

文章编号: 1672-2892(2010)02-0223-05

## 基于 OMAP-L137 的电能质量监测仪的研制

任雷<sup>1</sup>, 林岩<sup>1</sup>, 唐晓博<sup>2</sup>

(1.北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191; 2.哈尔滨电业局, 黑龙江 哈尔滨 150010)

**摘要:** 提出了基于 OMAP-L137 的电能质量监测仪的设计方案。在此基础上, 介绍了本仪器的软、硬件结构及算法。针对谐波检测中的动态扰动的存在, 采用了一种加窗插值修正算法来提高测量准确度; 同时通过 Delphi 编程工具, 设计了良好的人机交互界面, 并通过实验验证了系统的可靠性与实用性。

**关键词:** 电能质量; 谐波计算; 短时闪变值; 监测仪

**中图分类号:** TN98

**文献标识码:** A

## Design of electric power quality monitor device based on OMAP-L137

REN Lei<sup>1</sup>, LIN Yan<sup>1</sup>, TANG Xiao-bo<sup>2</sup>

(1.School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;  
2.Harbin Power Supply Bureau, Harbin Heilongjiang 150010, China)

**Abstract:** A design scheme about electric power quality monitor device based on OMAP-L137 was proposed. According to this, the framework and arithmetic of the device were introduced. Because of the existence of the harmonic disturbance, a scheme of adding windows combined with interpolation arithmetic was used to improve the accuracy of the measure scheme. Meanwhile, a good interface was designed with the programming tool of Delphi. The reliability and practicability were validated through experiments.

**Key words:** electric power quality; harmonic computing; short-term flicker value; monitor device

近年来, 随着我国电力事业迅猛发展和电力系统规模的不断扩大, 为了电力系统的安全运行、电力用户的安全用电、满足各种电力设备的要求, 以及提高用电效率从而增加国民经济效益, 对电能质量指标进行监测、统计和分析, 实现对电能的全面质量控制势在必行<sup>[1]</sup>。TI 公司最新推出了针对工业控制领域的双核 OMAP-L137 处理器, 它综合了 ARM(Advanced RISC Machines)和 DSP(Digital Signal Processor)两大主处理器各自在实时性和计算精度上的优势。两大处理器的主频均达到 300 MHz(DSP 的处理速度高达 2 400 MIPS/1 800 MFLOPS)<sup>[2]</sup>。本文根据电力行业关于电能指标的国家标准, 并结合生产实际, 提出了基于 OMAP-L137 平台的电能质量检测仪的设计和解决方案。

### 1 电能质量的算法

#### 1.1 电压、电流有效值的测量

正弦波交流电的电流、电压的大小通常用其有效值(均方根)来计量。按照电工理论的基本定义, 在连续的时间域<sup>[3]</sup>, 电压有效值:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (1)$$

电流有效值:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (2)$$

式中:  $u(t)$  是交流电压瞬时值;  $i(t)$  是交流电流瞬时值;  $T$  是交流正弦信号的周期。

### 1.2 电压偏差的测量

供电电压偏差是指实际电压与系统额定电压之差。根据《电能质量 供电电压允许偏差》(GB12325-90)的规定, 10 kV 及以下的三相供电电压允许偏差为额定电压的  $\pm 7\%$ 。电压偏差公式为<sup>[4]</sup>:

$$\text{电压偏差} = \frac{\text{实测电压} - \text{额定电压}}{\text{额定电压}} \times 100\% \quad (3)$$

### 1.3 三相不平衡度的测量

三相供电系统中, 三相相量大小相等, 频率相等, 相位依次相差  $120^\circ$  时, 称为三相对称, 否则称为三相不对称。三相不平衡系统的检测采用对称分量法把三相量分解为三组对称的正序、负序、零序分量, 并以负序分量与正序分量之比定义为三相不平衡度或不对称度, 用符号  $\varepsilon$  表示<sup>[5]</sup>。

三相电压/电流不平衡度的表达式为:

$$\varepsilon_V = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \quad (4)$$

$$\varepsilon_I = \frac{I_2}{I_1} \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $U_1, U_2$  为三相电压正序、负序分量均方根值;  $I_1, I_2$  为三相电流正序、负序分量均方根值。

### 1.4 短时闪变值的计算方法

短时闪变值的计算方法为:

1) 对锁相后的电压信号采样值  $u(n)$ , 由均方根值计算公式计算出每一个或半个周波的电压均方根值, 得到一段时间内的一组电压均方根值序列  $U(n)$ , 其中,  $u(n)$  为采样信号,  $m$  为一个或半个周波内的采样点数<sup>[6]</sup>。

$$U(n) = \sqrt{\sum_{n=1}^m u(n)^2 / m} \quad (6)$$

2) 对数列  $U(n)$  进行 FFT, 求出其离散的频谱序列  $U_f(k)$ , 见式(7)。各频率正弦波幅值的 2 倍对应着该频率的正弦波动电压信号的电压波动值, 用该电压波动值除以在该频率上产生 1 个单位瞬时闪变值所需的电压波动值  $d$  后再平方, 即获得该频率下的瞬时闪变值  $S$ 。单位瞬时闪变值  $S=1$  时, 频率与正弦电压波动值  $d$  的对应关系是离散的值且个数有限, 而且频谱序列  $U_f(k)$  析出的频率不一定能在表中直接找出。因此, 要根据  $U_f(k)$  中的频率, 进行插值拟合, 得到该频率下对应的单位瞬时闪变值时的正弦电压波动值  $d$ 。本文利用最小二乘法进行曲线拟合的结果如图 1 所示。

$$U_f(k) = FFT[U(n)] \quad (7)$$

因为一段波形均方根值的平方等于组成该波形各频率成分均方根值的平方和, 电压均方根值序列  $U(n)$  对应的瞬时闪变值等于其频谱上各频率对应的瞬时闪变值之和, 即  $U(n)$  频谱上各频率幅值的 2 倍除以该频率下 1 个单位瞬时闪变值对应电压波动值后的平方和, 如式(8)。

$$S = \sum_{i=0}^k \left[ \frac{|U_f(k)| \times 2}{du_i} \right]^2 \quad (8)$$

FFT 分解要求  $N$  值必须为 2 的整数次幂, 根据加权滤波的频谱特性, FFT 频谱分辨率应介于  $0.1 \text{ Hz} \sim 1 \text{ Hz}$  之间, 即计算一个瞬时闪变值  $S$  对应的时间应在  $1 \text{ s} \sim 10 \text{ s}$  之间。

3) 用离散的方法计算出瞬时闪变值  $S$  后, 就可利用式(9)计算短时间闪变值  $P_{st}$ 。但是, 通过累计概率函数 (Cumulative Probability Function, CPF) 曲线来确定该公式用到的 5 个规定值 ( $P_{0.1}, P_1, P_3, P_{10}, P_{50}$ ) 很繁琐, 不利于软件编程。本文用一种简单的排序统计方法, 无需做出 CPF 曲线就可以方便地求出  $P_{0.1}, P_1, P_3, P_{10}, P_{50}$ 。

$$P_{st} = 0.031 4P_{0.1} + 0.052 5P_1 + 0.065 7P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50} \quad (9)$$

只要将  $S$  序列中的元素从大到小重新排序, 然后分别找出 99.9%, 99%, 97%, 90%, 50% 的概率大值, 即可确定  $P_{0.1}, P_1, P_3, P_{10}, P_{50}$ 。将它们代入式(9), 即可计算出对应的短时间闪变值  $P_{st}$ 。

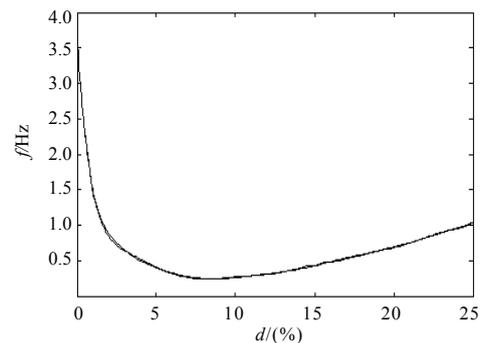


Fig.1 Fitted curve of frequency vs. voltage fluctuating value  
图 1 电压波动值-频率关系拟合曲线

## 2 基于海宁窗结合双峰插值修正法的谐波计算

### 2.1 窗函数

在数据采集时,即使采样频率满足了采样定理,但如果不是同步采样,将带来泄漏误差以及栅栏效应误差,使得算出的信号参数(如幅值和相位等)不准确,尤其是相位误差很大,从而无法满足谐波测量要求。对信号进行DFT分析,实际上就是对信号进行加矩形窗后再作DFT,也就是说在存在同步偏差时加矩形窗后再进行DFT分析的算法精度不高,但是选择合适的窗函数(该窗函数指除了矩形窗以外的其它窗函数,称之为特殊窗)则可能使泄漏误差减小,从而提高谐波测量的准确度<sup>[7]</sup>。

电网信号主要含有整数次谐波,因而常采用余弦窗函数,只要选取观测时间是信号周期的整数倍,其频谱在各次整数倍谐波频率处幅值为零,则谐波之间不发生相互泄漏。即使信号频率作小范围波动,泄漏误差也较小。余弦窗函数一般可以表达为( $M$ 为窗的项数):

$$w(n) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^M a_m \cos 2\pi nm / N, n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

余弦窗根据所取项数、各项系数的不同,窗的名字也不一样,常用窗所对应的各项系数取值见表1。本文所用的海宁(Hanning)窗函数表达式如下:

$$w(n) = 0.5 - 0.5 \cos(2\pi n / N), n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

### 2.2 基于海宁窗函数的插值修正 FFT 算法的步骤

具体步骤为:

- a) 选取适当周期长度截取实域数据;
- b) 对实域信号数据加海宁窗;
- c) 作FFT运算,得到频谱数据;
- d) 寻找各次谐波峰值点附近幅值最大

和次最大的谱线;

- e) 利用修正公式得到各次谐波的幅值和相位。

$$\begin{cases} w(n) = 0.5 - 0.5 \cos(2\pi n / N)(n = 0, 1, \dots, N-1) \\ a = 1.5\beta \\ \theta = \arg [\bar{X}(k_i \Delta f)] + \frac{\pi}{2} - \pi(a - (-1)^i \times 0.5)(i = 1, 2) \\ A = N^{-1}(y_1 + y_2)(2.356\ 194\ 03 + 1.155\ 436\ 82a^2 + 0.326\ 078\ 73a^4 + 0.078\ 914\ 61a^6) \end{cases} \quad (12)$$

式中:

$$\beta = \frac{y_2 - y_1}{y_2 + y_1} = \frac{|W(2\pi(-a+0.5)/N) - |W(2\pi(-a-0.5)/N)|}{|W(2\pi(-a+0.5)/N)| + |W(2\pi(-a-0.5)/N)|} \quad (13)$$

$$\bar{X}(k\Delta f) = (A/2j)e^{j\theta}W(2\pi(k\Delta f - f_0)/f_s) \quad (14)$$

式(13)~式(14)中: $y_1, y_2$ 表示峰值频率点左右两侧的谱线幅值; $\Delta f$ 表示离散频率间隔; $\bar{X}$ 表示正频点附近的连续频谱函数; $a$ 的数值范围是 $[-0.5, 0.5]$ 。

### 2.3 仿真结果对比

通过与单纯FFT算法结果对比,可以看出改进的加海宁窗结合双峰插值修正FFT算法能够得到更准确的结果,Matlab仿真结果见表2。

仿真信号:

$$X(t) = \sum_{i=1}^{13} A_i \cos(2\pi f_i t + \varphi) \quad (15)$$

表1 各余弦窗的系数表

coefficients	Hanning	Hamming	Blackman	Blackman-Harris
$a_0$	0.5	0.54	0.42	0.358 75
$a_1$	-0.5	-0.46	-0.5	-0.488 29
$a_2$			0.08	-0.001 108
$a_3$				

表2 仿真结果

	U/N			I/A		
	A	B	C	A	B	C
1	380.000	379.900	333.500	5.000	5.000	4.966
2	1.900	1.907	6.272	0.025	0.025	0.054
3	19.000	19.000	18.150	0.250	0.250	0.233
4	1.520	1.520	2.055	0.021	0.021	0.014
5	11.400	11.400	7.391	0.190	0.190	0.147
6	2.280	2.280	1.574	0.030	0.030	0.022
7	7.600	7.600	6.890	0.090	0.090	0.049
8	0.760	0.760	0.332	0.009	0.009	0.008
9	11.400	11.400	7.465	0.150	0.150	0.051
10	1.900	1.899	1.718	0.012	0.011	0.007
11	3.800	3.799	2.974	0.050	0.050	0.009
12	1.140	1.139	1.131	0.016	0.015	0.001
13	7.600	7.599	1.733	0.084	0.084	0.002

设定基波频率  $f_1=50.5$  Hz, 各次谐波幅值如表 2 中 A。以  $f_0=6\ 400$  Hz 频率进行采样, 利用双峰插值修正 FFT 算法求出的各次谐波幅值如表 2 中 B, 普通 FFT 计算幅值结果如表 2 中 C。

### 3 电能质量监测仪系统的实现

#### 3.1 系统工作原理

三相电压、三相电流经相应的互感器转换成交流小电压和小电流, 由于所测信号中存在一些噪声, 影响了测量准确度, 故在信号调理板上先低通滤波, 除去高于采样频率的噪声, 再通过调理板上的电路将交流小信号线性转换放大成数据采集卡能够接受的  $-5\text{ V}\sim+5\text{ V}$  电压, 然后进入高速数据采集芯片 ADS1178。采集芯片将模拟量转化成数字量提供给上位机软件处理、分析、计算, 最终在系统软件的实时数据界面上显示出计算结果, 同时将分析结果保存, 用户可以查询历史数据或将数据导出至 EXCEL 中。

电能质量监测仪的整体结构框图如图 2 所示。

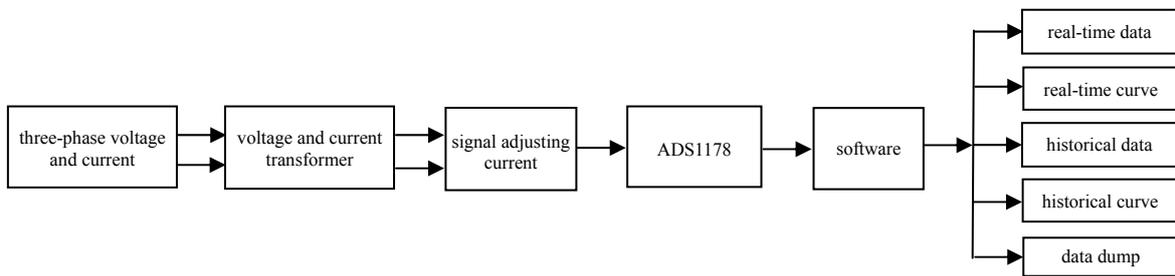


Fig.2 Block diagram of the whole system  
图 2 系统整体结构框图

#### 3.2 系统软件实现

本系统在 Windows XP 平台下, 采用 Delphi 软件编程实现, 主要功能包括实时数据、实时曲线、历史数据、历史曲线和数据转存。无需键盘和鼠标, 系统开机后自动运行, 系统运行后人机界面的操作全部由触摸屏完成。

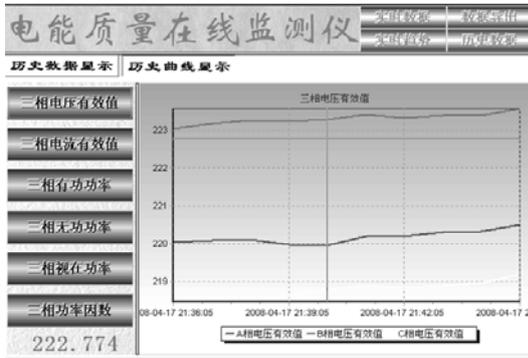


Fig.3 Interface of historical curve  
图 3 历史曲线界面

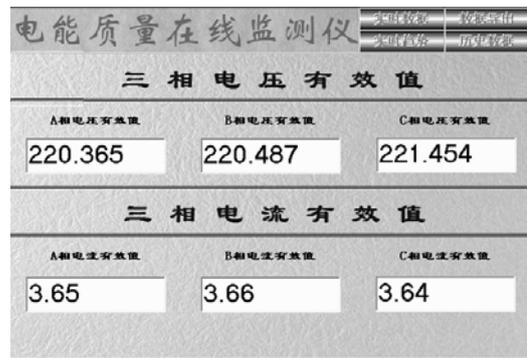


Fig.4 Interface of real-time data  
图 4 实时数据界面

### 4 结论

本文详细介绍了基于 OMAP-L137 平台的电能质量在线监测仪的系统开发过程, 经实验测试本装置具有在线监测、智能化、实时性好、成本低、数据精确度高等特点。通过本装置的使用, 能及时记录供电系统的各种干扰, 方便地对整个电网的电能质量水平做出正确的评价, 有利于分析扰动原因和找出减轻干扰影响的方法, 进而提高电网电能质量的监督管理水平。

#### 参考文献:

[ 1 ] Staudt V. Effects of window functions explained by signals typical to power electronics[C]// Proceedings of 8<sup>th</sup> International Conference on Harmonics And Quality of Power. 1998,2:952-957.