

High-Competitive Phase Deviation Correction Method for Electric Energy Metering Chip*

ZHANG Jiangan^{1*}, YANG Hongbai²

(1. Advanced Vocational Technical College, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 200437, China;
2. School of Science and Technology, Shanghai Open University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Traditional energy metering chips need to provide a larger capacity sampling buffer for phase deviation correction. The buffer occupies a large chip area and increases the cost of the chip. A new phase deviation correction method for energy metering chip is proposed. It calculates the first-order all-pass filter coefficient based on the phase deviation value, and uses selection switches to place it on the signal channel that needs phase correction, and uses its phase shift characteristic to complete phase deviation correction. The method can not only ensure high correction accuracy, but also eliminates data buffer, saves memory space, simplifies hardware circuit implementation, reduces total chip cost, and improves product competitiveness.

Key words: energy metering; chip design; phase deviation correction; all-pass filter; low cost
EEACC: 7310H **doi:** 10.3969/j.issn.1005-9490.2019.03.013

高竞争力的电能计量芯片相位偏差校正方法*

张江安^{1*}, 杨洪柏²

(1. 上海工程技术大学高等职业技术学院, 上海 200437; 2. 上海开放大学理工学院, 上海 200433)

摘要: 传统电能计量芯片需要提供较大容量的采样数据缓存器, 用于相位偏差校正。该缓存器占用较大的芯片面积, 增加了芯片成本。提出了一种新的电能计量芯片相位偏差校正方法, 它根据相位偏差值计算一阶全通滤波器系数, 并采用选择开关将其置于需要进行相位校正的信号通道, 利用其相移特性完成相位偏差校正。该方法不仅可以保证较高的校正精度, 而且无需数据缓存, 节省内存空间, 简化了硬件电路实现, 降低了芯片总成本, 提高了产品竞争力。

关键词: 电能计量, 芯片设计, 相位偏差校正, 全通滤波器, 低成本

中图分类号: TM933.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2019)03-0604-04

随着国民经济的快速发展, 我国已经成为全球电能计量仪表使用、生产及出口大国。随着数字信号处理和集成电路技术的发展, 采用电能计量专用芯片的数字电能表得到广泛应用。数字电能表不仅用于工业与民用电能计费, 而且在家居设备智能化升级过程中, 逐步渗透到空调、冰箱、插座等在内的各种家用设备, 实现实时监控、显示电器运行状况及提醒等功能^[1-2]。

电能计量芯片作为智能电表的核心器件, 直接关系到电能表的计量精度和工作可靠性、稳定性等产品品质^[3]。对于芯片设计和生产企业而言, 在保

证电能计量精度的前提下降低成本、增加可靠性可以大大提升企业核心竞争力。本项目为企业开发项目, 并于2017年获得发明专利授权^[4]。论文在分析电能计量芯片工作原理的基础上, 提出一种新的相位偏差校正方法, 在保证计量精度的前提下, 去除缓存存储器, 降低芯片设计复杂度, 减少芯片面积, 降低了芯片成本。

1 现有电能计量芯片相位偏差校正方法的缺点

图1为数字电能表工作原理图, 其中虚框部分

项目来源: 上海工程技术大学高职院校科技发展基金项目(GZ18-1); 上海开放大学2018年度学科研究项目(KX1805); 上海市智能制造及机器人重点实验室开放课题项目(ZK1801)

收稿日期: 2018-05-14 **修改日期:** 2018-07-06

为芯片内功能模块。数字电能计量芯片控制双通道A/D转换,同时对电压和电流进行采样,然后实现相乘功能并累计电能。由于电流传感器与电压传感器工作原理不同,对输入信号的相移特性存在差异,导致采样后电流和电压信号的相位夹角产生偏移。夹角的偏移量被称为相位偏差。对于有功功率计量而言,相位偏差是影响电能计量精度的一个重要因素^[5-7]。如不对其进行校正,则会降低电能计量精度。因此在电能计量芯片中有相应的相位偏差校正模块,负责实现此功能。在现有电能计量芯片的相位偏差校正模块中,工作原理一般基于时移法^[8-11],该方法也被称为数据缓存法。它需要一块随机存取存储器(RAM)作为缓存,不断存放最新的电流、电压采样数据片段,并根据电能表测试机台所测得的相位偏差值,对缓存中的两路采样数据进行对准,以抵消相位偏差带来的影响^[8-11]。从上述原理可知,时移法若要提高校正精度则必然要提高采样频率,包括模数转换器输出采样频率和其中Sigma-Delta调制器采样频率。而较高的采样频率意味着需要较大的缓存空间。另一方面,如果需要校正的相位偏差越大,则缓存空间越大。这两个因素导致芯片内部需预留较大容量的缓存空间,从而加大了芯片成本。另外,使用RAM缓存数据需要解码电路,这增加了电能计量芯片设计的复杂性,增大了芯片设计的时间成本。为此,寻找有效、可靠且低成本的电能表相位偏差校正方法具有实际意义。

本文提出了一种全新的相位偏差校正方法。该方法利用全通滤波器相位滞后的特性,采用一阶全通数字滤波器对电能计量芯片中的相位偏差进行校正,不仅可以保证校正精度,而且无需数据缓存,节省内存空间,简化了硬件实现,从而降低芯片总成本。

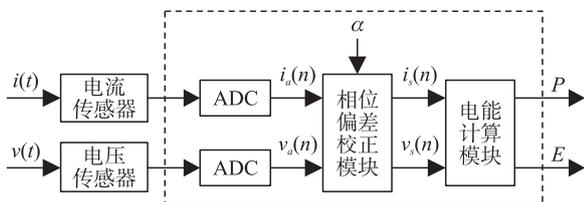


图1 电能表工作原理图

2 新相位偏差校正方法的实现

2.1 相位偏差校正的目标

对于如图1所示电能表,设输入相电流 $i(t) = \sqrt{2}I\sin(\omega t + \varphi)$, 相电压为 $v(t) = \sqrt{2}V\sin(\omega t)$, 其中 φ 为输入电流与电压信号的初始相位夹角。上述信号经过传感器信号拾取和模数转换器(ADC)采样,分

别被转换为数字信号 $i_a(n)$ 和 $v_a(n)$ 。设由电流传感器与电压传感器相移特性差异而引入的相位偏差为 α , 即 $i_a(n)$ 和 $v_a(n)$ 之间的相位夹角变为 $\varphi' = \varphi + \alpha$ 。显然, α 将影响电功率计算和电能计量精度。为此,有必要对 $i_a(n)$ 与 $v_a(n)$ 进行相位偏差校正处理,消除 α 的影响,使输出的校准信号 $i_s(n)$ 和 $v_s(n)$ 相位夹角恢复为 $\varphi'' = \varphi' - \alpha = \varphi$ 。

2.2 相位校正模块设计

相位偏差实际上反映了电流、电压之间相位关系的变化。这种变化可分为以下3种情况:(1) $\alpha > 0$ 时,电流信号相位超前于电压信号;(2) $\alpha < 0$ 时,电压信号超前于电流信号;(3) 当 $\alpha = 0$ 时,两者相位无偏差。

数字式全通滤波器具备改变信号相位而保持信号幅值不变的特性,适合用于相位偏差校正。由于稳定的全通滤波器具有负值相频响应^[12],它适用于使信号相位延后的场合,而不能用于使信号相位超前。为此,本文设计了如图2所示带有选择开关的相位偏差校正模块,其中相移功能由唯一的全通滤波器实现。其连通情况由 α 的正负性决定:(1) 当 $\alpha > 0$ 时,由于电流信号相位需要延后,将全通滤波器放在电流信号通道中;(2) 当 $\alpha < 0$ 时,由于电压信号相位需要延后,将全通滤波器放在电压信号通道中;(3) 当 $\alpha = 0$ 时,由于电流和电压信号相位均不需要延后,两个通道均无全通滤波器,全通滤波器处于被旁路状态。利用一个全通滤波器不仅实现了相位偏差校正,而且大大简化了模块设计,减小了芯片面积。

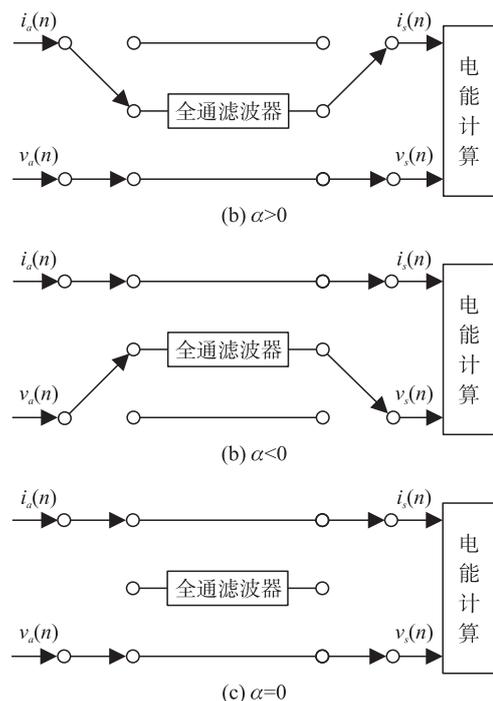


图2 α 取值与全通滤波器的配置

2.3 全通滤波器设计

全通滤波器选用一阶结构^[13-14],不仅可以实现相位偏差校正功能,而且使硬件开销最小。设其传递函数为

$$H(z) = \frac{k+z^{-1}}{1+kz^{-1}} \quad (1)$$

式中:唯一参数 k 为实数,极点为 $z_p = -k$ 。为使滤波器稳定,应保证 $|z_p| < 1$ 。因此 k 的取值范围被限定为 $-1 < k < 1$ 。

参数 k 可由 α 计算得出。设工频信号频率为 f_i , ADC 采样频率为 f_s 。工频信号归一化角频率为 $\omega = 2\pi f_i / f_s$ 。根据一阶全通滤波器传递函数,得到滤波器频域响应:

$$H(e^{j\omega}) = \frac{k+(e^{j\omega})^{-1}}{1+k(e^{j\omega})^{-1}} \quad (2)$$

由于 $e^{j\omega} = \cos\omega + j\sin\omega$,根据式(2)可得

$$H(e^{j\omega}) = \frac{(k\cos\omega+1)+jksin\omega}{(\cos\omega+k)+jsin\omega} \quad (3)$$

该滤波器相频特性为

$$\varphi(\omega) = \arctan\left(\frac{k^2\sin\omega - \sin\omega}{k^2\cos\omega + 2k + \cos\omega}\right) \quad (4)$$

为使全通滤波器能够抵消 α 的影响,应使 $H(e^{j\omega})$ 的相角等于 $-\alpha$,即

$$\varphi(\omega) = -\alpha \quad (5)$$

根据式(5),可解得两个根:

$$k_1 = \frac{\sin\omega\sqrt{1+\tan^2|\alpha|} - \tan|\alpha|}{\sin\omega + \cos\omega \cdot \tan|\alpha|} \quad (6)$$

$$k_2 = \frac{-\sin\omega\sqrt{1+\tan^2|\alpha|} - \tan|\alpha|}{\sin\omega + \cos\omega \cdot \tan|\alpha|} \quad (7)$$

实际应用中, ω 为远小于 $\frac{\pi}{2}$ 的正值,而 $|\alpha|$ 也是

$[0, \pi/2)$ 区间内较小的数。由于 $-\sin\omega\sqrt{1+\tan^2|\alpha|} - \tan|\alpha| < -\sin\omega - \tan|\alpha| < 0, 0 < \sin\omega + \cos\omega \cdot \tan|\alpha| < \sin\omega + \tan|\alpha|$,显然

$$k_2 < \frac{-\sin\omega - \tan|\alpha|}{\sin\omega + \tan|\alpha|} = -1 \quad (8)$$

由于 k_2 将导致滤波器不稳定,将其舍去。故 k 值计算公式为

$$k = \frac{\sin\omega\sqrt{1+\tan^2|\alpha|} - \tan|\alpha|}{\sin\omega + \cos\omega \cdot \tan|\alpha|} \quad (9)$$

式(9)的计算过程以离线方式完成。一旦计算出 k 值,即已完成全通滤波器设计。将 k 值定点化后写入电能计量芯片专设的寄存器中,即可由全通滤波器电路完成相位偏差校正。这种相位偏差校正

方式不仅节省硬件资源,而且相关电路模块在 f_s 变化时不需修改,提高了芯片设计的可重用性。

2.4 滤波器稳定性分析

继续分析由式(9)所设计滤波器的稳定性。设两个辅助函数分别为 $p(x) = \sin\omega\sqrt{1+x^2} - x, q(x) = \sin\omega + \cos\omega \cdot x$ 。它们的定义域均为 $[0, +\infty)$ 。 $p(x)$ 的一阶导数为

$$p'(x) = \frac{\sin\omega \cdot x}{\sqrt{1+x^2}} - 1 \quad (10)$$

由于 $0 < \sin\omega < 1$,显然对定义域上任意 x ,均有 $p'(x) < 0$ 。这说明 $p(x)$ 为单调递减函数。另一方面, $q(x)$ 为单调递增函数,故函数 $f(x) = \frac{p(x)}{q(x)}$ 在定义域 $[0, +\infty)$ 上为单调递减函数。

显然, $k = f(\tan|\alpha|)$ 。因此 k 将随着 $\tan|\alpha|$ 的增大而减小。当 $|\alpha| = 0$ 时, $\tan|\alpha| = 0$,根据式(9)可得 $k = 1$ (此时全通滤波器被旁路,不进行相位校正)。当 $|\alpha|$ 在 $[0, \pi/2)$ 范围内逐渐增大时, $\tan|\alpha|$ 为正值且不断增大, k 逐渐减小。这说明此时 $k < 1$ 。

当 $|\alpha| \rightarrow \frac{\pi}{2}$ 时, $\tan|\alpha| \rightarrow \infty$ 。此时

$$k = \frac{\sin\omega\sqrt{1/\tan^2|\alpha|+1} - 1}{\sin\omega/\tan|\alpha| + \cos\omega} \rightarrow \frac{\sin\omega - 1}{\cos\omega} \quad (11)$$

由于 $\sin\omega + \cos\omega > 1$,可得 $\sin\omega - 1 > -\cos\omega, \frac{\sin\omega - 1}{\cos\omega} > -1$ 。故此时 $k > -1$ 。

综上所述, $-1 < k < 1$,满足全通滤波器稳定性条件。

3 仿真实验

在 MATLAB 软件 Simulink 仿真平台上,对本文提出的相位偏差校正方法进行仿真。通过对比相位偏差校正前后的计量精度,验证该方法的有效性。

仿真测试中取采样频率 $f_s = 4\,000$ Hz,电压有效值 $V = 220$ V,电流有效值 $I = 1$ A。待系统进入稳定状态后,取连续 4 000 点有功功率信号(50 个工频周期)计算电能 E' ,并与理论电能值 E 进行比较,计算电能计量误差 e 。公式如下:

$$e = \frac{E' - E}{E} \quad (12)$$

式中: $E = IV\cos\varphi$ 。

测试分为两组:(1) $\varphi = 60^\circ$ (功率因数 p_f 为 0.5L);(2) $\varphi = -60^\circ$ (功率因数 p_f 为 0.5C), C 表示电路负载呈容性,电压相位滞后于电流相位; L 表示电路呈感性,电压相位超前于电流相位。每组测试中,分别设定 $\alpha = -0.5^\circ$ 和 $\alpha = 0.5^\circ$ 两种情况进行处理。仿

真时电流、电压信号利用 Simulink 正弦信号生成模块分别按上述条件生成。其中输入信号和全通滤波器系数 k 均采用 24 比特量化。仿真测试结果如表 1 所示。从中可见,在 $\pm 4.5^\circ$ 范围内,相位偏差校正后的电能计量误差在 10^{-6} 或更小的量级。由于实际应用中相位偏差一般小于 2° ,而电能表计量精度要求一般为 $|e| \leq 0.001$,因此上述测试结果说明该相位偏差校正方法完全可以满足电能表计量精度要求。

表 1 相位校正仿真测试结果

$\varphi/(\circ)$	$\alpha/(\circ)$	校正前 $e/\%$	校正后 $e/\%$
60	-4.5	13.30	1.24×10^{-6}
	-0.5	1.52	-9.86×10^{-5}
	0.5	-1.52	1.01×10^{-4}
	4.5	-13.90	1.24×10^{-6}
-60	-4.5	-13.90	-1.87×10^{-6}
	-0.5	-1.52	-9.78×10^{-5}
	0.5	1.51	-1.02×10^{-4}
	4.5	13.30	-1.87×10^{-6}

采用本文所提出相位偏差校正方法,减少了电能计量芯片面积,降低了电路设计复杂性和产品成本,增强了电路模块可重用性,现已成功地应用于国产某型号电能计量芯片产品中。

4 结语

基于在保证产品性能前提下降低芯片成本的诉求,本文提出了一种新的用于电能计量芯片相位偏差校正的方法,其中采用选择开关将一阶全通滤波器置于需要进行相位调整的信号通道,以实现电能表相位偏差校正功能。该方法无需 RAM 缓存采样数据,极大地简化了电能计量芯片的电路设计,节省了芯片面积,提高了电路模块的可重用性,降低了计量芯片和电能表的成本,提高了相关企业的核心竞争力。



张江安(1970-),男,汉族,江西景德镇人,博士,上海工程技术大学教师,高级工程师,主要研究方向为集成电路设计、计量系统设计及信号处理;

参考文献:

- [1] 芯海科技. 免校准电能计量芯片,让家电智能化更简单[EB/OL]. <http://www.eet-china.com/news/article/201703270800>, 2017,3,27.html,2017-03-27.
- [2] 孙建设. 电表脉冲数传仪[J]. 传感技术学报,2005,18(3):646-649.
- [3] 佚名. 2017年中国电能计量芯片市场概况及行业竞争情况[EB/OL]. <http://www.cima.org.cn/article.asp?classid=3&id=20237>,2017-06-23.
- [4] 张江安. 提高相位校正精度的电能表[P]. 中国专利,201410366395.7. 2014-10-29.
- [5] Jebroni Z, Chadli H, Tidhaf B, et al. Gain Correction and Phase Compensation of a Smart Electrical Energy Meter[C]//Proc of 2016 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS). New York:Curran Associates,2016:60-65.
- [6] 孙春志,孙静,王威廉. 基于CS5463智能单向电表的设计[J]. 电子测量技术,2012,35(3):28-31.
- [7] Cirrus Logic, Inc. CS5490:Two Channels Energy Measurement IC (CS5490 datasheet)[EB/OL]. http://origin.cirrus.com/en/pubs/proDatasheet/CS5490_F3.pdf,2013-03.
- [8] Analog Devices, Inc. Poly Phase Multifunction Energy Metering IC with per Phase Information (ADE7758 datasheet)[EB/OL]. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADE7758.pdf>,2011.
- [9] 侯曦,爰国华,张士文. 数字双向多功能电表设计[J]. 微处理机,2007,28(1):16-18.
- [10] 程科,俞诗鲲. TI单相电表计量库使用说明[EB/OL]. <http://www.ti.com.cn/cn/lit/an/zhea526/zhea526.pdf>,2013-04.
- [11] 周超,纪峰,田正其,等. 谐波工况下相位补偿对全波计量影响[J]. 电测与仪表,2016,53(21):71-75.
- [12] 奥本海姆 A V,谢弗 R W. 离散时间信号处理[M]. 黄建国,刘树棠,译. 北京:电子工业出版社,2015:196.
- [13] Regalia P A, Mitra S K, Vaidyanathan P P. The Digital All-Pass Filter:A Versatile Signal Processing Building Block[J]. Proceedings of the IEEE,1988,76(1):19-37.
- [14] 朱鹏,李开成,孙健,等. 电子式互感器相位补偿方法的研究和比较[J]. 电测与仪表,2014,51(12):7-11.



杨洪柏(1972-),女,汉族,江苏沭阳人,博士,上海开放大学副教授,主要研究方向为故障诊断及信号处理。