

冷轧轧机工作辊轴承疲劳寿命预测与换辊周期优化

喻小兵

五冶集团上海有限公司 上海 201999

摘要: 本文聚焦冷轧轧机工作辊轴承疲劳寿命预测与换辊周期优化。先分析轴承失效机理, 包括工况特点与失效模式根源。接着构建基于多物理场耦合的预测模型, 融合机理与数据驱动方法, 经试验验证其精准度高。针对传统换辊策略局限, 设计动态优化框架, 选粒子群优化算法, 搭建实时决策支持系统。还探讨未来方向, 考虑轴承退化非线性特性及结合区块链技术实现数据透明化管理, 为轧机维护提供科学指引。

关键词: 冷轧轧机; 轴承疲劳寿命预测; 换辊周期优化

引言: 冷轧轧机工作辊轴承作为核心传动部件, 其运行稳定性与寿命直接影响轧机生产效能。冷轧工况复杂, 轴承承受高强度、多载荷、强扰动, 易出现疲劳剥落、磨损等多种失效模式, 传统换辊策略存在明显局限。准确预测轴承疲劳寿命、动态优化换辊周期, 对保障轧机连续稳定运行、降低生产成本意义重大。本文深入探究相关问题, 旨在为冷轧轧机维护管理提供科学有效的方法与策略。

1 冷轧轧机工作辊轴承失效机理分析

1.1 冷轧工况特点

冷轧轧机工作辊轴承作为轧机核心传动部件, 其工作工况具有高强度、多载荷、强扰动的显著特点, 直接影响轴承运行稳定性与使用寿命。冷轧过程中, 工作辊需承受巨大的轧制力, 通常单辊轧制力可达数千千牛, 且轧制力随带钢规格、材质变化呈现周期性波动, 导致轴承滚道与滚动体间产生交变接触应力。同时, 轧机高速运转时, 工作辊线速度可达10~30m/s, 轴承内部摩擦加剧, 易产生大量热量, 若冷却系统散热不及时, 会导致轴承温度升至80°C以上, 加速润滑脂老化与材料性能退化^[1]。冷轧环境中存在大量铁鳞、乳化液等杂质, 易侵入轴承内部, 造成滚道磨损与润滑失效。加之带钢跑偏、辊系振动等突发扰动, 进一步加剧轴承受力不均, 形成复杂恶劣的综合工况, 为轴承失效埋下隐患。

1.2 轴承失效模式与根源

冷轧轧机工作辊轴承常见失效模式主要包括疲劳剥落、磨损、胶合、裂纹与断裂, 各类失效模式均有明确根源且相互关联。疲劳剥落是最主要的失效形式, 根源在于轴承长期承受交变接触应力, 滚道与滚动体表面材料发生疲劳损伤, 逐步形成微裂纹, 裂纹扩展后导致表层材料脱落, 形成凹坑, 影响轴承运转精度。磨损失效主要源于杂质侵入与润滑不足, 铁鳞、乳化液等杂质进

入轴承内部, 在滚动与滑动过程中造成滚道、滚动体表面磨损, 降低配合精度, 加剧应力集中。胶合失效多因轴承过热, 导致润滑脂碳化、润滑膜破裂, 滚道与滚动体表面金属直接接触并发生粘连, 严重时会造成轴承卡死。裂纹与断裂则多由装配偏差、冲击载荷或材料缺陷引发, 装配时的过盈量不当会产生预紧应力, 突发冲击载荷会导致应力瞬时激增, 最终引发轴承部件裂纹甚至断裂, 各类失效模式均会导致轴承无法正常工作, 影响轧机连续运行。

2 基于多物理场耦合的轴承疲劳寿命预测模型

2.1 模型构建思路

基于多物理场耦合的轴承疲劳寿命预测模型, 核心构建思路是融合力学场、温度场、润滑场三大物理场, 结合机理分析与数据驱动方法, 实现轴承疲劳寿命的精准预测, 解决传统预测模型忽略多场耦合效应、预测误差大的问题。首先, 明确多物理场耦合关系, 力学场中的交变接触应力与温度场中的热应力相互叠加, 加剧轴承材料疲劳损伤, 温度场影响润滑场中润滑脂性能, 进而影响轴承摩擦磨损状态, 三者形成相互关联、相互影响的耦合体系。在此基础上, 分为机理模型与数据驱动模型两部分构建, 机理模型基于疲劳失效理论与多场耦合方程, 描述轴承疲劳损伤演化规律; 数据驱动模型利用监测数据, 修正机理模型参数, 提升预测精度。最终通过模型验证与对比, 确保模型能够适应冷轧复杂工况, 实现轴承疲劳寿命的实时、精准预测, 为轧机维护决策提供科学依据。

2.2 机理模型部分

机理模型部分以轴承疲劳失效机理为核心, 结合多物理场耦合理论, 构建轴承疲劳损伤演化方程, 实现轴承疲劳寿命的理论预测。首先, 基于赫兹接触理论, 建立力学场模型, 计算轴承滚道与滚动体间的接触应力分

布,结合轧机轧制力波动数据,引入应力修正系数,量化交变接触应力对疲劳损伤的影响。其次,基于热传导方程,构建温度场模型,考虑轧制摩擦生热、润滑脂散热等因素,计算轴承内部温度分布,推导温度场与力学场的耦合方程,量化热应力对轴承疲劳损伤的作用^[2]。然后,结合润滑理论,构建润滑场模型,描述油膜厚度、润滑脂粘度随温度、载荷的变化规律,引入润滑修正因子,修正接触应力计算结果。最后,基于Miner线性累积损伤理论,融合三大物理场耦合效应,建立轴承疲劳损伤演化方程,通过求解方程,得到轴承理论疲劳寿命,为后续数据驱动模型提供基础框架。

2.3 数据驱动部分

数据驱动部分以冷轧轧机实际运行监测数据为基础,采用机器学习算法,修正机理模型参数,提升轴承疲劳寿命预测精度,弥补机理模型忽略复杂扰动因素的不足。首先,确定数据采集指标,包括轧制力、轴承温度、润滑脂粘度、轴承振动信号、杂质侵入量等,通过传感器实时采集数据,经过滤波、去噪等预处理,剔除异常数据,确保数据可靠性。其次,选取BP神经网络作为数据驱动核心算法,输入预处理后的监测数据,输出机理模型关键修正参数,包括应力修正系数、润滑修正因子等,通过训练样本对神经网络进行训练,调整网络权重与阈值,使修正参数更贴合实际运行工况。同时引入遗传算法优化BP神经网络初始参数,解决神经网络易陷入局部最优解的问题,提升模型训练效率与精度。最后,将数据驱动得到的修正参数代入机理模型,实现机理模型与数据驱动模型的融合,进一步提升轴承疲劳寿命预测的精准度与适应性。

2.4 模型验证与对比

为验证基于多物理场耦合的轴承疲劳寿命预测模型的有效性与优越性,选取某冷轧厂1250mm冷轧轧机工作辊轴承作为验证对象,进行试验验证与对比分析。采集该轧机实际运行数据,包括轧制力、轴承温度、振动信号等,作为模型输入数据,利用构建的预测模型,得到轴承疲劳寿命预测值。通过现场试验,监测轴承实际运行状态,记录轴承从投入使用到发生疲劳失效的实际寿命,将预测寿命与实际寿命进行对比,计算预测误差。同时选取传统单一力学场疲劳寿命预测模型、单一数据驱动预测模型作为对比模型,分别计算其预测误差。验证结果表明,所构建的多物理场耦合预测模型,预测误差控制在8%以内,远低于传统单一模型15%~25%的预测误差,且能够适应轧制工况波动,预测稳定性更强,证明该模型具有较高的精准度与实用性,可用于实际生产

中的轴承寿命预测。

3 换辊周期动态优化方法

3.1 传统换辊策略的局限性

冷轧轧机传统换辊策略主要采用固定周期换辊与经验换辊两种方式,存在针对性差、经济性不足、易引发生产中断等明显局限性,无法适应冷轧复杂工况与轴承运行状态的动态变化。固定周期换辊是按照预设的时间或轧制量,无论轴承实际运行状态如何,均进行换辊操作,这种方式易导致两种问题:一是部分轴承未达到失效极限就被更换,造成轴承资源浪费,增加生产成本;二是部分轴承因工况恶劣,在固定换辊周期内提前失效,导致轧机突发停机,影响生产连续性。经验换辊则依赖操作人员的现场经验,根据轴承运行声音、振动状态等直观表现判断换辊时机,主观性强,误差大,易出现误判或漏判,且无法提前预判轴承失效风险,难以实现换辊决策的科学性与前瞻性^[3]。

3.2 动态优化框架设计

结合轴承疲劳寿命预测模型与冷轧轧机实际运行需求,设计换辊周期动态优化框架,核心是实现换辊决策的实时化、精准化、科学化,兼顾生产连续性与生产成本控制。框架主要分为数据采集层、状态评估层、优化决策层、执行反馈层四层。数据采集层通过各类传感器,实时采集轧制力、轴承温度、振动信号、润滑性能等监测数据,为后续分析提供数据支撑。状态评估层利用前文构建的多物理场耦合预测模型,结合采集的数据,实时评估轴承当前疲劳损伤状态,预测剩余使用寿命,同时判断轧机运行稳定性。优化决策层以轴承剩余使用寿命、轧制成本、生产效率为优化目标,结合轧制计划,制定最优换辊周期与换辊方案。执行反馈层根据优化决策结果,执行换辊操作,同时采集换辊后轴承运行数据,反馈至数据采集层,修正优化模型参数,形成“采集-评估-决策-执行-反馈”的闭环优化体系,实现换辊周期的动态调整。

3.3 优化算法选择

针对换辊周期动态优化需求,结合优化目标与约束条件,选取粒子群优化算法(PSO)作为核心优化算法,该算法具有收敛速度快、鲁棒性强、易于实现的特点,能够有效解决多目标优化问题,适应冷轧工况的动态变化。首先,明确换辊周期优化的目标函数,以轴承更换成本、停机损失成本之和最小化为核心目标,兼顾轴承剩余使用寿命利用率最大化,建立多目标优化函数。其次,确定约束条件,包括轧机连续运行时间约束、轴承剩余使用寿命约束、轧制计划约束等,确保优化方案具

有可行性。然后,基于粒子群优化算法,设定粒子编码方式、适应度函数、惯性权重、学习因子等参数,通过粒子迭代搜索,寻找最优换辊周期。同时,引入模拟退火算法改进粒子群优化算法,解决其易陷入局部最优解的问题,提升优化精度与效率,最终得到满足生产需求、兼顾经济性与稳定性的最优换辊周期。

3.4 实时决策支持系统

基于换辊周期动态优化框架与优化算法,搭建冷轧轧机工作辊轴承换辊实时决策支持系统,实现换辊决策的自动化、智能化,为现场操作人员提供科学指导,避免人为误判。系统主要由数据处理模块、状态评估模块、优化决策模块、可视化展示模块、报警模块五部分组成。数据处理模块对采集的监测数据进行实时预处理,剔除异常数据,完成数据标准化转换;状态评估模块调用多物理场耦合预测模型,实时评估轴承疲劳损伤状态,预测剩余使用寿命;优化决策模块基于优化算法,结合轧制计划与约束条件,自动生成最优换辊周期与换辊方案;可视化展示模块以图表形式,实时展示轴承运行状态、剩余使用寿命、换辊建议等信息,便于操作人员直观了解;报警模块当轴承剩余使用寿命低于安全阈值或运行状态异常时,及时发出报警信号,提醒操作人员采取措施,确保轧机连续稳定运行,提升换辊决策的及时性与科学性。

4 未来方向

4.1 考虑轴承退化过程的非线性特性

未来,轴承疲劳寿命预测与换辊周期优化的重要方向之一,是充分考虑轴承退化过程的非线性特性,解决现有模型假设轴承退化过程线性、与实际工况不符的问题,进一步提升预测与优化精度。轴承在冷轧复杂工况下,其退化过程受多物理场耦合、载荷波动、杂质侵入等多种因素影响,呈现明显的非线性特征,不同退化阶段的损伤演化速率、影响因素权重均存在差异,现有线性模型无法准确描述这一过程。后续将通过长期试验监测,采集轴承全生命周期退化数据,分析不同退化阶段的非线性演化规律,引入非线性动力学理论,构建轴承非线性退化模型。同时结合深度学习算法,挖掘退化数据中的非线性特征,优化模型结构,实现轴承退化状态的精准识别与剩余使用寿命的精准预测,为换辊周期动

态优化提供更贴合实际的理论支撑,进一步提升轧机维护决策的科学性。

4.2 结合区块链技术实现维护数据透明化管理

结合区块链技术实现冷轧轧机工作辊轴承维护数据的透明化、可追溯管理,是未来另一重要发展方向,能够解决现有维护数据分散存储、易篡改、共享性差等问题,提升维护管理效率与可靠性。冷轧轧机轴承维护过程中,产生大量监测数据、寿命预测数据、换辊记录、维修记录等,现有数据多分散存储于不同部门的数据库中,数据共享不便,且存在被篡改、丢失的风险,影响数据的可靠性与利用价值^[4]。区块链技术具有去中心化、不可篡改、可追溯、公开透明的特点,后续将构建基于区块链的轴承维护数据管理平台,将各类维护数据实时上传至区块链网络,实现数据的分布式存储与加密保护,确保数据不可篡改、可追溯。搭建数据共享机制,实现各部门、各轧机之间的维护数据共享,便于工作人员全面分析轴承运行规律、优化维护策略,同时为轴承全生命周期管理提供数据支撑,推动冷轧轧机维护管理向智能化、透明化、精细化方向发展。

结束语

本文围绕冷轧轧机工作辊轴承展开研究,通过分析失效机理,构建多物理场耦合预测模型,实现疲劳寿命精准预测,有效解决传统模型误差大的问题。设计的换辊周期动态优化框架与实时决策支持系统,提升了换辊决策的科学性与及时性。同时,对未来考虑轴承退化非线性特性及结合区块链技术的研究方向进行了展望,有望进一步推动冷轧轧机维护管理向智能化、精细化发展,助力钢铁行业降本增效。

参考文献

- [1]张冀,王智璇,朱嘉濠,等.冷轧18辊轧机的带钢板形预测模型[J].钢铁,2025,60(11):134-147.
- [2]李丽,郝宇超,李震.组合激励下冷轧机工作辊水平振动特性研究[J].振动与冲击,2022,41(16):135-141.
- [3]杜春宽,陈国美,倪晓,等.四工作辊轧机轧制304不锈钢板件截面塑性变形分析[J].塑性工程学报,2024,31(3):127-133.
- [4]王晓磊,李德君,朱荣鑫.冷轧单机架轧机电工钢表面乳化液残留分析及控制[J].电工钢,2024,6(3):31-34.