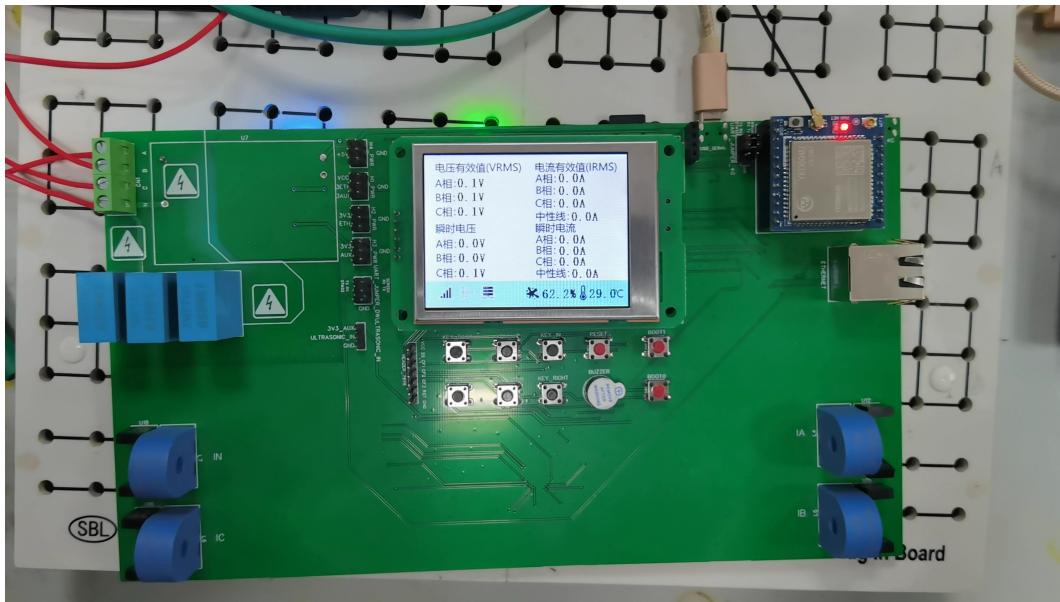


图 5.11 监控终端读数示意图（三相调压器无输出）

由图5.11可见，智能监控终端产生约 0.1V 的读数。经过分析，该读数是由外部干扰引起，在合理误差范围之内。旋转三相调压器的调压旋钮，使三相调压器输出有效值约 50V 的测试电压，观察配电变压器智能监控终端的读数，如图5.12所示。

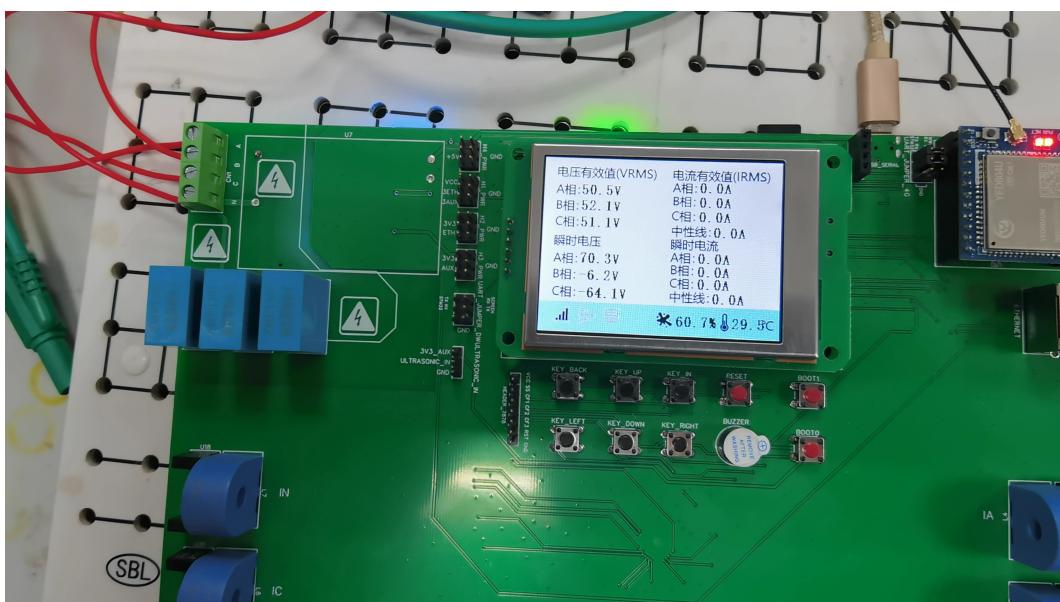


图 5.12 监控终端读数示意图（三相调压器输出有效值 50V）

由图5.12可见，智能监控终端三相电压有效值读数均约为 50V，且瞬时电压示数符合 50V 电压有效值时的电压范围 ($\pm 50\sqrt{2}$ V)。反向旋转三相调压器的调压旋钮，降低调压器输出的测试电压值，观察配电变压器智能监控终端的读数，如图5.13所示。

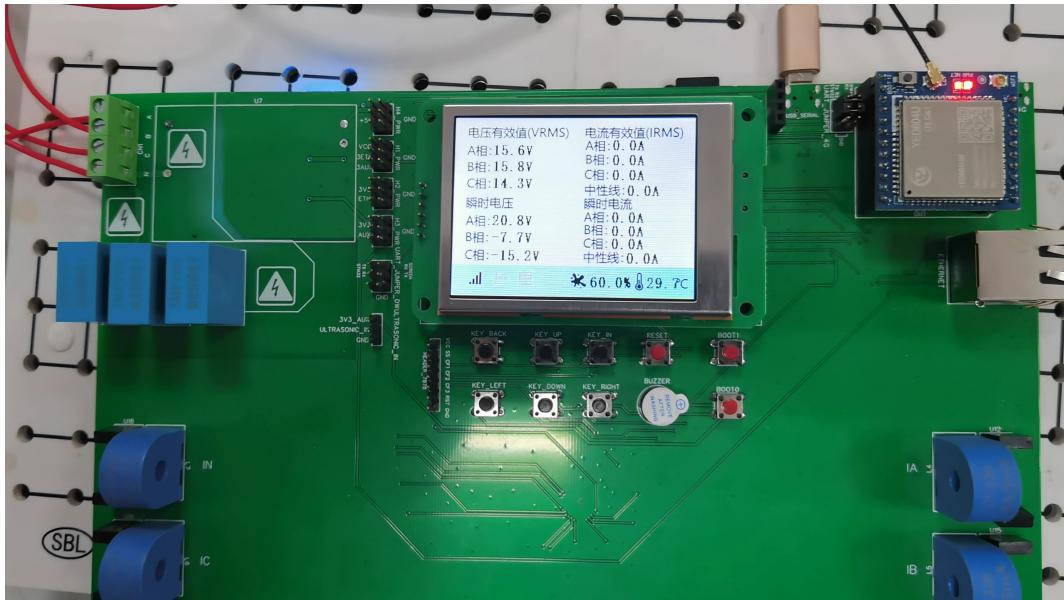


图 5.13 监控终端读数示意图（降低三相调压器输出）

由图5.13可见，智能监控终端的示数随着三相调压器的输出电压下降而下降。

以上测试结果说明配电变压器智能监控终端的电压监控功能与设计预期相符。

5.2.3 电压电流监控测试

本节将对配电变压器智能监控终端进行电压电流监控测试。与三相电压监控测试不同，本节的电压电流监控测试将对配电变压器智能监控终端的每一相进行独立的测试，并综合三相的数据得出最终的测试结论。根据智能监控终端在电压检测部分的电路图3.8和电流检测部分的电路图3.9，测试可使用信号发生器产生频率为 50Hz 的正弦波信号模拟外界的电压与电流信号。

本次测试将使用带有信号发生功能的数字示波器正点原子 DS100Mini 产生幅值约 20mV 的正弦波信号，并使用示波器的 A 通道进行输入波形显示。同时，本次测试将通过观测并检验配电变压器智能监控终端示数是否与示波器波形幅值相符的方式，获得每一相的测试结果。

(1) A 相电压电流监控测试

对于 A 相，配电变压器智能监控终端示数与示波器波形如图5.14所示。

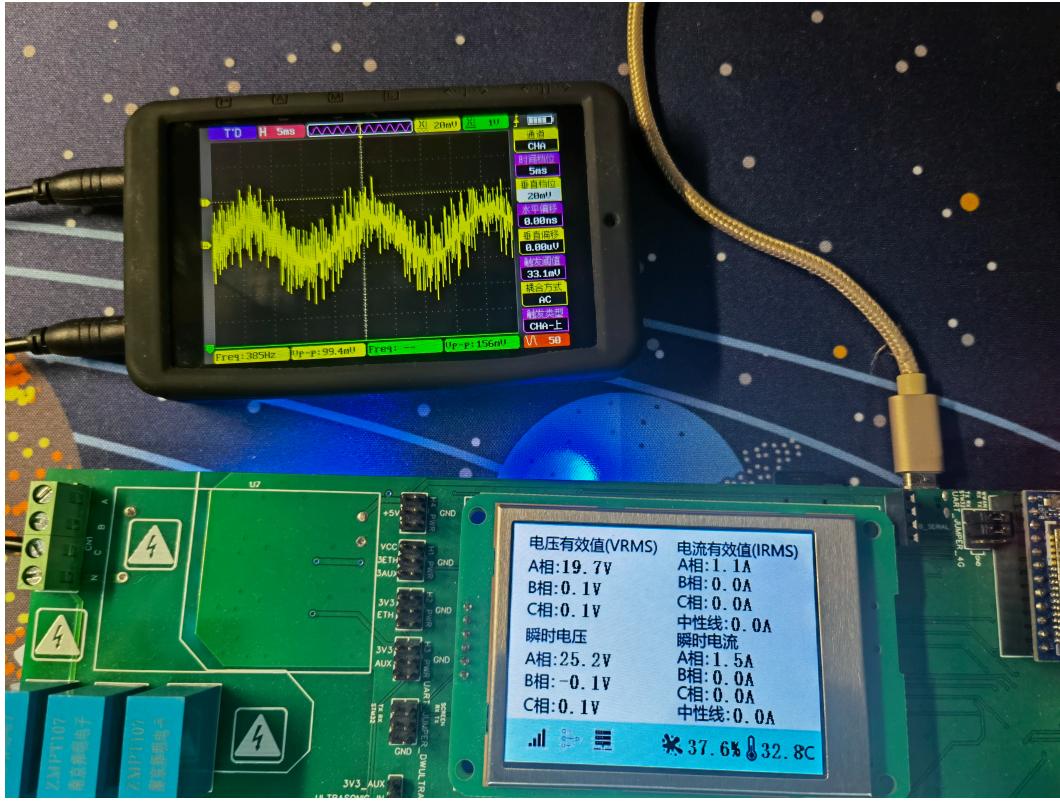


图 5.14 A 相电压电流监控测试结果示意图

由图5.14可见，此时智能监控终端示数为电压有效值 19.7V，电流有效值 1.1A。从示波器可知正弦波幅值约为 17mV，现根据公式(3.2)和公式(3.4)对理论电压有效值和电流有效值进行计算。

对于电压理论有效值，计算公式如(5.1)，即：

$$V_{Atheory} = \frac{200 \times 10^3 \times 17 \times 10^{-3}}{120 \times \sqrt{2}} = 20.03V \quad (5.1)$$

对于电流理论有效值，计算公式如(5.2)，即：

$$I_{Atheory} = \frac{1 \times 10^3 \times 17 \times 10^{-3}}{10 \times \sqrt{2}} = 1.20A \quad (5.2)$$

考虑测试过程中的环境干扰与仪器误差，配电变压器智能监控终端能够较为准确地获取 A 相测试波形所代表的理论电压/电流有效值。

(2) B 相电压电流监控测试

对于 B 相，配电变压器智能监控终端示数与示波器波形如图5.15所示。

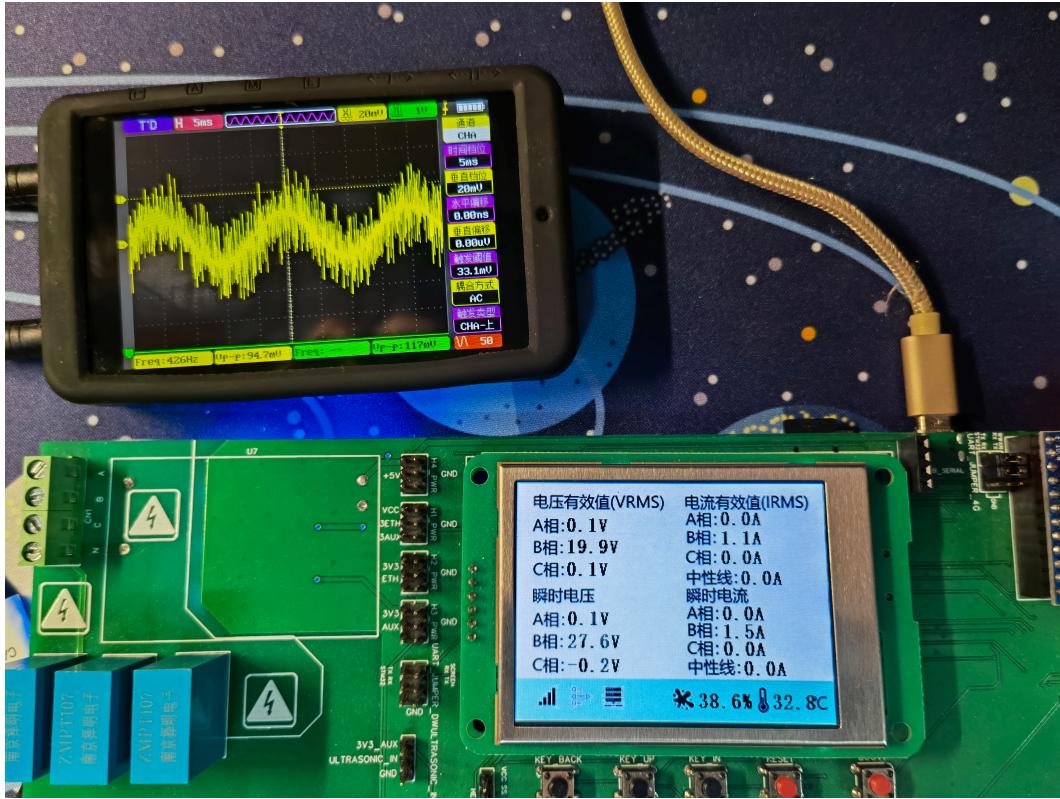


图 5.15 B 相电压电流监控测试结果示意图

由图5.15可见，此时智能监控终端示数为电压有效值 19.9V，电流有效值 1.1A。从示波器可知正弦波幅值约为 17mV，现根据公式(3.2)和公式(3.4)对理论电压有效值和电流有效值进行计算。

对于电压理论有效值，计算公式如(5.3)，即：

$$V_{Btheory} = \frac{200 \times 10^3 \times 17 \times 10^{-3}}{120 \times \sqrt{2}} = 20.03V \quad (5.3)$$

对于电流理论有效值，计算公式如(5.4)，即：

$$I_{Btheory} = \frac{1 \times 10^3 \times 17 \times 10^{-3}}{10 \times \sqrt{2}} = 1.20A \quad (5.4)$$

考虑测试过程中的环境干扰与仪器误差，配电变压器智能监控终端能够较为准确地获取 B 相测试波形所代表的理论电压/电流有效值。

(3) C 相电压电流监控测试

对于 C 相，配电变压器智能监控终端示数与示波器波形如图5.16所示。

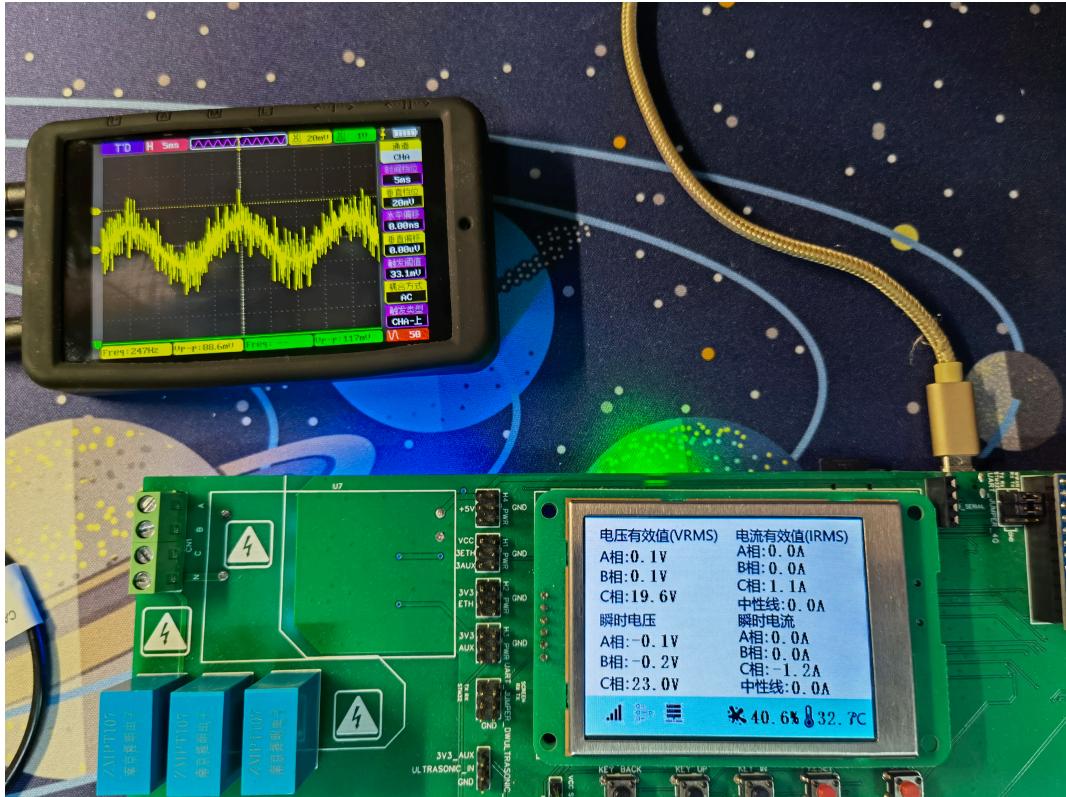


图 5.16 C 相电压电流监控测试结果示意图

由图5.16可见，此时智能监控终端示数为电压有效值 19.6V，电流有效值 1.1A。从示波器可知正弦波幅值约为 17mV，现根据公式(3.2)和公式(3.4)对理论电压有效值和电流有效值进行计算。

对于电压理论有效值，计算公式如(5.5)，即：

$$V_{Ctheory} = \frac{200 \times 10^3 \times 17 \times 10^{-3}}{120 \times \sqrt{2}} = 20.03V \quad (5.5)$$

对于电流理论有效值，计算公式如(5.6)，即：

$$I_{Ctheory} = \frac{1 \times 10^3 \times 17 \times 10^{-3}}{10 \times \sqrt{2}} = 1.20A \quad (5.6)$$

考虑测试过程中的环境干扰与仪器误差，配电变压器智能监控终端能够较为准确地获取 C 相测试波形所代表的理论电压/电流有效值。

(4) 中性线电流监控测试

对于中性线，配电变压器智能监控终端示数与示波器波形如图5.17所示。

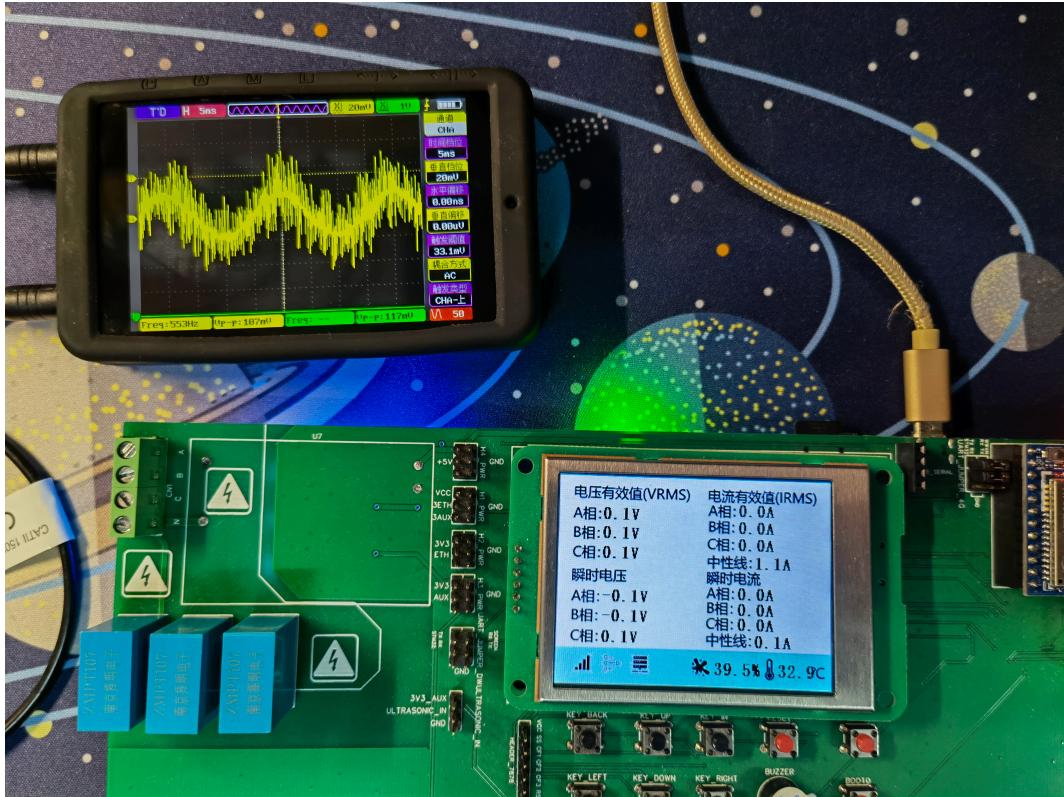


图 5.17 C 相电压电流监控测试结果示意图

由图5.17可见，此时智能监控终端示数为电流有效值 1.1A。从示波器可知正弦波幅值约为 17mV，现根据公式(3.4)对理论电流有效值进行计算，计算公式如(5.7)，即：

$$I_{Ntheory} = \frac{1 \times 10^3 \times 17 \times 10^{-3}}{10 \times \sqrt{2}} = 1.20A \quad (5.7)$$

考虑测试过程中的环境干扰与仪器误差，配电变压器智能监控终端能够较为准确地获取中性线测试波形所代表的理论电流有效值。

(5) 电压电流监控测试结论

综合 A、B、C 三相与中性线的电压电流监控测试结果，可知配电变压器智能监控终端在电压与电流的测量与监控上符合设计预期。

5.2.4 功率与电能监控测试

本节将对配电变压器智能监控终端进行功率与电能监控测试。与三相电压监控测试不同，本节的功率与电能监控测试将对配电变压器智能监控终端的每一相进行独立的测试，并综合三相的数据得出最终的测试结论。根据智能监控终端在电压检测部分的电路图3.8和电流检测部分的电路图3.9，测试可使用信号发生器产生频率为 50Hz 的正弦波信号模拟外界的电压与电流信号。

本测试在实验顺序上是与电压电流测试同步进行的，因此 2 项测试共享相同的输入信号，且可通过电压电流测试中的电压有效值和电流有效值读数验证功率与电能监控测试数

据的准确性。测试将使用带有信号发生功能的数字示波器正点原子 DS100Mini 产生幅值约 20mV 的正弦波信号，并使用示波器的 A 通道进行输入波形显示。

(1) A 相功率与电能监控测试

对于 A 相，配电变压器智能监控终端示数与示波器波形如图5.18所示。

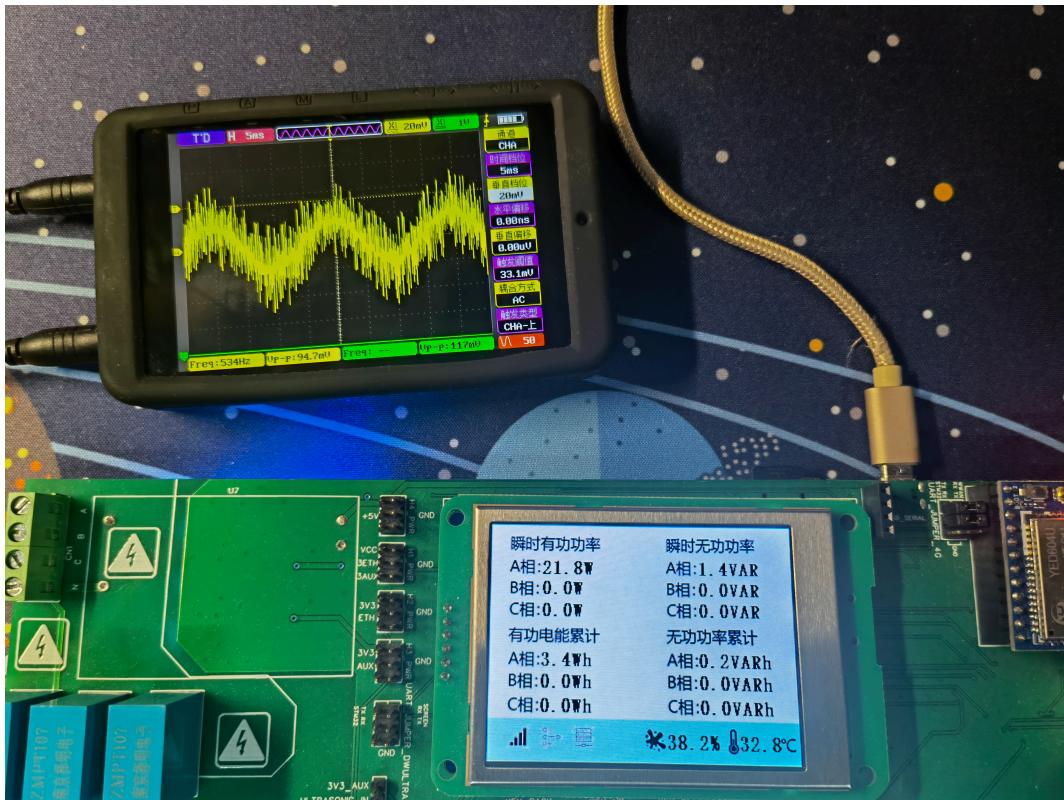


图 5.18 A 相功率与电能监控测试结果示意图

由图5.18可见，智能监控终端在测试条件下的 A 相瞬时有功功率示数为 21.8W。现根据图5.14中电压有效值与电流有效值示数计算瞬时有功功率的理论值，计算公式如(5.8)，即：

$$P_{A\text{theory}} = U_A \times I_A = 19.7V \times 1.1A = 21.67W \quad (5.8)$$

对比智能监控终端示数与公式(5.8)的计算结果，可知配电变压器智能监控终端能够较为准确地获取 A 相测试波形所代表的瞬时有功功率。另外，在测试过程中，观察到 A 相有功/无功电能累计均正常进行并产生符合对应功率值速度的累计值。

(2) B 相功率与电能监控测试

对于 B 相，配电变压器智能监控终端示数与示波器波形如图5.19所示。

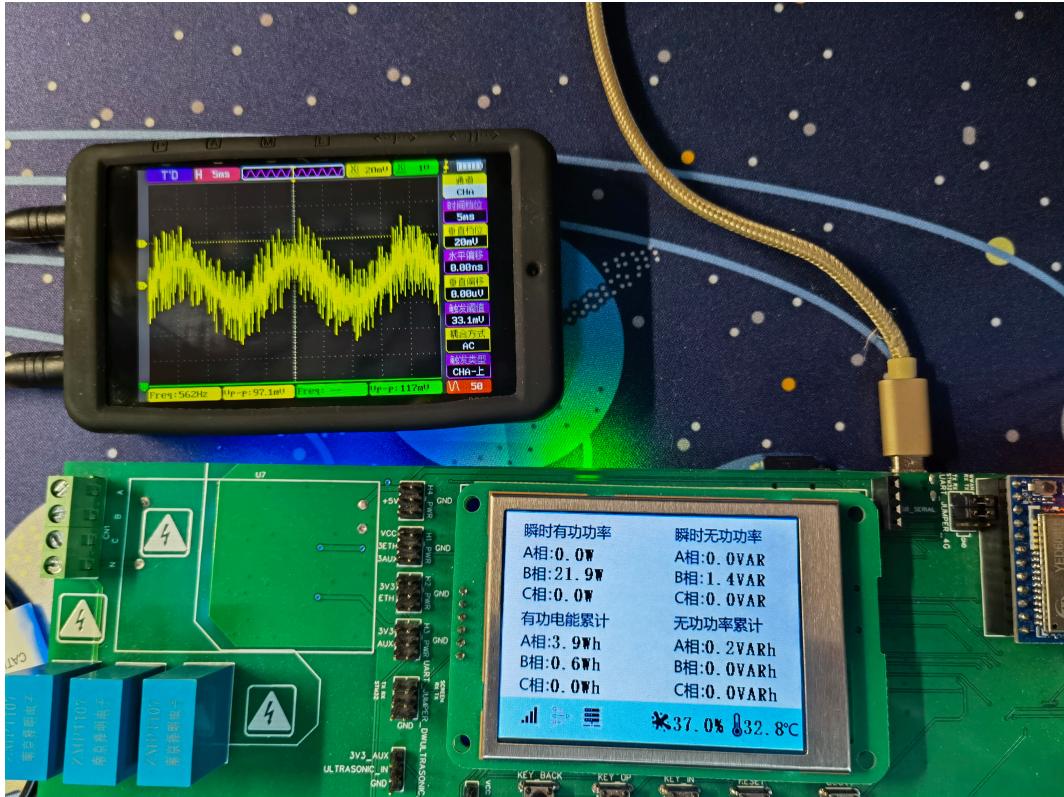


图 5.19 B 相功率与电能监控测试结果示意图

由图5.19可见，智能监控终端在测试条件下的B相瞬时有功功率示数为21.9W。现根据图5.15中电压有效值与电流有效值示数计算瞬时有功功率的理论值，计算公式如(5.9)，即：

$$P_{B\text{theory}} = U_B \times I_B = 19.9V \times 1.1A = 21.89W \quad (5.9)$$

对比智能监控终端示数与公式(5.9)的计算结果，可知配电变压器智能监控终端能够较为准确地获取B相测试波形所代表的瞬时有功功率。另外，在测试过程中，观察到B相有功/无功电能累计均正常进行并产生符合对应功率值速度的累计值。

(3) C 相功率与电能监控测试

对于C相，配电变压器智能监控终端示数与示波器波形如图5.20所示。



图 5.20 C 相功率与电能监控测试结果示意图

由图5.20可见，智能监控终端在测试条件下的C相瞬时有功功率示数为21.5W。现根据图5.16中电压有效值与电流有效值示数计算瞬时有功功率的理论值，计算公式如(5.10)，即：

$$P_{Ctheory} = U_C \times I_C = 19.6V \times 1.1A = 21.56W \quad (5.10)$$

对比智能监控终端示数与公式(5.10)的计算结果，可知配电变压器智能监控终端能够较为准确地获取C相测试波形所代表的瞬时有功功率。另外，在测试过程中，观察到C相有功/无功电能累计均正常进行并产生符合对应功率值速度的累计值。

(4) 功率与电能监控测试结论

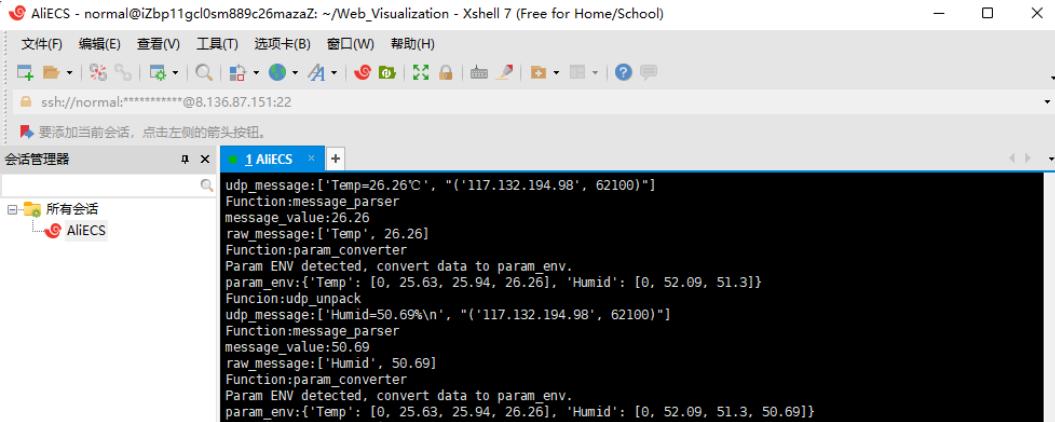
综合A、B、C三相的功率与电能监控测试结果，可知配电变压器智能监控终端在功率与电能的测量与监控上符合设计预期。

5.3 配电变压器智能监控系统服务端测试

5.3.1 数据接收线程测试

本节将对配电变压器智能监控系统服务端的数据接收线程进行测试。对于该线程，可通过启动系统服务端的调试模式并观察状态输出的方式检查其工作状态是否与设计预期相符。

对于环境参数，数据接收线程的测试结果如图5.21所示。

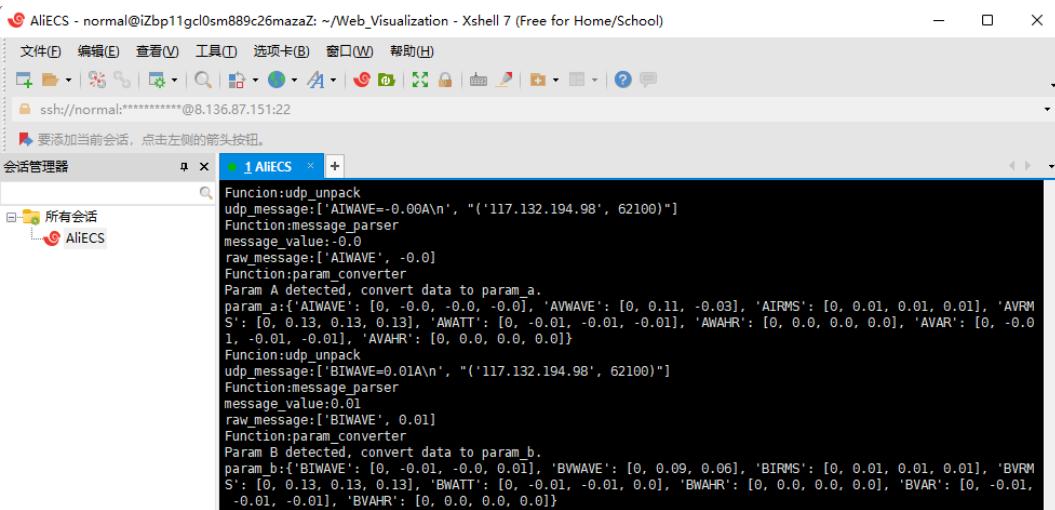


```
AliECS - normal@iZbp11gcl0sm889c26mazaZ: ~/Web_Visualization - Xshell 7 (Free for Home/School)
文件(F) 编辑(E) 查看(V) 工具(I) 选项卡(B) 窗口(W) 帮助(H)
ssh://normal:*****@8.136.87.151:22
要添加当前会话，点击左侧的箭头按钮。
会话管理器 1 AliECS +
所有会话 AliECS
udp_message:[ 'Temp=26.26°C', "('117.132.194.98', 62100)"]
Function:message_parser
message_value:26.26
raw_message:[ 'Temp', 26.26]
Function:param_converter
Param ENV detected, convert data to param_env.
param_env:{'Temp': [0, 25.63, 25.94, 26.26], 'Humid': [0, 52.09, 51.3]}
Funcion:udp_unpack
udp_message:[ 'Humid=50.69%', "('117.132.194.98', 62100)"]
Function:message_parser
message_value:50.69
raw_message:[ 'Humid', 50.69]
Function:param_converter
Param ENV detected, convert data to param_env.
param_env:{'Temp': [0, 25.63, 25.94, 26.26], 'Humid': [0, 52.09, 51.3, 50.69]}
```

图 5.21 数据接收线程环境参数测试图

由图5.21可知，线程程序能够正确接收来自智能监控终端上传的环境温湿度数据并放入存储字典中，提供实时数据记录与历史数据统计功能。

对于电能参数，以 A 相与 B 相瞬时电流为例，数据接收线程的测试结果如图5.22所示。



```
AliECS - normal@iZbp11gcl0sm889c26mazaZ: ~/Web_Visualization - Xshell 7 (Free for Home/School)
文件(F) 编辑(E) 查看(V) 工具(I) 选项卡(B) 窗口(W) 帮助(H)
ssh://normal:*****@8.136.87.151:22
要添加当前会话，点击左侧的箭头按钮。
会话管理器 1 AliECS +
所有会话 AliECS
Funcion:udp_unpack
udp_message:[ 'AIWAVE=-0.00A\n', "('117.132.194.98', 62100)"]
Function:message_parser
message_value:-0.0
raw_message:[ 'AIWAVE', -0.0]
Function:param_converter
Param A detected, convert data to param_a.
param_a:{'AIWAVE': [0, -0.0, -0.0, -0.0], 'AVWAVE': [0, 0.11, -0.03], 'AIRMS': [0, 0.01, 0.01, 0.01], 'AVRMS': [0, 0.13, 0.13, 0.13], 'AWATT': [0, -0.01, -0.01, -0.01], 'AWAHR': [0, 0.0, 0.0, 0.0], 'AVAR': [0, -0.01, -0.01, -0.01], 'AVAHR': [0, 0.0, 0.0, 0.0]}
Funcion:udp_unpack
udp_message:[ 'BIWAVE=0.01A\n', "('117.132.194.98', 62100)"]
Function:message_parser
message_value:0.01
raw_message:[ 'BIWAVE', 0.01]
Function:param_converter
Param B detected, convert data to param_b.
param_b:{'BIWAVE': [0, -0.01, -0.0, -0.01], 'BVWAVE': [0, 0.09, 0.06], 'BIRMS': [0, 0.01, 0.01, 0.01], 'BVRMS': [0, 0.13, 0.13, 0.13], 'BWATT': [0, -0.01, -0.01, 0.0], 'BWAHR': [0, 0.0, 0.0, 0.0], 'BVAR': [0, -0.01, -0.01, -0.01], 'BVAHR': [0, 0.0, 0.0, 0.0]}
```

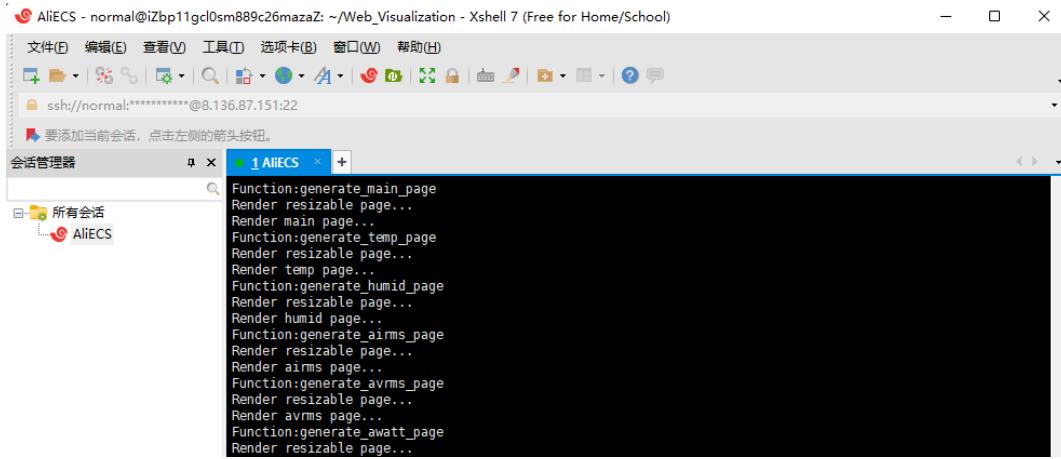
图 5.22 数据接收线程电能参数测试图

由图5.22可知，线程程序能够正确接收来自智能监控终端上传的电能参数并放入存储字典中，提供实时数据记录与历史数据统计功能。

根据以上测试结果，可知配电变压器智能监控系统服务端的数据接收线程工作符合设计预期。

5.3.2 HTML 图表生成线程测试

本节将对配电变压器智能监控系统服务端的 HTML 图表生成线程进行测试。对于该线程，可通过启动系统服务端的调试模式并观察状态输出的方式检查其工作状态是否与设计预期相符。测试结果如图5.23所示。



```

AliECS - normal@iZbp11gcl0sm889c26mazaZ: ~/Web_Visualization - Xshell 7 (Free for Home/School)
文件(F) 编辑(E) 查看(V) 工具(I) 选项卡(B) 窗口(W) 帮助(H)
ssh://normal:*****@8.136.87.151:22
要添加当前会话, 点击左侧的箭头按钮。
会话管理器 1 AliECS +
所有会话 AliECS
Function:generate_main_page
Render resizable page...
Render main page...
Function:generate_temp_page
Render resizable page...
Render temp page...
Function:generate_humid_page
Render resizable page...
Render humid page...
Function:generate_aims_page
Render resizable page...
Render aims page...
Function:generate_avms_page
Render resizable page...
Render avms page...
Function:generate_awatt_page
Render resizable page...

```

图 5.23 HTML 图表生成线程测试图

由图5.23可知，线程程序能够正确生成未布局的 HTML 图表，并根据布局 json 文件将其转换为布局后的 HTML 页面，工作状态符合设计预期。

5.3.3 Web 服务框架线程测试

本节将对配电变压器智能监控系统服务端的 HTML 图表生成线程进行测试。对于该线程，可直接访问远程服务器的 Web 端口，通过查看 HTML 图表页面展示效果的方式进行评估。

对于数据总览页面，测试结果如图5.24所示。



图 5.24 数据总览页面测试图

由图5.24可见，Web服务框架线程能够正确在指定端口渲染生成的HTML数据总览页面。

对于数据统计页面，以B相电压有效值统计页面为例，测试结果如图5.25所示。

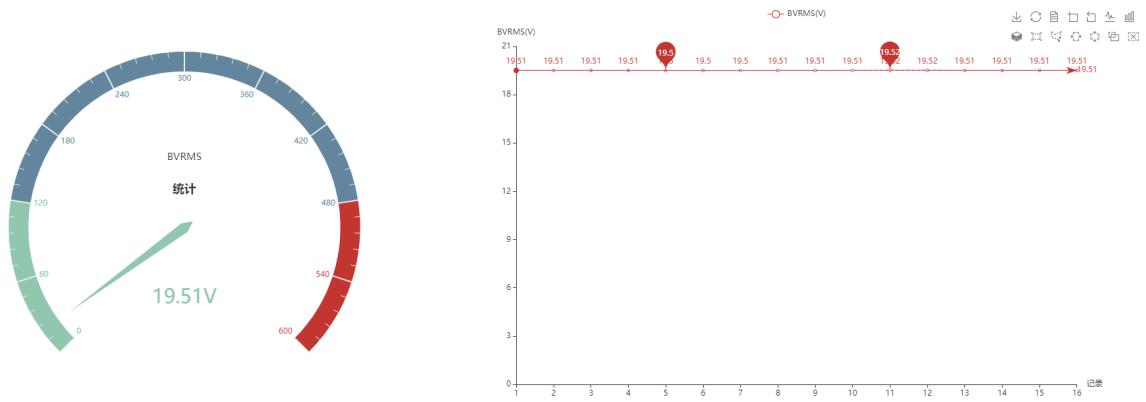


图 5.25 数据统计页面测试图

由图5.25可见，Web服务框架线程能够正确在指定端口渲染生成的HTML数据统计页面。

根据以上测试结果，可知配电变压器智能监控系统服务端的Web服务框架线程工作符合设计预期。

5.4 测试结论

如本章所述，配电变压器智能监控系统在进行的各项测试中均得到了与设计预期相符的结果：智能监控终端正常启动，通过所有自检项并以较高的准确度测量环境参数与电能参数；智能监控系统服务端能够通过UDP协议完整接收监控终端上传的数据，生成HTML图表页面并在指定端口上提供Web渲染服务。因此，本节得出配电变压器智能监控系统工作良好，符合设计预期的测试结论。

第6章 总结与展望

6.1 工作内容总结

本文主要设计了一种配电变压器智能监控系统，实现了对配电变压器的实时状态监控与远程数据可视化功能。本文的主要工作总结如下：

(1) 本文论述了对配电变压器进行监控的必要性及其数据可视化的意义，分析了国内外对配电变压器智能监控系统的研究现状，并分析了现有研究的局限性与可改进之处。

(2) 本文结合现有对配电变压器的研究，对配电变压器智能监控系统进行了需求分析，并提出了系统的实现架构与整体设计方案。

(3) 本文提供了配电变压器智能监控系统的硬件设计，包括电源、电能参数测量、环境参数测量、存储、网络和用户交互部分。本文对各个部分的器件组成进行了详细的介绍和分析，并论证了对应硬件设计的合理性与可行性。

(4) 本文提供了配电变压器智能监控系统的软件设计，包括配电变压器智能监控终端的嵌入式软件设计与服务端软件设计。在配电变压器智能监控终端的嵌入式软件部分，本文详细介绍了终端初始化配置软件与 FreeRTOS 实时操作系统任务软件的设计与实现。在配电变压器智能监控服务端软件部分，本文详细介绍了 UDP 数据接收线程、HTML 图表生成线程和 Web 服务框架线程的设计与实现。

(5) 本文对设计的配电变压器智能监控系统进行了测试，包括配电变压器智能监控终端与配电变压器智能监控系统服务端的测试。在配电变压器智能监控终端测试中，本文对终端的嵌入式软硬件进行了基础测试，并对其在电能参数的获取上进行了理论与实际的比较测试。在配电变压器智能监控系统服务端的测试中，本文对服务端软件组成的线程程序进行分别测试。测试最终得到了与设计预期相符的结果。

6.2 改进与展望

本文设计实现了一种配电变压器智能监控系统，经过测试，取得了一定的初步成果，但仍具有可改进之处。对本系统的进一步研究和改进可以从以下几个方面进行：

(1) 通过硬件设计布局与软件优化（如加入滤波算法）实现系统在检测精确度上的进一步提高。

(2) 增加系统的检测范围，不仅限于对配电变压器的参数监控，实现对配电变压器工作环境的图像获取与异常识别。

(3) 完善配电变压器智能监控系统服务端软件，提供更多数据驱动的分析和预警功能。

参考文献

- [1] 高胜宇. 配电变压器在线监测系统设计[D]. 华北电力大学, 2017.
- [2] 相光辉, 吴文东, 桂瑾琛. 2G/3G 网络精简及演进研究[J]. 邮电设计技术, 2021(05): 55-60.
- [3] 杨智. 变压器状态在线监测技术研究[D]. 天津大学, 2014.
- [4] 李雪云. 基于 BP 神经网络的变压器多参数在线监测系统的研究[D]. 安徽理工大学, 2017.
- [5] 陈国平. 电力变压器智能化配置和故障预测研究[D]. 2012.
- [6] 严小强. 配电变压器智能监测技术及系统研究[D]. 东华理工大学, 2019.
- [7] 杨炎升. 电器设备故障与环境影响[J]. 中国科技信息, 2006(24): 53-53.
- [8] 刘伟峰, 程光, 李沛霖, 等. 基于 PyEcharts 的尾气排放数据可视化监控平台构建及应用分析[J]. 现代制造工程, 2021(06): 46-50. DOI: 10.16731/j.cnki.1671-3133.2021.06.008.
- [9] 周文帆. 基于 Flask 的形式化验证系统的设计与实现[D]. 北京交通大学, 2020. DOI: 10.26944/d.cnki.gbfju.2020.001042.
- [10] AdvancedMonolithicSystems. 1A Low Dropout Voltage Regulator AMS1117[J/OL]., 2007. <http://www.advanced-monolithic.com/pdf/ds1117.pdf>.
- [11] STMicroelectronics. STM32F405xx STM32F407xx Datasheet[J/OL]., 2020. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f407ze.pdf>.
- [12] AnalogDevices. Polyphase Multifunction Energy Metering IC with Harmonic and Fundamental Information ADE7878[J/OL]., 2014. https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADE7854_7858_7868_7878.pdf.
- [13] Sensirion. Datasheet SHT3x-DIS[J/OL]., 2019. https://sensirion.com/media/documents/213E6A3B/61641DC3/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT3x_Datasheet_digital.pdf.
- [14] Microchip. Small Footprint RMII 10/100 Ethernet Transceiver with HP Auto-MDIX Support[J/OL]., 2016. <https://www.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/00002165B.pdf>.
- [15] Winbond. 3V 128M-Bit Serial Flash Memory With Dual/Quad SPI[J/OL]., 2021. <https://www.winbond.com/resource-files/W25Q128JV%20RevI%20008232021%20Plus.pdf>.

附录 A 配电变压器智能监控系统终端硬件原理图

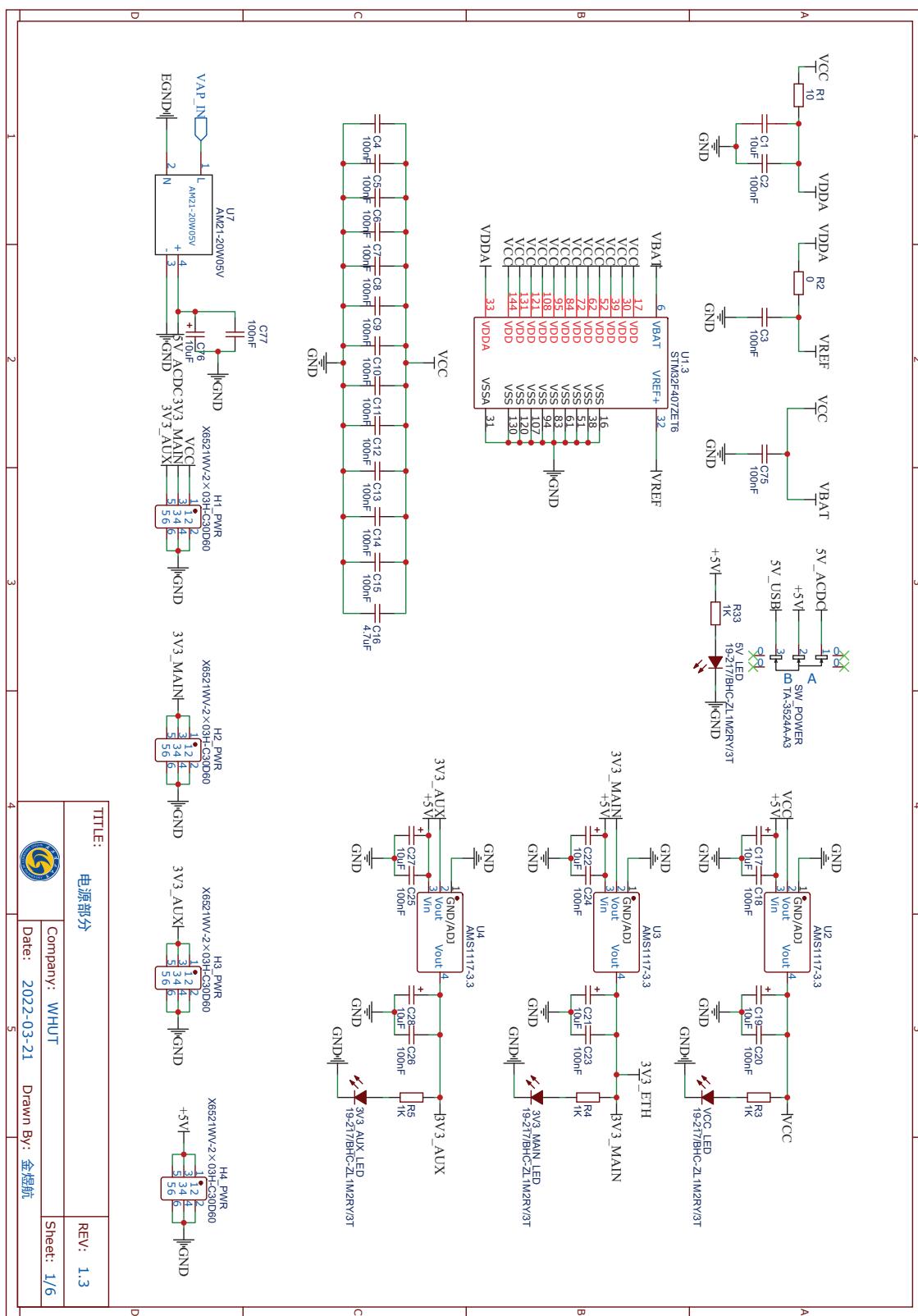


图 A1 电源部分原理图

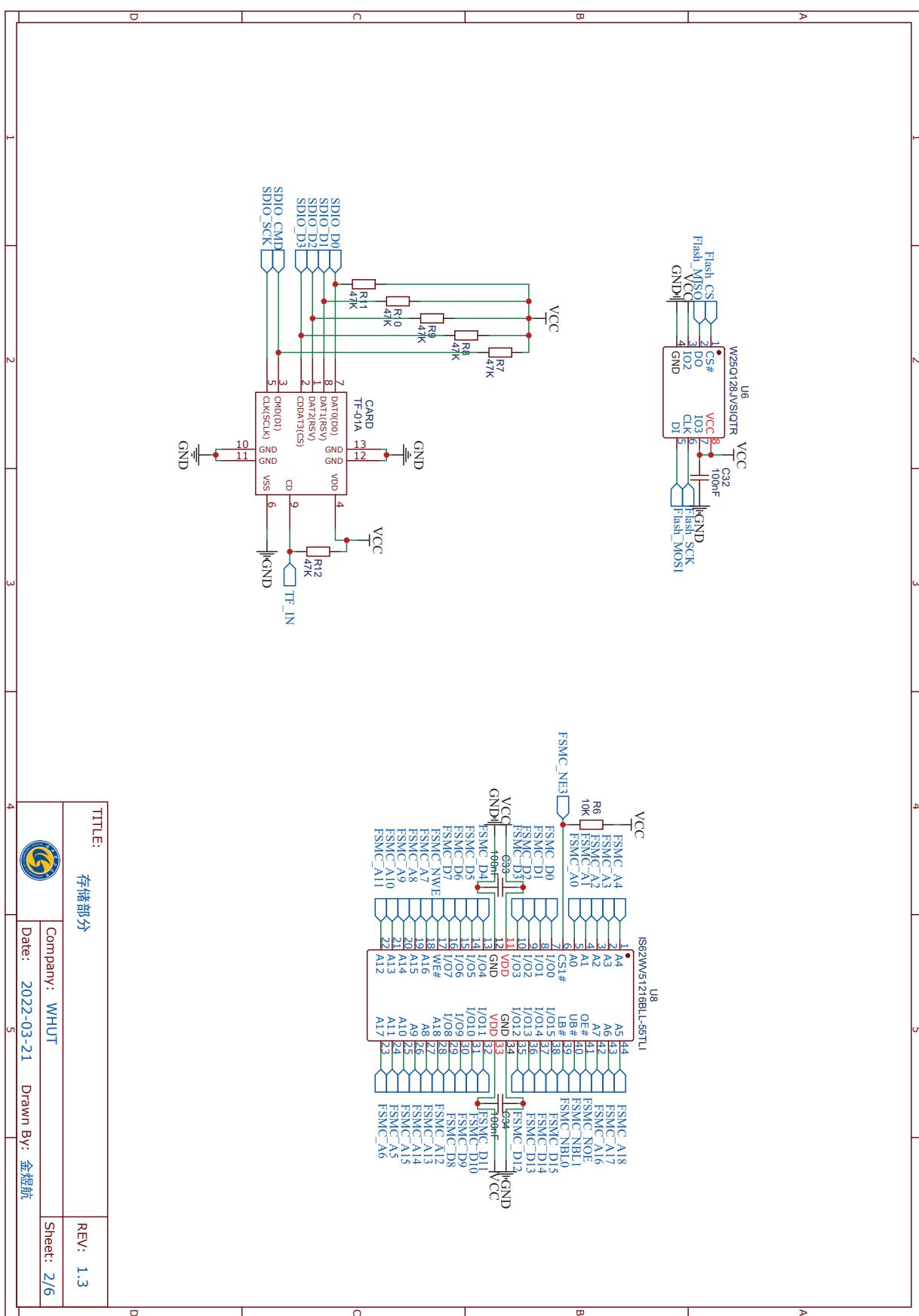


图 A2 存储部分原理图

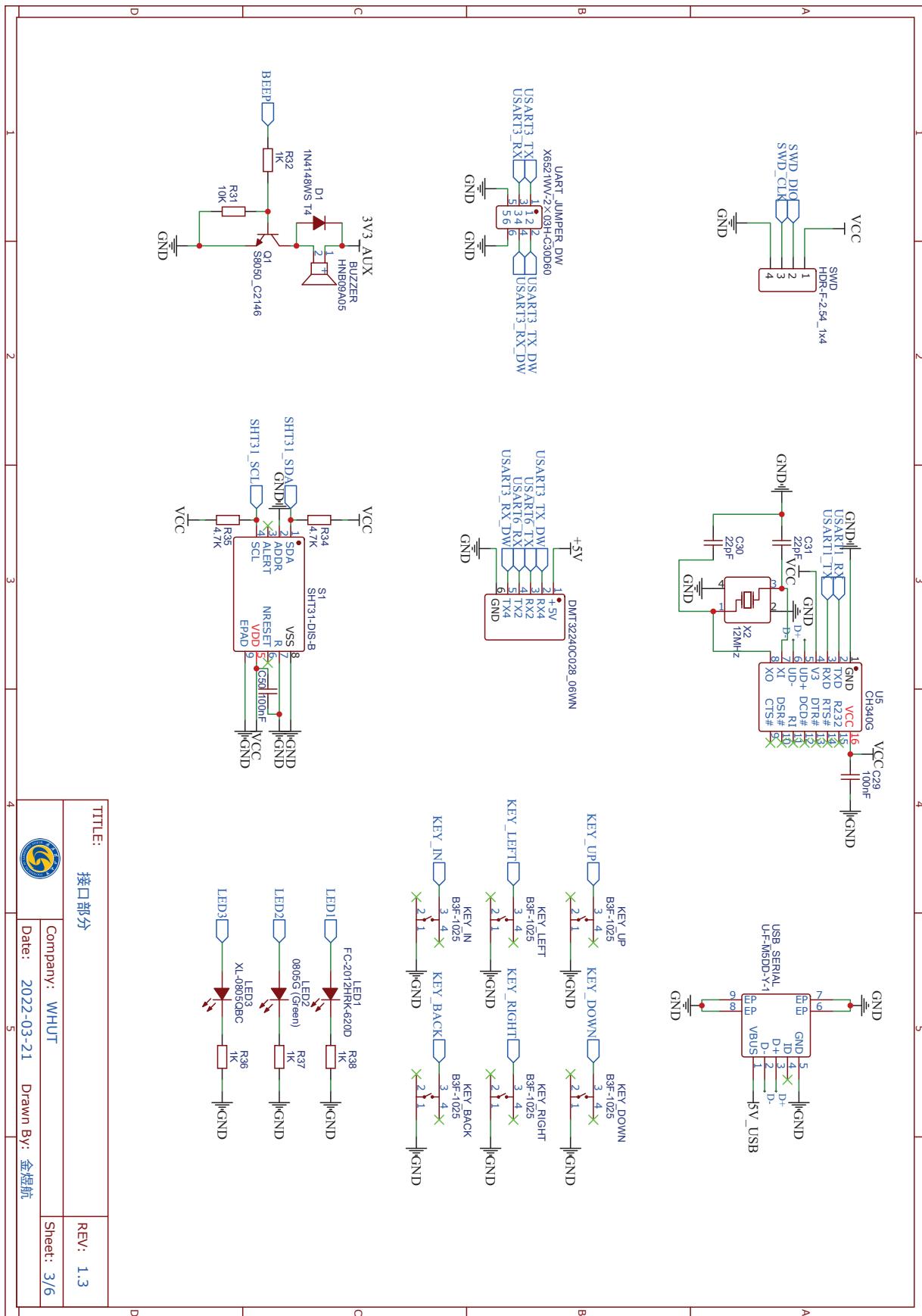
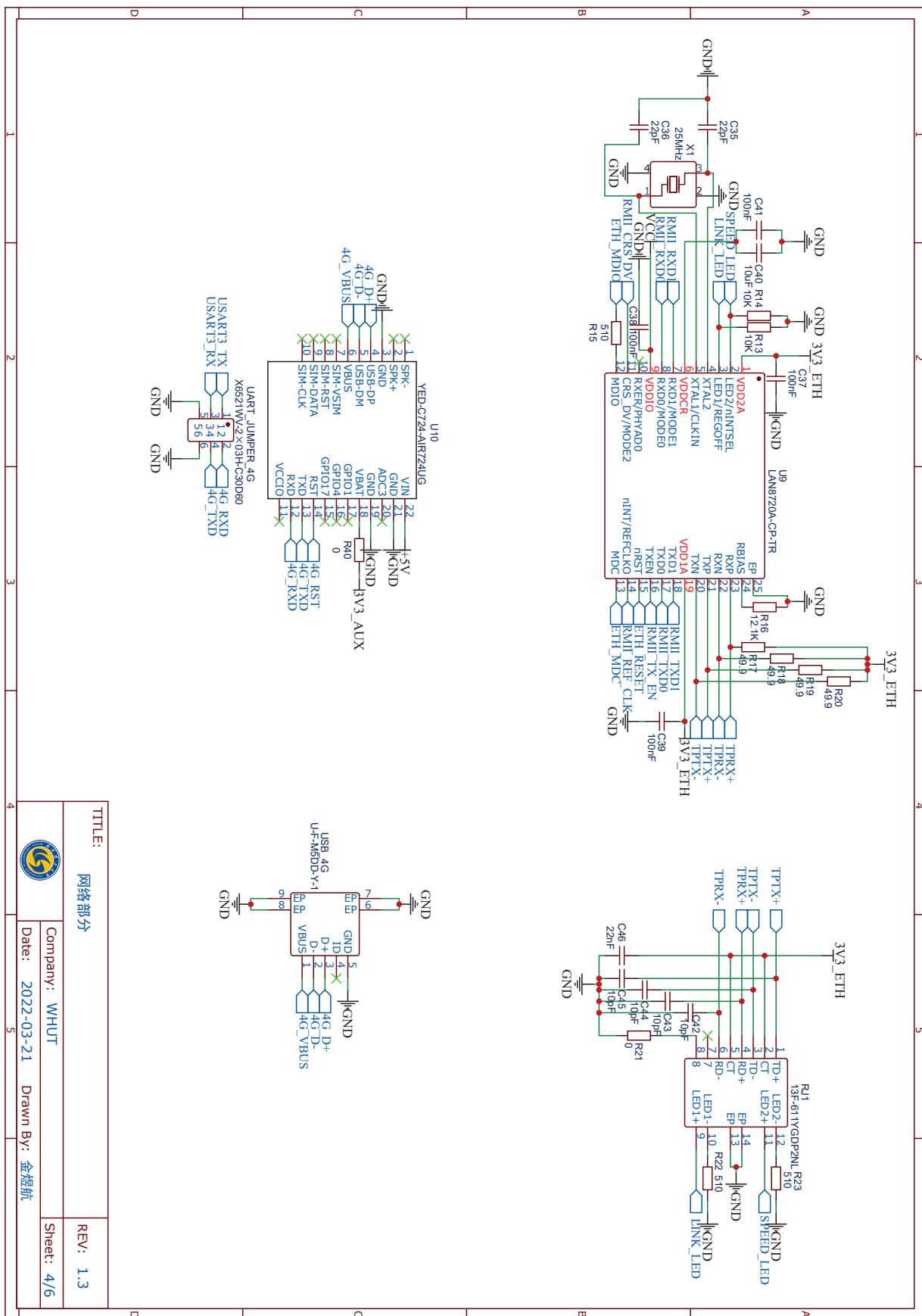


图 A3 接口部分原理图



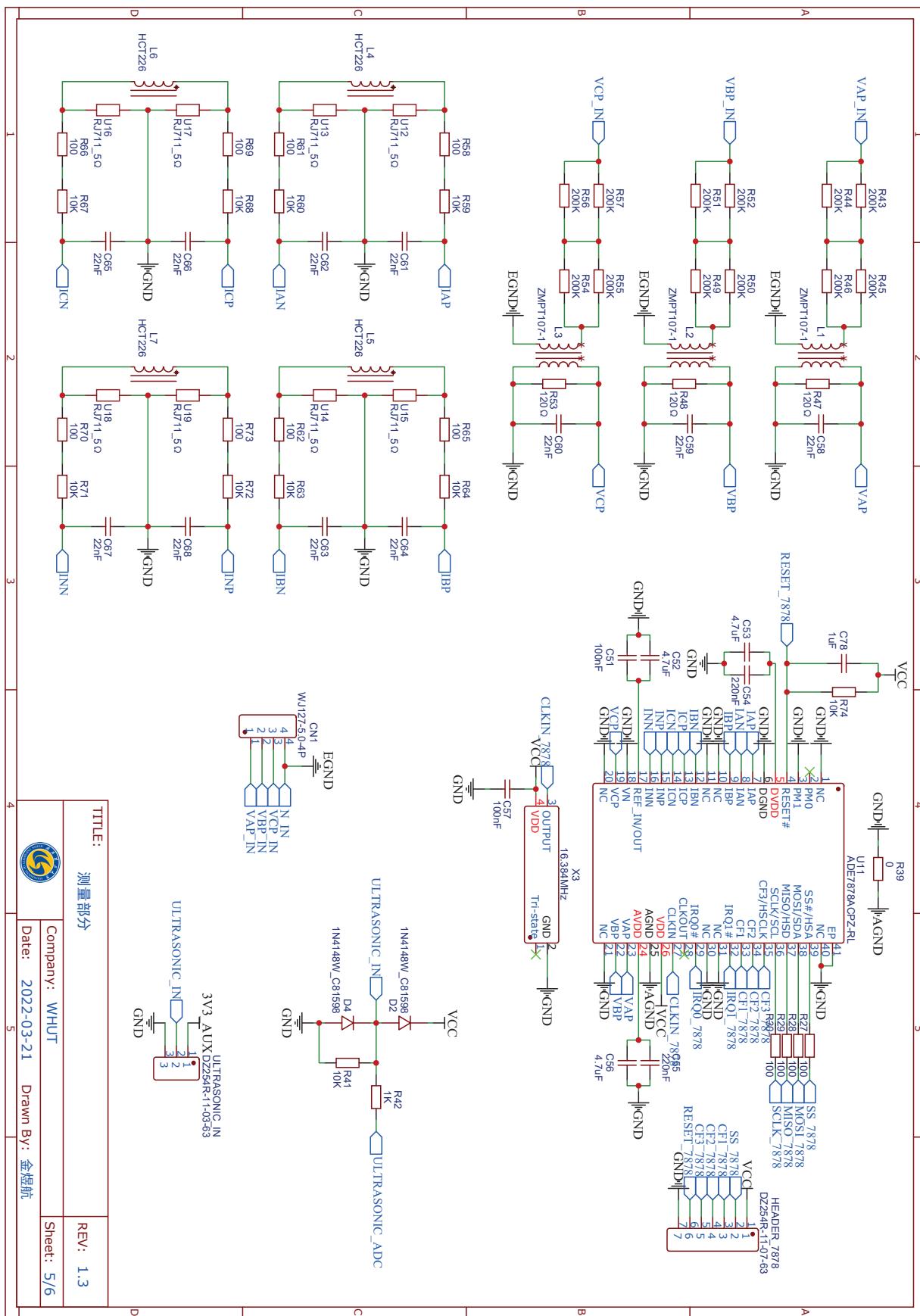


图 A5 测量部分原理图

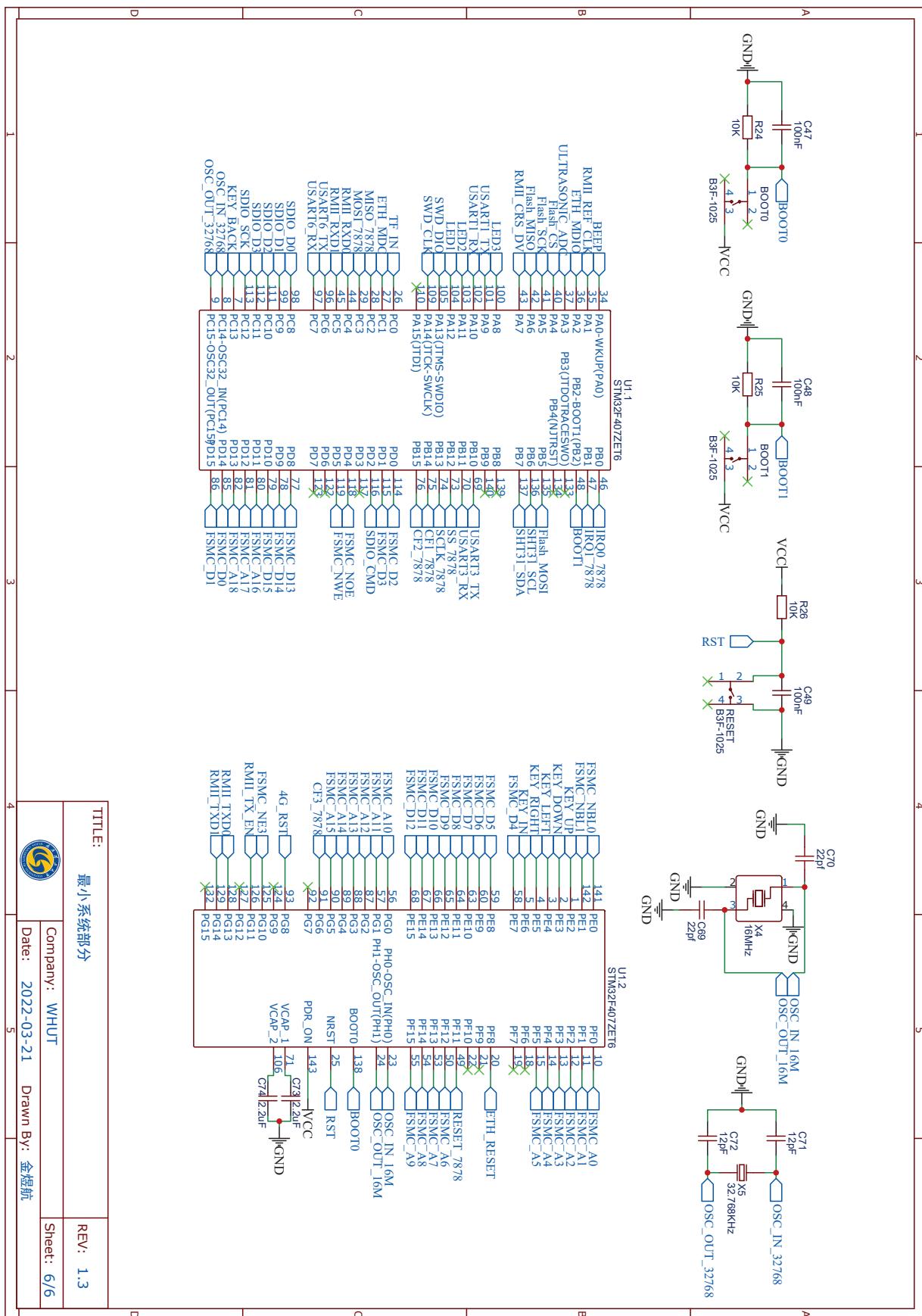


图 A6 最小系统部分原理图

附录 B 配电变压器智能监控系统终端 PCB 示意图

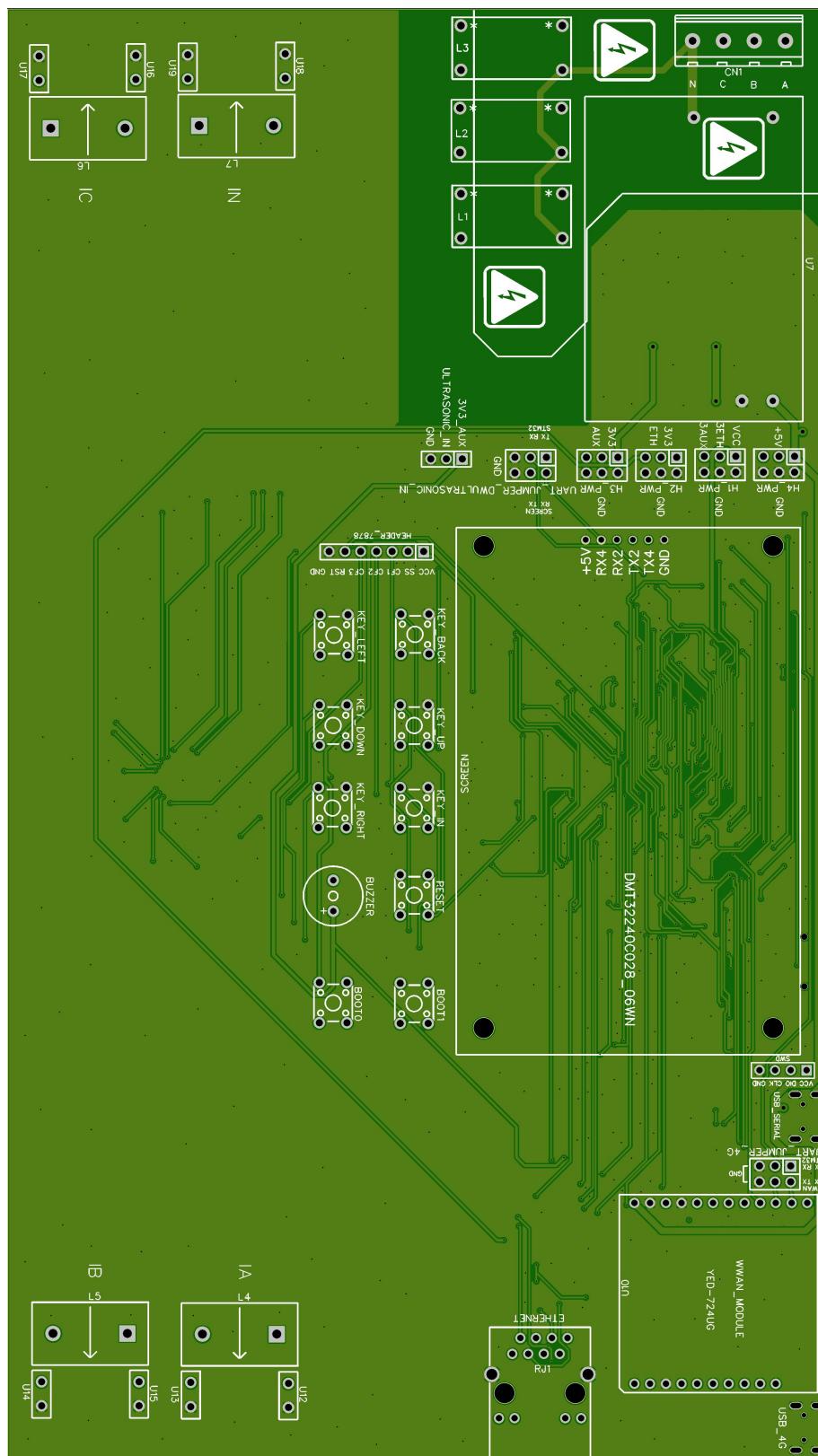
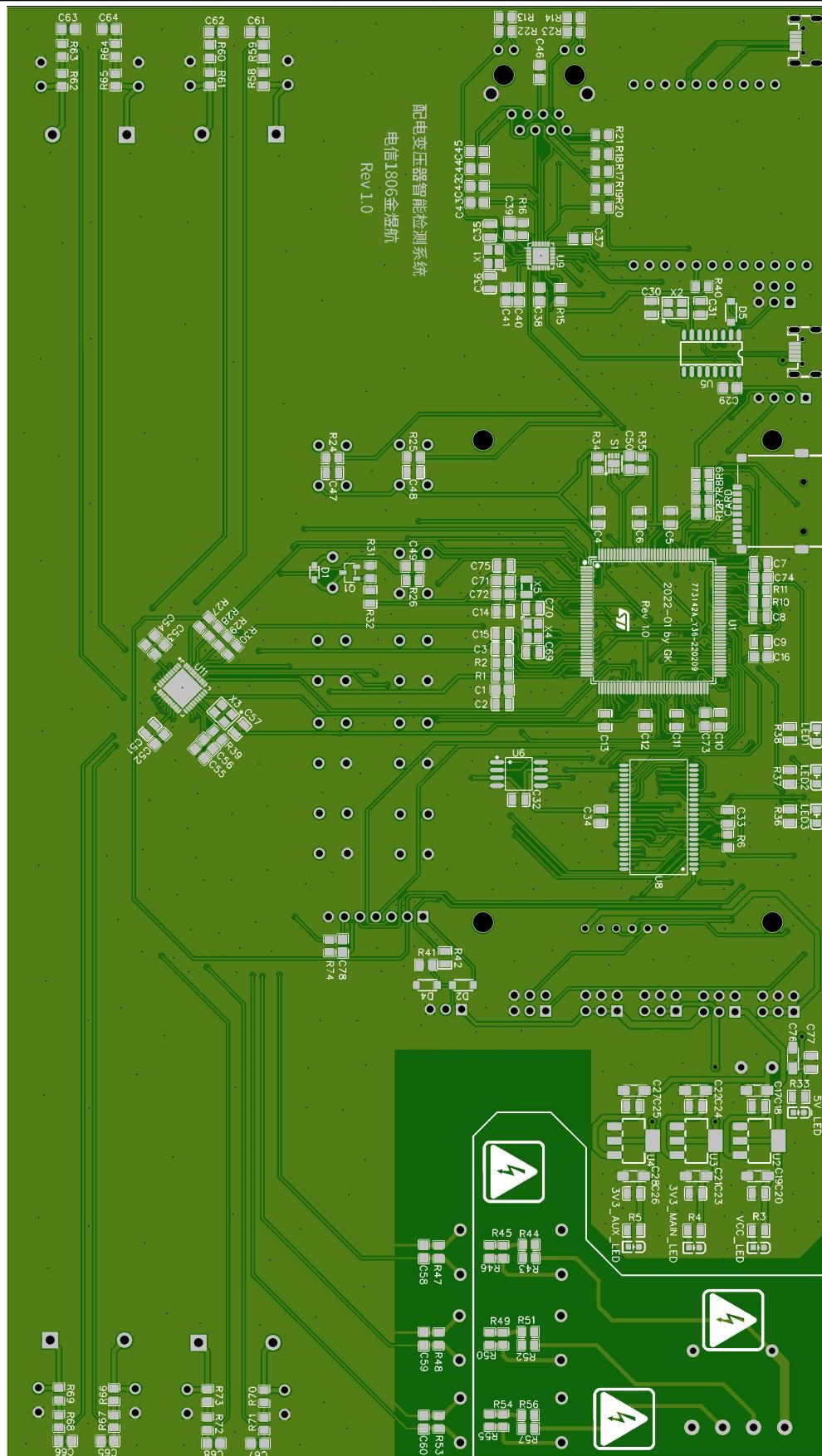


图 B1 印刷电路板 (PCB) 顶层示意图



致 谢

转眼之间，四年的大学生活即将告一段落。在完成毕业设计并撰写论文的这一段时间里，我也审视了自己的本科学习生涯。这是一段充满拼搏与激情的岁月，也是一个自我蜕变的过程。

我要首先感谢我的父母，感谢他们为我创造良好的学习条件，让我能安心和尽全力来完成学业。感谢他们无畏风雨，一直为我扛起生活的重担，为我创建避风的港湾。

我要特别感谢王克浩老师在这几个月的毕业设计过程中的指导和帮助，让我能够顺利完成毕业设计的制作和测试。没有王克浩老师对我进行了不厌其烦的指导和帮助，无私地为我进行论文的修改和改进，就没有我毕业论文的最终完成。

我要感谢在大学四年里无私教授我知识的所有任课老师，是他们讲解的理论和示范的实验让我具备了完成本次毕业设计所需的必要知识储备与实践能力。

我要感谢我的女朋友一直以来对我的支持、鼓励与陪伴。同样地，我要感谢我的舍友单海成、邹鑫、邓茗峰和张杰，他们在我大学四年的生活学习中给予了我莫大的帮助，同样也在本次毕业设计的完成和论文撰写过程中为我提供了重要的支持。

我要最后感谢本论文所引用的各位学者的专著，如果没有这些学者的研究成果的启发和帮助，我将无法完成本篇论文的最终写作，在此一并表示感谢。