

车载电子元器件环境可靠性测试及失效分析

莫 灵 舒凌波 蔡 普

中安智研(武汉)交通科技有限公司 湖北 武汉 430050

摘要: 车载电子元器件长期面临温湿度、振动、盐雾等复杂环境应力, 极易出现性能衰减与结构失效, 影响整车电气系统稳定性。本文梳理车载元器件环境应力类型与国内外测试标准体系, 开展单项及多环境耦合可靠性测试, 结合试验数据剖析各类失效模式与核心机理, 明确温度循环为首要失效诱因。最终从器件选型、工艺、防护及测试体系四个维度, 提出针对性可靠性优化方案, 为车载电子器件质量管控提供技术参考。

关键词: 车载电子元器件; 环境可靠性; 测试; 失效

引言: 随着汽车智能化、电气化快速升级, 车载电子元器件应用占比大幅提升, 其环境可靠性直接决定整车运行安全与使用寿命。车辆行驶过程中复杂多变的环境应力, 易引发元器件参数漂移、结构破损、电路故障等问题, 是车载系统失效的主要诱因。为精准把控器件可靠性, 本文依托车规测试标准, 开展全维度环境可靠性测试与失效分析, 挖掘失效核心规律, 制定优化改进策略, 助力提升车载电子系统的环境适配与耐久性能。

1 车载电子元器件环境应力与可靠性测试标准体系

1.1 车载复杂环境应力类型及危害

(1) 温度应力: 车辆运行过程中会面临高低温极值、温度循环冲击等温度应力, 是车载元器件失效的核心诱因之一。长期极端温度与温度骤变, 会破坏元器件封装结构, 引发封装开裂、内部焊料疲劳老化, 同时导致芯片电气参数漂移、性能偏移, 大幅降低元器件使用寿命与工作稳定性。(2) 温湿度耦合应力: 车载场景的高湿、湿热交变环境会形成温湿度耦合应力, 相较于单一环境应力破坏力更强。潮湿水汽会渗透元器件封装内部, 造成设备绝缘性能下降, 引发漏电、短路隐患, 同时加速金属引脚、内部线路腐蚀, 诱发封装分层、脱胶等不可逆失效问题。(3) 机械与特殊环境应力: 车辆行驶产生的持续振动、突发冲击, 以及户外场景的盐雾、静电干扰等特殊应力, 会造成元器件内部结构松动、焊点脱落, 盐雾会持续腐蚀器件引脚与外壳, 静电则会击穿精密电路, 最终导致器件机械损坏、电性能失效, 影响整车电气系统稳定运行^[1]。

1.2 车载电子元器件核心测试标准

(1) 国际通用标准: 主流国际标准包含ISO16750车载电气设备环境测试标准、AEC-Q系列车规元器件可靠性标准及IEC60068环境测试通用标准, 全面规范车载元器件环境适应性、可靠性的测试方法与判定依据, 是全

球汽车电子行业通用的准入准则。(2) 国内行业标准: 国内以GB/T21437车载电子设备环境可靠性测试标准为核心, 搭配专属汽车电子元器件环境试验规范, 贴合国内车辆运行工况、气候环境与生产制造需求, 为国内车载元器件检测、量产质检提供合规依据。(3) 标准差异化对比: 不同应用位置的车载元器件测试严苛度存在明显差异, 动力舱元器件测试标准最严苛, 需耐受高强度温变、振动应力; 底盘元器件侧重抗冲击、耐腐蚀测试; 车身元器件测试标准相对宽松, 各标准精准匹配不同场景的工况需求。

1.3 车载元器件可靠性测试基本原则与流程

(1) 测试基本原则: 测试严格遵循工况模拟性、标准合规性、重复性、安全性四大原则, 完全贴合车辆真实行驶、启停、户外静置等全场景运行环境, 确保测试数据真实有效, 同时保障试验过程安全可控、结果可复现。(2) 测试前期准备: 正式测试前需完成全流程准备工作, 筛选状态完好、批次合格的测试样品, 结合应用场景设定精准工况参数, 完成测试设备校准调试, 依据对应行业标准制定规范化、针对性的试验方案。(3) 通用测试流程: 行业通用测试流程标准化程度高, 依次为样品预处理、环境应力加载、全过程性能参数监测、试验后专项检测, 最后完成失效判定、数据整理与记录, 通过全流程管控精准评估元器件可靠性与环境适配能力。

2 车载电子元器件环境可靠性测试试验

2.1 测试样品与试验设备

(1) 测试样品选型: 本次测试选取车载系统高频使用的核心电子元器件作为测试对象, 主要包括车载传感器、主控MCU、贴片电容、精密电阻等关键器件。试验前统一明确所有样品的生产批次、额定电气参数、规格型号及整车装配状态, 剔除存在外观瑕疵、参数偏差的不合格样品, 保证测试样品具备普遍性与代表性, 贴

合实际车载应用场景。(2)核心试验设备:为匹配车规级全维度可靠性测试需求,配置全套专业试验设备,核心设备包含高低温试验箱、湿热交变试验箱、高频振动试验台、盐雾试验箱以及高精度电性能测试仪。各类设备分别对应温度、湿度、机械应力、腐蚀环境及电气性能检测,可全面覆盖车载元器件单项及复合环境试验需求^[2]。(3)设备校准与试验环境控制:测试前严格按照车规标准完成所有试验设备的精度校准,确保设备温度、湿度、振动频率、盐雾浓度等核心参数误差控制在规范允许范围内。同时统一试验室基准环境,固化温湿度、气压等基础条件,消除环境变量对试验结果的干扰,保障测试的规范性与准确性。

2.2 单项环境可靠性测试试验

(1)高低温及温度循环测试:依据车载工况特点,设定-40℃~85℃的典型车载温度区间,分别开展高低温恒温耐久测试与温度交变循环测试。试验过程中持续监测元器件电压、电阻、信号响应等电性能参数,排查极端温度与温变工况下的参数漂移、功能异常等问题,验证器件温度适应性。(2)湿热耐久测试:模拟车辆梅雨天气、密闭舱体潮湿等工况,搭建高湿恒定环境与温湿度交变环境,开展湿热耐久试验。重点验证元器件防潮、抗老化性能,试验后精准检测器件绝缘电阻、工作稳定性,排查受潮引发的绝缘下降、内部短路、性能衰减等失效隐患。(3)机械振动与冲击测试:依托振动试验台模拟车辆行驶过程中路面颠簸、启停冲击、高速抖动等真实机械工况,对元器件进行持续振动与瞬时冲击测试。聚焦检测器件封装结构、焊接点位、接口连接的稳定性,排查结构松动、焊点脱落、接触不良等机械失效问题。(4)盐雾腐蚀测试:针对户外行驶、沿海高盐雾行车场景,开展盐雾腐蚀试验,模拟长期盐雾侵蚀环境。重点检测元器件金属引脚、外壳封装、焊接部位的抗腐蚀能力,验证器件在复杂户外环境下的耐久性能,规避腐蚀引发的电路故障与器件失效^[3]。

2.3 多环境耦合可靠性测试

(1)温湿度+振动耦合测试方案:区别于单一环境测试,耦合试验还原车辆行驶中最常见的复合工况,搭建高温高湿与持续振动叠加的试验环境,模拟夏季高温、雨天高湿伴随路面振动的真实行车状态,更贴合元器件实际工作受力环境。(2)耦合试验数据采集:试验全过程实时采集元器件核心运行参数,包括工作电压、工作电流、信号响应精度、输出稳定性等数据,完整记录复合应力下的性能变化情况,并与单项环境测试数据进行横向对比,梳理性能差异特征。(3)耦合工况下可靠性

变化规律:通过多组耦合试验数据,分析温湿度与振动复合应力对元器件的协同破坏效应,总结器件性能衰退速率、参数偏移规律,精准识别复合工况下的主要失效触发条件,弥补单项测试无法覆盖的可靠性缺陷。

2.4 测试结果判定与数据整理

(1)车规级失效判定标准:严格依据车规标准界定失效类型与判定依据,主要包含器件功能完全失效、电气参数超出额定误差范围、封装结构开裂或变形、绝缘性能失效四类核心失效形式,任一指标不达标即可判定为样品试验失效。(2)试验数据统计与整理:试验结束后对所有单项、耦合测试数据进行分类汇总,统计合格、失效样品数量及占比,梳理不同工况下的失效问题,绘制元器件性能随环境应力变化的趋势曲线,直观呈现器件可靠性变化特征。(3)测试重复性与误差分析:针对试验过程开展误差溯源分析,排查设备精度偏差、人工操作差异、环境小幅波动等干扰因素,通过多组重复试验验证数据重复性,剔除异常数据,确保最终测试结果真实、有效、具备参考价值。

3 车载电子元器件典型失效分析与优化方案

3.1 常用失效分析技术与流程

(1)宏观形貌观测:宏观形貌观测是元器件失效分析的基础手段,主要通过目视观察、高清摄像等方式,对失效元器件开展全方位外观检测。重点排查器件外观缺陷、封装破损、裂纹缺损、引脚氧化腐蚀、变形脱落等宏观失效特征,快速初步判定失效类型,为后续精细化分析提供基础判断依据,高效筛选明显结构性失效问题。(2)微观表征分析:针对宏观观测无法定位的细微失效问题,采用高精度微观检测技术开展表征分析。依托金相显微镜、扫描电镜观测、能谱分析等专业设备,深入观察元器件内部结构、焊点微观形貌、材质成分变化,精准定位微观裂纹、材质劣化、杂质富集等隐蔽失效点位,明确微观层面的损伤特征。(3)电性能复测与故障溯源:在形貌检测基础上开展电性能复测与电路系统性检测,对比失效器件与完好器件的电气参数差异,排查电压、电流、信号精度等参数异常问题。结合外观、微观检测结果层层溯源,排除偶然故障,精准锁定元器件失效的根本诱因,完成故障归因分析。

3.2 不同环境应力下元器件典型失效模式与机理

(1)温度应力失效:车载高低温交替、极端温变环境易引发温度应力失效。元器件各结构材料热膨胀系数存在差异,温度循环过程中会产生反复热机械应力,造成焊料热疲劳开裂、封装壳体热变形。同时,长期温度冲击会导致半导体器件阈值电压漂移,内部芯片持续老

化,最终引发器件性能衰减、功能失效。(2)温湿度应力失效:高温高湿及湿热交变环境易诱发温湿度耦合失效。水汽可通过封装缝隙渗透至器件内部,造成器件受潮漏电,内部金属结构发生氧化腐蚀。同时,水汽会破坏封装结合界面,引发封装分层、脱胶问题,导致元器件绝缘介质老化,绝缘性能持续衰减,严重时引发短路故障^[4]。(3)机械应力失效:车辆行驶产生的振动、冲击机械应力,会持续作用于车载元器件。长期机械载荷易造成元器件引脚疲劳断裂、焊接焊点脱落、器件安

装位置偏移,引发电路虚接、接触不良等问题。此类失效具有隐蔽性、间歇性特征,易导致车载电气系统偶发故障,影响整车运行稳定性。(4)盐雾环境失效:在沿海、户外行驶场景中,盐雾电解质会附着于元器件表面,引发电化学腐蚀反应。长期侵蚀会造成金属引脚锈蚀、电极腐蚀损耗,直接导致器件接触电阻大幅增大,电路导通性能下降,严重时会出现线路断路、器件开路失效,彻底丧失工作能力。

3.3 车载元器件环境测试失效数据对比分析

表1 车载电子元器件不同环境测试失效情况对比表

测试项目	典型失效模式	失效占比	核心失效机理	风险等级
温度循环测试	焊点开裂、参数漂移	42%	材料热膨胀系数不匹配引发热机械疲劳	高
湿热测试	绝缘下降、漏电	28%	水汽侵入封装引发介质老化、离子迁移	中高
振动测试	引脚断裂、虚焊脱落	18%	持续机械振动引发结构疲劳损伤	中
盐雾测试	金属腐蚀、开路	12%	盐雾电解质引发电化学腐蚀	中

3.4 可靠性优化改进方案

(1) 器件选型优化:依据车身、底盘、动力舱等不同车载工况区域的环境特征,差异化选型元器件。针对高温、高振动、高腐蚀区域,优先选用耐高温、抗振动、耐腐蚀的高阶车规级元器件,从源头适配车载复杂环境,降低器件失效概率。(2) 工艺优化:优化元器件焊接与封装生产工艺,改进焊料配比与焊接参数,提升焊点抗热疲劳性能。同时升级封装材质与封装工艺,强化封装密封性与结构稳定性,有效提升器件防潮、抗温变、抗机械冲击的综合能力。(3) 防护设计优化:结合整车装配结构优化防护设计,为关键元器件增设防水、防震、防腐防护结构。合理规划元器件布局,避开高温、高振动、易腐蚀的高危区域,减少极端环境应力对器件的直接作用^[5]。(4) 测试体系优化:完善单一环境测试与多环境耦合测试机制,模拟真实车载复合工况开展可靠性试验,提前筛查器件潜在失效缺陷,实现元器件可靠性前置管控,持续优化车载电子系统整体稳定性。

结束语

本文系统完成车载电子元器件环境可靠性测试与失

效分析工作,明确了不同环境应力下器件的失效占比、模式及作用机理,验证了多环境耦合工况对元器件的协同破坏效应。研究证实温度、湿热、机械振动等应力是器件失效的关键因素。本次提出的选型、工艺、防护及测试体系优化方案,可有效改善元器件环境适应性,规避车载工况下的常见故障,对车载电子元器件量产质检与可靠性升级具备实际工程应用价值。

参考文献

- [1]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,2022,9(16):76-79.
- [2]吴俊.电子元器件可靠性试验[J].电子技术与软件工程,2023,10(23):89-92.
- [3]张光强.失效电子元器件分析方法[J].数字通信世界,2021,17(1):120-121.
- [4]柳思泉.浅谈电子元器件的失效机理[J].电力设备管理,2021,31(7):205-208.
- [5]刘建清.电子元器件技术发展与失效分析[J].电子元器件与信息技术,2023,4(3):118-120.