

## 電動車鋰電池健康及老化的模型化基礎參數定義之應用

Ryan Ahmed, McMaster Univ.

Javier Gazzarri, MathWorks Inc.

Simona Onori, Clemson Univ.

Saeid Habibi, McMaster Univ.

Robyn Jackey and Kevin Rzemien, MathWorks Inc.

Jimi Tjong, Ford Motor Co.

Jonathan LeSage, MathWorks Inc.

### 摘要

電動車目前正受到高度的關注，因它比傳統的石油燃料驅動車輛提供了一個更有效率且持久的運輸工具替代方案。電動車以電池組作為動力系統的主要能量儲存元件，需要精準的監測及控制。為了有效估測電池組的重要參數，像是電池的充電狀態(battery state of charge, SOC)、健康狀態(state of health, SOH)、及剩餘電量，需有一個高度逼真的電池模型以做為估測強健SOC策略的一部分。當電池的品質退化，模型參數也將有相當程度的改變，而且該模型必須能處理所有整個電池生命週期的運作情況。對於設計有效的電池管理系統來說，設計一個能隨著電池老化其參數也能隨之變化的物理模型是至關重要的。

這篇論文將介紹一個能在電池的各種健康狀態下有效進行離線電池模型參數估計的方法。帶有一個電壓源、一個串連的電阻以及幾對RC的等效電路構成了這個貫穿電池生命週期的充電、放電的動態模型。加速老化測試中，我們使用真實世界駕駛狀態來模擬電池用量，將鋰鎳錳鈷氧化物(LiNiMnCoO<sub>2</sub>)電池放在溫度35°C至40°C間進行測試，並在電池容量每下降5%時中斷來執行參考性能測試，以追蹤電池模型參數的變化。這個等效基礎電路模型藉著真實世界的行車狀態來進行驗證。這些參數的估測程序，其結果是建立一個能夠持續追蹤電池老化演變的有效率的模型。

引用: Ahmed, R., Gazzarri, J., Onori, S., Habibi, S. et al., "Model-Based Parameter Identification of Healthy and Aged Li-ion Batteries for Electric Vehicle Applications," *SAE Int. J. Alt. Power.* 4(2):2015, doi:10.4271/2015-01-0252.

## 簡介

過去幾年之間，油電混合動力車(HEVs)與電池電動車(BEVs)因為具備了效率及可持續性而受到高度的關注[1]。電池作為這類汽車至為關鍵的重要元件，必須具備精確的即時監測及控制，以避免任何會縮短電池壽命或影響其安全性的過度充電及過度放電的情形。

電池管理系統(battery management system, BMS)負責監測電池的充電狀態(SOC)、健康狀態(SOH)、電力狀態(SOP)以及剩餘可用壽命[2]。BMS也進行熱能管理、電池平衡，並試圖避免可能影響傳動裝置安全及縮短電池壽命的充電過度或放電不足的情形。電池的SOC、SOH、SOP為電池狀態監測及能量管理中所使用的三大關鍵變量。由於電動車出現在市場上相對時間較短，可能發生的電池故障或嚴重的起火將導致市場佔有率的流失，甚至從電動車界退出。因此，建立一個自適應性電池管理系統(BMS)，以處理可能影響車輛駕駛性能及各種運作的電池性能退化有其必要性。

HEVs及BEVs的性能及安全性高度地仰賴其電池充電系統(SOC)的精確與立即性的評定—即評定一台車輛在任何時候可充電及使用的電量、充電範圍、油耗效能以及其他計算電池效能的標準，也都有依SOC而定。因此，準確地評估SOC最終將同時改善車輛安全及客戶滿意度。電池健康狀態(SOH)則通常與電池容量的流失率有關。當一顆電池的容量降低至其起始容量的80%，該電池則被視為壽命終結。週期及時間性的老化均會造成電池儲電量的流失。

電池模型基本上可分為幾種類型：等效電路基礎模型(Equivalent circuit-based models)、行為模型(Behavioral models)、電氣化學模型(Electrochemical models)。等效電路基礎模型使用基礎RC電路元件，例如電阻及電容等來建立電池的動態模型。等效電路基礎模型具備簡單、高計算效率、可輕易實現於BMS等幾個特點。行為模型以經驗為依據，運用各種函數來建立電池的動態模型。如[3]，Plett介紹了一系列的行為模型，命名為混合模型(combined model)、簡易模型(simple model)、零態磁滯模型(zero-state hysteresis model)、單態磁滯模型(one-state hysteresis model)、自動修正加強模型(enhanced self-correcting model)。這些模型可以容易地被優化，並負責處理歐姆損耗、磁滯現象、及極化時間常數。電氣化學模型利用偏微分方程式來建立把鋰嵌入電解液及兩個電極的模型。由於電氣化學模型提供電池化學一個物理的見解，這些模型有利於SOH評估及追蹤電池性能衰減。然而，大致來說，電氣化學模型具備大量難以設定的參數，相對較複雜，並且需要更多運算能力。因此，當應用於即時BMS時，這些模型必須被簡化、及減少至適當動態顯著水準[3]。

在這之前，有一個電池老化研究是利用現成固定的C-rates老化電池來進行[4]，但真實世界的駕駛情況並未被反映。電動車的電池實際上承受了車輛加速及一再煞車產生的高瞬變電流，於是，本篇論文假設由一位正常的北美駕駛使用的BEV的電池老化情節來闡述這個議題。這些測試進行了超過12個月的時間，並且在溫度35 °C至40 °C間進行加快電池生命週期的測試，使用了真實世界行車型態的檔案，例如動力系統在都會區駕駛規範

(UDDS, Urban Dynamometer Driving Schedule)。我們使用一個帶有一電壓源、一系列電阻、及幾對RC的等效電路來建立這個貫穿預測電池生命週期的充電、放電的動態模型。這個模型在即時BMS實現模型的精確度以及簡易程度之間的抉擇提供了一個很好的折衷辦法。此外，我們也利用MATLAB來執行參數估計方法，利用其優化的函數讓模擬結果與實驗數據相符。這個參數估測的程序清楚地表現出等效電路模型參數對電池充電狀態及生命狀態的依賴關係。這些依賴關係會以查找表格的形式執行，用來進行模擬。

本文的架構如下：首先，我們說明這個電動車模型開發來產生實驗需要的電流分布。第二步，我們提供老化實驗的摘要。第三步，我們會說明用來收集資料的實驗設置。第四，我們把重點放在電池模型以及等效電路模型的在電池使用期限內的參數判定。第五，我們將討論實驗結果及電池因為老化而產生的變化。最後，我們會提出結論及的建議方法的適用性。

## 電動車模型及電流產生

在這個部分，我們將說明用來從多種行車型態的速度分布產生電流分布的電動車模型。圖1中的中型BEV模型，是由現有油電混合動力車輛模型修改而來[5]。這個模型是在Simulink利用Simscape函式庫的元件開發出來的。在完全充電的狀態下，這個模擬BEV的駕駛範圍大約為200公里。圖1為由一個鋰離子電池組、一個車速控制器、車輛動態模型、電動馬達、以及DC-DC轉換器所組成的BEV模型。

本研究以三個基準駕駛規範進行標竿測試(benchmark)，也就是都會區駕駛規範(UDDS)、高速高負載的輕型車行車型態(US06)、以及高速公路經濟型油耗測試(HWFET)[5]。UDDS行車型態被用來描繪都市的行車型態，其目的為複製一個正常駕駛的平均速度、怠速時間(idle time)以及停車次數。

US06型態為一個高加速、具侵略性的行車型態，而HWFET則象徵行車時速在60英哩以下的高速公路駕駛情形[6]。以上提及的三種駕駛型態如圖2所示。表1簡單列出這三種行車型態的特徵，像是距離、時間、以及平均速度等[6]。

圖3為從這三種行車型態而來的組合電流分布。這個組級別的電池我們忽略電池對電池的平衡，將其縮小為單電池。

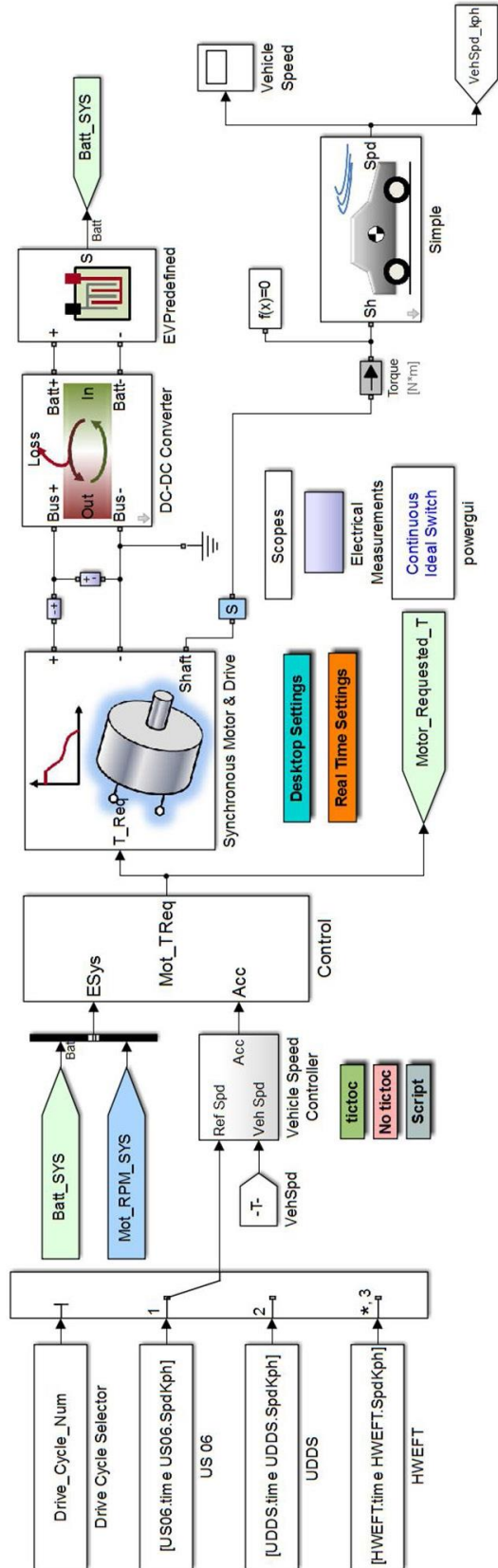


圖1. Simscape的全電動中型轎車模擬模型 (採用[5]資料)

表1: UDDS、US06、HWFET行車規範的特徵，[6]。

	Time (sec)	Distance (km / miles)	Average Speed (kph / mph)
UDDS	1,369	12 / 7.45	31.5 / 19.59
US06	596	12.9 / 8.01	77.8 / 48.37
HWFET	765	16.5 / 10.26	77.7 / 48.30

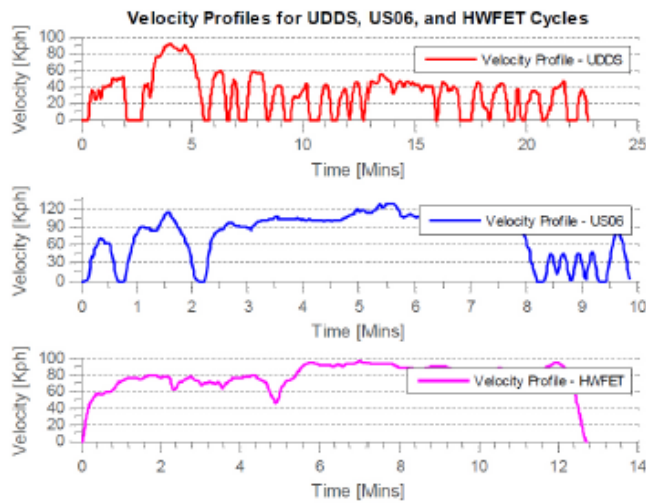


圖2. UDDS(上)、US06(中)、HWFET(下)的行車型態速度分布 [6]。

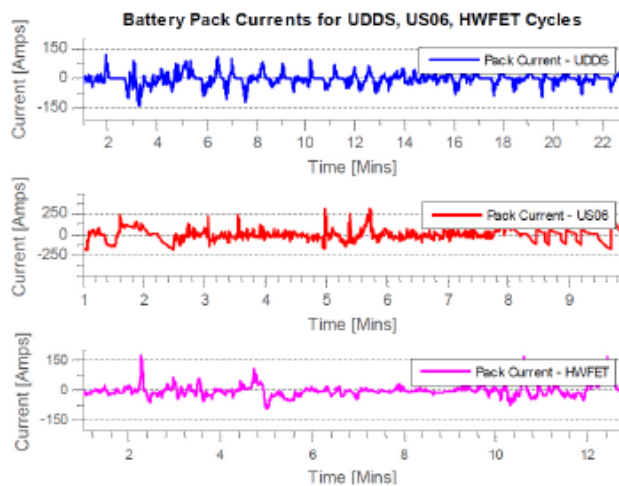


圖3. UDDS(上)、US06(中)、HWFET(下)行車型態的電池組電流分布。

## 老化研究概述

實驗室測試了單電池、模組、及電池組來評估在多種不同電池生命狀態及溫度條件下的表現[1]。在測試中收集的資料可以用來估計電池模型參數以及驗證電池模型，這對評估SOC及SOH非常必要。

這篇文章中，考慮了兩種測試規範：規範A為參考性能測試(RPTs, Reference Performance Tests)，規範B為老化測試(Aging Tests)。RPT指的是一個在1C的靜電容量測試以及脈衝充放電測試。RPTs於每15個模擬週進行一次，以追蹤電池老化所帶來的性能退化。而為了加快老化速度，以在較短的時間內取得實驗資料，所有的老化測試都在高溫下(35-40°C)進行。

### 規範A - 參考性能測試

RPTs擷取單電池基本性能特徵，例如電池功率容量、內部電阻、容量、時間常數。這個研究選擇的測試包括靜電容量及脈衝充放電測試。

#### 靜電容量測試 ( Static Capacity Test )

靜電容量測試在定流(CC, constant current)放電率下測量以安培小時(amperehours)計算的單電池容量。這個放電率，或C-rate，是根據電池容量來決定。舉例來說，一個1Ah電池在一小時內放電時有個1C的C-rate，也就是有1A的電流。這個測試提供了一個全新單電池的基準容量。本測試流程遵守定流定壓(CCCV, constant-current constant-voltage)協議，並由下列三個步驟組成 [3]：

1. 在CCCV模式下以1C rate (5.4A)將電池充飽。在電流終點值為0.02C (0.108 A)時，電池會被充飽至電壓為4.2V。
2. 為了使電壓及電流穩定，讓電池休息一小時。
3. 以恆定電流1C rate連續放電，直到電壓達到製造商建議的電池的最低電壓限制 2.8V。
4. 讓電池在無負載的狀態下休息一小時。

#### 脈衝充放電測試 ( Pulse Charge and Discharge Test )

脈衝充放電測試描繪了在各種充電狀態及電流速度下的電池電壓響應(單電池動態)特徵。本測試包含一系列的跨越整個SOC範圍的放電及充電脈衝。測試流程簡述如下：

1. 將電池充飽電。
2. 在電壓及電流穩定的狀態下讓電池休息一小時 [3]。
3. 對電池從SOC的100%至90%以每次1%的容量、電流速度1C進行脈衝放電，每次脈衝之間讓電池休息1小時。



- 在SOC的90%至10%之間，以每次5%的容量、電流速度1C進行放電，每個放電週期間隔4個小時。
- 在SOC的10%至0%之間，以每次1%容量、電流速度1C進行放電，每個放電週期間隔1小時。

### 規範B - 老化(壽命週期)測試

老化測試的目的是要模仿真實世界駕駛的行車狀況，研究電池因多次充放電循環而退化的過程[7]。目前的研究結合了UDDS、US06、及HWFET駕駛規範(表2)。這些測試是以一輛在Simscape建模的全電動、中型轎車模型的目標速度分布以及其對應的電流分布為依據來定義。

規範B由將電池放電至SOC的25%的多種行車型態組合而成。這個測試在35°C - 40°C的高溫下進行以加速老化。圖4及圖5分別說明了在平日及週末的駕駛速度分布下的規範B測試情形 [8]。

表2. 老化型態情節B [8]

Trip	Drive Cycle Combination	Frequency	Description
Work	UDDS <sub>t</sub> + US06 <sub>t</sub> + UDDS <sub>t</sub> + US06 <sub>t</sub>	Twice Daily 5 days/week 48 weeks/year	Starting from a fully charged state, a commute from home to work and back with no charge at work
Weekend / Vacation	UDDS <sub>t</sub> + HWFET <sub>t</sub>  + HWFET <sub>t</sub> + HWFET <sub>t</sub> + HWFET <sub>t</sub> + UDDS <sub>t</sub> + UDDS <sub>t</sub> + HWFET <sub>t</sub>  + HWFET <sub>t</sub> + HWFET <sub>t</sub> + HWFET <sub>t</sub> + UDDS <sub>t</sub>	2 days/week 124 days/year	Starting from a fully charged state, assuming no charging station at the weekend destination

Velocity (Kph)

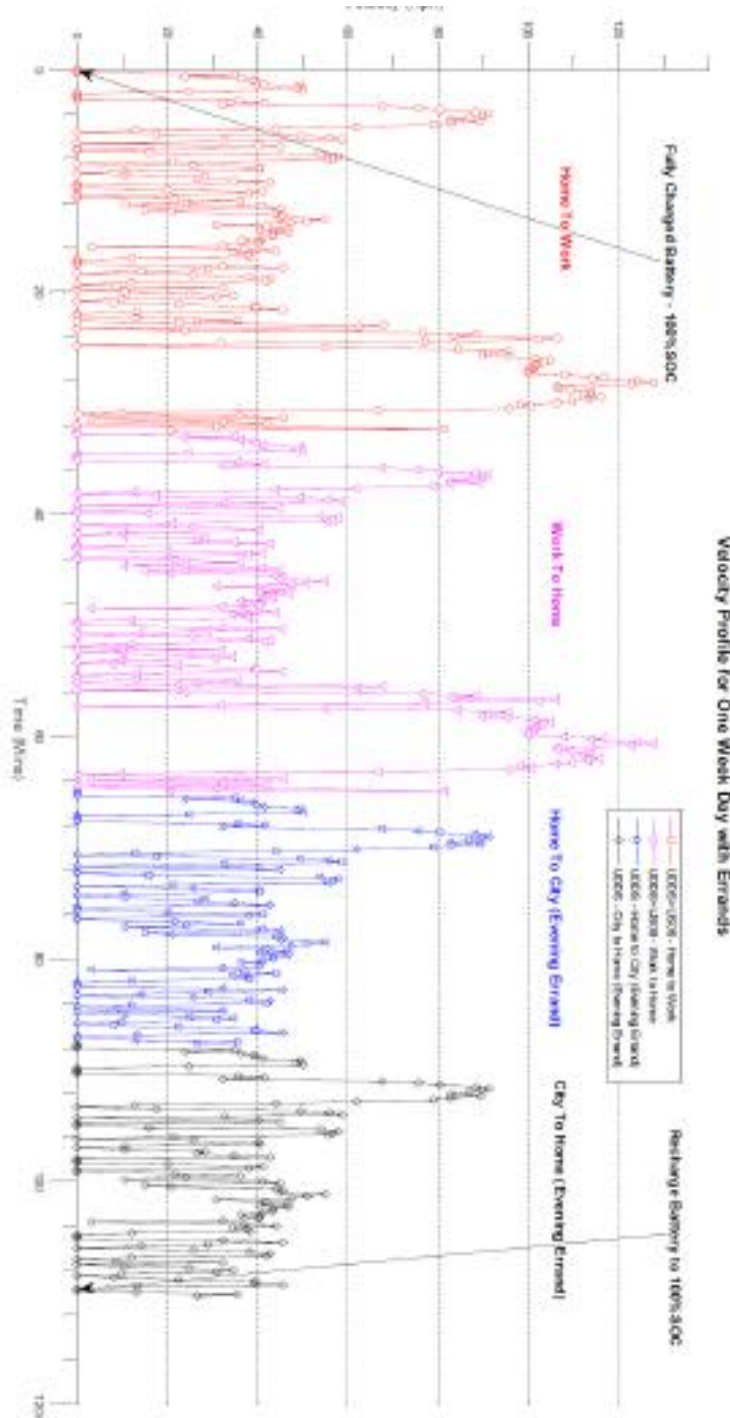


圖4. 規範B：具任務的平日駕駛型態

圖6為一週老化測試間的電流分布、電壓、及SOC情形。每天的SOC落在25%到90%之間。這顆電池接著在每天結束之後充飽電。電流值落在-2C至2C之間，而電壓則在3.6V到最高4.2V。圖7說明了經過一個平常日駕駛型態的車輛電池的電流、SOC、及電壓資料，圖8則為週末駕駛型態的資料。



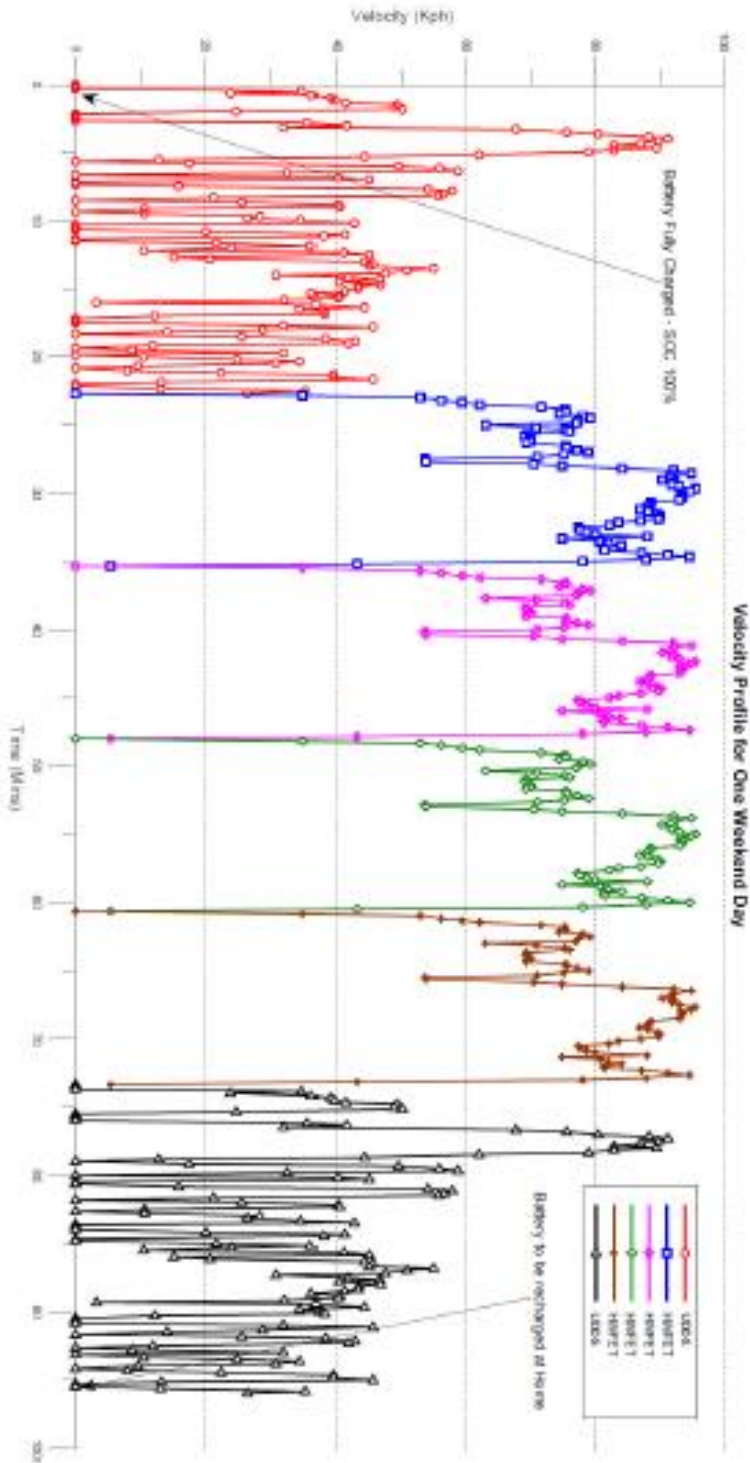


圖5. 規範B：週末期間一天的駕駛型態

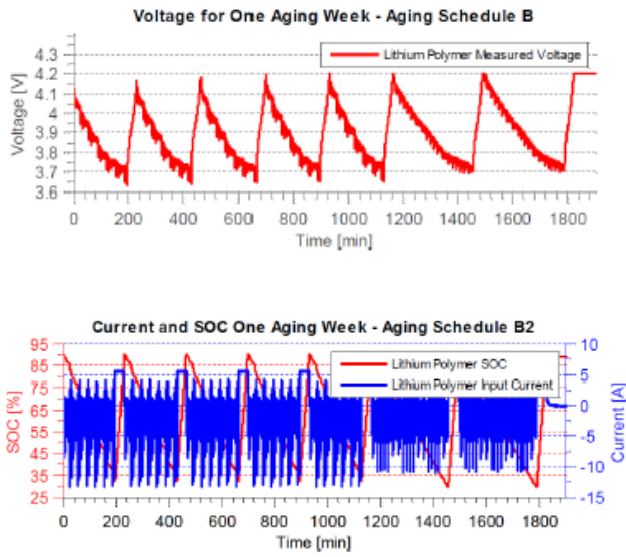


圖6. 老化測試一週間的電壓(上)、電流及SOC(下) - 規範B

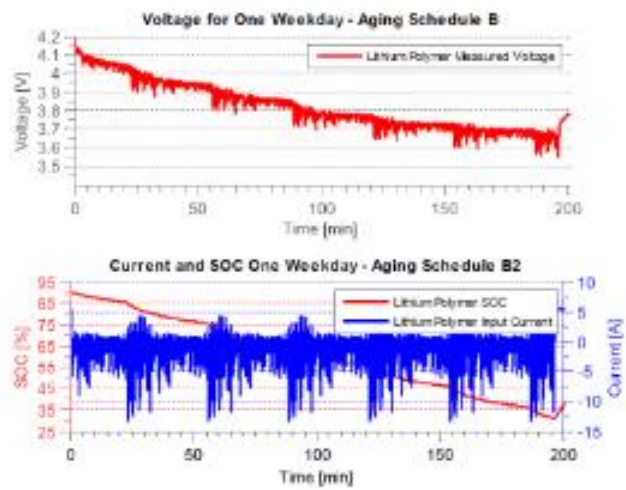


圖7. 一個平常日間的電壓(上)、電流及SOC(下) - 規範B

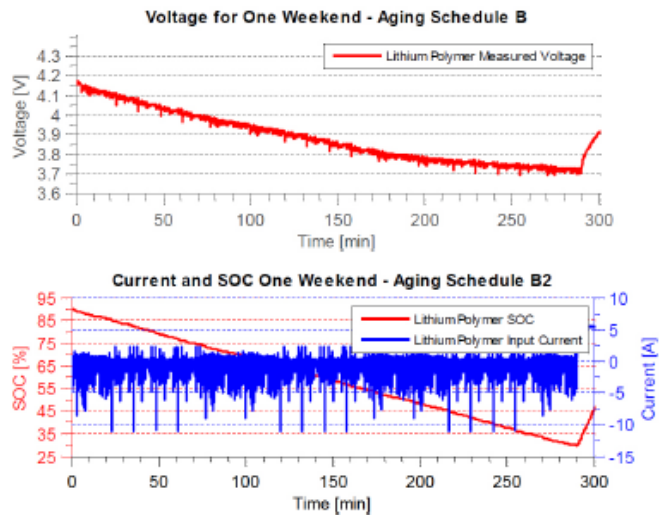


圖8. 週末期間一天的電壓(上)、電流及SOC(下) – 規範B

### 實驗設置

圖9、圖10、圖11展示了用來進行測試的實驗設置，包含一台有三個頻道的Arbin BT2000測試儀、三個NMC鋰聚合物單電池、三個環境測試箱、一個AVL Lynx資料擷取系統、及AVL Lynx使用者介面軟體。AVL Lynx軟體被用來設置這個測試流程及進行資料擷取。變量像是電池充放電時的電流、電壓、溫度、及其他變量以最高50Hz的頻率擷取。



圖9. Arbin BT2000循環儀、Espec及Thermotron環境測試箱



圖10. 實驗設置，包含循環儀、環境測試箱、資料擷取系統

單電池被放置在環境設置箱，目的是要在被控制的溫度下進行測試。

每一個電池都使用單獨的測試頻道個別進行測試。圖11為Arbin測試儀。該測試儀有三個獨立的頻道。這個循環儀可以使用2種操作電壓範圍，即0-5V與0-20V；以及3種電流範圍，0-400 A、0-40 A、0-5 A操作。

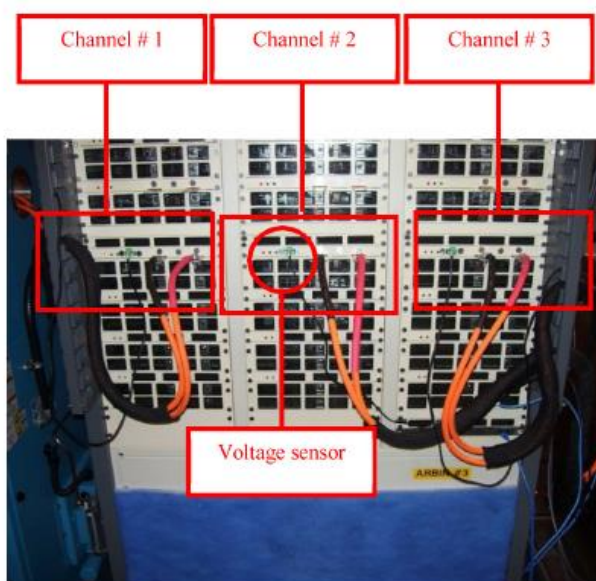


圖11. Arbin循環儀頻道：頻道裝配有電壓感測器及狀態指示燈。

## 參數定義

我們也建立了一個自動的參數估測程序[9]來追蹤了等效電路參數在整個老化過程中的變化。除此之外，這個在[10]提出的方法增加了估計的穩健性。相同的方式被應用在每一組循環週期分別為0、15、30、45週的特徵數據。這個估計流程在接下來的單元會做更詳細的解釋。

### 等效電路拓撲

等效電路拓撲的選擇在建模過程中是很重要的一部分。R-C在等效電路配對的數量決定了模型的能力符合量測的到瞬變電流響應。我們在所有緩和事件進行分析來判定我們在不同數量的R-C配對拓撲所能達到的最大準確度。

### 複雜程度及精確度之間的取捨分析 (Tradeoffs)

每一個鬆弛期間的曲線契合指數衰減方程式的自動化過程提供了一個有效率的電池動態分析。這個分析包含在電路上使用每個與R-C配對關聯、範圍從1至5的指數時間常數(TC)來嘗試契合情形。圖12提供了一個壽命起始時的範例結果。

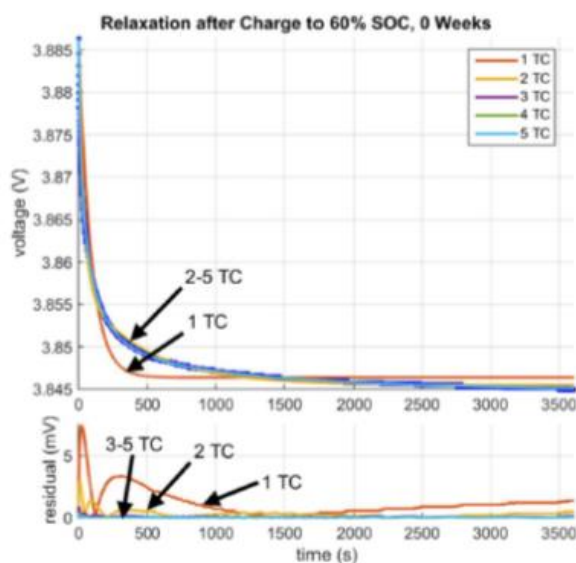


圖12. 鬆弛曲線擬合

經過檢驗，很清楚的可以看到1時間常數的情況比其他情形差了許多。圖13、圖14、以及圖15為這些在不同老化階段，讓SOC從55%脈衝充電至60%，放置一分鐘後的結果特寫。

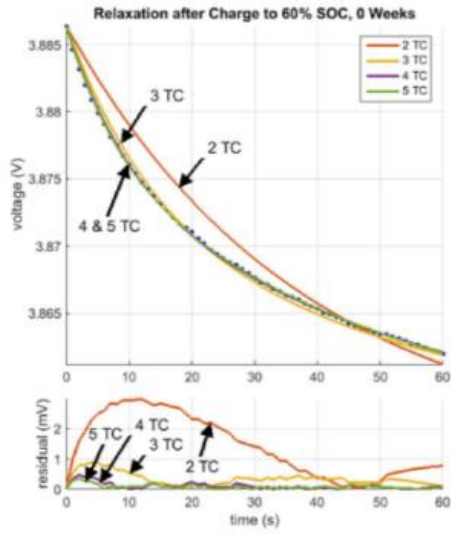


圖13. 電池壽命起始時的鬆弛曲線擬合

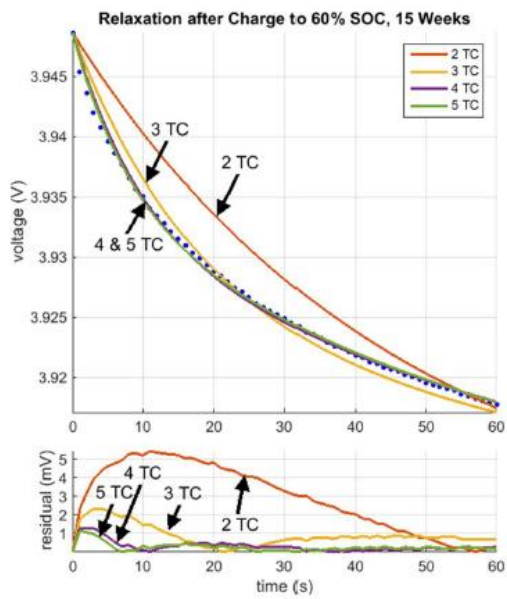


圖14. 電池壽命中期(15週)的鬆弛曲線擬合



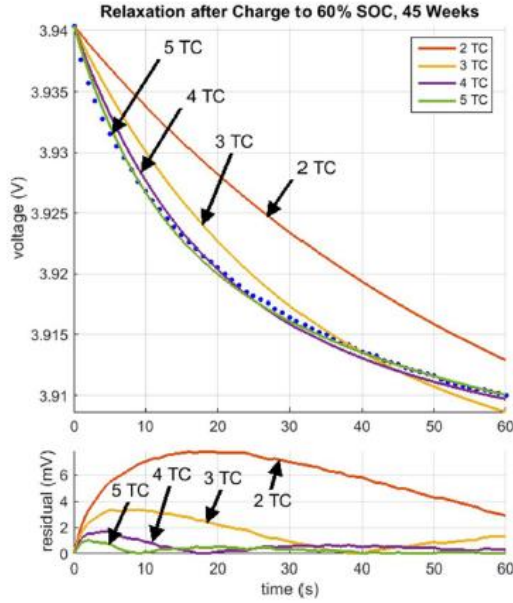


圖15. 電池壽命末期(45週)的鬆弛曲線擬合

從這些結果可以到兩個結論。第一，我們決定時間常數3為老化研究中需達成的合理精確度的最小值。第二，我們發現因為老化過程產生的額外物質過程，我們會需要一個更複雜的模型結構以在電池壽命末期時達成同等的精確度。舉例來說，為了維持曲線契合最大電壓剩餘在大約1 mV，在電池壽命起始時我們需要一個時間常數3，以及在電池壽命終結前需要時間常數5。

圖16為一個使用於電池壽命起始階段時間常數3的等效電路線路圖。

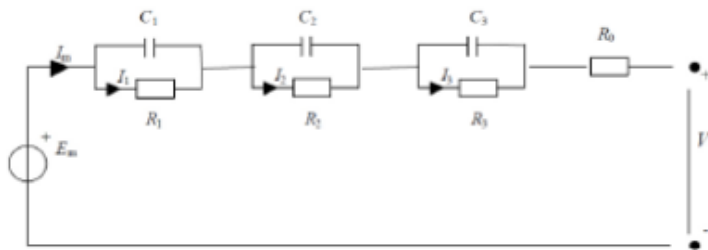


圖16. 帶有3個R-C分路的等效電路模型。

依照[11]描述的技巧，我們使用客製的Simcape模塊於每一個要素。每個電路成分需要一個有SOC、SOH、溫度、電流的尋找表代表輸入端。另一方面，在參數估計的階段，每

個資料集只有SOC不同，溫度、電流、SOH皆維持不變，所以基於估計的目的，在這個模型我們使用的是單一輸入查找表（lookup tables），如圖17所示。

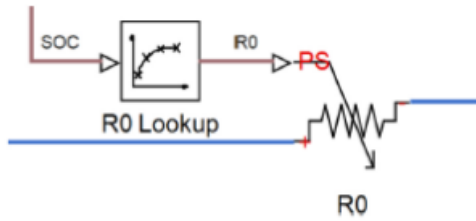


圖17. 電阻的單一輸入查找表

### 脈衝特徵數據

特徵數據包含了鬆弛期間之後的一系列充電或放電脈衝，如圖18所示。

這些測試讓電池在超過完全SOC的範圍下運作，同時觀察製造業者標示的電壓限制。脈寬的設定為以單電池額定容量大約2%至5%充電及放電。在高、低SOC範圍時，我們使用2%脈寬以更精準地捕捉電路參數突發的改變。在SOC的中間範圍，我們以5%脈寬來平衡測試時間及SOC資料點數量，例如我們稍後會提到的參數曲線上的解析度。

不同SOC值下的R-C等效電路瞬間動態可以在這些測試中做區別及觀察。脈衝序列在一個考慮到溫度、電流、SOH狀態的單一的工作點執行。圖19為一個1 TC等效電路的組成如何影響電壓反應的簡單的例子。

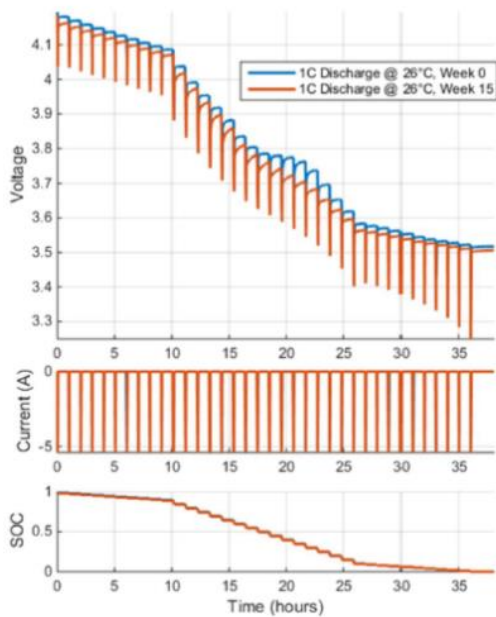


圖18. 脈衝放電特徵數據

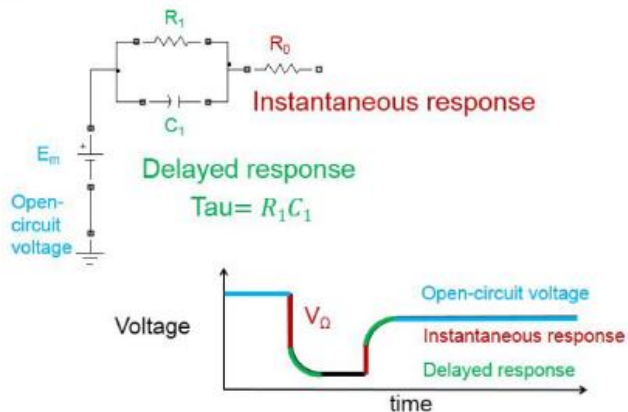


圖19. 觀測電壓動態與重現這些動態的模型等效電路相互關係之線路圖

### 自動參數估測

#### 脈衝及鬆弛事件定義

為了進行參數估計，首先要在實驗數據中自動地定義脈衝及鬆弛事件。我們的 MATLAB 程式碼觀察了電流量測值作為脈衝序列的特徵數據，並對轉移點的精確位置進行定位。我們的演算法使用這個特點來將這部分資料描繪為脈衝或鬆弛事件。圖20標示了單脈衝的識別點。

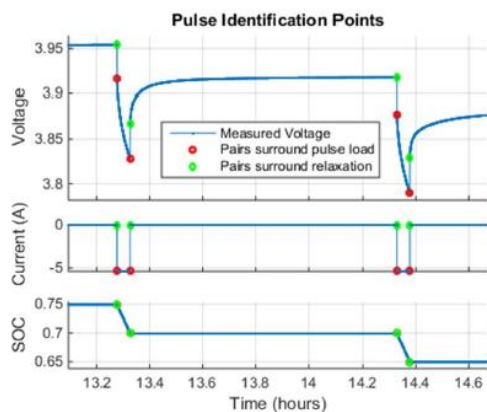


圖20. 脈衝及鬆弛事件的自動識別結果

## 初始值計算

### 斷路電壓及串聯電阻

在這個步驟，我們得到開放電路電壓(OCV，open-circuit voltage)的初始值的推測及串聯電阻值。這些數值與圖16的等效電路要素 $E_m$ 及 $R_0$ 相符。我們根據每一次脈衝事件及鬆弛的轉移電壓及電流來進行分析。

為了找出 $E_m$ 的初始估計值，我們假設任何瞬態都定在鬆弛期間的末端。在SOC已知的情況下，電池最終電壓將會接近OCV。我們可從這裡得到一個可在後面步驟做進一步調整的近似值。圖21提供一個我們用來計算以SOC 0.9作為分界點的 $E_m$ 及 $R_0$ 資料點圖解。

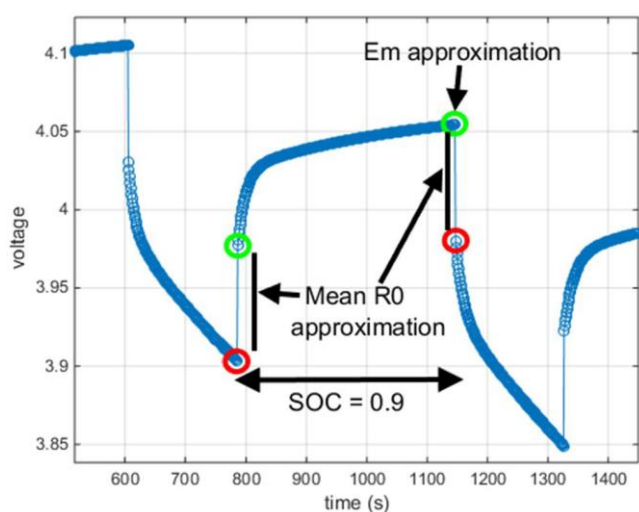


圖21.  $E_m$ 及 $R_0$ 之近似值

很重要的是，我們計算出來的 $R_0$ 電阻值會受到選擇的實驗數據取樣頻率影響。發生在數據樣本之間的有限時間內的瞬變動態的每一個部分反映了發生在轉換點的有效即時電壓變更。因此，在電阻 $R_0$ 的初始估計值中包含了任何設定得比我們在取樣頻率下量測到更快的動態。

圖22為一個在這種狀況下的初步結果的範例。

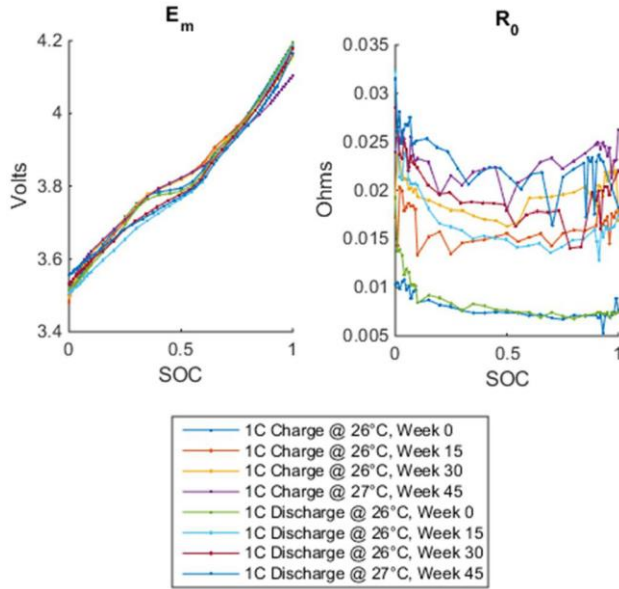


圖22. 與SOC對應的Em及R0初步估計值

### 鬆弛時間常數

下一步，我們透過每一個鬆弛階段的實驗數據來確認時間常數的初始值。扣除開放電路電壓，在終端觀察到的鬆弛動態可以單獨地利用初步電壓及時間常數來管理。以R-C配對3來說，電壓的結果為：

$$V(t) = V_{ini} + \tau_1 \frac{dV_{C1}}{dt} + \tau_2 \frac{dV_{C2}}{dt} + \tau_3 \frac{dV_{C3}}{dt} - V_{C1_{ini}} - V_{C2_{ini}} - V_{C3_{ini}} \quad (1)$$

其中V(t)為隨著時間推移而變動的端電壓值，V<sub>ini</sub>為初步鬆弛電壓，V<sub>Cn</sub>為電容器電壓，以及V<sub>Cn ini</sub>為電容的鬆弛起始時的初始電壓。

時間常數的初始值會透過執行一個使用曲線契合工具箱(Curve Fitting Toolbox)中fit指令的簡單的曲線契合演算法被執行來決定。我們使用算式中帶有標準化指數表達式fittype物件：

$$a_1 e^{-t/a_2} + b_1 e^{-t/b_2} + c_1 e^{-t/c_2} + V_{ini} - a_1 - b_1 - c_1 \quad (2)$$

其中a<sub>1</sub>、b<sub>1</sub>、c<sub>1</sub>為初始電容電壓，a<sub>2</sub>、b<sub>2</sub>、c<sub>2</sub>為時間常數，t為時間，V<sub>ini</sub>為鬆弛開始時的電壓。圖23提供一個鬆弛結果的曲線契合範例。

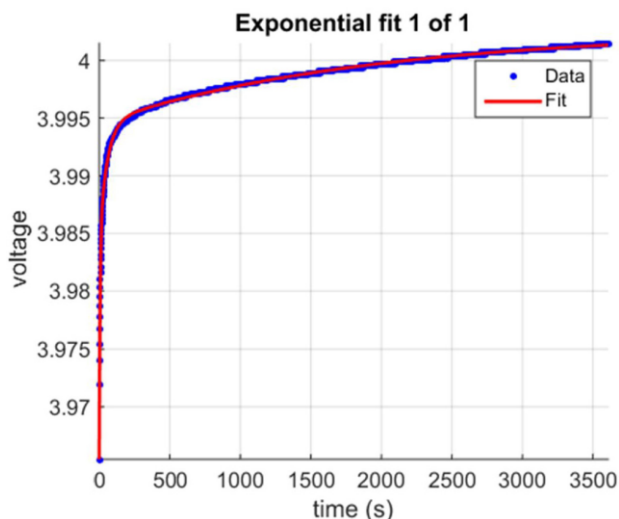


圖23. 用來取得初始時間常數估計值的鬆弛曲線契合

因為 這些曲線契合當中很多要在數個獨立的資料集處理，我們在一台8核心的電腦使用平行運算工具箱(Parallel Computing Toolbox)同步執行這些運算。圖24為三個時間常數估計結果。

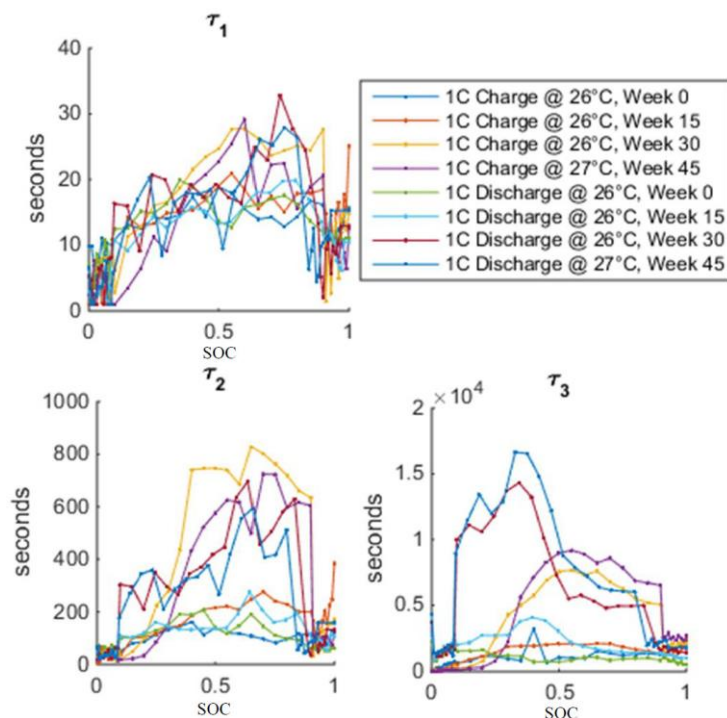


圖24. 從曲線契合產生的初始時間常數估計值

### R-C配對電阻

為了決定在 $n \geq 1$ 的情況下的阻抗初始值( $R_n$ )，我們把瞬變動態列入考慮。這些電阻在載入R-C配對的時候會影響電壓下降，但在鬆弛期間卻無法把阻抗值從R-C時間常數做切割。



如果我們只看單一次的脈衝事件，電壓響應是由連續的阻抗及R-C零件所驅動：

$$V(t) = I(t) * R_0 + \tau_1 \frac{dV_{C1}}{dt} + \tau_2 \frac{dV_{C2}}{dt} + \tau_3 \frac{dV_{C3}}{dt} \quad (3)$$

這個類型的問題會將以時間基礎的實驗數據視為線性系統方程式的一部分 進行數字上的分析來尋求端電壓解。然而，我們也考慮到電阻及電容值會因為SOC的改變而隨著脈衝有所變動。

為了要找出初始參數值，我們假設電壓在脈衝時皆為固定。這讓我們可以將從SOC起始至終止的脈衝期間參數值的作用按比例繪製。我們提出的這個線性問題說明為一個矩陣等式：

$$V(t) = V_{Em} + V_{R_0} + V_{RC_1} + V_{RC_2} + V_{RC_3} \quad (4)$$

其中每一個電路組成或R-C配對的作用構成了整體的終端電壓。矩陣的縱軸為時間，橫軸為SOC。每一個既定參數的作用只有在該參數與既定SOC的指數資料區域相關的時候會在矩陣中出現。這個線性系統優化問題透過矩陣等式設立：

$$v(t) = C(t) \cdot x \quad (5)$$

其中v行代表隨著時間變化的端電壓值，x為以行為基準待計算的參數向量，C為一個提供每個查找表在每個取樣時間部分參數作用的矩陣。圖25為部分v(t)及C(t)矩陣的範例。

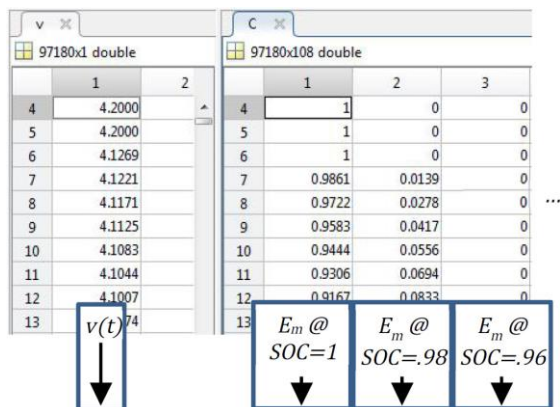


圖25. 線性系統矩陣範例

參數向量x以長形的行矩陣表示：

$$\begin{bmatrix} E_m @SOC=1 \\ E_m @SOC=0.98 \\ \vdots \\ E_m @SOC=0 \\ R_0 @SOC=1 \\ R_0 @SOC=0.98 \\ \vdots \\ R_1 @SOC=1 \\ \vdots \\ R_2 @SOC=1 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

(6)

最佳化工具箱(Optimization Toolbox)中的最小平方最佳化函式LSQLIN被利用來計算最理想的參數向量來將矩陣等式最小化，使用的物件為：

$$\min_x \frac{1}{2} \|C \cdot x - v\|_2^2 \quad (7)$$

這裡形成了一組阻抗 $R_n$ ， $n \geq 1$ 的參數值。這些值被標示於圖26。

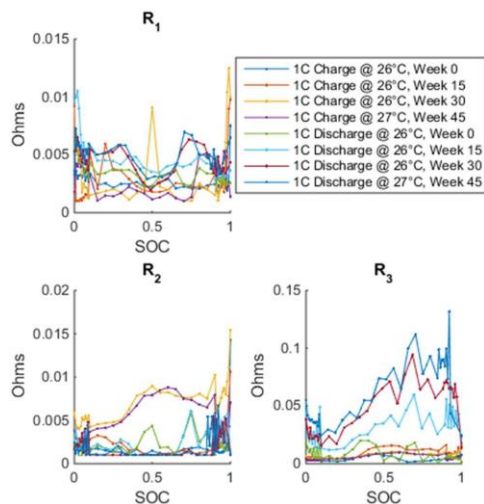


圖26. 從線性最佳化求初始電阻估計值

在這裡，我們有了很好的初步模型參數估計值。如果我們要模擬一整個脈衝序列，我們通常已經藉由初步的猜測得到一個與實驗數據相配的值，如圖27。這能夠幫助下一個步驟的進行，也就是在整個參數值中估計出最理想的值。

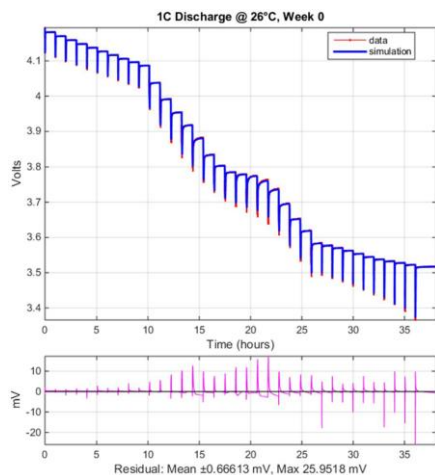


圖27. 一個帶有初始參數值的數據集在最終估計步驟前的實驗數據及模擬結果

## 參數估計

模型的最頂層是以電流作為輸入訊號，以及電壓、SOC作為輸出訊號來配置，如圖28。這讓我們可以連接模型到Simulink設計最佳化模塊組(Simulink Design Optimization)，因而可以使用我們的特徵數據來估計最終模型參數。

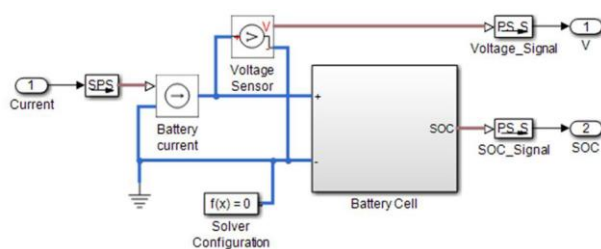


圖28. Simulink模型之最頂層

我們使用Simulink設計最佳化模塊組來讓每個脈衝自動形成迴圈，並估計出與量測數據相符的最理想的參數值。這包含下列幾個設置步驟：

1. 取得每一個任務的瞬態資料
2. 把瞬態資料從脈衝分配到與模型相關的實驗物件
3. 建立每一個可調參數，包括初始猜測及有效範圍

4. 建立估計設定以及平行(多核心)估計能力
5. 執行估計任務並收集結果

這些資料透過階層化(layered approach) [10]被分類到給一個估計任務。舉例來說，前兩個任務按照圖29的形式進行。

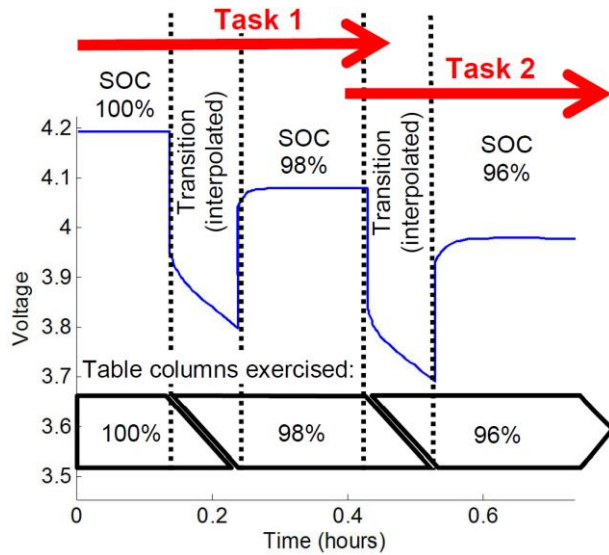


圖29. 圖示說明根據每一個脈衝分派分層估計任務的自動估計程序

每個任務之後，我們也會進行結果模擬來計算跨越每一個R-C配對在下一個任務開始時取樣的電壓值。這在下一個脈衝即將開始，而鬆弛期間的電壓並未完全確定的情況下非常重要。這些模擬的電壓值會被作為初始條件傳送到估測任務。

這些估測任務的結果被描繪於圖30。

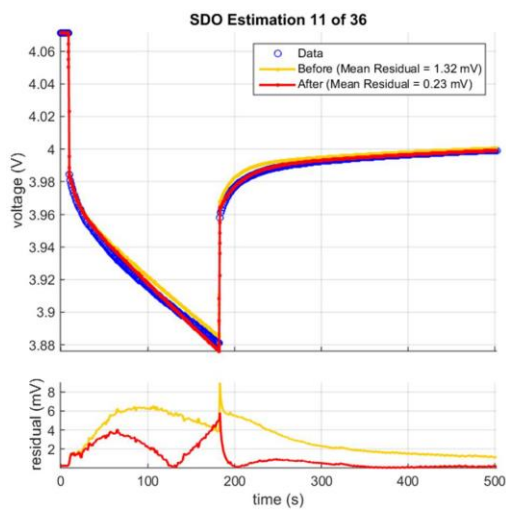


圖30. 一個自動進行的估計任務的結果

在我們完成一系列脈衝的估測任務之後，我們使用完整的脈衝序列電流來模擬Simscape模型，將電壓結果與實驗數據做比較。圖31為一個結果的範例。

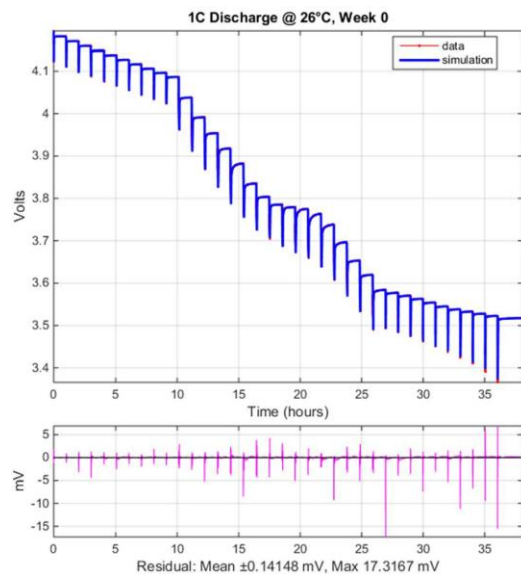


圖31. 實驗數據及一個使用內部參數值在最終估計之後的數據集模擬結果

## 結果

### 查找表

這個步驟的輸出為一組等效電路參數的查找表。在我們使用的單一溫度及C-rate下，我們看到參數出現重大改變。這些表格展示於圖32(放電)及圖33(充電)。

### 觀察報告

圖32及圖33顯示單電池的性能改變高度受到在實驗中老化的影響。老化對等效電路參數的影響主要有兩個改變：內部電阻增加，使得功率輸出能力降低；還有恢復時間的增加，可能為電極與電解質結構內新固相的出現造成受損擴散的結果。

這系列的電阻 $R_0$ 可能對電池的性能及應用有最大的影響。即使在老化實驗的前三分之一(15週)， $R_0$ 電阻大約增加為原本的兩倍，如此將減低功率能力為原本的一半。經過45周的老化，電阻值將成為初始值的三倍。這樣的影響一致地出現在整個SOC範圍。

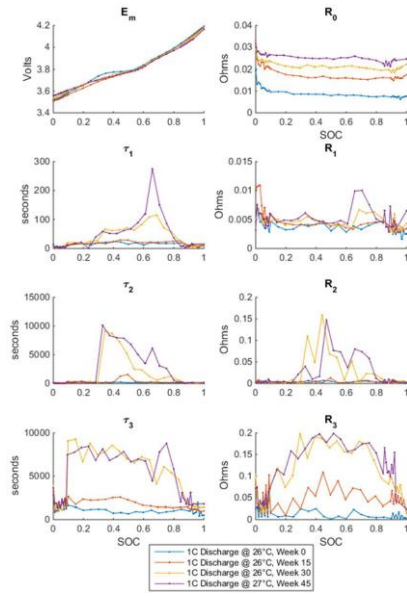


圖32.3 R-C等效電路在以1C放電的各老化階段的最佳化查找表

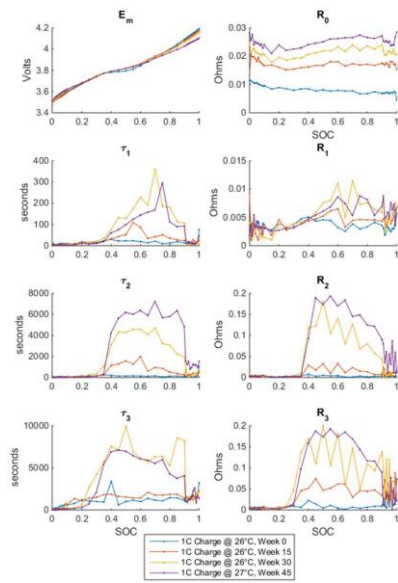


圖33.3 R-C等效電路以1C充電的各老化階段的最佳化查找表



## 模型驗證

為了評估自動契合處理的效率，模型驗證藉由使用一個老化規範B的行車型態數據的子集做比較來進行模型。這些行車型態雖被使用在電池的老化處理，但並不直接使用在參數判定。使用契合參數的模擬可拿來和從行車型態量測的實驗電池電壓做比較。這些行車型態由長脈衝充電、放電事件以及快速放電週期組成。

為了驗證等效電路電池模型，模型的最終電壓輸出被拿來與相同電流負載的實驗量測最終電壓做比較。圖34為使用於實驗電池及模擬的電流負載。初始SOC條件及實驗電池的靜電容量被用來將模擬模型初始化。在每一個驗證版本中，實驗電池以及模擬都從SOC的86.6%開始。

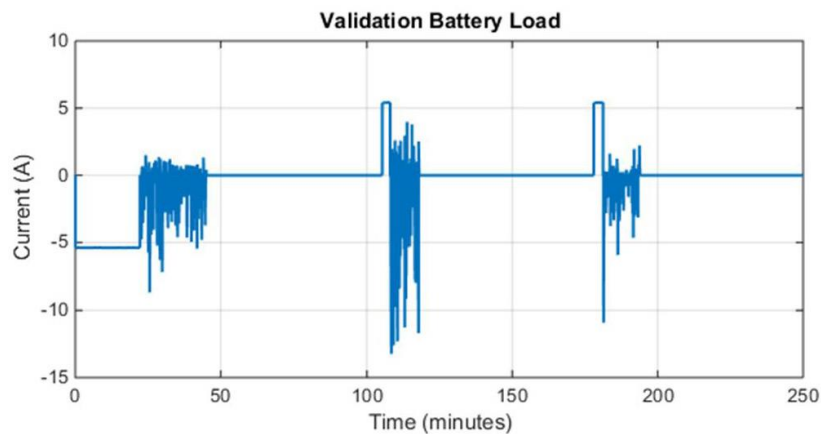


圖34. 用來做驗證研究的行車型態電流負載

圖35可以看到經過45週老化的實驗數據及模擬輸出的電池端電壓的比較。因為脈衝充電、放電測試只以5A的電量進行，Simulink模擬的參數是從放電或充電查找表依據施行的電流負載選擇。圖36可看到詳細的瞬態電池負載，其中殘餘電壓因為快速的動態而增加。

在 $\pm 5A$ 之間內插的充電、放電統一查找表的初步分析被發現不能充分表現電池0A時的鬆弛電壓恢復情形。參數特徵實驗只有在單純放電或充電的情況下使用，可能造成電池內活性物質極化。就其本身而言，契合參數僅代表充電鬆弛或放電鬆弛，並未包含極化滯後效應。對這些驗證研究來說，除非電池立即遭受到正電流，否則電壓鬆弛被假定為使用放電參數。

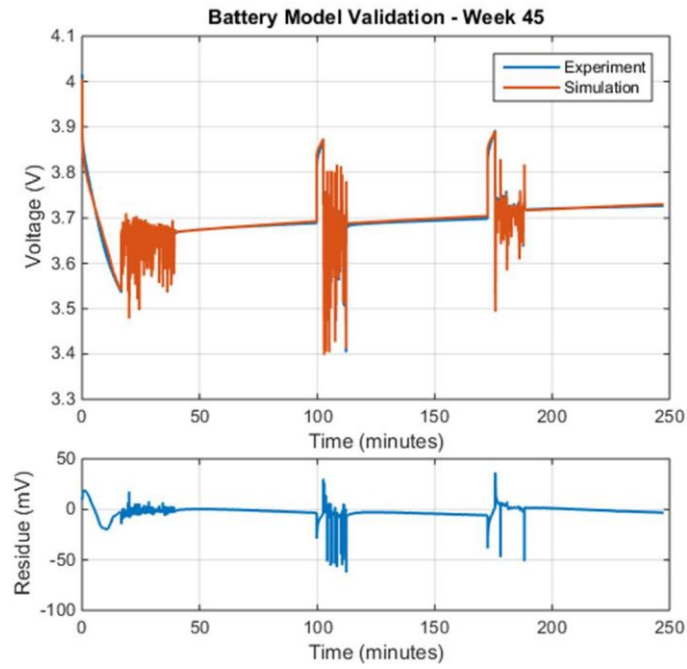


圖35. 經過45週行車型態老化的模擬及實驗電池電壓比較

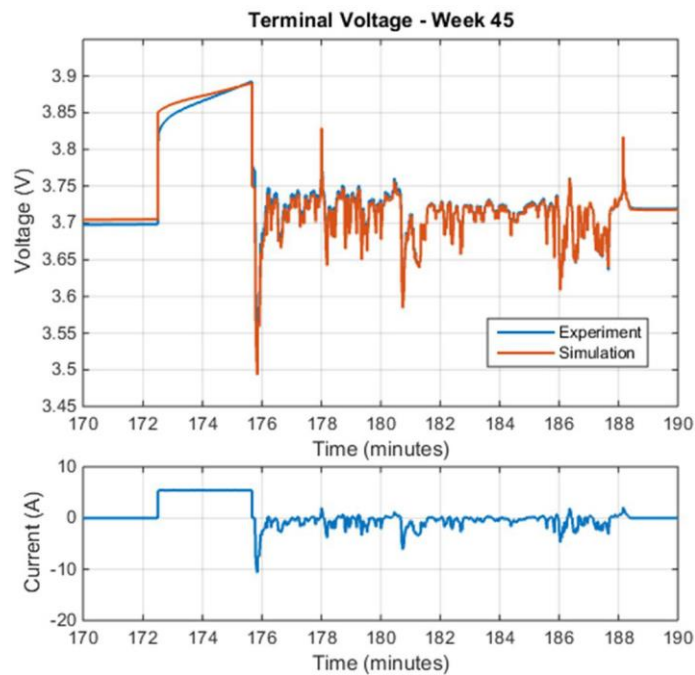


圖36. 經過45週老化強調瞬態的驗證研究子集

驗證研究在電池老化0、15、30、45週時進行。表3總結了每一個驗證測試得到的殘餘電壓平均值及最大值。

表3. 驗證研究中每個電池退化階段的殘餘電壓平均值及最大值

Battery Age (Weeks)	Mean Residual (mV)	Peak Residual (mV)
0	3.317	39.92
15	16.997	58.11
30	14.876	80.90
45	3.319	62.44

## 摘要及總結

一個使用在鋰離子電池不同老化階段自動、多階段的參數鑑別技術幫助決定電池參數的變化。加速老化測試使用了真實世界行車型態，讓單電池內部阻抗、容量、反應時間產生退化。脈衝測試在週期當中的0、15、30、45模擬週進行，顯示電池行為隨著測試週期明顯的改變。

帶有一個電壓源、一系列電阻、數個R-C配對的等效電路基礎模型組成了電池充電、放電動態模型。我們的結果顯示老化成效仰賴於等效電路拓撲的改變。在電池生命開始時，發現三個時間常數對重現電池動態很重要。然而在電池生命晚期，需要一個具備5 R-C配對的更複雜的模型結構以達到可相比擬的準確度。

未來的研究將會涉及測試在各種操作溫度的策略以及證實使用在電池組的技術。

## 參考資料

1. Andrea D., "Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs", Norwood: Artech House, 2010.
2. Plett G. L., "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 3. State and parameter estimation," Journal of Power Sources, no. 134, p. 277-292, 2004.
3. Plett G. L., "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs Part 2. Modeling and identification," vol. 134, 2004.
4. Todeschini F., Onori S., and Rizzoni G., "An experimentally validated capacity degradation model for Li-Ion batteries in PHEVs applications," Fault Detection,

Supervision and Safety of Technical Processes, Volume # 8 | Part# 1, 2012.

5. Miller S., "Hybrid-Electric Vehicle Model in Simulink" <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/28441-hybrid-electric-vehicle-model-in-simulink> 10 Aug 2010. (Updated 17 Apr 2014) [Online].
6. "[www.epa.gov/nvfel/testing/dynamometer.htm](http://www.epa.gov/nvfel/testing/dynamometer.htm)," EPA United States Environmental Protection Agency. [Online].
7. "Battery Test Manual for Plug-In Hybrid Electric Vehicles," U.S. Department of Energy, Idaho National Laboratory, Idaho Falls, Idaho 83415, March 2008.
8. "Plug-In Hybrid Electric Vehicle Value Proposition Study," U.S. Department of Energy, ORNL/TM-2010/46, July, 2010.
9. Jackey R., da Cunha A. and Gazzarri J., "Webinar: Automating Battery Model Parameter Estimation using Experimental Data," [Online]. Available:  
<http://www.mathworks.com/videos/automating-battery-modelparameter-estimation-using-experimental-data-81987.html>.
10. Jackey, R., Saginaw, M., Sanghvi, P., Gazzarri, J. et al., "Battery Model Parameter Estimation Using a Layered Technique: An Example Using a Lithium Iron Phosphate Cell," SAE Technical Paper [2013-01-1547](https://doi.org/10.4271/2013-01-1547), 2013, doi:[10.4271/2013-01-1547](https://doi.org/10.4271/2013-01-1547).
11. Huria T., Ceraolo M., Gazzarri J., and Jackey R., "High fidelity electrical model with thermal dependence for characterization and simulation of high power lithium battery cells," Electric Vehicle Conference (IEVC), March 2012.

## 縮寫及釋義

**BEV** - Battery Electric Vehicle 電池電動車

**BMS** - Battery Management System 電池管理系統

**CCCV** - Constant Current Constant Voltage 定流定壓，一種鋰離子電池的充電方式

**Em** - 等效電路模型的電壓源，代表開路電壓

**EV** - Electric Vehicle 電動車

**HEV** - Hybrid Electric Vehicle 油電混合動力車

**HPPC** - high-performance pulse characterization data 高效能脈衝特徵數據，一種包含在不同的SOC值放電及脈衝放電的實驗數據

**HWFET** - The Highway Fuel Economy Driving Schedule 高速公路燃油經濟性測駕駛規範指的是在高速公路以時速低於60英里的條件駕駛

**LiNiMnCoO<sub>2</sub>** - Lithium Nickel-Manganese-Cobalt Oxide 鋰鎳錳鈷氧化物，電池的一種

**NMC** - lithium nickel-manganese-cobalt oxide 鋰鎳錳鈷氧化物，電池的一種

**OCV** - open circuit voltage 開路電壓 (V)

**PHEV** - Plug-in Hybrid Electric Vehicle 插電式油電混合動力車

**R<sub>n</sub>** - 等效電路模型中的可變電阻<sub>n</sub>

**R-C branch** - R-C分路，等效電路的一部分，由一個平行可變電阻跟可變電容組成

**SOC** - State Of Charge 充電狀態，以充電量占總電池容量的比例表示，範圍介於0至1之間 (或0%至100%)

**SOH** - State Of Health 健康狀態，一個變換的數值，通常100%代表電池符合其應有的規格，而0%代表電池已經耗盡[2]

**SOP** - State Of Power 電力狀態，指電池被充電或放電到其容量的一定程度。

**$\tau$**  - 等效電路模型中R-C分路的時間常數<sub>n</sub>

**UDDS** - The EPA Urban Dynamometer Driving Schedule 美國國家環境保護局動力系統在都會區駕駛規範，通常被稱為“LA4”或“都市測試(the city test)”，代表在都市的駕駛情況。

**US06** - US06是一個高加速、具侵略性的行車型態，通常被視為“補充聯邦測試程序(SFTP)”駕駛規範。