

中华人民共和国能源行业标准

NB/T 42093.1 — 2016

干式变压器绝缘系统 热评定试验规程 第 1 部分: 600V 以上绕组

Insulating systems of dry-type transformers Test procedure for thermal
evaluation Part 1: Winding above 600V

2016-12-05 发布

2017-05-01 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 基本原则..... 2

5 试验程序..... 3

6 报告..... 11

参考文献..... 12

前 言

本部分按照 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写规则》给出的规则起草。

NB/T 42093—2016《干式变压器绝缘系统 热评定试验规程》由以下两部分组成：

——第 1 部分：600V 以上绕组；

——第 2 部分：600V 及以下绕组。

本部分为 NB/T 42093—2016 的第 1 部分。

本部分由中国电器工业协会提出。

本部分由全国电气绝缘材料与绝缘系统评定标准化技术委员会（SAC/TC 301）归口。

本部分主要起草单位：上海电器设备检测所、上海电器科学研究所（集团）有限公司、机械工业北京电工技术经济研究所、三变科技股份有限公司、浙江德通变压器有限公司、杜邦中国集团有限公司、北京大学深圳研究院、株洲时代新材料科技股份有限公司、海鸿电气有限公司、广州广高高压电器有限公司、沈阳变压器研究股份有限公司、桂林电器科学研究院有限公司、上海添唯认证技术有限公司。

本部分主要起草人：黄慧洁、管兆杰、刘亚丽、陶剑、郭振岩、张晓晶、陈昊、骆金海、曾智、居学成、梁庆宁、孟庆民、刘贤龙、罗传勇、李园园、汪双灿、邢国华、刘贤文、张生德、赵超、刘贤群、陈荣勤。

本部分为首次制定。

干式变压器绝缘系统 热评定试验规程

第 1 部分：600V 以上绕组

1 范围

本部分规定了干式变压器绝缘系统的热评定试验规程。

本部分适用于 600V 以上绕组的干式变压器绝缘系统。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 11026.4 电气绝缘材料 耐热性 第 4 部分：老化烘箱 单室烘箱

ASTM E104 通过水溶液方法保持恒定的相对湿度的标准实践

IEEE Std 4 高压试验的 IEEE 标准技术

IEEE Std C57.12.58 干式变压器线圈瞬态电压分析的 IEEE 操作导则

IEEE Std C57.12.60 干式变压器（浸渍式、浇注固化式和树脂包封式）绝缘系统热评定试验规程

IEEE Std C57.98 变压器冲击试验的 IEEE 导则

IEEE Std 101 热寿命试验数据统计分析的 IEEE 导则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

电气绝缘材料 electrical insulation material; EIM

具有可忽略不计的低电导率的材料，用于隔离电工设备中不同电位的导电部件。

3.2

电气绝缘系统 electrical insulation system; EIS

用于电气设备的与导电部分结合在一起的含有一种或多种电气绝缘材料（EIM）的绝缘组合。

注：按照 GB/T 20112，不同温度指数的 EIM 可组合成 EIS，其耐热等级可高于或低于任何单一组分的耐热等级。

3.3

耐热等级 thermal class EIS

EIS 相对应的最高连续使用温度（摄氏温度）的数值。

注 1：EIS 经受超过其耐热等级的运行温度将导致更短的预期寿命。

注 2：EIS 连续运行 40 000h 相对应的最高使用温度（℃）。

3.4

绕组 winding

构成与变压器标注的某一电压值相对应的电气线路的一组线匝。

3.5

线圈 coil

一组串联的线匝，通常是同轴的。

NB / T 42093.1 — 2016**3.6****试品 test object**

被试验的物品。试品可以是实际变压器或模型线圈。试品可包含不止一个试样。

3.7**试样 test specimen**

试品内的独立组件，可用来得到一组试验数据（如失效时间）。

注：试样可包含不止一个绝缘组件（例如匝间绝缘或对地绝缘），其中任意一个都能提供该组数据。

3.8**影响因子 factor of influence**

由运行条件、环境条件或影响绝缘系统老化或寿命的试验条件施加的应力。

3.9**老化 ageing**

由于一个或多个影响因子作用而引起 EIS 性能的不可逆变化。

注 1：若环境条件变化，则某些变化（例如水解变化）可能部分可逆。

注 2：老化可能导致 EIS 的降解。

3.10**老化因子 ageing factor**

引起老化的影响因子。

3.11**耐久性试验 endurance test**

试品绝缘结构暴露于一个或者多个与运行条件有关的老化因子的试验。在试验中通过诊断试验来评定特定性能的变化。

4 基本原则**4.1 概要**

本部分提出的方法以保留基本冲击绝缘水平为基础，适用于高压绕组，不适用于额定电压为 600V 及以下的低压绕组。若有必要进行感应耐压试验或为高压绕组提供接地层，可以以任意合适的方式模拟低压绕组。

4.2 老化因子

虽然主要老化因子为温度和时间，但高压绝缘系统的失效准则假定是与初始介电强度或额定基本冲击电压水平有关的电压。因此，在加速热老化期间通过热老化周期后的介电试验来确定绝缘系统的失效时间。

阿伦尼斯（Arrhenius）方程是本部分的理论基础。

本部分规定的试验方法属于加速方法，因而需要对在试验温度下获得的失效时间进行阿累尼乌斯外推（寿命对数与绝对温度倒数的关系），以获得绝缘系统的耐热等级。由于加速试验的条件通常是严格的，数据外推得到的失效时间将比实际运行的失效时间短。对于耐热等级的确定，以 40 000h 失效时间作为耐热等级的最低认可准则，见第 6 章 c) 4)。

4.3 数据处理

为了确保获得的有效结果没有偏差并适用于比较研究，应统计性地减少试验数据并应根据第 6 章要求记录结果。

一般应根据 5.1.1 描述的方法 1 进行试验，适用时也可以采用 5.1.2 描述的方法 2。

外推法仅适用于绝缘系统相同部位的失效。如果绝缘系统中不止一个部位发生失效，应单独处理每种失效模式的数据。同样地，应单独外推每种失效模式以确定耐热等级，用获得的最低外推温度代表整个绝缘系统的耐热等级。

5 试验程序

5.1 概述

5.1.1 方法 1

当没有绝缘系统基准寿命曲线时，可使用方法 1。除用于监测温度的控制样品之外，每个温度点下需要测试至少 3 个样品（使用全尺寸线圈时）或至少 12 个样品（使用模型线圈时）。选取 3 个（或更多）温度点进行试验。表 1 列出了建议的老化试验温度和每周期曝露时间。5.2~5.4 给出了模型结构和试验程序的详细信息。

表 1 建议老化试验温度和每周期曝露时间

建议老化 试验温度	预期的耐热等级 ℃						建议每周期 曝露时间 h
	105	130	155	180	220	250	
θ_1	135	165	195	230	275	310	336
θ_2	150	180	215	250	300	340	96
θ_3	165	200	235	270	325	375	24

注： θ_1 、 θ_2 、 θ_3 代表不同的试验温度。

5.1.2 方法 2

如果绝缘系统的热降解特性已知，可使用方法 2，并通过如式（1）所示的阿伦尼斯方程来实现：

$$t_i = Ae^{b/T}$$
 (1)

式中：

- t_i ——表示失效时间，单位为小时（h）；
- A ——常数，代表阿伦尼斯寿命曲线纵坐标截距；
- e ——常数，数值为 2.718；
- b ——失效时间温度关系中一个比率因子，取决于绝缘系统，代表阿伦尼斯曲线的斜率；
- T ——绝对温度，单位为开尔文（K）。

如果根据方法 1（见 5.1.1）进行的试验已确定 A 和 b ，那么在这种情况下，只需一组样品（ n 为样品数量）在一个温度点 T_2 （单位为 K）下进行试验，根据式（2）进行推导：

$$T_1 = \frac{b}{\ln\left(\frac{t_{11}}{t_{12}}\right) + \left(\frac{b}{T_2}\right)}$$
 (2)

式中：

- t_{11} ——40 000h 的基准寿命；
- T_1 ——温度极限，单位为开尔文（K），用于计算出预期等于或大于 t_{11} （40 000h）的失效时间；

NB / T 42093.1 — 2016

\bar{t}_{12} ——试验温度 T_2 下样品的平均失效时间（单位与 t_{11} 相同），用式（3）计算 \bar{t}_{12} ；
 T_2 ——试验温度，单位为开尔文（K）。

$$\bar{t}_{12} = \frac{t_{12(1)} + t_{12(2)} + t_{12(3)} + \cdots + t_{12(n)}}{n} \tag{3}$$

式中：
 $t_{12(n)}$ ——某个样品的 t_{12} 值；
 t_{12} ——试验温度 T_2 下样品失效时间的测量值；
 n ——在温度 T_2 下试验时的样品数量。

5.2 试验样品

5.2.1 模型设计的考虑

试验样品可以是下述一种：

- a) 变压器线圈。试验样品应是全尺寸的产品线圈。这些线圈应有合适的尺寸大小，既便于进行试验操作，也能提供所代表的电压等级需要的典型电气间隙。试验线圈的物理尺寸应接近于 500kVA~800kVA 的三相变压器线圈。经过筛选试验（见 5.3）后，通过提高温度对线圈进行加速老化试验，以确定它们的功能寿命。由于全尺寸变压器线圈能够很好地代表待评绝缘系统，可以采用每组 4 个样品线圈在不少于 3 个温度下进行试验，且每组指定 1 个线圈作为参考线圈，以测量试验温度。
- b) 典型模型线圈。作为选择之一，可以采用能够对所有可能的失效模式进行测试的绝缘系统典型模型线圈进行试验。经过筛选试验（见 5.3）后，通过提高温度对线圈进行加速老化试验，以确定它们的功能寿命。采用每组 13 个样品线圈在不少于 3 个温度下进行试验，且每组指定 1 个线圈作为参考线圈。

所有样品应该按照表 2 所示做好标识。为了准确评价热老化对变压器绝缘系统的影响，典型模型线圈应满足以下要求：

- a) 代表由热降解引起变压器绕组电气完整性劣化的关键绝缘系统；
- b) 模拟实际电应力（冲击或低频），以确定热老化后绕组绝缘系统的功能寿命；
- c) 采用并绕导线以模拟匝间结构并进行试验。

表 2 模型线圈标识

组 号	样 品 号	温度（参考表 1）
I	1~12	X
II	13~24	Y
III	25~36	Z

5.2.2 模型示例

制备模型应能模拟它们代表的绕组设计，包括支撑绝缘、最小电气间隙及树脂和环氧化合物等的浸渍处理。制备模型绕组分段时应确保能够进行匝间、层间、饼间、段间、绕组间和绕组对地的介电测试。

图 1 和图 2 分别列举了非包封式绕组和包封式绕组可能的线圈结构。图 3 列举了多层包封式绕组模型的构造，该图是从单一包封工艺生产多重测试线圈的技术举例。

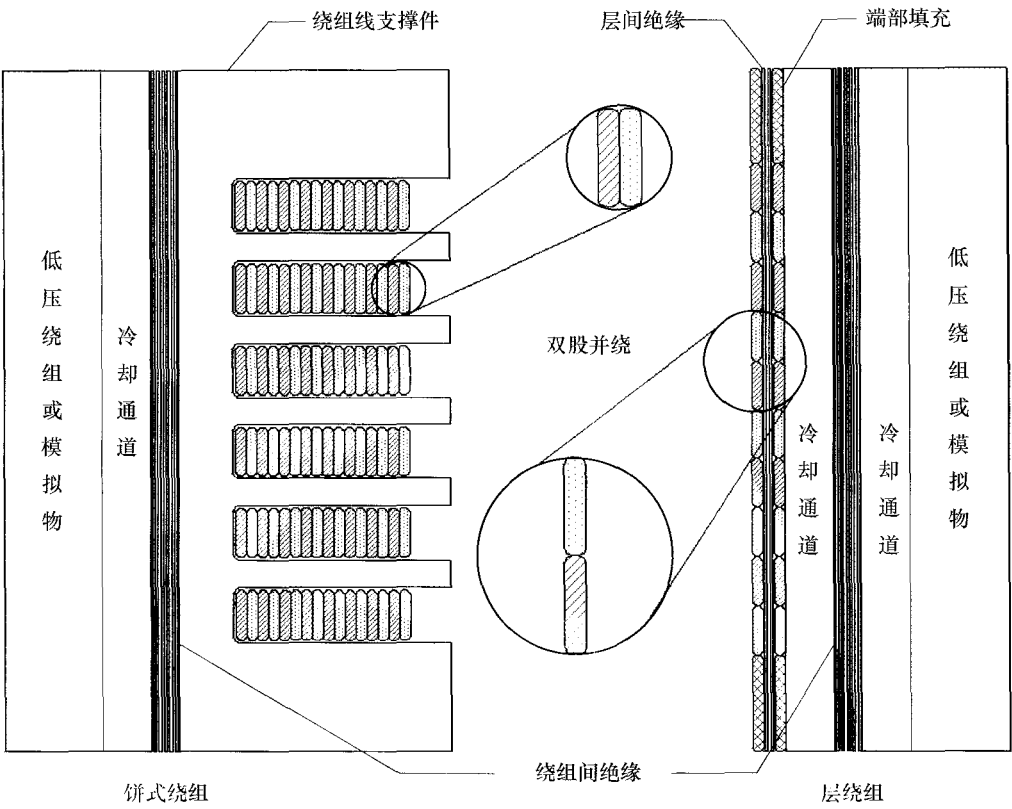


图 1 非包封式绕组模型举例

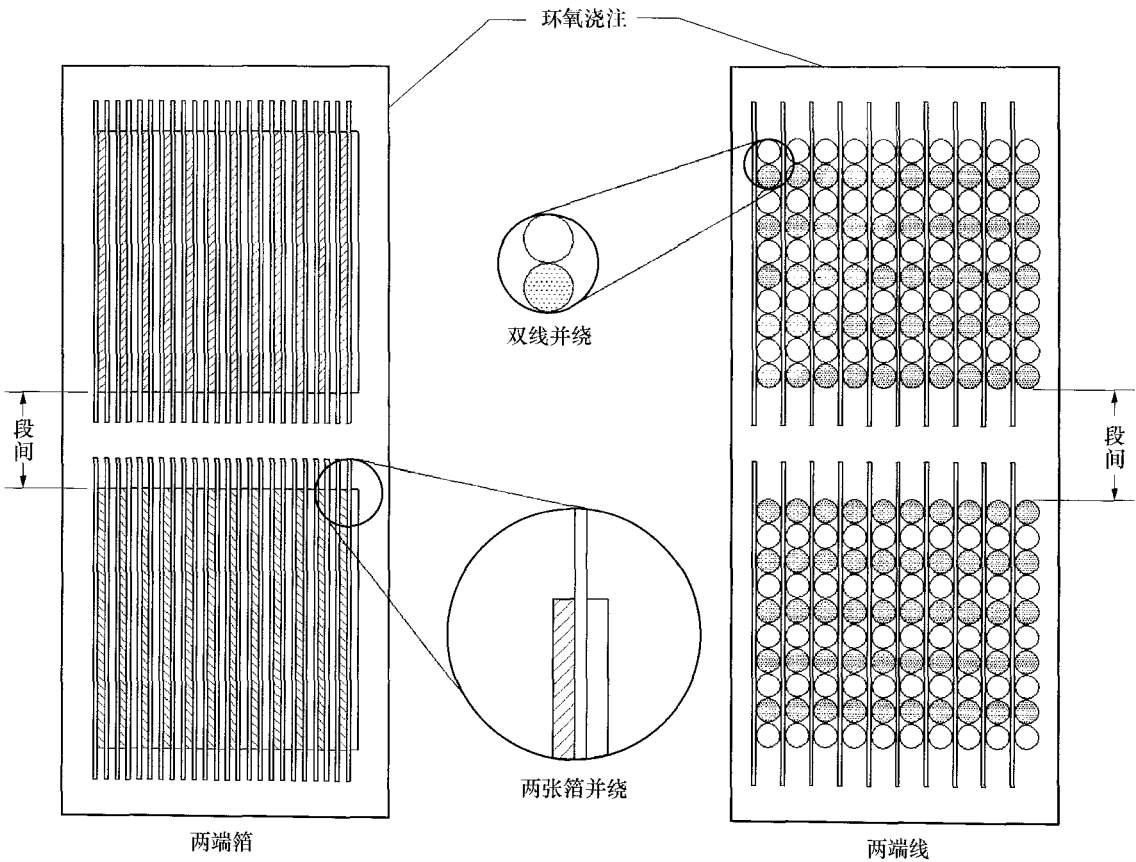


图 2 包封式绕组模型举例

NB / T 42093.1 — 2016

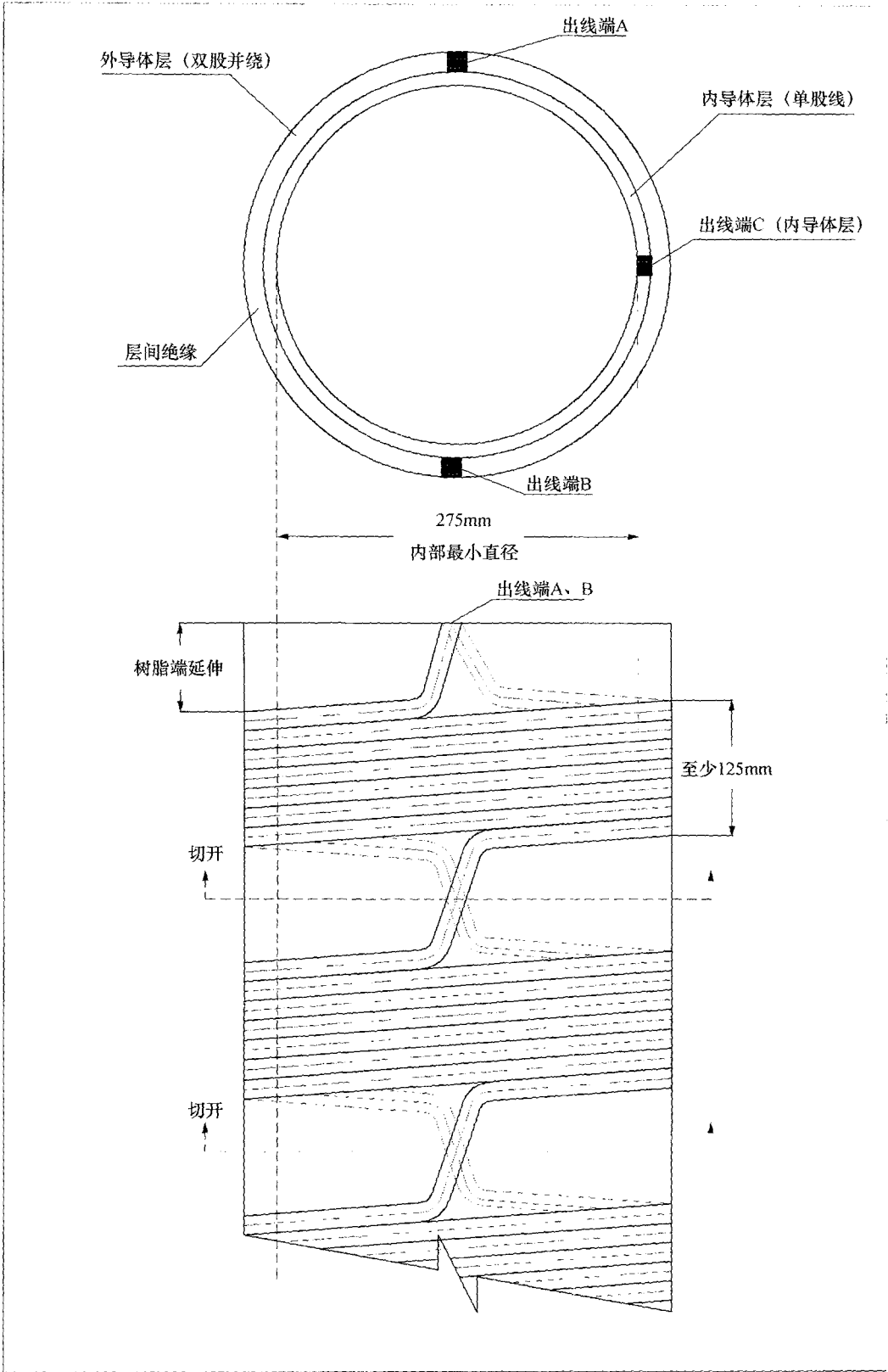


图3 多层包封式绕组模型构造

双股匝间介电测试在两个相邻导体间进行，相邻导体可以是被电气绝缘材料隔离的绕组线或箔。绕组线的绝缘可以采用任何适当的电气绝缘方式处理。对于箔式绕组，介电测试在被电气绝缘材料隔

离的相邻箔层间进行。

层间介电测试在被电气绝缘材料隔离的变压器绕组的相邻两层导体间进行。饼间介电测试在饼式绕组结构中相邻饼被绝缘隔离的导体间进行。

绕组间介电测试在变压器的两个线圈间进行，例如，被电气绝缘材料隔离的高压线圈对低压线圈。可以用金属接地排模拟低压线圈。两线圈间的隔离可以采用固体绝缘和/或空气。

绕组对地介电测试在铁芯和绕组间进行。可以用金属接地排模拟铁芯，铁芯和绕组间的隔离可以采用固体绝缘和/或空气。图 4 是绕组间和绕组对地试验装置的示例。

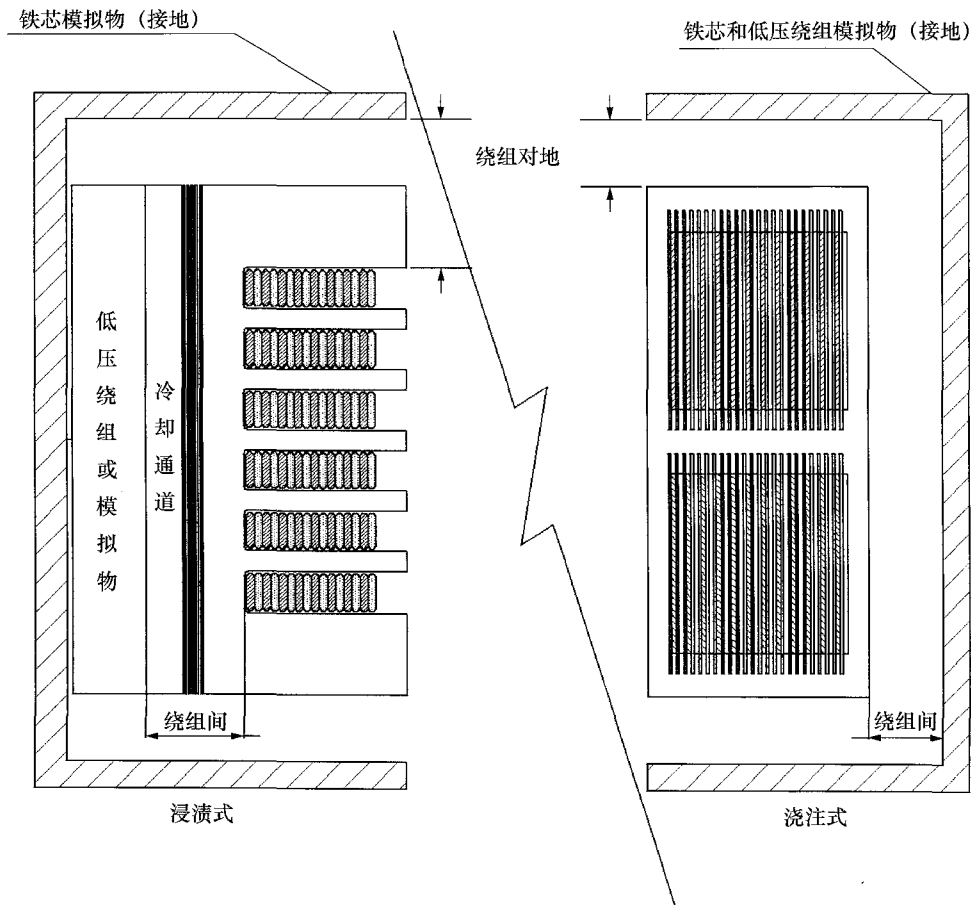


图 4 绕组间和绕组对地试验装置示例

5.3 试验规程

5.3.1 初始筛选试验

在第一个热老化试验周期之前，应该对所有试样进行初始筛选试验。初始筛选试验应该包括 5.3.2 中除热老化之外的所有试验。不能通过初始筛选试验的试样应被剔除。

5.3.2 重复试验周期

试样通过初始筛选试验之后，开始进行重复试验周期。每个重复试验周期应由以下部分组成并按以下顺序进行：

- a) 热老化试验（见 5.3.2.1）；
- b) 冷冲击试验（见 5.3.2.2）；

- c) 潮湿试验（见 5.3.2.3）；
- d) 潮湿条件下的介电试验（见 5.3.2.4）。

如有必要，可根据变压器实际运行情况增加相应的试验。例如，对于船用变压器，可在热老化试验后增加振动试验。

5.3.2.1 热老化试验

5.3.2.1.1 加热方法

加热方式可采用环电流加热或热老化箱加热，或者由两种方法组合。

当试品为变压器线圈时，宜采用环电流加热；当试品为典型模型线圈时，可采用热老化箱加热。应根据 GB/T 11026.4 选择试验用热老化箱并控制温度。

5.3.2.1.2 热老化温度和周期时间

不管所使用的是哪一种热老化方法，都应遵守以下原则：

- a) 在热老化期间应周期地记录试验温度以确定平均热点温度。选择的老化温度和暴露时间应使试品在（5~10）个周期内达到试样的平均失效时间。当在不同温度下测试几组样品时，应选择不同的试验周期以获得大约相同的平均失效周期数。
- b) 任意一组试样应在同一温度下进行热老化直至失效。表 1 可作为选择试验温度的依据，也可采用其他的时间和温度组合以符合某些特殊绝缘系统的老化特性。如果在第 7 个周期结束时试样还没有失效，剩余周期的老化时间可延长至小于之前周期的两倍。如果失效发生在第 4 个周期结束时，剩余周期的老化时间可缩短至不小于之前周期时间的一半。

表 1 中的不同温度和时间仅作为选择老化温度和时间的依据，不应期望根据表 1 中的温度和时间进行试验会使所有绝缘系统产生相同的终点。

在某个温度下老化样品的失效时间 t_2 应等于温度暴露的累积时间减去最后周期时间的一半，见式（4）：

$$t_2 = c \cdot t_\theta / n - \frac{1}{2} t_\theta / n \quad (4)$$

式中：

- t_2 —— 试验失效时间；
- c —— 在老化周期数；
- n —— 周期数；
- t_θ —— 在该温度下每周期的时间。

5.3.2.2 冷冲击试验

冷冲击试验仅适用于采用包封式绕组的变压器绝缘系统。

热老化后使试品冷却至室温，然后将其置于合适容器中直至样品温度达到-30℃。达到-30℃后允许将试品加热至室温，然后进行潮湿试验。

对于全尺寸线圈，可通过测量绕组绝缘电阻，或安装合适的接地热电偶（其应能测量线圈内部温度）来确定温度。对于典型模型线圈，由热电偶测得的参考样品温度来确定所有试品的温度。应将参考样品与试品一起进行试验。

5.3.2.3 潮湿试验

潮湿试验应在不通电的情况下进行，并符合以下条件：

- a) 试品在潮湿试验之前应恢复到室温;
- b) 潮湿曝露最小持续时间为 48h;
- c) 潮湿曝露试验时, 试品应放置在一个合适的箱体内部, 相对湿度不小于 90%。

作为维持湿度的一个方法, 试验箱底部可以盖一个平的装有饱和食盐溶液的容器 (见 ASTM E104-85, 方法 A 或 C)。箱体内提供吹风机或风扇, 安装有效的水蒸气防护材料 (例如铝箔)。潮湿温度应维持在 25℃~40℃。

5.3.2.4 介电试验

5.3.2.4.1 概述

初始筛选试验和周期终点介电试验应根据需要选择方法 A (见 5.3.2.4.2) 或方法 B (见 5.3.2.4.3)。介电试验应在潮湿条件下进行。适用时, 应按以下顺序进行试验:

- a) 匝间;
- b) 层间;
- c) 饼间;
- d) 段间;
- e) 绕组间;
- f) 绕组对地。

电气击穿或电压无法保持时应诊断为失效。

5.3.2.4.2 方法 A

方法 A 用于全尺寸变压器线圈的老化。介电试验应在线圈从潮湿箱移出 2h 内进行。初始筛选试验和周期性终点试验应该按以下步骤进行:

- a) 雷电冲击试验。对 3 个全尺寸变压器线圈进行雷电冲击试验, 按照 IEEE Std 4 中相关要求, 冲击电压为 75%全波冲击 (BIL) 电压。

对于每个线圈, 应对安装在二次绕组的铁芯进行冲击试验, 二次绕组不是试验的一部分, 但是必须存在以进行感应耐压试验并为雷电冲击试验提供接地层。冲击电压应施加在试验线圈的首端与末端、铁芯和二次接地间。通过在试验线圈的末端和首端、铁芯和二次接地间施加冲击以重复该试验。

- b) 感应耐压试验。

在雷电冲击试验后进行倍频感应试验, 试验条件为 150%的额定二次电压、频率不小于 120Hz, 进行 7200 个周期。

如果无失效发生, 线圈重新开始下一个热老化周期。

5.3.2.4.3 方法 B

方法 B 用于典型模型线圈的老化。介电试验应在线圈从潮湿箱移出 2h 内进行。

从对待评变压器类型绕组的暂态电压分析 (见 IEEE Std C57.12.58), 确定每一种可能的失效模式 (匝间、层间等) 下可能出现的全波冲击 (BIL) 电压的最大百分比 (见 IEEE Std C57.98)。

不同失效模式下的全波冲击电压的最大百分比可以通过暂态分析点的电压探头测量确定。最大百分比电压可以由绕组内冲击电压的初始分布或电网对冲击电压的响应电压引起。最大匝间电位差通常发生在接近线圈线端或中性点处。最大层间电位差通常发生在第一层和第二层之间, 从段式线圈的端部开始或从桶式线圈端部第一层到第二层开始。最大段间电位差通常发生在从端点开始的第一段到第二段或第二段到第三段。最大段对地电位差通常发生在终端的某个段对地端。最大绕组对地电位差通常发生在某个段对地端, 或桶式线圈的层对地端。对于连续的饼式绕组, 其最大对地电位差通常发

生在从线性端点开始的第六段到第十二段。通常有必要通过使用暂态分析设备做许多测试来确定每个失效模式的最大可能电压。

筛选和终点试验应该依据 IEEE Std 4, 用 $1.2 \times 50 \mu\text{s}$ 正全波冲击试验完成, 其他试验波形应该符合以下要求:

- a) 对匝间冲击试验, 电压应为峰值 170V 或按照式 (5) 计算得到的较大值。制造商可以选择更高电压。
- b) 对其他试验点, 按式 (5) 计算试验电压:

$$U = \frac{U_{\max}(\%) \cdot U_{\text{FW}} \times 1000 \times 0.75}{100}$$

(5)

式中:

- U —— 试验电压, 单位为伏特 (V);
- $U_{\max}(\%)$ —— 发生在失效模式点的全波冲击电压的最大百分比;
- U_{FW} —— 全波冲击电压, 单位为千伏 (kV)。

图 3 所示的示例线圈, 终端连接见图 5, 每个试样的试验顺序应按表 3 进行。

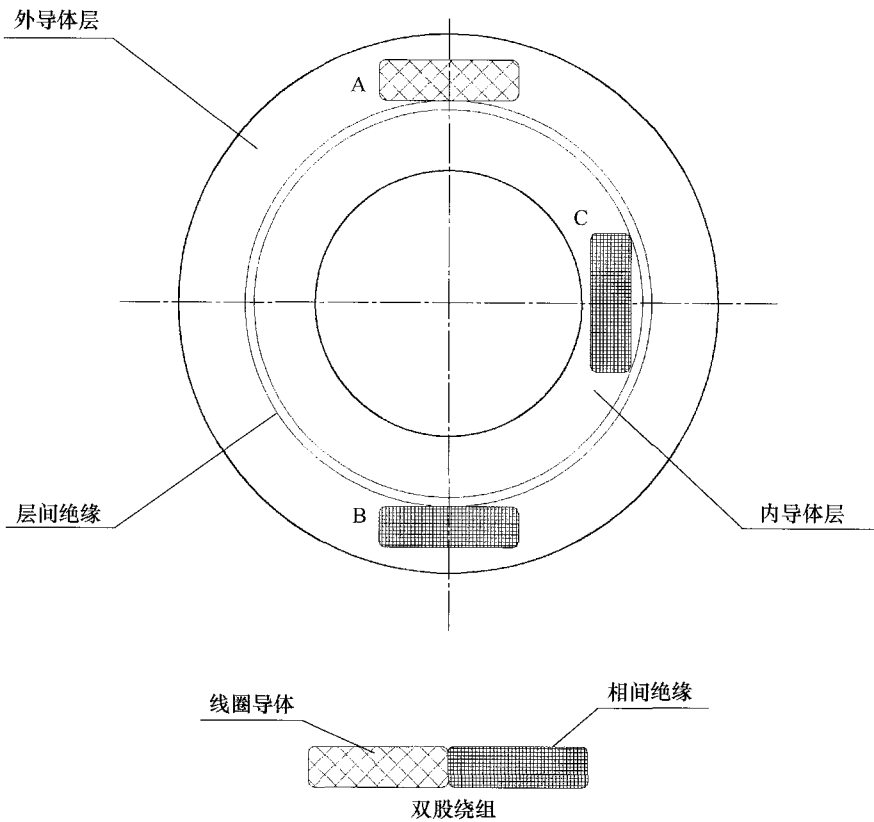


图 5 样品模型的终端连接

表 3 冲击电压的试验连接方法

试 验		端 子 连 接	
号码	类型	接地	加冲击电压
1	匝间	B	A
2	层间	A 和 B	C

表 3（续）

试 验		端 子 连 接	
号码	类型	接地	加冲击电压
3	绕组间	低压绕组或内部接地排	C
4	绕组对地	终端接地排铁芯	A、B 和 C

5.4 试验模型的失效

对于一个试样，任何试验失效后将不能再用于进一步试验。其他的线圈继续开始下一个试验周期。

6 报告

试验报告应根据 IEEE Std 101 统计数据，用于建立回归线。结果报告应包含以下信息：

- a) 试验样品的确认或描述；
- b) 温度暴露的持续时间，用到达失效的总小时数表达，与 5.3.2.1 一致，记录试验周期数；
- c) 如果应用方法 1（见 5.1.1）的试验程序，报告应包含以下内容：
 - 1) 线性度的计算值，如果数值不适合，应补充额外的数据；
 - 2) 从老化曲线计算得到的失效时间对温度的表格值；
 - 3) 在坐标图上，绘制纵坐标的失效时间（h）对数和横坐标的绝对温度倒数数据点；
 - 4) 对应失效时间为 40 000h 的温度外推值；
 - 5) 绝缘系统耐热等级（℃）。
- d) 如果应用方法 2（见 5.1.2）的试验程序，报告应包含以下内容：
 - 1) 样品的平均寿命值（ t_2 ）；
 - 2) 利用式（2）计算得到的对应失效时间 t_1 （40 000h）的温度；
 - 3) 绝缘系统耐热等级（℃）。

参 考 文 献

GB/T 20112 电气绝缘系统的评定与鉴别
