

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 846.2—2025

代替DL/T 846.2—2004

高压测试设备通用技术条件
第2部分：冲击电压测量系统

General technical specification for high voltage test equipment—

Part 2: Impulse voltage measuring system

2025-12-18 发布

2026-06-18 实施

国家能源局

发布

目次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 概述	2
5 技术要求	7
5.1 工作条件	7
5.2 外观及功能要求	7
5.3 性能要求	8
6 试验方法	11
6.1 标准装置及主要试验设备	11
6.2 外观及功能检查	13
6.3 性能试验	13
7 检验规则	27
7.1 检验分类	27
7.2 检验项目	27
7.3 型式试验	28
7.4 出厂试验	28
7.5 验收试验	28
7.6 周期试验	28
8 标识和随行文件	29
8.1 标识	29
8.2 随行文件	29
9 包装、运输和贮存	29
9.1 包装	29
9.2 运输	29
9.3 贮存	30
附录 A (资料性) 阻抗法确定各类冲击电压分压器的刻度因数	31
附录 B (资料性) 电缆波阻抗测量方法	33
附录 C (资料性) 冲击电压测量软件误差校验方法	35
附录 D (资料性) 冲击电压测量不确定度评定及示例	36

前 言

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

本部分是DL/T 846《高电压测试设备通用技术条件》的第2部分。DL/T 846已经发布了以下部分：

- 第1部分：高电压分压器测量系统；
- 第2部分：冲击电压测量系统；
- 第3部分：高压开关综合特性测试仪；
- 第4部分：脉冲电流法局部放电测试仪；
- 第5部分：六氟化硫微量水分仪；
- 第6部分：六氟化硫气体检漏仪；
- 第7部分：绝缘油介电强度测试仪；
- 第8部分：有载分接开关测试仪；
- 第9部分：真空开关真空度测试仪；
- 第10部分：暂态地电压局部放电检测仪；
- 第11部分：特高频局部放电检测仪；
- 第12部分：电力电容测试仪；
- 第13部分：避雷器监测器测试仪；
- 第14部分：绝缘油介质损耗因数及体积电阻率测试仪；
- 第15部分：高压脉冲源电缆故障检测装置；
- 第16部分：电力少油设备压力检测装置。

本文件代替DL/T 846.2—2004《高电压测试设备通用技术条件 第2部分：冲击电压测量系统》，与DL/T 846.2—2004相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- a) 修订了标准适用范围，适用范围中增加了测量振荡冲击波的冲击电压测量系统(见第1章，2004年版的第1章)；
- b) 增加了术语及定义，对“刻度因数”、“标称电压范围”、“线性度”、“标称时段”、“动态特性”和“干扰比”进行了定义和说明(见第3.1、3.2、3.3、3.4、3.5及3.6)；
- c) 增加了对冲击电压测量系统外观标识的要求和对应的检验方法(见5.2及6.2)；
- d) 增加了对冲击数字记录仪的技术要求及试验方法(见5.3.3及6.3.2)；
- e) 增加了对冲击电压测量系统中计算机软件的技术要求及试验方法(见5.3.4及6.3.3)；
- f) 增加了对冲击电压测量系统开展性能试验用的标准装置及主要试验设备的参数要求(见表1、表2、表3)；
- g) 修改了对冲击电压测量系统线性度的参数要求(见5.3.2.3)；
- h) 删除了对冲击电压测量系统长期稳定性的参数要求及对应的性能试验方法；
- i) 删除了测量标准冲击电压时，对冲击分压器阶跃响中过冲值与响应参数的关系要求，给出了标准冲击电压测量系统响应参数推荐值(见表1)；
- j) 增加了采用阶跃响应确定冲击电压测量系统动态性能的卷积计算方法(见6.3.4.3)；
- k) 删除了原附录A中试验一栏表，对应内容放置于7.2表6中(见表6，2004年版的附录A)；
- l) 增加了测量资料性附录A：阻抗法确定各类冲击电压分压器的刻度因数、附录B：电缆波阻抗测量方法、附录C：冲击电压测量软件误差校验方法及附录D：测量不确定度评定及示例(见附录A~附录D)。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电力企业联合会提出。

本文件由全国高压试验技术和绝缘配合标准化技术委员会高压试验技术分技术委员会(SAC/TC 163/SC 1) 归口。

本文件起草单位：中国电力科学研究院有限公司、国家高压电计量站、国网湖北省电力有限公司电力科学研究院、国网四川省电力公司电力科学研究院、国网浙江省电力有限公司电力科学研究院、国网重庆市电力公司电力科学研究院、广西电网有限责任公司电力科学研究院、国网河北省电力有限公司电力科学研究院、国网陕西省电力有限公司电力科学研究院、江苏新亚高压测试设备有限公司、湖北华中电力科技开发有限责任公司。

本文件主要起草人：许海清、周峰、李文婷、刘少波、张致、谢施君、王一帆、李永福、田树军、刘杰、牛博、陈忠伟、刘轲。

本文件及其所代替文件的历次版本的发布情况为：

——2004年首次发布为DL/T 846. 2—2004；

——本次为第一次修订。

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

引 言

DL/T 846拟由16个部分构成。

——第1部分：高电压分压器测量系统。目的在于规范高电压分压器测量系统的制造、使用和检验等要求。

——第2部分：冲击电压测量系统。目的在于规范冲击电压测量系统的制造、使用和检验等要求。

——第3部分：高压开关综合特性测试仪。目的在于规范高压开关综合特性测试仪的制造、使用和检验等要求。

——第4部分：冲电流法局部放电测试仪。目的在于规范脉冲电流法局部放电测试仪的制造、使用和检验等要求。

——第5部分：六氟化硫微量水分仪。目的在于规范六氟化硫微量水分仪的制造、使用和检验等要求。

——第6部分：六氟化硫气体检漏仪。目的在于规范六氟化硫气体检漏仪的制造、使用和检验等要求。

——第7部分：绝缘油介电强度测试仪。目的在于规范绝缘油介电强度测试仪的制造、使用和检验等要求。

——第8部分：有载分接开关测试仪。目的在于规范有载分接开关测试仪的制造、使用和检验等要求。

——第9部分：真空开关真空度测试仪。目的在于规范真空开关真空度测试仪的制造、使用和检验等要求。

——第10部分：暂态地电压局部放电检测仪。目的在于规范暂态地电压局部放电检测仪的制造、使用和检验等要求。

——第11部分：特高频局部放电检测仪。目的在于规范特高频局部放电检测仪的制造、使用和检验等要求。

——第12部分：电力电容测试仪。目的在于规范电力电容测试仪的制造、使用和检验等要求。

——第13部分：避雷器监测器测试仪。目的在于规范避雷器监测器测试仪的制造、使用和检验等要求。

——第14部分：绝缘油介质损耗因数及体积电阻率测试仪。目的在于规范绝缘油介质损耗因数及体积电阻率测试仪的制造、使用和检验等要求。

——第15部分：高压脉冲源电缆故障检测装置。目的在于规范高压脉冲源电缆故障检测装置的制造、使用和检验等要求。

——第16部分：电力少油设备压力检测装置。目的在于规范电力少油设备压力检测装置的制造、使用和检验等要求。

高电压测试设备通用技术条件

第 2 部分：冲击电压测量系统

1 范围

本文件规定了冲击电压测量系统的技术要求、试验方法、检验规则、以及标识、标签和随行文件、包装、运输和贮存等要求。

本文件适用于额定电压1kV及以上雷电冲击电压、操作冲击电压及振荡冲击电压的测量用冲击电压测量系统（以下简称“测量系统”）的制造、使用和检验。

2 规范性引用文件

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

GB/T 191 包装储运图示标

GB/T 6587-2012 电子测量仪器通用规范

GB/T 16896.1 高电压冲击测量仪器和软件 第1部分：对仪器的要求

GB/T 16896.2 高电压和大电流试验测量用仪器和软件 第2部分：对冲击电压和冲击电流试验用软件的要求

GB/T 16927.1 高电压试验技术 第1部分：一般定义及试验要求

GB/T 16927.2 高电压试验技术 第2部分：测量系统

GB/T 16927.3 高电压试验技术 第3部分：现场试验的定义及要求

GB/T 17626.2—2018 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验

GB/T 17626.3—2016 电磁兼容 试验和测量技术 射频电磁场辐射抗扰度试验

GB/T 17626.4—2008 电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验

GB/T 17626.5—2008 电磁兼容 试验和测量技术 浪涌（冲击）抗扰度试验

GB/T 17626.6—2017 电磁兼容 试验和测量技术 射频场感应的传导骚扰抗扰度

GB/T 17626.8—2006 电磁兼容 试验和测量技术 工频磁场抗扰度试验

GB/T 17626.11—2008 电磁兼容 试验和测量技术 电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度试验

GB 26861 电力安全工作规程 高压试验室部分

3 术语和定义

GB/T 16896.1、GB/T 16896.2、GB/T 16927.1、GB/T 16927.2、GB/T 16927.3界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

刻度因数 scale factor

测量系统输入冲击电压与输出冲击电压的峰值比例系数。

3.2

标定电压范围 assigned measured voltage range

测量系统保证测量不确定度的电压测量范围。

3.3

线性度 linearity

标定测量范围内测量系统不同电压点刻度因数与刻度因数平均值的偏差。

3.4

标称时段 nominal epoch

决定测量系统是否被认可的冲击电压相关时间参数的最小值 (t_{\min}) 和最大值 (t_{\max}) 之间的时间参数范围, 其中相关时间参数为:

——全波、波尾截断的雷电冲击电压的波前时间 T_1 ;

——波前截断的雷电冲击电压的截断时间 T_c ;

——操作冲击电压的峰值时间 T_p 。

3.5

动态特性 dynamic characteristic

标称时段最小值、中间值、最大值下测量系统的刻度因数与刻度因数平均值的偏差。

3.6

干扰比 interference ratio

干扰试验中, 测量系统测得的干扰峰值与测量系统测量该试验电压的实际输出峰值比值的绝对值。

4 概述

冲击电压测量系统是测量和分析冲击电压波形的装置, 一般由冲击电压分压器和冲击数字记录仪组成, 示意图如图1所示。

冲击电压分压器利用电阻或阻容分压的方式将冲击高电压转换为可供冲击数字记录仪记录的低压信号, 包括分压器本体以及传输系统 (一般为同轴测量电缆或数据传输光纤)。冲击数字记录仪一般内置电压衰减器及配套测量软件, 将衰减器二次分压后的冲击电压模拟信号转换为数字信号, 并对该数字信号分析计算得到冲击电压波形的各项特征参数 (峰值电压、时间参数等)。

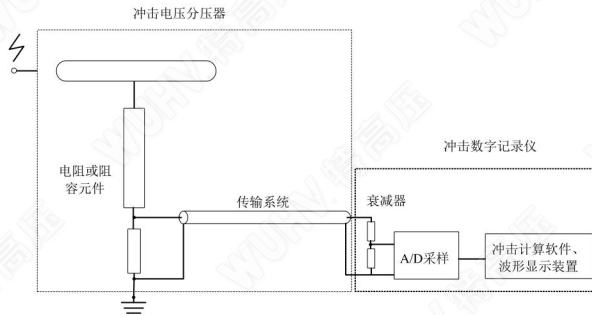
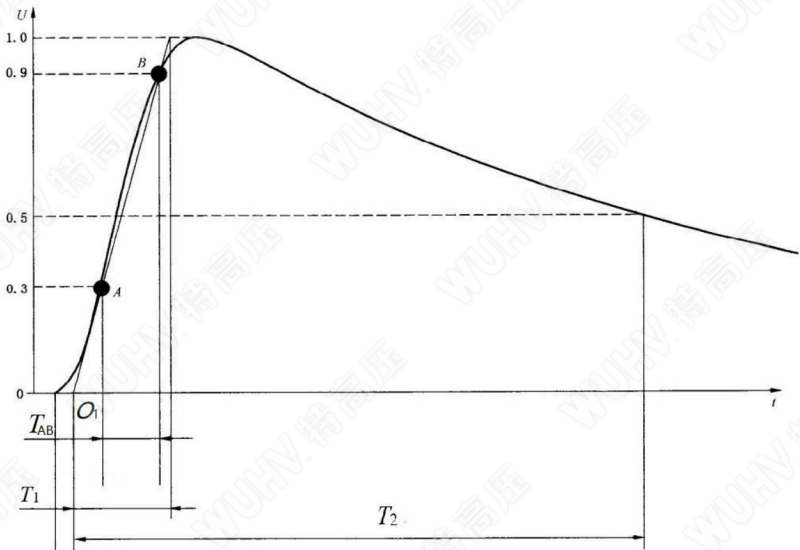


图1 冲击电压测量系统示意图

冲击电压测量中涉及多种不同类型的冲击电压波形，下面具体给出各类冲击电压波形及波形参数的示意图。

雷电冲击电压全波示意图如图2所示，其中波前时间 T_1 为试验电压曲线上上升部分幅值为峰值30%点（图中A点）和峰值90%点（图中B点）之间时间间隔 T_{AB} 的1/0.6倍，视在原点 O_1 是试验电压曲线中相对于A点超前 $0.3T_1$ 的瞬间，为波前部分的A、B两点所画直线与时间轴的交点。半峰值时间 T_2 定义为原点 O_1 到试验电压曲线下降到试验电压值一半时刻之间的时间间隔。冲击雷电截断波为波前雷电截断波和波尾雷电截断波两种，其截断时间 T_c 示意图如图3和图4所示。



图中符号说明：

O_1 ——视在原点；

A——电压上升部分30%峰值电压点；

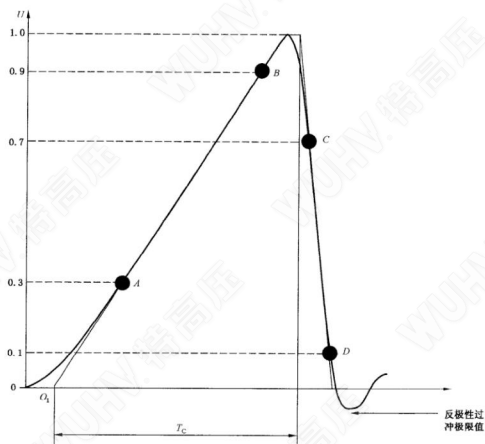
B——电压上升部分90%峰值电压点；

T_{90} ——A、B两点间的时间间隔；

T_1 ——波前时间；

T_2 ——半峰值时间。

图2 雷电冲击电压全波示意图



图中符号说明：

O——视在原点；

A——电压上升部分30%峰值电压点；

B——电压上升部分90%峰值电压点；

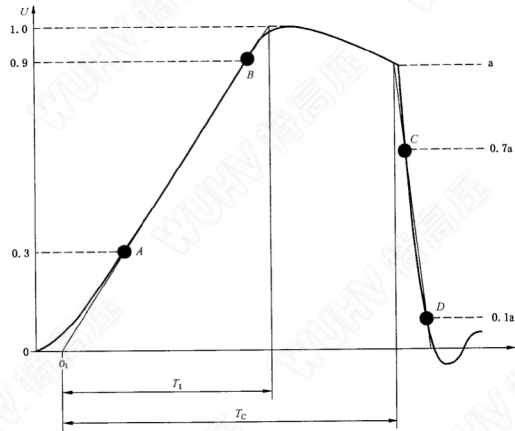
C——电压跌落曲线上70%峰值电压点；

D——电压跌落曲线上10%峰值电压点；

T_1 ——波前时间；

T_c ——截断时间。

图3 波前截断的雷电冲击电压波

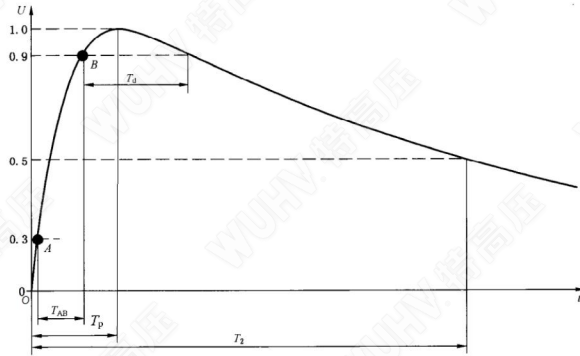


图中符号说明：

- O ——视在原点；
- A ——电压上升部分30%峰值电压点；
- B ——电压上升部分90%峰值电压点；
- a ——开始截断时刻对应电压值；
- C ——电压跌落曲线上0.7a电压点；
- D ——电压跌落曲线上0.1a电压点；
- T_1 ——波前时间；
- T_c ——截断时间。

图4 波尾截断的雷电冲击电压波

操作冲击电压全波的波形时间参数示意图如图5所示，到峰值时间 T_p 为电压波形上从实际原点到操作冲击电压的最大值时刻的时间间隔，波前时间 T_1 的定义与雷电波相同。实际原点 O 为记录曲线开始单调上升或下降的瞬间。实际原点和电压第一次衰减到半峰值瞬间的时间间隔为半峰值时间。90%峰值以上的持续时间用 T_0 表示，为冲击电压超过最大值90%的时间间隔。



图中符号说明：

O——实际原点；

A——电压上升部分30%峰值电压点；

B——电压上升部分90%峰值电压点；

T_{AB} ——A、B两点间的时间间隔；

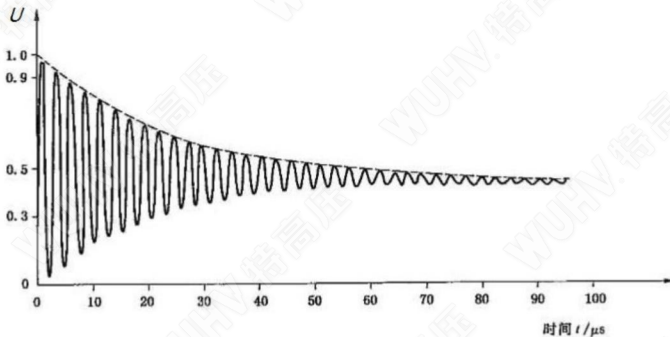
T_p ——到峰值时间；

$T_{0.9}$ ——90%峰值电压以上持续时间；

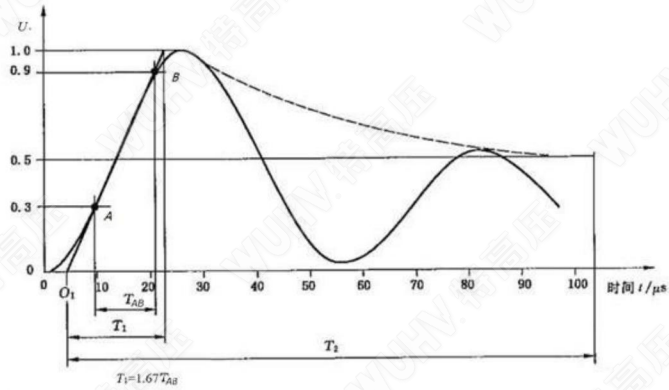
T_2 ——半峰值时间。

图5 操作冲击全波

振荡型雷电冲击电压波形是指冲击电压迅速上升至峰值，然后伴随着频率范围在15kHz和400kHz之间的阻尼振荡降低至零，其中有或无电压极性的改变，用包络线和振荡频率表述其特性，见图6。



a) $T_1/T_2 = (0.8/40) \mu\text{s}$ ，振荡频率：370kHz



b) $T_1/T_2 = (20/100) \mu\text{s}$, 振荡频率: 16kHz

图中符号说明:

O_1 ——视在原点;

A——电压上升部分30%峰值电压点;

B——电压上升部分90%峰值电压点;

T_{AB} ——A、B两点间的时间间隔;

T_1 ——波前时间;

T_2 ——半峰值时间。

图6 振荡型雷电冲击电压波形

5 技术要求

5.1 工作条件

冲击电压测量系统的工作条件要求如下:

——环境温度: $-10^{\circ}\text{C} \sim +40^{\circ}\text{C}$;

——环境湿度: 相对湿度 $\leq 80\%$;

——海拔: $\leq 1000 \text{ m}$;

——接地装置的接地电阻原则上不应超过 0.5Ω , 冲击电压分压器的接地引线宜使用宽度不小于 0.2 m 、厚度不小于 0.2 mm 的铜、铝金属带或金属箔, 试验回路应单点接地;

——周围应无影响系统正常工作的电磁干扰及机械振动;

——接地体及带电体对冲击电压测量系统的刻度因数的影响量不应大于冲击电压测量系统标称刻度因数的 $\pm 1\%$;

——周围带电体及接地体与冲击电压测量系统的安全距离应满足 GB 26861 中的要求。

对于海拔高度超过 1000 m 时, 应按照 GB/T 16927.1 规定的方法和程序计算空气密度修正因数。

5.2 外观及功能要求

5.2.1 外观要求

冲击电压测量系统的外观要求如下:

- 各部分组件均应满足机械强度的要求；
- 高压部分应配置专门的均压措施（如金属均压环、罩），金属均压装置表面应光洁，其外形尺寸应与测量系统电压等级相匹配；
- 各组件应具有明显可靠的接地端子，各电气连接部件应牢固可靠。

5.2.2 功能要求

冲击电压测量系统应能准确测量并显示雷电冲击全波电压、雷电冲击截波电压、操作冲击电压、振荡型雷电冲击电压、振荡型操作冲击电压，计算并显示所测冲击电压波形的峰值、时间等特征参数。

5.3 性能要求

5.3.1 基本要求

冲击电压测量系统除整套系统应进行性能试验外，系统中的冲击电压分压器、冲击数字记录仪及配套冲击测量软件均应分别进行性能试验。

冲击电压分压器的动态特性及干扰试验均在冲击电压测量系统中进行，冲击电压分压器进行线性度试验后，对冲击电压测量系统无需重复进行线性度试验。

5.3.2 冲击电压分压器

5.3.2.1 绝缘性能

冲击电压分压器应能耐受1.1倍额定值的雷电冲击电压，耐压试验过程中，冲击电压分压器不应发生闪络及击穿现象。

5.3.2.2 刻度因数

冲击电压分压器刻度因数的扩展测量不确定度不应大于3%（ $k=2$ ）。

5.3.2.3 线性度

冲击电压分压器的额定电压在2400kV范围内时，其线性度不应超过 $\pm 1\%$ ；当额定电压大于2400kV时，其线性度不应超过 $\pm 2\%$ 。

5.3.2.4 短期稳定性

冲击电压分压器的短期稳定性应在 $\pm 1\%$ 范围内。

5.3.2.5 温度效应

冲击电压分压器的环境工作温度在 $-10^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 范围内发生变化时，其刻度因数变化不应超过 $\pm 1\%$ 。

5.3.2.6 同轴电缆波阻抗

当冲击电压分压器的配套传输系统为同轴电缆时，应测量同轴电缆的波阻抗，同轴电缆的波阻抗参数应与传输电缆端部的匹配电阻参数一致。

5.3.3 冲击数字记录仪

5.3.3.1 总体要求

冲击数字记录仪一般由数字示波器或采集卡、配套衰减器及配套冲击计算软件组成，其性能应满足GB/T 16896.1中的全部要求，其环境适应性及电磁兼容性应满足GB/T 6587-2012的要求。

5.3.3.2 绝缘性能

冲击数字记录仪应能耐受1.1倍额定雷电冲击电压，耐受试验过程中冲击数字记录仪不应发生闪络及击穿现象。

5.3.3.3 额定分辨率

冲击数字记录仪的额定分辨率不应小于9bit。

5.3.3.4 采样率

冲击数字记录仪的采样率不应小于 $30/T_{AB}$ ， T_{AB} 为图2~图6中的冲击电压波形中上升部分A、B两点间的时间间隔；当测量冲击波形上的叠加震荡时，采样率应大于等于 $8f_{max}$ ， f_{max} 为试验回路中可能出现的最高振荡频率。

5.3.3.5 输入阻抗

冲击数字记录仪的输入阻抗不应小于 $1M\Omega$ 。

5.3.3.6 刻度因数

冲击数字记录仪的刻度因数应满足以下要求：

- 冲击数字记录仪刻度因数的扩展测量不确定度不应大于1% ($k=2$)；
- 环境温度发生变化时，冲击数字记录仪刻度因数的变化不应超过 $\pm 0.5\%$ ；
- 在 $0.5T_1 \sim T_{2max}$ 时间间隔内，刻度因数的稳定性应在 $\pm 1\%$ 范围内， T_1 和 T_{2max} 分别为待测雷电全波的波前时间和半峰值时间最大值。对于波尾截断的雷电冲击波， T_{2max} 用 T_c 代替；对于波前截波， T_1 和 T_{2max} 都以截断时间 T_c 代替；对于操作波，则 T_1 为 T_p ， T_{2max} 为半峰值时间最大值（4000 μs ）。

5.3.3.7 时间参数误差

测量各类冲击电压波形的时间参数时，对冲击数字记录仪的测量误差要求具体如下：

- 测量各类冲击电压波形的波前时间 T_1 时，其测量误差应不超过 $\pm 3\%$ ；
- 测量各类冲击电压波形的半峰值时间 T_2 时，其测量误差应不超过 $\pm 2\%$ ；
- 测量标准雷电截波（波尾截断）的截断时间 T_c 时，其测量误差应不超过 $\pm 3\%$ ；
- 测量波前截断的雷电冲击电压波形的截断时间 T_c 时，其测量误差应不超过 $\pm 5\%$ ；
- 测量操作冲击电压波形的峰值时间 T_p 时，其测量误差应不超过 $\pm 3\%$ 。

5.3.3.8 上升时间

冲击数字记录仪的上升时间不应大于 $3\%T_{AB}$ ， T_{AB} 为图2~图6中待测冲击电压波形中上升部分A、B两点间的时间间隔。

5.3.3.9 内部噪声水平

对于冲击电压测量，冲击数字记录仪内部噪声水平（有效值）应小于满刻度偏转值的0.4%；对于其他应用，内部噪声电平应小于满刻度偏转值的0.1%。

注：噪声电平影响雷电冲击极限值、操作冲击峰值和时间参数的评估。

5.3.3.10 环境适应性

冲击数字记录仪的环境影响量包含温度、湿度、振动、冲击和包装运输等5个方面，应符合GB/T 6587—2012环境组别为III组的相关规定要求。此外还应符合GB/T 6587—2012中流通条件为等级2级的规定要求。

5.3.3.11 电磁兼容

冲击数字记录仪的电磁兼容抗扰度试验应符合以下要求：

- a) 静电放电抗扰度应符合GB/T 17626.2-2018试验等级3，性能判据B的要求；
- b) 射频电磁场辐射抗扰度应符合GB/T 17626.3-2016试验等级3，性能判据A的要求；
- c) 电快速瞬变脉冲群抗扰度应符合GB/T 17626.4-2008试验等级3，性能判据B的要求；
- d) 浪涌（冲击）抗扰度应符合GB/T 17626.5-2008试验等级3，性能判据B的要求；
- e) 射频场感应的传导骚扰抗扰度应符合GB/T 17626.6-2017试验等级3，性能判据A的要求；
- f) 工频磁场抗扰度应符合GB/T 17626.8-2006试验等级4，性能判据A的要求；
- g) 电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度应符合GB/T 17626.11-2018试验等级3，性能判据C的要求。

5.3.4 冲击测量软件

冲击电压测量系统中配套的冲击测量软件波形计算程序及算法应满足GB/T 16927.1中的要求，并按按照GB/T 16896.2的规定对冲击测量软件进行误差测试，所有测试波形的计算结果的相对误差值应满足GB/T 16896.2的要求。

为便于误差测试，冲击测量软件应开放其数据测试端口，并应能兼容GB/T 16896.2中的测试波形文件的数据格式类型。

5.3.5 冲击电压测量系统

5.3.5.1 刻度因数

测量各类冲击电压波形时，冲击电压测量系统的刻度因数测量不确定度应满足以下要求：

- 测量雷电冲击全波、操作冲击波及雷电冲击截波（ $T_c \geq 2 \mu\text{s}$ ）及振荡冲击波时，其测量不确定度不应大于3%（ $k=2$ ）；
- 测量波前截断的雷电冲击电压波（ T_c 在0.5 μs 到2 μs 间）时，其测量不确定度不应大于5%（ $k=2$ ）。

5.3.5.2 时间参数

测量各类冲击电压波形时，冲击电压测量系统时间参数的扩展测量不确定度不应大于10%（ $k=2$ ）。

测量振荡型冲击电压波形时，冲击电压测量系统的振荡频率的扩展测量不确定度不应大于10%（ $k=2$ ）。

5.3.5.3 动态特性

5.3.5.3.1 冲击电压测量系统的动态特性可用测量系统在标称时段内的测量特性或阶跃波响应参数来表征。

5.3.5.3.2 冲击电压测量系统在标称时段内的测量特性通过与标准冲击电压测量系统比对应开展校准试验的方式确定，校准试验应在两种冲击电压波形（波前时间分别对应规定标称时段的下限 t_{\min} 和上限 t_{\max} ，波尾时间为最长的半峰值时间 $T_{2\max}$ ）下分别进行，动态特性参数应满足以下要求：

- 针对雷电冲击全波、雷电冲击截波、操作冲击波和振荡冲击波测量需求，测量系统在标称时段内的刻度因数变化量不应超过 $\pm 1\%$ ；针对波前截波雷电冲击波测量需求，其刻度因数变化量不应超过 $\pm 3\%$ ；

——冲击电压测量系统的时间参数测量不确定度不应超过10% ($k=2$)。

5.3.5.3.3 冲击电压测量系统的阶跃响应特性参数，应满足以下要求：

——针对雷电冲击全波、雷电冲击截波、操作冲击波和振荡冲击波测量需求，测量系统的阶跃响应波形在标称时段 (t_{\min} - t_{\max}) 内的电压值应稳定在 $\pm 1\%$ 以内，在最长的半峰值时间 $T_{2\max}$ 范围内的变化应稳定在 $\pm 5\%$ 以内；

——针对波前截波雷电冲击波测量需求，测量系统的阶跃响应波形在标称时段 (t_{\min} - t_{\max}) 内的电压值应稳定在 $\pm 3\%$ 以内。

注：对于全波和波尾截断的冲击波，标称时段下限 t_{\min} 为待测冲击电压波形的最短波前时间 T_{\min} 、标称时段上限 t_{\max} 为待测冲击电压波形的最长波前时间 T_{\max} ；对于波前截断的冲击， t_{\min} 为待测冲击电压波形的最短截断时间 T_{\min} ， t_{\max} 为待测冲击电压波形的最长截断时间 T_{\max} ；对于操作冲击电压波形，标称时段下限 t_{\min} 为待测冲击电压波形的最短峰值时间 $T_{p\min}$ ，标称时段上限 t_{\max} 为待测冲击电压波形的最大峰值时间 $T_{p\max}$ ，不同标称时段下对应的冲击试验波形的半峰值时间均为最长的半峰值时间 $T_{2\max}$ 。

5.3.5.4 干扰试验

冲击电压测量系统的干扰比不应超过1%。

6 试验方法

6.1 标准装置及主要试验设备

标准装置及主要试验设备应分别满足表1~表3的要求。

表 1 标准装置

序号	设备名称	性能要求
1	标准冲击电压测量系统	<p>对整套测量系统的要求如下：</p> <p>a) 测量雷电冲击全波、操作冲击波、雷电冲击截波 ($T_c \geq 2 \mu s$) 及振荡冲击波时，其刻度因数扩展测量不确定度不应大于 1% ($k=2$)；</p> <p>b) 测量波前截断的雷电全波冲击波 (T_c 在 $0.5 \mu s$ 到 $2 \mu s$ 间) 时，其扩展测量不确定度不应大于 3% ($k=2$)；</p> <p>c) 时间参数的扩展测量不确定度不应大于 5% ($k=2$)；</p> <p>d) 阶跃响应参数应满足以下要求：</p> <p>1) 测量全波和波尾截断雷电冲击时：实验响应时间 $T_N \leq 15 ns$，稳定时间 $T_s \leq 200 ns$，部分响应时间 $T_r \leq 30 ns$；</p> <p>2) 测量波前截断雷电冲击：实验响应时间 $T_N \leq 10 ns$，稳定时间 $T_s \leq 150 ns$，部分响应时间 $T_r \leq 20 ns$；</p> <p>3) 测量操作冲击波时：稳定时间 $T_s \leq 1 \mu s$。</p> <p>对标准测量系统中的冲击数字记录仪要求如下：</p> <p>a) 采样率不应小于 $60/T_{AB}$，其中 T_{AB} 是待测冲击电压波形上升部分 T_{30} 到 T_{90} 间的时间间隔，$T_{AB} = 0.6T_{30}$；</p> <p>b) 上升时间不得超过 T_{AB} 的 2%；</p> <p>c) 冲击数字记录仪的冲击刻度因数的扩展测量不确定度不应大于 0.5% ($k=2$)，在 5.3 中规定的时间间隔内，冲击刻度因数应保持恒定在 $\pm 0.5\%$ 范围内。</p>
2	标准冲击电压发生器	具体性能参数见表 2 所示。
3	电场测量仪	<p>测量冲击电压波形时：</p> <p>其刻度因数的测量不确定度不应大于 1% ($k=2$)；</p> <p>其时间参数的测量不确定度不应大于 5% ($k=2$)；</p> <p>额定电压范围内，其线性度应优于 1% ($k=2$)。</p>

表 2 标准冲击电压发生器要求

波形类型	参数	数值范围	测量不确定度 ($k=2$)	短期稳定性
雷电全波和波尾截断雷电冲击波	电压峰值	仪器使用范围内	$\leq 0.7\%$	$\leq 0.2\%$
	波前时间	$0.8 \mu s \sim 1.0 \mu s$ 和 $1.5 \mu s \sim 1.7 \mu s$	$\leq 2\%$	$\leq 0.5\%$
	半峰时间	$55 \mu s \sim 65 \mu s$	$\leq 2\%$	$\leq 0.2\%$
波前截断雷电冲击波	电压峰值	仪器使用范围内	$\leq 0.7\%$	$\leq 0.2\%$
	截断时间	$0.45 \mu s \sim 0.55 \mu s$	$\leq 2\%$	$\leq 1\%$
操作冲击波	电压峰值	仪器使用范围内	$\leq 0.7\%$	$\leq 0.2\%$
	峰值时间	$200 \mu s \sim 300 \mu s$	$\leq 2\%$	$\leq 0.2\%$
	半峰时间	$1000 \mu s \sim 4000 \mu s$	$\leq 2\%$	$\leq 0.2\%$

^a: 标准冲击电压发生器连接各类冲击电压数字记录仪时，其输出电压波形参数均不应发生变化；标准冲击电压发生器的短时稳定性是至少 10 次连续冲击电压波形的标准偏差。

表 3 主要试验设备

序号	设备名称	性能要求
1	阶跃波发生器	a) 直流电压幅值准确度应优于0.1%。 b) 上升时间： 1) 用于冲击数字记录仪的刻度因数校准时，应小于5.3规定的标称时段下限值 t_{\min} 的1/20； 2) 用于冲击数字记录仪的上升时间校准时，应小于0.6% T_{AB} ， T_{AB} 定义同表1。 c) 用于校准记录仪的刻度因数时，幅值不应小于记录仪满量程的90%。
2	冲击电压发生器	冲击电压发生器连接不同类型的冲击电压测量系统时，其输出波形应能满足以下要求： a) 输出电压幅值应覆盖试品冲击电压测量系统额定电压的1.1倍值； b) 输出波形的时间参数应能覆盖标准雷电全波、标准雷电截断波、标准操作冲击波所要求的时间参数范围； c) 若试验需要，发生器应能产生振荡冲击电压波形； d) 采用冲击电压发生器进行冲击分压器的线性度试验时，改变冲击电压发生器的充电时间时对其输出电压的影响不应大于1%。
3	直流电压发生器	用于冲击数字记录仪内部噪声校准时，直流电压恒定性应优于0.05%。
4	阻抗分析仪	测量电阻、电容量的测量不确定度应优于0.05% ($k=2$)。
5	试验数据发生器 (test data generator, 简称TDG)	试验数据发生器是生成数字化标准数据文件的计算机程序，提供了合成的和记录的标准冲击波形。TDG测试程序的版本应与现行的GB/T 16896.2中的版本保持一致。
注：试验数据发生器，test data generator，以下简称TDG。		

6.2 外观及功能检查

6.2.1 外观检查

目测，检查结果应满足5.2.1的要求。

6.2.2 功能检查

通电后，检查开关、按键、显示屏和各种状态指示灯（标志）应工作正常。冲击测量软件应与测量仪器正常通讯并可正常显示冲击电压测量波形。各项功能检查的结果应符合5.2.2中的要求。

6.3 性能试验

6.3.1 冲击电压分压器

6.3.1.1 绝缘性能试验

试验在正、负极性下进行，施加冲击电压测量系统额定电压值的1.1倍雷电冲击全波电压至冲击电压分压器的高压端，各极性下的试验次数不少于3次。若冲击电压分压器未发生击穿及闪络，则认为该分压器通过绝缘性能试验，试验结果应符合5.3.2.1的要求。

6.3.1.2 刻度因数标定

6.3.1.2.1 比对法

比对法为通过与标准冲击电压分压器比对试验的方式

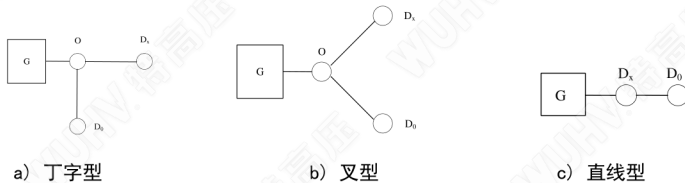
来确定冲击电压分压器的刻度因数的方法，试验电压波形一般为标准雷电冲击波及标准操作冲击波。

标准雷电冲击电压波形的时间参数为：波前时间：1.2 (1±30%) μs、半峰值时间：50 (1±20%) μs；
当试验电压超过800kV，校准试验波形的波前时间的上限范围可扩展到1.2 (1+100%) μs即2.4 μs。

标准操作冲击电压波形的时间参数为：波前时间：170 (1±20%) μs、峰值时间：250 (1±20%) μs、
半峰值时间：2500 (1±60%) μs。

标准冲击电压分压器与被试冲击电压分压器的布置方式有三种，分别为丁字型（图7a），叉型（图7b）和直线型（图7c）。其中丁字型和叉型，在布置方式中两台冲击电压分压器之间的夹角约为90°。

比对法校准的接线方式见图8，标准冲击电压分压器和被测冲击电压分压器的输出电压均进入标准测量仪器。



图中符号说明：

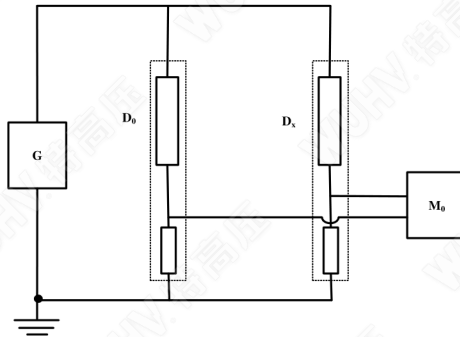
G——冲击电压发生器；

O——公共连接点；

D_x——被测冲击电压分压器；

D₀——标准冲击电压分压器。

图7 冲击电压分压器刻度因数标定试验布置示意图



图中符号说明：

G——冲击电压发生器；

D₀——标准冲击电压分压器；

D_x——被测冲击电压分压器；

M₀——标准测量仪器。

图8 比对法接线图

被校准冲击电压分压器的实测刻度因数按式 (1) 计算:

$$K_x = K_N \frac{U_{01}}{U_{x1}} \dots \dots \dots (1)$$

式中:

K_x ——被校冲击电压分压器的校准刻度因数;

K_N ——被校冲击电压分压器在测量系统中所设置的标称刻度因数;

U_{01} ——标准冲击测量系统的测量电压值;

U_{x1} ——被校冲击电压分压器的测量电压值。

注: U_0 和 U_x 分别为冲击计算软件上显示的标准冲击测量系统和被校准冲击电压分压器的一次电压值。

当试品冲击电压分压器的额定电压不超过标准冲击分压器时,在全电压范围内对试品分压器的刻度因数进行校准;当试品冲击分压器的额定电压高于标准冲击分压器时,在有限电压范围内对试品分压器的刻度因数进行校准。

a) 全电压范围内校准

按图 8 接线。在被校冲击分压器标定测量范围内的最小值、最大值以及中间较均匀选取的 3 个电压点 (共 5 个电压点) 下与标准测量系统进行比较 (见图 9), 每个电压点重复测量不少于 10 次, 分别记录被校冲击分压器的电压峰值和时间参数, 根据公式 (1) 计算电压峰值和时间参数的示值误差。

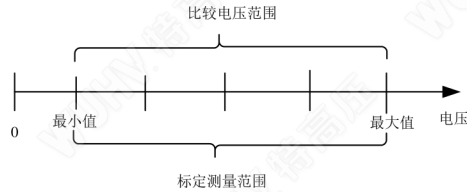


图 9 全电压范围内刻度因数标定示意图

b) 有限电压范围内校准

按图 8 接线。标准冲击分压器测量范围的最大值不低于被校测量系统标定测量范围的 20%, 并需额外进行单独的线性度试验。刻度因数校准电压点不应少于 2 个, 包括被校测量系统标定测量范围的最小值以及标准测量系统测量范围的最大值 (见图 10)。

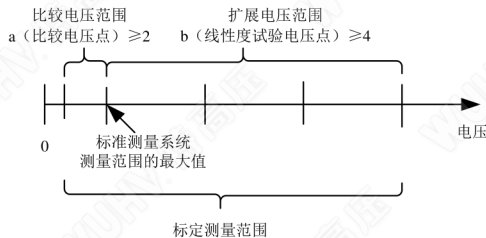


图 10 有限电压范围内刻度因数标定示意图

6.3.1.2.2 阻抗算法

使用阻抗分析仪测量冲击电压分压器高、低压臂各电阻、电容参数，基于实测阻容参数计算冲击电压分压器的刻度因数。阻抗分析仪的技术参数应满足表3中的要求，各类冲击电压分压器刻度因数的阻抗计算方法见附录A。

冲击电压分压器刻度因数标定试验结果应符合5.3.2.2的要求。

6.3.1.3 线性度试验

6.3.1.3.1 在全电压范围内对冲击电压分压器的刻度因数标定时，无需单独进行线性度试验，可基于冲击电压分压器各标定电压下的实测刻度因数来计算其线性度参数。

6.3.1.3.2 在有限电压范围内标定冲击电压分压器的刻度因数时，应选择与近似线性的冲击电压分压器、冲击电压发生器或者电场测量仪比对的方法进行线性度试验。首先在有限的刻度因数标定电压范围内选取合适的电压点完成刻度因数的标定，其次在扩展电压范围内选取不少于4个电压点进行线性度试验，线性度试验的电压点应包括刻度因数标定范围的最高电压点以及被测冲击电压分压器扩展电压范围的最大值（见图11），每个电压点重复测量次数不少于5次。冲击电压分压器的线性度计算方法见公式（2）：

$$R = \max_{i=1}^n \left| \frac{\eta_i - \eta_m}{\eta_m} \right| \dots\dots\dots (2)$$

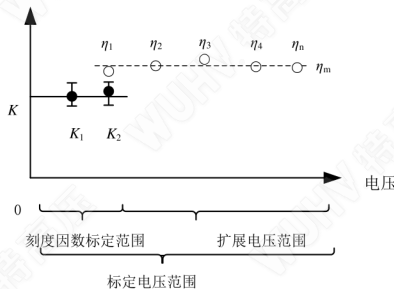
式中：

R ——被测冲击电压分压器扩展电压范围内的线性度参数，单位为%；

η_i ——不同电压下线性度试验确定的比值，通常为试品冲击分压器与比对测量装置测量电压值间的比值（ $i=1, 2, 3, 4, \dots, n$ ）；

n ——扩展电压范围内线性度试验电压点的个数；

η_m ——不同电压下线性度比值的平均值。



图中符号说明：

K_1 、 K_2 ——不同电压下实测分压比；

K —— K_1 、 K_2 的平均值；

η_i ——不同电压下线性度试验确定的比值（ $i=1, 2, 3, 4, n$ ）；

η_m ——不同电压下线性度比值的平均值。

图 11 有限电压范围内标定冲击刻度因数时线性度试验示意图

具体要求如下：

a) 与已知线性度的冲击电压分压器比对

使用已知线性度的冲击电压分压器标定被测冲击电压分压器的线性度时，在不同试验电压下分别测量被校准冲击电压分压器的测量电压及已知线性度的冲击电压分压器测量电压值，计算两台冲击分压器的实测电压间的比值 η_i ，根据公式（2）计算被测冲击电压分压器扩展电压范围内的线性度。

b) 与冲击电压发生器的充电电压比对

使用冲击电压发生器校准冲击电压分压器的线性度时,测量不同电压下被测冲击电压分压器测量电压与发生器充电电压,计算两个电压值间的比值 η_1 ,根据公式(2)计算被测冲击电压分压器扩展电压范围内的线性度。

试验的相关要求:

- 1) 冲击电压发生器各次充电电压不应小于充电电容额定电压的30%;
 - 2) 应剔除冲击发生器球隙自放电时的测量数据;
 - 3) 每个试验电压点下的有效测量次数不少于5次。
- c) 与电场测量仪输出比对
- 1) 试验前应使用标准冲击电压分压器标定电场测量仪的比例系数;
 - 2) 试验时,应合理布置电场测量仪的放置位置,确保电场测量仪处于待校准分压器测量电压产生的冲击电场中;
 - 3) 在不同电压点,测量被校冲击电压分压器与电场测量仪输出电压比值 η_1 ,根据公式(2)计算被校冲击电压分压器扩展电压范围内的线性度。

冲击电压分压器的线性度试验结果应符合5.3.2.3的要求。

6.3.1.4 短期稳定性

对冲击电压分压器在额定电压下以最大施加次数进行试验,最大施加次数一般为正负极性各10次。两次施加冲击电压波形之间的时间间隔一般为2min。对于额定电压为1000kV以上的电阻分压器,时间间隔可增长至3min。

完成最大施加次数的额定电压试验后,10min内立即测定该分压系统的刻度因数,试验前后冲击分压器刻度因数的变化值 K_d 为冲击电压测量系统的短期稳定性参数,试验前后应在同一试验电压下进行分压系统刻度因数的测定,短时稳定性的计算公式如(3)所示:

$$K_d = \frac{F_{after}}{F_{before}} - 1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

K_d ——冲击电压分压器的短时稳定性;

F_{before} ——短时稳定性试验前冲击电压分压器的刻度因数;

F_{after} ——短时稳定性试验后的冲击电压分压器的刻度因数。

冲击电压分压器的短期稳定性试验结果应符合5.3.2.4的要求。

6.3.1.5 温度效应

6.3.1.5.1 元器件法

基于元器件法开展冲击电压分压器的温度效应试验时,将冲击电压分压器的高低压臂中各组成元器件(电阻、电容)置于温度可调的温箱内,在 $-10^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,均匀的选取不少于5个温度试验点。在各选定的温度下,采用精密阻抗分析仪测量各元器件的量值,并计算在整个温度变化范围内各元器件参数的最大相对变化量 D_r ,计算方法如式(4)。各元器件的最大相对变化量 D_r 值中的最大值 A_r 确定为冲击电压分压器的温度效应参数,计算方法如式(5)。

$$D_r = \max_{i=1}^N \left| \frac{A_i - \bar{A}}{\bar{A}} \right| \times 100\% \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$A_r = \max_{i=1}^M a_i D_r \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

D_r ——冲击电压分压器各组成元器件在不同温度下参数值的最大相对变化量；

A_r ——不同温度下被测元器件的参数值；

\bar{A} ——不同温度下被测元器件参数的平均值；

N ——元器件温度试验点的个数；

A_r ——试品冲击电压分压器的温度效应参数；

M ——冲击电压分压器内开展温度特性试验的元件个数。

当采用元器件法无法准确评估冲击电压分压器的温度效应参数时，应采用分压器整体法进行试验。

6.3.1.5.2 整体法

基于整体法开展冲击电压分压器的温度效应试验时，冲击电压分压器应置于环境温度可调的试验大厅内，在冲击电压分压器的正常工作范围（-10℃~40℃）内，均匀选取不少于5个温度试验点开展温度效应试验。

在冲击电压分压器的额定电压范围内选取某一试验电压，记录不同环境温度下，冲击电压分压器在该试验电压下刻度因数的改变，试验接线原理图同图8。冲击电压分压器温度效应参数 A_r 计算方法如式（6）。

$$A_r = \max_{i=1}^N \left| \frac{F_i - \bar{F}}{\bar{F}} \right| \times 100\% \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

A_r ——试品冲击电压分压器的温度效应参数；

N ——冲击电压分压器温度试验点的个数；

F_i ——不同温度下试品冲击电压分压器的校准刻度因数；

\bar{F} ——不同温度下试品冲击电压分压器刻度因数的平均值。

冲击电压分压器温度效应的试验结果应符合5.3.2.5的要求。

6.3.1.6 电缆波阻抗测量

冲击电压分压器配套电缆波阻抗的测量方法包括：阶跃波法、谐振法、电感电容法、开路短路阻抗法等，具体测量方法见附录B。试验结果应符合5.3.2.6的要求。

6.3.2 冲击数字记录仪

6.3.2.1 绝缘性能

冲击数字记录仪的绝缘性能试验在正、负极性下进行，试验电压类型为雷电冲击电压及操作冲击电压。将1.1倍额定电压值的试验电压输入冲击数字记录仪的各通道，各极性下的试验次数不应少于3次，试验结果应符合5.3.3.2中的要求。

6.3.2.2 额定分辨率

冲击数字记录仪的额定分辨率通过核对冲击数字记录仪说明书确定，其参数应符合5.3.3.3中的要求。

6.3.2.3 采样率

冲击数字记录仪的采样率通过核对冲击数字记录仪说明书确定，其参数应符合5.3.3.4中的要求。

6.3.2.4 输入阻抗

冲击数字记录仪的输入阻抗可通过阻抗分析仪测量，测量结果应符合5.3.3.5中的要求；

6.3.2.5 刻度因数标定

6.3.2.5.1 标准冲击电压波标定

采用标准冲击电压波标定冲击数字记录仪的刻度因数时，试验接线如图12所示。冲击电压标准波由标准冲击电压发生器产生，其性能参数应满足表2中的要求。冲击数字记录仪试验所用的各量程均应进行冲击刻度因数校准。校准电压点应尽量覆盖量程值的10%点和满量程值点，在此量程范围内再均匀选取3个标定电压点。

根据冲击数字记录仪待测冲击电压的类型（雷电冲击全波、雷电冲击截波、操作冲击波），在标准冲击电压发生器中选择对应的波形进行校准。在各校准电压点，应至少进行10次重复测量。

被校冲击数字记录仪的实测冲击刻度因数 F_i 按式（7）计算：

$$F_i = \frac{U_0}{U_{sm}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：

F_i ——被校冲击数字记录仪的实测冲击刻度因数；

U_0 ——标准冲击电压发生器的实际输出电压值，V；

U_{sm} ——被校冲击数字记录仪的多次重复测量的冲击电压平均值，V。

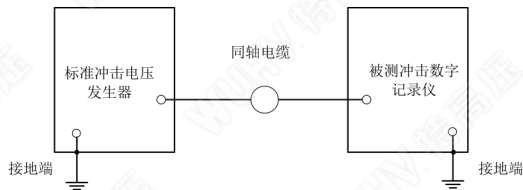


图12 标准冲击电压波标定刻度因数接线原理图

6.3.2.5.2 阶跃波标定

冲击数字记录仪阶跃波试验接线原理图如图13所示。在冲击数字记录仪的输入端施加阶跃波，记录冲击数字记录仪的输出阶跃响应波形，计算响应波形在规定标称时间间隔（ $0.5T_{1min} \sim T_{2max}$ ）内的瞬时值 $O(t)$ ， $O(t)$ 为阶跃响应波形上的各采样点的电压值的绝对值，如图14所示。采用规定标称时间间隔内各采样点处的 $O(t)$ 计算平均值 O_s ，重复测量不少于10次的阶跃波，基于各次试验所得平均值 O_s 计算总平均值 O_{sm} 。

被校冲击数字记录仪的实测冲击刻度因数按式（8）计算：

$$F_i = \frac{U_0}{O_{sm}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中：

F_i ——被校冲击数字记录仪的实测冲击刻度因数；

U_0 —阶跃波电源输出直流电压值，V；

O_{sm} —被校冲击数字记录仪的在标称时段内多次重复测量电压的总平均值，V。

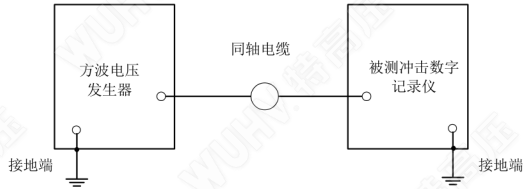
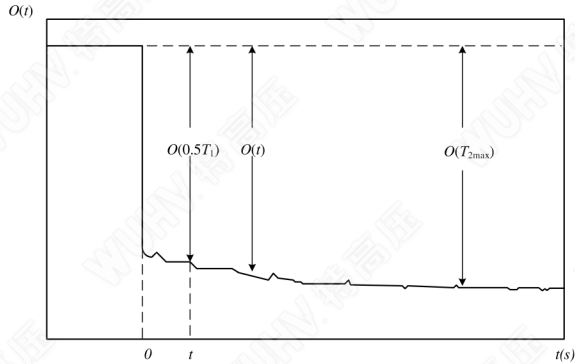


图13 冲击数字记录仪阶跃波试验接线原理示意图



图中符号说明：

$O(t)$ ——阶跃响应波形上的各瞬时电压值与0电平间的电压差的绝对值；

$O(0.5T_1)$ ——阶跃响应波形上 $0.5T_1$ 时刻对应的瞬时电压的绝对值；

$O(T_{2max})$ ——阶跃响应波形上 T_{2max} 时刻对应的瞬时电压的绝对值；

图14 采用阶跃波（下降沿）进行刻度因数校准的波形示意图

冲击数字记录仪的刻度因数稳定性也采用阶跃波电压试验进行校准，冲击数字记录仪在规定的标称时段内各瞬时值的 $O(t)$ 值与其平均值 O_s 的最大偏差值为刻度因数恒定性参数。刻度因数的恒定性校准对数字记录仪试验所用的各个量程均应进行。

冲击数字记录仪刻度因数试验结果应符合5.3.3.6 中的要求。

6.3.2.6 时间参数误差

冲击数字记录仪的时间参数误差采用标准冲击波进行校准，试验接线如图12所示。在同一校准电压波形下，重复试验次数应不少于10次，基于多次试验的平均值作为校准结果，冲击数字记录仪时间参数的示值误差使用公式（9）表示，示值相对误差使用公式（10）表示。

$$\Delta T = T_x - T_0 \dots\dots\dots (9)$$

式中:

ΔT ——时间参数示值误差, μs ;

T_x ——被校冲击数字记录仪的测量值, μs ;

T_0 ——标准冲击电压发生器输出波形时间参数的参考值, μs 。

$$\gamma = \frac{\Delta T}{T_0} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中:

γ ——时间参数示值相对误差, %。

冲击数字记录仪时间参数误差试验结果应符合5.3.3.7的要求。

6.3.2.7 上升时间

冲击数字记录仪的上升时间采用阶跃响应试验进行校准, 试验接线图同图12, 试验中所采用的电压阶跃波的参数应满足表3中的要求。试验时, 对冲击数字记录仪输入阶跃波电压后, 在数字记录仪所测量阶跃响应波形的前沿上升部分中, 采样点幅值对响应波形稳定幅值的10%电压点及稳定幅值90%电压点两点之间的时间间隔为仪器的上升时间 T_r , 如图15所示。通常采用多次(大于等于10次)试验、重复采样后取平均值的方法确定其上升时间。在实际测试中所使用的各量程下, 分别进行上升时间的测试。试验结果应符合5.3.3.8的要求。

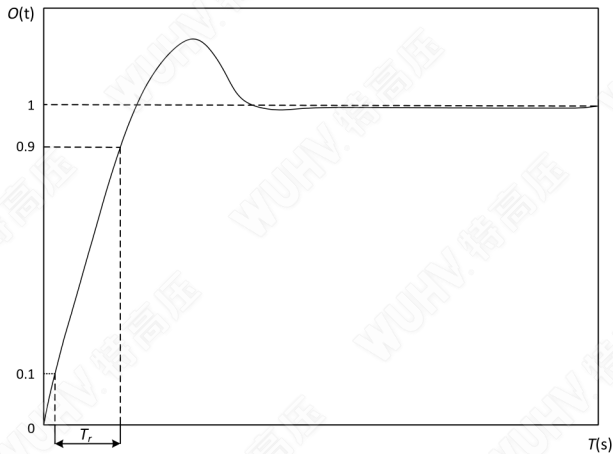


图15 冲击数字记录仪阶跃响应波形(上升沿)示意图

6.3.2.8 内部噪声电平

在冲击数字记录仪的输入端施加一幅值在其量程内的恒定直流电压, 试验接线图如图16所示。按给定采样率至少采集1000个直流电压试验数据点, 各采样点电压值 U_i 的标准偏差 K 为冲击数字记录仪的内部噪声电平, 计算方法如式(11)。

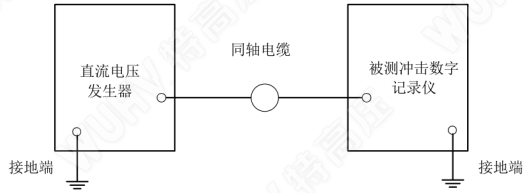


图16 冲击数字记录仪内部噪声电平试验接线原理图

$$K_z = \text{Stedv}(\sum_{i=1}^n U_i) \dots\dots\dots (11)$$

式中：

K_z ——内部噪声电平；

U_i ——各采样点处对应的直流电压值；

n ——采样点总个数。

冲击数字记录仪内部噪声电平的试验结果应符合5.3.3.9中的要求。

6.3.2.9 环境适应性

环境适应性试验按照表4的规定进行，试验结果应符合5.3.3.10的要求。

表4 环境适应性试验

试验项目	基础标准	试验等级
温度试验	GB/T 6587	III
湿度试验		
振动试验		
冲击试验		
运输试验	GB/T 6587	II

6.3.2.10 电磁兼容

电磁兼容抗扰度试验按照表5的规定进行，试验结果应符合5.3.3.11的要求。

表5 电磁兼容抗扰度试验

试验类别	端口	试验项目	基础标准	试验值	试验等级	性能判据
抗扰度试验	外壳	静电放电抗扰度试验	GB/T 17626.2	接触放电6kV，空气放电8kV	3级	B
		射频电磁场辐射抗扰度试验	GB/T 17626.3	10V/m (80MHz~1GHz) 10V/m (1.4GHz~2GHz) 10V/m (2GHz~2.7GHz)	3级	A
		工频磁场抗扰度试验	GB/T 17626.8	30A/m	4级	A
	测试	电快速瞬变脉冲群抗扰度试验	GB/T 17626.4	2kV，5kHz	3级	B

仪	浪涌（冲击）抗扰度试验	GB/T 17626. 5	2. 0kV	3级	B
	射频场感应的传导抗扰度试验	GB/T 17626. 6	10V, 150kHz~80MHz	3级	A
	电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度试验	GB/T 17626. 11	电压暂降 0%：0. 5周期、1周期	3类	C
			电压暂降 40%：10周期	3类	C
			电压暂降 70%：25周期	3类	C
			电压暂降 80%：250周期	3类	C
		短时中断 0%：250周期	3类	C	
注：性能判据：受试设备电磁兼容抗扰度试验结果评价性能判据分为四级： A级：在制造厂或委托方或客户规定的技术规范限值内性能正常； B级：功能暂时丧失或性能暂时降低，但在干扰停止后，受试设备能自行恢复，无需操作者干预； C级：功能暂时丧失或性能暂时降低，但需操作者干预才能恢复正常； D级：因硬件或软件损坏，或数据丢失而造成不能自行恢复至正常状态的功能降低或丧失。					

6. 3. 3 冲击计算软件

冲击计算软件的误差校验方法见附录 C，试验结果应满足 5.3.4 的要求。

6. 3. 4 冲击电压测量系统

6. 3. 4. 1 刻度因数标定

冲击电压测量系统的刻度因数标定采用与标准测量系统比对试验获得，试验接线图如图17所示。冲击电压测量系统的刻度因数标定试验一般在标准雷电冲击全波或标准操作冲击电压波形下进行，试验应在正、负两个极性下进行。被校冲击电压测量系统的实测刻度因数见式（12），冲击电压测量系统刻度因数校准值为所有电压点实测刻度因数的平均值。

$$F_x = F_N \frac{U_{02}}{U_{x2}} \dots\dots\dots (12)$$

式中：

F_x ——被校测量系统的实测刻度因数；

F_N ——被校测量系统的标称刻度因数；

U_{02} ——标准测量系统实测电压值，kV；

U_{x2} ——被校测量系统的测量电压显示值，kV。

注： U_{02} 、 U_{x2} 分别软件上显示的标准及被校测量系统的一次电压值。

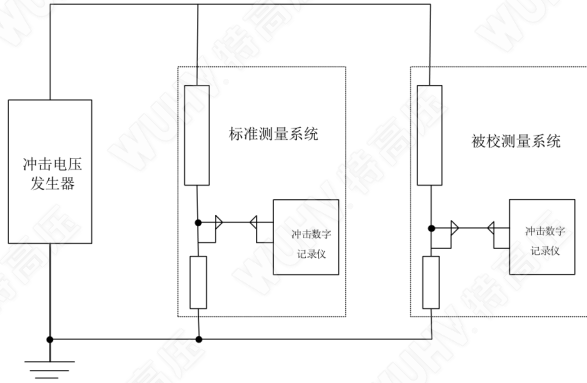


图17 比较法接线示意图

冲击电压测量系统刻度因数标定试验结果应满足 5.3.5.1 中的要求。

6.3.4.2 时间参数

冲击电压测量系统的时间参数示值误差校准也采用比较法，试验接线与试验设备布置如图17，试验时的冲击电压波形要求与刻度因数标定试验完全相同。冲击电压测量系统时间参数的示值误差使用式 (13) 表示，时间参数示值相对误差使用式 (14) 表示。

$$\Delta T = T_x - T_0 \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中：

ΔT ——时间参数示值误差， μs ；

T_x ——被测冲击电压测量系统时间参数的测量值， μs ；

T_0 ——标准冲击电压测量系统测量的时间参数值， μs 。

$$\gamma = \frac{\Delta T}{T_0} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中：

γ ——示值相对误差， $\%$ 。

冲击电压测量系统时间参数的校准试验结果应满足 5.3.5.2 中的要求。

6.3.4.3 动态特性

6.3.4.3.1 一般要求

冲击电压测量系统的动态特性可采用两种试验方法：在标称时段内测量冲击电压测量系统刻度因数的变化，或采用基于冲击电压测量系统阶跃响应试验的卷积计算方法。

6.3.4.3.2 测量标称时段内刻度因数变化

采用此方法时，试验波形应采用标准雷电冲击波或标准操作冲击波。冲击电压测量系统的动态特性试验按图14接线，调节冲击电压发电器的输出电压波形参数，在标称时段的下限、中间值、上限分别校

准冲击电压测量系统的刻度因数，校准电压点选取6.3.3.1中确定的任意一个刻度因数校准点，根据式(15)计算被校冲击电压测量系统的动态特性。

$$K_T = \max_{i=1}^3 \left| \frac{F_i - \bar{F}}{\bar{F}} \right| \times 100\% \quad \dots\dots\dots (15)$$

式中：

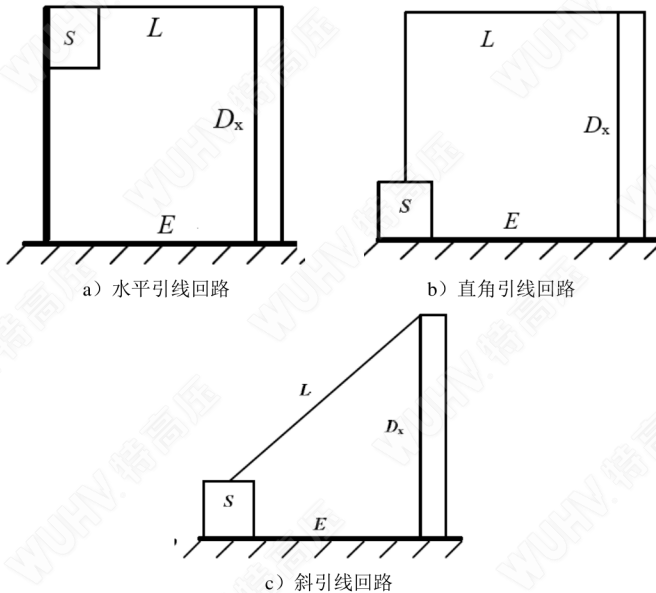
K_T ——被校测量系统动态特性；

F_i ——不同时间参数下校准的刻度因数；

\bar{F} ——标称时段内刻度因数平均值。

6.3.4.3.3 基于阶跃响应试验的卷积计算方法

冲击电压测量系统阶跃响应试验有三种典型的试验回路，分别为水平引线回路、直角引线回路和斜引线回路。



图中符号说明：

S ——方波电压发生器；

L ——试验连接引线；

E ——接地回路；

D_x ——试品冲击电压分压器。

图18 阶跃响应试验的典型试验回路

图18 a) 为水平引线回路：阶跃波发生器置于与冲击电压分压器相同的高度，连接在水平的高压引线始端，并用附加的垂直接地带或者利用金属屏蔽墙与接地回路相连。

图18 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连,形成一直角引线,这种试验回路会使测量系统的回路的电感有所增加。

图18 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冲击电压发生器相连,构成一三角形回路,这种回路将增大高压引线对冲击电压分压器的影响。

条件允许时,应采用水平引线回路的方式。

对冲击电压分压器施加阶跃电压波后,冲击数字记录仪记录冲击电压分压器输出的阶跃响应波形。基于该阶跃响应波形及卷积计算方法,可计算分析冲击电压分压器测量不同时间参数的雷电波时,冲击电压测量系数对应的刻度因数及时间参数误差,具体如下:

若一个冲击电压测量系统的输入冲击电压波形和单位归一化的阶跃响应分别为 $V_{in}(t)$ 和 $g(t)$, 则输出电压 $V_{out}(t)$ 可用式(16)的卷积积分表示:

$$V_{out}(t) = \int_0^t V'_{in}(\tau) g(t-\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (16)$$

式中:

t ——时间;

$V'_{in}(t)$ ——输入冲击电压波形 $V_{in}(t)$ 的一阶导数。

如果 $g(t)$ 和 $V_{in}(t)$ 以相同的采样间隔采样, 则式(16)连续卷积积分可简化为离散卷积积分式(17)的因果形式。

$$V_{out}(i) = \sum_{k=0}^i V'_{in}(k) \cdot g(i-k) \cdot \Delta t \quad i=0, \dots\dots\dots (17)$$

式中:

$V_{out}(i)$ ——离散输出电压数组;

$V'_{in}(i)$ ——输入电压数组的一阶导数;

$g(i)$ ——单位阶跃响应数组;

n ——输入电压数组取样个数;

Δt ——电压数组和阶跃响应数组的取样间隔。

改变输入波形参数 $V_{in}(t)$, 其时间参数依次改变为标称时段的下限、中间值及上限值。计算冲击电压测量系统在不同输入波形下的输出波形 $V_{out}(t)$ 参数, 计算冲击电压测量系统在不同输入波形下刻度因数和时间的变化, 获得冲击电压测量系统的动态特性参数。

冲击电压测量系统动态特性试验结果应符合5.3.5.3中的要求。

6.3.4.4 干扰试验

在不改变冲击电压分压器接地连接的情况下, 断开测量电缆与冲击电压分压器低压臂输出端之间的连接, 将测量电缆的输入端短路并与接地铜箔连接, 接线图见图19。对被校冲击电压测量系统施加20% 标称电压范围的标准雷电冲击截波电压, 记录冲击数字记录仪测得干扰电压波形的最大值 u_m 。根据式(18)计算被校冲击电压测量系统的干扰比。

$$I = \frac{u_m \times F_N}{U} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (18)$$

式中:

- I ——干扰比；
 u_m ——干扰电压的最大值，V；
 U ——一次电压峰值，V；
 F_N ——冲击电压测量系统标称刻度因数。

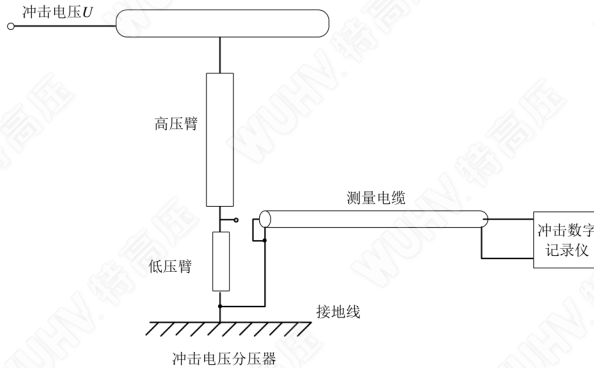


图19 干扰试验接线示意图

冲击电压测量系统干扰试验试验结果应符合5.3.5.4中的要求。

7 检验规则

7.1 检验分类

冲击电压测量系统的检验分为型式试验、出厂试验、验收试验和周期试验。如某项试验不合格，可更换组件或进行调整，直至全部试验项目合格。

7.2 检验项目

检验项目如表6所示。

表6 检验项目

序号	检验项目		标准及条款		型式试验	出厂试验	验收试验	周期试验
			检验要求	试验方法				
1	功能检查	外观检查	5.2.1	6.2.1	●	●	●	●
		功能要求	5.2.2	6.2.2				
2	冲击电压分压器	耐压试验	5.3.2.1	6.3.1.1	●	●	●	○
3		刻度因数标定	5.3.2.2	6.3.1.2	●	●	●	○
4		线性度	5.3.2.3	6.3.1.3	●	●	●	○
5		短时稳定性	5.3.2.4	6.3.1.4	●	●	●	○

6		温度效应	5.3.2.5	6.3.1.5	●	○	○	○
7		传输电缆波阻抗	5.3.2.6	6.3.1.6	●	○	○	○
8	冲击数字记录仪	绝缘性能	5.3.3.2	6.3.2.1	●	●	●	○
9		额定分辨率	5.3.3.3	6.3.2.2	●	○	●	○
10		采样率	5.3.3.4	6.3.2.3	●	○	●	○
11		输入阻抗	5.3.3.5	6.3.2.4	●	●	●	○
12		刻度因数	5.3.3.6	6.3.2.5	●	●	●	○
13		时间参数误差	5.3.3.7	6.3.2.6	●	●	●	○
14		上升时间	5.3.3.8	6.3.2.7	●	●	●	○
15		内部噪声电平	5.3.3.9	6.3.2.8	●	○	○	○
16		环境适应性	5.3.3.10	6.3.2.9	●	○	○	○
17		电磁兼容性	5.3.3.11	6.3.2.10	●	○	○	○
18	冲击测量软件		5.3.4	6.3.3	●	○	●	○
19	冲击电压测量系统	刻度因数	5.3.5.1	6.3.4.1	●	●	●	●
20		时间参数	5.3.5.2	6.3.4.2	●	●	●	●
21		动态特性	5.3.5.3	6.3.4.3	●	●	●	○
22		干扰试验	5.3.5.4	6.3.4.4	●	●	●	○

注：“●”为必须做试验项目，“○”为选做试验项目。

7.3 型式试验

下列情况之一的，冲击电压测量系统应进行型式试验：

- 新产品鉴定投产前；
- 在生产中当设计、材料、工艺或结构等改变，且其改变可能影响产品的性能时，亦应进行型式试验，此时的型式试验可以只进行与各项改变有关的试验项目；
- 国家质量监督机构要求进行质量一致性检验时。

7.4 出厂试验

由制造厂对生产的每一台产品进行检验。

7.5 验收试验

交接验收时由制造厂和用户共同对产品进行检验。

7.6 周期试验

冲击电压测量系统在后续使用过程中，用户可根据实际要求对成品进行检验。

8 标识和随行文件

8.1 标识

冲击电压测量系统的外观应完好,且标志和文字清晰,各组件功能键应操作灵活。同时应具备防潮、防水、防污功能。

冲击电压测量系统应在明显部位固定有耐久且不易腐蚀的铭牌,铭牌标识应包括以下内容:

- a) 产品名称、型号;
- b) 产品标准号;
- c) 制造商名称;
- d) 出厂编号;
- e) 制造年月;
- f) 额定电压;
- g) 产品质量、尺寸;
- h) 绝缘介质(如有)。

8.2 随行文件

冲击电压测量系统应提供随行文件,主要包括:

- 产品检验合格证;
- 产品说明书;
- 装箱单;
- 随机备件、附件清单;
- 安装图;
- 试验报告;
- 搬运说明;
- 其他有关资料。

9 包装、运输和贮存

9.1 包装

冲击电压测量系统包装应满足GB/T 191的有关标志的规定,并标明“小心轻放”、“向上”及“防潮”等标志。

电容器、电阻、绝缘支柱及所有的绝缘件均应包装,包装箱内填以质地柔软的衬垫,应有防潮措施,防止运输过程中受潮或碰撞。

冲击电压测量系统应附有全套的(包括标准件)安装说明书、产品合格证书、出厂试验记录、产品外形尺寸图、运输尺寸图、拆卸一览表、铭牌或铭牌标志图、备件表及装箱单。出厂资料应妥善包装,防止受潮及损坏。

9.2 运输

冲击电压测量系统的包装应满足陆运、空运及水运(海运)的要求,运输装卸按包装箱上的标志进行操作。

运输过程中应无严重振动、颠簸、冲击及倾斜,并应保证所有配件不受损。

户外移动式应具有标准集装箱配置，可实时进行运输、组装、拆卸，设备具备长途运输的减震、抗震措施。产品运至现场应进行相关检查。

9.3 贮存

包装完好的冲击电压测量系统应满足GB/T 191的贮存运输要求，长期不用的冲击电压测量系统应保留原包装，在相对湿度不大于80%的库房内贮存，周围空气温度应在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内。

室内应无酸、碱、盐，无腐蚀性、爆炸性气体，无灰尘以及雨、雪的伤害。贮存期间应定期开展检查，发现包装破损、器件残缺或变形等情况时，应当及时进行安全处理。

附录 A
(资料性)

阻抗法确定各类冲击电压分压器的刻度因数

A.1 概述

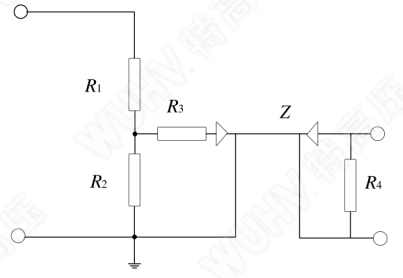
采用阻抗法确定冲击电压分压器的刻度因数时,应采用精密阻抗分析仪测量分压器高、低压臂有关的各阻容参数,并按公式计算分压系统的刻度因数。

A.2 电阻型冲击电压分压器

电阻型冲击电压分压器的接线图及刻度因数计算公式见表A.1。

表A.1 电阻型冲击电压分压器接线图及刻度因数计算公式

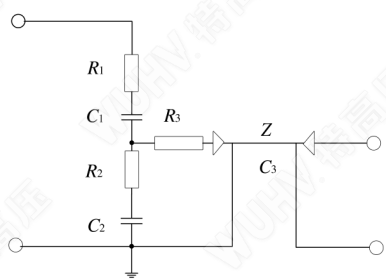
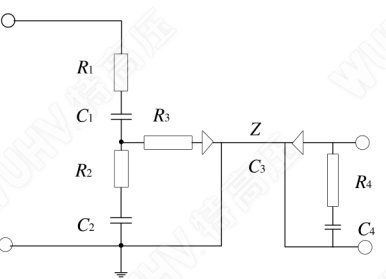
匹配方式	接线图	匹配条件和刻度因数
始端匹配		$R_2 + R_3 = Z$ $F = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$
终端匹配		$R_4 = Z$ $F = \frac{R_1 + R_2 // R_4}{R_2 // R_4}$

<p>两端匹配</p>		$R_2 + R_3 = R_4 = Z$ $F = \frac{R_1 + R_2 // (R_3 + R_4)}{R_2 // (R_3 + R_4)} \times \frac{R_3 + R_4}{R_4}$
<p>注：R₁—高压臂电阻；R₂—低压臂电阻；R₃—始端匹配电阻；R₄—终端匹配电阻；Z—测量电缆波阻抗。</p>		

A.3 阻容型冲击电压分压器

阻容型冲击电压分压器的结构原理图及刻度因数计算公式见表A.2所示。

表A.2 阻容型分压器接线图及刻度因数计算公式

匹配方式	接线图	匹配条件和刻度因数
<p>始端匹配</p>		$R_2 + R_3 = Z$ $F = \frac{C_1 + C_2 + C_3}{C_1}$
<p>两端匹配</p>		$R_2 + R_3 = R_4 = Z$ $C_1 + C_2 = C_3 + C_4$ $F = \frac{C_1 + C_2 + C_3 + C_4}{C_1} = 2 \left(1 + \frac{C_2}{C_1} \right)$
<p>注：R₁—高压臂电阻；R₂—低压臂电阻；C₁—高压臂电容；C₂—低压臂电容；C₃—测量电缆电容；C₄—终端电容；R₄—终端匹配电阻；Z—测量电缆波阻抗。</p>		

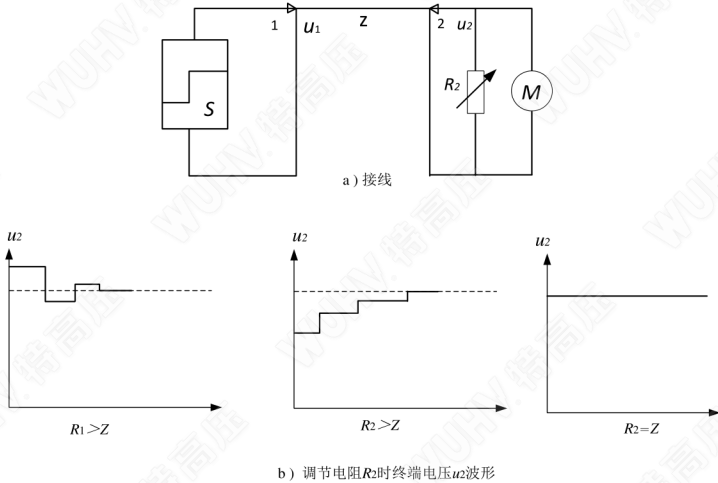
附录 B
(资料性)
电缆波阻抗测量方法

B.1 概述

冲击电压分压器配套电缆波阻抗的测量方法有阶跃波法、谐振法、电感电容法、开路短路阻抗法等。

B.2 阶跃波法

阶跃波法测量电缆波阻抗的接线如图B.1所示。阶跃波发生器S产生的阶跃波电压 u_1 作用测量电缆始端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，此时的终端电阻 R_2 即等于测量电缆波阻抗 Z 。



图中符号说明：

S——阶跃波发生器；

Z——电缆波阻抗；

R_2 ——终端电阻；

M——示波器；

u_1 ——阶跃波电压；

u_2 ——终端电压。

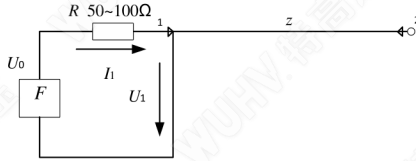
图B.1 阶跃波法测定电缆波阻抗

B.3 谐振法

谐振法测量电缆波阻抗的接线如图B.2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的过程中，始端

电压 U_1 第一次降到最低值时，记录此时谐振频率 f_0 ，另采用精密阻抗分析仪测量该电缆的电容 C ，则该测量电缆的波阻抗 Z 可按式（B.1）确定。

$$Z=1/4f_0C \quad \dots\dots\dots (B.1)$$



图中：
 F ——高频信号发生器；
 R ——电阻；
 Z ——电缆波阻抗。

图B. 2 谐振法测定电缆波阻抗

B. 4 电感电容法

利用精密阻抗分析仪测量一电缆终端短路时的电感 L 和终端开路时的电容 C ，则该测量电缆的波阻抗可按照式（B.2）确定。

$$Z = \sqrt{L/C} \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

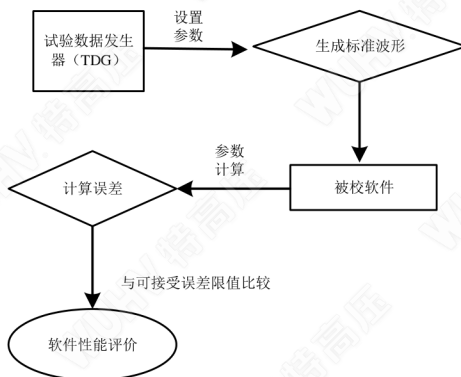
B. 5 开路短路阻抗法

开路短路阻抗法测量电缆波阻抗的接线与谐振法相同，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 ，由此求得该频率下电缆的始端阻抗 Z_1 。

$$Z_1=U_1/I_1=U_1R/U_R \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

附录 C
(资料性)
冲击电压测量软件误差校验方法

采用 GB/T 16896.2 中所附带的试验数据发生器(TDG)生成的波形对冲击计算软件进行误差校验,软件误差校验的流程见图 C.1。标准测试用冲击波形通过试验数据发生器(TDG)生成,保存为测试文件后导入被测软件中进行参数计算,软件性能通过被测软件的计算误差与可接受误差限值的比较进行评价。



图C.1 冲击计算软件误差校验过程

冲击测量软件的误差校验过程如图 C.1 所示,具体步骤如下:

- a) TDG 的设置应选择与使用该软件的冲击数字记录仪的设置相匹配,包括采样率、分辨率和内部噪声水平的选择,由此产生测试用 TDG 波形数据;
- b) 将 TDG 产生的测试波形文件导入被测软件,测试时,将被试软件确定的参数值与 GB/T 16896.2 中给出的可接受限值进行比较。如果被试软件对某一组冲击计算的参数值在该组规定的可接受限值范围内,则可判断被测软件通过该组测试;
- c) 软件性能记录,应包括:TDG 的版本号及其相关设置;被试软件的名称、版本号及发布日期;软件测试时所采用的算法类型;软件测试和通过测试的参数清单。

如果被试软件要求的数据格式或数值范围与 TDG 提供的数据格式或数值范围不对应,应使用适当的变换程序,应对每种计算方法以及与应用相关的每组波形的采样率、分辨率和噪声水平进行性能测试。

附录 D
(资料性)

冲击电压测量不确定度评定及示例

D.1 测量不确定度模型

D.1.1 冲击电压测量系统刻度因数不确定度评定模型

比对法校准被校测量系统刻度因数，测量模型可用式 (D.1) 表示。

$$F_x = F_N \frac{U_0}{U_x} \quad \dots\dots\dots (D.1)$$

式中：

F_x ——被校测量系统的实测刻度因数；

F_N ——被校测量系统标称刻度因数；

U_0 ——标准测量系统的测量电压，kV；

U_x ——被校测量系统的测量电压，kV。

各输入量之间不相关，刻度因数的不确定度传播可用式 (D.2) 表示，评定结果为相对测量不确定度。

$$u_{\text{crel}}(F_x) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(U_x) + u_{\text{rel}}^2(U_0)} \quad \dots\dots\dots (D.2)$$

式中：

$u_{\text{crel}}(F_x)$ ——被校刻度因数相对合成标准不确定度；

$u_{\text{rel}}(U_0)$ ——标准测量系统引入的相对标准不确定度分量；

$u_{\text{rel}}(U_x)$ ——被校测量系统引起的相对标准不确定度分量。

对比法校准被校测量系统峰值误差，测量模型可用式 (D.3) 表示：

$$\gamma = \frac{U_x - U_0}{U_0} = \frac{U_x}{U_0} - 1 \quad \dots\dots\dots (D.3)$$

各输入量之间不相关，示值误差的不确定度传播可用公式 (D.4) 表示，评定结果为测量不确定度。

$$u_{\text{crel}}(\gamma) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(U_x) + u_{\text{rel}}^2(U_0)} \quad \dots\dots\dots (D.4)$$

式中：

$u_{\text{crel}}(\gamma)$ ——峰值电压误差合成标准不确定度；

$u_{\text{rel}}(U_0)$ ——标准测量系统引入的标准不确定度分量；

$u_{\text{rel}}(U_x)$ ——被校测量系统引起的标准不确定度分量。

从 (D.3)、(D.4) 可以看出，刻度因数的相对测量不确定度和相对示值误差的测量不确定度结果是一致的，因此仅评定刻度因数的相对不确定度即可得到峰值电压相对示值不确定度。由于比对电压范围内的刻度因数和峰值电压误差测量不确定不涉及线性度，动态特性和干扰的影响，因此比对电压范围内的测量不确定度偏小，下面评定标定电压范围（500kV~2500kV）的测量不确定度。

刻度因数不确定度评定模型：

$$F = F_0 + \Delta F_1 + \Delta F_2 + \Delta F_3 + \Delta F_4 + \Delta F_5 + \Delta F_6 \quad \dots \quad (D.5)$$

F ——被校冲击电压测量系统的刻度因数；

F_0 ——被校冲击电压测量系统实测刻度因数；

ΔF_1 ——标准器的影响量；

ΔF_2 ——被校冲击电压测量系统的线性度的影响量；

ΔF_3 ——被校冲击电压测量系统扩展电压范围内非线性的影响量；

ΔF_4 ——环境温度影响的影响量；

ΔF_5 ——环境动态特性的影响量；

ΔF_6 ——干扰的影响量；

不确定度分量为：

u_1 ——由标准器引入的不确定度分量；

u_2 ——由测量结果重复性引入的不确定度分量；

u_3 ——由被校冲击电压测量系统的测量非线性引入的不确定度分量；

u_4 ——由被校冲击电压测量系统扩展电压范围内非线性引入的不确定度分量；

u_5 ——由环境温度影响引入的测量不确定度分量；

u_6 ——由动态特性影响引入的测量不确定度分量；

u_7 ——由干扰影响引入的测量不确定度分量；

D.1.2 时间参量模型

$$\Delta T = \Delta T_0 + \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 \quad \dots \quad (D.6)$$

ΔT ——时间参数的测量误差；

ΔT_0 ——实测的测量误差

ΔT_1 ——标准器的影响量；

ΔT_2 ——波前时间重复性的影响量；

ΔT_3 ——不同波前时间测量误差的偏差的影响量。

不确定度分量为：

u_1 ——由标准器引入的不确定度分量；

u_2 ——由测量结果重复性引入的不确定度分量；

u_3 ——由不同波前时间测量误差的偏差引入的不确定度分量；

D.2 冲击电压测量系统测量不确定度评定示例

被校测量系统技术参数：额定电压 3.6MV，最高标定电压为 2.5MV，测量电压类型：标准雷电冲击电压。

标准冲击电压测量系统技术参数：额定电压为 1000kV，峰值测量不确定度 1% ($k=2$)，标准雷电全波波前时间的平均误差是 0.01 μ s，测量不确定度 0.02 μ s ($k=2$)，半峰值时间平均误差为 0.4 μ s，测量不确定度 0.8 μ s ($k=2$)。工作温度范围 (15~30) $^{\circ}$ C。由于半峰值时间和波前时间的不确定度评定过程是相同的，因此本示例仅给出波前时间的不确定度评定过程。

D.2.1 刻度因数测量不确定度评定

D.2.1.1 标准不确定度分量评定

D.2.1.1.1 标准测量系统的相对标准不确定度 $u_{1,rel}$

标准测量系统的测量范围的最高电压为 1000kV，其刻度因数测量不确定度为 $u=1.0\%$ ($k=2$)，按 B 类方法进行评定，如式 (D.7) 所示：

$$u_1 = 5.0 \times 10^{-3} \dots\dots\dots (D.7)$$

D.2.1.1.2 刻度因数测量重复性引入的相对标准不确定度 $u_{2 \text{ rel}}$

标准冲击电压测量系统和被校冲击电压测量系统在正负极性下 500kV、1000kV 四个电压点进行比对校准，其比对数据如表 1 所示。各个电压水平下的结果汇总如表 D.2 所示。

根据表 1 和 2 的校准结果，由标准偏差最大值 10.6 计算电压比值重复性引入的相对标准不确定度，按 A 类方法进行评定，评定结果如式 (D.8) 所示：

$$u_2 = \frac{S_{\max}}{\sqrt{n}} = \frac{10.6}{\sqrt{10 \times 3841.9}} = 8.7 \times 10^{-4} \dots\dots\dots (D.8)$$

表D.1 500kV电压下的校准结果

校准电压/kV	V_0 /kV	V_i /kV	K_i	分压比平均值 K_i	标准偏差 $s(K_i)$
500	505.81	507.69	3835.7	3839.6	6.9
	506.85	509.15	3832.6		
	507.27	508.87	3837.9		
	506.14	508.54	3831.9		
	508.21	509.57	3839.7		
	506.75	508.12	3839.7		
	508.12	507.60	3853.9		
	508.21	508.73	3846.1		
	506.85	508.96	3834.0		
	506.47	507.18	3844.6		

表D.2 各电压水平下校准结果

校准电压数 i	电压水平/kV	K_i	实测分压比平均值 K_i	标准偏差 $s(K_i)$
1	500	3839.6	3841.9	6.9
2	-500	3834.1		10.6
3	1000	3849.2		7.5
4	-1000	3844.7		8.3

D.2.1.1.3 冲击电压测量系统非线性引入的相对标准不确定度 $u_{3 \text{ rel}}$

根据表 D.2 的校准结果，500kV、1000kV、-500kV、-1000kV 下冲击电压测量系统刻度因数与其平均值的最大差值为 7.8，为均匀分布，按 B 类方法进行评定，评定结果如式 (D.9) 所示：

$$u_{3 \text{ rel}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \frac{7.8}{3841.9} = 1.2 \times 10^{-3} \dots\dots\dots (D.9)$$

D. 2. 1. 1. 4 被校系统扩展范围的非线性引入的相对标准不确定度 $u_{4 \text{ rel}}$

线性度试验采用与近似线性的冲击电压发生器比对的方法进行测量，冲击电压发生器充分充电，确保输出电压波形没有明显变化，每个电压点重复测量 5 次。试验数据见表 D.3。

表D.3 扩展范围的线性度试验

序号	输出电压 kV	发生器充电电压 kV	输出电压/ 充电电压 η_i	平均值 R_c	$\frac{ \eta_i - \eta_m }{\eta_m}$	$R/\%$
1	1005	60.60	16.58	16.67	0.00525	0.525
2	1505	90.40	16.65		0.00105	
3	1996	119.80	16.66		0.00045	
4	2503	149.20	16.78		0.00675	

扩展范围的非线性 B 类不确定分量计算结果如式 (D.10) 所示：

$$u_{4 \text{ rel}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times R = 3.8 \times 10^{-3} \quad \dots\dots\dots (D.10)$$

D. 2. 1. 1. 5 被校冲击电压测量系统环境温度影响引入的相对标准不确定度 $u_{5 \text{ rel}}$

制造商提供的被校冲击电压测量系统的温度系数为 0.02%/°C，冲击电压测量系统使用温度范围 (5~35)°C，比对环境温度 25°C，工作温度偏差最大值为 $\Delta T=20^\circ\text{C}$ 。所以最大温度变化引入的测量不确定度分量如式 (D.11) 所示：

$$u_{5 \text{ rel}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times (0.02\% \times 20) = 2.3 \times 10^{-3} \quad \dots\dots\dots (D.11)$$

D. 2. 1. 1. 6 被校测量系统动态特性引入的相对标准不确定度 $u_{6 \text{ rel}}$

采用比对法在 500kV 雷电冲击电压下校准被校测量系统的动态特性，校准结果如表 D.4 所示，被校测量系统在标称时段内刻度因数的偏差为 0.14%，按照均匀分布，动态特性引入的测量不确定度分量如式 (D.12) 所示：

$$u_{6 \text{ rel}} = \frac{1.4 \times 10^{-3}}{\sqrt{3}} = 8.1 \times 10^{-4} \quad \dots\dots\dots (D.12)$$

表D.4 动态特性试验结果

校准电压 /kV	波形参数 / μs	刻度因数 F_i	刻度因数平均值 \bar{F}	动态特性 D
500	0.80/55	3833.4	3838.9	0.14%
	1.25/60	3839.6		
	1.60/58	3841.7		

D. 2. 1. 1. 7 干扰引入的相对标准不确定度 $u_{7 \text{ rel}}$

使用本规范 7.2.5 的方法测量的干扰比为 0.3%，按照均匀分布，干扰引入的测量不确定度分量如

式 (D.13) 所示:

$$u_{7\text{rel}} = \frac{3 \times 10^{-3}}{\sqrt{3}} = 1.7 \times 10^{-3} \quad \dots\dots\dots (D.13)$$

D.2.1.2 不确定度分量一览表

不确定度分量见表 D.5。

表D.5 测量系统刻度因数校准的不确定度分量表

不确定度分量	不确定度分量来源	评定方法	分布类型	相对标准不确定度 ($\times 10^{-3}$)
$u_{1\text{rel}}$	标准器	B	均匀	5.0
$u_{2\text{rel}}$	刻度因数重复性	A	正态	0.9
$u_{3\text{rel}}$	被校测量系统非线性	B	均匀	1.2
$u_{4\text{rel}}$	扩展电压范围的非线性	B	均匀	3.8
$u_{5\text{rel}}$	被校测量系统环境温度影响	B	均匀	2.3
$u_{6\text{rel}}$	动态特性	B	均匀	0.81
$u_{7\text{rel}}$	干扰	B	均匀	1.7

D.2.1.3 合成标准不确定度的计算

根据表 D.5 的不确定度分量表, 其合成相对标准不确定度如式 (D.14) 所示:

$$u_c = \sqrt{u_{1\text{rel}}^2 + u_{2\text{rel}}^2 + u_{3\text{rel}}^2 + u_{4\text{rel}}^2 + u_{5\text{rel}}^2 + u_{6\text{rel}}^2 + u_{7\text{rel}}^2} = 7.1 \times 10^{-3} \quad \dots\dots\dots (D.14)$$

D.2.1.4 扩展不确定度的确定

取包含因子 $k=2$, 则相对扩展不确定度计算结果如式 (D.15) 所示:

$$U_{\text{rel}} = k \times u_{\text{crel}} = 1.5 \times 10^{-2} \quad \dots\dots\dots (D.15)$$

标定电压范围: 500kV~2500kV, 被校测量系统刻度因数的校准结果表示为: $K_1=3842 (1 \pm 0.015)$, 25℃, 包含因子 $k=2$ 。

D.2.2 波前时间参数测量误差校准结果的不确定度评定

D.2.2.1 标准测量不确定度分量计算

D.2.2.1.1 标准测量系统引入的测量不确定度分量 u_1

标准测量系统的扩展不确定度为 $0.02 \mu\text{s}$, 正态分布, 包含因子 $k=2$, 按 B 类方法评定, 评定结果如式 (D.16) 所示:

$$u_1 = 0.02/2 = 0.01 \mu\text{s} \quad \dots\dots\dots (D.16)$$

D.2.2.1.2 测量重复性引入的测量不确定度分量 u_2

根据表 D.6 的校准结果数据, 测量重复性引入的相对标准不确定度, 按 A 类方法进行评定, 评定结果如式 (D.17) 所示:

$$u_2 = \frac{s(\Delta T_1)}{\sqrt{n}} = \frac{0.008}{\sqrt{10}} = 2.53 \times 10^{-3} \mu\text{s} \dots\dots\dots (D.17)$$

表D.6 波前时间10次重复性校准结果

校准电压点	测量次数 i	标准值 $T_{1N}/\mu\text{s}$	被校示值 $T_{1X}/\mu\text{s}$	示值误差 $\Delta T_{1i}/\mu\text{s}$	示值误差 平均值 $\Delta T_1/\mu\text{s}$	标准偏差 $s(\Delta T_1)/\mu\text{s}$
1000kV	1	1.251	1.26	0.009	0.017	0.008
	2	1.251	1.27	0.019		
	3	1.253	1.28	0.028		
	4	1.253	1.28	0.028		
	5	1.254	1.27	0.016		
	6	1.254	1.26	0.006		
	7	1.254	1.26	0.006		
	8	1.254	1.28	0.026		
	9	1.254	1.27	0.016		
	10	1.254	1.27	0.016		

表D.7 不同波前时间校准结果

量程	上升时间 $/\mu\text{s}$	示值误差 $/\mu\text{s}$	标准偏差 $s(\Delta T_1)/\mu\text{s}$
(0.84-1.56) μs	0.84	0.011	0.008
	1.20	0.012	0.008
	1.56	0.009	0.006
平均值		0.011	/

D.2.2.1.3 不同波前时间测量误差变化引入的相对标准不确定度 u_3

根据表 D.7, 不同波前时间测量值与平均值的偏差为 $0.02\mu\text{s}$, 为均匀分布, 按 B 类方法进行评定, 评定结果如式 (D.18) 所示:

$$u_3 = \frac{0.02}{\sqrt{3}} = 0.012 \mu\text{s} \dots\dots\dots (D.18)$$

D.2.2.2 不确定度分量一览表

不确定度分量见表 D.8。

表D.8 波前时间测量误差校准的不确定度分量表

不确定度分量	不确定度分量来源	评定方法	分布类型	标准不确定度/ μs
u_1	标准器引入	B	正态	0.01
u_2	上升时间测量重复性引入	A	正态	0.00254
u_3	不同波前时间测量误差变化引入	B	均匀分布	0.012

D. 2. 2. 3 合成标准不确定度的计算

相对合成标准不确定度计算结果如式 (D.19) 所示:

$$u_{\text{crel}} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.0113 \mu\text{s} \dots \dots \dots \quad (\text{D. 19})$$

D. 2. 2. 4 扩展不确定度的确定

扩展不确定度计算结果如式 (D.20) 所示:

$$U_{\text{rel}} = k \times u_{\text{crel}} = 0.023 \mu\text{s}, \text{ 包含因子 } k=2 \dots \dots \dots \quad (\text{D. 20})$$

被校测量系统波前时间校准结果表示为: 示值误差 $\Delta T_{1X} = 0.011 \mu\text{s} \pm 0.023 \mu\text{s}$, 包含因子 $k=2$ 。

D. 2. 3 半峰值时间测量误差校准结果的不确定度评定

D. 2. 3. 1 标准不确定度的评定

D. 2. 3. 1. 1 标准测量系统引入的测量不确定度分量 u_1

标准测量系统的扩展不确定度为 $0.8 \mu\text{s}$, 正态分布, 包含因子 $k=2$, 按 B 类方法评定, 评定结果如式 (D.21) 所示:

$$u_{1\text{rel}} = 0.8/2 = 0.4 \mu\text{s} \dots \dots \dots \quad (\text{D. 21})$$

D. 2. 3. 1. 2 测量重复性引入的测量不确定度分量 u_2

根据表 D.9 的校准结果数据, 测量重复性引入的相对标准不确定度, 按 A 类方法进行评定, 评定结果如式 (D.22) 所示:

$$u_2 = \frac{s_{\text{max}}}{\sqrt{n}} = \frac{0.043}{\sqrt{10}} = 0.013 \mu\text{s} \dots \dots \dots \quad (\text{D. 22})$$

表D.9 半峰值时间10次重复性校准结果

标准值 / μs	示值 / μs	相对误差 $\Delta T_2/\mu\text{s}$
60.16	59.95	-0.21
60.13	59.90	-0.23
60.12	59.85	-0.27
60.17	59.86	-0.31
60.18	59.90	-0.28
60.16	59.92	-0.24

60.16	59.87	-0.29
60.12	59.81	-0.31
60.14	59.83	-0.31
60.20	59.85	-0.35
示值误差平均值	-0.28	
标准偏差	0.043	

D. 2. 3. 2 不确定度分量一览表

不确定度分量见表 D.10。

表D. 10半峰值时间测量误差校准的不确定度分量表

不确定度分量	不确定度分量来源	评定方法	分布类型	相对标准不确定度 ($\times 10^{-3}$)
u_1	标准器引入	B	正态	0.4
u_2	测量重复性引入	A	正态	0.013

D. 2. 3. 3 合成标准不确定度的计算

相对合成标准不确定度计算结果如式 (D.23) 所示

$$u_{\text{rel}} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.41 \dots \dots \dots \quad (\text{D. 23})$$

D. 2. 3. 4 扩展不确定度的确定

扩展不确定度计算结果如式 (D.24) 所示:

$$U_{\text{rel}} = k \times u_{\text{rel}} = 0.82 \times 10^{-2}, \text{ 包含因子 } k=2 \dots \dots \dots \quad (\text{D. 24})$$

D. 2. 3. 5 扩展不确定度

时间参数的扩展不确定度:

波前时间 T_1 : $U=0.022\mu\text{s}$, 包含因子 $k=2$;

半峰值时间 T_2 : $U=0.82\mu\text{s}$, 包含因子 $k=2$ 。

D. 2. 3. 6 测量结果的表述

被校冲击电压测量系统波前时间校准结果表示为:

波前时间示值误差 $\Delta T_{1X} = 0.011\mu\text{s} \pm 0.023\mu\text{s}$, 包含因子 $k=2$ 。

半峰值时间示值误差 $\Delta T_{2X} = -0.28\mu\text{s} \pm 0.82\mu\text{s}$, 包含因子 $k=2$ 。