

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190654

交流电参数的卷积窗加权测量及其单片机实现

陈砚圃¹, 张介秋², 谭薇³

(1. 西京学院信息工程学院, 陕西 西安 710123; 2. 空军工程大学基础部, 陕西 西安 710051;
3. 国防科技大学信息通信学院试验训练基地, 陕西 西安 710106)

摘要: 分析了交流电电压、电流以及功率等均值参数的采样法测量理论, 给出了不引入测量误差的条件。分析了非同步采样导致交流电参数测量误差的原因以及采用窗函数加权抑制测量误差的机理。重点给出了非同步频偏很小时抑制误差最有效的矩形互卷积窗及误差公式。针对实际中模数转换(ADC)电路的输入信号中存在直流分量, 导出了适用于单片机直接实现交流电参数测量的卷积窗加权算法的系列公式。通过仿真实验测试了单片机执行卷积窗加权算法的机器周期数与时长。结果表明采用 STM32 单片机仅需利用采样周期的很小一部分时间即可完成 2 阶卷积窗加权算法交流电参数测量中 1 个采样点的计算, 算法具有很高的时效性。

关键词: 交流电均值参数; 非同步采样; 卷积窗算法; STM32 单片机; 执行时间

Convolution window weighted measurement for AC parameters and its MCU implementation

CHEN Yanpu¹, ZHANG Jieqiu², TAN Wei³

(1. College of Information Engineering, Xijing University, Xi'an 710123, China;

2. Department of Basic Sciences, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

3. Information and Communications Institute, National University of Defense Technology, Xi'an 710106, China)

Abstract: The theory of a sampling method for measuring the average parameters of AC voltage, current and power is analyzed, and a condition without introducing measurement error is given. The reasons for measurement error of AC parameters caused by non-synchronous sampling and the mechanism of window function weighted method to suppress measurement error are analyzed. Rectangular convolution windows, which are most effective in suppressing errors in the case of very small non-synchronous frequency deviation, and measurement error formulae are presented. Considering the DC component in the input signal of ADC circuit in practice, a series of formulae corresponding to the convolution window weighted algorithm for AC parameter measurement are derived. These are suitable for direct implementation by an MCU. The number of machine cycles and the length of time for the MCU to execute the convolution window weighted algorithm are tested by simulation. The results show that the convolution window weighted algorithm is time efficient. The calculation of one sampling point in the AC parameter measurement of 2-order convolution window weighted algorithm can be completed using a STM32 MCU in only a small part of the sampling period.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 6164006).

Key words: AC average parameter; non-synchronous sampling; convolution window algorithm; STM32 MCU; execution time

0 引言

对交流电电压、电流及功率等电气参数的测量可以采用专用芯片实现, 但随着单片机的发展, 其片上资源越来越丰富, 功能越来越强大, 因而在设

计各类交流电参数测量与谐波分析的仪表和终端时直接采用单片机实现专用芯片的功能已成为普选方案。交流电电压、电流及功率等电气参数属于周期信号的均值参数, 对应周期信号各谐波分量中的零频分量。交流电的谐波分析中因非同步采样和非整数周期截断会导致频谱泄露和栅栏效应。对采样信号进行加窗处理能够抑制频谱的泄露^[1-2], 不同的加窗函数在频域中对应不同的主瓣宽度和旁瓣衰减,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(6164006); 西安市科技计划项目资助(GXYD20.5)

因而对频谱泄露的抑制程度不同。本世纪以来,国内外学者通过对常用的窗函数(如矩形窗、三角窗、Hanning窗、Rife-Vincent窗、Nuttall窗等)进行卷积或相乘构造了一系列新型窗函数^[3-11],当用于交流电的参数测量与谐波分析时更能有效抑制频谱的泄露效应。针对栅栏效应,在结合新型加窗函数的基础上人们又进一步提出了多谱线插值算法^[10-18],提高了分析精度。文献^[19-20]较早研究了非同步采样和非整数周期截断对交流电均值参数的测量误差的影响。由于均值参数对应信号谐波的零频分量,其特点是在频谱中的位置不会偏移,不存在栅栏效应,故在抑制交流电均值参数测量误差时不必引入插值算法。基于新型加窗函数对各种交流电参数的加窗测量也已进行了大量研究^[21-27],但借助单片机实现时的具体问题考虑的还不深入。本文首先引入交流电参数的理论公式;给出基于同步采样的计算公式并分析其无误差条件;指出非同步采样及误差的成因;说明窗函数加权算法抑制非同步采样误差的机理,重点介绍当频偏很小时抑制非同步采样误差效果最佳的窗函数;导出适用于单片机实现的交流电参数测量的窗函数加权算法的系列公式,并通过单片机的仿真开发环境对交流电参数的测量精度和测量的实时性进行实验研究。

1 交流电参数的理论公式

设交流电压 $u(t)$ 和电流 $i(t)$ 均为周期 T 的周期信号,则电压有效值 U 、电流有效值 I 及有功功率 P 的定义式分别为^[19-20]

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

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

$$P = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u(t)i(t) dt \quad (3)$$

以上定义式中的核心部分是求周期信号 $u^2(t)$ 、 $i^2(t)$ 和 $u(t)i(t)$ 的均值,而相应的参数称为均值参数。实际上文中出现的交流电参数均指交流电均值参数。为了分析此类问题,用 $g(t)$ 表示周期信号,则其平均值(直流分量) A 可由信号在任一周期内求平均或在任意连续 k 个周期内求平均给出。

$$A = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g(t) dt \quad (4)$$

$$A = \frac{1}{kT} \int_{-kT/2}^{kT/2} g(t) dt \quad (5)$$

而交流电参数 U 、 I 和 P 的测量问题则对应于

周期信号 $g(t)$ 分别为 $u^2(t)$ 、 $i^2(t)$ 和 $u(t)i(t)$ 情况下的求均值问题。

2 基于同步采样的交流电均值参数测量

设周期信号 $g(t)$ 只含有限次的谐波分量且最高谐波次数为 M , 则 $g(t)$ 可以展为

$$g(t) = A + \sum_{m=1}^M a_m \sin(2\pi mft + \phi_m) \quad (6)$$

式中, $f=1/T$ 为信号的频率。基于式(4)对均值参数进行测量,首先要对 $g(t)$ 进行同步采样。同步采样是指周期 T 恰好是采样周期 t_s 的整数倍的均匀采样。若一个周期内有 N 个采样点,则同步采样的采样间隔为 $t_s = T/N$ 。不失一般性,令 $t_n = -T/N + nt_s$, 则周期信号 $g(t)$ 在区间 $[-T/2, T/2]$ 内的 N 个离散值为

$$g[n] = g(t_n) = g(-T/2 + nT/N), \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (7)$$

则可以用求和式^[19]

$$\tilde{A} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} g[n] \quad (8)$$

替代积分式(4)计算周期信号的均值。一般情况下式(8)只是 A 的近似,用 \tilde{A} 表示。将式(6)代入,可得出

$$\tilde{A} = A + \frac{1}{N} \sum_{m=1}^M a_m \text{Imag} \left[\sum_{n=0}^{N-1} e^{j \left(\frac{2\pi m}{N} n + \phi_m - m\pi \right)} \right] \quad (9)$$

式中, $\text{Imag}[\]$ 表示取虚部。容易证明当 $N > M$ 时,式(9)中的第二项为 0,因而得到 $\tilde{A} = A$ 。这表明,在一个周期内的同步采样点数 N 只要大于周期信号所含谐波的最高次数 M , 均值计算式(8)严格成立。

设 $u(t)$ 和 $i(t)$ 所含谐波的最高次数分别为 M_1 和 M_2 , 则 $u^2(t)$ 、 $i^2(t)$ 和 $u(t)i(t)$ 所含谐波的最高次数分别为 $2M_1$ 、 $2M_2$ 和 (M_1+M_2) 。欲使利用离散采样信号计算 U 、 I 和 P 时不引入误差,需满足

$$N > 2 \max(M_1, M_2) \quad (10)$$

3 卷积窗加权算法

同步采样是用采样法对周期信号的均值参数进行测量而不引入误差的前提。但是在实际中交流电的频率是起伏变化的,另外采样间隔也只能取系统时钟周期的整数倍,所以一般情况下交流电的周期和采样间隔不满足整数倍的关系,即实际中的采样都是程度不同的非同步采样。为了便于定量分析,引入相对频偏 x , 如式(11)所示。

$$x = (f - f_0) / f_0 = (T_0 - T) / T \quad (11)$$

式中: f_0 和 T_0 分别为信号的估计频率和估计周期。应用中总是将估计周期设定为采样间隔的 N 等份,

所以只有当信号的实际周期与估计周期相等即 $x=0$ 时才对应同步采样。

将信号的非同步采样值代入式(8)求信号的均值会引入误差, 这种误差称之为非同步误差。为了抑制周期信号参数测量与谐波分析中的非同步误差, 国内外学者先后通过构造不同的窗函数对近似整数个周期内的采样进行加权计算^[3-11]。每次测量总是选用宽度近似为整数个周期的窗函数对被测信号进行截断和加权, 再进行求均值计算。由于采样的不同步, 窗函数的宽度不严格等于周期的整数倍, 这将导致在频域中各高次谐波在直流分量处的频谱泄露。周期信号的均值参数对应其直流分量, 所以非同步采样将给交流电均值参数的测量带来误差。不同的窗函数所导致的各次谐波在直流分量处的频谱泄露不同^[1-3], 引入的测量误差也不同。理论分析和仿真实验均表明^[3-4]当频偏 $x \ll 1$ 时, 相对于已有的窗函数, 采用由矩形窗函数相互卷积得到的各阶卷积窗函数对信号进行加权求均值引入的误差最小。因此下面重点给出卷积窗函数^[3-4, 22]。

矩形窗函数的定义为

$$W_1(t) = \begin{cases} 0 & |t| > 1/2 \\ 1 & |t| < 1/2 \end{cases} \quad (12)$$

为了上下文统一, 矩形窗函数也称为 1 阶卷积窗函数。均值的计算公式(4)可写为

$$A = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) W_1\left(\frac{t}{T}\right) dt \quad (13)$$

2 阶卷积窗函数为 2 个矩形窗函数的互卷积。

$$W_2(t) = W_1(t) * W_1(t) = \begin{cases} 0 & |t| > 1 \\ 1 - |t| & |t| < 1 \end{cases} \quad (14)$$

可看出, 2 阶卷积窗函数恰好也是中心对称的三角窗函数^[21]。

k 阶卷积窗函数为 k 个矩形窗函数的互卷积或 $(k-1)$ 阶卷积窗函数与矩形窗函数的卷积

$$W_k(t) = \underbrace{W_1(t) * W_1(t) * \dots * W_1(t)}_k = W_{k-1}(t) * W_1(t) \quad (15)$$

它是一个在区间 $[-k/2, k/2]$ 上不为 0 的偶函数。 $k=3$ 以上的卷积窗函数的解析式见文献[3-4], 这里从略。

利用 k 阶卷积窗函数对连续 k 个估计周期上的信号进行加权求均值的公式为

$$A_k = \frac{1}{T_o} \int_{-\infty}^{+\infty} W_k\left(\frac{t}{T_o}\right) g(t) dt \quad (16)$$

将 $g(t)$ 代换为 $u^2(t)$ 、 $i^2(t)$ 和 $u(t)i(t)$, 则分别得到交流电的电压有效值平方、电流有效值平方和有功功率的卷积窗加权计算公式。对于相对频偏 $x \ll 1$

的正弦信号, 该三个电参数因非同步采样引起的均方根误差分别近似为^[22, 28]

$$\Delta U \approx \frac{\sqrt{2}}{4} \left| \frac{x}{1+x} \right|^k U \quad (17)$$

$$\Delta I \approx \frac{\sqrt{2}}{4} \left| \frac{x}{1+x} \right|^k I \quad (18)$$

$$\Delta P \approx \frac{\sqrt{2}}{2|\Psi|} \left| \frac{x}{1+x} \right|^k P \quad (19)$$

式中, Ψ 为交流电的功率因数。由误差公式容易看出卷积窗加权法抑制非同步采样误差的有效性。例如当相对频偏 $x=0.01$ 时, 用 $k+1$ 阶卷积窗对 $k+1$ 个估计周期的采样进行加权计算的误差相对于用 k 阶卷积窗对 k 个估计周期的采样进行加权计算的误差大约降低了 2 个数量级。

在一个周期内对交流电的采样点数满足关系式(10)时, U 、 I 和 P 的 k 阶卷积窗加权求和式为

$$U_k = \sqrt{\sum_{n=0}^{N_k-1} w_k[n] u^2[n]} \quad (20)$$

$$I_k = \sqrt{\sum_{n=0}^{N_k-1} w_k[n] i^2[n]} \quad (21)$$

$$P_k = \sum_{n=0}^{N_k-1} w_k[n] u[n] i[n] \quad (22)$$

式中: $u[n]$ 、 $i[n]$ 为电压、电流的离散信号; N_k 为连续 k 个周期内的采样点数; $w_k[n]$ 为离散形式的 k 阶卷积窗^[4]

$$w_k[n] = \frac{k}{N_k} W_k \left(\frac{k}{2N_k} (1 + 2n - N_k) \right), \quad n = 0, 1, 2, \dots, N_k - 1 \quad (23)$$

4 卷积窗算法的单片机实现

单片机与嵌入式系统的发展日新月异, 单个 MCU 芯片的片上资源越来越丰富, 功能越来越强大, 在对交流电参数的测量与谐波分析的仪表和终端中直接采用单片机实现专用芯片的功能已较为普及。交流电压 $u(t)$ 和交流电流 $i(t)$ 先经电压互感器 PT 和电流互感器 CT 变换, 再经幅度调整与中心搬移电路将信号调理到与单片机模数转换器(ADC)的输入电压范围相匹配, 最后由单片机直接进行采样与量化。虽然实际交流电压和电流的均值(直流分量)为 0, 但调理后输入信号的中心电压应尽可能接近单片机 ADC 参考电压 V_+ 与 V_- 的中值, 一般不为 0。设经采样与量化后的电压与电流分别为 $u_d[n]$ 与 $i_d[n]$, 显然它们的均值一般也不为 0。 $u[n]$ 、 $i[n]$ 与

$u_d[n]$ 、 $i_d[n]$ 的对应关系为

$$u[n] = K_{ud} \{u_d[n] - \bar{u}_d\} \quad (24)$$

$$i[n] = K_{id} \{i_d[n] - \bar{i}_d\} \quad (25)$$

式中： K_{ud} 与 K_{id} 为比例系数； \bar{u}_d 与 \bar{i}_d 分别为 $u_d[n]$ 与 $i_d[n]$ 的均值。

比例系数 K_{ud} 与 K_{id} 的值由所设定的 U 与 I 的测量量程 U_m 与 I_m 以及单片机ADC的量化位数 q 决定。

$$K_{ud} = \frac{\sqrt{2}}{2^{q-1}} U_m \quad (26)$$

$$K_{id} = \frac{\sqrt{2}}{2^{q-1}} I_m \quad (27)$$

要满足所设定的测量量程 U_m 与 I_m ，尚需调理电路的参数相配合。程序源码中代入的比例系数 K_{ud} 与 K_{id} 并不要求很精确，因为在测试校准时还要最后修定。

作为中间参量， \bar{u}_d 与 \bar{i}_d 在计算电压有效值、电流有效值及有功功率时会用到。显然它们也是均值参数，为了抑制非同步采样的影响其计算也采用 k 阶卷积窗加权计算。

$$\bar{u}_d = \sum_{n=0}^{N_k-1} w_k[n] u_d[n] \quad (28)$$

$$\bar{i}_d = \sum_{n=0}^{N_k-1} w_k[n] i_d[n] \quad (29)$$

将式(24)和式(25)代入式(20)一式(22)，并用式(28)和式(29)进行化简，可得

$$U_k = K_{ud} \sqrt{\sum_{n=0}^{N_k-1} w_k[n] u_d^2[n] - \bar{u}_d^2} \quad (30)$$

$$I_k = K_{id} \sqrt{\sum_{n=0}^{N_k-1} w_k[n] i_d^2[n] - \bar{i}_d^2} \quad (31)$$

$$P_k = K_{ud} K_{id} \left\{ \sum_{n=0}^{N_k-1} w_k[n] u_d[n] i_d[n] - \bar{u}_d \bar{i}_d \right\} \quad (32)$$

假设量化误差在量化步长内服从均匀分布，对于正弦交流电由量化引入的均方根误差近似为^[28]

$$\Delta U_q \approx \frac{\sqrt{2} C_k}{2^q \sqrt{3 N_k}} U_m \quad (33)$$

$$\Delta I_q \approx \frac{\sqrt{2} C_k}{2^q \sqrt{3 N_k}} I_m \quad (34)$$

$$\Delta P_q \approx \frac{\sqrt{2} C_k}{2^q \sqrt{3 N_k} |\Psi|} \sqrt{I^2 U_m^2 + U^2 I_m^2} \quad (35)$$

式中， $C_k = \sqrt{N_k \sum_{n=0}^{N_k-1} w_k^2[n]}$ ， $k=1, 2, 3, 4, 5$ 时

其取值分别为1.00、1.15、1.29、1.39、1.47。一般情况下交流电虽然不是严格的正弦信号，但基波占主要成分，量化误差仍然可以用式(33)一式(35)进行估计。

5 仿真实验

下面通过仿真实验，一方面验证卷积窗加权算法估计交流电参数的误差与相对频偏、采样点数与量化位数的关系，同时研究单片机直接测量的计算效率。实验中的 $u(t)$ 为正弦信号， $i(t)$ 为含有11次谐波的非正弦信号，分别为

$$u(t) = 220\sqrt{2} \sin[2\pi(1+x)f_0 t] \quad (36)$$

$$i(t) = 88\sqrt{2} \sin[2\pi(1+x)f_0 t] + 8.4\sqrt{2} \sin[22\pi(1+x)f_0 t] \quad (37)$$

其中电压和电流有效值的理论值分别为220 V和88.4 A。市电的估计频率为 $f_0=50$ Hz，实际频率为 $f=(1+x)f_0$ 。

实验中电压和电流的量程分别设为 $U_m=270$ V与 $I_m=100$ A。单片机选择目前广为应用的STM32F103VE，其ADC的量化位数为12。单片机的仿真环境为Keil MDK-ARM5.15，系统时钟频率设为其典型工作频率值72 MHz。考虑到 $k=2$ 即可满足绝大多数应用时的精度要求，故选用2阶卷积窗(三角窗)加权算法进行仿真实验。程序设计中采用的2阶卷积窗函数为^[4,21]

$$w_2[n] = \frac{2}{N_2} W_2 \left(\frac{1}{N_2} (1+2n-N_2) \right) = \frac{2}{N_2^2} (N_2 - |N_2 - 2n - 1|), \quad (38)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, N_2 - 1$$

式(38)的特点是括弧内的值为整数，这样可以使各加权求和式中每一加权项及其累加求和的计算均为整型运算，计算效率高。

实验中，每一个实验误差均为采样起点间隔相差一个信号周期的 $1/360$ ，共360个测量误差的标准差。表1为2个估计周期内的采样点数 $N_2=100$ 时，市电频率的缓慢起伏对交流电参数测量误差的影响。表中的 $\hat{\Delta U}$ 、 $\hat{\Delta I}$ 、 $\hat{\Delta P}$ 与 ΔU 、 ΔI 、 ΔP 分别对应相应参量的估计误差和实验误差。由于非同步误差和量化误差相互独立，估计误差为二者平方和的开方。 $f=50$ Hz时误差最小，因为此时不存在非同步误差，只有量化误差。频率在49~51 Hz范围变化

时, 实验得到的电压有效值、电流有效值和有功功率的相对误差均在 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 的数量级, 且与理论估计的综合误差非常吻合。实验验证了 2 阶卷积窗加权算法抑制交流电参数测量中非同步采样误差的有效性。

表 1 不同频率对应的 2 阶卷积窗加权测量结果
Table 1 The 2-order convolution window weighted measurement in frequency fluctuation

f/Hz	$\hat{\Delta U}/V$	$\Delta U/V$	$\hat{\Delta I}/A$	$\Delta I/A$	$\hat{\Delta P}/W$	$\Delta P/W$
51.00	0.030 4	0.029 6	0.012 0	0.012 4	5.303	5.270
50.50	0.009 3	0.009 6	0.003 0	0.004 0	1.490	1.568
50.25	0.005 7	0.006 1	0.000 8	0.002 3	0.730	0.793
50.00	0.005 4	0.005 5	0.002 0	0.001 9	0.647	0.658
49.75	0.005 8	0.006 4	0.002 2	0.002 3	0.734	0.816
49.50	0.009 6	0.009 7	0.003 8	0.003 9	1.540	1.525
49.00	0.032 8	0.032 8	0.013 2	0.013 2	5.739	5.737

表 2 给出了频率为 50.25 Hz 时, 采样点数变化时交流电参数的测量误差与测量时长的变化。被测电流的平方 $i^2(t)$ 含有 22 次谐波, 利用采样点对其进行无误差测量应满足 $N_2 > 44$, 而 $N_2 = 44$ 不满足该条件, 此时电流的实验误差明显偏大。表 2 中除了第 1 行外, 其他各行均满足 $N_2 > 44$, 对应的实验误差普遍很小。实际中交流电 20 次以上的谐波通常可以忽略, 故要求 1 个估计周期内的采样点数 $N > 44$ 或 2 个估计周期内的采样点数 $N_2 > 80$ 。随着 N_2 的增大, 实验误差降到一定程度后就不再下降, 因为 N_2 的增大只能减小量化误差而不能减小非同步误差。

表 2 不同采样点数对应的 2 阶卷积窗加权测量结果
Table 2 The 2-order convolution window weighted measurement at different sampling points

$N_2/\text{个}$	$\Delta U/V$	$\Delta I/A$	$\Delta P/W$	$M_{\text{CLK}}/\text{个}$	$T_{\text{MES}}/\mu\text{s}$	$T_{\text{PS}}/\mu\text{s}$
44	0.009 5	0.271 4	1.127	10 715	148.8	3.382
50	0.008 6	0.003 3	1.022	11 465	159.2	3.185
100	0.006 1	0.002 3	0.793	17 905	248.7	2.487
200	0.004 7	0.001 6	0.585	30 805	427.8	2.139
500	0.003 2	0.001 3	0.406 9	69 647	967.3	1.935
800	0.002 6	0.001 0	0.405 2	108 594	1 508	1.885

表 2 中 M_{CLK} 、 T_{MES} 、 T_{PS} 分别表示 STM32F103VE 单片机 1 次完成 3 个交流参数的测量对应的机器周期数、执行时间以及均分到每个采样点的执行时间。这里 1 个机器周期等于 $1/72 \mu\text{s}$ 。随着采样点的增加, 1 次测量的执行时间近于比例增长, 而均分到每个采样点的执行时间逐渐下降并最后稳定到不足 $2 \mu\text{s}$ 。实际上, 1 次计算的执行时间对应于对各个采

样点进行 2 阶卷积窗加权累加求和的执行时间与对总的累加和进行开方等运算的执行时间之和, 因而导致均分到每个采样点的执行时间不恒定。即便是当 $N_2 = 1\ 000$ 时, 1 次测量对应的执行时间 (1.866 ms) 和均分到每个采样点的执行时间 (1.866 μs) 均分别远小于 2 个估计周期时长 (40 ms) 和 1 个采样间隔时长 (40 μs)。这说明采用单片机直接处理可以轻松、实时地实现基于 2 阶卷积窗加权算法的交流电参数测量。

6 结论

导出了直接采用单片机和嵌入式系统实现交流电参数测量的卷积窗加权算法的系列公式。采用仿真开发环境和 STM32 单片机对交流电参数测量的 2 阶卷积窗加权算法进行了仿真实验研究, 验证了算法抑制非同步采样测量误差的有效性。实验结果还表明采用 STM32 单片机仅需利用采样周期的很小一部分时间即可完成 2 阶卷积窗加权算法交流电参数测量中 1 个采样点的计算, 算法具有很高的时效性。

参考文献

- [1] HARRIS F J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform[J]. Proceedings of the IEEE, 1978, 66(1): 51-83.
- [2] NUTTALL A. Some windows with very good sidelobe behavior[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1981, 29(1): 84-91.
- [3] 张介秋, 梁昌洪, 陈砚圃. 一类新的窗函数—卷积窗及其应用[J]. 中国科学: E 辑, 2005, 35(7): 773-784.
ZHANG Jieqiu, LIANG Changhong, CHEN Yanpu. A new family of windows—convolution windows and their applications[J]. Science in China: Series E, 2005, 35(7): 773-784.
- [4] 张介秋, 陈砚圃, 梁昌洪, 等. 基于卷积窗的电力系统谐波误差估计与数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 35-37.
ZHANG Jieqiu, CHEN Yanpu, LIANG Changhong, et al. Power system harmonic error estimation and simulation based on convolution window[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 35-37.
- [5] RELJIN I S, RELJIN B D, PAPIC V D. Extremely flat-top windows for harmonic analysis[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(3): 1025-1041.
- [6] 温和, 滕召胜, 卿柏元. Hanning 自卷积窗及其在谐波

- 分析中的应用[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 164-169.
- WEN He, TENG Zhaosheng, QING Baiyuan, et al. Hanning self-convolution windows and its application to harmonic analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 164-169.
- [7] WEN H, ZHANG J, MENG Z, GUO S, et al. Harmonic estimation using symmetrical interpolation FFT based on triangular self-convolution window[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(1): 16-26.
- [8] 李永刚, 张文静, 武玉才, 等. 基于 Rife-Vincent 自卷积窗插值校正的发电机准同期参量测量方法[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 368-374.
- LI Yonggang, ZHANG Wenjing, WU Yucai, et al. Generator quasi synchronization parameter measurement method based on Rife-Vincent self-convolution window and interpolation correction[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 368-374.
- [9] 孙仲民, 何正友, 臧天磊. 一种混合卷积窗及其在谐波分析中的应用[J]. 电工技术学报, 2016, 31(16): 207-214.
- SUN Zhongmin, HE Zhengyou, ZANG Tianlei. A kind of hybrid convolution window and its application in harmonic analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(16): 207-214.
- [10] 刘涛, 庄双勇, 陈晓伟, 等. 基于 Hanning 自乘-卷积窗 FFT 三峰插值修正的电能计量新算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 9-15.
- LIU Tao, ZHUANG Shuangyong, CHEN Xiaowei, et al. A new algorithm for electric energy measurement based on Hanning self multiplication-convolution window triple-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 9-15.
- [11] SUN Z, HE Z, ZANG T, et al. Multi-interharmonic spectrum separation and measurement under asynchronous sampling condition[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 65(8): 1902-1912.
- [12] CARVALHO J R, DUQUE C A, LIMAC M A, et al. A novel DFT-based method for spectral analysis under time-varying frequency conditions[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 108: 74-81.
- [13] 史丽萍, 谢强, 马晓伟. 基于五项 MSD 窗三谱线插值的高精度谐波分析算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 108-113.
- SHI Liping, XIE Qiang, MA Xiaowei. High accuracy analysis of harmonic algorithm based on 5-term maximum-sidelobe-decay window and triple-spectrum-line interpolation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 108-113.
- [14] 华敏, 陈剑云. 一种高精度六谱线插值 FFT 谐波与间谐波分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 9-15.
- HUA Min, CHEN Jianyun. A high precision approach for harmonic and interharmonic analysis based on six-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 9-15.
- [15] 沈放, 陈艳, 黄灿英, 等. 基于卷积高斯窗的电能计量研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(12): 69-72.
- SHEN Fang, CHEN Yan, HUANG Canying, et al. Study on energy measurement based on convolution gauss window[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(12): 69-72.
- [16] 曾宪东, 肖辉, 李文俊, 等. 基于三次样条插值信号重构的谐波间谐波检测算法[J]. 智慧电力, 2018, 46(5): 78-83.
- ZENG Xiandong, XIAO Hui, LI Wenjun, et al. Interharmonic harmonic detection algorithm based on cubic spline interpolation signal reconstruction[J]. Smart Power, 2018, 46(5): 78-83.
- [17] 张耀宇, 王伟冠, 仇志成, 等. 基于原子分解法的配电网谐波检测方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(6): 52-59.
- ZHANG Yaoyu, WANG Weiguan, QIU Zhicheng, et al. Research on harmonic detection method of distribution network based on atomic decomposition method[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(6): 52-59.
- [18] 叶远波, 谢民, 王同文, 等. 适用于非同步采样故障电流的极性比较式快速母线保护[J]. 智慧电力, 2018, 46(4): 87-92.
- YE Yuanbo, XIE Min, WANG Tongwen, et al. Polarity comparison fast bus protection for asynchronous sampling fault current[J]. Smart Power, 2018, 46(4): 87-92.
- [19] 戴先中. 准同步采样及其在非正弦功率测量中的应用[J]. 仪器仪表学报, 1984, 5(4): 390-396.
- DAI Xianzhong. The quasisynchronous sampling and its application in the measurement of nonsinusoidal power[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1984, 5(4): 390-396.
- [20] DAI X, GRETSCH I. Quasi-synchronous sampling algorithm and its applications[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1994, 43(2): 204-209.

- [21] CHEN Y, ZHANG J, LI D, et al. Triangular window weighted algorithm for RMS value measurement[C]// Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Signal Processing, August 31-September 4, 2004, Beijing, China: 85-88.
- [22] 张介秋, 陈砚圃, 梁昌洪, 等. 交流电电气参量高精度测量的加权算法[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(2): 172-176.
ZHANG Jieqiu, CHEN Yanpu, LIANG Changhong, et al. Weighted algorithm for high-accuracy measurement of AC electrical parameters[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(2): 172-176.
- [23] 张介秋, 梁昌洪, 韩峰岩, 等. 介质损耗因数的卷积窗加权算法[J]. 电工技术学报, 2005, 20(3): 100-104.
ZHANG Jieqiu, LIANG Changhong, HAN Fengyan, et al. Convolution window weighted algorithm for dielectric loss factor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(3): 100-104.
- [24] 温和, 滕召胜, 曾博, 等. 基于三角自卷积窗的介损角测量算法及应用[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 193-198.
WEN He, TENG Zhaosheng, ZENG Bo, et al. Dielectric loss angle measurement algorithm and application based on triangular self-convolution window[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 193-198.
- [25] ZENG B, TENG Z. Parameter estimation of power system signals based on cosine self-convolution window with desirable side-lobe behaviors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 250-257.
- [26] 袁小平, 胡秀娟, 孙英洲, 等. 基于加窗傅里叶变换的弱电网阻抗测量算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 97-101.
YUAN Xiaoping, HU Xiujuan, SUN Yingzhou, et al. A weak grid impedance detection method based on windowed Fourier transformation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 97-101.
- [27] 张建东, 冯小明, 吴国平, 等. 基于 TDFT 非同步采样谐波测量的小电流接地故障信号处理方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 117-124.
ZHANG Jiandong, FENG Xiaoming, WU Guoping, et al. Signal processing method of small current grounding fault based on TDFT non synchronous sampling harmonic measurement[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 117-124.
- [28] 张介秋, 韩峰岩, 冯大毅, 等. 有效值与有功功率测量的综合误差分析[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2003, 4(5): 18-19.
ZHANG Jieqiu, HAN Fengyan, FENG Dayi, et al. Analysis of synthetic error in measurement of RMS and active power[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2003, 4(5): 18-19.

收稿日期: 2019-06-07; 修回日期: 2019-08-31

作者简介:

陈砚圃(1963—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为信号处理、测控与仪器仪表等。E-mail: ch80021@163.com

(编辑 周金梅)