



中华人民共和国工业和信息化部 兵工民品计量技术规范

JJF(兵工民品) XXXX—20XX

火工品用静电感度仪校准规范

Calibration Specification for Electrostatic Sensitivity Tester of Initiating
Explosive Device

(报批稿)

××××—××—××发布

××××—××—××实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

火工品用静电感度仪 校准规范

Calibration Specification for Electrostatic
Sensitivity Tester of Initiating
Explosive Device

JJF（兵工民品） XXXX—20XX

归口单位：中国兵器工业标准化研究所

主要起草单位：陕西应用物理化学研究所

参与起草单位：中国兵器工业标准化研究所

93170 部队

本规范技术条文委托起草单位负责解释

本规范主要起草人：

李 瑞（陕西应用物理化学研究所）

薛园园（陕西应用物理化学研究所）

姚洪志（陕西应用物理化学研究所）

参加起草人：

关静宇（中国兵器工业标准化研究所）

李 明（陕西应用物理化学研究所）

张 川（93170 部队）

刘卫东（陕西应用物理化学研究所）

郑文静（陕西应用物理化学研究所）

目 录

引言 II

1 范围 1

2 引用文件 1

3 概述 1

4 计量特性 2

4.1 输出电压 2

4.2 放电回路参数 2

4.3 放电电流波形参数 2

5 校准条件 2

5.1 环境条件 2

5.2 校准用设备 3

6 校准项目和校准方法 3

6.1 校准项目 3

6.2 校准方法 3

7 校准结果表达 7

8 复校时间间隔 7

附录 A 火工品用静电感度仪原始记录(推荐)格式 8

附录 B 校准证书内页及内页格式 11

附录 C 测量不确定度评定示例 13

引 言

本规范依据 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》和 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》编写。

本规范为首次发布。

火工品用静电感度仪校准规范

1 范围

本规范适用于模拟人体-火工品静电放电模型，静电电位在30kV以内的火工品用静电感度仪校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

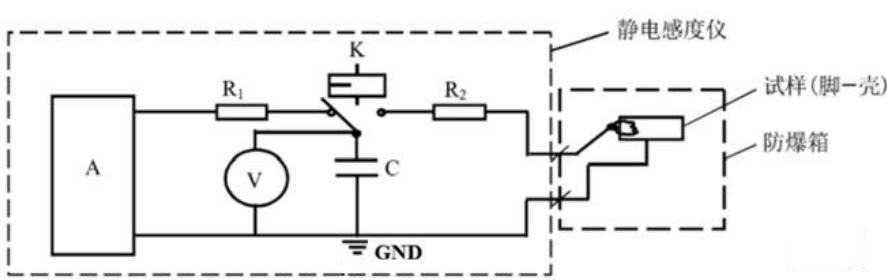
JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示

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 概述

3.1 原理

火工品用静电感度仪是在实验室条件下模拟人体产生的静电，测定火工品在静电放电环境下的敏感度，直流高压电源 A 产生直流高压电，通过限流电阻 R_1 和高压开关 K 对脉冲功率电容器 C 进行充电，进而模拟静电电压，通过静电电压表 V 显示加载的静电电压数值。当静电电压达到预设值后，通过控制高压开关实现静电的产生，进而对火工品进行静电敏感度试验，原理如图 1 所示。



A—直流高压电源； R_1 —充电限流电阻； R_2 —放电电阻；K—高压开关；V—静电电压表；C—电容器

图 1 火工品用静电感度仪原理图

3.2 用途

统一火工品用静电感度测试仪的校准方法与量值溯源。

4 计量特性

4.1 输出电压

输出电压：小于等于 30kV，最大允许误差为输出电压±5%，极性为正/负极性。

4.2 放电回路参数

电容：500pF±25pF；电阻：5000 Ω ±250 Ω；回路电感：小于 5uH。

4.3 放电电流波形参数

放电电流波形应与图 2 相符，放电电流波形参数等级见表 1。

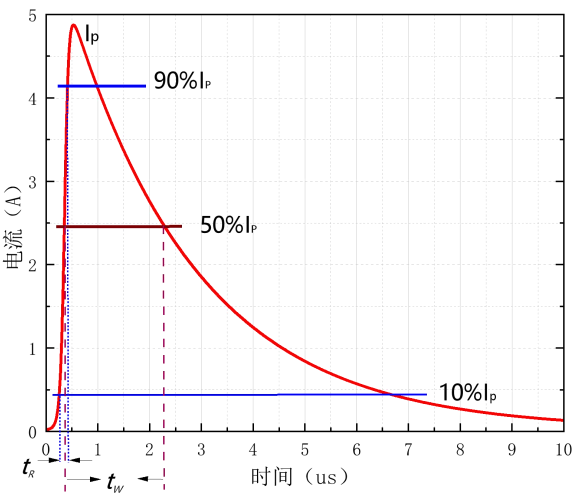


图 2 放电电流波形

表 1 放电电流波形参数等级

等级	指示电压 (kV)	放电峰值电流 $I_p(\pm 15\%)$ A	上升时间 $t_r(\pm 25\%)$ ns	半高宽度 $t_w(\pm 25\%)$ us
1	5	0.98	110	1.70
2	10	1.97	110	1.70
3	15	2.95	110	1.70
4	20	3.94	110	1.70
5	25	4.70	110	1.70

5 校准条件

5.1 环境条件

5.1.1 温度：20℃～30℃。

5.1.2 相对湿度：40%～70%。

5.1.3 气压：86kPa~106kPa。

5.1.4 周围无影响正常工作的电磁干扰等现象，环境电场不大于 100V/m。

5.1.5 环境洁净度：室内应无明显粉尘、腐蚀性气体、易燃易爆物质。

5.2 校准用设备

5.2.1 静电电压表量程：±(0.2~30)kV，最大允许误差：±(1%读数+1 字)；

5.2.2 LCR 测试仪，最大允许误差：±(0.05%读数+2 字)；

5.2.3 示波器，最大工作电压为 100V，模拟带宽不小于 1GHz，采样率不小于 5GS/s，垂直测量精度：±1.0%读数；时基精度±(5ppm×读数+0.1ns)；

5.2.4 校准装置：

1) 电流靶，最大工作电压为 40V，输入阻抗：1Ω(1.0Ω~1.1Ω)，应配合适当的电缆连接到示波器，电缆连接路径的插入损耗变化不应超过±1.2dB，DC~1GHz。

2) 屏蔽装置：尺寸不小于 25cm×20cm×20cm，频率范围 1kHz-2GHz；屏蔽效能：>20dB(1kHz-30MHz)；屏蔽效能：>30dB(30MHz-300MHz)；屏蔽效能：>40dB(300MHz-2GHz)。

6 校准项目和校准方法

6.1 校准项目

火工品静电感度仪的校准项目见表2。

表2 校准项目一览表

序号	校准项目
1	输出电压
2	放电电容
3	放电电阻
4	放电回路电感
5	放电电流波形参数

6.2 校准方法

6.2.1 校准前确认

6.2.1.1 被校火工品用静电感度仪应带有维持正常工作所必要的附件，应自带接地线，接地线长度为(2±0.05)m，接地电阻不大于 10Ω。

6.2.1.2 被校火工品用静电感度仪应完好无损，无影响正常工作的机械损伤。

6.2.1.3 被校火工品用静电感度仪接入校准装置后应能正常工作。

6.2.2 输出电压校准

静电高压电源在接触放电模式，放电电极与静电电压表的输入端连接，分别测量不同设定电压下的开路输出电压，输出电压校准示意图如图 3 所示，校准步骤如下：

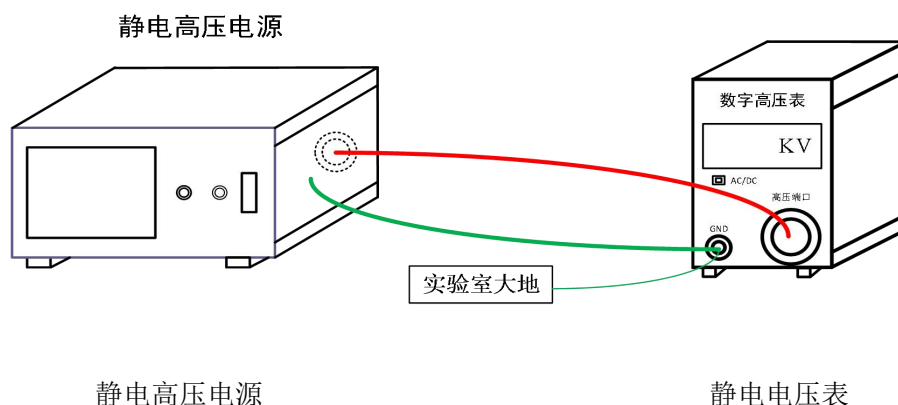


图 3 输出电压校准示意图

- 按图 3 连接好设备，预热 15min，预热温度 $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ；
- 在量程范围内选取 $\pm 5\text{kV}$ 、 $\pm 10\text{kV}$ 、 $\pm 15\text{kV}$ 、 $\pm 20\text{kV}$ 、 $\pm 25\text{kV}$ 十个电压测量点；
- 将静电电压表输入端与静电高压电源高压输出端连接；
- 设置静电高压电源电压，记为 U_2 ，单位为 kV；
- 当静电高压电源的电压达到预设电压时，记录此时静电电压表的读数为 U_1 ，单位为 kV；
- 用式(1)求出静电高压电源的电压误差 ΔU ，单位为 kV；

$$\Delta U = U_2 - U_1 \quad (1)$$

- 用式(2)计算相对误差 e

$$e = \frac{\Delta U}{U_1} \times 100\% \quad (2)$$

- 将输出电压调至 0，关闭静电高压电源启动按钮；
- 打开静电高压电源启动按钮，输入另一个测量电压值，重复 e~i；
- 测试结束后关闭静电高压电源开关和静电电压表开关，并断开静电电压表连接。

6.2.3 放电回路参数的校准

将 LCR 测试仪测量频率调至 1kHz，静态下测量电容、电阻以及回路电感测量，校准示意图如图 4 所示，校准步骤如下：

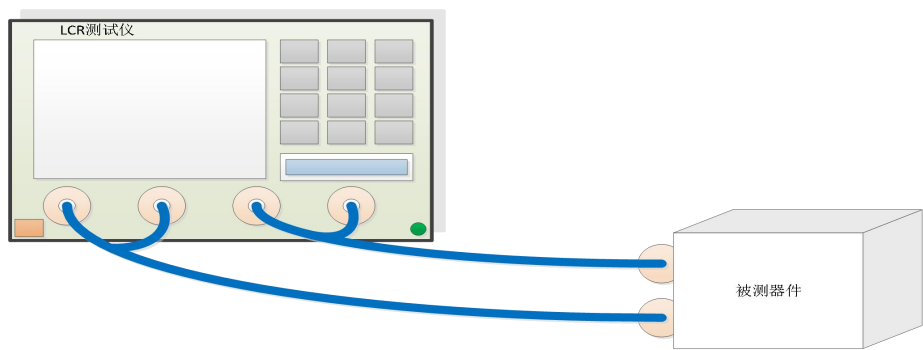


图4 放电回路参数校准示意图

- a) LCR 测试仪预热 15 分钟；
- b) LCR 测试仪测试频率设置为 1kHz；
- c) 将 LCR 测试仪进行开路校准，正负两极短接进行短路校准；
- d) 打开 LCR 测试仪测量功能，进行参数设置。
- e) 记录电感 L、电容 C、电阻 R 的数值；
- f) 测试结束后关闭 LCR 测试仪开关。

6.2.4 放电电流波形参数校准

校准原理如图 5 所示：

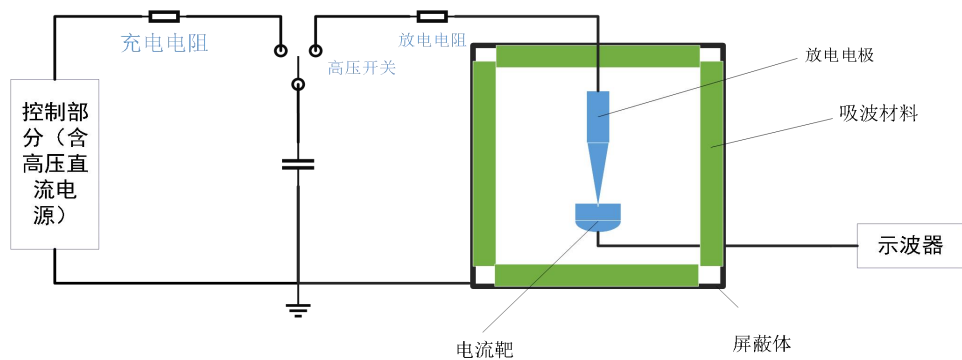


图5 放电电流波形校准原理图

火工品用静电感度仪由两部分组成，包括充电回路和放电回路。校准时静电高压电源对电容器充电，电容通过 5k Ω 放电电阻对校准装置放电，校准装置的电流靶通过 50 Ω 同轴电缆连接示波器，示波器输入阻抗为 50 Ω ，示波器测得的电压波形即为静电感度仪的放电电流波形。火工品用静电感度仪在电流靶产生的电流为 5A，示波器上得到的相应电压为 5V。

校准连接示意图如图 6 所示：

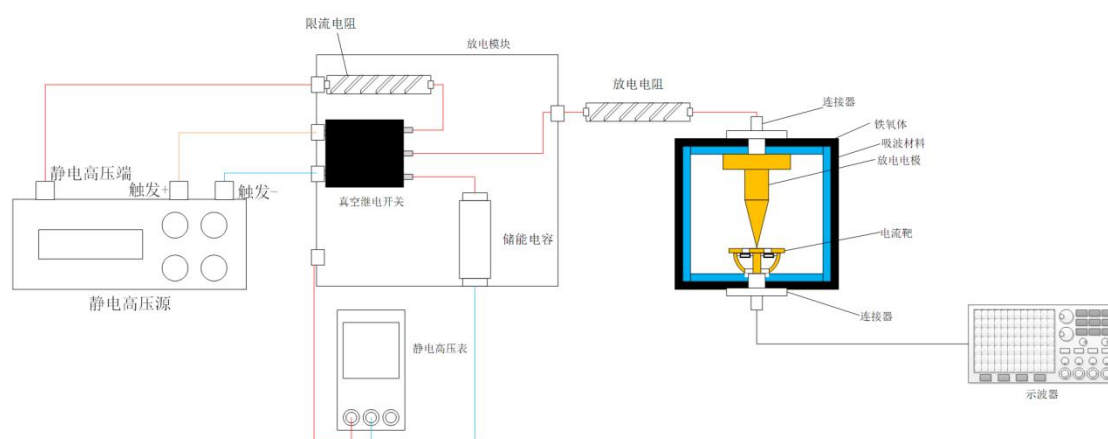


图6 放电电流波形参数校准连接示意图

校准过程：放电电极对电流靶中心放电，信号输出后经过同轴电缆进入示波器。

a) 按照图6将火工品用静电感度仪校准系统紧密连接，静电高压电源需使用耐压30kV高压线，并且高压电源与开关箱连接插头需使用耐压30kV高压插头，仔细检查连接器的连接状态，预热15min，将火工品用静电感度仪工作在接触放电模式；

b) 设置示波器的时基和垂直分辨率，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；

c) 将放电电极对准电流靶（1Ω）的中心导体；

d) 操作静电感度仪分别进行±5kV、±10kV、±15kV、±20kV、±25kV充电、放电，获得不同等级电位放电电流波形；

e) 从采样示波器读出放电电流波形的峰值幅度 I_p ，单位为A；上升时间 t_r ，单位为ns；半高宽度 t_w ，单位为us。

f) 用式(3)求出静电感度仪放电端的电流峰值

$$I_p = k_I V_p \quad (3)$$

式中：

I_p —电流峰值；

k_I —电流靶转换系数，取 $k_I=1.0$ ；

g) 将静电高压电源输出电压调至0，关闭静电高压电源启动按钮；

h) 打开静电高压电源启动按钮，输入另一个测电压值，重复步骤e)～g)；

i) 确认测量参数都符合表1要求。

g) 将静电高压电源输出电压调至0，关闭高压电源启动按钮，关闭示波器，断开电源；

k) 校准结束后关闭静电高压电源开关和静电电压表开关，并断开静电电压表连接。

7 校准结果表达

校准结束后出具校准证书，推荐校准证书内页格式见附录B。校准证书应准确、客观的报告校准结果。校准结果用校准数据的形式给出，并根据JJF 1059.1-2012测量不确定度评定与表示给出测量不确定度，不确定度评定示例见附录C。校准证书至少包含以下信息：

- a) 标题，如“校准证书”或“校准报告”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果不在实验室内进行校准）；
- d) 证书或报告的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 送校单位的名称和地址；
- 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) 对校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- i) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- j) 校准环境的描述；
- k) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- l) 对校准规范的偏离的说明；
- m) 校准证书或校准报告签发人的签名，以及签发日期；
- n) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- o) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书或报告的声明。

8 复校时间间隔

复校时间间隔建议不超过12个月，具体可根据使用情况、仪器稳定性等因素由用户确定，若仪器更换零件、配件建议复校。

附录 A

火工品用静电感度仪原始记录(推荐) 格式

第 页 共 页

委托单位：		校准证书编号：	
委托单位地址：		标准依据：	
仪器名称：	型号/规格：	出厂编号：	
制造单位：		仪器状况：	
校准地点：		环境温度： ℃	相对湿度： %

A. 1 外观及附件检查表

A. 1 外观及工作正常性检查

项目	检查结果
外观检查	
附件检查	

A. 2 火工品用静电感度仪计量特性

A. 2.1 输出电压

表 A. 2 输出电压

仪器设定电压（kV）	标准（kV）	实测电压（kV）
5	5	
10	10	
15	15	
20	20	
25	25	
-5	-5	

表 A.2 输出电压(续)

-10	-10	
-15	-15	
-20	-20	
-25	-25	

$$U_{rel}=1.18\%(k=2)$$

A.3 回路参数

表 A.3 回路参数

电容 (pF)		电阻(kΩ)		电感(μH)	
标准	实测	标准	实测	标准	实测
500		5		小于 5	

$$\text{电感: } U_{rel}=3\%(k=2)$$

$$\text{电容: } U_{rel}=1.82\%(k=2)$$

$$\text{电阻: } U_{rel}=0.068\%(k=2)$$

A.4 输出电流波形特征参数

表 A.4 放电电流波形特征参数

仪器设定电压 (kV)	第一峰值电流 A		上升时间 $t_r(\text{ns})$		脉冲宽度 $t_w(\mu\text{s})$	
	标准	实测	标准	实测	标准	实测
5	0.98		110		1.70	
10	1.97		110		1.70	
15	2.95		110		1.70	
20	3.94		110		1.70	
25	4.70		110		1.70	
-5	-0.98		110		1.70	
-10	-1.97		110		1.70	
-15	-2.95		110		1.70	
-20	-3.94		110		1.70	
-25	-4.70		110		1.70	

电流上升时间： $U_{rel}=6.60\%(k=2)$

峰值电流： $U_{rel}=6.1\%(k=2)$

半高宽度： $U_{rel}=9.9\%(k=2)$

附录 B

校准证书内页及内页格式

证书编号：XXXX-XXXX

校准结果

B.1 外观及附件检查

表 B.1 外观及外观及附件检查

项目	检查结果
外观检查	
外观及附件检查	

B.2 火工品用静电感度仪计量特性

B.2.1 输出电压

表 B.2 输出电压

仪器设定电压（kV）	标准（kV）	实测电压（kV）
5	5	
10	10	
15	15	
20	20	
25	25	
-5	-5	
-10	-10	
-15	-15	
-20	-20	
-25	-25	

$U_{rel}=1.18\%(k=2)$

B.2.2 回路参数

表 B.3 回路参数

电容（pF）		电阻（kΩ）		电感（μH）	
标准	实测	标准	实测	标准	实测

续表 B.3 回路参数

电容（pF）	电阻（k Ω ）	电感（ μ H）	电容（pF）	电阻（k Ω ）	电感（ μ H）
500		5		小于 5	

电感： $U_{rel}=0.3\%(k=2)$

电容： $U_{rel}=0.18\%(k=2)$

电阻： $U_{rel}=0.066\%(k=2)$

B.2.3 电流波形参数

表 B.4 电流波形参数

仪器设定电压 kV	峰值电流 A		上升时间 t_r (ns)		半高宽度 t_w (us)	
	标准	实测	标准	实测	标准	实测
5	0.98		110		1.70	
10	1.97		110		1.70	
15	2.95		110		1.70	
20	3.94		110		1.70	
25	4.70		110		1.70	
-5	-0.98		110		1.70	
-10	-1.97		110		1.70	
-15	-2.95		110		1.70	
-20	-3.94		110		1.70	
-25	-4.70		110		1.70	

电流上升时间： $U_{rel}=6.60\%(k=2)$

峰值电流： $U_{rel}=6.1\%(k=2)$

半高宽度： $U_{rel}=9.9\%(k=2)$

附录 C

测量不确定度评定示例

C.1 输出电压校准

校准条件：采用静电电压表对火工品用静电感度仪进行校准。

C.1.1 测量方法及测量模型

$$V_{out} = V_{ref} + \Delta V \quad (C.1)$$

式中：

V_{out} ——输出电压测量值，（V）；

V_{ref} ——校准源提供的标准值，（V）；

ΔV ——测量误差，（V）。

C.1.2 测量不确定度分量的评定

根据实际使用环境，在静电感度仪输出电压测量中影响总测量结果的不确定度来源主要有以下因素：

- a) 静电电压表引入的不确定度作为B类不确定度。
- b) 重复测量引入的校准结果不确定度作为A类不确定度。

C.1.3 标准不确定度分量评定

C.1.3.1 静电电压表引入的不确定度

静电电压表测量误差引入的不确定度可由以下公式算出：

$$u_B = \frac{a}{k} \quad (C.2)$$

式中：

a——区间半宽度；

k——置信因子。

由于测量电压10kV时，静电电压表的测量精度为±1%，最大允许误差为±0.1kV，则可能值区间半宽度为：a=0.1，并且测量结果符合均匀分布，查表得出 $k=\sqrt{3}$ ，相对标准不确定度

$$u_B = \frac{0.0577V}{10kV} \times 100\% \approx 0.58\%$$

C.1.3.2 重复测量值 V_{out} 引入的不确定度

重复测量电压10kV的输出电压10次如表C.1所示，引入的不确定度：

表 C.1 重复测量电压 10kV 的输出电压 10 次数据

测量次数	1	2	3	4	5	6	8	9	10
示值 (kV)	10.06	10.06	10.05	10.06	10.06	10.06	10.06	10.06	10.06

平均值:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i = 10.06 \text{ kV}$$

单次实验的标准差:

$$S(x_k) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.03 \text{ kV}$$

测量重复性的不确定度:

$$u(x) = s(\bar{x}) = \frac{S(x_k)}{\sqrt{n}} = 0.01 \text{ kV}$$

相对标准不确定度:

$$u_r(x) = \frac{u(x)}{\bar{x}} \times 100\% = 0.1\%$$

C.1.3.3 标准不确定度评定

不确定度分量, 不确定度来源, 不确定度值见表 C.2 一览表。

表 C.2 标准不确定度分量一览表

不确定度来源	评定方法	概率分布	不确定度值分量
静电电压表测量误差 u_B	B 类	均匀分布, $k=\sqrt{3}$	0.58%
测量重复性 $u(x)$	A 类	正态分布, $k=2$	0.1%

C.1.3.4 合成标准不确定度

$$u_C = \sqrt{u_B^2 + u_{r(x)}^2} \approx 0.59\%$$

C.1.3.5 扩展不确定度

$$U_{rel} = k \cdot u_C = 1.18\% \quad (k=2)$$

C.2 回路电参数测量不确定度评定

C.2.1 电感量测量不确定度评定

C.2.1.1 测量方法及测量模型

以回路电感 5μH 为例, 使用 LCR 测试仪在 1kHz 频率下直接测量被校回路的电感参

数，采用直接测量法。测量模型为：

$$L = L_X - L_0 \quad (C.3)$$

式中：

L ——被校回路电感量实际值；

L_X ——LCR 测试仪的电感量示值；

L_0 ——被校回路的零位电感。

C.2.1.2 测量不确定度分量的评定

根据实际使用环境，电感量测量中影响总测量结果的不确定度来源主要有以下因素：

C.2.1.2.1 由测量重复性引入的标准不确定度分量 u_A 。

C.2.1.2.2 由LCR测试仪引入的不确定度分量。

C.2.1.3 不确定度来源

C.2.1.3.1 由测量重复性引入的标准不确定度分量 u_A

按测量不确定度的 A 类方法评定。相同条件下，用 LCR 测试仪对被校回路电感量在 1kHz 频率下进行重复测量 10 次，如表 C.3 所示，结果如下：（单位：μH）

表 C.3 重复测量电感 10 次数据

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值	4.76	4.68	4.73	4.71	4.72	4.71	4.69	4.71	4.70	4.72

测量结果的平均值：

$$\bar{L} = \frac{\sum_{i=1}^{10} L_i}{10} = 4.713 \mu\text{H}$$

单次测量值的实验标准偏差：

$$S_n(L) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2}{n-1}} = 0.022 \mu\text{H}$$

测量重复性的不确定度

$$u_A = s_n(\bar{L}) = S_n(L) / \sqrt{n} = 0.007 \mu\text{H}$$

则相对不确定度：

$$u_A = 0.149\%$$

C.2.1.3.2 由 LCR 测试仪引入的不确定度分量

a) 由 LCR 测试仪的分辨力引入的标准不确定度分量 u_{B1}

LCR 测试仪在 1kHz 频率下测量 5uH 电感时的分辨力 0.005μH, 按均匀分布, 取 $k=\sqrt{3}$, 由此引入的不确定度分量为:

$$u_{B1} = \frac{\delta_x}{2k} = \frac{0.005\text{uH}}{5\text{uH} \times 2\sqrt{3}} \times 100\% = 0.029\%$$

b) 由 LCR 测试仪允许误差极限引入的标准不确定度分量 u_{B2}

LCR 测试仪在 1kHz 频率下测量 5μH 电感时最大允许误差为 ±0.02%, 即 $\alpha_1=0.02\%$, 按均匀分布, 取 $k=\sqrt{3}$, 由此引入的不确定度分量:

$$u_{B2} = \frac{\alpha}{k} = \frac{0.02\%}{\sqrt{3}} = 0.012\%$$

c) 由零位电感测量不准引入的标准不确定度分量 u_{B3}

根据被校回路的计量特性, 在 5μH 电感量时, 其零位电感应不大于 1μH, 即为标称值的 0.001%, 该不确定度分量可以忽略不计。

C.2.1.3.3 标准不确定度评定

不确定度分量, 不确定度来源, 不确定度值见表 C.4 一览表。

表 C.4 标准不确定度分量一览表

序号	不确定度来源	评定方法	概率分布	不确定度分量
1	测量重复性 u_A	A 类	正态分布, $k=2$	0.149%
2	LCR 测试仪的分辨力 u_{B1}	B 类	均匀分布, $k=\sqrt{3}$	0.029%
3	LCR 测试仪最大允许误差 u_{B2}	B 类	均匀分布, $k=\sqrt{3}$	0.012%

C.2.1.3.4 合成标准不确定度

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2} = 0.15\%$$

C.2.1.3.5 扩展不确定度

$U_{\text{rel}}=k \cdot u_C$, 取 $k=2$, 由此得到回路电感校准结果的扩展不确定度为

$$U_{\text{rel}}=2u_C=2 \times 0.15\%=0.3\%, \quad k=2。$$

C.2.2 电容量测量不确定度评定

C.2.2.1 测量方法及测量模型

以回路电容量 500pF 为例, 使用 LCR 测试仪在 1kHz 频率下直接测量被校回路的电容参数, 采用直接测量法。测量模型为:

$$C = C_X - C_0 \quad (\text{C.4})$$

式中:

C ——被校回路电容量实际值;

C_X ——LCR 测试仪的电容量示值；

C_0 ——被校回路的零位电容。

C.2.2.2 主要不确定度来源

主要不确定度来源包含：

- a) 测量重复性引入的标准不确定度分量；
- b) LCR 测试仪的分辨力引入的标准不确定度分量；
- c) LCR 测试仪允许误差极限引入的标准不确定度分量；
- d) 零位电容测量不准引入的标准不确定度分量。

C.2.2.3 标准不确定度分量评定

C.2.2.3.1 由测量重复性引入的标准不确定度分量 u_A

按测量不确定度的 A 类方法评定。相同条件下，用 LCR 测试仪对被校回路电容量在 1kHz 频率下进行重复测量 10 次，如表 C.5 所示：（单位：pF）

表 C.5 重复测量 10 次电容数据表

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值	502	503	505	498	510	506	503	502	493	501

测量结果的平均值：

$$\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^{10} C_i}{10} = 502.3 \text{ pF}$$

单次测量值的实验标准偏差：

$$S_n(C) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}{n-1}} = 4.57 \text{ pF}$$

则相对不确定度：

$$u_A = 0.91\%$$

C.2.2.3.2 由 LCR 测试仪的分辨力引入的标准不确定度分量 u_{B1}

LCR 测试仪在 1kHz 频率下测量 500pF 电容时的分辨力 0.1pF，按均匀分布，取 $k = \sqrt{3}$ ，由此引入的相对不确定度分量为：

$$u_{B1} = \frac{\delta_x}{2k} = \frac{0.1 \text{ pF}}{500 \text{ pF} \times 2\sqrt{3}} \times 100\% = 0.005\%$$

C.2.2.3.3 由 LCR 测试仪允许误差极限引入的标准不确定度分量 u_{B2}

LCR 测量仪在 1kHz 频率下测量 500pF 电容时最大允许误差为 $\pm 0.03\%$ ，即 $\alpha_1 = 0.03\%$ ，

按均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ ，由此引入的不确定度分量为：

$$u_{B2} = \frac{\alpha}{k} = \frac{0.03\%}{\sqrt{3}} = 0.017\%$$

C.2.2.3.4 由零位电容测量不准引入的标准不确定度分量 u_{B3}

根据被校回路的计量特性，在 500pF 电容量时，其零位电容应不大于 0.1pF，即为标称值的 0.02%，按均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ ，由此引入的不确定度分量为：

$$u_{B3} = \frac{\alpha}{k} = \frac{0.02\%}{\sqrt{3}} = 0.012\%$$

C.2.2.3.5 合成标准不确定度

测量不确定度分量汇总如表 C.6 所示。

表 C.6 标准不确定度分量一览表

序号	不确定度来源	评定方法	概率分布	不确定度分量
1	测量重复性 u_A	A 类	正态分布, $k=2$	0.91%
2	LCR 测量仪的分辨力 u_{B1}	B 类	均匀分布, $k=\sqrt{3}$	0.005%
3	LCR 测量仪最大允许误差 u_{B2}	B 类	均匀分布, $k=\sqrt{3}$	0.017%
4	零位电容误差 u_{B3}	B 类	均匀分布, $k=\sqrt{3}$	0.012%

上述分量中，则相对合成标准不确定度为

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2} = 0.09\%$$

C.2.2.3.6 扩展不确定度

$U_{rel} = k \cdot u_C$, 取 $k=2$, 由此得到回路电感校准结果的扩展不确定度为：

$$U_{rel} = 2u_C = 2 \times 0.09\% = 0.18\%, \quad k=2。$$

C.2.3 电阻量测量不确定度评定

C.2.3.1 测量方法及测量模型

以回路电阻 $5k\Omega$ 为例，使用 LCR 测试仪在 1kHz 频率下直接测量被校回路的电阻参数，采用直接测量法。

测量模型为：

$$R = R_X \quad (C.5)$$

式中：

R -被校回路电阻实际值；

R_X -LCR 测试仪的电阻量示值。

C.2.3.2 主要不确定度来源

主要不确定度来源包含：

- a) 测量重复性引入的标准不确定度分量；
- b) LCR 测试仪的分辨力引入的标准不确定度分量；
- c) LCR 测试仪允许误差极限引入的标准不确定度分量；
- d) 电阻测量不准引入的标准不确定度分量。

C.2.3.3 标准不确定度分量评定

C.2.3.3.1 由测量重复性引入的标准不确定度分量 u_A

按测量不确定度的 A 类方法评定。相同条件下，用 LCR 测试仪对被校回路电阻量在 1kHz 频率下进行重复测量 10 次，如表 C.7 所示：（单位： Ω ）

表 C.7 重复测量 10 次电阻数据表

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值	5004	5005	5004	5004	5005	5005	5005	5005	5005	5004

测量结果的平均值：

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^{10} R_i}{10} = 5004.6 \Omega$$

单次测量值的实验标准偏差：

$$S_n(R) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}{n-1}} = 1.55 \Omega$$

则相对不确定度：

$$u_A = 0.031\%$$

C.2.3.3.2 由 LCR 测试仪的分辨力引入的标准不确定度分量 u_{B1}

LCR 测试仪在 1kHz 频率下测量 5000 Ω 电阻时的分辨力 0.1 Ω ，按均匀分布，取 $k = \sqrt{3}$ ，由此引入的相对不确定度分量为：

$$u_{B1} = \frac{\delta_x}{2k} = \frac{0.1\Omega}{5000\Omega \times 2\sqrt{3}} \times 100\% = 0.0005\%$$

C.2.3.3.3 由 LCR 测试仪仪允许误差极限引入的标准不确定度分量 u_{B2}

LCR 测试仪在 1kHz 频率下测量 5000 Ω 电容时最大允许误差为 $\pm 0.02\%$ ，即 $\alpha = 0.01\%$ ，按均匀分布，取 $k = \sqrt{3}$ ，由此引入的不确定度分量为：

$$u_{B1} = \frac{\alpha}{k} = \frac{0.02\%}{\sqrt{3}} = 0.012\%$$

C.2.3.3.4 合成标准不确定度

测量不确定度分量汇总如表 C.8 所示。

表 C.8 标准不确定度分量一览表

序号	不确定度来源	评定方法	概率分布	不确定度分量
1	测量重复性 u_A	A 类	正态分布, $k=2$	0.031%
2	LCR 测试仪的分辨力 u_{B1}	B 类	均匀分布, $k=\sqrt{3}$	0.0005%
3	LCR 测试仪最大允许误差 u_{B2}	B 类	均匀分布, $k=\sqrt{3}$	0.012%

上述分量中, 则相对合成标准不确定度为

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2} = 0.033\%$$

C.2.3.3.5 扩展不确定度

$U_{rel}=k \cdot u_C$, 取 $k=2$, 由此得到回路电感校准结果的扩展不确定度为:

$$U_{rel}=2u_C=2 \times 0.033\%=0.066\% (k=2)$$

C.3 放电电流波形的校准

C.3.1 峰值电流的校准

C.3.1.1 峰值电流不确定度评定通常采用以下数学模型:

$$I = I_R + L_C + Z_f + \delta_P \quad (C.6)$$

式中:

I ——实际施加到受试设备的电流值, A;

I_R ——示波器测的电流值, A;

L_C ——路径电缆的损耗;

Z_f ——转换因子引入的损耗;

δ_P ——阻抗失配引起的损耗。

C.3.1.2 测量不确定度分量的评定

根据实际的校准环境, 在火工品用静电感度仪峰值电流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:

- 示波器垂直测量误差引入的不确定度作为B类不确定度;
- 静电放电靶-电缆频率响应引入的不确定度作为B类不确定度;
- 静电放电靶-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;
- 失配引入的不确定度作为B类不确定度;

e) 重复测量引入的校准结果不确定度作为A类不确定度。

C.3.1.3 标准不确定度分量评定

C.3.1.3.1 示波器测量精度引起的不确定度

示波器的技术指标中，垂直测量精度为满刻度 $\pm 1\%$ ，满刻度电压范围为 $1\text{V}/\text{Div} \times 10$ 格，即绝对误差范围为 $\Delta U = \pm 0.1\text{V}$ ，按均匀分布，取 $k = \sqrt{3}$ ，由此引入的相对不确定度分量：

$$u_{B1} = \frac{\Delta U}{k} = \frac{0.1}{10 \times \sqrt{3}} = 0.577\%$$

C.3.1.3.2 静电放电靶-电缆频率响应引入的不确定度

整个静电放电靶-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 $9\text{kHz} \sim 4\text{GHz}$ 的频率响应曲线。频率响应曲线的标准偏差为 0.10dB ，网络分析仪的测量不确定度为 0.04dB ，按正态分布，包含因子 $k=2$ 。

合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{0.10^2 + 0.04^2} = 0.1077\text{dB}$$

扩展不确定度为：

$$u_{B2} = k \times u_c = 0.2154\text{dB}$$

由此，得到静电放电靶-电缆的频率响应引入的不确定度为 $0.2\text{dB}(k=2)$ ，现性相对不确定度为 2.5% 。

C.3.1.3.3 静电放电靶-电缆的电压/电流转换因子引入的不确定度

静电放电靶-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 0.02% ，多用表的电压测量精度为 $\pm 0.008\%$ ， 50Ω 精密负载的精度为 $\pm 0.5\%$ ，重复测量，计算得到静电放电靶-电缆的电压/电流转换因子引入的不确定度，按正态分布，包含因子 $k=2$ 。

标准电流源测量不确定度： $u_r(I) = 0.01\%$

多用表电压测量不确定度： $u_r(I) = 0.004\%$

50Ω 精密负载测量不确定度： $u_r(R) = 0.25\%$

合成相对标准不确定度

$$U_{r,c}(Z) = \sqrt{u_r(U)^2 + u_r(I)^2 + u_r(R)^2} \approx 0.25\%$$

C.3.1.3.4 失配引入的不确定度

数字示波器输入端驻波比不大于 1.2 ，静电放电靶输出端驻波比不大于 1.5 。失配引入的不确定度为U型分布， $k = \sqrt{2}$ 。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放电靶引入的相对误差：

$$\delta_1 = \frac{1.5-1}{1.5+1} = 20\%$$

示波器驻波比引入的相对误差：

$$\delta_2 = \frac{1.2-1}{1.2+1} \approx 9.09\%$$

总失配相对误差：

$$\delta_{\text{总}} = \delta_1 \times \delta_2 = 20\% \times 9.09\% = 1.818\%$$

相对标准不确定度：

$$u_r = \frac{1.818\%}{\sqrt{2}} \approx 1.29\%$$

C.3.1.3.5 重复测量引入的校准结果不确定度

对10kV处峰值电流重复测量10次，如表C.9所示：（单位：A）

表 C.9 重复测量 10 次电流峰值数据表

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值	1.94	2.00	1.98	2.00	1.94	1.98	1.95	2.00	1.95	1.96

测量结果的平均值：

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^{10} A_i}{10} = 1.97\text{A}$$

单次测量值的实验标准偏差：

$$u_i(y) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}{n-1}} = 0.02\text{A}$$

则相对不确定度：

$$u_A = 1\%$$

C.3.1.3.6 系统合成标准不确定度

系统合成标准不确定度如表C.10所示：

表C.10 峰值电流校准不确定度分量一览表

序号	分量来源	评定方法	概率分布	不确定度分量
1	重复测量 u_A	A 类	正态分布， $k=1$	1.0%

续表C.10 峰值电流校准不确定度分量一览表

序号	分量来源	评定方法	概率分布	不确定度分量
----	------	------	------	--------

2	示波器垂直测量误差 u_{B1}	B 类	均匀分布, $k = \sqrt{3}$	0.577%
3	静电放电靶-电缆频率响应 u_{B2}	B 类	正态分布, $k = 2$	2.5%
4	静电放电靶-电缆的电压/电流 转换因子 $u_{r,c}(Z)$	B 类	正态分布, $k = 2$	0.25%
5	失配引入 u_r	B 类	U 型分布, $k = \sqrt{2}$	1.29%

上述分量中, 则合成相对标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{r,c(Z)}^2 + u_r^2} \approx 3.05\%$$

C.3.1.3.7 系统扩展不确定度

$U_{rel} = k \cdot u_c$, 取 $k=2$, 由此得到回路电感校准结果的扩展不确定度为:

$$U_{rel} = 2u_c = 2 \times 3.05\% = 6.1\%, \quad k=2。$$

C.3.2 电流上升时间的校准

C.3.2.1 电流上升时间不确定度评定通常采用以下数学模型:

$$t_r = I_P + I_{10} + I_{90} + t_b \quad (C.7)$$

式中:

I_P ——示波器峰值, A;

I_{10} ——10%峰值电流测量值, A;

I_{90} ——90%峰值电流测量值, A;

t_b ——示波器水平测量精度, ns。

C.3.2.2 测量不确定度分量的评定

根据实际的校准环境, 在火工品用静电感度仪电流上升时间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:

C.3.2.2.1 示波器峰值读数引入的不确定度作为B类不确定度;

C.3.2.2.2 示波器90%峰值电流读数引入的不确定度;

C.3.2.2.3 示波器10%峰值电流读数引入的不确定度;

C.3.2.2.4 示波器水平测量精度引入的不确定度;

C.3.2.2.5 静电放电靶-电缆链路引入的不确定度;

C.3.2.2.6 复测量引入的校准结果不确定度

C.3.2.3 标准不确定度分量评定

C.3.2.3.1 示波器峰值读数引入的不确定度作为B类不确定度

测量上升时间110ns乘以电流峰值的相对不确定度3.05%, 得到示波器峰值读数引入的不确定度为3.36ns, 认为是正态分布, 包含因子 $k=2$, 相对不确定度 u_{A1} 为3.05%。

C.3.2.3.2 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5GS/s,即每0.2ns采样一个点,由此引入的不确定度为0.1ns,认为是矩形分布,包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。相对标准不确定度为

$$u_i = \frac{0.1ns}{\sqrt{3} \times 110ns} \approx 0.053\%$$

C.3.2.3.3 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5GS/s,即每0.2ns采样一个点,由此引入的不确定度为0.1ns,认为是矩形分布,包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。相对标准不确定度为

$$u_{A2} = \frac{0.1ns}{\sqrt{3} \times 110ns} \approx 0.053\%$$

C.3.2.3.4 示波器水平测量精度引入的不确定度

$$\begin{aligned} \text{时间测量精度} &= 5ps + (5 \times 10^{-6} \times 1.1 \times 10^5 ps) \\ &= 5.55ps = 5.55 \times 10^{-3}ns \end{aligned}$$

相对标准不确定度:

$$u_B = \frac{5.55 \times 10^{-3}}{110.01 \times \sqrt{3}} \approx 0.0029\%$$

认为是矩形分布,包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。

C.3.2.3.5 静电放电靶-电缆链路引入的不确定度

静电放电靶-电缆链路的带宽为2GHz,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175ps。它对整个系统上升时间的影响由下式计算:

$$\begin{aligned} t_0 &= \sqrt{t_s^2 + t_r^2} = \sqrt{175^2 + (1.1 \times 10^5)^2} \\ &= 1.1 \times 10^5 ps \end{aligned}$$

其中 t_r 为电流上升时间,取典型值为110ns将此项作为不确定度项引入,则带来的不确定度为 $t_0 - t_r = 0ns$,因此可以忽略不计。

C.3.2.3.6 复测量引入的校准结果不确定度

对10kV处上升时间重复测量10次,结果如表C.11所示:(单位:ns)。

表 C.11 电流上升时间重复 10 测量数据

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值	110	112	108	111	109	111	110	112	109	109

测量结果的平均值:

$$\bar{t}_r = \frac{\sum_{i=1}^{10} t_{r_i}}{10} = 110.1 \text{ ns}$$

单次测量值的实验标准偏差:

$$u_i(t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}{n-1}} = 1.37 \text{ ns}$$

则相对不确定度:

$$u_{A3} = 1.25\%$$

C.3.2.3.7 系统合成标准不确定度

系统合成标准不确定度如表 C.12 所示:

表 C.12 电流上升时间校准不确定度

序号	分量来源	评定方法	概率分布	不确定度分量
1	示波器峰值读数引入 u_{A1}	B 类	正态分布, $k=2$	3.05%
2	示波器 90% 峰值电流 u_i	B 类	矩形分布, $k=\sqrt{3}$	0.053%
3	示波器 10% 峰值电流 u_{A2}	B 类	矩形分布, $k=\sqrt{3}$	0.053%
4	示波器水平测量精度 u_B	B 类	矩形分布, $k=\sqrt{3}$	0.0029%
5	重复测量 u_{A3}	A 类	正态分布, $k=1$	1.25%

上述分量中, 则合成标准不确定度为

$$u_C = \sqrt{u_{A1}^2 + u_i^2 + u_{A2}^2 + u_B^2 + u_{A3}^2} \approx 3.30\%$$

C.3.2.3.8 扩展不确定度

$U_{\text{rel}} = k \cdot u_C$, 取 $k=2$, 由此得到回路电感校准结果的扩展不确定度为:

$$U_{\text{rel}} = 2u_C = 2 \times 3.3\% = 6.6\%, \quad k=2。$$

C.3.3 半高宽度的校准不确定度

C.3.3.1 半高宽度不确定度评定通常采用以下数学模型:

$$t_w = I_P + (t_2 - t_1) + t_b \quad (\text{C.8})$$

式中:

I_P ——示波器峰值, A;

t_2 ——下降沿穿过50%峰值电流时的时刻, us;

t_1 ——上升沿穿过50%峰值电流时的时刻, us;

t_b ——示波器水平测量精度, ns。

C.3.2.2 测量不确定度分量的评定

根据实际的校准环境, 在火工品用静电感度仪半高宽度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:

C.3.2.2.1 示波器峰值读数引入的不确定度作为B类不确定度;

C.3.2.2.2 示波器 50% 峰值电流读数引入的不确定度;

C.3.2.2.4 示波器水平测量精度引入的不确定度;

C.3.2.2.5 复测量引入的校准结果不确定度

C.3.2.3 标准不确定度分量评定

C.3.2.3.1 示波器峰值读数引入的不确定度作为B类不确定度

测量上升时间110ns乘以电流峰值的相对不确定度3.05%，得到示波器峰值读数引入的不确定度为3.36ns，认为是正态分布，包含因子 $k=2$ ，相对不确定度 u_{A1} 为3.05%。

C.3.2.3.2 示波器 50% 峰值电流读数引入的不确定度

由于示波器的采样率为 5GS/s，即每 0.2ns采样一个点，由此引入的不确定度为 0.1ns，认为是矩形分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。相对标准不确定度为

$$u_i = \frac{0.1ns}{\sqrt{3} \times 1700ns} \approx 0.003\%$$

C.3.2.3.3 示波器水平测量精度引入的不确定度

$$\begin{aligned} \text{时间测量精度} &= 5ps + (5 \times 10^{-6} \times 1.7 \times 10^6 ps) \\ &= 13.5ps = 1.35 \times 10^{-5}us \end{aligned}$$

相对标准不确定度:

$$u_B = \frac{1.35 \times 10^{-5}}{1.7 \times \sqrt{3}} \approx 0.0005 \%$$

认为是矩形分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。

C.3.2.3.4 复测量引入的校准结果不确定度

对10kV处半高宽度重复测量10次，结果如表C.13所示: (单位: us)。

表 C.13 半高宽度重复 10 次测量数据

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值	1.65	1.70	1.64	1.78	1.76	1.77	1.78	1.65	1.79	1.65

测量结果的平均值:

$$\bar{t}_w = \frac{\sum_{i=1}^{10} t_{w_i}}{10} = 1.72us$$

单次测量值的实验标准偏差:

$$u_i(t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}{n-1}} = 0.067 \mu\text{s}$$

则相对不确定度:

$$u_{A3} = 3.9\%$$

C.3.2.3.6 系统合成标准不确定度

系统合成标准不确定度如表 C.14 所示:

表 C.14 半高宽度校准不确定度

序号	分量来源	评定方法	概率分布	不确定度分量
1	示波器峰值读数引入 u_{A1}	B 类	正态分布, $k=2$	3.05%
2	示波器 50% 峰值电流 u_i	B 类	矩形分布, $k=\sqrt{3}$	0.003%
4	示波器水平测量精度 u_B	B 类	矩形分布, $k=\sqrt{3}$	0.0005%
5	重复测量 u_{A2}	A 类	正态分布, $k=1$	3.9%

上述分量中, 则合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_{A1}^2 + u_i^2 + u_B^2 + u_{A2}^2} \approx 4.95\%$$

C.3.2.3.8 扩展不确定度

$U_{\text{rel}} = k \cdot u_c$, 取 $k=2$, 由此得到回路电感校准结果的扩展不确定度为:

$$U_{\text{rel}} = 2u_c = 2 \times 4.95\% = 9.9\%, \quad k=2。$$

中华人民共和国工业和信息化部

兵工民品计量技术规范

火工品用静电感度仪校准规范

JJF(兵工民品) XXXX—20XX

版权所有 不得翻印