

基于单片机的电能质量检测分析平台设计

一、项目概述

1.1 引言

随着现代工业的蓬勃发展，基于大功率电力电子开关设备的普及及应用，使得电力网中的非线性设备及电力负荷大量增加，同时由于为了提高系统效益而不断地采用电子装置，这些现象所带来的各种电能质量问题已日益突出。特别是冲击性和非线性负荷容量的不断增长，使得电网发生波形畸变和三相不平衡等电能质量问题，严重影响电力系统和电力用户供用电设备的安全运行。

电能质量的优劣将直接影响整个系统的稳定性和可靠性，已经引起了各国电力工作者的高度重视。电能质量所带来的问题和其他环境问题一样成为公害，电能质量的检测分析和质量控制越来越引起电力供应企业和电力用户的关注。电能质量的问题取决于供电和用电方，要提高电网的电能质量水平，使用户用上优质的电能，同时也为了电力设备的安全运行，必须由电力部门和接入电网的广大电力用户来共同维护。为了切实维护电力部门和用户的利益，保证电网的安全运行，净化电气环境，必须加强电力系统电网电能质量的检测和管理。

1.2 项目背景/选题动机

电能质量越来越引起电力企业与用户的关注，如何准确的评定电能质量的好坏，如何可靠的检测电能质量参数，已成为电能质量研究中必要的一环。研究电能质量并制定相应的标准，是评定电能质量以及电力技术工作者选用补偿方法、装置和技术措施的依据。

目前在国际上主要有两大电能质量标准体系，分别是 IEEE 标准和 IEC 标准，我国在参考这些电能质量标准的基础上，结合自己国家的国情，制定出自己的电能质量标准。我国电能质量有 5 项指标：电压偏差，频率偏差，谐波，电压波动和闪变，三相电压不平衡度，这些标准分别为：

《电能质量 供电电压允许偏差》(GB12325)

《电能质量 电力系统频率允许偏差》(GB/T 15945)

《电能质量 公用电网谐波》(GB/T 14549)

《电能质量 供电电压允许波动闪变》(GB12326)

《电能质量 三相电压允许不平衡度》(GB/T 15543)

与这些标准相关的测试应用范围广阔，工作方式和测试项目也比较多。这些测试要求同其他的自动化系统相比具有一定挑战性，电力应用决定了它是一个高速和实时性的应用，连续的测试分析统计又需要大的数据吞吐量，而作为测试分析设备或仪器又对分辨率和精度有较高要求。

为了满足电能质量的检测需求，有关电能质量检测和分析设备的研制开发一直都在进行中。国内外采取了许多先进的软、硬件技术以及数学仿真方法，涌现了许多研究成果和相应的产品。目前电能质量研究分析的方法主要有：时域仿真方法、频域分析方法和基于变换方法；这些实现有基于微处理器开发的嵌入式系统，也有运行于计算机上的基于各种高级编程语言开发的软件系统。其中，嵌入式的电能质量在线检测仪，由于其抗干扰能力强、精度高、耗电低、体积小、免维护、费用省等特点，成为电能质量在线检测的首选设备，而且，通过快速的数据传输通道，将所获取的原始数据传输计算机系统上，可以进行一些需要大量的存储空间和运算能力的复杂的分析计算和统计。

经过分析，我们认为这些测试要求具有一定的共性，将电能质量检测分析共性的部分抽取出来，开发一个检测分析平台，然后在其基础上开发不同的测试功能和不同运行模式的产品，是可行的。本项目的核心是基于PIC32设计开发电能质量检测分析平台，采用高性能RISC处理器，高速实时采集检测点的三相电流和三相电压模拟信号，对数据进行实时分析处理，计算电网的各种电能参数，分析电网的电能质量，对这些信息进行即时显示，将检测数据进行就地存储，并能通过通信接口将数据传输到后台计算机系统。

二、需求分析

2.1 功能要求

测试平台要完成功能的主要要求有：对电压和电流通道信号进行高速采

集，设计各种数据电参量计算的算法和统计算法，开发可灵活组织的人机界面程序，系统具有大吞吐量的数据传输方式。配备 PC 机端软件，数据通过以太网口或 USB 接口与 PC 机端软件进行通信，PC 机软件可以进行数据的读取、处理、存储、显示等操作。

本设计的检测系统用于单相或三相交流供电系统，适用于低压 220/380V 系统，也可以经由电压互感器检测高压系统，电流信号输入为 0-5A，直接测量或经由电流互感器接入。电能质量检测装置主要由信号调理模块、PIC32 采集处理模块和 PC 机软件模块这三大模块构成。系统的整体架构见图 1。

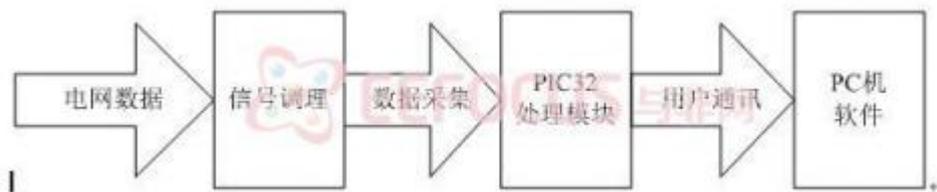


图 1 系统架构

2.2 性能要求

性能方面要求：三相电压，三相电流输入，采样速率每周波 128 点，100M 以太网或/和全速 USB 接口等。

2.3 可扩展性

此设计完成后，可以进一步开发不同的功能，完成诸如谐波测试分析，闪变测试，无功功率补偿测试等各项电能质量的测试，开发出具有特点和竞争力的产品，具有较大的实用意义，与工业实际结合起来，实用性强。

2.4 方案设计

电能质量检测装置要完成的任务种类繁多。首先要实现对现场的电能参数进行实时采集，然后要对采集数据进行快速处理，最后还要对处理参数进行统计和存储，同时要完成与用户的通讯等多个任务。这就要求我们所设计的系统不仅具有高速的处理能力，还要具备实时任务调度能力，当然最主要的还要考虑到设备的成本问题。目前已经出现过多种电能质量检测装置的设计

计方案，如（1）基于采集卡+工控机的设计实现方式，（2）基于单片机的设计实现方式，（3）基于 DSP 的设计实现方式。

采用上述方案都存在一些问题，基于采集卡+工控机的设计实现方式，设备成本偏高、体积大、灵活性不够，不适宜大量定点安放在各检测现场；基于单片机的设计实现方式，数据处理能力不够强大，内存资源不够丰富，实现大量的数据计算和交换比较困难；基于 DSP 的设计实现方式，成本高，一般适用于数据处理运算量比较大，实时性要求高而对控制和通信能力要求相对较低的检测系统。另外还有一些组合方案，如基于单片机+DSP 的设计实现方式，基于 MCU+CPLD 的设计实现方式，但系统复杂，开发困难，成本较高。

本项目采用基于带 5 级流水线的 32 位 MIPS 内核的高性能 RISC 处理器 PIC32 进行开发，速度快，最高 80 MHz 的频率，带有单周期乘法单元和高性能除法单元，很好的整合了单片机和 DSP 的功能，构成一功能强大的 32 位 DSC(数字处理控制器)，特别适合于控制、处理双密集型的场合，且该类处理器资源丰富、片内外设功能强大，足够满足常用控制场合。采用该设计方案，在满足处理大运算量实时任务要求的同时，系统的设计成本也相对较低。

PIC32 系列单片机是 Microchip Technology Inc. (美国微芯科技公司) 推出的高性能 32 位单片机，它是以 MIPS32 架构为基础设计的。目前推出的 PIC32MX3XX 分支为通用型，PIC32MX4XX 分支带有 USB 功能，PIC32MX5XX 分支带有 USB 和 CAN 功能，PIC32MX6XX 分支带有 USB 和 Ethernet 功能，PIC32MX7XX 分支则带有 USB、CAN 和 Ethernet 功能。PIC32 系列单片机采用哈佛结构，带有 5 级流水线，工作频率最高 80 MHz；具有高效指令架构、高性能硬件乘法器/累加器及多至 8 组 32 个内核寄存器，可实现 1.56 DMIPS/MHz 的运行速度。此外，PIC32 系统具有指令和 ROM 数据预取缓冲器的 64 字节高速缓存，128 位宽的闪存，可缩短单个指令的取指时间，支持 MIPS16e 16 位指令集构架，可最多减少 40% 的代码。

PIC32 系列单片机包括了闪存范围从 32KB 到 512KB 的可扩展器件，片上 RAM 从 8KB 到 128KB，引脚与 64/100 引脚的 16 位单片机 PIC24FJ-XXXGA 系列兼容，新推出的 PIC32MX5XX/6XX/7XX 提供 XBGA 的封装。另外，PIC32 系

列单片机带有丰富的外设资源—5 个定时器、16 路通道的 10 位 A/D 转换器及通信接口，即 SPI、I2C、UART 和 PMP，同时 PIC32 还有集成的 CRC 计算功能和基于模式的传输终端选择功能的 DMA 控制器。此外，PIC32MX5/6/7 系列包括 10/100 Mbps 以太网、CAN2.0b 控制器、USB 主设备/从设备和 OTG 功能。

PIC32 系列单片机不仅比 PIC 8 位、16 位单片机速度更快、性能更强，同时相对于 ARM 系列的 32 位单片机也具有一定的优势。虽然 Microchip 能选择的 MIPS 4K 最高时钟频率只有 80 MHz，但是由于 MIPS 内核简洁，多家处理器评估机构确认 PIC32 的处理能力总体性能更高，而且 PIC32 的指令多为单周期指令，比多周期指令执行速度更迅捷。PIC32 系列单片机多达 128 KB 的 RAM，使其在数据处理上更具优势。Microchip 微公司还有一个非常独特的优势，就是该公司所有 8、16 和 32 位的器件都是充分兼容的，所有的这些全系列的产品使用的都是同样的开发工具，单一的开发环境，软件库也是全面兼容的，这对于客户更为方便。此外，Ashling、Green Hills 及 Hi-Tech 提供了完整工具链支持，CM-X、Express Logic 等提供 RTOS 支持，EasyGUI、Segger、RamTeX 及 Micrium 等提供绘图工具支持。值得一提的是，微芯公司为开发人员准备了入门工具包，示例源文件，同时免费提供了如 USB、TCP/IP 协议栈，以及 Graphics 和 FAT16 文件系统开发的中间件模块。PIC32 的 MPLAB C32 编译器包括了 16 位 Microchip MCU 兼容的软件外设函数库，以更加方便快捷地使用外设模块。Microchip 集成开发工具支持所有 PIC32 型号单片机，包括 MPLAB 集成开发环境 (IDE)、MPLAB C32 C 编译器、MPLAB REAL ICE 仿真系统、MPLAB ICD2 在线调试器及 Explore 16 开发板等。

PIC32 微处理器的最大优势在于速度快、高性能、芯片集成度高和外围接口丰富，并且目前 PIC32 芯片的价格也只略高于单片机。在 PIC32 上可以移植无 MMU 的嵌入式实时操作系统，容易实现多任务调度，而且简化了 LCD 显示、硬盘存储、网络通讯等功能的开发，大大减少了产品的开发周期，同时系统更兼具了运算能力强大的优点。本方案不仅满足设备具有较高处理速度和处理能力的要求，而且具备了实时处理能力，最后也考虑到了成本的

问题。

三、系统硬件架构

系统结构框图如图 2 所示。它包括电压电流信号调理模块、PIC32 处理器及外围电路， LCD 液晶显示模块， USB 移动存储模块，以太网接口通信模块。

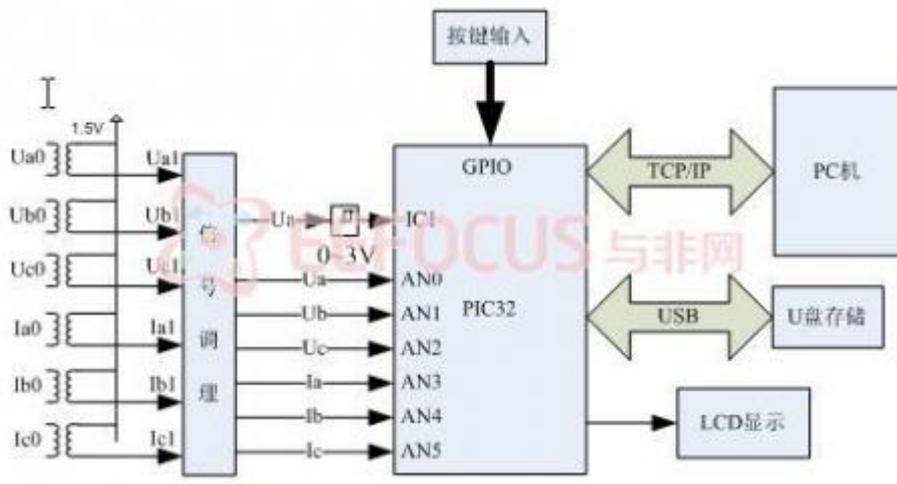


图 2 系统结构框图

通过微型电压和电流互感器，将输入的三相三路电压信号和三路电流信号进行信号调理，得到 0~3V 范围的模拟信号，接入到 PIC32 内置 AD 接口；因为实际三相电的频率与标准频率会有一定误差，所以需要频率进行测量，鉴于六路信号是同频率的，只需对其中一路信号频率测量即可，设计中通过对 Ua 信号频率进行测量，通过一个施密特触发器将正弦信号变换为矩形波，然后通过 PIC32 内置的输入捕捉功能进行频率测量。

连续每通道采集 16 个波形，共计 128*16 个点后，进行数据处理：周期计算、FFT 变换，求取三相电的基波以及谐波幅值与频率。然后用 LCD 显示处理后的三相基波、谐波波形曲线。同时通以太网将采集到的数据传送到 PC 机软件进行处理、分析、显示、存储。

3.1 电压电流信号采集回路

模拟量的采集是对电网中电压和电流的测量，经互感器变换再经调理后送给 PIC32 内置 A/D 输入端，电路图如图 3(以电流输入为例)所示，调整图

中反馈电阻 R 和 r 的值可得到所需要的电压小信号输出, R 精度 $>1\%$ 。电容 C_1 和 r' 是用来补偿相移的。电容 C_2 和 C_3 是小电容, 用来去耦合滤波; 两个反接的二极管是起保护运放作用的。经变换后的信号放大后再上拉就可以得到 $0\sim 3V$ 的单极性电压 (AD 输入范围为: $0\sim 3.3V$), 然后就可以送到芯片 AD 转换器的输入端进行采样。

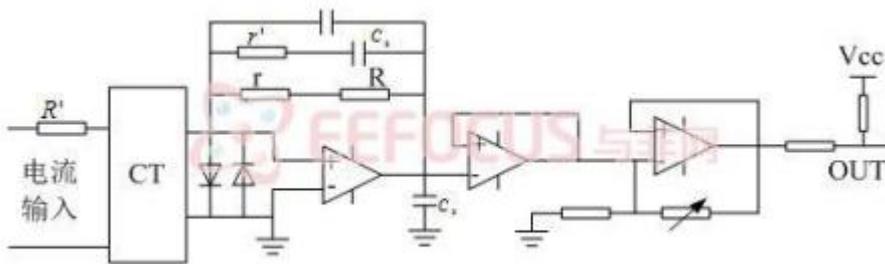


图 3 电流信号调理电路

3.2 LCD 液晶显示模块

设计中采用大屏幕液晶显示屏, 320×240 LCD 带背光, 可以实时显示电网的运行电压、电流、谐波、有功功率、无功功率、视在功率、通信信息等, 用户可以查看各种电参数和历史记录并可对仪器的某些参数进行设置。

3.3 以太网接口模块

以太网接口模块使用 PIC32 内置的带 MII 和 RMII 接口的 $10/100Mbps$ 以太网 MAC。支持全双工和半双工工作, 可连接同轴电缆和双绞线, 并可自动检测所连接的介质, 通过 RJ45 接口与以太网进行通信。

3.4 USB 移动存储模块

USB 移动存储控制器使用 PIC32 内置的符合 USB 2.0 规范的全速设备和 OTG (On-The-Go) 控制器, 主要用来存储电网运行参数记录, 用户只需将 U 盘从 USB 口插入, 选择存储功能即可。即插即用, 操作简单, 使用方便, 传输速率快, 存储容量不受限制。

四、系统软件架构

4.1 电参数测量

电参数测量首先要进行数据采集, 本设计采用图 3 所示的交流采样, 即

将二次侧的电压电流经高精度的电压电流互感器变换成 CPU 可测量的交流小信号，然后再送入 CPU 进行采样处理。这种方法可对被测量的瞬时值进行采样、实时性好，相位失真小，解决了一般直流采样中无法实时采样，测量精度易受变送器的精度和稳定性影响等缺点。

对电压和电流谐波等电参量的测量采用 FFT 算法，其计算流程如图 4 所示：

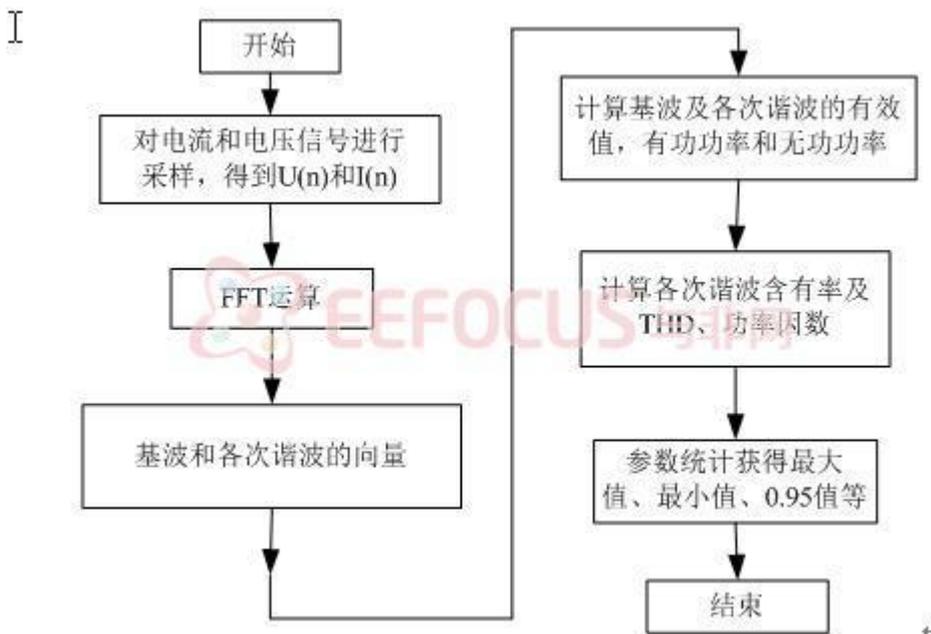


图 4 电参量计算流程

先对电压和电流信号进行采样，得到 16 个周期的波形数据，然后进行 FFT 计算，得到基波和各次谐波的电压值和电流值及其含量，然后计算谐波的总畸变率 THD，然后计算出电压和电流的有效值 U 、 I 及有功功率 P 、无功功率 Q ，再由 P 和 Q 计算视在功率 S ，进而可得到线路的功率因数以及其它参数值。

4.2 程序运行流程

在电参量的运算和系统的结构等问题解决之后，需要考虑程序运行的总的结构流程图。程序在运行之前首先要对硬件进行初始化，并且要自检以确保硬件部分无故障，为操作系统做好底层的准备。然后是操作系统的初始化，

创建任务主要是键盘检测、按键处理、信号采样数据处理及对这些任务的优先级进行排序等。具体的流程见图 5 所示。



图 5 程序运行流程图