

ICS 29.040.99
CCS E 38

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 2217—2021

变压器用天然酯和合成酯油 溶解气体分析导则

Guide for interpretation of gases generated in natural ester and
synthetic ester-immersed transformers

2021-01-07 发布

2021-07-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 油中气体的来源	2
5 检测周期	4
6 取样	5
7 气体组分含量检测方法	5
8 故障的识别	6
附录 A (资料性) 大卫三角形法	9
附录 B (资料性) 实验室热解和电弧实验	12
附录 C (资料性) 实验室热解实验	13
附录 D (资料性) 油中溶解气体分析数据库的统计分析	17
附录 E (资料性) ASTM D7150 杂散气体试验结果	19
附录 F (资料性) 暴露于荧光灯下引起的杂散气体	20
附录 G (资料性) 特征气体法	21
附录 H (资料性) 实例分析	22
附录 I (资料性) 天然酯绝缘油变压器出厂试验前后油中溶解气体分析数据	25
参考文献	26

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电力企业联合会提出。

本文件由全国电气化学标准化技术委员会（DL/TC 322）归口。

本文件起草单位：广东电网有限责任公司电力科学研究院、中国电力科学研究院有限公司、广东电网有限责任公司珠海供电局、国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司、华北电力科学研究院有限责任公司、西安热工研究院有限公司、国网福建省电力有限公司电力科学研究院、国网黑龙江省电力有限公司电力科学研究院、国网浙江省电力有限公司电力科学研究院、国网江苏省电力有限公司电力科学研究院、国网河南省电力有限公司电力科学研究院、国网安徽省电力有限公司电力科学研究院、国网湖南省电力有限公司电力科学研究院、广州供电局有限公司电力试验研究院、广东电网有限责任公司东莞供电局、重庆大学、西安交通大学、嘉吉投资（中国）有限公司。

本文件主要起草人：钱艺华、李丽、蔡胜伟、赵耀洪、熊婷婷、孟玉婵、吴义华、王应高、冯丽萍、郑东升、李国兴、明菊兰、朱洪斌、杨涛、祁炯、万涛、黄青丹、李剑、张冠军、杨震洋、张伟平、廖肇毅、张新忠、盘思伟、范圣平、周舟、连鸿松、王花蕊、陈程、杨贤、王增彬、王锐锋。

本文件为首次发布。

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

变压器用天然酯和合成酯油溶解气体分析导则

1 范围

本文件规定了变压器用天然酯和合成酯油溶解气体的分析方法。

本文件适用于以天然酯绝缘油或者合成酯绝缘油为主要绝缘材料的电力变压器。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 7597 电力用油（变压器油、汽轮机油）取样方法

GB/T 17623—2017 绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定法

GB 50150 电气装置安装工程 电气设备交接试验标准

NB/SH/T 0930 热应力下绝缘液体产气特性测定法

ASTM D7150 测定热应力下绝缘液体放气特性的标准试验方法（Standard test method for the determination of gassing characteristics of insulating liquids under thermal stress）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

特征气体 characteristic gas

对判断充油电气设备内部故障有价值的气体，即氢气（ H_2 ）、甲烷（ CH_4 ）、乙烷（ C_2H_6 ）、乙烯（ C_2H_4 ）、乙炔（ C_2H_2 ）、一氧化碳（ CO ）、二氧化碳（ CO_2 ）。

[来源：DL/T 722—2014，3.1]

3.2

天然酯绝缘油 natural ester insulating oil (hereinafter referred to as natural ester)

从种子或其他生物材料中提取、用于变压器或类似电气设备的绝缘液体，其主要成分是甘油三酯，具有良好的生物降解性和环境相容性，简称天然酯。

[来源：DL/T 1811—2018，3.1，有修改]

3.3

合成酯绝缘油 synthetic ester insulating oil (hereinafter referred to as synthetic ester)

有机酸与醇（如季戊四醇）经过酯化反应得到的绝缘油，简称合成酯。

3.4

高油酸基天然酯绝缘油 high oleic based natural ester insulating oil

油酸含量大于 75%的天然酯绝缘油。

3.5

高油酸基葵花型天然酯绝缘油 high oleic sunflower based natural ester insulating oil

具有典型脂肪酸组成（油酸 82%，亚油酸 9%，亚麻酸小于 1%）的高油酸基天然酯绝缘油。

3.6

大豆基天然酯绝缘油 soybean-based natural ester insulating oil

从大豆中提取的具有典型脂肪酸组成（油酸 24%，亚油酸 54%，亚麻酸 7%）的天然酯绝缘油。

3.7

菜籽基天然酯绝缘油 rapeseed-based natural ester insulating oil

从菜籽中提取的具有典型脂肪酸组成（油酸 62%，亚油酸 22%，亚麻酸 10%）的天然酯绝缘油。

3.8

总溶解性可燃气体 total dissolved combustible gas

氢气、甲烷、乙烷、乙烯、乙炔和一氧化碳气体含量的总和。

3.9

杂散产气 stray gassing

设备正常运行或未发生故障的过载运行条件下，酯类绝缘油所产生的气体。

3.10

酯类绝缘油变压器 ester insulating oil transformer

内充天然酯绝缘油或合成酯绝缘油作为绝缘介质的变压器。

3.11

典型值 typical value

酯类变压器在正常运行状态下油中特征气体的具有代表性的浓度值。

4 油中气体的来源

4.1 酯类绝缘油与矿物绝缘油产气差异

天然酯和合成酯绝缘油（以下简称“酯类绝缘油”）含有丰富的酯基和 C16~C18 链，矿物绝缘油主要为烷烃、环烷烃和芳香烃等，化学结构的差异性导致两者在故障状态下产生的气体种类虽然相同，但比率和产气率有较大差异。

酯类绝缘油与矿物绝缘油产气最显著的差别如下：

- a) 非故障条件下，含有亚麻酸的酯类绝缘油会产生乙烷；
- b) 过热产生的甲烷、乙烷和乙烯含量更高，且相比矿物绝缘油在更低温度下产生；
- c) 过热产生的甲烷、乙烷和乙烯的比例和矿物绝缘油不同；
- d) 酯类绝缘油过热产生大量的二氧化碳和一氧化碳。

4.2 杂散产气

杂散产气是指设备正常运行或未发生故障的过载运行条件下，天然酯（合成酯）绝缘油所产生的气体。杂散气体的检测参照 NB/SH/T 0930 或 ASTM D7150。由于亚麻酸氧化时会产生乙烷，选用亚麻酸含量较高的大豆基或菜籽基天然酯类绝缘油作为绝缘介质的电气设备，即使在正常运行和未发生故障的过载运行条件下，也会产生杂散气体乙烷，浓度可以达到几百微升每升。但随着时间的推移，乙烷浓度趋于稳定，应对杂散产气进行监测直至气体稳定并建立趋势基线。

4.3 酯类绝缘油在电应力作用下的产气

4.3.1 概述

在相同条件下，合成酯绝缘油中放电产生的故障气体含量与矿物绝缘油相近，而天然酯绝缘油中放电故障产生的气体含量比矿物绝缘油低一个数量级。附录 A 中的大卫三角形法说明，在 PD 区（局

部放电)和 D1 区(低能放电),天然酯(合成酯)绝缘油和矿物绝缘油产生的特征气体比值相近。

4.3.2 局部放电

酯类绝缘油变压器局部放电产生的特征气体主要是氢气(H_2)和甲烷(CH_4)。

4.3.3 电弧放电

酯类绝缘油变压器电弧放电产生的特征气体主要是氢气(H_2)、乙炔(C_2H_2)、乙烯(C_2H_4)。

酯类绝缘油和矿物绝缘油生成的氢气和碳氢化合物比例相近,但二者的产气率有所差异,生成的碳氧化合物比例也不同。

4.4 酯类绝缘油在热应力作用下的产气

4.4.1 概述

当达到一定的过热温度,酯类绝缘油通过碳氢链热分解、酯键热分解、游离酸组分反应及杂散产气等生成气体,其产气总量为矿物绝缘油的两倍以上,试验数据见附录 B 和附录 C。

4.4.2 酸性产物

甘油三酯的分解是天然酯(合成酯)绝缘油热解的主要反应之一。它将生成两种游离脂肪酸、丙烯醛和来自第三种脂肪酸的乙烯酮。该反应虽未生成气体产物,但是每种产物可进一步反应产生碳氧化合物、乙烯、甲烷和乙烷。总酸值随着反应的发生而上升,说明碳氧化合物、乙烯、甲烷和乙烷均由酯类绝缘油的热解产生。

4.4.3 碳氧化合物

酯类绝缘油热解产生的碳氧化合物为一氧化碳和二氧化碳,碳氧化合物的含量与酸值均随着热解温度的升高而增长,在相同温度下矿物绝缘油所产生的碳氧化合物比酯类绝缘油小几个数量级。此外,酯类绝缘油所产生的碳氧化合物含量也可能远大于纤维素绝缘纸,这将对纤维素绝缘纸老化程度的判断造成干扰,可通过酸值及乙烯含量来辅助判断气体来源。

4.4.4 乙烯

酯类绝缘油热解产生乙烯的温度较矿物绝缘油低 $50\text{ }^\circ\text{C}\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$,且在较高温度范围内仍然显著增加。通常情况下,天然酯类绝缘油中乙烯的含量不会超过一氧化碳的含量,但在一定高温下含量却明显超过一氧化碳含量,这种情况与矿物绝缘油相似。

4.4.5 甲烷和乙烷

酯类绝缘油热解过程中烃链断裂产生甲烷和乙烷,甲烷和乙烷的热解温度均较矿物绝缘油低 $50\text{ }^\circ\text{C}\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$,酯类绝缘油中甲烷和乙烷的产气特性与矿物绝缘油更为相似。在高温条件下,酯类绝缘油热解产生的甲烷和乙烷含量相近,但在矿物绝缘油中并非如此。造成油中甲烷和乙烷产物含量和比例差异的根本原因是天然酯绝缘油和矿物绝缘油具有不同的烃结构。

4.4.6 可燃性气体

酯类绝缘油在高温下会产生可燃性气体。气体的含量和产气率取决于酯类绝缘油类型、暴露于高温下的含量和曝光时间等,可燃性气体比率的变化反映了设备故障的严重程度,必要时应采取额外措施。

4.5 纤维素绝缘纸的热解产气

酯类绝缘油变压器中的纤维素绝缘纸在过热条件下产生的主要气体是 CO 和 CO₂，CO₂ 含量与 CO 含量比值是判断过热的依据，与矿物绝缘油类似。

纤维素绝缘纸的热解温度比酯类绝缘油低，设备在正常运行时通常会产生数百微升每升的 CO 和数千微升每升的 CO₂，当 CO₂ 含量不低于 5000 μL/L，CO 含量不低于 500 μL/L 时，CO₂ 含量与 CO 含量比值大于 7 可视为纤维素绝缘纸分解。当 CO 含量增加，CO₂ 含量与 CO 含量比值下降，表明纤维素绝缘纸的分解可能存在异常。当 CO 含量和 CO₂ 含量大幅增加时，应及时检查，可能存在着纤维素绝缘纸热解或天然酯绝缘油高温过热。

4.6 其他气体来源

除变压器内部故障产生的气体外，气体的来源还包括绝缘液体污染、设备油箱带油焊接和设备有载分接开关切换时导致绝缘油分解产生的气体以及溶于绝缘油中的空气等，应在溶解气体分析之前确定其他气体源。

酯类绝缘油变压器应设置密封或惰性气体覆盖液体的保护系统，以避免绝缘油接触氧气和水分。氮气来源包括初始溶解氮、吸收空气中的氮或变压器顶部空间或保护设备中的干燥氮气。当氮气浓度低于预期氮气浓度、氧气浓度升高或氧氮比率升高时，表明可能存在酯类绝缘油劣化或变压器密封不良等问题，应采取措施识别气体来源，评估酯类绝缘油的劣化程度并采取相应措施。

5 检测周期

5.1 投运前的检测

新的或大修后的 35 kV 及以上酯类绝缘油变压器，投运前应至少做一次油中溶解气体分析。不带油运输时，应对油罐中绝缘油进行油中溶解气体分析，检测结果与出厂值对比不应有明显增加；注油完成且静放时间满足要求后，应对变压器本体绝缘油进行油中溶解气体分析，特征气体含量不应明显增加。

现场交接试验应参照 GB 50150 的相关规定，试验后取样间隔时间应为同电压等级矿物绝缘油电力变压器规定时间的 1.5 倍，且不得少于 24 h。

5.2 新投运时的检测

新的或大修后的 35 kV 及以上的酯类绝缘油变压器至少应在投运后第 1 天、第 4 天、第 10 天、第 30 天各做一次油中溶解气体分析。

5.3 运行中的定期检测

运行中设备油中溶解气体检测周期应按表 1 的规定进行。

表 1 运行中设备油中溶解气体检测周期

设备电压等级或容量	检测周期
110 kV (66 kV) / 8 MV · A 及以上	1 年
220 kV	6 个月
注：其他电压等级用户自行规定。	

5.4 特殊情况下的检测

5.4.1 当设备出现异常情况（如变压器或气体继电器动作、差动保护动作、压力释放阀动作、大电流冲击、过励磁或过负荷等），应取油样检测。

5.4.2 当气体继电器中有集气时应取气样检测。

5.4.3 当怀疑设备内部有下列异常时，应根据情况缩减检测周期进行监测或退出运行。在监测过程中，若特征气体增长趋势明显，应采取其他相应措施；当在相近运行工况下，检测三次后含量稳定，可适当延长检测周期，直至恢复正常检测周期。

- a) 过热性故障。当怀疑主磁回路或漏磁回路存在故障时，可缩短到每周检测一次；当怀疑导电回路存在故障时，宜缩短到至少每天一次。
- b) 放电性故障。当怀疑存在低能量放电时，宜缩短到每天一次；当怀疑存在高能量放电时，应进一步检查或退出运行。

6 取样

按 GB/T 7597 中变压器油中溶解气体分析取样的有关规定进行，取样过程中应避免阳光或紫外线长时间直射。

7 气体组分含量检测方法

7.1 油中溶解气体油气分离方法、气相色谱仪配置及最小检测灵敏度要求、样品分析检测步骤、试验结果的表示等应参照 GB/T 17623—2017 的相关规定。

7.2 机械振荡法油中溶解气体各组分浓度，可采用公式（1）～公式（4）计算，其中公式（4）中的 0.907 按公式（5）计算。

$$V'_g = V_g \times \frac{323}{273 + t} \quad \text{..... (1)}$$

$$V'_1 = V_1 [1 + \alpha \times (50 - t)] \quad \text{..... (2)}$$

式中：

V'_g —— 50 °C、试验压力下平衡气体体积，mL；

V_g —— 室温 t 、试验压力下平衡气体体积，mL；

t —— 试验时的温度，°C；

V'_1 —— 50 °C 时油样体积，mL；

V_1 —— 室温 t 时所取油样体积，mL；

α —— 油的热膨胀系数，°C⁻¹。

$$X_i = \beta \times \frac{p}{101.3} \times c_{i,s} \times \frac{\overline{A}_i}{A_{i,s}} \left(K_i + \frac{V'_g}{V'_1} \right) \quad \text{..... (3)}$$

$$\beta = 0.907(1 + 30 \times \alpha) \quad \text{..... (4)}$$

$$0.907 = \frac{V_g^{20^\circ\text{C}}}{V_g^{50^\circ\text{C}}} = \frac{273 + 20}{273 + 50} \quad \text{..... (5)}$$

式中：

X_i —— 101.3 kPa 和 293 K (20 °C) 时，油中溶解气体 i 组分浓度，μL/L；

$c_{i,s}$ —— 标准气中 i 组分浓度，μL/L；

\overline{A}_i —— 样品气中 i 组分的平均峰面积，mV · s；

- $\overline{A_{i,s}}$ ——标准气中 i 组分的平均峰面积, $\text{mV} \cdot \text{s}$;
 V'_g ——50 °C、试验压力下平衡气体体积, mL ;
 V'_1 ——50 °C时的油样体积, mL ;
 p ——试验时的大气压力, kPa ;
 β ——油样中溶解气体从 50 °C 校正到 20 °C 时的温度校正系数;
 K_i ——组分 i 的气体分配系数。

注 1: 式中的 $\overline{A_i}$ 和 $\overline{A_{i,s}}$ 也可以用平均峰高 $\overline{h_i}$ 和 $\overline{h_{i,s}}$ 代替。

注 2: 50 °C 时大豆基、菜籽基和山茶籽基天然酯绝缘油中溶解气体各组分气体的奥斯特瓦尔德系数 (K_i) 见表 2, 测定方法参见 GB/T 17623—2017 中附录 D; 对牌号或基础油不明的酯类绝缘油油样, 溶解气体的气体分配系数不能确定时, 可采用二次溶解平衡测定法, 参见 GB/T 17623—2017 中附录 F。

表 2 50 °C 时天然酯绝缘油中溶解气体各组分气体的奥斯特瓦尔德系数 (K_i)

天然酯绝缘油类型	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	O ₂	N ₂
大豆基天然酯绝缘油	0.06	0.11	1.14	0.33	1.42	1.77	1.88	0.11	0.12
菜籽基天然酯绝缘油	0.06	0.10	1.23	0.33	1.45	1.76	1.69	0.16	0.10
山茶籽基天然酯绝缘油	0.06	0.13	1.19	0.34	1.34	1.83	1.80	0.10	0.11

8 故障的识别

8.1 故障分析步骤

本文件推荐的酯类绝缘油变压器油中溶解气体分析步骤如下:

- 取样和检测: 取样处理应按照本文件第 6 章执行, 确保样品的一致性和代表性, 取样后应参照 GB/T 17623—2017 对样品进行检测。
- 样品复测分析: 根据特征气体典型值, 对特征气体含量超过典型值的样品进行复测。
- 结果诊断: 应根据特征气体含量的绝对值、产气增长速率以及设备运行状况、结构特点、外部环境等因素综合判断设备是否存在故障以及故障的严重程度。
- 跟踪处理: 加强运维监控, 根据具体情况对设备采取不同的处理措施 (如调整试验周期、限制负荷、安排内部检查、停止运行等)。

8.2 新设备投运前油中溶解气体的含量要求

新设备投运前油中溶解气体分析结果中乙炔 (C₂H₂) 含量不应大于 0.1 $\mu\text{L/L}$, 氢气和总烃含量与出厂值不应有明显增长。

8.3 运行中酯类变压器特征气体典型值

8.3.1 运行中酯类变压器特征气体典型值

运行中酯类变压器特征气体典型值见表 3。

表 3 运行中酯类变压器特征气体典型值

单位: $\mu\text{L/L}$

酯类绝缘油类型	样本数量	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO
大豆基天然酯绝缘油	4378	112	20	232	18	1	161

表 3 (续)

酯类绝缘油类型	样本数量	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO
高油酸葵花基天然酯绝缘油	476	35	25	58	16	0.1	497
合成酯绝缘油	157	64	104	124	150	13	1344

注 1: 表 3 中数据来源于一些实验室、分析服务商和设备所有者提供的运行中变压器油中溶解气体分析数据, 统计分析的详细结果见附录 D。

注 2: 样本数量较少的统计结果更加具有不确定性, 因此合成酯绝缘油中特征值含量的置信区间范围更广。

油中溶解气体含量典型值的应用原则如下:

- 油中溶解气体含量典型值不是划分设备内部有无故障的唯一判断依据。当气体含量超过典型值时, 应按本文件 5.4 缩短检测周期, 结合产气速率进行判断。如油中溶解气体含量超过典型值, 但长期跟踪检测结果稳定, 可在超过典型值的情况下继续运行; 如油中溶解气体含量虽低于典型值, 但产气速率增加过快, 也应缩短跟踪检测周期。
- 当油中溶解气体含量突然大幅度增长或故障性质发生变化时, 须视情况采取必要措施。
- 注意区别非故障情况下的气体来源 (见本文件第 4 章)。
- 新变压器或无历史采样数据的运行变压器的油中溶解气体分析样本数据应与典型值相比较, 如超出典型值应再次进行油中溶解气体分析确认, 缩短跟踪检测周期, 结合产气速率综合判断。

8.3.2 气体的增长率

气体的增长率 (产气速率) 不但与故障能量大小、故障点的温度以及故障涉及的范围等有直接关系, 还与设备类型、负荷情况和所用绝缘材料的体积及其老化程度有关。为了评估故障的性质和严重程度, 应在合适的时间间隔内连续进行油中溶解气体检测分析并计算产气速率, 以确定重要的故障气体是间断生成、稳定生成或者加速生成。值得注意的是, 气体的产生时间可能仅在两次检测周期内的某一时间段, 因此产气速率的计算值可能小于实际值。

油中溶解气体的增长率 (产气速率) 以下列两种方式计算:

- 绝对产气速率, 即每运行日产生某种气体的平均值, 按公式 (6) 计算:

$$\gamma_a = \frac{c_{i,2} - c_{i,1}}{\Delta t} \times \frac{m}{\rho} \dots\dots\dots (6)$$

式中:

- γ_a —— 绝对产气速率, mL/d;
- $c_{i,2}$ —— 第 2 次取样测得油中某气体浓度, $\mu\text{L/L}$;
- $c_{i,1}$ —— 第 1 次取样测得油中某气体浓度, $\mu\text{L/L}$;
- Δt —— 两次取样时间间隔的实际运行时间, d;
- m —— 设备总油量, t;
- ρ —— 油的密度, t/m^3 。

- 相对产气速率, 即每运行月 (或折算到月) 某种气体浓度增加值相对于原有值的百分数, 按公式 (7) 计算:

$$\gamma_r = \frac{c_{i,2} - c_{i,1}}{c_{i,1}} \times \frac{1}{\Delta t} \times 100\% \dots\dots\dots (7)$$

式中:

- γ_r —— 每月相对产气速率, %;
- $c_{i,2}$ —— 第 2 次取样测得油中某气体浓度, $\mu\text{L/L}$;

$c_{i,1}$ ——第 1 次取样测得油中某气体浓度, $\mu\text{L/L}$;

Δt ——两次取样时间间隔的实际运行时间, 月。

通过对相似取样间隔内的连续产气速率进行比对可判断气体生成的快慢程度。但如果产气是间断的, 利用产气速率的方法并不合适。

目前尚未建立基于现场经验的产气速率注意值来评估设备故障的严重性。因为在取样、样品重现性和测量方法再现性等方面可能会出现误差, 在比较气体浓度时应该慎重。考虑到气体含量测量的重复性, 只有当增加的数量远远大于偶然误差时, 气体增量和产气速率的增加才有意义。

附录 A
(资料性)
大卫三角形法

A.1 总则

当油中溶解气体分析结果高于最低气体浓度并且设备中存在可疑故障时，可以应用大卫三角形法进行诊断。大卫三角区域是基于天然酯绝缘油和合成酯绝缘油日益增长的使用经验水平，通过对特定酯类绝缘油类型和观察设备气体来源的油中溶解气体分析结果的实证检验建立区域。使用表 A.1 中找到的比例评估甲烷（CH₄）、乙烯（C₂H₄）和乙炔（C₂H₂），每个比例项绘制在 A.2 实例中所示的三角形图中。

表 A.1 三角形公式

三角轴	公式
%CH ₄	$\%CH_4 = CH_4 / (CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2)$
%C ₂ H ₄	$\%C_2H_4 = C_2H_4 / (CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2)$
%C ₂ H ₂	$\%C_2H_2 = C_2H_2 / (CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2)$

A.2 实例

绘制示例参数的大卫三角形如图 A.1 所示。根据表 A.1 计算示例参数，示例参数绘制在大卫三角形上，如图 A.2~图 A.4 虚线所示。D2 区域符号与表 A.2 中的故障描述代码相匹配，表示可能存在高能量放电产气。大卫故障类型符号见表 A.3。

基于对最新的绝缘油数据的大卫三角图像如图 A.2~图 A.4 所示。

表 A.2 大卫三角示例参数

示例参数	
三角轴	
%CH ₄	10
%C ₂ H ₄	50
%C ₂ H ₂	40

表 A.3 大卫故障类型符号

符号	故障介绍
PD	局部放电
D1	低能量的放电
D2	高能量的放电
DT	放电或者过热
T1	低温过热, $t < 300\text{ }^\circ\text{C}$
T2	中温过热, $300\text{ }^\circ\text{C} < t < 700\text{ }^\circ\text{C}$
T3	高温过热, $t > 700\text{ }^\circ\text{C}$

注: t 表示过热温度。

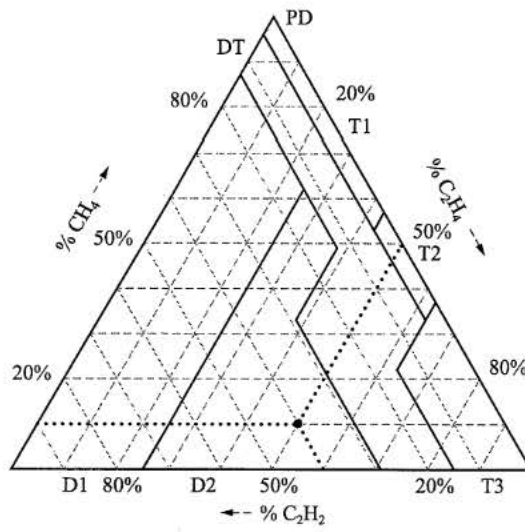


图 A.1 绘制示例参数的大卫三角形

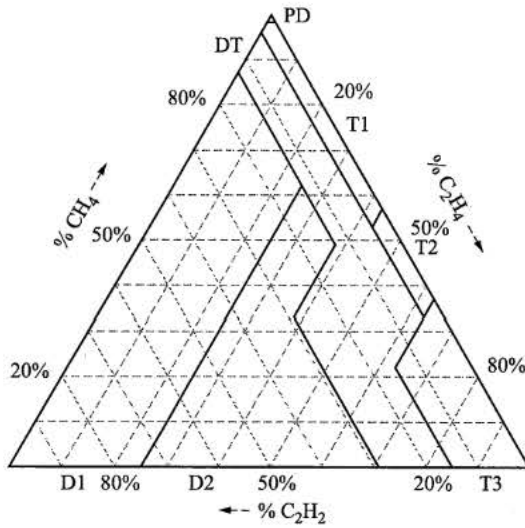


图 A.2 大豆基天然酯绝缘油的大卫三角形

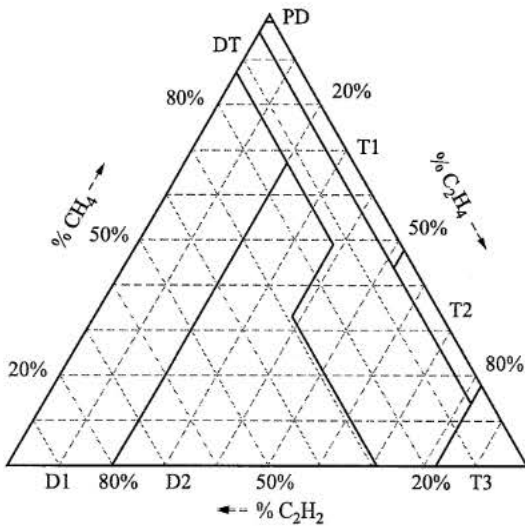


图 A.3 高油酸葵花型天然酯绝缘油的大卫三角形

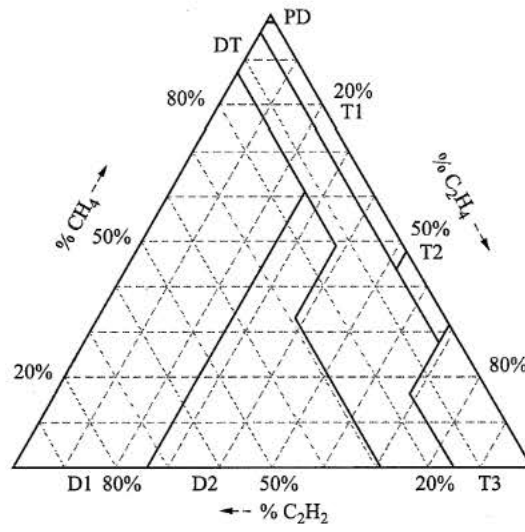


图 A.4 合成酯绝缘油的大卫三角形

附录 B
(资料性)
实验室热解和电弧实验

B.1 实验室热解实验

该实验与附录 C 的不同之处在于，实验装置包含绝缘油与典型的变压器内部材料（如导体和纤维素绝缘纸）的典型比例。表 B.1 和表 B.2 在类似实验条件下比较了矿物绝缘油和大豆基天然酯绝缘油。

将绝缘油加热到预定温度并维持一定时间，加热结束后，用注射器取油样并进行油中溶解气体分析检测。每个油样分别被加热到下列温度并持续如下时间：200 °C 下 5 d；300 °C 下 1 d；500 °C 下 20 min。大豆基天然酯绝缘油和矿物绝缘油的热解对比试验数据见表 B.1。

表 B.1 大豆基天然酯绝缘油热裂解实验室数据

单位：μL/L

气体	200 °C		300 °C		500 °C	
	矿物绝缘油	大豆基天然酯绝缘油	矿物绝缘油	大豆基天然酯绝缘油	矿物绝缘油	大豆基天然酯绝缘油
H ₂	4	3	23	460	900	1300
CH ₄	560	43	220	770	6800	7900
C ₂ H ₆	290	1400	170	1700	9000	3000
C ₂ H ₄	30	35	220	770	14 000	62 000
C ₂ H ₂	0	0	0	0	0	20
CO	280	200	420	4300	140	11 000
CO ₂	2400	6200	25 000	17 000	3000	77 000

B.2 电弧实验室实验

台式灭弧装置是为了模拟负载分接开关触点之间的灭弧而设计的，这个定制的金属容器（18.9 L）装有阀门、取样口、清洗口和允许两个浸在液体中的埃尔科尼接触点之间形成电弧的电子馈电。采用气动执行机构和商用焊接电源调节起弧速率。

设备试验条件：140 A，开关速率设置为 50 次/min，总共运转 5000 次。绝缘油温度保持为 20 °C～24 °C，顶部空间用氮气吹扫，然后进行测试。电弧实验结果见表 B.2。

表 B.2 电弧实验结果

单位：μL/L

气体	矿物绝缘油	大豆基天然酯绝缘油
H ₂	1430	380
CH ₄	159	35
C ₂ H ₆	40	15
C ₂ H ₄	572	410
C ₂ H ₂	3510	1440
CO	0	80

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/316204134200010033>