

ICS 29.180
K 41
备案号: 16988-2006

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 984 — 2005

油浸式变压器绝缘老化判断导则

Guide for the diagnosis of insulation aging
in oil-immersed power transformer

2005-11-28 发布

2006-06-01 实施

中华人民共和国国家发展和改革委员会 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 变压器寿命及绝缘老化机理	1
4.1 变压器寿命	1
4.2 绝缘老化机理	1
5 绝缘老化判断的测试项目及原理	2
5.1 纸绝缘的聚合度	3
5.2 油中糠醛	3
5.3 油中气体	3
6 判据及影响因素	3
6.1 纸绝缘的聚合度	3
6.2 油中糠醛	4
6.3 油中一氧化碳和二氧化碳	5
附录 A (规范性附录) 绝缘纸(板)聚合度测试方法	7
附录 B (规范性附录) 油中糠醛含量(用高效液相色谱仪)测量方法	10
附录 C (资料性附录) 典型实例	12

前 言

本标准是根据《国家发展和改革委员会关于印发 2005 年行业标准项目计划的通知》（发改办工业〔2005〕739 号）的安排制定的。变压器作为输变电的主要设备，有的投运时间已较长，需要确定是否还能继续运行；有的运行中发生了绝缘局部劣化而损坏的情况，希望能提前发现故障隐患。随着测试技术的进展，运行部门希望在绝缘老化判断技术方面有所总结和加以规范，以便进一步积累经验，推广应用。

本标准的附录 A 和附录 B 是规范性附录；附录 C 是资料性附录。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业电力变压器标准化委员会归口并负责解释。

本标准起草单位：中国电力科学研究院、辽宁省电力科学研究院、西北电力试验研究院、山东电力研究院、浙江电力试验研究所、湖北省电力试验研究院。

本标准主要起草人：薛辰东、凌慙、刘富家、陈楚羽、辜超、吴锦华、王瑞珍。

油浸式变压器绝缘老化判断导则

1 范围

本标准推荐了油浸式变压器绝缘老化程度的判断方法和判据。

本标准适用于油浸式变压器、电抗器等同类电气设备。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB/T 265 石油产品运动粘度测定法和动力粘度计算法

GB/T 15164 油浸式电力变压器负载导则（idt IEC 60354:1991）

GB/T 7252 变压器油中溶解气体分析和判断导则（neq IEC 60599:1999）

GB 7597 电力用油（变压器油、汽轮机油）取样方法

DL/T 572 电力变压器运行规程

DL/T 596 电力设备预防性试验规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

聚合度 degree of polymerization

一个纤维素分子中所包含的 D—葡萄糖单体的数量，称作该纤维素分子的聚合度。组成每个纤维素分子的 D—葡萄糖单体的数量是不同的。在实验室测出的绝缘纸（板）粘均聚合度，代表该样品纤维素分子聚合度的平均水平。

4 变压器寿命及绝缘老化机理

4.1 变压器寿命

油浸式变压器寿命一般是指油纸绝缘系统的寿命。因为绝缘油可以在变压器使用寿命期间再生或更换，而纸绝缘的老化过程是不可逆的，因此变压器寿命实际是指绝缘纸和层压纸板（以下简称纸绝缘）的寿命。纸绝缘寿命的判据，主要取决于机械特性。

变压器的实际寿命除制造质量外，与运行条件关系很大。在 GB/T 15164 和 DL/T 572 中，是按“6 度法则”的相对老化率来计算相对寿命损失的。变压器运行中的热点温度是受到严格限制的。在较高温度下运行的相对寿命损失值可以用较低温度下少损失的值来补偿。变压器负载大小直接对寿命有影响，负载率较低的变压器应比负载率较高的变压器运行年限更长。正常运行的变压器应该有 30 年以上寿命，达不到预期寿命而退役，通常是设备隐患或其他原因所致。

4.2 绝缘老化机理

4.2.1 变压器油

变压器油主要是由许多不同分子量的碳氢化合物组成的混合物，基本以烷烃、环烷烃和少部分芳香烃为主。

在变压器的正常运行温度下，油不会产生热分解。油的老化虽与温度有关，但主要是氧化导致，铜是

油氧化的催化剂。实际上,对不能与氧气完全隔离的油纸绝缘设备,即使长期不运行,也同样存在老化问题。油中吸收氧在水分、温度作用下使老化加速,生成醇、醛、酮等氧化物及酸性化合物,最终析出油泥。油氧化反应形成少量的 CO 和 CO₂,随着运行中气体的积累,CO 和 CO₂ 将成为油中气体的主要组分,还有少量 H₂ 和低分子的烃类气体。烃类气体的迅速增加是在非正常的油温(有故障)下产生的。电或热故障可以使某些 C—H 键和 C—C 键断裂,伴随生成少量活泼的氢原子和不稳定的碳氢化合物的自由基,这些氢原子或自由基通过复杂的化学反应迅速重新化合,形成氢气和低分子烃类气体(如甲烷、乙烷、乙烯、乙炔等),随着不同故障能量和时间的作用也可能生成碳氢聚合物(X—蜡)及固体炭粒。

4.2.2 纤维素绝缘材料

变压器的纸绝缘属于纤维素绝缘材料,它是由大约 90% 的 α—纤维素,10% 的半纤维素及极少量的木素等构成。α—纤维素又是由约 2000 个葡萄糖单体(C₆H₁₀O₅)组成的长链状高聚合碳氢化合物,其中约有 70% 的结晶部分和 30% 的无定型部分。半纤维素是葡萄糖单体少于 200 的碳氢化合物,这种成分的少量存在会对机械强度起不利作用。

变压器的纸绝缘在热的作用下,将会发生分子裂解的化学反应,即热解降解反应。温度升高时反应加速,加之水解和氧化的作用,使绝缘材料加剧分解。运行中的变压器纸绝缘的热解降解、水解降解和氧化降解三种反应是同时存在的,这三种降解反应的机理如下:

(1) 热解降解:热解使纤维素分子链发生解环或断裂,而解环和断裂可以在纤维素分子的任何部位发生。热解也可能只发生在分子链的尾端,把最后一个环链解开,产生 CO 和 CO₂ 等气体以及糠醛及其他呋喃化合物等液体。C—O 键的热稳定性比油中的 C—H 键要弱,在正常运行温度下,键也可能被打开。在 150℃ 以上时,纤维素结构中的化学结合水开始被脱除,会发生去氢反应。在油中氧含量较多时,部分氢与氧化合成水,导致进一步水解。试验证明,纤维素的分解作用,至少在温度近 200℃ 时,仍不会产生大量烃类气体,但 CO 和 CO₂ 增加较快,这就是有些变压器绝缘导体低温过热故障,油中气体总烃含量不大的原因。

(2) 水解降解:纤维素是由许多葡萄糖基(C₆H₁₀O₅)借 1—4 配糖键连接起来的大分子,1—4 配糖键对于酸的水溶液和高温水的作用是不稳定的,容易断裂产生水解反应,即水分子透过纤维素的长分子之间,水与相邻的两个葡萄糖环的氧反应,形成两个 OH 基,各附于一个环,使聚合物分离为两个部分。每次分裂就消耗 1 个水分子。油纸氧化所产生的酸是水解作用的催化剂。纤维绝缘材料中所含水分越多,纤维素水解速度越快。

(3) 氧化降解:由于纤维素纸的葡萄糖环的碳原子存在醇羟基(CH₂OH),它的化学性质非常活泼,

氧可能侵袭第六位 C 原子形成醛基— $\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{C} \\ | \\ \text{H} \end{array}$ 。醛基再氧化而生成羧基,由于同分异构化,在葡萄糖苷碳上

形成双键。于是葡萄糖苷碳键就变得很不牢固,容易发生水解。羧基发生水解时纤维素链断裂,因此醇羟基的氧化归根到底是纤维素链发生断裂。

纤维素降解机理说明,即使是在相同的运行温度下,变压器绝缘老化速度也会因含水量、含氧量等诸多因素的不同而不同。

此外,变压器油纸绝缘处于高电场下,还会产生电老化。如果各部位绝缘的工作场强远没有超过允许的使用场强,则这种电老化相对热老化而言是很小的,可以忽略不计;如果作用场强超过了允许值,就会产生具有不同能量放电特征的绝缘分解气体。本标准对电老化的机理不作详细分析。

5 绝缘老化判断的测试项目及原理

由老化的机理可知,纸绝缘降解的结果,首先为纤维素大分子的断裂,表现为聚合度的下降和机械强度的降低;其次是伴随降解过程,可得到溶解在油中的多种老化产物,如 CO、CO₂ 和糠醛等,因此,测试变压器中纸绝缘的聚合度和油中相应老化产物的含量,可推测变压器纸绝缘的老化状态。

对变压器油老化程度的判断可按 DL/T 596 中有关规定进行。

5.1 纸绝缘的聚合度

目前运行的大型变压器所使用的新绝缘纸（板）的平均聚合度一般在 1000 左右，这时的纸绝缘有很好的韧性和强度。纸绝缘的纤维素分子在温度、氧和水分等长期作用下发生降解，大分子断链成为较小的分子，使聚合度降低、材料的韧性和强度下降。

聚合度同纸的抗张强度有相关性，因此测试样品的聚合度对判断变压器整体老化程度或对可以直接取到纸样的故障部位的老化情况是有意义的。测试纸（板）的聚合度对样品无尺寸、形状等严格要求，但需在变压器放油后采集。聚合度的测试方法见附录 A。

5.2 油中糠醛

当绝缘纸（板）劣化时，纤维素降解生成一部分 D—葡萄糖单糖，它在变压器运行条件下很不稳定，容易分解，最后产生一系列氧杂环化合物溶解在变压器油中。糠醛是纤维素大分子降解后形成的一种主要氧杂环化合物。

合格的新变压器油不含糠醛，变压器内部非纤维素绝缘材料的老化也不产生糠醛，变压器油中的糠醛是唯有纸绝缘老化才生成的产物。因此，测试油中糠醛含量，可以反映变压器纸绝缘的老化情况。测试方法见附录 B。

5.3 油中气体

监视油中气体，是变压器运行中检测内部故障有效且广泛采用的方法。充分利用每台变压器的定期测试结果，加以认真整理分析，有可能得到有关绝缘老化状态的信息，为进一步的判断提供参考。

纸绝缘的正常老化与故障情况下的劣化分解，表现在油中 CO 和 CO₂ 含量上一般没有严格的界限，规律也不明显，这主要是由于从空气中吸收的 CO₂、绝缘纸（板）老化及油的长期氧化形成 CO 和 CO₂ 的基值过高造成的。但是从变压器运行过程中的产气速率来观察，仍然有一定的规律可循。无故障变压器，在投运后的前 1 年~2 年，CO、CO₂，特别是 CO 产气率是比较高的，然后逐年下降；多年运行后，含量的增长曲线渐趋饱和。当绝缘发生局部或大面积的深度老化时，CO、CO₂ 产气速率就会剧增。当故障温度较高涉及油分解时，烃类气体也会随之增加。

6 判据及影响因素

本标准根据以往积累的经验 and 大量的数据统计，推荐以下判据。但每一个测试项目都有其局限性，应在深入了解影响测试结果的各种不同因素基础上，根据具体情况综合考虑，才能作出较确切的判断。

6.1 纸绝缘的聚合度

6.1.1 判据

新变压器纸绝缘的聚合度大多在 1000 左右。试验表明，纸的抗张强度等随聚合度下降而逐渐下降。聚合度降到 250 时，抗张强度出现突降，说明纸深度老化；聚合度约为 150 时，绝缘纸完全丧失机械强度。建议当变压器中采集的纸或纸板样品的聚合度降低到 250 时，应对该变压器的纸绝缘老化引起注意；如果从气体分析中已发现存在局部过热的可能，则部分绝缘有可能已炭化，机械强度会受到影响，此时糠醛含量也应较高，则不宜再继续运行；或鉴于对设备的可靠性要求较高，且有条件更换时，也可考虑退出运行。当纸或纸板样品的聚合度降低到近 150 时，应当考虑该变压器退出运行。具体判据见表 1。

表 1 变压器纸绝缘聚合度判据

样品聚合度 <i>DP_V</i>	>500	500~250	250~150	<150
诊断意见	良好	可以运行	注意（根据情况作决定）	退出运行

6.1.2 影响因素

尽管聚合度是表征纸的机械强度的一个重要参数，由于变压器复杂的绝缘结构和取样位置的限制，

所取纸板或垫块等样品的聚合度往往高于老化严重部位纸绝缘的聚合度。但是正常老化的变压器，其不同部位纸的聚合度分布有一定规律性（见附录 C 例 1 和例 2），因此用能取到的样品聚合度也可大致判断变压器绝缘老化状况。如果属于故障性的局部绝缘加速老化，在不能取到该老化部位样品的情况下，测试结果反映的老化程度是不真实的，只能代表取样部位的聚合度。

另一方面，样品的聚合度有时可能比实际情况偏低，如取某些引线的外包绝缘纸，即使纸已过度老化，但不一定代表变压器内部绝缘情况。引线绝缘的老化可能是引线设计电流密度过大或焊接不良，此时内层绝缘比外层绝缘老化严重；也可能是油的过度老化，因酸性腐蚀引起外层绝缘严重劣化，虽然油的过度老化对其他部位的绝缘也有影响，但引线绝缘暴露在油中的面积大，影响也大。还有，在设备检修中被焊接高温烤焦的绝缘纸的聚合度也偏低。此外，取引线绝缘时应避免取属于棉纤维的白布带。

为了从测试结果得到正确判断，应在多个部位取样（加以标明）以便尽可能真实反映整体绝缘的聚合度。

6.1.3 取样

取样部位包括线圈上下部位的垫块、绝缘纸板、引线纸绝缘、散落在油箱内的纸片等。各不同部位的取样量应大于 2g。

有吊检机会时，在下述情况下取纸样：① 油中糠醛含量超过注意值；② 负载率较高的变压器运行 25 年左右；③ 变压器准备退役前。

6.2 油中糠醛

6.2.1 判据

变压器的油中糠醛含量应随运行时间的增加而增加，但不同变压器除了制造上的固有差异外，还因运行中环境温度、负载率等不同，造成在相同运行时间内糠醛含量的分散性；另外变压器油纸比例不同，测试结果用单位体积油中糠醛的毫克量表示，使相同老化状况的不同设备的测试结果出现不同；变压器油处理也是影响糠醛含量的重要因素。从而变压器的运行时间同糠醛含量的对数之间表现为一个线性区域。根据千台以上变压器统计，大部分变压器的运行时间与油中糠醛含量在图 1 的区域 B 范围内。图 1 的区域 B 和 C 的数据占总数据的 90% 以上，区域 A 不到 10%。因此将图 1 中不同运行年限落入区域 A 的变压器油中糠醛含量的下限值 $[\log(f) = -1.65 + 0.08t]$ ，其中 f 为糠醛含量，mg/l； t 为运行年数]，作为可能存在纸绝缘非正常老化的注意值。

当油中糠醛含量落入区域 A 时，应该了解变压器在运行中是否经受或多次经受急救性负载、运行温度是否经常过高、冷却系统和油路是否异常，以及含水量是否过高等情况；绝缘的局部过热老化，也能够引起油中糠醛含量高于注意值。为了诊断设备绝缘是否的确存在故障，应当根据具体情况缩短分析周期，监测油中糠醛和 CO、CO₂ 含量及其增长速度，并应避免外界因素对测试结果的影响。对运行时间不很长（如小于 10 年）的变压器，当油中糠醛含量过高时尤其需要重视（见附录 C 例 3 和例 4）。

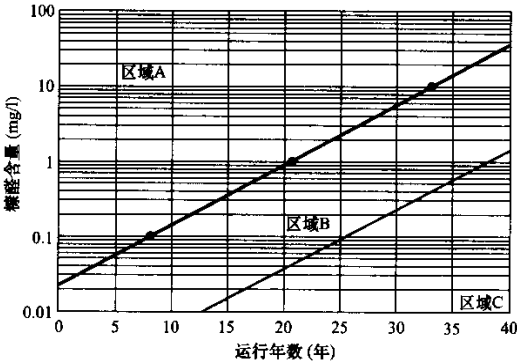


图 1 变压器油中糠醛含量同运行时间关系

6.2.2 影响因素

油中糠醛含量虽能反映绝缘老化状况，但测试结果会受多种因素影响。因此，设备在运行过程中可能出现糠醛含量波动。主要有以下影响因素：

- 作为一般多相平衡体系，糠醛在油和纸之间的平衡关系受温度影响。变压器运行温度变化时，油中糠醛含量会随之波动。
- 变压器进行真空滤油处理时，随着脱气系统真空度的提高、滤油温度的升高、脱气时间的增加，油中糠醛含量相应下降。变压器油经过某些吸附剂处理后，油中糠醛全部消失。
- 变压器油中放置硅胶（或其他吸附剂）后，由于硅胶的吸附作用，油中糠醛含量明显下降。装有净油器的变压器，油中糠醛含量随吸附剂量和吸附剂更换时间的不同而有不同程度的下降，每次更换吸附剂后可能出现一个较大降幅。
- 变压器更换新油或油经处理后，纸绝缘中仍然吸附有原变压器油。这时，油中糠醛含量先大幅度降低，然后由于纸绝缘中的糠醛向油中扩散，油中糠醛含量逐渐回升，最后达到平衡。

针对上述情况，为了弥补由于更换新油或油处理造成变压器油中糠醛含量降低，影响连续监测变压器绝缘老化状况，应当在更换新油或油处理前以及之后数周各取一个油样品，以便获得油中糠醛的变化数据。对于非强油循环冷却的变压器，油处理后可适当推迟取样时间，以便使糠醛在油纸之间达到充分的平衡。变压器继续运行后的绝缘老化判断，应当将换油或油处理前后的糠醛变化差值计算进去。

对于需要重点监视的变压器应当定期测定糠醛含量，观察变化趋势，一旦发现糠醛含量高，就应引起重视。在连续监测中，测到糠醛含量高而后又降低，往往是受干扰所致。

6.2.3 取样

按照 GB 7597 取油样。

在下述情况下取油样：① 需了解绝缘老化情况时；② 油中气体色谱分析判断有过热故障，需确定是否涉及纸绝缘时；③ 在取纸样测聚合度前；④ 大修前和变压器重新投运 1 月～2 月后；⑤ 超过注意值时，可在 1 年内检测 1 次。

6.3 油中一氧化碳和二氧化碳

GB/T 7252 中对 CO_2/CO 提供了经验判据，并对 CO 、 CO_2 产气速率提出了注意值。但对判断绝缘老化而言，与前两种方法的判据相比，用 CO 、 CO_2 判断绝缘老化的不确定性更大。根据大量变压器油中气体分析结果，得出以下判断经验：

- 正常情况下，随着运行年数的增加，绝缘材料老化，使 CO 、 CO_2 的含量逐渐增加。由于 CO_2 较易溶解于油中，而 CO 在油中的溶解度小、易逸散，因此 CO_2/CO 一般是随着运行年限的增加而逐渐变大的。当 CO_2/CO 大于 7（也有大于 10）时，认为绝缘可能老化，也可能是大面积低温过热故障引起的非正常老化，如附录 C 中实例 3 和实例 4。
- 根据对数百台 220kV 及以上隔膜密封式变压器投运后 CO 含量的增长情况分析，大致有以下几项规律：
 - 随着变压器运行时间增加， CO 含量虽有波动，总的是增加的趋势；
 - 变压器自投入运行后， CO 含量开始增加速度快，而后逐渐减缓，正常情况下不应发生陡增；
 - 不同变压器（如生产厂家不同、年代不同）投运初期 CO 含量差别很大。

据此提出以下经验公式。不满足时要引起注意。

$$C_n \leq C_{n-1} \times 1.2^{\frac{2}{n}} (\mu\text{l/l}) \quad (n \geq 2) \quad (1)$$

式中：

C_n ——运行 n 年的 CO 年平均含量；

n ——运行年数。

- 根据某地区近 150 台 220kV 及以上隔膜式密封变压器油中 CO_2 气体分析结果，得出以下经验公

式，不满足时要引起注意。

$$C \leq 1000(2+n) \quad (\mu\text{l/l}) \quad (2)$$

式中：

C ——运行 n 年的 CO_2 年平均含量；

n ——运行年数。

附录 A

(规范性附录)

绝缘纸(板)聚合度测试方法

A.1 目的

本方法是用于测定新的或者老化的绝缘纸(板)的粘均聚合度(简称聚合度,缩写用 DP_V 表示)。通过测量绝缘纸溶于铜乙二胺溶剂中的溶液特性粘度来确定纸的聚合度。

A.2 原理

根据马丁(Martin)的经验公式($k=0.14$)计算比粘度 $\eta_s < 1$ 时, η_s 函数的 $(\eta) \cdot C$ 乘积为 $0.01 \sim 0.78$ 。在这样低的浓度条件下,可以忽略切变速度的影响。在同一粘度计中可以测定溶液和稀溶剂的流出时间。由测量绝缘纸在铜乙二胺溶液的粘度和铜乙二胺稀溶剂的粘度,计算比粘度,并由此推导出溶液的特性粘度,从而计算出聚合度 DP_V 。

A.3 试剂

铜乙二胺(CED)的分子式为: $[\text{Cu}(\text{NH}_2\text{—CH}_2\text{—CH}_2\text{—NH}_2)_2](\text{OH})_2$

此溶液每升含有 1.0mol 铜和 2.0mol 乙二胺,也就是乙二胺浓度与铜浓度的克分子比是 $C_{\text{ED}}/C_{\text{Cu}}=2$ 。

A.4 仪器

A.4.1 溶解试样用仪器

- 溶解瓶:要求当装满 40ml 试验溶液时,还可将残留空气排出。可使用(45~50)ml 塑料瓶和密封用橡皮塞。
- 振荡装置。
- 玻璃球,直径 6mm 左右。
- 5mm×5mm×5mm 紫铜。
- 抽提器。

A.4.2 测量用仪器

- 毛细管粘度计,其常数 C (单位 mm^2/s^2) 应满足 $0.010 \leq C \leq 0.013$ 。
- 恒温水浴,控温在 $(20 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ 。
- 秒表,能够读准至 0.1s。

A.4.3 称量仪器

能够读准至 0.1mg。

A.4.4 烘箱

A.5 试验步骤

A.5.1 绝缘纸试样的制备

- 采用索氏抽提器,用无水乙醇抽提绝缘纸试样,必要时用氯仿使纸脱脂。
- 试样在室温下让溶剂挥发。
- 将试样浸泡在蒸馏水中 2h。
- 用尖镊子和刀片把润湿绝缘纸刮成薄膜,并撕裂成细微纤维状。
- 试样在一定湿度环境中平衡干燥。

A.5.2 溶液浓度的选择

被溶解的绝缘纸质量决定溶液的浓度。

取一定量的风干绝缘纸试样称重（精确至 0.1mg），大约是：

- a) 当 DP_v 在 100~300 之间时，称 0.125g。
- b) 当 DP_v 在 300~700 之间时，称 0.050g。
- c) 当 DP_v 在 700~1500 之间时，称 0.025g。

A.5.3 试验溶液的制备

- a) 在塑料溶解瓶中加入已称量的绝缘纸试样、铜块和玻璃球。
- b) 加入 20ml 蒸馏水，放置 0.5h，让水完全浸透试样。
- c) 用振荡器搅动溶解瓶，使所有试样润湿，并变成均匀纤维纸浆。
- d) 加入 20ml, 1mol/l 的铜乙二胺溶液。
- e) 立即排除溶解瓶内残留空气，塞紧橡皮塞。
- f) 用振荡器搅动溶解瓶，使绝缘纸试样溶解。溶解时间以 1.5h~2h 为宜。
- g) 将恒温水浴温度调整到 $20^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，将稀溶剂瓶和试样溶解瓶浸入恒温水浴中，静止 1h。

A.5.4 流出时间的测定

流出时间的测定应当符合 GB/T 265 的要求。

- a) 将稀溶剂抽吸到毛细管粘度计的上刻度线上，测量上下刻度线之间的流出时间。连续测量三次。最大和最小的流出时间差不应超过 0.5s。
- b) 用试验溶液冲洗粘度计。按 a) 所述方法，测定试验溶液的流出时间。

A.6 纸样的含水量测量

A.6.1 试样

在事先干燥并称量过的密闭称量瓶中称取一定湿度环境中平衡的纸样约 2g（精确到 1mg）。

A.6.2 含水量测量

称量后，打开称量瓶，把带有试样的瓶子和盖子一起放在烘箱中，在 $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 下加热足够的时间。试样加热至恒重。

干燥后，盖上盖子并放在干燥器中冷却 45min 左右。冷却后，迅速打开和合上盖子使称量瓶内外气压迅速地达到平衡。称量带有试样的称量瓶。

A.7 计算

A.7.1 溶液中干燥纸的浓度

纸样的含水量按下式计算：

$$H = \frac{M - M_0}{M_0}$$

式中：

H ——含水量；

M ——测定含水量用的试样干燥前的质量，g；

M_0 ——干燥后试样的质量，g。

溶液中干燥纸的浓度 C (g/100ml) 按下式计算：

$$C = \frac{100M}{40(1+H)}$$

A.7.2 比粘度 η_s

$$\eta_s = \frac{t_s - t_0}{t_0}$$

式中：

t_0 ——溶剂平均流出时间，s；

t_s ——溶液平均流出时间，s。

A.7.3 特性粘度 (η)

特性粘度是根据 Marting 公式由比粘度 η_s 和干纸浓度 C (g/100ml) 计算得出。

表 A.1 列出作为 η_s 函数的 $(\eta) \cdot C$ 乘积值。该表中，取 $k=0.14$ ，此值是在所述的操作条件下试验确定的。

表 A.1 按照 Marting 公式 ($k=0.14$) 计算的作为 η_s 函数的 $(\eta) \cdot C$ 乘积值

$(\eta) \cdot C$										
η_s	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0		0.010	0.020	0.030	0.039	0.049	0.059	0.068	0.078	0.087
0.1	0.097	0.106	0.116	0.125	0.134	0.143	0.152	0.161	0.170	0.179
0.2	0.188	0.137	0.206	0.215	0.223	0.232	0.241	0.249	0.258	0.266
0.3	0.275	0.283	0.291	0.300	0.308	0.316	0.324	0.332	0.340	0.349
0.4	0.357	0.365	0.372	0.380	0.388	0.396	0.404	0.412	0.419	0.427
0.5	0.435	0.442	0.450	0.457	0.465	0.472	0.480	0.487	0.495	0.502
0.6	0.509	0.516	0.524	0.531	0.538	0.545	0.552	0.559	0.566	0.574
0.7	0.581	0.588	0.594	0.601	0.608	0.615	0.622	0.629	0.636	0.642
0.8	0.649	0.656	0.662	0.669	0.676	0.682	0.689	0.695	0.702	0.708
0.9	0.715	0.721	0.728	0.734	0.740	0.747	0.753	0.759	0.766	0.772
1	0.778									

A.7.4 聚合度 DP_v

聚合度按下列公式计算

$$DP_v = \frac{(\eta)}{K}$$

式中： $K = 7.5 \times 10^{-3}$ ； (η) 为特性粘度。

A.8 检验结果的有效性

必须满足下列两个条件才能认为结果符合本方法要求。若有一个不满足，必须重新进行试验：

- a) 两个 DP_v 相差不应超过其平均值的 2.5%。
- b) 粘度测量后，用 3 号耐酸过滤漏斗过滤溶液。用稀盐酸洗涤过滤器和沉淀物，然后用蒸馏水洗，经过 110℃ 左右烘箱干燥后，在干燥器中冷却并称量，不溶残渣应当少于试样原始重量的 5%。

附录 B
(规范性附录)

油中糠醛含量(用高效液相色谱仪)测量方法

B.1 范围

本方法适用测定具有纤维绝缘材料的充油电气设备内部绝缘油中的糠醛含量。本方法可用于监测运行中设备的纸绝缘老化状况。

B.2 仪器与试剂

a) 高效液相色谱仪。该设备应具备:

- 1) 能够处理至少两种溶剂的高压输液系统;
- 2) 填充有十八烷基键合相的反相色谱分离柱;
- 3) 填充有同样材料的保护柱(可以不选用);
- 4) 紫外检测器, 在 274nm 波长检测为宜;
- 5) 进样量在 10 μ l~20 μ l 的进样装置, 配有合适的微量(50 μ l~250 μ l)注射器;
- 6) 数据采集系统(记录仪或积分仪)。

b) 机械振荡器。

c) 离心机。

d) 精密天平(0.1mg)。

e) 注射器, 1ml 和 10ml。

f) 试管。

g) 甲苯。

h) 甲醇。

i) 去离子水。

j) 糠醛。

B.3 取样

取样方法和样品标签见 GB 7597。

B.4 样品的萃取

用 10ml 注射器抽取 4.5ml 试样, 放入试管。用 1ml 注射器抽取 0.5ml 甲醇放入同一试管。将试管口塞住放入机械振荡器中振荡 5min, 然后取出在离心机中分离。

B.5 萃取液的分析

B.5.1 按照设备说明将液相色谱仪处于完好的运行状态。

B.5.2 按照被测电气设备的实际情况选择恰当的分离条件。推荐条件为:

a) 流动相: 水 60%~80%; 甲醇 20%~40%。

b) 流速: (0.5~2.0) ml/min。

当糠醛洗脱结束后, 可将流动相改为 100% 甲醇, 并适当加大流速, 以便尽快脱尽残余物。

B.5.3 紫外检测器的波长应调整在 274nm 附近。

B.5.4 当液相色谱测试系统处于稳定状态时, 用微量注射器仔细抽取试管中的甲醇萃取液层, 其量应

满足色谱仪的进样要求，并注入液相色谱。

B.6 标定与测量

B.6.1 标准溶液的配制

将 25mg 糠醛溶于 25ml 甲苯中，制成 1000mg/l 的糠醛稀释液。用新变压器油稀释糠醛稀释液，获得所需浓度的标准溶液（如 0.5、1.0、5 或 10mg/l）。

B.6.2 测量步骤

萃取并分析标准溶液中的糠醛含量。选取（0.5~10）mg/l 的四个标准溶液，将得到通过原点的一条直线。正常情况下，只需用 1.0mg/l 的标准溶液进行标定。

萃取并分析试样中的糠醛含量。

B.7 计算方法

测试响应系数按照以下公式进行计算：

$$F = C_s / R_s$$

式中：

F ——测试响应系数；

C_s ——标准溶液糠醛含量；

R_s ——检测器对标准溶液的响应值（糠醛的峰高或峰面积）。

样品的糠醛含量按照以下公式进行计算：

$$C = F \cdot R$$

式中：

C ——样品的糠醛含量，mg/l；

R ——检测器对样品的响应值（糠醛的峰高或峰面积）。

糠醛含量数据应表示到 0.01mg/l。

B.8 最小检测量

对于用新油配制的标准溶液，最小检测量应不大于 0.05mg/l。

B.9 测量结果的重复性

对于同一样品，在同一条件下（同一操作者、同一设备、同一试验室及较短时间间隔内）进行两次试验，测量值一般不大于平均值的 10%。当糠醛含量较低时，重复性将降低；对于老化的变压器油，由于老化产物的影响，重复性会进一步降低。

附 录 C
(资料性附录)
典 型 实 例

例 1: 某电厂 1 号、2 号两台 20000kVA/110kV 升压变压器, 分别自 1959 年和 1958 年投入运行, 经常负载率较大, 运行 30 年后测试油中糠醛和纸的聚合度结果见表 C.1 和表 C.2, 说明绝缘老化严重。

表 C.1 油中糠醛含量

样品	1 号变压器	2 号变压器
糠醛 (mg/l)	11.32	5.19
情况说明	1979 年前曾进行大修滤油, 后运行至 1989 年吊检, 并测油中糠醛和聚合度	1978 年前大修滤油, 1987 年处理油介损高, 经真空滤油, 1988 年吊检, 并测油中糠醛和聚合度

表 C.2 聚合度测试结果

取样部位	1 号主变压器		2 号主变压器		
	10kV A 相绝缘纸	35kV B 相绝缘纸	35kV 引线中间绝缘层	5mm 厚线圈绝缘压板 (上部)	固定 10kV 引线处的绝缘纸板
聚合度	228	288	213	163	262
样品观感	用手撕纸样时有脆裂感, 能将纸样捏成碎块, 未见黑色碳化物; 35kV 绝缘纸样略有韧性		样品可明显看到绝缘老化引起的炭化现象; 手捏时有脆裂和疏松感。引线内靠近导体绝缘炭化尤为严重, 外层绝缘强度略好, 说明引线绝缘以导体温度引起的老化为主, 测试取中间部分样品		

由试验结果可知, 变压器油中糠醛含量很高, 绝缘纸聚合度偏低, 不同部位的样品表明, 绝缘老化并非仅在局部范围, 而属整体绝缘老化, 应考虑更换新变压器。如因备品原因仍需继续运行一段时间, 由于绝缘机械强度已很差, 应采取安全措施; 防止出口短路, 不宜采取急救性负载运行方式, 加强运行监视。

例 2: 一台 SFPL—120000/220 升压变压器, 变压器额定电压 $242 \pm 2 \times 2.5\% / 10.5\text{kV}$; 铁心为三芯五柱, 高压线圈分为两部分, 布置方式为: 铁心—高压 II—低压—高压 I。

1974 年投运, 1991 年 8 月退出运行, 1992 年对该变压器进行了拆修和改造。为了对该变压器经 17 年运行后的绝缘老化情况有个全面了解, 利用变压器拆解的机会, 取不同部位绝缘纸 (板) 样作聚合度测试, 从而得到该变压器绝缘老化程度的分布情况。

1. 运行情况

(1) 变压器累计运行 132740h, 其中最大年运行时间为 8406h, 最小为 6993h。机组以 100MW 为基本负荷连续运行。运行电流以 6.0kA~6.3kA 居多, 最大 6.5kA 并带有两台厂用变压器 (通常负载约 6MW)。该变压器低压 10.5kV 侧额定电流为 6.6kA, 因此不会有超过铭牌出力的记录。

(2) 曾加装一台自制的水冷却器, 控制油温较低, 以 70℃作为限值, 通常上层油温冬季为 32℃~36℃, 夏季最高为 64℃~69℃。

(3) 投运约 3 年时曾发生 B 相高压 I 线圈端部匝间短路, 由于围屏高度仅至上压板下第 5 饼处, 因而弧光殃及 A 相, 导致 A、B 相 3~4 饼对应处相间短路。后在现场将 A、B 相高压线圈 I 的 1~4 饼重新绕制修复, 再次投入运行。

(4) 1988 年 10 月分析油中气体, 发现 H₂ 含量明显增加 (111μl/l), 烃类气体正常。1989 年 11 月 H₂ 达 381μl/l。1990 年 7 月 H₂ 约 400 μl/l、油中含水量 44 mg/l、击穿电压 26.2kV, 随即进行滤油脱气,

脱气后继续运行，H₂略有回升，至1991年停运前H₂已达130μl/l，油中含水量为47mg/l。

2. 绝缘老化测试

(1) 油中糠醛测试结果。从1987年开始测定油中糠醛含量，结果见表C.3。

由表中结果可知，糠醛含量高于同期运行的变压器水平，且以较高的速度增长。

表 C.3 糠醛测试结果

取样时间（年）	1987	1988	1990
糠醛含量（mg/l）	0.62	1.10	2.26

(2) 绝缘外观情况。变压器各线圈的绝缘纸呈棕黄色，部分棕红色，手掰时质脆、易折断；油道垫块、围屏呈棕色，撕开时可见纤维；低压引线绝缘严重炭化，高压引线有部分炭化现象。

(3) 聚合度测试结果。取样：考虑其对称性，线圈绝缘仅取B、C相的高Ⅰ、低压、高Ⅱ，其中上部和下部样品分别指上压板下2~3饼及下部2~3饼处取样。此外，考虑到一般正常吊检的变压器可取得的线圈油道垫块、围屏和引线外包绝缘纸样，在此也进行取样测试，以观察其代表性。

聚合度测试结果分别见表C.4~表C.7。

表 C.4 C相线圈绝缘聚合度

聚合度 线圈名	线圈中部匝绝缘		线圈上部匝绝缘	垫块		外围屏	引线
	B相侧	旁轭侧	旁轭侧	上部	中部	下部	
高压Ⅰ	257	279	263	368	382	433	238
高压Ⅱ	250	269	258	—	—	—	—
低压	162	168	157	—	—	—	192

表 C.5 线饼不同幅向位置匝绝缘聚合度

取样线饼之线圈	高压Ⅰ	高压Ⅱ	低压
内径侧	270	277	170
外径侧	268	281	165

表 C.6 线圈不同轴向位置匝绝缘聚合度

低压线圈	上部	中部	下部
	157	165	191

表 C.7 不同相的对应部位匝绝缘聚合度

相别及取样线圈	高压Ⅰ	高压Ⅱ	低压
C相	263	258	157
B相	278	269	176

3. 结果分析

(1) 从油中糠醛和聚合度的测试结果来看，该变压器应属非正常老化（因比同龄设备老化程度更严重），但从运行情况分析，并非因超过铭牌出力等因素使运行温度过高而引起，从油中气体监测和吊检后剖析可知，该变压器并不存在因局部高温引起局部绝缘过热老化的情况。因此，可能是因绝缘含水量过高而导致的加速老化，且因为是升压变压器，变压器经常处于较大的负载下运行，使纤维素在电场和温度的作用下，因水解作用使裂解加速（运行后期H₂含量升高、油中含水量较高也可说明）。

(2) 由于上述老化作用因素分布是比较均匀的，因而各不同部位老化程度的差异仍然与变压器各部

位运行温度的分布有关，从测试结果看，有以下一些规律：

- 1) 随着变压器运行温度由下部至上部逐渐升高，匝绝缘的聚合度由下至上逐渐下降。
- 2) 高压Ⅱ线圈布置在内，高压Ⅰ线圈在外部，内部老化比外部略严重一些，但差别不大。低压线圈（设计不同）老化程度比高压线圈严重。
- 3) 线圈轴向中部靠近 B 相一侧的匝绝缘比旁轭一侧的聚合度略低，可能与靠近旁轭一侧的油温偏低有关，也可能与导向油流的差异有关，就数值上的差别还难以说明其规律性；且同一饼线圈不同幅向位置上的匝绝缘老化情况应视为无差别。
- 4) 线圈匝绝缘的聚合度低于线饼间垫块的聚合度；上部垫块的聚合度低于下部垫块，但均低于围屏的聚合度。从该变压器测试结果可知，引线与匝绝缘的聚合度比较相近，但由于引线受电流密度的设计（差别较大）和受绝缘油性能的影响关系较大，因而不能说明具有普遍性。

（3）鉴于通常变压器测试绝缘聚合度时，以垫块、围屏纸板和引线绝缘作为判据样品，因此本导则推荐聚合度的判断指标并非指匝间绝缘的聚合度。虽然匝绝缘的聚合度更低，但从运行经验来看，纤维素绝缘纸的降解，对电气强度的影响不是直接的（炭化除外），对机械强度的丧失是直接的，是否在运行中损坏，还受外部因素的影响，这就是老化程度相同的变压器不一定同时损坏的原因。引线绝缘的聚合度作为参考值，还是有意义的（见 6.1.2）。

例 3：一台配 200MW 发电机组的 SFPSL7—240000/220 升压变压器，1981 年 9 月投运，1992 年 6 月事故烧损。

正常运行负荷率为 90% 左右，上层油温一般不超过 70℃。投运后除进行油中气体监测外，从 1988 年开始对油中糠醛进行测量。油中糠醛和事故前两次油中气体的分析结果见表 C.8、表 C.9。

表 C.8 油中糠醛测试结果 mg/l

测试时间（年）	1988	1989	1990	1991	1992
糠醛含量	1.63	1.41	1.38	1.79	2.18

表 C.9 油中气体测试结果 μl/l

测试时间	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO	CO ₂	总烃	CO ₂ /CO
1992.4	24	28	24	30	—	1590	26395	82	16.6
1992.5	34	37	32	39	—	2412	47201	107	19.6

由表 C.8 和表 C.9 可知，油中气体总烃含量并不高，但 CO、CO₂ 值及增长率均很高，且 CO₂/CO 值很大。在事故前的 1~2 个月中 CO 的产气速率在 1000ml/d 以上，CO₂ 的产气速率超过 25000ml/d。与运行年限相近的变压器比较，油中糠醛含量也远远大于 0.2mg/l 左右的注意值。

1992 年 6 月 11 日正常运行中主变压器轻重瓦斯动作、防爆筒喷油。吊检发现：故障发生在 A 相低压线圈下数第 3~4 段，最外一组数根导线烧熔；单半螺旋结构的低压线圈设计的 1.5mm 油道已全部堵塞，4.5mm 油道仅能插入 1.4mm 纸条；低压线圈上下端 1~5 段绝缘均有烧焦痕迹，并有露铝现象，导线段间绝缘纸均有炭化或深度老化情况。

事故原因是由于油道堵塞、冷却油流受阻，引起长时间低温过热，使低压线圈绝缘加速老化。经实际不到 10 年的运行时间，使匝（段）间绝缘脆裂甚至炭化，在电磁振动下绝缘性能破坏，形成短路环流而烧损。

例 4：一台配 200MW 机组的 SFP3—260000/220 升压变压器。低压线圈为单半螺旋换位导线绕制。1983 年 10 月投运，运行中油中气体及糠醛分析发现绝缘老化严重。1993 年 8 月吊检，很大一部分绝缘严重老化被得到证实，避免了一次绝缘击穿事故。

历年油中气体 CO、CO₂ 和糠醛测试结果见表 C.10、表 C.11。

表 C.10 油中 CO、CO₂ 及总烃测试结果

测试时间	1983 年	1984 年	1985 年	1986 年	1987 年	1988 年	1989 年	1990 年	1991 年	1992 年	1993 年
CO (μl/l)	156	930	1162	1468	966	1050	1060	1105	1325	1557	1152
CO ₂ (μl/l)	990	4113	6778	13498	8597	8536	7425	8129	10075	11851	10483
总烃 (μl/l)	4.0	15	17	46	46	42	40	52	41	31	38
CO ₂ /CO	6.3	4.4	5.8	9.2	8.9	8.1	7.0	7.4	7.6	7.6	9.1

表 C.11 油中糠醛含量测试结果

测试时间	1988 年	1990 年	1991 年	1992 年 6 月	1992 年 10 月
糠醛含量 (mg/l)	3.6	2.85	未测	0.29	0.21

该变压器虽然运行正常，总烃含量也十分低，但由表 C.10、表 C.11 可知，CO、CO₂ 含量增长十分异常，变压器运行约 5 年时间，糠醛已达 3.6mg/l。基于对绝缘过热故障的担心，运行部门决定彻底检查。在 1993 年 8 月吊检发现：低压线圈整体过热，线圈幅向油道有明显黑烟散发痕迹，绝缘纸均呈深红色，半螺旋处 1.5mm 油道未加垫块多处堵塞，6mm 油道仅剩 1mm~1.5mm。其中 B 相线圈绝缘的焦糊程度较两个边相更为严重。

由此可见，变压器退出运行进行检查是十分及时的。表 C.11 反映的一个问题需说明，就是该变压器的糠醛含量为什么 1988 年开始测试时如此之高，而后又大幅度的下降？从检修记录可知，该变压器在 1990 年大修，除油经过处理外，并在变压器净油器中加装了活性氧化铝。因此在大修后，原来纸中吸收的和运行中继续产生的糠醛，被吸附剂不断吸收所致。变压器运行约 5 年，糠醛含量达到 3.6mg/l，说明该变压器的绝缘过热面积很大，几乎波及整个三相低压线圈，但温度最高处的局部绝缘炭化还没有达到导致匝（层）间击穿的程度（从油的热分解产生的烃类气体含量很少也可得到证明），因而吊检前还能正常运行。

需强调的是：由于变压器油中糠醛是唯有纸（板）绝缘老化才出现的产物，只要测试正确，测到糠醛含量高，就代表纤维素绝缘老化严重；反之，含量低时，不一定说明老化不严重，因外界因素只能使测到的含量降低而不会使含量自动升高。因此，一旦发现测试结果高时，必须引起重视，后来数值变低，往往是受干扰所致。