

设备预防性维修模式下减速机检修周期优化研究

罗高峰 许德强 段佐诚

宁波钢铁有限公司 浙江 宁波 315800

摘 要：减速机是流程工业关键的传动设备，检修周期设定直接影响设备可靠性与维修经济性。针对当前预防性维修模式下检修周期多凭经验确定、缺乏精细化优化的问题，本文系统分析了减速机失效机理与劣化规律，研究了基于振动、油液和温度监测的多源状态监测手段，构建了健康指数劣化量化方法与剩余寿命预测模型，提出了以可靠性为约束的单维度优化模型及综合经济性与安全性的多维度优化模型，并建立了基于实时状态数据的动态检修策略与周期调整机制。数据驱动的检修周期动态优化可有效平衡维修成本与设备风险，为预防性维修决策提供科学依据。

关键词：预防性维修；减速机；检修周期；可靠性；状态监测

引言：减速机广泛应用于矿山、冶金、化工、建材等流程工业，承担动力传递核心功能，其运行可靠性直接决定生产线的连续性与安全性。预防性维修是主流设备管理模式，但检修周期多依据铭牌推荐值或通过经验确定，缺乏对具体工况和劣化规律的精细化考量——周期过短造成资源浪费，周期过长则面临突发故障风险。随着状态监测技术和数据分析方法的发展，基于设备实际劣化状态动态优化检修周期已成为可能。本文从减速机失效机理出发，系统研究状态监测数据驱动的检修周期优化方法，旨在为预防性维修决策提供科学模型支撑。

1 减速机设备概述与失效机理分析

1.1 减速机的结构组成与功能特点

减速机通过齿轮、蜗轮蜗杆或行星齿轮等传动副，将原动机的高转速低扭矩转换为工作机的低转速高扭矩，核心功能是匹配动力源与负载之间的转速扭矩关系。典型减速机由箱体、齿轮副、轴承、轴系、密封装置及润滑系统六大部分构成，齿轮和轴承是最关键的传动承载部件，其状态直接决定整机寿命。按传动类型可分为圆柱齿轮、圆锥齿轮、蜗轮蜗杆、行星齿轮及摆线针轮减速机等，按级数可分为单级、两级和三级。减速机在流程工业中通常连续运转，长期承受重载、冲击或交变载荷，润滑和散热条件对寿命影响显著。因其处于设备链中间传动环节，一旦故障往往造成整条生产线非计划停机，故通常被划为关键或主要设备，是预防性维修管理的重点对象。

1.2 减速机主要失效模式与故障机理

减速机失效模式归纳为齿轮失效、轴承失效、轴系

失效、密封失效和润滑失效五类，各类失效物理机理不同，劣化表征和识别方法各异。齿轮失效是最主要形式，包括齿面接触疲劳磨损、点蚀与剥落、胶合、齿根弯曲疲劳断齿及塑性变形，均从微观裂纹萌生开始，经历扩展、剥落或断裂的渐进过程，振动信号中表现为啮合频率及其倍频处的边带调制。轴承失效以滚动轴承为主，包括滚道疲劳剥落、滚动体磨损、保持架断裂及过热，包络解调谱中可区分损伤部位。轴系失效主要为断轴和键槽磨损，由交变应力疲劳或过载引起。密封失效导致润滑油流失和异物侵入，加速齿轮轴承磨损。润滑失效表现为油品劣化，通过油液分析可提前预警。各类失效非孤立发生，密封和润滑失效往往是齿轮轴承失效的先导原因^[1]。

1.3 减速机劣化规律与寿命特征

减速机劣化过程分为早期故障期、偶然故障期和耗损失效期三个阶段，符合浴盆曲线规律。早期故障期故障率较高但随运行迅速下降，多由制造缺陷或磨合不良引起，通过规范验收试车可有效筛除。偶然故障期是稳定运行阶段，故障率低且基本恒定，设备处于健康状态。耗损失效期是寿命末段，磨损、剥落等劣化累积后故障率呈指数型快速上升。进入耗损失效期的时间受负载率、启动频次、润滑条件和环境温度等多因素影响，同型设备不同工况劣化速度差异可达2~3倍，这是统一检修周期不合理性的根本原因。振动幅值、温度变化和油液金属含量等在耗损失效期呈加速增长趋势，通过趋势监测可识别劣化拐点。掌握劣化规律是从“定时维修”走向“按状态维修”的物理认知前提。

2 预防性维修模式与检修周期的确定方法

2.1 预防性维修的基本模式与策略分类

预防性维修是指在设备发生故障前,按预定计划或依据状态评估结果主动采取的维修活动,目标是预防或延缓设备功能失效。根据触发条件不同可分为三类策略。定时维修以运行时间或日历时间为触发条件,按固定周期执行,适用于故障模式与时间具有明确相关性的设备。状态维修以设备实际运行状态为触发条件,通过在线或离线检测获取状态参数,在劣化达到预设阈值时安排维修,适用于故障征兆可监测且劣化过程有足够发展时间的设备。预测性维修通过数据分析和寿命预测模型预估剩余寿命,在最佳时间窗口实施维修,是状态维修的高级形态。三类策略从“定时”到“按状态”再到“预测”,对数据基础的要求依次提高,但维修精准度和资源利用效率也相应提升^[2]。减速机故障演化具有渐进性、监测手段成熟、劣化规律可辨识,是实施状态维修和预测性维修的适宜对象。

2.2 检修周期确定的传统方法

减速机检修周期的确定主要依赖四种传统方法。经验类比法依据厂家推荐值、行业标准或同类设备运行经验确定周期,简单易行但高度依赖个人经验,缺乏对设备个体差异的考虑。统计分析法利用历史故障数据计算平均故障间隔时间确定检修频率,前提是设备具有足够失效数据且故障服从统计规律,但对单台或少量设备场景精度有限。可靠性评估法以设备可靠度不低于设定阈值为条件确定最大检修间隔,具有明确理论依据,但需建立准确的故障率模型。经济分析法以单位时间总维修成本最小化为目标,建立周期与成本、损失之间的函数关系,通过数值寻优得到最优周期,直面降本需求但需准确量化故障损失。各类方法在工程实践中往往组合使用,以弥补单一方法的局限性。

2.3 当前检修周期设定中存在的普遍问题

当前减速机检修周期设定普遍存在四方面问题。过度维修表现为周期过短,设备仍健康即安排拆机检修,造成备件人工浪费和额外装配风险。维修不足表现为周期过长,设备已进入耗损失效期仍未检修,隐患累积直至突发故障。决策依据主观化表现为周期多依赖个人经验和厂家推荐值,缺乏基于实际运行数据和状态监测结果的分析支撑,同类设备不同工况却执行相同周期。检修深度与周期匹配失当表现为小修、中修、大修边界模糊,各节点应执行何种深度工作缺乏明确技术标准。此外,检修计划多为年度一次性确定,全年执行中缺乏根据设备状态动态调整的机制,刚性周期设定方式与设备

实际劣化过程脱节,难以实现维修资源的精准配置。

3 基于状态监测的减速机劣化量化方法

3.1 减速机状态监测手段与技术

减速机状态监测是劣化量化和检修周期优化的数据基础,常用手段包括振动监测、温度监测、油液分析和电流监测四类,各具优势且互补性强。振动监测应用最广泛,通过轴承座上的加速度传感器采集振动信号,经频谱分析和包络解调提取特征频率及其边带成分,可有效识别齿轮磨损、轴承剥落、不平衡、不对中等故障,测点布置在输入轴端、输出轴端及中间轴承座处。温度监测通过铂热电阻或红外测温仪测量轴承温度、箱体温度和油温,异常升高反映摩擦加剧或润滑不良。油液分析通过定期取样检测理化指标和磨损元素,黏度、水分、酸值及金属颗粒浓度可反映润滑状态恶化和内部磨损。电流监测分析电机电流幅值变化识别负载异常,对过载或卡滞具有辅助诊断价值^[3]。监测频次应根据设备重要性和运行阶段差异化设定,关键设备或进入耗损失效期的设备宜加密监测。

3.2 劣化特征提取与健康状态评估

从原始监测信号中提取劣化特征并将多源信息融合为可量化的健康状态指标,是实现检修周期优化的关键环节。振动信号特征提取包括时域统计特征(均方根值、峰值因子、峭度)、频域特征(各频段能量占比、边带能量)及时频域特征,其中振动均方根值对磨损类故障长期趋势敏感,是劣化趋势监测的首选指标。油液分析特征参数包括金属颗粒浓度和分布、磨损元素含量及理化指标变化速率。温度特征以轴承温度与环境温度的差值为宜,以消除环境波动干扰。健康状态评估需将多源监测指标融合为单一健康指数,常用方法包括主成分分析法降维、加权综合法分配权重、模糊综合评价法处理边界模糊问题。健康指数归一化后取值介于0至1之间,根据运行经验和标准规范设定警戒阈值和报警阈值,实现健康状态阶段划分与分级预警。

3.3 剩余寿命预测模型

剩余寿命预测通过对设备劣化趋势的外推,估计当前状态下设备继续安全运行的时间区间。趋势外推法是最基础的建模手段,对健康指数时间序列进行线性回归或指数平滑拟合,外推至报警阈值对应时间即为预估剩余寿命,适用于劣化趋势平稳的工程场景。随机过程法将劣化视为随机增量过程,Wiener过程适于齿轮磨损等缓慢渐进劣化,Gamma过程则对轴承疲劳剥落、点蚀扩展等不可逆劣化更符合物理实际。机器学习法通过深度

学习模型学习多源监测数据与剩余寿命的非线性映射关系，自适应捕捉监测指标间复杂依赖关系，但需大量带标签历史数据支撑训练。工程应用中应根据数据条件和劣化特征选择合适方法，并给出预测置信区间，供决策者权衡提前检修成本与预测不准风险^[4]。

4 检修周期优化模型的构建

4.1 单维度优化模型：以可靠性为约束

以可靠性为约束的优化模型基于设备可靠度函数确定检修周期上限，核心是确保设备在整个周期内可靠度不低于预设阈值。该模型假设故障率随运行时间单调递增，令可靠度等于目标可靠度阈值，求解得到允许的最大检修间隔。目标可靠度阈值通常取 0.85 ~ 0.95，数值越高安全裕度越大。模型优势在于以可靠性为直接控制目标，安全边界清晰，特别适用于安全风险较高或故障后果严重的减速机。应用关键在于准确建立故障率变化规律——有历史失效数据时通过统计拟合确定参数，缺乏数据时依据设备设计寿命和行业经验设定等效参数。局限性在于仅考虑可靠性约束而未纳入经济性考量，适用于作为多维度优化的基础约束而非唯一决策依据。

4.2 多维度优化模型：考虑经济性与安全性

多维度优化模型将经济性成本和安全性风险纳入统一目标函数，平衡可靠性与资源消耗的对立关系。目标函数以单位时间总期望成本最小化为优化方向，总成本由四部分构成：预防性维修成本（随周期延长而降低）、故障维修成本（随周期延长而增加）、生产损失成本（停机导致的产值损失）以及安全风险成本（将故障后果严重度转化为费用表达）。求解方法为在预设的检修周期备选集中进行数值搜索，找出总期望成本最小的最优周期。安全风险成本量化可采用风险矩阵法将后果等级与概率等级综合转化为费用当量。工程应用时需同步校核该周期对应的可靠度是否满足企业最低可靠性要求，确保优化结果不突破安全底线^[5]。

4.3 动态检修策略与周期调整机制

动态检修策略的核心特征是检修周期不预先锁定，而是根据设备实时状态动态调整。该机制采用“基础

周期 + 动态调整”双层结构：基础周期由多维度优化模型根据设计寿命和通用工况预先确定，作为基准检修间隔；动态调整层根据实时健康指数和剩余寿命预测结果修正基准周期——健康指数衰减加快时前置检修，健康指数稳定时延后检修窗口。具体实现为：基于最新监测数据重新预测剩余寿命，若预测寿命低于基准间隔剩余时长则触发检修前置，若显著长于则评估延后可能。策略要求建立“定期评估 + 事件触发”双重更新机制，定期评估按固定周期滚动更新计划，事件触发由监测数据突破阈值或设备经历异常工况时即时启动。这是从经验驱动向数据驱动维修决策转型的关键实践。

结束语

减速机检修周期的科学优化是预防性维修体系从粗放走向精细的关键环节。本文系统分析了减速机的失效机理与劣化规律，探讨了基于振动、温度、油液等多源状态监测的劣化量化方法与剩余寿命预测技术，构建了以可靠性为约束的单维度优化模型和综合考虑经济性与安全性的多维度优化模型，提出了基于实时状态数据的动态检修策略与周期调整机制。随着传感器技术、工业大数据和人工智能的深度应用，检修周期优化将进一步与数字孪生技术融合，实现维修策略的自适应与自优化。

参考文献

- [1] 梁钢, 樊冰, 郑伟东, 等. 基于生命周期风险图的设备检修策略优化 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(24): 10310-10316.
- [2] 孟颀, 潘照双. 基于预防性维修策略的设备故障预测技术研究 [J]. 机械工程师, 2025(1): 12-14, 19.
- [3] 尚前明, 蒋婉莹, 王正强. 基于多源数据挖掘的齿轮箱复合故障诊断方法研究 [J]. 船海工程, 2026, 55(2): 154-160.
- [4] 韩强. 齿轮减速机日常维护及检修方法 [J]. 现代农机, 2023(4): 122-124.
- [5] 王光宇. 风电机组齿轮箱常见机械故障与维护策略 [J]. 电力设备管理, 2025(11): 266-268.