电力变压器高压试验和故障分析

李娟娟　田宏飞　陈　蕾
安阳钢铁建设有限责任公司　河南　安阳　455000

摘　要：高压试验实施质量关乎状态判断可靠性，试验核查与数据整理构成异常识别基础。特征提取兼顾时域统计与频域分布，经噪声抑制和多测点筛选保留敏感稳定特征。异常数据与故障类型经多特征映射建立对应关系，保留可解释性与置信水平。程度判定综合幅值、持续时间和重复性分级评分，临界数据设置缓冲区间。本文围绕绝缘、绕组结构及内部故障机理，讨论多参数联合诊断与诊断方式改进，强调趋势跟踪和动态判据协同，结论具备可追溯性。

关键词：高压试验；故障识别；特征提取；故障机理；诊断优化

引言：高压试验是掌握绝缘状态和结构完整性的重要手段，试验实施规范程度影响数据能否支撑准确判断。试验核查、升压管控和数据整理任一疏漏，都可能让异常特征失真，干扰故障识别结论。异常数据夹杂在正常波动中，特征提取需分离有效成分，为故障类型匹配提供输入。故障机理从绝缘劣化、绕组损伤和内部缺陷形成过程解释异常来源。诊断若停留在单次试验和固定阈值，易受测试条件差异和误差累积影响。多参数联合诊断与误差分析可提升识别稳定性。

1 电力变压器高压试验实施要点

1.1 试验前状态核查

进入现场后先把设备底数摸清，不能只看外观就安排升压。核查铭牌参数与台账信息是否对应，确认分接位置、油位油温、套管清洁度及表面缺陷情况，检查油箱与附件渗漏、接地连接可靠性和安全围栏完整性。试验电源容量、保护配置、仪器校准有效期和接线极性逐项确认，绝缘电阻与吸收比数据应具备可比条件。环境温湿度、表面污秽和邻近带电体距离纳入判断，放电接地措施落实到位。人员分工、操作票和异常处置接口提前明确，条件不明不进入加压环节。对历史记录和现场状态做交叉核对，发现疑点先处理再试验，关键部位复测并记录，确保后续试验有稳定起点。

1.2 试验过程管控要点

加压阶段按既定程序稳步推进，升压速度和停留时间不能随意改动，操作端与监视端保持呼叫确认。泄漏电流、局放信号、电压电流波形和异常声响连续关注，保护整定值与被试设备状态匹配，出现突变或超限立即停止升压并执行放电接地。试验接线变更后重新核对极性、量程和接地位置，避免带隐患继续操作。环境条件变化较大时暂停试验并记录现场状态，温升和持续时间按方案控制。操作人员站位、绝缘距离和监护职责清楚，关键动作留有可追溯记录，过程异常不得自行掩盖或简化处置[1]。对升压各阶段的数据趋势同步观察，发现偏离及时复核接线与屏蔽状态，确认无异常后再继续，操作口令复诵确认到位。

1.3 试验数据采集与整理

数据采集从接线完成就控制质量，仪器量程、采样频率和精度等级满足试验要求，原始读数与环境条件同步记录，手写与电子记录保持对应。采集过程中发现离散偏大、重复性不足或与历史趋势不符时，先核查接线、屏蔽和接地，再安排复测，不能直接修数。整理阶段保留有效数据、异常标记和复测说明，注明试验时间、分接位置、环境参数和仪器编号，电子文件及时备份并设置版本标识。审核人员核对记录完整性、计算过程和结论边界，签字后归档，确保数据可追溯、可复核且不被随意改动。对缺失项和可疑项补充说明，保持原始记录与整理结果相符，移交前完成复核。

2 基于高压试验结果的故障识别

2.1 试验异常数据特征提取

高压试验采集到的异常数据通常夹在正常波动里，特征提取得先把有效异常成分分出来。现场用起来不能只盯单一幅值，得把时域统计量、频域分布、突变点和趋势变化放在一起看。采集信号先做噪声抑制和归一化，压低测试条件差异带来的干扰，再提取幅值偏离、变化速率、持续时间和重复性等指标。多测点数据按相关性和一致性筛选，明显失真的通道要剔除，避免把坏数据带进判据。特征选择阶段保留敏感度高且稳定的量，做维度压缩，去掉冗余特征，防止异常判据被无

关量带偏。对特征还要做鲁棒性校验，看它在不同试验阶段是否稳定，能否支撑后续故障类型匹配。这样得到的异常特征更贴近故障表现，也给识别环节提供可用输入。现场操作中，特征提取要兼顾灵敏和稳定，宁可保留少量可疑特征，也不能让关键异常被平滑掉。

2.2 异常数据与故障类型对应关系

异常数据到故障类型的对应关系不能靠单个特征硬套，得在特征空间里做多特征联合映射。实际诊断中不同故障在幅值、频域分布、变化趋势和持续时间上会有交叉表现，所以要用多判据组合提高区分度。对每类故障整理敏感特征集，明确特征方向、边界区间和置信水平，形成可更新的对应关系。数据驱动结果要和试验机理相互校验，避免标注偏差把映射带偏。现场用起来，单一特征超限只能提示异常，不能直接定类型，还得看相关测点是否同步变化。对应关系要保留可解释性，便于复核判据来源和调整阈值[2]。对边界样本设置保守归类，减少误判。通过特征权重和类别置信度联合判断，使异常数据到故障类型的对应更稳定。对应关系不是固定表，试验条件变化后要重新校验敏感特征和边界，保留可追溯的判据记录，方便后续诊断复核。

2.3 故障程度初步判定方法

故障程度初步判定要综合异常幅值、持续时间、变化速率和重复出现情况做评分。现场用起来不能只看某次试验的瞬时超限，还得看多测点是否一致、异常是否可复现。对特征量划分区间并设置分级判据，按偏离程度和持续特征给出初步等级。对不确定度较大的数据要保守处理，先归入较低等级并安排复核，避免程度扩大。多源信息融合时按敏感性和可靠性分配权重，突出稳定异常成分。判定结果要保留中间状态，便于后续跟踪变化趋势。对临界数据设置缓冲区间，减少测试波动引起的等级跳动。初步判定重在快速筛出需要关注的对象，同时为后续精确诊断提供程度依据。现场执行中，分级阈值要结合试验阶段调整，判定记录要保留特征依据和置信水平，便于复核和趋势比较，避免单次结果直接放大程度。

3 电力变压器常见故障机理分析

3.1 绝缘类故障机理

变压器绝缘故障的机理通常是电、热、机械和环境因素共同作用的结果。电场集中在绝缘薄弱处会诱发局部放电，放电持续侵蚀油纸和固体绝缘，逐步形成放电通道，降低击穿场强。热老化使绝缘材料的聚合度下降，介质损耗增大，机械强度降低，热循环还会引起绝缘件收缩和松动。水分和杂质进入后会提高电导率和极化损耗，使绝缘电阻下降，局部电场畸变加重。油流带电和气泡在油道中积聚也会改变电场分布，诱发新的放电点。机械振动和热胀冷缩会让绝缘件产生裂纹和位移，形成新的薄弱环节。现场看，绝缘劣化早期特征微弱，不能只靠单次试验判断，得把局部放电、油色谱和介质损耗等参量放在一起分析，关注变化趋势和重复性。绝缘故障往往从局部缺陷开始，逐步扩展为贯穿性损伤，机理分析要突出多因素耦合和缺陷演化过程。

3.2 绕组结构故障机理

绕组结构故障主要来自电磁力、热应力和机械振动的共同作用。短路电流通过绕组时产生电磁力，使导线和线饼承受径向和轴向冲击，压紧力不足时容易出现绕组变形、松散和匝间位移。绝缘垫块在热循环中收缩，压紧力下降，绕组的轴向和径向稳定性随之降低。导线换位和焊接部位存在接触不良时，局部电阻增大，温升升高，热应力进一步集中。匝间绝缘损伤会形成匝间短路，短路环流造成局部过热，热量反过来加速绝缘劣化。绕组变形还会改变漏磁分布和电场分布，使局部损耗增大，局部放电风险上升。负载变化和热胀冷缩引起的反复松动会造成摩擦磨损，接触状态逐渐变差[3]。现场看，绕组故障早期往往表现为振动特征和温升变化，不能只看直流电阻单次结果，得结合频响特征和运行趋势判断结构状态。绕组故障机理分析要关注电磁力冲击、压紧力衰减和绝缘损伤之间的相互促进关系。

3.3 其他内部故障机理

其他内部故障主要出现在分接开关、铁芯、套管、引线和油系统这些部位。分接开关触头接触不良会使接触电阻增大，局部过热加速触头烧蚀，切换过程中的电弧侵蚀会进一步破坏接触面。铁芯多点接地会形成环流，造成局部过热和损耗增大，叠片绝缘破损后涡流损耗上升，热集中又加速绝缘老化。套管承受电场和机械应力，内部电容屏损伤会引起局部放电，密封不良会使水分进入并降低绝缘性能。引线连接松动会造成接触过热，连接部位的电阻变化会改变局部电场分布。油系统密封失效会让潮气侵入，油质劣化后介损和电导率上升，油泵和阀门异常还可能引起油流带电和气泡聚集。现场看，其他内部故障常与主绝缘和绕组状态相互牵连，温度、振动、油质和电气参量要同步观察。

4 高压试验诊断方法优化

4.1 多试验参数联合诊断思路

单一试验参数反映的只是设备状态的局部信息，多

试验参数联合诊断的核心在于把不同试验项目得到的特征量纳入统一判据框架做综合考量。现场用起来，局部放电、油色谱、介质损耗、直流电阻和频响特征各有敏感区间，也各有盲区，单靠某一项容易漏判或误判。联合诊断先要明确各参数对目标故障的敏感性和可靠性，按权重分配贡献度，避免把所有参量简单堆在一起造成信息冗余。参数之间还要做一致性校验，看不同试验结果是否指向同一类异常，出现矛盾时得追溯测试条件和缺陷演化阶段，不能直接取平均了事。联合判据要保留中间状态和置信水平，对边界样本设置保守归类，减少单次波动引起的结论跳变。多参数融合不是参数越多越好，关键在于选对敏感组合、理清主次关系，让诊断结论有据可查、可复核[4]。现场操作中还要考虑试验顺序和时效性，先做敏感度高且不易受干扰的项目，再安排辅助验证项目，减少重复测试和条件波动带来的影响。联合诊断的输出要给出各参数的贡献说明和矛盾点提示，方便复核人员判断结论可靠性。

4.2 试验误差对故障判定的干扰分析

试验误差对故障判定的干扰不能忽视，现场不少误判并不是故障本身复杂，而是误差把特征带偏了。误差来源大致分几类，测试设备本身的精度和稳定性、接线方式和接地状态、环境温湿度和电磁干扰、操作人员读数习惯以及试验时机选择。这些因素会让幅值偏离、相位漂移、重复性变差，严重时把正常波动放大成异常超限。误差对判定的干扰体现在两个方向，一是把真实异常淹没在噪声里造成漏判，二是把正常数据推过阈值造成误判。分析误差干扰要先做重复性校验和对比测试，看同一条件下多次结果是否收敛，再看不同测点之间是否一致。对不确定度大的数据要单独标记，不能直接进入分级判据。误差控制得从测试环节抓起，规范接线、稳定电源、控制环境条件，同时保留原始记录便于追溯。判定环节要设置缓冲区间和复核机制，对临界数据保守处理，避免误差直接放大成故障结论。现场还要关注误差的累积效应，多次试验中系统性偏差会逐步叠加，使趋势判断失真，所以定期做设备校准和比对测试很有必要。对误差分布特征要做统计记录，区分随机误差和系统偏差，前者靠重复测试平滑，后者得从测试条件上找原因。判定结论里要标明数据可靠程度，让复核人员清楚哪些结论受误差影响较大。

4.3 试验诊断方式改进方向

试验诊断方式的改进方向要围绕准确性、可追溯性和现场适应性来推进。当前诊断多依赖单次试验和固定阈值，对缺陷演化过程和测试条件差异考虑不足，改进上要转向趋势跟踪和动态判据。把多次试验结果按时间序列组织起来，关注特征量的变化速率和累积偏离，而不是只看某一次是否超限。判据阈值要结合设备历史状态和试验条件做自适应调整，减少固定阈值带来的误判。诊断流程上要加强多源信息融合，把电气参量、油质数据和运行工况放在一起校验，出现矛盾时保留中间结论并安排复核。诊断方式要便于执行，记录要完整，特征依据和置信水平要能追溯，方便后续复核和判据更新。改进还要重视诊断结果的可解释性，让判据来源和调整理由清楚可查，避免黑箱式结论。对不确定度较大的样本设置保守归类和跟踪观察机制，减少结论跳变[5]。现场推进改进时要考虑现有测试手段的兼容性，新判据不能脱离实际采集能力，否则执行不下去。诊断方式的更新要有过渡安排，新旧判据并行一段时间做对比验证，确认稳定后再逐步切换。

结束语：高压试验从实施要点到故障识别再到诊断优化，环节之间衔接紧密。试验核查和过程管控保障数据来源可靠，异常特征提取与多特征映射为故障类型判断提供依据，程度判定把异常表现转化为可分级跟踪的结论。绝缘、绕组结构和内部故障的机理分析说明缺陷演化涉及电、热、机械和环境因素共同作用，单靠某一参量难以完整刻画。多参数联合诊断强调敏感组合和一致性校验，误差分析提醒判定保留缓冲区间和复核机制，诊断方式改进指向趋势跟踪和动态判据协同。

参考文献

[1] 额尼日乐图, 杜玉杰, 雷凤瑞. 电力变压器电气高压试验及故障异常问题分析 [J]. 中文科技期刊数据库（全文版）工程技术,2026,(2):213-216.

[2] 李剑锋. 电力变压器电气高压试验技术分析 [J]. 消费电子,2026,(16):149-151.

[3] 丁义轩, 王文涛, 彭飞. 基于多头注意力机制的超高压电力变压器运行故障检测方法研究 [J]. 电气技术与经济,2026,(3):340-342.

[4] 李昆, 冷川, 张珮珊. 电力变压器电气高压试验及故障异常问题分析 [J]. 电力设备管理,2025,(17):197-199.

[5] 潘虹伊, 李音柯. 电力变压器的高压试验及故障分析 [J]. 能源新观察,2025,(11):113-114.