

[变压器]

多模态信息融合的配电变压器缺陷诊断方法

文/袁涛 张勇 刘文松 胡飞
江苏宏源电气有限责任公司

针对反映配电变压器运行状态的电量及非电量特征量进行分析，确定配电变压器缺陷诊断所需的关键特征量及提取方法，构建多模态信息融合的缺陷诊断方法，并对现场工程应用进行思考，提出就地基于边缘计算的轻量化方案与系统平台相结合的实现路径，既有效降低对平台系统算力的要求，又提升诊断的时效性。

配电变压器作为配电网关键设备，其运行状态直接影响配电网的可靠性和供电质量。现阶段配电变压器的运行状态监测基本靠巡视、巡检方式来完成，只能从外观、油位和温度来判断其运行状况，无法及时发现其本体绝缘下降、缺油、进水和发热等问题，从而造成配电变压器故障、烧损等情况。

随着新型配电网的建设，传统配电网运维逐步向智能化、精细化发展。然而，传统故障诊断方法主要依赖单一模态数据（如振动监测、红外测温或电气量分析），难以全面捕捉设备的复杂故障特征。例如，机械松动可能表现为异常振动但无明显温升，而绝缘老化则可能先反映在局部放电信号中。这种单模态检测的局限性易导致误判或漏检，尤其在复杂工况下其可靠性显著降低。

多模态信息融合技术通过整合反映被监测物体的物理、化学特征的多源异构数据，形成较为全面的设备状态画像，通过多信息源的交叉验证，降低部分传感器失效带来的风险，从而提升缺陷诊断的准确性与鲁棒性。此外，深度学习与边缘计算的发展为多模态数据的实时融合与智能分析提供了技术支撑。因此，研究多模态融合的配电变压器缺陷诊断方法，对提升设备预测性运维效率、降低电网运维成本具有重要工程价值。

反映配电变压器状态的特征量选择

1. 配电变压器典型异常状态分析

目前国内油浸式配电变压器的数量远高于干式配电变压器，本文以油浸式配电变压器作为研究对象。配电变压器常见的故障原因包括内部短路、铁心故障、绕组变形、过热、漏油和进水等。

配电变压器内部短路包括匝间短路、层间短路、相间短路和对地击穿等，绝缘老化和劣化是引起故障的主要原因，在配电变压器运行过程中受电、热及机械老化等因素的影响导致绕组绝缘性能下降。短路时会导致电源侧电流急剧增加和三相不平衡现象，导致线圈发热，铜损和铁损增加，从而使变压器内部温度快速上升，且会发出特殊声音。

铁心故障主要有过热、多点接地等。铁心过热是常见的故障现象之一，过热可能是由于绕组短路过载运行、铁心接地不良、铁心局部短路、电源电压过高、油循环不畅或油劣化等原因引起的；多点接地会导致环流产生，接地电流增大，交变磁场作用下导致铁心发热，使油温上升，产气速率增加。

受到巨大电动力作用，绕组可能会产生位移变形，绕组变形分为整体、局部变形两种，绕组变形或位移后，即使没有立即损坏，也会留下严重故障隐患。例如，绕组变形会导致绝缘距离发生改变，

造成突发性绝缘故障，有时在正常运行电压下，也可能会产生局部放电甚至导致绝缘击穿。另外，绕组变形可能会导致绕组机械强度下降，当再一次遭受短路电流冲击时，在积累效应影响下，承受不住巨大电力作用而发生损坏事故。

引起变压器过热的原因很多，包括过载、绕组故障、铁心故障等，其表现为故障点温度急速上升并导致配电变压器顶层油温快速上升。

配电变压器漏油的主要原因是设计、生产和安装质量不过关，存在油箱密封失效、密封不足等缺陷，或因为长期运行导致密封垫老化、龟裂导致变压器漏油，进而影响绝缘性能。

当配电变压器出现异常时，其特征表现为内部电气、温度、声音、油位、压力和油组份等的异常变化。配电变压器不同类型故障时各状态量的变化见表1。

表1 油浸式配电变压器缺陷-特征对照

故障类型	电压	电流	损耗	直流电阻	声音	接地环流	局部放电	温升	油位	油压/气压	油组份
短路故障	匝间短路	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓
	层间短路	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓
	相间短路	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓
	接地短路	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓
铁心故障	铁心过热		✓				✓	✓		✓	✓
	多点接地		✓			✓	✓	✓		✓	✓
其他缺陷	漏油								✓		
	绝缘不良						✓				✓
	温度异常							✓			
	绕组变形	✓	✓		✓						

当因绝缘发生劣化，在初期会产生局部放电现象，因此局部放电的监测是必要的，它能够提前发出绝缘下降预警；当发生电气故障时，可通过电气量的变化、温度、气体压力和油色谱等状态量反映。当发生铁心故障时，可通过电气量、振动特征、温升和环流等特征量进行反映。

油色谱监测在主变中较为普遍，但由于油色谱监测成本较高，不适合配电变压器的监测，可以采用其他特征量进行监测，另外配电变压器因进水烧毁的情况比较多，因此有必要对油中微水含量进行检测。

由表1可以看出，当配电变压器发生异常时，其

多个特征量均呈现一定的变化，形成多特征交叠形式，因此比较适合采用多模态融合方式进行诊断和预警。

2. 油浸式配电变压器特征量选择

与主变压器不同，配电变压器的数量众多，并且受监测成本影响，主变压器常用的高频和超声法局放、油色谱等监测方法无法用于配电变压器，需采用更具经济性的测量方案。配电变压器的全景监测方案如图1所示，电气量采集高低压侧电压和电流量，并通过计算得到配电变压器铜损和铁损以及其他进行绕组和铁心故障判别所需的状态量，非

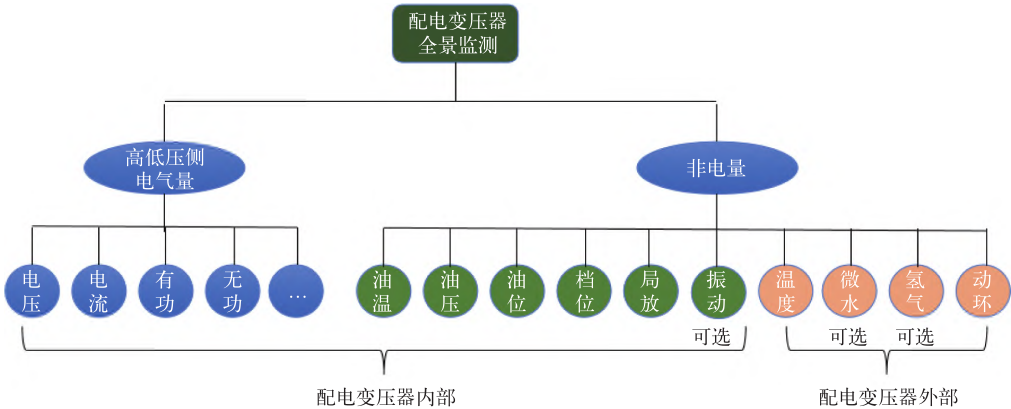


图1 油浸式配电变压器特征量

电气特征量以油温、油压、油位、局部放电、温湿度、振动和微水等构成，考虑到成本及集成问题，非电气特征量以油温、油压、油位、局部放电和环境温湿度所构成，微水、振动作为可选特征量。其简化方案如下。

1) 电气量特征包括：额定变比下高低压侧电压差 D_v ；高低压侧电流差 D_i ；铜损变化量 D_{pcu} ；铁损变化量 D_{pfe} ；总谐波含有率 D_h 。

2) 非电气量特征包括：温升 D_t ；气体压力 D_p ；油位 D_d ；局放严重程度 D_s 。

多模态数据采集及预处理

1. 电气量采集与特征量提取

由表1可知，当配电变压器内部出现短路故障时，其电源侧电压、电流会发生变化且与输出侧平衡，从而引起损耗增大。研究表明，通过监测配电变压器损耗的变化可以对因绕组短路、铁心接地等故障进行判别。因此，通过采集或计算得到能够反映配电变压器部分异常的电压、电流、有功、无功、铜损、铁损和谐波等7个状态量。

对于所采集的电压、电流离散值，令 $v_x(m)$ 、 $i_x(m)$ 为电压、电流的采样值， $x=\{A,B,C\}$ 或 $\{a,b,c\}$ 分别表示配电变压器高、低压侧相别， N 为采样点数， m 为序列当前值，则式(1)~(5)分别为电压有效值 V_{rms} 、电流有效值 I_{rms} 、视在功率 S 、有功功率 P 和无功功率 Q 计算公式，即

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} v_x^2(m)} \quad (1)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} i_x^2(m)} \quad (2)$$

$$S = V_{rms} I_{rms} \quad (3)$$

$$P = S \cos \varphi \quad (4)$$

$$Q = S \sin \varphi \quad (5)$$

对于[D,y]连接的变压器，式(6)、式(7)分别为铜损 P_{cu} 和铁损 P_{Fe} 计算公式，即

$$P_{cu} = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} [i_a(m) \left(\frac{v_A(m)}{k} - v_a(m) \right) + i_b(m) \left(\frac{v_B(m)}{k} - v_b(m) \right) + i_c(m) \left(\frac{v_C(m)}{k} - v_c(m) \right)] \quad (6)$$

$$P_{Fe} = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} [v_A(m) \left(i_A(m) - \frac{i_a(m)}{k} \right) + v_B(m) \left(i_B(m) - \frac{i_b(m)}{k} \right) + v_C(m) \left(i_C(m) - \frac{i_c(m)}{k} \right)] \quad (7)$$

由于铜损和铁损与负载及老化程度相关，可以采用相对于出厂时配电变压器损耗的变化量 Δ 来反映配电变压器异常状态。

2. 非电气量采集与特征量提取

图2为配电变压器1.5倍过载时油温、油压油位变化趋势图，图中数据经过了归一化处理，包含从送电→1.5倍过载→自然冷却的全过程。

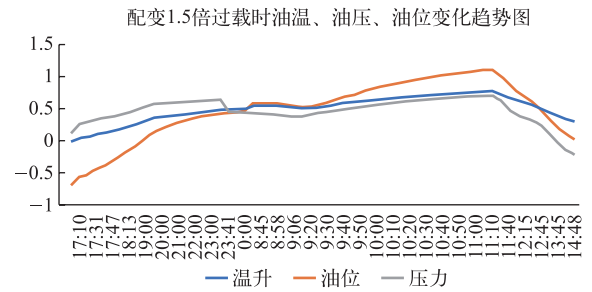


图2 油温、油压油位变化趋势图

由于配电变压器通常采用密封方式，当温度上升时，受膨胀影响，上部空气部分的压力以及油位也随之增加，由此可知，当出现绕组、铁心等故障时，随着大量的热量产生，上述3个参数也随之急速变化。

在本文中，局部放电采用电容耦合法进行局放检测，并与油温、油压和油位集成设计形成经济型一体化装置，采用局部放电活动量作为特征量的指标，其定义如下：

假定每次采集一定时间段（通常为1 s）内的局放幅值最大值 A_{max} 、脉冲数量 N_x ，其中，下标 $x=\{1,2,\dots,M\}$ ，表示第 x 个采集时间段；按指定周期（天、月、年）计算局放活动量，周期内局部放电活动总时间为

$$N_p = N_p + 1, N_x > 0 \quad (8)$$

其中 T_p 表示出现局放脉冲的周期之和，单位为秒，则局放活动量 $P_{(m)}$ 为：

$$P_{(m)} = \frac{\max(A_{Ave}, x=(1,2,\dots,M)) T_p}{T_{(m)}} \quad (9)$$

式中， $P_{(m)}$ 为对应给定周期内的局放发生的占比及强度，可以反映局放的严重程度； $T_{(m)}$ 为给定周期的

总时间长度，单位为s。

3. 数据预处理

由于不同类型特征量量纲和量程存在差异，为了保证不同模态数据的融合，还需对不同模态的数据进行归一化处理，使所有状态量数值在[0,1]区间。在本文中，对于电气量采用配电变压器的额定值，非电气量依据配电变压器相关标准所规定的最大值进行归一化处理。

对于采集的多模态的数据，受各种因素影响，存在一些异常值，需对数据进行预处理。预处理是提升数据质量的关键环节，数据预处理的工作包括对数据通过数字滤波、异常值检测以及数据剔除和重构等方法进行数据清洗，去除数据噪声和异常数据。其中，数据滤波方法包括：中值滤波、小波变换和卡尔曼滤波等，异常值剔除后，一般采用插值或相邻数据填充。

多模态融合诊断模型构建

多模态融合诊断模型可以采用物理关联性融合、机器学习两种方式，两种方式可以分级联合使用，在应用时，通过物理关联性融合方式进行初步筛选，然后通过机器学习方式进行进一步分析，从而提高计算效率。

(1) 物理关联性融合方式（初级融合）

依据配电变压器故障理论及实践经验，通过故障相关的特征量直接进行判断，关联映射关系见表2。

表2 故障特征映射

故障类型	关联特征
短路故障	$D_v \uparrow, D_t \uparrow, D_h \uparrow, D_{pcu} \uparrow, D_s \uparrow$
铁心故障	$D_{pfe} \uparrow, D_t \uparrow, D_s \uparrow$
过热缺陷	$D_t \uparrow, D_{pcu} \uparrow$ (铜损主导) $D_t \uparrow, D_{pfe} \uparrow$ (铁损主导)
漏油缺陷	$D_d \uparrow, D_p \uparrow, D_s \uparrow$
绕组变形	$D_v \uparrow, D_t \uparrow, D_h \uparrow, D_{pcu} \uparrow$

(2) 机器学习方式（高级融合）

随着技术的发展，机器学习的有很多，例如，D-S证据理论、专家系统、神经网络、模糊集理论、聚类分析法、SVM支持向量机及故障树诊断法等。在实现时，将归一化的特征向量作为输入，通过试验样本学习实现对故障进行分类，实现配电变压器异常的诊断、分类和识别。

配电变压器缺陷诊断工程应用研究

配电变压器多状态量采集及后续的诊断分析，在实际工程应用当中还需要考虑下述问题。

1) 若需要采用电气量作为特征量，需分别对高低压侧的电压电流分别进行采集，目前台区低压侧可直接从JP柜低压总进线侧进行测量，高压侧需通过加装智能熔断器或具有电气量采集能力的一二次融合配电变压器来获取，且为了获得较精确的值以便进行损耗计算，高压侧的电流测量准确度需要达到0.2 s级。

2) 建议采用就地诊断与平台诊断相结合的方式，边端或终端侧采用轻量化嵌入式部署，对被监测设备进行缺陷诊断和短期预测，利用就地处理降低平台侧的计算负担；平台侧可引入更多变量，利用大模型对边端发出告警的设备进行更深入的诊断分析和大数据分析，以便做出更准确的诊断结论和决策。

3) 诊断模型就地部署，存在模型安全更新的问题，需要不断在平台端对有缺陷设备的特征量进行提取，用于对分类器的训练，就地端由系统统一通过安全方式进行更新，提升就地端诊断准确率。

总结与展望

多模态信息融合能够综合利用多种传感器所采集到的信息，全面反映配电变压器的运行状态。通过信息之间的互补性和协同性有助于诊断系统更加全面、准确地判别配电变压器异常状态，从而发现传统单一信息难以揭示的潜在故障特征，准确进行故障类型识别和程度判别。

借助机器学习和深度学习等人工智能技术，可以对多模态信息进行深度挖掘和模式识别，提升配电变压器故障诊断的智能化水平。另外，若采用诊断模型在线学习、在线更新的方式，有助于配电变压器诊断的准确性的不断提升。EA

(收稿日期：2025-08-25)

参考文献

- [1] 杨健等，基于功率损耗的配电变压器故障监测研究，河南城建学院学报，2018，27(6)：77-81。
- [2] 郭太圣等，基于负序损耗比率的变压器故障诊断，中国科技论文在线，2007，2(3)：221-225。