

# 基于疲劳累积损伤等效理论的 PCB 板 振动加速试验研究

逯志国, 朱曦全, 卫国, 王丹

(北京强度环境研究所, 北京 100076)

**摘要:** **目的** 建立小样本情况下, 通过试验及仿真结合求解 PCB 板在随机振动激励下的振动加速因子的方法。**方法** 以疲劳累积损伤等效为研究基础, 以 PCB 板为研究对象, 通过实验室的动力学环境模拟试验, 在施加相同谱型不同量级的随机激励载荷下的振动加速因子, 并通过采用试验数据对仿真局部模型修正的方法得出 PCB 板在随机振动激励载荷下的振动加速因子。**结果** 通过试验数据与仿真计算结果的对比, 两种方法得出的振动加速因子的误差在 5% 以内, 满足工程实践精度要求。且进一步的证实了该方法的可行性。**结论** 对于不同种类的 PCB 板在进行小样本摸底试验及随机振动仿真计算的前提下, 确定电路板产品的薄弱位置, 之后通过疲劳仿真计算局部的疲劳寿命便可以求得一定精度要求下的振动加速因子。

**关键词:** 随机激励; 疲劳损伤; 振动加速因子; 仿真计算

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2018.03.011

**中图分类号:** TJ01; TG147

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2018)03-0053-04

## Vibration Acceleration Test of Printed Circuit Board Based on Equivalent Theory of Fatigue Cumulative Damage

LU Zhi-guo, ZHU Xi-quan, WEI Guo, WANG Dan

(Beijing Institute of Strength & Environment Engineering, Beijing 100076, China)

**ABSTRACT: Objective** To establish a method for vibration acceleration factor of printed circuit board under random vibration excitations by experiment and simulation in combination with small samples. **Methods** Based on fatigue cumulative damage equivalence, the printed circuit board was taken as the research object, to obtain the vibration acceleration factor of printed circuit board under the random excitation load through the dynamic simulation experiment in the laboratory, with the application of random excitation of the same spectrum type but different magnitude, based on modifying the simulation on local model by the experimental data. **Results** By comparing the experimental data with the simulation results, the error of the vibration acceleration factor obtained by the two methods was within 5%, which met the requirements of engineering practice accuracy. It also further confirmed the feasibility of this method. **Conclusion** For different kinds of printed circuit boards under the premise of small sample test and random vibration simulation calculation, it is able to determine the weak position of the circuit board products, then calculate the local fatigue life through the fatigue simulation to get vibration acceleration factor of certain precision.

**KEY WORDS:** stochastic excitation; fatigue damage; vibration acceleration factor; simulation calculation

随着现代工业水平的不断提高, 很多机器装备使用环境朝着高速、高温及高压的方向发展, 严重威胁

着现在工业设备安全的疲劳破坏问题日益突出。据有关统计, 在现在工业各个领域, 大约有 80% 以上的

结构强度破坏都是由于疲劳破坏造成的。在电子工业领域,电子设备已与人类的生产生活密不可分。由于电子设备结构的日益复杂,任何一个小小的元器件失效都可能导致整个设备发生故障,因此电子产品的可靠性问题越显重要<sup>[1-2]</sup>。

文中正是基于以上的实际情况与参考数据,从振动试验技术发展的角度出发,基于疲劳累积损伤等效模型针对板级电子产品开展疲劳加速研究,探寻板级电子产品的振动加速因子。从而实现实验室的力学环境模拟,降低产品在使用时的故障率,提高整体的可靠性。

### 1 研究方法

目前,常用的是 Palmgern-Miner 线性累积疲劳损伤理论<sup>[3-5]</sup>。线性累积疲劳损伤理论是最简单的一种统计模型,这种模型基于这样的假设:在疲劳过程中,每周交应力引起的损伤,无论与这以前的损伤累积过程,还是与这一时刻的损伤状态都没有关系,而只是占有整个损伤中的一部分比例。假设应力幅值  $S_i(i=1,2,\dots)$  引起疲劳破坏的重复周数为  $N_i$ , 由应力幅值  $S_i$  重复  $n_i$  周所引起的累积损伤可以表示为  $D_i=n_i/N_i$ 。因此,在各种不同应力幅值的作用,重复不同循环次数的情况下,疲劳破坏条件可以写成:

$$D_i = N_i / N_{D_i}, \sum_{i=1}^n D_i = D \geq 1$$

式中:  $D$  为常数。一般认为  $D$  达到 1 时,就会发生疲劳破坏。

在随机过程下,其均方根值应力为:

$$S = C_r \cdot [f_n \cdot Q \cdot W(f_n)]^{0.5} \tag{1}$$

其中  $f_n$  可以用  $E(P)$  期望峰值穿越率代替。也可以按试件激励加速度幅值  $w$  (随机激励的功率谱密度值) 表示:

$$N \cdot S^b = T \cdot E(P) \cdot \{\hat{A} \cdot \hat{W}\}^{0.5} = C \tag{2}$$

式中:  $E(P)$  期望峰值穿越率;  $\hat{W}$  为响应的功率谱密度值;  $\hat{A}$  响应谱密度值与应力的比值。

对于有阻尼的情况,拉泽在 1959 年建立了强迫振动时试件谐振放大因子与应变能  $U_s$ 、耗散能  $U_d$  之间的关系式:  $Q = \frac{U_s}{U_d}$ 。因为应变能比例于应力的平方,故亦比例于振动响应的平方。试件中由阻尼造成的能量耗散也与应力量值有关,其关系式为:

$U_d = C \cdot S^n$ 。对于一定的材料,  $C$  值为常数。一般结构材料在应力低于 80% 极限应力时,  $n$  取 2; 而在极限应力处  $n$  取 8。因此有:

$$Q = A \cdot (\hat{\sigma})^{2-n} = A' \cdot (\hat{W})^{1-\frac{n}{2}} \tag{3}$$

对于随机激励有:

$$Q\sigma = \hat{\sigma} \tag{4}$$

联立上式可以得到随机激励下的加速模型:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{W_2}{W_1}\right)^{\frac{b}{2}} \tag{5}$$

振动加速因子是振动速寿命试验的一个重要参数。它是振动加速应力下产品某种寿命特征值与正常振动应力下寿命特征值的比值,也可称为加速系数。加速试验是采用加速应力进行试件的寿命试验,从而缩短了试验时间,提高了试验效率,降低了试验成本。

MIL-STD-810 从 1975 年的 C 版到 2000 年颁布的 F 版,振动耐久试验条件越来越明确地按振动等效关系和寿命期环境剖面(LCEP)来确定。MIL-STD-810E 中强调应用寿命期环境剖面(LCEP)和疲劳关系式来确定耐久试验条件,在基本原则和方法上与以前的版本一致。给出了随机载荷下疲劳关系式:

$$(W_0 / W_1) = (T_1 / T_0)^{1/d} \tag{6}$$

对式(6)进行变换可得:

$$T_1 / T_0 = (W_0 / W_1)^d \tag{7}$$

因此只要特定试件在两个或多个相同谱形不同量级的振动载荷作用下产生了相同的疲劳损伤量值,便可以根据疲劳累积损伤理论来建立相应疲劳累积损伤的等效关系。疲劳累积损伤等效方法的主要好处是给出了通过变化振动量值来改变试验时间的方法,即可以在一定前提条件下增大振动试验量级来缩短试验时间,使两个不同量级的振动试验在不同的时间内对试件产生相同的疲劳累积损伤量值,这便是振动加速试验。

### 2 PCB 板的有限元计算

试验研究所用 PCB 板外形尺寸为 200 mm × 150 mm,采用四角螺栓固定,如图 1 所示。试验 PCB 板具有一定的检测功能,从直插座引线连接到小型的检

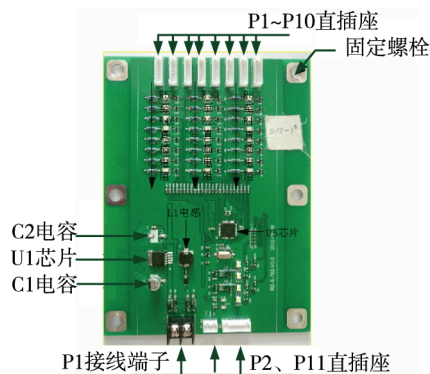


图 1 PCB 板

测板上, 对应的 LED 指示灯检测相应电路上的元器件的完好程度, 当对应元器件出现焊脚损伤或其他力学环境引起的破坏时, 指示灯亮度减弱直至熄灭。由此可以从 PCB 板的使用功能上对其进行疲劳试验的有效检测和损伤判断。

### 3 疲劳寿命分析

应用 MSC.Fatigue 疲劳分析软件<sup>[6-7]</sup>, 可以预测试件在随机载荷下的疲劳寿命。在对试件频率响应分析的基础上, 输入功率谱密度函数, 即可获得试件在随机载荷下的应力功率谱密度, 进而推出疲劳寿命及损伤。主要有基于窄带信号与宽带信号的疲劳分析。

在 MSC. Fatigue<sup>[8]</sup>软件中也提供了根据材料的极限拉伸强度估计材料  $S-N$  曲线的功能模块, 精度也存在一定的误差。铜的  $S-N$  曲线如图 2 所示<sup>[9]</sup>。

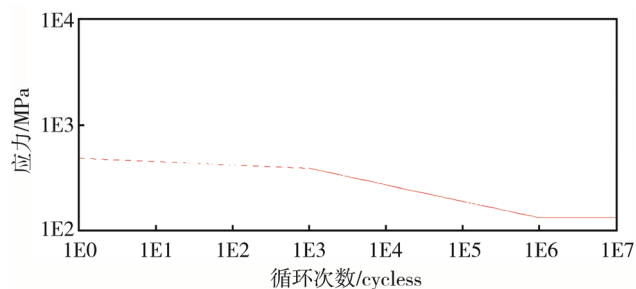


图 2 铜的  $S-N$  曲线

将整体随机响应计算中得到的 C2 电容引线处的加速度响应谱数据输入到 Fatigue 的 Vibration 模块中, 并依据预估材料  $S-N$  曲线对 C2 电容引线进行宽带的随机疲劳寿命计算, 在 0.12, 0.16, 0.20, 0.24  $g^2/Hz$  量级下的疲劳寿命分别为 42658, 16982, 8318, 4571 s。各量级下引线的疲劳寿命云图如图 3 所示。由仿

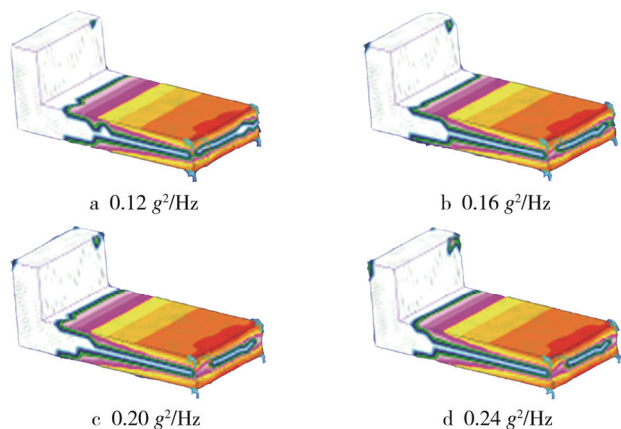


图 3 各量级引线寿命云图

真计算得到的不同振动应力下寿命特征值的比值, 即振动加速因子,  $d_{12}, d_{13}, d_{14}, d_{23}, d_{24}, d_{34}$  对应的振

动加速因子分别为 3.20, 3.20, 3.22, 3.20, 3.24, 3.28。

## 4 试验结果及数据处理

文中的试验研究取 4 组试件, 每组包含 4 件。选择相同谱形不同量级的随机载荷谱, 对试件进行  $z$  向的随机振动试验。为保证试件边界条件的一致, 在安装时使用力矩扳手, 保证每块试件四角螺栓的紧固力相同。这样各试件均可达到相同的试验精度要求, 使试件的一阶固有频率一致。试验中, 有三种失效损伤判据<sup>[6-7]</sup>: 以试件一阶固有频率变化超 5% 为试验终止信号, 并记录试验持续时间<sup>[10]</sup>; 以 LED 指示灯的明暗程度及亮度的变化为试验终止信号; 目测基板元器件是否脱落作为试验终止信号。

### 4.1 试验结果分析

试验中共分了 4 个不同量级对 PCB 板进行随机振动试验, 结果见表 1。试件的破坏形式在不同量级下均表现为统一的特征, 为 C2 贴片式电解电容引脚的断裂。综合有限元计算结果, C2 电容处的响应加速度值较大, 而处于板中心位置处的直插型电阻虽然其响应更大, 但对于装配方式而言, 并不能引起引脚产生大的交变应力, 故其疲劳寿命较高。此外, PCB 属于复合材料, 在试验中承受较大的响应值, 但是未发现其有损伤情况。在每个量级试验完成后, 对 PCB 板进行正弦扫频试验, 其一阶谐振频率未发生变化, 可以说明 PCB 板在几组试验中也有着较高的疲劳寿命。因此, 以 C2 电容的疲劳寿命等效为此板级产品的疲劳寿命是可行的。

试件试验结束后, PCB 板的破坏形式均统一, 表现为 C2 电容处引线的断裂。试验中, 监测 LED 灯出现闪烁后, C2 电容引线随即发生断裂, 其间隔时间不足 10 s。对于 PCB 板, 其一阶频率前后基本未发生变化, 由此可以初步判定基本在试验时间段内未发生疲劳破坏。采用 40 倍放大镜检查 C2 电容引线断口, 存在明显的粗粒状区及平滑区, 符合一般金属材料在循环应力下的破坏特征, 属于疲劳破坏。

### 4.2 随机振动疲劳累积损伤等效曲线

根据 4 组试验数据, 对 PCB 板在随机载荷下的疲劳累积损伤等效曲线进行拟合。分别采用幂函数拟合及威布尔寿命分布函数进行拟合。

1) 采用幂函数曲线,  $y = ax^b$  型, 令  $u = \lg y, v = \lg x, c = \lg a$ , 则  $u = c + bv (a > 0)$ 。拟合曲线如图 4 所示。通过回归曲线公式  $y = 3.3065x^{-0.3169}$ ,  $R^2 = 0.9994$  可以求得 PCB 板在相同谱形的随机载荷下的寿命特征值的比值, 即振动加速因子  $d=3.15$ 。

表 1 振动试验数据

振动量级/(g <sup>2</sup> ·Hz <sup>-1</sup> )	0.12				0.16			
	0.12-1	0.12-2	0.12-3	0.12-4	0.16-1	0.16-2	0.16-3	0.16-4
持续时间/s	34 102	36 762	41 340	26 568	15 393	16 264	16 944	9 553
振动量级/(g <sup>2</sup> ·Hz <sup>-1</sup> )	0.20				0.24			
	0.20-1	0.20-2	0.20-3	0.20-4	0.24-1	0.24-2	0.24-3	0.24-4
持续时间/s	8 280	7 695	7 005	5 820	4 800	4 574	1 919	4 540

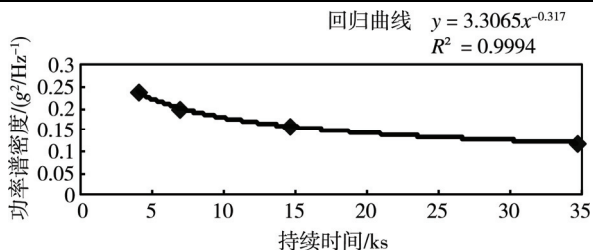


图 4 PCB 板板随机振动疲劳等效曲线

2) 采用威布尔寿命分布函数进行拟合, 由中位秩公式:  $F(t_j) = \frac{j-0.3}{n+0.4}$  估算试件的失效概率值  $F^{\wedge}(t_j)$ , 见表 2。

表 2 试件失效概率估计值

	振动持续时间/s				失效概率/%
	0.12g <sup>2</sup> /Hz	0.16g <sup>2</sup> /Hz	0.20g <sup>2</sup> /Hz	0.24g <sup>2</sup> /Hz	
1	26 568	10 873	5 820	3 381	15.91
2	34 102	15 393	7 005	4 540	38.64
3	36 762	16 264	7 695	4 574	61.36
4	41 340	16 944	8 280	4 800	84.09

采用最小二乘估计, 对于二参数威布尔分布, 分布函数为:

$$F(t) = 1 - \exp[-((t - \gamma) / \eta)^m] \tag{8}$$

对于式 (8) 进行线性变换, 令  $Y = \ln \ln \frac{1}{1 - F(t)}$ ,

$x = \ln t$ ,  $a = -m \ln \eta$ ,  $c = m$ , 则:

$$Y = a + cx \tag{9}$$

将表 1 中数据代入式 (9) 中, 根据最小二乘原理, 可以计算出  $a_i, c_i (i=1,2,3,4)$ , 继而可以求出形状参数  $m$  及尺度参数  $\eta$ , 结果见表 3。最后得到  $d_{12}, d_{13}, d_{14}, d_{23}, d_{24}, d_{34}$  对应的振动加速因子分别为 2.90, 3.10, 3.10, 3.36, 3.08, 3.08, 取平均值可以得  $d=3.10$ 。

表 3 参数的估计值

量级/(g <sup>2</sup> ·Hz <sup>-1</sup> )	形状参数 $m$	尺度参数 $\eta$
0.12	5.33	37 466
0.16	4.63	16 249
0.20	6.57	7 677
0.24	5.74	4 657

综合上述两种数据处理方法, 第一种是直接对试验数据中量级与持续振动时间进行幂函数的拟合, 进

而得到振动加速因子; 第二种方法在对每个试件进行失效概率的估算基础上, 对数据的处理采用最小二乘法, 对威布尔分布的参数进行估算, 从而利用试件的特征寿命 (尺度参数) 求解振动加速因子。

## 5 结语

文中在对工程中疲劳问题及随机载荷下振动加速试验技术的研究分析基础上, 结合对 PCB 板随机振动试验数据的分析, 并对 C2 电容引线进行了局部有限元模型建立、疲劳寿命仿真计算。拟合了 PCB 板在四角固定状态下, 在相同谱形不同量级的随机载荷作用下的振动加速因子, 并采用了 C2 电容引线在不同量级下疲劳寿命的仿真结果归纳了振动加速因子, 对比了试验与仿真结果, 振动加速因子的误差在 5% 以内。因此可以认为, 板级产品的疲劳寿命受控于局部元器件引线或焊脚的疲劳寿命。由此, 对于不同种类的 PCB 板在进行小样本摸底试验及随机振动仿真计算的前提下, 确定板级产品的薄弱位置, 之后通过疲劳仿真软件对局部疲劳寿命计算便可以求得满足一定工程精度的振动加速因子。

## 参考文献:

- [1] 刘文光, 陈国平, 贺红林, 等. 结构振动疲劳研究综述[J]. 工程设计学报, 2012, 19(1): 1-7
- [2] 曾春华, 郑十践. 疲劳分析方法及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [3] 朱学旺. 疲劳损伤等效在随机振动试验中的应用[J]. 装备环境工程, 2012, 9(2): 11-13.
- [4] 李奇志, 陈国平, 王明旭, 等. 振动加速因子试验方法研究[J]. 振动、测试与诊断, 2003, 2(1): 35-39.
- [5] 王冬梅, 谢劲松. 随机振动试验加速因子的计算方法[J]. 环境技术, 2010(2): 47-50
- [6] 张琳, 邓长华, 谭永华, 等. 随机振动试验仿真技术[J]. 机械强度, 2011, 33(6): 927-931.
- [7] 刘芳, 孟刚. 随机振动载荷下电路板组件三维有限元模拟[J]. 振动与冲击, 2012, 31(20): 31-64.
- [8] 周传月, 郑红霞, 罗慧强, 等. MSC.fatigue 疲劳分析应用与案例[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [9] 龙凯, 贾长治, 李宝峰. Patran2010 与 Nastran2010 有限元分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [10] 肖寿庭, 杜修德. LY12CZ 铝合金悬臂梁动态疲劳 S-N 曲线的试验测定[J]. 机械强度, 1995, 17(1): 22-24.