

# 《电池内阻测试仪校准装置校准规范》 试验报告

《电池内阻测试仪校准装置校准规范》编写组

2025 年 8 月

# 《电池内阻测试仪校准装置校准规范》试验报告

## 1. 概述（试验目的）

按照校准规范中主要校准项目开展校准，根据测量数据分析测量不确定度，验证校准规范正确性和可行性。

## 2. 样品选型

根据电池内阻测试仪校准装置校准规范的工作原理和使用覆盖面，选取应用较广及省内典型的电池内阻测试仪校准装置校准规范。

表 1 电池内阻测试仪校准装置基本信息

设备基本信息			
设备名称	型号/编号	制造厂商	技术参数
电池内阻测试仪 校验装置	DNB-2V/ DNB24037	武汉市龙成测控技术有限公司	电压输出范围及准确度：DC 0~800V，0.01%×读数+0.005%×满度； 电阻输出范围及准确度：1mΩ~4.1kΩ；×1kΩ、100Ω、10Ω、1Ω、100mΩ、10mΩ，0.05%；×1mΩ 0.1%±2uΩ
电池内阻测试仪 校准装置	BT-1/BT1202401	武汉启亦电气有限公司	电压输出范围及准确度：DC:0~12V，0.1%×读数+2mV； 电阻输出范围及准确度：1mΩ~10kΩ； ×1kΩ:0.5%±2Ω； ×10Ω:0.5%±2mΩ；×1Ω:0.5%±0.2mΩ；×1mΩ: 0.5%±2uΩ
电池内阻测试仪 校准装置	BT-2/BT2202312	武汉启亦电气有限公司	电压输出范围及准确度：DC:2~12V，0.1%×读数+0.001V； 电阻输出范围及准确度：1mΩ~1Ω； ×100mΩ:0.1%±0.1mΩ；×10mΩ:0.1%±10uΩ；×1mΩ: 0.1%±1uΩ
交流电阻箱	ZX123B/1721107	镇江市计量实验工厂	电阻输出范围及准确度：5Ω~10kΩ；0.1 级

## 3. 试验条件

### 3.1 环境条件

试验地点：1、武汉市龙成测控技术有限公司实验室

环境温度：20.0℃~23.0℃ 相对湿度：40%~70%

试验时间：2025 年 05 月 27 日

试验人员：荣中利、李艳、何媛

2、湖北省计量测试技术研究院光谷基地 B201

环境温度：20.0℃～23.0℃ 相对湿度：40%～70%

试验时间：2025 年 05 月 07 日～2025 年 08 月 07 日

试验人员：严伟、李艳、何媛

### 3.2 测量标准

表 2 标准器基本信息

名 称	型号规格	测量范围	不确定度 或准确度等级 或最大允许误差
多功能标准源	5730A	DCV: $\pm(10\text{mV}\sim1000\text{V})$ ; DCI: $\pm(20\mu\text{A}\sim1.9\text{A})$ ; ACV: $10\text{mV}\sim1000\text{V}$ ; ACI: $1\text{mA}\sim2\text{A}$	DCV: $(1.2\sim10)\times10^{-6}$ , $k=2$ ; DCI: $(8\sim30)\times10^{-6}$ , $k=2$ ; ACV: $(2\sim150)\times10^{-5}$ , $k=2$ ; ACI: $(5\sim10)\times10^{-5}$ , $k=2$
交流测量标准	5790B	ACV: $600\mu\text{V}\sim1000\text{V}$ 频率: $10\text{Hz}\sim1\text{MHz}$	直接测量 MPE: $\pm2.4\times10^{-5}$ ; 交直流转换 MPE: $\pm1.8\times10^{-5}$ (1 年期, $23^{\circ}\text{C}\pm5^{\circ}\text{C}$ )
数字多用表	8508A	DCV: $\pm(10\text{mV}\sim1000\text{V})$ ; DCI: $\pm(100\mu\text{A}\sim19\text{A})$ ; OHM: $1\Omega\sim10\text{G}\Omega$ ; ACV: $10\text{mV}\sim1000\text{V}$ ; ACI: $100\mu\text{A}\sim19\text{A}$	DCV: $(1.5\sim10)\times10^{-6}$ , $k=2$ ; DCI: $(5\sim100)\times10^{-6}$ , $k=2$ ; OHM: $18\times10^{-7}\sim6\times10^{-4}$ , $k=2$ ; ACV: $(3\sim200)\times10^{-5}$ , $k=2$ ; ACI: $(2\sim5)\times10^{-4}$ , $k=2$
纳伏表	2182A	DCV: $1\text{nV}\sim100\text{V}$	DCV: $\pm(0.0025\%\times\text{读数}+0.0002\%\times\text{量程})$ , $k=2$ ;
数字阻抗电桥	GR1693	电阻: $1\Omega\sim100\text{k}\Omega$	MPE: $\pm0.02\%$
标准电阻	BZ3 型	$1\Omega\sim1\text{k}\Omega$	一等
标准电感	1mH	$6.6298\Omega$ (1kHz)	一等
全自动电阻校验装置	RT9606 型	$(0.00001\sim100000)\Omega$	MPE: $\pm0.0003\%$

## 4. 试验项目和方法

### 4.1 交流电阻

#### 4.1.1 直接测量法

试验中采取规范中 7.2.2 的直接测量法对 ZX123B 交流电阻箱进行校准。

选用的标准器为数字阻抗电桥。

测试数据如下表所示。

表 3 交流电阻（ZX123B）测试数据

标称值（ $\Omega$ ）	实测值（ $\Omega$ ）	标称值（ $\Omega$ ）	实测值（ $\Omega$ ）	标称值（ $\Omega$ ）	实测值（ $\Omega$ ）
5	5.0006	100	100.03	1.25k	1250.2
6.25	6.2507	125	125.01	1.6667k	1.6669k
10	10.001	166.67	166.7	2k	2.0001k
12.5	12.502	200	200.02	2.5k	2.5000k
16.667	16.67	250	250.06	5k	5.0003k
25	25	500	500.13	3.333k	3.3336k
50	49.999	500	500.13	5k	5.0002k
33.33	33.332	333.3	333.39	6.25k	6.2508k
50	49.999	625	625.16	6.667k	6.6667k
62.5	62.498	666.7	666.85	8.333k	8.3330k
66.67	66.665	833.3	833.62	10k	9.9996k
83.33	83.354	1k	1000.1	---	---

#### 4.1.2 标准源表法

试验中采取规范中 7.2.2 的标准源表法对 DNB-2V 型校准装置进行校准。

选用的标准器为多功能标准源、交流测量标准。测试数据如下表所示。

表 4 交流电阻（DNB-2V）测试数据

标称值	$\times 1000\Omega$	$\times 100\Omega$	$\times 10\Omega$	$\times 1\Omega$	$\times 100m\Omega$	$\times 10m\Omega$	$\times 1m\Omega$
1	1.00026	99.9811	10.00556	1.000201	100.0205	10.0003	0.99886
2	1.99931	199.989	20.00598	2.000401	200.0446	20.0019	1.99826
3	2.99964	299.999	30.0075	3.00057	300.067	30.0025	2.99695
4	/	399.961	40.0051	4.00075	400.086	40.0034	3.99617
5	/	499.944	50.0035	5.00088	500.107	50.0046	4.9956
6	/	599.921	60.0017	6.00107	600.129	60.0055	5.99475
7	/	699.905	70.0056	7.00127	700.152	70.0073	6.99428
8	/	799.896	80.0053	8.00147	800.182	80.0086	7.9941
9	/	899.861	90.0034	9.00165	900.203	90.0114	8.9964
10	/	999.842	100.0025	10.00184	1000.0224	100.0133	9.99627

### 4.2.3 同标称值替代法

试验中采取规范中 7.2.2 的同标称值替代法对 ZX123B 交流电阻箱进行校准。

选用的标准器为标准电感、数字阻抗电桥。测试数据如下表所示。

表 5 交流电阻 (ZX123B) 测试数据

被检设备 型号	被校标称值 ( $\Omega$ ) (或被校显示值)	标准电阻值 ( $\Omega$ )	标准电阻 测量值 ( $\Omega$ )	被校测量 值 ( $\Omega$ )	实测值 ( $\Omega$ )
ZX123B	6.25	6.6298	6.6302	6.2507	6.2503

## 4.2 直流电阻

### 4.2.1 标准源表法

试验中采取规范中 7.2.3 的方法对 BT-1 型校准装置的直流电阻进行校准。

选用的标准器为标准源与纳伏表。

表 6 直流电阻 (BT-1) 测试数据

被校标称 值 ( $m\Omega$ )	实测值 ( $m\Omega$ )	被校标称 值	实测值			
			$\times 1 \Omega$	$\times 10 \Omega$	$\times 100 \Omega$	$\times 1k \Omega$
1	0.9996	1	1.000272	9.99265	99.99528	1.000515
2.01	2.0082	2	2.000169	19.99178	200.012	1.999539
5.9536	5.9471	3	3.000210	29.9838	300.0563	2.999107
10	9.9898	4	4.000301	39.98212	400	4.000677
20	19.95792	5	5.000401	49.98252	500.011	4.999194
50	50.02365	6	6.000485	59.99142	600.0452	5.998336
100	100.0812	7	7.000626	69.97779	699.9772	6.997496
200	199.9254	8	8.000611	79.95936	799.994	7.996291
500	500.0045	9	9.000553	89.9898	899.966	8.996121
1 $\Omega$	999.9365	10	10.000035	99.97482	999.2952	9.99477

### 4.2.2 间接测量法

试验中采取规范中 7.2.3 的方法对 BT-2 型校准装置的直流电阻进行校准。

选用的标准器为数字多用表及电子负载。

表 7 直流电阻 (BT-2) 测试数据

电阻标称值 ( $m\Omega$ )	电阻实测值 ( $m\Omega$ )		
	电阻档位 $\times 1$	电阻档位 $\times 10$	电阻档位 $\times 100$
1	1.054	10.051	99.84
2	2.080	20.034	199.78

3	3.069	30.032	299.62
4	4.059	40.022	399.54
5	5.067	50.014	499.47
6	6.065	60.011	599.40
7	7.055	70.012	699.33
8	8.071	80.003	799.27
9	9.078	90.003	899.25
10	10.080	100.03	999.18

#### 4.2.3 直接测量法

试验中采取规范中 7.2.3 的方法对 BT-1 型校准装置的直流电阻进行校准。

选用的标准器为全自动电阻校验装置和标准电阻。

表 8 直流电阻（BT-1）测试数据

被校标称值 ( $\text{m}\Omega$ )	实测值 ( $\text{m}\Omega$ )	被校标称 值	实测值			
			$\times 1\Omega$	$\times 10\Omega$	$\times 100\Omega$	$\times 1\text{k}\Omega$
1	1.002	1	1.0005	9.9939	99.96	1000.3
2.01	2.011	2	2.0002	19.995	199.98	1999.1
5.9536	5.9524	3	3.0002	29.992	300.02	2998.2
10	10.001	4	4.0003	40.007	399.92	3997.9
20	19.982	5	5.0004	49.994	499.93	4998.1
50	50.03	6	6.0004	59.987	599.96	5999.1
100	100.13	7	7.0006	69.978	699.85	6997.7
200	199.95	8	8.0006	79.968	799.81	7995.7
500	500.23	9	9.0005	89.963	899.79	8998.8
1 $\Omega$	1000.3	10	9.9994	99.953	999.27	9996.7

#### 4.2.4 同标称值替代法

试验中采取规范中 7.2.3 中同标称值替代法的方法对 BT-1 型校准装置的直流电阻进行校准。因同标称值的标准电阻限制，仅对特定值进行了试验。

表 9 直流电阻（BT-1）测试数据

被检设备 型号	被校标称值 ( $\Omega$ ) (或被校显示值)	标准电阻值 ( $\Omega$ )	标准电阻 测量值 ( $\Omega$ )	被校测量 值 ( $\Omega$ )	实测值 ( $\Omega$ )
BT-1	1	0.9999527	0.9997	1.0000	1.0002
	10	9.999928	10.0000	9.9926	9.9926
	100	99.99967	100.0000	99.9955	99.9955

4.3 直流电压

试验中采取规范中 7.2.2 的方法对有源校准装置进行校准，直流电压可调节的校准装置，每个量程均匀选取（3~5）个校准点，包括量程的 10%、50%、100%点；直流电压为固定点的校准装置，校准点为其标称值。选用的标准器为数字多用表 8508A。

测试数据图下表所示。

表 9 直流电压（DNB-2V）测试数据

量程	标称值 (V)	实际值 (V)
8V	0.8	0.79996
	4	3.99995
	8	7.99995
80V	8	8.0005
	40	40.0007
	80	80.0024
800V	80	79.998
	400	400.003
	800	800.005

表 10 直流电压（BT-1）测试数据

标称值 (V)	实际值 (V)
2	1.999922
4	3.998944
6	5.998174
8	7.999354
10	9.998788
12	11.998472

表 11 直流电压（BT-2）测试数据

标称值 (V)	实际值 (V)
2	1.998954
4	3.999523
6	5.997569
8	7.999857
10	9.997455
12	11.998456

5. 试验结果的不确定度

A 直流电压

以数字多用表 8508A 为标准设备，采用直接测量法对校准装置（BT-1）的直流电压进行校准。以电压 2V 点测量不确定度计量标准器详细参数如表 5.1 所示。

表 A.1 计量标准器技术参数

设备名称	技术性能	
	测量范围	测量不确定度
数字多用表（8508A）	DCV: 10mV~1000V	$(1.5 \sim 10) \times 10^{-6}$ , $k=2$ ;

### A.1 测量模型

$$\square\square X_i - X_o$$

式中：

- $X_i$ ——被检校准装置的示值；
- $X_o$ ——数字多用表的显示值；
- $\square\square$ ——被检校准装置示值误差。

### A.2 数字多用表引入的不确定度分量 $u(X_o)$

由数字多用表说明书可知，输出直流电压 10V 时技术指标为  $\pm(3.5 \times 10^{-6} \times \text{读数} + 0.2 \times 10^{-6} \times \text{量程})$ ，置信概率为 95%， $k=2$ 。则多功能校准器 5730A 引入的不确定度：

$$u(X_o) \square \frac{3.5 \square 10^{-6} \square 10V \square 0.2 \square 10^{-6} \square 10V}{2} \square \frac{37 \Delta V}{2} \square 0.00002V$$

### A.3 测量重复性引入的标准不确定度 $u_A$

被校数字多用表连续测量 10 次，所得数据如表所示。按 A 类评定，用贝塞尔公式计算测量重复性引入的标准不确定度。

表 A.2 直流电压 10V 测量点重复性测量数据（单位：V）

次数	1	2	3	4	5
显示值(V)	9.998873	9.998775	9.998655	9.998654	9.998345
次数	6	7	8	9	10
显示值(V)	9.998876	9.998789	9.998798	9.998796	9.998842

$$\overline{X} \square \frac{\sum_{i=1}^{10} X_i}{10} \square 9.9987403V$$

$$S_n(X) \square \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \overline{X})^2}{n - 1}} \square 0.00016V$$

$$u_A \square s_n(X) \square 0.00016V$$

### A.4 各不确定度分量汇总表

各不确定度分量汇总表如下所示。

表 A.3 直流电压 2V 测量不确定度分量汇总表



不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度
$u(X_r)$	标准器引入	0.00002V
$u_A$	重复性测量引入	0.00016V

#### A.5 合成标准不确定度 $u_c$

各分量相互独立，互不相关，按均方根方法合成。

$$u_c^2 = u(X)^2 + u_A^2$$

$$u_c = 0.0002V$$

#### A.6 扩展不确定度 $U$

取  $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 0.001V$$

$$U_{rel} = 0.01\%$$

**B 直流电阻**

**电池内阻测试仪校准装置直流电阻不确定度评定示例**

B.1 概述

B.1.1 环境条件：环境温度：21.3℃；相对湿度：60%。

B.1.2 被测对象：电池内阻测试仪校准装置。

B.1.3 标准器：数字多用表（8508A）两台。

表 B.1 标准器

设备名称	测量范围	测量不确定度
数字多用表	DCV: $\pm(10\text{mV}\sim1000\text{V})$ DCI: $\pm(100\mu\text{A}\sim19\text{A})$	DCV: $(1.5\sim10)\times10^{-6}$ , $k=2$ DCI: $(5\sim100)\times10^{-6}$ , $k=2$

B.1.4 测量方法：间接测量法。当测量串联型有源校准装置时，采用间接测量法。首先按图（3）接线，通过直流电压测量装置直接测量校准装置电压输出端开路电压；随后按图（6）接线，在该校准装置的电压输出端接入直流电子负载，通过数字电压表与电流表同步测量输出端电压及负载回路电流。

B.2 测量模型

根据测量方法，电池内阻测试仪校准装置直流电阻  $Z$  校准装置直流电阻  $R_x$  的示值表达式为：

$$R_x = \frac{U_0 - U_L}{I_L} \tag{B.1}$$

式中：

$R_x$  ——校准装置直流电阻实测值， $\Omega$ ；

$U_0$  ——校准装置开路电压实测值，V；

$U_L$  ——校准装置负载电压实测值，V；

$I_L$  ——校准装置负载电流实测值，A；

B.3 不确定度传播律

由于各分量相互独立，则合成标准不确定度  $u_c(Z)$  为：

$$u_c^2(R_x) = c_1^2 u^2(U_0) + c_2^2 u^2(U_L) + c_3^2 u^2(I_L)$$

其中灵敏系数：

$$c_1 = \frac{\partial R_x}{\partial U_0} = \frac{1}{I_L} \quad c_2 = \frac{\partial R_x}{\partial U_x} = -\frac{1}{I_L} \quad c_1 = \frac{\partial R_x}{\partial I_L} = -\frac{U_0 - U_L}{I_L^2}$$

#### B.4 标准不确定度分量来源

##### B.4.1 数字多用表 I 电压分量引入的标准不确定度分量 $u(U_0)$

- 1) A 类分量：测量重复性引入的标准不确定度分量  $u_1(U_0)$ ；
- 2) B 类分量：数字多用表 I 不确定度引入的标准不确定度分量  $u_2(U_0)$ ；

##### B.4.2 数字多用表 II 电压分量引入的标准不确定度分量 $u(U_L)$

- 1) A 类分量：测量重复性引入的标准不确定度分量  $u_1(U_L)$ ；
- 2) B 类分量：交流测量标准不确定度引入的标准不确定度分量  $u_2(U_L)$ ；

##### B.4.3 数字多用表 I 电流分量引入的标准不确定度分量 $u(I_L)$

- 1) A 类分量：输出重复性引入的标准不确定度分  $u_1(I_L)$ ；
- 2) B 类分量：标准电流源不确定度引入的标准不确定度分量  $u_2(I_L)$ ；

##### B.4.3 其他影响

环境条件影响、电源稳定度影响量引入的不确定度分量忽略不计。且分辨力影响远小于测量重复性，因此分辨力影响引入的不确定度分量亦忽略不计。

#### B.5 测量不确定度评估

以下针对电阻盘  $\times 1 \text{ m}\Omega$  盘第 10 点为例，对测量结果有主要影响的各标准不确定度分量进行评估。测量数据如表 B.2 所示。

表 B.2 测量重复性数据

测量次数	$U_0/\text{V}$	$U_L/\text{V}$	$U_0 - U_L/\text{V}$	$I_L/\text{A}$	$R_x/\text{m}\Omega$
1	1.99854	1.94815	0.05039	5.00085	10.07628703
2	1.99855	1.94813	0.05042	5.00081	10.08236666
3	1.99854	1.94813	0.05041	5.00083	10.08032667
4	1.99855	1.94814	0.05041	5.00083	10.08032667
5	1.99855	1.94816	0.05039	5.00084	10.07630718
6	1.99854	1.94815	0.05039	5.00085	10.07628703
7	1.99853	1.94817	0.05036	5.00086	10.07026791
8	1.99855	1.94815	0.0504	5.00086	10.07826654
9	1.99854	1.94815	0.05039	5.00082	10.07634748
10	1.99855	1.94814	0.05041	5.00086	10.08026619
平均值	1.9985440	1.9481478	---	5.0008389	10.0774204
实验标准偏差	0.0000070	0.0000130	---	0.0000176	0.0035034

##### B.5.1 数字多用表 I 直流电压引入的标准不确定度分量 $u(U_0)$

B. 5. 1. 1 数字多用表 I 直流电压测量重复性引入的标准不确定度分量 $u_1(U_0)$ ;

根据实际测量,用数字多用表 I 进行 10 次等精度测量,数据见表 B.2,计算实验标准偏差即为由测量重复性引入的不确定度分量。

由贝塞尔公式,计算得:

$$s=7\mu\text{V}$$

$$u_1(U_0)=7\mu\text{V}$$

B. 5. 1. 2 数字多用表 I 电压不确定度引入的标准不确定度分量 $u_2(U_0)$

由数字多用表说明书可知,测量直流电压 2V 时技术指标为 $\pm(3.5\times 10^{-6}\times\text{读数}+0.2\times 10^{-6}\times\text{量程})$ ,置信概率为 95%, $k=2$ 。则数字多用表 I 引入的不确定度:

$$u_2(U_0)=\frac{U_0}{k}\square\frac{3.5\square 10^{-6}\square 2\text{V}\square 0.2\square 10^{-6}\square 2\text{V}}{2}\square 3.7\mu\text{V}$$

B. 5. 1. 3 合成标准不确定度量 $u(U_0)$

$u_1(U_0)$ 、 $u_2(U_0)$  独立不相关,则合成标准不确定度为

$$u(U_0)=\sqrt{u_1(U_0)^2+u_2(U_0)^2}\approx 7.92\mu\text{V}$$

B. 5. 2 数字多用表 II 直流电压引入的标准不确定度分量 $u(U_L)$

B. 5. 2. 1 数字多用表 II 直流电压测量重复性引入的标准不确定度分量 $u_1(U_L)$ ;

根据实际测量,用数字多用表 I 进行 10 次等精度测量,数据见表 B.2,计算实验标准偏差即为由测量重复性引入的不确定度分量。

由贝塞尔公式,计算得:

$$s=13\mu\text{V}$$

$$u_1(U_L)=13\mu\text{V}$$

B. 5. 2. 2 数字多用表 II 直流电压不确定度引入的标准不确定度分量 $u_2(U_L)$

由数字多用表说明书可知,输出直流电压 2V 时技术指标为 $\pm(3.5\times 10^{-6}\times\text{读数}+0.2\times 10^{-6}\times\text{量程})$ ,置信概率为 95%, $k=2$ 。则数字多用表 I 引入的不确定度:

$$u_2(U_L)=\frac{U_L}{k}\square\frac{3.5\square 10^{-6}\square 2\text{V}\square 0.2\square 10^{-6}\square 2\text{V}}{2}\square 3.7\mu\text{V}$$

B. 5. 2. 3 合成标准不确定度量 $u(U_L)$

$u_1(U_L)$ 、 $u_2(U_L)$  独立不相关,则合成标准不确定度为

$$u(U_L)=\sqrt{u_1(U_L)^2+u_2(U_L)^2}\approx 13.53\mu\text{V}$$

B. 5. 3 数字多用表 I 直流电流分量引入的标准不确定度分量 $u(I_L)$

B. 5. 3. 1 数字多用表 II 直流电流测量重复性引入的标准不确定度分量 $u_1(I_L)$ ;

根据实际测量，数据见表 B.2 计算的实验标准偏差即为由测量重复性引入的不确定度分量。由贝塞尔公式，计算得：

$$s \approx 17.6 \mu A$$

$$u_1(I_x) = 17.6 \mu A$$

B. 5. 3. 2 数字多用表直流电流不确定度引入的标准不确定度分量 $u_2(I_L)$

由数字多用表说明书可知，输出直流电流 5A 时在 20A 量程下技术指标为 $\pm (400 \times 10^{-6} \times \text{读数} + 20 \times 10^{-6} \times \text{量程})$ ，置信概率为 95%， $k=2$ 。则数字多用表 I 引入的不确定度：

$$u_2(U_L) = \frac{U_L}{k} = \frac{400 \times 10^{-6} \times 5A + 20 \times 10^{-6} \times 20A}{2} = \frac{0.0024A}{2} = 0.0012A$$

B. 5. 3. 3 合成标准不确定度分量  $u(I_L)$

数字多用表 8508A 位数为 8 位半，在校准过程中，对不确定的影响可忽略不计。

$u_1(I_L)$ 、 $u_2(I_L)$  独立不相关，则合成标准不确定度为：

$$u_c(I_L) = \sqrt{u_1(I_L)^2 + u_2(I_L)^2} \approx 0.0012A$$

B. 5. 3 不确定度分量汇总表

各不确定度分量汇总表如下所示。

表 C. 3 不确定度分量汇总表

标准不确定度分量	不确定度来源	分类	分布	分量值
$u(U_0)$	测量重复性	A	正态分布	$7 \mu V$
	标准器最大允许误差	B	平均分布	$3.7 \mu V$
$u(U_L)$	测量重复性	A	正态分布	$13 \mu V$
	标准器最大允许误差	B	平均分布	$3.7 \mu V$
$u(I_L)$	测量重复性	A	正态分布	$17.6 \mu A$
	标准器最大允许误差	B	平均分布	$0.0012A$

B. 5. 5 直流电阻合成标准不确定度

由不确定度传播率，可得

$$u_c(R_x) = \sqrt{c_1^2 u^2(U_0) + c_2^2 u^2(U_L) + c_3^2 u^2(I_L)} \approx 3.95 \mu \Omega$$

其中：

$$c_1 = \frac{\partial R_x}{\partial U_0} = \frac{1}{I_L} \quad c_2 = \frac{\partial R_x}{\partial U_x} = -\frac{1}{I_L} \quad c_3 = \frac{\partial R_x}{\partial I_L} = -\frac{U_0 - U_L}{I_L^2}$$

## B.6 扩展不确定度

取  $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U(R_x) = k \times u_c(R_x) = 7.9 \mu \Omega$$

## C 交流电阻

### C.1 概述

C.1.1 环境条件：环境温度：22.3 °C；相对湿度：65%。

C.1.2 被测对象：电池内阻测试仪校准装置。

C.1.3 标准器：交流测量标准、标准电流源。

表 C.1 标准器

设备名称	测量范围	测量不确定度
交流测量标准	ACV: 10 mV~1000 V (10 Hz~1 MHz)	ACV: $(3 \sim 200) \times 10^{-5}$ , $k=2$
标准电流源	ACI: 1 mA~2 A (50 Hz~10 kHz)	ACI: $(5 \sim 10) \times 10^{-5}$ , $k=2$

C.1.4 测量方法：标准源表法。通过向电阻元件施加频率为 1 kHz 的标准电流，用交流测量标准同步测量交流电阻两端电压，依据欧姆定律计算其交流电阻值。

### C.2 测量模型

根据测量方法，电池内阻测试仪校准装置交流电阻  $Z$  的示值表达式为：

$$Z = \frac{U_x}{I_x}$$

式中：

$Z$  ——校准装置电阻值， $\Omega$ ；

$U_x$  ——交流测量标准显示值，V；

$I_x$  ——标准正弦电流源显示值，A。

### C.3 不确定度传播律

由于各分量相互独立，则合成标准不确定度  $u_c(Z)$  为：

$$u_c^2(Z) = c_1^2 u^2(I_x) + c_2^2 u^2(U_x)$$

其中灵敏系数：

$$c_1 = \frac{\partial Z}{\partial I_x} = -\frac{U_x}{I_x^2} \quad c_2 = \frac{\partial Z}{\partial U_x} = \frac{1}{I_x}$$

合成标准不确定度 $u_{\text{crel}}(Z)$ 为：

$$u_{\text{crel}}^2(Z) = \frac{u_c^2(Z)}{Z^2} = \frac{\left(-\frac{U_x}{I_x^2}\right)^2 u^2(I_x) + \left(\frac{1}{I_x}\right)^2 u^2(U_x)}{\left(\frac{U_x}{I_x}\right)^2} = \frac{u^2(I_x)}{I_x^2} + \frac{u^2(U_x)}{U_x^2} = u_{\text{rel}}^2(I_x) + u_{\text{rel}}^2(U_x)$$

#### C.4 标准不确定度分量来源

##### C.4.1 标准电流源分量引入的标准不确定度分量 $u(I_x)$

- 1) A 类分量：输出重复性引入的标准不确定度分量 $u_1(I_x)$ ；
- 2) B 类分量：标准电流源不确定度引入的标准不确定度分量 $u_2(I_x)$ ；
- 3) B 类分量：标准电流源分辨力引入的标准不确定度分量 $u_3(I_x)$ ；

##### C.4.2 电压分量引入的标准不确定度分量 $u(U_x)$

- 1) A 类分量：测量重复性引入的标准不确定度分量 $u_1(U_x)$ ；
- 2) B 类分量：交流测量标准不确定度引入的标准不确定度分量 $u_2(U_x)$ ；
- 3) B 类分量：交流测量标准分辨力引入的标准不确定度分量 $u_3(U_x)$ ；

##### C.4.3 其他影响量

环境条件影响、电源稳定度影响量引入的不确定度分量忽略不计。

#### C.5 测量不确定度评估

以下针对电阻盘 $\times 10 \text{ m}\Omega$ 盘第 10 点为例，对测量结果有主要影响的各标准不确定度分量进行评估。

校准过程中，采用标准电流源输入频率 1 A（1 kHz）的电流，使用八位半交流测量标准测量电阻盘端电压（1 kHz），并通过欧姆定律计算电阻值。测量数据如表 1 所示。

表 C.2 测量重复性数据

测量次数	电流值/A	电压值/mV	电阻值/ $\text{m}\Omega$
1	1.00000	10.0003	10.0003
2	1.00000	10.0004	10.0004
3	1.00000	10.0004	10.0004
4	1.00000	10.0004	10.0004
5	1.00000	10.0004	10.0004
6	1.00000	10.0005	10.0005
7	1.00000	10.0004	10.0004

8	1.00000	10.0003	10.0003
9	1.00000	10.0004	10.0004
10	1.00000	10.0004	10.0004
平均值	1.00000	10.0004	10.0004
实验标准偏差	0.00000	0.00005	0.00005

#### C. 5. 1 标准电流源分量引入的标准不确定度分量 $u(I_x)$

##### C. 5. 1. 1 标准电流源输出重复性引入的标准不确定度分量 $u_1(I_x)$ ;

根据实际测量，用标准电流源输入频率 1 A（1 kHz）的电流进行 10 次等精度输出，数据见表 C.1 计算的实验标准偏差即为由测量重复性引入的不确定度分量。

由贝塞尔公式，计算得：

$$s=0.00000$$

$$u_1(I_x)=0.00000$$

##### C. 5. 1. 2 标准电流源不确定度引入的标准不确定度分量 $u_2(I_x)$

查标准电流源技术说明书，交流电流 2 A 量程 1.0 A（1 kHz）点，校准温度  $\pm 5^\circ\text{C}$ ，置信水平 95%（ $k=2$ ）条件下，年不确定度为  $\pm (244\text{ppm} \times \text{输出} + 35 \mu\text{A})$ ，则年不确定度引入的标准不确定度分量为：

$$u_2(I_x)=\frac{I_x}{k}=\frac{279 \mu\text{A}}{2}=139.5 \mu\text{A}$$

##### C. 5. 1. 3 标准电流源分辨力引入的标准不确定度分量 $u_3(I_x)$

查标准电流源技术说明书，标准电流源输出 1 A(1 kHz)时分辨力为 10  $\mu\text{A}$ 。按均匀分布，则标准电流源分辨力引入的标准不确定度分量为：

$$u_3(I_x)=\frac{10 \mu\text{A}}{2\sqrt{3}}=2.9 \mu\text{A}$$

##### C. 5. 1. 4 合成标准不确定度分量 $u_{\text{rel}}(I_x)$

在测量不确定评定过程中，重复性和分辨力引入的不确定度，只考虑其最大值。因此在标准电流源合成分量中只用考虑年不确定度分量和分辨力分量。且  $u_2(I_x)$ 、 $u_3(I_x)$  独立不相关，则合成标准不确定度为：

$$u_c(I_x)=\sqrt{u_2(I_x)^2 + u_3(I_x)^2} \approx 139.53 \mu\text{A}$$

$$u_{\text{rel}}(I_x)=\frac{u_c(I_x)}{I_x}=0.01395 \%$$

#### C. 5. 2 电压分量引入的标准不确定度分量 $u(U_x)$



#### C. 5. 2. 1 交流测量标准测量重复性引入的标准不确定度分量 $u_1(U_x)$ ;

根据实际测量，用交流测量标准进行 10 次等精度测量，数据见表 C.1，计算实验标准偏差即为由测量重复性引入的不确定度分量。

由贝塞尔公式，计算得：

$$s=0.00005\text{mV}$$

$$u_1(U_x)=0.00005\text{ mV}$$

#### C. 5. 2. 2 交流测量标准不确定度引入的标准不确定度分量 $u_2(U_x)$

查阅交流电压测量标准技术说明书，交流电压 22 mV 量程 10 mV（1 kHz）点，校准温度  $\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ ，置信水平 99%（ $k=2.58$ ）条件下，年不确定度为  $\pm (110\text{ppm}\times\text{读数}+1.3\text{ }\mu\text{V})$ ，按均匀分布评定，则交流电压测量标准不确定度引入的标准不确定度分量为：

$$u_2(U_x)=\frac{U_x}{k}=\frac{0.0024\text{ mV}}{2.58}=0.00093\text{ mV}$$

#### C. 5. 2. 3 交流测量标准分辨力引入的标准不确定度分量 $u_3(U_x)$

交流测量标准测量电压 10 mV 时分辨力为 0.0001mV。则标准电流源分辨力引入的标准不确定度分量为：

$$u_3(U_x)=\frac{0.0001\text{ mV}}{2\sqrt{3}}=0.000029\text{ mV}$$

#### C. 5. 2. 4 合成标准不确定度分量 $u_{\text{rel}}(U_x)$

在测量不确定评定过程中，重复性和分辨力引入的不确定度，只考虑其最大值。因此在电压测量合成分量中只用考虑年不确定度分量和重复性分量。且 $u_1(U_x)$ 、 $u_2(U_x)$  独立不相关，则合成标准不确定度为

$$u_c(U_x)=\sqrt{u_1(U_x)^2 + u_2(U_x)^2}\approx 0.00093\text{mV}$$

$$u_{\text{rel}}(U_x)=\frac{u_c(U_x)}{U_x}=0.0093\%$$

#### C. 5. 3 不确定度分量汇总表

各不确定度分量汇总表如下所示。

表 C. 3 不确定度分量汇总表

标准不确定度分量	不确定度来源	分类	分布	分量值
$u(I_x)$	标准电流源不确定度	B	正态分布	139.5 $\mu\text{A}$

	标准电流源分辨率	B	平均分布	2.9 $\mu$ A
$u(U_x)$	交流测量标准测量重复性	A	正态分布	0.00005 mV
	交流测量标准不确定度	B	平均分布	0.00093 mV

#### C.5.5 交流电阻合成标准不确定度

由不确定度传播率，可得

$$u_{\text{crel}}(Z) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(I_x) + u_{\text{rel}}^2(U_x)} \approx 0.0168\%$$

#### C.6 扩展不确定度

取  $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U_{\text{rel}}(Z) = k \times u_{\text{crel}}(Z) \approx 0.034\%$$

### 6. 试验结果验证

#### 6.1 试验结果分析

在规定的试验条件，对电池内阻测试仪校准装置的核心性能指标（包括交流电阻、直流电阻、直流电压）进行了系统性验证。

试验数据显示，所有指标均满足要求。进一步分析表明，校准规范中设定的项目覆盖了装置实际应用中的核心性能需求，技术要求与行业内同类设备校准标准保持一致，且测试步骤清晰、操作流程可追溯，现场操作人员可在 30 分钟内完成单组校准试验，整体方法正确性与可操作性强，能够有效规范实际校准工作。

#### 6.2 一致性评价

为验证校准结果的稳定性与通用性，在相同试验条件下，分别选取 3 台同型号电池内阻测试仪校准装置及 1 台交流电阻箱，采用校准规范中的方法进行多次校准，并对比不同设备、不同次数的校准结果差异。

综合试验数据及不确定度分析，所有结果均符合技术指标要求，且呈现出良好的一致性。同时，将本次 DNB-2V 型校准装置的校准结果与湖南省院的历史校准数据对比，进一步证明该校准方法具有稳定的重复性与可靠的通用性，能够有效避免因操作差异或设备个体差异导致的校准结果偏差，为电池内阻测试仪校准装置的精准校准提供了统一、规范的技术依据。

#### 6.3 试验结论

综合试验结果分析与一致性评价可知，电池内阻测试仪校准装置校准规范中设定的项目

全面覆盖了装置核心性能需求，技术要求合理且符合行业实际应用场景，校准方法科学正确、操作流程简便可控。一方面，在规定试验条件下的各项性能指标均满足技术要求，且不同设备、不同次数的校准结果一致性良好，证明该规范中方法能够有效保障电池内阻测试仪校准的精准性与稳定性；另一方面，规范中的测试步骤清晰、所需设备（如标准电阻、环境控制设备）易于获取，现场操作人员经简单培训即可熟练掌握，具备较强的实际可操作性。此外，本次试验未发现规范存在遗漏或不合理的内容，规范列出的方法具体有多样性，满足不同类型校准装置的校准。综上，该校准规范可作为电池内阻测试仪校准装置的正式技术指导文件，用于规范日常校准工作，为电池内阻测试仪校准装置校准数据的准确性、可靠性提供有力技术支撑，进而保障电池生产、检测等环节的质量控制与安全管理。

#### **6.4 附录（试验记录）**

见下页。

## 附录 试验记录

原始记录 1 电池内阻测试仪校验装置（型号：DNB-2V）

直流电压和交流电阻（标准源表法）

交流电阻（1kHz）			
被校标称值	电流值（A）	电压值（mV）	实测值（ $\times 1\text{m}\Omega$ ）
1	10.0000	9.9886	0.99886
2	10.0000	19.9826	1.99826
3	10.0000	29.9695	2.99695
4	10.0000	39.9617	3.99617
5	10.0000	49.956	4.9956
6	10.0000	59.9475	5.99475
7	10.0000	69.9428	6.99428
8	10.0000	79.941	7.9941
9	10.0000	89.964	8.9964
10	10.0000	99.9627	9.99627
被校标称值	电流值（A）	电压值（mV）	实测值（ $\times 10\text{m}\Omega$ ）
1	1.00000	10.0003	10.0003
2	1.00000	20.0019	20.0019
3	1.00000	30.0025	30.0025
4	1.00000	40.0034	40.0034
5	1.00000	50.0046	50.0046
6	1.00000	60.0055	60.0055
7	1.00000	70.0073	70.0073
8	1.00000	80.0086	80.0086
9	1.00000	90.0114	90.0114
10	1.00000	100.0133	100.0133
被校标称值	电流值（mA）	电压值（mV）	实测值（ $\times 1\Omega$ ）
1	100.000	100.0201	1.000201
2	100.000	200.0401	2.000401
3	100.000	300.057	3.00057
4	100.000	400.075	4.00075
5	100.000	500.088	5.00088
6	100.000	600.107	6.00107
7	100.000	700.127	7.00127
8	100.000	800.147	8.00147
9	100.000	900.165	9.00165
10	100.000	1000.184	10.00184
被校标称值	电流值（mA）	电压值（mV）	实测值（ $\times 10\Omega$ ）

1	10.0000	100.0556	10.00556
2	10.0000	200.0598	20.00598
3	10.0000	300.075	30.0075
4	10.0000	400.051	40.0051
5	10.0000	500.035	50.0035
6	10.0000	600.017	60.0017
7	10.0000	700.056	70.0056
8	10.0000	800.053	80.0053
9	10.0000	900.034	90.0034
10	10.0000	1000.025	100.0025
被校标称值	电流值 (mA)	电压值 (mV)	实测值 ( $\times 100\Omega$ )
1	1.00000	99.9811	99.9811
2	1.00000	199.989	199.989
3	1.00000	299.999	299.999
4	1.00000	399.961	399.961
5	1.00000	499.944	499.944
6	1.00000	599.921	599.921
7	1.00000	699.905	699.905
8	1.00000	799.896	799.896
9	1.00000	899.861	899.861
10	1.00000	999.842	999.842
被校标称值	电流值 ( $\mu A$ )	电压值 (mV)	实测值 ( $\times 1000\Omega$ )
1	100.000	100.026	1.00026k
2	100.000	199.931	1.99931k
3	100.000	299.964	2.99964k
直流电压			
量程	标称值 (V)	实际值 (V)	
8V	0.8	0.79996	
	4	3.99995	
	8	7.99995	
80V	8	8.0005	
	40	40.0007	
	80	80.0024	
800V	80	79.998	
	400	400.003	
	800	800.005	

原始记录 2：电池内阻测试仪校准装置（型号：BT-1）

直流电压和直流电阻（标准源表法）

标准源表法			
被校标称值（mΩ）	电流值（mA）	电压值（mV）	实测值（mΩ）
1	100.000	0.09996	0.9996
2.01	100.000	0.200823	2.00823
5.9536	100.000	0.59471	5.9471
10	100.000	0.99898	9.9898
20	100.000	1.995792	19.95792
50	100.000	5.002365	50.02365
100	100.000	10.00812	100.0812
200	100.000	19.99254	199.9254
500	100.000	50.00045	500.0045
1Ω	100.000	99.99365	999.9365
被校标称值	电流值（mA）	电压值（V）	实测值（×1Ω）
1	100.000	0.1000272	1.000272
2	100.000	0.2000169	2.000169
3	100.000	0.3000210	3.000210
4	100.000	0.4000301	4.000301
5	100.000	0.5000401	5.000401
6	100.000	0.6000485	6.000485
7	100.000	0.7000626	7.000626
8	100.000	0.8000611	8.000611
9	100.000	0.9000553	9.000553
10	100.000	1.0000035	10.000035
被校标称值	电流值（mA）	电压值（V）	实测值（×10Ω）
1	10.0000	0.0999265	9.99265
2	10.0000	0.1999178	19.99178
3	10.0000	0.299838	29.9838
4	10.0000	0.3998212	39.98212
5	10.0000	0.4998252	49.98252
6	10.0000	0.5999142	59.99142
7	10.0000	0.6997779	69.97779
8	10.0000	0.7995936	79.95936
9	10.0000	0.899898	89.9898
10	10.0000	0.9997482	99.97482
被校标称值	电流值（mA）	电压值（V）	实测值（×1kΩ）
1	1.00000	0.099995	99.995
2	1.00000	0.200012	200.0120
3	1.00000	0.300056	300.056

4	1.00000	0.400000	400.000
5	1.00000	0.500011	500.011
6	1.00000	0.600045	600.045
7	1.00000	0.699977	699.977
8	1.00000	0.799994	799.994
9	1.00000	0.899966	899.966
10	1.00000	0.999295	999.295
被校标称值	电流值 ( $\mu\text{A}$ )	电压值 (V)	实测值 ( $\times 100\ \Omega$ )
1	100.000	0.1000515	1.000515
2	100.000	0.1999539	1.999539
3	100.000	0.2999107	2.999107
4	100.000	0.4000677	4.000677
5	100.000	0.4999194	4.999194
6	100.000	0.5998336	5.998336
7	100.000	0.6997496	6.997496
8	100.000	0.7996291	7.996291
9	100.000	0.8996121	8.996121
10	100.000	0.9994770	9.994770
直流电压标称值 (V)		直流电压实际值 (V)	
2		1.999922	
4		3.998944	
6		5.998174	
8		7.999354	
10		9.998788	
12		11.998472	

原始记录 3 电池内阻测试仪校准装置（型号：BT-2）

直流电压和直流电阻（间接测量法）

标称值	开路电压 (V)	负载电压 (V)	负载电流 (A)	实测值 ( $\times 1\text{m}\ \Omega$ )
1	1.99866	1.99339	5.0011	1.054
2	1.99866	1.98826	5.0011	2.080
3	1.99865	1.98330	5.0009	3.069
4	1.99864	1.97834	5.0008	4.059
5	1.99863	1.97329	5.0008	5.067
6	1.99862	1.96829	5.0007	6.065
7	1.99861	1.96333	5.0005	7.055
8	1.99859	1.95823	5.0006	8.071
9	1.99858	1.95318	5.0009	9.078
10	1.99856	1.94815	5.0008	10.080
标称值	开路电压 (V)	负载电压 (V)	负载电流 (A)	实测值 ( $\times 10\text{m}\ \Omega$ )

1	1.99852	1.94827	4.9995	10.051
2	1.99852	1.89836	4.9995	20.034
3	1.99849	1.84835	4.9993	30.032
4	1.99848	1.7984	4.9993	40.022
5	1.99847	1.74842	4.9996	50.014
6	1.99845	1.69842	4.9996	60.011
7	1.99844	1.64843	4.9993	70.012
8	1.99843	1.59848	4.9992	80.003
9	1.99842	1.54846	4.9994	90.003
10	1.99841	1.49832	4.9994	100.030
标称值	开路电压 (V)	负载电压(V)	负载电流 (A)	实测值 ( $\times 10\text{m}\Omega$ )
1	5.99794	5.79825	2.00010	99.84
2	5.99793	5.59836	2.00009	199.78
3	5.99792	5.39865	2.00008	299.62
4	5.99791	5.19879	2.00009	399.54
5	5.99789	4.99891	2.00008	499.47
6	5.99788	4.79906	2.00005	599.40
7	5.99787	4.59916	2.00006	699.33
8	5.99786	4.39927	2.00007	799.27
9	5.99787	4.19933	2.00005	899.25
10	5.99788	3.99945	2.00007	999.18
直流电压				
标称值 (V)		实际值 (V)		
2		1.998954		
4		3.999523		
6		5.997569		
8		7.999857		
10		9.997455		
12		11.998456		

原始记录 4 型号：交流电阻箱 (ZX123B)

交流电阻：直接测量法

标称值 ( $\Omega$ )	实测值 ( $\Omega$ )	标称值 ( $\Omega$ )	实测值 ( $\Omega$ )	标称值 ( $\Omega$ )	实测值 ( $\Omega$ )
5	5.0006	100	100.03	1.25k	1250.2
6.25	6.2507	125	125.01	1.6667k	1.6669k
10	10.001	166.67	166.7	2k	2.0001k
12.5	12.502	200	200.02	2.5k	2.5000k
16.667	16.67	250	250.06	5k	5.0003k
25	25	500	500.13	3.333k	3.3336k
50	49.999	500	500.13	5k	5.0002k



33.33	33.332	333.3	333.39	6.25k	6.2508k
50	49.999	625	625.16	6.667k	6.6667k
62.5	62.498	666.7	666.85	8.333k	8.3330k
66.67	66.665	833.3	833.62	10k	9.9996k
83.33	83.354	1k	1000.1	---	---

原始记录 5 同标称值替代法：

交流电阻：

被检设备 型号	被校标称值（ $\Omega$ ） （或被校显示值）	标准电阻值 （ $\Omega$ ）	标准电阻 测量值 （ $\Omega$ ）	被校测量 值（ $\Omega$ ）	实测值（ $\Omega$ ）
ZX123B	6.25	6.6298	6.6302	6.2507	6.2503

原始记录 6 同标称值替代法：

直流电阻：

被检设备 型号	被校标称值（ $\Omega$ ） （或被校显示值）	标准电阻值 （ $\Omega$ ）	标准电阻 测量值 （ $\Omega$ ）	被校测量 值（ $\Omega$ ）	实测值（ $\Omega$ ）
BT-1	1	0.9999527	0.9997	1.0000	1.0002
	10	9.999928	10.0000	9.9926	9.9926
	100	99.99967	100.0000	99.9955	99.9955

原始记录 7：电池内阻测试仪校准装置（型号：BT-1）

直流电阻（直接测量法）

被校标称值 （ $m\Omega$ ）	实测值 （ $m\Omega$ ）	被校标称 值	实测值			
			$\times 1\Omega$	$\times 10\Omega$	$\times 100\Omega$	$\times 1k\Omega$
1	1.002	1	1.0005	9.9939	99.96	1000.3
2.01	2.011	2	2.0002	19.995	199.98	1999.1
5.9536	5.9524	3	3.0002	29.992	300.02	2998.2
10	10.001	4	4.0003	40.007	399.92	3997.9
20	19.982	5	5.0004	49.994	499.93	4998.1
50	50.03	6	6.0004	59.987	599.96	5999.1
100	100.13	7	7.0006	69.978	699.85	6997.7
200	199.95	8	8.0006	79.968	799.81	7995.7
500	500.23	9	9.0005	89.963	899.79	8998.8
1 $\Omega$	1000.3	10	9.9994	99.953	999.27	9996.7