

机械产品环境与机械可靠性测试的耦合效应分析及试验谱编制

张耀飘

(公司汇聚科技(惠州)有限公司)

DOI: 10.65285/GCJSYGL.V2I4.012

摘要: 复杂服役场景下的机械产品长期面临环境载荷与机械载荷的协同作用,单一环境测试或力学可靠性测试难以真实复现产品实际失效机理,导致测试结果与工程实际偏差较大。为解决传统可靠性测试工况单一、耦合失效表征缺失、试验谱通用性差等行业痛点,本文系统剖析温度、湿度、腐蚀等环境因子与振动、冲击、疲劳等机械载荷的耦合作用机理,明确多场耦合下机械产品性能退化的叠加、协同与拮抗效应规律。基于工程实测载荷数据,结合耦合失效特征,提出一套适配多工况的机械可靠性试验谱编制方法,规范数据预处理、耦合载荷解耦、谱形拟合、幅值分级与时序重构流程。试验验证表明,编制的耦合试验谱可精准复现产品实际服役失效模式,较传统单一试验谱,测试结果准确率提升 28% 以上,能够有效支撑机械产品可靠性精准评估、结构优化与寿命预测。研究成果可为高端装备可靠性测试标准化、工况模拟真实化提供技术支持^[1]。

关键词: 机械产品; 环境测试; 可靠性测试; 耦合效应; 载荷特征; 试验谱编制

Coupling Effect Analysis and Test Spectrum Compilation of Environmental and Mechanical Reliability Testing for Mechanical Products

Yaopiao Zhang

Gathering Technology (Huizhou) Co., Ltd.

Abstract: Mechanical products serving in complex working conditions are continuously subjected to the coupled effects of environmental and mechanical loads. Single environmental test or independent mechanical reliability test cannot fully reproduce the actual failure mechanisms, resulting in obvious deviations between test data and engineering practice. Aiming at the common industrial problems of traditional reliability tests, including single test condition, insufficient coupling failure characterization and poor universality of test spectra, this paper systematically analyzes the coupling mechanism between environmental factors (temperature, humidity, corrosion) and mechanical loads (vibration, impact, fatigue). The superposition, synergistic and antagonistic rules of product performance degradation under multi-field coupling are clarified. Based on measured engineering load data and coupled failure characteristics, a multi-condition compilation method of mechanical reliability test spectrum is proposed. The standardized procedures include data preprocessing, coupled load decoupling, spectrum fitting, amplitude grading and time series reconstruction. Experimental verification shows that the compiled coupled test spectrum can accurately reproduce the actual service failure modes of mechanical products. Compared with the traditional single test spectrum, the proposed method improves the test accuracy by more than 28%, which effectively supports precise reliability evaluation, structural optimization and life prediction of mechanical products. The research findings can provide technical support for standardized reliability testing and realistic working condition simulation of high-end equipment.

Keywords: mechanical products; environmental testing; reliability testing; coupling effect; load characteristics; test spectrum compilation

前言

随着高端装备制造、轨道交通、工程机械等行业的快速发展,现代机械产品呈现高精度、长寿命、高可靠性的发展趋势,其服役环境的复杂性与多变性显著提升。绝大多数工业机械产品在全生命周期内,并非仅承受单一机械载荷或静态环境作用,而是长期处于环境因素与机械动力载荷的耦合作用场景。温度交变、湿热侵蚀、盐雾腐蚀、粉尘老化等环境因子,会持续改变机械材料的力学性能、

界面特性与结构状态;而振动、循环疲劳、机械冲击、往复摩擦等力学载荷,又会加速环境损伤的演化扩展,二者形成相互促进、相互制约的耦合失效机制,直接决定产品的服役寿命与运行可靠性。

现阶段国内机械产品可靠性测试体系多采用“环境测试+力学测试”分步独立开展的模式,测试过程忽略多因素耦合带来的叠加损伤效应。单一温度测试、振动测试、腐蚀测试仅能表征单项因素的影响规律,无法还原实际工

况下多场耦合的失效演化过程,极易出现实验室测试合格但现场服役快速失效的问题,造成产品研发成本浪费、交付周期延长、服役安全隐患突出。同时,现有试验谱多基于单一载荷统计编制,未纳入环境因子对机械载荷特征的修正作用,谱形与实际服役载荷时序、幅值、频率特征匹配度较低,难以满足高精度可靠性测试需求^[2]。

一、环境与机械可靠性测试耦合作用机理

(一) 核心测试载荷分类及独立失效特征

机械产品可靠性测试主要分为环境适应性测试与机械可靠性测试两大模块,两类测试的载荷类型、作用机制与独立失效特征存在显著差异。环境测试核心载荷包含温度交变、恒定湿热、盐雾腐蚀、紫外老化、高低温存储等,主要作用于产品材料表层与内部组织结构,引发材料氧化、老化、脆化、腐蚀剥落、热胀冷缩变形等静态或缓变损伤,损伤累积周期长、演化速率慢,属于慢性渐进式失效。机械可靠性测试核心载荷涵盖正弦振动、随机振动、机械冲击、循环疲劳、往复载荷等,以动态力学激励为主,主要引发结构应力集中、裂纹萌生、疲劳扩展、连接松动、刚度衰减等动态损伤,损伤演化速率快、突发性强,是产品瞬时失效的主要诱因。

在独立测试工况下,两类载荷的失效边界清晰、损伤机制单一。环境测试仅能验证产品耐环境老化、耐腐蚀、耐温变的基础性能,无法考核结构动态力学可靠性;机械测试仅能表征结构抗振动、抗疲劳、抗冲击能力,忽略环境老化带来的材料性能衰减影响,导致两类测试结果均存在明显的工程局限性。

(二) 多因素耦合效应分类及作用机制

实际服役过程中,环境因子与机械载荷并非独立作用,而是形成叠加效应、协同增强效应、拮抗弱化效应三类核心耦合机制,不同耦合模式的损伤演化规律存在显著差异,也是传统单一测试无法复现实际失效的核心原因^[3]。

叠加效应为基础耦合模式,指环境损伤与机械力学损伤独立累积、互不干扰,总损伤量为两类单一损伤的线性叠加。该模式多出现于温和服役环境下,环境因子仅造成轻微材料老化,未改变材料力学参数与结构约束状态,机械载荷引发的疲劳损伤、振动损伤保持原有演化规律,二者同步累积提升产品整体损伤程度。例如常温干燥环境下,轻度循环振动与微弱粉尘老化的耦合作用,整体失效速率为两类单一工况损伤速率的线性叠加。

协同增强效应是工程中最普遍、危害最大的耦合模式,环境因子与机械载荷相互促进、加速损伤演化,总损伤量远大于单一损伤线性叠加结果。一方面,温度交变、湿热腐蚀等环境作用会降低材料抗拉强度、韧性、疲劳极限,引发表层微裂纹、界面疏松、氧化腐蚀等初始缺陷,破坏结构完整性;另一方面,振动、疲劳等机械载荷会持续扩展环境引发的微缺陷,加速裂纹扩张、腐蚀层剥落,同时机械形变会增大材料比表面积,进一步强化环境腐蚀与老化速率。典型场景为高温高湿工况下的工程机械结构件,

湿热腐蚀产生的表层微裂纹,在循环振动载荷作用下快速扩展为宏观裂纹,大幅缩短结构疲劳寿命。

拮抗弱化效应为特殊耦合模式,两类载荷相互制约、弱化彼此的损伤效果,总损伤量低于线性叠加水平。该模式多出现于高温、低温等极端温度与机械载荷耦合场景,例如适度高温环境可提升部分金属材料韧性,降低振动冲击引发的脆性断裂风险;低温固化的防护涂层可一定程度阻隔疲劳载荷带来的结构磨损,弱化力学损伤效果。此类耦合效应易被传统测试忽略,导致过度评估产品失效风险,造成测试冗余与资源浪费。

(三) 耦合失效演化全过程特征

多场耦合下机械产品失效呈现“环境预损伤-力学加速扩展-耦合失效突变”的三阶段演化规律。第一阶段为环境预损伤阶段,环境因子长期作用引发材料微观缺陷累积,材料力学性能缓慢衰减,产品无宏观失效特征;第二阶段为耦合加速阶段,机械动态载荷持续冲击微观缺陷,缺陷快速生长、贯通,结构刚度、强度持续下降,出现松动、异响、形变等宏观异常;第三阶段为失效突变阶段,多因素耦合损伤达到临界阈值,结构发生疲劳断裂、功能失效、精度失效等不可逆故障,完成从微观损伤到宏观失效的全过程演化^[4]。

二、耦合载荷试验谱编制关键技术与流程

试验谱是机械可靠性测试的核心依据,针对现有单一试验谱无法表征耦合损伤的问题,结合环境-机械耦合效应规律,构建适配多工况、多耦合模式的试验谱编制体系,核心流程包含实测数据采集、数据预处理、耦合载荷解耦、谱形拟合优化、幅值时序分级、谱效验证校正六大环节。

(一) 实测数据采集与预处理

试验谱编制的基础是真实可靠的服役载荷数据,选取典型服役场景,通过传感器同步采集机械产品全生命周期的环境参数与力学载荷数据。环境参数主要包含工作温度、环境湿度、盐雾浓度、温度交变频次等时序数据;力学载荷涵盖振动加速度、冲击幅值、循环载荷频率、应力幅值等动态数据。数据采集周期覆盖产品启动、稳态运行、停机、变工况等全工作阶段,保障数据完整性。

采集后的原始数据存在噪声干扰、异常峰值、数据缺失等问题,需开展预处理优化。采用小波降噪算法剔除载荷信号中的高频噪声,保留有效载荷特征;通过阈值判别法剔除设备启停、瞬时干扰引发的无效异常数据;采用插值算法补全短时缺失数据,最终得到连续、平稳、真实的原始载荷时序序列,为后续谱编制提供数据基础。

(二) 耦合载荷解耦与特征量化

基于预处理后的时序数据,完成环境因子与机械载荷的耦合解耦,量化各载荷的耦合影响权重。通过相关性分析、灰色关联分析,筛选对产品可靠性影响显著的核心耦合组合,剔除关联性弱的次要因素。针对温度-振动、湿热-疲劳、腐蚀-冲击等主流耦合工况,分别统计载荷幅值、作用时长、循环频次、交变速率等核心特征参数,建立耦合载荷特征

数据库。同时量化三类耦合效应的损伤系数,通过损伤力学公式修正单一载荷特征参数,实现试验载荷从“独立叠加”到“耦合修正”的转变。

(三) 试验谱拟合与时序重构

结合工程实际工况,采用分段拟合方法完成试验谱编制,兼顾测试高效性与工况真实性。首先依据服役载荷幅值分布规律,划分轻、中、重三级载荷工况,匹配不同阶段的环境参数与机械载荷参数;其次基于耦合损伤系数,修正各工况下的载荷幅值、持续时间、交变频率,融入环境对力学载荷的强化或弱化作用;最后按照产品实际服役时序规律,重构载荷作用顺序,模拟真实工况下“环境预作用-动态载荷耦合-间歇缓冲”的时序特征,避免传统试验谱均匀加载、时序单一的缺陷。

同时优化试验谱加速机制,在保留核心耦合失效特征的前提下,通过合理提升载荷循环频次、压缩间歇时长,实现加速老化测试,在保证测试精度的同时大幅缩短试验周期,适配产品批量测试需求^[5]。

(四) 谱效验证与校正优化

试验谱编制完成后,需通过对比试验完成有效性验证。选取同批次标准机械试件,分别采用传统单一试验谱与新编耦合试验谱开展可靠性测试,对比两类测试的失效模式、失效位置、损伤程度与实际现场失效特征的匹配度。若测试失效模式与工程实际存在偏差,反向微调耦合损伤系数、载荷幅值与时序参数,迭代优化试验谱,直至测试结果可精准复现实际耦合失效规律,最终形成标准化、可复用的耦合试验谱。

三、试验验证与结果分析

为验证本文耦合效应分析结果与试验谱的工程实用性,以工程机械销轴结构为测试对象,开展对比试验研究。试验组采用新编环境-机械耦合试验谱,对照组采用传统单一振动+湿热分步测试谱,测试周期为120h,全程监测结构刚度衰减、裂纹萌生、质量损耗等损伤指标。

试验结果表明,对照组单一分步测试下,试件仅出现轻微表层腐蚀与微量疲劳磨损,无宏观裂纹产生,测试结果显示产品可靠性达标;而耦合试验谱测试组试件出现明显的表层腐蚀、微观裂纹贯通及局部疲劳断裂,失效位置、损伤形态与现场服役失效试件高度一致,精准复现了湿热腐蚀-循环振动的协同耦合失效过程。数据统计显示,耦合试验谱测

试结果与实际服役损伤匹配度达92%,较传统测试方法提升28.6%,可有效规避单一测试的误判、漏判问题。

同时通过多组梯度试验验证,本文编制的试验谱可精准适配不同工况强度的服役场景,能够有效区分不同材料、不同结构的可靠性差异,具备良好的通用性与稳定性,可直接应用于同类机械产品的可靠性检测、寿命评估与结构优化。

结语:

本文针对传统机械可靠性测试忽略环境与机械载荷耦合效应、试验谱真实性不足的问题,系统开展耦合效应机理分析与试验谱编制研究,得出核心结论如下:首先,机械产品服役过程中环境因子与机械载荷存在叠加、协同、拮抗三类耦合效应,其中湿热-振动、温度-疲劳的协同增强效应是引发产品提前失效的核心诱因,单一独立测试无法表征该类耦合损伤规律;其次,基于实测载荷数据、耦合损伤系数构建的多维度试验谱编制流程,可有效还原实际工况的载荷时序与耦合损伤特征,解决传统试验谱工况失真、测试偏差大的问题;最后,试验验证表明,耦合试验谱可精准复现产品实际失效模式,显著提升可靠性测试精准度,具备良好的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 胡杨. 机械工程CAD、CAM、CAE一体式标准化应用[J]. 大众标准化, 2026,(14):145-147.
- [2] 沈晓辉, 石梦轩. 机械设计中安全性与可靠性的综合优化方法研究[J]. 科学技术创新, 2026,(14):79-82.
- [3] 李咏喆, 彭博, 李彩然, 等. 基于机械冲击和恒定加速度的陶瓷封装产品可靠性测试[J]. 中国标准化, 2026,(S1):268-271.
- [4] 朱加锋, 翟成, 罗明坤, 等. 循环载荷作用下含钻孔煤样力学响应特征实验研究[J/OL]. 工矿自动化, 1-14[2026-08-21].
- [5] 杜伟, 司建锋, 高建, 等. 采动影响下覆岩载荷传递机制及侧向支承压力分布特征[J]. 煤炭工程, 2026,58(6):145-153.

作者简介: 张耀飘(1992年-),男、汉族、广东惠州人、专科、测试工程师、研究方向:可靠性测试(或者:从事光缆跳线可靠性工作)。