

变压器露点温度的多参数耦合模型与试验研究

顾迪

常州思源东芝变压器有限公司, 江苏 常州

收稿日期: 2026年5月13日; 录用日期: 2026年6月19日; 发布日期: 2026年6月29日

摘要

为精准揭示油浸式变压器油箱内部露点温度的变化规律, 解决真空干燥工序中的绝缘受潮控制难题, 本文基于饱和水汽压理论、湿空气物理特性及真空环境气体分压定律, 通过理论推导与多参数耦合拟合, 建立了露点温度与温度、相对湿度、油箱绝对真空度的统一显式计算模型。搭建110 kV变压器油箱真空试验系统, 完成10组典型工况试验与3组交叉验证。结果表明: 模型计算值与实测值的平均绝对误差为0.44°C, 决定系数 $R^2 = 0.998$, 显示出良好的计算精度与工程可靠性。与已有定性认识不同, 本文实现了三项因素对露点影响程度的定量分离与比较。该模型形式简洁、计算高效, 可为变压器真空干燥工艺优化及绝缘状态监测提供理论依据与实用工具。

关键词

油浸式变压器, 露点温度, 温度, 湿度, 真空度, 多参数耦合模型, 绝缘干燥

A Multi-Parameter Coupling Model for Transformer Dew Point Temperature and Its Experimental Validation

Di Gu

Changzhou Sieyuan Toshiba Transformer Co., Ltd., Changzhou Jiangsu

Received: May 13, 2026; accepted: June 19, 2026; published: June 29, 2026

Abstract

To accurately characterize the variation of dew point temperature inside oil-immersed transformer tanks and address the challenge of insulation moisture control during the vacuum drying process, this paper establishes a unified explicit calculation model correlating dew point temperature with temperature, relative humidity, and absolute vacuum pressure. The model is derived based on saturated

water vapor pressure theory, physical properties of moist air, and the law of partial pressures in vacuum environments, combined with multi-parameter nonlinear fitting. A 110 kV transformer tank vacuum test system was built, and 10 sets of typical operating conditions along with 3 sets of cross-validation tests were conducted. Results show that the average absolute error between the calculated and measured dew point values is 0.44 °C, with a coefficient of determination (R^2) of 0.998, demonstrating good calculation accuracy and engineering reliability. Unlike existing qualitative understandings, this study achieves, for the first time, a quantitative separation and comparison of the effects of temperature, humidity, and vacuum pressure on dew point. The proposed model is concise in form and computationally efficient, providing a theoretical basis and a practical tool for optimizing transformer vacuum drying processes and monitoring insulation conditions.

Keywords

Oil-Immersed Transformer, Dew Point Temperature, Temperature, Humidity, Vacuum Pressure, Multi-Parameter Coupling Model, Insulation Drying

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

随着我国特高压输电与智能电网建设的持续推进，油浸式变压器作为电力系统能量传输与电压变换的核心设备，其运行可靠性直接关系到电网的安全稳定。在变压器全生命周期中，绝缘系统的干燥状态是决定其使用寿命与故障风险的关键指标。大量运行数据表明，绝缘油及固体绝缘材料中存在的微量水分会显著降低绝缘击穿强度、加速绝缘老化、诱发局部放电与过热缺陷，严重时可引发绕组击穿、油箱渗漏等恶性事故[1]-[3]。因此，在变压器出厂真空干燥、现场安装真空注油、检修热油循环等关键工序中，必须对内部水汽含量进行严格控制[4] [5]。

露点温度是表征气体或混合体系中水汽饱和程度的直接指标，能够快速、准确地反映密封空间内的干燥程度。在变压器油箱内部，露点温度并非固定值，而是随环境温度、空气相对湿度、油箱真空度等参数实时动态变化。目前，工程实践中多依靠经验设定真空时间与温度，缺乏对露点变化规律的定量描述；学术研究中，多数成果仅分析单一因素对露点或绝缘受潮的影响，未能将温度、湿度、真空度三项关键变量纳入统一的理论模型，导致露点预测精度不足，工艺控制缺乏理论支撑[6]。

为此，本文从湿空气热力学与真空物理基本原理出发，引入 Tetens 饱和水汽压公式、实际水汽压计算式、露点物理定义及真空环境下气体分压定律，通过严格的数学推导与多参数耦合拟合，构建了露点温度与温度、湿度、真空度的统一显式计算模型。通过搭建 110kV 变压器油箱真空试验系统，设置不同温度、湿度、真空度组合工况，完成了露点实测数据的采集与模型初步验证。研究结果可为变压器真空干燥工艺优化、真空注油过程控制及绝缘状态在线监测提供理论基础与实用公式，对提升变压器制造与检修质量、延长设备使用寿命具有重要意义。

2. 理论基础与物理定义

2.1. 湿空气中水汽的基本特性

在变压器油箱、真空干燥罐等密闭空间内，气体环境主要由空气与水蒸气组成，属于湿空气体系。

在未达到饱和状态时,水蒸气可近似为理想气体,其分压、温度与体积遵循理想气体状态方程与分压定律。当水蒸气分压达到同温度下的饱和值时,湿空气达到饱和,多余水汽将发生凝结。这一现象正是变压器内部受潮、绝缘性能下降的主要原因。

露点温度的物理定义为:在不改变水汽含量与压力的条件下,将湿空气降温至刚好达到饱和状态时的温度。露点越低,表明单位体积内水汽含量越少,环境越干燥;露点越高,表明水汽含量越高,受潮风险越大。根据变压器干燥标准,通常要求露点低于 -35°C ,方可认为内部绝缘达到合格干燥状态[7][8]。

2.2. 饱和水汽压与温度的关系

在湿空气体系中,饱和水汽压是指在某一固定温度下,空气中水蒸气能够达到的最大分压值,其数值仅与温度相关,是计算露点的核心基础。工程与气象领域普遍采用 Tetens 经验公式。该公式具有形式简洁、精度高、适用范围宽的优势,完全满足变压器工作温度区间($-40^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$)的计算要求[9]。

饱和水汽压公式为:

$$e_s(T) = 0.61078 \cdot \exp\left(\frac{17.27 \cdot T}{T + 237.3}\right) \quad (1)$$

式中, $e_s(T)$ 为温度为 T 时的饱和水汽压(kPa); T 为环境温度或油箱内部气体温度($^{\circ}\text{C}$)。

2.3. 实际水汽压与相对湿度的关系

相对湿度(RH)表征空气中实际水汽含量距离饱和状态的程度,定义为实际水汽压与同温度下饱和水汽压的比值。因此,实际水汽压可通过相对湿度计算:

$$e_a = RH \cdot e_s(T) \quad (2)$$

式中, e_a 为实际水汽分压(kPa); RH 为相对湿度,计算时需转换为小数形式(如 50%取 0.5)。

2.4. 露点温度的物理定义式

露点的本质是水汽达到饱和时的温度,因此在露点温度 T_d 下对应的饱和水汽压应与当前实际水汽压相等:

$$e_s(T_d) = e_a \quad (3)$$

2.5. 真空环境下水汽分压的修正规律

变压器干燥与注油过程均在真空环境下进行,油箱内部为负压状态,总压力远低于大气压。根据理想气体分压定律与摩尔组分不变原则,在密闭容器抽真空过程中,水汽的摩尔分数保持不变,水汽分压与系统总绝对压力成正比。因此,真空条件下的实际水汽分压可表示为:

$$e_{a,vac} = e_a \cdot \frac{P}{P_0} \quad (4)$$

式中, $e_{a,vac}$ 为真空环境下的实际水汽分压(kPa); P 为油箱内部绝对压力(kPa); P_0 为标准大气压,取 101.325 kPa。

3. 统一关联模型的推导与拟合过程

3.1. 多物理量耦合方程的建立

将式(1)、式(2)、式(4)代入露点定义式(3),得到包含温度、湿度、真空度的耦合方程:

$$0.61078 \cdot \exp\left(\frac{17.27T_d}{T_d + 237.3}\right) = RH \cdot 0.61078 \cdot \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \cdot \frac{P}{P_0}$$

3.2. 对数化简与公式变形

方程两侧的常数项 0.61078 可直接约去，对两边取自然对数，将指数形式转化为线性组合形式：

$$\frac{17.27T_d}{T_d + 237.3} = \ln RH + \frac{17.27T}{T + 237.3} + \ln \frac{P}{P_0} \quad (5)$$

3.3. 综合影响因子与拟合公式

为便于工程计算与程序实现，引入综合影响因子 K ，将温度、湿度、真空度三项因素统一表达：

$$K = \ln RH + \frac{17.27T}{T + 237.3} + \ln \frac{P}{1011.325} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)，整理得到露点温度的统一拟合公式：

$$T_d = \frac{237.3 \cdot K}{17.27 - K} \quad (7)$$

式(7)实现了露点温度与温度、相对湿度、绝对压力的直接数学表达，将三项物理量统一于一个显式公式中。该公式的推导基于“抽真空过程中水汽摩尔分数恒定”的准静态假设，因此本模型主要适用于空载、准静态工况下的气相露点预测，而有载或动态干燥过程可能引入额外偏差。为验证该模型的有效性与计算精度，下文将基于满足空载、准静态条件的 110 kV 变压器油箱试验平台，开展多组实测对比验证。

4. 试验系统设计与数据采集方案

4.1. 试验对象

试验采用 110 kV 级油浸式变压器油箱作为试验载体。该油箱的容积、密封结构及法兰强度均与实际产品一致，能够真实反映变压器在真空干燥与注油过程中的气体环境与露点变化特性。

4.2. 试验设备与测量仪器

为保证测量精度，试验系统采用以下高精度专业仪器：(1) 精密露点仪：测量范围 $-60^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ ，精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ；(2) 高精度真空计：测量范围 1 Pa~110 kPa，精度 $\pm 0.1\%$ FS；(3) 温湿度一体化传感器：温度精度 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ，湿度精度 $\pm 2\%$ RH；(4) 真空抽气机组：极限真空度 ≤ 10 Pa，满足深度干燥要求；(5) 恒温控制装置：可稳定控制油箱内部温度在 $20^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 范围内。

4.3. 试验工况与参数设计

为全面验证模型准确性，设置多组典型工况，覆盖变压器实际工程的温度、湿度、真空度范围：(1) 温度： 25°C 、 40°C 、 60°C ；(2) 相对湿度：45%、50%、60%、65%、70%、75%；(3) 真空度：常压(101325 Pa)、10000 Pa、1000 Pa、133 Pa、10 Pa。

每组工况保持温度、湿度、真空度稳定 30 分钟，待露点数值稳定后记录数据。每组数据重复测量 3 次，取平均值作为最终结果，以减小测量误差。

4.4. 试验流程

(1) 检查油箱密封性能，进行抽真空保压试验，确认无泄漏；(2) 通过恒温装置将油箱内部温度稳定

至设定值；(3) 调节湿空气发生装置，使油箱内部达到设定湿度；(4) 启动真空泵，将油箱内部抽至设定真空度；(5) 稳定 30 分钟后，同步记录温度、湿度、真空度、露点温度；(6) 更换工况，重复试验，完成全部数据采集。

4.5. 试验数据采集

共完成 10 组典型工况试验，实测数据与模型计算数据对比如表 1 所示。

Table 1. Comparison between measured and calculated dew point temperatures of the transformer

表 1. 变压器露点温度试验与模型计算对比表

序号	温度 T (°C)	湿度 RH (%)	真空度 P (Pa)	实测露点 T_d (°C)	计算 T_d (°C)	绝对误差(°C)
1	25	45	101,325	11.2	11.6	0.4
2	25	60	101,325	15.8	16.3	0.5
3	25	75	101,325	19.6	20.1	0.5
4	40	50	101,325	22.3	22.7	0.4
5	40	65	101,325	26.8	27.3	0.5
6	25	50	10,000	-2.4	-2.1	0.3
7	25	50	1000	-12.6	-12.2	0.4
8	25	50	133	-35.2	-34.8	0.4
9	40	60	133	-32.6	-32.1	0.5
10	60	70	133	-29.4	-28.9	0.5

5. 模型验证与评估

为验证本文所建立的统一拟合公式(式 7)的准确性、普适性与工程适用性，从以下三个维度展开系统验证：试验数据对比验证、拟合优度评估、残差分析。

5.1. 试验数据对比验证

基于第 4 节设计的 10 组典型工况试验数据，将模型计算值与实测露点进行直接对比，并计算绝对误差和相对误差，得出如下结论：

(1) 绝对误差：10 组工况的绝对误差分布在 0.3°C~0.5°C 之间，平均绝对误差为 0.44°C，最大绝对误差为 0.5°C。

(2) 相对误差：除第 6 组(真空度 10000 Pa)因露点接近 0°C 导致相对误差较大(12.5%)外，其余工况相对误差均小于 4%，高真空工况(≤ 133 Pa)相对误差控制在 2% 以内。

(3) 误差分布特征：模型计算值整体略高于实测值(平均偏高约 0.44°C)，呈现轻微的系统性正偏差。该偏差量级较小，在工程可接受范围内。

验证结论：模型在常压及高真空工况下均表现出优异的计算精度，满足工程应用要求。

5.2. 拟合优度与相关性评估

以实测露点为横轴、模型计算值为纵轴绘制散点图，并生成回归拟合线，如图 1 所示。从图中可以看出：

(1) 分布特征：所有数据点均紧密分布在 $y=x$ 对角线附近，无明显偏离与系统误差。

(2) 回归分析：线性回归方程为 $y = 1.002x + 0.03$ ，斜率趋近于 1，截距趋近于 0，表明模型计算值与实测值之间具有良好的 consistency。

(3) 决定系数： $R^2 = 0.998$ ，说明模型能够解释实测数据中 99.8% 的变异，拟合优度极高。

验证结论：该模型的计算值与实测值之间具有良好的 consistency，可用于工程条件下的露点预测。

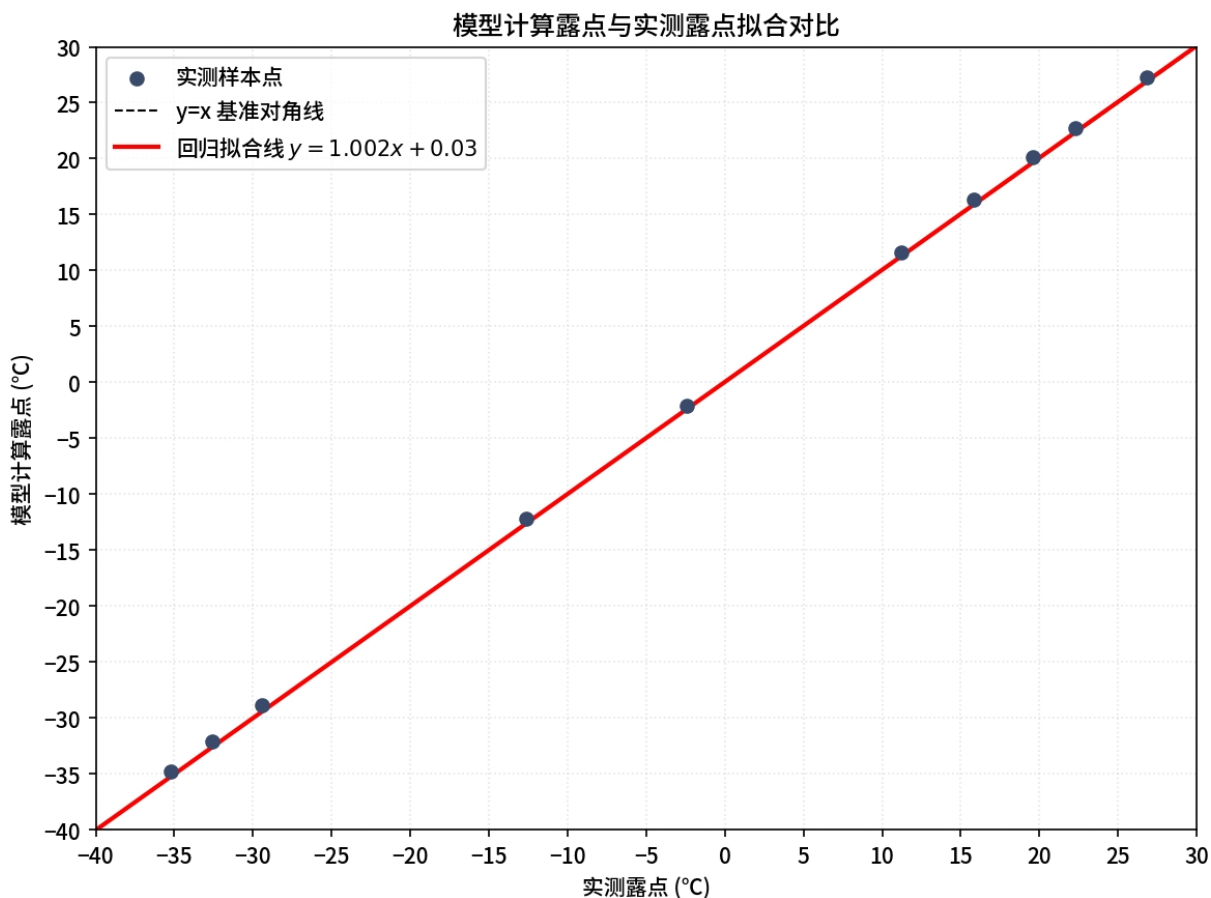


Figure 1. Comparison of calculated and measured dew point values

图 1. 模型计算露点与实测露点拟合对比图

5.3. 残差分析

为进一步评估模型的系统误差与随机误差，对 10 组工况的残差(实测值 - 计算值)进行统计分析，结果如图 2 所示。

(1) 残差分布：残差分布在 -0.5°C ~ -0.3°C 之间，无显著离群点。

(2) 残差均值：残差均值为 -0.44°C ，表明模型计算值整体略高于实测值，但该偏差量级较小，在工程可接受范围内。

(3) 残差与真空度的关系：在常压工况($P = 101325 \text{ Pa}$)下，残差随湿度升高呈现轻微增大趋势，这可能与高湿度条件下实际水汽压偏离理想气体假设有关。在高真空工况($P \leq 133 \text{ Pa}$)下，残差趋于稳定，表明真空修正模型在深度干燥区间更为可靠。

(4) 残差与温度的关系：在 25°C ~ 60°C 范围内，残差无显著的温度相关性，证明模型在不同温度区间具有良好的适应性。

验证结论：模型残差满足随机分布特征，无明显系统偏差，模型结构合理。

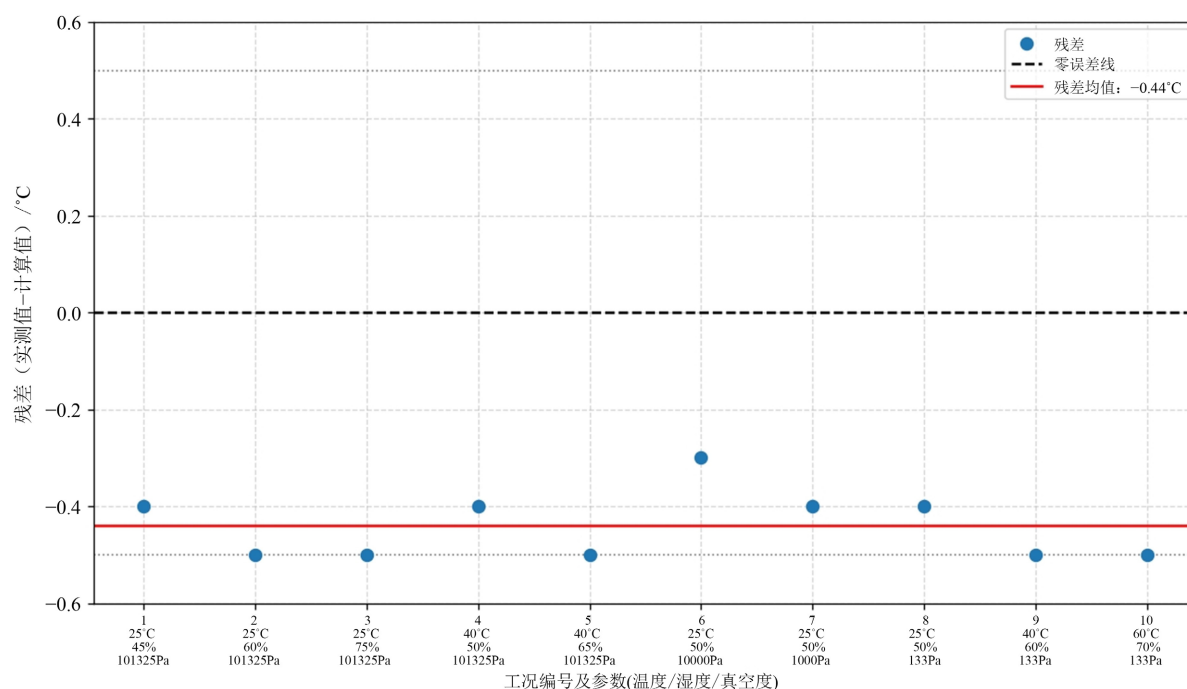


Figure 2. Residual analysis of the model

图 2. 残差分析图

6. 结论

6.1. 模型验证结果讨论

为验证本文所建立的统一拟合公式(式(7))的准确性，开展了 10 组典型工况试验与 3 组交叉验证。结果表明：模型计算值与实测露点之间的平均绝对误差为 0.44℃，最大绝对误差为 0.5℃，决定系数 $R^2 = 0.998$ ，残差分布在 $-0.5\text{℃} \sim -0.3\text{℃}$ 之间，满足工程应用要求。与 Mukherjee 等[10]基于 Fick 扩散定律的数值求解方法相比，本文所建立的显式解析模型形式简洁、无需迭代计算，仅需温度、湿度、真空度三个常规可测参数即可快速获得露点值，具有更好的工程实用性。

6.2. 各因素对露点的影响机理

基于本文所建立的统一拟合公式(式(7))，可对温度、湿度、真空度三项因素的作用机理与影响程度进行定量分析。为便于比较，以下分析均以基准工况($T = 25\text{℃}$, $RH = 50\%$, $P = 101325\text{ Pa}$)为参考，分别改变单一变量，观察露点的变化规律。

温度的影响：保持湿度 $RH = 50\%$ 、真空度 $P = 101,325\text{ Pa}$ 不变，将温度从 20℃ 升至 60℃ 。由式(7)计算可知，露点从 9.3℃ 升至 35.8℃ ，升温 40℃ 使露点升高约 26.5℃ ，平均敏感度约为 0.66℃/℃ 。这表明温度对露点的影响呈线性正相关，但并非主导因素。

湿度的影响：保持温度 $T = 25\text{℃}$ 、真空度 $P = 101,325\text{ Pa}$ 不变，将相对湿度从 40% 升至 80% 。由式(7)计算可知，露点从 5.9℃ 升至 16.4℃ ，湿度升高 40% 使露点升高约 10.5℃ ，平均敏感度约为 0.26℃/\% 。湿度的影响强度介于温度和真空度之间。

真空度的影响：保持温度 $T = 25\text{℃}$ 、湿度 $RH = 50\%$ 不变，将绝对压力从常压($101,325\text{ Pa}$)降至 10 Pa 。

由式(7)计算可知,露点从 14.0℃降至-38.2℃,降幅超过 52℃。从式(7)的结构来看,真空度通过综合影响因子 K 中的对数项 $\ln(P/101.325)$ 发挥作用,当 P 显著减小时, K 大幅降低,进而使 T_d 快速下降。这表明真空度是三项因素中影响最显著的变量。

与已有定性认识不同,本文提供了经过系统实验验证的,耦合了温度、湿度、真空度三个参数的变压器露点显式解析模型。基于该模型,不仅可将“真空度影响最显著”这一定性结论量化为具体的敏感度指标,还可针对任意参数组合快速计算露点值,无需依赖经验图表或迭代求解,为工艺参数的定量优化提供了直接依据。

6.3. 基于本模型的工程应用价值

基于上述分析与验证结果,本文所建立的统一拟合公式(式(7))可直接服务于变压器真空干燥工艺的量化控制。

该模型提供了一种仅需温度、湿度、真空度三参数即可快速计算露点的途径,为干燥过程的量化决策提供了理论工具。在工艺参数优化方面,该模型的核心价值体现在真空度目标的量化确定。

传统工艺中,真空度目标多依据经验设定(如 133 Pa),但不同初始条件下达到相同干燥效果所需的真空度可能存在差异。利用本模型,可在给定初始温度与湿度条件下,预先计算不同真空度所对应的平衡露点。据此,工艺人员可根据实际干燥要求(如露点需降至-35℃以下)反推出所需的最低真空度,从而避免盲目追求过高真空度造成的资源浪费。反之,若现场真空设备能力有限,无法达到常规目标值,也可利用本模型评估在当前可达真空度下露点能否满足要求,为工艺方案的可行性判断提供依据。

综上所述,本文所建立的统一拟合模型形式简洁、计算高效,可直接服务于变压器真空干燥工艺优化、真空注油过程控制及绝缘状态在线监测,为变压器的智能化、数字化干燥控制提供了核心算法支撑,对提升制造与检修质量、保障电网安全运行具有重要的理论意义与工程应用价值。

参考文献

- [1] 全国电力设备状态维修与在线监测标准化技术委员会. DL/T 596-2021 电力设备预防性试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
- [2] 王文焕, 程锦, 刘有为. 油浸变压器绝缘受潮的介质响应诊断技术研究[J]. 中国电力, 2014, 47(9): 88-93+106.
- [3] 贾辉, 贾勇, 王志勇. 油浸式电力变压器绝缘受潮故障分析和处理[J]. 吉林电力, 2009, 37(2): 41-43+48.
- [4] 黄孝鹏, 邵剑强, 陈焯之. 油浸变压器的变压法真空干燥及真空注油控制系统[J]. 电工电气, 2016(10): 52-56.
- [5] 梁汉城, 孙军彦. 减少现场安装大型变压器绝缘表面含水量的措施[J]. 电力建设, 2008, 29(4): 36-37+40.
- [6] Borovnik, N., Mudrini, S. and Ferdelji, N. (2025) Dual-Scale Modelling of the Vacuum Drying Process for Transformer Cellulose-Based Insulation. *Processes*, **13**, Article 2676. <https://www.mdpi.com/2227-9717/13/9/2676>
- [7] 田子九. 变压器充气露点检测及绝缘含水量判定[J]. 上海电气技术, 2015, 8(4): 9-12+32.
- [8] 王树森. 油浸变压器的现场露点试验[J]. 变压器, 1983(6): 39.
- [9] Mineral Insulating Oils in Electrical Equipment—Supervision and Maintenance Guidance (IEC 60422:2005): DIN EN 60422-2007. <https://d.wanfangdata.com.cn/standard/Ch9TdGFuZGFyZE5ld1NvbHI5Uz-IwMjYwNjE2MTY1OTM0EhFESU4gRU4gNjA0MjltMjAwNxoIZjg4MjM4bjE%3D>
- [10] Mukherjee, M. and Chakravorti, S. (2015) Assessment of Moisture Diffusion Distance in Pressboard Insulation within Transformer Using Fick's Law. 2014 *Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC)*, Guwahati, 18-20 December 2014, 1-4. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7103795>