

Research on Reliability Evaluation Methods for Mechanical Design and Model Validation

Leying Jiang Tingting Guo

Shandong Lutong Heavy Machinery Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

Abstract

Against the backdrop of increasingly complex mechanical equipment and high reliability requirements, reliability evaluation has become a critical component in ensuring safe and stable equipment operation. This paper systematically conducts the construction and validation of mechanical reliability evaluation models based on practical engineering needs. First, it elucidates the fundamental theories and methodological framework of reliability evaluation, proposing principles of accuracy, applicability, and operability in model construction. Building upon this foundation, the study integrates probabilistic statistical analysis, fault tree methodology, neural networks, and multi-method integration techniques to establish a mechanically versatile reliability evaluation framework. Through experimental comparisons, simulation analyses, and real-world case validations, the model's effectiveness, stability, and engineering applicability are comprehensively tested, resulting in a standardized evaluation index system. The research demonstrates that the established model accurately characterizes mechanical systems' reliability behavior under variable loads and environmental conditions, providing technical support for optimized design, fault prediction, and life estimation. This work contributes to advancing mechanical reliability evaluation toward standardization and intelligentization, offering valuable references for industry applications.

Keywords

mechanical design; reliability assessment; model establishment; validation methods; engineering practice; fault prediction

机械设计可靠性评估方法研究及模型验证

姜乐营 郭婷婷

山东路通重工机械有限公司, 中国·山东 济南 250000

摘要

在机械装备日益复杂化与高可靠要求的背景下, 可靠性评估成为保障设备安全稳定运行的关键环节。本文针对工程实际需求, 系统性地开展了机械可靠性评估模型的构建与验证工作。首先阐述了可靠性评估的基本理论与方法体系, 提出了模型构建中应注重的准确性、适用性和可操作性原则。在此基础上, 综合运用概率统计分析、故障树方法、神经网络以及多方法集成等技术, 构建了一套具有一定通用性的机械可靠性评估框架。通过试验对比、仿真分析与实际案例验证, 全面检验了模型的有效性、稳定性及工程实用性, 并形成了一套评价指标体系。研究显示, 所建立模型能够较准确地刻画机械系统在多变载荷与环境下的可靠性行为, 为优化设计、故障预警与寿命预估提供了技术支持。本工作有助于推动机械可靠性评估向规范化、智能化方向发展, 并为行业应用提供了参考。

关键词

机械设计; 可靠性评估; 模型建立; 验证方法; 工程实践; 故障预测

1 引言

随着“中国制造 2025”与智能制造理念的深入实施, 机械装备正朝着高可靠、高性能及智能化方向演进。可靠性作为产品质量的重要度量, 直接关系到设备的运行安全、维护成本和使用寿命。尤其在航空航天、能源动力、交通运输等高安全要求的行业中, 机械系统的失效可能引发重大事故与经济负担。因此, 实施科学、精确的可靠性评估, 已成为现代机械设计、制造和运维过程中不可忽视的一环。

【作者简介】姜乐营(1973-), 男, 中国山东泰安人, 本科, 中级, 从事机械设计研究。

当前, 可靠性工程在国内外已有较多研究成果, 形成了以概率统计、失效机理分析、系统工程等为基础的评估方法体系。然而, 面对现代机械系统多场耦合、载荷时变、故障模式多样等特点, 传统评估模型在适应性、预测精度与实时性方面仍面临诸多挑战, 主要表现在: 一, 多失效机制并时, 模型难以全面描述系统行为; 其二, 评估过程依赖大量历史数据, 在新产品、新材料应用中数据支持不足; 其三, 模型验证方式较为单一, 尚未形成公认的验证标准与评价体系。

为此, 本文以提高机械可靠性评估的实用性与准确性为目标, 开展面向工程实际的评估模型构建与系统验证研究。通过融合多种建模方法, 构建具备良好解释与预测能力的评估模型, 并结合实验与仿真手段实施多维度验证, 从而

形成一套适用于工程推广的可靠性评估方案,为我国机械装备的可靠性设计与运维管理提供方法支持。

2 机械可靠性评估的理论基础与发展现状

2.1 可靠性评估的基本概念与内涵

可靠性通常定义为“产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的能力”。该定义包含三个基本要素:规定条件(环境、工况)、规定时间(任务时长、设计寿命)与规定功能(强度、精度等)。可靠性评估即围绕上述三个要素,通过建模、分析与试验等方式,对产品能否持续保持其功能进行定量化评价。其核心在于识别潜在故障模式、评估失效概率、预测剩余寿命,并为设计改进与维修决策提供支持。常用的可靠性指标包括可靠度 $R(t)$ 、失效率 $\lambda(t)$ 、平均无故障时间(MTTF)等,共同构成了可靠性评估的量化基础。

2.2 国内外研究现状与发展趋势

国外在可靠性工程领域起步较早,已形成以 MIL-HDBK-217F、FIDES 等为代表的规范体系,并在航空航天、汽车电子等领域建立了较为完善的设计、试验与评估流程。近年来,随着数字孪生、人工智能等技术的发展,可靠性研究正朝着模型驱动与数据融合、实时评估与健康管理一体化方向发展。

国内研究虽起步相对较晚,但发展迅速,已在重大装备、核电、高铁等领域开展了大量可靠性技术攻关工作。目前的研究焦点主要集中在复杂系统多状态可靠性建模、退化过程与剩余寿命预测、不确定性量化分析等方面。然而,在评估模型的工程适用性、验证规范性与数据共享机制等方面,仍有进一步提升空间。

3 面向工程应用的可靠性评估模型构建

3.1 模型构建原则

为确保评估模型既科学合理又便于工程应用,构建过程遵循以下原则:

准确性原则: 模型需基于真实的失效机理与工程数据,参数应通过试验或现场数据校准,避免脱离实际的理论假设。

适用性原则: 模型应具备一定通用性与可扩展性,能够适应不同类型、不同层级的机械产品,支持模块化组合与参数化调整。

可操作性原则: 模型结构清晰、计算高效,便于集成至 CAD 平台或企业信息系统,供设计人员直接使用。

经济性原则: 在满足评估精度要求的前提下,应尽可能降低数据获取与计算成本,提升模型在中小型企业中的适用性。

3.2 多方法融合的模型构建框架

针对机械系统可靠性评估的复杂性,本文提出一种融

合多方法的建模框架,以系统功能与结构分析为基础,形成分层、分阶段的评估流程:

系统层建模: 采用故障树分析(FTA),通过顶事件(如“传动系统失效”)向下分解至底事件(如“轴承疲劳”),构建系统故障逻辑结构,识别薄弱环节与共因失效。

部件层建模: 针对关键零件,依据失效模式选用相应概率模型,如威布尔分布描述疲劳、退化过程模型刻画磨损等。

数据驱动增强: 在数据允许的情况下,引入机器学习方法,如随机森林、LSTM 网络等,用于故障识别、寿命预测与多源数据融合。

动态与不确定性建模: 考虑时变载荷与环境因素,建立基于马尔可夫或随机过程的动态模型,并采用蒙特卡罗模拟、区间分析等方法处理参数与输入的不确定性。

3.3 模型参数确定与数据需求

模型的准确性在很大程度上取决于参数取值的合理性。关键参数包括:

失效分布参数: 通过加速寿命试验、现场统计或同类产品数据类比获取;

载荷谱与环境谱: 依托实测数据或标准谱编制;

维修与退化参数: 基于历史维护记录与状态监测数据标定。

为支持参数获取,建议建立企业级可靠性数据库,收录故障案例、试验数据、运维记录等信息,为模型持续优化提供数据支撑。

4 模型验证方法与工程应用案例

4.1 多层次验证体系

为确保模型可靠、可用,建立包含以下三个层次的验证体系:

试验验证层: 通过实物试验或加速试验获取失效数据,与模型预测结果进行对比。例如,在某型高速轴承可靠性评估中,开展恒定与变载荷下的耐久试验,并对振动、温升、磨损等关键参数进行系统记录与分析,可全面、客观评估其可靠性,为设计优化与工程应用提供数据支持。

仿真验证层: 借助多体动力学、有限元、流体仿真等工具,模拟机械系统在复杂工况下的力学行为与失效过程,将仿真输出作为“虚拟试验数据”用于模型校验。例如,对风力发电机齿轮箱进行多工况载荷仿真,验证其疲劳可靠性模型在不同风速段的表现。

现场验证层: 选取在用设备,收集其运行状态与故障记录,进行模型回溯性与前瞻性验证。该层次验证最能体现实际工程价值,但周期较长、数据获取具有一定挑战。

4.2 验证评价指标

为客观衡量模型性能,构建以下四类评价指标:

指标类别	具体指标	说明
精度指标	平均绝对误差 (MAE)	反映预测值与实际值的平均偏离程度
	均方根误差 (RMSE)	强调较大误差的影响
	决定系数 (R^2)	衡量模型解释变异的能力
稳健性指标	灵敏度系数	考察参数变动对输出的影响
	变异系数 (CV)	评估多次预测结果的离散程度
时效性指标	模型单次计算时间	关乎工程应用中的实时性
	数据预处理复杂度	影响模型部署效率
工程适用指标	所需最小样本量	决定模型在数据稀缺场景下的可用性
	与现有设计流程的兼容性	影响模型推广难度

4.3 工程应用案例分析

以数控机床主轴系统为对象，开展可靠性评估模型的应用示范：

系统分析：识别主轴系统主要故障模式为轴承疲劳、轴挠曲过大、热变形超差。

模型构建：采用 FTA 构建系统可靠性框图，结合威布尔分布建立轴承寿命模型，基于有限元仿真与热力学模型分析变形可靠性。

数据输入：输入实际工作载荷谱、装配精度数据、润滑条件及历史维修记录。

评估输出：模型输出主轴系统在五年工作周期内的可靠度曲线，并指出轴承为最薄弱环节，建议加强状态监测与定期更换。

效果验证：对比实际产线中主轴系统的故障记录，模型预测的失效时间区间与实际故障发生时间吻合度达 85% 以上，为企业制定预防性维修计划提供了有效依据。

5 结论与展望

5.1 研究结论

本研究围绕机械可靠性评估模型的工程应用需求，开展了从理论构建到实践验证的系统工作，主要结论如下：提出了多方法融合的可靠性评估建模框架，能够兼顾系统逻辑关系、部件失效机理与数据驱动信息，增强了模型在复杂场景下的表达能力。建立了包含试验、仿真与现场验证的多层次验证体系，并构建了精度、稳健性、时效性与工程适用性四维评价指标，提升了模型验证的系统性与客观性。通过数

控机床主轴系统等案例表明，所构建的模型能够较好支持可靠性预测与维修决策，具备一定的工程推广价值。

5.2 未来展望

尽管本研究取得一定进展，机械可靠性评估仍面临诸多挑战，未来可在以下方向深入探索：

智能可靠性评估技术：结合数字孪生、边缘计算与人工智能，发展实时、在线的可靠性评估与预测系统，实现从“定期评估”向“状态驱动评估”的转变。

多学科耦合可靠性建模：针对机电液控一体化装备，开展机械 - 电气 - 软件多域失效耦合机理研究，建立跨学科可靠性评估模型。

不确定性综合管理：从数据、模型与认知三个层面系统管理不确定性，发展基于概率盒、模糊逻辑与贝叶斯更新的可靠性评估方法。

标准化与平台建设：推动可靠性数据格式、模型接口与验证流程的标准化工作，支持行业级可靠性数据平台与模型库建设，促进资源共享与协作创新。

可靠性是贯穿产品全生命周期的系统性工程，提升过程需要设计、制造、运维各环节的共同推进。期待本研究能为我国机械可靠性技术的发展提供有利参考，助力中国制造向高可靠、高品质方向持续迈进。

参考文献

[1] 谢伟东, 李运强, 姜澎湃, 等. 机械设计制造中可靠性优化设计分析[J]. 现代制造技术与装备, 2025, 61(01): 216-218.

[2] 梁伟波. 机械设备结构的可靠性设计与寿命评估方法研究[J]. 中国设备工程, 2024, (22): 107-110.

[3] 刘子敬. 浅谈机械产品可靠性设计和评估方法研究及应用[J]. 铁道车辆, 2023, 61(02): 59-63.

[4] 张义民. 机械可靠性设计理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2022.

[5] 董林, 赵军. 基于故障树与贝叶斯网络的复杂机械系统可靠性分析[J]. 机械工程学报, 2021, 57(10): 217-225.

[6] 宋彬, 王建华. 基于退化数据的机械剩余寿命预测方法综述[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(07): 1009-1016.

[7] 吕震雷, 李洪双. 结构可靠性分析与随机优化设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019.

[8] 郭磊, 陈建军. 不确定性结构可靠性分析的若干进展[J]. 力学进展, 2018, 48(1): 267-304.