

# 基于准同步采样法三相多功能电度表的研究\*

朱更军

(浙江师范大学 数理信息学院, 浙江 金华 321004)

**摘要:** 分析了准同步采样法的基本工作原理,研究了为了减少编程计算量的准同步简化算法,以及为了提高准同步采样法准确度的变频率采样法。最后,把准同步采样法应用到三相多功能电度表中,实现了0.2S精度的三相多功能电度表的设计。实际测试结果表明,该表具有精度高、功能齐全及性能可靠等特点。

**关键词:** 电能表; DSP; 准同步采样; 0.2S 精度

中图分类号: TM933.4

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2012)23-0032-03

## Research of the three-phase multi-functional power meter based on the quasi-synchronous sampling method

Zhu Gengjun

(School of Mathematical Information, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

**Abstract:** This paper analyses the basic principle of the quasi-synchronous sampling. It studies the simplified arithmetic of quasi-synchronous sampling in order to reduce the programming calculation, and studies the frequency sampling method to improve the precision. Finally, it applies the quasi-synchronous sampling into the three-phase multi-functional power meter, realizes the design of the three-phase multi-functional power meter with 0.2S precision. The result of the practical running testifies that it has the advantages of good precision, full function and high reliability.

**Key words:** power meter; DSP; quasi-synchronous sampling; 0.2S precision

近年来随着各种大功率整流、换流设备以及电弧炉等非线性负荷的日益增多,造成供电系统电压、电流波形不同程度畸变,产生了大量的谐波负荷、冲击负荷和低负荷负载等各种复杂负荷。这些复杂负荷不仅对供电系统的安全、稳定以及经济运行构成威胁、造成危害,而且也电能计量装置产生很大的影响。深入研究谐波负荷对供电系统电能计量的影响,研发出一款带有谐波电能计量的电能表,具有十分重大的社会意义和经济意义。同步采样是目前使用微处理器的电能测量装置中普遍采用的采样方法,它的优点是在满足一定的采样要求时,理论上没有测量方法误差。但是,严格的同步采样在实际应用中极难实现,尤其是固定采样频率下,测量电网参数基本上不可能做到同步采样。此时存在非同步误差,且成为测量系统的主要误差。减小非同步误差的方法可分为硬件法和软件法。第一类方法从硬件上来实

现,从目的上来分析是为了尽量减小失步度,即满足采样周期和信号周期同步,但这类方法的硬件实现比较复杂,同时,受系统的时钟影响,存在截断误差。第二类方法是在非同步采样的前提下,即无法达到同步采样的前提下采用的软件分析方法,即准同步采样方法。

准同步采样方法的最大特点是去掉了同步采样中的同步环节,在采样过程中,利用增加每周期的采样点和增加采样周期,采用新的数据处理方法,即通过数值积分公式进行迭加运算,可以获得对采样信号平均值的高准确度估计,达到消除同步误差的目的。采用该方法降低了对硬件的要求,在低频的情况下,可以得到很好的结果。

### 1 准同步采样算法

#### 1.1 准同步采样法的基本原理

测量电网参数如平均值、有效值和功率可看作是进行一种积分运算。例如:

\* 基金项目:浙江省科技计划项目(2008C21136)

电压有效值为:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{T_0}^{T+T_0} u^2(t) dt} \quad (1)$$

有功功率为:

$$P = \frac{1}{T} \int_{T_0}^{T+T_0} u(t) \times i(t) dt \quad (2)$$

其中,  $T$  是信号周期,  $T_0$  是积分起点。不作开方和其他算术运算并作变量代换, 令  $x = \omega t$ , 则式(1)、式(2)可表示为:

$$\overline{f(x)} = \frac{1}{2\pi} \int_{x_0}^{x_0+2\pi} f(x) dx \quad (3)$$

其中,  $\overline{f(x)}$  是  $f(x)$  的平均值,  $2\pi$  是周期, 是起始点对应的角度值。

如等分周期为  $N$  段, 且采样时间为  $\frac{T}{N}$ , 则  $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(i) = \overline{f(x)}$ , 此时为同步采样, 理论上没有测量方法误差。但如果积分区间不是  $T$  而是  $T + \Delta T$ , 则式(3)不能成立, 此时存在非同步误差。实际应用中几乎都存在非同步误差。

令  $E = \overline{f(x)} - \frac{1}{2\pi + \Delta} \int_{\alpha}^{\alpha + 2\pi + \Delta} f(x) dx$ ,  $E$  是非同步采样误差, 准同步采样算法就是在  $\Delta$  不太大的情况下, 通过适当增加采样数据量和增加迭代次数以尽量减少这种误差, 从而提高测量准确度的方法。算法推导如下:

将宽为  $2\pi + \Delta$  的积分区间  $[\alpha, \alpha + 2\pi + \Delta]$  等分为  $N$  段, 均匀采样得  $N+1$  个数据  $f(x_i)$ , ( $x_i = \alpha + i \cdot \frac{2\pi + \Delta}{N}$ ,  $i=0, 1, \dots, N$ ), 并按某种数值求积公式做如下定义的运算:

$$F^1 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \rho_i f(x_i) \quad (4)$$

其中,  $\rho_i (i=0, 1, \dots, N)$  为对应数值求积公式所确定的权系数;  $F^1$  表示第一次求积运算, 可以看出  $F^1$  是采样起点  $x_0$  (也就是  $\alpha$ ) 的函数。

于是可以将宽为  $n \times (2\pi + \Delta)$  的积分区间  $[\alpha, \alpha + n(2\pi + \Delta)]$  等分为  $n \times N$  段, 采样得到  $n \times N + 1$  个数据  $f(x_i)$ , ( $x_i = \alpha + i \cdot \frac{2\pi + \Delta}{N}$ ,  $i=0, 1, \dots, n \times N$ ), 记作  $f_1, f_2, \dots, f_L$  (其中  $L = n \times N + 1$ ), 把  $f_1 \sim f_{N+1}$  共  $N+1$  个数据分成一组, 对此实施式(4)的运算, 得到新的数据  $F_1^1$ 。同样, 把  $f_2 \sim f_{N+2}$  共  $N+1$  个数据分成第二组, 运算得新数据  $F_2^1$ 。依此类推, 直到把  $f_{L-N} \sim f_L$  诸数据分成第  $L-N$  组, 得到  $F_{L-N}^1$ 。至此完成了对原始数据的第一次分组处理。第二次分组处理类似第一次, 在数据共  $L-N$  个数据上进行, 得  $F_1^2, F_2^2, \dots, F_{L-N}^2$ , 总数据少了  $N$  个。连续处理  $n$  次, 直到剩下一个数据  $F_1^n$ 。以上分组分次递推运算公式如下:

$$F^n = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \rho_i F^{n-1}, n=2, 3, \dots \quad (5)$$

其中  $n$  为递推序号。具体递推过程如图 1 所示。

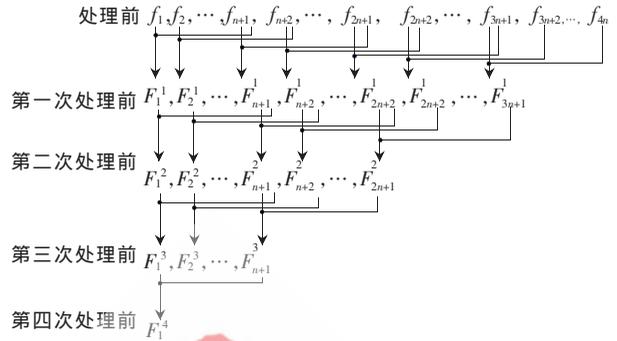


图 1 以  $n=4$  为例, 准同步采样法分组分次递推过程示意图

可以证明, 在一定条件下  $\lim_{n \rightarrow \infty} F^n = \overline{f(x)}$  成立, 因此, 剩下的最后一个数据  $F_1^n$  就是  $\overline{f(x)}$  的估计。

## 1.2 准同步采样法在实际应用的几个问题

### (1) 准同步采样法的简化算法

从图 1 来看, 准同步算法分组递推过程计算量比较大, 为了减少数据运算量和简化编程难度, 可以将复杂的递推运算过程变成一次加权处理, 如式(6)所示:

$$F^n = \frac{1}{\sum_{i=0}^N \rho_i} \sum_{i=0}^N \rho_i \left( \frac{1}{\sum_{i=0}^N \rho_i} \sum_{i=0}^N \rho_i F^{n-2} \right) = \frac{1}{\sum_{i=0}^N \rho_i} \sum_{i=0}^N \rho_i \dots \frac{1}{\sum_{i=0}^N \rho_i} \sum_{i=0}^N \rho_i f(x_i) = \sum_{i=0}^{nN} \eta_i f(x_i) \quad (6)$$

这样  $n \times N + 1$  个数据仅需加权一次求和就可得到  $\overline{f(x)}$  的估计。

各点对应的权系数  $\eta_i (i=0, 1, \dots, nN)$  由每周期采样点数  $N$  和递推级数  $n$  以及所采用的数值求积公式完全确定。当  $\Delta$  较小时,  $n=3$  就能很好地满足测量准确度的要求。实际应用时, 先将各权系数算好, 以数组的形式存入内存, 这样仅需对数据进行一次加权运算就可获得结果。

由式(6)可以得到电压有效值  $U$ 、电流有效值  $I$ 、有功功率  $P$  及功率因数  $\cos\phi$  的公式分别如下:

$$U = \sqrt{\sum_{i=0}^{nN} \eta_i u_k^2} \quad (7)$$

$$I = \sqrt{\sum_{i=0}^{nN} \eta_i i_k^2} \quad (8)$$

$$P = \sum_{i=0}^{nN} \eta_i u_k i_k \quad (9)$$

$$\cos\phi = \frac{P}{S} \quad (10)$$

根据式(7)~(10)则可完成电表电参数的计算。

(2) 减少准同步采样法误差的方法——变频采样法  
根据准同步采样的误差理论分析, 以及计算机仿真表明, 准同步采样的误差产生与频率偏差  $\Delta f$  相关。  $\Delta f$

越大,误差越大。表 1 给出了频率偏差与信号有效值的准确度关系。

表 1 频率偏差与信号有效值的准确度关系

仿真信号 频率/Hz	信号的 有效值/Hz	仿真信号 频率/Hz	信号的 有效值/Hz
45	100.005	50	100.00
46	100.003	51	99.999 9
47	100.002	52	99.999 5
48	99.999	53	99.998
49	100.00	54	100.004

(采样频率为 50 Hz×64, 信号有效值为 100)

减少误差最直接方法是改变根据实际电网频率实时改变采样频率,即变频采样法。它是在测量过程中,根据信号的频率值,改变采样频率,使信号频率与采样频率的偏差最小。具体实现方法有多种,本文采用方法是:首先采用一个采样频率对信号进行采样,根据准同步采样算法,计算出信号的有效值、谐波等,再计算出信号的频率。其次,根据这个频率去设置系统的采样频率。具体计算过程如下:

对于一个正弦波,它的频率等于两点的相位差除以这两点之间的时间差。时间差是由采样频率决定的。相位差可以通过谐波分析中得到。如果从  $t_0$  时刻开始进行谐波分析,求出此时刻的相位  $\psi_1$ ; 同样,如果从  $t_1$  时刻开始进行谐波分析,求出此时刻的相位  $\psi_2$ 。根据这两个相位差,可以根据式(11)准确地求出信号的频率:

$$F_s = \frac{\psi_2 - \psi_1}{2 \times \pi \times (t_1 - t_0)} \quad (11)$$

## 2 系统总体方案设计

三相多功能电度表的工作原理是,首先对电网的三相电压、电流信号进行调理,电压经过分压电阻,电流经过高精度电流互感器,把大信号转换为小信号,然后通过一个抗混叠滤波器,调理后的信号进行 A/D 采样,通过串行通信口, DSP 接收到采样数据。DSP 实时处理采样数据,计算出电压和电流有效值、有功和无功功率,累积电量,电网频率及功率因数等电网参数。采用高精度算法对电压、电流信号进行谐波成分分析,得到各次谐波分量有效值、频率和相位信息,利用这些信息,计算出各次谐波功率及谐波电能。计算结果通过 LCD 面板显示,同时也能与外部进行通信,系统提供电能脉冲输出,方便校表。系统框图如图 2 所示。

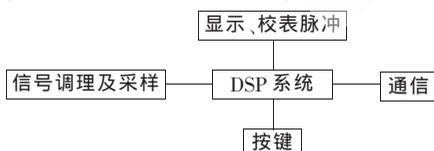


图 2 系统框图

### 2.1 多功能电度表基本结构

系统硬件结构参考市场上已有的成熟电能表硬件构成方案,分为 3 块工作电路板。DSP 系统所在模块按 4

层板设计,便于布线和提高抗干扰能力,另两块是双层 PCB,如图 3 所示。

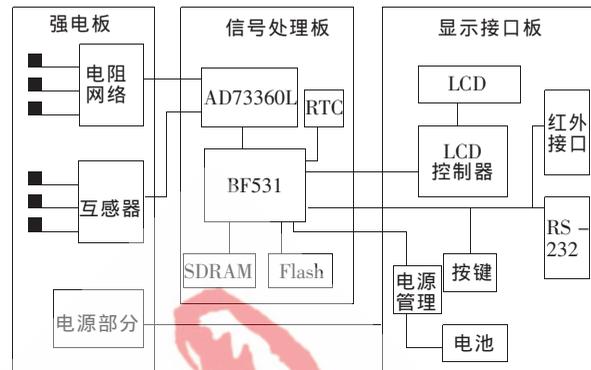


图 3 硬件结构图

各个模块功能简介如下:

#### (1) 信号调理和 A/D 采样

电压经电阻分压网络按比例分压,电流经电流互感器转换为小电流,同时起到强弱电隔离的作用,电流互感器内部有一个电流感应型互感线圈,当原方输入一定的交流电流时,在副方就会有电流输出。如果输入在额定范围之内,输出值和输入值是成线性关系的,它们的比值由原、副方的匝数比决定。

采样电路采用交流采样,采样芯片为 16 bit 的 AD73360,支持 6 通道同步转换,无同步误差。同时 AD73360 使用了过采样技术(Oversampling),前端的信号通道只需要使用简单的一阶低通滤波器即可消除混叠效应。

#### (2) 处理器模块

本项目采用 ADI 公司的 Blackfin531 16 bit 定点芯片,其最高处理能力可达 800 MIPS。BF531 处理器用于高速数字信号处理,将完成所有的电能计量和谐波分析。为了满足电能表实时性高、功能较多、程序量以及数据量大的要求,本项目为 BF531 配置了 SDRAM 芯片 IS42S16400,IS42S16400 是 ISSI 公司的同步存储器,容量达 64 MB,16 bit 宽访问,时钟频率最高为 133 MHz。同时使用 16 bit Flash 存储器 SST39VF200A,SST39VF200A 是 SST 公司生产的 Flash 存储器。

#### (3) 显示模块

液晶显示可以直观表达电表测量时需要显示出来的参数,可以为用户和系统维护人员带来极大的方便。PCF8576 正是一款专用驱动点阵式液晶的专用芯片。带有 I<sup>2</sup>C 总线接口,有 4 个背极输出和 40 个显示段输出,因此,最多可驱动 160 个 LCD 显示段。PCF8576 的外设连接相对来说比较简单,与 Blackfin 53x 系列高性能 DSP 相连无需特别的接口电路。

## 3 实验结果分析

测试方案:电能表均有有功和无功脉冲输出,根据

设定的脉冲常数和功率值,脉冲输出口以一定的频率输出脉冲,脉冲宽度设为 80 ms,脉冲频率反映了电功率大小,功率越大频率越高,一段时间内的脉冲数代表了电能。电能表检验台包含高精度的稳定源和标准表两部分。标准表连接信号源,同时被测仪表的脉冲输出也连接至标准表,根据标准表测量的脉冲和被测仪表的脉冲可以算出误差。这里每一圈计算一个误差,即一个脉冲刷新一次误差。

根据国标 GB/T 17883—1999 对准确度的要求测量多个测试点,以 A 相为例,有功电能的误差分布如表 2、表 3 所示,无功电能的误差分布如表 4、表 5 所示。

表 2 A 相功率因数为 1 的有功电能误差

标注 序号	分 A 1.0						
	$I_{max}$	$I_b$	$0.5I_b$	$0.2I_b$	$0.1I_b$	$0.05I_b$	$0.01I_b$
1	+0.05	+0.05	+0.02	0.0	-0.053	+0.06	+0.060 4
2	+0.02	+0.08	+0.05	+0.13	0.0	+0.05	+0.06
3	+0.02	+0.08	+0.02	+0.1	-0.08	+0.06	+0.060 4
4	+0.02	+0.08	+0.0	0	-0.06	-0.027	+0.060 4

表 3 A 相功率因数为 0.5C 的有功电能误差

标注 序号	分 A 0.5C						
	$I_{max}$	$I_b$	$0.5I_b$	$0.2I_b$	$0.1I_b$	$0.05I_b$	$0.01I_b$
1	+0.05	+0.05	+0.03	0.0	-0.024	+0.064	0.06
2	+0.05	+0.07	-0.0	-0.04	0.06	+0.06	0.06
3	-0.03	+0.05	+0.06	+0.01	-0.0	+0.064	0
4	+0.0	0	+0.03	0	-0.24	-0.02	0.06

表 4 A 相功率因数为 1 的无功电能误差

标注 序号	分 A 1.0						
	$I_{max}$	$I_b$	$0.5I_b$	$0.2I_b$	$0.1I_b$	$0.05I_b$	$0.01I_b$
1	+0.08	+0.01	+0.06	+0.05	-0.043	+0.058	-0.09
2	+0.078	+0.05	+0.05	+0.0	+0.02	+0.07	+0.073
3	+0.08	+0.06	+0.076	+0.08	0.0	+0.03	+0.03
4	+0.07	+0.04	+0.07	+0.089	-0.019	+0.053	-0.068

表 5 A 相功率因数为 0.5C 的无功电能误差

标注 序号	分 A 0.5C						
	$I_{max}$	$I_b$	$0.5I_b$	$0.2I_b$	$0.1I_b$	$0.05I_b$	$0.01I_b$
1	+0.057	+0.01	+0.032	0.067	-0.02	+0.05	+0.045
2	+0.05	+0.03	+0.056	+0.05	0	+0.01	+0.034
3	+0.02	+0.036	+0.073	+0.08	-0.067	+0.06	+0.059
4	+0.0	+0.07	+0.01	0	-0.01	-0.04	+0.034

从上面的测试数据可以看出,全量程范围内分相误差均小于 $\pm 0.2\%$ 。误差在接近 1% 量程时相对比较,但也能控制在 $\pm 0.2\%$ 以内,这是因为小电流时,互感器的角差和比差会相对变大一些,而整个测量系统只校正了一个点,即额定电流  $I_b$  处。从检定的结果可以看出,有功测量全量程可以达到 0.1%,无功测量可以达到 0.2%,检定合格。

本项目采用了准同步采样法,减少了非同步采样误差,为研发 0.2S 精度的三相多功能电度表提供了理论依据之一。实验结果表明,采用了准同步算法的电能表能够实现高精度的电参数测量,准确度符合 GB/T 17883—1999 和 DL/T614—1997 的 0.2S 级精度电能表标准,同时兼容 0.5S 级精度电能表。实现了电压、电流的各次谐波分析,最高测量到 21 次。具有很好的市场应用前景。

## 参考文献

- [1] 戴先中.准同步采样中的几个理论与实际问题[J].仪器仪表学报,1986(2).
- [2] Analog Devices, Inc. ADSP-BF533 Blackfin processor hardware reference, Preliminary Revision[Z]. 2005.
- [3] Zhong Daixian, GRETSCH R. Quasi-synchronous sampling algorithm and its application [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1994,43(2):204-209.
- [4] 李芙英,王恒福.用准同步离散 Fourier 变换实现高精度谐波分析[J].清华大学学报(自然科学版),1999,39(5):47-50.
- [5] HIDALGO R M, FERNANDEZ J G, RIVERA R R, et al. A simple adjustable window algorithm to improve FFT measurements [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002,51(1): 31-36.
- [6] 肖雁鸿,毛筱,周靖林,等.电力系统谐波测量方法综述[J].电网技术,2002,26(6): 61-64.

(收稿日期:2012-05-12)

## 作者简介:

朱更军,男,1973年生,博士研究生,讲师,主要研究方向:数字信号处理、非线性系统控制。