

高精度电能表现场校验仪设计

毛晓波¹, 黄云峰², 黄俊杰¹

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 郑州市供电公司 试验所, 河南 郑州 450007)

摘要: 介绍一种多功能、高精度、低成本的三相电能表现场校验仪。它使用简单可靠的硬件高速锁相环电路, 控制单片 6 通道 16 位 $\Sigma-\Delta A/D$ 转换器对三相电压、三相电流进行同步整周期均匀采样和抗混叠跟踪滤波; DSP 对采集的三相电压、电流数据进行高速运算、处理 and 数据分析, 并用软件方法产生高低频标准电能脉冲; FPGA 芯片实现频率、相位测量并配合 DSP 产生 A/D 控制时序和进行档位切换与增益控制; MCU 控制键盘输入、E²PROM 参数设置、LCD 显示、打印输出以及上位机的数据通信。给出了系统总体结构、倍频锁相电路、数据采集电路和各种电参数的测量算法。主要指标的准确度等级优于 0.05 级。

关键词: 现场校验仪; 锁相环; 同步采样; $\Sigma-\Delta A/D$ 转换器

中图分类号: TM 933.4; TP 23 **文献标识码:** B **文章编号:** 1006-6047(2007)07-0069-05

电力部门对电能计量装置的准确性、先进性及便利性的要求不断提高。

这里介绍的三相电能表现场校验仪可用于各种类型的电能表或电能计量装置的现场检测和校验, 兼有交流电参量测量功能(如电压、电流有效值, 有功、无功功率, 工频频率, 功率因数, 相位角等), 并能进行三相交流电的矢量分析和谐波分析。采用高性能的 DSP、FPGA 芯片和 6 通道 16 位 $\Sigma-\Delta A/D$ 转换器组成倍频锁相同步整周期均匀采样的数据采集系统, 实现现场校验、测量、记录、打印及数据上传一体化, 是新一代高精度全数字化电力测量设备。

重点介绍校验仪的硬件设计原理、核心部件的

设计方法及软件测量算法等。

1 系统硬件结构与工作原理

现场校验仪硬件电路结构如图 1 所示, 下面简要介绍其工作原理。

1.1 电参量测量

三相电压(0~480 V)、三相电流(直接输入: 5 A, 100 A; 嵌表输入: 5~1000 A)分别经精密电阻分压、精密电流互感器变换和高性能程控增益量程切换后转换为适合 ADC 输入要求的交流信号; 数据采集电路在倍频锁相电路、高速 DSP 和 FPGA 控制下, 以精确的时序, 按每周期 128 次的采样速率对 6 路交流电压、电流信号进行整周期同步均匀采样并转换为数字信号送入 DSP 芯片; DSP 按照特定的数值算法对采集到的数字化的交流信号进行分析、运算和处理, 得到

收稿日期: 2006-12-04; 修回日期: 2007-03-08

基金项目: 河南省优秀青年骨干教师基金资助计划项目

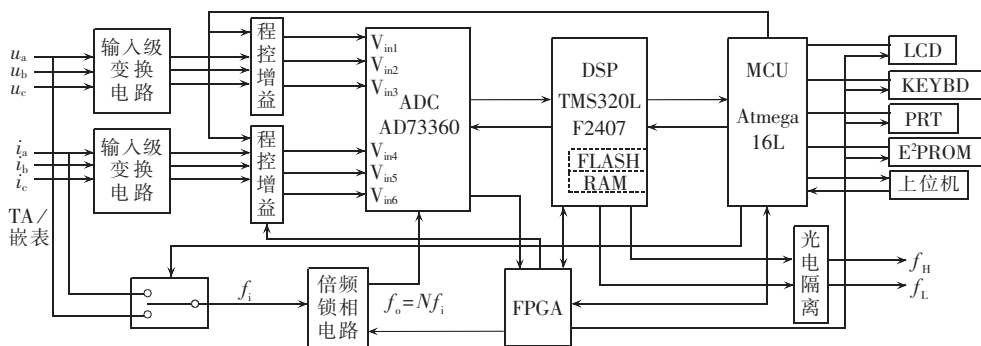


图 1 校验仪硬件电路结构图
Fig.1 Block diagram of field test equipment

各种电参量的测量值并输出显示、打印或传送给上位机处理。

1.2 电能表校验

电能表校验功能与同类产品相同,即:校验仪的电能脉冲输入接口可接收来自被测电能表的低频脉冲(可通过手动开关或光电头)输入,根据操作设定的电表常数和转数,记录被测电能表的输出电能脉冲时间间隔并将其换算为被测电能表测出的电能量,以仪器自身测出的电能量为标准作比较,以此得到被测电能表的误差并以相对值的百分比表示^[1]。

1.3 电能脉冲输出

本校验仪可作为标准电能表使用,用于仪器自身电能测量精度的检验与校准,可输出标准高低频电能脉冲: $f_u=100\text{ kHz}$ 或 10 kHz , $f_l=1\text{ Hz}$ 。

利用 DSP 芯片速度高的优势,采用软件方法产生高低频电能脉冲。其基本原理是根据 A/D 转换输出的电压、电流数字量计算出瞬时功率,将瞬时功率(有功或无功)的数字量不断累加得到电能值,当达到一个电能脉冲所代表的电能量时,就输出一个高频脉冲,低频脉冲由高频脉冲分频得到^[2]。该方法用极小的程序量产生标准的高低脉冲,硬件上仅占用 DSP 的定时器资源。产生的电能脉冲为 TTL 电平标准,通过光电隔离接口向外发送。笔者对该方法的详细描述请参见文献[2]。

1.4 其他功能

本校验仪还可显示三相电压、电流的向量图,自动判别接线错误,具有数据存储、查询等功能,并可通过 RS-232 串行接口与上位微机进行数据传送和管理。这些功能与同类产品原理相似^[3],此处略。

2 核心部件工作原理与电路设计

2.1 倍频锁相电路

根据采样速率是测量频率的整倍数,采样点包含整个周期、且满足采样定理时,用 DFT 频谱分析,频域不会发生泄漏,可完全消除误差的理论^[4-5],设计了硬件锁相环电路,产生整倍于测量信号的方波,来控制 A/D 转换器实现同步整周期采样和跟踪滤波。

图 1 中倍频锁相电路主芯片采用 74HC4046A, 这是一片含有相位比较器和压控振荡器的高速锁相

环,外接低通滤波器和分频器组成倍频锁相电路的原理框图如图 2 所示。

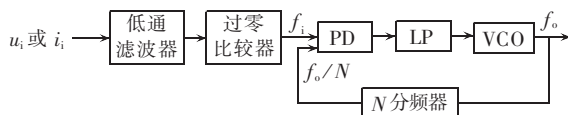


图 2 倍频锁相同步电路原理框图
Fig.2 Block diagram of multiple
-frequency phase-lock circuit

为使锁相环准确锁定在测量信号的基波频率上,输入信号(u_i 或 i_i)经 3 阶巴特沃斯有源低通滤波器滤除 60 Hz 以上高次谐波,经过零比较器输出对称方波,作为高速锁相环的输入基准信号 f_i 。在相位比较器 PD、低通滤波器 LP、压控振荡器 VCO 构成的锁相环内加入 N 分频器。 f_o 经 N 分频后与 f_i 相比较,根据锁相环工作原理,锁定时 $f_o/N=f_i$,即 $f_o=Nf_i$ 。由于锁相环的实时跟踪性,当被测信号频率 f_i 变化时,电路能自动快速跟踪并锁定,始终满足 $f_o=Nf_i$ 的关系,即采样频率为被测信号频率的整数(N)倍,从而实现一周内等间隔采样 N 点,从根本上克服了软件同步采样法存在的上述问题^[6-8]。锁相环产生的倍频输出信号 f_o 作为 A/D 转换器的主时钟信号,即采样信号。

2.2 AD73360 及其与 DSP 的接口

2.2.1 A/D 转换器的选择

由于电参量(电压、电流、功率等)算法公式中要求电压、电流必须是同一时刻的对应值,因此,要求电压、电流必须同时采样。目前,文献中介绍的同步采样实现方法有2种:一种是由一片单通道高速A/D转换器(如:16位LTC1605A)、多片采样保持器、多路模拟开关以及多路抗混叠滤波电路组成,同时采集6路信号送采样保持器保持,然后通过模拟开关切换分别送入A/D转换器进行转换。由于高速高分辨率A/D转换器价格昂贵,该方法可降低成本,但电路结构复杂、编程繁琐;另一种是采用多通道高速A/D转换器(如:4通道14位AD7865),但高分辨率(16位以上)多通道并行A/D转换器很少见,价格非常高,且所谓的多通道只不过是内含多路采样保持器和多路开关,还是由1个A/D转换器进行转换。

采用AD公司推出的可编程16位 $\Sigma-\Delta$ A/D转换器AD73360进行设计。内部6个独立通道同时采样,确保采样过程中信号间不产生相位差。一般高精度仪表较少采用 $\Sigma-\Delta$ 型A/D转换器的原因是其速度较低。但AD73360的采样率可达64K,用于电力参数测量完全能够满足要求,且 $\Sigma-\Delta$ 型A/D转换器具有抗干扰能力强、量化噪声小、分辨率高和线性度好等优点^①。

2.2.2 AD73360性能简介

AD73360的每个独立A/D转换通道内部结构如图3所示。

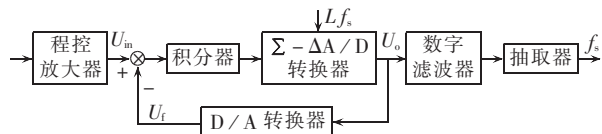


图3 $\Sigma-\Delta$ A/D转换器结构图

Fig.3 Block diagram of $\Sigma-\Delta$ A/D converter

经程控放大器调理后的输入信号 U_{in} 与反馈信号 U_f 相减的增量再经采样保持器保持后输入A/D转换器,低分辨率A/D转换器以 Lf_s ($Lf_s=DMCLK/8$)的高过采样率对保持后的增量进行高速采样,16位累加器对低分辨率采样值累加求和后得到高分辨率 U_o ,再由D/A转换器转换成16位模拟量 U_f 反馈到减法器,从而形成闭环负反馈 $\Sigma-\Delta$ A/D调制器。通过负反馈环路的不断调整,使 $U_o(N)=U_o(N-1)+[U_{in}-U_f(N-1)]$,即 $U_o(N)=U_{in}$ 。由于A/D转换器在量化过程中存在量化误差,但通过闭环负反馈环路的误差补偿性能和高速重复取样方法,把量化噪声延续到 $Lf_s/2$ 的整个频带范围内,并将它推到正常采样率以外的高频段上。

抗混叠数字滤波器对 $2k$ 个高速采样值 U_o 进行数字均值滑动滤波(抽取系数 k =高过采样率/采样率),滤除二分之一采样频率以上的高频噪声和输入信号的高次谐波。经滤波后的采样值按 $k:1$ 抽取作为输出,降低了A/D转换通道的采样率,从而降低了同步串行口的速度要求。A/D转换通道的采样频率 $f_s=Lf_s/k$ 。由 $\Sigma-\Delta$ A/D转换器原理可知:时钟频率与高速采样率、采样率和抽取系数 k 均存在整倍数关系,因而提供了控制 $\Sigma-\Delta$ A/D转换器实现同步采集、跟踪滤波的条件^②。

AD73360放大器增益、采样率、抗混叠数字滤波器的截止频率均可编程设置。具体特点如下:

- 各放大器增益在0~38 dB分8档编程设置;
- 最高采样率达64 K,当 $DMCLK=16.384$ MHz时,采样率可编程为8 K、16 K、32 K和64 K;
- 数字滤波器截止频率等于二分之一采样频率;
- 可编程设置同步串行口($DMCLK$ 、 $DMCLK/2$ 、 $DMCLK/4$ 、 $DMCLK/8$)波特率,与不同速度的微处理器进行数据通信;
- 具有良好的可扩展性,最多可8片级联使用,

扩展测量48路独立的A/D转换通道;

- 片内基准电压源,可编程选择1.25 V或2.5 V;
- 单2.5~5.5 V电源供电;
- 信噪比高(>88 dB),量化噪声小(<-77 dB);
- 具有抗干扰能力强、线性度好的优点。

AD73360内部有8个控制寄存器(CRA、CRB、CRC、CRD、CRE、CRF、CRG、CRH)完成对上述的各种设置。

AD73360引脚图如图4所示。各引脚功能简述如下:

RESET 复位端,低有效;

SE 串行口使能端,高有效,低电平串行口停止工作,进入节电状态;

MCLK 主时钟输入端;

SCLK 串行时钟输出端;

SDI 和 SDIFS 数据输入和帧同步信号输入,用于同步接收一帧数据;

SDO 和 SDOFS 数据输出和帧同步输出,用于AD转换数据输出;

其余的引脚分别为6路模拟输入、模拟电源和数字电源等。

AD73360使用16位的同步串行口,通过6条通信线实现数据的双向同步通信,并且只能工作在主控方式。串行口有3种工作模式:编程模式、数据模式和混合模式。编程模式只接收控制命令字,用于对各个控制寄存器的设置;数据模式只输出采样数据;混合模式允许在输出采样数据过程中接收控制字。

AD73360复位后,各控制寄存器全部清零,默认采样率为 $MCLK/2048$,SCLK的频率为 $MCLK/8$,各A/D转换通道均于停止工作状态,同步串行口工作在编程模式,等待微处理器对控制寄存器进行初始化。并且在每个采样周期输出一个帧同步信号SDOFS,但在SDO数据输出线上输出无效数据。

2.2.3 TMS320LF2407与AD73360接口电路设计

TMS320LF2407和AD73360都有一个16位的同步串行口,但4总线结构与6总线结构的通信标准不同,因此,TMS320LF2407必须进行总线扩展,才能与AD73360的6总线结构串行口相连^②。否则,将无法保证发送、接收数据的帧同步。

笔者通过对2种不同总线结构同步串行口的工作

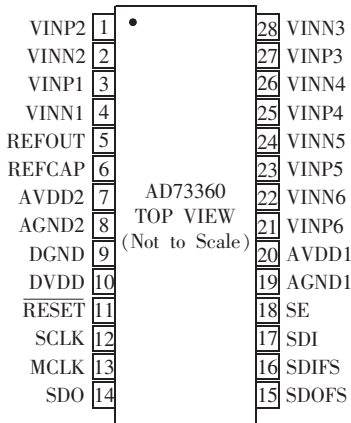


图4 AD73360引脚图

Fig.4 Pin configuration of AD73360

① AD73360 six-input channel analog front end, Analog Devices Inc., 2000.

② TMS320LF2407A DSP controller. Texas Instruments Inc., 2004.

原理和时序分析,设计出如图 5 所示的接口电路。

DSP (TMS320LF2407)的 SPISITE 接地,使同步串行口处于从动使能状态;IOPE5 与 AD73360 的 RESET 和 CE 相连接,控制 AD73360 的复位和串行口使能;AD73360 的 2 个帧同步信号接成帧同步返回环方

式,即输出帧同步 SDOFS 作为输入帧同步 SDIFS,同时连接 DSP 的 XINT1 输入端,作为 DSP 的收/发数据的帧同步信号。

根据 AD73360 的时序要求,通过软件设计,实现 DSP 与 AD73360 的数据通信。

2.3 MCU 与 FPGA

ATmega16L 是美国 ATEML 公司最新推出的内含 16 KB Flash 的低功耗、低价格的 8 位单片机,其内部集成了丰富的硬件资源,从而简化了外围电路的设计。ATmega16L 采用先进的 RISC 精简指令集,运行速度是普通单片机的几十倍^①。ATmega16L 在本系统中负责控制液晶显示器、打印机、键盘、串行 E²PROM(93LC 86)、档位切换及与上位机交换数据等,这些部分均采用 MCU 通用的控制方法,此处不再细述^[3]。系统使用 ATmega16L 内部的看门狗电路增强了装置的抗干扰能力。

FPGA 采用 XILINX 公司的 SPARTAN2 系列的 xc2s30tq144-6,配合 DSP 产生 A/D 控制时序并完成频率、相位测量。

3 软件测量算法

三相电压、电流信号经过取样电路处理后变为交流小信号,经前端档位切换、放大等预处理后送至 A/D 转换器,由 DSP 按照特定的算法对采样得到的离散数字序列进行处理得到测量值^[10-11]。下面就主要测量项目的算法做一简要说明。

3.1 U、I 测量

对电压、电流的周期性均方根积分运算获取真有效值。电压在一个周期内的均方根值定义为

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}$$

将其离散化,以一个周期内有限个采样电压数字量来代替一个周期内的连续变化的电压值,则

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{n=1}^N u_n^2 \Delta T_n}$$

式中 ΔT_n 为相邻 2 次采样的时间间隔; u_n 为第 n 个电压采样瞬时值($n=1, 2, \dots, N$), N 为一个周期内的采样点数。

由于采用锁相环跟踪输入信号频率,采用周期定点采样,所以相邻 2 次时间相等,即 ΔT_n 为常数 ΔT ,

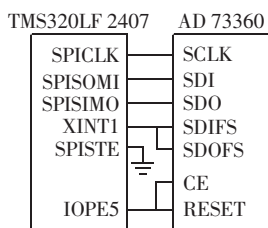


图 5 TMS320LF2407 与 AD73360 接口电路

Fig.5 Interface between TMS320LF2407 and AD73360

考虑到 $N=T/\Delta T$, 有

$$U = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n^2}$$

这就是根据一个周期内各采样瞬时值及采样点数来计算电压有效值的公式(实际取 $N=128$)。

同理,电流有效值计算公式为

$$I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_n^2}$$

3.2 有功功率测量

对电压、电流乘积的周期性积分获取有功功率。计算一相有功功率的离散化公式为

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n i_n$$

则三相有功功率为

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (u_{an} i_{an} + u_{bn} i_{bn} + u_{cn} i_{cn})$$

式中 u_n, i_n 为同一时刻的电压、电流采样值。

3.3 无功功率测量

对电流进行数字式移相 90° , 再对其与电压乘积的周期性积分获取无功功率。单相无功功率的离散化公式为

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n i_{(n+N/4)}$$

其中 $i_{(n+N/4)}$ 为滞后 u_n 90° 的电流值。

对三相无功功率累加即得三相无功功率。

3.4 功率因数测量

对功率三角形的计算获取功率因数:

$$\lambda = \cos \varphi = P / \sqrt{P^2 + Q^2}$$

3.5 累计电能

对有功功率、无功功率的连续累计(积分)可获得有功电能和无功电能。

3.6 谐波分析

对采样得到的数字离散序列进行基 2、128 点的 DFT 变换,可得各次谐波的幅值、相位等信息,对各次谐波的幅值计算得各次谐波的有效值^[12]。

为提高系统的测量精度、稳定性和抗干扰能力,在上述测量算法中还使用了去极值滤波、滑动平均滤波等多种数字滤波手段。

4 结语

介绍了三相电能表现场校验仪的软硬件设计原理。与同类产品相比,其主要特点是将硬件锁相环技术成功地应用在 16 位高速 $\Sigma-\Delta$ A/D 转换器上,设计出一种独特的 6 通道同时、同步整周期均匀采样、具有跟踪滤波功能的数据采集器,提高了测量精度;单片低成本 6 通道 ADC 和低价位片内资源丰富的 MCU 的选用及软件产生电能脉冲等技术的采用节省了大量的外围电路,降低了系统成本。实测结果

① 8-bit AVR Microcontroller with 16 K bytes in-system programmable flash ATmega16L, ATMEML Corporation, 2002.

表明,电压、电流、有功功率、电能等主要参数指标的准确度等级均优于0.05级,其设计思想对于研制高精度电力测量仪表具有实际的参考价值。

参考文献:

- [1] 马利人. 新一代单相多表位交流电度表检定装置的原理和检定[J]. 电测与仪表,2000,37(11):25-29.
MA Li-ren. Principle and calibration of new type calibration equipment with multi-meter position for single-phase watt-hour meter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2000,37(11):25-29.
- [2] 毛晓波,李志辉,张震. 电能脉冲的软件产生方法[J]. 电力自动化设备,2006,26(9):27-29.
MAO Xiao-bo,LI Zhi-hui,ZHANG Zhen. Using software to generate electric energy pulse[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(9):27-29.
- [3] 张有顺,冯井岗. 电能计量基础[M]. 北京:中国计量出版社,1996.
- [4] 黄俊杰,毛晓波,黄云峰. 基于 $\Sigma-\Delta$ A/D转换器的同步数据采集系统[J]. 电测与仪表,2004,41(7):22-25.
HUANG Jun-jie,MAO Xiao-bo,HUANG Yun-feng. A kind of synchronous data collection system based on multi-channels $\Sigma-\Delta$ A/D converter[J]. Measurement & Instrumentation,2004,41(7):22-25.
- [5] 万中田,陈小桥,杜广宇. 锁相倍频和准同步采样法在谐波测量中的应用[J]. 武汉大学学报:工学版,2001,34(5):39-44.
WAN Zhong-tian,CHEN Xiao-qiao,DU Guang-yu. Application of phase lock multiple frequency synchronous sampling and quasi-synchronous sampling to measurement of harmonics[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2001,34(5):39-44.
- [6] 毛晓波,吕建明. 电力参数的交流采样技术及软硬件设计研究[J]. 仪器仪表学报,2001,22(4):195-198.
MAO Xiao-bo,LÜ Jian-ming. AC sampling technology of power systems parameters and software and hardware designing methods[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2001,22(4):195-198.
- [7] 李正军. 跟踪锁相技术在电力电量交流采样中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报,1998,10(1):32-38.
LI Zheng-jun. Application of PLL tracking technology in

- electric energy AC sampling[J]. Proceedings of the EPSA, 1998,10(1):32-38.
- [8] 陈振晖,蔡灿勇,晏凯,等. 锁相环倍频器软件实现及在电力谐波参数检测系统中应用[J]. 电子测量技术,2001(4):24-25.
CHEN Zhen-hui,CAI Can-yong,YAN Kai,et al. The implementation of PLL frequency multiplier by software and its application in power harmonics parameters detection system[J]. Electronic Measurement Technology,2001(4):24-25.
 - [9] 潘焕成,赵卫东. 新型A/D变换器AD7360及其应用[J]. 国外电子元器件,2002(4):53-55.
PAN Huan-cheng,ZHAO Wei-dong. A new kind of A/D converter AD7360 and its applications[J]. International Electronic Elements,2002(4):53-55.
 - [10] 毛晓波,赵文丽,黄俊杰. 交流采样技术及其DSP实现方法[J]. 微计算机信息,2005,21(2):54-55.
MAO Xiao-bo,ZHAO Wen-li,HUANG Jun-jie. AC sampling technology and result of realizing using DSP[J]. Control & Automation,2005,21(2):54-55.
 - [11] 高辉,崔文进. 基于DSP的交流采样和电量数字测量的研究[J]. 电工技术杂志,2002(10):16-19.
GAO Hui,CUI Wen-jin. Study on AC data acquisition and electrical signal digital measurement based on DSP in power system[J]. Electrotechnical Journal,2002(10):16-19.
 - [12] 李君凯,丁化成. 一种新的电力系统谐波分析采样计算方法[J]. 电测与仪表,2000,37(10):5-7.
LI Jun-kai,DING Hua-cheng. New type calculating method based on sampling for harmonic analysis instrument on power system[J]. Measurement & Instrumentation,2000,37(10):5-7.
- (责任编辑:柏英武)

作者简介:

毛晓波(1965-),男,河南开封人,副教授,从事嵌入式系统、智能仪器仪表的教学与科研工作(E-mail:mail-mxb@zzu.edu.cn);

黄云峰(1980-),男,河南鄢陵人,助理工程师,主要从事电力系统自动化设备的设计与研究(E-mail:204boy@163.com);

黄俊杰(1951-),男,河南鄢陵人,工程师,主要从事智能仪器仪表及电力自动化设备的研发(E-mail:huangjj@zzu.edu.cn)。

Design of high-precision field test equipment for power meter

MAO Xiao-bo¹,HUANG Yun-feng²,HUANG Jun-jie¹

(1. Zhengzhou University,Zhengzhou 450001,China;

2. Zhengzhou Electric Power Co.,Zhengzhou 450007,China)

Abstract: A kind of multifunctional field test equipment for three-phase power meter with high-precision and low-cost is introduced. Applying simple and reliable fast phase-lock loop circuit, it controls the 6-channel 16-bit $\Sigma-\Delta$ A/D converter to synchronously and equally sample the three-phase voltages and currents for the whole period and implement the anti-aliasing tracing filtering. Its DSP processes the acquired voltage and current data and generates standard electric energy pulses. Its FPGA measures the frequency and phase,generates A/D converter timing sequence and controls tap position and amplifier gain. Its MCU controls keyboard inputs,E²PROM parameter settings,LCD display,printer outputs and data communication with superordinate PC. The overall system structure, multiple-frequency phase-lock circuit,data acquisition circuit and the electric parameter measurement algorithms are provided. The measuring accuracy of main parameters is better than 0.05 grade.

This project is supported by the Excellent Young Teacher Fund of Henan Province,China.

Key words: field test equipment; phase-lock loop; synchronous sampling; $\Sigma-\Delta$ A/D converter