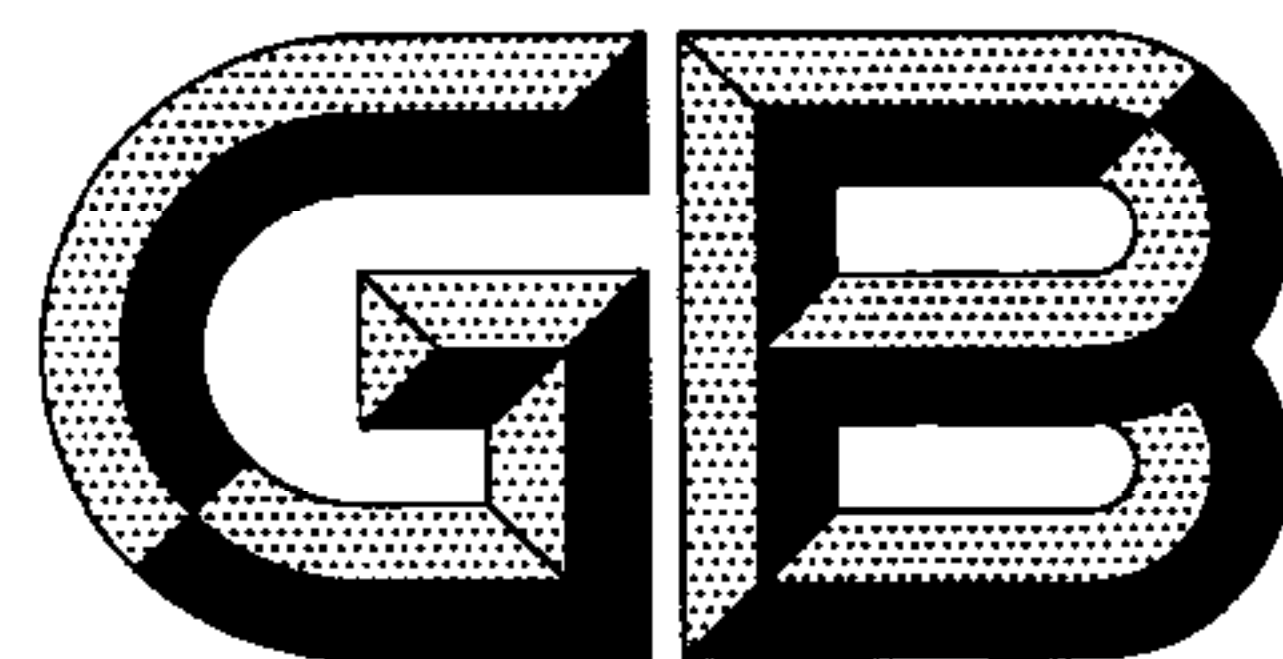




中华人民共和国国家标准

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

High-voltage test techniques—Part 1: General definitions and test requirements

(IEC 60060-1:2010, MOD)

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 45

B.4 对波尾截断雷电冲击参数的计算程序 45

B.5 计算示例 46

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 52

C.1 计算双指数函数拟合的导则 52

C.2 求取试验电压函数的数字滤波器的举例 52

附录 D (资料性附录) 冲击电压函数评估冲击过冲背景介绍 54

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。

本部分修改采用 IEC 60060-1:2010《高电压试验技术 第 1 部分：一般定义及试验要求》。

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 D“冲击电压函数评估冲击过冲背景介绍”；
- 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：

- 按 GB/T 1.1—2009 的规定，对标准的语言表述和格式作了修改；
- 删除了国际标准的前言，增加了本标准的前言；
- 计算特性参数 g 时，对“最小放电路径”增加说明“ L 可参考 GB 311.1 的附录 A”(见 4.3.4.3)；
- 湿试验明确给出 800 kV 及 1100 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：1100 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线(|)进行了标示。

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

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。

本部分负责起草单位：西安高压电器研究院有限责任公司、国网电力科学研究院。

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)

GB/T 16927.1—2011

电气有限公司、南方电网技术研究中心、江西省电力科学研究院、西安交通大学电气学院、沈阳变压器研究所、湖北省电力试验研究院、深圳电气科学研究所。

本部分主要起草人：王建生、杨迎建、崔东、雷民、张小勇、万启发、李彦明、危鹏、李前。

本部分参加起草人：王亭、廖学理、周琼芳、阎关星、曾其武、李众祥、陈玉峰、蒋正龙、刘成学、吕金壮、万军彪、李彦明、李世成、阮羚、邓永辉、肖敏英。

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。

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)

GB/T 22707 直流系统用高压绝缘子的人工污秽试验(IEC/TR 61245:1993,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值 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

发生在中间电极之间或导体之间的放电，此时试验电压并不跌落至零。除非有关技术委员会另有规定，否则，这种现象不能视作破坏性放电。

有些非破坏性放电称为“局部放电”，参见 GB/T 7354。

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

试验电压的实际特性 actual characteristics of a test voltage

试验电压的实际特性是指试验期间试品端子之间出现的特性。

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

耐受试验中，表征试品绝缘性能的规定的预期电压值。

除非另有规定，耐受电压是指标准大气条件下的值（见 4.3.1）。仅适用于外绝缘。

3.2.5

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。本标准中给出的试验程序,一般是基于统计考虑而确定的。试验结果的统计评价信息见附录 A。

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 可用百分数或适当的小数来表示。

3.4.2

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。如果破坏性放电概率为 p ,则耐受概率 q 为 $(1-p)$ 。

3.4.3

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: U_{10} 称为统计耐受电压;而 U_{90} 则称为统计确保破坏性放电电压。

3.4.4

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

U_{50}

50%破坏性放电电压是指在试品上产生破坏性放电的概率为 50%的预期电压值。

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 voltage of a test object**
 s

指破坏性放电电压分散性的大小。由下式计算：

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (U_i - U_a)^2}$$

式中：

U_i ——第 i 次破坏性放电电压的测量值；

U_a ——破坏性放电电压的算术平均值(大多数情况下 $U_a = U_{50}$)；

n ——测量次数(放电次数)。

注 1：标准偏差 s 也可从 50% 和 16% 破坏性放电电压的差值来估算(或从 84% 和 50% 破坏性放电电压的差值来估算)。通常表示为标么值 s^* 或 50% 破坏性放电电压的百分数。

注 2：对于连续破坏性放电试验，标准偏差 s 可由上述公式求得；对多级法和升降法试验，它是分位差。两种算法是一致的，因为在 $p=16\%$ 和 $p=84\%$ 之间，所有分布函数几乎是一致的。

3.5 试品绝缘的分类

设备和高压结构的绝缘系统可分为自恢复绝缘和非自恢复绝缘，并可能包含外绝缘和/或内绝缘。

3.5.1

外绝缘 external insulation

空气绝缘及设备固体绝缘的外露表面，它承受电压作用并直接受大气和其他外部条件的影响。

3.5.2

内绝缘 internal insulation

不受外部条件如污秽、湿度和虫害等影响的设备内部绝缘的固体、液体或气体部件。

3.5.3

自恢复绝缘 self-restoring insulation

施加试验电压引起破坏性放电后，能完全恢复其绝缘特性的绝缘。

3.5.4

非自恢复绝缘 non-self-restoring insulation

施加试验电压引起破坏性放电后，丧失或不能完全恢复其绝缘特性的绝缘。

注：在高压设备中，自恢复绝缘和非自恢复绝缘总是组合在一起的，有些部件在电压的连续或反复作用下绝缘可能出现劣化。有关技术委员会在规定所采用的试验程序时必须考虑这种情况下的绝缘特性。

4 一般要求

4.1 对试验程序的一般要求

特定试品的试验程序，例如试验电压、使用的极性、用两种极性试验时极性的顺序、加压次数和加压时间间隔应在有关设备标准中规定。规定时需考虑以下因素：

- 试验结果的准确度；
- 被观测现象的随机性；
- 被测特性与极性的关系；
- 重复施加电压引起绝缘逐渐劣化的可能性。

试品应装上对绝缘有影响的所有部件，并按有关设备标准规定的方法进行处理。试验时，试品应尽可能地适应试验区域环境大气条件(试品表面温度与周围环境温度)，应当记录到达平衡的时间。

4.2 干试验时试品的布置

试品的破坏性放电特性可能受到其总体布置的影响：

- 邻近效应(与其他带电或接地装置间的距离)；
- 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。

- 注 1：试品与外部构件的净距离不小于试品最短放电距离的 1.5 倍时,这些邻近效应可以忽略。在湿试验和污秽试验或试品上电压分布以及带电电极和周围电场显然不受外部影响时,在保证对外部构件不发生放电的条件下,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离时,则邻近物体的影响可以忽略。图 1 给出了最高试验电压同实际允许距离的关系。更短的净距离可能在个别的情况下适用。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。

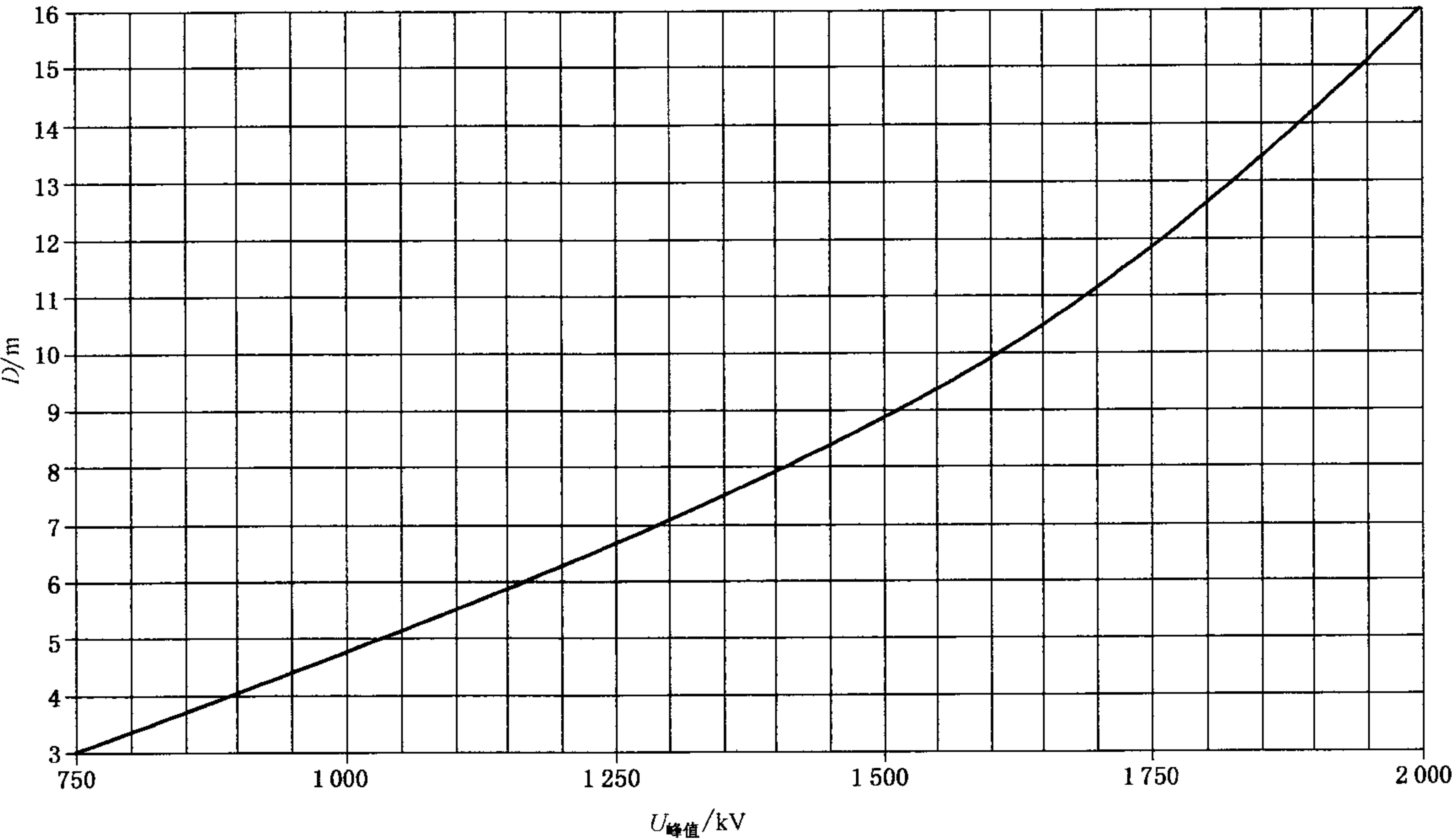


图 1 交流或正极性操作冲击试验时最高试验电压与试品高压电极对接地体或外部带电体间最小距离的关系

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 $t_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；
 - 绝对压力 $p_0 = 101.3\text{ kPa}$ ；
 - 绝对湿度 $h_0 = 11\text{ g/m}^3$ 。

注 1: 101.3 kPa 的压力相当于 0 °C 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:

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

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

外绝缘破坏性放电电压与试验时的大气条件有关。通常, 给定空气放电路径的破坏性放电电压随着空气密度或湿度的增加而升高; 但当相对湿度大于 80% 时, 破坏性放电会变得不规则, 特别是当破坏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

通过修正因数, 可以将试验条件下(温度 t 、压力 p 、湿度 h)测得的破坏性放电电压换算到标准参考大气条件下(温度 t_0 、压力 p_0 、湿度 h_0)的电压值。

将试验条件下测得的破坏性放电电压值 U 除以 K_t 可以得到标准大气条件下的电压值 U_0 :

$$U_0=U/K_t$$

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。

注 3: 若 K_t 接近 1, 则不必进行重复计算。

4.3.4 修正因数分量

4.3.4.1 空气密度修正因数

k_1

空气密度修正因数 k_1 取决于相对空气密度 δ , 一般可表达为:

$$k_1=\delta^m$$

式中:

m ——指数, 在 4.3.4.3 中给出。

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:

$$k_2 = k^w$$

指数 w 在 4.3.4.3 中给出。 k 取决于试验电压类型并由绝对湿度 h 与相对空气密度 δ 的比率 h/δ 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 $1 < h/\delta < 15\text{ g/m}^3$;

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

冲击: $k = 1 + 0.010(h/\delta - 11)$, 适用于 $1 < h/\delta < 20\text{ g/m}^3$ 。

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。

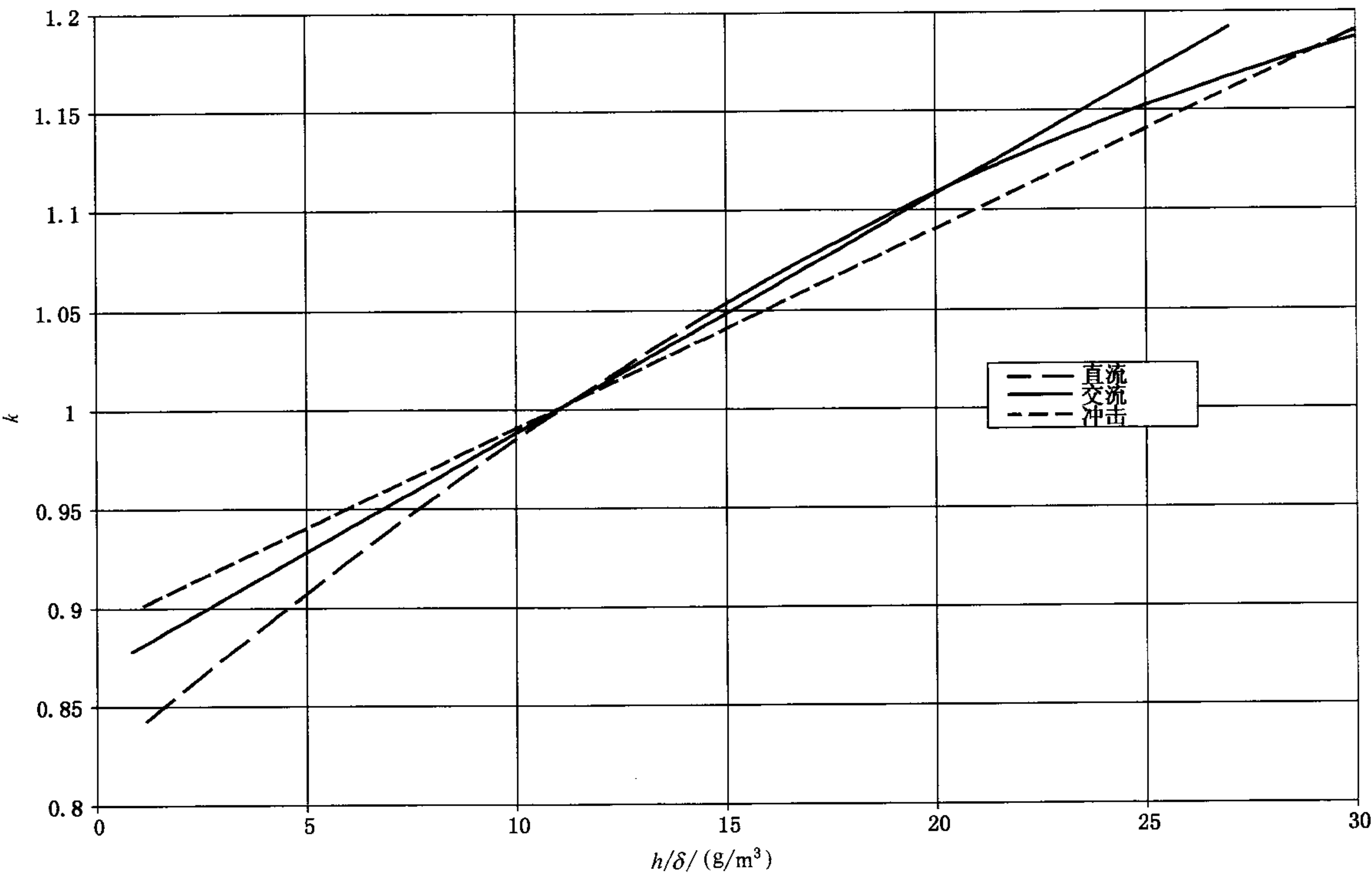


图 2 k 与 h/δ 的关系曲线(h 为绝对湿度, δ 为相对空气密度)

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

注: 对于特殊的电气设备,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;
 k ——4.3.4.2 定义的无量纲参数。

耐受试验时,无法得到 50%破坏性放电电压的估算值,此时 U_{50} 可假定为试验电压值 U_0 的 1.1 倍。
 L 参见 GB 311.1 附录 A。

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
$0.2\sim1.0$	$g(g-0.2)/0.8$	$g(g-0.2)/0.8$
$1.0\sim1.2$	1.0	1.0
$1.2\sim2.0$	1.0	$(2.2-g)(2-g)/0.8$
>2.0	1.0	0

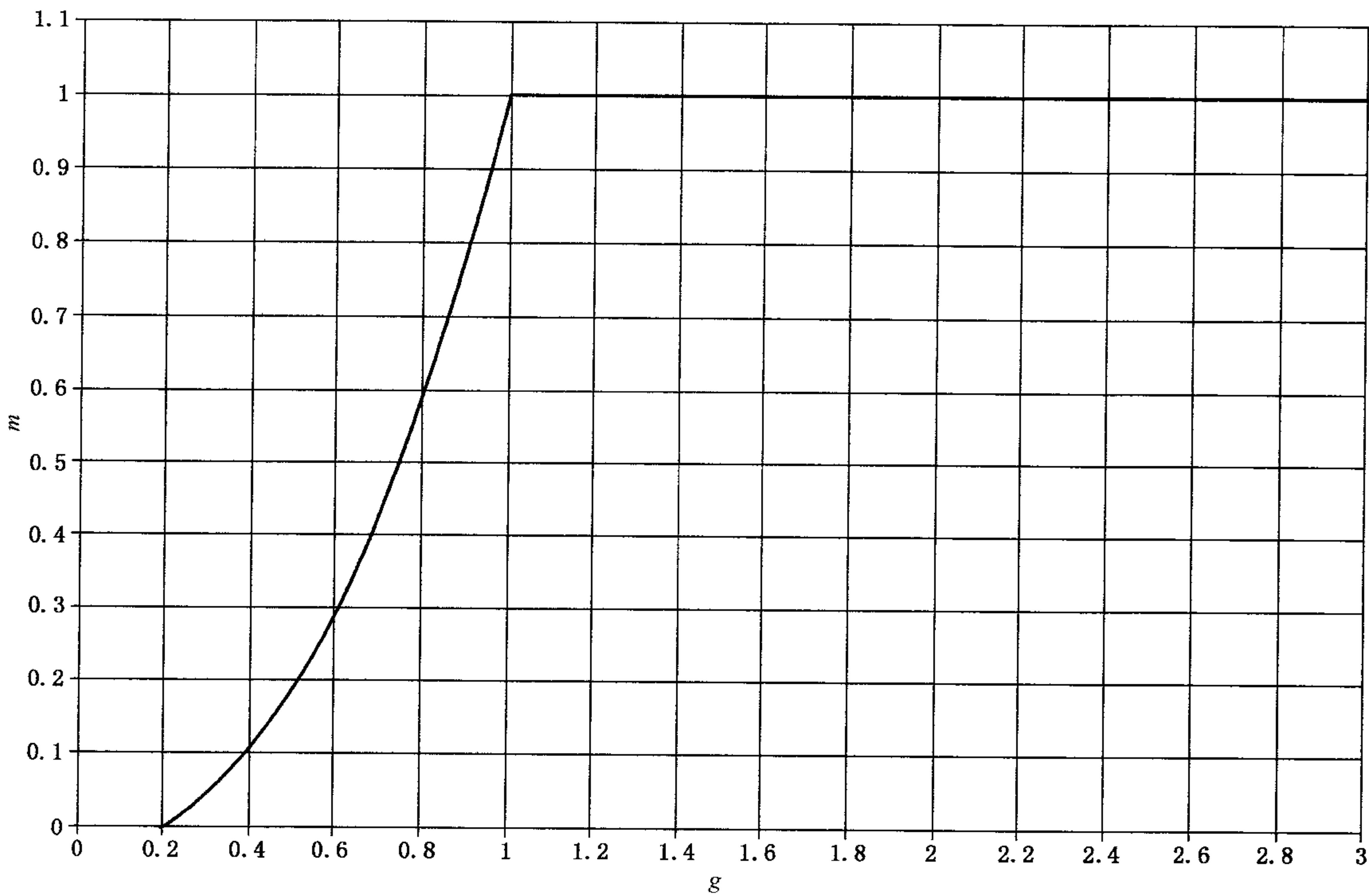


图 3 空气密度修正指数 m 值和参数 g 的关系

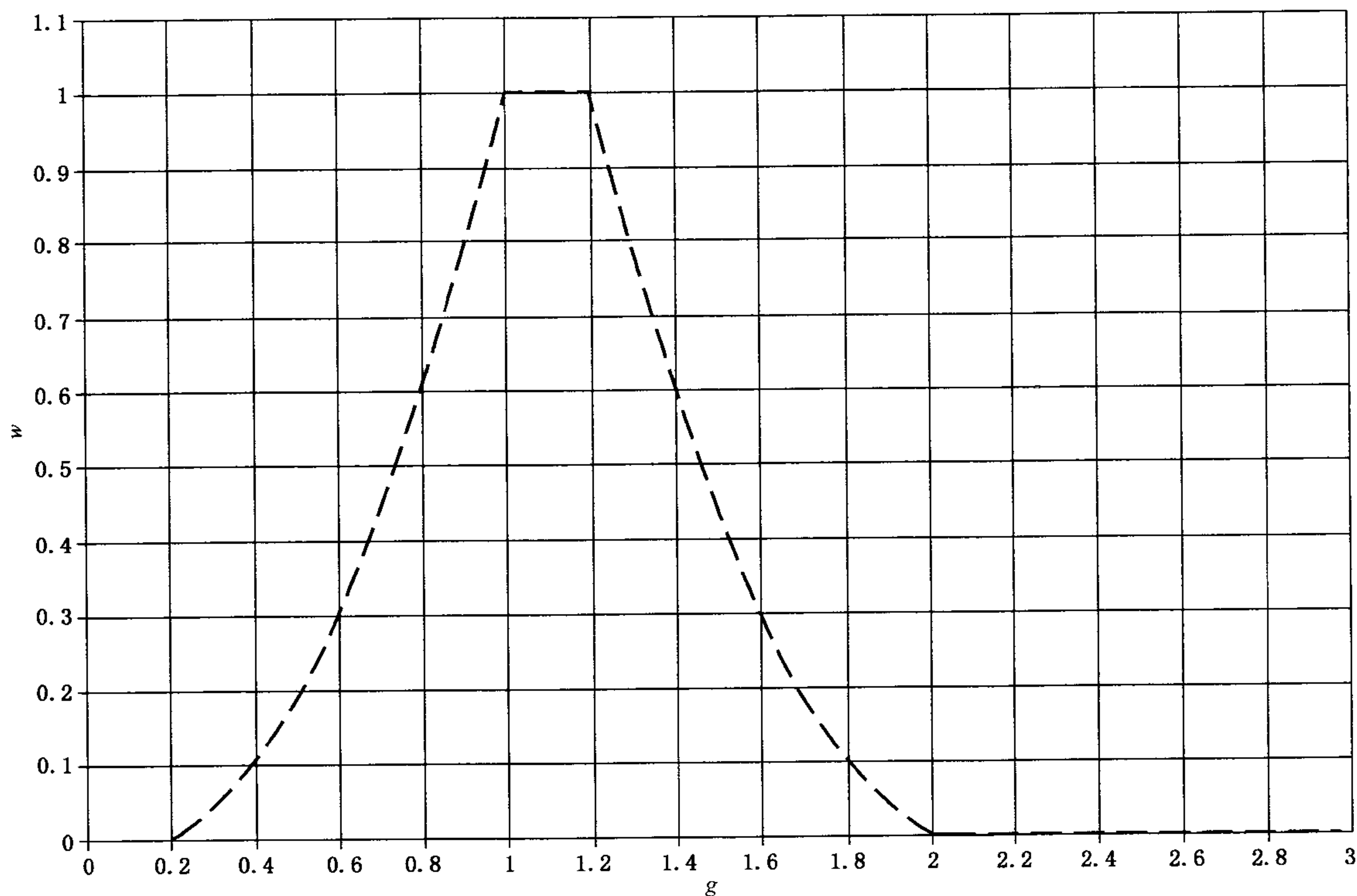


图 4 湿度修正指数 w 与参数 g 的关系

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/m^3 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。

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

- 式中:
- h ——绝对湿度, g/m^3 ;
 - R ——相对湿度,用百分数表示;
 - t ——环境温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

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。

图 4 是指标准大气压下空气湿度与干湿球温度读数的关系,非标准大气压条件时需将湿度图读数与修正值 Δh 相加以得到实际湿度值。 Δh 的计算公式为:

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

- 式中:
- t ——空气干球温度, $^{\circ}\text{C}$;
 - Δt ——干湿球温度之差;
 - Δp ——标准大气压与实际大气压之差,即 $\Delta p = 101.3 - p$, kPa ;
 - Δh ——绝对湿度的修正值, g/m^3 。

只要具有足够的准确度。亦可采用其他确定湿度的方法。

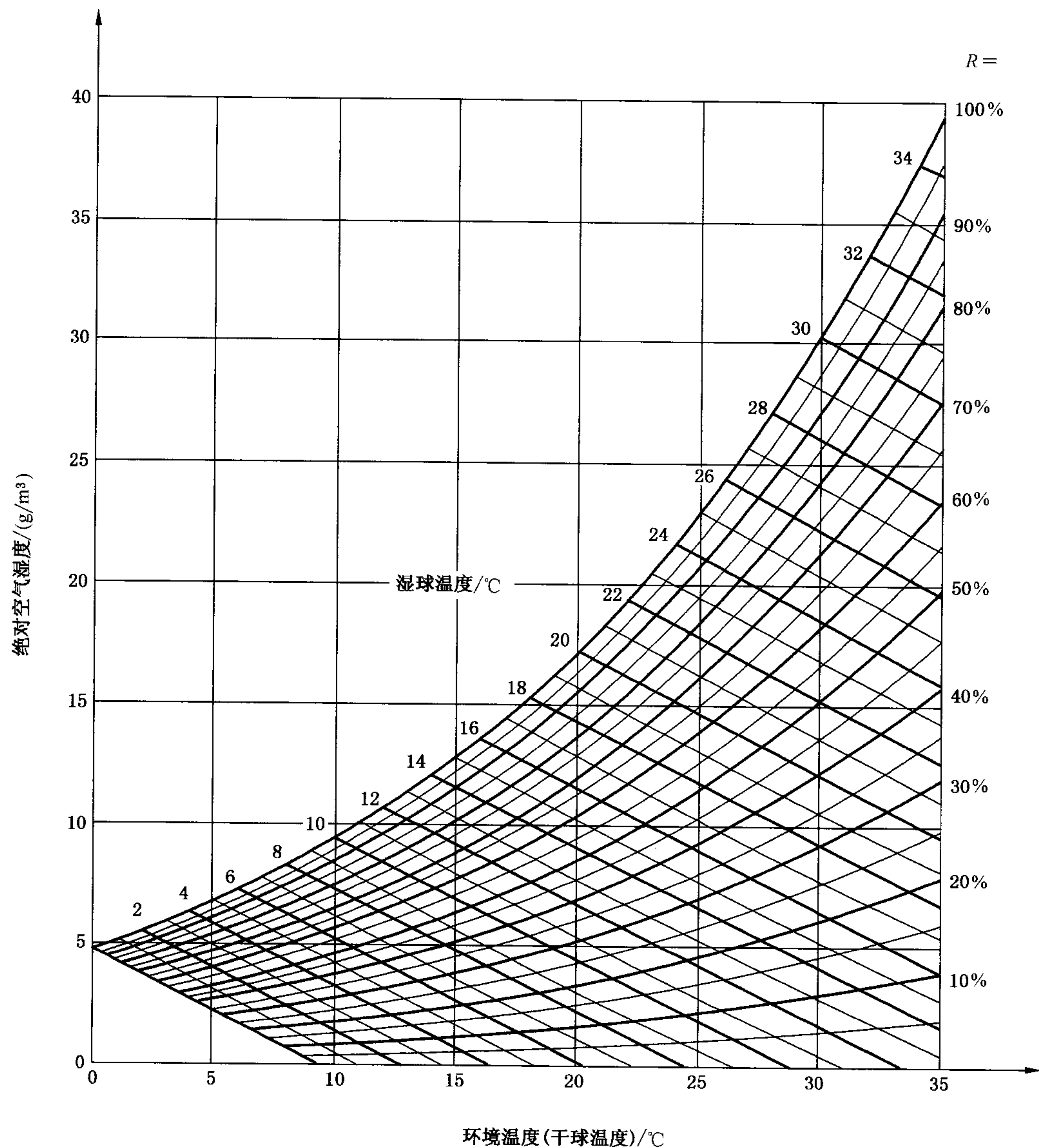


图 5 空气绝对湿度(相对湿度)与干、湿球温度计读数的关系

4.3.5.2 温度

通常测量环境温度扩展不确定度不大于 1 °C。

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冲突时的要求

当耐受水平是标准参考大气条件下的规定值时,由于试验室所处大气条件与标准参考大气条件的差异,会出现使用了大气修正因数后导致内绝缘的耐受水平明显高于外绝缘的耐受水平的情况。此时,

必须采取措施加强外绝缘的耐受水平,以使得能对内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,内绝缘应用额定值进行试验,外绝缘用模型进行试验。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。

应该用规定的电阻率和温度的水(见表2)喷射试品,落到试品上的水应成滴状(避免雾状),并控制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 $(100\sim 750)\text{cm}^2$ 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。测量时,应缓慢地在足够大的区域内移动并求其雨量的平均值。为避免个别喷嘴喷射不均匀的影响,测量的宽度应等于试品宽度,最大高度为1 m;
- 对于高度在 $(1\sim 3)\text{m}$ 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。

注:已有的试验经验表明对于超过8 m以上的试品,淋雨排宽度 $\geq 2\text{ m}$,高度 $\geq 15\text{ m}$,最高喷嘴离地高度 $\geq 20\text{ m}$ 的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。
- 试品表面用活性洗涤剂洗净会减少试验的分散性。洗涤剂在开始淋雨之前必须擦净。
- 试验的结果可能受局部反常(偏大或偏小)淋雨量的影响。如果需要的话,宜采用局部测量进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。

只要能满足本标准表2规定的淋雨条件,任何形式的喷嘴均可采用。

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。

除非有关技术委员会另有规定,湿试验的试验程序和规定的相应干试验的程序相同。交流电压湿试验的持续时间为60 s。如果没有其他规定,一般交流和直流电压湿耐受试验时,允许闪络一次,但在重复试验时不得再发生闪络。

表 2 标准湿试验程序的淋雨条件

所有测量点的平均淋雨率	垂直分量	mm/min	1.0~2.0
	水平分量	mm/min	1.0~2.0
单独每次测量和每个分量的极限值		mm/min	平均值±0.5
雨水温度		℃	周围环境温度±15
雨水电导率		μS/cm	100±15

4.4.2 湿试验的大气修正

湿试验时应按 4.3 进行空气密度修正,但不进行湿度修正。

4.5 人工污秽试验

人工污秽试验是为了得到外绝缘在典型污秽运行条件下的性能,不必模拟特定的运行条件。详细的方法见 GB/T 4585。

5 直流电压试验

5.1 直流试验电压的有关术语和定义

5.1.1

试验电压值 value of the test voltage
试验电压的算术平均值。

5.1.2

纹波 ripple
相对于直流电压算术平均值的周期性偏差。

5.1.3

纹波幅值 ripple amplitude
纹波的最大值与最小值之差的一半。

注：在纹波波形近似正弦时,纹波幅值可由实际有效值乘以 $\sqrt{2}$ 。

5.1.4

纹波因数 ripple factor
纹波幅值与试验电压值之比。

5.2 试验电压

5.2.1 对试验电压的要求

5.2.1.1 电压波形

除非有关技术委员会另有规定,试品上的试验电压应是纹波因数不大于 3% 的直流电压。

注：纹波幅值的增加直接与阻性电流的增加有关。有严重流注放电的绝缘试验会导致很大的纹波,和/或电压跌落。湿试验和污秽试验要求电源能提供足够大的阻性电流,参见 GB/T 22707。

5.2.1.2 容差

如果试验持续时间不超过 60 s,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±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则应保持在规定电压值的 $\pm 3\%$ 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件。这些要求主要由电源所提供的试验电流的数值和特性确定。试验电流的主要组成部分见 5.2.4。

5.2.3 试验电压的测量

算术平均值、纹波因数和试验电压的瞬时压降应使用满足 GB/T 16927.2 规定的认可测量系统测量。

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:

- a) 电容电流:由于开始加上试验电压或由于试验电压上纹波或其他波动所引起。
- b) 介质吸收电流:由于绝缘中发生缓慢的电荷位移而引起。电流可持续几秒至几小时。该过程局部可逆。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。

测量 a)、b)、c) 3 个分量时需用量程较宽的仪器。应注意保证仪器对某一个电流分量的测量不受其他分量的影响。对于非破坏性试验,有时可以从观测电流随时间的变化规律中了解绝缘状态。

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。

电压的极性或每种极性电压的施加次序,以及任何不同于上述规定的要求应由有关技术委员会规定。

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前的最后电压值。该试验需重复 n 次,以得到一组 n 个电压测量值。

如果在该组电压中没有有一个电压高于确保破坏性放电电压,则认为满足试验要求。

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,测量方均根值可能更有意义。

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,以便与 GB 311.1 相一致。

注 2: GB/T 16927.3 规定的交流试验电压的频率为 10 Hz~500 Hz。

试验电压的波形应为近似正弦波,且正半波峰值与负半波峰值的幅值差应小于 2%。若正弦波的峰值与有效值之比在 $\sqrt{2} \pm 5\%$ 以内,则认为高压试验结果不受波形畸变的影响。

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。

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

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 $\pm 1\%$ 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 $\pm 3\%$ 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以致明显影响试品上破坏性放电电压的测量值。

在非破坏性放电的情况下,除有关技术委员会另有规定外,只要表明试验电压值在相应放电发生后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%,则认为耐压试验通过。试验回路的特性必须满足上述要求,它与试验类型(干试验、湿试验)、试验电压水平和试品性能有关。

注:非破坏性放电可能使试品接线端之间的电压产生较大波动。这种现象可能造成试品和试验变压器损坏,补救的办法通常是在高压回路内串入电阻,但电阻应足够小,使其不能影响施加到试品上的试验电压值。

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。

6.2.2.2 对试验变压器回路的要求

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检测。

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,或发电机)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 及系统短路阻抗小于 20%,一般就足够了。

对自恢复外绝缘 100 kV 以上的绝缘试验(试品电容较小,如绝缘子、断路器和开关),试验电源的额定电流大于 100 mA 且系统短路阻抗小于 20%,对于试验且不产生流注放电的情况,通常也足够了。

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 $\geq 1\,000$ 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

串联谐振回路主要由容性试品或容性负载和与之串联的电感以及中压电源组成。它还可由电容器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,同时将有一个幅值远大于电源电压,且波形接近于正弦波的电压施加在试品上。

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比很小或者形成破坏性放电的能量很小时,串联谐振回路就特别有用。串联谐振回路可以作为回路的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。

对淋雨和污秽条件下的外绝缘试验,串联谐振回路可能不适用,除非能满足 6.2.2.1 的要求。一般,可事先在回路中加入足够的负载电容来满足湿试验要求。

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

通常使用接在试品地线上的传统的电流互感器测量试品电流,也可在试品高压引线上测取。

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 试验程序

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造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。

对于特殊目的,可采用波前近似线性上升或瞬态振荡或近似矩形的冲击波。

注:术语“冲击(impulse)”不同于术语“浪涌(surge)”,后者是指电气设备中或电网运行中出现的瞬态现象。

7.1.2

雷电冲击电压 lightning impulse voltage

波前时间小于 $20\ \mu\text{s}$ 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, $u(t) = A(e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2})$ 。

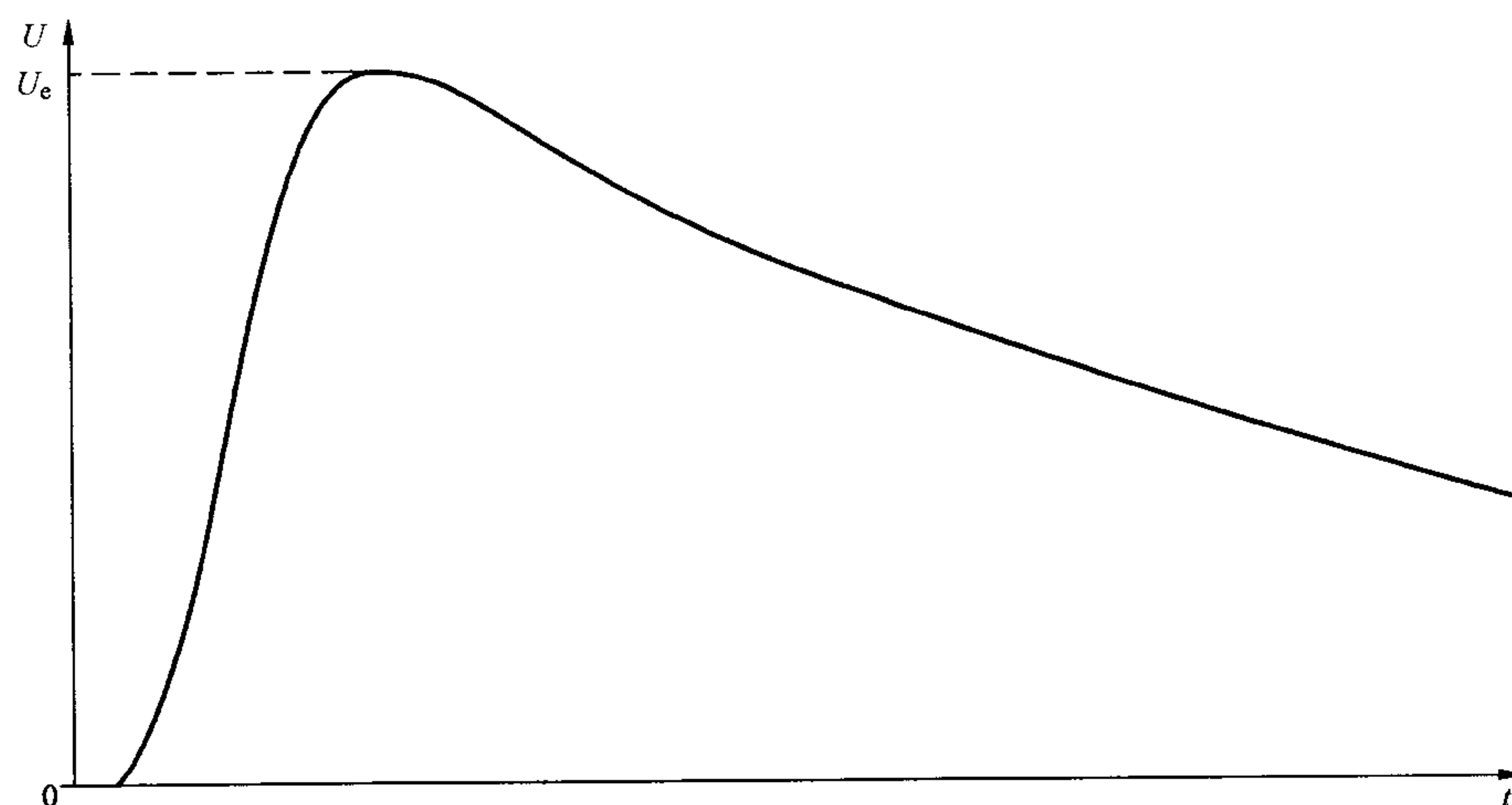


图 6 雷电冲击全波

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

$R(t)$

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

$R_f(t)$

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 value 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)。

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。

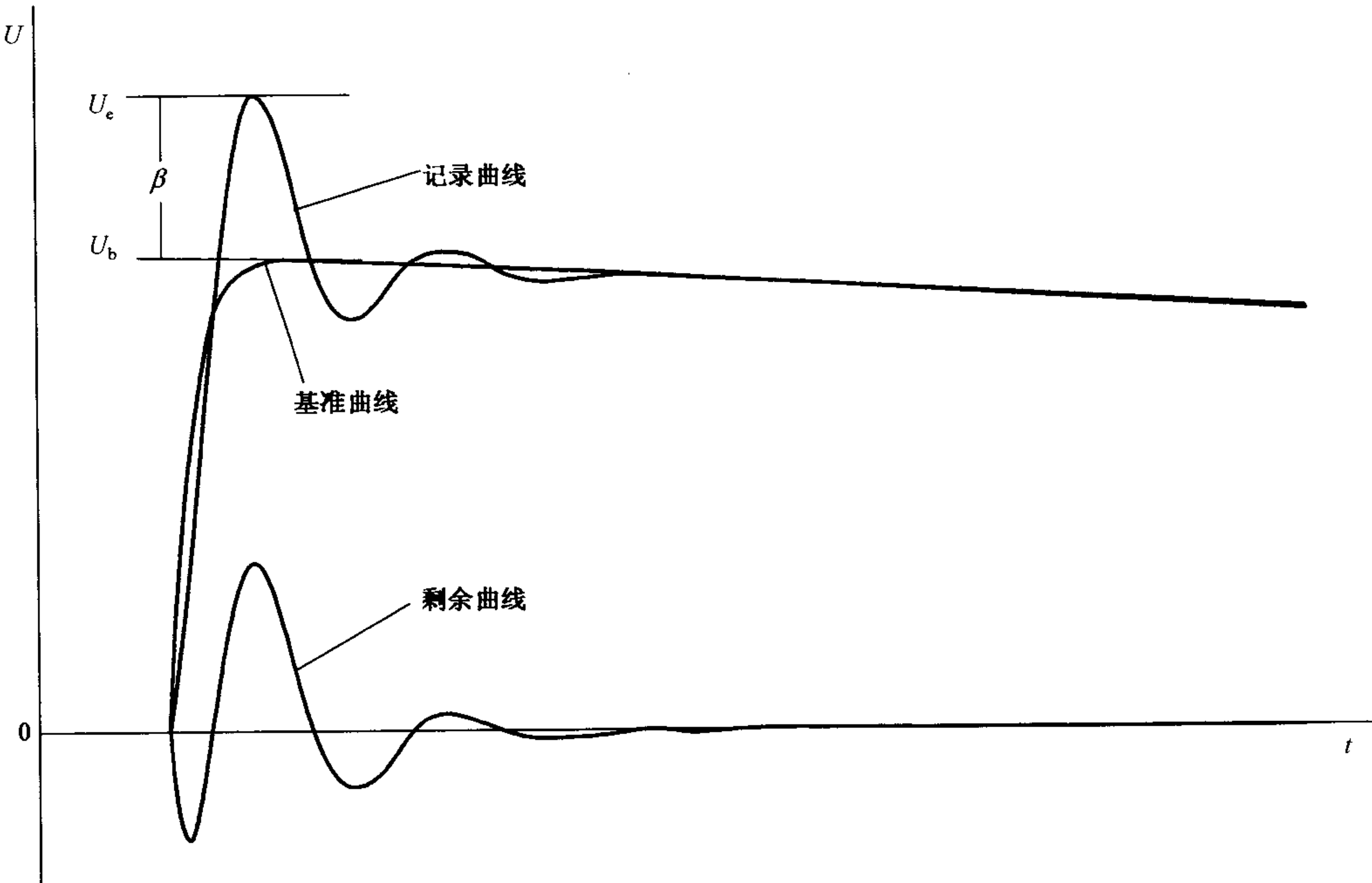


图 7 表示过冲和剩余曲线的记录和基准曲线

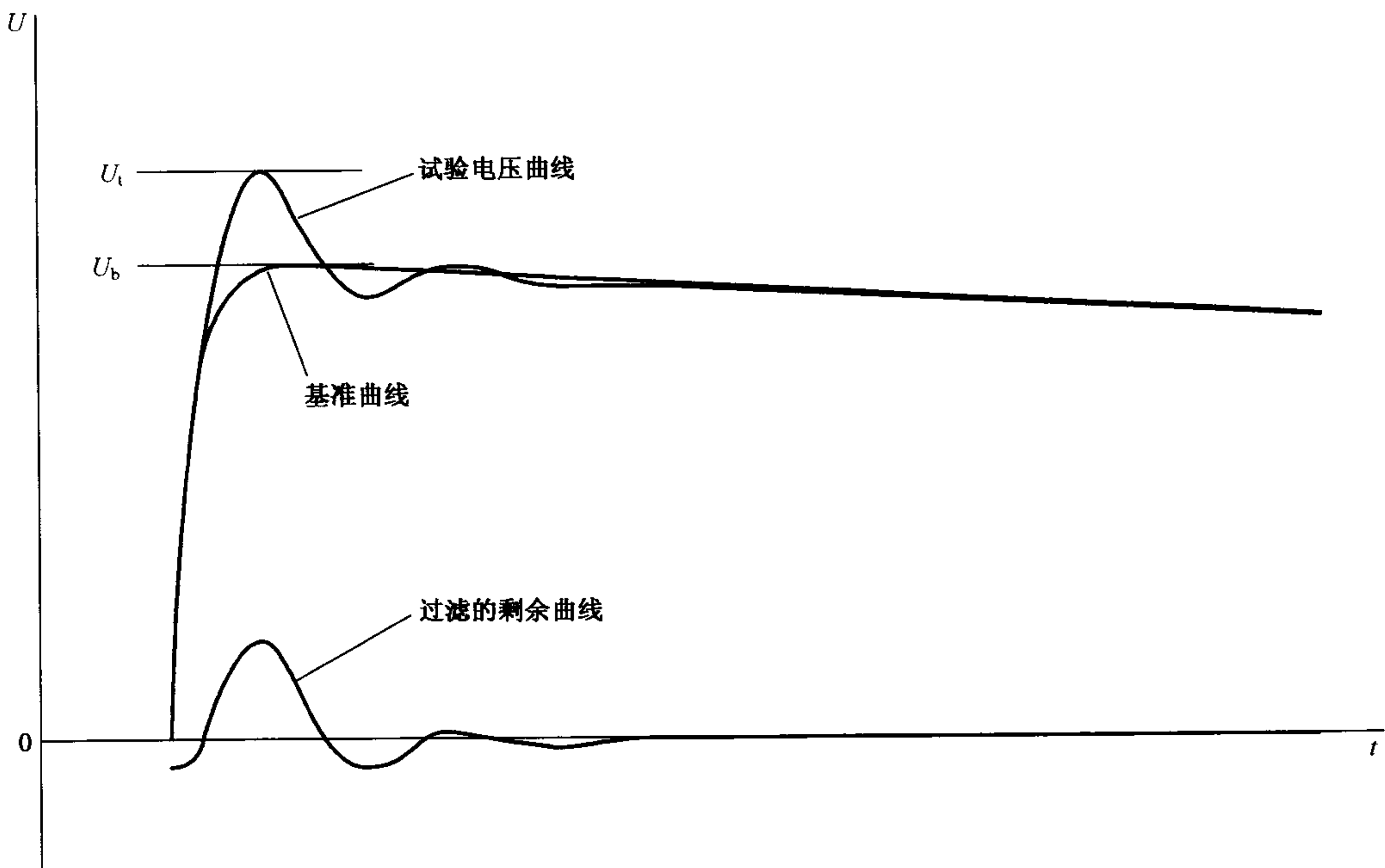


图 8 试验电压曲线(增加了基准曲线和过滤的剩余曲线)

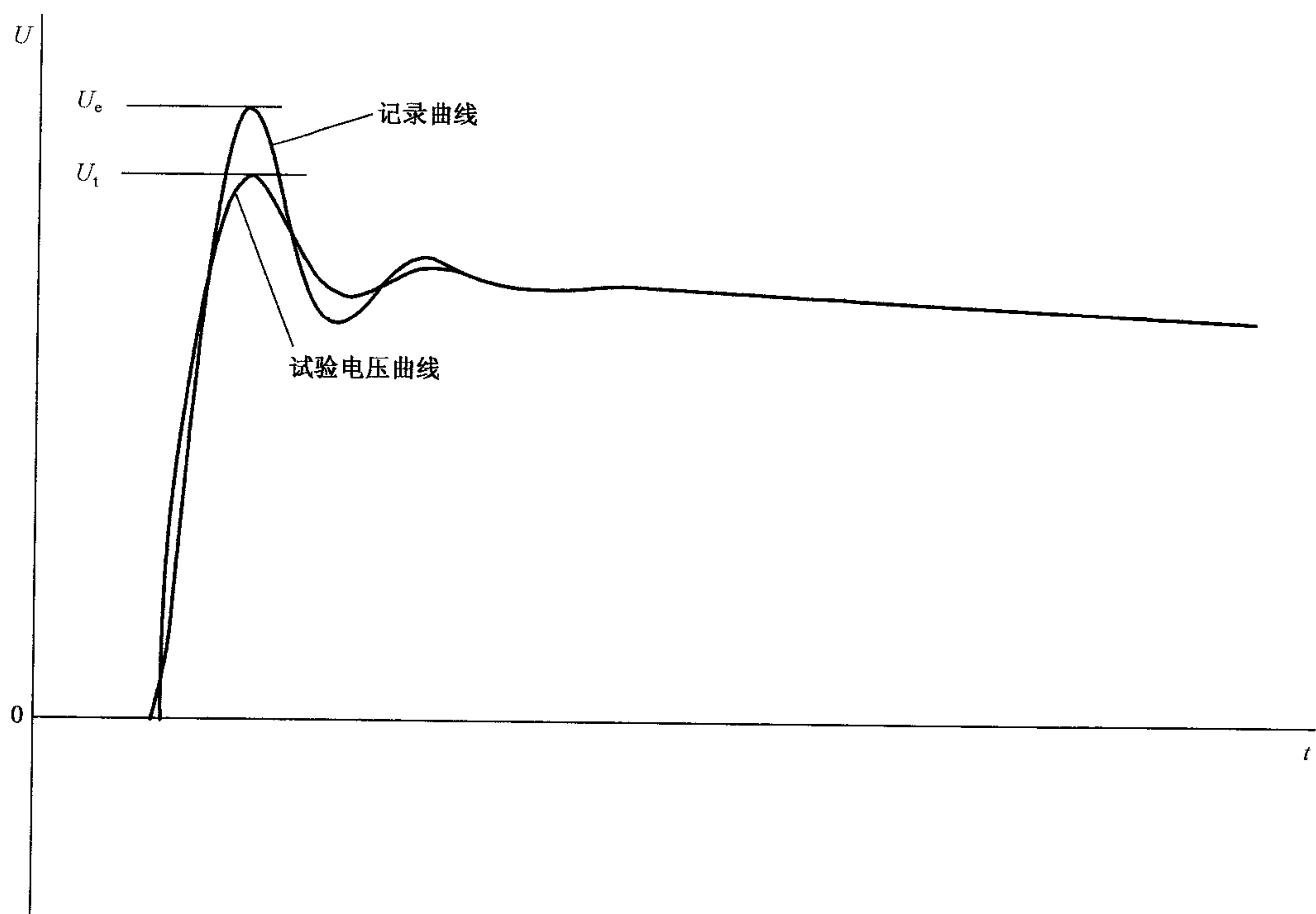


图 9 记录曲线和试验电压曲线

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:

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

式中:

f ——频率, MHz(见图 10)。

注 1: 当已获得更多的试验数据时,有关技术委员会可以规定不同绝缘类型的不同试验电压曲线。

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峰值的 30% 和 90%(图 11 中点 A 和 B)之间时间间隔 T 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 点超前 $0.3T_1$ 的瞬间,如图 11 所示。对于具有线性时间刻度的波形,它为通过波前部分的 A、B 两点所画直线与时间轴的交点。

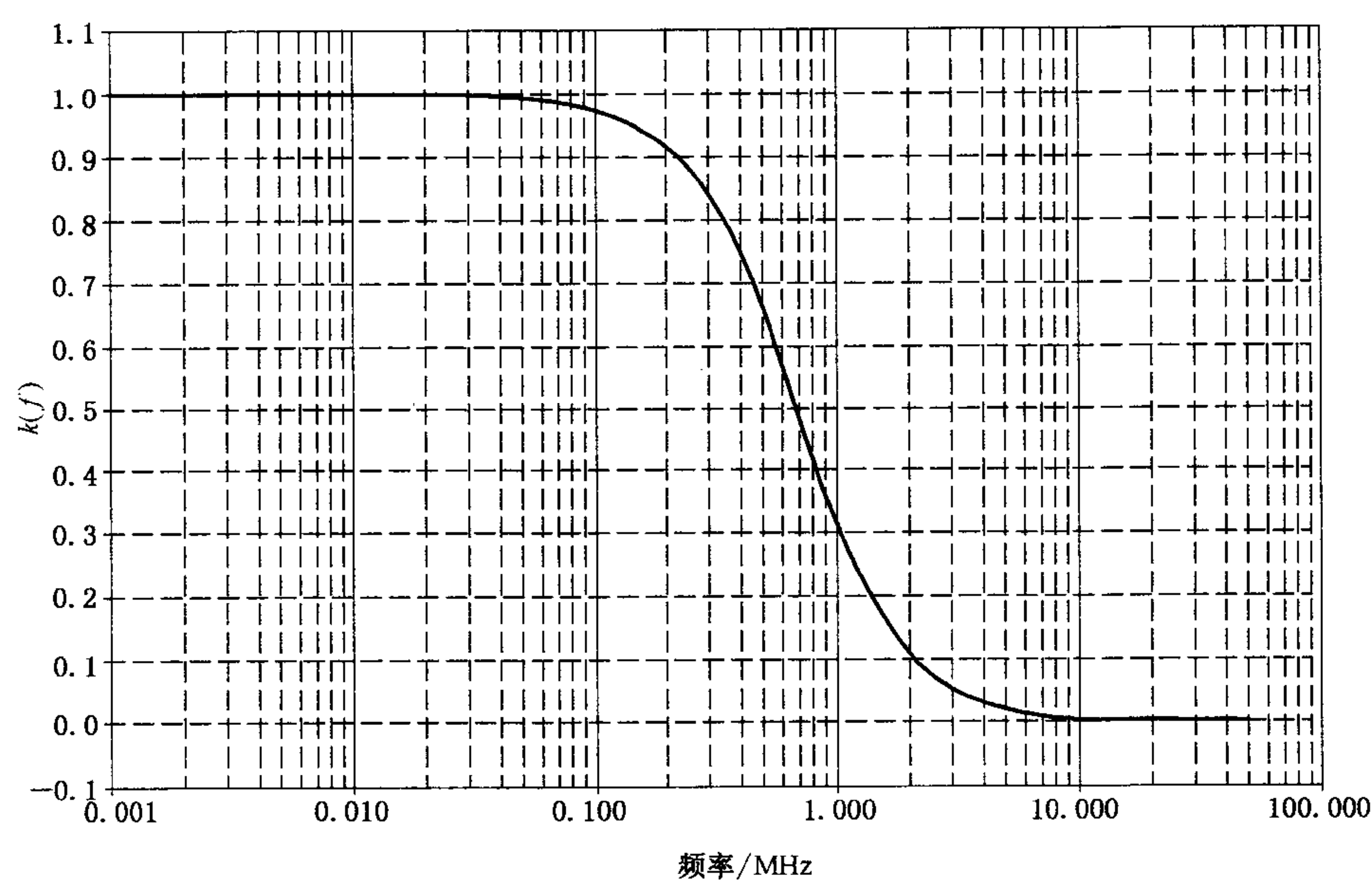


图 10 试验电压函数

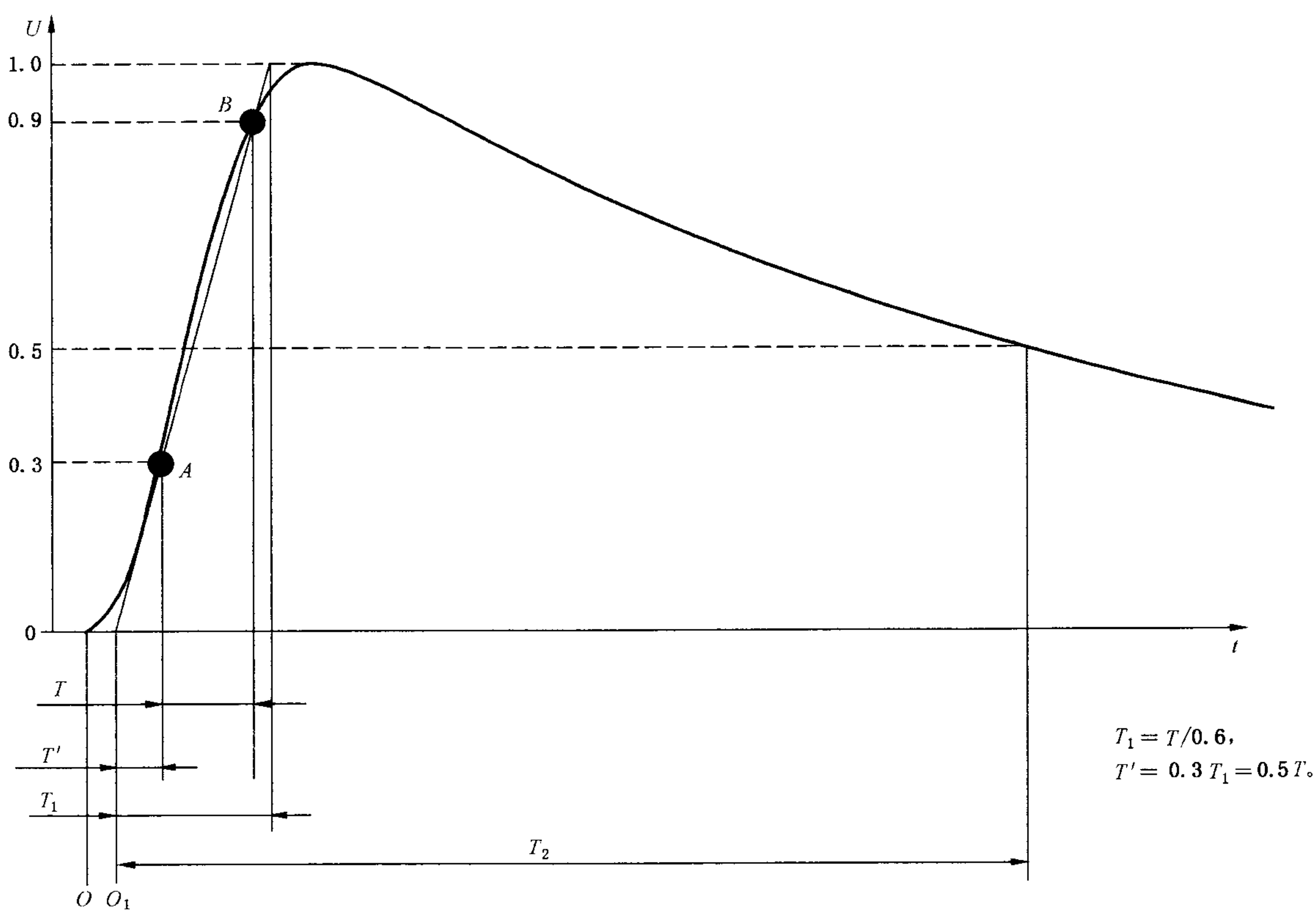


图 11 冲击全波电压时间参数

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 $\text{kV}/\mu\text{s}$ 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

半峰值时间 time to half-value

T_2

视在参数, 定义为从视在起点 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

电压时间间隔 voltage time interval

T_λ

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

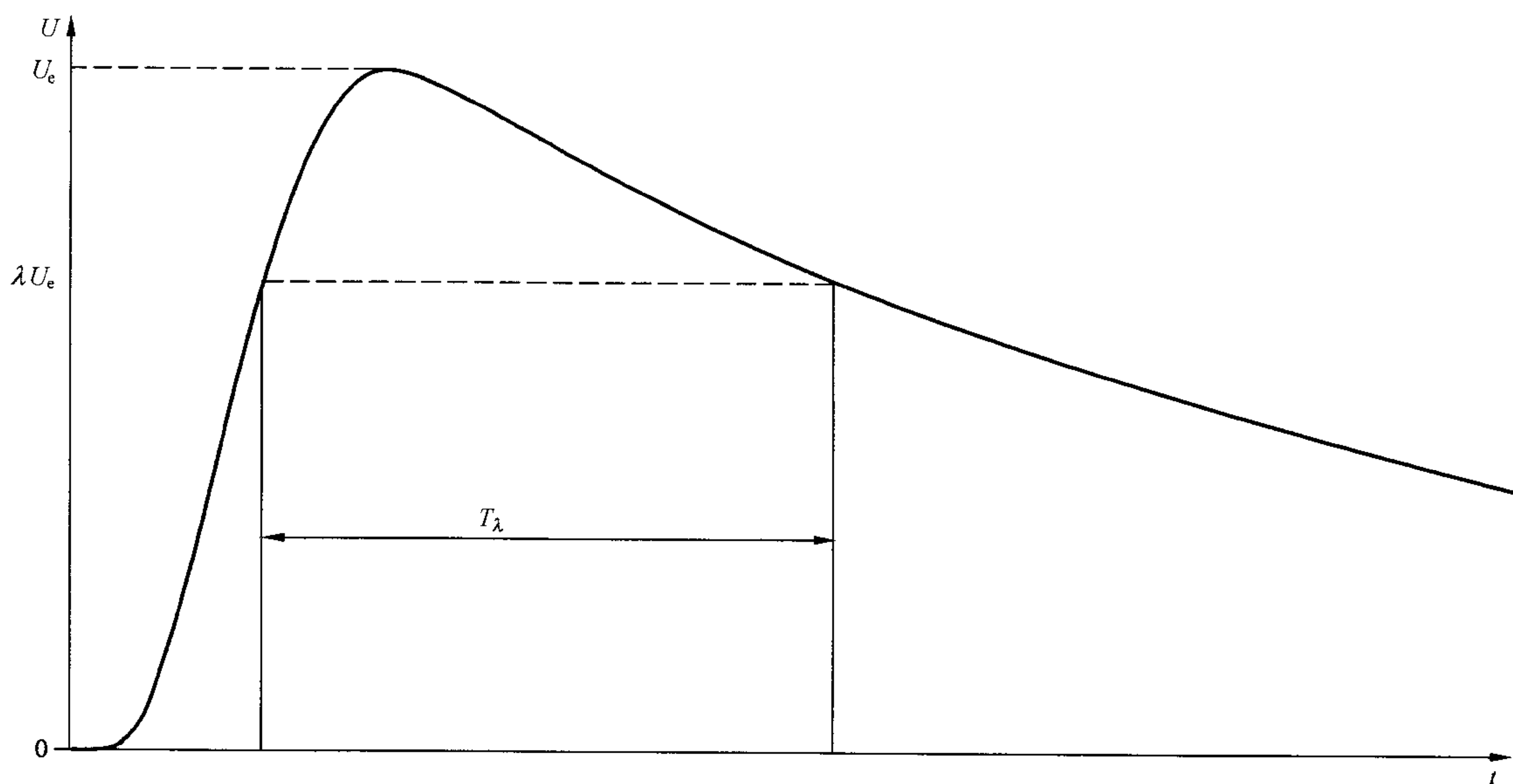


图 12 电压时间间隔

7.1.24

电压积分 voltage integral

在规定的時間间隔内的电压记录曲线对时间的积分(如图 13)。

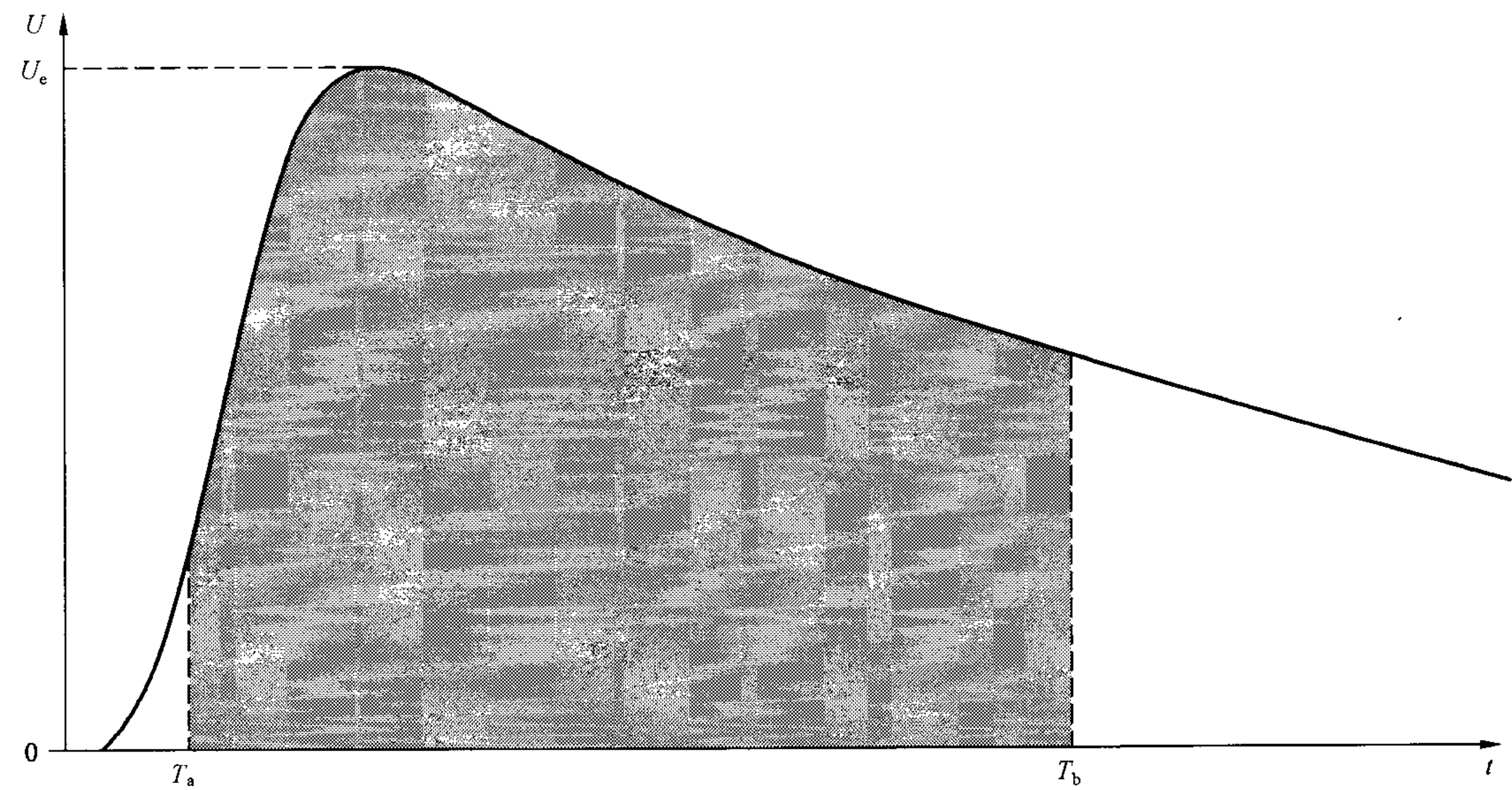


图 13 电压积分

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 $\leq 50\%$)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 和图 15)。

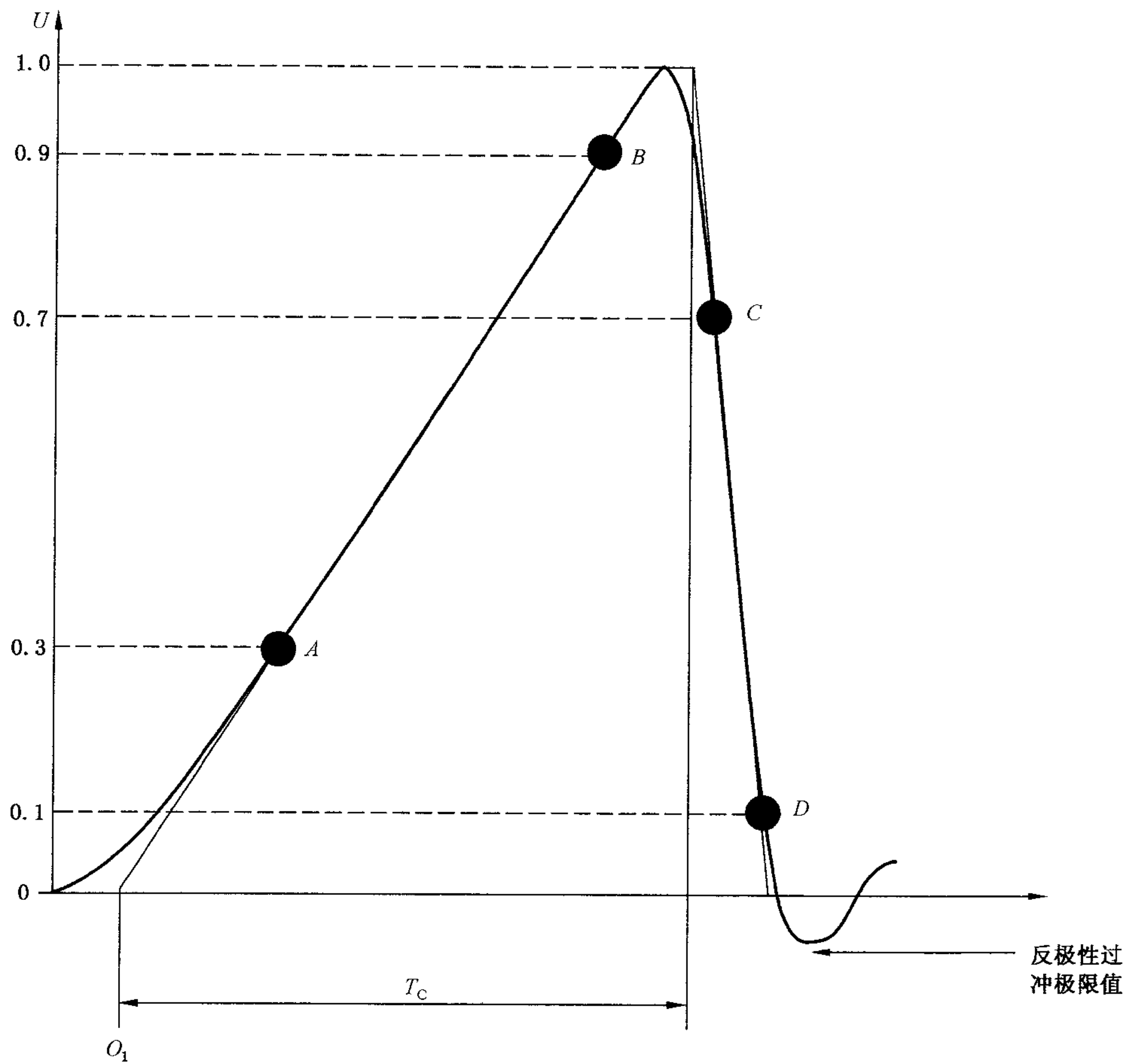


图 14 波前截断的雷电冲击波

7.1.27

截断时间 time to chopping

T_c

为一视在参数,定义为视在起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 11)。电压跌落的持续时间是 C 和 D 两点时间间隔的 1.67 倍。电压跌落的陡度是截断瞬时电压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)。

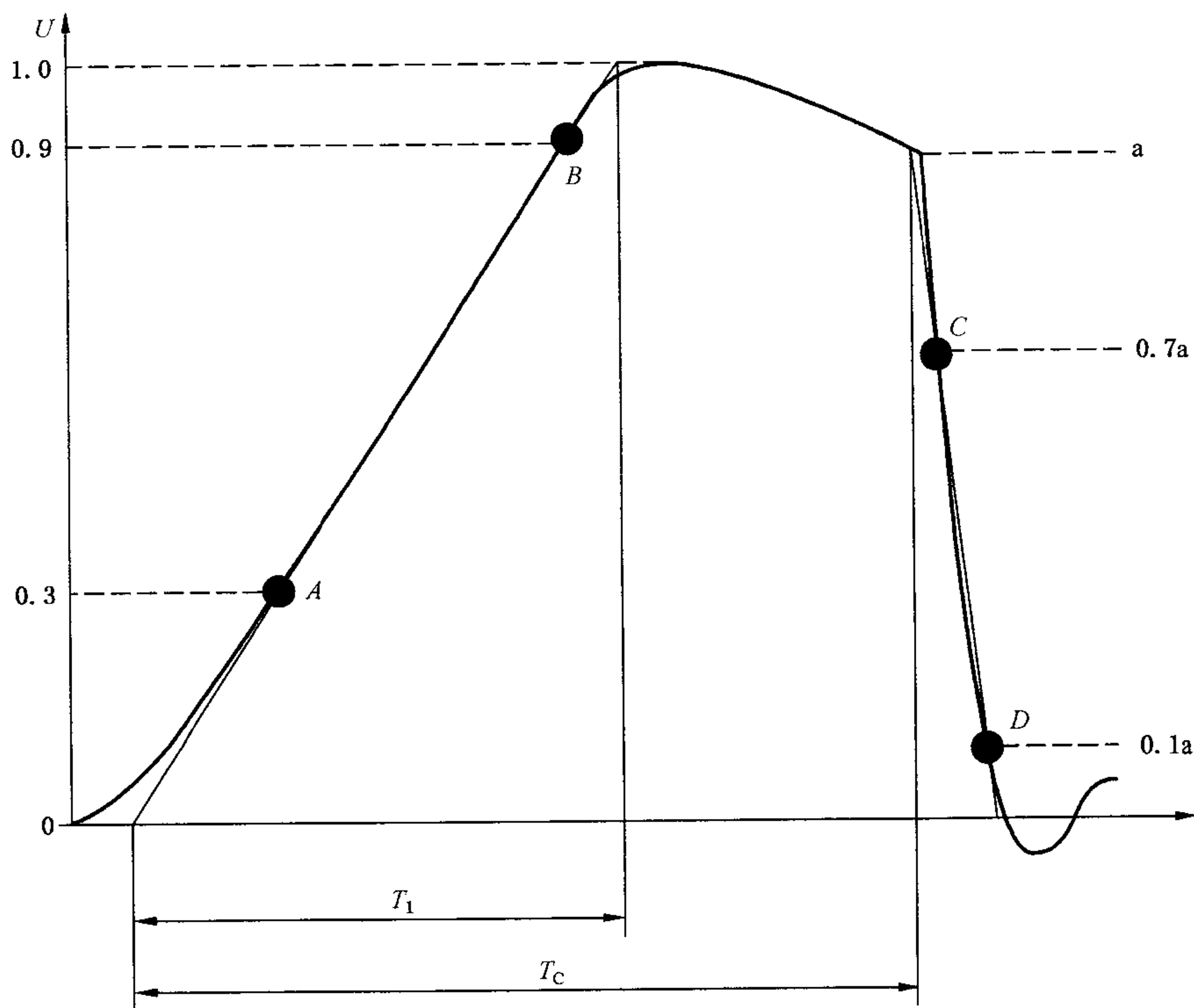


图 15 波尾截断的雷电冲击波

7.1.30

线性上升波前截断冲击 linearly rising front-chopped impulse

电压以近似恒定陡度上升直至由破坏性放电截断。

为了定义这种冲击波,在波前部分峰值的 30%和 90%之间画一条最佳拟合直线,该直线与峰值的 30%和 90%的两个交点分别记为 *E* 和 *F*(如图 16)。

此冲击波用下述参数定义:

U_e ——最大电压;

T_1 ——波前时间;

S ——视在陡度;

$$S=U_e/T_1$$

这是通过 *E*、*F* 两点所画直线的斜率,通常用 $\text{kV}/\mu\text{s}$ 表示。

如果波前从 30%幅值起到截断时刻完全位于与直线 *EF* 相平行,在时间上相差 $\pm 0.05 T_1$ 的两条直线之间,则可认为这种冲击截波近似为线性上升冲击截波(如图 16)。

注:视在陡度 S 的值和容差应由相关技术委员会规定。

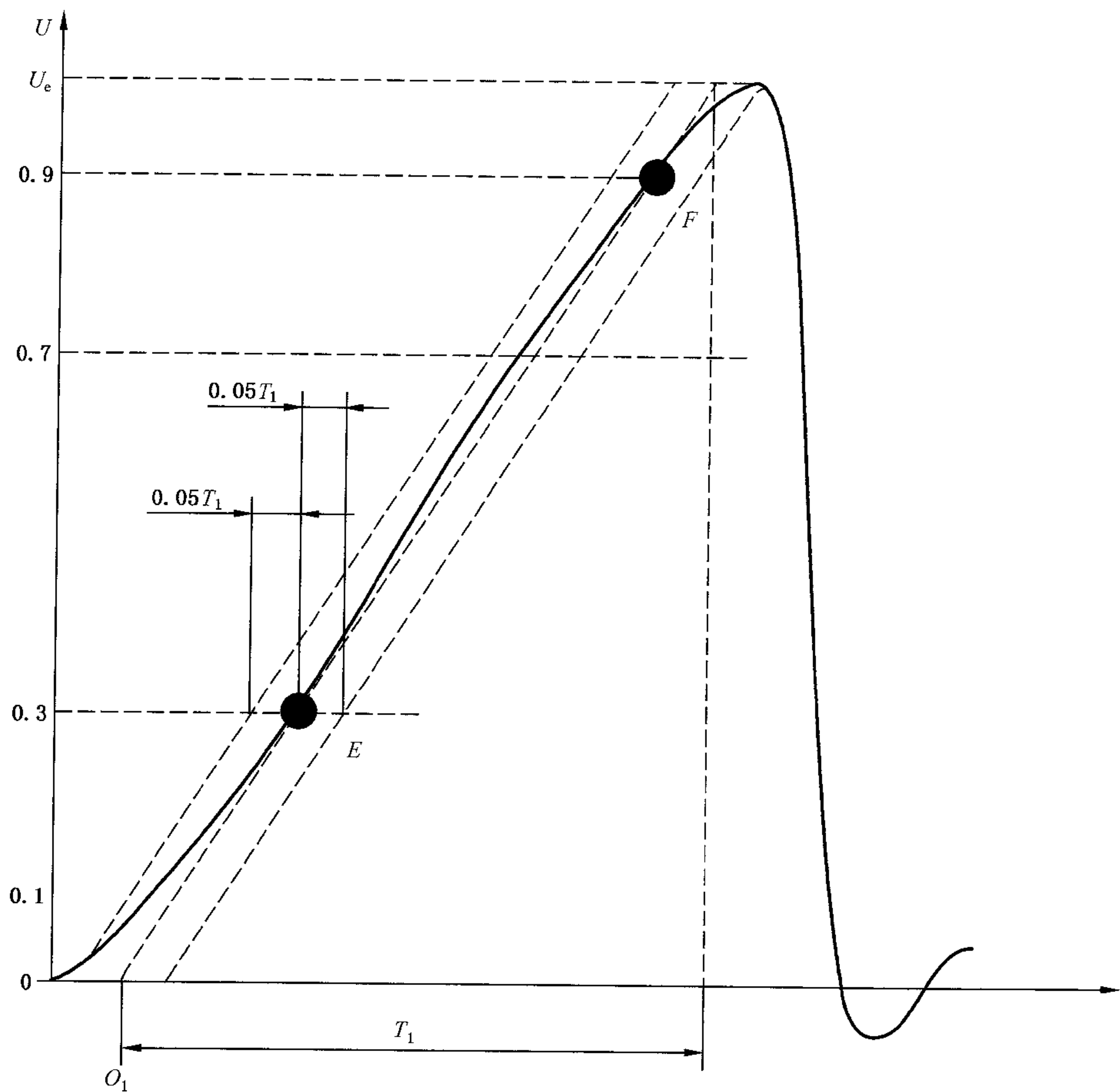


图 16 线性上升波前截断冲击

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

试品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)。

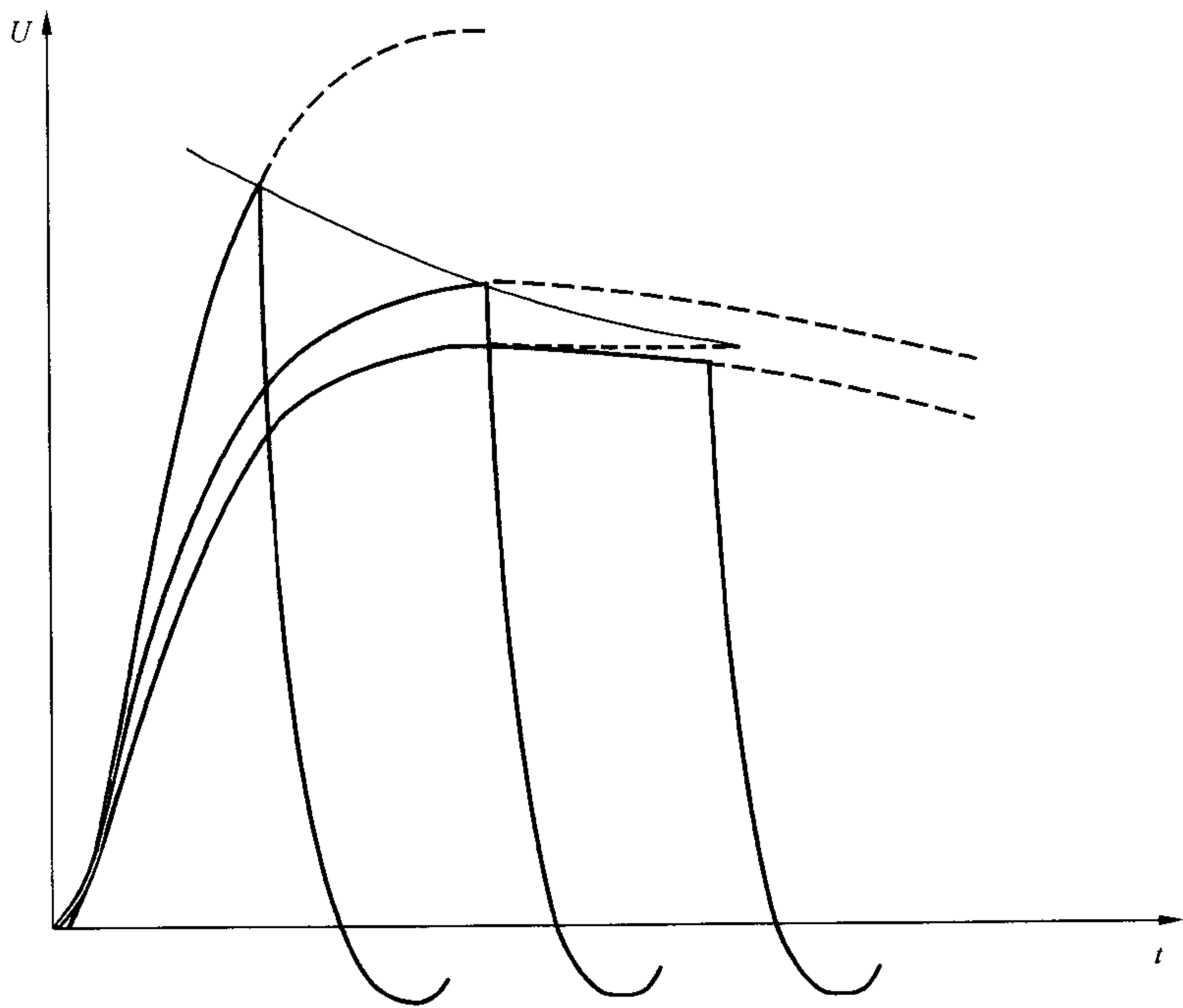


图 17 预期波形一定的冲击波的伏-秒特性

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 $1.2 \mu\text{s}$, 半波峰值时间 T_2 为 $50 \mu\text{s}$ 的光滑的雷电冲击全波。表示为 $1.2/50 \mu\text{s}$ 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 $\pm 3\%$;
- 波前时间 $\pm 30\%$;
- 半峰值时间 $\pm 20\%$ 。

过冲和峰值附近的振荡是容许的, 允许相对过冲最大幅值不超过 10% 。

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_A 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是可以忽略的。如果认为这些振荡和过冲很重要, 则建议这些振荡的幅值的 $A'B'$ 的直线 (见图 18) 以下。图中 AB 两点作法如下:

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 作纵轴的平等线段 AA' 和 BB' 并使其分别等于峰值的 25% 和 5% 。

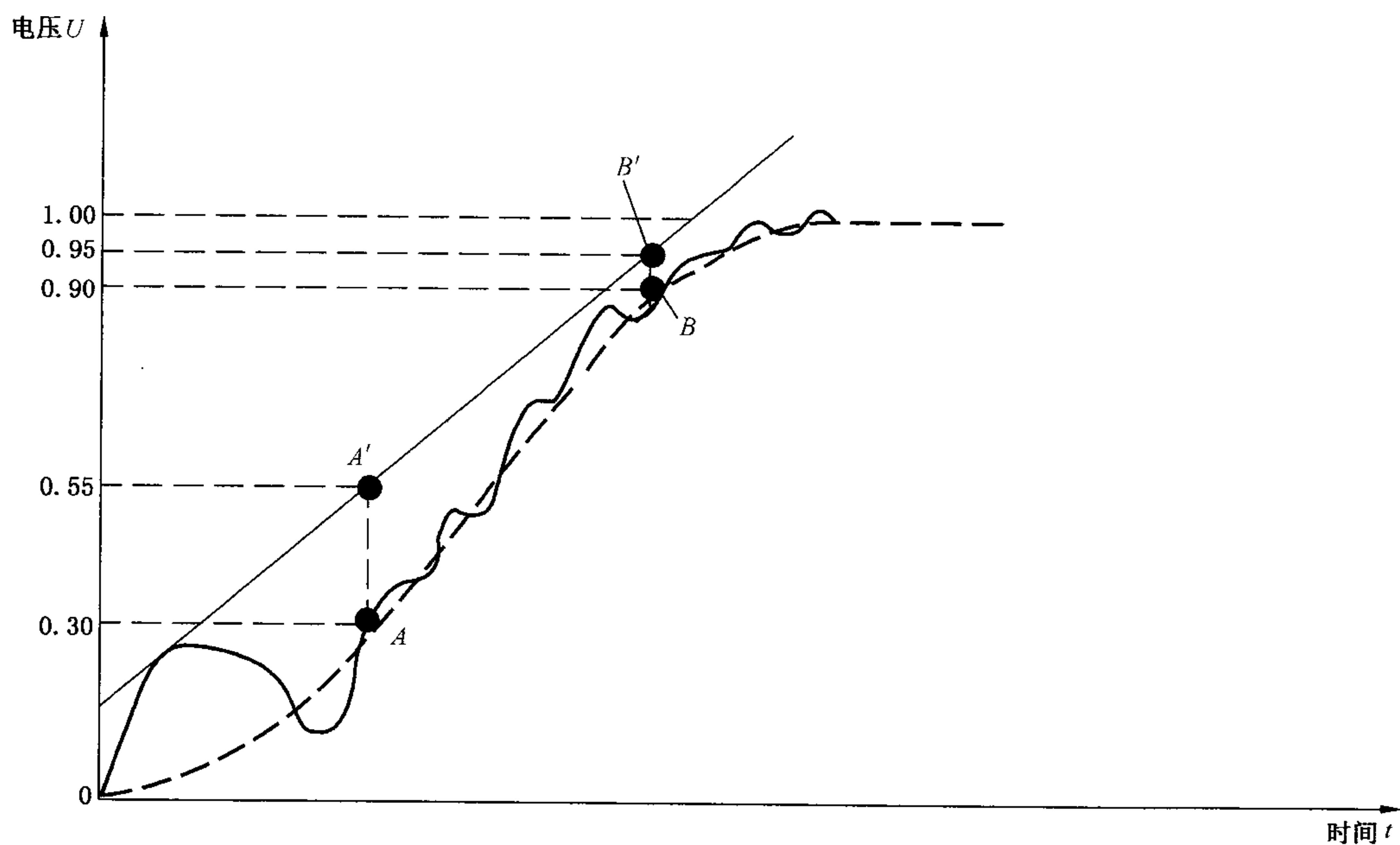


图 18 确定波前振荡最大允许值的示意图

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 $2\ \mu\text{s}\sim 5\ \mu\text{s}$ 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 16927.3。

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。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,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 $\leq 50\%$)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 次破坏性放电,且按有关技术委员会规定的检测方法确定非自恢复绝缘上无损伤,则认为通过试验。除非有关技术委员会另有规定,试验程序应按如下规定进行:

- 1) 冲击次数至少 15 次;
- 2) 非自恢复绝缘上不应出现破坏性放电;如不能证实,可通过在最后一次破坏性放电后连续施加 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 次施加冲击的合计破坏性放电次数,且仅发生在自恢复绝缘上);
- 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

对试品施加 3 次具有规定波形和极性的耐受电压,如果没有发生破坏性放电,则认为通过试验;如果发生破坏放电超过 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,则再加 9 次冲击,如再无破坏性放电发生,则试验通过。

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么值取 $s^* = 0.03$ 。

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 $m \geq 4$, 每级冲击次数 $n_i \geq 10$;

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

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

波前时间(按雷电冲击的计算)大于或等于 20 μs 的冲击电压。

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。

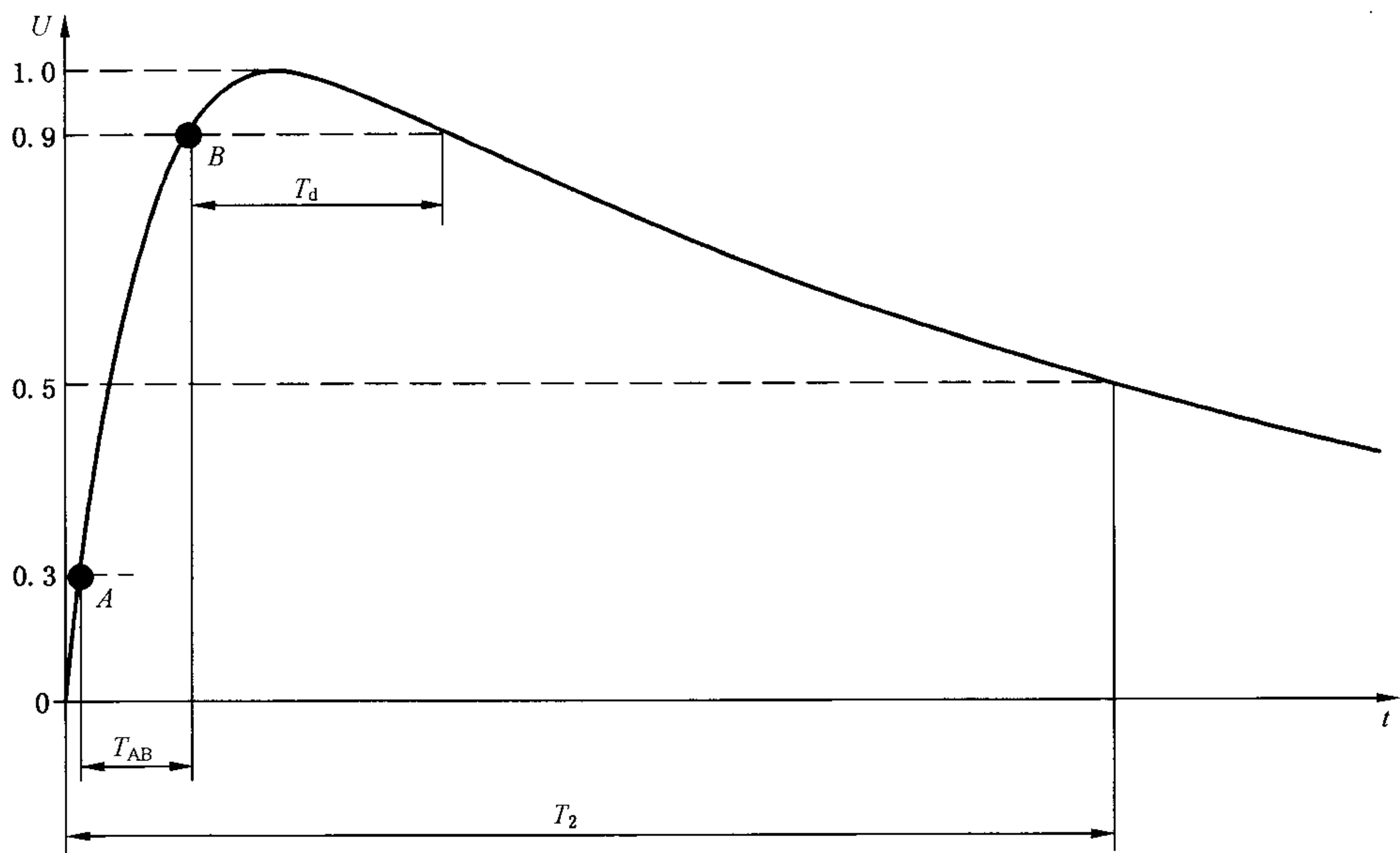


图 19 操作冲击全波

8.1.4

实际原点 true origin

O

记录曲线开始单调上升(或下降)的瞬间。

8.1.5

半峰值时间 time to half-value

T_2

实际原点和电压第一次衰减到半峰值瞬间的时间间隔(如图 19)。

8.1.6

90%峰值以上的时间 time above 90%

T_d

冲击电压超过最大值的 90%的时间间隔(如图 19)。

8.1.7

过零时间 time to zero

T_z

实际原点和电压第一次过零瞬间的时间间隔。

注：用 90%峰值以上的时间和到过零时间代替半峰值时间的规定是有用的，例如，当冲击波形受试品或试验回路中饱和现象支配时，或者认为对试品内绝缘的重要部分的试验严格程度主要取决于这些参数的场合。在定义操作冲击波时，通常仅给出一组与波形有关的参数。定义特殊的时间参数，应当清楚地指出，例如， T_p/T_2 或 $T_p/T_d/T_0$ 冲击波。

有关技术委员会可规定特殊试验的附加参数。

8.2 试验电压

8.2.1 标准操作冲击

标准操作冲击是到峰值时间 T_p 为 $250\ \mu\text{s}$ ，半峰值时间 T_2 为 $2\ 500\ \mu\text{s}$ 的冲击电压，表示为 $2\ 50/2\ 500\ \mu\text{s}$ 冲击。

8.2.2 容差

如果有关技术委员会未作其他规定,对于标准和特殊操作冲击,规定值和实测值之间允许下列偏差:

峰值	$\pm 3\%$;
波前时间	$\pm 20\%$;
半峰值时间	$\pm 60\%$ 。

在某些情况下,如低阻抗试品,难以将波形调节到推荐的容差范围内。此时有关技术委员会可规定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:

$$K = 2.42 - 3.08 \times 10^{-3} T_{AB} + 1.51 \times 10^{-4} T_2$$

式中: T_{AB} 和 T_2 的单位为 μs ,且 $T_{AB} = t_{90} - t_{30}$ 。

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,在同一个条件下进行试验,只需要校核一次。

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

除非有关技术委员会另有规定,试验程序一般与雷电冲击相同,而且可采用与之类似的统计法(参照 7.3 和附录 A)。对于不带任何其他绝缘的空气绝缘的干试验和湿试验的破坏性放电的标准偏差标幺值可假定为: $s^* = 0.06$ 。

当应用多级法和升降法时可使用较大的电压级差 ΔU 。

注:在操作冲击试验时,破坏性放电经常出现在峰值前的任意时刻,这时在按 7.3.1.4 整理破坏性放电试验结果时,放电概率与放电电压的关系中电压值通常以预期峰值来表示;但也可能用另一种方法,即测量每次冲击的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

指试品带电两端的最大电位差(如图 21a))。

a) 联合电压 $U = U_1 - U_2$ 。

b) 合成电压 $U = U_1 + U_2$ 。

9.1.3

合成电压 composite voltage

将适当方式连接的两个独立电源产生的不同的试验电压(参照第 7 章~第 9 章)的叠加(如图 21b)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。

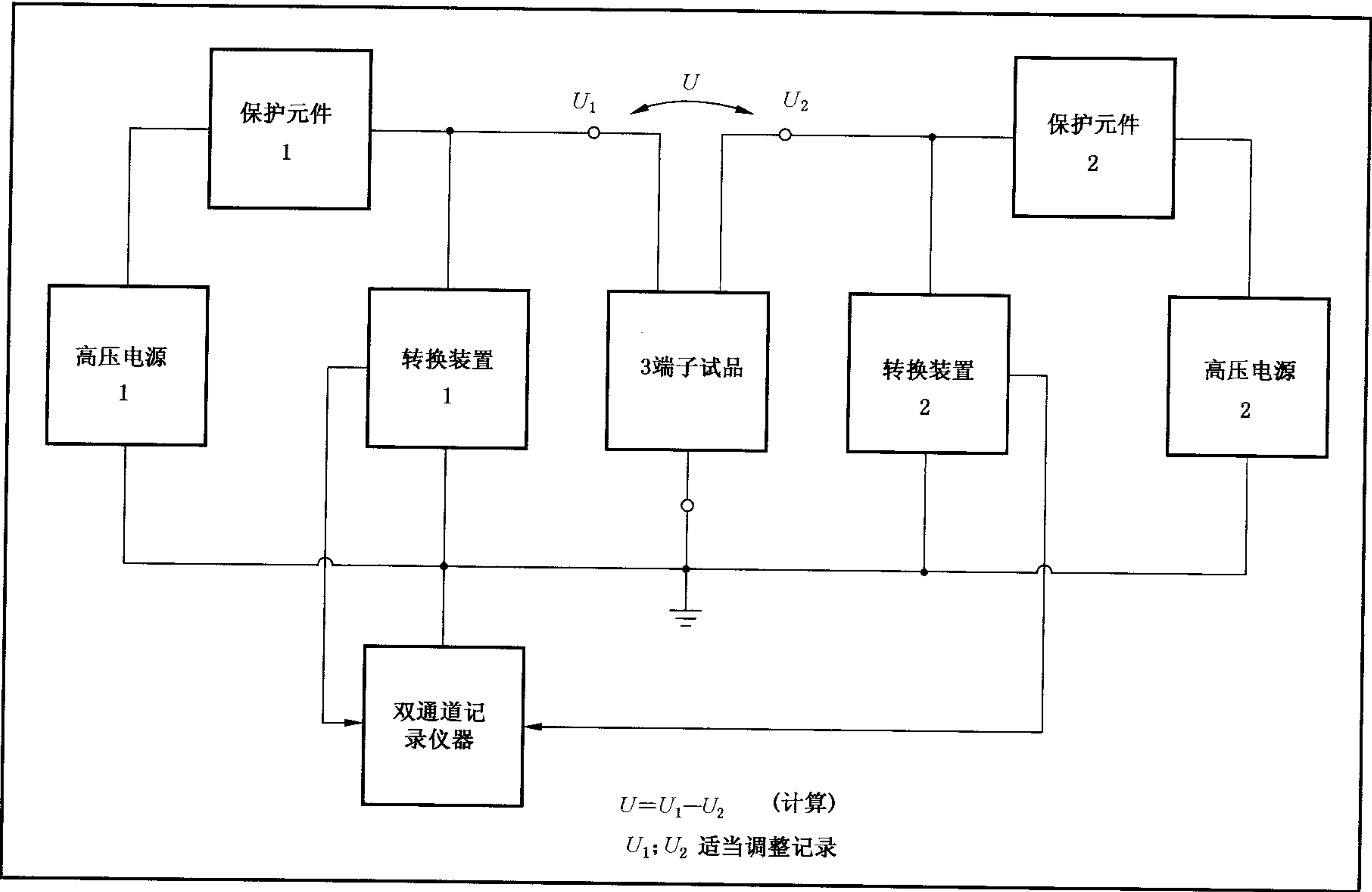


图 20 联合电压试验回路

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定)：

- 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

实际记录电压值与规定值之间的差应 $\leq \pm 5\%$ (除非有关技术委员会另有规定)。

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

因为两个单独电源被连接,因此每一个电源应经由一个保护装置连接到试品高压端子上(如图 20)。保护装置应当在相关电源引起试品破坏性放电情况下,使得作用电压不损坏其他电源。

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 $\leq 5\%$ 。

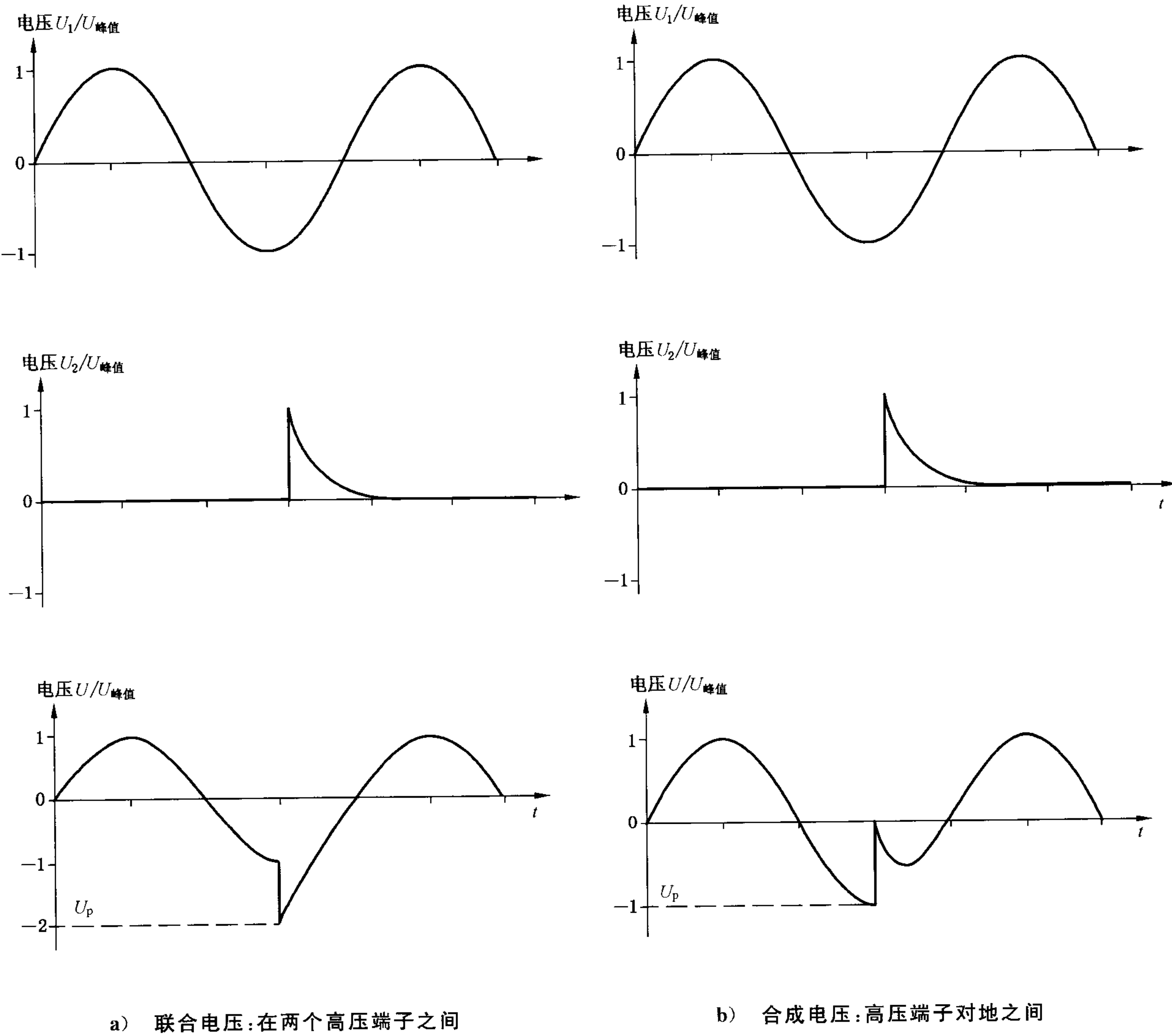


图 21 联合电压和合成电压图解示例

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 GB/T 16927.2 对两个电压分量测量的要求。根据 GB/T 16896 推荐用双通道记录仪器来直接记录联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。

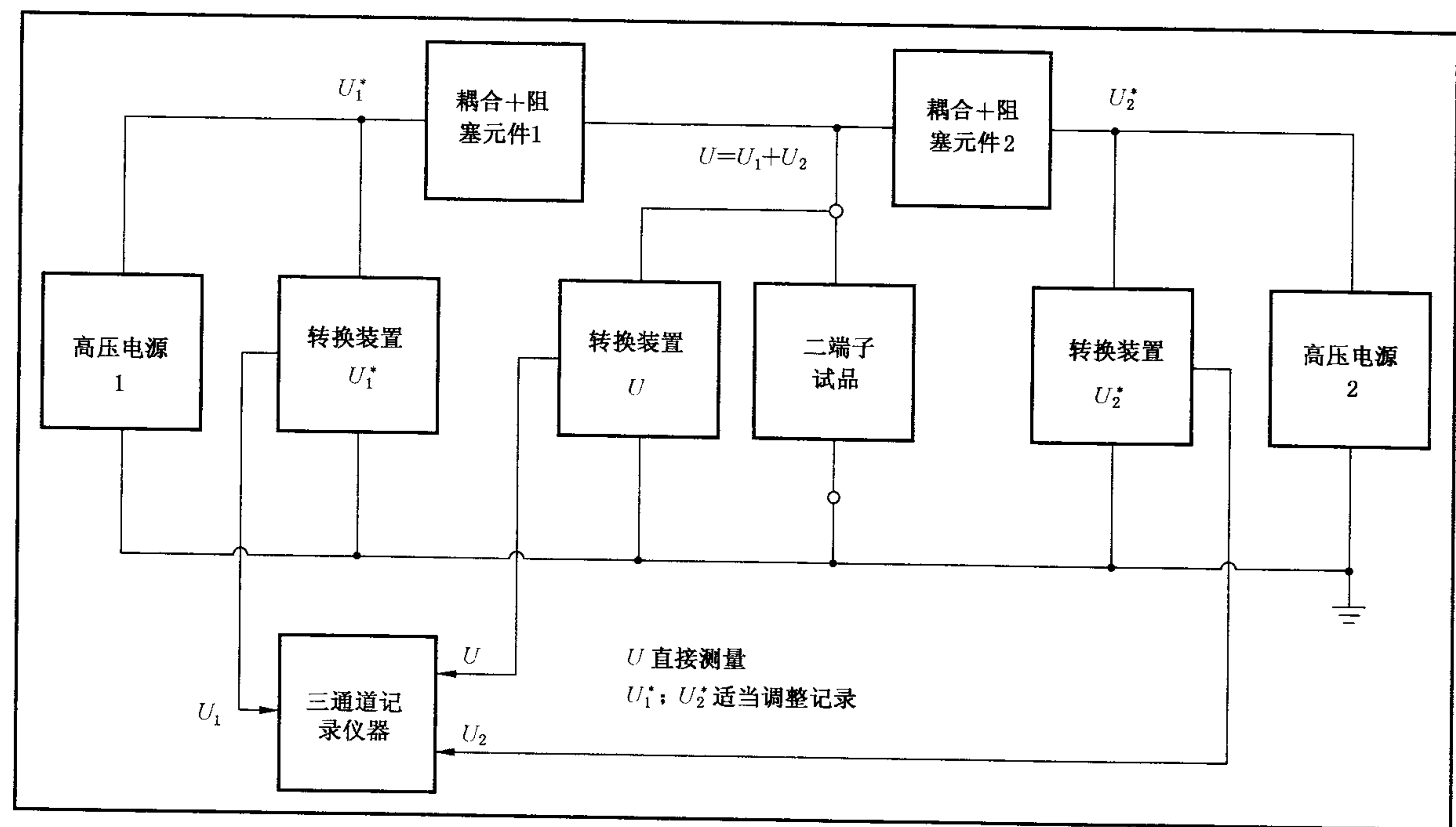


图 22 合成电压试验回路

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。

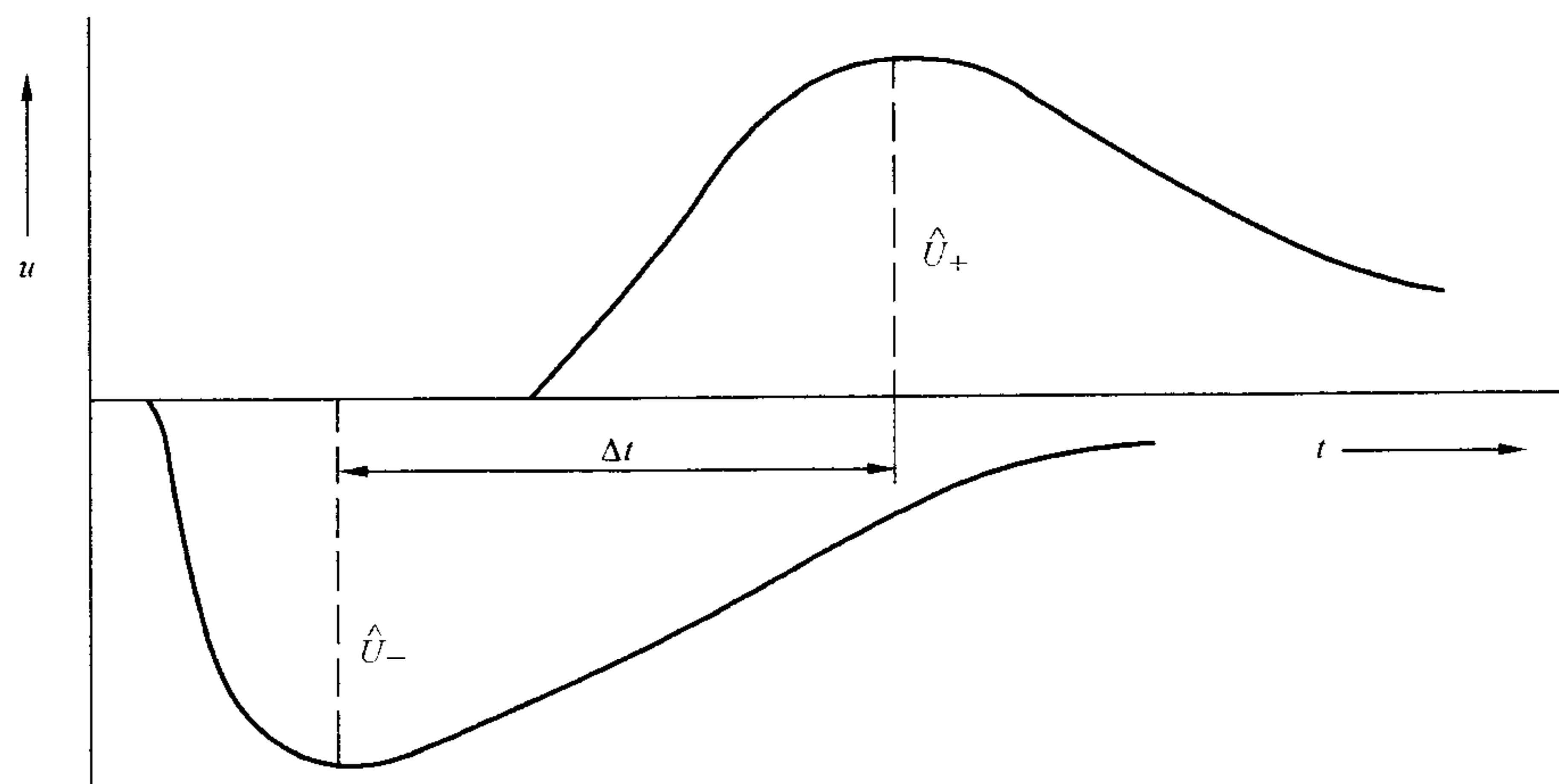
9.3.2 容差

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 $\pm 5\%$ 以内。

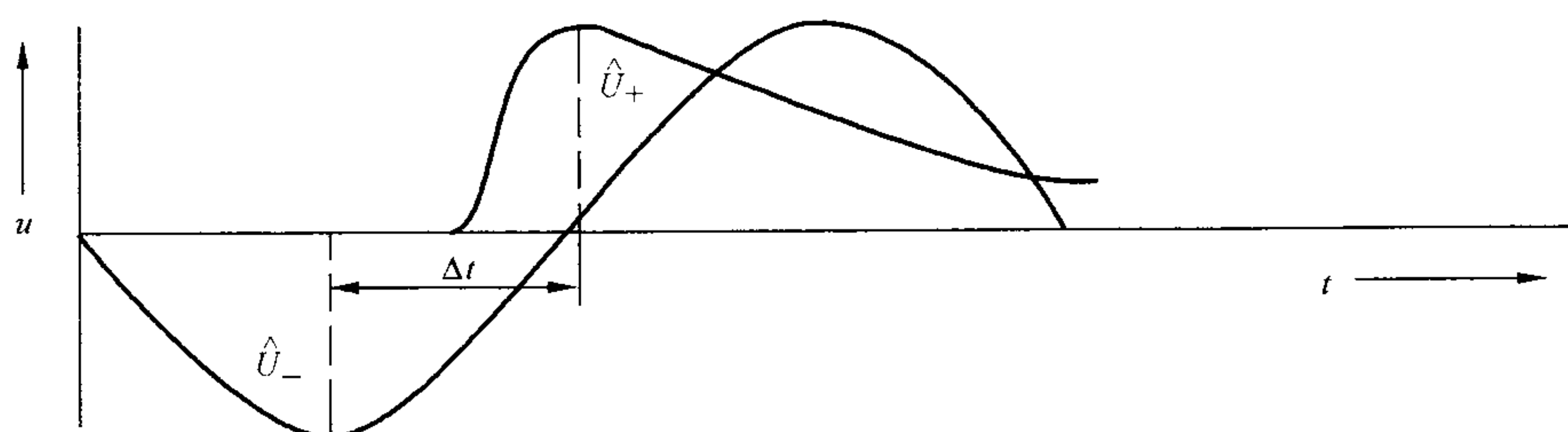
时延 Δt 的容差为 $\pm 0.05 T_p$,对于冲击, T_p 为波前时间;对交流电压, T_p 为四分之一周波时间,可认为 T_p 为两个电压分量的时间中的较大值。

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,应采取保护元件来避免一个电源对另一个电源的危害。对于电源本身的要求可参照本部分的相关条款。



a) 两个冲击电压的联合电压



b) 一个冲击电压和一个工频电压的联合电压

图 23 时延 Δt 定义

9.3.4 测量

合成电压的电压和时间特性应由一套安装在试品连接点与对地间的测量系统测量(如图 22)。测量系统必须满足 GB/T 16927.2 对两个电压分量的测量要求。建议直接测量每个电压源的输出电压(图 22)并同时记录 3 个电压。

9.4 试验程序

联合和合成电压试验的程序和试品的布置由有关技术委员会给出。

关于大气修正,参数 g (见 4.3.4.3)应根据联合或合成试验电压值计算。参数 k_1 和 k_2 (见 4.3.4.1 和 4.3.4.2)应根据电压分量中较大的值选取,并对两个分量都进行修正。

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 $\Delta U = U_{i-1} - U_i (i=1, 2, \dots, m-1)$) 的每个电压等级 $U_i (i=1, 2, \dots, m)$ 施加 n_i 次电压($i=1, 2, \dots, m$) (例如,雷电冲击),引起 $d_i \leq n_i$ 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 $i=1, 2, \dots, m$ 和 $\Delta U = (0.01 \sim 0.06)U_{50}$: $m \geq 5$; $n_i \geq 10$ 。

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 $k_i (i=1, 2, \dots, m)$ 。

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 $U_i (i=1, 2, \dots, l)$ 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;为了找出相应于高破坏性放电概率的电压水平的放电程序。在耐受程序中,如果一组 n 次加压中没有破坏性放电发生,则电压水平增加 ΔU ,否则减少同样的 ΔU 。在放电程序中,如果一组 n 次加压中耐受住一次或一次以上则增加 ΔU ,否则减少同样的 ΔU 。

当 $n=1$ 时,上面两种程序相同并相应于 50% 破坏性放电电压升降法试验。

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 下总的有效组数为 $m = \sum k_i (i=1, \dots, l)$ 。

注:以 $n=7$ 求得的 10% 和 90% 破坏性放电电压分别定义为耐受电压和破坏性电压(见 7.3.1.4)。只要满足 $\Delta U = (0.01 \sim 0.06)U_{50}$ 和 $m > 15$,也可选取其他参数。

A.1.3 第三类 连续放电试验

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在电压 U_i 下发生破坏性放电或在某个电压水平下保持不变,直到观察到在 t_i 时刻发生破坏性放电。试验结果表现为电压 U_i 下的加压次数 $n (n \geq 10)$,或破坏性放电发生的时刻 t_i 。

这种试验可用于连续或逐级升压的直流、交流试验以及逐级升压的冲击电压试验。在冲击波前发生破坏性放电的试验属于此类。

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展过程所确定的函数 $p(U)$ 表征。实际上,这种破坏性放电概率函数在数学上可以由至少与两个参数 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 3.4.6)。

注 1: $p(U)$ 的实例可以根据高斯(或正态)概率分布、韦伯尔(Weibull)概率分布和哥伯尔(Gumbel)概率分布函数来导出。经验表明 p 处于 0.16 和 0.84 之间时可以认为大多数理论分布是相等的。详见有关文献[3]~[6]。

注 2: 有时 p 是两个或两个以上参数的函数,例如 U 和 dU/dt ,这时没有简单的表示 p 的函数。详见有关文献。

只要在试验期间试品的特性保持不变,则从大量试验中可得到 $p(U)$ 、 U_{50} 和 s^* 。

实际上,施加电压次数是有限的,根据假定 $p(U)$ 估算的 U_{50} 和 s 具有统计不确定度。

A.2.1 置信限

如果参数 y 是根据 n 次试验结果估算的,则可以确定置信限的上限 y_u 和下限 y_l , y 的真值落于这些置信限内的概率为 C , C 称为置信水平,置信度上限和下限之差值称为置信宽度。

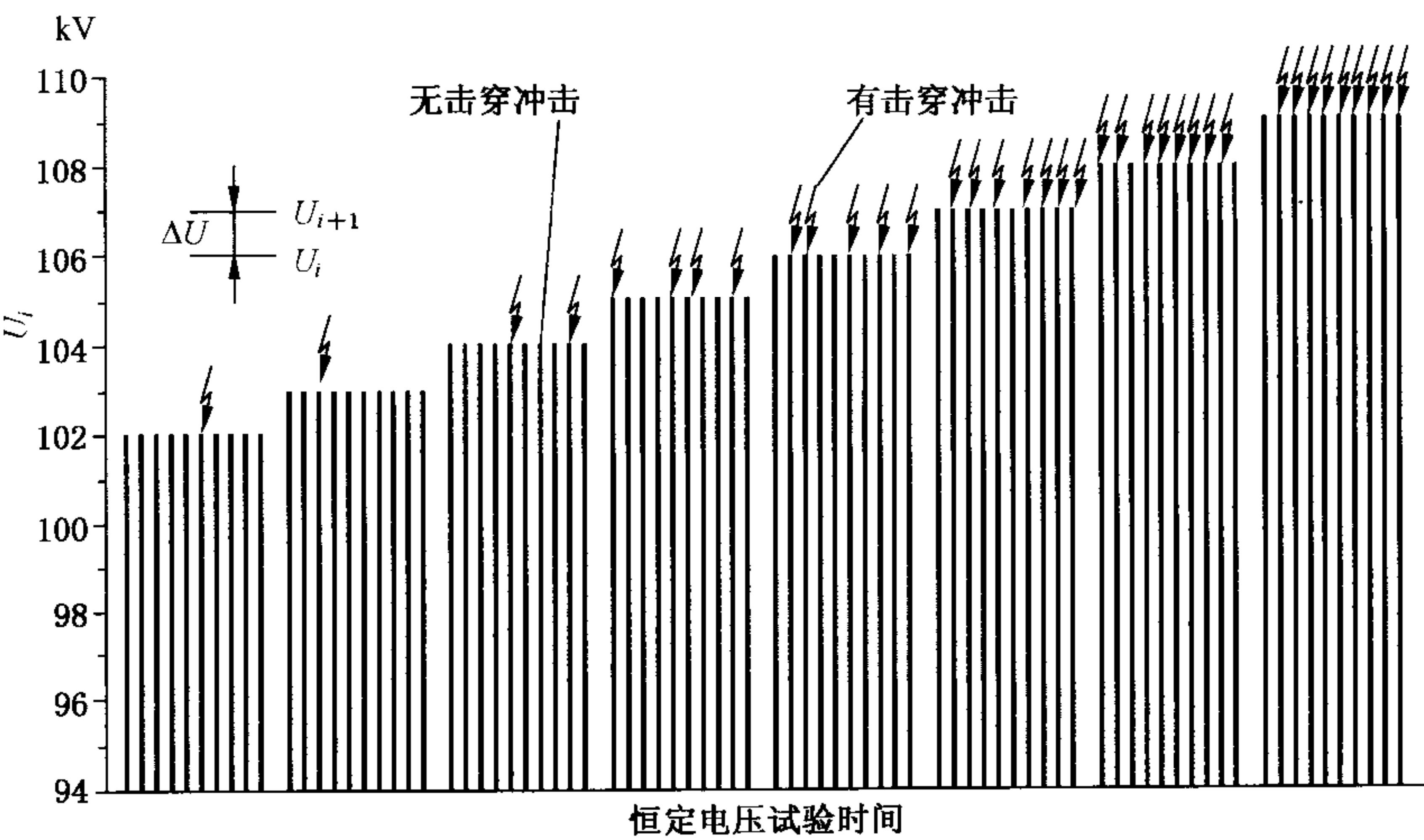
通常 C 取为 0.95(或 0.90),相应地称为 95%(或 90%)置信限。

对给定的 C 值,置信宽度同时取决于 n 和标准偏差 s 的值。标准偏差 s 可从实际试验中估算得到。但必须注意:当试验时间相当长时,可能因环境条件改变而抵消增加试验次数所提高的准确度。

由于从有限的试验次数中不能准确的估算 s ,因此有关技术委员会通常会规定根据一般试验结果所估算出的 s 值。

A.3 试验结果的分析

下列分析适用于试验结果是独立的,即第 n 次试验不受该次试验前任何一次试验的影响。



作用电压次数 i	1	2	3	4	5	6	7	8
电压施加次数 n_i	10	10	10	10	10	10	10	10
破坏性放电次数 k_i	1	1	2	4	5	7	8	9
破坏性放电频率 $f_i = k_i / n_i$	0.1	0.1	0.2	0.4	0.5	0.7	0.8	0.9
破坏性放电总数 g	1	2	4	8	13	20	28	37

图 A.1 多级法试验示例(第一类试验)

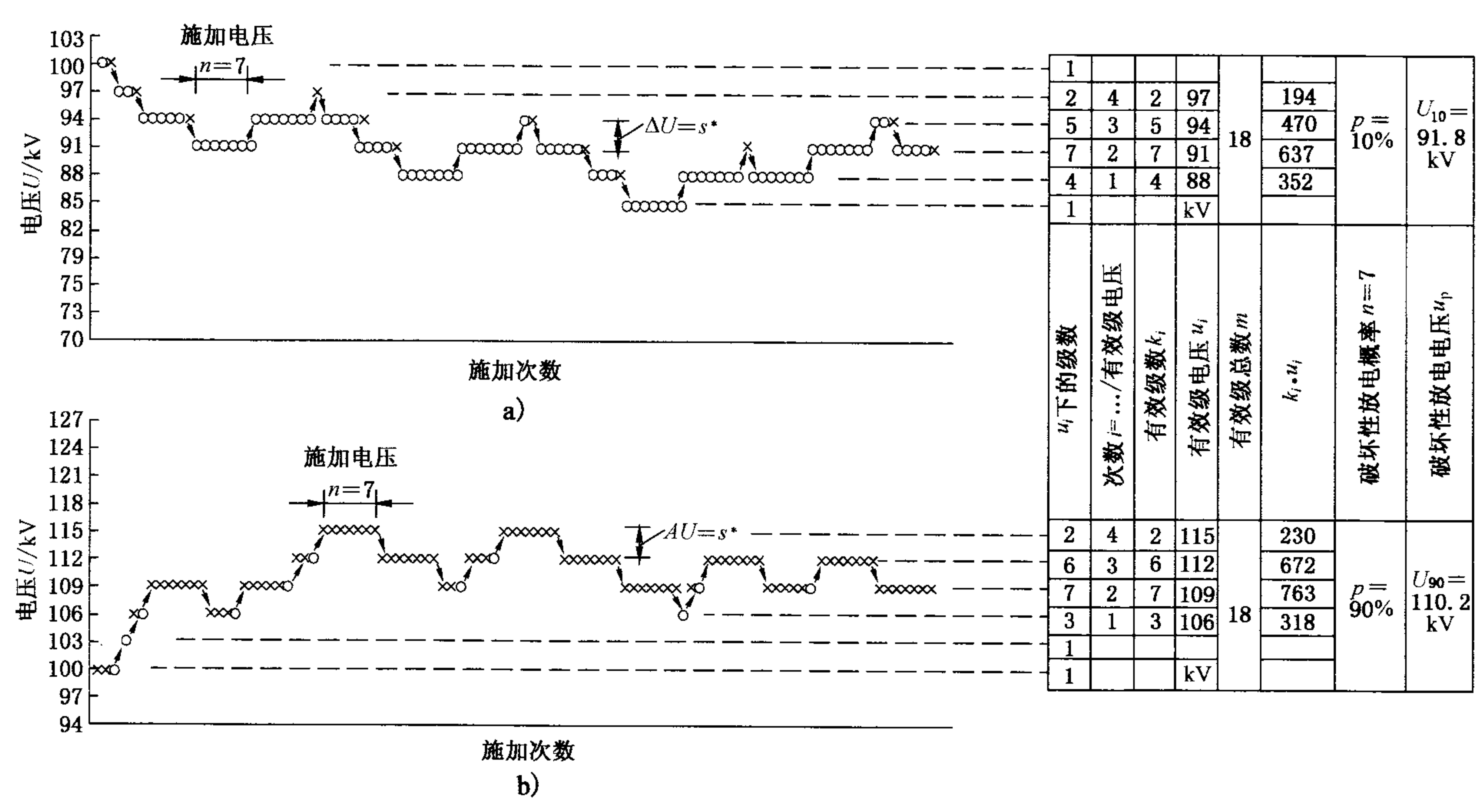


图 A.2 升降法试验分别确定 90%和 10%破坏性放电概率的示例(第二类试验)

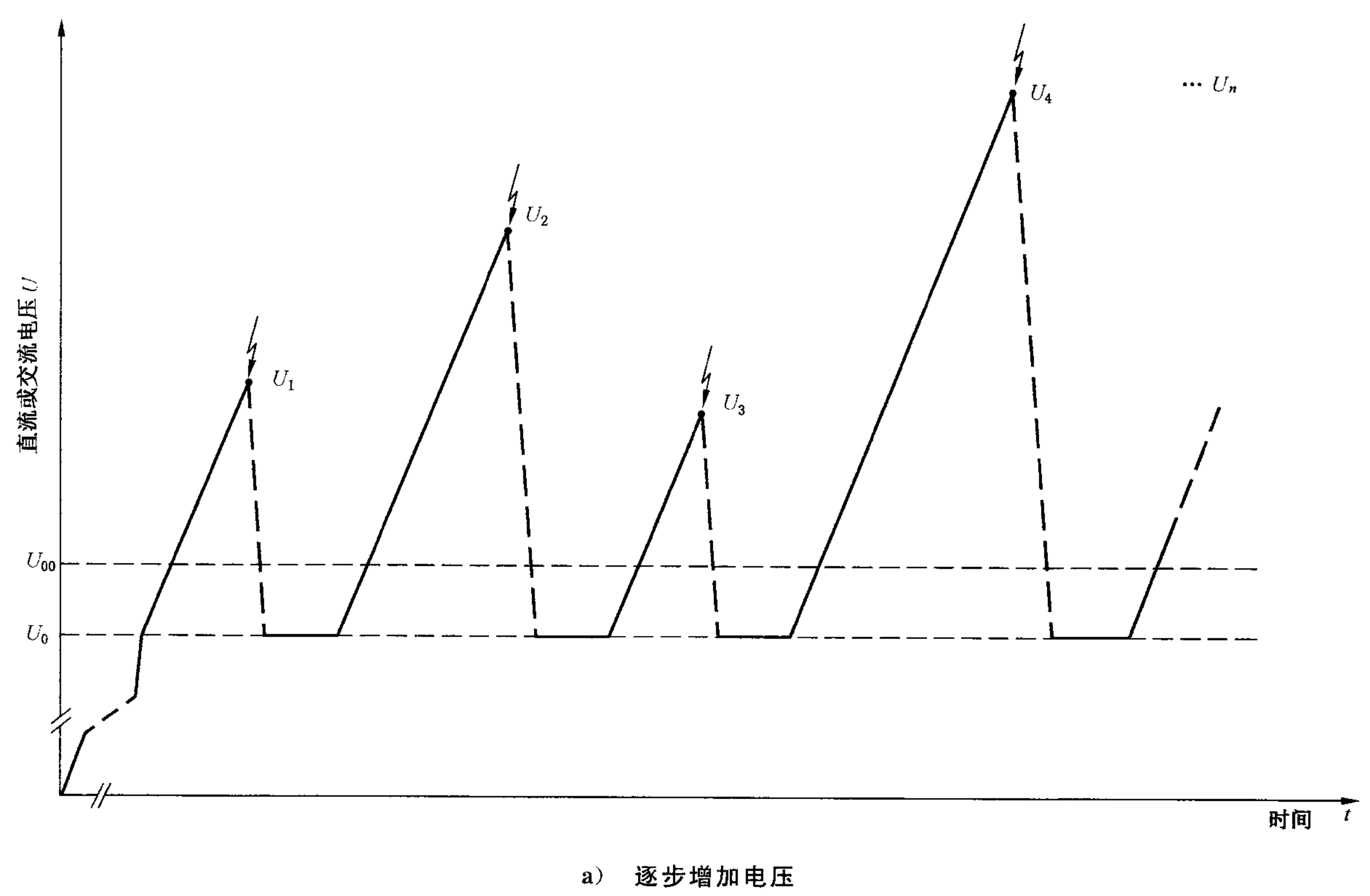
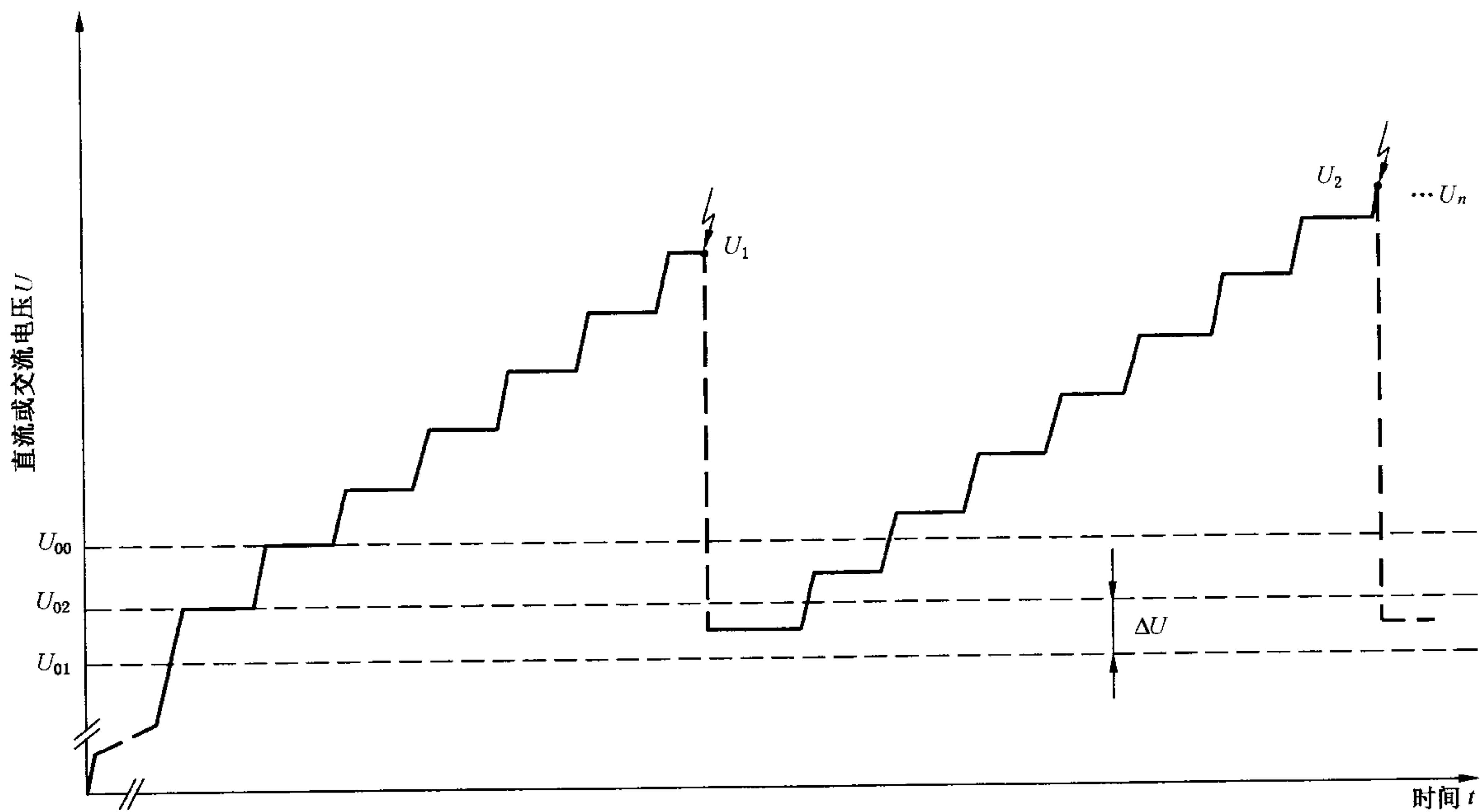


图 A.3 连续增加施加电压



b) 试验示例

图 A.3 (续)

A.3.1 第一类试验结果的处理

在这种情况下,电压水平 U_i 时的放电频率 $f_i (f_i = k_i/n_i)$ 取作电压 U_i 时放电概率 $p(U_i)$ 的估计值,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 。

当概率估算值符合一种特定的概率分布函数 $p(U)$ 时,传统的做法是在专门设计的坐标纸上画出 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点出。

另外应用最小二乘法或似然法(见 A.4)的计算机解析拟合技术可以找出 U_{50} 、 s (以及采用的其他分布函数的参数)和这些估算值的置信限。

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。如果所有的 f_i 值既不是 0 也不是 1,5 级电压($m=5$),每级加压 10 次($n=10$),则 95% 置信限为:

对于 U_{50} :

$$U_{50}^* - 0.72s^* \leq U_{50} \leq U_{50}^* + 0.72s^*$$

对于 s :

$$0.4s^* \leq s \leq 2.0s^*$$

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，其置信宽度趋于最小值。

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：

$$U_p^* = \sum(k_i U_i) / m$$

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 $2\Delta U$ 。

A.1.2 中所述的耐受程序提供了破坏性放电概率为 p 时的 U_p 的估算值 p 由下式给出：

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

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 p 值。

表 A.1

n	70	34	14	7	4	3	2	1
耐受程序 p	0.01	0.02	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30	0.50
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 。按高斯（或正态）分布，参数 U_{50} 和 s 的估算值为：

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

对于其他分布，可以用最大似然法来估计相关的参数（见 A.4）。对于分析破坏性放电发生时间 t_i 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} ：

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

对于 s ：

$$0.74s^* \leq s \leq 1.48s^*$$

A.4 最大似然法的应用

可用最大似然法并采用任何一种概率函数分析上述各类试验的结果。可用这些方法来进行参数的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置信水平 C 的置信限。

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:

$$L_i = p(U_i; U_{50}, s)^{k_i} (1 - p(U_i; U_{50}, s))^{w_i}$$

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 $m_i \geq 1$ 。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:

f ——表征 $U_i (i=1 \cdots n)$ 附近的概率密度函数。

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中找到。对于 $C=0.9$,可用方程 $L(U_{50}, s) = 0.1 L_{\max}$ 来确定这些置信限。

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

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：

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

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：

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

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平坦部分计算电压值的平均值，求取记录曲线的基准水平；
- 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_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 $R_t(t)$ 与基准曲线 $U_m(t)$ 相加,求得试验电压曲线 $U_t(t)$;
- 13) 计算试验电压值 U_t 以及从试验电压曲线上计算时间参数(如图 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, $\beta' = 100 \times (U_e - U_b) / U_e \%$;
- 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

从图形化的波形中手工计算冲击波参数从而实现式(B.1)的求解。

- 1) 手工绘制穿过记录曲线 $U(t)$ 的基准曲线 $U_m(t)$,以便去除波前和峰值处的振荡;
- 2) 找出 $U_m(t)$ 的峰值 U_b ;
- 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:

步骤 1) 至步骤 3) 对全波参考冲击和截波均适用;步骤 4) 至步骤 8) 适用于全波参考冲击波形。

- 1) 从输入电压为零所记录的开始部平坦部分计算电压值的平均值,求取记录曲线的基准水平;
- 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 ;
 - e) 将全波冲击和截波冲击之间的时间差 t_L 调至零;
 - 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 $R(t) = U_0(t) - U_m(t)$, 如图 7;
- 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);
- 12) 将滤波后的剩余曲线 $R_f(t)$ 与基准曲线 $U_m(t)$ 相加, 求得试验电压曲线 $U_t(t)$;
- 13) 计算试验电压值 U_t 以及从试验电压曲线上计算时间参数(如图 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, $\beta' = 100 \times (U_e - U_b) / U_e \%$;
- 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. 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)

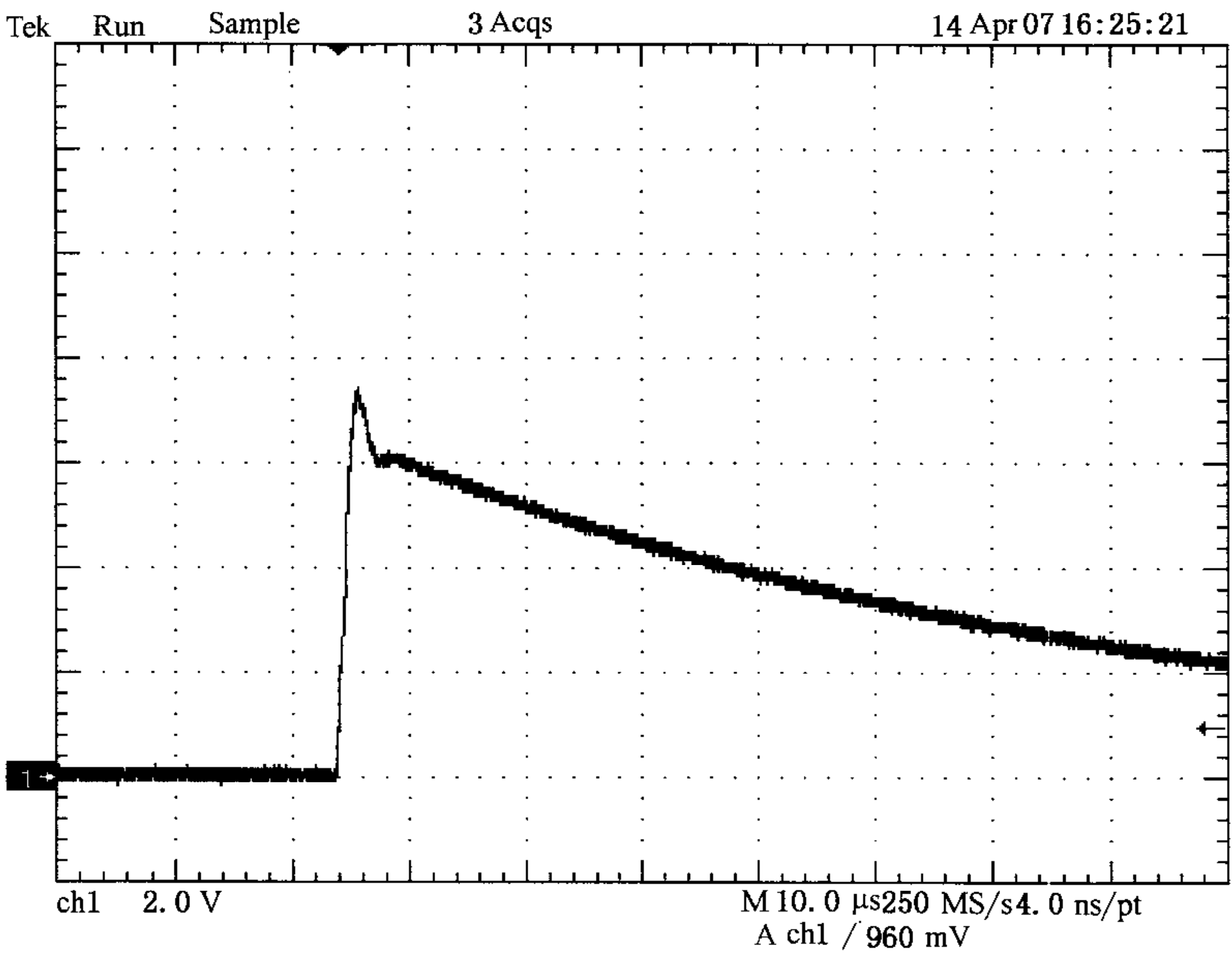


图 B. 1 特高压产品雷电冲击电压波形(正极性)

B.5.1.1 手工计算

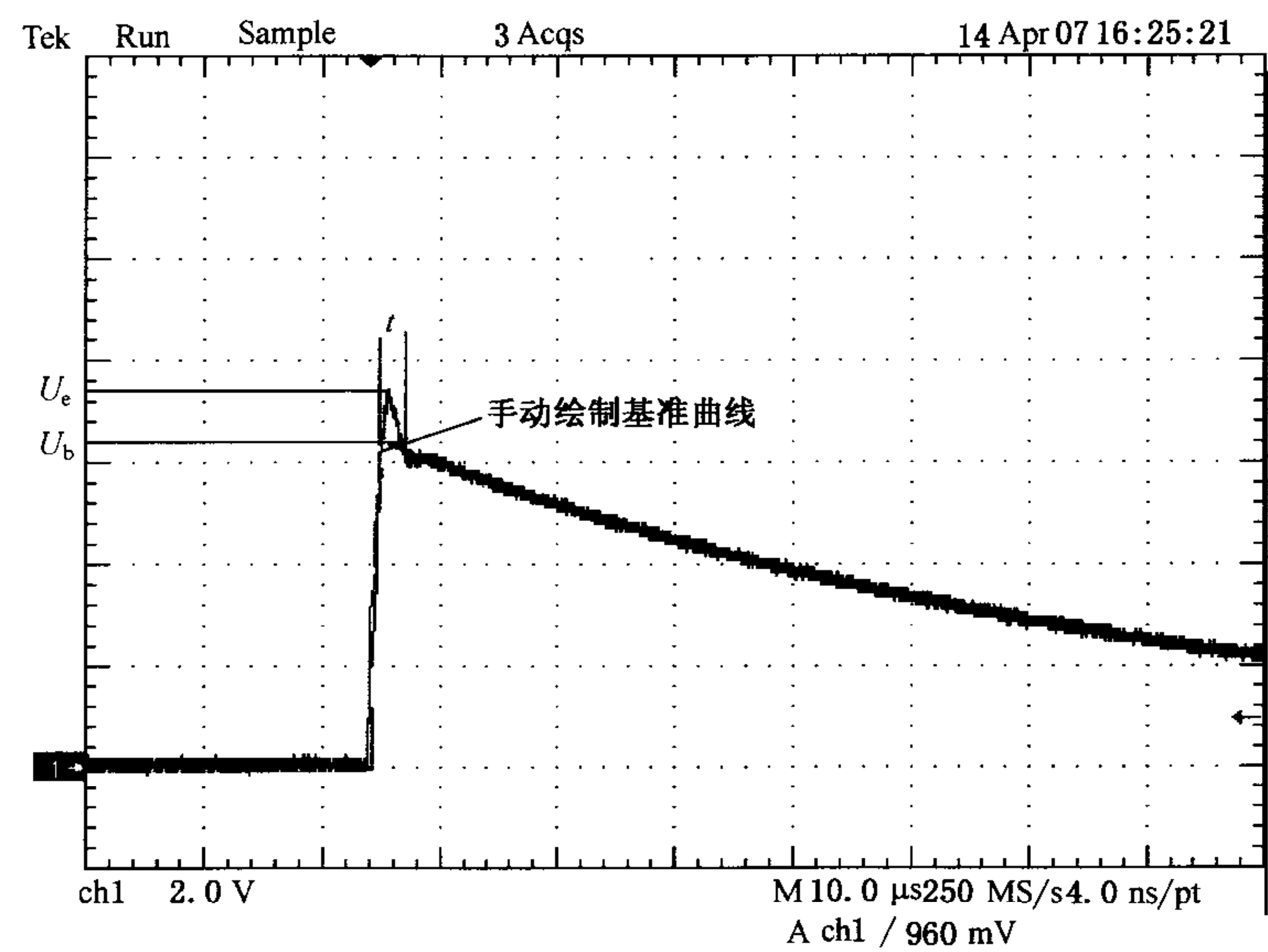


图 B.2 手动绘制基准曲线的雷电冲击电压波形

- 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 $f_0 = 1/2t$ ：
$$t = 10.0 \text{ μs} \times 0.214 = 2.14 \text{ μs}$$
$$f_0 = 1/2t = \frac{1}{2 \times 2.14} = 0.234 \text{ MHz}$$
- 5) 使用方程 $k(f) = \frac{1}{1 + 2.2f^2}$ 计算 $k(f)$ ；
- 6) $k(f) = \frac{1}{1 + 2.2f^2} = \frac{1}{1 + 2.2 \times 0.234^2} = 0.89$ ；
- 7) 使用方程 $U_t = U_b + k(f) \times (U_e - U_b)$ 计算 U_t ：
$$U_t = U_b + k(f) \times (U_e - U_b) = 6.40 + 0.89 \times (7.40 - 6.40) = 6.40 + 0.89 = 7.29 \text{ V}；$$
- 8) 计算相对过冲幅值， $\beta' = 100 \times (U_e - U_b) / U_e \%$ ：
$$\beta' = 100 \times \frac{U_e - U_b}{U_e} \% = 100 \times \frac{7.40 - 6.40}{7.40} \% = 13.5 \%$$
- 9) 以 U_t 为峰值电压，用基准曲线确定时间参数，如图 B.3。

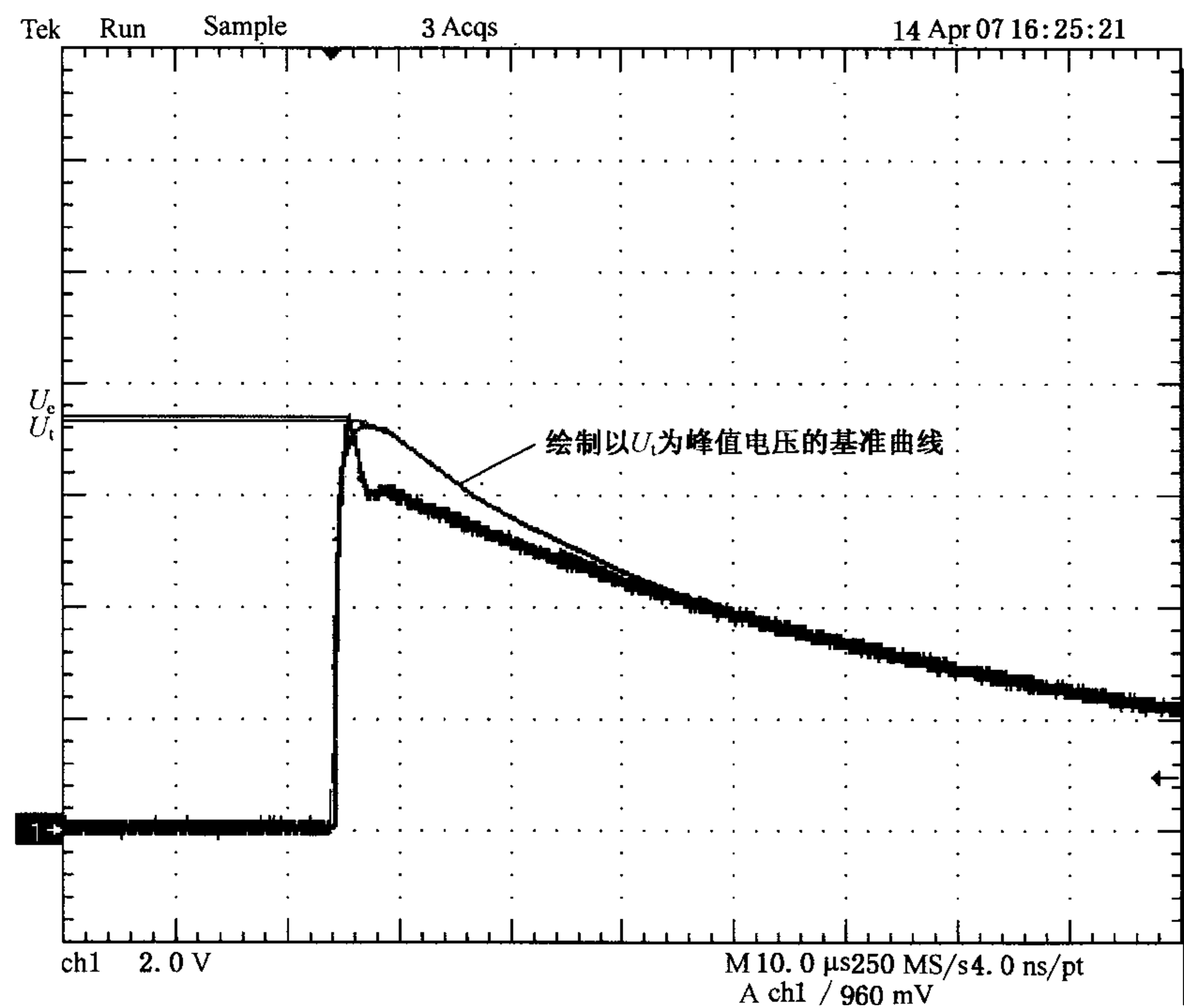


图 B.3 绘制以 U_t 为峰值电压的基准曲线

$$T_1=10.0\text{ }\mu\text{s}\times0.804/0.6=1.34\text{ }\mu\text{s}$$

$$T_2=10.0\text{ }\mu\text{s}\times4.24=42.4\text{ }\mu\text{s}$$

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

$$U_t=7.29\text{ V}; T_1=1.34\text{ }\mu\text{s}; T_2=42.4\text{ }\mu\text{s}; \beta'=13.5\text{ }\text{‰}。$$

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。

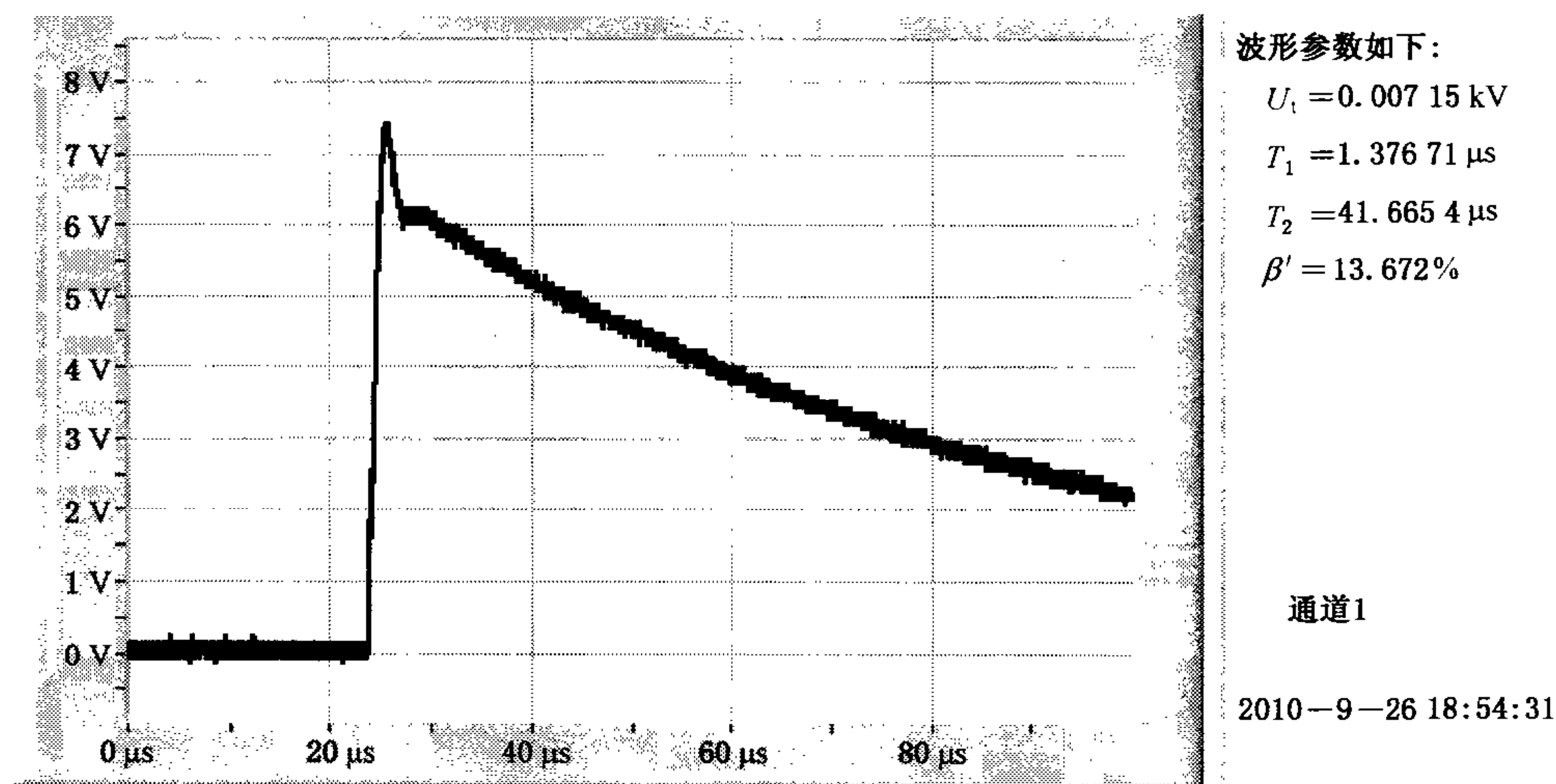


图 B.4 软件测量雷电冲击电压波形界面

$$U_t=7.15\text{ V}; T_1=1.38\text{ }\mu\text{s}; T_2=41.7\text{ }\mu\text{s}; \beta'=13.7\text{ }\text{‰}。$$

B.5.2 示例二(负极性)

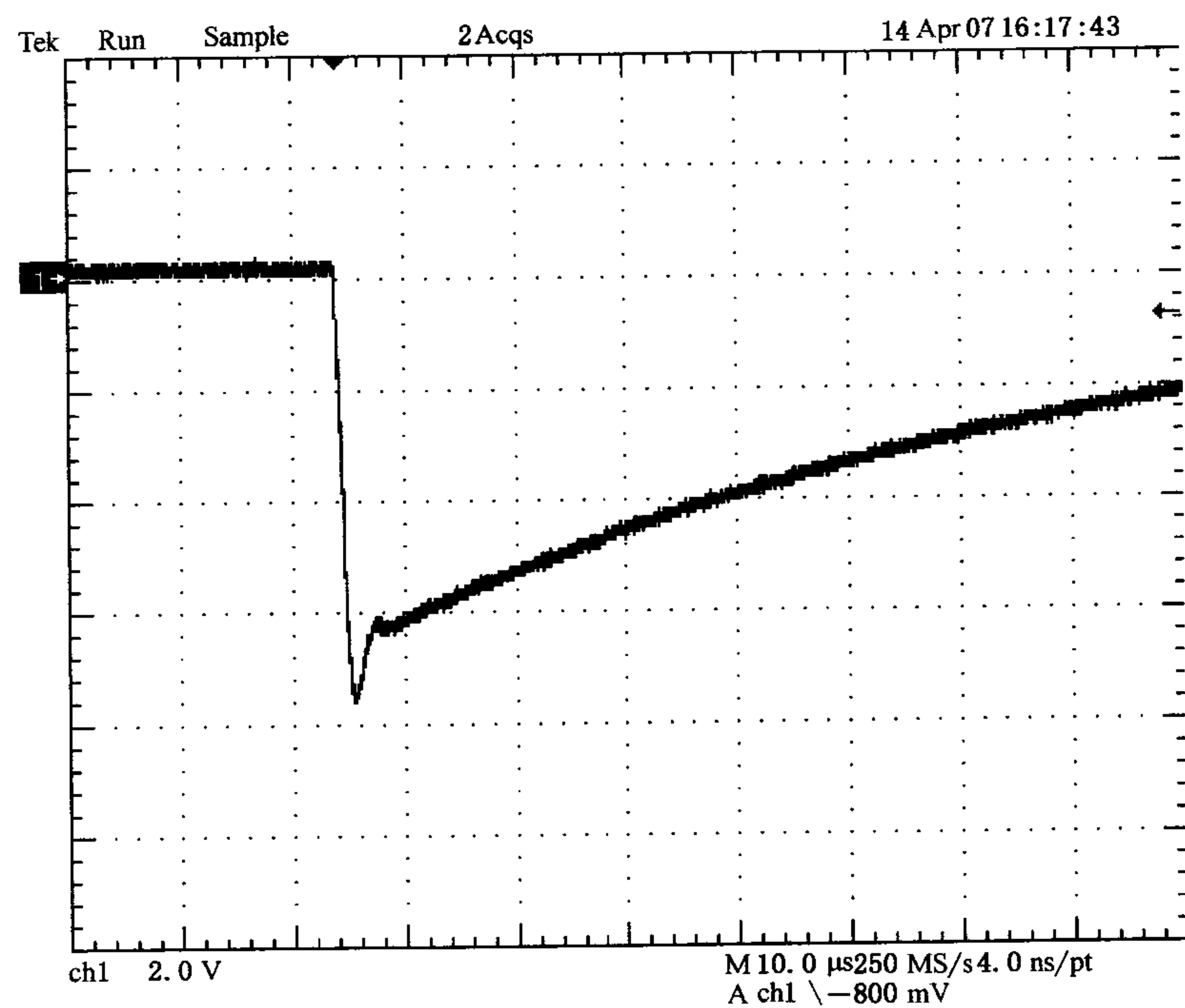


图 B.5 特高压产品雷电冲击电压波形(负极性)

B.5.2.1 手工计算

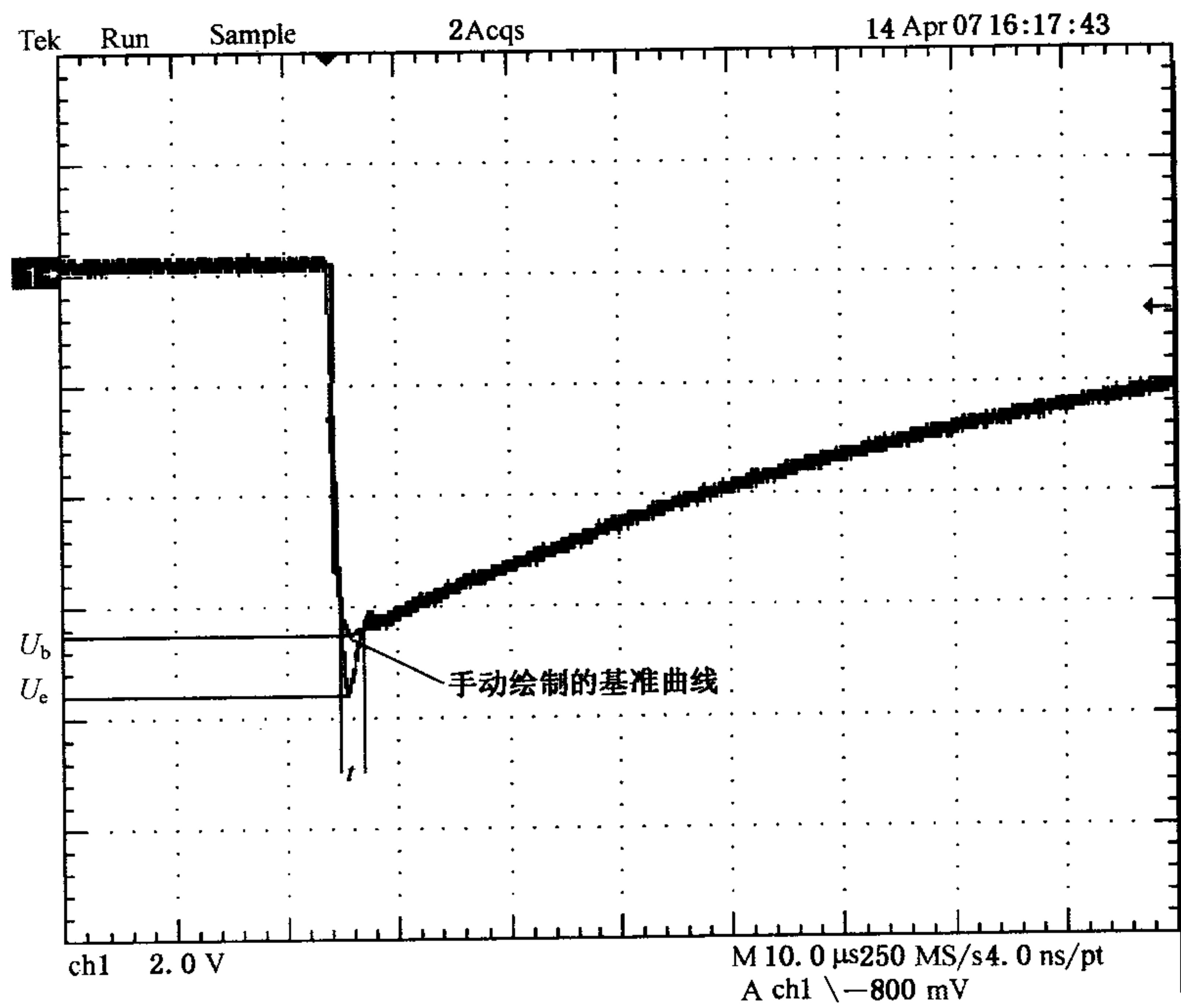


图 B.6 手动绘制基准曲线的雷电冲击电压波形

- 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 ：

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

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隔, 并且计算过冲频率 $f_0 = 1/2t$;

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

5) 使用方程 $k(f) = \frac{1}{1+2.2f^2}$ 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:

$$T_1 = 10.0 \text{ } \mu\text{s} \times 0.818 \div 0.6 = 1.36 \text{ } \mu\text{s}$$

$$T_2 = 10.0 \text{ } \mu\text{s} \times 4.20 = 42.0 \text{ } \mu\text{s}$$

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' :

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

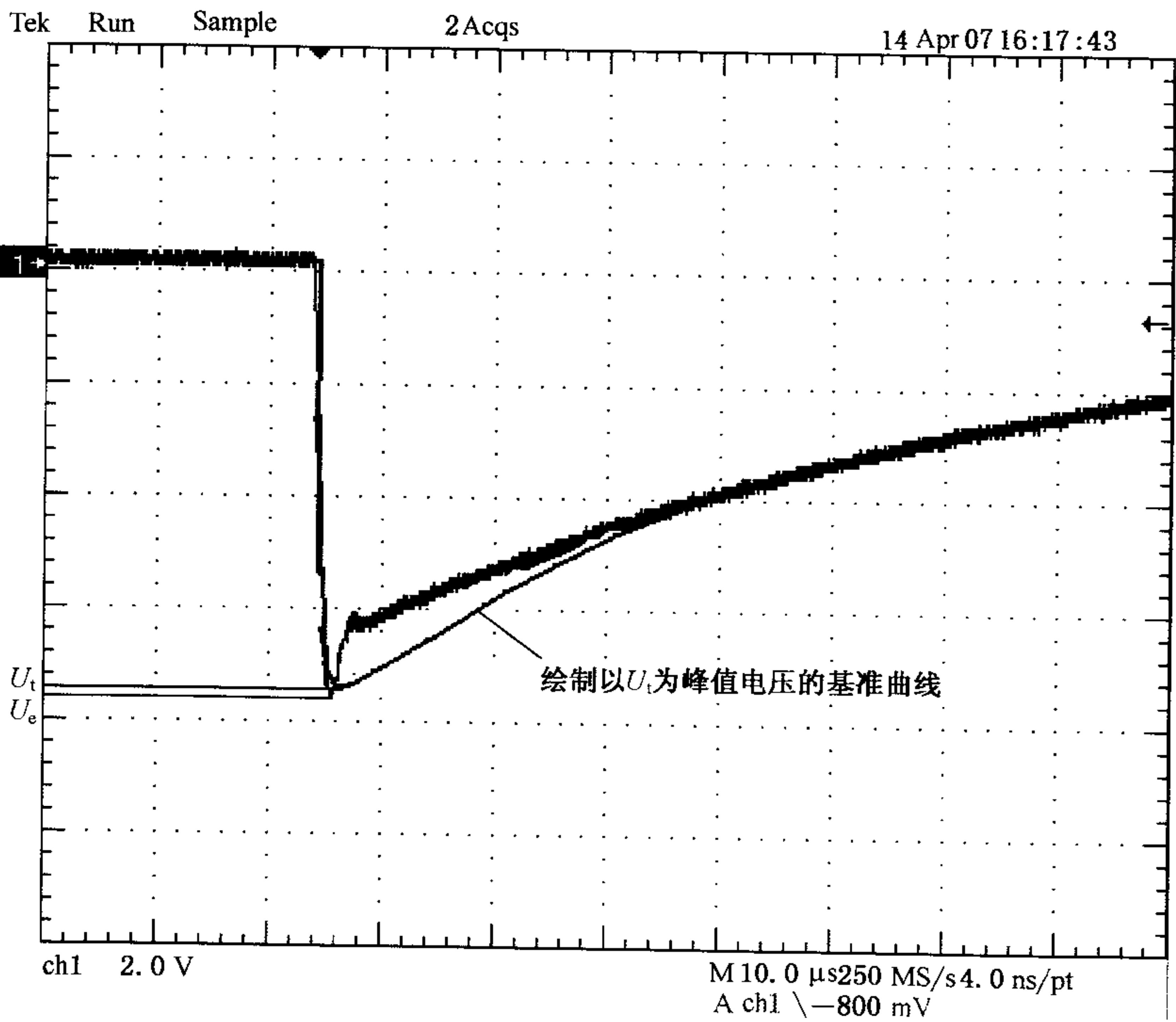


图 B. 7 手动绘制基准曲线的雷电冲击电压波形

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。

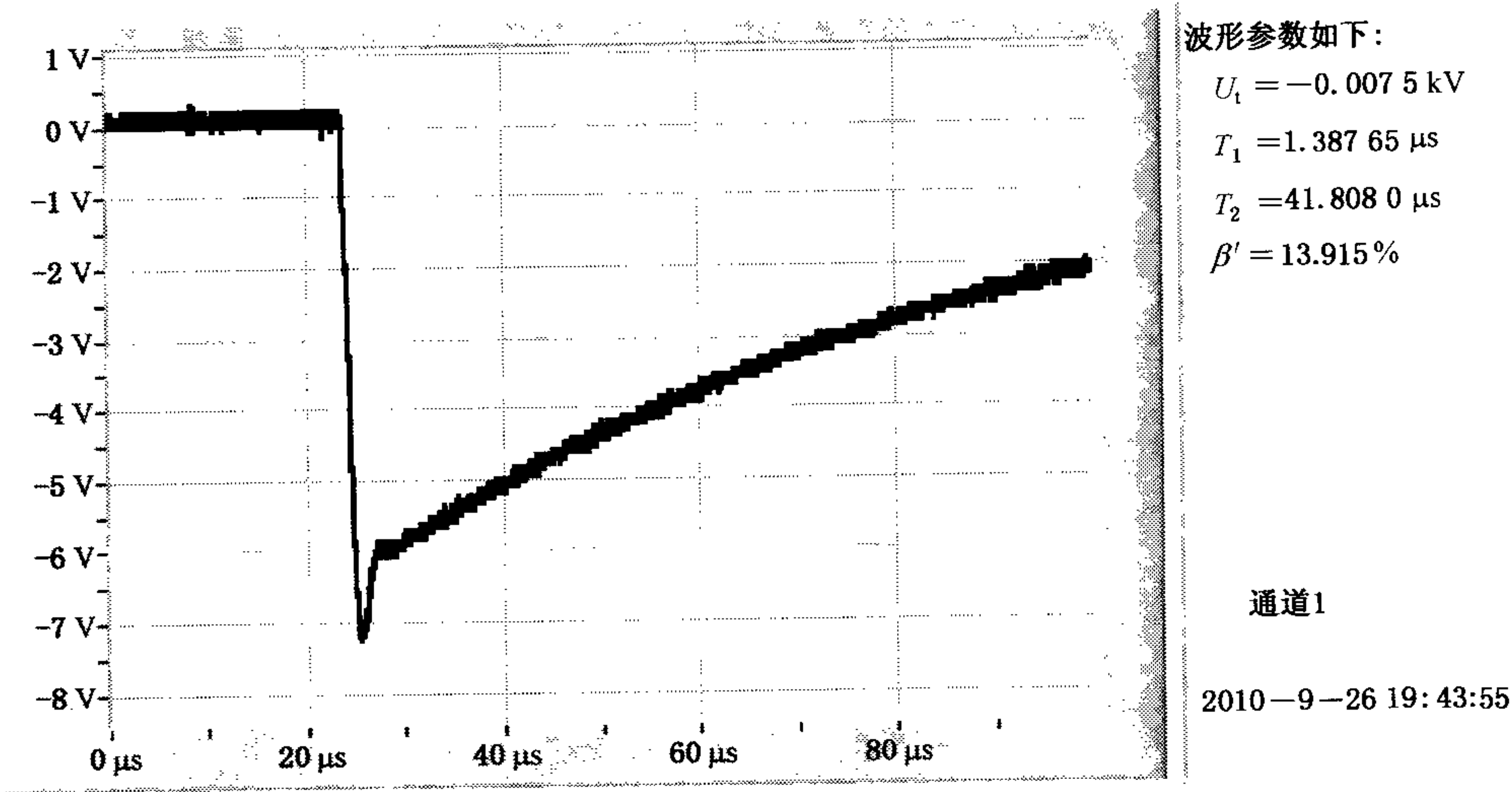


图 B.8 软件测量雷电冲击电压波形界面

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):

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

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 μ s;
- τ_2 ——0.4 μ s;
- 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,也可采用如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,滤波器的衰减仅为所需的一半,而数据需两次通过滤波器,先正向后反向。该滤波器与试验电压函数之间的幅值误差和相位漂移小到可忽略不计。

仅需两个滤波器系数就可实现正向滤波。文[7]导出的创建滤波器的公式如下:

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

$$b_0 = b_1 = x/(1+x)$$
$$a_1 = (1-x)/(1+x)$$
$$x = \tan[(\pi T_s/\sqrt{a})]$$

式中:

$$a = 2.2 \times 10^{-12} (K \text{ 因数滤波器} \text{ 的} -3 \text{ dB 点});$$

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):

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

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 μ s,为了便于测量应当绘制一条平均曲线,该曲线的最大幅值作为峰值被定义为试验电压值”。

这样就出现了突变的情况(如图 D.1)。但当过冲已限制在 5% 及以内时,对示波图这样的处理方法认为是可接受的。

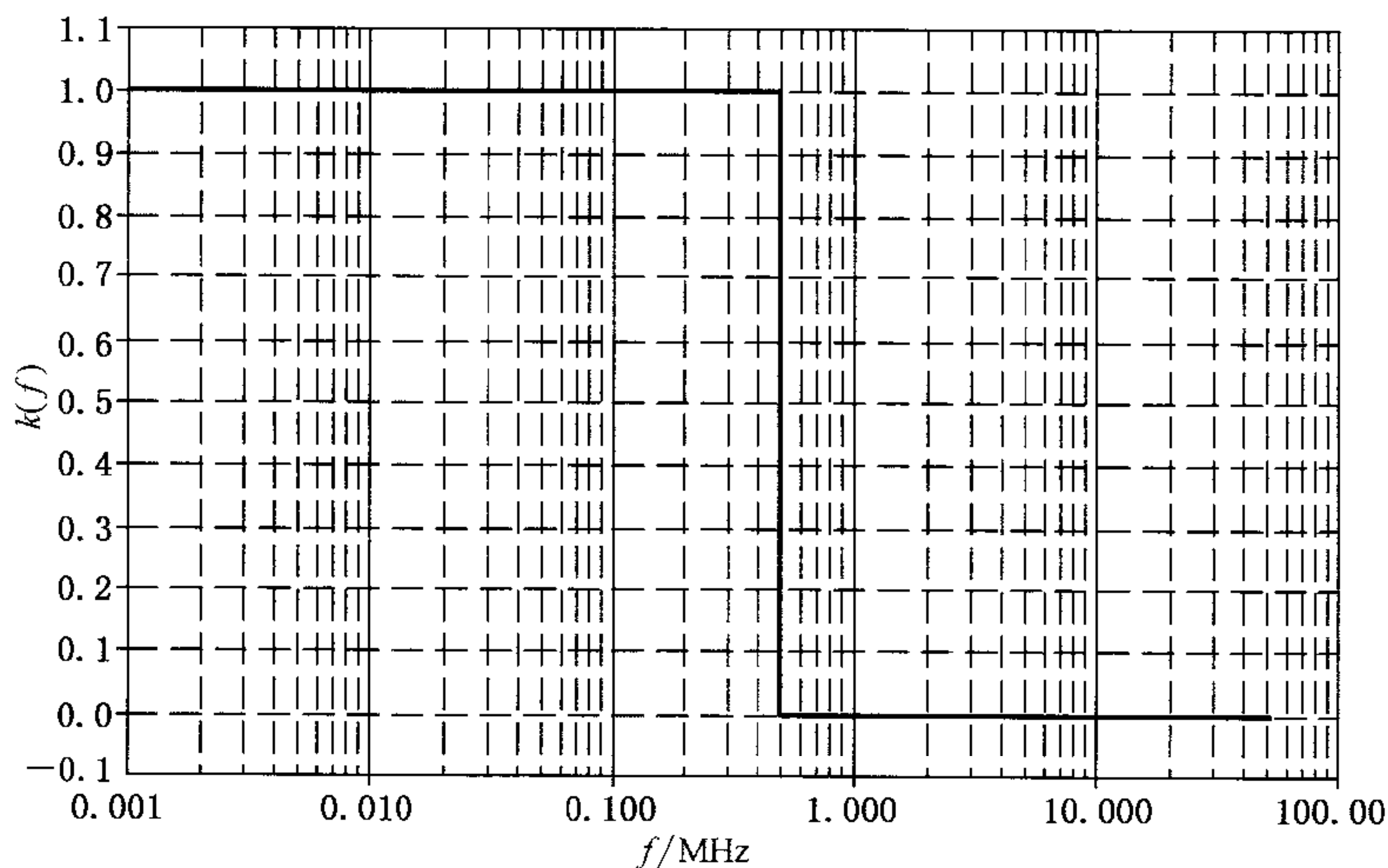


图 D.1 GB/T 16927.1—1997 中有效试验电压函数

这会导致测量一致性的 3 个问题:

- 1) 当过冲频率在 500 kHz 附近时,最大值到平均曲线最大值的突变会导致很大的误差。这种突变不能很好地说明绝缘材料的特性,而且也难以准确确定频率。
- 2) 选择平均曲线随意性很大,这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时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 D1.33(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。

尽管数据非常散乱,但是主要结论很清楚。叠加振荡的影响取决于频率。换句话说,过冲幅值频率对绝缘强度的关系是一种渐变而不是急剧的突变过程。

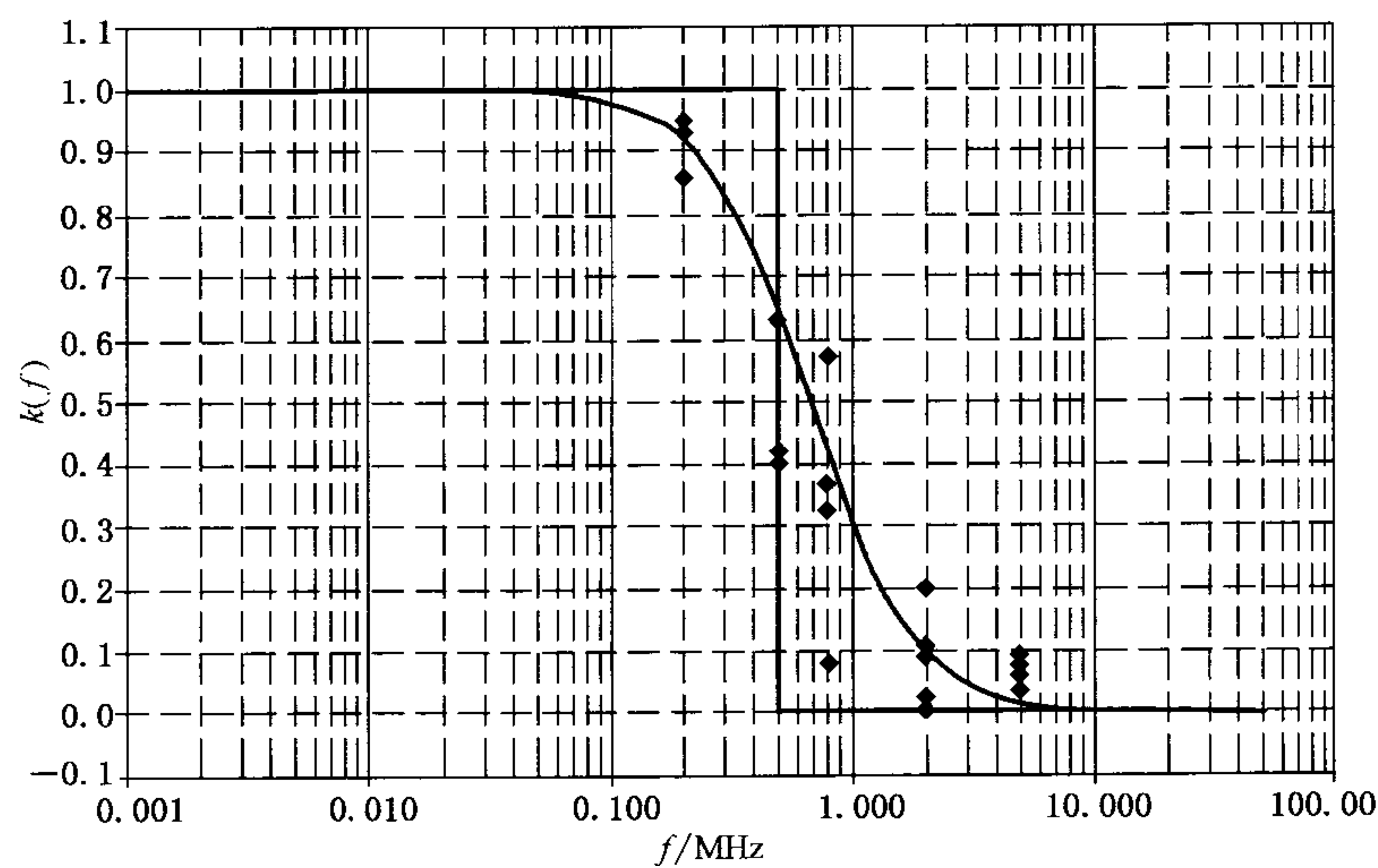


图 D.2 来自欧洲试验的数据点

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：
$$U_t = U_b + k(f)(U_e - U_b) \dots\dots\dots (D.1)$$

- 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,计算得出的起始和终止频率对结果影响不大,提出了一个简单公式(D.2)并被标准采纳。公式如下：

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

- 式中：
- f ——频率(MHz), 见图 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“剩余滤波”的方法,即用 k 因数方程得到测量的冲击与拟合的双指数波之间的差。已经发现双指数函数的选择对最大值的估算并不非常关键,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光滑。

另外,由于定义更加准确,且是基于数字记录处理,可用数字记录仪进行计算,从而可以获得很低的测量不确定度(许多实验室已经进行了计算)。

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中间曲线,只用它来去除剩余曲线(振荡)。保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。
- 若是光滑曲线,仅去除噪声,使得冲击参数可精确保留。
- 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”的随意性导致高的不确定度(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%会使正在试验的设备的结果产生影响。这种情况由有关技术委员会考虑。

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,且可用于检测严重畸变的波形,这种波形严重偏离双指数函数。

必须指出,这种方法是基于对绝缘的研究(如同GB/T 16927.1—1997),并没有考虑高上升率对设备电场分布的影响。

本标准给出了一些新参数的定义(如极限值、平均上升率),这是由CIGRE TF WG33.03建议的。

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。

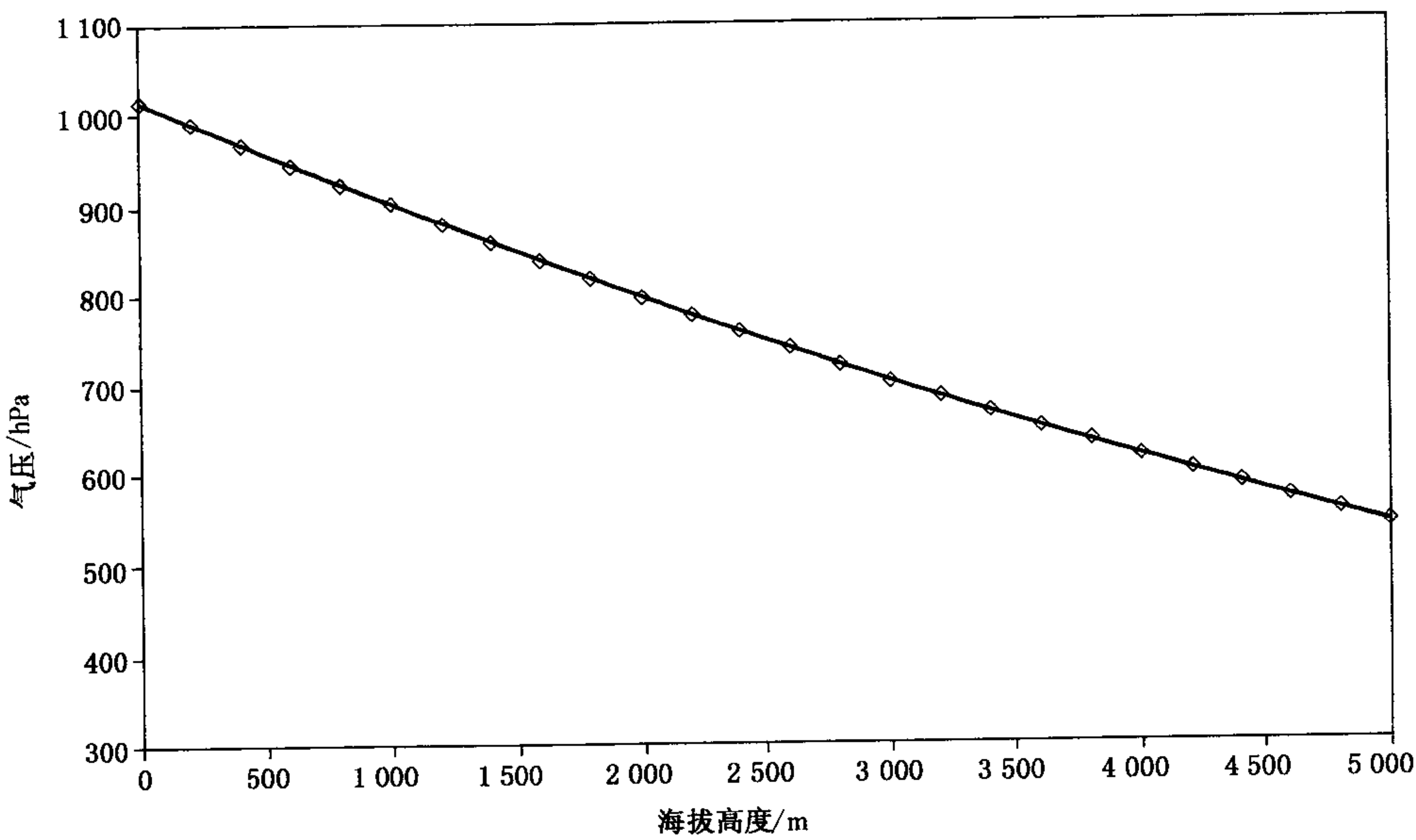


图 E.1 大气压力与海拔高度的关系

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

50%破坏性放电电压 U_{50} 作为计算大气修正因数 K_t 的输入,对 50%破坏性放电试验, U_{50} 是试验结果并可能直接用于 K_t 的计算。可以忽略由于 U_{50} 的误差引起的 K_t 的误差。

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_{50} 的值是不知道的。所以,4.3.4.3 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
0	101.30	25.4	35	2.57	0.990 4	-4.1×10^{-5}
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 $U_{50,0}$ 的初始估计值计算得到的。步骤如下:

规定的试验电压的峰值为:

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

则:

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

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

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

$$k_2=k^w=0.975\ 7$$

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

$$U_{t,0}=k_{t,0}\times U_{op}=194.30\ \text{kV}$$

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:

$$U_{50,i}=1.1\ U_{t,i-1}=1.1\ k_{t,i-1}\times U_{op}$$

下一个重复试验电压值 $U_{t,i}$ 的计算式为:

$$U_{t,i}=k_{t,i}\times U_{op}$$

因此,重复上述步骤,可以得到:

$$U_{50,1}=1.1\ k_{t,0}\times U_{op}=543.72\ \text{kV}$$

$$g=U_{50,1}/(500\ L\delta k)=0.584\ 0$$

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

$$k_2=k^w=0.982\ 0$$

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

$$U_{t,1}=k_{t,1}\times U_{op}=510.36\ \text{kV}$$

$$U_{50,2}=1.1\ k_{t,1}\times U_{op}=561.40\ \text{kV}$$

$$g=U_{50,2}/(500\ L\delta k)=0.603\ 0$$

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

$$k_2=k^w=0.980\ 5$$

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

$$U_{t,2}=k_{t,2}\times U_{op}=506.52\ \text{kV}$$

$$U_{50,3}=1.1\ k_{t,2}\times U_{op}=557.17\ \text{kV}$$

$$g=U_{50,3}/(500\ L\delta k)=0.598\ 5$$

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

$$k_2=k^w=0.980\ 9$$

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

$$U_{t,3}=k_{t,3}\times U_{op}=507.45\ \text{kV}$$

$$U_{50,4}=1.1\ k_{t,3}\times U_{op}=558.19\ \text{kV}$$

$$g=U_{50,4}/(500\ L\delta k)=0.599\ 6$$

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

$$k_2=k^w=0.980\ 8$$

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

$$U_{t,4}=k_{t,4}\times U_{op}=507.22\ \text{kV}$$

上述最后两步中试验电压峰值之差为:

$$507.45\ \text{kV}-507.22\ \text{kV}=0.23\ \text{kV}$$

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 $\Delta k_t(\%)$ 和第一个试验电压峰值的误差 $\Delta U_t(\%)$ 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_i 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。计算结果还表明温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_i 的初始值和收敛值

海拔高度 m	空气压力/kPa	空气温度 ℃	K_i 初始值	K_i 收敛值	ΔK_i 或 ΔU_i (%)
0	101.30	25.4	0.990 4	0.990 7	−0.03
0	101.30	15	0.987 1	0.987 6	−0.05
1 540	83.86	20	0.930 8	0.940 4	−1.03
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

当 K_i 小于 0.95 时(这不能归因于零海拔处的不正常天气),由于不正确的 U_{50} 初始输入值引起 K_i 的误差很明显。引起 K_i 偏低的主要原因是因为是在高海拔地点进行试验。示例表明即使在海拔高度为 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.
 - [2] HAUSCHILD, W. *Engineering the electrodes of HV test systems on the basis of the physics of discharges in air*. 9th ISH Graz (1995), Invited Lecture 9002.
 - [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 Peregrinus 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>.
 - [8] LEWIN, Paul L. , TRAN, Trung N. , SWAFFIELD, David J. , and HÄLLSTRÖM, Jari K. *Zero Phase Filtering for Lightning Impulse Evaluation: A K-factor Filter for the Revision of 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. , and WERLE, P. *Evaluation of lightning-impulse voltages based on experimental results*. Electra No. 204, October 2002.
 - [10] HÄLLSTRÖM, JK. et al, *Applicability of different implementations of k-factor filtering schemes for the revision of IEC 60060-1 and-2*. Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Beijing, 2005, paper B-32, p 92.
 - [11] ISO Guide to the expression of uncertainty in measurement, 1995.
 - [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
北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100013)
北京市西城区三里河北街 16 号(100045)
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
各地新华书店经销

*

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



GB/T 16927.1-2011