

一种基于红外热成像技术的星载 EPC 可靠性状态 检测方案研究¹

李振民 张锐 阴和俊

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘要: 该文针对星载 EPC(Electronic Power Conditioner) 可靠性状态检测问题引入了一种非接触式的红外热成像检测方法, 介绍了应用该方法进行可靠性状态检测的理论依据及其检测系统构成; 并在应用该系统对星载 EPC 样机进行了大量试验研究的基础上, 依据数理统计理论和欧氏距离判别方法, 首次提出了一个有效的基于红外热成像技术的 PCB(Printed Circuit Board) 可靠性状态检测数学模型。

关键词: 星载 EPC, 红外热成像, 欧氏距离判别方法, 可靠性状态检测模型

中图分类号: TN062 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)03-0410-06

A New Reliability Detection Method of Spaceborne EPC 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 Especially for the reliability state detection of space borne EPC, infrared thermal imaging technique, a new non-contact detection method, and its detection principle and the constitution of the detection system are introduced; and then, after plenty of test by applying this detection method on the space borne EPC sample, a new effective mathematical model of the PCB reliability detection, which based on mathematical statistics and Euclidean distance discrimination means, is brought forward first time.

Key words Space borne EPC, Infrared thermal imaging, Euclidean distance discrimination means, Reliability state detection model

1 前言

作为卫星大功率转发器核心部件的星载 TWTA(Traveling Wave Tube Amplifier) 主要由 EPC(Electronic Power Conditioner) 和 TWT(Traveling Wave Tube) 两部分组成, 其中 EPC 的主要功能是为 TWT 提供高达几千伏的多路高稳定度工作电压。高压电路增加了 EPC 的设计难度, 也使得其可靠性问题成为多年来制约长寿命高稳定度星载 TWTA 计划的瓶颈。众所周知, 电子设备的可靠性与其热性能密切相关, 尤其对于星载 EPC 来说, 其热可靠性问题表现的更为突出。因此, 从热性能角度着手进行 EPC 可靠性状态检测对于保证 EPC 乃至 TWTA 整机可靠性具有重要意义。红外热成像技术作为新兴的非接触式温度检测手段在 PCB(Printed Circuit Board) 可靠性状态检测及故障诊断方面的应用在文献 [1-5] 中已有介绍。本文在大量试验的基础上, 依据数理统计理论和欧氏距离判别方法, 并针对星载电子设备非批量生产及高可靠性要求等特点首次提出了一个可实际应用的基于红外热成像技术的 PCB 可靠性状态检测数学模型。

¹ 2002-09-24 收到, 2002-12-12 改回

中科院知识创新工程项目资助课题 (编号: KG CX2-404)

2 红外热成像检测技术的原理及特点

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, 辐射度由其热力学温度和发射率共同决定^[6]。红外热成像技术通过探测物体表面的热辐射来获得物体表面的温度场分布。星载 EPC 工作时, 各元器件消耗功率引起自身温升, 并通过热传导等方式相互影响, 最终反映到 PCB 表面, 因此, 星载 EPC 的 PCB 表面温度场分布及其变化信息包含各元器件的温度变化及工作状态信息。一旦 PCB 存在可靠性缺陷或发生故障, 缺陷处或故障器件往往会出现温度的异常变化或异常分布。因此, 依据工作状态下星载 EPC 的 PCB 表面温度分布及其变化情况, 就可以了解其可靠性状况。

非接触式检测是红外热成像检测技术的最大特点。该检测方法既不影响待测目标的工作状态, 也不会对待测目标造成任何损伤^[7]。因此, 该检测方法尤其适合于星载 EPC 的可靠性检测。因为星载 TWTA 正样机在各项环模试验之后, 禁止采用接触式的或可能造成损伤的检测方法, 而仅仅进行电气参数的测试无法发现其内部可能存在的可靠性隐患。尤其是 EPC 内部大量的高达几千伏的高压电路给检测工作带来很大的麻烦, 传统的接触式检测方法根本无法实现在线检测。

3 红外热成像检测系统

红外热成像检测系统主要由红外热像仪、 GPIB(Global Purpose Interface Bus) 总线、主控计算机、电源系统与测试平台及相应软件组成, 如图 1。

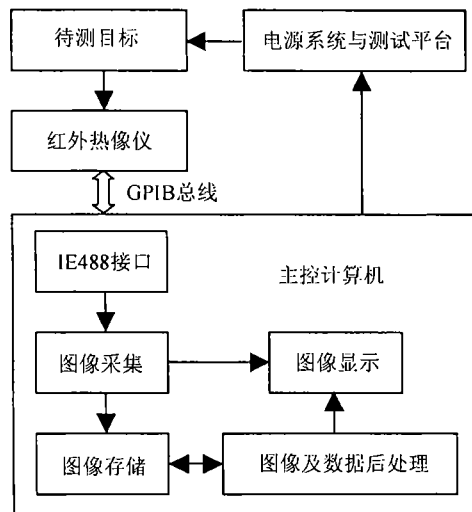


图 1 红外热成像检测系统框图

(1) 红外热像仪: 其主要功能是将待测目标的表面热辐射转变为二维图像数据。本系统采用 NEC-7102WX 型非制冷式红外焦平面热像仪, 其测温范围为 $-40^{\circ}\text{C}\sim 500^{\circ}\text{C}$, 温度分辨率为 0.08°C (30°C 时), 瞬时视场为 1.58mrad ^[8]。为了扩大检测范围, 还配备了分辨率为 $100\ \mu\text{m}$ 的红外显微透镜。

(2) GPIB 总线: 实现计算机与红外热像仪之间的通讯及数据传输。

(3) 主控计算机: 发出控制指令, 接受上传的红外热图像, 实现图像采集、显示、存储及数据的后处理。

(4) 电源系统及测试平台: 为待测目标提供电气工作环境; 调节红外热成像系统与待测目标的相对位置, 以保证红外热图的准确性与可重复性。

(5) 相应的软件: 红外热成像检测系统的软件部分主要包括远程控制及图像采集软件、图像及数据处理软件等。

4 星载 EPC 可靠性状态检测过程及检测模型

图 2 为工作在热稳态且可靠性状态良好的某型号星载 EPC 的 PCB 红外热图, 此时 EPC 工作在 8.3% 模态, 输入功率为 28W, 输出功率为 22W, 环境温度为 23°C。数据显示, 图 2 中最高温度为 58.4°C, 平均温度为 30°C。在图 2 中可见, PCB 的右半部分发热较为严重, 该部分主要包括预稳电路及推挽变换器 (不包括逆变变压器)。此外, 分散布置在 PCB 上的一些 IC 芯片的表面温度也略高于其周围器件及 PCB 表面。这恰恰对应于预稳电路、推挽变换器及 IC 芯片功耗密度较大的特点。图 2 中开关管和变压器的表面温度并不高, 这主要因为星载 EPC 热设计考虑充分, 尤其是变压器的热设计, 不仅通过增大体积来实现降低其功率密度, 还通过硅橡胶灌封来努力降低其内部的传热热阻。截取图 2 中 PCB 部分并进行温度直方图统计

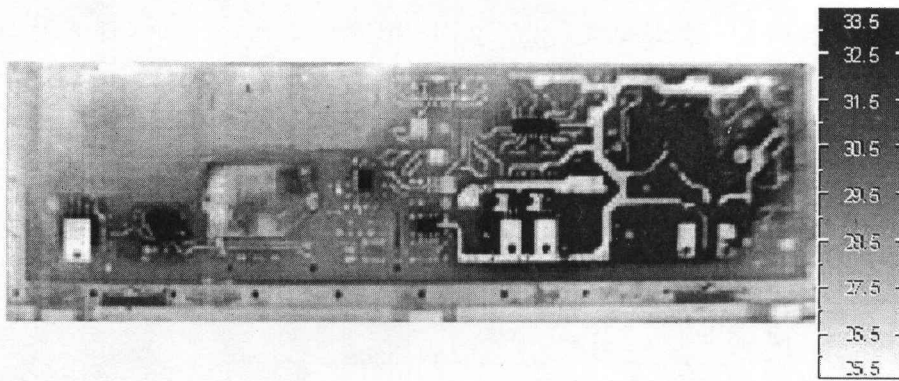


图 2 8.3% 模态星载 EPC 的 PCB 稳态红外热图

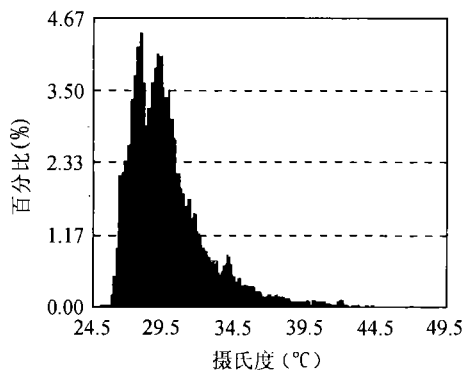


图 3 PCB 红外热图的温度统计直方图

处理, 如图 3 所示, 其横坐标为温度值, 纵坐标为红外热图中对应于某温度步长 ΔT 范围内的像元数目在总体像元数目中所占的百分比。图 3 显示, PCB 的表面温度主要集中在 26°C~36°C 范围内, 超过 45°C 的高温区域很少。该 PCB 的热点温度只有 58.4°C, 且其面积很小。这些都充分体现了该星载 EPC 系统良好的可靠性热设计。

在建立可靠性状态检测模型时涉及到数据的统计处理及特征提取问题。因此, 首先必须将表示 PCB 表面温度分布的红外热图 (只截取 PCB 部分) 数字化, 将其转换为温度矩阵。同时, PCB 表面温度分布与 EPC 的开机工作时间 t 有关, 因此, 数字化后的温度矩阵如式 (1) 所示,

矩阵的行数 M 和列数 N 对应于红外热像仪的像素空间。

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

如果采用 t_w 表示 EPC 从开机到进入热稳态阶段所需的时间。那么, 就可以采用 $\mathbf{T}(t_w)$ 表示处于热稳态的 PCB 红外热图数字化后的温度矩阵 (在常温常压下, 一般开机工作 40min 后 EPC 进入热稳态)。

依据式 (2) 对式 (1) 所示温度矩阵进行温度直方图统计处理, 获得如式 (3) 所示的 l 维列向量。该列向量的维数空间由温度矩阵的温度范围和温度步长 ΔT 决定, 其每一分量为对应的温度步长范围内的元素数目在元素总体中所占的百分比。

$$x_k = \frac{\text{温度在}[T_0 + (k \pm 1/2)\Delta T]\text{范围内的元素数目 } n_k}{\text{温度矩阵内元素总数 } M \times N}, \quad k = 1, 2, \dots, l \quad (2)$$

式中 ΔT 为进行温度直方图统计处理时选择的温度步长; T_0 为矩阵元素温度下限与 $\Delta T/2$ 的差值。

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_l(t)]^T \quad (3)$$

因此, 可以用列向量 $\mathbf{x}(t_w)$ 表示处于热稳态的 PCB 红外热图的温度直方图统计结果。但在实际应用过程中, 为防止因温度矩阵之间温度范围波动而引起式 (3) 所示的列向量的维数空间发生波动, 本方案中进行温度直方图统计处理时, 根据实际使用情况反馈, 统一选择温度步长为 $\Delta T = 0.2^\circ\text{C}$, 温度范围为 $23^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$, 获得统一的 $l = 185$ 维的列向量 $\mathbf{x}(t)$ 。

如果采集 n 幅同一型号且可靠性状态良好的星载 EPC 处于热稳态时的 PCB 红外热图, 显然, 这 n 幅红外热图中分别对应于 PCB 上相同位置的 n 个点温服从一元正态分布。推广该结论则可以认为这 n 幅红外热图数字化后的温度矩阵 $\mathbf{T}_1(t_w), \mathbf{T}_2(t_w), \dots, \mathbf{T}_n(t_w)$ 服从多元正态分布。因此, 这 n 幅红外热图经温度直方图统计处理后获得的列向量 $\mathbf{x}_1(t_w), \mathbf{x}_2(t_w), \dots, \mathbf{x}_n(t_w)$ 亦服从多元正态分布, 如式 (4) 所示。

$$p(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{l/2} |\boldsymbol{\Sigma}|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{u})^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{u})\right\} \quad (4)$$

式中 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_l]^T$ 是代表温度直方图统计结果的 l 维列向量; $\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_l]^T$ 是 l 维均值列向量; $\boldsymbol{\Sigma}$ 是 $l \times l$ 维协方差矩阵, $\boldsymbol{\Sigma}^{-1}$ 是 $\boldsymbol{\Sigma}$ 的逆矩阵, $|\boldsymbol{\Sigma}|$ 是 $\boldsymbol{\Sigma}$ 的行列式^[9]。

根据数理统计中多元正态分布的参数估计方法 (式 (5) 和式 (6)), 可以求得样本均值列向量 $\hat{\mathbf{u}}$ 和样本协方差矩阵 $\hat{\boldsymbol{\Sigma}}$ 。本方案中最初获得的样本数目为 $n = 480$ 。

$$\hat{\mathbf{u}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{x}_i \quad (5)$$

$$\hat{\boldsymbol{\Sigma}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mathbf{x}_i - \hat{\mathbf{u}})(\mathbf{x}_i - \hat{\mathbf{u}})^T \quad (6)$$

根据欧氏距离的定义^[10], 可以求得每个样本列向量 x_i 到样本均值列向量 \hat{u} 的欧氏距离 $D(x_i, \hat{u}), i = 1, 2, \dots, n$ (式(7))。同样, 对于待验样本列向量 x_T , 也可以求得其与样本均值列向量 \hat{u} 的欧氏距离 $D(x_T, \hat{u})$ 。

$$D(x_i, \hat{u}) = \sqrt{(x_i - \hat{u})^T(x_i - \hat{u})} \quad (7)$$

利用已经获得的 $n = 480$ 个样本列向量 x_i , 并根据式(7), 可以获得相应的 $n = 480$ 个欧氏距离 $D(x_i, \hat{u})$ 数据, 由于欧氏距离 $D(x, \hat{u}) \geq 0$, 因此, 利用这些数据可以训练出一个位于 X 轴正半轴的分布模型, 将实际训练出来的分布模型采用频数统计直方图形式表示如图 4 所示, 图中 X 轴表示欧氏距离, 下限为 0.880×10^{-2} , 上限为 4.540×10^{-2} , 步长为 0.183×10^{-2} , Y 轴表示频数统计结果。在这个分布模型中, 越是位于 X 轴正半轴右侧的样本, 即样本的欧氏距离 $D(x_i, \hat{u})$ 越大, 表明与之对应的样本列向量 x_i 与均值列向量 \hat{u} 之间的的差距越大, 相似性越小, 即与该样本列向量 x_i 对应的 PCB 板表面温度分布与其它 PCB 相比发生了较大的异常变化。因此, 利用该分布模型可以进行 PCB 的可靠性状态检测。但在应用该检测方案时需要根据具体应用情况下检测质量要求以及实际使用经验反馈, 为可靠性状态检测方案选择一个合理的欧氏距离 $D(x, \hat{u})$ 判别门限, 令其为 T 。然后, 通过将待验样本的欧氏距离 $D(x_T, \hat{u})$ 与判别门限 T 相比较来判断该待验样本的可靠性状态。如果 $D(x_T, \hat{u}) > T$, 则认为该待验样本的可靠性状态不满足要求。本来如果利用已知的欧式距离 $D(x, \hat{u})$ 样本数据能够获得由其训练出来的分布模型的分布密度函数, 就可以根据可靠性状态检测质量要求以及使用经验反馈信息来选择合适的实数 $\alpha(0 \leq \alpha \leq 1)$, 则在该分布模型的分布密度函数中对应于 α 的上侧分位数 $D_\alpha(x, \hat{u})$ 即为欧氏距离判别门限 T 。但在实际应用该检测方案时, 由于根据已有样本很难拟合出该分布模型的分布密度函数表达式。因此, 本文中实际采用式(8)所示方法确定欧氏距离 $D(x, \hat{u})$ 的判别门限。如果选择 $\alpha = 0.05$, 实际算得判别门限 $T = 4.357 \times 10^{-2}$; 如果 $\alpha = 0.10$, 算得判别门限 $T = 4.174 \times 10^{-2}$ 。本文依据星载 EPC 高可靠性要求以及实际使用经验反馈最终选择 $\alpha = 0.05$ 。

$$T = \text{Min}(D(x_i, \hat{u})) + [\text{Max}(D(x_i, \hat{u})) - \text{Min}(D(x_i, \hat{u}))] \times (1 - \alpha), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

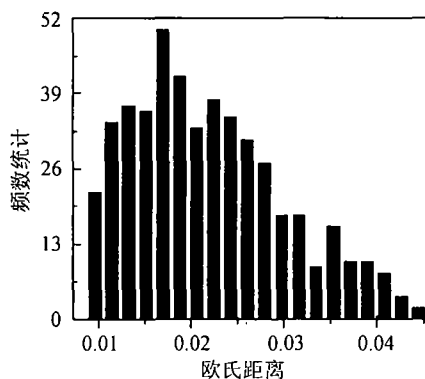


图 4 欧氏距离样本频数统计直方图

至此, 就可以对与训练样本同型号的星载 EPC 新样机的 PCB, 或是环模试验后的星载 EPC 样机的 PCB 进行可靠性状态检测。其过程如下: 首先在特定的环境温度 (23°C) 和工作模式下, 在待测 EPC 样机进入热稳态后采集其 PCB 的红外热图, 然后依据上文介绍的方法进行温

度直方图统计处理获得 $l=185$ 维的待验样本列向量 x_T , 接下来利用式 (7) 求得待验样本列向量 x_T 到样本均值向量 \hat{u} 的欧氏距离 $D(x_T, \hat{u})$ 。然后比较 $D(x_T, \hat{u})$ 与 T , 如果 $D(x_T, \hat{u}) \leq T$, 则认为该 EPC 样机目前工作状态良好, 可靠性状态满足要求; 如果 $D(x_T, \hat{u}) > T$, 则认为该 EPC 样机可靠性状态不满足要求。在可靠性状态检测过程中涉及到的不确定性讨论问题, 将在后续文章中讨论。

为了适应星载电子设备的高可靠性要求及非批量生产的特点, 本文中用于训练模型的样本均采集自仅有的少量标准 EPC 系统, 标准 EPC 系统是指各项功能指标完全合乎要求并且具有代表性的星载 EPC 系统。所有的训练样本均采集自相同的环境条件下, 即令星载 EPC 系统工作在特定的环境温度下且只采集其进入热稳态后的 PCB 红外热图作为样本。不论是训练样本还是待验样本, 在进行温度直方图统计处理时, 均应按上文介绍方法, 以保证列向量的维数空间统一, 即 $l=185$ 。 α 的选取直接决定欧氏距离 $D(x, \hat{u})$ 的判别门限 T 的结果, 因此, α 应根据具体情况下可靠性状态检测质量要求以及实际使用经验反馈选取。增大 α , T 值减小, 将使可靠性状态检测变得更为苛刻。实际使用中发现, 该检测方案尤其适用于面积小于 100cm^2 的 PCB 可靠性状态检测。如果 PCB 板面积较大, 可将其分割然后分别应用该检测方案进行可靠性状态检测。

5 结论

本文介绍的基于红外热成像技术的可靠性状态检测方法是针对星载 EPC 的高可靠性要求和非批量生产的实际情况提出的。应用实践证明该检测方法的检测质量很高, 但检测过程较为复杂。该检测方法有利于保证同一型号星载 EPC 各样机之间的统一性, 并且尤其有利于及时发现各项环模试验过程中可能引起的星载 EPC 系统的可靠性缺陷。

参 考 文 献

- [1] Kaplan H, et al.. The infrared automatic mass screening(IRAMS) system for printed circuit board diagnosis. IEEE International Automatic Testing Conference, San Antonio, TX, 1986: 301-306.
- [2] Wallin B. Real-time temperature on PCBs, hybrids and microchips, thermosense XIII: Proc. of SPIE, the International Society for Optical Engineering, Orlando, Florida, 1991, 1467: 180-187.
- [3] J. Walcutt, Thermal imaging critical for today's complex circuits. *Evaluation Engineering(EE)*, 1993, 32(10): 50-53.
- [4] 王格芳. 基于红外热成像的集成电路检测与诊断. *激光与红外*, 1999, 29(5): 315-317.
- [5] 候成刚等. 红外热成像技术对印刷电路板故障的诊断能力. *红外技术*, 1996, 18(6): 37-41.
- [6] 戴钢生. 传热学 (第二版). 北京: 高等教育出版社, 1999: 188-196.
- [7] 程玉兰. 红外诊断现场实用技术. 北京: 机械工业出版社, 2002: 1-19.
- [8] Thermal Tracer TH7102MX/WX Operation Manual, NEC San-ei Instruments, Ltd. 2001.
- [9] 应用数学教研室. 数理统计. 西安: 西北工业大学出版社, 1997: 167-170.
- [10] 边肇祺等. 模式识别 (第二版). 北京: 清华大学出版社, 2000: 185-188.

李振民: 男, 1974 年生, 博士生, 从事空间行波管放大器可靠性先进技术研究方面的工作。

张 锐: 男, 1960 年生, 博士, 副研究员, 从事空间行波管放大器可靠性先进技术研究方面的工作。

阴和俊: 男, 1963 年生, 博士生导师, 研究员, 从事电磁场方面的研究工作。