

# 基于 DSP 和 CPLD 实现的电能质量监测系统

左涛, 唐巍

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 电能质量监测技术是当前电力系统领域的研究热点。针对电网三相电压及电流信号的采集与处理, 设计了电能质量监测装置的数据采集系统, 系统以霍尔传感器和并行 A/D 转换芯片组成前向采集电路, 以数字信号处理器 (DSP) 组成数据处理电路, 以复杂可编程逻辑控制器 (CPLD) 和锁相环组成硬件同步采样电路并以快速傅立叶变换为主要处理算法。实验表明: 系统具有响应速度快、精度高、实时性好的优点。

**关键词:** 数字信号处理器; 电能质量; CPLD; 霍尔传感器

## Power quality monitoring system based on the DSP and CPLD chips

ZUO Tao, TANG Wei

(Information and Electrical Engineering College, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Power quality monitoring technology is the hotspots of current research in the field of power systems. Based on three-phase power grid voltage and current signal acquisition and processing, this paper designs the power quality monitoring device data acquisition system. The system takes a Hall sensor system and the parallel A/D converter chip as prior acquisition circuit, digital signal processor (DSP) as data processing circuits, and complex programmable controller (CPLD) and PLL as synchronous sampling hardware circuit. And fast fourier transform algorithm is also adopted as the main treatment. Experiments show the proposed system is of fast response, high accuracy, and real-time processing.

**Key words:** digital signal processor; power quality; CPLD; Hall sensor

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)08-0040-06

## 0 引言

随着电能质量对国民经济的影响逐渐加大和人们对电能质量研究的逐渐深入, 人们对电能质量关注的焦点已不仅仅是电压、频率和谐波等各种稳态指标, 还包括影响电能质量的实时信息, 如瞬时扰动和暂态谐波等, 同时也要求电能质量监测系统提供更为直观的分析结果, 以利于对电能质量问题做出决策, 如要求系统能够进行故障识别、干扰源识别、故障预测和信息共享等。如今电子技术和网络技术的飞速发展使得这种需要的实现成为可能。为满足电力系统网络化、自动化的发展需要, 电能质量监测系统正在朝着在线监测、实时分析、网络化和智能化的方向发展。本文介绍基于 TMS320F2812 和 CPLD 的电能质量监测系统, 利用 TMS320F2812 对电力参数进行计算, 利用 CPLD 协助测量。

基金项目: 国家科技支撑计划课题资助项目 (20006BAJ04B06)

## 1 监测装置总体硬件电路设计

在实际的电网测量中, 采样频率至少为每周波的 64 次, 一般采用 256 次以上。当每周波采样为 256 次时, 每个采样点之间的时间间隔为  $78 \mu\text{s}$ , 传统的 51 系列和 96 系列的单片机在多个通道同时采样的情况下无法满足实时测量与运算的要求。

数字信号处理器 (DSP) 技术的快速发展, 为电能质量实时监测提供了理想的解决方案。高性能的数字信号处理器采用改进的哈佛结构, 指令运行采用流水线结构, 其指令周期可达到  $12 \sim 30 \text{ ns}$ , 可以保证足够高的采样率 (最高可达每周波 1024 点), 从而实现高精度的同步数据采集处理。由于电力系统中高次谐波的含有量相对于几基波分量而言是非常低, 谐波次数越高其含量越低, 根据实测数据, 如果采用 12 位分辨率的 A/D 转换芯片, 仅仅因为 A/D 转换精度不够, 对 15 次谐波而言至少会引起 1.67% 的误差, 而且在实际谐波测量中一般测到 30

次谐波,这样产生的误差影响会更大,高次谐波测量数据将没有可信性,因此现场监测单元中 A/D 转换器的分辨率应保证为 14 位或 14 位以上。

电能质量监测装置的电量需要采集三相电压和

三相电流的有效值,共六路模拟量。需要从采样精度、速度及经济成本等多个方面权衡,选择合适的采样方式和采样频率,并注意强弱电的隔离和电磁干扰,从而确定最终的软、硬件设计和元器件选择。

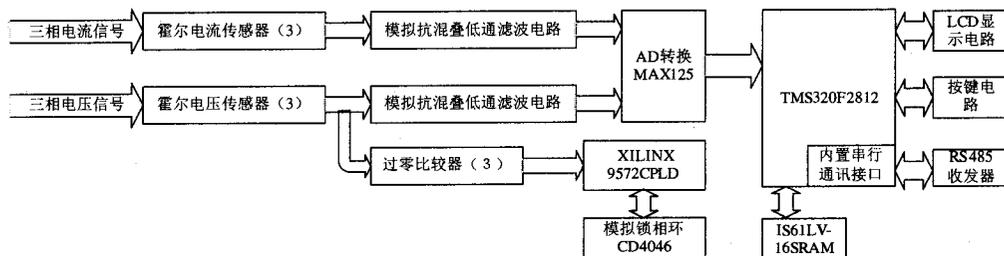


图 1 电能质量监测装置总体硬件结构

Fig.1 Overall hardware structure of power quality monitoring device

## 2 信号调理模块

电能质量监测装置需要首先解决的问题是现场电气参数的采集,电气参量采集的精度直接决定整个设备的测量精度。因此,必须从源头减小采集误差。电能质量监测装置输入信号取自现场电压互感器和电流互感器,额定值为线电压 100 V、电流 5 A。但是,这种高电压和大电流信号不能由计算机直接处理,需要把高电压和大电流信号转换成适合 DSP 处理的低电压和小电流信号。另外,除了信号幅值变换,还要有隔离和滤波,消除各种电磁干扰产生的高次谐波。因此,需要设计一个信号调理电路,其中对信号进行变换的电压、电流互感器应该有足够的精度和带宽。基于 TMS320F2812 DSP 芯片开发的电能质量监测装置的信号调理电路由光电隔离器、霍尔效应的传感器、自动增益控制等电路组成,实现对电压和电流信号的精确采集,确保整体数据处理分析的精度。

采用霍尔传感器采集三相电压和电流信号。相比传统互感器,霍尔传感器具有精度高(优于 1%)、响应速度快(小于 7  $\mu$ s)、工作频带宽(0~20 kHz)等特点,非常适合对电网动态信号的快速采集。

## 3 模拟抗混叠低通滤波电路的设计

抗混叠数字滤波器的作用是滤掉高频信号成分。使输入到 A/D 转换器的信号为有限带宽信号,并且以很小的衰减让有效的频率信号通过,而抑制这个频带以外的频率信号,从而防止信号的频谱发生混叠及高频干扰。为了提高测量精度,结合数字滤波的方法,可以降低对模拟抗混叠滤波器的技术要求。采用两极 RC 低通抗混叠滤波器。

滤波器的幅频响应和相频响应如下:

$$A_{vH} = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_H)^2}} \quad (1)$$

$$\phi_H = -\arctg(f/f_H) \quad (2)$$

当  $f \ll f_H$  时,  $A_{vH} \approx 1$ ,  $\phi_H$  趋向于  $0^\circ$ 。

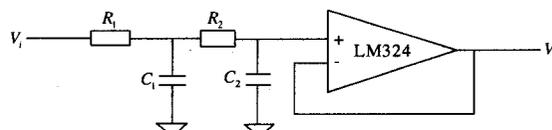


图 2 低通抗混叠滤波器

Fig.2 Low-pass anti-aliasing filter

## 4 采样频率同步电路设计

电力系统中的电压、电流信号是一种包含有多次谐波分量且基波频率会发生漂移的周期信号。如果不加限制地进行采样,将会因采样频率和信号基频不同步而产生较严重的泄漏误差。目前,根据提供采样信号的方式不同,同步采样法又分为软件同步采样法和硬件同步采样法两种。本文采用缺相判断电路和锁相环倍频电路共同实现硬件同步采样。具体电路结构如图 3 所示。其中缺相判断电路为锁相环倍频电路提供与电网频率相同的方波信号并保证其正确性。

### 4.1 缺相判断电路的设计

一般电网三相信号的频率相差无几。所以只需抽取某一相信号用来产生采样脉冲即可。但是如果所取那相信号缺失,系统将无法正常采样。因此,为保证系统稳定运行,须为系统加上缺相判断电路如图 3 框 A 部分所示。在判断缺相时需要为系统设定一个固定的判断时间。根据系统要求的频率测量范围(最低测量频率  $f_1=40$  Hz 最高

测量频率  $f_h = 80 \text{ Hz}$ ) 设定判断时间为  $1.25 \text{ ms}$ , 使用 Verilog HDL 语言编写程序。程序中, 由外部输入的高电平信号量来启动判断语句, 并且判断语句最多循环执行 10 次, 相应判断时间就为  $12.5 \text{ ms}$ , 在这段时间内如果没有低电平出现, 就认为信号丢失, 因此所能监测的电网信号最低频率为  $f_l = 40 \text{ Hz}$ ; 若循环 5 次, 相应判断相就出现低电平, 所监测的电网信号就为能够测得的最高频率  $f_h = 80 \text{ Hz}$ 。电路仿真结果如图 4 所示。U(A~C)是与电网信号同频率的三路方波信号。为了方便讨论, 设 UB 和 UA 信号缺失; RESET 为系统复位信号; F 为判断时钟信号; VAIN 为输出信号; I/O(1~3)分别为 U(A~C)的缺相报警信号; 1 代表缺相, 0 代表正常。由图 4 可以看出, 当 UB、UC 缺相时, 电路选择 UA 作为输出, 并使 I/O2 和 I/O3 输出为 1, 表示这两路丢失。

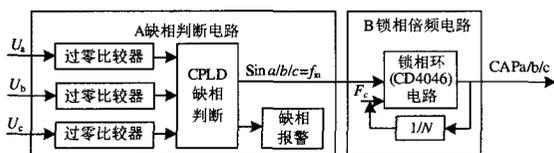


图 3 硬件同步采样电路结构图

Fig.3 Hardware synchronous sampling circuit structure

### 4.2 锁相环倍频电路及采样频率

电路原理图如图 3 框 B 所示, 其中  $F_{out}$  是倍频电路输出信号的频率, 为 A/D 转换芯片提供主时钟信号。为了保证电能质量监测装置采样的精度, 必须使采样频率具有快速的自适应能力, 同步跟踪电量的频率变化。如图 5 所示, 所设计的同步方波变换电路由退滞电压比较电路、高速光藕、锁相倍频电路组成。其中, 由 U4A(LM324 的 1/4)和 Q3 组成的退滞比较电路将正弦波输入信号变为  $0 \sim 5 \text{ V}$  的同频率方波信号, 同时利用退滞电压特性消除输入信号在过零点可能出现的抖动现象。高速光藕 6N137 把模拟部分和数字部分电路隔离开, 同时进一步隔离了强弱电之间的电气连接。锁相倍频电路由锁相环电路 U14(CD4046)和十进制分频电路 CD4017 组成, 按每周波采样 256 点计算, 三片 CD4017 完成 256 分频由于锁相环的相位负反馈作用, 当锁相环锁定时(D2 为锁定指示灯), U10\_6 的输出信号与 U14\_14 的输入信号同步, 也即与正弦输入信号同步, 此时 U14\_4 的输出信号频率为正弦信号频率的 256 倍并且跟随其同步变化, 即采样频率为被测信号频率的整数点 256 倍, 从而实现一周内等间隔采样 256 点。U10\_6 输出的同步信号经分压后, CAPa/b/c 被送入 TMS3202812 的捕获单元模块, 用于频率的测量, 以满足各个电能质量指标的计算。

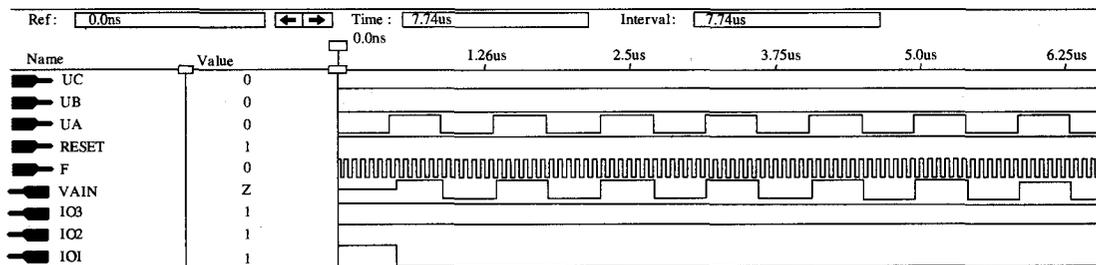


图 4 缺相判断电路仿真结果示意图

Fig.4 Phase lack of judgment circuit simulation results

## 5 数据采集及 A/D 转换电路

A/D 转换器是模数转换电路中的核心器件。模数转换电路的精度也主要取决于 A/D 转换器的分辨率。该环节在整个电气测量系统中占有重要地位。本仪器采用 MAXIM 公司的 MAX125 作为 A/D 转换器件。

在周期性电参量的测量中, 进行同步采样是准确测量实时信号的关键。所谓同步采样就是将信号的一个整周期(或多个周期)进行均匀离散, 在每一离散点处取其信号的瞬时值。

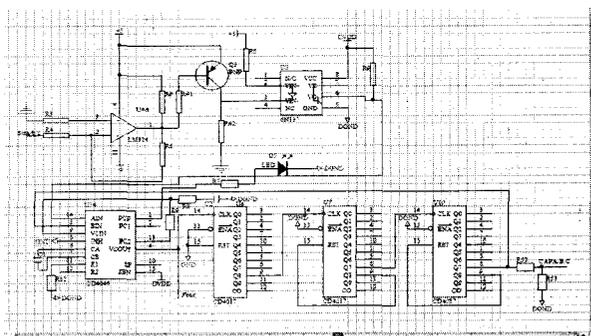


图 5 同步方波变换及锁相环倍频电路

Fig.5 Square wave transform and PLL frequency modification circuit

在电力系统的监测中,除了要知道每路信号值的大小之外,还要知道信号彼此之间的相位关系,这就要求采用同步采样技术来获得准确的信息。同步采样也是信号频谱分析的前提条件。而同步采样

模块一般采用多个采样保持器、多路转换开关和高速高分辨率的模拟数字转换器来构成。本仪器采用 MAX125 数据采集芯片,这可以使设计工作大为简化。

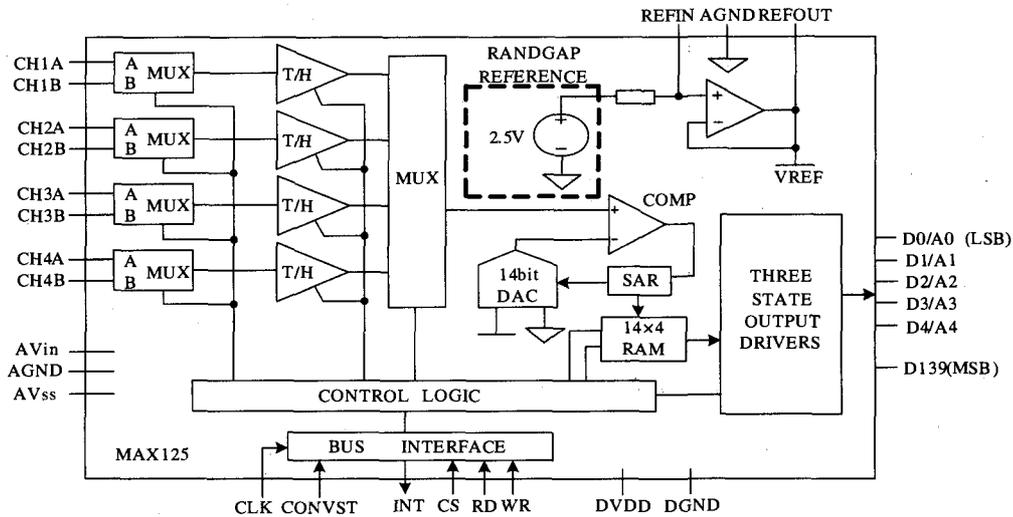


图 6 MAX125 功能结构图

Fig.6 MAX125 functional structure

MAX125 是内部带同步采样保持器的高速多通道 14 位数据采集芯片。芯片内部包括一个 14 bit, 单一通道转换时间为  $3 \mu s$  的逐次逼近型模拟数字转换器, 一个 +2.5 V 的内部电压基准, 一个经过穿冲的电压基准输入端, 一个内部 16 MHz 的时钟, 一组可以同时 4 路输入信号进行同步采样的采样保持电路。在每个 T/H 的前面有一个 2 选 1 的转换开关, 这样总共可以有 8 个输入信号。另外转换器允许一个  $-16.5 \sim +16.5 V$  的过电压。在信号转换的过程中, 一个通道的故障状态部影响其他通道的转换结果。片内有时序控制 1 至 4 通道一次进行转换, 当 4 个通道完全转换完毕后, 对外部产生一个中断信号。每一通道转换完成后将结果存储在芯片的  $4 \times 14 bit$  的 RAM 中, 当所有的转换完成后可以对 RD 脚施加读脉冲读处内部数据, 四次读操作依次读出 RAM 的 4 个数据字, 第一个读信号下降沿清除转换完成信号。

电力系统的信息采集需要同步采样各相电压、电流的瞬时值。而且在大多数情况下, 电力系统的三相是不平衡的, 这样就存在零序分量。采用两片 MAX125 可以实现 8 通道同时采样, 分时转换。

工作过程: 模拟锁相环的倍频信号作为 A/D 转换的启动信号, 启动 MAX125 开始进行转换, 两片 MAX125 的转换完成信号组合产生 INT1 信号, 引起 TMS320F2812 中断。A/D 转换流程: 首先设

定 MAX125 的工作模式, 初始化的 TMS320F2812, 开 DSP TMS320F2812 中断 1, TMS320F2812 外部中断 1 服务子程序用于读取 A/D 转换数据。

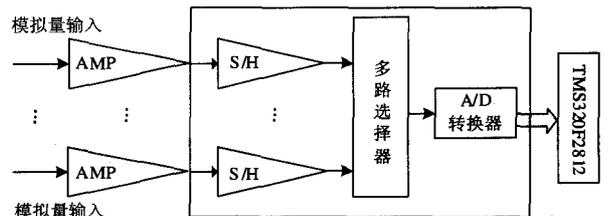


图 7 A/D 采样模块

Fig.7 A/D sampling module

## 6 电能质量监测装置的核心算法及试验结果

在电能质量监测中, 需要用数学方法对采样的电压、电流信号进行谐波分析, 对于离散信号的周期信号而言, 快速傅立叶变换 (FFT) 无疑是分析谐波的最好的算法之一, 利用 FFT 可以直接得到波形所含的各频谱分量。

FFT 并不是一种新的变换, 它是离散傅立叶变换 (DFT) 的一种快速算法。由于我们在计算 DFT 时一次复数乘法需用四次实数乘法和二次实数加法; 一次复数加法则需二次实数加法。每运算一个  $X(k)$  需要  $4N$  次复数乘法及  $2N^2(N-1) = 2(2N-1)$  次实数加法。所以整个 DFT 运算总共需要  $4N^2$  次实数乘法和  $N^2(2N-1) = 2N(2N-1)$  次实数加法。如此一

来, 计算时乘法次数和加法次数都是和  $N^2$  成正比的, 当  $N$  很大时, 运算量是可观的, 因而需要改进对 DFT 的算法减少运算速度。

根据傅立叶变换的对称性和周期性, 可以将 DFT 运算中有些项合并。

先设序列长度为  $N=2^L$ ,  $L$  为整数。将  $N=2^L$  的序列  $x(n)$  ( $n=0, 1, \dots, N-1$ ), 按  $N$  的奇偶分成两组, 也就是说我们将一个  $N$  点的 DFT 分解成两个  $N/2$  点的 DFT, 他们又从新组合成一个如下式所表达的  $N$  点 DFT:

$$x(k) = \sum_{r=0}^{N/2-1} x_1(r)W_N^{rk} + W_N^k \sum_{r=0}^{N/2-1} x_2(r)W_N^{rk} = X_1(k) + W_N^k X_2(k) \quad (3)$$

本文用 TI 公司 CCS2.21 集成开发平台完成算法程序的编程和调试, 硬件试验选用 DK-54 便携式程控精密测试电源为信号源, 电能质量检测装置作为硬件试验平台。

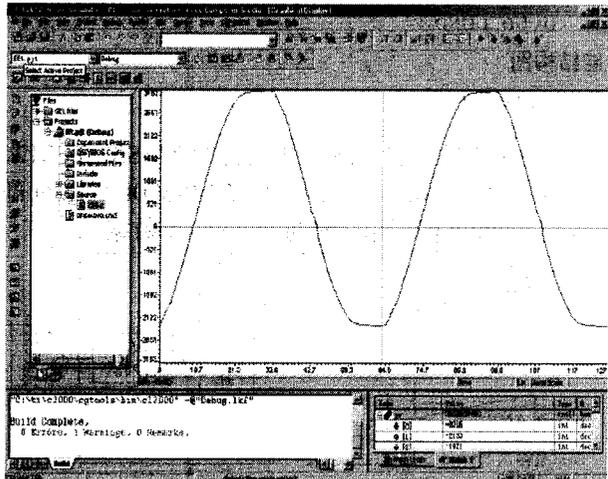


图 8 实测电压采样波形

Fig.8 The measured voltage waveform samples

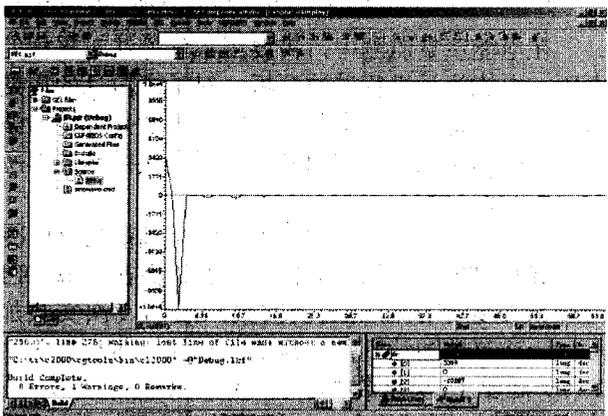


图 9 FFT 频谱实部

Fig.9 Real part of FFT spectrum

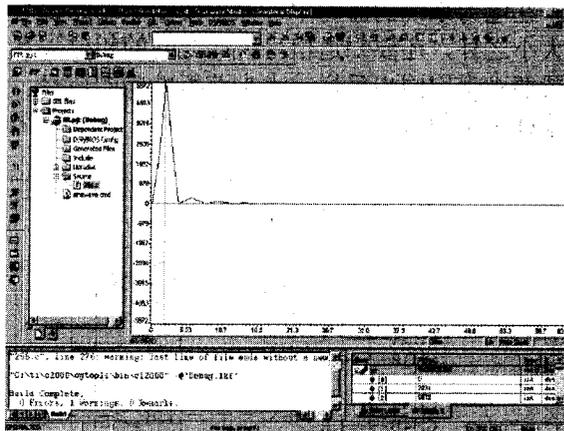


图 10 FFT 频谱虚部

Fig.10 Imaginary parts of FFT spectrum

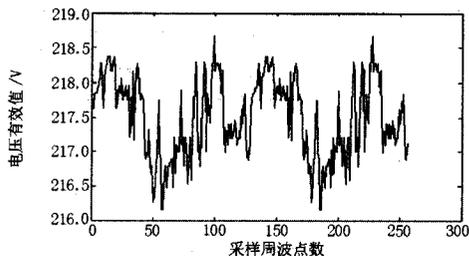


图 11 某实验楼的电压有效值曲线

Fig.11 RMS voltage curve of a certain experimental floor

## 7 质量监测系统的软件设计

该数据采集系统采用合众达科技发展有限公司提供的 SEED-XUSD2.0 仿真器, 它可以通过 USB 接口直接与 PC 机相连接, 在 CCS 集成开发环境通过 JTAG 接口, 调试、烧写程序, 其程序流程如图 12 所示。

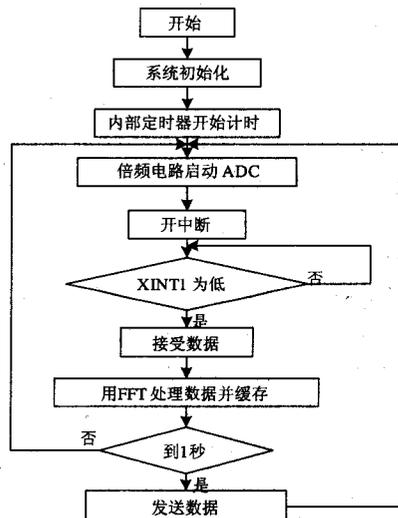


图 12 系统程序流程框图

Fig.12 System program flow diagram

程序首先对系统初始化,当 ADC 转换完毕,进入中断子程序,读取数据,并进行数据处理、缓存数据;每隔一秒钟,系统进入定时器中断子程序,对外发送数据,如此循环反复,从而实现了系统对输入模拟电压信号的实时采集。再通过 FFT 快速傅立叶算法,对电能质量的各项指标进行实时计算,已达到实时监测的目的。

## 8 结论

基于 TMS320F2812 DSP 芯片和 CPLD 的电能监测装置是结合满足电力部门监测需要,严格遵照电能质量国家标准开发的。监测装置通过对电网中的各级等级变电站和特殊点的指定线路的在线监测,精确测量出电网的电力参数,分析电网的电能质量数据信息,并通过串口实现现场数据的监测分析、实时显示,使电力部门实时、精确地了解电网的电能质量状况,在电能质量监测和分析的基础上,实现电能质量的系统化管理。

## 参考文献

- [1] TMS320F2812 Digital Signal Processors Data Manul[M]. Texas Instrument, 2002.
- [2] 吴金宏,倪向阳,吴昊.霍尔电流电压传感器/变压器模块的性能及应用[J].国外电子元件,2001,(1):12-15.  
WU Jin-hong, NI Xiang-yang, WU Hao. Hall Current

and Voltage Sensors/Transformer Modules and Application Performance[J]. International Electronic Elements,2001,(1):12-15.

- [3] 胡铭,张重雄,韩希.基于 DSP 和 CPLD 的电力参数监测装置[J].微机处理,2003,(3):58-59.  
HU Ming, ZHANG Chong-xiong, HAN Xi. Based on the DSP and CPLD Power Monitoring Device Parameters[J]. Computer Processing, 2003, (3) :58-59.
- [4] 黄中英,邢海瀛,邹江峰. MAX125 型模/数转换器在电能质量监控系统中的应用与设计[J].国外电子元件,2006,(16):17-19.  
HUANG Zhong-ying, XING Hai-ying, ZOU Jiang-feng. Application and Design of MAX125 ADC in the Power Quality System[J].International Electronic Element, 2006,(16):17-19.
- [5] 杨冠城.电力系统自动装置原理[M].北京:中国电力出版社,1995.  
YANG Guan-cheng. Electric Power System Automechanism Theory[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.

收稿日期:2007-09-26; 修回日期:2007-10-01

作者简介:

左涛(1982-),男,硕士研究生,主要研究方向为电能质量监测装置和 FFT 算法; E-mail:zt84622031@163.com

唐巍(1971-),女,博士,教授,研究方向为电力系统稳定分析与控制,人工智能、最优化技术在电力系统中的应用。

(上接第 25 页 continued from page 25)

测试结束后得到比率制动系数、启动电流、速断电流和动作时间等结果,同时将试验结果记录在试验报告中,完成保护试验。

## 6 结束语

本文介绍了一种光纤数字化继电保护测试仪,它采用了 ARM 嵌入式微处理器,将现代光纤通讯技术与微机继电保护测试仪相结合,大大地提高了输出数据的实时性、抗干扰性,具有更加广泛的适应性,可以满足各种数字化保护装置的测试工作。较之传统的模拟量输出的保护测试仪,本套装置结构更加简单,性能更加可靠。测试结果表明,这种测试仪能满足保护的试验要求。

## 参考文献

- [1] IEC61850-9-1, Specific Communication Service Mapping (SCSM) Sampled Values Over Serial Unidirectional Multidrop Point to Point Link,2003[S].
- [2] 韩笑,赵景峰,邢素娟.电网微机保护测试技术[M].北京:中国水利水电出版社,2005.

收稿日期:2007-10-24; 修回日期:2007-11-23

作者简介:

冯硕(1983-),男,硕士研究生,研究方向为微机继电保护测试技术; E-mail: sige6688@163.com

黄梅(1959-),女,教授,硕士生导师,研究方向为电力系统建模仿真及控制、继电保护和风力发电系统建模及接入系统分析;

李晓朋(1979-),女,本科,从事继电保护产品的研发测试工作。