

ICS 17.220.20

N 26

备案号: 17630-2006

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 992 — 2006

冲击电压测量实施细则

Detailed implementation guide for Impulse voltage measurement

2006-05-06 发布

2006-10-01 实施

中华人民共和国国家发展和改革委员会 发布

目 次

前言·	· II
1 范围·	· 1
2 规范性引用文件·	· 1
3 冲击电压测量系统·	· 1
4 冲击电压分压系统·	· 3
5 分压系统的验收试验·	· 4
6 冲击电压测量仪器·	· 12
7 数字记录仪的特性、要求和试验·	· 13
8 模拟示波器的特性、要求和试验·	· 22
9 峰值电压表的特性、要求和试验·	· 26
10 测量仪器的使用·	· 27
11 测量系统的组建·	· 28
12 测量系统的特性要求和试验项目·	· 33
13 测量系统的试验·	· 36
14 冲击电压测量·	· 42
15 冲击电压测量不确定度的估算·	· 48

前 言

本标准是根据《国家发展改革委办公厅关于印发 2005 年行业标准项目计划的通知》（发改办工业[2005] 739 号）安排制定的。

本标准在制定过程中参考了原专业标准 ZBF24001—1990《冲击电压测量实施细则》，与之相比有以下主要变化：

- 增加了标准测量系统的特性要求和校准试验，以及计量传递体系；
- 在实现计量传递中，将被试测量系统与标准测量系统的比对试验列为标准方法；
- 列出了分压系统、测量仪器和测量系统需做的试验项目和性能记录；
- 添加了分压系统的线性度等试验；
- 增加了数字记录仪的特性要求和试验；
- 删去了模拟示波器和峰值电压表的有关条文；
- 综合了测量系统的刻度因数、标称时段或阶跃波响应、干扰电平等各项特性的要求；
- 添加了二次分压器、光缆、不间断电源（UPS）等可选用的设备；
- 增加了冲击电压测量程序和波形参数计算软件的评估；
- 增加了冲击电压测量不确定度的估算和实例，替换原先的冲击电压测量误差的条文。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业高电压试验技术标准化技术委员会归口并负责解释。

本标准起草单位：清华大学、中国电力科学研究院。

本标准主要起草人：戚庆成、杨吟梅。

冲击电压测量实施细则

1 范围

本标准给出了冲击电压分压系统、测量仪器和整个测量系统的各项试验以及冲击电压测量等具体的实施方法。

本标准适用于冲击电压测量系统需做的各项试验和各类冲击电压的测量。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB/T 311.6—2005 高电压测量标准空气间隙（idt IEC 60052:2002）

GB/T 16896.1 高电压冲击测量仪器和软件 第一部分：对仪器的要求（mod IEC 61083:2001）

GB/T 16927.1—1997 高电压试验技术 第一部分：一般试验要求（eqv IEC 60060-1:1989）

GB/T 16927.2—1997 高电压试验技术 第二部分：测量系统（eqv IEC 60060-2:1994）

GB/T 17626.4 电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验（idt IEC 61000-4-4:1995）

IEC 60060-2:1994 修正件 1：1996 高电压试验技术 第二部分 附录 H（资料性附录）高电压测量不确定度的估算方法

IEC 61083-2:1996 高电压冲击测量用数字记录仪 第二部分：冲击波形参数测定软件的评估

3 冲击电压测量系统

3.1 冲击电压

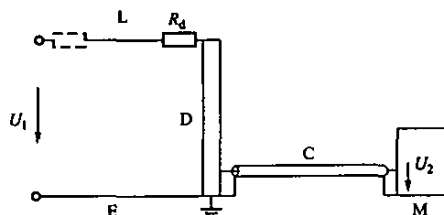
电力设备的冲击试验中采用的冲击电压基本上是单极性的脉冲电压。根据 GB/T 16927.1，冲击电压波形可分为：

- a) 雷电冲击全波（简称雷电全波） 主要参数为峰值 U_p 、波前时间 T_1 、半峰值时间 T_2 。标准雷电全波的波前时间 $T_1=1.2\mu\text{s}$ ，半峰值时间 $T_2=50\mu\text{s}$ 。
- b) 雷电冲击截波（简称雷电截波） 主要参数为峰值 U_p 、截断时间 T_C 。标准雷电截波的截断时间 $T_C=2\mu\text{s}\sim 5\mu\text{s}$ 。对于截断时间 $T_C=0.5\mu\text{s}\sim 2\mu\text{s}$ 的雷电截波可称为波前截断冲击波（简称波前截波）。注：对于截断时间 $T_C<0.5\mu\text{s}$ 的雷电截波，本标准可作参考。
- c) 操作冲击波（简称操作波） 主要参数为峰值 U_p 、波前时间 T_p （又称峰值时间）、半峰值时间 T_2 。标准操作波的波前时间 $T_p=250\mu\text{s}$ ，半峰值时间 $T_2=2500\mu\text{s}$ 。

上述冲击电压波形各项参数的定义见 GB/T 16927.1。

3.2 测量系统

冲击电压测量系统通常由分压器、高压引线、接地回路、测量电缆或光缆以及测量仪器（如数字记录仪、模拟示波器、峰值电压表）等部件所组成，如图 1 所示。测量系统的高压引线常需串接阻尼电阻，它可接在引线的分压器侧，如图 1 中实线表示的 R_d ，也可接在引线的始端，如图 1 中虚线表示的位置。



L—高压引线；E—接地回路； R_d —阻尼电阻；D—分压器；C—测量电缆或光缆；
M—测量仪器； U_1 、 U_2 —分压系统的输入、输出电压

图 1 冲击电压测量系统

测量系统的主要部件为分压器和测量仪器。在验收试验中通常把测量系统按其主要部件分为两部分分别测定它们的特性。测量仪器为一部分，分压器和高压引线、接地回路及测量电缆连接在一起为另一部分。后者以分压器为主体组成一不含测量仪器的系统，其主要功能在于分压，因而可称为分压系统。若测量电缆改用光缆等有源的信号传输系统，则应成为第三部分，需另行测定其特性。

3.3 认可的测量系统

通过历次性能试验和性能校核证实有一定的布置和条件下能满足 GB/T 16927 要求的测量系统。

3.4 标准测量系统

通过校准证实，具有足够高的准确度和稳定性的测量系统，它被用来认可其他的测量系统。

3.5 测量准确度的要求

根据 GB/T 16927.2，冲击电压测量准确度用总不确定度来表征，其总体要求如表 1 所示。

表 1 冲击电压测量准确度的要求

总不确定度 ^a		认可的测量系统	标准测量系统
峰值	雷电全波、操作波、 雷电截波 $T_C \geq 2\mu s$	±3%以内	±1%以内
	波前截波	$0.5\mu s \leq T_C < 2\mu s$	±5%以内
		$T_C < 0.5\mu s$	未作具体规定
波形时间	T_1 、 T_2 、 T_C 、 T_P 等	±10%以内	±5%以内
波形叠加振荡和过冲		可以测出 ^b	

a 总不确定度宜按 IEC60060-2 修正件 1 附录 H 来估算，其置信度不小于 95%（见本标准第 15 章）。
b 在试验回路中可能产生的最高振荡频率 f_{max} （参见 14.2.2.1）以下的频率范围内，其振荡幅值的测量值应不小于实际值的 20%。

3.6 计量传递体系

3.6.1 校准实验室

校准实验室是配备有标准测量系统和专业人员，能对其他标准测量系统和认可的测量系统进行校准的实验室。校准实验室使用的测量装置都应溯源到国家计量标准，并按相关标准通过校准试验；所用的冲击电压标准测量系统还应经过国际或国内同等级别的比对试验，证实其性能符合标准要求。

3.6.2 测试实验室

测试实验室是配备有认可的测量系统和专业人员，能按 GB/T 16927 进行测试的实验室。测试实验室使用的认可测量系统应在经过认证的校准实验室监督下进行首次性能试验，认可后才可开展测试工作。认可的测量系统需在实际使用条件下做的性能试验可以在测试实验室当地进行。测试实验室可备有自己的标准测量系统，国家认证机构可以授权经过认证的测试实验室对其配备的测量系统进行逐次的性

能试验。

3.7 测量系统和部件的试验

3.7.1 一般要求

为保证计量标准的传递和测量准确度，测量系统和部件在使用前和使用期间应进行有关试验，以验证其性能能够满足标准规定的要求。认可的测量系统和部件的试验包括验收试验、性能试验和性能校核。标准测量系统和部件应作认证性的校准试验。

3.7.2 验收试验

测量系统和部件在使用前检验其各项特性的试验。它包括型式试验和例行试验以及首次性能试验。型式试验在样机上进行，例行试验应每台装置都做，验收试验只需做一次。

3.7.3 性能试验

测量系统在工作条件下定期检验其性能的试验。性能试验最好每年做一次，至少每5年应重复一次。测量系统经过较大修理后、系统的布置超出性能记录中规定范围时以及性能校核发现刻度因数已明显变化时也应进行性能试验。

3.7.4 性能校核

测量系统在使用期间验证其最近一次性能试验确定的结果是否仍有效的简化试验。性能校核应按测量系统稳定性的时限重复进行。为了确定系统的稳定性，测量系统刚投入使用期间应经常进行性能校核。

3.7.5 标准测量系统的校准

标准测量系统和部件认证其各项性能符合试验标准要求的试验。校准试验在使用前及以后至少每5年应进行一次。

3.8 测量系统的性能记录

所有的试验结果以及试验所处条件均应作为该测量系统的性能记录予以保存，以备日后查核和对照，详见12.3。

4 冲击电压分压系统

4.1 分压系统

冲击电压分压系统以冲击分压器为中心，其高压侧的输入电压，即被测冲击电压，由高压引线和接地回路引入，低压侧的输出电压通过测量电缆或光缆输出（参见图1）。

分压系统的主体为分压器。分压器是把被测高电压按一定的比率（称作分压比）减小为低电压的测量设备，它由高压臂和低压臂串联组成。高压臂几乎承受全部被测的高电压，低压臂上可引出合适的低电压，以便数字记录仪等测量仪器进行测量。分压器按其高、低压臂采用的电阻、电容或阻容组合元件可分为电阻分压器、电容分压器和阻容分压器。由它们组成的分压系统可相应地分为电阻型、电容型和阻容型分压系统。

4.2 分压系统的特性要求

4.2.1 刻度因数

分压系统的刻度因数是其输入电压与输出电压之比。它在一定条件下是一个常数，并可理解为单位输出电压代表的输入电压值，利用它乘以输出电压就可求得被测冲击电压。

对于认可的测量系统，分压系统刻度因数的不确定度应不大于1%，且在规定的环境温度和净空距离等工作条件范围内应保持稳定。

对于标准测量系统，则要求整个测量系统刻度因数的不确定度应在±0.5%范围内。

4.2.2 动态特性

冲击电压分压系统的动态特性常以阶跃波响应来表征。分压系统的阶跃波响应一般应在接近实际使用条件下的整个测量系统上进行试验，其要求参见12.1.2.2.2及12.1.2.3.2。

4.2.3 耐受电压

分压系统的分压器在干耐压试验中应能耐受 110% 额定值的冲击电压。

4.3 分压系统的验收试验项目

分压系统的验收试验是整个测量系统验收试验的重要部分，试验目的是测定分压系统的各项特性。分压系统的验收试验包括型式试验和例行试验。型式试验主要是分压系统主体部件分压器的试验，通常在同类产品的样机上进行；例行试验要求每套系统都应进行。分压系统的验收试验项目列于表 2，表中也列入了相关的特性要求。若采用光缆等有源的信号传输系统，需参照表 2 项目单独进行试验。

表 2 分压系统的验收试验项目

试验项目	特性要求	型式试验	例行试验
刻度因数	4.2.1	—	5.1
线性度	5.2.1	—	5.2
最大施加次数与短期稳定性	5.3	5.3	5.3
长期稳定性	5.4	5.4	—
温度效应	5.5	5.5	—
邻近效应	5.6	5.6	—
阶跃波响应	4.2.2	5.7, 13.2.2	—
耐受电压	4.2.3	5.8	5.8

4.4 分压系统的性能记录

分压系统的性能记录为整个测量系统性能记录的一部分，详见 12.3。

5 分压系统的验收试验

5.1 刻度因数的测定

分压系统的刻度因数是直接确定被测冲击电压的主要特性参数，它对测量结果的准确度有很大影响。因此，正确测定其刻度因数在冲击电压测量中十分重要。

分压系统刻度因数的测定可采用阻抗法或输入输出法。测定中使用的仪器、设备必须经过校准，所测的量值应可溯源到国家计量标准。

5.1.1 阻抗法

阻抗法采用准确度较高的电桥测量分压器高、低压臂有关的各个阻容参数，并按公式计算分压系统的刻度因数，其接线图和计算公式见表 3~表 5。它是测定刻度因数的基本方法，有利于溯源到国家计量标准。标准测量系统在国际或国内相互比对试验前常先用阻抗法测定其分压系统的刻度因数。

5.1.1.1 电阻型分压系统刻度因数的测定

电阻型分压系统的典型接线和刻度因数的计算公式如表 3 所示。

表 3 电阻型分压系统接线图及 F 的计算公式

匹配方式	接线图	匹配条件和刻度因数 F
始端匹配		$R_2 + R_3 = Z$ $F = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$

表 3 (续)

匹配方式	接线图	匹配条件和刻度因数 F
终端匹配		$R_4 = Z$ $F = \frac{R_1 + R_2 \parallel R_4}{R_2 \parallel R_4} = 1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{R_4}$
两端匹配		$R_2 + R_3 = R_4 = Z$ $F = \frac{R_1 + R_2 \parallel (R_3 + R_4)}{R_2 \parallel (R_3 + R_4)} \times \frac{R_3 + R_4}{R_4}$ $= \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) + \frac{R_1}{R_4}$

注: R_1 —高压臂电阻; R_2 —低压臂电阻; R_3 —始端匹配电阻; R_4 —终端匹配电阻; Z —测量电缆波阻抗。

表 4 电容型分压系统接线图及计算公式

匹配方式	接线图	匹配条件和刻度因数 F
始端匹配		$R_3 = Z$ $F = \frac{C_1 + C_2 + C_3}{C_1} = 1 + \frac{C_2 + C_3}{C_1}$
两端匹配		$R_3 = R_4 = Z \quad C_1 + C_2 = C_3 + C_4$ $F = \frac{C_1 + C_2 + C_3 + C_4}{C_1} = 2 \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right)$

注: C_1 —高压臂电容; C_2 —低压臂电容; C_3 —测量电缆电容; C_4 —终端电容; R_3 —始端匹配电阻; R_4 —终端匹配电阻; Z —测量电缆波阻抗。

表 5 阻尼电容型分压系统

匹配方式	接线图	匹配条件和刻度因数 F
始端匹配		$R_2 + R_3 = Z$ $F = \frac{C_1 + C_2 + C_3}{C_1} = 1 + \frac{C_2 + C_3}{C_1}$
两端匹配		$R_2 + R_3 = R_4 = Z \quad C_1 + C_2 = C_3 + C_4$ $F = \frac{C_1 + C_2 + C_3 + C_4}{C_1} = 2 \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right)$

注: $C_1 \sim C_4$ 、 $R_3 \sim R_4$ 、 Z 的含义同表 4; R_1 —高压臂电阻; R_2 —低压臂电阻。

电阻型分压系统刻度因数的测定中应注意：

- 电阻分压器高、低压臂各有关电阻应采用测量不确定度不超过±0.1%的电桥进行测定。测量电桥应定期校验，以保证其测量准确度。
- 电阻型分压系统高压引线接有阻尼电阻 R_d 时，应将其计入高压臂电阻 R_1 ，即在计算刻度因数 F 时应以：

$$R'_1 = R_1 + R_d \quad (1)$$

取代表 3 刻度因数公式中的 R_1 。

- 当测量电缆较长时，电缆本身的电阻 r 将影响刻度因数 F 。此时，表 3 中始端匹配方式的刻度因数公式不改变，终端和两端匹配方式的刻度因数公式应修改为：

$$\text{终端匹配方式} \quad F' = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \left(1 + \frac{r}{R_4}\right) + \frac{R_1}{R_4} \quad (2)$$

$$\text{两端匹配方式} \quad F' = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \left(1 + \frac{R_3 + r}{R_4}\right) + \frac{R_1}{R_4} \quad (3)$$

此外，也可按每 100m 电缆将使冲击电压峰值衰减 2% 估算，刻度因数 F 可修改为：

$$F' = \frac{F}{1 - 0.0002 \times L} \quad (4)$$

式中：

L ——测量电缆的长度，m。

- 电阻型分压系统的电阻元件 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 和 R_d 最好选用相同的材料。在采用不同材料时，应按各自的温度系数和测试时的温度，把所测的电阻值均折算为使用温度或标准室温 20℃ 下的电阻值。若使用中电阻元件的温升较大，应考虑工作温升引起阻值变化的影响。

5.1.1.2 电容型、阻尼电容型分压系统刻度因数的测定

电容型和阻尼电容型分压系统的典型接线和刻度因数的计算公式分别如表 4 和表 5 所示（并联的阻容型分压系统因不常用而从略）。

电容型、阻尼电容型分压系统刻度因数的测定中应注意：

- 分压器高、低压臂各有关电容应采用测量不确定度不超过±0.5%（尽可能采用±0.1%）的三点式电容电桥进行测定。电桥应定期校验，以保证其测量准确度。实测前可用标准电容器校验电桥的测量准确度是否符合要求。若电桥的量程允许，高、低压臂各有关电容的测量尽量采用同一台电桥。
- 分压器高压臂与周围接地体或带电体之间存在杂散电容，因此从高压臂下端 b 点看进去是这些杂散电容与高压臂本体电容综合起来的等效电容，见图 2。由于周围物体的这种影响，在刻度因数的计算中不能直接用高压臂本体各个电容元件串联的电容值 C_{1n} ，而应采用上述等效电容的实测值作为高压臂电容 C_1 。实测时，周围接地体的影响将使 $C_1 < C_{1n}$ ，带电体的影响将使 $C_1 > C_{1n}$ ，两者综合影响的结果取决于实际布置情况。

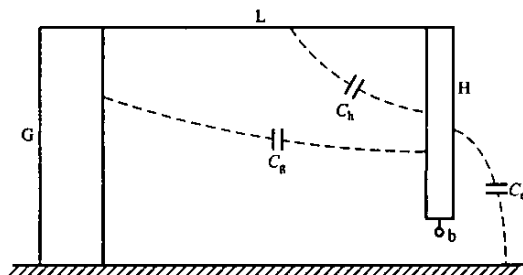
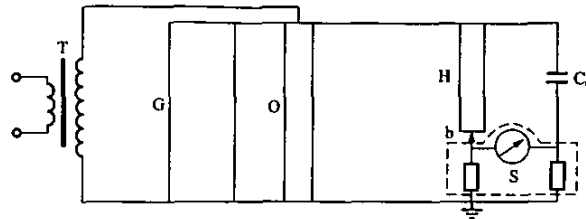


图 2 分压器高压臂与周围物体间的杂散电容
G—冲击电压发生器等；L—高压引线；H—分压器高压臂；b—高压臂下端与低压臂的连接点； C_b —高压臂与冲击电压发生器及试品等带电物体间的杂散电容； C_R —高压臂与高压引线间的杂散电容； C_s —高压臂对地电容

- c) 测量高压臂电容 C_1 (等效电容) 的接线如图 3 所示。测量时, 分压器的低压臂应解除, 并把下端连接点 b 接到电桥桥体。分压器周围环境的布置应与实际使用时相同。冲击电压发生器和试品按其所处的位置与测量系统相连 (注意测量电源的容量不可超载, 若容量不足, 可拆除阻值较小的波头、波尾电阻), 这样可使发生器和试品的电位分布基本上与实际使用时一致。按此接线测得的电容值是高压臂的等效电容的实测值, 即计算刻度因数需用的高压臂电容值 C_1 。



T—测量电源; G—冲击电压发生器; O—试品; H—分压器高压臂;
b—高压臂下端与低压臂的连接点; S—测量电桥桥体; C_0 —标准电容器

图 3 测量高压臂电容的接线

- d) 测量分压器高压臂电容时, 试验电压通常采用 10kV~20kV, 但有时与测量低压臂电容时一样采用低电压。为了检验在更高电压下电晕等可能产生的影响, 试验电压可按标准电容器等试验设备的额定电压为限, 采用数 10 万至数百万伏。此时, 由于试验电压较高, 冲击电压发生器及试品等应从测量回路中解除。
- e) 分压器低压臂电容 C_2 和电缆终端电容 C_4 一般较大, 因而低压臂杂散电容、仪器入口电容的影响可以忽略。测量电缆较短时, 电缆电容 C_3 也可略去不计。否则, 按所有这些电容并联的计算值或实测值作为低压臂的总电容计算刻度因数。
- f) 分压器高、低压臂各有关电容可能与频率有关。测量这些电容时的频率原则上应尽量与被测电压的频率相近。考虑到电桥的实际使用情况, 若工频 (50Hz) 电桥测量准确度较高, 则以此测量结果为准, 其他高频 (1kHz 及以上) 电桥测量准确度较低的结果作为校核; 若高频电桥能测得较准确的结果, 则应以此计算刻度因数。
- g) 分压器高、低压臂各有关电容在温度升高时可能有不同的变化, 此时需在分压器的工作温度范围内作一温度校正曲线。
- h) 分压器高、低压臂各有关电容元件采用相同材料时, 温度及频率等影响可以避免。

5.1.1.3 测量电缆波阻抗的测定

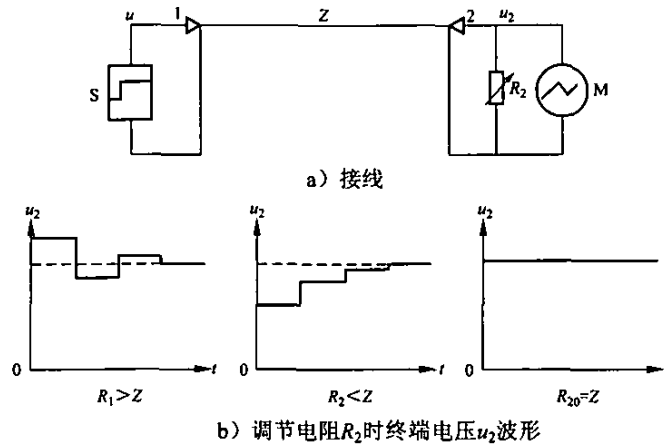
分压系统接线中匹配条件要求测量电缆端部匹配电阻应正好等于电缆的波阻抗 Z , 具体接线与计算参见表 3~表 5。测量电缆波阻抗 Z 的数值应以实测值为准, 电缆产品规格给定的数值可作参考。

电缆波阻抗的测定方法有阶跃波法、谐振法、电感电容法、开路短路阻抗法等。

5.1.1.3.1 阶跃波法

阶跃波法测定电缆波阻抗的接线如图 4 a) 所示。阶跃波发生器 S 产生的阶跃波电压 u 作用于测量电缆始端 1, 测量电缆终端 2 接一电阻 R_2 , 并以示波器 M 观测终端电压 u_2 波形。调节终端电阻 R_2 , 使电压 u_2 上的振荡消除而呈现为阶跃波形, 见图 4 b)。此时的终端电阻值 R_{20} 即等于测量电缆波阻抗 Z 。

$$Z=R_{20} \quad (5)$$



S—阶跃波发生器；Z—电缆波阻抗； R_2 —终端电阻；M—示波器； u —阶跃波电压； u_2 —终端电压

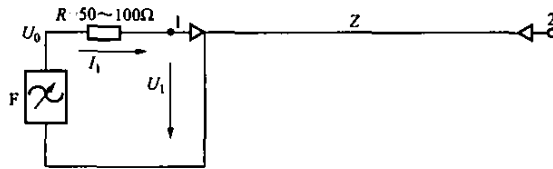
图4 阶跃波法测定电缆波阻抗

5.1.1.3.2 谐振法

谐振法测定电缆波阻抗的接线如图5所示，接线中测量电缆终端开路。调节高频信号发生器F的频率，保持其输出电压 u_0 幅值不变，观测电缆始端电压 u_1 。在信号由最低频向高频变化过程中，始端电压 u_1 第一次降到最低值时，记下此时的谐振频率 f_0 。另外用精密电桥测定此电缆段的电容 C 。于是该测量电缆的波阻抗 Z 可按下式确定：

$$Z = \frac{1}{4f_0C} \quad (6)$$

谐振法也可在测量电缆终端短路情况下测定波阻抗。此时需观测始端电压 U_1 第一次升到最高值时的谐振频率，它应与终端开路时测得的谐振频率 f_0 相同。同样可按式(6)确定该测量电缆的波阻抗 Z 。



F—高频信号发生器；R—电阻；Z—电缆波阻抗

图5 谐振法测定电缆波阻抗

5.1.1.3.3 电感电容法

利用精密电桥测定一电缆段终端短路时的电感 L 和终端开路时的电容 C ，则该测量电缆的波阻抗可确定为：

$$Z = \sqrt{L/C} \quad (7)$$

5.1.1.3.4 开路短路阻抗法

开路短路阻抗法测定电缆波阻抗的接线与图5谐振法接线相同。测定时高频信号发生器F的信号频率保持不变，测量始端电压 U_1 及电阻 R 上的压降 U_R 。由此可求得该频率下电缆的始端阻抗 Z_1 ：

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_1}{U_R} R \quad (8)$$

利用这样的方法，先把终端 2 开路，测定电缆的始端阻抗 Z_{10} ；然后把终端 2 短路，再测定电缆的始端阻抗 Z_{1k} 。于是该测量电缆波阻抗 Z 可确定为：

$$Z = \sqrt{Z_{10}Z_{1k}} \quad (9)$$

由于电缆的波阻抗 Z 与频率无关，测定时可在任意频率下进行。利用波阻抗的这一特点，可在若干不同频率下测定电缆波阻抗，对比测定结果进行互校。在不同频率下，始端阻抗 Z_{10} 和 Z_{1k} 虽然都有相应的变化，但测得的电缆波阻抗 Z 应相同。

此法测定波阻抗的准确度取决于高频电压的测量，因此必须注意其测量误差。若高频电压表准确度不高，不能以此法测定的结果为准。

5.1.2 输入输出法

输入输出法采用标准测量系统或测量设备与高准确度的测量仪器同时测量分压系统的输入电压 U_1 和输出电压 U_2 （参见图 1），按两者之比确定分压系统的刻度因数 F ：

$$F = U_1 / U_2 \quad (10)$$

这是测定刻度因数的重要方法，利用校准过的测量仪器设备可使测量结果溯源到国家计量标准。

5.1.2.1 采用标准测量系统（或分压器）测定刻度因数

采用标准测量系统（或分压器）在冲击电压下测定刻度因数的试验设备平面布置，如图 6 所示。

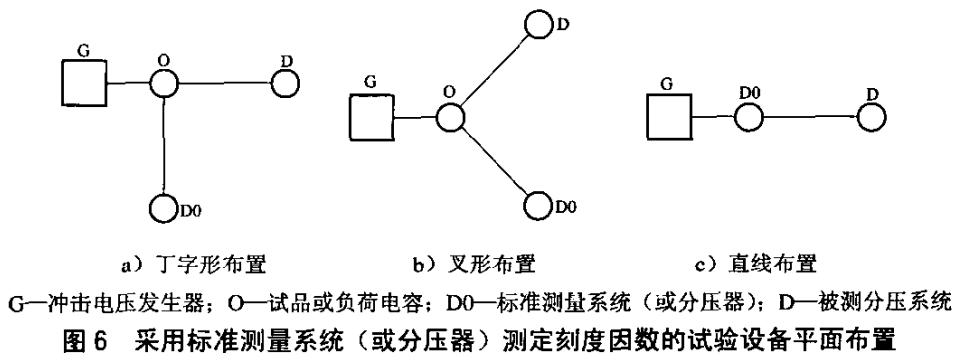


图 6 a)、b) 丁字形和叉形布置中标准测量系统和被测分压系统的高压引线互相垂直，以减少两者之间的相互影响。图 6 c) 直线布置中标准分压器直接接在被测分压系统高压引线始端。测定时用标准测量系统（或分压器）测量被测分压系统的输入电压，同时用高准确度的示波器测量被测分压系统的输出电压，两者之比即刻度因数。

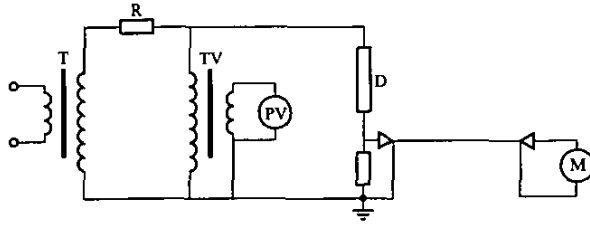
测定中采用的冲击电压应足够高，至少应不低于被测分压系统额定电压的 1/5。

标准测量系统中常采用 200kV~500kV 标准电阻分压器或标准电容分压器。利用高、低压标准电容器，采取特种接线后，也可用作冲击测量用的标准分压器。但把高、低压标准电容器直接相连只能用作工频测量用的标准分压器，因而仅适用于工频电压下的测定，其使用条件参见 5.1.2.2。

5.1.2.2 采用标准电压互感器测定刻度因数

采用标准电压互感器在工频高电压下测定刻度因数的接线如图 7 所示。测定时用 0.1~0.5 级标准电压互感器直接测量被测分压系统的输入电压，同时用 0.1~0.5 级静电电压表测量被测分压系统的输出电压。由两者之比计算刻度因数。

由于使用工频电压进行测试，此法仅适用于电容型和阻尼电容型分压系统刻度因数的测定，并且应以分压系统的冲击与工频的刻度因数相同为先决条件（即首先应分别测定分压系统的冲击和工频的刻度因数，若两者相等，往后就可采用此法）。



T—工频试验变压器；R—保护电阻；TV—标准电压互感器；
PV—低压电压表；D—被测分压系统；M—测量仪器

图7 采用标准电压互感测定刻度因数

5.2 线性度试验

5.2.1 试验要求

试验电压采用的波形为雷电全波和操作波；极性为正与负；幅度取分压系统测量范围的最大值和最小值以及其间大致等分的三个电压值。

在上述试验电压的5个幅度下，分压系统刻度因数的变化应不超过其平均值的 $\pm 1\%$ 。这可认为该分压系统是线性的。

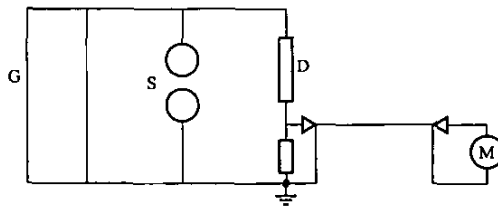
5.2.2 标准方法

采用标准测量系统（或分压器）测定被测分压系统的刻度因数（参见5.1.2.1），在规定的冲击试验电压5个幅度下检验其变化是否符合5.2.1的要求。

5.2.3 替代方法

根据实际试验条件，也可采取如下替代方法进行线性度试验：

- 已按标准方法通过线性度试验的认可的测量系统可替代标准测量系统，用以检验被测分压系统的线性度，参见5.2.2。
- 采用测量球隙测量被测分压系统的输入电压，如图8所示。由测得的输入电压与分压系统的输出电压之比计算该系统的刻度因数，在规定的冲击试验电压5个幅度下检验其变化是否符合5.2.1的要求。测量球隙装置应符合GB/T 311.6—2005规定要求，并用放电火花照射（可利用冲击电压发生器中间球隙放电产生的照射），整个试验应在短时间内完成。这样，测量球隙的放电电压就不必作大气条件修正，且其偏差可在 $\pm 1\%$ 以内。



G—冲击电压发生器；S—测量球隙；D—被测分压系统；M—测量仪器

图8 采用测量球隙进行线性度试验

- 利用冲击电压发生器的充电电压检验被测分压系统的线性度。试验中冲击电压发生器的充电条件应保持稳定。在规定的冲击试验电压5个幅度下，计算分压系统的输出电压与相应的充电电压之比。若此比值的在其平均值的 $\pm 1\%$ 范围内，则可认为该分压系统是线性的。
- 采用电场强度测量仪检验被测分压系统的线性度。电场强度测量仪应置于电场强度与试验电压成比例的位置。在规定的冲击试验电压5个幅度下，计算分压系统的输出电压与相应

的电场强度之比。若此比值的变化在其平均值的 $\pm 1\%$ 范围内，则可认为该分压系统是线性的。

- e) 多级分压系统可分级进行线性度试验。由几个相同单元组成的分压器为主体的被测分压系统，若等同的系统（如样机）整体已通过线性度试验，则可按上述方法分别检验每一单元的线性度。各单元通过线性度试验，且组装成的分压系统整体在最大工作电压下无可见电晕，则可认为该分压系统是线性的。

以上试验方法较简便易行，但试验结果不满足 5.2.1 规定要求时未必表示被测分压系统是非线性的。在这种情况下，应采用标准方法 5.2.2 或替代方法 5.2.3 a) 确认该系统的线性度。

5.3 最大施加次数与短期稳定性试验

被测分压系统在额定电压下以最大施加次数进行试验，试验持续时间与实际可能连续使用时间相当。试验后 10min 内立即测定该分压系统的刻度因数，它与试验前的刻度因数值相差不应超过 $\pm 1\%$ 。

被测分压系统的最大施加次数可由厂方与用户协商，无明确规定时应为每分钟 2 次。

5.4 长期稳定性检验

分压系统中分压器单个元件的稳定性、电压效应、温度效应等可由厂方提供数据或通过型式试验确定。这些影响引起该分压系统刻度因数在后续的历次性能试验中的变化应不超过 $\pm 1\%$ 。

分压系统的长期稳定性通过历次性能试验进行检验。

5.5 温度效应检测与估算

由于温度变化引起分压系统刻度因数或阻、容参数的变动，可在不同温度下检测或按单个元件的温度系数进行估算。温度系数可由厂方提供数据，并列入性能记录。对于温度变化很大的情况，可采用温度校正系数予以校正，所用的温度校正也应列入性能记录。不论温度效应的影响大小，计及温度校正后，分压系统刻度因数的变动应在 $\pm 1\%$ 以内。

在正常工作条件下，冲击分压器中电阻材料的发热按绝热过程计算温升：

$$\Delta T = W / MS \quad (11)$$

式中：

ΔT ——温升，K；

W ——电阻中耗散的能量，J；

M ——电阻的质量，kg；

S ——电阻材料的比热，J / (kg · K)。

对于重复加压的情况，应考虑累积的温升，此时允许温升取决于电阻材料的温度系数和所用绝缘材料的温度等级。

5.6 邻近效应试验

分压系统周围邻近的接地体或带电体对该系统的参数有一定影响，可能引起刻度因数变化。当需要检验这种影响时，才进行邻近效应试验。试验中改变一面接地墙或一个带电物体与分压系统的距离，其他接地体和带电体的距离保持不变或置于没有影响的远处，测量分压系统刻度因数的变化，并绘成曲线或列成表格。分压系统因邻近效应引起刻度因数的变动应在 $\pm 1\%$ 以内。

5.7 阶跃波响应试验

分压系统阶跃波响应试验一般在整个测量系统上进行，详见 13.2.2。

5.8 耐受电压试验

冲击分压器应在例行试验中通过 110% 额定电压的干耐受电压试验。按 GB/T 16927.1，干耐压试验采用正、负极性的标准雷电冲击全波、雷电冲击截波、操作冲击波等电压各施加 3 次。若被试分压器未发现破坏，且试验前后的刻度因数相差不超过 $\pm 1\%$ ，则认为该分压器通过干耐压试验。

有特殊规定时，分压器还需在型式试验中通过湿耐压试验或人工污秽试验。
认可的测量系统的冲击分压器应能耐受试品破坏性放电的影响而不改变其性能。

6 冲击电压测量仪器

6.1 测量仪器种类

冲击电压测量中现常用数字示波器或数字记录仪。数字示波器是带有显示屏幕的数字记录仪，它可将分压系统输出的已按一定比率缩小的被测冲击波形采集为数字记录予以存储，并可在屏幕上显示。所记录的波形也可通过其他设备打印或绘图。数字示波器或数字记录仪在认可的测量系统和标准测量系统中都可采用。

冲击电压测量中原用专门设计的“高压示波器”（属模拟示波器）和“峰值电压表”，以及满足规定要求的通用示波器（也属模拟示波器）和通用峰值电压表都仍可使用，这些仪器现仅用于认可的测量系统。

数字示波器或数字记录仪以及通用示波器和通用峰值电压表都应采取妥善的抗干扰措施才能用于冲击高电压测量。专门设计的数字记录仪、高压示波器和峰值电压表已具备一定的抗干扰能力，必要时按具体情况采取适当的补充措施。

6.2 测量仪器准确度的要求

根据 GB/T 16896.1，测量仪器的准确度用总不确定度来表征，其总体要求见表 6。

表 6 测量仪器准确度的要求

总不确定度 ^a		对于认可的测量系统	对于标准测量系统
峰 值	雷电全波、操作波、 雷电截波 $T_C \geq 2\mu s$	±2%以内	±0.7%以内
	波前截波 $0.5\mu s \leq T_C < 2\mu s$	±3%以内	±2%以内
波形时间	T_1 、 T_2 、 T_C 、 T_P 等	±4%以内	±3%以内
a 总不确定度宜按 IEC 60060-2 修正件 1 附录 H 来估算，其置信度不小于 95%（见本标准第 15 章）。			

6.3 测量仪器的试验

测量仪器在使用前应通过型式试验和例行试验，在使用期间应定期、重复地进行性能试验和性能校核。

型式试验应由厂方在同系列产品的样机上进行，并提供试验结果。否则，用户需安排这类试验，以验证测量仪器的有关特性是否符合规定要求。

每台仪器都应进行例行试验，试验由厂方完成，并提供试验结果。否则，用户也需安排这类试验，验证测量仪器的有关特性是否符合规定要求。

每台新的仪器都应进行性能试验，且每年由用户重复一次；当测量仪器的性能校核中发现冲击刻度因数的变化超过 1% 时，也需进行性能试验。每次性能试验的结果都应记录在性能记录中。

性能校核在整个测量系统的性能校核中发现冲击刻度因数有显著变化时进行。性能校核对需用的每一档都应进行。若采用外部衰减器而并未与分压系统一起校验过，则应包括在仪器的性能校核中。

数字记录仪、模拟示波器和峰值电压表在上述各类试验中需做的试验项目详见 7.2、8.2 和 9.2。

6.4 测量仪器的性能记录

测量仪器的性能记录为整个测量系统性能记录的一部分，详见 12.3。

7 数字记录仪的特性、要求和试验

7.1 数字记录仪的特性与有关要求

为满足 6.2 规定的测量仪器准确度要求，数字记录仪的各项特性应不超过以下各条所列限值。在某些情况下，若测量总不确定度满足规定的准确度要求，允许个别几项特性略超过所列限值。

7.1.1 采样率

数字记录仪的采样率为单位时间内的采样数，单位为 kS/s、MS/s 或 GS/s（注意：别把采样率与带宽相混淆，参见 7.1.8）。它的倒数为采样间隔，单位为 ms、 μ s 或 ns。

对于认可的测量系统和标准测量系统，数字记录仪的采样率 f_s 均应大于或等于 $30/T_X$ ， T_X 为待测的时间间隔，即 $f_s \geq 30/T_X$ 。例如，测量雷电全波的波前时间 T_1 时， t_{30} 和 t_{90} 分别为冲击波形达到峰值的 30% 和 90% 处的瞬间，则 T_X 为 t_{30} 与 t_{90} 之间的时间间隔。对于 1.2/50 μ s 标准雷电全波，最短的波前时间 $T_1=0.84\mu$ s，则 $T_X=0.6T_1 \geq 0.5\mu$ s，要求 $f_s \geq 60$ MS/s。

测量波前截波时，采样率一般应不小于 100MS/s；对于截断时间 T_C 仅为 100 μ s~200 μ s 的波前截波，采样率应不小于 400MS/s。

为测出冲击波形上叠加的振荡，采样率 f_s 应不小于 $8f_{\max}$ ， f_{\max} 为试验回路中可能出现的最高振荡频率（参见 14.2.2.1），即 $f_s \geq 8f_{\max}$ 。

7.1.2 额定分辨率

数字记录仪的额定分辨率为能测出的额定最小输入电压增量占满量程的份额。当数字记录仪的额定位数为 N 时，表示为

$$r = [1 / (2^N - 1)] \times 100\%$$

在冲击电压测量中，数字记录仪的额定分辨率应不大于 0.4%，即额定位数 N 不小于 8；测试中还涉及信号处理（如计算变压器的传递函数）时，推荐额定分辨率不大于 0.2%，即额定位数 N 不小于 9。

7.1.3 冲击刻度因数

数字记录仪的冲击刻度因数是单位数码代表的冲击电压值，校正偏置后的输出数码乘此刻度因数就可确定输入冲击电压的测量值。

注：偏置为仪器在零输入时的输出。

对于认可的测量系统，数字记录仪冲击刻度因数的不确定度应不大于 $\pm 1\%$ 。

对于标准测量系统，数字记录仪冲击刻度因数的不确定度应不大于 $\pm 0.5\%$ 。

7.1.4 冲击刻度因数的恒定性

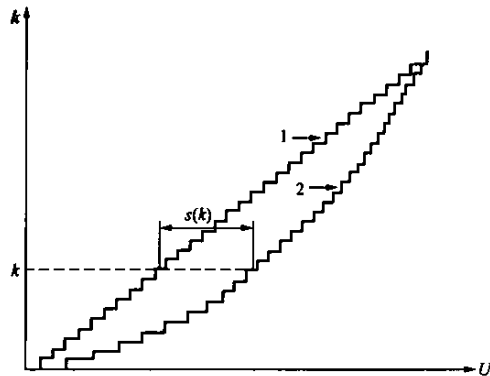
对于认可的测量系统，在 $0.5T_1 \sim T_{2\max}$ 的时间间隔内，数字记录仪的冲击刻度因数应保持恒定，其变动应不超过 $\pm 1\%$ 。上述 T_1 和 $T_{2\max}$ 分别为雷电全波的波前时间和半峰值时间最大值；对于雷电截波，后者以截断时间 T_C 代替，而对于波前截波，两者都以截断时间 T_C 代替；至于操作波， T_1 就改为它的波前时间 T_P ，而 $T_{2\max}$ 则为它的半峰值时间最大值。

对于标准测量系统，在上述这段时间间隔内数字记录仪的冲击刻度因数应恒定在 $\pm 0.5\%$ 以内。

7.1.5 幅值非线性

数字记录仪的静态整体非线性 S_m 为全部数码的整体非线性 $s(k)$ 的最大值，即 $S_m = |s(k)|_{\max}$ ，每个数码的整体非线性 $s(k)$ 为直流电压下实测的量化特性和按静态刻度因数计算理想的量化特性上数码 k 对应的两个输入电压之间的差，见图 9。

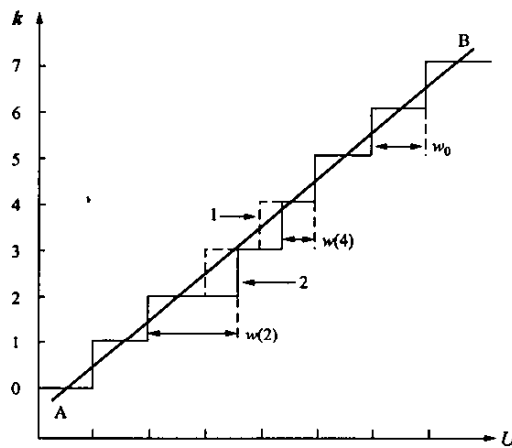
数字记录仪的局部非线性 D_m 为全部数码的局部非线性 $d(k)$ 的最大值，即 $D_m = |d(k)|_{\max}$ ，每个数码的局部非线性 $d(k)$ 为数码 k 的实测数码宽度 $w(k)$ （即数码 k 代表的实际输入电压区间，简称码宽）与平均码宽 w_0 （即一个数码在理论上可代表的输入电压区间，它应等于满量程电压与额定分辨率



注1：曲线1和曲线2分别为数字记录仪理想的和实测的量化特性；
注2：为使图形清楚起见，以低分辨率的5位数字记录仪为代表。

图9 数码 k 的整体非线性 $s(k)$

的乘积)之差除以平均码宽, 即 $d(k) = [w(k) - w_0] / w_0$, 见图10。



$w(2)$ 、 $w(4)$ —输出数码 k 为 2、4 的码宽； w_0 —平均码宽

注1：曲线1和曲线2分别为数字记录仪理想的和实测的量化特性；
注2：连线AB为理想的量化特性上码宽中点所连的直线；
注3：为使图形清楚起见，以低分辨率的3位数字记录仪为代表。

图10 数码 k 的局部非线性 $d(k)$

数字记录仪的静态整体非线性 S_m 应在满量程的 $\pm 0.5\%$ 以内, 静态和动态局部非线性 D_m 应在 ± 0.8 以内。

7.1.6 时基非线性

数字记录仪的水平扫描时间由所记录的采样间隔数乘以采样间隔时间来测定, 其时基非线性为数字记录中不同部位测得的水平扫描时间与已知准确值的差异。

数字记录仪的时基非线性应不大于 $0.5\% T_X$, T_X 为待测的时间间隔 (参见 7.1.1)。

7.1.7 上升时间

仪器的上升时间是它的阶跃波响应曲线上从稳定幅值的 $10\% \sim 90\%$ 的时间间隔。

冲击电压测量中, 仪器的上升时间应不大于 $3\% T_X$, T_X 为待测的时间间隔 (参见 7.1.1)。

为测出冲击波形上叠加的振荡, 上升时间应不大于 $1 / (2\pi f_{\max})$, f_{\max} 为试验回路中可能出现的最高振荡频率 (参见 14.2.2.1)。

7.1.8 带宽

仪器的带宽为直流 (DC) 至上限截止频率 (f_2) 的频带宽度, 常仅以 f_2 表示, 单位为 kHz、MHz 或 GHz。对于单次信号和重复信号测量, 有些仪器的带宽并不相同。冲击电压是单次信号, 必须注意选用单次信号测量带宽足够的仪器。

测量雷电全波、雷电截波以及冲击波形上叠加振荡时, 仪器的带宽应为 10MHz 以上; 测量操作波时, 仪器的带宽要求可适当降低; 测量波前截波时, 仪器的带宽要求较高, 对于截断时间 T_C 仅为 100 μ s~200 μ s 的波前截波测量, 带宽应不小于 100MHz。

7.1.9 内部噪声电平

数字记录仪的内部噪声电平是仪器输入恒定的直流电压时输出数码变动的标准偏差。

冲击电压测量中, 数字记录仪的内部噪声电平应小于满量程的 0.4%; 测试中还涉及信号处理时, 内部噪声电平应小于满量程的 0.1%。

7.1.10 使用范围

在冲击电压测量中, 数字记录仪使用范围的下限应不小于满量程的 $4/N$, N 为数字记录仪的位数; 在比对试验和涉及信号处理的测试中, 使用范围的下限应不小于满量程的 $6/N$ 。

7.1.11 记录长度

数字记录仪的记录长度为一次记录中存储的采样总数 (注意: 别与可存储多次记录数据的存储容量相混淆)。

在冲击电压测量中, 记录长度应足够长, 以便于冲击波形参数的计算或特定现象的观测。一般情况下, 记录长度需有 3000 个采样点以上。

7.1.12 干扰电平

对于认可的测量系统, 仪器与整个测量系统一起进行的干扰试验中, 电磁干扰引起偏离基线的最大幅值, 即干扰电平, 应不超过冲击试验所用满量程的 1%。

对于标准测量系统, 上述干扰电平应不超过所用满量程的 0.5%。

在冲击电压的实际测量中, 如果干扰不影响测量的准确度, 则干扰电平的要求可适当放宽。

仪器在型式试验中应通过单项干扰试验, 表明其抗干扰性能合格。若仪器用于良好的抗电磁干扰的环境中, 单项干扰试验可不作为要求。

7.2 数字记录仪的试验项目

数字记录仪的型式试验、例行试验、性能试验和性能校核 (见 6.3) 中需做的试验项目列于表 7, 表中也列入了相关的特性要求。

表 7 数字记录仪的试验项目

试验项目	特性要求	型式试验	例行试验	性能试验	性能校核
冲击刻度因数	7.1.3	—	7.3.1	7.3.1	7.3.1
刻度因数的恒定性	7.1.4	—	7.3.2	7.3.2	7.3.2
静态特性	7.1.5	7.3.3	—	—	—
动态局部非线性	7.1.5	—	7.3.4	—	—
时基非线性	7.1.6	7.3.5	—	—	—
上升时间	7.1.7	7.3.6	—	—	—
内部噪声电平	7.1.9	7.3.7	—	—	—
干扰电平 ^a	7.1.12	7.3.8	13.3	—	—

a 数字记录仪在型式试验中进行单项干扰试验; 在例行试验中与整个测量系统一起进行干扰试验。

7.3 数字记录仪的试验

数字记录仪试验中所用的校准设备都应直接或间接溯源到国家计量标准，并应有校准试验的记录。

7.3.1 冲击刻度因数的测定

数字记录仪冲击刻度因数的测定采用冲击波校准或阶跃波校准。仪器在实际测试中所用各档都应进行校准。校准中应注意避免低输入阻抗仪器的过载。

数字记录仪在例行试验中通过各档校准测定冲击刻度因数的标称值。在之后的历次性能试验和性能校核中冲击刻度因数的测定值与原标称值相差在 7.1.3 规定的限值内时，该标称值可不予变动；否则应加以修正。

7.3.1.1 冲击波校准

冲击波校准是测定仪器冲击刻度因数的标准方法，它也是校核仪器所测定的冲击电压波形时间参数的标准方法。

校准试验需用校准冲击波发生器。校准认可测量系统用的仪器时，校准冲击波发生器的要求见表 8。

表 8 校准冲击波发生器的要求

冲击波类型	参 数	数值范围 μs	不确定度 ^a %	短期稳定度 ^b %
雷电全波 和 雷电截波	峰 值	仪器使用范围内	≤0.7	≤0.2
	波前时间	0.8~0.9	≤2	≤0.5
	半峰值时间	55~65	≤2	≤0.2
波前截波	峰 值 截断时间	仪器使用范围内 0.45~0.55	≤1 ≤2	≤0.2 ≤1
操作波	峰 值	仪器使用范围内	≤0.7	≤0.2
	波前时间	15~300	≤2	≤0.2
	半峰值时间	2600~4200	≤2	≤0.2

a 按 IEC 60060-2 修正件 1 附录 H，不确定度由可溯源的校准来估算，其置信度不小于 95%（见第 15 章）。校准中至少以 10 次冲击波来计算其参数的平均值和标准偏差。
b 短期稳定度是至少用 10 次连续冲击波所测参数的标准偏差。

根据待测冲击电压的类型和极性选择校准冲击波。校准冲击波的峰值和时间参数应在表 6 所列范围内，其实际值应记录在性能记录中。

校准时，至少输入 10 次校准冲击波，记录仪器的输出。输出峰值与其平均值的最大偏差应在平均值的 ±1% 以内，则输入校准冲击波峰值 U_p 与输出峰值平均值 A_m 之比，确定为被校仪器的冲击刻度因数 F_i ，即：

$$F_i = U_p / A_m \quad (12)$$

同时，校核各次输出波形时间参数与输入校准冲击波时间参数的偏差应在 ±2% 以内。

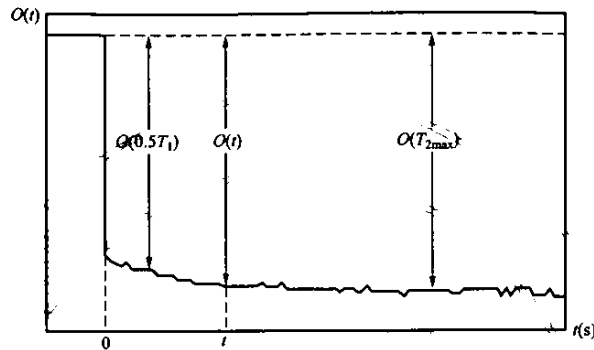
7.3.1.2 阶跃波校准

仪器的输入端施加一准确度在 ±0.1% 以内，幅值在使用范围内的已知直流电压 U_0 ，然后通过一适当的开关装置（如汞润开关）将直流电压对地短路，形成一阶跃波。阶跃波前沿的上升时间应小于 7.1.4 规定的时间间隔下限 $0.5T_1$ 的 10%。记录在此阶跃波作用下仪器的输出，并求得 7.1.4 规定的 $0.5T_1 \sim T_{2max}$ 时间间隔内输出的瞬时值 $O(t)$ ，见图 11。为减小随机噪声的影响，至少采用 10 次记录作平均计算。各瞬时的 $O(t)$ 值与其平均值 O_s 的偏差应在 7.1.3 规定的冲击刻度因数的限值以内。至少 10 次记录的平均值 O_s 与其总平均值 O_{sm} 的偏差也应在上述规定限值以内，则输入电压 U_0 与输出的总平均值 O_{sm} 之

比确定为被校仪器的冲击刻度因数 F_i ，即：

$$F_i = U_0 / O_{Sm} \quad (13)$$

阶跃波校准应采用两个极性阶跃波分别进行。若两者测定的冲击刻度因数偏差在 $\pm 0.1\%$ 以内，则此校准方法有效。否则，冲击刻度因数的测定应按 7.3.1.1 冲击波校准法在不同极性下进行。



$O(t)$ 一阶跃波作用下仪器输出的瞬时值： $0.5T_1 \sim T_{2max}$ —7.1.4 规定的时间间隔

图 11 阶跃波校准

7.3.2 刻度因数恒定性的检验

仪器刻度因数的恒定性采用 7.3.1.2 阶跃波校准方法进行检验。从试验结果中检验 7.1.4 规定的 $0.5T_1 \sim T_{2max}$ 时间间隔内刻度因数是否保持恒定在规定限值范围内。

若仪器刻度因数的测定采用阶跃波校准，实际上同时也检验了刻度因数的恒定性。

仪器刻度因数恒定性的检验对实际测试中所用各档都应进行。

7.3.3 静态特性试验

数字记录仪在直流电压下的特性称作静态特性，包括静态整体非线性和局部非线性以及静态刻度因数等。静态特性试验必然需用直流电压进行。试验方法有小增量法、大增量法和两点法。需测定全部静态特性时采用小增量法，只需测定静态刻度因数时可采用后两种方法以减小工作量。

若试验表明静态刻度因数与冲击刻度因数的差别不大于 0.5% ，则在性能校核中可采用静态特性试验代替 7.3.1.2 的阶跃波校准。

一般情况下，数字记录仪某一输入档测定的静态整体和局部非线性可以代表各输入档的特性。任何衰减器的影响可用 7.3.1.1 或 7.3.1.2 的冲击波或阶跃波校准来确定。校准中应注意避免低输入阻抗衰减器的过载。

7.3.3.1 小增量法

数字记录仪静态特性试验小增量法的步骤如下：

a) 记录与存储数据。输入数字记录仪的直流电压从满量程的 2% 的电压 $U(1)$ 起，逐次增加相同的小增量 ΔU ，直到满量程的 95% 以上。电压增量 ΔU 选取为平均码宽（即满量程电压与额定分辨率的乘积，参见图 10）的 $1/10 \sim 1/4$ 。在每一个输入电压 $U(i)$ 下取一次记录，计算所记录输出数码的平均值 $A(i)$ ，并存储 $U(i)$ 和 $A(i)$ 数据对。

b) 确定静态刻度因数。根据输入电压 $U(i)$ 和相应的输出数码平均值 $A(i)$ 的全部共 M 个数据对，利用最小二乘法把输入和输出拟合成直线关系：

先按下列各式计算 a 、 v 、 u 、 w 、 b ：

$$a = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M A(i) \quad (14)$$

$$v = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M U(i) \quad (15)$$

$$u = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M A(i)U(i) \quad (16)$$

$$w = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [U(i)]^2 \quad (17)$$

$$b = w - v^2 \quad (18)$$

然后再按下两式计算拟合直线的斜率 K 和截距 A_0 :

$$K = \frac{1}{b} (u - av) \quad (19)$$

$$A_0 = \frac{1}{b} (aw - uv) \quad (20)$$

所拟合的直线关系则为:

$$A(i) = KU(i) + A_0 \quad (21)$$

此直线关系可改写为:

$$U(i) = \frac{1}{K} [A(i) - A_0] = F_S [A(i) - A_0] \quad (22)$$

由上可知, 数字记录仪的静态刻度因数 F_S 为拟合直线斜率 K 的倒数, 即

$$F_S = 1/K \quad (23)$$

而拟合直线的截距 A_0 即为数字记录仪的偏置 (仪器在零输入时的输出)。

- c) 计算各数码转换的实际阈值。若仪器的输出 $A(i)$ 没有标定 (即它们是 A/D 变换器输出数码的平均值), 则数码从 k 转换到 $k+1$ 的理想阈值为:

$$T(k) = k + \frac{1}{2} \quad (24)$$

若仪器的输出 $A(i)$ 已经标定 (即它们以 V 为单位), 则数码从 k 转换到 $k+1$ 的理想阈值为:

$$T(k) = \frac{U_n}{2^N - 1} \left(k + \frac{1}{2} \right) \quad (25)$$

式中:

U_n —— 满量程电压;

N —— 仪器的额定位数。

为确定各数码转换的实际阈值, 先在全部数据中找出不大于 $T(k)$ 而 n 为最大的 $A(n)$, 再找出不小于 $T(k)$ 而 m 为最小的 $A(m)$, 如图 12 所示 N 点和 M 点, 则数码从 k 转换到 $k+1$ 的实际阈值 $c(k)$ 可由线性插值法求出:

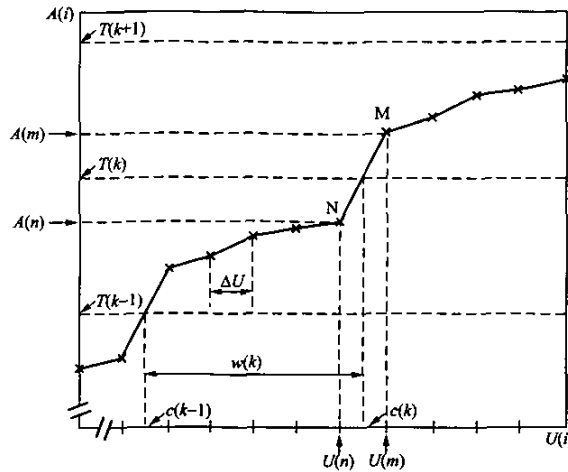
$$c(k) = U(n) + \frac{T(k) - A(n)}{A(m) - A(n)} [U(m) - U(n)] \quad (26)$$

- d) 计算各数码的实际宽度和中心电压。各数码 k 的实际宽度由其相邻的两个转换点所决定, 因而实际码宽 $w(k)$ 为其相邻的两个转换阈值之差 (见图 12), 即

$$w(k) = c(k) - c(k-1) \quad (27)$$

各数码 k 的中心电压 $p(k)$ 为其相邻的两个转换阈值的平均值, 它可表征数码 k 的电平, 即

$$p(k) = \frac{1}{2} [c(k) + c(k-1)] \quad (28)$$



注 1: 曲线为实测量化特性的一部分。

注 2: 数码转换的实际阈值 $c(k)$ 处于 N、M 两点连线与理想阈值 $T(k)$ 水平线的交点。

图 12 静态特性试验——数码转换的实际阈值

e) 确定静态整体和局部非线性。各数码 k 的静态整体非线性 $s(k)$ 和静态局部非线性 $d_s(k)$ 为:

$$s(k) = p(k) - (k - A_0) F_S \quad (29)$$

$$d_s(k) = \frac{w(k) - F_S}{F_S} \quad (30)$$

若仪器的输出已标定, 则上两式中 F_S 和 A_0 分别以 $F_S U_n / (2^N - 1)$ 和 $A_0 (2^N - 1) / U_n$ 替代, U_n 为满量程电压。

数字记录仪的静态整体非线性 S_m 和静态局部非线性 D_{sm} 为:

$$S_m = |s(k)|_{\max} \quad (31)$$

$$D_{sm} = |d_s(k)|_{\max} \quad (32)$$

7.3.3.2 大增量法

在不大于 95% 满量程电压范围内, 均匀地选取 20~50 个点作为输入直流电压值 $U(i)$ 。在每一个输入直流电压 $U(i)$ 下, 取一次记录, 并计算所记录输出数码的平均值 $A(i)$ 。

根据 20~50 个 $U(i)$ 和 $A(i)$ 数据对, 同样按 7.3.3.1 b) 的步骤, 利用最小二乘法把输入和输出拟合成直线关系, 并确定数字记录仪的静态刻度因数 F_S 。

7.3.3.3 两点法

取 k_1 和 k_2 两点, $(k_2 - k_1)$ 应大于或等于满量程偏转的 90%。按 7.3.3.1 a)、c) 和 d) 的步骤, 根据 k_1 和 k_2 两点附近的数据计算该两点的中心电压 $p(k_1)$ 和 $p(k_2)$, 则数字记录仪的静态刻度因数 F_S 可确定为:

$$F_S = \frac{p(k_2) - p(k_1)}{k_2 - k_1} \quad (33)$$

7.3.4 动态局部非线性试验

数字记录仪的动态局部非线性试验采用对称三角波电压, 幅值应为满量程电压 U_n 的 $(95 \pm 5)\%$, 斜率应不小于 $U_n / 0.4T_X$, T_X 为待测的时间间隔 (参见 7.1.1), 频率应与采样率无整数比例关系。

重复输入三角波电压 M 次, 记录输出数码。取每次记录中整周期的数据, 统计每个数码出现次数的累积直方图。所得的累积直方图一般中部较为平坦, 两边有较大的尖峰, 以一台 8 位的数字记录仪为例, 典型的直方图见图 13。试验的重复次数 M 应足够大, 使每个数码出现次数 $n(k)$ 的平均值 n_0 不小

于 100，且直方图中央平坦部分的宽度不小于满刻度的 80%。

则各数码的动态局部非线性为：

$$d(k) = \frac{n(k) - n_0}{n_0} \quad (34)$$

数字记录仪的动态局部非线性为：

$$D_m = |d(k)|_{\max} \quad (35)$$

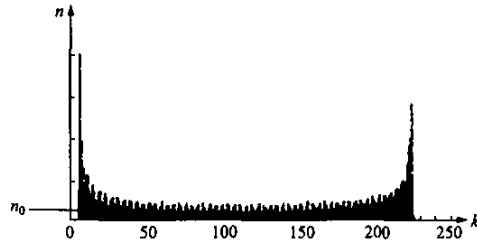


图 13 每个数码出现次数的累积直方图

一般情况下，数字记录仪某一输入档测定的动态局部非线性可以代表各输入档的特性。任何衰减器的影响可用 7.3.1.1 或 7.3.1.2 的冲击波或阶跃波校准来确定，校准中应注意避免低输入阻抗衰减器的过载。

7.3.5 时基校准和非线性试验

仪器的时基采用时标发生器或高频振荡器进行校准。校准器的准确度和稳定度均应在 1% 以内；为检验时基非线性，校准器的频率应足够高，以保证在一次记录中有充分的时标数或周期数。

试验时，输入时标或高频振荡信号，在某一扫描档的约 20%、40%、60%、80% 和 100% 处，测定各处的扫描时间。它们与校准时标或高频振荡信号所确定的准确时间之间的差值即为该扫描档的时基非线性。

仪器在实际测试中所用的各扫描档都应进行时基的校准。

7.3.6 上升时间测试

仪器的上升时间采用阶跃波电压进行测试。阶跃波电压可用 7.3.1.2 阶跃波校准中所述方法产生。阶跃波的上升时间应小于 7.1.7 中规定的仪器上升时间限值的 20%，幅值应为满量程的 $(95 \pm 5)\%$ 。

试验时，输入阶跃波电压，记录仪器的输出，即仪器的阶跃波响应。在此阶跃波响应的前沿上，按其稳定幅值的 10%~90% 之间的时间确定为仪器的上升时间。

仪器在实际测试中使用的各量程都应进行上升时间的测试。

7.3.7 内部噪声电平测试

数字记录仪的内部噪声电平采用直流电压进行测试。试验时，输入幅值在仪器量程内的恒定直流电压，按给定的采样率采集至少 1000 个采样。这些采样的标准偏差即确定为内部噪声电平。

此项测试可利用数字记录仪静态特性试验中采集的数据。

7.3.8 单项干扰试验

单项干扰试验是检验仪器对各种类型干扰的抗扰性或灵敏度，一般安排在型式试验中进行。若仪器使用的场合具有良好的屏蔽、接地和电源滤波与隔离等妥善的抗干扰措施，则单项干扰试验可以不做。但在整个测量系统的干扰试验中（见 13.3）测得的干扰电压应在允许限值以内。

当整个测量系统的干扰试验未能通过时，可利用这些单项试验弄清哪种干扰对仪器影响较大，以便相应地改善有关的抗干扰措施。

7.3.8.1 快速暂态脉冲群试验

快速暂态脉冲群试验是检验仪器对电源线引入的传导干扰的抗扰性。根据 GB/T 17626.4, 试验采用的脉冲群电压为: 单个脉冲上升时间 5ns, 持续时间 50ns; 脉冲重复频率 5kHz; 脉冲群持续时间 15ms, 间隔周期 300ms; 脉冲群波形见图 14。脉冲电压幅值按第 3 级试验等级取 2kV。

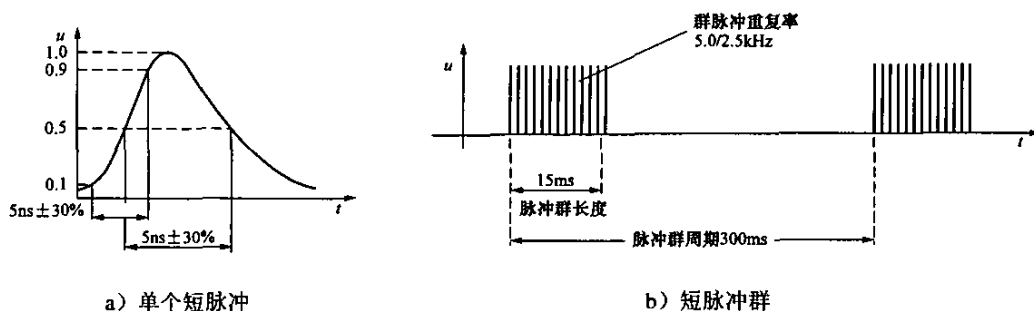


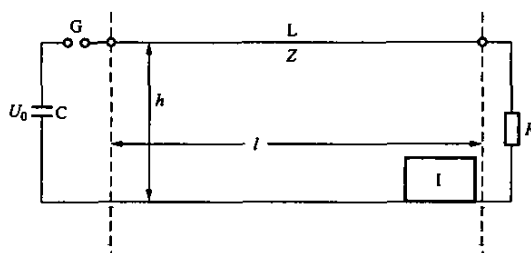
图 14 快速暂态脉冲群波形

试验电压通过电容以共模方式耦合到仪器电源的相线、中线和保护接地线上。试验的持续时间不少于 1min。若仪器在试验过程中显示出它的抗扰性, 并且在试验结束后仍能保持其性能在规定限值内, 则表明本项试验合格。

7.3.8.2 电场和磁场试验

电场和磁场试验是检验仪器对高电压试验回路产生快速变化的空间电场和磁场的抗扰性。在一些高电压实验室中进行的试验表明, 这种电场可达 100kV/m, 磁场可达 1000A/m。

试验可采用横向电磁场装置, 线路如图 15 所示。图中电容 $C=20\text{nF}$, 传输线长度 $l=5\text{m}$, 高度 $h=1\text{m}$ 。试验时, 电容器 C 先充电到试验电压 U_0 , 然后通过球隙 G 放电, 则在传输线与地面之间产生快速变化的电场和磁场。仪器置于此试区内以检验其抗扰性。



U_0 —试验电压; C —电容器; G —球隙; l 、 h —传输线的长度和高度;
 L —传输线; Z —传输线波阻抗; R —终端电阻; I —被试仪器

图 15 电场和磁场试验

做电场试验时, 传输线终端接匹配电阻, 其终端电阻 R 等于传输线的波阻抗 Z , 即 $R=Z$; 试验电压 $U_0=40\text{kV}$, 上升时间约 10ns。做磁场试验时, 传输线终端短路, 即 $R=0$; 试验电压 $U_0=100\text{kV}$, 试验电流为频率约 0.5MHz 的阻尼振荡波。

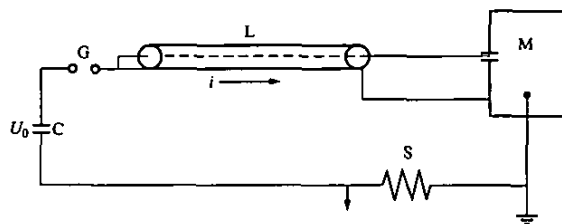
仪器在试验中应能正常工作, 性能仍保持在规定的限值内, 而不受试区中快速变化的电场和磁场的影响。

7.3.8.3 共模干扰试验

测量电缆和控制电缆的屏蔽层中流过暂态电流时将产生共模的传导干扰, 本项试验是检验仪器对这种由电缆引入的共模干扰的灵敏度。由于这种共模干扰与电缆的长度、传递阻抗和接地状况等密切相关,

因此试验应采用实际使用的电缆以正常工作的方式接地并连接到仪器上。同样原因，本项试验不属于单个仪器的型式试验范畴，而是用于分析和检验电缆引入共模干扰的大小和对仪器的影响。

共模干扰试验可采用的线路如图 16 所示。试验时，电容器 C 先充电到试验电压 U_0 ，然后通过球隙 G 放电，将暂态电流 i 注入电缆的屏蔽层。暂态电流最好以峰值 100A、振荡频率 1MHz 的振荡为主，其上还叠加有峰值 10A、频率 10MHz~20MHz、持续时间不小于 $10\mu\text{s}$ 的阻尼振荡波。试验测得的干扰电压的大小即表明电缆引入的共模干扰对仪器的影响。



U_0 —试验电压；C—电容器；G—球隙； i —暂态电流；L—电缆；S—分流器；M—仪器

图 16 共模干扰试验

8 模拟示波器的特性、要求和试验

8.1 模拟示波器的特性与有关要求

为满足 6.2 规定的测量仪器准确度要求，模拟示波器的各项特性应不超过以下各条所列限值。在某些情况下，若测量总不确定度满足规定的准确度要求，允许个别几项特性略超过所列限值。

8.1.1 冲击刻度因数及其恒定性

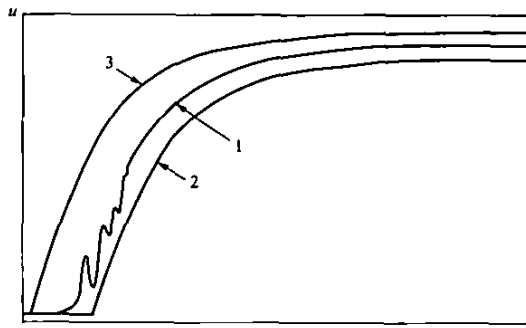
模拟示波器的冲击刻度因数是单位偏转刻度代表的冲击电压值。

模拟示波器冲击刻度因数的不确定度应不大于 $\pm 1\%$ ，并在 7.1.4 规定的 $0.5T_1 \sim T_{2\text{max}}$ 时间间隔内冲击刻度因数应恒定在 $\pm 1\%$ 以内。

8.1.2 电压偏转特性

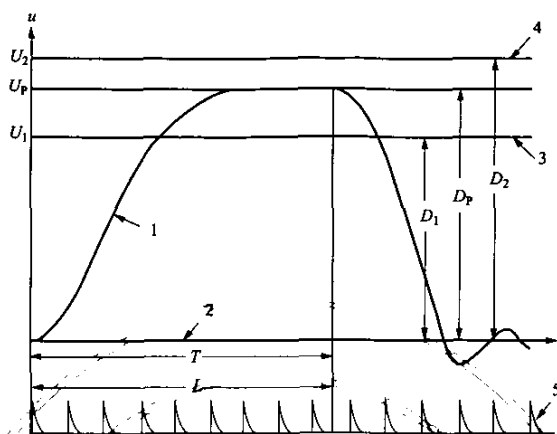
模拟示波器的屏幕上各垂直偏转点的实际刻度因数与其平均值最大偏差的百分数，称为电压偏转的非线性。若电压偏转的非线性在 $\pm 1\%$ 以内，则该示波器的电压偏转可认为是线性的。

在冲击电压测量中，模拟示波器电压偏转的非线性应不大于 $\pm 1\%$ ，即应是线性的。否则，被测冲击电压波形应与峰值相近的校准冲击波或校幅电压一起显示在示波图上，如图 17、图 18 所示，以便按上述要求校准该处的实际刻度因数，并确定被测冲击电压峰值。



1 被测冲击波；2、3—校准冲击波

图 17 冲击波比对校准



1—被测冲击波；2—零线；3、4—直流校幅电压；5—时标信号；
 U_P 、 D_P —被测冲击波峰值及其偏转幅度； T 、 L —待测扫描时间及其扫描长度；
 U_1 、 D_1 —稍低于 U_P 的校幅电压及其偏转幅度； U_2 、 D_2 —稍高于 U_P 的校幅电压及其偏转幅度

图 18 电压和时间分别校准

8.1.3 时基非线性

模拟示波器的时间刻度因数为单位水平刻度代表的扫描时间，由示波图上某一点的扫描长度乘以时间刻度因数就可确定该处的扫描时间。模拟示波器的时基非线性是示波图迹线上不同部位测得的扫描时间与已知准确值的差异。

在冲击电压测量中，模拟示波器的时基非线性应不大于 $2\%T_X$ ， T_X 为待测的时间间隔（参见 7.1.1）。否则，被测冲击电压波形应与时标信号一起显示在示波图上，如图 18 所示，以便按上述要求校准该处的时间刻度因数，并确定被测的扫描时间。

8.1.4 内置校准器的准确度

模拟示波器若具备内置校准器，其校幅电压的准确度应不大于 $\pm 0.5\%$ ，时标信号的准确度应不大于 $\pm 1\%$ 。

8.1.5 上升时间

模拟示波器上升时间的定义和要求与数字记录仪相同，详见 7.1.7。

8.1.6 带宽

模拟示波器带宽的定义和要求与数字记录仪相同，详见 7.1.8。

8.1.7 内部噪声电平

模拟示波器的内部噪声电平是输入恒定的直流电压下垂直偏转幅度变化的峰-峰值之半。

在冲击电压测量中，模拟示波器的内部噪声电平应小于满量程的 $\pm 0.5\%$ 。

8.1.8 使用范围

模拟示波器在测试中的垂直偏转宜在满屏偏转的（50~100）%范围内；水平偏转宜在全屏扫描的（30~100）%范围内。

8.1.9 示波图照相、放大和读数误差

模拟示波器在示波图照相、放大和读数过程中造成的测量误差应小于所用量程满刻度偏转的 $\pm 1\%$ 。

8.1.10 干扰电平

模拟示波器有关干扰电平的要求与用于认可测量系统的数字记录仪相同，详见 7.1.12。

8.2 模拟示波器的试验项目

模拟示波器的型式试验、例行试验、性能试验和性能校核（见 6.3）中需做的试验项目列于表 9，表中也列入了相关的特性要求。

表9 模拟示波器的试验项目

试验项目	特性要求	型式试验	例行试验	性能试验	性能校核
冲击刻度因数	8.1.1	—	8.3.1	8.3.1	8.3.1
刻度因数的恒定性	8.1.1	—	8.3.2	8.3.2	8.3.2
电压偏转特性	8.1.2	8.3.3	—	8.3.3	—
时基非线性	8.1.3	8.3.4	—	8.3.4	—
内置校准器(若具备)的准确度	8.1.4	—	8.3.5	8.3.5	—
上升时间	8.1.5	8.3.6	—	—	—
内部噪声电平	8.1.7	8.3.7	—	—	—
干扰电平 ^a	8.1.10	8.3.8	13.3	—	—

a 模拟示波器在型式试验中进行单项干扰试验；在例行试验中与整个测量系统一起进行干扰试验。

8.3 模拟示波器的试验

模拟示波器若使用外接衰减器，它可作为仪器的组成部分进行各项试验。否则，该衰减器的刻度因数和响应特性等需另行测试。

模拟示波器试验中所用的校准设备都应直接或间接溯源到国家计量标准，并应有校准试验的记录。

8.3.1 冲击刻度因数的测定

模拟示波器冲击刻度因数的测定采用冲击波校准或直流电压校准。仪器在实际测试中所用各档都应进行校准。

校准时，仪器的放大倍率和所用的照相机应与实际测试时相同；仪器的垂直预偏位置、水平扫描速度以及亮度、聚焦、像散等旋钮位置也尽量保持与实际使用时相同的情况，同时还须注意避免低输入阻抗仪器的过载。对于双线示波器，每条射线应单独进行校准；当校准某一条射线时，不宜以另一条射线作为基线。

若模拟示波器的电压偏转是线性的（参见 8.1.2），则在例行试验中通过各档校准测定的刻度因数可作为标称值。在之后的历次性能试验和性能校核中刻度因数的测定值与原标称值相差在 8.1.1 规定的限值内时，该标称值可不予变动，否则应加以修正。不过，模拟示波器的电压偏转常存在非线性问题，此时的刻度因数就不能用标称值一个常数来代表，在测量中须每次都用冲击波或直流电压校准刻度因数，如 8.1.2 所述。

8.3.1.1 冲击波校准

冲击波校准是测定仪器冲击刻度因数的标准方法，校准的具体做法详见 7.3.1.1。

8.3.1.2 直流电压校准

模拟示波器的冲击刻度因数也可用直流电压进行校准。直流校幅电压的不确定度应不大于±0.5%。校准时，在相同的时基下输入与被测冲击电压极性相同、峰值相近的校幅电压 U_0 ，它在屏幕上的偏转幅度为 D ，则刻度因数 F 为：

$$F=U_0/D \quad (36)$$

8.3.2 刻度因数恒定性的检验

模拟示波器刻度因数恒定性的检验同样采用阶跃波校准的方法，详见 7.3.1.2。试验中检验示波器刻度因数的恒定性是否满足 8.1.1 的要求。

刻度因数恒定性的检验对实际测试中所用各档都应进行。

8.3.3 电压偏转特性试验

模拟示波器电压偏转特性试验采用直流电压进行。直流校幅电压的不确定度应不大于 $\pm 0.5\%$ 。试验时，将正、负两种极性，幅值为某一档满量程的0%、10%、20%、…、100%的直流校幅电压分别输入示波器，同时测量屏幕上上述线相应的垂直偏转。由测得的垂直偏转与输入电压之间的关系，即为模拟示波器的电压偏转特性。

根据示波器的电压偏转特性，可按8.3.1.2的方法确定各偏转点的实际刻度因数，它们与其平均值最大偏差的百分数即为电压偏转的非线性。若电压偏转非线性不大于 $\pm 1\%$ ，则各偏转点实际刻度因数的平均值可确定为该档刻度因数的标称值。

试验时应注意示波器的亮度、聚焦、像散以及水平扫描速度等的影响，同时还须注意避免低输入阻抗仪器的过载。

一般情况下，模拟示波器某一输入档测定的电压偏转特性可以代表各输入档的特性。任何衰减器的影响可用7.3.1.1或7.3.1.2的冲击波或阶跃波校准来确定，校准中应注意避免低输入阻抗衰减器的过载。

8.3.4 时基校准和非线性试验

模拟示波器时基校准和非线性试验的方法与数字记录仪相同，详见7.3.5。

仪器在实际测试中所用的各扫描档都应进行时基的校准，校准中应注意采用单次扫描。

模拟示波器的水平扫描也常存在非线性问题，此时时间刻度因数不再是一个常数，在测量中需每次都用时标信号作时基校准，如8.1.3所述。

8.3.5 内置校准器准确度的检验

某些模拟示波器具备内置校准器，它包括校幅电压发生器和时标信号发生器。

校幅电压可为直流电压或方波电压。直流校幅电压应采用0.1级或0.2级高准确度的直流电压表直接测定其幅值来检验。方波校幅电压和无法引出的直流校幅电压可用已由高准确度电压表测定的外接直流电压进行比对的方法间接测定其幅值来检验。

时标信号可为重复脉冲、方波振荡或正弦波振荡信号。时标信号应采用 10^{-3} 以上高准确度的数字频率计直接测定其频率，也可用另一个已由高准确度频率计测定的时标信号进行比对的方法间接测定其频率来检验。

8.3.6 上升时间测试

模拟示波器上升时间测试的方法与数字记录仪相同，详见7.3.6。

示波器在实际测试中使用的各量程都应进行上升时间的测试。

8.3.7 内部噪声电平测试

模拟示波器的内部噪声电平采用直流电压进行测试。试验时，将幅值在仪器量程范围内的恒定直流电压输入示波器，测量垂直偏转可能发生的变化量，此变化量的峰—峰值之半即确定为内部噪声电平。

8.3.8 单项干扰试验

模拟示波器单项干扰试验的方法与数字记录仪相同，详见7.3.8。

此外，模拟示波器尚应进行触发干扰试验，对于双线示波器还应进行线间干扰试验。

触发干扰试验应在两种情况下进行。第一种是示波器输入端不加信号并且开路（无测量电缆），扫描时间取 $10\mu\text{s}$ 左右，在给定的触发信号波形、幅值为最大允许触发电压下，测量扫描迹线上可能出现的垂直偏转变化的最大值，即为示波器触发引起的干扰电平。第二种是示波器输入端施加1MHz~5MHz的正弦波信号，幅值为全屏垂直偏转的5%~10%，扫描时间也取 $10\mu\text{s}$ 左右，在上述触发电压下测量正弦波形可能出现的横向畸变，即为示波器触发引起水平扫描中的干扰。

双线示波器线间干扰试验是示波器的一条射线输入满屏垂直偏转的正弦波或其他波形信号，扫描时间取 $10\mu\text{s}$ 左右，测量另一条射线由感应产生的偏转即为双线示波器的线间干扰。

上述两项试验中，模拟示波器的触发干扰和线间干扰都在冲击试验所用满量程的 $\pm 1\%$ 以内，水平扫描中的触发干扰引起的波形畸变也可以忽略，则此两项试验通过。

9 峰值电压表的特性、要求和试验

9.1 峰值电压表的特性与有关要求

为满足 6.2 规定的测量仪器准确度要求，峰值电压表的各项特性应不超过以下各条所列限值。在某些情况下，若测量总不确定度满足规定的准确度要求，允许个别几项特性略超过所列限值。

9.1.1 冲击刻度因数

峰值电压表的冲击刻度因数是单位读数代表的冲击电压值。由制造厂给定或由校准试验确定的刻度因数，称为它的标称值。

峰值电压表冲击刻度因数的不确定度应不大于 $\pm 1\%$ ，并在读数保持时间内应恒定在 $\pm 1\%$ 以内，直至手动或自动复归为止。

9.1.2 电压幅度的非线性

峰值电压表电压幅度的非线性为使用范围内各点实际刻度因数和标称值之间最大差值的百分数。

峰值电压表电压幅度的非线性应不大于 $\pm 1\%$ 。满足这要求的峰值电压表可认为是线性的。

9.1.3 内置校准器的准确度

峰值电压表若备有内置校准器，其校准冲击波峰值的准确度应不大于 $\pm 0.5\%$ 。

9.1.4 使用范围

峰值电压表测量冲击电压适用的波形范围通常由制造厂给定，峰值范围宜在满量程的（50~100）%。

9.1.5 干扰电平

峰值电压表有关干扰电平的要求与用于认可测量系统的数字记录仪相同，详见 7.1.12。

若雷电截波产生的电磁干扰对测量有较大影响，制造厂应明确说明该峰值电压表只适用于雷电全波测量。

9.2 峰值电压表的试验项目

峰值电压表的型式试验、例行试验、性能试验和性能校核（见 6.3）中需做的试验项目列于表 10，表中也列入了相关的特性要求。

表 10 峰值电压表的试验项目

试验项目	特性要求	型式试验	例行试验	性能试验	性能校核
冲击刻度因数	9.1.1	—	9.3.1	9.3.1	9.3.1
电压幅度非线性	9.1.2	9.3.2	—	—	—
内置校准器（若具备）的准确度	9.1.3	—	9.3.3	9.3.3	—
干扰电平 ^a	9.1.5	9.3.4	13.3	—	—

a 峰值电压表在型式试验中进行单项干扰试验；在例行试验中与整个测量系统一起进行干扰试验。

9.3 峰值电压表的试验

峰值电压表测量的是冲击电压最大峰值。当冲击波形光滑、在波峰上无振荡和过冲时，才可单独用峰值电压表测量冲击电压峰值。否则，峰值电压表的读数有可能不代表冲击电压的峰值。此时必须与示波器并联使用，按 GB/T 16927.1 有关冲击电压峰值的定义来确定是否应对峰值电压表的读数进行修正。

若峰值电压表带有输入探头，则探头应作为仪器的组成部分进行各项试验。

峰值电压表试验中所用的校准设备都应直接或间接溯源到国家计量标准，并应有校准试验的记录。

9.3.1 冲击刻度因数的测定

峰值电压表冲击刻度因数的测定仅采用冲击波校准这一标准方法，详见 7.3.1.1。校准中同时观测读

数在手动或自动复归前应保持恒定在±1%以内。

峰值电压表应按实际测试中需测冲击电压的波形（或规定的标准冲击波形）和极性对所用的各档都进行校准。

峰值电压表在例行试验中通过各档校准测定的冲击刻度因数可作为标称值。在之后的历次性能试验和性能校核中刻度因数的测定值与原标称值相差在 9.1.1 规定的限值内时，该标称值可不予变动；否则应加以修正。

9.3.2 电压幅度非线性试验

峰值电压表电压幅度非线性试验采用冲击电压进行试验。试验时，将某一档量程内一系列已知峰值的冲击电压输入峰值电压表，记下相应的读数，即可测定这一量程内各点的实际冲击刻度因数。这些实际的冲击刻度因数与其平均值最大偏差的百分数，即为电压幅度的非线性。若电压幅度的非线性不大于±1%，则实际刻度因数的平均值可确定为该档冲击刻度因数的标称值。

峰值电压表电压幅度非线性试验所用冲击电压波形应接近实际使用波形（或规定的标准冲击波形），极性为正、负两种，峰值为满量程的（10~100）%；试验应在衰减器的各档下分别进行。

9.3.3 内置校准器准确度的检验

某些峰值电压表具备内置校准器，它实际上是一个冲击波信号发生器，其冲击波峰值固定或可调，极性有正、负两种，波形为标准冲击波或多种任选波形，或波形参数可调。

内置校准器冲击波峰值可用直流电压以比对的方法进行检验。比对用的直流电压应使用 0.1 级~0.2 级高准确度的直流电压表测定。比对时，可采用示波器进行观测，或用电压比较器、差分放大器等仪器进行检验。内置校准器冲击波峰值也可用专门设计的冲击电压校准仪等准确的仪器进行测定。用上述各种方法进行检验时，所用仪器的输入阻抗应足够大，不至于影响内置校准器的冲击波峰值。

此外，有些校准器采用精密阻容元件组成冲击波回路，可根据回路阻容参数及充电电压用计算的方法确定校准冲击波的峰值和波形参数。

9.3.4 单项干扰试验

峰值电压表单项干扰试验的方法与数字记录仪相同，详见 7.3.8。

10 测量仪器的使用

在实际测试中，影响测量仪器准确度的因素大致可分为两类：一类是仪器本身的特性，另一类是仪器的使用。为保证测量仪器的准确度符合 6.2 规定的要求，除了应对仪器进行定期的性能试验和必要的性能校核外，还应注意仪器的正确使用。

10.1 使用条件

仪器在表 11 规定的使用条件范围内应能正常工作，并且满足测量准确度的要求。

对表 11 中给定值以外的情况，应采取一定措施并通过试验证明仪器仍能达到的性能指标。这种情况应在性能记录中明确说明并标明为例外情况。

表 11 使用条件

条 件	范 围
环境温度	+5℃~+40℃
环境相对湿度	10%~90%
电源电压	±10%（有效值） 额定电压 ±12%（峰值）
电源频率	额定频率 ±5%

10.2 预热时间

仪器通电后达到符合全部技术要求的时间间隔,称为预热时间。仪器的预热时间通常由制造厂给定,一般为0.5h。在温度较低、湿度较大等不利的使用条件下,为保证测量准确度,可适当延长预热时间。

10.3 输入阻抗

仪器通常采用测量电缆与分压器相连接。与电阻分压器相连时,仪器的输入阻抗常取为电缆的匹配阻抗,即输入阻抗等于电缆的波阻抗,偏差应在 $\pm 2\%$ 以内;匹配阻抗也可直接外接在仪器的输入端。与电容或阻尼电容分压器相连时,仪器的输入阻抗应尽可能高,一般为不小于 $1M\Omega$ 和不大于 $50pF$ 的并联阻抗。当电容或阻尼电容分压器测量持续时间很长的冲击波时,低压臂电容与仪器输入电阻的乘积所构成的时间常数 T_D 应大于 $100T_{2max}$, T_{2max} 为待测冲击波的最大半峰值时间。

10.4 使用范围

仪器的使用范围是当输入电压在此范围内时可以保证测量准确度满足6.2规定的要求。通常,仪器应使用满量程一半以上的范围。

数字记录仪、模拟示波器和峰值电压表的使用范围参见7.1.10、8.1.8和9.1.4。

10.5 偏置

数字记录仪和模拟示波器的偏置是在零输入时的输出或基线位置。为取得较大的偏转以保证测量准确度,根据待测冲击电压的正、负极性,仪器宜分别采用满量程10%的低位和90%的高位偏置。

10.6 记录时间或扫描时间

数字记录仪的单次记录时间(记录长度与采样间隔的乘积)应不小于被测雷电冲击全波或操作冲击波的半峰值时间 T_2 ,以便测定这项参数。若仍以该记录的数据测定波前时间 T_1 或 T_p ,采样率 f_s 也许未能达到7.1.1规定的 $f_s \geq 30/T_x$,则应按此规定另选用较短的记录时间,再次记录被测冲击波的波前部分波形,以便准确测定波前时间。

模拟示波器测量冲击波时,一般选用不同的全屏扫描时间记录两次。较短的扫描时间记录波前部分波形,较长的扫描时间则记录到波尾后部的波形,以便分别准确测定被测冲击波的波前时间和半峰值时间。

10.7 照相、放大和读数

模拟示波器屏幕上显示的示波图需用照相的方式保存。拍摄示波图时,必须采用稳固的支架把相机的位置严格固定,否则相机与屏幕之间距离的变动将造成示波图照相的测量误差。

示波图照相底片上的迹线经放大后往往变得较粗,读数时应以迹线中心确定被测的偏转值。若数字示波器利用游标对屏幕上显示的示波图直接读数时,也应按此原则仔细操作来确定数值。

为检查照相、放大造成波形畸变导致的读数误差,可用一张标准的方格纸,以同样方式照相、放大。若放大后的方格坐标沿垂直和水平方向都仍然均匀分布,则可认为照相、放大无畸变。否则应作必要的调整或更换相机、放大机等仪器。

10.8 电磁干扰

冲击电压测量中总是有电磁干扰的影响,测量系统必须针对测量仪器可能受到的各种电磁干扰采取有效的抗干扰措施,并通过干扰试验检验这些抗干扰措施的效果,参见11.3和13.3。

11 测量系统的组建

11.1 测量设备的选用

11.1.1 冲击分压器

冲击电压测量中常用的分压器有电阻分压器、电容分压器和阻尼电容分压器。

a) 电阻分压器常选用温度系数很小的电阻丝绕制而成,它的阻值可用精密电桥准确测定。因此电阻分压器的分压比可达到较高的准确度,并且比较稳定。

电阻分压器的响应特性受对地杂散电容的影响较大。为此,常采用屏蔽电极补偿、电阻体

为小型化等结构，以改善分压器的响应特性。屏蔽式电阻分压器的响应时间可减小到数十纳秒。以绝缘油或 SF₆ 气体为绝缘的小型化电阻分压器的响应时间可减小到数纳秒，它常被用作校准用的标准分压器。

由于存在对地电容的影响，电阻分压器的阻值不能太大，一般不超过 10kΩ~20kΩ。因其阻值不大，这类分压器只限于测量峰值不高的雷电冲击波电压，不宜于测量操作冲击波电压，其额定工作电压一般不超过 1MV~2MV。

- b) 电容分压器常用多个电容器串联组成，也有用单个高压电容器作为分压器的高压臂。电容分压器只考虑对地电容的影响时，理论上仅引起峰值误差，而无波形误差，并且峰值误差可根据实测的等效电容予以校正。但由于不可避免的回路电感和杂散电感的存在，往往造成很严重的振荡。因此，这类分压器很少采用，只限于测量峰值较低的雷电冲击全波和操作冲击波电压。
- c) 阻尼电容分压器由电容与电阻串联组合而成，又称串联阻容分压器。它具有电容分压器的主要特点，而回路中的振荡可被串联电阻所阻尼。因此，这类分压器可取得相当好的响应特性，常用于测量峰值高达数兆伏的各种波形的冲击电压。

阻尼电容分压器的电容量一般为数百皮法。若其高压臂电阻 R_1 按

$$R_1 \approx (3 \sim 4) \sqrt{\frac{L_1}{C_e}} \quad (37)$$

选取，阻值约为 400Ω~1200Ω，则称为最佳阻尼电容分压器，式中 L_1 及 C_e 分别为分压器的电感和对地电容。此时，低压臂电阻 R_2 的选取应使低压臂的阻容乘积 $R_2 C_2$ 略小于高压臂的阻容乘积 $R_1 C_1$ 。若高压臂电阻 R_1 按

$$R_1 \approx (0.25 \sim 1.5) \sqrt{\frac{L}{C_1}} \quad (38)$$

选取，阻值约为 50Ω~300Ω，则称为低阻尼电容分压器，式中 L 及 C_1 分别为回路总电感和分压器电容。此时，低压臂电阻 R_2 常取零值或近似于零。

此外，还有并联阻容分压器，它由电容与电阻并联组合而成。并联阻容分压器兼有电容分压器和电阻分压器的特点，可用于测量含有直流分量的冲击电压，并且在理论上能做到较好的响应特性。但是，这类分压器需用一组电容元件和一组电阻元件，两者必须仔细配合，配合不当时反而使响应特性变坏。同样，回路电感仍可能造成较高的振荡。因此，在实际测试中很少采用并联阻容分压器。

无论哪一类分压器，高、低压臂应尽量采用相同的材料和特性相近的电阻、电容元件。分压器的电极应尽可能不发生电晕，以减小温度、频率、电压等的影响，使分压比保持稳定。

11.1.2 冲击测量仪器

冲击测量仪器首选数字记录仪。数字化测量具有波形存储、信号处理、预触发、程序控制等功能，极有利于冲击电压这类单次过程暂态信号的测量。当前 8~10 位、500MS/s 以上采样率、100MHz 以上带宽、3k 采样点以上记录长度的数字记录仪很容易买到，完全满足冲击电压（包括波前截波）测量的要求，并可用于测量系统阶跃波响应的测试。

以往冲击测量用的“高压示波器”和“峰值电压表”仍可使用。它们的输入电压允许高达千伏上下，可减少电磁干扰的影响。高压示波器显示的波形需用照相记录和保存，测量工作较麻烦些。峰值电压表一般需与示波器配合测量冲击电压峰值，仅在被测波形峰值附近确无过冲或振荡的情况下才能单独使用；选用时应注意制造厂给定的波形使用范围，否则不能保证测量准确度。

通用脉冲示波器和峰值电压表也可选用，但应确认它们的性能满足冲击电压测量的要求，并需采取妥善的抗干扰措施。

11.1.3 二次分压器（测量仪器外接衰减器）

采用数字记录仪或通用脉冲示波器测量冲击电压时，由于这些测量仪器的输入电压较低，常需在测量电缆终端加接二次分压器，否则测量电缆中传送的信号太低，电磁干扰的影响相对就较突出。

二次分压器作为分压系统的一部分，它将主分压器的输出电压再次降低，以适合测量仪器进行测量。它若作为测量仪器的一部分，即成为仪器的外接衰减器。

二次分压器可采用电阻或电容分压器，也可用阻容并联分压器。二次分压器接到测量仪器的电缆较短，通常采取始端或终端匹配方式的接线，参见表 3、表 4。电阻型的二次分压器制作较为简便，其高压臂电阻 r_1 不宜太大，一般可选取（10~50）k Ω ；当与电容型或阻尼电容型的主分压器配合使用时， r_1 也不能过小，它与主分压器低压臂电容 C_2 相乘的时间常数应为冲击波半峰值时间 T_2 的 100 倍以上，即 $r_1 C_2 \geq 100 T_2$ 。电容型和阻容并联型二次分压器的高压臂电容 C_1 不宜太大，一般可选取 100pF 左右。阻容并联型二次分压器的高、低压臂阻容相乘的时间常数应相等，即 $r_1 C_1 = r_2 C_2$ 。

11.1.4 测量电缆或光缆

测量电缆应选用高频同轴电缆，以保证较好的波形传输性能，选用双屏蔽同轴电缆还可提高抗干扰性能。

同轴电缆波阻抗通常为 50 Ω 或 75 Ω 。少数同轴电缆采用半空气介质的绝缘结构，波阻抗可达 150 Ω 。为达到良好的匹配效果，同轴电缆波阻抗的数值需以实测值为准，测定方法见 5.1.1.3。测量电缆所连接的仪器一般有两种输入阻抗：一种为高输入阻抗，阻值不小于 1M Ω ；另一种为匹配阻抗，阻值等于常用电缆的波阻抗值。在后者情况下，应选用波阻抗与仪器输入阻抗相同的同轴电缆。

测量电缆的长度应尽可能短，以减小被测波形在测量电缆中的衰减变形，以及降低测量电缆中形成的电磁干扰。

为彻底消除共模干扰以及仪器电源线引入干扰和电位的影响，可选用光缆取代测量电缆。所选光缆两端光电转换器的频带宽度应满足冲击电压测量的要求，并需按光缆传送信号的幅度合理配置分压器的输出电压。

11.1.5 高压引线

高压引线最好采用无电晕的大直径引线，以免电晕影响测量系统的性能。当实验室不具备大直径引线时，则采用细线较方便，但应注意避免在分压器附近发生强烈的电晕放电。

高压引线的长度、直径及位置都可影响测量系统的性能。做重要的试验时，高压引线的状况应与校准时大致相同。

高压引线上常串接阻尼电阻，以抑制测量系统回路中的振荡。阻尼电阻的大小应通过阶跃波响应试验确定。在实际测量中，计算电阻型分压系统的刻度因数以及选用阻尼电容分压器的低压臂时，应计及此高压引线的阻尼电阻。

11.1.6 接地回路

接地回路常采用宽度为 30cm~1m 的铜、铝等非磁性金属带或薄板，以减少回路阻抗。若试区地面上或地面下有大面积的金属板或细孔金属网，则可利用它作为接地回路。

11.1.7 抗干扰设备

抗干扰设备包括屏蔽、接地、等电位措施、双屏蔽同轴电缆、共模抑制器、二次分压器、隔离变压器、电源滤波器等，详见 11.3 抗干扰措施。抗干扰设备可根据测量系统的具体情况合适选用。

11.2 测量设备的连接与布置

11.2.1 分压器的周围环境

为保证测量准确度，分压器的周围环境，包括与周围各种带电体和接地体之间的距离和相对位置应与测量系统特性试验时的情况相同，周围带电体和接地体离开分压器的距离分别为分压器高度的 1.5 倍和 1.0 倍以上时，它们对测量准确度的影响很小，可以不予考虑。

11.2.2 分压器与试品的位置

分压器通常应以高压引线连到试品的高压端，而不应连到冲击电压发生器输出端或直接接在发生器

与试品的连接线上，以免在测量中包含了这段连接线上的电感压降。但在测量标准雷电冲击全波或波尾截波时，若试品电容 C 较小，且分压器与试品间连接线段的电感 L （可按 $1\mu\text{H/m}$ 估算）满足条件：

$$\sqrt{LC} \leq 0.05\mu\text{s} \quad (39)$$

则分压器可直接接在发生器和试品之间的连接线上。此时，连接线上电感压降所引起的误差可以忽略。

11.2.3 高压引线阻尼电阻的位置

高压引线上若需串接阻尼电阻时，通常接在引线的分压器端。对于以绝缘油或 SF_6 气体为绝缘的小型化电阻分压器，一般不需要用高压引线阻尼电阻，需要时常串接在高压引线的始端。

11.2.4 测量设备的接地

分压器与试品的接地端应直接连接，自成回路，并应注意减小此接地回路的阻抗，以降低回路阻抗压降造成的测量误差。

分压器到示波器之间常需用接地连线互相连接，接地连线阻抗也应尽量减小，使流过测量电缆外皮中的暂态电流减弱，以降低电磁干扰。

紧靠分压器附近应有集中的接地极，分压器接地端应以最短的宽带接地连线与此接地极相连。

除测量设备外，冲击电压发生器、负荷电容及试品等试验设备，因其接地端通过的电流较大，更需采用低阻抗的接地回路互相连接。

11.2.5 测量电缆的匹配

测量电缆两端与分压器及测量仪器的连接处应采取匹配措施，以防止波在电缆中多次反射引起波形振荡。电阻型分压系统较容易实现两端匹配，也可仅在始端或终端匹配，接线见表 3。电容型、阻尼电容型分压系统常采用始端匹配，若一端匹配不够完善，也可采用两端匹配，其接线见表 4、表 5。

11.2.6 测量仪器外接衰减器（二次分压器）

测量仪器通过外接衰减器与测量电缆连接时，可使测量电缆中传输的被测电压信号取较高的电平，以提高信噪比，减少干扰的影响。使用数字记录仪和通用示波器等低电压测量仪器时需采用外接衰减器。

11.3 抗干扰措施

冲击试验中常产生较强的电磁干扰，严重时可能影响冲击电压的准确测量，甚至危及仪器设备及人身安全。为此，测量系统必须按不同的干扰来源采取妥善的抗干扰措施。

11.3.1 电磁干扰的来源

冲击试验中电磁干扰主要有三方面来源：

- a) 测量电缆及控制电缆（如触发信号电缆）外皮中流过的暂态电流；
- b) 间隙放电时产生的空间电磁波辐射；
- c) 测量仪器电源线引入的干扰和电位。

在实际测量系统中，对这三方面干扰来源均需采取相应的抗干扰措施。

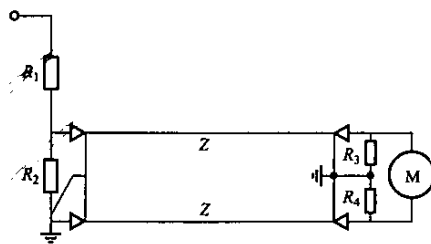
11.3.2 减小测量电缆及控制电缆外皮中的暂态电流

测量电缆或控制电缆外皮中暂态电流引起的电磁干扰，通常称作共模干扰。在实际测量中，与其他来源造成的干扰相比，这种干扰往往最为严重，必须予以充分重视。为降低共模干扰水平，可采取如下措施：

- a) 分压器应置于紧靠集中接地极的地点，并以最短的连线相接。此连线应采用较宽的铜带或铝带。
- b) 从分压器到测量仪器敷设宽度较大的金属板或金属带作为接地连线，使分压器与测量仪器尽量处于等电位的状况。电缆应沿此接地连线紧靠地面敷设，使电缆外皮与接地连线构成的回路面积尽量小。若有可能，电缆宜直接敷设在上述接地连线的金属板、带之下。
- c) 电缆的长度应尽可能短。
- d) 采用双屏蔽同轴电缆，或在单屏蔽同轴电缆外再套一金属管或屏蔽层，甚至在双屏蔽电缆外也再套金属管。电缆的外层屏蔽及金属管多点接地，至少应两端接地。电缆内层屏蔽在分压器端

接地，测量仪器端是否接地由干扰试验确定。

- e) 当测量仪器具有对称输入通道时，可采用平衡接线。以电阻型分压系统为例，如图 19 所示。此接线应采用两条型号、长度等都一样的电缆，它们的接地情况也应完全相同，因而可使引入的共模干扰彼此抵消。
- f) 电缆采取两端匹配的接线方式。
- g) 在电缆上加设共模抑制器，办法是将电缆在磁芯上绕若干圈，或将若干小磁环套在电缆上。
- h) 提高同轴电缆中传送的信号电平，使共模干扰所占比重减小，即提高信噪比，以降低干扰的影响。当信号电平高于测量仪器的允许限值时，测量仪器可加设外接衰减器或二次分压器。



R_1 、 R_2 —分压器高、低压臂电阻； Z —电缆波阻抗；
 R_3 、 R_4 —电缆终端匹配电阻； $R_3=R_4=Z$ ； M —测量仪器

图 19 测量仪器对称输入的平衡接线

11.3.3 加强仪器设备的屏蔽

仪器设备可采取如下屏蔽措施：

- a) 为限制空间电磁波穿透分压器低压臂测量回路时感应产生的电磁干扰，分压器低压臂需有接地的金属屏蔽套。测量电缆分别与分压器低压臂及测量仪器的连接均需用同轴插头。
- b) 为限制空间电磁波直接透入测量仪器内部回路形成的电磁干扰，仪器均有金属外壳等作为屏蔽。使用时，测量仪器应尽量远离放电点。
- c) 对于灵敏度较高的数字记录仪、通用示波器等测量仪器，需要更完善的屏蔽措施。此时，需采用金属网或金属板制成的全封闭的双层或单层屏蔽室或屏蔽箱，将仪器放在屏蔽室（箱）中，屏蔽室（箱）直接接地。若空间电磁波不很强，则屏蔽室（箱）即使有一边开口，只要开口处不正对辐射源，也可收到一定的屏蔽效果。

11.3.4 采用供电电源的隔离与滤波

为抑制电源线引入的干扰，减小电源中点电位的影响，仪器设备可采取如下隔离与滤波措施：

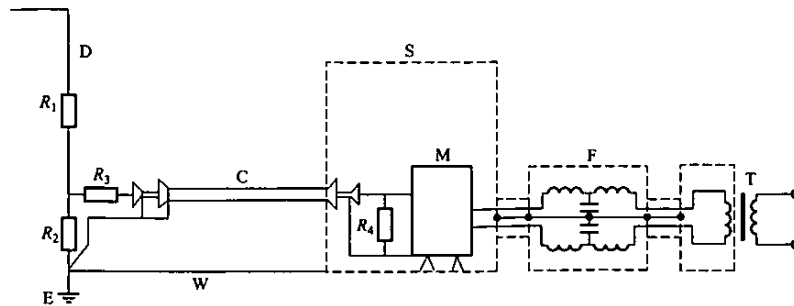
- a) 测量仪器可采用单独的隔离变压器供电。隔离变压器两个绕组之间通常设有屏蔽，则此屏蔽应与测量仪器的屏蔽室（箱）相连。为了屏蔽的完整，若隔离变压器放在屏蔽室（箱）外，它的二次绕组及出线应全部屏蔽；若放在屏蔽室（箱）内，则其一次绕组及连线必须全部屏蔽。
- b) 隔离变压器一般对抑制低频干扰较为有效，但高频干扰仍可通过绕组间的电容侵入测量仪器。为此，可在屏蔽室（箱）或仪器的电源入口处串接低通滤波器，以抑制高频干扰。
- c) 测量仪器采用不间断电源（UPS）或电池供电，以免除电源线引入干扰和电位。

11.3.5 利用光缆传送信号

利用光缆取代电缆传送被测电压信号或控制信号，可彻底消除共模干扰，并可避免试区地电位与仪器电源中点电位不同造成的干扰。目前，光缆技术发展很快，不少高电压测量系统已利用光缆传送信号。

11.3.6 抗干扰措施的实例

以上各项抗干扰措施可根据实际需要部分选用或全部采用。图 20 为电阻型测量系统采用综合措施的一个实例。



D—分压器； R_1 、 R_2 —高、低压臂电阻； R_3 、 R_4 —电缆始、终端匹配电阻；C—双屏蔽同轴电缆；
E—集中接地极；W—金属板接地连线；S—屏蔽室；M—测量仪器；F—电源滤波器；T—隔离变压器

图 20 抗干扰综合措施的实例

12 测量系统的特性要求和试验项目

12.1 测量系统的特性要求

为保证 3.5 规定的测量准确度要求，测量系统的各项特性应满足以下所列的要求。

12.1.1 冲击刻度因数

12.1.1.1 认可的测量系统的冲击刻度因数

在认可的测量系统中，分压系统和测量仪器的冲击刻度因数不确定度都应在 $\pm 1\%$ 以内，并在规定的条件范围内保持稳定，则整个测量系统的冲击刻度因数可符合要求。

12.1.1.2 标准测量系统的冲击刻度因数

标准测量系统的冲击刻度因数不确定度应在 $\pm 0.5\%$ 以内。

12.1.2 动态特性

12.1.2.1 标称时段和阶跃波响应

测量系统的动态特性可用标称时段和阶跃波响应来表征：

a) 标称时段是规定的冲击波时间参数最小值 (t_{\min}) 和最大值 (t_{\max}) 之间的间隔，在此间隔内测量系统的性能应满足标准规定的要求。规定的时间参数对于雷电全波、截波和操作波分别为波前时间 T_1 、截断时间 T_C 和峰值时间 T_p 。

注：对于不同波形，测量系统可有一个以上的标称时段。例如，某一测量系统对于 $T_1=800\text{ns}\sim 1000\text{ns}$ 的雷电全波可在一个标称刻度因数 F_1 下认可；对于 $T_C=0.5\mu\text{s}\sim 0.9\mu\text{s}$ 波前截波可在另一标称刻度因数 F_2 下认可；而对于 $T_p=200\mu\text{s}\sim 300\mu\text{s}$ 的操作波可在又一个标称刻度因数 F_3 下认可；则其标称时段为 $800\text{ns}\sim 1000\text{ns}$ 、 $0.5\mu\text{s}\sim 0.9\mu\text{s}$ 和 $200\mu\text{s}\sim 300\mu\text{s}$ 。

b) 阶跃波响应是测量系统输入一阶跃波信号时，以时间函数形式的输出。根据阶跃波响应计算确定的一些特定参数，可作为测量系统动态特性的指标。常用的阶跃波响应参数有部分响应时间 T_a 、实验响应时间 T_N 、剩余响应时间 $T_R(t)$ 、稳定时间 t_S 、过冲 β 、起始畸变时间 T_0 等（见 13.2.2.4）。

12.1.2.2 认可的测量系统的动态特性

12.1.2.2.1 基本要求

在规定的冲击波形（标称时段 $t_{\min}\sim t_{\max}$ ，最长的半峰值时间 $T_{2\max}$ ）下：

- 冲击刻度因数保持稳定：对于雷电全波、截波和操作波，稳定在 $\pm 1\%$ 以内；对于波前截波；稳定在 $\pm 3\%$ 以内。
- 测得的时间参数的不确定度在 $\pm 10\%$ 以内。
- 为重现波形上可能叠加的振荡，测量系统的部分响应时间 T_a 应满足：对于峰值附近的振荡，

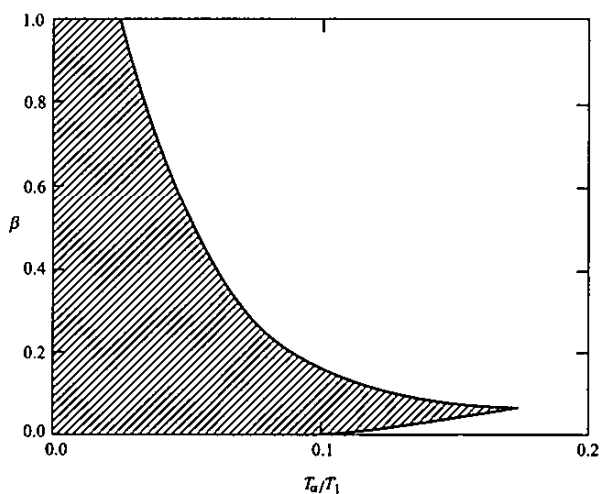
$T_{\alpha} < 30\text{ns}$; 对于波前部分的振荡, $T_{\alpha} < 15\text{ns}$ 。

则认可的测量系统的动态特性符合要求。

12.1.2.2.2 相关要求

测量系统阶跃波响应的相关要求:

- 阶跃波响应在标称时段内应保持恒定: 对于雷电全波、截波和操作波, 应稳定在 $\pm 1\%$ 以内; 对于波前截波应稳定在 $\pm 3\%$ 以内。
- 根据测量系统标称刻度因数测定时所用的波形, 阶跃波响应在 $t_{\min} \sim T_P$ 时间范围内应稳定在 $\pm 1\%$ 以内, T_P 为所用波形的峰值时间(例如, 若采用 1kHz 交流电压, 则 T_P 为 $250\mu\text{s}$; 若采用直流电压, 则 T_P 可定为 100ms)。
- 阶跃波响应在最长的半峰值时间 $T_{2\max}$ 范围内的变化应不大于 5% 。
- 若阶跃波响应上有高频振荡, 则对于雷电全波、截波和操作波, 要求稳定时间 t_S 小于 t_{\min} ; 对于波前截波, 要求在整个标称时段内剩余响应时间 $T_R(t)$ 的绝对值小于 $t/200$ 。
- 测量波前时间为 T_1 的标准雷电冲击波时, 阶跃波响应的过冲 β 和部分响应时间 T_{α} 对应的 β 和 T_{α}/T_1 关系点应处于图21阴影面积所示的限值范围内。
- 测量截断时间为 T_C 的波前截波时, 阶跃波响应的响应参数应符合下列条件:
 - 稳定时间 t_S : $t_S \leq T_C$;
 - 部分响应时间 T_{α} 和实验响应时间 T_N : $(T_{\alpha} - 0.03T_C) \leq T_N \leq 0.03T_C$;
 - 起始畸变时间 T_0 : $T_0 \leq 0.005T_C$ 。



β —过冲; T_{α} —部分响应时间; T_1 —所测冲击波的波前时间

图 21 阶跃波响应参数的限值范围

12.1.2.3 标准测量系统的动态特性

12.1.2.3.1 基本要求

在规定的冲击波形(标称时段 $t_{\min} \sim t_{\max}$, 最长的半峰值时间 $T_{2\max}$)下:

- 冲击刻度因数保持稳定在 $\pm 0.5\%$ 以内;
- 测得的时间参数的不确定度在 $\pm 5\%$ 以内。

则标准测量系统的动态特性符合要求。

12.1.2.3.2 相关要求

标准测量系统阶跃波响应参数的要求见表12。

表 12 标准测量系统阶跃波响应参数的要求

参数	雷电全波	波前截波	操作波
实验响应时间 T_N ns	≤ 15	≤ 10	—
部分响应时间 T_α ns	≤ 30	≤ 20	—
稳定时间 t_s ns	≤ 200	≤ 150	$\leq 10\mu s$
起始畸变时间 T_0 ns	—	≤ 2.5	—

12.1.3 干扰电平

对于认可的测量系统，干扰电平应不超过干扰试验所加冲击电压峰值的 1%；对于标准测量系统，干扰电平应不超过试验电压峰值的 0.5%。若证实干扰不影响冲击电压的测量，则干扰电平的限值可适当放宽。

12.2 测量系统的试验项目

认可的测量系统的验收试验是使用前检验各项特性的试验，通常按组件进行。验收试验包括分压系统和测量仪器的型式试验和例行试验以及整个测量系统的首次性能试验。型式试验在样机上进行；例行试验应每台都做。验收试验只需做一次。

认可的测量系统的性能试验是使用期间定期检验其性能的试验，建议每年做一次，至少每 5 年应重复一次；测量系统大修后、系统布置较大变动时以及性能校核发现刻度因数已明显变化时也应进行性能试验。

认可的测量系统的性能校核是使用期间检验其性能的简化试验，校核按测量系统稳定性的时限重复进行。

标准测量系统的校准是各项特性认证性的试验，校准试验在投入使用前及以后至少每 5 年应进行一次。测量系统的试验项目列于表 13，表中也列入了相关的特性要求。

表 13 测量系统的试验项目

试验项目	特性要求	认可的测量系统			标准测量系统
		验收试验	性能试验	性能校核	校准试验
分压系统	4.2	4.3	—	—	—
测量仪器	7.1, 8.1, 9.1	7.2, 8.2, 9.2	—	—	—
冲击刻度因数	12.1.1	13.1	13.1	13.4.1	13.1
动态特性	12.1.2	13.2	13.2	13.4.2	13.2
干扰电平	12.1.3	13.3	13.3	—	13.3

12.3 测量系统的性能记录

12.3.1 测量系统的一般说明

系统说明应包括对其鉴定所需的全部器件的资料如下：

- 冲击分压器：类型、产品编号、额定电压、阻容参数、标称分压比、标称时段、使用条件等。
- 测量电缆：型号、长度、波阻抗等。
- 测量光缆（若采用时）：型号、长度、传送信号的频带宽度和幅度范围等。
- 测量仪器：类型、型号、产品编号、输入电压量程、扫描时间范围、带宽、输入阻抗。数字记录仪的额定位数、最高采样率、最大记录长度；模拟示波器的触发方式、屏幕存储功能、内置校准器准确度；峰值电压表的冲击波形适用范围、读数保持时间、内置校准器准确度等。

- e) 高压引线：线型、长度、串联阻尼电阻阻值及位置。
- f) 接地回路：试品到分压器的接地回路、分压器到测量仪器的接地回路、分压器到集中接地极的连线等的结构、大小和布置。
- g) 抗干扰措施：屏蔽室（箱）、接地连线、其他抗共模干扰器件、隔离变压器、电源滤波器、不间断电源（UPS）或电池、光缆等。

12.3.2 组件的验收试验结果

测量系统的组件包括分压系统和测量仪器两部分，全部验收试验结果如下。

a) 分压系统的验收试验结果：

- 1) 型式试验：温度效应、邻近效应、长期稳定性等；
- 2) 例行试验：刻度因数、线性度、短期稳定性、干耐受电压等。

b) 测量仪器的验收试验结果：

- 1) 型式试验：数字记录仪的静态整体非线性、静态局部非线性；
模拟示波器的电压偏转特性；
峰值电压表的电压幅度非线性；
时基非线性、上升时间、内部噪声电平、单项干扰试验结果等；
- 2) 例行试验：冲击刻度因数、刻度因数的恒定性；
数字记录仪的动态局部非线性；
模拟示波器和峰值电压表的内置校准器准确度等。

12.3.3 测量系统的性能试验结果

测量系统性能试验的次序（首次、第二次、……）、日期、现场环境条件、校准机构（校准实验室）、校准用仪器设备的型号和编号、校准试验方法；测定的标称刻度因数、标称时段或阶跃波响应、干扰电平等。

12.3.4 测量系统的性能校核结果

测量系统性能校核的次序（首次、第二次、……）、日期、现场环境条件、校核试验方法；测定的刻度因数、冲击波时间参数或阶跃波响应等。按标准规定要求判断校核结果是否合格以及相应的处置情况。

13 测量系统的试验

13.1 标称刻度因数的测定

13.1.1 标准方法：比对试验

对于认可的测量系统，比对试验的平面布置与图 6 相同。试验电压最好采用额定电压。若最高电压的标准测量系统难以配备，则可采用不低于 20% 额定电压，但必须保证该试验电压在线性度试验覆盖的范围内。试验电压波形应与被测冲击波形相同。对于雷电全波、截波和操作波，波前时间应在所要求的标称时段内，半峰值时间应为测量系统被认可的最长半峰值时间；对于波前截波，截断时间应选在 $0.5\mu\text{s} \sim 0.9\mu\text{s}$ 范围内。

为取得合适的灵敏度，可改变测量仪器输入档的设置，也可采用不同的仪器。被试测量系统的仪器若具有两个输入通道，标准测量系统可利用其另一通道输入。采取这些变动时应注意两个测量系统的其余部分都没有改变。被试测量系统采用的仪器应符合规定要求，所用的输入档已通过校准，其量值都应直接或间接溯源到国家计量标准，并有校准试验的记录。

被试测量系统若有几个刻度因数（如分压器有几个低压臂），则每个刻度因数都应通过试验测定。

比对试验时，同时读取两个系统的读数。采用输入输出法确定标称刻度因数（见 5.1.2），即由标准测量系统测得的读数通过计算求得输入量 U_1 ，除以被试测量系统的仪器读数 U_2 ，便可确定该系统的刻度因数：

$$F = U_1 / U_2 \quad (40)$$

试验应在同一冲击电压水平下重复施加 n ($n \geq 10$) 次，得到 n 个读数 F_i ，并计算平均值 F_m ，其实验标准偏差应小于 F_m 的 1%，则 F_m 确定为该测量系统的标称刻度因数。

实验标准偏差 S 按下式计算:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i - F_m)^2}{n-1}} \quad (41)$$

注: 若某一估算值 F_0 取代式 (41) 中 F_m 的位置, 算得的实验标准偏差 S 也不大于 F_m 的 1%, 则此 F_0 也可用作标称刻度因数。

对于标准测量系统, 比对试验方法同认可的测量系统, 但须由校准实验室 (见 3.6.1) 用经过认证的标准测量系统进行比对。校准实验室配备的标准测量系统应通过校准试验溯源到国家计量标准, 并与国内或国际同等级别的标准测量系统进行相互比对试验, 证实其性能符合标准要求。

13.1.2 替代方法: 组件校准

测量系统各个组件 (分压系统和测量仪器) 的刻度因数分别采用相应的方法进行测定, 详见 5.1 和 7.3.1、8.3.1、9.3.1。在分别测定中要计及各组件间可能的相互影响, 然后将各组件刻度因数相乘的乘积确定为测量系统的标称刻度因数。

组件校准较便于溯源到国家计量标准, 为此, 标准测量系统常采用组件校准法测定其刻度因数。

13.2 动态特性试验

13.2.1 标准方法: 与标准测量系统比对确定标称时段

比对试验采用 13.1.1 相同的方法, 因而可与标称刻度因数的测定同时进行, 但应采用两个不同的冲击波形, 各施加 n ($n \geq 10$) 次试验电压。对于雷电全波、截波和操作波, 两个冲击波形分别具有较短的波前时间 t_{\min} 和较长的波前时间 t_{\max} , 并都有测量系统被认可的最长半峰值时间 $T_{2\max}$; 对于波前截波, 两个冲击波形分别具有较短的截断时间 t_{\min} 和较长的截断时间 t_{\max} (参见 12.1.2.1)。

测量系统的比对试验结果满足以下条件时, 可确定标称时段为 $t_{\min} \sim t_{\max}$:

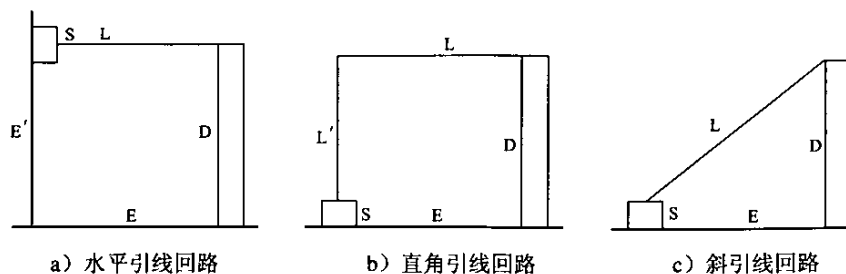
- 两个不同冲击波形下测定的刻度因数: 对于认可的测量系统, 两者之差应不超过 $\pm 1\%$ (雷电全波、截波和操作波) 和 $\pm 3\%$ (波前截波); 对于标准测量系统, 两者之差应不超过 $\pm 0.5\%$ 。
- 各个冲击波形下, 被试测量系统测得的每一时间参数与标准测量系统测得的对应值之差: 对于认可的测量系统, 应在 $\pm 10\%$ 以内; 对于标准测量系统, 相互间应在 $\pm 5\%$ 以内。
- 各个冲击波形下, 认可的测量系统与标准测量系统测得的每一时间参数之比值的实验标准偏差均应小于其平均比值的 5%。

13.2.2 替代方法: 通过阶跃波响应试验确定响应参数

被试测量系统输入阶跃波电压, 记录其输出波形, 即为该测量系统的阶跃波响应。由阶跃波响应, 按定义计算确定各项响应参数。

13.2.2.1 阶跃波响应试验回路

阶跃波响应试验有三种典型的试验回路, 见图 22。



a) 水平引线回路 b) 直角引线回路 c) 斜引线回路
S—阶跃波发生器; D—被试测量系统分压器; L—高压引线; L'—垂直引线;

E—接地回路; E'—垂直接地或金属屏蔽墙

图 22 阶跃波响应试验的典型试验回路

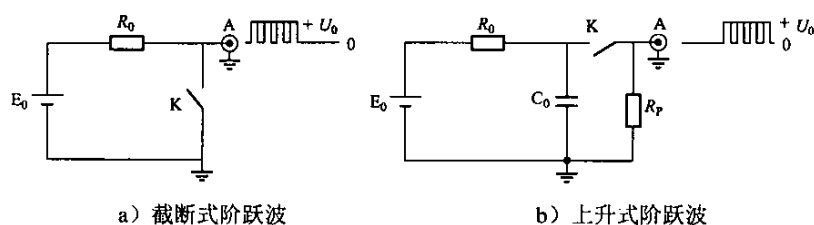
图 22 (a) 为水平引线回路：阶跃波发生器置于与分压器相同的高度，连接在水平的高压引线始端，并用附加的垂直接地或利用金属屏蔽墙与接地回路相连。这种回路是阶跃波响应试验较适用的回路。图 22 (b) 为直角引线回路：阶跃波发生器置于地面，由附加的垂直引线与水平的高压引线相接，形成一直角引线。这种回路会使测量系统的回路电感有所增加。图 22 (c) 为斜引线回路：阶跃波发生器置于地面，测量系统的高压引线适当加长后斜向下与发生器相接，构成一三角形回路。这种回路将增大高压引线对分压器的影响。

阶跃波响应试验回路布置应尽可能接近测量系统实际使用的情况。采用图 22 (a)、(b) 两种回路时，高压引线的长度取实际使用的长度，其走向可按实际情况，不一定取严格水平的方式。阶跃波响应试验的接地回路和附加的垂直接地宜采用铝板敷设，也可用两条以上的铝带或铜带并联组成宽度约 1m 的金属带，在全屏蔽的高电压试验室中可利用试验室本身的金属接地网和金属屏蔽墙。

测量系统高压引线始端或终端（分压器端）串接的阻尼电阻（见图 1）应仍处原位，但采用图 22 (b) 直角引线回路时，高压引线始端的阻尼电阻应改接在附加的垂直引线始端与阶跃波发生器之间。高压引线阻尼电阻的阻值可通过阶跃波响应试验确定。改变阻尼电阻值，测量一系列的阶跃波响应，可按测量系统响应特性的要求（见 12.1.2.2.2 和 12.1.2.3.2），选用合适的阻尼电阻值。

13.2.2.2 阶跃波发生器

阶跃波发生器可分为两种，分别产生截断式和上升式阶跃波，其原理接线见图 23。截断式阶跃波的优点在于截断后幅值始终保持恒定为零，而上升式阶跃波必须注意其幅值衰减不影响测量系统阶跃波响应在规定的时间内保持稳定（见 12.1.2.2.2）的检测。因此，阶跃波响应试验常用截断式阶跃波。当发生器内电阻 R_0 较大时，电阻型测量系统宜用上升式阶跃波进行试验（此时并联电阻 R_P 可以省略）。



E_0 —发生器电源； R_0 —内电阻； C_0 —充电电容； R_P —并联电阻；K—高速开关装置；A—输出端电缆插座

图 23 阶跃波发生器的原理接线

阶跃波发生器的电源常采用直流电压，也可用缓慢上升的冲击电压。阶跃波的前沿应非常陡，其上升时间一般不大于 5ns。为此，发生器必须采用高速接通的开关装置，如汞润开关、常压或增压的几毫米间距的均匀场间隙。这些高速开关装置分别适用于产生几百伏、几千伏和几十千伏的阶跃波电压。低电压设备较为简便，因而通常选用 100V~200V 低电压的阶跃波发生器。

发生器产生的阶跃波可采用单次或多次重复的波形，不过重复的阶跃波应有足够的持续时间，其间隔时间应使相继的阶跃波响应之间互不影响。

阶跃波电压波形应在阶跃波响应试验之前或同时进行测量。测量阶跃波的示波器应具有 100MHz 以上的带宽。测量时必须注意测量电缆的端部匹配，否则将造成严重的波形振荡。100V~200V 低电压阶跃波可用脉冲示波器直接测量，接线和匹配方式见图 24。高电压阶跃波需通过响应特性优良电阻型分压系统进行测量，接线和匹配方式见表 3。

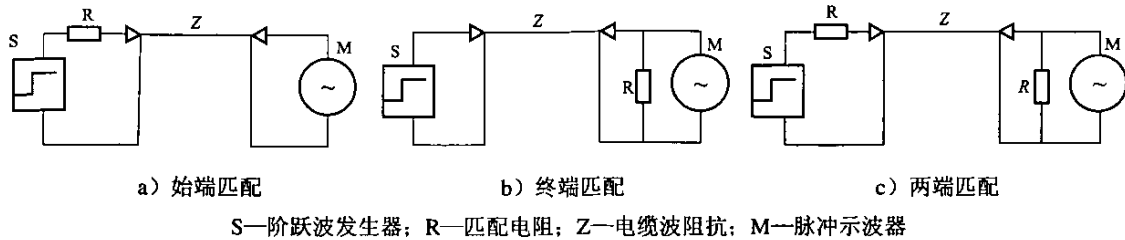


图 24 阶跃波电压波形测量接线

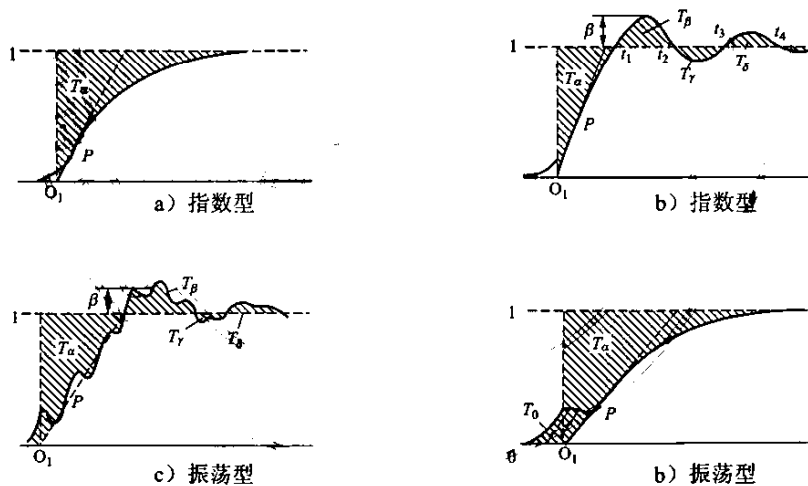
13.2.2.3 阶跃波响应的波形测量

测量系统阶跃波响应的波形测量常采用数字记录仪或通用脉冲示波器。由于阶跃波响应是以纳秒计的快速暂态过程，测量仪器的带宽应有 100MHz 以上，最高扫描速度可选用 1ns/div~5ns/div，扫描应能与波形信号良好同步。

为便于确定阶跃波响应参数，测量时可选用快、慢两档，快速扫描应能记录到满幅度跳变的波形前沿，慢速扫描应能记录到明显稳定的幅值线。数字记录仪可采用一小段预触发时间（又称延时）而采集到波形零点；通用脉冲示波器的触发至少应能显示 10% 幅值以下的前沿波形，最好也能采取某种延时的办法记录到波形零点。

阶跃波响应示波图上宜再记录一条零线。采用截断式阶跃波试验时，改换测量仪器前沿触发的正、负斜率（SLOPE），并用较慢的速度扫描；采用上升式阶跃波试验时，在测量仪器无信号的状态下扫描一次，均可记录到一条零线。

阶跃波响应通常都将其幅值标么化为单位 1，以便对比和参数计算。阶跃波响应的典型波形如图 25 所示，大体上可分为两大类：指数型，见图 25 (a)、(d)，和振荡型，见图 25 (b)、(c)。



1—单位幅值；0—实际零点； O_1 —视在零点；P—前沿最陡处的切点；

T_a 、 T_β 、 T_γ 、 T_δ —响应波形与单位幅值线之间的各块面积；

β —过冲； T_0 —响应波形与 P 点切线及零线之间的面积

图 25 阶跃波响应的典型波形

13.2.2.4 阶跃波响应参数计算

在计算阶跃波响应的各项参数之前，需确定响应波形的零线、单位幅值线和视在零点。

若阶跃波响应示波图没有记录零线（见 13.2.2.3，如图 25 中的水平实线），可由波形零点 0 画一条水平线，或按零电位处的水平刻度线作为零线。

阶跃波响应波形的幅值线为波形趋于稳定的水平线；对于振荡型阶跃波响应波形，它也是振荡的水平轴线（如图 25 中的水平虚线），其幅值都标么化为单位 1，称作单位幅值线。

视在零点 O_1 是阶跃波响应的计算起点。按标准规定，它是响应波形前沿最陡处 P 点作切线与零线的交点，如图 25 所示。若响应波形前沿部分有振荡，则以振荡中心线的最陡处作切线，见图 25 (c)。若波形起始的畸变较大，则在作切线时忽略波形起始的畸变部分，见图 25 (d)。

在响应参数计算中常需用如下式的积分，称作阶跃波响应积分 $T(t)$ 。它是单位幅值 1 与标么化阶跃波响应 $g(t)$ 之差从视在零点 O_1 到瞬时 t 的积分，其中 $g(t)$ 在切点 P 以下的起始段由所作的切线顶替，如图 26 所示。 $T(t)$ 的数值相当于从 $O_1 \sim t$ 的时段内响应波形与单位幅值线之间所围面积的代数和，其中响应波形在单位幅值线之下的面积为正值，之上的面积为负值。

$$T(t) = \int_{O_1}^t [1 - g(\tau)] d\tau \quad (42)$$

按照定义，阶跃波响应的各项参数计算如下：

- a) 实验响应时间 T_N 是阶跃波响应积分从 O_1 积到 t_{\max} 的值 $T(t_{\max})$ ， t_{\max} 为该测量系统标称时段的最大值（见 12.1.2.1），此积分值相当于图 26 (a) 中 T_α 、 T_β 、 T_γ 等各块面积代数和所代表的时间：

$$T_N = T(t_{\max}) = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma - \dots \quad (43)$$

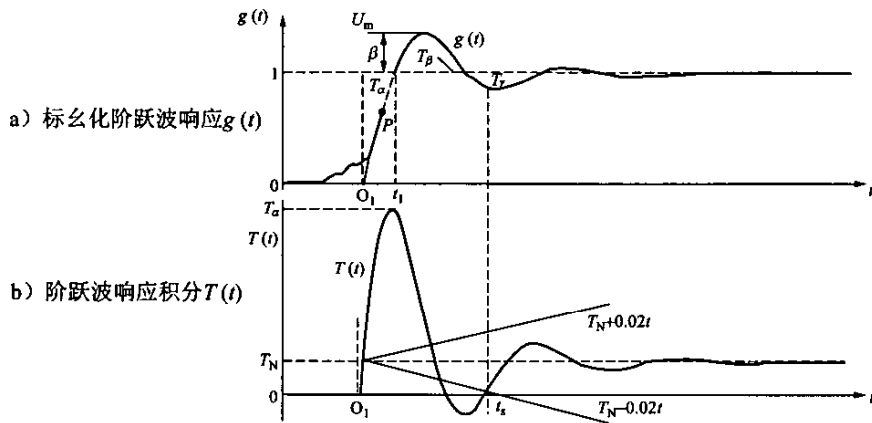


图 26 阶跃波响应的参数计算

对于指数型阶跃波响应，见图 25 (a)、(d)，其波形不超过单位幅值线即趋于稳定，因而阶跃波响应积分值 $T(t_{\max})$ 仅有面积 T_α ，此时：

$$T_N = T_\alpha \quad (44)$$

- b) 部分响应时间 T_α 是阶跃波响应积分从 O_1 积到 t_1 的值 $T(t_1)$ ， t_1 为 $g(t)$ 首次达到单位幅值的瞬时，此积分值相当于图 26 (a) 中第一块面积 T_α 所代表的时间，并且是阶跃波响应积分的最大值，见图 26 (b)：

$$T_\alpha = T(t_1) \quad (45)$$

- c) 过冲 β 是振荡型阶跃波响应波形峰值 U_M 超过单位幅值 1 的数量，见图 26，通常以百分数表示：

$$\beta = (U_M - 1) \times 100\% \quad (46)$$

当响应波形包含多种频率的振荡时，过冲 β 由基波振荡的峰值确定，见图 25 (c)。对于指数型阶跃波响应，过冲 $\beta = 0$ ，见图 25 (a)、(d)。

- d) 剩余响应时间 $T_R(t_i)$ 是实验响应时间 T_N 与阶跃波响应积分从 O_1 积到某一瞬时 t_i 的值 $T(t_i)$ 之差， t_i 小于 t_{\max} ，此积分值相当于 t_i 之后直至 t_{\max} 时段内响应波形与单位幅值线之间所围面积代数和所代表的时间：

$$T_R(t_i) = T_N - T(t_i) \quad (47)$$

- e) 稳定时间 t_s 是剩余响应时间 $T_R(t_i)$ 的绝对值达到并继续保持不大于 $0.02t_i$ 的最短时间, 即 t_i 在 t_s 之后直至 t_{\max} 的时段内都满足下列条件, 见图 26 (b):

$$|T_R(t_i)| = |T_N - T(t_i)| \leq 0.02t_i \quad (48)$$

这表明响应波形在 t_s 之后与单位幅值线已相差无几, 可以认为已保持稳定, 见图 26 (a)。

- f) 起始畸变时间 T_0 是阶跃波响应起始畸变的波形与 P 点切线及零线之间的面积所代表的时间, 计算中响应波形需从实际零点 0 开始起算, 见图 26 (a)。

13.3 干扰试验

干扰试验时, 整个测量系统的状况应保持与实际测试时一样, 只是将测量电缆的输入端从分压器上解开, 并把电缆的芯线与外皮直接短路, 电缆外皮应仍保持原有的接地状况。在此情况下施加冲击电压, 此时测量仪器显示或记录的现象即为电磁干扰, 其峰值称为干扰电平。

干扰电平与施加的冲击电压峰值和波形密切相关。由于干扰电平随试验电压而升高, 试验时冲击电压峰值宜逐级上升, 尽可能升到实验测试中的最高电压。冲击电压波形应采用截断波, 但宜先用雷电全波, 然后再用波峰截断波, 后者最好采用球隙放电形成的截断波。

13.4 认可的测量系统性能校核

13.4.1 刻度因数的校核

认可的测量系统刻度因数的校核可采用如下方法。

13.4.1.1 与认可的测量系统比对

采用类似 13.1.1 所述步骤, 在同一种冲击电压波形下, 被试测量系统与另一认可的测量系统 (或标准测量系统) 进行比对。施加冲击电压的次数可在 1 到最近一次性能试验施加的次数 n 之间选择。若两者测得的冲击电压之差并不大于 3%, 则可认为该测量系统的标称刻度因数依然有效。若相差较大, 则应按性能试验重新测定其标称刻度因数 (见 13.1)。

13.4.1.2 校核各组件的刻度因数

采用不确定度为 $\pm 1\%$ 以内的校准器 (包括校准冲击波发生器、测量仪器的内置校准器等) 校准被试测量系统各组件 (分压系统和测量仪器) 的刻度因数。若各组件的刻度因数与其以前数值之差并不大于 1%, 则可认为该测量系统的标称刻度因数是有效的。若有一个差值超过 $\pm 1\%$ 的范围, 则应重新测定其标称刻度因数 (见 13.1)。

13.4.1.3 与测量球隙比对

被试测量系统与测量球隙同时测量冲击电压进行比对。测量球隙应符合 GB/T 311.6—2005 规定要求, 且用放电火花照射 (可利用冲击电压发生器中间球隙放电产生的照射)。若两者测得的冲击电压值相差不大于 3%, 则可认为该测量系统的标称刻度因数是有效的。若相差较大, 则应重新测定其标称刻度因数 (见 13.1)。

13.4.2 动态特性的校核

认可的测量系统动态特性的校核可采用如下方法。

13.4.2.1 标称时段的校核

此项校核与 13.4.1.1 刻度因数校核同时进行, 但应采用两个不同的冲击波形, 它们分别具有时间参数最小值 t_{\min} 和最大值 t_{\max} (参见 13.2.1)。被试测量系统与另一认可的测量系统 (或标准测量系统) 测得的冲击波每一时间参数之差都应在 $\pm 10\%$ 以内。否则应按性能试验重新测定其标称时段 (见 13.2.1)。

13.4.2.2 阶跃波响应的校核

被试测量系统在性能试验中已有阶跃波响应的记录, 可采用同样线路和同一方式记录其阶跃波响应, 并与最近一次性能试验和其后历次校核的记录相比较。每次校核都会有些小变化, 根据早期的各次校核能确定可以接受的变化量。若有较大的变化, 则应查明原因并重新进行性能试验 (见 13.2.2)。

14 冲击电压测量

14.1 冲击电压波形记录

14.1.1 测量仪器的基本设置

为记录到所需的冲击电压峰值与波形，测量仪器需设置合适的量程、扫描和偏置：

- 根据被测冲击电压的峰值和分压系统的刻度因数选用合适的量程，使仪器的输入电压占满量程的一半以上，最好占 80% 左右。
- 根据被测冲击波的类型选用合适的扫描，例如测量雷电全波可选用全屏扫描 $50\mu\text{s}\sim 100\mu\text{s}$ （扫描档 $5\mu\text{s}/\text{div}\sim 10\mu\text{s}/\text{div}$ ）等。使用数字记录仪测量冲击波（特别是波前时间）时，必须注意所选用的扫描档应有足够的采样率（见 7.1.1）。
- 根据被测冲击波的极性设置合适的偏置。正极性时取低位偏置，如距离屏幕底边 1 格；负极性时取高位偏置，如距离屏幕顶边 1 格；使冲击波可有较大的偏转幅度，以保证足够的测量准确度。

14.1.2 测量仪器的同步触发

冲击电压是一次过程快速暂态信号，测量仪器的触发必须与被测信号准确同步才能记录好所需的冲击波形。触发过迟或过早都会造成所记录的波形不完整，甚至整个波形都记录不到，影响冲击电压的测量。

测量仪器的触发可采取内触发和外触发两种方式：

- 内触发方式是在测量仪器内部抽取被测电压的部分信号去触发仪器。采用内触发方式时无需外加其他部件或设备，只需按被测冲击波极性调节前沿触发的正、负斜率和电平，但在被测信号延时不足时容易造成触发过迟的现象。
- 外触发方式是由测量仪器外部引入信号去触发仪器。外部触发信号可用冲击电压发生器控制装置发出的同步脉冲。由于控制装置多个同步脉冲按预置的时间配合关系分别去触发测量仪器和冲击电压发生器等测试设备，且配合关系可按需调整，因而触发较稳定可靠，同步效果良好。此外，外部触发信号也可抽取冲击电压发生器点火脉冲的部分信号或利用天线接受发生器点火时产生的电磁波信号；这些方式延时不可调，触发较不稳定，并且当信号过强时可能干扰扫描回路而使波形发生横向振荡。

数字记录仪常采用内触发方式或由同步脉冲控制的外触发方式，它的预触发功能可调节全程扫描时间范围内任意多长的延时，因而具有十分优良的同步效果。

14.1.3 波形零线与校准信号

为计算冲击电压的各项参数，在记录冲击电压波形时宜再记录一条零线，它是测量仪器零输入条件下的输出数据与扫描迹线（见图 18）。

为校准冲击电压峰值和波形时间，在记录冲击波形时可再记录两条略高和略低于峰值的校准冲击波形（见图 17）或记录 1~2 条与峰值相近的直流校准电压迹线和时标信号（见图 18）。

14.1.4 冲击电压波形存储

模拟示波器采用照相的方式将所测的冲击电压波形保存下来，以便根据摄得的示波图计算冲击电压的峰值和时间参数。

数字记录仪具有存储的功能可将所测的冲击电压波形数据暂存在仪器的寄存器中，需要较长时间保存的波形数据可转存到计算机的硬盘，通常还与计算机软件确定的波形参数一并以文件形式存储起来。存储的冲击电压波形和参数可随时调用，将其显示或打印。

14.2 冲击电压波形振荡及其处理

14.2.1 冲击电压波形振荡的允许限值

在冲击试验中，试验回路有可能产生振荡，它将叠加在试验电压波形上。根据试验标准规定，作用

于试品的冲击电压波形振荡的允许限值为：

在冲击波的峰值附近，过冲或振荡（见图 27）的幅值应不超过冲击电压峰值的 5%；

在 90% 峰值以下的波前部分，振荡幅值宜在 A'B' 直线以下。A'B' 直线是波形前沿上 30% 和 90% 峰值的 A 和 B 两点分别提升 25% 和 5% 峰值的幅度确定的 A' 和 B' 两点所连的直线（见图 29）。

14.2.2 波形振荡的鉴别与校正

在冲击试验中，除了试验回路外，测量系统也有可能产生振荡。因此，测得的冲击电压波形需作必要的鉴别，以确认实际作用于试品的振荡及其幅值。

14.2.2.1 估算试验回路中可能产生的最高振荡频率 f_{\max}

试验回路中可能产生的最高振荡频率 f_{\max} (MHz) 可按式估算：

$$f_{\max} = \frac{C}{4(H_g + H_c)} \quad (49)$$

式中：

C —— 电磁波在空气中的传播速度， $C=300\text{m}/\mu\text{s}$ ；

H_g —— 冲击电压发生器的高度，m；

H_c —— 波前电容器的高度，m。

14.2.2.2 估算冲击波上叠加振荡幅值的校正系数 α

振荡幅值的校正系数 α 是振荡的实际幅值与测得的幅值之比，它可按式作近似估算：

$$\alpha \approx \sqrt{1 + (2\pi f T_\alpha)^2} \quad (50)$$

式中：

f —— 振荡频率；

T_α —— 测量系统阶跃波响应的部分响应时间，见 13.2.2.4。

14.2.2.3 判断测量系统传递叠加振荡的能力

为检测出试验回路中可能产生的最高振荡频率 f_{\max} 以下的叠加振荡，振荡幅值的测量值至少应不小于实际值的 20%，见表 1，即振荡幅值的校正系数 $\alpha \leq 5$ 。由此可得，判断测量系统对冲击波上所有可能出现的叠加振荡具有足够传递能力的条件为：

$$f_{\max} \leq \frac{2}{\pi T_\alpha} \quad (51)$$

式中：

T_α —— 测量系统阶跃波响应的部分响应时间，见 13.2.2.4。

若不能满足上述条件，则冲击试验电压上可能叠加的某些振荡会有测不出来的危险。在这种情况下，应设法改进测量系统的响应特性，以满足上述条件。

14.2.2.4 波形无振荡的情况

当测量系统的阶跃波响应特性满足上述条件时，若测得的冲击波形很光滑，并无叠加的振荡，则说明冲击试验电压上确实不存在振荡。

14.2.2.5 波形有振荡、测量系统具有指数型阶跃波响应的情况

测量系统具有指数型阶跃波响应表明：系统没有谐振的特征，本身不会产生振荡。因此，冲击波形上的振荡是试验回路中产生的。

此时，测得的振荡幅值一般需予以校正，即乘以校正系数 α ，便可确定波形上叠加振荡的实际幅值。若波形振荡的频率 f 满足以下条件：

$$f \leq \frac{1}{4\pi T_\alpha} \quad (52)$$

则对应的振荡幅值校正系数将接近于 1，所测的振荡幅值可不作校正，即可定为振荡的实际幅值。

14.2.2.6 波形有振荡、测量系统具有振荡型阶跃波响应的情况

测量系统具有振荡型阶跃波响应表明：系统本身有一定的谐振频率范围。冲击波形上频率在此谐振频率范围之外的振荡就不会是测量系统所产生，其来源必是试验回路。此时，频率低于谐振频率范围的振荡幅值可不作校正；频率高于谐振频率范围的振荡需用校正系数 α 确定其实际幅值。

对于冲击波形上频率在测量系统谐振频率范围内的振荡，就有可能产生于测量系统，也有可能产生于试验回路，并被测量系统所放大。此时，可用上述试验回路中可能产生的最高振荡频率 f_{\max} 先作鉴别，频率高于 f_{\max} 的振荡可以认为不是试验回路中产生的。至于频率低于 f_{\max} 的振荡，可采取抑制测量系统中振荡的措施（见 14.2.3），或改用具有指数型阶跃波响应的测量系统，重新测量冲击波形再行鉴别。若振荡随之消失，则可认为原有的振荡来源于测量系统；若振荡依然存在，则可认为振荡产生于试验回路，其振荡幅值需按测量系统改动后的条件予以校正或不作校正。

14.2.3 抑制测量系统中振荡的措施

14.2.3.1 测量系统中产生振荡的原因

在测量系统中产生波形振荡有多种原因：

- 波形中有规律的衰减振荡大多是具体回路中的振荡：测量系统主回路振荡的频率一般较低；低压臂回路和测量电缆回路振荡的频率较高。
- 波形中无规律的杂乱振荡通常是测量系统中的杂散振荡和电磁干扰。

对于各种原因产生的波形振荡，需有针对性地分别采取不同的抑制措施才能奏效。考察测量系统中产生振荡的原因以及采取抑制措施的效果时，利用测量系统阶跃波响应试验是最明显、最有效的方法，观测冲击电压波形则是最直接的方法。

14.2.3.2 具体回路振荡的抑制

抑制测量系统中具体回路中的振荡主要采取阻尼和匹配的方法：

- 测量系统的主回路振荡，包括高压引线中波的多次折、反射形成的振荡，可采取适当阻值的高压引线电阻予以阻尼或用作端部匹配。
- 分压器的低压臂回路振荡可采取以下改善措施：选用低电感的低压臂元件，尽量缩短低压臂回路接线或采取同轴结构，低压臂各并联支路按中心对称布置，若低压臂为电容则可串联适当的阻尼电阻，当低压臂电容由若干个电容并联组成时应在各并联电容支路中串联阻尼电阻等。
- 测量电缆应采取正确的匹配措施，以消除测量电缆中波的多次折、反射引起的振荡。各种类型的分压系统可采取的匹配方式详见表 3~表 5。

14.2.3.3 杂散振荡和电磁干扰的抑制

抑制杂散振荡和电磁干扰分别采取阻尼和抗干扰措施：

- 电容分压器本体对地电容等可引起杂散振荡，采用高压臂电阻分段串联在高压臂电容中构成阻尼电容分压器有利于阻尼这种杂散振荡。
- 测量系统应采取妥善的抗干扰措施。例如，良好的接地，特别需要注意分压器的接地、测量电缆和测量仪器的接地等；采用低压臂屏蔽、测量仪器的屏蔽室（箱）；测量电缆用双屏蔽同轴电缆；供电电源的隔离与滤波；采用光缆等抗干扰的各项措施，详见 11.3。

14.3 冲击电压参数的确定

冲击电压峰值和波形时间等各项参数均应按 GB/T 16927.1 中有关冲击电压波形的规定来确定。

14.3.1 雷电冲击全波

雷电冲击全波的各项参数确定如下。

14.3.1.1 峰值 U_p

冲击波形的零线是计算峰值等参数的基础。若冲击电压波形记录时没有再记录一条零线（见 14.1.3），则可由波形零点画一水平线或按零电位所处的水平刻度线作为零线，数字记录仪预触发时间内保持零输入的一小段迹线（不少于 10 个采样点）也可用作零线进行计算。

对于光滑的雷电冲击波形，波形曲线偏离零线的最大值，即确定为峰值 U_p 。

对于波峰部分带有振荡的雷电冲击波形，首先取振荡的平均曲线，并求得振荡的幅度和频率；然后经过鉴别和必要的校正（参见 14.2.2），确认是作用于试品的冲击电压波形上叠加的振荡，且其振幅或过冲在冲击波峰值的 5% 限值以内，则波峰部分的这种振荡是允许的，见 14.2.1。在此前提下，若振荡的频率小于 0.5MHz 或过冲的持续时间超过 $1\mu\text{s}$ ，则按包括振荡在内的冲击波形最大值确定为峰值 U_p ，见图 27a)、b)；否则，应取振荡的平均曲线偏离零线的最大值确定为峰值 U_p ，见图 27c)、d)。

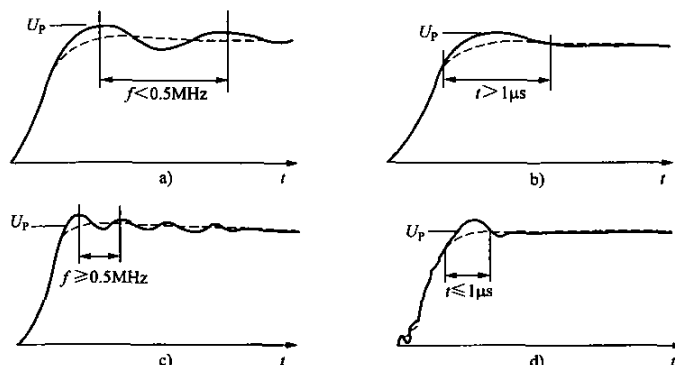


图 27 波峰部分带有振荡的雷电冲击全波峰值的确定

14.3.1.2 波前时间 T_1

对于光滑的雷电冲击波形，在前沿波形上取幅度为峰值的 30% 和 90% 的 A 和 B 两点。此两点连线与零线的交点即确定为冲击波形的视在零点 O_1 ，它是雷电冲击波时间参数的计算起点。此 AB 连线的另一端与幅度为峰值的水平线相交于 P 点。于是，从视在零点 $O_1 \sim P$ 点的时间间隔，亦即 A、B 两点之间时间间隔 T_x 的 1.67 倍，便确定为波前时间 T_1 ，见图 28。

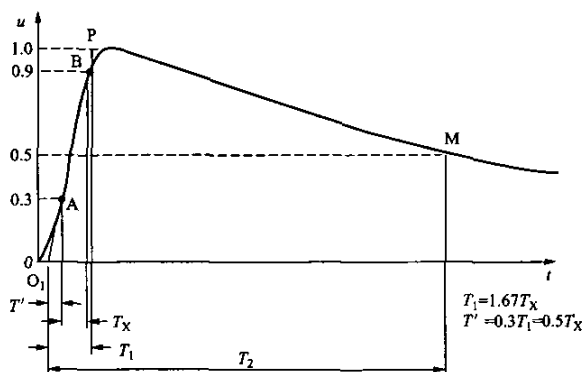


图 28 雷电冲击全波波形时间的确定

对于波前部分带有振荡的雷电冲击波形，先取振荡波形的平均曲线，并在此平均曲线上也按照 30% 和 90% 峰值的幅度取 A 和 B 两点。然后将此两点分别提升 25% 和 5% 峰值的幅度到 A' 和 B' 两点，并把它们连成 A'B' 直线，见图 29。若波前部分的振荡在此 A'B' 连线以下，则这些振荡是可以允许的，见 14.2.1。此时，同样由 A、B 两点用上述方法确定波前时间 T_1 。

14.3.1.3 半峰值时间 T_2

雷电冲击全波的波尾部分已无振荡。按 50% 峰值的幅度在波尾部分的波形上取 M 点，则从视在零点 $O_1 \sim M$ 点的时间间隔即确定为半峰值时间 T_2 ，见图 28。

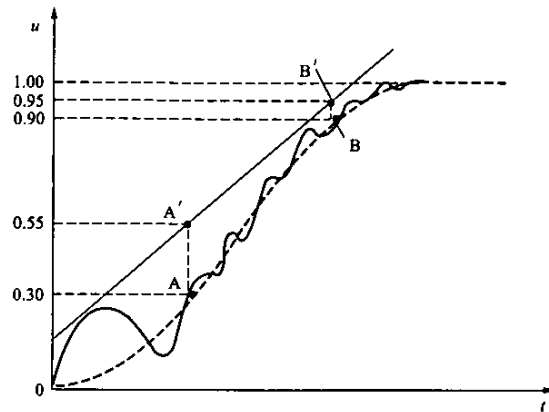


图 29 波前部分带有振荡的雷电冲击波波前时间的确定

14.3.2 雷电冲击截波

雷电冲击截波的各项参数确定如下。

14.3.2.1 峰值 U_P

对于波尾截波，峰值 U_P 的确定方法与雷电全波相同，见 14.3.1.1，如图 30 (a)。

对于波前截波，波形偏离零线的最大值确定为峰值 U_P ，如图 30b)。测量系统的动态特性对波前截波峰值的测量有较大影响，因此需用波前截波相应的标称时段中确定的标称刻度因数测定其峰值 U_P ；否则需用测量系统阶跃波响应特性对波形峰值进行校正：

$$U_P = U_{PM} + ST_N \quad (53)$$

式中：

U_P ——校正后确定的峰值；

U_{PM} ——波形图上的峰值；

S ——截断前冲击波的斜率；

T_N ——测量系统的实验响应时间。

14.3.2.2 截断时间 T_C

雷电冲击截波的视在零点 O_1 和截断点 F 之间的时间间隔确定为截断时间 T_C ，见图 30。

14.3.2.3 过零系数 K_0

雷电冲击截波截断后波形振荡的反向峰值 U_0 与截波峰值 U_P 之比确定为过零系数 K_0 ，即 $K_0 = U_0/U_P$ ，见图 30a)。

注：电力变压器等具有绕组的电力设备进行雷电冲击截波试验时需测定此项参数。试验采用截断时间 $T_C = 2\mu s \sim 5\mu s$ 的波尾截波；过零系数 K_0 应接近 0.3，其允许范围为 0.25~0.35。

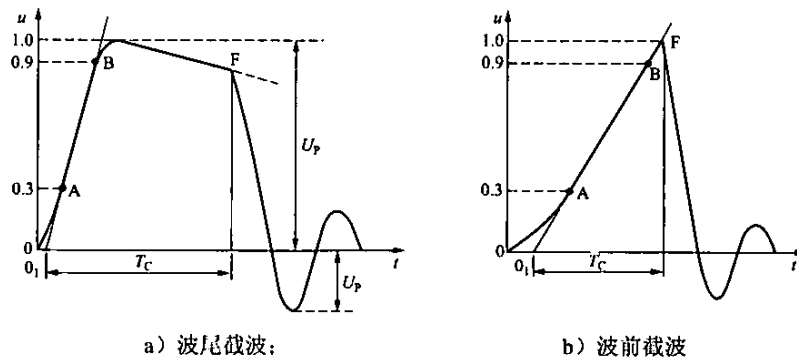


图 30 雷电冲击截波参数的确定

14.3.3 操作冲击波

操作冲击波的各项参数确定如下。

14.3.3.1 峰值 U_p

操作冲击波通常都是光滑波形，按波形偏离零线的最大值即确定为峰值 U_p ，见图 31。

14.3.3.2 波前时间（又称峰值时间） T_p

操作冲击波从波形的实际零点 O 到波峰 P 点的时间间隔确定为波前时间 T_p ，它实际上也就是峰值时间，见图 31。

14.3.3.3 半峰值时间 T_2

操作冲击波从波形的实际零点 O 到波峰 P 点后幅度下降为 50% 峰值的 M 点之间的时间间隔确定为半峰值时间 T_2 ，见图 31。

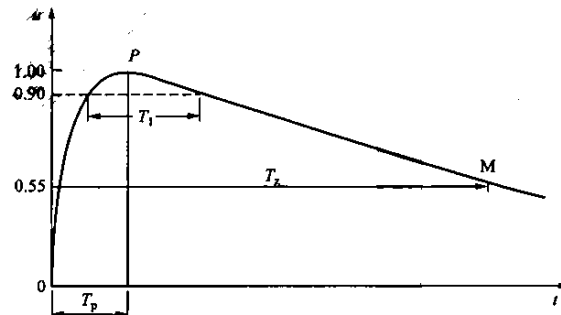


图 31 操作冲击波参数的确定

14.3.4 模拟示波图的处理方法

用模拟示波器拍摄的冲击电压示波图可直接在波形上按上述方法画出有关的点和线，并计算峰值和波形时间等各项参数。

为求得较准确的结果，可将示波图放大，然后按比例倍数计算参数。放大后波形迹线较粗时，可以迹线的中心线为准。

在带有振荡的冲击波形上求取平均曲线时，可采用手画的方法。较简便的画法是以振荡的峰-峰值之间按时间求取的中点相连较为合适，若按幅度求取的中点相连容易造成误差。

14.3.5 数字记录的处理方法

冲击电压测量时，数字记录仪寄存器中暂存的波形数据可用游标法读数，即利用仪器屏幕上的游标对准所选位置直接显示波形上有关的幅度和时间等读数，并以此确定冲击波的各项参数。这种方法受操作者人为影响而具有一定的读数误差，一般仅用于临时估算参数。

用数字记录仪测量冲击电压时，通常都采用数字计算法。它能充分发挥数字测量的优良功能而取得较准确的测量结果，因此在冲击电压参数计算中普遍利用数字计算软件确定各项参数。

由于量化的结果，数字记录仪采集的波形数据在幅度和时间上都是离散的，表现在波形上都会带有一定的随机噪声。在计算冲击电压的各项参数之前，波形数据需采用适当的数字滤波方法消除这些噪声的影响。

带有振荡的冲击波形求取平均曲线时，可采用曲线拟合、数字平滑滤波等多种方法。对于无振荡的光滑冲击波形，因波形数据是离散的，在求取特定点幅值和时间的准确值时同样也需采用曲线拟合等方法。

14.3.6 冲击电压波形参数计算软件的评估

确定冲击电压波形各项参数的数字计算软件可采用许多种方法进行编制。为检验各种数字计算软件确定参数结果的准确性，国际电工技术委员会（IEC）颁布了一份国际标准 IEC 61083-2:1996 高压冲击测量用数字记录仪 第二部分：冲击波形参数测定软件的评估。这份 IEC 国际标准提供了一套

DL/T 992 — 2006

冲击波形数据软件，称作试验数据发生器（TDG）。该发生器中有 15 种冲击波形：包括雷电冲击全波、截波和操作波；其中有光滑的、带有频率高于或低于 500kHz 振荡的；还有无噪声或有噪声的；多数是理论上模拟实际测量中可能遇到的波形，也有 5 个是实测的；仅最后第 15 种为冲击电流波形。根据这些冲击波形已知的峰值和波形时间等各项参数，标准还规定了被检计算机软件所确定的对应参数允许的偏差范围。利用这试验数据发生器的冲击电压波形数据，由被检的数字计算机软件进行处理，若所确定的各项参数在标准规定的允许偏差范围内，则该计算机软件才是合格的；否则不应在冲击电压测量中使用。

14.4 冲击电压测量程序

冲击电压测量采用数字记录仪和计算机后，改革了传统的模拟测量技术，开创了全新的数字化测量技术，便于实现测量的智能化和自动化。

在冲击电压测量中，利用编制好的测量程序，只需输入被测冲击波的类型、预期峰值和极性，程序便自动设置数字记录仪合适的扫描、量程和偏置，以及相应的预触发延时。待冲击电压发生器启动点火后，由被测信号内触发或同步脉冲触发启动数字记录仪自动采集和暂存冲击电压波形数据，并由计算机中的数字计算机软件处理这批波形数据和确定各项参数。所记录的冲击电压波形和测定的各项参数都一并自动显示在屏幕上。若认为本次测量结果需要保存，则设定一文件号可将这批波形数据和参数按文件格式存储在计算机中，需要时可随时调用、显示或按程序已编好的格式自动打印。

冲击电压测量程序还可与冲击电压发生器控制程序以及冲击试验程序相结合，实现冲击电压试验和测量全盘智能化和自动化。

15 冲击电压测量不确定度的估算

15.1 测量结果的不确定度

任何测量都会受到周围环境条件和仪器设备性能以及一些随机因素等各种影响，使测量结果总有一定的误差。测量误差按其定义是被测物理量的测量值与真值的差异；但在实践中，由于真值尚未明确，从严格的定义来说，测量误差就无法确定。

然而，多次重复测量的结果通常都将围绕真值呈现不同程度的分散性，且具有某种概率分布的特点。根据各种影响因素造成测量结果分散性的特点，可估算被测物理量的真值有一定的可能性处于某数值区间内。此数值区间的限值（ $\pm U$ ），称为不确定度，而这种可能性的概率（ P ），称为置信度。在估算中，不确定度采用多次测量结果的标准偏差来表征，置信度 P 一般推荐取 95%。

如上所述，测量不确定度需根据一定数量的测量结果才能作出估算。在相同的条件下，测量的重复次数越多，大部分测量结果通常就越接近中心值，不确定度的数值区间将随之缩小。冲击电压试验一般只需要做几次，甚至只允许做一次。单次测量结果仅提供分散性可能分布中的一个数值，在估算其不确定度时还需利用以往由大量测量结果估算的不确定度为依据。

测量的总不确定度由若干分量组成。这些分量按其数值估算所用的方法可分为 A 和 B 两大类。A 类分量考虑随机因素的影响，根据多次重复测量的结果用统计方法进行估算。B 类分量根据周围环境条件和仪器设备性能等已知的影响因素，用不同于统计的其他方法进行估算。大多数测量中，各种影响因素通常都互不相关，因此 A 和 B 两类的各项分量可以认为是互相独立的。总不确定度正是在此基础上把 A 和 B 两类分量组合起来作出估算。

高电压测量（包括冲击电压测量）的总不确定度也宜按同样原则分为 A 和 B 两类分量，参照 IEC 60060-2 修正件 1 附录 H 的方法进行估算。

15.2 A 类不确定度分量的估算

由于一些随机因素的影响，在相同条件下多次重复测量结果呈现的分散性具有 t 分布或高斯分布的特点。因此，可根据重复的测量结果用统计方法计算其平均值和标准偏差，并由此估算 A 类不确定度分量。

15.2.1 根据少量的测量结果估算

若测量次数较少，例如 10 次或其他若干次，则测量结果的分散性具有 t 分布的特点。

设测量次数为 n ，各次测量值为 X_i ， $i=1, 2, \dots, n$ ，这些测量结果的平均值 X_m 为：

$$X_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (54)$$

它们的标准偏差 S_r 为：

$$S_r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - X_m)^2} \quad (55)$$

则对于平均值 X_m ，要求置信度为 P 的 A 类不确定度分量 U_A 可按下式估算：

$$U_A = \frac{t S_r}{\sqrt{n}} \quad (56)$$

式中 t 为 t 分布因子，它与置信度 P 和测量次数 n 有关，其值可从表 14 查得。例如， $n=10$ ，要求置信度为一般推荐值 $P=95\%$ 时，从表中查得 $t=2.26$ 。

表 14 对于指定的置信度 P 、 t 分布因子与测量次数 n 的关系

n	t			
	$P=68.3\%$	$P=90.0\%$	$P=95.0\%$	$P=99.7\%$
2	1.84	6.31	12.7	—
3	1.32	2.92	4.30	—
4	1.20	2.35	3.18	9.22
5	1.14	2.13	2.78	6.62
6	1.11	2.02	2.57	5.51
7	1.09	1.94	2.45	4.90
8	1.08	1.89	2.36	4.53
9	1.07	1.86	2.31	4.28
10	1.06	1.83	2.26	4.09
20	1.03	1.73	2.09	3.45
∞^a	1.00	1.65	1.96 ^b	3.00

a 当 $n \rightarrow \infty$ 时， $t \rightarrow k$ ；
b 对于 $P=95\%$ ， $k \approx 2$ 。

15.2.2 根据大量的测量结果估算

若测量次数 $n \gg 10$ ，则测量结果的分散性具有高斯分布的特点，式 (56) 中的 t 可由正态分布因子 k 取代。此时，对于平均值 X_m ，要求置信度为 P 的 A 类不确定度分量 U_A 可按下式估算：

$$U_A = \frac{k S_r}{\sqrt{n}} \quad (57)$$

式中标准偏差 S_r 仍按上述公式计算。要求置信度 $P=95\%$ 时，正态分布的置信因子 $k=2$ 。

15.2.3 根据以往的大量测量结果估算

只根据单次或个别几次测量结果难于估算不确定度。若周围条件和测量系统没有重大变化，则可根据以往的大量测量结果（重复次数为 n_1 ）算得的标准偏差 S_r 值，估算随后的单次或个别几次（次数为

n_2) 测量结果的 A 类不确定度分量 U_A 为:

$$U_A = \frac{kS_r}{\sqrt{n_2}} \quad (58)$$

要求置信度 $P=95\%$ 时, 式中正态分布的置信因子 $k=2$; 以往的重复次数 n_1 应不小于 20 次; 个别次数 $n_2=1$ (或 2 等), $n_2 \ll n_1$ 。

15.3 B 类不确定度分量的估算

冲击电压测量中, 测量系统的环境温度、周围接地体和带电物体、分压系统刻度因数的非线性和长期稳定性、测量仪器的不确定度、校准所用的标准测量系统的不确定度等等周围环境条件和仪器设备性能都可能造成测量结果的分散性。温度效应、邻近效应等影响可通过试验或估算求得测量结果可能的变动区间。在此区间中, 测量值分布的概率大致是相等的, 可假设具有矩形分布的特点。测量仪器、标准测量系统的不确定度等可从仪器设备的校准试验报告或鉴定书中查得。仪器设备在某置信度下的不确定度表明其所测结果的分散性具有高斯分布的特点。这些因素给测量结果所造成的影响不是用统计方法, 而是根据上述求得的区间或查得的不确定度, 按各自分散性的特点计算测量值的标准偏差, 然后将各种影响综合估算 B 类不确定度分量。

15.3.1 根据已知的变动区间计算标准偏差

设某个影响因素造成测量结果可能的变动区间为 $\pm a$ (此处 a 为半区间宽度), 则测量结果按矩形分布考虑的标准偏差 S_a 为:

$$S_a = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (59)$$

若存在 N 个互不相关的影响因素, 则标准偏差 S_a 为:

$$S_a = \sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \dots + \frac{a_N^2}{3}} = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^N a_i^2} \quad (60)$$

式中:

a_1, a_2, \dots, a_N ——各个互不相关的影响因素造成测量值可能变动的半区间宽度。

若某个因素造成的影响只查得不确定度 $\pm U$, 而未标明置信度, 则应按等概率的矩形分布处理, 其半区间宽度 $a=U$ 。

15.3.2 根据已知的具有某置信度的不确定度计算标准偏差

设某仪器或设备校准结果的不确定度为 $\pm U$, 其置信度为 P , 则测量结果按高斯分布考虑的标准偏差 S_b 为:

$$S_b = \frac{U}{k} \quad (61)$$

式中, 要求置信度为 $P=95\%$ 时, 正态分布的置信因子 $k=2$ 。

若已知 M 台仪器、设备具有某置信度的不确定度, 它们按互不相关的影响因素考虑, 则由这些仪器设备测得结果的标准偏差 S_b 为:

$$S_b = \sqrt{\left(\frac{U_1}{k_1}\right)^2 + \left(\frac{U_2}{k_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{U_M}{k_M}\right)^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^M \left(\frac{U_j}{k_j}\right)^2} \quad (62)$$

式中:

U_1, U_2, \dots, U_M ——各台仪器、设备的不确定度;

k_1, k_2, \dots, k_M ——对应的某置信度的正态分布因子。

15.3.3 B 类不确定度分量的合成

由于上述的这些影响因素互不相关, 它们所造成的各个不确定度分量都是互相独立的, 因此标准偏

差 S_a 和 S_g 可合成为 S_s :

$$S_s = \sqrt{S_a^2 + S_g^2} \quad (63)$$

由此估算 B 类不确定度分量 U_B 为:

$$U_B = kS_s = k\sqrt{S_a^2 + S_g^2} = k\sqrt{\frac{1}{3}\sum_{i=1}^N a_i^2 + \sum_{j=1}^M \left(\frac{U_j}{k_j}\right)^2} \quad (64)$$

式中 k 为正态分布的置信因子, 要求置信度 $P=95\%$ 时, $k=2$ 。

15.4 总不确定度的估算

基于 A、B 两类不确定度分量 U_A 和 U_B 是互相独立的, 两者可按式组合起来估算总不确定度 U :

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (65)$$

式中 U_A 和 U_B 应为相同置信度下估算的不确定度分量。

15.5 不确定度和测量值的化整

不确定度应只含 1~2 位有效数。为避免给出过于乐观的数值, 不确定度写到报告中的数值都应化整。例如, 估算得的不确定度为 $\pm 0.82\%$, 则应化整为 $\pm 0.9\%$ 或 $\pm 1\%$ 。

测量值写到报告中时, 其分辨率不宜优于不确定度报告值的 10%, 应化整到保留有效数的最后一位。例如, 电压的测量值原具有分辨率为 0.01%, 其不确定度为 $\pm 1\%$, 则报告中的测量值应化整到分辨率为 0.1% 的有效数。

为限制附加误差, 估算不确定度时可比最终报告中保留的有效位数多取几位, 一般多取 2 位就足够了。

在有些情况下, 报告值多取 1 位有效数可能有助于察觉一系列测量中的漂移状况, 如因测量条件变化引起的漂移。

15.6 以标准方法进行性能试验中不确定度估算的实例

以下实例中, 被试测量系统在正常使用条件下以标准方法采用标准测量系统进行校准。在校准试验中, 这两套测量系统都接到试样上, 同时测量冲击电压 10 次。

标准测量系统已由国家校准实验室作了校准, 在校准证书中列有按要求做的冲击电压比对试验结果, 取得此结果的试验条件说明, 以及按置信度为 95% 估算的不确定度。

通常, 试验室不太可能做到标准测量系统本身作校准时完全相同的试验条件。这就需要标准测量系统补充一些性能数据, 以便对所测结果做些校正, 或在估算不确定度的式 (64) 中添加些分量。

对于大多数情况, 各个不确定度分量组合成总不确定度中都会给出偏于可靠或保守的结果, 因此建议不确定度的估算值应标明“置信度不低于 $P\%$ ”。

15.6.1 例 1: 2MV 冲击电压测量系统刻度因数的校准

校准试验中, 被试系统为 2MV 冲击电压测量系统 (MS); 标准系统为 600kV 标准冲击电压测量系统 (RMS)。MS 刻度因数的不确定度和校准结果如下:

15.6.1.1 A 类不确定度分量估算

冲击电压峰值 10 次重复的比对测量结果, 见表 15。

根据表 15 数据计算:

$$\text{MS 刻度因数的平均值 } F_m = 1.0124$$

$$\text{其标准偏差 } S_r = 0.161\%$$

按式 (56) 估算 A 类不确定度分量 U_A 为:

$$U_A = \frac{tS_r}{\sqrt{n}} = \frac{2.26 \times 0.161\%}{\sqrt{10}} = 0.115\% \quad \text{置信度 } P \geq 95\%。$$

表 15 冲击电压峰值 10 次重复比对测量结果

RMS 测得的峰值 U_A kV	MS 测得的峰值 U_B kV	MS 的刻度因数 ^a $F = U_A/U_B$
516	509	1.0138
520	513	1.0136
520	514	1.0117
516	509	1.0138
515	509	1.0118
518	512	1.0117
515	508	1.0138
516	511	1.0098
512	507	1.0099
518	511	1.0137

a MS 为直读高压值的测量系统，其刻度因数的理论值为 1。

15.6.1.2 B 类不确定度分量估算

根据已知的条件，B 类不确定度分量的各种影响因素以及对测量结果的影响如下：

- RMS 的总不确定度 $U_1=0.5\%$ ，置信度 $P \geq 95\%$ （对应的正态分布置信因子 $k_1=2$ ）。
- MS 所用的数字记录仪和冲击电压参数计算软件测定峰值的不确定度 $U_2=0.6\%$ ，置信度 $P \geq 95\%$ （对应的置信因子 $k_2=2$ ）。
- MS 的分压系统刻度因数的不确定度 $U_3=0.5\%$ ，但未标明置信度，测量结果按等概率的矩形分布处理，其半区间宽度 $a_1=U_3=0.5\%$ 。
- MS 的分压系统刻度因数的非线性影响测量结果的半区间宽度 $a_2=0.5\%$ 。
- MS 的邻近效应影响测量结果的半区间宽度 $a_3=0.3\%$ 。
- MS 的温度效应影响测量结果的半区间宽度 $a_4=0.7\%$ （环境温度每变化 10°C 时，MS 的刻度因数将变动 $\pm 0.7\%$ ；MS 校准时的温度为 20°C ，使用时的温度在 $10\sim 30^\circ\text{C}$ 范围内，因而使用温度与校准温度最大可能的温差为 10°C ）。

按式（64）估算 B 类不确定度分量 U_B 为：

$$U_B = 2 \times \sqrt{\frac{1}{3} \times (0.5^2 + 0.5^2 + 0.3^2 + 0.7^2) + \left(\frac{0.5}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.6}{2}\right)^2} \% = 2 \times 0.716\% = 1.43\% \quad \text{置信度 } P \geq 95\%$$

15.6.1.3 总不确定度估算

按式（65）估算总不确定度 U 为：

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} = \sqrt{0.115^2 + 1.43^2} \% = 1.43\% \approx 1.5\% \quad \text{置信度 } P \geq 95\%$$

15.6.1.4 刻度因数的校正

由于 MS 所在的试验室条件与 RMS 本身作校准时不同，其刻度因数需做校正。从 RMS 的校准证书中查得，在此试验条件下，RMS 刻度因数的校正系数 $d=1.0015$ 。因此，MS 的刻度因数也应相应地校正为：

$$F = d \cdot F_m = 1.0015 \times 1.0124 = 1.0139 = 1.014$$

15.6.1.5 完整的校准结果

MS 在 500kV 附近测量的刻度因数 $F=1.014$ ，其不确定度 U 为 1.5%，置信度 P 不小于 95%；

即 $F = 1.014 \pm 1.5\%$ ($P \geq 95\%$)。

15.6.2 例 2: 雷电冲击电压波前时间的比对测量

比对测量中, 被试测量系统 (MS) 和标准测量系统 (RMS) 与例 1 相同。MS 测量波前时间的不确定度估算和测量结果如下。

15.6.2.1 A 类不确定度分量估算

波前时间 T_1 的 10 次重复比对测量结果见表 16。

根据表 16 数据计算:

T_{1A} 的平均值 $T_{1Am} = 1.184 \mu\text{s}$;

T_{1B} 的平均值 $T_{1Bm} = 1.214 \mu\text{s}$;

D 的平均值 $D_m = +2.61\%$, 其标准偏差 $S_r = 4.33\%$ 。

按式 (56) 估算 A 类不确定度分量 U_A 为:

$$U_A = \frac{tS_r}{\sqrt{n}} = \frac{2.26 \times 4.33\%}{\sqrt{10}} = 3.09\% \quad \text{置信度 } P \geq 95\%。$$

表 16 波前时间 10 次重复比对测量结果

RMS 测得的波前时间 T_{1A} μs	MS 测得的波前时间 T_{1B} μs	相对偏差 % $D = [(T_{1B} - T_{1A}) / T_{1A}] \times 100\%$
1.198	1.208	+0.83
1.178	1.144	-2.89
1.171	1.245	+6.32
1.200	1.211	+0.92
1.170	1.191	+1.79
1.184	1.155	-2.45
1.201	1.209	+0.67
1.174	1.278	+8.86
1.171	1.284	+9.65
1.190	1.218	+2.35

15.6.2.2 B 类不确定度分量估算

根据已知的试验条件, B 类不确定度分量的各种影响因素以及对测量结果的影响如下:

RMS 测量波前时间的不确定度 $U_1 = 2\%$, 置信度 $P \geq 95\%$ (对应的正态分布置信因子 $k_1 = 2$);

MS 所用的数字记录仪和冲击电压参数计算软件测定 $0.84 \mu\text{s} \sim 1.56 \mu\text{s}$ 范围内波前时间的不确定度 $U_2 = 1.5\%$, 置信度 $P \geq 95\%$ (对应的置信因子 $k_2 = 2$);

因波形带有振荡, 当振荡幅度在允许范围内时, 它对波前时间测量附加影响的半区间宽度 $a_1 \leq 2\%$ 。

按式 (64) 估算 B 类不确定度分量 U_B 为:

$$U_B = 2 \times \sqrt{\frac{2^2}{3} + \left(\frac{2}{2}\right)^2 + \left(\frac{1.5}{2}\right)^2} \% = 3.40\% \quad \text{置信度 } P \geq 95\%。$$

15.6.2.3 总不确定度估算

按式 (65) 估算总不确定度 U 为:

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} = \sqrt{3.09^2 + 3.40^2} \% = 4.59\% \approx 5\% \quad \text{置信度 } P \geq 95\%。$$

15.6.2.4 完整的校准结果

MS 本次测得的波前时间校正偏差后的结果为：

$T_1 = T_{1Bm}(1 - D_m) = 1.214\mu\text{s} \times (1 - 2.61\%) = 1.18\mu\text{s}$ ，其不确定度为 5%，置信度不小于 95%；即 $T_1 = 1.18\mu\text{s} \pm 5\%$ ($P \geq 95\%$)。

在一般情况下，MS 测量 $0.84\mu\text{s} \sim 1.56\mu\text{s}$ 范围内波前时间的偏差 D_m 为 +2.6%，不确定度 U 为 5%，置信度 P 不小于 95%，即 $\Delta T_1 = +2.6\% \pm 5\%$ ($P \geq 95\%$)。
