

# 高压真空断路器寿命评估与预防性维护策略

李显东 欧林龙 朱达

宁波奥克斯智能科技股份有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i3.8807

**[摘要]** 高压真空断路器寿命衰减与故障发生由产品设计、工况运行、运维管理及环境影响等多因素共同驱动，当前其寿命评估存在溯源精度低、评估模型与设备工况适配性不足、全生命周期数据整合不充分等问题，预防性维护则面临维护体系层级缺失、维护措施滞后于设备劣化节奏、智能化预警机制不完善等痛点。本文提出构建多维度寿命衰减成因溯源识别体系、分级搭建全生命周期预防性维护体系、优化适配设备工况的寿命评估技术、搭建智能化寿命监测与维护管控平台等策略，进一步提升高压真空断路器寿命评估精准度与预防性维护有效性，筑牢电力系统一次设备安全运行防线。

**[关键词]** 高压真空断路器；寿命评估；预防性维护；劣化机理；维护策略

## Life Assessment and Preventive Maintenance Strategies for High-Voltage Vacuum Circuit Breakers

Li Xiandong Ou Linlong Zhu Da

Ningbo AUX Intelligent Technology Co., Ltd.

**[Abstract]** The lifespan degradation and failure occurrence of high-voltage vacuum circuit breakers are driven by multiple factors including product design, operational conditions, maintenance management, and environmental impacts. Current life assessment methods face challenges such as low traceability accuracy, insufficient compatibility between evaluation models and equipment conditions, and inadequate integration of lifecycle data. Preventive maintenance systems encounter pain points including missing hierarchical maintenance frameworks, measures lagging behind equipment deterioration rates, and incomplete intelligent early warning mechanisms. This study proposes strategies including establishing a multi-dimensional cause identification system for lifespan degradation, implementing tiered lifecycle preventive maintenance frameworks, optimizing equipment condition-adaptive life assessment technologies, and developing intelligent life monitoring and maintenance management platforms. These measures aim to enhance life assessment accuracy and preventive maintenance effectiveness for high-voltage vacuum circuit breakers, thereby strengthening the safety safeguards for primary power system equipment operations.

**[Key words]** High-voltage vacuum circuit breaker; Life assessment; Preventive maintenance; Degradation mechanism; Maintenance strategy

高压真空断路器作为电力系统中开合电路、保护设备的核心一次设备，其运行寿命与工作可靠性直接关系到电网的安全稳定运行，设备寿命衰减呈现出渐进性、隐蔽性与工况关联性等特征，若寿命评估失准、维护不及时，易引发设备拒动、误动等故障，不仅增加设备检修与更换成本，还可能诱发电网停电事故，影响电力供应连续性<sup>[1]</sup>。当前高压真空断路器寿命评估与预防性维护工作存在劣化成因分析不深入、评估模型缺乏

针对性、维护流程不闭环等问题，严重制约设备运维效率与电网精益化管理水平。基于此，本文围绕高压真空断路器寿命衰减主要类型与形成机理展开分析，探究科学有效的寿命评估方法与预防性维护策略，为高压真空断路器全生命周期运维管理提供技术与支撑。

### 1 高压真空断路器寿命衰减形成机理分析

高压真空断路器寿命衰减是设计先天局限、工况运行劣

化、运维操作不规范与环境因素侵蚀共同作用的结果，设计与产品制造为设备寿命奠定基础，工况运行、运维管理与环境影响则直接决定设备寿命衰减速率与故障发生概率。设计阶段的结构设计不合理、参数选取与电网工况不匹配、真空灭弧室设计缺陷等问题，为设备寿命衰减埋下先天隐患，如触头开距设计不足易加速电磨损，绝缘件结构设计疏漏易引发绝缘性能衰减。产品制造环节的工艺把控不严、零部件加工精度不达标、装配间隙偏差等，会造成设备初始性能缺陷，如真空灭弧室封接工艺不良易导致真空度下降，操动机构零部件加工误差易引发机械卡涩<sup>[2]</sup>。

## 2 高压真空断路器寿命评估与预防性维护现状分析

### 2.1 评估体系缺乏针对性，寿命溯源精准度低

当前高压真空断路器寿命评估缺乏科学的分级分类设计，评估体系的构建未充分结合设备型号、运行年限、电网工况等差异化特征，通用化评估模型与设备实际劣化状态的适配性较差。寿命衰减成因溯源仅聚焦于单一指标检测，未实现电、机械、绝缘等多维度劣化参数的协同分析，对触头电磨损、灭弧室真空度下降、操动机构机械疲劳等核心劣化因素的溯源深度不足。评估指标的设定缺乏全生命周期数据支撑，多依赖经验值与标准阈值，未考虑设备运行工况的动态变化，导致寿命评估结果与实际情况偏差较大，难以精准预判设备剩余寿命。

### 2.2 维护体系层级缺失，关键部件管控效能薄弱

高压真空断路器预防性维护缺乏分级防控设计，维护体系的层级构建存在明显缺失，真空灭弧室、操动机构、触头系统等核心部件作为维护管控的核心区域，其预防性维护的针对性与系统性不足。维护层级的划分缺乏明确标准，维护措施与部件劣化特征的适配性较差，未根据设备劣化程度、重要性等级制定差异化维护策略，且维护责任未实现全流程、各岗位细化落实。核心部件的维护多以定期计划维护为主，缺乏状态化、个性化维护方案，易出现“过度维护”或“维护不足”问题，关键部件的劣化隐患未能及时发现与处置，导致维护效能大打折扣。

### 2.3 维护措施适配性不足，滞后于设备劣化节奏

面对不同电压等级、不同运行工况、不同环境条件的高压真空断路器，现有预防性维护措施与设备实际劣化需求的适配性存在显著差距，维护技术的针对性、维护材料的适配性、维护工艺的科学性均未达到精细化管控标准。维护措施的制定仍依赖传统经验判断，未与设备寿命衰减成因溯源结果、实际运行工况参数进行深度绑定，专项维护技术的应用缺乏针对性，工艺与设备配套的协同性不足。

### 2.4 管控机制不完善，寿命与维护动态调控滞后

高压真空断路器全生命周期寿命监测与预防性维护的动

态管控机制尚未构建完善，设备劣化监测技术的应用覆盖不全面，电、机械、绝缘等关键参数采集的频次与精度未能满足评估与维护需求，各类设计、制造、运行、检测、维护数据的整合共享程度偏低。寿命评估与维护策略的调整多为事后处置，针对设备运行过程中出现的参数偏移、性能劣化等问题，未能实现快速溯源与精准调控。

## 3 高压真空断路器寿命评估与预防性维护策略

3.1 分级构建全生命周期预防性维护体系，强化核心部件管控效果

真空灭弧室、操动机构、触头系统等核心部件的预防性维护效果直接决定高压真空断路器的运行寿命与可靠性，肩负着设备劣化隐患提前预防与运行性能稳定保障的双重职责。分级构建科学完善的全生命周期预防性维护体系，可将精准维护技术全面融入设备劣化溯源、维护方案设计、现场实施、效果校验全流程，实现维护层级的精准定位与维护强度的梯度提升。

运维单位可搭建“部件分级-措施适配-工艺迭代”的全流程维护实施框架，以分级维护理念贯穿设备劣化排查、维护方案设计、现场施工、效果验收等各个环节，实现部件分级与维护工艺的精准适配。建立分级维护与寿命衰减成因溯源的联动机制，将全流程维护目标拆解为部件划分、措施制定、参数控制等具体任务，由技术攻坚小组牵头核心环节突破。例如在变电站高压设备运维中，设立“分级维护示范站”，由技术骨干主导核心部件划分、维护措施设计、维护工艺优化等核心工作。将维护责任细化到设备进场验收、运行监测、定期检测、故障处置、退役评估等全流程，其中真空灭弧室、操动机构设置一级维护，触头系统、绝缘拉杆设置二级维护，柜体、接线端子等附属部件设置三级维护，分层落实维护要求。

同时，推动分级维护标准与电力设备运维管理体系深度融合，将全流程维护施工流程、参数控制要求纳入企业设备运维管理制度。在维护方案优化过程中，由技术专家组联合一线运维人员，结合3组以上同类设备寿命评估与维护案例经验，梳理不同维护层级的设备劣化难点与隐患点，制定针对性分级维护方案，形成“劣化精准溯源+分级梯度维护”的协同推进机制。在维护实施阶段，采用“分层维护、逐道校验”模式，一级维护部件采用高精度检测与标准化维护工艺，运行过程中实时监测核心参数，维护验收实行100%全检；二级、三级维护部件依次降低检测频次与维护精度要求，实行抽样验收，同步实时监测设备运行数据，根据监测数据动态调整维护参数，推动核心部件的预防性维护效果持续强化。

3.2 适配设备工况与劣化特征，优化专项寿命评估技术体系

高压真空断路器寿命评估的精准度，核心取决于专项寿命

评估技术体系与设备运行工况、劣化特征的适配性与应用科学性，直接关系到设备剩余寿命预判的准确性与预防性维护策略的合理性。在电力设备精益化运维导向下，需以专项寿命评估技术体系优化为核心突破口，将评估技术、检测设备、数据分析等关键要素转化为设备寿命评估的实际成效。这既是破解不同工况下高压真空断路器寿命评估难、精度低、预判偏差大等行业痛点的关键举措，也是筑牢电力设备安全运行防线、提升电网运维管理水平核心支撑。

针对不同电压等级、不同运行工况、不同劣化特征的高压真空断路器，构建“技术优选、检测适配、数据分析”的三维专项寿命评估技术应用体系，以“适配性优先、评估性精准、预判性可控”为核心原则。该体系摒弃传统寿命评估“一刀切”的技术选型模式，将设备寿命衰减成因溯源结果、运行工况参数与评估技术指标深度绑定，通过高效专项评估技术（如真空度在线监测技术、触头电磨损检测技术、操动机构机械特性测试技术）、高精度检测设备（如微水仪、真空度测试仪、机械特性分析仪）、大数据劣化趋势分析方法（如灰色预测模型、BP神经网络模型）的三方协同，形成“技术保评估、检测提精度、分析强预判”的闭环管控模式。其关键在于将评估技术与检测设备选型从“经验判断”转向“精准适配”，从“单一指标检测”升级为“多维度体系化评估”，使专项寿命评估技术体系成为提升高压真空断路器寿命评估精度的核心支撑。

推行该体系时，需制定“高压真空断路器寿命评估技术与检测设备适配责任清单”，将评估技术参数、检测设备精度指标、数据分析标准化挂钩，以标准规范选型、以参数控制精度、以分析保障预判，推动寿命评估技术与检测设备应用全流程标准化落地。例如，溯源出真空灭弧室真空度下降为设备核心劣化成因后，优先选用测量精度 $\leq 10^{-4}$ Pa的真空度测试仪，搭配真空度在线监测装置实现连续数据采集，采用灰色预测模型对真空度衰减趋势进行拟合，预判灭弧室剩余寿命。为保证评估结果的精准性，可采用“离线检测+在线监测”的复合评估工艺，离线检测每3个月开展1次，在线监测数据每小时采集1组，结合设备运行年限、短路开断次数等参数调整预测模型系数。

### 3.3 全流程动态监测设备状态，优化寿命评估与维护管控参数

动态监测高压真空断路器全生命周期运行状态、优化寿命评估模型与预防性维护管控参数，是破解设备寿命衰减溯源难、评估精度低、维护滞后等问题的核心路径，更是保障设备运行可靠性、防范劣化隐患演变为故障的关键举措。

运维单位应建立“三维协同”溯源与管控机制，以《高压开关设备现场试验导则》等行业标准为准则，明确设备寿命衰

减溯源边界与寿命评估技术标准，以全过程监测数据为支撑优化维护管控参数，以专项技术革新提升评估与维护效能，实现设备劣化溯源、寿命评估、预防性维护、效果核验的全流程可控。在技术架构层面，组建由设计、制造、运维、检测等领域专家牵头，设备管控、现场运维、数据分析等班组深度参与的专项工作组，打破技术壁垒，建立数据实时共享与协同处置机制。

针对不同电压等级、不同运行工况及不同劣化类型的高压真空断路器，将寿命评估精度、检测设备性能、维护质量验收标准等核心要求，转化为可量化的技术指标，嵌入设备寿命评估与预防性维护全流程。例如，在设备劣化溯源阶段，采用高精度检测设备（测量精度 $\pm 0.01$ mm）与设备全生命周期追溯系统联合应用，每类核心参数每24小时采集1组数据，重点捕捉劣化位置、程度、速率、成因等关键信息。而在预防性维护阶段，优化核心维护工艺参数，如对操动机构进行维护时，将轴承间隙控制在0.05-0.1mm，分合闸线圈工作电压控制在额定电压的85%-110%，润滑脂加注量严格按照设备手册要求执行，同时每10分钟记录1次维护操作参数，动态适配设备劣化治理需求。

为提升寿命评估与维护管控决策的精准度，需搭建智能化寿命监测与维护管控平台，整合设备设计制造数据、运行监测数据、检测试验数据、维护处置记录等资源，实现多维度数据比对与劣化隐患预警。

## 4 结论

针对当前高压真空断路器寿命评估与预防性维护工作中成因溯源、评估体系、维护措施、管控机制等环节的现存问题，通过构建多维度寿命衰减成因溯源体系、分级搭建全生命周期预防性维护体系、优化适配设备工况的专项寿命评估技术体系、搭建智能化寿命监测与维护管控平台等策略，可有效提升高压真空断路器寿命衰减成因定位精准度与寿命评估准确性，实现预防性维护从“定期计划”向“状态精准”转变。

## [参考文献]

[1]樊荣,刘俊翔,莫永鹏,等.高压真空断路器分闸过程中段缓冲装置的仿真设计与研究[J].高压电器,2026,62(02):19-24.

[2]成兰.高压真空断路器灭弧室触头温度测算方法[J].真空,2026,63(01):74-81. DOI:10.13385/j.cnki.vacuum.2026.01.12.

作者简介:李显东,出生年月:1986-12-27,男,汉族,籍贯:河南濮阳清丰,学历:本科,职称:中级工程师,研究方向:电气工程、电力传输技术、高压断路器寿命评估和预防维护。