

新型家用电弧故障断路器(AFCI)的开发

作者：罗雷，刘晖

摘要：

大家知道传统的断路器只对过流、短路和漏电起保护作用，我今天介绍的家用的电弧故障断路器（AFCI）是在传统的断路器的基础上又添加了个崭新的功能——对故障电弧起保护作用，以防范电弧引发的火灾。在美国，根据 CPSC(美国消费品安全委员会)1998 年的统计，每年由于配电线路老化引起电弧造成的火灾有超过 40000 起，造成直接经济损失 \$16.8 亿美元。所以 CPSC 要求所有的住宅的卧室必须安装这种 AFCI 断路器，空调要安装 AFCI 插座。

本文将介绍电弧故障断路器（AFCI）的电路部分的技术开发，包括它的硬件和软件的基本实现方法及相关内容。

我们使用了一个电流互感器，感应 AC 电流的大小和 di/dt ，然后用 OP（运放）进行处理后，将信号再输入 MCU 进行 A/D 处理，MCU 将采样数值进行分析，如果符合故障电弧的特性，MCU 将发出断路器脱扣信号，使断路器断开。当然传统的过流、短路和漏电保护功能可方便的被集成，只要再增加一个电流互感器。

应用于各种断路器，墙插座和电源插接板等。

关键词：

AFCI，断路器，M37544M2，电流互感器，运算放大器。

基本概念：

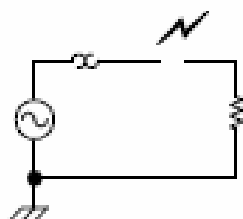
● 电弧：

线路上的电弧可分为两种，一种是正常的操作弧，称《好弧》，另一种是故障电弧，称《坏弧》。

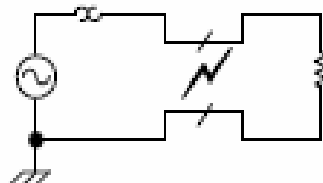
1，《好弧》是指当电机旋转产生的弧，如电钻，吸尘器等。另外当人们开关电器，插拔电器时产生的弧也是《好弧》。

2，《坏弧》是故障电弧，故障电弧的类型基本上可分两类。A 类和 B 类。A 类称串型电弧，B 类称并型电弧，图示如下：

A 类：



B 类：



- UL1699 标准：

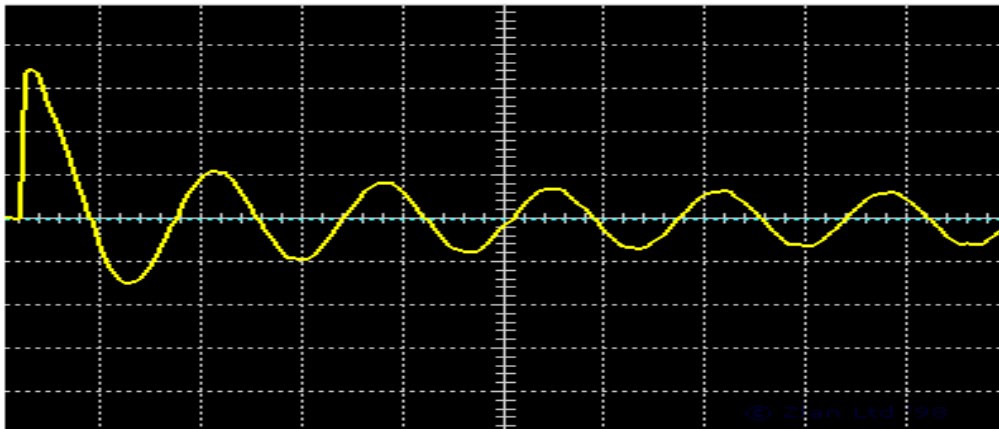
UL1699 是规范 AFCI 的，UL 1699 发展于上世纪 90 年代，用以识别由过电流产生的电弧而造成的家庭火灾。传统的断路器可以对过电流提供保护，然而研究发现在没有过电流发生的情况下由小电流引起的故障电弧也有足够的能量引发打火从而引起火灾。现在 UL1699 可用于规范 AFCI 技术在家用断路器、墙式安装插座、以及便携式 AFCI 插座的应用。

- AFCI 如何工作：

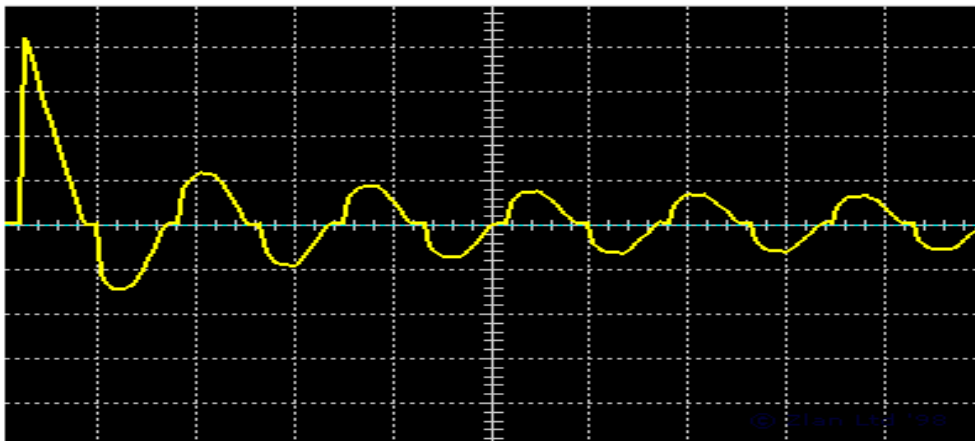
根据 UL1699 的标准，在 AC 线路上，当 AFCI 在 0.5 秒内察觉到 8 个半周的故障电弧，断路器执行脱扣，切断 AC 线路。

- 电弧和负载启动的电流波形：

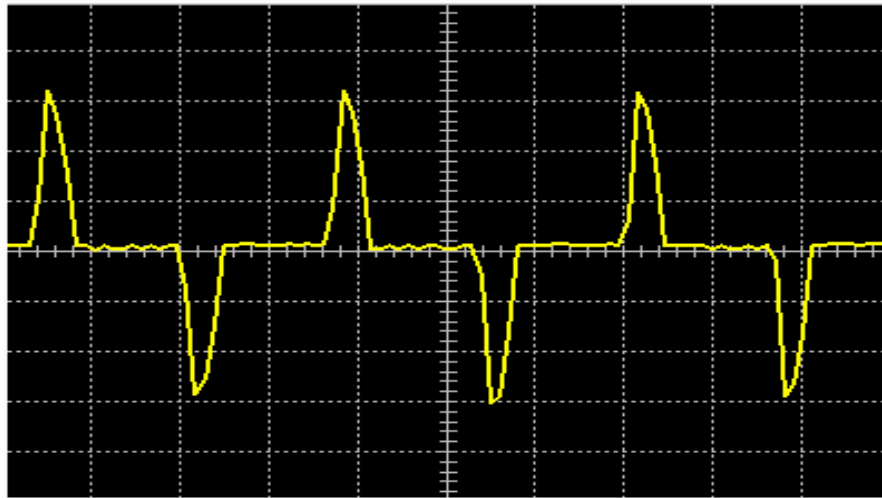
1, 1KW 白炽灯启动波形：（相角 30 度）



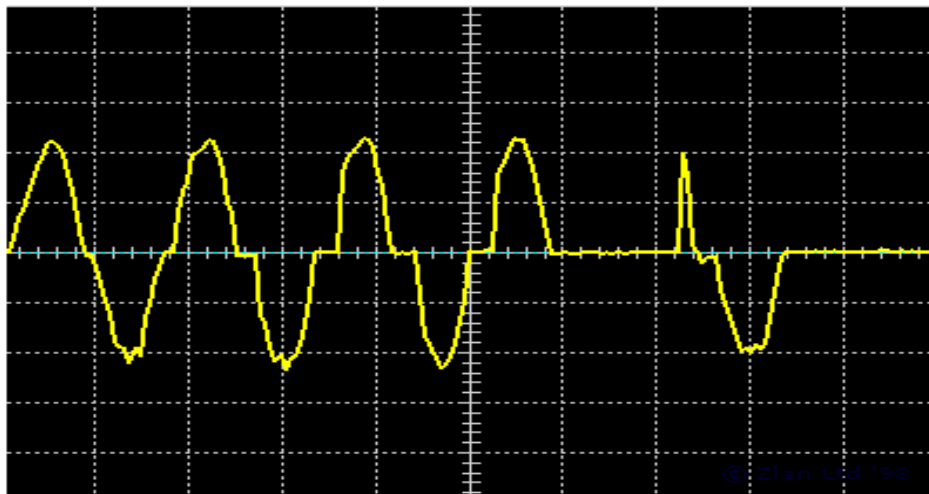
2, 1KW 调光灯启动波形：（导通角 100%）



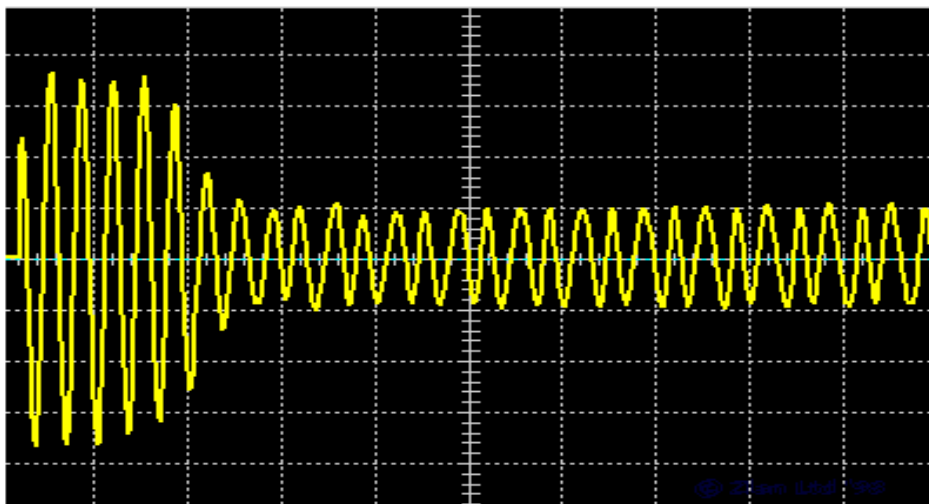
3, 计算机电源波形：



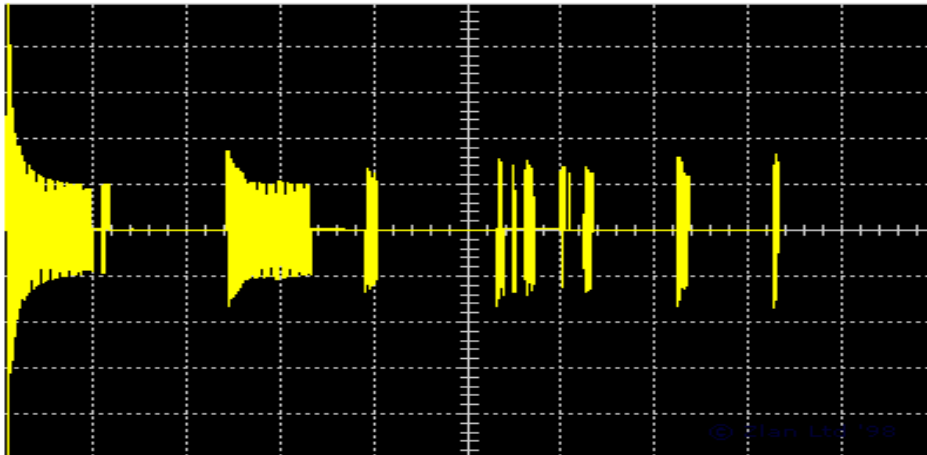
4, 一个 100A 点接触电弧波形：(并行电弧)



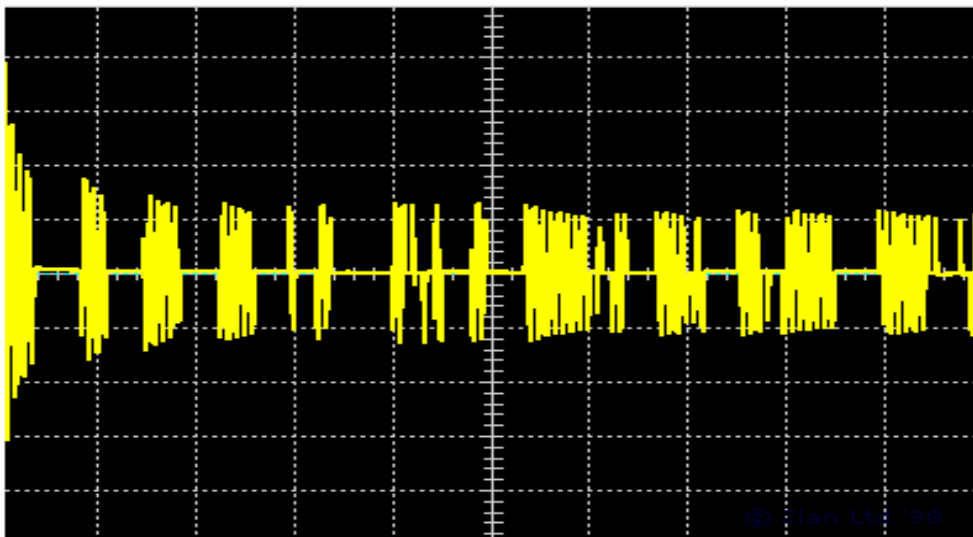
5, 1HP 空调的启动波形：



6, 安装 1KW 灯泡时, 灯口瞬时虚接产生的波形:

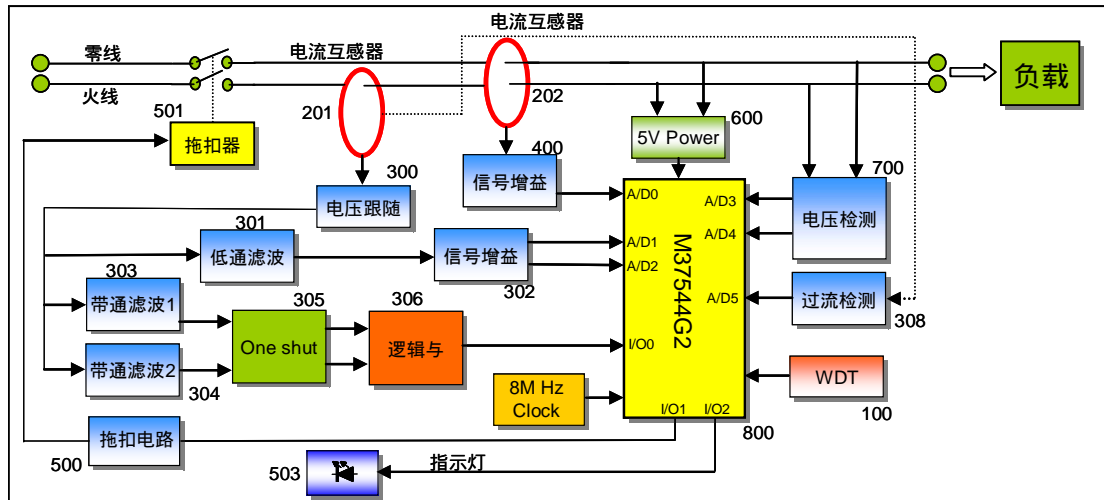


7, 串行电弧:

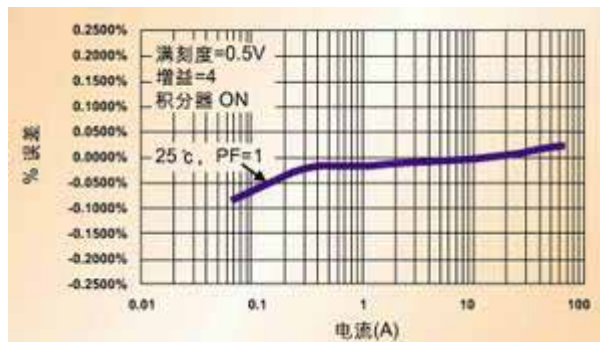


硬件介绍：

1， 以下是一个电弧断路器的原理框图 FIG1



- 在图中，电流互感器 201 采用气芯的电流互感器，它的特点是无磁滞和磁饱和现象，并有非常好的线性和暂态特性，如下图所示是显示它 0.5—100A 的线性，201 将感应信号送入 300 一个电压跟随器，以使输出信号



强化。301 是一个 50-60Hz 低通滤波器,302 是个双路非反向运放，负载电流的信号被放大后送入 800 (M37544) 处理。

- 303 和 304 是 200KHz 和 250K 的带通滤波器，是一个对电弧电流波形的傅立叶运算，之后，信号将送入 305 一个 1ms 的单稳触发电路，之后经过 306 逻辑

与送入 800 (M37544) 运算处理。

- 700 是个电压检测电路，当电弧发生时，AC 电源的电压是不稳定的。所以要对电压的绝对值进行采样，送入 800 处理。并且 700 负责检测电压的过零信号，并将此信号送入 800，用于电流采样值的运算。
- M37544:

FIG1 中 800(M37544) 是 Renesas 740 系列的 8 bit 单片机，它的最小指令时间为 0.25us, ROM size 8K, RAM size 256, 有可编程 I/O 口 25 个, 3 个定时器, 6 个 8bit A/D 转换器, A/D 的转换速度非常快，约 8us, 12 个中断源，一个 WDT，电源范围 2.2-5.5V。因为 M37544 是三菱的产品，所以有很好的 EMC 和 EMI 性能，是强电控制的首选。

在开发软件方面，它支持 C 语言加汇编语言的组合编写。编译器为 IAR Systems 的 M3T-ICC740。仿真工具方面，仿真器为三菱的 PC4701U+M38000TL2-FPD，仿真 MCU 的型号是 M37544RSS。

- 500 是执行 AFCI 的拖扣电路。采用一个 1A 双向可控硅 (Triac)。
- 600 是 AC220V/DC5V 转换电路。
- 308 是一个过流采样电路。

软件介绍：

作为一个全功能智能断路器，其软件应具备以下几项基本功能：

1. 准确的电弧检测

次项功能要求断路器能够根据对负载电流和电压的 A/D 采样，在短时间内检测出电弧的产生，这种检测包括对负载运转所产生的正常电弧检测以及负载在非正常状态所产生的电弧检测。

2. 快速的电弧特性分析

次项功能要求断路器在检测到电弧产生后，首先根据当时电压和电流的关系，运用高效而准确的算法（现多采用傅立叶 Fourier 变换法则），得到负载的相位角（phase angle）状态，判断出负载的类型，从而得出电弧的产生属于正常或异常的判断，进一步作出是否切断的动作。可见，这部分软件设计将决定断路器能否在发生故障电弧时及时做出切断动作，同时，它还将决定断路器能否在发生正常电弧时不会产生误动作。当然，这种判断还要依靠下面一项功能作为基础。

3. 丰富的负载电弧特征曲线(profile)储备

断路器应包括尽可能多的负载电弧特征，这需要大量的实验基础，对绝大多数的负载电弧特征进行分析，并将其存储在 MCU 中。还可以采用自学习方式，断路器可以在运行状态对产生的电弧进行实时的更新。

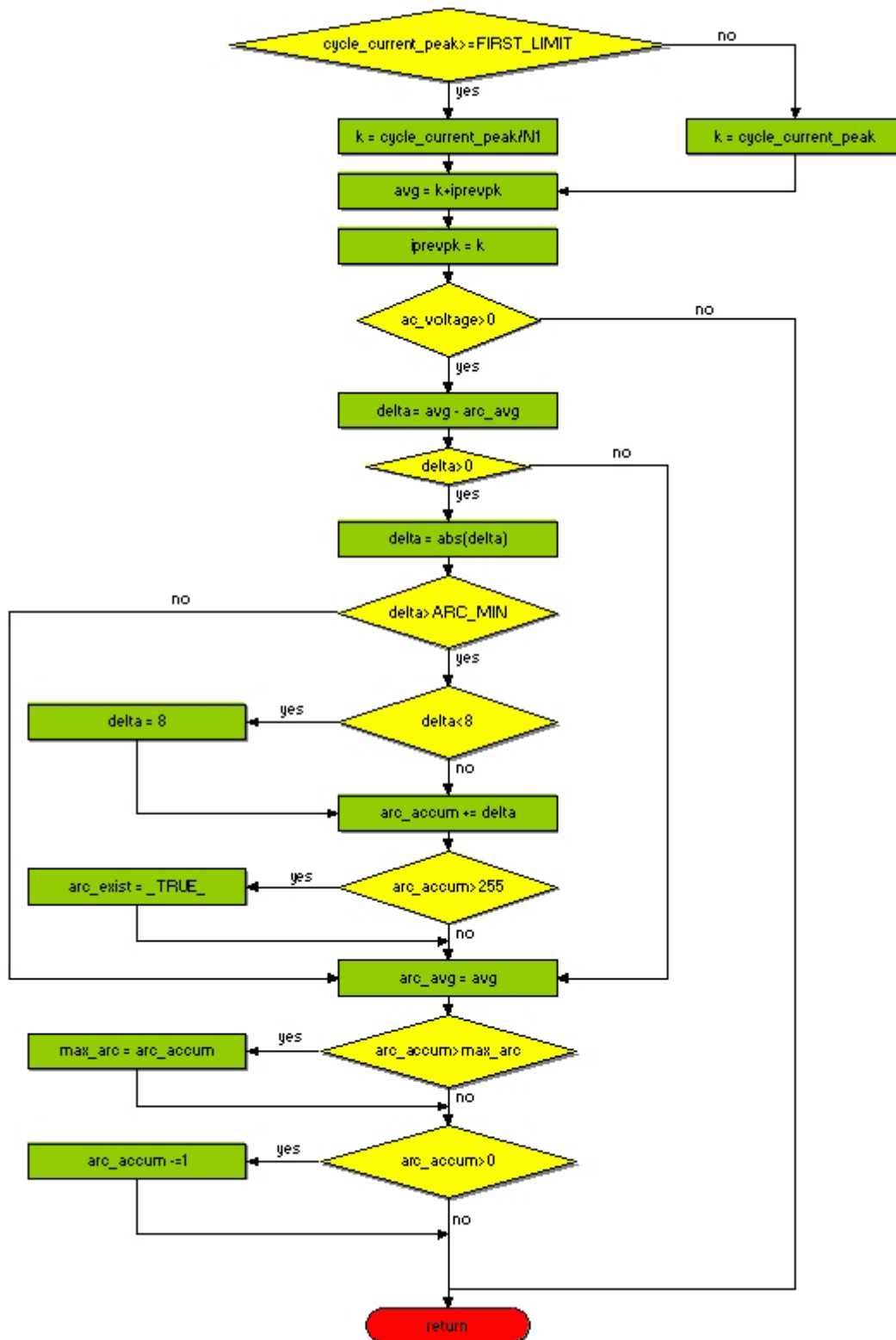
下面将根据以上功能对软件实现进行分析：

周期电流峰值，全局电流峰值，电流累加值

电弧检测的基本软件工作原理：

首先对正半周期电流峰值以及负半周期电流峰值采样，针对某一个整周期，将其正半周期的采样结果和负半周期的采样结果绝对值相加，求取平均值。然后将此周期的平均值与前一周期的平均值相比较，如果差距大于一个门限值，就判断为产生了一个电弧。需要指出的是，并不是只根据某一个周期的差距作出判断，而是将若干周期的差距累加，如果这个累加值超过了一个预先定义的累积门限，才作出最后的判断。当然，这个累积值会在一定的时间后复位。

Arc Checking



```

unsigned char check_arc(void)
{
    static unsigned char iprevpk=0;
    unsigned char arc_exist = _FALSE_;
    unsigned char k = (cycle_current_peak >= FIRST_LIMIT) ? cycle_current_peak
/N1:cycle_current_peak; //如果电流峰值超过门限值，需要通过比例因子调整
    unsigned char avg = k+iprevpk;
    int delta = 0;
    iprevpk = k;
    if(ac_voltage>0){ //只针对正半周期计算
        delta = avg - arc_avg;
        if(delta>0){ //如果峰值大于平均值，需要计算累计值
            delta = abs(delta); //取绝对值
            if(delta>ARC_MIN){
                if(delta<8) delta = 8;
                arc_accum += delta;
                if(arc_accum>255){
                    //累计值超过范围，有可能有电弧产生
                    arc_exist = _TRUE_;
                }
            }
        }
        arc_avg = avg;
        if(arc_accum>max_arc) max_arc = arc_accum; //更新累计峰值
        if(arc_accum>0) arc_accum -=1; //对累计值削减
    }
    return arc_exist;
}

```

电弧特性分析的基本软件原理：

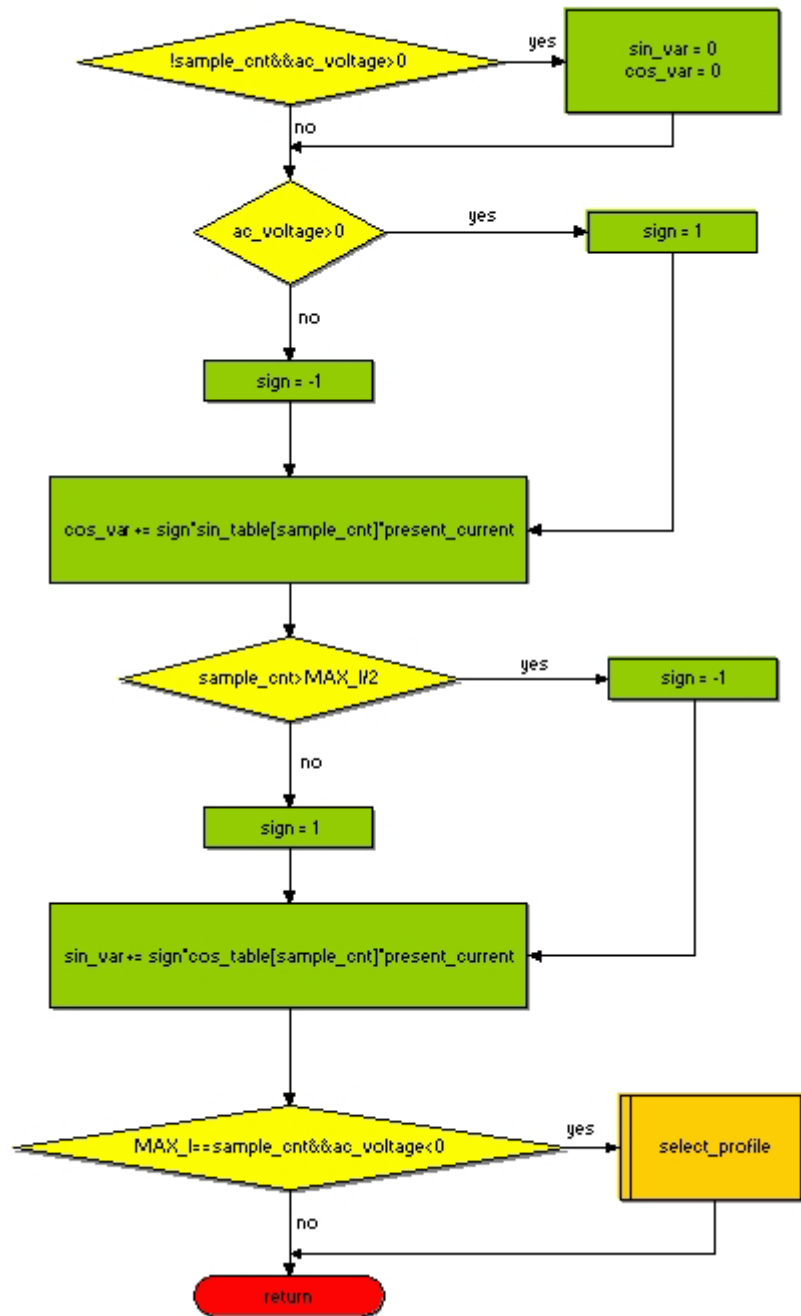
电弧特性分析是通过电压和电流的模拟同步检测实现的。当电压过零时，其极性将发生变化，同时，其采样值呈周期变化，电流的特性也是如此，而根据傅立叶变换的基本原理，一个周期函数可以展开成无数个正弦或余弦的函数之和，函数的周期越短，其（级数）收敛越快，周期越长收敛就越慢。具体的实现方法如下：

以电压波形两次正向过零为一个整个周期，每半个周期 N 次采样。

- 首先，当电压在正半周期并且 N 为 0 时将正弦累积值和预先累积值复位，以此作为一次计算相位的起始。
- 对于余弦累积值的计算，在电压经历正半周期时，电流的余弦累积值与前一次的余弦值相加，再电压在负半周期时，电流的余弦累积值与前一次的余弦值相减。
- 对于正弦累积值的计算，以 N/2 为界，前 N/2 次采样中，电流的正弦累积值与前一次的正弦值相加，后 N/2 次采样中，电流的正弦累积值与前一次的正弦值相减。
- 最后，当电压在负半周期并且 N 到达最大采样数时作为一次计算相位的结束。

至此，线电压和电流之间的相位差已经被模拟为正弦函数和与余弦函数和之间的比率，即正切值。由于正切曲线是圆滑的单调递增函数，由此，负载运行时产生的相位差应该满足这条曲线，负载的类型也就可以被判断出来。

Phase Checking



```

void check_phase(void)
{
    static unsigned char sin_var,cos_var;
    signed char sign = 0;
/*
    在每周期起始复位累加器
*/
    if(!sample_cnt&&ac_voltage>0){
        sin_var = 0;
        cos_var = 0;
    }
/*
    计算余弦值:
    当 VAC 为高, ADC 与前次余弦值相加
    当 VAC 为低, ADC 与前次余弦值相减
*/
    sign = ac_voltage>0?1:-1;
    cos_var += sign*sin_table[sample_cnt]*present_current;
/*
    计算正弦值:
    在前 8 次采样中, ADC 与前次正弦值相加
    在后 8 次采样中, ADC 与前次正弦值相减
*/
    sign = (sample_cnt>MAX_I/2)?-1:1;
    sin_var += sign*cos_table[sample_cnt]*present_current;

    if(MAX_I==sample_cnt&&ac_voltage<0){

    }
}

```

结合上述电弧检测的算法，对于每种负载，都可以对应一系列切断点（trip point），也就构成了不同的电弧特征曲线（profile），以便随时判断出产生的电弧是否已超越了电弧特征曲线上的点，从而达到及时切断和避免误切断的目的。

另外，为了增加稳定性和可靠性，还可以引进其他的参数，如周期电流累积值和全局电流峰值。对于周期电流累积值，并非直接将电流值相加。请参阅下面代码：

```

void accu_current_data(unsigned char adc)
{
    signed char sign = 0;
    unsigned char n = 0;
    if(adc != accumulate_current){
        sign = (adc>accumulate_current)?1:-1; //判断应对累计值如何操作
        accumulate_current += sign*(get_change_rate(n)); //累加比例因子
    }
}

```

首先，需要将当前电流值与累积值比较，根据情况分别相加或相减一个比例因子，目的是避免电流的突变对采样产生过大的影响，从而实现了数字过滤的作用，这样不会因为大量瞬变电流涌入负载而导致误切断。

电弧特征曲线(profile)的储备

通过以上分析可见，电弧特征曲线是区分负载类型的基础，它定义了负载发生电弧时断路器应该做出动作的切断点。因此，它应满足各种负载的特性，如阻性负载，容性负载，感性负载以及复合型负载，它们都具有不同的相位差特征。这些数据需要通过实验得到，存储在MCU的数据区。

当然，对于以上功能，还有其他的软件实现思路，如，根据电弧的分类出判断串行电弧（series arc）和并行电弧(parallel arc)，再分别加以处理。

参考文献：

- 1 , “Microcomputer Based Feeder Protection and Monitoring System-Utility Experience”, Martin Narendorf, B. Don Russell, Mike Aucoin, IEEE
- 2 , “High-Impedance Fault Detection Using Third-Harmonic Current”, Hughes Aircraft Company, Electric Power Research Institute, EPRI-EL-2430, Jun. 1982.
- 3 , “Incipient Fault Identification Through Neutral RF Monitoring of Large Rotating Machines”, James E. Timperley, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems; vol. PAS -102, No. 3; Mar. 1983; pp. 693-698.
- 4 , “Distribution High Impedance Fault Detection Utilizing High Frequency Current Components”, B. M. Aucoin, B. D. Russell, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, No. 6, Jun. 1982; pp. 1596-1606.
- 5 , “Status of High Impedance Fault Detection”, Mike Aucoin, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems; vol. PAS-104, No. 3; Mar. 1985, pp. 638-644.
- 6 , “Fault-Locating Method Using Harmonic Components of the Arc-Voltage Waveform”, Masayuki Okazaki, Tsuginori Inaba, Electrical Engineering in Japan; vol. 113, No. 3; 1993; pp. 27-35.
- 7 , “Detecting Arcing Downed-Wires Using Fault Current Flicker and Half-Cycle Asymmetry”, A. F. Sultan, G. W. Swift, D. J. Fedirchuk, IEEE Transactions on Power Delivery; vol. 9, No. 1; Jan. 1994; pp. 461-469.



罗雷

1997 加入三菱电机半导体，从事 MCU 硬件开发，专业应用于家电及计量仪表领域；

2003 至今 就职于瑞萨科技（北京）有限公司，从事 AFCL,GFCI 及家电的硬件设计。



刘晖

2001 加入三菱电机半导体，从事 MCU 软件开发，专业应用于家电及计量仪表领域；

2003 至今 就职于瑞萨科技（北京）有限公司，从事数字电视，AFCL,GFCI 软件设计。