

机械电子产品的可靠性设计与实验研究

范 雷

阿克苏地区第一人民医院 新疆 阿克苏 843000

摘 要：FMEA方法通过系统化的失效模式识别、风险量化与闭环改进，为机械电子产品可靠性设计提供结构化框架。其融合仿真、实验与数据监测技术，显著提升复杂系统的失效预防能力。综合机械与电子设计的共性需求，强调从系统架构到细节参数的全流程可靠性保障，为复杂机电产品的高效开发与稳定运行提供支撑。

关键词：机械电子产品；可靠性设计；实验

机械与电子可靠性设计的共性原则，强调从理论建模到实验验证的全流程闭环管理，为复杂系统的高可靠运行提供保障。技术的发展，标志着机械电子产品从经验驱动设计向数据驱动的全生命周期可靠性管理转型，为高端装备制造提供核心保障。

1 机械电子产品可靠性设计基础

(1) 可靠性设计核心理论。定义与目标。可靠性设计旨在通过系统性方法将可靠性“植入”产品全生命周期，涵盖机械与电子系统的失效预防、容错能力提升及寿命预测。其核心指标包括平均故障间隔时间 (MTBF) 和安全系数计算，需结合数学模型 (如串联/并联模型) 进行定量分析。数学基础。基于载荷-强度干涉理论，分析外界应力 (如机械振动、温度冲击) 与材料/部件强度分布的统计关系，通过安全裕度 (SM) 和载荷粗糙度 (LR) 量化失效概率。

(2) 关键设计准则与方法。冗余与容错设计。对关键功能模块 (如电源、传感器) 采用并行配置，确保局部失效时系统仍能正常运行。机械结构设计中引入多路径传力机制，避免单点失效引发整体崩溃。降额与环境防护设计。电子元件遵循降额准则 (如电压/电流低于额定值80%)，延长使用寿命。采用密封结构、抗腐蚀涂层等措施应对高低温、盐雾等恶劣环境。失效预测与预防。通过失效物理模型 (PoF) 和有限元分析 (FEA) 识别潜在失效点 (如焊接疲劳、轴承磨损)，优化设计参数。实施ESD防护设计，减少静电放电对MOS器件等敏感元件的损伤。

(3) 可靠性实验体系。实验分类。环境适应性试验：包括高低温循环 (-40℃至+85℃)、湿热交变 (85%RH)、盐雾测试 (5%NaCl溶液) 等，验证材料耐候性。机械应力试验：模拟振动 (正弦/随机频谱)、冲击 (峰值加速度50g) 等工况，评估结构完整性。加速寿命试验：利用温度-湿度-振动综合应力加速老化，推算

MTBF指标。标准化流程。预处理阶段：样品清洁与功能基线测试 (如电气性能、机械精度校准)。多应力加载：分阶段施加复合应力 (如高温与振动同步)，模拟实际工况的耦合效应。失效反馈迭代：通过根本原因分析 (RCA) 优化设计或工艺，形成闭环改进机制。

(4) 技术与工程应用。数字化融合技术。结合有限元分析 (FEA) 和计算流体力学 (CFD) 预测试验结果，减少实物验证次数。嵌入式传感器实时监测应力-应变、温升等参数，利用机器学习预测剩余寿命。行业实践案例。船用机械公司通过动态参数监测和故障树分析，将港口起重机电控系统故障率降低40%。国防技术领域沿用AGREE报告的可靠性标准，强化舰载设备的振动与电磁兼容性 (EMC) 试验。

2 机械电子产品可靠性设计基本原则

(1) 冗余与容错设计。冗余配置：对关键功能模块 (如电源、传感器、控制电路) 采用并行或备份设计，确保局部失效时系统仍可正常运行。容错机制：通过多路径传力结构 (机械) 或故障检测算法 (电子) 实现失效隔离与功能切换，降低单点故障对系统的影响。

(2) 简化设计与模块化。结构简化：减少零件数量和复杂度，降低因装配误差或零件失效引发的系统性风险。模块化设计：将系统划分为独立功能模块，便于维护、更换及升级，同时提高设计灵活性与通用性。

(3) 环境适应性设计。材料选择：结合工况 (如温度、湿度、腐蚀性介质) 选用耐候性材料，如抗盐雾涂层或高温合金。防护措施：采用密封结构、电磁屏蔽 (EMC) 或散热设计，抵御外部应力 (振动、温变、静电放电) 对系统的干扰。

(4) 预防性设计与参数优化。失效预防：基于失效物理模型 (PoF) 和有限元分析 (FEA) 预判潜在失效点 (如焊接疲劳、轴承磨损)，针对性优化设计参数。降额设计：对电子元件施加低于额定值的电压/电流 (如

80%额定值), 延长使用寿命并降低热应力损伤。

(5) 可维护性与耐久性设计。维护便捷性: 优化机械装配布局和接口标准化, 缩短维修时间; 电子设备预留测试端口, 便于故障诊断。寿命预测: 通过加速寿命试验(如温湿度-振动三综合测试)推算MTBF, 验证设计耐久性。

(6) 需求导向与持续改进。需求明确化: 在设计初期明确可靠性指标(如故障率、使用寿命), 并将其分解至子系统与零部件层级。迭代优化: 结合实验数据与用户反馈(如现场故障记录)持续改进设计, 形成闭环可靠性管理。

3 机械电子产品失效模式与影响分析方法(FMEA)

(1) FMEA的核心目标与分类。核心目标。识别产品/过程中潜在的失效模式及其对性能的影响, 探究失效机理并提出预防措施, 按风险等级(严重度、频度、探测度)排序改进优先级。分类。设计FMEA(DFMEA): 针对产品设计阶段, 分析潜在失效模式(如机械结构断裂、电子元件短路)及其对功能的影响, 优化设计方案。过程FMEA(PFMEA): 聚焦制造/装配过程, 识别工艺缺陷(如焊接不良、装配应力)导致的失效, 提升生产稳健性。系统FMEA: 适用于复杂机电系统, 分析子系统间的交互失效(如机械振动引发电路接触不良)。

(2) FMEA实施步骤。定义分析对象。明确分析范围(如PCBA组件、机械传动部件), 结合功能需求与使用环境确定边界条件。识别潜在失效模式。基于历史数据与仿真分析, 列举典型失效模式(如焊点开裂、轴承磨损、电磁干扰)。分析失效原因与影响。机械失效: 机械应力(振动、冲击)导致结构疲劳断裂; 电子失效: 静电放电(ESD)、温升引发元件参数漂移。评估失效后果的严重度(如功能丧失、安全风险)。量化风险与优先级排序。通过风险优先数($RPN = \text{严重度}(S) \times \text{频度}(O) \times \text{探测度}(D)$)排序改进措施。制定改进措施。设计优化: 采用冗余结构(双电源)、降额设计(电子元件80%额定值)降低失效概率; 工艺控制: 优化焊接参数(温度、时间)减少PCBA机械应力损伤。

(3) 关键分析工具与技术。失效模式分类工具。按功能(性能下降、功能丧失)、时间特征(渐进失效、间歇失效)、损伤机理(疲劳、腐蚀)分类, 提升分析效率。数据驱动方法。动态参数监测: 通过嵌入式传感器实时采集应力-应变、温升数据, 结合机器学习预测剩余寿命; 虚拟样机仿真: 利用有限元分析(FEA)模拟机械振动对电子元件的影响, 减少实物试验次数。实验验证。机械应力测试: 振动台模拟实际工况(50g冲击、随

机频谱振动), 验证结构可靠性; 环境适应性测试: 盐雾试验(5%NaCl溶液)、高低温循环(-40℃至+85℃)评估材料耐候性。

(4) 行业应用案例。PCBA机械应力失效控制。通过FMEA识别焊接过程应力集中点, 优化ICT测试参数, 使某型号工控设备焊点开裂率降低60%。港口起重机可靠性提升。采用DFMEA分析电控系统失效模式(如传感器漂移), 引入冗余电路与动态监测技术, 故障率下降40%。电子元件寿命预测。结合加速寿命试验(温度-湿度-振动三综合)与失效物理模型(PoF), 精准预测电阻器阻值漂移趋势。

4 机械电子产品可靠性设计方法与技术

(1) 可靠性设计方法。冗余与容错设计。对关键模块(如电源、传感器)采用并行配置或备份机制, 确保单点失效不影响系统整体功能, 例如双电源冗余、多路径传力结构设计。通过故障检测算法(电子)或机械失效隔离技术实现容错, 降低故障扩散风险。降额设计。电子元件工作参数(电压、电流、功率)低于额定值的80%, 降低热应力与老化速率。机械部件采用安全系数(如1.5倍最大载荷)设计, 避免过载失效。环境适应性设计。机械部件选用耐腐蚀材料(如抗盐雾涂层), 电子设备采用密封结构(IP67)和电磁屏蔽(EMC)设计, 抵御高低温、湿度、振动等环境应力。通过热仿真优化散热路径(如铜基板散热器), 降低温升对电子元件寿命的影响。

(2) 可靠性分析技术。应力-强度干涉理论。基于概率统计方法, 分析机械载荷(振动、冲击)与材料强度的分布关系, 计算安全裕度(SM)以量化失效概率。电子系统结合PoF(失效物理)模型, 预测焊点疲劳、芯片热失效等机理。系统可靠性建模。采用串联/并联/冗余系统模型(如可靠性框图)构建数学模型, 计算系统整体可靠度。例如:

串联系统可靠度:

$$R_{\text{系统}} = R_1 \cdot R_2 \cdot \dots \cdot R_n;$$

并联系统可靠度:

$$R_{\text{系统}} = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2) \dots (1 - R_n)。$$

动态仿真与实验验证。利用有限元分析(FEA)模拟机械振动对电子元件的应力分布, 优化结构设计。通过加速寿命试验(温度-湿度-振动三综合测试)验证设计耐久性, 推算MTBF指标。

(3) 关键防护技术。ESD防护设计。敏感器件(如MOS管)采用TVS二极管、接地屏蔽等措施, 防止静电放电(ESD)导致的突发性失效。遵循HBM(人体模

型)、CDM(带电器件模型)等标准设计防护电路。抗振动与冲击设计。机械结构采用阻尼减振(如橡胶垫)、应力分散设计(如弧形过渡)降低共振风险。电子模块通过灌封胶固定PCB,减少周期性振动引发的焊点开裂。

(4)测试与验证技术。环境适应性测试。执行盐雾试验(5%NaCl溶液)、高低温循环(-40℃至+85℃)等,验证材料与工艺的耐候性。机械应力测试。振动台模拟实际工况(如50g冲击、随机频谱振动),评估结构疲劳寿命。寿命预测技术。结合浴缸曲线分析电子设备的早期失效期、偶然失效期和损耗期,制定针对性维护策略。

5 机械电子产品可靠性实验研究与验证

(1)实验分类与核心目标。环境适应性验证。通过气候环境试验(如高低温循环、恒定湿热试验)模拟极端温湿度条件,验证机械结构与电子元件的耐候性,例如盐雾试验(5%NaCl溶液)评估抗腐蚀性能。化学环境测试(如气体腐蚀、霉菌试验)检验材料在复杂介质中的稳定性,防止因材料劣化导致功能失效。机械耐久性测试。采用振动台模拟实际工况(随机振动、正弦扫频),检测机械部件(如轴承、连接件)的疲劳寿命及电子模块(PCB焊点)的抗振性能。冲击与跌落试验(如半正弦波冲击、自由落体跌落)验证产品在运输或意外撞击下的结构完整性,例如手机跌落测试中屏幕与内部组件的抗冲击能力。寿命与失效机理分析。基于加速寿命试验(ALT),通过温湿度-振动三综合应力加速老化,预测产品MTBF(平均无故障时间),并定位薄弱环节(如电解电容容量衰减)。结合失效物理(PoF)模型与实验数据(如FEA仿真、微观形貌分析),明确失效模式(如金属迁移、焊点裂纹),指导设计优化。

(2)关键实验方法与技术。综合应力测试。三综合

试验(温度+湿度+振动)模拟复杂使用环境,例如车载电子设备需同时承受高温(85℃)、湿热(95%RH)与道路振动的影响。多应力叠加试验(如温度循环+机械冲击)快速暴露设计缺陷,缩短验证周期。动态性能监测技术。通过嵌入式传感器实时采集应力、温升、电流波动等参数,结合机器学习算法实现早期故障预警(如轴承异常振动识别)。高精度仪器(如高速摄像、红外热像仪)捕捉瞬态失效过程(如芯片热失控、连接器瞬断),提升失效分析准确性。标准与流程规范。遵循国际标准(如IEC 60068、MIL-STD-810)及行业规范(如GB/T 2423),确保实验条件与结果可比性。实验流程包括:样品筛选→应力加载→性能监测→数据分析→改进闭环,形成完整的可靠性验证体系。

(3)典型应用与验证案例。手术治疗类设备。通过盐雾试验(96小时)与随机振动(20-2000Hz)验证模块在人体体内环境下的可靠性,故障率下降35%。急救生命支持类设备。跌落试验(1.2m高度,6面3次)结合FEA仿真优化除颤仪外壳结构,屏幕碎裂率降低50%。车载医疗设备。三综合试验(-40℃~125℃温度循环+5-500Hz振动)验证ECU板级可靠性,焊点开裂问题减少80%。

总之,机械电子产品可靠性实验需融合环境适应性、机械耐久性及寿命分析等多维度验证,采用综合应力测试与动态监测技术精准定位失效机理。标准化流程与数据驱动方法(如加速试验、仿真优化)可显著提升验证效率,支撑复杂机电系统的高可靠性设计。

参考文献

- [1]郭宏.机械电子产品的可靠性设计与实验探讨.2022.
- [2]刘海英.浅谈机械电子产品的可靠性设计与实验研究.2023.