

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，都是由爬电引起的。

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烃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漏入变压器油箱内，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。

表 1-12 改良三比值法编码规则

气体比值范围	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
<0.1	0	1	0
$\geq 0.1 \sim < 1$	1	0	0
$\geq 1 \sim < 3$	1	2	1
≥ 3	2	2	2

表 1-13 改良三比值法的故障类型判断

序号	编码组合			故障类型	故障实例
	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6		
1	0	0	1	低温过热 ($T < 150^\circ\text{C}$)	绝缘导线过热, 注意 CO 和 CO_2 的含量及 CO_2/CO 值
2	0	2	0	低温过热 ($150^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$)	分接开关接触不良, 引线夹件螺丝松动或接头焊接不良, 涡流引起铜过热, 铁心漏磁, 局部短路, 层间绝缘不良, 铁心点接地
3	0	2	1	中温过热 ($300^\circ\text{C} \sim 700^\circ\text{C}$)	
4	0	0, 1, 2	2	高温过热 ($T > 700^\circ\text{C}$)	
5	0	1	0	局部放电	
6	2	0	0, 1, 2	低能放电 (火花放电)	引线对点位未固定的部件之间连续火花放电, 分接抽头引线和油隙闪络, 不同电位之间的油中火花放电或悬浮电位之间的火花放电
7	2	1	0, 1, 2	低能放电 (火花放电)	
8	2	2	0, 1, 2	低能放电 (火花放电) 兼过热	
9	1	0	0, 1, 2	高能放电 (电弧放电)	线圈匝间、层间短路相间闪络、分接头引线间油隙闪络、引线对箱壳放电、线圈熔断、分接开关飞弧、因环路电流引起电弧、引线对其他接地体放电等
10	1	1	0, 1, 2	高能放电 (电弧放电)	
11	1	2	0, 1, 2	电弧放电兼过热	

现在应用改良三比值法再对表 1-10 中的 60 个诊断样本依次进行诊断, 诊断结果如表 1-14 所示。

表 1-14 改良三比值法的故障诊断结果

序号	H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	实际故障	故障类型诊断结果	
1	93	58	43	37	0	中温过热	000	正常状态 [#]
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	011	局部放电
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	002	高温过热
12	14.67	3.68	10.54	2.71	0.20	正常	000	正常状态
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	低温过热
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	100	高能放电 [#]
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	002	高温过热

续表

序号	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	实际故障	故障类型诊断结果	
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	011	无法诊断
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	分解开关电弧	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	200	低能放电
36	188	236	18.1	237	31.8	电弧放电兼过热	122	电弧放电兼过热
37	166.6	28.31	6.72	12.4	0.3	温度 607℃	112	高能放电 [#]
38	890	729	246	1816	22	铁心多点接地	002	高温过热
39	7.5	5.7	3.4	2.6	3.2	无故障	100	高能放电 [#]
40	791	390	173	560	12	高温过热	002	高温过热
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	122	电弧放电兼过热
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	高能放电
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	高能放电 [#]
55	181	262	210	528	0	中低温过热	021	中温过热
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	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	局部放电
60	300	490	180	360	95	中温过热	121	电弧放电兼过热

注：表中符号“#”表示误诊断。

从表 1-14 的 60 个诊断样本诊断结果可见：改良三比值法不存在无编码情况。它在编码

方面优于常规 IEC 三比值诊断法，但诊断结果中出现误诊断的有 7 个样本，所以它的正确诊断率为 88.3%，高于常规 IEC 三比值法。在应用三比值法时还应注意以下的几点。

(1) 应用三比值故障诊断时，要结合油中各溶解气体组成含量的注意值或气体增长率的注意值来判断变压器故障的类型，应用气体比值法诊断才是有效的。若油中溶解气体的含量正常的，且没有增长趋势，此时应用比值法故障诊断没有意义。

(2) 如果油中溶解气体的比值与以前的有所不同，有可能新的故障重叠在老故障上或正常老化上。若仅为了得到新故障油中溶解气体的比值，则需从最后一次的分析结果中减去上一次的 analysis 数据，再重新计算它们的比值。

(3) 由于在分析油中溶解气体时可能存在测试误差，导致气体比值也存在某些不确定性。因此在使用比值法判断变压器故障类型和性质时，应注意各种可能降低诊断结果的影响因素。此外，当诊断结果有故障怀疑时，应结合其他方法进行综合判断。

(4) 由于电气设备发生故障是相当复杂的，应用三比值进行诊断时会出现编码组合不在诊断表中对应的故障，此时故障诊断要用多种比值法或结合设备平时的运行记录综合做出判断。如编码组合为 121，常规比值法无对应故障类型，然而用改良法则可诊断为电弧放电兼过热故障。

(5) 有载调压变压器故障诊断时，要考虑分接开关的电弧分解物及开关油室的油是否渗入变压器油箱内，否则会造成误诊断。

(6) 应用油中溶解气体比值法故障诊断时，要综合考虑固体绝缘正常老化和故障劣化的产物对油造成的影响，要结合 CO_2 与 CO 的比值进行判断。

1.6 无编码比值故障诊断

无编码比值法又称为二比值法，这是我国变压器故障诊断专家通过对大量的故障数据进行分析而研究出的一种简单易行的故障诊断方法。该方法只需计算出 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ 和 CH_4/H_2 中的两个比值就可快速地诊断出故障类型，其诊断依据如图 1-1 所示，而无须通过编码查找故障类型。此外，也可以通过表 1-15 查找故障类型。

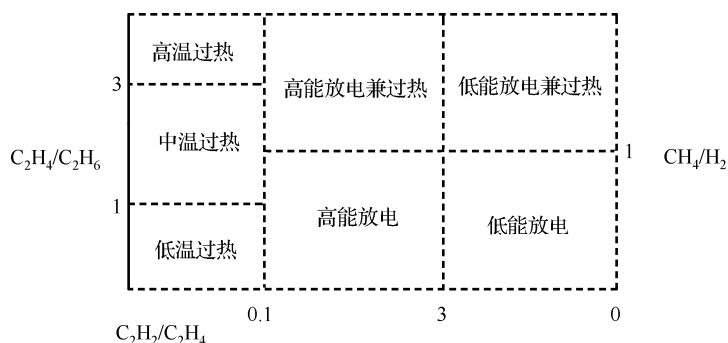


图 1-1 无编码比值诊断依据图

无编码比值的故障诊断步骤如下。

(1) 首先计算出 C_2H_2 与 C_2H_4 的比值。

(2) 若 C_2H_2 与 C_2H_4 的比值在 $(0, 0.1)$ 之间，则为过热性故障；然后根据 C_2H_4 与 C_2H_6

的比值判断属于何种类型的过热故障：若比值在 (0, 1) 之间，则为低温过热故障；若处于 (1, 3) 之间，则为中温过热；大于 3，是高温过热。

表 1-15 无编码比值故障诊断方法

故障类型	C_2H_2/C_2H_4	C_2H_4/C_2H_6	CH_4/H_2	典型故障分析
低温过热 ($T < 300^\circ C$)	<0.1	<1	无关	引线外包绝缘脆化，绕组油道堵塞，铁心局部短路
中温过热 ($300^\circ C \sim 700^\circ C$)	<0.1	>1 ~ <3	无关	铁心多点接地或铁心局部短路，分接开关引线接头接触不良
高温过热 ($T > 700^\circ C$)	<0.1	>3	无关	
电弧放电	>0.1 ~ <3	无关	<1	线圈匝间、层间短路，引线对地放电，分接开关拔插处围屏放电，有载分接开关、选择开关切断电流
电弧放电兼过热	>0.1 ~ <3	无关	>1	
火花放电	>3	无关	<1	围屏树枝状放电，分接开关错位，铁心接地铜片和铁心多点接触，选择开关调择不到位
火花放电兼过热	>3	无关	>1	

(3) 若 C_2H_2 与 C_2H_4 的比值大于 0.1 时，为放电型故障，此时再根据 CH_4 与 H_2 的比值进行判断：若 C_2H_2 与 C_2H_4 的比值在 (0.1, 3) 之间，当 CH_4 与 H_2 的比值小于 1 时为高能放电，当 CH_4 与 H_2 的比值大于 1 时为高能放电兼过热；若 C_2H_2 与 C_2H_4 的比值大于 3，则当 CH_4 与 H_2 的比值小于 1 时为低能放电，当 CH_4 与 H_2 的比值大于 1 时为低能放电兼过热。

由此可见：无编码比值法不存在像三比值法那样找不到无编码问题，当然也不存在编码少而查找不出故障类型的缺点。该方法判别简便，只需计算出两个比值就可确定出故障类型，其判断正确率较高，易于计算机判断。但该方法有一个明显的不足之处就是无法将正常情况与故障情况区分开来，且对纯氢超标的变压器不适合用该方法来判断，而且能诊断的故障类型有限，还需要进一步改进。

1.7 四比值故障诊断

由于变压器故障类型的多样性，且三比值法对电力变压器导电回路和磁路的铁心接地等过热性故障诊断的准确度不够高，由此国内外在三比值法的基础上，结合变压器油中溶解气体的色谱分析数据的统计分布研究，提出和推荐了多种比值诊断方法，这些方法对诊断变压器故障的性质各有自己的特色。下面分别介绍两种四比值诊断法。

1.7.1 得能堡比值法

1970 年英国中央电力公司首次提出应用 4 个油中溶解气体浓度的比值来诊断故障类型的方法，即得能堡比值法 (Doermenburg Ratios)，如表 1-16 所示。

表 1-16 Doermenburg 比值诊断法

故障类型	相对比值组合	气体比值	
		油	气体
热分解	CH_4/H_2	>1	>0.1
	C_2H_2/C_2H_4	<0.75	<1
	C_2H_2/CH_4	<0.3	<0.1
	C_2H_6/C_2H_2	>0.4	<0.2

续表

故障类型	相对比值组合	气体比值	
		油	气体
电晕	CH ₄ /H ₂	<0.1	<0.01
	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	—	—
	C ₂ H ₂ /CH ₄	<0.3	<0.1
	C ₂ H ₆ /C ₂ H ₂	>0.4	>0.2
击穿	CH ₄ /H ₂	0.1~1	0.01~1
	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	>0.75	>1
	C ₂ H ₂ /CH ₄	>0.3	>0.1
	C ₂ H ₆ /C ₂ H ₂	<0.4	<0.2

1.7.2 罗杰士比值法

在油中溶解气体分析法中较为常用的四比值法是罗杰士比（Rogers）值法，它是根据 5 种不同气体（H₂、CH₄、C₂H₄、C₂H₆、C₂H₂）的组成产生的四个比值（CH₄/H₂、C₂H₆/CH₄、C₂H₄/C₂H₆、C₂H₂/C₂H₄）对变压器故障进行诊断。现在分别介绍罗杰士比值法的编码规则和故障类型判断规则，如表 1-17 和表 1-18 所示。

表 1-17 Rogers 比值法编码规则

气体比	比值范围	编码
CH ₄ /H ₂	≤0.1	5
	>0.1, <1.0	0
	≥1, <3	1
	≥3	2
C ₂ H ₆ /CH ₄	<1	0
	≥1	1
C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	<1	0
	≥1, <3	1
	≥3	2
C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	>0.5	0
	≥0.5, <3	1
	≥3	2

表 1-18 Rogers 比值法故障类型判断规则

序号	故障类型	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₆ /CH ₄	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄
1	正常劣化	0	0	0	0
2	局部放电—电晕	5	0	0	0
3	局部放电—电晕（有爬电痕迹，注意 CO）	5	0	0	1/2
4	悬浮电位连续的放电故障	0	0	2	2
5	电弧放电—贯穿性放电	0	0	1	1
6	电弧放电—无贯穿性放电	0	0	0	1
7	低温过热（<150℃）	1/2	0	0	0
8	低温过热（150℃~200℃）	1/2	1	0	0
9	过热（200℃~300℃）	0	1	0	0
10	裸金属（导线）过热	0	0	1	0
11	绕组有环流（不平衡电流）或结线过热	1	0	1	0
12	铁心和箱壳有环流或接头过热	1	0	2	0

实践表明,用四比值法诊断充油电力变压器回路过热性故障比三比值法具有较高的准确度。比如应用三比值法诊断充油电力变压器回路过热性故障时,若有三个比值项与四比值法相同(022),此时由三比值法判断故障为过热性故障。再由四比值法中的 CH_4/H_2 比值按 $1\sim 3$ 和 ≥ 3 分别划分为“022磁”和“022电”两类。若“022”被划分为“022磁”时,则判断为磁回路过热性故障,反之为导电回路过热性故障。

例如,某台变压器,在投运期间可燃性气体含量不断上升,其色谱分析结果如表1-19所示。

表1-19 某变压器气体色谱诊断结果($\mu\text{L/L}$)

C_2H_2	C_2H_4	CH_4	H_2	C_2H_6	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	CH_4/H_2	$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	编码组合	诊断结果
0.49	233	103	39	67	0.0021	2.6410	3.4776	022磁	磁回路过热性故障

由表1-19分析可见,根据编码组合可判断出发生磁回路过热性故障。经实际检查,变压器发生铁心过热性故障,诊断结果与实际情况是相符合的。

1.7.3 无编码四比值法

德国工程技术人员在Rogers和Doermenburg四比值的基础上做了改进,保留四比值法的优点,简化工程技术人员编码操作过程和选择范围,其诊断法如表1-20所示。

表1-20 无编码四比值诊断法

序号	故障类型	CH_4/H_2	$\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$
1	一般损坏	$0.1\sim 1$	<1	<1	<0.5
2	局部放电	≤ 0.1	<1	<1	<0.5
3	轻过热($150^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$)	$1\sim 3/\geq 3$	<1	<1	<0.5
4	过热($150^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$)	$1\sim 3/\geq 3$	≥ 1	<1	<0.5
5	过热($150^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$)	$0.1\sim 1$	≥ 1	<1	<0.5
6	导线过热	$0.1\sim 1$	<1	$1\sim 3$	<0.5
7	线圈中不平衡电流或接线过热	$1\sim 3$	<1	$1\sim 3$	<0.5
8	铁件或油箱出现不平衡电流	$1\sim 3$	<1	≥ 3	<0.5
9	小能量击穿	$0.1\sim 1$	<1	<1	$0.5\sim 3$
10	电弧短路	$0.1\sim 1$	<1	$1\sim 3/\geq 3$	$0.5\sim 3/\geq 3$
11	长时间形放电	$0.1\sim 1$	<1	≥ 3	≥ 3
12	局部闪络放电(注意CO)	≤ 0.1	<1	<1	$0.5\sim 3/\geq 3$

四比值法的基本原理可归纳为:四比值法是在三比值法的基础上增加一个比值 $\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$,即利用5种气体组成的四对比值。四比值法的表示方法是:两组分浓度比值如大于1,用“1”表示;如小于1,则用“0”表示;若在1左右,表示在故障性质的中间变化,即故障性质暴露不明显。反之,若比值越大,则故障性质显示得越明显。

1.8 其他诊断方法

1.8.1 O_2/N_2 比值

通常油中溶解一定量的空气,空气的含量与油的保护方式有关。在开放式变压器中,油

被空气所饱和，含气量约占油总体积的 10%。由于溶解度的影响，其中氧的含量约为 30%，氮的含量约为 70%。在经真空滤油的新密封式变压器中，一般含气量为 1%~3%，也以这个比例存在于油中。在设备内，考虑到 O₂ 和 N₂ 的相对溶解度，油中 O₂/N₂ 的比值反映了空气的组成，为 0.5 左右。电气设备运行中，由于油的氧化或绝缘纸的老化，O₂ 的消耗比扩散更加迅速，造成这个比值可能再下降；负荷和保护系统也会影响这个比值。但当 O₂/N₂<0.3 时，一般认为是氧被极度消耗的迹象。在运行中可能发生以下现象。

(1) 总含气量增长，氧的含量也随之增高。如果不是取样或分析过程中引进的误差，则可能是隔膜或附件泄漏所致。一段时间后有可能导致油中溶解空气过饱和，当负荷、温度变化时，就会释放出气体。有可能引起气体继电器动作而报警。

(2) 当总含气量增加，而氧的含量却很低时，甚至有时因氩气的影响而出现负峰时，则设备内部可能存在故障。

对充氮式变压器，当负荷和环境温度变化而使油温变化时，不会使油中氧的含量有明显的变化。当总含气量和氧气含量明显增加时，可能是充氮系统密封不良或防爆膜龟裂，应查明原因。

无论是哪种保护方式，当设备内部存在热点时，分解气体不仅使油中的总含气量增加，而且由于氧化作用加速消耗氧，使油中氧的含量不断降低。随着故障的严重，高浓度的故障特征气体还会将油中的部分氧置换出来，氧又很难通过油来得到补充，就会导致油中的氧不断减少。实践证明，故障持续的时间越长，油中总含气量就越高，氧的含量就会越低。

1.8.2 C₂H₂/H₂ 比值

装有载调压装置的变压器，常常发生调压开关油箱中的油向主油箱渗漏，或有载调压开关油箱与变压器公用一个储油罐，致使开关油箱中由于开关操作产生的大量氢气和乙炔污染主油箱中的油。因此，测量油箱中 C₂H₂/H₂ 的比值有助于对故障状况的判断。

有载调压操作产生的气体和低能量放电情况相符。假如，某些油或气体在有载调压时，由于调压油箱和主油箱相通，或各自的储油罐之间相通，这些气体可能会污染主油箱的油，并导致误判断。主油箱中 C₂H₂/H₂>2，认为是有载调压污染的迹象。这种情况可利用比较主油箱和储油罐的油中溶解气体浓度来确定。由于氢气容易逸散，乙炔则容易溶于油中而不易散掉，这时会造成乙炔的含量大于氢气的含量。气体比值和乙炔浓度值与有载调压的操作次数和产生污染的方式等有关。

1.8.3 气体比值的图示法

利用气体的三对比值，建立 X-Y-Z 坐标立体图，该方法能直观方便地展示出不同类型故障的发展趋势，如图 1-2 所示。利用 CH₄、C₂H₂ 和 C₂H₄ 的相对百分数含量，在大卫三角形坐标图上也可以辅助判断各种故障类型，如图 1-3 所示。

在图 1-2 中，PD 表示局部放电；D1 表示低能放电；D2 表示高能放电；T1、T2 和 T3 分别表示： $t<300^{\circ}\text{C}$ 的热故障、 $300^{\circ}\text{C}<t<700^{\circ}\text{C}$ 的热故障和 $t>700^{\circ}\text{C}$ 的热故障。

在图 1-3 中， $\text{C}_2\text{H}_2\% = 100X/(X+Y+Z)$ ； $\text{C}_2\text{H}_4\% = 100Y/(X+Y+Z)$ ； $\text{CH}_4\% = 100Z/(X+Y+Z)$ 。单位均为 $\mu\text{L/L}$ 。图中 PD、D1、D2、T1~T3 与图 1-2 一致。各区域极限如表 1-21 所示。

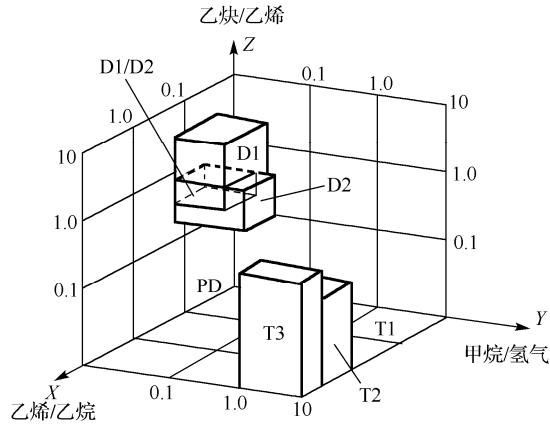


图 1-2 X-Y-Z 坐标图示法

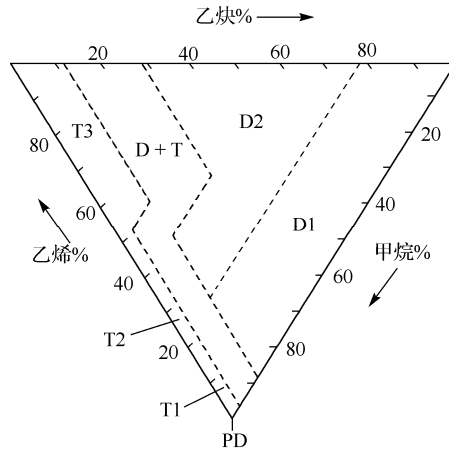


图 1-3 大卫三角形图示法

表 1-21 区域极限

PD (局部放电)	98%CH ₄	—	—	—
D1 (低能放电)	23%C ₂ H ₄	13%C ₂ H ₂	—	—
D2 (高能放电)	23%C ₂ H ₄	13%C ₂ H ₂	38%C ₂ H ₄	29%C ₂ H ₂
T1 ($t < 300^{\circ}\text{C}$ 热故障)	4%C ₂ H ₂	10%C ₂ H ₄	—	—
T2 ($300^{\circ}\text{C} < t < 700^{\circ}\text{C}$ 热故障)	4%C ₂ H ₂	10%C ₂ H ₄	50%C ₂ H ₄	—
T3 ($t > 700^{\circ}\text{C}$ 热故障)	15%C ₂ H ₂	50%C ₂ H ₄	—	—

1.8.4 改良电协法

日本提出的改良电协法与其他比值法比较，具有编码较为齐全、提供的故障类型也较多、故障诊断正确率也较高等优点。但它对编码为“0, 1, 1”未给出相应的故障类型，实际故障是“局部放电或低温过热”；对于编码为“0, 1, 0”，也有可能是由于进水对铁芯腐蚀的影响而产生高含量的 H₂，所以有必要测定油中的含水量。此外，该方法也需要进行编码，难免会出现个别超出编码范围或难以做出正确判断的问题和缺点。

通过对以上几种变压器故障诊断方法的简单分析，可以看出，现有的大部分方法都只对特定几种故障类型具有较强的诊断能力，而对超过其诊断范围的故障却束手无策，且用于划分故障类型的边界过于精确，无法体现变压器故障现象与故障类型之间的复杂性和模糊性。这些都是提高变压器故障诊断能力应考虑的因素。为此，本书将在后面介绍基于人工智能技术的变压器故障诊断方法，该方法就是针对这些不足而提出的，它不但可以体现变压器故障诊断本身所具有的模糊性，还可以通过自学习功能来提高系统诊断新故障的能力。