

# 机电一体化系统的可靠性分析与寿命预测方法

杨天钱

上海派启科技有限公司 上海

**【摘要】**机电一体化系统广泛应用于现代工业领域，其可靠性与寿命直接影响整体运行效率与安全性。面对复杂工况带来的多重挑战，传统可靠性评估与寿命预测方法在适应性、精度和动态响应方面存在明显不足。通过构建融合数据驱动与物理机制的预测模型，能够更有效地捕捉系统的退化规律，并提升预测的准确性与实用性。基于典型应用场景的实证分析表明，该类模型在实际运行中表现出良好的稳定性与泛化能力，为实现系统的智能运维与全生命周期管理提供了技术支撑。

**【关键词】**机电一体化；可靠性分析；寿命预测；数据驱动；复杂工况

**【收稿日期】**2025 年 1 月 20 日 **【出刊日期】**2025 年 2 月 18 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250063

## Reliability analysis and lifetime prediction methods for mechatronic systems

Tianqian Yang

Palki Technology Co. Ltd, Shanghai

**【Abstract】** Mechatronic systems are widely applied in modern industrial fields, where their reliability and service life directly affect overall operational efficiency and safety. Traditional reliability assessment and lifetime prediction methods exhibit significant limitations in adaptability, accuracy, and dynamic response under complex working conditions. By constructing a predictive model that integrates data-driven approaches with physical mechanisms, the degradation patterns of the system can be more effectively captured, thereby enhancing the accuracy and practicality of predictions. Empirical analysis based on typical application scenarios demonstrates that such models exhibit strong stability and generalization capability in real-world operations, providing technical support for intelligent maintenance and full lifecycle management of the system.

**【Keywords】** Mechatronics; Reliability analysis; Lifetime prediction; Data-driven; Complex operating conditions

### 引言

随着制造业自动化程度不断提高，机电一体化系统在各种关键装备中发挥着日益重要的作用。系统结构日趋复杂，运行环境多变，导致其可靠性问题愈加突出，寿命预测难度显著增加。现有方法在处理多因素耦合影响时存在局限，难以满足高精度、高实时性的需求。在此背景下，探索更加科学有效的可靠性分析与寿命预测手段，成为提升系统运行效能与维护水平的重要方向。

#### 1 机电一体化系统在复杂工况下的失效特征分析

机电一体化系统由机械、电子、控制、信息处理等多个子系统高度集成，其运行环境往往涉及温度变化剧烈、振动频繁、负载波动大以及电磁干扰等

多种复杂因素。这些外部环境与内部结构之间的交互作用显著影响系统的稳定性与可靠性，导致系统在长期运行过程中表现出多样化的失效模式。随着系统功能的不断增强和应用场景的不断拓展，传统基于单一故障机制的分析方法已难以准确揭示系统在复杂工况下真实的失效演化过程。深入研究机电一体化系统在多因素耦合条件下的失效特征成为提升其可靠性的基础性任务。

在复杂工况下，系统的失效行为通常呈现出非线性、时变性和随机性强的特点。一方面，由于外部载荷的动态变化，系统的应力状态随之发生波动，加速了关键部件的老化与疲劳损伤积累；另一方面，系统内部各模块之间存在高度耦合关系，某一模块

的性能退化可能引发连锁反应,造成整体系统的功能下降甚至突发故障。这种耦合效应使得系统失效路径具有不确定性,传统的二值逻辑判断方式难以有效应对。温湿度、灰尘、电磁场等环境变量也对系统元器件的物理性能产生持续性影响,特别在高温或高湿条件下,电子元件可能出现热疲劳、氧化腐蚀等问题,进一步加剧了系统的失效风险。

从失效机理的角度分析,机电一体化系统常见的失效形式涵盖机械磨损、电气短路、信号传输异常及控制系统误动作等。这些失效类型之间存在高度关联性,并在系统不同运行阶段呈现出差异化特征。初期阶段多由制造缺陷或装配误差引发早期失效,中后期则以材料疲劳、性能退化和累积损伤为主导,表现出明显的耗损特性。随着系统结构日益复杂和功能集成度不断提高,多种失效模式往往同时存在并相互耦合,形成复杂的失效链式反应<sup>[1]</sup>。例如,机械部件的微小磨损可能引起系统振动加剧,进而影响传感器信号采集精度,最终导致控制逻辑失准甚至系统误动作。这种跨模块、跨物理场的失效传播机制使系统失效行为更加难以预测与控制。在高温、高湿、强电磁干扰等复杂环境因素作用下,电子元器件易发生性能漂移或突发性故障,进一步加剧了系统的不稳定性和失效多样性。

## 2 传统可靠性评估与寿命预测方法的局限性

在机电一体化系统的发展过程中,工程界和学术界普遍采用了一些较为成熟的可靠性评估与寿命预测方法。这些方法多源自经典可靠性理论,主要以统计分析、物理失效模型和经验公式为基础,广泛应用于产品的设计验证、运行监测以及维护策略制定等环节。然而,随着系统复杂程度的不断提升以及运行环境的日益多样化,传统方法在面对新型机电系统时逐渐暴露出一系列固有的局限性。传统可靠性评估通常依赖于历史故障数据的积累,并基于一定的假设条件进行建模。

威布尔模型、指数分布模型等被广泛用于描述系统的失效率变化趋势。这类方法在处理单一故障模式或结构简单的机械系统时具有较好的适用性,但难以有效应对机电一体化系统中多模块耦合、多失效机制共存的问题。由于其对系统行为的刻画较为静态,无法充分反映系统在实际运行中因外部激励变化而产生的动态响应差异,从而影响了评估结

果的准确性。许多传统方法假设系统处于理想运行状态,忽略了环境因素、使用强度及操作差异带来的变异性,导致评估模型存在较大的偏差。

在寿命预测方面,传统的基于物理机制的方法通常依赖于对关键元器件的失效机理进行深入研究,并结合应力-强度干涉理论或疲劳寿命模型进行估算。此类方法虽能从微观层面揭示材料退化过程,但对于由软件控制、传感反馈和信息交互构成的复杂系统而言,其适用性受到明显限制<sup>[2]</sup>。现代机电系统广泛集成电子控制单元与智能算法,软件错误、逻辑误判及数据传输异常等因素日益成为影响系统寿命的重要原因。这类非物理性失效源具有隐蔽性强、演化复杂等特点,难以通过传统方法进行有效量化评估。

## 3 融合数据驱动与物理机制的预测模型构建

物理模型基于系统内部结构与失效机理建立,具有较强的解释性,但其对先验知识的依赖较高,难以适应系统运行状态的动态变化;而数据驱动方法虽然能够从大量监测数据中挖掘系统的潜在退化规律,但缺乏对系统内在物理过程的理解,导致模型泛化能力受限。将两者优势相结合,构建融合数据驱动与物理机制的综合预测模型,成为提升系统寿命预测精度与可靠性的关键路径。该类模型的核心在于实现物理信息与数据特征的有效集成。一方面,通过深入解析系统各组成模块的功能特性与失效模式,提取关键性能退化参数,并基于物理方程描述其演化过程。利用热传导方程、疲劳损伤累积理论等手段刻画电子元器件老化、机械部件磨损等行为,为模型提供机理层面的支撑。

另一方面,借助现代传感技术获取系统运行中的多源异构数据,包括温度、振动、电流、电压等实时监测信号,并通过信号处理与特征提取技术识别出反映系统退化趋势的关键指标。这些数据特征不仅补充了物理模型难以涵盖的非线性动态信息,还增强了模型对实际运行环境的适应能力。在建模策略上,需设计合理的融合框架以协调物理模型与数据驱动方法之间的交互关系<sup>[3-5]</sup>。一种有效的方式是采用协同建模结构,即将物理模型作为先验约束嵌入到数据驱动算法中,引导模型学习符合物理规律的状态演化路径。

借助机器学习与深度神经网络对系统历史运行数据进行训练,可有效提升模型对复杂耦合关系的

识别能力。结合贝叶斯推理、卡尔曼滤波等不确定性量化方法,实现对预测结果的动态修正,增强模型输出的稳定性和可信度。为适应系统全生命周期中不同阶段的状态演变,需构建具备时变特性的分层递进式建模架构,根据运行阶段变化动态调整输入变量与参数配置,实现系统健康状态的连续跟踪。在模型设计中应强化可解释性与实用性,引入基于规则的逻辑判断、因果推理等机制,降低“黑箱”带来的不确定性影响。

#### 4 基于典型应用场景的模型验证与效果评估

在构建融合数据驱动与物理机制的预测模型后,必须通过实际或模拟的应用场景对其性能进行系统性验证与量化评估。这一过程不仅是检验模型实用性的重要环节,也是揭示其在复杂工况下适应能力与预测精度的关键步骤。模型的有效性不能仅依赖于理论推导或仿真测试,还需结合机电一体化系统的运行特征,在具备代表性的应用环境中开展长时间的数据采集与对比分析,以获取具有统计意义的评估结果。

为确保验证工作的科学性和可重复性,需选择若干典型的机电一体化系统作为测试平台。这些系统应涵盖不同的功能结构、运行模式以及所处行业的典型工艺流程,如自动化生产线设备、智能机器人执行机构、数控加工中心等。此类系统通常具备较高的集成度和多参数耦合特性,能够全面反映模型在面对非线性行为、时变负载及外部干扰等情况下的表现。在验证过程中,应同步采集系统的运行状态数据、故障事件记录以及维修日志,形成完整的数据集,用于模型输入输出的匹配训练与误差分析。针对模型的评估指标应从多个维度进行设定,包括但不限于预测精度、响应实时性、稳定性鲁棒性、模型泛化能力等方面。

预测精度可通过均方误差、平均绝对误差等指标量化模型输出与实际寿命之间的偏差;响应实时性衡量模型在动态环境下快速调整与更新的能力;稳定性评估关注其在不同时间窗口和初始条件下的输出一致性;泛化能力则体现模型在未训练数据环境中的适应性与准确性<sup>[6-8]</sup>。为提升评估的全面性与可信度,应采用交叉验证与滚动窗口测试等方法。交叉验证通过划分数据集并交替训练测试,降低样本分布不均带来的偏差;滚动窗口测试适用于时序数据,更真实反映系统连续运行状态下的变化趋势。

同时引入多种建模策略对比实验,如融合模型与传统物理模型或纯数据驱动模型的对照测试,可凸显其在复杂因素影响下的性能优势。

#### 5 结语

机电一体化系统在复杂工况下的可靠性与寿命预测已成为保障设备稳定运行的关键问题。传统方法受限于模型适应性与数据利用效率,难以准确反映系统的动态退化过程。融合数据驱动与物理机制的预测模型为提升系统健康管理能力提供了新路径,在典型应用场景中的验证表明其具备更高的精度与鲁棒性。未来的发展趋势将集中在多源信息深度集成、在线实时建模以及智能决策支持等方面,推动机电系统向更高水平的智能化与自适应方向演进。

#### 参考文献

- [1] 常文春,林小军,牛玉艳,等.《机电一体化系统设计》课程教学创新与实践[J].才智,2025,(12):92-95.
- [2] 何静.基于智能传感器的机电一体化数据采集方法研究[J].科技与创新,2025,(07):85-88.
- [3] 余羽翔.智能控制技术在机电一体化系统中的应用[J].造纸装备及材料,2025,54(04):110-112.
- [4] 李国平.新兴传感技术在机电一体化系统中的创新融合与实践探索[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会,西南大学,重庆工商大学,重庆建筑编辑部.人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集.豪顿领湖(杭州)低碳科技有限公司,;2025:352-354.
- [5] 高瑞.机电一体化智能监控系统在煤矿安全生产中的应用[C]//中国机电一体化技术应用协会.第八届全国石油和化工电气设计与应用论文大赛入选论文集.中煤科工集团新疆研究院有限公司,;2025:784-785.
- [6] 叶家辉,侯如非.基于 Modelica 的发射车机电控一体化建模及仿真研究[C]//上海航天技术研究院,上海市宇航学会.第十九届上海航天科技论坛暨上海市宇航学会 2024 学术年会论文集.上海机电工程研究所,;2024:18-30.
- [7] 卢蓉芝.机器人移动平台的机电一体化系统设计与稳定性分析[J].智慧中国,2024,(11):71-72.
- [8] 张吉福.机电一体化在可再生能源设备中的创新应用[J].产业科技创新,2024,6(04):8-11.

版权声明:©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS