

國立臺灣大學生物資源暨農學院生物機電工程學系

碩士論文

Department of Biomechatronics Engineering

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master's Thesis



使用協同估計演算法於鋰離子電池多狀態模型的開發

Development of a multi-state model for lithium-ion

batteries using co-estimation algorithm

張晉維

Ching-Wei Chang

指導教授：江昭皚 博士

Advisor: Joe-Air Jiang, Ph. D.

中華民國 113 年 8 月

August 2024

致謝

在研究所中的這段時間，是我從學生轉變為社會人士的重要階段，除了專業領域相關技能之提升外，更關鍵的是心態轉變，包括如何剖析未知問題並構思解決方法、與人相處完成分工職能、面對壓力如何消化等等，皆令我受益良多。因此在這裡我想要這段期間惠我良多的恩人們進行感謝。

首先，特別感謝我的指導教授江昭皚老師以及我的共同指導教授李建興老師，在研究領域上，給予了我充分的時間及空間專注於研究方向選定及研究進行上，並且於每一次的報告中皆能提供我一些新的想法與有欠考慮的問題，在專業領域的部分給了我許多核心意見，每次都能直切核心指出研究重心及問題關鍵。兩位老師的指導使我能在兩年內順利完成碩士論文；在面對研究壓力與時間壓力下，也學會了安排研究進度，有條不紊的逐步解決問題，在此致上由衷地感謝。同時，也要感謝口試委員王人正教授、王永鐘教授與蕭瑛東教授，在口試時給予的許多寶貴指導和建議，使得學生的論文更加完善。

另外，特別感謝生物電磁實驗室的李政緯學長、賴胤皓學長、劉安琪學姊，提供很多的研究建議以及教導實驗儀器，讓我能在短時間內進入研究的軌道上並在之後穩步進行。同時，感謝同一實驗室的同學家泓、嘉俊、禹濤、紹翔，在研究上互相砥礪，儘管大家的題目各不相同，但仍會彼此互助，也感謝學弟宇賢、紹霖、亦淮幫忙分擔了實驗室相關事務，使得我能更專注於研究上。最後，感謝我的爸爸、媽媽與姊姊，讓我在這兩年內能夠無後顧之憂地完成學業。

摘要

電池模型在電池管理系統的設計和優化中扮演著至關重要的角色，本研究主要關注在多狀態電池模型的建模與後續應用，目標是可在實際場域的環境中做使用，故與其他多數研究不同的地方在於考慮了溫度變數與電池參數對溫度的相依關係推定。並且由於溫度參數的引入，新開發的三項協同估計演算法的精度將往上提升。

本研究探討了電池模型的重要性。電池模型用於電池參數估算、演算法開發、電池特性定義和控制系統的優化。在本研究中，探索了多種使用不同類型算法的電池模型，並進行實驗比較不同模型間準確性的差異。以鋰離子電池在各種溫度環境下的工作狀況進行實驗以深入研究。

此外，本研究也對運用此電池模型的電池管理系統於不同雜訊狀況下之表現進行研究，探討當電池監控裝置受環境雜訊影響時的表現。未來本電池管理系統可與物聯網元件進行聯動，在確保電池充電和放電過程中的均衡性和安全性的同時完成電池管理平台的可操作性，提高電池組的性能和壽命，從而推動綠色能源的廣泛應用。電池模型的選擇和應用將對電池管理系統和儲能系統的性能和可信性產生巨大影響，本研究有望加速可再生能源產業的持續發展，特別是我國目前重視的太陽能與風能產業。

關鍵字：

儲能系統、電池管理系統、電池模型、卡曼濾波器算法、協同估計演算法

Abstract

The battery model plays a crucial role in the design and optimization of battery management systems. This study focuses on the modeling and subsequent application of multi-state battery models, aiming for use in practical field environments. Unlike most other studies, it considers the temperature variable and the estimation of the dependency relationship between battery parameters and temperature.

This study investigates the importance of battery models. Battery models are used for battery parameter estimation, algorithm development, battery characteristic definition, and optimization of control systems. In this study, various battery models using different types of algorithms were explored, and experiments were conducted to compare the accuracy differences between different models.

Additionally, this study also investigates the performance of battery management systems utilizing this battery model under different noise conditions, exploring the performance when the battery monitoring device is affected by environmental noise. In the future, this battery management system can interact with IoT components, ensuring the balance and safety of the battery charging and discharging process while achieving the operability of the battery management platform, improving the performance and lifespan of battery packs, thereby promoting the widespread application of green energy. The selection and application of the battery model will have a significant impact on the performance and reliability of battery management systems and energy storage systems.

Keywords:

Energy storage system, Battery management system, Battery model, Kalman filter, Co-estimation algorithm

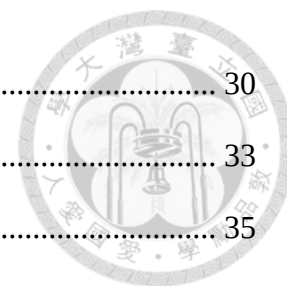
目次

=====



致謝	i
摘要	ii
Abstract	iii
目次	iv
圖次	vi
表次	viii
符號說明	x
第一章 前言	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究動機與目的	3
1.3 本論文之貢獻	5
第二章 文獻探討	6
2.1 電池模型	6
2.2 電池參數估計	9
2.3 協同估計演算法	14
2.4 卡曼濾波器算法	15
2.5 電池組平衡	17
第三章 研究方法	19
3.1 協同估計演算法系統架構	19
3.2 實驗儀器	21
3.3 系統參數辨識	24

3.4 SoC 估算	30
3.5 SoH & SoT 估算	33
3.6 模型負載測試	35
3.7 物聯網導向之管理平台架構	38
3.8 小型電池組之電池管理平台測試	39
第四章 實驗結果	43
4.1 歐姆內阻參數辨識結果	43
4.2 電路極化內阻辨識結果	44
4.3 極化電容參數辨識結果	46
4.4 SoT 估算結果	48
4.5 模型準確度負載測試結果	51
4.6 小型電池組電池管理平台測試結果	60
第五章 結論及未來工作	64
參考文獻	65
附錄	71



圖次

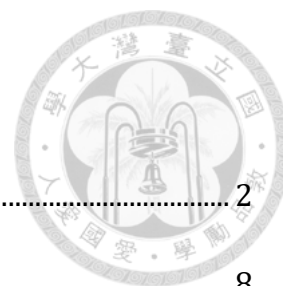


圖 1-1 電池儲能系統的簡易架構圖	2
圖 2-1 簡單電池模型等效電路圖	8
圖 2-2 阻抗電池模型等效電路圖	8
圖 2-3 運行時間模型等效電路圖	8
圖 2-4 戴維寧等效電路模型等效電路圖	8
圖 2-5 電池參數相依性示意圖	13
圖 2-6 混合模型溫度推估原理圖	13
圖 2-7 協同估計演算法基礎理念圖	15
圖 2-8 宏泰科技 HY2213B 芯片架構	18
圖 2-9 DC/DC converter 電池組主動平衡結構圖	18
圖 3-1 協同估計演算法系統架構圖	20
圖 3-2 實驗平台架構圖	22
圖 3-3 電壓平均法實驗流程圖	27
圖 3-4 HPPC 測試實驗流程圖	28
圖 3-5 HPPC 測試電壓節錄圖	29
圖 3-6 二階 RC 戴維寧等效電路圖	29
圖 3-7 短態和長態響應時間示意圖	30
圖 3-8 SoC 估測模型圖	32
圖 3-9 擴展卡曼濾波器算法區塊內部圖	32
圖 3-10 簡單內阻等效電路圖	34

圖 3-11 EIS 方法之電化學假想電路圖	34
圖 3-12 25 攝氏度下 BBDST 負載之 SoC 狀況圖	36
圖 3-13 模型負載測試模擬實驗之架構圖	37
圖 3-14 物聯網導向之電池管理平台架構圖	39
圖 3-15 小型電池組管理平台架構圖	41
圖 4-1 修正歐姆內阻 R_s 參數辨識結果圖	43
圖 4-2 短態/長態極化電阻 R_{TS} , R_{TL} 參數辨識結果圖	45
圖 4-3 短態/長態極化電容 C_{TS} , C_{TL} 參數辨識結果圖	47
圖 4-4 SOT 估算實驗環境圖	48
圖 4-5 不同溫度下 60-200Hz 電池阻抗相位移對 SoC 分佈圖	49
圖 4-6 不同溫度下 60-200Hz 電池阻抗相位移模型預測及實際測試比較圖	50
圖 4-7 不同溫度狀況下各模型 SoC 估測狀態圖	54
圖 4-8 不同溫度度狀況下各模型 SoC 估測誤差狀態圖	56
圖 4-9 高溫(45 攝氏度)狀況下各模型 SoC 估測誤差局部放大圖	58
圖 4-10 低溫(-5 攝氏度)狀況下各模型 SoC 估測誤差局部放大圖	59
圖 4-11 小型電池組結合電池管理平台之 SoC 估測狀態圖	62
圖 4-12 小型電池組結合電池管理平台之 SoC 估測局部放大圖	63

表次



表 2-1 SoC 估測方法優缺點比較表	11
表 2-2 常見卡曼濾波器類型比較表	12
表 3-1 電池模組 ICR-18650K 規格表	22
表 3-2 電子負載 Chroma63640 規格表	23
表 3-3 實驗儀器及品項名	23
表 3-4 小型電池組電池健康度資訊表	42
表 3-5 微控制器單晶片元件 Node-MCU 規格表	42
表 4-1 不同溫度相位移最大誤差表	49
表 4-2 模型預測及實際量測相位移誤差	50
表 4-3 各電池模型在 BBDST 負載及正常觀測誤差狀況下於各溫度 SoC 估測之均 方根誤差表	58
表 4-4 各電池模型在 BBDST 負載及極小觀測誤差狀況下於各溫度 SoC 估測之均 方根誤差表	59
表 4-5 各電池模型在 BBDST 負載，正常觀測誤差到極小誤差狀況下於各溫度 SoC 估測均方根誤差之變化差值表	60
表 4-6 電池管理平台資料傳輸相關資訊	63
表 a-1 EMF 實驗數據紀錄	71
表 a-2 R_s 參數推估實驗數據紀錄	74
表 a-3 R_{Ts} 參數推估實驗數據紀錄	77
表 a-4 R_{TL} 參數推估實驗數據紀錄	80

表 a-5 C_{TS} 參數推估實驗數據紀錄.....	83
表 a-6 C_{TL} 參數推估實驗數據紀錄	86
表 a-7 實驗電池單元健康度紀錄	89



符號說明



SoC	電池電量狀態 (%)
$SoC(t_0)$	電池初始電量狀態 (%)
SoH	電池健康狀態 (%)
SoT	電池溫度狀態 (°C)
C_n	電池額定容量 (Ah)
C_{aged}	電池老化容量 (Ah)
η	庫倫效率 (%)
I_L	工作電流 (A)
w_k	k 時刻之系統雜訊 (%)
v_k	k 時刻之觀測雜訊 (%)
Q	系統雜訊共變異數矩陣
R	觀測雜訊共變異數矩陣
K_k	k 時刻下的卡曼增益 (dimensionless)
K_k^-	k 時刻下的更新前卡曼增益 (dimensionless)
P_k	k 時刻下的共變異數矩陣 (dimensionless)
P_k^-	k 時刻下的更新前共變異數矩陣 (dimensionless)
$V_{terminal}/V_t$	端電壓 (V)
V_{chg}	充電時之電池端電壓 (V)
V_{dsg}	放電時之電池端電壓 (V)
V_R	歐姆電阻之跨壓 (V)
V_p	並聯電阻電容電路之跨壓 (V)

V_{OC}	電池開路電壓 (V)
R_S	電池歐姆內阻 (Ohm)
R_{TS}	短態極化響應電阻 (Ohm)
C_{TS}	短態極化響應電容 (F)
R_{TL}	長態極化響應電阻 (Ohm)
C_{TL}	長態極化響應電容 (F)
T_{TL}	長態響應所需時間 (s)
T_{TS}	短態響應所需時間 (s)
τ	極化響應時間常數 (s)
λ	遺忘因子 (dimensionless)
Cdl	電雙層 (F)
R_{ct}	離子轉移阻抗 (Ohm)
y_{RLS}	RLS 算法之系統輸出
x_{RLS}	RLS 算法之測量向量
w_{RLS}	RLS 算法之估測向量
P_{RLS}	RLS 算法之共變異數矩陣
k_{RLS}	RLS 算法之系統增益
e_{RLS}	RLS 算法之估測誤差



Note:

粗體斜體大寫英文字母 (ex: ***A***): 矩陣

粗體斜體小寫英文字母 (ex: ***a***): 向量

斜體英文字母 (ex: *a*): 純量

第一章 前言



1.1 研究背景

近年來國際上廣受關注的一項環保問題，即溫室氣體的排放與處理問題愈發受到重視，比如接近兩百個國家共同簽署的巴黎協定 (United nations climate change, 2023)，其核心目的便是減少溫室氣體的排放。因應此國際趨勢，越來越多的國家傾向於發展有別於傳統火力發電，溫室氣體排放量較為稀少的綠能發電方式，而我國近年也在積極發展以風能與太陽能為主的能源。但綠能受到季節和氣候的影響巨大，風力發電受風力大小的影響，而太陽能發電則取決於日照強弱，二者皆無法配合負載需求的即時變化。此一缺點是致命性的，因為一個電網系統需要穩定且反應迅速的電源供應才能穩定運作。而儲能系統的重要性則在此顯現，有一個反應快速，既是供電端也是負載端的儲能系統，才能讓未來以再生能源為主的電網保持穩定運作。

電池儲能系統(Battery energy storage system, BESS)由多個單元所組成，除了最基本的儲能單元電池外，電池管理系統、監控系統、控制主機、轉換器等皆是常見的電池儲能系統的組成單位，其架構簡易示意圖如圖 1-1 所示。而其中最為重要的便是電池管理系統(Battery management system, BMS)，BMS 可說是 BESS 的大腦，其最主要的功能是確保電池的充放電運作途中保持均衡性和安全性。均衡性指的是將儲能電池中電池組裡的複數顆電池維持均衡，保證每顆電池的充放電電壓相對一致，以避免過快消耗電池壽命的問題。而安全性則是保證每一顆電池的操作電壓、電流、溫度等狀況皆處在安全操作範圍內，如果過度充電、以過高的電流或在過高的溫度下充電，電池很有可能發生故障，甚至發生火災或爆炸。

每顆電池單元的可用容量和功率等參數無法直接量測，其需要根據電壓、電流、溫度等監測數據再經過計算得出，此過程稱為狀態估測(State estimation) (Wang *et al.*, 2021)。作為配合電網的儲能系統，需要能夠應對不同用途和應用場

景的需求，比如應急電源、負荷平衡和頻率調解等，而狀態估測要求在各種供電狀況、各種負載要求及各種環境下皆能有效運行，若無法保證狀態估測的準確性，則 BMS 基本的均衡性和安全性皆無法得到保障。一個有效的估測演算法便顯得尤為重要，能夠高效管理電池充放電的演算法才能最大程度地減少能量損失並延長電池壽命。

在開發演算法時，若是每次都使用實際的電池組進行實測，在成本問題難以忽視的同時，開發效率也無法令人接受，電池老化問題更是難以避免的一環。電池模型(Battery model)便是為了解決這些困難而誕生，電池模型的目的便是通過模擬的方式，去擬真儲能系統電池組的工作狀況。電池模型的主要功能包括電池特性制定、狀態估測、演算法的開發和優化等等。電池模型的建模至關重要，可以說是設計電池儲能系統中最基礎的一環，有著穩定且可信的電池模型才能夠支撐起後續電池儲能系統的一切開發(Wang *et al.*, 2021)。

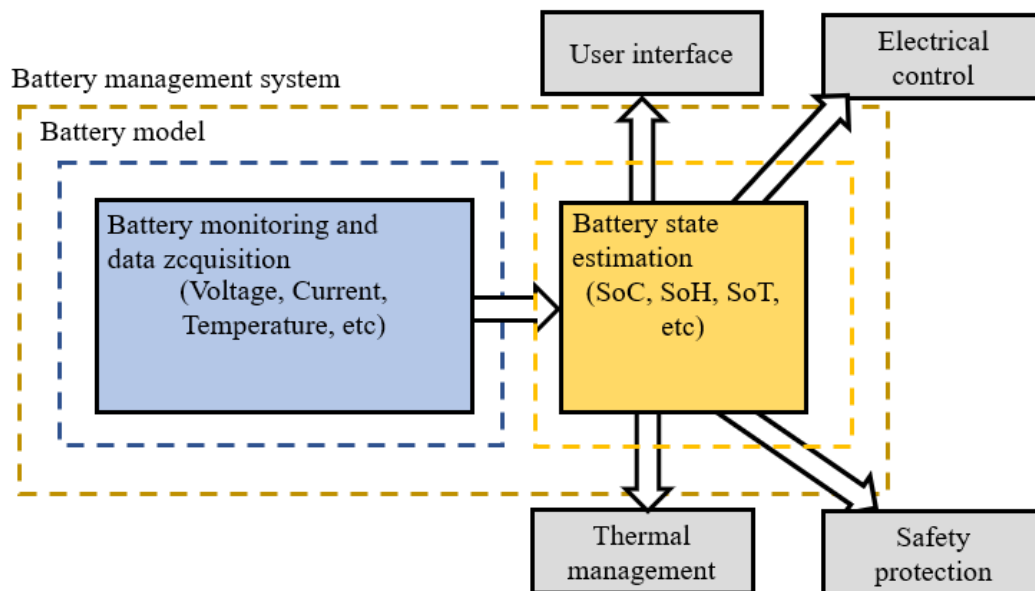


圖 1-1 電池儲能系統的簡易架構圖，可看出電池模型中準確的狀態估測是電池管理系統基礎，包括使用者交互介面(電池參數)、電路控制(SoC)、熱控制(SoT)、安全管理(SoS)等皆與狀態估測相關



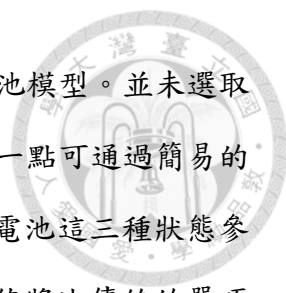
1.2 研究動機與目的

在電池管理系統的研究中，電池模型及演算法的開發對電池狀態評估至關重要。隨著電動車、可再生能源儲能系統及便攜式電子設備等領域的快速發展，對高效能、長壽命電池的需求日益增加。因此，如何準確地評估電池的狀態成為了一項重要課題。然而，現有文獻中的電池模型搭建，往往沒有特別考慮對電池效能影響甚大的溫度因素，主要關注實驗室或完善控溫環境下的狀況(Liu *et al.*, 2023)。這使得在實際應用中，這些模型的有效性和準確性受到限制。本研究旨在填補這一關鍵研究領域的空白，將目標放在電池管理系統在實際場地運用中的應用。

電池性能受到多種因素的影響，包括電壓、電流、溫度和工作狀況等。傳統的電池模型多數僅關注電量狀態(State of charge, SoC)，忽視了其他同樣重要的因素，如健康狀態(State of health, SoH)、溫度狀態(State of temperature, SoT)、功能狀態(State of function, SoF)及功率狀態(State of power, SoP)。僅僅依靠 SoC 來評估電池性能是遠遠不夠的，因為這樣的模型在長期運行和環境變化的情況下會產生顯著的誤差。因此，本研究計畫旨在開發一個新的多狀態電池模型，充分考慮到溫度對電池性能的重要影響，建立一個更加全面的電池模型，將溫度因素一併納入考慮。

而同時簡單電池估測方法往往只注意單一參數的檢測，忽視了電池狀態參數之間的相互影響。不可否認 SoC 是電池狀態中最重要的一部分。然而，忽視 SoH 對 SoC 之影響將會導致電池在長期運行後，由於老化而引發的演算法誤差增大甚至失效；忽視 SoT 對 SoC 和 SoH 的影響則會導致電池管理系統在環境變化下失去準確性。因此，協同估計演算法(Co-estimation algorithm)也成為本研究的重要主題之一。

協同估計演算法指的是除了電量狀態外，也將電池的其他狀態一併納入考量。目前已有的針對電池的協同估計演算法多為雙項至三項協同估測，即電量狀態、健康狀態和功能狀態。然而，納入溫度狀態因子的研究寥寥無幾，多數研究皆是在妥善控溫的環境下進行。本研究則是考慮到實際場域運用的狀況，將溫度狀態納入，



構建包括 SoC、SoH 及 SoT 的三項協同估計演算法之多狀態電池模型。並未選取 SoP 及 SoF 是由於這兩者代表著電池的可運用最大功率，而這一點可通過簡易的外在手段限制以避免電池使用出現超出最大功率現象。而由於電池這三種狀態參數相互依存，本研究的三項協同估計演算法在準確性上的期望值將比傳統的單項估測或雙項協同估測更高。

具體來說，本研究的多狀態模型將充分考慮各種運行條件下的溫度變化對電池性能的影響。溫度對電池的充放電效率、內部阻抗、壽命等有著重要的影響。高溫可能會加速電池的老化，而低溫則可能會降低電池的效率和容量。因此，在多狀態模型中加入溫度參數，能夠更準確地反映電池在不同環境條件下的性能變化，從而提高電池管理系統的準確性和可靠性。本研究的另一個重要目標是探討開發的多狀態模型和協同估計演算法進行應用於實際場地的電池管理系統中之可能，並根據評估結果進一步優化模型和算法的設計。此外，我們還將致力於開發與物聯網 (IoT) 導向的相容性，以用於遠程控制電池管理平台的物聯網元件的適配性。物聯網技術的應用，將使得電池管理系統能夠實現遠程監控和控制，從而進一步提高系統的靈活性和便捷性。通過與物聯網技術相結合，我們的電池管理系統將能夠實現實時監測、預警和智能調控，從而提升系統的整體性能和可靠性。

總結來說，本研究將通過開發多狀態電池模型和協同估計演算法，並將其應用於實際場地的電池管理系統，來提升電池管理的準確性和可靠性。通過考慮溫度對電池性能的影響，並引入先進的數據分析技術和機器學習算法，我們的多狀態模型將能夠提供更準確的電池狀態評估，從而提升電池管理系統的整體性能。最終，通過與物聯網技術的結合，我們的電池管理系統將實現遠程監控和智能調控，為未來智能電網和分佈式能源系統提供更加堅實的技術基礎。



1.3 本論文之貢獻

本論文提出的電池模型演算法在鋰離子電池之安全使用溫度範圍內表現優秀，並且在高溫和低溫的極端環境中表現尤為出色，相對於現有的演算法，具有顯著的優勢。具體而言，本研究之演算法通過深入挖掘溫度對電池特性的影響，針對不同溫度範圍下的電池行為做出細致的建模和分析。這種溫度特性的細緻建模使得本演算法能夠更好地捕捉到溫度對 SoC 估測的影響，從而提高了估測的準確性和可靠性。

值得注意的是，本演算法在高溫和低溫的極端環境中的表現顯著優於其他現有的演算法。在高溫環境下，本演算法能夠更好地抑制電池的熱失控現象，提高了電池的安全性和壽命；而在低溫環境下，本演算法能夠更準確地估計電池的可用容量，減少了量測雜訊對系統性能的影響。

這些優勢使得本演算法在實際應用中具有廣泛的應用價值。例如，在電動車中，本演算法可以提高電池系統的能源利用率和行駛安全性，同時減少對電池系統的管理成本。此外，本演算法還可以應用於其他需要對電池進行溫度補償的領域，如太陽能儲能系統、無人機和便攜式電子設備等。

因此，本論文提出的協同估計演算法在考慮到溫度因素的情況下表現優異，具有重要的學術和實踐價值。相信本研究成果將對未來電池管理系統的發展產生積極的影響，促進電動車及電力儲存等電力領域的持續發展。

第二章 文獻探討



2.1 電池模型

電池模型是設計電池管理系統時一項關鍵工具，主要用途包括電池參數估測、演算法開發、電池特性制定以及控制系統的優化等。在設計電池管理系統的控制策略時，若每次皆使用實際電池，會導致研究效率過低並且研究成本過高，而無可避免的電池老化令實驗的重複性難以保證，更是會對演算法開發效率造成重大影響。故建立可模擬電池運行的電池模型，先通過模擬方法進行實驗是目前最為主流的研究方法(Mousavi *et al.*, 2014)。

Mousavi 等人(2014)介紹了多種不同的電池模型，由理想電壓源和理想負載組成的簡單電池模型(Simple Model)，其等效電路圖如圖 2-1 所示。簡單電池模型中元件皆為理想元件，並未考慮電池老化狀況且無法反映非線性特性，且電池釋放之容量並未被考慮，故而僅適用於電路模擬而難以於實際場域運用。

如圖 2-2 所示，阻抗電池模型(Impedance-based model)使用電化學阻抗譜法(Electrochemical impedance spectroscopy, EIS)來描述模型中的阻抗元件，用於擬合電池在特定頻率範圍內的交流響應。並以奈奎斯特圖來表現。奈奎斯特圖由表示電池電阻的實軸和表示電池電抗的虛軸組成，當中的每一點都代表特定頻率下的阻抗響應。

運行時間模型(Runtime-based Model)之等效電路圖如圖 2-3 所示。運行時間模型考慮了恆定電流工況下的電池運作，以放電速率對終端電流的關係結合開路電壓特性曲線以得到模型之電量狀況資訊，此方法擬合準確度高，但對電池資訊量的要求過高加之計算負擔甚大，且因算法收斂速度較慢，導致該模型對於電流變化之強韌性不足。

基於戴維寧等效電路的戴維寧等效電路模型(Thevenin model)結合阻抗模型跟運行時間模型的特點，通過開路電壓曲線及電池內阻特性表現電池歐姆特性，使

用 EIS 分析以推估用於表現電池非線性特性的阻抗元件，該模型有著對電池參數預測準確度較高並且計算負擔較小的優勢，其等效電路圖如圖 2-4 所示。

Daowd 等人(2010)中討論了在 Simulink 環境下針對結合 RC 等效電路的戴維寧電路模型之電路參數估計，通過曲線擬合方式估算電路中阻抗元件之值，其最大誤差約為 1%，並且電量狀態估算之均方根誤差也始終小於 1%。並且 Daowd 等人指出二階 RC 電路模型是較為理想的階數，一階 RC 模型準確度過低無法表現電池本身非線性特性，而三階以上的模型則會面臨過擬合的問題。

Cacciato 等人(2015)在戴維寧電池模型中引入了 PI 觀測器以降低計算複雜度，且以實驗證明了與未降低計算負擔之估測法之準確度最大誤差在 2% 以下，充分說明戴維寧電池模型與基於電路分析之濾波器間的良好適配性。

Huang 等人(2018)比較了簡單模型、戴維寧等效電路模型、組合模型及運行時間模型等電池模型在不同工作狀況之強韌性，指出在高溫及低溫環境下戴維寧等效電路模型的強韌性相較其他諸類模型優秀，並且在電池工作電流變化時戴維寧等效電路之收斂速度也最快。考慮以上電池模型特性，並且戴維寧等效電路模型與基於卡曼濾波器原理的一系列算法有著較高的適配性，故而吾人選擇使用二階 RC 電路之戴維寧等效電路模型。

上述研究和模型的介紹表明了電池模型在電池管理系統開發中的重要性，以及在電池管理系統的設計和優化中，選擇適當的模型和演算法是至關重要的。這有助於提高電池系統的性能、安全性和穩定性，並且同時減少研究成本和提高研究效率。

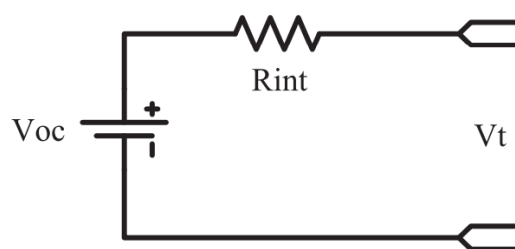


圖 2-1 簡單電池模型等效電路圖(Mousavi *et al.*, 2014)

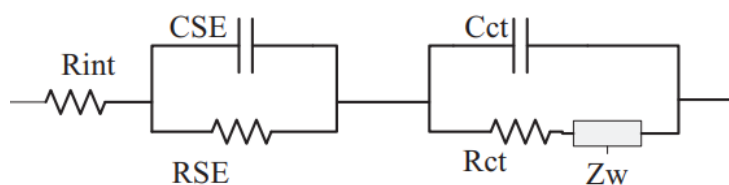


圖 2-2 阻抗電池模型等效電路圖(Mousavi *et al.*, 2014)

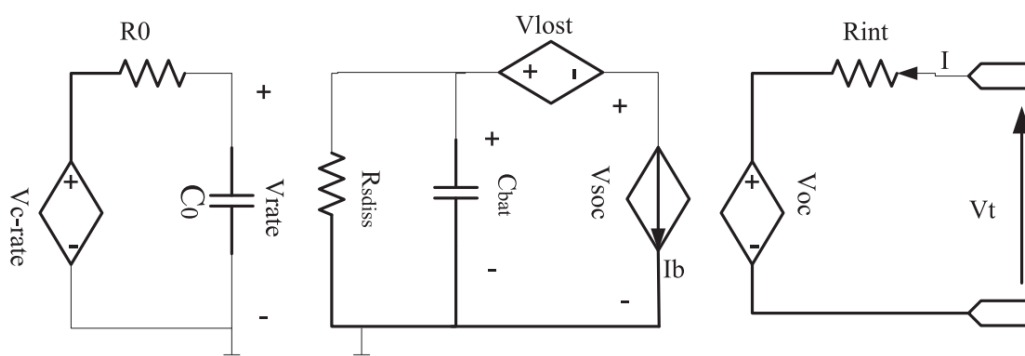


圖 2-3 運行時間模型等效電路圖 (Mousavi *et al.*, 2014)

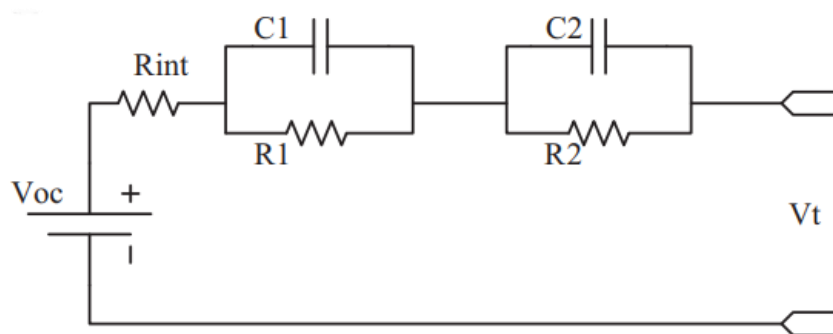


圖 2-4 戴維寧等效電路模型等效電路圖 (Mousavi *et al.*, 2014)



2.2 電池參數估計

電池模型之基礎原理是對實際電池的各項電池參數進行估計以模擬實際電池運行時的狀況，其主要的估測對象主要包括溫度狀態(State of temperature, SoT)、電量狀態(State of charge, SoC)、健康狀態(State of health, SoH)、安全狀態 (State of safety, SoS)、功能狀態(State of function, SoF)及功率狀態(State of power, SoP)等 (Liu *et al.*, 2023)，其相依性關係如圖 2-5 所示。其中 SoT 為一切參數估測的基礎；SoC 與 SoH 彼此有著強關連性；SoS 需依實際工況標準去定義；SoF 和 SoP 則是由 SoT, SoC, SoH, SoS 共同決定，且在電池系統中此二者可視為定義一致。

於所有電池狀態估測中，SoC 估測一般被認為是電池模型中最為重要的功能，常用的估測方法比較如表 2-1 所示。最為基礎的方法是庫倫積分法(Liang *et al.*, 2020)，又稱為安時法(Ah method)，其原理是通過已知的初始電量資料，以及實時進行電流的積分，計算出當前的電量狀態，如式(1)所示， C_n 為電池額定容量， η 為庫倫效率。但此方法最大的缺點是若是對電池初始電量或庫倫效率估測上出現誤差，積分特性會產生誤差累積效應導致算法失效。

$$\text{SoC}(t) = \text{SoC}(t_0) + \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^t \eta I(\tau) d\tau \quad (1)$$

而生活中最為常見的是開路電壓法(Open circuit method)，又稱為 EMF 曲線方法。開路電壓法通過研究電池開路電壓與電量狀態間特性，定義出電池的 SoC-OCV 曲線，即可通過量測開路電壓以估測電量狀態，市面上常見的特定電池電量計便是採用此方法。但此方法主要針對休息中的電池，於即時電池控制中因難以獲取準確的開路電壓數據而有所侷限性。(Taborelli *et al.*, 2014)

機器學習模型和卡曼濾波器原理模型則是目前學界傾向研究的兩種方向，前者基於機器學習的方式建立模型，比如支援向量機(Support Vector Machine, SVM)或是神經網路(Neural Network, NN)等，其特點是在大量實驗數據支持建模的前提下準確度極高(You *et al.*, 2016)。而後者則是將卡曼濾波器原理與戴維寧等效電路

模型結合，以數學方式估測參數相依性及電池狀態，與注重電池參數之間相依關係的協同估計演算法更加匹配。

而基於卡曼濾波器原理的算法選擇上，擴展卡曼濾波器算法(Extended Kalman Filter, EKF)是長年來被證實有效且常用的方法，除 EKF 外亦有如無跡卡曼濾波器(Unscented Kalman Filter, UKF)、雙平方無跡卡曼濾波器(Dual Square Root Unscented Kalman Filter, SRUKF)等同樣基於卡曼濾波器原理的算法(Dutt *et al.*, 2020)，其比較如表 2-2 所示，其中 EKF 雖最為基礎，但因其狀態方程單純性而最能體現參數相依關係，因此多被研究選用。

在 SoH 的估測上，無論是電池的內阻或是電池現在最大容量皆難以在運行途中直接量測，通常會採用與 SoC 的相依關係推估，或是建立老化模型等方式。Ecker 等人(2012)提出了基於電流、溫度及動態充電方式估測老化速率的循環壽命模型，並以鋰離子電池進行了驗證，證實了該種方法的有效性。但由於 SoH 的變化速率是反映電池的老化狀況，在正常使用上其變化速度較 SoC 要慢得多，故需要更廣泛的時間及更多的數據來訓練模型。

在 SoT 的估測上，一般的微型熱感應器僅能測量電池表面溫度，但由於電池表面溫度和電池內部電池溫度有所差異，在極端狀況下這個差異甚至能達到 20 攝氏度(Park *et al.*, 2020)，微型熱感應器難以達到準確掌握電池溫度的要求。故一個較為成熟的方法是，以電熱學角度著手，建立電熱模型估測出電池產熱功率，用散熱角度進一步建立內外溫差模型，再結合微型熱感應器感測的電池表面溫度資訊，套入內外溫差模型後得出內部電池溫度，此種混合模型方法是不用太多計算負擔又可以達到一定準確度的估測手段，如圖 2-6 所示(Park *et al.*, 2020)。

而在功能狀態 SoF 和功率狀態 SoP，若是在儲能系統的電池上，兩者皆可定義為最大可輸出功率，其可視為兩者一致。實際運行時我們難以獲取準確的最大可輸出功率，需要通過電池特性的判讀和電量狀態的評估來進行估測。Shen 等人(2018)在他們的研究中比較了幾種預測的方法，包括脈衝電流測試法(Hybrid pulse power characterization, HPPC)、SoC 限制法以及電壓限制法。其中 SoC 限制法和

電壓限制法受到電池工況限制而在實際場域運用中有所窒礙，HPPC 方法則是以電池放電特性推估理論最大功率，是目前最為常見之方法。



表 2-1 SoC 估測方法優缺點比較表

	庫倫積分法	SoC-OCV 曲線	機器學習算法	卡曼濾波器算法
原理	用初始電量和累計電流，直接進行當前電量計算	建立電量對開路電壓之對應曲線	使用相關參數及 SoC 數據建立模型	求出 SoC 狀態方程候用卡曼濾波器方法估測
優勢	算法單純，在無誤差情況下準確	計算量甚低	無須了解電池細節，數據足夠狀況下準確率最高	算法強韌性較高，與協同估計演算法相性良好
缺點	需準確掌握初始電量及庫倫效率，若有雜訊則會導致誤差累積 (Liang <i>et al.</i> , 2023)	量測開路電壓需要電池在休息狀態 (Taborelli <i>et al.</i> , 2014)	需要大量數據進行建模，電池特性改變後需要重新累積數據以建模 (You <i>et al.</i> , 2016)	準確率稍低於機器學習算法 (Dutt <i>et al.</i> , 2020)

表 2-2 常見卡曼濾波器類型比較表

	EKF	UKF	SRUKF	Dual SRUKF
特色	將非線性系統 進行線性化	使用概率函 數估計，配 合無跡轉換	使用雙平方根 轉換 (SRUT)	使用兩個 SRUKF 分別估 計狀態參數
優勢	可應用在非線 性系統	不用去線性 化系統和計 算 Jacobian (Feng <i>et al.</i> , 2022)	較傳統 UKF 收斂速度較快 (Dutt <i>et al.</i> , 2020)	更高的準確度 和更快的收斂 速度(Dutt <i>et al.</i> , 2020)
缺點	線性化系統時 產生誤差累積	穩定性會隨 老化而下降	計算負擔較傳 統 UKF 為大	計算負擔更進 一步提高

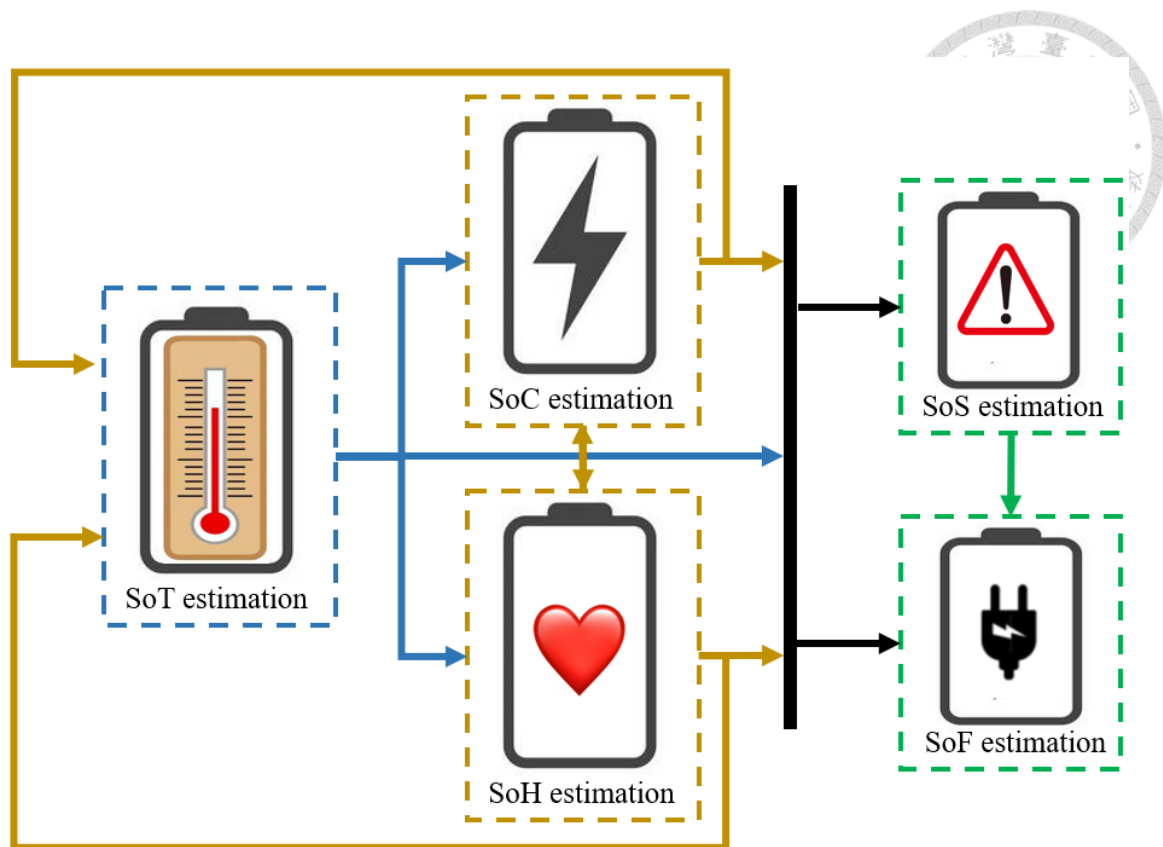


圖 2-5 電池參數相依性示意圖

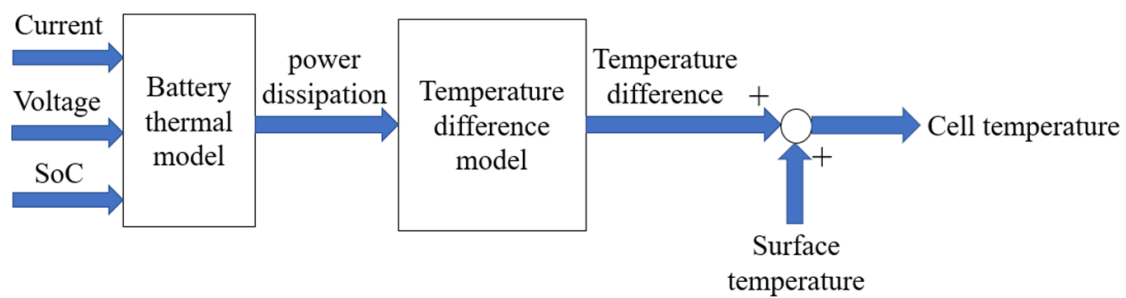


圖 2-6 混合模型溫度推估原理圖



2.3 協同估計演算法

如前文 2.2 節中所言，電池參數中最為關鍵的幾項參數皆相互具有強關聯性，SoC、SoH、SoF 及 SoP 相互皆有強關聯，而 SoT 更是會影響整體電池狀態。若是分別單項估測而忽略參數相依性，模型將在長期使用後有失能風險，如圖 2-7 所示。協同估計演算法便是藉由研究各狀態參數之間的相依性，建立電池關鍵參數之間的共變異數矩陣，來同時進行多狀態參數估測。在期望上不僅其準確率比分別單項估測各項參數為高，並且由於共變異數矩陣與電池狀態估測的相互更新其計算負擔也會隨之下降(Park *et al.*, 2020)。但需要特別注意的是，作為協同估計演算法基礎的狀態參數相依關係若是推導錯誤，很可能會導致整體算法失效。(Liu *et al.*, 2023)

Ma 等人(2022)推導了 SoC、SoH 及 SoF 的相依性關係，並針對車用鋰離子電池建立了協同估測之電池模型，以擴展卡曼濾波器算法為基礎去估測 SoC，再根據 SoC-OCV 曲線及狀態參數相依性關係，使用遞歸最小平方法去估算 SoH，獲得 SoH 相關數據後配合電池基本特性參數去求出 SoF，再將更新之相關參數回授至 SoC 估測中。並以實驗證明，由於電池容量及相關參數的即時更新，使得該算法之準確率要高於單項估測的方法。

而 Fang 等人(2019)建立了一協同估計演算法模型以估測鋰離子電池之 SoC 及 SoH，討論了何項參數對誤差影響最大，並在模擬中證明了最大影響因素為 SoC-OCV 曲線。而 Cacciato 等人(2015)則基於降低計算負擔之目的，開發了基於 PI 觀測器的協同估計演算法模型，並將其與使用 EKF 算法之模型相比較，以實驗證明了在有效減少計算負擔下對模型之整體穩定度及準確性不致於降低過多。

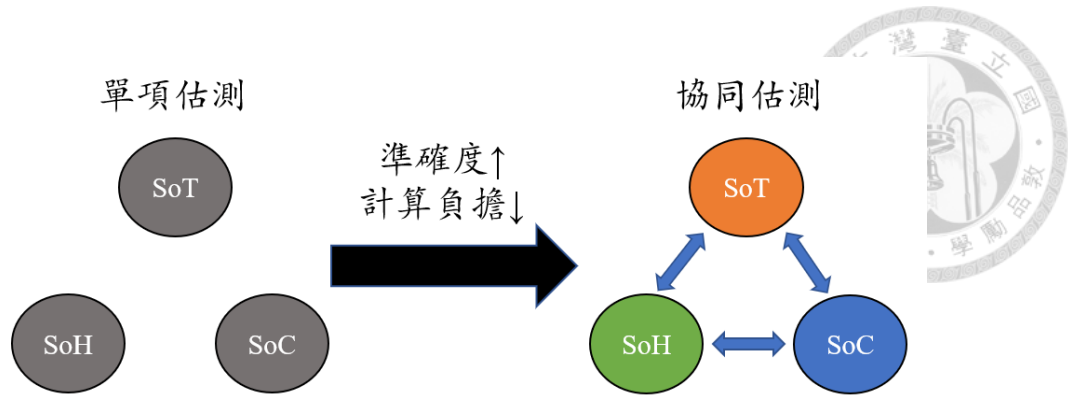


圖 2-7 協同估計演算法基礎理念圖

2.4 卡曼濾波器算法

於 2.2 節中略提了卡曼濾波器演算法，卡曼濾波器演算法是一種用於估計系統狀態的遞迴濾波方法，通常用於信號處理和控制系統中，在電動車領域尤其被用於估計電池的電量狀態。卡曼濾波器基於過去的測量值和系統模型，以最小化估計誤差的方差。其核心思想是通過融合不同資料來源的資訊來提高狀態估計的準確性。卡曼濾波器包括兩個主要步驟：預測和更新。在預測步驟中，濾波器基於系統模型和先前的狀態估計來預測下一個狀態。在更新步驟中，濾波器使用新的測量資料來修正預測，以生成更準確的狀態估計。

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \quad (2)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \mathbf{K}_k \mathbf{z}_k + (1 - \mathbf{K}_k) \hat{\mathbf{x}}_{k-1} \quad (4)$$

式(2)及式(3)分別代表著電池狀態模型中的狀態方程和觀測方程，其中 $\mathbf{x}_k$ 代表著電池的狀態向量， $\mathbf{y}_k$ 代表電池的觀測向量， $\mathbf{w}_k$ 和 $\mathbf{v}_k$ 分別代表系統雜訊和觀測雜訊，矩陣 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ 則為方程推導中的係數矩陣，依電池模型選定而有所區別。式(4)為基礎的卡曼濾波器式， $\hat{\mathbf{x}}_k$ 為當前狀態估計值， $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ 為前次狀態估計值， $\mathbf{K}_k$ 為卡曼增益，而 $\mathbf{z}_k$ 則是當前測量值。

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{B} \mathbf{u}_{k-1} \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \quad (6)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{C}^T (\mathbf{C} \mathbf{P}_k^- \mathbf{C}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (7)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k(\mathbf{y}_k - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}_k^-) \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{C})\mathbf{P}_k^- \quad (9)$$

式(5)和式(6)為卡曼濾波器算法中的預測步驟，其中 $\mathbf{P}$ 為估測值之共變異數矩陣(Covariance matrix)，而 $\mathbf{Q}$ 為系統雜訊之共變異數矩陣，在初始化狀態方程獲取了最初的 $\hat{\mathbf{x}}_0$ 和 $\mathbf{P}_0$ 後便可代入其中，進行第一次的預測步驟。而式(7)至式(9)則是卡曼濾波器的更新步驟，其中 $\mathbf{R}$ 為觀測雜訊，在更新步驟中先以預測中的共變異數矩陣 $\mathbf{P}_k^-$ 估測出卡曼增益 $\mathbf{K}_k$ ，再以觀測值 $\mathbf{y}_k$ 和卡曼增益 $\mathbf{K}_k$ 修正狀態估計值 $\hat{\mathbf{x}}_k$ ，最後更新出修正後的共變異數矩陣 $\mathbf{P}_k$ 。

卡曼濾波器算法的核心思想是，假設系統雜訊 $\mathbf{Q}$ 和觀測雜訊 $\mathbf{R}$ 為白雜訊，即符合高斯分布，那麼卡曼濾波器將兩層雜訊相融合後最小其方差以找出最佳估計。在每一次獲取測量值 $\mathbf{y}_k$ 後便可進行一輪預測及更新，獲取了下一輪的測量值 $\mathbf{y}_{k+1}$ 後重複一遍，在多次迭代中找到模型最適合的卡曼增益 $\mathbf{K}_k$ ，最終實現誤差方差最小的估計模型。卡曼濾波器算法和機器學習算法是目前針對電池模型的研究中兩大算法趨勢，傳統中研究內若無特別說明那多數皆是使用擴展卡曼濾波器(Extended kalman filter, EKF)算法，其以優秀的穩定度和強韌性備受青睞(Huang *et al.*, 2018)，而近年興起之機器學習算法則以在足量數據支撐情況下的極小誤差著稱。

但考慮到協同估測的方面，卡曼濾波器算法的另一大優勢便有所顯現，便是其算法與電池模型本身的緊密結合。事實上在推導卡曼濾波器基本狀態方程和觀測方程時，電池中多種參數的相依性皆會自然而然一併推導出(Ma *et al.*, 2022)，無需過多計算負擔便可適配協同估計演算法，正是其相較於機器學習算法的另一大優勢。



2.5 電池組平衡

於前文 2.2 節至 2.4 節中本研究探討完成了單顆電池之狀態估測，在電池技術的研究與應用中，單個電池的性能評估和優化是至關重要的一環。然而，在實際應用中，往往需要將多個電池組裝成電池組，以滿足各種需求，如電動車、儲能系統等。而電池組的性能不僅取決於單個電池的性能，還受到電池之間的平衡狀態的影響。因此，研究電池組平衡相關的方法和技術顯得至關重要。

電池組平衡技術的重要性不言而喻。在電池組中，不同電池的性能參數往往存在差異，比如容量、內阻、充放電特性等。如果在充放電過程中，某些電池因為這些差異而受到過度充電或過度放電，就會導致電池組的性能下降、壽命縮短甚至安全隱患。因此，通過有效的電池組平衡技術，可以確保各個電池在充放電過程中始終保持相對均衡的狀態，由此將評估單顆電池之技術擴大到評估整個電池組，從而提高電池組的整體性能和可靠性。常見的電池平衡方式分成被動平衡及主動平衡兩種，被動平衡的理念是通過外接的電阻串連將較高能量電池的能量由熱量方式釋放出來 (HY2213, 宏泰科技)，典型結構如圖 2-8 所示。當圖 2-8 中 pin2 之輸入電壓 VDD 達到晶片的保護閾值時，激活 MOSFET Q1，從串聯電阻 R2 處將多餘能量釋放。由於被動平衡是通過熱量將多餘能量釋放出來，故會產生較多的能量損耗，且放電平衡的表現較差，故而吾人轉而研究主動平衡方式。主動平衡其核心理念為將高能量電池之多餘能量轉移至低能量電池，而常見的主動平衡方式主要分成電容/電感方式及 DC/DC converter 方式。電容/電感方式其核心理念共通，皆是將高能量電池之多餘能量轉移至穿梭電容/電感儲存，再由穿梭電容/電感處將能量轉移至低能量電池處。結構大致可分成單電容/電感及多電容/電感兩類。但電容/電感方式隨著電池組中電池數量增多，其開關和儲能元件數量也成倍加多，且平衡時間相較其他方法較久，故而不適合本研究目標。

而 DC/DC converter 方式其理念是將整個電池組視為一個整體，同時觀察每顆單獨電池的 SoC，由整個電池組通過 DC/DC converter 將能量由高能量電池轉

移至低能量電池處，Ren 等人 (2019)提出了一個使用雙橋式直流/直流轉換器 (Dual-bridge DC/DC converter)的簡單電池組平衡結構，如圖 2-9 所示。Ren 等人 (2019)以各類連結方式之鋰電池組中，發現使用本結構平衡之電池組其收斂時間小於 2 秒，且每顆電池之 SoC 及 SoH 差距不大於 1%，故本電池平衡方式可說明若能過有效評估單顆電池，則通過電池組平衡手段可應用於多顆電池之電池組中，符合本研究目的。並且通過電池組系統中每個電池單元的能量平衡、達到平均充電及平均放電目的，避免了會大幅損害電池使用壽命之過充電現象及過放電現象的發生頻率，因而有效延長了電池組使用壽命。

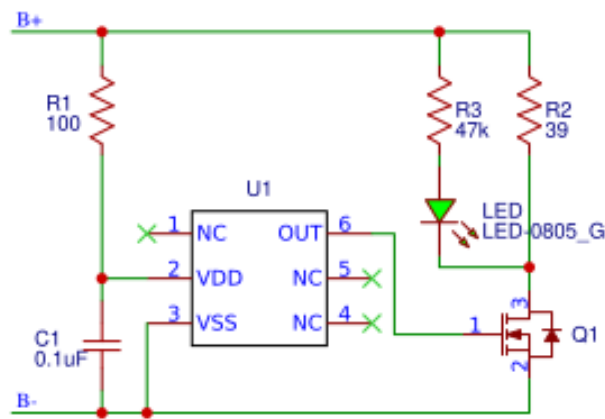


圖 2-8 宏泰科技 HY2213B 芯片架構圖

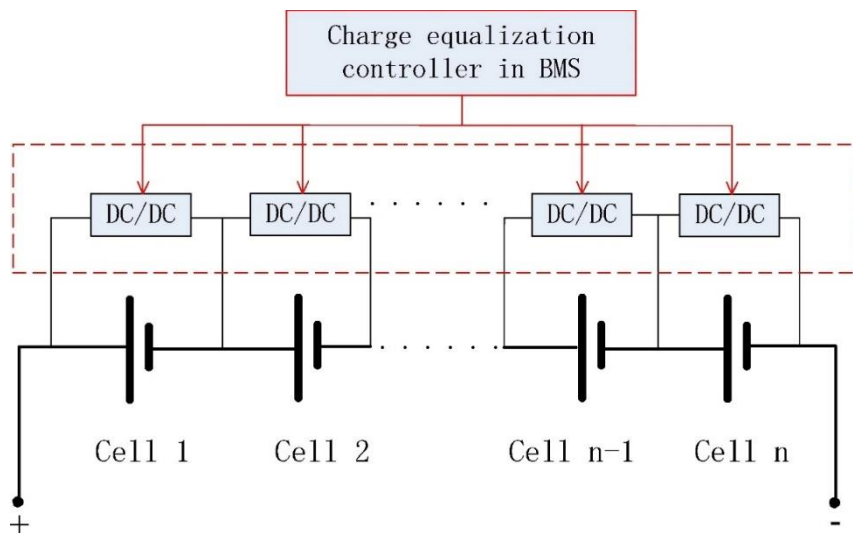


圖 2-9 運用 DC/DC converter 進行主動平衡之電池組架構圖 (Ren et al., 2019)

第三章 研究方法



3.1 協同估計演算法系統架構

在電池狀態的估計中，電量狀態 SoC 的估測是最為關鍵之一部份，準確估測 SoC 對於電池狀態管控以及最佳化使用效能和壽命都有著顯著的貢獻。然而 SoC 並沒有辦法通過直接量測獲取資訊，而需要以數學公式描述電池特性以進行量化。常見電量估測方法有直接量測法(Direct measure methods)、簿記法(Book-keeping methods)、適應系統法(Adaptive systems methods)等。直接量測法通過電池某些物理特性與電量之間關係去直接量測以獲取 SoC，常見的直接量測法中有開路電壓法(Open circuit voltage, OCV)，阻抗法及電解質濃度法等等。簿記法以記錄電池的充放電電流作為輸入，搭配電池本身之充放電效率及自放電特性進行 SoC 估計，庫倫積分法(Coulomb counting)便是此類典型。適應系統法則是應近年人工智能和演算法興起而流行的方法，考慮到電池本身是個非線性且受外部因素影響甚大的系統，適應系統法將其系統化，通過探討多目標函數的系統解來最佳化估計電池 SoC，常見的比如神經網路、模糊邏輯法(Fuzzy logical)、支持向量機(Support vector machine, SVM)和卡曼濾波器(Kalman filter, KF)等。

本研究則是採用混合方法(Hybrid methods)，其核心思想是以結合複數種估測方法的優勢以達到較原本方法更為優秀的估測效果，考慮到卡曼濾波器對多參數的高度兼容性，故本研究選用 EMF 曲線搭配卡曼濾波器及戴維寧等效模型之方法進行電池模型的建模。為此我等將通過實驗擬合出電池之 EMF 特性曲線，並通過曲線擬合(Curving fitting)將各溫度狀況及各 SoC 下的模型參數進行量化，最後進行卡曼濾波器模型的建置。同時為達成協同估測，於 SoC 之卡曼濾波器遞迴運算中我們需即時計算和更新溫度狀態 SoT 及健康狀態 SoH。溫度狀態 SoT 通過最小二乘法(Recursive least squares, RLS)估測系統電路參數後架構 EIS 電路模型，通過相位移(Phase change)和曲線擬合估測電池 SoT。健康狀態 SoH 同樣通過 RLS

方法估測電池開路電壓(Open circuit voltage, OCV)，通過 SoC-OCV 曲線及容量估測以估測當前健康狀態 SoH。

圖 3-1 為整體系統架構圖，主要可分為三大部分，左側為電池參數辨識區塊，即為了推估二階 RC 戴維寧等效電路模型之相關實驗及參數擬合，主要為電池開路電壓特性辨識、歐姆特性及極化特性辨識及相關參數擬合工作，具體方法將於下文 3.3 節中詳述。中間為協同估計演算法主體之 SoC 辨識，主要工作為使用更新之參數及測量值通過卡曼濾波器算法進行電量狀態 SoC 之估測，具體方法將於下文 3.4 節詳述。右側為協同估計演算法輔助之 SoT 辨識以及 SoH 辨識區塊，前者以 EIS 模型之相位移為參照評估電池溫度，後者以開路電壓特性及容量估算方法估測健康狀態，並且二者皆以 RLS 算法最小化誤差，具體方法將於下文 3.5 節詳述。

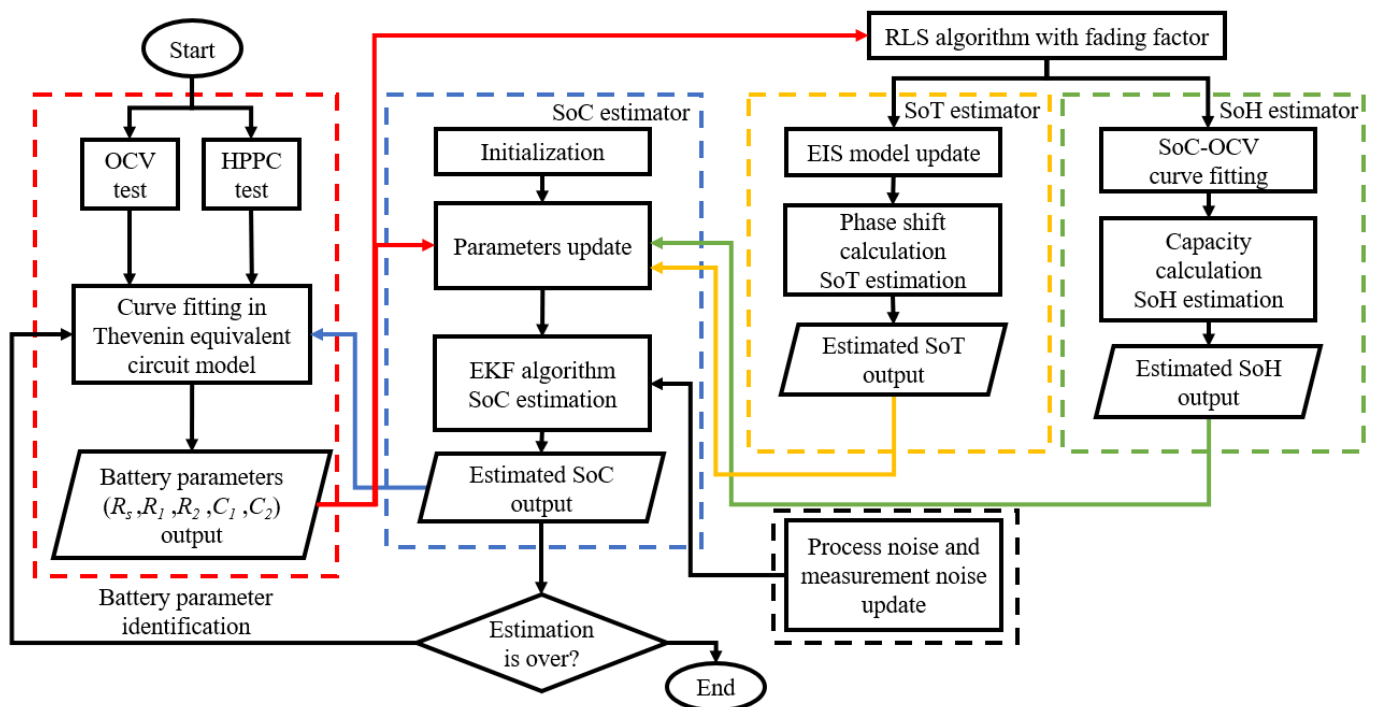


圖 3-1 協同估計演算法系統架構圖，由電池參數辨識區塊、SoC 辨識區塊、SoT 辨識區塊以及 SoH 辨識區塊組成，協同估計演算法將持續實時更新遞迴直至估測結束，於本研究中即負載工況停止，詳細設置可見 3.6 節



3.2 實驗儀器

本實驗主要內容為對電池模組進行以程式設定之充放電行為模擬電池工作狀況以進行後續分析。由於硬體條件限制，吾人以可編程型直流電子負載與可調式直流電源供應器組合，用以代替完整的充放電機儀器。而交流阻抗測試及電池檢測則使用 HIOKI 廠商提供之 BT4560 儀器。整體實驗將在定溫烘箱中進行，使用紅外線測溫傳感器量測電池表面溫度同時使用溫溼度傳感器獲取環境溫度數據。電路的保護和開關設計上使用光耦隔離器進行，而整體電路控制和資料傳輸則使用 Arduino 微控制器與 LabVIEW 程式合作進行，最後於 MATLAB/Simulink 環境中進行數據處理及電池模型架設，整體實驗平台架構圖如圖 3-2 所示。

本研究使用電池模組為 ICR18650-K，其規格如表 3-1 所述，其額定容量為 2600 mAh，額定電壓為 3.7 V，上下限電壓分別為 4.2 V 及 3.0 V，安全操作溫度在 0 至 45 攝氏度間，電池模組未使用時保存於室溫環境之密封容器中。本研究操作中操作之最低溫度至最高溫度分別是一 5 攝氏度及 45 攝氏度，並未大幅超出其安全操作溫度。使用之電子負載為 Chroma 63640-150-60，其規格如表 3-2 所述，其最大工作電壓為 150 V，最大工作電流為 60 A，最大功率為 400 W。電壓觀測精度和電流觀測精度分別為 0.05% 及 0.1% 流量精度(Full scale, F.S.)。其他儀器與品項名如表 3-3 所述，其大致可分成組合成電池實驗的電子負載 (Chroma 63640)、電源供應器 (NPS306W) 及電池檢測儀 (HIOKI BT4560)，控制溫度之對流烘箱 (EYELA WFO-400) 及低溫培養箱 (Sanyo MIR-153)，用於電路控制之隔離元件與微控制器，進行資料分析與模擬之電腦軟體等。

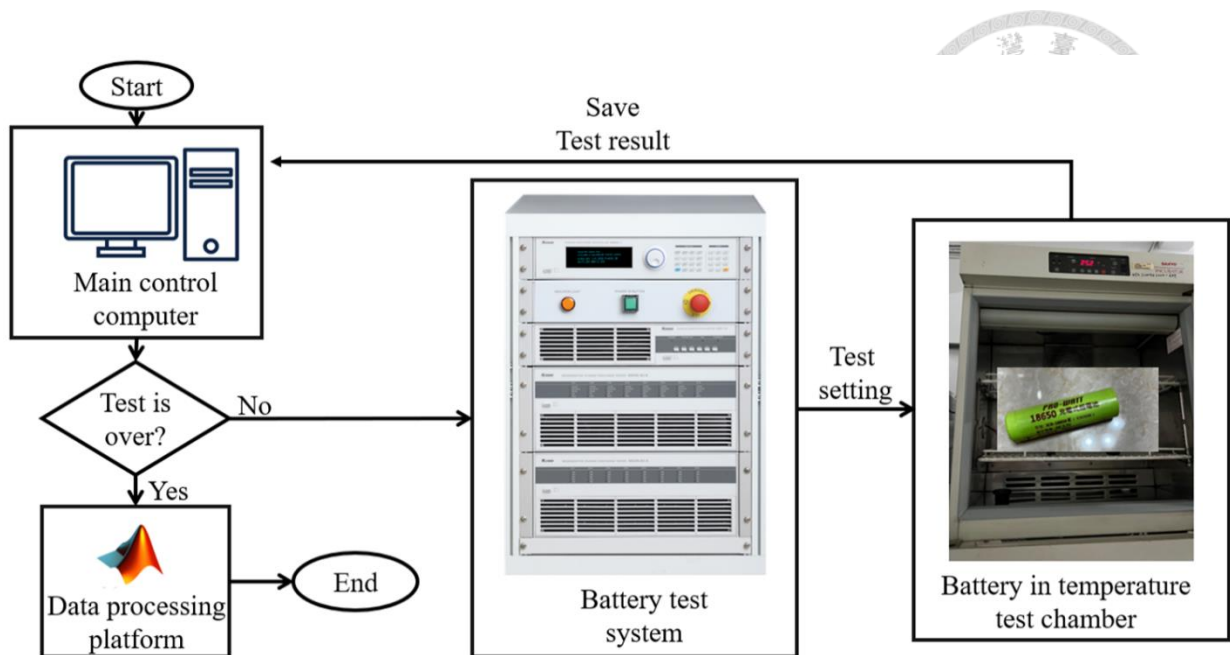


圖 3-2 實驗平台架構圖

Note: 實驗結束條件隨設定工況及實驗設置不同而相異，如 3-3 節電壓平均法實

驗條件為充電至 100% SoC 或放電至 0% SoC

表 3-1 電池模組 ICR-18650K 規格表

ICR 18650K	
電池模組	
額定容量	2600 mAh
標定電壓	3.7 V
上限電壓	4.2 V
截止電壓	3.0 V
截止電流	0.13 A
工作溫度	Charge : 0 °C ~ 45 °C Discharge : - 20 °C ~ 60 °C

表 3-2 電子負載 Chroma 63640 規格表

電池模組		Chroma 63640-150-60
		
最大電壓	150 V	
最大電流	60 A	
最大功率	400 W	
電壓精度	0.05% F.S.	
電流精度	0.1% F.S.	
功率精度	0.1% F.S.	
最大頻率	50 kHz	

表 3-3 實驗儀器及品項名

實驗儀器	品項名
電池模組	ICR-18650K
可編直流電子負載	Chroma 63640-150-60
可調式直流電源供應器	NPS306W
電池阻抗檢測器	HIOKI BT4560
紅外線測溫傳感器	GY-906
隔離器	TLP-250
微控制器	Arduino mega2560P
微控制器單晶片元件	Node-MCU
低溫培養箱	Sanyo MIR-153
對流烘箱	EYELA WFO-400
記錄軟體	LabVIEW 2023Q4
資料處理軟體	MATLAB R2023b



3.3 系統參數辨識

系統參數辨識之目的是為了瞭解電池特性並估算戴維寧等效電路模型的電路參數，這一區塊主要分成三個部分，第一部分為建立不同溫度下電池開路電壓與 SoC 之關係，即 EMF 曲線。溫度部分考慮到本電池模組之充電工作溫度限制，本實驗選擇測定 -5 至 45 攝氏度之狀態。建立 EMF 曲線的方法主要有電壓休息法與電壓平均法，電壓休息法原理是在不同 SoC 下透過對電池進行脈衝充電或放電接著休息一段時間，待電池電壓穩定後，即為當下 SoC 的開路電壓值；而電壓平均法是對電池使用相同電流進行完整充放電過程，接著將完整充放電過程所記錄的電池端電壓取平均值。

考慮到相較電壓休息法需注意脈衝電流大小及休息時間長短之影響，電壓平均法僅須注意充放電電流之大小，故我等選擇使用電壓平均法進行 EMF 曲線之建立，大致步驟如圖 3-3 所示。電壓平均法之核心理念是在假設電池內阻不變前提下完成一次完整充放電，將同一 SoC 對應的充電電壓與放電電壓取平均得出開路電壓，如式(10)-式(12)所示。其中， V_{chg} 為充電時之電池端電壓； V_{dsg} 為放電時之電池端電壓； V_R 為歐姆電阻之端電壓； V_p 為多組並聯 RC 電路代表之極化端電壓， V_{OC} 為電池開路電壓。而電壓平均法之一大關鍵便是充放電電流的選定，其電流越大則實驗結果誤差也會增大，我們參考 Bergveld 等人 (2002) 所著文獻，選擇使用 0.1 C-rate 之電流進行實驗，於本研究之電池模組 ICR18650-k 為例即為 0.26 A。

$$V_{chg} = V_{OCV} + V_R + V_p \quad (10)$$

$$V_{dsg} = V_{OCV} - V_R - V_p \quad (11)$$

$$V_{OC} = \frac{V_{chg} + V_{dsg}}{2} \quad (12)$$

第二部分為實驗求得不同溫度下本電池模組之等效電路之電路參數對 SoC 曲線，等效電路方面在考慮計算負擔、模型契合度、準確度增長及避免過擬合等因素，選擇了二階 RC 戴維寧等效電路模型，並使用脈衝電流測試法 (Hybrid pulse power characterization, HPPC) 搭配 MATLAB/Simulink 來建立相同實驗環境與建構等效電路模型，其中考慮到電子負載輸出電流與精度之關聯性，將 SoC 間隔定為 3.85%，其實驗步驟大致如圖 3-4 所示，實驗主體由不同 SoC 狀況下之脈衝充電及脈衝放電組成。HPPC 測試原理為將 HPPC 測試的脈衝放電與脈衝充電轉為電流信號再量測電池輸出的電壓信號，接著由參數估測使實際值與模擬值兩者的容許偏差低於閾值即可得到不同 SoC 下的歐姆電阻、極化電阻與極化電容，其大致圖形如圖 3-5 所示。

第三部分為通過電壓平均法及 HPPC 測試之數據完成電池之電路參數辨識，如圖 3-6 所示，構建出二階 RC 戴維寧等效電路後便可使用脈衝電流充放電測試的數據進行電路參數辨識，主要參數辨識之目標為歐姆內阻 R_S 、極化電阻 R_1 、 R_2 及極化電容 C_1 、 C_2 ，其端電壓 V_t 可以式(13)表示。而歐姆內阻 R_S 可通過脈衝電流測試計算，其電流發生瞬間所產生之電壓差可視為完全由歐姆內阻產生，如式(14)及圖 3-5 所示。而通過 Matlab 之 cftool (Curve fitting toolbox) 工具箱進行 R_1 、 R_2 、 τ_1 、 τ_2 之參數擬合，再通過電容定義式求得極化電容 C_1 、 C_2 之值，如式(15)及式(16)所示。

$$V_t = V_{OC} - I_L R_S - I_L R_1 (1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_1}}) - I_L R_2 (1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_2}}) \quad (13)$$

$$R_S = (\frac{V_a - V_b}{I} + \frac{V_e - V_d}{I})/2 \quad (14)$$

$$C_1 = \frac{\tau_1}{R_1} \quad (15)$$

$$C_2 = \frac{\tau_2}{R_2} \quad (16)$$

但須知若未為極化電阻代表的兩個 RC 並聯電路進行限制，則其電路參數辨識結果將具有不穩定性且可能發生過擬合 (Overfitting) 現象導致模型缺少普遍

性，故需定義此二 RC 並聯電路。Wang 等人 (2019)之研究探討了鋰電池各個參數的邊界範圍，而通過 Ramadan 等人的研究可看出電池之極化反應可拆分為短態響應和長態響應兩類，故吾人可將兩個 RC 並聯電路之參數 R_1 、 C_1 、 R_2 、 C_2 分別定義為短態極化電阻 R_{TS} ，短態極化電容 C_{TS} ，長態極化電阻 R_{TL} 及長態極化電容 C_{TL} ，如圖 3-7 所示。

但於此同時便也需要定義短態和長態響應分別的時間段，通過參考相關文獻 (Xie, 2023)吾人以 5%為區間進行劃分，並且假設長態響應所需時間 T_{TL} 較短態響應所需時間 T_{TS} 為長，且兩者之和為 100%，即 $T_{TS} : T_{TL}$ 為 (5%-45%) : (95%-55%)，並以此定義進行電路參數之辨識。並且考慮到整體曲線擬合的穩定性，極化電容和極化電阻之邊界值皆須進行定義，吾人參考 Wang 等人(2019)之研究，將短態極化電容標準值訂為 950 F，長態極化電容標準值則為 2000 F。

整體電路參數辨識實驗中，電壓平均法實驗及 HPPC 測試實驗我們皆進行了三次，並確認全程電池健康度在 95%以上，隨後計算平均值以獲取實驗結果，詳細實驗數據可見附錄表 a-1 至表 a-6。

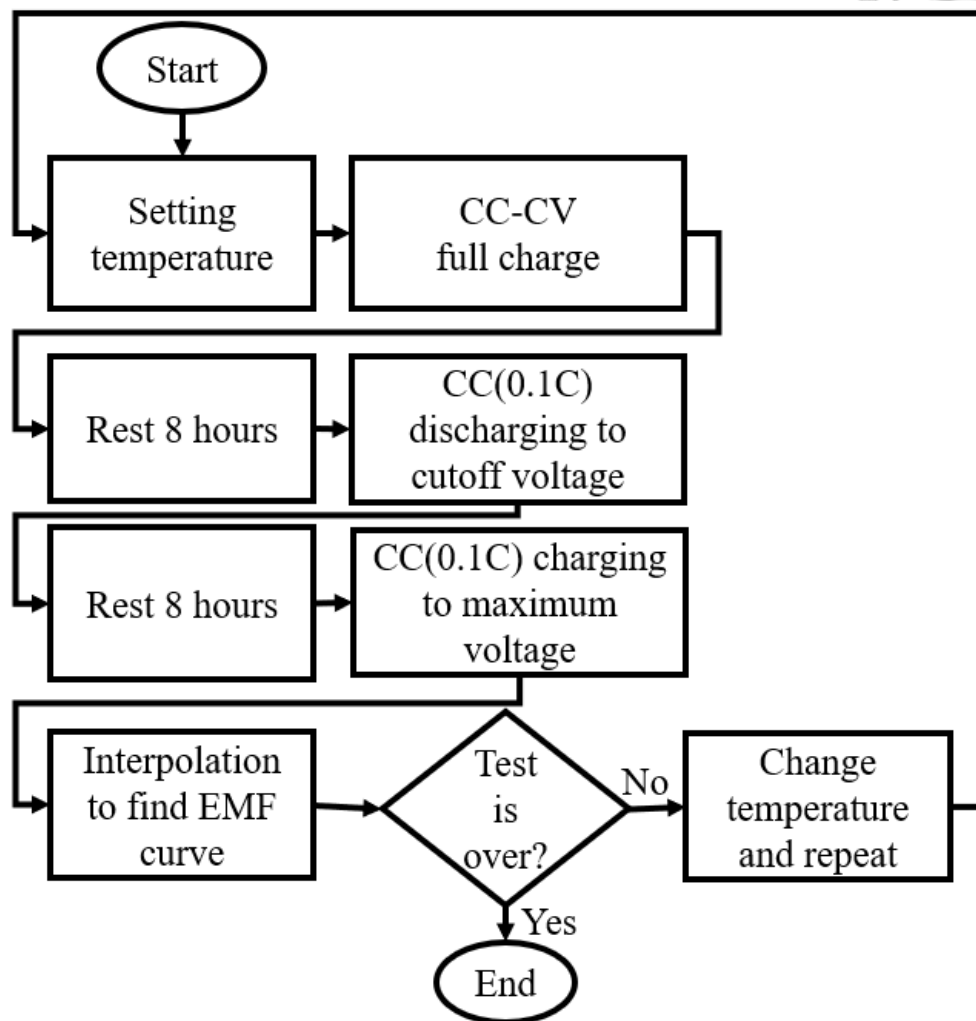


圖 3-3 電壓平均法實驗流程圖

Note: 設定電流為 $0.26\text{ A} = 0.1\text{ C-rate}$ ，溫度為 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$

$35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，每組溫度進行三輪實驗後平均得出結果，當溫度範圍遍歷完成後

結束實驗

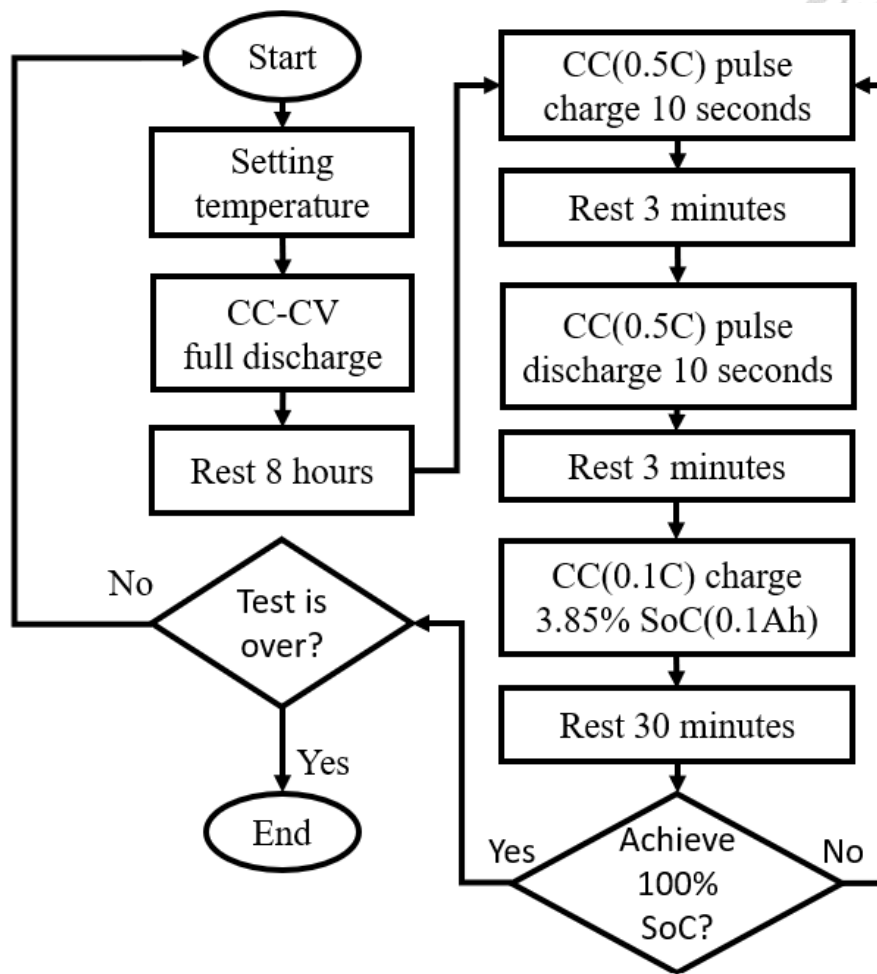


圖 3-4 HPPC 測試實驗流程圖

Note: 設定電流為 $0.26\text{ A} = 0.1\text{ C-rate}$ ，溫度為 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$

$35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，每組溫度進行三輪實驗後平均得出結果，當溫度範圍遍歷完成後

結束實驗

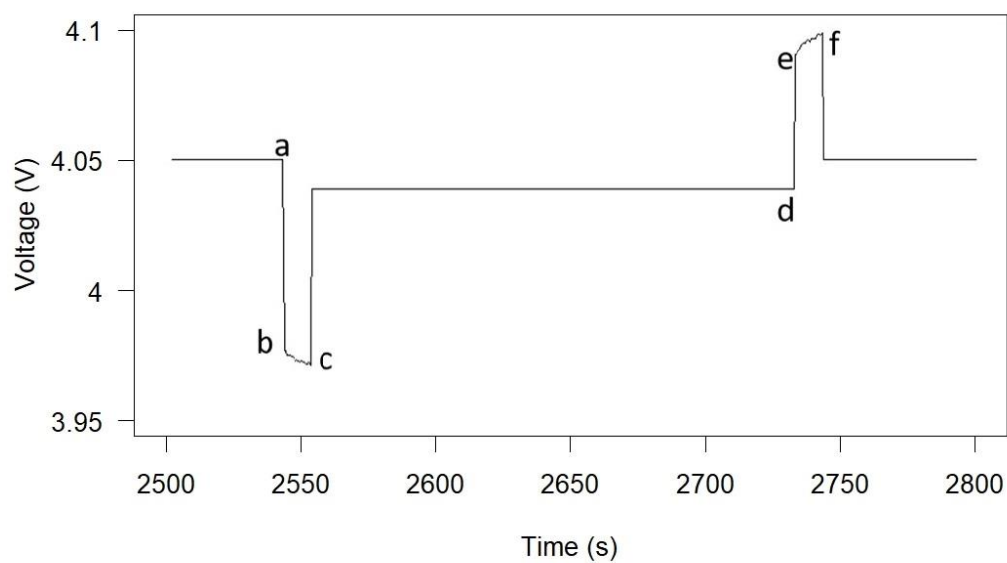


圖 3-5 HPPC 測試電壓節錄圖，圖中 ab 點及 de 點間之脈衝產生瞬間電壓差為電池歐姆特性表現，bc 點及 ef 點之脈衝期間電壓差為電池極化特性表現

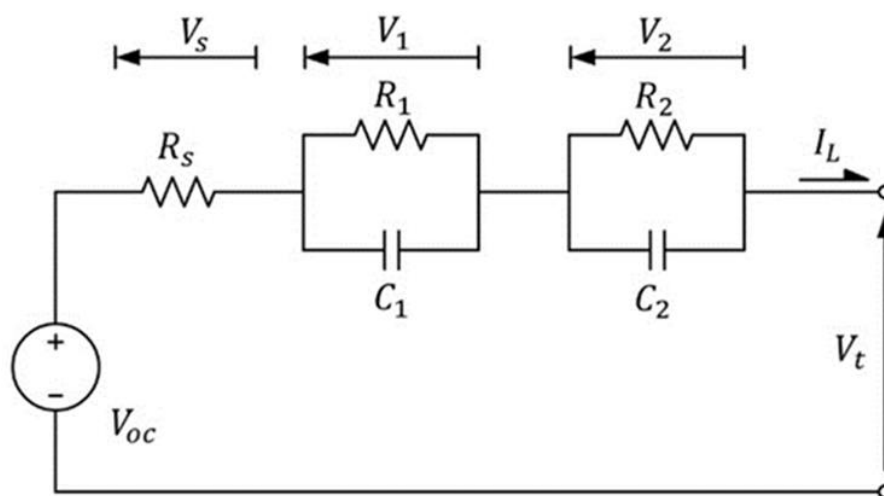


圖 3-6 二階 RC 戴維寧等效電路圖，由開路電壓 V_{oc} 、歐姆內阻 R_s 、極化內阻 R_1 和 R_2 、極化電容 C_1 和 C_2 組成

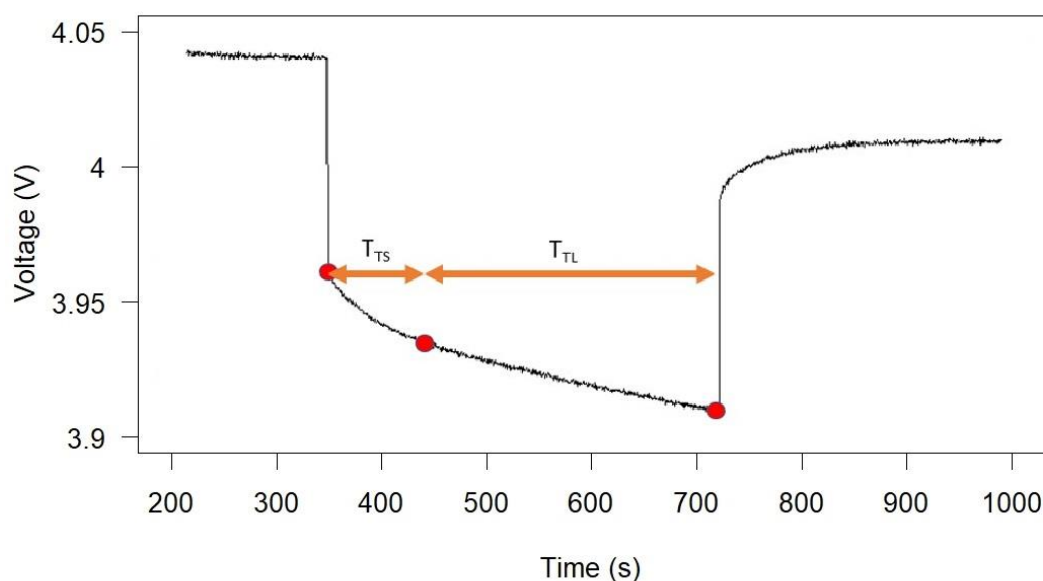


圖 3-7 短態和長態響應時間示意圖， T_{TS} 為短態極化響應時間， T_{TL} 為長態極化響應時間，二者比例限制於 $T_{TS} : T_{TL} = (5\%-45\%) : (95\%-55\%)$ 之範圍內

3.4 SoC 估算

於 SoC 估測中，吾人在 MATLAB 2023a 的 Simulink 環境下，參考模型 (Alterwl, 2022) 進行了初步電池模型的建立，其核心算法是基於擴展卡曼濾波器算法 (Extended Kalman Filter, EKF) 與二階戴維寧等效電路模型的組合，其模型大致如圖 3-8 所示。其中 Working condition input 區塊代表電池工作狀況資料輸入，Measurement noise adding 區塊為模擬觀測誤差的白雜訊生成元件，考慮到於 3.1 節介紹之電路參數評估元件，我們將正常觀測誤差定義為電壓 0.05% 標準差之白雜訊，電流則為 0.1% 標準差之白雜訊。同時將極小觀測誤差定義為電壓電流皆為 0.0001% 標準差之白雜訊，詳細設定可見 3.6 節。

圖 3-9 中 Thevenin 2-RC equivalent model 區塊所包含的是二階 RC 戴維寧等效電路模型。獲取了觀測電流 I_{obs} 數據之後，透過 3.3 節電路參數實驗中擬合完成的電路參數與電量狀態對照表求出二階 RC 電路的內部電路參數，再通過電流數據去計算出電壓的觀測值，輸出以用於下一步計算。

Extended Kalman filter block 區塊所包含的是基於擴展卡曼濾波器算法的電量狀態 SoC 預測模型，其關鍵式如式(15)-式(19)所示。透過輸入戴維寧等效電路模型區塊獲得的電壓觀測值以及經過觀測誤差白雜訊的電流觀測值，以求出關鍵的電量狀態 SoC 估計值，其內部模型如圖 3-9 所示。

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = f(\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, \mathbf{u}_{k-1}) \quad (15)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{k|k-1} = \mathbf{A}_{k-1} \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{A}_{k-1}^T + \mathbf{A}_{k-1} \quad (16)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{C}_k^T [\mathbf{C}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{C}_k^T + R_S] \quad (17)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k [\mathbf{y}_k - g(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}, \mathbf{u}_k)] \quad (18)$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{k|k} = [\mathbf{I}_L - \mathbf{K}_k \mathbf{C}_k] \mathbf{P}_{k|k-1} \quad (19)$$

圖 3-9 中左下角的三個橙色區塊代表三個二階 RC 電路所需要的轉換矩陣 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 及 $\mathbf{C}$ 。上半部份紫色區塊 State prediction 為電池參數狀態的預測，即式(15)，此處的電池參數狀態即為電量狀態和開路電壓的預測值 $\hat{\mathbf{x}} = [\text{SoC} \quad V_{oc}]^T$ ，而下半部份的紫色區塊代表共變異數矩陣 $\mathbf{P}$ 的預測，即式(16)。

隨後上半部份黃色 V_{terminal} calculation 區塊使用電量狀態與端電壓預測值去計算出端電壓，而下半部份黃色 Kalman gain calculation 區塊使用共變異數矩陣的預測值進行卡爾曼增益 (Kalman gain) 的計算，即式(17)。最後再進行狀態預測的修正以及共變異數矩陣預測的修正，即右上角的綠色 State update 區塊以及右下角的綠色 Covariance update 區塊，完成卡曼濾波器算法中的預測與修正兩步驟，即式(18)及式(19)，並輸出所估測出的電量狀態 SoC 估計值以用於後續誤差分析。

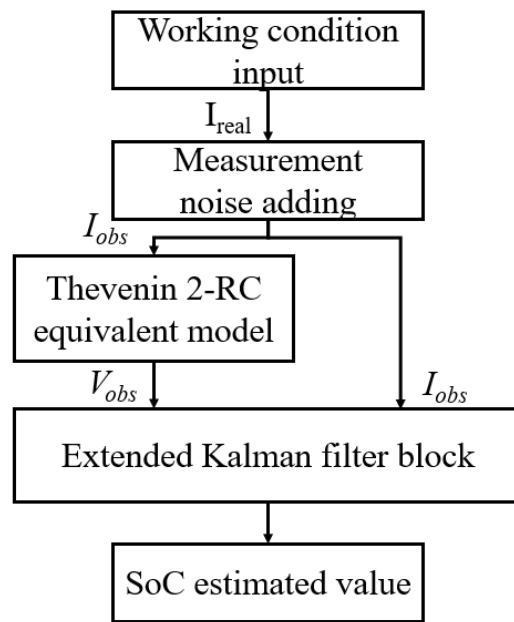


圖 3-8 SoC 估測模型圖，輸入設定工況和雜訊後進行戴維寧等效電路模型及擴展卡曼濾波器後評估 SoC 值

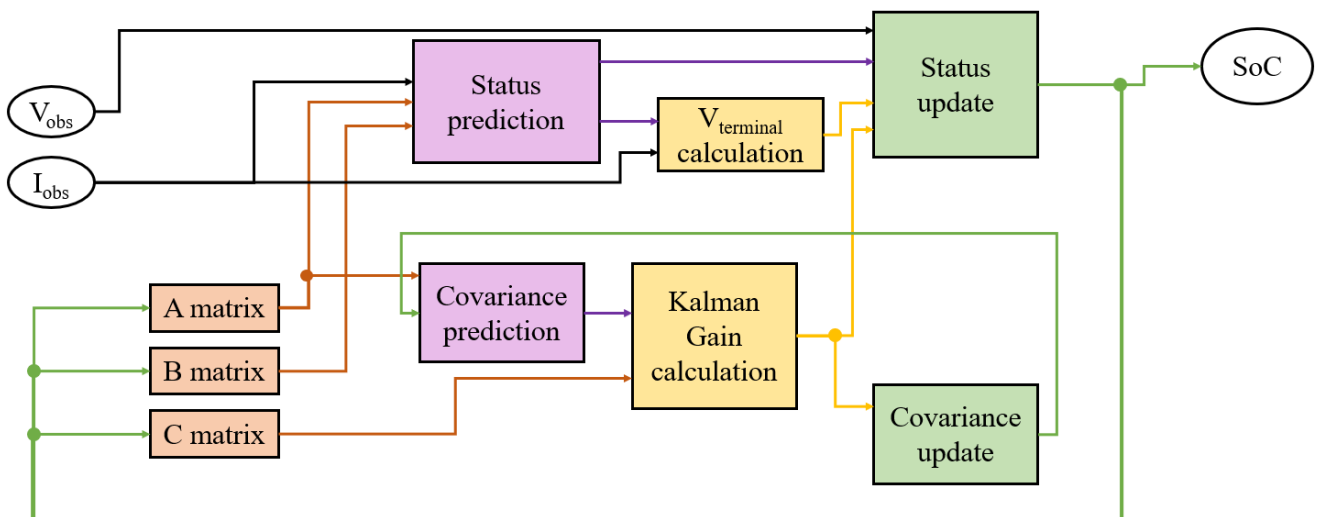


圖 3-9 擴展卡曼濾波器算法區塊內部程式結構圖



3.5 SoH & SoT 估算

當電池全新時，健康狀態 SoH 定義為 100%。隨著電池使用其容量逐漸衰退，當來到全新電池的 80% 容量時，將 SoH 定義為 0%，代表電池壽命結束。假設全新電池的容量為 C_n ，當前電池容量為 C_{aged} ，則電池 SoH 可定義為式(20)。

$$SoH = \frac{\left(\frac{C_{aged}}{C_n} - 80\%\right)}{(1 - 80\%)} \quad (20)$$

容量 C 可以通過一段時間內累積電荷與 SoC 變化的比率來計算，該比率由 SoC 變化與容量之間的關係推導而來，如式(21)所示，其中 ΔAh 是某一時間段內的累積電荷量， $SoC(t_a)$ 和 $SoC(t_b)$ 為某時刻之 SOC，可以通過對照由 3.3 節參數辨識中導出之 SOC-OCV 曲線獲取。

$$C_{aged} = \frac{\Delta Ah}{\Delta SoC} = \frac{\int_{t_a}^{t_b} I(t) dt}{SoC(t_b) - SoC(t_a)} \quad (21)$$

但是 SoC-OCV 曲線適用於長時間休息後量測，不適用於實時估測，為減小誤差影響，我們使用帶有遺忘因子的最小二乘法(Recursive least squares, RLS)進行 OCV 估測，RLS 可簡單定義為式(22)-式(26)。

$$y_{RLS_k} = x_{RLS_k}^T w_{RLS_k} \quad (22)$$

$$e_{RLS_k} = y_{RLS_k} - x_{RLS_k}^T \hat{w}_{RLS_k-1} \quad (23)$$

$$k_{RLS_k} = \frac{P_{RLS_k-1} x_{RLS_k}}{\lambda + x_{RLS_k}^T P_{RLS_k-1} x_{RLS_k}} \quad (24)$$

$$P_{RLS_k-1} = \frac{P_{RLS_k-1} - k_{RLS_k} x_{RLS_k}^T P_{RLS_k-1}}{\lambda} \quad (25)$$

$$\hat{w}_{RLS_k} = \hat{w}_{RLS_k-1} + k_{RLS_k} e_{RLS_k} \quad (26)$$

其中， y_{RLS} 是系統的輸出， x_{RLS} 是包含測量值的向量， w_{RLS} 是要估計的參數向量。 P_{RLS} 是共變異數矩陣， k_{RLS} 是更新增益， e_{RLS} 是終端電壓的預測誤差， λ 是遺忘因子，本算法中定義為 0.99。RLS 演算法需要基於參數之電池模型來應用，我們採用簡單內阻等效電路模型，因為考慮到 SoH 變化的單純性，與二階戴維寧 RC 模型相比，在模型參數較少的情況下，OCV 識別過程將更具穩固性，同時減少計算

負擔。簡單內阻等效電路模型的結構如圖 3-10 所示。終端電壓 V_t 作為系統輸出 y_k ，待識別的參數向量 w_k 則包含 V_{OC} 和歐姆電阻 R_s 。

而溫度狀態 SoT 估算，吾人選擇使用電化學阻抗頻譜法來進行電池之溫度估測，其主要原因是在於電化學頻譜分析法與戴維寧等效電路之意義十分相似。如圖 3-11， R_s 代表電解質阻抗，等效於戴維寧電路之電池內阻；而電雙層 Cdl 和離子轉移阻抗 Rct 代表極化現象，與戴維寧電路之極化內阻相似，故吾人使用前一節之參數辨識結果，同樣經由 RLS 方法最小化參數誤差後進行 SoT 估測。

電化學阻抗頻譜法評估 SoT 方式，其核心理念在於電路之阻抗為一與溫度及 SoC 強關聯的函數，尋找到與 SoC 關聯性較小的頻率段後便可通過反函數的方式將溫度狀態 SoT 逆推出來，通過對模擬電路 EIS 之分析便可建立相位移與溫度狀態 SoT 之關聯。

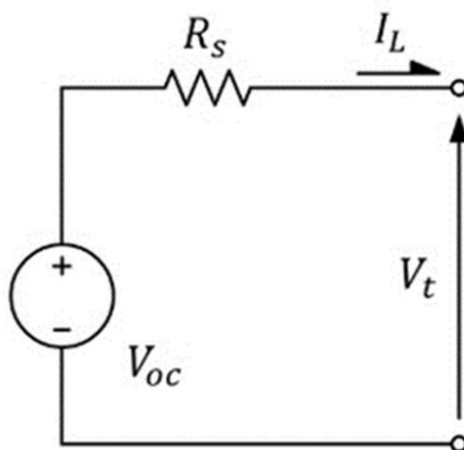


圖 3-10 簡單內阻等效電路圖

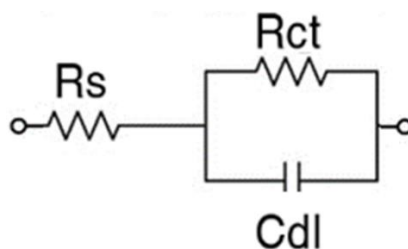


圖 3-11 EIS 方法之電化學假想電路圖



3.6 模型負載測試

為驗證本研究之電池模型之普適性，我等參考了 J. Feng 等人 (2022) 之實驗流程，將 70Ah 三元鋰離子電池為研究對象，以北京客車動態應力測試 (Beijing bus dynamic stress test, BBDST) 為設定負載，以 SoC 估測之準確度為標準，於 -5 攝氏度至 45 攝氏度進行電池模擬測試以驗證我等所提方法的有效性，25 攝氏度之 BBDST 負載狀況下之 SoC 狀況如圖 3-12 所示。

我們將在 -5、5、15、25、35、45 攝氏度下分別進行三次負載實驗，並比較包括安時法、僅使用 SoC 之 EKF 單項估測法，僅使用 SoC 之無跡卡曼濾波器 (Residual constraint fading factor Unscented Kalman filter, RCFFUKF or UKF) 單項估測法，使用 SoC+SoH 之 EKF+RLS 之雙項估測法，以及吾人所建立的使用 SoC+SoH+SoT 之 EKF+RLS 的三項協同估計演算法的 SoC 估測誤差，並由三次實驗之平均值比較各電池模型之 SoC 估測準確度。

整體負載測試架構圖大致如圖 3-13 所示，通過初始化中不同初始溫度狀態之設定和負載之輸入，結合觀測雜訊定義和不同模型演算法後評估出 SoC 估算值，並與不經過雜訊和模型算法，直接由工況定義算出之參考 SoC 值做殘差計算，以 SoC 殘差作為模型準確性的判斷基準。其中為考慮觀測誤差對模型造成之影響，我們同時在正常觀測誤差狀況和極小觀測誤差狀況分別進行三次實驗，考慮到 3.2 節中使用之儀器 Chroma 電子負載 63600-80-60 之標定規格，我們將正常觀測誤差定義為電壓 0.05% 標準差之白雜訊，電流則為 0.1% 標準差之白雜訊。同時將極小觀測誤差定義為電壓電流皆為 0.0001% 標準差之白雜訊。

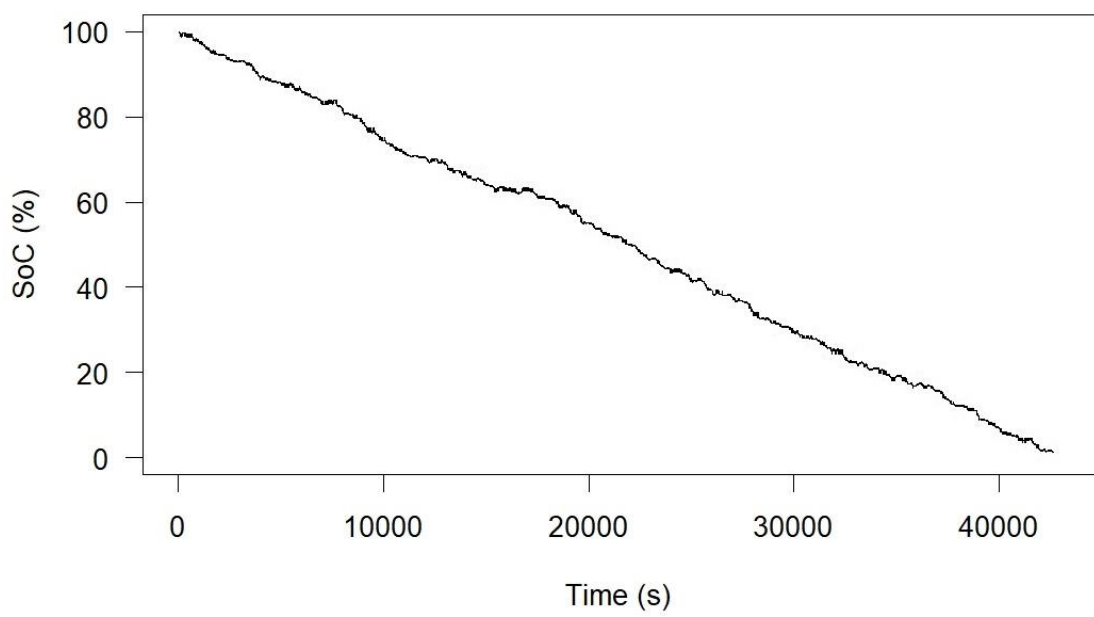


圖 3-12 25 攝氏度下 BBDST 負載測試之 SoC 總體模型工況圖

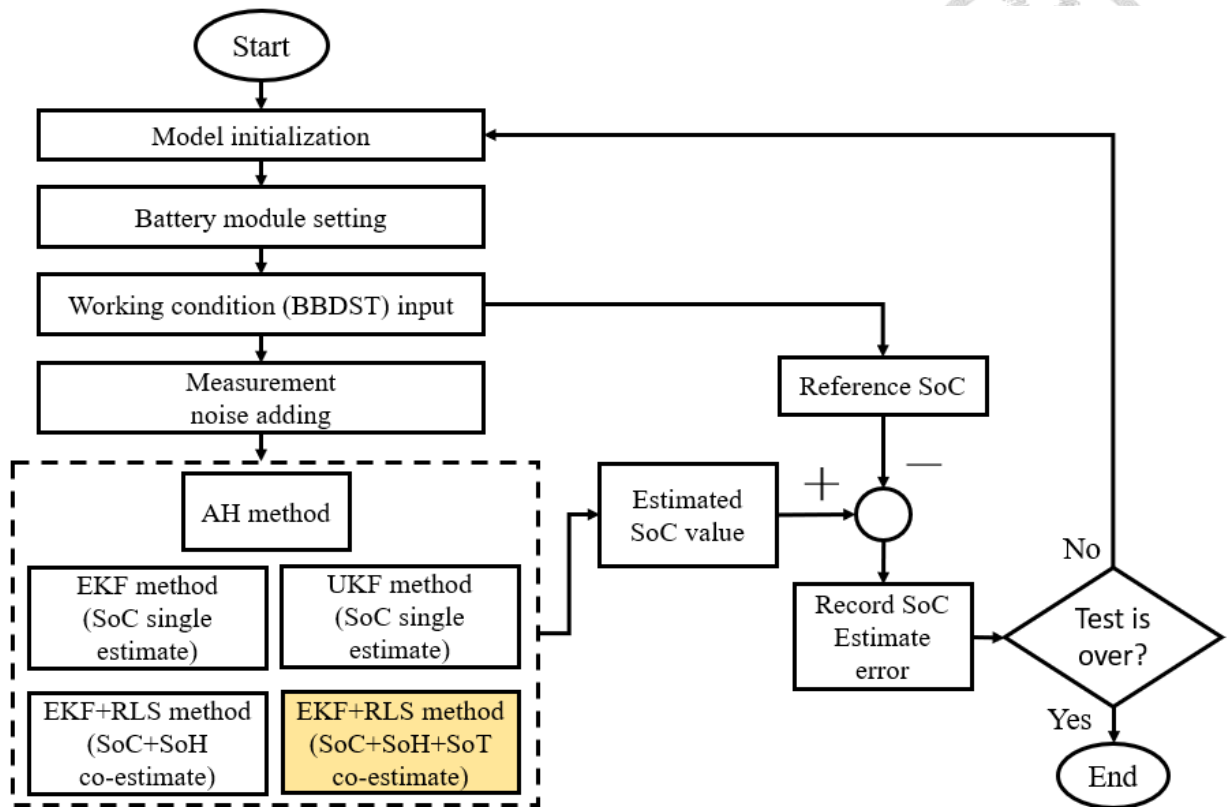


圖 3-13 模型負載測試模擬實驗之架構圖

Note: 比較安時法、單項估測之擴展卡曼濾波器及無跡卡曼濾波器、雙項估測之擴展卡曼濾波器及本研究之三項估測之擴展卡曼濾波器方法，並以 SoC 之估測準確度做為評估標準

Note: 實驗結束判斷條件之為設定之負載工況運行完成時，約 44000 s



3.7 物聯網導向之管理平台架構

於 3.3 - 3.5 節我們完成了在地 (Local)運行的協同估計演算法建構及電池模型，但在實際場域使用上使用者往往希望能夠進行遠端監控及控制，故而我們亦探討了結合物聯網(Internet of things, IoT)元件及我等電池模型，力圖開發一物聯網導向之電池管理平台。

物聯網導向之電池管理平台係藉由適當通信協定將電池狀態信息通過互聯網傳遞到雲端，並由伺服器對主機提供相關需求信息，且允許使用者通過自己設備遠端訪問使用者交互界面端口，達到遠端監控電池模組工作狀況之功能，其系統架構圖如圖 3-14 所示。

圖 3-14 中，我們以微控制器單晶片元件(Micro controller unit, MCU)為整體電池管理平台系統中轉核心，通過電路控制完成對電池模組的電池操作工況控制、電池平衡管控、電池安全保護及電池資料擷取，並將所擷取到之有效情報，比如環境溫度、觀測電流、觀測電壓等數據通過互聯網傳輸至主控制電腦端。

主控制電腦端接收到所擷取到之電池數據後，以此為基礎完成電池模型之狀態更新，完成電池狀態估測後，將當前電池情報紀錄至雲端，如 SoC、SoH、SoT 及運行狀態等等。而使用者則可遠端訪問使用者交互界面查看電池資訊，完成遠端監控功能。同時主控制電腦端亦通過互聯網通訊協定將指定操作工況命令傳輸至微控制器單晶片元件端，使其完成具體的電池操作工況控制、電池平衡管控及電池安全保護等工作。

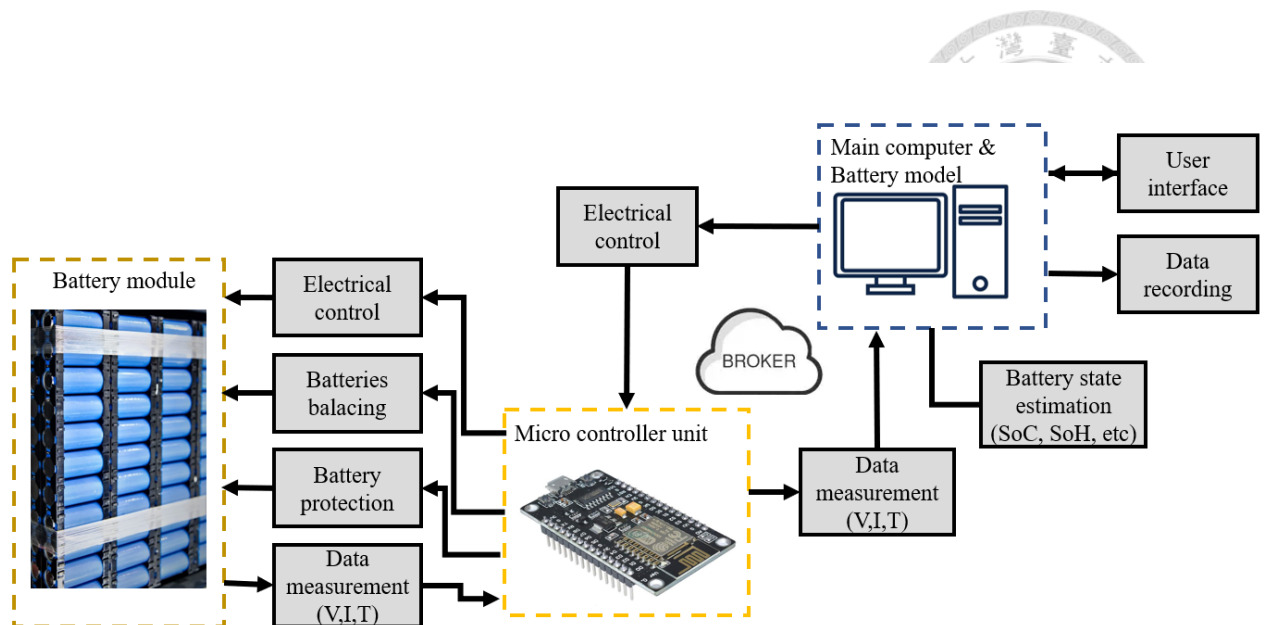


圖 3-14 物聯網導向之電池管理平台架構圖

3.8 小型電池組之電池管理平台測試

吾人已於前文 3.3 至 3.5 節完成了針對單顆電池單元的協同估計演算法推導，並結合 2.5 節討論之電池組平衡技術完成了集總電池模型之建構，並且於 3.6 節之負載測試中驗證了本研究之電池模型準確性相對使用其他算法的模型之比較。而為進一步驗證本研究之電池模型應用於電池組之適用性，以及於前文 3.7 節中討論的物聯網導向電池管理平台架構之可行性，本研究將結合小型電池組及電池管理平台架構進行電池狀態估測。整體實驗架構圖如圖 3-15 所示，整體實驗皆於室溫下進行。由主控制電腦端遠端通過 MQTT (Message queuing telemetry transport, MQTT)通訊協定對微控制器單晶片元件發送操作工況指令，再由微控制器單晶片元件端向電池測試平台輸入操作工況。針對小型電池組進行 3.3 節所討論之電池特性相關測試，即電壓平均法和脈衝電流測試法，以及 3.6 節所討論之負載測試，並通過 MQTT 協定實時將觀測數據傳回主控制電腦端進行電池模型之參數推估及數據紀錄。

本實驗所使用之小型電池組分別為兩顆 ICR-18650K 電池串聯組別及兩顆 ICR-18650 電池並聯組別，其電池健康度通過完整之 CC-CV 充放電流程進行容量

測試後與標稱容量之比值進行量測，定義式如式(20)。測量後其電池健康度分別為兩顆串聯組別之 97.18% SoH 及 97.12% SoH，兩顆並聯組別之 96.97% SoH 及 97.03% SoH，如表 3-4 所示。所使用之微控制器單晶片元件為 Node-MCU，其規格如表 3-5 所示。與電池組端通過 D-Sub 端口連結至電池測試平台之操作端口進行電池操作工況控制及電池數據擷取工作。與主控制電腦端則通過 MQTT 通訊協定進行數據傳輸，使用之傳輸伺服器為 HiveMQ，通訊頻率設定為 1 Hz。

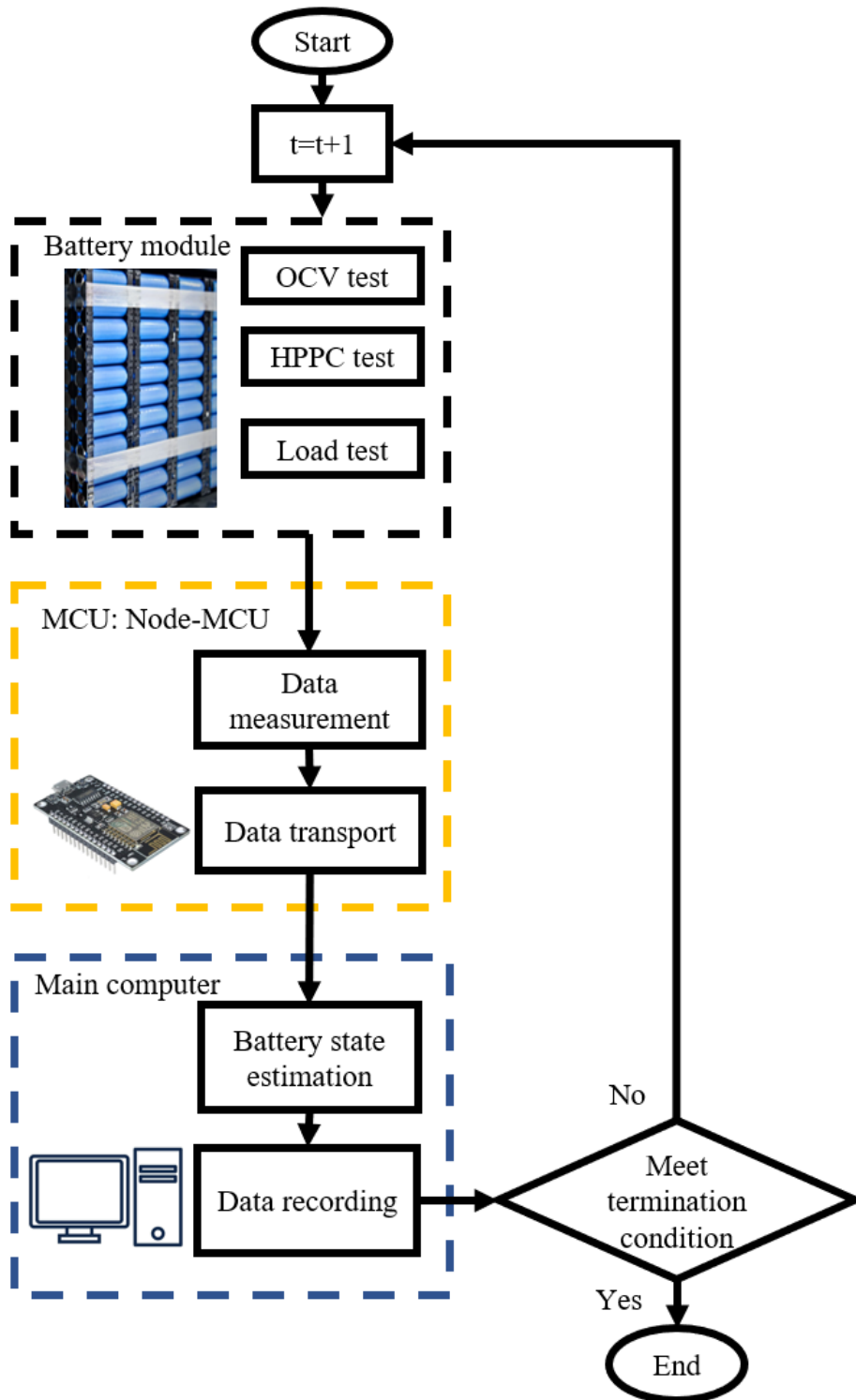


圖 3-15 小型電池組管理平台架構圖

Note: Termination condition 根據電池實驗不同而相異，請參照 3.3 節及 3.6 節

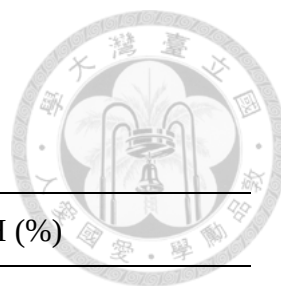
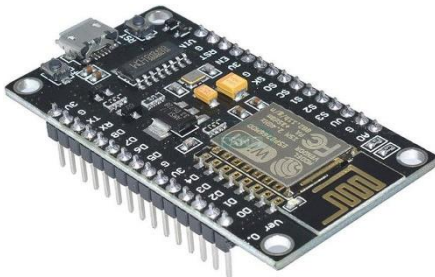


表 3-4 小型電池組電池健康度資訊表

電池編號		SoH (%)
兩顆 ICR-18650K	(a)	97.18%
串聯組	(b)	97.12%
兩顆 ICR-18650K	(c)	96.97%
並聯組	(d)	97.03%

表 3-5 微控制器單晶片元件 Node-MCU 規格表

Node-MCU Lua V3	
開發版品項名	
單晶片品項名	ESP8266
操作電壓	3.3 V
快閃記憶體 (Flash memory)	4 MB
靜態記憶體 (SRAM)	64 KB
時脈速率 (Clock speed)	80 MHz

第四章 實驗結果



4.1 歐姆內阻參數辨識結果

本研究中通過實驗完成 $-5, 5, 15, 25, 35, 40, 45$ 攝氏度環境下之二階 RC 戴維寧等效電路之電路參數辨識，流程可參考 3.3-3.5 節，詳細實驗紀錄可參考附錄表 a-2 至 a-6，相關結果討論茲分述如下。

由圖 4-1 可知，電池歐姆內阻 R_s 始終落在 0.03 Ohm 至 0.07 Ohm 之間，使用皮爾森積差相關性分析方法 (Pearson Correlation) 對溫度及電池歐姆內阻進行相關性分析，其相關係數落在 0.65 ，絕對值小於 0.7 。所以，電池歐姆內阻並未呈現與溫度狀況之強相關性。

但電池之效能於低溫狀況將大幅受影響此為一確定之事實。是故，吾人判斷電池在溫度變化產生之效能差異原因並非是因電池歐姆特性造成，其主要來源於極化現象的運作，將於 4.2-4.3 節將進行相關討論。

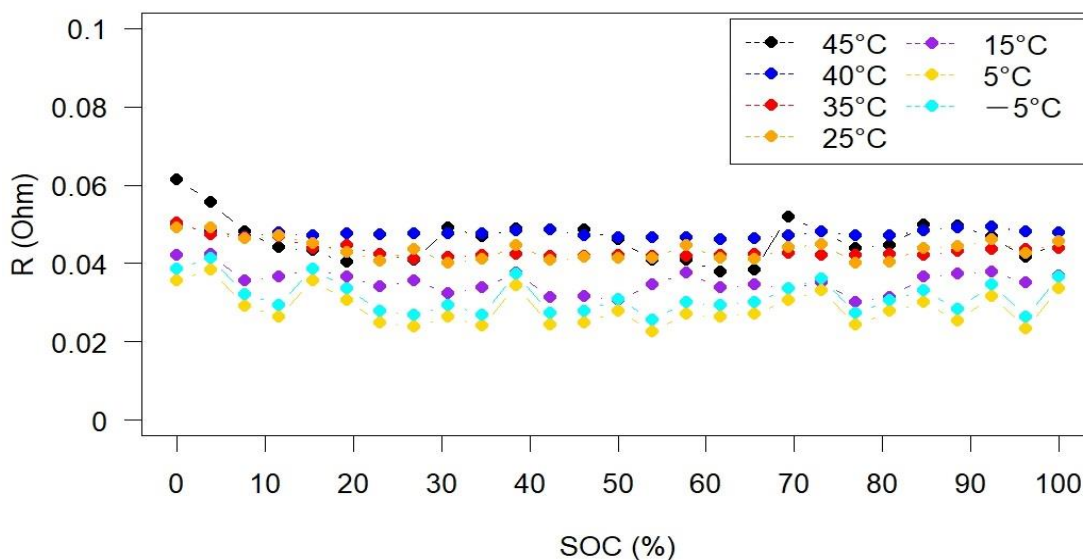


圖 4-1 歐姆內阻 R_s 參數辨識結果圖，可見圖中歐姆內阻與溫度相關性甚小，可見於 -5 至 45 攝氏度之間歐姆內阻並非影響電池效能之關鍵參數



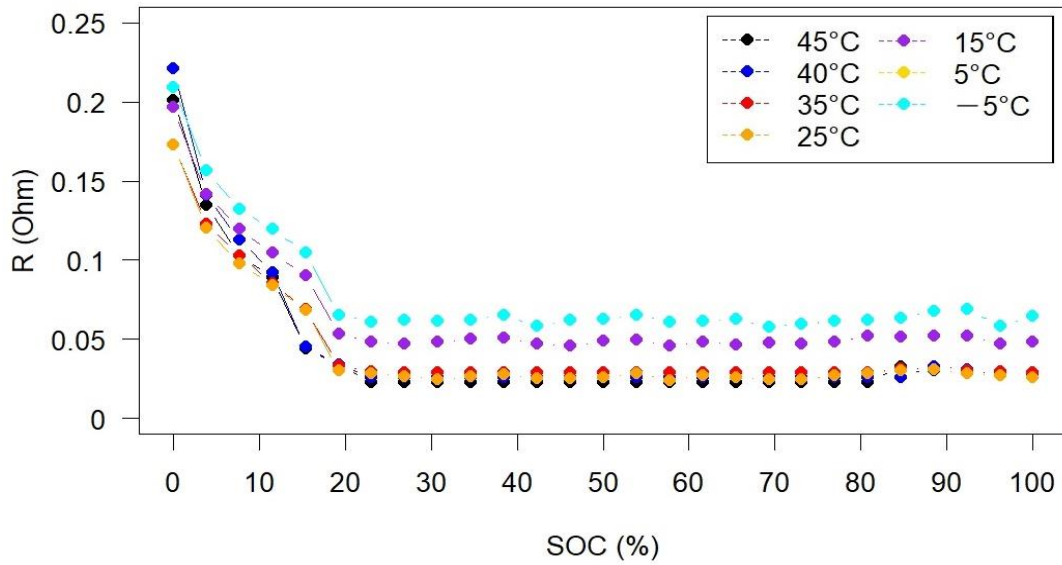
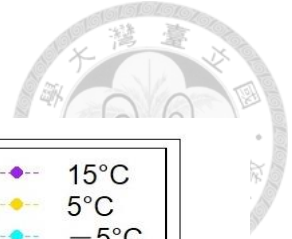
4.2 電路極化內阻辨識結果

二階戴維寧中電路模型中兩個 RC 並聯電路分別代表極化反應的短態響應和長態響應，由圖 4-2 可看出，當電池溫度於 45 至 25 攝氏度時，無論短態極化內阻 R_{TS} 還是長態極化內阻 R_{TL} 皆無明顯變化。然而，當溫度降低至 15 攝氏度時，不管是短態極化內阻 R_{TS} ，還是長態極化內阻 R_{TL} 都有明顯上升趨勢，並且隨著溫度持續降低其上升幅度更為明顯。由於電池之極化內阻反應的是在電池極化時離子在電解質中的移動速度，電阻的升高意味著離子移動速度的下降，可由此看出當溫度低於 15 攝氏度時電池的極化反應受到了相當程度的影響，離子移動速度明顯下降導致極化反應受阻，進而影響了電池之容量效能。

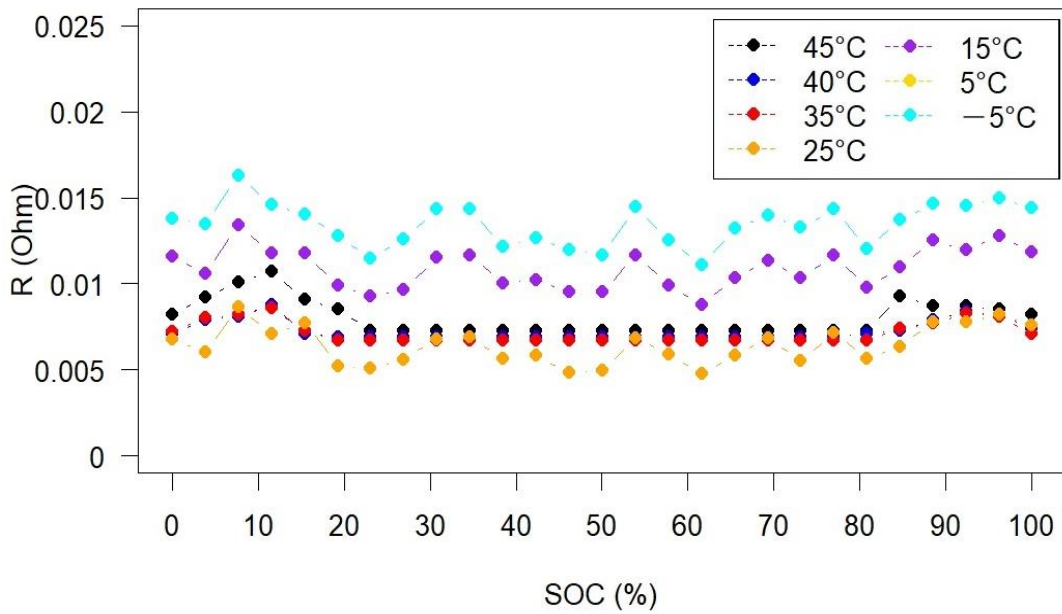
而同樣於圖 4-2 中亦可看出短態極化電阻 R_{TS} 在低電量狀況時的上升趨勢，考慮到時間常數 τ 為電阻 R 和電容 C 的乘積，如式(27)，電阻的上升代表時間常數 τ 的上升，也代表著響應時間的增長，可見低電量時短態極化反應之速度有所下降，極化反應將更多的由長態極化響應為主導。

再者，吾人亦觀察到在電池接近 0% SoC 時，短態極化電阻 R_{TS} 有著明顯的紊亂狀況發生，於其他電量狀況皆穩定的溫度梯度關係發生了改變。這是由於電池在空電量狀況的失能現象造成，故而於實際電池實驗上吾人將盡可能避開空電量狀況，將電池之使用電量保持在 5% SoC 至 95% SoC 之間。

$$\tau = R * C \quad (27)$$



(a) 短態極化電阻 R_{TS} 參數辨識結果圖，可見 15 °C 後有明顯之電阻上升趨勢，亦可見於低電量狀況將由長態極化響應主導極化反應



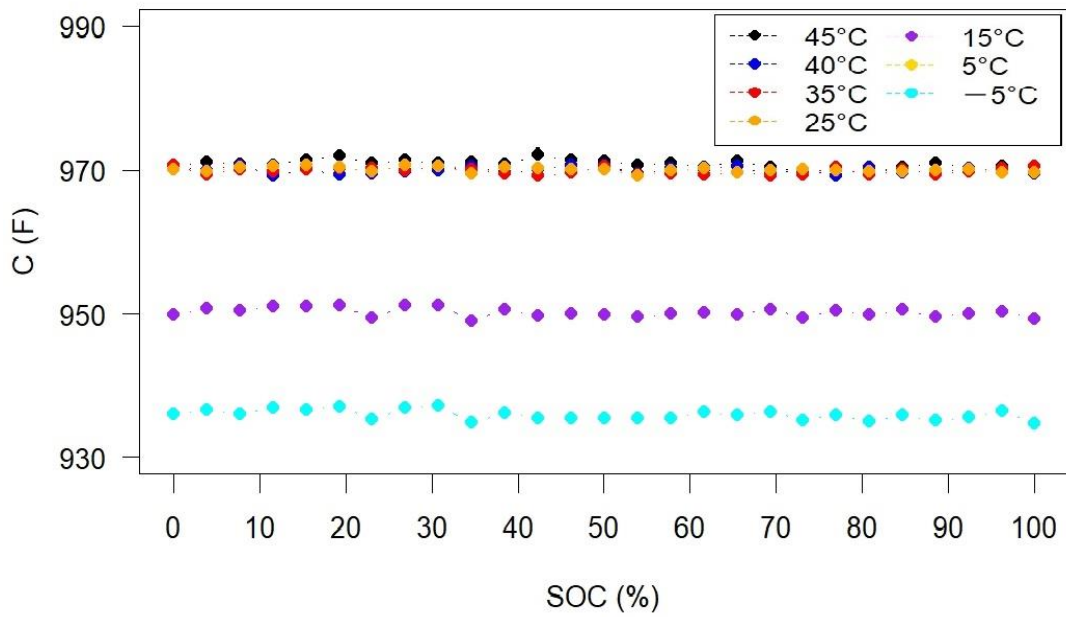
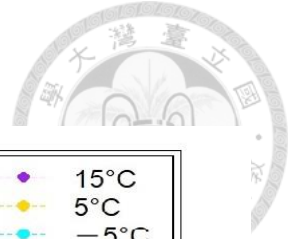
(b) 長態極化電阻 R_{TL} 參數辨識結果圖，可見 15 °C 後有明顯之電阻上升趨勢

圖 4-2 (a) 短態極化電阻 R_{TS} , (b) 長態極化電阻 R_{TL} 參數辨識結果圖

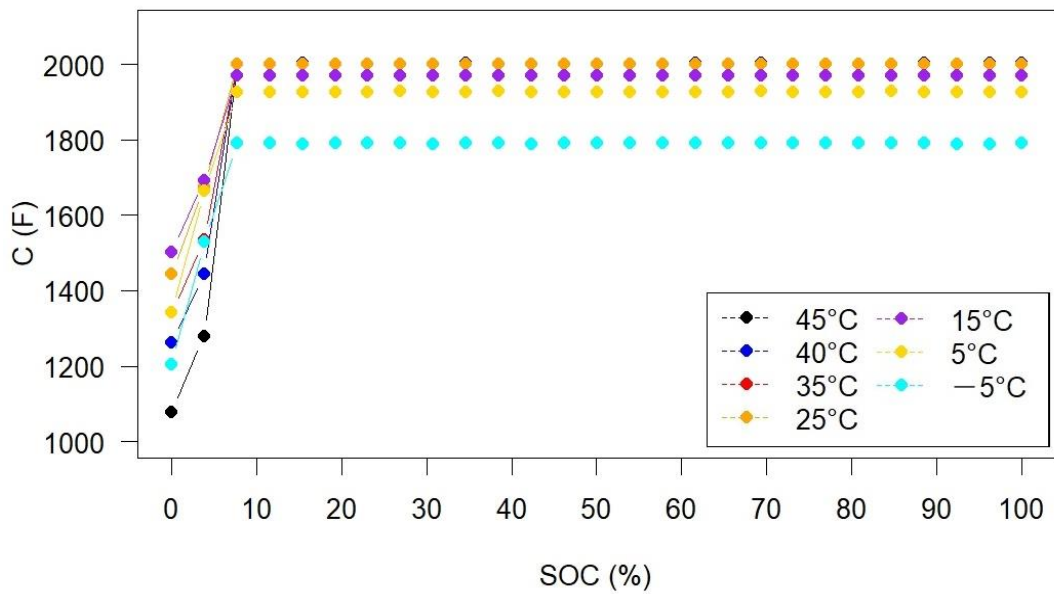


4.3 極化電容參數辨識結果

由圖 4-3 可明顯看出與 4.2 節分析相同，電池之極化反應於溫度降低至 15 攝氏度之下後產生了較大的變化，反應於極化電容之上則是呈現電容的下降趨勢。而極化電容代表的是在極化反應的兩極上化合物的生成速率，電容的下降也直接代表著電池極化反應的受阻，同樣與 4.2 節分析的一致。由此我們可做出當溫度下降至 15 攝氏度及以下時，鋰離子電池之極化反應將受到相當程度的阻礙此一結論。同時低電量時長態極化電容 C_{TL} 的下降，參考式(27)，則意味著低電量時長態極化響應的顯著程度有所上升，低電量時電池極化反應會更多的由長態極化響應為主導，此結論也與 4.2 節之推論一致。與 4.2 節類似，吾人亦觀察到在電池接近 0% SoC 時，長態極化電容 C_{TL} 有著明顯的紊亂狀況發生，於其他電量狀況皆穩定的溫度梯度關係發生了改變，這一特性於短態極化電阻 R_{TS} 亦有表現。這是由於電池在空電量狀況的失能現象造成，故而於實際電池實驗上吾人將盡可能避開空電量狀況，將電池之使用電量保持在 5% SoC 至 95% SoC 之間。



(a) 短態極化電容 C_{TS} 參數辨識結果圖，可見 15 °C 後有明顯之電容下降趨勢



(b) 長態極化電容 C_{TL} 參數辨識結果圖，可見 15 °C 後有明顯之電容下降趨勢，亦

可見於低電量狀況將由長態極化響應主導極化反應

圖 4-3 (a)短態極化電容 C_{TS} , (b)長態極化電容 C_{TL} 參數辨識結果圖



4.4 SoT 估算結果

SoT 估算方法如 3.5 節所述，通過模擬之 EIS 電路模型參數，於特定頻率段之相位移對 SoT 關係建立電池溫度狀態對照表。整體實驗使用電池阻抗測試儀 BT4560 進行，實驗環境大致如圖 4-4 所示，使用烘箱 WFO-400 及低溫培養箱 MIR-153 進行溫度控制。實驗中設定之溫度為 -5°C , 5°C , 15°C , 25°C , 35°C , 40°C , 45°C 等七組溫度，經 4 小時靜置令電池溫度穩定，每組溫度進行三輪實驗後平均得出結果進行後續分析。

吾人針對 10% 至 90% SoC 之荷電狀態，以程式篩選出 60-200Hz 頻率段之相位移進行分析，分別取出 5°C , 25°C , 45°C 等三種不同溫度與 SoC 對比，如圖 4-5 至圖 4-6 所示。由 MATLAB 之 cftool 工具箱初步篩選出 60-200 Hz 之頻率段進行驗證，於表 4-1 中可看出無論溫度如何，於 60-200 Hz 頻率段之相位移與電量狀態 SoC 之關係性皆極小，因此於此頻率段之 EIS 電路模型相位移可視作僅與溫度 SoT 相關之函數。故吾人選取 60-200 Hz 頻率段進行後續之 SoT 估測工作，其結果如圖 4-6 所示由圖 4-6 可看出於 60-200 Hz 之頻率段選擇下，相位移與溫度之間大致呈線性關係，且參考表 4-2 可看出模型預測之相位移與實測之相位移其最大誤差小於 10%，方均根誤差小於 5%，可視為結果一致。如此可說明本方法具有實際可行性，且可應用於工作中電池之溫度狀態 SoT 估測。



圖 4-4 SoT 估算實驗環境圖

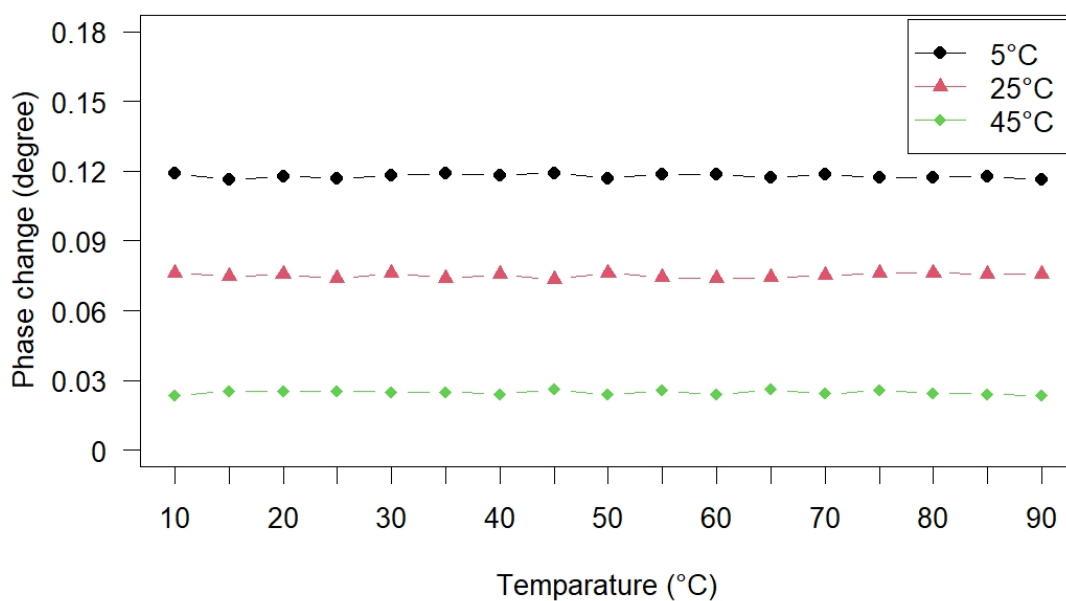


圖 4-5 5 攝氏度，25 攝氏度及 45 攝氏度下，60-200Hz 之電池 EIS 模型阻抗相位移對 SOC 分佈圖

表 4-1 不同溫度相位移最大誤差表

Temperature	MAE (degree)
5°C	0.0026
25°C	0.0024
45°C	0.0029

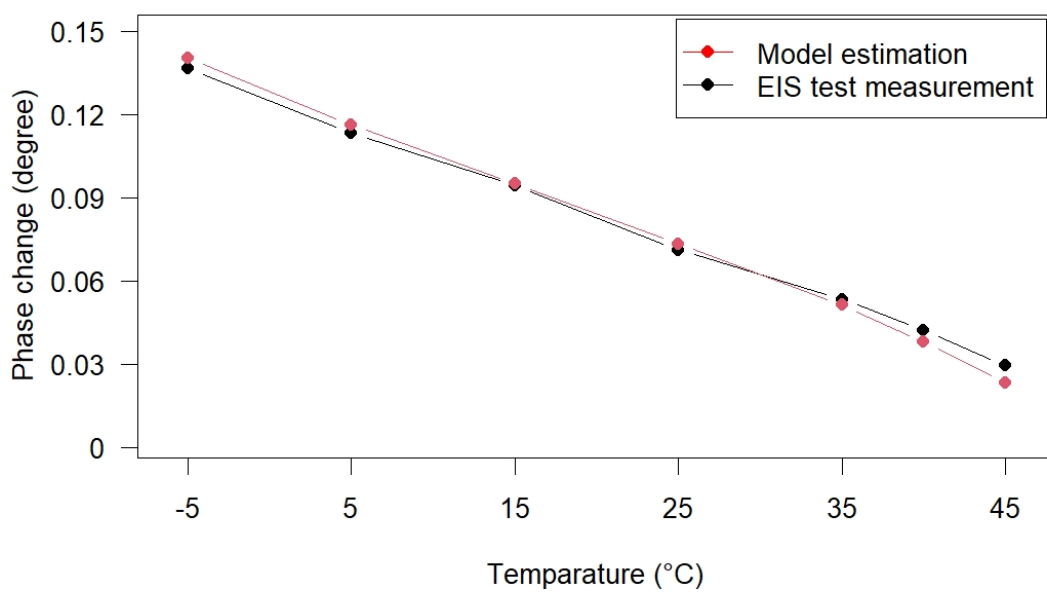


圖 4-6 不同溫度下 60-200 Hz 電池阻抗相位移模型估測及實際 EIS 測試結果比較

圖

表 4-2 模型預測及實際量測相位移誤差

	Error (degree)	Error (%)
MAE	0.0067	4.1%
RMSE	0.0041	2.3%



4.5 模型準確度負載測試結果

如 3.6 節所述，為驗證模型準確度，以 SoC 估測之準確度為標準，於 -5°C 至 45°C 進行 BBDST 電池模擬負載測試以驗證本研究所提方法的有效性，其觀測誤差之設定參考 Chroma 廠商之電池管理儀器 17020 系列，設定為電壓 0.05% 標準差，電流 0.1% 標準差之白雜訊，其結果及 SoC 估測殘差如圖 4-7 及圖 4-8 所示。吾人將由統計角度出發，以模型在完整操作工況下的 SoC 估測之均方根誤差值來定義模型準確度，則各模型於各溫度狀況下的均方根誤差如表 4-3 所示。

需注意的是圖 4-7 和圖 4-8 中，以 0 秒起始，約 4500 秒為週期出現的模型震盪現象，是由於吾人所設定之 BBDST 負載切換瞬間造成的暫態突波(Surge)現象所造成，除安時法模型外，其餘卡曼濾波器模型皆能在一秒內完成模型修正並收斂回穩態運作。

並且關於安時法仍須注意的是，由於安時法模型先天對雜訊之脆弱性，突波現象對安時法的影響也會尤為劇烈，比如圖 4-8 之(b)-(f)圖中，因為突波現象導致安時法模型的 SoC 估計殘差在瞬間有了大幅度上升，產生了明顯的震盪現象。

而安時法模型對誤差的脆弱性也導致了累積誤差現象的產生。圖 4-7 中可看到象徵安時法的藍色曲線與其餘以卡曼濾波器算法為核心之模型相差甚大，並且隨著時間經過其誤差累積進一步提升，最終導致模型徹底失效。如圖 4-8 中無論初始溫度狀況如何，安時法模型皆會在 3000 秒內迅速越過 1% SoC 估測誤差的失效線，宣告該模型之徹底失效。這也是我們於後文圖 4-9、圖 4-10 及表 4-3 至表 4-5 皆將安時法模型排除比較對象之原因。

由表 4-3 亦可看出，當吾人逐步擴充參與 EKF 演算法之電池參數維度時，其模型準確度將穩步上升。比如於室溫狀況，即 25°C 下單獨估測 SoC 時，其 SoC 估測誤差落在 0.231%，加入 SoH 後誤差降低到了 0.192%，又加入 SoT 後誤差進一步降低到了 0.135%，相對一開始的單獨估測 SoC 來說誤差降低了約 41.5%，這正是我們於前文第二章及第三章反覆提及之協同估計演算法之效果。SoC-SoH 的



雙項估測因為考慮到了電池使用時的健康度變化，並且可修正初始化程序中評估 SoH 之誤差，導致在各溫度下相較單項估測法其模型準確度皆有少許提升，如室溫下誤差降低了約 16.8%。模型準確度有所上升，但相對於加入 SoT 參數模型的 41.5% 成果而言提升幅度較小，其原因在於 SoH 相較於其他種類電池參數，如 SoC 等，其變化較為緩慢，比如鋰電池中往往需要近百次的循環使用才能令 SoH 改變 1-3%。而本實驗之負載測試並非長期運行，單次負載測試僅一個循環使用週期，其 SoH 變化幅度不大，故而導致加入 SoH 之準確度僅提升 16.8%。

而加入 SoT 參數的三項估測，即本研究使用之模型方法，由於考慮到了溫度變化對電池內部各參數之影響，使得模型準確度進一步上升。本模型方法在室溫下之 SoC 估測表現小幅優於傳統 EKF 及 UKF 算法，這是由於在高負載狀況時本模型考慮到了電池溫度的變化對模型內部參數之影響。

而在極端溫度下本模型表現更是顯著優於其他演算法，比如 25°C 下相對單項估測之 EKF 模型，本模型之誤差僅降低了約 41.5%，但在 -5°C 狀況下 SoC 估測誤差由 3.553 % 降低到了 0.352 %，降低了約 90%；而 45°C 狀況下相較單項估測之 EKF 模型，SoC 估測誤差由 2.063 % 降低到了 0.171 %，降低了約 91.7 %。這是由於其餘電池模型未考慮到電池特性受到電池溫度的影響，僅考慮恆定於 25°C 狀況的電池特性所造成的結果，故而隨著溫度變化，我們的模型優勢會進一步體現。

由表 4-3 中亦可看出，隨著溫度變化下，本模型方法之 SOC 估測準確度之降低幅度也遠較其他演算法為小。比如與單項估測之 UKF 方法相比，UKF 方法由 25 攝氏度至 -5 攝氏度之 SoC 估測均方根誤差由 0.176 % 增加到了 2.352 %，增長了約 1236%，而由 25 攝氏度至 45 攝氏度之誤差則由 0.176 % 增長到了 0.988 %，增長了約 461%。而本研究之模型算法之 SoC 估測誤差則僅由 0.135 % 來到了 0.352 % 和 0.171 %，僅增長了 160% 和 26%，由均方根誤差角度觀察於極端溫度環境下，加入了溫度參數的本模型表現較未考慮溫度參數之 EKF 雙項估測法優秀

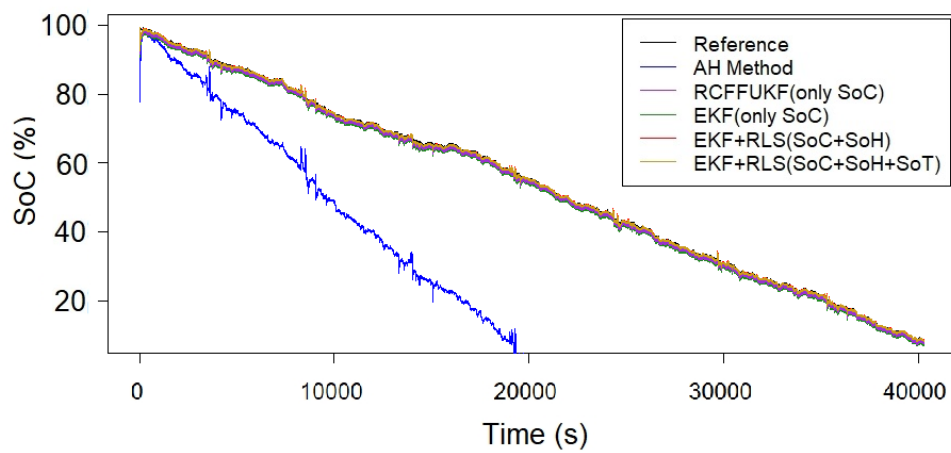
了約 7.09 至 9.15 倍。可觀察到如圖 4-7 之週期性震盪，且觀察到安時法模型因累積誤差原因於第一次負載循環後便迅速失能 (SoC 估測誤差 $>1\%$)

當吾人擷取局部的模型表現，如圖 4-9 擷取了 13630 s-13700 s 之時間段局部放大以觀察後，在極端環境下本研究之模型於絕對誤差上要顯著優於其他算法，並且可明顯看出曲線較為平滑，說明本研究之模型同時可壓低系統雜訊帶來的估測波動問題。圖 4-10 與圖 4-9 相同，亦可觀察到本研究方法之誤差較小且曲線平滑，充分說明模型於低溫狀況亦運作良好，準確度較其他方法為高且亦可降低過程雜訊影響。

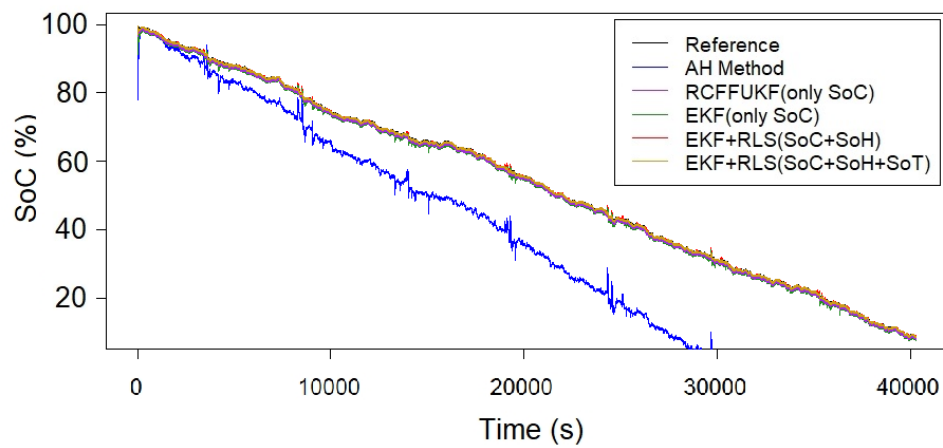
表 4-4 為極小觀測誤差狀況下，即電壓與電流之觀測誤差皆設定為 0.0001% 標準差之白雜訊時的各演算法於各溫度下 BBDST 負載狀況之 SoC 估測誤差表。

表 4-5 為正常觀測誤差與極小觀測誤差之 SoC 估測均方根誤差差值表，即表 4-3 與表 4-4 之差值，其代表著觀測誤差增大對模型所帶來的影響。

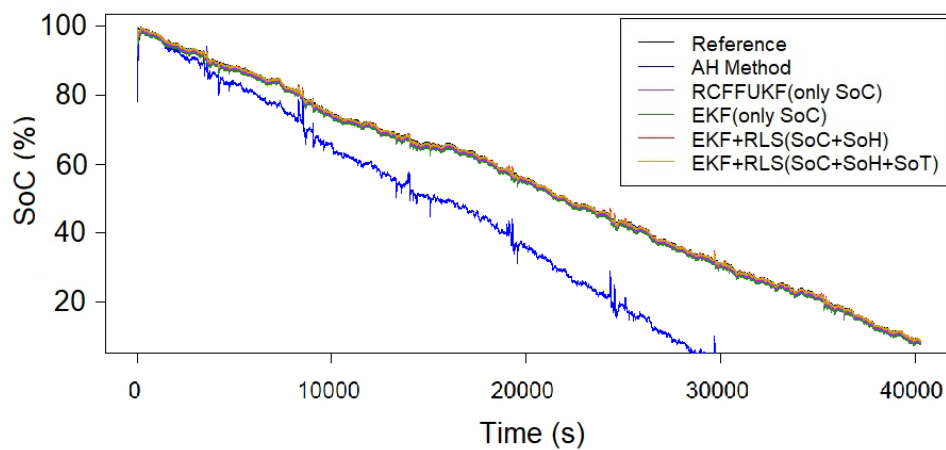
由表 4-5 可看出，隨著觀測誤差的加大，各演算法之 SoC 估測準確度皆會受到影響，如 -5°C 狀況下 UKF 模型之均方根誤差增長了 1.108%，在 45°C 下則增長了 0.751%。而我們的模型則僅增長了 0.041% 及 0.028%，這項事實說明本研究之模型在 -5°C 至 45°C 之環境下，除了系統誤差外，也能夠大幅度壓低因觀測誤差增大所造成的影響。



(a) -5°C 下各模型 SoC 估測狀態圖



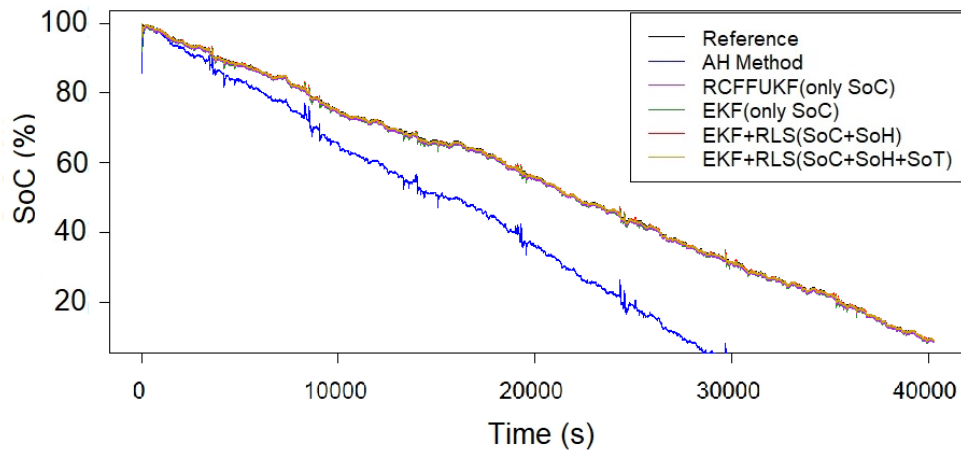
(b) 5°C 下各模型 SoC 估測狀態圖



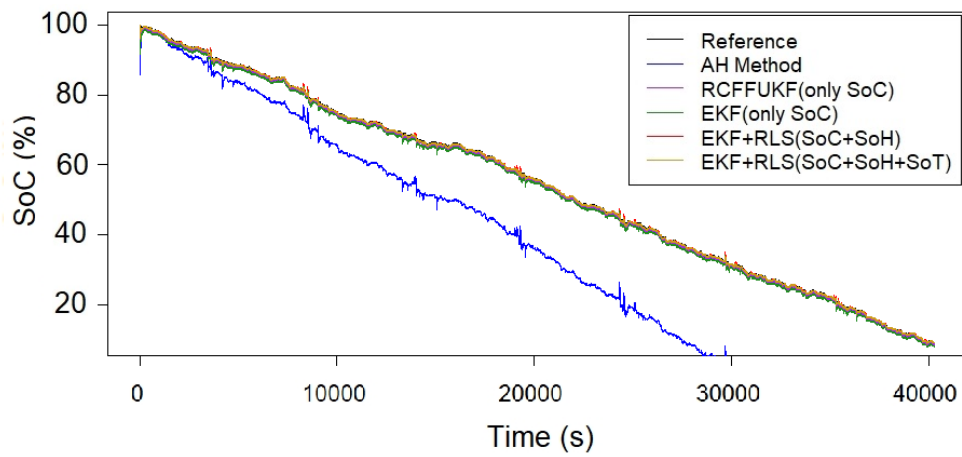
(c) 15°C 下各模型 SoC 估測狀態圖

圖 4-7 (a) -5 (b) 5 (c) 15 (d) 25 (e) 35 (f) 45 $^{\circ}\text{C}$ 下各模型 SoC 估測狀態圖，觀察到約

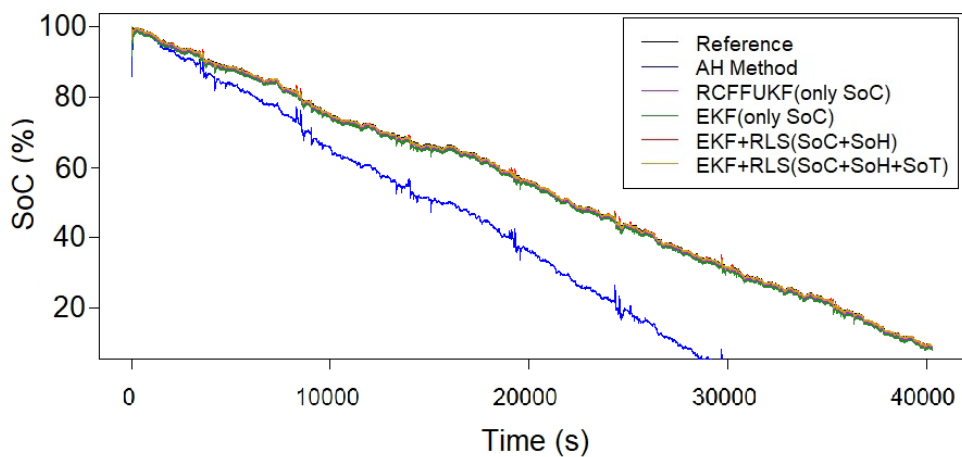
每 4500 秒週期性產生震盪，係由 BBDST 負載測試每次循環負載切換所造成



(d) 25°C 下各模型 SoC 估測狀態圖

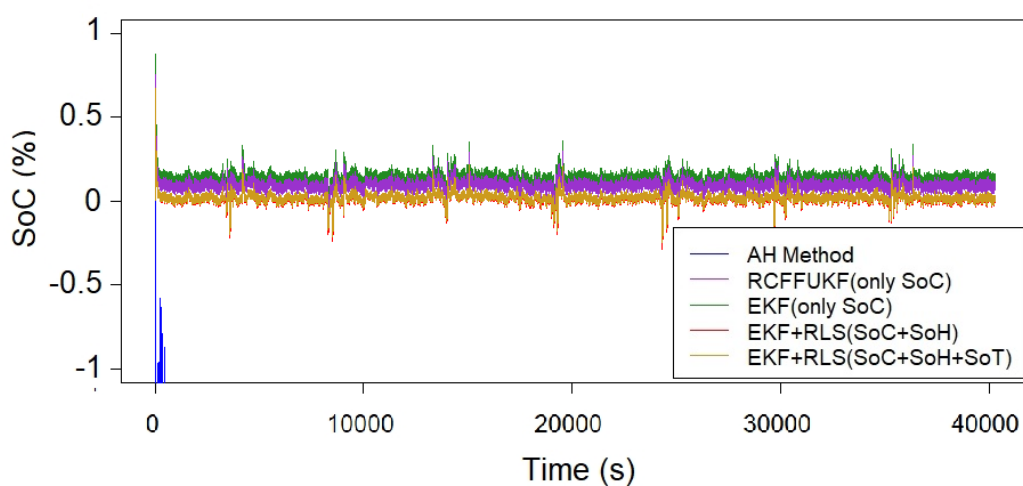


(e) 35°C 下各模型 SoC 估測狀態圖

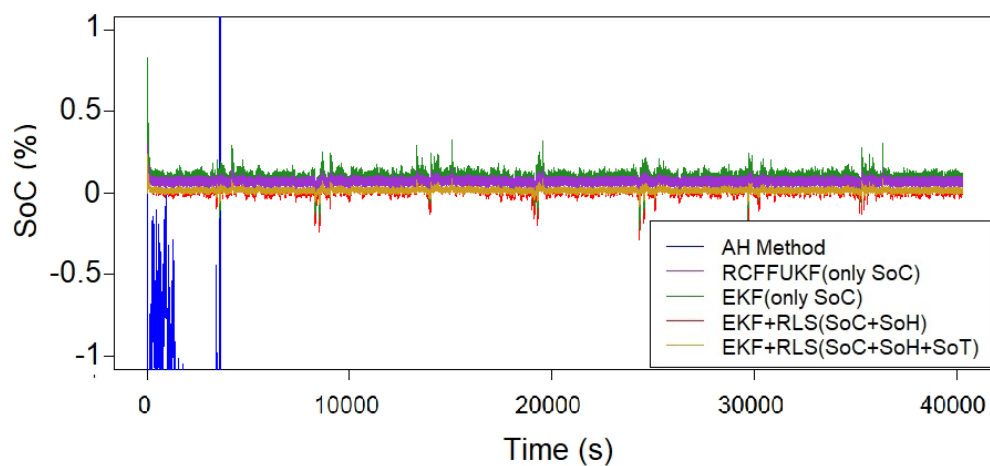


(f) 45°C 下各模型 SoC 估測狀態圖

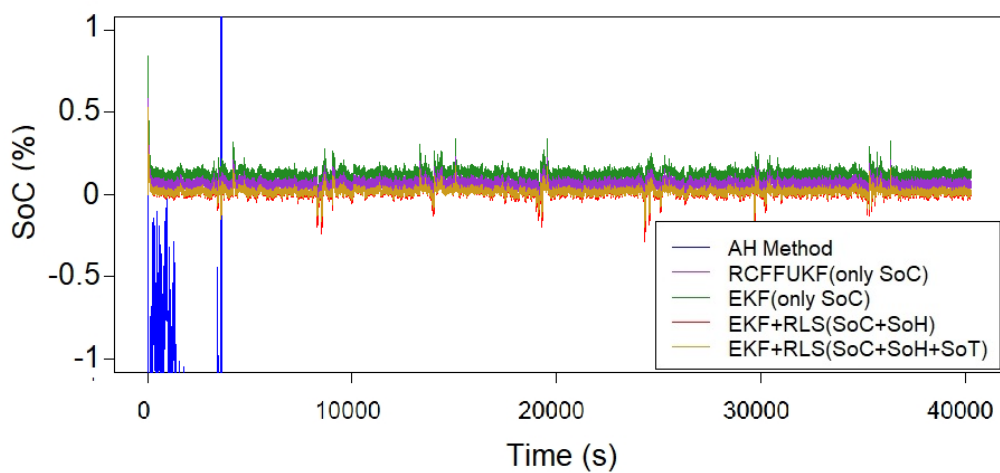
圖 4-7 (續)



(a) -5°C 下各模型 SoC 估測誤差狀態圖

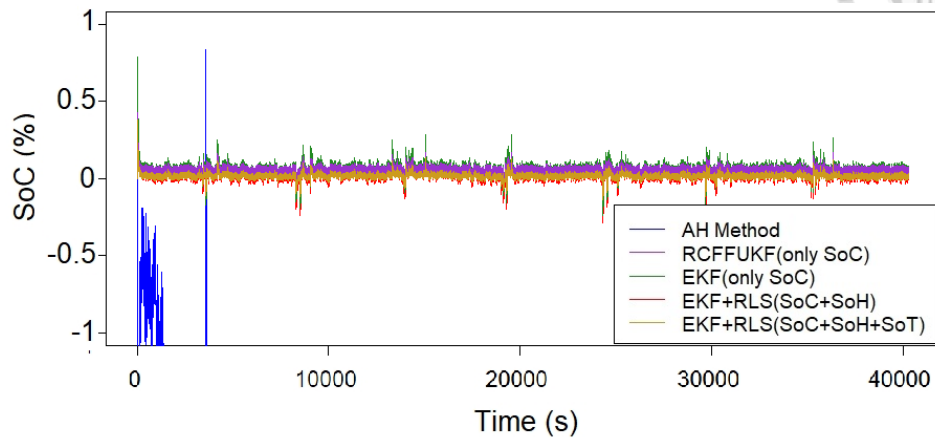


(b) 5°C 下各模型 SoC 估測誤差狀態圖

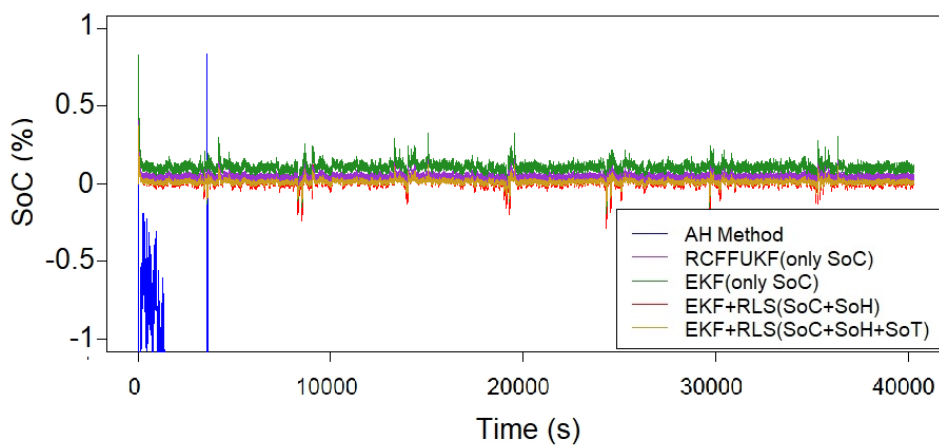


(c) 15°C 下各模型 SoC 估測誤差狀態圖

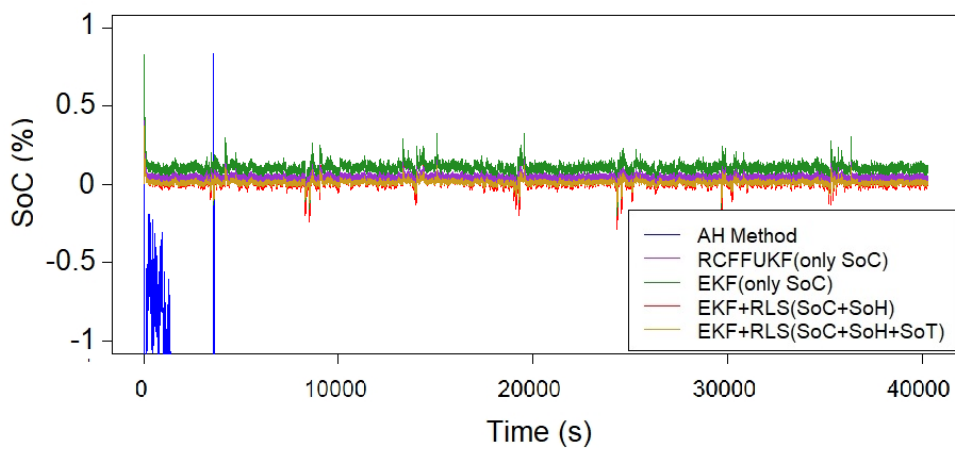
圖 4-8 不同溫度狀況下各模型 SoC 估測誤差狀態圖



(d) 25°C 下各模型 SoC 估測誤差狀態圖



(e) 35°C 下各模型 SoC 估測誤差狀態圖



(f) 45°C 下各模型 SoC 估測誤差狀態圖

圖 4-7 (續)

表 4-3 模型在 BBDST 負載及正常觀測誤差狀況下

於各溫度 SOC 估測之均方根誤差表

Fitting method	-5 °C	5 °C	15 °C	25 °C	35 °C	45 °C
UKF (only SoC)	2.352%	0.961%	0.473%	0.176%	0.552%	0.988%
EKF (only SoC)	3.553%	2.162%	0.814%	0.231%	0.911%	2.063%
EKF+RLS (SoC+SoH)	3.221%	1.729%	0.644%	0.192%	0.701%	1.213%
EKF+RLS (SoC+SoH+SoT)	0.352%	0.256%	0.181%	0.135%	0.145%	0.171%

Average in 3 times test

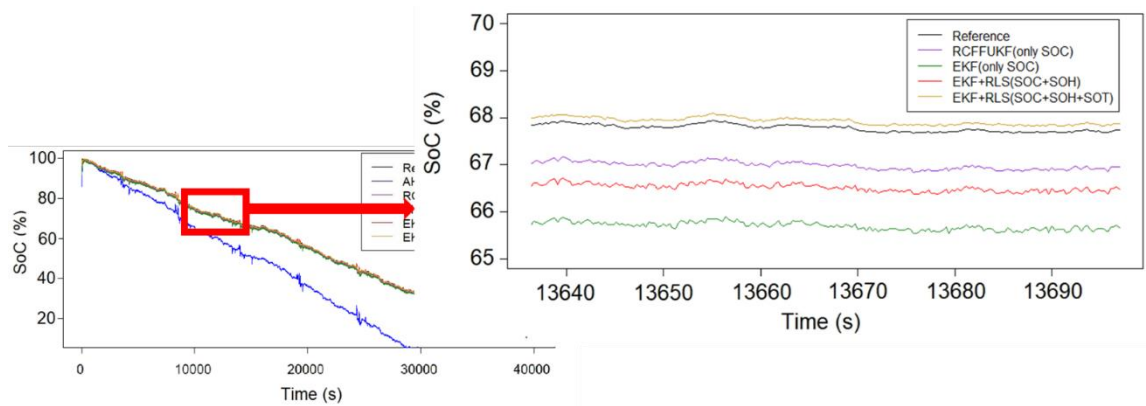


圖 4-9 高溫(45°C)狀況下各模型 SoC 估測誤差局部放大圖，可觀察到本研究方法之誤差較小且曲線平滑，充分說明模型於高溫狀況運作良好，準確度較其他方法為高且可降低過程雜訊影響

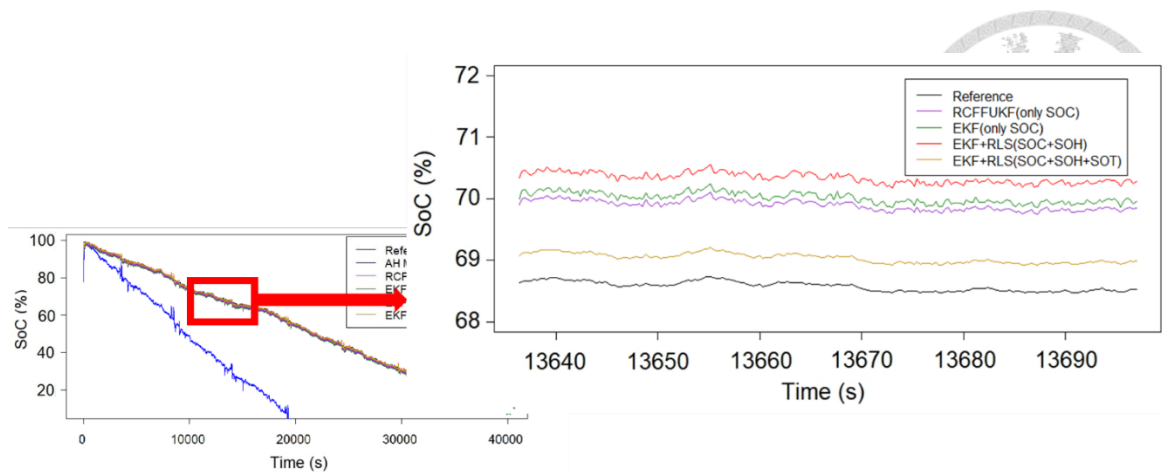


圖 4-10 低溫(-5°C)狀況下各模型 SoC 估測誤差局部放大圖

表 4-4 各電池模型在 BBDST 負載及極小觀測誤差狀況下

於各溫度 SoC 估測均方根誤差表

Fitting method	-5 °C	5 °C	15 °C	25 °C	35 °C	45 °C
UKF (only SoC)	1.244%	0.544%	0.185%	0.136%	0.203%	0.237%
EKF (only SoC)	2.437%	1.233%	0.277%	0.173%	0.343%	0.563%
EKF+RLS (SoC+SoH)	2.329%	1.073%	0.268%	0.135%	0.355%	0.477%
EKF+RLS (SoC+SoH+SoT)	0.311%	0.205%	0.133%	0.102%	0.122%	0.143%

Average in 3 times test

表 4-5 各電池模型在 BBDST 負載，正常觀測誤差到極小誤差狀況下

於各溫度 SoC 估測均方根誤差之變化差值表

Fitting method	-5 °C	5 °C	15 °C	25 °C	35 °C	45 °C
UKF (only SoC)	1.108%	0.417%	0.288%	0.040%	0.349%	0.751%
EKF (only SoC)	1.116%	0.929%	0.537%	0.058%	0.568%	1.500%
EKF+RLS (SoC+SoH)	0.892%	0.656%	0.376%	0.057%	0.346%	0.736%
EKF+RLS (SoC+SoH+SoT)	0.041%	0.051%	0.048%	0.033%	0.023%	0.028%

Average in 3 times test

4.6 小型電池組電池管理平台測試結果

如 3.7 至 3.8 節所述，吾人為驗證模型於小型電池組之適用性以及結合物聯網導向實驗平台架構的兼容性，以 SoC 估測之準確度為標準，針對兩顆 ICR-18650K 電池串聯組和兩顆 ICR-18650K 並聯組，於室溫環境下進行負載測試，其整體 SoC 估測狀況圖如圖 4-11 所示。需要注意的是雖然並聯電池組別的電池容量 (約 5200 mAh) 大約是串聯電池組別 (約 2600 mAh) 之約兩倍，但我們之負載工況之工作電流是以充放電率 (C-rate) 為單位，以此達到兩種電池組別運行至空電量所需時間不致相差過多。

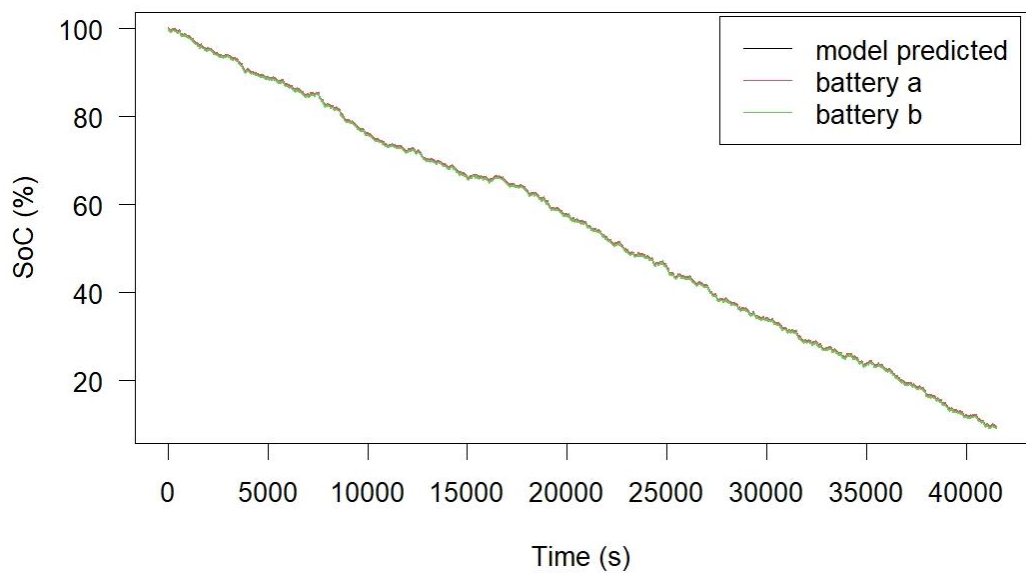
由圖 4-11 中可看出，在 BBDST 之負載操作工況下串聯電池組由 100% SoC 運轉至 0% SoC 時其續航時間約為 41520 秒，而並聯電池組則約為 41980 秒，同時於 3.6 節的負載測試中，單顆電池的續航時間約為 42300 秒。相對於單顆電池，串聯電池組及並聯電池組的續航時間約下降了 1.8% 及 0.75%。即使以充放電率為工況設定之單位以減少電池組電容量差別，並聯電池組之電池續航時間仍然

比串聯電池組稍微持久，而並非吾人預計中的同樣時長。這項事實彰顯了當使用 2.5 節討論之直流/直流轉換器進行電池平衡時，會有些許電量於主動平衡過程中遭到消耗，且相對於並聯電池組而言，串聯電池組所消耗在電池平衡上的電量會更多，其續航時間差距約落在 1.05%。

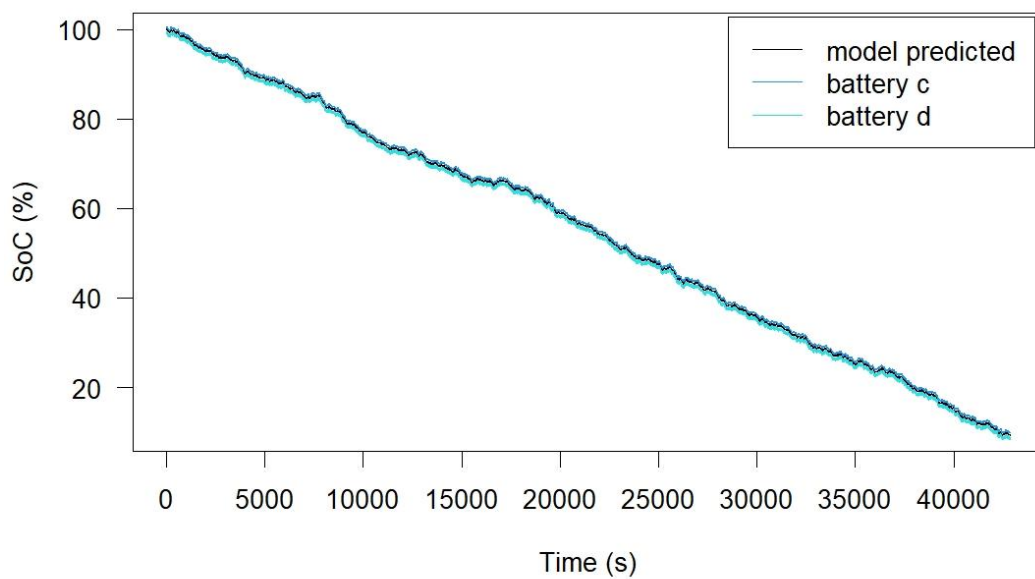
圖 4-12 是與 4.5 節之圖 4-9 及圖 4-10 相同，擷取 13630 s 至 13700 s 之 SoC 估測狀況進行詳細觀察，可看出相同時刻時，並聯電池組之 SoC 往往較串聯電池組稍高，與吾人前述之串聯電池組消耗於電池平衡之電量較多的推論吻合。並且一樣於圖 4-12 吾人亦可觀察到並聯電池組中兩顆電池單元，相同時刻之 SoC 差距是較串聯電池組同一時刻之兩顆電池單元的 SoC 差距為大，這項事實揭示了雖然並聯電池組消耗於電池平衡中的電量較少，但同時並聯電池組的電池平衡效果也略遜於串聯電池組。串聯電池組之每顆電池最大 SoC 差距為 0.42%，而並聯電池組則為約 0.79%。

表 4-6 為吾人所測試之電池管理平台之數據傳輸相關資料，通過將每一筆傳輸資料附上時間戳及編號，在完成負載測試後進行計算。可看到本電池管理平台架構之資料傳輸延遲時間約落在 800 ms 以下，最大延遲時間亦不超過 3 s。由表 4-6 亦可看出整體丟包率 (Packet loss rate) 落在 0.6 % 上下，丟包率是指在數據網絡中，數據包在傳輸過程中丟失的比例，吾人通過 MCU 端上傳之資料封包數與主控制電腦端接收到之資料封包數之比值進行定義。

本系統架構中電池模型是基於卡曼濾波器算法建立，如本研究在 2.4 節討論過的，該算法其一大特徵便是在含有雜訊和不完整的測量中估測盡可能準確之值，故而可大幅降低丟包率影響，由圖 4-12 也可觀察到即使有一定程度之資訊損失，最終之 SoC 估測值與每顆電池的差值也皆在 0.5% SoC 以下。



(a) 兩顆電池串聯小型電池組



(b) 兩顆電池並聯小型電池組

圖 4-11 結合電池管理平台之 SoC 估測狀態圖

Note: 施加之負載工況數據係以 C-rate 為統一之工作電流單位，故串聯組和並聯

組別之運轉時間並未因電池組容量差別產生大幅差距

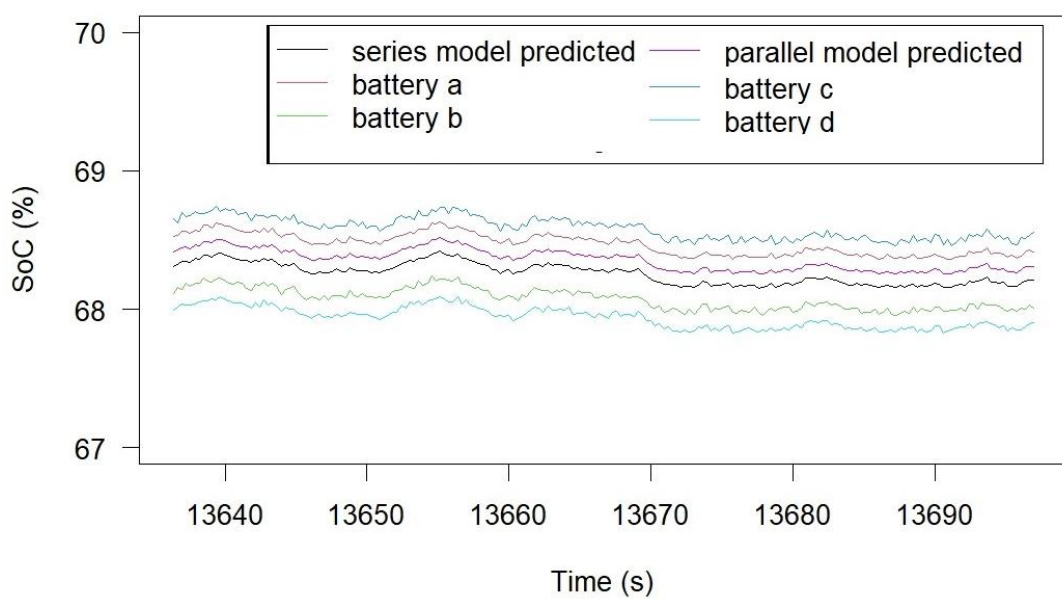


圖 4-12 小型電池組結合電池管理平台之 SoC 估測局部放大圖

Note: 擷取時間與 4.5 節相同為 13630 s – 13700 s

表 4-6 電池管理平台資料傳輸相關資訊表

電池組 連接型態	資料傳輸	資料傳輸平	MCU 端上	主控制電腦	資料傳輸丟
	最大延遲時間	均延遲時間	傳資料封	端收到資料	包率
	(unit: s)	(unit: s)	包數	封包數	(unit: %)
兩顆串聯	2.02 s	0.75 s	41525	41301	0.54%
兩顆並聯	1.99 s	0.76 s	41982	41737	0.59%

第五章 結論及未來工作



本論文提出了一種基於協同估計演算法的電池模型，最大的特點是考慮了溫度狀態 SoT，目的在解決溫度變化對電池狀態估測準確性的不利影響。實驗結果表明，該算法在室溫下略優於其他算法，在極端溫度環境中優勢則大幅加大，準確度可來到傳統算法的 7-10 倍，能夠較其他算法更準確地估測電池的狀態參數 (如 SoC)。此外，本文算法在抑制系統雜訊和觀測雜訊方面也顯示出了良好的效果，有效提升了電池狀態估測的穩定性和可靠性。

在本論文的研究中，吾人主要針對 BBDST 負載工況和恆流負載工況進行了探討，並通過模擬實驗驗證了所提出的演算法。然而，實際應用中電力系統的複雜性往往較為複雜。為進一步提高研究的適用性和演算法的準確性，未來研究中可考慮擴展到交流負載場景。其次，儘管模擬實驗能夠提供初步驗證和性能評估，但實際場域測試則更能揭示演算法在真實環境中的優缺點。因此，未來研究應積極在實際應用場景中進行實驗，通過與電網實際操作條件相結合，驗證演算法在真實工況下的有效性。這不僅可以發現潛在的問題和改進空間，還能夠為演算法優化提供重要的實證資料。

此外，多種不同類型電池的應用也將是未來研究的重要方向。不同電池技術 (如鉛酸電池、鈉硫電池等) 具有不同的充放電特性和壽命特徵。針對這些不同特性的電池進行演算法驗證，可以確保所提出的管理策略在各種電池技術中的普適性和可靠性。未來研究應在實驗中納入多種電池類型，並考慮其在不同使用場景下的表現差異，從而進一步提升演算法的通用性，並考慮更多環境因素對電池模型的影響，以期在更複雜的應用場景中發揮更大的作用。

參考文獻



- Alterwl. Github. 2022. Alterwl / Battery_SOC_Estimation. Available at: github.com/AlterWL/Battery_SOC_Estimation. Accessed 6 July 2023.
- Bergveld, H. J., W. S. Kruijt and P. H. L. Notten. 2002. Battery Management Systems Design by Modelling. Boston, USA. Kluwer Academic Publishers.
- Barletta, G., P. DiPrima and D. Papurello. 2022. Thevenin's Battery Model Parameter Estimation Based on Simulink. *Energies* 15(17): 1-10.
- Cacciato, M., G. Nobile, G. Scarcella and G. Scelba. 2015. Real-time model-based estimation of SOC and SOH for energy storage systems. In "IEEE 6th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems", 1-8
- Chakir, A., M. Tabaa, F. Moutaouakkil, H. Medromi, M. Julien-Salame, A. Dandache and K. Alami. 2020. Optimal energy management for a grid connected PV-battery system. *Energy Reports* 6(3): 218-231.
- Daowd, M., N. Omar, B. Verbrugge, P. V. D. Bossche, J. V. Mierlo. 2010. Battery Models Parameter Estimation based on Matlab/Simulink. In "The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition", 5-9
- Daud, M. Z., A. Mohamed and M.A. Hannan. 2013. An improved control method of battery energy storage system for hourly dispatch of photovoltaic power sources. *Energy Conversion and Management* 73: 256-270.
- Duong, V-H., H. A. Bastawrous, K. C. Lim, K. W. See, P. Zhang and S. X. Dou. 2015. Online state of charge and model parameters estimation of the LiFePO₄ battery in electric vehicles using multiple adaptive forgetting factors recursive least-squares. *Journal of Power Sources* 296: 215-224.

- 
- Dutt, R. and A. Amit. 2020. Real-Time and Accurate State-of-Charge Estimation Methodology using Dual Square Root Unscented Kalman Filter. In "2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems"
- Eberhardt, J.J. 2006. Motivations for Promoting Clean Diesels. In " EPA Region 5 Diesel Conference"
- Ecker, M., J. B. Gerschler, J. Vogel, S. Käbitz, F. Hust, P. Dechent, D. U. Sauer. 2012. Development of a lifetime prediction model for lithium-ion batteries based on extended accelerated aging test data. *Journal of Power Sources* 215: 248-257.
- Fang, L., J. Li and B. Peng. 2019. Online Estimation and Error Analysis of both SOC and SOH of Lithium-ion Battery based on DEKF Method. *Energy Procedia* 158: 3008-3013.
- Feng, J., F. Cai, J. Yang, S. Wang and K. Huang. 2022. An Adaptive State of Charge Estimation Method of Lithium-ion Battery Based on Residual Constraint Fading Factor Unscented Kalman Filter. *IEEE Access* 10:44549-44563
- Feng, T., L. Yang, X. Zhao, H. Zhang, and J. Qiang. 2015. Online identification of lithium-ion battery parameters based on an improved equivalent-circuit model and its implementation on battery state-of-power prediction. *Journal of Power Sources* 284: 192-203.
- Ghaeminezhad, N. and M. Monfared. 2021. Charging control strategies for lithium-ion battery packs: review and recent developments. *IET Power Electronics* 15(6): 349-367.
- Harting, N., R. Schenkendorf, N. Wolff, and U. Krewer. 2018. State-of-health identification of lithium-ion batteries based on nonlinear frequency response analysis: first steps with machine learning. *Applied Science* 8: 5.

He, H., Xx Zhang, Rx Xiong, Yx Xu and H. Guo. 2012. Online model-based estimation of state-of-charge and open-circuit voltage of lithium-ion batteries in electric vehicles. *Energy* 39(1):310-318.

Hsieh, Y. C., S. P. Chou and C. S. Moo. 2004. Balance discharging for series-connected batteries. In "2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference", 2697-2702.

Huang, C., Z. Wang, Z. Zhao, L. Wang, C. S. Lai and D. Wang. 2018. Robustness Evaluation of Extended and Unscented Kalman Filter for Battery State of Charge Estimation. *IEEE Access* 6: 27617-27628.

Julier, S. J. and J. K. Uhlmann. 1997. A New Extension of the Kalman Filter to Nonlinear Systems. In "The 11th International Symposium of Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Controls, Multi Sensor Fusion, Tracking and Resource Management II"

Kang, D., P-Y. Lee, K. Yoo and J. Kim. 2020. Internal thermal network model-based inner temperature distribution of high-power lithium-ion battery packs with different shapes for thermal management. *Journal of Energy Storage* 27:101017

Khezri, R., A. Mahmoudi, and H. Aki. 2022. Optimal planning of solar photovoltaic and battery storage systems for grid-connected residential sector: review, challenges and new perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 153: 111763.

Li, X., D. Hui and X. Lai. 2013. Battery Energy Storage Station (BESS)-Based Smoothing Control of Photovoltaic (PV) and Wind Power Generation Fluctuations. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 4(2): 464-473.

Liang, X., M. Zhang and G. Huang. 2020. Review on lithium-ion battery modeling methods based on BMS. *Energy Storage Science and Technology* 9(6): 1933-1939.

Liao, Z., S. Zhang, K. Li, M. Zhao, Z. Qiu, D. Han, G. Zhang and T. G. Habetler. 2020.

Hazard analysis of thermally abused lithium-ion batteries at different state of charges. *Journal of Energy Storage* 27:101065

Liu, C., M. Hu, G. Jin, Y. Xu, and J. Zhai. 2021. State of power estimation of lithiumion battery based on fractional-order equivalent circuit model. *Journal of Energy Storage* 41: 102954.

Liu, F., D. Yu, C. Shao, X. Liu, W. Su. 2023. A review of multi-state joint estimation for lithium-ion battery: Research status and suggestions. *Journal of Energy Storage* 73 Part C: 109071,

Ma, L., Y. Xu, H. Zhang, F. Yang, X. Wang and C. Li. 2022. Co-estimation of state of charge and state of health for lithium-ion batteries based on fractional-order model with multi-innovations unscented Kalman filter method. *Journal of Energy Storage* 52 part B:104904.

Mousavi, S.M., M. Nikdel. 2014. Various battery models for various simulation studies and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32: 477-485.

Pop, V., H. J. Bergveld, P. P. L. Regtien, B. Veld, D. Danilov and P. H. L. Notten. 2007, Battery Aging and Its Influence on the Electromotive Force. *Journal of The Electrochemical Society* 154(8).

Ramadan, H. S., M. Becherif, and F. Claude. 2017. Extended Kalman filter for accurate state of charge estimation of lithium-based batteries: a comparative analysis. *International Journal of Hydrogen Energy* 42(48): 29033- 29046

Ren, H. B., Y. Z. Zhao, S .Z. Chen, T. P. Wang. 2019. Design and implementation of a battery management system with active charge balance based on the SOC and SOH online estimation. *Energy* 166: 908-917.

Park, S., A. Jeongho, K. Taewoo, P. Sungbeak, Y. Kim, I. Cho and J. Kim. 2020. Review of state-of-the-art battery state estimation technologies for battery

management systems of stationary energy storage systems. *Journal of Power Electronics* 20(6): 1526-1540.



Shen, P., M. Ouyang, L. Lu, J. Li and X. Feng. 2018. The Co-estimation of State of Charge, State of Health, and State of Function for Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 67(1): 92-103.

Shen, X. F., B.S. Sun, H. F. Qi, X.B. Shen and X. J. Su. 2018. Research on peak power test method for Lithium Ion battery. *Energy Procedia* 152: 550-555.

Shete, S., P. Jog, R. K. Kumawat and D. K. Palwalia. 2021. Battery Management System for SOC Estimation of Lithium-Ion Battery in Electric Vehicle: A Review. In "IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering", 1-4.

Shu, X., G. Li, J.W. Shen, Z.Z. Lei, Z. Chen, Y.G. Liu. 2020. An adaptive multi-state estimation algorithm for lithium-ion batteries incorporating temperature compensation. *Energy* 207:118262.

Srinivasan, R., B. G. Carkhuff, M. H. Butler and A. C. Baisden. 2011. Instantaneous measurement of the internal temperature in lithium-ion rechargeable cells. *Electrochimica Acta* 56(17): 6198-6204.

Sun, F., R. Xiong, H. He, W. Li, and J. E. E. Aussems. 2012. Model-based dynamic multiparameter method for peak power estimation of lithium-ion batteries. *Applied Energy* 96: 378-386.

Taborelli, C. and S. Onori. 2014. State of charge estimation using extended Kalman filters for battery management system. In "2014 IEEE International Electric Vehicle Conference" 1-8

Takvi-Aninakwa, P., S. Wang, H. Zhang, Y. Xiao, C. Fernandez. 2023. Enhanced multi-state estimation methods for lithium-ion batteries considering temperature uncertainties. *Journal of Energy Storage* 66: 107495,

Tamilselvi, S., S. Gunasundari, N. Karuppiah, A. Razak RK, S. Madhusudan, V. M.

Nagarajan, T. Sathish, M. Z. M. Shamim, C. A. Saleel, and A. Afzal. 2021. A review on battery modelling techniques. *Sustainability* 13(18): 1-26.

United Nations Climate Change. 2023. Climate Plans Remain Insufficient: More Ambitious Action Needed Now.

Wang, Y., Y. Li, L. Jiang, Y. Huang and Y. Cao. 2019. PSO-based Optimization for Constant-current Charging Pattern for Li-ion Battery. *Chinese Journal of Electrical Engineering* 5(2): 72-78

Wang, Z.C. and C.Q. Du. 2021. A comprehensive review on thermal management systems for power lithium-ion batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 139: 110685.

World Economic Forum. 2023. The Global Risks Report 2023 18th edition.

You, G-W., S. Park and D. Oh. 2016. Real-time state-of-health estimation for electric vehicle batteries: A data-driven approach. *Applied Energy* 176: 92-103.

附錄

表 a-1 EMF 實驗數據紀錄 1(unit: V)



SoC(%)	-5°C-1	-5°C-2	-5°C-3	5°C-1	5°C-2	5°C-3	15°C-1	15°C-2	15°C-3
0	3.079	3.118	3.140	3.071	3.127	3.216	3.141	3.183	3.191
5	3.185	3.206	3.252	3.248	3.275	3.336	3.463	3.469	3.536
10	3.243	3.269	3.274	3.291	3.319	3.338	3.478	3.531	3.548
15	3.202	3.296	3.306	3.278	3.320	3.369	3.401	3.582	3.588
20	3.242	3.257	3.365	3.267	3.365	3.413	3.489	3.560	3.600
25	3.294	3.312	3.346	3.356	3.366	3.413	3.552	3.568	3.640
30	3.300	3.323	3.342	3.334	3.395	3.431	3.565	3.581	3.615
35	3.295	3.369	3.420	3.361	3.417	3.456	3.595	3.627	3.629
40	3.321	3.361	3.382	3.381	3.429	3.457	3.595	3.624	3.666
45	3.344	3.359	3.372	3.380	3.452	3.469	3.632	3.639	3.646
50	3.316	3.376	3.476	3.429	3.458	3.470	3.626	3.658	3.680
55	3.391	3.449	3.467	3.459	3.496	3.509	3.666	3.676	3.748
60	3.439	3.472	3.494	3.490	3.516	3.551	3.709	3.724	3.746
65	3.441	3.503	3.532	3.432	3.584	3.618	3.700	3.760	3.802
70	3.422	3.534	3.544	3.505	3.538	3.639	3.672	3.796	3.817
75	3.527	3.535	3.572	3.570	3.601	3.619	3.717	3.834	3.865
80	3.541	3.547	3.604	3.625	3.644	3.652	3.804	3.861	3.878
85	3.601	3.611	3.654	3.597	3.681	3.752	3.840	3.871	3.922
90	3.613	3.647	3.666	3.646	3.705	3.798	3.820	3.966	3.971
95	3.670	3.703	3.728	3.690	3.755	3.849	3.956	3.969	3.993
100	3.698	3.781	3.856	3.788	3.794	3.912	3.924	4.080	4.096

Note: 每組溫度進行三輪實驗，縱軸為 SoC 值，橫軸為對應溫度及實驗組數據

表 a-1 續 EMF 實驗數據紀錄 2(unit: V)

SoC(%)	25°C-1	25°C-2	25°C-3	35°C-1	35°C-2	35°C-3
0	3.210	3.246	3.281	3.252	3.281	3.309
5	3.582	3.605	3.666	3.580	3.625	3.677
10	3.628	3.647	3.679	3.619	3.661	3.698
15	3.667	3.684	3.684	3.647	3.662	3.757
20	3.624	3.679	3.782	3.684	3.704	3.708
25	3.692	3.709	3.716	3.670	3.718	3.743
30	3.680	3.690	3.771	3.662	3.744	3.748
35	3.673	3.734	3.760	3.714	3.719	3.743
40	3.724	3.730	3.751	3.681	3.757	3.790
45	3.696	3.770	3.787	3.735	3.787	3.801
50	3.716	3.799	3.805	3.712	3.787	3.856
55	3.744	3.811	3.833	3.796	3.812	3.828
60	3.736	3.837	3.892	3.785	3.869	3.877
65	3.823	3.856	3.874	3.790	3.876	3.920
70	3.831	3.897	3.918	3.849	3.897	3.925
75	3.872	3.923	3.947	3.893	3.923	3.968
80	3.885	3.921	4.043	3.938	3.963	3.973
85	3.967	3.969	4.031	3.938	4.012	4.055
90	4.024	4.030	4.043	4.018	4.021	4.089
95	4.018	4.079	4.139	4.055	4.073	4.151
100	4.103	4.139	4.180	4.110	4.147	4.195

Note: 每組溫度進行三輪實驗，縱軸為 SoC 值，橫軸為對應溫度及實驗組數據

表 a-1 續 EMF 實驗數據紀錄 3(unit: V)

SoC(%)	40°C-1	40°C-2	40°C-3	45°C-1	45°C-2	45°C-3
0	3.303	3.303	3.314	3.298	3.311	3.430
5	3.602	3.627	3.670	3.655	3.702	3.711
10	3.647	3.650	3.729	3.659	3.696	3.767
15	3.662	3.709	3.745	3.642	3.732	3.753
20	3.664	3.680	3.768	3.677	3.733	3.744
25	3.674	3.708	3.758	3.707	3.739	3.740
30	3.695	3.729	3.747	3.705	3.735	3.783
35	3.714	3.737	3.742	3.739	3.770	3.788
40	3.679	3.768	3.833	3.728	3.779	3.816
45	3.737	3.810	3.829	3.772	3.817	3.823
50	3.774	3.788	3.862	3.813	3.822	3.846
55	3.772	3.854	3.863	3.829	3.843	3.876
60	3.742	3.885	3.935	3.851	3.855	3.917
65	3.817	3.896	3.928	3.825	3.889	3.989
70	3.869	3.876	3.983	3.887	3.924	3.980
75	3.851	3.963	4.007	3.941	3.970	3.974
80	3.956	3.960	4.008	3.906	4.026	4.048
85	3.930	4.023	4.084	3.971	4.046	4.068
90	4.013	4.018	4.133	4.039	4.068	4.093
95	4.052	4.114	4.136	4.056	4.109	4.157
100	4.113	4.142	4.212	4.109	4.201	4.205

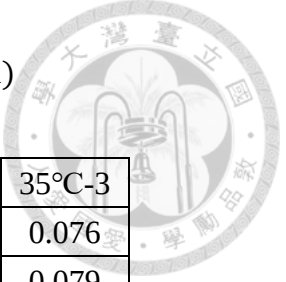
Note: 每組溫度進行三輪實驗，縱軸為 SoC 值，橫軸為對應溫度及實驗組數據

表 a-2 Rs 參數推估實驗數據紀錄 1(unit: Ohm)

SoC(%)	-5°C-1	-5°C-2	-5°C-3	5°C-1	5°C-2	5°C-3	15°C-1	15°C-2	15°C-3
0.00	0.045	0.046	0.055	0.046	0.049	0.050	0.052	0.054	0.058
3.85	0.031	0.037	0.048	0.036	0.037	0.043	0.048	0.053	0.058
7.70	0.044	0.048	0.048	0.043	0.045	0.052	0.055	0.055	0.058
11.55	0.036	0.041	0.044	0.035	0.037	0.050	0.047	0.058	0.060
15.40	0.044	0.044	0.046	0.040	0.046	0.049	0.053	0.055	0.056
19.25	0.042	0.043	0.043	0.042	0.042	0.044	0.046	0.047	0.056
23.10	0.036	0.036	0.046	0.036	0.041	0.041	0.041	0.048	0.056
26.95	0.045	0.050	0.050	0.044	0.049	0.051	0.049	0.054	0.057
30.80	0.042	0.043	0.052	0.041	0.048	0.048	0.048	0.052	0.054
34.65	0.042	0.042	0.043	0.038	0.042	0.046	0.046	0.050	0.062
38.50	0.040	0.041	0.043	0.038	0.042	0.044	0.048	0.049	0.057
42.35	0.042	0.042	0.042	0.040	0.043	0.043	0.050	0.057	0.060
46.20	0.036	0.038	0.038	0.036	0.037	0.040	0.048	0.053	0.057
50.05	0.042	0.043	0.044	0.041	0.041	0.047	0.046	0.048	0.051
53.90	0.032	0.037	0.050	0.034	0.038	0.048	0.043	0.053	0.053
57.75	0.030	0.042	0.047	0.037	0.039	0.042	0.044	0.051	0.052
61.60	0.044	0.050	0.054	0.047	0.049	0.052	0.053	0.054	0.060
65.45	0.036	0.037	0.044	0.037	0.037	0.043	0.048	0.052	0.056
69.30	0.035	0.044	0.046	0.037	0.041	0.046	0.048	0.050	0.053
73.15	0.032	0.034	0.050	0.030	0.039	0.047	0.041	0.057	0.063
77.00	0.035	0.042	0.043	0.038	0.039	0.042	0.049	0.050	0.057
80.85	0.041	0.047	0.049	0.040	0.048	0.049	0.050	0.054	0.061
84.70	0.048	0.051	0.052	0.050	0.051	0.051	0.054	0.056	0.060
88.55	0.039	0.042	0.043	0.039	0.043	0.043	0.049	0.055	0.059
92.40	0.039	0.043	0.050	0.042	0.044	0.046	0.052	0.053	0.056
96.25	0.047	0.054	0.059	0.048	0.055	0.057	0.055	0.062	0.063
100.00	0.048	0.049	0.055	0.047	0.052	0.053	0.057	0.060	0.064

Note: 每組溫度進行三輪實驗，縱軸為 SoC 值，橫軸為對應溫度及實驗組數據

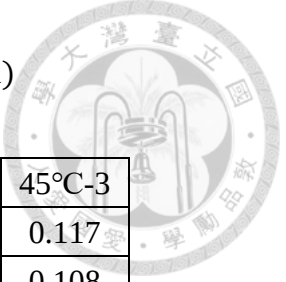
表 a-2 續 R_s 參數推估實驗數據紀錄 2(unit: Ohm)



SoC(%)	25°C-1	25°C-2	25°C-3	35°C-1	35°C-2	35°C-3
0.00	0.064	0.064	0.074	0.071	0.074	0.076
3.85	0.057	0.062	0.074	0.066	0.076	0.079
7.70	0.066	0.067	0.071	0.072	0.073	0.075
11.55	0.061	0.068	0.070	0.068	0.073	0.078
15.40	0.065	0.065	0.067	0.068	0.073	0.074
19.25	0.060	0.062	0.066	0.068	0.074	0.075
23.10	0.058	0.061	0.067	0.066	0.073	0.077
26.95	0.066	0.066	0.069	0.070	0.073	0.073
30.80	0.062	0.066	0.070	0.069	0.074	0.074
34.65	0.057	0.065	0.068	0.064	0.072	0.081
38.50	0.056	0.067	0.068	0.070	0.073	0.074
42.35	0.060	0.065	0.074	0.066	0.070	0.080
46.20	0.057	0.066	0.067	0.067	0.071	0.077
50.05	0.061	0.064	0.065	0.068	0.072	0.076
53.90	0.059	0.065	0.066	0.068	0.070	0.078
57.75	0.053	0.065	0.070	0.067	0.070	0.078
61.60	0.060	0.067	0.073	0.071	0.073	0.074
65.45	0.057	0.062	0.071	0.070	0.073	0.074
69.30	0.061	0.063	0.063	0.068	0.072	0.074
73.15	0.062	0.067	0.068	0.070	0.071	0.072
77.00	0.060	0.063	0.065	0.071	0.072	0.074
80.85	0.060	0.062	0.072	0.070	0.076	0.077
84.70	0.065	0.067	0.069	0.067	0.075	0.079
88.55	0.063	0.069	0.075	0.077	0.077	0.077
92.40	0.066	0.069	0.070	0.068	0.079	0.082
96.25	0.070	0.070	0.073	0.074	0.078	0.080
100.00	0.068	0.070	0.075	0.078	0.078	0.085

Note: 每組溫度進行三輪實驗，縱軸為 SoC 值，橫軸為對應溫度及實驗組數據

表 a-2 續 R_s 參數推估實驗數據紀錄 3(unit: Ohm)



SoC(%)	40°C-1	40°C-2	40°C-3	45°C-1	45°C-2	45°C-3
0.00	0.080	0.081	0.084	0.100	0.111	0.117
3.85	0.074	0.084	0.089	0.103	0.105	0.108
7.70	0.080	0.085	0.085	0.104	0.114	0.115
11.55	0.078	0.085	0.087	0.111	0.114	0.116
15.40	0.079	0.082	0.086	0.112	0.113	0.116
19.25	0.079	0.080	0.084	0.105	0.105	0.115
23.10	0.079	0.082	0.083	0.105	0.108	0.110
26.95	0.078	0.082	0.087	0.110	0.111	0.115
30.80	0.075	0.083	0.085	0.113	0.114	0.121
34.65	0.073	0.083	0.084	0.101	0.101	0.106
38.50	0.075	0.080	0.086	0.099	0.100	0.107
42.35	0.076	0.083	0.083	0.099	0.105	0.110
46.20	0.077	0.082	0.083	0.100	0.104	0.111
50.05	0.076	0.079	0.086	0.107	0.111	0.112
53.90	0.079	0.081	0.083	0.107	0.114	0.117
57.75	0.077	0.083	0.088	0.106	0.115	0.117
61.60	0.077	0.079	0.091	0.108	0.110	0.121
65.45	0.073	0.084	0.088	0.106	0.112	0.115
69.30	0.077	0.081	0.087	0.111	0.113	0.115
73.15	0.077	0.081	0.086	0.101	0.103	0.111
77.00	0.080	0.080	0.084	0.100	0.104	0.110
80.85	0.077	0.080	0.087	0.099	0.105	0.108
84.70	0.077	0.080	0.086	0.096	0.110	0.116
88.55	0.076	0.081	0.089	0.107	0.108	0.109
92.40	0.076	0.082	0.084	0.109	0.114	0.114
96.25	0.081	0.082	0.084	0.117	0.119	0.123
100.00	0.079	0.085	0.086	0.123	0.125	0.129

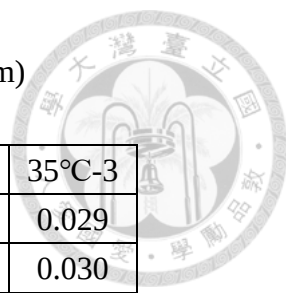
Note: 每組溫度進行三輪實驗，縱軸為 SoC 值，橫軸為對應溫度及實驗組數據

表 a-3 R_{ts} 參數推估實驗數據紀錄 1(unit: Ohm)

SoC(%)	−5°C-1	−5°C-2	−5°C-3	5°C-1	5°C-2	5°C-3	15°C-1	15°C-2	15°C-3
0.00	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.048	0.049	0.049
3.85	0.058	0.058	0.059	0.058	0.059	0.059	0.047	0.047	0.048
7.70	0.069	0.069	0.069	0.068	0.069	0.070	0.052	0.052	0.053
11.55	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.052	0.053	0.053
15.40	0.063	0.063	0.064	0.064	0.064	0.064	0.051	0.052	0.052
19.25	0.062	0.062	0.063	0.062	0.062	0.063	0.052	0.052	0.052
23.10	0.061	0.062	0.062	0.061	0.062	0.062	0.048	0.049	0.049
26.95	0.059	0.059	0.060	0.059	0.059	0.060	0.047	0.047	0.048
30.80	0.058	0.058	0.059	0.057	0.058	0.059	0.047	0.048	0.048
34.65	0.063	0.063	0.063	0.062	0.063	0.064	0.046	0.047	0.047
38.50	0.061	0.061	0.062	0.061	0.061	0.062	0.048	0.049	0.049
42.35	0.061	0.061	0.061	0.060	0.061	0.061	0.046	0.046	0.046
46.20	0.065	0.065	0.066	0.065	0.066	0.066	0.050	0.050	0.050
50.05	0.062	0.063	0.064	0.063	0.063	0.063	0.048	0.049	0.049
53.90	0.062	0.062	0.063	0.062	0.062	0.063	0.045	0.045	0.047
57.75	0.058	0.058	0.059	0.058	0.058	0.058	0.047	0.047	0.048
61.60	0.065	0.065	0.066	0.065	0.066	0.066	0.051	0.051	0.051
65.45	0.062	0.062	0.063	0.062	0.062	0.063	0.050	0.050	0.051
69.30	0.061	0.062	0.062	0.061	0.062	0.062	0.048	0.048	0.048
73.15	0.060	0.062	0.063	0.061	0.062	0.062	0.046	0.047	0.047
77.00	0.060	0.061	0.061	0.060	0.061	0.062	0.049	0.049	0.049
80.85	0.065	0.065	0.066	0.065	0.065	0.066	0.053	0.054	0.054
84.70	0.104	0.105	0.105	0.104	0.105	0.105	0.090	0.090	0.090
88.55	0.119	0.120	0.120	0.119	0.120	0.120	0.103	0.105	0.105
92.40	0.132	0.132	0.133	0.132	0.132	0.132	0.119	0.120	0.120
96.25	0.156	0.156	0.157	0.156	0.156	0.157	0.141	0.141	0.141
100.00	0.209	0.209	0.209	0.208	0.209	0.209	0.196	0.197	0.197

Note: 每組溫度進行三輪實驗，縱軸為 SoC 值，橫軸為對應溫度及實驗組數據

表 a-3 續 R_{TS} 參數推估實驗數據紀錄 2(unit: Ohm)



SoC(%)	25°C-1	25°C-2	25°C-3	35°C-1	35°C-2	35°C-3
0.00	0.026	0.026	0.026	0.029	0.029	0.029
3.85	0.027	0.027	0.028	0.029	0.030	0.030
7.70	0.028	0.029	0.029	0.029	0.030	0.031
11.55	0.030	0.031	0.031	0.030	0.031	0.031
15.40	0.030	0.030	0.030	0.031	0.031	0.032
19.25	0.028	0.028	0.029	0.029	0.029	0.029
23.10	0.027	0.027	0.028	0.029	0.029	0.029
26.95	0.024	0.025	0.026	0.028	0.029	0.029
30.80	0.024	0.024	0.025	0.029	0.029	0.029
34.65	0.025	0.026	0.026	0.028	0.029	0.030
38.50	0.027	0.027	0.027	0.029	0.029	0.029
42.35	0.024	0.024	0.024	0.028	0.029	0.029
46.20	0.028	0.028	0.029	0.029	0.029	0.029
50.05	0.026	0.026	0.026	0.028	0.029	0.029
53.90	0.025	0.025	0.026	0.029	0.029	0.029
57.75	0.025	0.025	0.025	0.029	0.029	0.029
61.60	0.027	0.028	0.028	0.029	0.029	0.029
65.45	0.026	0.026	0.027	0.029	0.029	0.029
69.30	0.024	0.025	0.025	0.028	0.029	0.029
73.15	0.026	0.026	0.027	0.029	0.029	0.029
77.00	0.028	0.028	0.030	0.029	0.030	0.030
80.85	0.030	0.030	0.031	0.033	0.033	0.034
84.70	0.068	0.069	0.069	0.068	0.069	0.070
88.55	0.083	0.084	0.084	0.085	0.085	0.085
92.40	0.098	0.098	0.098	0.102	0.104	0.104
96.25	0.120	0.121	0.121	0.123	0.123	0.123
100.00	0.172	0.173	0.173	0.173	0.173	0.173

Note: 每組溫度進行三輪實驗，縱軸為 SoC 值，橫軸為對應溫度及實驗組數據

表 a-3 續 R_{Ts} 參數推估實驗數據紀錄 3(unit: Ohm)



SoC(%)	40°C-1	40°C-2	40°C-3	45°C-1	45°C-2	45°C-3
0.00	0.027	0.027	0.027	0.026	0.026	0.026
3.85	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027
7.70	0.030	0.031	0.031	0.029	0.029	0.029
11.55	0.032	0.033	0.033	0.029	0.030	0.031
15.40	0.026	0.026	0.026	0.033	0.033	0.033
19.25	0.026	0.026	0.027	0.023	0.023	0.024
23.10	0.026	0.026	0.026	0.023	0.023	0.023
26.95	0.025	0.026	0.026	0.022	0.023	0.024
30.80	0.026	0.026	0.026	0.023	0.023	0.023
34.65	0.025	0.026	0.027	0.023	0.023	0.024
38.50	0.026	0.026	0.026	0.023	0.023	0.024
42.35	0.026	0.026	0.026	0.023	0.023	0.023
46.20	0.026	0.026	0.026	0.023	0.023	0.023
50.05	0.026	0.026	0.026	0.022	0.023	0.023
53.90	0.026	0.026	0.026	0.022	0.023	0.024
57.75	0.026	0.026	0.026	0.023	0.023	0.023
61.60	0.025	0.026	0.027	0.023	0.023	0.023
65.45	0.026	0.026	0.026	0.023	0.023	0.023
69.30	0.026	0.026	0.026	0.022	0.023	0.023
73.15	0.025	0.026	0.027	0.022	0.023	0.024
77.00	0.025	0.026	0.026	0.023	0.023	0.023
80.85	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034
84.70	0.045	0.045	0.045	0.044	0.044	0.044
88.55	0.092	0.092	0.092	0.089	0.089	0.089
92.40	0.113	0.113	0.113	0.103	0.103	0.103
96.25	0.141	0.141	0.141	0.134	0.135	0.136
100.00	0.221	0.221	0.222	0.200	0.201	0.202

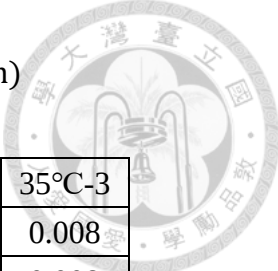
Note: 每組溫度進行三輪實驗，縱軸為 SoC 值，橫軸為對應溫度及實驗組數據

表 a-4 R_{TL} 參數推估實驗數據紀錄 1(unit: Ohm)

SoC(%)	-5°C-1	-5°C-2	-5°C-3	5°C-1	5°C-2	5°C-3	15°C-1	15°C-2	15°C-3
0.00	0.014	0.014	0.015	0.014	0.015	0.015	0.011	0.012	0.012
3.85	0.014	0.015	0.016	0.014	0.015	0.015	0.012	0.013	0.013
7.70	0.014	0.014	0.015	0.014	0.014	0.015	0.011	0.012	0.013
11.55	0.014	0.015	0.015	0.014	0.015	0.015	0.012	0.012	0.013
15.40	0.013	0.014	0.014	0.013	0.014	0.014	0.011	0.011	0.011
19.25	0.012	0.012	0.012	0.011	0.012	0.012	0.009	0.010	0.011
23.10	0.014	0.015	0.015	0.014	0.014	0.014	0.011	0.011	0.012
26.95	0.013	0.013	0.014	0.013	0.013	0.014	0.010	0.010	0.010
30.80	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.011	0.011	0.012
34.65	0.013	0.013	0.014	0.013	0.013	0.014	0.010	0.010	0.011
38.50	0.010	0.011	0.012	0.011	0.011	0.011	0.009	0.009	0.009
42.35	0.012	0.013	0.013	0.012	0.012	0.013	0.009	0.010	0.010
46.20	0.014	0.015	0.015	0.014	0.015	0.015	0.011	0.012	0.012
50.05	0.011	0.011	0.012	0.011	0.012	0.012	0.009	0.009	0.010
53.90	0.012	0.012	0.012	0.011	0.012	0.012	0.009	0.009	0.010
57.75	0.012	0.013	0.013	0.012	0.013	0.013	0.010	0.010	0.010
61.60	0.011	0.013	0.013	0.012	0.012	0.013	0.010	0.010	0.011
65.45	0.014	0.014	0.015	0.014	0.014	0.014	0.011	0.012	0.012
69.30	0.014	0.014	0.015	0.014	0.014	0.015	0.011	0.011	0.012
73.15	0.012	0.013	0.013	0.012	0.013	0.013	0.009	0.010	0.010
77.00	0.011	0.011	0.011	0.011	0.012	0.012	0.008	0.010	0.010
80.85	0.013	0.013	0.013	0.012	0.013	0.013	0.010	0.010	0.010
84.70	0.013	0.014	0.014	0.014	0.014	0.015	0.011	0.012	0.012
88.55	0.014	0.014	0.015	0.014	0.015	0.015	0.012	0.012	0.012
92.40	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.012	0.014	0.014
96.25	0.013	0.014	0.014	0.013	0.014	0.014	0.010	0.011	0.011
100.00	0.013	0.014	0.015	0.014	0.014	0.014	0.011	0.011	0.012

Note: 每組溫度進行三輪實驗，縱軸為 SoC 值，橫軸為對應溫度及實驗組數據

表 a-4 續 R_{TL} 參數推估實驗數據紀錄 2(unit: Ohm)



SoC(%)	25°C-1	25°C-2	25°C-3	35°C-1	35°C-2	35°C-3
0.00	0.006	0.008	0.008	0.007	0.007	0.008
3.85	0.008	0.008	0.009	0.008	0.008	0.008
7.70	0.007	0.007	0.009	0.008	0.008	0.009
11.55	0.008	0.008	0.008	0.007	0.008	0.008
15.40	0.006	0.006	0.007	0.007	0.008	0.008
19.25	0.005	0.006	0.006	0.006	0.007	0.007
23.10	0.007	0.007	0.008	0.006	0.006	0.008
26.95	0.005	0.006	0.006	0.006	0.007	0.007
30.80	0.006	0.006	0.008	0.006	0.007	0.007
34.65	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.008
38.50	0.005	0.005	0.005	0.006	0.007	0.007
42.35	0.005	0.006	0.007	0.006	0.007	0.007
46.20	0.006	0.007	0.008	0.006	0.007	0.007
50.05	0.004	0.006	0.006	0.006	0.007	0.007
53.90	0.004	0.005	0.005	0.006	0.007	0.007
57.75	0.005	0.006	0.007	0.006	0.007	0.007
61.60	0.005	0.005	0.006	0.006	0.007	0.007
65.45	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
69.30	0.007	0.007	0.007	0.006	0.007	0.007
73.15	0.005	0.006	0.006	0.006	0.007	0.007
77.00	0.005	0.005	0.005	0.006	0.007	0.007
80.85	0.005	0.005	0.006	0.006	0.007	0.007
84.70	0.007	0.008	0.008	0.007	0.007	0.007
88.55	0.007	0.007	0.008	0.008	0.008	0.009
92.40	0.008	0.009	0.009	0.008	0.008	0.009
96.25	0.006	0.006	0.006	0.008	0.008	0.008
100.00	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008

Note: 每組溫度進行三輪實驗，縱軸為 SoC 值，橫軸為對應溫度及實驗組數據

表 a-4 續 R_{TL} 參數推估實驗數據紀錄 3(unit: Ohm)



SoC(%)	40°C-1	40°C-2	40°C-3	45°C-1	45°C-2	45°C-3
0.00	0.007	0.008	0.008	0.008	0.008	0.009
3.85	0.008	0.008	0.008	0.008	0.009	0.009
7.70	0.008	0.008	0.009	0.009	0.009	0.009
11.55	0.007	0.008	0.008	0.008	0.008	0.010
15.40	0.006	0.008	0.008	0.009	0.009	0.010
19.25	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008
23.10	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008
26.95	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008
30.80	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008
34.65	0.006	0.007	0.008	0.007	0.007	0.008
38.50	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008
42.35	0.006	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008
46.20	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008
50.05	0.006	0.007	0.008	0.007	0.007	0.008
53.90	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008
57.75	0.006	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008
61.60	0.006	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008
65.45	0.006	0.007	0.008	0.007	0.007	0.008
69.30	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008
73.15	0.006	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
77.00	0.006	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
80.85	0.006	0.007	0.007	0.008	0.008	0.009
84.70	0.007	0.007	0.007	0.009	0.009	0.009
88.55	0.008	0.009	0.009	0.011	0.011	0.011
92.40	0.007	0.008	0.009	0.010	0.010	0.011
96.25	0.008	0.008	0.008	0.009	0.009	0.009
100.00	0.007	0.007	0.008	0.008	0.008	0.009

Note: 每組溫度進行三輪實驗，縱軸為 SoC 值，橫軸為對應溫度及實驗組數據

表 a-5 C_{TS} 參數推估實驗數據紀錄 1(unit: F)

SoC(%)	−5°C-1	−5°C-2	−5°C-3	5°C-1	5°C-2	5°C-3	15°C-1	15°C-2	15°C-3
0.00	934.267	934.844	934.902	934.339	934.719	934.955	949.005	949.077	949.643
3.85	935.914	936.737	937.080	936.228	936.645	936.858	950.095	950.497	950.565
7.70	935.005	935.876	935.940	935.254	935.647	935.920	949.816	950.056	950.392
11.55	934.507	935.251	935.574	934.923	935.171	935.238	949.436	949.467	949.654
15.40	935.387	935.878	936.394	935.713	935.715	936.231	950.614	950.637	950.655
19.25	934.708	934.926	935.403	934.791	935.049	935.197	949.061	950.094	950.220
23.10	935.785	935.832	936.204	935.658	936.018	936.145	949.965	950.642	950.666
26.95	934.490	935.484	935.606	934.897	935.205	935.478	949.110	949.663	949.672
30.80	935.793	936.719	936.767	936.141	936.566	936.571	950.610	950.633	950.819
34.65	935.596	935.779	936.223	935.690	935.881	936.027	949.429	949.789	950.477
38.50	935.740	936.570	936.633	935.381	936.358	937.205	949.725	950.264	950.423
42.35	934.817	935.371	936.137	935.343	935.391	935.591	949.511	949.766	950.750
46.20	935.245	935.504	935.540	935.190	935.195	935.905	949.267	949.676	949.679
50.05	935.350	935.542	935.550	935.261	935.530	935.653	949.300	949.730	950.519
53.90	935.500	935.524	935.549	935.283	935.624	935.667	949.610	949.706	950.530
57.75	935.125	935.332	935.790	934.920	935.653	935.675	949.057	950.066	950.202
61.60	935.747	935.861	937.186	935.916	936.238	936.640	950.212	950.467	951.019
65.45	934.379	934.992	935.096	934.144	935.063	935.260	948.790	948.883	949.415
69.30	936.847	936.927	938.130	936.991	937.204	937.709	950.776	951.115	951.939
73.15	936.206	936.870	937.739	936.892	936.918	937.006	950.731	951.316	951.481
77.00	934.874	935.198	936.037	935.135	935.390	935.584	949.040	949.378	949.713
80.85	936.839	937.221	937.253	936.842	937.082	937.389	950.578	951.534	951.632
84.70	936.152	936.767	937.119	936.456	936.657	936.925	950.815	951.032	951.382
88.55	936.668	936.752	937.404	936.568	937.064	937.192	950.867	950.982	951.378
92.40	935.774	936.060	936.283	935.384	935.841	936.892	949.919	950.482	950.834
96.25	935.519	936.974	937.363	936.132	936.854	936.871	950.301	950.806	950.972
100.00	935.622	935.966	936.408	935.240	935.991	936.766	948.995	950.098	950.720

Note: 每組溫度進行三輪實驗，縱軸為 SoC 值，橫軸為對應溫度及實驗組數據

表 a-5 續 C_{TS} 參數推估實驗數據紀錄 2(unit: F)



SoC(%)	25°C-1	25°C-2	25°C-3	35°C-1	35°C-2	35°C-3
0.00	969.375	969.683	969.948	970.303	970.568	971.041
3.85	969.153	969.373	970.617	969.618	970.142	971.195
7.70	969.603	969.893	970.747	969.586	969.871	970.105
11.55	969.696	969.951	970.415	969.339	969.359	969.653
15.40	969.291	969.930	970.357	969.914	969.984	970.617
19.25	969.601	969.846	970.165	968.775	969.335	969.866
23.10	969.484	970.039	970.569	969.845	970.594	970.714
26.95	969.727	970.090	970.549	969.195	969.273	969.887
30.80	969.916	969.982	970.259	968.890	969.194	969.542
34.65	969.401	969.548	970.318	969.133	969.485	970.582
38.50	969.872	970.508	970.544	969.147	969.351	969.579
42.35	968.958	970.083	970.766	969.429	969.436	969.731
46.20	968.889	969.325	969.491	969.233	969.329	969.493
50.05	969.874	970.168	970.347	969.619	970.523	971.686
53.90	969.791	969.900	970.654	969.470	969.660	969.730
57.75	969.573	970.689	970.777	968.229	969.362	970.241
61.60	970.238	970.455	970.511	968.491	969.449	970.828
65.45	968.750	969.596	970.189	969.674	969.760	971.057
69.30	970.537	970.670	970.716	970.532	970.668	970.669
73.15	970.426	970.816	970.896	969.856	969.877	970.019
77.00	969.416	970.019	970.244	969.959	970.168	970.597
80.85	969.844	970.354	971.155	969.943	970.220	970.479
84.70	970.172	970.506	971.551	969.660	970.078	970.743
88.55	969.952	970.411	971.216	969.005	970.086	970.416
92.40	970.085	970.124	971.217	969.960	970.096	970.393
96.25	969.702	969.968	970.048	968.982	969.490	969.704
100.00	969.310	970.135	970.928	970.198	970.544	971.547

Note: 每組溫度進行三輪實驗，縱軸為 SoC 值，橫軸為對應溫度及實驗組數據

表 a-5 續 C_{TS} 參數推估實驗數據紀錄 3(unit: F)



SoC(%)	40°C-1	40°C-2	40°C-3	45°C-1	45°C-2	45°C-3
0.00	969.404	969.600	969.965	968.775	969.418	970.359
3.85	969.599	969.658	970.607	969.872	970.343	971.478
7.70	969.984	970.125	970.901	969.871	970.562	970.585
11.55	969.014	969.918	970.351	970.865	970.961	971.340
15.40	968.663	970.012	970.315	970.263	970.342	970.635
19.25	970.048	970.470	970.709	969.165	969.875	970.387
23.10	969.081	969.179	969.564	969.479	969.485	970.858
26.95	969.965	970.071	970.487	969.832	969.955	969.965
30.80	969.005	969.070	970.007	970.302	970.544	970.546
34.65	970.161	970.389	971.421	971.303	971.328	971.467
38.50	969.485	970.222	970.772	970.160	970.421	970.859
42.35	970.016	970.288	970.529	970.708	970.797	971.792
46.20	969.125	969.614	969.700	970.179	970.791	971.330
50.05	969.975	970.974	971.379	970.547	971.572	971.717
53.90	970.329	970.948	971.012	970.570	971.549	972.345
57.75	969.863	969.952	970.666	971.854	972.147	972.495
61.60	969.138	969.764	969.977	970.669	970.795	971.166
65.45	970.292	970.747	970.800	970.894	971.257	971.318
69.30	969.544	969.992	970.347	970.515	971.106	971.590
73.15	969.685	969.692	969.938	971.218	971.451	971.573
77.00	969.146	969.600	969.786	970.886	970.894	971.142
80.85	968.668	969.359	969.971	971.597	972.303	972.413
84.70	969.913	970.037	970.575	971.187	971.709	971.760
88.55	969.098	969.332	969.485	969.795	970.794	971.458
92.40	970.058	970.801	971.497	970.764	970.926	971.078
96.25	969.745	970.016	970.200	971.009	971.351	971.419
100.00	970.446	970.473	970.931	970.000	970.392	971.015

Note: 每組溫度進行三輪實驗，縱軸為 SoC 值，橫軸為對應溫度及實驗組數據

表 a-6 C_{TL} 參數推估實驗數據紀錄 1(unit: F)

SoC(%)	-5°C-1	-5°C-2	-5°C-3	5°C-1	5°C-2	5°C-3	15°C-1	15°C-2	15°C-3
0.00	1790.804	1790.869	1791.339	1926.033	1927.047	1927.932	1969.808	1970.287	1971.145
3.85	1788.614	1788.880	1789.719	1924.828	1925.024	1925.362	1968.943	1969.363	1969.701
7.70	1788.773	1789.387	1789.454	1924.722	1925.130	1925.761	1968.568	1968.789	1968.967
11.55	1789.631	1789.759	1789.820	1925.212	1925.842	1926.157	1970.059	1970.430	1970.435
15.40	1790.817	1791.478	1791.692	1927.145	1927.379	1927.463	1969.668	1970.297	1970.537
19.25	1790.535	1791.096	1791.546	1926.033	1927.369	1927.775	1969.329	1970.138	1970.501
23.10	1790.038	1790.959	1791.550	1926.346	1926.812	1927.389	1969.305	1969.717	1970.388
26.95	1789.685	1789.752	1789.912	1925.236	1925.434	1926.679	1969.307	1969.688	1970.089
30.80	1790.934	1791.025	1791.619	1926.811	1927.233	1927.535	1970.665	1970.786	1971.090
34.65	1789.465	1789.481	1789.956	1925.157	1925.553	1926.192	1968.899	1969.586	1969.720
38.50	1788.947	1789.695	1790.160	1924.704	1925.959	1926.139	1968.330	1968.486	1969.078
42.35	1789.949	1790.529	1791.580	1926.022	1926.976	1927.061	1968.818	1969.460	1970.839
46.20	1789.305	1790.301	1791.054	1926.038	1926.198	1926.424	1969.477	1969.622	1969.682
50.05	1790.741	1790.774	1791.504	1926.603	1926.845	1927.570	1970.380	1970.529	1971.073
53.90	1790.301	1790.335	1791.227	1926.536	1926.568	1926.758	1969.529	1969.531	1969.618
57.75	1789.169	1789.524	1789.541	1925.085	1925.499	1925.650	1968.910	1969.368	1970.708
61.60	1789.965	1791.583	1791.823	1926.834	1927.068	1927.468	1968.955	1970.053	1970.819
65.45	1790.328	1790.728	1791.061	1926.429	1926.835	1926.853	1970.348	1970.483	1971.421
69.30	1788.441	1789.540	1789.593	1924.994	1925.176	1925.402	1969.243	1969.560	1969.908
73.15	1790.374	1791.405	1791.795	1926.542	1927.040	1927.993	1970.601	1970.641	1970.774
77.00	1790.149	1790.537	1791.137	1926.449	1926.491	1926.882	1970.062	1970.661	1970.672
80.85	1790.435	1790.665	1791.188	1926.358	1926.558	1927.373	1970.586	1970.838	1970.867
84.70	1788.129	1788.491	1788.616	1923.814	1924.381	1925.041	1968.681	1968.707	1969.677
88.55	1789.671	1790.566	1791.053	1925.947	1926.482	1926.860	1969.404	1969.862	1970.901
92.40	1790.538	1790.832	1791.288	1926.814	1926.850	1926.993	1969.463	1969.960	1970.015
96.25	1528.577	1528.785	1529.024	1664.607	1664.843	1664.937	1692.349	1692.526	1692.606
100.00	1204.900	1204.907	1205.666	1340.927	1341.087	1341.459	1501.249	1501.883	1502.218

Note: 每組溫度進行三輪實驗，縱軸為 SoC 值，橫軸為對應溫度及實驗組數據

表 a-6 續 C_{TL} 參數推估實驗數據紀錄 2(unit: F)



SoC(%)	25°C-1	25°C-2	25°C-3	35°C-1	35°C-2	35°C-3
0.00	1999.906	2000.347	2000.602	1999.534	1999.704	2000.289
3.85	1998.608	1999.342	2000.123	1999.927	1999.984	2000.351
7.70	1999.213	1999.245	1999.610	1999.121	1999.433	2000.644
11.55	1999.851	1999.915	2000.079	1999.163	2000.321	2000.756
15.40	2000.267	2000.784	2001.261	1999.300	2000.345	2000.444
19.25	1999.203	1999.381	1999.604	1999.235	1999.674	2000.012
23.10	1999.776	1999.908	2000.104	1998.923	1999.777	1999.782
26.95	1999.427	1999.852	2000.179	2000.002	2000.464	2001.262
30.80	2000.041	2000.077	2000.687	1998.969	1999.642	1999.654
34.65	1999.361	1999.374	2000.299	1999.551	2000.296	2001.431
38.50	1998.884	1999.269	1999.730	1999.547	2000.198	2000.678
42.35	1999.848	1999.979	2000.420	1998.985	1999.106	2000.134
46.20	1999.309	1999.401	2000.050	1999.160	1999.475	1999.586
50.05	2000.361	2000.881	2001.123	2000.283	2000.473	2000.706
53.90	1999.226	1999.366	1999.514	1999.755	1999.763	1999.947
57.75	1999.189	1999.700	1999.768	1999.867	2000.215	2000.520
61.60	1999.549	2000.853	2001.578	1999.925	2000.064	2000.174
65.45	1999.198	2000.252	2000.630	2000.028	2000.508	2000.668
69.30	1998.499	1999.530	2000.125	1999.597	2000.006	2000.984
73.15	1999.829	2000.111	2000.361	1999.779	1999.973	2001.199
77.00	1999.967	2000.153	2001.137	1999.690	1999.916	2001.043
80.85	2000.339	2000.361	2000.563	2000.133	2000.711	2000.834
84.70	1999.620	1999.850	1999.956	1999.953	2000.382	2000.893
88.55	1999.607	1999.612	1999.925	1998.972	1999.344	2000.211
92.40	2000.112	2000.204	2000.288	1999.569	1999.680	1999.973
96.25	1675.011	1675.056	1675.503	1533.834	1534.359	1534.577
100.00	1442.850	1443.304	1443.530	1340.779	1341.275	1341.919

Note: 每組溫度進行三輪實驗，縱軸為 SoC 值，橫軸為對應溫度及實驗組數據

表 a-6 續 CTL 參數推估實驗數據紀錄 3(unit: F)

SoC(%)	40°C-1	40°C-2	40°C-3	45°C-1	45°C-2	45°C-3
0.00	1999.132	1999.612	2000.529	2000.897	2001.928	2002.706
3.85	1999.993	2000.549	2000.865	2001.870	2002.173	2002.482
7.70	2000.123	2000.328	2000.617	2000.761	2000.790	2001.050
11.55	1999.374	1999.494	1999.539	2001.272	2002.372	2002.827
15.40	1999.287	1999.443	1999.595	2000.253	2000.752	2001.121
19.25	1999.513	2000.409	2001.121	1999.469	1999.977	2000.710
23.10	1999.500	1999.879	2000.028	2000.399	2001.132	2001.882
26.95	1999.917	2000.076	2000.566	1999.926	2000.235	2000.417
30.80	1999.432	1999.715	2000.093	2001.717	2001.986	2002.269
34.65	1999.069	1999.094	2000.272	2001.093	2001.260	2001.779
38.50	1999.074	1999.340	2000.200	2001.029	2001.399	2001.868
42.35	2000.426	2000.489	2000.819	2000.277	2000.548	2000.599
46.20	1999.215	1999.448	1999.820	2000.571	2001.007	2001.168
50.05	1998.509	2000.094	2000.402	1999.143	2000.039	2000.728
53.90	1999.219	1999.427	1999.753	2000.842	2001.484	2001.598
57.75	1999.326	1999.558	1999.947	1999.927	2000.393	2000.792
61.60	1999.260	1999.988	2000.266	2000.434	2001.095	2002.171
65.45	1999.398	1999.572	1999.660	2001.620	2002.039	2003.112
69.30	1999.972	2000.030	2000.429	1999.979	2000.137	2001.465
73.15	1999.344	1999.613	2001.024	1999.934	2000.777	2000.867
77.00	1999.839	2000.575	2000.640	2000.801	2000.907	2001.021
80.85	1999.853	2000.406	2001.468	2000.388	2000.919	2000.934
84.70	1999.150	1999.680	2000.440	2001.420	2001.462	2001.671
88.55	1999.759	1999.801	1999.877	2000.869	2000.959	2000.972
92.40	1999.836	1999.940	2000.832	2000.319	2000.859	2001.597
96.25	1444.124	1444.251	1444.939	1279.040	1279.053	1280.117
100.00	1261.337	1261.620	1262.196	1076.909	1077.355	1077.422

Note: 每組溫度進行三輪實驗，縱軸為 SoC 值，橫軸為對應溫度及實驗組數據

表 a-7 實驗電池單元健康度紀錄(unit: %)

	EMF test-1	EMF test-2	EMF test-3	HPPC test-1	HPPC test-3	HPPC test-3
−5°C	98.56%	98.28%	98.13%	98.52%	98.39%	98.01%
5°C	98.52%	98.33%	98.03%	98.51%	98.44%	97.93%
15°C	98.53%	98.35%	98.10%	98.49%	98.36%	98.05%
25°C	98.59%	98.21%	98.17%	98.45%	98.34%	98.11%
35°C	98.49%	98.37%	98.06%	98.57%	98.41%	97.96%
40°C	98.47%	98.38%	98.16%	98.56%	98.26%	97.90%
45°C	98.58%	98.28%	98.18%	98.48%	98.37%	98.04%

Note: 通過完整 CC-CV 充電之容量與標定容量(2600 mAh)比值計算健康度，紀錄之數據為實驗開始時之電池健康度