《电池芯绝缘短路测试仪校准规范》
测量不确定度评定报告

1 引言

电池芯绝缘短路测试仪的校准项目有 6 项，校准项目和对应的校准方法见表 1，涉及的参数包括直流电压、直流电阻、电容、直流电流和时间间隔。其中短路测试电压、绝缘电阻测试电压评定过程类似，标准不确定度来源和评定程序类似，不过多阐述。

表 1 电池芯绝缘短路测试仪校准项目一览表

序号	校准项目	校准方法	评定过程序号
1	短路测试电压	标准电压表法（直接测量法）	2.1
		比例标准法（间接测量法）	2.2
2	短路测试时间	示波器法	3
3	绝缘电阻测试电压	标准电压表法（直接测量法）	2.1
		比例标准法（间接测量法）	2.2
4	绝缘电阻	直接测量法	5
5	等效电容	直接测量法	6
6	直流漏电流	标准表法（直接测量法）	7
注：绝缘电阻测试电压测量不确定度的评定过程参照短路测试电压的评定。			

2 短路测试电压测量不确定度评定

2.1 标准电压表法

2.1.1 概述

测量条件：环境温度：（23±5）℃，相对湿度：25%～75%。

测量标准：数字多用表、数字高压表。

被测对象：电池芯绝缘短路测试仪。

测量方法：采用标准表法，即直接测量法，用数字高压表直接测量电池芯绝缘短路测试仪的短路测试电压 500 V，记录被校测试仪短路测试电压示值V_x和标准值V_0。

2.1.2 测量模型

被校测试仪短路测试电压示值误差ΔU为输出量。被校测试仪短路测试电压示值U_x、数字高压表的测量值U_0为输入量。考虑到被校测试仪短路测试电压分辨力δU_x的影响，以及在标准条件下，由温度、湿度、供电电源不稳定和电磁干扰等带来的影响

可忽略，标准表法的测量模型可用（2.1）式表示。

$$\Delta U = U_{\mathrm{x}} - U_0 + \delta U_{\mathrm{x}} \qquad (2.1)$$

式中：

ΔU ——被校测试仪短路测试电压示值误差，V；

U_{x} ——被校测试仪短路测试电压示值，V；

U_0 ——直流电压标准值，V；

δU_{x} ——被校测试仪短路测试电压分辨力，V。

因各输入量互不相关，则其测量不确定度传播律可用（2.2）式表示。

$$u_{\mathrm{c}}^2(\Delta U) = c^2(U_{\mathrm{x}}) \times u^2(U_{\mathrm{x}}) + c^2(U_0) \times u^2(U_0) + c^2(\delta U_{\mathrm{x}}) \times u^2(\delta U_{\mathrm{x}}) \qquad (2.2)$$

式中，灵敏系数为：

$$c(U_{\mathrm{x}}) = 1 \qquad c(U_0) = -1 \qquad c(\delta U_{\mathrm{x}}) = 1$$

2.1.3 标准不确定度来源

1）被校测试仪短路测试电压测量重复性引入的标准不确定度 $u_{\mathrm{A}}(U_{\mathrm{x}})$。

2）被校测试仪短路测试电压示值分辨力引入的标准不确定度 $u(\delta U_{\mathrm{x}})$。

3）数字高压表的最大允许误差引入的标准不确定度 $u(U_0)$。

2.1.4 标准不确定度评定

2.1.4.1 被校测试仪短路测试电压测量重复性引入的标准不确定度 $u_{\mathrm{A}}(U_{\mathrm{x}})$

连续重复测量10次，得到一系列被校测试仪短路测试电压的重复性测量数据，见表2.1。按A类评定，用贝塞尔公式计算其实验标准偏差作为被校测试仪短路测试电压测量重复性引入的标准不确定度。

表 2.1 被校测试仪短路测试电压的测量重复性测量数据

第 i 次测量	1	2	3	4	5
测量值（V）	500.1	500.2	500.2	500.1	500.3
第 i 次测量	6	7	8	9	10
测量值（V）	500.1	500.0	500.2	500.1	500.1

用单次测量值作为校准结果时，单次测量值的实验标准偏差 $s(U_{\mathrm{x}})$ 为：

$$s(U_{\mathrm{x}}) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{10} \left(U_{\mathrm{x}i} - \overline{U_{\mathrm{x}}} \right)^2} = 0.084 \text{ V}$$

则测量重复性引入的标准不确定度$u_{\mathrm{A}}(U_{\mathrm{x}})$为：

$$u_{\mathrm{A}}(U_{\mathrm{x}})=s(U_{\mathrm{x}})=0.084\ \mathrm{V}$$

2.1.4.2　被校测试仪短路测试电压分辨力引入的标准不确定度$u(\delta U_{\mathrm{x}})$

被校测试仪短路测试电压的示值分辨力为0.1 V，由此引入的标准不确定度按B类评定，服从均匀分布，包含因子$k=\sqrt{3}$，则被校测试仪短路测试电压示值分辨力引入的标准不确定度为：

$$u(\delta U_{\mathrm{x}})=\frac{0.1}{2\sqrt{3}}\mathrm{V}=0.029\ \mathrm{V}$$

2.1.4.3　数字高压表的最大允许误差引入的标准不确定度$u(V_0)$

由数字高压表的说明书可知，当短路测试电压评定点为500 V时，数字高压表的量程为1000 V，其最大允许误差为±0.2%，按B类评定，服从均匀分布，包含因子$k=\sqrt{3}$，则数字高压表最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(U_0)=\frac{500\times 0.2\%}{\sqrt{3}}\mathrm{V}=0.577\ \mathrm{V}$$

2.1.4　合成标准不确定度

短路测试电压标准不确定度分量汇总表见表2.2。

表 2.2　短路测试电压标准不确定度分量汇总表

输入量	标准不确定度来源	评定方法	概率分布	k值	标准不确定度	灵敏系数
$u_{\mathrm{A}}(U_{\mathrm{x}})$	被校测试仪短路测试电压测量重复性	A	正态	/	0.084 V	1
$u(\delta U_{\mathrm{x}})$	被校测试仪短路测试电压分辨力	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.029 V	1
$u(U_0)$	数字高压表最大允许误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.577 V	-1

被校测试仪短路测试电压的分辨力与重复性引入的标准不确定度存在重复，故舍去其中较小者，取其较大者$u_{\mathrm{A}}(U_{\mathrm{x}})$，又$u(\delta U_{\mathrm{x}})$和$u(U_0)$互不相关，则合成标准不确定度$u_{\mathrm{c}}$为：

$$u_{\mathrm{c}}=\sqrt{u_{\mathrm{A}}^2(U_{\mathrm{x}})+u^2(U_0)}=0.58\ \mathrm{V}$$

2.1.6　扩展不确定度的确定

取$k=2$，则扩展不确定度U为：

$$U=ku_{\mathrm{c}}=2\times 0.58\ \mathrm{V}\approx 1.2\ \mathrm{V}\quad (k=2)$$

2.1.7　测量不确定度的最后陈述

用标准表法对被校测试仪短路测试电压500 V校准点进行校准，短路测试电压500 V校准结果的测量不确定度为U=1.2 V（k=2）。

2.2　高压探头法

2.2.1　概述

测量条件：环境温度：（23±5）℃，相对湿度：25%～75%；

测量标准：高压探头、数据采集器；

被测对象：电池芯绝缘短路测试仪；

测量方法：采用标准源法，即直接测量法，用标准短路测试电压源输出电压 500V，记录被校测试仪短路测试电压示值U_x、高压探头分压比K和数据采集器测得的电压标准值U_0。

2.2.2　测量模型

被校测试仪短路测试电压示值误差ΔU为输出量。被校测试仪短路测试电压示值U_x、高压探头分压比K、数据采集器测得的电压标准值U_0。考虑到被校测试仪短路测试电压分辨力δU_x对测量结果的影响，以及在标准条件下，由温度、湿度、标准短路测试电压源的短期稳定性、供电电源不稳定和电磁干扰等带来的影响可忽略，标准源法的测量模型可用（2.3）式表示。

$$\Delta U = U_x - KU_0 + \delta U_x \qquad (2.3)$$

式中：

ΔU——被校测试仪短路测试电压示值误差，V；

U_x——被校测试仪短路测试电压示值，V；

K——高压探头分压比，V/V；

U_0——数据采集器测得的电压标准值，V；

δU_x——被校测试仪短路测试电压分辨力，V。

因各输入量互不相关，则其测量不确定度传播律可用（2.4）式表示。

$$u_c^2(\Delta U) = c^2(U_x)\times u^2(U_x) + c^2(K)\times u^2(K) + c^2(U_0)\times u^2(U_0) + c^2(\delta U_x)\times u^2(\delta U_x) \qquad (2.4)$$

式中，灵敏系数为：

$$c(U_x)=1 \qquad c(K)=1 \qquad c(U_0)=-1 \qquad c(\delta U_x)=1$$

2.2.3　标准不确定度来源

1）被校测试仪短路测试电压测量重复性引入的标准不确定度$u_{\mathrm{A}}(U_{\mathrm{x}})$。

2）被校测试仪短路测试电压示值分辨力引入的标准不确定度$u(\delta U_{\mathrm{x}})$。

3）高压探头分压比最大允许误差引入的标准不确定度$u(K)$。

4）数据采集器电压最大允许误差引入的标准不确定度$u(U_0)$。

2.2.4　标准不确定度评定

2.2.4.1　被校测试仪短路测试电压测量重复性引入的标准不确定度$u_{\mathrm{A}}(U_{\mathrm{x}})$

连续重复测量10次，得到一系列被校测试仪短路测试电压的重复性测量数据，见表2.3。按A类评定，用贝塞尔公式计算其实验标准偏差作为被校测试仪短路测试电压测量重复性引入的标准不确定度。

表 2.3　被校测试仪短路测试电压测量重复性测量数据

第 i 次测量	1	2	3	4	5
测量值（V）	500.2	500.5	500.1	500.1	500.3
第 i 次测量	6	7	8	9	10
测量值（V）	500.1	500.0	500.3	500.2	500.4

用单次测量值作为校准结果时，单次测量值的实验标准偏差$s(U_{\mathrm{x}})$为：

$$s(U_{\mathrm{x}})=\sqrt{\frac{1}{(n-1)}\sum_{i=1}^{10}\left(U_{\mathrm{x}i}-\overline{U_{\mathrm{x}}}\right)^2}=0.155\ \mathrm{V}$$

则测量重复性引入的标准不确定度$u_{\mathrm{A}}(U_{\mathrm{x}})$为：

$$u_{\mathrm{A}}(U_{\mathrm{x}})=s(U_{\mathrm{x}})=0.155\ \mathrm{V}$$

重复性引入的标准不确定度相对值为

$$u_{\mathrm{A}}=\frac{0.155\ \mathrm{V}}{500\ \mathrm{V}}=0.031\%$$

2.2.4.2　被校测试仪短路测试电压示值分辨力引入的标准不确定度$u(\delta U_{\mathrm{x}})$

被校测试仪短路测试电压的示值分辨力为0.1 V，由此引入的标准不确定度按B类评定，服从均匀分布，包含因子$k=\sqrt{3}$，则被校测试仪短路测试电压示值分辨力引入的标准不确定度为：

$$u(\delta U_{\mathrm{x}})=\frac{0.1}{2\sqrt{3}}\mathrm{V}=0.029\ \mathrm{V}$$

分辨力引入的标准不确定度相对值为：

$$u_{\delta}=\frac{0.029\ \mathrm{V}}{500\ \mathrm{V}}=0.0058\%$$

2.2.4.3　高压探头分压比引入的标准不确定度$u(K)$

由高压探头的说明书可知，其分压比的最大允许误差为±0.15%，按B类评定，服从均匀分布，包含因子$k=\sqrt{3}$，则高压探头分压比最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(K)=\frac{0.15\%}{\sqrt{3}}=0.087\%$$

2.2.4.4　数据采集器的最大允许误差引入的标准不确定度$u(U_0)$

由数据采集器的说明书可知，其电压量的最大允许误差为±0.05%，按B类评定，服从均匀分布，包含因子$k=\sqrt{3}$，则标准短路测试电压表最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(U_0)=\frac{0.05\%}{\sqrt{3}}=0.029\%$$

2.2.5　合成标准不确定度

短路测试电压标准不确定度分量汇总表见表2.4。

表 2.4　短路测试电压标准不确定度分量汇总表

输入量	标准不确定度来源	评定方法	概率分布	k值	标准不确定度	灵敏系数
$u_{\mathrm{A}}(U_{\mathrm{x}})$	被校测试仪短路测试电压测量重复性	A	正态	/	0.031%	1
$u(\delta U_{\mathrm{x}})$	被校测试仪短路测试电压分辨力	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0058%	1
$u(K)$	高压探头分压比	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.087%	-1
$u(U_0)$	数据采集器电压最大允许误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.029%	-1

被校测试仪短路测试电压的分辨力与重复性引入的标准不确定度存在重复，故舍去其中较小者，取其较大者$u_{\mathrm{A}}(U_{\mathrm{x}})$，又$u(\delta U_{\mathrm{x}})$和$u(U_0)$互不相关，则合成标准不确定度$u_{\mathrm{c}}$为：

$$u_{\mathrm{c}}=\sqrt{u_{\mathrm{A}}^2(U_{\mathrm{x}})+u^2(K)+u^2(U_0)}=0.096\%$$

2.2.6　扩展不确定度的确定

取$k=2$，则扩展不确定度U_{rel}为：

$$U_{\mathrm{rel}} = ku_{\mathrm{c}} = 2 \times 0.096\% = 0.2\% \quad (k=2)$$

则扩展不确定度U为：$U = U_{\mathrm{x}} U_{\mathrm{rel}} = 500\ \mathrm{V} \times 0.2\% = 1\ \mathrm{V}$ （k=2）

2.2.7　测量不确定度的最后陈述

用标准源法对被校测试仪短路测试电压500 V进行校准，则其校准结果的测量不确定度为U=1 V（k=2）。

3　短路测试时间测量不确定度评定

3.1　概述

测量条件：环境温度：（23±5）℃，相对湿度：25%～75%；

测量标准：数字示波器，高压差分探头。

被测对象：电池芯绝缘短路测试仪。

测量方法：采用示波器法，用数字示波器通过高压差分探头直接测量被校测试仪输出短路测试电压的时间间隔，记录被校测试仪短路测试时间的设置值 t_{x}和数字示波器的测量值 t_0。

3.2　测量模型

用数字示波器校准电池芯绝缘短路测试仪的短路测试时间，数字示波器可以直接测量脉冲宽度t_0，短路测试时间的测量模型可用式（3.1）表示：

$$\Delta t = t_{\mathrm{x}} - t_0 \tag{3.1}$$

式中：

Δt——被校测试仪短路测试时间的示值误差，ms。

t_{x}——被校测试仪短路测试时间的示值，ms。

t_0——数字示波器测得的短路测试时间的实测值，ms。

短路测试时间的不确定度传播可用公式（3.2）表示。

$$u_{\mathrm{c}}\left(\Delta t\right) = \sqrt{u_{\mathrm{A}}^2(t_0) + u_{\mathrm{b}}^2(t_0) + u_1^2(t_0) + u_2^2(t_0) + u_{\mathrm{r}}^2(t_0)} \tag{3.2}$$

式中：

$u_{\mathrm{c}}\left(\Delta t\right)$——被校准测试仪短路测试时间的合成标准不确定度，ms；

$u_{\mathrm{A}}(t_0)$——短路测试时间测量重复性引入的标准不确定度，ms；

$u_{\mathrm{b}}(t_0)$——数字示波器时基误差引入的标准不确定度，ms；

$u_1(t_0)$——人员确定短路测试时间起始点不准引入的标准不确定度，ms；

$u_2(t_0)$——人员确定短路测试时间终止点不准引入的标准不确定度，ms；

$u_r(t_0)$——数字示波器时间测量分辨力引入的标准不确定度，ms。

3.3　不确定度来源

不确定度来源如下：

a）短路测试时间测量重复性引入的标准不确定度$u_A(t_0)$；

b）数字示波器时基误差引入的标准不确定度$u_b(t_0)$；

c）人员确定短路测试时间起始点不准引入的标准不确定度$u_1(t_0)$；

d）人员确定短路测试时间终止点不准引入的标准不确定度$u_2(t_0)$；

e）数字示波器时间测量分辨力引入的标准不确定度$u_r(t_0)$。

3.4　标准不确定度分量评定

3.4.1　短路测试时间测量重复性引入的标准不确定度$u_A(t_0)$

测量结果的重复性引入的标准不确定度，通过多次重复测量进行 A 类评定。被测电池芯绝缘短路测试仪的短路测试时间的设定值为 100 ms，数字示波器的测量值如表 3.1 所示，用贝塞尔公式（3.3）计算实验标准差：

$$s(t_0)=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10}(t_{0i}-\overline{t_0})^2}{n-1}} \tag{3.3}$$

式中：

$\overline{t_c}$——数字示波器多次测量值的平均值，ms；

t_{ci}——数字示波器第 i 次测量值，ms；

n——重复测量的次数，此处$n=10$。

表 3.1　电池芯绝缘短路测试仪短路测试时间重复性测量数据

第 i 次测量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值/ms	99.96	99.98	99.94	99.98	99.92	99.96	99.94	99.98	99.96	99.98

根据表 A.1 中的数据，可由公式（A.3）计算数字示波器多次重复测量的实验标准差：

$$u_A(\Delta t)=s(t_0)=0.021\ \text{ms}$$

3.4.2　数字示波器时基误差引入的标准不确定度$u_b(t_0)$

采用 B 类方法评定，数字示波器的时基误差为$\pm 2\times10^{-5}$，则区间半宽度为2×10^{-5}，

服从均匀分布，按 B 类评定，取包含因子 $k=\sqrt{3}$，由表 A.1 中的数据，可以算出短路测试时间的平均值为 99.88 ms，则数字示波器时基误差引入的标准不确定度为：

$$u_{\mathrm{b}}(t_0)=\frac{99.88\ \mathrm{ms}\times 2\times 10^{-5}}{\sqrt{3}}=0.0012\ \mathrm{ms}$$

3.4.3　人员确定短路测试时间起始点不准引入的标准不确定度 $u_1(t_0)$

由数字示波器说明书知记录长度为 10000 点，示波器测量 100 ms 的水平时域偏转系数为 20 ms/div，满屏 10 div，故测量光标步进分辨力为 0.02 ms，服从均匀分布，按 B 类评定，取包含因子 $k=\sqrt{3}$，则人员确定短路测试时间起始点不准引入的标准不确定度为：

$$u_1(t_0)=\frac{0.02\ \mathrm{ms}}{\sqrt{3}}=0.012\ \mathrm{ms}$$

3.4.4　人员确定短路测试时间终止点不准引入的标准不确定度 $u_2(t_0)$

同上，人员确定短路测试时间终止点不准引入的标准不确定度为：

$$u_2(t_0)=\frac{0.02\ \mathrm{ms}}{\sqrt{3}}=0.012\ \mathrm{ms}$$

3.4.5　数字示波器时间测量分辨力引入的标准不确定度 $u_{\mathrm{r}}(t_0)$

由数字示波器说明书知其分辨力为 0.01 ms，区间半宽度为 0.005 ms，服从均匀分布，按 B 类评定，取包含因子 $k=\sqrt{3}$，则数字示波器时间测量分辨力引入的标准不确定度为：

$$u_{\mathrm{r}}(t_0)=\frac{0.01\ \mathrm{ms}}{2\times\sqrt{3}}=0.0029\ \mathrm{ms}$$

3.5　合成标准不确定度

短路测试时间的标准不确定度分量见表 3.2。

表 3.2　电池芯绝缘短路测试仪短路测试时间测量不确定度分量表

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	分布类型	k 值	标准不确定度
$u_{\mathrm{A}}(\Delta t)$	重复性引入	A	正态	1	0.021 ms
$u_{\mathrm{b}}(t_0)$	数字示波器时基误差引入	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0012 ms
$u_1(t_0)$	人员确定起始点不准引入	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.012 ms
$u_2(t_0)$	人员确定终止点不准引入	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.012 ms
$u_{\mathrm{r}}(t_0)$	数字示波器分辨力引入	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0029 ms

表 3.2 中，分辨力引入的标准不确定度小于重复性引入的标准不确定度，舍掉，其余各分量独立不相关，则被校测试仪短路测试时间的合成标准不确定度为：

$$u_{\mathrm{c}}=\sqrt{u_{\mathrm{A}}^2(t_0)+u_{\mathrm{b}}^2(t_0)+u_1^2(t_0)+u_2^2(t_0)}=0.027\ \mathrm{ms}$$

3.6　扩展不确定度

取包含因子 k=2，则被校测试仪短路测试时间的扩展不确定度为：

$$U=ku_{\mathrm{c}}\approx 0.06\ \mathrm{ms}$$

3.7　测量不确定度的最后陈述

用示波器法对被校测试仪短路测试时间100 ms进行校准，则其校准结果的测量不确定度为：

U= 0.06 ms　（k =2）。

4　绝缘电阻测试电压测量不确定度评定

绝缘电阻测试电压测量不确定度的评定过程参照短路测试电压的评定，此处不再重新评定。

5　绝缘电阻测量不确定度评定

5.1　概述

测量条件：环境温度：（23±5）℃，相对湿度：25%～75%；

测量标准：高压高阻箱；

被测对象：电池芯绝缘短路测试仪；

测量方法：采用直接测量法，将被校测试仪与高压高阻箱直接连接，调节高压高阻箱电阻值为 1 MΩ，记录被校测试仪绝缘电阻测量值 R_{x} 和高压高阻箱的标准值 R_0。

5.2　测量模型

被校测试仪绝缘电阻示值误差 ΔR 为输出量。被校测试仪绝缘电阻示值 R_{x}、高压高阻箱的标准值 R_0 为输入量。考虑到被校测试仪绝缘电阻示值分辨力 δR_{x} 对测量结果的影响，以及在标准条件下，由温度、湿度、供电电源不稳定和电磁干扰等带来的影响可忽略，标准表法的测量模型可用（5.1）式表示。

$$\Delta R=R_{\mathrm{x}}-R_0+\delta R_{\mathrm{x}} \qquad (5.1)$$

式中：

ΔR ——被校测试仪绝缘电阻示值误差，MΩ；

R_x ——被校测试仪绝缘电阻示值，MΩ；

R_0 ——直流电阻标准值，MΩ；

δR_x ——被校测试仪绝缘电阻示值分辨力，A。

因各输入量互不相关，则其测量不确定度传播律可用（5.2）式表示。

$$u_c^2(\Delta R)=c^2(R_x)\times u^2(R_x)+c^2(R_0)\times u^2(R_0)+c^2(\delta R_x)\times u^2(\delta R_x) \qquad (5.2)$$

式中，灵敏系数为：

$$c(R_p)=1 \qquad c(R_0)=-1 \qquad c(\delta R_x)=1$$

5.3 标准不确定度来源

1）绝缘电阻测量重复性引入的标准不确定度$u_A(R_x)$。

2）被校测试仪绝缘电阻示值分辨力引入的标准不确定度$u(\delta R_x)$。

3）高压高阻箱的最大允许误差引入的标准不确定度$u(R_0)$。

5.4 标准不确定度评定

5.4.1 被校测试仪绝缘电阻测量重复性引入的标准不确定度$u_A(R_x)$

用被校测试仪连续重复测量10次，得到一系列重复性测量数据，见表5.1。按A类评定，用贝塞尔公式计算其实验标准偏差作为被校测试仪绝缘电阻测量重复性引入的标准不确定度。

表 5.1 绝缘电阻测量重复性测量数据

第 i 次测量	1	2	3	4	5
测量值（MΩ）	0.992	0.991	0.992	0.993	0.992
第 i 次测量	6	7	8	9	10
测量值（MΩ）	0.991	0.992	0.992	0.993	0.992

用单次测量值作为校准结果时，单次测量值的实验标准偏差$s(R_x)$为：

$$s(R_x)=\sqrt{\frac{1}{(n-1)}\sum_{i=1}^{10}\left(R_{xi}-\overline{R_x}\right)^2}=0.00067\ \text{MΩ}$$

则测量重复性引入的标准不确定度$u_A(R_x)$为：

$$u_A(R_x)=s(R_x)=0.00067\ \text{MΩ}$$

5.4.2 被校测试仪绝缘电阻示值分辨力引入的标准不确定度$u(\delta R_x)$

被校测试仪说明书可知绝缘电阻示值的分辨力为0.001 MΩ，即设定值分辨力的区

间半宽度为0.0005 MΩ，由此引入的标准不确定度按B类评定，服从均匀分布，包含因子$k=\sqrt{3}$，则被校测试仪绝缘电阻示值分辨力引入的标准不确定度为：

$$u(\delta R_{\mathrm{x}})=\frac{0.0005}{\sqrt{3}}\mathrm{M\Omega}=0.00029\ \mathrm{M\Omega}$$

5.4.3　高压高阻箱的最大允许误差引入的标准不确定度$u(R_0)$

由高压高阻箱的说明书可知，当绝缘电阻评定点为1 MΩ时，高压高阻箱的最大允许误差为±0.2%，按B类评定，服从均匀分布，包含因子$k=\sqrt{3}$，则高压高阻箱最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(R_0)=\frac{1\times 0.2\%}{\sqrt{3}}\mathrm{M\Omega}=0.0012\ \mathrm{M\Omega}$$

5.5　合成标准不确定度

绝缘电阻标准不确定度分量汇总表见表5.2。

表5.2　绝缘电阻标准不确定度分量汇总表

输入量	标准不确定度来源	评定方法	概率分布	k值	标准不确定度	灵敏系数
$u_{\mathrm{A}}(R_{\mathrm{x}})$	被校测试仪绝缘电阻测量重复性	A	正态	/	0.00067 MΩ	1
$u(\delta R_{\mathrm{x}})$	被校测试仪绝缘电阻示值分辨力	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.00029 MΩ	1
$u(R_0)$	高压高阻箱最大允许误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0012 MΩ	-1

被校测试仪绝缘电阻的分辨力与重复性引入的标准不确定度存在重复，故舍去其中较小者，取其较大者$u_{\mathrm{A}}(R_{\mathrm{x}})$，又$u(\delta R_{\mathrm{x}})$和$u(R_0)$互不相关，则合成标准不确定度$u_{\mathrm{c}}$为：

$$u_{\mathrm{c}}=\sqrt{u_{\mathrm{A}}{}^2(R_{\mathrm{x}})+u^2(R_0)}=0.00133\ \mathrm{M\Omega}$$

5.6　扩展不确定度的确定

取$k=2$，则扩展不确定度U为：

$$U=ku_{\mathrm{c}}=2\times 0.00133\ \mathrm{M\Omega}\approx 0.003\ \mathrm{M\Omega}\qquad (k=2)$$

5.7　测量不确定度的最后陈述

用标准表法对被校测试仪绝缘电阻1 MΩ进行校准，则其校准结果的测量不确定度为U=0.003 MΩ　(k=2)。

6　等效电容测量不确定度评定

6.1　概述

测量条件：环境温度：（23±5）℃，相对湿度：25%～75%；

测量标准：标准电容箱；

被测对象：电池芯绝缘短路测试仪；

测量方法：采用直接测量法，用被校测试仪直接测量标准电容箱的标准电容值100nF，记录被校测试仪等效电容示值C_x和标准电容箱测量值C_0。

6.2 测量模型

被校测试仪等效电容示值误差ΔC为输出量。被校测试仪等效电容示值C_x、标准电容箱的标准值C_0为输入量。考虑到被校测试仪等效电容分辨力δC_x对测量结果的影响，以及在标准条件下，由温度、湿度、供电电源不稳定和电磁干扰等带来的影响可忽略，标准表法的测量模型可用（6.1）式表示。

$$\Delta C = C_x - C_0 + \delta C_x \tag{6.1}$$

式中：

ΔC——被校测试仪等效电容示值误差，F；

C_x——被校测试仪等效电容示值，F；

C_0——等效电容标准值，F；

δC_x——被校测试仪等效电容分辨力，F。

因各输入量互不相关，则其测量不确定度传播律可用（6.2）式表示。

$$u_c^2(\Delta C) = c^2(C_x)\times u^2(C_x) + c^2(C_0)\times u^2(C_0) + c^2(\delta C_x)\times u^2(\delta C_x) \tag{6.2}$$

式中，灵敏系数为：

$$c(C_x)=1 \qquad c(C_0)=-1 \qquad c(\delta C_x)=1$$

6.3 标准不确定度来源

1）被校测试仪等效电容测量重复性引入的标准不确定度$u_A(C_x)$。

2）被校测试仪等效电容示值分辨力引入的标准不确定度$u(\delta C_x)$。

3）标准电容箱的等效电容最大允许误差引入的标准不确定度$u(C_0)$。

6.4 标准不确定度评定

6.4.1 被校测试仪等效电容测量重复性引入的标准不确定度$u_A(C_x)$

连续重复测量10次，得到一系列被校测试仪等效电容重复性测量数据，见表6.1。按A类评定，用贝塞尔公式计算其实验标准偏差作为被校测试仪等效电容测量重复性引入的标准不确定度。

表 6.1　被校测试仪等效电容测量重复性测量数据

第 i 次测量	1	2	3	4	5
测量值（nF）	100.0	100.1	100.0	100.1	100.0
第 i 次测量	6	7	8	9	10
测量值（nF）	100.0	100.0	100.1	100.0	100.1

用单次测量值作为校准结果时，单次测量值的实验标准偏差 $s(C_{\mathrm{x}})$ 为：

$$s(C_{\mathrm{x}})=\sqrt{\frac{1}{(n-1)}\sum_{i=1}^{10}\left(C_{\mathrm{x}i}-\overline{C}_{\mathrm{x}}\right)^2}=0.052\ \mathrm{nF}$$

则测量重复性引入的标准不确定度 $u_{\mathrm{A}}(C_{\mathrm{x}})$ 为：

$$u_{\mathrm{A}}(C_{\mathrm{x}})=s(C_{\mathrm{x}})=0.052\ \mathrm{nF}$$

6.4.2　被校测试仪等效电容示值分辨力引入的标准不确定度 $u(\delta C_{\mathrm{x}})$

被校测试仪等效电容的示值分辨力为0.1 nF，由此引入的标准不确定度按B类评定，服从均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$，则被校测试仪等效电容示值分辨力引入的标准不确定度为：

$$u(\delta C_{\mathrm{x}})=\frac{0.1}{2\sqrt{3}}\mathrm{nF}=0.029\ \mathrm{nF}$$

6.4.3　标准电容箱的等效电容最大允许误差引入的标准不确定度 $u(C_0)$

由标准电容箱的说明书可知，当等效电容评定点为100 nF时，标准电容箱的最大允许误差为±0.02%，按B类评定，服从均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$，则标准电容箱最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(C_0)=\frac{100\times0.02\%}{\sqrt{3}}\mathrm{nF}=0.0115\ \mathrm{nF}$$

6.5　合成标准不确定度

等效电容标准不确定度分量汇总表见表6.2。

表 6.2　等效电容标准不确定度分量汇总表

输入量	标准不确定度来源	评定方法	概率分布	k值	标准不确定度	灵敏系数
$u_{\mathrm{A}}(C_{\mathrm{x}})$	被校测试仪等效电容测量重复性	A	正态	/	0.05 nF	1
$u(\delta C_{\mathrm{x}})$	被校测试仪等效电容分辨力	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.029 nF	1
$u(C_0)$	标准电容箱最大允许误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0115 nF	-1

被校测试仪等效电容的分辨力与重复性引入的标准不确定度存在重复，故舍去其中较小者，取其较大者$u_{\mathrm{A}}(C_{\mathrm{x}})$，又$u(\delta C_{\mathrm{x}})$和$u\ (C_0)$互不相关，则合成标准不确定度$u_{\mathrm{c}}$为：

$$u_{\mathrm{c}}=\sqrt{u_{\mathrm{A}}{}^2(C_{\mathrm{x}})+u^2(C_0)}=0.053\ \mathrm{nF}$$

6.6　扩展不确定度的确定

取$k=2$，则扩展不确定度U为：

$$U=ku_{\mathrm{c}}=2\times 0.053\ \mathrm{nF}\approx 0.11\ \mathrm{nF}\quad（k=2）$$

6.7　测量不确定度的最后陈述

用比较测量法对被校测试仪等效电容100 nF进行校准，则其校准结果的测量不确定度为U= 0.11 nF（k=2）。

7　直流漏电流测量不确定度评定

7.1　概述

测量条件：环境温度：（23 ± 5）℃，相对湿度：25%～75%。

测量标准：皮安表。

被测对象：电池芯绝缘短路测试仪。

测量方法：采用标准表法，即直接比较测量法，用皮安表的电流表通道串联至电池芯绝缘短路测试仪的直流漏电流测量回路中，记录被校测试仪直流漏电流示值I_{x}和皮安表测得的直流漏电流标准值I_0。

7.2　测量模型

被校测试仪直流漏电流示值误差ΔI为输出量。被校测试仪直流漏电流示值I_{x}、皮安表测得的直流漏电流标准值I_0为输入量。考虑到被校测试仪直流漏电流分辨力δI_{x}的影响，以及在标准条件下，由温度、湿度、供电电源不稳定和电磁干扰等带来的影响可忽略，标准表法的测量模型可用（7.1）式表示。

$$\Delta I=I_{\mathrm{x}}-I_0+\delta I_{\mathrm{x}}\qquad（7.1）$$

式中：

ΔI——被校测试仪直流漏电流示值误差，A；

I_{x}——被校测试仪直流漏电流示值，A；

I_0——皮安表测得的直流漏电流标准值，A；

δI_{x}——被校测试仪直流漏电流分辨力，A。

因各输入量互不相关，则其测量不确定度传播律可用（7.2）式表示。

$$u_c^2(\Delta I)=c^2(I_x)\times u^2(I_x)+c^2(I_0)\times u^2(I_0)+c^2(\delta I_x)\times u^2(\delta I_x) \qquad (7.2)$$

式中，灵敏系数为：

$$c(I_x)=1 \qquad c(I_0)=-1 \qquad c(\delta I_x)=1$$

7.3 标准不确定度来源

1）被校测试仪直流漏电流测量重复性引入的标准不确定度$u_A(I_x)$。

2）被校测试仪直流漏电流示值分辨力引入的标准不确定度$u(\delta I_x)$。

3）皮安表的最大允许误差引入的标准不确定度$u(I_0)$。

7.4 标准不确定度评定

7.4.1 被校直流漏电流测量重复性引入的标准不确定度$u_A(I_x)$

连续重复测量10次，得到一系列被校测试仪直流漏电流的重复性测量数据，见表7.1。按A类评定，用贝塞尔公式计算其实验标准偏差作为被校测试仪直流漏电流测量重复性引入的标准不确定度。

表 7.1 被校测试仪直流漏电流的测量重复性测量数据

第 i 次测量	1	2	3	4	5
测量值（μA）	99.99	99.98	100.00	99.98	99.97
第 i 次测量	6	7	8	9	10
测量值（μA）	99.99	99.98	99.97	99.98	99.96

用单次测量值作为校准结果时，单次测量值的实验标准偏差$s(I_x)$为：

$$s(I_x)=\sqrt{\frac{1}{(n-1)}\sum_{i=1}^{10}\left(I_{xi}-\overline{I_x}\right)^2}=0.012\ \mu A$$

则测量重复性引入的标准不确定度$u_A(I_x)$为：

$$u_A(I_x)=s(I_x)=0.012\ \mu A$$

7.4.2 被校测试仪直流漏电流分辨力引入的标准不确定度$u(\delta I_x)$

被校测试仪直流漏电流的示值分辨力为0.1μA，由此引入的标准不确定度按B类评定，服从均匀分布，包含因子$k=\sqrt{3}$，则被校测试仪直流漏电流示值分辨力引入的标准不确定度为：

$$u(\delta I_x)=\frac{0.01}{2\sqrt{3}}\mu A=0.0029\ \mu A$$

7.4.3 皮安表的最大允许误差引入的标准不确定度$u(I_0)$

由皮安表的说明书可知，当短路测试电压评定点为100 μA时，皮安表的量程为200 μA，其最大允许误差为±（0.1%+5 nA），按B类评定，服从均匀分布，包含因子$k=\sqrt{3}$，则皮安表最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(I_0)=\frac{100\times0.1\%+0.005}{\sqrt{3}}\mu\text{A}=0.061\ \mu\text{A}$$

7.5　合成标准不确定度

直流漏电流标准不确定度分量汇总表见表7.2。

表 7.2　直流漏电流标准不确定度分量汇总表

输入量	标准不确定度来源	评定方法	概率分布	k值	标准不确定度	灵敏系数
$u_{\text{A}}(I_{\text{x}})$	被校测试仪直流漏电流测量重复性	A	正态	/	0.012 μA	1
$u(\delta I_{\text{x}})$	被校测试仪直流漏电流分辨力	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0029 μA	1
$u(I_0)$	皮安表电流表最大允许误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.061 μA	-1

被校测试仪直流漏电流的分辨力与重复性引入的标准不确定度存在重复，故舍去其中较小者，取其较大者$u_{\text{A}}(I_{\text{x}})$，又$u(\delta I_{\text{x}})$和$u(I_0)$互不相关，则合成标准不确定度$u_{\text{c}}$为：

$$u_{\text{c}}=\sqrt{u_{\text{A}}^2(I_{\text{x}})+u^2(I_0)}=0.062\ \mu\text{A}$$

7.6　扩展不确定度的确定

取$k=2$，则扩展不确定度U为：

$$U=ku_{\text{c}}=2\times0.062\ \mu\text{A}\approx0.13\ \mu\text{A}\quad(k=2)$$

7.7　测量不确定度的最后陈述

用标准表法对被校测试仪直流漏电流100 μA校准点进行校准，直流漏电流100 μA校准结果的测量不确定度为U=0.13 μA （k=2）。

8　结论

上述评定测量不确定度均小于电池芯绝缘短路测试仪各项参数最大允许误差的三分之一，因此分析结果表明《电池芯绝缘短路测试仪校准规范》中给出的校准方法正确可行，主要不确定度的来源明确，对测量标准的要求符合实际，合理可行，实验验证所用标准设备满足校准规范中对整个校准系统不确定度的要求。