

杭州电子科技大学

硕士学位论文

题 目： 智能低压分路监测系统的设计与实现

研 究 生 胡晓双

专 业 电子与通信工程

指导教师 陈科明 副教授

企业导师 曾佳

完成日期 2022 年 5 月

杭州电子科技大学硕士学位论文

智能低压分路监测系统的设计与实现

研 究 生： 胡晓双

指导教师： 陈科明 副教授

2022 年 5 月

**Dissertation Submitted to Hangzhou Dianzi University
for the Degree of Master**

Design and implementation of intelligent low-voltage Shunt monitoring System

Candidate: Hu Xiao shuang

Supervisor: Associate Prof. Chen Keming

May, 2022

杭州电子科技大学

学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名：胡晓双

日期：2022 年 05 月 31 日

学位论文使用授权说明

本人完全了解杭州电子科技大学关于保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属杭州电子科技大学。本人保证毕业离校后，发表论文或使用论文工作成果时署单位名称仍然为杭州电子科技大学。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅和借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。（保密论文在解密后遵守此规定）

论文作者签名：胡晓双

日期：2022 年 05 月 31 日

指导教师签名：陈利明

日期：2022 年 05 月 31 日

摘 要

低压电网的运行状态对用户的用电安全和供电质量有着直接影响，需要对低压电网的电压、电流等参数进行实时监测。传统的监测设备只能对低压分支线路进行本地监测，无法将数据上传到云端，进行远程实时数据采集分析和存储，同时设备缺少对会产生重大危害的电力谐波进行有效分析。目前低压分路监测设备的参数校正系统自动化程度不高，实际操作过程中，需要大量人工参与、耗时长、效率低。

为了实现低压电网的智能监测，本文设计了一种基于物联网技术的低压分路监测系统，该系统实现了多个电能参数实时采集、数据存储、在线监测和故障报警等功能。设计了一款低压分路监测设备，通过罗氏线圈快速采集大交流电流数据，并对电力谐波进行基于复序列分裂基快速傅里叶变换的算法分析，将异常结果实时上报。设计了智能网关，通过 485 总线将多台低压分路监测设备进行连接将数据上报至云平台，电网运维监管人员可以实时监测多个分支线路的运行状态，及时接收到报警信息。

常用的基-2 FFT 的谐波分析算法，在单片机上实现时，运算量过大，并且运算精度有限。本文设计了基于复序列分裂基快速傅里叶变换的谐波分析算法，通过把电压和电流的采样序列组建成复序列，将分裂基 FFT 算法同复数运算结合起来，仅需一次复序列 FFT 运算就可以获取各次谐波值，该算法相较于基-2 FFT 算法，减少了乘法和加法的运算次数。并在谐波分析算法过程中采用了减少频谱混叠、减少频谱泄露、避免栅栏效应等改进措施，来减少运算精度的下降，实验结果表明，相较于基-2 FFT 算法运算精度提高了 3.1%，达到预期设计要求。

智能低压分路监测设备在出厂前，必须完成参数校正操作，实现高精度采集。传统校正方式存在耗时较长、校正步骤繁琐的问题。基于此设计了一款参数自动校正系统，该系统由智能低压分路监测设备、校正上位机、校正台体组成。结合网络通信技术、多线程处理机制、虚拟串口技术等实现对设备的批量校正功能，通过点击校正台体上的启动校正按键开启校正流程，由校正上位机控制校正流程，实现校正流程自动化，简化校正流程，可以在 40s 左右校正 12 台设备，平均单台校正时间缩短至 3.37s。

关键词：低压电网、在线监测、物联网、谐波分析、自动校正

ABSTRACT

For the immediate impact on the safety of power consumption and quality of power supply by the running state of low-voltage power grid, it is necessary to monitor the voltage, current and other parameters of low-voltage power grid in real time. The traditional monitoring equipment which is lack of effective analysis of power harmonics that will cause great harm, can only monitor the low-voltage branch lines locally, but cannot upload the data to the cloud for remote real-time data acquisition, analysis and storage. At present, the automation degree of parameter correction system of low-voltage shunt monitoring equipment is not high, which requires a lot of manual participation, time-consuming and low efficiency in the actual operation process.

In order to realize the intelligent monitoring of low-voltage power grid, this paper designs a low-voltage shunt monitoring system which can realize the functions of real-time acquisition of multiple power parameters, data storage, on-line monitoring and fault alarm with the Internet of Things technology. Meanwhile, a low-voltage shunt monitoring equipment is designed to quickly collect large AC current data through Rogowski Coil, and analyze power harmonics based on complex sequence split-radix Fast Fourier transform algorithm, and report the abnormal results in real time. An intelligent gateway is designed to connect multiple low-voltage shunt monitoring devices through 485 bus and report the data to the cloud platform. The power grid operation and maintenance supervisor can monitor the operation status of multiple branch lines in real time and receive the alarm information in time.

When the commonly used harmonic analysis algorithm of radix-2 FFT is realized on single chip microcomputer, the amount of operation is too large and the operation accuracy is limited. An algorithm for harmonic analysis based on the split-radix Fast Fourier transform of complex sequence is designed in this paper. It is composed of voltage and current sampling sequences into complex sequences. In this algorithm, the split-radix FFT algorithm is combined with the complex number operation, and each harmonic value can be obtained only by one complex sequence FFT operation. Compared with the base-2 FFT algorithm, The Times of multiplication and addition are reduced. In the process of harmonic analysis algorithm, the improvement measures such as reducing spectrum aliasing, reducing spectrum leakage and avoiding fence effect are adopted to reduce the decline of operation accuracy. The experimental results show that the operation accuracy is improved by 3.1% compared with base-2 FFT algorithm, which meets the expected design requirements.

Before leaving the factory, the parameter correction operation of the intelligent low-voltage shunt monitoring equipment must be completed to achieve high-precision acquisition. The traditional correction method has the problems of long time-consuming and cumbersome correction steps. Based on this, an automatic parameter correction system is designed, which is composed of intelligent low-voltage shunt monitoring equipment, correction upper computer and correction machine body. Combined with network communication technology, multithreading processing mechanism and virtual serial port technology to realize batch correction function of the equipment. The correction process is started by clicking the start correction button on the correction machine body. The correction process is controlled by the correction upper computer to realize the automation of the correction process and simplify the correction process. 12 sets of equipment can be corrected in about 40s, and the average correction time of a single equipment is shortened to 3.37s.

Keywords: Low-voltage power grid, Online monitoring, Internet of Things, Harmonic analysis, Automatic correction

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
目 录.....	IV
第一章 绪 论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 低压分路监测技术分析.....	1
1.2.1 国内外研究现状.....	1
1.2.2 低压分路监测原理.....	3
1.3 电力谐波分析技术研究.....	4
1.3.1 电力谐波产生的原因.....	4
1.3.2 电力谐波的危害.....	5
1.3.3 电力谐波分析技术概述.....	6
1.4 电能参数校正技术研究现状.....	7
1.5 本文主要研究的内容及章节安排.....	8
第二章 基于物联网技术的智能低压分路监测系统设计.....	10
2.1 系统总体设计.....	10
2.1.1 需求分析.....	10
2.1.2 系统总体框架设计.....	11
2.2 智能低压分路监测设备设计.....	12
2.2.1 智能低压分路监测设备硬件设计.....	12
2.2.3 智能低压分路监测设备软件设计.....	15
2.3 Cat.1 智能网关设计.....	18
2.3.1 Cat.1 智能网关硬件设计.....	18
2.3.2 Cat.1 智能网关软件设计.....	18
2.4 监测终端软件设计.....	23
2.4.1 云平台设计.....	23
2.4.2 前端设计.....	24
2.5 应用上位机软件设计.....	25
2.5.1 配置上位机设计.....	25
2.5.2 量产上位机设计.....	27

2.6 系统总体展示.....	27
2.7 本章小节.....	31
第三章 基于复序列分裂基快速傅里叶变换的谐波分析算法.....	32
3.1 传统基于傅里叶变换的谐波分析算法方案分析.....	32
3.1.1 谐波分析原理.....	32
3.1.2 方案局限性分析.....	34
3.1.3 FFT 算法对比与选择.....	35
3.2 基于复序列的 SRFFT 改进算法设计与实现.....	37
3.2.1 复序列 SRFFT 算法设计.....	37
3.2.2 误差因素及改进措施.....	40
3.2.3 复序列 SRFFT 算法实现.....	42
3.3 谐波分析功能测试.....	45
3.4 本章小节.....	49
第四章 智能低压分路监测设备的自动校正系统设计.....	50
4.1 传统电能参数校正方案分析.....	50
4.2 需求分析和改进方案设计.....	51
4.2.1 需求分析.....	51
4.2.2 改进方案设计.....	51
4.2.3 自动校正系统关键技术分析.....	52
4.3 自动校正系统设计与实现.....	54
4.3.1 自动校正系统框架设计.....	54
4.3.2 自动校正系统通信协议设计.....	55
4.3.3 校正上位机设计.....	57
4.3.4 自动校正系统软件设计.....	60
4.3.5 自动校正系统实物展示.....	63
4.4 自动校正系统功能测试.....	66
4.4.1 系统功能测试.....	66
4.4.2 测试数据展示与分析.....	67
4.5 本章小结.....	73
第五章 总结与展望.....	74
5.1 总结.....	74
5.2 展望.....	75
致谢.....	76
参考文献.....	77

附录.....81

第一章 绪 论

1.1 研究背景与意义

随着生活水平的日益提高，人们使用的用电设备也日益丰富多彩，配电网结构也日益复杂，用电用户密切关注着用电的安全性和供电的可靠性，同时也代表着对电力系统有了更高的标准和要求。为了能够稳定的向用电用户提供电力，必须保证配电网系统的安全稳定运行。

电力是推动经济发展的关键因素之一，配电网属于电力系统中关键一环，低压配电网系统位于配电网的末端，直接向用户供电，用户的用电安全和供电的质量受低压电网运行状态的直接影响^[1]。低压配电网的结构复杂，分支线路多，早期对低压配电网结构不合理的规划，导致低压电网的运行状态较差，存在很大的安全隐患^[2]。与智能化程度比较高的主网建设相比，低压配电网的智能化程度明显偏低，电网运检人员无法获取低压电网的实时运行状态，从而不方便对低压电网进行管理。传统配电网故障排查工作主要依靠人工定期实地的对电力系统进行检查和维修，工作效率较低，而且人工检修往往容易出现漏检、误检的情况，导致配电网故障频繁发生^[3]。低压配电网出现故障时，电网运检人员由于没有及时获取到报警信息，使得故障抢修处理效率较低，直接影响低压用户的用电体验，甚至威胁到用户的生命财产安全。

结合当代智能化技术手段，实时监测低压分路的运行状态信息，对保障低压配电网系统安全可靠运行有着重要意义。通过对低压配电网电力运行参数如电压、电流、谐波等的采集，可对电网的运行状态和电能质量进行分析。持续对低压分路进行监测，可以在线路故障或出现如欠压、过压等异常现象时，及时进行故障报警，有利于电网运检人员接到报警后及时赶往故障点处理故障问题。据统计，电气故障是造成火灾事故的主要原因^[4]。通过对低压线路运行状态的实时有效监测，可以根据对电力运行参数的分析，对电气设备进行故障预测，能够有效减少因电气故障而造成的火灾事故的发生^[5]。因此对低压分路的实时监测，对提升低压配电网系统的供电可靠性以及保障用户的用电体验有着重要意义。

1.2 低压分路监测技术分析

1.2.1 国内外研究现状

在对低压分路监测技术的国内外发展现状进行研究后发现，一些工业较为发达的国家如美国、瑞士等在低压分路监测技术方面有着较为先进的技术研究和实践。比如：由美国福禄克公司研制的 Fluke43 设备，是一种手持式的电能质量分析仪器，与其相配套的还有 PQSecure

系统，其实物图如图 1.1 所示；由瑞士的莱姆公司所设计 PQFIX 仪器，是一款对低压电网进行在线监测的固定式电能质量监测仪^[6]，其实物图如图 1.2 所示；还有包括日本日置公司设计研发的用来对低压电网电能质量进行在线监测的 3193 系列；此外还包括由法国 CA 公司研制的 CA833X 系列^[7]等。

由于国外对低压分路监测技术方面有着较为深入的研究，因此所研发的设备性能较为优越，主要用于测量分析电网中电压/电流的基波有效值、有功/无功功率、谐波等，但这类监测仪都有着同样的缺点，那就是存储空间有限，不能对线路进行长期持续在线监测，同时价格也较为昂贵。



图 1.1 Fluke43 电能质量分析仪



图 1.2 PQFIX 电能质量分析仪

我国由于较为重视主网的建设和发展，长期以来疏于对低压电网的运维管理，使得低压分路监测技术发展缓慢。随着用电安全知识的推广，人们的用电安全意识日益提升，用电需求逐渐增多的同时，也对低压电网的有着愈加丰富的要求，低压电网监测技术的研究势在必行。基于此，国内一些企业研发了很多在线监测设备并投入使用。例如：由深圳中电技术有限公司所设计的能够对电能质量进行监测的 PMC-580，该款设备具有较为优越的电能质量监控功能；由上海宝钢安大有限公司研发的便携式在线监测设备 PQ116，还有该公司研发的拥有较为完整的低压电网在线监测系统的 PQ132 系列^[8]；由深圳华清仪器仪表有限公司设计研发的综合型电能质量监测仪 ETCR5000；由南京钛能科技股份有限公司设计的 TDA-111 低压分路监测设备；由山东盛康电气有限公司设计研发的低压分路监测终端 SCPB-ILTU-S 等。图 1.3 为 PCM-580 的设备实物图，图 1.4 为 ETCR5000 的设备实物图。

在低压电网在线监测方面，我国目前所研发的设备基本是一些只能进行本地数据采集和显示的功能较为单一的设备，这些设备无法进行远程实时数据采集分析和存储，也无法实现数据共享与分析。在传统工业应用中，一般是在工业控制计算机的基础之上，现场采集电能数据并存储在计算机上，再利用其他软件对数据进行分析 and 处理^[9]。采用这种方案可以得到比较全面的数据，但是该方案不仅灵活性较差，且所需的硬件成本也比较高，不适合应用于长期持续性的在线监测。



图 1.3 PMC-580 电能质量分析仪



图 1.4 ETCR5000 的设备实物图

1.2.2 低压分路监测原理

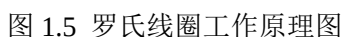
低压分路监测原理是通过一些技术手段将采集到的电能信号传送至计量芯片中，由计量芯片对其进行处理，主控芯片通过读取计量芯片的相应寄存器并对其进行简单处理即可得到相应电能参数的值，然后再根据软件设置参数阈值，从而对其工作状态进行判断和处理。

本次设计中需要测量的电能参数包括电压、电流、功率、谐波等，均是通过对电压/电流信号的测量得到，因此最重要的是实现对电压和电流信号的检测。本次设计中电压的测量量程为 0~220V，工作电流的测量量程为 0~720A，保护工作电流测量量程为 0~400A。电压信号可以采用电压互感器和电阻分压方式输入信号，而基于对生产成本的考虑，本次设计选用电阻分压采样方式对电压进行测量。三相电流信号可以采用电流传感器(Current Transformer, CT)或罗氏线圈等 di/dt 传感器输入信号^[10]。CT 和罗氏线圈的对比如表 1.1 所示。

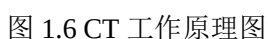
表 1.1 CT 和罗氏线圈比较

类别	CT	罗氏线圈
理论依据	法拉第电磁感应定律	电磁感应原理
结构	无铁芯线圈和积分器	闭合铁芯和绕组
输出信号	很小的电压信号	交流电流信号
过载能力	强（不饱和）	弱（易饱和）
频率范围	宽频	窄频
线性度	线性	非线性
抗干扰能力	较弱	强
反应能力	无磁滞效应（快）	有磁滞效应（慢）
安全性	高	低

罗氏线圈工作原理图如图 1.5 所示，包括线圈和放大积分电路两部分组成。一次侧导体垂直穿过线圈中心，当导体中流过变化的电流，导体周围会产生变化的磁场，由法拉第电磁



CT 工作原理图如图 1.6 所示。由闭合的铁芯和绕组组成，其原理是依据电磁感应原理将一次侧大电流转换成二次侧小电流^[12]。



罗氏线圈和普通电流互感器相比, 因为其没有铁芯, 因此不会出现铁芯饱和现象, 特别适合应用于测量大电流, 且反应速度快, 无二次开路危险^[13]。也正是因为没有铁芯, 所以罗氏线圈感应出的电压信号相较于 CT 而言十分微弱, 也很容易受到外界干扰, 因此对线圈的绕制工艺要求非常高^[14]。因此为了保证测量工作电流的准确性, 本次设计中采用 CT 传感器测量的电信号作为工作电流输入信号。当线路异常比如遭遇雷击时, 电路中保护电流可能会瞬间达到几千安培, 基于对电路安全性的考虑, 采用罗氏线圈来测量保护工作电流。

1.3 电力谐波分析技术研究

1.3.1 电力谐波产生的原因

因交流电网中有效分量是固定频率，所以将电压、电流中所有和其不一样的电压、电流分量叫做谐波^[15]。基波与三级谐波形成的两阶合成波形如图 1.7 所示，其中横坐标表示时间，单位毫秒，纵坐标表示幅度。

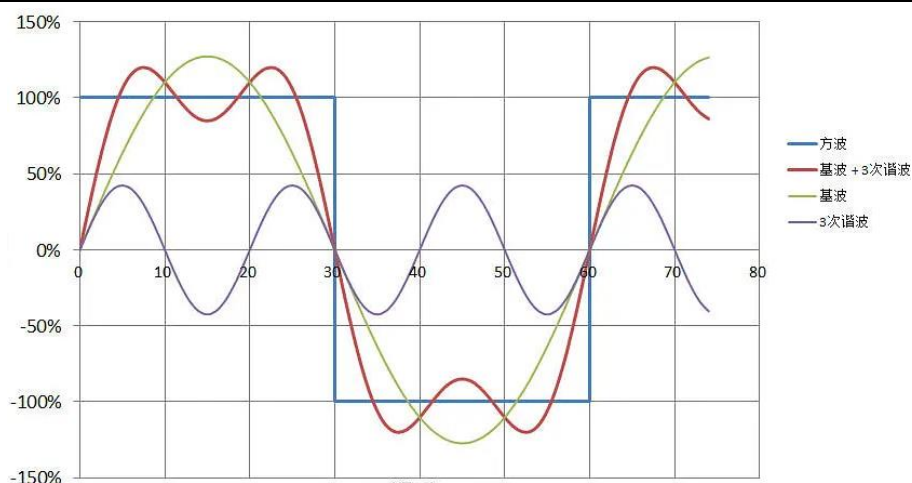


图 1.7 基波与三级谐波形成的两阶合成波形

产生电力谐波的原因主要包括下面几种:

(1) 发电源的质量差。因为现有生产工艺无法生产出完全对称的发电机三相绕组，同时也无法生产出完全均匀的铁芯以及一些别的因素，使得电源中产生谐波，不过通常含量较少^[16];

(2) 输配电系统产生谐波。电能在输送和配变过程中，电力变压器会产生谐波，其工作磁密会选择在磁化曲线近饱和段，导致磁化电流波形呈尖顶状，导致奇次谐波的产生，铁芯饱和程度越高，电流谐波越大^[17];

(3) 用电设备产生谐波。据统计，谐波大部分是由整流设备生成，约占总谐波的 40%^[18]。

1.3.2 电力谐波的危害

近二三十年来，大量的电力电子设备的使用严重污染了公用电网环境，由谐波引起的各种故障和安全事故频繁发生，电力谐波的危害也逐渐引起了人们的高度关注。电力谐波的存在给电网系统和用电用户带来了很大的安全隐患。电力谐波的危害主要有以下几个方面：

(1) 对设备造成附加损耗。输电线路的电阻会随着谐波频率增高以及趋肤效应而增加，会导致附件线损，当中性线中流经很多 3 次谐波时，将导致线温升高，增大了火灾发生的风险^[19];



图 1.8 设备老化图



图 1.9 变压器被击穿

(2) 对电力设备的正常运行产生不良影响。由谐波而产生的过电压、机械噪声以及机械振动，使变压器局部温度极高，造成设备过热，加速设备绝缘老化的速度，引起一定的铜损和铁损，缩短设备使用年限乃至造成设备损坏^[20]。如图 1.8 和 1.9 分别是由谐波造成设备老化和变压器被击穿，铜线损耗与谐波畸变率的关系如图 1.10 所示；

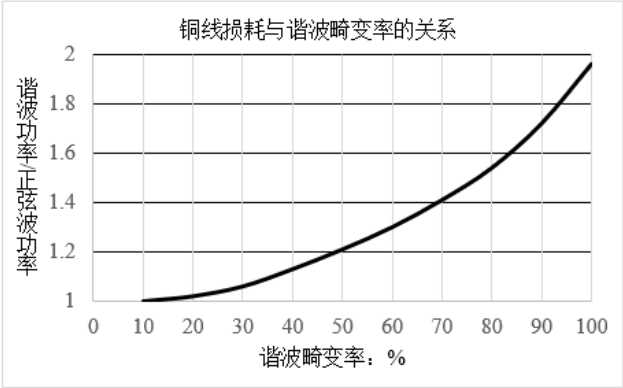


图 1.10 铜线损耗与谐波畸变率的关系

(3) 在公网局部产生串联谐动和并联振动，增大谐波程度^[21]。使得上述(1)和(2)的危害程度大幅度提高，甚至引起严重的安全事故；

(4) 造成自动装置和继电保护设备的错误操作，同时会对测量仪表的测量精度造成不良影响；

(5) 影响邻近通讯系统的通讯质量。当谐波频率与载频临近时，会对电力线载波通信和远动装置信号传输造成不良影响。

1.3.3 电力谐波分析技术概述

电网系统中大量非线性负载如电机、开关电源等的接入，产生了大量谐波。电力谐波的存在给电网系统带来了很多安全隐患，不仅对电网系统造成污染，还会对电力设备造成损害，同时还会影响供电质量，因此有必要对电网中的电力谐波进行分析。通过对电力谐波相关参数的分析，可以为电力系统出现故障和异常现象的分析、电能质量分析提供数据支撑。目前主流的几种电力谐波的分析方案如表 1.2 所示：

表 1.2 几种电力谐波分析方案比较

名称	简述	优点	缺点
基于瞬间无功功率理论的谐波分析	瞬间无功功率理论简称 P-Q 理论，该理论不再用平均功率来表示功率。其中，P 是瞬时实功率，Q 是瞬时虚功率。	测量原理简单；测量精度相对较高。	当谐波分析的对象是三相三线电路时，需要确保电压波形没有畸变，且绝对对称，否则测量结果不准确。

续表 1.2

名称	简称	优点	缺点
模拟滤波器法	构建模拟电路，该电路有着滤波器的功能，只允许有用信号通过。是最早的谐波分析方法。	硬件电路简易；Q 值高；成本低；操作较为简单。	使用频率单一；会出现电压漂移等现象；这些现象会降低测量精度。
小波变换谐波分析法	通过变换充分突出问题的某方面特征，是实现信号时频分析、处理的理想工具，属于一种新的方法。	突出某些特征；局部化分析；时频信号自适应；高分辨率；	计算方法较为复杂；延时性大；稳定性较差；较难应用于实际的谐波计算中。
基于傅里叶变换的谐波分析	最常用的分析方法。基波和各次谐波的幅值和相位是通过傅里叶分析将时域中的连续周期信号转换为频域中离散的频域分量序列方式得到的。	简单易实现和调用；算法效率高，可以同时监测到基波含量、总谐波含量以及各次谐波含量。	计算量太大；延时性大、导致实时性较差；存在混叠失真、频谱泄露、栅栏效应等现象，对测量精度影响较大。
基于神经网络理论的谐波分析	根据生物神经网络原理，建立人工神经网络模型，设计相应算法，在技术上实现该模型模拟人脑的某些智慧行为来解决实际问题 ^[22] 。	测量精度一般；延时较小；稳定性较强；可以同时监测基波含量和各次谐波含量。	应用起来比较困难；可行性较差。

综合对以上五种谐波分析方案的对比分析，可以看出，基于傅里叶变换(Fourier Transform, FT)的谐波分析方法虽然测量精度较低，但是简单易实现。虽然可能会出现混叠失真等现象，但是可以通过插值加窗、末尾补零等处理提高其可用性。因此，在本次谐波分析功能设计中选用的是基于傅里叶变换的谐波分析方法。

1.4 电能参数校正技术研究现状

低压分路监测设备能够实现对多个电能参数的精确测量是对低压分路监测设备的基本要求。而因为现在技术上的不足，导致不同厂家以及不同批次所生产的元器件在参数上可能会有一些误差，最终使得采用这些元器件所生产的设备在出厂时的电压、电流等参数上产生测量误差，使得设备自身的测量精度无法满足实际的客户需求。考虑到厂家在进行设备量产时，需要在设备出厂前为设备进行校正操作，以避免测量误差，实现高精度采集。为了减少参数测量的误差，同时提高设备的校正效率，需要对现有的电力仪表设备的电能参数测量误差校正方法进行研究，并提出准确快速的校准方法。



图 1.11 校正台实物图

早期国内的单相电子式电表一般使用 ADE7755 芯片，依赖于人工实现参数校正，工人大多通过调节芯片电压回路的电阻矩阵来达到调节误差的目的^[23]。根据公式 $P=U \cdot I$ ，工人通过电烙铁短路电阻从而调整进入 ADE7755 芯片电压检测回路中的电压，以此达到调整误差的效果^[24]。工人通常都是在校正台上完成校正操作，一般校正台能够同时连接多个单相电表，由负责校正的工人将待校正的电表安装在校正台上，给校正台提供电源，工人需要一边使用电烙铁调节误差，一边观察各个电表的误差显示，一般校正一台电表需要反复调整三次，平均调整时间约为 40s。显然，这种校正方法不仅工序繁琐、校正效率低，且校正效果极易受到校正工人的主观影响，导致同一批设备校正后的设备精度一致性较差。工人进行手动校正的校验台如图 1.11 所示。

文献[25]针对这种校正方法的弊端，研制了一种电子式电表自动校正工具。其校正过程中不需要对芯片的外部电阻做调整，通过对芯片内部存储器进行编程来实现误差调整。将调整电表这种简单重复的劳动，用机器来代替，理想状况下，相较于原先的生产校正方式，校正效率提升了 80%，平均单台校正时间约为 8s，简化了校正流程，同时电表经过该校正工具校正后的精度一致性相对较好^[25]。但这种依靠自动校正工具的校正方法，在给电表设备校正时，需要给每一个待校表设备插入电源和通讯接口电路板，提高了生产成本。

通过上述对电能参数校正技术的研究，本文所设计的用于智能低压分路监测设备进行参数校正的自动校正系统，在实现设备批量校正操作时，参考了文献[25]的校正思想，并进一步提出了改进的校正方案。

1.5 本文主要研究的内容及章节安排

本文主要对智能低压分路监测系统进行设计，并对关键技术进行研究。设计一款智能低压分路监测设备，该设备可实现对 400V 低压分支线路的在线监测和故障指示。通过 Cat.1

网关实现物联网，将设备采集到的多种参数上传至 OneNET 云平台，电网运检工作人员可以在 Web 端查看低压分支线路的实时运行状态、电能参数信息等。电网中电力谐波的存在，对电网性能有不良影响，利用基于复序列分裂基的快速傅里叶算法完成谐波分析。设备出厂时需要进行出厂前的校正操作，实现高精度采集，结合设备的生产现状和生产厂家的需求，自主研发了一款参数自动校正系统。该参数自动校正系统能够同时对 12 台智能低压分路监测设备进行校正，使校正后设备采集精度达到预期标准。相较于传统校正方式，简化校正流程，保证设备采集精度的一致性，提高了校正效率，缩短校正所需时间，节约成本。

本文的内容安排如下：

第一章：绪论，首先介绍了智能低压分路监测系统的研究背景和意义，接着对低压分路检测技术进行分析，主要包括对国内外研究现状、数据采集方案以及低压分路监测原理进行分析。然后，对电力谐波产生的原因及危害进行研究，针对目前主流的几种谐波分析方案进行分析，并结合本系统的特点，选择基于傅里叶变换对谐波进行分析。最后对电能参数校正技术的研究现状进行分析。

第二章：对智能低压分路监测系统的详细设计，首先进行需求分析，指明本系统预实现的功能，然后对其整体进行框架设计。之后对系统中的各个部分进行详细介绍，包括智能低压分路监测设备、Cat1 智能网关的软硬件实现、实时监测终端软件设计与实现以及应用上位机软件设计，最后进行系统的整体展示。

第三章：基于复序列分裂基快速傅里叶变换的谐波分析算法设计，对传统基于傅里叶变换的谐波分析算法进行分析，包括谐波分析原理分析、方案局限性分析，对几种 FFT 算法并对比分析。并结合系统特点提出改进算法，然后对改进后的复序列 SRFFT 改进算法进行设计，并对谐波分析过程中可能出现的导致运算精度下降的误差因素提出相应的改进措施，来改善运算精度。继而通过软件设计实现谐波分析功能，最后对改进算法进行谐波分析功能测试，并根据测试数据进行分析。

第四章：智能低压分路监测设备的自动校正系统设计，首先对传统参数校正方式进行分析，接着进行需求分析并提出改进措施，结合系统特点，进行改进方案设计。对系统设计时应用的关键技术进行分析，包括虚拟串口技术和多线程处理机制。然后对自动校正系统进行总体设计与实现，包括自动校正系统框架设计、通信协议设计、校正上位机设计、自动校正系统软件设计，然后进行自动校正系统实物展示。最后对自动校正系统从校正效率和采集精度两方面进行功能测试，并根据测试数据进行分析。

第五章：总结与展望，对本文所设计的智能低压分路监测系统及其采用的关键技术进行总结，并对未来的智能低压分路监测系统的功能优化进行展望。

第二章 基于物联网技术的智能低压分路监测系统设计

针对现有低压电网对智能化的需求，就无法对分支线路进行远程数据采集分析和存储、无法对低压电网运行状态进行实时监测的问题，本文提出并设计了一种基于物联网技术的智能低压分路监测系统，可分为智能低压分路监测设备和可视化实时监测终端。智能低压分路监测设备对线路运行时的电力参数进行实时采集。通过串口与 Cat.1 智能网关建立连接，通过网关将设备采集到的实时运行参数和运行状态上传至基于 OneNET 云平台的可视化实时监测系统，电网运检人员能够通过该监测终端实时监测各个线路的运行状态，也可以在故障或异常后根据保存历史数据进行故障分析。在线路出现故障和异常时能够及时的发送报警信息，电网运检人员能够及时赶往故障点排除故障，使得供电的安全性和可靠性得到了保障，同时也将更高质量的供电服务提供给用户。

2.1 系统总体设计

2.1.1 需求分析

根据当前低压配电网监测技术和电子设备参数校正技术的不足，针对本文所设计的智能低压分路监测系统，提出以下几点需求：

(1) 改变传统人工定期实地考察低压配电网运行状态的方式，采用信息化手段，在低压配电网分支线路上实现线路运行状态的实时采集。改变事后处理模式，尽可能避免用电安全事故发生；

(2) 实现物联网，将监测设备采集到的相关线路运行参数信息上传至云平台，并将相关数据在前端页面加以显示，实现对低压配电网的实时监测；

(3) 开发配套的可视化软件监测系统，电网运检工作人员能够通过前端页面的数据显示，总览整个低压配电网的运行状态，实现对低压配电网的整体运行状态进行实时把控；

(4) 故障报警功能，当监测设备检测到线路处于异常运行状态时，能及时将运行状态信息上传至云平台，在可视化监测页面进行异常状态显示，可以通过短信告知运检工作人员，保证工作人员能够及时收到报警信息以便尽快排除故障，提高供电服务质量；

(5) 谐波分析功能，通过算法对电网中谐波进行分析，并将分析得到的谐波参数上报至云平台，在线路运行异常时，可协助进行故障分析；

(6) 参数自动校正功能，监测设备在出厂前需要经过参数校正，提高采集精度，降低误差，改变传统人工手动进行参数校正的方式，设计配套的参数自动校正系统，简化校正流程，提高校正效率，节约时间和人工成本，保证设备采集的准确性、稳定性和统一性。

2.1.2 系统总体框架设计

从整个系统的传输链路来看，可划分成三个层次分别为：数据采集层、数据传输层、数据应用层^[26]，系统总体框图如图 2.1 所示。

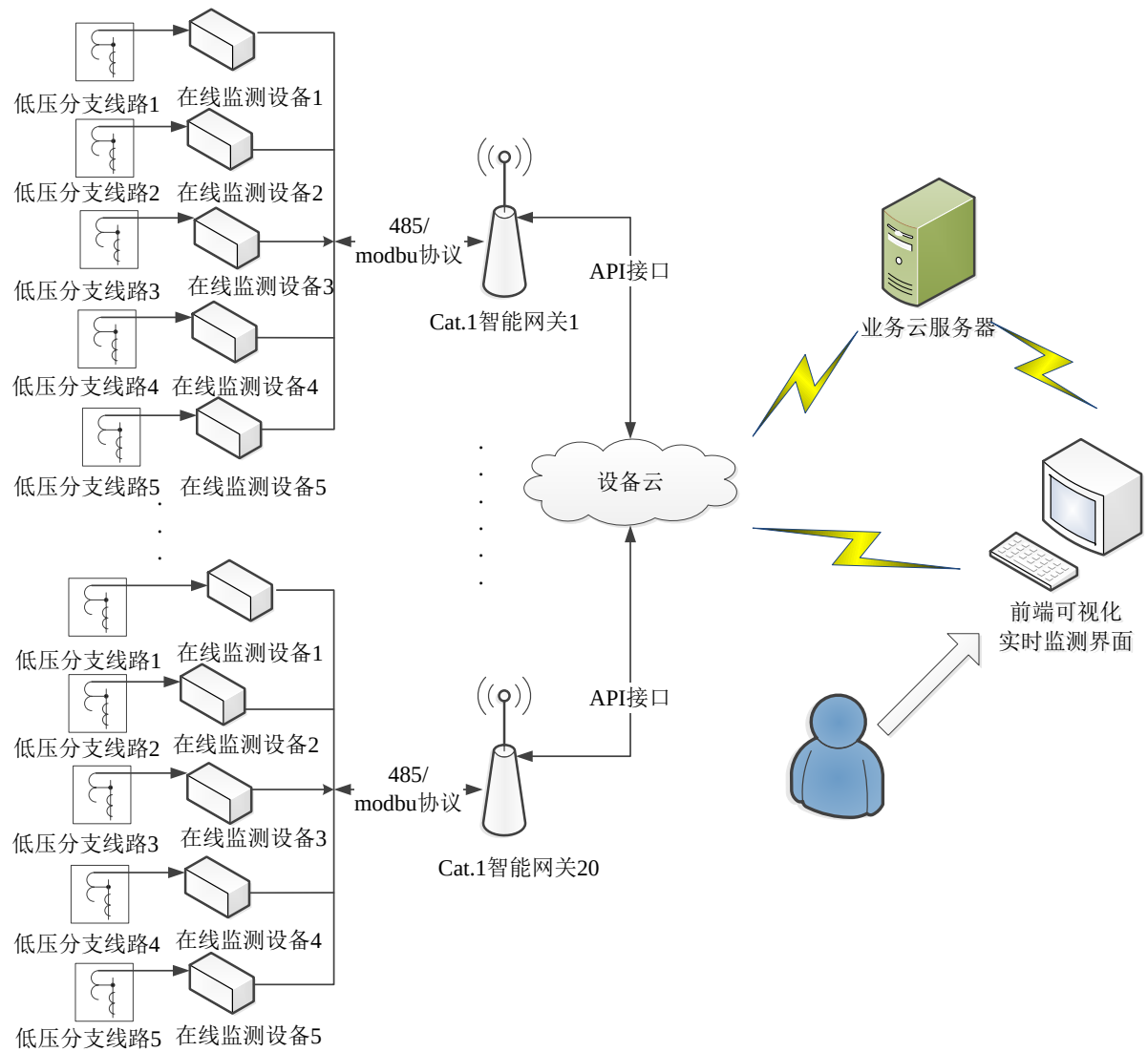


图 2.1 系统总体框图

数据采集层是物理最底层,主要由安装在各低压分支线路上的低压分路在线监测设备负责完成实时数据采集工作，如线路实时电压、电流、功率、电力谐波、环境温度、运行状态等信息。

数据传输层属于中间层，用于将监测设备采集到的实时数据通过 Cat.1 智能网关上传至 OneNET 云平台，Cat.1 网关通过 485 串口与低压分路监测设备建立连接，基于 Modbus 协议进行数据传输，在 OneNET 云平台上进行数据汇总，实现监控设备的统一管理。

数据应用层处于最顶层，主要由 OnetNET 云平台和前端可视化实时监测界面构成，OneNET 云平台与下挂设备之间的数据交互以网关为传输媒介，云平台解析并存储由网关上

传的信息。Web 端可以调用平台所提供的 API 接口函数来获取云平台保存的设备信息，并在前端页面进行展示。

2.2 智能低压分路监测设备设计

2.2.1 智能低压分路监测设备硬件设计

2.2.1.1 数据采集方案分析

对于本文所设计的智能低压分路监测系统而言，数据采集功能是最基础也是最重要的功能，因此选择一个合适的数据采集方案，对于整个系统而言至关重要。随着科技的不断进步，电力仪器不再局限于一种数据采集方案，可以结合不同的项目需求，选择合适的数据采集方案，目前针对电力仪器数据采集方案有以下几种：

(1) 单 MCU 采集方案：该方案是利用芯片把模拟信号转换成数字信号，再经移相和积分等步骤处理^[27]，该方案对芯片的时钟频率有着严格的要求，不能处理很多数据，同时采集精度较低，硬件电路复杂，设计实现困难；

(2) 单 SoC 计量芯片采集方案：该芯片需要具有串口、GPIO 口、采样等功能，数据采集由单独的 SoC 计量芯片经采集处理得到。该方案可以降低芯片使用量，大幅缩减研发工作量，降低研发难度，降低生产成本，但是该方案不适合应用于需要对大量数据进行处理的工作场景，只适用于功能比较单一的电力仪器^[28]；

(3) 单片机加计量芯片采集方案：计量芯片中有寄存器、时钟、仿真器、ADC 电路，其思路是由计量芯片将 ADC 采样电路获取到的外部电能模拟信号转变为数字信号，然后经过仿真器运算处理后写进内部寄存器^[29]。单片机与计量芯片可采用 SPI 接口、I2C 接口或者串口等方式实现连接，获取寄存器中保存的数值。采用该方案可以高效利用单片机程序空间，提高系统的稳定性。

结合上述分析及对本系统的实时性和稳定性的考量，本文所设计的智能低压分路监测设备采用单片机加计量芯片的采集方案，由计量芯片实现对电力运行参数的实时采集和处理，由主控芯片提供更多的资源用于设备的其他功能。采用该采集方案，简化了系统设计的复杂度，减少芯片负荷，同时系统稳定性也能得到提高。

2.2.1.2 监测设备硬件设计

智能低压分路监测设备的硬件采用模块化设计，智能低压分路监测设备的硬件设计框图如图 2.2 所示。

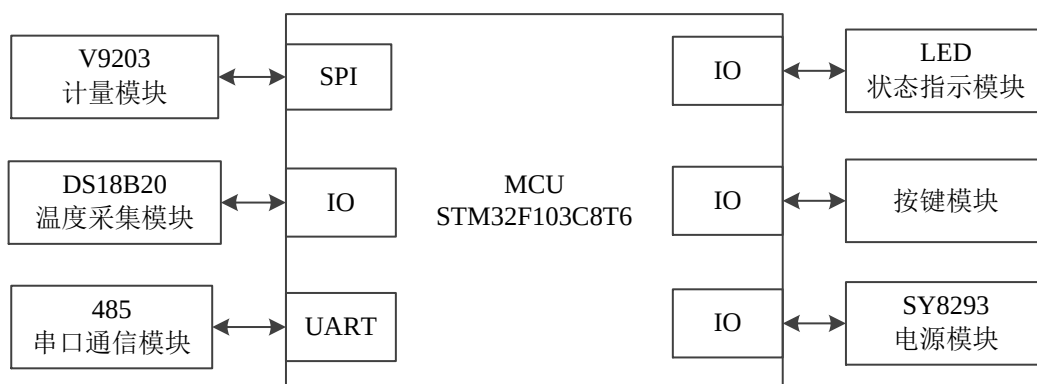


图 2.2 智能低压分路监测设备硬件框图

MCU 主控单元：MCU 是整个智能低压分路监测系统的核心，本系统选用的是 ST 公司生产的 STM32F103C8T6 芯片，该芯片具有性能稳定、功能强大、资源丰富、易于扩展等优势，具有 SPI 接口、UART 接口、DMA 控制器等^[30]。系统设计中，通过 UART 与 485 通信电路相连接，通过 SPI 接口与 V9203 计量模块相连接，实现数据交互。芯片的 OS_IN 和 OS_OUT 引脚外接 16MHz 晶振，再加上两个 12pF 的电容器构建外部时钟电路，为单片机提供外部时钟源。为了保证单片机上电复位后能够正常运行，芯片的 NRST 引脚外接一个 10K 的上拉电阻，接入高电平，并通过一个 100nF 滤波电容接地。为了保证单片机系统能够稳定运行，单片机的电源和地之间并联去耦电容，滤除电源的噪声干扰。

V9203 计量模块：计量模块是整个设备的核心单元模块，用于实现线路多种电能参数的实时采集和处理。该模块选取 V9203 作为计量芯片，该芯片具有测量量程宽、性能稳定、计量精度高等优势，支持三相三线和三相四线应用、软件校表、CT/di/dt 的电流输入模式、SPI 接口，提供多种工作模式，能够测量多种电能参数^[31]。芯片电压输入范围为 2.5V~3.6V，基准电压为 1.185V。开发者通过配置 V9203 内部的模拟控制寄存器来达到配置采样通道增益的目的，经放大后的输入信号接入计量芯片内部的二阶 Σ - Δ ADC。本文设计的智能低压分路监测设备应用于交流电工作场景，需要去掉输入信号中的直流分量，用分离出的交流分量来计算电量有效值。

计量模块的硬件电路图如图 2.3 所示，V9203 的 BGIO 管脚外接 1uF 的去耦电容，是芯片参考电压的接口。VDCIN 为掉电监测输入管脚，当该引脚上的输入电压高于 1.1V 时，表明当前系统供电正常，当该引脚上的输入电压低于 1.1V 时，说明当前系统发生了掉电。通过 MOSI 和 MISO 引脚与主控芯片 SPI 接口相连接，实现数据交互。芯片与 13.1072MHz 的外部晶体振荡器相连，为芯片工作提供时钟源，通过分频操作后，时钟源会生成三个时钟，包括 32768Hz 的 SoC 时钟、6.5536MHz 的电能量计时钟和 819.2kHz 的 ADC 时钟，分别用于芯片复位电路、电能计量电路、ADC 采样电路。

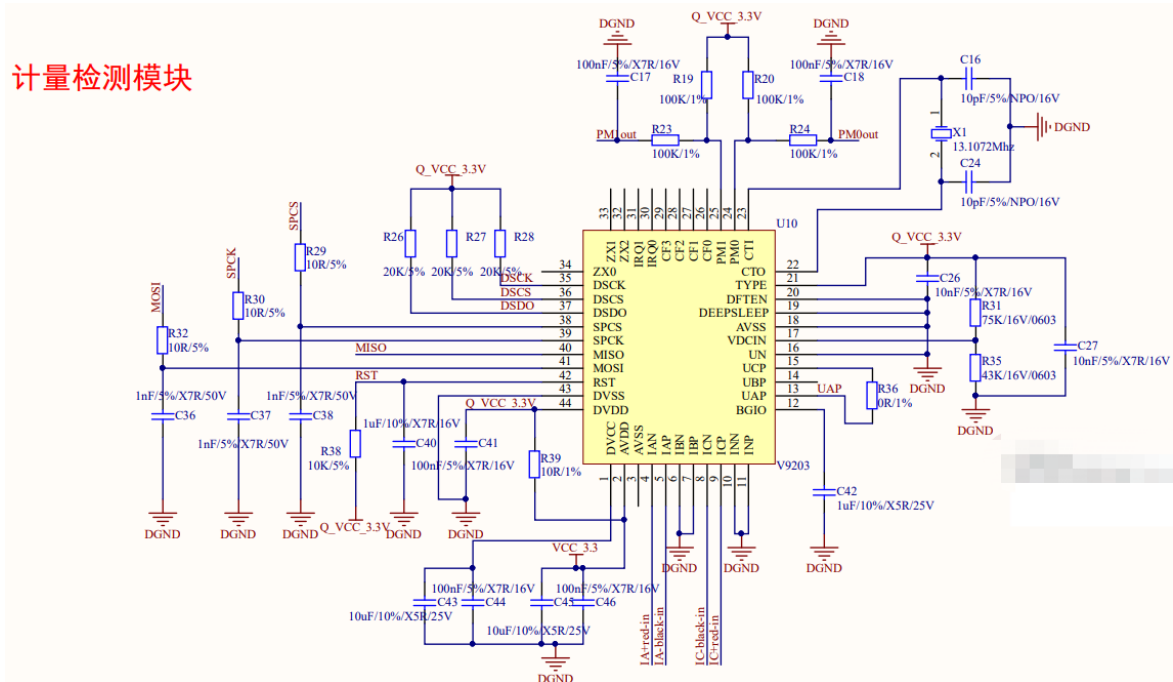


图 2.3 计量模块电路原理图

电流检测电路通过 CT 互感器或罗氏线圈将大电流耦合为二次侧小电流，小电流经过采样电阻后转变为交流小电压信号，再经过滤波电路后接入计量芯片各相电流采样通道输入端。采用 CT 互感器检测工作电流，采用双端完全差动输入方式，CT 互感器通过 IAN、IAP 电流通道接口将采集到的电信号输入计量芯片中，CT 检测工作电流的电路原理图如图 2.4 所示。采用罗氏线圈检测保护电流，罗氏线圈通过 ICN、ICP 电流通道接口将采集到的保护电流信号输入至计量芯片，接线方式与 CT 类似，罗氏线圈检测保护电流的电路原理图如图 2.5 所示。引脚 INN、INP 为零线电流的信号输入接口。

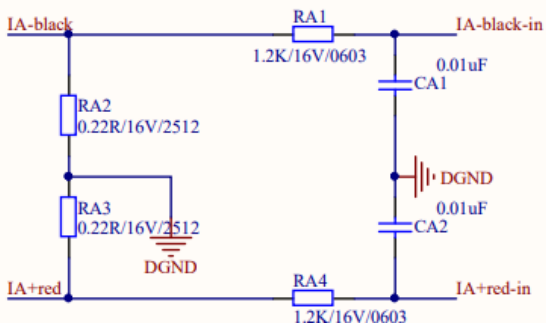


图 2.4 CT 检测工作电流电路原理图

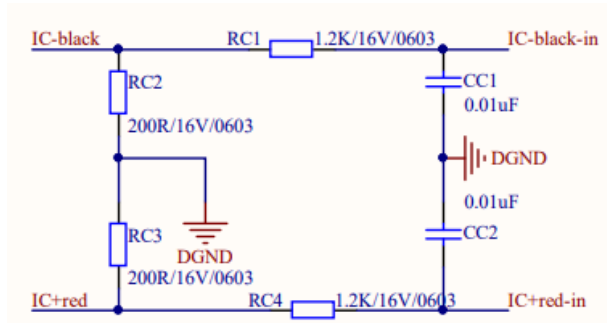


图 2.5 罗氏线圈检测保护电流电路原理图

采用电阻分压电路实现工作电压检测，采用伪差分输入方式。利用多个电阻串联的方式来提高电路的安全性，避免因为一个电阻短路而烧毁芯片。通过 UAP 电压通道 P 端输入接口将检测的电压信号输入计量芯片，引脚 UN 为三相电压信号 N 端输入接口，电阻分压电路原理图如图 2.6 所示。

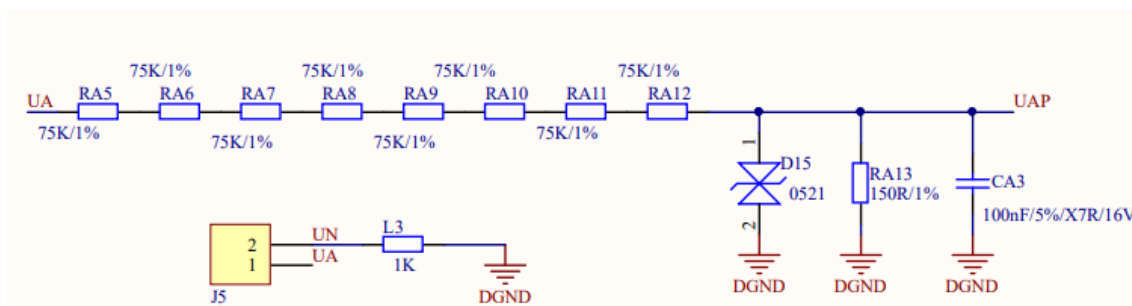


图 2.6 电阻分压电路原理图

LED 状态指示模块：用三个 LED 灯对设备工作状态进行指示，分别是电源指示灯、正常运行指示灯、故障指示灯。电源指示灯在设备通电后会被点亮，正常工作状态下，正常运行指示灯常亮，故障指示灯熄灭。设备进入配置状态后，正常运行指示灯按照 1Hz/s 的频率进行闪烁。当设备在检测到线路出现过压、欠压等异常状态或计量芯片自检失败无法正常运行时，进入故障状态，故障指示灯被点亮。其他情况表示系统中出现异常需要排查问题。

485 串口通信模块：该模块承担着监测设备与外部上位机和 Cat.1 智能网关通信的工作。电路中加入了光耦隔离器，起到电路隔离和信息高速传递的作用，提高电路的抗干扰性能，双向 TVS 管，起到保护芯片的作用。

温度采集模块：系统中选取 DS18B20 温度传感器作为测温芯片，用于实现对分支线路周围环境的温度进行测量，监测环境温度过高时可以此作为判断条件进行报警，预防电气火灾。

按键模块：主控芯片通过判断 IO 口电平状态，来判断按键是否被按下，从而切换设备状态。本文所设计的智能低压分路监测设备有四种运行状态，包括正常运行状态、配置状态、校正状态、故障状态。正常运行状态下进行正常的数据采集和上报的工作，当检测到设备故障和线路运行异常时切换到故障状态，通过短按按键实现设备重启工作。设备处于配置状态时结合自主研发的配置上位机，配置设备的采集参数，可以通过设备上电时长按按键的方式进入配置状态。设备处于校正状态时，结合校正台体装置和自主研发的校正上位机进行参数校正。

电源模块：为其他模块提供电源支持。24V 直流电源转 5V，向各种外设提供工作电源，如隔离芯片、485 接口等。5V 降压至 3.3V，向 MCU 和 V9203 计量芯片等提供工作电源。

2.2.3 智能低压分路监测设备软件设计

智能低压分路监测设备软件设计框图如图 2.7 所示。主要包括：Flash 数据处理、V9203 数据采集、串口数据处理、Modbus 协议规约、参数校正模块、按键状态处理、LED 状态处理。

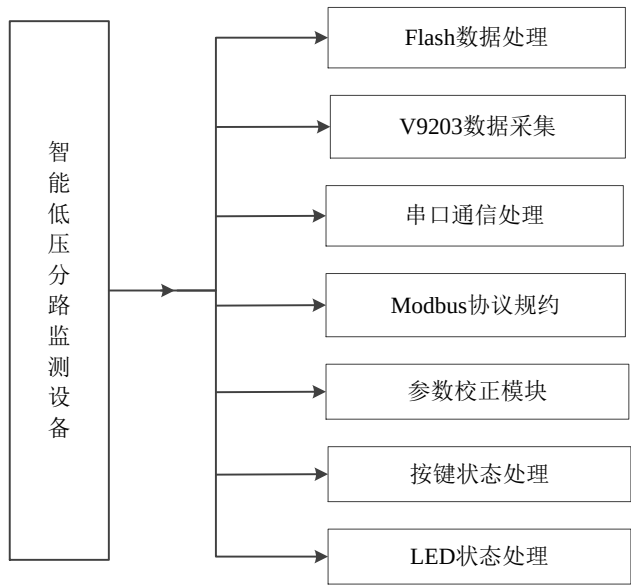


图 2.7 智能低压分路监测设备软件设计系统框图

具体的软件设计流程图如图 2.8 所示。设备上电后，先对硬件进行初始化操作，完成 SPI 通信接口参数配置，获取设备唯一的 UUID 作为设备的产品 ID，在设备入库时使用。在 V9203 芯片初始化后需完成自检工作，芯片自检的作用是测试 V9203 和 STM32F103C8T6 芯片能否正常通信。之后再对设备的工作状态进行判断，设备处于正常运行状态时，会定时进行 Flash 数据处理，每隔 1 分钟更新一次保存在 Flash 中的数据；循环的对按键和 LED 等状态进行判断，用于及时的完成设备的状态切换；不断的监测串口是否接收到数据，完成数据接收并将根据 Modbus 协议内容进行相应处理。

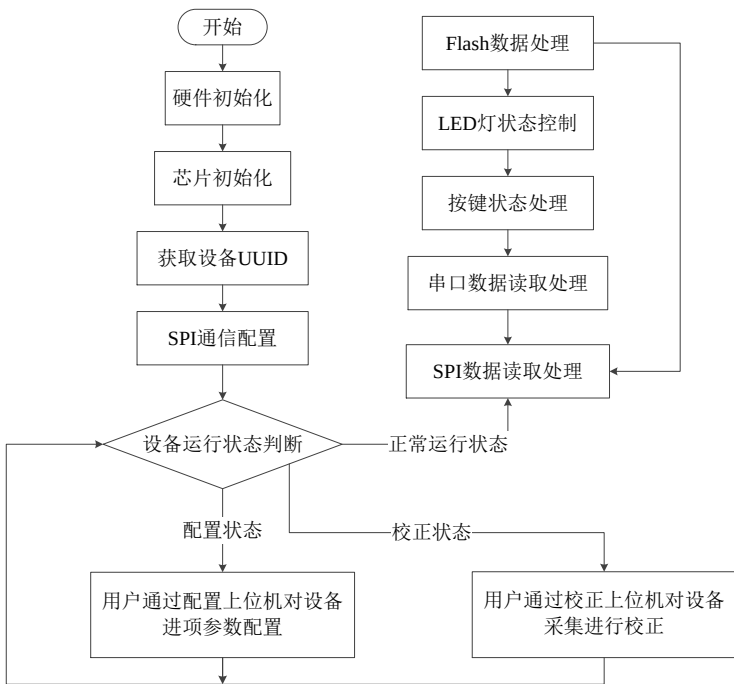


图 2.8 智能低压分路监测设备软件设计流程图

主控芯片通过 SPI 不断的读取 V9203 计量芯片采集到的多种电能数据，然后对采集到的数据进行处理。设备处于配置状态时，可以结合配置上位机对设备的版本信息、通信参数信息、采集参数信息进行配置。设备和配置上位机通过 485 总线建立连接，基于 Modbus 协议实现双向通信。设备有两种进入配置状态的方式，第一种是在设备上电时长按按键，通过检测按键的状态，当检测到按键被长按时，设备就会进入配置状态；第二种是通过配置上位机将设备的通信波特率配置为 4800Baud，重新上电后当检测到设备的波特率为 4800Baud 时，设备进入配置状态。设备处于校正状态时，可以结合自动校正系统对设备进行参数校正，设备通过检测校正标志位是否被置位来判断设备是否进入校正状态。当设备监测到被监测线路处于欠压、过压等异常状态或者计量芯片自检失败时，设备被置为故障状态。

设备与外部上位机及 Cat.1 网关都是通过串口建立连接，基于 Modbus 通讯协议实现双向通信的。Modbus 协议是一种串行通讯协议，采用异步“主-从”模式的半双工通讯方式^[32]。智能低压分路监测设备作为从设备，请求方作为主设备，从设备的地址和通讯配置可变，采用“一应一答”机制，由主设备发送数据帧来创建和断开通信链路，任何一次通讯都需要主设备主动发起请求。

Modbus 有 RTU 和 ASCII 两种协议格式，本次设计时使用的是 RTU 格式，其帧格式如表 2.1 所示。其中，地址域也就是从设备地址，占 1 个字节，功能码用于区分设备特定行为，占 1 个字节，数值范围在 1~255 之间，如功能码 0x02 表示读取一个或者多个离散量状态。数据域的内容会根据功能码的不同而有所差异，最多占 252 个字节。差错校验码为 CRC 作为差错校验码，占 2 个字节。

表 2.1 Modbus 协议帧格式

地址域	功能码	数据域	差错校验码
1 字节	1 字节	1-252 字节	2 字节

智能低压分路监测设备的的相关数据保存在如表 2.2 所示的对应寄存器中，每个数据占 2 个字节的地址空间。

表 2.2 寄存器存放地址

寄存器类型	功能码	寄存器地址范围	所占字节数
输入状态寄存器	0x02	0000~0007	16
输入型寄存器	0x04	0000~0007 2000~2012	42
控制寄存器	0x05	0000~0007	16
配置参数寄存器	0x10	1000~1010	22

2.3 Cat.1 智能网关设计

2.3.1 Cat.1 智能网关硬件设计

Cat.1 智能网关的硬件设计框图如图 2.9 所示, Cat.1 智能网关采用 Air724UG 作为主控芯片, 该芯片已经集成了 Cat.1 功能, 通过在 Air724UG 上面编程, 实现串口、GPIO 管脚的控制。主要包括 Air724UG、RS485 接口、LED 指示灯模块、按键。

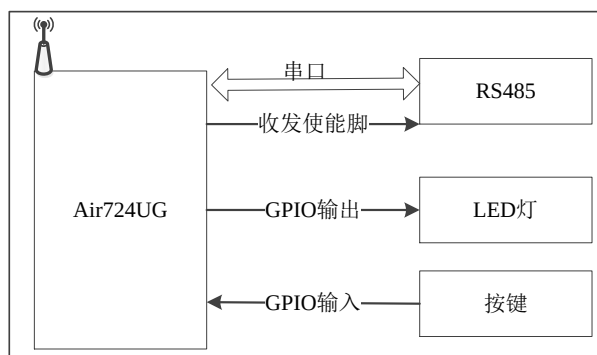


图 2.9 Cat.1 智能网关硬件设计框图

Air724UG: 是一款 4G LTE 模组, 内置了多种互联网通讯协议, 具有多种接口, 且能够实现多种设备驱动; 内置移动贴片 SIM 卡, 具有丰富的 IO 口、3 个 UART 接口、1 个 USB 接口、一个 SPI 接口等, 供电电压在 3.3V~4.3V 范围内^[33]。Air724UG 就是通过 UART 与 RS485 模块实现通信, 通过 IO 口对 LED 灯和按键电平实现控制。

RS485 接口: 网关通过该接口与下挂设备进行通信, 电路中加入了光耦隔离器, 起到电路隔离和信息高速传递的作用, 提高电路的抗干扰性能。自恢复保险丝, 在瞬时电流过大时呈高阻抗, 对芯片起保护作用。

LED 指示灯模块: 该模块用 3 个 LED 灯对网关运行状态进行指示, 分别是电源指示灯、系统指示灯、联网状态指示灯。电源指示灯会在网关上电后被点亮, 正常运行时系统指示灯闪烁。网关通电后会主动进行联网操作, 联网过程中, 联网状态指示灯闪烁, 当其由闪烁转为常亮时, 表示联网成功。

按键: 用于进行网关的重启复位操作。

2.3.2 Cat.1 智能网关软件设计

Cat.1 智能网关软件设计框图如图 2.10 所示, 主要包括 Cat.1 模块初始化配置、网关信息注册、文件系统管理、串口数据处理、OneNET 数据处理、Cat.1 数据通信、点表信息链表处理。

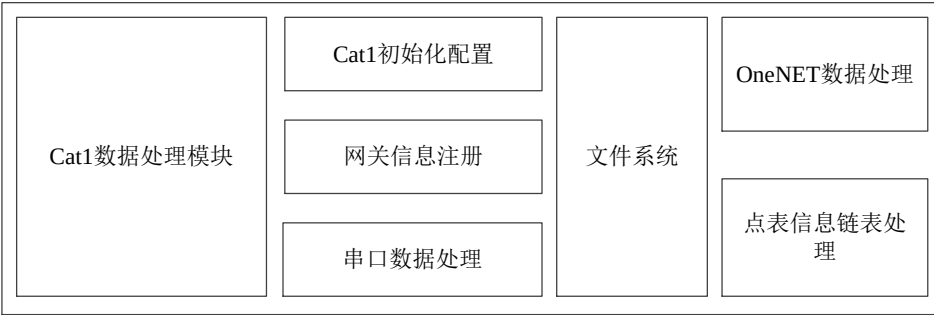


图 2.10 Cat.1 智能网关软件设计框图

Cat.1 模块初始化配置：对 Cat.1 网关进行初始化配置，初始化配置功能开启的前提条件是 Cat.1 模块处于未配置状态且功能正常。依次获取 SIM 卡卡号、网络注册状态、GPRS 网络与基站信息、信号强度等，激活 PDP 并查询上下文状态，完成 Cat.1 模块初始化。Cat.1 模块初始化配置流程图如图 2.11 所示。

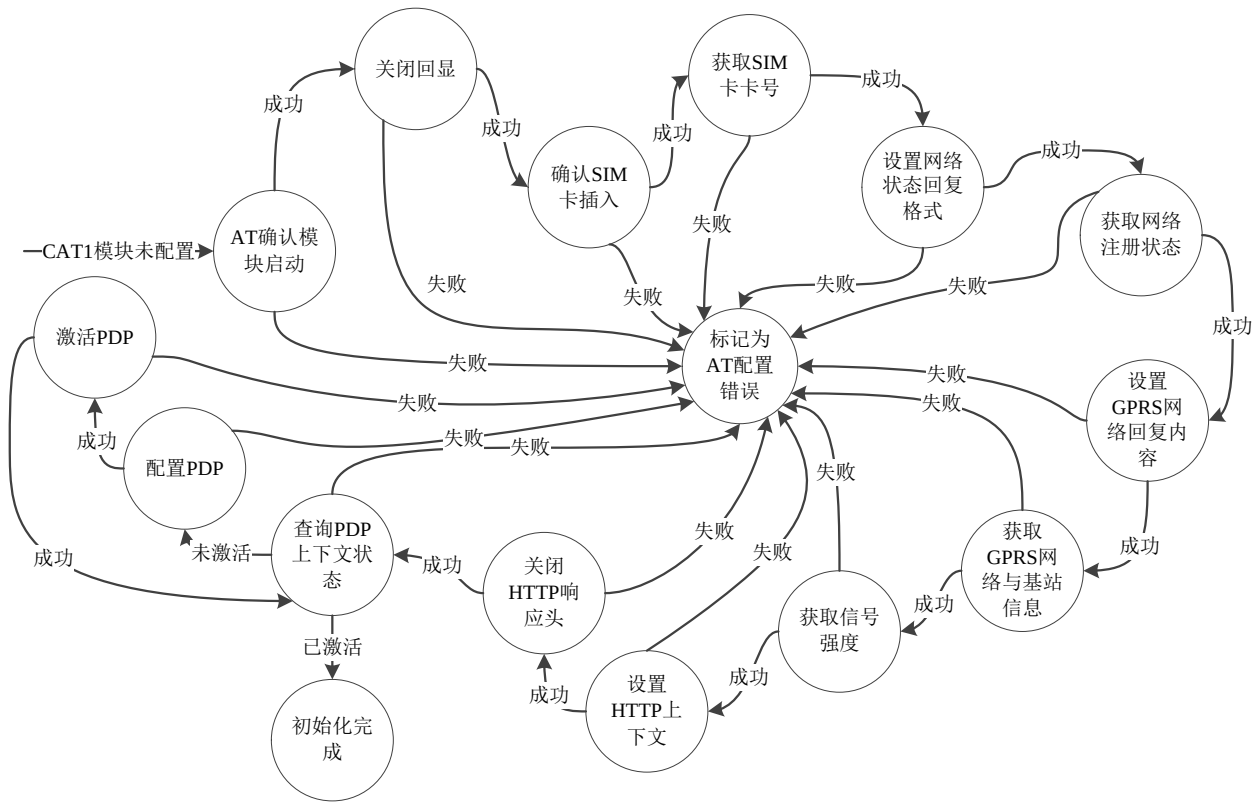


图 2.11 Cat.1 模块初始化配置流程图

网关信息注册：网关进行注册会先向 OneNET 平台发送 URL 完成设备注册，然后会向平台发送网关设备入库 URL，再将 OneNET 返回的设备 ID，以及自身的 IMEI 码发送到第三方平台，进行设备入库。并将设备 ID 以及 APIkey 进行本地存储，完成网关设备信息注册。网关信息注册流程图如图 2.12 所示。

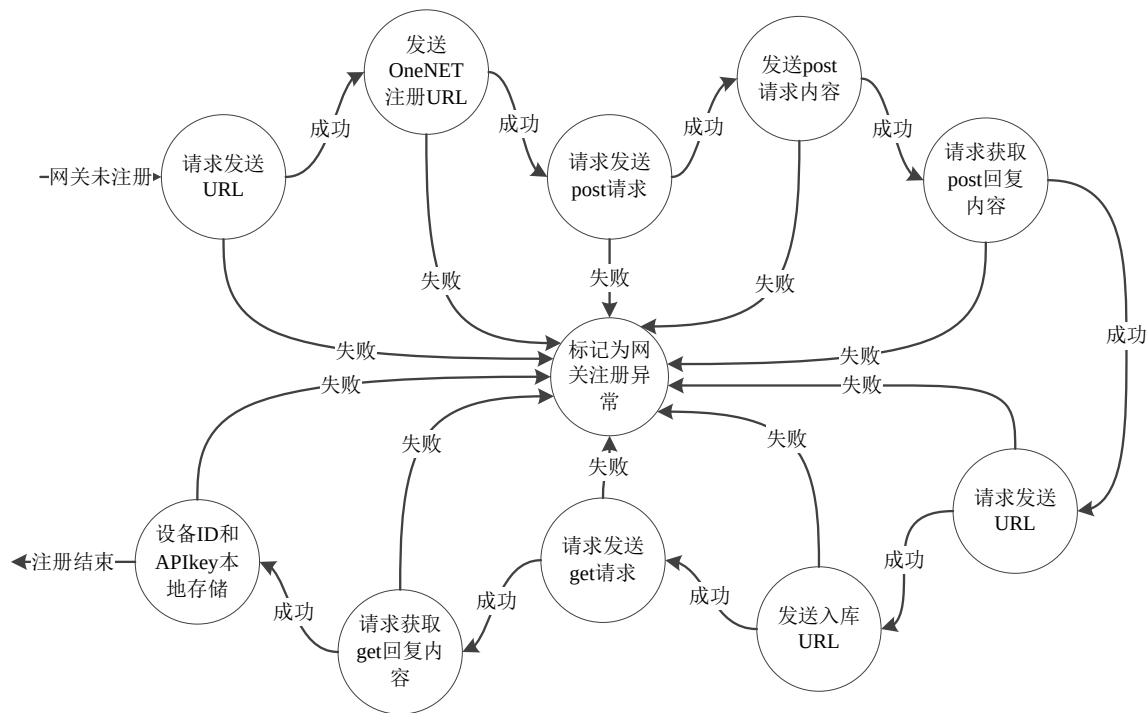


图 2.12 网关注册流程图

文件系统管理：通过文件系统管理，能够很方便的实现对存储数据的读写操作，主要存储的数据信息包括：网关升级包、下挂设备信息描述文件、下挂设备电表文件、OneNET 注册信息文件、离线缓存信息等。文件传输流程如图 2.13 所示。

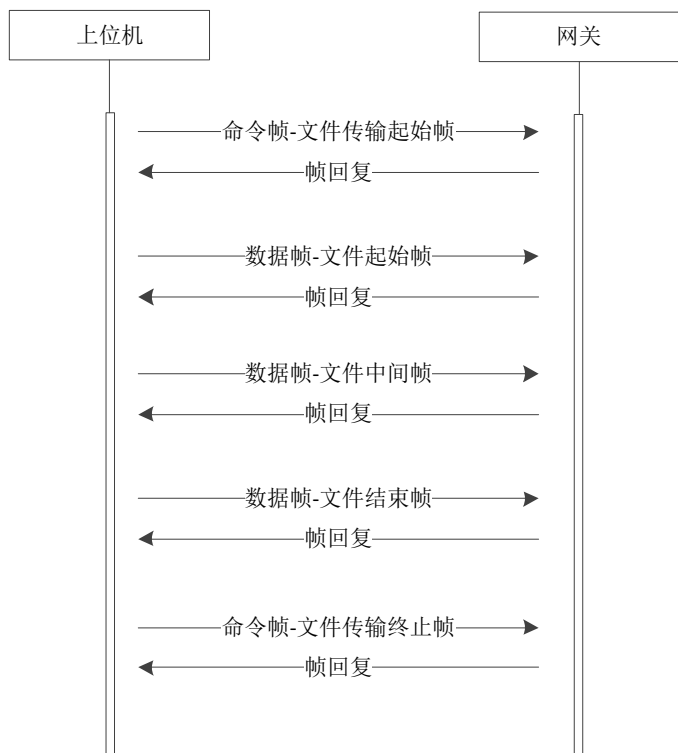


图 2.13 文件传输流程图

串口数据通信：通过 RS485 接口实现数据通信，主要涉及到 RS485 串口数据交互，当串口接收到数据时会把数据缓存至 RS485 串口接收队列中，当检测到 RS485 串口接收队列中有数据，就会根据帧协议对其进行数据解析。串口数据处理流程如图 2.14 所示。

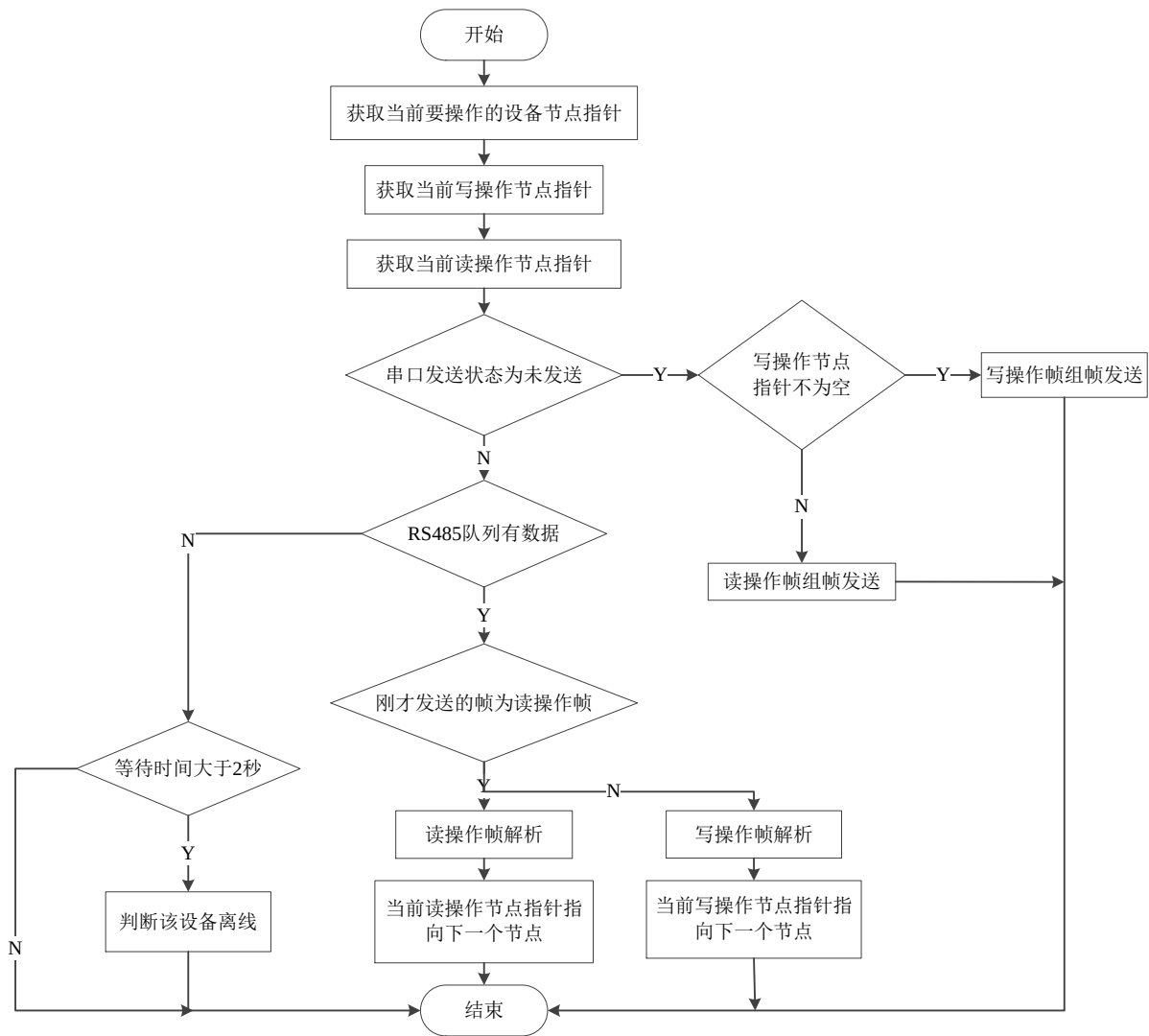


图 2.14 串口数据处理流程图

OneNET 数据处理：与 OneNET 通信的协议为 MQTT 协议，数据内容采用 JSON 格式数据。OneNET 数据处理功能框图如图 2.15 所示。

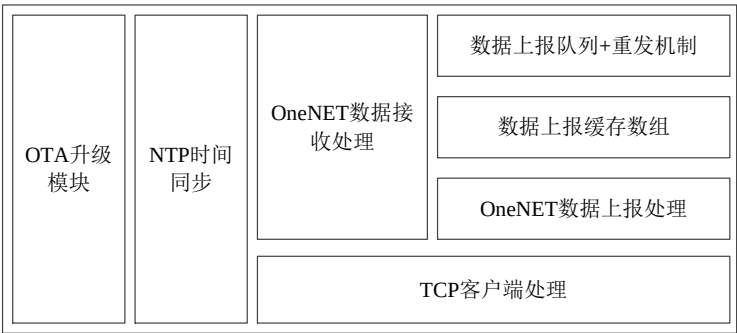


图 2.15 OneNET 数据处理功能框图

Cat.1 数据通信：该模块可分为外设数据交互、数据传输队列、应用模块。数据交互内容有初始化配置指令、HTTP 指令、TCP/IP 指令和文件读取指令。Cat.1 数据通信框架设计图如图 2.16 所示。

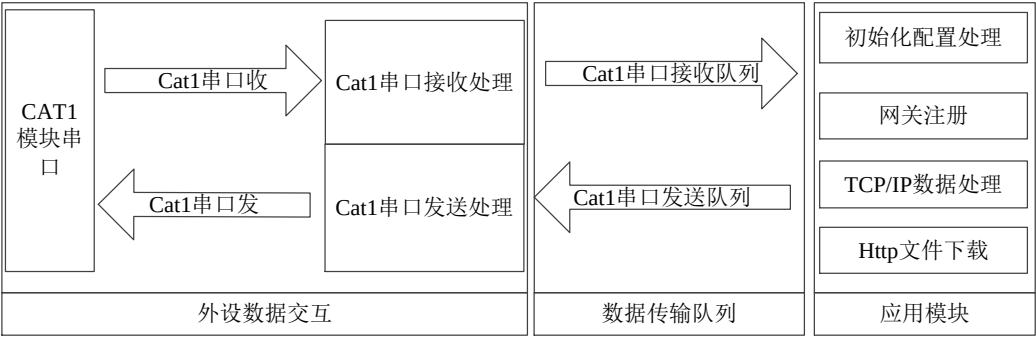


图 2.16 Cat.1 数据通信框架设计图

Cat.1 模块整体数据处理流程图如图 2.17 所示。

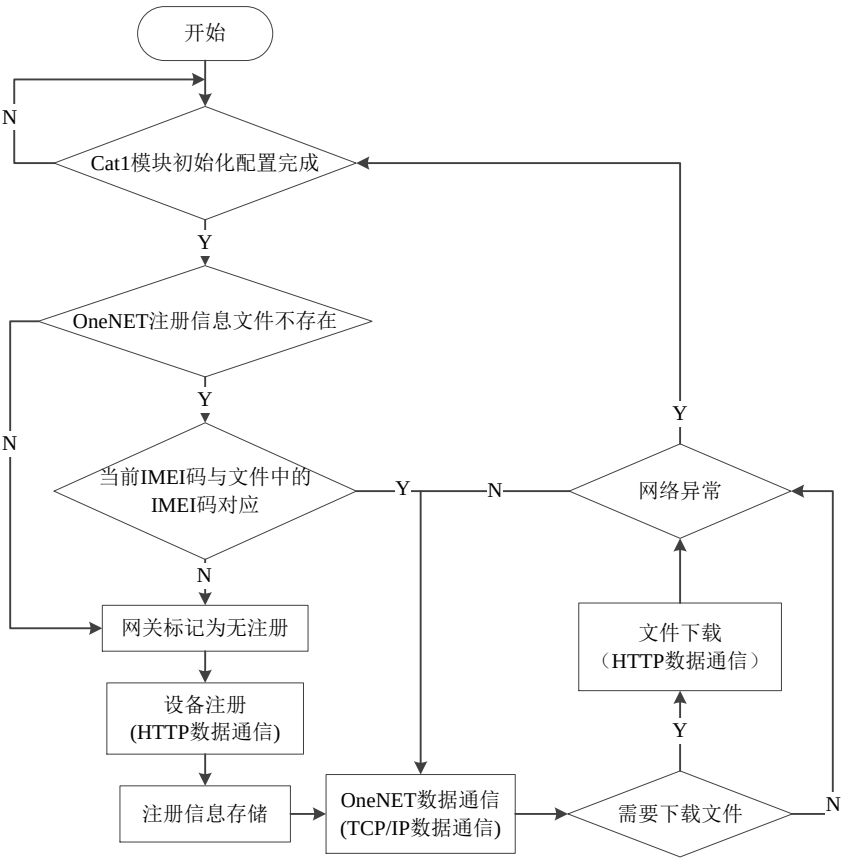


图 2.17 Cat.1 整体数据处理流程图

点表信息链表处理：为了便于数据处理，将设备信息、设备读监控点、设备写监控点分别存储在设备信息结构体、读操作监控点结构体、写操作监控点结构体中，对其进行链表化处理。下挂的每台设备都有一个设备信息节点与之对应，每个设备信息节点中会下挂读操作监控点链表和写操作监控点链表，分别用于存储当前读取的监控点信息和写操作监控点信息。点表信息结构体链表关系如图 2.18 所示。

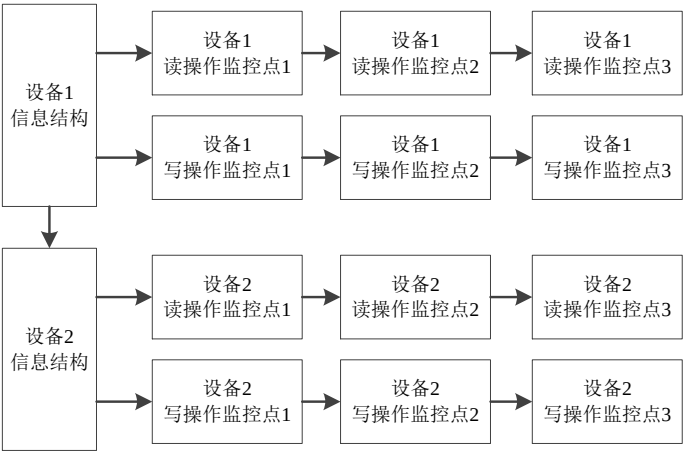


图 2.18 点表信息结构体链表关系图

2.4 监测终端软件设计

2.4.1 云平台设计

2.4.1.1 设备云

本次设计中选择 OneNET 云平台对设备信息进行存储和管理，设备和云平台依赖于网关进行数据交互，设备信息按照规定好的格式通过网关上传至云平台。Cat.1 网关通过 4G 联网方式与云平台建立连接，基于 MQTT 协议并将 JSON 格式的数据上传至云平台。开发人员可以通过调用云平台提供一些 API 接口进行设备注册、产品注册等，云平台展示图如图 2.19，云平台在线设备展示界面如图 2.20 所示。开发人员能够根据实际的项目需求，进行设备管理、数据查询等。

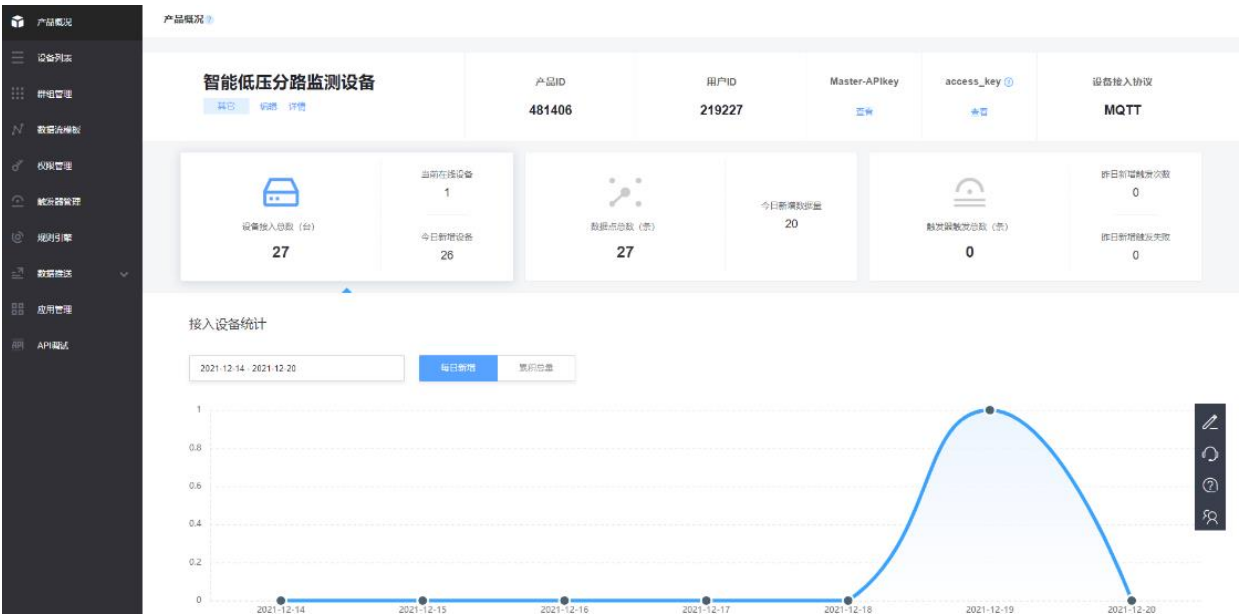


图 2.19 云平台展示图

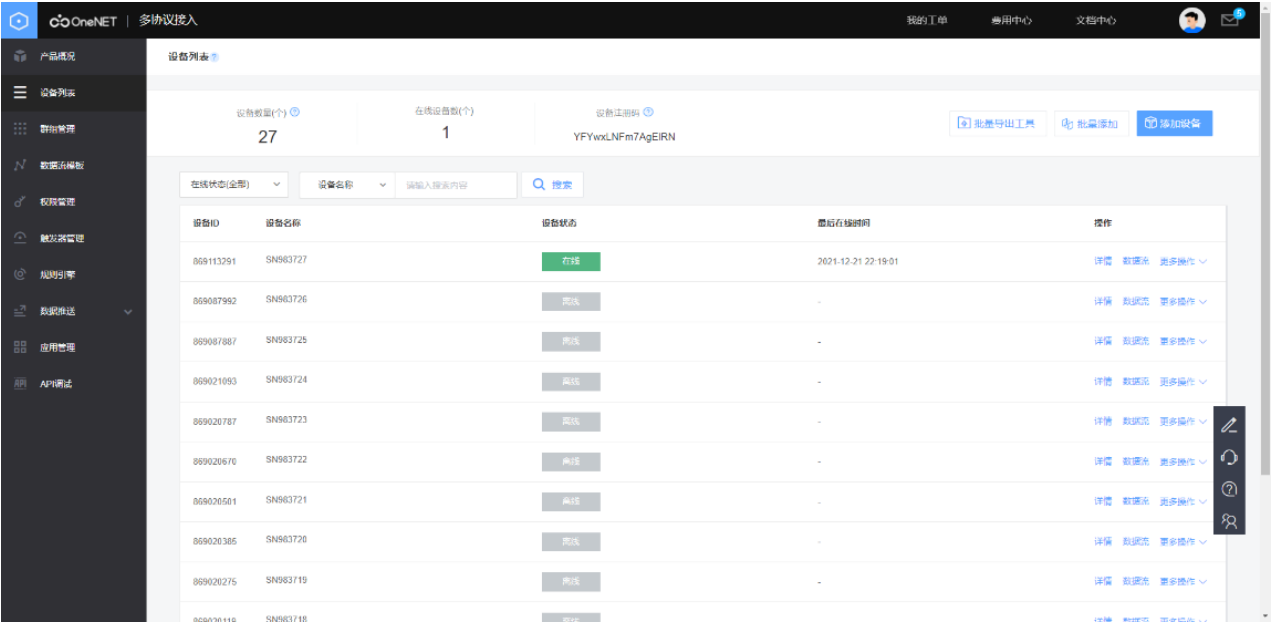


图 2.20 云平台在线设备展示图

2.4.1.2 业务云

业务云主要包括数据服务层、赋能层和存储层，同时支持客户端实现业务和存储支撑服务器集群^[34]。业务云设计逻辑如图 2.21 所示。



图 2.21 业务云设计逻辑

2.4.2 前端设计

前端页面用于展示低压分路监测设备采集到的实时数据，在出现故障和异常时进行消息推送，同时监测设备和网关的绑定也是在前端页面由用户操作的。管理员和用户给予不一样的操作权限，进行设备添加、删除等，具体如表 2.3 所示。

表 2.3 前端功能表

-----	----	拥有者	观察者
条目	内容	超级管理员	用户
网关管理	添加设备	✓	
	删除设备	✓	
	功能设置	✓	
智能低压监测设备管理	添加/删除设备	✓	
	添加/删除/修改监控点	✓	
	功能设置	✓	
报警记录	报警查询	✓	✓
	报警确认	✓	✓
	权限管理	✓	
	功能设置	✓	
历史数据	数据查询	✓	✓
	功能设置	✓	
基本设置	信息查询	✓	✓
	信息修改	✓	

2.5 应用上位机软件设计

在进行智能低压分路监测系统设计时，配套研发的用于配置设备参数的配置上位机、用于设备批量入库的量产上位机，上位机软件是在 Microsoft Visual Studio 2017 编程软件上基于 C#语言开发的。

2.5.1 配置上位机设计

应客户需求同时也便于设备在调试过程中查看相关数据信息，配套研发的配置上位机。智能低压分路监测设备通过 485 串口与配置上位机建立连接，在设备处于配置状态时与上位机基于 Modbus 协议进行通信。

配置上位机界面如图 2.22 所示，通过在配置上位机的通讯连接区选择相应的连接端口号和端口通信波特率后点击“连接”按键，即可与设备建立连接。正确建立连接后，配置上位机和设备可实现双向通讯，同时在通讯状态显示区，连接状态由未连接变为已连接，同时也会对上位机发送和接收的帧数量进行统计。配置上位机会在刚建立连接后主动发送设备信息读取帧，对设备的版本信息、通信参数信息、设备采集的多种电能数据信息进行读取，并分别显示在配置上位机的设备信息展示区、参数配置区、只读数据区。配置上位机会定时发送

数据读取帧，定时获取设备采集到的多种电能数据，并在只读数据区进行显示。当需要对下挂设备的通讯参数或者采集通道信息等进行重置时，在参数配置区选择范围内的配置值，点击“保存配置”按钮即可完成对设备的参数的配置。

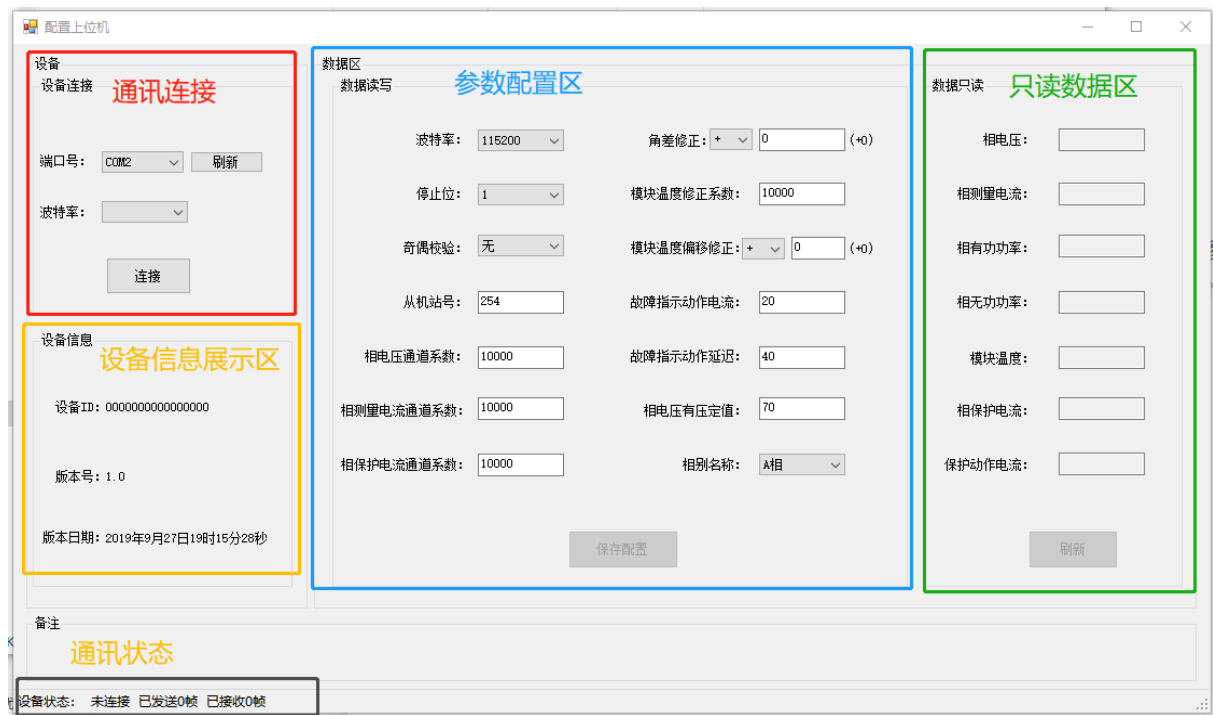


图 2.22 配置上位机页面展示图

通过配置上位机读取智能低压分路监测设备实时采集到的电力参数值的展示图如图 2.23 所示。



图 2.23 用配置上位机读取参数值

2.5.2 量产上位机设计

智能低压分路监测设备通过 485 串口与量产上位机建立连接，与上位机基于 Modbus 协议进行通信。量产上位机主要用于设备版本信息设置，并通过串口下载至设备，并将设备信息加入后台数据库，可通过对量产上位机界面相关控件的操作来完成对后台设备信息的增删改查操作。设备的版本信息包括：设备 ID，产品生产编号、版本号、版本日期。通过点击“获取最新 deviceId”，获取最新的设备 ID，也就是在已入库的最大的设备 ID 自增一，每一个设备的设备 ID 都是唯一的，由 16 个十六进制字符组成。产品生产编号由厂家自定义，由 12 个十进制字符组成。版本号分为主版本号和次版本号。版本日期由系统自动获取，精确到秒。



图 2.24 量产上位机页面展示图

如图 2.24 所示为量产上位机界面，主要分为设备信息栏、操作栏、交互信息打印栏。通过点击操作栏的“下载”按键，完成版本信息下载和设备入库，设备入库成功后，会提示设备信息下载成功。交互信息打印栏主要是用于打印上位机与设备之间传输的数据信息，以及上位机和后台之间交互信息。通过点击操作栏的“下载”、“删除”“查找”按键等操作完成设备信息的增、删、改、查操作，设备数据库中的设备信息的增、删、改、查是通过调用相应 API 接口实现的。

2.6 系统总体展示

智能低压分路监测设备电路板分为上下两部分，主控芯片等位于上板，计量芯片、按键、

通信接口、电源接口等位于下板，智能低压分路监测设备电路板实物图以及通过 Jlink 仿真器向电路板下载程序的操作图如图 2.25 和 2.26 所示。



图 2.25 设备电路板实物图



图 2.26 设备程序下载图

智能低压分路监测设备采用开合结构，中间的圆形空洞是夹线槽，设备成品图以及电路板模具封装图如图 2.27 和 2.28 所示。



图 2.27 设备成品图



图 2.28 电路板模具封装图

Cat.1 智能网关实物图如图 2.29 所示，能看到几个指示灯、SIM 卡槽、Air724UG 模组等。



图 2.29 Cat.1 智能网关实物图

监测终端页面展示，如图 2.30 所示为以监控点形式表示的设备实时采集到的电能数据，包括 A、B、C 三相电流、电压、谐波总畸变率(THD)、设备离线/在线状态等。

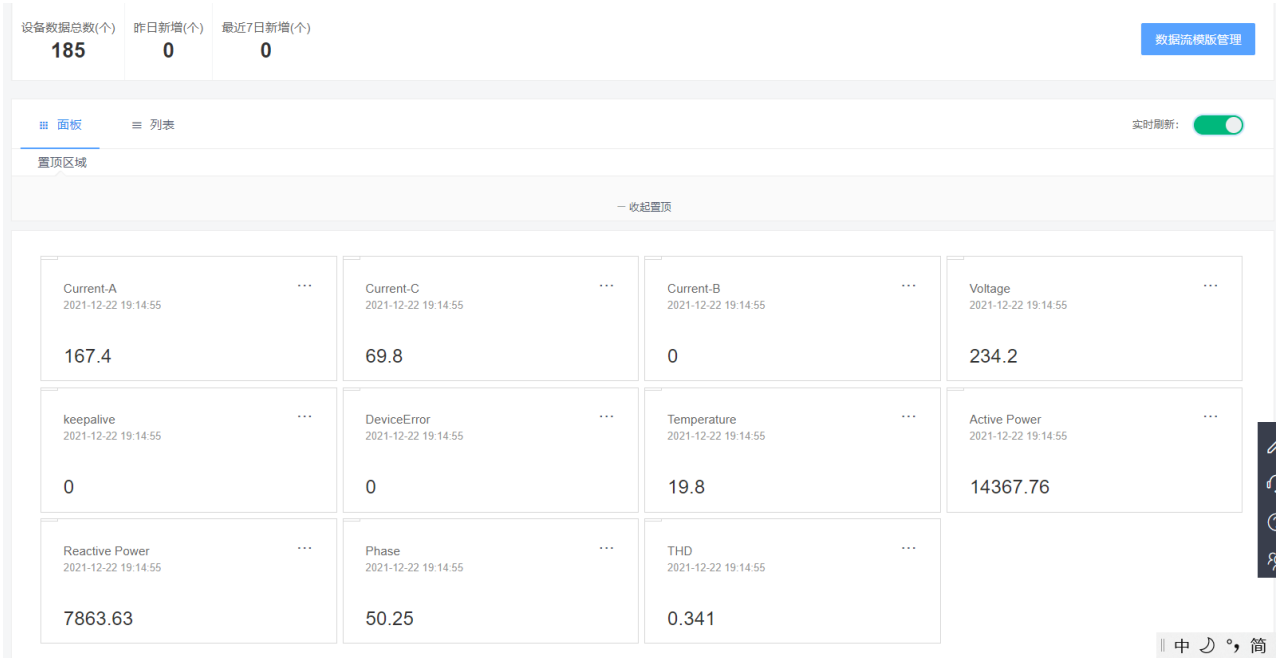


图 2.30 云平台监控点展示图

设备在线状态总览如图 2.31 所示。对设备的在线、离线状态进行展示。

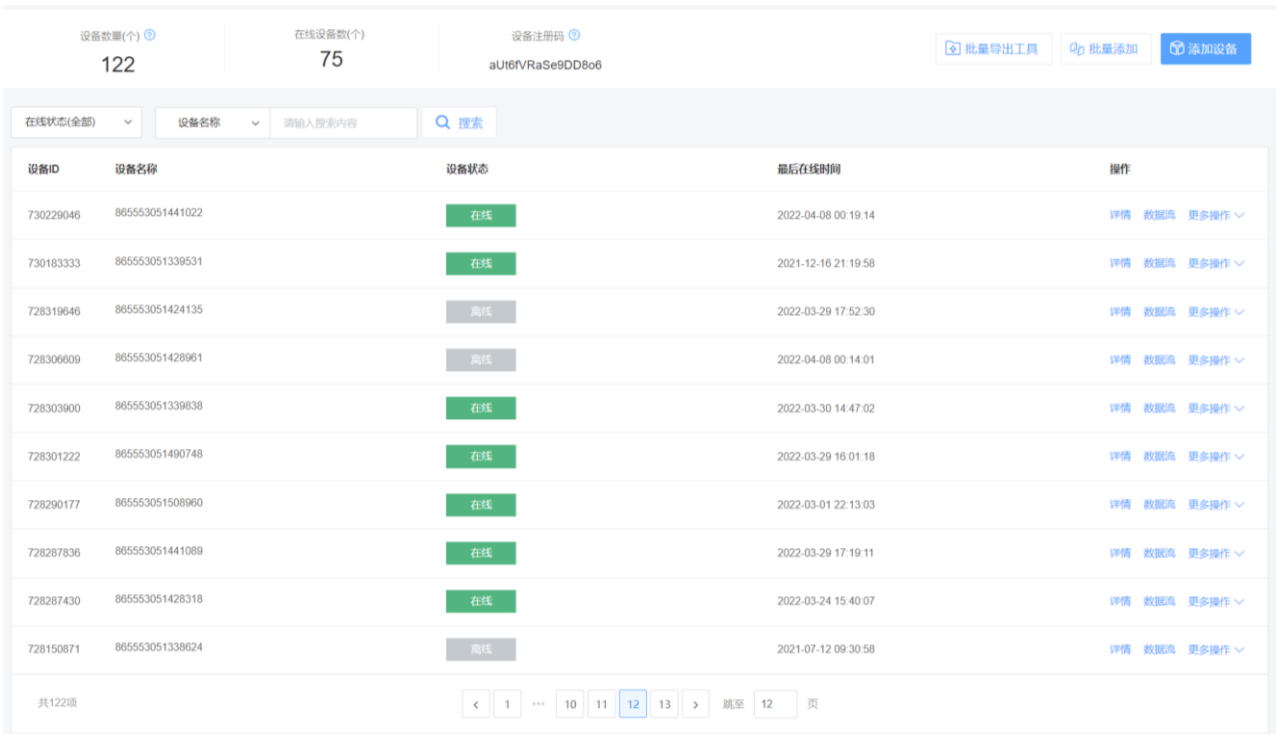


图 2.31 设备在线状态展示图

如图 2.32 所示为设备详情页，展示设备 ID、设备接入方式、安装地点等。

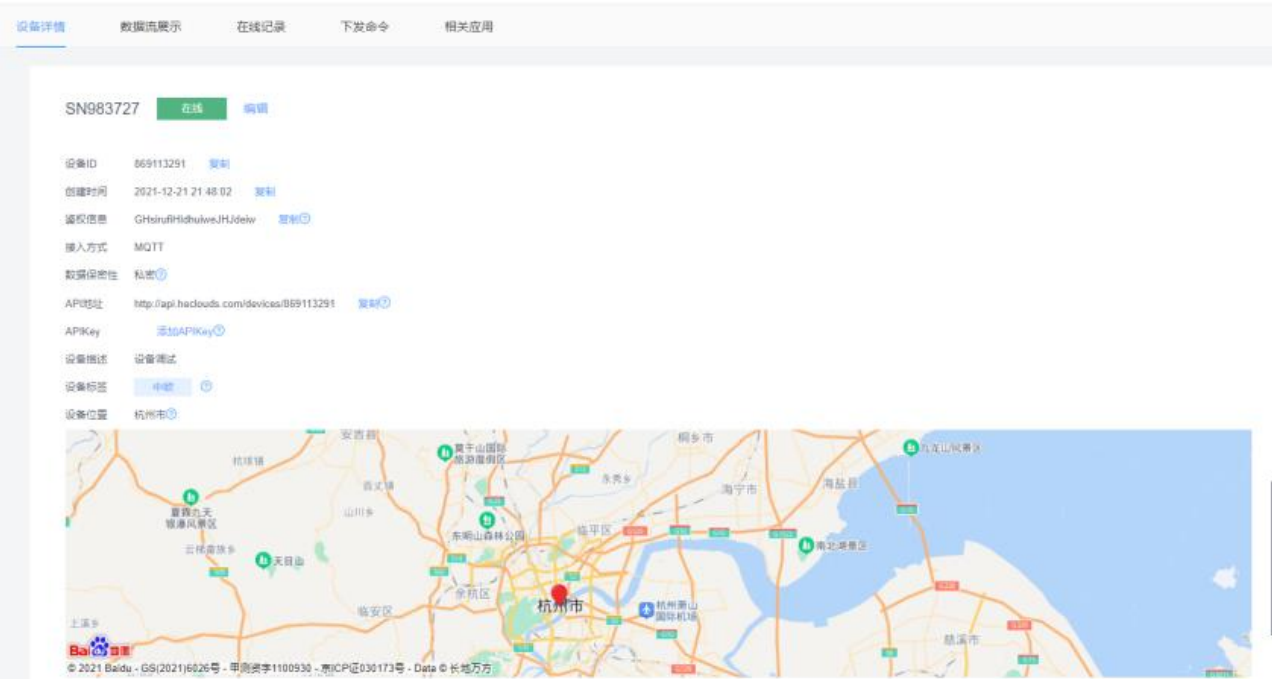


图 2.32 云平台设备详情页

图 2.33 为监控点 THD 参数折线图，可以看到 THD 实时上传数据以及历史数据。



图 2.33 监控点 THD 参数折线图

有两种途径推送报警信息：分别是通过前端页面进行推送和通过手机短信进行报警提示，当低压电网出现异常时，会将报警信息推送给管理人员。前端报警信息推送如图 2.34 所示，短信通知报警信息如图 2.35 所示。



报警区域	报警类型	报警次数	最新报警日期	
6#配电柜	低压	6	2021-06-27 18:32	确认
12#配电柜	欠压	2	2021-07-21 19:25	确认
11#配电柜	过流	12	2021-09-11 20:17	确认
18#配电柜	过温	9	2021-09-15 13:24	确认

图 2.34 前端报警信息推送



短信/彩信
今天星期三

【thingcom物联平台】异常状态报警：12#配电柜出现欠压状况，当前电压值为168.7V，报警时间：[2021-09-11 20:17:36](#)

图 2.35 短信通知报警信息

2.7 本章小节

本章首先对智能低压分路监测系统进行需求分析，继而对系统整体进行设计。然后对系统的各个部分进行详细设计，包括智能低压分路监测设备软硬件设计、Cat.1 智能网关软硬件设计、监测终端软件设计以及一些应用上位机软件设计。最后再对系统进行总体展示。

第三章 基于复序列分裂基快速傅里叶变换的谐波分析算法

对电网中的电力谐波进行分析,可以为电能质量分析提供数据支持。传统多采用基-2 FFT 算法进行谐波分析,对其谐波分析原理进行研究后发现,该算法运算量较大,运算精度有限,不适合应用于本系统。结合系统特点,对 FFT 谐波算法进行改进,设计了基于复序列的 SRFFT 谐波分析算法,通过对其谐波分析原理的分析,可知在进行数据处理时,该算法比基-2 FFT 算法的运算量少,并通过仿真,证明了对同一批采样序列进行分析处理时,相较于基-2 FFT 算法,SRFFT 算法运算时间更短。同时还对谐波分析过程中可能出现的误差因素提出了相应改进措施,改善运算精度,结合本文所设计的智能低压分路监测设备进行算法软件设计与实现,最后结合设备进行了谐波分析功能测试。

3.1 传统基于傅里叶变换的谐波分析算法方案分析

3.1.1 谐波分析原理

所有的周期函数都能够通过正弦和余弦函数所组成的无穷级数进行描述。利用傅里叶级数对周期信号(电压、电流)进行分解,其中工作频率是 50Hz 的频率分量属于基波分量,而频率是其整数倍的属于谐波分量^[35]。

基于傅里叶变换的谐波分析基本原理就是利用傅里叶级数及其变换将周期性的畸变波形分解出基波和各次谐波^[36]。

假定,存在于电网里的电压电流畸变波形都是包含 N 级谐波的周期信号,那么这些电压电流畸变波形能够用傅里叶级数分别描述成式 (3-1) 和式 (3-2) 的形式。

$$\begin{aligned} u(t) &= U_{0m} + \sum_{h=1}^N U_{hm} \sin(h\omega_n t + \theta_h) \\ &= a_0 + \sum_{h=1}^N [a_h \cos(h\omega_n t) + b_h \sin(h\omega_n t)] \end{aligned} \quad (3-1)$$

$$\begin{aligned} i(t) &= I_{0m} + \sum_{h=1}^N I_{hm} \sin(h\omega_n t + \varphi_h) \\ &= c_0 + \sum_{h=1}^N [c_h \cos(h\omega_n t) + d_h \sin(h\omega_n t)] \end{aligned} \quad (3-2)$$

其中,

$$U_{hm} = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}, U_{0m} = a_0, \theta_h = \arctg \frac{a_h}{b_h} \quad (3-3)$$

$$I_{hm} = \sqrt{c_h^2 + d_h^2}, I_{0m} = c_0, \varphi_h = \arctg \frac{c_h}{d_h} \quad (3-4)$$

式(3-1)和(3-2)中,常数项 a_0 、 c_0 对应的是电压、电流的直流分量。当 $h=1$ 时, $U_{1m} \sin(h\omega_1 t + \theta_1)$ 和 $I_{1m} \sin(h\omega_1 t + \varphi_1)$ 表示基波分量,该分量周期和频率固定。当 $h=2,3,\dots,N$ 时,其余数据项对应各次谐波。其中, U_{hm} 、 I_{hm} 对应 h 次谐波电压、电流的幅值, θ_h 、 φ_h 对应 h 次谐波电压、电流的初相角, a_h 、 b_h 对应 h 次谐波电压余弦和正弦系数, c_h 、 d_h 对应 h 次谐波电流余弦和正弦系数。它们之间的关系如下所示:

$$a_h = U_{hm} \sin \theta_h, b_h = U_{hm} \cos \theta_h, c_h = I_{hm} \sin \varphi_h, d_h = I_{hm} \cos \varphi_h \quad (3-5)$$

$$U_{hm} = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}, I_{hm} = \sqrt{c_h^2 + d_h^2} \quad (3-6)$$

$$\theta_h = \arctg \frac{a_h}{b_h}, b_h \neq 0; \varphi_h = \arctg \frac{c_h}{d_h}, d_h \neq 0 \quad (3-7)$$

所以,只需求出各项谐波正余弦系数,即可求出第 h 次谐波的幅值和相位,据此进行谐波分析。假定存在于一个畸变波形里的各谐波频率都是 ω_1 ,依据傅里叶级数理论可知:

$$\begin{cases} a_h = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} u(t) \cos(h\omega_1 t) dt \\ b_h = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} u(t) \sin(h\omega_1 t) dt \end{cases} \quad (3-8)$$

$$\begin{cases} c_h = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i(t) \cos(h\omega_1 t) dt \\ d_h = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i(t) \sin(h\omega_1 t) dt \end{cases} \quad (3-9)$$

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} u(t) dt \\ c_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i(t) dt \end{cases} \quad (3-10)$$

以电压为例,为了便于在计算机上进行运算,将电压连续信号处理成为离散信号,如式(3-11):

$$\begin{cases} a_h = \frac{2}{M} \sum_{k=0}^{M-1} u_k \cos \frac{2\pi}{M} hk \\ b_h = \frac{2}{M} \sum_{k=0}^{M-1} u_k \sin \frac{2\pi}{M} hk \\ a_0 = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} u_k \end{cases} \quad (3-11)$$

式中的 M 表示周期采样点。为方便运算，周期函数采用指数形式进行表达，具体公式如下：

$$u(t) = \sum_{h=-\infty}^{+\infty} U_h e^{jh\omega_1 t} \quad (h=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (3-12)$$

$$U_h = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} u(t) e^{-jh\omega_1 t} dt, U_{-h} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} u(t) e^{jh\omega_1 t} dt \quad (3-13)$$

式 (3-1) 和 (3-12) 相比较可得出以下表达式：

$$U_h = \frac{1}{2}(a_h - jb_h) = |U_h| e^{ja_h}, U_{-h} = \frac{1}{2}(a_h + jb_h) = |U_h| e^{-ja_h} \quad (3-14)$$

因此，对各次谐波实现离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)处理，能够得出

$$U_h = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{M-1} U_k e^{-j(2\pi/M)kh} \quad (h=0, 1, 2, \dots, (M/2)-1) \quad (3-15)$$

3.1.2 方案局限性分析

为了更好的在计算机和监测设备上实现，根据上一节对谐波分析原理的分析，令

$$\begin{cases} U(h) = a_h - jb_h \\ I(h) = c_h - jd_h \end{cases} \quad (3-16)$$

结合式 (3-8)、(3-9)、(3-10)、(3-16) 和 $e^{-jh\omega_1 t} = \cos(h\omega_1 t) - j\sin(h\omega_1 t)$ ，可以得出：

$$\begin{cases} U(h) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} u(t) e^{-jh\omega_1 t} dt \\ I(h) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i(t) e^{-jh\omega_1 t} dt \end{cases} \quad (3-17)$$

式 (3-17) 刚好就是电压和电流的傅里叶变换表达式，结合式 (3-16) 能够推算出

$$\begin{cases} a_h = \frac{1}{2}[U(h) + U^*(h)] \\ b_h = \frac{1}{2}[U(h) - U^*(h)] \\ c_h = \frac{1}{2}[I(h) + I^*(h)] \\ d_h = \frac{1}{2}[I(h) - I^*(h)] \end{cases} \quad (3-18)$$

假如在基波周期内对周期的电压连续信号进行等间隔同步采样，采样点数为 K ，得到电压序列 $\{u(k)\}$ ，对该电压序列进行 DFT 变换，如式 (3-19) 所示：

$$U(h) = DFT[u(k)] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{K-1} [u(k)W^{hn}] \quad (3-19)$$

DFT 的处理对象是无限周期序列和有限长序列，假设 $x(n)$ 是长度为 N 点的有限长序列，那么该序列的 DFT 正变换是：

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3-20)$$

逆变换 IDFT 为：

$$x(k) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k)W_N^{-nk} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3-21)$$

其中 $W_N = e^{-\frac{2\pi}{N}}$ ，根据式 (3-20) 可知，每个 $X(k)$ 计算需经过 $N-1$ 次复加和 N 次复乘， $X(k)$ 的总得 DFT 运算，需要经过 $N(N-1)$ 次复加和 N^2 次复乘，而计算机进行乘法计算消耗的时长比加法更久，因此当 N 较大时，计算机运算量非常宏观，运算时间较长，对计算机使用寿命也存在影响。

3.1.3 FFT 算法对比与选择

由于本系统中采用的是 STM32 单片机作为数据处理芯片，芯片运算处理能力有限，要尽可能减少芯片的运算量，保证系统稳定运行。为了减少运算量，可用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)代替 DFT 进行数据处理，FFT 根据 DFT 旋转因子 W_N^{nk} 的特点，合并 DFT 运算中的某些项，把一个长的 DFT 序列分解成几个短的 DFT 序列，来达到缩减运算量的目的^[37]，8 点三阶 DFT-FFT 变换示意图如图 3.1 所示。

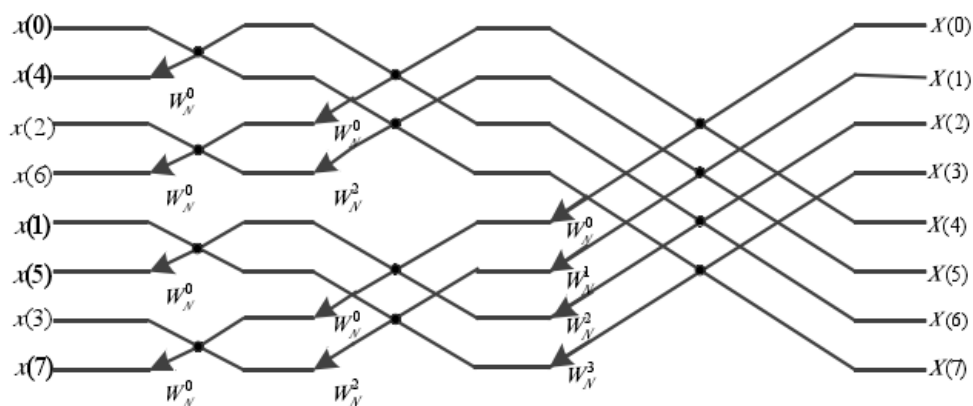


图 3.1 DIT-FFT 变换示意图

FFT 算法有很多种，常见的 5 种 FFT 算法如表 3.1 所示，对这五种算法的原理和特点进行对比。

表 3.1 常见 FFT 算法对比

算法名称	算法原理	算法特点
基-2 FFT 算法	以 2 作为时间或者频率抽取的基数	算法规则简单，比较容易实现
混合基算法	多基多进制	时间复杂度较小，灵活性较好
基-4 FFT 算法	以 4 作为时间或者频率抽取的基数	运算量相对减少，但运算也较为复杂
SRFFT 算法	对偶序列输出采用基-2 FFT 算法，对奇序号采用基-4 FFT 算法输出	乘法和加法的运算次数最少，算法结构较为复杂
Zoom FFT 算法	对全频段的一个子集实现了 FFT 变换	分辨率较高、运算量较少

通过对表 3.1 中几种常见 FFT 算法的对比分析可知，相较于其他几种 FFT 算法，SRFFT 算法进行数据处理运算时乘法和加法次数最少，结合本系统的特点，选择 SRFFT 算法进行谐波分析较为符合本次设计需求。对 DFT、基-2 FFT、基-4 FFT 以及 SRFFT 的乘法和加法运算次数进行统计，如表 3.2 所示。

表 3.2 DFT 和几种 FFT 的乘法和加法运算次数比较

点数 $N=2^m$	DFT	基-2 FFT		基-4 FFT		SRFFT	
		乘	加	乘	加	乘	加
16	1024	24	152	20	148	20	148
32	4096	88	408			68	388
64	16384	264	1032	208	976	196	964
128	65536	712	2504			516	2308

对表 3.2 中的数据进行分析可以发现，每种算法的计算量随着采样点数 N 的增加而增加。选择 128 个数作为采样序列，对其分别进行 DFT、基-2 FFT、SRFFT 运算仿真测试，统计他们各自的运算时间，如表 3.3 所示。

表 3.3 几种算法的仿真运算时间

算法类型	DFT	基-2 FFT	SRFFT
运行时间 (s)	54.49	0.08	0.06

对表 3.3 中的数据进行分析可知, 对与同一批 128 个点数的数据采样序列进行运算处理时, DFT 运算处理时间最长达 54.49s, 而基-2 FFT 算法和 SRFFT 的仿真运算时间分别是 0.08s 和 0.06s, SRFFT 所需时间最短, 相较于基-2 FFT 算法运算时间缩短了 25%, 当采样点数足够大时, 利用 SRFFT 进行数据运算处理的优势会更为明显, 通过仿真测试说明了 SRFFT 算法更适合应用于本系统进行谐波分析数据处理。

3.2 基于复序列的 SRFFT 改进算法设计与实现

3.2.1 复序列 SRFFT 算法设计

分裂基(Split-radix)快速傅里叶变换(SRFFT)算法的算法原理是采用基-2 FFT 算法对偶序号序列进行运算, 采用基-4 FFT 算法对奇序号序列进行运算^[38]。针对 $N = 2^m$, 将 $\{u(n)\}$ 划分为三个序列:

$$\begin{cases} u_1(r) = u(2r) & r = 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1 \\ u_2(r) = u(4l + 1) & l = 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{4} - 1 \\ u_3(r) = u(4l + 3) & l = 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{4} - 1 \end{cases} \quad (3-22)$$

对式 (3-19) 进行离散傅里叶运算, 令

$$W_N = e^{-j(2\pi/N)}, W_N^* = e^{j(2\pi/N)} \quad (3-23)$$

则有:

$$\begin{aligned} U(k) &= \sum_{r=0}^{N/2-1} u(2r) \cdot W_N^{2rk} + \sum_{l=0}^{N/4-1} u(4l+1) \cdot W_N^{(4l+1)k} + \sum_{l=0}^{N/4-1} u(4l+3) \cdot W_N^{(4l+3)k} \\ &= \sum_{r=0}^{N/2-1} u_1(r) \cdot W_{N/2}^{rk} + W_N^k \sum_{l=0}^{N/4-1} u_2(l) \cdot W_{N/4}^{lk} + W_N^{3k} \sum_{l=0}^{N/4-1} u_3(l) \cdot W_{N/4}^{lk} \\ &= U_1(k) + W_N^k U_2(k) + W_N^{3k} U_3(k) \end{aligned} \quad (3-24)$$

式 (3-24) 中, $U_1(k)$ 是 $u_1(r)$ 的 $N/2$ 点 DFT, $U_2(k)$ 是 $u_2(r)$ 的 $N/4$ 点 DFT, $U_3(k)$ 是 $u_3(r)$ 的 $N/4$ 点 DFT。依据旋转因子的特点可以得出

$$\begin{cases} U_1(k) = U_1(k + \frac{N}{2}) \\ U_2(k) = U_2(k + \frac{N}{4}) \\ U_3(k) = U_3(k + \frac{N}{4}) \end{cases} \quad k = 0, 1, \dots, \frac{N}{4} - 1 \quad (3-25)$$

$$\begin{cases} U(k) = U_1(k) + W_N^k U_2(k) + W_N^{3k} U_3(k) \\ U(k + \frac{N}{4}) = U_1(k + \frac{N}{4}) - j W_N^k U_2(k) + j W_N^{3k} U_3(k) \\ U(k + \frac{N}{2}) = U_1(k + \frac{N}{2}) - W_N^k U_2(k) - W_N^{3k} U_3(k) \\ U(k + \frac{3N}{4}) = U_1(k + \frac{N}{4}) + j W_N^k U_2(k) - j W_N^{3k} U_3(k) \end{cases} \quad (3-26)$$

图 3.2 所示为 SRFFT 算法（时间抽取）的第一级流图。

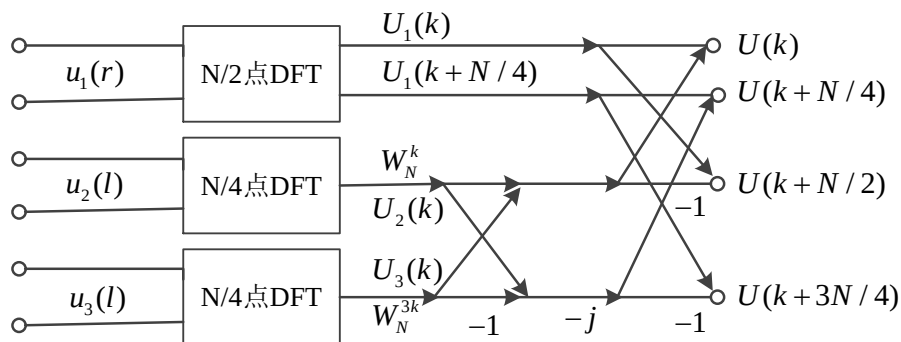


图 3.2 分裂基 DIT-FFT 算法的第一级流图

可以看出，一个 N 点 DFT 能够分解成一个 $N/2$ 点的 DFT 以及两个 $N/4$ 点的 DFT，称作 L 形蝶形运算，每个 L 蝶形单元需要进行两次乘以旋转因子的计算，剩下的都是加减计算^[39]。 $N/2$ 点的 DFT 和 $N/4$ 点的 DFT 可以接着进行 L 形蝶形运算，就这样循环分解下去。

因此，针对 $N = 2^m$ ，流图能够分解至 m 级，如果第 l 级总共是 N_l 个 L 形蝶形单元，那么第 l 级的 N 个数据里有 $4N_l$ 个本级蝶形单元，第 $l+1$ 级有 $2N_{l+1}$ 个蝶形单元，即

$$N = 4N_l + 2N_{l+1} \quad (3-27)$$

推导可知，第一级没有蝶形单元，仅在基-2 的蝶形单元运算后，第 m 级存在 $N/4$ 个蝶形单元，因此根据当 $l=m$ 时， $N_m = N/4$ 的这个条件，能够求出式 (3-27) 的差分方程，并推导出第 l 级蝶形单元的个数 N_l ：

$$N_l = \frac{N}{6} \left[1 - \left(-\frac{1}{2}\right)^{m-l+1} \right] \quad (2 \leq l \leq m) \quad (3-28)$$

那么该运算中存在的全部 L 形蝶形运算的个数 N_{total} 为

$$\begin{aligned} N_{total} &= \sum_{l=2}^m N_l = \sum_{l=2}^m \frac{N}{6} \left[1 - \left(-\frac{1}{2}\right)^{m-l+1} \right] \\ &= \frac{1}{6} N_m - \frac{N}{9} + (-1)^m \times \frac{1}{9} \\ &\approx \frac{1}{6} N_m \end{aligned} \quad (3-29)$$

已知每个蝶形单元需要进行两次复乘和六次复加^[40]，因此，SRFFT 算法总的复乘次数 a_c

和复加次数 m_c 是：

$$\begin{cases} a_c = N_m = N \log_2 N \\ m_c = \frac{1}{3} N_m = \frac{1}{3} N \log_2 N \end{cases} \quad (3-30)$$

根据以上推导可知，当 $N = 2^m$ 时，SRFFT 算法需要进行乘法运算次数最少，相较于基-2 FFT 算法，乘法运算缩减了 33%，相较于基-4 FFT 算法，乘法运算缩减了 11%。SRFFT 算法是同址运算结构，运算序列符合倒位序排序，因此只需把采样数的二进制位倒置，程序和硬件较容易实现。

本次谐波分析设计中，SRFFT 算法的运算对象不再采用传统的实序列，而是把电压和电流的采样序列组建成复序列，将 SRFFT 算法同复数运算结合起来，仅需一次复序列 FFT 运算就可以获取各次谐波值。假定 $\{x(n)\}$ 是 N 点的复序列，其 SRFFT 表达式为：

$$X(k) = \text{SRFFT}[x(n)] = XR(k) + jXI(k) \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3-31)$$

式 (3-31) 中， $XR(k)$ 表示 $X(k)$ 的实部， $XI(k)$ 表示 $X(k)$ 的虚部。

假设实际测试中采集到的电压序列为 $\{u(n)\}$ ，电流序列为 $\{i(n)\}$ ， $\{u(n)\}$ 和 $\{i(n)\}$ 组成复序列 $\{x(n)\}$ ， $\{x(n)\}$ 的表达式为：

$$x(n) = u(n) + ji(n) \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3-32)$$

对 $\{x(n)\}$ 进行 SRFFT 运算，即可求出一对信号的谐波量，即：

$$X(k) = \text{SRFFT}[x(n)] = \text{SRFFT}[u(n)] + j\text{SRFFT}[i(n)] = U(k) + jI(k) \quad (3-33)$$

根据式 (3-31) 和 (3-33)，可以求出电压和电流的频谱分别为：

$$U(k) = \frac{1}{2} [XR(k) + XR(N-k)] + \frac{j}{2} [XI(k) - XI(N-k)] \quad (3-34)$$

$$I(k) = \frac{1}{2} [XI(k) + XI(N-k)] + \frac{j}{2} [-XR(k) + XR(N-k)] \quad (3-35)$$

再结合式 (3-1) 至 (3-4) 以及 (3-18) 即可推导出各次谐波参数的表达式：

$$a_k = \frac{XR(k) + XR(N-k)}{2} \quad (3-36)$$

$$b_k = \frac{XI(N-k) - XI(k)}{2} \quad (3-37)$$

$$a_k = \begin{cases} \arctg \frac{XR(k) + XR(N-k)}{XI(N-k) - XI(k)} (b_k > 0) \\ \arctg \frac{XR(k) + XR(N-k)}{XI(N-k) - XI(k)} + 180^\circ (b_k < 0) \end{cases} \quad (0 \leq k \leq L) \quad (3-38)$$

式 (3-38) 中 L 表示最高谐波次数。

3.2.2 误差因素及改进措施

3.2.2.1 误差因素

采用 SRFFT 算法对采集到的电信号实现谐波分析时，信号经过采样、截断处理后，往往会存在一定误差，这些误差主要体现在三个方面，分别是：混叠现象、截断效应、栅栏效应^[41]。

(1) 混叠现象

将采样得到的离散信号还原为连续信号过程中信号频谱出现的相互交叠的现象叫做频谱混叠^[42]。DFT 逼近连续时间信号的傅里叶变换时，首先要进行信号采样，采样频率需要满足奈奎斯特准则，假定信号最高频率为 f_c ，那么原则上信号采样频率 f_s 不得低于 $2f_c$ ，只有满足了该准则，采样序列的数字频谱才能准确反映连续信号的模拟频谱，从而得到全部的谐波频谱，不然信号频谱就会出现混叠，如图 3.3 所示。可以通过增大采样频率的方式减轻频谱混叠现象，增大采样频率后的频谱如图 3.4 所示，混叠现象的严重程度随着 f_s 的降低而加重。

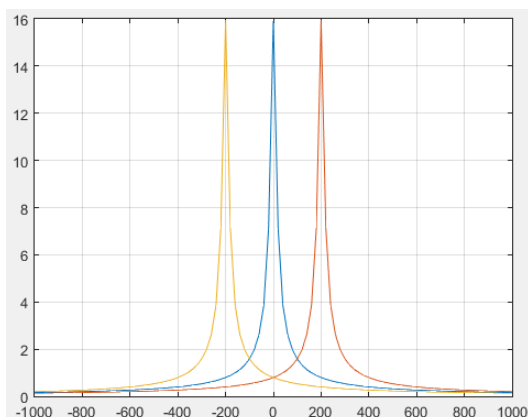


图 3.3 频谱混叠现象

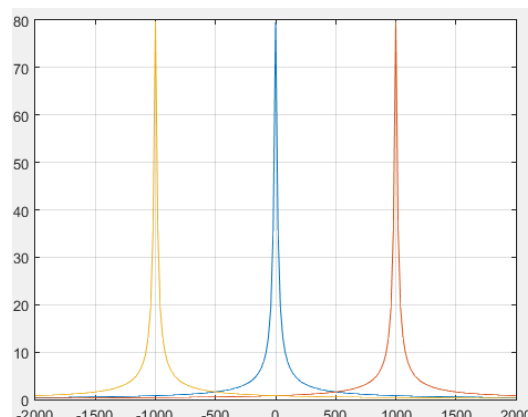


图 3.4 增大采样频率后的频谱

(2) 截断效应

连续时间信号的采样序列和离散序列进行 DFT 运算时，会截取序列中的一部分，称作截断处理，也就是对离散序列的加窗处理。频谱分析过程中，可能会产生频谱泄露和谱间干扰，这种现象被叫做截断效应^[43]。

原信号采样序列经截断处理后，信号频谱会往两边扩展，产生拖尾现象，这种现象就是频谱泄露^[44]，如图 3.5 为正弦波信号波形图，该信号经截断处理，可能会产生如图 3.6 所示频谱泄露现象。造成频谱泄露的原因是因为用于序列截断的窗函数宽度有限，原信号频谱与其卷积一定会出现拖尾现象，导致原谱线向两边扩展。频谱泄露会降低频谱分辨率。泄露程度与窗函数幅度谱主瓣宽度有关，窗函数的旁瓣特性也和频谱泄露密度密切关联^[45]。窗函数类型一定的情况下，窗函数的窗口越长，主瓣宽度越窄，频谱泄露越少^[46]。选择合适的窗函

数对采样序列进行处理，可以有效抑制频谱泄露。

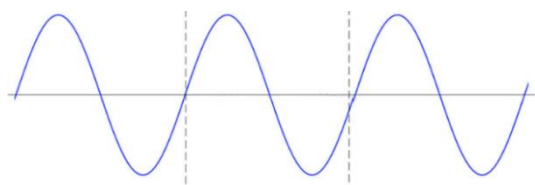


图 3.5 正弦波信号波形图

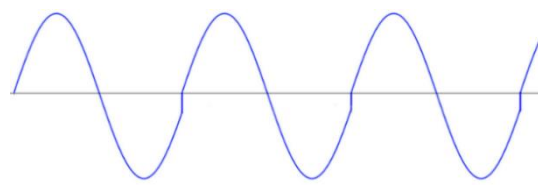


图 3.6 频谱泄露现象

谱间干扰是指主谱线两边产生许多旁瓣对其他频率分量造成干扰的现象，特别是强信号谱的旁瓣也许会覆盖掉弱信号谱，也可能被错认成其他频率的信号谱线，这些都会是频谱分析结果不准确^[47]。

(3) 栅栏效应

对频谱连续的连续时间信号进行 DFT 运算，获得的只是连续信号频谱上的某些点，会遮住某些频谱分量，好像透过栅栏查看频谱，或许会导致某些频谱的峰点或谷点被挡住，这种现象就叫做栅栏效应^[48]。频域采样时，栅栏效应影响较大，也许会遮住一些有用的频率分量，影响结果的精确性。栅栏效应是影响频谱分析精度重要因素，想要更加精确利用频谱进行谐波分析，栅栏效应是必然会遇到的一个难题。

3.2.2.2 改进措施

(1) 减少频谱混叠

抑制频谱混叠的方法有两种，一种是提高采样频率 f_s ，适当提高采样频率，一般选择 2.5~3 倍的信号最高频率作为采样频率，但是系统无法达到很大的采样频率。另一种是利用抗混叠滤波器。在 f_s 一定的条件下，信号在采样前先进行滤波处理，去掉高于 $f_s/2$ 的频率成分，通过这样的手段减少频谱混叠，其处理流程如图 3.7 所示。

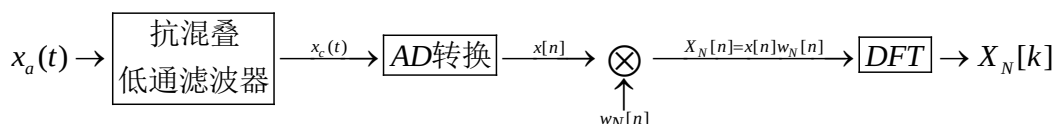


图 3.7 采用抗混叠滤波器的处理流程

(2) 减少频谱泄露

频谱泄露直接影响到谐波分析结果的准确性。为了减少频谱泄露，可以通过调整窗口宽度实现增大采样点数的方式，也可以通过适当形状的窗函数和插值技术的方式来进一步改善。

(3) 避免栅栏效应

整周期截取待测信号是避免栅栏效应最有用的方式^[49]。根据不同类型的序列，采用不同的方式来抑制栅栏效应。对于有限长序列，可通过增加频域采样点数的方式，获得高密度谱，对应时域是对序列的末尾补零，缩短了缝隙间隔，所以能够有效抑制栅栏效应。针对无限长

序列，为了提高分辨率，可以增加采样点数，通过增加有效数据长度来抑制栅栏效应。

3.2.3 复序列 SRFFT 算法实现

监测设备进行谐波分析首先需要通过计量芯片进行 ADC 数据采样，再对采集到的数据进行一些简单处理后，对其进行基于复序列 SRFFT 算法的谐波分析。

3.2.3.1 ADC 采样程序设计

系统进行谐波分析前，需要先获取原始波形数据。主控单元向计量模块下发数据请求命令，计量模块中的三相计量芯片 V9203 通过 SPI 接口将电压电流原始 ADC 波形数据高速传输至主控芯片以供其进行谐波分析。设置周期内采样点数为 128，那么采样频率需要达到 6.4KHz。

V9203 具有 7 路独立的高性能过采样 Σ/Δ ADC、可通过 DMA 方式进行数据传输，并通过 SPI 接口向外围器件发送 7 路电压/电流 ADC 原始波形，更新频率为 6.4KHz，22bitADC 转换^[50]。当系统时钟频率为 6.5536Mhz，芯片中的采集频率为 6.4Khz。当系统采集满负载的情况下，即 7 路通道都在工作，最低的传输频率为 51.2kHZ，数据长度为 32bit 时，最低的传输速率为 1638.4kbps。为了保证采集系统的稳定和数据可靠性，推荐的最低速率为 3.2768Mbps，本文设计时采用的传输速率大于 3.2768Mbps。

当进行数据传输时，相应片选管脚 DSCS 会拉低。每次传输 32-bit，相应数据发送结束后，片选 DSCS 管脚会拉高。相应的 MCU 通过 SPI 通信，获取 32-bit 的数据。主控芯片请求 ADC 数据时，使能计量芯片的主 SPI 口传输 ADC 数据。设置计量芯片的主 SPI 口通过 DMA 传输方式向主控芯片发送数据，一次可以传输 32-bit 的数据，设置数据校验方式为偶校验。

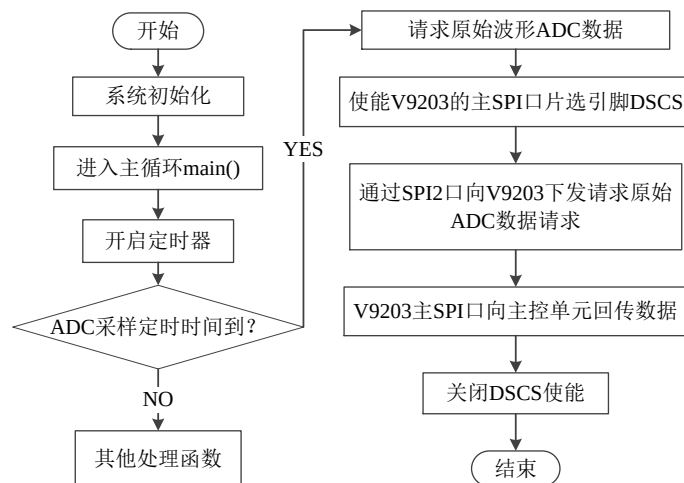


图 3.8 ADC 采样流程图

ADC 采样流程图如图 3.8 所示。软件设置设备定时进行 ADC 数据采集，ADC 采样时间

到了，主控单元向计量芯片请求电压/电流 ADC 原始波形数据，计量芯片接收到请求后回传相应数据。未到 ADC 定时采样时间时，处理主循环中其他处理函数。

3.2.3.2 基于复序列 SRFFT 的谐波分析程序设计

计量模块将采集到的电压/电流 ADC 原始波形数据转换得到的离散数字信号传送至主控单元，由主控芯片完成谐波分析功能。主控芯片对获取到的用于谐波分析的波形数据进行加窗处理，然后对处理后的数据进行基于复序列 SRFFT 算法运算，进而计算出电网中各次谐波含量。

在对谐波分析数据进行加窗处理时，为了抑制频谱泄露，需选择恰当的窗函数对谐波分析数据进行加窗处理，选取时以主瓣窄、旁瓣小、衰减速度快为标准^[51]。常用的几种典型的窗函数如表 3.4 所示。

表 3.4 几种典型窗函数特性

窗类型	主瓣宽度	旁瓣峰值衰减(dB)	旁瓣滚降
矩形窗	$4\pi / N$	-13	-6
三角窗	$8\pi / N$	-25	-12
Hanning 窗	$8\pi / N$	-31	-18
Hamming 窗	$8\pi / N$	-41	-6
Blackman 窗	$12\pi / N$	-57	-18
凯泽窗($\beta = 7.865$)	----	-57	-6

根据对表 3.4 中几种窗函数的特性进行分析，可以看出 Hanning 窗函数较为符合本次设计窗函数选择标准。Hanning 窗也被叫做升余弦窗，它的主瓣宽度加宽，高度降低，旁瓣明显变小，为了更好的抑制频谱泄露，Hanning 窗比矩形窗更为合适，其泄露和波动都得到有效抑制，也增加了其选择性。采用 Hanning 窗对信号进行加窗处理可以达到较为理想的效果。

通过加 Hanning 窗处理后，对复序列进行 SRFFT 运算，计算出各次谐波电能参数。通过上述步骤计算出的谐波参数存在一定误差，需要采取一定措施以减少误差。本设计通过双峰插值的方式来对计算得到的谐波参数进行修正，修正步骤如下所示：

- (1) 采用 Hanning 窗后，经 SRFFT 算法运算求出谐波参数；
- (2) 求出距离基波频率最近的频率分辨点的值，通常处于 35~65Hz 之间；
- (3) 求得最大频谱后，求出离基波频率两边最近的频率，也就是该谱线两边的最大值 y_{11} 和 y_{12} ；
- (4) 根据 y_{11} 和 y_{12} ，来校正基波的幅值和频率等；
- (5) 重复步骤(3)，找到第 k 次谐波两边的频谱的最大值 y_{k1} 和 y_{k2} ，继而根据 y_{k1} 和 y_{k2} 校正第 k 次谐波参数。

谐波分析程序流程图如图 3.9 所示。

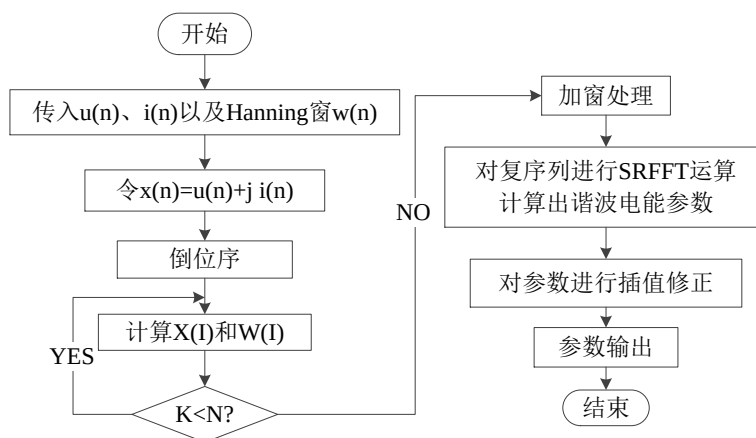


图 3.9 谐波分析程序流程图

3.2.3.3 谐波含有率和总畸变率计算程序设计

电能质量的优劣通常用各次谐波含有率和总畸变率来表示^[52]。电力谐波分析过程中，用 2~N 次谐波的谐波含量和谐波含有率来表示电压、电流波形相对于正弦波形的畸变程度，用谐波总量与基波分量的比值来表示谐波总畸变率^[53]。

从电压、电流中减掉基波分量后剩余的就是电压、电流的谐波含量^[54]，分别用 UH 、 IH 表示，其表达式分别为：

$$UH = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} \quad (3-39)$$

$$IH = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (3-40)$$

其中 U_n 、 I_n 表示第 n 次谐波电压、电流有效值。

N 次电压、电流谐波含有率可分别用 HRU_n 、 HRI_n 来表示，其表达式如下：

$$HRU_n = \frac{U_n}{U_1} \times 100\% \quad (3-41)$$

$$HRI_n = \frac{I_n}{I_1} \times 100\% \quad (3-42)$$

其中， U_n 、 I_n 表示第 n 次谐波电压、电流有效值， U_1 、 I_1 表示电压电流、基波分量有效值。

电压、电流谐波总畸变率可分别用 THD_u 、 THD_i 来表示，其表达式如下：

$$THD_u = \frac{UH}{U_1} \times 100\% \quad (3-43)$$

$$THD_i = \frac{IH}{I_1} \times 100\% \quad (3-44)$$

谐波含有率和谐波总畸变率的算法设计流程图如图 3.10 所示。其中， $X[2][11]$ 为电压和电流的 1~11 次谐波， $XI[I][J]$ 是复序列的实部， $XR[I][J]$ 是复序列的虚部， $X_1[I][J]$ 、 $X_2[I][J]$ 分别为电压和电流各次谐波的幅值和相位， $X_3[I]$ 为各谐波电压和电流有效值 U 、 I ， $X_4[I][J]$ 为电压和电流各次谐波的谐波含有率， $X_5[I]$ 为电压和电流的谐波总畸变率。

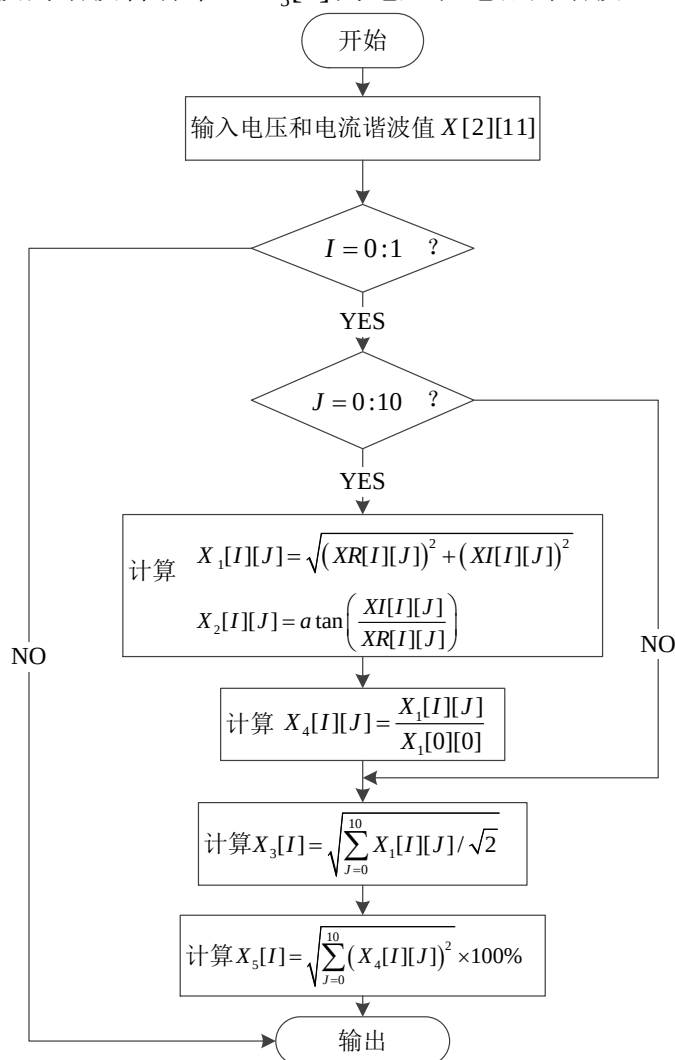


图 3.10 谐波含有率和谐波畸变率算法设计流程图

3.3 谐波分析功能测试

用智能低压分路监测设备对本节所设计的谐波分析功能进行功能测试，为了测试便利，利用现有的校正台体提供电源输出，在校正台体的显示屏上可以直观查看实时的电能参数信息。智能低压分路监测设备实物图如图 3.11 所示，设备下载程序图如图 3.12 所示，校正台体实物图如图 3.13 所示，校正台体电力参数显示屏如图 3.14 所示，设备安装于校正台体测

试图如图 3.15 所示。



图 3.11 智能低压分路监测设备实物图



图 3.12 设备下载程序



图 3.13 校正台体实物图



图 3.14 校正台体电力参数显示屏

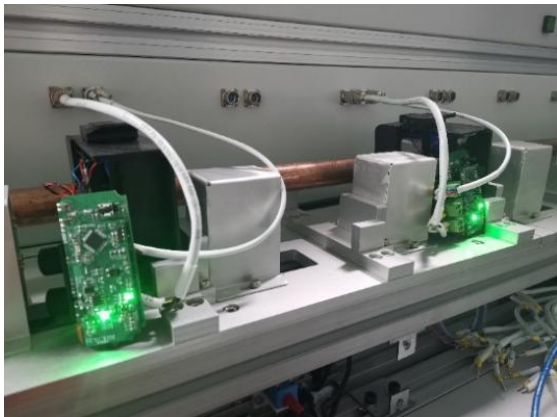


图 3.15 设备安装于校正台体测试

利用智能低压分路监测设备所测得的各次谐波电压和电流及相位如表 3.5 所示。

表 3.5 电压和电流及其相位参数

k	U_k / V	$\phi_{uk} / (^{\circ})$	I_k / A	$\phi_{ik} / (^{\circ})$
1	219.884	34.625	10.5	28.465
2	0.743	29.378	0.032	9.684
3	1.589	178.431	0.078	70.652
4	0.147	51.241	0.004	68.234
5	1.576	112.437	0.080	50.381
6	0.169	100.021	0.008	18.245
7	0.352	52.054	0.017	171.561
8	0.112	19.187	0.004	42.221
9	0.569	44.629	0.031	153.856
10	0.141	15.367	0.006	19.247
11	0.253	74.236	0.017	41.736

根据设备输出谐波参数数据，可以计算出各次谐波含有率和谐波总畸变率。为了验证设备测量数据的有效性，利用 PM3000A 分析仪对电力谐波含量进行测量，如图 3.16 所示。PM3000A 是一种可达 500kHz 高频的高精度多功能电力参数分析仪，可测量参数有电压、电流、频率、谐波、基波等，测量范围为 0~1500V，测量带宽为 0.1~1MHz，即便在高度失真的情况下，依旧可以提供精确的测量数据，基本测量精度高达 0.05%^[55]。该电力分析仪测量出的谐波信号量可作为电网中谐波含量的标准值，即可作为本次测量结果的对比标准值。



图 3.16 PM3000A 电力参数分析仪

为了判断本文所设计的基于复序列的 SRFFF 算法的运算精度相较于基-2 FFT 算法是否有所改善，加入了基于基-2 FFT 算法的谐波分析对比测试，并将 PM3000A 测得的值作为标准值。基于基-2 FFT 测得的各次谐波含有率 B_k^u 、谐波总畸变率 THD_b ，基于 SRFFT 测得各次

谐波含有率 C_k^u 、谐波总畸变率 THD_c 和通过 PM3000A 测得的谐波含有率 D_k^u 、谐波总畸变率 THD_d 如表 3.6 所示。

表 3.6 1~11 次谐波含有率和谐波总畸变率

k	$B_k^u / \%$	$C_k^u / \%$	$D_k^u / \%$	$THD_b (\%)$	$THD_c (\%)$	$THD_d (\%)$
1	1(221.348)	1(221.100)	1(219.783)	1.286	1.334	1.522
2	0.232	0.319	0.346			
3	0.427	0.618	0.754			
4	0.129	0.024	0.046			
5	0.434	0.525	0.708			
6	0.056	0.064	0.081			
7	0.256	0.110	0.142			
8	0.016	0.037	0.048			
9	0.289	0.245	0.264			
10	0.009	0.044	0.063			
11	0.164	0.142	0.112			

基-2 FFT 算法，SRFTT 算法以及 PM3000A 测得的谐波含有率折线图如图 3.17 所示。

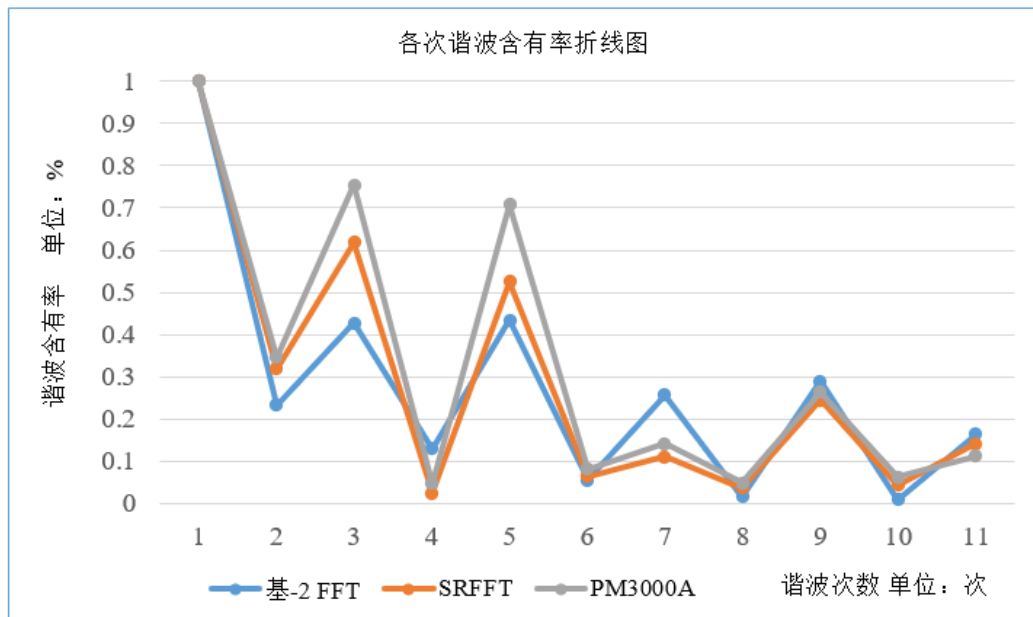


图 3.17 各次谐波含有率折线图

根据表 3.6 中可知，由 PM3000A 测得的各次谐波值和谐波总畸变率为 1.522 可作为标准值，基-2 FFT 测得的谐波总畸变率为 1.286，计算精度为 84.5%，SRFFT 测得的谐波总畸变率为 1.334，计算精度为 87.6%，相较于基-2 FFT 计算精度提高的 3.1%。根据图 3.17 的各次

谐波折线图也可以比较直观的看出 SRFFT 折线总体更贴近 PM300A 折线。测试结果表明基于复序列的 SRFFT 改进算法能够较为准确的测得电网中电压、电流中各次谐波得含有率和谐波总畸变率，从而更加准确的反映电能质量的优劣程度。

3.4 本章小节

本章基于复序列 SRFFT 的谐波分析算法原理和实现机理进行介绍，传统多采用基-2 FFT 算法进行谐波分析，对其工作原理和局限性进行研究和分析。结合本系统的特点提出改进算法，进行了仿真对比分析，得出 SRFFT 算法进行数据分析处理所花费的时间最短。对分析过程中了可能出现的影响分析精度的误差因素如频谱泄露等，提出相应的改进措施。然后通过软件设计实现基于 SRFFT 的谐波分析功能，主要可分为电压/电流 ADC 采样程序设计、基于 SRFFT 谐波分析程序设计、谐波含有率和总畸变率计算程序设计。最后对系统进行谐波分析功能测试，并与基于基-2 FFT 算法实现和 PM3000A 电力分析仪器的测量结果进行测量精度对比分析。测量数据表明，改进的 SRFFT 算法相较于基-2 FFT 算法的计算精度提高的 3.1%，可以更加准确的测量出谐波参数，从而更真实的反映电能质量的优劣程度。

第四章 智能低压分路监测设备的自动校正系统设计

因为现在技术上的不足，导致不同厂家以及不同批次所生产的元器件在参数上可能会有一些误差，最终使得采用这些元器件所生产的设备在出厂时的电压、电流等参数上产生测量误差，使得设备自身的测量精度无法满足实际的客户需求。厂家在进行设备量产时，需为其进行校正操作，以避免测量误差，实现高精度采集，需要占用大量的人力，且耗时较长，校正流程繁琐重复，且校正后的采集精度不统一。考虑到生产厂家的实际需求，对当前的电能参数校正技术的研究现状进行研究后，设计了用于智能低压分路监测设备的自动校正系统，简化校正流程，通过该校正系统能够对设备进行批量校正，实现校正流程自动化，缩短校正时间，解放人工，经校正后的设备采集精度达到精度要求的同时，保证了采集精度的统一性。

4.1 传统电能参数校正方案分析

国内早期的单相电子式电表，主要依赖于人工通过电烙铁短路电阻，从而调整进入芯片电压检测回路中的电压来达到调节误差的目的。工人在校正台上，一边用电烙铁调节误差，一边观察各个表位的误差显示。在工人熟练掌握该校正方式的情况下，平均每台仍需要反复调整 3 次，平均单台校正时间为 40s。不难看出，此种校正方式步骤繁琐，校正效率低，且对工人的技术要求比较高，校正效果极易受到工人的主观影响，校正后的设备采集精度一致性较差。

后来，针对人工校正方式的弊端，人们设计自动校正工具，用机器代替人工进行重复的校正操作。通过电子式电表自动校正工具来对设备进行参数校正。该校正方式通过对芯片内部的存储器进行编程来实现误差调整，采用并行校正方式。但是在为设备校正时，需要为每一台待校设备插入电源和通讯接口电路板。平均单台设备校正时间为 8s，相较于传统人工校正方式，其校正效率有所提高，校正流程有所简化，但是生产成本也因为需要为每一台设备准备电源和通讯接口电路板有所提高。

本文所设计的智能低压分路监测设备的自动校正系统，根据对以上两种校正方案的分析，提出了改进措施。可以借鉴第二种方案的校正思路，通过对计量芯片内部的校正寄存器进行编程来实现电能参数校正，用机器代替人工重复的操作。通过多线程处理机制实现设备的批量校正，来提高校正效率。通过统一的感应式电源和虚拟串口来取代一对一的电源和通讯接口电路板，降低生产成本。通过软件设计一键开启校正流程功能，实现校正流程自动化，简化校正流程。尽可能减少人工参与，避免人工对设备采集精度的主观影响，保证校正后设备采集精度的统一性。

4.2 需求分析和改进方案设计

4.2.1 需求分析

根据设备生产厂家的需求，需要能够通过该自动校正系统对智能低压分路监测设备进行批量校正，实现校正流程自动化，缩短校正时间，简化校正流程，经校正后的设备电能参数采集精度需要达到如表 4.1 所示的精度要求。

表 4.1 电能参数采集精度要求表

校正内容	备注	精确度
相电压	A 相全波电压有效值	精确到 0.005
相测量电流	A 相全波电流有效值	精确到 0.005
相有功功率	A 相全波平均有功功率	精确到 0.01
相无功功率	A 相全波平均无功功率	精确到 0.01
相保护电流	C 相基波电流有效值	精确到 0.08

4.2.2 改进方案设计

通过以上对传统校正方案的分析并提出的相应改进措施，结合生产厂家的需求，对智能低压分路监测设备的自动校正系统进行设计。本文所设计的自动校正系统主要包括设备、校正台体、校正上位机三部分，设备作为校正主体，最多可同时对 12 台设备进行校正，用校正台体来提供统一的待校参数标准源，通过设计校正上位机来控制校正流程。三者进行通信的前提是要建立可靠的通信链路。基本的通信链路是：待校设备依次安装在校正台体的测试架上，每台设备对应两个串口，分别是该设备与校正上位机进行双向通信的设备串口和校正上位机向校正台体发送误差的误差串口，校正台体上设置一个启动校验按键，需要能够通过点击启动校正按键，一键开启校正流程。通过启动校验串口向校正上位机发送起始帧请求开始校正流程。进入校正流程后，无需其他人工操作，一切校正步骤由自动校正系统独立完成，校正结束后设置复检步骤，并由校正上位机将复检后的采集精度发送至校正台体的误差显示数码管。工人只需根据数码管上的测量误差是否符合精度标准，来决定是否需要进行二次校正。

通过以上分析可知，建立可靠的通信链路首先要提供至少 25 个串口。为了减少使用的数据电缆数量，降低连线复杂度，通过虚拟串口技术模拟出虚拟串口代替物理串口。校正上位机与校正台体之间为实现高效通信，基于 UDP 通信协议进行通信。校正上位机与设备利用串口实现数据交互，基于 Modbus 协议实现通信。为了实现 12 个表位的设备能够同时进行校正操作，采用多线程处理方式，来提高校正效率。自动校正系统结构示意图如图 4.1 所示。

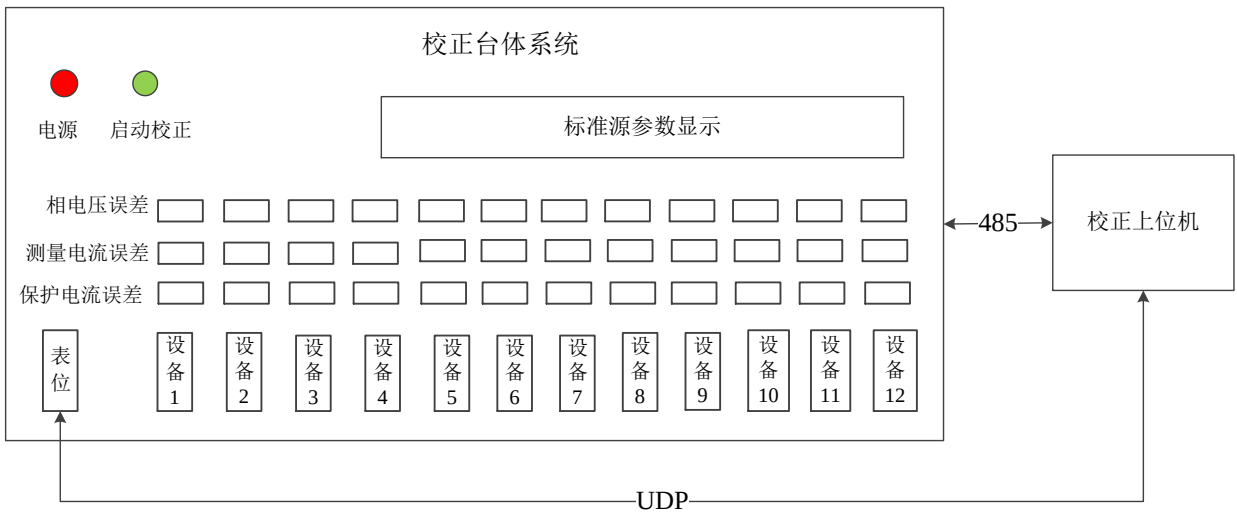


图 4.1 自动校正系统结构示意图

4.2.3 自动校正系统关键技术分析

为了提高校正效率，该自动校正系统采用多线程处理机制来实现对设备的批量校正，并发执行同一批设备的校正操作。通过虚拟串口技术解决批量校正时多串口的需求。

(1) 虚拟串口技术的应用

虚拟串口是指基于底层设备驱动技术，构建的行为和传统串行接口相同且能够支持应用程序访问的编程接口^[56]。虚拟串口与关联的串行接口设备一般采用不同与串口通信的通信方法，当虚拟串口接收到来自应用程序的访问会映射到对串行接口设备的访问^[57]。

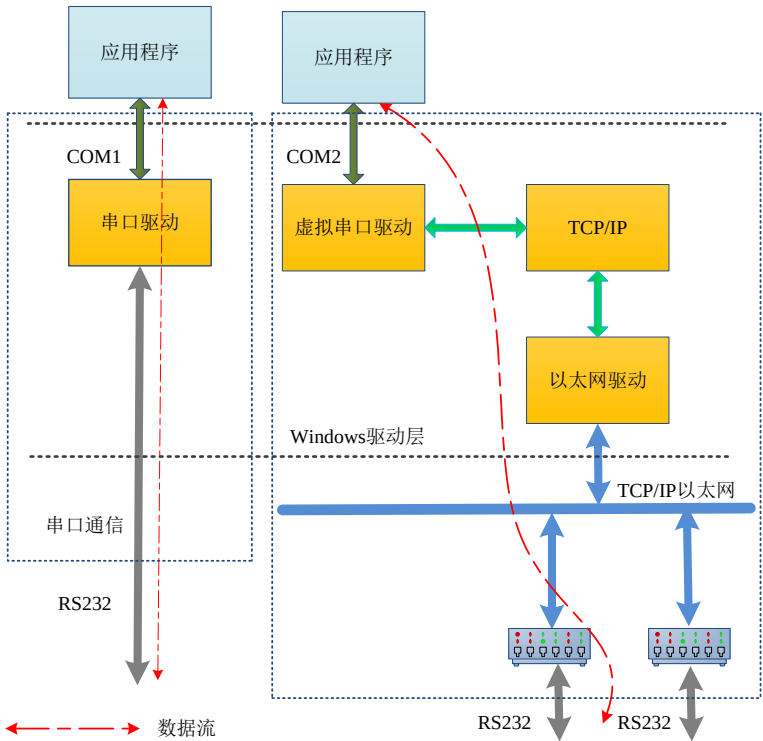


图 4.2 虚拟串口原理

虚拟串口的工作原理如图 4.2 所示。虚拟串口平台运行后，将依据配置在驱动层生成虚拟串口，该虚拟串口会自动关联以太网的串行接口联网设备，创建通信链路。当应用程序向虚拟串口发送数据时，虚拟串口平台经该通信链路向串行接口联网设备传输数据，然后再通过串行接口联网设备的串口发出^[58]。在串行接口联网设备接收到串口数据后，通过该通信链路将接收到的串口数据传输至虚拟串口，再由虚拟串口发送给应用程序。

基于本文所设计的自动校正系统对多串口的需求，同时考虑到批量设备进行出厂校正时，一批设备校正结束后需要从校正台体的测试架上拆除，更换为下一批设备，采用物理串口的情况，每换一批设备就需要将物理串口电缆从上一批设备上拆下来，安装在下一批设备上，这种方案无疑是耗时的，且连接线缆过多容易混乱，因此使用虚拟串口技术就可以很好的解决这个问题。如图 4.3 所示，在校正台体设备端内部安装一个 TCP/IP 转 232 的虚拟串口服务器，再通过 232 转 USB 连接到校正上位机 PC 端，即可虚拟出 36 个虚拟串口，校正上位机通过这些虚拟的串口与设备和校正台体实现通信。

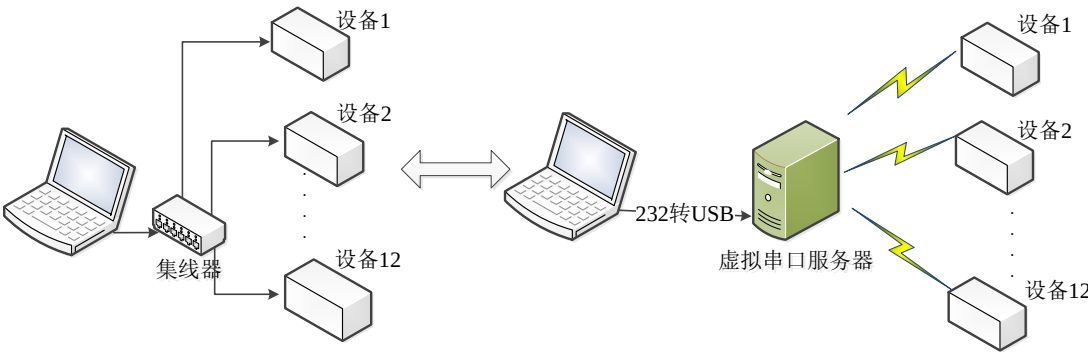


图 4.3 虚拟串口实现

(2) 多线程处理机制

一个程序运行后能够生成一个或者多个进程，一个进程里至少存在一个线程。将一个程序分割成多个相互独立的程序模块，基于这种编程理念的处理方式叫做多线程处理。多线程将并发机制运用到程序中，将完整的程序分成多个子程序，子程序并发执行，每个运行起来的子程序就是一条线程，从而实现多线程处理^[59]。

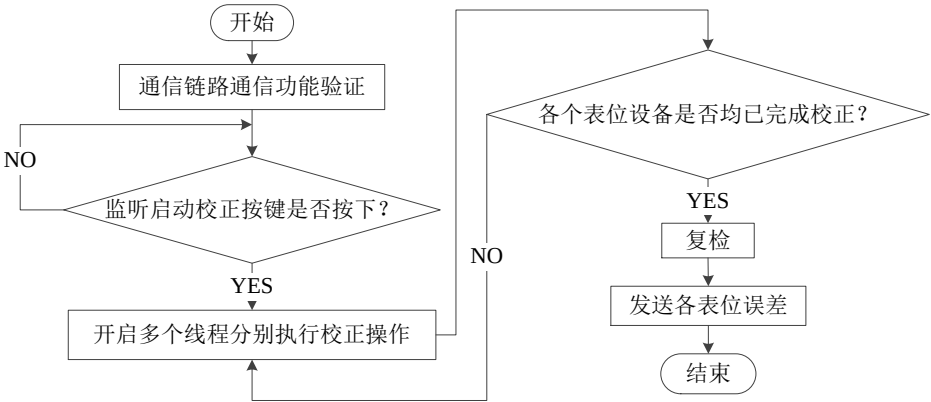


图 4.4 自动校正系统多线程处理流程图

本文所设计的自动校正系统需要能够满足同时对多台设备进行校正的要求，为保证多台设备校正同步且各个设备的校正流程互不干扰，采用多线程处理机制来提高系统整体的处理性能，提高校正效率。自动校正系统多线程处理流程图如图 4.4 所示。

4.3 自动校正系统设计与实现

4.3.1 自动校正系统框架设计

自动校正系统是由校正台体系统、校正上位机、待校设备三部分组成。校正台体系统包括电源按键、启动校正按键、测试架、误差显示数码管、标准源显示屏等，通过点击校正台体上的启动校正按键启动整个校正流程。待校设备作为校正主体按表位依次安装在校正台体的测试架上，由校正台体提供标准电流源、电压源输出。由校正上位机控制整个校正流程，通过对校正上位机的软件设计来达到多台智能低压分路监测设备同步校正的目的。通过对待校设备进行软件设计，安装于测试架上的设备测量值和标准值根据校正算法计算出比差值，并写进相应的校正补偿寄存器里，依次校正多项参数。自动校正系统框架设计如图 4.5 所示。

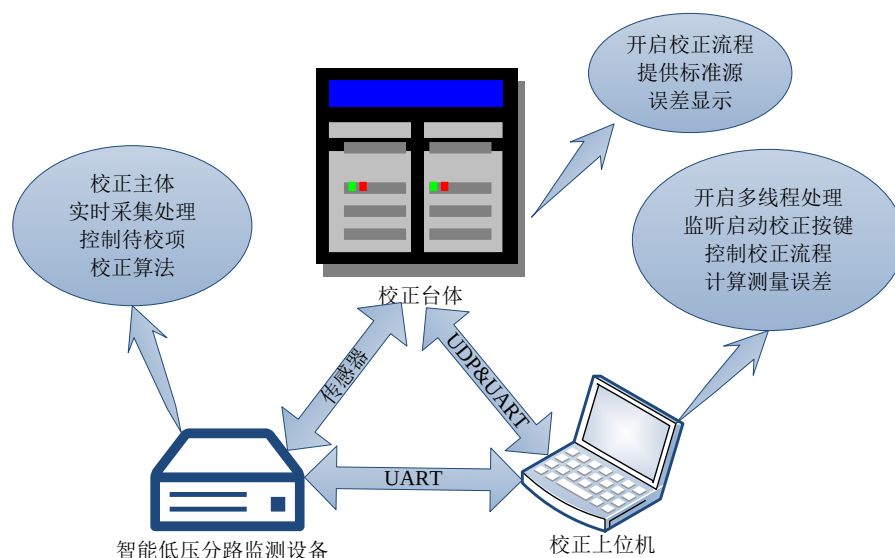


图 4.5 自动校正系统框架设计图

校正上位机与校正台体基于 UDP 通信协议进行通信，预先设置好本地 IP 和端口号以及远程 IP 和端口号，通过校正上位机向校正台体发送 UDP 数据帧，设置和读取校正台体的标准源输出。校正上位机通过由虚拟设备串口与待校设备建立连接，基于 Modbus 通信协议进行通信，通过对数据帧的解析处理，控制各个设备的多个待校参数的校正流程。同一批设备校正结束后，由校正上位机向校正台体发送 UDP 升源数据帧，对校正后的设备进行复检，根据校正台体标准源参数值和设备实时测量值计算测量误差，并将计算得到的各项测量误差经虚拟的误差传输串口传输至校正台体，然后显示于台体的误差显示数码管上，同时也可以在校正上位机上显示每个设备的测量误差。智能低压分路监测设备通过该自动校正系统进行

参数校正的流程图如图 4.6 所示。

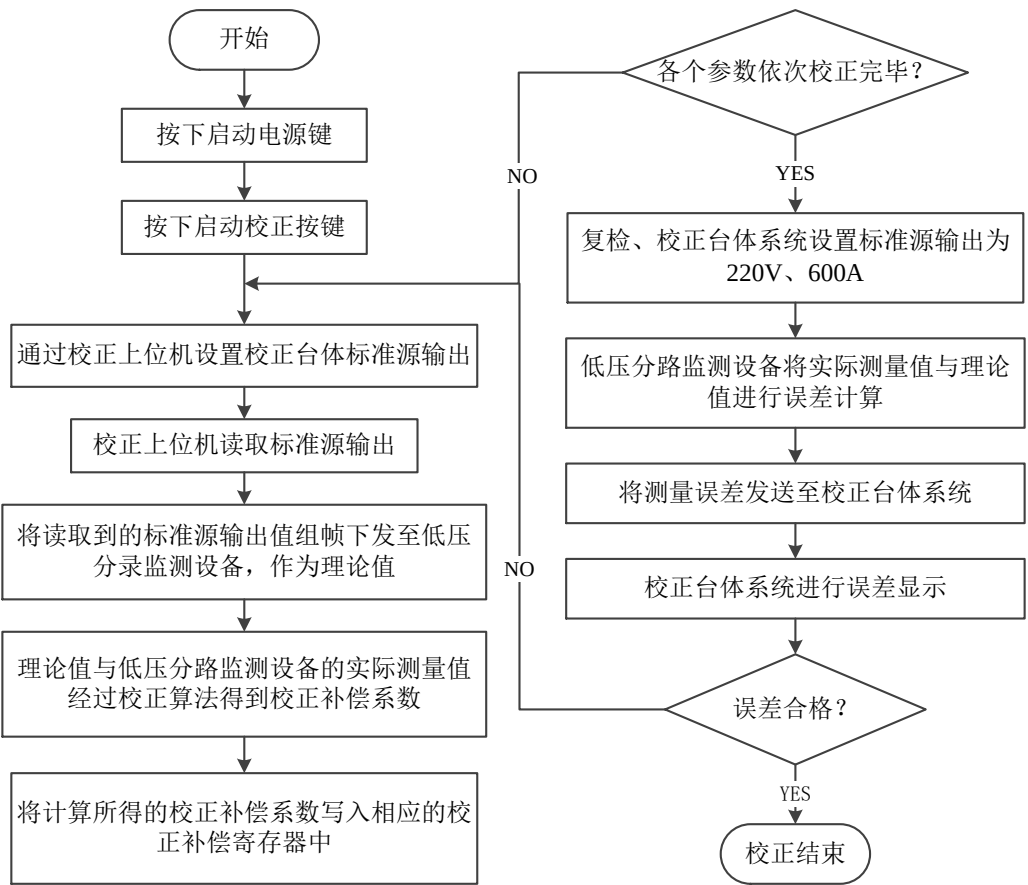


图 4.6 自动校正系统校正流程图

4.3.2 自动校正系统通信协议设计

实现自动校正系统功能的基础是能够进行正常的数据传输，通信双方需要按照规定好的通信协议格式对数据进行解析处理。本设计中的自动校正系统主要采用了 UDP 协议和 Modbus 协议，自定义协议格式，下面对应用的两种通信协议进行设计。

(1) UDP 通信协议设计

UDP 数据帧包括长度固定的首部和长度不固定的数据部分，UDP 首部包括源端口号、目标端口号、包长度、校验和四个部分，各占 2 个字节，UDP 数据报文格式如表 4.2 所示。源 IP 地址、目标 IP 地址、源端口号、目标端口号包长度中任意一项不对，都无法得到正确的校验和，不能进行正常的数据通信。

表 4.2 UDP 数据报文格式

源端口号	目标端口号	包长度	校验和	数据部分
2 字节	2 字节	2 字节	2 字节	N 字节

预先设置好本地主机和远程目标主机的 IP 地址和端口号,这里的本地主机是指校正上位机所在 PC 终端,远程目标主机是指校正台体内部控制终端。确认好本地和远程主机,通过调用 VS2107 中 `recvfrom()`和 `sendto()`两个 API 接口函数来进行数据收发。

依据 UDP 数据包中数据功能的不同,将其分为请求数据帧和响应数据帧,响应数据帧又根据响应内容分为正常响应数据帧和异常响应数据帧。数据帧采用“UTF-8”编码格式,具体帧格式如表 4.3 所示:

表 4.3 各种数据帧格式

数据帧类型	帧格式
请求数据帧	cmd=命令字,sn=序号,data=数据 1;数据 2;…数据 n 说明: 分为命令字、序号、数据三部分,使用“,”分隔;“命令字”为 2 字节十六进制值,0201H 表示写操作,0301H 表示读操作,此时“序号”不能为“00”;“序号”为 1 字节十六进制值,表示表位号,00 表示所有表位,01-nn 表示单个表位;
正常响应数据帧	cmd=命令字,sn=序号,ret=0,data=数据 1;数据 2;…数据 n 说明: 分为命令字、序号、返回值、数据四部分,使用“,”分隔,正常响应返回值固定为“0”;
异常响应数据帧	cmd=命令字,sn=序号,ret=1,data=ERR1;ERR2;ERRn 说明: 分为命令字、序号、返回值、EER 四部分,使用“,”分隔,正常响应返回值固定为“1”;出现错误响应时,若有多个 ERR 项,则多个 ERR 项间用“;”分隔,没有出现异常的组件对应的 ERR 项为“null”;

由表 4.3 可知,配置校正台体标准源输出时,UDP 数据帧的命令字为 0201H,最常用的功能是通过发送 UDP 配置帧对校正台体进行升源和降源操作,升源是指配置台体标准源输出值高于当前标准源输出值,降源是指配置台体的标准源输出为 0V、0A。通过读取标准源输出判断标准源是否稳定,读取校正台体标准源输出时,UDP 数据帧的命令字为 0301H。

(2) Modbus 通信协议设计

Modbus RTU 数据帧主要包括设备地址、功能码、数据域、CRC 校验码四个部分,如表 4.4 所示即为 Modbus 帧格式。设备地址、功能码各占一个字节,在本次设计中,设备地址设置为 FE,功能码根据设备行为而有所不同。自动校正系统在校正过程中进行通信时,使用 Mosbus 数据帧读取多个寄存器,此时的功能码 0x03,数据域最多占 252 个字节,CRC 校验码占两个字节,分为高八位和低八位,其中低位在前,高位在后。

表 4.4 Modbus 帧格式

设备地址	功能码	数据域	CRC16 低 8 位	CRC16 高 8 位
FE	03	最大 252 字节	1 字节	1 字节

Modbus 数据帧根据数据域内容的不同可以分为 Modbus 发送帧和 Modbus 接收帧，Modbus 发送帧的数据域内容由寄存器地址和寄存器数目构成，各占两个字节，寄存器地址表示要访问该设备的哪个寄存器，寄存器数目指明从该寄存器地址开始连读的寄存器个数。Modbus 发送帧格式如表 4.5 所示。

表 4.5 Modbus 发送帧格式

设备地址	功能码	寄存器地址高 8 位	寄存器地址低 8 位	寄存器数高 8 位	寄存器数低 8 位	CRC16 低 8 位	CRC16 高 8 位
1 字节	1 字节	1 字节	1 字节	1 字节	1 字节	1 字节	1 字节

Modbus 接收帧的数据域内容包括数据长度 N 和 N 个数据，数据长度 N 占一个字节，表示数据所占字节数，一个数据占一个字节。Modbus 接收帧格式如表 4.6 所示。

表 4.6 Modbus 接收帧格式

设备地址	功能码	数据长度 N	数据 1		数据 N	CRC16 低 8 位	CRC16 高 8 位
1 字节	1 字节	1 字节	1 字节		1 字节	1 字节	1 字节

校正过程中，校正上位机和下挂设备通过读取或者设置 0x3000-0x3010 这些校正寄存器来获取或配置设备的数据信息和校正状态信息。其中 0x3000 寄存器地址中保存的是设备当前的校正状态信息，占两个字节。寄存器 0x3001-0x3010 中保存的是经 1000 倍或者 10000 倍放大的多项电能参数有效值，各占四个字节。

4.3.3 校正上位机设计

为了实现批量设备校正，提高校正效率，实现校正自动化，自主研发了校正上位机，该上位机软件是在 Microsoft Visual Studio 2017 编程软件上基于 C#语言开发的。校正上位机通过 485 串口与下挂设备建立连接，基于 Modbus 协议实现双向通信，与提供标准源的校正台体基于 UDP 传输协议实现双向通讯，最多可挂载 12 台设备，对 12 台设备同时进行校正。

校正上位机在整个自动校正系统中起着至关重要的作用。操作人员需要通过校正上位机配置本地 IP 地址、端口号、通信串口号、标准源参数值等，应该有简单易操作的人机交互界面

面。通过监听校正台体的启动校正按键开启校正流程，通过为每一台设备创建状态处理线程来控制每台设备的校正流程，是实现批量校正的关键。因为所有设备共用同一个台体标准源，因此必须同步每一台设备校正状态，比如在进行 A 向全波电压有效值校正时，先完成该项参数校正的设备需要等待其他设备都完成该项参数的校正后，才能进入对下一项参数的校正处理。在进行软件设计时，通过控制一个存储设备校正状态的数组来实现。

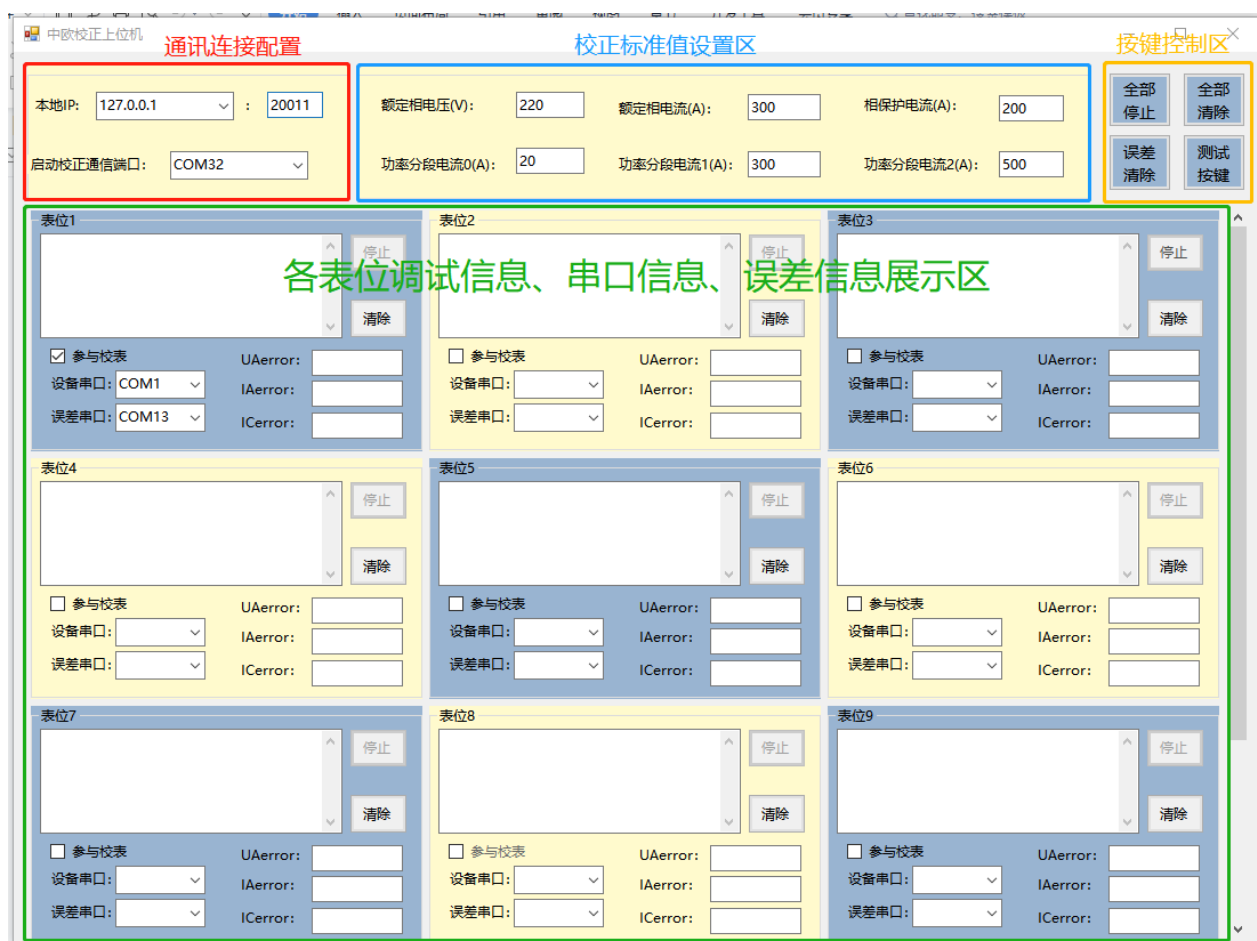


图 4.7 校正上位机页面展示图

校正上位机页面如图 4.7 所示。可分为通讯连接配置区、校正标准值设置区、按键控制区、表位信息展示区。在通讯连接配置区输入本地 IP 地址及端口号，与远程终端建立连接，选择校正台体上启动按键与校正上位机的通信端口。在校正标准值设置区设置待校正参数的标准值，具体待设置标准值的参数项如图 4.7 中的校正标准值设置区所示。通过点击按键控制区“全部停止”的按键，能够停止校正流程，通过点击“全部清除”按键，能够清空表位信息展示区中文本框的打印信息，通过点击“误差清除”按键，清除表位信息展示区中各表位的校正后误差值，便于下一批设备进行校正，通过点击“测试按键”能够测试校正上位机是否与校正台体以及下挂设备成功建立连接。表位信息展示区包括 12 个表位的信息展示区，每个表位的信息展示区中能够通过选择是否勾选“参与校正”的控件，决定该表位是否参与

校正，文本框中显示的是该表位校正过程中与下挂设备和校正台体之间的信息交互内容，主要用于方便开发者在调试过程中通过查看调试信息判断校正流程的进程，以及在校正流程意外出错时，通过查看文本框的调试信息开发者能够尽快找到问题所在，尽快找到解决问题方案，加快研发进程。

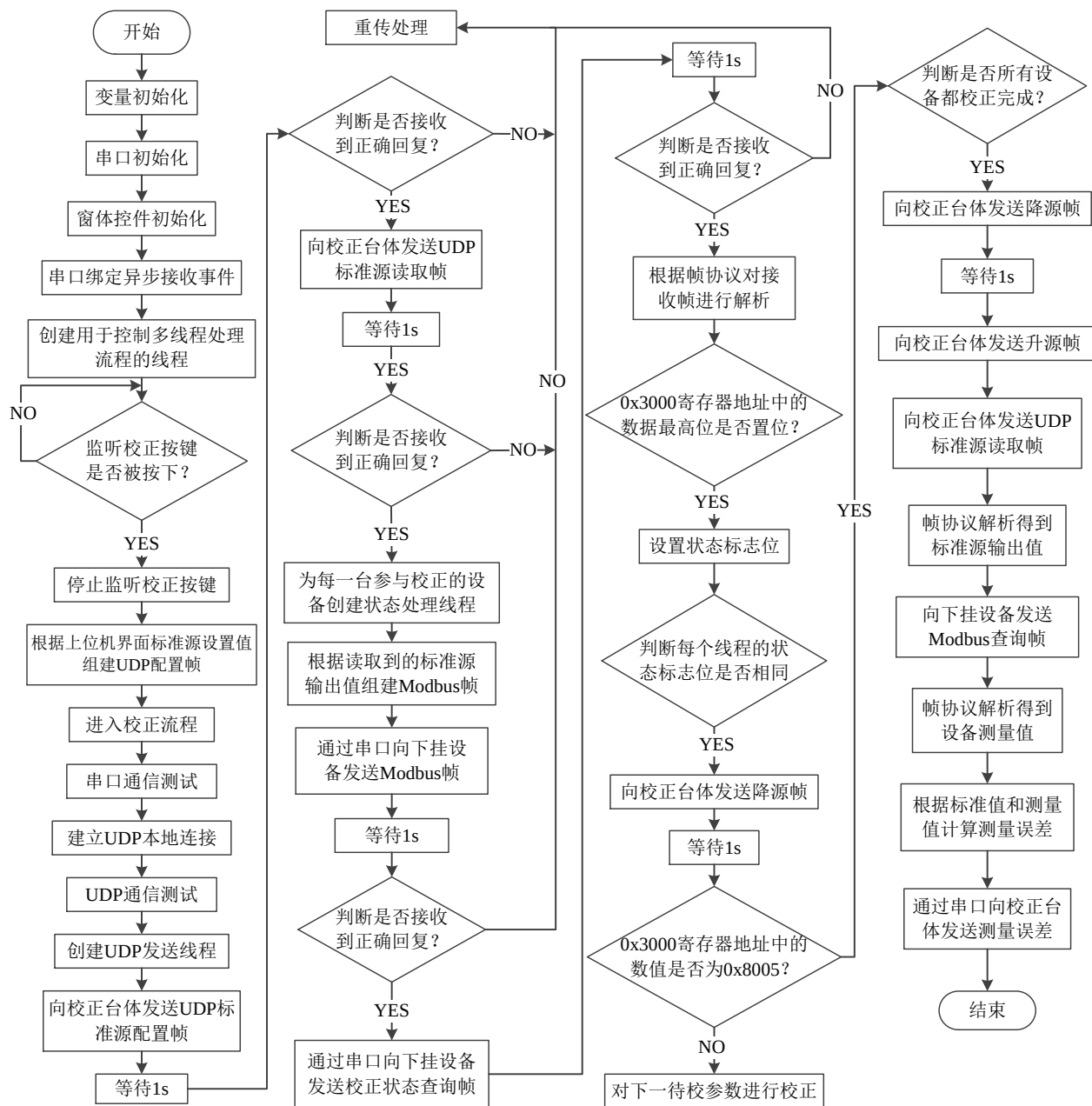


图 4.8 校正上位机软件设计流程图

该校正上位机软件设计流程图如图 4.8 所示。在校正流程开始前，需要预先设置好每个表位的设备串口和误差串口，否则无法成功进入校正流程，设备串口是指该表位的下挂设备与校正上位机进行通信的串口，误差串口是指校正上位机与校正台体之间发送误差值的通信串口。各表位完成校正后经过复检计算出校正后的测量误差值，包括相测量电压误差、相测量电流误差、相保护电流误差，在表位信息展示区进行展示，同时上位机将误差值经误差串

口传送给校正台体，并显示在校正台体的数码管上，便于工作人员判断误差是否合格。

4.3.4 自动校正系统软件设计

自动校正系统整体软件设计流程图如图 4.9 所示。

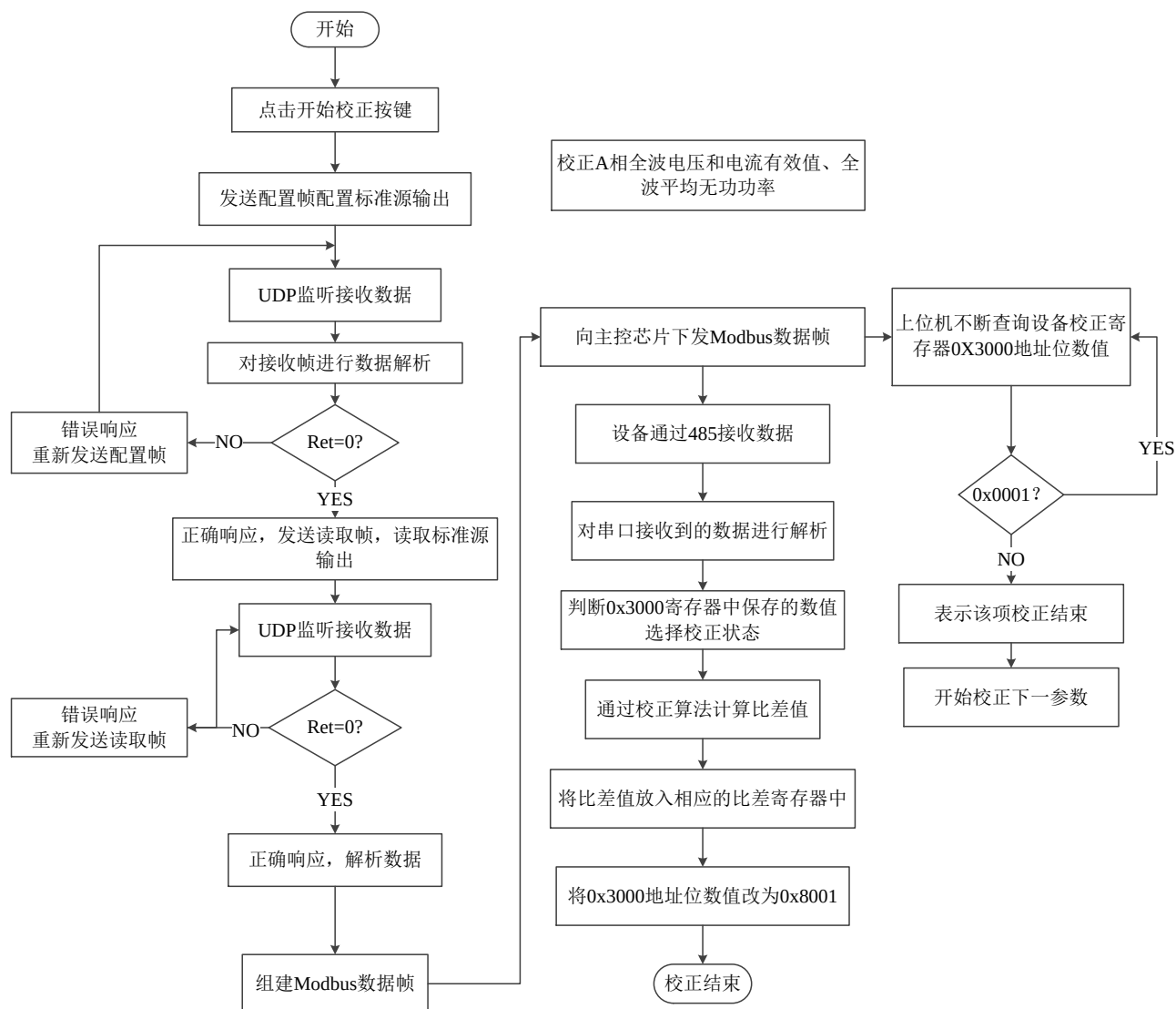


图 4.9 自动校正系统整体软件设计流程图

校正上位机通过监听启动校正串口是否接收到预先规定的启动校正帧，来判断启动校正按键是否被按下。当监测到启动校正按键被按下后，由校正上位机向校正台体发送 UDP 配置帧，设置台体标准源输出。之后监听 UDP 端口，对 UDP 端口接收到的数据帧进行数据解析。鉴于 UDP 通信不保证可靠传输，为了尽可能的保证通信质量和效率，采用超时重传和错误重传进制。当接收到错误响应或者数据发送后规定时间内未接收到响应，都会对上一次传输的数据帧进行重传处理。通过软件可以限制重传次数 N，当重传了 N 次后仍未接收到正确响应，则判定为通信失败，校正异常，终止当前校正流，本系统设计中在进行 UDP 通信

均采用该重传机制。

在对 UDP 返回数据帧进行数据解析时,如果返回值 Ret 不等于 0,表示接收到错误响应,校正台体标准源未配置成功;如果返回值 Ret 等于 0,表示接收到正确响应。校正上位机向校正台体发送 UDP 读取帧,读取标准源输出,继续监听 UDP 端口,并根据协议格式对 UDP 端口接收到的数据帧进行解析。如果返回值 Ret 不等于 0,表示接收到错误响应,未能正确读取校正台体标准源输出,根据重传机制进行重传处理。

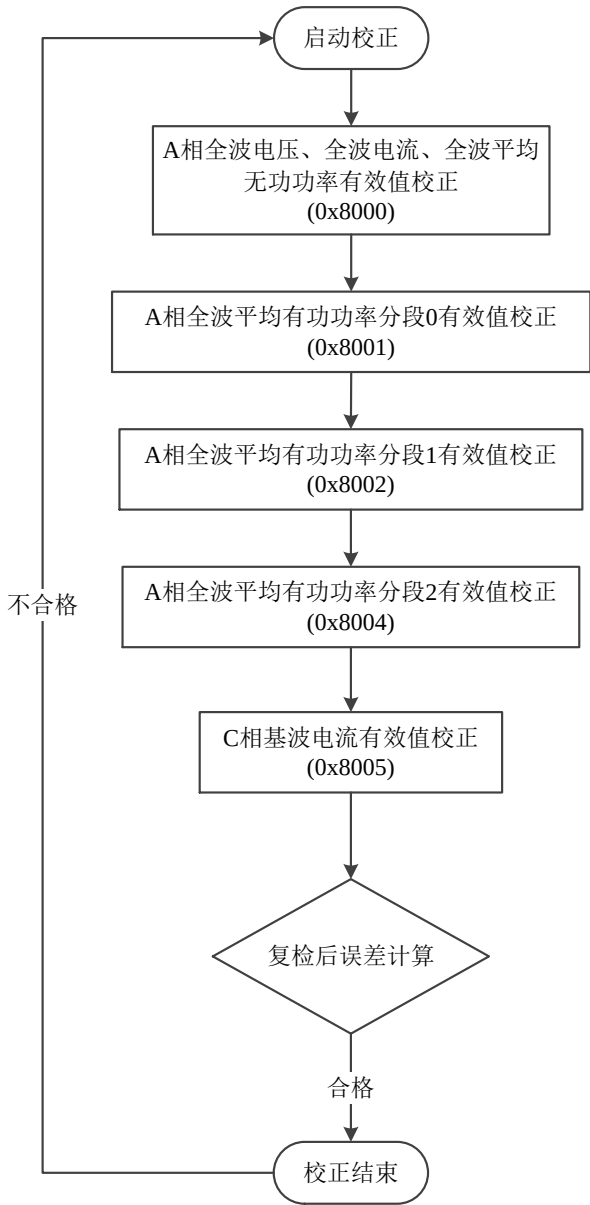


图 4.10 待较参数校正顺序

设备和校正上位机之间通过串口建立连接,基于 Modbus 通信协议进行双向通信。根据读取到的标准源输出参数值组建对应的 Modbus 数据帧,校正上位机通过设备通信串口向设备下发 Modbus 数据帧,下挂设备的串口通信处理单元会对串口接收数据进行解析处理。

校正上位机会定时向设备发送校正状态查询帧,查询设备的校正状态。待较参数校正状

态保存在 0x3000 寄存器中，初始值为 0x00，通过判断 0x3000 寄存器中保存的数值来判断设备是否开始或结束校正操作以及控制校正哪项待校参数，待校参数校正顺序如图 4.10 所示。如果 0x3000 寄存器中的数据内容为 0x0001，则将设备工作状态设置为校正状态，设备开始进行参数校正。某项参数校正结束后将 0x3000 寄存器最高位置位。当 0x3000 寄存器中的数据内容为 0x8005，表示该设备所有待校参数校正完毕。

批量的待校设备中除了校正异常终止的设备外，其他正常执行校正流程的设备的各个待校参数均已完成校正，则判定为校正结束。当校正上位机判断所有待校设备均已校正结束，对该批设备进行复检。校正上位机向校正台体发送 UDP 设置帧，设置标准源输出为 220V、600A，延时 1s 后，向校正台体发送 UDP 读取帧，读取标准源输出作为标准值，向下挂设备发送数据查询帧获取设备的实时测量值，将下挂设备的实时测量值与标准源输出值对比计算出误差值，通过误差传输串口将相电压、相电流、相保护电流的误差值发送给校正台体，并在台体误差显示数码管上进行显示，由人工判断误差是否合格。各参数校正后需达到的采集精度范围如表 4.7 所示。

表 4.7 参数精度范围

参数	精度范围
相电流和相电压	$\leq 0.5\%$
有功和无功功率	$\leq 1.0\%$
保护电流	$\leq 8\%$
温度	$\leq 2^{\circ}\text{C}$

设备作为校正主体，进行校正操作时安装于校正台体的测试架上，通过对设备主控模块的软件设计控制设备端的校正流程。通过对 Modbus 数据帧解析，获得校正台体的标准源输出值，经式 (4-1) 校正算法公式对设备实时测量值和标准值的计算得到对应比差值，并用这些计算得到的比差值配置计量芯片的对应比差寄存器，实现对设备参数的校正。其中 S 表示计算得到的补码形式的比差值， S_1 表示原始比差值，这里为了方便计算，在校正前将原始比差值设置为 0， e 表示误差，误差计算公式如式 (4-2) 所示。

$$S = 2^{31} \left(\frac{1}{1+e} + 1 \right) + S_1 \left(\frac{1}{1+e} \right) \quad (4-1)$$

$$e = \frac{X - X_{\text{标准}}}{X_{\text{标准}}} \quad (4-2)$$

其中 X 即为设备端实时测量值， $X_{\text{标准}}$ 表示校正台体标准源输出值。设备端校正处理软件设计流程图如图 4.11 所示

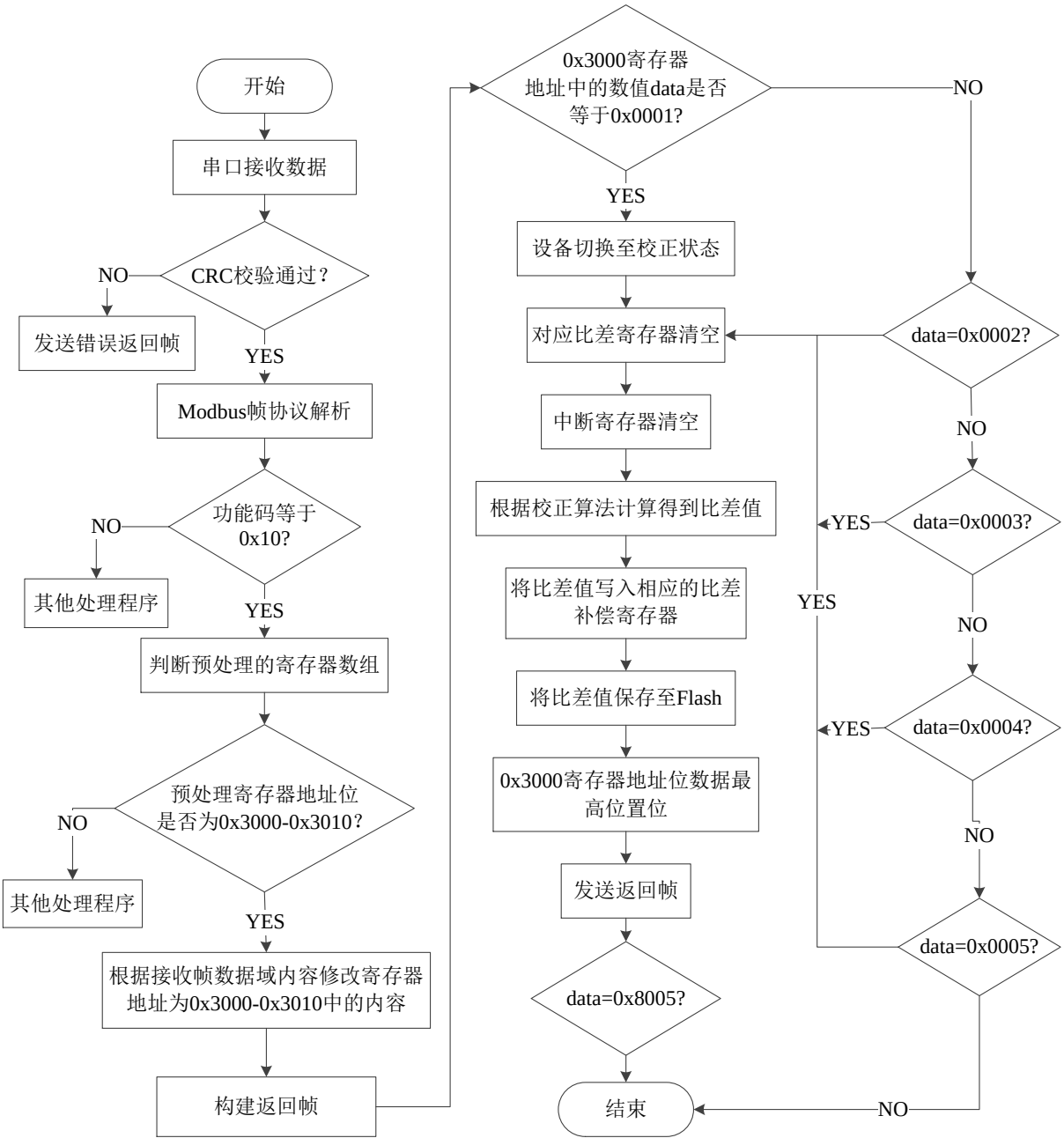


图 4.11 设备端校正处理软件设计流程图

4.3.5 自动校正系统实物展示

校正台体设备是由某电力公司生产的，校正台体设备实物正面和背面分别如图 4.12 和图 4.13 所示，负责提供标准源输出以及校正后误差显示。卡扣设计的待校设备安装于校正台体测试架，操作工人只需按下校正台体上的启动校正按键即可一键开启校正流程，无需其他人工操作，校正过程中台体输出参数值会显示在台体的显示屏上。校正台体的电源按键和启动校验按键如图 4.14 所示，误差显示数码管如图 4.15 所示，标准源参数显示屏如图 4.16 所示，校正台体设备测试架如图 4.17 所示。



图 4.12 校正台体设备正面图



图 4.13 校正台体设备背面图



图 4.14 校正台体按键



图 4.15 校正台体误差显示数码管



图 4.16 校正台体标准源参数显示屏

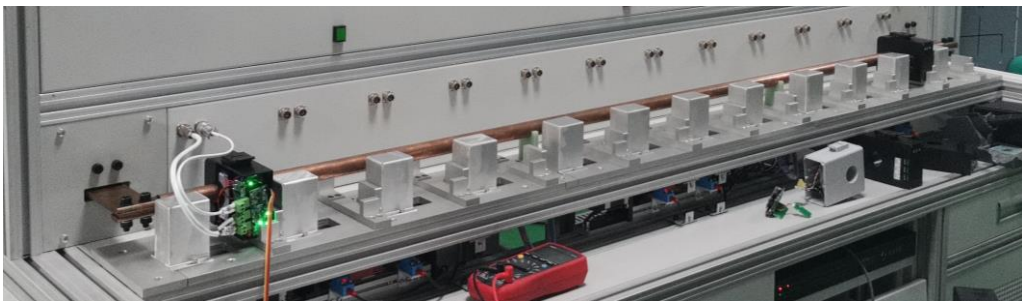


图 4.17 校正台体设备测试架

校正上位机是自动校正系统的一部分，是实现设备批量校正的关键，也是本文设计的重要一环。在进行校正流程之前，工作人员需要通过校正上位机配置 UDP 通信的本地 IP 地址

和端口号，配置进行串口通信的设备串口号和误差串口号，设置台体的标准源输出，开发人员可以通过校正上位机中文本框的打印数据信息，判断校正流程，便于设备调试，校正过程中如若出现异常可以通过操作上位机界面的按键，停止校正流程，校正结束后，相电压、相电流、相保护电流误差回显示在上位机界面上。自动校正系统调试过程中校正上位机界面如下图所示，

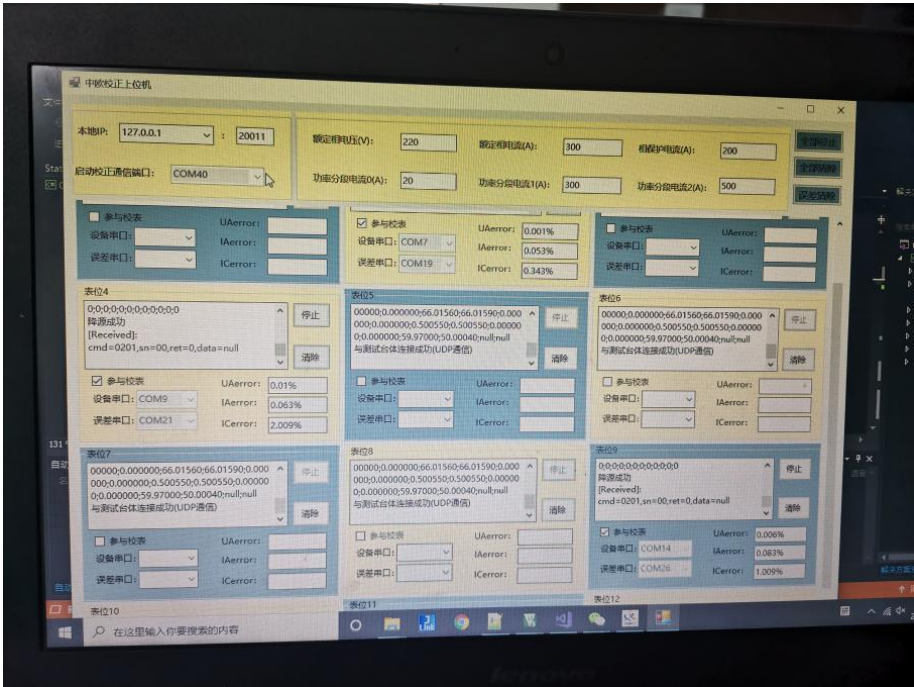


图 4.18 校正上位机测试界面

智能低压分路监测设备是校正主体，设备实物图如图 4.19 所示，设备主控板实物图如图 20 所示，设备的外壳体是由上、下壳体组成，上、下壳体采用铰接方式连接，上壳体的底面制成上凹槽形式，下壳体的顶部制成上凹槽形式，上壳体和下壳体对合时会构成一个圆形夹线槽，采用开合式结构，卡扣设计，在进行校正时被安装于校正台体的测试架上。设备安装于校正台体测试架的展示图如图 4.21 所示。



图 4.19 智能低压分路监测设备实物图



图 4.20 智能低压分路监测设备主控板实物图



图 4.21 设备安装于测试架展示图

4.4 自动校正系统功能测试

4.4.1 系统功能测试

系统测试是在工厂生产车间进行的，测试环境如图 4.22 所示，进行测试前，首先要完成以下准备工作：

- (1) 将待校正设备安装在校正台体的测试架上，最多可以同时测量 12 台设备，设备电源线接入校正台体提供的电源接口；
- (2) 将校正台体提供的虚拟串口服务器接口接入用于运行校正上位机的 PC 端；
- (3) 在校正上位机操作界面设置本地 IP 地址和端口号；
- (4) 在校正上位机操作界面配置启动校正通信串口号、各个表位设备的误差串口号、设备串口号；
- (5) 在校正上位机界面设置校正台体标准源输出值；
- (6) 在校正上位机界面勾选参与校正的设备；
- (7) 点击校正台体上的电源按键，开启校正台体的电源；
- (8) 点击校正台体上的启动校正按键，开启校正流程。



图 4.22 自动校正系统现场测试图

进行批量校正的智能低压分路监测设备的数量对自动校正系统性能没有影响，由于在测试期间只有 3 台设备，因此进行系统测试时，先对 3 台设备进行校正测试，将 3 台设备分别安装在测试架的表位 1、表位 3、表位 8。设备校正结束后进行复检，并将测量误差由校正上位机通过误差串口传输至校正台体，在台体的误差显示数码管上加以显示，数码管显示值除以 1000 即为百分比误差。如图 4.23 所示即为校正台体的误差显示，其中表位 1 的设备电压、测量电流、保护电流的测量误差分别为 0.001%、0.053%、0.343%均在要求精度范围以内。



图 4.23 校正台体的误差显示图

4.4.2 测试数据展示与分析

4.4.2.1 校正效率测试数据展示与分析

采用该自动校正系统进行了 10 次设备批量校正测试，并对这 10 次校正所占用的时间进行统计，统计结果如表 4.8 所示。

表 4.8 校正时间统计表

次数 N（次）	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
时间 t（s）	39	41	44	37	40	42	38	42	41	40

由表 4.8 中的数据可知，10 次校正所占用的时间均在 37~44s 之间，校正时间折线图如图 4.24 所示。校正时长相对较为稳定，平均每批设备校正需要 40.4s，平均每台设备校正所需时间与进行批量校正的设备数量成反比，由于批量进行校正的设备数量对校正时间没有影

响，也就是说批量校正 3 台设备和批量校正 12 台设备所花费的时间是一样的，因此假定对 12 台设备进行批量校正，那么平均每台设备校正所需时间约为 3.37s。

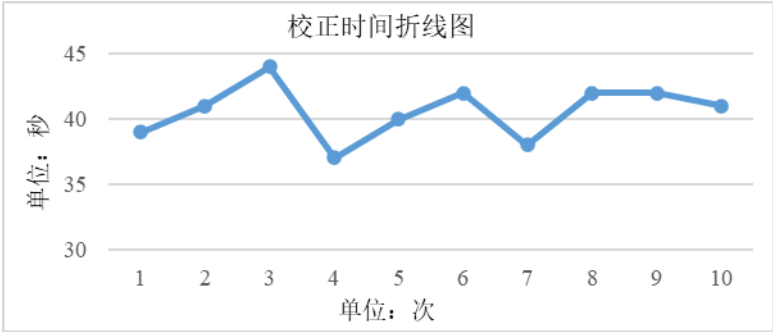


图 4.24 校正时间折线图

现有两种应用较为广泛的误差校正方式，一种是通过人工调节芯片电压回路的电阻矩阵来调节测量误差，为了便于描述简称方式一；另一种是通过对芯片内部存储器进行编程来实现误差调整，简称为方式二，将本文通过自动校正系统进行误差校正的方式称作方式三。对三种方式进行对比分析如表 4.9 所示。

表 4.9 三种校正方式对比

类别	特点	平均单台校正时间
方式一	依赖于人工手动校正，校正流程繁琐、易受工人主观因素影响，校正精度一致性差，校正效率低	40s
方式二	机器代替人工，校正效率有所提高，校正流程有所简化，但是硬件成本高	8s
方式三	校正操作简单，批量校正，极大提高了校正效率	3.37s

根据表 4.9 中的数据可知，本文所采用的方式三，平均校正每台设备仅需 3.37 秒，相较于方式一，校正效率提升了 91.6%，相较于方式二，校正效率提升了 57.9%，极大的提高的校正效率，且校正流程也极为简化，工人只需点击校正开始按键，即可一键开启批量校正操作。经过多次校正测试，本文所设计的自动校正系统实现了提高校正效率、简化校正流程的设计目标。

4.4.2.2 采集精度测试数据展示与分析

对经自动校正系统校正后的智能低压分路监测设备的采集精度进行测试，相电压和相电流分别在 0~220V、0~720A 区间段内分段进行测试和数据统计。

在 0~220V 电压区间内，取五个测试点分别是 50V、100V、150V、200V、220V，在这 5 个测试点进行相电压测试，相电压测量数据如表 4.10 所示。

表 4.10 相电压测量数据

测试点	相电压理论值（V）	相电压测量值（V）	测量误差
50	50	49.98	0.0400%
100	100	99.97	0.0300%
150	150	149.98	0.0133%
200	199.98	199.97	0.0050%
220	220	220	0.0000%

根据相电压测量值和理论值计算相电压测量误差，其折线图如图 4.25 所示。

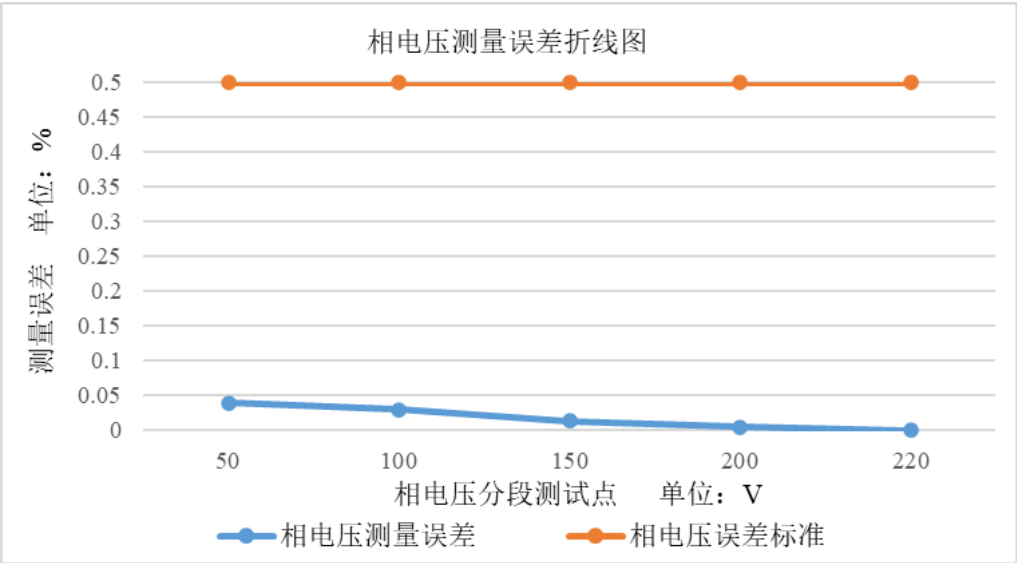


图 4.25 相电压测量误差折线图

要求相电压测量误差低于 0.5%，由图 4.25 可知，设备在 0~220V 任意区间段内的测量误差均低于 0.5%，满足预期精度要求。

在 0~720A 电流区间段内，取 8 个测试点分别是 20A、100A、200A、300A、400A、500A、600A、720A，对这 8 个测试点进行相电流和保护电流测量精度测试。相电流测量数据如表 4.11 所示。

表 4.11 相电流测量数据

测试点	相电流理论值(A)	相电流测量值(A)	测量误差
20	20	19.98	-0.1000%
100	100.77	100.69	-0.0794%
200	200.868	200.196	-0.3345%
300	301.27	301.22	-0.0166%
400	401.85	401.92	0.0174%
500	502.53	502.76	0.0350%

续表 4.11

测试点	相电流理论值(A)	相电流测试值(A)	测量误差
600	603.16	603.5	0.0564%
720	723.37	723.99	0.0857%

根据相电流测量值和理论值计算相电流测量误差，其折线图如图 4.26 所示。

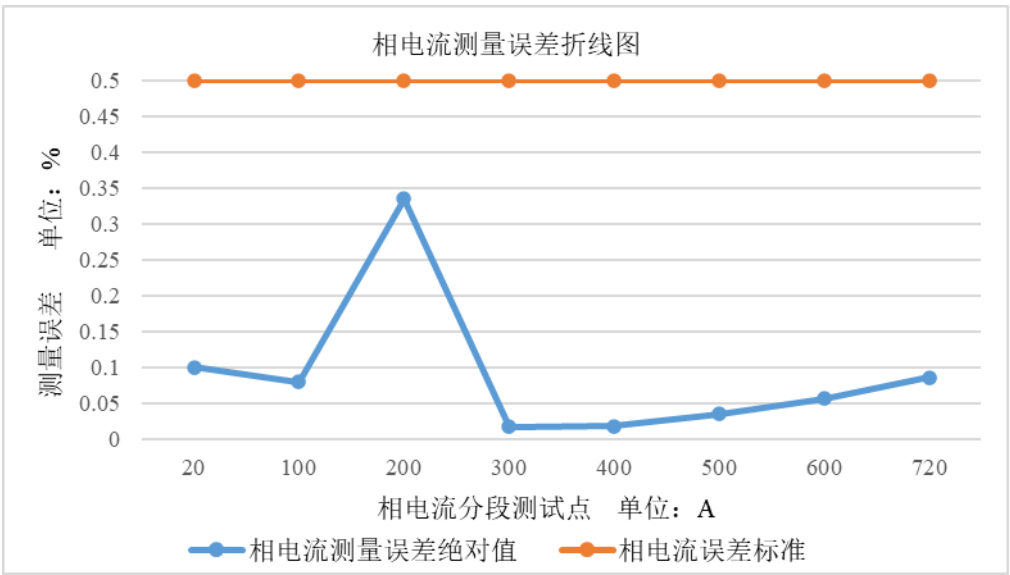


图 4.26 相电流测量误差折线图

要求相电流的测量误差低于 0.5%，由图 4.26 可知，设备在 0~720A 任意区间段内的相电流测量误差均低于 0.5%，满足预期精度要求。

保护电流测量数据如表 4.12 所示。

表 4.12 保护电流测试数据

测试点	保护电流理论值（A）	保护电流测量值（A）	测量误差
100	100.8	99.14	-1.6468%
200	200.4	199.36	-0.5190%
300	301.35	299.9	-0.4812%
400	401.91	400.11	-0.4479%
500	502.548	498.23	-0.8592%
600	603.22	591.73	-1.9048%
720	723.67	697.57	-3.6066%

根据保护电流测量值和理论值计算测量误差，保护电流测量折线图如图 4.27 所示

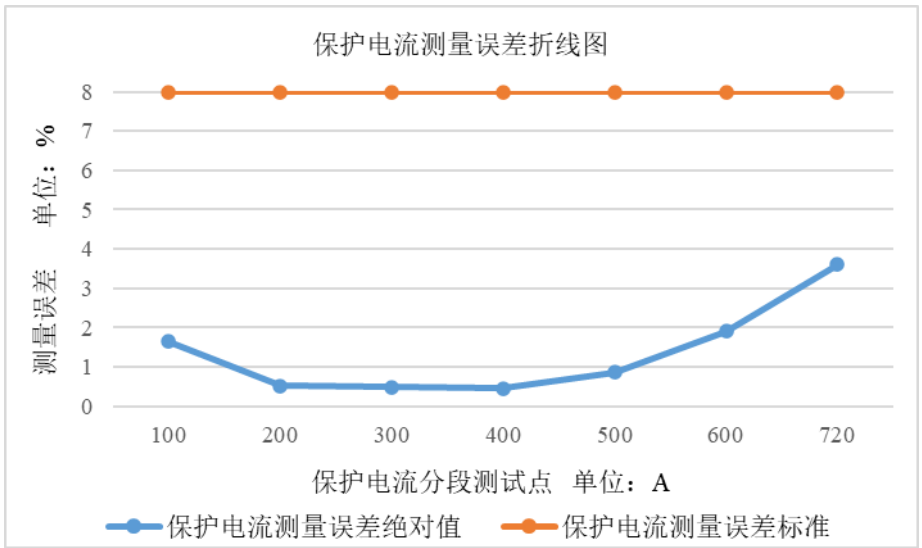


图 4.27 保护电流测量误差折线图

要求保护电流的测量误差低于 8%，由图 4.27 可知，设备在 0~720A 任意区间段内的保护电流测量误差均低于 8%，满足预期精度要求。

在 0~15000W 内分别取 15 个测试点对有功功率和无功功率测量精度进行测试。有功功率测量数据如表 4.13 所示。

表 4.13 有功功率测试数据

序号	有功功率理论值（W）	有功功率测量值（W）	测量误差
1	2185.58	2179	-0.3467%
2	8840.58	8826	-0.2453%
3	17722.56	17695.87	-0.1506%
4	22170.42	22144.5	-0.1169%
5	35146.14	35120.53	-0.0729%
6	48506.76	48466.45	-0.0831%
7	57409.86	57373.6	-0.0632%
8	66282.6	66164.64	-0.1780%
9	75138	75020	-0.1570%
10	88419.6	88300.44	-0.1348%
11	97273.2	97138.4	-0.1386%
12	106159.2	106022	-0.1292%
13	119401.8	119293.77	-0.0905%
14	128231.4	128115.76	-0.0902%
15	150321	150.182.78	-0.0919%

无功功率的测量数据如表 4.14 所示。

表 4.14 无功功率测试数据

序号	无功功率理论值 (W)	无功功率测量值 (W)	测量误差
1	3816	3800	-0.4193%
2	11480	11507.52	0.2397%
3	23040.78	22985.85	-0.2384%
4	38173.2	38087.06	-0.0057%
5	45887.46	45787.8	-0.2172%
3	57409.02	57314.84	-0.1641%
7	68915.4	68812.84	-0.1488%
8	76566	76487.93	-0.1020%
9	88072.2	87967.04	-0.1194%
10	99557.4	99479.57	-0.0782%
11	107219.4	107219.3	-0.0840%
12	103387.2	103309.07	-0.0756%
13	118730.4	118635.46	-0.0800%
14	126371.4	123297.42	-0.0585%
15	137814.6	137737.25	-0.0561%

根据分别根据有功功率和无功功率理论值和测量值计算出对应误差，有功功率和无功功率测量误差折线图如图 4.28 所示。

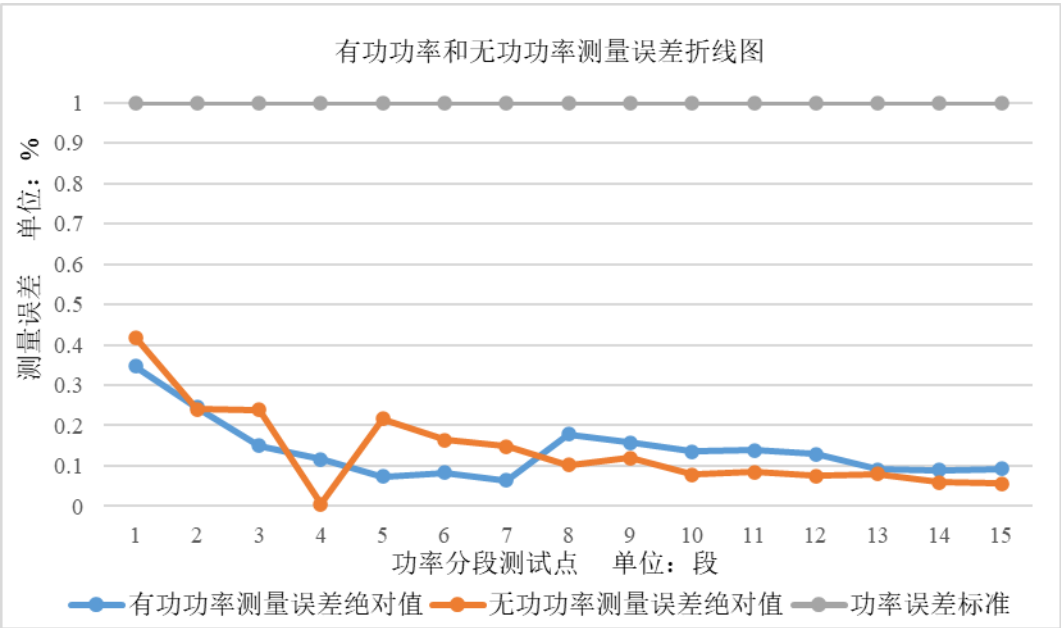


图 4.28 有功功率和无功功率测量折线图

要求有功功率和无功功率的测量误差低于 1%，由图 4.28 可知，设备在 0~15000W 任意区间内，有功功率和无功功率的测量误差均低于 1%，满足预期精度要求。

通过对相电压、相电流、保护电流、有功功率、无功功率分段进行采集精度测试，测量结果表明，经自动校正系统校正后的设备相电压和相电流测量误差低于 0.5%，保护电流测量误差低于 8%，有功功率和无功功率测量误差低于 1%，均达到了预期精度要求，测量误差浮动较小，设备校正后的采集精度一致性较好。

4.5 本章小结

本章首先对传统电能校正方案进行分析，继而进行需求分析和改进方案设计，对自动校正系统需要应用到的虚拟串口技术、多线程处理机制进行技术分析。接着对自动校正系统进行设计，包括自动校正系统框架设计、通信协议设计、校正上位机设计、系统软件设计，然后进行系统实物展示。最后对系统分别进行了校正效率和采集精度的测试，测试表明，采用本文所设计的自动校正系统进行设备的参数校正时，平均校正单台设备仅需 3.37s，相较于传统人工校正。校正效率提升 91.6%，相较于方式二校正效率提升了 57.9%，简化了校正流程，解放人工。经自动校正系统校正后的智能低压分路监测设备的各项电能参数测量误差均达到预期的精度要求，且设备校正后的采集精度一致性较好，本文所设计的自动校正系统投入实际应用可以节省校正时间，减少人力资源占用，利用有限时间创造更大经济效益。

第五章 总结与展望

5.1 总结

本文针对实际项目--智能低压分路监测系统的设计与实现。传统的监测设备智能化程度较低，只能对低压线路进行本地即时监测，无法进行远程实时数据采集分析和存储，同时基本也不具备谐波分析功能，没有重大事故的报警功能。为了能够实现对 400V 低压分支线路运行状态的在线监测和故障指示以及电能质量分析等功能，本文基于这个背景下进行了研究，所做内容包括：

(1) 对低压分路监测系统的研究背景及研究意义进行分析，接着对低压分路检测技术国内外研究现状进行分析，进行数据采集方案的对比分析和选择以及低压分路监测原理分析，然后对电力谐波相关问题进行研究，包括分析电力谐波产生的原因和危害，对主流的几种电力谐波分析技术进行对比分析，结合本系统的特点，选择基于傅里叶变换原理进行谐波分析最后对电能参数校正技术研究现状进行分析。

(2) 对智能低压分路监测系统的各个部分进行详细设计，由智能低压分路监测设备、Cat.1 智能网关的硬件平台组成。智能低压分路监测设备实时采集低压分路的电能参数数据，并通过 Cat.1 智能网关依托计算机网络通信技术，将下挂设备采集到的状态信息以监控点的形式上报给云平台，在 Web 监测终端界面上可以总览各个设备监测的电网实时运行状态信息。当监测到电网状态异常时，及时向工作人员推送异常报警信息，从而可使检修人员及时前往故障点检修，降低火灾风险，提高供电质量。

(3) 针对谐波分析功能的设计，考虑到原基于离散傅里叶变换的谐波分析运算量较大、运算精度低，为了减少芯片数据运算量，改善算法运算精度，对该算法进行分析优化，采用基于复序列分裂基的快速傅里叶算法对电力谐波进行分析，并针对该算法可能出现的误差因素提出相应的改进措施，改善算法的分析精度，结合本系统，通过软件设计实现谐波分析功能。同时结合本文所设计的智能低压分路监测系统进行谐波分析功能测试，从测试数据得出相较于传统 FFT，采用该算法提高了谐波分析的运算精度，满足本次设计需求。

(4) 应客户需求，结合智能低压分路监测设备在设备出厂之前需要进行参数校正参数，以满足高精度用户的需求，而当前多采用人工手动校正的操作，校正效率低，校正流程繁琐重复，校正精度不一致。为了提高校正效率，简化校正流程，自主设计研发了智能低压分路监测设备的自动校正系统，结合网络通信技术、多线程软件编程技术、虚拟串口技术对该自动校正系统进行设计实现设备的批量校正功能。自动校正系统主要由智能低压分路检测设备、校正上位机、校正台体三部分组成，设备作为校正主体，校正台体提供标准源输出，由

校正上位机控制校正流程。利用该自动校正系统可通过点击校正台体上的校正开始按键，一键开启校正流程，无需其他的人工操作，校正结束后的芯片测量误差可在校正台体的数码管上进行显示。最后对该自动校正系统进行系统测试，测试数据表明，通过该自动校正系统能够在 40s 左右完成 12 台设备的批量校正，缩短了校正时间，简化了校正流程，经校正后的设备测量精度一致性较好，满足预期精度要求，达到设计需求。

5.2 展望

本文智能低压分路监测系统的设计与实现，解决了人工实地检测效率低，不能实时获取低压电网运行状态，且当电网工作异常时，无法及时赶往故障点维修等问题，但个人在进行智能低压分路监测系统的设计经验有限。结合日益复杂的实际需求，系统功能可以进一步完善：

(1) 智能低压分路监测设备只实现的低压配电网线路中部分电能数据的实时采集，随着用电负载的不断接入，配电网系统结构日益复杂，电网系统所受到的干扰也不断增加，未来智能低压分路监测设备需要可以采集到更多的电能指标，功能还可以进一步完善；

(2) 构建基于物联网的智能低压分路监测系统，不仅可以对低压电路进行实时监测，还可以根据用户需求，设计一款用户侧预检装置。该装置可在低压总电源通电前，提前对供电线路实现预检，可以提前检测出线路的短路、漏电等状况，有利于增强用电安全性；

(3) 在大数据分析背景下，可以对智能低压分路监测设备进行参数分析，对智能低压分路监测设备的使用寿命进行预测。通过对相关设备参数进行分析，可以更为精确及时的捕捉到设备异常情况，并结合使用场景，为智能低压分路监测设备分析提供有效的数据支持。

致谢

时光飞逝，转眼间我的研究生生涯即将画上一个句号，回想起这三年来的历程，掺杂着主动的吃苦与实际的磨练，但到最后最重要的还是一路走下来的收获与一次次尝试的经验积累。在即将完成的论文中承载着我这三年的收获与老师对我培养的心血，以及杭电对我求学之路上提供的学习环境。

首先，我要感谢我的导师陈科明教授。读研期间，陈老师严谨的求学态度、渊博的学识积累和勤勉的工作精神深深的影响了我，为我提高专业知识和技能打下敦实的基础，从而让我能够胜任社会工作，给予我立于社会之根本。陈老师在我书写论文期间给予了极大的关心和指导，陈老师在指导中亲历亲为，循循善诱，让我能够顺利完成研究生三年的求学之路。感谢陈老师的付出，这份恩情我将铭记于心，承蒙师恩不弃，望师珍重！

感谢我的师兄师姐、同门、师弟师妹以及实习中遇到的小伙伴们。感谢你们在学习、生活和工作上给予我莫大的帮助，如今将要各奔东西，愿诸君前程似锦，万里无忧！

感谢我的家人。感谢我的父母这么多年来无怨无悔不求回报的付出，永不停歇的照顾；感谢我的家人在我迷茫时做我最坚实的靠山，家永远是我温暖的港湾和最有力的支撑；感谢你们在我面临选择时，能够像朋友一样谈心，帮我分析得失而从不替我做决定；感谢你们为我营造的有爱的家庭氛围，让我无忧无虑的长大，成为一个积极向上，乐观开朗的女孩。养育之恩，无以回报，希望我努力的成长能赶上你们变老的速度，希望我亲爱的爸爸妈妈还有我亲爱的弟弟能够身体健康，远离病痛，平安喜乐，万事胜意！

感谢我的师兄兼男朋友吴新虎。学路漫漫，幸遇良人，感谢你许我偏爱，护我周全，给我包容。感谢你在书写论文期间默默支持我、鼓励我，给我提供了宝贵的修改意见，督促我完成论文的编写。愿未来万事顺遂，携手并进，今年，明年，年年！

感谢论文评阅和答辩委员会的老师，感谢你们的耐心，我一定会悉心听取你们宝贵的意见并积极改正。

最后，由衷的祝愿所有人，万事胜意，乘风破浪，一起迎接更美好的明天！

参考文献

- [1] 张勇军, 刘斯亮, 江金群, 羿应棋, 李钦豪. 低压智能配电网技术研究综述[J]. 广东电力, 2019, 32(01): 1-12.
- [2] 南方电网报. 南方电网实现智能电表和低压集抄全覆盖. [EB/OL]. (2018-12-24).
- [3] 张薛鸿. 国家电网有限公司智能配电网探索与实践. [EB/OL]. (2018-09-18).
- [4] 张小龙. 低压电网实时监测相关技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [5] 朱威, 刘文刚. 住宅小区建筑低压配电系统的设计[J]. 科技创新与应用, 2012(21): 248-249.
- [6] 黄海潮, 钟一俊, 龚小刚. 配电线路在线监测系统的研发与应用[J]. 电力信息与通信技术, 2015, 13(03): 78-81.
- [7] 李栋. 电能质量远程在线监测系统的开发[D]. 郑州: 郑州大学, 2015.
- [8] 叶健锋. 智能电网设备状态监测评估及预测应用研究[J]. 电子制作, 2018(10): 64-65.
- [9] 景晶晶. 低压电网在线监测终端的设计与实现[D]. 西安: 西安工程大学, 2019.
- [10] 孙海波. 基于 ARM 的电能质量监测系统的设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.
- [11] 许加柱, 李晓芳, 黄际元, 姚新丽, 向博, 廖闻迪. 低压配电网智能监测与控制终端软硬件设计[J]. 电工电能新技术, 2012, 31(04): 79-82.
- [12] Upadhyaya S, Mohanty S. Fast Methods for Power Quality Analysis[J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2017, 18(5): 383-386.
- [13] Rinchin W. Mosobi, Sarsing Gao. Power quality analysis of low voltage distributed generators in standalone and grid connected modes[J]. International Journal of Power and Energy Conversion, 2021, 12(4): 274-278.
- [14] 张小龙. 低压电网实时监测相关技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [15] 王允彬. 配电网谐波在线监测与溯源研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.
- [16] 邵建昂, 吴为麟. 电能质量的谐波测量与分析[J]. 能源工程, 2003(01): 22-25.
- [17] 李维翰. 具有谐波分析功能的智能电表的研制[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.
- [18] 曹志威. 基于小波变换的谐波分析方法研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2019.
- [19] Gustavo R G, Mario M O, Carlos D K. Early infrastructure of an Internet of Things in Spaces for Learning[C]. Eighth IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies, 2008: 381-383.
- [20] Amardeo C, Sarma J G. Identities in the Future Internet of Things[J]. Wireless

- Personal Communications, 2009, 49(3): 353-363.
- [21] Dai Hao, Yang Zhenbao, Xue Zhicheng, Cui Zhiwen. Research on Active Distribution Network Monitoring and Police Method of Substation Based on Fault Tree[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1345(5): 179-182.
- [22] 张旭霞. 三相电能质量分析仪中的电能参数检测算法研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [23] RemigioCarmona Paula, Gonz á lez dela Rosa Juan Jos é , Florencias Oliveros Olivia, Sierra Fernández José María, Fernández Morales Javier, Espinosa Gavira Manuel Jesús, Agü era Pérez Agustín, Palomares Salas José Carlos. Current Status and Future Trends of Power Quality Analysis[J]. Energies, 2022, 15(7): 465-468.
- [24] 王先强, 任金娣, 谢晨晖, 吴国强. 一种改进的误差校表法自动校准软件[J]. 科技创新与生产力, 2015(03): 97-99.
- [25] 严应亮, 王玮. 一种单相电子式电表自动校正工具的研制[J]. 电子世界, 2013(06): 69-71.
- [26] 马丽萍, 张卫国. 基于 ZigBee 的电能质量监测系统的设计[J]. 电源技术, 2012, 36(08): 1192-1195.
- [27] Ashish Joshi, Gaurav Sharma. Power Quality Analysis in Power distribution Network[J]. CIGRE India Journal, 2020, 9(1): 189-192.
- [28] 卫建华, 徐薇, 刘文玥, 王琳萍, 王咪. 低压电网监测系统设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(01): 118-122.
- [29] 张展豪. 基于 NB-IoT 的电力仪表设计[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
- [30] 晏五一. 基于 ARM 的新型远程配变监控终端研究与设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- [31] 朱大伟. 基于 ARM 的嵌入式智能监测系统的设计和实现[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- [32] 盛亚杰. 基于物联网的 SF₆ 在线监测系统[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- [33] 严小强. 配电变压器智能监测技术及系统研究[D]. 上海: 东华理工大学, 2019.
- [34] 吴新虎. 基于物联网技术的 SPD 实时监测系统设计与实现[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2021.
- [35] Yuqing Zhou. Harmonic analysis of power grid with distributed generation[J]. AIP Conference Proceedings, 2019, 2154(1): 454-461.
- [36] Zengqiang Lai, Zhihong Xiao, Guoqing Zhang, Guizhong Wang, Ying Liu, Hongming Shen, Xu Gao. Application of FFT Interpolation Correction Algorithm Based on Window Function in Power Harmonic Analysis[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 252(3): 156-164.

- [37] 时军伟. 电能质量监测终端装置的研制[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [38] Paolo Attilio Pegoraro, Kyle Brady, Paolo Castello, Carlo Muscas, Alexandra von Meier. Compensation of Systematic Measurement Errors in a PMU-Based Monitoring System for Electric Distribution Grids. [J]. IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, 2019, 68(10): 341-345.
- [39] 蔡冰华. 基于 MSP430F5438 的智能电表的谐波分析及计量的研究[D]. 上海: 东华理工大学, 2015.
- [40] 代亚杰. 基于傅里叶变换和小波变换的电能质量谐波检测及扰动分析[D]. 太原: 中北大学, 2020.
- [41] 李剑飞, 陈隆道. 应用于电力谐波分析的改进插值算法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(08): 138-144.
- [42] 陈媛. 基于 STM32 的谐波检测仪的开发及谐波检测算法研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2013.
- [43] Rui Zhang, Wanying Jiang, Wei Li, Hui Gao, Qichao Song. Harmonic Analysis for Power Systems based on AD-RQEA[J]. International Journal of Performability Engineering, 2019, 15(6): 277-281.
- [44] Tao Jin, Yiyang Chen, Rodolfo C. C. Flesch. A novel power harmonic analysis method based on Nuttall-Kaiser combination window double spectrum interpolated FFT algorithm[J]. Journal of Electrical Engineering, 2017, 68(6): 348-354.
- [45] 董小双. 基于 IDT90E36 多回路电力监测仪的设计与实现[D]. 湖南: 湖南大学, 2017.
- [46] Zhipeng Jiang, Zhengyu Chen. An improved optimize method for power harmonics analysis based on windowed double-spectrum-line interpolation[J]. Journal of Interdisciplinary Mathematics, 2016, 19(2): 551-556.
- [47] Lin Cai. The Design of Power Harmonic Analyzer Based on UC/OS-II[J]. Advanced Materials Research, 2014, 3614(1055-1055): 324-327.
- [48] 王金丽, 盛万兴, 王金字, 杨洪磊, 宋祺鹏. 中低压配电网统一数据采集与监控系统设计和实现[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 72-76+81.
- [49] 陈和洋, 吴文宣, 郑文迪, 晁武杰, 唐志军. 电力系统谐波检测方法综述[J]. 电气技术, 2019, 20(09): 1-6.
- [50] 马文秀. 智能电能多功能测量仪的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2017.
- [51] Huang Jing, Bekiaris Georgios, Fitamo Temesgen, Scheutz Charlotte, Bruun Sander. Prediction of biochemical methane potential of urban organic waste using Fourier transform mid-infrared photoacoustic spectroscopy and multivariate analysis[J]. Science of the Total Environment, 2021, 790: 673-681.

- [52] Yoon Yeunggurl, Son Yongju, Cho Jintae, Jang SuHyeong, Kim YoungGeun, Choi Sungyun. High-Frequency Modeling of a Three-Winding Power Transformer Using Sweep Frequency Response Analysis[J]. *Energies*, 2021, 14(13): 432-437.
- [53] 张子悦. 基于 DSP 且具有物联网功能的智能电表研究与设计[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [54] 陈薇. 电力系统谐波分析方法研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2017.
- [55] 赵惠玲. 基于小波和 FFT 的电网谐波实时检测系统的研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2012.
- [56] 张金金. 基于嵌入式 Linux 的电能监测装置的研究与设计[D]. 青岛: 青岛大学, 2013.
- [57] 石伟峰, 罗花锋, 于鹏. 测试设备数据自动传输系统研究与设计[J]. *宇航计测技术*, 2013, 33(03): 53-58+67.
- [58] Kumar L Ashok, Indragandhi V., Selvamathi R. Design, power quality analysis, and implementation of smart energy meter using internet of things[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2021, 93: 171-178.
- [59] Ding Chaojie, Zhang Yiwei, Li Xiaorong, Ding Jianmin, Wei Shurong, Wang Lele. Power quality analysis of the Zhangjiakou regional network in China[J]. *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, 2017, 2017(1): 346-352.

附录

作者在读期间发表的学术论文及参加的科研项目

参加的科研项目：

- [1] 智能低压分路监测器开发，横向课题(KYH043119067M). 2019.11-2022.7
- [2] 新一代智能割草机控制系统开发，横向课题(KYH043121015M). 2021.01-2023.11

专利：

- [1] 胡晓双,陈科明,等.一种低压分路监测设备的自动校正方法[P]. 浙江省：CN113552522A, 2021-10-26.
- [2] 陈科明,胡晓双,等.一种低压分路监测设备的谐波分析方法[P]. 浙江省：CN114414886A, 2022-04-29.