

SOH 检测-探讨采计参数物理意义、检测方式

关于 SOH

随着现代电动载具与电能储存装置的需求提升，主要应用组件之一：电池，其状态检测也越来越受到重视。电池健康状态(State of Health, SOH)就字面上很容易理解，但很难确切定义。现代多数使用放电容量作为参考指针[1][2]，但是在目前广泛的运用范围仅使用放电容量难以评定电池完整的性能。在早期电池作为燃油车启动电瓶时，就需要标定启动电流(Cranking Amperes, CA)或冷启动电流(Cold Cranking Amperes, CCA)左证驱动启动马达的能力；在电能储存装置应用时，经常以电池电能容量与转换效率计量系统承载能力。是故依据应用端的需求采用多面向参数探讨，较能评定电池在应用端发挥的能力。



电池特性参数

因应各项应用需求，需要多方采计各项特性参数较能客观呈现电池「健康状态」。将常见的参数特性与测试方式归纳如下：



■ 电池电压

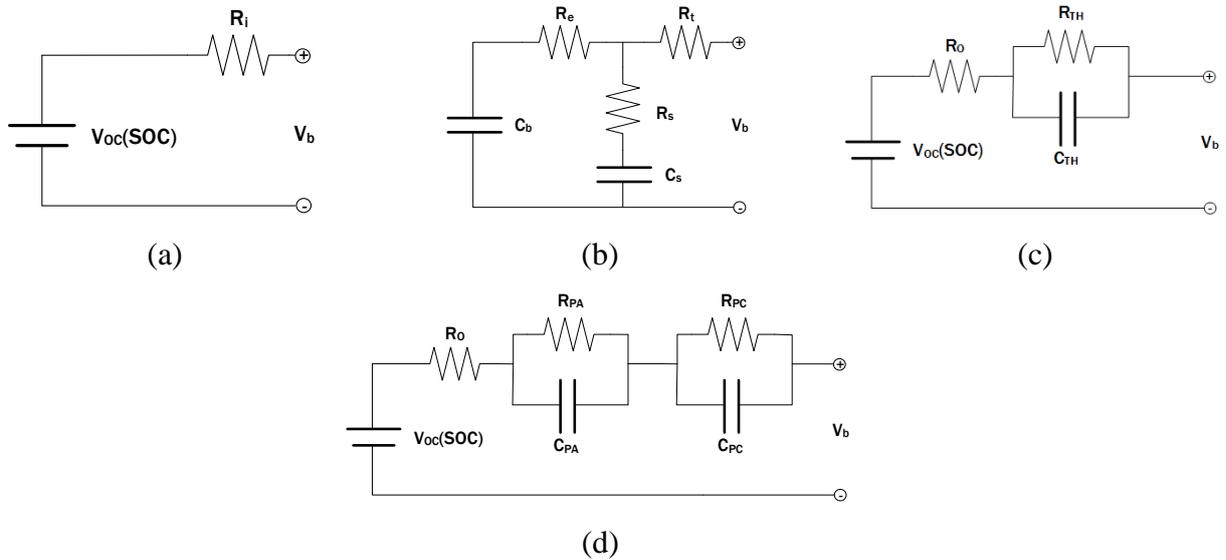


图 1 (a) R_{int} Model (b)RC Model (c)Thevenin Model (d)DP Model

电池电压是指电池正极相对负极之电位差，相当于(图 1)等效电路模型的 V_b 。当电流为 0 时电池电压会趋近于开路电压($V_{oc}(SOC)$)，一般假设开路电压为荷电状态(State of Charge, SOC)函数。电池电压在部分测试是作为判断标准(SAE J537, CCA)或放电截止条件使用。

■ 电池电流

电池电流为经电池正极与负极路径之电流。一般由外部观测电流由正极进入/负极输出为电池充电；电流由正极输出/负极进入为电池放电。部分测试标准会将充电电流标示为正值；放电电流标示为负值。

■ 功率

直流系统功率(P)定义为 $V \cdot I$ ，电池充电功率为电池电压 · 充电电流；电池放电功率为电池电压 · 放电电流。部分测试标准会将充电功率标示为正值；放电功率标示为负值。

■ 电流容量

一般定义电流容量是指电池由荷电饱和(充电完成)至放电截止条件可释出的电量。实际操作时可发现以不同电流定电流放电时，测得电流容量并不一致。故商用电池标示额定容量也会附注放电倍率。放电倍率常以 C 表示，1C 表示电池在 1 小时由充满电状态以定电流释放电量至截止条件之电流。是故 2C 电流即 1C 电流之 2 倍；0.5C 即 1C 电流之 0.5 倍。多数锂电池额定容量是以 1C 测定。



常用电流容量计算方式是利用离散式电流对时间积分。多数测试方式是以定电流方式执行，此时电流容量计算仅存在量测误差。但是在定电流-定电压充电操作的定电压区间或定功率容量计算则会存在演算误差与量测误差，一般会透过提升采样率或改善算法降低演算误差。

电流容量常用来指示电池或电源系统可支持供给的时间。在能量型应用时作为主要参考指标参数之一。

■ 荷电状态、放电深度

电池荷电状态(State of Charge, SOC)是用以指示相对于电流容量，当前至截止条件可释出之电量比。放电深度(Depth of Discharge, DOD)则定义为相对于电流容量，满荷电状态至当前已释出之电量比。当相对参考值(电流容量)一致时， $SOC + DOD = 100\%$ 。电池状态参数：开路电压、内阻值等都是与荷电状态相关参数。在作内阻值等与电池荷电状态相关参数评定时，往往需要先判别目前荷电状态。在电池或电源系统运作时，SOC也能指示出至电量用罄之前操作时间。

■ 库仑效率

库仑效率(Coulombic Efficiency)定义为电流容量与 SOC: 0% 充电至满荷电状态充电所需电量比值。可理解为充电电量转换为可释出之电量效率。现在多数商用锂离子二次电池库仑效率可高达 99%。

■ 电能容量

一般定义电能容量是指电池由荷电饱和(充电完成)至放电截止条件可释出的电能。常用电能容量计算方式是利用离散式功率对时间积分。由于功率对时间多数情况并非收敛到一次线性，故电能容量计算存在演算误差与量测误差。

在大型电能供给系统设计时倾向参考电能容量，同样为能量型应用时作为主要参考指标参数之一。

■ 转换效率

相对于库仑效率使用电量定义，转换效率定义为”电能”容量与 SOC: 0% 充电至满荷电状态充电所需”电能”比值。在储能系统平均负载应用时，需参考转换效率设计负载量。所以在长周期性操作

■ 内阻抗

内阻抗狭义是指与电池电流呈一次线性的电压变化之等效阻抗，如图 1(a)等效电路模型之 R_i 。广义则包含所有造成电池电压与电池开路电压之电位差的等效阻抗。

内阻抗计算原理可初分为：直流内阻(DCIR)、交流响应(AC Impedance)与焦耳热损(Joule's Law)。



• 直流内阻(DCIR)

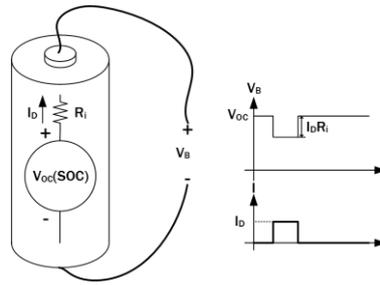


图 2 直流内阻量测原理

直流内阻量测原理是假设电池等效模型为(图 1(a))，当电池施加电流时电池电压与电池开路电压的电位差为放电电流(I_D)·内阻抗(R_i)。下列方式是基于上述原理做内阻抗量测：

◆ VDA Current Step Method

(图 3)在电池静置时测得开路电压(U_1)，使电池以规格内最大电流($I_{Discharge}$)定电流放电 18 秒。分别纪录放电开始 2 秒、10 秒与 18 秒电池电压(U_2 、 U_3 、 U_4)，透过 U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 、 $I_{Discharge}$ 计算可得放电内阻抗；充电以相对方式处理可得放电内阻抗。

使用最大电流测试是为了有效解析开路电压与电池电压之电位差，但同时也产生放电测试过程 SOC 偏移之问题。[4]提出利用对放电区间电压做一次线性拟合，利用拟合线性函数推算放电开始之电池电压。利用开路电压与推算之电池电压进行内阻抗计算以降低 SOC 偏移产生之误差。

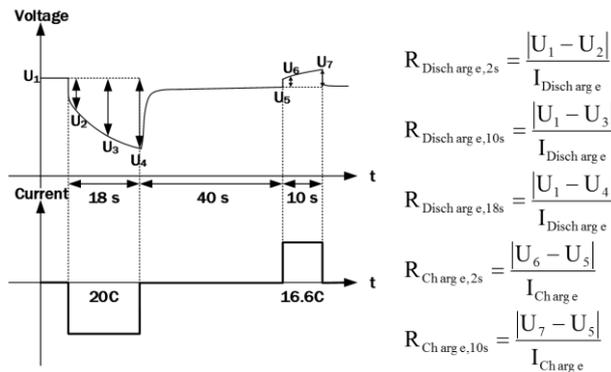


图 3VDA Current Step Method

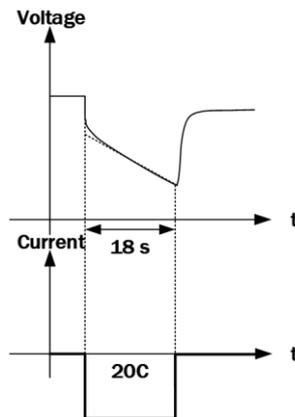


图 4 VDA Current Step Method (Advanced Method)

◆ **Current-Off Method**

(图 5)采用与 VDA Current Step Method 相同的测试方式，但是取放电截止($\Delta U_{\text{discharge}}$)与充电截止(ΔU_{charge})的电位变化进行计算。利用 Current-Off Method 同样可降低 SOC 偏移产生之误差。

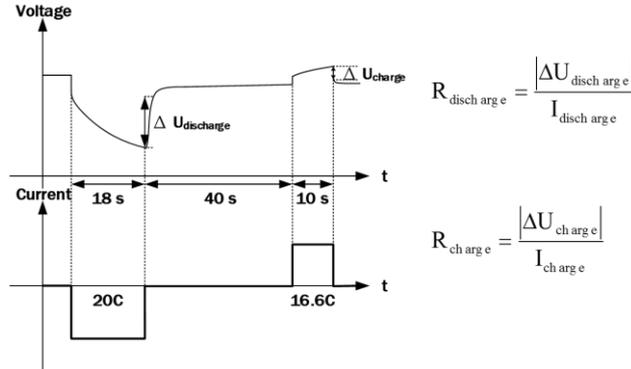


图 5 Current-OFF Method

◆ **Switching Current Method**

(图 6)先对电池进行 5 秒定电流放电后直接以同样电流定电流充电 5 秒，以切换电流的方式提升解析电位(图 6)。Switching Current Method 可以有效提升计算时的分辨率，但无法区隔充电直流内阻与放电内阻。

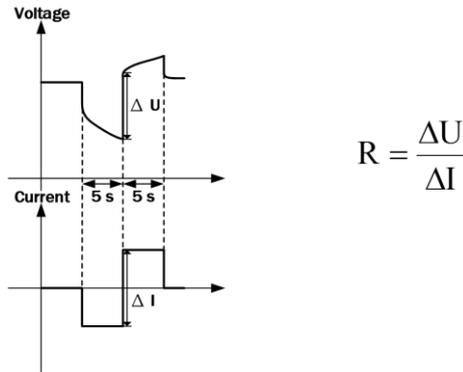


图 6 Switching-Current Method

● **交流响应(ACIR)**

交流响应或交流阻抗(Alternating Current Impedance, Alternating Current Internal Resistance, ACIR)分析，是近代用来分析电极材料的方法之一。透过对电池施加已知频率的电流或电压弦波(图 7 红线)并观察响应电压或电流(图 7 蓝线)之增益($|Z|, R$)与相位($\angle Z$)。



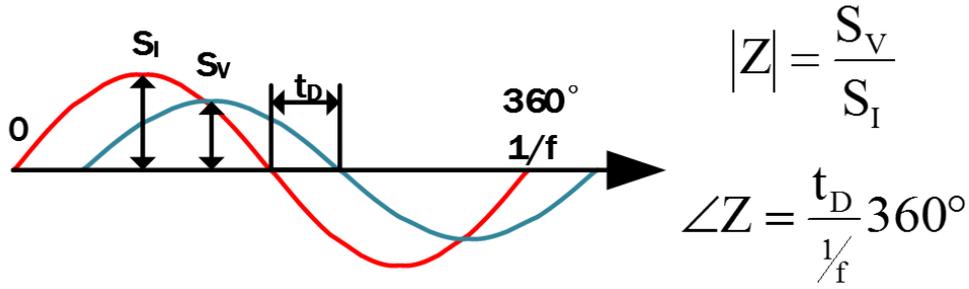


图 7 ACIR

频谱式分析(spectroscopy)则是使用一连串已知频率的电流弦波进行响应测试，常用之分析方式是将测试结果绘制在极坐标上(图 8)形成奈氏图(Nyquist Plot, Cole-Cole Plot)。

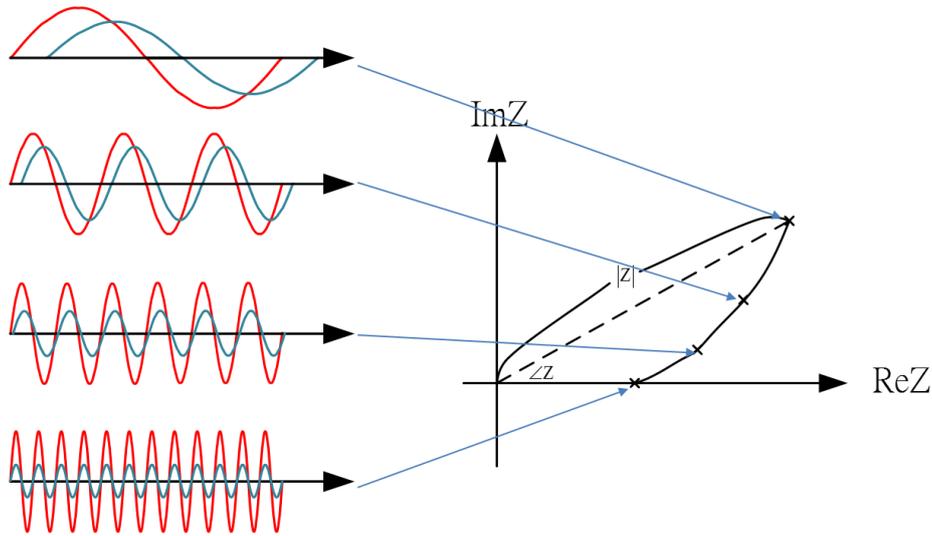


图 8 Nyquist Plot

在现代电化学分析会使用奈氏图验证或建立等效电路模型(图 1 d)，依据电极材料响应带宽结合奈氏图(图 9)解析特性也是常见的应用方式。

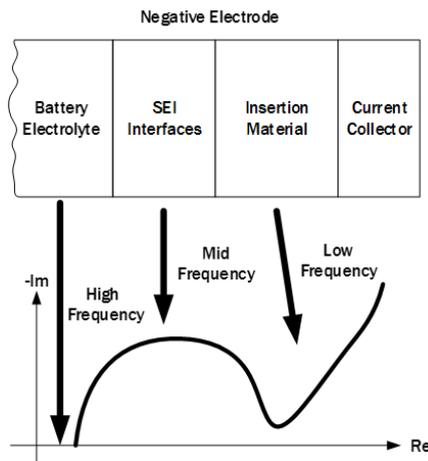


图 9 锂电池 Nyquist Plot



台湾总公司
241 新北市三重区光复路一段 61 巷 27 号一楼
E-mail: sales@chentech.com.tw
Tel: 02-22783825
Fax: 02-22783926

• 焦耳热损(Joule's Law)

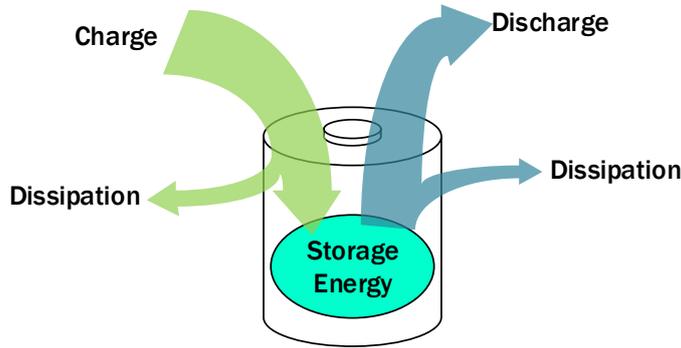


图 10 能量转换损失

焦耳热损原理是透过功能原理的方式计算内阻。以相同电量进行充电与放电，可发现电池充电消耗电量恒大于放电电池释出电量。假定这过程逸散的能量是因为内阻抗焦耳热损造成的。透过(图 11)可得区间等效之内阻抗，但如同 switching current method 无法区隔充电直流内阻与放电内阻。

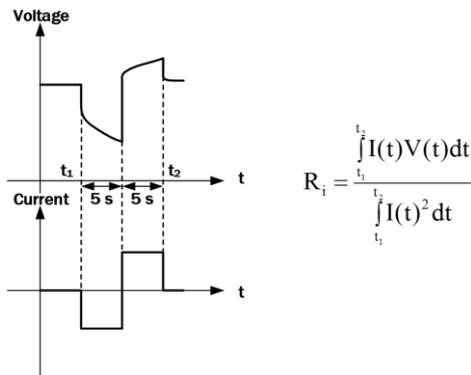


图 11 Energy Loss Method

从上述原理(图 10)内阻会与电池充/放电时溢散能成相关，所以可以得知内阻与转换效率相关。在动力型应用时，内阻是影响负载电压的主要因素之一，关系到供给系统的驱动能力。



■ 瞬时分析

在交流响应(ACIR) 频谱式分析部分有说明电化学分析透过频域响应建立等效电路模型，瞬时分析则是透过时域响应与假定的等效电路模型推算出等效电路模型的内部参数。虽精确度未若频谱式分析，但瞬时分析测试条件相对容易满足。瞬时分析的参数虽未能直观地呈现输出效能，但如同 ACIR 与频谱测试其结果与输出效能参数存在对应关系。

电池特性参数与 SOH 评估技术

上述为常见的电池特性指标，而承德科技所开发的 SOH 评估技术则是基于客户的应用要求，将整体评估方式依据”时效性”与”准确性”做出”客制化加权评比”。为了使客户可以更直观地运用 SOH 评等，承德科技在技术上先将各项参数正规化处理，根据应用端的需求做各项参数权重的量身定做，将正规化参数取加权评比后的数值加总，并藉由专业的建模方式，大幅降低所需时间。让 SOH 评估除了符合客户在应用上所需求的加权分数，更能在半分钟内得出结果。如此便可以有效并快速地测试出该受测电池在客户端应用环境之评等。

技术支持

承德科技提供业界最高规格之纪录时间，MCB、ABT1000、MCL2、MCL2 MINI、BT1000 等系列设备均可适用 100 ms 撷取时间，MCL2 与 BT1000 系列设备在特定条件下更可调整至 1ms 的撷取时间。高数据撷取频率除了可降低积分数据误差，在瞬时分析也有相当大的帮助。控制软件 iBest 亦提供直观与弹性的制程设定功能，如：变量功能、DCIR 测试、SOC 截止功能等，有效地辅助制程设计与数据分析。目前这项技术已经在许多实务应用上获得验证，如：家用储能系统、巴士充电站、汰役电池分容与物流电动机车的健康状态检测等等。

参考数据

- [1] Nicolas Murer ,“Electrochemical Impedance Spectroscopy Webinar Series” , Webniar,2017
- [2] Martin Coleman, William Gerard Hurley and Chin Kwan Lee ,“An Improved Battery Characterization Method Using a Two-Pulse Load Test”, *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, VOL. 23, NO. 2, JUNE 2008
- [3] Noshin Omar , Mohamed Daowd , Omar Hegazy , Grietus Mulder ,Jean-Marc Timmermans , Thierry Coosemans , Peter Van den Bossche and Joeri Van Mierlo, “Standardization Work for BEV and HEV Applications : Critical Appraisal of Recent Traction Battery Documents , ” *Energies* 2012: 5 138-156 , 2012
- [4] Hans-Georg Schweiger , OssamaObeidi , Oliver Komesker, André Raschke , Michael



台湾总公司
241 新北市三重区光复路一段 61 巷 27 号一楼
E-mail: sales@chentech.com.tw
Tel: 02-22783825
Fax: 02-22783926

- [5] Schiemann , Christian Zehner , Markus Gehnen , Michael Keller and Peter Birke ,
“Comparison of Several Methods for Determining the Internal Resistance of Lithium Ion Cells ,”
Sensors 2010 : 5604-5625 , 2010
- [6] Hongwen He , RuiXiong and Jinxin Fan , “Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent
Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach,” *Energies*2011 : 4 582
– 598 , 2011
- [7] Thomas B. Reddy , *Linden’s Handbook of Batteries* , Fourth ed. , Mc Graw Hill Education ,
Columbus , 2010
- [8] 孙建中, *锂离子电池特性分析与管理系统设计*, 台北, 2016
- [9] <http://batteryuniversity.com/>
- [10] <https://zh.wikipedia.org>

