

SOH 檢測-探討採計參數物理意義、檢測方式

關於 SOH

隨著現代電動載具與電能儲存裝置的需求提升，主要應用元件之一：電池，其狀態檢測也越來越受到重視。電池健康狀態(State of Health, SOH)就字面上很容易理解，但很難確切定義。現代多數使用放電容量作為參考指標[1][2]，但是在目前廣泛的運用範圍僅使用放電容量難以評定電池完整的性能。在早期電池作為燃油車啟動電瓶時，就需要標定啟動電流(Cranking Amperes, CA)或冷起動電流(Cold Cranking Amperes, CCA)佐證驅動啟動馬達的能力；在電能儲存裝置應用時，經常以電池電能容量與轉換效率計量系統承載能力。是故依據應用端的需求採用多面向參數探討，較能評定電池在應用端發揮的能力。



電池特性參數

因應各項應用需求，需要多方採計各項特性參數較能客觀呈現電池「健康狀態」。將常見的參數特性與測試方式歸納如下：



■ 電池電壓

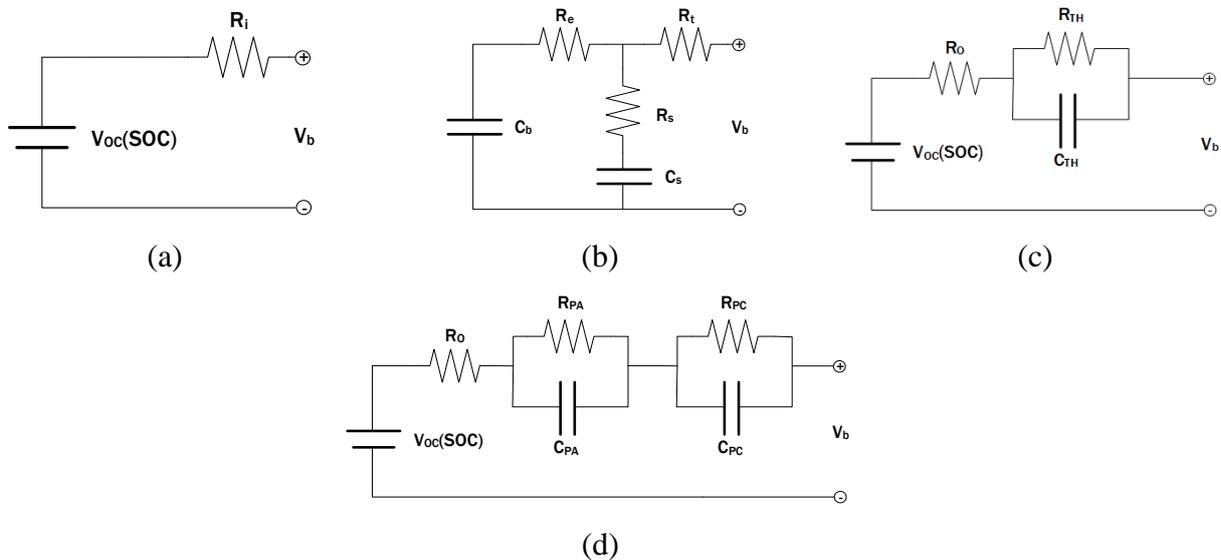


圖 1 (a) R_{int} Model (b)RC Model (c)Thevenin Model (d)DP Model

電池電壓是指電池正極相對負極之電位差，相當於(圖 1)等效電路模型的 V_b 。當電流為 0 時電池電壓會趨近於開路電壓($V_{oc}(SOC)$)，一般假設開路電壓為荷電狀態(State of Charge, SOC)函數。電池電壓在部分測試是作為判斷標準(SAE J537, CCA)或放電截止條件使用。

■ 電池電流

電池電流為經電池正極與負極路徑之電流。一般由外部觀測電流由正極進入/負極輸出為電池充電；電流由正極輸出/負極進入為電池放電。部分測試標準會將充電電流標示為正值；放電電流標示為負值。

■ 功率

直流系統功率(P)定義為 $V \cdot I$ ，電池充電功率為電池電壓 · 充電電流；電池放電功率為電池電壓 · 放電電流。部分測試標準會將充電功率標示為正值；放電功率標示為負值。

■ 電流容量

一般定義電流容量是指電池由荷電飽和(充電完成)至放電截止條件可釋出的電量。實際操作時可發現以不同電流定電流放電時，測得電流容量並不一致。故商用電池標示額定容量也會附註放電倍率。放電倍率常以 C 表示，1C 表示電池在 1 小時由充滿電狀態以定電流釋放電量至截止條件之電流。是故 2C 電流即 1C 電流之 2 倍；0.5C 即 1C 電流之 0.5 倍。多數鋰電池額定容量是以 1C 測定。



常用電流容量計算方式是利用離散式電流對時間積分。多數測試方式是以定電流方式執行，此時電流容量計算僅存在量測誤差。但是在定電流-定電壓充電操作的定電壓區間或定功率容量計算則會存在演算誤差與量測誤差，一般會透過提升採樣率或改善演算法降低演算誤差。

電流容量常用來指示電池或電源系統可支援供給的時間。在能量型應用時作為主要參考指標參數之一。

■ 荷電狀態、放電深度

電池荷電狀態(State of Charge, SOC)是用以指示相對於電流容量，當前至截止條件可釋出之電量比。放電深度(Depth of Discharge, DOD)則定義為相對於電流容量，滿荷電狀態至當前已釋出之電量比。當相對參考值(電流容量)一致時， $SOC + DOD = 100\%$ 。電池狀態參數：開路電壓、內阻值等都是與荷電狀態相關參數。在作內阻值等與電池荷電狀態相關參數評等時，往往需要先判別目前荷電狀態。在電池或電源系統運作時，SOC 也能指示出至電量用罄之前操作時間。

■ 庫侖效率

庫侖效率(Coulombic Efficiency)定義為電流容量與 SOC: 0% 充電至滿荷電狀態充電所需電量比值。可理解為充電電量轉換為可釋出之電量效率。現在多數商用鋰離子二次電池庫侖效率可高達 99%。

■ 電能容量

一般定義電能容量是指電池由荷電飽和(充電完成)至放電截止條件可釋出的電能。常用電能容量計算方式是利用離散式功率對時間積分。由於功率對時間多數情況並非收斂到一次線性，故電能容量計算存在演算誤差與量測誤差。

在大型電能供給系統設計時傾向參考電能容量，同樣為能量型應用時作為主要參考指標參數之一。

■ 轉換效率

相對於庫侖效率使用電量定義，轉換效率定義為”電能”容量與 SOC: 0% 充電至滿荷電狀態充電所需”電能”比值。在儲能系統平均負載應用時，需參考轉換效率設計負載量。所以在長周期性操作

■ 內阻抗

內阻抗狹義是指與電池電流呈一次線性的電壓變化之等效阻抗，如(圖 1(a))等效電路模型之 R_i 。廣義則包含所有造成電池電壓與電池開路電壓之電位差的等效阻抗。

內阻抗計算原理可初分為：直流內阻(DCIR)、交流響應(AC Impedance)與焦耳熱損(Joule's Law)。



• 直流內阻(DCIR)

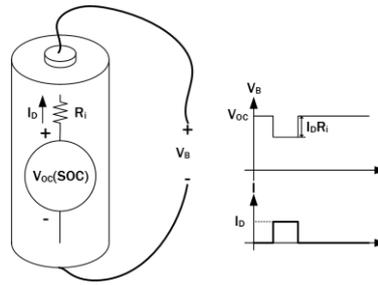


圖 2 直流內阻量測原理

直流內阻量測原理是假設電池等效模型為(圖 1(a))，當電池施加電流時電池電壓與電池開路電壓的電位差為放電電流(I_D)·內阻抗(R_i)。下列方式是基於上述原理做內阻抗量測：

◆ VDA Current Step Method

(圖 3)在電池靜置時測得開路電壓(U_1)，使電池以規格內最大電流($I_{Discharge}$)定電流放電 18 秒。分別紀錄放電開始 2 秒、10 秒與 18 秒電池電壓(U_2 、 U_3 、 U_4)，透過 U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 、 $I_{Discharge}$ 計算可得放電內阻抗；充電以相對方式處理可得放電內阻抗。

使用最大電流測試是為了有效解析開路電壓與電池電壓之電位差，但同時也產生放電測試過程 SOC 偏移之問題。[4]提出利用對放電區間電壓做一次線性擬合，利用擬合線性函數推算放電開始之電池電壓。利用開路電壓與推算之電池電壓進行內阻抗計算以降低 SOC 偏移產生之誤差。

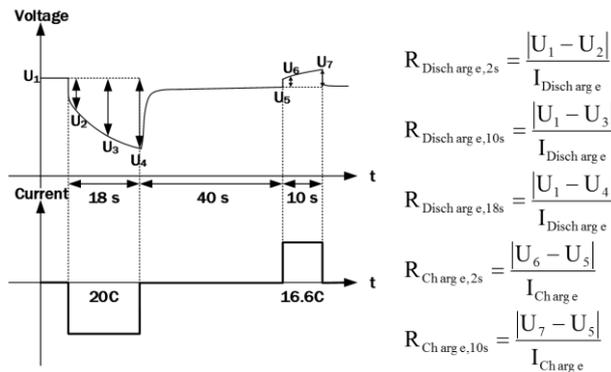


圖 3 VDA Current Step Method

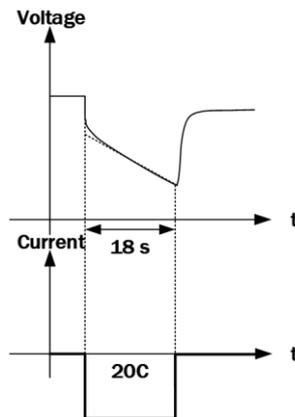


圖 4 VDA Current Step Method(Advanced Method)

◆ **Current-Off Method**

(圖 5)採用與 VDA Current Step Method 相同的測試方式，但是取放電截止($\Delta U_{\text{discharge}}$)與充電截止(ΔU_{charge})的電位變化進行計算。利用 Current-Off Method 同樣可降低 SOC 偏移產生之誤差。

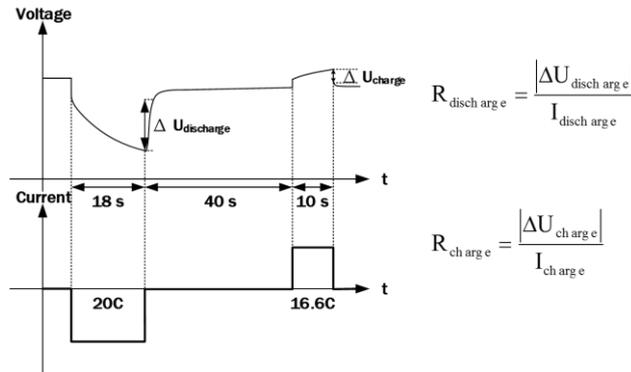


圖 5 Current-OFF Method

◆ **Switching Current Method**

(圖 6)先對電池進行 5 秒定電流放電後直接以同樣電流定電流充電 5 秒，以切換電流的方式提升解析電位(圖 6)。Switching Current Method 可以有效提升計算時的解析度，但無法區隔充電直流內阻與放電內阻。

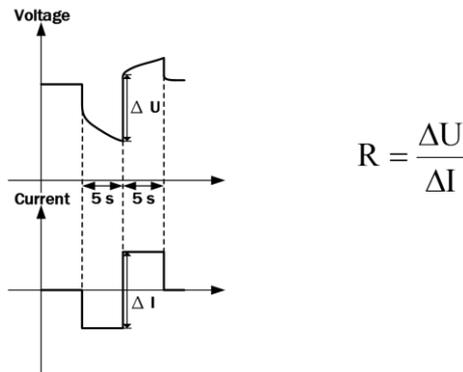


圖 6 Switching-Current Method

● **交流響應(ACIR)**

交流響應或交流阻抗(Alternating Current Impedance, Alternating Current Internal Resistance, ACIR)分析，是近代用來分析電極材料的方法之一。透過對電池施加已知頻率的電流或電壓弦波(圖 7 紅線)並觀察響應電壓或電流(圖 7 藍線)之增益(|Z|, R)與相位($\angle Z$)。



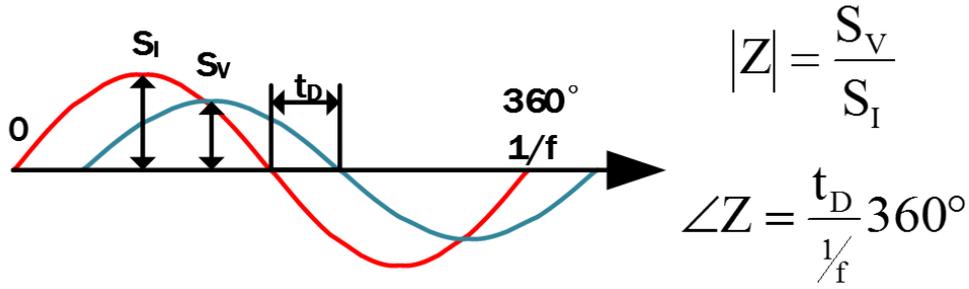


圖 7 ACIR

頻譜式分析(spectroscopy)則是使用一連串已知頻率的電流弦波進行響應測試，常用之分析方式是將測試結果繪製在極座標上(圖 8)形成奈氏圖(Nyquist Plot, Cole-Cole Plot)。

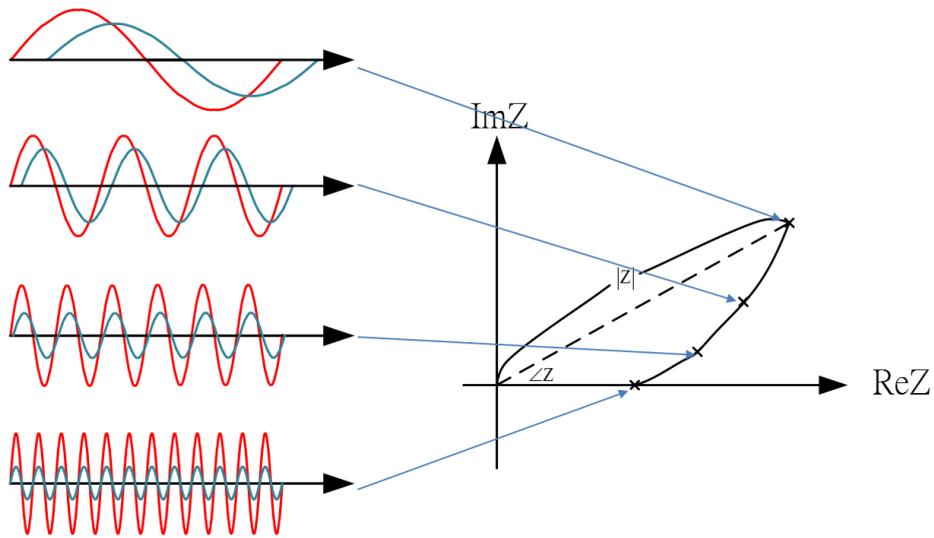


圖 8 Nyquist Plot

在現代電化學分析會使用奈氏圖檢證或建立等效電路模型(圖 1 d)，依據電極材料響應頻寬結合奈氏圖(圖 9)解析特性也是常見的應用方式。

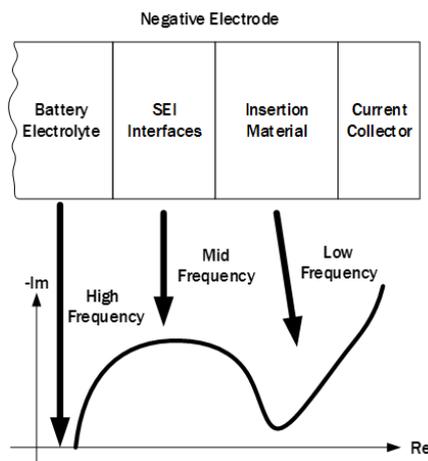


圖 9 鋰電池 Nyquist Plot



台灣總公司
241 新北市三重區光復路一段 61 巷 27 號一樓
E-mail: sales@chentech.com.tw
Tel: 02-22783825
Fax: 02-22783926

- 焦耳熱損(Joule's Law)

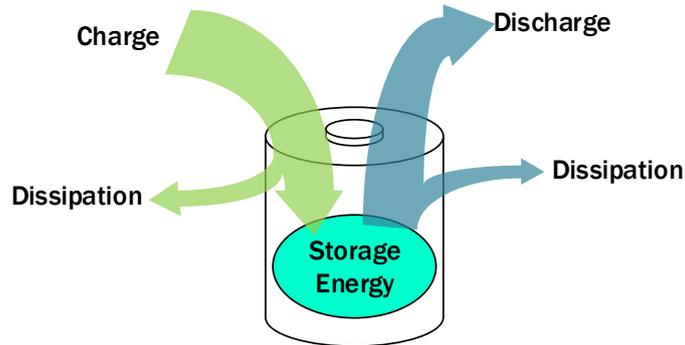


圖 10 能量轉換損失

焦耳熱損原理是透過功能原理的方式計算內阻。以相同電量進行充電與放電，可發現電池充電消耗電量恆大於放電電池釋出電量。假定這過程逸散的能量是因為內阻抗焦耳熱損造成的。透過(圖 11)可得區間等效之內阻抗，但如同 switching current method 無法區隔充電直流內阻與放電內阻。

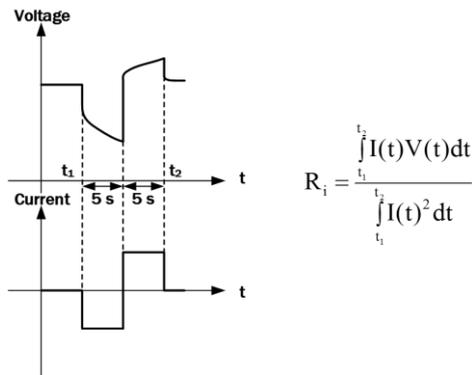


圖 11 Energy Loss Method

從上述原理(圖 10)內阻會與電池充/放電時溢散能成相關，所以可以得知內阻與轉換效率相關。在動力型應用時，內阻是影響負載電壓的主要因素之一，關係到供給系統的驅動能力。



■ 暫態分析

在交流響應(ACIR) 頻譜式分析部分有說明電化學分析透過頻域響應建立等效電路模型，暫態分析則是透過時域響應與假定的等效電路模型推算出等效電路模型的內部參數。雖精確度未若頻譜式分析，但暫態分析測試條件相對容易滿足。暫態分析的參數雖未能直觀地呈現輸出效能，但如同 ACIR 與頻譜測試其結果與輸出效能參數存在對應關係。

電池特性參數與 SOH 評估技術

上述為常見的電池特性指標，而承德科技所開發的 SOH 評估技術則是基於客戶的應用要求，將整體評估方式依據”時效性”與”準確性”做出”客製化加權評比”。為了使客戶可以更直觀地運用 SOH 評等，承德科技在技術上先將各項參數正規化處理，根據應用端的需求做各項參數權重的量身定做，將正規化參數取加權評比後的數值加總，並藉由專業的建模方式，大幅降低所需時間。讓 SOH 評估除了符合客戶在應用上所需求的加權分數，更能在半分鐘內得出結果。如此便可以有效並快速地測試出該受測電池在客戶端應用環境之評等。

技術支援

承德科技提供業界最高規格之紀錄時間，MCB、ABT1000、MCL2、MCL2 MINI、BT1000 等系列設備均可適用 100 ms 擷取時間，MCL2 與 BT1000 系列設備在特定條件下更可調整至 1ms 的擷取時間。高資料擷取頻率除了可降低積分資料誤差，在暫態分析也有相當大的助益。控制軟體 iBest 亦提供直觀與彈性的製程設定功能，如：變數功能、DCIR 測試、SOC 截止功能等，有效地輔助製程設計與資料分析。目前這項技術已經在許多實務應用上獲得驗證，如：家用儲能系統、巴士充電站、汰役電池分容與物流電動機車的健康狀態檢測等等。

參考資料

- [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



- [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] 孫建中, 鋰離子電池特性分析與管理系統設計, 台北, 2016
- [9] <http://batteryuniversity.com/>
- [10] <https://zh.wikipedia.org>

