

# 用电能计量芯片 ADE7763 测量功率因数

左自强 成 焘 冯军强

(西安交通大学电气绝缘中心 710049)

**摘 要** 利用高精度有功电能和视在电能计量芯片 ADE7763 设计了一款功率因数测量表, 由于合理利用了 ADE7763 集成的模拟和数字处理功能, 简化了硬件和软件设计, 加快了开发周期, 降低了成本。同样由于很多功能都集中在单片芯片内实现, 电路的稳定性也得以提高。此外, 还介绍了测量原理, ADE7763 的工作原理, 并结合 ADE7763 对测量原理的误差从多方面进行了分析。

**关键词** ADE7763 功率因数 相位差 误差分析

## 1 引言

功率是电力负荷的一个重要参数, 最常用测量方法是过零法, 该方法通过测量两信号过零点的时间差, 经过进一步处理获取功率因数。这种方法原理简单, 但电路复杂, 而且由于未能充分利用被测信号包含的信息, 精度不是很高, 抗干扰能力较弱<sup>[1]</sup>。另外一种方法是用傅立叶变换分别求出基波电压和电流信号的初相位, 然后根据相位差计算功率因数。这种方法易受到频率波动、频谱泄漏等因素的影响<sup>[1]</sup>。还有一种常用的方法是分别求出有功功率和视在功率, 二者的比值即是功率因数。这种方法对多种误差因素都有很好的免疫能力, 因此原理上要优于前两种方法。具体实现起来, 早期的方法使用模拟乘法器、积分器、除法器实现<sup>[2]</sup>, 精度不高, 灵活性不足。后来引入 A/D 转换器和单片机来实现数字化测量, 数字化测量方法具有电磁兼容性好, 方便灵活等优点<sup>[3]</sup>。但早期单片机较低的时钟频率, 8 位字长, 有限的内存都限制了精度和速度的提高。最近几年更高性能的 DSP 被引入该应用领域, 较好地满足了精度和速度要求<sup>[4]</sup>。但基于 DSP 的测试仪表系统构成较为复杂, 开发周期较长, 成本也较高。在本文中, 我们选用多功能电能计量芯片 ADE7763 来实现功率因数的测量。它将 AD 转换器和数字信号处理功能集成到单个芯片内, 能够完成有功电能、视在电能等参数的准确测量。依据有功电能和视在电能, 就可以由微控制器计算出功率因数。

## 2 测量原理

在电力系统中, 假设电压  $u(t)$  和电流  $i(t)$  都是纯基波正弦信号, 则可表示为

$$\begin{aligned} u(t) &= \sqrt{2} U \sin(\omega t) \\ i(t) &= \sqrt{2} I \sin(\omega t + \theta) \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $U$  为电压有效值,  $I$  为电流有效值,  $\theta$  为电流超前电压的相角。如果将  $u(t)$  和  $i(t)$  相乘, 则得到瞬时功率  $p(t)$

$$p(t) = u(t) \times i(t) = UI \cos\theta - UI \cos(2\omega t + \theta) \quad (2)$$

在上式右侧, 第一项为直流成分, 不随时间变化, 定义为有功功率  $P$ ; 第二项为交流成分, 而且为正弦信号, 频率为电网频率的 2 倍<sup>[5]</sup>。 $u(t)$ ,  $i(t)$ ,  $p(t)$  和  $P$  的关系如图 1 所示。

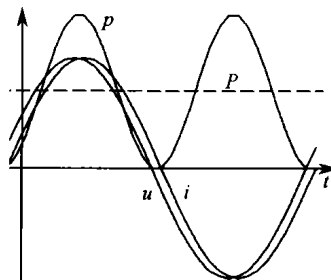


图 1 电压、电流、瞬时功率和有功功率的关系

功率因数  $\cos\theta$  包含在有功功率中, 如果能从瞬时功率中提取出有功功率, 并计算出  $U$  和  $I$ , 或者二者的乘积——视在功率  $S$ , 根据

$$\cos\theta = P/S \quad (3)$$

即可求出功率因数。为了分离出  $P$ , 可以将  $p(t)$  通过一个高通滤波器, 理论上交流成分就会被滤

掉。不过现实的滤波器只是一定程度地逼近理想滤波器, 因此不可能百分之百地滤掉不需要的成分, 而且滤波器还会改变信号的幅值和相位。更为有效的方法则是利用正弦信号的对称性, 在整数个电网半波周期内对  $p(t)$  进行积分, 这样正弦信号积分为零, 而有功功率被放大若干倍, 变为有功电能  $PE$ 。为了抵消掉这个倍数, 需要在同样的时间内, 以同样的采样间隔对视在功率进行积分, 获取视在电能  $SE$ 。式 (3) 演化为

$$\cos\theta = PE/SE \quad (4)$$

为确保在整周期内积分, 可以对电网信号过零时刻 (方向任意) 进行监测, 在某次过零时开始积分, 在第若干次过零时停止积分。

### 3 系统设计

#### 3.1 ADE7763 简介

与 ADE77XX 系列的其他电能计量芯片相比, ADE7763 的主要不同之处是增加了对视在电能的测量, 其它主要特点有: ① 能够测量有功电能、视在电能、瞬时电压、瞬时电流、电压有效值、电流有效值。② 高精度, 在 1000:1 的动态范围内有功功率的测量误差  $< 0.1\%$ , 符合 IEC 61036/61827 标准。③ 具有相位误差, 直流偏移, 增益等校正功能。④ 能够检测信号过零、跌落、超标。⑤ 具有 SPI 串行接口, 方便与微控制器的连接。

ADE7763 的内部包含两个程控放大器, 两个 2 阶 16 位的  $\Sigma - \Delta A/D$  转换器, 一个电压基准, 一个温度传感器以及一个功能可通过寄存器配置的 DSP 算法内核, DSP 内核利用数字化的电压电流数据进行各种参数的计算, 它包含许多功能模块, 与本应用相关的主要模块有: ① 一个高通滤波器 HPF1, 可以去掉计算有功功率时信号直流偏移的影响。② 一个积分器, 使得 ADE7763 可直接与  $di/dt$  类型的电流传感器 (如 Rogowski 线圈) 接口。③ 两个低通滤波器 LPF1 和 LPF2, LPF2 用来滤掉瞬时功率中的交流成分。④ 一个 SPI 串行接口, 主机通过其访问内部寄存器。⑤ 中断管理模块, 用来产生, 使能, 置位, 复位中断。⑥ 64 个寄存器, 包括工作模式寄存器、通信寄存器、中断管理寄存器, 各种计算结果和配置参数寄存器。⑦ 过零检测模块。⑧ 相位、偏移、增益校准模块。

#### 3.2 ADE7763 的工作原理

代表电网信号 (电压和电流) 的模拟电压信号经过可编程放大器后, 进入  $\Sigma - \Delta A/D$  转换器。由于采用了过采样 (894kHz) 和噪声整形技术,  $\Sigma - \Delta A/D$  转换器可以达到很高的精度<sup>[6]</sup>。转换为数字量的电网信号由 DSP 进行各种运算处理, 来获取各种电网参数。其中, 有功电能的计算是用在电网周期有功电能累加模式下, 在积分周期寄存器设置的电网周期内不断累加电压和电流的乘积——瞬时功率, 积分结束时, 产生 CYCEND 中断, 微控制器可以读取有功电能。计算视在电能需要先分别计算电压和电流有效值。有效值的计算为

$$U = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U^2(i)} \quad (5)$$

ADE7763 以 CLKIN/4 频率持续同步计算电压和电流有效值和二者的乘积——视在功率, 并更新有效值寄存器 VRMS 和 IRMS 及视在功率寄存器。在电网周期视在电能模式下, 在与有功电能相同的累加时间内, ADE7763 同步累加视在功率获得视在电能, 并同样以 CYCEND 标志积分结束。微控制器读取有功电能和视在电能后就可以根据式 (4) 计算功率因数。通过过零检测来同步有功电能和视在电能计算的方法提高了二者的计量精度, 进而提高了功率因数的计算精度。

#### 3.3 硬件构成

以 ADE7763 为核心, 辅以简单的外围电路, 设计了一款功率因数表, 硬件简图如图 2 所示。为方便接口, 选用了同样具有 SPD 的微控制器 ATmega8。用户通过键盘和 LED 可以设置芯片的工作参数, 读取或校准测量结果。由于 ATmega8 内部有 512B 的 EEROM, 在不外扩存储器的情况下, 也可以保存一定数量的测量结果。为了消除谐波的影响, 电压和电流信号在进入 ADE7763 之前首先由低通滤波器滤波。滤波器采用 MAX291, 该滤波器为 8 阶巴特沃斯型电容滤波器, 应用时只需外接一决定截止频率的电容即可。在该设计中, 截至频率设为 100Hz。微控制对 ADE7763 所有操作都是通过 SPI 串行口操作 ADE7763 的各个寄存器实现的, 而 ADE7763 的工作状态则通过中断模块反馈给微控制器。

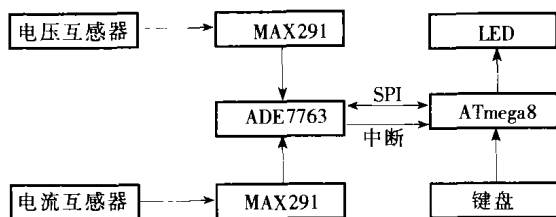


图 2 硬件结构框图

## 4 误差分析

### 4.1 随机噪声

随机噪声无处不在，在某些场合可能十分严重。如果电压和电流中分别包含随机噪声信号  $n_u(t)$  和  $n_i(t)$ ，式 (2) 变为

$$p(t) = [u(t) + n_u(t)] \times [i(t) + n_i(t)] \\ = u(t)i(t) + u(t)n_i(t) + i(t)n_u(t) + n_u(t)n_i(t) \quad (6)$$

由于  $n_u(t)$  和  $n_i(t)$  是随机的，式 (5) 右边的后三项也是随机的。如果在计算有功能量时，积分时间足够长，则根据随机信号的遍历性，随机噪声因叠加而抵消，因此可认为计算结果不受随机噪声的影响。对于视在电能，原理相同。可见由于采用能量而不是功率来计算功率因数，大大减弱了随机噪声的影响。对于 50Hz 的周期信号，ADE7763 的最长积分时间可达 10.92min，此时随机噪声对功率因数的影响是可以忽略的。

### 4.2 通道附加相位差

电流和电压模拟信号通道的结构不同会引起附加相位差。由于本设计中模拟通道的环节很少（互感器，滤波器，ADE7763 内部的放大器），而且两个通道的器件相位延迟特性基本相同，因此测量电路引起的附加相位差很小。为消除残余的通道相位差，ADE7763 在电流通道提供了一个相位校正寄存器，可以在  $-1.84^\circ \sim 0.72^\circ$  的范围内，以  $0.04^\circ$  的精度对相位进行校正。校正后，通道附加相位差引起的误差可以不计。

### 4.3 过零误差

通过在整数个半波周期内对瞬时功率或者视在功率积分可以消除交流干扰，这依赖于 ADE7763 的过零检测单元能准确地检测到信号的过零点。如果由于干扰或者谐波引起信号过零误差，必然会造成交流成分经积分后不能完全抵消。但过零点附近交流成分的幅值很小，加之如果积分时间足够长，

则过零误差引起的积分误差相对有功功率的积分是很小的，因此过零误差对功率因数的影响也可以忽略。

### 4.4 频率波动

如前所述，用能量代替功率来计算功率因数有很多好处，但前提要求积分是在整数个电网周期内进行。如果采用固定积分长度，电网频率波动时势必造成不能在整周期内积分。然而对于 ADE7763，由于积分长度由实时过零检测来控制，这一问题并不存在。

### 4.5 直流偏移

信号本身可能包含直流成分，A/D 转换、干扰也可能产生新的直流成分。假如电压信号包含直流成分  $U_d$ ，电流信号包含直流成分  $I_d$ ，瞬时功率表达式变为

$$p(t) = [u(t) + U_d] \times [i(t) + I_d] \\ = UI \cos \theta - UI \cos(2\omega t + \theta) + \\ u(t)I_d + i(t)U_d + U_d I_d \quad (7)$$

所增加的成分中只有  $U_d I_d$  为直流成分，其他两项的影响可以通过低通滤波器或者积分消除。对于  $U_d I_d$ ，只要消除  $U_d$  或  $I_d$  之一，便可消除。ADE7763 在电流通道上 ADC 之后提供了一个高通滤波器 HPF1 来达到此目的。然而由于电压通道无高通滤波器，如果电压信号中的包含直流成分，仍会造成视在能量的计算误差，对此误差，可以使用 ADE7763 提供的信号偏移寄存器 CHOS1 和 CHOS2 及有效值偏移寄存器 IRMSOS 和 VRMSOS 来消除。直流偏移还会造成过零检测误差，由于 ADE7763 过零检测依据的是通道 2 的信号，而此通道无高通滤波器，因此要在 ADE7763 内部消除此误差只能借助 CHOS2。

### 4.6 谐波

随着电网中非线性负载的增多，很多情况电网信号不再是假设的纯基波正弦信号，而是包含了很多谐波成分。这时，功率因数的计算方法将发生变化。以仅包含 3 次谐波为例， $p(t)$  可表示为

$$p(t) = [u_1(t) + u_3(t)] \times [i_1(t) + i_3(t)] \\ = u_1(t)i_1(t) + u_3(t)i_1(t) + u_1(t)i_3(t) + u_3(t)i_3(t) \\ = U_1 I_1 \cos(\theta_1) + U_3 I_3 \cos(\theta_3) - \\ U_1 I_1 \cos(2\omega t + \theta_1) - U_3 I_3 \cos(6\omega t + \theta_1) + \\ U_1 I_1 \cos(2\omega t + \theta_3) - U_1 I_3 \cos(4\omega t + \theta_3) + \\ U_3 I_1 \cos(2\omega t + \theta_1) - U_3 I_1 \cos(4\omega t + \theta_1) \quad (8)$$

其中,  $u_1(t)$  为基波电压,  $u_3(t)$  为 3 次谐波电压,  $i_1(t)$  基波电流,  $i_3(t)$  为 3 次谐波电流,  $U_1, U_3, I_1, I_3$  则是相应的有效值。  $\theta_1$  和  $\theta_3$  分别为基波和 3 次谐波的相位差。可见, 3 次谐波的出现给  $p(t)$  引入了一个新的直流成分  $U_3 I_3 \cos \theta_3$ 。实际上, 每个谐波成分都会引入一个直流成分。对于视在电能, 存在类似的问题。

ADE7763 中, 通道 2 有一个低通滤波器 LPF1, 但它只用于计算有效值, 而没有用于计算瞬时功率, 因此并不能消除  $p(t)$  中由谐波引入的直流成分。对于视在能量, 由于 LPF1 的截至频率为 140Hz, 可认为不受谐波的影响。为消除谐波对有功能量测量造成的误差, 只能在通过外接低通滤波器的方法。另外, 谐波被抑制后, ADE7763 对过零点的判断也必然更为准确。

## 5 结束语

本文设计的功率因数表具有结构简单, 性能可靠, 准确度高, 开发方便, 成本低廉等优点, 而且由误差分析可见, 一些同类仪表中常见的误差源对于本设计而言都可以忽略。但由于 ADE7763 的数字信号处理功能基本固定, 虽然可通过寄存器对某些功能模块进行配置, 灵活性仍嫌不足。这也是获得开发便利的同时必然要付出的代价。

## 参考文献

- 1 范春菊, 郁惟镛. 功率因数的实时精确测量方案探讨. 继电器, 2003 (7)
- 2 张章. 一种新颖的高精度功率因数测量装置的设计. 广

(上接第 88 页)

序以及整定值在掉电情况下不丢失, 在目标板上配有 E<sup>2</sup>PROM, 通过 CPLD2003 向 FPGA 下载程序的同时, 将程序烧进 E<sup>2</sup>PROM。对整个系统划分成若干模块, 并对每个模块继续划分, 首先实现底层的设计, 进而完成整个系统的实现。

## 参考文献

- 1 Feng tao, Zhang guiqing. A FPGA - Based implementation of data acquisition and processing for digital protective relay. ASIC, 2001.
- 2 谭会生, 张昌凡. EDA 技术及应用. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001

东自动化与信息工程, 2000 (3)

- 3 李先祥. 基于 DSP 控制的功率因数校正系统的设计. 电测与仪表, 2002 (7)
- 4 郭松林, 林海军, 张礼勇. 电子式电能表专用芯片分类及原理. 电测与仪表, 2002 (10)
- 5 邱关源. 电路 (第四版). 北京, 高等教育出版社, 1999
- 6 A. N. Samra, W. T. Jewell, A. Teshome. Application of digital microprocessor technology to power meter in the presence of harmonic. Proceedings of the 34th Midwest Symposium on Circuits and Systems, 1991

## Measuring Power Factor Utilizing Energy Metering IC ADE7763

Zuo Ziqiang

(Xi'an Jiaotong University)

**Abstract** Based on high accuracy active and apparent energy metering IC ADE7763, a power factor meter is developed. Because of appropriate employment of the integrated analog and digital processing functions in ADE7763, hardware and software design is greatly reduced, development process is accelerated and cost is lowered. Also because many functions were implemented within a single IC, the circuit reliability is improved too. Furthermore, the measurement theory, the operating theory of ADE7763 are introduced and in conjugation with ADE7763, the measurement principle error is analyzed from several angles.

**Keywords** ADE7763 power factor phase difference error analyse

收稿日期: 2004-07-05

技大学出版社, 2001

## The Design of Motor Protection Based on FPGA

Zhang Xin

(China University of Mine Technology)

**Abstract** This article gives a special research VHDL, Graphic editor and the "top-down" mode to design motor protection device on Field Programmable Gate Array (FPGA).

**Keywords** motor protection FPGA

收稿日期: 2004-06-04