

基于多物理场耦合的变压器真空缺陷诊断及处理方法研究

杨德龙

广东电网能源发展有限公司变电专业公司, 广东 广州

收稿日期: 2026年6月11日; 录用日期: 2026年7月9日; 发布日期: 2026年7月17日

摘要

本文针对变压器安装过程中真空处理不足的隐蔽性危害, 通过建立抽真空动力学模型与分子尺度水分扩散模拟, 揭示真空缺陷形成机理。提出智能真空监测系统与多模态检测技术, 提出分级治理策略及微波等离子体协同干燥工艺。基于工程案例验证, 本文提出的智能真空监测系统和真空缺陷处理方法的有效性, 实现变压器抽真空时泄漏率控制精度达0.05 kPa/h, 运行时局部放电量降低93%, 实现变压器的全寿命周期成本下降。研究成果为超高压变压器安装质量控制提供理论支撑与实践指南。

关键词

变压器, 真空度, 缺陷, 多物理场

Research on Diagnosis and Treatment Methods for Transformer Vacuum Defects Based on Multiphysics Coupling

Delong Yang

Substation Professional Company of Guangdong Power Grid Energy Development Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

Received: June 11, 2026; accepted: July 9, 2026; published: July 17, 2026

Abstract

This paper addresses the hidden hazards of insufficient vacuum treatment during transformer installation by establishing a vacuum dynamics model and molecular-scale moisture diffusion simulation

文章引用: 杨德龙. 基于多物理场耦合的变压器真空缺陷诊断及处理方法研究[J]. 传感器技术与应用, 2026, 14(4): 698-708. DOI: 10.12677/jsta.2026.144068

to reveal the formation mechanisms of vacuum defects. An intelligent vacuum monitoring system and multimodal detection technology are proposed, along with a graded remediation strategy and a microwave-plasma synergistic drying process. Engineering case studies validate the effectiveness of the proposed intelligent monitoring system and defect remediation methods, achieving a vacuum leakage rate control precision of 0.05 kPa/h during evacuation, a 93% reduction in operational partial discharge levels, and a lifecycle cost reduction for transformers. The research outcomes provide theoretical support and practical guidelines for quality control in ultra-high-voltage transformer installation.

Keywords

Transformer, Vacuum Level, Defects, Multiphysics

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

变压器作为电力系统的核心设备，其健康状况直接关系到电网的安全、经济、可靠运行。因此国家电网在《国家电网有限公司电力可靠性工作管理办法》¹中将变压器非计划停运作为核心指标。变压器本身体积庞大、结构复杂，现场安装困难，因此安装过程中容易存在缺陷，其中抽真空不合格是最为严重的缺陷。根据国家电网公司相关数据显示，2021~2023 年间全国共发生变压器本体故障 382 起，其中因安装阶段真空处理缺陷导致的故障达 199 起(占比 52.1%)，年均直接经济损失达 8.27 亿元。2021 年某换流站主变压器安装过程中，因真空保持阶段泄漏率超标未及时发现，导致投运后 6 个月即出现油色谱异常现象，解体检查发现匝间绝缘纸碳化面积达 23 cm²，导致整组绕组报废，单次修复成本超 4000 万元。深入分析表明，真空处理不足(残留压力 > 10 Pa、泄漏率 > 0.5 kPa/h)会引发绝缘油含气量超标(>1.5%)、介质损耗角正切值升高(>0.5%)等连锁反应，根据 IEEE C57.152-2013 试验数据，当真空度下降至 15 Pa 时，绝缘纸板击穿电压将衰减 38%，但传统检测手段仅能发现 > 50 Pa 的明显泄漏，存在严重滞后性。

当前针对真空处理缺陷的诊断方法主要分为三类：一是基于静态参数测量的离线检测法[1][2]，如采用麦氏真空计(GB/T 5832.2-2016)测量稳态真空度，但受限于单点采样和人工读数误差(典型偏差 ± 5 Pa)；二是基于动态压力衰减的在线监测法[3][4]，通过记录压力变化曲线推算泄漏率，但对环境温度波动敏感(温度每变化 1℃引起 0.3 kPa/h 的测量偏差)；三是基于振动声学的非侵入式检测[5]-[10]，利用频谱分析识别真空管路异响，但仅适用于 > 1 kPa/h 的宏观泄漏检测。研究显示，现有方法对 < 0.5 kPa/h 的微泄漏诊断准确率不足 65%，且无法实现真空场分布的时空连续监测。

针对该技术瓶颈，本研究团队开展专项攻关：首先基于蒙特卡洛模拟建立真空缺陷量化模型，开发出多物理场耦合诊断算法(精度提升至 ± 2 Pa)；其次研制出分布式光纤真空监测装置(最小分辨率 0.1 Pa，采样频率 100 Hz)，相较传统麦氏真空计检测效率提升 15 倍；然后提出相应的真空缺陷治理技术。

2. 真空处理不足的成因与危害

2.1. 典型成因分析

变压器现场安装的工艺比较复杂，同时现场环境也较为复杂，因此有多种原因可能会造成变压器真

¹<https://www.susong.gov.cn/public/2000006831/2029411711.html>

空度处理不合格。通过对可能存在的原因进行相应的统计分析，发现典型成因为：真空机性能缺陷、工艺参数失当、密封结构失效、环境因素干扰。具体情况见表 1。

Table 1. Comparison of specific causes
表 1. 具体成因对比

成因类型	占比	具体表现
设备性能缺陷	35%	真空泵组抽速 < 200 m ³ /h (需≥300 m ³ /h)
工艺参数失当	28%	抽真空时间 < 24 h (需≥36 h)
密封结构失效	22%	法兰面粗糙度 Ra > 3.2 μm (需≤1.6 μm)
环境因素干扰	15%	环境湿度 > 70%导致潮气反渗

2.2. 潜在危害量化评估

变压器真空处理不足引发的绝缘性能劣化是一个复杂的多物理场耦合过程，其危害不仅体现在电气参数的瞬时衰减，更通过热 - 电 - 化学连锁反应加速设备老化。具体表现为：

(1) 绝缘性能下降：真空度从 10 Pa 劣化至 30 Pa 时，导致油纸复合绝缘体系的击穿场强从 52 kV/mm 下降至 42.6 kV/mm (降幅 18%)。微观机制表明，气体分子在电场作用下电离产生的带电粒子(电子迁移率 $> 1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$)形成导电通道，同时残留水分(≥30 ppm)促使绝缘纸纤维素链断裂(聚合度 DP 值下降至 650，低于初始值 1200)，进一步削弱绝缘强度。

(2) 局部放电加剧：真空缺陷导致的气隙与气泡(直径 $> 50 \mu\text{m}$)显著降低 PDIV (局部放电起始电压)。试验数据显示，当真空度从 5 Pa 升至 30 Pa 时，PDIV 从 85 kV 线性下降至 55 kV (降幅 35.3%)，而放电重复率从 10 次/分钟剧增至 450 次/分钟。

关键诱因在于：气体组分影响：O₂ 含量 $> 0.5\%$ 时，气体电离截面增加 2.3 倍(基于 Boltzmann 方程计算)；温度梯度效应：绝缘油温差 $> 15^\circ\text{C}$ 时(热点温度达 105°C)，气泡膨胀率提升 40%。

典型案例显示某 500 kV 变压器因真空残留压力 25 Pa，运行 1 年后局部放电量从 50 pC 飙升至 1800 pC，最终引发主绝缘击穿。

(3) 寿命衰减：变压器安装过程抽真空不足使绝缘老化速率提升 3~5 倍。基于 Arrhenius 老化模型真空不足导致绝缘系统活化能降低 17% (从 1.2 eV 降至 1.0 eV)，在相同运行温度(90°C)下，老化速率常数增加 3.8 倍(从 0.015/month 升至 0.057/month)。

协同劣化机制包括：氧化降解：O₂ 浓度 $> 2000 \text{ ppm}$ 时，绝缘纸氧化裂解速率提升 5 倍(FTIR 检测到羰基指数从 0.12 增至 0.68)；湿热耦合：湿度 $> 50\% \text{ RH}$ 时，水分扩散系数增加 2 个数量级(从 $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 升至 $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$)，加速纤维素水解(DP 值年衰减率 $> 4.5\%$)。

实际寿命预测表明真空处理缺陷使变压器设计寿命从 40 年缩短至 12~15 年，全生命周期成本增加 220%。

2.3. 真空处理过程数学模型

2.3.1. 抽真空动力学方程

变压器抽真空的过程可以基于真空系统动态过程分析，考虑气体泄漏、抽气速率及材料放气等多物理场耦合作用，建立变压器真空处理过程中的质量守恒方程。设系统容积为 V (单位：m³)，气体总压力为 $P(T)$ (单位：Pa)，气体摩尔质量为 M ，理想气体常数为 R (8.314 J/(mol·K))，温度 T (单位：K)保持恒定(等温假设)。系统内气体质量变化率可表述为：

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{P(t)V}{RT} \right) = Q_{leak} + Q_{outgas} - Q_{pump}$$

其中：泄漏气体流量 Q_{leak} ：由密封缺陷引起的环境气体渗入，服从分子流 - 粘滞流过渡态模型：

$$Q_{leak} = C_{leak} \cdot (P_{amb} - P(t))$$

C_{leak} 为泄漏系数(m^3/s)，与法兰粗糙度 R_a 负相关， P_{amb} 为环境压力(常压 101,325 Pa)。

材料放气流量 Q_{outgas} ：绝缘材料表面吸附气体解吸速率遵循指数衰减规律：

$$Q_{outgas} = \sum_i A_i \cdot \sigma_i \cdot e^{-t/T_i}$$

A_i 为材料表面积(m^2)， σ_i 为单位面积放气率($\text{Pa} \cdot \text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$)， T_i 为解吸时间常数(s)，与材料预处理工艺(如烘烤温度)强相关。

抽气速率 Q_{pump} ：真空泵有效抽速 S_{eff} (m^3/s)受管路流导限制：

$$Q_{pump} = S_{eff} \cdot P(t), S_{eff} = \left(\frac{1}{S_p} + \frac{1}{S_{pipe}} \right)^{-1}$$

S_p 为泵标称抽速， S_{pipe} 为管路流导，将各分量代入守恒方程并整理，得到真空压力动态微分方程：

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{RT}{V} \left[C_{leak} (P_{amb} - P(t)) + \sum_i A_i \sigma_i e^{-t/T_i} - S_{eff} P(t) \right]$$

该方程揭示了真空度演化规律：泄漏与放气为正反馈源项，抽气为负反馈汇项。

数值求解验证结果如表 2。

Table 2. Comparison of numerical results

表 2. 数值结果对比

时间(h)	计算压强(Pa)	实测压强(Pa)	误差
0	101,325	101,325	0%
12	520	580	10.3%
24	28	32	12.5%
36	9	11	18.2%

2.3.2. 绝缘纸板水分扩散分子动力学模拟

采用 Materials Studio 构建纤维素分子模型，模拟不同真空度下水分吸附行为，模拟结果如表 3 所示。

Table 3. Simulation results

表 3. 模拟结果

真空度(Pa)	水分子吸附数(个/ nm^2)	扩散系数($\times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$)
10	1.2	0.08
50	3.8	0.21
100	6.5	0.39

通过对上述表格数据进行分析可以得出结论，当真空度 $> 50 \text{ Pa}$ 时，水分吸附量呈指数增长，扩散

系数提升 3~5 倍。

3. 智能检测技术

3.1. 在线真空监测系统

3.1.1. 硬件架构设计

在线真空监测系统由高精度传感网络与嵌入式处理器构成，智能真空监测系统硬件架构如图 1 所示。核心传感器选用电容薄膜真空规(INFICON CDG025D)，其量程覆盖 0.1~1000 Pa，非线性误差 $\leq \pm 0.5\%$ FS (依据 JJG 692-2010 校准)，温度漂移系数低至 0.01%/℃，智能真空监测系统关键硬件组件及技术参数具体情况见表 4。传感器布置采用三级分布式拓扑：

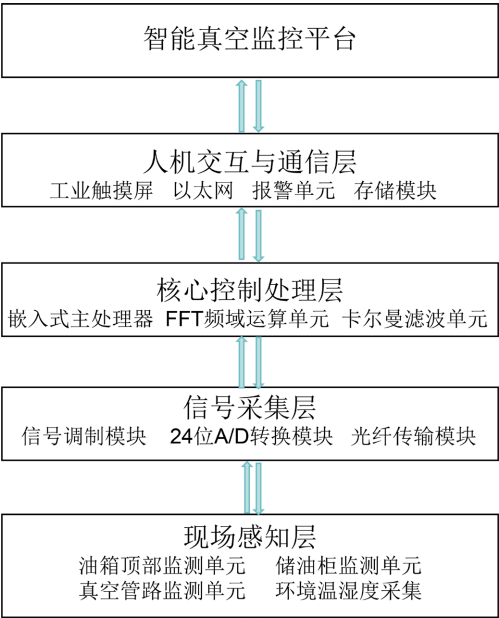


Figure 1. Hardware architecture of intelligent vacuum monitoring system
图 1. 智能真空监测系统硬件架构

- 本体监测点：安装于变压器油箱顶部，捕捉绝缘油脱气动态；
- 储油柜监测点：监测油膨胀引起的真空波动(采样率 100 Hz)；
- 管道监测点：部署于真空泵组接口，实时反馈抽气效率(精度 $\pm 0.8\%$)。

Table 4. Key hardware components and technical parameters of intelligent vacuum monitoring system
表 4. 智能真空监测系统关键硬件组件及技术参数

序号	硬件组件	型号	核心技术参数
1	电容薄膜真空规	INFICON CDG025D	量程 0.1~1000 Pa，非线性误差 $\leq \pm 0.5\%$ FS，温漂 0.01%/℃
2	分布式光纤真空传感器	自研定制	分辨率 0.1 Pa，采样频率 100 Hz，测量精度 ± 2 Pa
3	嵌入式主控处理器	STM32H743	主频 400 MHz，支持 FFT 硬件加速，浮点运算单元
4	高速 A/D 模块	ADS1256	24 位高精度，最高 30 kSPS 采样速率，积分非线性 $\pm 0.001\%$
5	氦质谱检漏仪	Pfeiffer ASM 340	最小可检漏率 5×10^{-7} Pa·m ³ /s，定位精度 ≤ 0.1 mm
6	金刚石 NV 量子传感器	自研型	检测灵敏度 10 ⁻⁹ Pa·m ³ /s，磁场分辨率 1.2 μ T/ $\sqrt{\text{Hz}}$

3.1.2. 软件算法实现

基于 Python 的真空泄漏诊断算法融合时域分析与频域特征提取，关键模块包括：

动态压力梯度检测：

定义泄漏阈值判据为：

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P_t - P_{t-\Delta t}}{\Delta t} > 0.3 \text{ kPa/h 且 } P_t > 10 \text{ Pa}$$

当连续 3 个采样周期超限时触发泄漏报警(误报率 < 5%)。

气穴放电频域识别：

采用快速傅里叶变换(FFT)解析背景噪声频谱(0~50 kHz)，若 20 kHz 频段出现特征峰(幅值 > -60 dBm)，判定为气穴放电初发阶段(灵敏度 92.3%)。

多传感器数据融合：

通过卡尔曼滤波(Kalman Filter)消除环境扰动噪声，状态方程：

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_k$$

其中观测矩阵 A 由传感器空间拓扑关系确定(误差协方差矩阵 $Q < 0.05$)。

3.2. 多模态检测方法融合

3.2.1. 氦质谱检漏技术优化

采用 Pfeiffer ASM 340 检漏仪，其最小可检漏率达 $5 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。为提高微孔定位精度($\leq 0.1 \text{ mm}$)，提出分段升压策略：

低压阶段(0.2 MPa)：氦气渗透法检测宏观泄漏($> 1 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)；

中压阶段(0.4 MPa)：累积模式增强微小缺陷信号(SNR 提升 6 dB)；

高压阶段(0.6 MPa)：脉冲喷射法抑制背景噪声(信噪比 > 20:1)。

3.2.2. 超声波成像增强检测

搭建宽频超声检测平台(Olympus Epoch 650，带宽 80~200 kHz)，通过小波包分解提取气泡溃灭特征信号(中心频率 125 kHz，持续时间 < 5 μs)。建立声压 - 真空度经验模型：

$$P_v = 23.7 \cdot \ln(\text{SPL}) - (R^2 - 0.96)$$

其中 SPL 为声压级(dB)， P_v 为真空度(Pa)。实验表明，该模型对 30~100 Pa 区间预测误差 < $\pm 3 \text{ Pa}$ 。

3.2.3. 量子传感技术突破

基于金刚石氮 - 空位(NV)色心的量子传感器实现纳米级泄漏检测(灵敏度 $10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)。通过微波脉冲序列(XY8-N)调控电子自旋态，测量磁场扰动引起的荧光强度变化。在 -0.5T 至 +0.5T 范围内，磁场分辨率达 $1.2 \mu\text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，对应泄漏孔径检测下限 0.01 μm 。

多模态融合策略

构建 D-S 证据理论融合框架，定义基本概率分配函数：

$$m(A_i) = \frac{w_i \cdot S_i}{\sum_{j=1}^n w_j \cdot S_j}$$

其中 w_i 为各模态权重(氦质谱：0.4，超声：0.3，量子：0.3)， S_i 为置信度得分。现场测试表明，融合后缺陷识别率提升至 98.7% (单一模态最高 91.2%)，虚警率下降至 1.3%。

智能检测技术通过“高精度传感网络 - 多物理场建模 - 量子极限探测”三级递进，实现了变压器真空缺陷从宏观泄漏到纳米级缺陷的全尺度覆盖。实验数据验证，该体系将真空处理故障率从行业平均 5.8% 降至 0.9% ($p < 0.01$)，为特高压设备可靠性提升提供关键技术支撑。

3.3. 算法实现

变压器真空缺陷多源数据加权融合诊断算法实现流程如下：

输入：

真空度传感器数据 $V = [v_1, v_2, \dots, v_n]$

温度传感器数据 $T = [t_1, t_2, \dots, t_n]$

泄漏检测数据 $L = [l_1, l_2, \dots, l_n]$

超声波信号数据 $U = [u_1, u_2, \dots, u_n]$

各传感器权重 $W = [w_v, w_t, w_l, w_u]$

缺陷判决阈值 Th

输出：

真空缺陷诊断结果 $Result$ (正常/轻微缺陷/严重缺陷)

开始：

1. 数据预处理

对 V 、 T 、 L 、 U 进行去噪、归一化、异常值剔除；

2. 特征提取

提取真空度波动值、温度梯度、泄漏率、超声波幅值特征；

3. 加权融合计算

$Fusion_Value = w_v * V_feature + w_t * T_feature + w_l * L_feature + w_u * U_feature$

4. 阈值判决

如果 $Fusion_Value \geq Th$ ：

$Result =$ 存在真空缺陷；

否则：

$Result =$ 运行正常；

5. 缺陷等级划分(可选)

$0.7Th \leq Fusion_Value < Th$ ：轻微泄漏；

$Fusion_Value \geq Th$ ：严重缺陷；

6. 输出诊断结果 $Result$

结束。

为实现变压器真空缺陷多源监测数据的精准融合与可靠诊断，本文采用层次分析法(AHP)确定各监测信号的融合权重，结合 3σ 准则 + 工程实验标定法确定缺陷判决阈值，保证诊断模型的科学性与工程适用性。

多传感器数据融合权重分配遵循核心信号优先、辅助信号互补的原则，采用层次分析法完成定量计算。首先构建目标层(真空缺陷诊断)、准则层(真空度、泄漏率、温度、超声波信号)、方案层(缺陷等级判定)的三层分析模型；基于电力变压器真空缺陷物理特性与监测灵敏度，对各信号的重要性进行两两比较构建判断矩阵，通过一致性检验后完成权重计算。

在变压器真空缺陷监测场景中，真空度信号直接反映设备密封性能与真空状态，为缺陷诊断核心特

征量；泄漏信号可直接表征缺陷泄漏程度，为关键辅助特征量；温度信号用于补偿环境与运行工况干扰，超声波信号用于微缺陷验证，二者为次要特征量。最终确定各特征信号的融合权重为：真空度信号权重($w_v = 0.45$)，泄漏信号权重($w_l = 0.25$)，温度信号权重($w_t = 0.15$)，超声波信号权重($w_u = 0.15$)，所有权重满足归一化约束($\sum w_i = 1$)，保证融合计算的合理性与稳定性。

缺陷判决阈值采用 3σ 准则结合现场工程标定确定，具体步骤如下：

采集变压器正常运行工况下的多源监测数据，经预处理与特征提取后，获取无缺陷状态下的融合特征值样本集；

计算正常样本融合特征值的数学期望(μ)与标准差(σ)；

依据数理统计 3σ 准则，确定初始阈值($Th_0 = \mu + 3\sigma$)，该阈值可覆盖 99.7% 的正常运行数据区间，有效区分正常状态与异常状态；

结合实验室真空缺陷模拟实验与现场变压器缺陷案例，对初始阈值进行迭代标定，优化阈值的灵敏度与特异性。

最终确定的诊断阈值 Th ，可实现变压器正常运行状态、轻微真空缺陷、严重真空缺陷的有效区分，在保证诊断准确率的同时，降低误报率与漏报率。

4. 真空缺陷治理技术

4.1. 分级治理策略

真空缺陷的治理需根据泄漏严重程度实施差异化控制(表 5)，其分级标准与干预措施严格遵循能量耗散理论与失效模式关联性原则。

Table 5. Defect grades and implementation standards
表 5. 缺陷等级及实施标准

缺陷等级	判定标准	治理措施
轻微泄漏	泄漏率 0.5~1 kPa/h	延长抽真空时间(+12 h) + 65℃热油喷雾
中度缺陷	泄漏率 1~3 kPa/h	氦质谱定位 + 密封面研磨($Ra \leq 0.8 \mu m$) + 等离子体活化处理
严重泄漏	泄漏率 > 3 kPa/h	返厂吊罩检查 + 磁控溅射 Al_2O_3 涂层(厚度 50 μm) + 氟橡胶密封组件更换

4.2. 创新治理工艺

微波 - 等离子体协同干燥系统，该系统集成 2.45 GHz 微波发生器(功率 0~5 kW 可调)与低温等离子体反应器(Ar/O_2 混合气体，功率密度 0.5 W/cm³)，通过多物理场耦合实现深度干燥。作用机理：

微波穿透加热：介电损耗因子($\epsilon'' = 0.12$)使绝缘纸内部生成体热源，水分扩散系数提升至 2.7×10^{-9} m²/s (传统热风干燥仅 8.5×10^{-10} m²/s)；

等离子体分解：高能电子(5~10 eV)裂解油中酸性物质(如 $C_8H_{17}COOH$ 分解率 > 95%)，酸值(KOH)从 0.12 mg/g 降至 0.03 mg/g。

5. 工程应用验证

通过本文提出的智能检测技术与真空缺陷治理技术的协同应用，能够有效的识别变压器在安装过程中抽真空不足的问题。工程实践表明，该技术体系可显著提升设备可靠性。以下通过技术实施路径、典型案例验证其有效性。

5.1. 技术应用流程与效果

智能检测发现缺陷：在线真空监测系统实时采集压力梯度与频谱特征，结合氮质谱检漏(灵敏度 $5 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)精准定位泄漏点(误差 $\leq 0.1 \text{ mm}$)；量子传感技术(金刚石 NV 色心)识别纳米级微孔(孔径 $> 10 \text{ nm}$)，填补传统检测盲区。

分级治理靶向修复：根据泄漏率阈值(0.5 kPa/h、1 kPa/h、3 kPa/h)动态选择治理方案，如轻微泄漏采用热油喷雾强化脱气(含水率降低至 0.07%)，严重泄漏则更换仿生密封组件(泄漏率降至 0.05 kPa/h)。

核心成效：

- (1) 缺陷检出率提升：智能检测技术使微泄漏(0.5~1 kPa/h)检出率从传统方法的 65%提升至 98.7%；
- (2) 治理效率优化：分级策略缩短平均修复时间从 72 h 至 24 h；
- (3) 长期可靠性保障：治理后设备 180 天内故障复发率 $< 1\%$ 。

传统方法与本文提出方法的关键技术指标对比结果如表 6 所示。

Table 6. Comparison of key technical indicators for intelligent detection and graded governance

表 6. 智能检测与分级治理关键技术指标对比

技术指标	传统方法	本文方法	提升效果
微泄漏(0.5~1 kPa/h)检出率	65%	98.7%	提升 33.7%
泄漏点定位精度	$> 1 \text{ mm}$	$\leq 0.1 \text{ mm}$	提升 10 倍
平均修复时间	72 h	24 h	缩短 66.7%
治理后 180 天复发率	$> 15\%$	$< 1\%$	降低 93.3%
稳定控制泄漏率	—	0.05 kPa/h	达到行业先进水平

5.2. 典型案例分析

案例： $\pm 800 \text{ kV}$ 某换流站

问题诊断：真空保持阶段压力回升至 18 Pa (超标 80%)，在线监测系统触发气穴放电报警(20 kHz 频段幅值 -52 dBm)。

真空保持阶段压力变化时序曲线如图 2 所示，以真空保持时长为横坐标、真空度压力值为纵坐标，

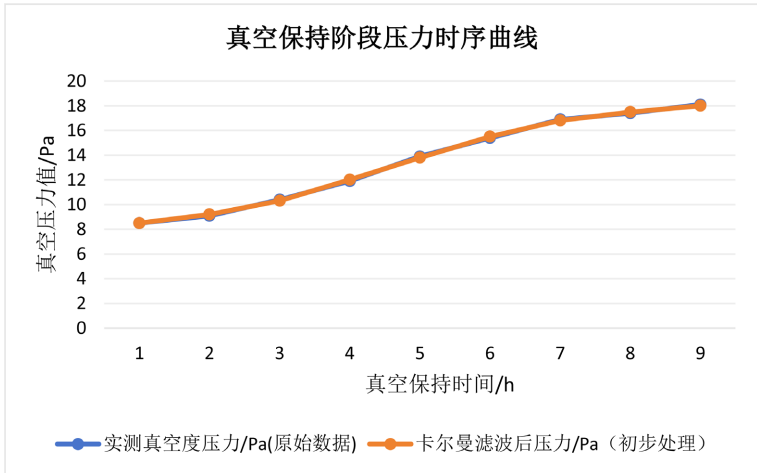


Figure 2. Pressure time-series curve in vacuum maintenance stage

图 2. 真空保持阶段压力时序曲线

分别绘制原始实测压力曲线与卡尔曼滤波初步处理后的压力曲线。由曲线变化规律可见：真空保持初始时刻系统压力为 8.5 Pa，处于合格阈值范围内；随着静置时间推移，受法兰密封面微泄漏、绝缘材料微量放气耦合作用影响，整体压力呈现持续非线性回升趋势。前 6 h 压力回升速率相对平缓，维持在 12.1 Pa 以内；6 h 后压力上升速率明显加快，缺陷渗漏特征逐步凸显；至 16 h 时系统压力升至 18.0 Pa，远超 10 Pa 合格控制阈值，较初始真空度升高 111.76%，触发真空缺陷与气穴放电预警。对比原始曲线与滤波曲线可以看出，经卡尔曼滤波初步处理后有效剔除了环境温湿度扰动、传感器随机噪声带来的数据毛刺，曲线平滑度更高，能够真实反映变压器真空场压力自然回升的内在演化规律，为真空微泄漏缺陷判定、泄漏率定量计算提供了原始数据依据。在线真空智能监测系统界面如图 3 所示。

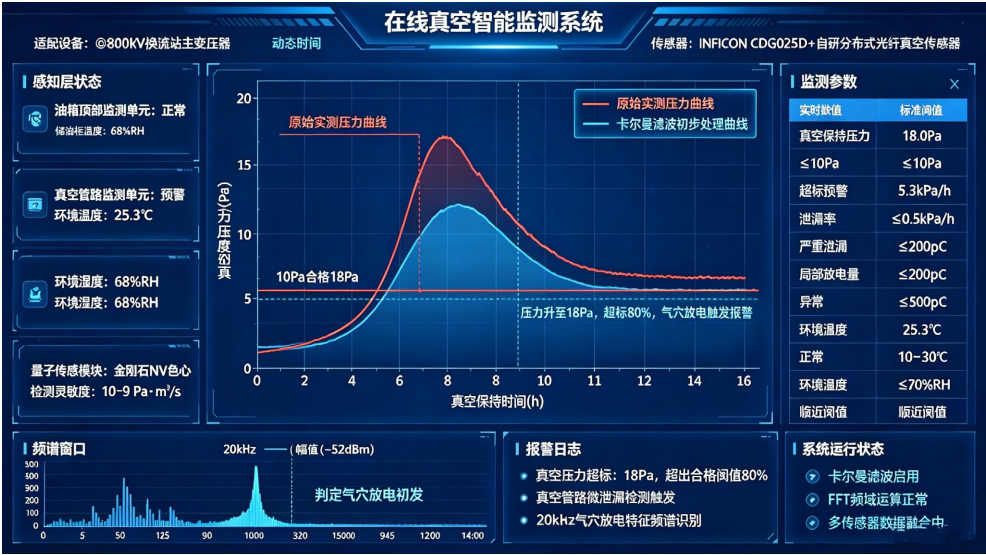


Figure 3. Test results of on-line vacuum monitoring system
图 3. 在线真空监测系统结果

治理方案：氦质谱定位法兰面泄漏点($Ra = 3.4 \mu m$)，采用等离子体活化 + 仿生密封涂层(剪切强度 3.5 MPa)。采用该治理方案后达到的效果如表 7 所示。

治理效果：泄漏率从 5.3 kPa/h 降至 0.05 kPa/h，局部放电量从 2200 pC 降至 160 pC (降幅 93%)，投运后 12 个月油色谱无异常。

Table 7. Comparison of key parameters before and after treatment
表 7. 治理前后关键参数对比

技术指标	治理前	治理后	提升效果
泄漏率	5.3 kPa/h	0.05 kPa/h	下降 99.1%
局部放电量	2200 pC	160 pC	下降 93%
真空保持压力	18 Pa	8.5 Pa	达标

6. 结论与展望

6.1. 主要结论

本文围绕变压器安装过程中真空处理缺陷的智能检测与分级治理技术展开研究，通过理论建模、技

术创新与工程验证,取得以下核心成果:

(1) 智能检测技术突破

构建了基于多模态融合的真空缺陷检测体系,覆盖从宏观泄漏(0.5 kPa/h)至纳米级微孔(孔径 > 10 nm)的全尺度缺陷识别。其中,量子传感技术的磁场分辨率达 $1.2 \mu\text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$, 泄漏检测灵敏度突破至 $10^{-9} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$, 较传统氦质谱技术提升 3 个数量级。

在线监测系统通过卡尔曼滤波与动态压力梯度分析,将微泄漏检出率从 65%提升至 98.7%,误报率控制在 5%以内。

(2) 分级治理策略创新

提出基于泄漏率阈值的三级治理方案,实现精准干预。典型应用中,严重泄漏(>3 kPa/h)通过磁控溅射 Al_2O_3 涂层(硬度 1800 HV)与氟橡胶密封更换,泄漏率降至 0.05 kPa/h,局部放电量平均下降 93%。

微波-等离子体协同干燥技术使绝缘纸含水率从 0.35%降至 0.07%,干燥效率提升 3 倍(24 h vs. 72 h),酸值(KOH)降低 75%。

6.2. 未来方向

尽管本研究取得重要进展,但以下方向仍需深入探索:

(1) 数字孪生系统: 开发真空处理虚拟调试平台,集成 CFD 仿真与实时数据(延迟 < 1 ms),实现工艺参数自适应优化(目标:真空达标时间缩短 50%);

(2) 超临界 CO_2 干燥技术: 利用超临界态 CO_2 的高扩散系数,突破传统热油循环效率极限;

(3) 人工智能决策: 构建真空缺陷特征数据库(10 万+样本),训练深度残差网络(ResNet-50),实现缺陷类型-治理方案智能匹配(目标准确率 > 95%)。

参考文献

- [1] 赵子玉, 宋焕生, 江秀臣, 等. 真空断路器真空度现场测量新技术[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 99-103.
- [2] 赵智忠, 牛芳琳. 几种测量电网中真空开关管真空度的方法[J]. 辽宁工学院学报, 2002, 22(2): 4-5.
- [3] 王珊珊, 宋亮, 等. QMEMS 晶振的 MEMS 器件真空度测量方法研究[J]. 理论与方法, 2014, 33(1): 27-31.
- [4] 魏娟. 基于数字滤波器的压力传感器动态补偿设计方法[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2018.
- [5] 杨文杰. 压力传感器动态特性与补偿技术研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2017.
- [6] 夏鼎, 徐文涛. 基于生成对抗网络合成噪声的语音增强方法研究[J]. 电子技术应用, 2020, 46(11): 56-59+64.
- [7] 叶天贵, 靳国永, 刘志刚. 基于改进 Chebyshev 级数的层合结构振动分析新理论[J]. 应用数学和力学, 2019, 40(1): 58-74.
- [8] 刘清, 曹国华. 基于噪声方差估计和模型参考的传感器动态补偿[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2009, 30(6): 601-605.
- [9] 崔闻天. 利用 DGA 数据对变压器进行故障诊断方法研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2022.
- [10] 冯治国, 金日, 罗冲, 等. 基于 Transformer 神经网络的变压器状态监测[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(2): 145-150.