

面向智能电网的电能质量分析装置

李强¹,李刚¹,贺艺²,张帅²

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 西安大易电子科技有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要:针对国内市场上电能质量分析装置功能不完善、网络化和智能化程度不高的问题,研制了一种面向智能电网的电能质量分析装置。该装置将国产物联网操作系统 RT-Thread 移植到跨界处理器 MIMXRT1021DAG5A,根据从 AD7606 获取的三相电流、电压值计算电压偏差、频率偏差、谐波、电压闪变、三相不平衡度、电压暂降等电能质量指标;将所测数据隔时通过 4G 模块上传至主站;一旦有异常事件发生,波形数据就会被保存在 U 盘中;WIFI 通信模块、RS485 通信模块、以太网模块可以实现局域网组网,4G 通信模块可以实现广域网组网,所有通信模块均可实现主从设备间数据交换和数据的实时传输。

关键词:电能质量;RT-Thread 操作系统;网络化;嵌入式系统

中图分类号:TM711 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed20317

Power Quality Analysis Device for Intelligent Power Grid

LI Qiang¹, LI Gang¹, HE Yi², ZHANG Shuai²

(1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048, Shaanxi, China; 2. Xi'an Dayi Electronic Technology Co., Ltd.,

Xi'an 710000, Shaanxi, China)

Abstract: Aiming at the problem that the power quality analysis device function in the domestic market is imperfect, the low degree of networking and intelligence, a power quality analysis device for intelligent smart grid was developed. The device transplants RT-Thread, a domestic product networking operating system to the cross-border processor MIMXRT1021DAG5A. Power quality indicators such as voltage deviation, frequency deviation, harmonics, voltage flicker, three-phase unbalance, and voltage sag were calculated according to the three-phase current and voltage values obtained from the AD7606. The measured data was uploaded to the main station through the 4G module at intervals, once an abnormal event occurs, the waveform data was saved in the U disk. WIFI communication module, RS485 communication module and Ethernet module can realize local area network(LAN) networking, while 4G communication module can realize wide area network(WAN) networking. All communication modules can realize data exchange between the master and slave devices and real-time transmission of data.

Key words: power quality; RT-Thread operating system; networked; embedded system

电能质量不仅对电网的安全、高效运行有重要意义,而且直接关系用户侧的设备能否正常工作^[1]。国内研制的电能质量分析装置普遍存在功能不完善、网络化程度低等缺点。随着“智能电网”的推进以及“泛在电力物联网”概念的提出,除了高可靠性,网络化和智能化将成为电能质量分析装置的发展目标。针对这种情况,急需研制一种功能完善、网络化程度高的电能质量分析

装置^[2-3]。

针对电能质量分析装置的实际需求,本文提出了一种基于 ARM Cortex-M7 内核的 i.MX RT 系列跨界处理器 MIMXRT1021DAG5A 和 AD7606 实时三相电压电流采集的设计方案,充分利用 MIMXRT1021DAG5A 跨界处理器的浮点运算单元(float point unit, FPU)等丰富的片上资源,实现对电能质量各项指标实时计算,采用以太网和

基金项目:陕西省科技统筹创新工程计划(NO.2012KTCG01-13)

作者简介:李强(1964—),男,硕士,副教授,Email:qiangli@xaut.edu.cn

RS485有线传输技术实现电能质量指标有线传输,采用WIFI和4G实现电能质量指标无线传输,采用U盘存储录波数据^[4]。

1 装置总体设计

装置总共分为3层,底层是电源模块和互感器模块,中间层是处理器模块和电压电流采集模块,顶层主要是有线和无线通信模块。三相电压、电流通过互感器转换为mV级的电压信号,经过前置放大电路转换为范围是±5 V的模拟信号,高精度AD采集芯片AD7606将放大后的模拟信号转换成数字信号并送入处理器MIMXRT1021DAG5A。处理器运用滑动滤波、FFT、锁相等算法计算电压偏差、频率偏差、谐波、电压闪变、三相不平衡度、电压暂降等电能质量指标^[5-6]。一旦有异常事件发生,三相电压波形就会被保存在U盘中。装置可以通过RS485总线、以太网、WIFI及4G读取数据和配置相关参数。利用4G通信在多个台区组建网络,数据上传至监控主站,实现实时准确的远程监控,为泛在电力物联网建设添砖加瓦。总体结构图如图1所示。

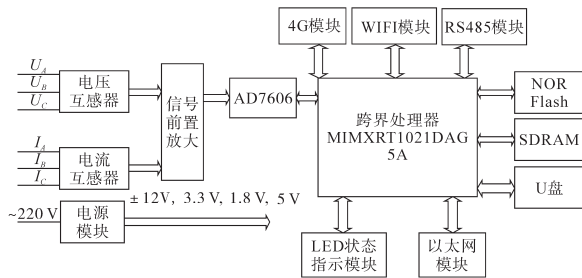


图1 总体结构图

Fig.1 Diagram of overall structure

1.1 硬件设计

1.1.1 跨界处理器MIMXRT1021DAG5A

MIMXRT1021DAG5A是恩智浦打破应用处理器和MCU之间的界限,打造的一类新“跨界”嵌入式处理器。MIMXRT1021DAG5A内核运行速度可达500 MHz,256 KB片上RAM,144引脚封装,外设丰富,中断延迟低至20 ns。这种新型应用处理器在应用处理器和MCU之间取长补短,填补了高性能与易用性之间的空白。

1.1.2 电压电流采集模块

电压互感器和电流互感器输出mV级的电压,使用OPA2277仪表放大器进行放大,单级放大电路不能满足需求,故用二级前置放大电路。在设计电路放大倍数时,以正常电压的±5%作为

裕量,以保证装置检测出用电异常情况。二级前置放大电路如图2所示。

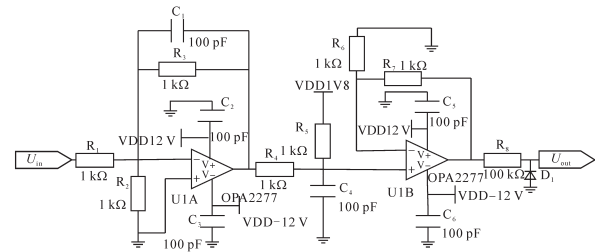


图2 二级前置放大器

Fig.2 Secondary preamplifier

6路放大后的±5 V双极性信号输入到16位高精度AD芯片AD7606。AD7606每个通道的采样率可达到200 ks/s,与处理器之间采用SPI串行通信。

1.1.3 装置存储模块

存储设备主要有96 KB boot ROM,256 KB片上RAM,8 M外部nor flash,32 M外部SDRAM、大容量外部U盘。处理器内部固化的boot ROM存放的是处理器启动信息,外部nor flash存放所有应用程序及启动程序。处理器上电后,从外部nor flash启动,通过分散加载文件把运行频次高的程序拷贝到片上RAM,剩下的程序拷贝到外部SDRAM。同理,高频次使用的变量和常量放在片上RAM,剩下的变量和常量放在外部SDRAM中。通过这种方法尽可能挖掘处理器的运行能力,提高装置的实时性。外部U盘主要用来存放用户异常事件发生时生成的录波文件和装置升级程序。

1.1.4 通信模块

RS485,WIFI,4G通信接口均由专用通信芯片和串口控制器组成;以太网通信接口由PHY芯片、网络变压器和以太网控制器组成。RS485、以太网、WIFI主要用于短距离大型设备间的组网和现场调试,4G主要用于电力部门宏观监控和台区间的远距离、大范围组网。

1.2 软件设计

1.2.1 RT-Thread物联网操作系统的移植

RT-Thread是一个集实时操作系统内核、中间件组件和开发者社区于一体的技术平台,由熊谱翔先生带领并集合开源社区力量开发而成。RT-Thread操作系统有体积小、成本低、功耗低、启动快速、组件丰富、高度可伸缩等特点。下载RT-Tread4.0.0版本源码,定位到MIMXRT1021DAG5A的板级支持包。根据硬件电路,ENV工具裁剪操

作系统,分配相关引脚,完善各个组件的功能并分别测试验证。

1.2.2 应用程序的设计

RT-Thread是嵌入式实时多线程操作系统,基本属性之一是支持多任务。处理器上电后,系统初始化,板级初始化,然后跳转到主线程,主线程主要完成子任务的创建和启动。本文设计了设备初始化任务、LED测试任务、电能质量计算任务、电能质量参数更新任务、RS485通信任务、WIFI通信任务、4G通信任务、以太网通信任务和异常事件检测任务,并对各个任务按照主次进行优先级划分,任务间通过信号量和消息队列进行通信,实现任务快速调度和管理。软件任务描述如表1所示,系统程序流程图如图3所示。

表1 任务描述
Tab.1 The description of task

任务类型	功能描述
设备初始化	AD7606, WIFI, 4G, U盘, 以太网初始化
LED测试	显示当前装置的工作状态
电能质量计算	原始数据进行滤波、锁相计算
电能质量参数更新	隔时计算频率、FFT、功率等并更新
RS485通信	对MODBUS主机的召测做出响应
WIFI通信	负责响应服务器下发的指令
4G通信任务	隔时向主站上报全部数据
以太网通信	负责响应服务器下发的指令
异常事件检测	检测电压暂降、闪变等事件并把事件波形保存在U盘

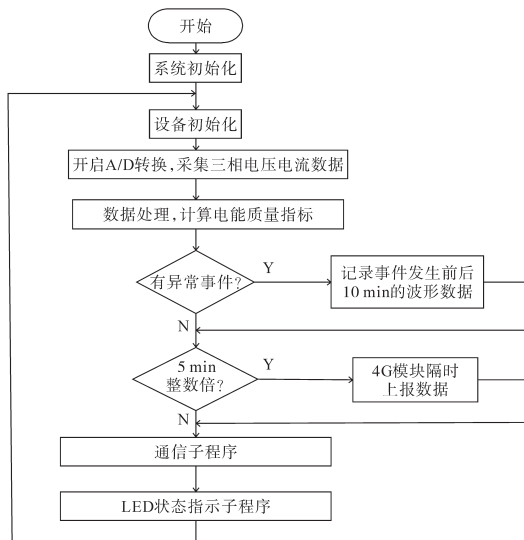


图3 系统程序流程图

Fig.3 Diagram of system program flow chart

2 相关算法实现

2.1 滑动平均滤波

对于离散系统,连续取 N 个采样值看成1个循环队列,队列的长度固定为 N ,每次采样到1个新数据放入队尾,并扔掉原来队首的1个数据(先进先出原则),滤波器每次输出的数据总是当前队列中的 N 个数据的算术平均值。在调试过程中发现其对周期性干扰有较好的抑制作用且平滑度高,但是对偶然出现的脉冲性干扰的抑制作用较差。

工业现场环境复杂,难免出现脉冲性干扰。为了保持较高的平滑度又能抑制脉冲性干扰,去掉队列中的最大值和最小值,把 $N-2$ 个数据的算术平均值作为滤波器的输出。串口打印装置的滤波数据,Matlab作图如图4所示。

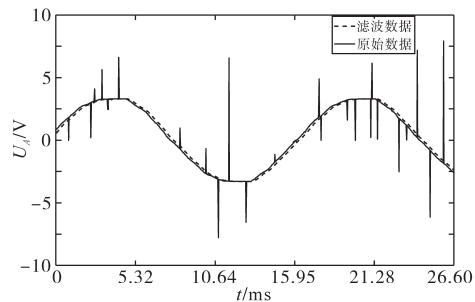


图4 滤波效果图

Fig.4 Diagram of filtering effect

从图4可以看出,滤波后数据不仅平滑度高,而且可以有效滤掉脉冲干扰。

2.2 谐波检测

对现场复杂多变的被测时域信号进行Fourier级数变换^[7],表达式为

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(2\pi n f_1 t) + b_n \sin(2\pi n f_1 t)] \quad (1)$$

其中 $f_1 = 1/T$

式中: $x(t)$ 为具备周期性质的电压信号; T 为工频周期; f_1 为基波频率; a_n, b_n 为Fourier级数的系数。

硬件采集回来的数据有限长度且是离散值。离散傅里叶变换(discrete fourier transform, DFT)计算量较大,不适合在硬件中快速分析。快速傅里叶变换(fast fourier Transform, FFT)的本质其实和DFT相同,只不过在运算上比DFT少很多倍的数量级。

本文谐波检测采用经典的快速傅里叶变换,

设计每个周波采样256个点,采样间隔为78 μs,作1024点FFT变换。处理器自带浮点运算单元FPU,官方提供有DSP库arm_cortexM7lfdp_math.lib,加载到工程可以直接调用FFT变换函数arm_rfft_fast_f32()。经测试,1次1024点FFT变换耗时4 ms,完全满足电能质量分析需求。设置1个1024个点的循环队列,每隔0.5 s计算1~50次谐波值。

2.3 锁相环

锁相环即锁定相位的环路,通常由鉴相器、环路滤波器、压控振荡器3部分组成。由分频器组成频率相位的反馈通路^[8],锁相环结构框图如图5所示。

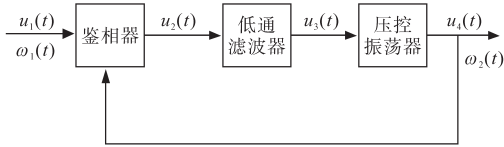


图5 锁相环结构图

Fig.5 Diagram of the phase-locked loop structure

锁相环是一个闭环控制系统,通过输入信号 $u_1(t)$ 与输出信号 $u_4(t)$ 的误差实时跟踪输入信号的相位信息。 $u_2(t)$ 为相位差信号, $u_3(t)$ 为滤波后的相位差信号并作为压控振荡器的控制信号,对于鉴相器,以压控振荡器振荡中心瞬时相位 $\omega_3(t)$ 为参考相位,此时有:

$$u_1(t) = U_{im} \sin[\omega_3(t) + \omega_1(t)] \quad (2)$$

$$u_4(t) = U_{om} \sin[\omega_3(t) + \omega_2(t)] \quad (3)$$

式中: U_{im}, U_{om} 分别为电压输入、输出幅值; $\omega_1(t)$ 为参考频率; $\omega_2(t)$ 为实际频率。

由此可以得到乘法器的输出:

$$K_m u_1(t) u_2(t) = \frac{1}{2} K_m U_{im} U_{om} \sin[2\omega_3(t) + \omega_1(t) + \omega_2(t)] + \frac{1}{2} K_m U_{im} U_{om} \sin[\omega_1(t) - \omega_2(t)] \quad (4)$$

式中: K_m 为环路增益。

环路滤波器通常由无源元件组成且被视作线性系统,它去掉了高频谐波的干扰,留下低频信号。输出电压在频域的表达式为

$$u_3(s) = u_2(s) F(s) \quad (5)$$

式中: $F(S)$ 为滤波器的传递函数。

压控振荡器是电压随频率变化的环节,其中频率 $\omega(t)$ 与控制电压 $u_3(t)$ 的关系曲线如图6所示。

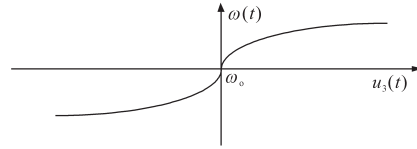


图6 压控振荡特性曲线

Fig.6 Voltage controlled oscillation characteristic curve

由图6可得到:

$$\omega(t) = \omega_0 + K_o u_3(t) \quad (6)$$

式中: K_o 为VCO特性曲线的控制灵敏度; ω_0 为自由振荡角频率。

压控振荡器在锁相环中起着积分作用,输出相位表示为

$$\omega_2(t) = K_o \int_0^t u_3(t) dt \quad (7)$$

本文使用锁相环是为了准确快速计算电压相位以及过零点,以保证高精度的频率计算。设计锁相函数PLL_Cal(float*U_in),以实时电压作为输入,电压实际相位为输出,实验结果如图7所示。

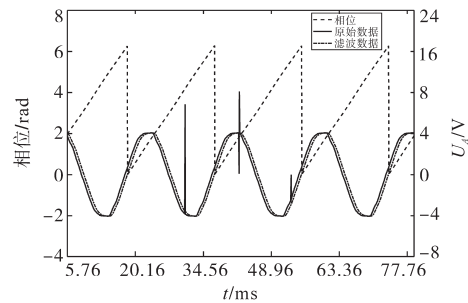


图7 锁相效果图

Fig.7 Diagram of the phase-locked effect

从图7可以看到,串口打印输出的相位信息和输入电压幅值,跟踪相位准确并有效检测过零点。

3 实验分析

在实验室使用标准电压源和电流源作为装置的输入,根据装置的输出计算误差。表2为三相电压数据表,表3为三相电流数据表,可以看出,测量误差较小。三相电压最大误差百分比为0.43%,三相电流最大误差百分比为0.46%。将三相电接入该装置和实验室标准电能质量分析仪中,采集各项电能质量指标。表4为2种装置测量的部分三相电压谐波值,可以看出本文装置与标准分析仪的绝对差都不大于0.2 V。图8为两种装置系统频率绝对误差图,绝对误差不大于0.01 Hz。实验结果表明,本文装置符合国家标准,性能较好。

表2 三相电压测量值

标准电压/V	U_A/V	U_B/V	U_C/V
70.00	69.96	70.16	69.83
110.00	109.73	110.40	110.47
150.00	150.62	150.63	150.31
190.00	190.39	190.04	190.15
230.00	230.28	230.77	229.83

表3 三相电流测量值

标准电流/A	I_A/A	I_B/A	I_C/A
0.25	0.248 9	0.249 1	0.250 4
1.00	1.003 7	0.996 4	0.995 5
2.00	1.995 0	1.991 5	1.994 1
4.00	3.997 0	3.990 6	4.017 8
6.00	6.013 5	6.024 3	6.017 0

表4 三相电压谐波对比

谐波次数	1	3	5	7	9	11	13	15	
本文装置	U_A/V	221.5	2.3	3.8	0.4	0.7	0.7	1.7	0.2
	U_B/V	230.1	2.3	4.5	0.5	0.5	0.1	2.3	0
	U_C/V	226.9	2.8	5.1	0.5	0.7	0.7	2.5	0.1
实验室标准分析仪	U_A/V	221.7	2.3	3.7	0.4	0.8	0.7	1.6	0.2
	U_B/V	230.2	2.2	4.6	0.4	0.4	0.1	2.3	0
	U_C/V	226.9	2.8	5.2	0.5	0.7	0.7	2.4	0

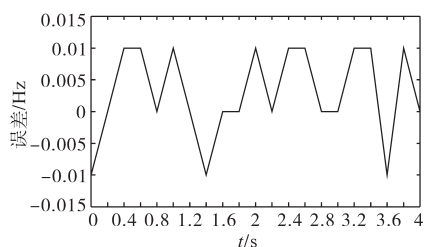


图8 系统频率误差曲线

Fig.8 System frequency error curve

4 结论

本文介绍的电能质量分析装置采用应用处理器和MCU之间的跨界处理器MIMXRT1021DAG5A, 搭载组件丰富的国产物联网操作系统RT-Thread, 外扩16位高精度AD芯片AD7606, 多种组网方式并存, 提高了系统的稳定性和实时性, 电能质量指标精度方面有较大提高, 物联功能得到完善, 大大地缩短了开发周期, 降低了生产成本。

本文提出的电能质量分析装置比较全面地反映了国家有关标准要求检测的各种电能质量指标, 满足近远程的网络化需求, 达到了智能化设备的要求。

参考文献

- [1] 张宇帆, 艾芊, 肖斐, 等. 数据驱动电能质量分析现状及其支撑技术与展望[J]. 电力自动化, 2018, 38(11): 187-196.
- [2] 李乐, 马保慧. 微电网中的电能质量问题浅析及建议[J]. 电气传动自动化, 2016, 38(2): 51-54.
- [3] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 1-8.
- [4] 佟为明, 佟春天, 陈培友, 等. 基于DSP+ARM双核系统的电能质量检测装置设计[J]. 电测与仪表, 2019, 56(18): 1-8.
- [5] 廖建权, 周念成, 王强钢, 等. 直流配电网电能质量指标定义及关联性分析[J]. 中国电机工程报, 2018, 38(23): 6847-6860.
- [6] 林顺富, 汤继开, 汤波, 等. 典型电能质量稳态指标预测模型研究[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 614-620.
- [7] 刘真. 基于嵌入式的电网谐波检测与分析系统设计[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [8] 孙永磊, 杨昕欣. 基于锁相环实现信号相频突变的跟踪[J]. 现代电子技术, 2018, 41(1): 51-56.

收稿日期: 2019-05-24

修改稿日期: 2019-07-05