

锂离子电池的电气测量手册

～从基础知识到应用～

*Electrical Measurements of Lithium Ion Batteries:
Fundamentals and Applications*



目录

前言.....	3
1. 锂离子电池制造工艺概览.....	4
2. 电极材料与电极制造工艺材料, 电极的制造.....	5
-1. 在电池组装前的工艺中电极材料与电极的品质检查的重要性.....	5
-2. 电极涂层分散度的品质检查.....	6
-3. 电极片制作时电极片的品质检查.....	7
-4. 电极片的金属异物检查.....	9
3. 电池单体组装.....	10
-1. 端子/极耳焊接部电阻值检查、端子/极耳焊接部电阻测量.....	10
(1) 测量电流.....	10
(2) 4 端子法电阻测量.....	10
(3) 温差电动势差的影响.....	11
-2. 注液前电极间、电极-外壳间的绝缘电阻检查.....	12
(1) 绝缘电阻值的测量范围.....	13
(2) 电压输出性能.....	13
(3) 间隔时间.....	13
(4) 接触检查功能.....	15
(5) 微短路检查功能.....	15
-3. 边电压测量(层叠型锂离子电池).....	16
(1) 电压测试仪的输入电阻.....	18
(2) 可靠的探针.....	19
(3) 干扰对策.....	19
4. 电池单体完成品 (电池单体性能评估).....	20
-1. 预充电与充放电特性试验.....	20
-2. 老化工艺中开路电压(OCV)测量.....	20
-3. 电池的阻抗测量.....	23
(1) 测量方式.....	25
(2) 感应磁场的影响.....	25
(3) 施加电流值.....	26
(4) 测量频率与最大输入电压.....	27
(5) 与电池端子的接触.....	27
(6) 电池测试仪器的选择.....	29
5. 电池模组, 电池包 (实际应用层面的性能评估).....	31
-1. 电池模组, 电池包的总电阻检查.....	31
(1) 电池模组化工艺中电池单体端子(极耳)的焊接・连接的品质管理(电阻测量).....	31
(2) 电池模组, 电池包的总电阻检查.....	33
-2. BMS 基板的检查.....	34
-3. 电动汽车的电池实际负载试验.....	38
结语.....	41

前言

锂离子电池（LIB）在二次电池中性能相较优越，广泛运用于各个产业领域。其曾经主要的用途是用作便携式电子设备的电源，近年来扩展至固定式蓄电系统，汽车动力领域。伴随着行业扩展，需要进一步地高性能化，低成本化。

在此之中特别的是，由于受到世界各国汽车电动化政策的快速推进影响，面向 EV、xEV (HEV、PHEV) 等电动汽车的电池的需求正急速增长。

对于电动汽车所搭载的电池而言，性能要求极高。汽车特性与为满足汽车特性电池所需的要素的对应关系举例如下

- 行驶距离远 : 高能量密度（大容量化并且小型、轻量化）
- 充电时间短 : 能够进行大电流充电（优秀的大电流特性）
- 长时间使用 : 电池的长寿命化（重复充放电的性能提升）
- 提升安全性 : 不会着火（电池内部的防短路、BMS 等的保护功能）
- 车辆低价格化 : 控制材料价格，高生产性（开发低价的材料、提高成品率）

为了实现这些电池特性，需要在电池制造的各个工艺中进行各种测试与检查，以及保证各个工艺作成物的品质。并且不仅限于制造，研究开发与成品检查中的各种情况下都必须进行测试和检查。

测试设备和检查设备中，具有代表性的有充放电试验机、阻抗测量设备、绝缘电阻试验设备、高精度电压计。HIOKI 在电气测量领域，提供了很多适用于电池测试和检查的设备。

本手册将介绍在做材料、制造的各个工艺、完成品等的检测时，对于性能评估来说必不可少的测量・检查设备的选择方法。

1. 锂离子电池制造工艺概览

首先，锂离子电池的生产工艺与各工艺实施的检查概览如图 1 所示。锂离子电池完整的工艺，大致可分为以下几类。

- 材料，电极的制造
- 电池单体的组装
- 电池单体成品的性能检查
- 电池模组，电池包(电池组)的组装
- 电池模组，电池包(电池组)的性能检查

以下、将介绍用于各工艺中必要评估项目的测试设备。

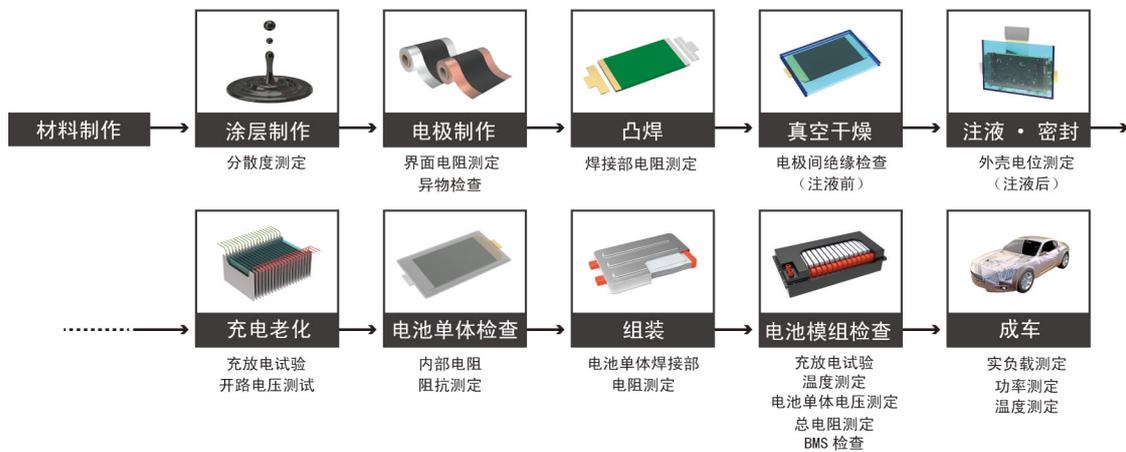


图 1 各工艺检查项目

2. 电极材料与电极制造工艺材料，电极的制造

-1. 在电池组装前的工艺中电极材料与电极的品质检查的重要性

电池单体完整的工艺，大致可分为材料制造、涂层制作、电极制作、电池组装。

为了稳定生产合格的电池，确保各工艺的品质是极其重要的。如果越是能够在上游工艺中排除不良品，就越有助于提升生产效率。需要管理的品质指标较多，在此对于以下三点

- 涂层制作： 材料比例与混合状态
- 电极制作： 干燥条件与电极密度的不同
- 组装工艺： 不纯物混入的程度

将进行解释说明。

各流程的严格管理，与开发工艺中各流程的改进与改善，以及生产工艺中的高品质、高成品率、稳定地生产紧密相关。

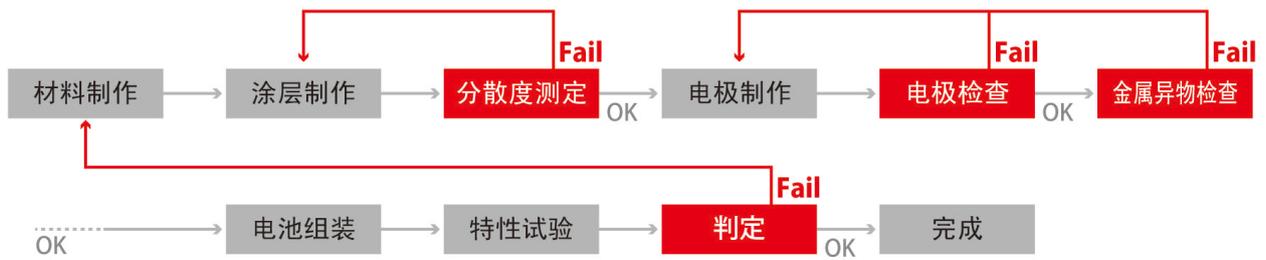


图 2 电池组装工艺的检查

2. 电极涂层分散度的品质检查

现在的锂离子电池电极片是由以活性物质、导电剂、聚合物粘合剂及有机溶剂构成的电极涂层制作而成的。

为了电池的高容量化，需要减少导电剂的比例，提高活性物质的比例。另一方面，为了减少电池的内部电阻，电子传导性是否充分这点很重要，因此又需要适量的导电剂。在这权衡下，活性物质与导电剂的比例最优化就显得十分重要了。

根据近年来的研究显示，为了获得良好的电池特性，最重要的是电极涂层内各物质的均匀分布¹⁻³⁾。如果活性物质的各粒子表面与电解液充分地接触了，那么反应面积增大电池特性也会更好。同时导电剂作为电子传导的通道，也需要适当地分散。如果涂层在混合时剪切力太低，会导致导电剂无法很好地分散。相反过高会导致导电剂微细化，无法很好地进行电子传导。当导电剂呈块状的情况下，电池组装后进行充放电时会出现电荷集中的情况。由于更希望电极全体能够均匀地发生电池反应，因此这种现象是不可取的。所以说电极涂层中的活性物质与导电剂的粒径分布与分散性管理十分的重要。

HIOKI 提出了一种通过测量阻抗来分析电极涂层的新方法。可以分析源于导电剂的电子传导性和活性物质的粒径·分散所影响的容量成分。这是过去直流法与光学式无法做到的。

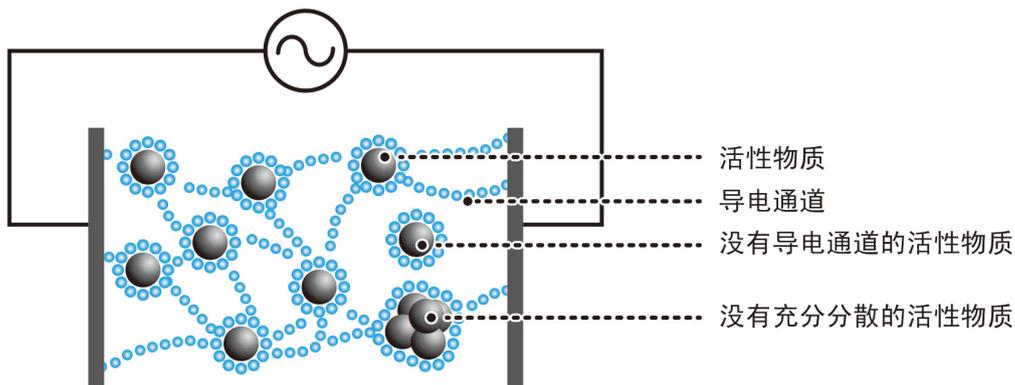


图 3 电极涂层的阻抗测量

3. 电极片制作时电极片的品质检查

电极片制作工艺是，先在金属箔(集流体)上薄薄地涂一层涂层，接着在热风中将溶剂蒸发干燥，之后为了提高敷料层强度和电气传导性能用金属轧辊对其进行轧制。电极制作中与电池性能相关的要因有以下几点。

第一，涂层涂抹厚度的均匀性。如果厚度不均匀，电池反应也会产生偏倚。当涂层中有气泡混入时，会出现气泡周边的涂层变薄这一现象。为了涂料时的品质管理和异常检知，需要对涂层的长宽方向厚度的误差进行测量。这个厚度的测量将使用非接触式厚度测试仪。

第二，涂层内粒子是否充分分散。如果是分散不良的情况，由于无法充分发挥各粒子的功能，电池特性也会较差。分散状态很差的情况下，会经常出现各粒子在涂层中呈块状的现象。在块状状态下进行涂层的涂抹，由于粒子分散不均因此涂膜后会出现条纹状现象。而通常的检测方法，是使用相机查看涂层上是否出现条纹，以此作为涂层特性的评估标准。

第三，由于干燥后的电极敷料层很脆，需要通过轧制提高其机械强度。同时也有让活性物质渗入集流体，优化电气传导性的效果。高轧制压力会使集流体与敷料层的接触电阻(界面电阻)变低。但过高又会导致电解液浸润困难，使电池电阻变高，影响电池的输入输出特性。相反，压力过低会导致敷料层机械强度不够，从而在重复充放电时会发生破损。这又与电池寿命低下直接关联。因此，需要设定并维持在一个合适的轧制压力。

HIOKI 针对电极片电阻评估的管理方法，建议使用电极电阻测量系统 RM2610。(图 4)。RM2610 是一款在敷料层表面施加电流，测量并计算电流分布所产生的表面电位分布，从而分离出辅料层的体积电阻率，集流体和辅料层的接触电阻(界面电阻)的设备。

通过 RM2610，以“敷料层体积电阻率”和“接触电阻”作为电极片指标，使得电池单体在组装前阶段就能得到评估。可以预见，它保证了电极片制作工艺的品质，锂离子电池进化·改善的开发时间将缩短，生产的成品率将提升。



图 4 电极电阻测量系统 RM2610

过去的测试手法有 4 探针测试法(图 5) 与贯通电阻测试(图 6)两种, 在这里简单介绍一下。4 探针法是通过 4 根探针按在电极片的表面, 进行 4 端子电阻测量。贯通电阻测试是通过两块一定面积的平板金属将电极夹在中间, 进行 2 端子电阻测量。

这两种测量方法, 无法把敷料层和接触电阻(界面电阻)分离开。但是作为能够反应出电极特性的电阻值测试的方法, 依然广泛用作电极制作工艺中定性的品质指标。只是一般情况下测量的再现性很低, 必须严格管理测量条件。

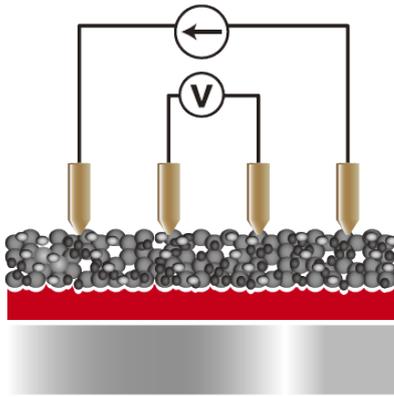


图 5 4 探针测试法

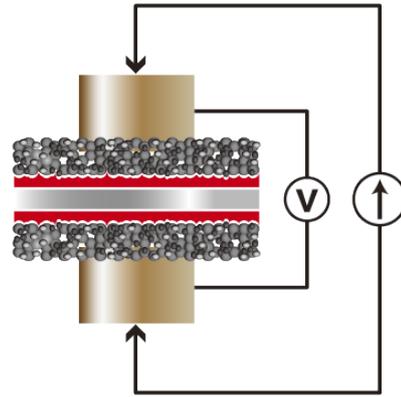


图 6 贯通电阻测试

4. 电极片的金属异物检查

电极片制造工艺中，必须严格管理确保没有金属粉末混入。金属粉末混入的原因如下

- 从制造现场的金属，例如制造设备的外壳上刮碰下来的粉末
- 将电极切割成预定尺寸中产生的毛刺
- 粘附在操作人员衣服上的金属粉末

金属粉末混入会导致在电池工作时内部有短路的风险。比如铁、铜、镍等金属混入后，在充电时溶解进入电解液，并在负极呈树枝状析出¹。一连串的反应会使得容量发生劣化，最坏的情况下会产生大规模的正负极短路，并有可能发生爆炸之类的重大事故（图 7）。

作为防止混入的对策，在此简单介绍一下实际运用中可以直接检出异物的异物检出设备。异物检出设备有如下几个种类。

- 相机画面检查设备：可以相对较低成本的检查较大范围。虽然只检出金属有些困难²，但也有已经实现了该功能的设备。缺点是比较难以检出电极内部的异物。
- X射线金属异物检出：除了金属，还能检出树脂等异物。初始和维护成本高于其他检查方法。
- 磁传感器金属异物检出：为了检出微小的金属片，需要把传感器和电极片尽可能地靠近。只能检出带磁性的金属异物。

以上的测试手法各有优劣，需要根据测试目的选择相应的测试设备，或者多种方法并用。

在电极片卷绕前进行检查，可以确实地防止电池单体的金属异物混入。或者也可以通过多种工艺检查，从而确定哪个工艺中混入了哪些异物。

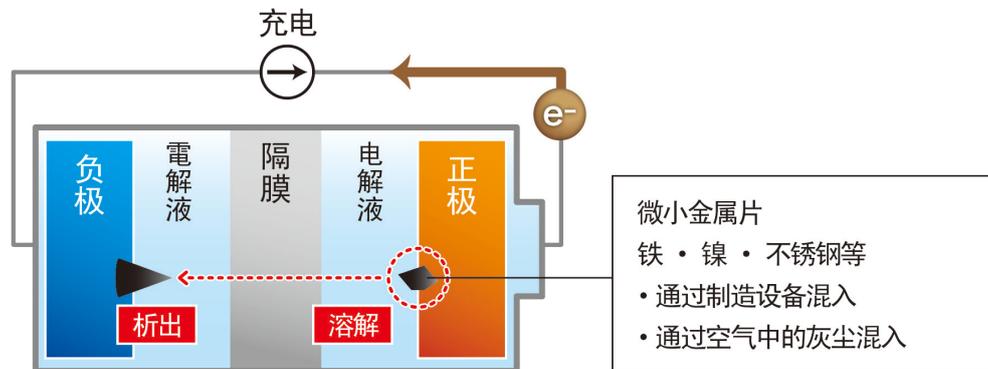


图 7 由异物混入导致的电池内部短路

¹ 像树枝状析出的金属称作树状结晶。

² 如果电池单体中混入不会影响电池性能的异物，将其判定为不良品就是过度评判了。这会导致成品率恶化。

3. 电池单体组装

3-1. 端子/极耳焊接部的电阻值检查、端子/极耳焊接部的电阻测量

为了能够充分利用高性能的电池，电池能量出入端子(极耳)的焊接品质十分的重要(图8)。特别是用于电动汽车的情况下，希望尽可能减小输出损失，控制发热在最低限度。因此，理想的状态是保证焊接部电阻是接近 0Ω 的超低电阻。

一般以焊接部分电阻在 $0.1\text{m}\Omega$ 以下作为良品与不良品的判断标准。需要选择分辨率在 $1\mu\Omega$ 以下，适用于低电阻测量的电阻计。

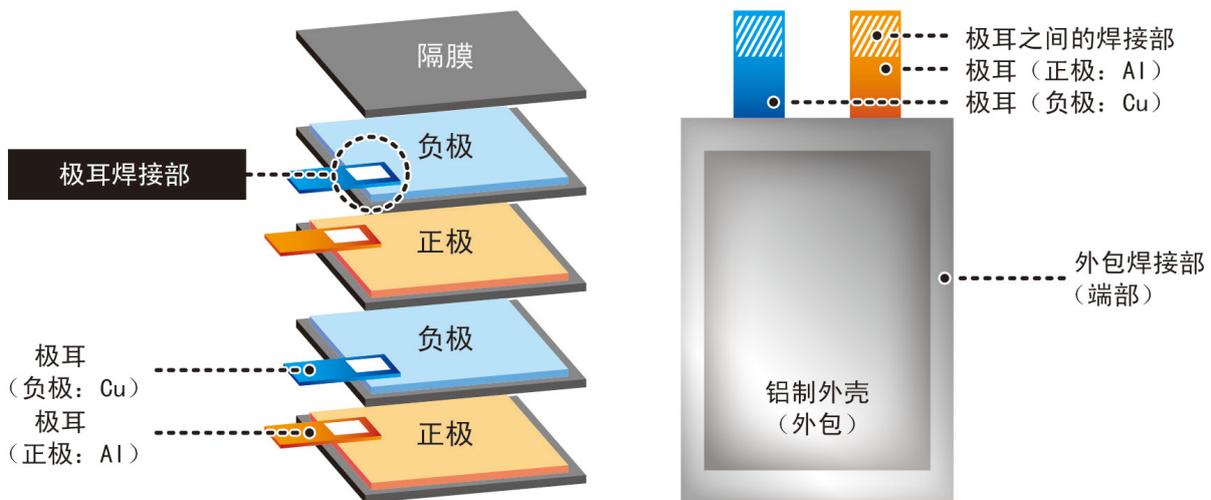


图8 层叠型锂离子电池的极耳

以下列举一些低电阻测量的注意点。

(1) 测量电流

首先对于测量对象(这里指焊接部分)，通过定电流源输出电流，测量其电阻成分产生的电压值。根据欧姆定律可以计算出电阻值。使用这种电阻测量方法的测试仪叫做电阻计。一般的，低电阻测量需要在大测量电流条件下才能正确地测量。测量对象电阻值在 $1\text{m}\Omega$ 以下的情况，推荐电阻计电流不低于 100mA ，最好是 1A 以上。

(2) 4端子法电阻测量

在低电阻测量时，测量表笔的配线电阻与表笔前端的接触电阻的影响是十分大的，无法忽略。特别是测量表笔接触部分的接触电阻，根据环境条件的不同，从几 Ω 到几十 Ω 都有可能。

2端子法测量时，测量电流 I 不只流过测量对象 R_0 ，同时还会流过配线电阻和接触电阻 r_1 和 r_2 ，测得的电压值 E 为 $E = I(R_0 + r_1 + r_2)$ 。由这个公式通过欧姆定律算出的电阻值为 $R_0 + r_1 + r_2$ (图9)。

为了解决这个问题，可使用4端子法。4端子法流出测量电流的端子与测量电压的端子是分开的。测量电流 I 流过电阻 R_0 ，但不流过电压测量端子 r_3 、 r_4 。也就是说 r_3 、 r_4 部分不产生电压。结果是，电压计的测

试电压 E 与测量对象两端实际产生的电压 E_0 是相等的、可以测量出不受到 r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 影响的正确的电阻值(图 10)。

由于以上原因， $m\Omega$ 量级的低电阻测量需要选择 4 端子法的电阻计。

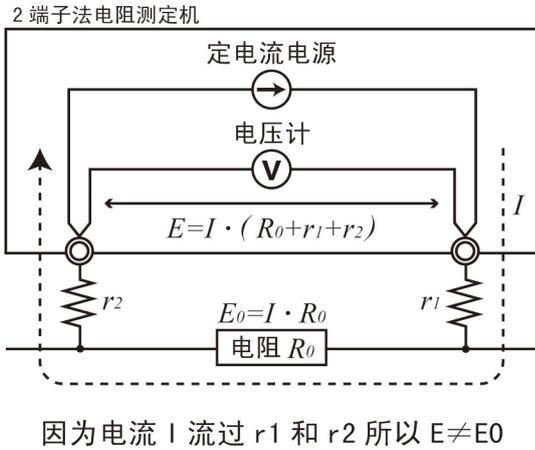


图 9 2 端子法电阻测量

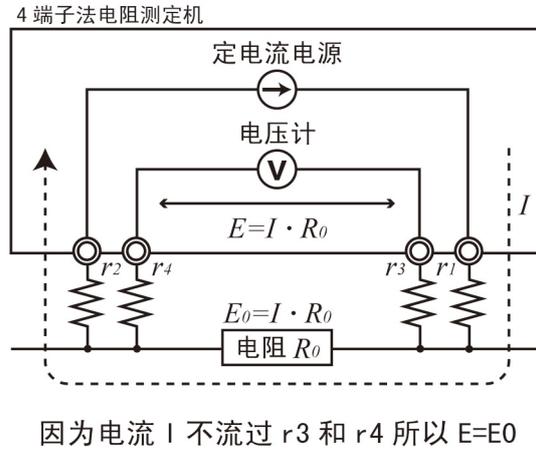


图 10 4 端子法电阻测量

(3) 温差电动势差的影响

温差电动势差是指不同金属在接触部分会产生电位差的现象。测量对象金属部分和测试表笔接触所产生的电位差是电阻测量产生误差的重要因素。特别是在测量对象电阻值 R_X 很小的情况下，测量电流 I_M 流经检出的电压 $R_X I_M$ 也很小，温差电动势差 V_{EMF} 的影响会变得很大(图 11)。为了消除温差电动势差的影响，可以通过反转测量电流，正负方向共测试两次的方法，经过计算后去除温差电动势差的影响。

正方向流过测量电流时检出的电压减去负方向流过测量电流时检出的电压，可以得到去除温差电动势差影响后的电阻值。(图 12、式(1))。电阻计 RM3545 搭载了 OVC 功能 (OVC: Offset Voltage Compensation)，可以去除温差电动势差的影响。

$$\frac{(R_X I_M + V_{EMF}) - (-R_X I_M + V_{EMF})}{2I_M} = R_X \quad (1)$$

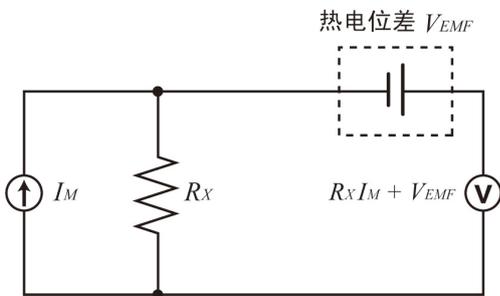


图 11 由温差电动势差产生的误差

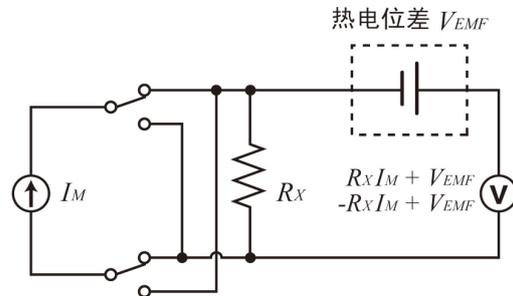


图 12 通过电流反转法消除温差电动势差

2. 注液前电极间、电极-外壳间的绝缘电阻检查

对于锂离子电池，应该绝缘的部分没有做好充分的绝缘，或者说绝缘电阻不足的情况下，会有电池寿命低下或者引起着火事故的风险。绝缘电阻变低的主要原因是，金属异物混入或者是隔膜破坏等。

应该绝缘的部分主要有，电极与电极间，电极与外壳间³。



图 13 使用绝缘电阻试验机 ST5520 进行电池单体的绝缘电阻检查

为了确认绝缘电阻是否足够，在电解液注液前必须对电池单体进行绝缘电阻检查。绝缘电阻检查需要使用绝缘电阻计。绝缘电阻计是电阻计的一种，专门用于测量高电阻值⁴。

绝缘电阻计通过对绝缘体施加高电压，检出流过的微小电流从而计算出电阻值。内部装有可以正确检出 pA(皮安)，fA(法安)级别的微小电流的高灵敏度电流计。

因为绝缘电阻测量时所测的信号非常微小，所以外部干扰和漏电流对测量值的影响非常大。良好的测量环境对获得稳定的测量值来说很重要。

习惯上把可以测到 10GΩ 的设备称为绝缘电阻计。可以测量更高电阻值的(典型的 $T\Omega = 10^{12}\Omega$ 以上)绝缘电阻计称为超高电阻计。以示区别⁴，之后本手册将对“绝缘电阻计”“超高电阻计”两种测量仪进行大致的说明。这两类产品的成本有很大的区别，需要根据绝缘状态的良好判定基准选择合适的绝缘电阻计。

³ 特别是负极-外壳间绝缘不良的情况下，必须准确地判定为不良品。对此，在之后的“边电压测量”中将详细说明。

⁴ 超高电阻计，也有被称为皮安表。

HIOKI 能够提供的绝缘电阻计有，绝缘电阻测试仪 ST5520；超高电阻计有，高阻计 SM7110 系列。如果不知道怎样选择合适的测量仪，可以以以下关键参数作为参考要点

(1) 绝缘电阻值的测量范围

需要选择能够测量出绝缘是否合格，绝缘电阻值超过阈值合格范围的绝缘电阻测试仪。特别是判定阈值在数 GΩ 以上的情况，需要确保量程足够。

- 判定阈值在几 MΩ 到几 GΩ 之间，精度要求几个%以内的情况下：ST5520
- 判定阈值在几 kΩ 到几百 TΩ 之间，精度要求更高的情况下：SM7110, SM7120

(2) 电压输出性能

根据绝缘电阻测量时施加的电压大小选择合适的产品。

- 1000V 以下：ST5520, SM7110
- 2000V 以下：SM7120

同时需要注意电池单体的静电容量。电池单体约有几百 pF 到几百 μF 以上的静电容量，在测量这种电池单体时，外施电压可能会发生过冲现象。如果发生过冲，输出电压稳定至设定的试验电压需要一定时间。这对后续将提到的间隔时间会有负面影响。又因为过冲会在被测物上施加一个高于设定的电压，被测物可能会被损坏。

HIOKI 的绝缘电阻测试仪和高阻计，对于容性负载也能做到抑制输出电压发生过冲的情况，因此可以说非常适合用于电池的绝缘电阻检测。

(3) 间隔时间

为了高效地检测大量的电池单体，需要检查的间隔时间最短化。测试间隔时间由以下绝缘电阻计的规格决定。

a. 电流容量（电流限制）

电流容量是指，能在测量回路中施加的电流的界限值。在测试仪的产品规格中，也可能被称为“充电电流”“电流限制”“电流 limit”“测量电流”“额定电流”等。在测量例如电池单体这种容性被测物时，电流容量越小，从开始施加测量电压到可以进行测试为止所需的时间越长。根据所需要的间隔时间，选择电流容量足够的测试仪。

绝缘电阻的测量是对被测物施加一个恒压。施加电压后，注液前的电池单体电极与电极之间，电极与外壳之间的绝缘层会聚集电荷⁵。这时容性被测物的电荷充电时间 $t[s]$ ，与被测物的容量 $C[F]$ 、回路中流过的电流 $I[A]$ 、试验电压 $V[V]$ 的关系以如下公式表示。

$$t = \frac{CV}{I} \quad (2)$$

t: 放电时间 C: 被测物的容量 V: 外施电压 I: 充电电流

⁵ 这种对绝缘部分充电的现象叫作介电吸收。

被测物的容量 C 和试验电压 V 是由工艺决定的。因此绝缘电阻开始测量所需要的时间，是和测试仪输出的电流大小呈反比的。也就是说，如果要缩短外施测量电压到正式开始测量的时间，需要使用电流容量足够大的绝缘电阻计。

HIOKI 的绝缘电阻计电流容量如下。

ST5520: 最大到 1.8 mA

SM7110, SM7120: 最大到 50 mA (limit 电流值可变)

b. 放电功能 (电荷吸收功能)

放电功能是指，释放在绝缘电阻实验中被测物的绝缘层上聚集的电荷的功能。放电不充分，可能会导致残留电荷引起的触电事故，或者被测物的故障。因此测量结束后，需要通过放电功能将被测物的电荷释放掉。大多数绝缘电阻计都搭载了放电功能，实现方式上有电阻放电法和恒流法两种。比如电池单体的容性被测物，使用恒流法能够更快速地进行放电。

[电阻法放电时间]

$$t = CR \ln \left(\frac{V_0}{V_1} \right) \quad (3)$$

[恒流法放电时间]

$$t = \frac{C(V_0 - V_1)}{I} \quad (4)$$

t : 放电时间 C : 被测物的容量 R : 放电电阻 V_0 : 充电状态被测物的端子间电压
 V_1 : 放电状态被测物的端子间电压 I : 放电电流

HIOKI 的绝缘电阻测试仪 ST5520 和高阻计 SM7110, SM7120 都搭载了恒流定电流法放电功能。

ST5520: 10 mA 恒流放电

SM7110, SM7120: 根据电流 limit 设定的电流值恒流放电(最大 50mA)

(4) 接触检查功能

测量表笔和测量对象物如果没有发生电气接触，当然是无法测到被测物的绝缘电阻值的，但是开路状态下绝缘电阻计的表示值是极大值，只看表示值的话与良品并无区别(图 14)。这样的话，绝缘不良的电池也会有可能被误判为良品。因此，在测量前确认表笔是否正确接触了被测物是很重要的。确认表笔与测量对象物接触与否的功能称为接触检查功能。为了防止向市场流出不良品，应该选择搭载了接触检查功能的绝缘电阻计。

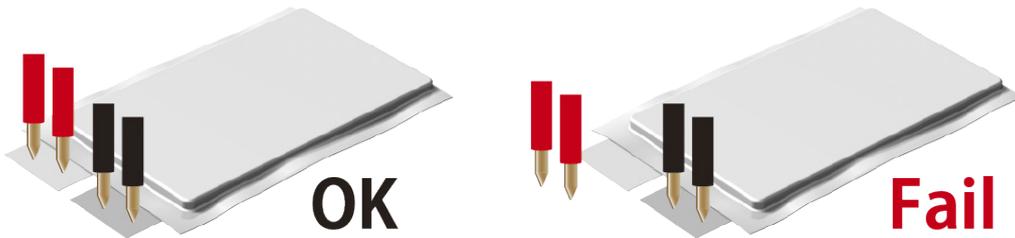


图 14 正确的接触状态（左）和错误的接触状态（右）

(5) 微短路检查功能

由金属异物和毛刺形成的小区域导通状态称为微短路(micro short)⁶。内部存在微短路的电池进行绝缘电阻测量时，外施高电压⁷会在微短路区域产生集中电场，并将微短路部分烧断。这种情况下，因为测量使得微短路状态发生了“改善”，结果会判断为良品(图 15)。然而，这种微短路电池在重复充放电后会有发生大规模短路的风险，必须判定为不良品。

为了避免这种情况，绝缘电阻测量前需要施加一个不会改善微短路状态的低电压(几 V 左右)，检出微短路状态。推荐选择搭载了这种功能的绝缘电阻计。

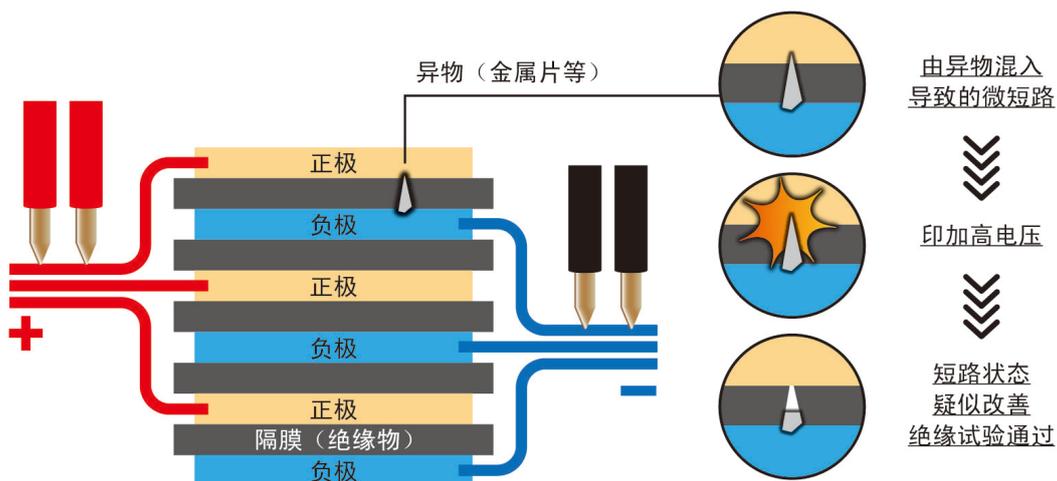


图 15 由于施加高电压导致暂时的微短路改善

⁶ 锂离子电池业界，微短路大多情况下是指“随着树状结晶的成长正极与负极导通的现象”。而在绝缘性能试验的语境中一般把“本应绝缘的部分导通了，且导通区域比较微小，在绝缘性能试验中施加高电压会使这个导通区域烧断，从而检测不出绝缘不良”的这种状态称作微短路。这里使用的是后者的含义。

⁷ 注液前的绝缘电阻测量，一般施加 100V 到 200V 左右的电压。

3. 边电压测量(层叠型锂离子电池)

如图 16 所示的层叠型锂离子电池，根据对其有效的边电压测量，对绝缘检测进行说明。

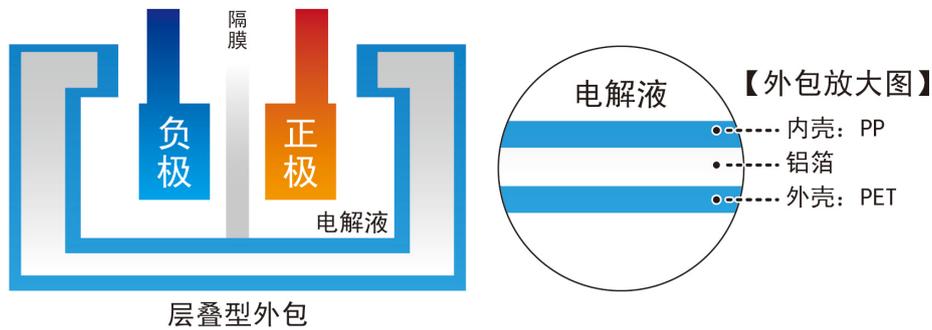


图 16 层叠型锂离子电池的构造图例

即便确认了电解液注液前的绝缘性，在注液后由于形成了新的电气回路，也可能导致绝缘不良。因此，确认注液后的绝缘状态非常的重要。但是，此时如果和注液前一样，通过高电压进行绝缘电阻测量的话，会将电池特性没有影响的异常情况判定为“不良品”。同时施加高电压也可能会引起电解液的分解。

例如图 17 左，假设负极和铝制外壳间发生了绝缘不良。而且同时如图 17 右，铝制外壳的树脂膜产生了裂纹，电解液和铝制外壳导通了。此时就产生了如图 17 右内箭头所示的电流路径。由于铝比负极材料电位高，在铝制外壳-电解液界面发生还原反应生成了 Li-Al 合金。这种 Li-Al 合金非常的脆，因此会导致在铝制外壳上出现小孔。如果有水分通过小孔进入电池，锂离子电池的寿命会显著下降(图 18)。也就是说，为了制造高品质的电池，必须检测出负极和铝制外壳间的绝缘不良。

另一方面，假设正极-外壳间绝缘不良，同时电解液-外壳短路。此时由于铝的电位低所以发生氧化反应，无法生成 Li-Al 合金(图 19)。因为不会影响到锂离子电池的寿命，所以可以判定为“良品”（表 1. (3)）。

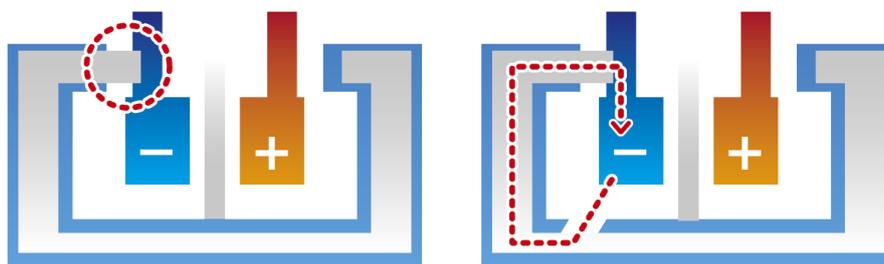


图 17 由于负极绝缘不良与外壳内部产生裂缝形成的电流回路

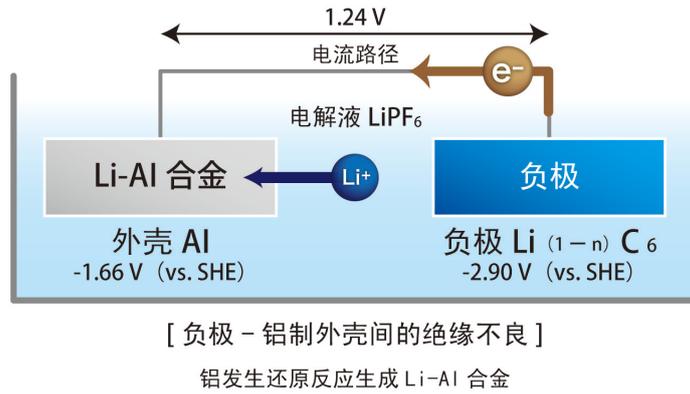


图 18 由于负极-铝制外壳间绝缘不良引起的反应

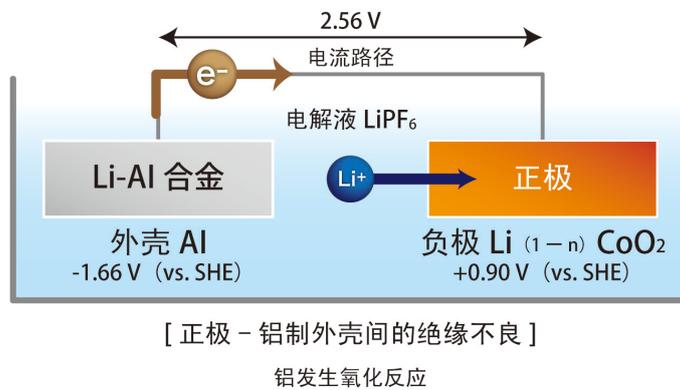


图 19 由于正极-铝制外壳间绝缘不良引起的反应

对于层叠型的锂离子电池，负极和铝制外壳间绝缘不良的检测，有效的判定方法是测量正极与铝制外壳间产生的电位差。这个电位差，后文都称作“边电压”。根据绝缘不良的状态不同，边电压的电压值会发生变化。内部绝缘不良模式和边电压关系总结如表 1 所示。

根据之前所说的，必须能够准确地检出如表 1. (5) 所示的负极-铝制外壳间绝缘不良。此时，铝制外壳和负极电势相同，边电压=正极电位-负极电位，也就是和电池电压值相同。即边电压与电池电压相近时，就可以怀疑负极与铝制外壳间发生了绝缘不良。

内部绝缘状态良好的电池如表 1. (1)，不会产生边电压。为了检出此时的 0V，有效的方法是电压计 High-Low 端子间接如一个 $10\text{M}\Omega$ - $10\text{G}\Omega$ 的电阻 R_N 。通常情况下，电压计都有 $10\text{M}\Omega$ - $10\text{G}\Omega$ 的输入电阻，这个输入电阻值就是 R_N 值(图 20)。

另一方面，正极-负极间短路的情况(表 1. (2))下，会和合格电池一样不会产生边电压，电位不定。也就是说，测量边电压是无法检出正极-负极间的短路的。这当然也是会导致重大事故的绝缘不良，因此，注液前对正极-负极实行绝缘电阻检查，准确地检出短路与否是非常有必要的。

又如表 1. (4) 所示，假设绝缘涂层产生裂纹。边电压=正极电位-铝制外壳电位。铝制外壳电位约 -1.7V (vs. SHE⁸) 左右。正极电位根据电池电压和正极活性物质不同而有所差异，例如电池充电率较高的 LiCoO_2

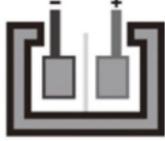
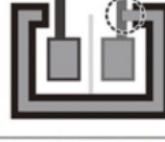
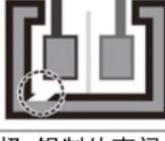
⁸ 表示与 SHE (标准氢电极、Standard Hydrogen Electrode) 的相对电位。与 SHE 的相对电位称作标准电极电位。

的话约为+0.9 V (vs. SHE)左右。此时能测到外壳电位差约为 2.6 V 左右。绝缘涂层裂缝本身对电池特性没有影响，即使判定为良品也可以。

正极-铝制外壳间短路的情况也一样(表 1. (3))，不会对电池特性产生影响所以可以判定为良品。此时边电压和合格品相同，为 0V。

根据上述内容，在外壳电位差接近于电池电压时判断为不良品，可以准确地检出负极-铝制外壳间的绝缘不良。

表 1 层叠型锂离子电池内部绝缘不良的模式与良否判定

	绝缘不良位置	原因	现象	良否判定	外壳电位	检查方法
(1)	无绝缘不良 	-	-	良品	不稳定 (0V)	-
(2)	正极-负极间 	树状结晶导致隔膜贯通 金属粒子混入 卷边不齐	自身放电增大 异常发热	不良品	不稳定 (0V)	绝缘电阻
(3)	正极-铝制外壳间 	金属粒子混入 外壳包装不良	电池特性无影响	良品	0V	外壳电位
(4)	电解液-铝制外壳间 	绝缘涂层裂缝	电池特性无影响	良品	~2.6V {+0.9 - (-1.7)}	外壳电位
(5)	负极-铝制外壳间 	金属粒子混入 外壳包装不良	随着时间的变化 铝制外壳将产生 裂缝，会使得电 池劣化	不良品	~3.8V {+0.9 - (-2.9)}	外壳电位

在测量边电压时，需要注意以下三点。

(1) 电压测试仪的输入电阻

如果测试仪输入电阻过低，会和被测电压产生分压，使不良品与良品的判断变得困难。也就是说，为了更好的检查结果，推荐使用输入电阻高的电压计。

比如，绝缘电阻 10MΩ，输入电阻 R_N 10MΩ 的情况下，边电压有一半会被分压。因此需要使用输入电阻更高的电压计，推荐使用输入电阻 10GΩ 以上的仪器。但是，大多数测试仪没有这么高的输入电阻。一般的电压计或数字万用表的输入电阻大多在 10MΩ 左右，选择时需要注意。

(2) 可靠的探针

边电压测量是通过边电压是否接近 0V 从而判断电池是不是良品。另一方面如图 21 所示，在表笔没有接触到测量对象情况下，因为有输入电阻 R_{IN} 导致电压计会同样测得 0V。而这种接触不良会把不良品误判为良品，导致不良品流入市场的结果。特别是因为铝制外壳侧有绝缘涂层，所以很容易发生接触不良。

HIOKI 的电压计 DM7275/DM7276 有接触检查功能，可以在确认接触状态后再进行测量。选择带有接触检查功能的测试仪，在确认接触状态后进行测量是很重要的。

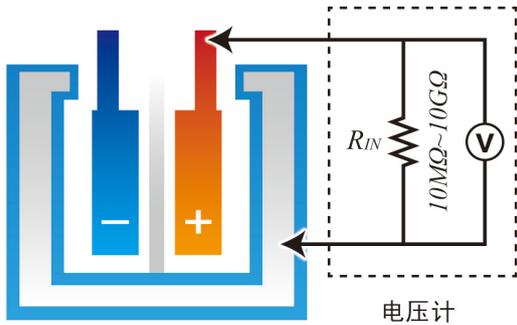


图 20 电压计连接输入电阻 (R_{IN}) 的状态

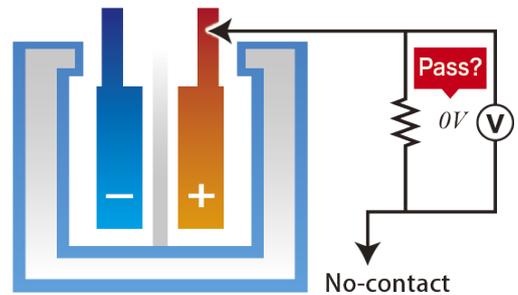


图 21 由于错误接触导致的误判定例

(3) 干扰对策

测量边电压时测量点的输出电阻通常较高。环境中外来干扰过多，会导致测量值偏差变大，有误判定的可能性。作为对策，测试线选用屏蔽线，使其不容易受到外来干扰的影响。另外，为减少商用电源工频噪声的影响，做好电压计的积分时间和电源频率的同步设定，也是非常重要的事。

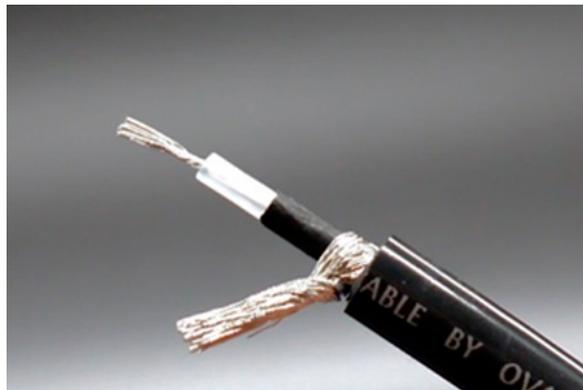


图 22 屏蔽线

4. 电池单体完成品（电池单体性能评估）

-1. 预充电与充放电特性试验

为了防止电解液注液后负极集流体析出，必须尽快进行预充电。预充电使用的充放电试验器需要充分满足输出电压和电流容量的要求。电池单体注液后，电池电压可能出现负电位的情况，因此充放电试验器最好搭载有负电压充电功能。

预充电通过一个小电流值，在负极表面形成一个均匀的 SEI 膜(Solid Electrolyte Interphase)。另外，SEI 膜会在重复充放电的过程中慢慢地变厚。可以通过阻抗变化来判断 SEI 膜的形成状态。

为了评估各种各样的电池特性，充放电试验器需要有多种充放电模式。而最基本的容量测量，是恒流恒压(CC-CV)模式充电和恒流(CC)模式放电。此外，脉冲充放电模式可以模拟例如手机这种短时间大电流的机器的实际负载情况，按其电流模式进行放电，模拟实际使用时的容量检测。还有可以模拟实际负载情况做更详细模拟试验的充放电试验器，比如可以模拟逆变器电流的高频纹波。除此之外，根据电池的用途不同，还有额定电阻放电模式和额定功率模式等，可以进行模拟实际使用状态的试验。

电池内部电阻是了解电池状态的重要指标。测量内部电阻有交流法和直流法两种方法。交流法对电池施加交流信号，通过测出电流和电压的变化从而算出阻抗。与此相对的，直流法是用开始或放电停止瞬间测得的电压和电流的变化，计算出电阻值的方法。因此在直流法测内部电阻时，最好使用能够迅速切换电流供给状态的，并且能测到电压高速变化状态的充放电试验器。

因为电池特性会随温度而发生变化，所以电池温度管理对充放电特性试验而言很重要。因此为了正确地调查电池特性，恒温箱不可欠缺。一般在恒温箱达到设定温度后，需要设定一个静置时间，使电池内部温度也达到均衡。需要根据电池的体积(热容量)决定静置时间。

也有搭载了放电功率回生再利用功能的充放电试验器，放电功率在系统侧再生后可以直接利用为充电电流。因为充放电试验器会消耗大量的功率，再生功能可以节省能源和降低发热。

充放电试验器最大输出功率，根据电池单体，电池模组，电池包的使用方式不同会有很大区别。可以满足目标的输出电压和充放电电流作为选择的基准。

-2. 老化工艺中开路电压(OCV)测量

电池放置过程中，也会缓慢地有树状晶体析出，在正负极间产生微短路。这种现象会有在未来发生大规模短路的可能性，需要在制造工艺中避免这种情况。正负极间发生微短路后电池的开路电压(OCV, Open-Circuit Voltage)会发生变化，可以通过电压值进行检测。通常在电池预充电后的老化工艺中，通过测试 OCV 变化量进行检查。除树状晶体外，因为电极表面附着的导体引起的微短路在之前工艺的绝缘检查中可能检测不出来，所以需要在老化工艺中进行 OCV 测量。

因为 OCV 的变化量很微小，需要进行长时间的老化工序。一般情况下进行 OCV 测量，判断是否合格最短也需要 100 到 200 小时，长的情况也需要几周左右。为了检出微小的电压变化，OCV 测量需要使用高精度和重复性好的电压计。

随着时间变化，良品和不良品的 OCV 差别会变大，很容易能检出。但是，过长的老化工艺会导致生产性低下(图 24)。使用的电压计的重复性和精度够好的话，可以在短时间的老化工艺中正确的判定出良品与不良品。特别是测量电池单体电压(4V 左右)时，需要选择精度有保证的万用表或者电压计。测试仪量程范围等参数不尽相同，不能仅凭分辨率和表示位数这些单纯的性能进行比较。通过对测得的电池单体电压(4V 左右)数据的重复性进行计算，算出测量误差，之后尽可能选择测量精度更高的测试仪。

HIOKI 提供的高精度直流电压计 DM7276 (图 25)，使用了内部自动校正系统，能保证 1 年内的使用精度，且基本电压测量精度为 9ppm，从而能在老化工艺上实现高效率低成本的不良电池单体检测。

表 2 电极表面附着的导电体种类

-1	金属污染 (树状结晶的原因)
-2	切断电极时集流体的粉末
-3	切断时活性物质产生的粉末
-4	集流体侧面的毛刺

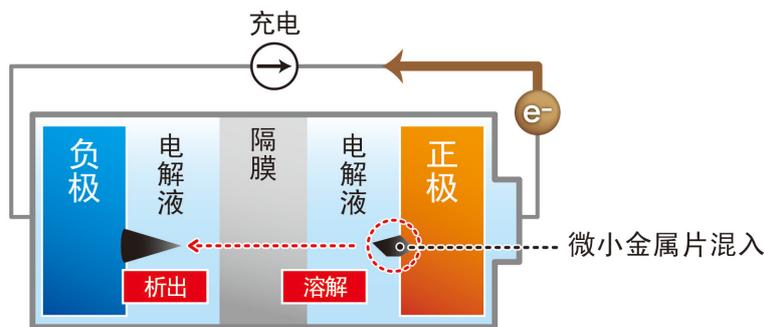


图 23 随着树状晶体的成长将会刺破隔膜

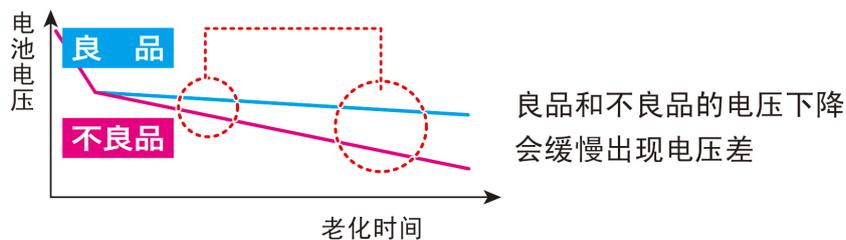


图 24 老化中电池电压的变化



Precision DC Voltmeter DM7276

图 25 直流电压计 DM7276

3. 电池的阻抗测量

根据电池内部电阻值变化，电池特性也会发生较大变化。内部电阻越高内部能量损耗越大，电池性能会变差。同时，使用中电池的发热也会变大，其特性与电池峰值性能变差的原因紧密相关。一般认为内部电阻越小电池特性越好。电池的内部电阻值被广泛用作判定电池特性的指标。

电池内部的电阻测量，有交流法和直流法两种。

直流法，是将电池以一定的电流进行放电，通过放电的电流值和特定时间内电压下降的程度，计算出内部电阻的方式。主要用于模拟实际工作状态的大电流特性检测。

而使用交流法测量内部电阻时，会对电池施加一个微小的交流信号，将电池的电阻成分和电抗成分分离开再进行测量。因测量仪体积小，测试重复性好，又能在短时间内完成测量，使用交流法的内部电阻测试方式被广泛运用于锂离子电池之类的二次电池的性能和品质评估上。又因为直流法会对电池进行放电，测量中电池充电率会发生变化。为了避免发生这种问题，选择交流法更好。

依照惯例，直流法测量的电阻值称作 DC-IR，交流法测量的电阻值称作 AC-IR⁹⁾。而且交流法的内部电阻测量方式通常会被称作“阻抗测量”，下文也会使用这个叫法。

需要注意的是，通常电阻测量使用的电阻计，或者说阻抗测量使用的阻抗测试仪(LCR 测试仪)，是无法测量电池的(图 26)。为了和普通的 LCR 测试仪作区分，我们将可以对电池进行测量的 LCR 测试仪称作电池测试仪。电池测试仪一般可以测量阻抗和电池电压。

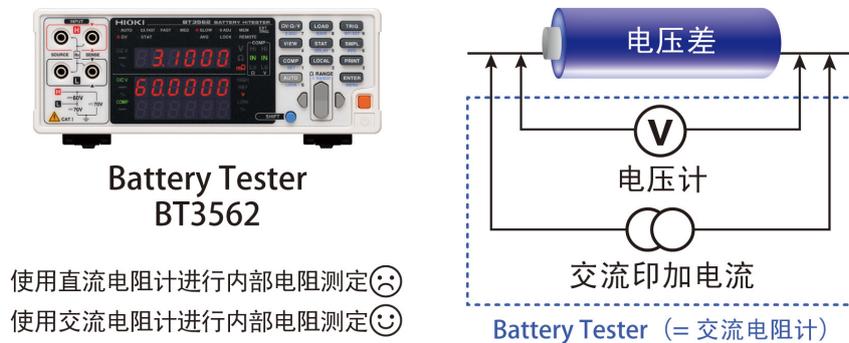


图 26 使用电池测试仪(交流电阻计)进行电池内部电阻测量

一般检查线上的出货检查和验收检查，是在指定频率下(大多为 1kHz)进行阻抗测试的。将电阻和感抗成分分离，只对电阻成分的有效电阻值进行显示。因为可在短时间内完成检测，所以特别适用于量产的检查和验收检查。

在与便携式测量仪的锂离子二次电池相关的 JIS C8711:2013 规定中，将 1kHz 的阻抗测量法，记载为“电池组的交流内部电阻测量法”。而 IEC61960-3:2017 规定沿用了相关内容⁹⁾。规格内容如下框所示。

⁹⁾ IR: Internal Resistance (内部电阻)

使用频率 $1.0 \pm 0.1 \text{ kHz}$ 的交流电流 I_a 对电池组通电 1~5 秒，测量交流电压 U_a 。

与通电的触点不同，电压测量均在其他电池端子进行。

电池组的交流内部电阻 R_{ac} 按以下公式求得。

$$R_{ac} = \frac{U_a}{I_a}$$

其中、 R_{ac} : 交流内部电阻 [Ω]

U_a : 交流有效电压 [V]

I_a : 交流有效电流 [A]

注意 1 使用交流电流测量的情况下，叠加的交流电压峰值不超过 20mV。

注意 2 这个方法通常用于特定频率下，测量大约等于电阻的阻抗。

不止单一频率，对阻抗进行扫频的测量方法也很常用。测量结果一般会用科尔科尔图 (图 27) 表示。

由于频率带宽不同，影响阻抗的物理现象也不同。比如高频 (~1kHz) 情况下电解液中锂离子的移动，低频 (<1Hz) 情况下锂离子在电极内的扩散，中频 (1Hz~数百 Hz) 情况下的电荷交换反应，这些物理现象会影响阻抗。也就是说，对科尔科尔图作详细分析可以分别评估电池的各部分发生的现象。最具代表性的分析手法，即使用如图 28 所示的等价回路模型进行等价回路分析⁶⁾。电池内部的每个现象都对应了等价回路中的某个要素。解析后获得的各要素值，可以用来表示该要素代表的物理现象的特性。

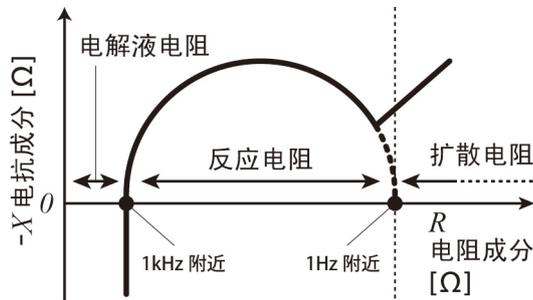


图 27 锂离子电池的科尔图示例

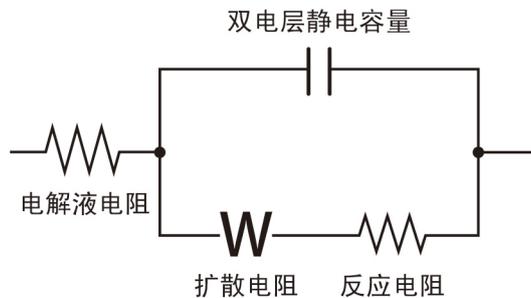


图 28 电池的等价回路示例

HIOKI 根据电池电压和测量频率范围不同，提供各种电池阻抗测试仪。在这里介绍一下选择测试仪和测试方法的要点。特别是大容量的且内部阻抗极小的，在 $1\text{m}\Omega$ 以下的锂离子电池，对其进行正确的测量并不简单。因此必须要注意测量设备的选择和测量的方法。

(1) 测量方式

低阻抗的测量一般不使用 2 端子法而是使用 4 端子法进行测量。因为 4 端子法可以不受测量表笔的配线电阻和接触电阻的影响，进行正确稳定的测量¹⁰。

(2) 感应磁场的影响

由于外施了电流，周围的金属中产生了涡电流，从而产生了感应磁场。这个感应磁场如果进到了电压测试线围成的回路内就会导致测量误差，因此需要特别注意(图 29)。像这种现象不会发生在直流测量中，是交流测量中特有的现象。

例如 EV 用的大型电池，因为电池尺寸很大，电极间的距离也就很长。因此电压测试线围成的回路的面积也就更大了。在测量这种电池时，流过电池金属部的测量电流会产生感应磁场，从而导致测量误差。

为了减少感应磁场的影响，可以考虑以下对策。

a. 将测试线互相缠绕

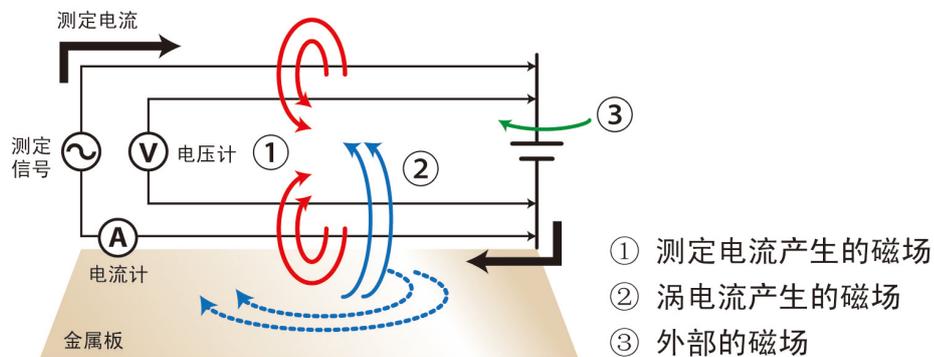
将电流测试线，电压测试线各自进行缠绕，尽可能多的相互缠绕测试线是一种有效的方法。电流测试线相互缠绕后，电流产生的磁场会被抵消，向外部漏出的磁场会变小。电压测试线相互缠绕后，磁场能够影响的面积就变小了。而且，涡电流和外部磁场的影响也会减轻。

b. 将测试线和电池远离金属物

增大电流和金属间的距离，能够减轻其对感应磁场的影响。注意尽可能的与测试设备的金属，测试设备放置的桌面的金属部分留出足够的距离。

c. 采用 4 端子对法

选择 4 端子对法(不是 4 端子法)的测量设备也是一种有效的方法(图 30)。4 端子对法是在测量电流的屏蔽层部分，反向流过一个同等大小的电流。这样电流产生的磁场几乎不会向外泄漏，影响自然也就变得最小了。



¹⁰ 4 端子法请参照 3. -1。

图 29 4 端子法

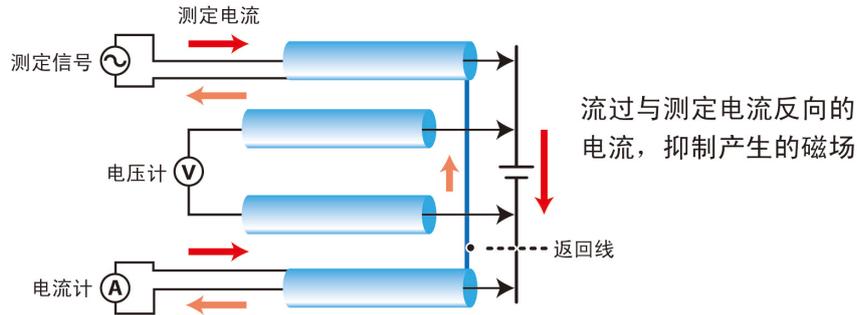


图 30 4 端子对法

d. 测量频率的变更

降低测量频率也是有效的方法。如之前所说的，现在一般的阻抗测试使用的是 1kHz。频率越高涡电流对测量产生的影响越大，在 1kHz 的测量频率下也会产生不小的影响。比如频率在 100Hz 时，涡电流影响量会明显变小。但频率变低会使间隔时间变长，所以需要兼顾两者关系来决定频率值的选择。

(3) 施加电流值

测量时，需要根据电池的阻抗值决定施加的电流值。电池阻抗越低，越是需要施加大电流，这样才能稳定地测量。但是由于电池的 I-V 特性不是线性的（图 31）大电流外施过度了会导致明显的非线性曲线。而通常来说，电池两端产生的交流电压振幅，需要控制在线性范围内（图 32）。

一般来说，在电化学系统中测交流阻抗时，施加的交流电压一般得控制在 $20\text{mV}_{\text{p-p}}$ 以内。也就是说，电池阻抗在 $1\text{m}\Omega$ 的情况下，施加的电流最大为 7A_{rms} 左右（式(5)）。在实际探讨需要施加多少电流时，电池电压变动在 $5\text{--}10\text{mV}_{\text{p-p}}$ 左右的电流值为最合适的范围，若测量值的 S/N 比变差就提高电流值以作调试。而 S/N 值若在允许范围内，电流值小一点也没有问题。

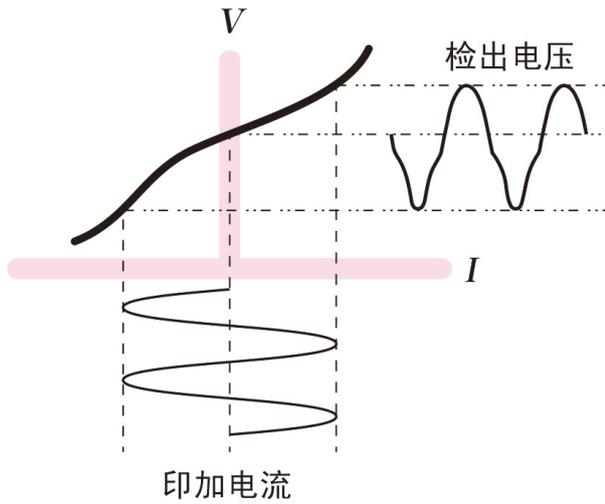


图 31 测量电流过大的情况下检出电压失真

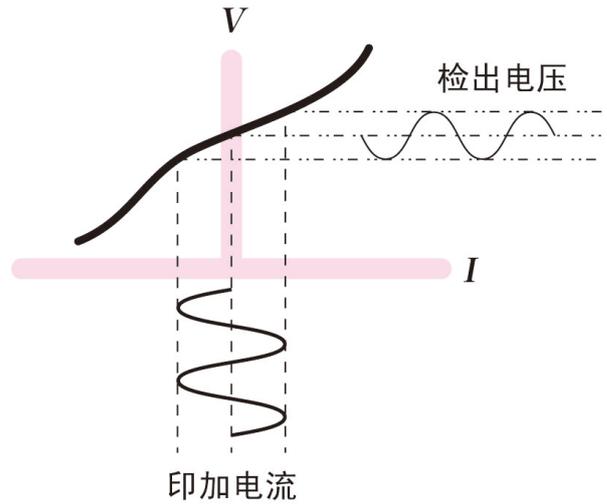


图 32 测量电流合适的情况下的检出电压

$$\frac{20.0 \text{ [mV]}}{2\sqrt{2}} \div 1.0 \text{ [m}\Omega\text{]} \doteq 7.0 \text{ [A}_{\text{rms}}\text{]} \quad (5)$$

(4) 测量频率与最大输入电压

关于阻抗测量设备，根据 JIS C 8711 规定的记载，有 1kHz 单一频率专用的设备，也有搭载了扫频功能的设备。后者多用于科尔科尔图和等价回路分析等电池详细特性的评估上。想要进行扫频测量时，由于电池种类不同其频率特性也不同，所以必须选择测量频率带宽能够满足要求的测量设备。在测量低频阻抗时，电池会因为测量电流发生充放电行为。而测量开始与停止时间如果没有设定好，就会使测量前后的电池的充电率发生改变。为了避免这种情况，就需要测量仪有测量信号的零位交叉停止功能(图 33)。

需要根据电池的电压情况选择合适的测量设备。测量设备的最大输入电压在检测电池单体时约为 5V，EV 用电池组的检测约 1000V。必须注意输入电压的额定值。

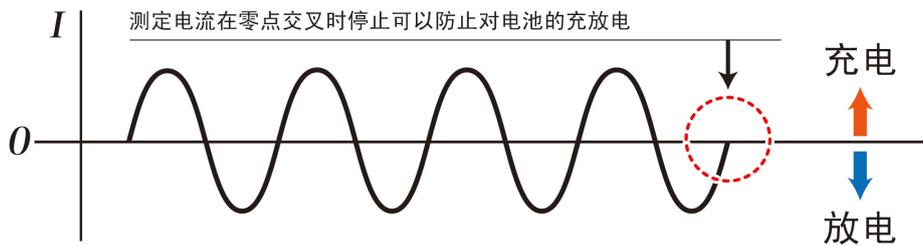


图 33 测量信号的零位交叉停止功能

(5) 与电池端子的接触

做低阻抗测量时，需要注意测量端子的接触方法。

4 端子法和 4 端子对法的情况下，分别有施加了测量电流的电流端子和测量压降的电压端子。电流端子的电位梯度很陡，电压端子测量的位置如果不当测量值的变动会很大。因此，为了保证测量的重复性，以下 4 点很重要(图 34，图 35，图 36)。

- 电压端子和电流端子要分开一定距离
- 测量时要确保这个距离
- 测量对象和表笔保证有且只有一点接触点
- 每次测量同一个接触点

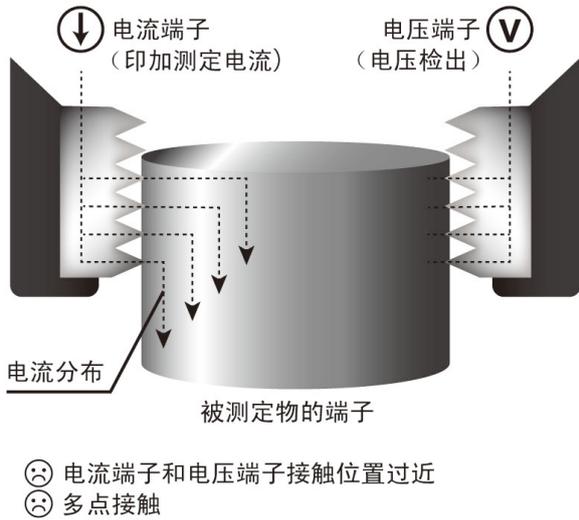


图 34 多点接触的影响

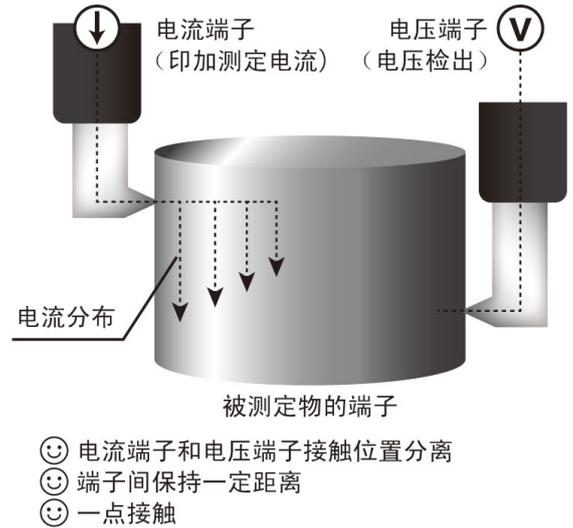


图 35 再现性良好的接触方法

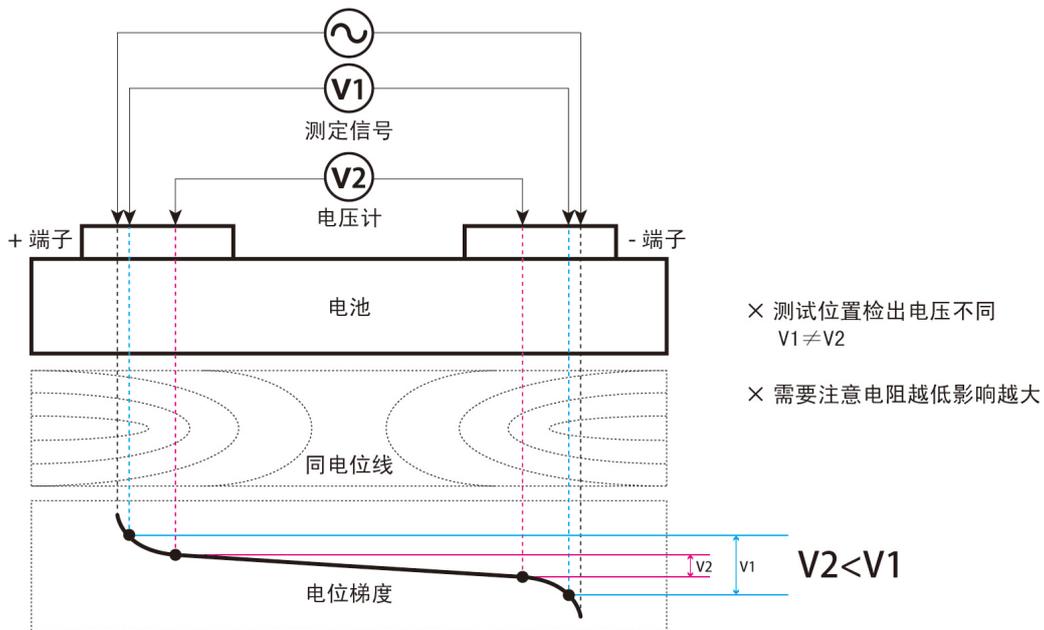


图 36 电流端子和电压端子接触位置的影响

(6) 电池测试仪器的选择

基于以上内容，总结一下选择 HIOKI 提供的电池测试仪的注意点。

• 测量频率

1 kHz 单一频率专用： 3561、BT3562、BT3563、BT3564、BT3554

扫频可能： BT4560 (0.1 Hz - 1050 Hz※)、IM3590 (0.001 Hz - 200 kHz)

※ 特注可扩大至 0.01 Hz - 1050 Hz

检查线的出货检查和验收检查通常用固定频率检查电池的内部电阻，所以一般会使用 1 kHz 单一频率的测试仪。因此建议根据输入电压和阻抗范围选择合适的测试仪。

如果要更详细地评估电池内部的特性，就需要使用扫频测试仪。想要更宽的测量频率范围，可以选用 IM3590，需要边扫频边高精度的测量阻抗时，可以选择 BT4560。（图 37）。

• 能够测量的阻抗范围

0.1 $\mu\Omega$ - 100 m Ω ： BT4560※

0.1 $\mu\Omega$ - 3000 Ω ： BT3562、BT3563、BT3564

1 $\mu\Omega$ - 3 Ω ： BT3554

10 $\mu\Omega$ - 3 Ω ： 3561

10m Ω - 10 Ω ： IM3590

※特注可扩大至 3 Ω

一般来说，电池尺寸越大内部电阻值就越低。如车载用大型电池的内部电阻可能会小于 1m Ω ，因此推荐选择能够正确测试低电阻的 BT4560 和 BT3562。

• 其他

需要携带测试仪的情况下推荐便携式的 BT3554（图 38）。

除 BT3554 以外，所有电池测试仪都可以通过使用 SW100x 系列进行多通道测量。非常适合需要测量数个电池内部电阻的情况。



图 37 电池阻抗测试仪 BT4560 和电化学阻抗分析仪 IM3590



Battery Tester
BT3554

图 38 电池测试仪 BT3554

5. 电池模组，电池包（实际应用层面的性能评估）

5-1. 电池模组，电池包的总电阻检查

完成的电池单体，有直接安装到机器里的，但大多情况下是 2 个-几十个电池单体组装成模组、电池包之后进行使用（图 39）。用于小型机器的电池包的总电压约为数 V 到数十 V。近年随着 xEV 和助动车之类电动车的增加，数十 V 到数百 V 的高电压电池包的实用化也在推进中。总电压 24V, 48V, 72V, 300V 之类的电池包也越来越普遍了。

2019 年，在日本市面上销售得最多的 EV，搭载了 192 个层叠型锂离子电池，电池包排布方式为 2 并 96 串（根据车种的不同有时会有 3 并）。总电压约为 350V。



图 39 层叠型锂离子电池的形态示例

将复数的电池单体连接起来使用的情况，需要做以下的电气检查。

(1) 电池模组化工艺中电池单体端子(极耳)的焊接・连接的品质管理(电阻测量)

a. 需要正确测量低电压电池模组的情况（直流电阻计 RM3545）

模组化工艺是指通过金属母线的固定或焊接等，将数个电池单体的端子(极耳)相连接的过程。电池流通大电流时，即使电阻值很小，也会造成巨大的能量损失，为了能最大限度地发挥电池的性能，各端子的连接品质就显得非常重要了。焊接产生的电阻值越低越好。电池单体的内部电阻，一般 21700 圆形锂离子电池约在 $20\text{m}\Omega$ 左右，大型的层叠型锂离子电池在 $1\text{m}\Omega$ 以下。对品质管理来说，焊接电阻最好在在 $0.1\text{m}\Omega$ 以下。因此需要选择分辨率在 $1\ \mu\Omega$ 以下，适用于低电阻测量的电阻计¹¹。

焊接部分的两端是同电位，正确测量的情况下测试端子间并不会产生电压。对于这种情况，为了高精度地测量焊接电阻，推荐使用直流电阻计。特别值得一提的是，HIOKI 的直流电阻计 RM3545，无需调零就可以准确的测试出 $0\ \Omega$ ，最适用于测量焊接电阻等高精度品质管理方面¹²。

¹¹ 参照 3.1 “端子/极耳焊接部的低电阻测量”。

¹² 对于低电阻的正确测量方法，请参照参考文献⁸⁾。

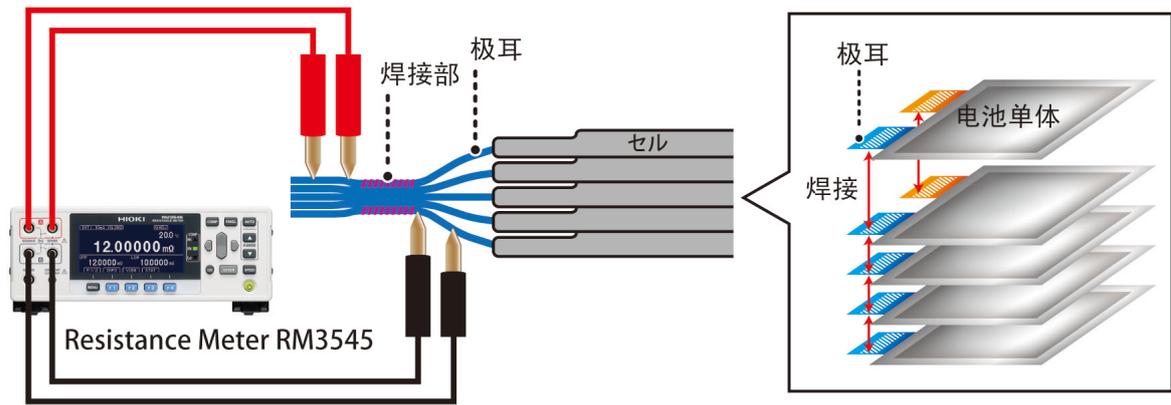


图 40 复数电池单体的极耳焊接部电阻测量

b. 需要安全地测量高电压电池模组的情况（电池测试仪 BT3562/BT3563/BT3564）

测量电池模组的焊接电阻时，对于检查对象带有电压这点一定要特别注意。假设电池模组为 20 个电池单体串联连接，这时电池模组端子间的电压最大可能会到 74V 左右。如果发生母线连接错误，或者测试表笔测到错误的端子等情况时，模组电压可能会顺着回路进到测量仪内部。而一般的直流电阻计并没有考虑到这种情况的电压输入，因此这种过电压输入会导致测量仪发生故障。

出于安全性考虑，更为了防止过电压输入导致事故的发生，推荐使用兼具高耐压性能和高精度电阻测量性能的电池测试仪（交流电阻计）BT3562（60V）/ BT3563（300V）/ BT3564（1000V）以代替直流电阻计。为了能准确测量低电阻及极低电阻的电阻值，在使用电池测试仪时请正确调零。

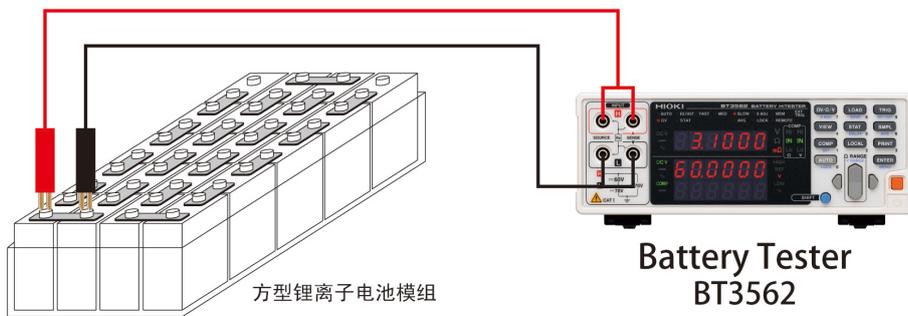


图 41 能安全的进行电阻测量的电池测试仪 BT3562 系列

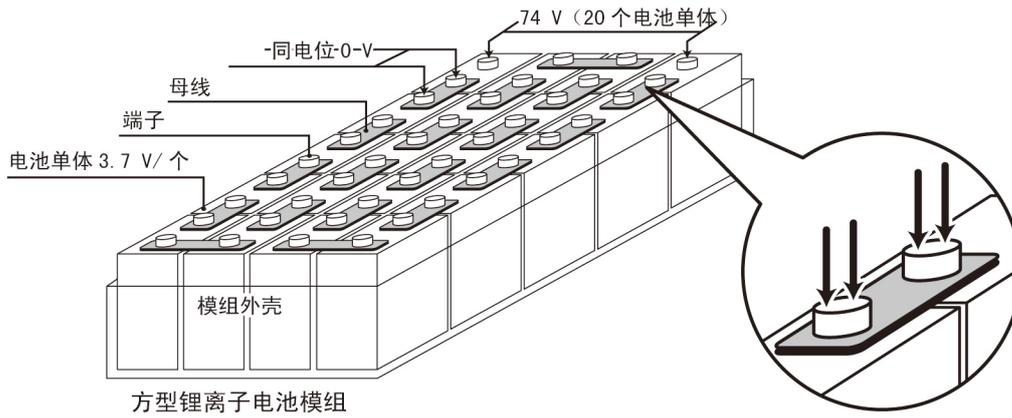


图 42 方型锂离子电池模组的母线连接部电阻测量

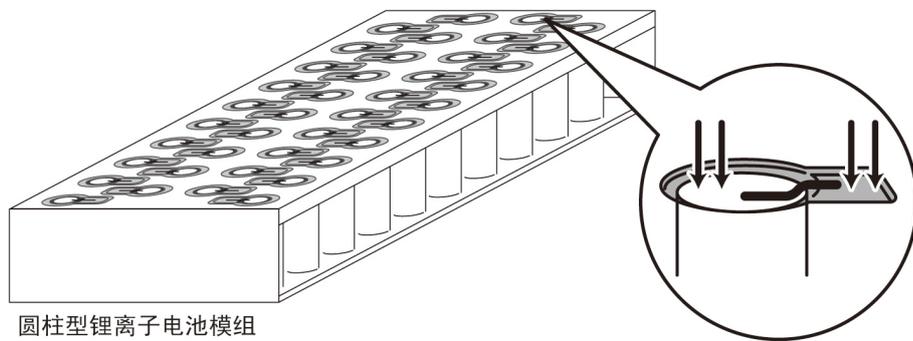


图 43 圆柱型锂离子电池模组的母线连接部电阻测量

(2) 电池模组，电池包的总电阻检查

组装好的电池，在最终评估阶段需要进行总电阻测量和 OCV 测量，以检查电池完成品是否合格。这个检查主要是在电池的出货检查或验收检查时实施。因为总电阻中包含电池的内部电阻，因此需要用交流法进行检查。电池单体的电压一般为 4V 左右，而电池模组和电池包的电压一般能到 48V, 350V 甚至 1000V。这时就需要选择额定输入电压大于测试对象总电压和对地间电压的测量设备。

- 3561 : 20 V 以下
- BT3562 : 60 V 以下
- BT3563 : 300 V 以下
- BT3564 : 1000 V 以下

-2. BMS 基板的检查

电池包中搭载了监视，控制各电池单体的 BMS 基板¹³。为了最大程度发挥电池的性能，用 BMS 对电池进行控制是不可缺少的。

BMS 有以下作用。

• 电池单体电压测试

为了检出电池单体电压的过电压与低电压，即电池的过充电和过放电，需要对电池单体进行电压测量。这样能够保证电池包在安全的电压范围内的使用。

• 电池均衡

每个电池单体的特性必定会有个体差存在。因此，电池充电时的充电量，使用时的放电量以及漏电流都会有所不同，而各电池单体的残余容量的偏差也是无法避免的。对于这种状态的电池包或者电池模组，将各电池单体的残余容量调整至相等的功能，叫做电池均衡。通过电池均衡，可以防止电池单体出现过充电或过放电等异常状态。

对于电池均衡，有主动均衡和被动均衡两种方法。

主动均衡是指使用变压器，将能量从残余容量多的电池单体移到残余容量少的或者是原来的充电回路中(再生)的均衡方法。而被动均衡是指使用电阻，将残余容量多的电池单体进行放电，直到与残余容量少的电池单体的容量一致的方法。能源利用率方面主动均衡方式更好。但主动均衡法需要用到很多部品，从成本和故障率(可靠性)方面考虑，被动均衡方式更经济实用。因此现在的主流方式是被动均衡。

• 电池温度的测量

为检出电池的异常发热，需要对电池表面温度进行测量。另外，由于电池特性与温度有关，有时测量电池温度也会用于电池残余容量的计算上。

• 电池的 SOC (State of Charge)、SOH (State of Health) 计算

为了评估电池的使用安全性能，还有搭载了电池残余容量和劣化程度计算功能的 BMS。计算方法有很多种，各种各样的研究开发正在进行中。

除了上述以外，还能够测量充电电流和电池包总电压，进行异常检出。

如上所述，BMS 具有许多复杂且重要的功能，对这些功能的检查也十分重要。开发 BMS 时需要进行检测，而制造重要功能时有时也会进行检测。

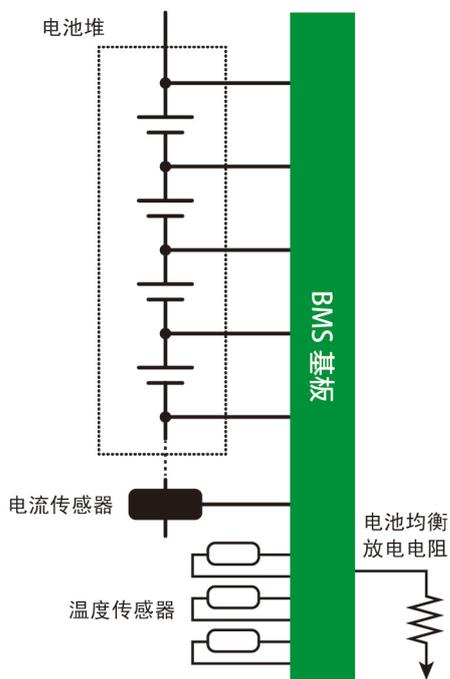
检测 BMS 时，需要将 BMS 和电池或与具有类似电池功能的设备相连接。使用电池实物进行检查当然是可以的(图 44)。但是由于电池特性会随着电池状态(充电状态、温度、劣化情况)出现差异情况，难以实现同一条件下的多次检查。可以说是不适合进行定量的试验的。当然，虽说有需要确认不同电池状态的工作情况，但实际上制作特定特性的电池几乎是不可能的。即便只让电池电压发生变化，也需要花时间进行电池的充放电，效率非常低。特别是做对再现性有要求的定量性试验时，需要避免使用实物电池。

¹³ BMS 是 Battery Management System 的略称。也称作 BMU (Battery Management Unit)。

不使用实物电池进行检查是可能的。首先将 BMS 与电源设备连接。首先由电源设备向 BMS 输入一个模拟电池的电压，看 BMS 是否能正确捕捉到电池的动作。然而，如果需要确认电池电压监视功能是否正常运行，则需要根据需检测的电池单体数量准备同数量的电源设备。如果还要模拟电流，温度的测试值，需要再准备额外的电源设备。最后，为了使这些电源模拟出电池的动作，还需要进行非常复杂的控制功能的制作，到能投入运用时可能已经花费了大量的成本和时间。

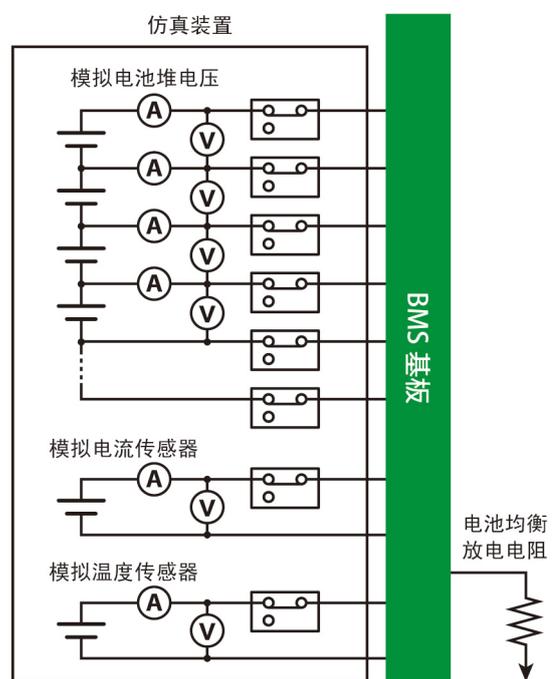
而且为了检查近年逐渐高精度化的 BMS IC，对电压输出精度也有了更高的要求，市面上销售的电源设备大多数都达不到要求的精度。对于电压精度，虽说将高精度的电压计或万用表与电源设备并联可以解决这个问题，但这样一来，使用的机器数量就又增加了，对于控制就更复杂了。而且成本也是个大问题，对于大规模的检测并不实用。

这里我们想介绍一款能够解决以上所有问题的，多通道高精度电压发生器。它是为 BMS 的检测专门研发的产品，，一台设备有多个通道，控制起来也更加简单（图 45）。



使用实际的电池和传感器的情况

图 44 使用实际电池和传感器的评估设备



使用多通道源表的情况

图 45 仿真设备构成示例

选择 BMS 检查设备，需要注意以下事项。

- 精度规格

正如上文所描述的，近年来 BMS IC 的精度越来越高。因此对于 BMS 检查设备的电压发生的精度要求也越来越高。至少需要比 IC 的电压测量精度更高的设备。

- 最大输出电流

BMS 检查设备，输出性能需要高于在电池均衡时流过的电流值。

主动均衡基本是依靠大电流（数 A）来实现均衡的方式，因此希望 BMS 检查设备能够输出大电流。同时，为了能够使残余容量多的电池单体向少的提供电流，要求其具有双向电源功能（灌电流功能）。

另一方面被动均衡，相较于主动均衡电流更小（数百 mA），不需要像主动均衡那样大的输出电流。又因为被动均衡仅通过电阻放电，检查设备有电流源功能就足够了。

- 对地间电压（可以连接的最大电压）

对于 BMS 的基板构成分别有，一枚 BMS 基板连接电池包全体，和 BMS 基板对应连接电池模组的两种方式。特别是对于前者，在检查时使用模拟电池包的检查设备是十分必要的。而大规模的电池包串联的单体电池数很多，因此也需要好几台 BMS 检查设备串联进行检查。但是，请注意 BMS 检查设备是有串联上限的。可以模拟的最大电压，由产品规格规定的可连接的最大电压或者对地间电压决定，但必须低于电池包的整体电压。

- 微小电流测量

对于 BMS 而言，为了更高效的使用电池，电池均衡回路的开关部的漏电流，待机电流（通电后非动作时的电流值）以及暗电流（没通电时的电流值）都是经过仔细设计的。不仅是动作时的电流，对于这种微小电流，也会检查其是否如设计时那样动作。但是与电池均衡时的电流相比，待机电流和暗电流值都非常微小，测量电池均衡电流时使用的量程在测量这种微小电流时无法保证其测量精度。而低于最小分辨率时，基本无法测量。因此区别于测量工作电流，测量微小电流时需要使用搭载了对应量程的检查设备。

- 断线模拟

当电池-BMS 间连接线断开或者 BMS 基板的部品出现不良等情况，导致电池和 BMS IC 间的电气连接断开时，会造成 BMS IC 无法进行正常的电压测量和电池均衡。这种情况下，就会发生过充电过放电，使电池变为危险的状态。因此，大多数 BMS 都搭载了能尽早检测出断线状态的功能。检查设备如果能够模拟短线状态，会使得断线检出试验更容易操作。

- 电阻发生

大多数情况下，BMS 在电池温度测量时会使用热敏电阻。温度测量的方法是通过测量热敏电阻的阻值，再将其换算成温度。因此，在进行温度测量回路检查时，装有电阻发生功能的检查设备使用起来更方便。



图 46 HIOKI 的 BMS 检查设备

3. 电动汽车的电池实际负载试验

像电动汽车这样高速大电流的负载在使用电池时，实际电池包与设备组装后的特性评测很重要。仅靠阻抗测量和充放电容量测量试验，无法正确地把握高速大电流使用情况下的电池特性。而最好的做法是在实际工作状态下测量其特性。

对于这种试验使用功率分析仪(功率测量设备)是最合适的。比如图 47，一般情况下是将电池包与后段的变压器和电机连接后测试其电压·电流值。这种结构不仅可以测量电池的实际负载特性，还能将后段（逆变器，电机等）组成部分的总消费能量，能量变换效率一并测量出来。

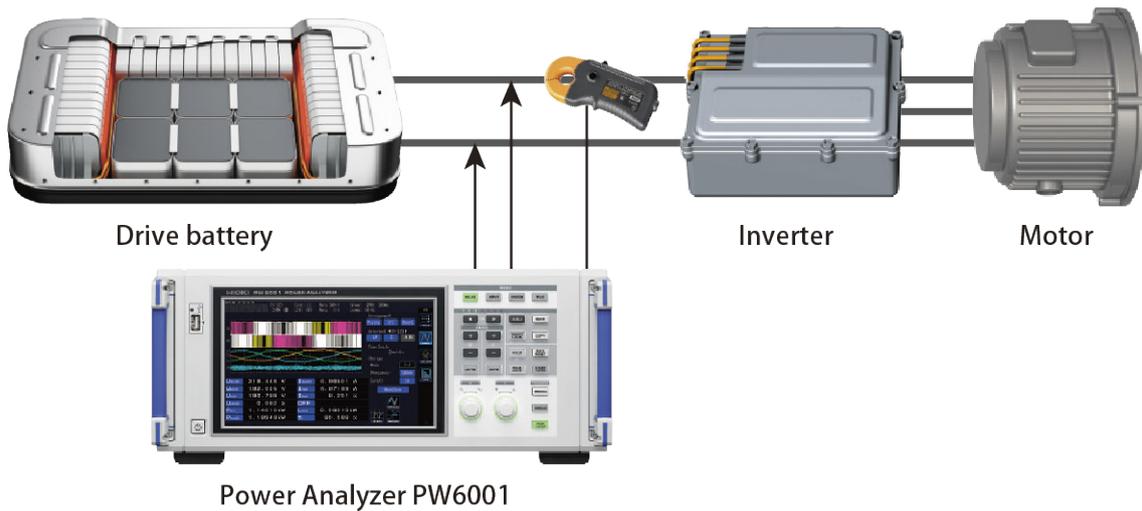


图 47 EV 用变频电机的功率测量

以下对测量电池实际负载特性的功率分析仪所需要的功能进行说明

(1) 电流测量方式

电流测量的方法有分流电阻测量法(直连式)和电流传感器测量法(传感器式)两种。一般情况下，直连式适合用于低电流的测量，传感器式适合用于高频大电流的测量。电机的变频器输入侧流入大电流，同时电流有高频纹波叠加，因此此处适合使用电流传感器。

电流传感器可以分为两大类，分别称为贯通型和钳型(图 48)。贯通型在频率带宽，测量精度，稳定性方面都具有十分优越的性能。但是由于需要将测试线穿过传感器，在准备的时候比较麻烦。在实际整车测试中设置电流传感器十分的困难，因此在整车试验中使用贯通型电流传感器是不现实的。使用测试台架的测试，在配线处理比较自由的情况下，如果想进行功率的高精度测量，建议使用贯通型电流传感器。

另一方面，钳型探头的频率带宽和测量精度比不上贯通型，但传感器的设置相对更简单。在做整车测试时选择钳型探头更好。如果测试不要求贯通型那样的高精度，钳型探头的便利性能够使试验效率大幅提升。



图 48 贯通型电流传感器（左）和钳型电流传感器（右）的示例

(2) 测量带宽和精度

电机的变频器输入侧流入大电流，同时电流上还叠加有高频纹波。为了正确的进行功率测量，一定要选择合适的额定电流，额定电压，测量频率带宽的功率分析仪和电流传感器。电流传感器额定电流有根据峰值规定和根据有效值规定两种。若把以电流峰值为基准的传感器，当做负荷电流有效值的传感器去使用的话，会发生额定不足的情况，因此在选择时需要特别注意。

在分析变频器输入功率时，特别要注意测量频率带宽。变频器会产生高频纹波电流。这个纹波电流是电池包发热的原因，对性能也有影响，因此必须要进行评估。因为纹波电流的频率包含变频器开关频率的高频波，为了能够正确评估，需要选择频率带宽为变频器开关带宽 5 倍以上的电流传感器。

纹波电流的大小，根据式 (6) 表示的电流纹波率 I_{rf} 进行评估。是评估变频器性能的重要参数。

$$I_{rf} = \frac{I_{pk+} - I_{pk-}}{2 \times |I_{dc}|} \times 100 \quad [\%] \quad (6)$$

I_{pk+} : 电流最大值 I_{pk-} : 电流最小值 I_{dc} : 电流平均值

(3) 新耗油标准 WLTP 要求的功能

长期以来，对于汽车耗油量进行的试验周期·实试验方法各国·地区均有不同规定，所以以往针对开发动力总成系统的耗油测试，也被要求需对应各种不同的实验条件。而近年，发布了作为世界统一规格的乘用车等排气·耗油试验方法规定(WLTP: Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure)，试验方法的统一化也在逐渐推行中。WLTP 的实行时期根据各国自行判断。因为标准实验法对出口有促进作用，各国都在积极探讨推进该方法。而企业层面则已经将 WLTP 作为标准的试验法进行实际运用了。

使用 WLTP 规定的标准试验，对于 EV、xEV (HEV、PHEV)、FCV，需要按照规定的方式进行整车行驶时的电池消耗功率量 [Wh] 的测量。铅酸蓄电池，燃料电池，行驶用的锂离子电池和镍氢电池都是测试对象。在要求汽车减轻环境负担的社会背景下，减少二氧化碳排放量是测试的最终目的。

进行使用 WLTP 标准的试验时，必须选择满足 WLTP 要求的电流传感器和功率测试计。在表 3 总结了 WLTP 在功率测量方面，对功率分析仪和电流传感器的要求。对从大电流到微小电流的状态变化着的负荷电流进行高精度测试的能力是不可欠缺的。HIOKI 提供的高精度钳型电流传感器和高精度功率计构筑成的功率测试系统有以下优点，适合于 WLTP 的功率测量。

- 高精度的钳型电流传感器：为了在整车状态下测量，使用钳型电流传感器更合适。HIOKI 提供的高精度钳型电流传感器，能够充分满足 WLTP 的测量精度的要求。
- 高精度的功率计：为了正确计算电流和功率积分值，需要高精度的 DC，以及高速的数据更新能力。HIOKI 的高精度功率计十分重视 DC 的测量精度，拥有良好的 DC 特性。数据更新率最高能达到 10ms，且在最高速下也能保持最高精度的优点。
- 相位补偿功能：通过功率计的演算功能对电流传感器的高频相位特性加以补正。由于 HIOKI 同时开发电流传感器和功率计，因此才能有这个功能，能大幅提升包括高频的纹波电流频率带宽的功率测量性能。

表 3 WLTP 要求的内容⁷⁾

测定项目	测定精度	测定分辨率
功率[Wh]	±1 %	0.001 kWh
电流[A]	±0.3 % of full scale or ±1 % of reading	0.1 A
电压[V]	±0.3 % of full scale or ±1 % of reading	0.1 V

结语

本书主要介绍了对于选择锂离子电池生产工艺中进行性能评估时必需的测量设备时的注意点。大型锂离子电池的实际应用面正在逐年扩大。今后需要的，一定是安全性和输出更高，寿命更长的高性能电池。为了能够稳定提供高性能的电池，生产工艺中的品质管理起着重要的作用。

参考文献

- 1) E. Ligneel, B. Lestriez, O. Richard, D. Guyomard, J. Phys. Chem. Solids, 67, 1275 (2006)
- 2) T. J. Patey, A. Hintennach, F. La Mantia, P. Novák, J. Power Sources, 189, 590 (2009)
- 3) C.-C. Li, Y.-S. Lin, J. Power Sources, 220, 413 (2012)
- 4) 日置電機株式会社、絶縁抵抗測定の手引き (2018)
<https://www.hioki.co.jp/file/cmw/hdCatalog/4832/pdf/?action=browser&log=1&lang=jp>
- 5) JIS C 8711:2013 ポータブル機器用リチウム二次電池
IEC 61960-3:2017 Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes - Secondary lithium cells and batteries for portable applications - Part 3: Prismatic and cylindrical lithium secondary cells and batteries made from them
- 6) 小山 昇(監修)、リチウムイオン二次電池の性能評価、日刊工業新聞社 (2019)
- 7) ECE/TRANS/WP.29/GRPE/2016/3, Proposal for amendments to global technical regulation No. 15 on Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP)
- 8) 日置電機株式会社、抵抗測定の手引き Vol.1 (2017)
<https://www.hioki.co.jp/file/cmw/hdCatalog/4350/pdf/?action=browser&log=1&lang=jp>

HIOKI 的简介

关于 HIOKI

日置电机株式会社 (HIOKI) 是创立于 1935 年的电气测量仪器厂商, 位于日本长野县上田市, 集研究开发·生产·维护服务功能于一身, 可提供高品质的测量仪器及各种具体服务。以记录仪·电子测量仪·现场测量仪·自动测量设备这 4 个领域为主, 将搭载了独自研发的技术产品送往全球各地。

关于品质保证·修理

所购产品若发生异常或故障, 请联系代理商进行修理委托。停产产品自停产日起, 会保留至少 5 年的维修对应服务。在 HIOKI 产品的质保期间, 对于产品本身的故障提供无偿修理或换新服务。

营业网点一览

日本:

东北分公司·长野分公司·金沢事务所·北关东分公司·东京分公司·横滨分公司·厚木事务所·静冈分公司·名古屋分公司·大阪分公司·广岛事务所·福冈分公司

中国:

上海总部·北京分公司·广州分公司·深圳分公司·成都分公司·苏州事务所·南京事务所·沈阳事务所·西安事务所·武汉事务所·济南事务所

海外销售公司:

美国·新加坡·韩国·印度·德国·台湾

发行

日置(上海)商贸有限公司 <https://www.hioki.cn/>

售后服务 info@hioki.com.cn

地址: 上海市黄浦区西藏中路 268 号来福士广场 4705 室

电话: 021-63910350; 63910096, 0097, 0090, 0092

2020 年 2 月 26 日初版发行