

一种高精度的电能质量监测系统

夏建生 赵进全 杨涛

(西安交通大学电气工程学院 西安 710049)

摘要: 研究和设计完成了一套 DSP+PC 架构的电能质量监测管理系统。系统不但可以准确地检测稳态电能质量, 并且对暂态扰动可以精确地进行定位和识别。对涉及的电能质量指标算法(FFT 算法、小波变换的 Mallat 算法和 IEC 闪变检测算法)进行了建模仿真。硬件平台以 TMS320F2812DSP 为核心, 采用硬件锁相环自适应调整采样率技术, 减小了频谱泄露和栅栏效应; 在 CCS3.3 环境下开发监测终端程序; 在 VB6.0 环境下开发监测中心界面。采用 Modbus 通信协议, 通过 RS232 总线实现数据通信。系统进行了测试和联调, 综合调试实验证明, 系统稳定可靠、操作方便, 上位机监控界面简洁明了。整个系统运行状况良好, 各项性能指标均达到预定要求, 实现了预期的设计目标。

关键词: 电能质量; 检测系统; 高精度; FFT; TMS320F2812

中图分类号: TM930.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

High precision power quality monitoring system

Xia Jiansheng Zhao Jinqun Yang Tao

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The project has studied and designed a monitoring and management system for power quality. The designed system adopts the new architecture based on DSP+PC. Through researching the newly national power quality standard and analytic method for power quality, the relevant power quality algorithms containing FFT, wavelet transformation and IEC are simulated by the tool of MATLAB. The hardware platform takes the DSP of TMS320F2812 as core, besides, the technology of hardware PLL greatly reduces the spectrum leakage and fence effect. The monitoring terminal program is completed with development environment CCS3.3. The monitoring center interface is developed with Visual Basic, and receives communication data from the terminal unit through RS232 based on Modbus communication protocol. After debugging and experiment, the designed system is stable and reliable. The system runs well and the project has reached the expected design aims.

Keywords: power quality; monitoring system; high precision; FFT; TMS320F2812

1 引言

非线性 and 冲击性负荷造成电能质量的污染对电力系统安全运行和用电设备的正常工作带来的影响和危害在不断增加, 因此, 获取用户的电能质量实时监测数据, 对于评估电能质量水平、电力设备的运行分析及电能质量的进一步改善很有必要。课题是为北京某大型宾馆设计并实现的一套高精度电能质量监测管理系统, 对宾馆的电能质量进行动态监测和分析。系统包括监测终端、串口通讯、监测中心三部分, 监测终端对现场信号的采集和数据的处理; 串口通讯实现监测终端与监测中心之间的数据传输; 监测中心实现对监测数据的实时显示存储和分析。通过监测来评估电能质量水平, 对动力设备进行运行测控分析, 采取补偿措

施, 降低用电能耗。

2 电能质量基本概念

电能质量主要分为两类: 稳态分量与暂态分量。稳态分量包括: 频率偏差、电压偏差、电网谐波、三相电压、电流不平衡度、电压波动和闪变等。暂态分量有电压暂降、电压暂升和电压瞬时中断等^[1-4]。

2.1 稳态电能质量指标的算法研究

1) 谐波检测算法分析

离散傅里叶变换(DFT)是数字信号分析与处理中的一种重要变换。FFT 算法作为 DFT 的优化算法, 能使 DFT 的运算效率提高 1~2 个数量级。系统采用时域抽取法基 2FFT 算法(DIT-FFT)来分析谐波。

设序列 $x(n)$ 的长度为 N ，且满足 $N = 2^M$ ， M 为自然数。按 n 的奇偶把 $x(n)$ 分解成两个 $N/2$ 点的子序列：

$$x_1(r) = x(2r), r = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1 \quad (1)$$

$$x_2(r) = x(2r + 1), r = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1 \quad (2)$$

则 $x(n)$ 的 DFT 为：

$$X(k) = DFT[x(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk} = \sum_{r=0}^{N/2-1} x(2r)W_N^{2kr} + \sum_{r=0}^{N/2-1} x(2r+1)W_N^{k(2r+1)} = \sum_{r=0}^{N/2-1} x_1(r)W_N^{2kr} + W_N^k \sum_{r=0}^{N/2-1} x_2(r)W_N^{2kr} \quad (3)$$

由于 $X_1(k)$ 和 $X_2(k)$ 均以 $N/2$ 为周期，且 $W_N^{k+\frac{N}{2}} = -W_N^k$ ，因此 $X(k)$ 可以表示为：

$$X(k) = X_1(k) + W_N^k X_2(k), k = 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1 \quad (4)$$

$$X(k + \frac{N}{2}) = X_1(k) - W_N^k X_2(k), k = 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1 \quad (5)$$

将 N 点 DFT 分解为两个 $N/2$ 点 DFT，式(4)与(5)中的运算为蝶形运算式，依次类推，经过 M 次分解，最后将 N 点的 DFT 分解成 N 个 1 点 DFT 和 M 级蝶形运算。以 8 点的 DIT-FFT 运算为例，其蝶形运算流程如图 1 所示。

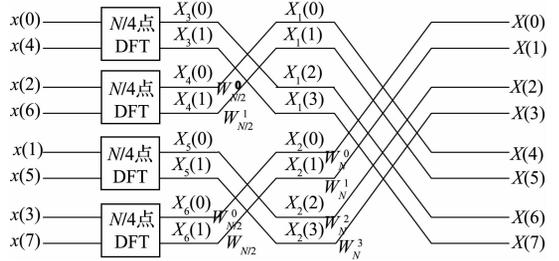


图 1 8 点 DIT-FFT 蝶形运算流程图

蝶形运算的输出即为输入信号的频谱，可以得到各次谐波的幅值和相位值，可算出各次谐波含量及畸变率，并算出三相不平衡度值。

2) 闪变检测方法研究

根据 IEC 推荐的闪变检测方法，图 2 给出了闪变检测的原理框图。

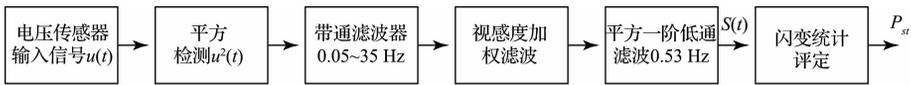


图 2 闪变检测原理框图

图 2 中通频带为 0.05~35 Hz 的带通滤波器可以选用截止频率为 0.05 Hz 的高通滤波器和截止频率为 35 Hz 的低通滤波器来实现。传递函数如下：

$$HP(s) = \frac{s/\omega_c}{1 + s/\omega_c}, \omega_c = 2\pi \times 0.05 \quad (6)$$

35 Hz 的低通滤波器选用 6 阶巴特沃兹滤波器，传递函数如下：

$$BW(s) = \frac{a}{s^6 + bs^5 + cs^4 + ds^3 + es^2 + fs + a} \quad (7)$$

式中： $a = 1.131 \times 10^{14}$ 、 $b = 849.7$ 、 $c = 3.61 \times 10^5$ 、 $d = 9.722 \times 10^7$ 、 $e = 1.746 \times 10^{10}$ 、 $f = 1.987 \times 10^{12}$ 。

2.2 暂态电能质量指标算法分析

小波变化时频局域化特性，在检测突变信号方面有着非常明显的优势。系统采用小波多分辨率分析的 Mallat 算法来分析暂态电能质量。主要基于该算法进行暂态扰动检测和扰动波形的提取^[5-9]。

1) 小波变换的多分辨率分析

多分辨率分析将信号分解为一个近似逼近部分和一系列细节部分，逼近部分对应于信号的低频部分，而细节部分对应于信号的高频部分。

将原始信号的频谱 $X(\omega)$ 的总带宽 $0 \sim \pi$ 定义为空间 V_0 ，则在第一级分解后， V_0 被划分为两个子空间，即低频

的 V_1 空间(频带 $0 \sim \frac{\pi}{2}$)和高频的 W_1 空间(频带 $\frac{\pi}{2} \sim \pi$)。经过第二级分解后， V_1 空间又被划分为低频 V_2 空间(频带 $0 \sim \frac{\pi}{4}$)和高频的 W_2 空间(频带 $\frac{\pi}{4} \sim \frac{\pi}{2}$)。如此这样分解下去，可以得到如图 3 所示的从频带划分的多分辨率分析的小波变换。

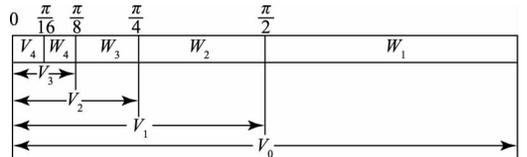


图 3 从频带划分的多分辨率分析

2) Mallat 算法

由多分辨率分析方法可知， $\varphi(t)$ 、 $\varphi(t)$ 依次为尺度空间 V_0 和小波空间 W_0 的一对正交基。又由于 $V_0 \subset V_{-1}$ 、 $W_0 \subset V_{-1}$ ，所以 $\varphi(t)$ 、 $\varphi(t)$ 也肯定属于 V_{-1} 。所以说， $\varphi(t)$ 、 $\varphi(t)$ 可用空间 V_{-1} 里的正交基 $\varphi_{-1,n}(t)$ 线性展开：

$$\varphi(t) = \sum_n h(n)\varphi_{-1,n}(t) = \sqrt{2} \sum_n h(n)\varphi(2t-n) \quad (8)$$

$$\varphi(t) = \sum_n g(n)\varphi_{-1,n}(t) = \sqrt{2} \sum_n g(n)\varphi(2t-n) \quad (9)$$

式(8)、(9)为尺度函数与小波函数的二尺度方程的时

域表示。其中系数 $h(n), g(n)$ 为线性组合权重。

将式(9)对时间进行伸缩和平移,有:

$$\varphi(2^{-j}t - k) = \sum_n h(n) \sqrt{2} \varphi(2^{-j+1}t - 2k - n) \quad (10)$$

令 $m = 2k + n$, 则:

$$\varphi(2^{-j}t - k) = \sum_m h(m - 2k) \sqrt{2} \varphi(2^{-j+1}t - m) \quad (11)$$

对于任意的 $f(t) \in V_{j-1}$ 在 V_{j-1} 空间展开式为:

$$f(t) = \sum_k c_{j-1,k} 2^{-(j-1)/2} \varphi(2^{-j+1}t - k) \quad (12)$$

将 $f(t)$ 分解一次(即投影到 V_j, W_j 空间),则有:

$$f(t) = \sum_k c_{j,k} 2^{-j/2} \varphi(2^{-j}t - k) + \sum_k d_{j,k} 2^{-j/2} \varphi(2^{-j}t - k) \quad (13)$$

式(13)中 $c_{j,k}$ 和 $d_{j,k}$ 分别为尺度系数和小波系数,且:

$$c_{j,k} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) 2^{-j/2} \varphi^*(2^{-j}t - k) dt \quad (14)$$

$$d_{j,k} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) 2^{-j/2} \varphi^*(2^{-j}t - k) dt \quad (15)$$

从上述 Mallat 算法公式可以看出, Mallat 不需要知道尺度函数 $\varphi(t)$ 和小波函数 $\varphi(t)$ 的具体结构, 仅根据滤波器系数就可以实现对信号的快速分解。Daubechies 小波具有正交、时域紧支撑、高正则性和具有 Mallat 快速算法的特点, 所以选择适用于电能质量暂态分析的 DB4 小波作为 Mallat 算法的滤波器。

3 系统硬件结构设计

系统的整体结构如图 4 所示。以 DSP 为核心的监测终端完成电力信号的采集和处理, 以 PC 机为核心的监测中心完成对监测结果进行实时分析显示及存储, 两者之间通过串口通讯实现数据的传输。

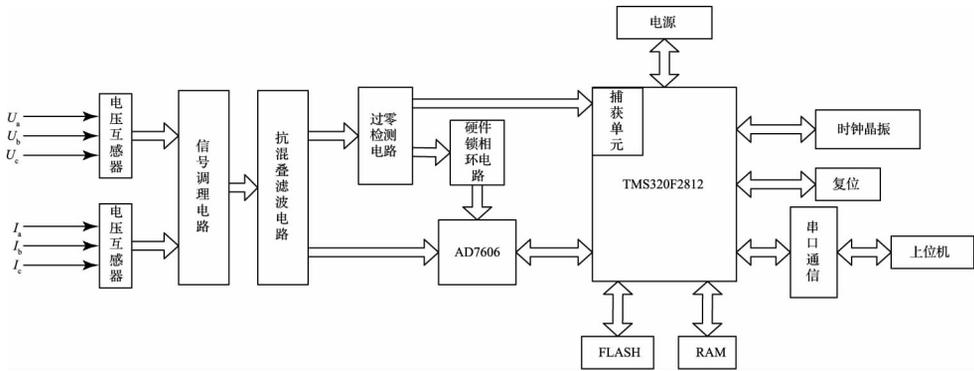


图 4 系统整体结构图

三相电压、电流信号经过信号调理电路后, 通过抗混叠滤波电路, 滤除高频噪声和谐波信号, 输出信号作为 A/D 采集芯片的输入, 另一路作为过零检测电路的输入, 完成交流正弦信号转换成同频的方波信号, 方波信号一路送给 DSP 的捕获单元, 一路作为硬件锁相环电路的输入, 锁相环电路对输入信号进行 128 倍的倍频, 用作 A/D 芯片的转换触发信号, 实现 6 通道电力信号的同步采样, 通过中断方式 DSP 读取 A/D 转换结果进行数据处理, 最后通过串口向上位机输出监测数据, 实现数据的存储及显示^[10-12]。

3.1 前端信号主要调理电路

1) 抗混叠滤波电路

电力信号中由于存在大量的高次谐波, 国家电能质量标准规范规定, 一般对电网的谐波分析到 31 次为止, 没有抗混叠滤波电路就会造成在频谱分析过程中出现频谱混叠现象, 影响测量精度。

系统设计的二阶低通滤波器可将 31 次以上的高频信号滤除, 由于系统的基波频率为 50 Hz, 所以设计滤波器的

截止频率为 1 600 Hz, 滤波器的增益系数设计为 1。抗混叠滤波电路的设计如图 5 所示。

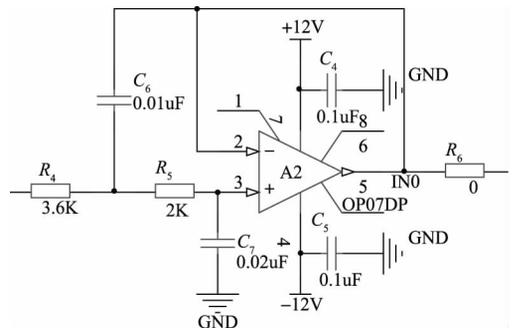


图 5 二阶低通滤波器设计电路

系统的传递函数为:

$$H(s) = \frac{1}{R_1 R_5 C_6 C_7 s^2 + (R_4 + R_5) C_7 s + 1} \quad (16)$$

用 MATLAB 对传递函数进行仿真得到其波特图如图 6 所示。

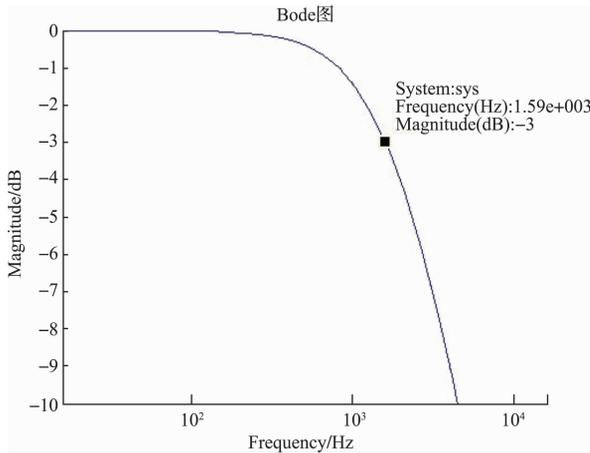


图6 抗混叠滤波电路仿真波特图

从图6中可以看出,当幅值衰减到-3 dB时,幅值衰减较快,对应的频率正好约为1 600 Hz。

2) 硬件锁相环电路

由于电力负荷的不断变动等因素,频率如果用定时采样的话,会导致在进行谐波分析时出现频谱泄露的现象,影响分析精度。系统设计利用硬件锁相环电路来实现同步采样,可减小由于非同步采样导致的频谱泄露的问题。

锁相环由鉴相器(PD)、压控振荡器(VCO)和环路滤波器(LF)三部分组成,原理框图如图7所示。

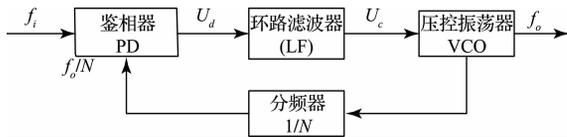


图7 锁相环电路原理框图

差值电压信号 U_d , 经过低通特性的 LF , 输出平均值电压 U_c , 控制 VCO 的振荡频率。锁定的输出信号频率 f_o 将等于 N 倍的 f_i , 系统中设置的 N 为 128。系统选用 CMOS 集成锁相环芯片 CD4046。

3.2 数据采集和处理电路设计

1) 数据采集芯片选型

数据采集是电能质量监测的关键。电力系统中的高次谐波含量相对于基波分量来说是比较低的。若采用 12 位分辨率的 DSP 内置 A/D 模块的话,对 15 次谐波至少会引起 1.67% 的误差,若要求检测到 31 次谐波,则会引起更大的误差。系统采用 ADI 公司的 16 位高性能 A/D 采集芯片 AD7606。

2) 系统 CPU 选型

TMS320F2812 是 TI 公司推出的 32 位定点 DSP 芯片。该芯片不仅在数据处理方面功能强大,还具有嵌入式输出控制功能和完善的事件管理能力,适用于处理精度和处理速度要求比较高的测控场合。

3.3 串口通讯电路

电能质量监测数据通过 RS232 异步串行总线上传给上位机,RS232 总线的逻辑电平与 CMOS、TTL 逻辑电平不同。DSP 等接口不能直接与 RS232 相连,系统用 MAX232 芯片进行电平转换。

4 系统软件设计

系统的软件由两部分组成:监测终端软件设计和监测中心软件设计。监测终端的软件设计采用 C 语言在 CCS3.3 编译环境中对 DSP 编写程序,监测中心的软件设计是采用 Visual Basic 语言完成对监测界面的设计。系统软件通过串口通信协议建立两部分的联系,系统的软件总体结构如图 8 所示。



图8 系统软件总体结构图

4.1 监测终端软件设计

1) 主程序设计

系统主程序设计如图 9 所示。DSP 上电复位后,做初始化配置。DSP 的 GPIO3 口输出信号对 AD7606 进行复位。输入信号经信号调理电路和抗混叠滤波电路后作为

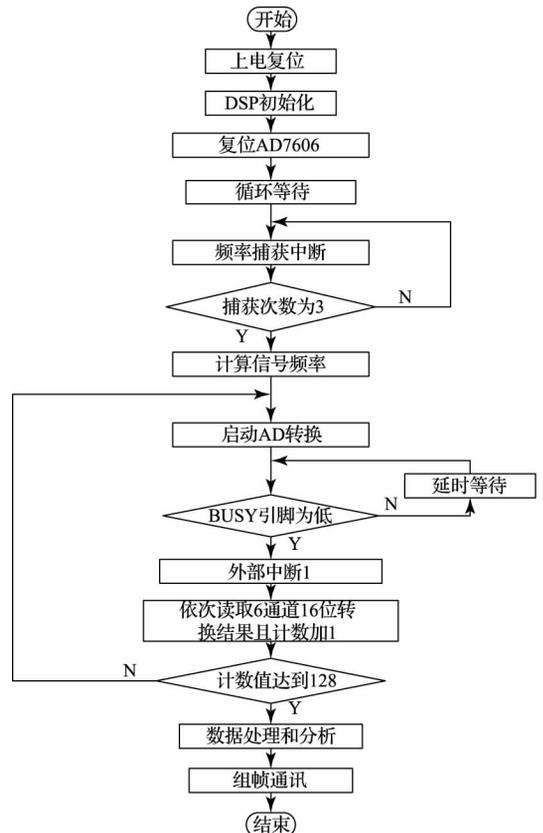


图9 监测终端主程序流程图

AD7606 的输入信号,一路送给 DSP 的捕获引脚 CAP1,计算信号的频率;一路作为硬件锁相环的输入信号,启动 AD7606 进行数据转换, DSP 通过并行数据总线读取 AD7606 转换数据,进行数据处理和分析,分析完的数据通过串口送给上位机。

2) 频率捕获中断程序设计

频率捕获中断程序实现对信号频率的测量。系统设计的频率检测范围为 20~1 000 Hz,由于实际电网工频信号为 50 Hz 左右,当测得的频率值的范围处于 45~55 Hz 之间时,认为频率测量正确并存储,否则舍弃当前值重新测算。

3) 数据处理程序设计

系统采用了将快速傅里叶变换和小波变换相结合的设计思想,充分发挥快速傅里叶变换分析稳态信号和小波变化分析暂态信号的优势。整个系统的数据处理流程如图 10 所示。

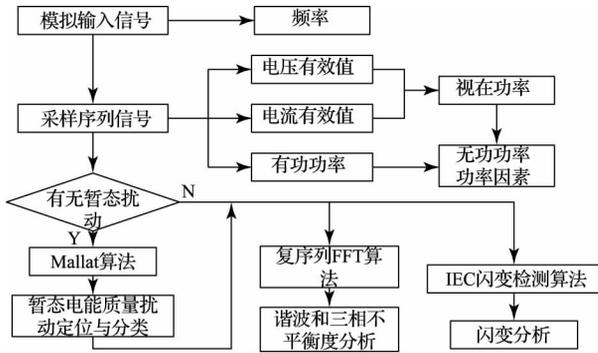


图 10 系统数据处理流程图

a) 电能质量暂态分析

图 11 为暂态电能质量分析流程图。

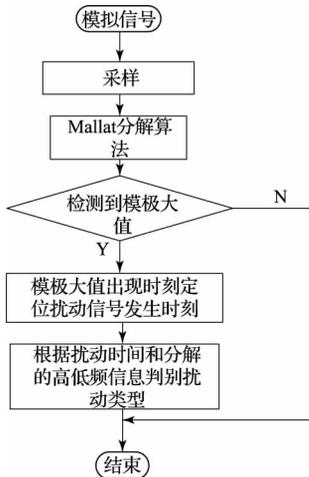


图 11 暂态电能质量分析流程图

b) FFT 算法程序设计

系统选择快速傅里叶(FFT)算法来检测谐波,利用硬

件锁相环电路实现了对信号的同步采样。图 12 为 DIT-FFT 运算程序流程图。从输入端(第 1 级)开始,逐级进行,共进行 M 级运算。在进行第 L 级运算时,依次求出 B 个不同的旋转因子,每求出一个旋转因子,就计算完它对应的所有 2^{M-L} 个蝶形。这样,可以用三重循环程序实现 DIT-FFT 运算^[13-14]。

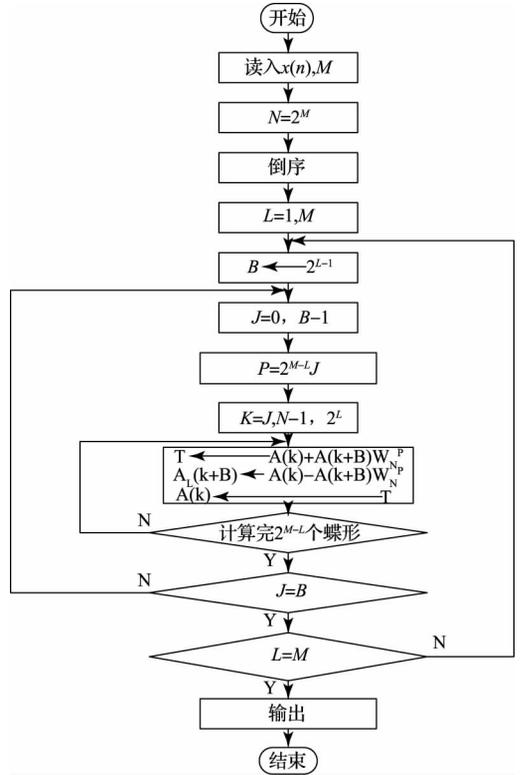


图 12 DIT-FFT 运算程序流程图

c) 闪变检测流程图

根据前述的闪变检测原理,周期性正弦波动电压闪变计算的软件程序流程如图 13 所示。

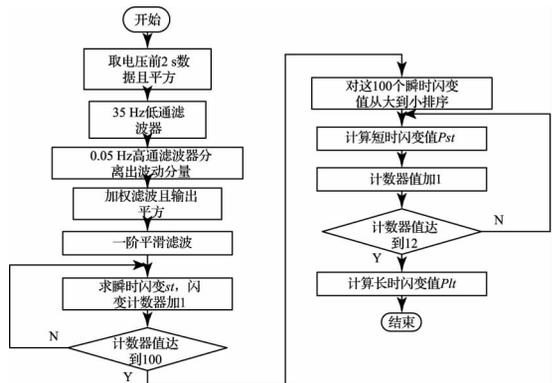


图 13 电压闪变检测流程图

5) 通讯程序设计

本设计选用 Modbus 通信协议,数据通过 RS232 总

线,按照 Modbus 通信协议规定的信息格式在下位机和上位机之间进行传输,采用 RTU 模式进行通信。

4.2 监测中心软件设计

监测中心软件主要完成显示、管理和保护监测终端上传的监测数据。数据库采用 Access 数据库,库中有 8 个表记录,包括用户信息、基本电能质量参数、电压偏差、频率偏差、三相不平衡度、谐波分析、电压波动与闪变和暂态电能质量等;监测中心软件使用 VB 编程语言,在 VB6.0 环

境下进行开发设计。串行通信空间 MSCComm 控件,系统通过编程 MSCComm 控件实现串行端口数据的传送和接收。

5 系统性能测试

1) 谐波测试结果

输入信号经模数转换和 FFT 运算后,可以分析出信号的频谱,表 1 为本次实验谐波测试结果。

表 1 谐波测试结果

谐波次数	标准输入幅值/V	理论计算各次谐波含量	实测谐波幅值/V	相对误差	实测各次谐波含量	相对误差
1	200	100%	199.0001	-0.50%	100%	0
3	15	7.5%	14.8900	-0.73%	7.4824%	-0.23%
5	10	5%	10.0200	0.20%	5.0352%	0.70%
7	5	2.5%	5.0300	0.60%	2.5276%	1.10%
9	2	1%	1.9940	-0.30%	1.0020%	0.20%
11	1	0.5%	0.9990	-0.10%	0.5020%	0.40%
13	0.5	0.25%	0.5000	0	0.2513%	0.52%
15	0.2	0.1%	0.2001	0.05%	0.1005%	0.50%
17	0.1	0.05%	0.0998	-0.2%	0.0502%	0.40%
19	0.05	0.025%	0.0503	0.6	0.0251%	0.40%

总谐波畸变率的相对误差为 0.1316%。可以看出,设计的系统对多次谐波具有较高的检测精度。

图 14 所示为在 DSP 图形显示区的谐波分析图,通过图形观察,可以准确分析出信号的频谱。

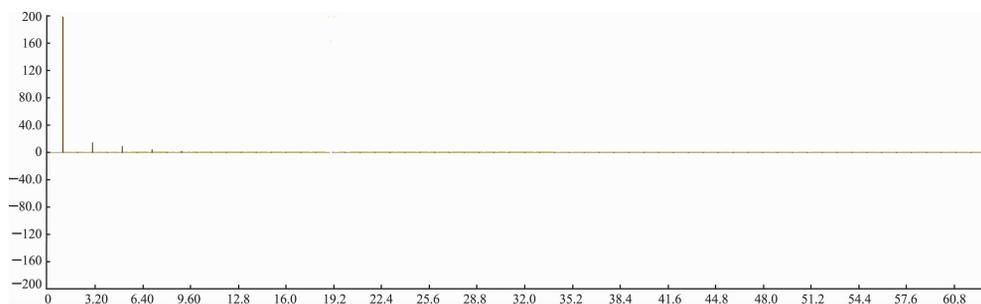


图 14 频谱分析图

2) 暂态扰动检测结果

为了对暂态电能质量进行检测,本测试选择的扰动信号为电压瞬时中断信号,选用 DB4 小波,分解尺度选为 5

层。小波分解后的逼近部分(A5)和细节部分(D1)分别如图 15 所示。

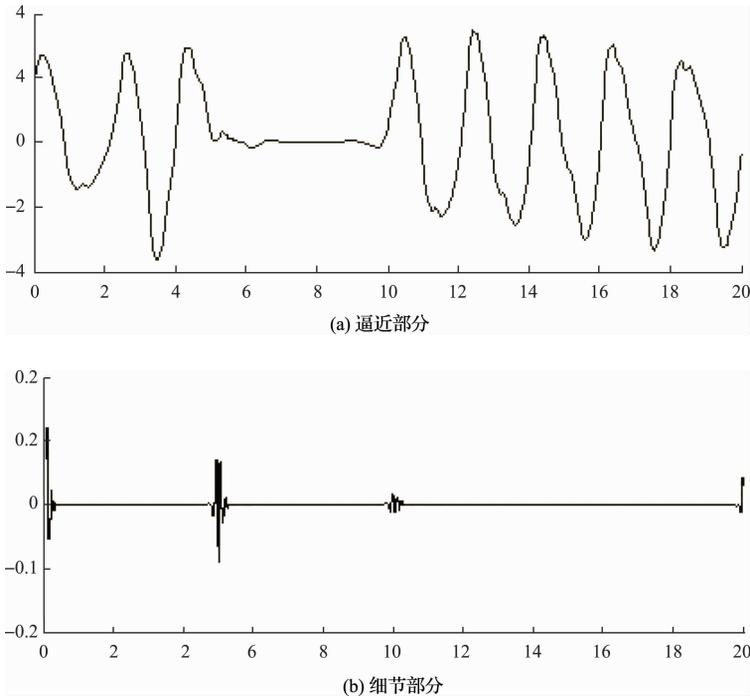


图 15 电压瞬时中断检测

3) 界面显示

谐波分模块显示界面图 16 所示。



图 16 谐波分模块显示结果界面

图表曲线图显示界面,如图 17 所示,由于输入信号只 示输入信号中的谐波含量。
包含 1、3、5、7、9 次谐波,在图表曲线中可以直观、准确地显

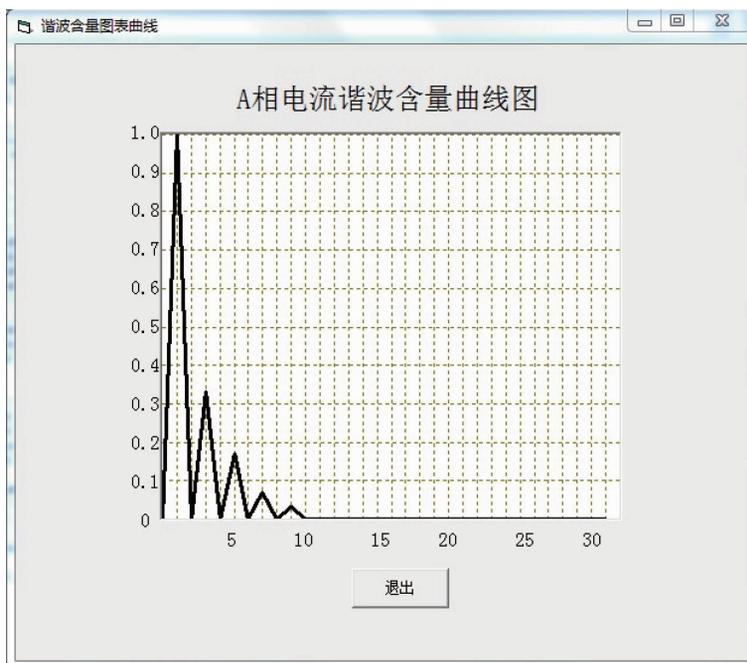


图17 图表曲线显示结果界面

6 结 论

课题对电能质量指标的分析方法进行了研究,利用 MATLAB 的软件编程和 Simulink 仿真功能对基 2FFT 算法、基于 DB4 小波的 Mallat 算法和 IEC 闪变检测方法进行了分析和建模;完成了系统硬件电路的设计及调试;在 CCS3.3 环境下开发监测终端程序;在 VB6.0 环境下开发监测中心界面,用 Visual Basic 语言完成系统主模块监视界面、分模块监视界面及图表曲线界面等设计。采用 Modbus 通信协议,通过 RS232 总线实现数据通信。

最后对系统进行了软硬件平台的功能测试和联调,通过测试结果及误差分析可以看出,系统具有较高的检测精度,各项性能指标均达到设计的预定要求。

参考文献

- [1] 程浩忠,吕干云,周荔丹. 电能质量监测与分析[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [2] 陈龙龙. 电能质量监测系统的设计与研究[D]. 武汉:华中科技大学,2009.
- [3] 艾芊,张志刚,朱子述. 电能质量概论[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [4] GB/T 12325-2008. 国家电能质量标准. 电能质量供电电压允许偏差[S]. 2008.
- [5] CAROLINA V, HORTENSIA A, JULIO U. Assessment of flicker limits compliance for wind energy conversion system in the frequency domain [J]. Renewable Energy,2006,31(8):1089-1106.
- [6] 胡南,乐秀璠. 多 N 值 Db 小波多分辨率分解的电压闪变检测[J]. 江苏电机工程,2010,29(3):5-9.

- [7] 刘锐. 基于小波变换的电能质量扰动研究[D]. 厦门:厦门大学,2006.
- [8] 杨杰,王金浩,章雪萌,等. 基于小波分辨率分析的电压暂降源定位研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(22):90-95.
- [9] 孔令荣,王昊,庄涛. 高精度采集系统研究与实现[J]. 电子测量技术,2014,37(9):122-127.
- [10] 刘明亮,朱江森. 数字信号处理对电子测量与仪器的影响研究[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(10):1041-1046.
- [11] 李红刚,张素萍. 基于单片机和 LabVIEW 的多路数据采集系统设计[J]. 国外电子测量技术,2014,33(4):62-66.
- [12] 高西全,丁玉美. 数字信号处理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2008.
- [13] SUN X X, GUAN X H, ZHANG M. Research and application of database based on ADO interface in aluminum stain locating system[C]// 2010 The 2nd IEEE International Conference on Information Management and Engineering (ICIME). IEEE, 2010: 381-384.

作者简介

夏建生,1955 年出生,副教授,研究方向为测控技术及图像分析等。

E-mail: xiajs77@sohu.com

赵进全,1961 年出生,教授,研究方向为电力系统状态分析。

杨涛,1987 年出生,硕士研究生,研究方向为测控技术。