

# 电力变压器套管绝缘劣化检测与状态评估方法研究

何家旭

大唐四川电力检修运营有限公司 四川 成都 610074

**【摘要】**：电力变压器套管绝缘劣化直接影响电力系统安全稳定运行。针对套管绝缘劣化检测与状态评估难题，研究多种检测技术与评估方法。局部放电检测捕捉绝缘内部放电信号，红外热像检测获取表面温度分布，油中气体分析依据特征气体浓度变化判断绝缘状况。构建基于多源信息融合的状态评估模型，结合模糊综合评判与神经网络算法，提高评估准确性。

**【关键词】**：电力变压器；套管绝缘；劣化检测；状态评估；多源信息融合

DOI:10.12417/2811-0722.25.09.061

## 引言

电力变压器作为电力系统核心设备，其套管绝缘性能关乎电网安全稳定。随着电力系统容量增大与电压等级提升，套管绝缘劣化引发的故障时有发生，严重威胁供电可靠性。传统检测与评估方法存在局限性，难以准确判断绝缘劣化程度与发展趋势。开展电力变压器套管绝缘劣化检测与状态评估方法研究，探寻更有效技术手段，对保障电力系统安全运行具有重要意义。

## 1 绝缘劣化检测技术

(1) 局部放电检测原理与应用：局部放电检测作为窥探绝缘内部状况的“电子显微镜”，其核心在于捕捉绝缘介质内部气隙或缺陷处因电场集中引发的微弱放电信号。当绝缘材料内部存在气隙、杂质或受潮等缺陷时，在高电压作用下会产生局部放电现象，这些放电以高频脉冲形式向外辐射电信号。高频传感器如同敏锐的“听觉器官”，能精准捕捉到这些仅持续纳秒级的微弱脉冲。通过对放电脉冲幅值、相位分布及出现频次细致分析，技术人员可如同解读“电信号密码”一般，识别出绝缘缺陷究竟是气隙放电、沿面放电还是内部放电等类型，并依据脉冲特征的剧烈程度判断缺陷的严重程度，为绝缘状态诊断提供关键线索。

(2) 红外热像检测的独特视角：红外热像检测另辟蹊径，从热学角度为绝缘劣化诊断打开新窗口。其基于热传导理论，认为物体表面温度分布是内部热状态的直观映射。电力变压器套管在运行过程中，正常情况下各部位温度应保持相对稳定且符合一定规律。一旦绝缘出现劣化，无论是局部介质损耗增加，还是因接触不良导致的电阻增大，都会使相应区域产热异常。这些热量通过热传导、对流和辐射等方式传递至套管表面，形成肉眼难以察觉的温度差异。红外热像仪如同“热视镜”，能将这种温度差异转化为可视化的热像图谱，使技术人员可以直观地观察到套管表面的热点区域、温度梯度分布等信息，从而快速锁定因绝缘劣化引发的局部过热故障，为故障定位与原因分析提供直观依据。

(3) 油中气体分析的化学洞察：油中气体分析则从化学

层面揭示绝缘劣化的奥秘。电力变压器套管内部的油纸绝缘系统在正常运行时处于稳定状态，但当遭受电、热、机械应力或水分侵蚀时，油纸材料会发生一系列复杂的化学反应并分解产生特征气体。氢气通常是油纸绝缘早期劣化的“预警信号”，其产生往往源于局部放电或高温下的水分解；乙炔的出现则表明可能存在电弧放电等严重故障；一氧化碳和二氧化碳的浓度变化，能够反映绝缘材料长期受热老化的程度。

## 2 多源信息获取

(1) 多维度数据采集的协同布局：为全面掌握变压器套管的绝缘状态，需构建一套高效协同的数据采集体系。局部放电检测、红外热像检测和油中气体分析分别从电气、热学和化学三个维度获取数据，三者缺一不可。局部放电检测装置如同在绝缘内部插的“电子探针”，持续监测绝缘内部的放电活动；红外热像仪则像围绕套管的“热感知哨兵”，实时扫描表面温度变化；油色谱分析仪犹如精密的“化学侦察兵”，定期分析绝缘油中特征气体成分。

(2) 数据采集系统的实时监测功能：先进的数据采集系统是实现多源信息获取的关键枢纽。该系统采用分布式架构，将各类检测设备与数据处理中心有机连接，实现数据的实时传输与集中管理。通过高速通信网络，局部放电的脉冲数据、红外热像的温度图谱以及油中气体的浓度信息能够在瞬间汇聚到数据处理平台。系统配备的实时数据处理模块如同高效的“数据管家”，对采集到的数据进行初步筛选、滤波和格式转换，去除噪声干扰，提取关键特征信息。系统还具备异常数据预警功能，一旦检测到数据偏离正常范围，便会立即发出警报，提醒运维人员关注套管运行状态，真正做到对套管运行状况的全时段、无死角监测。

(3) 多源信息的互补与融合价值：单一的检测手段只能反映套管绝缘状态的某一个侧面，而多源信息的融合则能拼凑出完整的“状态拼图”。局部放电检测数据如同展示绝缘内部缺陷的“解剖图”，清晰呈现内部缺陷的位置与类型；红外热像数据好比套管表面的“热健康档案”，直观反映表面温度异常情况；油中气体数据则似记录绝缘劣化进程的“化学日志”，深度揭示绝缘材料的化学变化。这三类数据相互补充、相互印

证,当局部放电检测发现内部存在异常放电时,结合红外热像数据可判断是否伴随局部过热现象,再参考油中气体数据便能进一步确定故障的严重程度与发展阶段。

### 3 评估模型构建

(1) 模糊综合评判的模糊性处理:在构建变压器套管绝缘状态评估模型时,模糊综合评判方法发挥着重要作用。由于绝缘状态受多种因素影响,且这些因素之间的界限往往模糊不清,传统精确数学方法难以准确描述。模糊综合评判通过引入模糊集合理论,巧妙地处理这种模糊性。它将局部放电、红外热像和油中气体分析等检测数据转化为模糊隶属度,即判断这些数据隶属于不同绝缘状态等级(如良好、注意、异常、严重)的程度。对于局部放电脉冲幅值这一指标,根据历史经验和专家知识设定不同幅值范围对应的隶属度函数,当实际检测到的幅值落入某一范围时,就能计算出其属于各个绝缘状态等级的可能性。通过这种方式,模糊综合评判将原本复杂、模糊的多因素信息转化为可量化的模糊关系矩阵,为后续的综合评估奠定基础。

(2) 神经网络算法的学习与映射能力:神经网络算法在评估模型中充当“智能学习器”的角色。它通过大量的历史样本数据进行训练,如同人类大脑的神经元相互连接学习一样,不断调整网络内部的权重和阈值参数,从而学习检测数据与绝缘状态之间的内在对应关系。在训练过程中,将已知绝缘状态的多源检测数据输入神经网络,网络通过正向传播计算输出结果,并与实际的绝缘状态进行对比,根据误差大小进行反向传播,调整网络参数,使输出结果不断逼近真实值。经过反复训练,神经网络能够构建起复杂的非线性映射模型,即便面对新的、从未见过的检测数据组合,也能依据学习到的规律准确预测绝缘状态。这种强大的学习和泛化能力,使其成为处理多源信息复杂关系的有效工具。

(3) 融合模型的量化评估优势:将模糊综合评判与神经网络算法相结合,形成的融合评估模型充分发挥了两者的优势。模糊综合评判先对多源检测数据进行模糊化处理,将其转化为统一的评估语言;神经网络则在此基础上进一步学习数据间的复杂关系,实现从模糊隶属度到绝缘状态量化结果的精准映射。模型在评估过程中,综合考虑各检测指标的权重,这些权重通过层次分析法、熵权法等科学方法确定,以体现不同检测手段在绝缘状态评估中的重要程度差异。相较于单一的评估方法,融合模型克服了模糊综合评判主观性较强、神经网络缺乏解释性等局限性,能够更全面、准确地对套管绝缘状态进行量化评估,为运维决策提供可靠的科学依据,有效提升评估结果的准确性与可靠性。

### 4 模型验证优化

(1) 实验室模拟验证的基础作用:实验室模拟是评估模

型验证与优化的重要起点。在实验室环境中,技术人员可以人为设置不同程度、不同类型的绝缘劣化场景,如在套管模型中制造气隙缺陷、设置局部过热区域、添加模拟油纸劣化的化学物质等,以此模拟实际运行中可能出现的各种绝缘问题。在模拟过程中,运用局部放电检测、红外热像检测和油中气体分析等手段,采集对应场景下的多源检测数据。这些数据作为“标准样本”,用于对评估模型进行初步训练与验证。通过对比模型输出结果与实际设定的绝缘状态,技术人员可以直观地评估模型的准确性,发现模型在处理不同类型绝缘劣化问题时存在的不足,为后续的优化提供明确方向,确保模型在复杂绝缘状态评估中具备基本的可靠性。

(2) 实际应用对比分析的实践检验:将经过实验室验证的评估模型应用于实际运行的变压器套管,是对模型实用性的真正考验。在实际电网中,选取不同运行年限、不同负荷条件的变压器套管作为应用对象,采集其真实运行数据并输入模型进行评估。采用传统的评估方法,如基于经验阈值判断、单一指标分析等方式,对同一批套管进行绝缘状态评估。将两种评估结果进行详细对比分析,不仅关注评估结论的一致性,更深入研究在不同运行工况下、面对复杂绝缘缺陷时,模型与传统方法在评估准确性、灵敏度和可靠性等方面的差异。实际应用中的数据具有多样性和复杂性,通过这种对比分析,能够进一步暴露模型在实际应用中可能存在的问题,为模型优化提供更贴合实际的改进依据。

(3) 模型参数结构优化与算法改进:根据实验室模拟和实际应用验证的结果,对评估模型进行针对性的参数调整与结构优化。对于神经网络部分,可能需要调整网络的层数、神经元个数、学习率等参数,以提高模型的学习效率和泛化能力;对于模糊综合评判部分,可能需要重新优化隶属度函数和指标权重,使其更符合实际情况。随着人工智能算法的不断发展,还可以引入新的算法或改进现有算法,如采用深度学习中的卷积神经网络增强对图像数据(如红外热像图谱)的特征提取能力,或结合遗传算法优化模型参数的搜索过程。通过持续的优化改进,不断提高模型对各种复杂绝缘状态的适应能力与评估精准度,确保模型在电力系统实际应用中能够稳定、可靠地发挥作用,为变压器套管绝缘状态评估提供强有力的技术支撑。

### 5 实际应用价值

(1) 提前预警与科学运维决策:将该检测与评估方法应用于电力系统,如同为变压器套管安装了一套智能“健康监测系统”。通过实时监测与精准评估,能够提前捕捉到绝缘劣化的早期迹象,将故障隐患扼杀在萌芽状态。以往,变压器套管的运维主要依赖定期检修,这种方式不仅效率低、成本高,还可能因检修周期过长而错过故障早期处理时机。而新的评估方法能够依据套管的实际运行状态,提供科学的运维决策建议。当评估模型检测到绝缘状态出现“注意”等级的异常时,系统

会及时发出预警,并结合历史数据和运行工况,为运维人员制定个性化的检修计划,如缩短检测周期、加强局部监测等,使设备维护从被动应对转变为主动预防,大大提高了运维工作的针对性和有效性。

(2) 保障电网安全稳定运行: 变压器套管作为电力系统中关键的电气设备,其绝缘状态直接关系到电网的安全稳定运行。一旦套管绝缘失效,可能引发短路故障,导致大面积停电事故,严重影响社会生产和居民生活。该检测与评估方法的应用,能够有效降低此类风险。通过对套管绝缘状态的持续监测和准确评估,及时发现并处理潜在故障,避免故障的进一步扩大和蔓延。在电网遭受恶劣天气、负荷突变等外部冲击时,评估系统能够实时跟踪套管状态变化,为电网调度提供可靠的设备信息支持,确保电网在复杂工况下依然能够安全、稳定地运行,维护电力供应的连续性和可靠性,保障社会经济的正常运转。

(3) 经济效益与资源优化配置: 从经济效益角度来看,该检测与评估方法的应用具有显著优势。一方面,通过提前发现绝缘劣化隐患并及时处理,能够避免因套管故障导致的突发停电事故,减少停电造成的直接经济损失,如工业生产停滞、商业活动中断等带来的损失。另一方面,精准的状态评估为设备检修提供了科学依据,改变了传统的“一刀切”式检修模式,避免了不必要的过度检修,降低了设备维修成本,包括维修材料费用、人工费用以及设备停运带来的间接损失等。合理的运维计划还能延长变压器套管的使用寿命,优化电力设备资源的配置,提高设备利用率,实现电力企业经济效益的最大化,同时也为电力系统的可持续发展奠定了坚实基础。

## 6 技术改进方向

(1) 智能传感技术的升级演进: 随着科技的飞速发展,智能传感技术将成为推动变压器套管绝缘检测技术进步的重要力量。未来,检测设备将朝着高灵敏度、高精度和小型化方向不断演进。高灵敏度传感器能够捕捉到更微弱的局部放电信号、更细微的温度变化以及更低浓度的特征气体,使检测技术能够更早地发现绝缘劣化迹象,实现故障的超早期预警。高精度传感器则确保检测数据的准确性和可靠性,减少因测量误差导致的误判和漏判。而小型化设计使得传感器可以更方便地安装在变压器套管的各个关键部位,实现对套管全方位、无死角

### 参考文献:

- [1] 李剑,孙才新,杜林等.电力变压器套管绝缘状态在线监测技术研究[J].高电压技术,2005,31(4):1-3.
- [2] 唐炬,魏钢,张晓星等.基于油中气体分析的电力变压器绝缘故障诊断方法研究[J].电网技术,2004,28(10):53-56.
- [3] 张冠军,严璋,邱毓昌.局部放电检测技术在电力设备绝缘诊断中的应用[J].高压电器,1999,35(3):39-41.
- [4] 律方成,李丽,刘云鹏等.基于红外热像技术的电力设备故障诊断[J].高电压技术,2008,34(12):2552-2557.
- [5] 牛玉广,李继强,李维国等.模糊神经网络在电力变压器故障诊断中的应用[J].电力自动化设备,2007,27(10):38-41.
- [6] 孙景强,李庆民,钱家骊等.电力变压器套管绝缘状态评估方法研究[J].电工技术学报,2011,26(10):14-20.

的监测,甚至可以开发出嵌入式传感器,直接集成到套管内部,实时获取最真实的运行状态信息,为绝缘检测提供更丰富、更准确的数据来源。

(2) 人工智能算法的创新突破: 人工智能算法的不断创新发展将为绝缘状态评估模型注入新的活力。除了现有的模糊综合评判和神经网络算法,未来将有更多先进算法融入评估模型。深度学习领域的图神经网络、生成对抗网络等算法,能够更好地处理多源信息之间的复杂关系和数据的高维特征,增强模型对复杂绝缘状态的分析和理解能力。强化学习算法可以使模型在与实际运行环境的交互过程中不断自我优化,根据实时监测数据动态调整评估策略,提高模型的适应性和决策能力。算法的创新还将体现在模型的可解释性方面,开发出更具透明性和可理解性的评估模型,使技术人员能够更清晰地了解模型的决策依据,增强对评估结果的信任度,推动人工智能技术在绝缘状态评估领域的深度应用。

(3) 多源信息融合的深入探索: 加强多源信息深度融合研究是提升检测与评估技术水平的关键方向。未来,需要探索更有效的数据处理方法,打破不同类型数据之间的壁垒,实现信息的深度融合与协同分析。运用数据挖掘技术从海量检测数据中提取隐藏的关联信息,发现不同检测指标之间的潜在关系;采用多模态数据融合算法,将局部放电的电信号数据、红外热像的图像数据和油中气体的化学数据进行有机整合,构建更全面、更准确的绝缘状态表征模型。还可以结合物理模型和数据驱动模型,将变压器套管的电磁、热学、化学等物理过程与检测数据相结合,建立更具物理意义的融合评估模型,从而实现了对套管绝缘劣化更准确的预测,为电力设备的智能化运维提供更强大的技术支撑,推动绝缘检测与评估技术不断迈向新的高度。

## 7 结语

电力变压器套管绝缘劣化检测与状态评估方法研究取得阶段性成果,多种检测技术与融合评估模型有效提升绝缘状态监测能力。未来,伴随传感与人工智能技术革新,检测设备性能将进一步优化,评估模型持续升级,多源信息融合深度拓展。新技术有望实现对套管绝缘劣化更早期预警、更精准评估,为电力系统安全稳定运行提供更强有力的技术保障。