

车规级产品封装测试机电系统可靠性验证与方法研究

马 冰

江西万年芯微电子有限公司深圳分公司 广东深圳 518000

摘要：车规级产品作为汽车电子系统的核心组成，其封装测试质量直接决定汽车行驶安全与使用寿命。车规级产品封装测试机电系统需在极端环境、长周期运行中保持稳定性能与精准测试能力，可靠性验证是保障系统服役质量的关键环节。本文聚焦车规级产品封装测试机电系统可靠性研究，系统分析严苛工况下的性能稳定性要求、长周期高负荷运行失效风险、测试精度与一致性保证难题等核心挑战；构建基于失效模式分析的验证规划、多应力耦合加速寿命试验、边界条件测试的可靠性验证体系；提出关键部件退化监测评估、薄弱环节识别强化、基于验证数据的可靠性增长等综合提升方法，为车规级封装测试机电系统的可靠性设计与验证提供技术支撑，助力汽车电子产业高质量发展。

关键词：车规级封装测试；机电系统；可靠性验证；加速寿命试验

随着新能源汽车与智能网联汽车的快速发展，汽车电子在整车中的占比持续提升，车规级产品的性能与可靠性直接关系到整车安全、续航与智能化水平。车规级产品封装测试机电系统作为保障产品出厂质量的核心装备，承担着芯片封装完整性检测、电气性能测试、机械可靠性验证等关键任务。与消费电子封装测试设备不同，车规级产品需满足-40℃至155℃的极端温度范围、长达15年以上的使用寿命、复杂路况下的抗振动冲击等严苛要求，这对封装测试机电系统的可靠性提出了极高标准。当前，部分封装测试机电系统存在极端环境适应性不足、长周期运行稳定性欠佳、批量测试一致性偏差等问题，制约了车规级产品质量管控效率。因此，深入分析系统可靠性挑战，构建科学完善的验证体系，探索高效的可靠性提升方法，对于强化车规级产品质量保障、推动汽车电子产业安全可控发展具有重要现实意义。

1 车规级封装测试系统的可靠性挑战

1.1 严苛工况下的系统性能稳定性要求

汽车行驶环境的复杂性决定了车规级产品必须耐受极端且多变的工况，这一要求直接传导至封装测试机电系统的性能稳定性标准。车规级产品需在高低温交替、高湿、强振动、电磁干扰等多因素叠加的环境中保持功能正常，封装测试机电系统作为产品质量的核心检验装备，自身必须具备更优的环境适应性。高温环境下，系统电子控制模块、功率器件易出现参数漂移，机械传动部件的润滑性能下降，导致运动精度波动；低温环境可能造成密封材料硬化、电路接口接

触不良，影响信号传输稳定性。汽车行驶过程中的振动与冲击会通过测试环境传递至机电系统，引发精密运动平台共振、传感器检测误差增大。此外，测试现场的电磁干扰可能干扰系统控制信号与测试数据传输，引发误判。这些严苛工况对机电系统的材料选择、结构设计、抗干扰能力提出了极高要求，如何在复杂环境中保持性能稳定成为核心可靠性挑战。

1.2 长周期高负荷运行的失效风险

车规级产品的使用寿命通常要求达到10年以上或百万公里行驶里程，对应的封装测试机电系统需具备长周期、高负荷的连续运行能力。在大规模量产场景下，机电系统每天需完成数千甚至数万次的测试循环，核心部件长期处于高频次工作状态。机械传动部件如线性导轨、滚珠丝杠等在持续往复运动中，会产生渐进式磨损，配合间隙逐渐增大，导致运动精度退化；伺服电机、步进电机等动力部件长期高负荷运行，会出现绕组老化、轴承磨损等问题，影响动力输出稳定性。电子部件方面，功率模块、电容、电阻等在长期通电状态下，会因电应力、热应力累积出现性能衰减，甚至突发失效。长周期高负荷运行导致的部件疲劳、老化与磨损具有累积效应，初期可能仅表现为性能微小波动，若未及时监测与干预，极易引发系统功能失效，影响测试工作连续性与产品质量判断准确性^[1]。

1.3 测试精度与一致性的保证难题

车规级产品对电气性能、机械尺寸的精度要求极高，

封装测试机电系统的测试精度直接决定产品合格判定的准确性。在批量测试过程中，系统需在不同时间、不同环境条件下保持稳定的测试精度，确保所有产品的判定标准一致。然而，多种因素会导致测试精度波动与一致性下降：环境温度变化会引起测试夹具、传感器的热变形，导致测量基准偏移；长期运行造成的部件磨损会使运动定位精度、检测灵敏度下降；测试信号传输过程中的干扰会导致数据采集误差，影响测试结果准确性。此外，批量测试中产品的微小个体差异与测试工位的细微偏差，若未通过系统自身的精度补偿机制修正，会进一步放大测试一致性偏差。如何在复杂环境与长期运行中，持续保证测试精度与一致性，是车规级封装测试机电系统面临的关键技术难题。

2 机电系统可靠性验证的体系构建

2.1 基于失效模式的分析与验证规划

基于失效模式的分析是可靠性验证体系的基础，通过全面识别系统潜在失效风险，为验证规划提供科学依据。首先梳理机电系统的核心部件、功能模块与工作流程，明确各环节的失效形式与影响后果。针对机械系统，重点分析传动部件磨损、结构件疲劳开裂、密封失效等失效模式；针对电子系统，聚焦芯片过热损坏、电路短路、传感器失灵等失效场景；针对控制系统，关注信号传输延迟、程序逻辑错误等失效风险。结合失效模式的发生概率、严重程度与检测难度，建立风险优先级评估体系，确定重点验证对象与验证优先级。基于深入细致的分析结果，精心制定具有针对性的验证规划，详尽地明确各个验证项目的具体测试指标、科学合理的测试方法、充足的样本数量以及严谨的判定标准。这一规划旨在确保验证工作能够全面覆盖所有潜在的高风险失效模式，从而有效防范和降低风险。同时，在制定规划的过程中，充分考虑验证工作的效率与成本控制，力求在保证验证效果的前提下，优化资源配置，避免不必要的浪费。通过这一系列周密安排，最终形成一套既科学又合理的验证框架，为后续的验证工作提供坚实的指导基础^[2]。

2.2 多应力耦合的加速寿命试验设计

加速寿命试验是缩短验证周期、快速评估系统可靠性的关键手段，多应力耦合设计能够更真实模拟实际运行工况。结合车规级产品的服役环境，选取温度、振动、电应力作为核心应力因素，设计多应力耦合试验方案。温度应力采用高低温循环模式，覆盖 -40℃至 155℃的极端温度范围，

模拟不同气候条件与行驶状态下的温度变化；振动应力参考汽车行驶过程中的振动频谱，设置不同频率与幅值的随机振动，模拟路况对系统的影响；电应力根据系统工作电压与负载特性，设置额定电压、过载电压等不同应力等级，模拟电力供应波动的影响。通过正交试验设计，合理组合各应力因素的强度与作用时间，避免单一应力试验无法反映实际工况的局限性。在试验进行的过程中，采取了一系列严谨的措施，其中包括对系统性能参数进行实时的监测，以及对各个部件状态变化的细致跟踪。同时，详细记录了每一次失效发生的确切时间点，以及对应的失效模式，确保数据的完整性和准确性。随后，利用这些收集到的数据，通过科学的数据拟合分析方法，深入探究系统的寿命分布规律。基于这些分析结果，能够快速且准确地评估出系统在长期运行状态下的可靠性水平，为后续的优化和改进提供有力的数据支撑^[3]。

2.3 系统功能与性能的边界条件测试

边界条件测试旨在验证机电系统在极限工况下的功能完整性与性能稳定性，是可靠性验证的重要环节。围绕系统运行的关键边界参数，制定全面的测试方案。在环境边界测试方面，模拟极端高温、高湿、盐雾等极限环境条件，测试系统的启动性能、运行稳定性与恢复能力，验证系统对极端环境的适应性。在负载边界测试方面，通过调整测试批量、测试频率，模拟最大负荷运行状态，评估系统在高负荷下的持续工作能力与性能衰减规律。在精度边界测试方面，针对系统的最小测量单位、最大测试范围等精度指标，在不同环境与负载条件下进行反复测试，验证精度保持能力。此外，还需开展故障注入测试，通过模拟部件故障、信号干扰等异常场景，验证系统的故障诊断能力与容错性能。边界条件测试能够全面暴露系统在极限工况下的潜在问题，为可靠性设计优化提供精准依据。

3 系统可靠性的综合评估与提升方法

3.1 关键部件的退化状态监测与评估

关键部件的退化状态直接影响系统整体可靠性，建立全生命周期监测与评估机制是提升可靠性的基础。针对机械传动部件，部署位移传感器、振动传感器、扭矩传感器等设备，实时采集运动精度、振动幅值、传动效率等数据，通过数据分析模型评估部件磨损程度与剩余使用寿命。针对电子部件，监测电压、电流、温度等参数，分析性能衰减趋势，预判潜在失效风险。例如，某车规级封装测试设备企业通过

在滚珠丝杠与伺服电机上部署监测传感器，实时采集运行数据，建立退化评估模型，成功提前预警 30% 以上的部件潜在失效，避免了系统停机故障。为了构建关键部件的退化数据库，需要收集并整合监测数据，这些数据来源于对关键部件运行状态的实时监测。通过对这些数据的深入分析，可以总结出关键部件的退化规律，这些规律对于后续的维护策略制定和产品设计优化具有重要意义。通过这种方式，可以实现从传统的被动维修模式向主动预警模式的转变，从而提高设备的可靠性和稳定性，降低维护成本，延长设备的使用寿命。

3.2 系统薄弱环节的识别与强化设计

通过可靠性验证数据与运行数据的综合分析，精准识别系统薄弱环节，针对性开展强化设计。针对验证过程中暴露的结构刚度不足问题，优化结构设计，采用高强度、抗疲劳材料，增加关键部位的支撑强度，减少振动与变形影响；对于密封性能不佳的部件，更换耐高低温、抗老化的密封材料，优化密封结构设计，提升环境适应性。针对电子系统抗干扰能力不足的问题，采用屏蔽设计、滤波技术优化电路布局，减少电磁干扰影响；对于控制算法存在的响应延迟问题，优化程序逻辑，提升系统动态调节能力。某企业在可靠性验证中发现，测试夹具的热变形是影响测试精度的薄弱环节，通过采用陶瓷基复合材料替代传统金属材料，并增加主动控装置，使夹具热变形量降低 60%，测试精度稳定性显著提升。通过薄弱环节的识别与强化，系统性提升系统整体可靠性水平。

3.3 基于验证数据的可靠性增长措施

基于可靠性验证过程中积累的测试数据、失效模式分析结果，制定针对性的可靠性增长措施，形成“验证-分析-优化-再验证”的闭环提升机制。建立验证数据共享平台，整合失效模式、应力条件、性能衰减等多维度数据，通过统计分析挖掘可靠性提升关键点。针对验证中发现的共性问题，优化系统设计方案，修订设计规范与工艺标准，避免同类问题重复出现；对于部件层面的失效问题，与供应商联合开展技术攻关，提升部件自身可靠性。同时，基于验证

数据优化维护策略，制定差异化的维护周期与维护内容，对于易退化部件缩短维护周期，加强监测力度；对于高可靠性部件适当延长维护周期，降低维护成本。某车规级封装测试设备企业通过三轮“验证-优化”循环，基于验证数据持续优化系统结构与部件选型，使设备平均无故障工作时间提升 80%，可靠性水平显著增长。

4 结语

车规级产品封装测试机电系统的可靠性直接关系到汽车电子产品与整车行驶安全，是汽车电子产业高质量发展的重要保障。通过系统分析车规级封装测试机电系统面临的严苛工况性能稳定性要求、长周期高负荷运行失效风险、测试精度与一致性保证难题，明确了可靠性提升的核心方向；构建了基于失效模式分析的验证规划、多应力耦合加速寿命试验、边界条件测试的可靠性验证体系，为系统可靠性评估提供了科学方法；提出了关键部件退化监测评估、薄弱环节识别强化、基于验证数据的可靠性增长等综合提升方法，为系统可靠性优化提供了实践路径。这些验证体系与提升方法的应用，能够有效提升车规级封装测试机电系统的环境适应性、长周期运行稳定性与测试精度一致性，为车规级产品质量管控提供坚实支撑。在汽车电子产业快速发展的背景下，持续强化封装测试机电系统的可靠性设计与验证，将进一步推动车规级产品质量升级，助力汽车产业向安全、可靠、智能的方向发展，为我国新能源汽车与智能网联汽车产业的核心竞争力提升奠定坚实基础。

参考文献：

- [1] 吴津丞. 镀钯铜合金线在 Grade0 汽车电子封装键合中的应用研究 [D]. 上海交通大学, 2020.
- [2] 回晓双, 宁圃奇, 范涛, 等. EconoDUAL 封装, 母线电压 800V 的 1200 A IGBT 功率模块设计与开发 [J]. 电源学报, 2024, 22(3):72-77.
- [3] 佚名. 兆易创新 GD5F 全系列 SPI NAND Flash 通过 AEC-Q100 车规级认证 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2022(4).