

基于 TMS320F2812 的谐波检测系统的设计

郭爱英

(山西大学电子信息工程系 太原 030013)

摘要: 如今电网谐波污染日益严重,精确实时地检测谐波能为谐波控制提供实用的参考依据,具有重要意义。TMS320F2812 DSP 是一款集强大的数据处理能力和较强控制功能于一体的芯片,以 F2812 为核心,充分利用芯片内部资源,设计了电力谐波检测系统。该系统采用基于捕获单元 CAP 的软件实现同步采样,并且对 F2812 中的模数转换 ADC 模块进行了软硬件改进,文中给出了关键的硬件设计和软件代码。测试结果表明,该设计在较简易的硬件系统上可以实时精确地检测出 50 Hz 输入信号所含的谐波幅值和相位,并进行同步的显示和控制。

关键词: 谐波检测;同步采样;DSP;ADC

中图分类号: TM933.13 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4010

Design on the power harmonic detection system based on TMS320F2812 DSP

Guo Aiying

(Electronic Information Engineering Department, Shanxi University, Taiyuan 030013, China)

Abstract: In recent years the power harmonic pollution is increasingly serious, precise and real-time harmonic detection can provide a important reference for the harmonic control. TMS320F2812 DSP is a chip with powerful data processing capability and control function. In this paper, using the DSP chip as the core controller and making full use of the chip resources, a power harmonic detection system with high precision is designed. The ADC calibration based on hardware&software aspects and synchronized sampling based on software phase-locked of Capture unit(CAP) improve the precision of the system. Besides, This paper presents the key hardware circuits and software codes. The experimental results show that this system can realizes real-time accurate detection, as well as synchronized display and control, to the harmonic amplitude and phase.

Keywords: harmonic measurement; synchronized sampling; DSP; AD

1 引言

如今,大量电力电子装置的迅速普及使得电网的谐波污染日益严重,所以对电力参数进行准确、快速、实时的检测,以便掌控供电电路及设备的运行状态,对及时发现和解决隐患,具有重要意义。

电力谐波检测已引起广泛关注。谐波检测的主要方法有^[1]:快速傅里叶变换法及改进算法^[2]、小波分析法^[3-4]神经网络法和粒子群算法^[5]。文献[6]提出了基于提升小波变换和变步长相结合的自适应谐波检测算法;文献[7]提出一种将 FFT 频谱区间连续细化算法与改进的蚁群优化相结合的混合算法。

TMS320F2812 是一款集控制和强大数据处理能力为一体的高性能 DSP 芯片,频率高达 150 MHz,不仅具有丰富的片内外设资源^[8],而且支持反序间接寻址等特殊指令,

1 024 点 FFT 的时间已小于 1 μ s,保证了 FFT 算法的实时实现。本文以 TMS320F2812 为核心电路,基于 F2812 内集成的捕获单元 CAP 和改进的 ADC 等资源设计了电力谐波检测系统。

2 TMS320F2812 介绍

TMS320F2812 整合了 DSP 及微控制器的最佳特性,内部集成了丰富的片内外设资源,大大降低了硬件电路的设计难度。本文设计中所用到的片内外设资源包括事件管理器 EV、模数转换模块 ADC。F2812 中有 2 个 EV(EVA 和 EVB),EVB 和 EVA 具有完全相同的配置和功能。EVA 中包含 2 个 16 位的通用定时器(T1 和 T2)和 3 个捕获单元(CAP1、CAP2、CAP3)。定时器 T1(和 T2)的阴影寄存器允许用户在任意时刻改写周期寄存器值,从而更新计数周期。T1 的周期中断通过配置可以产生启动 ADC 转换的

信号(ADSOC)。每个 CAP 能捕获输入波形的边沿,并记录边沿之间的时间,故 CAP 可用于测量数字信号的周期。F2812 内部的 ADC 模块是一个 12 位的模数转换器,有 2×8 个采样通道,采样频率最高达 12.5 Msps。此外,F2812 集成了丰富的接口(SCI、SPI、CAN、McBSP),非常便于控制和人机交互。

此外,TMS320F2812 具有较强的数据处理能力,具有特别适合数字信号处理算法的硬件支持和寻址方式。F2812 的硬件结构和高速易配置的三级时钟体系不仅保证了算法的实时性,而且提供了良好的易扩性。

CCS3.3 是一种针对 TMS320 系列 DSP 的集成开发环境,支持 C 语言中直接嵌入汇编语言的程序开发界面,提供环境配置、源文件编辑、程序调试、跟踪和分析等工具。

3 硬件设计

硬件电路系统适用于三相电的谐波检测,有 3 路电压和 3 路电流检测通道。首先,采用电压和电流互感器进行降压降流,利用信号隔离的调理电路^[1,9]滤除 50 次谐波以上的高频干扰信号。待测信号转换成 $0 \sim 3$ V 的电压信号后,一路送入 DSP 的 ADC 模块,另一路经过零检测电路变成方波信号送入 CAP 捕获电路。然后,使用 TMS320F2812 内部集成的 12 位 ADC、CPU 定时器、EV 定时器 T3 电路和 CAP 电路实现信号的同步采集和模数转换,采样处理后进行 FFT 实现信号时域到频域的转换。最后,计算并在 LCD 上实时显示电力信号参数,所测数据可通过键盘做简单控制。

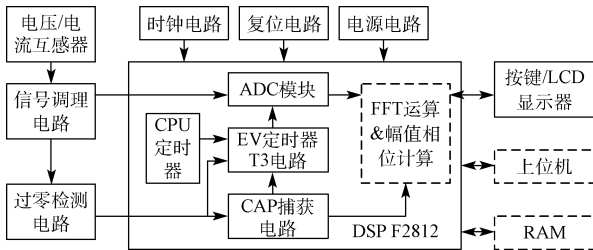


图 1 硬件设计框图

3.1 基于捕获单元 CAP 的同步采样

三相电路中 50 Hz 的基波频率,在实际中随着电网负荷总是在 50 Hz 左右变化,固定的采样频率会造成一定程度的频谱泄漏,从而影响测量误差^[10]。为保证信号的同步采样,文献^[1,9,11]中均采用硬件锁相倍频电路的方式,产生采样脉冲,触发 ADC 进行同步采样。本文为实现采样间隔随电网频率的变动而实时调整,采用 CAP 和 ADC 相结合的软件方式,保证信号的同步采样。

默认情况下,本系统设定每 30 s 刷新采样一次,具体过程为:由外加过零检测电路^[9]将待测信号整成方波信号送至 CAP 引脚,CPU 定时器定时 29.9 s(电力参数在 0.08~0.16 s 之间可近似为恒定值)时,使用 CAP 捕获电

路测出待测信号的实时周期 T ,计算出新采样间隔 T_s ,调整 EV 中 T3 的周期寄存器 T3PR,从而得到与当前信号相匹配的采样间隔 T_s 。同步过程:CPU 定时器定时 30 s 且方波上升沿到达时,启动 T3 计时采样间隔 T_s ,计满溢出后产生 ADSOC,触发 ADC 开始采样。

CAP 测得的信号周期不仅可以实时更新采样间隔,完成跟踪采样,而且可以提供 FFT 变换后谐波成分的计算依据。

3.2 改进的 ADC 模块

尽管 F2812 具有 12 位的 ADC 模块,但在实际使用过程中,采样值和实际值之间的相对误差有时可达 15%,严重影响谐波参数的测量精度。本文通过硬件电路和软件算法相配合的方法,有效提高 ADC 的采样精度。

F2812 中 ADC 转换精度较差的主要原因是存在增益误差和偏移误差,对这两种误差补偿的具体方法为:利用 ADC 的两路采样通道求得 ADC 存在的增益误差和偏移误差,并依此校正其余 A/D 采样通道。本文选用 CJ431 电压基准芯片产生两路基准电压,并选择 ADC0 和 ADC8 两通道为校正通道,具体电路如图 2。

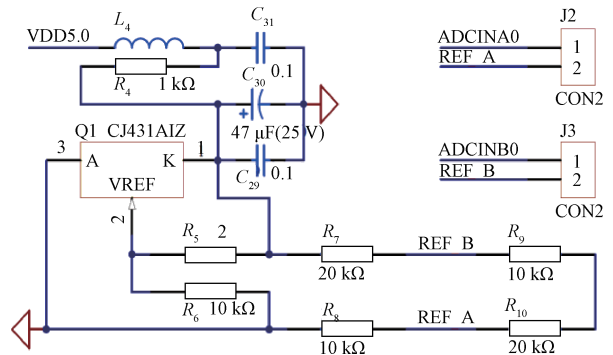


图 2 ADC 模块硬件改进电路

4 软件设计

软件设计采取模块化的实现方法,便于各个功能模块的程序设计、调试和维护。系统软件设计具体包括: DSP 系统时钟初始化、GPIO 和外设初始化、中断控制、ADC 采样改进算法、FFT 算法、按键控制和 LCD 显示等。

4.1 改进的 ADC 算法

基于 3.2 节中 ADC 误差分析和硬件改进基础,ADC 软件改进算法的具体过程为:每个通道采样 N 次,对 N 次采样结果进行排序,采用中值滤波算法得到采样结果,等待做校正处理。然后将 ADCINA0 和 ADCINB0 的结果进行计算,求出此次采样过程中的增益和偏移。最后校正处理后的结果即为本次采样各个通道的输入电压。文中 N 取 8,算法流程如图 4 所示。

图 4 中, $CalGain$ 和 $CalOffset$ 为用于校正的增益和偏移。 X_1 和 X_2 为通道 ADCINA0 和通道 ADCINB0 中输

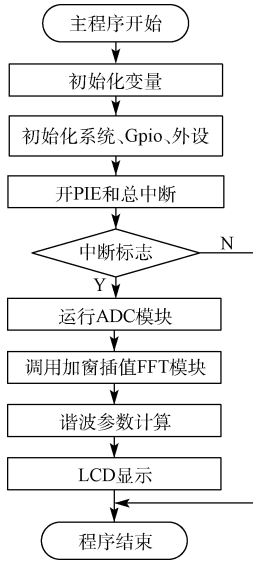


图 3 软件设计流程

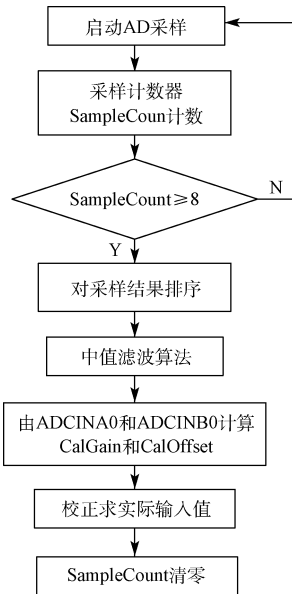


图 4 ADC 改进算法流程

的基准电压, Y_1 和 Y_2 是与 X_1 和 X_2 相应得到的采样值。

$$CalGain = \frac{1}{ma} = \frac{X_2 - X_1}{Y_2 - Y_1} \quad (1)$$

$$CalOffset = \frac{b}{ma} = \frac{X_1 \times Y_2 - X_2 \times Y_1}{Y_2 - Y_1} \quad (2)$$

以 ADCINB0 为例,校正算法关键代码如下:

```

interrupt void ADCINT_ISR(void)
{ SampleCount++; //采样计数器计数 adc[0]=
((float)AdcRegs.RESULT0)×3.0/
65520.0+adclo; //读取 ADCINA0 采样结果
adcresulta0[SampleCount-1]=adc[0];
.....
  
```

```

if(SampleCount==8) //采样 8 次滤波处理
{
.....
sequence(adcresulta0,8);
// ...对 8 次采样数据排序
for(i=2;i<6;i++) //.....中值滤波法
{ Output0=Output0+adcresulta0[i]; } .....
Output0=Output0/4;
//.....计算 4 个采样数据平均值
CalGain = (Input8-Input0)/(Output8-Output0);
CalOffset = (Input8×Output0-Input0×Output8)/
(Output8-Output0);
Input1=Output1×CalGain-CalOffset;
//通过采样数据来计算实际的输入
..... } .....
  
```

4.2 基于捕获单元的信号周期测量

由 FFT 运算后的结果,可计算分析出电力信号的谐波成分,文献[12]介绍了 FFT/apFFT 相位差频谱校正算法,实现了谐波成分的较精确计算。本文中则根据捕获单元 CAP 实时获取的当前电力信号的基波频率,较简易精确地估算出谐波分量。

捕获单元的实现过程如图 5。图中 1 除进行系统时钟和看门狗设置外,还应使能相应外设的时钟,关键代码为: SysCtrlRegs.PCLKCR.bit.EVAENCLK=1;

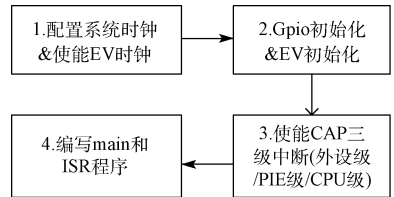


图 5 CAP 软件实现过程

图中 2 的 Gpio 初始化主要设置捕获引脚为功能引脚; EV 初始化主要对 CAPCONx、CAPFIFOx 和定时器 Tx 进行设置。关键代码:

```

GpioMuxRegs.GPAMUX.bit.CAP3QI1_GPIOA10=1;
EvaRegs.CAPCON.all=0x1408;
//使能 CAP3,选用 T1,检测上升沿
EvaRegs.CAPFIFO.all=0x0000;
EvaRegs.EVAIMRC.bit.CAP3INT=1;
EvaRegs.T1CON.bit.TMODE=2;
EvaRegs.T1CON.bit.TPS=6;
//T1CLK=HSPCLK/64=1.1719M
EvaRegs.T1CON.bit.TCLKS10=0;
EvaRegs.T1PR=0xFFFF;
EvaRegs.T1CMPR=0x0;
EvaRegs.T1CNT=0;
  
```

图中 3 使能 CAP 的三级中断,代码为:

```
PieCtrl.PIEIER3.bit.INTx7 = 1;
IER |= M_INT3;           //开 CPU 中断
EINT;                    //使能全局中断
```

图中 4 中断服务子程序主要实现方波周期的计算,关键代码为:

```
EvaRegs.EVAIFRC.bit.CAP3INT = 1;
//清除 CAP3 中断标志位
capfbot1 = capfifol;
capfifol = EvaRegs.CAP3FIFO;
if (capfifol > capfbot1)
period1 = capfifol - capfbot1;
// period = period1 / 1.1719M
else
period1 = capfifol + 0xFFFF - capfbot1;
PieCtrl.PIEACK.bit.ACK3 = 1;
//响应同组其他中断
```

4.3 基于加窗插值的 FFT & 显示 & 按键

由非同步采样导致的频谱泄漏和栅栏现象,一般的 FFT 算法检测出谐波的幅值相角和频率等存在较大误差。针对这个问题,文献[13]提出了一种基于空间谱技术与连续小波变换相结合的间谐波检测算法提高检测精度,本文则采用加窗插值^[14-15]的 FFT 算法来减小误差。文中直接使用 CCS FFT Library 函数实现 FFT,FFT 库函数全部由汇编语言编写,充分发挥 DSP 的硬件和寻址特性,保证算法的实时性。

按键操作代码中,首先根据硬件电路对 IIC 总线的信号线 SCL 和 SDA 进行定义;然后根据 IIC 数据传输时序图、起始和停止时序等编写相应的代码模块。LCD 显示的关键是根据数据传输时序编写操作时序模块(如写指令/数据的程序模块),并根据需要对 LCD 的指令代码进行设置。

5 实验结果

由于实验条件所限,无法提供一个已知的准确谐波源,文中先分步调试好每个模块,然后利用 DSP 模拟产生信号波作为谐波源,测试整个系统的功能。

ADC 改进算法验证:由万用表测量得知,参考电压 1 和 2 的值分别为 0.420 V 和 1.653 V,给 ADCINA1 通道加电压为 2.062 V。设置断点,在 watchwindows 窗口观察变量值,得到如表 1 的采样结果。经多组数据验证,改进后 ADC 的相对误差不超过 0.3%,精度平均为 0.2%。

CAP 捕获功能验证:利用 EV 产生精确的 50 Hz 方波,用 CAP3 捕获该 50 Hz 方波的结果如图 6 和表 2,表中实测周期等于 period1/1.1719M,结果表明 CAP 可以精确捕获方波信号的频率,相对误差仅为 0.005%。

表 1 ADC 改进算法的测试数据

采样次数	数据 1	数据 2	数据 3
1	2.109 89	2.110 623	2.115 018
2	2.104 762	2.115 018	2.106 96
3	2.108 425	2.112 088	2.108 425
4	2.111 355	2.117 216	2.110 623
5	2.112 82	2.105 494	2.112 088
6	2.113 553	2.109 157	2.115 018
7	2.108 425	2.114 286	2.112 088
8	2.115 018	2.108 425	2.115 751
校正结果	2.059 88	2.060 23	2.058 155
相对误差(%)	0.10	0.08	0.19

Name	Value
capfifol	51655
capfbot1	28217

Name	Value
capfifol	23894
capfbot1	456

图 6 CAP 捕获方波周期的实验数据

表 2 CAP 捕获方波周期的实验数据表

capfifol	capfbot1	period1	实测周期/ ms	实测频率/ Hz	相对误 差(%)
46 876	23 438	23 438	20.000	50.000 0	0
4 778	46 876	23 437	19.999	50.002 5	0.005
28 217	4 778	23 439	20.001	49.997 5	0.005
51 655	28 217	23 438	20.000	50.000 0	0
14 337	56 435	23 437	19.999	50.002 5	0.005
23 894	456	23 438	20.000	50.000 0	0

LCD 验证:利用软件函数库产生 $v(t) = 3\sin(\omega_0 t + 0.1) + \sin(2\omega_0 t + 0.2) + 0.9\sin(3\omega_0 t + 0.3)$,通过采样、FFT 变换及相位幅值计算后,最终 LCD 显示结果如图 7。

基	幅值	相位
一	2.993	0.108
二	0.981	0.206
三	0.981	0.324

图 7 LCD 显示幅值和相位

图 7 是在完全同步采样、整周期截断的理想情况下得到的 LCD 显示结果,所以精度高,实际系统的精度受 ADC 模块、CAP 模块、FFT 变换等每级处理模块的影响。电力

系统多数情况只关心谐波的幅值,所以在考虑提高幅值精度时,相位误差相对偏大。

5 总 结

本文以 TMS320F2812 为核心,有效利用 DSP 内部资源设计了电力谐波检测系统,节省了系统开发成本,减小了外界干扰。采用基于 CAP 的软同步采样和谐波计算,以及改进的 ADC 和加窗插值的 FFT 算法,保证了电力谐波的准确测量。同时为了实现谐波测量的实时性,FFT 算法使用汇编语言编写,充分利用了 DSP 为 FFT 算法专门的反序倒相结构,节省了运算时间。实验结果表明,本文设计的系统能实时精确地进行电力信号谐波检测。

参考文献

- [1] 许晓禹. 基于 DSP 和 CPLD 的电力谐波检测系统的研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2013.
- [2] 牛胜锁,梁志瑞,张建华,等. 基于三谱线插值 FFT 的电力谐波分析算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16):130-136.
- [3] 李红斌. 一种基于离散小波变换的谐波分析方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3):252-259.
- [4] 纪萍,陈玲. 改进 FFT 和小波变换在电力系统谐波检测中的应用研究[J]. 长江大学学报, 2014, 10(28): 57-61.
- [5] 吕干云,方奇品,蔡秀珊. 一种基于粒子群优化算法的间谐波分析方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 156-161.
- [6] 高红霞,刘晓乐. 电力谐波检测改进算法在 DSP 上的

- 应用与实现[J]. 电源技术与应用, 2015(5):125-128.
- [7] 王志川,刘丹莉,周群,等. 基于改进蚁群优化算法的电力谐波和间谐波的检测与分析[J]. 四川电力技术, 2014, 12(37):49-53.
- [8] 伦涛,庞丽娟,袁野. 一种 TMS320F2812 片内 FLASH 串行加载方法[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(6):57-60.
- [9] 王迪,汪志强. 基于 DSP 的电网谐波检测系统的设计与实现[J]. 电子世界, 2014:11-12.
- [10] 朱高中,张莹. 基于小波变换和 FFT 的电能质量检测的研究[J]. 电子质量, 2009(1):3-5.
- [11] 张旭. 基于 DSP 的电力系统谐波测量装置设计[J]. 科技与创新, 2015(6):116-117.
- [12] 谭春花. 基于 DSP 的一种频谱校正算法的实现[J]. 电子器件, 2014, 6(37):570-573.
- [13] 薛凌云,黄伟,陈超. 基于空间谱估计技术的间谐波小波检测算法[J]. 电子测量技术, 2014, 37(10):46-49.
- [14] 罗冠姗,卢惠辉,陈元电,等. 一种基于小波包变换的电力谐波检测方法[J]. 电力建设, 2015, 3(36):71-77.
- [15] 刘美容. FFT 算法的 DSP 实现[J]. 微电子学与计算机, 2015, 32(1):76-79.

作者简介

郭爱英,电子科技大学通信与信息系统工程硕士,现工作于山西大学,助教,主要研究方向为 DSP 应用设计、光纤通信技术。

E-mail: guoay@sxu.edu.cn