

文章编号: 1672-8785(2017)01-0023-08

利用红外温升多特征矢量提升电子装备热像异常检测性能的方法

张 斌¹ 温立新² 史志鹏³ 袁 兵³

(1. 陆军参谋部, 北京 100144 ;

2. 66444 部队, 北京 100042 ;

3. 中国电子科技集团公司第三十三研究所, 山西太原 030032)

摘 要: 针对传统的接触式电参数故障检测方法难以满足日益复杂的电子装备的检修需要问题, 提出了一种基于红外热像的可提升非接触式电子装备异常检测性能的温升多特征方法。在红外与光学异源配准的基础上, 获得电子装备各元件的精确位置。然后基于红外观测图像获取各个标准和待测元件中心区域的温升均值曲线。在对这些曲线进行全帧程分段后, 精细化地提取温升统计矢量。接着计算待测温升统计矢量与标准温升统计矢量的差异并对其进行归一化处理, 从而构建温升多特征矢量。最后根据该矢量, 通过分段表决和异常量化实现电子装备热像异常的整体态势感知。与传统的热像异常检测方法相比, 本文所构建的温升多特征矢量可以更精细、更稳健地描述温升变化。通过分段表决和异常量化实现了温升全程表征, 为后续的电路故障智能推理奠定了基础。实验结果表明, 本文方法具有检测准确率高、实时性好等优点。

关键词: 红外检测; 温升多特征; 热像异常; 电子装备故障

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.01.005

Method for Improving Detection performance of Thermal Abnormality of Electronic Equipment by Using Infrared Multi-feature Vector

ZHANG Bin¹, WEN Li-xing², SHI Zhi-peng³, YUAN Bing³

(1. Army Staff, Beijing 100144, China;

2. Unit 66444, PLA, Beijing 100042, China;

3. No.33 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Taiyuan 030032, China)

Abstract: To solve the problem that traditional contact electric parameter fault detection methods are difficult to meet the maintenance requirement of increasingly complex electronic equipment, a temperature rising multi-feature method based on infrared thermography which can improve noncontact electronic equipment abnormality detection is proposed. Firstly, on the basis of infrared and optical heterologous registration, the accurate position of each element in an electronic equipment is obtained. Then, the mean value curves of temperature rising in the central areas of each standard element and each element to be detected are obtained on the basis of the infrared images observed. After the curves are divided into multiple subsections, the temperature rising statistical vectors are extracted precisely. Secondly, the

收稿日期: 2016-11-28

作者简介: 张斌(1956-), 男, 四川泸州人, 高级工程师, 主要从事信息工程研究。E-mail: sfff@qq.com

difference between the temperature rising statistical vector to be detected and the standard temperature rising statistical vector is calculated and normalized so as to construct the temperature rising multi-feature vector. Finally, according to the vector, the whole situation awareness of thermal abnormality of the equipment to be detected is implemented by segmental judgment and abnormal quantification. Compared with the traditional thermal abnormality detection method, the temperature rising multi-feature vector constructed can more precisely and robustly describe the variation of temperature rising. The experimental result shows that this method has the advantages of high accuracy and good real-time performance. It lays a foundation for the subsequent intelligent reasoning of electric circuit fault.

Key words: infrared detection; multi-feature of rising temperature curve; thermal abnormality; electronic equipment fault

0 引言

传统的接触式电参数检测方法通过测量电路中的电压、电阻和频率等参数并结合电路连接情况来诊断电路板故障^[1-2]。该方法难以满足日益复杂的精密电子装备的故障检测需求,其原因有三个:一是耗时长,要求高。不仅检测时间长,而且对检测人员的专业技能要求高,通常需要他们知晓电路原理图、元器件封装说明等资料。二是对于大规模集成电路元件来说,接触式电参数测量操作起来极其困难。在现代电子装备中,大规模集成电路元件封装已呈现出高密度、超大规模等特点,如芯片级封装(Chip Scale Package, CSP)和球栅阵列(Ball Grid Array, BGA)封装等。它们不仅管脚数目多、间隙小,而且管脚往往位于芯片底部。三是在高频电路中,探针接触会造成分布参数变化,导致电参数测量结果产生失真。因此,研究快速有效的非接触式装备故障无损检测技术具有十分重要的意义。

由于具有快速、高效、无需接触以及没有损伤等优点,红外检测手段在电子装备故障检测中受到了人们的极大关注。根据斯蒂芬-玻尔兹曼原理,只要物体温度大于 $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ 就会向外界产生热辐射^[3]。在红外检测过程中,利用传感器焦平面^[4]上的多晶硅或氧化钨单元感应待测物体与背景之间的温差,接着通过平衡电桥将温度信息转换为电信号,并在采样后以数字形式将其量化成待测物体的像素分布及温度等信息。然后采用红外热像处理软件从这些信息中提取出待测物体的温度特征,并将其与标准库

中的热像数据进行对比,从而判断温度异常的元器件^[5]。

目前,利用红外信息检测电子装备故障的方法主要有差分热图检测法和序列热图检测法两种^[6-8]。其中,差分热图检测法利用标准稳态热图与待测稳态热图之间的差异进行热像异常检测。由于仅仅利用电子装备的瞬时热像信息,该方法只适用于由静态故障造成的稳定明显的热像差异,且不具备动态热像差异捕捉能力。由于热像稳定时热扩散效应会导致大功率元件的发热“污染”临近小功率元件的温度信息,所以小功率元件热像异常的误判率会增大。序列热图检测法用红外热像仪分别采集标准电子装备和待测电子装备在工作时的红外热图像序列,然后分别提取元件的标准温度变化曲线和待测温度变化曲线,并通过对温度变化曲线作进一步分析和比较以判定该元件是否存在故障。由于此类方法主要采用温度变化速率作为分析的主要参数,同一电子装备在重复温升过程中的检测结果可能并不一致,造成检测可靠性较差;在利用温升全帧程数据完成拟合时,由于需要等待温升过程结束后才能处理,等待时间长,温升数据量大、曲线拟合计算的复杂度高,导致检测耗时长,从而造成序列热图检测法的实时性较差。

针对上述方法的各种不足,我们利用环境温度控制装置保持测试环温,以消除环温对电子装备红外数据采集的影响;为了准确反映温度变化,直接处理高精度浮点温度数据;通过光

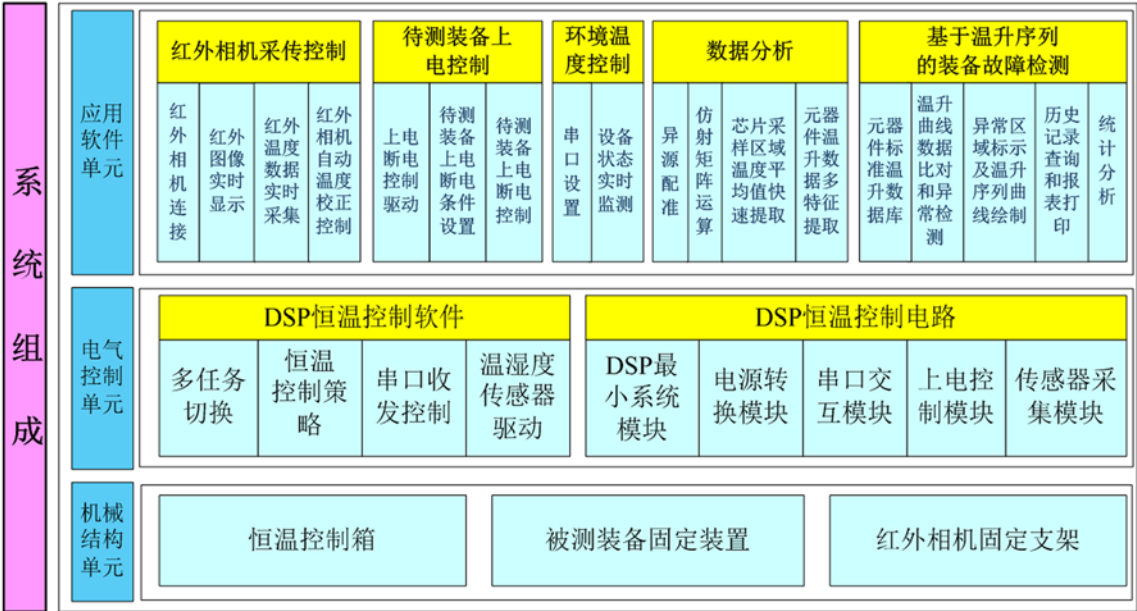


图 1 系统结构图

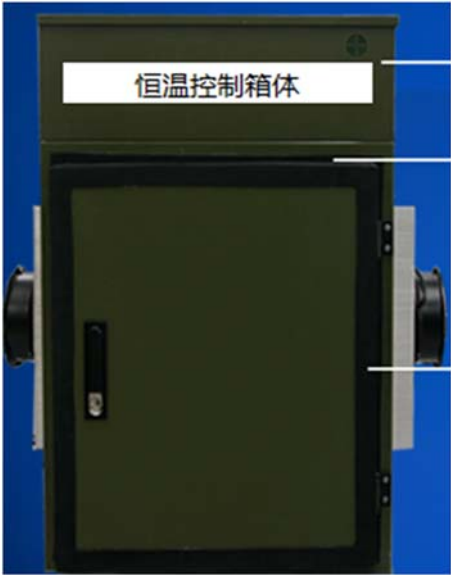


图 2 恒温控制箱体



图 3 红外传感器固定支架

学与红外的异源配准，利用光学分辨力高的优势，准确定位元件的发热区域；通过构建温升多特征矢量来捕捉温升的细微变化，由于增加了特征维度，可提高检测的可靠性；基于温升的分段表决提高精细化观测程度，并利用热像异常量化表征来实现整体态势分辨。

1 试验系统

1.1 系统结构

如图 1 所示，整个系统由机械结构单元、电气控制单元和应用软件单元组成。机械结构单元包括恒温控制箱体（见图 2）、被测装备固定装置和红外传感器固定支架（见图 3）。其中，被测装备固定装置可保证被测装备每次的放置位置完全相同；红外传感器固定支架不仅具有支撑和锁定传感器的作用，而且由于高度可调节，所以还具备适应不同尺寸电路板的完整观测能力。电气控制单元包括 DSP 恒温控制电路和 DSP 恒温控

制软件两部分,用于实现对环境温度、箱内温度的实时采集/回显和对恒温控制组件的驱动。该单元将恒温控制箱的内部温度保持在 $10\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,以减小环境温度的波动对红外观测温度数据的干扰。应用软件单元包括红外传感器采传控制模块、待测装备上电控制模块、环境温度控制模块、数据分析模块和故障检测模块,用于实现光学和红外图像的异源配准、红外传感器的采传控制、保温箱体环境温度的设置与恒温控制、装备电路板的自动上电以及电路板各个元器件的温升数据提取和分析等功能。

1.2 工作原理

红外图像的视觉模糊性以及较低的分辨率会给元器件辨识带来困难,因此本文对光学与红外图像进行配准,同时得到电路板的背景信息和辐射信息,以便维修人员辨识故障元器件。由于本系统中的机械结构单元可保证被测装备每次的放置位置完全相同,所以只需进行一次配准即可。根据光学和红外图像之间的空间位置映射关系,利用在光学图像中事先标注的元器件位置,实现电路板的热图像信息与各个元器件之间的一一对应。

测试人员通过 PC 端的人机交互界面设定保温箱体的恒温温度(本文采用 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$)、恒温时间和数据采集时间等参数。系统运行的基本流程如下:(1)通过 DSP 恒温控制单元将箱体内部温度调节至 $10\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。(2)在达到恒温温度后,对

箱体内部进行保温。保温时间由所设定的恒温时间决定。(3)使装备的电路板自动上电,然后采集电路板上各个元器件中心区域的温度平均值。采集时间由所设定的数据采集时间决定。(4)对各个元器件的温升数据进行多特征提取,并将其与标准特征库进行比对,从而完成异常分析和异常器件定位。然后以表格、曲线和直方图等形式,通过人机交互界面将结果呈现给用户。图 4 为本文系统的工作原理框图。

2 检测方法

2.1 检测过程的标准化及元器件温度特征信息

通过用恒温控制装置保持测试环温,可以消除环境温度对电子装备红外数据采集的影响。电子装备的上电时刻和元器件中心区域温度数据的采集过程均由 PC 机自动控制,以保证每次检测过程的标准化。因此,使用红外传感器分别采集标准装备电路板和待测装备电路板自上电开始至采集结束时元器件的温升数据,然后通过对温升数据作进一步分析和比较,判定该元件是否存在故障。若某个元器件存在故障,则其温升数据与正常元器件工作时的温升数据相比,必然会有明显差异。为了更加有效地利用温升数据,人们通常会提取出温升数据中的某些参数,如温升数据变化率、最终温度与初始温度的温差以及到达稳定温度所需的时间等。因此,能否提取出可有效表征元器件温升特征的

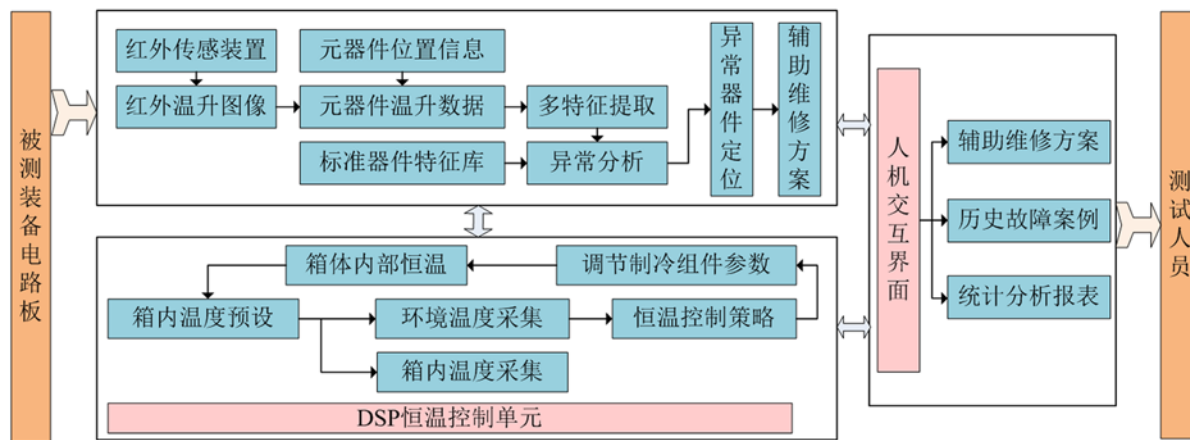


图 4 本文系统的工作原理框图

参数以及定义比对温度变化数据差异的准则, 是决定元器件故障判别准确度的关键因素。

本文对待测元器件的温升数据进行全帧程分段, 其中每段提取出该元器件的温升统计矢量。该矢量由最大值、最小值、中值和均值组成。在用标准温升统计矢量的相应元素对温升差异统计矢量进行归一化处理之后, 构建温升统计联合多特征矢量。根据温升多特征矢量, 通过分段表决与异常量化来实现电子装备热像异常的整体态势感知。

2.2 温升多特征矢量的构建

假设电路板上共有 M 个需要检测的元器件, 将其中每一个元器件的标准数据和待测数据均分成 N 个子段, 并提取出每一子段中的最大值、最小值、中值和均值, 以构建式 (1) 和式 (2) 所示的温升统计矢量。

$$\mathbf{T}_{i,j}^{(utc)} = \left[T_{max}^{(utc)}(i,j) \ T_{min}^{(utc)}(i,j) \ T_{mid}^{(utc)}(i,j) \ T_{mean}^{(utc)}(i,j) \right]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{T}_{i,j}^{(std)} = \left[T_{max}^{(std)}(i,j) \ T_{min}^{(std)}(i,j) \ T_{mid}^{(std)}(i,j) \ T_{mean}^{(std)}(i,j) \right]^T \quad (2)$$

式中, $T_{max}^{(g)}(i,j)$ 、 $T_{min}^{(g)}(i,j)$ 、 $T_{mid}^{(g)}(i,j)$ 和 $T_{mean}^{(g)}(i,j)$ 分别为第 i 个元器件第 j 段的最大值、最小值、中值和均值; $i = 1, 2, \dots, M$, $j = 1, 2, \dots, N$; 上标 utc 和 std 分别表示待测元器件和标准元器件。

对于第 i 个元器件的每一子段, 均用待测元器件的温升统计矢量 $\mathbf{T}_{i,j}^{(utc)}$ 减去标准温升统计矢量 $\mathbf{T}_{i,j}^{(std)}$ 并取其模值, 从而获得温升差异矢量 $\mathbf{T}_{i,j}^{(diff)}$:

$$\mathbf{T}_{i,j}^{(diff)} = \begin{bmatrix} |T_{max}^{(utc)}(i,j) - T_{max}^{(std)}(i,j)| \\ |T_{min}^{(utc)}(i,j) - T_{min}^{(std)}(i,j)| \\ |T_{mid}^{(utc)}(i,j) - T_{mid}^{(std)}(i,j)| \\ |T_{mean}^{(utc)}(i,j) - T_{mean}^{(std)}(i,j)| \end{bmatrix} \quad (3)$$

用标准温升统计矢量的相应元素对温升差异矢量 $\mathbf{T}_{i,j}^{(diff)}$ 中的每个元素进行归一化处理, 然后利用所得到的相应最大值、最小值、中值和均值的特征失配率构建温升多特征矢量 $\gamma_{i,j}^{(mis)}$:

$$\gamma_{i,j}^{(mis)} = \mathbf{T}_{i,j}^{(diff)} / \mathbf{T}_{i,j}^{(std)}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{|T_{max}^{(utc)}(i,j) - T_{max}^{(std)}(i,j)|}{T_{max}^{(std)}(i,j)} \\ \frac{|T_{min}^{(utc)}(i,j) - T_{min}^{(std)}(i,j)|}{T_{min}^{(std)}(i,j)} \\ \frac{|T_{mid}^{(utc)}(i,j) - T_{mid}^{(std)}(i,j)|}{T_{mid}^{(std)}(i,j)} \\ \frac{|T_{mean}^{(utc)}(i,j) - T_{mean}^{(std)}(i,j)|}{T_{mean}^{(std)}(i,j)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.3 热像异常的分段表决与量化表征

如果某个元器件发生故障, 那么其局部或者全帧程的温升数据与正常元器件工作时所对应的温升数据相比必然会存在明显差异, 从而导致其子段的温升多特征矢量 $\gamma_{i,j}^{(mis)}$ 中的元素值都偏大。本文将温升统计联合多特征矢量 $\gamma_{i,j}^{(mis)}$ 的元素平均值作为稳健表征, 检测待测样本与标准温升数据在某一子段上的失配程度 (见式 (5))。若失配程度超过失配门限, 则认为待测元件在该段存在热像异常, 并将热像异常标志设置为 1; 否则就认为待测元件在该段没有热像异常现象, 并将热像异常标志设置为 0。

$$\mathbf{M}(i,j) = \begin{cases} 1, & \text{mean}(\gamma_{i,j}^{(mis)}) > T_1 \\ 0, & \text{mean}(\gamma_{i,j}^{(mis)}) \leq T_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中, T_1 为失配门限; $\mathbf{M}(i,j)$ 为第 i 个元件、第 j 段的热像异常标志。

在红外热成像的数字化和传输过程中, 受成像设备以及外部环境的噪声干扰等影响, 不可避免地会引入噪声。因此, 即使在某一子段上判断元器件的热像标志异常, 也不一定就说明该元器件存在故障。本文根据待测元器件各个子段的异常标志占整个子段数目的比例来判断待测元器件是否存在热像异常现象:

$$\gamma_i^{(fail)} = \text{sum}(\mathbf{M}(i, 1:N)) / N \quad (6)$$

$$\mathbf{F}(i) = \begin{cases} 1, & \gamma_i^{(fail)} > T_2 \\ 0, & \gamma_i^{(fail)} \leq T_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\gamma_i^{(fail)}$ 为第 i 个待测元件的热像异常比例; T_2 为全帧程热像异常的阈值; $\mathbf{F}(i)$ 为第 i 个待测元件的全帧程热像异常标志。

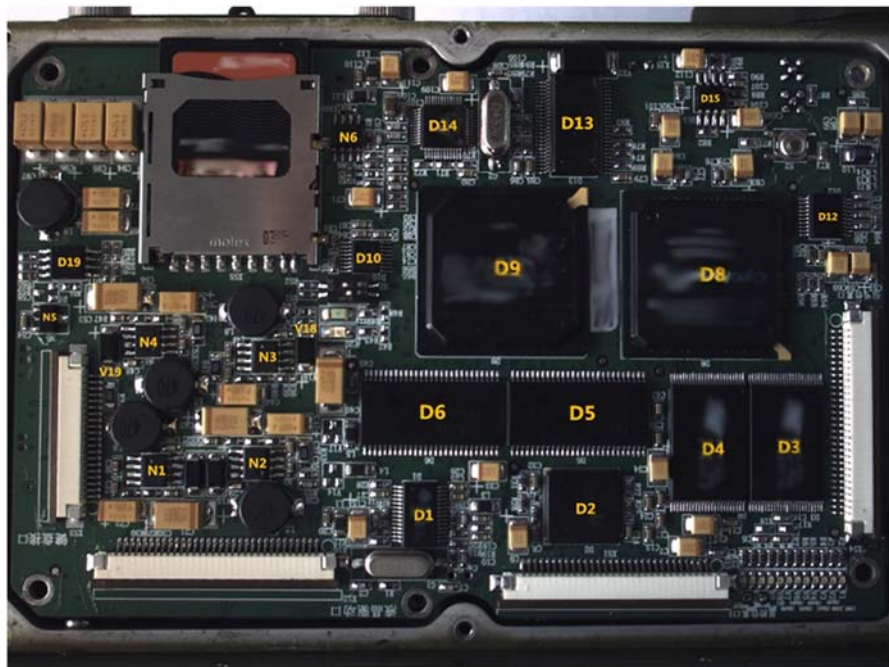


图 5 待测装备电路板及其元器件编号

3 实验结果

3.1 元器件编号以及标准温升数据的提取

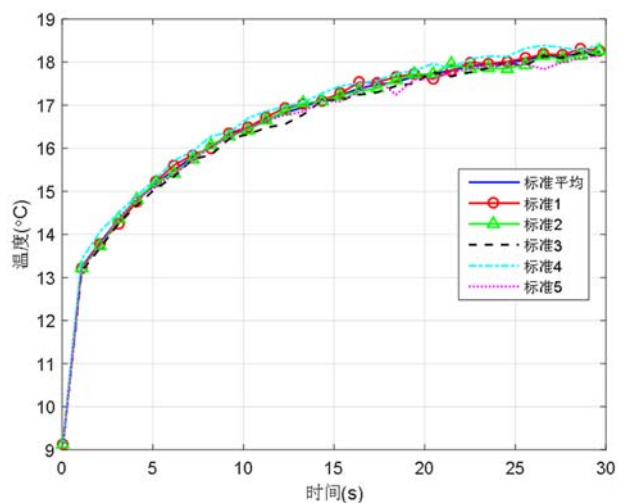
本文采用上海巨哥电子有限公司生产的 MAG32 型红外传感器, 其分辨率为 384×288 (宽 $\times$ 高), 测温范围为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 测温数据精度为 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (或 2%), 采集帧率为 25 frame/s。在实测过程中, 箱体的内部温度设置为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保温时间设置为 30 s, 采集时间设置为 30 s。对待测电路板上的元器件进行标号, 并手工设置故障, 以检测算法的鲁棒性和实时性。由于本系统的每次检测过程均已实现标准化, 对多块功能正常的装备电路板分别进行 10 次通电测试, 并保证同一块装备电路板在相邻通电期间完全合理地冷却。然后对所获得的相同时刻的温度数据进行平均处理, 并建立各个元器件的标准温升信息数据库。

图 5 所示为待测装备电路板及其元器件编号。采用人工方式给编号为 D12 和 D15 的元器件设置故障。其中, D12 芯片的电源引脚翘起, 导致其无法正常工作, 进而造成 D15 芯片的输入电流过大。然后给多块功能正常的装备电路板通电。图 6(a) 和图 6(b) 分别为编号为 D12 和 D15 的元器件的温升数据建模的示意图(为了显

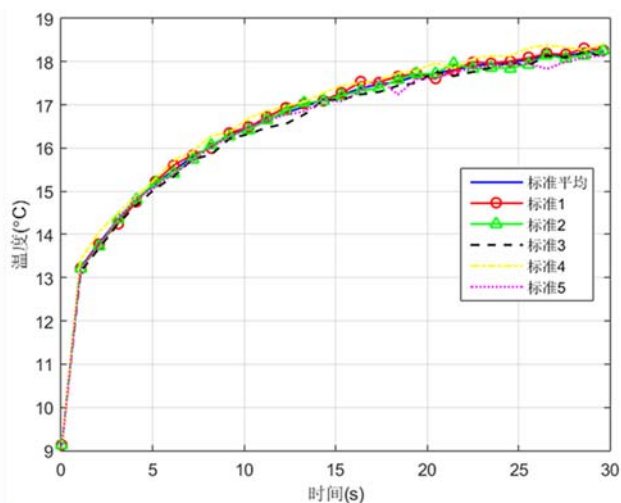
示清楚, 这里只画出了 5 组温升数据和标准温升数据)。从中可以看出, 由于本系统已经对电路板的检测过程实现了标准化, 两块芯片的标准温升数据之间具有很好的一致性。

3.2 元器件的热像异常诊断

在建立各个元器件的标准温升数据库之后, 给待测装备电路板通电。接着分别获取每一块芯片的温升数据并对其进行全帧程分段。本文选取每秒钟所采集的温升数据作为一个子段, 并将采集时间设为 30 s, 因此共有 30 个子段。图 7(a) 和图 7(b) 所示分别为 D12 芯片和 D15 芯片的待测温升数据。可以看出, 由于没有正常工作, D12 芯片的温升数据远远低于标准温升数据, 而 D15 芯片的输入电流过大, 导致其温升数据高于标准温升数据。很多文献主要采用温度的变化速率作为分析的主要参数, 但是从图 7(c) 和图 7(d) 中可以看出, D12 芯片的待测温度变化率与标准温度变化率之间的差异较为明显, 因而比较容易判别。但是, D15 芯片的待测温度变化率和标准温度变化率之间的差异不是十分明显, 这就给后续的异常判别带来了困难, 因此必须增加其他特征来进行辅助判断。

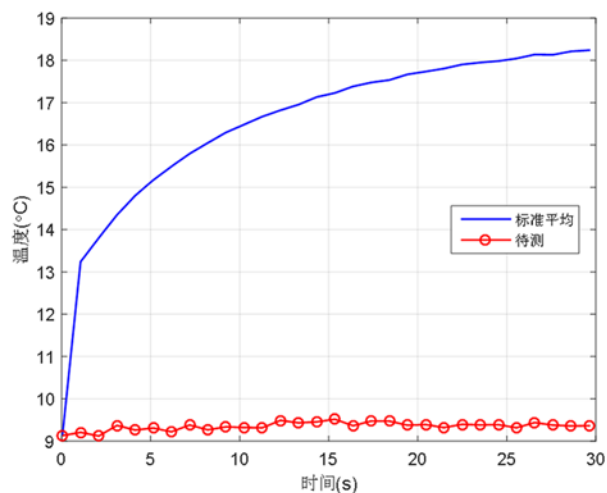


(a) D12芯片的标准温升数据

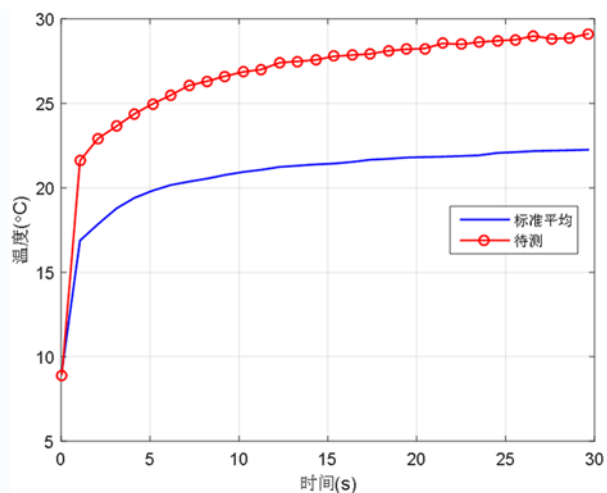


(b) D15芯片的标准温升数据

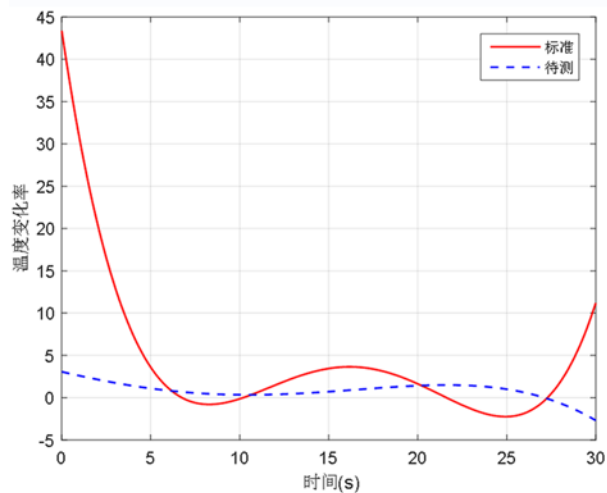
图 6 建立 D12 芯片和 D15 芯片的标准温升数据的示意图



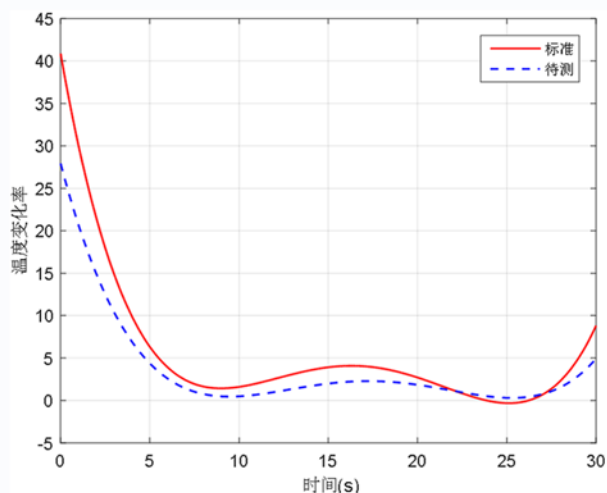
(a) D12芯片的待测温升数据



(b) D15芯片的待测温升数据



(c) D12芯片的温度变化率



(d) D15芯片的温度变化率

图 7 待测装备电路板中 D12 芯片和 D15 芯片的温升数据

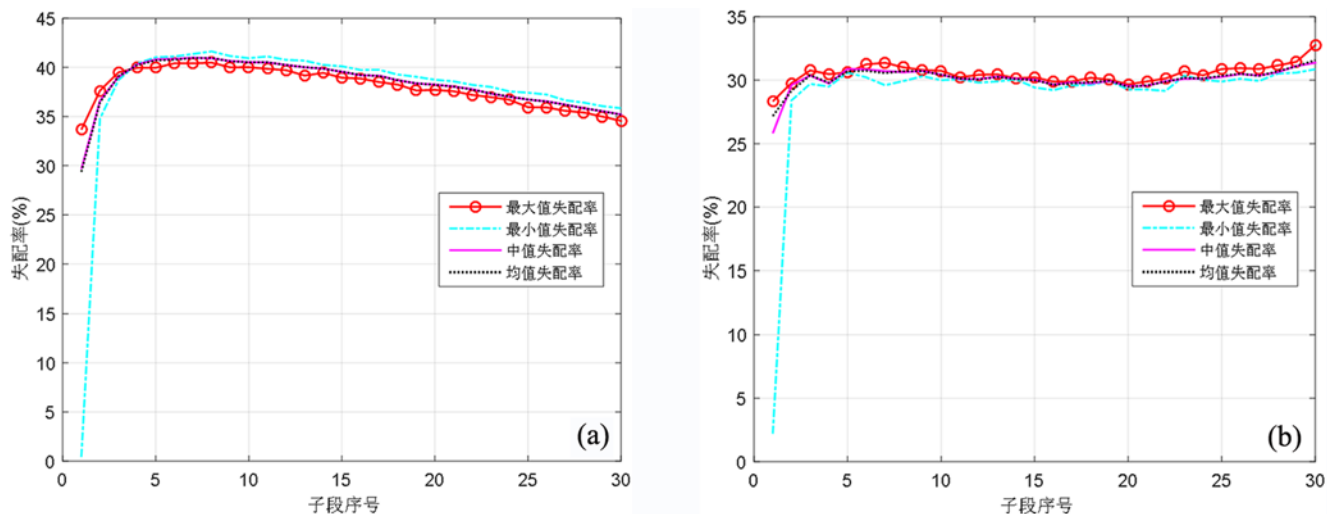


图 8 待测装备电路板的温升数据中各子段的失配率:(a) D12 芯片;(b) D15 芯片

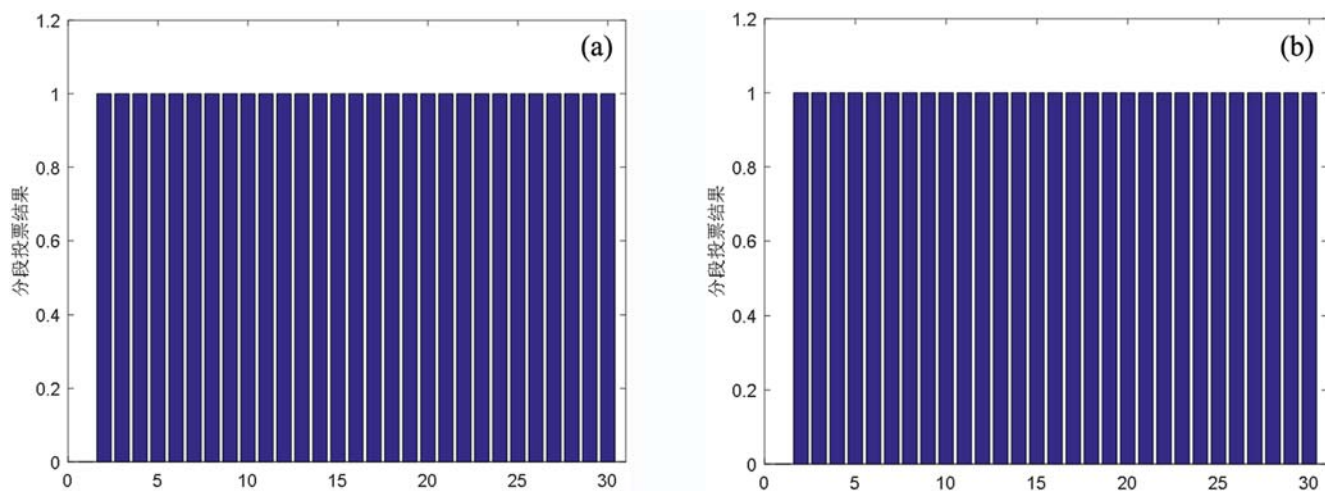


图 9 待测装备电路板的温升数据中各子段的热像异常标志:(a) D12 芯片;(b) D15 芯片

计算元件待测温升数据中每一个子段的最大值、最小值、中值和均值,并以此构建温升差异矢量。根据式(4),利用标准温升统计矢量对其进行归一化处理,并计算特征失配率。图8所示为D12芯片和D15芯片待测温升数据中各子段所对应的最大值、最小值、中值和均值的失配率。可以看出,除了第一子段的最小值失配率较小以外,D12芯片和D15芯片待测温升数据中其余子段的最大值、最小值、中值和均值的失配率均超过25%。图9所示为利用式(5)计算出的各子段所对应的热像异常标志(这里采用的阈值 $T_1 = 0.25$)。

4 结束语

针对目前基于红外差分热图与序列热图的电子装备热像异常检测方法存在的可靠性差、表征未量化等缺点,提出了一种新的利用红外温升多特征矢量来实现电子装备热像异常检测的方法。所构建的温升多特征矢量可以更精细、更稳健地描述温升变化;通过分段表决和异常量化可以实现温升全程表征;所获取的整体态势分辨与电路故障之间具有高关联性,为下一阶段的智能故障推理奠定了良好的工作基础。实验结果表明,本文方法具有检测准确率高、实时性好等优点。

(下转第35页)