

数字图像相关用于印刷电路板全场微应变的测量

杨 靖¹, 吴思进¹, 郑伟巍², 李伟仙¹, 杨连祥³

- (1. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100101;
2. 诺基亚通信系统技术(北京)有限公司, 北京 100102;
3. 奥克兰大学 机械工程系, 美国 密西根州 罗彻斯特市 48309)

摘要: 提出了利用数字图像相关技术测量印刷电路板全场微应变的方法, 用于评估电路板由应力所导致的失效风险, 克服传统实验测试方法不能有效测量全场应变以及难以给出应变集中区域的不足。设计了基于三维数字图像相关技术和应力加载策略的实验方法, 通过所获得的全场主应变分布及局部区域内应变历史曲线来评估电路板的失效风险。实验结果表明, 所提出的电路板微应变测量方法的重复性优于 $100 \mu\epsilon$, 能够有效地获得电路板全场的微应变分布, 尤其是能够直观地显示电路板应变超过额定值的区域分布, 为改进电路板设计、降低电路板失效风险和保护电子元器件的安全提供了重要的实测数据。

关键词: 数字图像相关; 印刷电路板; 应变测量; 风险评估

中图分类号: TN41; O348 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1103004

Full-field measurement of micro strain of printed circuit board assembly using digital image correlation

Yang Jing¹, Wu Sijin¹, Zheng Weiwei², Li Weixian¹, Yang Lianxiang³

- (1. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China; 2 Nokia Solutions and Networks System Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100102, China;
3. Department of Mechanical Engineering, Oakland University, Rochester, MI 48309, USA)

Abstract: A method of full-field micro strain measurement using digital image correlation was proposed to evaluate the risk of printed circuit board assembly failure induced by stress. It outperformed traditional testing methods based on experiment in terms of full-field strain measurement and location of strain concentration. Experimental method based on three-dimensional digital image correlation and stress loading strategy was designed. The risk of circuit board assembly failure was evaluated by the obtained full-field distributions of principle strain and history curves of strain on selected local areas. High repeatability of the presented method, which was better than $100 \mu\epsilon$, was exhibited by the experiments, allowing the obtainment of the circuit board assembly full-field micro strain distribution. Moreover, areas where strain exceeds rated value can be localized easily and exhibited intuitively. The presented method

收稿日期: 2017-10-10; 修订日期: 2017-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(51675055, 11672045, 51705025); 北京信息科技大学“勤信人才”培育计划

作者简介: (1989-), 女, 硕士生, 主要从事数字散斑干涉和散斑方面的研究。Email: yangjing139kl@163.com

导师简介: 吴思进(1979-), 男, 副教授, 博士, 主要从事全场光测技术方面的研究。Email: swu@bistu.edu.cn

杨连祥(1959-), 男, 教授, 博士, 主要从事光测力学、光学无损检测方面的研究。Email: yang2@oakland.edu

provides important measured data which can be used to improve the circuit board assembly design, reduce the risk of circuit board assembly failure, and protect the safety of electronic components.

Key words: digital image correlation; printed circuit board assembly; strain measurement; risk evaluation

0 引言

随着电路集成度的提高和功能的扩展,电路在设备和系统中的作用越来越重要,同时电路失效所带来的经济损失和安全隐患也越来越巨大。电路失效主要由电气参数波动和环境载荷引起的,后者主要包括机械应力^[1]和热应力^[2]。对于集成了众多表贴电子元器件的印刷电路板来说,由于电路板受力不均等原因,导致电路板存在应变集中现象,如果该应变超过了额定值,将使电子元器件和印刷电路板焊盘存在破裂和脱落的风险,或者降低了电子元器件的性能,影响其寿命。如电路板上非常常见的小型表面贴片陶瓷电容,对机械应力非常敏感,如果该电容所处的电路板局部区域应变超过其额定值,将会引起很高的电容失效风险^[3-4]。因此对电路板的应变分布进行检测,确定应变超过额定值的区域,是评估电路板失效风险、预测元器件寿命的有效措施,同时也可以作为电路板改进设计的依据。

目前对于印刷电路板应变分布的测量,主要分为仿真模拟法和实验测试法。仿真模拟法首先需要建立失效模型,然后进行理论计算或有限元分析^[5-6]。仿真模拟法成本低,可给出全场量化结果,但结果的准确性依赖于模型的正确性。由于实际电路板组成比较复杂,且其中电子元器件的位置和力学性能的一致性也存在差异,因此难以精确预测其模型,导致了仿真模拟法难以给出准确的计算结果。实验测试法可以提供实测数据,其结果更加精确可靠。目前实验测试法主要采用电阻应变片法,该法具有灵敏度高、信号处理方便等优点^[7-9]。然而电阻应变片属于点测量方法,需要将其粘贴、焊接或埋入被测位置上,在无法事先预知应变集中所处具体位置和应变方向的情况下,不能够正确安装应变片,因此也不能够得到电路板应变分布的极值^[10]。而且由于尺寸的影响,应变片只能得到工程应变,无法得到真实应变,体现不了应变极值的大小。

针对基于电阻应变片的电路板应变测量方法的不足,文中提出了利用数字图像相关技术(Digital Image Correlation, DIC, 又称数字散斑相关技术)测量印刷电路板应变的方法。DIC 是一种非接触全场光学测试技术,能够有效测得整个被侧面内的不同应变类型(真实应变、工程应变、拉格朗日应变)的主应变、剪应变、水平方向应变和垂直方向应变的分布,而且可以得到任意点、线、面上的应变历史曲线^[11-16]。该方法所测得的数据丰富、分辨率高,因此能够有效地获得电路板全场微应变的分布,为客观评估电路板失效风险提供实测数据。

1 数字图像相关技术

1.1 图像相关原理

DIC 是一种基于数字图像的全场变形测量技术,其本质上是通过匹配并跟踪各个微小图像子区(又称模版)的位移而确定全场的位移分布。子区通常为数十至数百个相邻像素构成的矩形图像区域,子区的中心即为所考察的位置。对于具有自然纹理的物体来说,不同位置上的子区各不相同,如图 1 所示某物体数字图像的局部放大图,从中可以看出,在图像不同位置的子区具有不一样的图像灰度分布。在 DIC 中,不同位置上子区之间的相似度越低越好,如此可以更加容易区分不同的子区,因此对于自

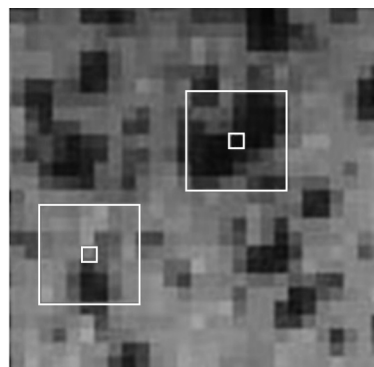


图 1 数字图像局部放大图(27 pixel×27 pixel,子区 7 pixel×7 pixel)
Fig.1 Partial enlargement of digital image (27pixel×27 pixel;
facet: 7 pixel×7 pixel)

然纹理对比不强烈的物体表面, 通常需要人工制造随机斑纹, 如通过喷涂、粘贴、印刷、蚀刻、光刻等方法制作随机分布的黑白斑点, 形成散斑场。另外子区尺寸和图像深度(图像灰度的位数)对相似度的影响也很大。

子区的相似度可以通过计算两个子区之间的相关系数来定量描述, 比如采用标准化的相关函数来计算相关系数, 写成:

$$C_0(u,v) = \frac{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x,y)g(x+u,y+v)]}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M f^2(x,y)} \sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M g^2(x+u,y+v)}} \quad (1)$$

式中: $C_0(u,v)$ 为标准相关系数; $f(x,y)$ 为第一个子区在坐标处的灰度值; $g(x+u,y+v)$ 为第二个子区在该坐标的灰度值; (u,v) 为子区 1 和 2 之间的距离, 子区大小为 $(2M+1)^2$ 个像素。标准化相关系数为 $[0, 1]$ 区间内的一个无量纲数, 越接近 0, 表示两者之间相似度低; 越接近 1, 表示相似度高。在 DIC 测试中, 一般是计算两幅图之间的位置对应关系, 此时 f 和 g 分别代表不同图中的子区。

当物体变形时, 子区的灰度分布也会随着物体的变形而发生变化。当变形比较小时, 可以认为子区内的灰度分布变化很小, 即变形前后两幅图相对应的子区之间的相关系数很大, 远大于与其他子区之间的相关系数。因此, 可以在变形前的图(参考图)中确定一个参考子区, 然后在变形后的图中选取不同位置但尺寸相同的子区, 分别计算这些子区与参考子区之间的相关系数, 如果其中某子区与参考子区之间的相关系数显著大于其他子区, 可以判断该子区即对应于参考子区。比较所对应子区中心点的坐标位置, 可以确定该点随着物体变形所发生的位移, 上述过程如图 2 所示。以特定步长(通常为数个至数十个像素)遍历整幅图像, 重复相关系数计算过程, 即可以确定图像中任一点在变形过程中的位移。结

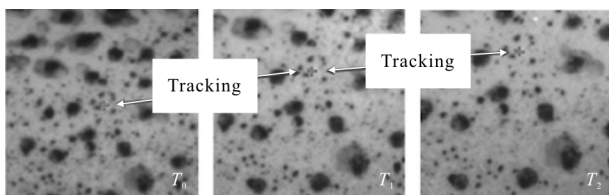


图 2 变形过程中特定点跟踪示意图

Fig.2 Principle of point tracking using DIC during deformation

合亚像素算法, 比如插值法、曲面拟合+插值法、坐标轮换法、迭代法、梯度法和遗传算法等等, 该位移确定的精度可以达到 $0.01 \text{ pixel}^{[17]}$ 。

1.2 三维位移测量原理

计算相关系数可以跟踪任意点在图像平面内的位移, 如果事先已对相机的内外参数进行标定, 即建立了相机坐标与世界坐标之间的转换关系, 即可计算得到物体任意点的位移。计算公式如下:

$$Z_c = \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{dx} & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{dy} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: Z_c 为相机坐标; (X_w, Y_w, Z_w) 为世界坐标; M_1 为相机的内参数矩阵, 由相机有效焦距 f 、像素尺寸 dx 、 dy 和初始像素坐标 u_0 、 v_0 决定; M_2 为相机的外参数矩阵, 由旋转矩阵 R 、平移矩阵 T 等相机在世界坐标中的位置参数决定。

对于只有一支相机的二维 DIC 系统来说, 相机坐标只能转换为二维的世界坐标, 即只能测量二维面内的位移。三维位移的测量需要采用三维 DIC 系统, 即采用一对相机, 利用双目立体视觉的原理, 从不同角度观测被测物, 获得三维数据。其基本原理如图 3 所示, 基于针孔成像原理, 将两支相机通过各自中心的线交于一点, 即可以确定该点的三维坐标。

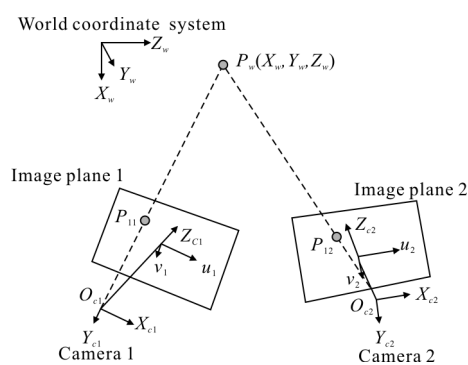


图 3 双目视觉成像原理

Fig.3 Principle of binocular vision imaging

1.3 应变测量原理

得到了被测物体的位移场, 理论上来说, 对位移场沿面内空间方向进行微分, 得到位移的空间梯度, 然后根据位移空间梯度与应变之间的等价关系计算应变。应变矩阵可表示为:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:主对角线上元素 ε_x 、 ε_y 和 ε_z 为正向应变;其余的元素为张量剪应变。张量剪应变为实际剪应变的一半。 (u,v,w) 为三维变形量, (x,y,z) 为世界坐标系。由于 DIC 是一种平面测量技术,无法获得深度方向上的信息,因此不能得到 x 方向上的应变,但可以获得 x,y 方向上的应变和对应的剪应变。同时由于 DIC 具备全场数据,因此很容易得到主应变的大小和方向。

实际上,由于噪声、伪影等影响,直接根据公式(3)计算应变将导致较大的误差。目前通常是将位移场平滑以后再求差分,以减小随机噪声对应变结果的影响;也可以采用多项式拟合法,利用特定阶次的多项式来拟合计算点附近的局部位移数据,从而计算应变。一般来说,二维 DIC 的应变测量精度达到 $100 \mu\varepsilon$;而三维 DIC 由于可以得到更加全面的信息,可以将三维应变分量完全分离,从而避免了二维 DIC 测量面内应变时受离面位移分量的影响而带来的误差增大现象,因此其应变测量精度更高,达到 $50 \mu\varepsilon$ 。

2 实验

2.1 实验系统

该实验对某电路板的应变分布进行测试。该电路板尺寸为 $265 \text{ mm} \times 220 \text{ mm}$,包括许多电子元器件,其中数量众多的小型贴片陶瓷电容分布于电路板的各个位置,这些电容的材料较脆,容易断裂,额定应变值为 $\pm 800 \mu\varepsilon$ 。实验需要查找电路板应变较大的区域,为改进电路板设计提供依据,以规避或降低电容受损或破裂的风险。由于电路板不具有随机的表面纹理,因此测试前需在其表面制作散斑图形。采用黑白两色的亚光喷漆,其中白漆作底,黑漆制作随机斑点,形成对比度强的随机斑纹,如图 4 所示。



图 4 具备随机斑点的电路板

Fig.4 Circuit board assembly with random speckle pattern

构建了如图 5 所示的三维 DIC 系统(德国 Dantec Dynamics 公司的 Q-400)对该电路板进行测试。DIC 系统主要由两支 5 百万像素相机、LED 照明光源、控制采集电路、软件组成,能够测量物体的表面轮廓、位移和应变,其标称的应变测量分辨率为 $100 \mu\varepsilon$,满足电路板的测试要求。实验工作距离约为 900 mm ,两相机之间的夹角调整约为 30° 。

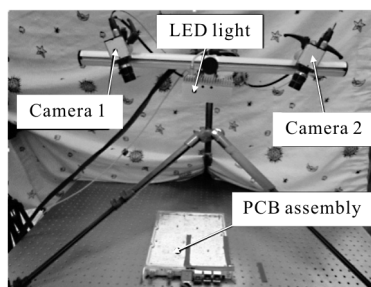


图 5 基于三维 DIC 系统的电路板全场微应变测量系统

Fig.5 Experimental system for full-field micro strain measurement of circuit board assembly using 3D DIC

实验开始前先调整光学系统,设置系统参数,然后用 $23 \text{ mm} \times 23 \text{ mm}$ 的棋盘格标定板进行标定,以获得相机的内外参数。

2.2 螺钉紧固所致应变的测量

如图 4 所示,该电路板通过 12 枚螺钉安装在专用金属底座上,电路板与底座之间部分区域存在导热胶。当螺钉紧固时,电路板存在不均匀的面内应变;且螺钉紧固顺序不同,也会影响应变分布值。

该次测试共采集 34 幅图,螺钉紧固力矩设置为 0.8 Nm ,实验顺序如下:

(1) 在电路板没有加载时,使用一对相机连续进行 5 次图像同步采集。

(2) 按照先四周再中间的螺钉加载顺序,每加载

一枚螺钉,进行一次图像采集。

(3) 导入预先标定的数据,对所采集的图像进行评估计算,其中子区设定为 17 pixel×17 pixel,步距为 12 pixel。

(4) 采用 31 pixel×31 pixel 的平滑滤波算法对应变结果进行显示。考虑到瓷片电容额定应变范围为 ±800 με,该实验将应变的显示范围设定为 ±600 με,大于 600 με 的区域显示为深红色,小于 -600 με 的区域显示为深蓝色。

(5) 对选定的局部区域进行分析,展示应变随加载步骤的变化。

螺钉加载前,电路板的最终真实第一主应变空间分布如图 6 所示;当最后一枚螺钉紧固后,电路板的最终真实第一主应变空间分布如图 7 所示。图中真实第一主应变的大小用颜色展示,方向用线段方向展示。

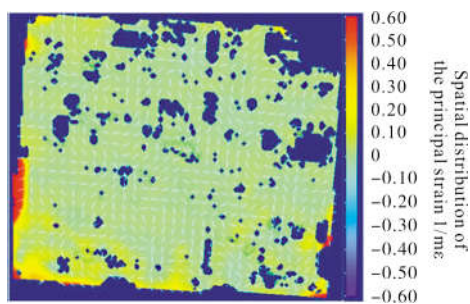


图 6 螺钉紧固加载前主应变空间分布

Fig.6 Spatial distribution of the principal strain before screw fastening

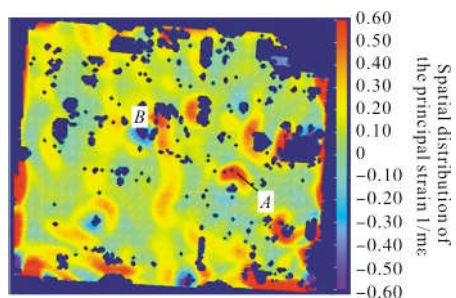


图 7 全部螺钉紧固加载后主应变空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of the principal strain after entire screw fastening

从图 6 和 7 中可以发现:

(1) 部分区域数据缺失,在图中呈现空洞现象。对照实物图可知,空洞区域都是较高的电子器件或封闭的金属屏蔽层所处的位置,这些器件导致了散

斑斑纹的不连续,影响了软件对该区域的评估结果。就全局而言,空洞区域所占面积的比例不高,不影响对电路板应变分布的整体评估。

(2) 图像四周数据普遍较大,即使在螺钉加载前也具有较大的数据。对比滤波前后的数据可知,这种现象大部分由滤波算法引起的,在计算图像边缘的数据时难以有效选择滤波窗口,导致了数据异常。

(3) 当螺钉未加载时,除四周噪声较大的区域外,其他位置应变都非常小,不超过 ±100 με;全场平均真实第一主应变约为 3.1 με。可以总结得到,按照文中的实验方法,DIC 的噪声可控制在 (-100 με, 100 με) 范围内,满足文中实验对电路板应变的检验要求。

(4) 当螺钉加载后,全场平均真实第一主应变变为 38.2 με。部分区域存在应变超限或接近超限的现象,说明了这些地方存在应变集中现象。

在图 7 所示的应变集中区域分别选取了 A 和 B 两处微小区域,一处应变接近正极限,另外一处应变接近负极限。图 8 展示了这两处应变随时间的变化,即加载过程中应变的变化,其中 A 点所展示的是第一主应变,B 点展示的是第二主应变。

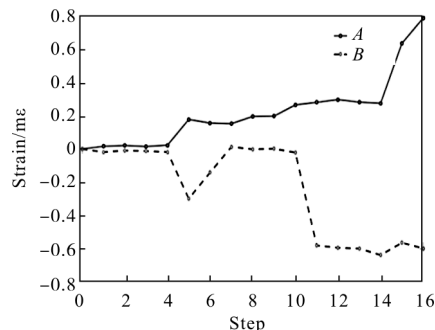


图 8 螺钉加载过程中局部应变历史曲线

Fig.8 Strain history curves of local area in screw loading process

从图中可以发现:

(1) 前五步螺钉未加载时,A 和 B 两处的应变值都小于 ±50 με。考察电路板全场其他区域,除四周噪声较大的区域外,应变普遍不超过 ±100 με。

(2) 第六步当第一枚螺钉紧固时,所测出的应变明显变化,说明本方法灵敏度高,能够有效检测螺钉加载导致的应变变化。

(3) 随着不同步骤螺钉的加载过程,应变的大小发生变化。螺钉加载对局部应变的影响与电路板的

结构、装配关系等有关。

根据测试结果,同时忽略图像边缘噪声的影响,可以确定由于螺钉紧固导致的应变超限的区域,如图 9 所示,说明在这些区域的电容有较大的失效风险。

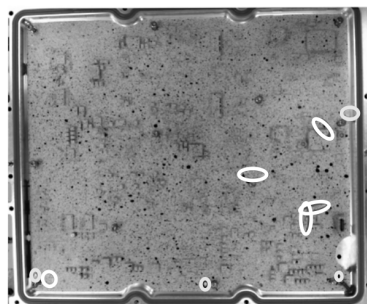


图 9 应变异常区域

Fig.9 Areas with abnormal strain

2.3 重复性测试实验

为了获得更加精确的数据,在保持光学系统不变的前提下,减小了工作距离和视场,提高了单位距离上的分辨率。该次测量区域调整为 135 mm×125 mm,只测量电路板上部分区域的应变。重复 2.2 节所述的测量步骤,共测量三次。

图 10 展示了对应于最后一枚螺钉的加载情形,三次测量各自所得到的真实第一主应变空间分布的对比;图 11 展示了真实第二主应变的对比图。从图中可知,三次测量得到的结果非常接近,其应变分布趋势一致,数值上的差距也都在±100 με 以内。

在图 10 和 11 中选取了 C 和 D 两处应变绝对

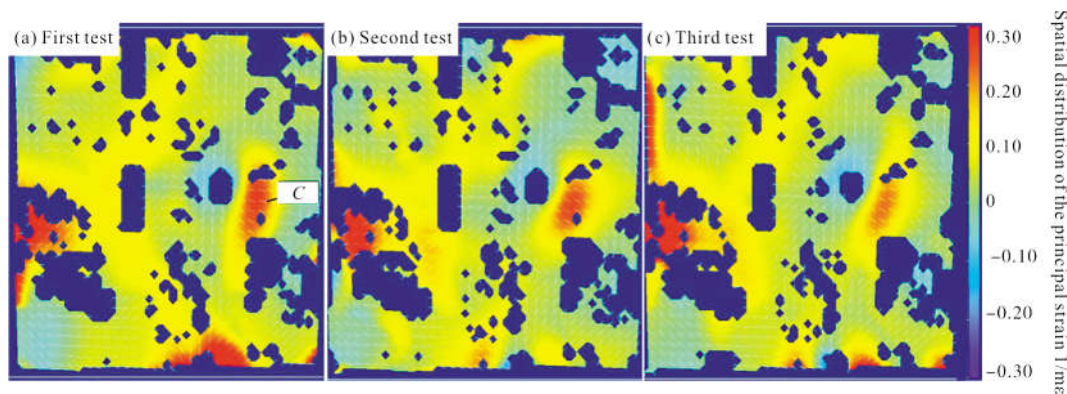


图 10 真实第一主应变分布重复测量

Fig.10 Repeated measurements of the real principal strain 1

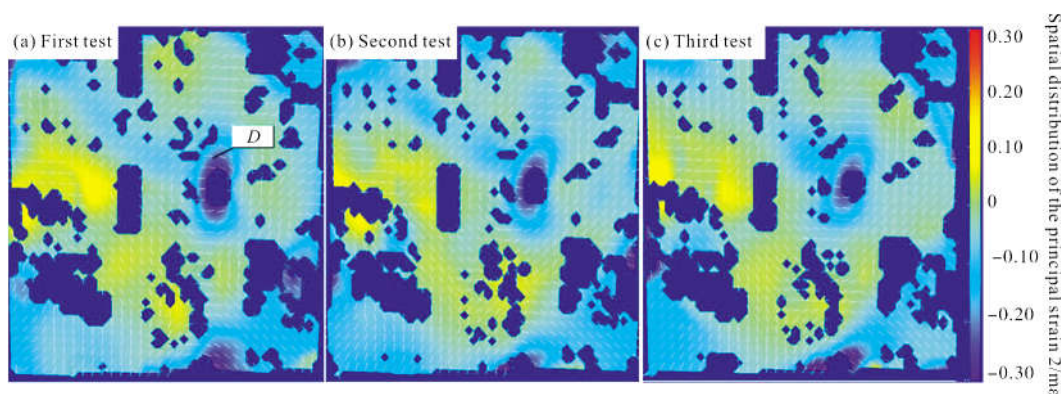


图 11 真实第二主应变分布重复测量

Fig.11 Repeated measurements of the real principal strain 2

值较大的微小区域,通过应变的历史曲线进一步展示三次测量的差别。其中图 12 显示了 C 点的应变历史曲线,图 13 显示了 D 点的应变历史曲线。从这两幅图中可知,不同次应变测量的历史曲线重合度较好,差别

在±100 με 以内。考察全场不同区域内的测试结果均类似。因此可以总结得到,按照文中的实验方法,DIC 的重复性可在(-100 με, 100 με)范围内,说明该方法是一种有效的电路板应变测量方法。

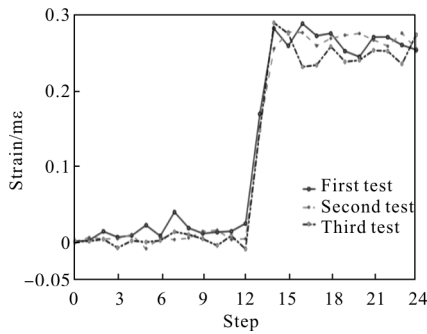


图 12 局部区域第一主应变重复性测试

Fig.12 Repeated measurement of the principal strain 1 on local area

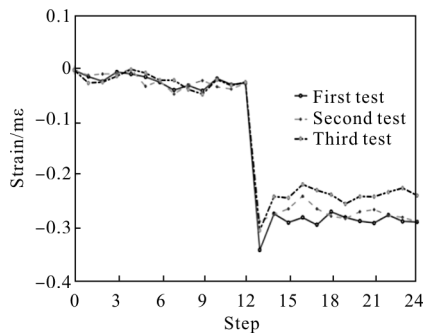


图 13 局部区域第二主应变重复性测试

Fig.13 Repeated measurement of the principal strain 2 on local area

2.4 电路板弯曲所致应变的测量

待测的电路板从金属底座中取出时,由于底部导热胶的粘连以及单侧受力的影响,使电路板承受较大的弯曲应力,容易导致瓷片电容器受损或破裂。实验模拟人工取出电路板的过程,从图 4 所示的右下角缺口处以平常速度手动掀开电路板,同时使用 DIC 系统连续进行 19 次采样,并采用与 2.2 节同样的数据评估和处理方法,得到电路板应变的时间和空间分布。

图 14 展示了最后一次采样所得到的真实第一主应变的空间分布。从图中可以看出,有多处区域的应变值超限,说明电路板弯曲导致了较大的应变,给电路板带来了较大的失效风险。沿图 14 中所示水平黑线的方向可得到第一主应变沿该线段的空间分布,如图 15 所示。从该曲线图中可知,最大应变超过 $1\ 500\ \mu\epsilon$,远大于瓷片电容器的额定值,说明这种人工掀开电路板的方式对电路板具有一定的风险性,容易造成电路板的失效。应该通过降低人工掀开速度,缓慢释放导热胶的粘力,以降低电路板的失效风险。

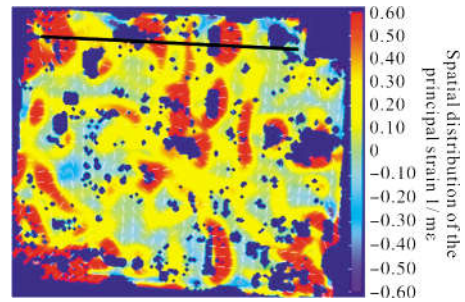


图 14 电路板弯曲所致第一主应变空间全场分布

Fig.14 Full-field spatial distribution of the principal strain 1 induced by circuit board assembly bending

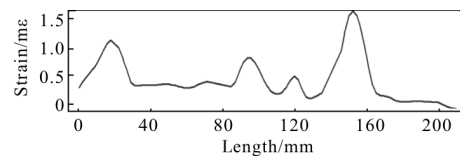


图 15 电路板弯曲所致水平方向上第一主应变空间分布

Fig.15 Spatial distribution of the principal strain 1 induced by circuit board assembly bending along the horizontal direction

3 结论

文中提出了利用 DIC 技术检测电路板应变的方法,能够有效地确定电路板在应力作用下的应变集中现象,为改进电路板设计、降低电路板风险提供了实测数据。所展示的方法系统简单、操作方便,能够快速精准地获得电路板全场微应变的分布,因此是一种有效的评估电路板失效风险的方法。

参考文献:

- [1] Amy R A, Aglietti G S, Richardson G. Board-level vibration failure criteria for printed circuit assemblies: an experimental approach [J]. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2010, 33(4): 303-311.
- [2] Chan Y C, Yeung F, Mok T S. Failure analysis of miniaturized multilayer ceramic capacitors in surface mount printed circuit board assemblies [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 1994, 5: 25-29.
- [3] Vogel G. Avoiding flex cracks in ceramic capacitors: Analytical tool for a reliable failure analysis and guideline for positioning cercaps on PCBs [J]. *Microelectronics*

- Reliability*, 2015, 55(9-10): 2159-2164.
- [4] Wunderle B, Braun T, May D, et al. Nondestructive failure analysis and simulation of encapsulated 0402 multilayer ceramic chip capacitors under thermal and mechanical loading. [J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2009, 131(1): 011012.
- [5] Lv Weimin, Hu Dong, Xie Jinsong, Case study on prognostics technique based on PoF to predict life of PCB [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2013, 42(2): 635-640. (in Chinese)
吕卫民, 胡冬, 谢劲松. 基于失效物理的电路板寿命预测案例研究[J]. 电子科技大学学报, 2013, 42(4): 635-640.
- [6] Liu Zhimin. Reliability evaluation of FPC under bending stress [C]//Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, 2011, 6: 2955-2958.
- [7] Medvedev A M. A metalized-hole PCB as a strain gauge [J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2016, 59(6): 879-881.
- [8] Shi Hongbin, Ikezawa Satoshi, Ueda Toshitsugu. A novel method for evaluating triaxial strain gages used in printed circuit board assemblies (PCBA) strain monitoring [C]//Sensors, 2011 IEEE, 2011: 1697-1700.
- [9] Huang Chienyi, Ying Kuoching. Applying strain gauges to measuring thermal warpage of printed circuit boards [J]. *Measurement*, 2017, 110: 239-248.
- [10] Shi Hongbin, Wu Jinchang, Zhang Jing. Selection methodology study of strain gages for printed circuit board strain measurement [J]. *Printed Circuit Information*, 2009(9): 30-35. (in Chinese)
史洪宾, 吴金昌, 章晶. 印制电路板应变测量用应变片选用方法研究[J]. 印制电路信息, 2009(9): 30-35.
- [11] Wang Yonghong, Dan Xizuo, Li Junrui, et al. Multi-perspective digital image correlation method using a single color camera [J]. *Science China Technological Sciences*, 2017, 60: 1-7.
- [12] Chen Xu, Yang Lianxiang, Xu Nan, et al. Cluster approach based multi-camera digital image correlation: Methodology and its application in large area high temperature measurement [J]. *Optics and Laser Technology*, 2014, 57: 318-326.
- [13] Xue Yuan, Su Yong, Zhang Chi, et al. Full-field wrist pulse signal acquisition and analysis by 3D Digital Image Correlation [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 98: 76-82.
- [14] Pan B, Wang B, Lubineau G, et al. Comparison of subset-based local and finite element-based global digital image correlation [J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(5): 887-901.
- [15] Pan Bin, Wang Bo. Research progress in digital volume correlation method [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(16): 1671-1681. (in Chinese)
潘兵, 王博. 数字体图像相关方法研究进展[J]. 科学通报, 2017, 62(16): 1671-1681.
- [16] Dai Xianglu, Xie Huimin, Wang Huaixi. Analysis of the error caused by off-plane displacement in two-dimensional digital image correlation measurement [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2013, 28(1): 10-19. (in Chinese)
戴相录, 谢惠民, 王怀喜. 二维数字图像相关测量中离面位移引起的误差分析[J]. 实验力学, 2013, 28(1): 10-19.
- [17] Shao Xinxing, Chen Zhenning, Dai Yuntong, et al. Research progress of several key problems in digital image correlation method [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2017, 32(2): 305-325. (in Chinese)
邵新星, 陈振宁, 戴云彤, 等. 数字图像相关方法若干关键问题研究进展[J]. 实验力学, 2017, 32(2): 305-325.