

航电电源板层间 CAF 短路失效机理及退化时间分析

邓林^{1,2}, 连可^{3*}, 黄付刚^{1,2}, 李墨¹, 阳昆³

(1.中国电子科技集团公司第二十九研究所, 成都 610036; 2.四川省高效电源变换技术工程研究中心, 成都 610036; 3.敏捷智能计算四川省重点实验室, 成都 610036)

摘要: **目的** 掌握 CAF 失效机理 MTTF 分析方法, 以便于在实际案例中实施工程优化决策, 从而降低故障危害风险和寿命周期总费用。**方法** 以某航电电源母板 CAF 失效为例, 基于 CAF 失效机理的物理化学变化时间特性模型算法, 建立电压、介质间距和 MTTF 变化关系, 以辅助工程优化决策。**结果** 基于仿真计算数据, 形成对特定范围产品的改进和处置决策, 从而限制失效危害风险的进一步扩散, 降低了产品生命周期维护费用, 并提升了客户满意度。**结论** 掌握装备常见失效机理和采取适宜的应对措施, 是持续改进装备可用性、可靠性和环境适应性的必要条件。

关键词: 阳极导电丝生长 (CAF); 失效模式; 根本原因分析 (RCA); 退化时间

中图分类号: TN956

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)11-0038-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.11.006

Analysis on the Failure Mechanism and Degradation Time of CAF between Layers in the PWBs of Avionics Power Supply Module

DENG Lin^{1,2}, LIAN Ke³, HUANG Fu-gang^{1,2}, LI Mo¹, YANG Kun³

(1. The 29th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610036, China; 2. Sichuan Provincial Engineering Research Center of High Efficiency Power Converter Technology, Chengdu 610036, China; 3. Agile Intelligent Computing Sichuan Key Laboratory, Chengdu 610036, China)

ABSTRACT: The work aims to acquire the MTTF analysis method for the failure mechanism of Conductive Anodic Filament Formation (CAF), so as to facilitate the implementation of engineering optimization decisions in practical cases, thus reducing the risk of failure hazards and the total cost of life cycle. With the failure of CAF in a certain avionics power supply PWB as an example, the relationship among voltage, dielectric spacing and MTTF change was established based on the time characteristic model algorithm of physical and chemical changes of CAF failure mechanism. Based on the simulation calculation data, the improvement and disposal decisions for a specific range of products were formed, thus limiting the further spread of the risk of failure hazards, reducing the maintenance cost of product during life cycle and improving customer satisfaction. It is necessary

收稿日期: 2023-08-09; 修订日期: 2023-08-31

Received: 2023-08-09; Revised: 2023-08-31

基金项目: 企业预研项目 (Y225889)

Fund: Enterprise Pre Research Project (Y225889)

引文格式: 邓林, 连可, 黄付刚, 等. 航电电源板层间 CAF 短路失效机理及退化时间分析[J]. 装备环境工程, 2023, 20(11): 38-44.

DENG Lin, LIAN Ke, HUANG Fu-gang, et al. Analysis on the Failure Mechanism and Degradation Time of CAF between Layers in the PWBs of Avionics Power Supply Module[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(11): 38-44.

*通信作者 (Corresponding author)

to master the common failure mechanism of equipment and take appropriate countermeasures to continuously improve the availability, reliability and environmental adaptability of equipment.

KEY WORDS: Conductive Anodic Filament Formation (CAF); failure mode; root cause analysis (RCA); degradation time

航空装备随装载平台运行在多种不同环境条件及参数的地域范围中, 如高原、热带湿热、近海沿海等。同时, 伴随任务的执行还会受到局部特征应力的影响, 如电压、频率等。在这些环境综合作用下, 设计制造中如果认知维度考虑的因素不全或缺失, 往往会引发一些意想不到的失效, 如果反应不及时, 其故障往往导致装备系统的可用性不足、停机时间过长、运维费用大幅增加, 进而导致顾客和用户的满意度下降^[1]。

对于复杂功能的航电系统来讲, 往往会跟随飞机平台的飞行、转场、贮存等任务, 经受各种不同的环境条件考验^[2]。其中, 温度和湿度是引发航电设备失效的主要因素^[3], 尤其是由其诱发的底层材料或构件间的物理化学变化。这些变化会随时间推移, 引发底层电路的高危害失效模式, 进一步导致处于高功能层次的系统功能故障, 造成装备无法使用或出现致命性故障而停机。阳极导电丝生长 (Conductive Anodic Filament Formation, CAF) 便是其中一类。某航电装备因此故障而导致大范围召回, 成为较为典型的失效教案案例。对此, 本文讨论了 CAF 的失效机理和适宜的应对措施, 以期望在行业范围内形成知识案例, 避免类似问题的再发生, 并促进降低类似失效的故障影响, 持续改进装备可用性、可靠性和环境适应性。

1 CAF 背景及机理

1.1 失效成因及特征

20 世纪 70 年代开始, 随功能复杂度的不断增加和制造工艺技术的快速改进, 电子产品的布线 MI 度迅速增加。通常, 电子产品还需要在温度和湿度较高且不受控制的外部环境下运行, 引发了不少温、湿度诱发的可靠性问题。20 世纪 70 年代中期, 在调查这些失效案例时, 贝尔实验室 (Bell Labs) 的研究人员发现了一种新的失效模式^[4]。这种失效模式的特征是在电位差持续影响下, 导体之间的绝缘电阻突然、不可预测地下降。阳极丝是电化学迁移 (Electrochemical Migration, ECM) 过程的结果, 该过程在阳极启动并沿着印制线路板 (Printed Wiring Boards, PWBs) 分离的纤维/环氧树脂界面进行^[5]。其生长路径整体呈现沿电势降低方向生长的趋势, 但并非仅沿着电势梯度的方向生长, 具有随机性^[6]。基于该研究, 贝尔实验室于 1976 年定义了此失效模式, 称其为 CAF^[4], 其生长过程如图 1 所示。

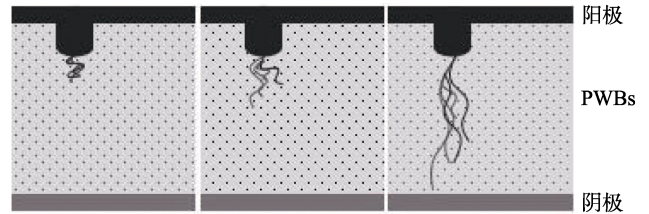


图 1 CAF 形成过程
Fig.1 Process of CAF formation

Antonio 等^[5]、王泽华等^[6]、童福生等^[7]、赵丽等^[8]、胡梦海等^[9]研究了 CAF 的形成机理, 并对铜迁移阳极丝生长和击穿过程进行了建模仿真与试验研究。研究表明, 线路板在高压、高湿等环境下长时间工作, 会发生阳极铜被氧化为铜离子, 缓慢向阴极方向移动并还原为铜沉积下来, 以此形成逐步生长的导电性铜丝, 最终导通阴极和阳极, 造成击穿和失效, 如图 2 所示。

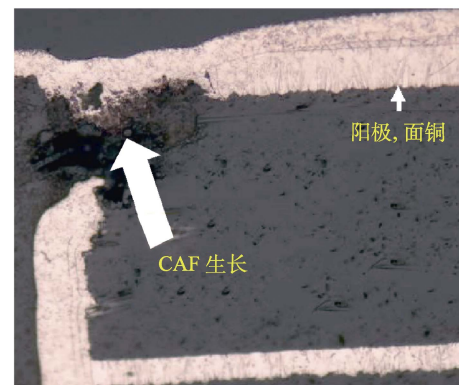
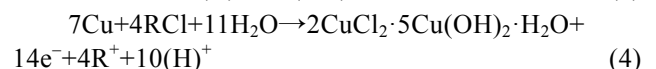
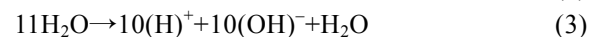


图 2 CAF 形貌
Fig.2 Morphology of CAF

大量扫描电镜 SEM 分析的成分数据研究表明, 大部分的 CAF 失效都包含金属铜与氯的电化学反应^[5], 此导电离子迁移过程在阳极和阴极的反应式见公式 (1) ~ (4)。



式中: R 表示通用阳离子。其化学反应生长过程, 与电压、湿度、温度等参数相关, 可用时间的函数拟合, 这也是确定 CAF 平均失效前时间 (Mean Time to Failure, MTTF) 的主要方法。

1.2 失效退化时间模型

CAF 失效时间与水解时间和电化学迁移时间相

关,水解时间主要取决于相对湿度、温度,电化学迁移时间则与电势差、电气间距、相对湿度、温度相关。Welsher 等^[10-11]和 Chan^[12]研究了 CAF 的生长规律,确认当 PWBs 暴露在湿热环境下,CAF 的发展过程与温度、湿度、生长路径的阳极对阴极电压、距离等参数相关,其中湿度与材料特性关联,退化时间服从 Arrhenius 模型。在选择不同材料、介质距离、温度、湿度参数并实施试验取得数据后, Welsher 等给出了 CAF 失效的 MTTF 模型,见式(5)。

$$M_{\text{TF}} = a \times H^b \times e^{\left(\frac{E_a}{kt}\right)} + d \times \left(\frac{L^2}{U}\right) \quad (5)$$

式中: H 为相对湿度, %; E_a 为激活能, eV; t 为温度, °C; L 为介质间距, m; U 为介质间电压, V; k 为 Boltzman 常数, $k=8.62 \times 10^{-5}$ eV/K; a 、 b 为 PWBs 材料相关常数; d 为湿度与温度依存常数。

在此基础上, Mitchell 和 Welsher 等根据 CAF 过程中温度和湿度相互依存关系,优化了模型表达式^[13],见式(6)。

$$M_{\text{TF}} = \alpha \times \left(1 + \beta \times \frac{L^n}{U}\right) \times H^\gamma \times e^{\left(\frac{E_a}{kt}\right)} \quad (6)$$

式中: α 、 β 为材料相关常数; n 为基于介质配置几何因子; γ 为湿度依赖常数。

为确定 MTTF 所需的参数类型和量值, Ready 和 Turbini 等基于实验设计(DOE)的加速寿命试验(ALT)数据分析进一步将式(5)、(6)优化为式(7)^[4]。

$$M_{\text{TF}} = C \times e^{\left(\frac{E_a}{kt}\right)} + d \times \left(\frac{L^4}{U^2}\right) \quad (7)$$

式中: C 是材料湿度依存因子,根据 PWBs 特性,基于试验数据取值区间可在 $1.2 \times 10^{-3} \sim 7.4 \times 10^{-3}$; 温度在 20~60 °C 时, E_a 取值在 0.03~0.2 eV^[4,14-15]; 常数 d 经多组试验数据得出取值为 9.23×10^{13} V²/mm⁴。

2 航电 CAF 案例剖析

2.1 失效分析过程

2022 年,某航电设备使用期间,客户进行任务出动前检查发现,机载任务系统多个功能单元同时自检报故,综合分析判断后,认定该航电设备不能有效执行指定任务,任务退出终止。在地面运维人员按规程排查分析下,此故障定位至综合处理机匣中的电源在线可维修模块(Line Replaceable Module, LRM)上。拆下对应的电源 LRM,测试结果显示,其已开路无输出。开盖检查发现,其 PWBs 部分线路呈现烧蚀现象,形貌如图 3 所示。

图 3 中,失效对应的位置关系上,270 V 母线、板间盲孔、电源输入端引脚的烧蚀形貌尤其突出。电源 DC/DC 变换器中, U1、U2、U4、U5 失效, U3

功能正常。进一步检测表明, U1、U2、U4、U5 输入输出均未开路或短路,因而判断故障并非 DC/DC 变换器引发。U3 的 270 V 线路输入端需经过板间盲孔,因 U3 正常而板间盲孔烧毁,因此从逻辑上判断该起故障的起因是板间盲孔短路,其短路引发 270 V 母线电流过载,进而引发印制板 270 V 覆铜线路发热、碳化,且将电源输入端引脚烧蚀,如图 4 所示。

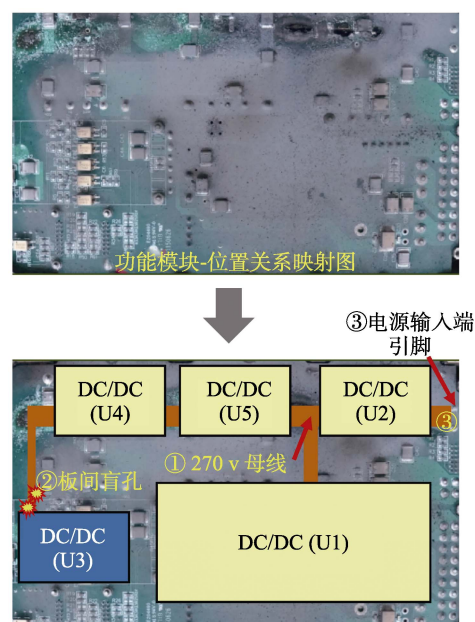


图 3 开盖后的烧蚀形貌及位置关系
Fig.3 Failure morphology and position relationship after opening of cover



图 4 电源输入端引脚烧蚀形貌
Fig.4 Ablation morphology of the pins at the power input terminal

为证实分析过程逻辑的正确性,将该故障产品送第三方进行失效分析。对此航电电源板间盲孔进行固封研磨金相切片,在金相显微镜下观察其热熔形貌,如图 5 所示。同时,也对未有烧蚀损伤的板上它处盲孔作对比观察分析,如图 6 所示。形貌显示,盲孔处孔铜过热烧毁、热熔, PWBs 基材过热碳化,其内基材可见过热烧蚀,但未碳化。烧蚀区域从正面到背面呈现漏斗状,可以判断,孔铜熔点为温度最高的位置。同时,观察到未损伤样品的盲孔介质间间距

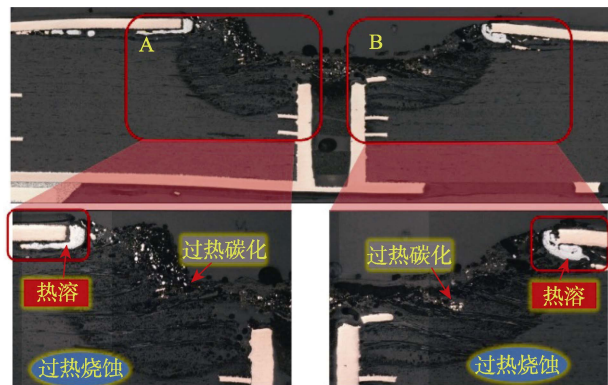


图 5 板间盲孔处截面形貌
Fig.5 Cross-sectional morphology of blind hole at position

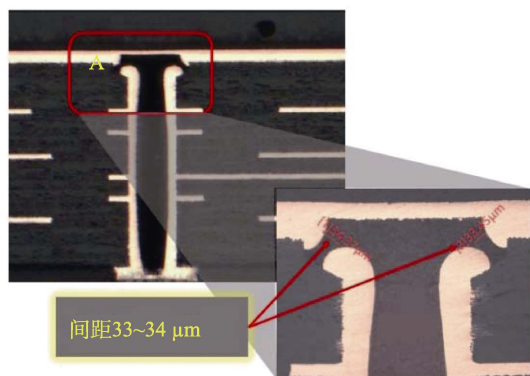


图 6 未损伤盲孔处介质间距形貌
Fig.6 Cross-sectional morphology of undamaged blind holes
较短, 多组不同数据显示其间距为 20~35 μm 。
第三方失效分析所得出的结论与判断基本一致,

即板间盲孔短路引发大电流, 造成印制板 270 V 覆铜线路电流过载致使 270 V 母线传输路径过热碳化, 过高的热量也使得其线路上的 U1、U2、U4、U5 失效, 同时也将电源输入端引脚热熔。随时间演化, LRM 的 270 V 线路上的短路变为输出端的开路, 整体上引发该模块供电的功能单元无法工作, 形成了客户观察到的装备系统级“自检多个功能单元同时报故”的失效模式。因故障导致装备系统不可用, 说明其危害性较高, 如图 7 所示。

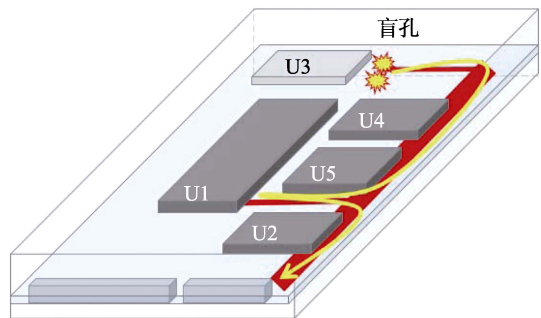


图 7 失效传播路径过程
Fig.7 Failure propagation path

2.2 根本原因 CAF 的确定

参考 IEC 62740:2015 Root cause analysis(RCA), 采用根本原因分析中的“5-Why 提问分析法”^[16]对板间盲孔热熔失效模式展开分析, 结合相应的 SEM 和金相分析结果, 得出如图 8 的分析结果。

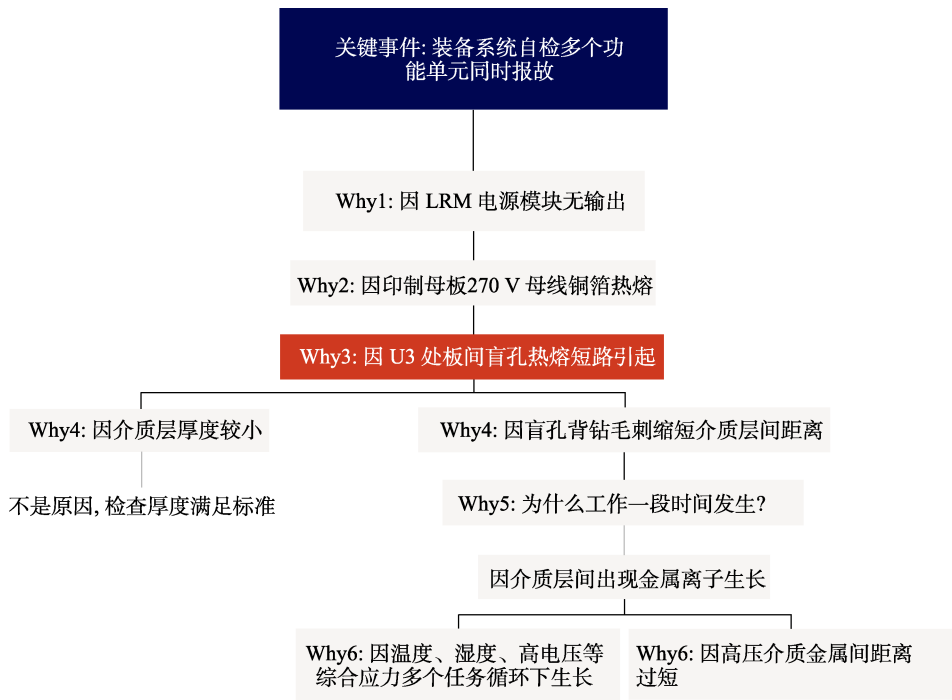


图 8 故障根本原因分析
Fig.8 Root cause analysis of the failure

经过根本原因分析判明,此故障的根本原因有2个方面。其一,盲孔制作与镀铜工艺失当,产生的毛刺与孔铜再生长,导致介质层间距离较小(最小处仅 $20\text{ }\mu\text{m}$);其二,产品使用的多任务循环过程中,在各种应力加载情况下,包括飞行期间DC+270 V加载、飞行起降转场过程湿度、温度的交替变换等,使得介质间发生阳极导电丝CAF生长,进一步降低了介质间的绝缘性能。两者综合情况之下,在任务持续时间作用条件下引发了关键事件,导致航电电源烧毁失效,形成任务系统“自检多个功能单元同时报故”的故障发生,使得用户在任务执行期间载机不能有效执

行任务,系统可用性和顾客满意度下降。

2.3 失效时间预测

在此期间,类似的故障先后出现过几起,产品履历数据反映都是在交付使用后的2~3 a期间失效。为避免故障影响的进一步扩大,需基于CAF的MTTF模型计算可能的影响范围,以便于做出适宜的判断和处置决策。

对该类产品库房存量 and 用户巡检的电源母板进行检测,同时收集客户使用现场相关环境条件数据,结合相关文献^[17-18]得到相关模型计算参数,见表1。

表1 CAF退化时间模型参数取值
Tab.1 Degradation time model parameters of CAF

	$L/\mu\text{m}$	U/V	$H/\%$	$t/^\circ\text{C}$	E_a/eV	$C/(10^{-3}\text{ h})$	$d/(10^{13}\cdot\text{V}^2\cdot\text{mm}^{-4})$
下限	20.0	265	60	26	0.01	0.25	9.23
典型	22.8	270	70	35	0.03	0.84	9.23
上限	35.1	275	85	55	0.08	3.3	9.23

考虑到特定工艺和运行环境下,湿度、温度和PWBs材质决定的激活能 E_a 趋同,而电压和间距是影响CAF退化时间的主要因素。因此,根据实验和检测的结果,将 C 、 E_a 、 t 、 H 等参数取值固定为 $0.25\times 10^{-3}\text{ h}$ 、 0.03 eV 、 40°C 、 70% 。利用式(5)建立MTTF与电压和间距之间的关系。考虑介质间距在20、22.8、 $35.1\text{ }\mu\text{m}$ 条件下,进行电压变化的退化时间预测,仿真拟合出图9的退化规律^[19-21]。

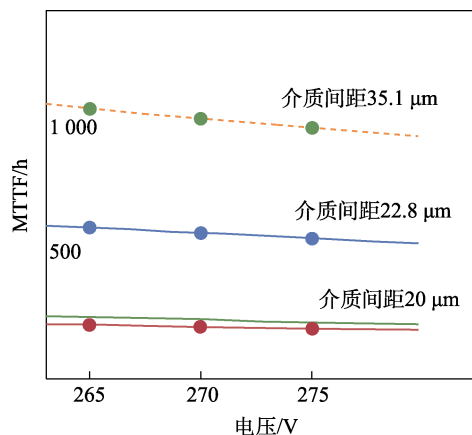


图9 不同介质间距下CAF退化时间
Fig.9 CAF degradation time at different spacing

预测结果中,以电压为变量计算所得对应的MTTF值见表2。

从仿真的结果来看,介质间距是影响CAF退化时间的主变因素。随间距的增加,退化时间明显放慢,在该产品标准电压270 V条件下,PWBs盲孔介质层间不同间距MTTF分别对应257、1 559 h。因同批次交付给用户的产品可能存在类似的问题,因而选取了库房未交付的产品送第三方检测,在金相显微镜下观

表2 MTTF预测结果
Tab.2 MTTF prediction results

介质间距/ μm	MTTF/h		
	265 V	270 V	275 V
20	264.877 8	257.180 6	249.899 4
22.8	855.700 3	826.323 4	789.534 2
35.1	1 616.865 1	1 559.557 9	1 505.348 1

察到此类似盲孔阳极介质间间距在 $22.8\sim 35.6\text{ }\mu\text{m}$ 。因这些产品未在实际任务环境中上电应用,因此未观察到CAF生长情况。经过企业风险评估,认为不能等到故障危害暴露后再行处置,否则会造成不可控的失效影响和顾客损失。因而根据分析结果决策,按新的盲孔加工工艺重新制作PWBs,新工艺下介质间距大于 $91.9\text{ }\mu\text{m}$,以保证产品工作的长期可靠性和安全性^[22-28]。基于仿真分析数据,综合考虑实施可行性,对交付3 a以上的产品召回,并逐年逐批次直至全面更换。

3 结语

本文分析了PCBs的CAF短路失效形成机理,给出了退化时间MTTF的仿真计算公式,指出该特征由PCBs材料特性决定,与介质间距的4次方成正比,与介质间电压的平方成反比。因而,可靠性设计应首要考虑不同应用场合和质量特性要求下的材质选择。根据仿真结果,通常CAF多发生在阳极电压大于100 V的场合,对低于此电压出现的PCBs失效,应首先考虑分析其他类型的失效模式。在具有此条件的航空电子设备设计中,需要综合考虑多种影响因素,包括随飞机平台飞行、转场、贮存等所经历各种环境

条件影响,也包括在其任务期间的多循环各种条件所带来的综合环境效应。

为避免CAF失效模式在航电设备中的发生,给出以下几点建议:

1) PCBs宜选择三嗪树脂和玻璃布复合材料,避免使用环氧树脂。

2) 电源层与地层间布线距离宜大于 $91.9\ \mu\text{m}$ 。

3) 宜基于失效机理的仿真数据,进行工程优化并综合决策,以便于在降低最终用户的故障影响的同时开展产品可靠性的改进。

本文仅从一个侧面,通过分析CAF成因和生长规律下的MTTF模型,结合实际失效案例的根本原因和参数分析,应用解决工程优化和决策问题,以便于进行有效产品环境适应性和可靠性的改进,并降低最终用户的故障影响。文中方法可供工程实践参考。

参考文献:

- [1] 孙建勇,张建军,常海娟.飞机平台环境数据库及预计系统构建研究[J].装备环境工程,2013,10(3):77-82.
SUN Jian-yong, ZHANG Jian-jun, CHANG Hai-juan. Construction of Airplane Environment Resource Database and Prediction System[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(3): 77-82.
- [2] 闫光巍,孙泽鹏.民用飞机环境包线研究[J].广东科技,2020,29(5):70-71.
YAN Guang-wei, SUN Ze-peng. Study on Environmental Envelope of Civil Aircraft[J]. Guangdong Science & Technology, 2020, 29(5): 70-71.
- [3] 张军,苗学问,宋岳恒,等.热带岛礁大气环境对飞机环境适应性的影响分析研究[J].强度与环境,2022,49(4):58-64.
ZHANG Jun, MIAO Xue-wen, SONG Yue-heng, et al. Analysis and Research on the Influence of Tropical Island Reef Atmospheric Environment on Aircraft Environmental Adaptability[J]. Structure & Environment Engineering, 2022, 49(4): 58-64.
- [4] READY W J, TURBINI L J. The Effect of Flux Chemistry, Applied Voltage, Conductor Spacing, and Temperature on Conductive Anodic Filament Formation[J]. Journal of Electronic Materials, 2002, 31(11): 1208-1224.
- [5] ANTONIO C, LAURA J T, DOUG D P. Conductive Anodic Filament (CAF) Formation[J]. Journal of Electronic Materials, 2010, 39(1): 85-90.
- [6] 王泽华,周国云,洪延,等.印制电路板导电性阳极丝击穿模型仿真研究[J].印制电路信息,2023,31(S1):45-49.
WANG Ze-hua, ZHOU Guo-yun, HONG Yan, et al. Simulation of Dielectric Breakdown Model for Conductive Anodic Filament in Printed Circuits[J]. Printed Circuit Information, 2023, 31(S1): 45-49.
- [7] 童福生,熊厚友,钟国华.印制电路板的一种CAF失效模式分析[J].印制电路信息,2017,25(8):52-55.
TONG Fu-sheng, XIONG Hou-you, ZHONG Guo-hua. Analysis of an CAF Failure Mode for PCB[J]. Printed Circuit Information, 2017, 25(8): 52-55.
- [8] 赵丽,王玉,徐伟明.印制电路板CAF现象研究[J].电子工艺技术,2018,39(1):58-62.
ZHAO Li, WANG Yu, XU Wei-ming. Study on CAF Phenomenon of Printed Circuit Board[J]. Electronics Process Technology, 2018, 39(1): 58-62.
- [9] 胡梦海,陈蓓.印制线路板CAF失效研究[J].印制电路信息,2012,20(4):79-83.
HU Meng-hai, CHEN Bei. Conductive Anodic Filament Failure Investigation of PCB[J]. Printed Circuit Information, 2012, 20(4): 79-83.
- [10] WELSHER T L, MITCHEL J P, LANDO D J. CAF in Composite Printed-Circuit Substrates: Characterization, Modeling and a Resistant Material[C]//18th Annual Proceedings of the IEEE Reliability Physics Symposium, Las Vegas: IEEE Electron Devices Society, 1980.
- [11] SOOD B, PECHT M. Conductive Filament Formation in Printed Circuit Boards: Effects of Reflow Conditions and Flame Retardants[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2011, 22(10): 1602-1615.
- [12] CHAN L S. Effects of Curing Agents and Drilling Methods on CAF Formation in Halogen-Free Laminates[EB/OL]. 2012[2023]. <http://hdl.handle.net/10012/6470>.
- [13] MITCHELL J P, WELSHER T L. Conductive Anodic Filament Growth in Printed Circuit Materials[C]//Circuit World Proc Printed Circuit World Convention II. Germany: MCB UP Ltd, 1981.
- [14] COOMBS C F, HOLDEN H T. Printed Circuits Handbook[M]. 7th Edition. New York: The McGraw-Hill Companies, 2008.
- [15] KRISHNA J V J, PRASHANTH P F, VINU R. Distributed Activation Energy Modeling and Py-GC/MS Studies on Pyrolysis of Different Printed Circuit Boards for Resource Recovery[EB/OL]. 2022[2023]. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.2c02003>.
- [16] IEC 62740, The International Electro Technical Commission (IEC) Root Cause Analysis (RCA)[S].
- [17] YUNG W K C. Conductive Anodic Filament: Mechanisms and Affecting Factors[EB/OL]. 2006[2023]. <https://www.researchgate.net/publication/237642332>.
- [18] CAPUTO A. Conductive Anodic Filament (CAF) Formation[D]. Toronto: University of Toronto, 2010.
- [19] 夏权,任羿,孙博,等.动态工况下锂电池组多物理场仿真与退化分析[J].装备环境工程,2023,20(6):108-116.
XIA Quan, REN Yi, SUN Bo, et al. Multi-Physical Simulation and Degradation Analysis of Lithium-Ion Battery Pack under Dynamic Conditions[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(6): 108-116.
- [20] 罗道军,汪洋,聂昕.PCB失效分析技术与典型案例[J].印制电路资讯,2009(4):67-72.

- LUO Dao-jun, WANG Yang, NIE Xin. PCB Failure Analysis Technology and Typical Cases[J]. Printed circuit information, 2009(4): 67-72.
- [21] 陈跃良, 吴省均, 张勇, 等. 不同表面状态 2024-T3 铝合金腐蚀行为及 DFR 退化规律[J]. 装备环境工程, 2020, 17(6): 44-50.
- CHEN Yue-liang, WU Xing-jun, ZHANG Yong, et al. Corrosion Behavior and DFR Degradation Law of 2024-T3 Aluminium Alloy in Different Surface State[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(6): 44-50.
- [22] 许康恒, 顾国帅, 王正之. 高频开关电源的印制板设计优化研究[J]. 数字技术与应用, 2018, 36(6): 151-152.
- XU Kang-heng, GU Guo-shuai, WANG Zheng-zhi. Research on the Optimal Design of PCB for High Frequency Switching Power Supply[J]. Digital Technology and Application, 2018, 36(6): 151-152.
- [23] SJ 21083—2016, 高密度互连印制板设计要求[S].
- SJ 21083—2016, Design Requirements for High Density Interconnect Printed Circuit Boards[S].
- [24] 鲜飞. 印制板设计与制作工艺[J]. 印制电路信息, 2005, 13(6): 26-34.
- XIAN Fei. PCB Design and Fabrication Technology[J]. Printed Circuit Information, 2005, 13(6): 26-34.
- [25] 何润宏. 新型印制电路板叠通孔设计及其制造方法[J]. 印制电路信息, 2011, 19(4): 200-202.
- HE Run-hong. New Stack of Through-Hole Printed Circuit Board Design and Manufacturing Methods[J]. Printed Circuit Information, 2011, 19(4): 200-202.
- [26] 周文木, 刘锦锋, 张良静, 等. 印制板盘中孔工艺分析及可靠性研究[J]. 印制电路信息, 2021, 29(9): 20-26.
- ZHOU Wen-mu, LIU Jin-feng, ZHANG Liang-jing, et al. Process Analysis and Reliability Research of Hole in Printed Circuit Board[J]. Printed Circuit Information, 2021, 29(9): 20-26.
- [27] 王燕清. 浅谈多层埋/盲孔厚铜板的厚度控制[J]. 印制电路信息, 2006, 14(9): 32-34.
- WANG Yan-qing. The Thickness Control of Heavy Copper Multilayer PCB with Blind and Buried Vias[J]. Printed Circuit Information, 2006, 14(9): 32-34.
- [28] 马步霞. T/CPCA 6045—2017《高密度互连印制电路板技术规范》标准介绍[J]. 印制电路信息, 2017, 25(11): 49-53.
- MA Bu-xia. The Introduction of CPCA Standard T/CPCA 6005—2017 “Technical Specification for High Density Interconnect Printed Circuit Board”[J]. Technical Specification for High Density Interconnect Printed Circuit Board, 2017, 25(11): 49-53.

责任编辑: 刘世忠