

基于油色谱分析的变压器故障诊断与性能评估研究

颜小雨

(中国石化扬子石油化工有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要 根据某化工厂 32 台变压器九年油色谱数据, 构建了融合机器学习的变压器智能运维体系。研究发现: 化工极端工况 (负载 $> 100\%$ 、温度 $> 40\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下, 氢气 $> 150\text{ }\mu\text{L/L}$ 预示局部放电概率 82%, 乙炔 $> 8\text{ }\mu\text{L/L}$ (较 IEC 标准降低 78%) 可提前 72 小时预警电弧; $\text{CO}/\text{CO}_2 > 0.25$ 为绝缘老化新阈值, 结合耐溶剂材料使突发维护成本降低 75%。创新开发 ANN 模型, 以气体浓度及工况参数为输入, 在氯碱高湿 ($> 80\%$) $\pm 15\%$ 负载波动场景下实现 95% 诊断准确率, 有效识别苯溶剂渗透等非常规故障。提出三级动态维护策略: 预警期红外热成像定位隐患 (成本效益比 1:62.5), 干预期真空滤油实现零停产维修 (成本降低 60%), 紧急期 SCADA 系统 0.5 小时快速隔离。实施后年均维护成本降低 29.2%, 故障停机减少 65.6%, 验证了化工连续生产场景的高效性与经济性。

关键词 油色谱分析; 变压器; 故障诊断; 性能评估

中图分类号: TM4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.25.009

0 引言

化工生产的连续性高度依赖变压器可靠性, 故障停机将导致全线停产。油色谱分析技术通过监测变压器油中溶解气体 (包括氢气、乙炔、总烃、一氧化碳和二氧化碳) 的浓度变化, 可提前识别潜伏性故障, 成为保障化工连续安全生产的关键手段。然而, 当前普遍采用的定期检修模式存在高成本与低精度的矛盾, 为破解这一难题, 本研究以某化工厂 2015 年至 2023 年间 32 台变压器累计 1 860 条油色谱历史数据, 采用机器学习算法构建精准故障诊断模型与分级维护策略。

1 数据来源与预处理

1.1 工厂数据描述

某化工厂 2015 年至 2023 年间 32 台主变压器的油色谱监测记录, 原始数据总量为 1 860 条。按设备运行状态分类: 正常工况记录 1 520 条 (占总量的 81.7%), 过热故障记录 210 条 (11.3%), 放电故障记录 95 条 (5.1%), 绝缘老化记录 35 条 (1.9%)。数据集包含两类核心参数: 第一类为气体浓度参数, 包括氢气 (检测范围 $0.1 \sim 650\text{ }\mu\text{L/L}$)、乙炔 (检测范围 $0.01 \sim 480\text{ }\mu\text{L/L}$)、总烃 (甲烷、乙烯、乙烷浓度之和)、一氧化碳及二氧化碳含量; 第二类为运行工况参数, 涵盖负载率 60% (轻载状态) 至 110% (过载状态)、环境温度 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (严寒条件) 至 $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ (高温条件),

其中负载率超过 100% 或温度高于 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的极端工况数据占比 23%。

1.2 数据清洗与标准化

在预处理阶段, 首先进行数据清洗: 删除 42 条无效记录, 具体包括 31 条乙炔浓度超过 $500\text{ }\mu\text{L/L}$ 的采样误差数据, 以及 11 条总烃浓度负值或超量程的异常数据, 清洗后获得有效样本 1 818 条 (保留率 97.7%)。随后执行数据标准化: 对五种气体浓度统一采用 Z-score 方法处理, 即每种气体的原始浓度值减去该气体的历史平均浓度, 再除以其历史浓度标准差^[1]。此处理消除了不同气体量纲差异 (如氢气与乙炔的浓度数量级差异), 使模型训练效率提升 40%。所有气体单位统一为 $\mu\text{L/L}$, 环境温度数据严格按国家标准《变压器油中溶解气体分析导则》(GB/T 7252) 取自变压器周边 2 米通风处。预处理后的数据集完整保留 110% 过载、 $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温等化工典型极端工况特征, 为故障诊断提供工业级可靠基础。

2 基于工厂数据的故障规律分析

2.1 气体—故障关联性

该化工厂九年运行数据的分析表明, 气体浓度与故障类型存在明确对应关系。当氢气检测值超过 $150\text{ }\mu\text{L/L}$ 时, 82% 的案例在 7 日内发生局部放电故障, 典型案例为 2020 年 5 号变压器——其氢气浓度在一周内从 85

$\mu\text{L/L}$ 飙升至 $255\ \mu\text{L/L}$ ，解体后确认存在匝间放电，且在化工高负荷生产环境（负载率 $>100\%$ ）下该阈值灵敏度提升15%。乙炔浓度突破 $5\ \mu\text{L/L}$ 标志电弧故障风险显著上升，若超过 $35\ \mu\text{L/L}$ （如2018年11号变压器案例），3日内爆发短路的概率超过90%，此规律在高温工况（ $>40\ ^\circ\text{C}$ ）下尤为显著。总烃含量超过 $150\ \mu\text{L/L}$ 时需紧急排查过热故障隐患（如铁芯涡流损耗或绕组接触不良），该标准在32台变压器中验证有效率达89%。

2.2 固体绝缘老化特性

通过对该化工厂35例绝缘老化案例的深度分析，发现 CO 与 CO_2 气体浓度的比值（ CO/CO_2 ）是判断绝缘老化的核心指标：当该比值超过0.3时，变压器内部绝缘纸的老化速率加快至正常工况的3倍。具体表现为，比值大于0.3的设备其绝缘纸聚合度年均下降值达150单位（正常工况年均下降约50单位），直接导致设备寿命缩短30%以上^[2]。基于此规律构建的气体寿命预测模型，经工厂数据验证显示预测结果与实际剩余寿命的吻合度达85%——典型案例为2021年某台变压器测得 CO/CO_2 比值为0.41，模型输出剩余寿命28年（设计寿命40年），2023年绝缘纸抽检结果完全吻合预测。该模型可提前5年至8年预警老化风险，将突发性更换成本（超过80万元）转化为计划性维护（低于20万元），单台设备即可节约费用60万元以上。

3 故障诊断与智能预测

3.1 IEC标准验证

基于国际电工委员会IEC 60599标准对该化工厂2015–2023年全部305例故障案例（含过热210例、放电95例）的逐条诊断表明：在过热故障类别中，典型铁芯过热（如2019年#7变压器因铁轭螺杆松动致局部温升 $180\ ^\circ\text{C}$ ）或绕组过热（如2022年#15变压器低压绕组接触不良）共5例典型案例，其中4例严格符合标准定义的甲烷/乙烯浓度比值大于1（实测均值 1.8 ± 0.3 ）且乙炔浓度低于 $5\ \mu\text{L/L}$ （实测均值 $2.1\pm0.7\ \mu\text{L/L}$ ）的双重判据，符合率80%，唯一例外为2021年#3变压器在苯类溶剂蒸汽渗透下出现非常规过热特征；在放电故障案例中，89%（95例中的85例）满足乙炔浓度 $>20\ \mu\text{L/L}$ （均值 38.5 ± 12.3 ）与氢气浓度 $>150\ \mu\text{L/L}$ （均值 285 ± 75 ）的组合阈值，包括2020年#5变压器匝间放电（ H_2 峰值 $255\ \mu\text{L/L}$ ， C_2H_2 峰值 $31\ \mu\text{L/L}$ ）及2018年#11变压器电弧短路（ C_2H_2 骤升至 $35\ \mu\text{L/L}$ ）等典型事件，该标准在化工典型多干扰工况（如氯碱装置区湿度 $>80\%$ +负载波动 $\pm15\%$ ）下仍维持85.7%的

诊断稳定性。需特别指出，标准对35例绝缘老化故障的漏判率达15%（5例失效），根本原因为化工环境特有的有机溶剂渗透（如芳烃类物质加速纤维素解聚），导致 CO/CO_2 比值异常波动（ $0.15\sim0.45$ ），超出标准预设的 $0.3\sim0.4$ 正常波动带，此缺陷直接关联近三年约50万元/年的计划外维修成本。

3.2 机器学习模型性能

基于该化工厂1818条预处理数据构建的智能诊断模型，以氢气、乙炔、总烃、一氧化碳、二氧化碳五种气体浓度结合负载率（ $60\%\sim110\%$ ）、环境温度（ $-5\sim42\ ^\circ\text{C}$ ）共七维特征为输入，经五折交叉验证显示：支持向量机（SVM）模型在过热、放电、绝缘老化三类故障诊断中实现92%准确率与88%召回率，如2021年#3变压器苯溶剂渗透导致的非常规过热故障（传统IEC标准漏判，SVM准确预警），年均可减少非计划停机1.5次，节约维护成本38万元；人工神经网络（ANN）模型进一步将准确率提升至95%、召回率至93%，其深层非线性映射能力有效捕捉化工极端工况（如2020年氯碱装置区湿度 $>80\%$ +负载波动 $\pm15\%$ 场景）下的气体异常耦合特征，年成功预警故障7例（包括2例IEC标准未识别的绝缘老化），避免停机2次，年节约成本升至50万元。关键性突破在于：较IEC标准，ANN模型诊断精度提升15%（ $80\%\rightarrow95\%$ ），预警时间提前72小时以上——以2018年#11变压器为例，ANN在乙炔浓度达 $8\ \mu\text{L/L}$ 时即发出电弧风险警报（早于IEC标准的 $35\ \mu\text{L/L}$ 阈值），为抢修赢得关键窗口期。经成本效益核算，该模型三年累计降低故障损失150万元，扣除20万元开发投入，净收益达650%。

4 经济性维护策略优化

4.1 分阶段维护设计

当氢气浓度超过 $100\ \mu\text{L/L}$ 或乙炔浓度突破 $2\ \mu\text{L/L}$ 时，系统自动进入预警期维护阶段，该阶段成本严格控制在总维护预算的10%以内^[3]。具体执行流程包括：将油色谱检测频次从每月1次加密至每周1次（采用GB/T 7252标准方法，单次检测成本0.12万元），同步启动高精度红外热成像扫描（使用FLIR T840设备，分辨率 $\pm1\ ^\circ\text{C}$ ，重点监测套管接点、铁芯夹件等12处易放电部位，单次扫描成本0.08万元），并在变压器周边2米处部署温湿度传感器组（监测范围 $-20\ ^\circ\text{C}$ 至 $80\ ^\circ\text{C}$ ，数据实时上传至厂区DCS系统）。以2022年某化工厂苯乙烯装置区的9号变压器为例，氢气浓度从 $90\ \mu\text{L/L}$ 升至 $125\ \mu\text{L/L}$ 触发预警，红外扫描发现B相套管接头局部温度达 $92\ ^\circ\text{C}$ （环境温度 $45\ ^\circ\text{C}$ ），

经螺栓紧固消除隐患。该案例累计投入 0.48 万元（含 0.28 万元环境监测升级），规避了潜在电弧故障（最小损失估值 30 万元），成本效益比达 1:62.5。

若总烃浓度突破 $150\ \mu\text{L/L}$ 或一氧化碳/二氧化碳比值高于 0.25，则升级至干预期维护，此阶段成本占比 30%。核心操作包含三部分：吊罩检查分接开关触头烧蚀状况（依据 DL/T 574 标准，发现碳化即更换新型银钨合金触头，材料费 3.5 万元/台），启用 ZYD-100 真空滤油机进行油处理（脱气效率 $> 95\%$ ，处理量 $1\ 000\ \text{L/h}$ ，耗时 8 小时，耗电与耗材成本 4.2 万元），以及对老化纸板涂覆 AK04 耐溶剂绝缘漆（耐苯系腐蚀特性，材料费 1.8 万元）。2021 年精对苯二甲酸（PTA）装置区的 14 号变压器总烃浓度突增至 $180\ \mu\text{L/L}$ ，触发干预后经滤油处理降至 $45\ \mu\text{L/L}$ ，同步更换过热点触头并加固绝缘。总成本 12 万元（含 2.5 万元人工），较传统全面大修方案（30 万元）节约 60%，且全程未中断连续生产，体现了化工设备“在线维修”的核心优势。

当乙炔浓度突破 $10\ \mu\text{L/L}$ 或二氧化碳浓度超过 $15\ 000\ \mu\text{L/L}$ 时，强制启动紧急期维护，此阶段成本占比 60%^[4]。标准化响应流程为：通过 SCADA 系统在 0.5 小时内切断负荷并隔离设备，进行全容量变压器油置换（注入 GB 2536 标准 25 号新油，单价 1.2 万元/吨，单台用量 40 吨），随后解体更换碳化绝缘材料（按 Q/SH 0650 规范选用 Nomex® 芳纶纸，材料费 18 万元），并对绕组实施 $105\ ^\circ\text{C}$ 恒温烘干 48 小时。2019 年氯碱装置区的 8 号变压器案例中，乙炔浓度达 $18\ \mu\text{L/L}$ 且二氧化碳突破 $16\ 200\ \mu\text{L/L}$ ，解体检测显示绝缘纸聚合度从初始 900 降至 400。经 48 小时紧急维修（含 22 万元特种作业费），总成本 48 万元，但成功规避了氯碱电解槽全线停产事故（按日产值计算最小损失 500 万元），单次投入回报比 1:10.4。近三年该机制在扬子石化触发 3 次，累计避免损失超 1 500 万元。

4.2 实施经济效益

该化工厂 2020 年至 2023 年实施分阶段维护策略的经济效益对比显示：传统定期维护模式下，年均投入成本达 120 万元（含 48 万元计划性大修费、35 万元故障抢修费及 37 万元监测支出），对应年均故障停机 3.2 次（以 2021 年为例，因 #11 变压器电弧故障导致 PTA 装置停产 32 小时，单次损失 180 万元）；而分阶段策略实施后，年均成本压缩至 85 万元（预警期 8.5 万元/年、干预期 25.5 万元/年、紧急期 51 万元/年），故障停机次数锐减至 1.1 次（如 2022 年仅因 #3 变压器苯溶剂渗透过热停机 16 小时）。核心经济指标表现为：年均直接成本节约 35 万元（降幅 29.2%），其中预警

期投入回报比最高（2022 年 #9 变压器案例中 0.48 万元投入规避 30 万元损失），紧急期单次成本虽达 48 万元（如 2019 年 #8 变压器维修），但较潜在停产损失（氯碱装置单日产值超 300 万元）仍具显著经济性^[5]。三年累计节约维护成本 105 万元，扣除初期智能诊断模型开发投入 20 万元，净收益 85 万元，按 $\text{ROI} = (\text{累计节约} - \text{开发成本}) / \text{开发成本} \times 100\%$ 计算，投资回报率达 425%，相当于每投入 1 元技术开发费产生 5.25 元收益。此效益尚未计入故障减少带来的间接收益——近三年避免的 6.3 次非计划停机（ $3.2 \times 3 - 1.1 \times 3$ ），按化工装置单次停机最小损失 300 万元计，隐性效益达 1 890 万元。

5 结论

本研究基于某化工厂 32 台变压器 2015–2023 年 1 860 条油色谱数据，建立了精准的变压器故障诊断与经济性维护体系。研究发现：氢气浓度超过 $150\ \mu\text{L/L}$ 可预警局部放电（概率 82%），乙炔浓度突破 $5\ \mu\text{L/L}$ 标志电弧故障风险显著升高， CO/CO_2 比值大于 0.3 时绝缘纸老化速率加速至正常的 3 倍。开发的人工神经网络（ANN）诊断模型准确率达 95%，较 IEC 标准提升 15%，实现故障提前 72 小时预警（如乙炔 $8\ \mu\text{L/L}$ 即发出电弧警报）。提出的分阶段维护策略通过动态阈值响应实施：当氢气 $> 100\ \mu\text{L/L}$ 或乙炔 $> 2\ \mu\text{L/L}$ 时启动强化监测（成本占比 10%）；总烃 $> 150\ \mu\text{L/L}$ 或 $\text{CO}/\text{CO}_2 > 0.25$ 时执行在线检修（成本占比 30%）；乙炔 $> 10\ \mu\text{L/L}$ 或 $\text{CO}_2 > 15\ 000\ \mu\text{L/L}$ 时触发快速抢修（成本占比 60%）。该体系在多家化工厂应用中年均降低维护成本 29.2%（节约 35 万元），故障停机次数从 3.2 次/年降至 1.1 次/年，三年累计净收益 85 万元，投资回报率达 425%，间接避免停产损失 1 890 万元。研究成果为化工连续生产场景提供了高效运维支持，全生命周期可降本超千万元，具有显著的工程价值。

参考文献：

- [1] 尹琦琳,宋媛,王帅,等.基于绝缘油色谱试验的 110 kV 变压器异常状态分析[J].变压器,2024,61(05):71-74.
- [2] 鲁永,赵映宇,陈婕,等.基于油色谱分析技术的变压器故障分析[J].变压器,2023,60(06):64-67.
- [3] 刘佳佳,李春雨,杨春飞.变压器油色谱在线装置故障诊断与预测分析[J].集成电路应用,2024,41(05):396-397.
- [4] 于哲,张月,迟秀华,等.变压器油色谱分析及故障诊断的应用[J].冶金动力,2022(06):11-12.
- [5] 高泽梅.基于油色谱数据的变压器故障监控策略分析[J].集成电路应用,2023(12):40.