

文章编号:1001-9014(2004)02-0107-06

# 基于红外热像技术的星载 TWTA 可靠性 检测及故障诊断技术研究

李振民, 张锐, 阴和俊

(中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

**摘要:**针对星载 TWTA (Traveling Wave Tube Amplifier) 的 PCB (Printed Circuit Board) 可靠性检测及故障诊断问题引入了非接触式的红外热像检测方法, 介绍了其应用的理论依据. 然后, 应用数理统计理论和矩阵范数理论提出了一个基于红外热像技术的 PCB 可靠性检测模型. 并在此基础上给出了一个基于事例库的故障诊断方案. 最后, 介绍了该可靠性检测模型及故障诊断方案在星载 TWTA 可靠性检测及故障诊断中的应用.

**关键词:**星载 TWTA; 红外热像技术; 可靠性检测模型; 故障诊断

**中图分类号:** TN2.6      **文献标识码:** A

## RESEARCH ON RELIABILITY DETECTION AND FAULTS DIAGNOSIS OF SPACEBORNE TWTA BASED ON INFRARED THERMAL IMAGING TECHNIQUE

LI Zhen-Min, ZHANG Rui, YIN He-Jun

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** Infrared thermal imaging technique, a new non-contact detection method, was introduced into reliability detection and faults diagnosis of spaceborne TWTA and its detection principle was also presented. Then, a new effective model, which basess on mathematical statistics and matrix norm theory and uses infrared thermal imaging technique, was put forward for PCB reliability detection. On the basis of the model, a PCB faults diagnosis method, which bases on examples database, was advanced. Finally, applications of the PCB reliability detection model and faults diagnosis method to spaceborne TWTA were presented.

**Key words:** space-borne TWTA; infrared thermal imaging technique; reliability detection model; faults diagnosis

### 引言

对于卫星大功率转发器核心部件的星载 TWTA 来说, 真空绝热的工作环境及其 PCB 上大量高达几千伏的高压电路, 不仅其设计难度增加, 而且其可靠性问题表现的十分突出. 众所周知, 电子设备的可靠性状况与其热性能密切相关, 因此, 工作状态下的 PCB 表面的热模式不仅是其工作状态更是其可靠性状况的重要表征. 近年来采用红外热像技术从检测 PCB 表面热模式着手进行电子设备的状态检测及故障诊断得到了一定发展<sup>[1-3]</sup>. 本文在对星载 TWTA

红外热像试验数据分析处理的基础上, 应用数理统计理论和矩阵范数理论首次提出了一个基于红外热像技术的 PCB 可靠性检测模型, 并进一步给出了一个基于事例库的故障诊断方案, 文章的最后介绍了该可靠性检测模型以及故障诊断方案在星载 TWTA 可靠性检测及故障诊断中的应用情况.

### 1 红外热像技术检测原理

Stefan-Boltzmann Law 指出, 温度高于绝对零度的一切物体都在向外界发射热辐射, 辐射力由其热力学温度和发射率共同决定<sup>[4]</sup>. 红外热像仪能够接

收稿日期: 2003-06-25, 修回日期: 2003-10-22

基金项目: 中科院知识创新工程资助项目 (KGCX2-404)

作者简介: 李振民 (1974-), 男, 辽宁省辽宁人, 助理研究员, 博士研究生. 主要从事空间行波管放大器研发及其可靠性技术研究.

Received date: 2003-06-25, revised date: 2003-10-22

收物体表面的热辐射并通过将其转化为电信号来获得物体表面的温度场分布. 星载 TWTA 工作时, PCB 上各元件消耗功率, 引起自身温升, 并通过 PCB 的热传导等相互影响, 形成 PCB 表面特定的温度分布及其变化过程. 因此, PCB 表面温度分布及其变化信息包含各元件的工状状态信息. 一旦 PCB 上存在可靠性缺陷或发生元件故障, 缺陷处或故障元件的温度分布及变化过程往往会出现异常. 因此, 依据工作状态下的 PCB 表面温度分布及其变化情况, 就可以了解 PCB 的可靠性状况以及故障信息. 图 1 为某型号星载 TWTA 的 PCB 稳态红外热图. 由该图可见, 通过红外热图可以充分了解 PCB 表面的温度场分布. 如果连续采集红外热图就可以记录 PCB 表面温度分布的变化过程.

## 2 基于红外热像技术的 PCB 可靠性检测过程

本文中可靠性检测, 首先需要将 TWTA 的 PCB 红外热图数字化, 转换为温度矩阵. 由于 PCB 红外热图中的温度分布与 PCB 的工作时间  $t$  有关, 因此, 其数字化后的温度矩阵是时间  $t$  的函数, 矩阵的行数  $M$  和列数  $N$  由红外热像仪的象素空间以及 PCB 面积在红外热图总面积中所占的比例共同决定. 将 PCB 红外热图数字化后获得的温度矩阵减去 TWTA 工作环境温度后就获得如公式(1)所示的温度增量矩阵  $\mathbf{T}(t)$ .

$$\mathbf{T}(t) = \begin{bmatrix} T_{0,0}(t) & T_{0,1}(t) & \cdots & T_{0,N-1}(t) \\ T_{1,0}(t) & \cdots & \cdots & T_{1,N-1}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{M-1,0}(t) & \cdots & \cdots & T_{M-1,N-1}(t) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

如采用  $t_1$  表示 TWTA 开机工作后的  $t_1$  时刻, 则  $\mathbf{T}(t_1)$  即为该时刻 PCB 红外热图的温度增量矩阵.

如果在特定环境和特定工作模式下针对同一型

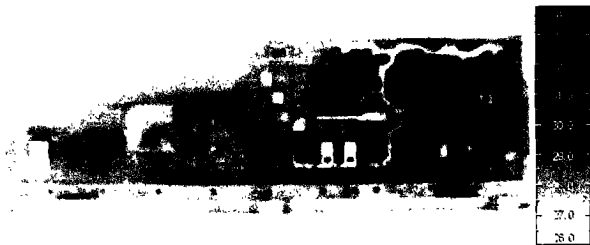


图 1 某型号星载 TWTA 的 PCB 稳态红外热图

Fig. 1 Thermal infrared imagery from PCB of a certain spaceborne TWTA

号且状态良好的多台 TWTA 正样机, 采集  $n$  幅其工作在  $t_1$  时刻的 PCB 红外热图, 则依上文方法可获得  $n$  个温度增量矩阵  $\mathbf{T}_{(t_1)}^1, \mathbf{T}_{(t_1)}^2, \dots, \mathbf{T}_{(t_1)}^n$ . 显然它们的对应元素  $T_{i,j}^1(t_1), T_{i,j}^2(t_1), \dots, T_{i,j}^n(t_1)$  服从一元正态分布, 如公式(2)所示. 将这一结论在  $i=0, 1, \dots, M-1$  和  $j=0, 1, \dots, N-1$  范围内推广, 则这  $n$  个温度增量矩阵共同服从于一个多元正态分布.

$$f(T_{i,j}(t_1)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{i,j}} \exp\left\{-\frac{(T_{i,j}(t_1) - u_{i,j})^2}{2\sigma_{i,j}^2}\right\}, \quad (2)$$

式中,  $T_{i,j}(t_1)$  为温度增量矩阵  $\mathbf{T}(t_1)$  的第  $i$  行第  $j$  列元素;  $u_{i,j}, \sigma_{i,j}$  分别为  $T_{i,j}(t_1)$  服从的一元正态分布的均值和均方差[5].

如果已知  $n$  个温度增量矩阵样本, 则据一元正态分布的参数估计方法(见公式(3)), 可求得这  $n$  个温度增量矩阵对应元素  $T_{i,j}^1(t_1), T_{i,j}^2(t_1), \dots, T_{i,j}^n(t_1)$  分别服从的一元正态分布的均值估计量.

$$\hat{u}_{i,j} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n T_{i,j}^k(t_1). \quad (3)$$

将所有的均值估计量  $\hat{u}_{i,j}$  按照其对应元素在温度增量矩阵中的位置组合, 就形成如公式(4)所示的均值估计量矩阵, 简称为均值矩阵, 并定义该均值矩阵为 PCB 的标准热模式.

$$\hat{\mathbf{u}} = [\hat{u}_{i,j}]. \quad (4)$$

$$i = 0, 1, \dots, M-1, j = 0, 1, \dots, N-1$$

利用式(5)计算  $n$  个温度增量矩阵样本  $\mathbf{T}^k(t_1)$

与均值矩阵  $\hat{\mathbf{u}}$  的差矩阵, 令其为  $\mathbf{Q}^k(t_1)$ . 并利用式(6)计算所有差距阵  $\mathbf{Q}^k(t_1)$  的 F-范数  $\|\mathbf{Q}^k(t_1)\|_F$ , 采用  $F(\mathbf{Q}^k(t_1))$  表示之.

$$\mathbf{Q}^k(t_1) = \mathbf{T}^k(t_1) - \hat{\mathbf{u}}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$F(\mathbf{Q}^k(t_1)) = \|\mathbf{Q}^k(t_1)\|_F = \|\mathbf{T}^k(t_1) - \hat{\mathbf{u}}\|_F = \sqrt{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} |T_{i,j}^k(t_1) - \hat{u}_{i,j}|^2}. \quad (6)$$

显然  $F(\mathbf{Q}^k(t_1)) \geq 0$  恒成立. 因此, 只要  $n$  足够大, 利用  $n$  个  $F(\mathbf{Q}^k(t_1))$  ( $k=1, 2, \dots, n$ ) 的样本数据就可以训练出一个位于  $X$  正半轴的分布模型, 显然  $F(\mathbf{Q}(t_1))$  必服从该分布模型. 在这个分布模型中, 越是位于  $X$  轴右侧的样本, 即  $F(\mathbf{Q}^k(t_1))$  越大, 表明与之对应的温度增量矩阵  $\mathbf{T}^k(t_1)$  与均值矩阵  $\hat{\mathbf{u}}$  之间的差距越大、相似之处越少. 这一特点恰可应用于可靠性检测. 但是, 首先要根据这一可靠性检测模型的具体应用环境对可靠性检测质量要求以及实

际使用情况反馈,在这个训练出来的分布模型中选择一个门限值  $TH$ . 如果样本  $F(Q^k(t_1)) > TH$ , 则认为温度增量矩阵样本  $T^k(t_1)$  不属于这个分布模型总体,即可判断与其对应的 PCB 可靠性不满足设计要求.

至此,利用训练出来的分布模型和门限值  $TH$  即可对与训练样本同型号的待验 TWTA 之 PCB 样本进行可靠性检测. 令其在与训练样本相同的环境温度和工作模式下工作,采集其  $t_1$  时刻 PCB 红外热图,然后依上文方法求出该待验样本的温度增量矩阵  $T_T(t_1)$ 、 $T_T(t_1)$  与均值矩阵  $\hat{u}$  的差距阵  $Q_T(t_1)$  及其  $F$ -范数  $F(Q_T(t_1))$ . 并通过  $F(Q_T(t_1))$  与门限值  $TH$  的比较结果来判断该待验星载 TWTA 样本的可靠性状况,如  $F(Q_T(t_1)) \leq TH$ , 则认为该待验星载 TWTA 的 PCB 工作状态良好,可靠性满足设计要求;如  $F(Q_T(t_1)) > TH$ , 则认为该待验星载 TWTA 的 PCB 的可靠性不满足设计要求.

### 3 基于事例库的故障诊断过程

#### 3.1 建立基于事例的故障数据库

基于事例的故障数据库是指提取星载 TWTA 各种已知 PCB 故障事例的故障特征,并将其分类组合形成数据库,以便对待测样本进行故障诊断时进行特征查询. 建立故障数据库首先涉及到 PCB 故障事例的特征提取问题. 提取故障特征时需要使用一个过程矩阵,称其为门限矩阵  $\Delta T$ . 门限矩阵  $\Delta T$  的确立过程如下,首先利用上文结论即  $n$  个温度增量矩阵样本的对应元素  $T_{i,j}^1(t_1), T_{i,j}^2(t_1), \dots, T_{i,j}^n(t_1)$  共同服从于一个一元正态分布,并借用在  $F(Q^k(t_1))$  所服从的分布模型中确定门限值  $TH$  的原则,同样在  $n$  个温度增量矩阵样本的对应元素  $T_{i,j}^1(t_1), T_{i,j}^2(t_1), \dots, T_{i,j}^n(t_1)$  所服从的一元正态分布模型中也可以确定一个门限值  $\Delta T_{i,j}$ . 将求解门限值  $\Delta T_{i,j}$  的计算方法在  $i=0, 1, \dots, M-1$  和  $j=0, 1, \dots, N-1$  范围内推广,即可求出  $T^k(t_1)$  各元素所分别服从的一元正态分布模型总体的门限值  $\Delta T_{i,j}$  ( $i=0, 1, \dots, M-1, j=0, 1, \dots, N-1$ ). 将门限值  $\Delta T_{i,j}$  按照其对应元素在温度增量矩阵中的位置组合,就形成如式(7)所示的门限矩阵  $\Delta T$ . 如某待验样本的温度增量矩阵  $T_T(t_1)$  的某元素  $T_{i,j}(t_1) \notin (\hat{u}_{i,j} \pm \Delta T_{i,j})$ , 则认为该元素为奇异点. 由于待验样本的温度增量矩阵  $T_T(t_1)$  十分庞大,因此,某个元素或分散的某几个元素发生奇异不足以说明该待验样本的可靠性状况.

$$\Delta T = [\Delta T_{i,j}].$$

$$i = 0, 1, \dots, M-1, j = 0, 1, \dots, N-1 \quad (7)$$

故障数据库的建立过程如下,首先在上文中指定的环境温度和工作模式下收集各种故障已查明但星载 TWTA 仍工作于故障状态下的  $t_1$  时刻 PCB 红外热图,记其温度增量矩阵为故障温度增量矩阵  $T_g(t_1)$  (其形式如式(1)),然后利用式(8)求得过渡矩阵  $g(1)$  和  $g(2)$ ,接下来利用式(9)处理过渡矩阵  $g(1)$ 、 $g(2)$ ,并利用式(10)合并式(9)的处理结果,即求得对应于 PCB 目前故障状态的故障特征矩阵  $G$ . 星载 TWTA 存在可靠性隐患或发生故障时,可能是 PCB 上某个区域或分散的某几个区域的温度分布出现异常,因此,对于每个特定故障都可以求得与之对应的故障特征矩阵  $G$ . 故障特征矩阵  $G$  只能是某种形式的稀疏矩阵,矩阵中非零元素的分布及其数值表征着 PCB 故障特征. 收集星载 TWTA 的故障特征矩阵  $G_k$  ( $k=1, 2, \dots, m$ ),并将故障特征矩阵  $G_k$  与故障类型对应分类,就组建成故障数据库.

$$\begin{cases} g(1) = T_g(t_1) - \hat{u} - \Delta T, \\ g(2) = T_g(t_1) - \hat{u} + \Delta T. \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} g(1)_{i,j} = \begin{cases} g(1)_{i,j} & g(1)_{i,j} > 0 \\ 0 & g(1)_{i,j} \leq 0 \end{cases} \\ g(2)_{i,j} = \begin{cases} g(2)_{i,j} & g(2)_{i,j} < 0 \\ 0 & g(2)_{i,j} \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

$$i = 0, 1, \dots, M-1, j = 0, 1, \dots, N-1$$

$$G = g(1) + g(2). \quad (10)$$

#### 3.2 故障诊断过程

采用第2节介绍的方法对星载 TWTA 进行可靠性检测,对于检测结果不满足可靠性要求的星载 TWTA,有必要采用如下办法对其 PCB 进行故障诊断,首先依本文3.1节方法提取该待验样本的 PCB 故障特征矩阵,称为待验故障特征矩阵  $M$ . 然后利用公式(11)逐个求得  $M$  的拉直  $\bar{M}$  与故障数据库中所有故障特征矩阵  $G_k$  的拉直  $\bar{G}_k$  之间的欧式距离  $D_k$  ( $k=1, 2, \dots, m$ ). 接下来再利用公式12求得  $M$  与故障数据库中所有故障特征矩阵  $G_k$  的相关系数  $r_k$  ( $k=1, 2, \dots, m$ ). 如果故障数据库完备,即故障数据库中不存在与待验样本的 PCB 故障特征矩阵  $G_p$ , 则  $G_p$  与  $M$  之间的欧式距离  $D_p$  和相关系数  $r_p$ ,将使  $D_p = \text{Min}(D_k)$  和  $r_p = \text{Max}(r_k)$  ( $k=1, 2, \dots, m$ ) 同时成立. 如果故障数据库中没有与待验样本的 PCB 故障相吻合的故障特征矩阵,则与待验样本的 PCB 故

障特征最为相似的故障特征矩阵  $G_q$  与待验故障特征矩阵  $M$  之间的欧式距离  $D_q$  和相关系数  $r_q$ , 将使  $D_q = \text{Min}(D_k)$  或  $r_q = \text{Max}(r_k)$  ( $k=1, 2, \dots, m$ ) 成立. 因此, 在本故障诊断方案中, 认为故障数据库中使  $\text{Max}(r_k)$  ( $k=1, 2, \dots, m$ ) 成立的第  $k$  个故障特征矩阵或使  $\text{Min}(D_i)$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) 成立的第  $i$  个故障特征矩阵最为可能与待验样本的 PCB 故障特征相吻合. 同时, 接近于使  $\text{Max}(r_k)$  ( $k=1, 2, \dots, m$ ) 和  $\text{Min}(D_i)$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) 成立的故障特征矩阵对于故障诊断也具有一定的参考价值. 影响该故障诊断方案准确性的因素较多, 其中主要取决于故障数据库的完备性.

$$D_k = \sqrt{(\vec{M} - \vec{G}_k)^T (\vec{M} - \vec{G}_k)}, \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

$$r_k = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (M_{i,j} - \bar{M}) \times (G_{k,i,j} - \bar{G}_k)}{\sqrt{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (M_{i,j} - \bar{M})^2 (G_{k,i,j} - \bar{G}_k)^2}} \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

式中,  $\bar{M} = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} M_{i,j}}{M \times N}$ ,  $\bar{G}_k = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} G_{k,i,j}}{M \times N}$ , 即  $\bar{M}$ 、 $\bar{G}_k$  分别为待验样本 PCB 故障特征矩阵  $M$  的均值和故障数据库中的故障特征矩阵  $G_k$  的均值.

#### 4 可靠性检测模型及故障诊断方案相关问题讨论

本文介绍的可靠性检测模型及故障诊断方案中, 特征、证据、故障等诸多不确定性因素都会对可靠性检测及故障诊断结果的准确性造成影响. 其一, 利用上文可靠性检测方法确定为可靠性不满足要求的待验星载 TWTA 样本, 不一定就肯定存在可靠性隐患或故障. 这主要取决于检测之前设定的可靠性质量要求, 即表现为可靠性检测门限  $TH$  的选取. 降低门限值  $TH$ , 可靠性检测将变得苛刻, 一些原来满足可靠性要求但靠近门限值  $TH$  边缘的待验样本可能会被排除在外. 其二, 故障本身的不确定性、故障数据库的不完备性以及故障可能并发等因素将影响故障诊断结果的准确性. 其三, 由于该故障诊断方案是基于故障事例库的, 因此, 它不适用于那些可能导致星载 TWTA 不能开机工作的严重故障情况. 其四, 该故障诊断方案的诊断结果在提供故障方位信息方面更为准确, 而最终确诊故障仍需要使用者的个人经验参与. 改进故障特征提取方法以及采用多

种故障诊断方案并行工作等方法有利于提高诊断结果的准确性.

#### 5 可靠性检测及故障诊断方案在星载 TWTA 中的应用

结合星载 TWTA 非批量生产、高可靠性要求等特点, 并考虑其加电时序的特殊性, 在将该可靠性检测模型及故障诊断方案应用于星载 TWTA 时, 最初采集的训练样本数目为  $n=480$ , 分别来自几台星载 TWTA 标准正样机, 且选择星载 TWTA 处于热稳态时采集训练样本 (即 PCB 红外热图). 如采用  $t_w$  表示星载 TWTA 从开机到热稳态所必须的时间, 则上文中可靠性检测模型及故障诊断方案中的  $t_1$  时刻应全部修改为  $t_w$  时刻. 首先是训练可靠性检测模型, 依上文方法计算出所有训练样本的温度增量矩阵  $T^k(t_w)$  ( $k=1, 2, \dots, 480$ ). 然后利用式(5)求出其 PCB 标准热模式 (即均值矩阵  $\hat{u}$ ), 如图 2 所示. 再利用式(6)和式(7)计算所有训练样本的温度增量矩阵  $T^k(t_w)$  与均值矩阵  $\hat{u}$  的差距阵  $Q^k(t_w)$  及其  $F$ -范数  $F(Q^k(t_w))$  ( $k=1, 2, \dots, 480$ ). 然后训练  $F(Q^k(t_w))$  服从的可靠性分布模型, 将该分布模型采用频数统计图表示如图 3 所示. 图中 X 轴表示  $F$ -范数数值, Y 轴表示频数统计结果. 算得所有样本对应的  $F$ -范数的下限是 25.399, 上限是 103.708, 进行频数统计时, 选择的步长为 3.915. 由于受限于样本数目, 图 3 中所示的  $F$ -范数的频数统计走势波动较大, 但总体走势是样本差距阵  $F$ -范数的统计频数分布沿 X 轴方向逐渐降低.

在训练出了  $F(Q^k(t_w))$  的分布模型之后, 本文采用式(14)确定了可靠性检测门限值  $TH$ . 依据星载 TWTA 的可靠性质量要求以及使用经验反馈, 选择系数  $\alpha=0.10$ , 并实际算得  $TH=95.877$ .

$$TH = \text{Min}(F(Q^k(t_w))) + (1 - \alpha) \times (\text{Max}(F(Q^k(t_w))) - \text{Min}(F(Q^k(t_w)))) \quad k = 1, 2, \dots, 480 \quad (14)$$

建立星载 TWTA 故障数据库过程如下, 首先利

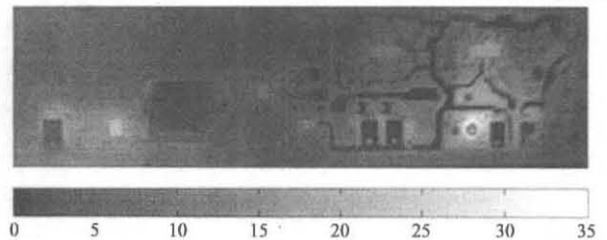


图 2 PCB 标准热模式的图像表示 (色温表单位为  $^{\circ}\text{C}$ )  
Fig. 2 The standard thermal pattern of PCB

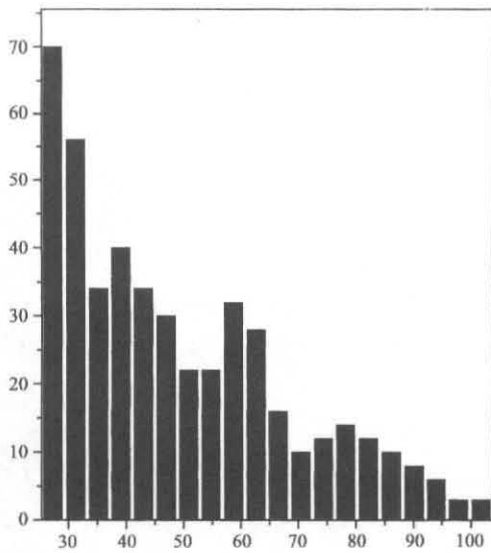


图3 480 个差距阵  $F$ -范数样本的频数统计图  
 Fig.3 The frequency number distribution of 480 Frobenius norm samples

用上文计算结果以及式(15)和式(16)确定门限矩阵  $\Delta T$  的所有元素  $\Delta T_{i,j}$ , 同样设定式(16)中的系数  $\alpha = 0.10$ . 将实际求得的星载 TWTA 门限矩阵采用图像表示如图 4 所示. 然后收集星载 TWTA 处于各种已知故障状态下的 PCB 稳态红外热图, 接下来利用门限矩阵  $\Delta T$  以及 3.1 节介绍的方法求出所有已知故障的故障特征矩阵, 最后将星载 TWTA 的各种已知故障与其故障特征矩阵一一对应分类后组建星载 TWTA 故障数据库. 在对具体的星载 TWTA 待验样本进行故障诊断时其详细过程如 3.2 节介绍.

$$\Delta T_{i,j}^k = |T_{i,j}^k(t_w) - \hat{u}_{i,j}^k|, k = 1, 2, \dots, 480 \quad (15)$$

$$\Delta T_{i,j} = \text{Min}(\Delta T_{i,j}^k) + (1 - \alpha) \times (\text{Max}(\Delta T_{i,j}^k) - \text{Min}(\Delta T_{i,j}^k)), \quad k = 1, 2, \dots, 480 \quad (16)$$

图 5 为某星载 TWTA 待验样本温度增量矩阵的图像表示. 实际求得该待验样本温度增量矩阵  $T_r(t_w)$  与 PCB 标准热模式 (即均值矩阵  $\hat{u}$ ) 之间的差距矩阵的  $F$ -范数  $F(Q_r(t_w)) = 27.389$ , 该值小于可靠性检测门限值  $TH = 95.877$ , 即可靠性检测结果表明该待验样本工作状态良好, 可靠性满足设计要求. 为了进一步检验该可靠性检测模型, 对图 5 进行了人工处理, 即人为的将位于 PCB 左下角处的 MOSFET 表面温度提高  $10^\circ\text{C}$ , 图 6 即为该处理后的待验样本温度增量矩阵的图像表示. 此时, 求得其与 PCB 标准热模式之间的差距矩阵的  $F$ -范数  $F(Q_r(t_w)) = 145.011$ , 该值大于可靠性检测门限值  $TH = 95.877$ ,

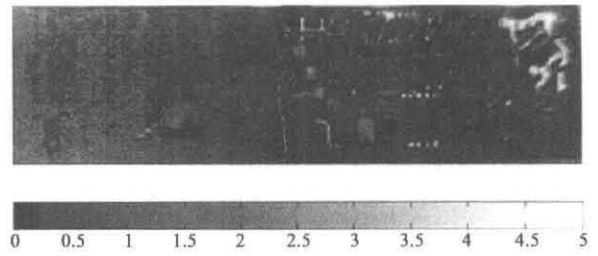


图4 门限矩阵  $\Delta T$  的图像表示 (色温表的单位是  $^\circ\text{C}$ )  
 Fig.4 Image of the threshold matrix  $\Delta T$

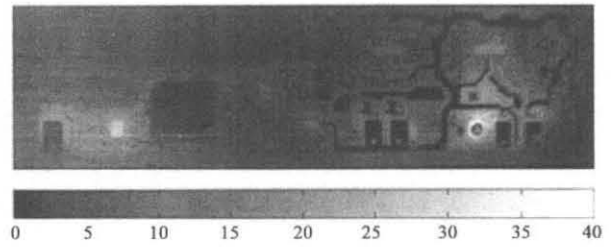


图5 某待验样本温度增量矩阵的图像表示  
 Fig.5 A test sample's temperature increment matrix

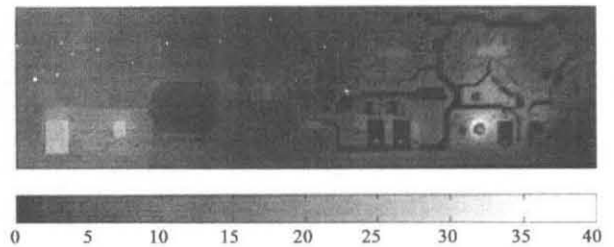


图6 经处理后的某待验样本温度增量矩阵的图像表示  
 Fig.6 A treated test sample's temperature increment matrix

表明经处理后该待验样本的可靠性不再满足设计要求. 该例子说明, 因某种原因而引起 PCB 上某个或某几个元件工作温度升高时, 其工作热应力和失效率会随之增大, 从而影响到星载 TWTA 整机的可靠性. 当然, 其对星载 EPC 整机可靠性的影响程度取决于其温度变化幅度. 当其温度变化幅度超过本文设定的可靠性检测门限值时, 本文提出的可靠性检测方法能及时检测出这种变化, 甚至进一步可以根据其超出可靠性检测门限值的幅度来判断这种变化带给星载 EPC 整机可靠性的影响程度. 该例子证实了本文提出的可靠性检测方法是有效的.

按照上文介绍的故障诊断过程, 对图 5 所示的待验样本进行处理, 获得如图 7 所示的故障特征矩阵. 该故障特征矩阵中元素的最大值为  $0.323^\circ\text{C}$ , 最小值为  $-0.593^\circ\text{C}$ , 即该待验样本中只有少数的奇异

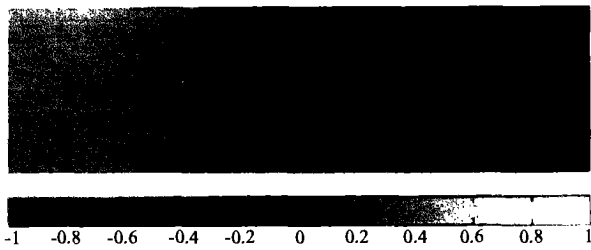


图7 某待验样本故障特征矩阵的图像表示  
Fig.7 The fault characteristic matrix of a test sample

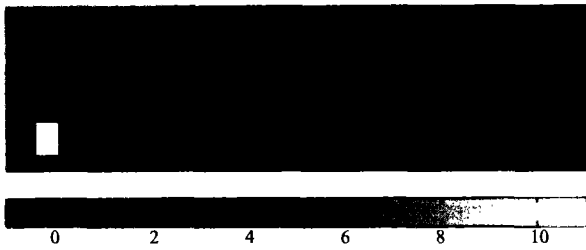


图8 经处理后的某待验样本故障特征矩阵的图像表示  
Fig.8 The fault characteristic matrix of a treated test sample

点. 图8为处理后的待验样本(图6所示)的故障特征矩阵的图像表示,其故障特征矩阵中元素的最大值为 $10.209^{\circ}\text{C}$ ,最小值为 $-0.593^{\circ}\text{C}$ ,即表明经处理后的待验样本发生显著变化.这同样证明了本文提出的故障诊断方案的可行性.

应用该可靠性检测模型以及故障诊断方案对星载TWTA进行可靠性检测及故障诊断时,其应用过程同时也是对可靠性检测模型和故障诊断方案的训练过程,即待验样本同时也作为训练样本的补充.这样,随着其在星载TWTA可靠性检测和故障诊断中的应用,可靠性检测模型更趋完善,检测结果更趋准确,同时故障数据库也不断的得到更新扩大.

## 6 结语

本文针对星载TWTA可靠性检测及故障诊断问题,提出了一种基于红外热像技术并且可广泛应用于各型PCB的可靠性检测模型及故障诊断方案.在将该方案应用于星载TWTA可靠性检测及故障诊断过程中发现,该可靠性检测模型检测结果准确性高,但对待验样本的可靠性要求较为苛刻,这一特点尤其适合于保证星载TWTA同一型号各样机之间的统一性,有利于及时发现各项环模试验过程中引起的可靠性隐患及各种故障.但该可靠性检测模型对应用环境要求较为严格,使用起来也较为复杂.该故障诊断方案的准确性很大程度上取决于故障数据库的完备性,在故障数据库尚不完备阶段该故障诊断方案优越性主要表现在其提供的故障定位信息,但最后的故障确认还需要使用者的经验参与.

## REFERENCES

- [1] Kaplan H. The infrared automatic mass screening(IRAMS) system for printed circuit board diagnosis[R]. *IEEE International Automatic Testing Conference*, 1986: 301—306
- [2] Wallin B. Real-Time Temperature on PCBs, hybrids and Microchips. Thermosense X III [J]. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering*, 1991, **1467**: 180—187
- [3] Walcutt J. Thermal imaging critical for today's complex circuits[J]. *Evaluation Engineering(EE)*, 1993, 50—53
- [4] DAI Guo-Sheng. *Heat Transfer(2nd Edition)* [M]. Beijing: Higher Education Press(戴焱生. *传热学(第二版)*). 北京: 高等教育出版社, 1999: 188—196
- [5] Applied Mathematics Research Group. *Mathematical Statistics* [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical Univ. Press(应用数学教研室. *数理统计*. 西安: 西北工业大学出版社), 1997: 1—43