

Reliability Optimization Strategy in Electromechanical Fuze Design

Chengguang Guo¹ Shaoping Wang¹

1. Xi'an Institute of Mechanical and Electrical Information Technology, Xi'an, Shaanxi, 710065, China

Abstract

With the rapid development of military technology, the combat environment is becoming increasingly complex, and the reliability requirements for electromechanical fuses are becoming higher and higher. Therefore, conducting research on reliability optimization design methods for electromechanical fuses is not only of great significance for improving the comprehensive performance of weapon systems, but also in line with the development of modern military technology. In the design of electromechanical fuses, reliability is one of the most important performance indicators. From design, production to service and maintenance, reliability runs through the entire life cycle of the fuse. The reliability of fuses directly affects the hit rate and combat efficiency of weapon systems, as well as the personal safety of operators and the stability of weapon systems.

Keywords

electromechanical fuse; Design; Reliability; optimize

机电引信设计中的可靠性优化策略

郭晨光 王少平

西安机电信息技术研究所, 中国·陕西 西安 710065

摘要

随着军事科技的飞速发展, 作战环境日趋复杂, 对机电引信的可靠性要求越来越高。因此, 开展机电引信可靠性优化设计方法研究, 不仅对提高武器系统综合性能具有重要意义, 而且与现代军事科技发展相适应。在机电引信设计中, 可靠性是最重要的性能指标之一, 从设计、生产到服役、维护等全过程来看, 可靠性是贯穿于引信全寿命周期的全过程。引信的可靠性直接影响着武器系统的命中率与作战效率, 也影响着操作者的人身安全及武器系统的稳定。

关键词

机电引信; 设计; 可靠性; 优化

1 引言

为有效提升引信应用寿命与工作稳定性, 降低故障率, 探索一套科学的可靠性分析方法与优化策略尤为重要。从而保障武器系统高效率运行提供有力保障, 为当前相关行业热议课题。

2 机电引信设计中可靠性影响因素

2.1 复杂机电耦合环境下的多物理场交互

机电引信在应用过程中, 所处环境复杂, 多物理场相互作用是影响引信可靠性的一个重要因素。机电引信是一种新型的机电引信, 它是一种新型的机电引信。在复杂电磁环境中, 电子元器件产生的电磁场会干扰机械零部件的运

动, 造成机械零部件精度降低或运动不正常^[1]。同时, 机械零部件的振动、冲击也会影响电子元器件的稳定性, 造成信号畸变、短路、断路等故障。

2.2 微型化高集成度引发的应力集中与热失配

随着现代军事科技的不断进步, 电子机械引信正朝着小型化、集成化方向发展。这一趋势在提高引信性能、功能密度的同时, 也对可靠性提出新的要求。由于引信的小型化, 使得引信的机械结构、电子元器件更加紧凑, 同时由于空间的限制, 应力集中问题更加突出^[2]。在机械零件中, 疲劳裂纹极易在应力集中的部位产生, 并随时间的推移而扩展, 最终导致零件的失效。电子元器件小型化设计导致芯片与电路板高度集成, 受限空间内热量难以有效散发, 易造成热失配等问题。不同材料具有不同的热膨胀系数, 当温度发生变化时, 材料间的热膨胀不一致会产生应力集中, 从而影响电子元器件的电学性能及力学稳定性。另外, 高集成度的设计也导致引信内部的散热问题更为复杂, 局部过热可能导致器件性能退化, 甚至失效。

【作者简介】郭晨光(1992-), 男, 中国陕西咸阳人, 硕士, 助理研究员, 从事机电引信总体设计研究。

【作者简介】王少平(1992-), 男, 中国陕西咸阳人, 硕士, 工程师, 从事引信工艺设计及试制研究。

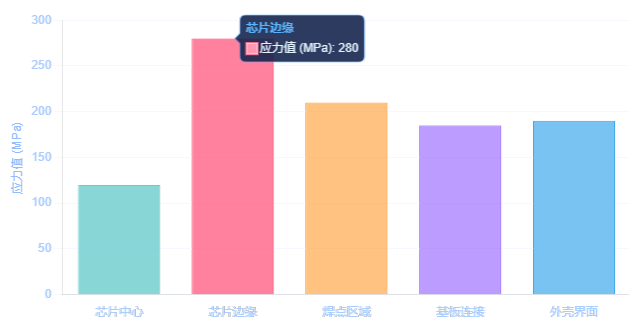


图1 应力集中与热失配分析

2.3 长期贮存期间化学—机械协同老化机理

长时间贮存过程中，机电引信受化学与机械因素共同作用，其共同老化机制是影响引信可靠性的重要因素之一。从化学角度讲，引信内的物质可能与空气中的氧、湿等发生化学反应，使其性能退化。如金属零件可能被氧化侵蚀，塑胶零件可能因老化而变脆。这些化学变化不仅影响材料的力学性能，而且可能引起器件绝缘性能的降低，从而增大短路的危险。从力学角度看，长时间的静应力及微小振动都可能影响引信的可靠性。长期受力的机械零部件可能产生疲劳损伤，而电子元器件在微振动作用下可能发生接触不良、焊点断裂等现象。化学与机械因素共同作用，可使引信加速老化，降低其使用寿命及可靠性。

2.4 极端发射与飞行冲击载荷的动态疲劳累积

机电引信在发射、飞行过程中将承受极强的冲击载荷，其动态疲劳累积是影响引信可靠性的一个重要因素。引信在发射过程中，将承受较大的加速度及冲击载荷，对其机械零件及电子元器件造成较大冲击。机械零件可能发生变形，开裂，甚至断裂，电子元器件可能发生焊点脱落，插脚断裂等现象。同时，引信在飞行过程中也会受到气动载荷的影响，这些载荷会随飞行姿态的变化而改变，这将进一步加剧引信动态疲劳累积。动态疲劳累积可引起材料性能退化，从而影响引信结构强度与可靠性。此外，在极端发射与飞行环境中，温度、振动、冲击等多因素耦合作用下，引信可靠性也会受到复杂影响。

3 机电引信设计中的可靠性优化策略

3.1 基于故障物理的健壮参数匹配与容差设计

基于故障物理原理的鲁棒参数匹配和容错设计需要从对引信核心部件失效机理的分析入手^[3]。应通过建立故障物理模型，明确不同工作状态下引信结构疲劳、元器件老化、电磁干扰引起的信号畸变等关键失效模式。综合运用热力学、电磁学等相关理论，建立引信各部件的材料性能、结构参数、应用环境等基础数据，建立故障物理方程，定量描述各部件的失效与参数变化之间的相关性。在确定引信失效模式的基础上，筛选出影响引信可靠性的关键设计参数，如弹簧弹性系数、电路电阻、传感器测试精度等。采用蒙特卡洛模拟、拉丁超立方抽样等方法，开展多维扰动实验，分析参

数波动对引信性能指标（触发精度、工作可靠度、抗干扰能力）的影响程度，确定参数灵敏度等级。在后续的鲁棒匹配中，将具有更高灵敏度的参数作为重点。下一步，实现鲁棒参数匹配，在此基础上，基于参数灵敏度分析结果，构建以平均无故障工作时间、任务成功概率等引信可靠度指标为目标函数、关键参数允许波动范围为约束条件的参数匹配优化模型。利用响应曲面和田口法联合优化敏感参数，调节参数之间的匹配关系，减小单一参数变化对系统性能的影响。如通过调节电路电阻和电容的匹配，消除因温度变化引起的时间常数漂移，提高引信计时精度的稳定度。

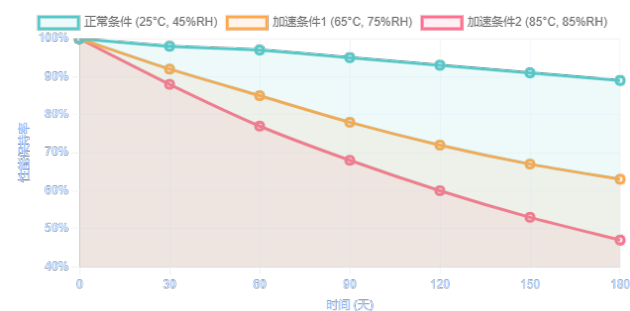


图2 加速退化试验与寿命评估

3.2 多层级冗余与自适应重构的容错架构

多级冗余容错体系结构设计需要从冗余层次划分出发，应明确引信系统层次结构，将其划分为核心功能层（触发控制、安全保障等）、副功能层（电源管理、信号传输等）以及环境感知层（加速度、磁场等）。根据各层功能的重要程度，确定冗余配置策略：核心功能层采用硬件冗余和软件冗余相结合的方法，辅助功能层采用软件冗余，环境感知层采用多传感器冗余配置。进行冗余单元的部署，在硬件冗余方面，核心模块需要配备双CPU结构和双电源供电等备用单元，以保证在主设备出现故障的情况下可以快速切换。备份单元需要和主单元在物理上隔离，以防止并发失效。软件冗余需要将指令校验、数据冗余存储、程序自修复等功能嵌入到核心控制程序中，通过反复计算和数据校验等方法来发现和纠正软件运行过程中出现的错误。多传感器冗余需要在不同原理、不同安装位置的传感器上配置，如时配置加速度、压电式等传感器，以降低单个传感器故障带来的感知失效风险。建立自适应重配置逻辑，采用分层故障检测和定位机制，通过实时监测各单元运行状态参数（电压、电流、信号完整度、响应时间等），建立故障特征库，实现对故障单元和故障类型的快速识别。在故障定位之后，按照预先设定的重配置策略，启动相应的重配置流程：如果是硬件设备失效，启动主备切换机制，断开失效单元的连接，启动备份单元，更新系统拓扑。如果是软件逻辑上的错误，则启动程序重置或重装模块，恢复正常工作流程。当传感器数据出现异常时，启动数据融合算法，将异常数据剔除，并根据有效传感数据对状态进行评估。

3.3 贮存—应用全周期加速退化试验与寿命评估

贮存-使用过程中的加速退化试验和寿命评估需要建立在全周期环境轮廓的基础上。需要对引信产品从制造到使用的整个生命周期进行梳理,包括储存(仓储、运输、储存)、服务处理(装卸、搬运)、服役(发射、飞行、目标动作)。在此基础上,通过采集贮存阶段的温湿度、振动频率、冲击加速度、气压、电磁辐射等环境参数,构建全周期环境参数矩阵,明确各个阶段的环境应力类型、幅值、持续时间和变化规律。进行加速退化实验的设计,选取影响引信性能退化的主要应力因素:温度、湿度、振动和电应力等。根据加速老化试验的原理,确定了恒应力加速、逐级加载和加速加载的方法。为保证应力水平高于实际服役环境,又不会产生新的破坏模式,需要进行理论计算。在此基础上,开展以下研究工作:(1)确定测试样本量及监测参数;(2)研究引信性能参数(触发灵敏度、信号传输率等)与退化特性参数(电阻值变化、结构形变)。然后,进行加速老化实验和数据收集,根据试验方案,将引信试件置于加速加载环境下,利用传感器实时获取其性能参数及劣化参数,并记录其随时间的变化规律。在试验过程中,需要定期检测试样的性能,直到试样发生故障或性能指标在容许范围内为止。同时,需要对测试环境的稳定性进行严格的控制,以避免非目标应力对测试结果的影响,保证测试结果的准确与可重复性。实验完成后,对原始数据进行预处理,剔除异常值,再经过数据平滑和归一化处理,得到归一化的降质轨迹数据。

3.4 智能传感与在线诊断融合的预测性维护

智能感知和在线诊断相融合的预测维护需要从构建感知系统入手针对引信结构特点及任务要求,采用基于分布式智能传感器网络的方案。传感器的种类要涵盖力学、电子和环境等多个方面,如用于监测结构应力的应变片,用于检测电子元件工作温度的温度传感器,用于检测电路运行状态的电流传感器,用于检测机械运动稳定性的振动传感器。为满足引信在狭小空间和苛刻环境下的安装要求,传感器必须小型化,低功耗,抗干扰。同时,还需要在传感器上加装

数据预处理模块,对信号进行滤波、放大和A/D转换,以保证采集到的数据真实有效。构建实时数据的传输和存储机制;感知数据需要通过有线(如排线)或无线(如短程射频)传输到引信中枢,在传输过程中需要对数据进行加密校验,以防止数据丢失或被篡改。中央处理单元需要具有数据缓存功能,用于暂时存储实时数据,并且按照预定的周期向地面监测系统(适用于可回收引信)或者内建内存(适用于一次性引信)。为方便后续的故障诊断分析,需要对数据的存储格式进行标准化,包括时间标记、传感器标识和参数值等关键信息。建立在线诊断模型,在线诊断需要分为两个层次,一是实时监控,二是报警。实时状态监测是指通过设置一定的参数阈值,实时地对传感器数据进行比对,当参数超过正常值时,就会触发一次报警。基于支持向量机、神经网络等机器学习算法对模型进行训练,提取故障特征模式。该模型需要具有实时更新的能力,并在在线学习的基础上持续优化故障辨识的准确性,在参数没有超出临界值而呈现异常变化趋势的情况下,能够及时发出预警。

4 结语

综上,在机电引信设计中进行可靠性优化策略研究是具有重要意义,系统地分析并优化引信设计的可靠性,能有效地提高引信的应用寿命、抗干扰能力及环境适应能力,进而提高武器系统的综合战斗力。未来,随着新材料、新工艺、新工艺的不断出现,引信可靠性优化的可能性越来越大,要进一步完善引信可靠性设计理论与方法,促进引信技术在现代军事科技发展中的应用。

参考文献

- [1] 王发林,施坤林,汪仪林,宁波.评价机电引信设计安全性的基本要素[J].探测与控制学报,2025,47(01):33-40.
- [2] 刘伟钊,李蓉.基于性能退化的机电引信部件贮存寿命评估方法[J].探测与控制学报,2022,44(03):17-21.
- [3] 武澎,王森,马兵,井会锁,刘奇.机电引信滚动轴承外圈局部磨损间隙故障建模方法[J].探测与控制学报,2022,44(02):6-10.