

# 汽轮机关键部件疲劳寿命预测及优化设计

宁凡建

上海祥舜电力技术服务有限公司, 上海市, 202150;

**摘要:** 汽轮机关键部件作为电力装备安全运行的核心载体, 疲劳寿命精准预测与结构优化是保障装备从稳定服役迈向长效可靠的核心指标。传统汽轮机关键部件设计存在重强度校核轻疲劳演化、重静态分析轻动态响应、重经验选型轻机理建构等局限, 难以支撑部件全生命周期内疲劳性能的层级化提升。本文立足汽轮机服役工况特征与行业标准设计规范, 从明确疲劳寿命演化层级、优化载荷边界条件、构建多维度分析框架、完善全流程评价体系四个维度, 结合汽轮机不同工况下关键部件典型服役场景, 系统探究关键部件疲劳寿命预测与优化设计的实施路径, 推动部件从静强度满足、动响应适配逐步走向疲劳机理明晰与寿命可控, 为提升汽轮机关键部件结构可靠性、落实电力装备安全高效运行要求提供工程实践参考。

**关键词:** 汽轮机; 关键部件; 疲劳寿命; 寿命预测

**DOI:** 10.69979/3029-2727.26.02.069

当前传统汽轮机关键部件疲劳分析与设计存在方法固化、路径单一、评价终端化等短板, 难以适配现代电力装备对长周期、高可靠、低损耗的运行需求。多数工程设计仍以“定载荷—算应力—选材料—核强度”为核心流程, 忽视部件在变温、变载、交变冲击下疲劳损伤的累积过程与演化规律, 造成部件面对复杂工况耦合、长期循环载荷、极端环境扰动时, 无法将材料本构特性、结构几何特征、载荷传递机制转化为自主抵御疲劳失效的工程能力<sup>[1]</sup>。且标准化的设计流程无法适配不同部件、不同工况下疲劳损伤的差异化发展特征, 缺少阶梯式载荷建模与全过程机理分析, 导致疲劳预测偏差、优化方向模糊、寿命管控不足等问题更为突出。为此, 本文立足汽轮机关键部件疲劳失效机理与工业运行实际工况, 以高、中、低压缸核心部件为研究对象, 进一步探究汽轮机关键部件疲劳寿命预测及优化设计的工程策略, 为汽轮机结构设计与寿命管控提质增效提供实践依据。

## 1 汽轮机关键部件疲劳寿命演化的核心特征

汽轮机关键部件疲劳寿命演化遵循由轻到重、由局部到整体、由线性累积到非线性扩展的发展规律, 呈现明确的层级化特征。其核心表现为阶段式演进, 从初始微缺陷萌生起步, 经微裂纹稳态扩展过渡, 最终发展为宏观裂纹失稳断裂, 层层递进、不可跨越。而损伤过程可视化是疲劳寿命演化最突出的特征, 强调通过应力场解析、温度场耦合、损伤变量表征等手段揭示内在疲劳发展路径, 以外在力学响应支撑内在损伤机理认知<sup>[2]</sup>。

同时, 疲劳演化具有显著的工况关联性与结构耦合性, 能够从单一静载荷响应走向交变载荷适配、多场耦合协同、全工况兼容, 逐步形成可预测、可调控、可优化的疲劳性能体系, 与汽轮机高效安全运行的工程目标高度契合。

## 2 汽轮机关键部件疲劳寿命预测及优化设计的核心诉求

### 2.1 寿命预测层级不足, 工况梯度适配欠缺

传统汽轮机关键部件疲劳寿命预测以恒定载荷与简化工况为主要分析条件, 缺少低、中、高疲劳损伤层级的梯度建模, 无法充分匹配部件实际服役中的载荷波动与环境变化。设计分析仍以标准工况、简单载荷叠加为主, 未能将“缺陷萌生—稳定扩展—失稳断裂”的疲劳演化逻辑融入寿命预测模型, 造成低温工况下缺陷识别不足、中温工况下扩展速率估算偏差、高温工况下寿命衰减预判失误的工程困境。且载荷与边界条件难以实现从恒定到交变、从单一场到多场耦合的有序衔接, 损伤演化链条呈现碎片化, 无法形成“基础载荷—交变载荷—耦合载荷—极端载荷”的递进式预测路径。此外, 设计方案与实际工况的适配性不足, 难以将零散的强度校核数据转化为系统的寿命管控方法, 降低疲劳寿命预测对结构优化的支撑效能<sup>[3]</sup>。

### 2.2 优化设计方法单一, 疲劳机理挖掘薄弱

电力装备高质量发展对结构可靠性的需求推动设

计方法持续革新,但传统汽轮机关键部件设计仍局限于经验主导的模式。工程设计以材料选型与尺寸修正为核心,缺少对结构几何优化、载荷路径重构、损伤抑制机制的深度探索,无法破解“强度达标但疲劳薄弱、静态合格但动态失效、短期稳定但长期衰减”的工程难题。且设计过程中缺少“载荷解析—应力表征—损伤建模—寿命预测—方案优化—效果验证”的闭环设计,设计人员被动遵循规范条款,缺少在疲劳分析中经历多场耦合、参数敏感性分析、机理归纳、模型建构的深度研究。现有设计体系无法很好结合汽轮机“高温、高压、高转速”的服役特征,既没有系统构建材料疲劳特性、结构应力集中、热机耦合损伤等分析载体,也没有差异化的优化目标设计,造成部件抗疲劳性能、结构稳定性、寿命冗余度提升滞后于电力装备发展要求。

### 3 汽轮机关键部件疲劳寿命预测及优化设计路径构建分析

#### 3.1 立足疲劳演化规律,重塑寿命预测分析体系

设计人员需依据汽轮机关键部件疲劳损伤发展规律重新构建寿命预测分析体系,以现行汽轮机设计标准与工程实践为载体,打破重强度轻疲劳、重校核轻机理的传统局限。以锚定“缺陷萌生识别—扩展速率表征—寿命阈值判定—全周期管控”四级疲劳寿命演进为出发点,把关键部件设计参数转化为可解析、可表征、可迭代的阶梯式分析模型,契合汽轮机“从常温到高温、从静载到动载、从单一场到多场耦合”的服役特征,提升疲劳寿命预测的工程精度。

在基础寿命预测环节,依托材料疲劳性能试验数据与长期服役失效案例,构建材料本构与损伤累积模型,明确不同温度、不同应力水平下的疲劳性能边界,用基础力学特性支撑损伤机理认知。通过应力集中系数解析、热变形匹配性判定、载荷传递路径分析,清晰呈现从力学响应到损伤萌生的内在关联,确立关键部件基础疲劳寿命的判定逻辑。结合行业标准与设计规范构建基础分析任务,通过多物理场边界条件赋值,夯实静强度向疲劳性能过渡的分析基础。

分层预测建模层面,设计人员可根据不同部件服役等级,以设计规范为依据构建梯度化寿命预测模型。基础层级以工况载荷解析为核心,完成边界条件确定、应力场计算、关键部位定位;提升层级以疲劳损伤机理为核心,结合材料疲劳曲线与损伤累积准则,开展交变载

荷下损伤速率分析,引导分析模型从单一响应向动态演化过渡。针对应力集中、热疲劳、接触疲劳等典型失效模式,可将设计参数进行系统化拆解,区分高应力区、中应力区、低应力区的损伤发展差异,明确不同区域疲劳寿命的控制机制,帮助设计人员掌握多模式失效下的寿命预测方法。

同时,设计人员可搭建“力学响应—损伤表征—寿命预测”的分析桥梁,深化疲劳寿命预测与结构设计的融合。依据汽轮机整体设计体系,需将后续全生命周期运维要求嵌入前期设计阶段,在开展静强度分析时,同步考虑长期交变载荷、热冲击、振动耦合对疲劳寿命的影响。且设计人员可依托标准设计模型,自主构建面向特定工况的寿命预测模块,将基础力学分析与寿命动态预测相结合,使寿命预测过程与结构优化目标有机统一,强化设计方案的疲劳寿命导向<sup>[4]</sup>。

#### 3.2 优化设计实施流程,构建“解析—表征—建模—优化”四阶设计体系

汽轮机关键部件疲劳寿命预测与优化设计的协同落地,需要系统化的设计流程提供支撑。“解析—表征—建模—优化”四阶设计体系能够解决部件应力集中突出、损伤路径模糊、优化方向不明、验证不足等问题,满足不同层级疲劳性能提升需求。

设计人员首先立足行业规范,夯实载荷与边界解析环节,确立优化设计起点。针对载荷类型识别、温度场赋值、约束条件确定、关键部位筛选等设计要点,结合标准设计条款拆解分析流程,用参数化定义、边界敏感性分析、工况等效转化等方法保障设计精度。通过分步表述载荷传递路径、应力分布特征、损伤潜在区域,外化学响应与疲劳损伤的内在关联,明确优化设计逻辑。

其次,设计人员依托分析载体完成应力与损伤表征任务,使疲劳损伤过程可量化、可追踪。设计人员可根据部件结构特征,从标准设计模型延伸出多场耦合分析、应力集中抑制、损伤变量监测等分析方法。在热机耦合部件设计中,以规范模型为模板,利用温度场与应力场耦合分析明确高疲劳风险区域,直观呈现“热变形—机械应力—疲劳损伤”的演化链条。针对复杂结构部件,可设置多参数协同分析任务,让设计人员依据规范方法自主完成应力表征与损伤定位,明确优化重点。

最后,设计人员需搭建疲劳寿命建模与方案优化环节,推动疲劳性能深度提升。设计人员围绕寿命预测要

求,把寿命预测模型同结构优化目标相结合,设计递进式优化任务。以汽轮机典型高温部件为例,引导设计人员从具体结构参数中提炼出“抑制应力集中、减缓损伤扩展、延长寿命周期”的优化模型,把单一部件设计上升为系统化抗疲劳设计方法。经过参数迭代、对比分析、机理归纳,精准建立同类部件的疲劳设计模型,让设计人员直观认识到寿命预测对优化设计的支撑作用。

设计人员可借助材料性能数据库、结构分析工具反复验证设计方案,检验优化方向合理性。通过寿命预测结果反向校核结构参数,验证优化方案是否满足全周期服役要求,定位设计薄弱环节,从而深化对汽轮机关键部件疲劳设计方法的认知。设计人员则根据分析结果与优化过程梳理设计要点,构建“载荷解析—损伤表征—寿命预测—方案优化”的设计闭环,提升关键部件疲劳设计的系统性与精准性。

### 3.3 强化全过程管控,构建多维疲劳性能保障机制

全过程管控是汽轮机关键部件疲劳寿命预测及优化设计落地的核心支撑,也是连接材料选型、结构设计、寿命预测、运维保障的关键纽带。设计人员依靠多场耦合分析、梯度化建模、参数敏感性分析、全流程评价,可打通前期设计、中期制造、后期运维的疲劳性能管控壁垒,融合设计分析、制造检测、服役监测、全周期评估,构建研、产、用、管深度衔接的疲劳性能保障体系。

根据汽轮机部件服役需求与行业设计规范,采用阶梯化推进、全过程管控的方式,使设计优化服务于部件疲劳性能全面提升,实现结构合规与寿命达标的同步完成。设计人员应以载荷解析、应力表征、损伤建模、寿命预测、方案验证为核心,创建“模型支撑、参数精准、梯度优化、评价促改”的设计策略。

设计人员可协同前期设计、中期分析、后期验证,将关键部件疲劳设计难点进行系统化拆解。前期设计阶段构建定制化分析模块,包含材料疲劳性能数据库、工况等效方法、基础应力分析任务,让设计人员自主完成参数赋值、载荷识别、潜在损伤定位,并记录设计中的关键问题,形成初步设计诊断。中期分析阶段采用“析—模—优”三段式设计,利用多场耦合分析、参数化建模、敏感性分析等工具,引导设计人员完成载荷解析、

损伤表征、寿命预测、方案优化的递进式任务,并实时跟踪分析结果与设计偏差。通过设计分析记录表、参数优化报告、方案对比表完成多维全过程评价,针对共性设计短板及时调整优化方向。

对于应力集中突出、热疲劳严重、寿命预测偏差等问题,设计人员可将全过程评价结果同梯度化优化目标相结合,设计疲劳性能提升任务。基础层级要求设计人员依托分析模型,完成载荷解析与应力表征,形成基础设计方案;提升层级鼓励设计人员脱离简化模型,独立完成多场耦合分析与损伤建模,提出针对性优化措施;拓展层级引导设计人员结合工程实际,自主构建面向特殊工况的疲劳设计方案并完成可行性验证。后期设计人员汇总分析数据、优化报告、验证结果,结合设计全流程制作疲劳性能评估报告,向设计方案推送个性化优化建议,搭建疲劳寿命预测与优化设计的完整闭环。

## 4 结论

电力装备高质量发展背景下,汽轮机关键部件设计应打破传统强度校核的局限。通过构建分析体系重构、四阶设计优化、全过程管控保障的实施路径,实现疲劳寿命预测与结构优化设计深度融合,从而全面提升汽轮机关键部件疲劳可靠性与全生命周期服役能力。

### 参考文献

- [1]黄友欢,孙文霞,徐斌.汽轮机关键部件材料用高速钢麻花钻选型[J].热力透平,2026,55(01):59-64.
- [2]岳新宇.汽轮机关键部件状态监测与寿命评估方法探析[J].电力设备管理,2025,(14):77-79.
- [3]马丁.电厂汽轮机关键部件制造工艺优化分析[J].现代制造技术与装备,2024,60(04):177-179.
- [4]李全德,龚显龙,倪荣,等.超临界CO<sub>2</sub>环境下典型汽轮机关键部件用材腐蚀行为研究[J].原子能科学技术,2023,57(09):1790-1799.

作者简介:宁凡建(1988.11-),男,汉,籍贯:山东省章丘市,学历:大专,职称:无,研究方向:机械(机械设计与制造)。