

基于失效物理的电路板寿命预测案例研究

吕卫民¹, 胡冬², 谢劲松³

(1. 海军航空工程学院7系 山东 烟台 264001; 2. 91515部队 海南 三亚 572016;

3. 北京航空航天大学可靠性与系统工程学院 北京 海淀区 100191)

【摘要】舰载电子产品中电路板运用有效的寿命预测技术,可满足舰载武器寿命周期内的特定需求,从而提高其贮存期内维修保障的效率。依照基于失效物理的寿命预测流程,以典型舰载电子产品中的某个电路板为案例,拟定出3个薄弱环节,并参考该电子产品的实际应用情况,经剪裁后得到了其典型寿命周期环境载荷剖面且加载该剖面;同时对电路板温度分布、结构动力振动进行了有限元仿真计算,得出了该电路板上薄弱环节的寿命及其变化范围,从而预测出该电路板的寿命为3.25年;最后进一步分析了模型中电磁继电器对于空气的等效标准漏率以及应用环境中相对湿度对寿命的影响。

关键词 案例研究; 寿命周期环境剖面; 失效物理; 电路板; 寿命预测

中图分类号 TN602

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.04.020

Case Study on Prognostics Technique Based on PoF to Predict Life of PCB

LV Wei-min¹, HU Dong², and XIE Jin-song³

(1. Seventh Department, Naval Aeronautical Engineering Institute Yantai Shandong 264001; 2. Unit 91515, PLA Sanya Hainan 572016;

3. School of Reliability and Systems Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics Haidian Beijing 100191)

Abstract An efficient prognostics technique based on physics-of-failure is proposed to predict life of printed circuit board (PCB) in the ship-borne electronic products. By the case study of a PCB in typical ship-borne electronic products, the life prediction process of ship-borne PCB is presented. The typical life cycle environmental profile of the PCB is formed by considering three weak parts and the working environment of the PCB. After loading the environmental profile, the PCB life with its variation is obtained by the finite element analysis on temperature distribution and structural dynamic. In addition, two influencing factors L_{air} and RH from electromagnetic relays on the PCB life are analyzed in the models.

Key words case study; life cycle environmental profile; physics-of-failure; printed circuit board; prognostics

在实际工程应用中,基于失效物理(physics-of-failure, PoF)的电子产品寿命预测方法需要量化分析产品所历经的环境因素,提供载荷信息,从器件级薄弱环节的失效物理建模出发,进一步研究系统级失效,最终给出系统级寿命的预测结果。曾报道通过监控产品的实际所处环境条件与特征信号的方式,开展PHM(prognostics and health management)实践,但是这两者的结合仅仅体现在方式上,并没有具体的成功案例析出。在诸如印刷电路板(printed circuit board, PCB)这样的典型电子产品的服役期内,机械应力、温度分布和热应力是产品所承受的主要环境载荷。文献[1-4]通过对整板PCB的模式分

析、结构有限元仿真与随机振动实验,计算PCB板的疲劳寿命。文献[5-8]通过对整板PCB的热分析,在其温度分布和热应力引起形变方面进行了仿真与实验研究。此外,国内外学者针对PCB板上不同材料与封装形式的焊点和镀通孔失效分别开展了大量研究。但是上述研究大多限于广泛的产品设计阶段,而不同电子产品在其实际服役期内所受环境条件与失效机理皆有不同,对于特定环境剖面量化描述、薄弱环节选取和工程化分析流程确定仍缺乏更多技术细节,目前仍没有系统的工程实践。

本文以电子产品延寿为背景,选用舰载电子产品中的一个整板PCB作为研究对象,运用失效物理

收稿日期: 2011-11-28; 修回日期: 2012-11-12

基金项目: 国防预研基金

作者简介: 吕卫民(1970-),男,博士,教授,主要从事综合保障、可靠性工程方面的研究。

仿真分析技术进行寿命预测。针对PCB板实际贮存阶段中的主要失效机理及其相应的寿命预测模型,详细给出了诸多技术细节,增强在工程实践中运用失效物理技术的可操作性,为后续完善基于失效物理的电子产品可靠性仿真软件平台提供标准的工程化计算流程。

1 仿真分析流程

电路板寿命预测的仿真分析流程如图1所示。其中,由部位(包括元器件、焊点的互连处以及镀通孔的裸板3类)至PCB板级模型的搭建采用竞争失效法则(即“最小薄弱原理”),在此不作赘述。

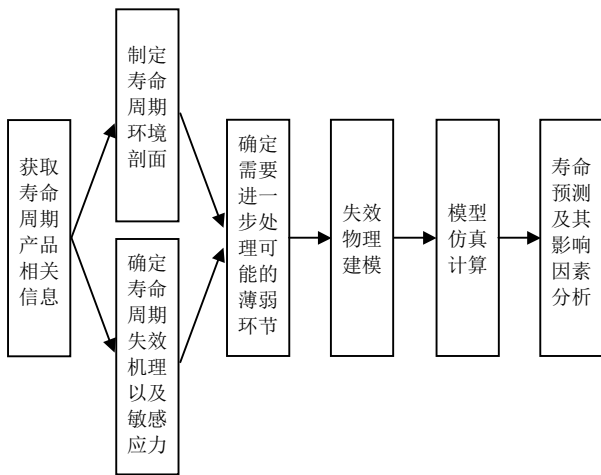


图1 仿真分析流程

整个流程中各个步骤的“里程碑文件”包括:

- 1) 获取寿命周期产品相关信息,可得到产品基本信息及现场失效信息与相应的失效分析;
- 2) 制定寿命周期环境剖面(life cycle environmental profile, LCEP);
- 3) 失效机理以及敏感应力的确定,可得到拟定的薄弱环节与敏感应力矩阵;
- 4) 后期建模仿真分析,可得到相应的失效物理模型以及模型中的参数取值;
- 5) 最终寿命预测,可得到系统级(即电路板)的计算结果及其相应影响因素分析。

2 研究对象及其失效状况分析

本案例中,整个电路板由14个型号、94个电子元器件(组件)组成,控制过程中完成发出G指令等功

能。后续温度分布与结构动力有限元分析中,对有限元模型进行了简化。外观检查中发现,该板原有玻璃纤维涂漆固化以及部分元器件与单板互连的裸露导线焊点不满足现行焊接标准,维修方式为手工补焊,焊接一致性不佳。

根据现场调查,判断该板存在以下失效情况:

- 1) 在长期贮存过程中,密封型电磁继电器在一定漏率存在的情况下,环境中水汽进入会造成继电器触点腐蚀。该失效的敏感应力主要为温湿度影响。
- 2) 由于个别插接元器件本体质量较重,其管脚受弯矩作用,长时间使用时使其在弹性范围内会出现高周应力疲劳。
- 3) 在长期贮存过程中,功率三极管由于芯片缺陷、表面污染等,特别是在加电测试时历经高温,会出现正常腐蚀、老化。

此外,插接件焊点在循环应力下可能出现应变疲劳,但是由于该电路板上焊点质量分散性较大,在此不对其作可靠性方面的寿命预测。

3 寿命周期环境剖面与薄弱环节矩阵制定

3.1 寿命剖面制定

本文将贮存定义为除“使用”之外的全部事件,即从装备交装后,到装备使用或装备报废之间的整个过程,其中主要包括库房储存、运输/装卸和平台部署3个阶段,具体贮存期寿命剖面如图2所示。

3.2 LCEP制定

环境应力水平参考该电子产品实际环境监测记录以及英军标 Def Stan 00-35、北约组织标准 STANAG 4370和美军标 MIL-STD-810G, LCEP据此进行环境载荷量化分析,如图3所示。这里,认定电路板在出厂前经历一次典型的环境应力筛选试验,同时设定该型舰载电子产品出厂送达至基地距离为2 520 km,送达时行车速度为35 km/h,共耗时72 h,各个阶段的简化振动谱形如图4所示。

该剖面通过简化,即忽略电路板与其电子产品的相关性,不进行该电子产品与特定电路板层次间环境条件的折算,则寿命预测严于寿命耗损实际值。

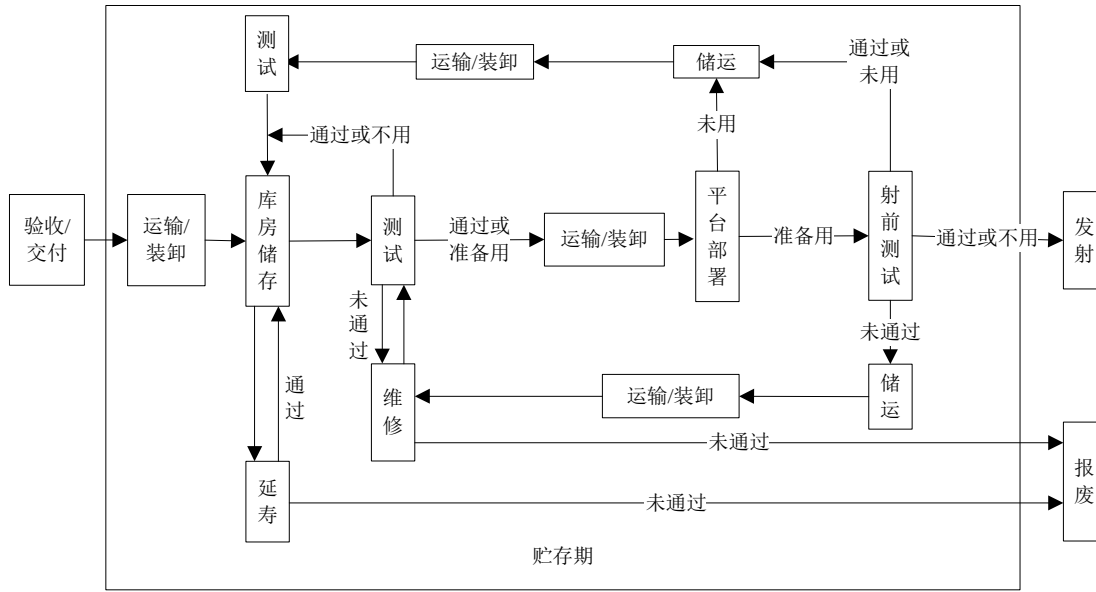


图2 贮存期寿命剖面

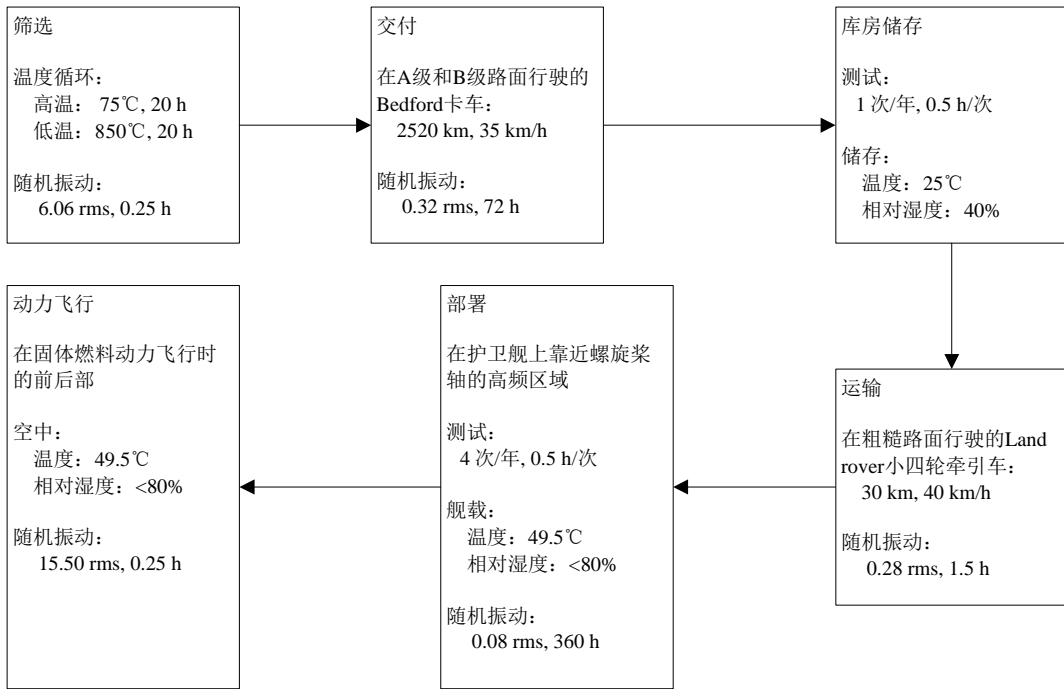


图3 案例中的LCEP

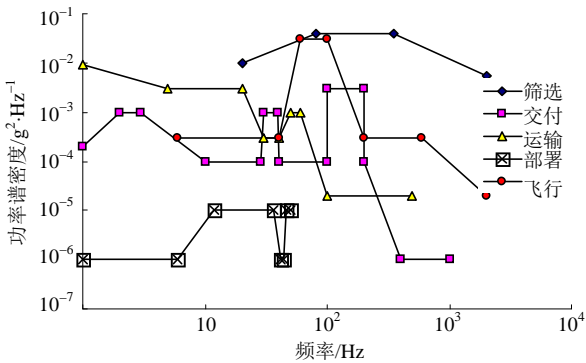


图4 简化振动谱形

3.3 薄弱环节矩阵制定

根据LCEP和初步拟定的薄弱环节, 可得薄弱环节与敏感应力矩阵, 如表1所示。

表1 拟定薄弱环节矩阵

失效部位	失效机理	敏感应力	阶段
电磁继电器	腐蚀	温度、湿度	储存 部署
插接件管脚	断裂	振动	筛选 交付 运输 部署 飞行
功率三极管	老化	温度	筛选 储存 部署 飞行

4 失效物理建模

4.1 电磁继电器失效

密封电磁继电器的主要失效模式是触点接触失效,它是由于外部水汽渗入、触点材料氧化腐蚀效应引起的。本文采用水汽含量计算模型^[9]:

$$\begin{cases} L = VP_0 \ln \frac{\Delta p}{\Delta p - p} / \left[\left(\frac{M_{\text{水汽}}}{M_{\text{空气}}} \right)^{1/2} L_{\text{空气}} \right] \\ \Delta p = RHP_{\text{饱和}} \\ P_{\text{饱和}} = 0.0061e^{\frac{17.76T_c}{T_c + 245.3}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, L 为持续状态的寿命值; V 为密封空腔体积, P_0 为标准大气压; Δp 为初始水汽分压差; p 为密封空腔内的水汽分压; $L_{\text{空气}}$ 为对于空气的等效标准漏率; $M_{\text{水汽}}$ 为水汽分子量,取值18; $M_{\text{空气}}$ 为空气分子量,取值29; $P_{\text{饱和}}$ 为饱和水汽压; RH 为相对湿度; T_c 为温度。

同时认为当潮湿空气达到约为继电器内部空气容积的0.1浓度时,腐蚀可能在触点组件、衔铁、轴承及机构等部位发生,此作为失效判据^[10]。这里设定继电器空腔内原有水汽含量为0, $L_{\text{空气}}$ 参照GJB65B取 $10^{-10} \sim 10^{-8} \text{ atm}\cdot\text{cm}^3/\text{s}$ 。恒温条件下的水汽含量变化是一个非常缓慢变化的过程,参数取值如表2所示。

表2 电磁继电器参数

参数	数值
V/cm^3	0.832
P_0/atm	1
p/atm	0.01
$L_{\text{空气}}/\text{atm}\cdot\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1}$	$10^{-10} \sim 10^{-8}$
$M_{\text{水汽}}$	18
$M_{\text{空气}}$	29
$RH(\%)$	40~80
$T_c/^\circ\text{C}$	25/49.5

4.2 插接件管脚失效

在随机振动载荷下,插接件管脚会出现裂纹直至疲劳开裂,主要由弹性范围内的高周应力疲劳造成,其疲劳寿命为:

$$N_1 = N_2 \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^b \quad (2)$$

式中, N_1 为持续状态的疲劳寿命; N_2 为参考点寿命; S_1 为应力均方根值; S_2 为参考点应力均方根值; b 为 $S-N$ 曲线斜率。参考铜引脚的 $S-N$ 曲线,如图5所示,对管脚局部应力 S_1 进行结构动力分析,参数取值如表3所示^[11]。

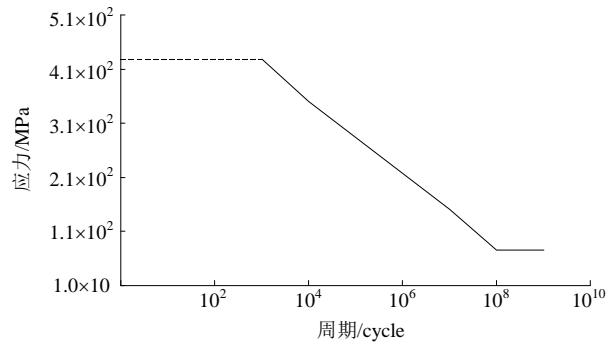


图5 铜管脚的 $S-N$ 曲线

表3 插接件管脚参数

参数	数值
S_2/MPa	350
N_2/cycle	1×10^4
b	5.98

但是在实际寿命损耗中,工程上采用如下3段技术模型进行计算^[12]:

$$\begin{cases} N(\sigma) = 1 \times 10^4 \left(\frac{350}{S_1} \right)^{5.98} \\ N(2\sigma) = 1 \times 10^4 \left(\frac{350}{2S_1} \right)^{5.98} \\ N(3\sigma) = 1 \times 10^4 \left(\frac{350}{3S_1} \right)^{5.98} \\ R_i = \frac{3600f_0 \times 68.3\%}{N(\sigma)} + \frac{3600f_0 \times 27.1\%}{N(2\sigma)} + \frac{3600f_0 \times 4.33\%}{N(3\sigma)} \end{cases} \quad (3)$$

式中, f_0 近似为一阶模态时的共振频率(单位: Hz); $N(\sigma)$ 、 $N(2\sigma)$ 、 $N(3\sigma)$ 分别为在共振频率 f_0 下发生概率为68.3%、27.1%、4.33%时的寿命值(单位: cycle); R_i 为发生概率99.73%的寿命损耗。

4.3 功率三极管失效

对于硅NPN型功率三极管,文献[13-14]通过大量实际失效数据表明,Arrhenius模型可作为稳态高温下三极管的寿命计算,且当温度在 $0 \sim 85^\circ\text{C}$ 范围内,主导失效机理表现为金属化学腐蚀,其激活能为 0.29 eV ,控制系统实际失效率为 $0.0045 \times 10^{-6}/\text{h}$;而当温度超过 85°C 时,主导失效机理表现为表面退化,其激活能为 0.8 eV ,控制系统实际失效率为 $0.892 \times 10^{-6}/\text{h}$ 。本文在缺乏参数修正试验的情况下采用Arrhenius模型:

$$L = A \exp \left(\frac{E_a}{kT} \right) \quad (4)$$

式中, L 为持续状态的寿命值; A 为与材料特性、产

品设计、失效准则以及其他因素相关的系数; T 为绝对温度; k 为波尔兹曼常数, 取值 8.617×10^{-5} ; E_a 为激活能。

这里的三极管失效函数假设为指数分布, 以其可靠寿命 $N(0.999)$ 作为模型中参考系数 A 进行计算, 该假设简化方式在工程可以运用, 但是实际效果仍需在今后的研究中予以充分论证。借助ANSYS®对局部温度进行温度分布分析, 参数取值如表4所示。

表4 功率三极管参数

参数	数值
A/h	$2.22 \times 10^6 / 1.12 \times 10^3$
E_a/eV	0.29/0.8
k	8.617×10^{-5}

在此, 利用公认的Palmgren-Miner线性寿命叠加原理进行累计耗损寿命或累计残余寿命计算:

$$R = \sum R_i = 1 \quad R_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (5)$$

式中, n_i 为循环次数; N_i 为总循环次数; R_i 为单次耗损; R 为总耗损。

在计算残余寿命时, 首先减去生产、交付以及1次飞行中所损耗的寿命, 然后再按照每年的循环数计算可贮存或使用多少时间(单位: 年)。

5 仿真计算及其影响因素分析

5.1 计算结果

电磁继电器的计算结果如表5所示, 在 $L_{\text{空气}}$ 取 $10^{-8} \text{ atm}\cdot\text{cm}^3/\text{s}$ 条件下, 相对湿度保持在库房储存时的平均状态40%, 其寿命为3.25年。

表5 电磁继电器计算结果

阶段	$T/^\circ\text{C}$	RH/(%)	n/y	D/h	R
储存	25	40	3.25	8 040	0.283
部署	49.5	40	0.481	720	0.171

按照LCEP, 对电路板加载5种随机振动简化谱后, 模态分析得到一阶模态下的共振频率为93.715 Hz, 可观察到局部应力多集中在固体钽电容管脚处, 故将此作为考察对象。如表6所示, 计算结果发现, 除筛选与飞行状态时的载荷外, 其他载荷所计算出的寿命均太大(即寿命总耗损 R 非常小), 故插件接管脚不是薄弱环节, 剔除参与竞争失效。

表6 插件接管脚计算结果

阶段	S/MPa	R_i	R
筛选	50.978	5.77×10^{-4}	0.040 77
交付	4.498	8.18×10^{-9}	5.801×10^{-7}
运输	2.5	5.07×10^{-12}	2.433×10^{-9}
部署	0.11	9.40×10^{-18}	6.744×10^{-16}
飞行	39.811	1.31×10^{-4}	0.009 11

表7 功率三极管计算结果

阶段	$T/^\circ\text{C}$	$\lambda/h^{-1} \times 10^{-6}$	A/h	E_a	R
筛选_低温	2.937	0.004 5	2.22×10^6	0.29	4.42×10^{-5}
筛选_高温	127.937	0.892	1.12×10^3	0.8	1.56×10^{-3}
储存	25	0.004 5	2.22×10^6	0.29	4.76×10^{-2}
测试	77.937	0.004 5	2.22×10^6	0.29	1.49×10^{-5}
部署	49.5	0.004 5	2.22×10^6	0.29	4.58×10^{-3}
飞行	102.437	0.892	1.12×10^3	0.8	4.03×10^{-6}

按照LCEP, 对电路板加载6种温度剖面后(未加电测试时, 一般库房储存和平台部署不作温度分布分析, 温度值默认为参考环境的 25°C 和 49.5°C), 可观察到高温集中在功率三极管, 则将此作为考察对象。计算结果如表7所示, 该三极管的寿命为17.59年。

5.2 相关影响因素分析

参照上述电磁继电器失效物理模型, 分别对两个重要影响因素 $L_{\text{空气}}$ 、RH进行分析。依据相关标准, $L_{\text{空气}}$ 应在 $10^{-10} \sim 10^{-8} \text{ atm}\cdot\text{cm}^3/\text{s}$ 之间, 而3.25年的寿命预测结果为取最大漏率时, 若实际漏率比该量值小, 结果发现寿命将快速上升, 如图6所示。但是较小漏率的密封电磁继电器的生产与测试条件有相当大的限制, 如生产 $10^{-10} \text{ atm}\cdot\text{cm}^3/\text{s}$ 等级电磁继电器存在较大的难度, 且对于准确检测该等级的漏率, 客观上检测设备的精度与检测流程的要求相对较高。此外, 当平台部署时的相对湿度RH在可允许的40%~80%范围内变化时, 该阶段的寿命也将有较大变化, 特别是在高温高湿环境下, 内部相对湿度变化会更加剧烈, 如图7所示。上述两点在理论上成为密封电磁继电器寿命的影响因素, 在准确预测寿命的过程中应该通过工程方法得到其准确的试验与测试数据。

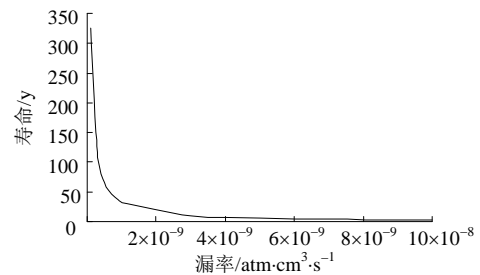


图6 寿命随漏率变化

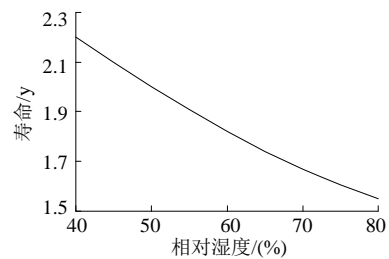


图7 寿命随相对湿度变化

6 结 论

按照最小薄弱原理,在 $L_{\text{空气}}$ 取 10^{-10} atm·cm³/s、相对湿度保持在库房储存时的平均状态40%的条件下,以其“短板”电磁继电器的寿命为电路板的寿命,即为3.25年。电磁继电器的失效判据选择当空腔内水汽含量为空气容积的0.1浓度时,存在发生腐蚀的可能性,这可能使得失效判据过于保守。但是,该电路板寿命也不可能超过三极管17.59年寿命值,这与实际维修保障中的现场失效反馈比较一致。

在基于失效物理的电路板寿命预测方法中,待考察薄弱环节寿命计算模型中参数的准确性及其变化范围影响整个电路板的寿命预测结果。特别是在缺乏充分的产品信息和必要试验情况下,给寿命预测结果带来较大分散性。若要得到较为精确的寿命值(或寿命变化范围),则需针对失效物理模型开展参数修正试验,这将作为下一步重点研究内容。

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] AL-YAFAWI A, PATIL S, DA Yu, et al. Random vibration test for electronic assemblies fatigue life estimation[C]// Proceedings of Intersociety Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems Conference. Binghamton: IEEE, 2010.
- [3] 李春洋. 印制电路板有限元分析及其优化设计[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
LI Chun-yang. Finite element analysis and optimization of printed circuit board[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.
- [4] 金有刚, 姚军. 随机振动环境下电路板的疲劳寿命与可靠性研究[J]. 强度与环境, 2007, 34(3): 58-62.
JIN You-gang, YAO Jun. The method research on fatigue life analysis and reliability of the typical circuit board in random-vibration environment[J]. Structure and Environment Engineering, 2007, 34(3): 58-62.
- [5] SHANKARAN G V, DOGRUOZ M B, DE ARAUJO D. Orthotropic thermal conductivity and Joule heating effects on the temperature distribution of printed circuit boards[C]// IEEE Symposium on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. Binghamton: IEEE, 2010.
- [6] HATAKEYAMA T, ISHIZUKA M, NAKAGAWA S, et al. Development of practical thermal design technique of printed circuit boards for power electronics[C]// Proceedings of Intersociety Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems Conference. Binghamton: IEEE, 2010.
- [7] NETSU T, TANIGUCHI M, ISHIDA H, et al. Thermal analysis of printed circuit board due to thermal stress by using thermography and holography[C]// Proceedings of Instrumentation and Measurement Technology Conference. Ottawa: IMTC, 2005: 1965-1969.
- [8] ANDONOVA A, KAFADAROVA N, VIDEKOV V, et al. Investigation of thermal conductivity of PCB[C]// Proceedings of 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology. Brno: ISSE, 2009.
- [9] GREENHOUSE H. Hermeticity of electronic packages[M]. Park Ridge: Noyes Publications, 2000: 48-80.
- [10] 周俊峰. 继电器触点接触失效物理浅析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 1997, 15(1): 25-30.
ZHOU Jun-feng. Analysis on failure physics of contact of relay[J]. Electronic Product Reliability and Environmental testing, 1997, 15(1): 25-30.
- [11] 孙炜. 插装型电子元器件强化振动试验疲劳仿真研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2003.
SUN Wei. Vibration fatigue simulation research on through-hole electronic component in RET[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003.
- [12] STEINBERG D S. Vibration analysis for electronic equipment[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1998: 208-214.
- [13] 杨家铿. 晶体管非工作期失效机理及可靠性预计[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 1994, 12(1): 15-22.
YANG Jia-keng. Reliability prediction and failure mechanism of transistors in non-operation period[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 1994, 12(1): 15-22.
- [14] 杨家铿, 翁寿松. 晶体管非工作期失效率预计[J]. 半导体学报, 1994, 15(8): 558-564.
YANG Jia-keng, WENG Shou-song. Failure rate prediction of transistors in non-operation period[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 1994, 15(8): 558-564.

编辑 张俊