

JJF (闽) 1161—2025



福建省地方计量技术规范

JJF (闽) 1161—2025

锂电池极片电阻仪校准规范

Calibration Specification for Lithium Battery Electrode Resistance Meters

2025 - 08 - 11 发布

2025 - 11 - 11 实施

福建省市场监督管理局 发布

锂电池极片电阻仪校准规范

Calibration Specification for Lithium Battery
Electrode Resistance Meters

JJF (闽) 1161—2025

归口单位：福建省市场监督管理局
主要起草单位：福建省计量科学研究院
元能科技（厦门）有限公司
参加起草单位：厦门市计量检定测试院

本规范委托福建省计量规范技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

张煌辉（福建省计量科学研究院）

董琪琪（福建省计量科学研究院）

王 益〔元能科技（厦门）有限公司〕

参加起草人：

张杰梁（福建省计量科学研究院）

陈建志（厦门市计量检定测试院）

齐琼琼〔元能科技（厦门）有限公司〕

福建省计量规范技术委员会

目 录

引言	(Ⅲ)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语	(1)
3.1 测试端子	(1)
3.2 锂电池	(1)
3.3 极片	(1)
3.4 标准厚度块	(1)
3.5 标准电阻块	(1)
4 概述	(1)
5 计量特性	(2)
5.1 力值	(2)
5.2 厚度	(2)
5.3 电阻	(2)
6 校准条件	(2)
6.1 环境条件	(2)
6.2 测量标准	(2)
6.2.1 标准测力仪	(2)
6.2.2 标准厚度块	(3)
6.2.3 标准电阻块	(3)
7 校准项目和校准方法	(3)
7.1 校准项目	(3)
7.2 校准方法	(3)
7.2.1 校准前准备	(3)
7.2.2 力值示值误差	(3)

7.2.3 厚度示值误差..... (4)

7.2.4 电阻示值误差..... (4)

8 校准结果表达 (5)

8.1 校准报告 (5)

8.2 数据处理原则 (5)

9 复校时间间隔 (5)

附录 A 锂电池极片电阻仪校准记录 (式样) (6)

附录 B 校准证书内页 (式样) (8)

附录 C 锂电池极片电阻仪测量结果不确定度评定 (示例) (9)

引 言

本规范依据 JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》及 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》等基础性系列规范进行制定。

本规范为首次制定。

福建省计量规范技术委员会

锂电池极片电阻仪校准规范

1 范围

本规范适用于两探针原理的锂电池极片电阻仪的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

T/CIAPS0011—2021 锂离子电池制造术语

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于该规范；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 测试端子 test terminal

测试端子是锂电池极片电阻仪的测试部分，主要由呈圆柱形的金属上端子和下端子组成。测试时，将极片或标准件固定在下端子上，上端子下压，接触极片或标准件，即可实现不同力值条件下电阻、力值、厚度等参数的测量。

3.2 锂电池 Li-ion battery

锂电池，又称为锂离子电池。利用锂离子作为导电离子，在正极和负极之间移动，通过化学能和电能相互转化实现充放电的电池。包括单体锂离子电池和锂离子电池组。

[T/CIAPS0011—2021，电池产品术语 3.2.2，有改动]

3.3 极片 electrode

将一定比例的活性物质、导电剂、粘结剂等充分混合后涂覆于集流体上，制作而成的复合单面或双面多孔涂层电极。

3.4 标准厚度块 standard thickness

标准厚度块是由厚度片和工装件组成，其中厚度片嵌入工装件内部，固定测试点位，以确保与锂电池极片电阻仪测试平台的测试端子对齐，用于仪器厚度值测量功能的校准。

3.5 标准电阻块 standard resistance block

标准电阻块是由电阻件和工装件组成，其中电阻件嵌入工装件内部，固定测试点位，以确保与锂电池极片电阻仪测试平台的测试端子对齐，用于仪器电阻测量功能的校准。

4 概述

锂电池极片电阻仪是一款测试锂电池极片电阻的专用设备，由自主施力模块、力

值传感模块、电阻测试模块、厚度测量模块组成。其采用上下平面可控压探头对极片进行直接测量，进而获得不同力值条件下极片整体电阻值及厚度。实现电阻、力值、厚度等参数的全自动测量，并同步、实时显示数据。

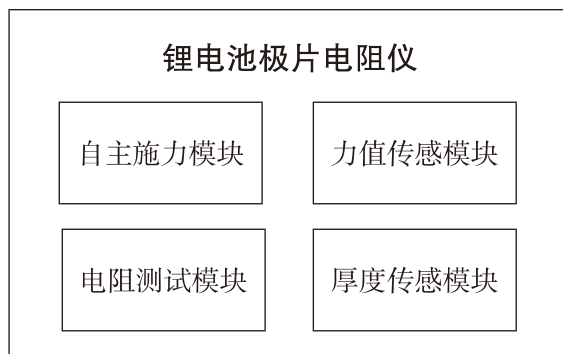


图1 锂电池极片电阻仪结构示意图

5 计量特性

5.1 力值

测量范围 40 N ~ 10 kN，最大允许误差： $\pm (0.3\% \sim 5\%) \text{FS}$ 。

5.2 厚度

测量范围 10 μm ~ 5000 μm ，最大允许误差： $\pm (3\% \sim 10\%)$ 。

5.3 电阻

测量范围 0.1 $\mu\Omega$ ~ 3000 Ω ，最大允许误差： $\pm (0.5\% \sim 5\%) \text{FS}$ 。

注：以上所有指标不用于合格性判别，仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

a) 环境温度：20 $^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 。

b) 相对湿度：45% ~ 75%。

c) 供电电源：

电源电压为 $(220 \pm 22) \text{V}$ 或 $(110 \pm 11) \text{V}$ ；

频率为 $(50 \sim 60) \text{Hz}$ 。

d) 周围无影响正常工作的电磁干扰。

6.2 测量标准

6.2.1 标准测力仪

标准测力仪范围应覆盖锂电池极片电阻仪的力值测量范围，测量不确定度 ($k=2$) 应不大于被校锂电池极片电阻仪最大允许误差绝对值的 1/3。

6.2.2 标准厚度块

标准厚度块表面应保持清洁,无镀层、无划痕、无凹槽,不得有油脂、灰尘等附着物。标准厚度块有效面积的几何尺寸应与锂电池极片电阻仪的测试端子相吻合。

标准厚度块厚度范围应覆盖锂电池极片电阻仪的厚度测量范围,测量不确定度 ($k=2$) 应不大于被校锂电池极片电阻仪最大允许误差绝对值的 $1/3$ 。

6.2.3 标准电阻块

标准电阻块表面应保持清洁,无镀层、无划痕、无凹槽,不得有油脂、灰尘等附着物。标准电阻块有效面积的几何尺寸应大于锂电池极片电阻仪测试端子的有效面积。

标准电阻块电阻范围应覆盖锂电池极片电阻仪的电阻测量范围,测量不确定度 ($k=2$) 应不大于被校锂电池极片电阻仪最大允许误差绝对值的 $1/3$ 。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

锂电池极片电阻仪校准项目见表 1。

表 1 锂电池极片电阻仪校准项目一览表

序号	项目名称	校准方法的条款
1	力值示值误差	7.2.2
2	厚度示值误差	7.2.3
3	电阻示值误差	7.2.4
注: 1、根据被校锂电池极片电阻仪的功能和客户需求选择校准项目。 2、为保证电阻测量准确性,严格按序号 1、2、3 顺序执行校准项目。 3、若被校锂电池极片电阻仪无测厚度功能,则按顺序执行 1 和 3。		

7.2 校准方法

7.2.1 校准前准备

标准厚度块、标准电阻块、标准测力仪、被校锂电池极片电阻仪应置于同一环境中至少 60 min。

a) 外观检查

被校锂电池极片电阻仪外观应完好,不能有机机械损伤,调节旋钮或按键无松动现象;铭牌清晰完整,至少包括制造厂、仪器编号、型号规格等。

b) 预热及工作正常性检查

按被校锂电池极片电阻仪说明书的要求进行预热或不少于 10 min,锂电池极片电阻仪应能正常与计算机通信,各项测控功能应正常工作。

7.2.2 力值示值误差

在整个量程范围内,均匀选取 3~5 个校准点,可根据客户要求增加或减少校准点。

校准前确保锂电池极片电阻仪的测试端子表面及周边位置清洁。将标准测力仪置于锂电池极片电阻仪上进行测试,设置被校锂电池极片电阻仪的设定力值,读取标准测力仪和被校锂电池极片电阻仪力值的显示值并记录,每个力值校准点重复测量 3 次,计算每个校准点的平均值并记录。每个校准点的力值测量示值误差均用公式(1)计算:

$$\Delta F = \bar{F} - \bar{F}_0 \quad (1)$$

式中:

ΔF —— 被校锂电池极片电阻仪力值示值误差, N 或 kN;

$\bar{F}$ —— 被校锂电池极片电阻仪力值示值的平均值, N 或 kN;

$\bar{F}_0$ —— 标准测力仪显示值的平均值, N 或 kN。

7.2.3 厚度示值误差

在整个量程范围内,均匀选取 3~5 个校准点,可根据客户要求增加或减少校准点。

校准前确保锂电池极片电阻仪的测试端子表面及周边位置清洁,然后将标准厚度块置于锂电池极片电阻仪的测试平台上,施加标称力值进行测试,待被校锂电池极片电阻仪示值稳定后,读取仪器显示值并记录,每个厚度校准点重复测量 3 次,计算得到每个校准点的平均值并记录。每个校准点的厚度测量示值误差均用公式(2)计算:

$$\Delta h = \bar{h} - h_0 \quad (2)$$

式中:

Δh —— 被校锂电池极片电阻仪的厚度示值误差, μm ;

$\bar{h}$ —— 被校锂电池极片电阻仪校准厚度平均值, μm ;

h_0 —— 标准厚度块厚度标称值, μm 。

注:标称力值,根据被校锂电池极片电阻仪的技术要求进行设置,7.2.4 同此备注信息。

7.2.4 电阻示值误差

在整个量程范围内,均匀选取 3~5 个校准点,可根据客户要求增加或减少校准点。

校准前确保锂电池极片电阻仪的测试端子表面及周边位置清洁,然后将标准电阻块放置在锂电池极片电阻仪的测试平台上,施加标称力值进行测试。待被校锂电池极片电阻仪示值稳定后,读取仪器显示值并记录,每个电阻校准点重复测量 3 次,计算得到每个校准点的平均值并记录。每个校准点的电阻测量示值误差均用以下公式计算:

$$\Delta R = \bar{R} - R_0 \quad (3)$$

式中:

ΔR —— 被校锂电池极片电阻仪的电阻示值误差, Ω ;

$\bar{R}$ —— 被校锂电池极片电阻仪校准电阻平均值, Ω ;

R_0 —— 标准电阻块电阻值, Ω 。

8 校准结果表达

8.1 校准报告

校准结果应在校准证书上反映, 校准证书应至少包括以下信息:

- a) 标题, 如“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) 证书或报告的唯一性标识(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) 对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) 校准证书或校准报告签发人的签名、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, 不得部分复制证书或报告的声明;
- 校准原始记录格式见附录 B, 校准证书(报告)内页格式见附录 C。

8.2 数据处理原则

误差数据计算后, 应采用四舍五入法则进行修约, 数据末位应修约到对应于该点最大允许误差绝对值的 1/10 的位数。

9 复校时间间隔

建议复校时间间隔为 1 年。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, 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。

附录 A

锂电池极片电阻仪校准记录（式样）

委托单位				记录编号	
样品	名 称		型号规格		
	制造厂		出厂编号		
技术依据					
校准地点			温 度	℃	
			相对湿度	%	

标 准 器	名 称	型号规格	测量范围	溯源机构 / 证书编号
		出厂编号	准确度等级或最大允差 或不确定度	有效期限
	名 称	型号规格	测量范围	溯源机构 / 证书编号
		出厂编号	准确度等级或最大允差 或不确定度	有效期限
	名 称	型号规格	测量范围	溯源机构 / 证书编号
		出厂编号	准确度等级或最大允差 或不确定度	有效期限

1、外观检查：						
2、预热及工作正常性检查						
3、力值示值误差						
设定力值 (N)	测量值 (N)	实际值 (N)	测量值 平均值(N)	实际值 平均值(N)	误 差 (N)	扩展不确 定度($k=2$)
4、厚度示值误差						
测量值 (μm)	平均值 (μm)	实际值 (μm)	误 差 (μm)	扩展不确定度 ($k=2$)		
5、电阻示值误差						
测量值(Ω)	平均值(Ω)	实际值(Ω)	误差(Ω)	扩展不确定度 ($k=2$)		

校准日期：____年____月____日

校 准 员：_____

核验员：_____

附录 B

校准证书内页 (式样)

证书编号 XXXXXX-XXXX

校准结果:

B.1 外观检查:

B.2 预热及工作正常性检查:

B.3 力值示值误差

设定值 (N)	测量值 (N)	实际值 (N)	示值误差 (N)	扩展不确定度 ($k=2$)

B.4 厚度示值误差

测量值 (μm)	实际值 (μm)	示值误差 (μm)	扩展不确定度 ($k=2$)

B.5 电阻示值误差

测量值 (Ω)	实际值 (Ω)	示值误差 (Ω)	扩展不确定度 ($k=2$)

附录 C

锂电池极片电阻仪测量结果不确定度评定 (示例)

C.1 力值测量不确定度评定

C.1.1 概述

测量环境条件：温度：22 ℃；相对湿度：55%

测量标准：标准测力仪。

被测对象：锂电池极片电阻仪。

测量方法：校准前确保锂电池极片电阻仪的测试平台测试端子表面及周边位置清洁。将标准测力仪置于锂电池极片电阻仪的测试平台上进行测试，待被校锂电池极片电阻仪示值稳定后，读取仪器显示值并记录，每个力值校准点重复测量不少于 3 次，计算得到每个校准点的平均值并记录。

评定结果的使用：符合上述条件的测量，一般可直接使用本不确定度的评定方法。

C.1.2 测量模型

$$\Delta F = \bar{F} - \bar{F}_0 \quad (\text{C.1})$$

式中：

ΔF —— 被校锂电池极片电阻仪的力值示值误差，N 或 kN；

$\bar{F}$ —— 被校锂电池极片电阻仪力值示值的平均值，N 或 kN；

$\bar{F}_0$ —— 标准测力仪显示值平均值，N 或 kN。

根据不确定度传播律，锂电池极片电阻仪电阻示值误差合成标准不确定度计算公式为：

$$u_c^2(\Delta F) = c_1^2 u_A^2(\Delta F) + c_2^2 u^2(\varepsilon_F) \quad (\text{C.2})$$

式中：

$u_A(\Delta F)$ —— 锂电池极片电阻仪力值示值误差重复性引入的标准不确定度，N 或 kN；

$u(\varepsilon_F)$ —— 标准测力仪引入的标准不确定度，N 或 kN。

c_1 、 c_2 为各项灵敏系数。

C.1.3 不确定度来源分析

根据测量模型，锂电池极片电阻仪力值测量示值误差的不确定来源包括以下几个部分：

- 1) 被校锂电池极片电阻仪力值测量重复性引入的不确定度 (A 类)；
- 2) 被校锂电池极片电阻仪分辨力引入的不确定度 (B 类)；
- 3) 标准测力仪引入的不确定度 (B 类)。

C.1.3.1 测量重复性引入的不确定度

设置锂电池极片电阻仪施加力值为 3850 N，标准测力仪对施加力值进行测量，计算 3 次连续测量值的平均值为一次测量结果，记录 10 次连续测量结果如表 C.1 所示：

表 C.1 锂电池极片电阻仪力值重复性测量数据

单位：N

第 i 次	F_X	$[(F_X)_i - (\overline{F_X})]$
1	3858	+6.0
2	3865	+13.0
3	3847	-5.0
4	3842	-10.0
5	3859	+7.0
6	3848	-4.0
7	3849	-3.0
8	3847	-5.0
9	3850	-2.0
10	3859	+7.0
$\overline{F_X}$	3852	/

用贝塞尔公式计算测量结果，可得 A 类评定的不确定度分量，计算公式为：

$$u_A(\Delta F) = \frac{s}{\sqrt{3}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_{Xi} - \overline{F_X})^2}{n-1}} \quad (\text{C.3})$$

式中：

$u_A(\Delta F)$ —— 锂电池极片电阻仪力值示值重复性引入的标准不确定度，N；

F_{Xi} —— 第 i 次标准测力仪对施加力值的测量值，N；

$\overline{F_X}$ —— n 次标准测力仪对施加力值测量值的平均值，N；

n —— $n=10$ ，为测量次数。

计算得到： $u_A(\Delta F) = 4.2$ N。

C.1.3.2 被校锂电池极片电阻仪分辨力引入的不确定度

被校锂电池极片电阻仪分辨力为：1 N，假设为均匀分布分辨力引入的不确定度为：

$$\frac{1}{2\sqrt{3}} \text{ N} = 0.29 \text{ N}, \text{ 小于测量重复性引入的不确定度，因此，该分量可忽略。}$$

C.1.3.3 标准测力仪引入的不确定度

标准压力传感器的准确度等级为 1 级，假设为均匀分布则标准测力仪引入的标准

$$\text{不确定度为：} u(\varepsilon_F) = \frac{3850 \text{ N} \times 1 \times 10^{-2}}{\sqrt{3}} = 22.2 \text{ N}$$

C.1.4 灵敏系数

锂电池极片电阻仪在测量 3850 N 力值时, 根据测量模型公式 C.1, 可以得到各分量的灵敏系数:

$$c_1 = \partial \Delta F / \partial \bar{F} = 1 \quad (\text{C.4})$$

$$c_2 = \partial \Delta F / \partial \bar{F}_0 = -1 \quad (\text{C.5})$$

C.1.5 合成标准不确定度

锂电池极片电阻仪力值示值误差的合成不确定分量见下表 C.2:

表 C.2 锂电池极片电阻仪力值示值误差的合成不确定分量汇总表

输入量	标准不确定度	分 布	灵敏度系数	合成标准 不确定度
$u_A(\Delta F)$	4.2 N	正态	+1	22.6 N
$u(\varepsilon_F)$	22.2 N	均匀	-1	

合成标准不确定为:

$$u_c(\Delta F) \approx 22.6 \text{ N} \quad (\text{C.6})$$

C.1.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 则锂电池极片电阻仪力值示值误差扩展不确定度为:

$$U = k u_c(\Delta F) = 2 u_c(\Delta F) = 46 \text{ N} \quad (\text{C.7})$$

C.1.7 测量结果的表述

在本实例中, 被校锂电池极片电阻仪在测量 3850 N 值点的测量结果为 3852 N, 其扩展不确定度为: $U=46 \text{ N}$, $k=2$ 。

C.2 厚度测量不确定度评定

C.2.1 概述

测量环境条件: 温度: 22℃; 相对湿度: 55%

测量标准: 标准厚度块。

被测对象: 锂电池极片电阻仪。

测量方法: 校准前确保锂电池极片电阻仪的测试平台测试端子表面及周边位置清洁, 然后将标准厚度块置于锂电池极片电阻仪的测试平台上, 施加标称力值进行测试, 待被校 锂电池极片电阻仪示值稳定后, 读取仪器显示值并记录, 每个厚度校准点重复测量不少于 3 次, 计算得到每个校准点的平均值并记录。

评定结果的使用: 符合上述条件的测量, 一般可直接使用本不确定度的评定方法。

C.2.2 测量模型

$$\Delta h = \bar{h} - h_0 \quad (\text{C.8})$$

式中：

Δh —— 被校锂电池极片电阻仪的厚度示值误差， μm ；

$\bar{h}$ —— 被校锂电池极片电阻仪校准厚度平均值， μm ；

h_0 —— 标准厚度块厚度标称值， μm 。

根据不确定度传播律，锂电池极片电阻仪厚度示值误差合成标准不确定度计算公式为：

$$u_c^2(\Delta h) = c_1^2 u_A^2(\Delta h) + c_2^2 u^2(\varepsilon_h) \quad (\text{C.9})$$

式中：

$u_A(\Delta h)$ —— 锂电池极片电阻仪厚度示值误差复性引入的标准不确定度，(μm)；

$u(\varepsilon_h)$ —— 标准厚度块引入的标准不确定度，(μm)。

c_1 、 c_2 为各项灵敏系数。

C.2.3 不确定度来源分析

根据测量模型，锂电池极片电阻仪厚度测量示值误差的不确定来源包括以下几个部分：

- 1) 被校锂电池极片电阻仪厚度测量重复性引入的不确定度 (A 类)；
- 2) 被校锂电池极片电阻仪分辨力引入的不确定度 (B 类)；
- 3) 标准厚度块引入的不确定度 (B 类)。

C.2.3.1 测量重复性引入的不确定度

用 $50\ \mu\text{m}$ 标准厚度块对锂电池极片电阻仪进行测量，计算 3 次连续测量值的平均值为一次测量结果，记录 10 次连续测量结果如表 C.3 所示：

表 C.3 锂电池极片电阻仪厚度重复性测量数据

单位： μm

第 i 次	h_x	$[(h_x)_i - \bar{h}_x]$
1	50.6	0.00
2	50.6	0.00
3	50.6	0.00
4	50.6	0.00
5	50.6	0.00
6	50.5	-0.10
7	50.5	-0.10
8	50.7	+0.10
9	50.6	0.00
10	50.7	+0.10
$\bar{h}_x$	50.6	/

用贝塞尔公式计算测量结果，可得 A 类评定的不确定度分量，计算公式为：

$$u_A(\Delta h) = \frac{s}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_{xi} - \bar{h}_x)^2}{n-1}}}{\sqrt{3}} \quad (\text{C.10})$$

式中:

$u_A(\Delta h)$ ——锂电池极片电阻仪厚度示值重复性引入的标准不确定度, μm ;

h_{xi} ——第 i 次锂电池极片电阻仪的厚度测量值, μm ;

$\bar{h}_x$ —— n 次锂电池极片电阻仪厚度测量值的平均值, μm ;

n —— $n=10$, 为测量次数。

计算得到: $u_A(\Delta h) = 0.0385 \mu\text{m}$

C.2.3.2 被校锂电池极片电阻仪分辨力引入的不确定度

被校锂电池极片电阻仪分辨力为: $0.1 \mu\text{m}$, 假设为均匀分布分辨力引入的不确定度为: $\frac{0.1}{2\sqrt{3}} \mu\text{m} = 0.0289 \mu\text{m}$, 小于测量重复性引入的不确定度, 因此, 该分量可忽略。

C.2.3.3 标准厚度块引入的不确定度

根据标准厚度块的测试报告, $50 \mu\text{m}$ 标准厚度块的最大允许误差: $\pm 0.3 \mu\text{m}$, 假设为均匀分布则标准厚度块引入的标准不确定度分别为: $u(\varepsilon_h) = \frac{0.3}{\sqrt{3}} \mu\text{m} = 0.1732 \mu\text{m}$ 。

C.2.4 灵敏系数

锂电池极片电阻仪在测量 $50 \mu\text{m}$ 厚度时, 根据测量模型公式 C.8, 可以得到各分量的灵敏系数:

$$c_1 = \partial \Delta h / \partial \bar{h} = 1 \quad (\text{C.11})$$

$$c_2 = \partial \Delta h / \partial \bar{h}_0 = -1 \quad (\text{C.12})$$

C.2.5 合成标准不确定度

锂电池极片电阻仪厚度示值误差的合成不确定分量见下表 C.4:

表 C.4 锂电池极片电阻仪厚度示值误差的合成不确定分量汇总表

输入量	标准不确定度	分 布	灵敏度系数	合成标准不确定度
$u_A(\Delta h)$	$0.0385 \mu\text{m}$	正态	+1	$0.177 \mu\text{m}$
$u(\varepsilon_h)$	$0.1732 \mu\text{m}$	均匀	-1	

合成标准不确定为:

$$u_c(\Delta h) = 0.177 \mu\text{m} \quad (\text{C.13})$$

C.2.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则锂电池极片电阻仪厚度示值误差扩展不确定度为：

$$U = k u_c (\Delta h) = 2 u_c (\Delta h) = 0.4 \mu\text{m} \quad (\text{C.14})$$

C.2.7 测量结果的表述

在本实例中，被校锂电池极片电阻仪在测量 $50 \mu\text{m}$ 厚度点的测量结果为 $50.6 \mu\text{m}$ ，其扩展不确定度为： $U=0.4 \mu\text{m}$ ， $k=2$ 。

C.3 电阻测量不确定度评定

C.3.1 概述

测量环境条件：温度： 22°C ；相对湿度： 55%

测量标准：标准电阻块。

被测对象：锂电池极片电阻仪。

测量方法：校准前确保锂电池极片电阻仪的测试平台测试端子表面及周边位置清洁，然后将标准电阻块放置在锂电池极片电阻仪的测试平台上，施加标称力值进行测试。待被校锂电池极片电阻仪示值稳定后，读取仪器显示值并记录，每个电阻校准点重复测量不少于 3 次，计算得到每个校准点的平均值并记录。

评定结果的使用：符合上述条件的测量，一般可直接使用本不确定度的评定方法。

C.3.2 测量模型

$$\Delta R = \bar{R} - R_0 \quad (\text{C.15})$$

式中：

ΔR —— 被校锂电池极片电阻仪的电阻示值误差， Ω ；

$\bar{R}$ —— 被校锂电池极片电阻仪校准电阻平均值， Ω ；

R_0 —— 标准电阻块电阻值， Ω 。

根据不确定度传播律，锂电池极片电阻仪电阻示值误差合成标准不确定度计算公式为：

$$u_c^2 (\Delta R) = c_1^2 u_A^2 (\Delta R) + c_2^2 u^2 (\varepsilon_R) \quad (\text{C.16})$$

式中：

$u_A (\Delta R)$ —— 锂电池极片电阻仪电阻示值误差复性引入的标准不确定度， Ω ；

$u (\varepsilon_R)$ —— 标准电阻块引入的标准不确定度， Ω 。

c_1 、 c_2 为各项灵敏系数。

C.3.3 不确定度来源分析

根据测量模型，锂电池极片电阻仪电阻测量示值误差的不确定来源包括以下几个部分：

1) 被校锂电池极片电阻仪电阻测量重复性引入的不确定度 (A 类)；

2) 被校锂电池极片电阻仪分辨力引入的不确定度 (B 类) ;

3) 标准电阻块引入的不确定度 (B 类) 。

C.3.3.1 测量重复性引入的不确定度

用 $10\ \Omega$ 标准电阻块对锂电池极片电阻仪进行测量, 计算 3 次连续测量值的平均值为一次测量结果, 记录 10 次连续测量结果如表 C.5 所示:

表 C.5 锂电池极片电阻仪电阻重复性测量数据

单位: Ω

第 i 次	R_x	$[(R_x)_i - \overline{R_x}]$
1	9.9949808	+0.00000229
2	9.9949808	+0.00000229
3	9.9949808	+0.00000229
4	9.9949808	+0.00000229
5	9.9949808	+0.00000229
6	9.9949579	-0.00002061
7	9.9949808	+0.00000229
8	9.9949808	+0.00000229
9	9.9949808	+0.00000229
10	9.9949808	+0.00000229
$\overline{R_x}$	9.9949785	/

用贝塞尔公式计算测量结果, 可得 A 类评定的不确定度分量, 计算公式为:

$$u_A(\Delta R) = \frac{s}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{xi} - \overline{R_x})^2}{n-1}}}{\sqrt{3}} \quad (\text{C. 17})$$

式中:

$u_A(\Delta R)$ —— 锂电池极片电阻仪电阻示值重复性引入的标准不确定度, Ω ;

R_{xi} —— 第 i 次锂电池极片电阻仪的电阻测量值, Ω ;

$\overline{R_x}$ —— n 次锂电池极片电阻仪电阻测量值的平均值, Ω ;

n —— $n=10$, 为测量次数。

计算得到: $u_A(\Delta R) = 0.00000418\ \Omega$

C.3.3.2 被校锂电池极片电阻仪分辨力引入的不确定度

被校锂电池极片电阻仪分辨力为: $0.00000001\ \Omega$, 假设为均匀分布分辨力引入的不确定度为 $\frac{0.00000001}{2\sqrt{3}}\ \Omega = 0.0000000029\ \Omega$, 远小于测量重复性引入的不确定度, 因此,

该分量可忽略。

C.3.3.3 标准电阻块引入的不确定度

标准电阻块的准确度等级为 0.2 级, 假设为均匀分布则标准电阻块引入的标准不确定度为: $u(\varepsilon_R) = \frac{10\Omega \times 0.2 \times 10^{-2}}{\sqrt{3}} = 0.0115\Omega$

C.3.4 灵敏系数

锂电池极片电阻仪在测量 10Ω 电阻时, 根据测量模型公式 C.15, 可以得到各分量的灵敏系数:

$$c_1 = \partial \Delta R / \partial \bar{R} = 1 \quad (\text{C.18})$$

$$c_2 = \partial \Delta R / \partial R_0 = -1 \quad (\text{C.19})$$

C.3.5 合成标准不确定度

锂电池极片电阻仪电阻示值误差的合成不确定分量见下表 C.6:

表 C.6 锂电池极片电阻仪电阻示值误差的合成不确定分量汇总表

输入量	标准不确定度	分布	灵敏度系数	合成标准不确定度
$u_A(\Delta R)$	0.00000418Ω	正态	+1	0.0115Ω
$u(\varepsilon_R)$	0.0115Ω	均匀	-1	

合成标准不确定为:

$$u_c(\Delta R) = 0.0115\Omega \quad (\text{C.20})$$

C.3.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 则锂电池极片电阻仪电阻示值误差扩展不确定度为:

$$U = ku_c(\Delta R) = 2u_c(\Delta R) = 0.023\Omega \quad (\text{C.21})$$

C.3.7 测量结果的表述

在本实例中, 被校锂电池极片电阻仪在测量 10Ω 电阻点的测量结果为 9.995Ω , 其扩展不确定度为: $U=0.023\Omega, k=2$ 。