

机械设备全生命周期内的故障率分布规律与维修时机优化

段佐诚 罗高峰 许德强
宁波钢铁有限公司 浙江 宁波 315807

摘要: 机械设备全生命周期管理是提升运行效率、降低成本的关键, 故障率分布规律对优化维修时机意义重大。本文界定全生命周期各阶段标准, 剖析不同阶段故障模式与机理, 给出故障数据采集及预处理方法。构建故障率分布模型, 揭示其动态变化, 结合维修优化因素与指标, 建立维修时机优化模型, 针对不同故障期制定差异化策略。基于故障率分布的维修优化能减少停机时间、提升可靠性, 为运维管理提供科学依据, 对推动制造业设备管理智能化、精细化有重要实践价值。

关键词: 机械设备; 全生命周期; 故障率分布; 维修时机优化

引言: 工业化生产中, 机械设备是保障生产连续稳定的核心, 其状态影响生产效率、质量与成本。制造业向高端化、智能化转型, 对设备可靠性与运维管理要求更高。传统维修依赖经验, 易出现维修不足或过度, 增加成本、加剧损耗。机械设备全生命周期内, 故障率受多种因素影响呈特定分布。精准掌握规律并优化维修时机, 是突破传统维修瓶颈的关键。本文围绕相关内容研究, 为企业提供运维方案, 提升设备管理效能与竞争力。

1 机械设备全生命周期阶段划分与故障特征

1.1 全生命周期阶段定义

机械设备全生命周期以购入验收合格为始, 至报废处置完成为终, 依故障规律与运行状态, 可分三个核心阶段。早期故障期即磨合期, 从安装调试到稳定运行初期, 时长 1 - 6 个月, 因设备类型和工况复杂度而异。此阶段运行不稳定, 故障发生率快速下降, 故障多源于设计缺陷、安装误差、零部件适配问题。偶然故障期是设备稳定运行阶段, 持续时间最长, 占全生命周期 60% - 80%。此时零部件适配良好, 运行平稳, 故障发生率低且稳定, 故障随机发生, 多由突发因素引发。耗损故障期是设备老化阶段, 运行至后期, 零部件因磨损、疲劳老化性能衰退, 故障发生率快速上升, 直至报废, 故障多为不可逆耗损性故障。

1.2 各阶段故障模式与机理分析

早期故障期核心故障模式有零部件松动、卡滞、电路接触不良、软件适配异常等。机理上, 制造残留应力、加工精度偏差在首次运行时易暴露问题; 操作人员不熟悉设备特性, 误操作或参数设置不当也会致运行异常。偶然故障期故障模式无规律, 常见突发电路短路、

异物侵入部件损坏、瞬时过载保护性停机等。其机理主要与外部突发因素有关, 如电网电压波动、环境粉尘超标、物料杂质混入等, 与设备自身老化耗损关联小, 故障不可预测。耗损故障期以零部件失效为主, 如轴承磨损、齿轮断裂等, 因长期承受载荷、摩擦损耗及疲劳损伤、腐蚀老化等, 故障集中爆发^[1]。

1.3 故障数据采集方法

故障数据采集需覆盖设备全生命周期, 确保数据完整性、准确性与时效性, 为后续分析提供可靠支撑。首先, 建立多维度数据采集体系, 涵盖设备基础信息、运行参数、故障记录三大类数据。设备基础信息通过台账录入实现, 包括设备型号、制造厂家、安装日期、技术参数等静态数据。运行参数采用实时监测方式采集, 借助传感器、数据采集终端等设备, 实时捕捉设备转速、温度、振动、压力等动态参数, 数据采样频率不低于 10Hz, 确保捕捉到细微运行异常。故障记录采用人工与自动相结合的方式, 设备发生故障时, 自动监测系统触发报警并记录故障发生时间、工况参数; 维修人员同步记录故障现象、部位、原因、维修措施及耗时等信息。另外, 搭建数据传输与存储平台, 通过工业互联网将采集数据实时传输至云端数据库, 采用数据清洗技术剔除异常值、缺失值, 保障数据质量, 为故障率分析与模型构建奠定基础。

2 机械设备全生命周期故障率分布规律分析

2.1 故障率数据采集与预处理

故障率数据采集需以全生命周期各阶段为范围, 明确采集指标与标准, 确保数据针对性。采集指标包括故障发生时间、间隔周期、故障类型、故障部位、运行时长等, 针对不同阶段调整采集重点, 早期故障期重点

采集安装调试数据与初期故障信息,耗损故障期强化零部件磨损数据与故障频次记录。数据采集完成后,需进行系统预处理,首要步骤是数据筛选,剔除因传感器故障、人工误录导致的无效数据,保留真实有效的故障与运行数据。其次,进行数据标准化处理,将不同格式、单位的参数统一转换为标准格式,如将故障间隔时间统一换算为小时。最后,开展数据分类与整合,按故障类型、发生阶段、设备部位等维度对数据进行分类,构建结构化数据集。同时,采用趋势分析方法剔除数据中的随机干扰项,凸显故障率变化趋势,确保预处理后的数据能够准确反映设备故障率的真实分布特征^[2]。

2.2 全生命周期各阶段故障率特征分析

全生命周期内机械设备故障率呈现“浴盆曲线”分布特征,各阶段特征差异显著。早期故障期故障率随运行时间延长快速下降,此阶段故障多为先天性问题,设备运行初期故障频次较高,但随着问题部件的更换、参数的优化及操作人员熟练度的提升,故障率迅速降至稳定水平,下降幅度可达70%-80%。偶然故障期故障率维持在较低的稳定区间,波动幅度极小,此阶段设备运行状态最佳,故障发生无明显时间规律,多由偶然因素引发,单次故障发生率低于0.5%,是设备高效运行的核心阶段。耗损故障期故障率随运行时间延长呈指数级上升,当设备运行至生命周期后期,零部件磨损、老化程度加剧,性能大幅衰退,故障频次显著增加,如轴承类部件在耗损期故障率较偶然故障期提升5-10倍,最终因故障修复成本过高或无法修复导致设备报废。

2.3 故障率分布模型构建

结合机械设备全生命周期故障率“浴盆曲线”特征,采用分段建模方式构建故障率分布模型,确保模型精准度。早期故障期采用威布尔分布模型,其形状参数小于1,能够精准拟合故障率随时间递减的变化规律,模型参数通过极大似然估计法确定,输入数据为早期故障期的故障发生时间与频次。偶然故障期采用指数分布模型,该模型适用于故障发生具有随机性的场景,其故障率为常数,通过统计偶然故障期内的平均故障间隔时间,即可确定模型核心参数。耗损故障期采用威布尔分布模型(形状参数大于1)或对数正态分布模型,前者适用于零部件疲劳耗损类故障,后者适用于受多种老化因素影响的故障类型,通过采集耗损期内零部件磨损数据、故障记录等,结合最小二乘法优化模型参数。构建的分段模型通过拟合优度检验验证,确保模型能够准确反映全生命周期故障率分布规律,为维修时机优化提供可靠的模型支撑。

3 基于故障率分布的维修时机优化模型

3.1 维修时机优化的影响因素与约束条件

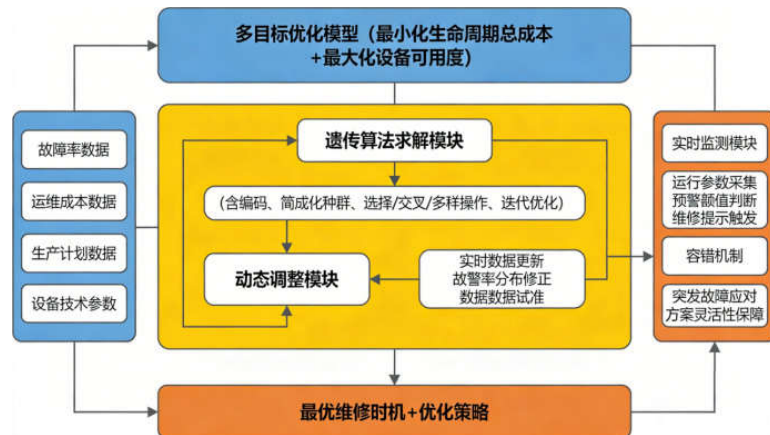
维修时机优化受多重因素影响,核心包括设备故障率、运维成本、生产需求及设备重要度。设备故障率是核心依据,直接决定维修的必要性与紧迫性;运维成本涵盖维修材料、人工、停机损失等,需在维修效果与成本间寻求平衡;生产需求方面,关键生产设备需尽量避免生产高峰期维修,降低停机影响;设备重要度不同,优化优先级存在差异,核心设备需重点保障可靠性。约束条件主要包括技术约束、成本约束与时间约束。技术约束指维修需依托现有技术水平与设备条件,确保维修效果;成本约束即维修总成本不得超过预设预算,避免过度投入;时间约束指维修时长需控制在合理范围,尤其是关键设备,需缩短停机时间,保障生产连续性。此外,安全规范也是重要约束,维修过程需符合设备安全运行标准,避免引发安全事故。

3.2 维修时机优化的核心指标体系

构建多维度核心指标体系,为维修时机优化提供量化依据,指标体系涵盖可靠性指标、经济性指标与运维效率指标三大类。可靠性指标包括平均故障间隔时间、故障率、平均修复时间,其中平均故障间隔时间反映设备稳定运行能力,故障率直接关联维修必要性,平均修复时间衡量维修效率;经济性指标包括单位维修成本、停机损失成本、设备生命周期总成本,单位维修成本反映单次维修的经济性,停机损失成本体现维修时机对生产的影响,生命周期总成本是长期优化的核心依据;运维效率指标包括维修及时率、设备可用度、备件周转率,维修及时率衡量维修响应速度,设备可用度反映设备有效运行能力,备件周转率保障维修的及时性与经济性^[3]。各指标权重根据设备类型、重要度及企业需求确定,通过加权评分实现维修时机的量化优化。

3.3 维修时机优化模型构建

以全生命周期故障率分布模型为基础,结合核心指标体系,构建多目标优化模型,目标是最小化生命周期总成本、最大化设备可用度。输入参数含各阶段故障率、运维成本、生产计划及设备技术参数等。采用遗传算法求解,将维修时机转化为决策变量,初始化种群后,以目标函数为适应度函数,经选择、交叉、变异迭代生成最优解。引入动态调整机制,依实时数据更新故障率与成本数据优化时机。搭建实时监测模块,参数超预警或故障率达临界值触发维修提示。设置容错机制应对突发情况,保障方案灵活可行。实例验证,该模型可提升维修决策科学性与精准度。



基于故障率分布与多目标优化的机械设备维修时机优化模型构建流程图

3.4 不同生命周期阶段的维修时机优化策略

3.4.1 早期故障期

早期故障期优化核心为“快速排查、精准整改”，避免故障扩大。采用预防性维修与事后维修结合的策略，设备安装调试后，开展全面的试运行检测，记录运行参数与故障信息，针对高频故障部位进行重点排查，及时更换存在缺陷的零部件，优化设备参数。建立早期故障台账，分析故障共性原因，针对性改进安装工艺或调整操作规范。维修时机优先选择试运行阶段或生产间隙，避免影响正式生产。设定故障率临界值，当故障率降至预设稳定区间后，转入正常运维模式。同时，加强操作人员培训，提升其对设备的熟悉度，减少误操作引发的故障，通过精准整改与规范操作，快速缩短早期故障期，推动设备进入稳定运行阶段^[4]。

3.4.2 偶然故障期

偶然故障期故障发生率低且随机，优化策略以“状态监测为主、事后维修为辅”。加强设备实时状态监测，通过传感器采集振动、温度等关键参数，设置参数预警阈值，当参数异常时及时预警，开展针对性检查与维修。避免盲目开展预防性维修，降低不必要的运维成本。针对故障发生具有随机性的特点，建立快速维修响应机制，储备常用备件，确保故障发生后能够及时修复，缩短停机时间。维修时机优先选择生产间隙或低峰期，对于非关键故障，可适当延迟维修至合适时段；对于关键设备的突发故障，启动应急维修预案，保障快速恢复运行。通过状态监测与快速响应，在保障设备可靠性的同时，最大化降低运维成本。

3.4.3 耗损故障期

耗损故障期故障率快速上升，优化策略以“预防性维修为主、故障修复为辅”，核心是在零部件达到疲劳极限前完成维修或更换。基于故障率分布模型，预测

零部件失效时间，提前制定预防性维修计划，维修时机选择在故障集中爆发前且非生产高峰期。针对关键零部件，采用定期检测与状态监测相结合的方式，精准掌握其磨损状态，合理确定更换周期。对于修复成本过高或接近报废的零部件，直接更换，避免反复维修增加成本。建立耗损故障预警机制，当故障率达到预设临界值时，启动全面检修。同时，结合设备生命周期总成本，评估设备继续维修与报废的经济性，若维修成本超过新设备购置成本的60%，则建议报废更新，实现全生命周期的经济性优化。

结束语

本文系统研究了机械设备全生命周期内的故障率分布规律与维修时机优化问题，明确了全生命周期三阶段的划分标准、故障模式及机理，构建分段式故障率分布模型，建立基于多目标的维修时机优化模型，并制定差异化的阶段优化策略。研究成果突破了传统维修模式的经验化局限，为机械设备运维管理提供了科学的量化依据。未来，随着智能化技术的深度应用，机械设备全生命周期管理将向精准化、智能化方向进一步发展，为制造业高质量发展提供更坚实的设备保障，助力企业提升核心竞争力与市场适应能力。

参考文献

- [1]魏涛,石艳芬,许璐,徐健.高校大型仪器全生命周期管理模式探索[J].中国信息界,2024(05):136-138.
- [2]董子英.石油企业物资供应商全生命周期管理研究与价值创造[J].石化技术,2024,31(08):279-281.
- [3]何志强.机械设备全生命周期管理分析[J].价值工程,2022,41(20):19-21.
- [4]曹增欢,苏渊.港口机械设备全寿命周期管理软件系统设计[J].港口科技,2022(03):16-21.