

适配器匹配下的大规模模拟电路故障 红外图像检测系统设计

仲赞[†], 王建锋, 周安仁, 林文钊

(国网浙江省电力有限公司 湖州供电公司, 浙江 湖州 313000)

摘要: 为了提升模拟电路故障检测效果, 精准定位确定电路故障区域, 设计了适配器匹配下的大规模模拟电路故障红外图像检测系统。通过三维精密电动平台, 确定大规模模拟电路的红外成像范围; 通过定位标志刻画电路红外图像边缘; 利用适配器统一匹配待测电路输入输出接口信号; 通过三维精密电动平台、定位标志与适配器, 共同控制热像仪, 扫描待测电路, 获取电路红外图像; 利用图像存储卡存储扫描获取的电路红外图像; 通过红外图像预处理模块, 滤波处理红外图像; 大规模模拟电路故障诊断模块利用互信息配准法, 配准图像存储卡内的电路红外图像, 通过差分检测法初步确定电路故障区域, 利用热序列检测法精准检测电路故障元件; 利用互网络实现整个系统的通信。实验证明: 该系统可有效采集并预处理电路红外图像, 提升红外图像清晰度; 该系统可有效初步确定电路故障区域, 精准诊断电路故障元件。

关键词: 适配器; 大规模; 模拟电路; 故障检测; 红外图像; 差分检测法

中图分类号: TP302.1

文献标识码: A

Design of Infrared Image Detection System for Large-scale Analog Circuit Faults Based on Adaptor Matching

ZHONG Zan[†], WANG Jianfeng, ZHOU Anren, LIN Wenzhao

(Huzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Huzhou, Zhejiang 313000, China)

Abstract: In order to improve the effect of analog circuit fault detection, accurately locate and determine the circuit fault area, a large-scale analog circuit fault infrared image detection system with adaptor matching is designed. The infrared imaging range of large-scale analog circuit is determined through the three-dimensional precision electric platform; The infrared image edge of the circuit is depicted by positioning marks; use the adaptor to uniformly match the input and output interface signals of the circuit under test. Through the three-dimensional precision electric platform, positioning mark and adaptor, the thermal imager is jointly controlled to scan the circuit to be tested and obtain the infrared image of the circuit; using the image memory card to store the infrared image of the circuit obtained by scanning; Through the infrared image preprocessing module, filter and process the infrared image, the large-scale analog circuit fault diagnosis module uses the mutual information registration method to register the circuit infrared image in the image memory card, preliminarily determines the circuit fault area through the differential detection method, and uses the thermal sequence detection method to accurately detect the circuit fault components. The communication of the whole system is realized by using the Internet. Experiments show that the system can effectively collect and preprocess the infrared image of the circuit and improve the definition of the infrared image. The system can effectively determine the circuit fault area and accurately diagnose the circuit fault components.

Key words: adaptor; large scale; analog circuit; fault detection; infrared image; differential detection method

收稿日期: 2023-03-07

基金项目: 国网浙江省电力有限公司双创资助项目(B711JZ210008)

作者简介: 仲赞(1988—), 男, 江苏宿迁人, 本科, 工程师, 研究方向: 电气工程及其自动化。

[†] 通信联系人, E-mail: sharuo22862@163.com

若确保电力设备正常运行的电路发生故障,将导致电力设备运行异常,出现大规模停电情况,影响人们的生活^[1-3]。传统电路故障检测技术需要工作人员在现场检测,需要带电作业,存在一定的风险,且检测精度低、检测效率慢^[4]。吴钊等^[5]依据改进 LMD 方法,设计大规模模拟电路软故障诊断系统,利用信息熵和分形维数,融合电路信号相关性和门限,获取电路故障诊断结果,该系统可有效按照电路信号相关性获取故障诊断结果,具有较高的故障诊断效率,提升故障诊断精度。董海迪等^[6]设计容差模拟电路多参数故障诊断系统,通过牛顿法建立电路故障诊断模型,利用四阶龙格库塔法求解该模型,获取故障诊断结果,该系统可有效诊断电路故障。上述两个系统均无法统一不同类型电路信号,导致其适用范围较小,无法诊断各种类型模拟电路故障。适配器属于不同待测电路红外图像采集的前提,其切换性能可提升模拟电路故障检测效果,扩展模拟电路故障检测范围^[7]。为此设计适配器匹配下的大规模模拟电路故障红外图像检测系统,提升大规模模拟电路故障检测效果。

1 大规模模拟电路故障红外图像检测系统

依据适配器的信号匹配性能,设计适配器匹配下的大规模模拟电路故障红外图像检测系统,该系统整体框架如图 1 所示。

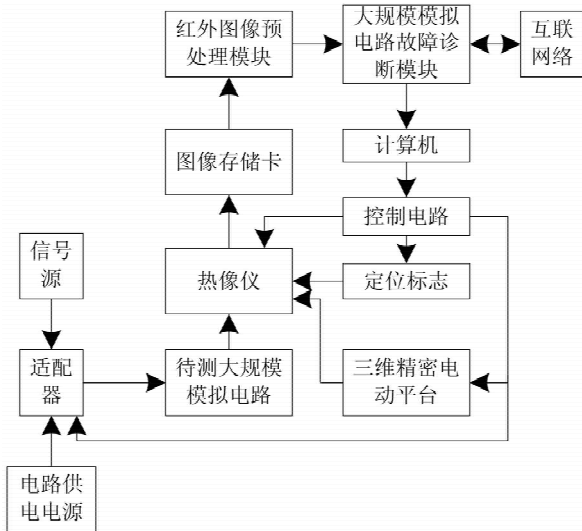


图 1 大规模模拟电路故障红外图像检测系统

利用计算机驱动控制电路,控制三维精密电动平台,确定大规模模拟电路的红外成像范围;通过定位标志刻画大规模模拟电路红外图像边缘;利用

适配器统一匹配待测大规模模拟电路信号与负载等,令热像仪扫描到的大规模模拟电路信号与负载等具备统一性,方便后续故障诊断;通过三维精密电动平台、定位标志与适配器,共同控制热像仪,扫描待测大规模模拟电路;利用图像存储卡存储扫描获取的大规模模拟电路红外图像;通过红外图像预处理模块,滤波处理红外图像;大规模模拟电路故障诊断模块,利用互信息配准法配准同一目标,不同时间、不同角度扫描获取的电路红外图像,通过差分检测法初步确定大规模模拟电路故障区域,利用热序列检测法精准诊断大规模模拟电路故障元件;利用互网络实现整个系统的通信。

2.1 大规模模拟电路信号匹配的适配器

因为各待测大规模模拟电路型号不同,导致信号与负载等各不相同,所以利用适配器统一匹配各待测大规模模拟电路信号与负载,令待测大规模模拟电路输入输出信号接口具备统一性,提升大规模模拟电路故障红外图像检测系统的适用范围,该适配器的结构如图 2 所示。

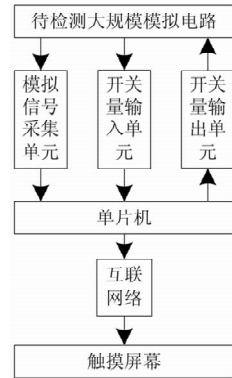


图 2 适配器结构

该适配器的配置为 2.8 寸触摸屏,钣金外壳,待机时长超过 3 小时,高温操作(60 ± 2) $^{\circ}\text{C}$,低温操作(-20 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ 。该适配器采用 AT89C52 单片机进行设计,由于有 PDIP、PQFP/TQFP 及 PL-CC 三种封装形式以适应不同产品的需求,且开发成本较低,可以匹配大部分待检测大规模模拟电路的信号与负载等,模拟信号采集单元选择 $-10\text{V} \sim +10\text{V}$ 模拟信号的 A/D 转换电路^[8],开关量输入单元选择 +48 开关量信号采集电路,开关量输出单元选择 +48 开关量信号输出电路,满足现场输入设备与输入模块之间距离较长的需求。采用互联网进行通信,利用触摸屏控制适配器,匹配待检测的大规模模拟电路信号和负载信息。

适配器利用中继电缆和待检测大规模模拟电

路进行连接,单片机内部采用时钟工作模式,其扩展端口为 P0 口,利用译码器 74AHC138 为片选信号译码芯片。模拟信号采集单元为 16 位多量程 A/D 转换器,转换精度超过 1/5096,符合大规模模拟电路故障红外图像检测系统使用需求,其内部时钟为采集转换时钟^[9,10]。开关量输入单元为 64 路 48V 开关量采集电路,符合系统开关量使用需求,利用光电耦合器 TLP181GBSOP4,隔离开关输入量,输入双向总线收发器 74HC245TS 内。开关量输出单元选择 BL8023D 继电器驱动芯片,利用 74AHC138 译码器与 48V 继电器,建立 52 路开关量输出电路。

2 大规模模拟电路红外图像预处理模块

利用红外图像预处理模块滤波处理热像仪采集的大规模模拟电路红外图像,为后续大规模模拟电路故障检测提供清晰的红外图像;红外图像预处理模块结构如图 3 所示。

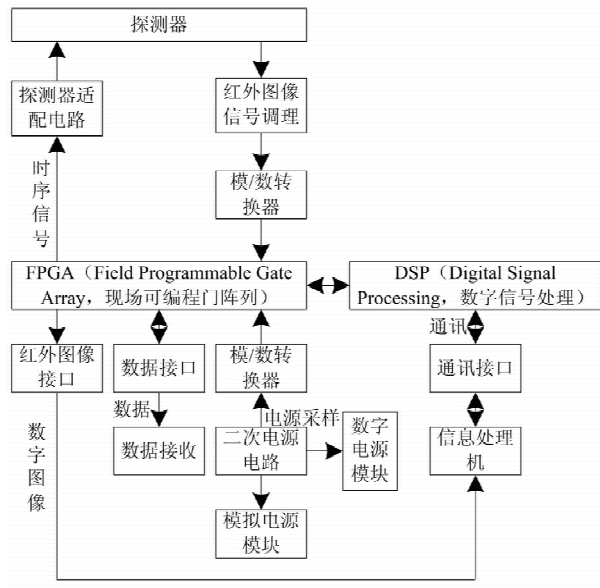


图 3 红外图像预处理模块结构图

该模块利用探测器完成红外图像预处理的时序控制,探测器接收的图像存储卡内热像仪采集的大规模模拟电路红外图像为模拟信号,先利用红外图像信号调理单元进行信号调理,再通过模/数转换器将模拟信号转换成数字信号,传输至 FPGA 与 DSP 内,FPGA 与 DSP 属于红外图像预处理模块的信号处理核心,FPGA 接收大规模模拟电路红外图像数字信号后,利用 FPGA 与 DSP 联合处理该数字信号,完成大规模模拟电路红外图像预处理^[11],同时控制探测器与红外图像预处理模块外

围电路,差分转换数据信号,可确保大规模模拟电路红外图像质量,利用红外图像数据差分转换接口电路,传输差分转换数据信号至后续处理电路中,利用串口通信控制信号处理机与预处理电路间的控制指令与数据,利用 DSP 控制串口通信接口电路实现通信^[12]。红外图像预处理模块内器件种类繁多,各器件的供电电源要求不同,因此利用二次电源电路转换电源,为各器件提供其需要的电源。

2.3 大规模模拟电路故障检测

大规模模拟电路故障诊断模块,利用互信息配准法配准同一目标,不同时间与不同角度扫描获取的电路红外图像,通过差分检测法初步确定大规模模拟电路故障区域,利用热序列检测法精准诊断大规模模拟电路故障元件。

红外图像能够直接呈现大规模模拟电路中元件的发热情况,红外图像 ROI(Region of Interest) 代表红外图像内感兴趣区域。

在两幅大规模模拟电路红外图像 X 与 Y 重叠情况下,重叠区域存在共同信息,利用互信息带代表该部分共同信息,记作信息熵^[13],指 X 信息所处像素位置中相对于 Y 的信息最稳定, X 与 Y 的信息熵如下:

$$Z(X) = - \sum_x \lambda p_X(x) \lg p_X(x)$$

$$Z(Y) = - \sum_y \lambda p_Y(y) \lg p_Y(y) \quad (1)$$

$$Z(X,Y) = - \sum_{x,y} \lambda p_{XY}(x,y) \lg p_{XY}(x,y)$$

其中, X 与 Y 的信息熵是 $Z(X)$ 、 $Z(Y)$; X 与 Y 的像素点是 x 、 y ; X 与 Y 内像素点 x 与 y 的概率分布是 $p_X(x)$ 、 $p_Y(y)$; 常数是 λ ; X 与 Y 的联合熵是 $Z(X,Y)$; X 与 Y 内像素点 x 与 y 的联合概率分布是 $p_{XY}(x,y)$ 。

已知 Y 时 X 的条件熵是 $Z(X/Y)$, 已知 X 时 Y 的条件熵是 $Z(Y/X)$, 公式如下:

$$Z(X/Y) = - \sum_{x,y} \lambda p_{XY}(x,y) \lg p_{X/Y}(x/y)$$

$$H(Y/X) = - \sum_{x,y} \lambda p_{XY}(x,y) \lg p_{Y/X}(y/x) \quad (2)$$

其中,已知 Y 时 X 的条件概率分布是 $p_{X/Y}(x/y)$; 已知 X 时 Y 的条件概率分布是 $p_{Y/X}(y/x)$; X 与 Y 的互信息及归一化的互信息如下:

$$\begin{aligned}
I(X,Y) &= Z(X)+Z(Y)-Z(X,Y) \\
&= Z(X)-Z(X/Y)=Z(Y)-Z(Y/X) \\
NMI(X,Y) &= (Z(X)+Z(Y))/\gamma Z(X,Y)
\end{aligned} \quad (3)$$

其中,归一化系数是 γ ;归一化互信息是 $NMI(X,Y)$;互信息是 $I(X,Y)$ 。

利用互信息配准法,配准大规模模拟电路红外图像需先提取红外 ROI 图像,并实施灰度压缩^[14],对压缩后的红外图像展开互信息配准。

通过区域增长法提取红外 ROI 图像具体步骤如下:

步骤 1:扫描 X ,在 X 内寻找温度最高点,以其为起始种子点 P ;

步骤 2:确定种子生长规则,令自适应阈值为 G ,在低于 G 时种子生长,即 $X(x_1,y_1)-X(x,y)<G$,否则结束生长, X 内像素 (x_1,y_1) 、 (x,y) 的生长值是 $X(x_1,y_1)$ 、 $X(x,y)$;

步骤 3:重复操作步骤 2,以不产生新种子为止,该区域记作 M_1 , M_1 内具有大规模模拟电路元件的发热区与热辐射区,在 X 内剔除 M_1 ,获取新大规模模拟电路红外图像 X_1 ,反复操作步骤 1 与步骤 2,获取新的区域 M_2 ^[15],以此类推,获取全部区域 M_n ,区域数量是 n ;

步骤 4:令大规模模拟电路内元器件附近温度为 D ,设置温度阈值为 D' ,扫描 A 获取温度最高点 $Q(x,y)-D' \leq D$ 时, A 的全部发热区域与热辐射区域完成提取,温度最高点为 $Q(x,y)$;

步骤 5:令生长完成的区域最外层像素集合为 U , U 属于大规模模拟电路初始轮廓,计算 U 获取大规模模拟电路内元件区域轮廓,获取新的红外 ROI 图像 $X(x,y)$;灰度压缩 $X'(x,y)$,降低图像灰度级,缩减计算量,提升大规模模拟电路红外图像配准精度,最大化互信息量,灰度压缩公式如下:

$$X'(x,y) = \frac{D(x,y)-D_{\min}}{D_{\max}-D_{\min}} \times \theta \times 255 \quad (4)$$

其中,压缩系数是 θ ;红外 ROI 图像内像素点温度最高值、最低值是 D_{\max} 、 D_{\min} ;红外 ROI 图像内像素点温度值是 $D(x,y)$;红外 ROI 图像坐标是 x,y 。

令 X 与 Y 的红外 ROI 图像是 X' 、 Y' ;仿射变换 X' 获取新红外图像 X'' ,令 X'' 与 Y' 的互信息量达到最大,大规模模拟电路红外图像配准时,调

整仿射变换参量,实现红外图像配准。利用最小二乘法估计仿射变换参数,在标准大规模模拟电路红外图像内选择 m 个特征点 (x_1,y_1) 、 (x_2,y_2) 、 \dots 、 (x_m,y_m) , $m \geq 4$,待配准大规模模拟电路红外图像特征点是 (x'_1,y'_1) 、 (x'_2,y'_2) 、 \dots 、 (x'_m,y'_m) ;按照仿射变换原理获取:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = k\mu \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X'_i \\ Y'_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,大规模模拟电路标准红外图像内第 i,j 个像素位置为 (x_i,y_i) ;待配准大规模模拟电路红外图像内第 i,j 个像素位置为 (x'_i,y'_i) ;仿射变换系数为 μ ;旋转角度为 α ;平移量为 x_0,y_0 。

将式(5)变更成:

$$\begin{cases} x_i = a_{11}x'_i + a_{12}y'_i + a_{13} \\ y_i = a_{21}x'_i + a_{22}y'_i + a_{23} \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \end{bmatrix} = [\mathbf{S}^T \mathbf{S}]^{-1} \mathbf{S}^T \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\text{其中, } \mathbf{S} = \begin{bmatrix} x'_1 & y'_1 & 1 \\ x'_2 & y'_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_m & y'_m & 1 \end{bmatrix}; \text{转置符号是 T。}$$

简化式(6)获得:

$$\begin{bmatrix} x'_1 & y'_2 & 1 \\ x'_2 & y'_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_m & y'_m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

通过式(7)完成大规模模拟电路红外图像配准。

差分检测法是差分运算大规模模拟电路故障红外图像与标准红外图像,按照温度差初步判断大规模模拟电路故障区域,该方法是在故障温度与正常温度存在显著差距时,利用差分检测法获取差分图像,将其作为判定故障区域的依据,再利用相应大规模模拟电路搜索故障区域,令配准后的大规模模拟电路故障红外图像与标准红外图像 $L(x,y)$ 、 $R(x,y)$,差值图像 $E(x,y)$ 公式如下:

$$E(x,y) = R(x,y) - L(x,y) \quad (8)$$

依据 $E(x,y)$ 初步判断大规模模拟电路故障区域。

利用热序列检测法在初步判断的大规模模拟

电路故障区域中,精准检测大规模模拟电路故障元件,在配准后大规模模拟电路故障区域红外图像内提取元件温度信息,生成温度曲线。该曲线呈现了元件温度的变化情况,对比分析故障元件温度曲线与标准元件温度曲线,确定该元件是否存在故障,完成大规模模拟电路故障检测。

3 实验分析

以某电子厂生产的电路板为实验对象,利用本文系统检测该电路板大规模模拟电路故障,分析本文系统故障检测的有效性。

对本文系统展开性能测试,利用本文系统检测大规模模拟电路故障时,各项性能指标测试结果如表 1 所示。

表 1 本文系统性能指标测试结果

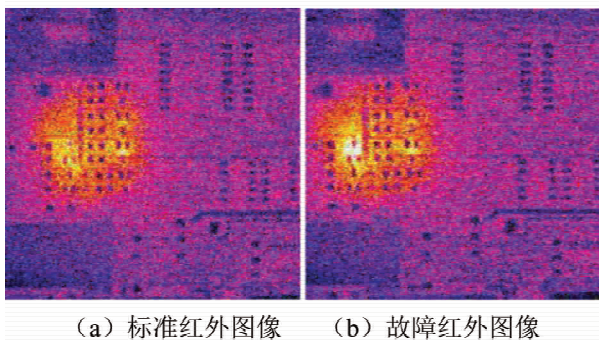
项目	指标要求	实际指标	符合情况
阻抗测试	无短路	正常	符合
红外图像输出	功能正常	正常	符合
串口通信	功能正常	正常	符合
红外图像畸变	小于或等于 0.5%	-0.3%	符合
红外图像灰度级	256 级	256 级	符合
成像周期	小于 60 帧/s	55 帧/s	符合
像元素	320×265	320×265	符合
成像延时	小于 6 行红外图像数据传输时间	小于 3 行	符合
功耗	小于或等于 4w	34.1w	符合
故障诊断精度	大于或等于 90%	96.8%	符合

根据表 1 可知,经过测试,本文系统的各项性能指标均符合大规模模拟电路故障检测需求,且大规模模拟电路故障检测精度高达 95.8%,具备较优的故障检测效果。

在该电子厂生产的电路板内随机选择一个标准大规模模拟电路,以及一个故障大规模模拟电路,利用本文系统采集这两个大规模模拟电路的红外图像,采集结果如图 4 所示,利用本文系统对采集的红外图像进行预处理,预处理结果如图 5 所示。

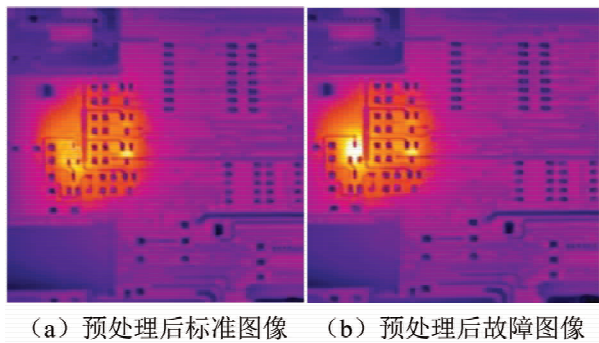
综合分析图 4 与图 5 可知,本文系统可有效采集标准与故障大规模模拟电路红外图像,经过预处理后的红外图像,可有效去除红外图像内部噪声,

明显呈现红外图像内模拟电路的细节信息,为后续大规模模拟电路故障检测提供清晰的红外图像。实验证明:本文系统可有效采集并预处理大规模模拟电路红外图像。



(a) 标准红外图像 (b) 故障红外图像

图 4 大规模模拟电路红外图像采集结果



(a) 预处理后标准图像 (b) 预处理后故障图像

图 5 大规模模拟电路红外图像预处理结果

本文系统利用差分检测法初步判断大规模模拟电路故障区域,大规模模拟电路故障区域判断结果如图 6 所示。

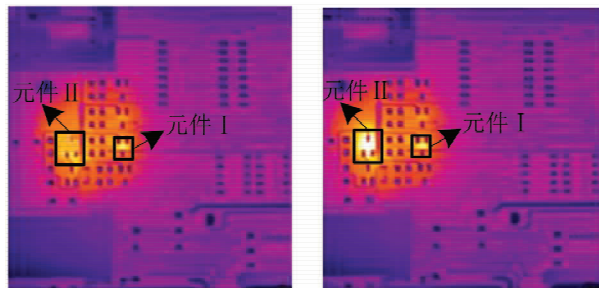
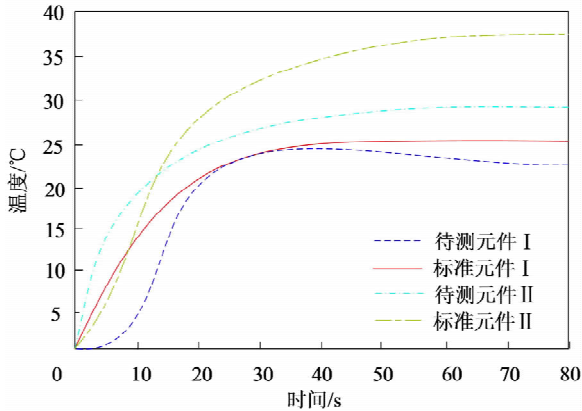


图 6 大规模模拟电路故障区域判断结果

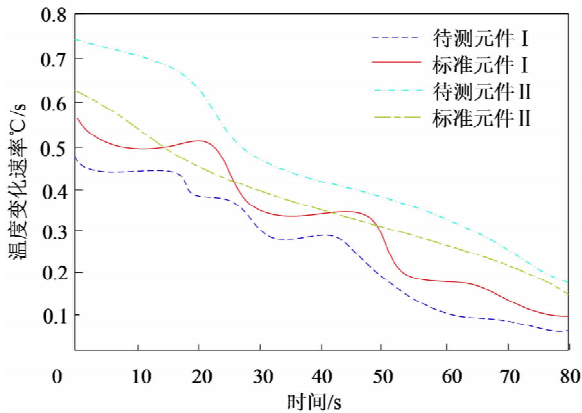
根据图 6 可知,标准大规模模拟电路红外图像中元件 I 附近温度,与故障红外图像中元件 I 附近温度无显著差别,说明该元件附近区域无故障,标准红外图像内元件 II 附近温度与故障红外图像内元件 II 附近温度存在显著差别,说明该元件附近区域存在故障。实验证明:本文系统可有效初步判断

大规模模拟电路故障区域。

利用本文系统进一步检测该大规模模拟电路故障元件,元件 I 与元件 II 的温度变化曲线与温度变化速率如图 7 所示。



(a)大规模模拟电路元件温度变化曲线



(b)大规模模拟电路元件温度速率变化曲线

图 7 大规模模拟电路元件温度与温度速率变化曲线

根据图 7 可知,待测元件 I 的温度变化曲线与温度速率变化曲线始终低于标准元件 I,说明该元件无故障;待测元件 II 在时间超过 10s 左右后,温度变化曲线明显高于标准元件 II,且待测元件 II 温度变化速率明显高于标准元件 II,说明待测元件 II 为故障元件。实验证明:本文系统可有效检测大规模模拟电路故障元件。

4 结 论

科技发展导致各个领域的用电量呈指数型增长,提升电路短路概率,为此设计适配器匹配下的大规模模拟电路故障红外图像检测系统,结合适配器与红外图像,精准检测大规模模拟电路故障,提升电子设备使用的连续性,确保电子设备正常运行。日后还需进一步改善适配器,提升开关速度,

扩展吞吐切换信号数,加强大规模模拟电路诊断效果。

参考文献

- [1] 汪晓璐,李畅,张朝龙. 基于深度学习的模拟电路故障诊断方法[J]. 电子器件, 2019, 42(3): 674-678.
- [2] 张朝龙,何怡刚,杜博伦. 基于 DBN 特征提取的模拟电路早期故障诊断方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(10): 112-119.
- [3] 单剑锋,杨雨. 粒子群优化的流形 SVM 模拟电路故障诊断[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(2): 260-264.
- [4] 孙健,胡国兵,邓韦,等. 基于 RS-PSO-SVM 集成的模拟电路软故障诊断[J]. 微电子学, 2020, 50(2): 227-231.
- [5] 吴钊,张海彬. 基于 LMD 算法的大规模模拟电路软故障诊断仿真[J]. 计算机仿真, 2021, 38(6): 424-427+433.
- [6] 董海迪,刘刚,何兵,等. 基于系统搜索的容差模拟电路多参数故障诊断[J]. 中国测试, 2019, 45(7): 134-139.
- [7] 尤文斌,丁永红. 基于 WPSO-PO 的冲击波测试适配器参数优化研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 221-228.
- [8] 谈恩民,王晨. 基于表征学习的模拟电路故障诊断[J]. 计算机工程与科学, 2022, 44(1): 27-35.
- [9] 熊魁,岳长喜,刘冬梅,等. 基于 IGWO 算法优化的 SVM 模拟电路故障诊断[J]. 微电子学与计算机, 2019, 36(1): 16-21.
- [10] 高伟,李福胜,张铁竹. 基于一维卷积神经网络的模拟电路故障诊断[J]. 电子器件, 2021, 44(4): 871-875.
- [11] 郝建新,王力. 基于改进脉冲耦合神经网络的电路板红外图像分割[J]. 激光与红外, 2020, 50(11): 1410-1416.
- [12] 高明哲,许爱强,唐小峰,等. 基于多核多分类相关向量机的模拟电路故障诊断方法[J]. 自动化学报, 2019, 45(2): 434-444.
- [13] 李楠,邓威,王晨,等. 基于 K-means 聚类与概率神经网络的模拟电路故障诊断方法[J]. 中国测试, 2021, 47(3): 98-103+109.
- [14] 孙健,胡国兵,王成华. 基于随机投影和 NB 网络的模拟电路故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 105-112.
- [15] 胡鸿志,岑德炼,徐翠锋,等. 基于 CS 优化神经网络的模拟电路故障诊断[J]. 计算机工程与设计, 2019, 40(4): 1151-1155.