

基于 STM32 故障电弧检测装置的设计

于 坤, 吴桂初, 吴自然, 王盼盼

(温州大学 物理与电子信息工程学院, 浙江 温州 325000)

摘要: 对负载电流信号的检测是判断低压配电线路中是否发生电弧故障的有效方法之一; 用 ADC 模块对负载电流信号进行采样, 将发生电弧故障时的电流波形与正常工作时的电流波形相比较, 检测是否有电弧故障发生; 比较的电流波形特征量主要有过零点后的上升率、电流正半周期采样时间宽度和正半周期采样幅值, 将这 3 个特征量作为电弧故障识别算法的判断条件, 检测电弧故障; 为了在硬件上验证该时域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, 设计出了一台基于 STM32 的故障电弧检测装置样机; 该样机可以实现电流信号采集、过零点检测、数据处理以及串联电弧故障检测识别; 在以日光灯、开关电源和吸尘器为屏蔽负载的实验结果表明, 该装置可以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: 电流信号; 特征量; 故障电弧检测; STM32

A Design of Arc Fault Detecting Device Based on STM32

Yu Kun, Wu Guichu, Wu Ziran, Wang Panpan

(College of Wenzhou, Wenzhou 325000, China)

Abstract: Current signal inspection is an effective method to determine whether arcs fault occur in a low-voltage distribution line. Current signals are sampled by an ADC converter. Using current signals as the characteristic, differences between the rising rates, sampling times and magnitudes of two current waveforms are used as the judging conditions of arcs fault. To verify the feasibility and effectiveness of the arc fault detection algorithm in time domain by hardware, the algorithm was implemented on an STM32 platform, and a prototype of a arc fault detection device was designed. The prototype acquires current signals, performs zero-crossing detection, and achieves series arc fault recognition. In the experiment which uses fluorescent lamps, switch power supplies and vacuum cleaners as shielding loads, the device can detect series arcs fault and perform high-reliability, with avoidance of misjudgments when no fault occurs.

Keywords: current signal; characteristic; detecting arc fault; STM32

0 引言

楼宇的电气布线, 家用电器、插座等电源线由于长时间的过负荷运行, 线路老化或者不良的电气连接、线路绝缘层破损等情况, 很可能引发故障电弧, 致使产生电弧火花引发火灾。如何检测线路电弧故障, 设计出有效的电弧故障检测装置一直以来是一个备受关注的热点话题。

实验研制的故障电弧检测装置样机主要包括三部分: 电流信号采集电路, 过零点检测电路和 MPU 计算处理单元。电弧故障检测装置以电流取样的方式, 通过电流互感器将一次侧的大电流转换为二次侧的小电流, 后面连接一个采样电阻将电流信号转换为电压信号, 经调理电路放大, 滤波后送往微处理器单元进行数字信号运算, 并由串联故障电弧识别算法进行综合判断, 若达到电弧故障检测装置 (AFDD) 的要求^[1], 则判断有故障电弧发生, 检测装置发出报警信号。因为 AFDD 标准对电弧半波的个数和时间有明确的要求, 所以 MCU 需要获得过零点的脉冲信号, 用来触发 AD 采集并统计故障电弧中燃弧

半波的个数。

1 检测原理

目前, 已有很多专家学者在故障电弧诊断领域提出了多种检测故障电弧的方法^[2]。比较著名的有小波分析法、频谱分析法和时域波形分析法^[3-5]。小波分析法, 即对电流信号进行多层小波分解, 提取电弧特征^[6]。频域分析法, 通过对电流信号进行快速傅里叶变换 (FFT), 提取电流信号中的高频成分, 判断是否发生电弧故障^[7]。还有一些机器学习的方法检测电弧故障。比如对电流信号进行多个特征量的提取, 然后采用神经网络、深度学习或支持向量基 (SVM) 等方法进行训练, 得到判断特征与电弧故障的算法^[8-9]。对于检测低压配电柜中的电弧故障, 通常采用声光检测法, 即对电弧电压信号和弧光信号进行检测, 判断是否有电弧故障发生^[10]。

实验检测装置采用了时域波形分析法。时域波形分析法, 即对电流信号进行采集, 提取时域波形的特征量。然后对提取的特征量分析比较, 如果相比较的两个波形之间的差异超出了设定的阈值, 则认为出现电弧故障。此算法基于时域波形分析, 分别提取时域电流波形的幅值、波形上升率和正半周期时间宽度作为特征量。在保留最大原始有效信息的同时, 针对不同负载用不同的特征量进行判别, 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。

1.1 时域电流波形比较算法

故障电弧发生时会导致负载电流波形出现很大的波动, 这

收稿日期: 2017-08-21; 修回日期: 2017-10-23。

基金项目: 浙江省自然科学基金 (LQ16E070004)。

作者简介: 于 坤 (1992-), 男, 山东淄博人, 硕士研究生, 主要从事电器智能化方向的研究。

吴桂初 (1957-), 男, 教授, 主要从事智能电网用户端、智能电器方向的研究。

种波动会使故障电弧的波形在不同周期内出现差异，因此可以根据这种差异程度判断电弧故障是否发生。图 1~3 分别为日光灯、开关电源和吸尘器负载在正常工作 and 发生电弧故障时的电流波形。

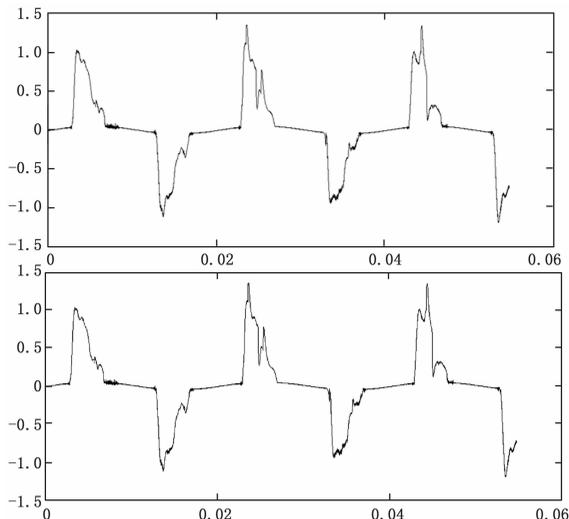


图 1 日光灯负载

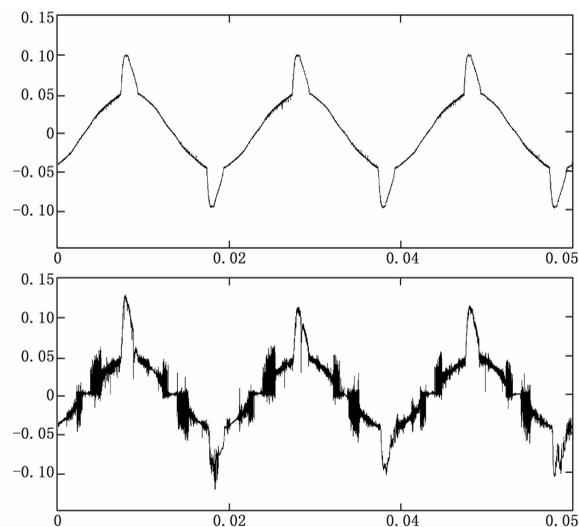


图 2 开关电源负载

通过图中的波形对比可以看出，当发生故障电弧时，其电流波形和正常工作时的电流波形相比较有明显的差异性。主要包括以下几种特征：

- 1) 电流波形在过零处有毛刺，波形含有高频噪声；
- 2) 电弧电流的上升率一般高于正常电流；
- 3) 发生电弧故障时，电弧电流在过零点附近会有平肩现象；
- 4) 电弧波形具有一定的随机性；

图 1 对比日光灯负载正常工作和电弧故障下的波形图可以发现，发生故障时，电流波形前后两周期不完全相同，波形出现随机性，在零点附近出现毛刺，且波形峰值的幅值增大，电流波形正半周期采样幅值差异明显，所以日光灯负载可以通过 AD 转换器采集电流幅值，和负载正常工作下的电流幅值作

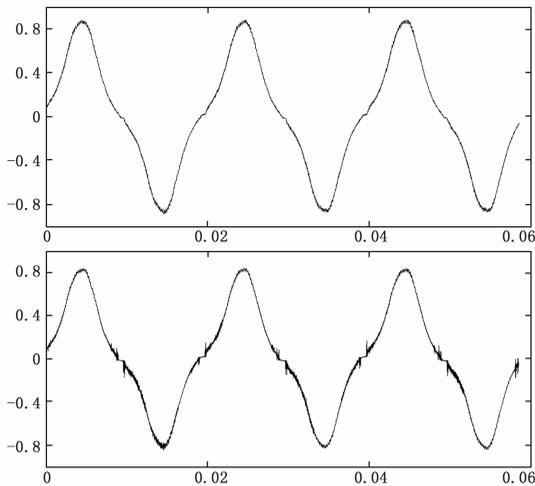


图 3 吸尘器负载

差，计算其差异值，再和设定的阈值相比较，判断是否发生电弧故障。

对于开关电源负载，发生串联电弧故障时波形在过零点附近有平肩现象，且在波形上升处出现大量毛刺，电流波形过零后上升率变大。所以对于开关电源负载，可以通过 AD 采集电流波形数据点，取出数据中相应的点计算波形的上升率，将计算出的波形上升率和正常工作时的上升率作差，将差值和设定的阈值相比较，判断是否发生电弧故障。

对于吸尘器负载，通过对比可以发现，发生电弧故障时，电流波形在过零处有平肩现象且波形出现毛刺。由于波形在过零点处出现平肩，过零检测电路就不会产生高电平信号，也就不会触发 AD 采集。负载电流波形出现平肩现象会导致高电平时间缩短，相应的 AD 采样时间也会缩短。在 AD 采样频率一致的情况下，采集到的点也会减少。所以对于吸尘器负载，可以通过采样时间宽度进行判断是否发生电弧故障。

上述 3 个特征量就是设计电弧故障检测装置样机的原理基础。其中电流波形幅值差异值的具体计算方法如下。

1) 设每个波形正半周期采集 N 个点，采集 3 个半波的电流波形，通过比较 3 个波形的差异判断该波形是否属于正常波形：

$$\Delta i_k(j) = i_k(j) - i_{k-1}(j), j = 1, 2, \dots, N, k = 2, 3 \quad (1)$$

2) 再求波形幅值之差的绝对值在一个正半周期内的平均值：

$$D_k = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |\Delta i_k(j)| \quad (2)$$

3) 在 STM32 系统初始化结束后开始 AD 采样，可以得到前 3 个正半周期和两个值，比较两个值，若

$$|D_1 - D_2| \leq 0.0002 \quad (3)$$

则可以判断前 3 个半波为负载正常工作波形，同时将第三个半波的数据保存作为初始正常波形，与接下来的波形相比较。

4) 计算波形正半周期幅值的差值。

$$\Delta i_k(j) = i_3(j) - i_k(j), j = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

5) 根据式 (4) 计算差值在正半周期内的平均值。

$$D_k = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |\Delta i_k(j)|, k = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

6) 计算波形幅值在正半周期内的平均值。

$$I_k = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |i_k(j)| \quad (6)$$

7) 最后将数值量化, 计算波形正半周期幅值的差异值并将其作为一个电流波形特征量。

$$G_k = \frac{D_k}{I_k} \quad (7)$$

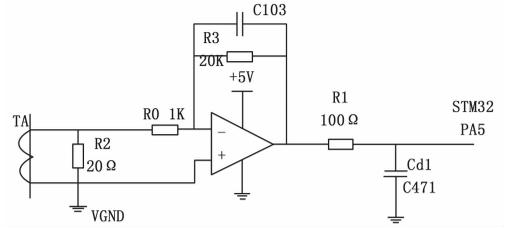


图 5 电流信号采集电路

电阻 R1 为限流电阻, 限定电路的工作电流, 使电路运行在一个合适的工作状态下。

2.2 过零检测电路

根据 AFDD 标准对电弧半波个数和时间要求, 当试验电路中发生燃弧时, 在 50 Hz 额定频率下, 电路电流大于 100A 时, AFDD 动作判别的极限值是检测到 8 个燃弧半波 (大电弧电流可能由地绝缘故障或并联电弧产生)。为此 MCU 需获得过零点脉冲信号, 作为判断统计故障电弧个数的同步脉冲。正半周期电流检测电路如图 6。

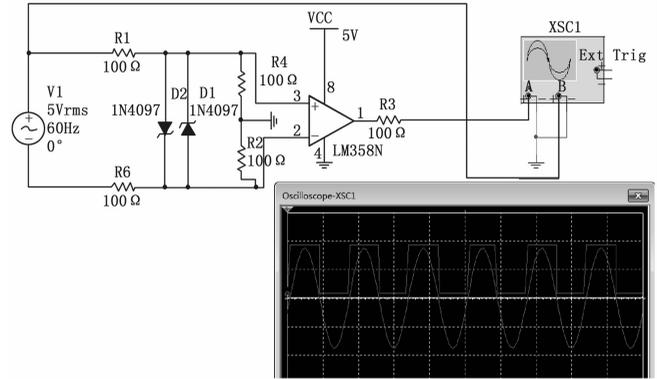


图 6 过零点检测电路及仿真结果

通过波形图可以发现当输入信号处于正半周期时, 电路输出高电平, 当信号处于负半周时, 电路输出低电平。因此可以把该电路的输出信号接 STM32 的输入引脚 PA1, 当 PA1 采集到高电平时, AD 转换器开始采样; 当 PA1 采集到低电平时, AD 转换器停止采样。所以该电路的作用是输出波形过零点信号, 触发 A/D 采集, 统计燃弧半波个数。

2.3 A/D 转换电路

STM32 片上拥有 3 个 ADC, 这些 A/D 转换器可以独立使用, 也可以使用双重/三重模式 (提高采样率)^[10]。通过对 ADC 相关寄存器进行配置, 可以设置它的分辨率、采样通道、转换时间等参数。试验方案使用 ADC1 的通道 5 进行采集, 转换分辨率设为 12 位, 转换时间为 96 个时钟周期, 参考电压为 3.3 V, A/D 可以采集的电压幅值范围为 0~3.3 V。ADC 为 STM32 的片上资源, 完全满足 A/D 转换的精度要求。

3 软件的设计

装置样机中的 STM32 检测程序用库函数编程的方式编写, 库函数是由 ST 官方提供的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

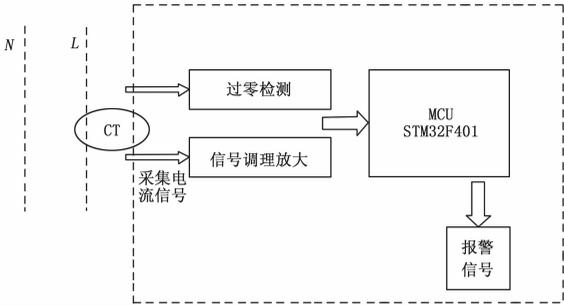


图 4 故障电弧检测装置系统框图

1.2 系统框图

故障电弧检测装置系统框图如图 4。该装置包括电流信号采集、过零检测、数据处理保存及电弧故障识别等部分。

一次侧回路的负载电流经电流互感器衰减后送往信号采集电路, 通过电流取样的方式获取电压信号。调理电路对信号进行滤波和放大, 然后送往单片机进行 AD 转换和信号处理; MCU 在过零点信号的同步脉冲控制下采集电流信号波形, 并进行故障电弧的检测判断, 若检测到电弧故障就会发出报警信号 (LED)。MCU 是电路的核心运算器件, 选择的 MCU 至少要满足以下要求: 1) 时钟频率要满足计算和 A/D 采样的时间要求; 2) 内部 RAM 要有足够的存储空间以存储数据; 3) 要有 DMA 功能。

兼顾性价比和可靠性的综合考虑, 选择了意法半导体公司的 STM32F407VEZT 芯片。该芯片是 ST 公司基于 Cortex-M4 内核生产的具有众多外设的 MCU。通过充分利用其片上 ADC、DMA、定时器和独立看门狗等资源进行设计, 可以提高故障电弧检测装置的简洁性和可靠性。A/D 转换器快速采集电路的电流波形信号; DMA 控制器将数字信号传送至指定内存交由 CPU 处理; 在 STM32F4 的平台上, 电弧检测算法运算速度能达到实时性的要求。

2 故障电弧检测装置的硬件设计

检测装置的硬件部分可以实现电流信号的采集、过零检测、A/D 转换和数据处理等功能。

2.1 信号采集调理电路

采样系统采集的模拟量为交流电流信号, 外加调理电路的作用是把采样信号进行滤波和放大, 送往 STM32 的 A/D 口进行采集和处理。电流信号采集电路如图 5 所示。

电流互感器选用的型号为 GNCT-226A, 额定电流变比 5A/5 mA, R2 为采样电阻, 把电流信号转换为电压值输入到单片机中。运算放大器的放大倍数选定为 20 倍, 将电压值转化成 STM32 的 A/D 口可以识别的 0~3.3 V 电平以内的信号。

的寄存器，具有程序移植性好，易于阅读，开发周期短等优点。

在 ADC 采样程序中，为了提高 CPU 的利用效率，开启了 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。主程序流程图如图 7。

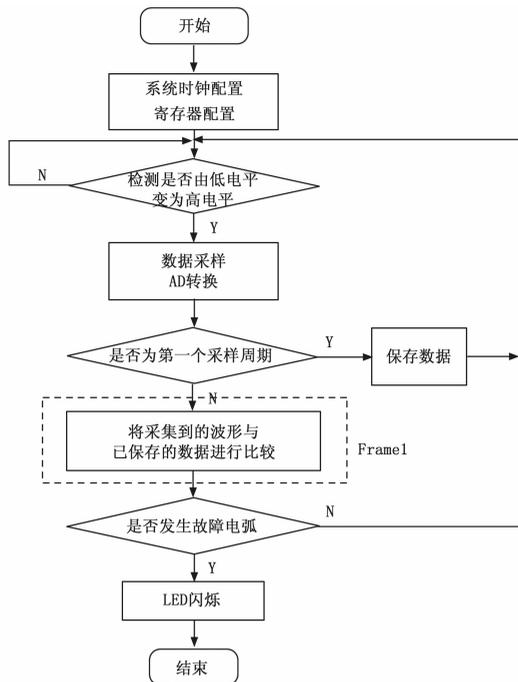


图 7 检测算法流程图

故障电弧检测程序：

框图 7 中的波形比较过程是算法的核心部分，当电路中的屏蔽负载不同时，电流时域波形所表现出的差异值也不相同。以上述 3 种实验负载为例，将正半周期采样时间宽度差值，波形上升率差值和正半周期电流采样幅值的差异值作为特征量，判断是否发生故障电弧。Frame1 为检测判断流程，具体过程如图 8。

STM32 系统时钟配置完成后，MCU 进入正常运行模式，当过零检测电路发出高电平信号时，软件开始接收采集到的数据和定时器中断，并将采集的数据通过 DMA 方式送往预设内存地址。故障判断模块读取全局数据，并将每个特征值依次比较，判断是否超过阈值。若超过，故障标志位 Flag 加 1，不符合就继续下一次判断。在进行比较时，只要满足其中任何一个特征量的预设值，故障标志位 Flag 加 1 并跳出剩下的判断条件。在每次的主循环中都会判断时间和故障标志位是否达到预设条件，若满足设定条件，则发出电弧故障报警信号，若不足，继续下一条指令。

由图 8 可知，检测算法程序是通过比较两个电流波形之间的差异值来检测故障电弧是否发生，其主要特征量是电流波形正半周期时间宽度的差值是否大于阈值，波形上升率之差是否大于阈值，正半周期内的采样幅值之差是否大于阈值。

4 实验结果验证

采用 C 语言编程，在完成电路板焊接和软件代码移植后

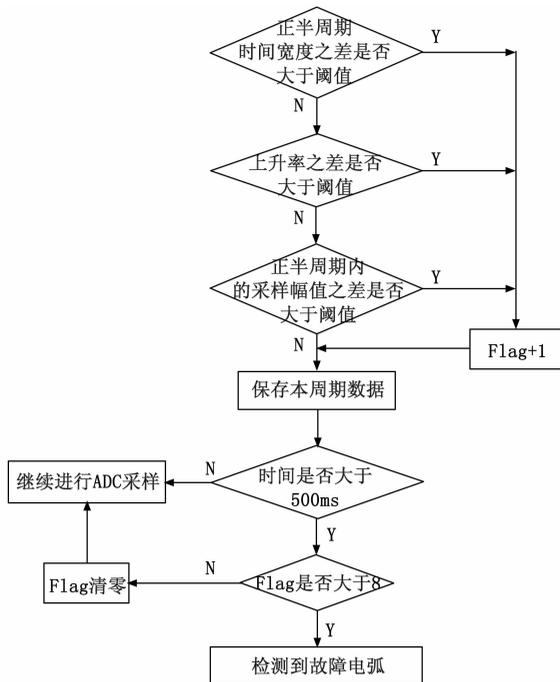


图 8 故障电弧检测判断流程

进行测试。判断电弧检测算法的有效性。A/D 采样频率设为 3 kHz，STM32 在每个周期计算输出的数据结果如下。

表 1 STM32 的计算输出结果负载类型

负载类型	日光灯	开关电源	吸尘器
没有 Δt	0	3	1
产生 Δk	0.023	0.090	0.023
故障 $\Delta value$	0.007	0.013	0.003
电弧			
产生 Δt	3	11	6
故障 Δk	0.089	0.192	0.053
电弧 $\Delta value$	0.189	0.091	0.007

Δt 为电流波形采样时间宽度之差； Δk 为电流波形的上升率之差； $\Delta value$ 为电流波形的幅值之差。表中数据为多次采样计算后获得，每个周期的数据在表中数据的基础上略有波动。根据输出结果可以设置判断阈值 $\Delta t = 5$ ， $\Delta k = 0.161$ ， $\Delta value = 0.150$ 。

表 2 和对串联故障电弧的判别效果汇总负载类型

负载类型	$\Delta t = 5$	$\Delta k = 0.161$	$\Delta value = 0.150$
日光灯	×	×	√
开关电源	√	√	×
吸尘器	√	×	×

注：√为可以判别，×为不能判别。

对已知负载的电弧故障检测：

进行串联电弧故障试验，实验负载分别为日光灯、吸尘器和开关电源，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。分别进行 100 次测试，验证电路中突然出现串联电弧故障时 AFDD 能否正确识别。

表 3 对固定负载的电弧故障检测结果

负载类型	故障识别率(%)	误判次数
日光灯	98	2
吸尘器	98	2
开关电源	100	0

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、吸尘器和开关电源为实验负载时, 该基于 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软件检测算法移植到 STM32 平台, 通过对 3 种屏蔽负载的实验, 测试了电弧检测算法的有效性。意法半导体公司的 ARM 芯片 STM32, 拥有丰富的片上外设资源, 成本较低, 可靠性高, 可以通过编程轻松实现 A/D 转换, 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广阔的应用价值和市场前景。

参考文献:

[1] GB/31143-2014 [S]. 电弧故障保护电器 (AFDD) 的一般要求.
 [2] 施惠冬, 潘东强, 付 华. 电弧故障检测的分析和研究 [J]. 低压

电器, 2013, 20 (4): 17-20.

[3] 孙 鹏, 秦 猛. 采用波形比较法的串联故障电弧快速诊断技术 [J]. 低压电器, 2013 (20), 5-7.
 [4] 王盼盼, 吴自然, 吴桂初, 等. 基于时域波形比较法的故障电弧检测算法的研究 [J]. 温州大学学报 (自然科学版), 2016, 37 (4): 46-53.
 [5] 刘晓明, 徐叶飞, 刘 婷. 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, 2015, 30 (13): 125-133.
 [6] 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.
 [7] 施惠冬, 付 华, 潘东强. 应用短时傅里叶变换识别串联电弧故障特征的研究 [J]. 电器与能效管理技术, 2014, 24 (6): 24-29.
 [8] 段培永, 周 夫, 徐丽平. 基于 HCMAC 神经网络的故障电弧检测方法 [J]. 低压电器, 2013, 20 (4): 17-20.
 [9] 王子骏, 张 峰, 张士文, 等. 基于支持向量机的低压串联故障电弧识别方法研究 [J]. 电测与仪表, 2013, 50 (568): 22-26.
 [10] 董爱华, 吕 辉, 苏 波. 低压配电箱故障电弧信号在线检测与报警系统 [J]. 电测与仪表, 2008, 45 (506): 17-19.
 [11] 任宏斌, 冷建伟. 基于 STM32 的交流电压检测, 电子设计工程, 2016, 24 (13): 133-135.
 [12] 鲍洁秋. 单相串联电弧故障识别方法研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016.

(上接第 8 页)

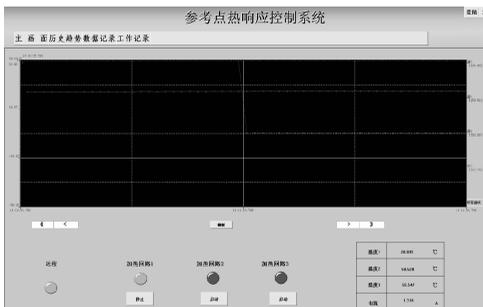


图 11 系统远程实时监控

参考点热响应测试结束后, 将弹出提示对话框, 如图 12 所示。并将测试结果保存在本地文件夹下的“测试结果.txt”中。



图 12 自动判读软件界面图

5 结束语

本文提出了一种采用铂电阻和薄膜加热片组成反馈单元, 由温度测量仪、线性电源和电流表等组成控制箱, 通过 LAN 网络与远程计算机连接实现远程监控的方案, 进行参考点热响应测试系统集成。该系统具有良好的人机交互界面、操作过程简单、通用性好的特点, 对保障航天器真空热试验地顺利进行具有重要作用。目前, 该系统已成为 KM6、KM7 等大型空间环境模拟设备的必需配置, 并在多项型号试验中得到成功应用。

参考文献:

[1] 郭 赣. 真空热试验的温度测量系统 [J]. 航天器环境工程. 2009, 26 (1): 33-36
 [2] Y. Tam U and C. Uematsu. Inhomogeneity of each thermoelements of type T thermocouples [J]. SICE 2002 Aug: 5-7
 [3] 张海涛, 罗 珊, 郭 涛. 热电偶冷端补偿改进研究 [J]. 仪表技术与传感器. 2011 (7): 11-14
 [4] 孙怀远, 宋来全, 杨丽英, 等. 热电偶温度检测系统设计与应用 [J]. 电子测量技术. 2014, 37 (12): 86-89
 [5] 黄本城, 童靖宇. 空间环境工程学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
 [6] 孙兴华, 苏新明, 陶 涛. 真空热试验热电偶测温参考点分析改进 [J]. 航天器环境工程, 2012, 29 (5): 522-526.
 [7] 张红松. ANSYS 12. 0 有限元分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.