

# 中华人民共和国国家标准

## 电力变压器和电抗器的雷电冲击 和操作冲击试验导则

UDC 621.314.222  
.6:621.316  
.933:621.317  
GB 7449—87

Guide to the lightning impulse and  
switching impulse testing of power  
transformers and reactors

本导则等效采用IEC 722(1982)《电力变压器和电抗器的雷电冲击试验与操作冲击试验的导则》。

本导则引用了GB 311.2~311.6—83《高压试验技术》和GB 1094.3—85《电力变压器 第三部分 绝缘水平和绝缘试验》中的内容。

### 1 范围

本导则的目的是对电力变压器的雷电冲击和操作冲击试验的现行方法提供一个准则并作一些说明，以作为GB 1094.3—85的补充。本导则的内容通常也适用于电抗器，至于电磁式电压互感器也可以参照执行。

本导则包括试验电路、接线、波形及试验时接地、故障检测方法、试验程序、测量技术以及试验结果分析等方面。

本导则所述的一切试验技术，尽可能采用GB 311.2~311.6—83中所规定的内容。

### 2 总则

本导则是以通用的冲击电压发生器对变压器和电抗器进行雷电冲击和操作冲击试验为基础而编制的。至于另用电容器组对变压器的低压或中压绕组放电，产生操作冲击波的方法也是适用的。但对于在电路中另加串联电感调波，对高压绕组传递一种弱衰减振荡波的方法，本导则没有涉及。

本导则不规定其它产生或模拟操作冲击波的方法，如从低压或中压绕组通入直流励磁电流然后截断，用工频电压的一个周波或某一段波形等方法。

选择变压器和电抗器的雷电冲击和操作冲击试验时的试验电路及端子接线有不同的考虑。雷电冲击试验时，变压器和电抗器所有端子和绕组均可分别地按规定的耐受电压水平值进行试验；但在操作冲击试验下，由于各绕组之间主要是靠磁耦合传递电压，一个绕组加压时，则传递至其它非试绕组的端电压是一定的，因此规定的耐受电压水平只能在一个绕组上达到。

电抗器的雷电冲击试验与变压器相似，在本导则中是放在一起叙述的。但在操作冲击试验中，电抗器和变压器有不同的考虑，且出现的问题也不完全一样，故分别加以叙述。

### 3 标准波形

按GB 1094.3—85的规定，试验时采用的标准波形为：

- a. 雷电冲击全波： $1.2 \pm 30\% / 50 \pm 20\% \mu s$ ；
- b. 雷电冲击截波：截断时间  $2 \sim 5 \mu s$ ，过零系数接近于0.3 ( $0.25 \sim 0.35$ )；
- c. 操作冲击波：视在波前时间 ( $T_1$ ) 为  $20 \sim 250 \mu s$ ，超过90%峰值的时间 ( $T_d$ ) 至少为  $200 \mu s$ ，从视在原点到第一个过零点的时间 ( $T_z$ ) 至少为  $500 \mu s$ 。

确定波形的方法见GB 311.3—83的有关规定；操作冲击波见本导则图1。

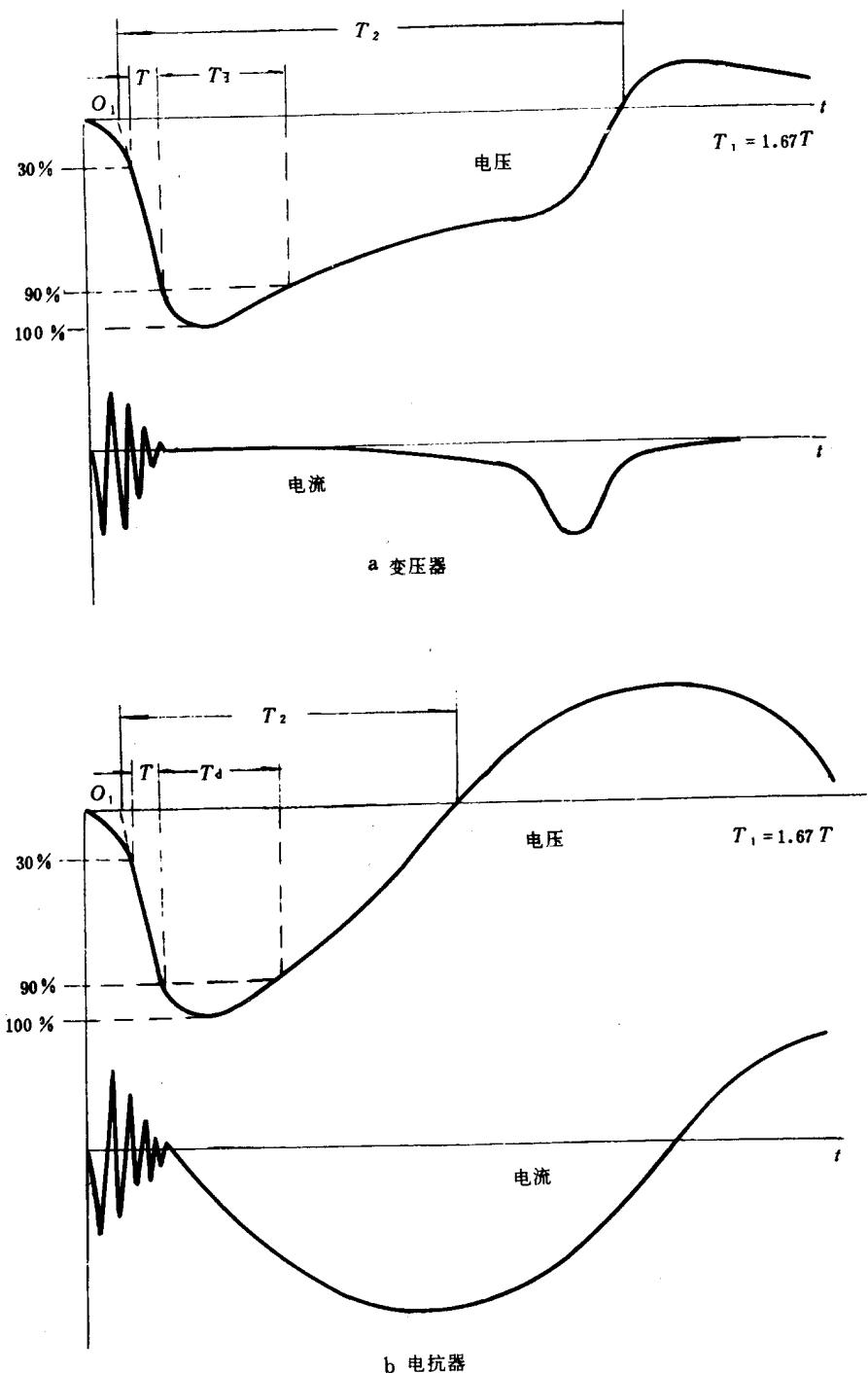


图 1 变压器和电抗器的操作冲击波形

#### 4 试验电路

按试验设备, 试品及测量装置的实际布置, 可分为下述三个基本电路 (参见图 2):

- 主电路: 包括冲击电压发生器, 附加调波元件及试品;
- 测量电路;
- 截断波电路 (产生截波用)。

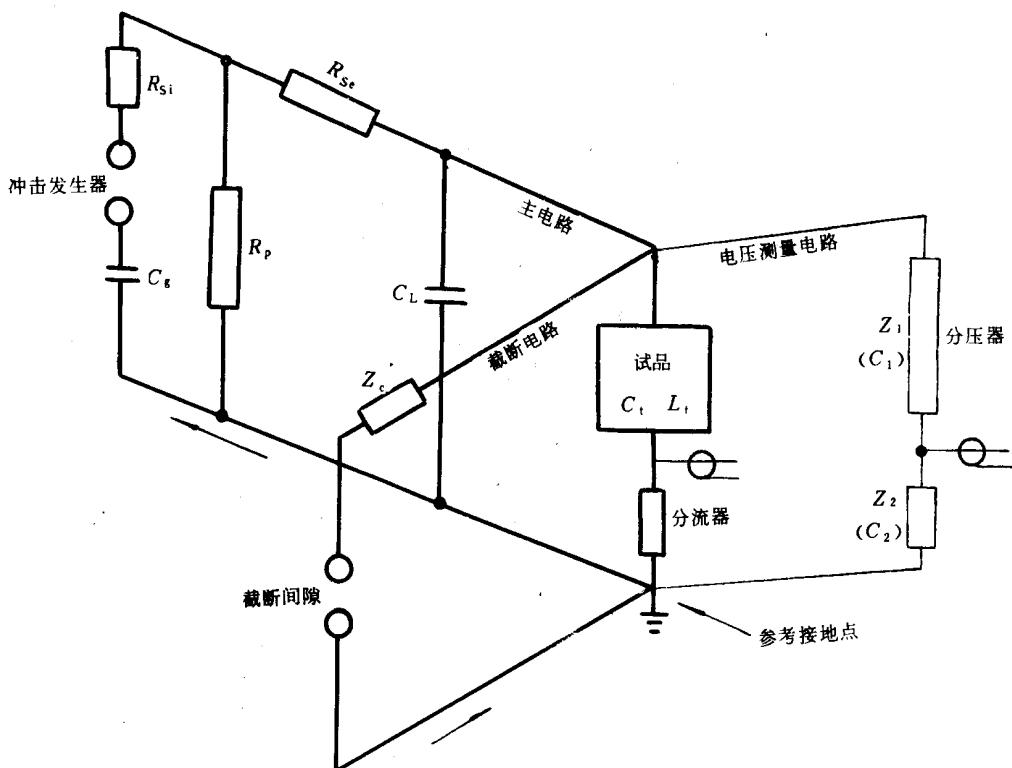


图 2 典型的冲击试验电路图

$C_g$ —发生器电容;  $C_L$ —负荷电容;  $C_t$ —试品等值电容;  $L_t$ —试品等值电感;  
 $R_{si}$ —串联电阻(波前电阻);  $R_{se}$ —外部串联电阻(或波前电阻);  $R_p$ —并联  
 电阻(波尾电阻);  $Z_c$ —截断电路中的附加阻抗;  $Z_1$ —分压器高压臂阻抗;  
 $Z_2$ —分压器低压臂阻抗

注: 由于试验设备不同,  $R_{si}$ 、 $R_{se}$ 可能只有一个。

下列参数对冲击电压波形有影响:

a. 试品的等值电容  $C_t$  和等值电感  $L_t$ ;

就一台试品而言, 在某一波形下  $C_t$  基本上是一固定值, 至于  $L_t$  随试品端子接线不同而不同, 详见 6.1, 6.3, 7.2.1, 7.3.1 及附录 A。

b. 冲击电压发生器电容  $C_g$ ;

c. 调波元件  $R_{si}$ ,  $R_{se}$ ,  $R_p$ ,  $C_L$  及分压器阻抗  $Z_1$ ;

d. 冲击电压发生器和整个试验电路的寄生电感和杂散电容;

e. 截断波装置;

视在波前时间  $T_1$ , 主要决定于  $C_g$ 、 $C_t$ 、 $R_{si}$ 、 $R_{se}$ 、 $C_L$  等参数。

视在半值时间  $T_2$ , 主要决定于  $L_t$ 、 $C_g$ 、 $R_p$  等参数, 但如  $L_t$  太小,  $R_{si} + R_{se}$  对  $T_2$  也有明显的影响。至于操作波  $T_2$  详见第 7 章。

雷电冲击和操作冲击试验用的设备, 基本上是一样的, 只是元件的参数不同, 如电阻值和电容值不相同, 此外, 还有试验时试品端子接线不同。

冲击电压发生器的输出电压，由试品的试验电压决定，所需要的能量主要由试品的阻抗决定。

为了满足雷电冲击和操作冲击试验的不同要求，一套设备必须有几种不同参数的 $R_{si}$ 、 $R_{se}$ 、 $R_P$ 和 $C_L$ 。操作冲击试验需要高值的 $R_{si}$ ，和(或) $C_L$ ，这将使发生器输出效率明显的降低。

关于波形调节原理的简要说明可参见附录A。

试验设备、试品、高压引线，连接电缆以及接地线等布置要考虑到试验室空间的限制，特别是各种结构的邻近效应。由于冲击试验时冲击电压和冲击电流幅值很大并且变化率又很高，再者接地系统的阻抗并不是理想的无限小的值，因此，不能认为整个接地系统都处在零电位。不同接地点的电位将有明显的差异，故选择一个合适的“参考接地点”是非常重要的。

试品和冲击电压发生器之间的电流回线应是低阻抗的，并且此电流回线应与接地系统牢固地接在一起，最好在试品附近处的接地点接地，此接地点便认为是“参考接地点”，所有接地线均应是低阻抗的导线，参见GB 311.5—83。

电压测量电路应从试品加压端子上直接引出，引线应尽可能的短，并且是一个只有测量电流流过的单独的支路，它应与上述“参考接地点”连接良好，电压测量支路的电流和通过试验绕组的电流相比应是很小的。在操作冲击试验中，冲击电压和冲击电流的变化率比雷电冲击试验时要小的多，并且通常又无截波试验要求，因此试验电路周围和“参考接地点”的电位梯度均明显降低，危险性较小。但仍建议按雷电冲击试验的接地方式接地。

## 5 测量系统及校正

测量装置应按GB 311.5—85标准要求进行校验；至于测量系统及其校正，本导则不再提出任何新的建议。试验前，应对试验电路和测量系统进行全面的检查；此时施加电压值可在额定耐受试验电压的50%以下，检查时，电压值可用球隙放电或用其它已经检验合格的测量系统进行比较来决定。当用球隙测量电压时，只能做为检查性的工作，不能做为测量系统的定期校正工作。检查完毕，除拆除检查用的各种装置外，试验电路和测量系统均不得变动。

关于分压器的型式及其使用方法、准确度、校正和检查等，详见GB 311.4—83和GB 311.5—83中的有关规定。

## 6 雷电冲击波试验

### 6.1 全波波形

在大型电力变压器和电抗器的雷电冲击全波试验中，由于其绕组的等值电感小和(或)等值电容大，往往不可能得到规定的标准波形，此时应允许波形有更大的偏差。

#### 6.1.1 视在波前时间 $T_1$

由于变压器冲击入口电容是一个常数，故为得到符合要求的 $T_1$ ，只能减少串联电阻，另外，因为设备本身和试验回路中存在着一定数量的寄生电感，若串联电阻值过小，将使波形的波前部分产生严重的振荡，按GB 311.3—83规定，振荡(或过冲)幅值不应大于施加电压峰值的5%，这样就使串联电阻的阻值不能太小，从而决定了波形的 $T_1$ 值。

若想得到标准的 $T_1$ 值，往往振荡(或过冲)幅值超限，若保证振荡(过冲)幅值，将使 $T_1$ 值超限，因此必须两者同时兼顾。一般地说，在振荡(过冲)幅值不超过施加电压峰值10%的前提下，应尽量的缩短 $T_1$ 值。

#### 6.1.2 视在半值时间 $T_2$

对于大型电力变压器，尤其是低压或中压绕组的冲击试验 $T_2$ 往往达不到标准规定的下限，增加 $T_2$ 时间的办法，通常是增加 $C_g$ 和 $R_P$ ，但 $C_g$ 由试验设备而定。

当 $L_t$ 过小时， $R_P$ 增加到一定数值后则基本上不起调节作用。

另外可以改变试品本身的接线以增加其阻抗，尽量拉长 $T_2$ 值。如：

- a. 非试绕组的高压端子经电阻接地，这将使试品的被试绕组的有效电感显著增大；但必须保证

非试绕组端子上的电压不超过该绕组的额定耐受电压的75%。

b. 自耦变压器被试绕组的非试端子（接地端除外），可以通过小于 $400\Omega$ 的电阻接地，但应保证非试端子上的电压不超过本身额定耐受电压的75%。

c. 当被试绕组是全绝缘或三角形联结绕组时，被试绕组的非试端子，允许通过小于 $500\Omega$ 的电阻接地，但应保证非试端子上的电压不超过本身额定耐受电压的75%。

当试品电感太小和（或）发生器的电容较小，以至波尾呈现振荡时及极性电压峰值不应超过施加电压峰值的50%。根据这个原则，关于发生器电容值的选择及波形调节准则，可参见附录A。

### 6.1.3 中性点试验的全波波形

当由高压端加压时，加压端应为标准波形，中性点端只考虑电压，不要求波形。当中性点直接加压时，允许 $T_1 < 13\mu s$ 。为保证 $T_2$ 值，允许高压端经电阻接地。当中性点未引出时，三相入波也可参照上述原则。

## 6.2 截波波形

### 6.2.1 截断时间 $T_c$

不同的 $T_c$ （定义见GB 311.3—83），由于绕组具体结构及其布置不同，将在绕组的不同部位处产生不同持续时间和幅值的电压，因此，不可能对变压器或电抗器规定一个严格的截断时间，只要求在 $2 \sim 5\mu s$ 之内即可。

6.2.2 电压过零系数（定义见GB 311.3—83）和电压骤降陡度过零系数和电压骤降陡度，是由截断电路的布置和电路中各元件的参数决定的。满足过零系数不大于0.3，截断电路不应另加任何阻抗。当过零系数大于0.3时，允许截断电路接入附加阻抗 $Z_c$ （参见图2）把过零系数限制在0.25~0.35范围内。应尽量缩短截断装置和加压端子连接线的长度，以便得到更短的截断持续时间，增大电压骤降陡度，这样才能严格的考验证品。

### 6.3 试品端子接线及故障探测方法

变压器雷电冲击试验时，试品端子接线，在GB 1094.3—85中已有较详细的叙述，至于电抗器则可参见关于电抗器的相应标准中的规定。通常非试绕组所有端子及被试绕组的非试端子，均应接地。但是，为了改善半值时间 $T_2$ ，有时则采用特殊接线（参见本导则第4章和6.1条）。

当分接绕组，绕组的某一部分或增压变压器的串联绕组是用避雷器保护时，在试验时，建议用电阻代替避雷器，电阻值的大小应使电阻上的电压值与避雷器保护水平相接近。

试品的接地方式，主要由所采用的故障探测方法决定。通常是采用记录施加电压和下述瞬变现象的波形图来探测故障，参见图3，一般地说，在正常试验中只需记录施加电压波形和其中一个瞬变现象波形。

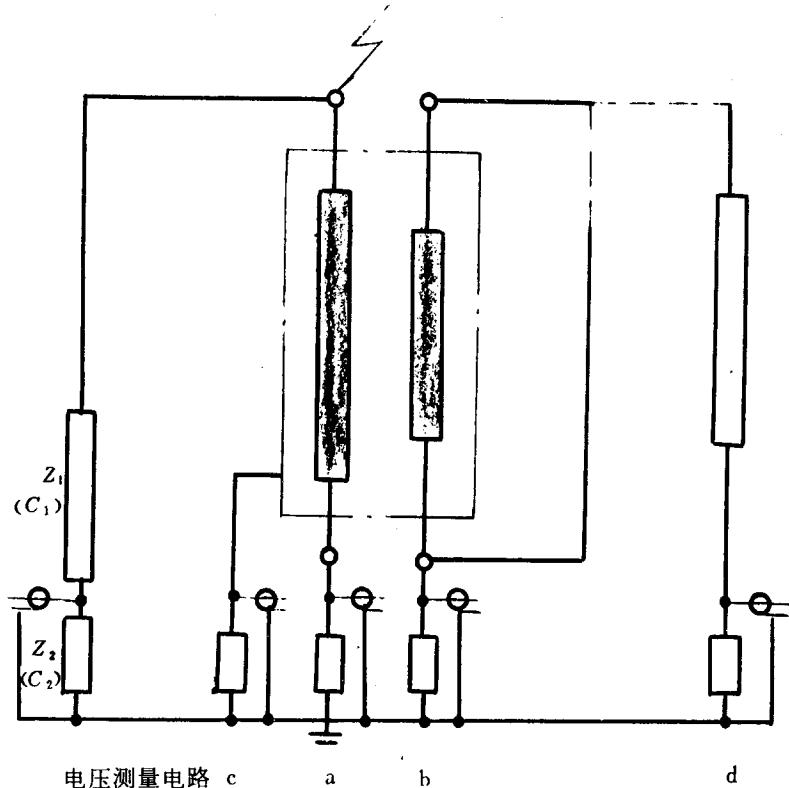


图 3 雷电冲击试验中的端子接线和故障探测方法

a—中性点电流；b—电容传递电流；  
c—油箱电流；d—传递电压

- a. 中性点电流：即通过被试绕组的电流，由被试绕组的接地端引出；
  - b. 电容传递电流：即传递到邻近绕组的电流；
  - c. 油箱电流：即传递到油箱上的电流；
  - d. 传递到非试绕组上的电压。
- a.、b.和c.的总和称为“线电流”。电抗器试验时，方法b.和方法d.是不适用的；方法c.因灵敏度比其它方法低，仅作为一种辅助的瞬变现象记录方法。

#### 6.4 试验程序

一般地说，试验程序包括试验方法和试验顺序。

优先采用触发型截断间隙，因为它能保持截波的截断时间稳定，便于对所记录的波形进行比较，并且在全截波试验时，试验电路和各元件参数可以统一，试验顺序按 GB 1094.3—85 的规定进行。

注：若因设备条件所限，也允许采用简单的球间隙产生截波，此时若采用全、截波交替试验，因电路需反复变换元件参数，试验费时甚多，难度较大，因此允许截波、全波分别试验。在降低电压下应分别校正测量装置。

冲击电压直接加在被试端子上是一种常用的、优先采用的方法；不过，在某些特殊情况下，如低压或中压绕组在运行时不会直接受到与其相连接系统中来的雷电过电压，故对低压或中压绕组可采用“传递冲击”方法。此时，低压或中压绕组和高压绕组的冲击试验同时进行，在这种情况下，传递电压的波形可以不考虑，只要求电压值达到规定的水平。采用的办法可详见 GB 1094.3—85 中说明，但应注意有时低压或中压绕组可能无法达到规定的试验电压值；对于三角形联结绕组，相间可能会出现较高的电压，而使相间的内、外绝缘有受到损伤的危险，所以降压或中压的电压值同样也受到限制。采用这种方式试验时，必须在预加的降低电压下，测得高、低（中）各端子电压及相间电压，经计算后确定最后加压值，如低压或中压绕组不能达到所规定的试验电压值，则不能采用这种方法。

注：在油箱内部，例如在绕组的某些段间或整个绕组上装有不带间隙的非线性元件时，建议在施加全试验电压

之前，逐级升压；由所记录的波形图的变化，找出变化规律，方可施加全试验电压；但若将非线性元件用于铁心接地或两端接有放电间隙时，则无法找出波形图变化规律。

## 6.5 示波器记录

### 6.5.1 概述

按GB 1094.3—85中的规定应记录：

- a. 外施电压波形；
- b. 至少一个瞬变现象的波形（见6.3条）。

即至少需要两个独立的记录通道。

必须记录外施电压的波形，至于记录其它瞬变现象，可根据所采用的故障探测方法来选择。

为了便于对试验结果进行分析及使全试验电压下和降低电压的波形图便于比较，最好利用示波器上合适的衰减器，使相对应的波形图均具有相同的幅值。

### 6.5.2 电压波形记录

#### a. 波形测定

在调节试验电路参数时，需要详细的记录电压波形；全波波形需记录：波前部分，一般示波器扫描时间可选择为 $10\mu s$ 之内（中性点试验时可以更长一些）；波尾部分，应能计算出半值时间，有时还需记录出第一个反峰值。截波波形需记录：从零至第一个反峰值出现后的整个波形，示波器扫描可选择在 $10\mu s$ 左右。

#### b. 试验波形记录

主要是为了记录波形的峰值，并且尽可能记录较长时间的波形变化情况，通常示波器扫描时间可选择为：

对于全波，不小于 $50\mu s$ ；

对于截波， $10 \sim 25\mu s$ 。

在正常试验中，一般采用一个时间来记录波形是足够的，但试验出现疑问时，为了便于判断，则可能需要几种不同扫描时间的记录。

### 6.5.3 电流波形记录

一般地说，记录瞬变电流的变化，是探测故障较灵敏的方法，因此观察电流波形图的变化情况，是试验结果分析的主要依据。

记录电流波形图，根据波形形状和持续时间不同，可能需要二个或更多的扫描时间同时记录；为了波形清楚起见，也可以选择线性扫描或指数扫描，以保证：

- a. 尽可能地得到包括波形峰值附近处的高频分量在内的清晰波形；
- b. 尽可能地得到电流波形变化的主要过程。

对于具体的扫描时间，由于每台变压器的响应特性不同，波的传播过程与绕组结构有一定的关系，因此，很难拟定一个确切的规定。全波试验当记录中性点电流时，上述情况a.可选择为 $10 \sim 20\mu s$ ；情况b.至少要记录到电感电流达到峰值之后，以便观察是否存在段间或匝间出现击穿的短路故障，通常扫描时间可选择为 $100 \sim 200\mu s$ ，当记录电容传递电流时，通常两种情况可以用同一扫描，时间为 $10 \sim 50\mu s$ ，截波试验的扫描时间一般亦可选择为 $10 \sim 50\mu s$ 。

## 7 操作冲击试验

### 7.1 特殊说明

变压器和电抗器对操作冲击波的响应有较大差异，这是因为变压器有一个完全闭合的磁路，并且操作冲击波持续时间较长，因此，在铁芯中将出现相当多的磁通、试品等效电感是一个变量，而电抗器则不同。此外，二者的波形问题，试验程序等也各不相同，所以对这两种设备的试验问题分别叙述。

### 7.2 变压器

#### 7.2.1 波形

按GB 1094.3—85的规定，视在波前时间 $T_1$ 为 $20\sim250\mu s$ ，从视在原点到第一个过零点时间 $T_2\geqslant 500\mu s$ ，超过90%峰值持续时间 $T_d\geqslant 200\mu s$ （参见图1a）；可见操作波试验时对波前时间的要求并不严格，只是要求有足够长的时间以保证绕组上的电压分布基本上均匀即可。当波尾部分出现振荡时，对反极性峰值的要求仍然同雷电冲击全波一样，应不大于施加电压峰值的50%。

波前时间是由绕组的等值电容、负荷电容和串联电阻（参见图2）等参数决定的，波前时间的调节问题基本与雷电冲击全波试验调波相同。

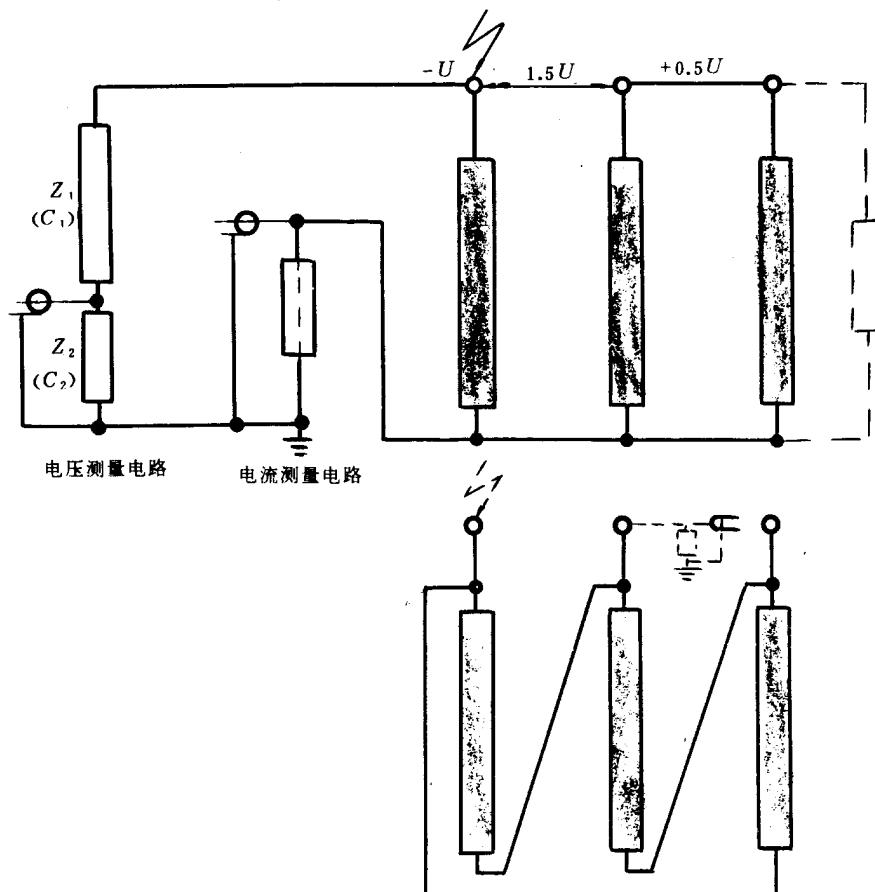
波尾时间，不仅受电路各种参数影响，而且还可能受到磁密达到饱和的影响，一旦铁芯磁饱和时，试品等值电感骤降，使波形迅速下跌过零，绝大多数变压器在全试验电压下铁芯将达到磁饱和，因此波尾时间不能用半值时间来表征，而用 $T_2$ 和 $T_d$ 表征（参见图1a）。

铁芯达到饱和的时间与铁芯尺寸，剩磁情况和施加电压高低有关。施加电压相同的操作冲击波，为了保证各次波形一致，必须使加压前铁芯的起始磁化状态相同。

降低电压下的波形不可能与全试验电压下的波形完全相同，在降低电压下，一般铁芯不出现磁饱和，甚至有时在全试验电压下，也可能不出现磁饱和，如果铁芯出现饱和，对波形的影响大小与其饱和程度有关，因此在降低电压下，只能确定 $T_1$ 和 $T_2$ 。只有在施加第一次全试验电压之后，才能确定 $T_2$ 。由于变压器不同铁芯柱的磁阻也不完全相同，因此各相试验时，波形的波尾形状也可能有差异。

### 7.2.2 试品端子接线和故障探测方法

按照GB 1094.3—85的要求，对于三相变压器只允许采用一种接线。如图4所示，其中性点总是接地的，一相加压另两个非试相端子可以连接在一起，对于三角形联结绕组非试相端子必须开路，一般不允许非试绕组短路。因为对操作冲击试验，这种短路的效应基本上与感应高压试验时相同。



虚线表示冲击波施加于角接绕组时的接线

图4 操作冲击试验中的端子接线和故障探测方法

选择哪一个绕组直接施加电压及此电压值的大小，一般可由制造厂决定，施加电压值的大小，必须保证最高额定电压绕组上的端电压，达到额定耐受电压水平。

虽然操作冲击波的基本波形部分是通过电磁感应传递的，从理论上来讲当对一相端子施加电压 $U$ 时，非试相端子上的电压将为 $0.5U$ ，相间电压为 $1.5U$ ；但是，由于相间耦合电容，每相本身的电容和电感等将能引起附加的振荡，并迭加在基本传递波上，所以在实际试验时若不采取适合措施的话，非试端子上的电压要高于 $0.5U$ ，相间电压也高于 $1.5U$ （参见附录B图B 14）。

通常采用在非试相端子上接入电阻负载，把非试相的电压限制为0.5倍的被试相所施加的电压；当非试相接入电阻时，将使非试相波形的波前时间拉长，这样被试相端电压波形和非试相端电压波形的 $T_1$ 值有差异，从而使相间电压可能略小于1.5倍的施加电压，这是允许的。

对于自耦变压器的被试相非试端子（接地端除外），也可能产生振荡，使电压超过本身的额定耐受电压，对此亦可采取上述措施加以限制。

故障判断方法，一般只用施加电压的波形图就够了；当采用低压或中压加压，还需记录高压端的波形，对于加压绕组的接地电流，可作为一种辅助的故障判断方法。观察电压波形的过零时间和电流波形峰值时间之间的差异，可以帮助判断是否发生故障。

注：对于壳式及无三角形联结绕组的五柱式变压器，由于磁通不完全通过非试相铁芯柱上的绕组，故相间电压不能达到1.5倍的相对地电压。

### 7.2.3 试验程序

每相分别施加操作冲击波，顺序为：

- a. 至少一次降低电压（为额定耐受电压的50~75%）的负极性冲击波。
- b. 施加合适的正极性操作冲击或正极性直流电压以产生剩磁。
- c. 三次额定耐受电压的负极性冲击；第二、第三次加压前均应重复前一项，以产生剩磁。

产生剩磁的优先采用方法是施加反极性（即正极性）操作冲击波，为使各次施加全电压时的波形相同，应使剩磁点保持不变，此点最好是“饱和剩磁点”。通常反极性励磁的电压不大于试验电压的60%，次数为1~2次；这样一般能满足三次全试验电压下波形相同。

### 7.2.4 示波器记录

#### 7.2.4.1 概述

在操作冲击波试验中，主要应记录被试绕组端子上的电压值，但是，正如第7.2.2款所述，由于非试相端子对地电压可能过大，至少要对这些电压进行检查。

电压波形图的变化，通常也能显示非试绕组上的任何故障，亦可记录冲击电流波形图，在许多情况下，可以给出有关故障的补充信息。

记录操作冲击波波形，应使用电容分压器。

#### 7.2.4.2 电压波形记录

##### a. 波形测定

在调节电路参数，决定波形的情况下，当记录波前时间时，其示波器扫描时间必须大于波形峰值出现的时间，通常为 $100\sim300\mu s$ ，当记录波尾时间时，由于只需确定 $T_d$ 值，扫描时间通常为 $500\sim1000\mu s$ 。

##### b. 试验波形记录：

为了记录波形的峰值和对任何可能出现的故障进行探测，要求示波器扫描时间应足够长，至少应大于 $T_2$ 值，甚至应大于第一个反极性峰值出现的时间，通常为 $1000\sim2000\mu s$ 。

#### 7.2.4.3 电流波形记录

在实际试验中，最好也记录直接加压绕组的电流波形，该电流包括下述三部分：

- a. 初始脉冲；
- b. 与电压波形波尾部分相对应的缓慢且均匀上升的电流；
- c. 与电压波形过零点相对应的电流峰值。

记录电流波形时示波器扫描时间，通常与记录电压波形时扫描时间相同。最好再选用一种快一些的扫描时间，来记录初始脉冲部分的电流。

### 7.3 电抗器

#### 7.3.1 波形

电抗器操作冲击试验波形，仍然用 $T_1/T_d$ 和 $T_2$ 来表征，其规定与变压器的规定相同（参见图1b及附录B图B16）。电抗器上得到的波形呈一余弦衰减波，试品由于磁路不闭合，铁芯不出现饱和现象，基本上是一个恒定的电感参数。波形主要用频率及衰减系数来表征，频率主要由电抗器的等值电感和冲击电压发生器的主电容决定（参见附录A中的A2）。

波前时间 $T_1$ 仍与变压器那样，主要由绕组的等值电容，负载电容和串联电阻等决定（参见附录A中的A1）； $T_1$ 要求有足够长，以保证被试绕组上电压分布均匀。当 $T_1$ 较大时，衰减系数也较大， $T_2$ 则相应的缩短；当 $T_1$ 较小时，将使反极性峰值增加，有时可能达到75%的全试验电压水平。对于反峰值的限制仍然与变压器一样，为第一个峰值的50%以下。这样就基本上决定了电路和波形的各种参数。电抗器操作冲击试验时，在降低电压下和全试验电压下，波形应基本上是相同的。

对于大型电抗器的操作冲击试验，有时也很难得到规定的标准波，允许有较大的偏差，但应尽量的接近标准波。

#### 7.3.2 试品端子接线和故障探测

由于每相只有一个绕组，试验电压只能加到被试绕组的高压端子上，另一端应接地。

故障探测，像变压器那样，通常只记录电压波形就够了，但最好同时记录通过被试绕组的电流波形，以作为辅助的故障探测方法。

注：三相电抗器操作冲击试验中，由于磁通不直接通过非试相铁芯柱上的绕组，故相间电压不能达到被试相对地电压的1.5倍。

#### 7.3.3 试验程序

电抗器操作冲击试验顺序为：

- a. 波形测定；
- b. 至少一次降低电压值的负极性冲击波；
- c. 三次额定耐受电压值的负极性冲击波。

#### 7.3.4 示波器记录

电压波形记录的原则，总的说，与变压器相同；不过示波器扫描时间最好是能把电压波形的第二个半周的波形包括在内。对于电流波形应与电压波形的时间相对应，最好再采用一种更短的扫描时间，以便记录初始时的电容瞬变电流。

### 8 试验结果分析

附录B给出了变压器和电抗器实际试验时，所记录的一些有故障和无故障的波形图，可供对试验结果分析时作参考；但应强调指出的是，由于各种产品的结构不同，故障部位、性质及损坏程度很难相同，即使波形图畸变情况很相似，也很难说其故障性质也相似。

#### 8.1 雷电冲击波

试验结果分析，主要是靠所记录的波形图来判断；而波形图的判断，是根据降低电压和全试验电压或连续几次全试验电压下所记录的波形图进行比较而得到的，这是一项技术性较强的工作，在试品正常的情况下，降低电压所记录的波形与全试验电压下所记录的波形以及几次全试验电压下的波形，除幅值外，应完全相同。当波形发现不相符和畸变时，由于可能出现各种各样的干扰，故均应对它进行仔细分析和必要的检查复试。

为找出波形发生变化的原因，建议首先对试验电路，测量电路和接地方式进行仔细检查，确定它们是否会产生干扰，如果发现疑点，应加以消除或尽量减少其影响。另外在多级冲击发生器中，由于各级点火时间不同，可能使电流波形的起始高频振荡部分的幅值有少量的变化，但其基波频率不变，

出现的时间大都在波前，幅值为峰值的50%以下的范围内（参见附录B图B13）。

其次，应检查铁芯接地和内部的任何非线性元件，确认它们不是干扰源。无间隙的非线性电阻元件随外施电压增高，波形图可能会出现某种有规律的变化（参见附录B图B12）。

一旦排除上述各种干扰原因和指明了干扰引起的波形变化情况，则：当降低电压下和全试验电压下，或者几次全试验电压下，所记录的波形图有畸变，均可以认为是由于试品绝缘故障而引起的。

雷电冲击截波试验示波图判断更加困难，出现干扰的原因除上述原因外，还应考虑截断时间不同而引起的波形不相符。当截波的截断时间不很一致时，一般波形都不大相符，波形截断后的部分不容易比较。即使是采用了可控的截断间隙，也只能得到近似相同的截断时间，虽然截断时间差别较小，但对某些变压器而言，也可能使截断后那部分波形不相符，这是由于冲击波波前部分相对应的瞬变现象和截断时引起的瞬变现象叠加在一起，两种现象的影响因素都很多，而且大都是一些随机因素，这样使得降低电压下和全试验电压下，及几次相同电压下的波形图均不大相符，造成混乱。容易误判断（参见附录B图B11）。

### 8.1.1 全波试验的电压波形图

用施加电压的波形图来判断故障是不够灵敏的，当发现波形畸变时，则说明试品绝缘中出现了较大的故障。

记录的波形，只要选择合适的扫描时间，可以分析出畸变的原因，如：

- a. 被试绕组加压端部的主绝缘出现对地故障时，将使电压波突然下跌（参见附录B图B1）；
- b. 沿被试绕组发生爬电逐渐发展呈完全闪络时，电压波形一般呈阶梯状逐级下跌；
- c. 沿被试绕组的某一部分闪络时，将使试品阻抗降低，因而半值时间 $T_2$ 减小，并且在波形上还可能出现高频振荡（参见附录B图B3、图B4和图B5）；
- d. 范围不太大的故障，如段间或匝间击穿时，一般电压波形很难看出变化，但有时也可能在基本波形上出现附加的高频振荡，在高压端部出现局部故障时，电压波形上可能出现不相符的变化征兆（参见附录B图B6）。这种故障，通常电流波形图可以看出明显变化。

传递到非试绕组上电压波形图亦能指示出上述故障，且灵敏度比施加电压的波形图要高一些。

### 8.1.2 全波试验的电流波形图

电流波形图是故障判断的主要依据，因为它具有较高的灵敏度，然而这种较高的灵敏度，也可能显示出某些非故障的干扰讯号，如8.1条所述。它们可能使波形发生不相符或畸变，因此应对此进行研究。

若电流波形图发生明显变化，则说明绕组内部或绕组对地可能发生了击穿（参见附录B图B1）。根据所用的故障探测方法，其变化形式也不相同，电流可能增大，也可能减小，并且方向也可能变化，这些现象可作为确定故障性质及发生部位的依据（参见附录B图B3）。

a. 中性点电流：若电流明显增大，则表明被试绕组内部出现故障；若电流变小时，则表明被试绕组对相邻绕组或对地出现故障。

b. 电容传递电流：若被试绕组内部或对地出现故障时，则使该电流的极性发生突然的变化，其基本频率也有变化，幅值可能降低；如果是被试绕组对相邻绕组的故障时，则将使该电流突然增加基本频率也发生变化。

所有这些故障均使波形图上迭加不同程度的高频振荡。

c. 小量的，局部的，不规则，或持续时间较短（2～3μs）的畸变，一般情况下，可能是由于匝间，线段间或线段引线等处有局部击穿或严重的放电而引起的。

对于串联电容小的绕组，即基本上能显示行波特性的绕组，可根据电容电流畸变和行波电流发生畸变到达中性点时间的差异来分析故障的位置。

### 8.1.3 截波试验的电压和电流波形图

上面提到了截波试验对故障探测的困难之处，但截波试验时只要仔细观察波形，分析波形的各种情况，还是可以得出正确的结论的。

- a. 当几次施加电压波形的截断时间很接近时，利用电压和电流波形图在截断后部分的差异，可以探测出试品是否存在故障（参见附录B图B8和图B9）；
- b. 当截断前波形出现畸变，分析故障基本上和全波试验相同（参见附录B图B2和图B7）。

## 8.2 操作冲击波

### 8.2.1 电压波形图

操作冲击试验中，由于沿整个绕组上的电压分布是均匀的，因此，出现故障，一般情况下，都是较大的损坏，如段间。绕组的某一部分，绕组之间或绕组对地等出现了击穿放电或沿面爬电，这将使波形图出现明显畸变，如：电压波形突然下跌或 $T_2$ 时间明显缩短，有时也可能只出现短时的下跌使波形呈一个凹陷。因此操作冲击试验中的电压波形图对大多数故障而言，是有足够灵敏度的（参见附录B图B15）。

应注意的是，当波形的 $T_2$ 时间缩短时，应区别是由于故障引起的，还是由于铁芯的剩磁情况不同而导致的；因此试验中应尽量保持铁芯的初始磁化状态相同，这样才能更好的对试验结果进行分析。

### 8.2.2 电流波形图

在第7.2.4.3项和7.3.4款中，已分别叙述了变压器和电抗器的电流波形图情况。电流波形图的灵敏度与电压波形图基本相同，当电压波形图出现畸变时，电流波形图也相应的出现畸变，则意味着绝缘发生了故障；对于在初始时间出现的故障，采用较快的扫描来记录电流波形图，将更为有利一些。

## 附录 A 波形调整原理 (补充件)

变压器在雷电冲击试验时的波形调整原理，可用图A.1及图A.2的简化电路图来说明。今按下述两种情况分别叙述：

- a. 高阻抗绕组;
  - b. 低阻抗绕组。

#### A.1 高阻抗绕组 ( $L_t > 100\text{mH}$ )

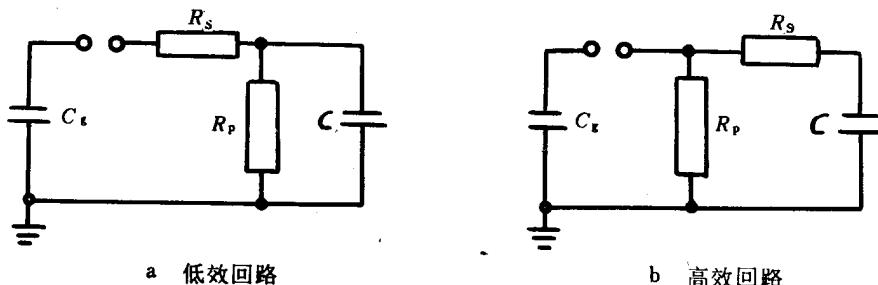


图 A1 高阻抗绕组的试验电路原理图

$C_g$ —发生器电容;  $C = C_t + C_L + C_g$  (见图 2)。

$R_s = R_{si} + R_{se}$  总串联电阻 (见图 2);  $R_p$ —并

联电阻（见图2）

波前时间为:

半值时间为:

$$\left. \begin{aligned} T_2 &\approx 0.7 (R_s + R_p) (C_g + C) \quad (\text{按图 A1a}) \\ T_2 &\approx 0.7 R_p (C_g + C) \quad (\text{按图 A1b}) \end{aligned} \right\} \dots \quad (A 2)$$

当  $R_p \gg R_s$  且  $C_g \gg C$ , 则:

$$\left. \begin{array}{l} T_1 \approx 3R_s C \\ T_2 \approx 0.7R_p C_g \end{array} \right\} \dots \dots \dots \quad (\text{A } 3)$$

通常，波前和波尾参数均是根据纯电容负荷时的原理来进行调节的。但应当指出：变压器的等效电容 $C_t$ 是包括在 $C$ 之内，且 $C_t$ 在波头和波尾的情况下有不同的实际值。

对于波前  $C_t \approx C_B + \sqrt{C_s C_e}$ , 其中  $C_B$  为套管电容;  $C_s$  为绕组的串联电容;  $C_e$  为绕组的对地电容。

对于波尾， $C_t$ 大致等于 $C_B$ 加上 $C_e$ 的某一部分值，此部分的确切数值是与起始电压分布有关。很显然，在大多数实际情况中〔见式（A3）〕， $C_t$ 值的大小考虑对波尾而言，是无关紧要的。

对于绕组等值电感在 $20\sim100\text{ mH}$ 时，它明显地使放电时间常数 $\tau$  ( $\tau = R_p \cdot C_g$ )减少。此时， $T_2$ 不能直接按式(A3)调节。为了计及这种影响， $R_p$ 必须足够大。经验表明： $R_p$ 之实际值有必要比按式

(A3) 求出的大 2 ~ 10 倍。

#### A.2 低阻抗绕组 ( $L_t < 20 \text{ mH}$ )

对于波前调节，与高阻抗绕组的情况相同。

对于波尾调节，试品可用图A2所示的等值电感表示：

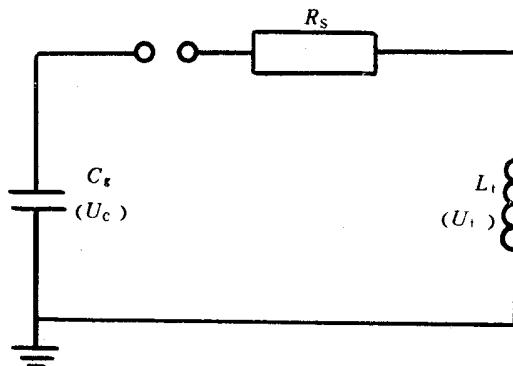


图 A2 低阻抗绕组在波尾时试验电路原理图

根据电路中的阻尼系数 $k$ 的大小，将使试验电压波形呈振荡型或呈指数型。在临界阻尼( $k=1$ )或过阻尼( $k>1$ )的电路中，可得到指数的电压波形。然而，一般是不采用这种波形的，因为在这种情况下，与此相应的电阻值将过大，使波前时间延长到不能接受的程度。

若  $k < 1$ ，试验电压为：

$$U_t = U e^{-at} \left( \cos \omega t - \frac{a}{\omega} \sin \omega t \right) \\ = \frac{U}{\cos \varphi} e^{-at} \cos (\omega t + \varphi) \quad \dots \dots \dots \quad (A4)$$

其中：

$$\omega^2 = \omega_0^2 - \alpha^2,$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L_s G_s} ,$$

$$\alpha = \frac{R_s}{2J_{st}} ,$$

$$\tan \varphi = \frac{a}{b}$$

$$= \frac{k}{\sqrt{1 - k^2}},$$

$$k = -\frac{\alpha}{\omega_0}$$

$$= \frac{R_s}{2\sqrt{\frac{L_t}{C_g}}} \quad \circ$$

此电压为衰减振荡波，如图A3所示。

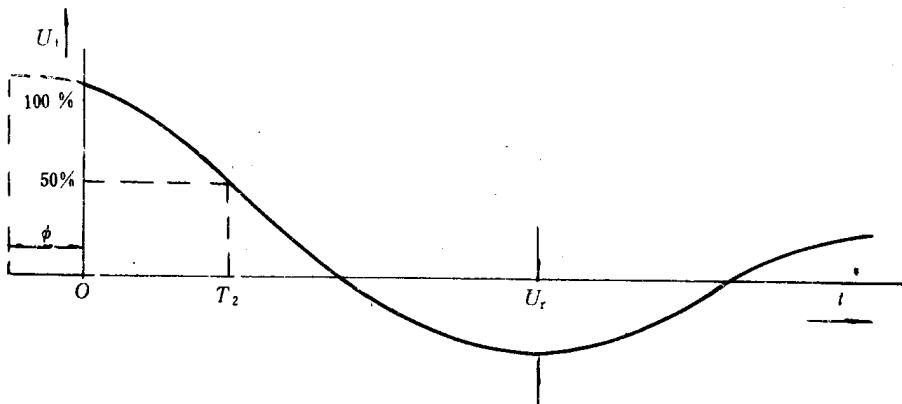


图 A3 衰减振荡波

为了初步估算  $T_2$ ，令  $R_s$  为零。因此式 (A4) 为  $U_t = U \cos \omega_0 t$ 。

半值时间  $T_2$  为：

$$T_2 = \frac{1}{6} \cdot \frac{2\pi}{\omega_0}$$

$$= \frac{\pi}{3} \sqrt{L_t C_g} \quad \dots \dots \dots \quad (A5)$$

但在这种理论条件下，将得到反极性幅值为 100% 的余弦波。

按照 GB 1094.3—85，反极性幅值  $U_r$  限制为 50% 以内，故要作大的衰减，由此，半值时间将比按式 (A5) 计算要小。在此条件下， $k = 0.25$ ，故半值时间  $T_2$  为：

$$T_2 \approx \sqrt{0.5 L_t \cdot C_g} \quad \dots \dots \dots \quad (A6)$$

式 (A5) 及 (A6) 表示出调节试品电感  $L_t$  或冲击发生器电容  $C_g$  以控制波尾的准则。

$L_t$  是受非试绕组接线方式影响的，如果将非试绕组短路接地（即通常采用的接线方式）， $L_t$  便是变压器的漏抗；如果在非试绕组上接入电阻负载时，等效电感增大，但是必须限制非试绕组端子上的电压值不大于其额定雷电冲击耐受电压值的 75%。

$C_g$  可随冲击发生器的各级串、并联接线变动而改变。下式 (A7) 可估算出所需的冲击发生器电容  $C_g$  最小值。

$$C_g \approx 2 \cdot \frac{T_2^2}{L_t} \quad \dots \dots \dots \quad (A7)$$

但是当  $L_t$  太小，由于非试绕组端子上的电压值受到不应超过 75% 的限制，非试绕组端子经电阻接地的方法来加大  $L_t$ ，也将受到限制，式 (A7) 不是总能得到满足的。此时电路中的放电时间常数为：

$$\tau = \frac{L_t}{R_s} \quad \dots \dots \dots \quad (A8)$$

式 (A8) 表示调节波尾的另一种方法，此时建议增大负荷电容  $C_L$ ，这样可以减小  $R_s$ ，但  $R_s$  太小，将使波前部分振荡严重，反极性峰值过大，因此也就限制了  $R_s$  的数值。

如果上述控制波尾的方法还不能得到合适的半值时间的话，需要采取折衷的办法，或接受更小的半值时间；或在被试绕组非试绕组上也经电阻接地如图 A 4 所示。在后一情况下，非试端子上的电压值仍然要求不大于其额定雷电冲击耐受电压值的 75%，最好还是采用更小的半值时间（详见正文说明）。

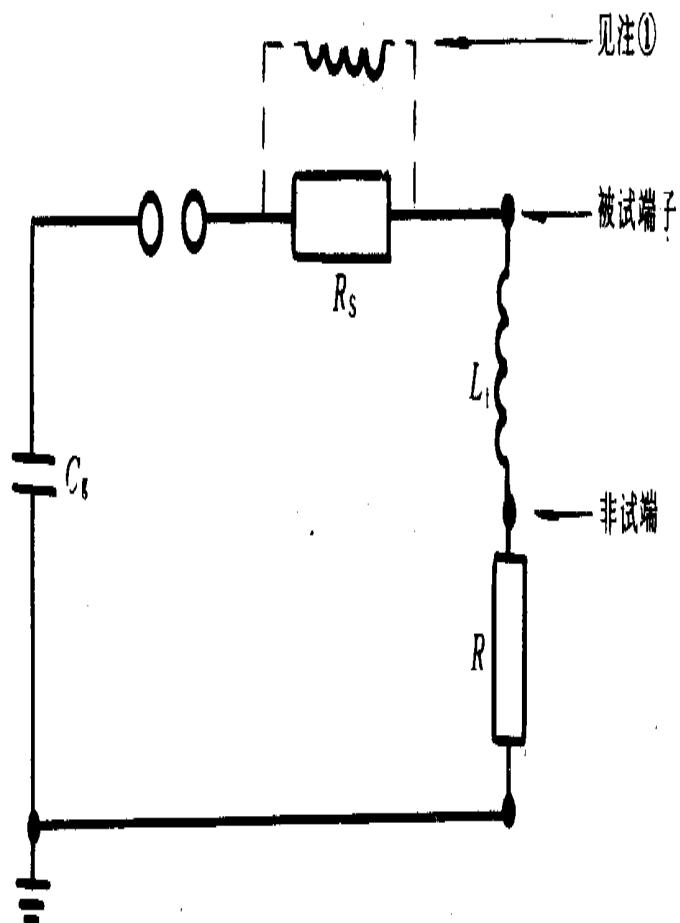


图 A4 低阻抗绕组通过电阻接地，试验电路原理图

- 注：① 现已发展了一种加大半值时间的补充方法，它是在 $R_s$ 上并联附加的电感元件，在波尾部分起到减小 $R_s$ 的作用，增加时间常数 $\tau$ 。
- ② 在调节操作冲击波的波头时间中，也可采用上述的一些考虑。但是，由于波前时间长，变压器的等效电容 $C_1$ 便等于绕组的对地有效电容 $C_e$ 再加上套管电容 $C_b$ 。

**附录 B**  
**录取的典型波形图**  
**(补充件)**

以后各页有、无故障时的波形图，是根据同芯式绕组布置的芯式电力变压器和并联电抗器在实际实验时所得到的波形图复制的。应强调注意的是：这些波形图仅是典型性的。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，其上所出现的波形畸变，即使与本附录所列举的波形畸变很相似，也不能认为是同一原因引起的。图中所列举的故障具体说明，仅仅是作为一般的准则提出的。各图均引自IEC 722 (1982)。

**波形图实例一览表**

**雷电冲击试验**

**全波故障**

- a. 被试绕组线端对其中性点端击穿（见图B 1）；
- b. 被试绕组段间击穿（见图B 2）；
- c. 粗调分接绕组的层间击穿（见图B 3）；
- d. 分接绕组外部的分接引线间击穿（见图B 4）；
- e. 细调分接绕组一个线段间击穿（见图B 5）；
- f. 高压绕组中的多股并联导线间击穿（见图B 6）；
- g. 套管内部电容屏之间击穿（见图B 7）。

**截波故障**

- a. 被试高压绕组匝间击穿（见图B 8）；
- b. 细调分接绕组中的匝间击穿（见图B 9）。

**截波——截断时间不同时的影响**

- a. 截断时间相同时的试验情况（见图B 10）；
- b. 截断时间多少有点差异时的情况（见图B 11）。

**全波——无故障时存在的波形不相符**

- a. 分接开关中的非线性电阻元件的影响（见图B 12）；
- b. 冲击发生器不同步时的影响（见图B 13）。

**操作冲击试验**

- a. 变压器试验合格（见图B 14）；
- b. 变压器被试绕组击穿（见图B 15）；
- c. 电抗器试验合格（见图B 16）。

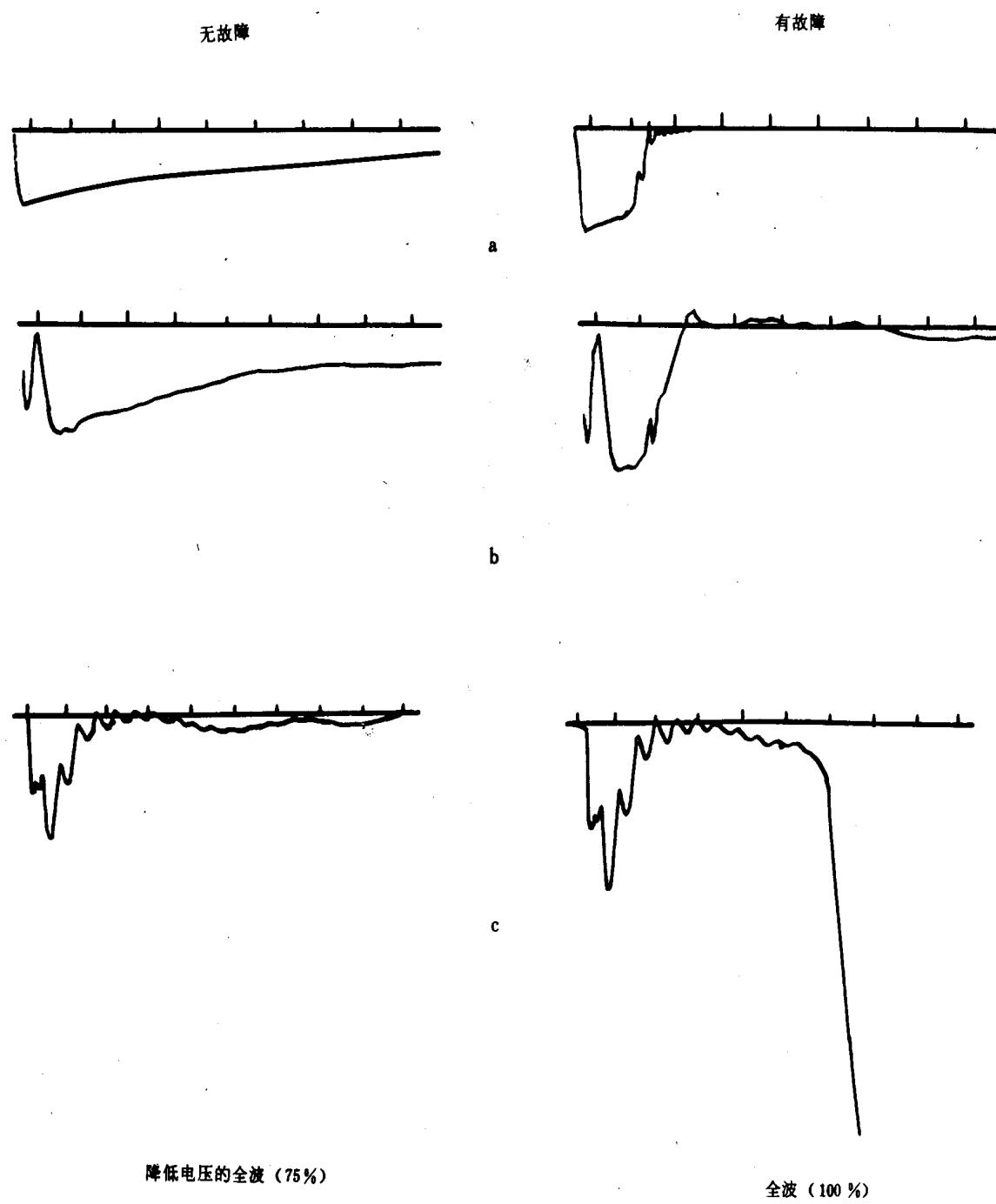


图 B1 雷电冲击——全波故障，系400kV发电机  
变压器被试高压绕组线端对中性点端的击穿

- a 施加的冲击电压波，扫描时间 $100\mu s$ ；
- b 传递到低压绕组上的电压，扫描时间 $100\mu s$ ；
- c 中性点电流，扫描时间 $25\mu s$ 。

在施加的电压波，传递电压波及中性点电流波等波形图中均明显地表示出在 $13\mu s$ 前后出现了故障。

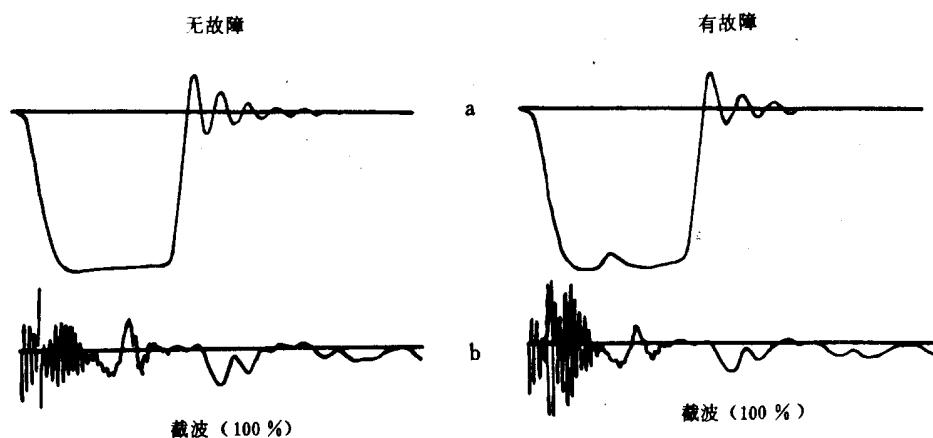
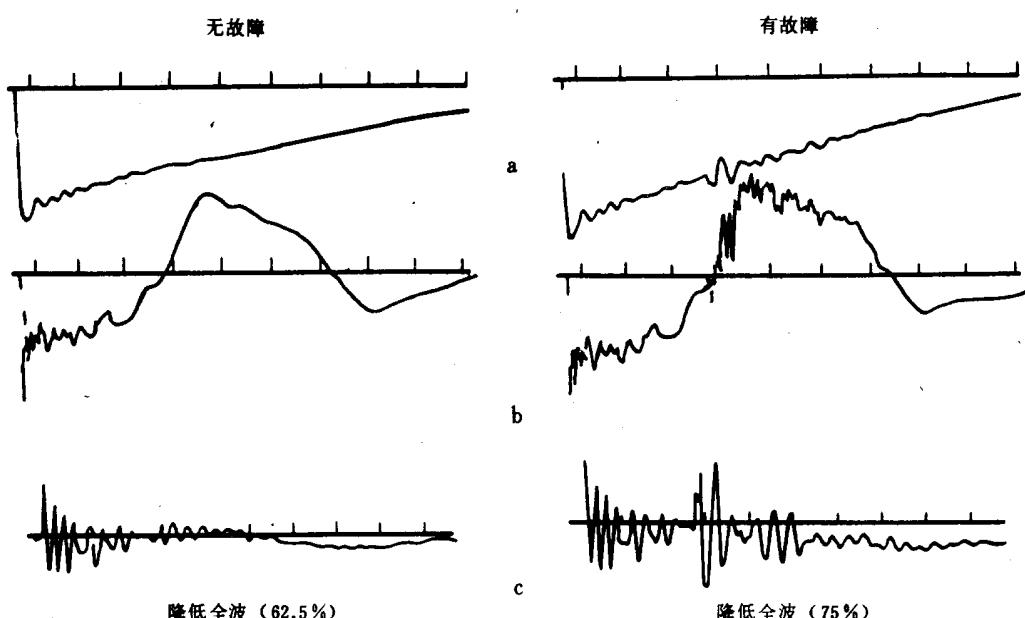


图 B2 雷电冲击——全波故障, 115kV 变压器被试高压  
绕组人口处并间的击穿

a 施加的冲击电压波, 扫描时间  $10\mu s$ ;

b 中性点电流, 扫描时间  $100\mu s$ 。

在施加的电压波及中性点电流波上均能很清楚地显示出故障是在  $2\mu s$  前后出现的, 由于故障是在截断前出现的, 故认为是全波故障。



幅值未调整相等  
图 B3 雷电冲击——全波故障, 400/220kV 变压器粗  
调分接绕组中的层间击穿

a 施加的冲击电压波, 扫描时间  $100\mu s$ ;

b 电容传递电流, 扫描时间  $100\mu s$ ;

c 中性点电流, 扫描时间  $100\mu s$ 。

在施加的电压波、电容传递电流及中性点电流波上均明显地表示出故障是在  $30\mu s$  后出现的。

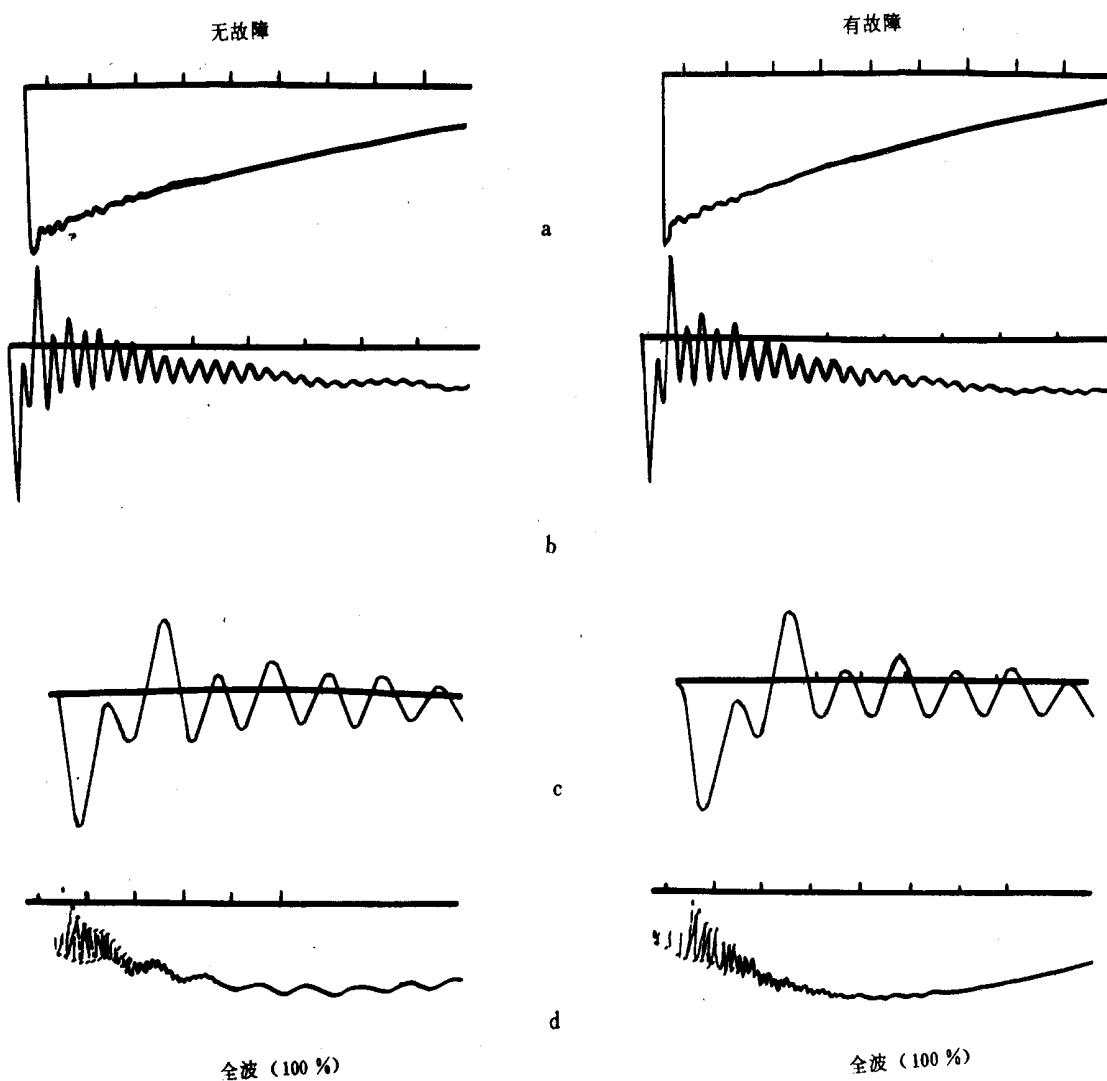


图 B4 雷电冲击——全波故障，400kV升压变压器绕组外部两根相差1.1%线段的引线之间的击穿

- a 施加的冲击电压波，扫描时间 $100\mu s$ ；
- b 中性点电流，扫描时间 $100\mu s$ ；
- c 中性点电流，扫描时间 $25\mu s$ ；
- d 中性点电流，扫描时间 $250\mu s$ 。

在第二次施加100%全波电压时，所有波形图均显示出少量的变化，指示出有故障。

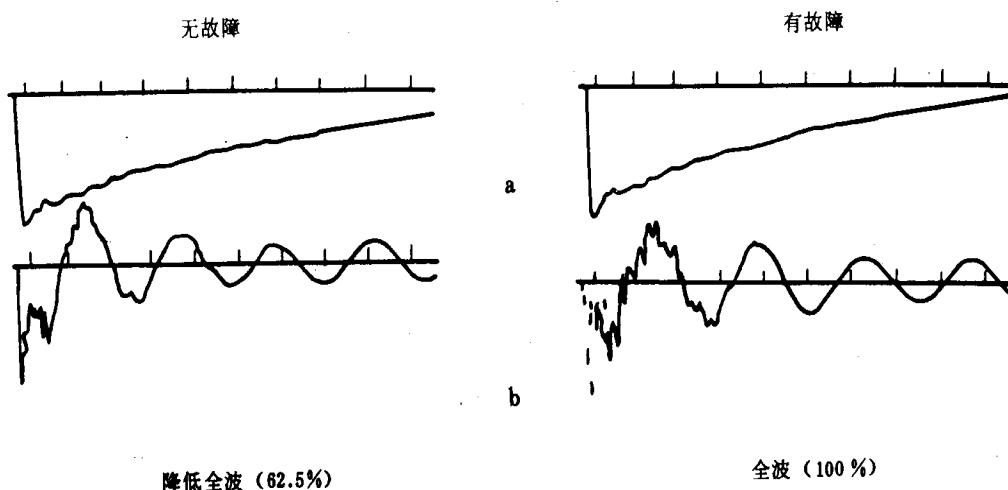


图 B5 雷电冲击——全波故障, 220kV 变压器细调分接  
绕组中的一段击穿

a 施加的冲击电压波形, 扫描时间  $100\mu s$ ;

b 电容传递电流, 扫描时间  $100\mu s$ 。

从电压波及电容传递电流波上均表示出有故障。

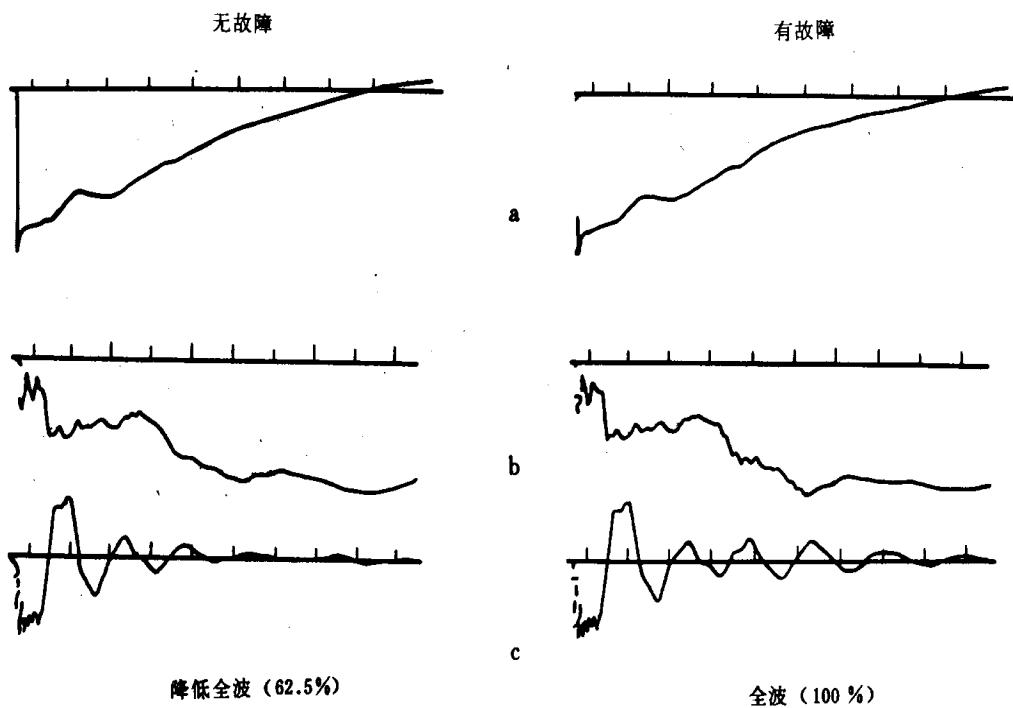


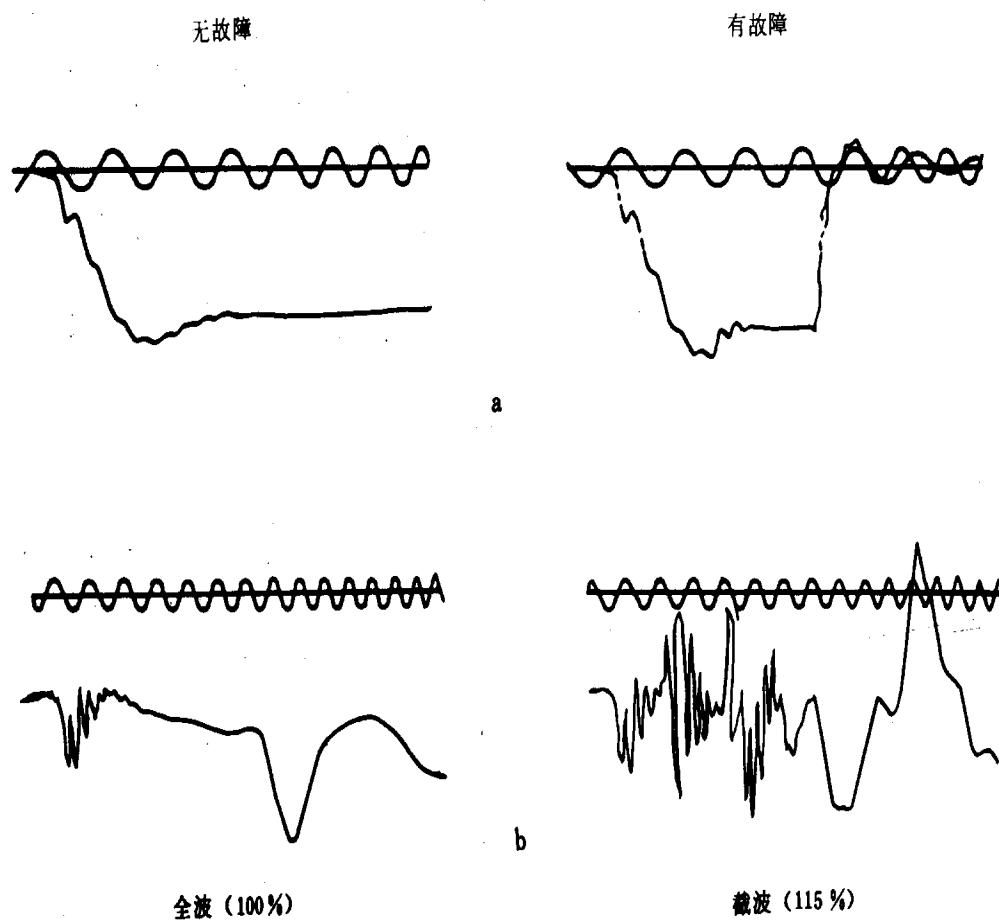
图 B6 雷电冲击——全波故障, 220/110kV 变压器高压  
绕组中的并联导线之间的击穿

a 施加的冲击电压波, 扫描时间  $100\mu s$ ;

b 中性点电流, 扫描时间  $100\mu s$ ;

c 电容传递电流, 扫描时间  $100\mu s$ 。

由中性点电流及电容传递电流波形图均明显地表示出在  $30 \sim 35\mu s$  期间发生故障, 但外施电压波却显示不出故障。



幅值未调整相等  
图 B7 雷电冲击——全波故障，被试绕组66kV套管内  
部电容屏间击穿

a 施加的冲击电压波，扫描时间 $10\mu s$ ；

b 中性点电流，扫描时间 $15\mu s$ 。

从电压波下降10%和中性点电流波均表示出故障是在峰值出现之后及截断瞬间之前出现的。

注：由于故障是在截断前出现的，故仍认为是全波故障。

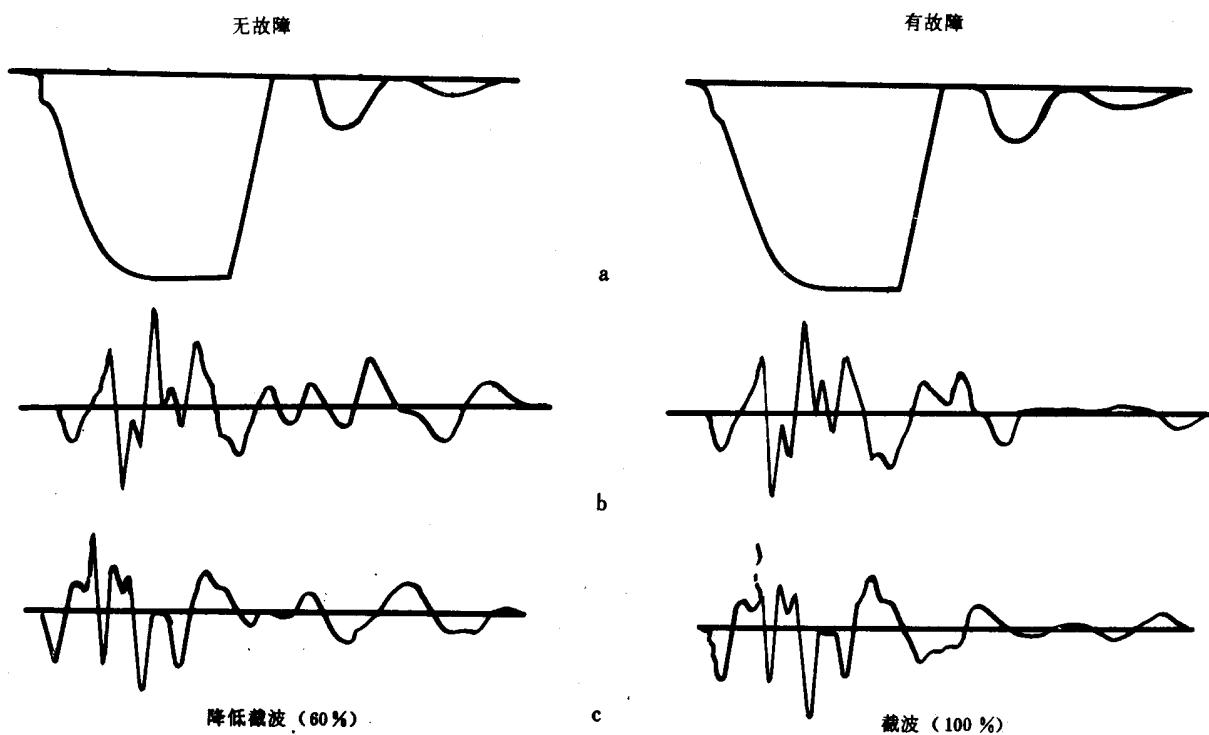


图 B8 雷电冲击——截波故障, 115kV 变压器高压绕组匝间击穿

- a 施加的冲击电压波, 扫描时间  $10\mu s$ ;
- b 电容传递电流, 扫描时间  $50\mu s$ ;
- c 中性点电流, 扫描时间  $50\mu s$ 。

从电容传递电流及中性点电流波形图中均明显地指出故障是在  $10 \sim 15\mu s$  后出现的。

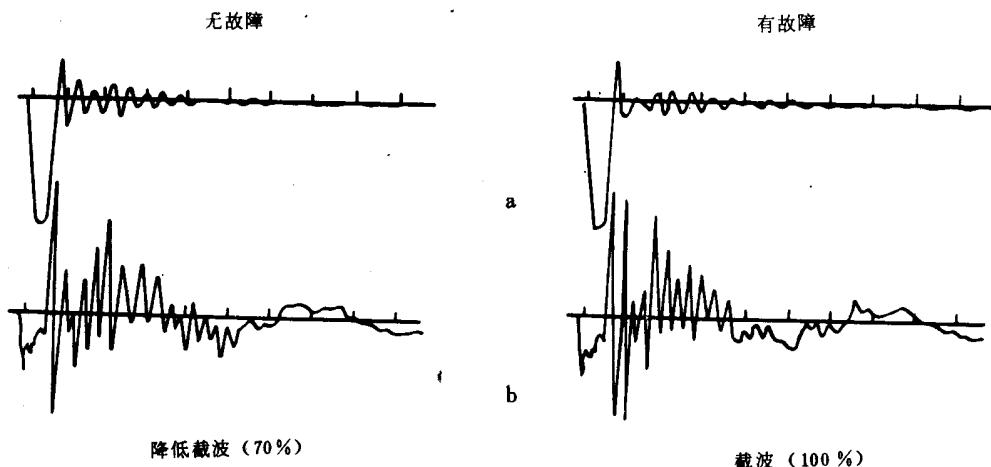


图 B9 雷电冲击——截波故障, 220kV 变压器细调分接绕组匝间击穿

- a 施加的冲击电压截波, 扫描时间  $50\mu s$ ;
- b 电容传递电流, 扫描时间  $50\mu s$ 。

在电压及电容传递电流波形图中, 均指出紧挨截断后出现了故障。

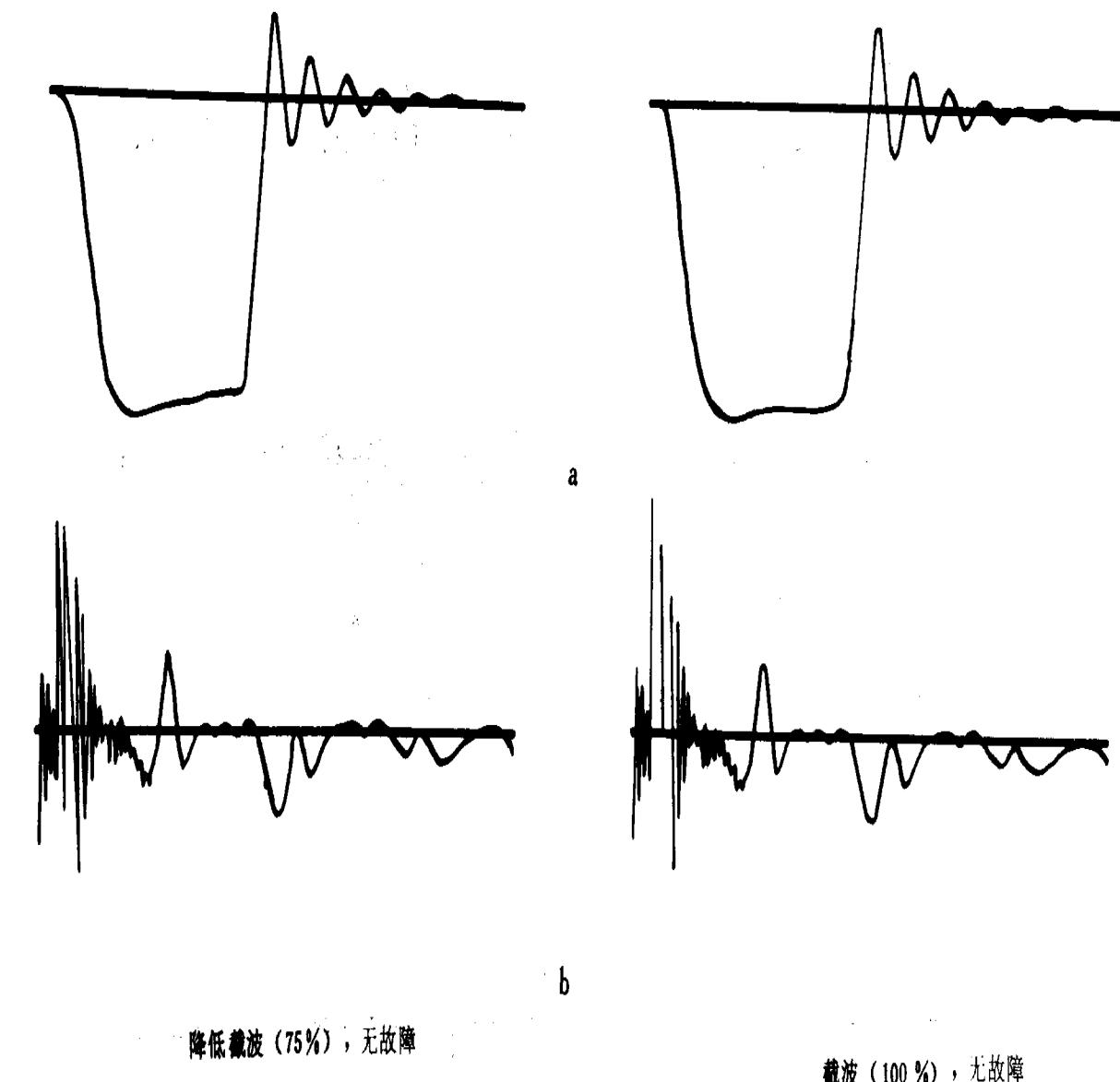


图 B10 雷电冲击截波，115kV 变压器在不同电压值但  
截断时间相同时的冲击试验波形

a 施加的冲击电压截波扫描时间  $10\mu s$ ；

b 中性点电流，扫描时间  $100\mu s$ 。

当截断时间相同时，电压及电流波形图亦全同。

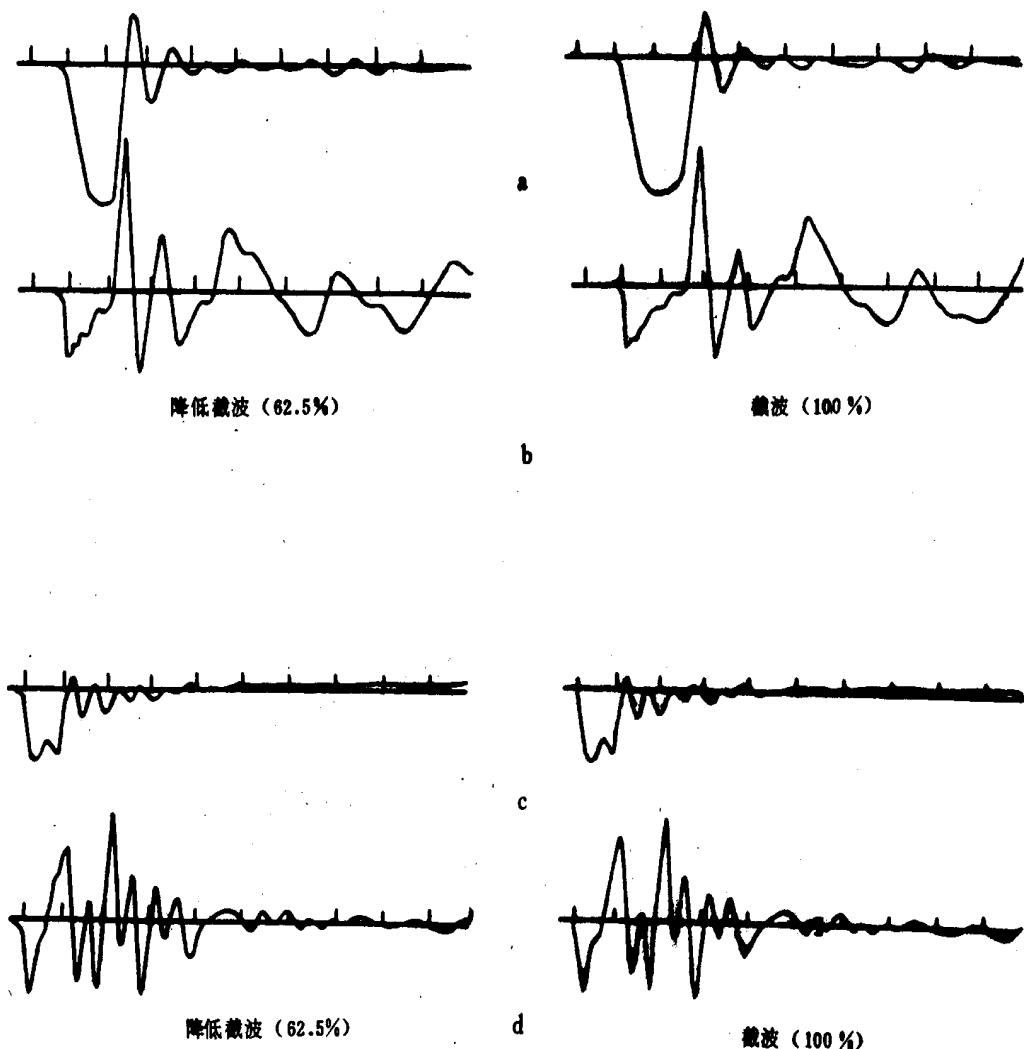


图 B11 雷电冲击截波，在220kV变压器冲击试验截断  
时间不同时的影响

a 施加的冲击电压波，扫描时间 $25\mu s$ ；

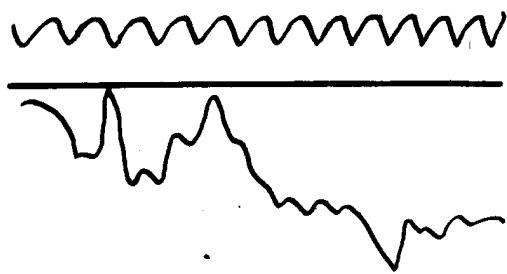
b 电容传递电流，扫描时间 $25\mu s$ ；

c 施加的冲击电压波，扫描时间 $50\mu s$ ；

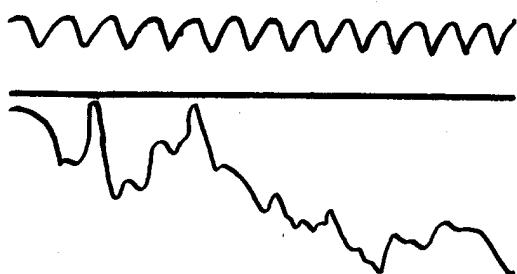
d 电容传递电流，扫描时间 $50\mu s$ 。

上二图：截断时间差别较大时（高压绕组），在电容传递电流上迭加的高频振荡波和在电压截断后的电压波形中均发生变化。

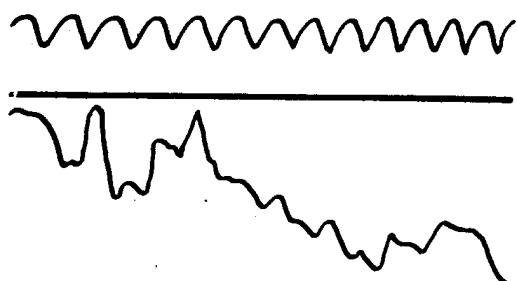
下二图：截断时间差别较小（低压绕组），虽然电压波形看不出差异，但电容传递电流波上迭加的高频振荡有变化。



降低全波 (50%)



降低全波 (75%)



全波 (100%)

图 B12 雷电冲击全波，在非自耦式变压器中的中性点  
有载分接开关上装有非线性电阻元件时的影响

中性点电流，扫描时间 $75\mu s$ 。

注： 上面示出的波形变化比通常有非线性电阻时还要明显些。

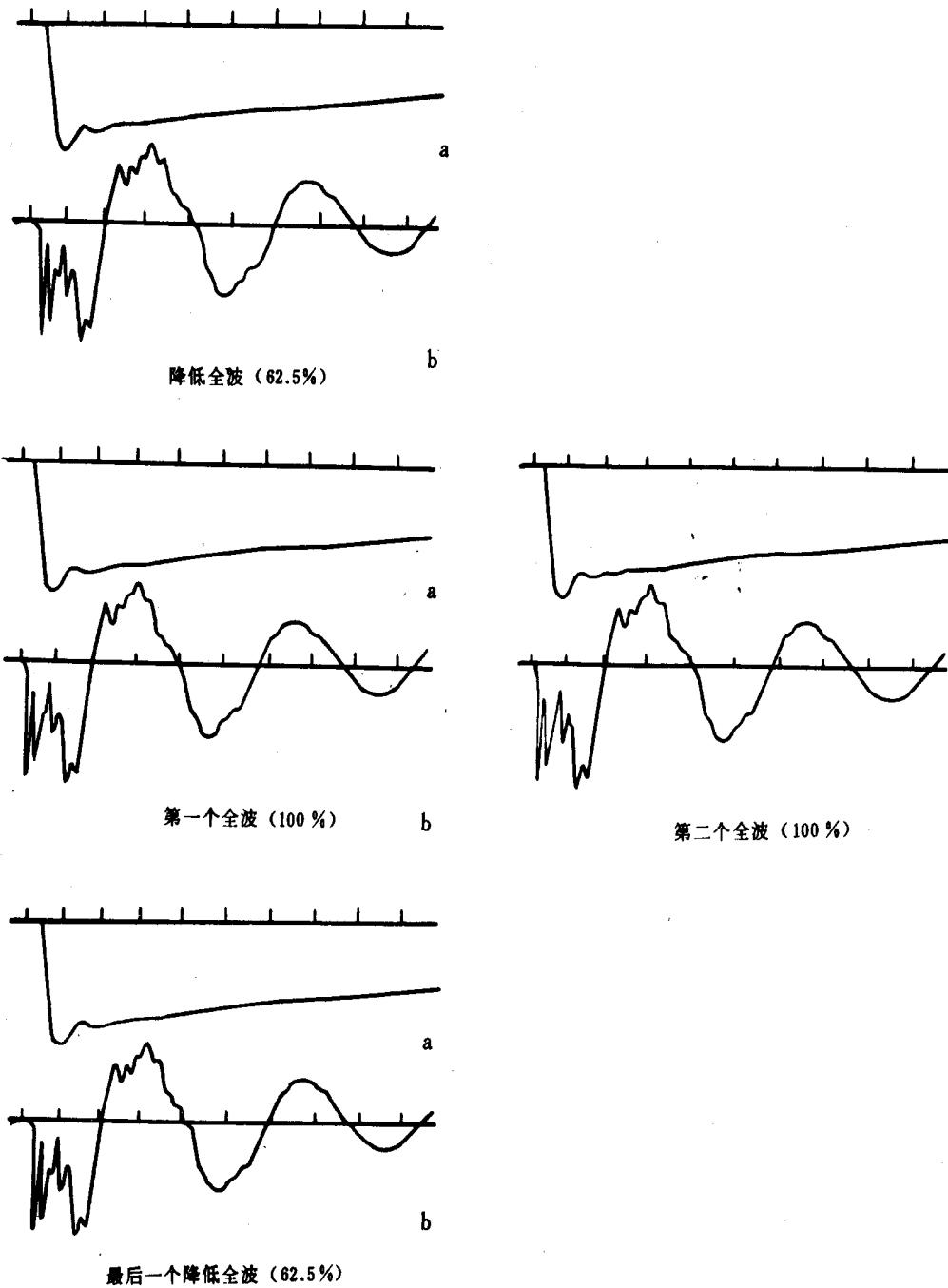


图 B13 雷电冲击全波，在400kV变压器试验时，不同电压值下的冲击发生器不同步时的影响

a 施加的冲击全波，扫描时间 $50\mu s$ ；

b 电容传递电流，扫描时间 $50\mu s$ 。

通过对100%电压值下的电容传递电流和62.5%电压值下的电容传递电流波形之间的对比，表明起始高频部分处有变化。

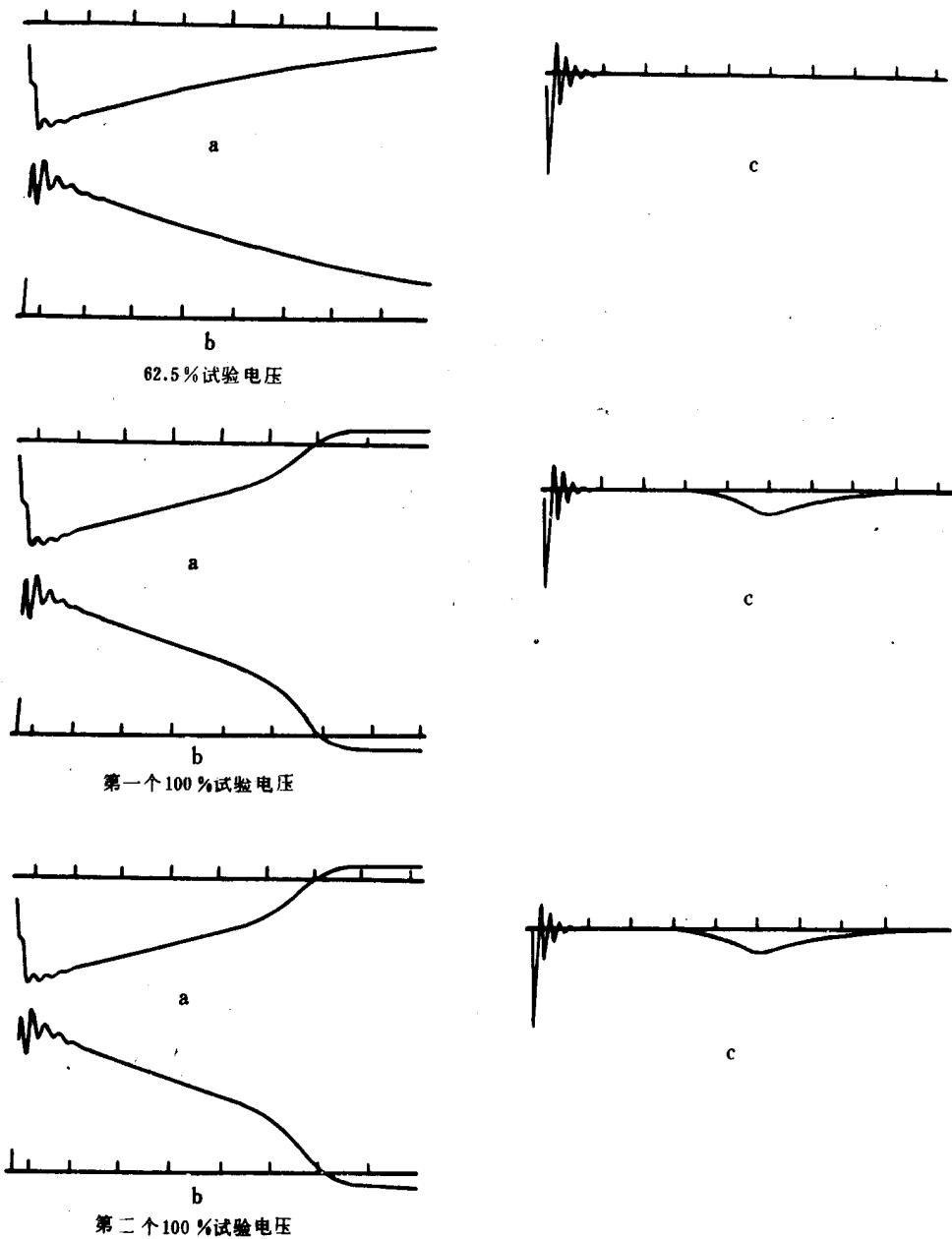


图 B14 操作冲击波, 400kV三相发电机变压器试验合格

- a 施加的操作冲击电压波, 扫描时间5000μs;
- b 在非试相绕组诸端子连在一起与地之间的感应操作冲击电压波(为外施电压的52%正极性), 扫描时间5000μs;
- c 中性点电流, 扫描时间5000μs。

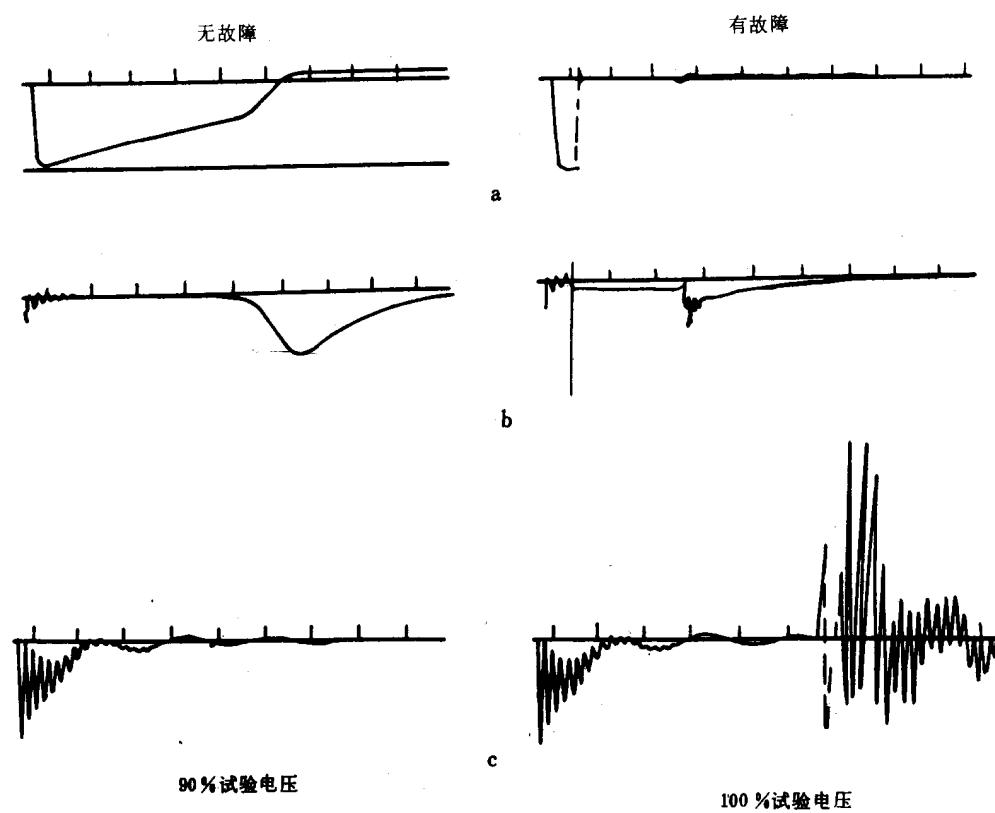


图 B15 操作冲击波，单相525kV发电机变压器高压绕组纵向闪络击穿

a 施加的操作冲击电压波，扫描时间 $500\mu\text{s}$ ；

b 中性点电流，扫描时间 $5000\mu\text{s}$ ；

c 中性点电流，扫描时间 $500\mu\text{s}$ ；

在100%试验电压值下，约在 $300\mu\text{s}$ 发生故障。

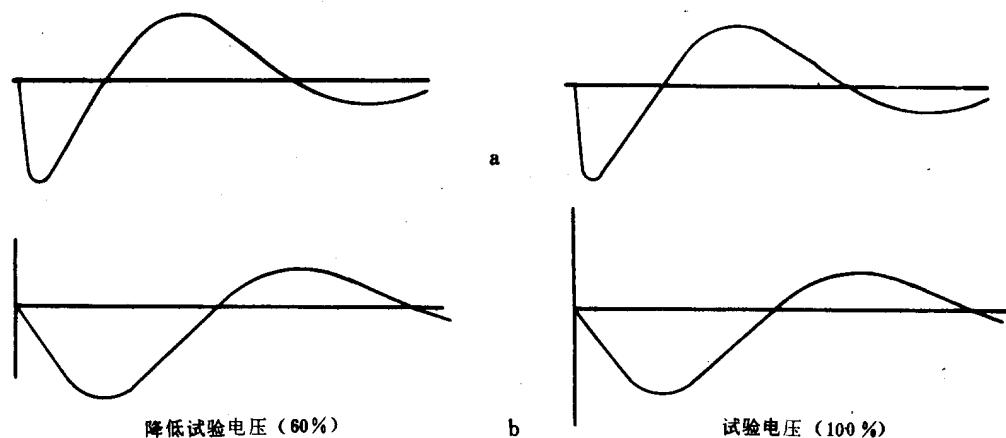


图 B16 操作冲击波，单相525kV 33兆乏并联电抗器试验合格

a 施加的操作冲击电压波，扫描时间 $5000\mu\text{s}$  ( $T_1 200\mu\text{s}$ ,  $T_d 225\mu\text{s}$ ,  $T_2 1000\mu\text{s}$ )；

b 中性点电流，扫描时间 $5000\mu\text{s}$ 。

GB 1140-87

---

**附加说明:**

本标准由全国变压器标准化技术委员会提出。

本标准由沈阳变压器研究所归口。

本标准主要起草人于思广、贺以恭、张宜佩、王建平。