



普通高等教育“十三五”规划教材
电气工程、自动化专业规划教材

电力变压器智能故障诊断 与绝缘测试技术

◎ 蔡金锭 邹阳 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十三五”规划教材
电气工程、自动化专业规划教材

电力变压器智能故障诊断 与绝缘测试技术

蔡金锭 邹 阳 编著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

电力变压器智能故障诊断与绝缘测试技术是电气工程研究生(或本科生)的一门专业课程。全书共10章,分别阐述神经网络诊断方法及其混合算法在变压器油中溶解气体的故障诊断应用、基于粗糙集理论的变压器故障诊断和故障定位、绝缘电阻和电容及介质损耗因数的测量、油纸绝缘极化响应与时域介电谱测量、极化等效电路模型和等效电路参数计算、油纸绝缘老化与等效电路特征量的关系等内容。本书内容由浅入深,为读者构筑了一个从理论到实践的学习平台。书中除了阐述故障诊断理论外,还提供大量的故障诊断分析实例、诊断程序和图表,力求让读者通过学习能系统掌握变压器故障诊断方法和绝缘测试等知识。本书提供配套的分析实例、MATLAB 计算程序等。

本书可以作为高等院校电气、自动化等专业高年级本科生和研究生相关课程的教材,也可以供电力工程技术人员学习和参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电力变压器智能故障诊断与绝缘测试技术 / 蔡金锭, 邹阳编著. —北京: 电子工业出版社, 2017.9

电气工程、自动化专业规划教材

ISBN 978-7-121-32023-1

I. ①电… II. ①蔡… ②邹… III. ①电力变压器—故障诊断—高等学校—教材 ②电力变压器—绝缘—测试—高等学校—教材 IV. ①TM41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 144263 号

策划编辑: 王晓庆

责任编辑: 王晓庆

印 刷: 三河市良远印务有限公司

装 订: 三河市良远印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 11.5 字数: 294 千字

版 次: 2017 年 9 月第 1 版

印 次: 2017 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 39.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010)88254113, wangxq@phei.com.cn。

前 言

电力变压器智能故障诊断与绝缘测试技术是电气工程研究生（或本科生）的一门专业课程，书中涉及的基础理论和专业知识面较广，与工程应用关系密切。书中部分章节内容是作者及课题组成员多年来在变压器故障诊断和油纸绝缘老化评估研究领域取得的成果。本书在内容上由浅入深、先理论后实践，详细阐述了油浸式变压器故障特征、故障诊断方法、绝缘电阻、电容和介质损耗因数的测量及时域响应理论和极化谱的测量及其应用。在内容上注重理论与实际应用相结合，为方便读者学习，各章中都列举出故障诊断应用的示例，并附上大量的分析数据和图表，力求使读者通过学习能系统掌握变压器故障诊断方法和绝缘测试等理论知识。

全书共分 10 章：第 1~3 章阐述人工神经网络诊断方法及其混合算法在变压器油中溶解气体的故障诊断应用；第 4~5 章介绍了基于粗糙集理论的变压器故障诊断方法和故障定位；第 6 章阐述了绝缘电阻和电容及介质损耗因数的测量方法；第 7 章阐述了油纸绝缘响应及时域谱的测量方法；第 8~9 章详细介绍了油纸绝缘极化等效电路模型和等效电路参数的计算；第 10 章介绍了油纸绝缘老化与等效电路特征量的关系。除了阐述故障诊断理论和方法外，还提供了大量的故障分析实例、诊断程序和图表。从知识层次和内容结构上为读者构筑一个从理论到实践的学习平台，充实和拓宽专业知识面，为今后从事相关工作打好基础。本书可以作为高等院校电气、自动化等专业高年级本科生和研究生相关课程的教材，也可以供电力工程技术人员学习和参考。

本书提供配套的分析实例、MATLAB 计算程序等资源，请登录华信教育资源网（<http://www.hxedu.com.cn>）注册下载。

全书由福州大学、福建省新能源发电与电能变换重点实验室（福州大学）蔡金锭教授、邹阳副教授编著，最后由蔡金锭统稿和审核。本书的出版得到福州大学教务处、研究生院的鼎力支持。在编辑过程中，福州大学博士研究生贺德华，硕士研究生陈汉城、曾庆美、叶荣、陈群静和张晓燕等为本书校对工作付出了辛勤劳动，在此向他们致以谢意，同时向书中引用参考文献的所有作者深表谢意。

由于电力变压器智能故障诊断与绝缘测试涉及的专业知识面广而深，限于作者水平有限，难免在书中出现错误和缺点，恳请读者谅解和批评指正。

作 者

2017 年 8 月于福州大学

目 录

第 1 章 油中溶解气体比值法故障诊断	1
1.1 油浸式电力变压器主要结构和绝缘系统	1
1.2 变压器故障特征	2
1.2.1 变压器油中溶解气体的产生	2
1.2.2 固体绝缘材料的分解及产生的气体	3
1.2.3 气体的其他来源	4
1.3 故障类型及其特征	4
1.4 油中溶解气体故障诊断的依据	5
1.5 油中气体三比值故障诊断	6
1.5.1 常规 IEC 三比值法	7
1.5.2 改良三比值诊断法	9
1.6 无编码比值故障诊断	12
1.7 四比值故障诊断	13
1.7.1 得能堡比值法	13
1.7.2 罗杰士比值法	14
1.7.3 无编码四比值法	15
1.8 其他诊断方法	15
1.8.1 O_2/N_2 比值	15
1.8.2 C_2H_2/H_2 比值	16
1.8.3 气体比值的图示法	16
1.8.4 改良电协法	17
第 2 章 GA 算法和 BP 神经网络算法原理及操作步骤	19
2.1 遗传算法基本原理	19
2.1.1 遗传算法	19
2.1.2 遗传算法的基本流程	19
2.1.3 模式定理和隐含并行性	21
2.1.4 算法关键参数与操作设计	21
2.2 改进的遗传算法	25
2.2.1 杂交率、变异率的自适应调整	25
2.2.2 交叉算子的改进	26
2.2.3 变异算子的改进	27
2.2.4 加快收敛速度的措施	27
2.2.5 最优保存策略	28
2.2.6 改进遗传算法的仿真	28
2.3 BP 神经网络及其改进算法	28

2.3.1	BP 神经网络	28
2.3.2	BP 神经网络算法原理及模型	29
2.3.3	BP 神经网络算法的实现步骤	31
2.4	改进反向传播 BP 算法的措施	32
第 3 章	基于 GA-BP 混合算法的变压器故障诊断	34
3.1	GA-BP 混合算法基本原理	34
3.1.1	GA-BP 混合算法	34
3.1.2	编码策略	34
3.1.3	群体设定	35
3.1.4	适应度函数的确定	35
3.1.5	混合算法的实现	35
3.1.6	混合算法的收敛性分析	37
3.1.7	混合算法的优点	37
3.2	GA-BP 网络及混合算法的故障诊断	37
3.3	基于三比值神经网络法故障诊断	42
3.4	基于四比值神经网络法故障诊断	44
第 4 章	基于粗糙集理论的变压器故障诊断	47
4.1	粗糙集基本理论	47
4.1.1	知识与知识库	47
4.1.2	粗糙集的上、下近似集	48
4.1.3	知识约简	48
4.1.4	知识表达系统	49
4.1.5	决策表	49
4.1.6	决策表的化简及分类规则	50
4.2	变压器故障的分类代号	53
4.2.1	常规 IEC 三比值法故障分类代号	53
4.2.2	DGA 新导则故障分类代号	53
4.3	基于粗糙集理论的 IEC 三比值故障诊断	54
4.3.1	基于粗糙集的常规三比值表化简	54
4.3.2	基于粗糙集的新导则 IEC—60599 诊断法	56
4.4	变压器故障诊断实例分析	59
第 5 章	基于粗糙集理论的变压器故障定位	62
5.1	基于粗糙集理论的变压器故障定位诊断	62
5.2	变压器故障定位的判断规则	62
5.3	变压器故障定位实例分析	65
第 6 章	绝缘电阻和电容及介质损耗因数的测量	66
6.1	绝缘电阻与电阻率	66
6.2	影响绝缘电阻的主要因素	67

6.3	绝缘电阻的直接测量法	68
6.4	比较法测量绝缘电阻	70
6.5	充放电法测量绝缘电阻	72
6.6	相对介电常数	75
6.7	介质损耗因数	75
6.8	影响相对介电常数和介质损耗因数的主要因素	76
6.9	C_x 和 $\tan\delta_x$ 的电桥测量法	77
6.10	双 T 电桥测量法	83
6.11	谐振法测量 C_x 及 $\tan\delta$	85
第 7 章	油纸绝缘时域介电谱的测量	91
7.1	油纸绝缘变压器绝缘老化机理	91
7.2	油纸绝缘电介质极化理论	92
7.3	油纸绝缘介质响应特性	94
7.4	绝缘老化导致极化特性变化	95
7.5	极化、去极化电流法	96
7.6	回复电压法	97
7.7	变压器极化谱的测量方法	97
7.7.1	回复电压测量的接线	97
7.7.2	极化、去极化电流测量	99
7.8	影响回复电压测量的主要因素	101
7.9	充电电压对极化谱测量的影响	104
7.9.1	充电电压对回复电压最大值的影响	105
7.9.2	充电电压对回复电压初始斜率的影响	105
7.9.3	充电电压对峰值时间的影响	105
7.10	充放电时间对极化谱测量的影响	106
7.10.1	充放电时间比与回复电压最大值的关系	107
7.10.2	充放电时间比与初始斜率 S_i 的关系	107
7.10.3	充放电时间比与峰值时间 t_p 的关系	108
第 8 章	油纸绝缘极化等效电路及其响应	110
8.1	油纸绝缘极化等效电路模型	110
8.1.1	极化等值电路元件的组成	111
8.1.2	基于 X-Y 模型的等值电路	113
8.2	基于扩展德拜模型的等值电路	114
8.3	极化等效电路的响应函数	116
8.4	油纸绝缘混联等效电路模型	118
8.4.1	混联等效电路模型	119
8.4.2	改进的混联等效电路模型	121
第 9 章	油纸绝缘变压器极化等效电路参数计算	128
9.1	介质极化等效电路模型	128

9.2	粒子群算法及其在参数计算中的应用	130
9.2.1	建立求解非线性方程组的目标函数	130
9.2.2	标准粒子群优化算法	131
9.2.3	改进粒子群优化算法	132
9.3	应用改进粒子群算法求解电路参数值	135
9.4	回复电压计算方法	138
9.4.1	单极化支路回复电压计算公式	138
9.4.2	多极化支路回复电压计算通式	140
9.4.3	等效电路中几何电阻 R_g 的求解	140
9.5	等效电路参数计算准确性分析	140
第 10 章	油纸绝缘老化与等效电路参数关系	144
10.1	油纸绝缘老化与等效电路极化支路数	144
10.1.1	等效电路极化支路数唯一性探讨	144
10.1.2	油纸绝缘老化与极化支路数的关系	150
10.2	油纸绝缘老化与极化支路时间常数的关系	153
10.3	实例分析和验证	155
附录 A	故障诊断程序	158
附录 B	基于混沌粒子群混合算法的计算程序	163
附录 C	参数计算结果与测量曲线对比	169
参考文献		172

油中溶解气体比值法故障诊断

1.1 油浸式电力变压器主要结构和绝缘系统

油浸式电力变压器是电力系统输、变电设备中最重要和最昂贵的设备之一，也是电力系统中容量较大、故障率较高的设备，保障电力变压器安全运行直接关系到整个电力系统的安全稳定运行。当变压器一旦发生故障时，轻则影响生产，减少发电量，给人们生活带来不便；重则危及人们的生命和财产安全，妨碍了整个国民经济的发展进程。因此，随时检测变压器的工作状况，及早发现并排除可能存在的故障隐患，是保障电力系统安全可靠供电的重要手段，也是电力系统中一项具有重大理论和实际应用价值的研究课题。

油浸式电力变压器主要是由铁心、高低压绕组、油箱、套管和油纸绝缘系统等部件组成的。现分别简要地介绍各组成部分的功能和作用。

变压器铁心是构成变压器主磁通的磁路，包括主磁通磁路部分和机械机构部分。铁心的主磁通磁路是由导磁材料和阻磁材料构成的。导磁材料是硅钢片。阻磁材料是硅钢片表面的涂层及铁心各部分的隔磁附件。铁心的机械结构部分是由绑扎的硅钢片和紧固框架构成的。

变压器绕组包括高压绕组和低压绕组两部分。它的功能是利用成对绕组之间的匝数比决定电压比和电流比的关系，即将一个系统的交流电压和电流，转换为另一个系统的交流电压和电流。变压器绕组由线圈、引线（包括套管）和分接开关等构成。绕组是一种电压等级的电路，它与任何电路一样，由导体和绝缘体构成。绕组使用的导体是铜或铝。铜、铝的优点是导电性能好。绕组的绝缘是油与纸合理结合而成的油纸绝缘。

变压器油箱是盛油和保存器身的容器。油箱本体分为可拆式油箱和不可拆式油箱。可拆式油箱是指钟罩式油箱或可以揭盖的筒式油箱；不可拆式的油箱是指油箱本体不使用螺栓连接，而全部使用痕迹连接。油箱的作用包括盛油、封存、散热、基座、运输、干燥等。

变压器绝缘系统由内绝缘系统和外绝缘系统组成。内绝缘系统包括主绝缘、纵绝缘、端绝缘、中性点绝缘及引线绝缘、绝缘纸和变压器油等；外绝缘系统包括空气间隙和沿面爬电距离等两部分。空气间隙是指相对地距离和相间距离。例如，高压套管端头与储油柜、冷却装置及中性点接地端子间的距离，是相对地的外绝缘；三相变压器高压套管的倾斜方向和角度所决定的相间距离是相间的外绝缘。

外绝缘的沿面爬电距离是指沿瓷套表面的爬电距离，与瓷套的瓷裙数量和形状有关。套管的沿面爬电距离，是变压器外绝缘的薄弱环节。变压器在运行中的污闪或雨闪，都是由电引起的。

1.2 变压器故障特征

电力变压器发生故障绝大多数是绝缘性故障，其主要原因是由电应力和机械应力，强电场相互作用引起绝缘损坏，过热及综合因素导致变压器绝缘被破坏。例如，变压器局部过热可导致油温上升，使绝缘过热而发生熔、裂，最后发展为局部放电性绝缘故障。

运行中的电力变压器发生故障时，会产生异常的现象和信息，如外部异常特征（套管表面放电、渗漏油等），颜色、气味异常，声响异常，温度异常，油位异常，负载异常。故障检测与诊断就是检测和搜集变压器的异常现象和信息，根据出现的这些现象和信息进行分析，从而判断出变压器的运行状态、故障类型、严重程度和发生故障的所在部位。

利用变压器油中溶解气体进行故障分析，不受各种电磁干扰的影响，数据可靠性高，技术较为成熟，从定性到定量分析都积累了相当的经验。实践证明：变压器的油中溶解气体分析法，是目前电力系统中对油浸电力设备常规使用的监测手段，它能够及时发现变压器内部存在的潜伏性故障，而采用电气试验方法很难发现某些局部故障。因此，1997年颁布执行的《电力设备预防性试验规程》把油中溶解气体色谱分析放到了首位。

1.2.1 变压器油中溶解气体的产生

国内外生产的充油电力变压器的主绝缘大多采用油-屏障结构，通常将变压器油箱以外的空气（包括沿面）绝缘称为外绝缘，它直接受到外界气候条件（气压、湿度、脏污等）的影响。油箱内的绝缘（内绝缘）分为主绝缘及众绝缘。充油电力变压器的绝缘油起着绝缘和散热的双重作用。正常运行充油电气设备内的绝缘材料在电、热和外部环境等作用下将逐渐发生老化，产生某些可燃性气体，使油的闪点降低，引起早期故障或潜在故障。当充油变压器内部存在早期故障或逐渐形成新的故障时，产气量和产气速率将逐渐明显增大，气体在油中不断积累并经过对流、扩散而不断溶解，直到饱和而析出气泡。

变压器油是天然石油经过蒸馏、提炼得到的一种矿物油。它是由各种碳氢化合物所组成的化合物，其中，碳、氢两元素占其全部质量的95%~99%，其余元素如硫、氮、氧和极少量的金属元素等。石油基碳氢化合物含有这三种类型的烃化合物，如环烷烃、烷烃、芳香烃等成分。在变压器油中，不同烃类气体的性能是各不相同的。

- (1) 环烷烃具有较为稳定的化学性能和介电稳定性，其黏度随着温度的变化较小。
- (2) 芳香烃有较好的化学性能和介电稳定性。芳香烃易燃，在电场作用下不析出气体，反而吸收气体；但随着含量的增大，其凝固点增高，且在电弧作用下，会生成较多的碳粒，导致油的电气性能降低。
- (3) 环烷烃中的石蜡烃有稳定的化学性能，它容易使油凝固，但在电场的作用下容易产生电离而析出气体，形成树枝形状的X蜡，使油的导热性能发生变化。

当变压器油在运行中受电场、温度、氧气、水分和铜、铁等材料的催化作用，发生氧化、裂解与碳化等反应时，生成某些氧化产物及其混合物，产生氢及低分子烃类等气体，这就是呈现绝缘油的老化和劣化。在热、电、氧的作用下，变压器油的劣化过程以游离基链式反应进行，反应速率随着温度的上升而增大。氧和水分的存在及其含量高低对反应影响很大，铜和铁等金属也起着触媒作用使反应加速，老化后所生成的酸和 H_2O 及油泥等危及油的绝缘性能。在正常

老化和劣化情况下, 变压器油中仅能产生少量的气体, 通常它们的含量在临界值之下。

如果存在潜伏性故障时, 情况就大不相同了, 当变压器油受到高电场的作用时, 即使温度较低也会分解产生气体。若场强在 130kV/cm 的电场作用下油温在 25℃~30℃时, 油中产生的气体成分如表 1-1 所示。

表 1-1 在电场 130kV/cm 作用下油中产生的气体 (体积%)

编号/试样	甲烷	乙烷	乙烯	乙炔
1	3.3	1.7	1.9	3.0
2	2.2	1.4	2.3	2.4
3	3.72	1.01	1.61	1.42

若仅在高温作用下, 变压器油在 230℃~600℃时也会分解出气体, 油中溶解气体成分如表 1-2 所示。

表 1-2 温度在 230℃~600℃局部加热油中分解的气体 ($\times 10^{-1}$ mg/g 油)

气体种类	230℃	300℃	400℃	500℃	600℃
氢	—	—	—	1.52	3.20
甲烷	—	—	—	42.58	58.48
乙烷	—	—	—	0.45	26.01
乙烯	—	—	—	0.17	32.47
丙烷	—	—	—	1.18	2.08
异乙烯	—	—	—	3.26	6.97
二氧化碳	0.17	0.22	2.19	0.67	0.28
其他	—	—	—	0.96	2.25

由于变压器油是由许多不同分子量的碳氢化合物分子组成的混合物, 它们在电或热的作用下会使某些 C-C 键和 C-H 键断裂, 形成了不稳定的氢原子和碳氢化合物的自由基, 这些氢原子或碳氢化合物的自由基迅速重新化合生成氢气和低分子烃类气体, 如甲烷、乙烷、乙烯、乙炔等。不同的键断裂需要不同的能量, C-H 键在局部放电的情况下, 将会断裂生成氢气。而对于 C-C 键, 则需要较多的能量到达断裂, 然后迅速化合分别生成相应的乙烷、乙烯和乙炔。乙炔仅在温度较高的时候才产生, 满足这种条件的只有高温过热和放电; 甲烷在低温下产生较多, 主要是在低温过热和局部放电, 随着温度的升高, 气体的产生速率反而下降了; 乙烷始终未能成为主要的气体成分; 乙烯在低温下产生很少, 但随着温度升高到中高温过热时, 气体产生的速率会大大提高。

1.2.2 固体绝缘材料的分解及产生的气体

固体绝缘在变压器绝缘中广泛应用, 变压器的固体绝缘主要是绝缘纸和绝缘纸板。绝缘纸包括: 电缆纸、电话纸、金属皱纹纸、点胶绝缘纸等, 虽然它们的名称各不相同, 但是它们的主要成分都是纤维素, 所以固体绝缘的强度和弹性都较好, 机械性能良好。当固体材料的聚合度为 150~200 时, 其绝缘老化程度接近寿命终止。纸、层压板或木块等变压器固体绝缘材料中含有大量的无水右旋糖环和弱的 C-O 键, 它们的稳定性比油中的 C-H 键弱, 温度高于 105℃时, 固体绝缘中聚合物发生裂解, 温度高于 300℃时, 完全裂解和碳化。在生成水的

同时,生成大量的化合物,同时油被氧化,导致油中氧的含量和纸的湿度不断增大。由表 1-3 可知,在 470℃时,纤维素热分解产生的气体组分主要是 CO 和 CO₂。

表 1-3 在 470℃时纤维素热分解产物

分解产物	质量/%	分解产物	质量/%
水	35.5	二氧化碳	10.40
醋酸	1.40	一氧化碳	4.20
丙酮	0.07	甲烷	0.27
焦油	4.20	乙烯	0.17
其他有机物质	5.20	焦炭	39.59

1.2.3 气体的其他来源

在某些情况下,有些气体可能不是设备故障所造成的,比如油中含有水,可以与铁作用生成氢气;过热的铁心层间油可膜裂解生成氢气;在新的不锈钢部件中,也可能在钢的加工过程中或焊接时吸附氢而后又慢慢释放到油中。特别是在温度较高的情况下,油中有溶解氧时,设备中某些油漆(醇酸树脂)在某些不锈钢的催化下,甚至可能生成大量的氢。某些改型的聚酰亚胺型的绝缘材料也可生成某些气体而溶解于油中。油在阳光照射下也可以生成某些气体。此外,设备检修时暴露在空气中的油可吸收空气中的 CO₂ 等。这时,如果不是在真空下滤油,油中 CO₂ 的含量则与周围环境的空气有关,约为 300μL/L。

此外,变压器的某些操作也会生成故障气体,例如:有载调压变压器中切换开关时油室中的油向变压器主油箱渗漏,或选择开关在某个位置动作时悬浮电位放电的影响;设备曾经有过故障,而故障排除后绝缘油未经彻底脱气,部分残余气体仍留在油中,或留在经油浸渍的固体绝缘中;设备油箱带油补焊;原注入的油就含有某些气体等。

1.3 故障类型及其特征

电力变压器内部的故障模式主要是机械、热和电三种类型,而且以后两种为主,并且机械性故障常以热或电的故障形式表现出来。其中,过热性故障是由于有效热应力所造成的绝缘加速裂化,具有中等水平的能量密度。电性故障是在高电应力作用下造成的绝缘裂化,由于能量密度的不同而分为高能放电(电弧放电)、低能放电(火花放电)和局部放电等不同的故障类型。高能放电将导致绝缘电弧击穿。高能放电以绕组匝、层间绝缘击穿为多见,其次为引线断裂或对地闪络和分接开关飞弧等故障。这种故障产气急剧,产气量大,尤其是匝、层间绝缘故障,因无前驱现象,一般难于预测,最终以突发性事故暴露出来。火花放电是一种间歇性放电。局部放电的能量密度低,并常常发生在气隙和悬浮带电体的空间内。

多年来人们对国产多台故障变压器统计分析可知:过热性故障和高能放电故障是变压器故障的主要类型,分别占总故障的 53%和 18.1%左右,其次是过热兼高能放电故障、火花放电故障和受潮或局部放电故障。根据大量的试验和故障变压器实例分析可知:高能放电变压器油主要分解出乙炔、氢气及少量的甲烷;局部放电变压器油主要分解出氢气和甲烷;过热时变压器油主要分解出氢气、甲烷、乙烯等;固体绝缘在过热时主要分解出一氧化碳和二氧化碳等。不同故障类型所产生的主要特征气体和次要特征气体如表 1-4 所示。

表 1-4 充油电力变压器不同故障类型产生的气体

故障类型	主要特征气体	次要特征气体
油过热	甲烷, 乙炔	H ₂ , C ₂ H ₆
油和纸过热	甲烷, 乙炔, 二氧化碳, 一氧化碳	H ₂ , C ₂ H ₆
油纸绝缘中局部放电	氢气, 甲烷, 一氧化碳	C ₂ H ₂ , C ₂ H ₆ , CO ₂
油中火花放电	氢气, 乙炔	
油中电弧	氢气, 乙炔	CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆
油和纸中电弧	氢气, 乙炔, 二氧化碳, 一氧化碳	CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆

根据充油变压器故障的原因及严重程度, 可将变压器的故障类型分为 6 种, 各种故障类型及其可能的原因如表 1-5 所示。

表 1-5 充油变压器的典型故障

故障类型	举 例
局部放电	固体绝缘纸的湿度较高、变压器油过于饱和或空腔造成的充气空腔中的局部放电, 并导致形成局部放电
低能量放电(火花放电)	接触不良形成不同电位或悬浮电位, 造成火花放电或电弧。可能发生在屏蔽环、绕组中相邻线饼间或导体间, 连线开焊处、铁心的闭合回路中、夹件间、套管与箱壁、线圈内的高压和地端放电、木质绝缘块、绝缘构件胶合处, 以及绕组垫块沿面放电。油击穿、选择开关切断电流瞬间等
高能量放电(电弧放电)	局部高能量或短路造成的闪络, 沿面放电或电弧。 低压对地、接头之间、线圈之间、套管与箱体之间、铜排与箱体之间、绕组与铁心之间短路放电。环绕主磁通的两个邻近导体之间放电。铁心的绝缘螺丝、固定铁心的金属环之间放电
过热 $T < 300^{\circ}\text{C}$	变压器在超负荷状态下运行、绕组中变压器油流被阻塞。 在铁轭夹件中的杂散磁通量过大
过热 $300^{\circ}\text{C} < T < 700^{\circ}\text{C}$	固定螺栓连接处, 特别是铝排、可滑动接触面、选择开关内的接触面, 以及套管引线和电缆的连接接触不良等。 接地线路中的环流, 以及磁屏蔽上的不良、焊点和夹件的环流、绕组中平行的相邻导体之间的绝缘磨损等
过热 $T > 700^{\circ}\text{C}$	油箱和铁心上形成的环流。 油箱壁未补偿的磁场过高、形成一定的电流。 铁心叠片之间发生短路

1.4 油中溶解气体故障诊断的依据

变压器潜伏性故障跟油中溶解气体的含量和比值有着密切的关系。实践证明, 基于油中溶解气体分析来诊断电力变压器故障类型和严重程度是一种非常有效和可行的方法。

在变压器正常运行条件下, 绝缘油和纤维绝缘材料在充油电气设备中随着绝缘的逐渐老化和分解一般会产生少量的气体, 包括低分子碳氢化合物和 H₂、CO₂、CO 等。它们大部分能溶解在油中, 当存在潜伏性的过热和放电故障时, 产气量和产气率将加大。所以根据气体的含量和产生速度可以在一定程度上判断变压器是否有发生故障。人们根据国内 90 多台新投运油绝缘变压器投在运行期间分析变压器油中溶解气体, 总结出变压器运行过程中气体的极限浓度如表 1-6 所示。

有关研究资料表明变压器油中各特征气体的注意值如表 1-7 所示。

表 1-6 新变压器投运前后油中气体的极限浓度

(单位: $\mu\text{L/L}$)

组分 投运时间	氢气	C ₁		C ₂		总烃	一氧化 碳	二氧化 碳
		甲烷	乙烷	乙烯	乙炔			
投运前或 72h 试运行期内	50	10	5	10	痕 (<0.5)	20	200	1500
运行半年内	100	15	5	10	痕 (<0.5)	25	—	—
运行时间较长	150	60	40	70	10	150	—	—

表 1-7 特征气体的注意值

(单位: $\mu\text{L/L}$)

	正常值	注意值	故障值
氢气	100 以下	100~200	200 以上
乙炔	5 以下	5~10	10 以上
甲烷	30	45	—
乙烷	25	35	—
乙烯	45	65	—
总烃	100 以下	100~200	200 以上

判断变压器是否存在故障的另一个方面是: 气体的产生速率是否达到注意值。当存在潜伏性故障时, 虽然气体的含量值还很小, 但是其气体产生速率较快, 所以根据气体的产生速率能够判断变压器的运行状态。气体产生速率分为绝对速率和相对速率。绝对速率是每天运行产生某种气体的平均值; 相对速率是折算到月的某种气体浓度增加量占原有值的百分数的平均值。气体产生速率还与变压器性能、故障类型、绝缘材料及其老化程度和负荷情况有关, 应结合这些情况进行综合分析。特征气体与变压器故障性质的关系如表 1-8 所示。

表 1-8 特征气体与变压器故障性质的关系

故障性质	特征气体的特点
一般过热性故障 (低于 500℃)	总烃较高, 甲烷>乙烯, 乙炔<5 $\mu\text{L/L}$, 乙炔占总烃的 2%以下
严重过热性故障 (高于 500℃)	总烃高, 乙烯>甲烷, 乙炔>5 $\mu\text{L/L}$, 但乙炔不是总烃的主要成分, 乙炔占总烃的 5.5%以下, 氢气含量较高, 氢气一般占氢烃总量的 27%以下
局部放电	总烃不高, 氢气>100 $\mu\text{L/L}$, 并占氢烃总量的 90%以上, 甲烷占总烃中的 75%以上, 为主要成分
火花放电 (低能量放电)	总烃不高, 乙炔>10 $\mu\text{L/L}$, 并且一般占总烃的 25%以上, 氢气较高, 占氢烃总量的 27%以上, 乙烯占总烃的 18%以下
电弧放电 (高能量放电)	总烃较高, 乙炔高并构成总烃中的主要成分, 占 18%~65%, 氢气含量高, 占氢烃总量的 27%以上
过热兼电弧放电	总烃较高, 乙炔占总烃含量的 5.5%~18%, 氢气占氢烃总量的 27%以下

1.5 油中气体三比值故障诊断

油中溶解气体的含量反映了变压器的运行状况, 但要判断变压器的故障性质和状态, 还得根据气体的相对浓度。随着故障点温度的上升, 变压器油裂解产生烃类的气体按 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 的顺序推移, 并且 H_2 是低温时由局部放电的离子碰撞游离所产生的。因此有 CH_4/H_2 、 $\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$ 这 4 个比值, 即各组分气体的相对浓度。由

于 C_2H_6/CH_4 比值只能有限地反映热分解的范围，于是 IEC 将其去掉而使用其他三个比值来判断故障类型。

1.5.1 常规 IEC 三比值法

IEC 三比值法^[43-44]是国际电工委员会 (International Electrotechnical Commission) 在进行广泛统计、分析和研究的基础上最后于 1978 年归纳总结出的一种判断变压器故障性质的有效方法。目前已被人们普遍接受，我国 1997 年起实施的《电力设备预防性试验规程》已将油中溶解气体分析 (DGA) 方法列为油浸变压器试验项目的首位。简单地说，IEC 三比值故障诊断法的原理就是：根据油中 5 种特征气体成分 (H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2) 的含量计算出 C_2H_2/C_2H_4 、 CH_4/H_2 与 C_2H_4/C_2H_6 三对特定比值，由比值结果分别得到一组编码，再根据这组编码查找出与其相对应的故障类型。因其方法简单实用，故得到世界各国的普遍接受。常规的 IEC 三比值法的编码规则和故障类型判断方法如表 1-9 和表 1-10 所示。

表 1-9 常规 IEC 三比值编码表

特征气体的比值	比值范围编码			编码说明
	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6	
<0.1	0	1	0	如 $C_2H_2/C_2H_4=1.5$ ， 属于 1~3 范围，编码为 1
0.1~1	1	0	0	
1~3	1	2	1	
>3	2	2	2	

表 1-10 常规 IEC 三比值法故障类型判断

代号	故障性质	编码组合		
		C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
1	无故障	0	0	0
2	低能量密度的局部放电	0	1	0
3	高能量密度的局部放电	1	1	0
4	低能放电 (火化放电)	1~2	0	1~2
5	高能放电 (电弧放电)	1	0	2
6	$T < 150^\circ C$ 低温过热性故障	0	0	1
7	$150^\circ C \sim 300^\circ C$ 低温过热性故障	0	2	0
8	$300^\circ C \sim 700^\circ C$ 中温性故障	0	2	1
9	$> 700^\circ C$ 高温过热性故障	0	2	2

常规的 IEC 三比值诊断法在工程实际中是切实可行的诊断方法，但是主要存在以下三个方面的问题，尤其是以第二个问题表现最为突出。

- (1) 当油中特征气体含量未达到注意值时，无法用该方法进行诊断；
- (2) 若根据编码规则和分类方法得到的编码超出已知的编码表范围，则无法确定出故障类型；
- (3) 当多种故障同时发生时，三比值法难以区分。

现在应用常规 IEC 三比值法对 60 个样本进行诊断，其诊断结果如表 1-11 所示。

表 1-11 常规 IEC 三比值法的诊断结果

序号	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	实际故障	三比值编码/故障类型
1	93	58	43	37	0	中温过热	000 无故障 [#]
2	336	419	105	1074	21	高温过热	022 高温过热
3	335	67	18	143	170	工频续流放电	102 高能放电
4	73	520	140	1200	6	磁路高温过热	022 高温过热
5	15	125	29	574	7	引线接头过热	022 高温过热
6	160	130	33	96	0	中低温过热	001 低温过热
7	120	120	33	84	0.55	中低温过热	001 低温过热
8	57	77	58	21	0	中低温过热	001 低温过热
9	565	93	34	47	0	有局部放电	* 无编码
10	98	123	33	296	16	层间绝缘不良	022 高温过热
11	36	30	10	93	7.1	高温过热	* 无编码
12	14.67	3.68	10.54	2.71	0.20	正常	000 正常
13	650	53	34	20	0	有局部放电	010 局部放电
14	181	262	210	528	0	中低温过热	020 中温过热
15	172.9	334.1	172.9	812.5	37.7	高温过热	022 高温过热
16	1678	652.9	80.7	1005.9	419.1	高能放电	102 高能放电
17	7.5	5.7	3.4	2.6	3.2	正常	* 无编码
18	4072	15850	9057	22621	535	中温过热	021 中温过热
19	20.6	19.89	7.4	61.27	1.51	局部高温过热	* 无编码
20	56	286	96	928	7	导电回路高温过热	022 高温过热
21	73	520	140	1200	4	磁路高温过热	022 高温过热
22	42	97	157	600	0	局部高温过热	022 高温过热
23	16	237	92	470	0	导电回路高温过热	022 高温过热
24	86	110	18	92	7.4	高温过热	022 高温过热
25	1565	93	34	47	0	有局部放电	* 无编码
26	1308	125	112	6	0	有局部放电	010 局部放电
27	59	10.4	4	10	12.7	低能放电	010 局部放电
28	200	48	14	117	131	工频续流放电	102 高能放电
29	32.4	5.5	1.4	12.6	13.2	围屏放电	102 高能放电
30	150	27	5.6	65	90	围屏放电	102 高能放电
31	59	28	9	70	15	分解开关飞弧	102 高能放电
32	766	993	116	665	4	高温过热	022 高温过热
33	980	73	58	12	0	有局部放电	010 局部放电
34	80	153	42	276	18	层间绝缘不良	022 高温过热
35	30	7.4	8.5	1.8	19	低能放电	* 无编码
36	188	236	18.1	237	31.8	电弧放电兼过热	* 无编码
37	166.6	28.31	6.72	12.4	0.3	温度 607℃	* 无编码
38	890	729	246	1816	22	铁心多点接地	* 无编码
39	7.5	5.7	3.4	2.6	3.2	无故障	* 无编码
40	791	390	173	560	12	高温过热	* 无编码
41	150	27	3.8	65	90	围屏放电	102 高能放电
42	4072	15850	9057	22621	535	中温过热	021 中温过热
43	98.5	555	200	1636	8.3	分解开关接触不良而过热	022 高温过热
44	26.5	298	0	69.3	8.6	放电兼过热	* 无编码

续表

序号	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	实际故障	三比值编码/故障类型	
45	162	109	11.1	201	183	放电故障	102	高能放电
46	164	244	103	197	8.3	铁心两点或多点接地	022	高温过热
47	4670	3500	5040	2120	2560	电弧放电	101	低能放电
48	173	334	172	813	37.7	高温过热	022	高温过热
49	127	107	11	154	224	高能放电	102	高能放电
50	220	340	42	480	14	高温过热	022	高温过热
51	170	320	53	520	3.2	高温过热	022	高温过热
52	27	90	42	63	0.2	中低温过热	021	中温过热
53	32.4	5.5	1.4	12.6	13.2	高能放电	102	高能放电
54	345	112.25	27.5	51.5	58.75	低能放电	101	低能放电
55	181	262	210	528	0	中低温过热	021	中低温过热
56	25.1	411.91	320.9	1832.8	18.4	高温过热	022	高温过热
57	4.32	193	118	125	0	中低温过热	001	中低温过热
58	673.6	423.5	77.5	988.9	344.4	高能放电	102	高能放电
59	650	53	34	20	0	低能放电	010	低能放电
60	300	490	180	360	95	中温过热	121	中温过热

注：表中符号“#”表示误诊断、“*”表示三比值无对应的编码。

从以上 60 个诊断样诊断结果可以看出：在 60 个诊断样本中，用常规 IEC 三比值法诊断出现误诊断 1 个、超出三比值编码范围无法诊断的样本有 12 个。它的正确诊断率约为 78.33%。此外，人们在工程实践应用中还发现常规 IEC 三比值诊断法还存在以下问题。

(1) 只有油中特征气体含量达到或超过注意值时，并且经综合分析确定变压器内部存在故障后，才能使用三比值法，如果不论变压器是否存在故障一律使用三比值法，可能造成对正常变压器造成误诊断。

(2) 由于故障分类存在模糊性，一种故障可能引起多种故障特征，而一种故障特征也可在不同程度上反映多种故障状态，故三比值法不能全面反映故障状况。

(3) 当多种故障同时存在时，常规三比值诊断法无法进行诊断，在三比值编码边界模糊的比值区间内的故障，往往易误诊断。

(4) 由于充油电气设备的内部故障非常复杂，在实际应用中会出现不包括在表中编码组合对应的故障，再者由于引起 H₂ 含量高的原因很多，此时难以做出正确的判断。如编码组合 010，要确定是否是由于进水对铁腐蚀而产生高含量 H₂ 等其他原因，否则会造成误判。

(5) 在有载调压变压器中，分接开关筒里的电弧分解物及开关油室的油可能渗入到变压器油箱内，以致造成误判。

1.5.2 改良三比值诊断法

由于常规 IEC 三比值诊断法存在一定的缺陷，因此，人们在应用常规 IEC 三比值法的大量实践中，对比值编码范围和编码组合及故障类型分别进行改良，如表 1-12 和表 1-13 所示。改良后的方法简称为改良三比值法。但目前仍称之为三比值法，其诊断的准确率比常规三比值法大大得到提高。