

ICS 29.180

CCS K 41

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 2486—2022

变压器振荡型操作冲击感应耐压 试验导则

Test guide for induced oscillating switching impulse voltage withstand of power transformer

2022-05-13 发布

2022-11-13 实施

国家能源局 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 试验原理	1
5 试验条件	2
6 试验装置	3
7 试验接线及要求	4
8 试验方法	4
9 结果判断	5
10 试验记录	6
附录 A (资料性) 振荡操作冲击电压发生器原理	7
附录 B (规范性) 试验接线方式	9
附录 C (规范性) 典型振荡操作冲击电压波形	11
附录 D (资料性) 试验结果的判断	12
附录 E (资料性) 试验记录格式	15
参考文献	16



前 言

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

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电力企业联合会提出。

本文件由电力行业电力变压器标准化技术委员会（DL/TC 02）归口。

本文件起草单位：广东电网有限责任公司电力科学研究院、广东电网有限责任公司、西安交通大学、国网宁夏电力有限公司电力科学研究院、特变电工衡阳变压器有限公司、中国南方电网有限责任公司超高压输电公司检修试验中心、云南电网有限责任公司电力科学研究院、国网江西省电力有限公司电力科学研究院、中国电力科学研究院有限公司、国网甘肃省电力公司电力科学研究院、国网河南省电力公司电力科学研究院、国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司、特变电工沈阳变压器集团有限公司、吴江变压器有限公司、武汉启亦电气有限公司。

本文件主要起草人：蔡玲珑、孙文星、李军浩、吴旭涛、胡伟、刘青松、钱国超、杨贤、邹阳、杜砚、包艳艳、王伟、张连星、董春光、欧阳旭东、周鹏、彭浩。

本文件为首次发布。

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

变压器振荡型操作冲击感应耐压试验导则

1 范围

本文件规定了变压器振荡型操作冲击感应耐压试验（以下简称“振荡操作冲击试验”）的试验原理、试验条件、试验方法、结果判断及试验记录等要求。

本文件适用于 110 kV~750 kV 电压等级油浸式电力变压器进行振荡操作冲击试验，其他电压等级变压器可参考使用。

2 规范性引用文件

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

- GB/T 311.1 绝缘配合 第 1 部分：定义、原则和规则
- GB/T 1094.3 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 2900.19 电工术语 高电压试验技术和绝缘配合
- GB/T 16896.1 高电压冲击测量仪器和软件 第 1 部分：对仪器的要求
- GB/T 16927.1 高电压试验技术 第 1 部分：一般定义及试验要求
- GB/T 16927.2 高电压试验技术 第 2 部分：测量系统
- GB/T 16927.3 高电压试验技术 第 3 部分：现场试验的定义及要求
- GB 26860 电力安全工作规程 发电厂和变电站电气部分
- GB 50148 电气装置安装工程 电力变压器、油浸电抗器、互感器施工及验收规范
- DL/T 848.5 高压试验装置通用技术条件 第 5 部分：冲击电压发生器

3 术语和定义

GB/T 311.1、GB/T 1094.3、GB/T 2900.19、GB/T 16927.1 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

振荡型操作冲击 **oscillating switching impulse**

电压迅速上升到峰值，然后伴随着频率范围在 1 kHz 和 15 kHz 之间的阻尼振荡降低至零，其中有或无电压极性的反转，其特性可用包络线和振荡频率描述。

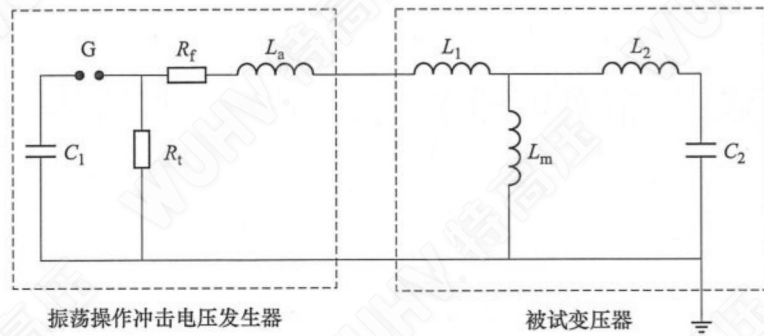
3.2

电压传递函数 **voltage transfer function**

变压器高压绕组电压和低压绕组电压进行快速傅里叶变换，将时域信号转换为对应的频域信号，并将高压绕组频域信号与低压绕组频域信号作比。

4 试验原理

通过在双指数冲击电压产生平台的高压回路中串联电感线圈，调整电路参数，可产生振荡操作冲击电压波形，在被试变压器低压侧输入一个低幅值冲击电压，在其高压侧感应产生满足变压器试验要求的振荡操作冲击电压，试验原理如图 1 所示，详细原理见附录 A。



说明：

- C_1 ——主电容；
- G ——触发球隙；
- R_t ——波尾电阻；
- R_f ——波头电阻；
- L_a ——调波电感；
- L_1 ——低压侧漏电感；
- L_2 ——高压侧漏电感；
- L_m ——励磁电感；
- C_2 ——高压侧等效电容。

图 1 基本原理示意图

5 试验条件

5.1 正常环境条件

进行振荡操作冲击试验的正常环境条件如下：

- a) 温度：周围空气温度不超过 40℃，且 24 h 内测到的平均值不超过 35℃；
- b) 湿度：周围空气相对湿度不超过 80%；
- c) 海拔：不超过 1000 m；
- d) 污秽：周围空气没有显著地被灰尘、烟雾、腐蚀性气体、蒸汽或盐雾污染，污秽等级不超过 C 级污秽；
- e) 其他：允许出现凝露和沉积，考虑了以露水、凝露、雾、雨、雪或积霜形式出现的沉积物。

5.2 标准参考大气条件

标准参考大气条件为：

- a) 标准温度：20℃；
- b) 标准压力：101.3 kPa；
- c) 绝对湿度：11 g/m³。

5.3 特殊环境条件

5.3.1 对环境周围空气温度高于 40℃ 的设备，其外绝缘在干燥状态下的试验电压应取本部分的额定耐受电压值乘以温度修正因数 K_t 。

$$K_t = 1 + 0.0033(t - 40) \dots\dots\dots (1)$$

式中：

t ——环境空气温度，单位为摄氏度 (℃)。

5.3.2 对于环境周围空气相对湿度超过 80%的设备,其外绝缘的试验电压应取本部分的额定耐受电压值乘以湿度修正因数,修正方法应符合 GB/T 16927.1 的规定。

5.4 试品条件

5.4.1 本试验应在绝缘特性测量、电压比测量、油耐压试验的结果得到确认并满足标准后方可进行。

5.4.2 试验前应将被试变压器静置,静置时间应符合 GB 50148 的规定。

5.4.3 被试变压器套管外绝缘的绝缘强度应符合 GB/T 311.1 的规定。

5.4.4 被试变压器还应符合以下规定:

- a) 分接开关应处于最大分接挡位;
- b) 安装的所有电流互感器,二次绕组应短接并接地。

5.5 回路条件

5.5.1 现场试验时,被试变压器套管接线端子应与所连接电气设备引线断开,断开安全距离应符合 GB 26860 的规定,电气设备引线应短接并接地。

5.5.2 试验回路中,所有接地线应连接在一起后一点接地。

6 试验装置

6.1 振荡操作冲击电压发生器本体

6.1.1 一般要求

振荡操作冲击电压发生器本体一般要求为:

- a) 应有明显的接地符号或表面接地字样;
- b) 外壳应涂漆保护,应无明显损伤;
- c) 尖端部位应设置防晕屏蔽罩;
- d) 充电电压测量误差应小于 1%;
- e) 电容器应具备接地保护装置;
- f) 应具备极性转换功能,能进行正负极性转换。

6.1.2 绝缘强度

振荡操作冲击电压发生器的绝缘部件和电阻应符合 DL/T 848.5 的规定,本体的绝缘强度应满足整个振荡操作冲击电压发生器的绝缘要求。

6.2 控制系统和测量装置

6.2.1 控制系统

振荡操作冲击电压发生器的所有电气及机械操作均应在控制箱上进行,并要求:

- a) 手动、自动控制的所有按钮功能齐全、准确;
- b) 指示灯应显示准确,不误动作;
- c) 紧急停止按钮应准确,快速动作;
- d) 控制箱应具有有良好的接地点,应采用隔离变压器供电;
- e) 触发点火装置应 100%可靠动作;
- f) 自动接地保护装置在任何情况应 100%动作并可靠接地。

6.2.2 测量系统

振荡操作冲击电压发生器的测量系统一般要求为：

- a) 应符合 GB/T 16927.2 和 GB/T 16896.1 的规定；
- b) 被试变压器低压侧及高压侧宜采用分压器进行电压波形的测量，必要时可采用套管试验抽头并并联小电容进行测量；
- c) 应具备电压传递函数计算功能。

7 试验接线及要求

7.1 试验接线

变压器进行振荡操作冲击试验接线示意图如图 2 所示，具体接线按附录 B 的规定。

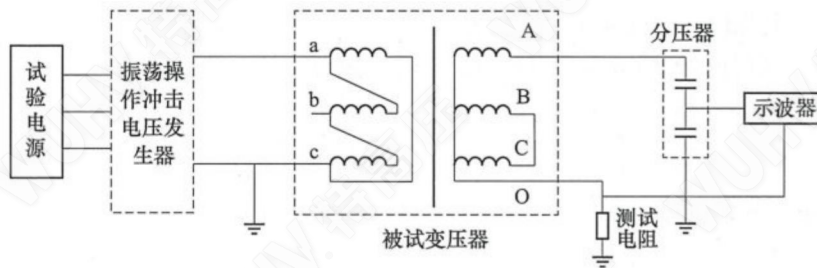


图 2 振荡操作冲击试验接线示意图

7.2 试验要求

振荡操作冲击试验应符合以下规定：

- a) 110 kV 及以上电压等级三相变压器试验时，非被试绕组端子电压峰值不应超出被试绕组端子电压峰值的 50%；
- b) 示波器等测量装置应与试验电源有效隔离，若采用隔离变压器，其工频耐受电压水平不应低于 10 kV（方均根值）。

8 试验方法

8.1 试验波形

振荡操作冲击试验施加到被试绕组的电压波形应符合 GB/T 16927.3 的规定，确定波形的的方法应符合 GB/T 16927.1 的规定，典型振荡操作冲击电压波形应符合附录 C 的规定。

波形关键参数如下：

- a) 峰值时间：20 μs ~400 μs ；
- b) 半峰值时间：1000 μs ~4000 μs ；
- c) 振荡频率：1 kHz~15 kHz。

8.2 试验电压

8.2.1 不同电压等级的振荡操作冲击试验电压水平应符合表 1 的规定。如无另行规定，振荡操作冲击试验电压水平应与操作冲击试验电压水平一致。

表 1 振荡操作冲击试验电压水平

单位: kV

系统标称电压 (方均根值)	设备最高电压 U_m (方均根值)	双指数操作冲击 (SI) (峰值, 相对地)	振荡型操作冲击 (峰值, 相对地)
110	126	395	395
220	252	650	650
	252	750	750
330	363	850	850
	363	950	950
500	550	1050	1050
	550	1175	1175
750	800	1550	1550

根据技术协议操作冲击电压另有要求, 则试验电压应与技术协议一致;
除非另有规定, 试验电压的测量值与规定值的偏差应保持在 $\pm 3\%$ 之内。

8.2.2 以下情况的被试变压器应在 100%试验电压水平进行振荡操作冲击试验:

- 全新变压器的出厂试验;
- 翻新变压器(经质保修理或绕组完全重新绕制、重新装配达到全新变压器状态)的出厂试验;
- 在变电站、发电厂组装的全新及翻新变压器。

8.2.3 以下情况的被试变压器应在 80%试验电压水平进行振荡操作冲击试验:

- 投运前的现场交接试验;
- 已投运变压器经检修后的诊断性试验;
- 怀疑存在主绝缘、纵绝缘及引线绝缘缺陷时。

8.3 试验流程

8.3.1 根据被试变压器结构形式, 按照 7.1 的要求对变压器进行接线。

8.3.2 被试变压器低压侧应逐相施加相应的试验电压, 通常施加负极性电压。

8.3.3 详细试验步骤如下:

- 在变压器低压侧施加 30%~50%全电压下的冲击, 校核高压侧感应电压波形、频率, 应符合 8.1 的规定。如不符合应调整波头电阻、波尾电阻和调波电感, 调整方法见附录 A, 记录低压侧施加电压与高压侧感应电压幅值的比例关系。
- 在主变压器低压侧施加三次连续的全电压下的冲击, 在全电压冲击前应进行足够的反极性磁冲击, 以确保铁心的磁化状态是相似的, 如果铁心未饱和, 则可不进行反极性去磁。
- 低压侧施加全电压冲击时, 记录高压侧感应电压水平是否符合表 1 的规定, 不符合则修正低压侧施加电压与高压侧感应电压的比例关系。
- 对被试变压器施加三次具有规定波形和幅值的全电压, 按照第 9 章的规定对结果进行判断, 试验未通过时应中止试验并查明原因。
- 任何一次冲击下, 在线路中或在套管间隙处发生了外部闪络, 或者在任何规定测量通道上的示波记录图失效, 则这一次冲击不应计入, 并应重新施加一次。

9 结果判断

试验结果同时满足以下要求, 判定该次试验通过:

- a) 被试变压器绕组未出现异常噪声，变压器套管无可见烟雾或火花放电。
 - b) 比较全电压与 50%充电电压下的电压、电流波形，幅值按电压大小正比例变化，电压波形未出现突然截断、振荡频率变化，电流波形未出现突然增大。
 - c) 比较全电压与 50%充电电压下的电压传递函数，电压传递函数极值点频率无改变。
 - d) 试验后静置 24 h 进行油色谱分析，结果无异常。
- 试验结果的判断案例见附录 D。

10 试验记录

振荡操作冲击试验记录至少应包括以下内容：

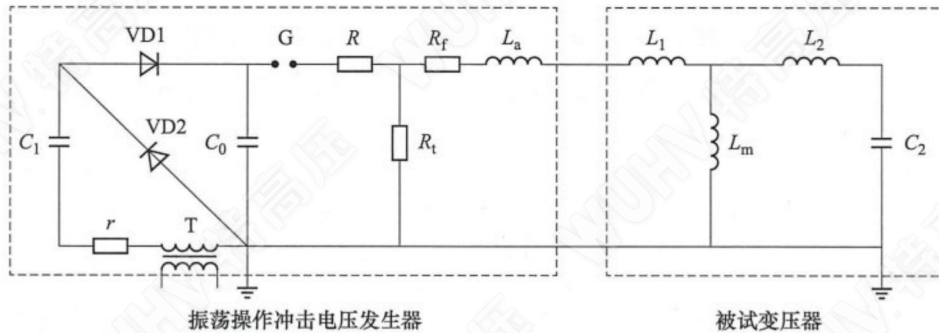
- a) 一般内容：
 - 被试变压器的型号、制造厂家、出厂编号、出厂日期；
 - 试验场地的温、湿度；
 - 试验的工作地点、日期。
- b) 每个绕组的冲击试验情况：
 - 振荡冲击发生器的配置参数；
 - 被试绕组电压波形、波头时间、波尾时间、振荡频率、电压幅值；
 - 波形记录编号；
 - 每次试验的接线图；
 - 电压和电流测量点及其测量布置；
 - 测量系统型号参数。
- c) 试验记录，格式见附录 E。

附录 A

(资料性)

振荡操作冲击电压发生器原理

振荡操作冲击电压发生器由图 A.1 所示的高效振荡回路构成。该装置原理是在双指数冲击电压产生平台的高压回路中串联电感线圈，通过调整电路参数，可产生振荡操作冲击电压波形。为进一步提高振荡操作冲击电压发生器的输出电压幅值，采用倍压充电电路向电容 C_2 充电；采用光电触发电控制的球隙作为开关器件。



说明：

- C_0 、 C_1 —— 充电电容；
- VD1、VD2 —— 高压硅堆；
- r 、 R —— 保护电阻；
- T —— 试验变压器；
- G —— 触发球隙；
- R_t —— 波尾电阻；
- R_f —— 波头电阻；
- L_a —— 调波电感；
- L_1 —— 低压侧漏电感；
- L_2 —— 高压侧漏电感；
- L_m —— 励磁电感；
- C_2 —— 高压侧等效电容。

图 A.1 振荡操作冲击电压发生器原理示意图

在被试变压器高压绕组产生的振荡冲击电压由两部分组成，如图 A.2 所示，一部分是仅存在于 4 ms 内的

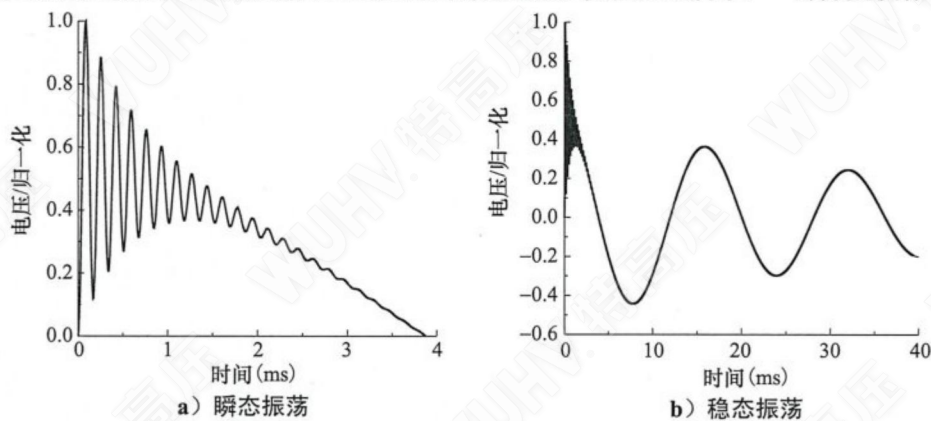


图 A.2 被试变压器高压绕组振荡冲击电压波形

频率较高的瞬态振荡，如图 A.2 a) 所示，这就是 IEC 标准推荐的振荡操作冲击电压波形，也是本文件的重点；另一部分是频率和幅值较低的稳态振荡，如图 A.2 b) 所示，其对绝缘的考核作用较弱，在实际试验中，当球隙间的电弧熄灭后，稳态振荡很快就会衰减至零。瞬态振荡和稳态振荡的等效电路如图 A.3 所示。

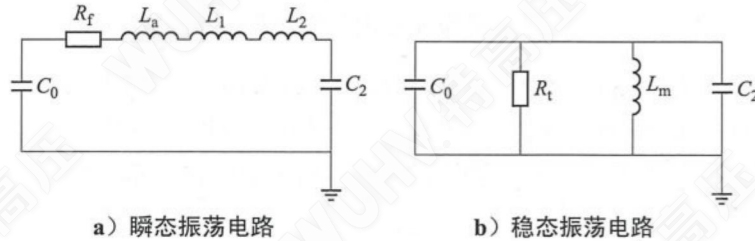


图 A.3 变压器振荡操作冲击不同阶段的等效电路

瞬态振荡的频率可根据公式 (A.1) 计算。

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_a + L_1 + L_2) \frac{C_0 C_2}{C_0 + C_2}}} \dots\dots\dots (A.1)$$

振荡操作冲击电压发生器各元件对高压绕组电压的影响见表 A.1。试验时将据此进行调波，使电压波形符合 IEC 60060-3 的规定。表 A.1 中，“+”表示冲击电压发生器元件参数和变压器高压绕组电压波形参数呈正相关，“-”表示冲击电压发生器元件参数和变压器高压绕组电压波形参数呈负相关，“\”表示两者无明显关联。

表 A.1 振荡操作冲击发生器各元件对高压绕组电压的影响

项目	波前时间	波尾时间	振荡频率
波头电阻	+	+	\
调波电感	+	+	-
波尾电阻	\	+	\

附录 B

(规范性)

试验接线方式

B.1 单相自耦变压器

单相自耦变压器振荡操作冲击试验接线如图 B.1 所示，主电容 C_1 被充电后通过球隙 G 、波头电阻 R_f 、波尾电阻 R_t 、调波电感 L_a 对变压器低压绕组放电，在高压绕组上感应出规定的振荡操作冲击试验电压。低压绕组一端接地，中压绕组悬空；中性点经示伤电阻接地；示波器记录高、低压绕组电压波形，以及流过示伤电阻的电流。

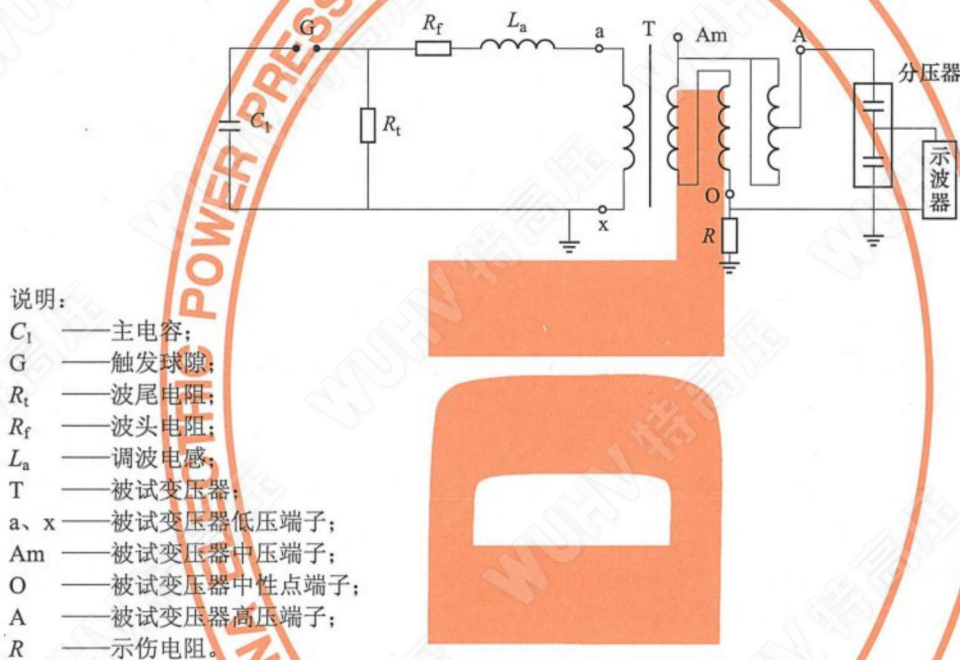
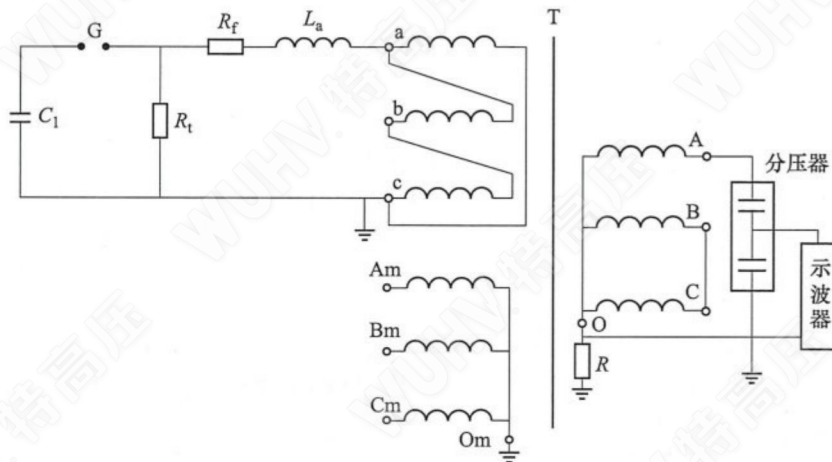


图 B.1 单相自耦变压器振荡操作冲击试验接线示意图

B.2 三相三绕组变压器

三相三绕组变压器振荡操作冲击试验接线如图 B.2 所示。主电容 C_1 被充电后通过球隙 G 、波头电阻 R_f 、波尾电阻 R_t 、调波电感 L_a 对变压器低压绕组放电，在高压绕组上感应出规定的振荡操作冲击试验电压。低压绕组一端接地，非被试相悬空；高压绕组中性点经示伤电阻接地，非被试相短接；中压绕组中性点接地，其余端子悬空；示波器记录高、低压绕组电压波形，以及流过示伤电阻的电流。

图 B.2 中被试相全励磁，其余两相半励磁，这样便在中性点接地的高压绕组上产生两种电压：在被试相产生额定试验电压；在其余两相产生与它极性相反、幅值为 1/2 额定值的试验电压。这样不仅使被试相的对地绝缘受到 1.0（标么值）的外施电压，而且使相间绝缘受到 1.5（标么值）的外施电压，满足 GB/T 1094.3 的要求。特殊情况相对地绝缘超过 1.0（标么值）外施电压时，会导致相间绝缘受到超过 1.5（标么值）的外施电压，从而导致外绝缘击穿，为使相间电压衰减，可在被试绕组系统的非被试端子上通过高阻值阻尼电阻器（5 k Ω ~20 k Ω ）接地。

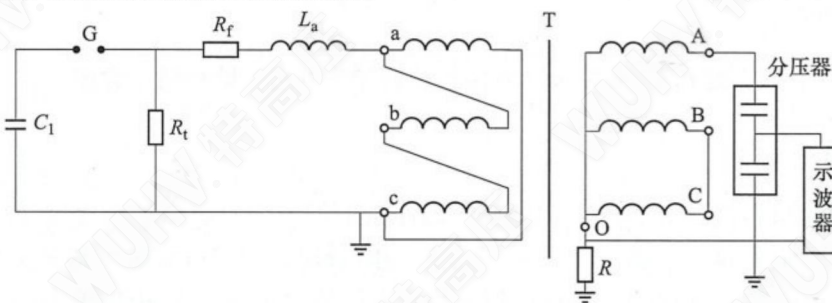


- 说明：
- C_1 ——主电容；
 - G ——触发球隙；
 - R_t ——波尾电阻；
 - R_f ——波头电阻；
 - L_a ——调波电感；
 - T ——被试变压器；
 - a、b、c ——被试变低压端子；
 - A_m 、 B_m 、 C_m ——被试变中压端子；
 - O_m ——被试变中压中性点端子；
 - A、B、C ——被试变高压端子；
 - O ——被试变高压中性点端子；
 - R ——示伤电阻。

图 B.2 三相三绕组变压器振荡操作冲击试验接线示意图

B.3 三相双绕组变压器

三相双绕组变压器振荡操作冲击试验接线如图 B.3 所示。主电容 C_1 被充电后通过球隙 G、波头电阻 R_f 、波尾电阻 R_t 、调波电感 L_a 对变压器低压绕组放电，在高压绕组上感应出规定的振荡操作冲击试验电压。低压绕组一端接地，非被试相悬空；高压绕组中性点经示伤电阻接地，非被试相短接；示波器记录高、低压绕组电压波形，以及流过示伤电阻的电流。



- 说明：
- C_1 ——主电容；
 - G ——触发球隙；
 - R_t ——波尾电阻；
 - R_f ——波头电阻；
 - L_a ——调波电感；
 - T ——被试变压器；
 - a、b、c ——被试变压器低压端子；
 - A、B、C ——被试变压器高压端子；
 - O ——被试变压器高压中性点端子；
 - R ——示伤电阻。

图 B.3 三相双绕组变压器振荡操作冲击试验接线示意图

附录 C

(规范性)

典型振荡操作冲击电压波形

典型振荡操作冲击电压波形如图 C.1 所示。电压迅速上升到峰值，然后伴随着频率范围在 1 kHz 和 15 kHz 之间的阻尼振荡降低至零，其中有或无电压极性的反转，用包络线和振荡频率表述其特性。

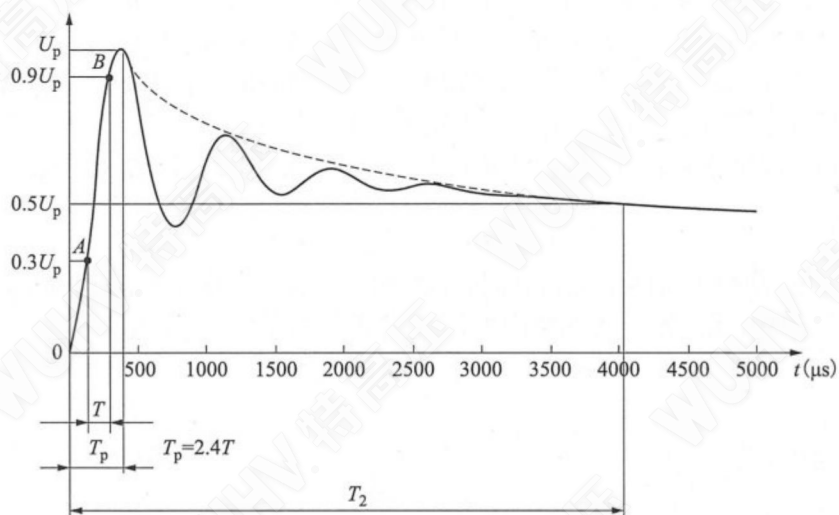


图 C.1 典型振荡操作冲击电压波形

试验电压值是指振荡操作冲击电压峰值。

波前时间 T_p 是指实际原点和到达电压峰值时刻之间的时间间隔，定义为冲击电压峰值的 30% 和 90% 两时刻时间间隔 T 的 2.4 倍，振荡型操作冲击的波前时间一般应在 $20 \mu\text{s} \sim 400 \mu\text{s}$ 之间。

振荡操作冲击电压半峰时间 T_2 是指实际原点和振荡操作冲击电压的包络线降低到半峰值时刻之间的时间间隔，振荡操作冲击的半峰时间一般应在 $1000 \mu\text{s} \sim 4000 \mu\text{s}$ 之间。

振荡冲击电压的频率是指两个连续峰值之间时间间隔的倒数，振荡操作冲击的频率一般应在 $1 \text{ kHz} \sim 15 \text{ kHz}$ 之间。

附录 D (资料性) 试验结果的判断

D.1 试验结果

如果电压和电流波形没有发生形状上的改变，它们的幅值按电压大小正比例变化，说明变压器内部没有发生绝缘击穿故障，若波形在整体形状上发生变化，或增加了新的振荡，或振荡频率有了变化，或幅值与电压不成比例等，表明试品绝缘发生击穿故障，但应该指出，被试变压器铁心的饱和程度、剩磁情况对电压和电流波形稍微有些影响。若有与电流磁效应同向的剩磁存在，以及随着饱和程度的增加将使电压过零时间和中性点电流达到峰值的时间提前，在进行故障判断时应引起注意。

D.2 典型波形图

本附录中有、无故障的波形图，是根据同心式绕组布置的心式电力变压器在实际试验中获得，见图 D.1 和图 D.2。应强调的是：这些波形图仅是典型的，对于任何一台电压不同，且设计制造也不一样的变压器或电抗器，其上所出现的畸变与本附录中不会完全相同。

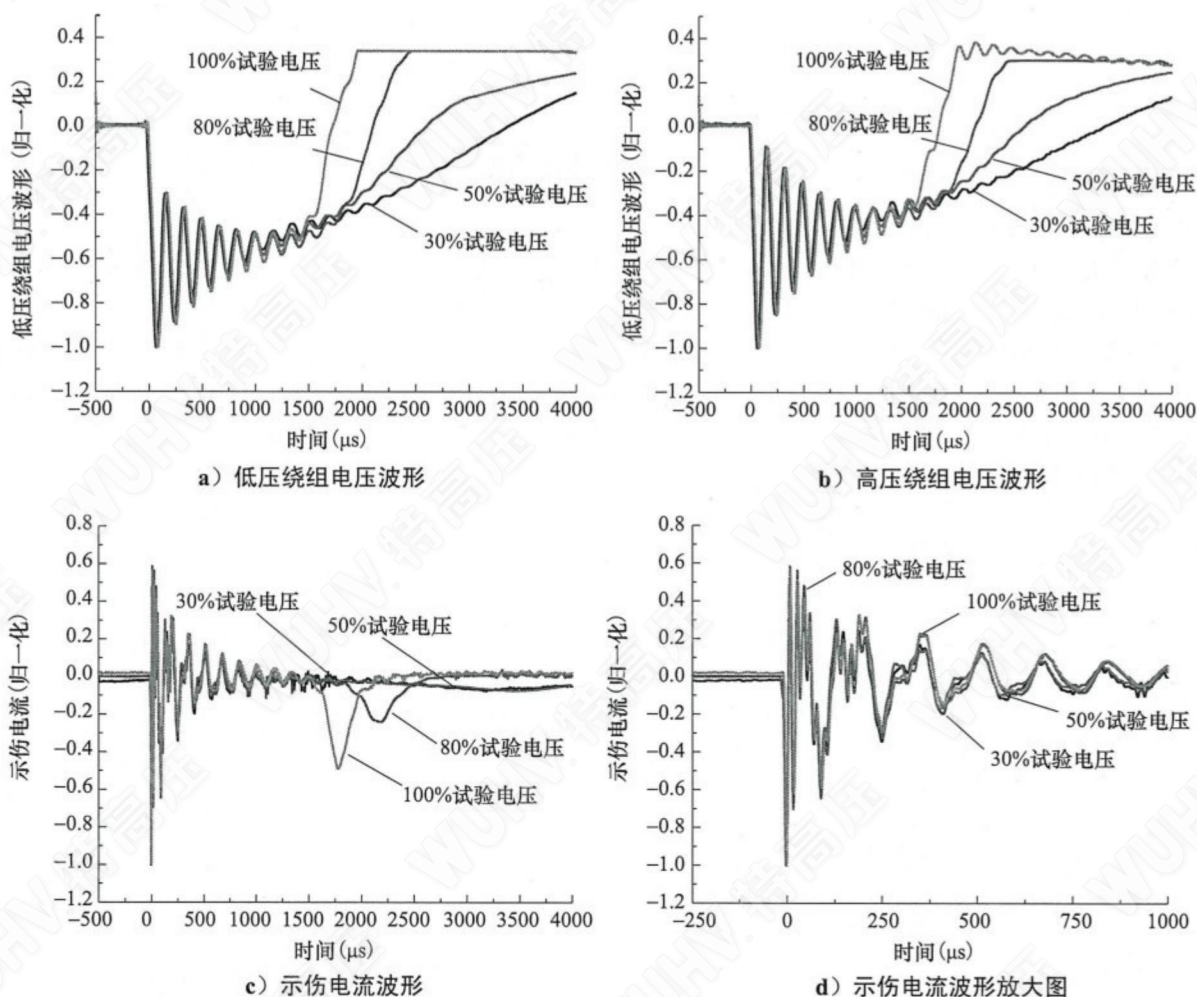


图 D.1 某主变压器振荡操作冲击试验合格

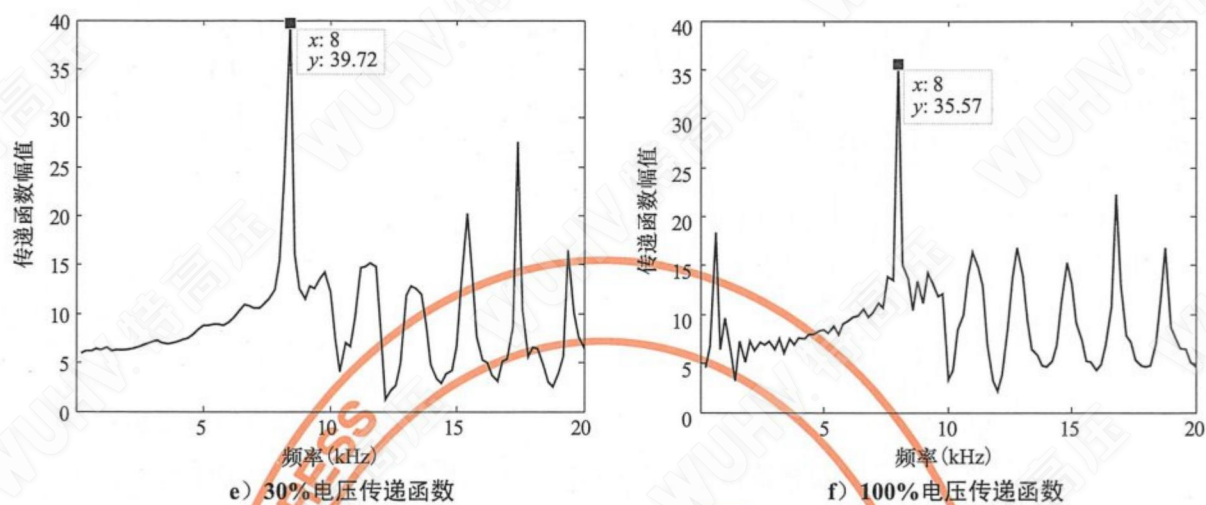


图 D.1 某主变压器振荡操作冲击试验合格 (续)

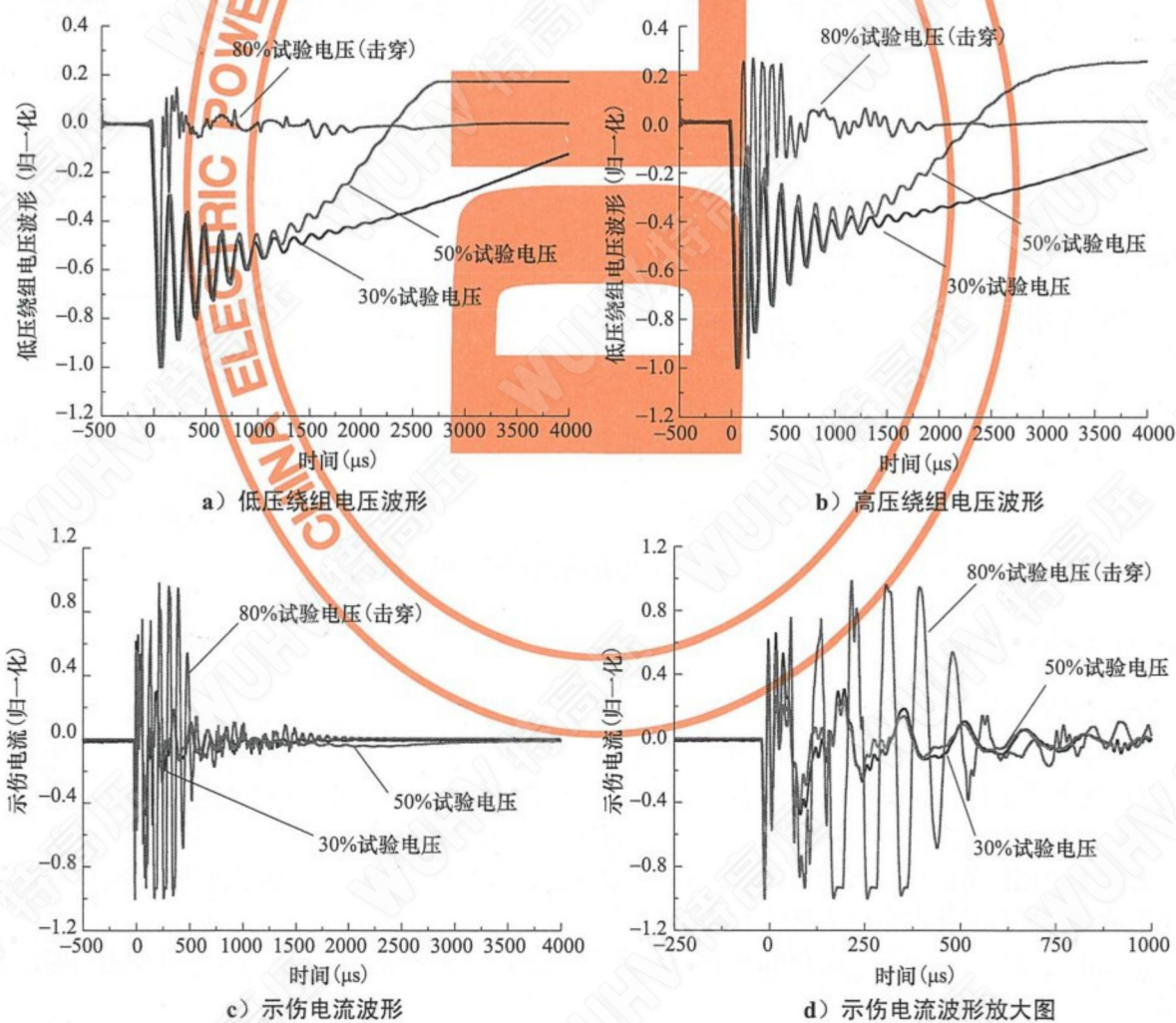


图 D.2 某主变压器振荡操作冲击试验 80% 电压内绝缘击穿

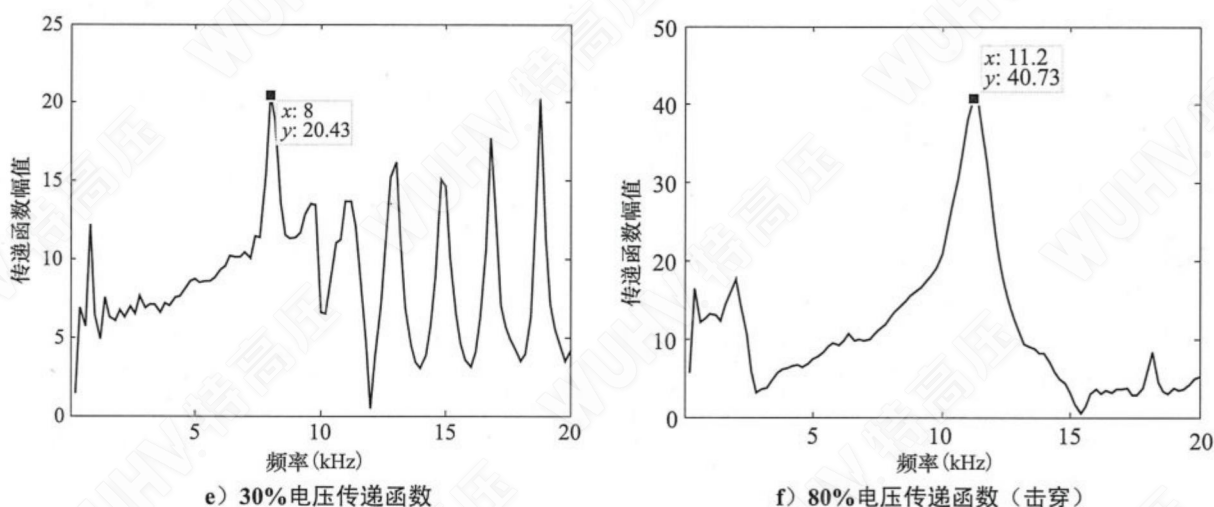


图 D.2 某主变压器振荡操作冲击试验 80%电压内绝缘击穿(续)

图 D.3 中主变压器 A 绕组和主变压器 B 绕组在 80%和 100%试验电压下,励磁电感发生饱和,饱和对高压绕组和示伤电流的影响在波尾时间之后,高压绕组电压进入基频振荡时显现出来,电压波形急速向正极性方向变化,励磁电流增大,且试验电压越高,励磁电感饱和的影响出现得越早,越明显。

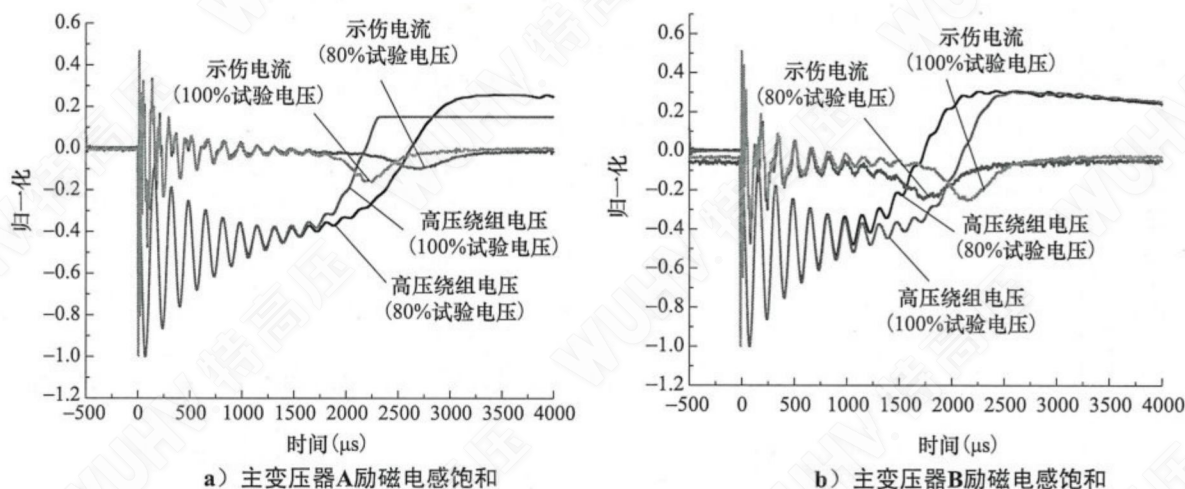


图 D.3 主变压器励磁电感饱和波形对比

D.3 故障类型及判断

绝缘故障主要包含以下两种:

- 主绝缘击穿。当主绝缘发生击穿时,电压突然截断并随之产生振荡,同时电流也突然上升。
- 匝间或段间绝缘损坏。当发生匝间(段间)短路时,波形变化不像主绝缘击穿时那样明显,总的趋势是被试端电压幅值降低,波头时间变短,波尾时间缩短。

通常还通过振荡操作冲击试验前后的工频空载试验来验证变压器是否出现了匝间短路,但应注意某些匝间故障的变压器仍能耐受空载试验的电压。

在变压器发生绝缘损坏时还会出现异响,这种异响有助于故障判断,但它本身不可作为判断故障的依据。

附录 E
(资料性)
试验记录格式

振荡操作冲击试验记录格式见表 E.1。

表 E.1 振荡操作冲击试验记录

委托单位	检测单位		
变压器 主要参数	型 号	制造厂家	
	出厂编号	出厂日期	
环境条件	温 度	湿 度	
检测仪器	生产厂家	型 号	
标准			
工作地点	试验日期		
波形类型			
测试值	第一次	第二次	第三次
波头时间 (μs)			
波尾时间 (μs)			
振荡频率 (kHz)			
电压幅值 (kV)			

参 考 文 献

- [1] 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
 - [2] GB/T 311.2 绝缘配合 第2部分：使用导则
 - [3] JB/T 501 电力变压器试验导则
 - [4] IEC 60060-3 高压试验技术 第3部分：现场试验的定义和要求 (High-voltage test techniques - Part 3: Definitions and requirements for on-site testing)
 - [5] 张哲铭, 靳宇晖, 吴邦, 等. 基于感应式振荡冲击耐压试验的变压器故障诊断技术 [J]. 高电压技术, 2019, 45 (02): 549-556.
 - [6] 李军浩, 郭飞, 张亮, 等. 变压器感应式振荡型操作冲击试验及局部放电测量技术 [J]. 高电压技术, 2016, 42 (04): 1199-1206.
-