ICS 19.020
K 40

中华人民共和国国家标准

GB/T 16927.1—2011
代替 GB/T 16927.1—1997

高电压试验技术
第1部分:一般定义及试验要求

(IEC 60060-1:2010,MOD)

杭州高电
设备为主,是集检测仪器制造与电力试验工程服

2011-12-30 发布　　2012-05-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会　发布

目　　次

前言 …… Ⅲ
1　范围 …… 1
2　规范性引用文件 …… 1
3　术语和定义 …… 1
4　一般要求 …… 4
4.1　对试验程序的一般要求 …… 4
4.2　干试验时试品的布置 …… 5
4.3　干燥状态试验(干试验)时的大气条件修正 …… 5
4.4　湿试验 …… 11
4.5　人工污秽试验 …… 12
5　直流电压试验 …… 12
5.1　直流试验电压的有关术语和定义 …… 12
5.2　试验电压 …… 12
5.3　试验程序 …… 13
6　交流电压试验 …… 14
6.1　交流电压试验的术语和定义 …… 14
6.2　试验电压 …… 14
6.3　试验程序 …… 16
7　雷电冲击电压试验 …… 17
7.1　雷电冲击电压试验的术语和定义 …… 17
7.2　试验电压 …… 27
7.3　试验程序 …… 29
8　操作冲击电压试验 …… 30
8.1　操作冲击电压试验的有关术语和定义 …… 30
8.2　试验电压 …… 31
8.3　试验程序 …… 33
9　联合和合成电压试验 …… 33
9.1　联合和合成电压试验的有关术语和定义 …… 33
9.2　联合试验电压 …… 34
9.3　合成试验电压 …… 36
9.4　试验程序 …… 37
附录A（资料性附录）　试验结果的统计评价 …… 38
A.1　试验分类 …… 38
A.2　破坏性放电的统计特性 …… 38
A.3　试验结果的分析 …… 39

A.4 最大似然法的应用 …… 42
附录 B（规范性附录） 叠加过冲或振荡的标准雷电冲击参数计算程序 …… 44
B.1 程序依据 …… 44
B.2 雷电冲击全波参数的计算程序 …… 44
B.3 根据波形的手工计算程序 …… 49
附录 C（资料性附录） 求取试验电压参数的数字法程序实例
C.1 计算双指数函数拟合的导则 …… 52
D.1 GB/T 16927.1—1997 版标准情况 …… 54
D.2 解决办法的研究和软件开发情况 …… 55
D.3 过冲限值 …… 56
D.4 超出限值的冲击 …… 56
附录 E（资料性附录） 确定大气修正因数时逆程序中的重复计算方法 …… 57
E.1 概述 …… 57
E.2 大气压力随海拔高度的变化 …… 57
E.3 K_t 对 U_{50} 的敏感度 …… 58
E.4 用重复计算程序进行计算 …… 58
E.5 小结 …… 60
参考文献 …… 61

前　言

GB/T 16927《高电压试验技术》分为3个部分：

——第1部分：一般定义及试验要求；

——第2部分：测量系统；

——第3部分：现场试验的定义及要求。

本部分是GB/T 16927的第1部分。

本部分按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本部分是对GB/T 16927.1—1997《高电压试验技术　第1部分：一般试验要求》的修订。

本部分与GB/T 16927.1—1997相比，除编辑性修改外主要技术变化如下：

——增加了一般定义和术语；

——删除了人工污秽试验的详细描述和原有附录B“人工污秽试验程序”；

——删除了所有用认可的测量装置校准未认可的测量装置条款；

——删除了冲击电流试验的相关内容；

——删除了原有附录C“用棒-棒间隙校核未认可的测量装置”；

——增加了规范性附录B“叠加过冲或振荡的标准雷电冲击参数计算程序”；

——增加了资料性附录C“求取试验电压函数的数字滤波器举例”；

——增加了资料性附录E“确定大气修正因数时逆程序中的重复计算方法”；

——对大气修正进行了修订(见4.3)；

——重新定义雷电冲击波形过冲限值的规定和计算方法(见第7章)；

——联合电压试验给出了具体规定(见第9章)。

本部分与IEC 60060-1:2010的主要差异如下：

——删除了国际标准的前言，增加了本标准的前言；

——湿试验明确给出800 kV及1 100 kV设备外绝缘湿试验程序提出仪器设备的推荐值(见4.4)；

——IEC 60060-1频率范围为45 Hz～65 Hz，考虑到60 Hz对我国电网不适用，故将频率范围定为45 Hz～55 Hz，以便与GB 311.1相一致(见6.2.1.1)；

——雷电冲击波前振荡保留对波前振荡最大允许值的要求，IEC标准对此不做要求(见7.2.2)；

——增加了计算示例：1 100 kV断路器的实际试验时获得的示波图作为示例进行计算(见附录B)。

本部分与IEC 60060-1:2010的上述主要差异涉及的条款已通过在其外侧页边空白位置的垂直单

本部分由中国电器工业协会提出。

本部分由全国高电压试验技术和绝缘配合标准化技术委员会(SAC/TC 163)归口。

本部分参加起草单位：昆明电器科学研究院、河南平高电气股份有限公司、保定天威保变电气股份有限公司、山东电力研究院、湖南省电力试研院、国家绝缘子避雷器质量监督检验中心、库柏耐吉(宁波)

[redacted]

本部分主要起草人：王建生、杨迎建、崔东雪、张小勇、王启发、李彦明、倪鹏、李前[redacted]

[redacted]

本部分所代替标准的历次版本发布情况为：

——GB 311.2—1983、GB 311.3—1983、GB/T 16927.1—1997。

HZHV TECH www.hzhv.com
杭州高电 HZHV TECH http://www.hzhv.com

高电压试验技术
第1部分:一般定义及试验要求

1 范围

GB/T 16927的本部分规定了所用的术语,对试验程序和试品的一般要求,试验电压和电流的产生、试验程序、试验结果的处理方法和试验是否合格的判据。

本部分适用于最高电压U_m为1 kV以上设备的下列试验:

a) 直流电压绝缘试验;

b) 交流电压绝缘试验;

c) 冲击电压绝缘试验;

d) 以上电压的联合和合成试验。

注1:有关现场试验见GB/T 16927.3。

注2:为获得可再现且有效的结果,可以要求采用替代试验程序。由有关技术委员会选择合适的试验程序。

注3:对U_m大于800 kV的设备,若要满足某些规定的程序,则有可能无法满足容差和不确定度。

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 311.1 绝缘配合 第1部分:定义、原则和规则(IEC 60071-1:2006,MOD)

GB/T 4585 交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验(IEC 60507:1991,IDT)

GB/T 7354 局部放电测量(IEC 60270:2000,IDT)

GB/T 11022 高压开关设备和控制设备标准的共同技术要求(IEC 60694:1996,EQV)

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(IEC 61083-1:2001,MOD)

GB/T 16896.2 高电压冲击测量仪器和软件 第2部分:软件的要求(IEC 61083-2:1996,MOD)

GB/T 16927.2 高电压试验技术 第2部分:测量系统(IEC 60060-2:1994,EQV)

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(IEC 60060-3:2006,MOD)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 放电特性

3.1.1

破坏性放电 disruptive discharge

与电气作用下绝缘发生故障有关的现象。试验时绝缘完全被放电桥接,并使电极间的电压实际降到零。适用于固体、液体和气体介质以及它们的复合介质中的破坏性放电。有时也称“电气击穿”。

注：也可能出现非自持破坏性放电，此时试品被火花放电或电弧短暂桥接。这种情况下，试品上的电压会短暂地降到零或非常低的值。根据试验回路和试品的特性，可能出现绝缘强度的恢复，甚至允许试验电压达到更高的数值。除非有关技术委员会另有规定，否则这种情况应视作破坏性放电。

3.1.2

火花放电　sparkover

气体或液体媒介中发生的破坏性放电。

3.1.3

闪络　flashover

气体或液体媒介中沿介质表面发生的破坏性放电。

3.1.4

击穿　puncture

固体介质中发生的破坏性放电。

注：固体介质中发生破坏性放电会导致绝缘强度的永久丧失；而在液体或气体介质中绝缘只是暂时丧失强度。

3.1.5

试品的破坏性放电电压　disruptive discharge voltage value of a test object

本部分相关条款规定的各种试验中引起破坏性放电的试验电压值。

3.1.6

非破坏性放电　non-disruptive discharge

[redacted]

规定，否则，这种现象不能视作破坏性放电。

3.2　试验电压特性

3.2.1

试验电压的预期特性　prospective characteristics of a test voltage

如果没有破坏性放电发生，应该能获得的特性。一旦使用预期特性，必须加以注明。

3.2.2

[redacted]

3.2.3

试验电压值　value of the test voltage

见本部分的相关条款。

3.2.4

试品的耐受电压　withstand voltage of a test object

[redacted]

试品的确保破坏性放电电压　assured disruptive discharge voltage of a test object

破坏性放电试验中，表征绝缘性能的规定的预期电压值。

3.3　容差和不确定度

3.3.1

容差　tolerance

测量值与规定值之间的允许差值。

注 1：容差不同于测量不确定度。

注 2：试品试验通过(或失败)的结论是根据测量值确定的，并不考虑测量不确定度的影响。

3.3.2

测量不确定度　uncertainty of a measurement

与测量结果有关的一个参数，它表征受到测量一定程度影响的数值的分散性。

在本部分中，所有不确定度规定为在 95%置信水平下的值。

注 1：不确定度是正的，给出时不带符号。

注 2：不应与试验规定值或参数的容差相混淆。

3.4　破坏性放电电压值的统计特性

破坏性放电电压是随机变化的，通常须进行大量的试验才能获得统计意义上的电压值。本标准中

3.4.1

试品的破坏性放电概率　disruptive discharge probability of a test object

p

施加一次给定波形的具有确定的预期电压数值的电压后试品上引起破坏性放电的概率。参数 *p*

试品的耐受概率　withstand probability of a test object

q

施加一次给定波形的具有确定的预期电压数值的电压后试品上不引起破坏性放电的概率。如果破

3.4.4

试品的 *p*%破坏性放电电压　*p*% disruptive discharge voltage of a test object

U_p

在试品上产生破坏性放电概率为 *p*%的预期电压值。

注 1：数学上，*p*%破坏性放电电压是对应 *p* 分位点的击穿电压。

注 2：

试品的 50%破坏性放电电压　50% disruptive discharge of a test object

U_{50}

3.4.5

试品的破坏性放电电压的算术平均值　arithmetic mean value of the disruptive voltage of a test object

U_a

由下式估算：

$$U_a = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} U_i$$

式中：

U_i——第 *i* 次破坏性放电电压的测量值；

n——测量次数(放电次数)。

注：对于对称分布，$U_a = U_{50}$。

3.4.6

试品的破坏性放电电压的标准偏差 standard deviation of the disruptive discharge voltage of the test object

4.2 干试验时试品的布置

——离地面的高度，试品应模拟实际产品现场运行的高度；

——高压引线的布置等。

总体布置应由有关技术委员会规定。

下，可取较小距离。

注 2：在交流或正极性操作冲击电压高于 750 kV(峰值)的情况下，当带电电极对邻近物体的距离不小于其对地距

个别的情况下适用。但是考虑到电压取决于最大场强，因此建议采用实验结果或进行电场计算。

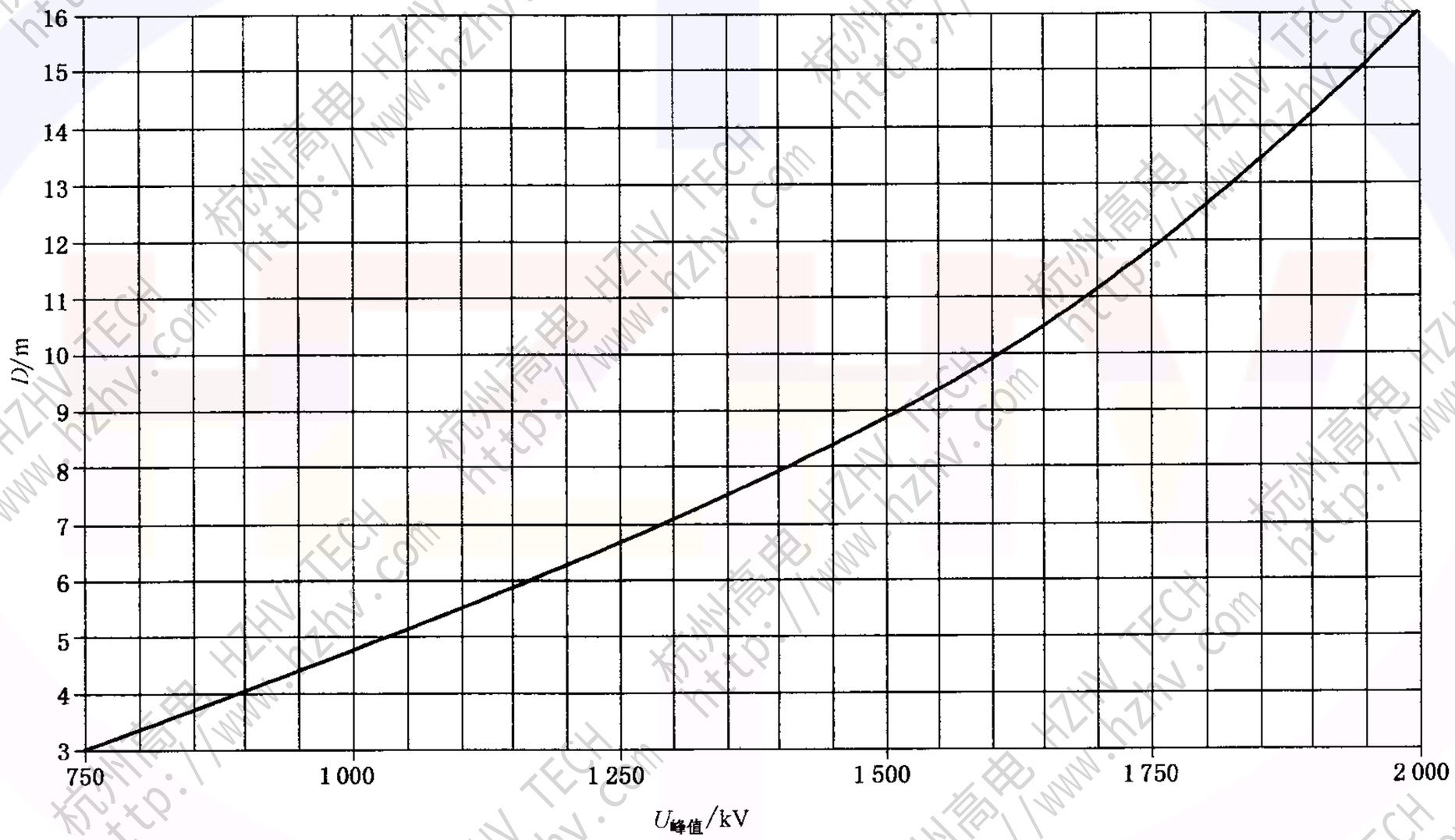


图 1 交流或正极性操作冲击试验时最高试验电压与试品高压电极对接地体或外部带电体间最小距离的关系

干试验时，试品应当干燥清洁并在试区大气条件下进行试验，除非有关技术委员会另有规定。电压施加程序在本标准的相关条款中规定。

4.3 干燥状态试验(干试验)时的大气条件修正

4.3.1 标准参考大气条件

标准参考大气条件是：

——温度 $t_0=20$ ℃；

——绝对压力 $p_0=101.3$ kPa；

——绝对湿度 $h_0=11$ g/m^3。

注 1：101.3 kPa 的压力相当于 0 ℃时水银气压计中汞柱高度为 760 mm 高度。如果气压计水银柱高度是 H mm 时，则用 kPa 表示的大气压力近似为：

$$p=0.133\ 3\ H \quad \text{kPa}$$

不考虑水银柱高度的温度修正。

注 2：不应该使用能自动修正压力的气压计。

4.3.2 大气修正因数

性放电发生在绝缘表面时。

注：大气修正不适用于闪络，只适用于火花放电。

破坏性放电电压值正比于大气修正因数 K_t。K_t是下列两个因数的乘积：

——空气密度修正因数 k_1(见 4.3.4.1)；

——湿度修正因数 k_2(见 4.3.4.2)。

$$K_t=k_1k_2$$

4.3.3 修正因数的使用

4.3.3.1 标准程序

[illegible]

$$U_0=U/K_t$$

试验报告应提供试验期间的实际大气条件和使用的修正因数。

4.3.3.2 逆程序

反之，必须将标准参考条件下规定的试验电压换算到试验条件下的电压值，此时，可能需要采用重复计算程序。试验期间施加在试品外绝缘上的电压 U 由规定的试验电压 U_0 乘以 K_t 求得(除非有关技术委员会另有规定)：

$$U=U_0K_t$$

但是，由于 K_t 的计算中引入了 U，因此会有重复计算的过程(见附录 E)。

注 1：对使用 $U_0=U/K_t$ 来正确选取 U 时，如果结果是规定的试验电压 U_0，则 U 选择正确。如果 U_0 太大，应减小 U；反之，应增大 U。

注 2：对海拔>1 000 m 的试验地点，应进行重复计算。

4.3.4 修正因数分量

4.3.4.1 空气密度修正因数

k_1

[illegible]

空气密度修正因数 k_1 表示相对空气密度 δ，一般可表达为：

$$k_1=\delta^m$$

式中：

[illegible]

当温度为 t 和 t_0 以摄氏度表示，大气压力为 p 和 p_0 单位相同时(如 kPa)，相对空气密度为：

$$\delta=\frac{p}{p_0}\cdot\frac{273+t_0}{273+t}$$

k_1 在 0.8～1.05 范围内时是可靠的。

4.3.4.2 湿度修正因数

k_2

湿度修正因数可表达为：

$$k_2=k^w$$

[redacted]

的函数来求得，函数如下(或如图 2)：

直流：$k=1+0.014(h/\delta-11)-0.000\ 22(h/\delta-11)^2$，适用于 $1<h/\delta<15$ g/m^3；

交流：$k=1+0.012(h/\delta-11)$，适用于 $1<h/\delta<15$ g/m^3；

冲击：$k=1+0.010(h/\delta-11)$，适用于 $1<h/\delta\leq20$ g/m^3。

注：对于冲击 k 值是基于正极性雷电冲击波形的试验数据。也适用于负极性雷电冲击电压和操作冲击电压。

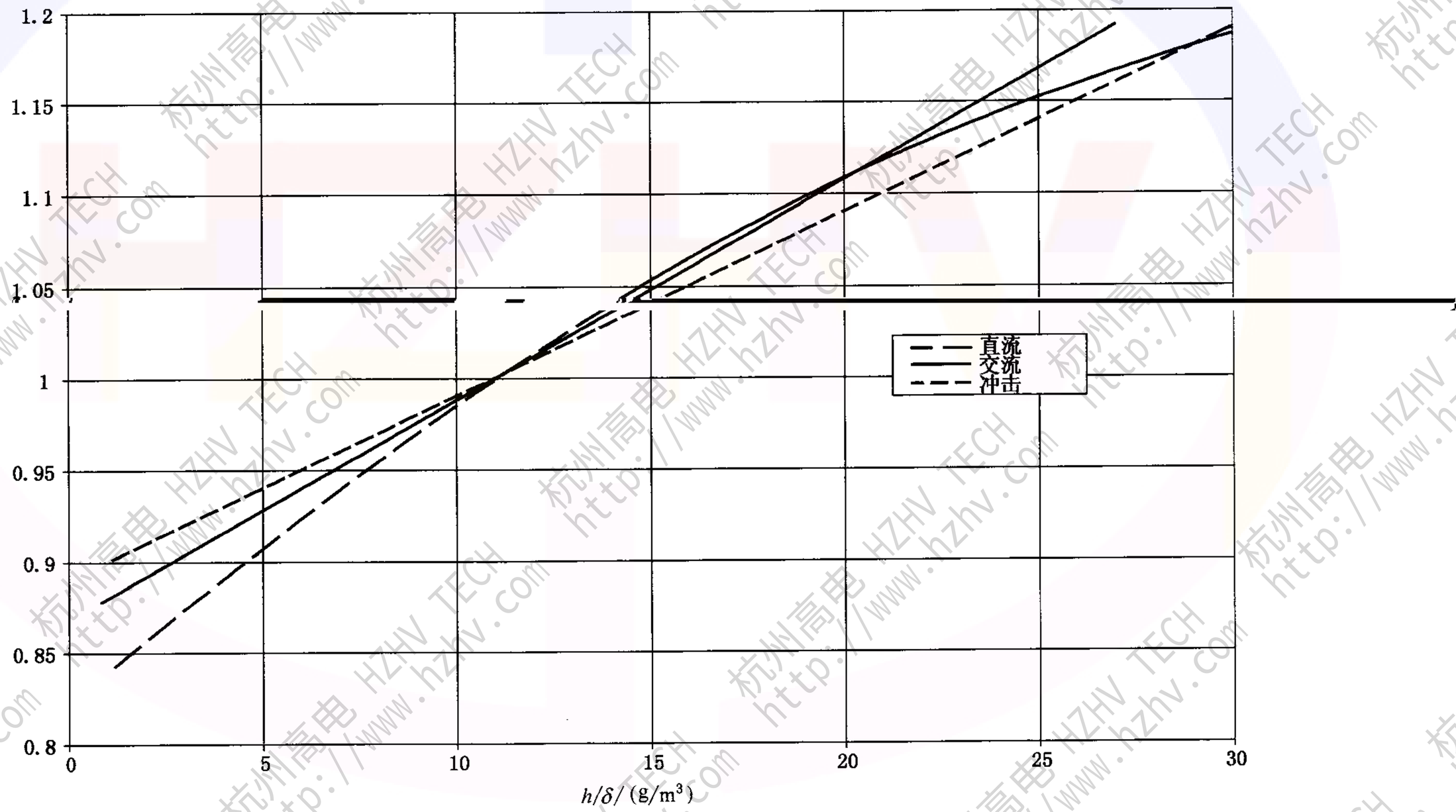


图 2 k 与 h/δ 的关系曲线(h 为绝对湿度，δ 为相对空气密度)

对于最高电压 U_m 低于 72.5 kV(或间隙距离 $l<0.5$ m)的设备，目前不规定进行湿度修正。

注：对于特殊的电器设备，其他程序由有关技术委员会规定(如 GB/T 11022 高压开关设备和控制设备)

4.3.4.3 指数 m 和 w

由于修正因数与预放电类型有关，由此引入参数 g：

$$g=\frac{U_{50}}{500L\delta k}$$

式中：

U_{50}——指实际大气条件时的 50%破坏性放电电压值(测量值或估算值)，kV；

L ——试品最小放电路径，m；

δ ——相对空气密度；

[illegible]

指数 m 和 w 可由表 1 中 g 的范围得到（或由图 3、图 4 求得）。

表 1　空气密度修正指数 m 和湿度修正指数 w 与参数 g 的关系

g	m	w
<0.2	0	0
0.2～1.0	$g(g-0.2)/0.8$	$g(g-0.2)/0.8$
1.0～1.2	1.0	1.0
1.2～2.0	1.0	$(2.2-g)(2-g)/0.8$
>2.0	1.0	0

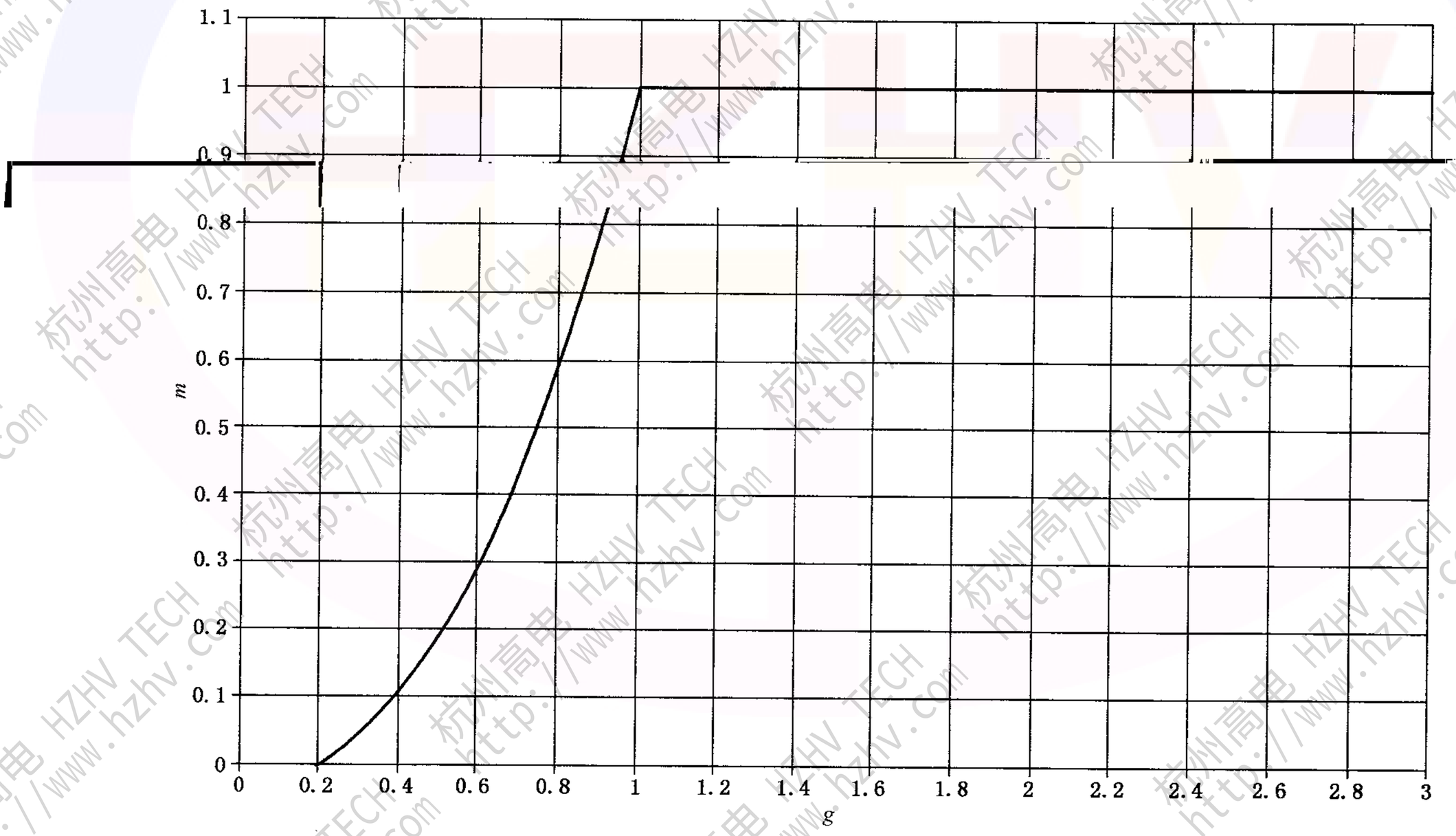


图 3　空气密度修正指数 m 值和参数 g 的关系

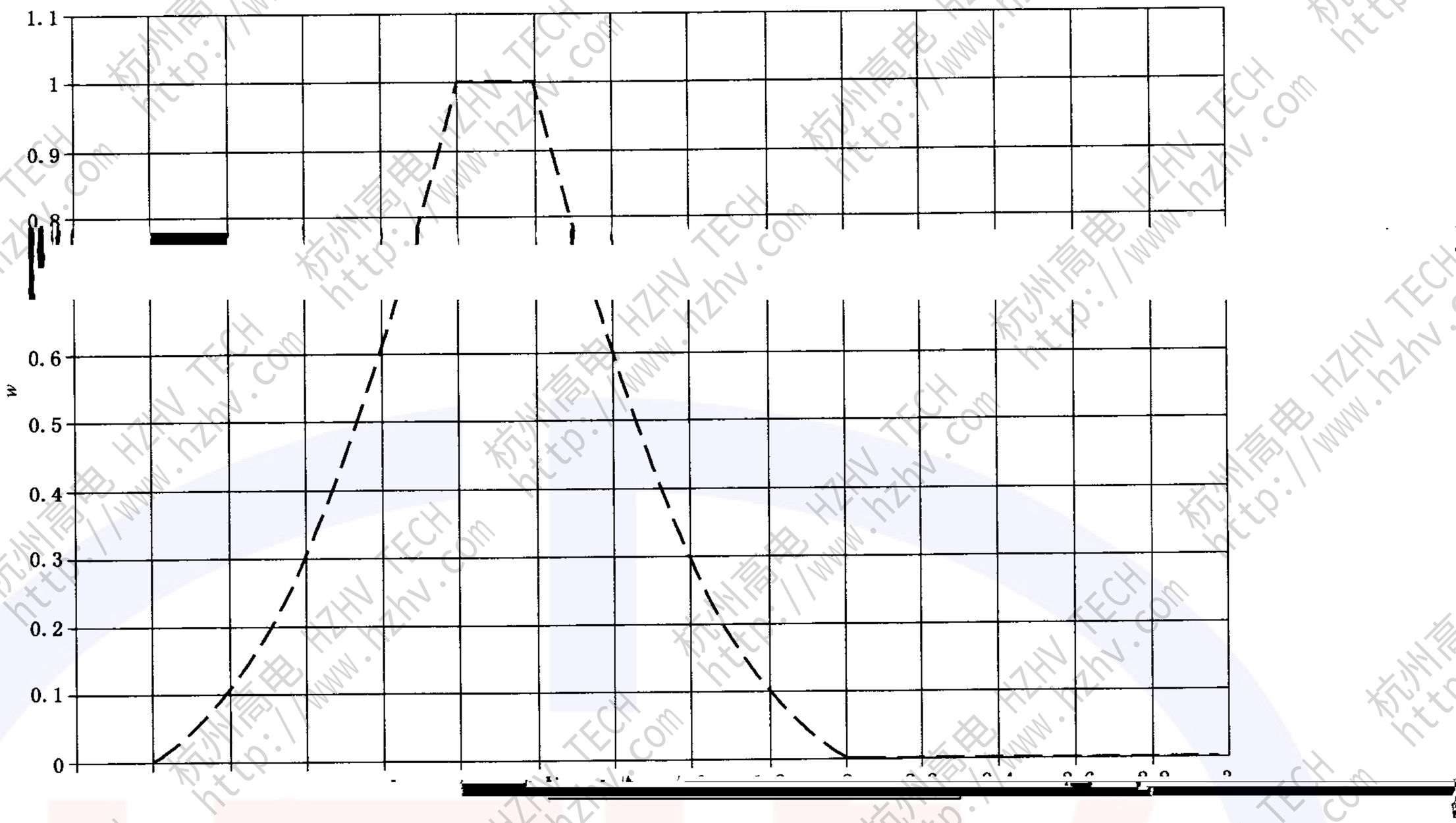


图 4　湿度修正指数 w 与参数 g 的关系

4.3.5　大气参数的测量

4.3.5.1　湿度

湿度最好用其扩展不确定度不大于 1 g/m³ 的仪表直接测量绝对湿度，只要能够满足上述绝对湿度测量准确度的要求，也可以通过测量相对湿度和环境温度确定绝对湿度。

$$h=\frac{6.11\times R\times e^{\frac{17.6\times t}{243+t}}}{0.4615\times(273+t)} \qquad \cdots\cdots(1)$$

式中：

h ——绝对湿度，g/m³；

R——相对湿度，用百分数表示；

t ——环境温度，℃。

注：这种测量也可使用通风式干湿球温度计的方法进行，绝对湿度是温度计读数的函数，可按照图 4 确定，图 4 还可以确定相对湿度。重要的是将温度计处于良好的通风环境中并仔细读取温度，以免在确定湿度时造成过大的误差。

[redacted]

与修正值 Δh 相加以得到实际湿度值。Δh 的计算公式为：

$\Delta h=(1.445\times\Delta t\times\Delta b)/(273+t)$

式中：

t ——空气干球温度，℃；

[redacted]

Δp——标准大气压与实际大气压之差，即 $\Delta p=101.3-p$，kPa；

Δh——修正湿度的修正值，g/m³

只要具有足够的准确度。亦可采用其他确定湿度的方法。

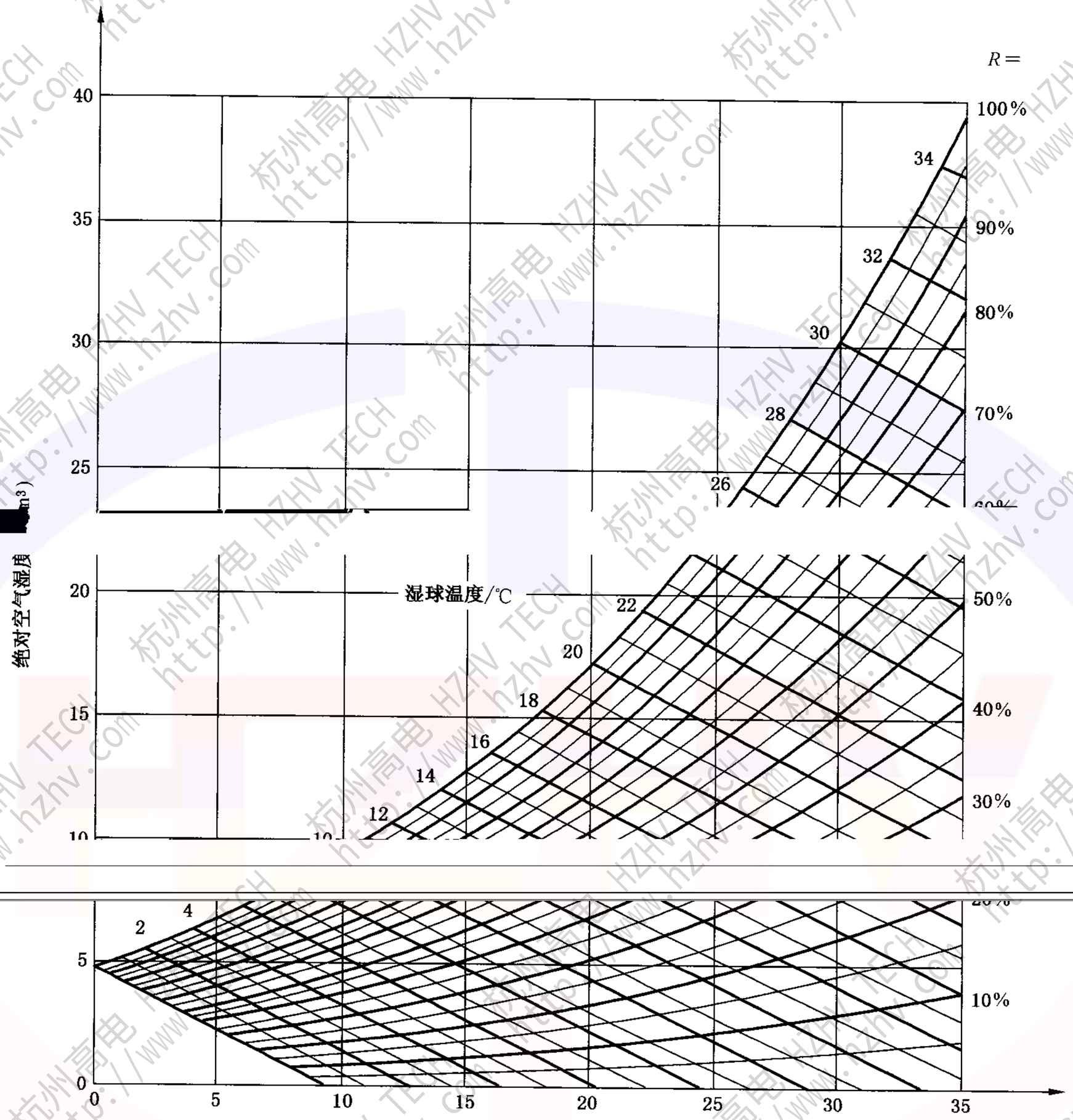


图 5 空气绝对湿度(相对湿度)与干、湿球温度计读数的关系

4.3.5.2 温度

通常测量环境温度扩展不确定度不大于 1 ℃。

4.3.5.3 绝对压力

测量周围绝对压力的扩展不确定度应不大于 0.2 kPa。

4.3.6 内绝缘和外绝缘试验有油密时的要求

必须采取措施加强外绝缘的耐受水平，以使得能够进行绝缘施加正确的试验电压。有关技术委员会应根据不同的被试设备规定相关措施，包括将外绝缘浸入绝缘的液体或压缩气体中等。

对于外绝缘试验电压高于内绝缘耐受电压的情况，只有当内绝缘具有较大设计裕度时才能正确地试验外绝缘，否则，除非有关技术委员会另有规定，内绝缘应用被定值适当试验外绝缘所使用的试验。在这种情况下，有关技术委员会应规定所使用的试验程序。

4.4 湿试验

4.4.1 标准湿试验程序

湿试验程序的目的是模拟自然雨对外绝缘的影响。建议对所有类型的设备进行所有类型的电压试验。

有关技术委员会应规定湿试验中试品的布置。

喷射角度使其垂直和水平分量大致相等。用量雨器测量雨量，量雨器应具有两个隔开的开口均为(100～750)cm^2 的容器；一个开口测水平分量，一个开口测垂直分量，垂直的开口面对淋雨方向。

试品相对于雨水垂直和水平分量的方位，应由有关技术委员会规定。

通常湿试验结果与其他高压放电或耐受试验相比，其重复性差，为减少分散性，应采用下述办法：

——对于高度小于 1 m 的试品，量雨器要在靠近试品的地方，但要避免试品上溅出雨滴。测量的宽度应等于试品宽度，最大高度为 1 m；

——对于高度在(1～3)m 之间的试品。应在试品顶部、中部和底部分别进行测量，每一测量区域仅涵盖试品高度的三分之一；

——对于高度超过 3 m 的试品，测量段的数目应增加至覆盖试品的整个高度，但不应重叠；

——对高度超过 8 m 的试品，测量段数不少于 5 段。

淋雨装置较易满足试验要求。

——对于水平尺寸大的试品采用类似做法。

行检验以改进喷射的均匀性。

淋雨装置应能调整以便在试品上产生表 2 中规定的在允许容差内的淋雨条件。

应在收集到的即将到达试品的水的样品中测量雨水的温度和电阻率。若经验证明在水从水箱到达试品的时候水温没有多大变化，可以由储水箱取样测量。

试品应按规定条件在规定的容差范围内至少不间断预淋 15 min，预淋时间不包括为调整喷水需要的时间。开始时也可以用自来水预淋 15 min，接着在试验开始前需用规定条件的水连续预淋至少 2 min。雨水条件应在试验开始前进行测量。

内；当试验持续时间超过 60 s 时，在整个试验过程中试验电压测量值则应保持在规定电压值的 ±3% 以内。

注：必须强调，容差为试验电压规定值与试验电压测量值之间允许的差值。它与测量不确定度不同(见 3.3.1)。

电源的额定输出电流应使试品电容在适当短的时间内充电。但当试品电容很大时，也允许长达几分钟的充电时间。当进行湿试验或污秽试验时，电源(包括储能电容)还应能提供试品的瞬时放电电流且其电压降应小于 10%。

5.2.2 试验电压的产生

试验电压一般用变压器整流回路产生。对试验电源的要求很大程度上取决于试品的类型和试验条

5.2.3 试验电压的测量

在测量纹波、瞬态电压或电压稳定性时，测量装置的响应特性应符合要求。

5.2.4 试验电流的测量

在测量流过试品的电流时，可以区分出几个独立的分量。对同一个试品和同一试验电压，各分量的大小可能差几个数量级。这些分量是：

局部可逆。当试品放电或短路时，可观察到反极性电流。

c) 持续泄漏电流：当 a)和 b)分量衰减到零后，在恒定电压下达到稳态的直流电流。

d) 局部放电电流。

每个电流分量的相对幅值和重要性取决于试品的类型和状态、试验的目的以及试验的持续时间

当特别需要区分某一特定分量时，相应的测量程序由有关技术委员会规定。

应使用校准过的测量系统进行电流测量。

应使用 GB/T 7354 局部放电测量标准中规定的专用仪器进行局部放电脉冲电流的测量。

注：由于直流电压试验中可能出现破坏性放电，其电流远大于常规电流，因此通常应在直流电流测量回路中使用电压保护装置。

5.3 试验程序

5.3.1 耐受电压试验

对试品施加电压时应从足够低的数值开始，以防止瞬变过程引起的过电压的影响；然后应缓慢地升高电压，以便能在仪表上准确读数，但也不应太慢，以免试品在接近试验电压 U 时耐压的时间过长。如果当电压高于 75%U 时以 2%U/s 的速率上升，通常能满足上述要求。将试验电压值保持规定的时间后，通过适当的电阻使回路电容(包括试品电容)放电来降低电压。

耐受电压的持续时间应由有关技术委员会根据试品的电阻和电容决定的达到稳态电压分布的时间来确定。若有关技术委员会没有规定，则耐受电压试验持续时间为 60 s。

规定。

如果试品上没有破坏性放电发生，则满足耐受试验要求

5.3.2 破坏性放电电压试验

在试品上施加电压并连续升压(同耐受电压试验)直至试品上发生破坏性放电。应记录破坏性放电发生瞬间的最后电压值。该试验应重复 n 次,以得到一组 n 个电压测量值。

有关技术委员会规定升压速度、施加电压次数和评估试验结果的方法(见附录 A)。

5.3.3 确保破坏性放电电压试验

在试品上施加电压并连续升压(同耐受电压试验)直至试品上发生破坏性放电。应记录破坏性放电发生瞬间的最后电压值。该试验应重复 n 次,以得到一组 n 个电压测量值。

如果在该组电压中没有一个电压高于确保破坏性放电电压,则认为通过试验要求。

有关技术委员会应规定施加电压的次数和升压速度。

6 交流电压试验

6.1 交流电压试验的术语和定义

6.1.1

交流电压峰值 peak value of an alternating voltage

正负半波峰值的平均值。

注:在许多情况下仪器只测量一个极性的峰值,如果经确认电压波形对称,且在 6.2.1.1 要求的范围内,这样的单极性峰值是可以接受的。

6.1.2

试验电压值 value of the test voltage

峰值除以 $\sqrt{2}$

注:有关技术委员会可能要求测量试验电压的方均根值(有效值),而不是峰值。例如考虑热效应时,测量方均根值

6.1.3

方均根(有效)值 r. m. s. value

一个完整的周波中电压值平方的平均值的平方根。

6.1.4

电压跌落 voltage drop

几个周波的短时间内试验电压的瞬时降低。

6.2 试验电压

6.2.1 对试验电压的要求

6.2.1.1 电压波形

试验电压一般应是频率为 45 Hz~55 Hz 的交流电压,通常称为工频试验电压。有些特殊试验,有关技术委员会可规定频率低于或高于这一范围。

注 1:IEC 60060-1 频率范围为 45 Hz~65 Hz,考虑到 60 Hz 对我国电网不适用,故将频率范围定为 45 Hz~55 Hz。

注 2:GB/T 16927.2 规定的交流试验电压的频率为 10 Hz~500 Hz。

对于常用的一些试验回路允许更大的偏差。但注意，特别是试品具有非线性特性，可能会使正弦波产生严重畸变。

注：除了上述要求，可用总谐波失真度(THD)来表征波形畸变，因为这可能对局部放电模式识别测量很重要。具体可由有关技术委员会规定。

$$\mathrm{THD}=\frac{\sqrt{\sum_{2}^{m}U_n^2}}{U_1}$$

式中：

U_1——基波有效值；

U_n——是 n 次谐波有效值；

m ——为考虑的最高次谐波。

除非有关技术委员会另有规定，实际情况下认为 $m=7$ 就足够了。

6.2.1.2 容差

若试验持续时间不超过 60 s 时，在整个试验过程中试验电压的测量值应保持在规定电压值的±1%以内。当试验持续时间超过 60 s 时，在整个试验过程中试验电压测量值应保持在规定电压值的±3%以内。

试验电压源，包括附加电容，应足以提供瞬态放电电流，并在湿试验和污秽试验时压降不超过 20%。

注：必须强调，容差为试验电压规定值与试验电压测量值之间允许的差值。它与测量不确定度不同(见 3.3.1)。

6.2.2 试验电压的产生

6.2.2.1 一般要求

试验电压一般用升压试验变压器产生，也可用串联谐振或并联谐振回路产生。

试验回路的电压应足够稳定。不致受泄漏电流变化的影响。试品上非破坏性放电不应使试验电压降低过多及维持时间过长而影响局部放电试品上破坏性放电电压的测量值。

[redacted]

的几个周期时间内变化不超过 5%，并且非破坏性放电期间瞬时电压降不超过电压峰值的 20%。则认为

[redacted]

[redacted]

试品和所有外接电容的总电容量应足以确保测得的破坏性放电电压不受试品非破坏性局部放电或预放电的影响。通常，总电容量在 0.5 nF～1.0 nF 范围内就足够了。

[redacted]

高电压试验时，随着电压的上升，通常会在负载电流上叠加随时间变化的电流脉冲。试验布置、连接试品的引线、大气条件、试验电源的特性和其他因素会影响电流脉冲的幅值和持续时间。对被试设备来讲，产生一些脉冲属正常现象，因为试验电压远远高于运行电压，且这些设备试验时电极尺寸不够大，接地屏蔽不良，从而会产生电晕。由于电流脉冲持续时间短，传统的交流测量系统无法识别电压跌落，有随时间变化的泄漏电流脉冲时的交流试验系统的电压稳定性可用一频带足够宽的电压测量系统来

[redacted]

一般来说，当出现变化的泄漏电流时，为了使电压的稳定性和电压跌落小于要求值的 5%，就必须要求试验电源系统(变压器、调压器等)及其电机的短路阻抗小于 20%。

对固体绝缘、液体绝缘或两者复合的试品在 100 kV 以下的干试验时，电源额定电流大于 100 mA

对自恢复绝缘 100 kV 以下的破坏性试验(注日击穿时，短路限制开关、试验电源的

对于 100 kV 以上的绝缘试验，若出现持续流注放电，或进行湿试验，则可能要求试验系统的额定电流为 1 A 且系统短路阻抗小于 20%。当出现持续流注放电，建议使用较快响应的电压测量系统，以保证在试验持续时间内，试验电压保持在 5%的容差以内。当然，也可以采取措施来降低流注放电，如增加电极直径或使用粗导线等。

任何试验电压下出现的短时电流脉冲大多是由试验回路中的存储电容器的电荷引起的，建议对 100 kV 以上的试验，回路电容应≥1 000 pF。

对人工污秽试验，可能要求 1 A～5 A 额定电流，参见 GB/T 4585。

6.2.2.3 对串联谐振回路的要求

电容性试品电压下实现试品或实验条件和与之串联的电感以及电源组成一个工频

与感性试品串联而成。改变回路参数或电源频率，回路即可调谐至谐振，同时将在一个标准试品上产生

电压，在该标准试品上的电压就加在试品上。

谐振条件和试验电压的稳定性取决于电源频率和试验回路特性的稳定性，用品质因数来表征，是无功功率与有功功率之比。

当试品放电时，由回路电容瞬时放电，因而电源输出电流较小，从而限制了对试品绝缘的严重损坏

当试品为容性时(如电容器、电缆或气体绝缘的试品)其外绝缘泄漏电流同流过试品的电容电流相

附加电容提供较大的泄漏电流。串联谐振回路具有足够大的回路电容时对电抗器试验也很实用。

6.2.3 试验电压的测量

试验电压值，方均根(有效)值和瞬态电压降的测量应采用经 GB/T 16927.2 规定程序认可的测量系统。

6.2.4 试验电流的测量

应使用校准过的测量系统进行电流测量。

注：假定并联电容器的容性电流可以忽略，试验电流还可在升压变压器或谐振电抗器的地线上测取。

6.3.1 耐受电压试验

对试品施加电压时，应当从足够低的数值开始，以防止操作瞬变过程引起的过电压的影响；然后应缓慢地升高电压，以便能在仪表上准确读数。但也不能升得太慢，以免造成在接近试验电压 U 时耐压时间过长。若试验电压值从达到 75%U 时以 2%U/s 的速率上升，一般可满足上述要求。试验电压应保持规定时间，然后迅速降压，但不得突然切断，以免可能出现瞬变过程而导致故障或生成不正确的试验结果。

试验电压施加时间由有关技术委员会规定，并且在频率为 45 Hz～55 Hz 范围内与频率无关。如果有关技术委员会未规定试验电压的施加时间，则耐受试验的持续时间为 60 s。

如果试品上无破坏性放电发生，则满足耐受试验要求。

6.3.2 破坏性放电电压试验

在试品上施加电压并连续上升(同耐受电压试验)直到试品上发生破坏性放电,并记录破坏性放电发生瞬间的试验电压值。该试验需重复 n 次,以得到一组 n 个测量电压。

有关技术委员会应规定升压速度、施加电压次数和试验结果的评价方法(见附录 A)。

6.3.3 确保破坏性放电电压试验

在试品上施加电压并连续上升(同耐受电压试验)直到试品上发生破坏性放电,并记录破坏性放电发生瞬间前的最后试验电压值。该试验程序需重复 n 次,以得到一组 n 个测量电压。

如果在规定的加压次数中每次记录的放电电压值均不高于规定的确保放电电压,则认为满足试验要求。

加压次数和升压速度由有关技术委员会规定。

7 雷电冲击电压试验

7.1 雷电冲击电压试验的术语和定义

7.1.1

冲击电压 impulse voltage

迅速上升到峰值然后缓慢地下降到零的非周期瞬态电压。

[illegible]

7.1.2

雷电冲击电压 lightning impulse voltage

波前时间小于 20 μs 的冲击电压。

7.1.3

雷电冲击全波电压 full lightning impulse voltage

不为破坏性放电而截断的雷电冲击电压(如图 6)。

注:波形可通过双指数波近似模拟,$u(t)=A(e^{-t/\tau_1}-e^{-t/\tau_2})$。

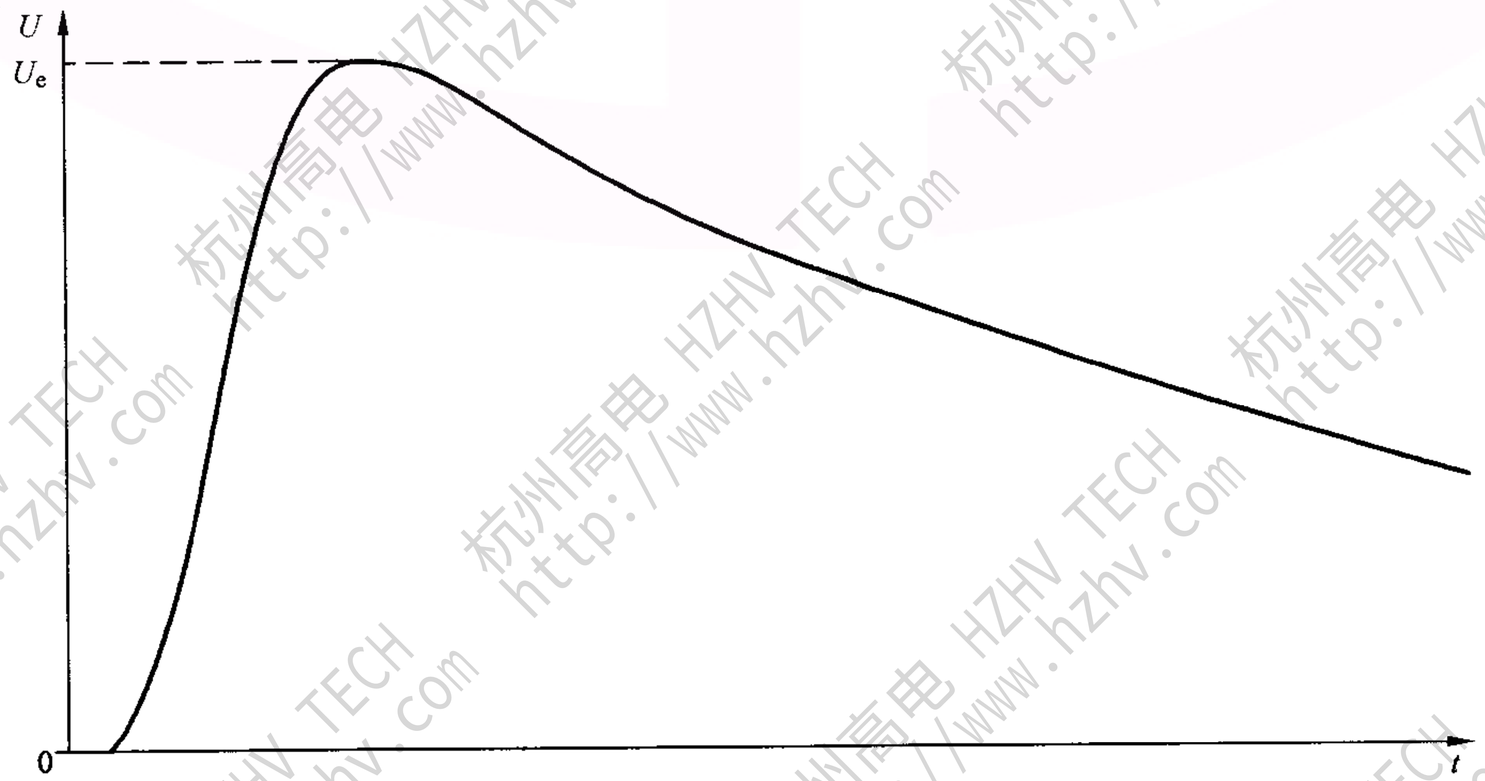


图 6 雷电冲击全波

7.1.4

过冲　overshoot

冲击电压的峰值处因回路引起的阻尼振荡而导致的幅值的增加。

注：这种振荡(频率范围通常为 0.1 MHz～2 MHz)是由回路电感引起的，而且有时无法避免，特别是大尺寸回路或感性试品。过冲的计算方法见附录 B。

7.1.5

记录曲线　recorded curve

冲击电压试验数据的图形或数字化的表示(见图 7)。

7.1.6

基准水平　base level

当记录仪器零信号输入时，冲击测量系统记录到的水平。

7.1.7

基准曲线　base curve

没有叠加振荡的雷电冲击全波电压的估计曲线(如图 7 和图 8)。基准曲线的计算方法见附录 B。

7.1.8

剩余曲线　residual curve

记录曲线和基准曲线间的差(如图 7)。

7.1.9

极限值　extreme value

U_e

从与施加冲击一致的基准水平上测得的记录曲线的最大值。

7.1.10

基准曲线最大值　base curve maximum

U_b

基准曲线的最大值。

7.1.11

滤波后的剩余曲线　filtered residual curve

$R_c(t)$

对试验电压函数(图 10)进行滤波后的剩余曲线，见图 8。

7.1.12

试验电压曲线　test voltage curve

基准曲线和滤波后的剩余曲线(由滤波器进行滤波，该滤波器的频率响应由试验电压函数确定)之和，见图 8。

注：该曲线仅为过程中的数学表达式曲线，并不具有物理意义或不是等效的冲击。

7.1.13

试验电压值　valut of the test voltage

U_t

从与施加冲击一致的基准水平上测得的试验电压曲线的最大值(见图 8)。

7.1.14

过冲幅值　overshoot magnitude

β

记录曲线极值和基准曲线最大值之差(见图 7)。

HZHV TECH www.hzhv.com
杭州高电 HZHV http://www.hzhv.com

7.1.15

相对过冲幅值　relative overshoot magnitude

β′

过冲幅值和极限值 U_e 的比率，通常用百分数表示。

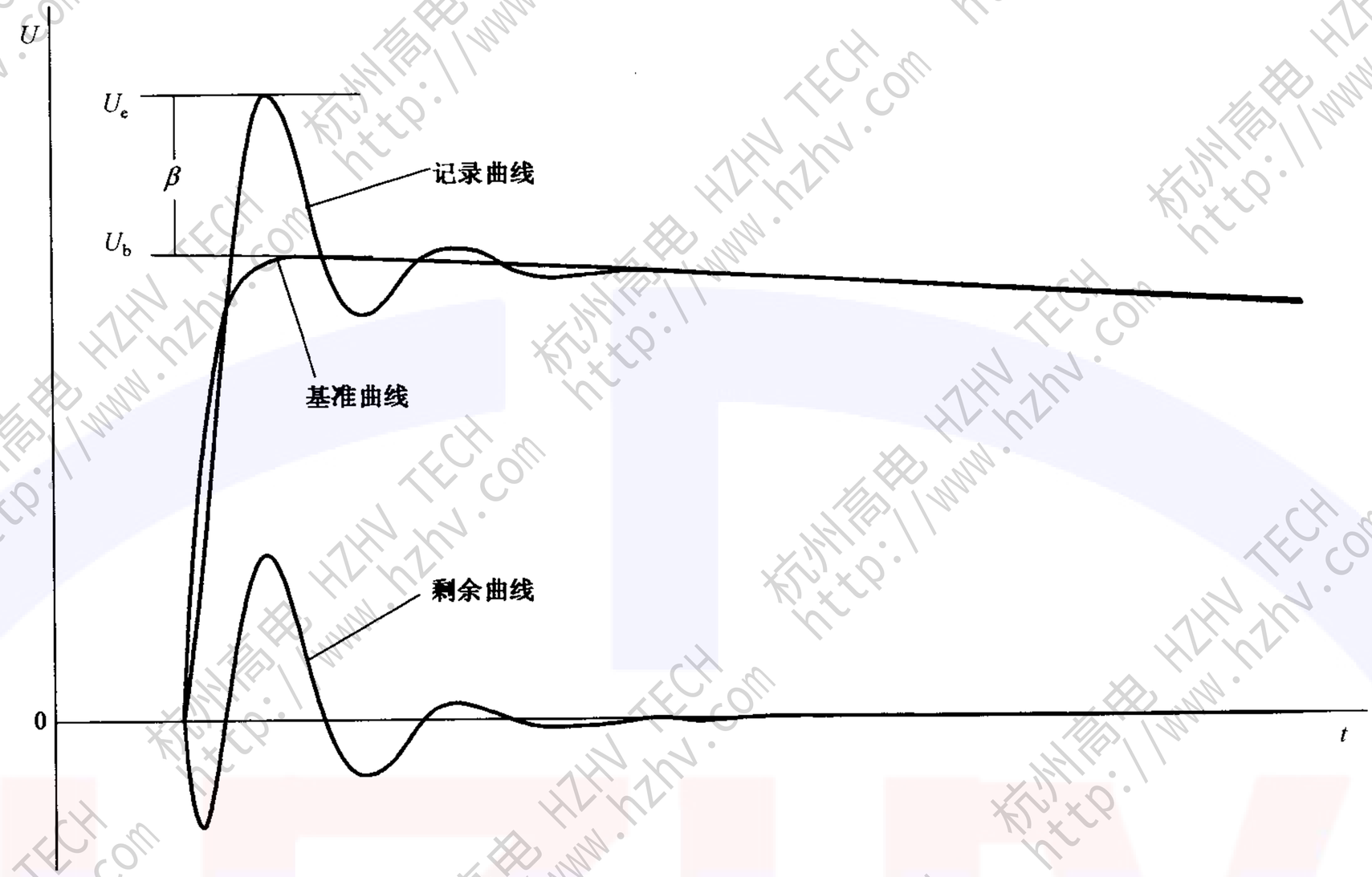


图 7　表示过冲和剩余曲线的记录和基准曲线

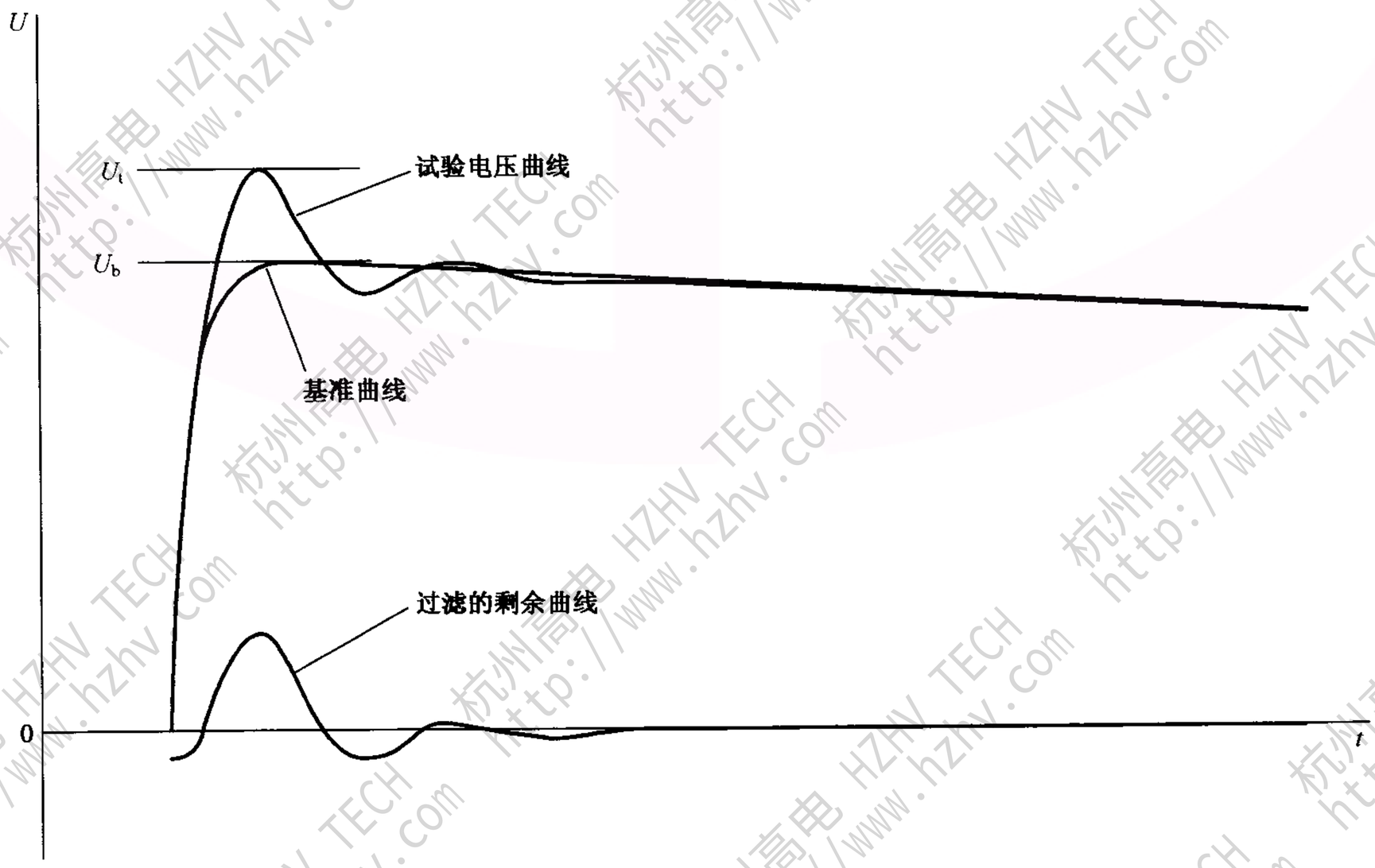


图 8　试验电压曲线（增加了基准曲线和过滤的剩余曲线）

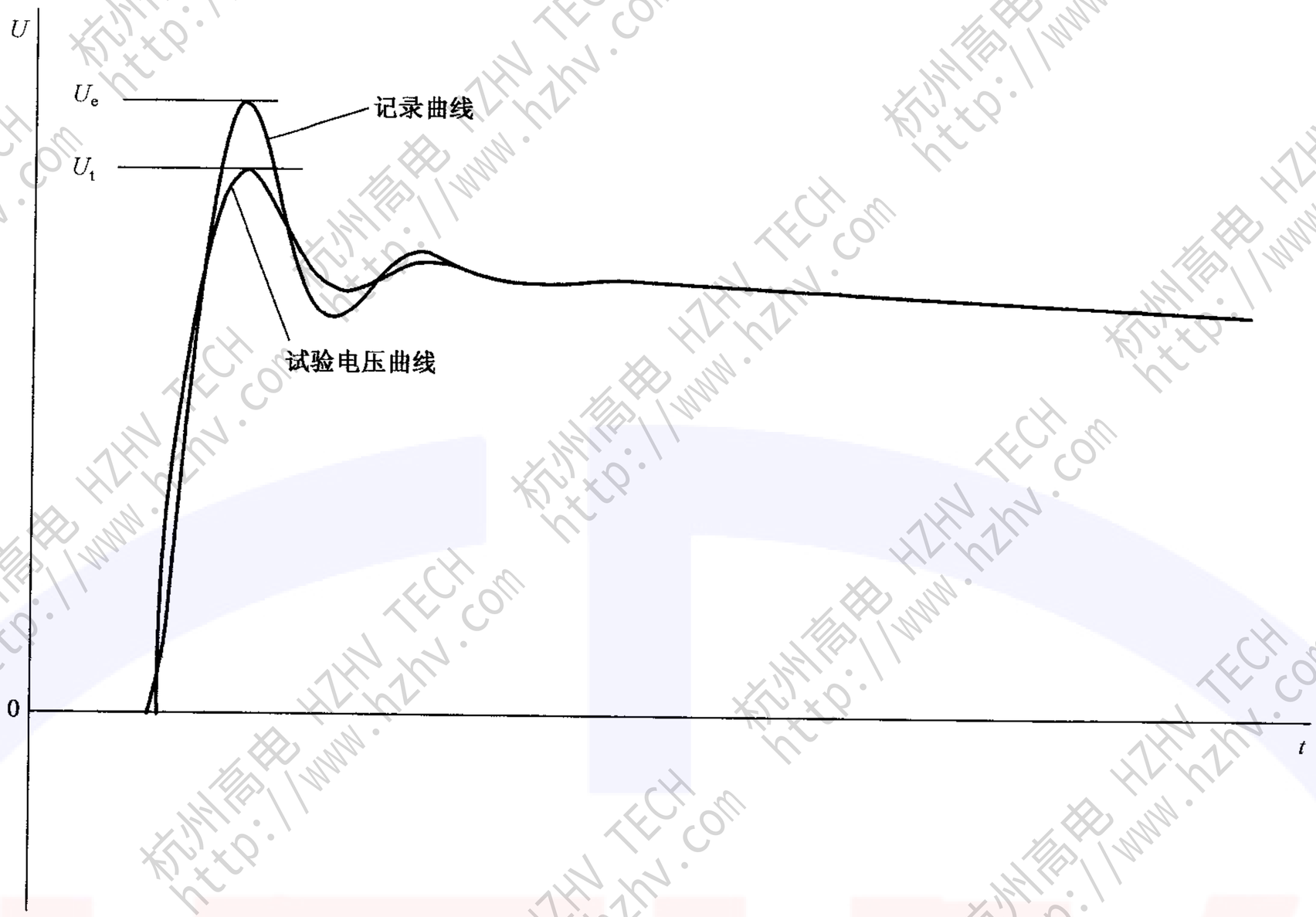


图 9 记录曲线和试验电压曲线

7.1.16

试验电压函数 test voltage function

幅频函数，定义为绝缘对具有过冲的冲击的响应。由下式给出：

$$k(f)=\frac{1}{1+2.2f^2}$$

式中：

f——频率，MHz(见图 10)。

注 2：用函数对剩余曲线进行滤波，允许对等效雷电冲击全波电压的试验电压值进行计算(见附录 B、附录 C 和附录 D)。

7.1.17

波前时间 front time

T_1

视在参数，定义为试验电压曲线中相对于 A 点提前 0.3T_1 的瞬间与相对于 A 点提前 0.9T_1 的瞬间之间的时间间隔的 1/0.6 倍。

7.1.18

视在原点 virtual origin

O_1

试验电压曲线中相对于 A 点提前 0.3T_1 的瞬间与时间轴的交点。

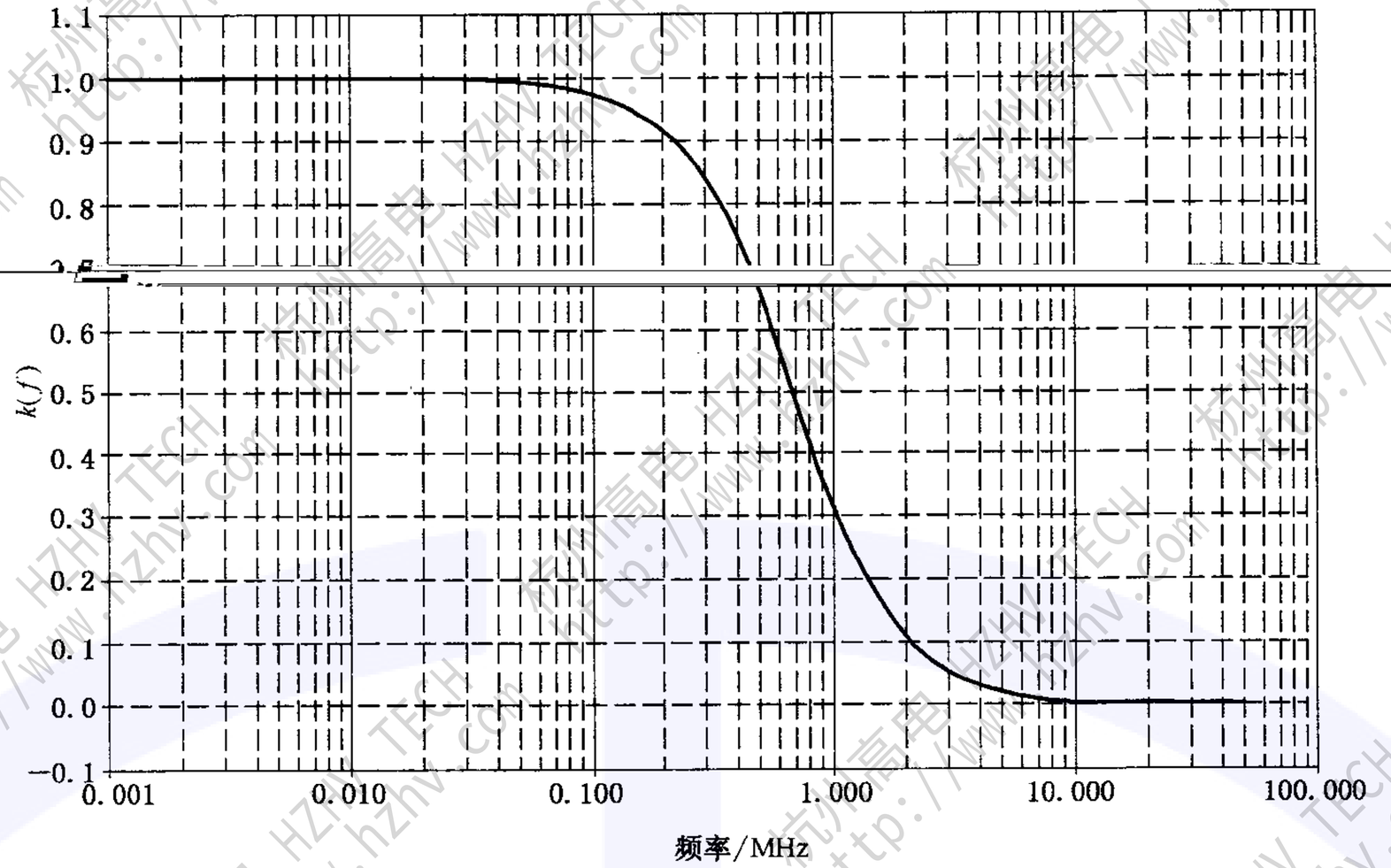


图 10 试验电压函数

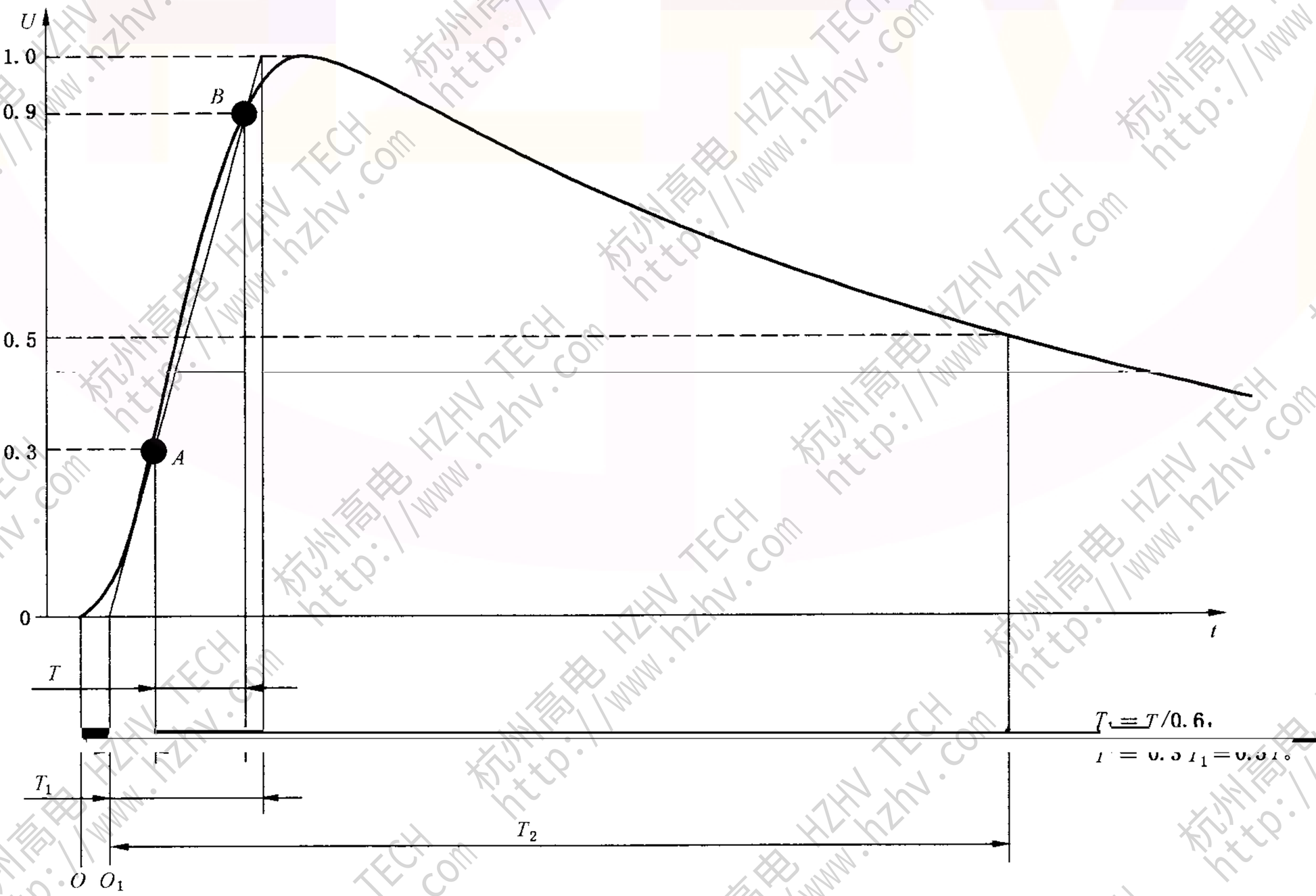


图 11 冲击全波电压时间参数

7.1.19

平均上升率　average rate of rise

由记录曲线极限值的30%和90%之间的全部数据点计算得到最佳拟合直线的斜率，通常用kV/μs表示。

注：对于30%和90%处有噪声或振荡，数据点将被界定在起点为最后通过30%值的点，终点为第一个通过90%值的点。

7.1.20

峰值时间　peak time

T_e

极限值U_e除以平均上升率后得到的时间。

7.1.21

T_2

视在参数，定义为从视在原点O_1到试验电压曲线下降到试验电压值一半时刻之间的时间间隔(如图11)。

7.1.22

等效光滑冲击　equivalent_smooth_impulse

没有过冲的且峰值等于试验电压曲线的最大值，波前时间与半峰值时间与试验电压曲线相应时间相同的估计的雷电冲击电压。

7.1.23

记录曲线超过λU_e($0 \leq \lambda < 1$)的时间间隔(如图12)

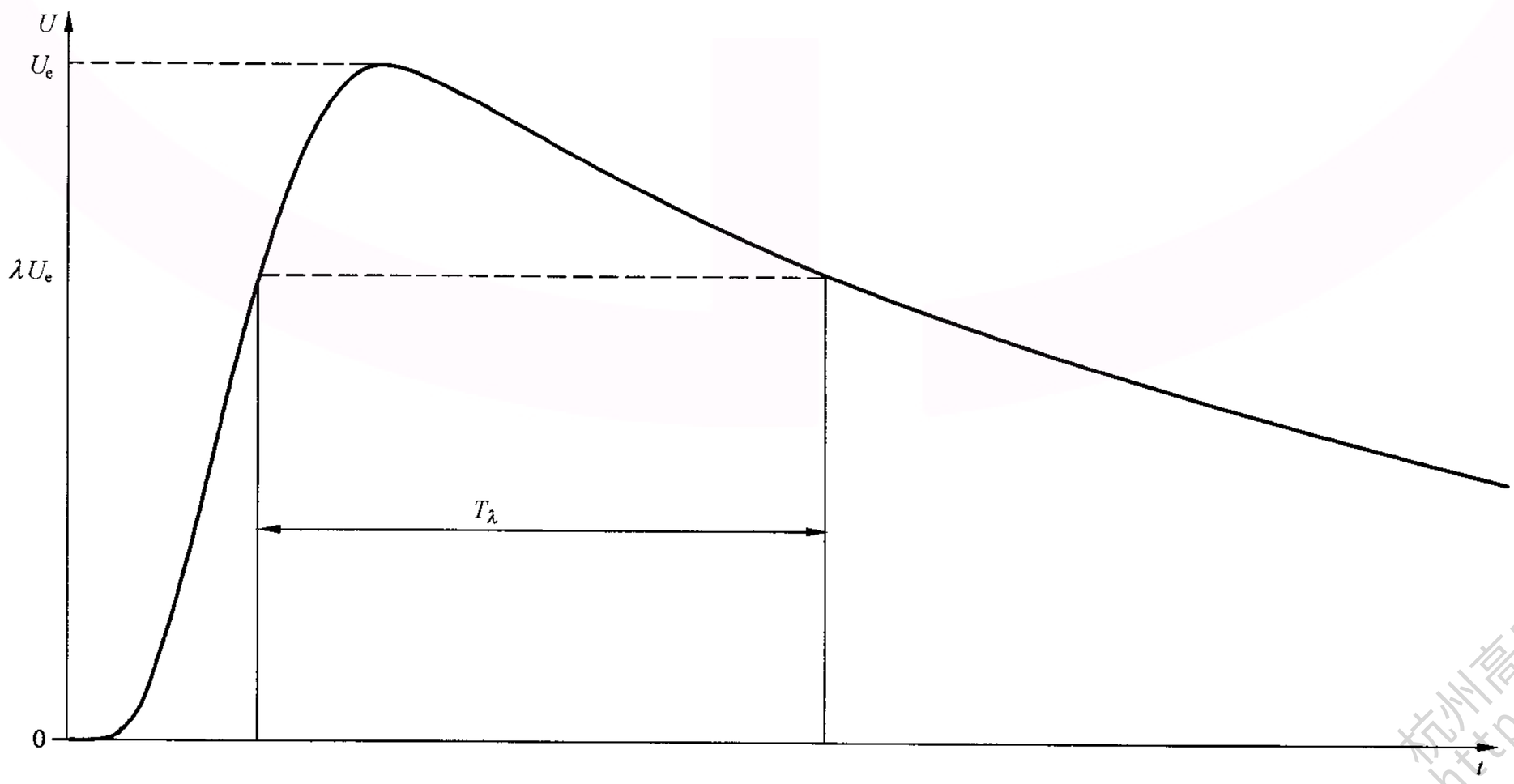


图12　电压时间间隔

7.1.24

电压积分　voltage integral

在规定的时间间隔内的电压记录曲线对时间的积分(如图 13)。

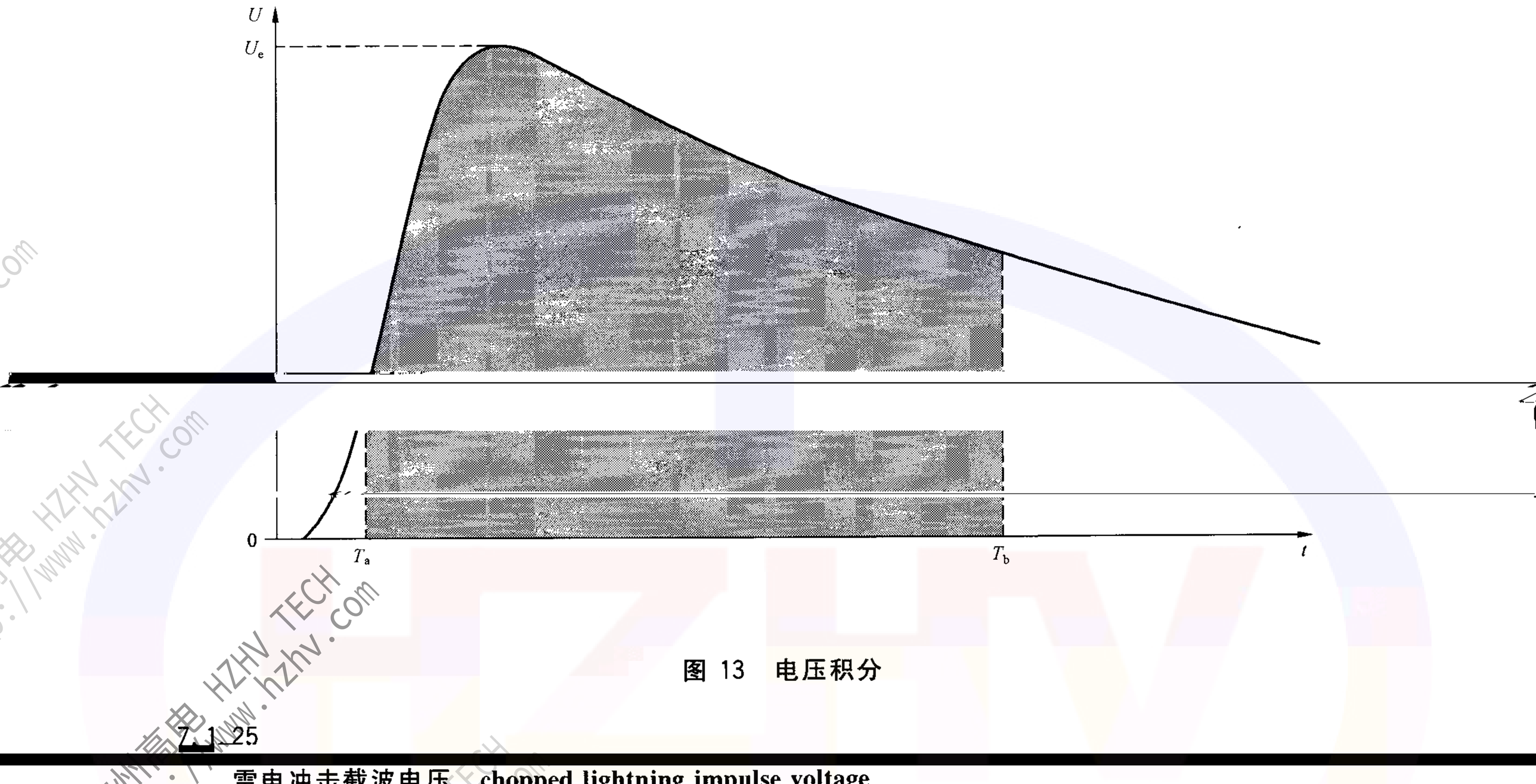


图 13　电压积分

7.1.25

雷电冲击截波电压　chopped lightning impulse voltage

指由破坏性放电导致的电压突然跌落至零的雷电冲击电压(如图 14～图 16)。

跌落可以发生在波前、波峰或波尾。

对于波前截断的雷电冲击电压,试验电压曲线是记录曲线。

对于波尾截断的冲击电压可像全波一样计算试验电压和波前时间,即可在降低电压下(例如≤50%)来确定。

注 1:截断可通过外部截断间隙实现,或由于试品内绝缘或外绝缘的破坏性放电所引起。

注 2:对某些试品或试验布置,可能使波峰变平或在电压截断前电压呈圆弧状,由于测量系统的不完善也可观察到类似的结果,有关截波参数的精确确定需要用陡变及快速响应的测量系统。其他情况由有关技术委员会考虑。

7.1.26

截断瞬时　instant of chopping

在电压跌落曲线上 70%和 10%点(C 点和 D 点)连接的直线与电压跌落曲线的交点的时刻(见

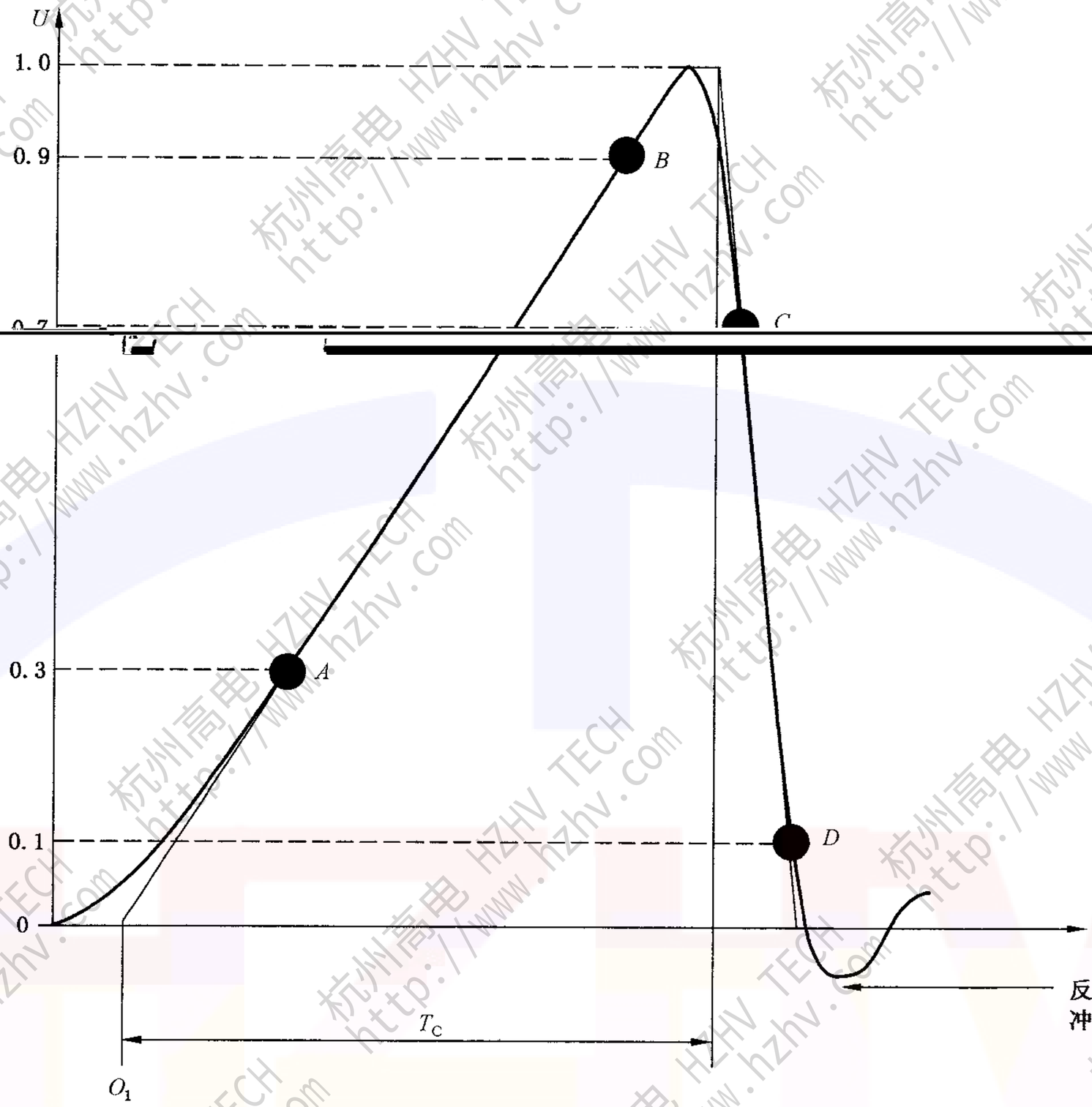


图 14　波前截断的雷电冲击波

7.1.27

截断时间　time to chopping

为一视在参数，定义为视在原点与截断瞬时的时间间隔(如图 14 和图 15)。

7.1.28

截断时电压跌落特性　characteristics related to the voltage collapse during chopping

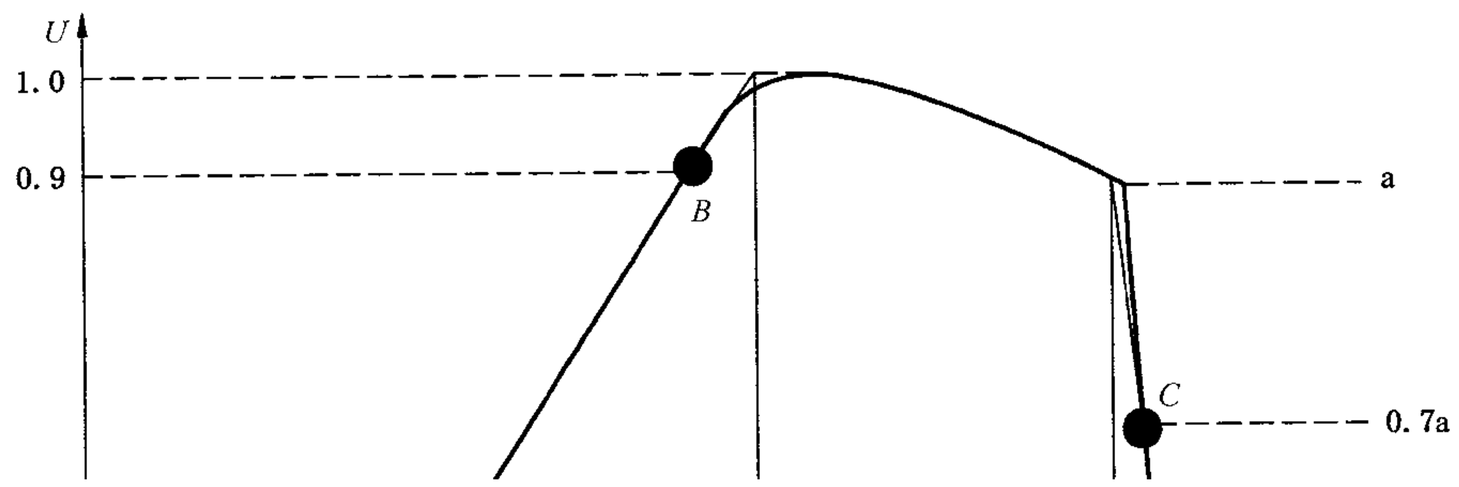
截断时电压跌落的视在特性是根据截断瞬时电压的 70%和 10%处的两个点即 C 和 D 来定义(如图 14 和图 15)，即电压跌落的幅值与电压跌落的持续时间之比。

注：C 和 D 两点仅是为了定义的目的，并不意味着截断的持续时间和陡度可以用传统的测量系统进行任意准确度的测量。

7.1.29

冲击反极性过冲的极限值　extreme value of the undershoot of an impulse

针对施加冲击由基准水平测得的反极性最大幅值(如图 14)。


U
1.0
0.9
B
a
C
0.7a

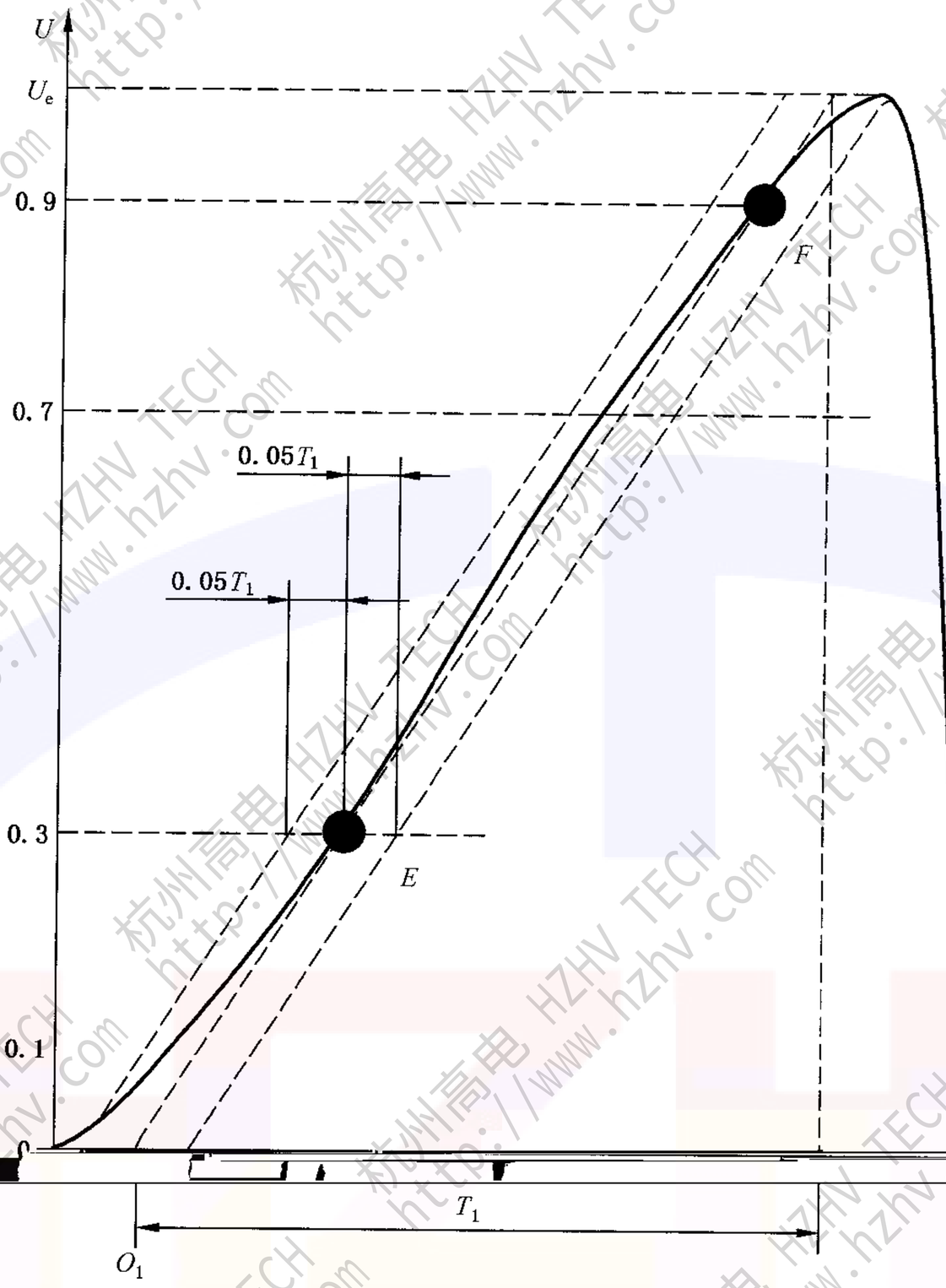


图 16　线性上升波前截断冲击

7.1.31

伏/秒特性　voltage/time curves

7.1.31.1

线性上升冲击电压的伏/秒特性　voltage/time curve for linearly rising impulse voltage

指放电电压与波前时间 T_1 的关系曲线。此曲线可通过施加不同陡度的冲击电压获得(如图 16)。

7.1.31.2

恒定预期波形冲击电压的伏/秒特性　voltage/time curve for impulse voltage of constant prospective shape

指放电电压与截断时间的关系曲线，截断时间可能发生在波前、峰值或波尾。此特性曲线可通过施加波形一定而预期峰值不同的冲击电压获得(如图 17)。

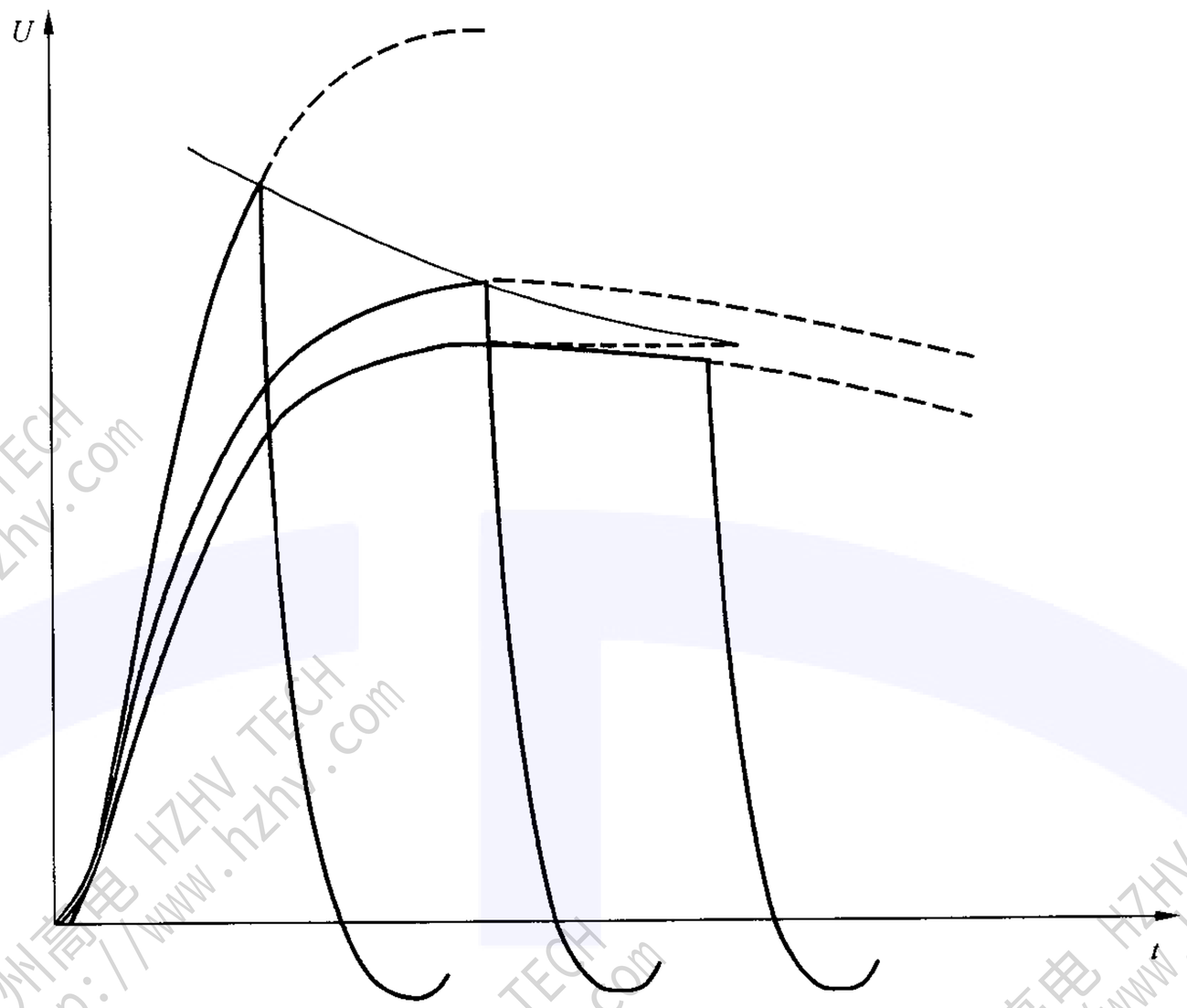


图 17　预期波形一定的冲击波的伏-秒特性

7.2　试验电压

7.2.1　标准雷电冲击电压

标准雷电冲击电压是指波前时间 T_1 为 1.2 μs，半波峰值时间 T_2 为 50 μs 的光滑的雷电冲击全波。表示为 1.2/50 μs 冲击。

7.2.2　容差及过冲允许值

除非有关技术委员会另有规定，以下的偏差为标准雷电冲击规定值与实际记录值之间的允许偏差：

峰值　　±3%；

波前时间　　±30%；

半峰值时间　　±20%

注 1：有关技术委员会可规定更低的过冲幅值。

对某些试验回路和试品，不易实现规定的标准波形。此时，为避免超出允许的过冲幅值，可适当延长波前时间 T_1。有关技术委员会需给出这种情况的导则。

注 2：正在考虑用峰值时间 T_e、电压时间间隔 T_λ 和电压积分作为雷电冲击电压的表征参数，具体由有关技术委员会规定。

对于通常使用的冲击电压发生器回路，在峰值的 90% 以下波前部分的振荡对试验结果的影响一般[illegible]

[illegible]首先作出振荡波的平均曲线（如虚线所示），并按波前时间的定义确定 A、B 两点，然后由 A、B 作纵[illegible]

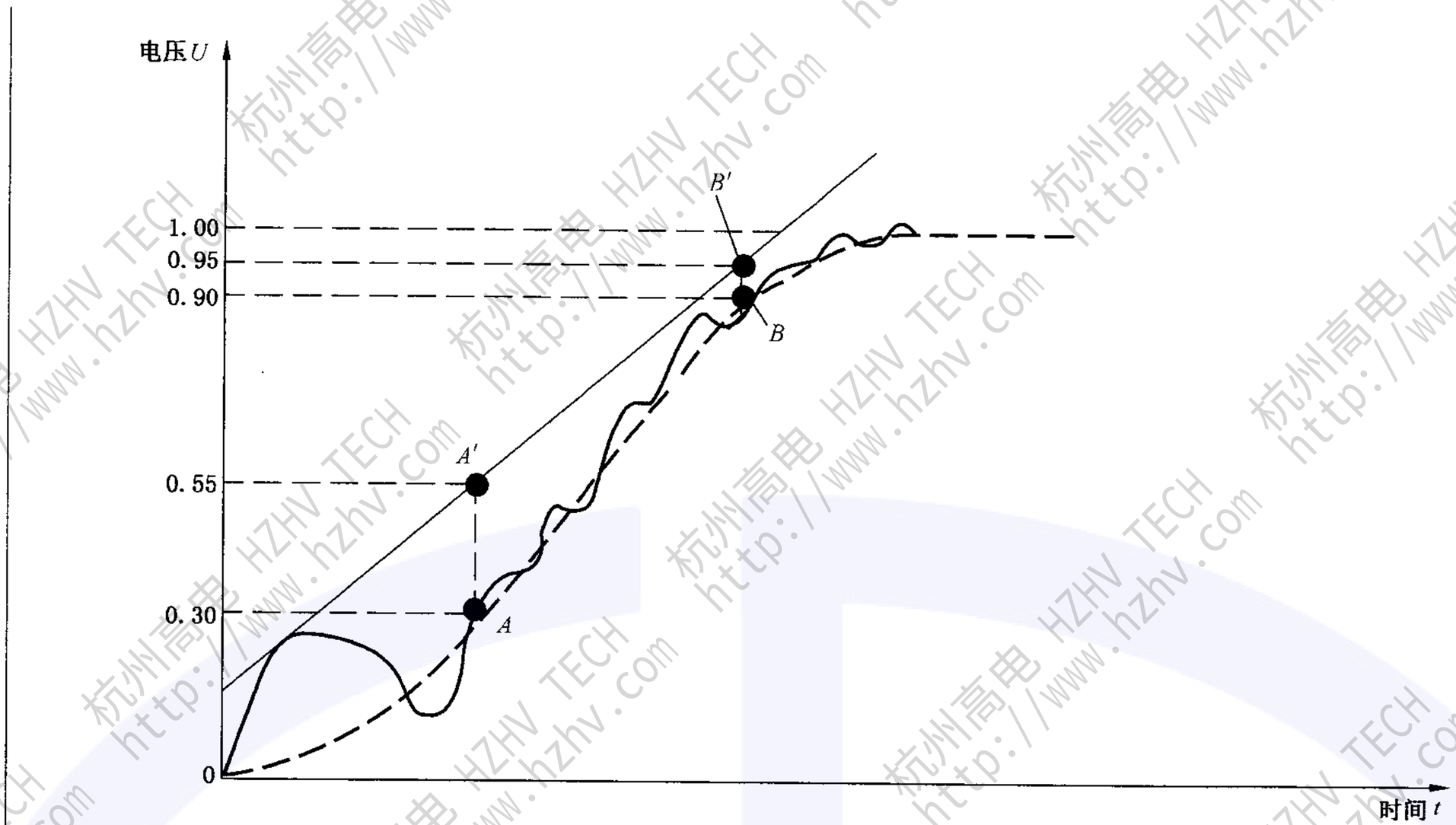


图 18　确定波前振荡最大允许值的示意图

这些冲击基本上应为单向的，特殊情况见注。

注：在特殊情况下，例如在低阻抗试品或大尺寸特高压试验回路中，可能无法将冲击波形调整在所规定的容差之内或无法保持振荡或过冲在规定限值之内或无法避免极性翻转，这些情况均在有关设备标准中处理。

7.2.3　标准雷电冲击截波电压

标准雷电冲击截波是指截断时间为 2 μs～5 μs 被外部间隙截断的标准冲击。有关技术委员会可以规定不同的截断时间。电压跌落时间可能比冲击的波前时间更短，有关技术委员会可规定其限值。相应的测量和不确定度要求参见 GB/T 16927.2。

7.2.4　特殊雷电冲击

在某些情况下，可采用振荡雷电冲击，这使得可能产生较短波前时间的冲击或者使发生器效率大于1。

注：参见 GB/T 16927.2。

7.2.5　试验电压的产生

试验电压一般由冲击电压发生器产生，冲击电压发生器主要由许多电容器组成，电容器先由直流电源并联充电，然后串联对包含试品在内的回路放电。

7.2.6　试验电压的测量和冲击波形的确定

测量试验电压峰值、各时间参量和振荡或过冲时，用经 GB/T 16927.2 规定程序认可的测量系统[illegible]几个试品，在同一个条件下进行试验，只需要校核一次。

对于雷电冲击截波电压，电压跌落可出现在波前、峰值或是波尾。对于波前截断的雷电冲击，试验电压曲线就是记录曲线；对波尾截断的雷电冲击，试验电压和波前时间的计算可与全波一样的计算方法

来处理，即可由不造成截断的降低电压的冲击（如≤50%）来确定。截断可以通过一个外部截断间隙来完成或由试品内部或外部绝缘的破坏性放电来产生。

对于有些试品或试验布置，在电压最终跌落前，峰值部分可能会出现平坦或弧形。由于测量系统的缺陷，也会观察到类似情况。有关截波参数的精确确定需要采用突变和快速测量系统。其他情况由有关技术委员会去考虑。

根据试验回路参数，通过计算不能作为确定冲击波形的依据。

7.2.7 冲击电压试验过程中电流的测量

由有关技术委员会规定在高压冲击试验时应测量的流过试品的电流的特性。这类测量用于进行比较时，电流波形很重要，而电流绝对值的测量可能不太重要。

7.3 试验程序

7.3.1 耐受电压试验

推荐的试验程序与试品性质有关，见3.5。由有关技术委员会规定应采用哪一种程序。在程序A、B和C中，施加到试品上的电压仅仅是规定的耐受值，而在程序D中，必须施加几个电压等级。

注：不同程序的“试验目的”不同，但对绝缘配合(GB 311.1)来讲，假定试验结果是相同的。

7.3.1.1 耐受电压试验程序A

对试品施加3次具有规定波形和极性的耐受电压。如果按有关技术委员会规定的检测方法未发现损坏，则认为通过试验。

注：这种程序推荐用于非自恢复绝缘。

7.3.1.2 耐受电压试验程序B

对试品施加15次具有规定波形和极性的耐受电压，如果在自恢复绝缘上发生不超过2次破坏性放

委员会另有规定，试验程序应按如下规定进行：

1) 冲击次数至少15次；

2)

3次冲击耐受来确认；

3) 破坏性放电的次数不应超过2次(此次数是指从第1次施加冲击至最后1次施加冲击的合计

4) 如果在第13次至第15次冲击中发生1次破坏性放电，则在放电发生后连续追加3次冲击(总冲击次数最多18次)。如果在追加的3次冲击中没有再发生破坏性放电，则认为试品通过试验。

7.3.1.3 耐受电压试验程序C

如果发生破坏性放电超过1次，则试品未通过试验；如果仅在自恢复绝缘上发生1次破坏性放电，则附加

如果在试验期间按有关技术委员会规定的检测方法发现非自恢复绝缘部分有任何损坏，则试品未通过试验。

7.3.1.4 耐受电压试验程序 D

自恢复绝缘的10%冲击破坏性放电电压U_{10}由附录A阐述的统计试验程序估算。

这些试验方法允许直接估算U_{10}和U_{50}或者间接估算U_{10}。

对于后一种情况，U_{10}可由以下关系式从U_{50}导出：

$$U_{10}=U_{50}(1-1.3s^*)$$

有关技术委员会应规定破坏性放电电压的标准偏差s的假定值，对于不包含任何其他绝缘的空气绝缘干试验的标准偏差标幺值取$s^*=0.03$。

如果U_{10}不低于规定的冲击耐受电压值，则满足试验要求。

有两种试验方法可确定50%放电电压值U_{50}：

a) 多级法(见A.1.1)：电压级数m≥4，每级冲击次数n_i≥10；

b) 升降法(见A.1.2)：每级冲击次数$n=1$，有效冲击次数m≥20。

为估算U_{10}，可采用每级不超过7次冲击，至少8个有效电压级的升降法。

电压级差ΔU约为U_{50}估算值的1.5%～3%。

7.3.2 确保放电电压试验程序

确保放电电压试验程序类似于7.3.1中叙述的耐受电压试验程序，仅在放电和耐受条件间作相应变化。

有关技术委员会还可为特殊试品规定其他程序。

8 操作冲击电压试验

8.1 操作冲击电压试验的有关术语和定义

8.1.1

操作冲击电压 switching impulse voltage

[illegible]

8.1.2

试验电压值 value of the test voltage

如果有关技术委员会未作其他规定，试验电压值是指最大值。

8.1.3

波前时间(到峰值时间) time to peak

T_p

从实际原点到操作冲击电压的最大值时刻的时间间隔。

注：由于最大电压处的持续时间相对较长，在实际确定该时间时会有难度，8.2.3中给出了方法

8.2.2 容差

[redacted]

峰值　　±3%；

波前时间　　±20%；

半峰值时间　　±60%。

[redacted]

其他容差或其他冲击波形。

注：如果破坏性放电发生在峰值或波前，则允许预期半峰值时间有较大的容差。

8.2.3 到峰值时间的估算

8.2.3.1 标准操作冲击电压

对具有双指数波形的标准操作冲击电压，可由下式计算：

$$T_p = K T_{AB}$$

式中：

K——无量纲参数，表达式为：

$$K = 2.42 \quad 3.08\times10^{-3} T_{AB} + 1.51\times10^{-4} T_2$$

[redacted]

注：在 GB/T 16927.3 现场试验中，标准操作冲击电压的 $T_p = 2.4 T_{AB}$。

8.2.3.2 非标准操作冲击

此时可根据实际波形，采用多种数字曲线拟合的方法来确定到峰值时间。

注：如果要求考虑不确定度，须注明到峰值时间的计算方法。

8.2.4 特殊操作冲击

为特殊目的，认为用标准操作冲击不能满足要求或不适合时，有关技术委员会可以规定其他非周期性或振荡波形两种特殊的操作冲击。

注：参见 GB/T 16927.3。

8.2.5 试验电压的产生

操作冲击通常由冲击电压发生器产生。

注：也可用对试验变压器（或被试变压器）的低压绕组施加冲击电压的方法来产生，但这种方法很难产生 8.2.1 和 8.2.2 规定的标准参数。

在选择产生操作冲击回路的元件时，要避免由试品的非破坏性放电电流而引起冲击波形畸变过大。特别是高压外绝缘的湿试验时，电流可能达到相当大的数值；如果试验回路的内阻抗相当高，可能引起波形严重畸变，甚至阻止破坏性放电发生。

8.2.6 试验电压的测量和冲击波形的确定

测量试验电压峰值、各时间参量时，应使用经 GB/T 16927.2 规定程序认可的测量系统。测量应在试品接入回路时进行。通常对每个试品都要校核冲击波形，但是具有相同设计和相同尺寸的几个试品

[redacted]

8.2.7 冲击电压试验时电流的测量

有关技术委员会应规定高压冲击试验时应测量的流过试品的电流的特性。若此类测量仅用于比较时，波形就显得重要，而电流的绝对值的测量并不重要。

8.3 试验程序

么值可假定为：$s^* = 0.06$。

[illegible]

的，放电概率与放电电压的关系中电压值通常以损耗峰值来表示，但也可能用另一种方法[illegible]

实际破坏性放电电压，然后可按照附录 A 中第 3 类试验结果规定的方法确定实测电压值的概率分布。

9 联合和合成电压试验

9.1 联合和合成电压试验的有关术语和定义

9.1.1

联合电压 combined voltage

指由两个独立电源产生的两个不同电压(参照第 5 章)分别接到有 3 个端子试品的两个带电端子之间(第三端接地)的电压(如图 20)。

注：联合电压适用于以下试验，例如开关装置的纵绝缘和三相系统和设备的相间绝缘试验。电压施加于试品的不同端子上。

9.1.2

联合电压值 value of a combined voltage

[illegible]

a) [illegible]

b) 合成电压 $U = U_1 + U_2$。

9.1.3

合成电压 composite voltage

[illegible]

和图 22)。

注：两个电源同时施加到试品的一个端子上。

9.1.4

合成电压值 value of a composite voltage

在试品上测得的最大值。

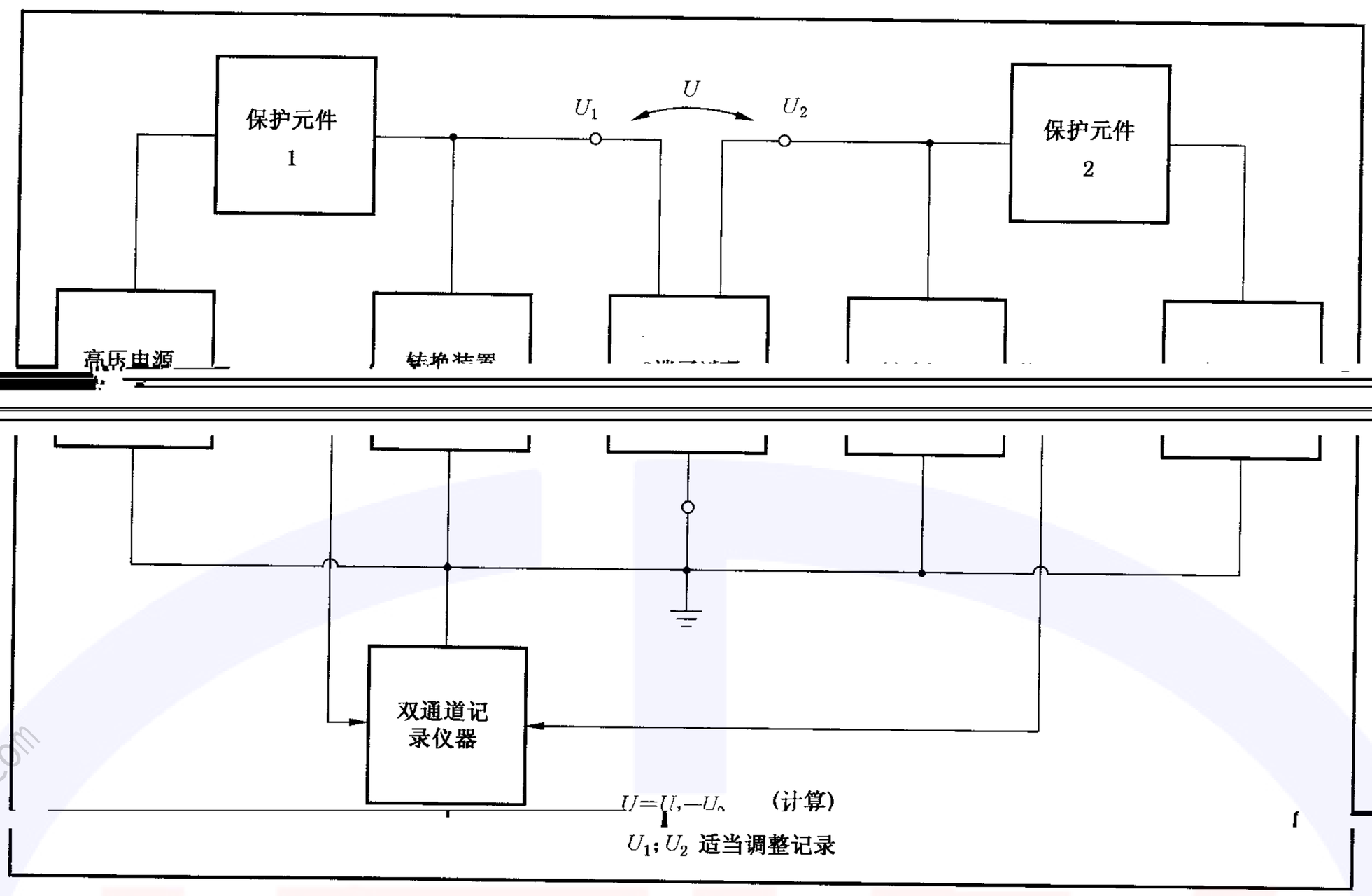


图 20 联合电压试验回路

9.1.5

电压分量 voltage components

指根据本部分相关条款表征的，作用在试品上引起联合或合成的两个试验电压。

9.1.6

时延 time delay

Δt

两个电压分量到达峰值时刻之间的时间间隔(如图 23)。

注：若有一个电压分量是工频，以负峰值时刻作为时延计时起点。

9.2 联合试验电压

9.2.1 参数

根据本部分由两个电压分量产生的联合试验电压，由下列参数表征(除非有关技术委员会另有规

——电压值；

——时延；

——根据本标准相关条款规定的两个分量的参数。

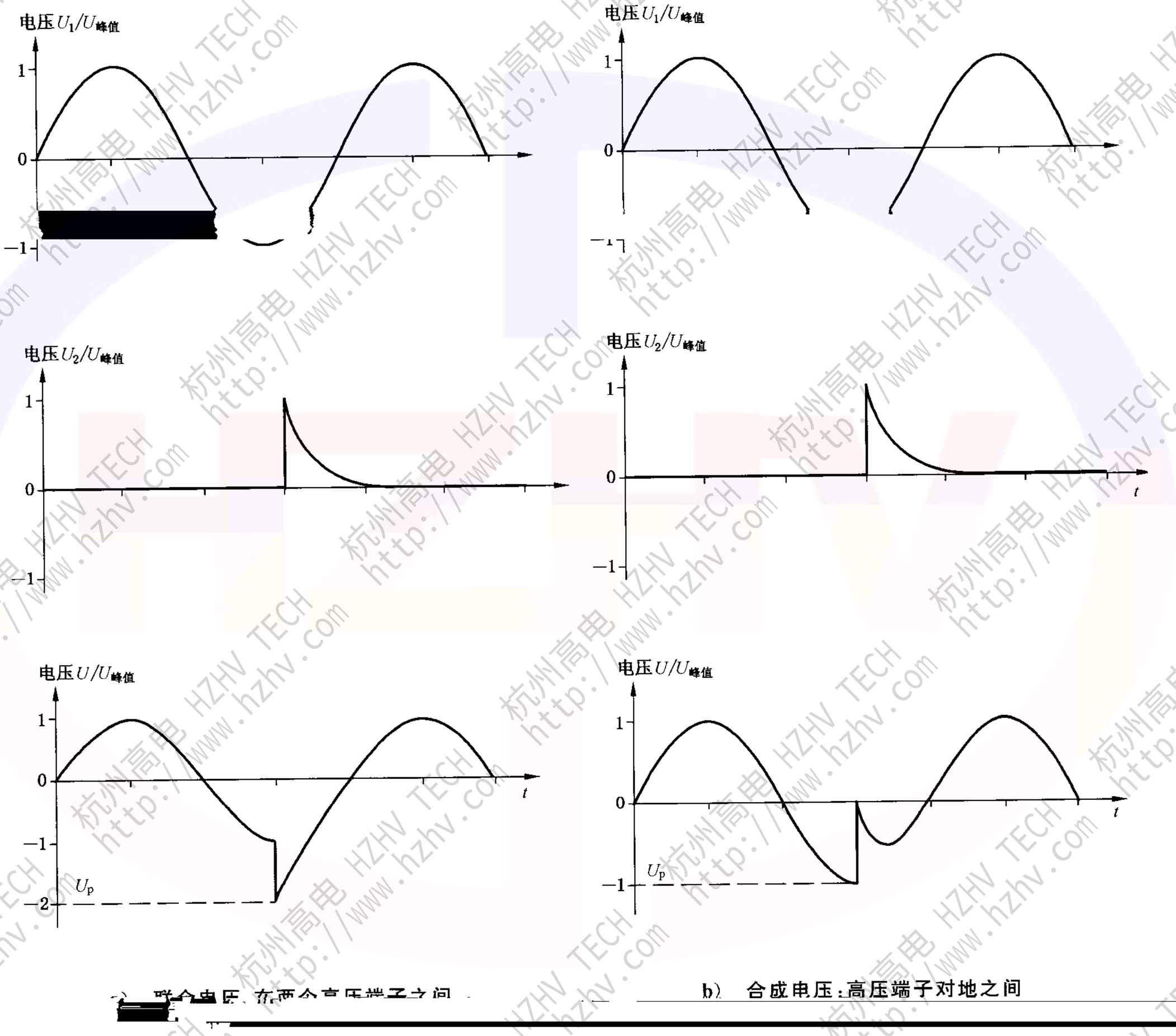
9.2.2 容差

时延 Δt 的容差为 $\pm 0.05 T_p$，对于冲击，T_p 为到峰值时间或波前时间；对交流电压，T_p 为四分之一周波时间。T_p 可取两个电压分量的时间中的较大值。

9.2.3 试验电压的产生

[redacted]

由于两个电源系统之间的耦合，使得两个电压分量的幅值和波形可能不同于分别单独用同一电源产生的电压的幅值和波形。工频电压上跌落应≤5%。



[redacted]

b) 合成电压：高压端子对地之间

9.2.4 测量

由于系统耦合（如图 20）接在试品每一高压端子和地之间的两个电压分量测量系统必须满足

合电压的两个电压分量，如图 21a)所示。

注：工频电压测量系统应同时能够满足 GB/T 16927.2 对雷电冲击电压测量的要求。

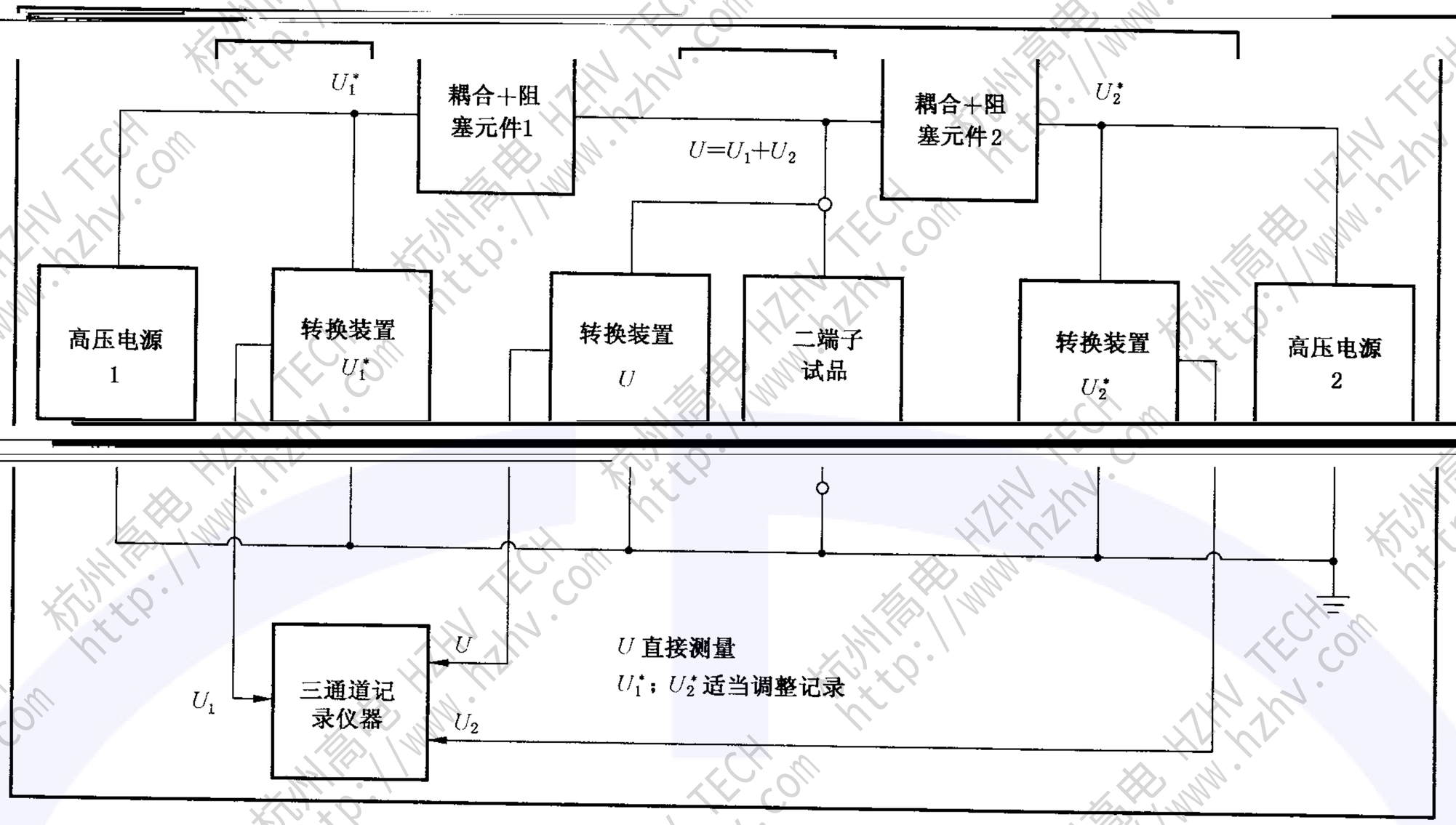


图 22 合成电压试验回路

9.3 合成试验电压

9.3.1 参数

根据本部分由两个电压分量产生的合成试验电压，由下列参数表征：

——电压值；

——时延；

——根据本部分相关条款规定的两个分量的参数。

9.3.2 容差

除非有关技术委员会另有规定，记录电压值应保持在规定电压值的±5%以内。

时延 Δt 的容差为±0.05 T_p，对于冲击，T_p 为波前时间；对交流电压，T_p 为四分之一周波时间，可认为 T_p 为两个电压分量的时间中的较大值。

9.3.3 试验电压的产生

由于两个独立电压源共同连接于试品高压端子的连接点(如图 22)，必须考虑两个电源的相互作用，应采取相应的[illegible]。对于电源本身的要求可参照本部分的相关条款。

附 录 A
（资料性附录）
试验结果的统计评价

A.1 试验分类

为对试验结果进行统计评价，可将破坏性放电试验程序分为三类。

A.1.1 第一类 多级法试验（图 A.1）

在第一类试验中，对 m 个电压等级（相邻电压等级之间的级差为 $\Delta U=U_{i+1}-U_i(i=1,2\cdots\cdots m-1)$）的每个电压等级 $U_i(i=1,2\cdots\cdots m)$ 施加 n_i 次电压（$i=1,2\cdots\cdots m$）（例如，雷电冲击），引起 $d_i \leqslant n_i$ 次破坏性放电。这一类程序主要适用于冲击试验，但是某些规定持续时间的交流和直流电压试验也属于这一类。

注：相关参数应选择如下：对所有 $i=1,2\cdots\cdots m$ 和 $\Delta U=(0.01\sim0.06)U_{50}$，$n_i>5$，$m>10$。

试验结果为电压作用次数 n_i 和每级电压 U_i 时的破坏性放电次数为 $k_i(i=1,2\cdots\cdots m)$。

A.1.2 第二类 升降法试验（图 A.2）

在第二类试验中，电压等级 $U_i(i=1,2\cdots\cdots l)$ 施加 m 组，每组 n 次基本不变的电压，每组加压的电压水平根据前一组试验结果来确定增加或减少一个小量 ΔU。

通常采用两种试验程序，为找出相应于低破坏性放电概率的电压水平的耐受程序。为了找出相应于

也可用其他的 n 值进行试验来确定相应于其他破坏性放电概率的电压。试验结果为用电压 U_i 所加的电压组数 k_i。第一个 U_i 是在该电压下至少已经施加了两组的电压。电压水平 U_i 下总的有效组数

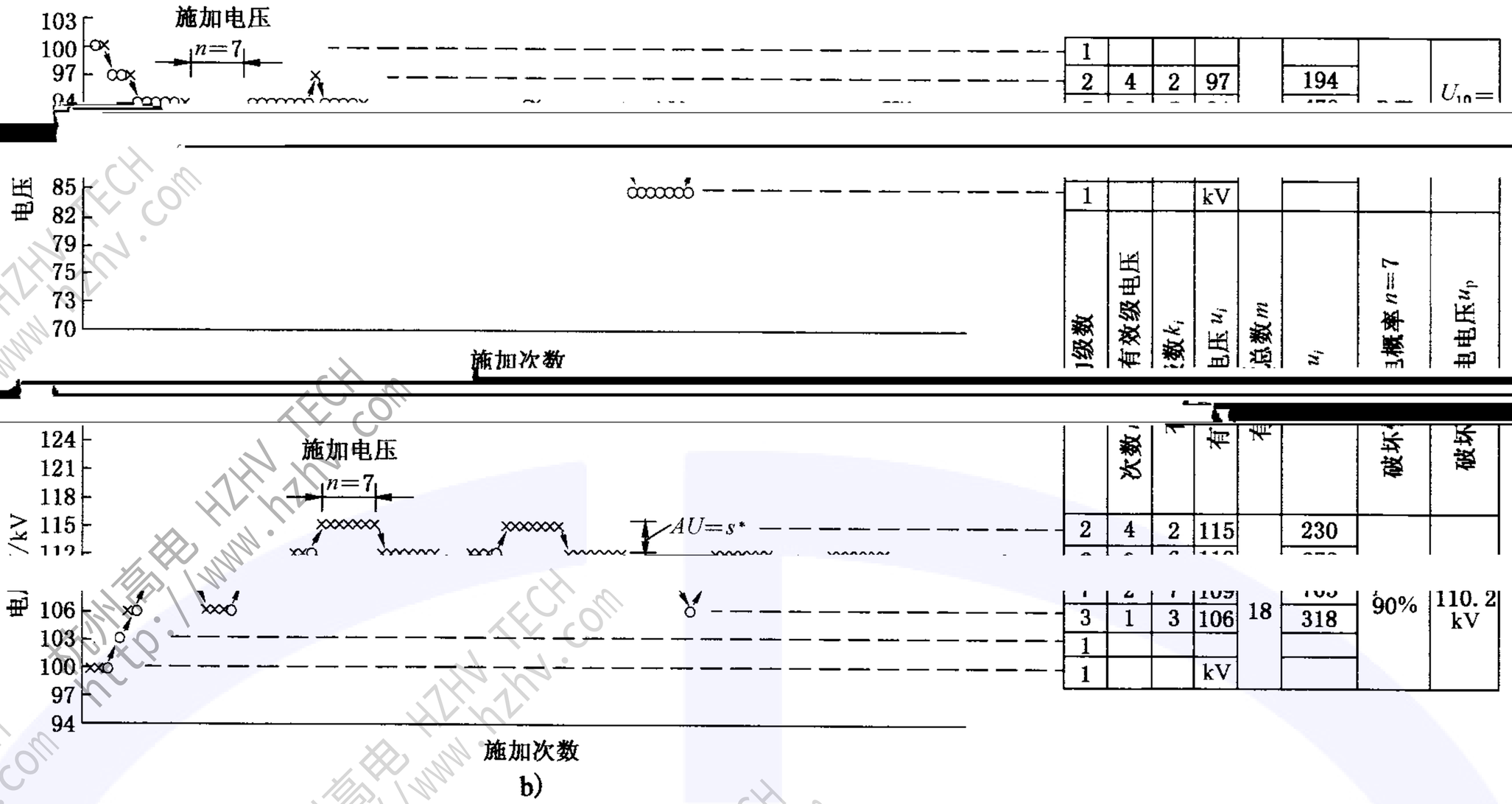
$(0.01\sim0.06)U_{50}$ 和 $m>15$，也可选取其他参数。

在第三类试验中，施加 n 次电压，每次试品均发生破坏性放电。试验电压可连续或逐级升高直到

A.2 破坏性放电的统计特性

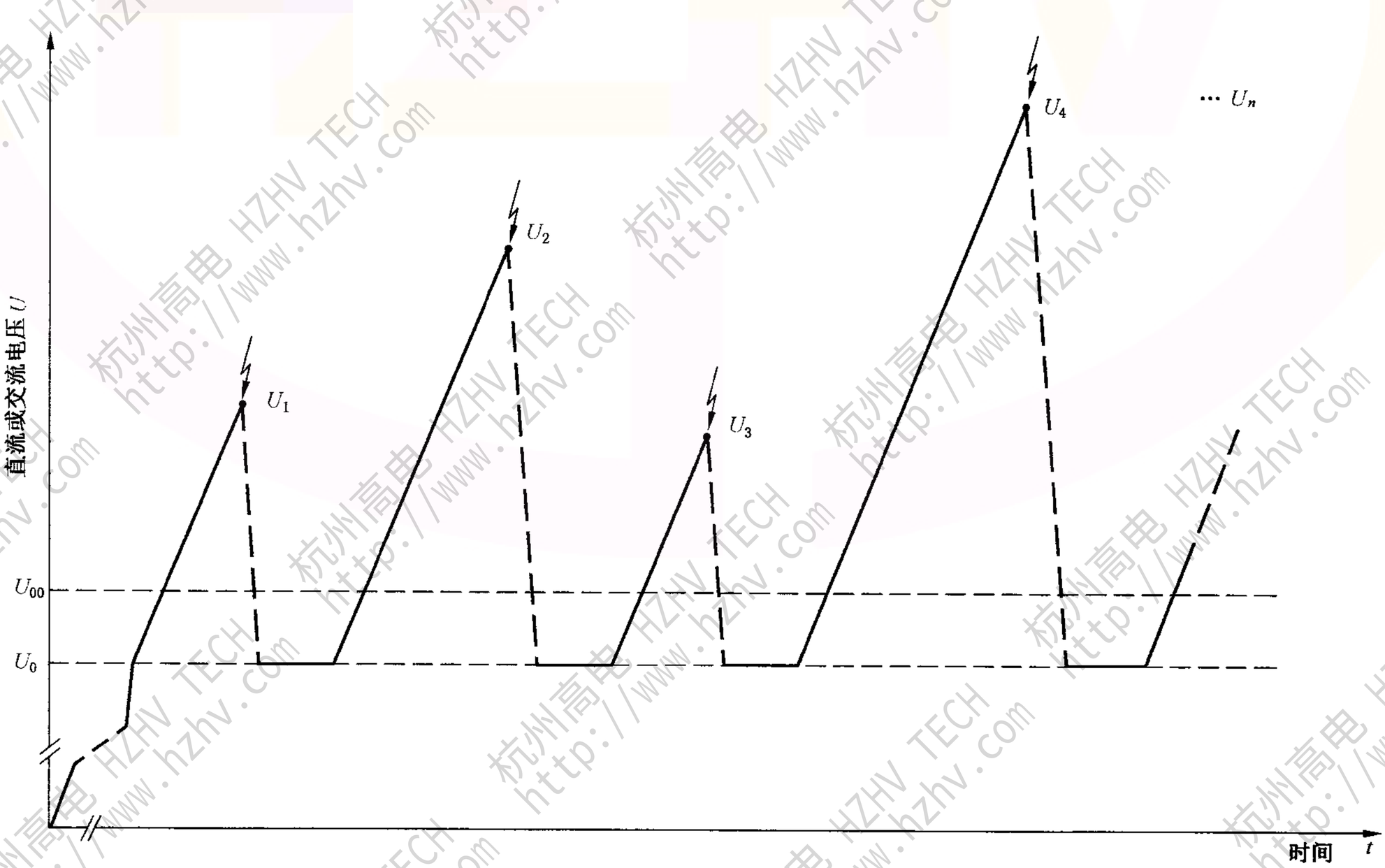
对一个给定的试验程序，当破坏性放电概率 p 仅取决于试验电压 U 时，试品的特性可以由放电发

U_{50} 和 s 有关的理论概率分布函数来表示，其中 U_{50} 为 50%放电电压，$p(U)=0.5$，s 为标准偏差（见 3.4.4 和



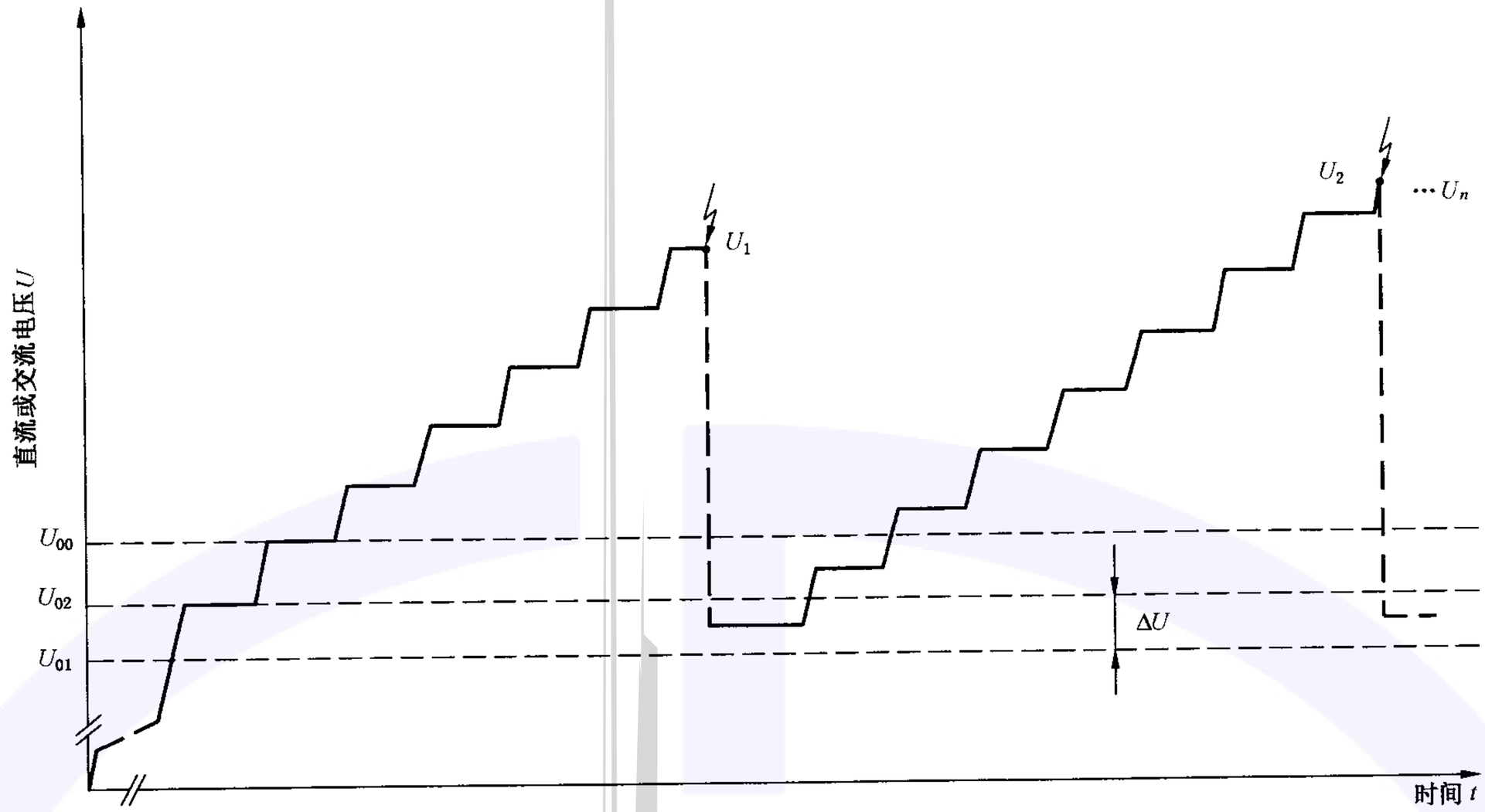
b)

图 A.2 升降法试验分别确定 90%和 10%破坏性放电概率的示例(第二类试验)



a) 逐步增加电压

图 A.3 连续增加施加电压



b） 试验示例

图 A.3（续）

A.3.1 第一类试验结果的处理

[redacted]在第一类试验中得到的 m 个 $p(U_i)$估计值拟合至一个设定的概率分布函数 $p(U)$，然后确定参数 U_{50} 和 s。

[redacted]f_i和 U_i的关系直线。高斯(或正态)概率纸是一个熟悉的例子，对于估算符合高斯分布的函数，绘出一条直线。

$$p(U)=(1/s\sqrt{2\pi})\int_{-\infty}^{u}\exp[-(u-U_{50})^2/2s^2]\,du$$

注：正态概率分布纸不能给出 $p=0$ 或 $p=1$ 的点，因此，全部放电($k_i=n_i$)的电压和不发生放电的电压($k_i=0$)不可能直接画出。用这些结果的可能方法是将这些值与邻近电压水平得到的值结合起来作为加权平均电压将它们[redacted]布函数的参数)和这些估算值的置信限。

[redacted]在任何情况下，要用适当的方法(例如惯用回归系数或置信限)来检查所假定的概率函数是否以足够的准确度与测量值相符。

作为一般导则，置信宽度与每一级电压 U_i的施加次数 n_i的平方根成反比，和电压级数 m 成反比。

对于 s

$$0.4s^*\leqslant s\leqslant 2.0s^*$$

杭州高电 HZHV TECH http://www.hzhv.com

式中 U_{50}^{*} 和 s^{*} 为试验结果拟合到假定的放电概率分布函数 $p(U)$ 所得到的 U_{50} 和 s 的估算值。

注：对于 $p=0.5$ 或 50%附近的 U_p 估算值，其置信度将较高且与

A.3.2 第二类试验结果的处理

第二类试验提供了破坏性放电概率为 p 的电压 U_p 估算值 U_p^{*}，U_p 估算值 U_p^{*} 由下列近似公式给出：

其中 k_i 为电压 U_i 下施加电压的组数（每组施加 n 次电压）；m 为总的有效组数。对期望的概率 p，n 的适合值由下面公式给出。为避免明显的误差，所考虑的最低电压与 U_p^{*} 的差不大于 $2\Delta U$

$$p=1-(0.5)^{1/n}$$

放电程序给出破坏性放电概率为 p 时的 U_p 值 p 由下式给出：

$$p=(0.5)^{1/n}$$

升降法试验中可以估计的 U_p 的 p 值受到 n 应为整数的限制，表 A.1 给出了对于不同的 n 值的

表 A.1

n	70	34	14	7	4	3	2	1
对应程序 p								
放电程序 p	0.99	0.98	0.95	0.90	0.85	0.80	0.70	0.50

估算 s 以及 s 的置信限的程序可以获得，但建议不作为通用目的。

A.3.3 第三类试验结果的处理

第三类试验结果一般是 n 个电压值 U_i，根据它可以确定破坏性放电概率函数的参数 U_{50} 和 s。按

$$s^{*}=\left[\sum(U_i-U_{50}^{*})^2/(n-1)\right]^{1/2}$$

对于其他分布可应用最大似然法得出相关参数（

的情况则用同样的表达式和方法。

对于高斯分布（U_{50} 和 s），置信限可以用学生式 t 分布或 chi-平方式分布来求出。

例如对高斯分布，根据 $n=20$ 的试验所得的 U_{50} 和 s 估算值的 95%的置信限为：

对于 U_{50}：

$$U_{50}^{*}-0.47s^{*}\leqslant U_{50}\leqslant U_{50}^{*}+0.47s^{*}$$

对于 s：

$$0.74s^{*}\leqslant s\leqslant 1.48s^{*}$$

可用最大似然法并采用任何一种标准分析技术

估算以及破坏性放电电压 U_p 的定值，而且，可能使用所得到的全部结果并可求出相应于任何期望信

对于第一类和第二类试验，在每个电压水平U_i的放电次数k_i和耐受次数w_i是已知的。如果已知或假定了放电概率分布函数 $p(U;U_{50};s)$，则在电压U_i 的放电概率为 $p(U;U_{50};s)$，耐受概率为$[1-p(U;U_{50};s)]$。相应于在电压水平U_i时的k_i次放电和w_i耐受的似然函数L_i为：

[redacted]

因 U_i、k_i和w_i是已知的，则L_i仅是U_{50}和 s 的函数。

包括 n 和U_i的一套完整结果的似然函数为：

$$L=L_1\ L_2\cdots L_i\cdots L_n=L(U_{50},s)$$

对于逐级升压的第 3 类试验，在结果中出现的每个电压水平U_i相当于破坏性放电。通常电压水平U_i将出现m_i次，这里 $m_i\geqslant 1$。似然函数则变为：

$$\log L=m_1\log[f(U_1;U_{50},s)]+m_2\log[f(U_2;U_{50},s)]+\cdots+m_n\log[f(U_n;U_{50},s)]$$

式中：

[redacted]

U_{50}和 s 的最佳估算值是L 为最大值时的U_{50}^*和 s^*。这可以通过数值计算求得，已有相关的软件。

通常使用计算机对于假定的U_{50}^*和 s^* 重复计算 L 以逐步逼近得到最大值。固定U_{50}^*和s^*相应于所要求的放电概率 p 的U_p值可以假定的放电概率分布函数。确定U_{50}^*和 s^* 置信限的方法可在有关文献

附 录 B
（规范性附录）
叠加过冲或振荡的标准雷电冲击全波参数计算程序

本附录描述使用试验电压函数方程计算叠加过冲的雷电冲击全波电压的波形参数。

B.1 程序依据

该程序基于经验公式：

$$U_t = U_b + k(f)(U_c - U_b) \quad \cdots\cdots (B.1)$$

式中：

U_b——基准曲线的最大值；

U_c——去除噪声后的原始记录曲线最大值。

描述在过冲幅值 β 的雷电冲击电压下，决定绝缘的试验电压 U_t。

试验电压函数 $k(f)$ 与频率有关，由下式给出：

$$k(f) = \frac{1}{1 + 2.2f^2} \quad \cdots\cdots (B.2)$$

式中：

f——频率，MHz。

B.2 雷电冲击全波参数的计算程序

运用计算机辅助计算程序实现式(B.1)以数字形式计算冲击波。该程序用于从试验电压曲线求得冲击参数。程序步骤如下：

1) 从输入电压为零所记录的开始部分计算电压值的平均值，求取记录曲线的基准水平；

步骤；

3) 从偏置补偿记录曲线 $U_0(t)$（见图 7）找出极限值 U_c；

4) 找出波前小于 $0.2\,U_c$ 电压值的最后采样点；

5) 找出波尾大于 $0.4\,U_c$ 电压值的最后采样点；

6) 选取步骤 4）中确定的采样点与后面步骤 5）中确定的采样点之间的采样点；

7) 对步骤 6）中数据进行下列双指数函数拟合：

$$u_d(t) = U[e^{-(t-t_d)/\tau_1} - e^{-(t-t_d)/\tau_2}]$$

式中：

t ——时间；

$u_d(t)$ ——双指数电压函数；

U、τ_1、τ_2 和 t_d ——拟合所得出的参数。

8) 用记录曲线的基准水平对时间 t_d 内采样点（步骤 4））和从时间 t_d 到步骤 5）中最后采样点时刻的 $u_d(t)$，构建波形的基准曲线 $U_m(t)$；

9) 从偏置补偿记录曲线 $U_0(t)$ 中减去基准曲线 $U_m(t)$ 以获得剩余曲线 $R(t) = U_0(t) - U_m(t)$，如图 7；

10) 用等于试验电压函数函数 $k(f)$（式 B.2）的传递函数 $H(f)$ 创建滤波器；

11) 对剩余曲线 $R(t)$ 进行滤波，求得滤波后的剩余曲线 $R_f(t)$（如图 8）；

12) 将滤波后的剩余曲线 $R_r(t)$ 与基准曲线 $U_r(t)$ 相加，求得试验电压曲线 $U(t)$；

14) 找出基准曲线 $U_r(t)$ 的最大值 U_r（如图 9）；

16) 显示偏置补偿记录曲线 $U_0(t)$ 和试验电压曲线 $U_t(t)$（如图 9）；

17) 给出试验电压值 U_t、波前时间 T_1、半峰值时间 T_2 和相对过冲幅值 β'。

B.3 根据波形的手工计算程序

3) 找出记录曲线 $U(t)$ 的最大值 U_e；

4) 计算过冲持续时间 t，即 $U(t)$ 最大峰值的两侧的 $U(t)$ 曲线和 $U_m(t)$ 曲线的两个交点的时间间隔，并且计算过冲频率 $f_0=1/2t$；

5) 用式(B.2)计算试验电压函数 $k(f)$；

6) 用式(B.1)计算试验电压值 U_t；

7) 计算相对过冲幅值，$\beta'=100\times(U_e-U_b)/U_e\%$；

8) 用 U_t 作为峰值来确定 $30\%U_t$、$50\%U_t$ 和 $90\%U_t$ 的值，以此来确定基准曲线的时间参数；

9) 给出试验电压值 U_t、波前时间 T_1、半峰值时间 T_2 和相对过冲幅值 β'。

注：由于手工计算存在很大的随意性，因此手工计算结果的不确定度很可能超出 GB/T 16927.2 的规定值。

B.4 对波尾截断雷电冲击参数的计算程序

本程序采用 B.2 中计算雷电冲击全波的算法，可用本程序来计算在极限值的 95% 之后截断的波形参数。

本程序需要记录两种波形

——需计算用的波尾截断冲击波形；

——不改变试验布置，在较低电压下(不截断)的全波参考冲击波形。

本程序步骤如下：

2) 从记录曲线 $U(t)$ 中去掉基准水平偏置，求得偏置补偿记录曲线 $U_0(t)$，并用该曲线进行后续步骤；

3) 从偏置补偿记录曲线 $U_0(t)$（见图 7）找出极限值 U_e；

4) 找出波前小于 $0.2\,U_e$ 电压值的最后采样点；

5) 找出波尾大于 $0.4\,U_e$ 电压值的最后采样点；

6) 选取步骤 4)中确定的采样点之后至步骤 5)中确定的采样点之前的数据进行进一步分析；

7) 对步骤 6)中数据进行下列双指数函数拟合：

$$u_d(t)=U[e^{-(t-t_d)/\tau_1}-e^{-(t-t_d)/\tau_2}]$$

式中：

t ——时间；

$u_d(t)$ ——双指数电压函数；

U、τ_1、τ_2 和 t_d ——拟合所需的参数。

8) 用记录曲线的基准水平对时间 t_d 内采样点(步骤 4))和从时间 t_d 到步骤 5)中最后采样点时刻的 $u_d(t)$,构建波形的基准曲线 $U_m(t)$;

下面步骤 a)至 g)仅适用于波尾截断的冲击波形:

a) 找出截断时刻;

b) 找出截波波形开始偏离全波参考冲击波形的点;

c) 选取步骤 b)中确定的点之前的数据作进一步分析;

d) 用交叉关系技术,或在波前找出 30%,50%和 80%电压的点的方法来求出全波参考冲击波形和截断冲击波形之间的时间差 t_L;

f) 找出截波幅值和全波幅值的比率 E。方法可以采用峰值相除或在两个波形上规定时间的时间间隔内计算得到的平均值相除;

g) 用该比率 E 在基准曲线幅值标上刻度。

9) 从偏置补偿记录曲线 $U_0(t)$中减去基准曲线 $U_m(t)$以获得剩余曲线 $R(t)=U_0(t)-U_m(t)$,如

10) 用等于试验电压函数 $k(f)$(式 B.2)的传递函数 $H(f)$创建滤波器;

11) 对剩余曲线 $R(t)$进行滤波,求得滤波后的剩余曲线 $R_f(t)$(见图 8);

14) 找出基准曲线 $U_m(t)$的最大值 U_b(如图 8);

15) 计算相对过冲幅值,$\beta'=100\times(U_e-U_b)/U_e\%$;

17) 给出试验电压值 U_t、波前时间 T_1、半峰值时间 T_2 和相对过冲幅值 β。

B.5 计算示例

以下给出实验室进行特高压试验时采集的有过冲的雷电冲击波形并计算相关参数例子。

B.5.1 示例一(正极性)

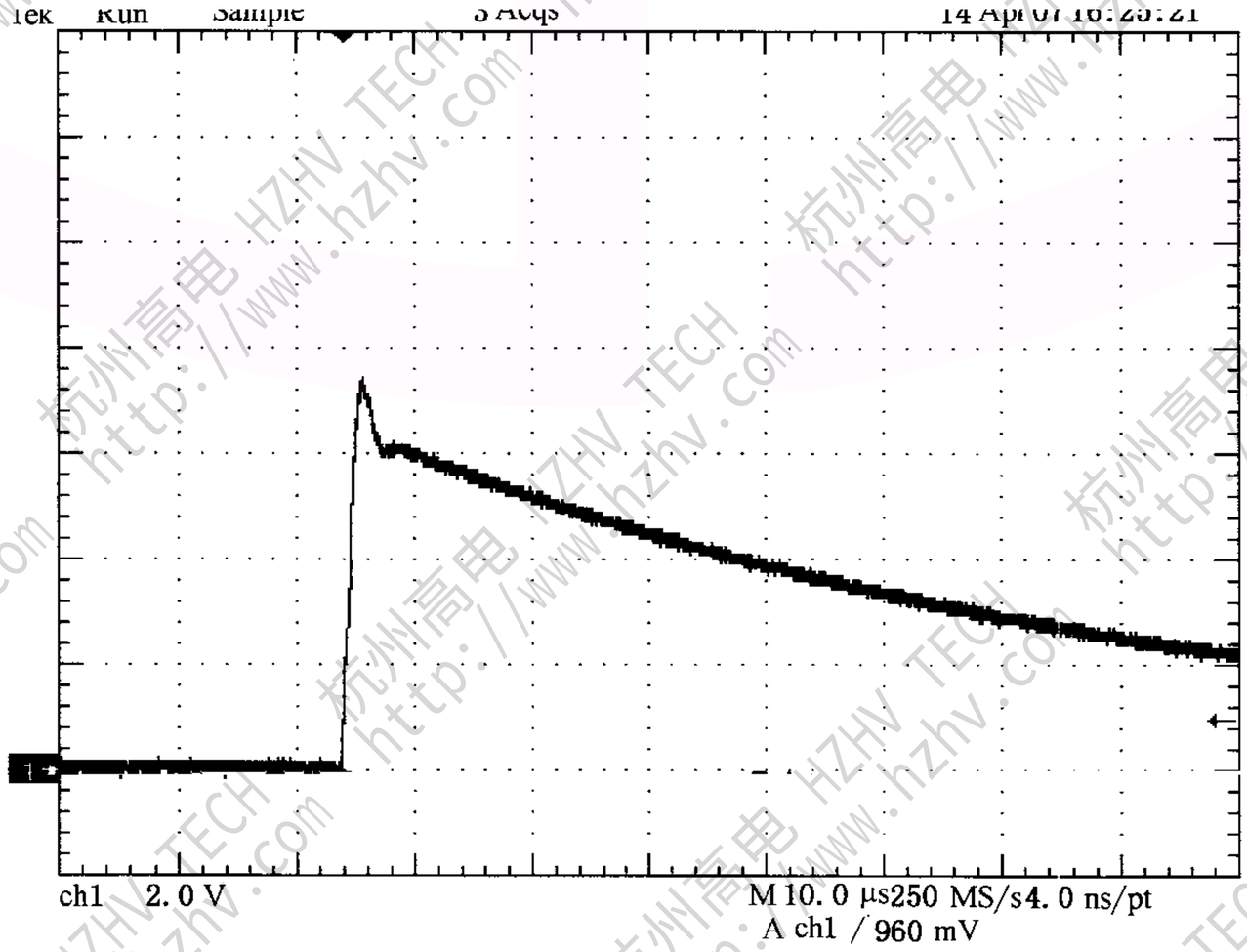


图 B.1 特高压产品雷电冲击电压波形(正极性)

B.5.1.1 手工计算

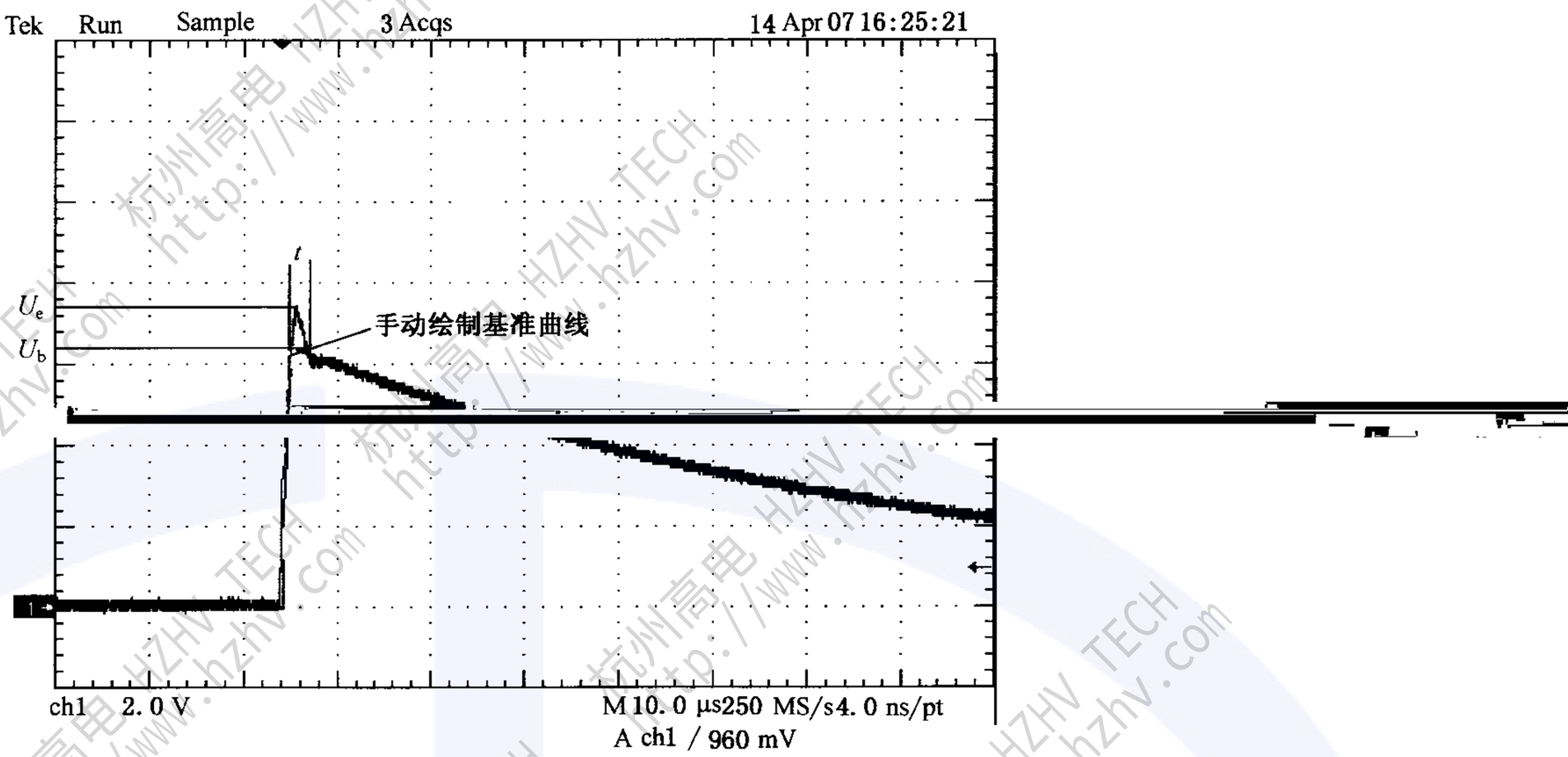


图 B.2 手动绘制基准曲线的雷电冲击电压波形

1) 根据记录曲线用手工绘制基准曲线；

2) 找出基准曲线 $U_m(t)$ 的峰值 U_b：

$$U_b = 2.0\ \text{V} \times 3.20 = 6.40\ \text{V}$$

3) 找出记录曲线 $U_m(t)$ 的峰值 U_e：

$$U_e = 2.0\ \text{V} \times 3.70 = 7.40\ \text{V}$$

4) 计算过冲持续时间 t，即 $U(t)$ 最大峰值的两侧的 $U(t)$ 曲线和 $U_m(t)$ 曲线的两个交点的时间间隔，并且计算过冲频率 $f_0 = 1/2t$；

$$t = 10.0\ \mu\text{s} \times 0.214 = 2.14\ \mu\text{s}$$

$$f_0 = 1/2t = \frac{1}{2 \times 2.14} = 0.234\ \text{MHz}$$

5) 使用方程 $k(f) = \frac{1}{\quad}$ 计算 $k(f)$：

6) $k(f) = \frac{\quad}{1+2.2f^2} = \frac{\quad}{1+2.2\times 0.234^2} = 0.89$；

7) 使用方程 $U_t = U_b + k(f) \times (U_e - U_b)$ 计算 U_t：

$U_t = U_b + k(f) \times (U_e - U_b) = 6.40 + 0.89 \times (7.40 - 6.40) = 6.40 + 0.89 = 7.29$ V；

8) 计算相对过冲幅值，$\beta' = 100 \times (U_e - U_b)/U_e\%$：

$$\beta' = 100 \times \frac{U_e - U_b}{\quad}\% = 100 \times \frac{7.40 - 6.40}{\quad}\% = 13.5\%$$

9) 以 U_t 为峰值电压，用坐标曲线确定时间参数，如图 B.3。

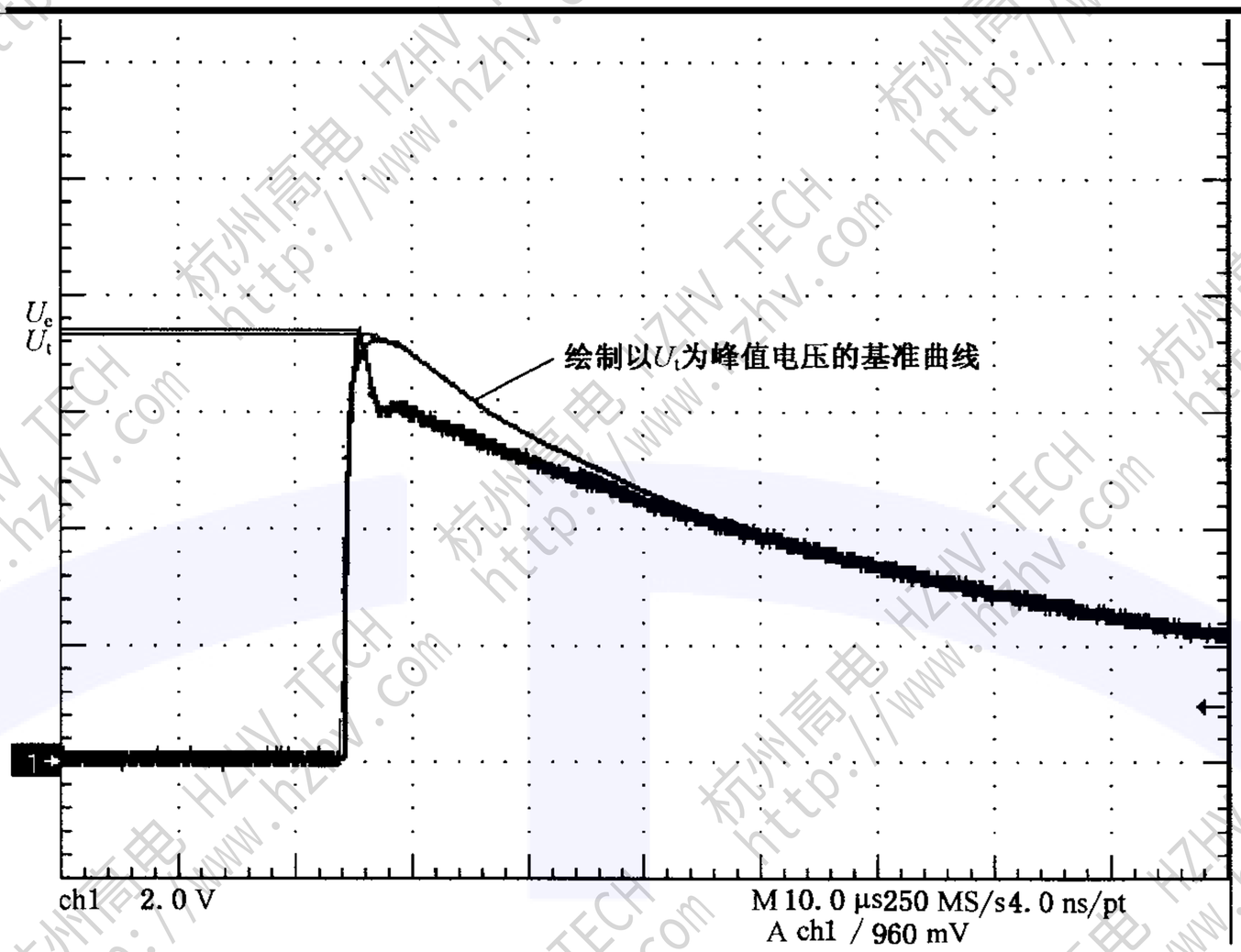


图 B.3 绘制以 U_t 为峰值电压的基准曲线

$T_1 = 10.0\ \mu s \times 0.804/0.6 = 1.34\ \mu s$

$T_2 = 10.0\ \mu s \times 4.24 = 42.4\ \mu s$

给出试验电压值 U_t、波前时间 T_1、半峰值时间 T_2 和相对过冲幅值 β'。

$U_t = 7.25$ V；$T_1 = 1.34\ \mu s$；$T_2 = 42.4\ \mu s$；$\beta' = 13.6\%$。

B.5.1.2 数字化计算结果

波形通过满足标准要求的测量软件进行处理和计算，如图 B.4。

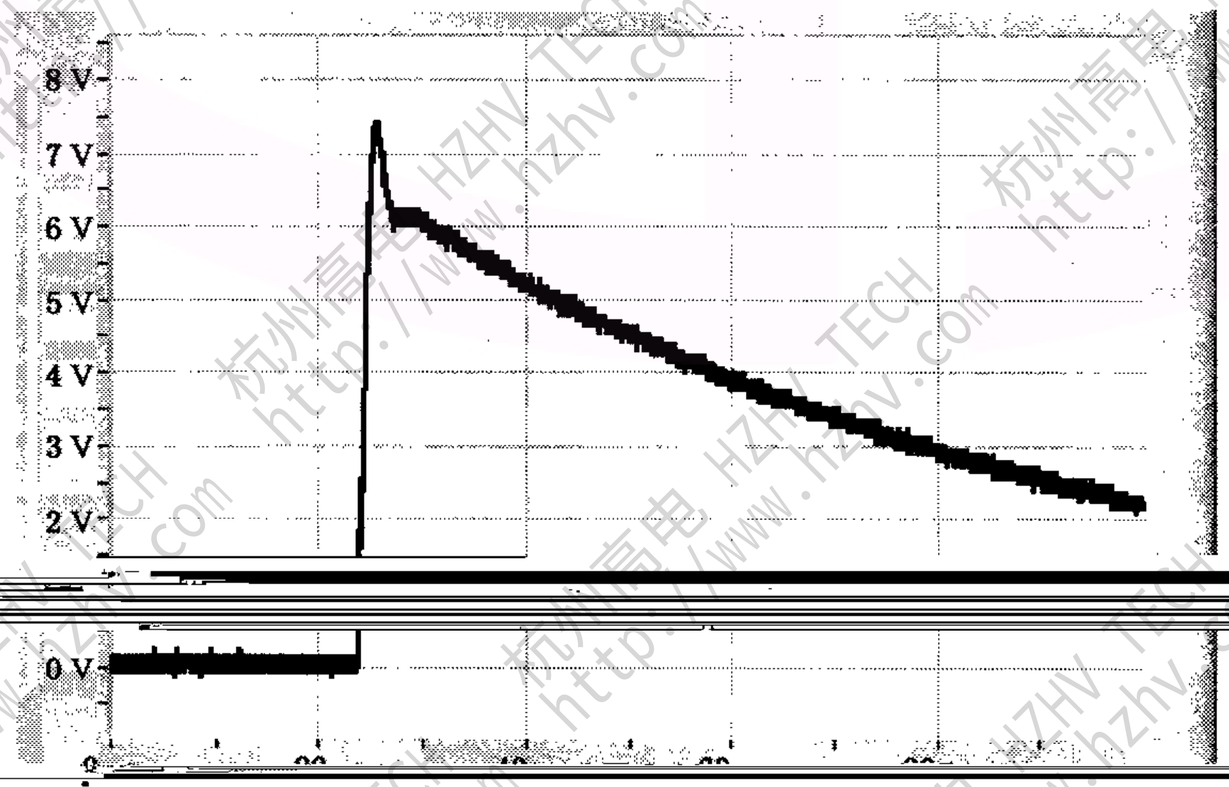


图 B.4 软件测量雷电冲击电压波形界面

$U_t = 7.15$ V；$T_1 = 1.38\ \mu s$；$T_2 = 41.7\ \mu s$；$\beta' = 13.7\%$

B.5.2 示例二(负极性)

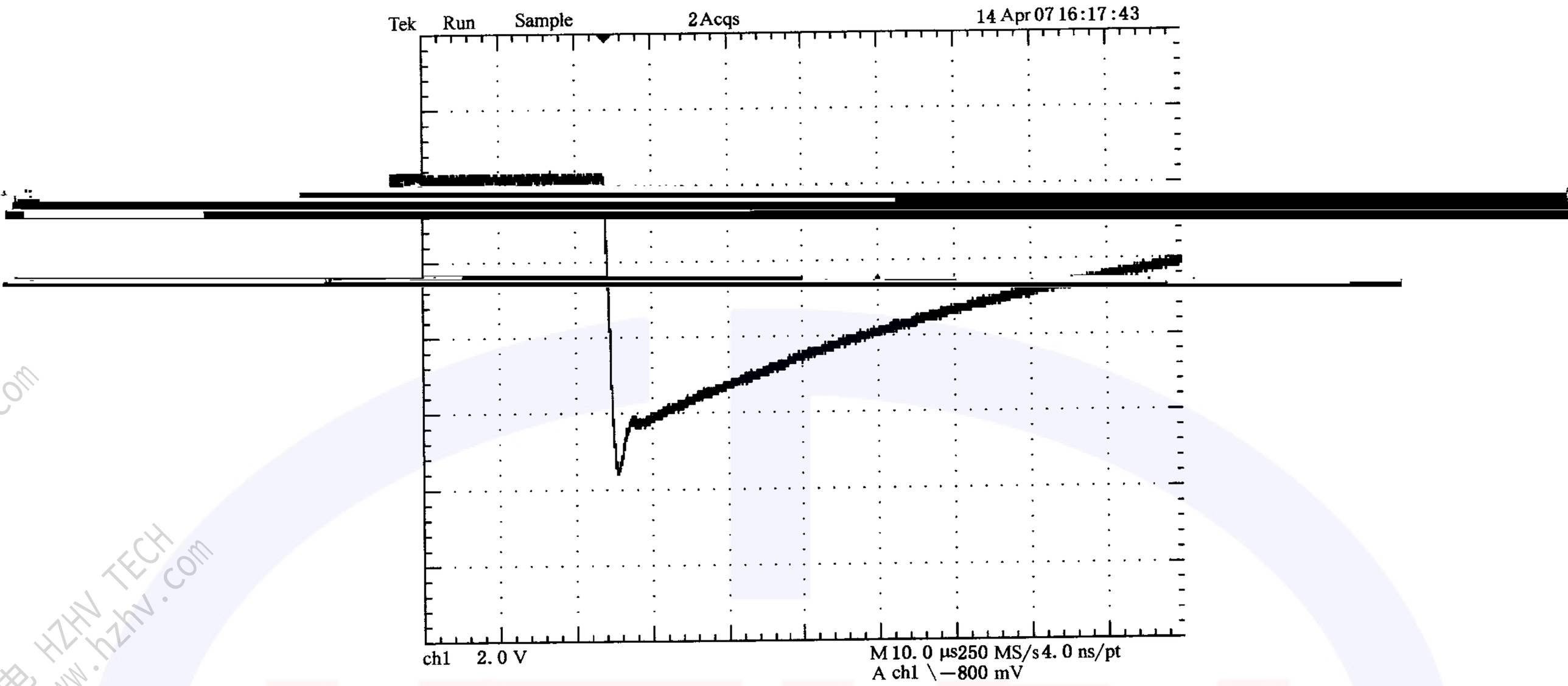
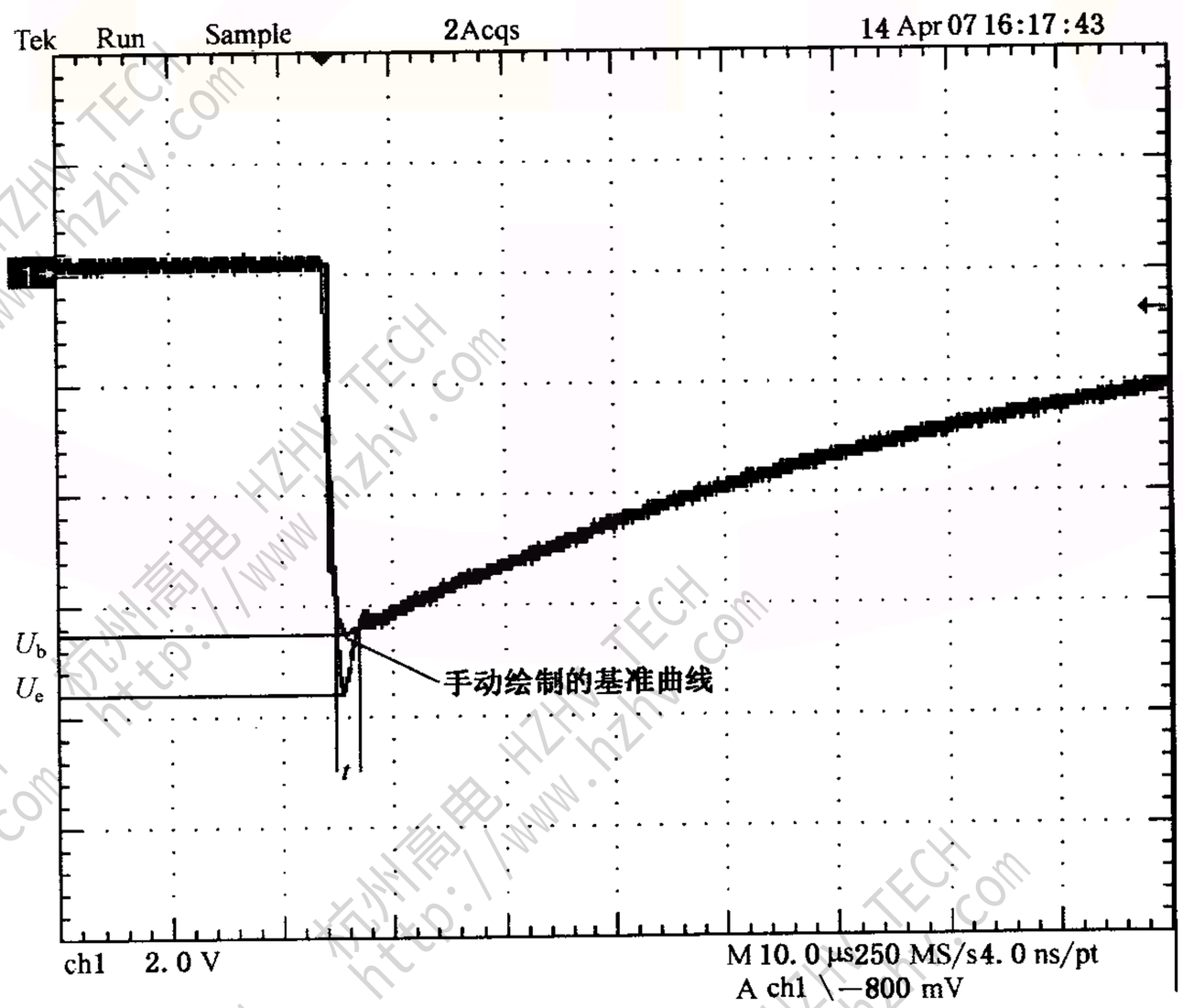


图 B.5 特高压产品雷电冲击电压波形(负极性)

B.5.2.1 手工计算



1) 根据记录曲线用手工绘制基准曲线;

2) 找出基准曲线 $U_m(t)$ 的峰值 U_b:

$$U_b = 2.0\ \text{V} \times 3.28 = 6.56\ \text{V};$$

3) 找出记录曲线 $U(t)$ 的峰值 U_e：

$$U_e=2.0\ \text{V}\times 3.80=7.60\ \text{V};$$

4) 计算过冲持续时间 t，即 $U(t)$ 最大峰值的两侧的 $U(t)$ 曲线和 $U_m(t)$ 曲线的两个交点的时间间

$$t=10.0\ \mu\text{s}\times 0.232=2.32\ \mu\text{s}\quad f_0=1/2t=\frac{1}{\quad}=0.216\ \text{MHz}$$

5) 使用方程 $k(f)=\dfrac{1}{1+2.2f^2}$ 计算 $k(f)$：

$$k(f)=\frac{1}{1+2.2f^2}=\frac{1}{1+2.2\times 0.216^2}=0.91;$$

6) 使用方程 $U_t=U_b+k(f)\times(U_e-U_b)$ 计算 U_t：

$$U_t=U_b+k(f)\times(U_e-U_b)=6.56+0.91\times(7.60-6.56)=6.56+0.95=7.51\ \text{V};$$

7) 计算相对过冲幅值，$\beta'=100\times(U_e-U_b)/U_e\%$：

$$\beta'=100\times\frac{U_e-U_b}{U_e}\%=100\times\frac{7.60-6.56}{7.60}\%=13.7\%;$$

8) 确定以 U_t 为峰值电压的基准曲线的时间参数，如图 B.7：

$T_1=10.0\ \mu\text{s}\times 0.818=0.6$

$T_2=10.0\ \mu\text{s}\times 1.20=42.0\ \mu\text{s}$

给出试验电压值 U_t、波前时间 T_1、半峰值时间 T_2 和相对过冲幅值 β'：

$U_t=7.51\ \text{V}$；$T_1=1.36\ \mu\text{s}$；$T_2=42.0\ \mu\text{s}$；$\beta'=13.7\%$。

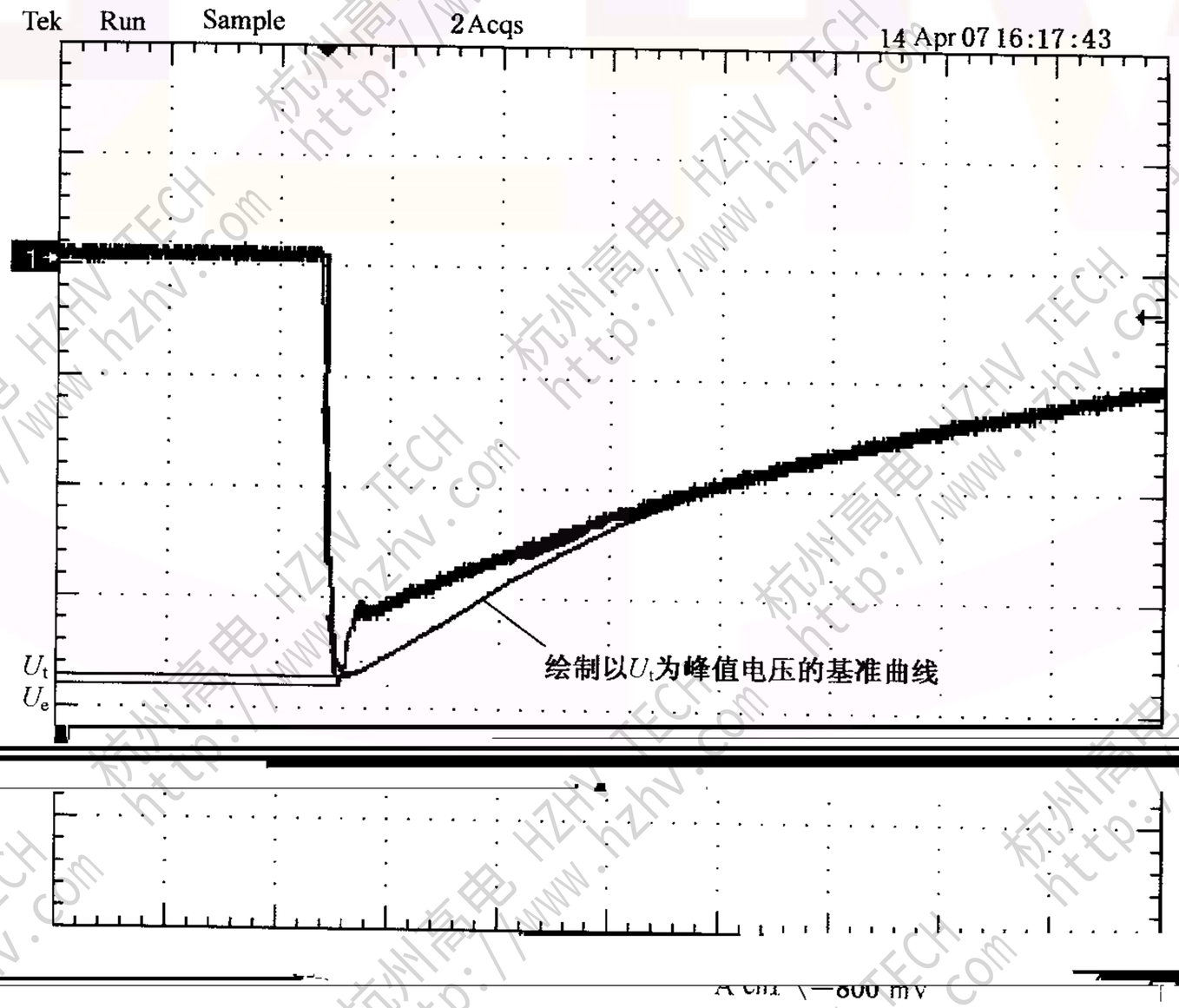


图 B.7 手动绘制基准曲线的雷电冲击电压波形

B.5.2.2 数字化计算结果

波形通过满足标准要求的测量软件进行处理和计算，如图 B.8。

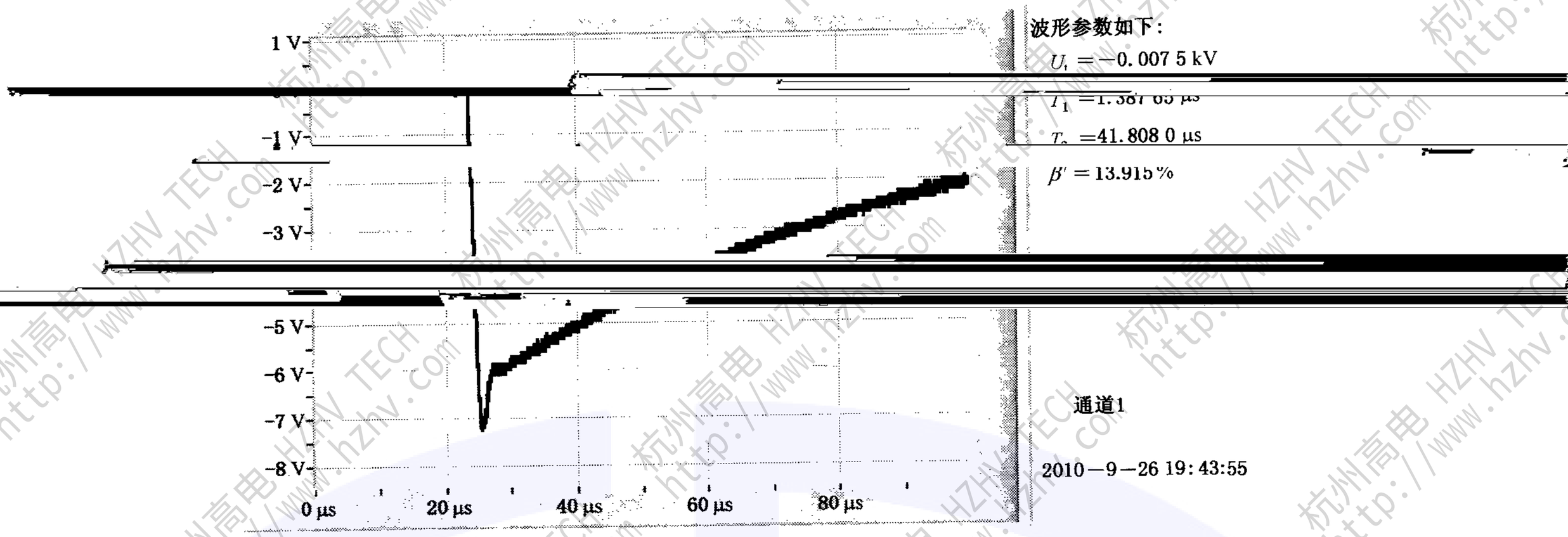


图 B.8 软件测量雷电冲击电压波形界面

附 录 C
（资料性附录）
求取试验电压函数的数字滤波器的举例

C.1 计算双指数函数拟合的导则

用于计算拟合曲线的函数有四个自由参数(U、τ_1、τ_2 和 t_d)：

$$u_d(t)=U[e^{-(t-t_d)/\tau_1}-e^{-(t-t_d)/\tau_2}] \quad \cdots\cdots(C.1)$$

莱温布-马夸特(Levenberg-Marquart)算法[7]及其演算曾经成功用于及录取线的拟合，下列软件包可以用于此类拟合：

软件包(试验版)	拟合函数
Matlab 及其优化工具(7.0.4 版)	Lqscurvefit
GNU Octave(3.2.0 版)	Leasqr
LabVIEW(LabVIEW 8 专业版)	Nonlinear Curve Fit
LabWindows/CVI(第 6 版)	NonLinearFit

设置 3 个参数初始假定值，可以缩短计算时间。对拟合函数，其初始假定值如下：

U——曲线的极限值；

τ_1——70 μs；

τ_2——0.4 μs；

t_d——曲线的实际原点或视在原点。

已经发现数据归一化(即对电压和时间刻度分距近似为 0～1)可以加速计算的收敛，然后，拟合后参数需还原到实际电压时间刻度。

牛顿-拉普森(Newton-Raphson)算法的结果与莱温布-马夸特算法的结果是一致的。

C.2 求取试验电压函数的数字滤波器的举例

为求取试验电压函数，必须建立其幅频响应等于试验电压函数的数字滤波器(附录 B 中式 B.2)。本附录中给出了有效和精确求取零相位 IIR 滤波器的例子，也可采用加通过频率采样方法得到的 FIR 滤波器，或用开窗任意响应滤波器设计算法得到的和商用软件中的其他滤波器。

以下描述基于正向计算的零相位 IIR(有限冲击响应)滤波器见文[8]。在该方法中，滤波器的衰减和相位漂移小到可忽略不计。

[illegible]。其中的递归滤波器的公式如下：

$$y(i)=b_0x(i)+b_1x(i-1)+a_1y(i-1) \quad \cdots\cdots(C.2)$$

$b_0=b_1=x/(1+x)$

$a_1=(1-x)/(1+x)$

$x=\tan[(\pi T_s/\sqrt{a})]$

式中：

$a=2.2\times10^{-12}$(K 因数滤波器的−3 dB 点)；

T_s ——记录信号时使用的采样间隔；

$x(i)$——滤波器的输入采样排列(电压)；

$y(i)$——滤波器的输出采样排列。

例如，对 10 ns 采样间隔，可得到下列数据：

$a_1=0.958\ 511\ 3$，$b_0=b_1=0.020\ 744\ 34$。

然后用所得的 IIR 正向滤波器根据下列差分方程进行两次滤波(一次正向，一次反向)：

$$y(i)=0.020\ 744\ 34[x(i)+x(i-1)]+0.958\ 511\ 3y(i-1) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(C.3)$$

为了避免 IIR 滤波器经常出现的数值问题，对滤波器系数必须有足够的有效位数(本例中有效位数为≥6)。

附 录 D
（资料性附录）
冲击电压函数评估冲击过冲背景介绍

D.1 GB/T 16927.1—1997 版标准情况

在20世纪80年代后期，大多数实验室用示波器记录冲击波形，此时需要花大量时间来读示波图，而且对各实验室的要求受到实际情况限制，很难规定示波器分辨率的限值。GB/T 16927.1—1997 将雷电冲击全波波形分为两类：即光滑的雷电冲击全波电压和带阻尼振荡的雷电冲击全波电压。实际上，所有冲击均带有振荡。因此，实验人员不得不对波形做出主观判断，什么情况下需将这类冲击看作带阻尼振荡的雷电冲击全波电压来处理。实际做法是，把带阻尼振荡的雷电冲击全波电压在振荡处画“平均曲线”来求取参数。因此，试验人员必须主观判断所画的光滑曲线是否正确。在该标准中还规定了“对单峰振荡峰值不能超过冲击电压峰值的5%”这一限值。

在GB/T 16927.1—1997中的7.1，给出了依据过冲的持续时间和频率来确定峰值的方法：“对于一些试验回路，冲击峰值附近会有振荡或过冲，如果振荡频率不低于0.5 MHz或过冲时间不超过1 μs，为

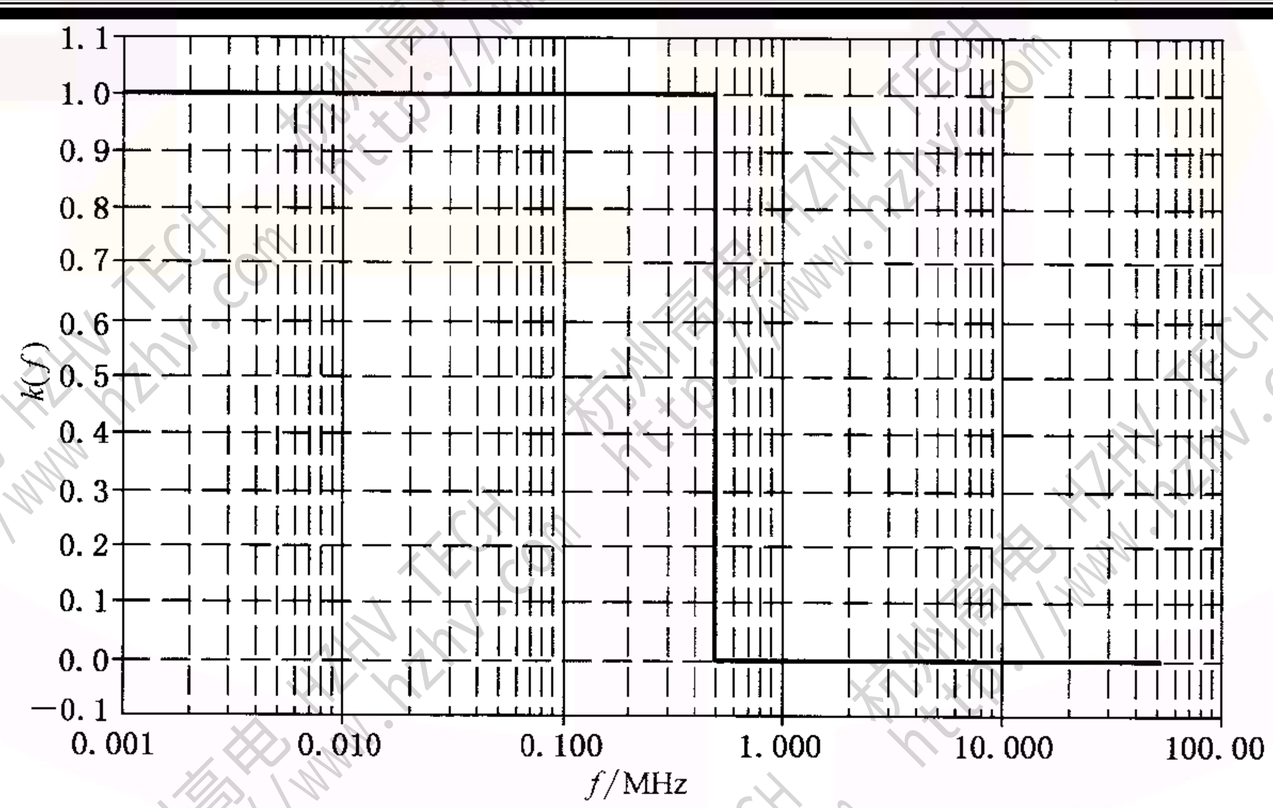


图 D.1 GB/T 16927.1—1997 中有效试验电压函数

这会导致测量一致性的3个问题：

2) 选择平均曲线随意性很大，对计算带阻尼振荡的雷电冲击全波的参数带来了很大的附加不确定度。与光滑冲击相比会导致参数估算的产生很大的不确定度。

3) 对冲击是光滑的，或仅带有很小叠加振荡时，也没有准确规定如何处理。

在过去的20年间，数字记录仪的使用越来越普遍，由软件来分析的数字记录仪的精确度远比GB/T 16927.1—1997规定的不精确的示波器的要高。许多用户开发了各种软件程序，这些软件经过了IEC 61083-2 TDG波形的测试，但其使用仍受到GB/T 16927.1—1997不精确定义的限制。由特定软件程序计算的参数值与IEC 61083-2中的参数值之间的差异给出了用于不确定度计算的附加分量。

D.2 解决办法的研究和软件开发情况

CIGRE WG D1.03(前身是 CIGRE WG33.03)收集了过去20年的这些问题,而且 IEC TC42 MT4 也一直在进行这方面的工作。

从1997年～1999年由欧洲共同体资助的在5个研究院开展了一项调查,研究叠加在双指数雷电波上的不同频率和幅值的振荡对于5类绝缘击穿强度的影响,数据见图D.2。结果给出了接近于双指数波叠加的光滑的雷电冲击全波电压下的击穿电压概率,还给出了叠加有不同频率和幅值的振荡的同一冲击波形时的击穿电压概率,并给出了光滑雷电冲击全波电压的等效电压值。叠加振荡频率 f 的影响因采用因数 $k(f)$ 而降低,即等效冲击的峰值等于施加光滑冲击的峰值加上振荡峰值的 $k(f)$ 倍。通过实验确定了 $k(f)$ 与频率的关系曲线,见图D.2。

对绝缘强度的关系是一种渐变而不是急剧的突变过程。

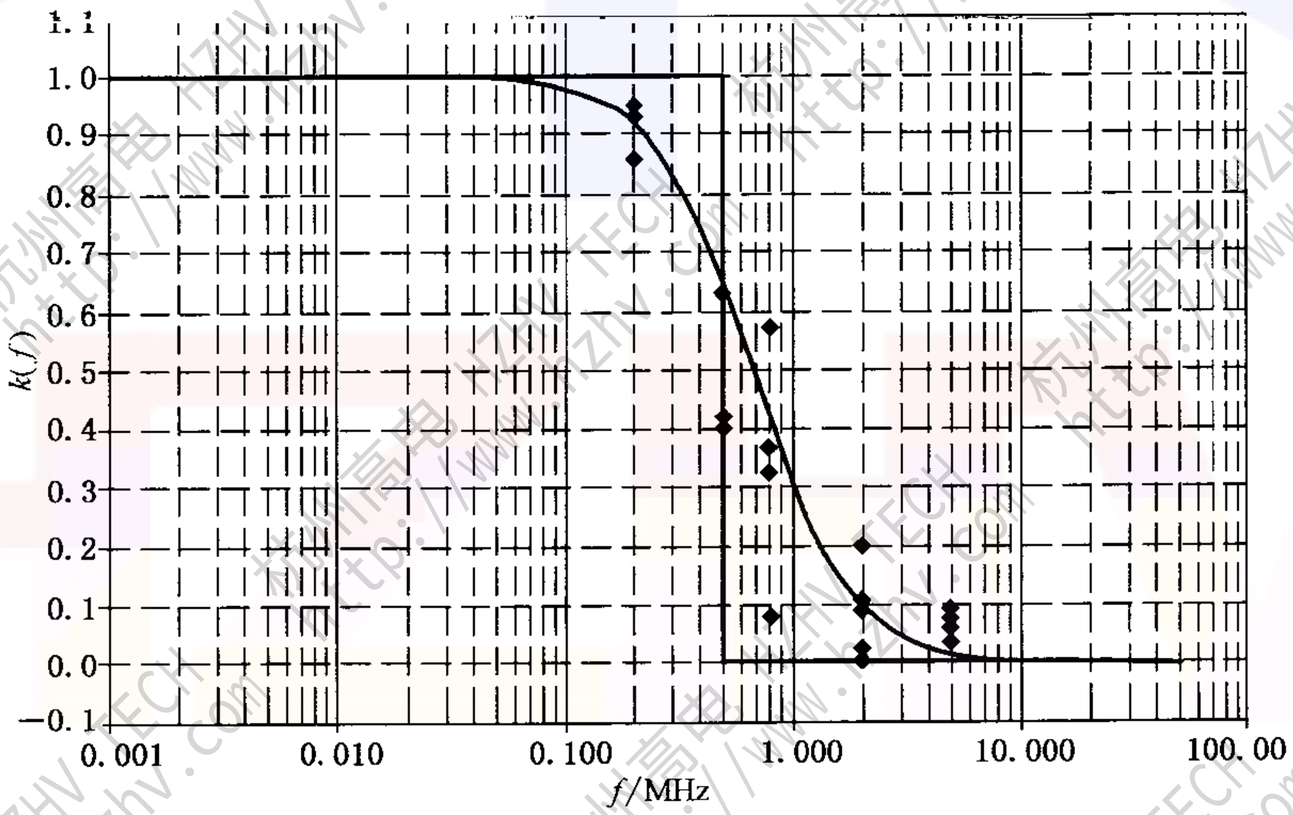


图 D.2 来自欧洲试验的数据点

研究人员引入因数 k,$k(f)$,来描述这个渐变过程。也就是现在标准中所称的试验电压函数:

$$U_t = U_b + k(f)(U_b - U_e) \quad \cdots\cdots (D.1)$$

式中:

U_t——待确定的试验电压值;

U_b——拟合基准曲线的最大值;

U_e——原始记录曲线的最大值。

试验电压值 U_t 为等效光滑雷电冲击全波电压的最大值。“试验电压曲线”用于计算时间参数,因为这种方法很精确、可重复,且实用。试验电压曲线是一数学人工产物,不是等效光滑雷电冲击的物理表示。允许时间参数有大的容差是基于几十年的经验,欧洲试验的结果也支持了这样的事实,即时间参数对确定击穿来讲并不十分重要。因此,对时间参数的新计算方法只要足够接近用老方法计算的值即可。

$k(f)$ 的最佳公式在CIGRE进行过很多讨论。由于在过冲频率可能的最大范围,计算得出的起始

$$k(f) = \frac{1}{1 + 2.2f^2} \quad \cdots\cdots (D.2)$$

由于原始数据来自叠加了振荡的双指数冲击波，标准中使用了称作“剩余波”的方法，即用人甲数

常关键，但为获得一致的时间参数的估算有必要规定双指数波拟合的方法。

因此，前面提到的 3 个问题得以解决：

——渐变过程代替了以前的突变过程，不需要再确定过冲频率。

——选取平均曲线的难题得以解决，因为引入了明确的基准曲线。

——所有雷电冲击电压均用一样的方法处理，不需要再确定冲击是否必须

另外，由于定义更加准确，只是基于数字记录处理，可用数字记录仪进行分析，从而可以获得很低的

还考虑了若出现其他形式的畸变时由新程序求得的结果的一致性。这些畸变包括：

——波前振荡；

——叠加在过冲上的振荡；

——波尾振荡；

——高频噪声。

采用试验电压曲线可得到如下结论：

——所有高频噪声可以去掉，冲击波前振荡可以去掉。这与以前版本的标准是一致的，但对其他数字滤波器，或曲线拟合程序不再作要求。在计算试验电压曲线时可自动实现这些干扰的去除。

结论是：冲击参数的结果比有这些干扰时的结果更加满意。

——可以保留波形上的所有低频信号，即保留冲击的完整波形，这个波形可能明显不同于基准曲线。该方法中的基准曲线仅是由双曲线，只用它来去除剩余曲线（振荡），但留了剩余曲线上

的所有低频分量，同时也就在试验电压曲线上保留了低频分量。原则上，这与以前版本标准是一致的，但本版中的程序给出了更满意的结果。

——一般说来，同一程序可用于所有雷电冲击（除波前截断波形外）的参数计算。

D.3 过冲限值

希望能明确给出等价于 GB/T 16927.1—1997 中所使用的过冲限值。“平均曲线”的随意性导致了

的不确定度（估计为 2%）。双指数函数叠加后处在光滑曲线的下方，平均来说，约为 3%。为了涵盖几乎所有（97.5%）且被 GB/T 16927.1—1997 中所允许的带阻尼振荡的冲击，因此，将相对过冲限值设定为 10%。这样就允许和以前一样处理同一冲击波形，但允许用更精确的方法来分析。

注：某些情况下（如电力变压器）有过冲时无法确定对绝缘的作用情况，把相对过冲幅值的容差增加到 10%（个体于

D.4 超出限值的冲击

欧洲的研究中，阻尼振荡的幅值可达 20%，因此可以说明对绝缘的影响。但对一般试验，不需要超过 10%。对特殊情况，由有关技术委员会来确定最佳方案。剩余曲线可用于判断畸变的程度，只可用于评定畸变的波形。这种波形要重新定义参数。

备电场分布的影响。

本标准给出了一些新参数的定义（如极限值，平均上升率），注意与 GB/T 16927.1—1997 的

附 录 E
（资料性附录）
确定大气修正因数时逆程序中的重复计算方法

E.1 概述

已经发现，如果 K_t 远小于 1（如 $K_t=0.95$ 或更小），而不采用重复计算（见 4.3.3.2），大气修正因数 K_t 的计算误差很大。在典型的高海拔试验地点，由于空气压力低，因此 K_t 数值小是很普遍的。

本附录中给出的例子表明，当大气压力明显低于标准水平时，必须采用 4.3.3.2 的重复计算程序。示例还表明，对在接近海平面的地方进行试验时，通常不必采用重复计算程序。

E.2 大气压力随海拔高度的变化

海拔高度 10 000 m 以内，空气压力几乎随海拔高度的增加而线性下降。在给定的海拔高度下的大气压力可由下式计算求得：

$$p=101.3\times e^{-(H/8\,150)}$$

式中：

p ——大气压力，kPa；

H ——海拔高度，m。

空气压力 p 与海拔高度 H 的关系见图 E.1。表 E.1 列出了三个典型海拔的空气压力。

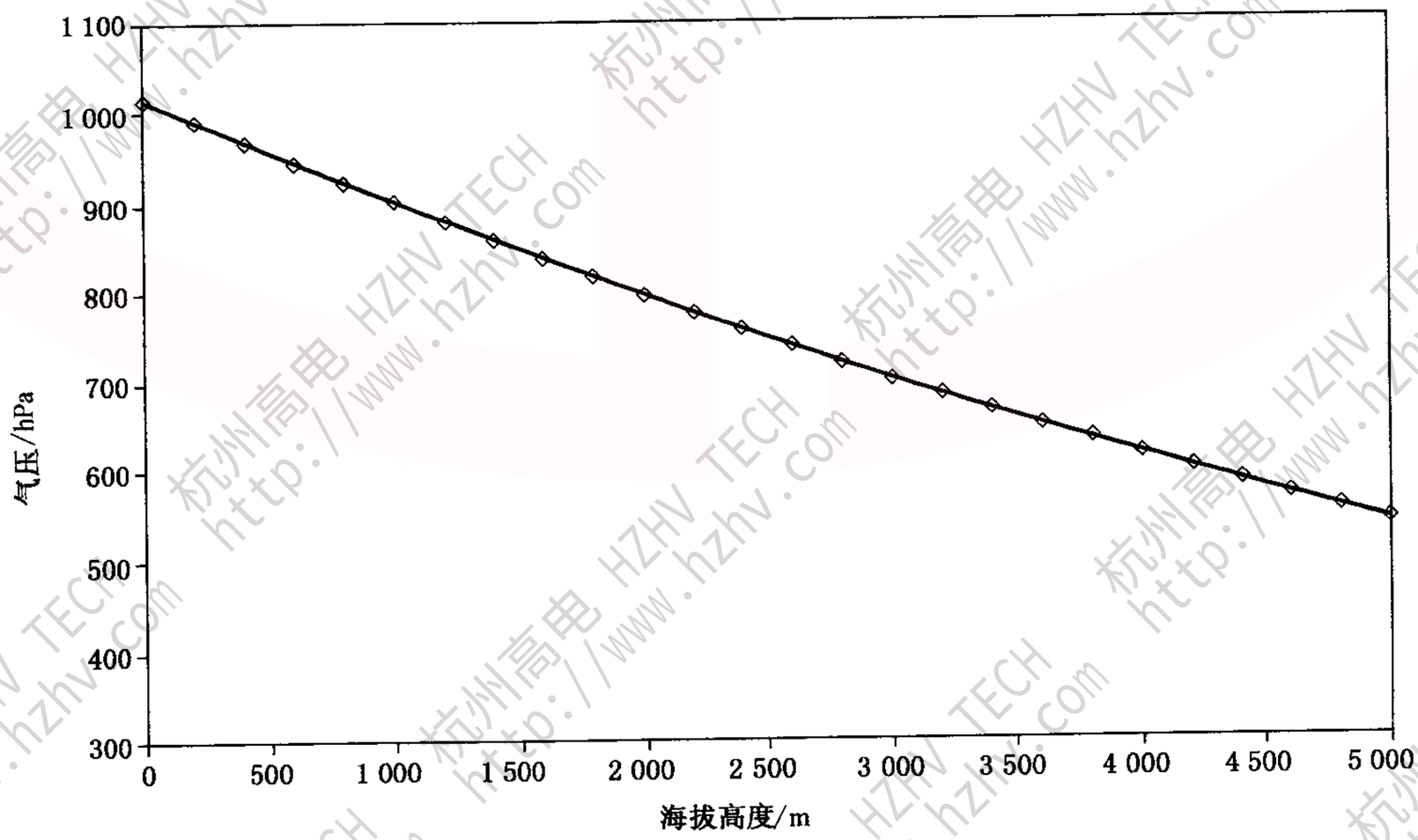


图 E.1 大气压力与海拔高度的关系

表 E.1　某些地点的海拔高度和空气压力

地　　点	A	B	C
海拔高度/m	0	1 540	2 240
空气压力/kPa	101.30	83.86	76.96

E.3　K_t 对 U_{50} 的敏感度

[redacted]

然而，如果在进行电压耐受试验时 K_t 是用来修正试验电压 U 的值是不知道的，所以 [redacted]

推荐用规定的试验电压 U_0 的 1.1 倍来估算 U_{50}。即：$U_{50}=1.1U_0$，在计算 K_t 时用估算的 U_{50}。

用估算的 U_{50} 可能导致 K_t 的计算误差，因此修正试验电压 $U=K_tU_0$。

K_t 误差取决于对 U_{50} 的变化 K_t 有多大的敏感度。数值计算表明，K_t 相对于 U_{50} 的敏感系数在空气压力接近海平面时是非常小的，典型值为：5% 的 U_{50} 的误差引起的 K_t 的误差小于 0.1%。在海拔高度约为 2 000 m 处的敏感系数随空气压力的下降而明显增大。在这一海拔高度，敏感系数的典型值为：5% 的 U_{50} 的误差引起的 K_t 的误差约为 1%。

表 E.2 列出了计算得到的 K_t 初始值（未采用重复计算程序）以及交流试验电压为 395 kV 耐受试验时的敏感系数。该交流有效值对应于 GB/T 11022 中规定的 252 kV 断路器的相对地试验电压

表 E.2　标准试验电压 395 kV 下，K_t 初始值以及对 U_{50} 的敏感系数

海拔高度/m	空气压力 kPa	空气温度/℃	相对湿度 RH %	放电长度/m	K_t 初始值	dK_t/dU_{50} 1/kV
[redacted]						
1 500	83.86	20	35	2.57	0.930 8	-2.7×10^{-4}
2 240	76.96	15	35	2.57	0.884 9	-4.3×10^{-4}

E.4　用重复计算程序进行计算

在重复计算程序中，一直要重复计算 K_t 直到其收敛于一恒定值为止。其剩余误差限由试验电压的总不确定度预计值确定。

用参数 U_{50} 计算 K_t（4.3.2）。以运行在海拔 2 240 m（接近西宁地区海拔）的 252 kV 断路器为例

第一个 K_t 为 $K_{t,0}$；和第一个试验电压值为 $U_{t,0}$ 是由 50% 破坏性放电电压 U_{50} 的初始估计值计算得到

规定的试验电压的峰值为：

$$U_{0p}=\sqrt{2}U_0=558.61\ \text{kV}$$

则：

$U_{50,0}=1.1\,U_{0p}=614.48$ kV

$g=U_{50,0}/(500\ L\delta k)=0.660\ 0$

$k_1=\delta^m=0.906\ 9$

$k_2=k^w=0.975\ 7$

$k_{t.0}=k_1\times k_2=0.884\ 9$

$U_{t.0}=k_{t.0}\times U_{0p}=194.30$ kV

第 i 步中 $k_{t.i}$ 和 $U_{t.i}$ 的计算中用的 U_{50} 是用第 $i-1$ 步中的 $k_{t.i-1}$ 值求得的 K_t 来计算的，即：

$$U_{50.i}=1.1\ U_{t.i-1}=1.1\ k_{t.i-1}\times U_{0p}$$

下一个重复试验电压值 $U_{t.i}$ 的计算式为：

$$U_{t.i}=k_{t.i}\times U_{0p}$$

因此，重复上述步骤，可以得到：

$U_{50.1}=1.1\ k_{t.0}\times U_{0p}=534.73$ kV

$g=U_{50.1}/(500\ L\delta k)=0.584\ 0$

$k_1=\delta^m=0.930\ 3$

$k_2=k^w=0.982\ 0$

$k_{t.1}=k_1\times k_2=0.913\ 6$

$U_{t.1}=k_{t.1}\times U_{0p}=510.36$ kV

$U_{50.2}=1.1\ k_{t.1}\times U_{0p}=561.40$ kV

$g=U_{50.2}/(500\ L\delta k)=0.603\ 0$

$k_1=\delta^m=0.924\ 7$

$k_2=k^w=0.980\ 5$

$k_{t.2}=k_1\times k_2=0.906\ 7$

$U_{t.2}=k_{t.2}\times U_{0p}=506.52$ kV

$U_{50.3}=1.1\ k_{t.2}\times U_{0p}=557.17$ kV

$g=U_{50.3}/(500\ L\delta k)=0.598\ 5$

$k_1=\delta^m=0.926\ 1$

$k_2=k^w=0.980\ 9$

$k_{t.3}=k_1\times k_2=0.908\ 4$

$U_{t.3}=k_{t.3}\times U_{0p}=507.45$ kV

$U_{50.4}=1.1\ k_{t.3}\times U_{0p}=558.19$ kV

$g=U_{50.4}/(500\ L\delta k)=0.599\ 6$

$k_1=\delta^m=0.925\ 8$

$k_2=k^w=0.980\ 8$

$k_{t.4}=k_1\times k_2=0.908\ 0$

$U_{t.4}=k_{t.4}\times U_{0p}=507.22$ kV

上述最后两步中试验电压峰值之差为：

$$\Delta U=U_{t.4}-U_{t.3}=-0.23\ \text{kV}$$

该值已经小于最后一步重复计算得到的试验电压峰值的 0.1%。将 0.1%作为收敛限值是比较合适的，而且采用自动计算的话很容易达到。

第一个 k_t 估计值的误差 Δk_t(%)和第一个试验电压峰值的误差 ΔU_t(%)可分别为：

$$\Delta k_t=100\times(0.884\ 9-0.908\ 0)/0.884\ 9=-2.61\%$$

$$\Delta U_t=100\times(494.30-507.22)/494.30=-2.61\%$$

最终施加到试品上的交流试验电压(有效值)可由最终收敛的交流试验电压峰值来计算确定。对本例,其值为:

$$507.22\ \text{kV}/\sqrt{2}=358.66\ \text{kV}$$

注:这个试验电压是指在海拔 2 240 m 处施加的电压,而设备则是安装在标准参考大气条件处(接近海平面),不是指安装在海拔 2 240 m 处的设备,在标准参考大气条件下所要施加的试验电压。

表 E.3 列出了用重复计算程序对表 E.2 中具有相同相对湿度和放电长度的其他海拔高度计算得到的 K_t 的初始值和收敛值。最后一列给出了与没有进行重复计算比较时的误差。计算结果还表明湿度对误差的影响通常可以忽略。

表 E.3 395 kV 标准相对地交流试验电压下 K_t 的初始值和收敛值

海拔高度 m	空气压力/kPa	空气温度 ℃	K_t 初始值	K_t 收敛值	ΔK_t 或 ΔU_t (%)
0	101.30	25.4	0.990 4	0.990 7	−0.03
0	101.30	15	[illegible]	[illegible]	[illegible]
1 540	83.86	15	0.927 2	0.937 7	−1.14
2 240	76.96	20	0.890 7	0.912 0	−2.39
2 240	76.96	15	0.884 9	0.908 1	−2.62

E.5 小结

[illegible]的误差很明显,引起 K_t 的误差很明显,引起 K_t 的误差主要由[illegible]的不正确的 U_{50} 初始输入值引起 K_t 的误差很明显,引起 K_t 的误差主要由[illegible]

1 540 m 处不采用重复计算程序,修正试验电压时的误差可高达 1.1%;对海拔约为 2 240 m 时,误差增加到了 2.6%。在零海拔处,这种误差通常可以忽略。

参 考 文 献

[1] FESER, K. *Dimensioning of electrodes in the UHV range-Illustrated with the example of toroid electrodes for voltage dividers*. ETZ-A 96 (1975), 4 pp, 206-210.

[3] CARRARA, G., and HAUSCHILD, W. *Statistical evaluation of dielectric test results*. Electra No. 133 (1990), pp. 109-131.

[4] YAKOV, S. *Statistical analysis of dielectric test results*. CIGRE Brochure No. 66 (1991)

[5] HAUSCHILD, W., and MOSCH, W. *Statistical Techniques for HV Engineering*. IEE Power Series No. 13, Peter Pereginus Ltd., London, 1992.

[6] VARDEMAN, S. B. *Statistics for Engineering Problem Solving*. IEEE Press/PWS Publishing Company, Boston, 1994.

[7] http://www.siam.org/siamnews/mtc/mtc1093.htm.

IEC 60060-1 and 2 IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 23 No. 1 pages 3-12 January 2008

[9] GARNACHO, F., SIMON, P., GOCKENBACH, E., HACKEMACK, K., BERLIJN, S.,

No. 204 October 2002

High Voltage Engineering, Beijing, 2005, paper B-32, p 92.

[12] IEC 60060-2, High-voltage test techniques, Part 2: Measuring systems, Annex A.

[13] IEC 62271-1 Ed. 1.0: High-voltage switchgear and controlgear—Part 1: Common specifications.

中华人民共和国
国家标准
高电压试验技术
第1部分：一般定义及试验要求
GB/T 16927.1—2011
*
中国标准出版社出版发行
[illegible]
网址 www.spc.net.cn
总编室：(010)64275323 发行中心：(010)51780235
读者服务部：(010)68523946
中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
开本 880×1230 1/16 印张 4.25 字数 122 千字
2012年5月第一版 2012年7月第四次印刷
*
书号：155066·1-45076
如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话：(010)68510107