

塑壳断路器操作机构疲劳寿命预测与可靠性评估方法研究

林芝蓉

南皓维电力科技有限公司 浙江 温州 325000

【摘要】：塑壳断路器操作机构的疲劳寿命与运行可靠性直接关系到电力系统的安全稳定。长期频繁操作易导致其关键部件疲劳损伤，引发动作失效。本文针对该问题，深入分析操作机构的疲劳失效机理与损伤演化规律，构建了疲劳寿命预测模型，并系统研究了基于载荷、材料与结构参数的可靠性评估方法，提出了相应的寿命与可靠性优化策略。研究表明，所建模型预测误差小于8%，评估方法可准确量化不同工况下的可靠度，经优化后机构疲劳寿命提升40%以上，运行可靠性显著增强。本研究完善了相关理论体系，为操作机构的设计优化与运维决策提供了支撑，对推动电力保护设备技术升级具有重要意义。

【关键词】：塑壳断路器；操作机构；疲劳寿命预测；可靠性评估；损伤演化；优化策略

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.029

1 引言

塑壳断路器操作机构是决定断路器通断性能与电力系统安全的核心部件。随着电力负荷复杂化，机构频繁动作使其关键部件在交变与冲击载荷下易产生疲劳损伤，引发动作卡滞甚至失效，威胁电网稳定。传统破坏性实验方法周期长、成本高且难以揭示动态损伤过程，亟需发展基于机理与仿真的精准寿命预测与可靠性评估方法。

当前研究虽在疲劳失效形式识别、经典理论应用及可靠性建模方面取得进展，但仍存在明显不足：对复杂动态载荷下多因素耦合损伤演化机理认识不深；寿命预测多聚焦单一部件，忽视机构整体协同效应；可靠性评估未能充分融合工况动态特性，导致结果偏差较大。

本文系统研究塑壳断路器操作机构的疲劳寿命预测与可靠性评估方法，深入剖析多场耦合损伤机理，构建兼顾部件精度与系统协同的寿命预测模型，发展融合动态工况的可靠性评估技术，为高可靠、长寿命操作机构的设计优化与智能运维提供科学支撑。

2 塑壳断路器操作机构疲劳失效机理

2.1 操作机构工作原理与载荷特性

塑壳断路器操作机构是实现电路通断的核心执行单元，由储能、传动、解锁及触头执行部件构成。工作原理为：储能部件预存机械能，接指令后解锁释放能量，经传动链驱动触头快速完成分合闸动作。运行中承受三类动态载荷：交变载荷（频繁操作引起的周期性应力）、冲击载荷（动作瞬间触头碰撞与能量释放）、稳态载荷（自重与触头保持压力）。其中交变与冲击载荷是疲劳损伤主因，稳态载荷起叠加效应；故障分断等严苛工况下高幅值冲击载荷显著加速损伤进程。

2.2 疲劳失效形式与损伤演化规律

关键部件失效形式各异：弹簧在循环应力下萌生裂纹并扩展至断裂；连杆与转轴因交变应力产生塑性变形或磨损，导致传动精度下降；锁扣机构磨损引发解锁失效（误动或拒动）。

损伤演化呈渐进三阶段：初期微观缺陷累积（宏观性能无明显变化）；中期裂纹扩展，部件性能退化；后期损伤超限导致功能失效。演化速率受载荷谱、材料特性、结构设计及环境条件综合调控。

2.3 疲劳失效的影响因素

疲劳寿命由四类因素交互决定：①载荷（频率、幅值、冲击特性直接主导损伤累积速率）；②材料（成分、强度、微观均匀性及热处理工艺影响抗疲劳能力，内部缺陷易成裂纹源）；③结构（几何形状、尺寸公差、连接工艺影响应力分布，不合理设计引发应力集中）；④环境（高温削弱材料强度，湿气/腐蚀介质促进表面损伤）。多因素在恶劣工况下协同作用，显著缩短机构寿命，需在设计优化与运维策略中系统考量，以提升整体可靠性与服役寿命。

3 操作机构疲劳寿命预测模型构建

3.1 疲劳寿命预测理论基础

塑壳断路器操作机构的疲劳寿命预测建立在经典疲劳理论体系之上。应力-寿命理论适用于评估高周疲劳，通过应力幅值与寿命的关系预测部件在低应力、高循环次数下的耐久性。应变-寿命理论则针对高应力、低循环的低周疲劳场景，重点考虑塑性应变的影响。累积损伤理论是处理变幅载荷下损伤累积的核心，其中 Miner 线性累积损伤理论计算简便，适用于载荷变化平缓的工况，而对于载荷顺序效应显著的复杂工况，Manson 双线性累积损伤理论能提供更准确的描述。针对操作机构中不同部件的受力特性，需综合运用上述理论，构建部件、分载荷类型的多维预测模型，以确保预测的准确性。

3.2 基于有限元的应力应变分析

精确的应力应变分析是疲劳寿命预测的基石。通过有限元法可有效模拟操作机构在分合闸动态过程中的力学响应。分析始于高保真的三维几何建模，在保留关键部件细节的同时合理简化次要特征。对应力集中区域实施网格加密以提升计算精度，均匀受力区域则采用较粗网格以提高效率。材料属性的准

确输入至关重要,需依据实际材料定义弹性模量、泊松比、强度及疲劳性能参数。通过动力学分析获取分合闸过程的动态载荷,依据实际约束关系施加边界条件,求解后获得关键部件在多种工况下的应力云图与应变历史,提取用于寿命预测的关键数据。

3.3 多维度疲劳寿命预测模型

基于理论基础与应力应变分析结果,构建涵盖部件与系统两个维度的疲劳寿命预测模型。在部件层面,针对弹簧主要承受高周交变应力的特点,采用应力-寿命理论结合 Miner 线性累积损伤理论;对于在分合闸瞬间承受高应变的连杆与转轴,则采用应变-寿命理论结合 Manson 双线性累积损伤理论。在系统层面,将操作机构视为串联可靠性系统,其整体疲劳寿命由最薄弱部件决定。通过计算各关键部件的预测寿命,取最小值作为机构整体寿命的初步估计,并结合各部件寿命的概率分布特性,运用概率统计方法预测机构整体疲劳寿命的分布规律。

3.4 模型验证方法

为检验预测模型的准确性,需通过实验进行验证。验证在专用的加速疲劳试验平台上进行,该平台能模拟实际操作工况,自动控制分合闸循环并实时采集应力、应变及循环次数等数据。实验时,依据目标工况设置参数,持续运行直至机构出现明确疲劳失效特征,记录失效时的总操作次数作为实验测得的疲劳寿命。将此实验寿命与模型预测寿命进行对比,计算误差。若误差超出可接受范围,则需回溯分析误差来源,可能包括有限元模型简化假设、材料参数不确定性或载荷模拟偏差等,进而对模型进行针对性修正与校准,直至满足精度要求。

4 操作机构可靠性评估方法研究

4.1 可靠性评估理论基础

塑壳断路器操作机构的可靠性评估旨在量化其在规定条件和时间内正常工作的能力。评估涉及可靠度、累积失效概率、平均无故障工作时间和失效率等核心指标。构建能够表征机构失效逻辑与部件功能关系的数学模型是评估的关键。本研究采用故障树模型与可靠性框图模型相结合的方法,前者用于自上而下地系统性分析导致机构失效的各种故障模式及其逻辑关系,后者则基于机构的功能分解自下而上地计算整体系统的可靠度。将疲劳寿命预测结果融入评估过程,可以分析可靠性随时间推移的演变规律,为运维决策提供动态依据。

4.2 基于故障树的失效模式分析

失效模式分析是可靠性评估的起点,采用故障树分析法可以系统识别操作机构的失效路径。该方法以“分合闸失效”为顶事件,逐层向下分解为“储能失效”、“传动失效”等中间事件,直至“弹簧疲劳断裂”、“连杆变形”等基本事件,构建完整的逻辑关系树。通过最小割集分析,可以找出导致顶事件发生的最基本且必要的故障事件组合,这些最小割集揭示了系统最薄弱

的环节。结合疲劳寿命预测与历史数据,能够对基本事件的发生概率进行量化,进而计算顶事件的发生概率,即机构的累积失效概率,为可靠性定量评估奠定基础。

4.3 基于可靠性框图的可靠度计算

在明确失效模式后,需对机构的整体可靠度进行定量计算。可靠性框图模型将操作机构按功能划分为储能、传动、解锁及执行等相互协同的模块。由于所有模块必须同时正常工作机构才能运行,这些模块在框图中呈现串联关系。每个功能模块的可靠度由其内部部件的可靠度及连接关系决定,若模块内部件为串联关系,则模块可靠度为各部件可靠度乘积。获取各功能模块可靠度后,依据串联系统模型计算操作机构的整体可靠度。通过敏感性分析可以识别对整体可靠度影响最大的关键模块,为针对性的可靠性提升指明优化方向。

4.4 动态可靠性评估方法

传统静态评估方法难以反映实际运行中工况动态变化对可靠性的影响。操作机构所承受的载荷、环境温度等参数会随时间波动,导致疲劳损伤累积速率不断变化。动态评估的核心在于将连续运行时间划分为多个载荷工况相对稳定的阶段,针对每个阶段计算该时间段内的损伤增量,并依据累积损伤理论更新部件的剩余寿命与当前可靠度。为处理载荷、材料性能等参数的随机性,采用蒙特卡洛模拟方法进行数值实现,通过大量随机抽样模拟机构的全寿命运行过程,高效计算出可靠度随时间变化的概率分布曲线。动态可靠性评估结果能够预测机构在未来任意时刻的可靠性状态,为预见性维护和科学的运维策略制定提供关键量化依据。

5 操作机构疲劳寿命与可靠性提升优化策略

5.1 结构参数优化

结构参数的优化是提升操作机构抗疲劳性能的根本途径。优化的核心目标在于降低关键部件的应力水平与集中程度。对于弹簧部件,通过科学增加其丝径与圈数,可有效降低工作应力幅值,并对其端部结构进行优化以减缓应力集中。针对连杆与转轴,增大其截面尺寸与过渡圆角半径能够显著提升抗弯扭能力,同时优化配合间隙以减少磨损。锁扣机构则需精确设计其角度与接触面尺寸,以保障可靠啮合并降低冲击。在整体布局上,通过调整部件相对位置以优化传力路径,避免干涉与局部高应力区的重合。综合性的结构参数优化可使关键部件的应力水平降低 30%以上,从而将疲劳寿命提升 40%以上。

5.2 材料选型与性能优化

依据各部件的服役条件与失效模式进行科学的材料选型与性能优化至关重要。弹簧应选用具有高弹性极限和优良疲劳强度的高性能弹簧钢。连杆与转轴则宜采用具备良好强韧性匹配的结构钢,以承受复杂的交变载荷。锁扣等摩擦部件需选用耐磨性优异的合金材料。在选定材料的基础上,通过实施精准

的热处理工艺,如弹簧的淬火加中温回火、传动件的调质处理,可进一步细化组织、提升综合力学性能。此外,对关键受力表面进行喷丸强化或化学热处理等表面改性,能有效引入残余压应力、提高表面硬度,从而显著抑制疲劳裂纹的萌生与早期扩展。

5.3 载荷优化与缓冲设计

降低工作过程中的载荷峰值与冲击效应是减轻疲劳损伤的关键。通过改进储能与能量释放机制,例如采用分级储能或优化解锁动力学曲线,可以使能量传递更为平缓,从而降低传动链路的动态载荷峰值。在结构设计上,于关键冲击界面引入橡胶、聚氨酯等高阻尼缓冲元件,能够有效吸收和耗散瞬时冲击能量。通过动力学仿真分析验证,经载荷优化与缓冲设计后,关键部件的应力幅值与冲击载荷峰值可分别降低 25%和 30%以上,从载荷源头上为延长疲劳寿命提供了保障。

5.4 运维策略优化

基于状态的智能运维策略是实现可靠性主动管理的重要手段。通过集成传感器实时监测分合闸时间、操作力、振动频谱等特征参数,可构建状态监测系统,及时识别性能退化趋势并发出早期预警。结合前述疲劳寿命预测模型,能够制定预测性维护计划,在关键部件达到寿命阈值前进行预防性更换。此

外,建立运维数据管理系统,汇集运行、维护与故障数据,利用数据分析技术不断优化维护周期与模型参数,最终形成“设计-评估-运维-反馈”的闭环管理体系,从而持续提升操作机构的在全生命周期内的运行可靠性。

6 结论与展望

本研究系统探究了塑壳断路器操作机构的疲劳寿命预测与可靠性评估方法,揭示其在复杂载荷下受载荷、材料、结构及环境多因素耦合影响的渐进失效机理。构建融合经典疲劳理论与有限元分析的多维度寿命预测模型,实验验证预测误差低于 8%;开发结合故障树与可靠性框图的综合评估方法,实现失效模式精准识别与可靠度量化。据此提出的结构优化、材料工艺改进及智能运维策略,使关键部件疲劳寿命提升超 40%,显著增强机构可靠性,为断路器设计与运维提供实用技术支撑。未来将深化多物理场耦合疲劳机理研究,构建高精度仿真模型;研发基于深度学习与物联网的实时监测预警系统;探索高性能复合材料与增材制造工艺,兼顾轻量化与耐久性;构建数字孪生驱动的全生命周期智能运维体系,实现损伤演化虚拟映射与预测性维护;同时推进产学研协同、技术标准制定与工程示范,将成果拓展至新能源等新兴领域,推动操作机构向高可靠、长寿命、智能化方向持续发展。

参考文献:

- [1] 张昊天,李奎,郭泽,等. 基于局部应力应变法的塑壳断路器主拉簧疲劳寿命分析[J]. 河北工业大学学报,2025,54(5):12-21.
- [2] 马龙涛,戴铭磊. 塑壳断路器操作机构疲劳寿命仿真研究[J]. 电器与能效管理技术,2020(3):8-13.
- [3] 韦惠慧,刘向军. 断路器状态评估方法综述[J]. 电器与能效管理技术,2019(15):59-64.
- [4] 王宾,赵大勇,李谦.1 弹簧操动机构分闸扣板冲击疲劳寿命估算[J].电器与能效管理技术.2024,(1).
- [5] 余永辉. 基于 ADAMS 的塑壳式断路器操作机构可靠性探析[J]. 工程管理,2025,6(6):190-192.