

水电站主变压器绝缘油老化特性与寿命评估方法探索

祝 菁

重庆大唐国际彭水水电开发有限公司 重庆 409600

摘 要：水电站主变压器作为电力系统能量转换与传输的核心设备，其运行可靠性直接关乎水电站乃至区域电网的安全稳定。绝缘油是主变压器内部关键的绝缘与冷却介质，其性能随运行时间推移发生的老化劣化，是影响变压器寿命与运行安全的核心因素。本文以绝缘油特性为核心研究侧重点，系统分析水电站主变压器绝缘油的老化机理，深入探讨老化过程中绝缘油关键特性的演变规律，包括理化特性、电气特性及抗氧化特性等方面的变化特征；在此基础上，梳理并探索适用于水电站主变压器绝缘油的寿命评估方法，为精准判断绝缘油状态、保障变压器安全长效运行提供理论支撑。

关键词：水电站；主变压器；绝缘油；老化特性；寿命评估

引言

水电站电力生产传输体系中，主变压器是连接发电端与电网的核心枢纽，承担水轮发电机组低压电能至高压电能的转换职责。绝缘系统是设备稳定运行的核心，绝缘油作为系统重要组成部分，兼具绝缘、冷却、灭弧功能，性能稳定性直接决定主变压器运行状态与使用寿命。复杂运行环境下，绝缘油受多因素作用逐渐老化劣化，威胁绝缘系统安全。深入研究绝缘油老化特性与寿命评估方法，对提升设备可靠性、降低运维成本意义重大。本文聚焦绝缘油特性，剖析其老化机理与演变规律，为寿命评估优化提供理论支撑。

一、水电站主变压器绝缘油的基本特性与老化机理

（一）绝缘油的基本特性

水电站主变压器所用绝缘油多为矿物绝缘油，其核心功能的实现依赖于自身优异的基本特性，主要包括理化特性、电气特性和抗氧化特性三大类，这些特性共同决定了绝缘油对变压器的保护效能。

理化特性是绝缘油基础性能的直观体现，主要涵盖黏度、密度、酸值、水分含量、介损因数、击穿电压等关键指标。其中，黏度直接影响绝缘油的冷却效能，较低的黏度可确保油液在变压器内部顺畅循环，及时带走绕组产生的热量；密度则与油液的对流循环特性相关，合理的密度范围能保障冷却系统的高效运行；酸值是衡量绝缘油中酸性物质含量的重要指标，初始状态下绝缘油酸值极低，可避免对变压器内部金属部件和绝缘材料产生腐蚀；水分含量是影响绝缘油绝缘性能的关键因素，

微量水分即可显著降低绝缘油的击穿电压，因此初始水分含量需严格控制在极低水平。

电气特性是绝缘油实现绝缘功能的核心保障，主要包括击穿电压、介电强度、体积电阻率等指标。击穿电压是指绝缘油在电场作用下发生电击穿时的最低电压，直接反映油液的绝缘能力，是判断绝缘油能否有效隔绝变压器内部不同电位部件的关键参数；介电强度与击穿电压密切相关，表征绝缘油抵抗电场击穿的能力；体积电阻率则反映绝缘油的导电性能，较高的体积电阻率可减少油液中的泄漏电流，避免因电流损耗导致油液温度升高，进而延缓老化进程。

抗氧化特性是绝缘油维持长期稳定运行的重要基础。绝缘油在运行过程中不可避免地会与氧气接触，若抗氧化性能优异，可有效抑制氧化反应的发生，减少老化产物的生成；反之，氧化反应会持续加剧，导致绝缘油性能快速劣化。通常，绝缘油中会添加适量抗氧化剂，以增强其抗氧化能力，延长使用寿命。

（二）绝缘油的老化机理

水电站主变压器绝缘油的老化是一个复杂的物理化学过程，其老化机理主要与热老化、电老化及环境因素引发的氧化老化相关，三者相互作用，共同加速绝缘油的性能劣化。

热老化是绝缘油老化的主要诱因之一。主变压器运行过程中，绕组会因电流损耗产生大量热量，导致绝缘油温度升高。在高温环境下，绝缘油分子链会发生断裂，生成小分子化合物，引发氧化反应，产生有机酸、醛、酮、酯等老化产物。温度越高，分子链断裂速度越快，

氧化反应越剧烈，老化产物的生成量也会显著增加。高温会加速绝缘油中抗氧化剂的消耗，进一步降低其抗氧化能力，形成“高温-氧化加剧-性能劣化”的恶性循环。

电老化是在电场作用下引发的绝缘油老化过程。主变压器内部存在强电场环境，绝缘油在强电场作用下会发生电离，产生自由基等活性粒子。这些活性粒子会引发绝缘油分子的化学反应，导致分子结构破坏，促进氧化反应的进行。电场会加速绝缘油中水分和杂质的迁移与聚集，形成局部放电通道，进一步加剧绝缘油的绝缘性能劣化，严重时可能引发击穿故障。

环境因素引发的氧化老化是绝缘油老化的重要补充。水电站运行环境复杂，空气中的氧气、水分、灰尘等杂质可能通过变压器的密封缝隙进入油液内部。氧气与绝缘油分子发生氧化反应，生成酸性物质和油泥等老化产物；水分的侵入会降低绝缘油的介电强度，同时加速酸性物质对金属部件的腐蚀，产生的金属离子又会作为催化剂，进一步加速氧化反应的进程；灰尘等固体杂质则会降低绝缘油的清洁度，影响其绝缘性能和冷却效能^[1]。

二、水电站主变压器绝缘油老化过程中的特性演变规律

（一）理化特性的演变规律

在老化过程中，绝缘油的理化特性会发生显著变化，这些变化可直观反映绝缘油的老化程度。其中，酸值的变化是绝缘油老化的重要标志之一。随着老化进程的推进，绝缘油中的氧化反应持续发生，生成的有机酸不断积累，导致酸值逐渐升高。酸性物质的增加不仅会腐蚀变压器内部的铜、铁等金属部件，生成金属皂类化合物，还会与绝缘纸发生反应，降低绝缘纸的机械强度，进而影响整个绝缘系统的性能。

黏度的变化也呈现明显的规律性。老化过程中，绝缘油分子链断裂生成的小分子化合物会在后续反应中逐渐聚合，形成大分子聚合物，同时油泥等老化产物的生成也会增加油液的黏稠度。黏度升高会显著降低绝缘油的流动性，影响其冷却效能，导致变压器内部热量无法及时散发，进一步加速绝缘油的老化和绝缘材料的劣化。

水分含量在老化过程中呈逐渐上升趋势。一方面，绝缘油老化生成的有机酸与金属部件反应可能会产生水分；另一方面，变压器密封性能随运行时间推移可能下降，外部环境中的水分会侵入油液内部。水分含量的增加会直接降低绝缘油的击穿电压和介电强度，同时加剧电老化和氧化老化的进程，形成恶性循环。

绝缘油的密度、闪点等理化指标也会随老化进程发

生变化。密度会因老化产物的生成而略有升高；闪点则会因老化过程中轻质组分的挥发和老化产物的积累而降低，增加变压器内部发生火灾的风险。

（二）电气特性的演变规律

绝缘油的电气特性是保障变压器绝缘系统安全的核心，其在老化过程中的演变规律直接反映绝缘油的绝缘效能。击穿电压是电气特性中最关键的指标之一，其变化趋势与水分含量和老化产物含量密切相关。随着老化进程的推进，绝缘油中水分、酸性物质、油泥等杂质不断积累，这些杂质会破坏油液的绝缘均匀性，形成局部电场集中区域，导致击穿电压逐渐降低。当击穿电压降至临界值以下时，绝缘油将无法有效隔绝不同电位部件，可能引发局部放电甚至击穿故障，威胁变压器安全运行。

介损因数在老化过程中呈逐渐增大的趋势。介损因数反映绝缘油在电场作用下的能量损耗程度，老化过程中生成的极性老化产物（如有机酸、醛、酮等）会增加油液的极性，导致介损因数升高。介损因数增大意味着油液在运行过程中的能量损耗增加，会进一步升高油液温度，加速老化进程。

体积电阻率在老化过程中则呈逐渐下降的趋势。老化生成的酸性物质和金属离子等会增加绝缘油的导电性能，导致体积电阻率降低。体积电阻率下降会使油液中的泄漏电流增大，不仅增加能量损耗，还会加剧局部发热，同时可能引发电晕和局部放电，进一步劣化绝缘油和绝缘纸的性能。

（三）抗氧化特性的演变规律

绝缘油的抗氧化特性在老化过程中会逐渐弱化，主要表现为抗氧化剂含量的降低和氧化反应速率的加快。新鲜绝缘油中含有适量的抗氧化剂，可有效抑制氧化反应的发生。但在长期运行过程中，尤其是在高温、强电场等恶劣条件下，抗氧化剂会不断被消耗，其含量逐渐降低，抗氧化能力随之下降。

当抗氧化剂含量降低到临界值以下时，绝缘油的氧化反应会进入加速阶段，氧化反应速率显著加快，老化产物的生成量大幅增加。此时，绝缘油的各项性能会快速劣化，使用寿命急剧缩短。老化过程中生成的酸性物质和金属离子等还会对氧化反应起到催化作用，进一步弱化绝缘油的抗氧化特性，加速老化进程^[2]。

三、水电站主变压器绝缘油寿命评估方法探索

（一）基于特性指标的寿命评估方法

基于绝缘油老化过程中的特性演变规律，可通过监测关键特性指标的变化情况，构建寿命评估模型，实现

对绝缘油寿命的评估。该方法的核心思路是：确定绝缘油各关键特性指标的临界值，通过定期检测绝缘油的实际指标值，对比临界值，判断绝缘油的老化程度，进而评估剩余寿命。

在理化特性指标中，酸值、黏度、水分含量是常用的评估参数。通过长期跟踪监测绝缘油的酸值变化曲线，可建立酸值与运行时间的关系模型，当酸值达到临界值时，即可判断绝缘油已达到使用寿命；同理，黏度和水分含量也可作为评估依据，当黏度升高至临界值或水分含量超过允许范围时，表明绝缘油性能已无法满足运行要求。

在电气特性指标中，击穿电压和介损因数是核心评估参数。击穿电压的临界值是保障绝缘性能的最低要求，当检测到击穿电压低于临界值时，说明绝缘油的绝缘能力已严重劣化，需及时更换；介损因数的升高反映了绝缘油能量损耗的增加，当介损因数达到临界值时，也可作为绝缘油寿命终结的判断依据。

基于特性指标的寿命评估方法具有操作简单、直观性强的优点，可通过常规检测手段实现，适用于水电站日常运维中的绝缘油寿命评估工作。该方法需建立大量长期的监测数据，且不同运行环境下绝缘油特性指标的变化规律存在差异，需根据水电站的具体运行条件进行参数修正。

（二）基于老化机理的寿命评估方法

基于老化机理的寿命评估方法以绝缘油的老化机理为理论基础，通过分析老化反应的动力学过程，建立老化速率模型，进而预测绝缘油的剩余寿命。该方法的核心是明确绝缘油老化的控制步骤，确定老化反应的速率常数和活化能，通过动力学方程描述老化产物的生成速率与时间、温度等因素的关系。

热老化是绝缘油老化的主要控制步骤，因此基于热老化机理的寿命评估方法应用最为广泛。该方法通过模拟不同温度下绝缘油的老化过程，确定热老化反应的活化能，利用阿累尼乌斯方程建立老化寿命与温度的关系模型。根据变压器实际运行温度，代入模型即可预测绝缘油的剩余寿命。结合电老化和氧化老化机理，可对模型进行优化，考虑电场强度、氧气浓度等因素的影响，提高寿命评估的准确性^[1]。

基于老化机理的寿命评估方法具有理论性强、预测精度高的优点，可实现对绝缘油寿命的提前预测。但该方法需要深入研究绝缘油的老化机理，确定相关动力学

参数，且模型建立过程复杂，对试验设备和技术人员的要求较高，在水电站日常运维中的应用受到一定限制。

（三）综合寿命评估方法

综合寿命评估方法结合了基于特性指标和基于老化机理的两种方法的优点，通过多维度指标监测和多模型融合，实现对绝缘油寿命的全面、精准评估。该方法的核心思路是：一方面，通过常规检测手段监测绝缘油的理化特性和电气特性指标，实时掌握绝缘油的当前老化状态；另一方面，基于老化机理建立寿命预测模型，结合实际监测数据对模型参数进行修正，提高预测精度。

综合寿命评估方法还可考虑水电站的运行环境、变压器的负载情况等因素，建立多因素影响模型。根据变压器不同运行阶段的负载变化，调整老化温度参数；结合水电站的湿度、海拔等环境条件，修正绝缘油的老化速率。通过综合考虑各种影响因素，可使寿命评估结果更符合实际运行情况，为绝缘油的更换和维护提供科学依据。

综合寿命评估方法具有全面性和精准性的优点，是未来绝缘油寿命评估的发展方向。该方法需要整合多方面的技术和数据，系统构建复杂，目前仍处于不断完善阶段。

结语

绝缘油是水电站主变压器的核心绝缘与冷却介质，其老化特性直接决定设备运行可靠性与使用寿命。本文以绝缘油特性为核心展开研究，系统分析其基本特性与老化机理，深入探讨老化过程中理化特性、电气特性及抗氧化特性的演变规律，同时梳理出基于特性指标、老化机理及综合类的三种寿命评估方法。研究表明，绝缘油的特性演变与老化进程密切相关，基于特性演变规律构建的综合寿命评估方法，可实现对绝缘油寿命的精准评估。相关研究成果可深化老化机理认知、优化寿命评估模型，为设备安全长效运行提供有力技术支撑。

参考文献

- [1] 李毅军. 冲击负荷热老化下牵引变压器油纸绝缘寿命评估方法[J]. 电气开关, 2022(001): 060.
- [2] 郝莹莹. 绝缘油性能检测与老化评估技术研究[J]. 电子通信与计算机科学, 2025(10).
- [3] 沈琦, 衡怡彤. 变电运维中电气设备绝缘老化评估与寿命预测方法研究[J]. 技术与市场, 2025(10).