

基于自补偿技术的模数混合标准电能表设计

王一民¹, 吴振宇¹, 朱重冶²

(1. 宁波市计量测试研究院, 浙江 宁波 315048; 2. 宁波三维电测设备有限公司, 浙江 宁波 315032)

摘要: 目前数字化电能表溯源方面存在很多问题, 针对这一情况, 描述了一款模拟数字混合标准电能表的设计方法, 使数字化电能表溯源统一到传统的模拟溯源体系中。介绍了功率角自补偿的方法, 提升功率角的测量精度; 通过一系列技术措施, 克服了 61850-9-2 数字报文采样率偏低的困难, 使得该标准表准确度等级达到了 0.01 级, 对于开展电力公司常用的 0.05 级数字电能表校验仪检定工作有重要的意义。

关键词: 数字化电能表溯源; 积分算法; 加窗函数; 功率角自补偿

中图分类号: TN06; TM933

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200452

中文引用格式: 王一民, 吴振宇, 朱重冶. 基于自补偿技术的模数混合标准电能表设计[J]. 电子技术应用, 2021, 47(7): 88-91, 96.

英文引用格式: Wang Yimin, Wu Zhenyu, Zhu Chongye. Design of analog digital standard meter based on self feedback[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(7): 88-91, 96.

Design of analog digital standard meter based on self feedback

Wang Yimin¹, Wu Zhenyu¹, Zhu Chongye²

(1. Ningbo Institute of Metrology and testing, Ningbo 315048, China;

2. Ningbo Sunrise Instruments Co., Ltd., Ningbo 315032, China)

Abstract: At present, there are many problems in the traceability of digital energy meters. In view of this situation, this article describes a design method of an analog-digital hybrid standard energy meter, which makes the traceability of digital energy meters unified into the traditional analog traceability system. The article introduces the method of power angle self-compensation to improve the measurement accuracy of the power angle; through a series of technical measures, it overcomes the difficulty of the low sampling rate of 61850-9-2 digital message, making the standard table accuracy level reach 0.01, which is of great significance for the verification work of the 0.05 class digital energy meter calibrator commonly used by power companies.

Key words: digital energy meter tracing; integral algorithm; windowing function; power angle self compensation

0 引言

随着智能变电站 IEC61850 数字化标准的推广及相应技术的发展, 数字化电能表应用日益广泛^[1-2]。因此, 如何确立其检定规范、如何对其检定标准进行溯源等也就成了电力计量人员关心的问题^[3-5]。现有对标准数字电能表的检定仅仅是虚负荷情况下的校准, 因此无法对数字化电能表实现垂直计量、溯源。由于模拟电能表计量检测体系非常成熟、规范, 如果能够利用模拟量计量体系实现数字电能表检测, 则可以使数字电能表溯源统一到模拟溯源体系中。

1 设计原理

模拟数字混合标准表内部分成模拟和数字两个采样部分, 数字部分处理的信号为 IEC61850-9-2 的数字报文信号, 在传输过程中不会出现误差。主要的误差产生于模拟量部分的采样系统^[6-9], 对电压/电流量的高精

度采样和同相电压/电流之间的角度的测量是引起误差的关键部分。本装置主要存在以下技术难点:

(1) 在采样率受到限制的情况下对 0.005 级的电压量和电流量的准确测量;

(2) 自校准模块的设计, 优化电压和电流之间的功率因数角的准确测量方法, 对于提高功率因数 0.5L/0.5C 情况下的电能测量精度至关重要;

(3) 电能表部分的误差补偿算法及电能的加窗计算, 特别对频率为 50 Hz 非整数倍条件下的测量准确度有重要意义。

本装置采用 STM32+FPGA 的架构, 通过采用 24 位多通道高精度 A/D 转换器、4 kHz 的采样频率和可配置的积分时间、电压/电流之间功率因数角的自补偿技术以及准同步算法, 大大提高了标准电能表的精度和性能。系统结构框图如图 1 所示。

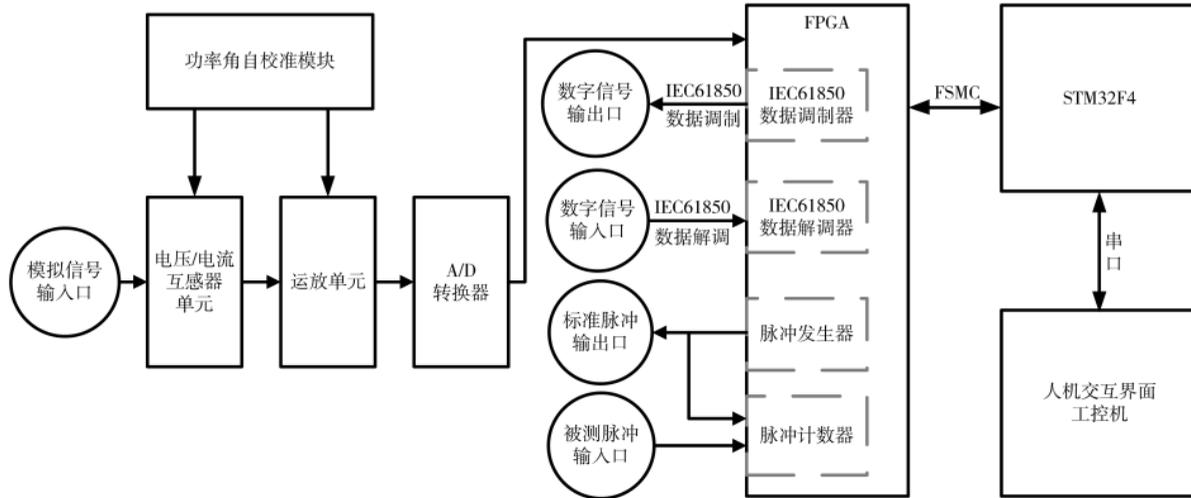


图1 系统结构框图

2 关键技术介绍

2.1 AD转换器

本设计使用 $\Delta\Sigma$ 型A/D转换器AD1274对模拟信号进行采样^[10]。共使用3片ADS1274芯片,每片ADS1274负责一相电压、电流信号的采样,三相之间采用不同的电源供电,且通过高速数字光耦进行完全隔离,有效地降低了不同相之间的干扰^[11]。3片ADS1274处于同一工作模式,且共用一个工作时钟CLK。通过FPGA生成的SYNC同步输入信号控制3片ADS1274同时进行采样。

如图2所示,每片ADS1274采样完成后,均会输出一个采样完成信号DRDY;由于3片ADS1274是同步进行采样的,且共用一个工作时钟,因此三者的DRDY信号是同时发生的,即一旦收到DRDY信号,则可以认为所有通道数据均采样完成。在收到DRDY信号后,FPGA将生成一个时钟SCLK作为SPI时钟,从3片ADS1274芯片中读取采样数据,完成6路信号同时采样。

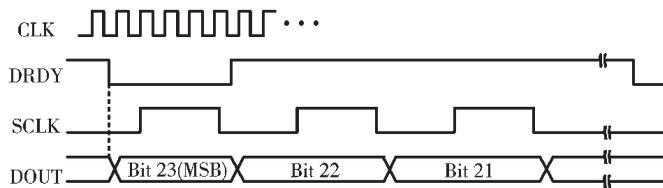


图2 ADS1274数据输出时序图

2.2 加窗算法

标准电能算法为内嵌标准表的核心,在上位机中可根据需求灵活实现多种复杂的高精度算法^[12]。目前国内标准表一般以全电能计量为主,主要采用点积和电能积分算法:

$$P = \frac{U_1 \times I_1 + U_2 \times I_2 + U_3 \times I_3 + \dots + U_N \times I_N}{N} \quad (1)$$

其中, P 为有功功率, U_N 为电压采样点瞬时值, I_N 为电流采样点瞬时值, N 为采样点数。点积和算法具有简单、计算速度快、计算量小的优点,在积分时间足够长的情况

下,其理论误差非常小。

在实际应用中,电能计算需要实时性较强的算法;另电表的采样速率固定,在50 Hz非整数倍频率时,由于实时性的要求会产生采样周期的不完整的情况,非常影响电能计量的精度。

对此,可以通过加窗的方式来避免非整周期采样对电能计量的影响。常用的窗函数有Hamming窗、Blackman窗、旁瓣最低与最速下降窗等^[13]。

本装置采用了旁瓣最低与最速下降窗(FDMS)^[14]与点积和电能积分算法结合,实现对模拟电能采样以及数字电能采样情况下的电能计量。

设某时刻的电压信号为 $u = U \cdot \cos(2\pi t/f)$ 、电流信号为 $i = I \cdot \cos(2\pi t/f + \varphi)$, f 为信号频率。将电压、电流离散化,并添加FDMS窗 $F(n)$ 后,可以得到有功功率公式为:

$$P = \sum_{n=0}^{N-1} [U(n) \cdot I(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} [\cos(\frac{2\pi fn}{N}) \times \cos(\frac{2\pi fn}{N} + \varphi)] \times F^2(n) \quad (2)$$

式中, N 为参与运算的点数。将加窗之后的有功功率乘上还原系数 $\zeta = 4.4329$ 即可得到准确的有功功率。

在4 kHz采样频率、400 ms积分时间的情况下,使用稳定度为0.001%的信号源输出幅值为100 V、1 A,功率因数为1.0的不同频率的信号。点积和算法、加窗点积和算法在不同频率下的电能计量值如表1所示。

表1 不同频率下两种电能算法的计量值

频率/Hz	点积和电能/W	加窗点积和电能/W
47	100.191 83	99.999 99
48.3	100.265 64	99.999 99
50	100.000 03	100.000 03
51.7	99.653 02	99.999 94
53	99.723 35	99.999 98

3 误差校准措施

3.1 采样准确度

使用稳定性为 0.001% 的标准信号源、准确度等级为 10^{-6} 的感应分压器以及 0.01 级进口三相电能标准表 K2006 来校准本装置各相电压互感器的准确度及线性度、电流通道的程控运放各量程增益误差。

电压部分,每个增益量程选择量程满度值的 100%、80%、50%进行测试;电流部分则测试 5 A、1 A、0.25 A、0.1 A 4 个额定值。

3.2 功率因数角自补偿

本设计采用功率因数角自补偿技术来提升功率因数角的测量精度。在仪器开机之后,对 A/D 模块相移量、电压/电流互感器单元相移量自动进行测量并补偿。具体测量方法如图 3 所示。

(1)测量 A/D 模块相移量

通过内部“校准用 DDS 模块”生成一个频率为 50 Hz 的正弦波信号;A/D 采样模块的电压通道、电流通道同时对该正弦波信号进行采样,则理论上功率因数角应该为 0。由于 A/D 模块带来的电压/电流信号相移,使采样信号的功率因数角不为 0,此时测得的功率因数角即为 A/D 模块的相移量。

对采样点数据进行傅里叶运算,可以得到电压信号的初相 φ_u 、电流信号的初相 φ_i ,将 A/D 模块的相移量记为 β_1 ,原始信号功率因数角记为 φ ,则有:

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i - \beta_1 \quad (3)$$

(2)测量电压/电流互感器单元相移量

通过内部“校准用高精度电压电流模块”输出一个功率因数角为 0 的电压电流信号,将该信号同时送入之前已经校准好的 A/D 模块中,并同时开始采样,则理论上功率因数角也应该为 0。由于电压/电流互感器单元带来的电压电流信号相移,使采样信号的功率因数角不为 0,此时测得的功率因数角即为电压/电流互感器单元的相移量。

对采样点数据进行傅里叶运算,可以得到电压信号的初相 θ_u 、电流信号的初相 θ_i ,将电压/电流互感器单元的相移量记为 β_2 ,原始信号功率因数角记为 θ ,则有:

$$\theta = \theta_u - \theta_i - \beta_2 \quad (4)$$

至此,便将 A/D 模块与电压/电流互感器单元带来的角度偏移进行了补偿,保证了功率因数角的测量精度。

3.3 A/D 模块自补偿相移测量实例

通过校准用 DDS 模块输出不同幅值的 50 Hz 正弦波信号,对各个量程进行电压/电流相移测量,具体测量数据如表 2 所示。

表 2 程控运放不同量程引起的电压/电流相移

信号幅值/V	电压放大倍数	电流放大倍数	A 相 UI 相位差/(°)	B 相 UI 相位差/(°)	C 相 UI 相位差/(°)
5	1	1	0.017	-0.016	-0.071
3	1	2	0.263	0.233	0.187
1.5	1	4	0.713	0.692	0.656
0.75	1	8	1.406	1.399	1.384
3	2	1	-0.243	-0.269	-0.326
3	2	2	0.007	-0.015	-0.065
1.5	2	4	0.456	0.444	0.406
0.75	2	8	1.154	1.148	1.133
1.5	4	1	-0.701	-0.719	-0.774
1.5	4	2	-0.451	-0.465	-0.513
1.5	4	4	-0.006	-0.011	-0.050
0.75	4	8	0.689	0.697	0.678
0.75	8	1	-1.421	-1.422	-1.476
0.75	8	2	-1.171	-1.173	-1.216
0.75	8	4	-0.725	-0.718	-0.751
0.75	8	8	-0.031	-0.014	-0.029

3.4 电压/电流互感器单元自补偿相移测量实例

通过校准用高精度电压电流模块输出指定同相位的电压/电流信号,对各个电流量程进行电压/电流相移测量,具体测量数据如表 3 所示。

表 3 电流互感器不同量程引起的电压/电流相移

信号源输出	信号源输出	电压/电流功率因数	A 相相位差偏差/(°)	B 相相位差偏差/(°)	C 相相位差偏差/(°)
电压/V	电流/A				
100	5	1.0	0.613	0.331	0.359
	1	1.0	0.420	0.187	0.238
	0.25	1.0	0.515	0.246	0.232
	0.1	1.0	0.480	0.171	0.199

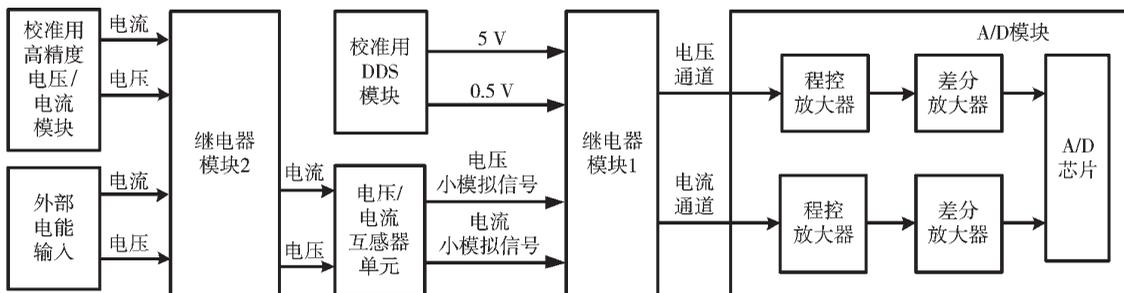


图 3 功率因数角自补偿模块框图

3.5 功率因数修正方法

通过积分算法,可以得到有功功率 P 、电压有效值 U 、电流有效值 I 。此时的有功功率 P 中包含了A/D模块、电压/电流互感器单元的角度偏移,需要将该角度偏移进行补偿,以保证积分算法的测量精度。

将原始信号的功率因数角记为 φ ,A/D模块、电压/电流互感器单元引起的角度偏移记为 β ,则有:

$$\cos(\varphi+\beta)=PI(U \cdot I) \quad (5)$$

$$\cos\varphi=\cos[(\varphi+\beta)-\beta] \quad (6)$$

将式(5)、式(6)进行展开,可得到:

$$\cos\varphi=\cos(\varphi+\beta)\cos\beta+\sin(\varphi+\beta)\sin\beta \quad (7)$$

$$\sin(\varphi+\beta)=\pm\sqrt{1-\cos^2(\varphi+\beta)} \quad (8)$$

式中,有功功率因数 $\cos(\varphi+\beta)$ 以及角度偏移量 β 均已知,只有 $\sin(\varphi+\beta)$ 的符号不能直接确定。需要对当前运算周期内的采样点数据进行傅里叶运算,从而得到电压、电流的相位并计算出功率因数角 $\varphi+\beta$ 的值,进而判断 $\sin(\varphi+\beta)$ 的符号。至此, $\cos[(\varphi+\beta)-\beta]$ 展开式的所有子项均已知,即可以计算出修正后的功率因数。

3.6 仪器不确定度的确定

功率的不确定度 U_p 是由电压的不确定度 U_v 和电流的不确定度 U_i 以及电压电流之间相角的求得的功率因数的不确定度 U_{PF} 的综合来确定^[15]:

$$U_p=\sqrt{U_v^2+U_i^2+U_{PF}^2} \quad (9)$$

电压部分采用高精度电压互感器,电流部分采用I-V转换器,A/D模块采用低温漂基准芯片和24位ADC ADS1274。通过有效的滤波算法和电能采集测量算法,能将电压电流的不确定度控制在0.004%。通过采样自补偿的方式,将功率因数角的不确定度控制在0.0015°。当功率因素在1.0时,由于功率因数角引起的不确定度为0,总的 uncertainty 可以达到0.0056%;当功率因数为0.5L/0.5C时,由于功率因数角引起的不确定度为0.0045%,总的 uncertainty 可以到达0.0071%。

4 测量验证

将本装置与送检完成的0.01级三相电能标准表K2006进行比较,扣除K2006误差值之后的比较结果如表4、表5所示。其中, P_A 、 P_B 、 P_C 为三相功率, ΣP 为合相

表4 电压、电流有效值测试数据

输入	相对误差/%		
	A相	B相	C相
100 V	-0.001	0.000	0.001
60 V	-0.001	0.001	0.001
5 A	0.000	0.002	0.002
2 A	0.001	0.002	0.002
1 A	0.001	0.002	0.002
0.25 A	0.001	0.002	0.002
0.1 A	-0.001	0.002	0.000
0.05 A	0.000	0.001	0.001
0.01 A	-0.001	0.002	0.001

表5 电能测试数据

输入		相对误差/%				
		P_A	P_B	P_C	ΣP	ΣF_{out}
57.7 V 5 A	1.0	0.001	0.002	0.002	0.002	0.001
	0.5L	-0.004	-0.003	0.002	-0.002	-0.002
	0.5C	0.003	0.004	-0.003	0.001	0.001
57.7 V 1 A	1.0	0.001	0.000	0.002	0.001	0.001
	0.5L	-0.005	-0.004	-0.002	-0.004	-0.003
	0.5C	0.004	0.004	0.003	0.004	0.003
57.7 V 0.25 A	1.0	0.003	0.001	0.001	0.002	0.001
	0.5L	-0.004	-0.002	0.004	0.000	0.000
	0.5C	0.005	0.003	-0.003	0.002	0.002
57.7 V 0.1 A	1.0	0.000	-0.001	-0.001	0.000	0.000
	0.5L	-0.004	-0.003	-0.002	-0.003	-0.003
	0.5C	0.003	0.004	0.003	0.003	0.003

功率; ΣF_{out} 为合相功率高频脉冲信号输出。

通过对57.7 V,1 A,1.0 /0.5L/0.5C测试点进行长期测试,得到的误差如图4所示。

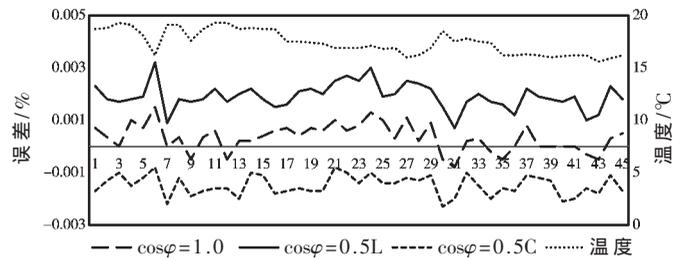


图4 误差变化趋势图

通过图4分析表的稳定性:在温度变化范围15°~20°范围内仪器较为稳定,1.0、0.5L和0.5C误差变化不超过0.003%。

5 标准表的溯源

本装置可以按照传统的标准表法进行溯源,具体如图5所示。

标准表法需要一个稳定的功率源和更高等级的标准电能表。目前某单位采用6台3458A作为标准电能表:3台将电压分压之后作为电压采样,3台通过I-V转化将电流转化小电压进行采样,上位机同时接收6台3458A数据进行计算得出电能量。

将功率源的输出接入本装置和标准电能表,将本装置输出的电能脉冲经分频器降频后作为被检脉冲接入误差计算单元,将标准电能表输出的电能脉冲作为标准脉冲接入误差计算单元,通过误差计算单元即可得到本装置的电能误差。

6 结论

本文设计的模拟数字混合标准表具备标准模拟、数字电能表功能,实现模拟电能表与数字电能表的校验。通过模拟标准表的计量方法对数字化电能表进行校验,

(下转第96页)

子技术应用, 2020, 46(10): 57-60, 78.

[11] 王臣.高精度相位测距系统硬件研究与设计[D].西安: 西安电子科技大学, 2019.

[12] 韦孟辉.高精相位控制的多通道任意波形发生器研究[D].洛阳: 河南科技大学, 2015.

[13] 戢慧.任意波形发生器的设计[D].武汉: 华中师范大学, 2011.

[14] 张福洪,朱怀环,戴绍港.基于 AD9959 的频率合成器设计及其应用[J].电子器件, 2008(4): 1155-1158.

[15] 刘俊俊,廖小松,袁嫣红.提高过零检测精度的方法研究[J].工业控制计算机, 2009, 22(10): :80-81, 88.

[16] Gu Dawei, Yao Yao, Zhang Dengming, et al. Matlab/simulink based modeling and simulation of fuzzy PI control for PMSM[J].Procedia Computer Science, 2020(166): 195-199.

(收稿日期: 2021-01-15)

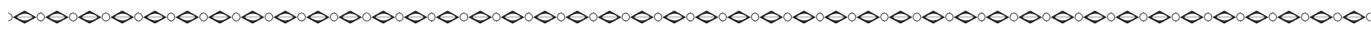
作者简介:

周珏(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 嵌入式控制系统。

吴东岷(1973-), 通信作者, 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: MEMS 光学成像系统等, E-mail: dmwu2008@sinano.ac.cn。



扫码下载电子文档



(上接第 91 页)

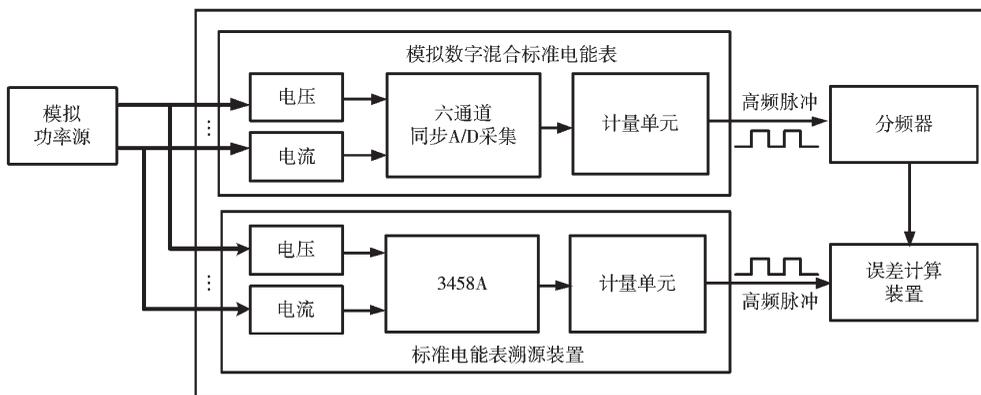


图 5 标准表的溯源

打破了数字化电能表之间相互比较的方法, 采用模拟电能表计量检测溯源体系实现了数字电能表的量值溯源。本项目设计成功对完善数字化电能计量体系有着重要的意义。

参考文献

[1] IEC 61850-9-2 E2.0.Communication networks and systems in substations, part 9-2: specific communication service mapping(SCSM)-sampled values over ISO.IEC8802-3[S]. 2012.

[2] 孙卫明,林国营.IEC 61850 协议电能表的校验方法研究[J].电测与仪表, 2010, 47(7A): 13-15.

[3] 穆小星,段梅梅,张健.数字化电能表“溯源”探究与分析[J].电测与仪表, 2014, 51(23): 28-34.

[4] 唐毅,江波,李红斌.数字电能计量系统检定方法综述[J].电工技术学报, 2013, 28(2): 372-377.

[5] 宋晓林,任伟,邵方静,等.基于新型标准数字功率源的数字化电能表检定和溯源方法[J].电测与仪表, 2018, 55(2): 92-99, 136.

[6] 陈璐怡.基于 IEC 61850 的数字化电能计量误差分析[D].重庆: 重庆大学, 2017.

[7] 潘峰,孙卫明,赵伟,等.数字化电能计量中数值积分算法的误差分析[J].电测与仪表, 2012, 49(6): 23-28.

[8] 穆小星,张健,段梅梅.采样率及数值积分算法对数字化电能计量误差影响分析[J].计量技术, 2014(12): 3-6.

[9] 刘莉,陈辉,李莉,等.标准电能表测量准确度影响因素分析[J].电力设备管理, 2019(5): 24-26.

[10] 李素芬,李刚,孙景发.模数转换技术及其发展[J].电子技术应用, 2002, 28(4): 72-75.

[11] 苏家洪.刍议 AD 板的抗干扰设计[J].中国新技术新产品, 2011(1): 28.

[12] 肖勇,赵伟,罗睿希,等.数字化电能计量算法综述[J].电测与仪表, 2018, 55(7): 1-7.

[13] 周冬跃,林海全,张洪林,等.采用窗函数法进行数字信号截短的优化算法[J].电子技术应用, 2015, 41(12): 32-35.

[14] 温和,滕召胜,王永,等.基于 FDMS 的 FFT 电力谐波分析算法研究[J/OL].(2012-12-27).[2020-06-04].http://www.paper.edu.cn.

[15] 汪树青,韦邦跃,吴勇,等.仪器仪表测量不确定度评定方法[J].电子技术与软件工程, 2019(10): 80-81.

(收稿日期: 2020-06-04)

作者简介:

王一民(1966-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 电磁计量和电工电子产品检测。

吴振宇(1981-), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向: 电能、电磁学领域的计量技术。

朱重冶(1964-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 电磁计量溯源新技术。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所