

## 基于 TMS320F28023 的 AFCI 电弧检测方案

TERRY DENG

South China FAE Team

### 摘要

这篇文档描述一个满足 UL1699 标准的 AFCI 电弧检测系统。该系统硬件包括主动型滤波电路，可以在充满噪声的真实环境中获得理想的检测信号；并基于 F28023 的 DSP 处理器运行 FFT 等复杂的信号处理核心软件算法，准确可靠的识别判断电弧异常状态。

这篇文档包括方案的性能介绍，并分析其硬件设计，软件设计，以及核心算法理论。

### 名词解释：

**AFCI:** (Arc-Fault Circuit-Interrupter)，即电弧故障分断器。它是通过识别电路中的电弧故障特征信号，在电弧故障发展成为火灾或电路出现短路之前断开电源电路的一种保护装置。

**FFT:** (Fast Fourier Transformation)，即为快速傅氏变换，是离散傅氏变换 (DFT) 的快速算法，它是根据离散傅氏变换的奇、偶、虚、实等特性，对离散傅立叶变换的算法进行改进获得的。

## Contents

1	简介	4
2	系统规格	5
3	AFCI 检测原理	6
3.1	电弧信号分析	6
3.2	ADC 信号采集	7
4	硬件设计	8
4.1	基本系统框图描述	8
4.2	模拟前端	9
4.3	数字信号处理器	10
5	软件设计	11
5.1	软件流程图	11
5.2	信号采集的实现	12
5.3	信号处理的实现	13
6	FFT 算法的理论说明	14
6.1	时域和频域	14
6.2	加窗算法	15
7	测试结果	16
8	参考文献	17

## Figures

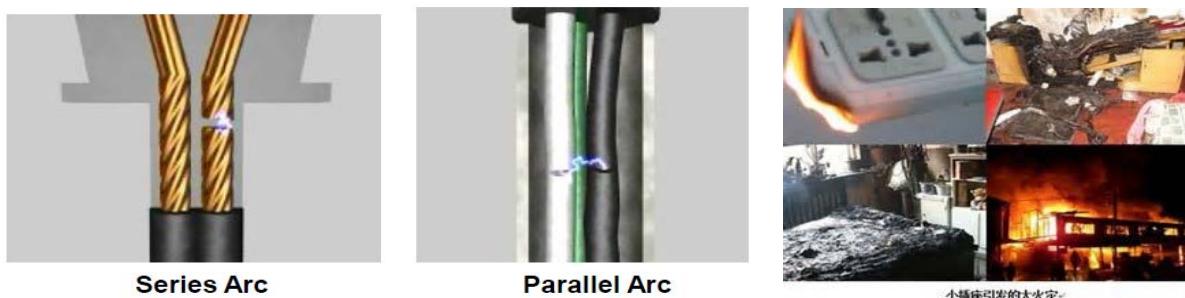
Figure 1.	电弧类型和危害 .....	4
Figure 2.	电器系统中的电弧 .....	4
Figure 3.	电弧时域波形 .....	6
Figure 4.	电弧频谱波形 .....	6
Figure 5.	电流检测范围指标 .....	7
Figure 6.	过采样的效果 .....	7
Figure 7.	AFCI 的系统框图 .....	8
Figure 8.	电流测量电路 .....	9
Figure 9.	低通滤波电路 .....	9
Figure 10.	高通滤波电路 .....	10
Figure 11.	F28023 引脚使用说明 .....	10
Figure 12.	软件流程框图 .....	11
Figure 13.	正弦波时域波形 .....	14
Figure 14.	正弦波频谱波形 .....	14
Figure 15.	非周期信号的波形 .....	15
Figure 16.	Hanning 窗信号的波形 .....	15
Figure 17.	测试平台 .....	16
Figure 18.	测试波形 .....	16
Figure 19.	测试时间 .....	17

## 1 简介

安全电弧检测: UL1699

随着电器在家庭中应用的越来越多, 安全措施也被要求的越来越多, 以避免电相关的灾难性事件, 比如有害的电击或引起的火灾。这些事件是由电弧导致的, 当线路或电器接口出现故障时, 高压线路就可能会产生电弧。

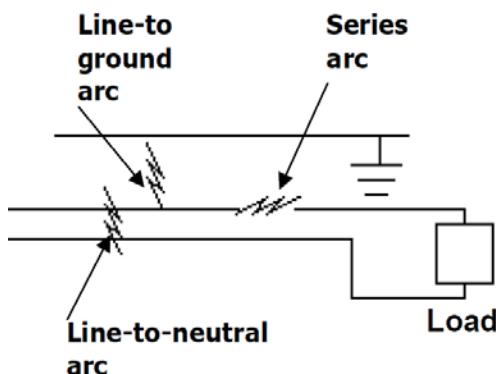
如下图所示, 既可能发生单根线自身的串弧, 也可能发生在火线与零线之间并弧。串弧由于串联负载的存在, 幅值可能小于线路额定电流范围, 但这种电弧依然会损害事物甚至生命。而并弧最为危险, 因为它是在两条线路中间发生的短路现象, 会引起很大的异常电流, 造成严重的灾害。



**Figure 1.** 电弧类型和危害

这些电弧可使电器带电, 就可能会让接触的任何人触电。这些电弧还可能导致火灾, 从而导致电器设备损坏, 甚至大范围的财产损失。因此制定了 **UL1699** 标准, 针对电弧故障电路的保护标准, 是国家电器规范 (NEC) 第 690 章的一个子集。

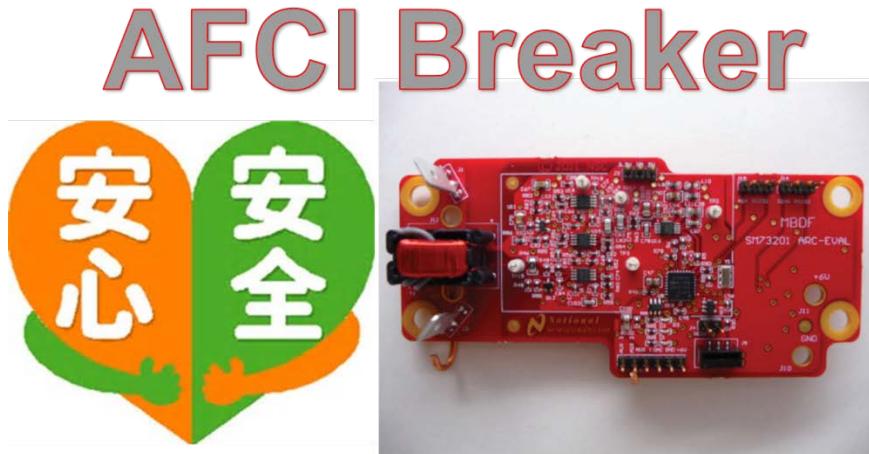
但是电器正常工作有时也会产生正常电弧信号, 并往往与线路故障引起的异常电弧信号非常相似, 比如空调压缩机, 吸尘器, 电钻, 甚至 LED 灯在启动时候, 就可能产生与异常电弧相似的电流尖峰。比如下图在单根电线中的串弧, 由于负载的存在带有一定的阻性, 电弧引起的异常电流特征往往不会明显大于负载工作的电流幅度。而 **UL1699** 标准要求异常电弧检测结果既准确和又响应快, 所以实现起来具有较大的挑战。



**Figure 2.** 电器系统中的电弧

## 2 系统规格

本文描述了一种电弧检测的方案，其产品功能和性能实现如下：



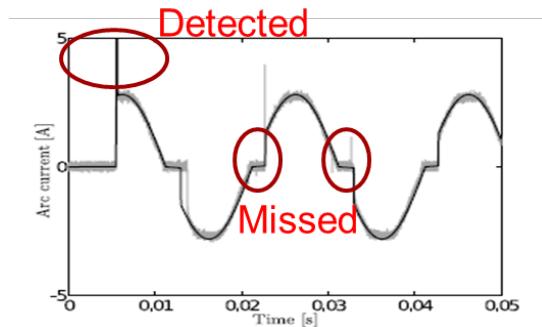
- 电流传感器器 1,000V 隔离等级
- 输入电压范围 85V ~ 265V
- 输入电源频率 50Hz/60Hz
- 最大检测电弧电流幅值 30A
- 最小检测漏电流幅值 5mA
- 工作温度范围-40°C to +85°C
- 整体运行功耗 < 400mW
- LED 故障检测标志
- UART 通讯接口

### 3 AFCI 检测原理

#### 3.1 电弧信号分析

电弧发生的时候主要是引起电流的异常，因此 AFCI 检测是通过对电缆线电流的采样分析而判断的。

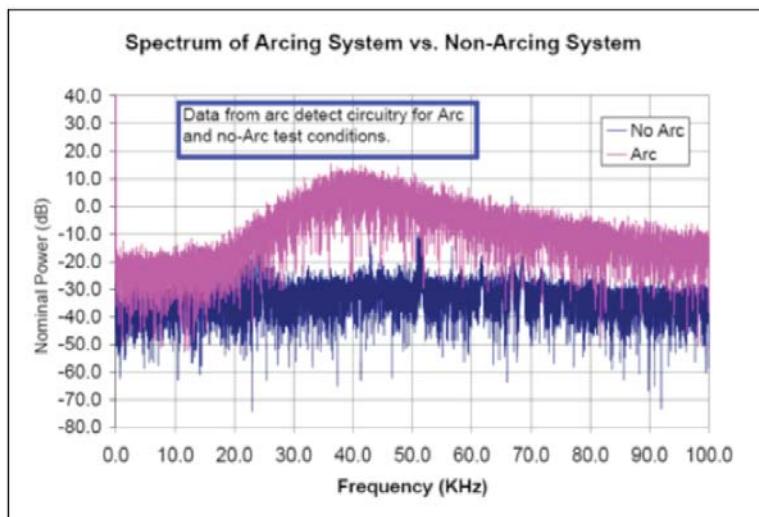
有时候电弧发生的时候会造成瞬态的高幅值尖峰电流，但也有很多时候（比如电线间的断开情况）电流只会断开一段时间而这时电流峰值并不大。如下图，所以如果只判断电流幅度的变化就可能不够准确。



**Figure 3.** 电弧时域波形

而 UL1699 要求是电弧检测后必须系统跳闸手动重置，这使得误报电弧检测的后果是系统将会一直断电，直到技术人员过来现场重置系统。这对于安装了电弧检测的设备，尤其是遥远位置的设备，提出了一个很大的难度：未能检测到电弧带来的危害后果可能很严重（例如身体伤害，设备损坏，灾难性火灾），而错误的电弧检测后果也很严重（即不必要但却付出代价的重启服务）。

为了非常可靠的检测电弧，我们必须设计能够全面的监控分析电流信号的检测处理方法。一种方案是从另一个角度—频谱特性来考虑电弧在电线中产生的电流，因为电流的变化在频谱角度具有高斯分布。如下图的电流频谱波形，红色是有发生电弧的情况，很清晰对比蓝色没有电弧的情况。



**Figure 4.** 电弧频谱波形

在典型的电器系统中，背景无序噪声一般在 200Khz 以上频率才变化明显。而电器系统中的逆变器等开关型控制器电路，正常工作的频谱则通常低于 50Khz。更不用说交流电源信号本身是在更低的 50/60hz 的频率。因此通过 FFT 算法把检测到的电缆线电流转换到频谱领域，然后分析在 30Khz 到 100Khz 之间的频带就可以很好的区分出电路系统正常工作和异常电弧的不同情况。

### 3.2 ADC 信号采集

为了精确可靠的检测电弧，需要使用快速并且高分辨率的 ADC 进行电流信号采集。如果分辨率不够，检测电路有可能无法准确区分电弧和非电弧事件。另外如下表 UL1699 要求检测电流最大范围 75A 的情况，也要满足漏电流 5mA 的精度，所以 ADC 的分辨率至少需要大于  $75000\text{mA}/15\text{mA} = 15000$ ，所以需要 14 位的 ADC 才能满足要求。

	Line to Neutral	Line to GND	Neutral to GND
<b>Branch/Feeder AFCI</b>	75 A	5 A	5 A
<b>CAFCI</b>	75 A	5 A	5 A
<b>Dual Function (AFCI + GFCI)</b>	75 A	5 mA	5 mA + Grounded Neutral
<b>GFCI</b>	No	5 mA	5 mA + Grounded Neutral

**Figure 5.** 电流检测范围指标

然而 F28023 内部 ADC 只有 12 位分辨率，因此对同一个电流信号采用过采样算法。如下的计算公式显示，每多采样一倍次数，分辨率可以等价增加 0.5 位，同时信噪比可以增强 3dB。

$$\text{SNR}_{\text{OSR}} = \text{SNR}_{\text{NYQ}} + 10 \times \log_{10}(k)$$

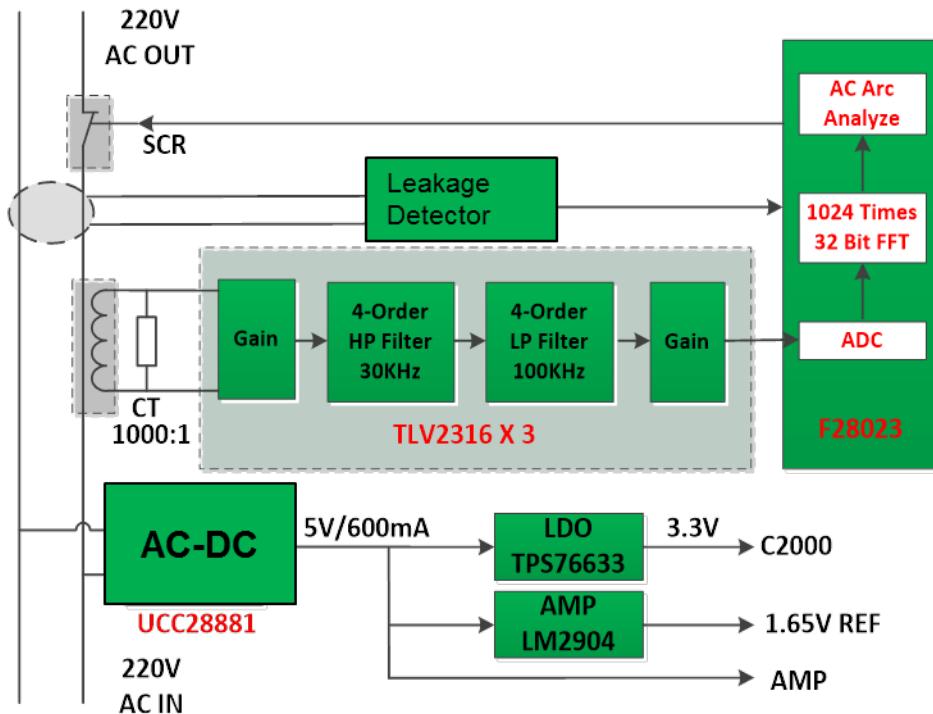
Oversampling Factor (K)	SNR Improvement (dB)	Extra Bits of Resolution
2	3	0.5
4	6	1
8	9	1.5
16	12	2
...	...	...

**Figure 6.** 过采样的效果

UL1996 对 AFCI 的采样指标只需要 200KHz，而 F28023 的 ADC 采样速度是 4Mhz，所以在满足指标的同样时间段内，F28023 可以允许连续采样  $4000\text{Khz} / 200\text{Khz} = 20$  次，这样能够增加 2 位分辨率满足 14 位的要求。

## 4 硬件设计

### 4.1 基本系统框图描述



**Figure 7. AFCI 的系统框图**

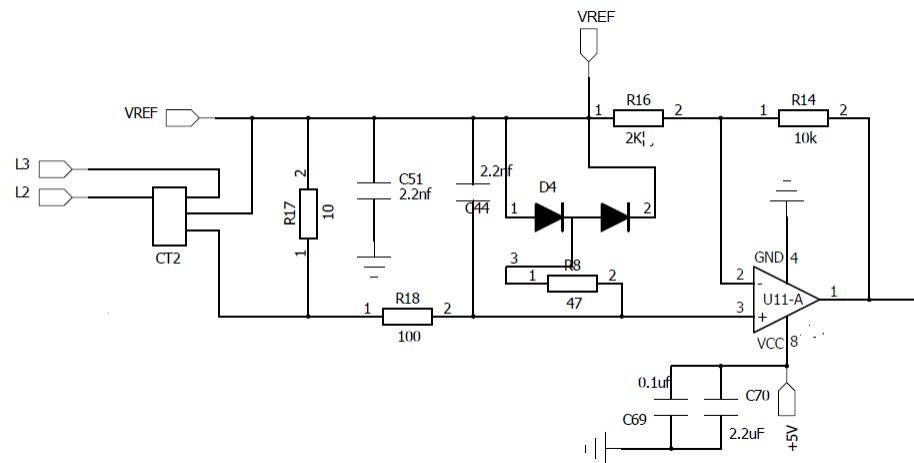
系统设计整体架构采用一种创新的方式，可以根据电路系统实际需要，灵活的调节信号处理范围，满足特定的带宽要求，进行频谱的分析。

- 模拟前端：利用广带宽的电流传感器接收电流信号，在采样前进行适当的信号滤波和调理。这可以很灵活的调节所需的频率范围，和优化频带增益。
- 数字信号处理器：模拟信号被数字化来捕捉波形的各种特性，这样可以很灵活的在不用改变硬件的情况下调整处理参数和使用不同算法。

## 4.2 模拟前端

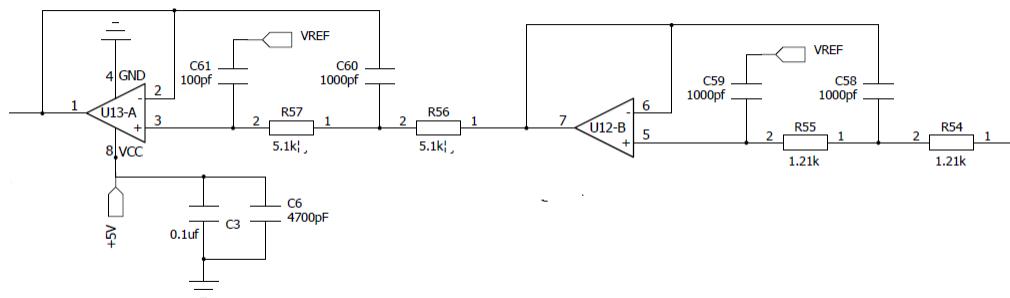
主要包括以下部分：

- 电流测量：探头使用隔离式 CT 器件，设计指标为测量单相交流电，频率 50Hz/ 60Hz ( $\pm 10\%$ )，线电流最大 100A，对地漏电流最小 5mA。



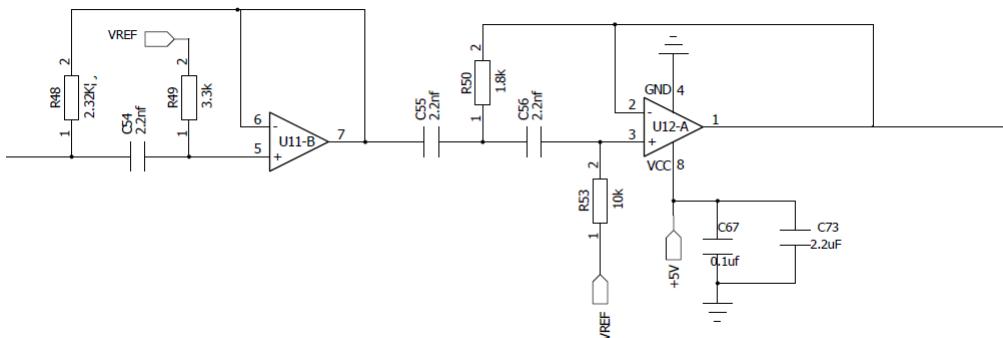
**Figure 8.** 电流测量电路

- 低通滤波 LPF：该滤波器用于消除高频分量进入 ADC 中。截止频率选择小于 ADC 采样速率的一半。比如 ADC 的采样在 200ksps，那么截止频率选择小于 100KHz。由于 LPF 的输入电压幅值是全范围摆幅，所以选择了单位增益的二阶滤波器配置。而所用的运算放大器则选择轨到轨的输入和输出电压范围，以及低增益带宽和低  $I_Q$  性能的 tlv2316。



**Figure 9.** 低通滤波电路

- **高通滤波 HPF:** 因为目标是捕捉电弧引起的高频信号，所以设计该滤波器用来消除低频分量。为了捕捉到很微弱的电弧信号，在 HPF 中也加入了额外的增益放大回路，用来提高高频分量的分辨率。而运算放大器还是可以用 tlv2316，或者选用 OPA836 因为有更充分的增益带宽，允许所有必须的高频分量都可以通过。



**Figure 10.** 高通滤波电路

### 4.3 数字信号处理器

F28023 是 Piccolo™ 系列家族中的一种控制器，管脚 48PIN 封装，提供基于 C28x™ 核的 32 位 60Mhz 强大运算能力，以及高度集成各种外设功能。

此芯片内部集成的稳压源允许单 3.3V 供电。而 12 位的 ADC 可以转换 0 到 3.3V 的全范围信号。同时连接 4 个 ADC 引脚到交流电缆的电流信号，方便启用过采样算法。而自带 10 位参考源的模拟比较器可以直接对外部设备进行开关控制。

下面表格是 AFCI 系统使用的引脚分配。

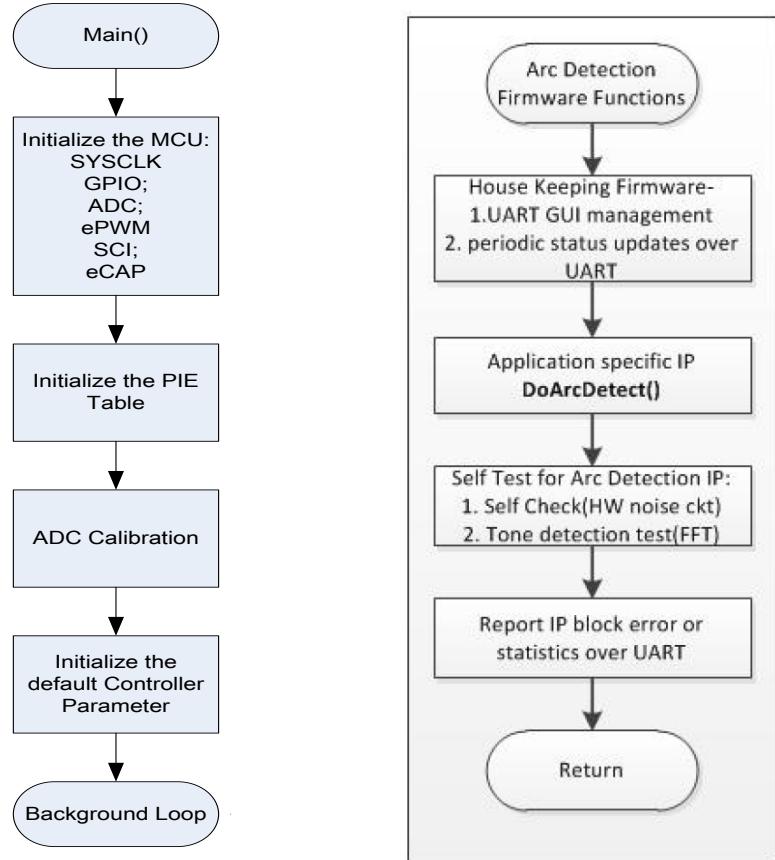
Pin Num.	Peripherals	Pin Name	Signal Name	Function
10	ADC	ADCINA0	I_in	交流电源电流信号
8		ADCINA1	I_in	交流电源电流信号
9		ADCINA2	I_in	交流电源电流信号
7		ADCINA3	I_in	交流电源电流信号
41	GPIO	GPIO6	LED	故障指示信号
29	GPIO	GPIO0	OVA	继电器控制信号
47	SCI	SCITXDA	TXD	串口发送信号
42		SCIRXDA	RXD	串口接收信号

**Figure 11.** F28023 引脚使用说明

## 5 软件设计

### 5.1 软件流程图

左边是整个系统的初始化流程图，主要是配置芯片的各个外设，并启动 ADC 进行连续不间断的电流采样。右边是主循环流程图，进行电流信号的处理，电弧的判断，以及通讯等系统功能。



**Figure 12.** 软件流程框图

## 5.2 信号采集的实现

如章节 3.2 和 4.3 的说明，需要对 ADC 设置过采样处理，并且用到 4 个 ADC 引脚进行电流采样。所以 ADC 设置为 4 个引脚同时采集电流，完成后进入中断对 4 个信号进行过采样处理，并累加采集次数。当 ADC 中断次数达到 1024 个结果则设置采样完成标志，以便进行 FFT 信号处理。

```
main()
{
    .....
    AdcRegs.INTSEL1N2.bit.INT1E      = 1; //Enabled ADCINT1
    AdcRegs.INTSEL1N2.bit.INT1CONT  = 1; //Enabled ADCINT1 Continuous mode
    AdcRegs.INTSEL1N2.bit.INT1SEL   = 3; //setup EOC3 to trigger ADCINT1 to fire
    AdcRegs.ADCSOC0CTL.bit.CHSEL   = 0; //set SOC0 channel select to ADCINA0
    AdcRegs.ADCSOC1CTL.bit.CHSEL   = 1; //set SOC1 channel select to ADCINA1
    AdcRegs.ADCSOC2CTL.bit.CHSEL   = 2; //set SOC2 channel select to ADCINA2
    AdcRegs.ADCSOC2CTL.bit.CHSEL   = 3; //set SOC3 channel select to ADCINA3
    AdcRegs.ADCSOCFRC1.all         = 0x0F; //Force start of conversion SOC0 ~ 3
    PieVectTable_ADCINT1 = &adc_isr;
    .....
}

__interrupt void adc_isr(void)
{
    ConversionCount++;
    real[ConversionCount] = (AdcResult.ADCRESULT0 + AdcResult.ADCRESULT1 +
                           AdcResult.ADCRESULT2 + AdcResult.ADCRESULT3) / 4;

    if(ConversionCount >= 1024)
    {
        ConversionCount = 0; ConversionDone = 1;
    }
}
```

```
 }  
.....  
}
```

### 5.3 信号处理的实现

采集到的电流信号，主要通过调用 TI 基于 DSP 提供的 FFT 函数来实现。其实现的代码如下：

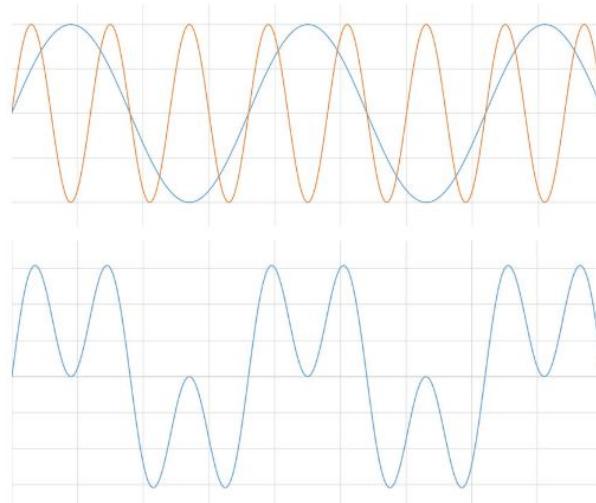
```
#include fft.h  
  
#define N 1024  
  
/* Data buffer alignment */  
  
long ipcbsrc[2*N]; //电流的 ADC 采集数据  
  
long ipcb[2*N];  
  
/* Header structure initialization */  
  
CFFT32 fft=CFFT32_32P_DEFAULTS;  
  
main()  
{  
    .....  
  
    // Generate sample waveforms:  
    for(i=0; i < (N*2); i=i+2)  
    {  
        ipcbsrc[i] = (long)real[i] //Q31  
    }  
    .....  
  
    /* Real part bit reversing */  
    CFFT32_brev(ipcbsrc, ipcb, N);  
    fft.ipcbptr=ipcb; /* FFT computation buffer */  
    fft.init(&fft); /* Twiddle factor pointer init */  
    fft.calc(&fft); /* Compute the FFT */  
}
```

## 6 FFT 算法的理论说明

### 6.1 时域和频域

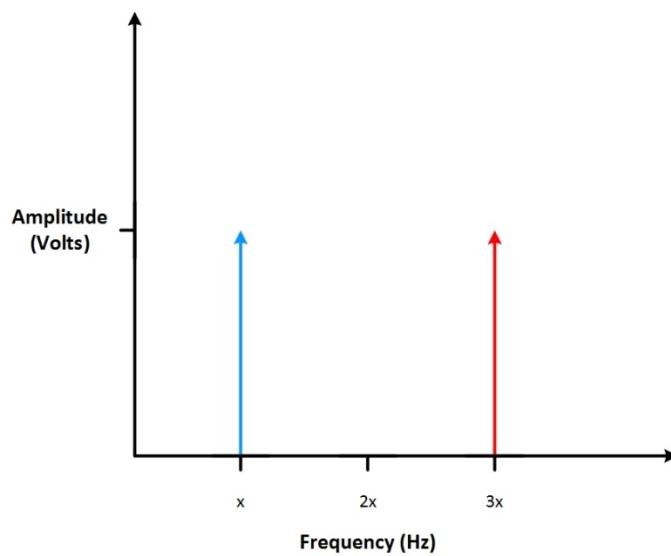
从根本上说，FFT 变换是将一个信号分解为不同幅值和频率的正弦波。

因为所有信号都是若干正弦波的和。例如，有两个正弦波，其中一个的频率是另一个的 3 倍。将两个正弦波相加，就得到了一个不同的信号。



**Figure 13.** 正弦波时域波形

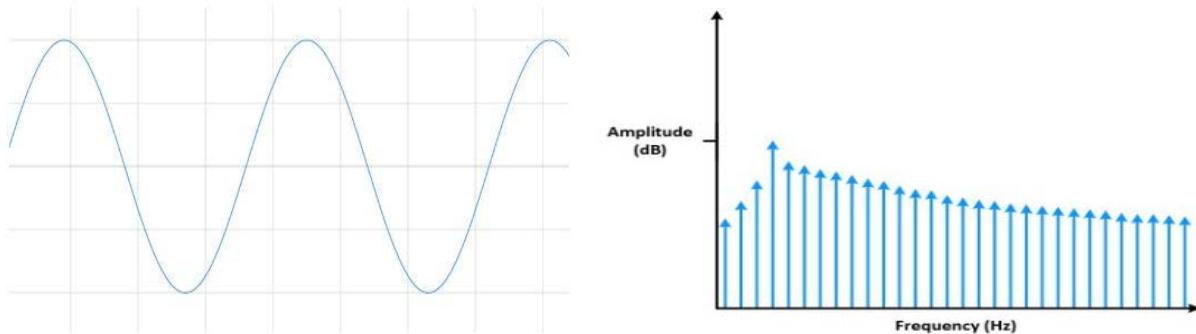
所以同理也可以将所有信号分解为若干正弦波的和，这样可查看和分析原信号中不同频率的幅值。FFT 是傅立叶变换的一种数字优化实现，计算量较少。查看上图 1 中的信号，经过 FFT 算法就会显示两条表示不同频率的竖线。



**Figure 14.** 正弦波频谱波形

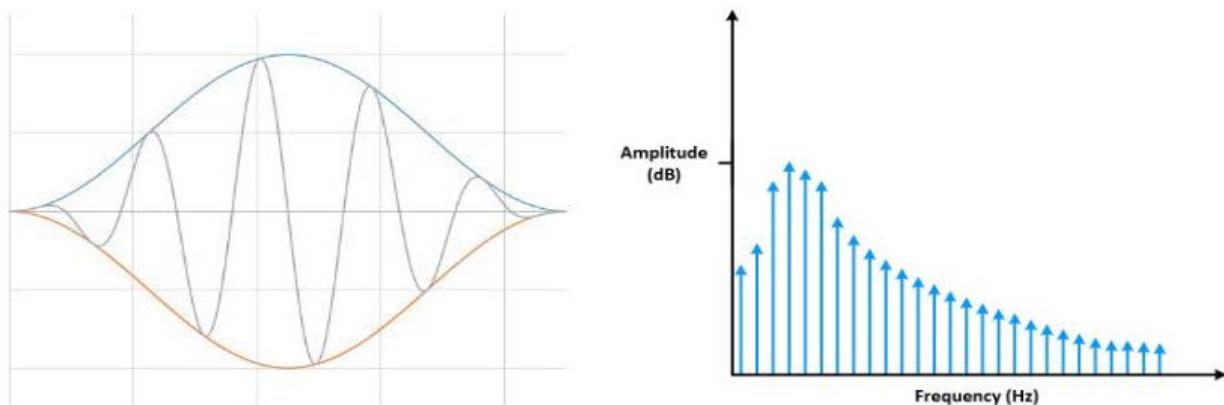
## 6.2 加窗算法

因为 **FFT** 算法认为波形是一组有限数据的集合，也就是必须是周期信号的整数倍。如下图所示，如果测量到的信号被从周期中间切断，这些不连续片段在 **FFT** 中显示为高频成分。这些高频成分其实并不存在于原信号中，会使得分析结果产生错误。



**Figure 15.** 非周期信号的波形

加窗算法尽可能减少在非整数个周期上进行 **FFT** 产生的误差。如下图所示，加窗包括将时间记录乘以有限长度的窗，窗的幅值逐渐变小，在边沿处为 0。加窗的结果是尽可能呈现出一个连续的波形，减少剧烈的变化。



**Figure 16.** Hanning 窗信号的波形

## 7 测试结果

### 7.1 测试平台搭建

使用的测试平台如下图，电源的两端接在两个相距很近但是没有接触的金属棒，当通电之后金属棒之间会产生电弧，调节电源的电流幅值和金属板之间的距离，就可以改变电弧的强度和时间满足 IEC1996 的要求。这个测试平台串联在系统电路中，则可以测试串弧；如果并联在系统电路中也可以测试并弧。

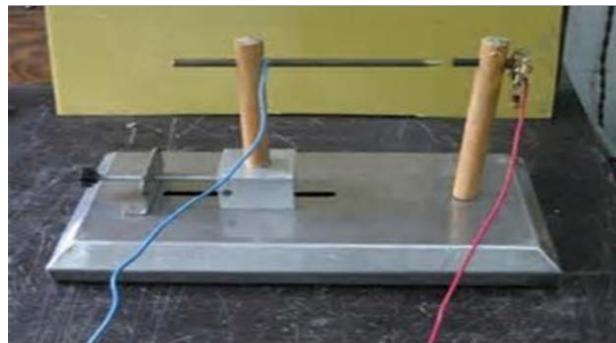


Figure 17. 测试平台

### 7.2 测试波形

测试平台模拟发生的电弧波形如下图，算法可以正确识别出电弧的存在。

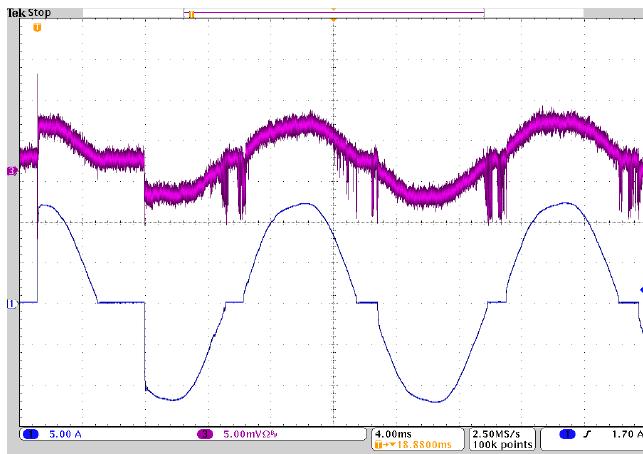


Figure 18. 测试波形

### 7.3 测试参数

软件算法各个功能的代码量和运行时间测试如下。

Function	Cycles	Time (ms)
Arc Detect (Total)	997375	16.6229
- Data Acquisition	435179	7.2529
- Time Domain Processing	98311	1.6385
- Frequency Domain Processing	233115	3.8852
- Data Analysis	230614	3.8435

Figure 19. 测试时间

### 7.4 测试结论

此方案可以快速准确的识别出异常电弧，其识别率和响应速度满足 UL1699 的要求。

## 8 参考文献

1. TMS320F2802x Datasheet (SPRS523I)
2. DSP Software Library User Guide (SPRUGL8C)
3. RD195 DC Arc Detection Evaluation Board (SNOA564F)
4. UL 1699 ISBN 0-7629-0401-1 Arc-Fault Circuit-Interrupters

## 有关 TI 设计信息和资源的重要通知

德州仪器 (TI) 公司提供的技术、应用或其他设计建议、服务或信息，包括但不限于与评估模块有关的参考设计和材料（总称“TI 资源”），旨在帮助设计人员开发整合了 TI 产品的应用；如果您（个人，或如果是代表贵公司，则为贵公司）以任何方式下载、访问或使用了任何特定的 TI 资源，即表示贵方同意仅为该等目标，按照本通知的条款进行使用。

TI 所提供的 TI 资源，并未扩大或以其他方式修改 TI 对 TI 产品的公开适用的质保及质保免责声明；也未导致 TI 承担任何额外的义务或责任。TI 有权对其 TI 资源进行纠正、增强、改进和其他修改。

您理解并同意，在设计应用时应自行实施独立的分析、评价和判断，且应全权负责并确保应用的安全性，以及您的应用（包括应用中使用的所有 TI 产品）应符合所有适用的法律法规及其他相关要求。你就您的应用声明，您具备制订和实施下列保障措施所需的一切必要专业知识，能够（1）预见故障的危险后果，（2）监视故障及其后果，以及（3）降低可能导致危险的故障几率并采取适当措施。您同意，在使用或分发包含 TI 产品的任何应用前，您将彻底测试该等应用和该等应用所用 TI 产品的功能。除特定 TI 资源的公开文档中明确列出的测试外，TI 未进行任何其他测试。

您只有在为开发包含该等 TI 资源所列 TI 产品的应用时，才被授权使用、复制和修改任何相关单项 TI 资源。但并未依据禁止反言原则或其他法理授予您任何 TI 知识产权的任何其他明示或默示的许可，也未授予您 TI 或第三方的任何技术或知识产权的许可，该等产权包括但不限于任何专利权、版权、屏蔽作品权或与使用 TI 产品或服务的任何整合、机器制作、流程相关的其他知识产权。涉及或参考了第三方产品或服务的信息不构成使用此类产品或服务的许可或与其相关的保证或认可。使用 TI 资源可能需要您向第三方获得对该等第三方专利或其他知识产权的许可。

TI 资源系“按原样”提供。TI 兹免除对 TI 资源及其使用作出所有其他明确或默认的保证或陈述，包括但不限于对准确性或完整性、产权保证、无屡发故障保证，以及适销性、适合特定用途和不侵犯任何第三方知识产权的任何默认保证。

TI 不负责任何申索，包括但不限于因组合产品所致或与之有关的申索，也不为您辩护或赔偿，即使该等产品组合已列于 TI 资源或其他地方。对因 TI 资源或其使用引起或与之有关的任何实际的、直接的、特殊的、附带的、间接的、惩罚性的、偶发的、从属或惩戒性损害赔偿，不管 TI 是否获悉可能会产生上述损害赔偿，TI 概不负责。

您同意向 TI 及其代表全额赔偿因您不遵守本通知条款和条件而引起的任何损害、费用、损失和/或责任。

本通知适用于 TI 资源。另有其他条款适用于某些类型的材料、TI 产品和服务的使用和采购。这些条款包括但不限于适用于 TI 的半导体产品 (<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>)、评估模块和样品 (<http://www.ti.com/sc/docs/samptersms.htm>) 的标准条款。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122  
Copyright © 2017 德州仪器半导体技术（上海）有限公司