

矿山大型机电装备可靠性分析与寿命预测研究

刘瑞锋

国能准能集团有限责任公司哈尔乌素露天煤矿 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘要: 矿山大型机电装备长期服役于粉尘、潮湿、强振动等恶劣工况,机械结构疲劳损伤、电气元件老化劣变与环境诱发起效相互叠加,装备可靠性与寿命呈现多因素耦合衰减特征。本文围绕装备失效机理展开分析,揭示单因子与多因子耦合条件下分系统差异化退化规律及整机寿命动态演化过程。在经典寿命预测理论框架基础上,结合矿山装备工况特殊性完成理论适配性筛选,依托可靠性特征参量搭建寿命预测体系,为矿山机电装备全服役周期的寿命研判提供系统化技术路径。

关键词: 矿山机电装备; 可靠性分析; 失效机理; 寿命预测; 退化演化

引言: 矿山大型机电装备承担着开采与输送等核心作业职能,机械传动、电气控制、动力供给等多系统协同运转,长期承受高负荷连续作业与复杂环境的持续侵蚀。装备各结构单元的性能衰退节奏各异,机械磨损、电气老化与环境侵蚀交错推进,可靠性衰减与寿命消耗呈现出显著的非线性与多维耦合特征。深入剖析装备失效诱发机制与寿命演化规律,构建贴合矿山工况的寿命预测理论框架,对于提升装备服役管理水平具有重要的学术价值与工程意义。

1 矿山大型机电装备可靠性与寿命属性特征

1.1 矿山大型机电装备系统构成与运行属性

矿山大型机电装备依托多元结构模块形成完整作业体系,不同功能模块相互配合完成矿山开采与输送相关作业流程。设备整体结构涵盖机械传动结构、电气控制模块、动力供给结构以及辅助运行结构,各结构单元承担差异化的作业职能^[1]。矿山作业场景的复杂环境会持续作用于机电装备整体结构,让设备长期处于高负荷连续运转状态。设备运行过程中会承受持续荷载与动态荷载的交替作用,运行状态会随作业环境变化产生持续性波动。复杂的作业条件塑造出矿山机电装备独有的运行特质,结构受力状态与运行负荷状态会随着作业时长产生渐进式变化,直接影响设备整体运行的稳定程度。

1.2 矿山机械系统可靠性固有属性

矿山机电装备机械系统具备固定的结构运行特质,结构设计形式与材质性能决定机械系统基础运行稳定程度。机械构件的材质耐受性能、结构适配精度、传动配合状态,构成机械系统可靠性的核心内在条件。机械结构长期承受荷载作用会产生持续性的损耗累积,构件磨损与结构形变会逐步改变系统原有运行状态。机械系统内部各构件的适配程度,会直接影响整体作业的连贯程

度,结构匹配精度的细微变化都会影响系统运行质量。机械系统的固有属性贯穿设备全服役阶段,结构耐受性能与损耗耐受能力,决定机械系统应对复杂作业工况的适应能力。

1.3 矿山电气控制系统可靠性固有属性

矿山机电装备电气控制系统依托各类电气元件与控制单元搭建整体运行体系,元件性能参数与线路连接状态形成控制系统的基础运行特质。电气元件的工作耐受性能、信号传输稳定程度、控制程序适配程度,保障电气控制系统的基础运行质量。矿山作业环境中的各类干扰条件会对电气元件运行状态产生影响,元件性能衰减会逐步引发控制精度下滑。控制单元的响应能力与信号传输的稳定水平,决定电气控制系统对机械作业结构的调控质量。电气控制系统的固有运行特质,直接关联设备启停调控、负荷调节、状态管控等各类作业行为的稳定程度。

1.4 矿山机电装备服役寿命固有属性

矿山大型机电装备的服役寿命依托结构材质与系统设计形成固定的损耗周期规律。设备各组成结构的耐受极限与性能衰减速度,界定设备正常服役的时长范围。作业环境与运行负荷的持续作用,会推动设备整体性能产生渐进式退化,各类损耗的持续累积会不断消耗设备固有服役时长。不同结构单元的性能衰减速度存在差异,整体设备的寿命状态由各单元损耗演化状态共同决定。设备寿命的固有变化规律贴合矿山持续作业的运行特点,性能衰减的演化节奏始终匹配设备长期连续作业的运行模式。

2 矿山大型机电装备失效机制与可靠性关联关系

2.1 恶劣作业环境下装备失效诱发机制

矿山作业环境包含粉尘堆积、空气潮湿、介质腐蚀及

温度波动等多种恶劣条件,各类环境因素会持续侵蚀机电装备各类结构与元器件。细微粉尘会逐步附着于设备传动缝隙与电气连接部位,阻碍结构运转与信号传输^[2]。潮湿空气会加速金属结构氧化腐蚀进程,弱化机械构件结构强度与连接紧密性。腐蚀介质会持续侵蚀设备表层与内部核心构件,逐步破坏设备原有运行状态。温度的频繁波动会造成结构材料性能波动,弱化材料稳定性能,逐步催生各类初始故障隐患,推动装备运行状态持续劣变。

2.2 机械结构疲劳损伤的产生与发展机制

矿山机电装备长期承受往复荷载与交变应力作用,机械结构内部会逐步产生细微损伤缺陷。应力持续集中于结构薄弱位置,会让微观损伤不断生成并缓慢扩张,形成初始结构性损伤。持续的作业荷载会推动细微损伤逐步延展连通,改变结构整体受力分布状态。损伤范围与损伤深度会伴随作业时长不断扩大,结构承载性能会出现持续性下滑。损伤累积发展会逐步破坏机械结构完整状态,让设备传动与承载能力持续弱化,逐步引发结构性故障问题。

2.3 电气元件老化劣变的内在机制

电气元器件长期处于矿山复杂工况中,自身材料性能与工作参数会出现持续性衰减。长期通电运行产生的热量会持续损耗元件内部材料,改变材料物理与电气性能。外部环境干扰会持续影响元件工作状态,造成信号处理与电力传输性能逐步弱化。元件内部材料会随服役时长出现自然老化,绝缘性能与导电性能逐步下降。各类负面条件的长期作用会不断加剧元件劣变程度,造成电气系统调控精度持续下降,引发电气系统运行不稳定问题。

2.4 多维度失效形式与可靠性的内在关联

环境诱发失效、机械疲劳失效与电气老化失效会从不维度影响机电装备运行状态,各类失效形式均会持续消耗设备运行稳定性能。机械结构损伤会降低设备承载与传动稳定性,改变整机运行基础状态。电气元件劣变会干扰系统调控精度,破坏设备运行调控平衡。多维度失效问题的持续发展会不断压缩设备可靠运行空间,改变装备固有运行属性。各类失效问题的演化进程直接决定装备可靠性的衰减速度,失效演化的剧烈程度直接对应设备运行稳定水平的高低。

3 矿山大型机电装备寿命衰减演化机制

3.1 单一影响因子下装备寿命衰减规律

矿山机电装备服役过程中会受到单一环境或工况条件的持续作用,各类独立影响因素会引导设备性能产生定向衰减趋势。恒定荷载的长期作用会让机械结构产生

稳定的损耗积累速率,材料性能会按照固定节奏逐步弱化^[3]。单一环境介质的持续侵蚀会匀速损耗设备表层与内部结构,延缓设备正常服役状态的维持时长。电气系统在单一温度或电压条件的持续作用下,元件老化速度会保持平稳变化趋势。独立影响条件对装备产生的损耗作用具备均匀性与持续性,性能衰退进程会跟随服役时长呈现平稳递进的变化特点,形成稳定且可追溯的寿命衰减节奏。

3.2 多因子耦合作用下寿命衰减演化机理

矿山实际作业场景中各类影响条件不会单独存在,多种环境与工况因素会相互交织叠加,共同作用于机电装备整体结构。荷载波动与环境侵蚀的相互结合会放大单一因素的损耗作用,加速机械结构损伤的拓展速度。温湿度变化与电气负荷波动的相互搭配会加深电气元器件的性能劣变程度,打破单一因子作用下的平稳衰减节奏。不同类型的影响因子会形成相互促进的作用关系,让设备结构损耗与性能退化出现加速演化的特征。多重因素的交叉作用会改变装备原有寿命衰减节奏,催生非线性的性能衰退过程,让寿命演化进程呈现更为复杂的变化形态。

3.3 分系统寿命衰减的差异化特征

矿山大型机电装备由多个功能系统共同组成,不同系统的结构形式与工作原理存在明显区别,寿命衰减表现出显著的差异化特点。机械传动系统长期接触外部作业环境,承受力学荷载的持续作用,损耗形式以结构磨损与疲劳损伤为主,衰减进程具备缓慢积累的特点。电气控制系统依托封闭元件完成运行调控,劣变核心集中于元件材料性能退化,衰减速度会随工况波动产生明显变化。辅助运行系统接触环境干扰的范围更广,损耗形式更为多元,寿命状态的波动程度相对更高。各功能系统的运行环境与受力条件差异,造就不同的寿命衰减速率与衰退表现形式。

3.4 装备整体寿命的动态演化规律

机电装备整体寿命状态由各分系统运行状态共同决定,单系统的性能衰退会逐步传导至设备整体运行体系。装备服役初期各系统性能状态保持稳定,寿命损耗速度维持较低水平。服役中期各分系统损耗逐步积累,性能衰退进程稳步推进,整体设备运行状态开始出现小幅波动。服役后期各类损耗问题持续叠加,分系统性能大幅下滑,设备整体稳定运行状态难以维持。装备整体寿命演化全程呈现动态变化特征,损耗积累程度与系统匹配状态的改变,持续推动设备服役状态从稳定运行逐步转向性能衰退,完整展现装备全服役周期的寿命动态

变化过程。

4 矿山大型机电装备寿命预测理论体系与技术路径

4.1 装备寿命预测的经典理论溯源

寿命预测相关理论依托设备性能退化规律逐步发展成型, 各类成熟理论围绕设备性能损耗与服役时长的对应关系展开研究^[4]。损伤累积理论聚焦结构损耗的渐进发展过程, 阐释设备长期承载运行过程中损伤不断累积的内在规律, 为机械类设备寿命推演提供核心思路。性能退化理论侧重捕捉设备运行性能的连续变化趋势, 梳理各类设备在持续服役过程中性能参数的演变规律, 适配多类型工业设备的寿命研判工作。概率统计理论依托设备损耗数据的分布特征, 挖掘设备性能衰退的普遍变化规律, 为稳定性较强的工业设备寿命推演提供理论支撑。状态演化理论着重分析设备运行状态的递进转变过程, 建立运行状态与剩余服役时长的关联关系, 成为现代设备寿命研判工作的重要理论支撑。各类经典理论形成完备的基础框架, 为各类工业装备寿命研究提供稳固的理论支撑。

4.2 适配矿山机电装备的预测理论适配性研究

通用寿命预测理论拥有成熟的研究框架, 能够适配常规工业设备平稳规律的性能衰退研判场景。常规设备工况波动幅度小, 性能退化趋势相对稳定, 理论模型可以较好适配其寿命演化规律。矿山机电装备长期处于复杂作业环境, 工况动态变化幅度大, 性能衰退全程呈现显著的非线性波动特征。机械结构疲劳损伤与电气元件劣变交织发展, 让装备寿命演化规律具备独特行业特征。通用预测理论的适用范围存在局限, 无法全面覆盖矿山装备复杂的衰退过程。通过辨析各类经典预测理论的核心优势与适用边界, 结合矿山装备专属的损耗演化特点, 比对不同理论对复杂工况的兼容能力。依据比对结果完成理论筛选与针对性优化, 搭建高度适配矿山大型机电装备的寿命预测理论支撑体系。

4.3 可靠性特征参量在寿命预测中的运用逻辑

可靠性特征参量能够直观反映机电装备运行性能的波动与衰退状态, 是串联装备可靠性研究与寿命研判工作的核心载体。各类特征参量涵盖机械结构损耗参数、电气运行稳定参数、系统运行状态参数等多个维度, 全方位体现装备服役过程中的性能变化。性能参数的持续波动能够直观反馈装备损伤累积与元件劣变的发展

程度, 量化装备服役状态的衰退进程。寿命研判工作可依托参量的动态变化趋势, 捕捉装备性能衰退的演化速率与波动规律, 搭建性能状态与剩余服役时长的对应关系。通过对核心参量的持续追踪与规律挖掘, 能够实现装备寿命演化进程的动态研判, 让寿命推演工作具备量化依据与科学支撑。

4.4 矿山大型机电装备寿命预测的体系构建路径

矿山大型机电装备寿命预测体系的搭建需要依托适配的理论框架与量化研判逻辑, 结合装备分系统差异化衰退特征与整体动态演化规律推进搭建工作。体系构建前期需要整合适配矿山复杂工况的寿命预测理论, 确立贴合装备损耗特征的核心研判依据。中期需要纳入各类可靠性特征参量, 建立参量变化与寿命衰减进程的联动机制, 完善体系的量化研判维度。结合单一因子与多因子耦合作用下的寿命演化规律, 优化体系对非线性衰退、差异化损耗的捕捉能力, 提升体系对矿山装备独有寿命特征的适配水平。最终整合理论支撑、参量指标、演化规律等核心内容, 形成层次清晰、贴合矿山工况、适配装备特征的完整寿命预测体系, 为矿山机电装备寿命研判提供系统化的技术支撑。

结束语

矿山大型机电装备的可靠性与寿命问题, 根植于恶劣服役环境与复杂运行工况的深层交互, 机械疲劳、电气老化与环境侵蚀三者的耦合效应决定了装备性能退化的非线性演化轨迹。通过解析分析系统差异化衰退特征与整机寿命动态演化规律, 结合多源可靠性参量的量化研判逻辑, 可建立贴合矿山工况的寿命预测技术路径。装备寿命管理需持续追踪核心参量的动态变化趋势, 在理论框架与工程实践之间形成良性循环, 推动矿山机电装备运行管控向精细化、系统化方向持续演进。

参考文献

- [1]黄可.浅析矿山机电设备远程控制技术的应用[J].中国设备工程,2025(9):195-197.
- [2]商芷萱.矿山机电设备故障诊断分析与研究[J].内蒙古煤炭经济,2023(2):46-48.
- [3]吴海洋,李志琪.煤矿机电一体化智能化装备的故障诊断与维护策略研究[J].模型世界,2025(29):41-43.
- [4]张思鸣,段子康.矿山机电设备故障诊断与预测维护技术研究[J].大众科学,2025,46(21):59-61.