



河北省地方计量技术规范

JJF(冀) XXXX-XXXX

振铃波模拟器校准规范

Calibration Specification for Ring Wave Generator

(报批稿)

发布

实施

河北省市场监督管理局 发布

振铃波模拟器校准规范

Calibration Specification for Ring Wave Generator

JJF (冀) XXXX-XXXX

归口单位：河北省市场监督管理局

主要起草单位：河北省计量监督检测研究院

本规范委托主要起草单位负责解释

本规范主要起草人：

王 平（河北省计量监督检测研究院）

韩旭晓（河北省计量监督检测研究院）

马志寰（河北省计量监督检测研究院）

参加起草人：

曹寅华（河北省计量监督检测研究院）

目 录

引言

1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 术语和定义.....	(1)
4 概述.....	(2)
5 计量特性.....	(3)
5.1 振铃波发生器	(3)
5.2 振铃波发生器接每线额定电流不大于 63A 的交/直流电源端口耦合/去耦 网络	(3)
5.3 振铃波发生器接非屏蔽不对称互连线 CDN	(5)
5.4 振铃波发生器接非屏蔽对称互连线 CDN	(5)
6 校准条件.....	(6)
6.1 环境条件.....	(6)
6.2 校准用的主要设备.....	(6)
7 校准项目和校准方法.....	(7)
7.1 校准项目.....	(7)
7.2 校准方法.....	(8)
8 校准结果	(16)
9 复校时间间隔	(17)
附录 A 校准记录推荐格式.....	(18)
附录 B 校准证书内页推荐格式.....	(25)
附录 C 不确定度评定示例.....	(28)

引 言

本规范是以 JJF1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF1001-2011《通用计量术语及定义》和 JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》为基础性系列规范进行编写的。

在本规范的制定过程中，参考了 GB/T 17626.12-2023《电磁兼容 试验和测量技术 第 12 部分：振铃波抗扰度试验》中的部分内容。

本规范为首次发布。

振铃波模拟器校准规范

1 范围

本校准规范适用于符合 GB/T 17626.12-2023《电磁兼容 试验和测量技术 第 12 部分：振铃波抗扰度试验》中规定的振铃波发生器及耦合/去耦网络的校准，其他规格的振铃波模拟器可参照执行。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 17626.12-2023 电磁兼容 试验和测量技术 第 12 部分：振铃波抗扰度试验

GB/T 4365-2003 电磁兼容术语

JJF 1059-2012 测量不确定度评定与表示

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语和定义

GB/T 4365-2003 界定的以及下列术语适用于本规范。

3.1 耦合网络 coupling network; CN

将能量从一个电路传送到另一个电路的电路。

3.2 耦合/去耦网络 coupling/decoupling network; CDN

耦合网络和去耦网络的组合。

3.3 去耦网络 decoupling network; DN

用于防止施加到 EUT 上的试验电压影响其他非受试装置、设备或系统的电路。

3.4 振铃波 ring wave

阻尼时间常数约为一个周期的衰减振荡。

3.5 上升时间 rise time T_r

脉冲瞬时值首次从脉冲峰值的 10% 上升到 90% 所经历的时间。

3.6 振荡周期 oscillation period; T

第一个峰值后第一个和第三个过零点之间的时间。

3.7 振荡频率 oscillation frequency; f

第一个峰值后第一个和第三个过零点之间的时间的倒数。

3.8 残余振铃波电压 residual ring wave voltage

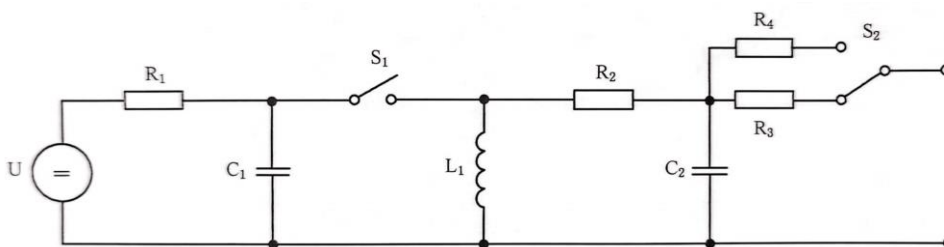
去耦网络电源输入端测得的施加振铃波线路与地之间的振铃波电压，单位为 V。

3.9 非预期振铃波电压 unwanted ring wave voltage

耦合网络输出端测得的未施加振铃波电压线路与地之间的振铃波电压,单位为V。

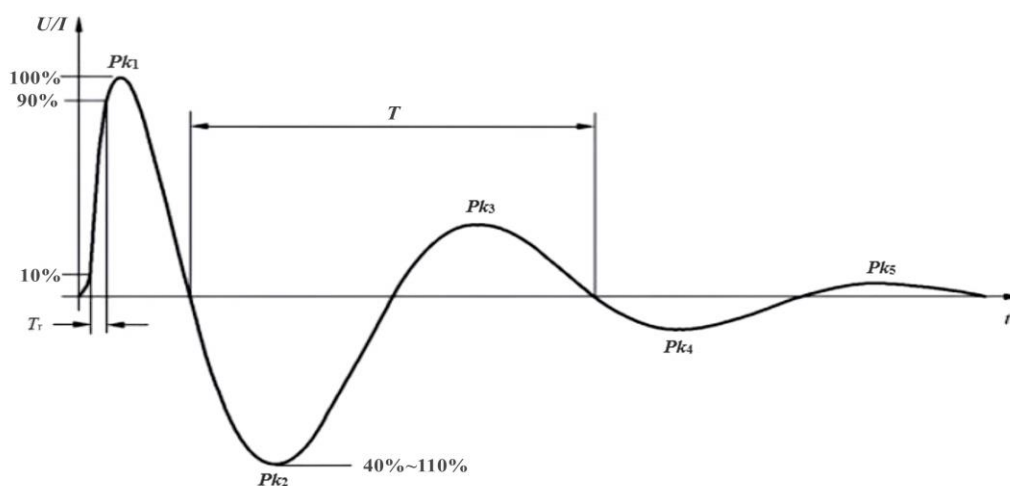
4 概述

振铃波模拟器是指单独的振铃波发生器,或者由振铃波发生器与特定的耦合/去耦网络组成的一组测试设备。振铃波发生器主要由高压源、储能电容、滤波电容、充电电阻、滤波电阻、电阻器、振荡电路线圈、高压开关、输出阻抗选择器组成,它模拟了 $0.5\mu\text{s}$ 上升时间、 100kHz 振荡频率的典型振铃波干扰,广泛用于产品测试。耦合/去耦网络由耦合网络和去耦网络两部分组成,用于交/直流电源端口或互连线的振铃波抗扰度测试,测试交/直流电源端口和屏蔽互连线时振铃波发生器选择电阻器 $R_4(12\Omega)$;测试非屏蔽互连线时振铃波发生器选择电阻器 $R_3(30\Omega)$ 。典型的振铃波发生器原理图如图1所示,振铃波开路电压和短路电流波形如图2所示。



U — 高压源; R_3 — 30Ω 电阻器; R_4 — 12Ω 电阻器; C_1 — 储能电容; C_2 — 滤波电容;
 L_1 — 振荡电路线圈; R_1 — 充电电阻; R_2 — 滤波电阻; S_1 — 高压开关; S_2 — 输出阻抗选择器。

图1 振铃波发生器电路原理图



T_r : 上升时间; T : 振荡周期;

Pk_1 : 开路电压或短路电流第一峰值;

Pk_2 、 Pk_3 、 Pk_4 、 Pk_5 : 开路电压波形第二、第三、第四、第五峰值。

注: 电流波形只规定了 Pk_1 值。

图2 振铃波开路电压和短路电流波形

5 计量特性

5.1 振铃波发生器

5.1.1 开路电压峰值

峰值标称值：(0.25~4) kV；最大允许误差：±10%。

极性：正、负。

5.1.2 开路电压上升时间

标称值：0.5μs；最大允许误差：±30%。

5.1.3 电压振荡频率

标称值：100kHz；最大允许误差：±10%。

5.1.4 衰减

电压衰减应满足以下要求：

$$0.4 \leq |Pk_2/Pk_1| \leq 1.1,$$

$$0.4 \leq |Pk_3/Pk_2| \leq 0.8,$$

$$0.4 \leq |Pk_4/Pk_3| \leq 0.8,$$

从 Pk_5 开始无要求。

5.1.5 短路电流峰值

短路电流峰值与开路电压峰值对应关系如表 1 所示。

最大允许误差：±10%；

极性：正、负。

表 1 短路电流峰值与开路电压峰值对应关系

在发生器输出端的 开路电压峰值设定值	在 12Ω 发生器输出端的短路 电流峰值标称值	在 30Ω 发生器输出端的短路 电流峰值标称值
0.25kV	20.8A	8.3A
0.5kV	41.7A	16.7A
1.0kV	83.3A	33.3A
2.0kV	166.7A	66.7A
4.0kV	333.3A	133.3A

5.1.6 短路电流上升时间

标称值 0.2μs~1μs。

5.2 振铃波发生器接每线额定电流不大于 63A 的交/直流电源端口耦合/去耦网络

5.2.1 开路电压峰值

峰值标称值：(0.25~4) kV；最大允许误差：±10%。

极性：正、负。

5.2.2 开路电压上升时间

标称值：0.5 μ s；最大允许误差： $\pm 30\%$ 。

5.2.3 电压振荡频率

标称值：100kHz；最大允许误差： $\pm 10\%$ 。

5.2.4 衰减

电压衰减应满足以下要求：

$$0.4 \leq |Pk_2/Pk_1| \leq 1.1,$$

$$0.4 \leq |Pk_3/Pk_2| \leq 0.8,$$

$$0.4 \leq |Pk_4/Pk_3| \leq 0.8,$$

从 Pk_5 开始无要求。

5.2.5 残余振铃波电压

残余振铃波电压不大于开路电压峰值最大设定值的 15%或额定电压峰值的 2 倍中较大者。

5.2.6 非预期振铃波电压

非预期振铃波电压不应超过开路电压峰值最大设定值的 15%。

5.2.7 相移

相对于 EUT 交流电压相位角，在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围之内允差 $\pm 10^\circ$ 。

5.2.8 短路电流峰值

短路电流峰值与开路电压峰值对应关系如表 2 所示。

额定电流 $\leq 32A$ 时最大允许误差： $\pm 10\%$ ；

$32A < \text{额定电流} \leq 63A$ 时最大允许误差： $-25\% \sim +10\%$ 。

表 2 振铃波发生器接交/直流电源端口耦合/去耦网络的短路电流峰值与开路电压峰值对应关系

在发生器输出端的开路电压峰值设定值	在耦合/去耦网络 EUT 输出端的短路电流峰值标称值
0.25kV	20.8A
0.5kV	41.7A
1.0kV	83.3A
2.0kV	166.7A
4.0kV	333.3A

5.2.9 短路电流上升时间

标称值：0.2 μ s~1 μ s。

5.3 振铃波发生器接非屏蔽不对称互连线 CDN

5.3.1 开路电压峰值

开路电压峰值：(0.25~4) kV；

最大允许误差：±10%。

极性：正、负。

5.3.2 开路电压上升时间

标称值：0.5μs；

最大允许误差：±30%。

5.3.3 电压振荡周期

标称值：10μs；

最大允许误差：±10%。

5.3.4 电压峰值间的比率

应满足以下要求：

$$0.4 \leq |Pk_2/Pk_1| \leq 1.1,$$

$$0.4 \leq |Pk_3/Pk_2| \leq 0.8,$$

$$0.4 \leq |Pk_4/Pk_3| \leq 0.8,$$

从 Pk_5 开始无要求。

5.3.5 短路电流峰值

计量特性同表 1 中 30Ω 发生器输出端的短路电流峰值标称值。

5.3.6 短路电流上升时间

标称值：0.2μs ~ 1μs。

5.4 振铃波发生器接非屏蔽对称互连线 CDN

5.4.1 开路电压峰值

开路电压峰值：(0.25~4) kV；

最大允许误差为±10%。

极性：正、负。

5.4.2 开路电压上升时间

开路电压上升时间标称值为 0.5μs；

最大允许误差为±30%。

5.4.3 电压振荡周期

电压振荡周期标称值为 10μs；

最大允许误差为 $\pm 10\%$ 。

5.4.4 电压峰值间的比率

应满足以下要求：

$$0.4 \leq |Pk_2/Pk_1| \leq 1.1,$$

$$0.4 \leq |Pk_3/Pk_2| \leq 0.8,$$

$$0.4 \leq |Pk_4/Pk_3| \leq 0.8,$$

从 Pk_5 开始无要求。

5.4.5 短路电流峰值

计量特性同表 1 中 30Ω 发生器输出端的短路电流峰值标称值。

5.4.6 短路电流上升时间

短路电流上升时间标称值 $0.2\mu\text{s} \sim 1\mu\text{s}$ 。

6 校准条件

6.1 环境条件

环境温度： $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。

相对湿度： $20\% \sim 80\%$ 。

电源要求： $(220 \pm 11)\text{V}$ ， $(50 \pm 1)\text{Hz}$ 。

周围应无影响正常校准工作的电磁干扰和机械震动。

6.2 校准用的主要设备

6.2.1 数字存储示波器

带宽不小于 100MHz ；

幅度测量最大允许误差： $\pm 2\%$ ；

时基最大允许误差： $\pm 1 \times 10^{-4}$ 。

6.2.2 高压差分探头

衰减比不小于 $100:1$ ，最大允许误差： $\pm 2\%$ ；

带宽不小于 20MHz ；

可承受脉冲电压峰值：不小于 4kV 。

6.2.3 电流探头

电流探头转换系数最大允许误差： $\pm 2\%$ ；

带宽不小于 20MHz ；

脉冲电流峰值：不小于 400A 。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

如表 3 所示

表 3 校准项目一览表

序号	校准项目	
1	振铃波发生器	开路电压峰值
		开路电压上升时间
		电压振荡频率
		衰减
		短路电流峰值
		短路电流上升时间
2	振铃波发生器接每线额定电流不大于 63A 的交/直流电源端口耦合/去耦网络	开路电压峰值
		开路电压上升时间
		电压振荡频率
		衰减
		残余振铃波电压
		非预期振铃波电压
		相移
		短路电流峰值
短路电流上升时间		
3	振铃波发生器接非屏蔽不对称互连线 CDN	开路电压峰值
		开路电压上升时间
		电压振荡周期
		电压峰值间的比率
		短路电流峰值
		短路电流上升时间
4	振铃波发生器接非屏蔽对称互连线 CDN	开路电压峰值
		开路电压上升时间
		电压振荡周期
		电压峰值间的比率
		短路电流峰值
		短路电流上升时间

7.2 校准方法

7.2.1 外观检查

被校振铃波发生器的开关、旋钮、按键应能够正常工作，不应有影响电气性能的机械损伤；被校振铃波发生器应设有接地端子，并标明接地符号，接地线应完好无损。按说明书要求进行预热。将检查结果记录在附录 A.1 中。

7.2.2 振铃波发生器的校准

7.2.2.1 开路电压峰值

设备连接如图 3 所示。按说明书要求进行预热。设置振铃波发生器为高压端口输出模式，数字示波器输入阻抗设置为 $1\text{M}\Omega$ ，调节数字示波器使脉冲波形的第一峰完整显示于屏幕中央。分别在输出阻抗设置为 12Ω 和 30Ω 时测量不同设定电压下的开路电压峰值，建议按试验等级选择校准点，将结果记录在附录 A.2.1 中。

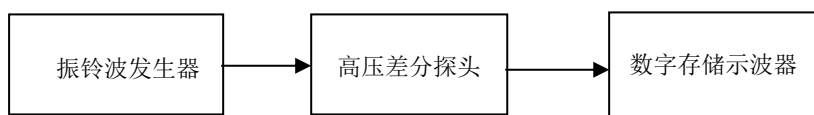


图 3 发生器输出端口开路电压校准连接示意图

7.2.2.2 开路电压上升时间

设备连接如图 3 所示。设置振铃波发生器为高压端口输出模式，数字示波器输入阻抗设置为 $1\text{M}\Omega$ ，调节数字示波器使脉冲波形第一峰的上升沿完整显示于屏幕中央。以第一峰值 10%~90% 的间隔时间作为开路电压上升时间，分别在输出阻抗设置为 12Ω 和 30Ω 时测量不同设定电压下的上升时间，建议按试验等级选择校准点，将结果记录在附录 A.2.2 中。

7.2.2.3 电压振荡频率

设备连接如图 3 所示。设置振铃波发生器为高压端口输出模式，数字示波器输入阻抗设置为 $1\text{M}\Omega$ ，调节数字示波器使脉冲波形的第一峰、第二峰、第三峰和第四峰完整显示于屏幕中央，测量振铃波波形初始峰值后第一和第三个零点之间的时间间隔，求倒数得到振荡频率。分别在输出阻抗设置为 12Ω 和 30Ω 时测量不同设定电压下的开路电压振荡频率，建议按试验等级选择校准点，将结果记录在附录 A.2.3 中。

7.2.2.4 衰减

设备连接如图 3 所示。设置振铃波发生器为高压端口输出模式，数字示波器输入阻抗设置为 $1\text{M}\Omega$ ，调节数字示波器使脉冲波形的前 5 个峰完整显示于屏幕中央，分

别在输出阻抗设置为 12Ω 和 30Ω 时测量不同设定电压下的第一、第二、第三、第四电压峰值，建议按试验等级选择校准点，将结果记录在附录 A.2.4 中。

7.2.2.5 短路电流峰值

设备连接如图 4 所示。将振铃波发生器输出端短接，短路线穿过电流探头的感应端，短路线电阻应小于 0.1Ω 。设置振铃波发生器为高压端口输出模式，根据所选择的电流探头特性选择合适的示波器的输入阻抗 ($50\Omega / 1M\Omega$)，并根据电流探头的电压/电流转换系数以及示波器的测量范围来确定是否需要接入适当的衰减器以保护示波器。调节数字示波器使脉冲波形的第一峰完整显示于屏幕中央，分别在输出阻抗设置为 12Ω 和 30Ω 时测量不同设定电压下的短路电流峰值，建议按试验等级选择校准点，将结果记录在附录 A.2.5 中。

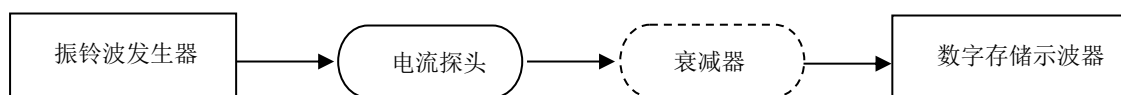


图 4 发生器短路电流校准连接示意图

7.2.2.6 短路电流上升时间

设备连接如图 4 所示。将振铃波发生器输出端短接，短路线穿过电流探头的感应端，短路线电阻应小于 0.1Ω 。设置振铃波发生器为高压端口输出模式，根据所选择的电流探头特性选择合适的示波器的输入阻抗 ($50\Omega / 1M\Omega$)，并根据电流探头的电压/电流转换系数以及示波器的测量范围来确定是否需要接入适当的衰减器以保护示波器。调节数字示波器使脉冲波形的第一峰完整显示于屏幕中央，以第一峰值 $10\% \sim 90\%$ 的间隔时间作为短路电流上升时间，分别在输出阻抗设置为 12Ω 和 30Ω 时测量不同设定电压下的短路电流上升时间，建议按试验等级选择校准点，将结果记录在附录 A.2.6 中。

7.2.3 振铃波发生器接每线额定电流不大于 63A 的交/直流电源端口耦合/去耦网络的校准

7.2.3.1 开路电压峰值

设备连接如图 5 所示。耦合/去耦网络电源输入端开路，高压差分探头与施加振铃波线路的耦合输出端相连。设置振铃波发生器为电源线耦合输出模式，数字示波器输入阻抗设置为 $1M\Omega$ ，调节数字示波器使脉冲波形的第一峰完整显示于屏幕中央。在输出阻抗设置为 12Ω 时测量不同设定电压下的开路电压峰值。改变电源线耦合输出线

路，重复上述过程，测量电源线耦合输出每一种耦合线路的开路电压峰值，建议按试验等级选择校准点，将结果记录在附录 A.3.1 中。

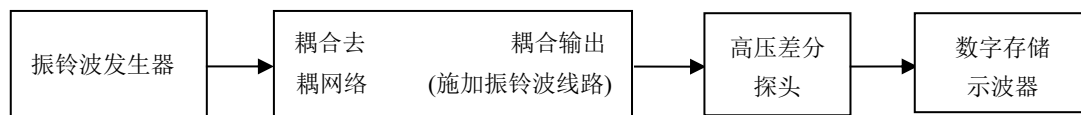


图 5 振铃波发生器接交/直流电源端口耦合/去耦网络开路电压校准接线示意图

7.2.3.2 开路电压上升时间

设备连接如图 5 所示。耦合/去耦网络电源输入端开路，高压差分探头与施加振铃波线路的耦合输出端相连。设置振铃波发生器为电源线耦合输出模式，数字示波器输入阻抗设置为 $1\text{M}\Omega$ ，调节数字示波器使脉冲波形的第一峰完整显示于屏幕中央。以第一峰值 10%~90% 的间隔时间作为开路电压上升时间，在输出阻抗设置为 12Ω 时测量不同设定电压下的上升时间。改变电源线耦合输出线路，重复上述过程，测量电源线耦合输出每一种耦合线路的开路电压上升时间，建议按试验等级选择校准点，将结果记录在附录 A.3.2 中。

7.2.3.3 电压振荡频率

设备连接如图 5 所示。耦合/去耦网络电源输入端开路，高压差分探头与施加振铃波线路的耦合输出端相连。设置振铃波发生器为电源线耦合输出模式，数字示波器输入阻抗设置为 $1\text{M}\Omega$ ，调节数字示波器使脉冲波形的第一峰、第二峰、第三峰和第四峰完整显示于屏幕中央，测量振铃波波形初始峰值后第一和第三个零点之间的时间间隔，求倒数得到振荡频率。在输出阻抗设置为 12Ω 时测量不同设定电压下的开路电压振荡频率，改变电源线耦合输出线路，重复上述过程，测量电源线耦合输出每一种耦合线路的开路电压振荡频率，建议按试验等级选择校准点，将结果记录在附录 A.3.3 中。

7.2.3.4 衰减

设备连接如图 5 所示。耦合/去耦网络电源输入端开路，高压差分探头与施加振铃波线路的耦合输出端相连。设置振铃波发生器为电源线耦合输出模式，数字示波器输入阻抗设置为 $1\text{M}\Omega$ ，调节数字示波器使脉冲波形的前 5 个峰完整显示于屏幕中央，在输出阻抗设置为 12Ω 时测量不同设定电压下的第一、第二、第三、第四电压峰值，改变电源线耦合输出线路，重复上述过程，测量电源线耦合输出每一种耦合线路的第一、第二、第三、第四电压峰值，建议按试验等级选择校准点，将结果记录在附录 A.3.4 中。

7.2.3.5 残余振铃波电压

设备连接如图 6 所示。耦合/去耦网络电源输入端开路，高压差分探头测量耦合线路与去耦网络电源输入端口的地之间的电压。设置振铃波发生器为电源线耦合输出模式，数字示波器输入阻抗设置为 $1M\Omega$ ，调节数字示波器使脉冲波形的第一峰完整显示于屏幕中央。在输出阻抗设置为 12Ω 时测量最大设定电压下的残余振铃波电压。改变电源线耦合输出线路，重复上述过程，测量电源线耦合输出每一种耦合线路的残余振铃波电压，记录在附录 A.3.5。

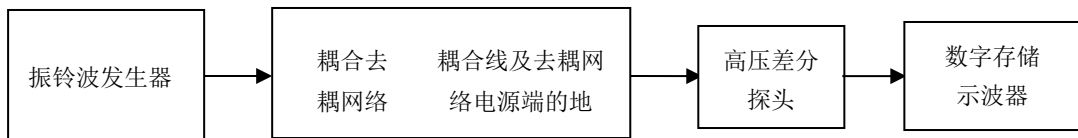


图 6 振铃波发生器接交/直流电源端口耦合/去耦网络残余振铃波电压校准接线示意图

7.2.3.6 非预期振铃波电压

设备连接如图 7 所示。耦合/去耦网络电源输入端口开路，高压差分探头与耦合输出端口其中一条未施加振铃波线路及地线相连。设置振铃波发生器为电源线耦合输出模式，调节数字存储示波器使一个完整的波形显示于屏幕中央。在输出阻抗设置为 12Ω 时测量最大设定电压下的非预期振铃波电压。改变测量线路，重复上述过程，测量电源线耦合输出每一种耦合线路的非预期振铃波电压，记录在附录 A.3.6 中。

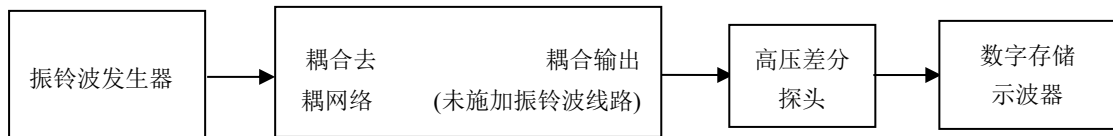


图 7 振铃波发生器接交/直流电源端口耦合/去耦网络非预期振铃波电压校准接线示意图

7.2.3.7 相移

设备连接如图 8 所示。耦合/去耦网络电源输入端口与市电相连，高压差分探头与耦合输出施加振铃波线路相连。

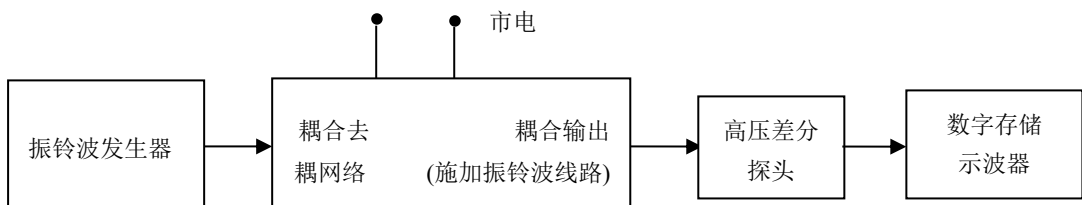


图 8 振铃波发生器接耦合/去耦网络相位校准接线示意图

设置振铃波发生器为电源线 L(L1、L2、L3)-N 耦合输出模式，电压为 $1kV$ ，调节数字存储示波器使一个完整周期的市电波形及振铃波信号显示于屏幕中央，如图 9 所

示。在输出阻抗设置为 12Ω 时测量振铃波信号与零相位参考点之间的时间间隔，按公式 (1) 计算相位改变振铃波发生器相位设定值，重复上述过程，将校准结果记录在附录 A.3.7 中。

$$\theta = \frac{\Delta t}{t_0} \times 360 \quad (1)$$

式中：

θ —— 相位角实测值，(°)；

Δt —— 时间间隔实测值，ms；

t_0 —— 输出电压信号周期，ms。

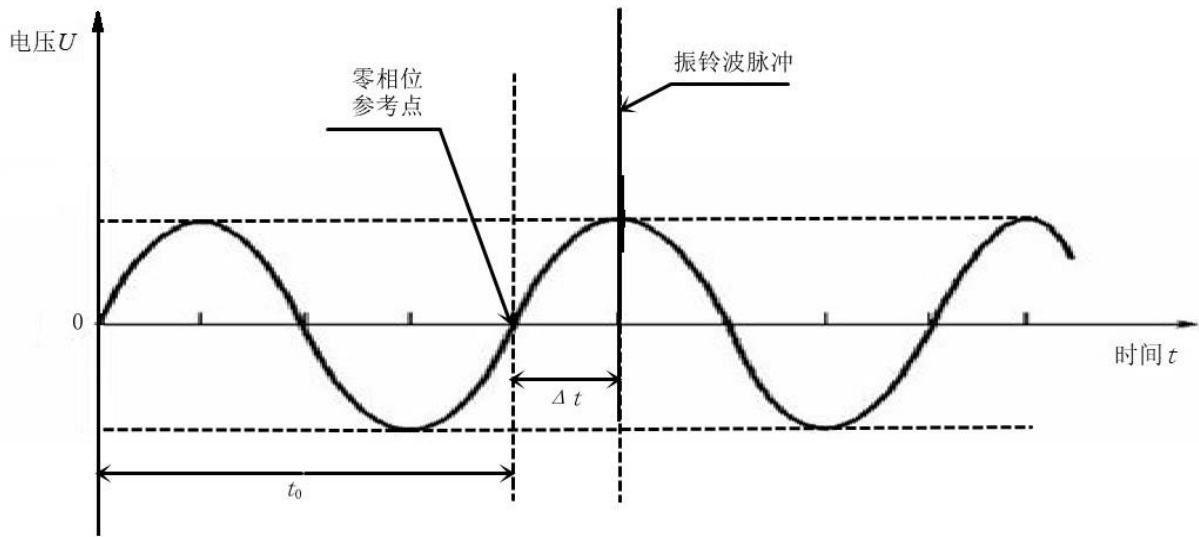


图 9 振铃波发生器接耦合/去耦网络相移校准波形示意图

7.2.3.8 短路电流峰值

设备连接如图 10 所示。耦合/去耦网络电源输入端口开路，将耦合输出施加振铃波线路短接，短路线 (尽可能短，电阻应小于 0.1Ω) 穿过电流探头的感应端。设置振铃波发生器为电源线耦合输出模式，根据所选择的电流探头特性选择合适的示波器的输入阻抗 ($50\Omega / 1M\Omega$)，并根据电流探头的电压/电流转换系数以及示波器的测量范围来确定是否需要接入适当的衰减器以保护示波器。调节数字示波器使脉冲波形的第一峰完整显示于屏幕中央。在输出阻抗设置为 12Ω 时测量不同开路电压设定值下的短路电流峰值。改变电源线耦合输出线路，重复上述过程，测量电源线耦合输出每一种耦合线路的短路电流峰值，记录在附录 A.3.8 中。

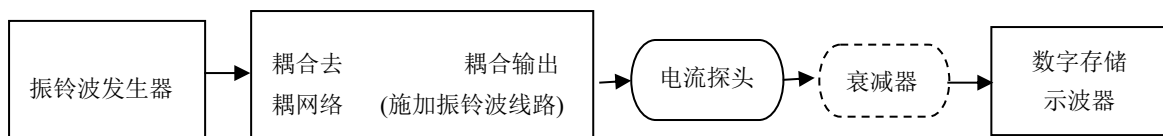


图 10 振铃波发生器接耦合/去耦网络短路电流校准连接示意图

7.2.3.9 短路电流上升时间

设备连接如图 10 所示。耦合/去耦网络电源输入端口开路，将耦合输出施加振铃波线路短接，短路线 (尽可能短，电阻应小于 0.1Ω) 穿过电流探头的感应端。设置振铃波发生器为电源线耦合输出模式，根据所选择的电流探头特性选择合适的示波器的输入阻抗 ($50\Omega / 1M\Omega$)，并根据电流探头的电压/电流转换系数以及示波器的测量范围来确定是否需要接入适当的衰减器以保护示波器。调节数字示波器使脉冲波形的第一峰完整显示于屏幕中央，以第一峰值 10%~90%的间隔时间作为短路电流上升时间，在输出阻抗设置为 12Ω 时测量不同设定电压下的短路电流上升时间，改变电源线耦合输出线路，重复上述过程，测量电源线耦合输出每一种耦合线路的短路电流上升时间，将结果记录在附录 A.3.9 中。

7.2.4 振铃波发生器接非屏蔽不对称互连线 CDN 的校准

7.2.4.1 开路电压峰值

设备连接如图 5 所示。耦合/去耦网络辅助设备端口所有线路对地短接，高压差分探头与施加振铃波线路的耦合输出端相连。设置振铃波发生器为高压端口输出模式，输出阻抗为 30Ω ，数字示波器输入阻抗设置为 $1M\Omega$ ，调节数字示波器使脉冲波形的第一峰完整显示于屏幕中央，测量 $\pm 4kV$ 峰值电压下的开路电压峰值。改变耦合输出线路，重复上述过程，测量每一种耦合线路的开路电压峰值，记录在附录 A.4.1 中。

注：宜在最大额定脉冲电压下校准 CDN，若 CDN 的最大额定脉冲电压是其他值，则校准应在此最大额定脉冲电压下进行。

7.2.4.2 开路电压上升时间

设备连接如图 5 所示。耦合/去耦网络辅助设备端口所有线路对地短接，高压差分探头与施加振铃波线路的耦合输出端相连。设置振铃波发生器为高压端口输出模式，输出阻抗为 30Ω ，数字示波器输入阻抗设置为 $1M\Omega$ ，调节数字示波器使脉冲波形的第一峰完整显示于屏幕中央。以第一峰值 10%~90%的间隔时间作为开路电压上升时间，测量 7.2.4.1 中设置的峰值电压下的开路电压上升时间。改变耦合输出线路，重复上述过程，测量每一种耦合线路的开路电压上升时间，记录在附录 A.4.2 中。

7.2.4.3 电压振荡周期

设备连接如图 5 所示。耦合/去耦网络辅助设备端口所有线路对地短接，高压差分探头与施加振铃波线路的耦合输出端相连。设置振铃波发生器为高压端口输出模式，输出阻抗为 30Ω 。数字示波器输入阻抗设置为 $1M\Omega$ ，调节数字示波器使脉冲波形的

第一峰、第二峰、第三峰和第四峰完整显示于屏幕中央，测量振铃波波形初始峰值后第一和第三个零点之间的时间间隔即振荡周期，测量 7.2.4.1 中设置的峰值电压下的电压振荡周期。改变耦合输出线路，重复上述过程，测量每一种耦合线路的电压振荡周期，将结果记录在附录 A.4.3 中。

7.2.4.4 电压峰值间的比率

设备连接如图 5 所示。耦合/去耦网络辅助设备端口所有线路对地短接，高压差分探头与施加振铃波线路的耦合输出端相连。设置振铃波发生器为高压端口输出模式，输出阻抗为 30Ω ，数字示波器输入阻抗设置为 $1M\Omega$ ，调节数字示波器使脉冲波形的 5 个峰完整显示于屏幕中央，读取波形的第一、第二、第三、第四电压峰值，计算电压峰值间的比率。测量 7.2.4.1 中设置的峰值电压下的电压峰值间的比率。改变耦合输出线路，重复上述过程，测量每一种耦合线路的电压峰值间的比率，将结果记录在附录 A.4.4 中。

7.2.4.5 短路电流峰值

设备连接如图 9 所示。耦合/去耦网络辅助设备端口所有线路对地短接，将耦合输出端口施加振铃波线路短接，短路线(电阻应小于 0.1Ω) 穿过电流探头的感应端。设置振铃波发生器为高压端口输出模式，输出阻抗为 30Ω ，根据所选择的电流探头特性选择合适的示波器的输入阻抗 ($50\Omega / 1M\Omega$)，并根据电流探头的电压/电流转换系数以及示波器的测量范围来确定是否需要接入适当的衰减器以保护示波器。调节数字示波器使脉冲波形的第一峰完整显示于屏幕中央，测量 7.2.4.1 中设置的峰值电压下的短路电流峰值。改变耦合输出线路，重复上述过程，测量每一种合耦合线路的短路电流峰值，将结果记录在附录 A.4.5 中。

7.2.4.6 短路电流上升时间

设备连接如图 9 所示。耦合/去耦网络辅助设备端口所有线路对地短接，将耦合输出端口施加振铃波线路短接，短路线(电阻应小于 0.1Ω) 穿过电流探头的感应端。设置振铃波发生器为高压端口输出模式，输出阻抗为 30Ω ，根据所选择的电流探头特性选择合适的示波器的输入阻抗 ($50\Omega / 1M\Omega$)，并根据电流探头的电压/电流转换系数以及示波器的测量范围来确定是否需要接入适当的衰减器以保护示波器。调节数字示波器使脉冲波形的第一峰完整显示于屏幕中央，以第一峰值 10%~90%的间隔时间作为短路电流上升时间，测量 7.2.4.1 中设置的峰值电压下的短路电流上升时间。改变耦合输出线路，重复上述过程，测量每一种耦合线路的短路电流上升时间，将结果记录在附录 A.4.6 中。

7.2.5 振铃波发生器接非屏蔽对称互连线 CDN 的校准

7.2.5.1 开路电压峰值

设备连接如图 5 所示。耦合/去耦网络辅助设备端口所有线路对地短接，施加振铃波线路的耦合/去耦网络耦合输出端 EUT 侧所有端口之间用线短接，高压差分探头接 EUT 侧端口和地。设置振铃波发生器为高压端口输出模式，数字示波器输入阻抗设置为 $1\text{M}\Omega$ ，调节数字示波器使脉冲波形的第一峰完整显示于屏幕中央。在输出阻抗设置为 30Ω 时测量 $\pm 4\text{kV}$ 电压下的开路电压峰值。记录在附录 A.5.1 中

注：宜在最大额定脉冲电压下校准 CDN，若 CDN 的最大额定脉冲电压是其他值，则校准应在此最大额定脉冲电压下进行。

7.2.5.2 开路电压上升时间

设备连接如图 5 所示。耦合/去耦网络辅助设备端口所有线路对地短接，施加振铃波线路的耦合/去耦网络 EUT 侧所有端口之间用线短接，高压差分探头接 EUT 侧端口和地。设置振铃波发生器为高压端口输出模式，数字示波器输入阻抗设置为 $1\text{M}\Omega$ ，调节数字示波器使脉冲波形的第一峰完整显示于屏幕中央。以第一峰值 10%~90% 的间隔时间作为开路电压上升时间，在输出阻抗设置为 30Ω 时测量 7.2.5.1 中设置的电压下的开路电压上升时间。记录在附录 A.5.2 中

7.2.5.3 电压振荡周期

设备连接如图 5 所示。耦合/去耦网络辅助设备端口所有线路对地短接，施加振铃波线路的耦合/去耦网络 EUT 侧所有端口之间用线短接，高压差分探头接 EUT 侧端口和地。设置振铃波发生器为高压端口输出模式，数字示波器输入阻抗设置为 $1\text{M}\Omega$ ，调节数字示波器使脉冲波形的第一峰、第二峰、第三峰和第四峰完整显示于屏幕中央，测量振铃波波形初始峰值后第一和第三个零点之间的时间间隔即振荡周期，在输出阻抗设置为 30Ω 时测量 7.2.5.1 中设置的电压下的电压振荡周期。将结果记录在附录 A.5.3 中。

7.2.5.4 电压峰值间的比率

设备连接如图 5 所示。耦合/去耦网络辅助设备端口所有线路对地短接，施加振铃波线路的耦合/去耦网络 EUT 侧所有端口之间用线短接，高压差分探头接 EUT 侧端口和地。设置振铃波发生器为高压端口输出模式，数字示波器输入阻抗设置为 $1\text{M}\Omega$ ，调节数字示波器使脉冲波形的前 5 个峰完整显示于屏幕中央，读取波形的第一、第二、第三、第四电压峰值，计算电压峰值间的比率。在输出阻抗设置为 30Ω 时测量 7.2.5.1 中设置的电压下的电压峰值间的比率。将结果记录在附录 A.5.4 中。

7.2.5.5 短路电流峰值

设备连接如图 9 所示。耦合/去耦网络辅助设备端口所有线路对地短接，施加振铃波线路的耦合/去耦网络 EUT 侧所有端口之间短接之后再用短接线短接到地，短路线 (电阻应小于 0.1Ω) 穿过电流探头的感应端。设置振铃波发生器为高压端口输出模式，根据所选择的电流探头特性选择合适的示波器的输入阻抗 ($50\Omega / 1M\Omega$)，并根据电流探头的电压/电流转换系数以及示波器的测量范围来确定是否需要接入适当的衰减器以保护示波器。调节数字示波器使脉冲波形的第一峰完整显示于屏幕中央，在输出阻抗设置为 30Ω 时测量 7.2.5.1 中设置的电压下的短路电流峰值。将结果记录在附录 A.5.5 中。

7.2.5.6 短路电流上升时间

设备连接如图 9 所示。耦合/去耦网络辅助设备端口所有线路对地短接，施加振铃波线路的耦合/去耦网络 EUT 侧所有端口之间短接之后再用短接线短接到地，短路线 (电阻应小于 0.1Ω) 穿过电流探头的感应端。设置振铃波发生器为高压端口输出模式，根据所选择的电流探头特性选择合适的示波器的输入阻抗 ($50\Omega / 1M\Omega$)，并根据电流探头的电压/电流转换系数以及示波器的测量范围来确定是否需要接入适当的衰减器以保护示波器。调节数字示波器使脉冲波形的第一峰完整显示于屏幕中央，以第一峰值 10%~90% 的间隔时间作为短路电流上升时间，在输出阻抗设置为 30Ω 时测量 7.2.5.1 中设置的电压下的短路电流上升时间。将结果记录在附录 A.5.6 中。

8 校准结果

振铃波发生器校准后，出具校准证书，校准证书至少应包含以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性和应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；

- k) 校准环境的描述;
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明;
- m) 对校准规范偏离的说明;
- n) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识;
- o) 校准结果仅对被校对象有效的说明;
- p) 未经实验室书面批准, 不得部分复制证书的声明。

9 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸因素所决定的, 因此, 送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔, 推荐为 1 年。

附录 A：校准记录推荐格式

A.1 外观及工作正常性检查

A.2 振铃波发生器

A.2.1 开路电压峰值

仪器设定		数字示波器电压 测量值/V	高压差分探 头衰减比	开路电压峰值 实测值/V	不确定度 ($k=2$)
输出阻抗	电压设定值/V				
12 Ω					
30 Ω					

A.2.2 开路电压上升时间

仪器设定		上升时间标称值/ μs ($1\pm 30\%$)	开路电压上升时间实 测值/ μs	不确定度 ($k=2$)
输出阻抗	电压设定值/V			
12 Ω		0.5		
30 Ω		0.5		

A.2.3 开路电压振荡频率

仪器设定		电压振荡频率标称 值/kHz ($1\pm 10\%$)	电压振荡频率实测 值/kHz	不确定度 ($k=2$)
输出阻抗	电压设定值/V			
12 Ω		100		
30 Ω		100		

A.2.4 电压衰减

仪器设定		数字示波器第一峰值电压测量值/V	数字示波器第二峰值电压测量值/V	$ Pk_2/Pk_1 $ [0.4,1.1]	数字示波器第三峰值电压测量值/V	$ Pk_3/Pk_2 $ [0.4,0.8]	数字示波器第四峰值电压测量值/V	$ Pk_4/Pk_3 $ [0.4,0.8]	不确定度 ($k=2$)
输出阻抗	电压设定值/V								
12Ω									
30Ω									

A.2.5 短路电流峰值

仪器设定		电流峰值标称值/A ($1 \pm 10\%$)	数字示波器电压测量值/V	电流探头转换系数	短路电流峰值实测值/A	不确定度 ($k=2$)
输出阻抗	电压设定值/V					
12Ω						
30Ω						

A.2.6 短路电流上升时间

仪器设定		上升时间标称值/ μs	短路电流上升时间实测值/ μs	不确定度 ($k=2$)
输出阻抗	电压设定值/V			
12Ω		0.2~1.0		
30Ω		0.2~1.0		

A.3 振铃波发生器接每线额定电流不大于 63A 的交/直流电源端口耦合/去耦网络

A.3.1 开路电压峰值

仪器设定			数字示波器 电压测量值 /V	高压差分 探头衰减 比	开路电压峰 值实测值 /V	不确定度 ($k=2$)
输出阻抗	耦合线路	电压设定值/V				
12Ω						

A.3.2 开路电压上升时间

仪器设定			上升时间标称值 /μs (1±30%)	开路电压上升时间实 测值/μs	不确定度 ($k=2$)
输出阻抗	耦合线路	电压设定值/V			
12Ω			0.5		

A.3.3 开路电压振荡频率

仪器设定			电压振荡频率标称 值/kHz (1±10%)	电压振荡频率实测值 /kHz	不确定度 ($k=2$)
输出阻抗	耦合线路	电压设定值/V			
12Ω			100		

A.3.4 电压衰减

仪器设定			数字示 波器第 一峰值 电压测 量值/V	数字示 波器第 二峰值 电压测 量值/V	$ Pk_2/Pk_1 $ [0.4,1.1]	数字示 波器第 三峰值 电压测 量值/V	$ Pk_3/Pk_2 $ [0.4,0.8]	数字示 波器第 四峰值 电压测 量值/V	$ Pk_4/Pk_3 $ [0.4,0.8]	不确定 度 ($k=2$)
输出 阻抗	耦合 线路	电压设 定值/V								
12Ω										

A.3.5 残余振铃波电压

仪器设定			数字示波器 电压测量值 /V	高压差分探 头衰减比	残余振铃波 电压峰值实 测值/V	不确定度 ($k=2$)
输出阻抗	耦合线路	电压设定值/V				
12 Ω	-PE					

A.3.6 非预期振铃波电压

仪器设定				数字示波器 电压测量值 /V	高压差分探 头衰减比	非预期振铃 波电压峰值 实测值/V	不确定度 ($k=2$)
输出 阻抗	耦合 线路	测量 线路	电压设定值/V				
12 Ω							

A.3.7 相移

仪器设定			相位设定值 / $^{\circ}$ ($1\pm 10\%$)	时间间隔测 量值/ms	电压信号周 期/ms	相位实测值 / $^{\circ}$	不确定度 ($k=2$)
输出 阻抗	耦合 线路	电压设定 值/V					
12 Ω			0		20		
			90				
			180				
			270				

A.3.8 短路电流峰值

仪器设定			数字示波器 电压测量值 /V	电流探头转 换系数	短路电流峰 值实测值 /A	不确定度 ($k=2$)
输出阻抗	耦合线路	电压设定值/V				
12 Ω						

A.3.9 短路电流上升时间

仪器设定			上升时间标称值 / μs	短路电流上升时间 实测值/ μs	不确定度 ($k=2$)
输出阻抗	耦合线路	电压设定值/V			
12 Ω			0.2~1.0		

A.4 振铃波发生器接非屏蔽不对称互连线 CDNA.4.1 开路电压峰值

仪器设定			数字示波器 电压测量值 /V	高压差分 探头衰减 比	开路电压峰 值实测值 /V	不确定度 ($k=2$)
输出阻抗	耦合线路	电压设定值/V				
30 Ω						

A.4.2 开路电压上升时间

仪器设定			上升时间标称值 / μs ($1\pm 30\%$)	开路电压上升时间实 测值/ μs	不确定度 ($k=2$)
输出阻抗	耦合线路	电压设定值/V			
30 Ω			0.5		

A.4.3 电压振荡周期

仪器设定			电压振荡周期标称 值/ μs ($1\pm 10\%$)	电压振荡周期实测值 / μs	不确定度 ($k=2$)
输出阻抗	耦合线路	电压设定值/V			
30 Ω			10		

A.4.4 电压峰值间的比率

仪器设定			数字示 波器第 一峰值 电压测 量值/V	数字示 波器第 二峰值 电压测 量值/V	$ Pk_2/Pk_1 $ [0.4,1.1]	数字示 波器第 三峰值 电压测 量值/V	$ Pk_3/Pk_2 $ [0.4,0.8]	数字示 波器第 四峰值 电压测 量值/V	$ Pk_4/Pk_3 $ [0.4,0.8]	不确定 度 ($k=2$)
输出 阻抗	耦合 线路	电压设 定值/V								
30 Ω										

A.4.5 短路电流峰值

仪器设定			数字示波器 电压测量值 /V	电流探头转 换系数	短路电流峰 值实测值 /A	不确定度 (k=2)
输出阻抗	耦合线路	电压设定值/V				
30Ω						

A.4.6 短路电流上升时间

仪器设定			上升时间标称值 /μs	短路电流上升时间 实测值/μs	不确定度 (k=2)
输出阻抗	耦合线路	电压设定值/V			
30Ω			0.2~1.0		

A.5 振铃波发生器接非屏蔽对称互连线 CDN

A.5.1 开路电压峰值

仪器设定			数字示波器 电压测量值 /V	高压差分 探头衰减 比	开路电压峰 值实测值 /V	不确定度 (k=2)
输出阻抗	耦合线路	电压设定值/V				
30Ω	所有线 -PE					

A.5.2 开路电压上升时间

仪器设定			上升时间标称值 /μs (1±30%)	开路电压上升时间实 测值/μs	不确定度 (k=2)
输出阻抗	耦合线路	电压设定值/V			
30Ω	所有线 -PE		0.5		

A.5.3 电压振荡周期

仪器设定			电压振荡周期标称 值/μs (1±10%)	电压振荡周期实测值 /μs	不确定度 (k=2)
输出阻抗	耦合线路	电压设定值/V			
30Ω	10		100		

A.5.4 电压峰间的比率

仪器设定			数字示 波器第 一峰值 电压测 量值/V	数字示 波器第 二峰值 电压测 量值/V	$ Pk_2/Pk_1 $ [0.4,1.1]	数字示 波器第 三峰值 电压测 量值/V	$ Pk_3/Pk_2 $ [0.4,0.8]	数字示 波器第 四峰值 电压测 量值/V	$ Pk_4/Pk_3 $ [0.4,0.8]	不确定 度 (k=2)
输出 阻抗	耦合 线路	电压设 定值/V								
30Ω	所有 线 -PE									

A.5.5 短路电流峰值

仪器设定			数字示波器 电压测量值 /V	电流探头转 换系数	短路电流峰 值实测值 /A	不确定度 ($k=2$)
输出阻抗	耦合线路	电压设定值/V				
30 Ω	所有线 -PE					

A.5.6 短路电流上升时间

仪器设定			上升时间标称值 / μs	短路电流上升时间 实测值/ μs	不确定度 ($k=2$)
输出阻抗	耦合线路	电压设定值/V			
30 Ω	所有线 -PE		0.2~1.0		

附录 B：校准证书内页推荐格式

B.1 外观及工作正常性检查

B.2 振铃波发生器

B.2.1 开路电压

输出阻抗	电压设定值 U/V	电压峰值/ V $U(1\pm 10\%)$	上升时间/ μs $0.5(1\pm 30\%)$	振荡频率/ kHz $100(1\pm 10\%)$	电压衰减		
					$ Pk_2/Pk_1 $ [0.4~1.1]	$ Pk_3/Pk_2 $ [0.4~0.8]	$ Pk_4/Pk_3 $ [0.4~0.8]
12 Ω							
30 Ω							

校准结果的不确定度：

B.2.2 短路电流

输出阻抗	电压设定值/ V	电流峰值标称值 I / A	电流峰值实测值/ A $I(1\pm 10\%)$	上升时间/ μs (0.2~1.0)
12 Ω				
30 Ω				

校准结果的不确定度：

B.3 振铃波发生器接每线额定电流不大于 63A 的交/直流电源端口耦合/去耦网络

B.3.1 开路电压

耦合线路	电压设定值 U/V	电压峰值/ V $U(1\pm 10\%)$	上升时间/ μs $0.5(1\pm 30\%)$	振荡频率/ kHz $100(1\pm 10\%)$	电压衰减		
					$ Pk_2/Pk_1 $ [0.4~1.1]	$ Pk_3/Pk_2 $ [0.4~0.8]	$ Pk_4/Pk_3 $ [0.4~0.8]

校准结果的不确定度描述:

B.3.2 残余振铃波电压

耦合线路	电压设定值/V	残余阻尼振荡电压/V

校准结果的不确定度:

B.3.3 非预期振铃波电压

耦合线路	测量线路	电压设定值/V	残余阻尼振荡电压/V

校准结果的不确定度:

B.3.4 短路电流

耦合线路	电压设定值/V	电流峰值标称值 I /A	电流峰值实测值/A $I(1 \pm 10\%)$	上升时间/ μs (0.2~1.0)

校准结果的不确定度描述:

B.4 振铃波发生器接非屏蔽不对称互连线 CDN

B.4.1 开路电压

耦合线路	电压设定值 U /V	电压峰值 /V $U(1 \pm 10\%)$	上升时间/ μs $0.5(1 \pm 30\%)$	振荡周期/ μs $10(1 \pm 10\%)$	电压峰值间的比率		
					$ Pk_2/Pk_1 $ [0.4~1.1]	$ Pk_3/Pk_2 $ [0.4~0.8]	$ Pk_4/Pk_3 $ [0.4~0.8]

校准结果的不确定度:

B.4.2 短路电流

耦合线路	电压设定值/V	电流峰值标称值 I /A	电流峰值实测值/A $I(1 \pm 10\%)$	上升时间/ μs (0.2~1.0)

校准结果的不确定度:

B.5 振铃波发生器接非屏蔽对称互连线 CDN**B.5.1 开路电压**

耦合线路	电压设定值 U/V	电压峰值 /V $U(1 \pm 10\%)$	上升时间/ μs $0.5(1 \pm 30\%)$	振荡周期/ μs $10(1 \pm 10\%)$	电压峰值间的比率		
					$ Pk_2/Pk_1 $ [0.4~1.1]	$ Pk_3/Pk_2 $ [0.4~0.8]	$ Pk_4/Pk_3 $ [0.4~0.8]
所有线-地							

校准结果的不确定度描述:

B.5.2 短路电流

耦合线路	电压设定值/V	电流峰值标称值 I /A	电流峰值实测值/A $I(1 \pm 10\%)$	上升时间/ μs (0.2~1.0)
所有线-地				

校准结果的不确定度:

附录 C:

不确定度评定示例

C.1 振铃波峰值电压的不确定度评定

被校准脉冲峰值电压幅值的数学模型为:

$$y=A \times V \quad (1)$$

其中, y 是开路电压峰值测量值; A 为高压差分探头的分压比; V 是示波器示值。

不确定度传播率

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2$$

电压读数的不确定取决于:

C.1.1 测量重复性引入的不确定度 $u_{1rel}(y)$;

重复测量发生器开路电压 4kV 的 10 次数据如下

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
示值 /kV	4.02	4.02	4.01	4.02	3.98	4.01	3.99	4.00	4.03	4.01

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i = 4.015 \text{ kV}$$

$$\text{单次试验的标准差 } s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.0085 \text{ kV}$$

不确定度 $u_1(y) = 0.0085 \text{ kV}$, $u_{1rel}(y) = 0.2\%$

C.1.2 高压差分探头衰减比不准引入的不确定度分量 $u_{2rel}(y)$;

高压差分探头衰减比最大允许误差 $\pm 2\%$, 设为均匀分布, 则

$$u_{2rel}(y) = 2\% / \sqrt{3} = 1.16\%$$

C.1.3 数字存储示波器电压测量引入的不确定度分量 $u_{3rel}(y)$;

示波器电压测量最大允许误差 $\pm 1.5\%$, 设为均匀分布, 则

$$u_{3rel}(y) = 1.5\% / \sqrt{3} = 0.87\%$$

C.1.4 数字存储示波器读数分辨力引入的不确定度分量 $u_{4rel}(y)$;

$$u_{4rel}(y) = (1/256) \times 10/8 = 0.49\%$$

当校准结果的重复性引入的不确定度分量小于被校准仪器的分辨力所引入的不确定度分量时，应当用分辨力引入的不确定度分量代替校准结果的重复性分量。故振铃波峰值电压的不确定度分量取 $u_{2rel}(y)$ 、 $u_{3rel}(y)$ 、 $u_{4rel}(y)$ 。

各输入量间不相关时，被测量的测量结果的相对合成标准不确定度按以下公式计算：

$$\frac{u_c(y)}{|y|} = \sqrt{\sum_{i=1}^N [u(x_i)/x_i]^2}$$

所以，电压幅度的合成标准不确定度为：

$$u_{crel}(y) = \sqrt{u_{2rel}^2(y) + u_{3rel}^2(y) + u_{4rel}^2(y)} = 1.53\%$$

扩展不确定度

$$U_{rel} = k u_{crel}(y) = 4\%, (k=2)$$

C.2 峰值电压上升时间校准不确定度评定

测量模型：

$$T_V = T$$

T_V --脉冲上升时间测量值， μs ；

T --10%峰值和 90%峰值两点之间所对应的时间间隔数字存储示波器示值， μs 。

不确定度传播率

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2$$

C.2.1 标准不确定度评定：

测量重复性引入的不确定度 $u_{1rel}(T_1)$ ：

重复测量振铃波发生器开路电压 4kV 上升时间的 10 次数据如下

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
示值 / μs	0.378	0.385	0.383	0.387	0.379	0.384	0.383	0.377	0.382	0.385

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i = 0.3823 \mu\text{s}$$

$$\text{单次试验的标准差 } s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.0033\mu\text{s}$$

$$\text{不确定度 } u_1(T_V) = 0.0033\mu\text{s}, u_{1\text{rel}}(T_V) = 0.86\%$$

C.2.2 测量标准的频带不充分宽引入的不确定度 $u_{2\text{rel}}(T_V)$:

标准器由数字存储示波器（带宽 500MHz）和高压差分探头（70MHz）组成，则

$$\text{测量标准的瞬态响应时间为 } t_r = \sqrt{\left(\frac{0.35}{0.5}\right)^2 + \left(\frac{0.35}{0.07}\right)^2} = 5.0\text{ns}, \text{ 被测的振铃波发生器峰值}$$

电压上升时间标称值为 $0.5\mu\text{s}$, $n = 0.5\mu\text{s} / 5\text{ns} = 100$, 则测量标准上升时间引入的测量

$$\text{误差为 } \delta = \sqrt{1 + \frac{1}{n^2}} - 1 = 0.0\%, \text{ 误差为均匀分布, 则测量标准的频带不充分宽引入的不}$$

确定度 $u_{2\text{rel}}(T_V)$ 近似为 0%。

C.2.3 数字存储示波器游标测量引起的不确定的分量 $u_{3\text{rel}}(T_V)$

设读取脉冲幅度的 10%和 100%时因游标测量分辨力相对误差分别为 ε_1 和 ε_2 , 读取脉冲幅度的 10%和 90%时因游标测量分辨力相对误差分别为 ε_3 和 ε_4 , 读取脉冲幅度的 10%和 90%对应的时间刻度时因游标测量分辨力相对误差分别为 ε_5 和 ε_6 , 6 次的判读误差均相等, 即 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = \varepsilon_5 = \varepsilon_6 = \varepsilon = 1.5\%$, 则

$$u_{31\text{rel}}(T_V) = u_{32\text{rel}}(T_V) = u_{33\text{rel}}(T_V) = u_{34\text{rel}}(T_V) = u_{35\text{rel}}(T_V) = u_{36\text{rel}}(T_V) = \frac{1.5\%}{\sqrt{3}} = 0.866\% \text{ 则}$$

$$u_{3\text{rel}}(T_V) = \sqrt{u_{31\text{rel}}^2(T_V) + u_{32\text{rel}}^2(T_V) + u_{33\text{rel}}^2(T_V) + u_{34\text{rel}}^2(T_V) + u_{35\text{rel}}^2(T_V) + u_{36\text{rel}}^2(T_V)} = 2.1\%$$

当校准结果的重复性引入的不确定度分量小于被校准仪器的分辨力所引入的不确定度分量时, 应当用分辨力引入的不确定度分量代替校准结果的重复性分量。故峰值电压上升时间校准不确定度分量取 $u_{2\text{rel}}(T_V)$ 、 $u_{3\text{rel}}(T_V)$ 。

以上各项标准不确定度分量是不相关的, 峰值电压上升时间校准的合成标准不确定度为:

$$u_{\text{crel}}(T_V) = \sqrt{u_{2\text{rel}}^2(T_V) + u_{3\text{rel}}^2(T_V)} = 2.1\%$$

$$\text{扩展不确定度 } U_{\text{rel}} = k u_{\text{crel}}(T_V) = 5\% \quad (k=2)$$

C.3 短路电流峰值校准不确定度评定

测量模型:

$$I = C \times V$$

I —短路电流峰值测量值, kA;

C —电流探头转换系数, A/V;

V —数字存储示波器脉冲电压峰值示值, V。

不确定度传播率

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2$$

C.3.1 测量重复性引入的不确定度 $u_{1\text{rel}}(I)$

重复测量振铃波发生器开路电压 4kV、阻抗 12 Ω 时的短路电流 10 次数据如下

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
示值 /A	350	350	350	353	349	349	352	351	352	349

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i = 350.5 \text{ A}$$

$$\text{单次试验的标准差 } s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 1.43 \text{ A}$$

不确定度 $u_1(I) = 1.43 \text{ A}$, $u_{1\text{rel}}(I) = 0.41\%$

C.3.2 由电流探头转换系数引入的不确定度 $u_{2\text{rel}}(I)$

电流探头转换系数最大允许误差 $\pm 1\%$, 设为均匀分布, 则

$$u_{2\text{rel}}(I) = 1\% / \sqrt{3} = 0.58\%$$

C.3.3 数字存储示波器电压测量引入的不确定度分量 $u_{3\text{rel}}(I)$

示波器电压测量最大允许误差 $\pm 1.5\%$, 设为均匀分布, 则

$$u_{3\text{rel}}(I) = 1.5\% / \sqrt{3} = 0.87\%$$

C.3.4 数字存储示波器读数分辨力引入的不确定度分量 $u_{4\text{rel}}(I)$;

$$u_{4\text{rel}}(I) = (1/256) \times 10/8 = 0.49\%$$

当校准结果的重复性引入的不确定度分量小于被校准仪器的分辨力所引入的不确定度分量时, 应当用分辨力引入的不确定度分量代替校准结果的重复性分量。故短路电流峰值校准的不确定度分量取 $u_{2\text{rel}}(I)$ 、 $u_{3\text{rel}}(I)$ 、 $u_{4\text{rel}}(I)$ 。

各输入量间不相关时，被测量的测量结果的相对合成标准不确定度按以下公式计算：

$$\frac{u_c(y)}{|y|} = \sqrt{\sum_{i=1}^N [u(x_i)/x_i]^2}$$

短路电流峰值的合成标准不确定度为：

$$u_{\text{crel}}(I) = \sqrt{u_{2\text{rel}}^2(I) + u_{3\text{rel}}^2(I) + u_{4\text{rel}}^2(I)} = 1.2\%$$

扩展不确定度 $U_{\text{rel}} = k u_{\text{crel}}(I) = 3\%$ ($k=2$)

C.4 短路电流上升时间校准不确定度评定

测量模型：

$$T_1 = T$$

T_1 --脉冲上升时间测量值， μs ；

T --10%峰值和 90%峰值两点之间所对应的时间间隔数字存储示波器示值， μs 。

C.4.1 标准不确定度评定：

测量重复性引入的不确定度 $u_{1\text{rel}}(T_1)$ ：

重复测量振铃波发生器 4kV 峰值电压时的短路电流上升时间的 10 次数据如下

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
示值/ μs	0.410	0.400	0.406	0.416	0.392	0.396	0.414	0.409	0.391	0.396

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i = 0.403\mu\text{s}$$

$$\text{标准偏差 } s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.0092\mu\text{s}$$

不确定度 $u_1(T_1) = 0.0092\mu\text{s}$, $u_{1\text{rel}}(T_1) = 2.3\%$

C.4.2 测量标准的频带不充分宽引入的不确定度 $u_{2\text{rel}}(T_1)$ ：

标准器由数字存储示波器（带宽 500MHz）和电流探头（20MHz）组成，则测量

标准的瞬态响应时间为 $t_r = \sqrt{\left(\frac{0.35}{0.5}\right)^2 + \left(\frac{0.35}{0.002}\right)^2} = 17.51\text{ns}$ ，被测的振铃波发生器短路电

流上升时间为 $0.2\mu\text{s} \sim 1\mu\text{s}$ ， $n = 0.2\mu\text{s}/17.51\text{ns} = 11.42$ ，则测量标准上升时间引入的测量

误差为 $\delta = \sqrt{1 + \frac{1}{n^2}} - 1 = 0.38\%$ ，误差为均匀分布，则测量标准的频带不充分宽引入的

不确定度 $u_{2rel}(T_1) = 0.38\% / \sqrt{3} = 0.22\%$ 。

C.4.3 数字存储示波器游标测量引起的不确定的分量 $u_{3rel}(T_1)$

设读取脉冲幅度的 0% 和 100% 时因游标测量分辨力相对误差分别为 ε_1 和 ε_2 ，读取脉冲幅度的 10% 和 90% 时因游标测量分辨力相对误差分别为 ε_3 和 ε_4 ，读取脉冲幅度的 10% 和 90% 对应的时间刻度时因游标测量分辨力相对误差分别为 ε_5 和 ε_6 ，6 次的判读误差均相等，即 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = \varepsilon_5 = \varepsilon_6 = \varepsilon = 1.5\%$ ，则

$$u_{31rel}(T_1) = u_{32rel}(T_1) = u_{33rel}(T_1) = u_{34rel}(T_1) = u_{35rel}(T_1) = u_{36rel}(T_1) = \frac{1.5\%}{\sqrt{3}} = 0.866\% \text{ 则}$$

$$u_{3rel}(T_1) = \sqrt{u_{31rel}^2(T_1) + u_{32rel}^2(T_1) + u_{33rel}^2(T_1) + u_{34rel}^2(T_1) + u_{35rel}^2(T_1) + u_{36rel}^2(T_1)} = 2.1\%。$$

当校准结果的重复性引人的不确定度分量大于被校准仪器的分辨力所引人的不确定度分量时，重复性中已经包含分辨力对校准结果的影响，故不再考虑分辨力所引人的不确定度分量。所以短路电流上升时间校准的不确定度分量取 $u_{1rel}(T_1)$ 、 $u_{2rel}(T_1)$ 。

以上各项标准不确定度分量是不相关的，短路电流上升时间校准的合成标准不确定度为：

$$u_{crel}(T_1) = \sqrt{u_{1rel}^2(T_1) + u_{2rel}^2(T_1)} = 2.3\%$$

扩展不确定度： $U_{rel} = k u_{crel}(T_1) = 5\%$ ($k=2$)

C.5 电压衰减的校准不确定度评定

测量模型：

$$A = V_2 / V_1$$

V_1 -- 开路电压波形第一峰值，V；

V_2 -- 开路电压波形第二峰值，V。

不确定度传播率

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2$$

电压衰减的校准不确定度：

$$u_{crel}(A) = \sqrt{2u_c^2(y)} = 2.16\%$$

扩展不确定度:

$$U_{\text{rel}} = k u_{\text{crel}}(A) = 5\%$$