

矿山变电所绝缘在线监测与剩余寿命预测模型构建

于国军

赤峰中色白音诺尔矿业有限公司 内蒙古赤峰

【摘要】矿山变电所作为能源输送与设备运行的核心枢纽，其绝缘系统状态直接影响供电稳定性与安全性。传统检测方法难以及时发现潜在劣化问题，易造成设备突发故障。通过构建绝缘在线监测体系，可实现运行状态参数的实时采集与趋势分析，并结合寿命预测模型对绝缘退化过程进行量化评估。该方法在提升诊断准确性与预测可靠性方面具有优势，能够为设备维护提供决策依据，降低突发风险，延长关键部件使用周期。

【关键词】矿山变电所；绝缘在线监测；寿命预测；模型构建

【收稿日期】2025年11月5日 **【出刊日期】**2025年12月6日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250224

Construction of online insulation monitoring and remaining life prediction model for mine substation

Guojun Yu

Chifeng Zhongse Baiyinnuoer Mining Co., Ltd. Chifeng, Inner Mongolia

【Abstract】 As the core hub for energy transmission and equipment operation, mine substations have their insulation systems directly impacting power supply stability and safety. Traditional detection methods often fail to promptly identify potential deterioration issues, leading to sudden equipment failures. By establishing an online insulation monitoring system, real-time data collection and trend analysis of operational parameters can be achieved. Combined with life prediction models, this approach enables quantitative evaluation of insulation degradation processes. This methodology demonstrates advantages in enhancing diagnostic accuracy and predictive reliability, providing decision-making support for equipment maintenance while reducing unexpected risks and extending the service life of critical components.

【Keywords】 Mine substation; Online insulation monitoring; Life prediction; Model construction

引言

矿山变电所作为供电网络的重要节点，长期处于高负荷、高湿度与粉尘复杂环境下，其绝缘系统易受到电场、热场与外界环境的多重应力作用而逐步退化。传统的定期检修方式难以全面反映绝缘材料的动态变化，容易出现隐患未及时发现的情况，增加了设备运行风险。随着传感技术与数据分析手段的快速发展，在线监测逐渐成为提高运行可靠性的重要方向。通过实时监测绝缘参数，并结合预测模型对剩余寿命进行评估，可以从源头上提升状态感知与风险预警能力，为设备维护提供精准参考。这一研究路径不仅能够减少突发停电事故，也为矿山供电系统的安全稳定运行奠定了技术基础。

1 矿山变电所绝缘系统的退化特征与风险隐患

矿山变电所的绝缘系统在长期运行中会受到电应力、热应力及环境因素的综合作用而逐步退化。高压电场在绝缘介质内部产生局部电荷积累，导致局部击穿

和表面闪络现象，同时长期负荷波动引起的热应力会加速绝缘材料分子结构老化，使介电强度下降^[1]。湿度、粉尘及化学腐蚀等外界环境因素进一步影响绝缘性能，促使局部缺陷扩展，并形成微裂纹和局部碳化路径，这些隐患在未被及时发现的情况下可能引发局部放电甚至设备跳闸。

绝缘系统内部劣化过程具有非线性和随机性特征，局部绝缘缺陷的累积效应会引起电气参数的波动，例如泄漏电流增大、局部电容变化及介质损耗因数上升，这些信号的微小变化是绝缘退化的重要指示。在实际运行中，传统人工巡检或周期性试验难以覆盖所有关键节点，对异常早期信号的捕捉存在延迟，无法提供实时动态数据支持。

随着矿山变电所设备运行负荷增大，绝缘系统的劣化速度呈现加快趋势，绝缘缺陷的空间分布具有高度不均匀性，局部薄弱环节可能成为系统整体可靠性下降的核心因素^[2]。高压开关柜、变压器及母线连接部

位是绝缘退化最易集中的区域，其绝缘失效不仅影响局部设备运行，还可能引发连锁反应，导致供电中断或安全事故。对绝缘系统退化特征的深入分析及潜在风险隐患的识别，对保障矿山变电所安全稳定运行具有重要意义。

2 绝缘在线监测关键技术与实施路径

绝缘在线监测技术通过在矿山变电所关键设备上布设传感器，实现对绝缘状态的连续、实时观测。高压绝缘局部放电在线监测系统可以捕获微小放电信号，通过电磁、超声及电流三类传感装置，将局部放电的幅值、脉冲数量和频率特性转化为可分析的数字信号。结合高精度数据采集模块，能够获取泄漏电流、介质损耗因数、绝缘电阻等关键电气参数的连续变化趋势，为后续状态评估提供可靠数据支撑。传感器的选型和布置方式需依据设备结构及运行环境确定，确保信号覆盖全面且干扰最小，同时采用抗干扰设计和屏蔽技术减少外界噪声对数据精度的影响。

数据传输与存储系统在在线监测中发挥核心作用。通过光纤通信、工业以太网或无线传输技术，将采集到的高频数据实时传送至集中监控平台，保证信息完整性和传输稳定性^[3]。监控平台对海量数据进行实时处理和特征提取，包括信号滤波、频谱分析和趋势建模，以识别异常模式和绝缘劣化特征。数据处理算法的精确性直接影响对绝缘状态的判断，因此需要结合机器学习和统计分析方法，对历史运行数据进行训练和优化，实现对不同工况下绝缘参数波动的敏感识别。

实施路径方面，首先要建立覆盖矿山变电所主要设备的监测网络，包括变压器、高压开关柜及母线连接部位，对各关键节点进行状态参数连续采集。其次，通过智能数据处理模块实现对异常信号的快速判别，结合预设阈值和动态模型评估绝缘退化水平。系统可根据监测结果生成实时告警及可视化报表，为运维人员提供决策参考^[4]。在长期运行中，监测系统能够积累设备健康数据，通过趋势分析和多参数关联计算，对绝缘状态进行周期性更新和优化，实现对潜在风险的早期识别和精准定位。

在线监测系统的可靠性依赖于传感器性能、数据采集精度以及监控平台的软件算法的稳定性。针对矿山复杂环境，需采用耐高温、防尘、防潮设计，并结合冗余布点和多通道采集技术提高数据可靠性。通过综合运用电气参数测量、局部放电信号分析与环境因素监测，可形成多维度、连续化的绝缘状态感知，实现对矿山变电所绝缘系统的动态掌控，为寿命预测和运

策略提供坚实的数据基础。

3 剩余寿命预测模型的构建与应用

剩余寿命预测模型通过对矿山变电所绝缘系统的状态参数进行量化分析，实现对设备寿命衰减过程的动态评估。模型以在线监测获得的局部放电幅值、泄漏电流、绝缘电阻及介质损耗因数等关键电气参数为基础，通过数学建模和统计推断建立退化趋势曲线。在模型构建中，引入时间序列分析与非线性回归方法，刻画绝缘性能随运行时间变化的衰减规律，同时考虑环境因素如温度、湿度及粉尘浓度对退化速率的影响，从而提高寿命预测的准确性和适用性。

在实际应用中，模型通过数据预处理与特征提取，将高频采集数据转化为可用于预测的输入变量^[5]。多维数据融合技术被应用于综合分析不同监测指标间的相关性，形成对绝缘状态的全面认知。基于退化趋势和阈值设定，模型能够计算剩余寿命分布，并评估不同设备或部件的健康等级。通过模拟绝缘材料在未来运行工况下的性能变化，可以预测可能出现的临界状态，为运维安排提供依据。

为提高模型的鲁棒性和泛化能力，采用机器学习算法对历史运行数据进行训练，构建自适应预测框架。算法能够识别复杂非线性关系与随机波动，减少单一参数异常对寿命评估的干扰，并通过动态更新策略保持预测结果与实际状态的高度一致。剩余寿命预测模型不仅支持对单台设备的寿命评估，也可扩展到变电所整体绝缘系统的健康管理，实现多设备协同监控和预防性维护计划的制定^[6]。在应用过程中，模型输出的寿命预测结果可与在线监测系统形成闭环反馈，实现对关键参数的动态调整和风险识别。结合可视化界面与告警机制，运维人员能够快速获取设备健康状况和潜在故障位置，优化检修资源配置。通过对剩余寿命的定量化管理，能够降低突发故障概率，延长关键设备的运行周期，并提升矿山变电所整体供电系统的稳定性与安全性。

4 监测与预测结果的综合分析与优化策略

通过对矿山变电所绝缘系统在线监测数据与剩余寿命预测结果的综合分析，可以实现对设备运行状态的多维度评估。监测数据提供了局部放电幅值、脉冲数、泄漏电流、介质损耗因数及绝缘电阻等关键指标的连续变化曲线，这些参数能够反映绝缘材料在不同工况下的退化趋势。将实时监测数据与预测模型输出的剩余寿命信息进行交叉验证，有助于识别数据异常、误差波动及潜在风险区域，从而对设备的健康状况形成更

加准确的量化描述。通过时间序列分析和趋势对比，可以发现绝缘退化的加速阶段及关键影响因素，为精准维护提供依据。

在综合分析过程中，多维数据融合技术发挥重要作用。监测参数之间存在高度相关性，通过对泄漏电流、局部放电信号和环境条件的联合分析，可识别出局部绝缘劣化的空间分布特征及演变规律^[7]。基于大数据处理和统计推断方法，对各类监测指标进行加权整合，生成绝缘健康指数和风险等级评估图，实现对不同设备或关键部位的差异化管理。这种综合分析能够揭示设备退化过程中的非线性变化趋势，识别出可能导致突发故障的薄弱环节，为后续维护策略提供精准参考。

优化策略依赖于对监测与预测结果的深入理解。通过闭环反馈机制，将寿命预测结果与在线监测参数相结合，可以实现动态阈值调整和预警级别优化，确保异常信号能够被及时捕捉并分类处理。基于剩余寿命分布，运维策略可以实现针对性检修，对高风险设备提前安排维护，降低运行中断概率，同时合理分配检修资源，提高系统整体运维效率。在策略设计中，引入冗余监测节点和多通道数据采集，能够进一步增强数据完整性和可靠性，对抗复杂环境和干扰因素影响。

监测与预测结果的可视化分析为运维决策提供了直观支持。通过图表、曲线和风险地图呈现关键绝缘参数及健康指数，使运维人员能够快速掌握设备状态变化趋势，识别潜在风险位置。结合历史数据积累，可建立设备寿命数据库，为长期趋势分析和模型优化提供数据基础^[8]。通过持续迭代更新预测模型，使其能够适应不同运行工况下绝缘退化的非线性特征，提高预测精度与稳定性。综合监测和预测结果能够形成对矿山变电所绝缘系统的动态掌控，实现对潜在风险的实时识别和精准定位。通过对关键指标的连续跟踪、趋势分析和健康等级划分，能够在确保供电安全的同时，优化维护资源配置，延长设备使用周期，并为矿山变电所的可靠运行提供系统化、数据驱动的技术支撑。

5 结语

矿山变电所绝缘系统的安全运行依赖于对退化特征的准确识别和潜在风险的及时掌握。通过在线监测技术实现关键电气参数的实时采集，并结合剩余寿命预测模型进行动态分析，可以量化绝缘退化过程并识别薄弱环节。监测数据与预测结果的综合分析不仅提升了故障预警能力，也为运维策略提供了科学依据，实现设备健康状态的精细管理与资源优化配置。该方法能够降低突发故障风险，延长关键设备运行周期，确保矿山变电所供电系统的稳定性与可靠性。

参考文献

- [1] 龙宇航.金属矿山井下变电所自动化改造[J].电工技术,2025,(08):220-221+225.
- [2] 狄多涛,骆军军,马海军,等.供配电系统智能监视与集中控制技术在龙首矿的应用[J].采矿技术,2025,25(01):187-194.
- [3] 李汉超.电动机绝缘在线监测装置在电厂中的应用[J].电气技术与经济,2025,(08):79-81.
- [4] 陈蓉.高压开关柜绝缘故障在线监测与安全预警技术研究[J].产业创新研究,2025,(14):132-134.
- [5] 连鸿松,黄锦,郑东升,等.绝缘油中溶解气体在线监测装置可靠性评测的现场加速试验方法及平台[J].变压器,2025,62(05):53-58.
- [6] 赵琳霞.中压开关柜智能化在线监测技术研究[J].电气技术与经济,2025,(05):146-148.
- [7] 李永红.高压 SF6 气体绝缘开关气室局部放电在线监测研究[J].工业仪表与自动化装置,2025,(01):98-102.
- [8] 刘刚,李瑞,张圆明,等.循环老化下电缆绝缘介损特征及在线监测修正方法[J].电力科学与技术学报,2025,40(01):274-280.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS