

Research on Reliability Testing Methods and Result Evaluation of Electronic Components

Minghui Xue Peng Zhang

Shaanxi Hengtai Electronic Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710021, China

Abstract

The reliability of electronic components directly affects the service life and failure probability distribution of the entire system. Traditional testing methods have significant limitations in simulating extreme working conditions and tracing failure mechanisms. This study takes the application of HX-2024 series surface mount resistors in the electronic control system of new energy vehicles as the research object. A multidimensional test system integrating environmental adaptability, electrical durability, and failure mode analysis was established. The accurate prediction of failure time and quantitative evaluation of reliability indicators were completed using multi parameter real-time monitoring and Weibull distribution model fitting methods. From the test results, it can be seen that when the temperature cycle reaches the critical value, a significant failure concentration phenomenon appeared in this batch of samples, providing data support for component selection optimization and system level reliability prediction.

Keywords

electronic components; Reliability testing; Failure Mode Analysis; Weibull distribution; quantitative evaluation

电子元器件可靠性试验方法及结果评估研究

薛明辉 张鹏

陕西恒太电子科技有限公司, 中国·陕西 西安 710021

摘要

电子元器件的可靠性直接影响着整机系统的服役寿命和故障概率分布, 传统试验方法在极端工况模拟以及失效机理溯源上存在很大局限性。本研究以HX-2024系列贴片电阻在新能源汽车电控系统中的应用为研究对象, 建立了环境适应性、电气耐久性、失效模式分析为一体的多维试验体系, 用多参数实时监测、威布尔分布模型拟合的方法完成了失效时间的准确预测、可靠性指标的量化评估, 从试验结果可知, 在温度循环达到临界值的时候, 该批次样品就出现了明显的失效集中现象, 为元器件选型优化和系统级可靠性预测提供数据支持。

关键词

电子元器件; 可靠性试验; 失效模式分析; 威布尔分布; 量化评估

1 引言

电子元器件是电子系统最基本的组成单元, 电子元器件的可靠性水平微小的波动, 都会在系统层面被逐级放大, 最终演变成难以预判的整机故障, 从微观失效到宏观崩溃的传递链条在航空航天、轨道交通、新能源汽车等领域尤其致命。目前工业界常用的加速寿命试验虽然可以在较短时间内暴露潜在缺陷, 但是由于加速因子选择具有经验性、失效机理映射模糊等不足而受到质疑, 实验室中获得的失效数据能否真实地反映实际服役环境中的退化轨迹, 至今还没有得到令人满意的答案。

【作者简介】薛明辉(1992—), 男, 中国陕西西安人, 本科, 助理工程师, 从事电子元器件检测、可靠性试验、破坏性物理分析研究。

2 可靠性试验类型与方法设计

2.1 环境适应性试验(温湿度、振动等)

环境应力对电子元器件的侵蚀具有高度的非线性特征, 单一应力的独立作用很难复现实际服役中复杂的退化行为, 温度梯度引起的热机械疲劳、湿度渗透引起的电化学腐蚀、振动激励引起的机械断裂相互耦合、相互催化, 形成远大于线性叠加的协同破坏效应^[1]。HX2024系列样本的环境适应性试验采用的是三轴向综合应力加载方案, 温度循环范围从-40摄氏度到125摄氏度, 升降温速率控制目的是充分激发发热冲击效应, 湿度条件保持在高温状态并叠加随机振动谱, 这一参数组合来源于整车级路谱数据的统计分析, 比单纯按照标准规范设定的试验条件更具有工况代表性。试验过程中发现, 当温度循环累积到一定次数的时候, 首批样本的绝缘电阻出现了超出常规波动范围的异常跃变, 而在传统的单因素试验中从来没有出现过这样的情况, 说明多应力耦合

确实可以激活一些隐蔽的失效前兆。

2.2 电气性能耐久性试验

电气性能的长期稳定性是元器件可靠性评价的主要方面，阻值漂移、绝缘劣化和脉冲耐受能力衰退都会造成电路功能的逐渐失效，这类软失效由于其隐蔽性往往比硬失效更具有破坏性。对于 HX-2024 系列贴片电阻，电气耐久性试验主要是对持续负载条件下阻值的稳定性、瞬态过压耐受阈值进行试验，持续负载试验采用额定功率的 110% 应力水平连续加载，定时采集阻值数据并计算相对漂移量；瞬态过压试验采用标准雷电波形，电压峰值从额定值逐级增加，每级施加多次脉冲后检测样本的电气完整性。数据表明，在持续负载到中后期的时候，批次编号为 HX-2024-Q3-B07 的样本组平均阻值漂移已经接近设计容差的上边界，在同批次在瞬态过压达到临界水平的时候出现了第一例击穿失效，失效样本的显微切片分析表明，电极和基体界面处存在明显的金属迁移痕迹，这个微观证据给后面失效机理建模提供重要线索^[2]。

2.3 失效模式与影响分析 (FMEA)

失效模式与影响分析属于前馈式风险识别手段，它把分散的失效现象规整成结构化的因果网络，进而给试验方案改良和设计改良赋予决策支撑。HX2024 系列 FMEA 根据前面试验中暴露出的失效样本展开，共识别出多种主要失效模式，按严酷度与发生概率的乘积排序后电极脱落和基体开裂排在前面，这两类机械性失效与温度循环应力有很强的相关性，而阻值漂移超差这类电气性失效与持续负载时长有更强的线性关系。

3 试验数据采集与处理技术

3.1 多参数实时监测系统搭建

可靠性试验数据的质量好坏直接影响后面分析的可信度，传统的离线监测模式由于采样间隔过大而容易忽略瞬态异常事件，实时监测系统可以提高时间分辨率来记录失效演化全过程动态。监测系统包含阻值、绝缘电阻、温度、振动加速度这四种传感通道，采样频率的设置要兼顾数据量与信息密度之间的矛盾，所有的通道数据通过工业以太网实时上传到上位机，并用时间戳同步存储，在系统长期运行中没有出现数据丢失或者时钟漂移的情况。监测系统另一项重要的功能就是异常事件的在线预警，对各个通道设置动态阈值，并采用滑动窗口统计的方式，当参数瞬时值偏离均值超过设定倍数的标准差时，就会触发告警并自动标记该时段的数据^[3]。

3.2 试验数据预处理与异常值剔除

原始监测数据不可避免地带有传感器噪声、通信干扰、偶发性毛刺等噪声，如果不加以筛选就直接进行统计分析，将会严重歪曲可靠性评估的结论。数据预处理流程包含缺失值插补、去趋势化、异常值剔除三个步骤，缺失值用局部加权回归进行插补来保持时序的连续性，去趋势化通过高通滤波消除温度漂移等慢变因素的影响，异常值剔除使用改进的

格拉布斯准则，将判定阈值设为样本标准差的某个倍数。经过预处理后有效数据量比原始数据少了一些，剔除的异常点经过人工复核后，绝大多数都是由于传感器接触不良或者供电波动，少数和真实失效前兆有关而被单独标记出来用于后续机理分析。

3.3 可靠性统计分布模型拟合

失效时间的统计分布特征是可靠性评价的数学基础，由于威布尔分布具有形状参数灵活的特点，所以它成为电子元器件寿命建模的首选工具，形状参数小于某个临界值时表明早期失效占主导，等于临界值时为随机失效，大于临界值时为耗损失效^[4]。HX-2024 系列样本的失效时间数据用最大似然估计拟合后，形状参数和尺度参数的取值表明该批次元器件已经过了早期失效期，进入稳定的随机失效期，这一结论与样本的筛选工艺记录相吻合，即出厂前已经做了高温老化剔除早期缺陷品。拟合优度检验用柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫方法，统计量表明威布尔分布假设在常规置信水平下不能被拒绝，模型的预测精度满足工程应用要求。

3.4 失效时间与失效率数据分析

失效率是可靠性评价的主要指标，它随时间变化的曲线，即著名的“浴盆曲线”，形象地描绘了元器件整个生命周期的失效规律。HX2024 系列瞬时失效率曲线呈现出典型的三阶段形态，早期失效率的快速下降是由于筛选工艺把缺陷品剔除了，中期失效率的平稳低位对应的是随机失效的稳态区间，后期失效率的加速攀升预示着耗损失效机制的启动。

4 结果评估体系与工程应用

4.1 可靠性指标量化评估方法

可靠性指标的量化，就是将试验数据转化为工程决策依据的过程，平均失效前时间 MTTF、失效率 λ 、可靠度函数 $R(t)$ 是基本的可靠性指标。HX-2024 系列 MTTF 用威布尔分布参数计算得出，该数值远大于设计规范的下限要求，说明批次质量较好；特定置信水平下可靠度下限为系统级可靠性分配提供输入参数，避免了用点估计值直接代入计算所造成的过度乐观偏差。在指标量化过程中，还加入了加速因子的修正，把试验应力条件下的失效数据外推到实际服役应力水平，修正系数的确定依据是阿伦尼乌斯模型和逆幂律模型的联合拟合结果。

贝叶斯估计方法的加入，克服了小样本条件下经典频率学派方法置信区间过宽的缺点。通过将历史批次的先验信息和当前试验的似然函数结合起来，后验分布就可以给出更加精确的参数估计值，当样本量受成本限制不能增加时，该优势更加明显。另外 Bootstrap 重抽样技术用来检验估计量的稳定性，一千次迭代的结果表明形状参数 β 的变异系数在可接受的范围内，说明参数估计是可靠的。不确定性传递分析用蒙特卡洛模拟的方法，把输入参数的分布特性传送到

可靠度预测结果中,最后得到以概率密度形式呈现的可靠度区间,而不是单一数值,给风险决策提供更多的信息维度^[5]。

4.2 试验结果与设计规范的符合性分析

试验结果与设计规范的比对是判定元器件是否合格的最终裁决环节,符合性分析不能只看指标数值是否在允许区间内,还要看失效模式是否偏离预期类型。HX-2024系列各项可靠性指标均满足或超过设计规范要求,但是FMEA中识别出的复合失效模式没有被现行规范所覆盖,这说明标准体系滞后于工程实践的固有缺陷,因此在试验报告中专门增加对这种失效模式的补充测试建议,推动规范条款的迭代更新。

符合性判定流程采取分层递进的逻辑架构,第一层级是强制性指标的门槛筛选,只要有一项不达标就实行一票否决,第二层级是推荐性指标的综合评分,按照层次分析法确定各个指标的权重系数之后进行加权得分,第三层级是边界条件下的敏感性审查,考察服役环境参数在允许范围内波动时指标是否仍然可以保持合格。对处于临界区域的样本用灰色关联度的方法进行符合性分析,用实测数据序列和标准规范序列之间的关联系数来判定偏离程度,避免简单二值化判定造成的信息损失。

4.3 元器件选型与系统级可靠性预测

元器件选型决策要实现性能、成本、可靠性三者之间的平衡,试验数据给这种权衡赋予了量化支撑。HX-2024系列和HY-2024系列的对比显示,前者高温耐受性好,后者在振动环境下更好,根据实际服役工况的应力谱分析,BMS模块所在位置的温度应力权重大于振动应力,因此选择天平为HX-2024系列。系统级可靠性预测采用应力强度干涉模型,把元器件级失效率通过可靠性框图向上卷积到模块级、整机级,预测整车在质保期内电控系统的失效概率可以控制在设定目标之内。

选型决策矩阵的建立还要考虑供应链风险和技术成熟度等非技术因素。利用多准则决策分析模型,把可靠性试验数据、供应商审核评分、历史故障反馈、成本效益比等各方面信息融合起来,得到综合排序结果来支持最终决策。系统级可靠性预测中,共因失效的建模是不可忽视的环节, β 因子模型被用于量化同批次元器件因制造缺陷或环境应力而发生相关失效的概率,该修正项的引入使系统级失效率估

计较独立失效假设下的结果上浮了一定比例,更加贴近实际运行状况。

4.4 可靠性改进建议与试验标准优化

试验过程中暴露出来的薄弱环节给元器件设计改进指明了方向,电极和基体界面的金属迁移现象提示要改进阻挡层工艺,绝缘层微裂纹的萌生则指向基体材料配方的调整。现行规范中的单因素应力加载标准,需要补充多应力耦合方案,异常值剔除的判定标准,也应当由固定阈值变为自适应阈值,以便于适应不同的样本离散性,这些建议已经提交给了行业标准化委员会,供其修订。

设计改进措施的优先级排序按照风险优先数RPN的量化逻辑,把失效严酷度、发生频度和可探测度三者相乘得到综合评分,评分排在前面的改进项得到资源倾斜。金属迁移问题改进方案为,阻挡层材料升级、界面粗糙度控制、工作电流密度限值重新标定;微裂纹问题改进方案为,在基体材料中添加增韧相颗粒提高断裂韧性,优化烧结温度曲线减小残余热应力。试验标准优化路径用PDCA循环持续改进的理念进行,在标准修订稿发出之前安排验证性试验评价新条款的操作性和有效性。

5 结语

电子元器件可靠性试验的价值不仅在筛选缺陷品和验证设计余量上,更在于对失效机理的深入挖掘以推动产品迭代与标准进步,HX-2024系列试验实践表明,多应力耦合条件下失效行为比单因素实验更能体现出来,只有不断完善试验方法与评价体系才能接近可靠性工程最终的目标,即让失效可预测、可预防、可控制。

参考文献

- [1] 魏莎莎,李真. 电子元器件可靠性试验方法研究[J].环境技术,2023,41(08):36-38+43.
- [2] 罗雨薇,李晓红. 电子元器件质量与可靠性技术及其研究进展[J].电子产品可靠性与环境试验,2021,39(06):84-91.
- [3] 杨喜存,惠好鹏. 电子元器件可靠性与产品故障关系研究[J].环境技术,2020,(S1):42-44+55.
- [4] 吴俊. 电子元器件可靠性试验[J].电子技术与软件工程,2020,(23):89-90.
- [5] 强苗. 探究电子元器件的失效模型与可靠性试验方法[J].电子世界,2019,(16):76-77.