

# 中华人民共和国机械行业标准

**JB/T 501—2021**

代替 JB/T 501—2006

## 电力变压器试验导则

**Test guide for power transformers**

2021-05-17 发布

2021-10-01 实施



**中华人民共和国工业和信息化部 发布**

## 目 次

|                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| 前言 .....                                                                  | III |
| 1 范围 .....                                                                | 1   |
| 2 规范性引用文件 .....                                                           | 1   |
| 3 油浸式电力变压器试验 .....                                                        | 2   |
| 4 干式电力变压器试验 .....                                                         | 54  |
| 图 1 单相变压器电压比测量接线示意图（油浸式电力变压器） .....                                       | 12  |
| 图 2 三相变压器电压比测量接线示意图（油浸式电力变压器） .....                                       | 13  |
| 图 3 三相变压器负载试验接线示意图（油浸式电力变压器） .....                                        | 14  |
| 图 4 单相变压器负载试验接线示意图（油浸式电力变压器） .....                                        | 14  |
| 图 5 三相变压器空载试验接线示意图（油浸式电力变压器） .....                                        | 17  |
| 图 6 单相变压器空载试验接线示意图（油浸式电力变压器） .....                                        | 17  |
| 图 7 外施耐电压试验典型接线示意图（油浸式电力变压器） .....                                        | 23  |
| 图 8 感应耐电压试验典型接线示意图（油浸式电力变压器） .....                                        | 24  |
| 图 9 带有局部放电测量的感应耐电压试验接线示意图 .....                                           | 25  |
| 图 10 带有局部放电测量的感应耐电压试验施加电压的时间顺序 .....                                      | 26  |
| 图 11 三相三绕组变压器线端交流耐电压试验典型接线示意图 .....                                       | 28  |
| 图 12 单相变压器中性点外接支撑电位的线端交流耐电压试验典型接线示意图 .....                                | 28  |
| 图 13 绕组对地电容测量接线示意图（“反接”法） .....                                           | 31  |
| 图 14 计算机程序外推冷却曲线 .....                                                    | 35  |
| 图 15 不带冷却设备的变压器声级测量时传声器的典型位置 .....                                        | 38  |
| 图 16 冷却设备直接安装在油箱上或冷却设备在距主油箱基准发射面小于 3m 处分体式安装的<br>变压器声级测量时传声器的典型位置 .....   | 39  |
| 图 17 风冷却设备独立安装在油箱上或冷却设备在距主油箱基准发射面小于 3 m 处分体式安装的<br>变压器声级测量时传声器的典型位置 ..... | 40  |
| 图 18 距变压器基准发射面距离 3 m 及以上处分体式安装的冷却设备声级测量时传声器的典型位置 .....                    | 41  |
| 图 19 风扇和油泵电动机功率测量原理图 .....                                                | 45  |
| 图 20 暂态电压传输特性试验接线示意图 .....                                                | 46  |
| 图 21 三相变压器零序阻抗试验原理接线图 .....                                               | 46  |
| 图 22 三相变压器短路承受能力试验接线示意图 .....                                             | 49  |
| 图 23 油流静电试验接线示意图 .....                                                    | 53  |
| 图 24 绕组电阻测量试验接线示意图 .....                                                  | 56  |
| 图 25 单相变压器电压比测量接线示意图（干式电力变压器） .....                                       | 57  |
| 图 26 三相变压器电压比测量接线示意图（干式电力变压器） .....                                       | 57  |
| 图 27 单相变压器负载试验接线示意图（干式电力变压器） .....                                        | 58  |
| 图 28 三相变压器负载试验接线示意图（干式电力变压器） .....                                        | 59  |
| 图 29 单相变压器空载试验接线示意图（干式电力变压器） .....                                        | 61  |
| 图 30 三相变压器空载试验接线示意图（干式电力变压器） .....                                        | 61  |

|      |                              |    |
|------|------------------------------|----|
| 图 31 | 外施耐电压试验接线示意图（干式电力变压器） .....  | 64 |
| 图 32 | 感应耐电压试验接线示意图（干式电力变压器） .....  | 65 |
| 图 33 | 单相变压器局部放电测量的接线示意图 .....      | 65 |
| 图 34 | 三相变压器局部放电测量的接线示意图 .....      | 66 |
| 图 35 | 局部放电例行试验的施加电压方式 .....        | 66 |
| 图 36 | 局部放电特殊试验的施加电压方式 .....        | 67 |
| 图 37 | 单相相互负载法接线示意图 .....           | 69 |
| 图 38 | 三相相互负载法接线示意图 .....           | 69 |
| 图 39 | 确定切断电源瞬间热电阻温度的方法 .....       | 71 |
| 图 40 | 无保护外壳变压器声级测量的测量点示意图 .....    | 73 |
| 表 1  | 油浸式电力变压器试验项目 .....           | 2  |
| 表 2  | 绝缘油耐电压规定值 .....              | 5  |
| 表 3  | 绝缘油含水量规定值 .....              | 8  |
| 表 4  | 绝缘油含气量规定值 .....              | 9  |
| 表 5  | 绝缘油溶解气体气相色谱分析含量值 .....       | 11 |
| 表 6  | 变压器绕组电阻不平衡率判定要求 .....        | 12 |
| 表 7  | 油浸式电力变压器负载损耗和短路阻抗的允许偏差 ..... | 16 |
| 表 8  | 双绕组变压器绝缘电阻测量的组合方式 .....      | 18 |
| 表 9  | 三绕组变压器绝缘电阻测量的组合方式 .....      | 19 |
| 表 10 | 不同类别变压器的要求与试验项目 .....        | 20 |
| 表 11 | 绕组的试验电压水平 .....              | 20 |
| 表 12 | 分级绝缘变压器中性点端子的试验电压水平 .....    | 21 |
| 表 13 | 双绕组变压器绕组对地和绕组间电容测量组合方式 ..... | 31 |
| 表 14 | 三绕组变压器绕组对地和绕组间电容测量组合方式 ..... | 31 |
| 表 15 | 试验接受准则（油浸式电力变压器） .....       | 42 |
| 表 16 | YNyn0d11 的试品零序阻抗测量组合 .....   | 47 |
| 表 17 | YNyn0yn0 的试品零序阻抗测量组合 .....   | 47 |
| 表 18 | 干式电力变压器试验项目 .....            | 54 |
| 表 19 | 试验顺序 .....                   | 55 |
| 表 20 | 干式电力变压器负载损耗和短路阻抗的允许偏差 .....  | 60 |
| 表 21 | 绝缘电阻测量组合方式 .....             | 62 |
| 表 22 | 干式电力变压器绝缘水平 .....            | 63 |
| 表 23 | 绕组温升限值 .....                 | 72 |
| 表 24 | 试验接受准则（干式电力变压器） .....        | 74 |

## 前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准代替 JB/T 501—2006《电力变压器试验导则》，与 JB/T 501—2006 相比主要技术变化如下：

- 对规范性引用文件进行了调整；
- 对标准的整体结构进行了调整，将油浸式电力变压器与干式电力变压器的相关内容分别作为独立的章节；
- 取消了主要符号的章节，将符号在相应公式下面进行说明；
- 增加了油浸式电力变压器的绝缘试验顺序；
- 对试验项目的排列顺序进行了调整；
- 对绝缘试验中的试验项目进行了修改，增加了带有局部放电测量的感应耐电压试验（IVPD）、线端交流耐电压试验（LTAC），取消了短时感应耐电压试验（ACSD）、长时感应耐电压试验（ACLD）；
- 新增了液浸式变压器真空变形试验、液浸式变压器压力变形试验，取消了油箱机械强度试验；
- 将绝缘特性测量调整为绕组对地及绕组间直流绝缘电阻测量、铁心和夹件绝缘检查、绕组对地和绕组间电容测量和绝缘系统电容的介质损耗因数  $\tan\delta$  测量；
- 增加了压力密封试验、内装电流互感器变比和极性试验、短时过负载能力试验、强迫油循环变压器冷却油流系统的负压测试、暂态电压传输特性测定、频率响应测量、外部涂层检查、运输质量测定、油箱开裂试验、运输颠簸试验、所有分接位置的负载损耗测量、长时间空载试验、油流静电试验、转动油泵时的局部放电测量、环境试验、气候试验和燃烧性能试验。

本标准由中国机械工业联合会提出。

本标准由全国变压器标准化技术委员会（SAC/TC 44）归口。

本标准起草单位：沈阳变压器研究院股份有限公司、国家变压器质量监督检验中心、中国电力科学研究院有限公司、特变电工沈阳变压器集团有限公司、西安西电变压器有限责任公司、特变电工衡阳变压器有限公司、山东输变电设备有限公司、顺特电气设备有限公司、特变电工股份有限公司新疆变压器厂、明珠电气股份有限公司、江苏华鹏变压器有限公司、江苏华辰变压器股份有限公司、海鸿电气有限公司、浙江江山变压器股份有限公司、鲁特电工股份有限公司。

本标准主要起草人：吕祥鹏、李世成、刘锡忠、张显忠、任晓红、刘丰、吕建玉、邹宇星、刘永、肖明、虞金华、蔡定国、周国伟、徐健、梁庆宁、姜振军、张令健。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为：

- JB/T 501—1964、JB/T 501—1991、JB/T 501—2006。

# 电力变压器试验导则

## 1 范围

本标准规定了油浸式电力变压器和干式电力变压器的例行试验、型式试验和特殊试验的程序及方法。

本标准适用于油浸式电力变压器和干式电力变压器的试验。

特种变压器的试验可参照执行。

## 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 507 绝缘油 击穿电压测定法

GB/T 1094.1—2013 电力变压器 第1部分：总则

GB/T 1094.2—2013 电力变压器 第2部分：液浸式变压器的温升

GB/T 1094.3—2017 电力变压器 第3部分：绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙

GB/T 1094.4 电力变压器 第4部分：电力变压器和电抗器的雷电冲击和操作冲击试验导则

GB/T 1094.5 电力变压器 第5部分：承受短路的能力

GB/T 1094.10 电力变压器 第10部分：声级测定

GB/T 1094.11 电力变压器 第11部分：干式变压器

GB/T 1094.18 电力变压器 第18部分：频率响应测量

GB/T 3785.1—2010 电声学 声级计 第1部分：规范

GB/T 3785.2—2010 电声学 声级计 第2部分：型式评价试验

GB/T 4893.4 家具表面漆膜理化性能试验 第4部分：附着力交叉切割测定法

GB/T 4956 磁性基体上非磁性覆盖层 覆盖层厚度测量 磁性法

GB/T 5654 液体绝缘材料 相对电容率、介质损耗因数和直流电阻率的测量

GB/T 6451—2015 油浸式电力变压器技术参数和要求

GB/T 7354 高电压试验技术 局部放电测量

GB/T 7597 电力用油（变压器油、汽轮机油）取样方法

GB/T 7600 运行中变压器油和汽轮机油水分含量测定法（库仑法）

GB/T 7601 运行中变压器油、汽轮机油水分测定法（气相色谱法）

GB/T 10228 干式电力变压器技术参数和要求

GB/T 13499 电力变压器应用导则

GB/T 17623 绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定法

GB/T 22072 干式非晶合金铁心配电变压器技术参数和要求

DL/T 423 绝缘油中含气量测定方法 真空压差法

DL/T 703 绝缘油中含气量的气相色谱测定法

DL/T 911 电力变压器绕组变形的频率响应分析法

JB/T 10088 6 kV~1 000 kV 级电力变压器声级

## 3 油浸式电力变压器试验

## 3.1 试验项目

例行试验、型式试验及特殊试验的项目按照 GB/T 1094.1 和 GB/T 6451 的规定，详见本标准表 1。

表1 油浸式电力变压器试验项目

| 序号   | 试验                                                                                        | 条款    |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 例行试验 |                                                                                           |       |
| 1    | 绝缘油试验                                                                                     | 3.4   |
| 2    | 绕组电阻测量                                                                                    | 3.5   |
| 3    | 电压比测量和联结组标号检定                                                                             | 3.6   |
| 4    | 短路阻抗和负载损耗测量                                                                               | 3.7   |
| 5    | 空载损耗和空载电流测量                                                                               | 3.8   |
| 6    | 绕组对地及绕组间直流绝缘电阻测量                                                                          | 3.9   |
| 7    | 绝缘例行试验                                                                                    | 3.10  |
| 8    | 有载分接开关试验（适用于有载调压变压器）                                                                      | 3.11  |
| 9    | 压力密封试验                                                                                    | 3.12  |
| 10   | 内装电流互感器变比和极性试验                                                                            | 3.13  |
| 11   | 铁心和夹件绝缘检查                                                                                 | 3.14  |
| 12   | 绕组对地和绕组间电容测量（适用于额定容量为 8 000 kVA 及以上的电压等级 35 kV 变压器和电压等级 66 kV 及以上的所有变压器）                  | 3.15  |
| 13   | 绝缘系统电容的介质损耗因数 $\tan\delta$ 测量（适用于额定容量为 8 000 kVA 及以上的电压等级 35 kV 变压器和电压等级 66 kV 及以上的所有变压器） | 3.16  |
| 14   | 在 90%和 110%额定电压下的空载损耗和空载电流测量（适用于设备最高电压 $U_m > 72.5$ kV 的所有变压器）                            | 3.29  |
| 15   | 除分接开关油室外的每个独立油室的绝缘油中溶解气体测量（适用于设备最高电压 $U_m > 72.5$ kV 的所有变压器）                              | 3.4.6 |
| 型式试验 |                                                                                           |       |
| 16   | 绝缘型式试验                                                                                    | 3.10  |
| 17   | 温升试验                                                                                      | 3.17  |
| 18   | 声级测定                                                                                      | 3.18  |
| 19   | 风扇和油泵电动机吸取功率测量                                                                            | 3.19  |
| 20   | 短时过负载能力试验（适用于配电变压器）                                                                       | 3.27  |
| 21   | 强迫油循环变压器冷却油流系统的负压测试                                                                       | 3.28  |
| 22   | 在 90%和 110%额定电压下的空载损耗和空载电流测量                                                              | 3.29  |
| 特殊试验 |                                                                                           |       |
| 23   | 绝缘特殊试验                                                                                    | 3.10  |
| 24   | 绕组对地和绕组间电容测量                                                                              | 3.15  |
| 25   | 绝缘系统电容的介质损耗因数 $\tan\delta$ 测量                                                             | 3.16  |

表1 油浸式电力变压器试验项目（续）

| 序号   | 试验                                                                                                | 条款   |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 特殊试验 |                                                                                                   |      |
| 26   | 暂态电压传输特性测定                                                                                        | 3.20 |
| 27   | 三相变压器零序阻抗测量                                                                                       | 3.21 |
| 28   | 短路承受能力试验                                                                                          | 3.22 |
| 29   | 液浸式变压器真空变形试验                                                                                      | 3.23 |
| 30   | 液浸式变压器压力变形试验                                                                                      | 3.23 |
| 31   | 外部涂层检查                                                                                            | 3.24 |
| 32   | 运输质量测定                                                                                            | 3.25 |
| 33   | 频率响应测量                                                                                            | 3.26 |
| 34   | 油箱开裂试验（适用于电压等级 10 kV 的配电变压器）                                                                      | 3.30 |
| 35   | 运输颠簸试验（适用于电压等级 35 kV 及以下的配电变压器）                                                                   | 3.31 |
| 36   | 所有分接位置的负载损耗测量（适用于额定容量为 20 000 kVA 及以上的具有独立调压绕组的电压等级 35 kV、66 kV 变压器和电压等级 110 kV 及以上的具有独立调压绕组的变压器） | 3.32 |
| 37   | 长时间空载试验（适用于电压等级 220 kV 及以上的变压器）                                                                   | 3.33 |
| 38   | 油流静电试验（适用于电压等级 220 kV 及以上的强迫油循环变压器）                                                               | 3.34 |
| 39   | 转动油泵时的局部放电测量（适用于电压等级 220 kV 及以上的强迫油循环变压器）                                                         | 3.35 |

### 3.2 绝缘试验顺序

绝缘试验前至少应完成以下试验项目：绝缘油试验，绕组电阻测量，电压比测量和联结组标号检定，绕组对地及绕组间直流绝缘电阻测量，铁心和夹件绝缘检查。对于设备最高电压  $U_m > 72.5$  kV 的变压器还应完成绕组对地和绕组间电容测量，绝缘系统电容的介质损耗因数  $\tan\delta$  测量，空载损耗和空载电流测量。

绝缘试验顺序一般应按照 GB/T 1094.3 的规定执行。试验顺序如下：

- 雷电冲击试验（LI、LIC、LIN、LIMT，如果规定）；
- 线端操作冲击试验（SI，如果规定）；
- 外施耐电压试验（AV）；
- 线端交流耐电压试验（LTAC，如果规定）；
- 感应耐电压试验（IVW，如果规定）；
- 带有局部放电测量的感应耐电压试验（IVPD，如果规定）。

经制造方与用户协商同意，绝缘试验顺序也可以进行少量的更改，如果线端操作冲击试验在雷电冲击试验前进行，在绝缘试验前应增加带有局部放电测量的感应耐电压试验（IVPD）。

如果要求进行带有局部放电测量的感应耐电压试验（IVPD），那么带有局部放电测量的感应耐电压试验（IVPD）应作为最后进行的绝缘试验。

### 3.3 一般试验条件

本条是对油浸式电力变压器一般试验条件的要求，如果试验项目中无具体的规定，则应按本条执行。

一般试验条件包括：

- 除绝缘试验和温升试验外，试验应在  $5^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$  的环境温度下进行。
- 温升试验宜在介于  $5^{\circ}\text{C}$  与变压器设计所依据的最高环境温度之间进行。

- 绝缘试验时，绝缘系统的温度应不低于 5℃，但允许高于 40℃。
- 有可能影响变压器性能的外部组件和装置，均应安装在规定的位置上。
- 试验应在主分接上进行，试验条款另有规定或供需双方另有协议时除外。
- 参考温度应按照以下规定选取：
  - 对于额定绕组平均温升不大于 65 K（OF 或 ON 冷却方式）或 70 K（OD 冷却方式）的液浸式变压器：
    - 参考温度为 75℃；
    - 按照用户要求，参考温度选取额定绕组平均温升加 20℃和额定绕组平均温升加外部冷却介质年平均温度两者之中的较高者。
  - 对于其他额定绕组平均温升值的液浸式变压器，参考温度选取额定绕组平均温升加 20℃和额定绕组平均温升加外部冷却介质年平均温度两者之中的较高者。
- 测量及试验时的工频电源频率或变压器额定频率的偏差应在 1%以内。
- 试验电源电压波形中的谐波含量不应超过 5%。除空载损耗和空载电流测量按照规定进行波形校正外，其他损耗测量不应考虑谐波含量而将损耗向下校正。
- 当采用三相电源时，电源电压应对称，试验时，施加到每个相绕组上的最高电压与最低电压之差不应超过最低电压的 3%。

制造方对其在额定频率下试验或测量能力方面的任何不足，均应在投标书中说明，并与用户协商采取适当的转换系数。

### 3.4 绝缘油试验

#### 3.4.1 概述

绝缘油的例行试验包括击穿电压测量、介质损耗因数测量、含水量测定、含气量测定及溶解气体气相色谱分析。

#### 3.4.2 击穿电压测量

##### 3.4.2.1 试验目的

绝缘油的击穿电压是衡量绝缘油被水和悬浮杂质污染程度的重要指标。绝缘油的击穿电压越低，变压器的整体绝缘性能就越差，直接影响变压器的安全运行。因此应严格测试，以便将绝缘油击穿电压控制在不同范围内。

##### 3.4.2.2 试验方法

绝缘油击穿电压测量的试验方法按 GB/T 507 的规定执行。

##### 3.4.2.3 试验仪器

本标准推荐使用全自动击穿电压测试仪-油试验器，整套仪器应满足以下条件：

- 油杯：由透明的绝缘材料制成，且对绝缘油和所有清洗剂具有化学惰性。有效容积在 350 mL～600 mL 范围内，并带有封盖。
- 电极：由黄铜或不锈钢磨制而成，形状可以是球形或球盖形（蘑菇形），几何尺寸应满足 GB/T 507 的规定，电极距离为  $2.5\text{ mm} \pm 0.05\text{ mm}$ 。
- 调压装置：采用自动升压系统，可采用自耦式调压器或电阻分压器。
- 变压器：采用低压侧电源为 50 Hz 的升压变压器；高压侧输出电压波形应为近似正弦波，峰值因数应在  $\sqrt{2}(1 \pm 7\%)$  范围内，升压速度控制在  $(2\text{ kV} \pm 0.2\text{ kV})/\text{s}$ ，并且当电压大于 15 kV 时，变压器的最小短路电流应大于 20 mA。

- 保护装置：包括与试验电极串联的限流电阻和接在一次电路上的断路器，断路器应在试样击穿后 0.01 s 内受击穿电流作用而动作，以保护试验设备。
- 其他部分：仪器应有自动搅拌器和安全防尘罩，最好具有自动显示和记录击穿电压值、计算平均值与规定值的偏差、打印试验结果的功能。

### 3.4.2.4 试品取样

试品按 GB/T 7597 规定的方法取样。

### 3.4.2.5 试验过程

试验过程如下：

- a) 熟悉仪器使用说明书，按要求连接试验仪器并调试正常，且仪器经计量部门检定合格。
- b) 首次使用时应拆卸电极，用清洗剂彻底清洗电极和油杯，再用蒸馏水清洗几遍，用电吹风彻底吹干；安装电极时应用标准规调整电极间隙到 2.5 mm；正常使用情况下不必每次拆洗电极。
- c) 将平衡到室温的试验用绝缘油（与环境温度之差小于 5℃）倒入油杯，并洗刷两次，最后倒入油杯的试验用绝缘油油面至少超过电极 40 mm。
- d) 盖上安全防尘罩，选定标准值，按“开始”键，仪器自动开始测试；每测试完 1 次，仪器打印 1 次击穿电压值；在测试完 6 次后，仪器打印出 6 次击穿电压的平均值与规定值的偏差。

### 3.4.2.6 注意事项

注意事项如下：

- 检测交流电源，在保证仪器要求的情况下才能接通电源；
- 仪器外壳和接地点应可靠接地；
- 油杯和电极清洗后，严禁用手或不洁净物接触；
- 油杯较长时间未用或测得击穿电压值过低（低于 10 kV）时，应按 3.4.2.5b) 的要求重新清洗；
- 环境相对湿度不得大于 75%；
- 确认仪器检定有效期，标准规也应定期检定，其厚度应保证在  $(2.5 \pm 0.05)$  mm 范围内；
- 样品测量平均值与规定值的偏差超过规定值的  $\pm 10\%$  时应引起注意，此时最好重复取样做平行试验，以便证实结果是否由操作不当所引起。

### 3.4.2.7 结果的判定

技术协议没有规定时，试验结果的合格判定按表 2 的规定。

表2 绝缘油耐电压规定值

| 电压等级<br>kV | 击穿电压<br>kV |
|------------|------------|
| $\leq 35$  | $\geq 40$  |
| 66~220     | $\geq 45$  |
| 330        | $\geq 55$  |
| 500        | $\geq 65$  |

技术协议有特殊规定时，按技术协议的规定判定结果是否合格。

### 3.4.3 介质损耗因数测量

#### 3.4.3.1 试验目的

绝缘油介质损耗因数是衡量绝缘油本身绝缘性能和被杂质污染程度的重要参数。绝缘油的损耗因数越大，变压器的整体介质损耗因数也就越大，绝缘电阻相应降低，油纸绝缘的寿命也会缩短。因此应严格测试，以便将绝缘油的介质损耗因数控制在较低范围内。

#### 3.4.3.2 试验方法

绝缘油介质损耗因数试验方法按 GB/T 5654 的规定执行。

#### 3.4.3.3 试验仪器

绝缘油介质损耗因数一般采用电桥及配套装置或介质损耗因数测量仪进行测量。

具体要求如下：

- 主机：具有分辨率为  $10^{-5}$  的交流（工频）电桥；
- 电极杯：采用零件易于拆卸和清洗、重新装配后空杯电容量不易改变的三端电极杯；
- 恒温加热装置：应能保持温度在规定值  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  以内。

#### 3.4.3.4 试品取样

试品按 GB/T 7597 规定的方法取样。

#### 3.4.3.5 试验过程

试验过程如下：

- a) 熟悉仪器使用说明书，按要求连接试验仪器并调试正常，且仪器经计量部门检定合格；
  - b) 完全拆卸电极杯，先用丙酮、后用洗涤剂彻底清洗，再用蒸馏水清洗几遍，并放到蒸馏水中煮沸 1 h，然后放在鼓风干燥箱里干燥 1 h~2 h，再重新装配电极；
  - c) 测量空杯介质损耗因数应接近零，电容量应在规定值范围内；
  - d) 用试验用绝缘油洗刷三次油杯，正式测试时按规定量（一般 40 mL~45 mL）倒入试验用绝缘油；
  - e) 接通恒温加热装置，给试验用绝缘油加热至规定温度，按规定施加电压、测试，测试过程不宜超过 10 min；
  - f) 如果使用自动介质损耗因数测量仪，则设置完参数按“开始”键即可自动完成测试过程。
- 对于新仪器，a)、b)、c) 项应实施，而在正常使用情况下，可不必要每次都实施。

#### 3.4.3.6 注意事项

注意事项如下：

- 检测交流电源，在保证仪器要求的情况下才能接通电源；
- 仪器外壳和接地点应可靠接地；
- 确认仪器检定的有效期限；
- 自动介质损耗因数测量仪电源不宜接在磁饱和稳压电源上；
- 油杯清洗后严禁用手或不洁净物接触电极；
- 油杯使用时间较长或受到严重污染（介质损耗因数值超过 0.1）后应按 3.4.3.5b)、c) 清洗和测量空杯介质损耗因数；
- 测试下一个油样时，如果上次油样结果大于此油样对应的合格值，则油杯应用介质损耗因数值较低的绝缘油洗刷几次后，再用试验用绝缘油洗两次；

——装、倒试验用绝缘油时，内电极不宜接触任何物体。

### 3.4.3.7 结果的判定

测量同一油样时，两次测试值之差不应大于 0.000 1 加上两个值中较大值的 25%；如果不能满足上述重复性要求，则应继续测量油样，直到满足要求，此时测量结果才能视为有效；取两次有效测量中较小值作为油样的介质损耗因数。

技术协议没有规定时，绝缘油介质损耗因数（90℃）规定值：电压等级 330 kV 及以下产品，应小于 0.010；电压等级 500 kV 产品，应小于 0.007。

技术协议有规定时，按技术协议的规定判定结果是否合格。

## 3.4.4 含水量测定

### 3.4.4.1 试验目的

水分影响油纸绝缘性能、加快油纸绝缘老化速度。为了将绝缘油中含水量控制在较低范围，应在注油前后对绝缘油中含水量进行测定。一般电压等级 66 kV 及以上产品应进行此项试验。

### 3.4.4.2 试验方法

以下条款适用按照 GB/T 7600 进行绝缘油含水量测定，如果按照 GB/T 7601 进行绝缘油含水量测定，则试验应符合 GB/T 7601 的要求。

### 3.4.4.3 试验仪器

按 GB/T 7600 进行绝缘油含水量测定时，试验仪器应符合以下要求：

- 试验仪器应是以库仑法为基础、用卡尔·费休试剂作电解液的微量水分测试仪；
- 电解液最好分为阴极液和阳极液两种；
- 应定期用纯水或标准水分含量试剂校验仪器的准确性；
- 其他试验器材：至少准备 2 mL、5 mL 和 100 mL 的注射器各 1 支用于取样，还要常备 1 个电吹风，用于干燥电解池。

### 3.4.4.4 试品取样

试品按 GB/T 7597 规定的方法取样。

### 3.4.4.5 试验过程

试验过程如下：

- 按使用说明书要求接通微量水分测试仪的电源及设置仪器参数；
- 如果电解液发生过碘现象，则可注入适量的含水甲醇或纯水予以消除；
- 仪器稳定后，用油样冲洗注射器不应少于三次，然后正式向仪器电解池中进行样，进样量依绝缘油中含水量大小来定，仪器使用说明书有规定的按其规定执行，无规定的一次所进试样中的水分含量一般不得高于 10 mg/L。

### 3.4.4.6 注意事项

注意事项如下：

- 在进样前应将进样口处及针头擦拭干净，不得用手接触上述位置；
- 进样应迅速、利落；
- 环境湿度越高，操作越应谨慎，夏季试验场地的相对湿度一般不应高于 85%；

——每次更换电解液时，应用石油醚、无水乙醇将电解池彻底清洗并用电吹风吹干。

#### 3.4.4.7 结果的判定

两次平行测试结果的差值不应超过以下规定：

- 样品含水量为 10 mg/L 以下时，允许差值为 2 mg/L；
- 样品含水量为 10 mg/L～20 mg/L 时，允许差值为 3 mg/L；
- 样品含水量为 21 mg/L～40 mg/L 时，允许差值为 4 mg/L；
- 样品含水量大于 41 mg/L 时，允许差值为 10%。

取两次平行试验结果的算术平均值作为测定值。

技术协议没有规定时，试验结果的合格判定按表 3 的规定。

表3 绝缘油含水量规定值

| 电压等级<br>kV | 含水量<br>mg/L |
|------------|-------------|
| ≤110       | ≤20         |
| 220        | ≤15         |
| ≥330       | ≤10         |

技术协议有规定时，按技术协议的规定判定结果是否合格。

#### 3.4.5 含气量测定

##### 3.4.5.1 试验目的

绝缘油溶解空气的能力很强，当空气含量过高时，在注油和运行中溶解的空气易在绝缘油中形成气泡，导致局部放电。即使溶解的空气不产生气泡，其中的氧气也会加速油纸绝缘老化。因此绝缘油中的含气量应控制在较低的范围内。一般电压等级 330 kV 及以上产品应进行此项试验。

##### 3.4.5.2 试验方法

###### 3.4.5.2.1 概述

本标准规定的绝缘油中含气量的测定方法有两种：一种为气相色谱法，其方法按 DL/T 703 的规定；另一种为 DL/T 423 规定的真空压差法，真空压差法试验方法分为 A 法（电子真空计法）和 B 法（U 形油柱压差计法）。

###### 3.4.5.2.2 取样

按 GB/T 7597 规定的油中溶解气体分析样品采集方法进行采样、运输和保存。

###### 3.4.5.2.3 试验方法

试验中使用的仪器与器材、详细的试验步骤、含气量的计算及精密度的要求应符合 DL/T 423 和 DL/T 703 的规定。

##### 3.4.5.3 试验报告

取连续两次满足精密度要求的测试结果算术平均值作为试验用绝缘油含气量报告值。

### 3.4.5.4 结果的判定

取两次平行试验结果的算术平均值为测定结果，两次测定值之差应小于平均值的 10%。  
技术协议没有规定时，试验结果的合格判定按表 4 的规定。

表4 绝缘油含气量规定值

| 电压等级<br>kV | 含气量<br>% |
|------------|----------|
| ≥330       | ≤1       |

技术协议有规定时，按技术协议的规定判定结果是否合格。

### 3.4.6 溶解气体气相色谱分析

#### 3.4.6.1 试验目的

绝缘油中溶解的和气体继电器中收集的一氧化碳、二氧化碳、氢气、甲烷、乙烷、乙烯、乙炔等气体的含量，间接地反映了充油设备（变压器、电抗器、套管等）本身的实际情况，通过对这些组分的变化情况进行分析，就可以判断设备在试验或运行过程中的状态变化情况，并对判断和排除故障提供依据。一般电压等级 66 kV 及以上产品应进行此项试验。

#### 3.4.6.2 试验方法

##### 3.4.6.2.1 概述

根据对绝缘油中溶解气体进行脱气的方式不同，在实际工作中所使用方法分为两种，都是先采集充油设备中的油样，然后脱出油样中的气体，再用气相色谱仪进行分离、检测，最后对谱图数据进行处理，计算各组分的浓度。具体试验方法按 GB/T 17623 的规定。

##### 3.4.6.2.2 机械振荡法（溶解平衡法）

机械振荡法按以下要求：

- a) 脱气过程：一般在 40 mL 油样中注入 5 mL 氮气，然后在 50℃ 下进行恒温定时振荡，振荡 20 min、静放 10 min 即可达到平衡，取出气样，记录体积值（精确到 0.1 mL）；
- b) 分离、检测气样：用 1 mL 玻璃针管取出 1 mL 气样，立即注入气相色谱仪、输入脱出气样体积值，气相色谱仪进行分离、检测，色谱工作站随之记录谱图、读取峰高或峰面积值，并自动计算油中溶解气体各组分的浓度。

##### 3.4.6.2.3 真空脱气法（变径活塞泵全脱气法）

真空脱气法按以下要求：

- 脱气过程：变径活塞脱气装置由变径活塞泵、脱气室、磁力搅拌器和真空泵、集气室等组成，先由真空泵对脱气室抽真空，将 20 mL 绝缘油注入脱气室，装置自动进行多次脱气、集气，使气样合并并收集到集气室内，最后排出油样，记录油样和气样的体积（精确到 0.1 mL）；
- 分离、检测气样：同 3.4.6.2.2b)。

##### 3.4.6.3 气态样品中各组分浓度的测试

主要针对从气体继电器中取出的气样进行测试分析；取 1 mL 气样注入气相色谱仪进行测试，得出峰面积或峰高值，直接计算结果。

#### 3.4.6.4 试验仪器

试验仪器如下：

- 气相色谱仪应具备热导鉴定器、氢焰离子化鉴定器及镍触媒转化器，建议使用单次进样自动阀切换控制双柱分离的气路流程，便于自动控制；色谱柱对所测组分的分离度应满足定量分析的要求；测试过程中，气相色谱仪基线应平稳；气相色谱仪对各种溶解气体的最小检测浓度( $\mu\text{L/L}$ )为：氢气 2，烃类 0.1，一氧化碳 5，二氧化碳 10。
- 色谱工作站要求结构简单、运行稳定；可针对不同的样品状态和脱气方式分别进行处理，通常只需输入试验参数就可直接计算结果，并保存、打印结果及谱图。
- 载气或反应气可用压缩气瓶或气体发生器作为气源，要求达到足够的纯度，氮气（或氩气）、氢气纯度不低于 99.99%，空气应纯净无油。

#### 3.4.6.5 试品取样

试品按 GB/T 7597 规定的方法取样。

#### 3.4.6.6 仪器的标定

仪器的标定按以下要求：

- 每次试验前均应采用外标法对仪器进行标定；
- 在仪器稳定的状态下，用 1 mL 玻璃针管取 1 mL 含各已知浓度待测组分的标准混合气注入气相色谱仪，色谱工作站自动读取并记录谱图的峰高或峰面积值；
- 标定的条件和试验的条件应相同，仪器工作应稳定，至少标定两次，且其重复性应在其平均值的 $\pm 2\%$ 以内；
- 仪器参数设定应以满足试验的要求为先决条件，根据仪器性能分别进行。

#### 3.4.6.7 注意事项

注意事项如下：

- 应根据待测油样中所溶解的气体组分含量的高低选用标准混合气中各组分的浓度，对于例行试验和投运试验，因其各组分含量较低，因此宜选用低浓度的标准混合气；对于运行中的设备，因气体含量较高，因此宜选用高浓度的标准混合气。
- 仪器标定和样品分析应使用同一进样注射器，保证进样体积相同。
- 标准混合气应在有效期内使用，禁止超期使用。
- 取样时玻璃针管内的空气应排净，针芯可自由滑动、不卡涩。
- 胶头内的空气亦应排净。
- 对于变径活塞脱气装置，应定期对它的气密性进行测试，保证脱气完全。
- 气样应尽快地测试，防止泄漏，保存期应短于油样。
- 对结果进行判定时，应考虑各种可能对结果产生干扰的因素（例如，电焊、油样被污染等因素），防止误判。
- 应对所有玻璃针管体积进行标定，以减小误差。

#### 3.4.6.8 结果的判定

##### 3.4.6.8.1 气体组分的含量判定

对于出厂和新投运的产品，各种气体组分的含量应满足表 5 的规定，并且在产品绝缘耐受电压试验、局部放电试验、温升试验及空载运行试验前后各组分不能有明显升高。

表5 绝缘油溶解气体气相色谱分析含量值

| 组分 | 变压器和电抗器<br>$\mu\text{L/L}$ | 套管<br>$\mu\text{L/L}$ |
|----|----------------------------|-----------------------|
| 氢气 | <30                        | <150                  |
| 乙炔 | 0                          | 0                     |
| 总烃 | <20                        | <10                   |

如果结果不符合上述要求，则应仔细查明原因；气体中出现乙炔时应考虑有放电现象；如果用户有特殊要求，则其结果还要符合技术协议的规定。

#### 3.4.6.8.2 结果的重复性和再现性

同一试样至少应进行两次平行试验，取两次结果的算术平均值为试验结果；当绝缘油中溶解的气体浓度大于  $10 \mu\text{L/L}$  时，两次测定结果值之差应小于平均值的 10%；当绝缘油中溶解的气体浓度小于或等于  $10 \mu\text{L/L}$  时，两次测定结果值之差应小于平均值的 15%；不同实验室对于同一试样测定值的相对偏差，当组分浓度大于  $10 \mu\text{L/L}$  时，应小于平均值的 15%；当组分浓度小于或等于  $10 \mu\text{L/L}$  时，应小于平均值的 30%。

### 3.5 绕组电阻测量

#### 3.5.1 试验一般要求

变压器注入绝缘油后，至少 3 h 不励磁，顶层液体与底部液体温度之差不应超过 5 K。为快速达到目的，可以用泵强迫液体循环。测量应采用直流电，在测量中，应注意将自感效应的影响降到最低。

带分接的绕组，每个分接都应测量。

#### 3.5.2 测量仪器和仪器准确度

测量仪器推荐采用准确度不低于 0.2 级恒流输出的直流电阻测试仪；也可采用准确度不低于 0.5 级的电阻电桥。

#### 3.5.3 试验方法

##### 3.5.3.1 绕组温度的测量

对于油浸式变压器应测量顶层液体温度和底部液体温度，取顶层液体温度和底部液体温度的平均值作为绕组温度。

##### 3.5.3.2 测量电流的选取

根据样品绕组电阻计算值，测量电流按照仪器规定的范围选取；测量电流不得大于被试绕组额定电流的 15%。

##### 3.5.3.3 绕组电阻测量

绕组的电阻应分别在各绕组的线端上测量；三相变压器绕组为 Y (y) 联结无中性点引出时，应测量其线电阻，如果有中性点引出，则应测量其相电阻，但对中性点引线电阻所占比例较大的 YN (yn) 联结的变压器，应测量其线电阻及中性点对一个线端的电阻。绕组为 D (d) 联结时，首末端均引出的，应测量其相电阻；封闭三角形的试品，应测量其线电阻。

3.5.4 结果判定

结果的合格判定按表 6 的规定。

表6 变压器绕组电阻不平衡率判定要求

| 变压器的要求                                     | 相电阻        | 线电阻        |
|--------------------------------------------|------------|------------|
| 电压等级 10 kV                                 | $\leq 4\%$ | $\leq 2\%$ |
| 电压等级 35 kV（配电变压器）                          | $\leq 4\%$ | $\leq 2\%$ |
| 电压等级 35 kV（电力变压器）                          | $\leq 2\%$ | $\leq 1\%$ |
| 电压等级 66 kV（额定容量 $\leq 1\,600\text{ kVA}$ ） | $\leq 4\%$ | $\leq 2\%$ |
| 电压等级 66 kV（额定容量 $\geq 2\,000\text{ kVA}$ ） | $\leq 2\%$ | $\leq 1\%$ |
| 电压等级 110 kV 及以上                            | $\leq 2\%$ | $\leq 1\%$ |

当由于结构原因和线材原因造成的电阻不平衡率超过表 6 的规定时，试验报告应注明原因。

3.5.5 注意事项

对于带有无励磁分接开关的变压器应在绕组断电的情况下切换分接开关的位置。

3.6 电压比测量和联结组标号检定

3.6.1 试验一般要求

每个分接都应进行电压比测量。应检定单相变压器的极性和三相变压器的联结组标号。如果采用双电压表法测量，则两个绕组的电压应同时测量。

3.6.2 测量仪器准确度

仪器的准确度应不低于 0.2 级。

3.6.3 试验方法

3.6.3.1 概述

测量方法：推荐采用电压比测试仪测量。

3.6.3.2 试验接线示意图

单相变压器试验接线示意图如图 1 所示。

三相变压器试验接线示意图如图 2 所示。

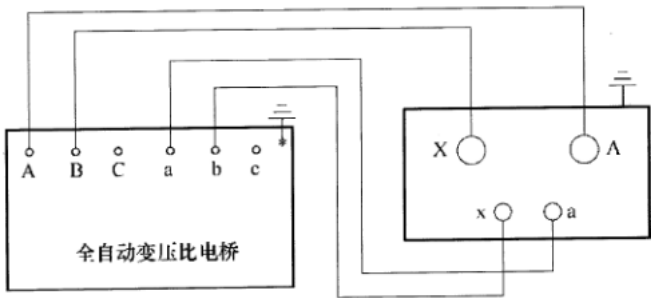


图1 单相变压器电压比测量接线示意图（油浸式电力变压器）

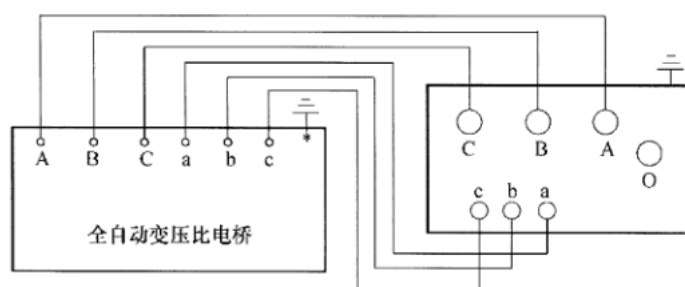


图2 三相变压器电压比测量接线示意图（油浸式电力变压器）

### 3.6.3.3 电压比值的基准值计算

电压比值的基准值应按照产品铭牌标称的电压值进行计算，当使用分接因数计算所对应的分接位置的电压比与产品标称的电压所计算的电压比一致时，允许只计算主分接的电压比，其他分接可以使用主分接的电压比与分接因数进行计算，否则应按产品铭牌标称的电压值计算所有分接位置的电压比。

### 3.6.3.4 绕组对和分接的选择

带有分接的绕组应在所有分接下进行测量。

如果无其他规定，则测量一对绕组的电压比，如果两个绕组都带有分接，则可以先测量较高绕组所有分接对较低绕组额定分接位置电压比。较低绕组其他分接位置，可以与其他不带分接的绕组组成绕组对进行测量。例如，电压组合  $(110 \pm 8 \times 1.25\%) / (35 \pm 2 \times 2.5\%) / 11 \text{ kV}$  应测量的电压比为：

- 高压（所有分接）/中压（额定分接）；
- 高压（所有分接）/低压；
- 中压（所有分接）/低压。

### 3.6.4 结果判定

测量结果与规定值的偏差，应不超过 GB/T 1094.1—2013 中表 1 规定的下列空载电压比允许偏差：

- 第一绕组对的主分接或极限分接（如果规定）：规定电压比的  $\pm 0.5\%$  或实际阻抗百分数的  $\pm 1/10$ ，取两者中的较小者；
- 第一绕组对的其他分接：匝数比设计值的  $\pm 0.5\%$ ；
- 其他绕组对：匝数比设计值的  $\pm 0.5\%$ 。

### 3.6.5 注意事项

注意在绕组电阻测量或短路承受能力试验后，铁心剩磁可能影响测量结果。

## 3.7 短路阻抗和负载损耗测量

### 3.7.1 试验一般要求

变压器的温度接近试验时的环境温度，油浸式变压器测量顶层与底层绝缘油温度，其平均值作为绕组温度。

一对绕组的短路阻抗和负载损耗测量时，应在额定频率下，将电压施加到一个绕组上，另一绕组短路，其他绕组（如果有）开路。施加的试验电流宜为相应的额定电流（分接电流），不应低于该电流的 50%。试验应尽快进行，以减少温升引起的明显误差。顶层绝缘油与底部绝缘油的温差应足够小，不应大于 5 K，以便准确得到绝缘油平均温度。为了更快速得到结果，可以用泵搅拌绝缘油。

负载损耗测量值应乘以额定电流（或分接电流）对试验电流之比的二次方。得到的结果应校正到参考温度。 $I^2R$  损耗（ $R$  为绕组直流电阻）随绕组温度呈正向变化，而所有其他损耗与温度呈反向变化。

大容量、低电压变压器的负载试验（如双分裂变压器，低压 1 对低压 2 绕组的负载试验），受试验设备能力限制时，在制造方与用户协商一致的情况下，可以根据试验能力降低试验电流。

对于分接范围不超过 $\pm 5\%$ 的变压器，一般在主分接进行短路阻抗和负载损耗测量。

对于分接范围超过 $\pm 5\%$ 的变压器，应对主分接、两个极限分接进行短路阻抗和负载损耗测量。试验报告中，除了提供主分接短路阻抗和负载损耗外，还应提供两个极限分接短路阻抗。

对于分接范围不超过 $\pm 5\%$ ，但额定容量超过 2 500 kVA 的变压器，如果产品进行温升试验，为了便于进行温升试验，应对主分接、两个极限分接进行短路阻抗和负载损耗测量。如果不进行温升试验，则对主分接进行短路阻抗和负载损耗测量。对于这类变压器，在短路后的复试中也仅在主分接进行短路阻抗和负载损耗测量。

负载试验施加的电流以三相负载电流的算术平均值为准。

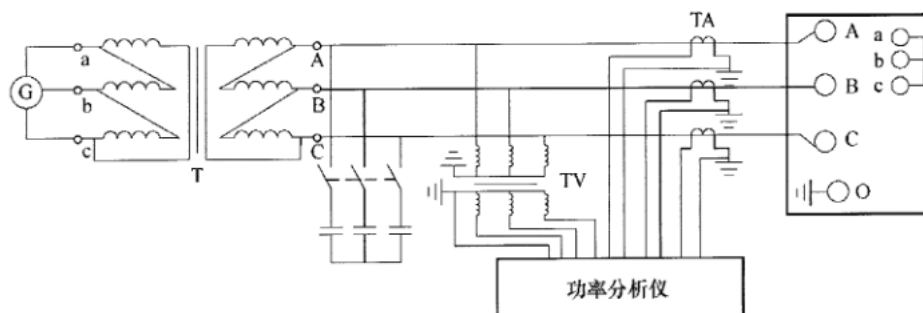
### 3.7.2 测量仪器和准确度

互感器的准确度不低于 0.2 级,对于大型变压器推荐采用准确度不低于 0.05 级的互感器;所用仪表准确度应不低于 0.5 级。

### 3.7.3 试验方法

#### 3.7.3.1 试验接线示意图

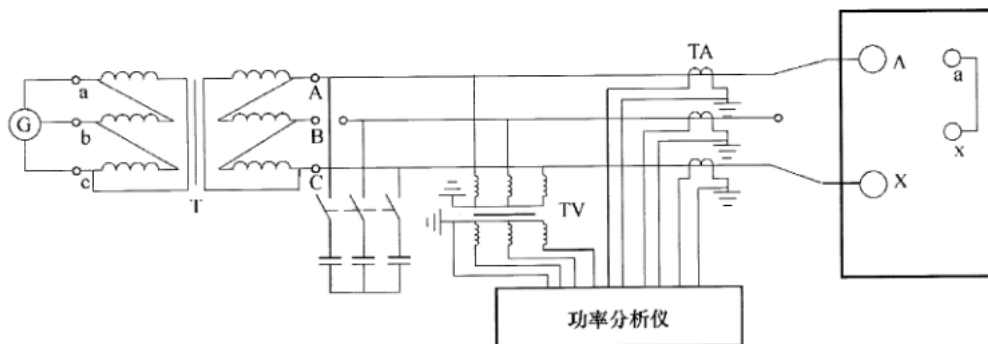
三相变压器负载试验接线示意图如图 3 所示, 单相变压器负载试验接线示意图如图 4 所示。



说明:

T——中间变压器；TA——电流互感器；TV——电压互感器。

图3 三相变压器负载试验接线示意图（油浸式电力变压器）



说明:

T——中间变压器；TA——电流互感器；TV——电压互感器。

图4 单相变压器负载试验接线示意图（油浸式电力变压器）

## 3.7.3.2 测量结果计算

## 3.7.3.2.1 环境温度下负载损耗和短路阻抗换算到参考温度

负载损耗按公式(1)折算。

$$P_k = \frac{P_{kt} + (K_t^2 - 1) \sum I^2 R}{K_t} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$P_k$ ——参考温度下的负载损耗,单位为千瓦(kW);

$P_{kt}$ —— $t^\circ\text{C}$ 时的负载损耗,单位为千瓦(kW);

$K_t$ ——电阻温度换算系数;

$\sum I^2 R$ ——试验温度下一对绕组的电阻损耗,单位为千瓦(kW)。

绕组温度为 $t^\circ\text{C}$ 时的短路阻抗按公式(2)计算,参考温度时的短路阻抗按公式(3)折算。

$$z_{kt} = \frac{U_{kt}}{U_r} \times \frac{I_r}{I_k} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

$$z_k = \sqrt{Z_{kt}^2 + \frac{P_k^2 - P_{kt}^2}{(10S_r)^2}} \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

式中:

$z_{kt}$ ——绕组温度为 $t^\circ\text{C}$ 时的短路阻抗;

$U_{kt}$ ——绕组在温度为 $t^\circ\text{C}$ 下通过试验电流 $I_k$ 时的阻抗电压,单位为千伏(kV);

$U_r$ ——施加电压侧的额定电压,单位为千伏(kV);

$I_r$ ——施加电压侧的额定电流,单位为安(A);

$I_k$ ——试验施加电流,单位为安(A);

$z_k$ ——参考温度时的短路阻抗;

$P_k$ ——参考温度下的负载损耗,单位为千瓦(kW);

$P_{kt}$ —— $t^\circ\text{C}$ 时的负载损耗,单位为千瓦(kW);

$S_r$ ——额定容量,单位为兆伏安(MVA)。

## 3.7.3.2.2 电阻损耗计算

典型三相变压器一对绕组的电阻损耗应为两绕组电阻损耗之和,计算方法见公式(4)和公式(5)。

$$P_r = 1.5 I_r^2 R_{xn} = 3 I_r^2 R_{xg} \text{ (Y或YN联结的绕组)} \dots\dots\dots (4)$$

$$P_r = 1.5 I_r^2 R_{xn} = I_r^2 R_{xg} \text{ (D联结的绕组)} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

$P_r$ ——电阻损耗,单位为千瓦(kW);

$I_r$ ——额定电流,单位为安(A);

$R_{xn}$ ——线电阻,单位为欧( $\Omega$ );

$R_{xg}$ ——相电阻,单位为欧( $\Omega$ )。

## 3.7.4 结果判定

结果的合格判定按技术协议的规定,但不得低于表7的规定。

表7 油浸式电力变压器负载损耗和短路阻抗的允许偏差

| 项目               |                                           | 允许偏差                 |                                                                |
|------------------|-------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------|
| 负载损耗             |                                           | +15%<br>但总损耗不得超过+10% |                                                                |
| 短<br>路<br>阻<br>抗 | a) 有两个独立绕组的变压器, 或<br>b) 多绕组变压器中规定的第一对独立绕组 | 主分接                  | 当阻抗值 $\geq 10\%$ 时, $\pm 7.5\%$<br>当阻抗值 $< 10\%$ 时, $\pm 10\%$ |
|                  |                                           | 其他分接                 | 当阻抗值 $\geq 10\%$ 时, $\pm 10\%$<br>当阻抗值 $< 10\%$ 时, $\pm 15\%$  |
|                  | a) 自耦联结的一对绕组, 或<br>b) 多绕组变压器中规定的第二对绕组     | 主分接                  | 规定值的 $\pm 10\%$                                                |
|                  |                                           | 其他分接                 | 设计值的 $\pm 10\%$                                                |
|                  | 其他绕组对                                     | 按协议, 但绝对值不小于 15%     |                                                                |

3.7.5 注意事项

对于低电压、大电流的试品, 电压互感器一次线应连接到试品线端, 以免线路损耗影响测量结果。  
对于大容量变压器, 采用低压侧短接, 由于低压电流很大, 短路连接的电阻损耗引入的测量误差较大, 可在试验结果中加以校正。  
对于功率因数较低的试品, 如果互感器的相位差对测量结果产生影响, 则应按照 GB/T 13499 的规定进行校正。

3.8 空载损耗和空载电流测量

3.8.1 试验一般要求

变压器的温度接近试验时的环境温度。  
通常由被试品的低压侧施加额定频率的额定电压(应尽可能为对称的正弦波电压), 其余绕组开路; 如果施加电压的绕组是带有分接的, 应使分接开关处于主分接的位置; 如果被试品绕组中有开口三角形联结绕组, 则应使其闭合。运行中的地电位处(分级绝缘变压器的中性点、铁心、夹件等)和油箱或外壳应可靠接地。  
对于三相变压器, 选择接到试验电源的绕组和联结方式时, 应尽可能使三个心柱上出现对称的正弦波电压。  
如果无其他规定, 则对于有不同额定容量的多绕组变压器, 空载电流百分数应换算到最大额定容量。

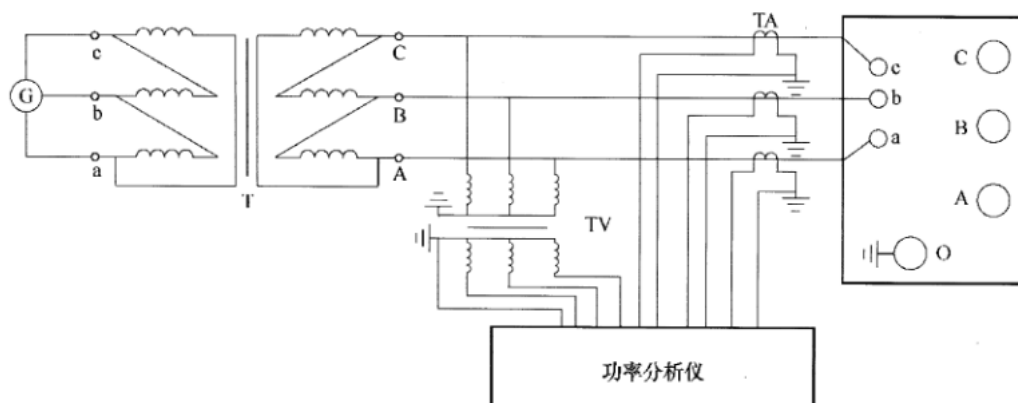
3.8.2 测量仪器和精度

空载损耗和空载电流测量, 对测量系统的要求低于负载损耗的测量, 因此能够满足负载损耗测量的测量系统适用于空载损耗和空载电流测量。

3.8.3 试验方法

3.8.3.1 试验接线示意图

三相变压器空载试验接线示意图如图 5 所示, 单相变压器空载试验接线示意图如图 6 所示。



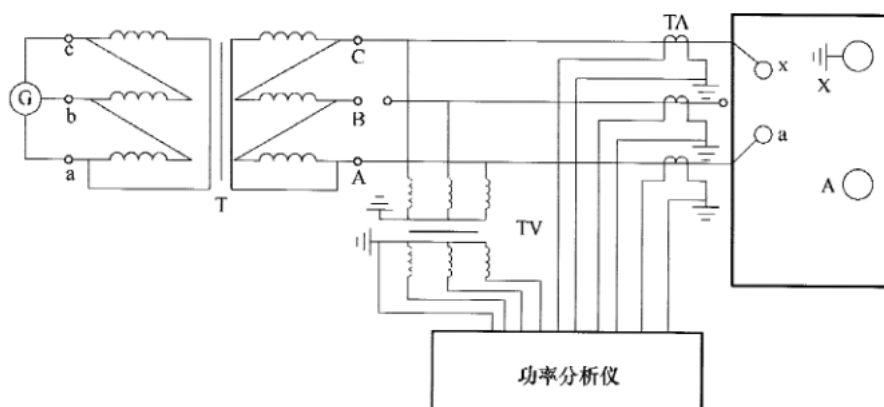
说明:

T——中间变压器;

TA——电流互感器;

TV——电压互感器。

图5 三相变压器空载试验接线示意图（油浸式电力变压器）



说明:

T——中间变压器;

TA——电流互感器;

TV——电压互感器。

图6 单相变压器空载试验接线示意图（油浸式电力变压器）

### 3.8.3.2 试验电压的施加

试验电压施加应从零电压开始，在升压过程中应连续观察所有测量仪表的指示状况，尤其在测量过程中，应注意剩磁对测量结果的影响，在测量仪器和试验设备不过载的情况下，先对被试品进行 110% 额定电压励磁，降压时电压尽可能降到零电压，然后进行额定电压励磁，保持几分钟，待损耗和电流没有下降的趋势时，进行测量记录。

励磁电压应以平均值电压表的读数  $U'$  为准，该读数与方均根值电压表的读数  $U$  具有同一刻度。

### 3.8.3.3 空载损耗的波形校正

如果  $U'$  与  $U$  相差 3% 以内，则按照  $P_0 = P_m(1+d)$  进行校正，其中  $P_0$  为校正后的空载损耗， $P_m$  为测量的空载损耗， $d = (U' - U)/U'$ 。

如果  $U'$  与  $U$  相差不大于 3%，则此电压的波形满足试验要求。如果  $U'$  与  $U$  相差大于 3%，则应按照

协议确认试验的有效性。在励磁电压高于额定电压时，可以接受超过 3% 的读数差，但测量值属于保证值的情况除外。

3.8.4 结果判定

如果技术协议没有规定，则空载电流允许偏差为+30%，空载损耗允许偏差为+15%。  
如果技术协议有规定，则合格判定按技术协议的规定，但不得低于上述要求。

3.8.5 注意事项

绕组电阻测量、冲击试验及短路承受能力试验后铁心可能产生剩磁，应注意剩磁对空载损耗和空载电流测量的影响。

3.9 绕组对地及绕组间直流绝缘电阻测量

3.9.1 试验一般要求

试验应在环境温度（被试品温度）为 5℃~40℃、相对湿度小于 85% 的条件下进行。

3.9.2 测量仪器和精度

测量仪器采用数字绝缘电阻表，精度不大于 5%。

3.9.3 试验方法

3.9.3.1 测量参数

测量被试品的温度和环境湿度。

电压等级 35 kV（额定容量为 4 000 kVA 以下）及以下的变压器提供  $R_{60}$ （60 s 时的绝缘电阻）的值；电压等级 35 kV（额定容量为 4 000 kVA 及以上）至 220 kV 以下的变压器提供  $R_{60}$  的值和吸收比  $R_{60}/R_{15}$ （15 s 时的绝缘电阻）的值；电压等级 220 kV 及以上的变压器提供  $R_{60}$  的值、吸收比  $R_{60}/R_{15}$  的值及极化指数  $R_{600}$ （10 min 时的绝缘电阻）/ $R_{60}$  的值。

铁心和夹件提供  $R_{60}$  的值。

3.9.3.2 测量组合方式

双绕组变压器绝缘电阻测量的组合方式不少于表 8 的规定。

三绕组变压器绝缘电阻测量的组合方式不少于表 9 的规定。

表8 双绕组变压器绝缘电阻测量的组合方式

| 序号                                       | 被试部位    | 接地部位          |
|------------------------------------------|---------|---------------|
| 1                                        | 高压绕组    | 低压绕组、铁心、夹件及油箱 |
| 2                                        | 低压绕组    | 高压绕组、铁心、夹件及油箱 |
| 3 <sup>a</sup>                           | 高压及低压绕组 | 铁心、夹件及油箱      |
| 4                                        | 铁心      | 夹件及油箱         |
| 5                                        | 夹件      | 铁心及油箱         |
| <sup>a</sup> 仅适用于额定容量为 16 000 kVA 以上变压器。 |         |               |

表9 三绕组变压器绝缘电阻测量的组合方式

| 序号                                        | 被试部位       | 接地部位               |
|-------------------------------------------|------------|--------------------|
| 1                                         | 高压绕组       | 中压绕组、低压绕组、铁心、夹件及油箱 |
| 2                                         | 中压绕组       | 高压绕组、低压绕组、铁心、夹件及油箱 |
| 3                                         | 低压绕组       | 高压绕组、中压绕组、铁心、夹件及油箱 |
| 4 <sup>a</sup>                            | 高压及中压绕组    | 低压绕组、铁心、夹件及油箱      |
| 5 <sup>a</sup>                            | 高压、中压及低压绕组 | 铁心、夹件及油箱           |
| 6                                         | 铁心         | 夹件及油箱              |
| 7                                         | 夹件         | 铁心及油箱              |
| <sup>a</sup> 仅适用于额定容量为 16 000 kVA 及以上变压器。 |            |                    |

### 3.9.3.3 被试品温度的测量

油浸式变压器测量顶层与底部绝缘油的温度，其平均值作为被试品的温度。顶层与底部绝缘油的温度接近时，顶层的温度作为被试品的温度。

### 3.9.3.4 测量电压的选择

额定容量为 4 000 kVA 的电压等级 35 kV 变压器和电压等级 66 kV 及以上的变压器测量时使用 5 000 V 电压。其他变压器测量时使用 2 500 V 电压。

铁心和夹件测量时使用 2 500 V 电压。

### 3.9.3.5 不同温度下的绝缘电阻值换算

不同温度下的绝缘电阻值按公式（6）换算。

$$R_2 = R_1 \times 1.5^{(t_1 - t_2)/10} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

$R_1$ 、 $R_2$ ——温度分别为  $t_1$ ℃、 $t_2$ ℃时的绝缘电阻值。

### 3.9.4 结果判定

如果技术协议没有规定，则铁心和夹件的绝缘电阻值应不小于 500 MΩ（60 s、20℃时）。

如果技术协议有规定，则结果判定按照技术协议的规定。

### 3.9.5 注意事项

充电时间会影响绝缘电阻值的测量结果，在进行不同方式的绝缘电阻测量时，应对绕组进行充分的放电。

环境湿度较大时，可能影响测量结果，应对靠近加压端子的绝缘体用金属环进行屏蔽，以降低泄漏电流对测量结果的影响。

### 3.10 绝缘试验

#### 3.10.1 绝缘试验的一般要求

对于油浸式变压器，绝缘试验仅适用于内绝缘。外绝缘补充要求或试验应由制造方与用户商定。

在进行绝缘试验时，如果有必要，则可以对套管端子采取屏蔽措施，但是与套管端子相邻的接地部分的任何屏蔽应视为运行时变压器的一部分，局部放电试验期间所需要的屏蔽除外。

3.10.2 不同类别变压器的绝缘试验项目

变压器的绝缘试验项目是按被试变压器中最高电压绕组的  $U_m$  值确定的，试验项目见表 10。

表10 不同类别变压器的要求与试验项目

| 电压等级                                                                                                             | $U_m \leq 72.5 \text{ kV}$ | $72.5 \text{ kV} < U_m \leq 170 \text{ kV}$ |                 | $U_m > 170 \text{ kV}$ |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------|-----------------|------------------------|
| 绝缘类型                                                                                                             | 全绝缘                        | 全绝缘                                         | 分级绝缘            | 全绝缘和分级绝缘               |
| 线端雷电冲击试验 (LI)                                                                                                    | 型式 (包含在 LIC 中)             | 例行                                          | 例行              | 例行                     |
| 线端雷电冲击截波试验 (LIC)                                                                                                 | 型式                         | 型式                                          | 型式              | 型式                     |
| 中性点端子雷电全波冲击试验 (LIN)                                                                                              | 型式 <sup>a</sup>            | 型式 <sup>a</sup>                             | 型式              | 型式                     |
| 线端操作冲击试验 (SI)                                                                                                    | 不适用                        | 特殊                                          | 特殊              | 例行                     |
| 外施耐电压试验 (AV)                                                                                                     | 例行                         | 例行                                          | 例行              | 例行                     |
| 感应耐电压试验 (IVW)                                                                                                    | 例行                         | 例行                                          | 例行              | 不适用                    |
| 带有局部放电测量的感应耐电压试验 (IVPD)                                                                                          | 特殊 <sup>b</sup>            | 例行 <sup>b</sup>                             | 例行 <sup>b</sup> | 例行                     |
| 线端交流耐电压试验 (LTAC)                                                                                                 | 不适用                        | 特殊                                          | 例行 <sup>c</sup> | 特殊                     |
| 辅助接线的绝缘试验 (AuxW)                                                                                                 | 例行                         | 例行                                          | 例行              | 例行                     |
| 注：如果用户另有要求，不同类别绕组的要求与试验也可参照 GB/T 1094.3—2017 中 E.1 的规定，但需要在订货合同中注明。                                              |                            |                                             |                 |                        |
| <sup>a</sup> 对于全绝缘的三相变压器，当中性点不引出时，中性点端子雷电全波冲击试验 (LIN) 为特殊试验。                                                     |                            |                                             |                 |                        |
| <sup>b</sup> IVW 的试验要求包括在 IVPD 试验中，因此只需要一个试验。此外， $U_m = 72.5 \text{ kV}$ 且额定容量为 10 000 kVA 及以上变压器的 IVPD 试验为例行试验。 |                            |                                             |                 |                        |
| <sup>c</sup> 经用户与制造方协商一致，该变压器的 LTAC 试验可由 SI 试验代替。                                                                |                            |                                             |                 |                        |

3.10.3 绕组的绝缘试验电压水平

根据被试变压器不同种类绕组的  $U_m$  要求确定的试验电压水平见表 11。

所有试验电压均为相电压。

一般情况下，表 11 中每行给定的值是配合使用的。如果只规定雷电冲击电压水平，那么与雷电冲击电压水平位于同一行的其他试验电压值将被采用。

表11 绕组的试验电压水平

单位为千伏

| 系统标称电压<br>(方均根值) | 设备最高电压 $U_m$<br>(方均根值) | 雷电全波冲击<br>(LI)<br>(峰值) | 雷电截波冲击<br>(LIC)<br>(峰值) | 操作冲击<br>(SI)<br>(峰值) | 外施电压 (AV) 或线端交<br>流电压 (LTAC)<br>(方均根值) |
|------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------------------------|
| —                | $\leq 1.1$             | —                      | —                       | —                    | 5                                      |
| 3                | 3.6                    | 40                     | 45                      | —                    | 18                                     |
| 6                | 7.2                    | 60                     | 65                      | —                    | 25                                     |

表11 绕组的试验电压水平（续）

单位为千伏

| 系统标称电压<br>(方均根值) | 设备最高电压 $U_m$<br>(方均根值) | 雷电全波冲击<br>(LI)<br>(峰值) | 雷电截波冲击<br>(LIC)<br>(峰值) | 操作冲击<br>(SI)<br>(峰值) | 外施电压 (AV) 或线端交<br>流电压 (LTAC)<br>(方均根值) |
|------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------------------------|
| 10               | 12                     | 75                     | 85                      | —                    | 35                                     |
| 15               | 18                     | 105                    | 115                     | —                    | 45                                     |
| 20               | 24                     | 125                    | 140                     | —                    | 55                                     |
| 35               | 40.5                   | 200                    | 220                     | —                    | 85                                     |
| 66               | 72.5                   | 325                    | 360                     | —                    | 140                                    |
| 110              | 126                    | 480                    | 530                     | 395                  | 200                                    |
| 220              | 252                    | 850                    | 950                     | 650                  | 360                                    |
|                  |                        | 950                    | 1050                    | 750                  | 395                                    |
| 330              | 363                    | 1 050                  | 1 175                   | 850                  | 460                                    |
|                  |                        | 1 175                  | 1 300                   | 950                  | 510                                    |
| 500              | 550                    | 1 425                  | 1 550                   | 1 050                | 630                                    |
|                  |                        | 1 550                  | 1 675                   | 1 175                | 680                                    |
| 750              | 800                    | 1 950                  | 2 100                   | 1 550                | 900                                    |
| 1 000            | 1 100                  | 2 250                  | 2 400                   | 1 800                | 1 100                                  |

注 1: 对于系统标称电压为 750 kV 和 1 000 kV 的产品, 除表中给出的试验电压水平外, 制造方与用户可结合具体工程的实际情况, 协商确定其他的试验电压水平。

注 2: 如果用户另有要求, 则试验电压水平也可按 GB/T 1094.3—2017 中 E.2 的规定选取, 但需要在订货合同中注明。

表 12 给出了分级绝缘变压器中性点端子的试验电压水平。

表12 分级绝缘变压器中性点端子的试验电压水平

单位为千伏

| 系统标称电压<br>(方均根值) | 中性点端的设备最高<br>电压 $U_m$<br>(方均根值) | 中性点接地方式 | 雷电全波冲击 (LI)<br>(峰值) | 外施电压 (AV) 或线<br>端交流电压 (LTAC)<br>(方均根值) |
|------------------|---------------------------------|---------|---------------------|----------------------------------------|
| 110              | 52                              | 不直接接地   | 250                 | 95                                     |
|                  | 72.5                            |         | 325                 | 140                                    |
| 220              | 40.5                            | 直接接地    | 185                 | 85                                     |
|                  | 126                             | 不直接接地   | 400                 | 200                                    |
| 330              | 40.5                            | 直接接地    | 185                 | 85                                     |
|                  | 145                             | 不直接接地   | 550                 | 230                                    |
| 500              | 40.5                            | 直接接地    | 185                 | 85                                     |
|                  | 72.5                            | 经小阻抗接地  | 325                 | 140                                    |

表12 分级绝缘变压器中性点端子的试验电压水平（续）

单位为千伏

| 系统标称电压<br>(方均根值)                                                                                                                                                                                                  | 中性点端的设备最高<br>电压 $U_m$<br>(方均根值) | 中性点接地方式 | 雷电全波冲击 (LI)<br>(峰值) | 外施电压 (AV) 或线<br>端交流电压 (LTAC)<br>(方均根值) |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------|---------------------|----------------------------------------|
| 750                                                                                                                                                                                                               | 40.5                            | 直接接地    | 185                 | 85                                     |
| 1 000                                                                                                                                                                                                             | 40.5                            | 直接接地    | 185                 | 85                                     |
|                                                                                                                                                                                                                   | 72.5                            |         | 325                 | 140                                    |
| 注 1: 表中 $U_m=52$ 和 $U_m=145$ 是参照 GB/T 1094.3—2017 中 E.2 的规定确定的。用户也可参照 GB/T 1094.3—2017 中 E.2 的规定, 另行确定中性点端的设备最高电压及相应的试验电压水平, 但需要在订货合同中注明。<br>注 2: 其他中性点端 $U_m$ 的标准值可由用户规定 (可参考 GB/T 1094.3—2017 中附录 E 的规定通过计算确定)。 |                                 |         |                     |                                        |

3.10.4 辅助接线的绝缘试验 (AuxW)

辅助电源和控制电路的接线应承受 2 kV (方均根值)、1 min 交流外施电压的对地耐电压试验, 如果没有电压突然下降或其他击穿特征, 则表明通过了试验。

电流互感器二次绕组接线应进行 2.5 kV (方均根值)、1 min 交流外施电压的对地耐电压试验, 如果互感器的拐点电压超过交流 2 kV, 那么试验应在交流 4kV 下进行。电流互感器二次绕组接线如果没有电压突然下降或其他击穿特征, 则表明通过了试验。

辅助设备用的电动机和其他二次原件的绝缘要求应符合产品技术条件的规定。所有固态、基于微处理器的设备将不连接在试验电路中。所有三相继电器和可拆卸设备应从试验电路中拆除。

3.10.5 外施耐电压试验 (AV)

3.10.5.1 试验前的准备

- 被试品铁心、夹件引出接线端子应可靠接地。
- 被试品油箱应可靠接地。
- 对装有放气塞的套管升高座、低压接线盒、穿缆式套管及有载分接开关均应放气, 直到其溢油为止。

3.10.5.2 试验一般要求

- 外施耐电压试验的频率应为不低于 80%额定频率的任意一合适频率, 取峰值电压除以  $\sqrt{2}$  作为试验电压。电压的波形应接近正弦波, 即峰值除以  $\sqrt{2}$  与方均根值的偏差不超过  $\pm 5\%$ 。
- 施加试验电压的允许偏差为  $\pm 1\%$ 。

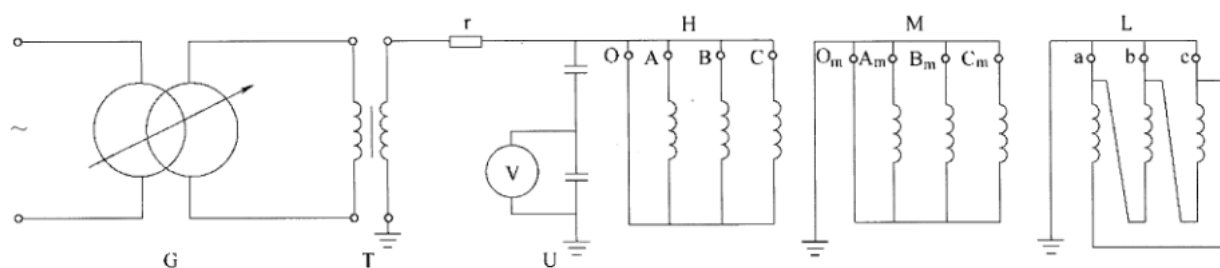
3.10.5.3 测量系统的不确定度

- 电压测量系统的不确定度为  $\pm 3\%$ 。

3.10.5.4 试验方法

3.10.5.4.1 试验接线示意图

外施耐电压试验典型接线示意图 (以试验高压绕组为例) 如图 7 所示。



说明:

T——试验变压器；  
r——保护电阻；  
G——调压器；  
U——工频测量系数；

L——被试品低压绕组；  
H——被试品高压绕组；  
M——被试品中压绕组。

图7 外施耐电压试验典型接线示意图（油浸式电力变压器）

#### 3.10.5.4.2 施加电压程序和方法

试验时电压应从不大于规定试验电压值的  $1/3$  开始施加，并与测量相配合尽快地增加到规定试验电压值，在规定试验电压下持续 1 min 时间。试验完毕，应将电压迅速地降到  $1/3$  规定试验电压值以下，并切断电源。

#### 3.10.5.5 结果判定

试验过程中，如果电压不突然下降，则认为试验合格。

#### 3.10.6 感应耐电压试验 (IVW)

##### 3.10.6.1 试验前的准备

见 3.10.5.1。

##### 3.10.6.2 试验一般要求

中性点和其他正常运行情况下处于地电位的端子应接地。

三相变压器应使用三相对称电压加压。任何不与试验电源相连的电路端子应开路。

带分接的绕组，除非特别指定或经用户同意，一般在主分接进行试验。

施加的相对地试验电压为  $2U_r/\sqrt{3}$  ( $U_r$  为绕组额定电压)。

电压的波形应接近正弦波，试验中电压的峰值与方均根值都应测量，取电压峰值除以  $\sqrt{2}$  与方均根值两者中的较小值作为试验电压值。

试验电压应在最高电压端子上测量，如果不可行，则应在与电源相连的端子上测量。可以在 50%~80% 的试验电压下进行校正，并记录此时被试品励磁侧的试验电压，从而外推出最高电压端子在 100% 试验电压时的被试品励磁侧的试验电压。

试验时间在 60 s 以内的试验电压的允许偏差为  $\pm 1\%$ 。如果试验持续时间超过 60 s，则在整个试验过程中试验电压的测量值应保持在规定电压的 97%~103% 以内。

##### 3.10.6.3 测量系统的不确定度

测量系统的不确定度为  $\pm 3\%$ 。

## 3.10.6.4 试验方法

## 3.10.6.4.1 试验接线示意图

感应耐电压试验典型接线示意图（以联结组标号为 YNyn0d11 的三绕组变压器为例）如图 8 所示。

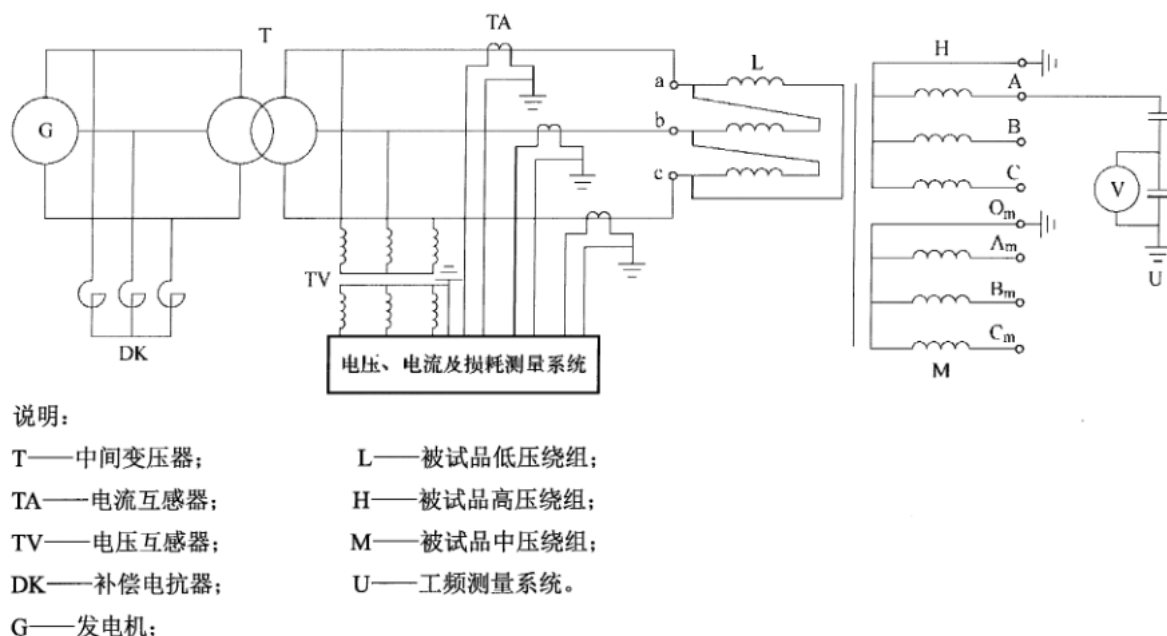


图8 感应耐电压试验典型接线示意图（油浸式电力变压器）

## 3.10.6.4.2 施加电压的程序和方法

为了防止试验时励磁电流过大，试验电压频率应适当地比额定频率高。对于某些产品，励磁电流可能呈现容性电流，为了防止发电机自励磁现象发生，可以在励磁电路中并联补偿电抗器。

除非另有规定，当试验电压的频率等于或小于两倍额定频率时，其全电压下的试验时间应为 60 s。当试验频率超过两倍额定频率时，试验时间为： $120 \text{ s} \times \text{额定频率} / \text{试验频率} (\text{s})$ ，但不少于 15 s。

试验时电压应从不大于规定试验电压值的  $1/3$  开始施加，并与测量相配合尽快地增加到规定试验电压值（相对地试验电压为  $2U_r/\sqrt{3}$ ），在规定试验电压下持续到规定时间。试验完毕，应将电压迅速地降到  $1/3$  规定试验电压值以下，并切断电源。

## 3.10.6.5 结果判定

试验过程中，如果电压不出现突然下降，则试验合格。

## 3.10.7 带有局部放电测量的感应耐电压试验（IVPD）

## 3.10.7.1 试验前的准备

见 3.10.5.1。

## 3.10.7.2 试验一般要求

中性点和其他正常运行情况下处于地电位的端子应接地。

三相变压器应使用三相对称电压加压。任何不与试验电源相连的电路端子应开路。

带分接的绕组，除非特别指定或经用户同意，一般在主分接进行试验。

为了避免容升电压和电压波形畸变影响试验电压，试验电压应在最高电压端子上测量，如果不可行，



120 s×额定频率/试验频率 (s)，但不少于 15s ( $U_m \leq 800$  kV)

或

600 s×额定频率/试验频率 (s)，但不少于 75 s ( $U_m > 800$  kV)

试验顺序如下：

- 在不大于  $0.4U_r/\sqrt{3}$  的电压下接通电源；
- 试验电压升高至  $0.4U_r/\sqrt{3}$ ，进行背景局部放电 (PD) 测量并记录；
- 试验电压升高至  $1.2U_r/\sqrt{3}$ ；
- 测量并记录 PD 水平；
- 试验电压升高至 1 h 的 PD 测量电压，保持至少 5 min 以进行稳定的 PD 测量；
- 测量并记录 PD 水平；
- 电压上升至增强电压，保持规定时间；
- 之后立刻不间断地将电压降至 1 h 的 PD 测量电压；
- 测量并记录 PD 水平；
- 保持 1 h 的 PD 测量电压至少 1 h，并进行 PD 测量；
- 在 1 h 内每隔 5 min 测量并记录 PD 水平；
- 在 1 h 的 PD 测量的最后一次测量完毕后，降低电压至  $1.2U_r/\sqrt{3}$ ，并保持至少 1 min 以进行稳定的 PD 测量；
- 测量并记录 PD 水平；
- 测量电压降至  $0.4U_r/\sqrt{3}$ ，进行背景 PD 测量并记录；
- 试验电压降至  $0.4U_r/\sqrt{3}$  以下；
- 切断电源。

增强电压为  $1.8U_r/\sqrt{3}$ ，对于  $U_m \leq 170$  kV 的产品，当增强电压采用  $2U_r/\sqrt{3}$  时，本试验可以代替感应耐电压试验 (IVW)。

试验顺序主要特征如图 10 所示。

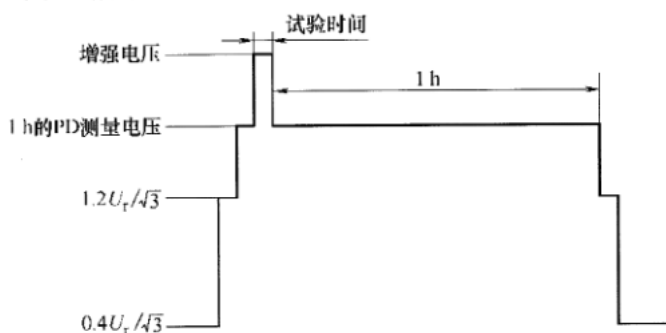


图10 带有局部放电测量的感应耐电压试验施加电压的时间顺序

经用户与制造方协商，对于  $U_m \leq 72.5$  kV 的产品，PD 测量电压可持续较短的时间，推荐时间为 5 min。

如果用户要求，则可采用较高的电压水平，此时，增强电压（相对地）按  $\sqrt{3} U_m/\sqrt{3}$ ，局部放电测量电压按  $1.5U_m/\sqrt{3}$ 。

#### 3.10.7.4.3 局部放电测量方法

局部放电测量前应对包括套管和电容耦合器在内的每个 PD 测量通道按照视在电荷法 (pC) 进行校正。

PD 测量结果用 pC 给出，应参考测量仪器指示的最高稳态重复脉冲而得出。

偶然出现的高幅值局部放电脉冲可以不计入。

试验期间对于所有  $U_m \geq 72.5$  kV 的套管出线端子均要进行局部放电测量并记录, 除非特别指定, 当这样的出线端子超过 6 个时仅需测量并记录 6 个出线端子 (依最高电压线端排序) 的局部放电测量。

整个测量时间内至少能在一个测量通道连续观测到局部放电水平。

更详细的局部放电测量技术见 GB/T 7354。

### 3.10.7.5 结果和判定

在试验开始和结束时测得的 PD 背景噪声均没有超过 50pC 时试验方有效。

如果结果满足下列判据则试验合格:

- a) 试验电压不产生突然下降;
- b) 在 1 h 局部放电试验期间, 没有超过 250pC 的局部放电记录;
- c) 在 1 h 局部放电试验期间, 局部放电水平无上升趋势, 在最后 20 min 内局部放电水平无突然持续增加;
- d) 在 1 h 局部放电试验期间, 局部放电水平的增加量不超过 50pC;
- e) 1 h 局部放电测量后电压降至  $1.2U_t/\sqrt{3}$  时测量的局部放电水平不超过 100pC。

如果判据 c) 或 d) 不满足, 则可以延长 1h 测量时间, 如果在后续连续 1 h 内结果满足上述条件, 则可以认为试验合格。

## 3.10.8 线端交流耐电压试验 (LTAC)

### 3.10.8.1 试验前的准备

被试品铁心、夹件引出接线端子应可靠接地; 被试品油箱应可靠接地; 对装有放气塞的套管升高座、低压接线盒、穿缆式套管及有载分接开关均应放气, 直到其溢油为止。

### 3.10.8.2 试验一般要求

本试验的目的是考核分级绝缘绕组每个线端对地的耐电压试验, 而不是考核相间和匝间的电压试验。该项试验是对操作冲击试验的有效补充。

对于带分接绕组的变压器, 应选择合适的分接使被试绕组产生所要求的电压, 其他绕组端子出现的电压尽可能接近于所要求的试验电压值。

受试验设备和产品结构限制时, 较低电压绕组端子承受的试验电压不应比规定电压低 8%。

如果无其他规定, 则分接位置和感应倍数由制造方确定。

电压的波形应接近正弦波, 试验中电压的峰值与方均根值都应测量, 取峰值除以  $\sqrt{2}$  作为试验电压。

试验电压应在最高电压端子上测量, 如果不可行 (如受外绝缘距离和高压绝缘系统绝缘限制), 则应在与电源相连的端子上测量。可以在 50%~80% 的试验电压下进行校正, 并记录此时被试品励磁侧的试验电压, 从而外推出最高电压端子在 100% 试验电压时的被试品励磁侧的试验电压。在甩掉高压测量系统后, 可以采用外推的被试品励磁侧的试验电压对被试品施加试验电压。

试验电压的允许偏差为  $\pm 1\%$ 。

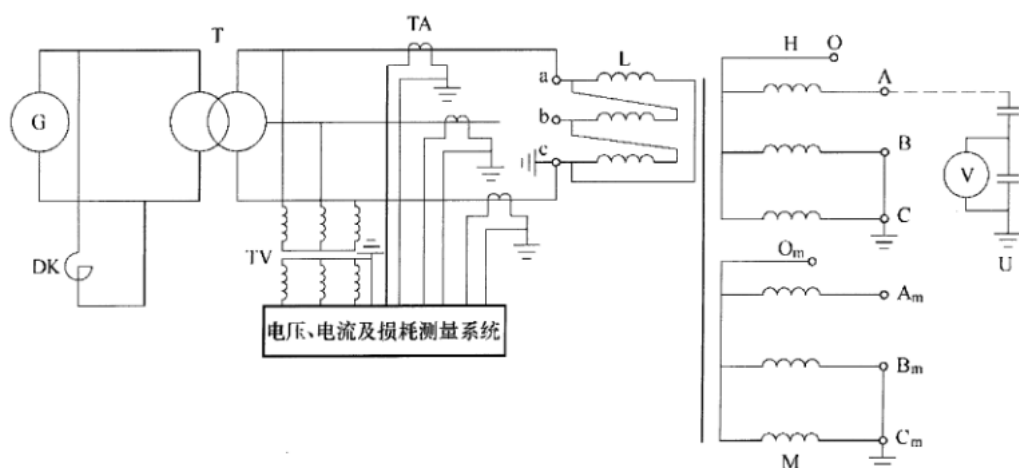
### 3.10.8.3 测量系统的不确定度

工频测量系统的不确定度为  $\pm 3\%$ 。

### 3.10.8.4 试验方法

#### 3.10.8.4.1 接线示意图

当被试变压器的中性点的绝缘水平大于线端绝缘水平的 1/3 时, 典型的试验方法为非被试相支撑法, 图 11 为联结组标号为 YNyn0d11 的三相三绕组变压器 (试验 A 相时) 的典型接线示意图。

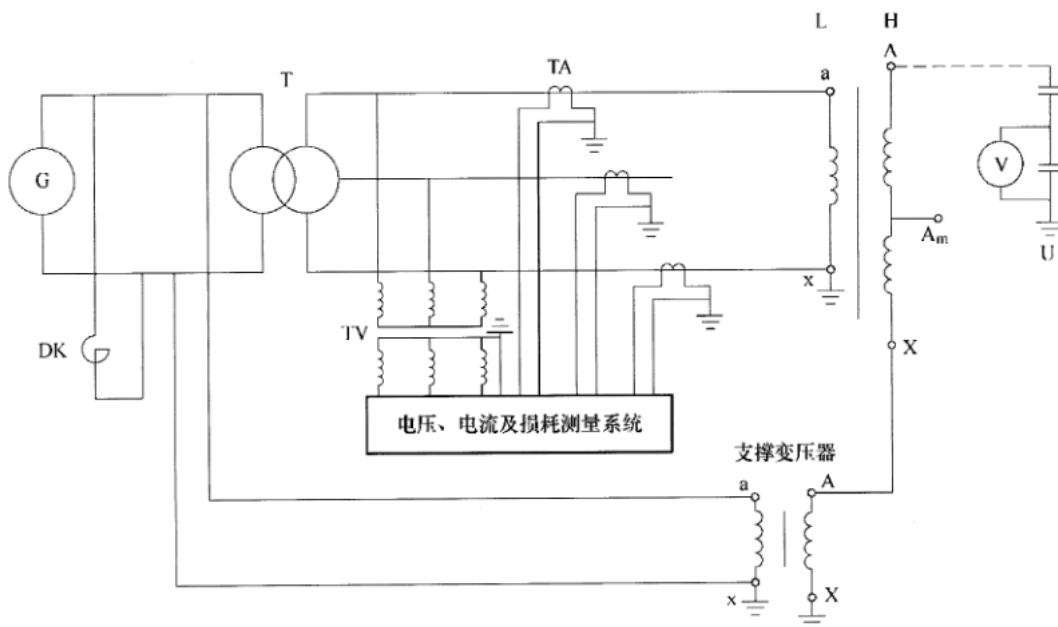


说明:

T——中间变压器;  
TA——电流互感器;  
TV——电压互感器;  
DK——补偿电抗器;  
G——发电机;  
L——被试品低压绕组;  
H——被试品高压绕组;  
M——被试品中压绕组;  
U——工频测量系统。

图11 三相三绕组变压器线端交流耐电压试验典型接线示意图

单相变压器进行试验时,为了使被试变压器的感应倍数不超过2倍,同时使具有较低 $U_m$ 电压的绕组线端尽可能接近试验电压,典型的试验方法是采用中性点外接支撑电位的方法,如图12所示。



说明:

T——中间变压器;  
TA——电流互感器;  
TV——电压互感器;  
DK——补偿电抗器;  
G——发电机;  
L——被试品低压绕组;  
H——被试品高压绕组;  
U——工频测量系统。

图12 单相变压器中性点外接支撑电位的线端交流耐电压试验典型接线示意图

### 3.10.8.4.2 施加电压的程序和方法

除非另有规定，当试验电压的频率等于或小于 2 倍额定频率时，试验时间为：

$$120\text{ s} \times \text{额定频率/试验频率 (s)}, \text{ 但不少于 } 15\text{ s}$$

试验应在不大于规定试验电压的 1/3 电压下接通电源，并与测量相配合尽快将电压升至规定试验电压值。施加规定试验电压达到规定时间后，应将电压迅速降至规定试验电压的 1/3 以下，然后切断电源。

### 3.10.8.5 结果和判定

如果试验电压不出现突然下降，则试验合格。

### 3.10.9 操作冲击和雷电冲击试验

操作冲击和雷电冲击试验按 GB/T 1094.4 的规定进行。

## 3.11 有载分接开关试验（适用于有载调压变压器）

### 3.11.1 操作试验

在变压器完成装配后，有载分接开关应承受以下顺序的操作试验，且不应发生故障：

- 变压器不励磁，完成 8 个操作循环（1 个操作循环是从分接范围的一端到另一端，并返回到原始位置）；
- 变压器不励磁，且在操作电压降到额定值 85% 时，完成 1 个操作循环；
- 变压器在额定频率、额定电压下空载励磁时，完成 1 个操作循环；
- 将变压器的一个绕组短路，并尽可能使分接绕组中的电流达到额定值，在粗调选择器或极性选择器操作位置处或中间分接每一侧的两个分接范围内，完成 10 次分接变换操作（分接开关经过转换位置 20 次）；
- 大型变压器受设备容量的限制时，如果不能完成在粗调选择器或极性选择器操作位置处或中间分接每一侧的两个分接范围内的分接转换，则允许分段进行，但分接开关应经过转换位置 20 次。

### 3.11.2 安装在变压器本体上的有载分接开关密封试验

本试验可结合变压器本体的压力密封试验进行，对分接开关施加比油箱顶层压力高 20 kPa 的压力，持续 24 h，分接开关表面应无渗漏，压力表的指示降低应不超过 70%。

## 3.12 压力密封试验

### 3.12.1 一般要求

压力密封试验应在装配完毕的产品上进行，对于可拆卸的储油柜、净油器、散热器或冷却器可单独进行。对于拆卸运输的变压器一般进行两次压力密封试验，第一次是在变压器装配完毕，且装全所有充油组件后进行的；第二次是在变压器拆卸外部组部件后、在运输状态下对变压器本体进行的。压力以最高油面为基准施加。

### 3.12.2 试验目的

检测变压器油箱和充油组部件本体及装配部位的密封性能，防止运行时渗漏油的发生，以及防止变压器主体在运输时的漏气、漏油或因进水而引起的变压器受潮。

### 3.12.3 试验方法

#### 3.12.3.1 试验准备

试验前连接好试验管路、紧固试漏系统的所有紧固件，安装好压力表，并擦净油箱及充油组部件的外表面，以便在试漏过程中观察渗漏油情况。打开注油系统通向变压器及变压器组部件之间连接的所有阀门，并打开吸湿器连管的盖板（中小型变压器打开储油柜上部放气塞），向变压器内注入变压器油至规定油面高度。

#### 3.12.3.2 装全所有充油组部件的压力密封试验

##### 3.12.3.2.1 吊罐油柱法：通过吊罐油柱的静压力来达到要求的试漏压力的方法。

从油箱底部连接好吊罐，关闭储油柜与油箱间的阀门，打开吊罐与油箱间的所有阀门，利用垂直的吊罐油面压力给变压器油箱及组部件施加一个静压力；吊罐油柱的高度由试漏压力计得出。

##### 3.12.3.2.2 充气加压法：通过向储油柜胶囊内或储油柜油面上充入一定压力的干燥气体来达到要求的试漏压力的方法。

将储油柜内油面调整到规定高度，通过吸湿器联管上安装的充气装置或在储油柜放气塞外装的气门，向储油柜的胶囊内或储油柜内充入干燥空气或氮气，通过压力传递向油箱及组部件施加油压；注意充气速度不应过快，当压力表指示达到规定值时关闭阀门。

#### 3.12.3.3 试漏压力及持续时间

试漏压力及持续时间应符合 GB/T 6451 或 GB/T 1094.1 的规定或按用户要求，但最后一次补漏后的试漏时间不得少于试漏规定总时间的 1/3，应注意油箱底部所受压力一般不应超过油箱所能承受的压力值。

#### 3.12.3.4 试验结果的判定

试验过程中应随时检查压力表的压力是否下降，油箱及其充油组部件表面是否渗漏油，重点检查渗漏焊缝和密封面的渗漏油情况。如果结果符合 GB/T 6451 的规定，则判定该变压器压力密封试验合格。

### 3.13 内装电流互感器变比和极性试验

本试验的目的是检查内装电流互感器的二次接线位置是否正确。试验可采用电流互感器（TA）测试仪或变比测试仪。仪器的精度应保证其能够定性地检查电流互感器的变比和极性。

对所有内装的电流互感器的变比和极性进行检查。

检查的结果应与铭牌标称一致。

### 3.14 铁心和夹件绝缘检查

本项试验通常与绕组对地及绕组间直流绝缘电阻测量一同进行。试验见 3.9。

### 3.15 绕组对地和绕组间电容测量

#### 3.15.1 试验一般要求

试验应在相对湿度小于 85%、环境温度（被试品温度）为 5℃~40℃并尽可能在 20℃左右的条件下进行。

额定容量为 8 000 kVA 及以上的电压等级 35 kV 变压器和电压等级 66 kV 及以上的所有变压器应进行本项试验。

3.15.2 试验前的准备

被试品油箱及测量仪器接地端应牢固接地，被试品应放气，并应接地放电。如果铁心和夹件单独引出，则应将引出端子可靠接地。

3.15.3 测量仪器和精度

测量仪器可采用西林电桥或介质损耗因数测量仪，精度不大于 2%。

3.15.4 试验方法

3.15.4.1 试验接线示意图

绕组对地电容测量接线示意图（“反接”法）如图 13 所示。

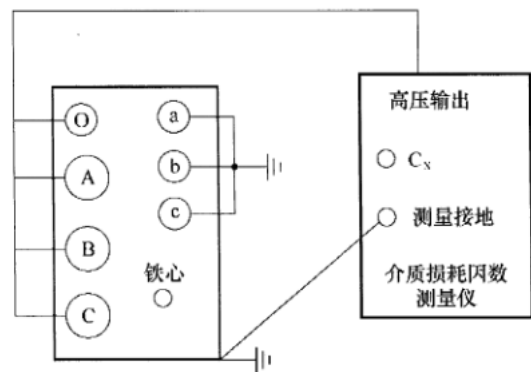


图13 绕组对地电容测量接线示意图（“反接”法）

3.15.4.2 测量方式组合

双绕组变压器的测量组合方式应不少于表 13 的规定。

表13 双绕组变压器绕组对地和绕组间电容测量组合方式

| 序号 | 被试绕组    | 接地部位          | 测量方法  |
|----|---------|---------------|-------|
| 1  | 高压绕组    | 低压绕组、铁心、夹件及油箱 | “反接”法 |
| 2  | 低压绕组    | 高压绕组、铁心、夹件及油箱 |       |
| 3  | 高压及低压绕组 | 铁心、夹件及油箱      |       |

三绕组变压器的测量组合方式应不少于表 14 规定。

表14 三绕组变压器绕组对地和绕组间电容测量组合方式

| 序号 | 被试绕组       | 接地部位               | 测量方法  |
|----|------------|--------------------|-------|
| 1  | 高压绕组       | 中压绕组、低压绕组、铁心、夹件及油箱 | “反接”法 |
| 2  | 中压绕组       | 高压绕组、低压绕组、铁心、夹件及油箱 |       |
| 3  | 低压绕组       | 高压绕组、中压绕组、铁心、夹件及油箱 |       |
| 4  | 高压及中压绕组    | 低压绕组、铁心、夹件及油箱      |       |
| 5  | 高压、中压及低压绕组 | 铁心、夹件及油箱           |       |

3.15.4.3 测量电压的选取

被试绕组为 10 kV 及以上时，测量电压选用 10 kV；被试绕组为 10 kV 以下时，测量电压选用接近

额定电压。

### 3.15.5 结果的判定

应提供实测值。

结果的判定按照技术协议的规定。

## 3.16 绝缘系统电容的介质损耗因数 $\tan\delta$ 测量

### 3.16.1 试验方法

本项试验与绕组对地和绕组间电容测量一起完成。试验要求见 3.15。

### 3.16.2 结果的判定

测试结果的判定条件如下：

- 应尽可能在同一温度下比较  $\tan\delta$  值；
- 结果应符合技术协议的规定；
- 提供实测值。

## 3.17 温升试验

### 3.17.1 试验前准备

被试品绝缘油面应处于合适的位置。

被试品周围不得有墙壁、热源、堆积物及外来辐射气流等干扰。

被试品铁心、夹件引出接线端子应可靠接地。

被试品油箱应可靠接地。

对装有放气塞的套管升高座、低压接线盒、套管、冷却系统及有载分接开关均应放气，直到其溢油为止。

应确认油泵、风机旋转方向是否正确。

应确认分接开关的位置是否正确。

应布置温度传感器。

应按照 3.5 的要求测量冷态电阻。

### 3.17.2 试验一般要求

测定稳态温升的标准方法是采用短路接线的等效试验方法。

按照协议也可采用“直接负载法”和“相互负载法”。

试验温度应介于 5℃ 与变压器设计所依据的最高环境温度之间。

冷却水的温度应介于 5℃ 与变压器设计所依据的最高冷却水温度之间。

对于分接范围不超过  $\pm 5\%$ ，且额定容量不超过 2 500 kVA（单相 833 kVA）的变压器，在主分接下进行温升试验。

对于分接范围超过  $\pm 5\%$  的变压器，或额定容量超过 2 500 kVA（单相 833 kVA）的变压器，试验时施加的总损耗应为最大总损耗分接下的损耗，在第二阶段施加的电流，应为最大电流分接的电流。

如果变压器具有多个额定容量值（两种或多种冷却方式），则原则上温升试验应在每个额定容量下进行，但经制造方与用户协商同意，试验的数量可以减少。

对于多绕组变压器，当一个绕组的额定容量等于其余绕组的额定容量之和时，其温升要求是指所有绕组均同时在各自额定负载下的。如果情况不是这样，则应选定一种或多种特定的组合，并规定相应的温升限值。

多绕组变压器的损耗按 GB/T 13499 的规定进行计算。

对于三相变压器，绕组平均温升测量应包含中间相绕组。对于 Y 联结、低电压且大电流绕组，应测量电路端子间的电阻，以排除中性点引线对绕组平均温升测量的影响。

### 3.17.3 主要测量仪器和准确度

主要测量仪器和准确度如下：

- 电压互感器和电流互感器：中型以下变压器推荐采用不低于 0.2 级，大型变压器推荐采用不低于 0.05 级；
- 功率分析仪或类似仪器：在测量的功率因数下推荐采用不低于 0.5 级；
- 温度测试仪：推荐采用测量偏差不超过  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ；
- 直流电阻测试仪：推荐采用不低于 0.2 级。

### 3.17.4 接线示意图

接线示意图与“短路阻抗和负载损耗测量”的接线示意图相同。

### 3.17.5 试验方法

#### 3.17.5.1 概述

试验分下面两个阶段进行：

- 施加总损耗（试验第一阶段）：本阶段可以测定顶层液体温升和液体平均温升，试验中，应监测顶层液体和冷却介质的温度，试验需持续进行，直到液体的温升稳定为止。当顶层液体温升的变化速率小于  $1\text{ K/h}$ ，并至少维持 3 h，本试验阶段可以结束。
- 施加额定电流（试验第二阶段）：顶层液体温升测定之后，应立即将试验电流降至额定电流继续试验。持续 1 h，在此期间应至少每间隔 5 min 记录一次顶层液体、绕组热点（如果测量）和外部冷却介质温度，并连续记录。施加额定电流 1 h（如果要求进行油箱表面热点温升测量，则应在此试验阶段结束前测量）结束时，应迅速切断电源和打开短路接线，立即测量绕组的电阻。如果电阻测量失败，或需要对其余的绕组进行电阻测量，则可重复上述过程。

#### 3.17.5.2 冷却介质温度的测量

##### 3.17.5.2.1 环境温度的测量

温度传感器或温度计在试品周围不少于 4 个，大型变压器（额定容量不小于 100 MVA）不少于 6 个。

对于 ONAN 变压器，其周围的环境温度传感器或温度计应放置在冷却表面高度约一半的位置处。

温度传感器或温度计应沿油箱四周分布，距油箱和冷却表面 2 m，高度为冷却表面高度的一半，且传感器或温度计应避免直接受热辐射的影响。为了防止空气湍流引起剧烈的温度变化，应为温度传感器或温度计配备与变压器时间常数近似的适当吸热容器。

对于强迫风冷变压器，温度传感器或温度计应放置在距冷却器进风口处约 0.5 m 的位置。

##### 3.17.5.2.2 冷却水温度

冷却水温变化应尽量小，测量冷却器入口温度，定期记录水温 and 水的流量。

#### 3.17.5.3 被试变压器液体温度的测量

##### 3.17.5.3.1 顶层油温度的测量

顶层油的温度是用 1 个或多个浸入油箱内顶层液体中的温度传感器或温度计或箱盖上的温度传感器或温度计座中的温度传感器或温度计测定的，温度传感器或温度计数量规定如下：

——额定容量 $\geq 100$  MVA: 3 个;

—— $20 \text{ MVA} \leq \text{额定容量} < 100 \text{ MVA}$ : 2 个;

——额定容量 $< 20 \text{ MVA}$ : 1 个。

如果温度传感器或温度计的数量大于 1, 则取温度读数的平均值。

### 3.17.5.3.2 底部油温度的测量

底部油温度是用置于散热器(或冷却器)连接到油箱中的油联管处的温度传感器或温度计来测定的。

如果装有几组散热器(或冷却器), 则应用多个温度传感器或温度计来测量。

### 3.17.5.3.3 油平均温度的测量

油平均温度是顶层油温度与底部油温度的平均值。

### 3.17.5.4 温升计算

#### 3.17.5.4.1 顶层液体温升、液体平均温升计算

顶层液体温升按公式(7)计算。

$$\Delta\theta_o = \theta_o - \theta_a \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中:

$\Delta\theta_o$ ——顶层液体温升;

$\theta_o$ ——施加总损耗结束时测得的顶层液体温度;

$\theta_a$ ——施加总损耗结束时测得的外部冷却介质温度。

液体平均温升计算按公式(8)计算。

$$\Delta\theta_{om} = \theta_{om} - \theta_a \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:

$\Delta\theta_{om}$ ——液体平均温升;

$\theta_{om}$ ——施加总损耗结束时计算的液体平均温度;

$\theta_a$ ——施加总损耗结束时测得的外部冷却介质温度。

#### 3.17.5.4.2 绕组平均温度的计算

根据测量绕组的电阻值, 可按公式(9)或公式(10)计算绕组平均温度。

$$\theta_2 = \frac{R_2}{R_1} (235 + \theta_1) - 235 \quad (\text{对于铜线绕组}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\theta_2 = \frac{R_2}{R_1} (225 + \theta_1) - 225 \quad (\text{对于铝线绕组}) \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中:

$\theta_2$ ——电源断开瞬间的绕组平均温度, 单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ );

$R_2$ ——用断开电源后测得的绕组电阻值外推到断开电源瞬间的绕组电阻值;

$R_1$ ——稳定环境温度下的绕组电阻值;

$\theta_1$ ——稳定的环境温度下的绕组温度, 单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ )。

#### 3.17.5.5 电源断开瞬间的绕组电阻测定

测量电源断开瞬间的绕组电阻时的冷却系统运行方式宜与产品温升试验时一致。

尽可能减少断开试验电路与接通电阻测量电路的时间,并合理选择电路参数以减小电气时间常数,以便尽快测量出第一个有效的绕组热电阻值。对于额定容量 $<100\text{ MVA}$ 的变压器,测得的第一个有效的绕组热电阻值的测量时间不宜超过 $2\text{ min}$ ;对于 $100\text{ MVA}\leq\text{额定容量}<500\text{ MVA}$ 的变压器,测得的第一个有效的绕组热电阻值的测量时间不宜超过 $3\text{ min}$ ;对于额定容量 $\geq 500\text{ MVA}$ 的变压器,测得的第一个有效的绕组热电阻值的测量时间不宜超过 $4\text{ min}$ 。

中型变压器的热电阻测量时间为 $20\text{ min}$ ,大型变压器的热电阻测量时间为 $30\text{ min}$ 。

### 3.17.5.6 冷却(下降)曲线的数值外推法

电源断开瞬间绕组温度和冷却曲线的数值外推过程采用计算机程序来进行,以将这组温度读数数值拟合成一个解析函数估算出绕组的平均温度值。更详细的内容见 GB/T 1094.2—2013 中附录 B。计算机程序外推冷却曲线如图 14 所示。

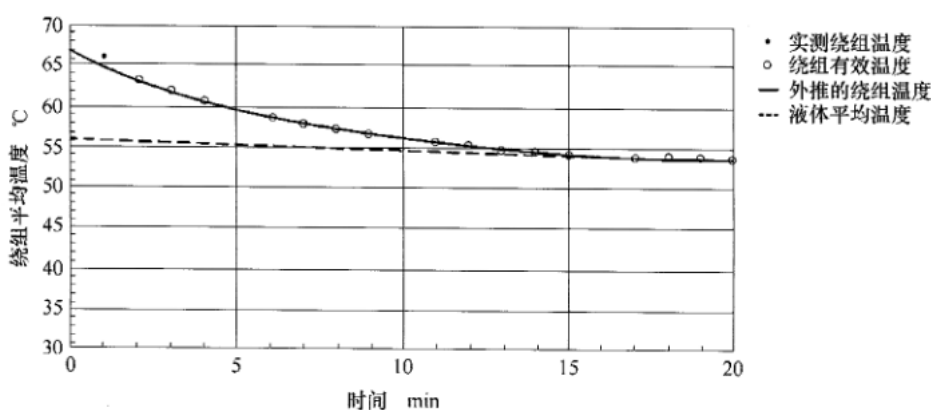


图14 计算机程序外推冷却曲线

### 3.17.5.7 绕组热点温升确定

对于额定容量小于 $\frac{20}{3}\text{ MVA/相}$ 的变压器,绕组热点温升既不需要直接测量也不需要计算。通常认为绕组平均温升足以满足热点温升的要求。

对于额定容量不小于 $\frac{20}{3}\text{ MVA/相}$ 的变压器,绕组热点温升应以试验结果为基础计算得出,也可以通过直接测量得到。

根据温升试验结果按照公式(11)计算绕组热点温升。

$$\Delta\theta_h = \Delta\theta_o + Hg \quad (11)$$

式中:

$\Delta\theta_h$ ——绕组热点温升;

$\Delta\theta_o$ ——顶层液体温升;

$H$ ——热点系数(按照 GB/T 1094.2—2013 中附录 D 计算得出);

$g$ ——绕组与液体之间的平均温度梯度(绕组平均温升与液体平均温升之差)。

按照公式(12)计算直接测量的绕组热点温升。

$$\Delta\theta_h = \theta_h - \Delta\theta_{of} - \theta_a \quad (12)$$

式中:

$\theta_h$ ——电源断开瞬间绕组的热点温度;

$\Delta\theta_{of}$ ——在额定电流下 $1\text{ h}$ 试验期间的顶层液体温度的降低值;

$\theta_a$ ——施加总损耗结束时测得的外部冷却介质温度。

## 3.17.5.8 油箱表面热点温升的确定

油箱表面热点温度应在温升试验施加额定电流 1 h 结束前进行测量, 油箱表面热点温升按照公式 (13) 计算。

$$\Delta\theta_{bh} = \theta_{bh} + \Delta\theta_{of} - \theta_a \cdots \cdots (13)$$

式中:

$\Delta\theta_{bh}$ ——油箱表面的热点温升;

$\theta_{bh}$ ——电源断开前油箱表面的热点温度;

$\Delta\theta_{of}$ ——在额定电流下 1 h 试验期间的顶层液体温度的降低值;

$\theta_a$ ——施加总损耗结束时测得的外部冷却介质温度。

## 3.17.6 温升修正

如果不能施加规定的总损耗或电流, 则其测试结果应按下列规定进行修正。修正的有效范围是: 施加的总损耗与规定的总损耗之差在  $\pm 20\%$  之内; 施加的电流与规定的电流之差在  $\pm 10\%$  之内。

通过协商, 也可扩大修正的适用范围。但施加的总损耗不应低于规定总损耗的 70%; 施加的电流不应低于规定电流的 85%。

施加总损耗结束时高于外部冷却介质温度的液体温升应乘以:

$$\left[ \frac{\text{总损耗}}{\text{试验损耗}} \right]^x$$

修正指数  $x$  规定如下:

——对于 ONAN 冷却方式的配电变压器,  $x=0.8$ ;

——对于 ON 冷却方式的中、大型变压器,  $x=0.9$ ;

——对于 OD 或 OF 冷却方式的中、大型变压器,  $x=1.0$ 。

电源断开瞬间, 高于顶层液体温度的绕组平均温升应乘以:

$$\left[ \frac{\text{额定电流}}{\text{试验电流}} \right]^y$$

修正指数  $y$  规定如下:

——对于 ON 或 OF 冷却方式的变压器,  $y=1.6$ ;

——对于 OD 冷却方式的变压器,  $y=2.0$ 。

## 3.17.7 试验结果判断

对于绝缘系统温度为  $105^\circ\text{C}$  的固体绝缘, 绝缘液为矿物油或燃点不大于  $300^\circ\text{C}$  的合成液体, 在正常使用条件下温升限值按技术协议的规定, 但不得高于以下规定限值:

——顶层液体温升: 60 K;

——绕组平均温升: 65 K (ON 及 OF 冷却方式)、70 K (OD 冷却方式);

——绕组热点温升: 78 K。

对特殊冷却条件下的温升限值, 应按照 GB/T 1094.2 的规定进行修正。

油中的许可气体增长率应符合 GB/T 1094.2—2013 中附录 A 的要求。

## 3.18 声级测定

## 3.18.1 概述

声级测定通常采用声压法, 也可采用声强法, 详见 GB/T 1094.10 的规定。

### 3.18.2 试验前准备

被试品铁心、夹件引出端子应可靠接地。  
 被试品油箱应可靠接地。  
 确认产品励磁绕组分接开关位置（额定分接下）。  
 确认风机和油泵电动机的旋转方向。  
 画出规定的轮廓线和测量时传声器的位置。

### 3.18.3 试验一般要求

试验应在 5℃~40℃环境温度（被试品温度）下进行。反射物体应尽可能远离被试品，地面的反射面应大于被试品表面积在其上的投影。

如果无其他规定，则是否进行负载电流下的声级测量可通过按照公式（14）估算来确定。

$$L_{WA,IN} \approx 39 + 18 \lg (S_r/S_p) \dots\dots\dots (14)$$

式中：

$L_{WA,IN}$ ——变压器在额定电流、额定频率及短路阻抗下的 A 计权声功率级；

$S_r$ ——额定容量，单位为兆伏安（MVA）；

$S_p$ ——基准容量，这里  $S_p=1$  MVA。

如果  $L_{WA,IN}$  值比保证的声功率级低 8 dB 或更多，则负载电流下的声级测量不必进行。

如果进行负载电流下的声级测量，则除试验电流不得低于 70% 额定电流外，其余要求与短路阻抗和负载损耗测量时一致。

应在测量即将开始前和测量刚结束后对测量设备进行校准。如果校准变化超过 0.3 dB，则本次测量结果无效，应重新进行测量。

声压级测量采用 A 计权，用 A 计权声压测量确定声功率级数值，应使用仪器的快速响应指示。

对于其他要求，空载下的声级测量与空载损耗和空载电流测量一致，负载下的声级测量与短路阻抗和负载损耗测量一致。

### 3.18.4 测量仪器的要求

测量用声级计应符合 GB/T 3785.1—2010 和 GB/T 3785.2—2010 中 1 型声级计的要求，声校准器的偏差应不超过 ±2 dB。

声级计在测量前和测量后的校准偏差应不超过 ±0.3 dB。

对于其他仪器要求，空载下的声级测量与空载损耗和空载电流测量一致，负载下的声级测量与短路阻抗和负载损耗测量一致。

### 3.18.5 试验接线示意图

对于试验接线示意图，空载下的声级测量与空载损耗和空载电流测量一致，负载下的声级测量与短路阻抗和负载损耗测量一致。

### 3.18.6 试验方法

#### 3.18.6.1 基准发射面、规定轮廓线及传声器位置的确定

##### 3.18.6.1.1 带或不带冷却设备的变压器基准发射面确定

基准发射面应将距变压器油箱距离小于 3 m 的冷却设备、箱壁加强铁及诸如电缆盒和分接开关等辅助设备包括在内。距变压器油箱距离为 3 m 及以上的冷却设备，则不包括在内。其他部件，如套管、油管路和储油柜、油箱或冷却设备的底座、阀门及其他次要附件也不包括在内。

3.18.6.1.2 规定轮廓线的确定

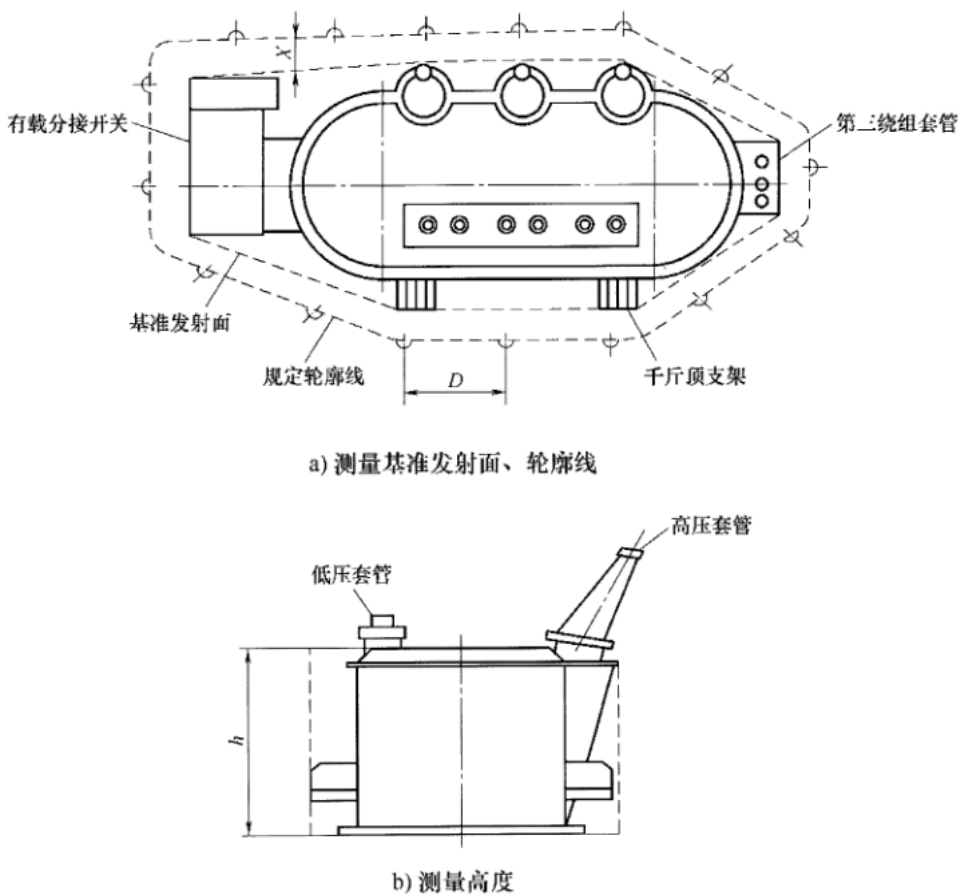
在风冷却设备（如果有）停止运行的条件下进行声级测量时，规定的轮廓线应距基准发射面 0.3 m，在风冷却设备投入运行的条件下进行声级测量时，规定的轮廓线应距基准发射面 2 m。

对于油箱高度小于 2.5 m 的变压器，规定轮廓线应位于油箱高度 1/2 处的水平面上。对于油箱高度为 2.5 m 及以上的变压器，应设置 2 个轮廓线，分别位于油箱高度 1/3 处和 2/3 处的水平面上，但如果由于安全的原因，则选择位于油箱高度更低处的轮廓线。

在仅有冷却设备工作的条件下进行声级测量时，如果冷却设备总高度（不包括储油柜、管路等）小于 4 m，则规定轮廓线应位于总高度 1/2 处的水平面上。如果冷却设备总高度（不包括储油柜、管路等）为 4 m 及以上，应设置 2 个轮廓线，分别位于冷却设备总高度 1/3 处和 2/3 处的水平面上，但如果由于安全的原因，则选择位于冷却设备总高度更低处的轮廓线。

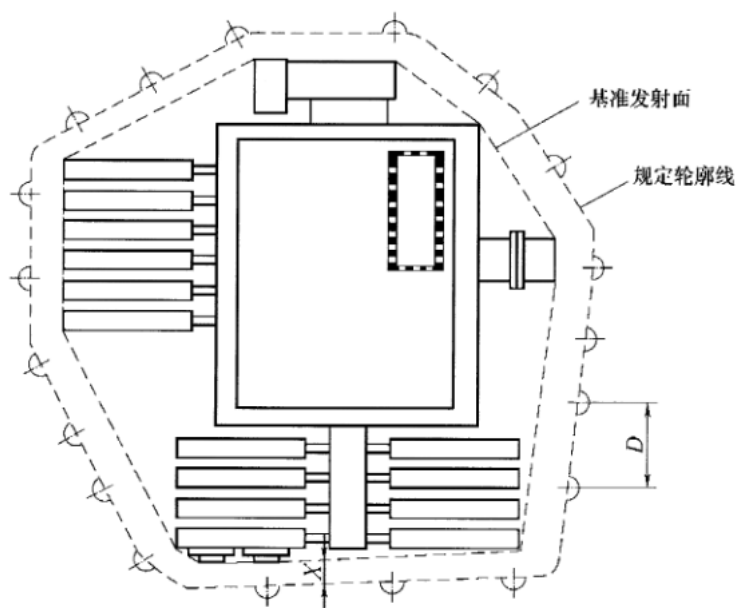
3.18.6.1.3 传声器位置的确定

传声器应位于规定轮廓线上，彼此间距大致相等，间距不得大于 1 m。至少应设有 6 个传声器位置。典型被试品基准发射面、规定轮廓线及传声器的位置如图 15～图 18 所示。

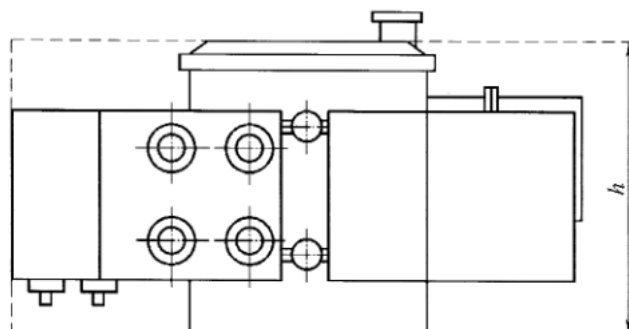


说明：  
 $X$ ——测量距离；  
 $D$ ——传声器间距；  
 $h$ ——油箱高度。

图15 不带冷却设备的变压器声级测量时传声器的典型位置



a) 测量基准发射面、轮廓线



b) 测量高度

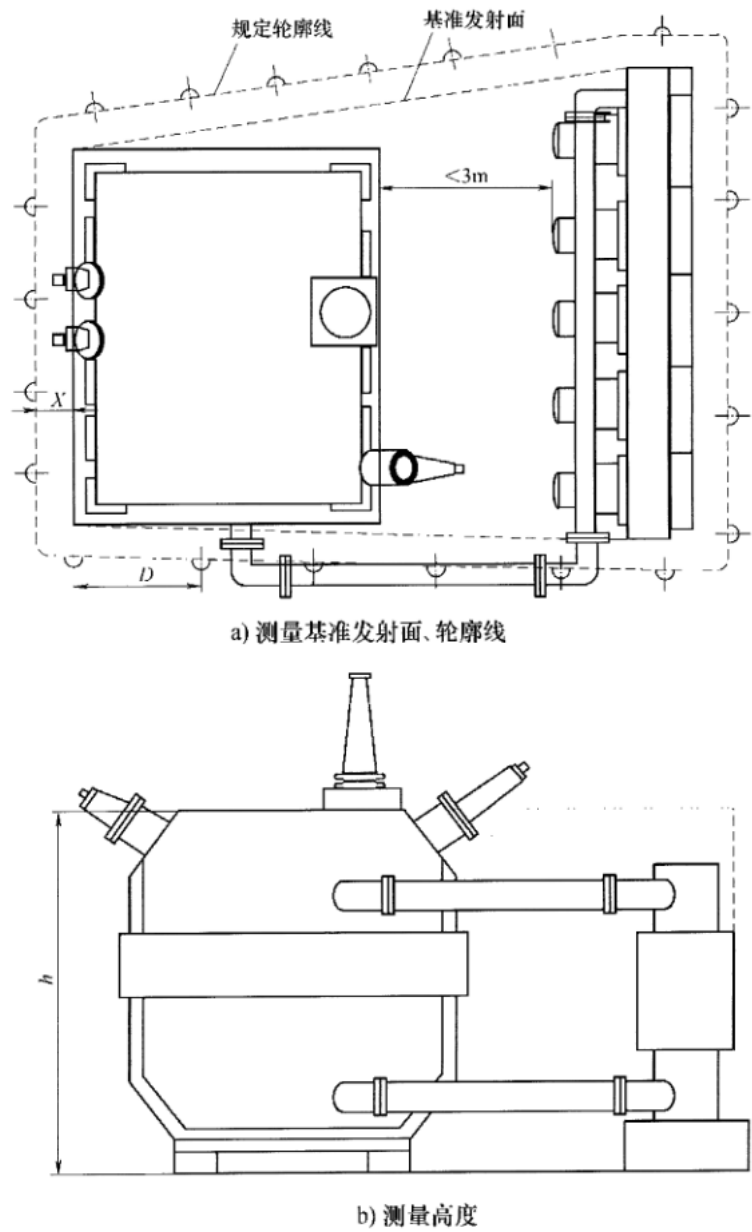
说明:

$X$ ——测量距离;

$D$ ——传声器间距;

$h$ ——油箱高度。

图16 冷却设备直接安装在油箱上或冷却设备在距主油箱基准发射面小于3m处分体式安装的变压器声级测量时传声器的典型位置



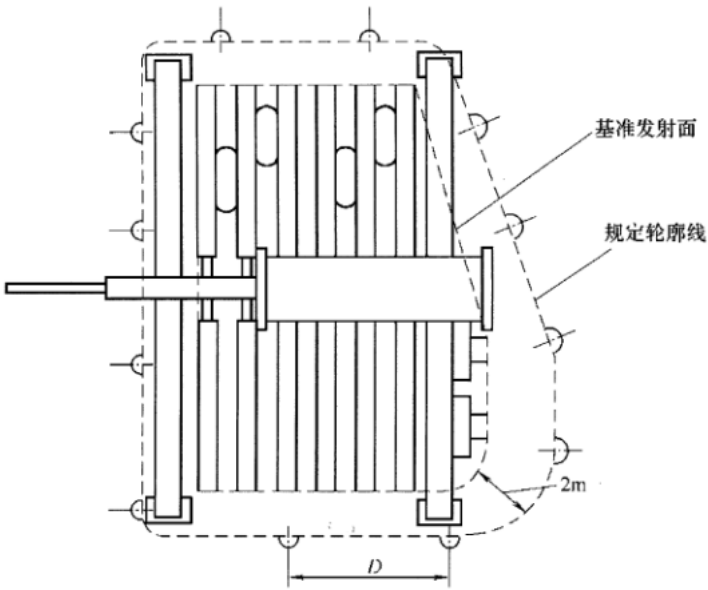
说明:

$X$ ——测量距离;

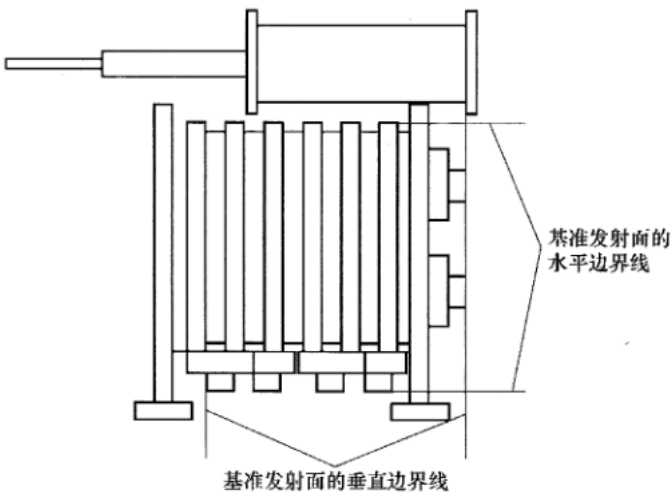
$D$ ——传声器间距;

$h$ ——油箱高度。

图17 风冷却设备独立安装在油箱上或冷却设备在距主油箱基准发射面小于3 m处分体式安装的变压器声级测量时传声器的典型位置



a) 测量基准发射面、轮廓线



b) 测量高度

说明：  
 $D$ ——传声器间距。

图18 距变压器基准发射面距离3 m及以上处分体式安装的冷却设备声级测量时传声器的典型位置

3.18.6.2 背景噪声的测量

测量应在背景噪声值近似恒定时进行。

在即将对试品噪声测量前，应先测出背景噪声的 A 计权声压级。测量背景噪声时，传声器所处的高度应与测量试品噪声时其所处的高度相同，背景噪声的测量点应在规定的轮廓线上。

当测量点总数超过 10 个时，允许只在试品周围呈均匀分布的 10 个测量点上测量背景噪声。

如果背景噪声的声级明显低于试品和背景噪声的合成声级（即差值大于 10 dB），则可仅在一个测量点上进行背景噪声测量，且不需对所测出的试品的声级进行修正。

如果试验前、后背景的平均 A 计权声压级  $\overline{L_{bgA}}$  之差大于 3 dB，且较高者与未修正的平均 A 计权声压级  $\overline{L_{pA0}}$  之差小于 8 dB，则本次测量无效，应重新进行试验。但是，当未修正的平均 A 计权声压级小

于保证值时除外。此时，应认为试品符合声级保证值的要求。这种情况应在试验报告中予以记录。

如果两个背景的平均 A 计权声压级中的较高者，与未修正的平均 A 计权声压级之差小于 3 dB，则本次测量无效，应重新进行试验。但是，当未修正的平均 A 计权声压级小于保证值时除外。此时，应认为试品符合声级保证值的要求。这种情况应在试验报告中予以记录。试验接受准则见表 15。

表15 试验接受准则（油浸式电力变压器）

| $\overline{L_{pA0}}$ 与较高的 $\overline{L_{bgA}}$ 之差<br>dB (A)                 | 试验前的 $\overline{L_{bgA}}$ 与试验后的 $\overline{L_{bgA}}$ 之差<br>dB (A) | 结论                |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------|
| $\geq 8$                                                                    | —                                                                 | 接受                |
| $< 8$                                                                       | $< 3$                                                             | 接受                |
| $< 8$                                                                       | $> 3$                                                             | 重新试验 <sup>a</sup> |
| $< 3$                                                                       | —                                                                 | 重新试验 <sup>a</sup> |
| <sup>a</sup> 如果 $\overline{L_{pA0}}$ 小于保证值，则认为试品符合声级保证值的要求。这种情况宜在试验报告中予以记录。 |                                                                   |                   |

3.18.6.3 测量表面积的计算

距基准发射面 0.3 m 处的测量表面积按公式（15）计算。

$$S=1.25hl_m \cdots \cdots \cdots (15)$$

式中：

- S——测量表面积，单位为平方米（m<sup>2</sup>）；
- h——油箱高度，单位为米（m）；
- l<sub>m</sub>——轮廓线周长，单位为米（m）。

距基准发射面 2 m 处的测量表面积按公式（16）计算。

$$S=(h+2)l_m \cdots \cdots \cdots (16)$$

距基准发射面 1 m 处的测量表面积按公式（17）计算。

$$S=(h+1)l_m \cdots \cdots \cdots (17)$$

考虑安全因素，要求整个轮廓线或其中一部分距基准发射面的测量距离应超过上述规定的试品上的测量。

测量表面积按公式（18）计算。

$$S=\frac{3l_m^2}{4\pi} \cdots \cdots \cdots (18)$$

式中：

- S——测量表面积，单位为平方米（m<sup>2</sup>）；
- l<sub>m</sub>——按安全距离考虑的轮廓线周长，单位为米（m）。

3.18.6.4 环境修正值 K 的计算

环境修正值 K 按公式（19）和公式（20）计算。

$$K=10\lg\left(1+\frac{4S}{A}\right) \cdots \cdots \cdots (19)$$

$$A=\alpha S_v \cdots \cdots \cdots (20)$$

式中：

- K——环境修正值；
- A——吸声面积，单位为平方米（m<sup>2</sup>）；

$S$ ——测量表面积, 单位为平方米 ( $\text{m}^2$ );  
 $\alpha$ ——平均吸声系数, 工业厂房取 0.15;  
 $S_v$ ——实验室 (墙壁、天棚和地面) 的总面积, 单位为平方米 ( $\text{m}^2$ )。

### 3.18.6.5 平均声压级计算

未修正的平均 A 计权声压级  $\overline{L_{pA0}}$  应根据在试品供电时各测量点上测得的 A 计权声压级  $L_{pAi}$  按公式 (21) 计算。

$$\overline{L_{pA0}} = 10 \lg \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1 L_{pAi}} \right) \dots\dots\dots (21)$$

式中:

$N$ ——测量点总数。

注: 当各  $L_{pAi}$  差别不大于 5 dB 时, 可用简单的算术平均值来计算。

背景噪声的平均 A 计权声压级  $\overline{L_{bgA}}$  应根据试验前、后各测量点上测得的背景噪声 A 计权声压级  $L_{bgAi}$  按公式 (22) 计算。

$$\overline{L_{bgA}} = 10 \lg \left( \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M 10^{0.1 L_{bgAi}} \right) \dots\dots\dots (22)$$

式中:

$M$ ——测量点总数。

修正的平均 A 计权声压级  $\overline{L_{pA}}$  按公式 (23) 计算。

$$\overline{L_{pA}} = 10 \lg (10^{0.1 \overline{L_{pA0}}} - 10^{0.1 \overline{L_{bgA}}}) - K \dots\dots\dots (23)$$

式中:

$10^{0.1 \overline{L_{bgA}}}$  ——两个计算出的背景噪声平均 A 计权声压级中的较小者。

### 3.18.6.6 声功率级计算

试品的 A 计权声功率级  $L_{WA}$  应根据修正的平均 A 计权声压级  $\overline{L_{pA}}$  按公式 (24) 计算。

$$L_{WA} = \overline{L_{pA}} + 10 \lg \frac{S}{S_0} \dots\dots\dots (24)$$

式中:

$S$ ——测量表面积, 单位为平方米 ( $\text{m}^2$ );

$S_0$ ——基准参考面积, 这里  $S_0 = 1 \text{ m}^2$ 。

对于冷却设备直接安装在油箱上的变压器, 其冷却设备的声功率级  $L_{WA0}$  按公式 (25) 计算。

$$L_{WA0} = 10 \lg (10^{0.1 L_{WA1}} - 10^{0.1 L_{WA2}}) \dots\dots\dots (25)$$

式中:

$L_{WA1}$ ——变压器和冷却设备的声功率级;

$L_{WA2}$ ——变压器的声功率级。

对于冷却设备为独立安装的变压器, 变压器和冷却设备的声功率级按公式 (26) 计算。

$$L_{WA1} = 10 \lg (10^{0.1 L_{WA0}} + 10^{0.1 L_{WA2}}) \dots\dots\dots (26)$$

### 3.18.6.7 降低的负载电流声功率级计算

如果只能在降低的电流下进行声级测量，则在额定电流下的 A 计权声功率级  $L_{WA,IN}$  应按公式 (27) 计算。

$$L_{WA,IN} = L_{WA,IT} + 40 \lg \frac{I_N}{I_T} \dots\dots\dots (27)$$

式中：

$L_{WA,IT}$ ——降低电流下的 A 计权声功率级；

$I_N$ ——额定电流；

$I_T$ ——降低电流。

该公式只在降低的电流为额定电流的 70%及以上时适用。

### 3.18.6.8 空载声功率级和负载电流声功率级相加的计算

对于在额定电压和额定电流下运行的变压器，其 A 计权声功率级  $L_{WA,SN}$  可由 A 计权空载声功率级  $L_{WA,UN}$  和 A 计权额定电流声功率级  $L_{WA,IN}$  按公式 (28) 计算。

$$L_{WA,SN} = 10 \lg(10^{0.1L_{WA,UN}} + 10^{0.1L_{WA,IN}}) \dots\dots\dots (28)$$

### 3.18.6.9 被试品的声级测定

按技术协议对试品进行供电。

对于空载下的声级测量，其供电方式与空载损耗和空载电流测量时一致。

对于负载下的声级测量，其供电方式与短路阻抗和负载损耗测量时一致。

在绕组电阻测量或短路承受能力试验后进行声级测量时，应注意剩磁对测量结果的影响。

试品一旦达到稳定状态应立即进行测量，避免试品温度变化而导致声级变化。

所允许的供电组合如下：

- 变压器供电，冷却设备及油泵不运行；
- 变压器供电，冷却设备及油泵投入运行；
- 变压器供电，冷却设备不运行，油泵投入运行；
- 变压器不供电，冷却设备及油泵投入运行。

对于每一测量点上的 A 计权声压级需予以记录。

### 3.18.7 试验结果的判定

试验结果应符合 JB/T 10088 或技术协议的规定。

### 3.18.8 注意事项

应使传声器的位置限制在安全范围内。

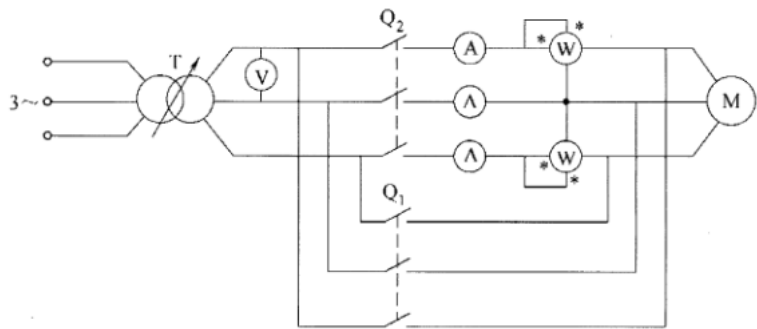
## 3.19 风扇和油泵电动机吸取功率测量

### 3.19.1 试验前准备

检查仪器功能是否正常，并确认仪器检定有效期。

相关试验设备及仪表应按要求正确接线，试验接线如图 19 所示。

被试冷却（散热）装置的风扇和油泵应装备完好。



说明：  
Q<sub>1</sub>、Q<sub>2</sub>——刀开关；  
T——调压器；  
M——电动机；  
A——电流表；  
V——电压表；  
W——功率表。

图19 风扇和油泵电动机功率测量原理图

3.19.2 试验方法

试验方法采用两功率表法或三功率表法。

3.19.3 注意事项

应根据电动机铭牌数据正确选择功率表、电压表及电流表的电压量程、电流量程及功率因数 ( $\cos\varphi=0.8$ )。

正确接线后，应首先合刀开关 Q<sub>1</sub>，调节电压至额定电压，起动电动机并调整转向正确，然后合刀开关 Q<sub>2</sub>；将刀开关 Q<sub>1</sub> 断开，待表计数值稳定后同时读取各表的数值。

测量结果应与铭牌数据符合对应规律。

3.20 暂态电压传输特性测定

3.20.1 试验一般要求

试验主要按照 GB/T 1094.3—2017 中附录 C.2 进行，一般只是在具有大的匝数比的发电机变压器或具有低电压的第三绕组的高电压系统用的大容量变压器上进行。

3.20.2 测量仪器和精度

测量仪器主要为示波器和电容分压器，系统精度应不大于 3%。

3.20.3 试验方法

3.20.3.1 概述

试验可以采用冲击发生器重复施加降低电压的雷电全波冲击电压，配合冲击测量系统进行测量；也可采用低电压重复波发生器配合示波器进行测量。

3.20.3.2 试验接线示意图

暂态电压传输特性试验接线如图 20 所示。

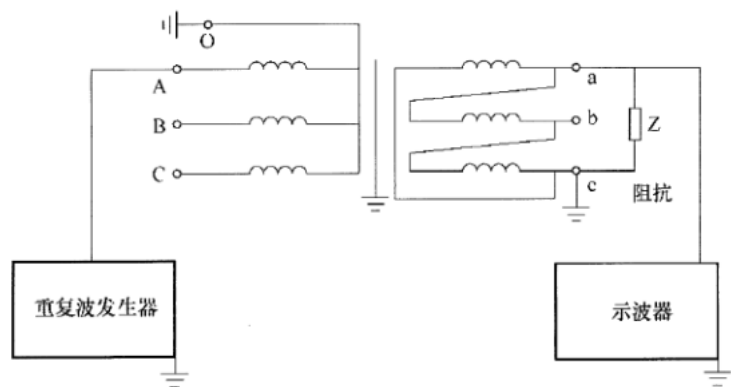


图20 暂态电压传输特性试验接线示意图

3.20.3.3 施加电压的波形和阻抗

施加的电压波形为低电压雷电全波冲击波形： $1.2\mu\text{s}\pm 30\%/50\mu\text{s}\pm 20\%$ 。  
系统波阻抗由用户提供，如果用户不能提供系统波阻抗，则制造方宜提供端子开路时的传递过电压。

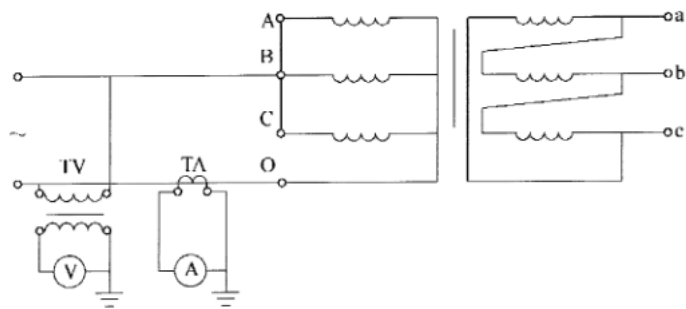
3.20.4 试验结果的判断

试验结果应符合技术协议的规定。  
应提供实测值。

3.21 三相变压器零序阻抗测量

3.21.1 概述

对运行中有零序回路的绕组（YN 联结）均需测量零序阻抗，试验原理接线图如图 21 所示。



说明：  
TA——电流互感器；  
TV——电压互感器；  
A——电流表；  
V——电压表。

图21 三相变压器零序阻抗试验原理接线图

试验时一般从三相线端对中性点供电，以电流为准，测量电压。零序阻抗通常以每相的欧姆数表示，按公式（29）计算。

$$Z_0=3U/I\cdots\cdots\cdots (29)$$

式中：  
 $Z_0$ ——零序阻抗，单位为欧每相（ $\Omega/\text{相}$ ）；

$U$ ——试验电压，单位为伏（V）；

$I$ ——试验电流，单位为安（A）。

### 3.21.2 有平衡安匝的零序阻抗测量

对于联结组标号为 YNyn0d11、Dyn11yn11 的三绕组变压器和 YNd11 的双绕组变压器，其绕组中有一个封闭的三角形联结的绕组，均属有平衡安匝的试品。

有平衡安匝的试品，其零序阻抗是线性的，一般只测量一点，试验电源的波形和测量系统的精度应满足要求。

如果无特殊要求，零序阻抗的测量应按下列测量组合进行：

——对于联结组标号为 YNd11 的试品，只测量高压绕组，试验时 ABC—O 供电、低压开路。

——对于联结组标号为 YNyn0d11 的试品，低压开路时的测量组合见表 16。

表16 YNyn0d11的试品零序阻抗测量组合

| 序号 | 供电端子                | 开路端子                | 短路端子                |
|----|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1  | ABC—O               | $A_m B_m C_m - O_m$ | —                   |
| 2  | ABC—O               | —                   | $A_m B_m C_m - O_m$ |
| 3  | $A_m B_m C_m - O_m$ | ABC—O               | —                   |
| 4  | $A_m B_m C_m - O_m$ | —                   | ABC—O               |

对其他有平衡安匝的绕组联结组合可参照以上两种联结组合的部位进行测量。在以上测量中由于电流沿三角形联结自行构成回路，因此所测的零序阻抗都是短路零序阻抗，而没有空载零序阻抗。

### 3.21.3 无平衡安匝的零序阻抗测量

联结组标号为 YNyn0yn0 的三绕组变压器和 Yyn0 的双绕组变压器及所有联结组合中无闭合三角形的试品，均属无平衡安匝的试品。

无平衡安匝的试品，其零序阻抗是非线性的，每个测试组合均需测量 4 点或 5 点的零序阻抗。试验电流应尽量等于额定电流，如果零序阻抗太大，则应控制其试验电压不超过额定的相电压。以该试验电流等差递减分别测量各点的零序阻抗。

如果无特殊要求，零序阻抗的测量组合按下列规定进行：

——对于 Yyn0 的试品，只测量低压绕组；

——试验时 abc—o 供电、高压绕组开路；

——这种试品只有空载零序阻抗，没有短路零序阻抗；

——对于 YNyn0yn0 的试验，测量组合见表 17。

表17 YNyn0yn0的试品零序阻抗测量组合

| 序号 | 供电端子  | 开路端子                         | 短路端子                |
|----|-------|------------------------------|---------------------|
| 1  | ABC—O | $A_m B_m C_m - O_m$<br>abc—o | —                   |
| 2  | ABC—O | abc—o                        | $A_m B_m C_m - O_m$ |
| 3  | ABC—O | $A_m B_m C_m - O_m$          | abc—o               |

表17 YNyn0yn0的试品零序阻抗测量组合（续）

| 序号 | 供电端子            | 开路端子                     | 短路端子                     |
|----|-----------------|--------------------------|--------------------------|
| 4  | ABC—O           | —                        | $A_mB_mC_m—O_m$<br>abc—o |
| 5  | $A_mB_mC_m—O_m$ | ABC—O<br>abc—o           | —                        |
| 6  | $A_mB_mC_m—O_m$ | abc—o                    | ABC—O                    |
| 7  | $A_mB_mC_m—O_m$ | ABC—O                    | abc—o                    |
| 8  | $A_mB_mC_m—O_m$ | —                        | ABC—O<br>abc—o           |
| 9  | abc—o           | ABC—O<br>$A_mB_mC_m—O_m$ | —                        |
| 10 | abc—o           | $A_mB_mC_m—O_m$          | ABC—O                    |
| 11 | abc—o           | ABC—O                    | $A_mB_mC_m—O_m$          |
| 12 | abc—o           | —                        | ABC—O<br>$A_mB_mC_m—O_m$ |

以上测试组合中序号 1、6、10 是空载零序阻抗，其他均为短路零序阻抗。对于空载零序阻抗测量，应指派专人监视试品油箱各部位，避免零序磁通集中而引起箱壁局部过热，大型产品尤应注意。  
对其他无平衡安匝的试品可参照以上的测量组合进行测量。

3.22 短路承受能力试验

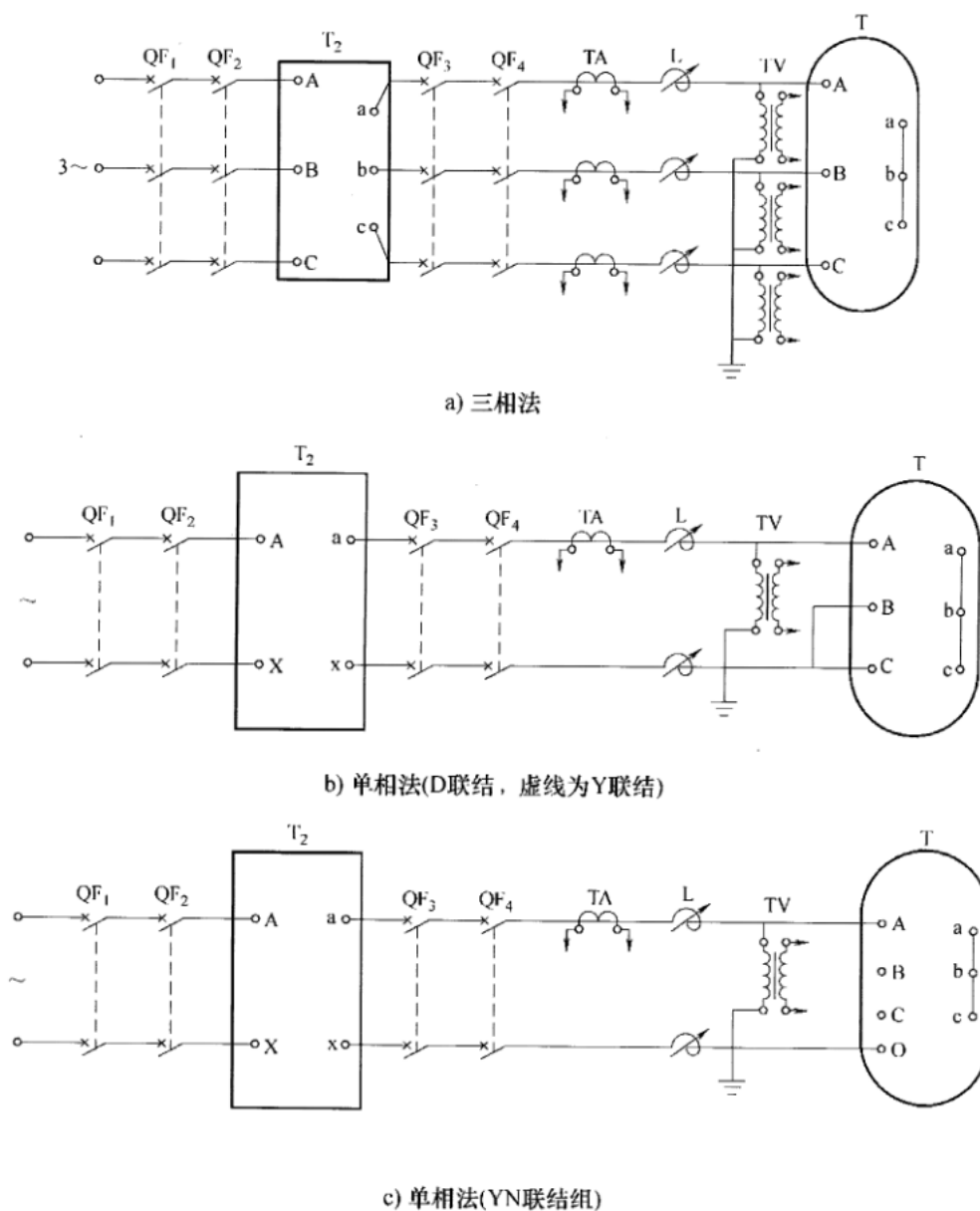
3.22.1 短路承受能力试验通过模拟运行中最严酷的短路故障，使变压器绕组、分接开关、套管、引线及各机械紧固部件承受来自短路电流所产生的巨大的动稳定效应与热效应的考核，从而验证结构的合理性与运行的可靠性。

3.22.2 变压器承受热稳定的能力检验：通常使产品在运行温度下发生短路，对称短路电流产生的热效应全部用来提高绕组温度，其最高温度应不超过 GB/T 1094.5 的规定。变压器承受热稳定的能力可通过计算来验证。

试品的对称短路电流值及持续时间按 GB/T 1094.5 的规定。

3.22.3 对于承受短路的动稳定能力，应通过试验或计算验证其结构、工艺和制造的可靠性。试验通常在大容量试验站进行。试验电源可以是网络，也可以是冲击发电机组，一般均需配置合适的短路试验变压器和电抗器。

3.22.4 对三角形联结的绕组进行三相试验时，如果低压侧为星形联结，则可采用测量低压电流的方法。对三角形联结的绕组进行单相试验时，单相电压应施加在三角形的两个角上，试验时的电压应与三相试验时的相间电压相同。对于星形联结绕组，如果电源容量不足以进行单相试验，而中性点可以利用且能承受相关的电流，则经协商单相电源可施加于线端与中性点之间。短路承受能力试验的接线示意图如图 22 所示。



说明:

QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub>、QF<sub>3</sub>、QF<sub>4</sub>——断路器;

L——限流电抗器;

T<sub>2</sub>——中间变压器;

T——试品;

TA——电流互感器 (接示波器电流测量回路);

TV——电压互感器 (接示波器电压测量回路)。

图22 三相变压器短路承受能力试验接线示意图

### 3.22.5 短路试验前变压器应具备的条件如下:

- 应进行 GB/T 1094.1 规定的例行试验项目 (不包括雷电冲击试验), 试验合格后方能进行短路试验; 对试验没有影响的附件 (如可拆卸的冷却器) 可以不安装; 其中负载试验应在最大分接、主分接和最小分接上进行, 提供以上三个分接的短路阻抗和负载损耗。
- 短路试验开始时, 绕组的平均温度最好在 10℃~40℃ 范围内。

——试品运到试验站后,宜在现场吊心,沿线圈的轴向在高压侧和低压侧的线段和垫块上分别画出 2 条或 3 条直线,如果有可能幅向也应画对应轴向的等条数的直线作为标记;然后拍照,以记载试品短路试验前的形态。

——试验前还应精确测量被试一对绕组试验分接的电抗值,重复测量电抗的误差应在 $\pm 0.2\%$ 以内。

——有条件时,可进行绕组频谱分析测量。

3.22.6 短路电流非对称分量的峰值计算按 GB/T 1094.5 的规定。

3.22.7 短路试验可以采用预先短路、选相合闸,也可以采用预先送电、选相短路的方法。

对单同心式绕组的变压器采用预先短路的方法试验时,为了避免最初几个周波中由于铁心饱和产生的励磁电流迭加在短路电流上,施加电压的绕组应选距铁心较远的那个绕组。

对双同心式绕组(高/低/高)和交叠式绕组的变压器采用预先短路的方法试验时,制造方需与用户协商。

3.22.8 为了在试品绕组中获得规定的初始峰值电流,应采用选相合闸装置控制在电压过零的瞬间合闸;Y 联结的绕组应在相电压过零时合闸,D 联结的绕组应在线电压过零时合闸。

3.22.9 三相变压器应使用三相电源进行试验,没有三相电源时也可使用单相电源;使用单相电源时,D 联结的绕组单相电源应施加在三角形的两个角上;试验期间该单相电源应相当于三相试验的线电压。Y 联结的绕组单相电源应施加于一个线端与另外两个连在一起的线端上;试验期间单相电压应等于三相试验时线电压的 $\sqrt{3}/2$ 倍。

分级绝缘变压器需考虑其中性点绝缘是否能够满足单相电源的试验要求;Y 联结的变压器,如果电源容量不足且其有中性点可以利用时,则经制造方与用户协商,可在线端与中性点间使用单相电源进行试验。

3.22.10 首先施加小于 70%试验电流进行调试;当合闸相角、试验电流的峰值和对称值及持续时间均达到要求时,再进行 100%试验电流的正式试验;小于 70%试验电流的试验不计入试验次数。

3.22.11 对于 I 类和 II 类的单相变压器,试验次数为三次;如果无另行规定,带有分接的变压器的试验应分别在最大、额定和最小分接位置上各进行一次;三相变压器试验为九次,在不同分接位置上进行,即在旁柱的最大分接、中柱的额定分接和另一旁柱的最小分接位置上分别进行三次。

对于 III 类变压器,其试验程序和分接位置通常由制造方与用户协商确定,一般与 I 类和 II 类变压器相同。

每次试验施加的短路电流允许偏差:峰值电流为 $\pm 5\%$ ,方均根值电流为 $\pm 10\%$ 。

每次试验的持续时间:对 I 类变压器为 0.5 s、对 II 类和 III 类变压器为 0.25 s,其允许偏差为 $\pm 10\%$ 。

3.22.12 每次试验除用示波器记录电流波形外,还应派专人监视试品;每次试验过后,应对电流波形、气体继电器进行观察,并测量该分接的电抗值。

3.22.13 短路试验后应重复全部例行试验,包括在 100%规定试验电压下的绝缘试验;如果规定了雷电冲击试验,则雷电冲击试验也应在此阶段中进行;但对于 I 类变压器,除绝缘试验外的其他试验项目,可以不做。

3.22.14 首先外观检查油箱的几何形状有无变形,套管有无裂痕,压力释放阀有无喷油,然后吊心检查,查看分接开关有无熔焊现象,引线机械紧固及绝缘包扎有无松动、开裂及变形,绕组有无变形,垫块和各支撑件有无位移,各部位有无放电痕迹。

最后分别在高压侧与低压侧按短路试验前的部位拍照,进行比较检查。

3.22.15 如果试验中短路电流峰值与稳定值、持续时间及试验次数均达到 GB/T 1094.5 的规定;试验中的波形和电抗与原始值比较,符合 GB/T 1094.5 的规定;且例行试验复试项目,包括 100%规定试验电压下的外施耐电压试验、感应耐电压试验及雷电冲击试验(如果有规定)合格;在外观及吊心检查中油箱的几何形状无变形、高低压套管与分接开关无损伤、绕组和支撑件无变形、标记无明显位移、无放电痕迹、气体继电器中无气体、压力释放阀无喷油等,则认为该产品经受住短路试验考核,试验合格;如果以上任何一项超出了允许范围和规定,则认为试验不合格。

### 3.23 液浸式变压器压力变形试验和液浸式变压器真空变形试验

#### 3.23.1 概述

按照 GB/T 1094.1 的要求，真空变形试验和压力变形试验应在装配完整的变压器上进行。

#### 3.23.2 试验目的

通过压力变形试验和真空变形试验检测变压器的机械强度是否符合设计要求，保证变压器在后续的使用过程中不出现异常变形。

#### 3.23.3 试验方法

试验方法如下：

- 试验准备：首先将变压器放置平稳，并连接好真空泵或压缩空气泵及试验管路，在变压器上安装好合适量程的压力表或真空表，按规定紧固箱沿和法兰盖板的螺栓。
- 测试点的选择：测试点一般选在强度比较薄弱、变形比较大的位置，测试点的具体数量可根据变压器的结构、大小及加强铁的数量按以下要求选择：
  - 高、低压侧：一般在变压器高度方向的中部箱壁和加强铁上至少各取 3 点，带盒壁结构的变压器需在盒壁上至少选取 1 个测试点；
  - 箱顶：根据不同结构或对变形的特殊要求，选择易变形的部位作为测试点，应在箱盖中部或其他薄弱部位至少选取 2 个测试点；
  - 两侧端面：是否选择测试点可根据变压器宽度及加强铁而定，对于宽度较大、加强铁较少的变压器可设测试点。
- 测试基准线：在每个被测试面拉细绳作为测试基准线，在测试点的两端将细绳固定好，注意测试基准线不可随变压器的变形而移动。
- 初始值的确定：试验时一般先进行真空变形试验，然后进行压力变形试验；在试验之前，为释放焊接应力可先对变压器进行真空预抽，使之消除一定的变形应力；预抽解除后，测量测试基准线到变压器上各测试点的距离，将此数值作为真空变形试验的初始值；预抽真空度可根据变压器的大小由制造方自行制定；真空变形试验后，变压器恢复变形后的测量值为压力变形试验的初始值。
- 试验数据的获得：试验压力和时间按 GB/T 1094.1 的规定；当试验压力和时间达到规定值时，测量测试基准线到各测试点的距离，该数值与它的初始值之差为测试点的弹性变形量；解除压力或真空后再次进行测量，此数值与它的初始值之差为测试点的永久变形量。

#### 3.23.4 结果的判定

变压器的弹性变形量或永久变形量应符合制造方有关技术条件的规定，如果弹性变形量或永久变形量在规定范围内，则变压器的压力变形试验和真空变形试验合格。如果超出了规定，则应对变压器进行加固，并重新按上述规定试验。

#### 3.23.5 注意事项

注意事项如下：

- 变压器的所有紧固件应装配齐全且紧固到位。
- 整个试验应指派专人监视，在试验过程中应随时观察压力表和真空表的示值和变压器的变形量，特别是压力变形试验时应控制试验压力不得超出规定值。如果发现变压器有异常变形或声音，则应立即停止试验并查找原因。压力变形试验时不要在变压器附近长时间停留，随时注意安全。

### 3.24 外部涂层检查

外部涂层检查包含漆膜厚度测量和划格试验。试验方法分别按照 GB/T 4956 和 GB/T 4893.4 的规定。测量结果应符合用户技术协议及制造方工艺文件的规定。

### 3.25 运输质量测定

额定容量不大于 1.6 MVA 的变压器采用整体测量。大型变压器采用测量或计算的方法，具体由制造方与用户协商。

### 3.26 频率响应测量

频率响应测量（频率响应分析）按照 GB/T 1094.18 或 DL/T 911 进行。

### 3.27 短时过负载能力试验

#### 3.27.1 试验一般要求

测量系统的精度和试验接线与温升试验时一致。试验应在最高油位下进行。

#### 3.27.2 试验方法

一般在温升试验结束后立即施加 1.5 倍额定电流，持续时间为 2 h。

#### 3.27.3 试验结果的判断

如果结果符合下列条件，则试验合格：

- 压力保护装置不动作；
- 变压器无渗漏油现象；
- 油箱波纹及片式散热器的变形量在规定范围内；
- 油箱外壳及套管温升不大于 85K。

### 3.28 强迫油循环变压器冷却油流系统的负压测试

#### 3.28.1 试验一般要求

变压器冷却系统的安装应与运行时一致。变压器的油位应符合规定的要求。

#### 3.28.2 试验方法

在每个冷却器油泵进油端的放气处安装压力表。

试验前应通过变压器本体及冷却器的放气塞放气，确认冷却器油泵的油流方向正确。

同时开启所有油泵，连续观测并记录稳定的压力表读数。

#### 3.28.3 试验结果的判断

压力表不出现负压读数为合格。

### 3.29 在 90%和 110%额定电压下的空载损耗和空载电流测量

试验应按照 3.8 的规定进行。

在 110%额定电压时，如果用户未要求空载损耗保证值，则允许平均值电压表的读数（该读数与方均根值电压表的读数具有同一刻度）与方均根值电压表读数的差值超过 3%。

### 3.30 油箱开裂试验

试验按照 GB/T 6451—2015 中 4.3.9 进行。在系列产品中抽取 1 台变压器油箱，对其施加 103 kPa 正压力（液压），历经 10 min 后，其不应出现开裂现象。

### 3.31 运输颠簸试验

试验按照 GB/T 6451—2015 中 4.3.10 和 5.3.13 进行。试验方法及要求由用户与制造方协商确定。

### 3.32 所有分接位置的负载损耗测量

应在所有分接下进行负载损耗测量，试验方法按照 3.7。

如果无其他规定，则除主分接外的其他分接负载损耗测量结果应符合制造方的设计要求。

### 3.33 长时间空载试验

本项试验应在绝缘试验后进行。变压器施加 1.1 倍额定电压，开启正常运行时的全部油泵，运行 12 h，试验过程中，应无明显的局部放电声、电信号。试验前、后油中应无乙炔，总烃含量应无明显变化。

### 3.34 油流静电试验

#### 3.34.1 试验一般要求

试验前产品油箱应可靠接地。产品本体及冷却器应放气。产品油位应符合要求。确认油泵的转动方向是否正确。

#### 3.34.2 测量仪器的要求

直流纳安表：0.5 级，分辨力不大于 0.1 nA。

#### 3.34.3 接线示意图

接线示意图如图 23 所示。

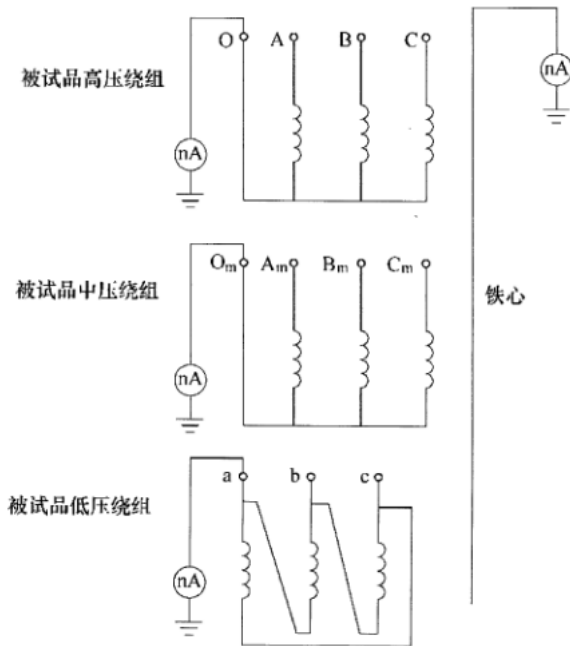


图23 油流静电试验接线示意图

3.34.4 试验方法

变压器不励磁，开启所有油泵，历时 4 h，测量各绕组端子及铁心对地的泄漏电流，直至电流达到稳定值。

3.34.5 试验结果的判断

试验中应无放电信号。

3.35 转动油泵时的局部放电测量

3.35.1 试验一般要求

试验应按照 3.10.7 的规定进行。

3.35.2 试验方法

启动全部油泵运行 4 h，期间连续测量中性点、铁心对地的泄漏电流，并监视有无放电信号。然后在不停油泵的情况下进行局部放电试验，对低压线端施加电压，使高压绕组线端电压为  $1.58U_n/\sqrt{3}$ ，并维持 60 min，期间连续观察测量局部放电量。

3.35.3 试验结果的判断

运转油泵时的局部放电量测量值与油泵不运转时的局部放电量测量值相比，应无明显变化；油中应无乙炔。

4 干式电力变压器试验

4.1 试验项目

例行试验、型式试验及特殊试验的项目按照 GB/T 1094.11 和 GB/T 10228 的规定，详见本标准表 18。

表18 干式电力变压器试验项目

| 序号   | 试验                   | 条款   |
|------|----------------------|------|
| 例行试验 |                      |      |
| 1    | 绕组电阻测量               | 4.4  |
| 2    | 电压比测量和联结组标号检定        | 4.5  |
| 3    | 短路阻抗和负载损耗测量          | 4.6  |
| 4    | 空载损耗和空载电流测量          | 4.7  |
| 5    | 绝缘电阻测量               | 4.8  |
| 6    | 外施耐电压试验              | 4.9  |
| 7    | 感应耐电压试验              | 4.10 |
| 8    | 局部放电测量               | 4.11 |
| 9    | 有载分接开关试验（适用于有载调压变压器） | 4.12 |

表18 干式电力变压器试验项目（续）

| 序号   | 试验       | 条款   |
|------|----------|------|
| 型式试验 |          |      |
| 10   | 雷电冲击试验   | 4.13 |
| 11   | 温升试验     | 4.14 |
| 特殊试验 |          |      |
| 12   | 局部放电测量   | 4.11 |
| 13   | 声级测定     | 4.15 |
| 14   | 短路承受能力试验 | 4.16 |
| 15   | 环境试验     | 4.17 |
| 16   | 气候试验     | 4.18 |
| 17   | 燃烧性能试验   | 4.19 |

4.2 气候、环境和燃烧性能等级的试验准则

当变压器被宣称符合某一气候、环境和燃烧性能等级时，应按表 19 给出的试验顺序，在同一台变压器上进行这些相应的试验，以验证其是否符合所宣称的相应等级的要求。

4.17~4.19 规定的试验，应在能代表所设计类型的同一台变压器上进行。

表19 试验顺序

| 等级 |           |        | 气候 |    | 环境 |    |    | 燃烧性能 |    |
|----|-----------|--------|----|----|----|----|----|------|----|
| 试验 |           | 条款     | C1 | C2 | E0 | E1 | E2 | F0   | F1 |
| 1  | -5℃下的热冲击  | 4.18.4 | 是  | 否  | —  | —  | —  | —    | —  |
| 2  | -25℃下的热冲击 | 4.18.5 | 否  | 是  | —  | —  | —  | —    | —  |
| 3  | 凝露试验      | 4.17.4 | —  | —  | 否  | 是  | 否  | —    | —  |
| 4  | 凝露和湿渗透试验  | 4.17.5 | —  | —  | 否  | 否  | 是  | —    | —  |
| 5  | 燃烧性能试验    | 4.19   | —  | —  | —  | —  | —  | 否    | 是  |

4.3 一般试验条件

以下规定是对干式电力变压器一般试验条件的要求，如果试验项目中无具体的规定，则应按此规定执行。一般试验条件包括：

- 试验应在 5℃~40℃的环境温度下进行；
  - 定期的型式试验应至少每 5 年进行一次；
  - 变压器进行绝缘试验时，其温度应与试验场所的温度接近；
  - 试验应在相关附件装好后的完整变压器上进行（绝缘试验时外壳可不装）；
  - 带分接的绕组应在主分接下进行试验，但相应试验条款另有规定或供、需双方另有协议时除外。
- 除绝缘试验外，变压器其他所有特性的试验均以额定条件为基础，但有关试验条款另有规定时除外。

#### 4.4 绕组电阻测量

##### 4.4.1 试验一般要求

变压器在恒定的环境温度下静止的时间不应少于 3h。绕组温度近似等于环境温度（按 GB/T 1094.1—2013 中 11.2.2）。

带分接的绕组，每个分接都应测量。对所有引出的相应端子间的电阻值均应进行测量。

##### 4.4.2 测量仪器和仪器准确度

测量仪器推荐采用准确度不低于 0.2 级恒流输出的直流电阻测试仪；也可采用准确度不低于 0.5 级的电阻电桥。

##### 4.4.3 试验方法

###### 4.4.3.1 试验接线

绕组电阻测量试验接线示意图如图 24 所示。

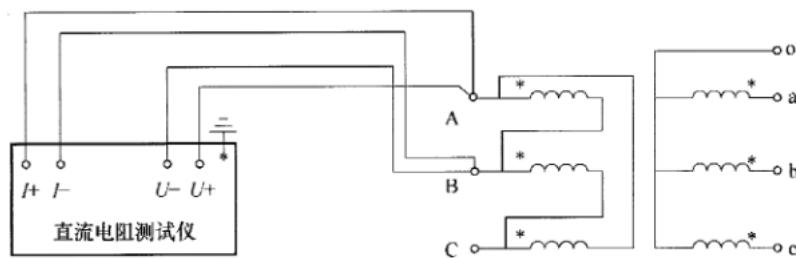


图24 绕组电阻测量试验接线示意图

###### 4.4.3.2 绕组温度的测量

测量时的温度应取置于线圈表面的至少 3 个温度计（温度传感器或热电偶）的读数平均值。绕组的电阻和温度应同时记录。

###### 4.4.3.3 测量电流的选取

根据试品绕组电阻计算值，测量电流应按照仪器规定的范围选取，且不得大于被试绕组额定电流的 15%。

##### 4.4.4 结果判定

对于额定容量为 2 500 kVA 及以下的配电变压器，其绕组直流电阻不平衡率：相为不大于 4%，线为不大于 2%。

对于额定容量为 630 kVA 及以上的电力变压器，其绕组直流电阻不平衡率：相（有中性点引出时）为不大于 2%，线（无中性点引出时）为不大于 2%。

如果绕组直流电阻不平衡率由于线材及引线结构等原因而超过上述值，除应在例行试验记录中记录实测值外，还应写明引起这一偏差的原因。使用单位应将其与同温度下的例行试验测量值进行比较，其偏差应大于 2%。

## 4.5 电压比测量和联结组标号检定

### 4.5.1 试验一般要求

每个分接都应进行电压比测量。应检定单相变压器的极性和三相变压器的联结组标号。

### 4.5.2 测量仪器准确度

仪器的准确度应不低于 0.2 级。

### 4.5.3 试验方法

#### 4.5.3.1 测量方法

测量方法：推荐采用电压比测试仪测量。

#### 4.5.3.2 试验接线

##### 4.5.3.2.1 单相变压器试验接线

单相变压器电压比测量接线示意图如图 25 所示。

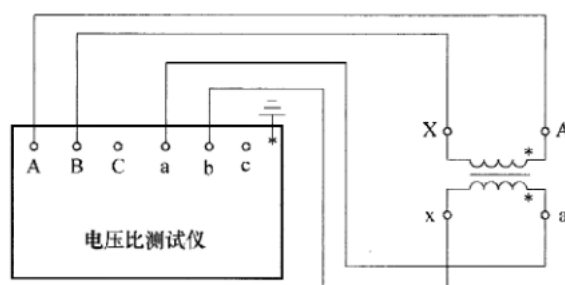


图25 单相变压器电压比测量接线示意图（干式电力变压器）

##### 4.5.3.2.2 三相变压器试验接线

三相变压器电压比测量接线示意图如图 26 所示。

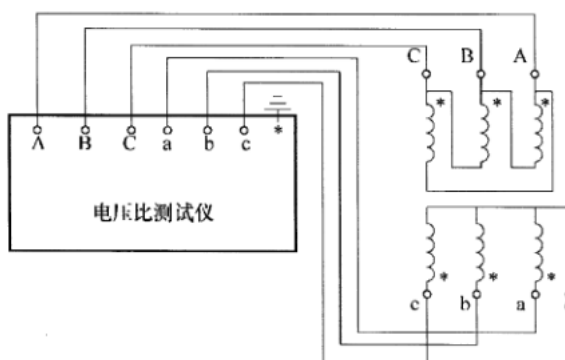


图26 三相变压器电压比测量接线示意图（干式电力变压器）

#### 4.5.3.3 电压比值的基准值计算

电压比值的基准值计算应按照产品铭牌标称的电压值进行，当使用分接因数计算所对应的分接位置的电压比与使用产品标称的电压所计算的电压比一致时，允许只计算主分接的电压比，其他分接可以使用主分接的电压比与分接因数进行测量，否则应计算所有分接位置的电压比。

#### 4.5.4 结果判定

测量结果与规定值的偏差，应不超过 GB/T 1094.1—2013 中表 1 规定的下列空载电压比允许偏差：

- 第一绕组对的主分接或极限分接（如果规定）：规定电压比的 $\pm 0.5\%$ 或实际阻抗百分数的 $\pm 1/10$ ，取两者中的较小者；
- 第一绕组对其他分接：匝数比设计值的 $\pm 0.5\%$ ；
- 其他绕组对：匝数比设计值的 $\pm 0.5\%$ 。

#### 4.6 短路阻抗和负载损耗测量

##### 4.6.1 试验一般要求

变压器的温度接近试验时的环境温度。

一对绕组的短路阻抗和负载损耗测量时，通常由被试品的较高电压绕组施加额定频率的近似正弦波的电压，另一绕组短路，其余绕组开路。应施加相应的额定电流（或分接电流）。在受到试验设备的限制时，可以施加不小于相应额定电流（或分接电流）的 50% 的电流，测得的负载损耗值乘以额定电流（或分接电流）与试验电流之比的平方。

对于分接范围不超过 $\pm 5\%$ 的变压器，一般在主分接进行短路阻抗和负载损耗测量。

对于分接范围超过 $\pm 5\%$ 的变压器，应对主分接、两个极限分接进行短路阻抗和负载损耗测量。试验报告中，除了提供主分接的短路阻抗和负载损耗外，还应提供两个极限分接的短路阻抗。

对于分接范围不超过 $\pm 5\%$ ，但额定容量超过 2 500 kVA 的变压器，如果产品进行温升试验，为了便于进行温升试验，应对主分接、两个极限分接进行短路阻抗和负载损耗测量。如果不进行温升试验，则对主分接进行短路阻抗和负载损耗测量。对于此类变压器，在短路后的复试中也仅在主分接进行短路阻抗和负载损耗测量。

负载试验施加的电流以三相负载电流的算术平均值为准。

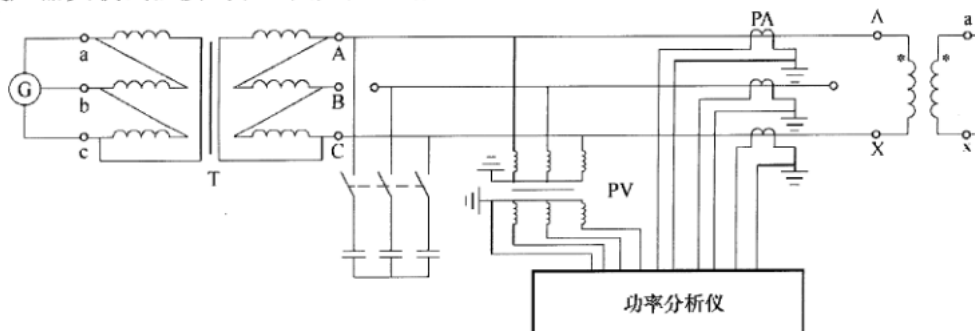
##### 4.6.2 测量仪器和准确度

互感器的准确度不低于 0.2 级，所用仪表准确度应不低于 0.5 级。

##### 4.6.3 试验方法

###### 4.6.3.1 试验接线

单相变压器负载试验接线示意图如图 27 所示。



说明：

T——中间变压器；

PA——电流互感器；

PV——电压互感器。

图27 单相变压器负载试验接线示意图（干式电力变压器）



$U_r$ ——施加电压侧的额定电压，单位为千伏（kV）；  
 $I_r$ ——施加电压侧的额定电流，单位为安（A）；  
 $I_k$ ——试验施加电流，单位为安（A）；  
 $z_k$ ——参考温度时的短路阻抗；  
 $P_k$ ——参考温度下的负载损耗，单位为千瓦（kW）；  
 $P_{kt}$ —— $t^{\circ}\text{C}$ 时的负载损耗，单位为千瓦（kW）；  
 $S_r$ ——额定容量，单位为兆伏安（MVA）；

4.6.3.2.3 电阻损耗计算

典型三相变压器一对绕组的电阻损耗应为两绕组电阻损耗之和，计算方法见公式（33）和公式（34）。

$$P_r=1.5I_r^2R_{xn}=3I_r^2R_{xg} \text{ (Y或YN联结的绕组) } \cdots\cdots\cdots (33)$$

$$P_r=1.5I_r^2R_{xn}=I_r^2R_{xg} \text{ (D联结的绕组) } \cdots\cdots\cdots (34)$$

式中：

$P_r$ ——电阻损耗，单位为千瓦（kW）；  
 $I_r$ ——额定电流，单位为安（A）；  
 $R_{xn}$ ——线电阻，单位为欧（Ω）；  
 $R_{xg}$ ——相电阻，单位为欧（Ω）。

4.6.4 结果判定

结果的合格判定按技术协议，但不得低于表 20 的规定。

表20 干式电力变压器负载损耗和短路阻抗的允许偏差

| 项目   |                                          | 允许偏差                 |                                   |
|------|------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| 负载损耗 |                                          | +15%<br>但总损耗不得超过+10% |                                   |
| 短路阻抗 | a) 有两个独立绕组的变压器，或<br>b) 多绕组变压器中规定的第一对独立绕组 | 主分接                  | 当阻抗值≥10%时，±7.5%<br>当阻抗值<10%时，±10% |
|      |                                          | 其他分接                 | 当阻抗值≥10%时，±10%<br>当阻抗值<10%时，±15%  |
|      | a) 自耦联结的一对绕组，或<br>b) 多绕组变压器中规定的第二对绕组     | 主分接                  | 规定值的±10%                          |
|      |                                          | 其他分接                 | 设计值的±10%                          |
|      | 其他绕组对                                    | 按协议，但绝对值不大于 15%      |                                   |

4.6.5 注意事项

对于低电压、大电流的试品，电压互感器一次线应连接到试品线端，以免线路损耗影响测量结果。

4.7 空载损耗和空载电流测量

4.7.1 试验一般要求

变压器的温度接近试验时的环境温度。  
通常由被试品的低压侧施加额定频率的额定电压(应尽可能为对称的正弦波电压)，其余绕组开路；如果施加电压的绕组是带有分接的，则应使分接开关处于主分接的位置。运行中的地电位处宜可靠接地。

对于三相变压器，选择接到试验电源的绕组和联结方式时，应尽可能使三个心柱上出现对称的正弦波电压。

如果无其他规定，则对于有不同额定容量的多绕组变压器，空载电流百分数应换算到最大额定容量。

4.7.2 测量仪器和精度

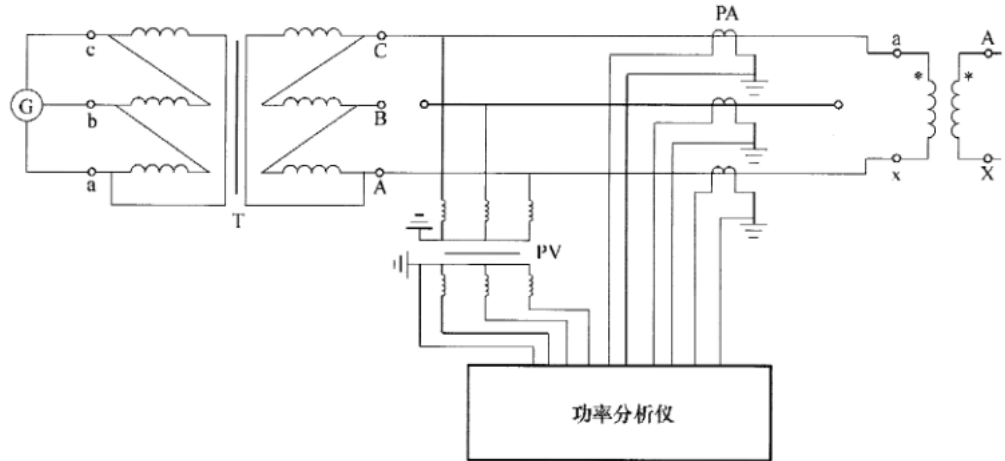
空载损耗和空载电流测量对测量系统的要求低于负载损耗的测量，因此能够满足负载损耗测量的测量系统适用于空载损耗和空载电流测量。

4.7.3 试验方法

4.7.3.1 试验接线

单相变压器空载试验接线示意图如图 29 所示。

三相变压器空载试验接线示意图如图 30 所示。



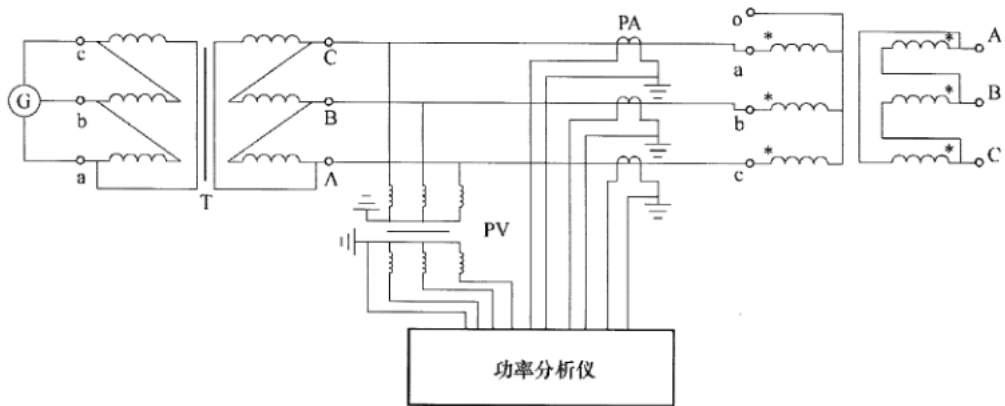
说明：

T——中间变压器；

PA——电流互感器；

PV——电压互感器。

图29 单相变压器空载试验接线示意图（干式电力变压器）



说明：

T——中间变压器；

PA——电流互感器；

PV——电压互感器。

图30 三相变压器空载试验接线示意图（干式电力变压器）

4.7.3.2 试验电压的施加

试验电压施加应从零电压开始，在升压过程中应连续观察所有测量仪表的指示状况，尤其在测量过程中，注意剩磁对测量结果的影响，在测量仪器和试验设备不过载的情况下，先对被试品进行 110% 额定电压励磁，降压时电压尽可能降到零电压，然后进行额定电压励磁，保持几分钟，待损耗和电流没有下降的趋势时，进行测量记录。

励磁电压应以平均值电压表的读数  $U'$  为准，该读数与方均根值电压表的读数  $U$  具有同一刻度。

4.7.3.3 空载损耗的波形校正

如果  $U'$  与  $U$  相差 3% 以内，则按照  $P_o = P_m (1 + d)$  校正，其中  $P_o$  为校正后的空载损耗， $P_m$  为测量的空载损耗， $d = (U' - U) / U'$ 。

如果  $U'$  与  $U$  相差大于 3%，则应按照协议确认试验的有效性。在励磁电压高于额定电压时，可以接受超过 3% 的读数差，但测量值属于保证值的情况除外。

4.7.4 结果判定

结果判定按技术协议的规定。如果技术协议没有规定，则空载电流的允许偏差为 +30%，空载损耗的允许偏差为 +15%。

4.7.5 注意事项

应注意剩磁对空载损耗和空载电流测量的影响。

4.8 绝缘电阻测量

4.8.1 测量仪器和精度

测量仪器采用数字绝缘电阻表，精度不大于 5%。

4.8.2 测量参数

测量  $R_{60}$ （60 s 时的绝缘电阻）值。

4.8.3 测量组合方式

绝缘电阻测量组合方式见表 21。

表21 绝缘电阻测量组合方式

| 序号 | 双绕组变压器  |            | 三绕组变压器     |                 |
|----|---------|------------|------------|-----------------|
|    | 被试绕组    | 接地部位       | 被试绕组       | 接地部位            |
| 1  | 低压绕组    | 铁心、夹件及高压绕组 | 低压绕组       | 铁心、夹件、高压绕组及中压绕组 |
| 2  | 高压绕组    | 铁心、夹件及低压绕组 | 中压绕组       | 铁心、夹件、高压绕组及低压绕组 |
| 3  | —       | —          | 高压绕组       | 铁心、夹件、中压绕组及低压绕组 |
| 4  | 高压及低压绕组 | 铁心、夹件      | 高压及中压绕组    | 铁心、夹件及低压绕组      |
| 5  | —       | —          | 高压、中压及低压绕组 | 铁心、夹件           |

4.9 外施耐电压试验

4.9.1 试验前准备

试品接地点应可靠接地。  
被试绕组端子短接并连接试验变压器，非被试绕组端子短接并可靠接地。

4.9.2 试验一般要求

4.9.2.1 一般要求

外施耐电压试验的频率应为不低于 80%额定频率的任意一合适频率。  
试验峰值电压除以  $\sqrt{2}$  作为试验电压。电压的波形应接近正弦波。  
试验电压的允许偏差为  $\pm 1\%$ 。  
用于一般公共配电网或工业电网中的变压器，其绝缘水平应符合表 22 的规定。

表22 干式电力变压器绝缘水平

单位为千伏

| 系统标称电压<br>(方均根值) | 设备最高电压 $U_m$<br>(方均根值) | 额定短时外施耐受电压<br>(方均根值) | 额定雷电冲击耐受电压 (峰值) |      |
|------------------|------------------------|----------------------|-----------------|------|
|                  |                        |                      | 组 I             | 组 II |
| $\leq 1$         | $\leq 1.1$             | 3                    | —               | —    |
| 3                | 3.6                    | 10                   | 20              | 40   |
| 6                | 7.2                    | 20                   | 40              | 60   |
| 10               | 12                     | 35                   | 60              | 75   |
| 15               | 17.5                   | 38                   | 75              | 95   |
| 20               | 24                     | 50                   | 95              | 125  |
| 35               | 40.5                   | 70                   | 145             | 170  |

4.9.2.2 用于高海拔处的变压器

当变压器运行地点的海拔为 1 000 m~3 000 m，而其试验却是在正常海拔处进行时，其额定短时外施耐受电压值，应根据安装地点的海拔超过 1 000 m 的部分，以每 100 m 增加 1%的方式来提高。当变压器在海拔超过 3 000 m 处运行时，其绝缘水平应由供、需双方协商确定。

4.9.3 测量系统的不确定度

工频测量系统的不确定度为  $\pm 3\%$ 。

4.9.4 试验方法

4.9.4.1 试验接线

外施耐电压试验接线示意图如图 31 所示。

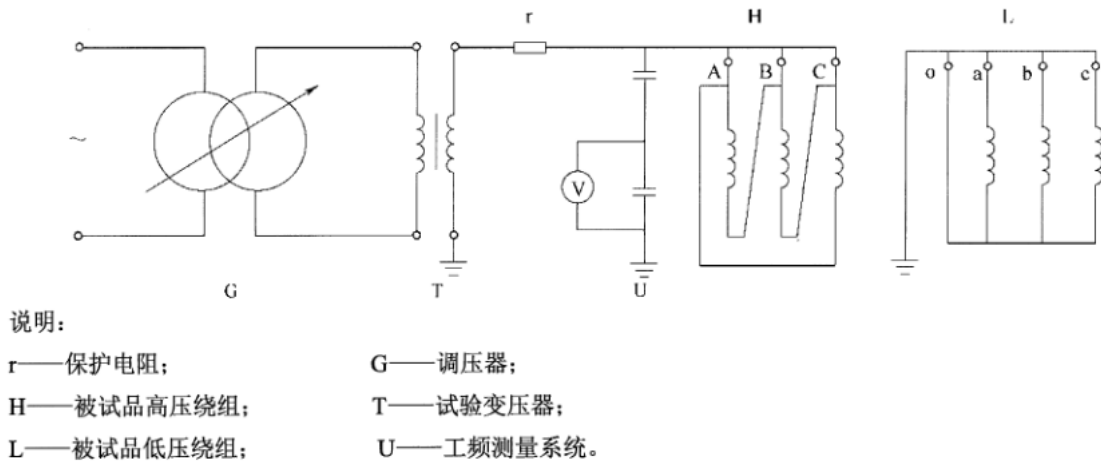


图31 外施耐电压试验接线示意图（干式电力变压器）

4.9.4.2 施加电压程序和方法

试验时电压应从不大于规定试验电压值的 1/3 开始施加，并与测量相配合尽快地增加到规定试验电压值，在规定试验电压下持续 1 min 时间。试验完毕，应将电压迅速地降到 1/3 规定试验电压以下，并切断电源。

4.9.5 结果判定

试验过程中，如果电压不突然下降，则试验合格。

4.10 感应耐电压试验

4.10.1 试验前准备

试品接地点应可靠接地。

任何不与试验电源相连的电路端子应开路。

4.10.2 试验一般要求

三相变压器应使用三相对称电源加压。

带分接的绕组，除非特别指定或经用户同意，一般在主分接进行试验。

施加的试验电压为  $2U_r$  ( $U_r$  为额定电压)。

电压的波形应接近正弦波，试验中电压的峰值与方均根值都应测量，取峰值除以  $\sqrt{2}$  和方均根值两者中较小的值作为试验电压值。

试验电压的允许偏差为  $\pm 1\%$ 。

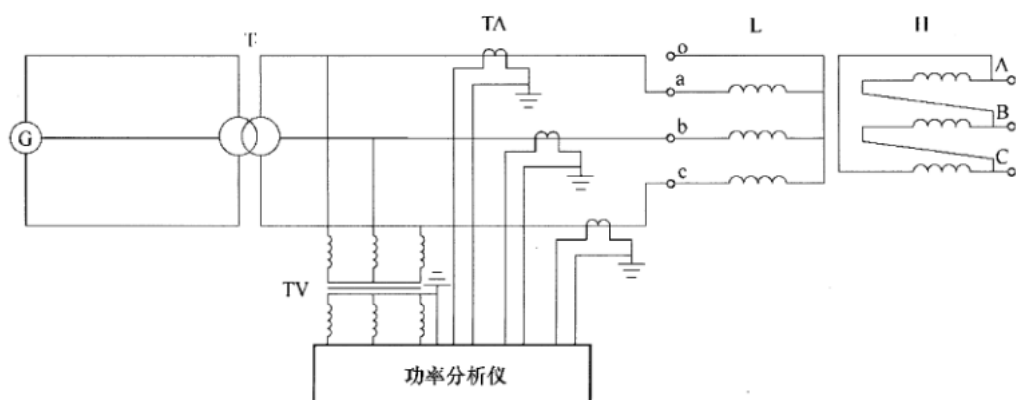
4.10.3 测量系统的不确定度

测量系统的不确定度为  $\pm 3\%$ 。

4.10.4 试验方法

4.10.4.1 试验接线

感应耐电压试验接线示意图如图 32 所示。



说明：

T——中间变压器；

TV——电流互感器；

L——被试品低压绕组；

G——发电机；

TA——电压互感器；

H——被试品高压绕组。

图32 感应耐电压试验接线示意图（干式电力变压器）

#### 4.10.4.2 施加电压的程序和方法

为了防止试验时励磁电流过大，试验电压频率应适当地比额定频率高。

除非另有规定，当试验电压的频率等于或小于两倍额定频率时，其全电压下的试验时间应为 60 s。

当试验频率超过两倍额定频率时，试验时间为： $120 \text{ s} \times \text{额定频率} / \text{试验频率} (\text{s})$ ，但不少于 15 s。

试验时电压应从不大于规定试验电压值的  $1/3$  开始施加，并与测量相配合尽快地增加到规定试验电压值，在规定试验电压下持续到规定时间。试验完毕，应将电压迅速地降到  $1/3$  规定试验电压以下，并切断电源。

#### 4.10.5 结果判定

试验过程中，如果电压不出现突然下降现象，则试验合格。

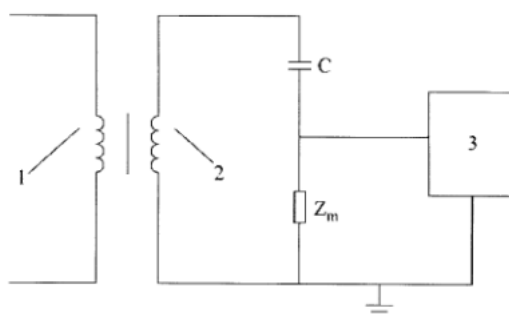
### 4.11 局部放电测量

#### 4.11.1 概述

局部放电测量应在  $U_m \geq 3.6 \text{ kV}$  的绕组上进行。

#### 4.11.2 测量电路

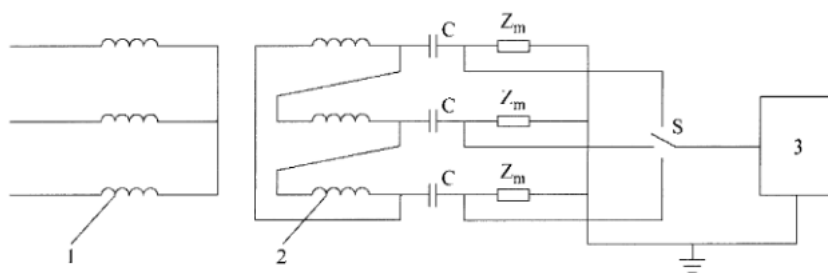
局部放电测量电路如图 33 和图 34 所示。



说明：

1——低压绕组；2——高压绕组；3——测量仪器。

图33 单相变压器局部放电测量的接线示意图



说明：

- 1——低压绕组；
- 2——高压绕组（D或Y联结）；
- 3——测量仪器；
- S——开关。

图34 三相变压器局部放电测量的接线示意图

图中 C 为无局部放电的高压耦合电容器（其电容值与校准发生器的电容  $C_0$  相比应足够大），该电容器与测量阻抗  $Z_m$  串联，且与每个被试高压绕组端子相连接。

#### 4.11.3 测量电路的校准

在绕组内部和测量电路中，均会出现放电脉冲的衰减现象。校准按 GB/T 7354 的规定进行，将一台标准放电校准器所产生的模拟放电脉冲施加到变压器被测绕组端子上。为了方便，可使校准发生器的重复频率与变压器试验时所用电源频率（每半个周期中有一个脉冲）相当。

#### 4.11.4 电压施加方式

##### 4.11.4.1 概述

局部放电测量应在所有绝缘试验项目完成后进行。根据变压器是单相还是三相结构，确定其低压绕组是由单相电源还是三相电源供电。试验电压波形应尽可能是正弦波，且试验频率应适当地比额定频率高些，以免试验期间励磁电流过大。

##### 4.11.4.2 三相变压器

###### 4.11.4.2.1 例行试验

本试验应在所有的干式变压器上进行，施加电压方式如图 35 所示。

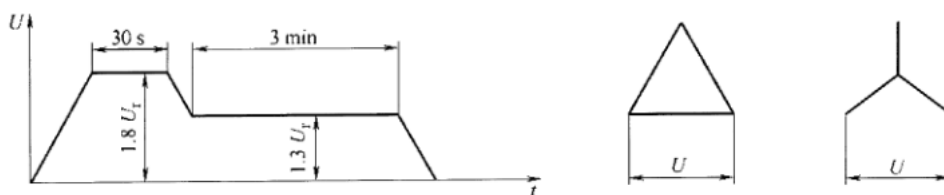


图35 局部放电例行试验的施加电压方式

相间预加电压为  $1.8U_r$ （ $U_r$  为额定电压），加压时间为 30 s。然后不切断电源，将相间电压降至  $1.3U_r$ ，保持 3 min，在此期间应进行局部放电测量。

#### 4.11.4.2.2 附加的试验程序（特殊试验）

对于拟接到中性点绝缘或经高阻抗接地的电力系统中的变压器，由于它能在单相对地故障条件下继续运行，故可能要对变压器进行附加的试验。本试验只在用户有规定时才进行，施加电压方式如图 36 所示。

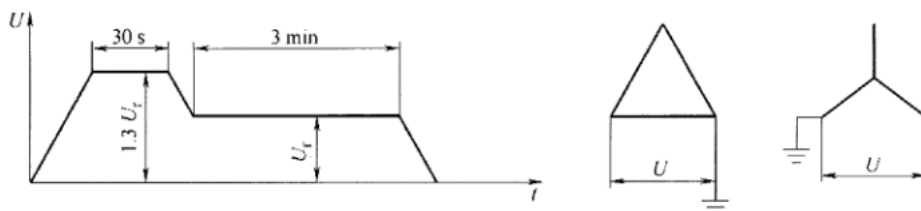


图36 局部放电特殊试验的施加电压方式

本试验是在一个线端接地时，先施加相间预加电压  $1.3U_r$ ，加压时间为 30 s，然后不切断电源，将相间电压降至  $U_r$ ，保持 3 min，在此期间应进行局部放电测量。此后，依次将另一个线端接地，重复进行本试验。

#### 4.11.4.3 单相变压器

对于单相变压器， $U_r$  应视实际情况，为相间电压或相对地电压。

对于由三台单相变压器组成的三相变压器组，其试验要求应与三相变压器相同。

#### 4.11.5 局部放电接受水平

局部放电水平的最大值为 10 pC。

可能要对装有某些附件（如避雷器）的变压器进行特殊考虑。

#### 4.12 有载分接开关试验

见 3.11.1。

#### 4.13 雷电冲击试验

##### 4.13.1 一般要求

冲击试验用的波形： $1.2 \mu\text{s} \pm 30\% / 50 \mu\text{s} \pm 20\%$ 。

试验电压值的允许偏差： $\pm 3\%$ 。

测量系统不确定度： $\pm 3\%$ 。

如果分接范围不超过  $\pm 5\%$  且变压器的额定容量不超过 2 500 kVA，则试验在变压器的主分接上进行。

如果分接范围超过  $\pm 5\%$  或变压器的额定容量超过 2 500 kVA，则除非经过同意，否则试验在变压器的两个极限分接和主分接上进行，在三相变压器的每相或三相变压器组的每台单相变压器上各使用其中的一个分接进行试验。

##### 4.13.2 试验顺序

试验电压应采用负极性。每个线端的试验顺序为：在 50%~70% 额定耐受电压下进行 1 次全波冲击，在 100% 额定耐受电压下进行 3 次全波冲击。

##### 4.13.3 判断准则

如果在降低电压下所记录的电压和电流瞬变波形与在额定耐受电压下所记录的相应的瞬变波形无明显差异，则试验合格。

## 4.14 温升试验

## 4.14.1 试验一般要求

三相变压器的温升试验应使用三相电源进行。

在试品周围 2 m~3 m 处不得有墙壁、热源、杂物堆积及外来辐射气流等干扰，室内可有自然的通风，但其不应引起显著的空气回流。

对于分接范围不超过±5%，且额定容量不超过 2 500 kVA 的变压器，在主分接进行温升试验。

对于分接范围超过±5%的变压器，或额定容量超过 2 500 kVA 的变压器，在最大电流分接进行温升试验。

## 4.14.2 试验方法

## 4.14.2.1 模拟负载法

本方法适用于非封闭式、封闭式或全封闭式干式自冷或风冷变压器。

温升值是通过短路试验（提供负载损耗）和空载试验（提供空载损耗）的组合来确定的。

试验开始时，变压器的温度应与实验室的环境温度一致。应测量高、低压绕组各自的电阻值，这些测量值将作为计算这两个绕组温升值的基准值。实验室的环境温度也应被测量并记录下来。

对于三相变压器，其电阻测量应在中间相与一个边相绕组的线端之间进行。

各温度测量点〔即测量环境温度的温度计和变压器上的传感器（如果有）〕的位置，不论是参考测量还是最终测量，均应相同。

绕组短路试验是在一个绕组施加额定电流而另一个绕组短路下进行的，且持续到绕组和铁心温度都达到稳定为止。用电阻法或叠加法确定各绕组的温升  $\Delta\theta_c$ 。

在额定频率和额定电压下的空载试验，应持续到绕组和铁心温度都达到稳定为止，然后应测出各自绕组的温升  $\Delta\theta_e$ 。

模拟负载法应采用以下两种方法之一：

——先进行绕组短路试验，直到铁心和绕组温度达到稳定为止，然后进行空载试验，直到铁心和绕组温度达到稳定为止；

——先进行空载试验，直到铁心和绕组温度达到稳定为止，然后进行绕组短路试验，直到铁心和绕组温度达到稳定为止。

在绕组通过额定电流和铁心为额定励磁下，每个绕组的总温升  $\Delta\theta'_c$  按公式（35）计算。

$$\Delta\theta'_c = \Delta\theta_c \left[ 1 + \left( \frac{\Delta\theta_e}{\Delta\theta_c} \right)^{\frac{1}{K_1}} \right]^{K_1} \dots\dots\dots (35)$$

式中：

$\Delta\theta'_c$ ——绕组总温升；

$\Delta\theta_c$ ——短路试验下的绕组温升；

$\Delta\theta_e$ ——空载试验下的绕组温升；

$K_1$ ——对于自冷式为 0.8，对于风冷式为 0.9。

## 4.14.2.2 相互负载法

如果有两台同样的变压器，且实验室具有必需的试验设备，则采用本方法是合适的。它适用于封闭式或非封闭式干式自冷或风冷变压器。

试验开始时，变压器温度应与实验室的环境温度一致。应测量高、低压绕组各自的电阻值，这些测

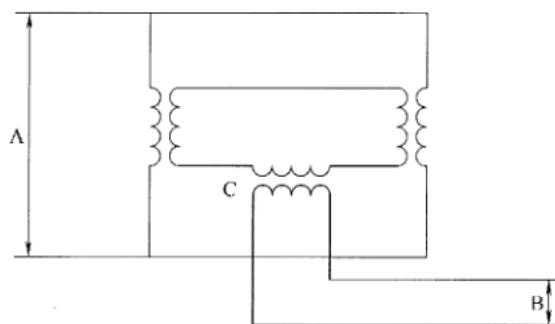
量值将作为计算这两个绕组温升值的基准值。实验室的环境温度也应被测量并记录下来。

各温度测量点的位置，不论是参考测量还是最终测量，均应相同。

对于三相变压器，其电阻测量应在中间相与一个边相绕组的线端之间进行。

对于绕组为星形联结的三相变压器，最好在中间心柱的绕组上进行测量。

将两台变压器并联连接，其中一台为被试变压器，且最好对这两台变压器的内部绕组以被试变压器的额定电压进行励磁。利用两台变压器的电压比不同或另输入某一电压的方法，使被试变压器绕组中通过额定电流，直到铁心和绕组温度达到稳定为止，如图 37 和图 38 所示。



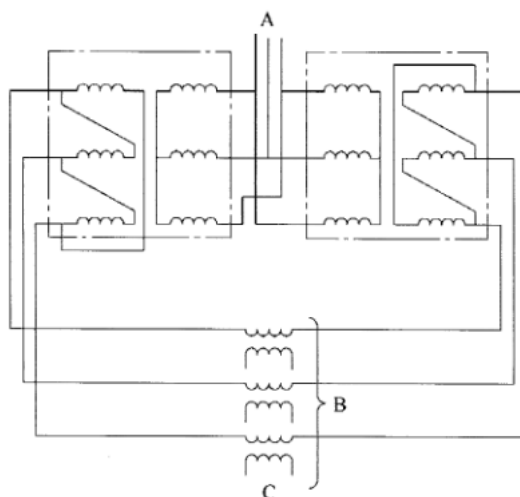
说明：

A——供产生空载损耗的额定频率的电压源；

B——供产生负载损耗的额定频率的额定电流源；

C——增压变压器。

图37 单相相互负载法接线示意图



说明：

A——供产生空载损耗的额定频率的电压源；

B——供产生负载损耗的额定频率的额定电流源；

C——增压变压器。

图38 三相相互负载法接线示意图

#### 4.14.2.3 直接负载法

本方法只适用于小型变压器。

将变压器的一个绕组，最好是内部绕组在额定电压下励磁，另一个绕组连接适当的负载，以使两个绕组都通过额定电流。

## 4.14.3 温度测量

## 4.14.3.1 冷却空气（环境温度）的测量

温度传感器或温度计在试品周围不少于 3 个，距冷却表面 1 m~2m，高度为冷却表面高度的一半。温度传感器或温度计应插入油量不少于 1 000 mL 的悬空金属油杯中，其时间常数应为 2 h。

## 4.14.3.2 变压器温度的测量

测量上铁轭的中心处和尽可能靠近最内部低压线圈顶部处的导体温度。

## 4.14.3.3 绕组温度的测量

绕组温度是靠冷热电阻的变化率决定的；因此准确测量冷热电阻的阻值、冷电阻的绕组温度和热电阻的冷却介质的温度是极为重要的；具体规定如下：

- 冷电阻和绕组温度测量按 4.4 的规定，为了使冷、热电阻的测量误差减小到最低，应记录冷电阻测量时电源电流、电压、稳定时间等。
- 热电阻的测量应与冷电阻测量的连线、仪器仪表、电源及电流、电压、稳定时间等完全相同；切断试验电源时应尽量减少对冷却条件的干扰（保持风扇继续运行），并以最快的速度打开短路工具，接通电源测量热电阻；应特别注意切断与被测绕组并联的供电回路和电压、功率测量回路，否则测量将会失败。
- 绕组平均温度的测定。
- 电源切断瞬间的绕组温度的确定。

绕组平均温度是通过绕组电阻确定的。三相变压器中，最好在中柱进行测量。温度  $\theta_2$  (°C) 下的电阻  $R_2$  与  $\theta_1$  (°C) 下的电阻  $R_1$  之间的比值按公式 (36) 或公式 (37) 计算。

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{235 + \theta_2}{235 + \theta_1} \quad (\text{对于铜线绕组}) \quad (36)$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{225 + \theta_2}{225 + \theta_1} \quad (\text{对于铝线绕组}) \quad (37)$$

变压器应在稳定的环境温度下进行绕组电阻 ( $R_1, \theta_1$ ) 的测量，在另一温度  $\theta_2$  时测出的电阻为  $R_2$ ，则可按公式 (38) 或公式 (39) 计算温度  $\theta_2$  值。

$$\theta_2 = \frac{R_2}{R_1} (235 + \theta_1) - 235 \quad (\text{对于铜线绕组}) \quad (38)$$

$$\theta_2 = \frac{R_2}{R_1} (225 + \theta_1) - 225 \quad (\text{对于铝线绕组}) \quad (39)$$

令切断电源时，外部冷却介质的温度为  $\theta_a$ ，则绕组温升  $\Delta\theta_w$  按公式 (40) 计算。

$$\Delta\theta_w = \theta_2 - \theta_a \quad (40)$$

绕组电阻在切断电源并去掉短路接线后进行测量，电源切断瞬间的电阻  $R_2$  按下列规定确定：

温升试验要求准确测定电源切断瞬间的绕组平均温度。在切断电源和打开短路接线后，立即将要测的绕组接入直流测量电路，由于绕组的电气时间常数 ( $L/R$ ) 较大，因而只有经过一段延时后，才能测得准确的电阻值。因绕组在切断电源后开始冷却，绕组电阻随冷却时间变化，故应至少测量 10 min，以便可以用外推法推算电源切断瞬间的绕组温度（见图 39）。

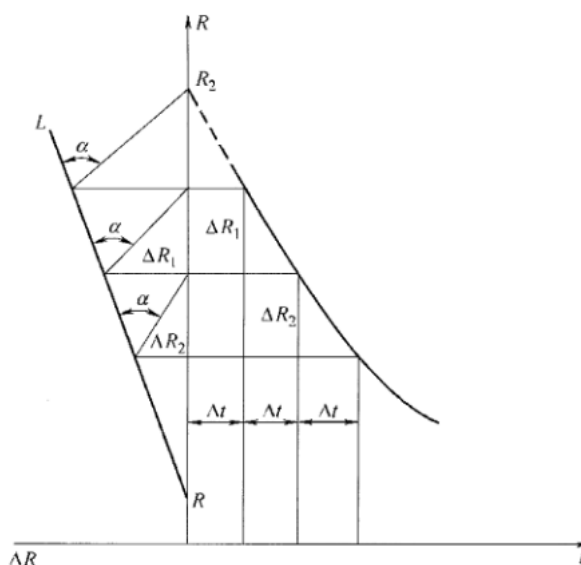


图39 确定切断电源瞬间热电阻温度的方法

#### 4.14.4 变压器温升计算

4.14.4.1 采用直接负载法、相互负载法、循环电流法或零序法使试品铁心达到额定励磁、绕组达到额定负载时，绕组温升按公式（41）计算。

$$\Delta\theta = \frac{R_2}{R_1}(T + \theta_1) - (T + \theta_2) \dots\dots\dots (41)$$

式中：

$\Delta\theta$ ——绕组对空气的温升，单位为开（K）；

$R_2$ ——电源切断瞬间的电阻，单位为欧（ $\Omega$ ）；

$R_1$ ——绕组的冷态电阻，单位为欧（ $\Omega$ ）；

$T$ ——温度常数，铜为 235，铝为 225；

$\theta_1$ ——绕组的冷态温度，单位为摄氏度（ $^{\circ}\text{C}$ ）；

$\theta_2$ ——试验最后 1 h 内空气的平均温度，单位为摄氏度（ $^{\circ}\text{C}$ ）。

4.14.4.2 当试品铁心达到额定励磁、绕组电流达到 90%及以上额定电流时，绕组温升按公式（42）计算。

$$\Delta\theta = \Delta\theta_t \left( \frac{I_t}{I_r} \right)^q \dots\dots\dots (42)$$

式中：

$\Delta\theta_t$ ——负载电流为  $I_t$  时绕组对空气的温升，单位为开（K）；

$I_r$ ——额定电流，单位为安（A）；

$I_t$ ——负载电流，单位为安（A）；

$q$ ——空气自冷（AN）为 1.6，风冷（AF）为 1.8。

#### 4.14.5 结果判定

按正常运行条件设计的变压器，当按上述规定进行试验时，其每个绕组的温升均不应超过表 23 所列的相应限值。

表23 绕组温升限值

| 绝缘系统温度<br>℃ | 额定电流下的绕组平均温升限值<br>K |
|-------------|---------------------|
| 105 (A)     | 60                  |
| 120 (E)     | 75                  |
| 130 (B)     | 80                  |
| 155 (F)     | 100                 |
| 180 (H)     | 125                 |
| 200 (N)     | 135                 |
| 220         | 150                 |

4.15 声级测定

4.15.1 试验一般要求

声级测定通常采用声压法，也可采用声强法。  
反射物体应尽可能远离被试品，地面的反射面应大于被试品表面积在其上的投影。  
如果无其他规定，则是否进行负载电流下的声级测量可通过按公式（43）估算来确定。

$$L_{WA,IN} \approx 39 + 18 \lg (S_r / S_p) \dots\dots\dots (43)$$

式中：  
 $L_{WA,IN}$ ——变压器在额定电流、额定频率及短路阻抗下的 A 计权声功率级，单位为分贝（dB）；  
 $S_r$ ——额定容量，单位为兆伏安（MVA）；  
 $S_p$ ——基准容量，这里  $S_p=1$  MVA。

如果  $L_{WA,IN}$  值比保证的声功率级低 8 dB 或更多，则负载电流下的声级测量不必进行。

如果进行负载电流下的声级测量，则除试验电流不得低于 70% 额定电流外，其他要求与短路阻抗和负载损耗测量时一致。

应在测量即将开始前和测量刚结束后对测量仪器进行校准。如果校准偏差超过 0.3 dB，则本次测量结果无效，应重新进行测量。

声压级测量采用 A 计权，应使用仪器的快速响应指示。

空载下的声级测量与空载损耗和空载电流测量的要求一致，负载下的声级测量与短路阻抗和负载损耗测量的要求一致。

4.15.2 测量仪器的要求

测量用声级计应符合 GB/T 3785.1—2010 和 GB/T 3785.2—2010 中 1 型声级计的要求，声校准器的偏差不得超过 ±2 dB。

声级计在测量前和测量后的校准偏差应不超过 ±0.3 dB。

4.15.3 试验接线

空载下的声级测量，其试验接线与空载损耗和空载电流测量时一致；负载下的声级测量，其试验接线与短路阻抗和负载损耗测量时一致。

4.15.4 试验方法

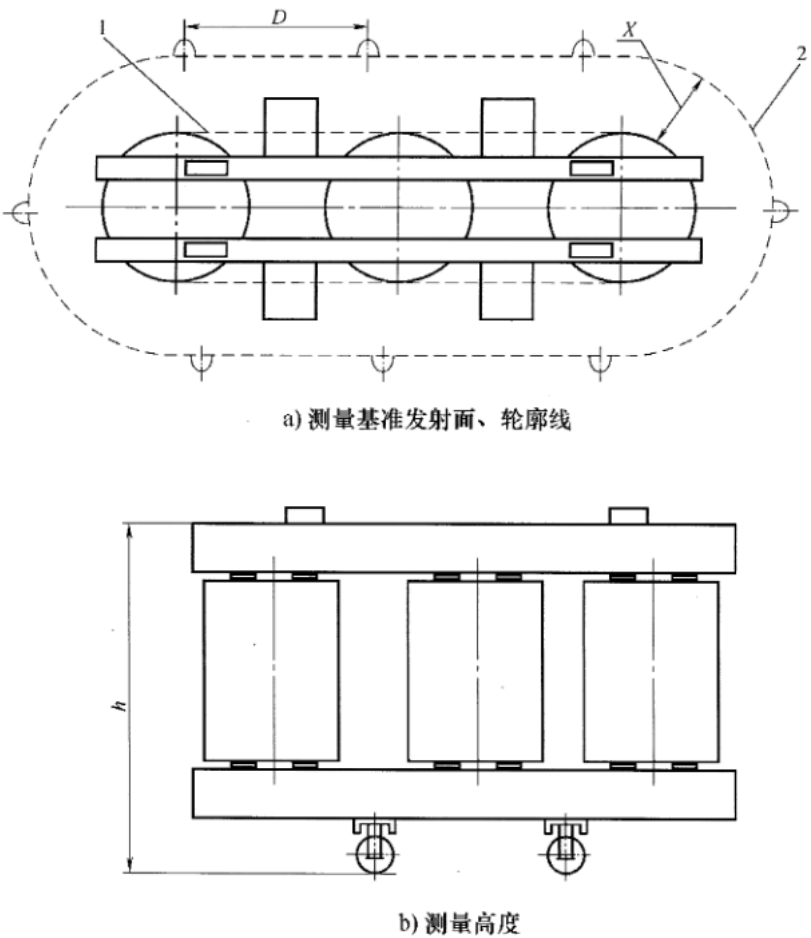
4.15.4.1 基准发射面、规定轮廓线及传声器位置的确定

4.15.4.1.1 带保护外壳的变压器及保护外壳内装有冷却设备的变压器

基准发射面是指由一条围绕变压器的弦线轮廓线，从箱盖顶部垂直移动到箱底所形成的表面。

4.15.4.1.2 无保护外壳的变压器基准发射面确定

基准发射面是指由一条围绕变压器的弦线轮廓线，从变压器顶部垂直移动至其有效部分底面所形成的表面，但基准发射面不包括框架、外部连线和接线装置以及不影响发射的附件（见图 40）。



说明：  
1——基准发射面；  
2——规定轮廓线；  
 $h$ ——带框架的铁心高度；  
 $D$ ——传声器间距；  
 $X$ ——测量距离。

图40 无保护外壳变压器声级测量的测量点示意图

4.15.4.1.3 规定轮廓线的确定

对于带保护外壳的变压器及保护外壳内装有冷却设备的变压器，规定的轮廓线应距基准发射面 0.3 m。  
对于无保护外壳变压器，规定的轮廓线应距基准发射面 1 m。

4.15.4.1.4 传声器位置的确定

传声器应位于规定轮廓线上，彼此间距大致相等，间距不得大于 1 m（见图 40 的尺寸  $D$ ）。至少应设 6 个传声器位置。

4.15.4.2 背景噪声的测量

测量应在背景噪声值近似恒定时进行。

在即将对试品噪声测量前，应先测出背景噪声的 A 计权声压级。测量背景噪声时，传声器所处的高度应与测量试品噪声时其所处的高度相同，背景噪声的测量点应在规定的轮廓线上。

当测量点总数超过 10 个时，允许只在试品周围呈均匀分布的 10 个测量点上测量背景噪声。

如果背景噪声的声级明显低于试品和背景噪声的合成声级（即差值大于 10 dB），则仅可在一个测量点上进行背景噪声测量，且不需对所测出的试品的声级进行修正。

如果试验前、后背景的平均 A 计权声压级  $\overline{L_{bgA}}$  之差大于 3 dB，且较高者与未修正的平均 A 计权声压级  $\overline{L_{pA0}}$  之差小于 8 dB，则本次测量无效，应重新进行试验。但是，当未修正的平均 A 计权声压级小于保证值时除外。此时，应认为试品符合声级保证值的要求。这种情况应在试验报告中予以记录。

如果两个背景的平均 A 计权声压级中的较高者，与未修正的平均 A 计权声压级之差小于 3 dB，则本次测量无效，应重新进行试验。但是，当未修正的平均 A 计权声压级小于保证值时除外。此时，应认为试品符合声级保证值的要求。这种情况应在试验报告中予以记录。

试验接受准则见表 24。

表24 试验接受准则（干式电力变压器）

| $\overline{L_{pA0}}$ 与较高的 $\overline{L_{bgA}}$ 之差<br>dB (A)                 | 试验前的 $\overline{L_{bgA}}$ 与试验后的 $\overline{L_{bgA}}$ 之差<br>dB (A) | 结论                |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------|
| $\geq 8$                                                                    | —                                                                 | 接受                |
| $< 8$                                                                       | $< 3$                                                             | 接受                |
| $< 8$                                                                       | $> 3$                                                             | 重新试验 <sup>a</sup> |
| $< 3$                                                                       | —                                                                 | 重新试验 <sup>a</sup> |
| <sup>a</sup> 如果 $\overline{L_{pA0}}$ 小于保证值，则认为试品符合声级保证值的要求。这种情况宜在试验报告中予以记录。 |                                                                   |                   |

4.15.4.3 测量表面积的计算

距基准发射面 0.3 m 处的测量表面积按公式（44）计算。

$$S=1.25hl_m \dots\dots\dots (44)$$

式中：

- $S$ ——测量表面积，单位为平方米（ $m^2$ ）；
- $h$ ——试品高度，单位为米（m）；
- $l_m$ ——轮廓线周长，单位为米（m）。

距基准发射面 1 m 处的测量表面积按公式（45）计算。

$$S=(h+1)l_m \dots\dots\dots (45)$$

4.15.4.4 环境修正值  $K$  的计算

环境修正值  $K$  按公式（46）和公式（47）计算。

$$K = 10 \lg \left( 1 + \frac{4S}{A} \right) \dots\dots\dots (46)$$

$$A = \alpha S_v \dots\dots\dots (47)$$

式中:

$K$ ——环境修正值。

$A$ ——吸声面积, 单位为平方米 ( $\text{m}^2$ );

$S$ ——测量表面积, 单位为平方米 ( $\text{m}^2$ )。

$\alpha$ ——平均吸声系数, 工业厂房取 0.15;

$S_v$ ——实验室(墙壁、天棚和地面)的总表面积, 单位为平方米 ( $\text{m}^2$ )。

#### 4.15.4.5 平均声压级计算

未修正的平均 A 计权声压级由在试品供电时各测量点上测得的 A 计权声压级按公式 (48) 计算。

$$\overline{L_{pA0}} = 10 \lg \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1 L_{pAi}} \right) \dots\dots\dots (48)$$

式中:

$\overline{L_{pA0}}$ ——未修正的平均 A 计权声压级, 单位为分贝 (dB);

$L_{pAi}$ ——试品供电时各测量点上测得的 A 计权声压级, 单位为分贝 (dB);

$N$ ——测量点总数。

注: 当各  $L_{pAi}$  差别不大于 5 dB 时, 可用简单的算术平均值来计算。

背景噪声的平均 A 计权声压级应根据试验前、后的各测量值按公式 (49) 计算。

$$\overline{L_{bgA}} = 10 \lg \left( \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M 10^{0.1 L_{bgAi}} \right) \dots\dots\dots (49)$$

式中:

$\overline{L_{bgA}}$ ——背景噪声的平均 A 计权声压级, 单位为分贝 (dB);

$M$ ——测量点总数;

$L_{bgAi}$ ——各测量点上测得的背景噪声 A 计权声压级, 单位为分贝 (dB)。

修正的平均 A 计权声压级按公式 (50) 计算。

$$\overline{L_{pA}} = 10 \lg (10^{0.1 \overline{L_{pA0}}} - 10^{0.1 \overline{L_{bgA}}}) - K \dots\dots\dots (50)$$

式中:

$\overline{L_{pA}}$ ——修正的平均 A 计权声压级, 单位为分贝 (dB);

$L_{bgAi}$ ——两个计算出的背景噪声平均 A 计权声压级中的较小者。

#### 4.15.4.6 声功率级计算

试品的 A 计权声功率级  $L_{WA}$  应根据修正的平均 A 计权声压级  $\overline{L_{pA}}$  按公式 (51) 计算。

$$L_{WA} = \overline{L_{pA}} + 10 \lg \frac{S}{S_0} \dots\dots\dots (51)$$

式中:

$S$ ——测量表面积, 单位为平方米 ( $\text{m}^2$ )。

$S_0$ ——基准参考面积, 这里  $S_0=1 \text{ m}^2$ 。

#### 4.15.4.7 降低的负载电流声功率级计算

如果只能在降低的电流下进行声级测量, 则在额定电流下的声功率级应按公式 (52) 计算。

$$L_{WA,IN} = L_{WA,IT} + 40 \lg \frac{I_N}{I_T} \dots\dots\dots (52)$$

式中:

$L_{WA,IN}$ ——额定电流下的 A 计权声功率级, 单位为分贝 (dB);

$L_{WA,IT}$ ——降低电流下的 A 计权声功率级, 单位为分贝 (dB);

$I_N$ ——额定电流, 单位为安 (A);

$I_T$ ——降低电流, 单位为安 (A)。

该公式只在降低的电流为额定电流的 70%及以上时适用。

#### 4.15.4.8 空载声功率级和负载电流声功率级合成的计算

对于在额定电压和额定电流下运行的变压器, 其 A 计权声功率级  $L_{WA,SN}$  可由 A 计权空载声功率级  $L_{WA,UN}$  和 A 计权额定电流声功率级  $L_{WA,IN}$  按公式 (53) 计算。

$$L_{WA,SN} = 10 \lg(10^{0.1L_{WA,UN}} + 10^{0.1L_{WA,IN}}) \dots\dots\dots (53)$$

#### 4.15.5 结果判定

按 GB/T 22072、JB/T 10088 或技术协议的规定。

#### 4.16 短路承受能力试验

见 3.22。

#### 4.17 环境试验

##### 4.17.1 概述

本试验用于确定变压器是否符合 4.17.2 规定的环境等级。

如果无其他规定, 则本试验应在 1 台包括附件 (与试验有关的) 在内的装配完整的变压器上进行。变压器及其附件应是新的、清洁的, 且绝缘件表面应无任何附加处理。

##### 4.17.2 环境等级

干式变压器的环境条件是指湿度、凝露、污秽和环境温度。

注: 上述环境条件不仅对干式变压器的运行是重要的, 而且对其在安装前的贮存也是重要的。

根据湿度、冷凝和污秽的程度, 规定以下三种不同的环境等级:

——E0 级: 变压器上没有凝露, 且污秽可以被忽略。对于清洁、干燥的户内式安装, 环境通常可以达到这一等级。

——E1 级: 变压器上偶尔有凝露 (如当变压器无励磁时), 可能会出现有限的污秽。

——E2 级: 变压器上经常有凝露或严重的污秽, 或两者同时都有。

### 4.17.3 试验的有效性

在一台变压器上得到的环境试验结果,对基于同一设计准则的其他变压器也有效。这些设计准则为:

- 设计概念相同(如绕组是否被固体绝缘封闭、绕组类型、防护等级等);
- 主要的绝缘材料相同。

### 4.17.4 E1 级变压器环境试验

#### 4.17.4.1 试验要求

本试验为凝露试验。

变压器应放在温度和湿度可以控制的试验箱内。

试验箱的容积至少为沿变压器外围划线所构成的长方体体积的 5 倍,变压器任一部位到箱壁、箱顶和喷嘴之间的距离应不小于变压器带电部件之间的最小相间距离,且不小于 150 mm。

试验箱内的空气温度应能确保变压器上出现凝露。

试验箱内的相对湿度应保持在 93% 以上。

水的电导率应在  $0.1\text{ S/m} \sim 0.3\text{ S/m}$  范围内。

变压器在无励磁状态下,至少在空气相对湿度大于 93% 的环境中放置 6 h。

此后,应在 5 min 内对变压器进行以下的感应耐电压试验:

- 对于拟接到中性点直接接地或经低阻抗接地的电力系统中的变压器,其应在 1.1 倍额定电压下励磁 15 min。
- 对于拟接到中性点绝缘或经高阻抗接地的电力系统中的变压器,其应连续承受 3 次且每次为 5 min 的感应耐电压试验。试验时每个高压端子应依次接地,在其他端子与地之间施加 1.1 倍额定电压。三相试验也可用单相试验来代替,此时,应将两个不接地相的端子连接在一起。

上述试验最好在试验箱内进行。

#### 4.17.4.2 结果判定

在施加电压过程中,变压器应无闪络现象发生,且外观检查应无严重的放电痕迹。

### 4.17.5 E2 级变压器环境试验

#### 4.17.5.1 凝露试验

凝露试验与 4.17.4 的规定相同,但水的电导率应在  $0.5\text{ S/m} \sim 1.5\text{ S/m}$  范围内。

#### 4.17.5.2 湿渗透试验

##### 4.17.5.2.1 试验要求

在湿渗透试验开始时,变压器应为干燥状态。试验中,变压器在无励磁状态下,置于试验箱内 144 h。试验箱内的温度为  $(50 \pm 3)^\circ\text{C}$ ,相对湿度为  $(90 \pm 5)\%$ ,在该试验终了时,将变压器置于正常环境条件中,最迟经过 3 h,应对变压器进行外施交流耐电压试验和感应交流耐电压试验,但施加的试验电压值应降到标准规定值的 80%。

##### 4.17.5.2.2 结果判定

在绝缘例行试验(外施耐电压试验和感应耐电压试验)中变压器应无闪络或击穿现象发生,且外观检查应无严重的放电痕迹。

## 4.18 气候试验

### 4.18.1 概述

本试验（又称为热冲击试验）用于确定变压器是否符合 4.18.2 规定的气候等级。

### 4.18.2 气候等级

规定以下两种气候等级：

- C1 级：变压器适合于在不低于 $-5^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下运行，但其运输和贮存时的环境温度可低至 $-25^{\circ}\text{C}$ ；
- C2 级：变压器适合于在低至 $-25^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下运行、运输和贮存。

### 4.18.3 试验的有效性

在一台变压器上得到的气候试验结果，对基于同一设计准则的其他变压器也有效。这些设计准则为：

- 设计概念相同（如绕组是否被固体绝缘封闭、绕组类型、防护等级等）；
- 绕组平均温升相同；
- 导电材料相同；
- 主要的绝缘材料相同。

### 4.18.4 C1 级变压器的气候试验（热冲击试验）

#### 4.18.4.1 试验要求

试验应在一台不带外壳（如果有）的完整变压器上进行，被试变压器应置于试验箱内。

注：按供、需双方协议，可以对由铁心上取出的所有线圈进行本试验，但最终的绝缘检查宜在这些试验过的线圈重新套装到变压器铁心后进行。

试验箱内的环境温度至少应由 3 个测量点来确定，测量点应距试品外表面 0.1 m 处，高度在试品的 1/2 位置处，取各测量点读数的平均值作为环境温度参考值。

#### 4.18.4.2 试验程序

试验程序如下：

- a) 将试验箱内的环境温度在 8 h 内逐渐降到 $(-25\pm 3)^{\circ}\text{C}$ ，然后至少保持 12 h，直到温度达到稳定为止。
- b) 此后将试验箱内的环境温度在 4 h 内逐渐上升到 $(-5\pm 3)^{\circ}\text{C}$ ，并至少保持 12 h，直到温度达到稳定为止。
- c) 然后对被试绕组（封闭于固体绝缘内）施加两倍额定电流以进行热冲击试验。应将此电流维持到被试绕组的实测平均温度等于表 23 中给出的绕组平均温升限值加上 $40^{\circ}\text{C}$ （正常使用条件下的最高环境温度）为止。绕组的平均温度是根据电阻值的变化来确定的。可选择下述方法之一来进行热冲击试验：

- 1) 直流电源试验法：热冲击试验是通过将规定的直流电流施加在被试绕组上进行的。对于多相变压器，此试验电流可施加在串联在一起的所有各相绕组上。

注 1：为使各相绕组串联在一起，可能需要拆开绕组的原有连接。

在试验过程中，绕组平均温度的监测，可直接用测量试验电流和相应电压降的伏安法来进行。

- 2) 交流电源试验法：热冲击试验是通过将规定的交流电流施加在被试绕组上进行的，此时，其余绕组短路。对于多相变压器，宜采用对称电流来进行本试验。在试验过程中，绕组平均温度的监测，宜采用将直流测量电流叠加到交流试验电流上的方法或其他等效的方法来进行。

- 3) 另一种交流电源试验法: 在一个绕组短路的情况下, 对变压器施加两倍额定电流, 通过固定在绕组顶部和底部表面处的温度传感器的读数, 来监测每个绕组的温度。温度传感器应通过一种校准试验来进行校准。此校准试验是在实际热冲击试验前的正常环境温度下, 通过施加两倍额定电流来进行的。

传感器的校准是通过将传感器的读数, 与根据绕组电阻值的变化所测定的绕组温升进行比较来实现的。这样, 传感器的读数便与绕组平均温升限值加上  $40^{\circ}\text{C}$  的值相对应。应在从低环境温度下开始的试验中, 读取同一传感器的读数。

注 2: 由于变压器各部分的热暂态特性不同, 故应注意防止某些绕组出现过热现象。

d) 热冲击试验后, 应将变压器温度恢复到  $(25 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ 。

#### 4.18.4.3 评价准则

热冲击试验结束, 并至少再经过 12 h 后, 应对变压器进行绝缘例行试验 (外施耐电压试验和感应耐电压试验), 但应根据绕组的绝缘水平, 将施加的试验电压值降为标准规定值的 80%。

此外, 对绕组被固体绝缘封闭的变压器, 应按 4.11 进行局部放电测量试验, 但施加的预加试验电压值应不大于降低的感应耐电压试验的试验电压值 (160%额定电压值), 所测得的局部放电量应不大于例行试验中的规定值。

经外观检查, 绕组应无可见的异常现象, 如裂缝或开裂。

#### 4.18.5 C2 级变压器的气候试验 (热冲击试验)

##### 4.18.5.1 试验要求、试验程序

除下述修改外, 试验要求、试验程序与 4.18.4.1、4.18.4.2 的规定相同:

取消 4.18.4.2b) 项, 以便在  $-25^{\circ}\text{C}$  下进行热冲击试验。

##### 4.18.5.2 评价准则

评价准则与 4.18.4.3 的规定相同。

#### 4.19 燃烧性能试验

##### 4.19.1 概述

为使变压器的性能最佳, 应使其在燃烧时所逸出的有毒物质和不透明烟雾降至最低程度。因此, 应避免使用含有卤化物的材料。应按 4.19.3 检测所逸出的腐蚀性及其有害气体。此外, 变压器在外部发生火灾时不应明显助燃。燃烧性能应按 4.19.4 的试验程序进行评估。

##### 4.19.2 燃烧性能等级

规定以下两种燃烧性能等级:

- F0 级: 无须特别考虑火灾危险。除变压器设计中所固有的特性外, 不采取特殊的措施来限制其可燃性。不过, 应使其在燃烧时所逸出的有毒物质和不透明烟雾降至最低程度。
- F1 级: 变压器易遭受火灾危险, 要求限制其可燃性。应使其在燃烧时所逸出的有毒物质和不透明烟雾降至最低程度。

变压器在经过按 4.19.4 所述程序进行的特殊试验后, 应表明其是否符合 F1 级的要求。

##### 4.19.3 腐蚀性及其有害气体逸出的检测

应从变压器上提取少量可燃性材料, 用以检测其在燃烧时所逸出的腐蚀性和有害气体。

原则上, 该试验将能检测出下述成分: 氯化氢 (HCl)、氰化氢 (HCN)、溴化氢 (HBr)、氟化氢

(HF)、二氧化硫(SO<sub>2</sub>)和甲醛(HCHO)。

至于试验程序的细节及可接受的限值,可由供、需双方协商确定。

#### 4.19.4 F1级变压器的燃烧性能试验

##### 4.19.4.1 一般要求

本试验应在变压器一个完整的相上进行,完整的相应包括高压(HV)线圈、低压(LV)线圈、铁心柱和绝缘件,但不包括外壳(如果有)。供试验用的铁心柱也可以用与原铁心柱尺寸及热特性类似的材料来代替。不应考虑铁轭,将低压引线在该线圈上、下两端面处切去。

被试变压器的圆形线圈外径或非圆形线圈的最大横向尺寸应介于400 mm~500 mm范围内。

注:经过协商,可用尺寸较大或较小的线圈进行本试验。

##### 4.19.4.2 试验的有效性

在一台变压器上得到的燃烧试验结果,对基于同一设计准则的其他变压器也有效。这些设计准则为:

- 设计概念相同(如绕组是否被固体绝缘封闭、绕组类型、防护等级等);
- 绕组平均温升限值相同(按表23);
- 主要的绝缘材料相同。

##### 4.19.4.3 试验设施

试验箱、火源应符合GB/T 1094.11的规定。

#### 4.19.5 待测参量和测量装置

##### 4.19.5.1 温度

应使用热电偶或等效装置来测量下列各部位的温度:

- 进气口;
- 出气口;
- 低压线圈顶部表面(任选);
- 高压线圈顶部表面(任选);
- 铁心柱或其模拟件的底部和顶部(任选);
- 铁心和低压线圈间的气道中部(任选);
- 高、低压线圈间的气道中部(任选)。

注:测量传感器在试品上的置放位置依据GB/T 1094.11的规定。

##### 4.19.5.2 其他待测参量

其他待测参量如下:

- 测量段内可见光的传输,该测量应沿着穿过烟雾的光学通路进行,其长度至少应为500 mm;

注:设透光率为 $X$ ,实际的光学路径长度为 $p$ [单位为米(m)],则换算到1 m长光学路径的透光率 $\tau=X^{1/p}$ 。

- 进气口的气体流量;
- 烟囱内的气体流量(任选)。

##### 4.19.6 不带试品时试验箱的校准

应在24 kW的辐射板通电加热至少40 min后,对试验箱进行校准。

应在稳定状态下,将进气段内测得的空气流量调节到在20℃时为 $0.21 \times (1 \pm 15\%) \text{ m}^3/\text{s}$ 。当试验装置以自然气流为基础时,其流量可通过调节阀或等效的装置来调节。而当试验装置采用强迫气流时,

其流量可通过风扇系统来调节。

注：为了得到稳定条件下的空气流量，可能需要多次调节。

#### 4.19.7 试验方法

试品应按下列条件置于试验箱中：

- 外线圈表面与辐射板间的距离约为 175 mm；
- 容器内酒精的起始液面与变压器线圈底面间的距离约为 40 mm；

注：在某些情况下，供、需双方需根据试品的设计进行协商。

- 半圆筒形金属屏应置于辐射板的对面，且应与试品同心；
- 试验开始时，试验箱内部、入口处空气及试品的温度，均应在 15℃～30℃ 范围内；
- 应在试验开始前的 5 min 内，对容器注入酒精。

当酒精刚点燃且辐射板 (24 kW) 同时通电时，试验开始。40 min 后，将辐射板电源切断。应对 4.19.5.1 和 4.19.5.2 所列参量进行记录，记录时间应从试验开始时至少持续 60 min，或为整个试验期间。

试验前及试验后，均应称出试品的质量，称量的精度应不超过 ±0.5%。铁心柱和带绝缘部件的线圈可以分别称重。

#### 4.19.8 试验报告

试验报告应包含下列信息：

- 材料样品的试验结果（如果用户要求）；
- 可燃烧材料的计算质量、热能值（如果可能）及试品质量的测量值；
- 试验箱的校准结果（空气流量、测量段内的温度、调节阀或抽气系统的调节量等）；
- 对试验方法的全面说明，包括酒精燃烧时间和通电加热时间；
- 试验时可燃烧材料的质量损失（精度为 ±10%）及释放热量 (MJ) 的计算值（如果可能）；
- 整个试验过程的温度记录值，从试验开始起（酒精点燃时开始），每隔 2 min 或更短的时间记录一次；
- 整个试验过程中，在测量段内传输的可见光的连续记录值 (%)；
- 在整个试验过程中，每隔 2 min 或更短的时间测量的测量段内的空气流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )；
- 试品上可见的燃烧状态。

#### 4.19.9 试验结果的评价准则

如果试品满足下列要求，则试验合格：

- 在整个试验过程中，在烟囱内的测量段中的气体对周围环境温度的温升应不超过 420 K；
- 辐射板断电后 5 min（即试验开始后的 45 min），在烟囱内的测量段中的气体对周围环境温度的温升应不超过 140 K，且在 10 min 后的测量期间内，此温升值应呈下降趋势；
- 试验开始后 60 min，在烟囱内的测量段中的气体温升应不超过 80 K，该条件用以表明火焰已经熄灭；
- 如果储存的热能阻止了自然气流的温度下降，则可允许有较高的温升；
- 在试验开始后的 20 min～60 min 期间，测量段中透光率（换算到 1 m 长的穿过烟雾的光学路径）的算术平均值应不低于 20%。

中 华 人 民 共 和 国  
机械行业标准  
电力变压器试验导则  
JB/T 501—2021

\*

机械工业出版社出版发行  
北京市百万庄大街 22 号  
邮政编码: 100037

\*

210mm×297mm·5.5 印张·178 千字

2021 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

定价: 72.00 元

\*

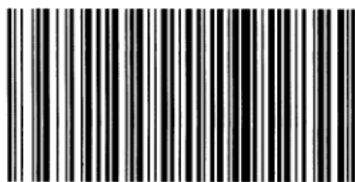
书号: 15111·16153

网址: <http://www.cmpbook.com>

编辑部电话: (010) 88379399

直销中心电话: (010) 88379399

封面无防伪标均为盗版



JB/T 501—2021

版权专有 侵权必究