

振动载荷下面向电子设备 PHM 的板级封装潜在故障分析方法

汤 巍, 景 博, 黄以锋, 盛增津, 焦晓璇

(空军工程大学航空航天工程学院, 陕西西安 710038)

摘 要: 面向电子设备故障预测与健康管理(Prognostics and Health Management, PHM), 基于自适应谱峭度与核概率距离聚类提出一种振动载荷下板级封装潜在故障特征提取与模式辨识方法. 首先, 基于最大谱峭度原则利用经验模态分解的方法对电子组件的应变响应数据进行滤波, 计算并重构包含潜在故障信息的包络谱形成故障征兆向量; 其次, 应用高斯径向基核函数概率距离方法, 将非线性故障征兆数据映射到高维 Hilbert 空间, 对其进行聚类分析形成表征板级封装健康状态与各故障模式的类中心; 最后, 根据实时监测的板级封装的包络谱数据计算与各中心的概率距离, 判断其所属的状态从而实现封装故障模式的早期辨识. 通过试验分析, 该方法可以有效辨识与预测板级封装即将发生的故障模式, 为实现电子设备 PHM 提供了一种新式的思路与手段.

关键词: 板级封装; 故障预测与健康管理; 谱峭度; 核概率距离聚类; 振动载荷

中图分类号: TH212; TH213.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2016)04-0944-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.04.027

Latent Fault Analysis of Board-Level Package for Electronics PHM Subjected to Vibration

TANG Wei, JING Bo, HUANG Yi-feng, SHENG Zeng-jin, JIAO Xiao-xuan

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

Abstract: A pre-failure feature extraction and modes classification method of board-level package subjected to vibration loading is presented for prognostics and health management of electronics using adaptive spectrum kurtosis and kernel probability distance clustering. Firstly strain response data of electronic components is filtered by empirical mode decomposition method based on maximum spectrum kurtosis, and fault symptom vector is developed by computing and reconstructing the envelope spectrum which contains potential fault information. Secondly nonlinear fault symptom data is mapped and clustered in sparse Hilbert space based on Gaussian radical basis kernel probability distance method. Several cluster centers are formed with the characterizations of the board-level package health state and various failure modes. Finally the current state of board-level package is estimated on basis of its envelope spectrum by computing its probability distance, and the forthcoming failure mode is identified before it happen. The experimental analysis demonstrate the method can recognize and predict the upcoming failure mode of board-level package effectively and serve as a new approach to achieve PHM of electronics.

Key words: board-level package; prognostics and health management (PHM); spectrum kurtosis; kernel probability distance clustering; vibration loading

1 引言

电子装备在全寿命周期内受到服役环境的影响, 在热、振动、冲击等应力的作用下不可避免的造成损伤累积直至故障或失效. 随着电子装备的功能越来越多, 结构越来越复杂, 服役环境越来越严酷, 其出现故障的

概率大大增加, 维护成本也越来越高. 由机内自测试 (Build In Test, BIT) 发展而来的故障预测与健康管理的 (Prognostics and Health Management, PHM) 被视为降低装备维护费用, 实现装备自主保障的关键技术而日益受到重视^[1-3]. 实现电子设备 PHM 的前提和基础是故障预测, 即在系统发生故障之前, 通过无损检测等手段

发现潜在故障模式以便及时采取有效维护措施。

美国空军航空电子分析中心的统计数据显示^[4],热应力是导致电子设备故障的最主要因素,因此大量的研究工作集中在热载荷作用下电子设备及组件的失效机理与疲劳寿命预测^[5-7]。但是,随着电子设备的应用领域越来越广,很多电子设备尤其是机载或车载电子设备在实际服役过程中经常处于各种振动环境中,振动已经成为导致其发生故障或失效的重要环境因素。同时,随着电子产品的无铅化,电子封装结构中的无铅焊点相比于传统的 Pb-Sn 焊点,具有更大的硬度与脆性,使其对振动载荷更加敏感^[8-10]。相关研究表明,电子封装已成为电子设备中最薄弱的环节之一,电子设备失效 70% 的原因是由电子封装故障引起的^[11]。因此研究振动载荷下电子封装的可靠性具有重要意义。

在往复振动载荷下,电子组件基板和 PCB 板都会产生较大的弯曲变形,在封装结构中形成交变应力,从而可能导致焊球开裂、芯片断裂、引线缺失、芯片脱落等故障模式^[12]。当前,确定封装损伤的方法大都基于对菊花链电参数的测量,但是研究表明^[13,14],当焊点结构损坏超过 90% 时其电阻值的变化不超过 1mΩ,因此以电参数为封装损伤标尺,通过监测其阻值变化显然不能满足电子设备 PHM 的要求。本文面向电子设备 PHM,针对振动载荷下电子封装出现的主要故障模式,应用自适应谱峭度与核概率距离聚类方法提出一种基于故障征兆空间的板级封装潜在故障特征提取与模式辨识方法。

谱峭度法(Spectral Kurtosis, SK)是一种通过检测信号每根谱线上的峭度,发现并指出信号中隐藏的非平稳成分所在频率的时频分析方法^[15],适用于强噪声条件下的微弱信号检测,目前谱峭度方法已成功应用于轴承等机械振动系统的早期故障诊断。例如, Lee 等人^[16]利用谱峭度的方法检测螺旋桨叶尖涡空化噪音。

Chen 等人^[17]利用谱峭度与信息熵相结合的方法对车轮轴承进行缺陷检测。赵妍等人^[18]结合 Hilbert 包络解调和时谱峭度法对异步电机进行故障诊断。丁康等人^[19]基于谱峭度和 Morlet 小波方法对滚动轴承微弱故障进行诊断。越来越多的电子设备也处于振动环境中,因此本文尝试将谱峭度方法与经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)相结合应用于振动环境下电子设备中的板级封装潜在故障信号特征提取。首先,通过数字散斑相关技术获取振动载荷下电子组件的全局与局部应变响应数据,利用 EMD 方法将原始应变信号分解为若干固有模态分量(Intrinsic Mode Function, IMF)。其次,对高频 IMF 分量计算快速峭度图,基于最大谱峭度原则选择中心频率与带宽构造带通滤波器对相应 IMF 分量进行滤波。最后,将保留的低频 IMF 分量与滤波后的高频 IMF 分量重构形成包含封装结构潜在故障信息的特征信号,并计算该特征信号的包络谱,提取表征不同故障模式的特征频率值形成征兆向量并组成故障征兆空间。由于在反复振动下,电子封装可能出现的故障模式带有较大的随机性和并发性,导致表征潜在故障模式的特征数据具有较强的非线性,因此基于径向基核函数概率距离方法,将数据集映射到高维 Hilbert 空间对特征向量进行聚类,辨识出电子封装最可能将要发生的故障模式,以期实现板级封装的早期故障辨识与预测,为电子设备 PHM 提供技术支撑。

2 振动载荷下板级封装疲劳失效试验

试验选用的是在机载电子设备中常见的球栅阵列(Ball Grid Array, BGA)式封装器件,试验电路板及 BGA 焊点截面图,如图 1 所示。封装中焊点所用钎料为 Sn3.0Ag0.5Cu(SAC305),印刷电路板为镀 Ni/Au 层的 FR-4 基板,焊盘选用常见的 Au/Ni/Cu 结构镀层焊盘。器件尺寸参数如表 1 所示。

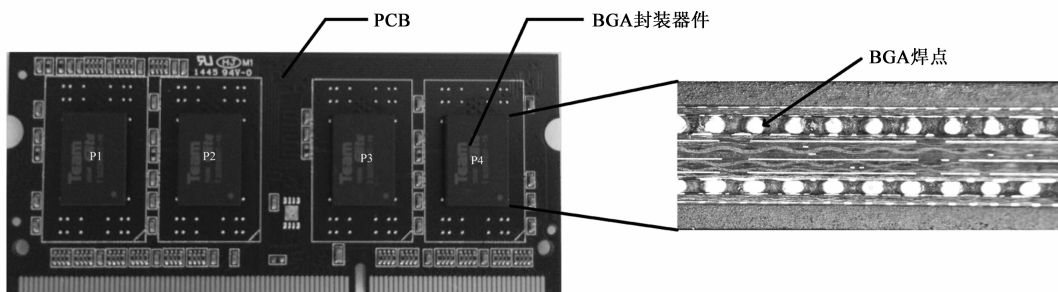


图1 试验组件及BGA焊点截面图

表 1 BGA 器件尺寸表

器件	FR-4 基板 (mm × mm × mm)	焊球直径 (D/mm)	焊点间距 (B/mm)	焊点高度 (H/mm)	焊点矩阵
BGA 封装组件	67.5 × 29.7 × 1.2	0.45	0.5	0.1	6 × 13

在电子设备中,电路板的固定方式通常为插槽式,因此,本研究选用单边固支方式进行振动试验,如图2所示,并结合近5年(2008-2013)某型机载计算机中的电子组件在实际服役过程中出现的故障信息分析振动载荷下板级封装的故障模式.为减少应变片本身对试验器件的影响,本研究将PCB板背侧涂成散斑状,形成上万个虚拟应变片,利用数字散斑动态应变测量系统对PCB背侧中心处在振动过程中的实时应变进行非接触测量,两个高速摄像机实时采集的PCB板在各个变形阶段的散斑图像,通过跟踪和匹配变形前后所采集图像的灰度信息来测量PCB板在振动载荷作用下的全局与关键局部瞬时应变场,如图3所示.根据理论分析与试验研究^[20,21],通常位于封装最外围边角处的焊点受到的应力应变最大,最先发生失效,因此重点监测封装四周边角焊点背侧部的局部应变数据并以其作为表征封装结构可能将要发生故障的特征向量的原始数

据.试验参照MIL-STD-810F标准进行,用PXI数据采集系统实时监测菊花链电阻值,当其值增大10倍以上,且持续时间大于1s,则判断封装完全失效.

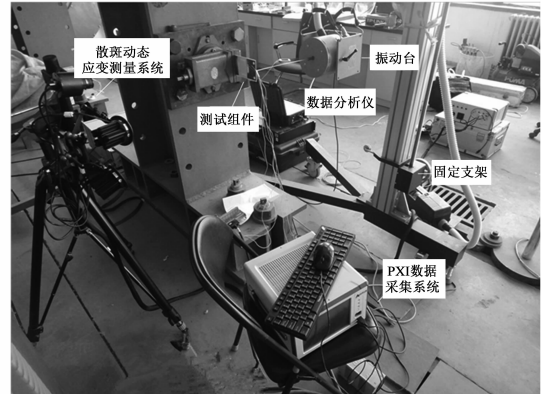


图2 振动试验装置

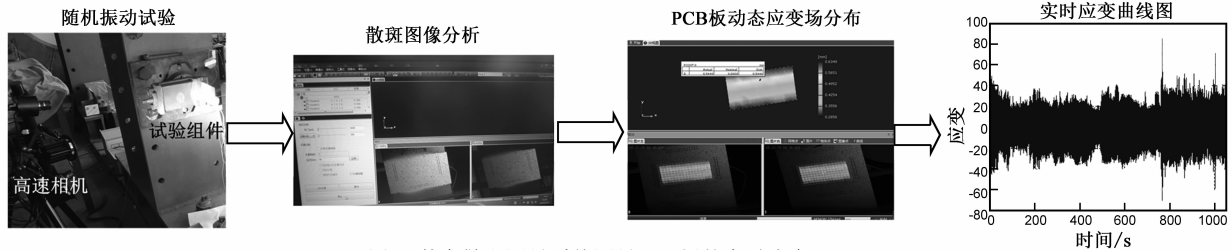


图3 数字散斑测量系统测量PCB板的实时应变

3 板级封装潜在故障特征信息提取

3.1 谱峭度法检测故障信号特征信息原理

根据 Antoni 等人对谱峭度的研究^[15],将非平稳信号 $X(t)$ 的谱峭度 $K_X(f)$ 定义为能量归一化的四阶谱累积量,即

$$K_X(f) \triangleq \frac{C_{4X}(f)}{S_{2X}^2(f)} = \frac{S_{4X}(f)}{S_{2X}^2(f)} - 2, \quad f \neq 0 \quad (1)$$

$$C_{4X}(f) = S_{4X}(f) - 2S_{2X}^2(f) \quad (2)$$

式中, $C_{4X}(f)$ 为 $X(t)$ 的四阶谱累积量, $S_{2nX}(t, f)$ 为 $2n$ 阶时间平均矩.

设一个条件非平稳随机过程 $Y(t) = X(t) + N(t)$, 其中 $N(t)$ 为独立于 $X(t)$ 的加性白噪声信号. 则 $Y(t)$ 的谱峭度为

$$K_Y(f) = \frac{K_X(f)}{(1 + \rho(f))^2}, \quad f \neq 0 \quad (3)$$

式中, $K_X(f)$ 为信号 $X(t)$ 的谱峭度, $\rho(f)$ 为噪信比, 其定义为

$$\rho(f) = \frac{S_{2N}(f)}{S_{2X}(f)} \quad (4)$$

根据式(3)可知,在信号噪信比很高的频率处, $K_Y(f)$ 趋于零值;在噪信比很低的频率处, $K_Y(f) \approx$

$K_X(f)$. 因此通过计算并搜索整个频域的谱峭度,确定最大谱峭度频带,即为信号 $X(t)$ 所在频带.

3.2 基于奇异值分解的板级封装潜在故障信号 EMD 滤波方法

传统 EMD 滤波方法的原理是将非线性平稳信号分解为一系列本征模态函数 IMF 和一个残差项的和,通过去除原始信号中的主要包含噪声信息的高频 IMF 分量实现滤波^[22,23]. 由于 EMD 分解出的高频 IMF 分量中也包含一定的有用信息,直接去除必然也会将这些有用信息连同噪声一起滤掉. 因此本研究在对板级封装应变信号进行 EMD 分解的基础上,利用谱峭度法计算高频 IMF 分量的快速谱峭度图,基于最大谱峭度原则,构造并确定带通滤波器的中心频率与频带对该 IMF 分量进行滤波,在此基础上通过傅里叶变换计算重构信号的包络谱,提取能够表征封装潜在故障的特征频率作为特征向量,为之后的故障模式聚类提供准确的输入数据. 整个算法流程图如图4所示.

3.3 滤波性能验证

为验证 2.2 节的滤波方法在提取板级封装潜在故障特征的有效性,以第 1 节振动疲劳试验中出现的 BGA 器件焊点断裂为例检验滤波性能. 图 5 为单边固

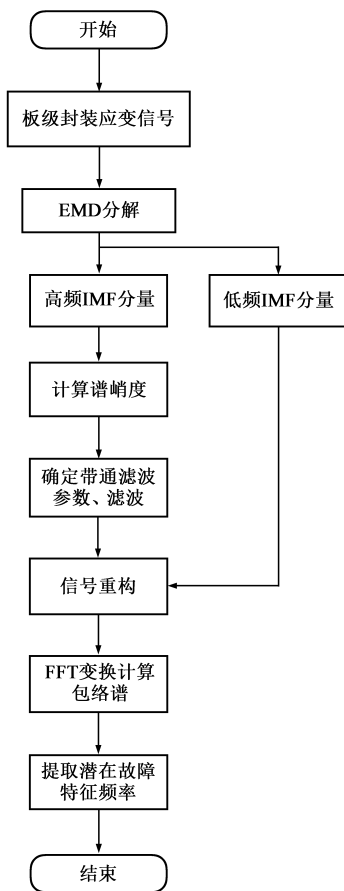


图4 板级封装潜在故障信号滤波流程

支条件下焊点出现微裂纹(裂纹长度 < 0.01mm)时所采集的应变信号时域波形及其频谱,此时电子器件的电参数测量正常,焊点的电压值基本没有变化.可以看出由于大量噪声的影响,时域信号不能看出封装中

存在的潜在故障特征,频域的潜在故障特征频率也不明显.

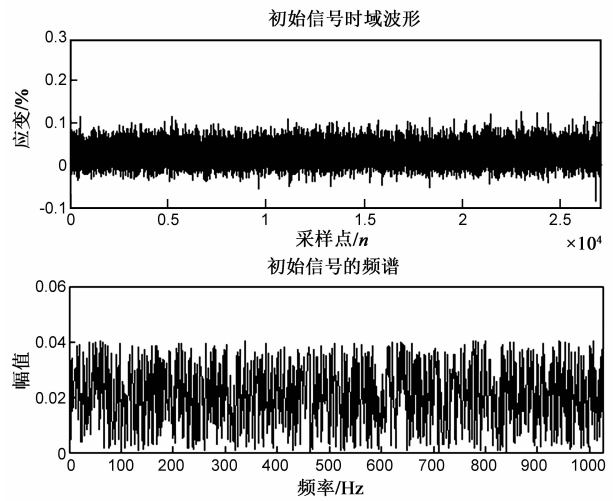


图5 板级封装焊点出现微裂纹时应变信号的时域波形及其频谱

为提取封装结构的潜在故障特征,首先用 EMD 方法对应变信号进行分解,得到 10 个 IMF 分量,如图 6 所示.噪声主要存在于前 3 个 IMF 分量中,因此对 IMF1、IMF2 和 IMF3 分量进行谱峭度分析.以 IMF1 分量为例,对 IMF1 分量进行谱峭度分析,可得到 IMF1 分量的快速谱峭度图如图 7 所示.

从图 7 中可以看出,IMF1 分量的最大谱峭度所在频带范围为 420 ~ 500Hz,因此设计中心频率为 440Hz,带宽为 80Hz 的带通滤波器对 IMF1 分量进行滤波,滤波前后的信号对比如图 8 所示.同理对 IMF2 和 IMF3 分量滤波处理后进行重构信号,并对重构信号进行平方包络,并通过傅里叶变换求出包络谱如图 9 所示.

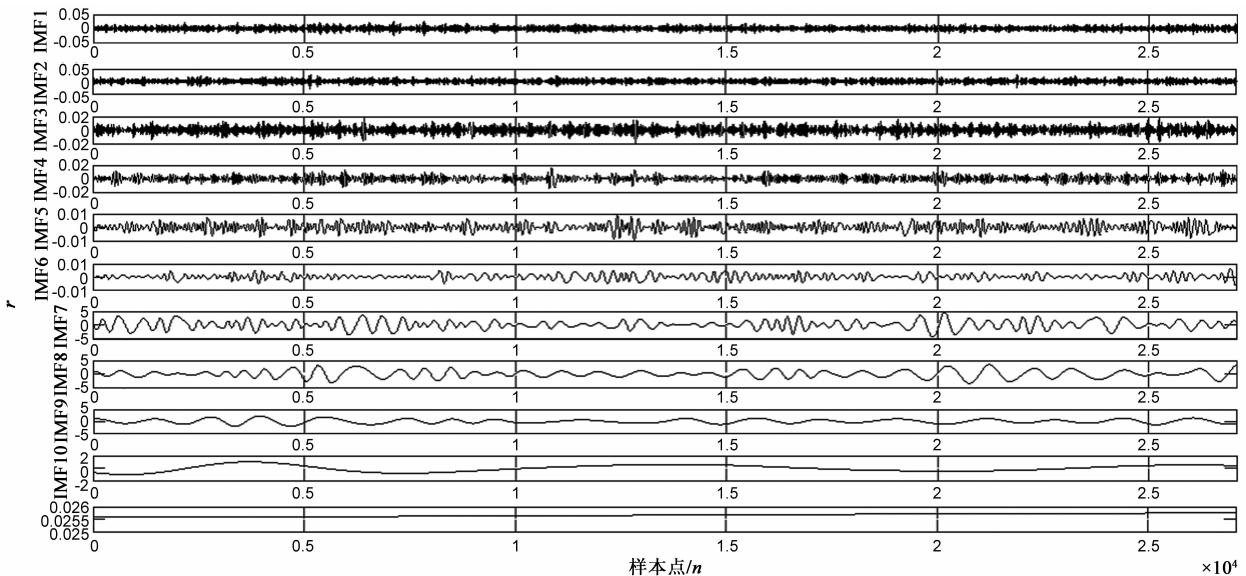


图6 经EMD分解后的应变信号

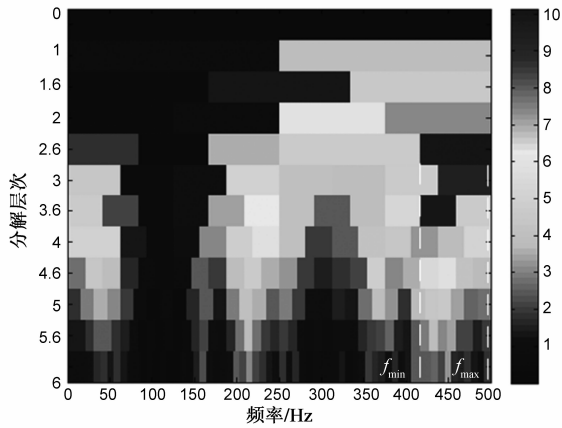


图7 IMF1分量的快速谱峭度图

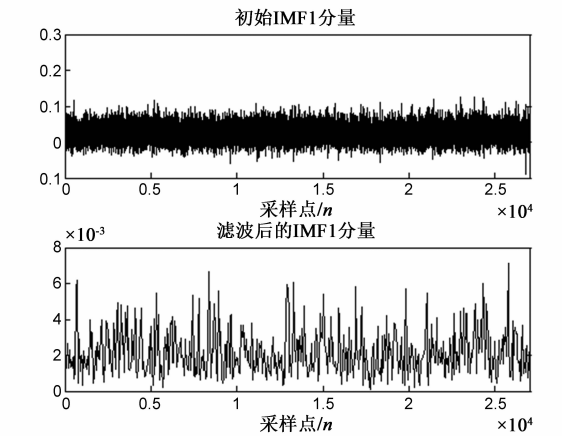


图8 滤波前后的IMF1分量

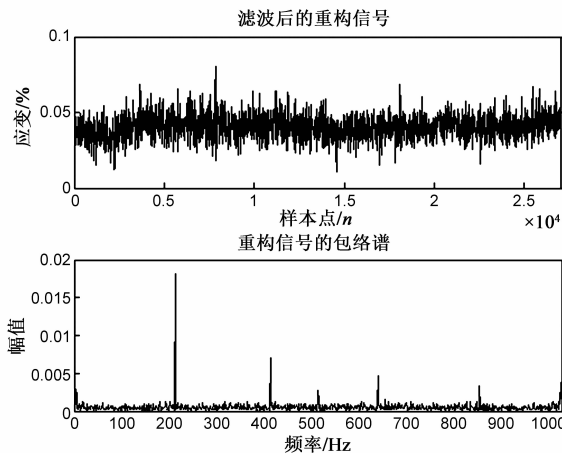


图9 滤波后的重构信号及其包络谱

对比图5与图9,利用基于最大谱峭度原则的EMD滤波后可以清晰看出,反应焊点微裂纹出现的特征频率为215Hz,因此可以将滤波后的包络谱作为表征封装结构潜在故障模式的征兆向量,并以此构成故障征兆空间.由于板级封装故障出现的位置、故障程度有较大的随机性,同一故障模式的包络谱可能会存在差异,因

此在构建征兆向量的基础上,需要利用第3节的基于概率距离的聚类方法对可能存在的潜在故障模式进行辨识与预测.

4 基于核概率距离的板级封装潜在故障模式辨识

4.1 概率距离聚类方法原理

概率距离聚类是Israel等人^[24]提出的一种稳健的统计分类方法,一般只需几步迭代即可收敛.设 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为 n 维故障征兆空间 \mathbf{R}^n 中的征兆向量, $C_i (i=1, 2, \dots, k)$ 为存在于 \mathbf{R}^n 中的类, c_i 表示类中心, $d_i(\mathbf{x})$ 表示向量 \mathbf{x} 与第 i 类中心的距离, $p_i(\mathbf{x})$ 表示向量 \mathbf{x} 隶属于第 i 类的概率.

在概率距离聚类中,对于任何向量 \mathbf{x} 与类 C_i ,均有

$$p_i(\mathbf{x})d_i(\mathbf{x}) = O(\mathbf{x}), \quad (i=1, 2, \dots, k) \quad (5)$$

其中, $O(\mathbf{x})$ 称为向量 \mathbf{x} 的距离函数,用以度量 \mathbf{x} 到 $c_i (i=1, 2, \dots, k)$ 中心的距离,仅与 \mathbf{x} 有关,当向量 \mathbf{x} 确定时,其值也随之确定.该式的物理意义为向量 \mathbf{x} 属于第 i 类的隶属概率 $p_i(\mathbf{x})$ 越大,则其到该类中心 c_i 的距离值 $d_i(\mathbf{x})$ 越小,反之亦然.

根据式(5)与概率值和为1($\sum_{i=1}^k p_i(\mathbf{x}) = 1$)的原则,向量 \mathbf{x} 隶属于 C_i 的概率可表示为

$$p_i(\mathbf{x}) = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{d_i(\mathbf{x})}{\prod_{j \neq i} d_j(\mathbf{x})}} = \frac{\prod_{j \neq i} d_j(\mathbf{x})}{\sum_{i=1}^k \prod_{j \neq i} d_j(\mathbf{x})} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5),则可得

$$O(\mathbf{x}) = \frac{\prod_{j=1}^k d_j(\mathbf{x})}{\sum_{i=1}^k \prod_{j \neq i} d_j(\mathbf{x})} \quad (7)$$

设数据集合为 $\{x_i | i=1, 2, \dots, m\}$,则集合中所有向量与空间 \mathbf{R}^n 中类中心 $c_i (i=1, 2, \dots, k)$ 的距离函数总和可表示为

$$f(c_1, c_2, \dots, c_k) = \sum_{i=1}^M \frac{\prod_{j=1}^k d_j(x_i)}{\sum_{i=1}^k \prod_{j \neq i} d_j(x_i)} \quad (8)$$

由于 $O(\mathbf{x})$ 为距离 $d_i(\mathbf{x})$ 的单调函数,其值越大表示向量 \mathbf{x} 分类的不确定性越大.因此可通过输入训练数据集,经过一系列迭代使 $f(c_1, c_2, \dots, c_k)$ 函数值最小化来确定 \mathbf{R}^n 空间中的 k 个类的中心.令

$$\frac{\partial f(c_1, c_2, \dots, c_k)}{\partial c_k} = 0, \text{ 则}$$

$$c_k = \sum_{i=1}^M \left(\frac{u_k(x_i)}{\sum_{j=1}^M u_k(x_j)} \right) \cdot x_i \quad (9)$$

$$u_k(x_i) = \begin{cases} \frac{p_k^2(x_i)}{d_k(x_i)}, & x_i \neq c_k \\ 1, & x_i = c_k \end{cases} \quad (10)$$

其中, $u_k(x_i)$ 被称为权系数. 确定类中心之后, 即可通过计算输入数据的隶属概率实现数据的聚类.

4.2 板级封装潜在故障的核函数概率距离聚类方法

由于在外界载荷的作用下电子封装故障的随机性, 使得表征封装结构潜在故障特征向量并非是线性不变的, 因此输入空间为非线性数据集. 这种情况下, 可利用核函数将其转换到 Hilbert 空间, 使得输入空间原来非线性不可分, 在高维空间变得线性可分. 即首先基于高斯径向基核函数将前期试验数据与实际服役故障数据的包络谱进行非线性变换; 然后训练生成表征健康及各故障模式的聚类中心点; 最后根据试验中实时监测的数据计算其与各中心的概率距离, 判断其所属的状态从而实现封装故障模式的早期辨识. 具体算法步骤如下:

步骤 1 将前期试验与实际服役中常见的各故障模式(焊球开裂、芯片断裂、焊点缺失、芯片脱层)与出厂健康状态对应的包络数据作为训练数据集 $x = \{x_i | i = 1, 2, \dots, n\}$, $x_i \in \mathbf{R}^n$. 基于高斯径向基函数 $k(x_i, x_j) = e^{-\frac{1}{\sigma^2}(x_i - x_j)^2}$ 对其进行非线性变换 $x \rightarrow \varphi(x)$, $\mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{F}$, 得到映射数据集 $\varphi(x) = \{\varphi(x_i) | i = 1, 2, \dots, n\}$.

步骤 2 选择 5 个映射数据 $(\varphi(c_1), \varphi(c_2), \dots, \varphi(c_5))$ 构成生成空间 \mathbf{F} 中的表征封装结构 5 种状态的聚类中心.

步骤 3 根据式(5)~式(7), 在空间 \mathbf{F} 中计算数据集中每一元素 $\varphi(x_i)$ 与类中心 $\varphi(c_k)$ 的欧式距离与隶属概率, 即 $d_k(\varphi(x_i)) = \|\varphi(x_i) - \varphi(c_k)\|$, $p_k(\varphi(x_i)) = \frac{\prod_{j \neq i} d_j(\varphi(x_i))}{\sum_{t=1}^k \prod_{j \neq t} d_j(\varphi(x_i))}$.

步骤 4 根据式(8)与式(10), 计算 $\varphi(x_i)$ 的权系数, $u_k(\varphi(x_i)) = \begin{cases} \frac{p_k^2(\varphi(x_i))}{d_k(\varphi(x_i))}, & \varphi(x_i) \neq \varphi(c_k) \\ 1, & \varphi(x_i) = \varphi(c_k) \end{cases}$.

步骤 5 根据式(9)更新 \mathbf{F} 空间中的类中心, $\varphi(c_k) = \sum_{i=1}^M \left(\frac{u_k(\varphi(x_i))}{\sum_{j=1}^M u_k(\varphi(x_j))} \right) \cdot \varphi(x_i)$.

步骤 6 重复步骤 2 至步骤 4, 直到类中心变化误差小于 0.01 为止.

步骤 7 将当前状态包络谱数据作为输入数据集 y , 计算其隶属概率, 并将其划归为隶属概率最大的类, $p_k(\varphi(y)) = \max_{1 \leq i \leq 5} \{p_i(\varphi(y))\}$.

4.3 实例验证

将前期试验数据结合实际服役过程中板级封装结构出现的常见故障模式数据将封装的状态分为 5 类: 健康(Health)、焊球开裂(Solder Cracking)、芯片断裂(Chip Cracking)、焊点缺失(Interconnect Missing)、芯片脱层(Chip Delamination). 设置类数目为 5, 高斯径向基核函数宽度参数 $\sigma = 175$, 利用核函数将输入数据变换后, 映射数据变得较为稀疏, 使分类较为容易. 在外界振动载荷作用下, 板级封装结构在发生故障前, 由第 2 节生成的故障征兆向量即重构信号的包络谱会发生变化. 通过对 90 组试验件的随机振动试验数据统计分析, 训练生成的板级封装各状态聚类中心如图 10 所示, 训练误差变化如图 11 所示. 各类故障模式所对应的特征值呈现出以中心辐射状分布. 但由于板级封装出现微损伤的程度、部位及模式具有较大的随机性与并发性, 表征同一故障模式的包络谱会存在差异, 并且不同故障模式的包络谱之间也可能存在混叠现象, 所以表征故障模式的故障征兆向量之为一个值域区间而非定值, 具有一定的统计特性, 具体试验统计结果如表 2 所示. 如能同时结合故障征兆向量的幅值与频率的变化, 可以在故障征兆期较容易发现并辨识出封装结构中潜在的故障模式, 从而最大程度的避免故障发生.

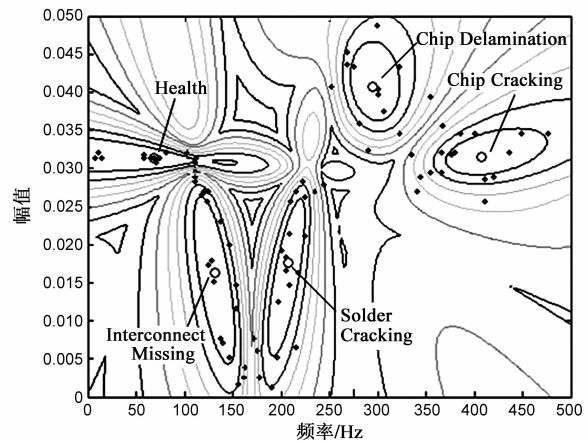


图 10 板级封装健康状态与故障模式聚类图

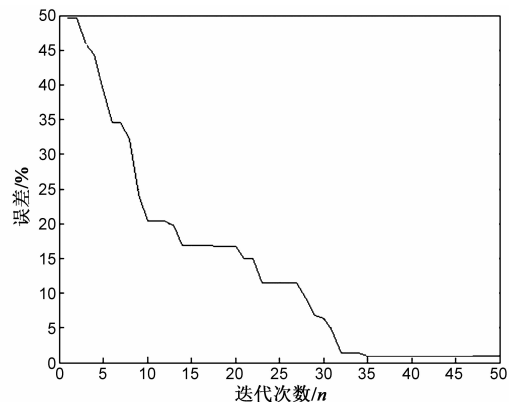


图 11 训练误差变化图

表 2 随机振动试验结果

试验序号	故障模式	故障征兆向量的特征值区间				辨识度 /准确率
		频率		幅值		
		极小值	极大值	极小值	极大值	
3, 6, 10, 21, 29, 44, 46, 53, 69, 70, 75, 76, 80	-	5	115	0.030	0.033	95.3%
1, 4, 7, 8, 12, 14, 17, 20, 22, 25, 31, 34, 35, 47, 49, 56, 64, 67, 68, 77, 79	焊球开裂	170	249	0.0027	0.029	90.5%
11, 13, 18, 19, 24, 27, 32, 39, 43, 45, 50, 51, 62, 66, 71, 74, 78	焊点缺失	115	165	0.003	0.028	85.9%
2, 5, 15, 16, 23, 26, 28, 38, 41, 42, 54, 55, 63, 72, 73	芯片断裂	335	480	0.026	0.035	89.4%
9, 30, 33, 36, 37, 40, 48, 52, 57, 58, 59, 60, 61, 65	芯片脱层	261	360	0.032	0.048	88.2%

注：“-”代表健康

为进一步验证对板级封装状态辨识与预测的准确性,将第 1 节试验中 BGA 封装出现的 8 组早期故障试验数据作为输入,计算其分类结果如图 12 所示.通过金相分析等手段观察这 8 组试验的最终结果,以第 1 组试验件为例,焊点截面的光学显微照片如图 13 所示.从图中可以清晰地看出,在近封装侧焊点出现了微裂纹.在焊点裂纹故障征兆出现时有效地辨识出了板级封装将要出现的故障模式,验证了该方法对板级封装状态辨识的准确性,这也是实现电子设备 PHM 的关键.

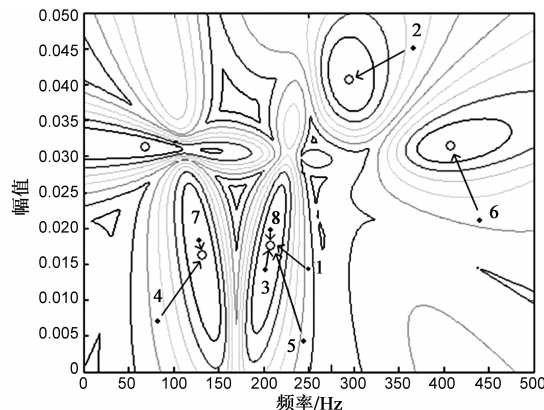


图 12 BGA 封装的故障征兆向量分类图

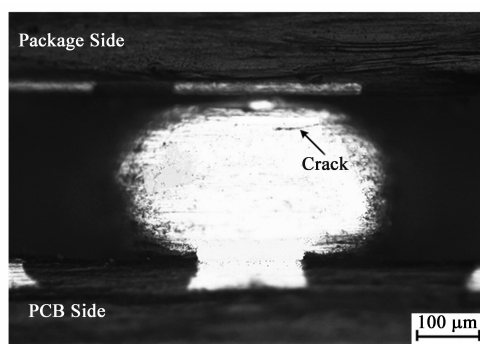


图 13 焊点在近封装侧出现微损伤的截面图

5 结论

基于自适应谱峭度与核概率距离聚类提出了一种振动载荷下面向电子设备 PHM 的板级封装潜在故障

特征提取与模式辨识方法.通过试验分析与验证,得到以下结论:

(1)板级封装的应变响应数据包含了封装结构的潜在故障信息.

(2)谱峭度作为高阶累积量,将其与 EMD 方法有效结合能有效滤除噪声,重构信号能有效表征封装结构中可能存在的故障信息.

(3)基于高斯径向基函数的概率距离聚类方法可以实现对振动载荷下板级封装常见的故障模式分类,根据实时包络谱数据判断板级封装当前状态,在故障发生之前有效辨识出即将出现的故障模式.

(4)该方法为实现电子设备 PHM 提供了一种新的研究思路与手段.

参考文献

- [1] Medjaher K, Skima H, Zerhouni N. Condition assessment and fault prognostics of microelectromechanical systems [J]. *Microelectronics Reliability*, 2014, 54(1): 143 - 151.
- [2] Rezvanianiani S M, Liu Z, Chen Y, et al. Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility [J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 256(1): 110 - 124.
- [3] Mosallam A, Medjaher K, Zerhouni N. Nonparametric time series modeling for industrial prognostics and health management [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 69(5 - 8): 1685 - 1699.
- [4] Steinberg D S. *Vibration Analysis for Electronic Equipment (3rd Edition)* [R]. New York: Wiley, 2000.
- [5] Zeng Z, Li X, Li M, et al. Analysis of power consumption on laser solder joints of electric connector [J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2014, 23(4): 666 - 668.
- [6] Hokka J, Mattila T T, Xu H, et al. Thermal cycling reliability of Sn-Ag-Cu solder interconnections—part 2: failure mechanisms [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2013, 42(6): 963 - 972.
- [7] 余慧, 吴昊, 陈更生, 等. 一种堆叠式 3D IC 的最小边界热分析方法 [J]. *电子学报*, 2012, 40(5): 865 - 869.

- Yu Hui, Wu Hao, Chen Geng-sheng, et al. A minimal boundary thermal analysis method for stacked 3D IC [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(5): 865 – 869. (in Chinese)
- [8] Wu M L. Vibration-induced fatigue life estimation of ball grid array packaging [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, 19(6): 065005.
- [9] Yeh C L, Lai Y S. Effects of solder alloy constitutive relationships on impact force responses of package-level solder joints under ball impact test [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2006, 35(10): 1892 – 1901.
- [10] Hokka J, Mattila T T, Li J, et al. A novel impact test system for more efficient reliability testing [J]. *Microelectronics Reliability*, 2010, 50(8): 1125 – 1133.
- [11] Mirman B. Tools for stress analysis of microelectronic structures [J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2000, 122(3): 280 – 282.
- [12] Lall P, Gupta P, Goebel K. Decorrelated feature space and neural nets based framework for failure modes clustering in electronics subjected to mechanical shock [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2012, 61(4): 884 – 899.
- [13] Caers J F J, Wong E H, Seah S K W, et al. A study of crack propagation in Pb-free solder joints under drop impact [A]. *Proceedings of IEEE 58th Electronic Components and Technology Conference* [C]. USA: IEEE Press, 2008. 1166 – 1171.
- [14] Wong E H, Seah S K W, Van Driel W D, et al. Advances in the drop-impact reliability of solder joints for mobile applications [J]. *Microelectronics Reliability*, 2009, 49(2): 139 – 149.
- [15] Antoni J. The spectral kurtosis: a useful tool for characterizing non-stationary signals [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, 20(2): 282 – 307.
- [16] Lee J H, Seo J S. Application of spectral kurtosis to the detection of tip vortex cavitation noise in marine propeller [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 40(1): 222 – 236.
- [17] Chen B, Yan Z, Chen W. Defect detection for wheel-bearings with time-spectral kurtosis and entropy [J]. *Entropy*, 2014, 16(1): 607 – 626.
- [18] 赵妍, 李志民, 李天云. 一种基于谱峭度的异步电机故障诊断方法 [J]. *电工技术学报*, 2014, 29(5): 189 – 196.
Zhao Yan, Li Zhimin, Li Tianyun. A method for fault diagnosis of induction motors based on spectral kurtosis [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(5): 189 – 196. (in Chinese)
- [19] 丁康, 黄志东, 林慧斌. 一种谱峭度和 Morlet 小波的滚动轴承微弱故障诊断方法 [J]. *振动工程学报*, 2014, 27(1): 128 – 134.
- Ding Kang, Huang Zhi-dong, Lin Hui-bin. A weak fault diagnosis method for rolling element bearings based on Morlet wavelet and spectral kurtosis [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2014, 27(1): 128 – 134. (in Chinese)
- [20] Wong E H, Seah S K W, Selvanayagam C S, et al. High-speed cyclic bend tests and board-level drop tests for evaluating the robustness of solder joints in printed circuit board assemblies [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2009, 38(6): 884 – 895.
- [21] 刘芳, 孟光, 赵玫, 等. 板级跌落碰撞下无铅焊点的可靠性研究 [J]. *电子学报*, 2007, 35(11): 2084 – 2086.
Liu Fang, Meng Guang, Zhao Wen, et al. Researches of lead-free solder joint reliability under board-level drop impact [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(11): 2084 – 2086. (in Chinese)
- [22] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [A]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences* [C]. London, England: The Society, 1998, 454. 903 – 995.
- [23] 田中大, 高宪文, 李琨. 基于 EMD 与 LS-SVM 的网络控制系统时延预测方法 [J]. *电子学报*, 2014, 42(5): 868 – 873.
Tian Zhong-da, Gao Xian-wen, Li Kun. Time-delay prediction method of networked control system based on EMD and LS-SVM [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(5): 868 – 873. (in Chinese)
- [24] Israel A B, Iyigun C. Probabilistic D-clustering [J]. *Journal of Classification*, 2008, 25(1): 5 – 26.

作者简介



汤 巍 男, 1987 年出生, 河北保定人, 空军工程大学航空航天工程学院 控制科学与工程专业博士研究生, 主要研究方向为故障诊断、预测与健康管埋。

E-mail: rk1019@163.com



景 博 女, 1965 年出生, 河北邯郸人, 空军工程大学教授, 博士生导师. 主要研究方向为故障诊断与容错控制、测试性设计与验证、信息物理融合系统。