

# 基于 STM32 的故障电弧检测装置设计\*

佟为明, 佟春天, 金显吉

(哈尔滨工业大学 电气工程系, 哈尔滨 150000)

**摘要:** 检测负载电流信号特征是判断低压配电网中是否发生电弧故障的有效方法之一。依据国家标准 GB/T 31143-2014《电弧故障保护电器(AFDD)的一般要求》,搭建模拟串联故障电弧实验平台,研究故障电弧发生时电流波形的特征,并采用 db4 小波函数作为小波基函数,对降噪后的电流波形进行小波分解重构,提取小波高频分量,计算小波高频分量的周期方差值,将周期方差值作为主要特征值来进行电弧故障检测;为了在硬件上验证该检测算法的可行性和有效性,将电弧故障检测算法移植到 STM32 平台,设计了基于 STM32 的故障电弧检测装置,该装置可以实现电流信号采集、数据处理和串联电弧故障检测识别功能。在以阻性负载、LED 灯、吸尘器和微波炉为屏蔽负载的实验结果表明,该装置能够检测出串联电弧故障,且可靠性高,不会在没有产生故障电弧的情况下产生误判。

**关键词:** 故障电弧检测; 小波函数; 特征量; 周期方差值; STM32

**中图分类号:** TM501.2      **文献标志码:** A      **doi:**10.11884/HPLPB201931.180320

## Design of fault arc detection device based on STM32

Tong Weiming, Tong Chuntian, Jin Xianji

(Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, China)

**Abstract:** The detection of the load current signal is one of the effective methods for judging whether an arc fault occurs in the low-voltage distribution line; according to the national standard GB/T 31143-2014 "General Requirements for Arc Fault Protection Devices (AFDD)", the analog series fault arc is built. The experimental platform studies the characteristics of the current waveform when the fault arc occurs. The db4 wavelet function is used as the wavelet basis function to decompose and reconstruct the current waveform after noise reduction, and extract the wavelet high-frequency component, calculate the periodic variance value of the wavelet high-frequency component, and detect the arc fault according to this value; The feasibility and effectiveness of the detection algorithm are verified. The arc fault detection algorithm is transplanted to the STM32 platform, and the fault arc detection device based on STM32 is designed. The device can realize the functions of current signal acquisition, data processing and series arc fault detection and recognition. Experiments with resistive loads, LED light, vacuum cleaners and microwave ovens have shown that the device can detect series arc faults with high reliability and will not cause false positives without generating fault arcs.

**Key words:** fault arc detection; wavelet function; feature amount; period variance; STM32

**PACS:** 07.05. Hd; 07.05. Kf; 84.30. Bv

随着我国国民经济的迅猛发展,生产及居民用电量日益提高,电气火灾事故也更加频发。由于用电装置的电源线路长时间过负荷运行、不良的电气连接、线路老化或线路绝缘层破损等问题,因而故障电弧引起的火灾事故所占比例越来越高,对故障电弧的研究已经引起了社会的广泛关注<sup>[1]</sup>。国内外学者纷纷投入到对故障电弧这一现象的研究当中来。目前,检测电路中电流信号来判断故障电弧的检测方法主要有三种<sup>[2-3]</sup>:基于频域的检测方法、基于时域的检测方法和基于物理特性的检测方法。尽管国内外学者对频域和时域的方法研究较多,但在故障电弧检测方面依然存在检测方法不够完善、特征值提取复杂、装置精度不够等问题<sup>[4]</sup>。本文利用故障电弧发生时会产生高次谐波这一特征,从频域角度出发,提取电路电流中的高次谐波值,以此来检测故障电弧是否发生。在硬件电路方面,选用意法半导体公司的 STM32F407 芯片,该芯片具有计算速度快、开发简

\* 收稿日期:2018-11-14; 修订日期:2019-02-18

基金项目:哈尔滨市应用技术与开发项目(2017RAXXJ005);国家国际科技合作重大项目(2011DFR70910)

作者简介:佟为明(1964—),男,教授,博士,研究方向为智能电网通信与信息安全技术、开关电源与谐波抑制等;dianqi@hit.edu.cn。

单、外围接口电路齐全等优点,方便以后更多功能的开发和设计;信号提取部分采用 8 通道 16 位高精度的 AD7606 芯片,采用 10.24 kHz 这一最适合谐波分析的采样频率来提取电路中的电流信号。在算法方面通过将提取的电流信号进行小波分解,提取小波高频分量并计算周期方差值,将周期方差值作为特征值,据此来判断电路中是否存在故障电弧。若达到电弧故障检测装置(AFDD)的要求,则判断故障电弧发生,检测装置发出报警信号。

## 1 故障电弧产生原因

电弧是指两电极之间的空气隙由绝缘变为介质,从而形成连续的放电现象,伴随有强烈的发热、发光等现象,是一种非常复杂的电磁响应过程。

### 1.1 故障电弧产生原因

电弧属于气体放电的一种形式。气体放电分为自持放电与非自持放电两类,电弧属于气体自持放电中的弧光放电。故障电弧发生后,轻则使电路不能快速实现开断,损坏电气设备,重则引起设备故障运行,甚至发生起火、爆炸,给周围的人带来生命危险<sup>[5-6]</sup>。故障电弧产生原因有很多,主要原因可以归结为以下三种。

(1)绝缘碳化:在供电线路中,如果供电导线发生绝缘破裂或者是设备电源线路连接不当,在导线之间将会发生漏电,形成电火花等现象,产生大量热能,产生的热量造成导线绝缘损伤更加严重,最终使绝缘皮碳化,形成碳化通道。

(2)外界引起的空气电离:正常情况下,空气的介电常数是相当大的,通常可以达到 3 MV/m,但是使空气电离并不需要很大的能量,当线路发生故障电弧时,周围的气体介质被电离,一旦接触到了别的线路,空气的介电强度立刻降低,形成燃烧,这也是故障电弧导致火灾的主要原因。

(3)载流回路:电弧性短路,是指本来两个不互相连接的导体之间的空气被击穿,产生电弧,弧温使得附近金属融化,形成短路。

### 1.2 好弧与坏弧的区别

线路上的电弧可以分为两种:一种是正常的操作弧,称为“好弧”;另一种是故障电弧,称为“坏弧”。“好弧”是指在使用电器时,人们已知的并按人类意愿或控制进行的电弧,例如开关动作产生的电弧、插拔插座时产生的电弧、电焊机、有刷电机工作时产生的电弧等,其在人类已知或控制范围内,能够对其产生的危害进行控制。“坏弧”是指非按人类意愿或控制产生的电弧,如因绝缘老化、线路破损而产生的电弧等,严重影响用电设备和人身安全。

## 2 检测原理与算法

目前的检测方法可以分为三大类:一类是基于电弧的某个或某些特征,如基于电弧电流畸变点的小波分析法,基于电弧电流高频谐波的傅里叶分析法,基于电弧电流上升率的分析法,基于电弧随机性的差值-方均根检测方法<sup>[7-8]</sup>;二是对电弧进行整体识别,已有的算法有模型参数法、支持向量机法、神经网络法;三是上述两种方法的组合,基于电弧电流波形的畸变性,通过小波变换的细节系数检测电弧电流的畸变点,进而检测出电弧。从整体识别的角度,使用神经网络算法对电弧信号进行训练,其特点是识别率较高,但是实时性差,需要对大量数据进行训练。把小波检测和神经网络识别进行结合,以减小模式识别的数据量,提高了检测的实时性,然而其改善程度并不明显<sup>[9]</sup>。本文装置仅采用了小波分析法处理信号。对燃弧前后的电流数据进行波形分析,在相邻周期波形相减的基础上,利用小波阈值提取到故障电弧特征量,并进行分析。此算法基于时-频域分析,在保留最大原始有效信息的同时,针对不同负载进行判别,提高了准确率,减少误判。且该方法计算量小,准确性高,易于在单片机上实现。结果表明该检测方法具有很高的识别率。

### 2.1 检测原理

故障电弧电流是一种随机的非平稳信号,这就要求用于电弧信号分析的数学工具必须要具备良好的局部分析能力。传统的频域分析方法是傅里叶变换,但其不能反映信号的时域特征,发生电弧故障时信号产生短时高频冲击和微弱的波形突变,经傅里叶变换后,这些时域特征因积分而被踢出,因此傅里叶变换难以提取电弧故障有效信息。而小波变换从时域和频域两个方面来反映电弧故障信号时频特征,其时域和频域窗口的宽度可以自由调节,可以完成伸缩和平移变换,实现信号的多尺度细化分析<sup>[10]</sup>。小波变换的基本原理是:设  $\psi(t) \in L^2(\mathbb{R})$ , 对应的傅里叶变换为  $\psi(\omega)$ ,  $\psi(\omega)$  若满足以下允许条件

$$C_\psi < \int_R \frac{|\psi(\omega)|}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

式中： $\psi(t)$  是一个基本小波或母小波。将母小波  $\psi(t)$  伸缩平移后得到

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in R; a \neq 0 \quad (2)$$

式中： $\psi_{a,b}(t)$  称为小波函数； $a$  为伸缩因子； $b$  为平移因子。小波函数是窗函数，它的时-频窗特性反映了小波变换的时-频局部变化分析能力。

对任意的函数  $f(t) \in L^2(R)$  的连续小波变换为

$$W_f(a,b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

在实际应用中，特别是计算机上实现时，信号一般都是离散的，所以必须将小波变换离散化。

令式(3)中  $a = a_0^m, b = kb_0 a_0^m$  可将小波离散化，离散小波变换公式为

$$WT_f(m,k) = \langle f, \psi_{m,k} \rangle = |a_0|^{-m/2} \int_R f(t) \overline{\psi(a_0^{-m}t - kb_0)} dt \quad (4)$$

其中： $a_0 > 1; b_0 > 0; m, k \in Z; \psi(t)$  是小波基函数。

## 2.2 算法实现

当电路中发生故障电弧时，会导致负载电流波形出现很大的波动，这种波动会使得电流信号中的高频分量发生变化<sup>[12]</sup>。本文装置利用故障电弧产生是其电流信号中高频分量变化的这一特性，采用 db4 小波函数作为小波基函数，对采样数据进行小波分解重构，提取出电流信号中的小波高频分量。降噪后数据经小波分解与重构得到的小波高频分量为  $X$ ， $N$  个周期的小波高频分量分别为  $X_1, X_2, \dots, X_N$ ， $X_N = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ， $n$  为每周期采集的数据点数。

首先，计算得到周期波形数据平均值

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (5)$$

周期方差值为

$$S_2 = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n} \quad (6)$$

对数据处理后，得到的图形结果示例如图 1 所示。图 1(a) 为阻性负载周期方差值，图 1(b) 为微波炉负载周期方差值。

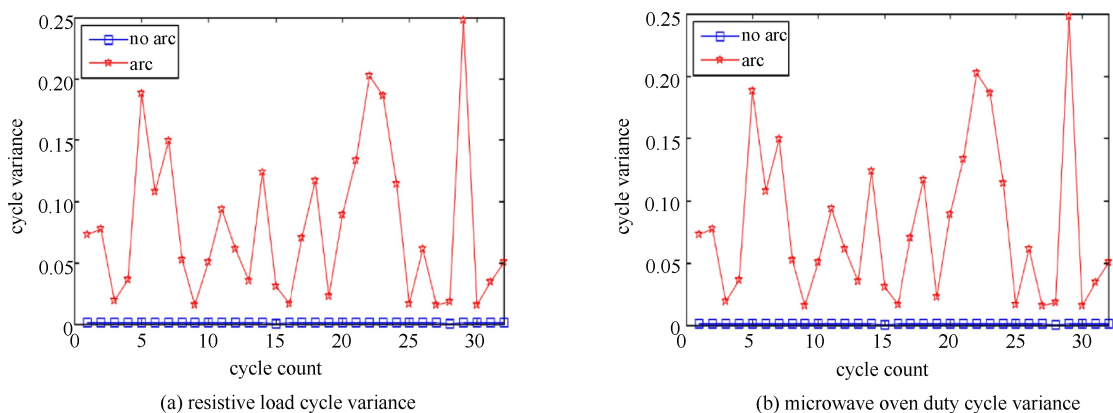


Fig. 1 Wavelet high frequency component period variance value

图 1 小波高频分量周期方差值

周期方差值表征周期小波高频分量的波动剧烈程度，能够表明故障电弧发生时，电流波形的畸变情况。由图 1 可知，正常工作时的周期方差值有明显的分界，且特征值无交叉。此处可设定特征值阈值为 0.01，特征值大于阈值认为电流发生一次电弧，因此可将小波高频分量周期方差值作为判据判断一个周期内是否有故障电弧发生。由于 AFDD 标准对电弧半波的个数和时间有明确的要求，所以在计算时需要统计故障电弧中燃弧半波的个数和时间。经过算法处理后，得到电路中是否有电弧发生。

### 3 故障电弧检测装置软硬件设计

#### 3.1 硬件设计

检测装置整体框图如图 2 所示。针对故障电弧的检测需求,检测装置硬件电路包括电源电路、信号调理电路、A/D 采集电路、外围扩展接口电路、声光报警电路、主控电路和通讯电路等。可以实现电流信号的调理、A/D 采集、报警和数据处理等功能。

(1)主控电路:主控电路是硬件电路的核心部分,主要功能是接收数据采集电路传送过来的信号,对数据进行一系列算法处理,提取信号特征,判断线路状态。当判定为故障电弧时需要发出驱动信号,使得报警电路报警。

(2)电源电路:开关电源芯片型号为 XRP6658ISTR-F,负责整个装置的供电工作。

(3)信号调理电路:核心器件为电流互感器,将电网中电流信号转换为 A/D 采集电路输入量程范围内的交流小信号。

(4)A/D 采集电路:基于采样芯片 AD7606 进行设计,用于采集电路中电流实时数据,将模拟信号转换为数字信号,然后输入到主处理器模块。

(5)声光报警电路:当故障电弧检测装置正常工作并且线路中没有产生故障电弧时,运行指示灯常亮;当产生故障电弧时,报警指示灯常亮,报警蜂鸣器发出尖锐的报警声。

(6)通信模块:采用以太网和 UART 两种通信方式,实现装置与上位机之间的数据传输。

(7)外围扩展接口电路:为装置提供各种外接设备的接口。

(8)按键测试电路:测试装置的各部分功能,方便调试。

##### 3.1.1 信号调理电路

采样系统采集的模拟量为交流电流信号,信号调理模块中电流信号调理电路如图 3 所示,其与电流互感器相连。电流互感器型号为北京星格 SCT240B。电流互感器的输入量程为 40 A,额定电流变比为 40 A/20 mA,R11 为采样电阻,把电流信号转换为电压信号。由于信号采集模块的 AD7606 芯片的电压输入设置为 $\pm 5\text{ V}$ 的差分式信号输入,所以信号调理电路二次侧输出也就是  $I_a$  和  $U_b$  管脚设计的输出电压幅值均小于 5 V。

##### 3.1.2 AD 转换电路

AD7606 外围电路连接图如图 4 所示。信号采集模块采用的芯片是 AD7606。AD7606 芯片上集成模拟输入箝位保护、二阶抗混叠滤波器、跟踪保持放大器、16 位电荷再分配逐次逼近型 ADC 内核、2.5 V 基准电压源及缓冲、高速串行和并行接口等。

本设计采用的 AD7606 芯片为 8 通道同步采样的 16 位的高速度、高精度模数转换芯片,该芯片支持全通道 200 ksp/s 采样率并行采集和转换。信号采集模块输入的电压范围为 $\pm 5\text{ V}$ 的双极性信号。信号采集模块与主处理器模块之间通过 SPI 接口模式与 STM32 相连。

##### 3.1.3 以太网通信电路

以太网接口电路如图 5 所示,采用了 SMSC 的 LAN8720A 网卡芯片。LAN8720A 支持 100 Mbps 通信速率,并可通过简化介质独立接口与以太网层通信。在采用简化介质独立接口(RMII)通信时,需由外部提供给 LAN8720A 和 RMII 接口 50 MHz 时钟。此处可选用 25 MHz 晶振,经过 LAN8720A 内部倍频后得到 50 MHz 时钟信号。

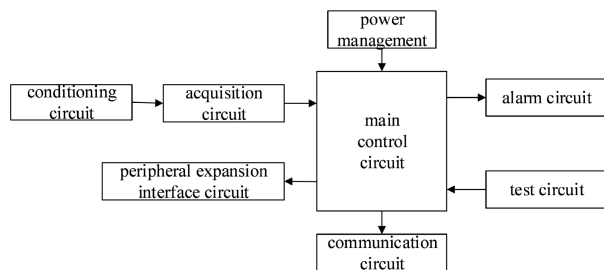


Fig. 2 Block diagram of the overall design of the fault arc detection device hardware

图 2 故障电弧检测装置硬件总体设计框图

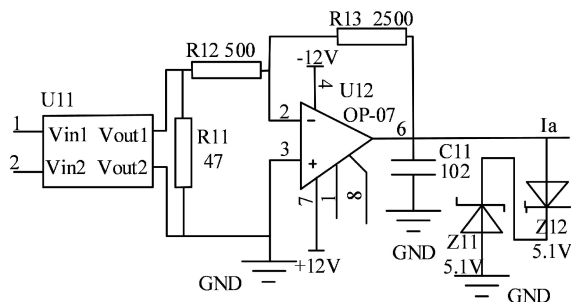


Fig. 3 Current and voltage signal conditioning circuit

图 3 电流信号调理电路

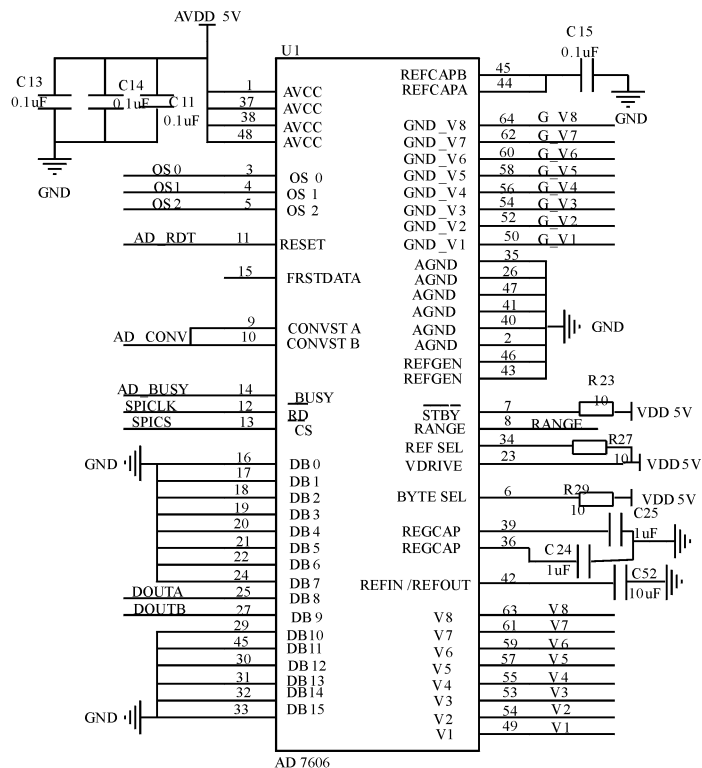


Fig. 4 Diagram of AD conversion circuit

图 4 AD 转换电路图

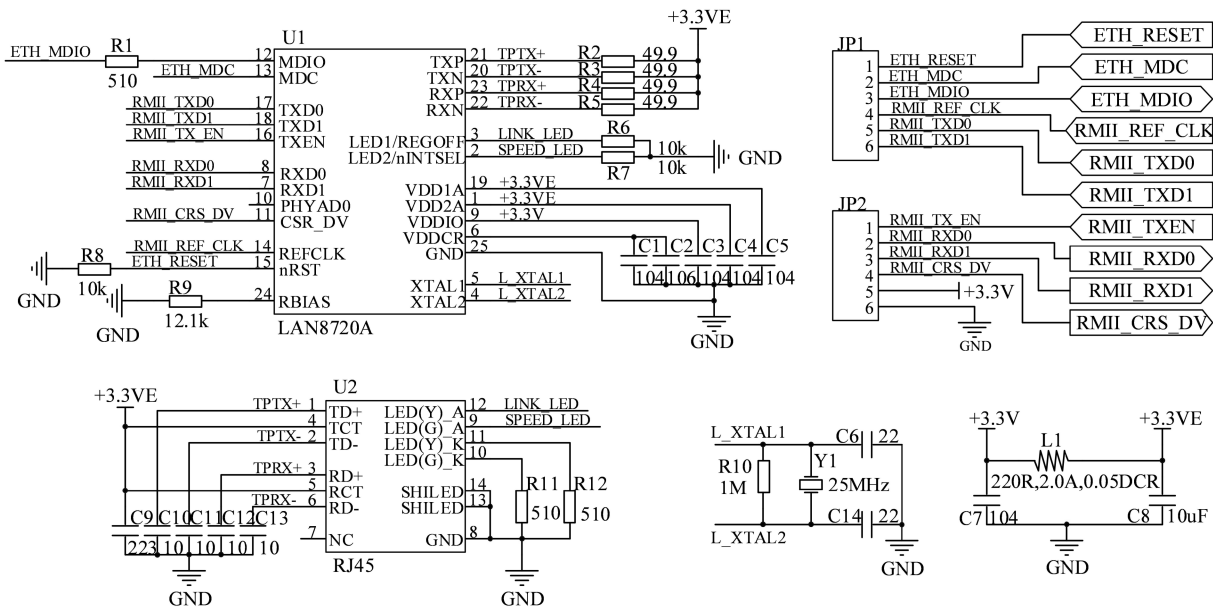


Fig. 5 Ethernet interface circuit

图 5 以太网接口电路

### 3.2 软件设计

STM32 单片机部分的程序设计通过 MDK5 开发环境实现,工程编译成功后链接生成可执行文件,通过 JTAG 连接向单片机烧录程序。本设计装置的检测程序由 ST 官方提供的库函数编程的方式编写。库函数是建立在寄存器与用户驱动层之间的代码,向下处理与寄存器直接相关的配置,向上为用户提供配置寄存器的接口。使用库函数的方式配置 STM32 的寄存

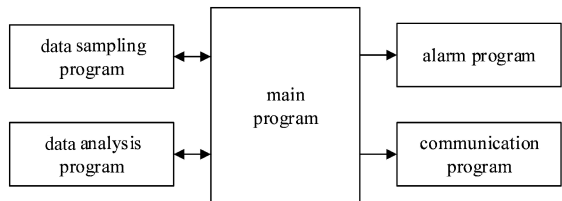


Fig. 6 Block diagram of faulty arc detection device software overall design

图 6 故障电弧检测装置软件总体设计框图

器,具有程序移植性好,易于阅读,开发周期短等优点<sup>[14-15]</sup>。

故障电弧检测装置软件总体设计框图如图 6 所示。

在 ADC 采样程序中,为了提高 CPU 的利用效率,开启 STM32 的片上外设 DMA。DMA 为 CPU 分担了数据转移的工作,使 CPU 在 DMA 转移数据的过程中同时进行数据运算、响应中断,提高了执行的效率。故障电弧检测流程图如图 7 所示。由图 7 可知,检测算法程序通过对采样数据进行小波分解,提取高频分量并计算周期方差值等参数,通过周期方差值计算出特征值,并与设定阈值进行比较,若特征值大于设定阈值,则计数次数加 1,根据 AFDD 标准中规定的 0.5 s 内允许的最大半波数来判定电路中是否发生电弧故障。由标准可知,在 0.5 s 内如果检测到 8 次半波数超出阈值,则判定电路中检测到故障电弧,此时进行报警和跳闸操作;若没有检测到故障电弧,则进行下一个时间段。

#### 4 实验结果及讨论

采用 C 语言编程,程序编写调试成功后烧写进装置进行实验测试。判断电弧检测算法的有效性。A/D 采样频率设为 10.24 kHz,STM32 在每周计算输出的数据结果进行统计,结果如表 1 所示。由表 1 可以看出,高频分量波动率不随负荷的增减而变化,检测阈值为高频分量波动率的 3 倍以上,具有良好的可靠性。故障电弧发生时,高频分量波动率明显增加,达到检测阈值的 1.7 倍以上,具有良好的灵敏性。

应用该装置对已知负载的电弧故障进行串联电弧故障试验,实验负载分别为阻性负载、吸尘器、微波炉和 LED 灯,按照 AFDD 标准要求连接电路并施加额定电压,通过电弧发生器产生电弧故障,故障电弧设置位微弱燃烧<sup>[16]</sup>。分别进行 100 次测试,验证电路中突然出现串联电弧故障时设计装置能否正确识别。

对固定负载的电弧故障检测结果如表 2 所示。

表 1 故障电弧特征值对比

Table 1 Fault arc characteristic value comparison

working conditions		normal	arc weak	arc fierce
resistive load	high frequency range	$[-0.0227, 0.0239]$	$[-0.3133, 0.2814]$	$[-0.9264, 0.8209]$
	volatility	$3.0107 \times 10^{-5}$	$1.9513 \times 10^{-4}$	$9.2735 \times 10^{-4}$
	period variance range	$[0, 0.01]$	$[0.02, 0.16]$	$[0.02, 0.25]$
inductive load	high frequency range	$[-0.0245, 0.0236]$	$[-0.1410, 0.1451]$	$[-0.3725, 0.3669]$
	volatility	$2.9145 \times 10^{-5}$	$1.6775 \times 10^{-4}$	$2.5442 \times 10^{-4}$
	period variance range	$[0, 0.0005]$	$[0.001, 0.007]$	$[0.002, 0.011]$
capacitive load	high frequency range	$[-0.0205, 0.0215]$	$[-0.1235, 0.1217]$	$[-0.5843, 0.664]$
	volatility	$2.9624 \times 10^{-5}$	$2.5442 \times 10^{-4}$	$3.0152 \times 10^{-4}$
	period variance range	$[0, 0.0005]$	$[0.002, 0.01]$	$[0.002, 0.015]$

由表 2 中可以看出,当负载分别为阻性负载、吸尘器、微波炉和 LED 灯时,该装置能够对电路中的电弧故障进行识别,且具有准确的检测功能。

本文设计的故障电弧检测装置对更对未知负载的检测还需进一步验证。但从原理上来讲,本文应用周期方差值作为主要的特征值进行故障电弧检测,对于阻性负载或线性负载来讲,由于故障电弧发生时,电路中产生大量的高次谐波,其周期方差值增加,检测效果明显。但对于某些非线性负载来说,由于电路中本身就存在大量的谐波和高次谐波,在产生故障电弧时,其

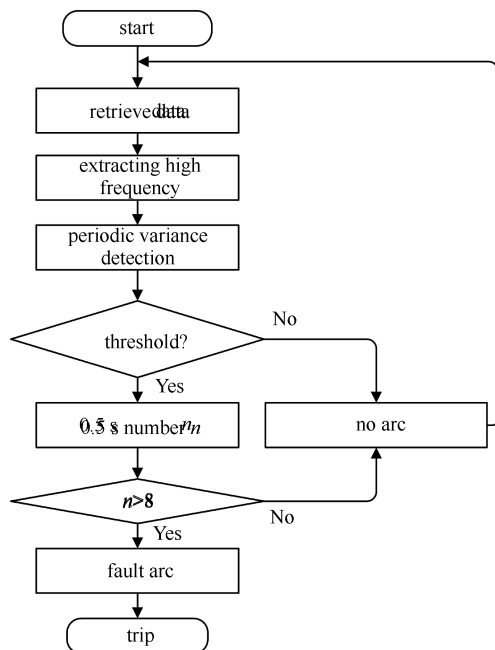


Fig. 7 Flow chart of fault arc detection program

图 7 故障电弧检测程序流程图

表 2 固定负载检测结果

Table 2 Fixed load test results

load type	successful recognition	failure
	rate/%	rate/%
resistive load	100	0
vacuum cleaner	99	1
LED light	98	2
microwave oven	99	1

高次谐波含量和周期方差值是否会满足检测判定, 还需进行深入研究。

## 5 结 论

经实验测试验证, 在模拟电弧故障试验中, 当分别选用日光灯、吸尘器、开关电源和微波炉为实验负载时, 本文设计的基于 STM32 的故障电弧检测装置对电弧故障的检测具有较高的准确性, 但对更多未知负载的检测需要进一步实验验证。本文的研究意义在于将库函数算法移植到 STM32 平台, 以小波周期方差值为重点研究对象, 结合故障电弧发生时电路中电流的变化, 将电路中电流的特征综合考虑, 判断电路故障。通过对 4 种屏蔽负载的实验, 测试了电弧检测算法的有效性。另外意法半导体公司的 STM32 芯片, 拥有丰富的片上外设资源, 成本较低并且可靠性高, 可以通过编程轻松实现数据的运算处理、数据传输等功能, 简化了硬件的设计。随着低压保护电器的不断发展, 基于 STM32 单片机的故障电弧检测装置将会拥有的巨大的应用价值和广阔的市场前景。

## 参考文献:

- [1] 公安部消防局. 中国消防年鉴[M]. 北京: 国际文化出版公司, 2011-2016. (Fire Department of Ministry of Public Security. China fire year-book. Beijing: International Cultural Publishing Company, 2011-2016)
- [2] 沈阳, 曹菲菲. 基于因子分析的全国火灾统计[J]. 消防科学与技术, 2012, 30(5): 532-535. (Shen Yang, Cao Feifei. National fire statistics based on factor analysis. Fire Science and Technology, 2012, 30(5): 532-535)
- [3] 谭秋秋. 低压电弧故障检测方法及其装置[D]. 济南: 山东建筑大学, 2017 (Tan Qiuqiu. Low-voltage arc fault detection method and device. Ji'nan: Shandong Jianzhu University, 2017)
- [4] 刘晓明, 徐叶飞, 刘婷, 等. 基于电流信号短时过零率的电弧故障检测[J]. 电工技术学报, 2017, 30(13): 125-133. (Liu Xiaoming, Xu Yefei, Liu Ting, et al. Arc fault detection based on short-time zero-crossing rate of current signal. Journal of Electrotechnics, 2017, 30(13): 125-133)
- [5] 赵景波, 唐勇伟, 张磊. 基于改进小波变换的故障电弧检测方法的研究[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(2): 90-97. (Zhao Jingbo, Tang Yongwei, Zhang Lei. Research on fault arc detection method based on improved wavelet transform. Journal of Electric Machines and Control, 2016, 20(2): 90-97)
- [6] 李珂, 唐基超, 雒佳明, 等. 基于 STM32 电压质量检测装置的研究[J]. 电子电路设计方案, 2018(5): 18-24. (Li Ke, Tang Jichao, Luo Jiaming, et al. Voltage quality detection research based on STM32. Electronic Circuit Design, 2018(5): 18-24)
- [7] 张耀, 齐晓辉. 电能质量监测终端自动测试系统的技术和应用[J]. 电气技术, 2018(3): 126-127. (Zhang Yao, Qi Xiaohui. Technology and application of automatic test system for power quality detection terminal. Electrical Engineering, 2018(3): 126-127)
- [8] Karakose E, Gencoglu M T, Karakose M, et al. A new arc detection method based on fuzzy logic using S-transform for pantograph-catenary systems[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2015(4): 1-18.
- [9] 王万岗, 马东, 蒋强, 等. 电弧型电气火灾检测方法研究[J]. 自动化仪表, 2013, 34(6): 16-19. (Wang Wangang, Ma Dong, Jiang Qiang, et al. Research on arc type electrical fire detection method. Automatic Instruments, 2013, 34(6): 16-19)
- [10] 赵洋. 低压串联电弧故障的诊断研究与应用[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014. (Zhao Yang. Diagnostic research and application of low voltage series arc fault. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2014)
- [11] GB/T 31143-2014, 电弧故障保护电器(AFDD)的一般要求[S]. (GB/T 31143-2014, General requirements for arc fault protection appliances(AFDD))
- [12] 丁俊. 故障电弧检测技术的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016. (Ding Jun. Research on arc fault detection technology. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2016)
- [13] 段培永, 窦甜华, 段晨旭, 等. 低压供电线路故障电弧检测方法[J]. 消防科学与技术, 2011, 30(7): 617-620. (Duan Peiyong, Dou Tianhua, Duan Chenxu, et al. Low-voltage power supply and distribution line fault arc detection method. Fire Science and Technology, 2011, 30(7): 617-620)
- [14] Park D W, Kim I K, Choi S Y, et al. Detection algorithm of series arc for electrical fire prediction[C]// IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. 2008: 716-719.
- [15] Lezama J, Schweitzer P, Tisserand E, et al. An embedded system for AC series arc detection by inter-period correlations of current[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 129(2): 227-234.
- [16] Lezama C J, Schweitzer P, Weber S, et al. Arcing detection at home system using correlation analysis[C]//The 27th International Conference on Electrical Contacts. 2014: 1-6.