



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1397—2013

静电放电模拟器校准规范

Calibration Specification for Electrostatic Discharge Simulators



2013-02-16 发布

2013-05-16 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

静电放电模拟器校准规范

Calibration Specification for
Electrostatic Discharge Simulators

JJF 1397—2013

归口单位：全国无线电计量技术委员会
起草单位：中国计量科学研究院

本规范委托全国无线电计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

黄 攀（中国计量科学研究院）

谢 鸣（中国计量科学研究院）

参加起草人：

刘柏吉（中国计量科学研究院）



目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语	(1)
3.1 保持时间	(1)
3.2 转移阻抗	(1)
4 概述	(1)
4.1 静电放电模拟器的用途	(1)
4.2 静电放电模拟器的结构	(2)
5 计量特性	(2)
5.1 输出电压	(2)
5.2 接触放电电流	(2)
6 校准条件	(3)
6.1 环境条件	(3)
6.2 校准用设备	(3)
7 校准项目和校准方法	(4)
7.1 常规检查	(4)
7.2 校准方法	(4)
8 校准结果表达	(6)
9 复校时间间隔	(6)
附录 A 原始记录格式	(7)
附录 B 校准证书内页格式	(8)
附录 C 不确定度评定示例	(10)

引 言

本校准规范是依据 GB/T 17626.2 《电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验》和 IEC 61000-4-2: 2008 《电磁兼容 试验和测试技术 静电放电抗扰度试验》(Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-2: Testing and measurement techniques—Electrostatic discharge immunity test) 中对静电放电模拟器的校准要求编制而成。

本规范为首次发布。



静电放电模拟器校准规范

1 范围

本规范适用于依据 GB/T 17626.2 《电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验》和 IEC 61000-4-2: 2008 《电磁兼容 试验和测试技术 静电放电抗扰度试验》(Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-2: Testing and measurement techniques—Electrostatic discharge immunity test) 中静电放电模拟器要求的仪器的校准, 其他类型的静电放电模拟器可参照执行。

2 引用文件

本规范引用了下列文件:

GB/T 4365—2003 电工术语 电磁兼容 (idt IEC 60050 (161): 1990)

GB/T 17626.2 电磁兼容 试验和测试技术 静电放电抗扰度试验

IEC 61000-4-2: 2008 电磁兼容 试验和测试技术 静电放电抗扰度试验 (Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-2: Testing and measurement techniques—Electrostatic discharge immunity test)

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

3.1 保持时间 holding time

放电之前, 由于泄漏而使试验电压下降不大于 10% 的时间间隔。

3.2 转移阻抗 transfer impedance

静电放电靶-衰减器-电缆的转移阻抗定义为注入到靶的输入端的电流和电流输出端 50 Ω 精密负载上的电压之比 (精密负载放置在电缆的一端, 替代示波器的负载)。

注: 在静电放电模拟器校准过程中, 如果电流 I_{sys} 注入到靶上, 那么示波器会显示一个电压 V_{osc} 。为了使用显示电压来计算未知电流, 则需要确定低频转移阻抗。低频转移阻抗可以通过以下步骤确定:

- 在静电放电靶的前端注入 1A 的直流电流 I_{sys} 。电流靶的前端就是进行放电的那一面。
- 在电缆端, 即连接示波器一端, 连接一个 50 Ω 精密负载。50 Ω 负载的允差为 ±1%。
- 测量精密 50 Ω 负载上的电压 V_{50} 。

则转移阻抗为: $Z_{\text{sys}} = \frac{V_{50}}{I_{\text{sys}}}$

4 概述

4.1 静电放电模拟器的用途

静电放电模拟器用于模拟人体或物体对邻近的电气和电子设备静电放电时的情况，还包括从人体到靠近关键设备的物体之间可能发生的静电放电。目的在于建立通用的和可重现的基准，以评估电气和电子设备在承受静电放电时的性能。

4.2 静电放电模拟器的结构

静电放电模拟器的主要部分包括（见图 1）：

- 充电电阻 R_c ；
- 储能电容器 C_s ；
- 分布电容 C_d ；
- 放电电阻 R_d ；
- 电压指示器；
- 放电开关；
- 可更换的放电电极头；
- 放电回路电缆；
- 电源装置。

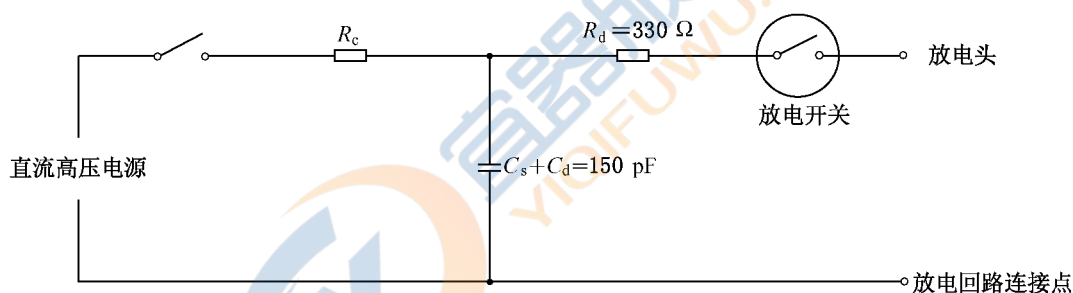


图 1 静电放电模拟器电路原理图

5 计量特性

5.1 输出电压

输出电压：1 kV~15 kV，允差为输出电压示值 $\pm 5\%$ ，输出电压极性可以为正极性或负极性。

5.2 接触放电电流

接触放电电流波形应与图 2 相符，波形参数见表 1。

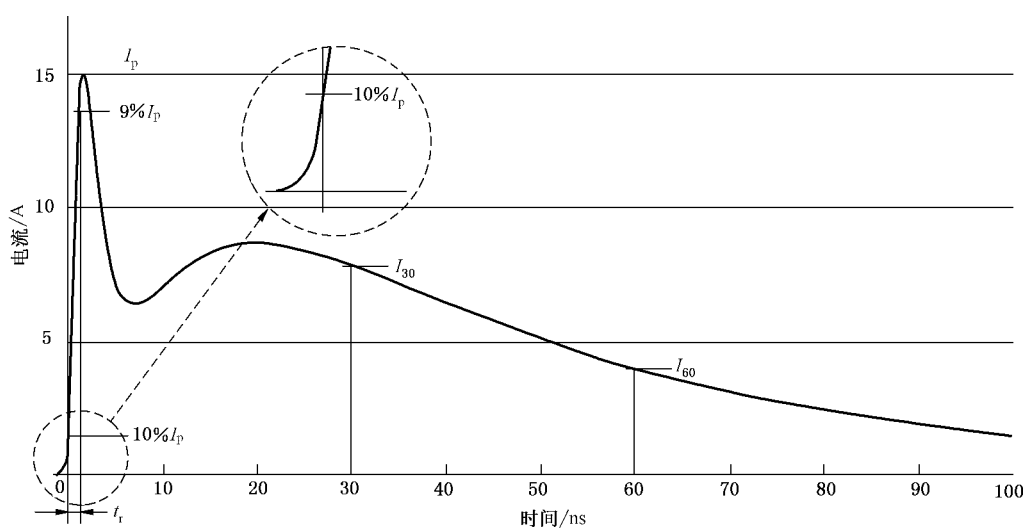


图 2 接触放电电流波形

表 1 波形参数

等级	指示电压 kV	放电的第一个峰值 电流 ($\pm 15\%$) A	放电开关操作时 的上升时间 t_r ($\pm 25\%$) ns	在 30 ns 时的电流 ($\pm 30\%$) A	在 60 ns 时的电流 ($\pm 30\%$) A
1	2	7.5	0.8	4	2
2	4	15	0.8	8	4
3	6	22.5	0.8	12	6
4	8	30	0.8	16	8

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 温度：15 °C ~ 35 °C

6.1.2 相对湿度：30% ~ 60%

6.1.3 周围无影响正常校准工作的电磁干扰和机械震动

6.2 校准用设备

6.2.1 高压表或具有类似功能和指标的单台仪器或多台仪器的组合，例如高压衰减器和示波器或直流电压表的组合，也可以使用静电电压表。

量程： ≥ 15 kV；

输入阻抗： ≥ 1 G Ω 。

6.2.2 高速示波器或具有类似功能和指标的单台仪器或多台仪器的组合。

模拟带宽： ≥ 2 GHz。

6.2.3 静电放电靶

静电放电靶应符合 IEC 61000-4-2: 2008 附录中的要求。

静电放电靶应配合适当的衰减器和电缆，以连接到示波器。

静电放电靶-衰减器-电缆链路的低频转移阻抗应经过校准。

静电放电靶-衰减器-电缆链路的带宽： ≥ 4 GHz。

静电放电靶-衰减器-电缆链路的插入损耗的变化不应超过：

± 0.5 dB, < 1 GHz;

± 1.2 dB, 1 GHz~4 GHz。

6.2.4 用于安装静电放电靶的前面板尺寸至少为 1.2 m×1.2 m，从靶中心到前面板平面的边沿至少 0.6 m（参见图 4）。示波器放置在前面板后，应确保校准系统具有足够的抗干扰性。

注：如果可以通过测量证明对测量系统的直接耦合路径不影响校准结果，那么可以不需要将示波器屏蔽起来。如果示波器在下面的情况中没有被触发，那么可以认为校准系统具有足够的抗干扰性能，无需屏蔽室或法拉第笼。

- 将示波器的触发电平设置为等于最低测试等级 ± 2 kV 的放电电流第一峰值对应的电压值的 10%。
- ESD 发生器使用最高测试等级 ± 8 kV，对靶的外圈（不是内圈）进行放电。

7 校准项目和校准方法

7.1 常规检查

7.1.1 被校静电放电模拟器应带有维持正常工作所必要的附件。静电放电模拟器必须自带接地线，接地线长度应为 (2.00 ± 0.05) m。

7.1.2 被校静电放电模拟器各部分应完好无损，无影响正常工作的机械损伤。

7.1.3 被校静电放电模拟器接入校准装置后能正常工作。

7.2 校准方法

7.2.1 输出电压校准

输出电压校准连接如图 3 所示。静电放电模拟器工作在接触放电模式或空气放电模式。将静电放电模拟器的放电电极与高压表的输入端相连接。分别测量不同设定电压下的开路输出电压，填入表 A. 1。



图 3 输出电压校准连接示意图

7.2.2 接触放电电流波形校准

7.2.2.1 静电放电模拟器校准布置

静电放电模拟器校准连接示意图如图 4 所示。

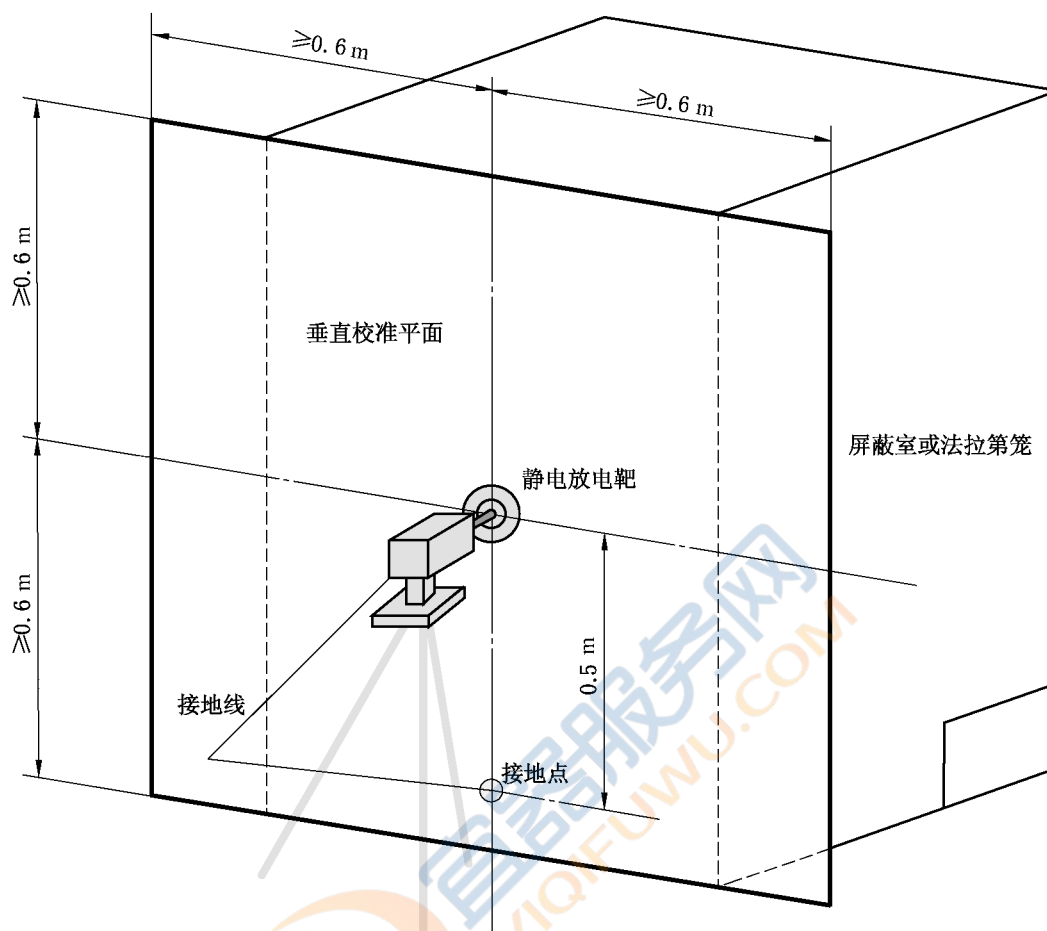


图 4 静电放电模拟器校准连接示意图

静电放电靶必须安装在符合图 4 要求的垂直校准平面的中心。从靶中心到平面的边缘至少 0.6 m。静电放电模拟器的接地线应该连接在靶下方 0.5 m 处的靶平面底部中心的端子上。应从接地线的中部将其向后拉起，形成一个等腰三角形。在校准过程中，不允许将接地线放置在地板上。

在校准过程中，静电放电模拟器安装在三脚架或者等效的非金属的低损耗支持物上。

在进行接触放电时，静电放电模拟器的放电电极应垂直于静电放电靶平面。

7.2.2.2 静电放电靶输出端在连接衰减器和电缆后连接到示波器的输入端，连接如图 5 所示。

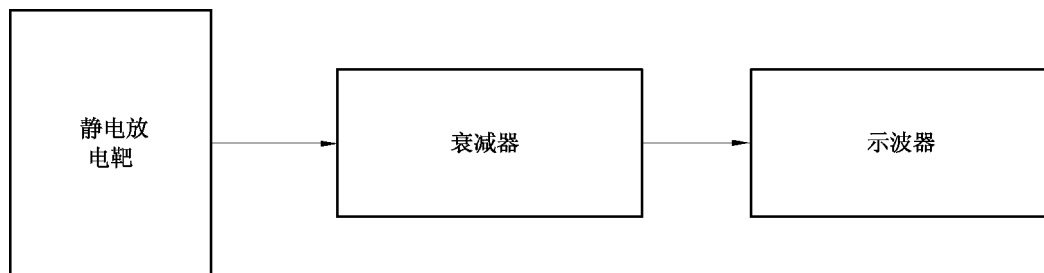


图 5 连接示意图

7.2.2.3 静电放电模拟器工作在接触放电模式。分别将电压设置到 ± 2 kV, ± 4 kV, ± 6 kV 和 ± 8 kV, 将示波器设置为能够观测到静电放电电流完整波形的合适的量程和触发模式。在每一个电压等级, 分别对静电放电靶进行 5 次接触放电, 按照 7.2.2.4 至 7.2.2.6 的描述, 用示波器对放电电流波形进行记录。

7.2.2.4 第一峰值电流测量

根据示波器采集的电流波形, 记录第一峰值电压的值, 使用电压值除以低频转移阻抗得到电流值, 填入表 A. 2。

7.2.2.5 30 ns 和 60 ns 电流测量

根据示波器采集的电流波形, 以到达第一峰值 10% 时的点为时间起点, 分别记录 30 ns 和 60 ns 后的电压值, 使用电压值除以低频转移阻抗得到电流值, 填入表 A. 2。

7.2.2.6 电流上升时间测量

根据示波器采集的电流波形, 记录从第一峰值的 10% 到 90% 的间隔时间, 作为上升时间, 填入表 A. 2。

7.2.2.7 放电电流波形图

可分别保存示波器采集的 ± 8 kV 电流波形图, 作为参考加入到校准报告中。

8 校准结果表达

静电放电模拟器校准后, 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) 本次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) 对校准规范的偏离的说明;
- 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声明;
- 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

原始记录格式

表 A.1 输出电压

仪器设定 kV	标准 kV	实测电压 kV	仪器设定 kV	标准 kV	实测电压 kV
2	2		-2	-2	
4	4		-4	-4	
6	6		-6	-6	
8	8		-8	-8	
10	10		-10	-10	
12	12		-12	-12	
15	15		-15	-15	

表 A.2 接触放电电流

仪器 设定 kV	第一峰值的电流 A		上升时间 ns		在 30 ns 时的电流 A		在 60 ns 时的电流 A	
	标准	实测	标准	实测	标准	实测	标准	实测
2	7.5		0.8		4		2	
4	15				8		4	
6	22.5				12		6	
8	30				16		8	
-2	-7.5				-4		-2	
-4	-15				-8		-4	
-6	-22.5				-12		-6	
-8	-30				-16		-8	

附录 B

校准证书内页格式

1 输出电压

仪器设定 kV	标准 kV	实测电压 kV	仪器设定 kV	标准 kV	实测电压 kV
2	2		-2	-2	
4	4		-4	-4	
6	6		-6	-6	
8	8		-8	-8	
10	10		-10	-10	
12	12		-12	-12	
15	15		-15	-15	

电压： $U_{\text{rel}} = 3\%$ ($k=2$)

2 接触放电电流

仪器 设定 kV	第一峰值的电流 A		上升时间 ns		在 30 ns 时的电流 A		在 60 ns 时的电流 A	
	标准	实测	标准	实测	标准	实测	标准	实测
2	7.5		0.8		4		2	
4	15				8		4	
6	22.5				12		6	
8	30				16		8	
-2	-7.5				-4		-2	
-4	-15				-8		-4	
-6	-22.5				-12		-6	
-8	-30				-16		-8	

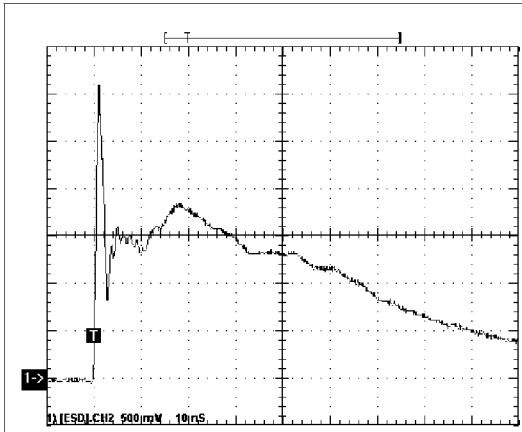
电流上升时间： $U_{\text{rel}} = 13\%$ ($k=2$)

电流峰值： $U_{\text{rel}} = 6\%$ ($k=2$)

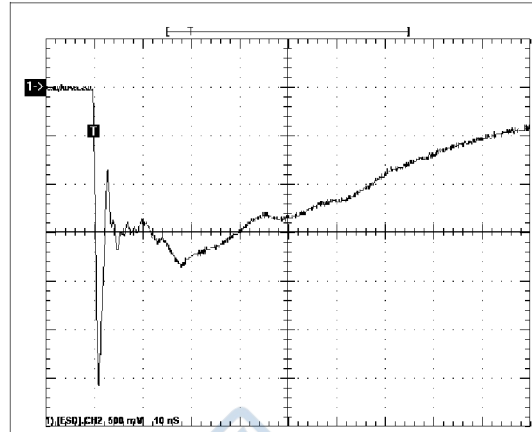
30 ns 电流值： $U_{\text{rel}} = 10\%$ ($k=2$)

60 ns 电流值： $U_{\text{rel}} = 10\%$ ($k=2$)

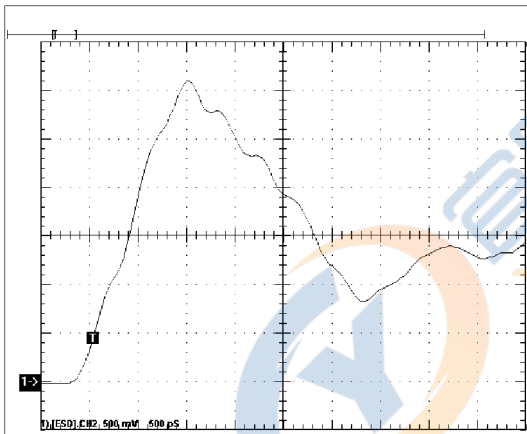
3 波形图



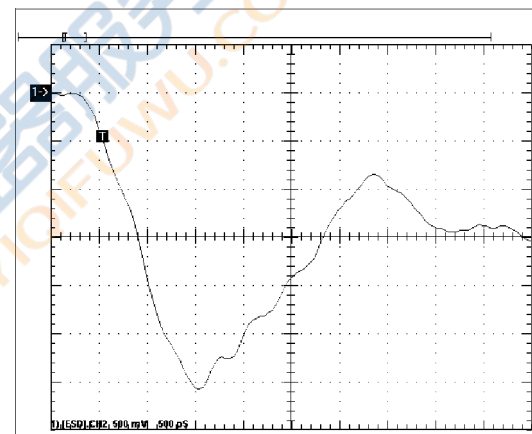
+8 kV 放电电流波形



-8 kV 放电电流波形



+8 kV 放电电流上升沿波形



-8 kV 放电电流下降沿波形

本证书所列校准结果均可溯源至复现（SI）单位的中国国家计量基准。
校准结果不确定度的评估和表述均符合 JJF 1059（等同于 ISO GUM）的要求。

敬告：

1. 被校准仪器修理后，应立即进行校准。
2. 在使用过程中，如对被校准仪器的技术指标产生怀疑，请重新校准。
3. 根据客户要求和校准文件的规定，通常情况下 12 个月校准一次。

校准员：

核验员：

附录 C

不确定度评定示例

本附录将对静电放电模拟器的校准结果进行不确定度评定。根据各个校准项目的不同，分别讨论不确定度的评定计算方法。

C.1 输出电压校准

校准条件：采用高压表对静电放电模拟器的输出电压进行校准。

C.1.1 测量不确定度分量的评定

根据实际的校准环境，在静电放电模拟器输出电压测量中影响总的测量结果的不确定度来源主要有以下几个因素：

- (1) 高压表引入的不确定度，作为 B 类不确定度；
- (2) 重复测量引入的校准结果的不确定度分量，作为 A 类不确定度。

C.1.1.1 高压表引入的不确定度

由高压表的技术指标中，得到其准确度为 0.5% + 末尾 2 位数字，认为是矩形分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。以 8 kV 为例，则其测量精度为 0.75%。

C.1.1.2 重复测量引入的不确定度

通过 10 次重复测量，并计算标准差，得到重复测量的标准差为 1.0%。

C.1.2 输出电压校准的合成标准不确定度和系统扩展不确定度（表 C.1）

表 C.1 输出电压校准的不确定度

贡献量	分布	数值 %	$u_i(y)$ %
高压表精度	矩形, $k = \sqrt{3}$	0.75	0.433
重复性	正态	1.0	1.0
输出电压的合成标准不确定度 u_c		1.1	
输出电压的扩展不确定度 U	正态, $k = 2$	2.2	

C.2 接触放电电流波形校准

C.2.1 第一峰值电流的校准

C.2.1.1 测量不确定度分量的评定

根据实际的校准环境，在静电放电模拟器放电电流第一峰值测量中影响总的测量结果的不确定度来源主要有以下几个因素：

- (1) 示波器垂直测量精度引入的不确定度，作为 B 类不确定度。
- (2) 静电放电靶-衰减器-电缆的频率响应引入的不确定度，作为 B 类不确定度。
- (3) 静电放电靶-衰减器-电缆的电压/电流转换因子引入的不确定度，作为 B 类不确定度。
- (4) 失配引入的不确定度，作为 B 类不确定度。

(5) 由重复测量引入的校准结果的不确定度分量, 作为 A 类不确定度。

C. 2. 1. 1. 1 示波器垂直测量精度引入的不确定度

示波器的技术指标中, 其垂直测量精度为满刻度 $\pm 1.0\%$, 认为是矩形分布, 包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。

C. 2. 1. 1. 2 静电放电靶-衰减器-电缆的频率响应引入的不确定度

整个静电放电靶-衰减器-电缆链路连接静电放电靶适配器在网络分析仪上进行校准, 得到其 100 kHz~4 GHz 的频率响应曲线。频率响应曲线的标准偏差为 0.10 dB, 网络分析仪的测量不确定度为 0.04 dB。由此, 得到静电放电靶-衰减器-电缆的频率响应引入的不确定度为 2.5%, 认为是正态分布, 包含因子 $k=2$ 。

C. 2. 1. 1. 3 静电放电靶-衰减器-电缆的电压/电流转换因子引入的不确定度

静电放电靶-衰减器-电缆的电压/电流转换因子测量所使用的标准电流源与多用表进行测量。标准电流源输出 1A 直流电流的不确定度为 $\pm 0.02\%$, 多用表的电压测量精度为 $\pm 0.008\%$, 50 Ω 精密负载的精度为 $\pm 0.5\%$, 重复测量, 计算得到静电放电靶-衰减器-电缆的电压/电流转换因子引入的不确定度为 $\pm 0.6\%$, 认为是正态分布, 包含因子 $k=2$ 。

C. 2. 1. 1. 4 失配引入的不确定度

示波器输入端口的电压驻波比 (VSWR) $< 1.50 : 1$ 。使用网络分析仪对静电放电靶的 S_{11} (输入端口反射系数) 进行测量, 其最大 VSWR = 1.17 : 1。因此, 在示波器和静电放电靶之间由失配引起的相对标准不确定度由下式计算得到:

$$\left[1 + \left(\frac{1.17 - 1}{1.17 + 1} \right) \times \left(\frac{1.5 - 1}{1.5 + 1} \right) \right]^2 - 1 = 3.1\%$$

失配引入的不确定度为 U 形分布, 因此除数为 $\sqrt{2}$ 。

C. 2. 1. 1. 5 重复测量引入的 A 类不确定度

通过 10 次重复测量, 并计算标准差, 得到重复测量的标准差为 1.5%。

C. 2. 1. 2 系统合成标准不确定度和系统扩展不确定度 (表 C. 2)

表 C. 2 接触放电电流波形校准的不确定度

贡献量	分布	数值 %	$u_i(y)$ %
示波器垂直测量精度	矩形, $k=\sqrt{3}$	1.0	0.58
静电放电靶-衰减器-电缆链路频率响应	正态, $k=2$	2.5	1.25
静电放电靶-衰减器-电缆的电压/电流转换因子	正态, $k=2$	0.6	0.3
失配	U 形, 除数= $\sqrt{2}$	3.1	2.2
重复性	正态, 除数=1	1.5	1.5
第一峰值电流的合成标准不确定度 u_c		3.0	
第一峰值电流的扩展不确定度 U	正态, $k=2$	6.0	

C. 2. 2 电流上升时间的校准

C. 2. 2. 1 测量不确定度分量的评定

根据实际的校准环境，在静电放电模拟器放电电流第一峰值测量中影响总的测量结果的不确定度来源主要有以下几个因素：

- (1) 示波器峰值读数引入的不确定度，作为 B 类不确定度。
- (2) 示波器 90% 峰值电流读数引入的不确定度，作为 B 类不确定度。
- (3) 示波器 10% 峰值电流读数引入的不确定度，作为 B 类不确定度。
- (4) 示波器水平测量精度引入的不确定度，作为 B 类不确定度。
- (5) 静电放电靶-衰减器-电缆链路引入的不确定度，作为 B 类不确定度。
- (6) 由重复测量引入的校准结果的不确定度分量，作为 A 类不确定度。

C. 2. 2. 1. 1 示波器峰值读数引入的不确定度

测量上升时间 800 ps 乘以电流峰值的不确定度 6.0% 得到示波器峰值读数引入的不确定度为 48 ps，认为是正态分布，包含因子 $k=2$ 。

C. 2. 2. 1. 2 示波器 90% 峰值电流读数引入的不确定度

由于示波器的采样率为 10 GS/s，即每 100 ps 采样一个点，由此引入的不确定度为 50 ps，认为是矩形分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。

C. 2. 2. 1. 3 示波器 10% 峰值电流读数引入的不确定度

由于示波器的采样率为 10 GS/s，即每 100 ps 采样一个点，由此引入的不确定度为 50 ps，认为为矩形分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。

C. 2. 2. 1. 4 示波器水平测量精度引入的不确定度

$$\begin{aligned} \text{时间测量准确度} &= 5 \text{ ps} + (10 \times 10^{-6} \times \text{读数}) \\ &= 5 \text{ ps} + (10 \times 10^{-6} \times 800 \text{ ps}) \\ &\approx 5 \text{ ps} \end{aligned}$$

认为为矩形分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。

C. 2. 2. 1. 5 静电放电靶-衰减器-电缆链路引入的不确定度

静电放电靶-衰减器-电缆链路的带宽为 4 GHz，根据采样定理，带宽和上升时间之间的关系，可以计算出它的上升时间为 87 ps。它对整个系统上升时间的影响由下式计算：

$$T_{\text{Observed}} = \sqrt{T_{\text{System}}^2 + T_{\text{ESD}}^2} = \sqrt{87^2 + 800^2} \approx 805 \text{ ps}$$

其中： T_{ESD} 为电流上升时间，取典型值为 800 ps。

将此项作为不确定度项引入，则带来的不确定度为

$$T_{\text{Observed}} - T_{\text{ESD}} = 805 - 800 = 5 \text{ ps}$$

认为是 U 形分布，因此除数为 $\sqrt{2}$ 。

C. 2. 2. 1. 6 重复测量引入的 A 类不确定度

通过 10 次重复测量，并计算标准差，得到重复测量的标准差为 22 ps。

C. 2. 2. 2 系统合成标准不确定度和系统扩展不确定度（表 C. 3）

表 C.3 电流上升时间校准的不确定度

贡 献 量	分 布	数 值 ps	u_i (y) ps
峰值读数	正态, $k=2$	48	24
90%峰值电流的时间读数	矩形, $k=\sqrt{3}$	50	28.9
10%峰值电流的时间读数	矩形, $k=\sqrt{3}$	50	28.9
示波器水平测量精度	矩形, $k=\sqrt{3}$	5	2.89
静电放电靶-衰减器-电缆链路	U形, 除数 $=\sqrt{2}$	5	3.54
重复性	正态	22	22
上升时间的合成标准不确定度 u_c		52	
上升时间的扩展不确定度 U	正态 $k=2$	104 (13%)	

