

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 Thesis

快速電池健康度估測應用於 18650 鋰離子電池

Quick State of Health Estimation for 18650 Li-Ion

Batteries

張育國

Yu-Kuo Chang

指導教授：黃振康 博士

Advisor: Chen-Kang Huang, Ph.D.

中華民國 112 年 7 月

July 2023



摘要

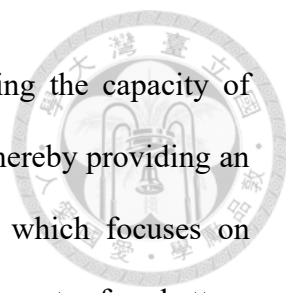
隨著各方重視淨零碳排，農機電動化為重要的發展方向。其中電池與能源的管理相當重要，必須了解電池之壽命以及使用狀況，延長使用壽命。本研究旨在開發電池管理系統之評估電池健康狀態 (State of Health, SOH) 快速估算方法以及可用電量估測。在獲取電池充放電實驗之完整電壓、電流及溫度，使用 Arduino Nano 控制板，搭配電壓、電流以及溫度感測器製作監控裝置，同時將數據記錄於記憶卡中，完成資料收集。快速估算法藉由大電流放電，觀察電壓下降幅度，以快速估算法與等效電路模型計算電池之內電阻，不需要額外量測儀器，可在短時間得知電池之 SOH。以快速估算法得知，大部分廠牌電池 SOH 為 0% 時，其電池容量約為原始容量之 60%。使用快速估算法與儀器量測之內電阻計算 SOH，其均方根誤差 (Root Mean Square Error, RMSE) 為 3.0 %；使用等效電路模型計算出內阻與儀器量測之內電阻計算 SOH，其 RMSE 為 3.8 %。利用完整公開之電池資料集，經由訓練模型預測電池容量，預測結果之 RMSE 為 178 mAh。在老舊電池之容量浮動約 200 mAh 的狀況，預測結果會較接近真實容量。真實容量和預測容量計算 SOH，RMSE 為 5.7%。因有完整的循環狀況，此方法適合用於估測老化情形較嚴重之電池的容量，進而估算電池之 SOH。本研究對於開發電池管理系統之電池內電阻以及 SOH 之估算，希望對於未來電動農機或者田間充電站之充放電管理系統的發展，可以提供一些實驗經驗以及數據，並產生更多討論和研究想法。

關鍵字: 電動農機、內電阻、電池健康狀態 (State of Health, SOH)、電池電量狀態 (State of Charge, SOC)、支持向量迴歸 (Support Vector Regression, SVR)

Abstract



Due to the increasing focus on achieving net-zero carbon emissions, traditional agricultural machinery is gradually transitioning to electric systems for operation. Effective battery and energy management is very important. It is essential to understand battery lifespan and usage conditions in order to prolong operational time and achieve sustainability goals. This research aims to develop a fast estimation method for evaluating State of Health (SOH) and estimating available energy in a battery management system. To obtain complete voltage, current and temperature data during battery charging and discharging experiments, Arduino Nano control board was utilized along with voltage, current and temperature sensors to create a monitoring device. The collected data was then recorded on a memory card for data collection purposes. In response to the agricultural environment, a fast estimation algorithm was proposed, which utilizes high-current discharging to observe voltage drop and calculate battery internal resistance without the need for additional measurement instruments. This method allows for the quick assessment of the battery's SOH within a short timeframe. According to this method, when the SOH of most battery brands is 0%, their capacity is approximately 60% of the original capacity. The root mean square error (RMSE) for estimating SOH using the fast estimation method and instrument measurement for internal resistance calculation is 3.0%. On the other hand, the RMSE for estimating SOH using the Internal resistance obtained through equivalent circuit model and instrument measurement is 3.8%. By utilizing publicly available battery datasets, a trained model was employed to predict battery capacity, resulting in a RMSE of 178. In cases where the capacity of older batteries fluctuates by approximately 200mAh, the predicted results are closer to the actual capacity. The RMSE for calculating SOH by comparing real capacity and predicted



capacity is 5.7%. This method is particularly suitable for estimating the capacity of heavily aged batteries by considering complete cycling conditions, thereby providing an estimation of the battery's SOH. The objective of this research, which focuses on estimating battery internal resistance and SOH for the development of a battery management system, is to provide experimental experience, data, and generate more discussions and research concepts for the development of charging and discharging management systems in electric agricultural machinery or on-field charging stations.

Key words : Electric agricultural machinery , Internal resistance, State of Health (SOH), State of Charge (SOC), support vector regression (SVR)

目錄

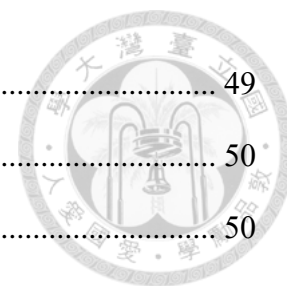


摘要	i
Abstract.....	ii
圖目錄	vii
表目錄	ix
第一章 前言	1
1.1 背景	1
1.2 研究背景	2
第二章 文獻探討	4
2.1 農機電動化	4
2.1.1 碳足跡	5
2.1.2 碳中和	6
2.1.3 淨零	6
2.1.4 電動農機	9
2.2 儲能電池	10
2.2.1 鉛酸電池簡介	11
2.2.2 鉛酸電池結構	11
2.2.3 鉛酸電池工作原理	13
2.2.4 三元鋰離子電池簡介	14
2.2.5 鋰離子電池結構	14
2.2.6 鋰離子工作原理	17
2.2.7 磷酸鋰鐵電池(LFP)簡介.....	18
2.2.8 磷酸鋰鐵電池結構	18
2.2.9 常用電池比較	18
2.3 電池基本特性與參數	20



2.3.1 能量型電池與動力型電池特性	20
2.3.2 電池電量狀態(State of Charge, SOC)	21
2.3.3 電池健康狀態(State of Health, SOH)	21
2.4 電量估測方法	21
2.4.1 庫倫計量法	22
2.4.2 開路電壓法	22
2.4.3 電解質物理特性量測	23
2.5 電池健康狀態估測	23
2.5.1 以容量估測	23
2.5.2 以內電阻估測	24
2.6 等效電路模型模擬	26
2.6.1 分析電池等效電路模型	27
2.6.2 放電測試進行模擬	27
2.7 機器學習	29
2.7.1 標準機器學習預測電池容量	29
2.7.2 支援向量迴歸(Support Vector Regression, SVR)應用於電池	31
第三章 研究方法	35
3.1 電壓、電流及溫度監控裝置	35
3.1.1 硬體選擇與架構	36
3.1.2 流程架構	39
3.2 快速估算方法	41
3.2.1 實驗儀器介紹	42
3.2.2 快速估算法實驗流程	44
3.2.3 放電方法	45
3.2.4 充電方法	47
3.3 等效電路模型方法	49

3.3.1 以大電流放電方法計算模型元件之參數.....	49
3.4 以機器學習方法預測電池容量.....	50
3.4.1 電池資料集介紹.....	50
3.4.2 電池資料集之特徵提取.....	50
3.4.3 基於支持向量迴歸 (SVR) 預測電池容量.....	51
第四章 結果與討論.....	53
4.1 電壓、電流及溫度監控裝置.....	53
4.1.1 電壓、電流及溫度監控裝置.....	53
4.1.2 電壓、電流及溫度監控裝置校正.....	54
4.1.3 電壓電流監控裝置結果.....	60
4.2 大電流放電實驗.....	62
4.2.1 大電流放電實驗.....	62
4.2.2 快速估算法.....	67
4.2.3 等效電路模擬.....	71
4.3 SVR 預測電池容量.....	74
第五章 結論與建議.....	76
5.1 結論.....	76
5.2 建議.....	77
第六章 參考文獻.....	78



圖目錄



圖 1.1 永續三要素	1
圖 1.2 不同類型之電動農機	2
圖 2.1 人為排放之溫室體變化量	8
圖 2.2 鉛酸電池結構	12
圖 2.3 鋰離子結構圖	15
圖 2.4 鋰離子電池內部隔離膜	17
圖 2.5 不同正極材料之鋰電池特性	20
圖 2.6 鉛酸電池開路電壓與電池充電狀態之關係	23
圖 2.7 直流法的電路模型	25
圖 2.8 二階等效電路模型	27
圖 2.9 混和脈波功率特性測試電壓電流曲線	28
圖 2.10 機器學習之模型架構	29
圖 2.11 SVM 示意圖	31
圖 2.12 SVR 示意圖	32
圖 2.13 使用鬆弛變數和損失函數之 SVR	33
圖 3.1 研究方法架構圖	35
圖 3.2 電壓、電流及溫度監控裝置硬體架構圖	36
圖 3.3 分壓電路示意圖	37
圖 3.4 電壓、電流及溫度監測裝置流程架構圖	40
圖 3.5 PEL-3041 可程控直流電子負載	43
圖 3.6 PSW 80-27 可程控開關電源	43
圖 3.7 放電實驗流程圖	45
圖 3.8 恆流恆壓充電法示意圖	47
圖 3.9 18650 電池充電流程	48

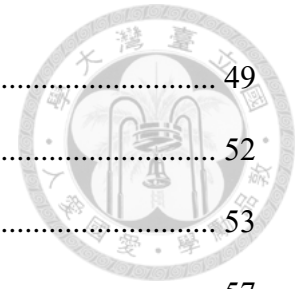


圖 3.10 一階等效電路	49
圖 3.11 SVR 訓練流程.....	52
圖 4.1 電壓、電流及溫度監控器	53
圖 4.2 電壓與電流感測器線路示意圖	57
圖 4.3 電流與電壓誤差之關係圖	58
圖 4.4 A 廠牌鋰電池電壓、電流曲線	60
圖 4.5 電池放電之溫度曲線.....	61
圖 4.6 彈片式電池盒	62
圖 4.7 LG_2600_1 內阻變化.....	63
圖 4.8 LG_2600_2 內阻變化.....	64
圖 4.9 LG_2600_3 內阻變化.....	64
圖 4.10 LG_2600_4 內阻變化.....	65
圖 4.11 LG_3400 內阻變化.....	65
圖 4.12 P_LFP_1100 內阻變化	66
圖 4.13 P_LFP_1500 內阻變化.....	66
圖 4.14 LG_2600MAH 新舊電池放電曲線圖	67
圖 4.15 LG_3400MAH 新舊電池放電曲線圖	67
圖 4.16 SANYO_2600MAH 新舊電池放電曲線圖	68
圖 4.17 使用 PEL-3041 之 LG_2600MAH 放電曲線	71
圖 4.18 使用 PEL-3041 之 LG_3400MAH 放電曲線	72
圖 4.19 使用 PEL-3041 之 SANYO_2600MAH 放電曲線.....	72

表目錄



表 2.1 化石燃料的生產和燃燒所產生的二氧化碳排放量	5
表 2.2 各溫室氣體之 GWP	7
表 2.3 電解液溶劑的物理性質	16
表 2.4 各類電池之參數	19
表 2.5 電池電量以及健康狀態檢測方法優缺點比較	26
表 2.6 各模型之 RMSE	30
表 2.7 不同核函數之表示式	34
表 4.1 無電流下電壓量測與校正之結果	55
表 4.2 電流量測與校正結果	56
表 4.3 電壓電流校正結果	58
表 4.4 二次校正後量測結果	60
表 4.5 大電流放電測試之電池實驗結果	69
表 4.6 LG_2600 和 LG_3400 之 C 和 Y	69
表 4.7 SANYO_2600 之 C 和 Y	70
表 4.8 鉛酸電池之 C 和 Y	70
表 4.9 HANLIN_2300MAH 之 C 和 Y	71
表 4.10 一階等效電路各元件之參數值	73
表 4.11 以等效電路模型所得之 LG 電池之 Y	73
表 4.12 不同方法獲得之內阻計算 SOH 之比較表	74
表 4.13 SVR 預測結果	74
表 4.14 以 SVR 預測容量與真實容量計算 SOH 結果	75

第一章 前言



1.1 背景

因暖化來的氣候異常，近年來隨著各界重視減碳，目前各國積極的推動淨零政策，陸續提出「2050 淨零碳排」的宣示與行動，降低碳排放量已經成為各產業發展的重點，電氣化為快速且有效率的解決方法。

當今造成氣候異常主要由工業革命導致，排放大量的溫室氣體，造成地球暖化升溫。針對解決氣候危機目標來說，主要分為以下三種階段：碳中和、淨零和負碳排。碳中和指的是利用各種手段將所有碳排放進行抵銷。淨零又稱淨零碳排，造成暖化的氣體不只是二氧化碳，還有臭氧、甲烷等，必須減少所有溫室氣體的排放，將人為所產生的溫室氣體接近於零。最後階段則是負碳排，在這些組織或者企業所消除的二氧化碳遠超過排放的二氧化碳量，就達成了負碳排。

過去以經濟發展為目標的做法，造成環境上的危害，以至於影響了經濟的發展。廣義上來說，永續發展是在不影響後代之情況下，滿足現代的需求。一般可由三個方向來解釋永續發展，環境、社會和經濟要素，如圖 1.1 所示，必須在三個要素中找到平衡點。

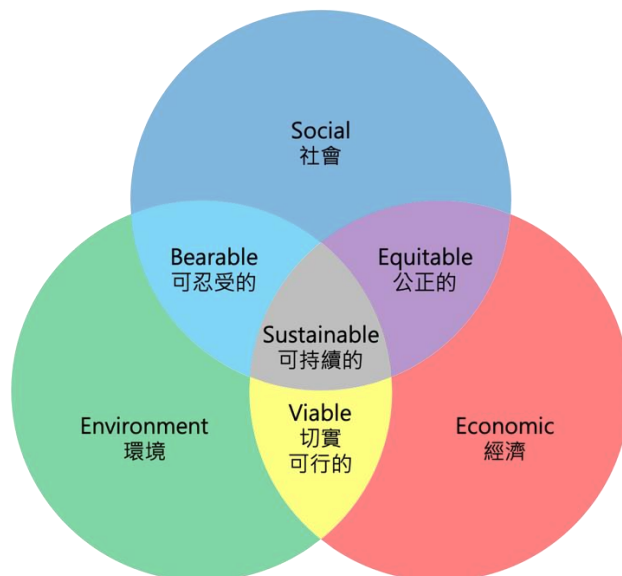


圖 1.1 永續三要素

在農業上，農用機具是不可或缺的一部分，各界重視淨零碳排，傳統農機逐漸轉換為使用電力為主的工具，以達永續所追求的低污染、低排放。將以往傳統農具使用的引擎與油箱改為由直流馬達和蓄電池來驅動，可以減少碳排，又可以降低能源的浪費。



圖 1.2 不同類型之電動農機 (蘇等人, 2022)

在農機的電池選擇上，主要使用鋰電池和鉛酸電池。鋰電池為成熟且穩定的電池，許多的電動車廠商都選擇此電池做為動力來源，它的優點是單體的體積小、容量大、電壓高、能量密度及循環次數高且較沒有記憶效應。

目前常用工具機所使用的二次電池，因成熟的技術已取代了鎳氫電池。早期鋰離子電池常用於電子產品中，因此類電池的能量密度大、較長使用壽命、沒有記憶效應，且低自放電率。因為有這類特性所以鋰離子電池具有極大的優勢 (Chaturvedi *et al.*, 2010)。

1.2 研究背景

電池是電動農機的主要能量供給，對於電池之充放電控制以及健康程度上的掌握，是提升電動農機使用效率的關鍵因素。所以在充電站的建置上，必須考量多種充電的充電方法，在不傷害電池的情況下，以最快的速度將電池回復至飽和狀態。一般定電壓充電法，在充電初期會因為過大的電流導致電池的容量及性能劣化，且

電流會因電池的充飽程度而降低。所以若沒有一套優良的充電管理系統則會對電池造成一定的損傷。

一般商用鋰電池有各種尺寸及形狀，其中常見格式為 14500、18650 和 21700，以 18650 來說明其規格，它代表長度為 65 毫米，直徑為 18 毫米之圓柱形電池，本研究使用 18650 電池進行充放電實驗來進行探討。

評估電池之健康狀態是否良好的物理特性為其容量以及內電阻，每顆電池出廠會標明其額定容量，因製作過程和保存條件的影響下，會導致實際容量會與標示之額定容量有所誤差。其內電阻在使用週期中，因電池材料的化學變化而產生性能衰退，此特性也是判斷電池健康度的指標之一。

當前在電池的電量估測上有許多研究方法，但都因為其測量成本和使用場域的考量，故無法普及使用。所以本研究會針對幾種常見的電量估算方法結合電池之內電阻，用以加速評估電池的剩餘電量和老化程度。

本研究的目的是以快速且低成本之方法，獲得估算電池剩餘電量以及老化程度的參數，主要包含記錄電池參數、SOH、SOC 等部分。

在電池放電時，其參數的量測是藉由 Arduino 使用自身類比輸入結合 ACS758 電流感測模組以及 DS18B20 溫度感測器，來進行電壓、電流和溫度的量測，且利用 SD 卡模組記錄數據，結合可調數控恆流電子負載進行放電，每次放電結束，記錄此次電池容量，並且使用內阻測試儀，量測電池放電前後之內電阻，進而計算出 SOH、SOC。

第二章 文獻探討



2.1 農機電動化

目前的汽車產業投入大量研究工作，為找到降低排放方法，同時確保車輛的駕駛性能及動力表現不受影響。自 2009 年起，歐盟對新型乘用車實施強制性的二氧化碳 (CO₂) 排放標準。該規定要求從 2020 年開始，新車的平均排放量應為每公里 95 克 CO₂。從 20 世紀 90 年代初開始，乘用車的氮氧化物 (NO_x) 和柴油顆粒物排放已受到監管，而非道路車輛的監管則始於 20 世紀 90 年代中期，並且排放限制逐漸變得更加嚴格 (Gorjian *et al.*, 2021)。

國際農業研究諮商組織 (Consultative Group on International Agricultural Research, CGIAR) 指出，農業產品供應鏈消耗了全球能量的 30%，且對化石燃料的高度依賴，溫室氣體 (Greenhouse Gas, GHG) 排放大約占全球總量的三分之一 (19~29%)，農業耕作方式則導致全球年度二氧化碳 (CO₂) 排放量接近 20%。農業相關部門的溫室氣體排放通常以碳當量 (carbon dioxide equivalent, CO₂e) 來表示。發電是造成碳足跡最高比例 (78%) 的因素。農業相關部門面臨提高能源價格、化石燃料枯竭速度加快、水資源減少、對農藥的抗性以及環境保護等挑戰。為了在農業領域實現可持續發展，聯合國糧食及農業組織 (The Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) 提出了三個必要條件：增加生產力和收入、應對氣候變遷的適應性與靈活性，以及減輕或消除溫室氣體排放 (Moreda *et al.*, 2016)。

可持續性農業已成為全球農業發展的熱門話題。隨著人們和國際組織對環境保護和資源節約的意識提高，農業相關產業也開始尋求更環保且可持續的方法來種植和生產食物。燃燒化石燃油釋放出大量的 CO₂ 和其餘溫室氣體，使氣候變化產生不良影響，製造和燃燒產生二氧化碳排放量，如表 2.1。而電動農機採用電力

作為動力來源更可與再生能源系統，如太陽能板等結合使用，進一步減少對傳統電網的依賴，盡可能消除尾氣排放。



表 2.1 化石燃料的生產和燃燒所產生的二氧化碳排放量 (Dwipayana *et al.*, 2018)

燃料種類	燃料燃燒	製造及運輸	總和
汽油	18.34	2.93	21.27
柴油	18.92	3.03	21.95
蒸餘油	20.19	3.23	23.42
液化石油氣	16.11	2.58	18.69
石油焦	26.41	4.23	30.64
輕油	18.84	3.01	21.85
煤	24.43	0.73	25.16
天然氣	13.72	0.82	14.54
木頭	25.32	0.12	25.44
輪胎熱解	22.19	0.07	22.26

2.1.1 碳足跡

氣候變化已成為當代最大的環境和發展挑戰，也影響著可持續發展的重要性。Wackernagel and Rees (1998) 將生態經濟學的容受力評估作為基礎，轉換成生態足跡之概念。

生態足跡的概念就是種量化指標，用於衡量人類活動對生態系統的影響和資源利用程度。它基於將人類活動產生的資源消耗和廢物排放轉換為等價的土地面積，以評估人類對生態系統的壓力，而碳足跡的定義是指衡量一項產品或者行為在其生命週期中，直接和間接產生的 CO₂ 排放量。從原物料的採集和製造階段，到產品的使用和最終處理階段所產生的碳排放(Wiedmann and Minx, 2007)。

通過碳足跡分析，可以辨別碳排放之最大來源，並且優先選擇需要減少排碳的領域，有助於管理排放且評估減排措施 (Pandey and Agrawal, 2014)。



2.1.2 碳中和

為一家企業、組織、個人或者一項產品及活動，在一定的期間內直接或者間接所產生二氧化碳之排放量，透過各種手段，抵銷所排放之二氧化碳，也就是說達成了淨零排放二氧化碳或者是碳中和 (Chen *et al.*, 2022)。

為了實現碳中和，政府間氣候變化專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)，在關於全球升溫高於工業革命前的水準之 1.5°C 的特別報告中強調了淘汰或者取代石化燃料的必要性，且將可再生能源的利用比例提高，增加能源效率。Hepburn *et al.* (2021) 指出在不同地區、國家和城市，都已經制定了不同策略，以達成碳移除以及封存，就現實層面來說，仍然具有挑戰性。

聯合國氣候變遷大會 (cop26) 對實現碳中和的影響進行了討論，要在 2050 年至 2060 年間達成碳中和，所有會員國需採取兩種方法，減排和碳移除，把全球能源系統轉換為清淨能源技術為主導的系統 (Chen *et al.*, 2022)。

2.1.3 淨零

又稱淨零碳排 (net zero)，目前已有 130 多個國家宣示並採取行動，估計於 2050 年之前，達淨零碳排。造成暖化的溫室氣體，其中二氧化碳和甲烷 (CH₄) 佔大部分，約為 80~85%，其餘氣體如，氧化亞氮 (N₂O)、臭氧層破壞物質 (Ozone Depleting Substances, ODS)、氟氯碳化物 (HFCs)、六氟化硫 (SF₆) 和全氟碳化物 (PFCs)，這些一併屬於溫室氣體。在排放後的數十年，還是會對氣候產生影響，其中二氧化碳和氧化亞氮，更會在大氣中存在百年以上。但因上述非二氧化碳的溫室氣體的排放，大部分都是因為食物和能源的基本需求有關，故需全球國家努力減少它們，否則將導致氣候持續變暖 (Montzka *et al.*, 2011; Smith *et al.*, 2008; Tuckett, 2019)。

在此研究中(Herzog *et al.*, 2000)，提出一種標準單位，用以描述不同種類的溫室氣體，對於任一種溫室氣體，都可以轉換為二氧化碳當量(Carbon dioxide equivalent, CO₂e)，其意義代表具有相同影響程度的二氧化碳量；若將 GHG 的排放量乘上全球暖化潛勢(Global warming potential, GWP)，即可得到其 CO₂e，如 (2-1) 式；各溫室氣體之 GWP，如表 2.2，將所有氣體統一成相同單位，可以進行直接的比對。

$$W_{gas} \cdot GWP = CO_2 e \quad (2-1)$$

其中 W_{gas} 為氣體重量。

表 2.2 各溫室氣體之 GWP (Dwipayana *et al.*, 2018)

No.	Type	Chemical Formula	GWP 100-year
1	Carbon dioxide	CO ₂	1
2	Methane	CH ₄	28
3	Nitrogen oxide	N ₂ O	265
4	CFC-11	CCl ₃ F	4660
5	CFC-12	CCl ₂ F ₂	10200
6	CFC-13	CClF ₃	13900
7	CFC-113	CCl ₂ FCClF ₂	5820
8	CFC-114	CClF ₂ CClF ₂	8590
9	CFC-115	CClF ₂ CF ₃	7670

Montzka *et al.* (2011)在研究中指出，從 1980 年代開始，人為產生的非 CO₂ 氣體的排放量與燃燒化石燃料的的排放相等，如圖 2.1 所示。1990 年代，非二氧化碳溫室氣體的總排放量已經下降到 15 Gt CO₂e/yr，這些減排已經足以抵銷其他溫室氣體排放，但自 2003 年開始，燃燒化石燃料的排放量又超出了這些減排。由此可知，

在農業及工業領域上實現淨零碳排，要在之間取得平衡是有挑戰性的。Fankhauser *et al.* (2022)提出，淨零碳排的過程中需考慮長期性和持續性，若是在短短幾十年間，依靠植樹造林或碳捕捉技術進行的去除，同時大量排放化石燃料產生的溫室氣體，這樣並無法解決根本問題。必須轉向清淨能源、提高能源效率，通過農業實踐和工業轉型，實現可持續性的淨零排放目標。

最終是從大氣中移除的二氧化碳超過排放之二氧化碳，就可以實現負碳排目標。許多企業及政府相關部門，如微軟及學術機構之研究中心，從固碳技術至新型節能機具之開發，以達到永續發展（方，2023）。

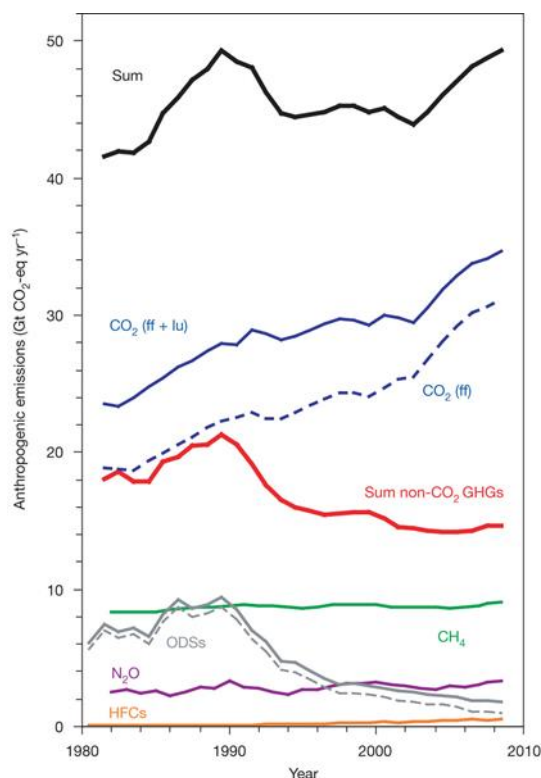


圖 2.1 人為排放之溫室體變化量(Montzka *et al.*, 2011)




2.1.4 電動農機

因全球減碳的浪潮加速推動，為了保護環境，相關機構對於燃燒石化燃料的車輛及機械工業進行排氣限制，加速了電動化的發展。將中小型燃油引擎轉變為電動式農機，減少傳統農機所排放的溫室氣體和有害懸浮微粒；電動農機還具有低噪音和降低維護成本等優勢 (周，2022)。

電動農機的功率需根據具體的應用需求來設計和選擇，對於較高負載的農機，如搬運車、中耕機，使用的馬達扭力較高，功率約數千瓦；而較低負載的農機，如背負式割草機，則所需功率約數百瓦，可採用功率及扭力較小的馬達。在此供需之間的差異下，儲能電池在其中的運作至關重要。電池的設計和性能直接的影響農機的續航能力整體功率。高性能的電池可提供更長的工作時間及動力輸出，而增加農機的效率 and 便利性 (周，2022)。

因電動車的發展如日中天，所以農業機械相關的電動機、電池與其相關控制模組的發展也蒸蒸日上，以內燃機為主的農機正逐步改以電動化方式作業。因電動化大量減少碳排外，電動化也使農機的操作控制上更加靈活多元、更加智慧化(蘇等人，2022)。

目前的農業機械大部分都是以小型機具，例如噴霧機、割草機和搬運機等等已有許多電動化的產品在市面可以選用，電動的割草機大多採用無刷馬達的作業方式是以高速旋轉進行割草，而電池可裝置在機體上或者背負式，電池的選用則是以鋰電池為主，其次為鋰鐵電池。使用折疊式的電動化中耕機，其輸出扭力約 9 kg-m，計算出的動力效率最高為 66.7%。因為是採用電力，估算後的能源成本僅為汽油機的 10.9%，而 CO₂ 排放僅為汽油機的 30.4%，在減碳及節能上具有極大的優勢，更有播種機結合 300 W 太陽能板，在天候適合條件下，約可在 4 小時增加 0.5 公頃的播種面積。相較於傳統的曳引機，可減少 CO₂ 排放超過 12 公噸 (蘇等人，2022)。



謝等人(2013) 提出在電動式除中耕除草機與引擎式中耕除草機的作業性能探討中，在碳排放量減少的實驗數據中顯示，在壤土區，電動式除草刀與開墾刀的平均排放量為 5.43 及 5.14 kg / ha，而引擎式的排放量為 25.97 及 25.45 kg / ha。而在黏壤土區的平均排放量則是 5.33 及 5.43 kg / ha，實驗結果顯示，電動式的碳排放量都低於引擎式，其減少碳排放量的效益顯著。

2.2 儲能電池

電池能將光與熱或者是化學能轉化成電能。若以光與熱等物理能量轉換成電力，則為「物理電池」。若藉由內部化學物質之氧化還原所產生的能量轉換為電能，則稱「化學電池」，其中又分為一次電池跟二次電池。二次電池，其特點為可以在沒電時充電、重複多次使用，因可攜帶電子產品的蓬勃發展，二次電池的種種特性，使得它們在被選擇使用上受到關注。

目前常用工具機所使用的二次電池，因成熟的技術已取代了鎳氫電池，其餘還有鋰離子電池。早期鋰離子電池常用於電子產品中，因這類電池的高能量密度、較長使用壽命、沒有記憶效應，且低自放電率。因為有這類特性所以鋰離子電池具有極大的優勢 (Chaturvedi *et al.*, 2010)。

現今的鋰離子電池若要達到與汽油相同能量，電池增加的重量約為汽油重量的 19 倍，如此一來，電池的重量對於農民的操作上有不小的負重壓力；同時電池所儲存之能量會直接影響到電動農機的續航時間，若一台電動農機使用功率 3kW 之馬達為動力源，在田間連續作業長達 4 小時所需耗費的能量約為 43.2 MJ/kg，則至少須背負約 17.3 kg 之鋰離子電池，假設使用鉛酸蓄電池則須背負約 308.6 kg 的重量，且尚未考慮在田間操作所時各種容易造成大電流放電之情況，如崎嶇不平且有障礙物之地形或者黏壤土地區作業等。為避免機體因電池而過度增重，且要維持長時間操作，首要作法為增加電池之能量密度，再來是可以考慮電池的使用時機與模式，去改善替換電池之更換設計 (周，2022)。

周(2022)提出，考慮替換電池的使用模式，充電為使用情況下最重要的挑戰。一般農地大部分位於市郊，故缺乏足夠的電力供應，因此農民們需在家中先將替換電池充滿後備而使用。若可在田間附近建置充電站，在其中導入太陽能與新型材料電池，落實節能減碳，且對電池進行充放電管理，延長電池壽命又可降低成本。

在此節中對各類的二次電池的基本特性做深入的探討，著重於電池的結構、電極材料以及電解質材料，以及電池在應用上的考量，一併做介紹。

2.2.1 鉛酸電池簡介

鉛酸電池由 Gaston Planté 所發明，儘管其能量密度明顯低於鋰離子電池，僅為理論極限之 30~40%；而鋰離子電池為 90%，但因為其材料組成均為低成本原料且具有不易燃的水基電解質，而在回收率的部分高達 99%，故對於環境的影響較低。鉛酸電池因其能量密度低，相對於鋰離子電池，安全性較高，發生火災的可能性低，因此非常適合用於雲端數據中心 (Lopes and Stamenkovic, 2020)。

2.2.2 鉛酸電池結構

鉛酸電池在包裝的設計上分為開口型和閥控式密閉型 (Valve-Regulated Lead Acid Battery, VRLA)，差別在於密閉型在充放電時，電解質已被固定在其中，以重新組合成氧氣及氫氣，因其有密閉結構，具有壓力釋放閥，防止氣體擴散出來；相反的，開口型必須定期補充電解液。以下為電池主要結構之介紹。

(1) 電極

負極材料為鉛板 (Pb)，而正極材料使用二氧化鉛 (PbO₂)，因為在較高電位下，正極中的鉛會被氧化成二氧化鉛，使得內部的鉛不再繼續進行自發性氧化反應，讓鉛能傳遞電流和支撐活性物質的作用。在設計如格子般的柵板時，必須使用活化性較低的鉛基合金，因與電解液接觸之介面是相當不穩定的，會逐漸地腐蝕至內部。

(2) 電解液

電解液中主要成分為硫酸，與其它電池不同，是參與氧化反應的活性物質。因此，電解質濃度會因為充電而升高；濃度因放電過程而升高。根據能斯特方程式，如式 (2-2)，鉛酸電池的開路電壓會根據電解液濃度而改變，電解液的電阻和凝固點也取決於硫酸的濃度。

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln(Q) \quad (2-2)$$

(3) 隔離板

放置於正極和負極之間的多孔性隔膜，防止正負極成分互相接觸，以避免造成短路，但同時具有良好的離子導電性、低電阻且良好的抗氧化性和耐腐蝕性。此外，可將玻璃纖維墊片固定在隔離板上，使離子可自由進出，並且不讓鉛穿透隔離板，防止在循環過程中失去活性，以維持電解液功能。

(4) 電池槽

又稱電解槽，其材料都由熱塑性塑膠 (Acrylonitrile butadiene styrene, ABS) 所製成，必須可耐酸鹼、腐蝕性、耐熱及耐衝擊；且還需完全密閉的狀態，以確保使用之安全性(May *et al.*, 2018; Pavlov, 2011; Pavlov *et al.*, 2008)。

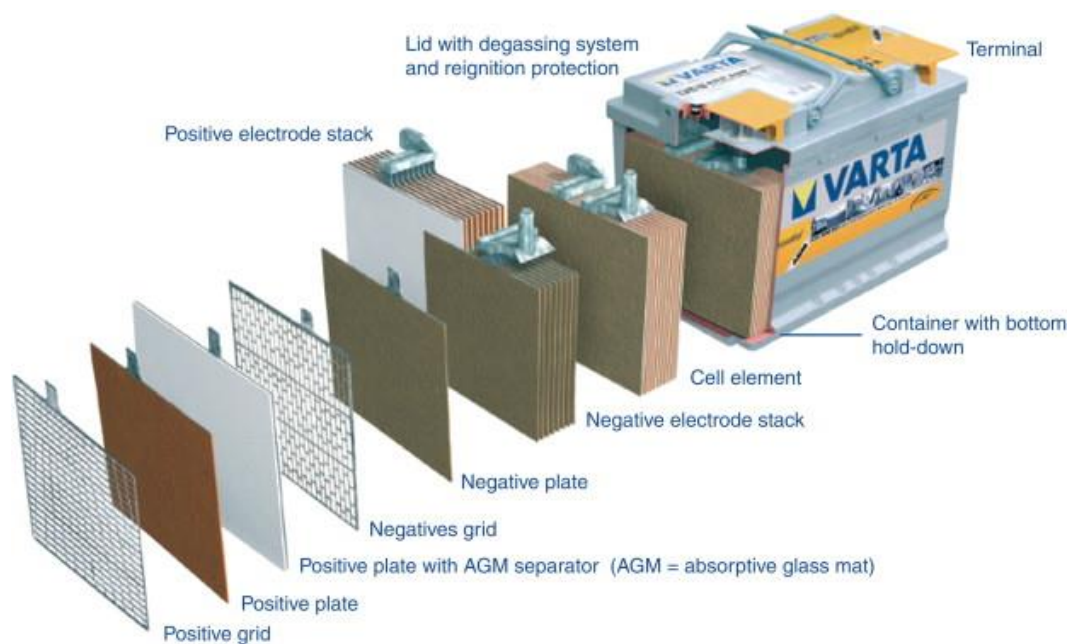


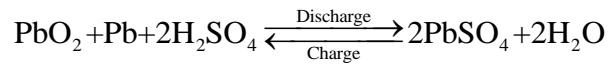
圖 2.2 鉛酸電池結構(Köhler, 2009)



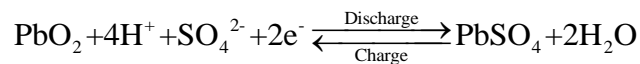
2.2.3 鉛酸電池工作原理

鉛酸電池中的電化學反應式：

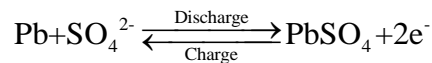
全反應：



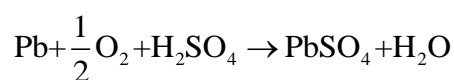
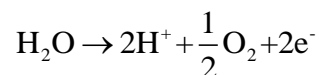
正極：



負極：



正極材料為多孔性二氧化鉛，負極為均勻分布海綿狀的鉛，電解液則是稀釋後之硫酸溶液。當放電過程時，硫酸氫根 (HSO_4^-) 離子會遷移至負極，產生氫離子和硫酸鉛；而正極之二氧化鉛與硫酸溶液反應，形成硫酸鉛晶體和水。兩個電極都因放電而成為電導性較差的硫酸鉛，隨著反應進行，電解液會逐漸稀釋；而在充電過程中，反應方向相反，兩電極由硫化鉛轉換為二氧化鉛及鉛。當充電完成後，若再繼續對電池充電，則會導致電解液中的水分持續發生水解使得正極產生氫氣，負極產生氧氣，進而排出電池外界，因此需定期補充水分。若電池為封閉型電池，不需額外添加水分，因負極的材料使用吸水玻璃纖維隔離膜，故不會產生氧氣，而全反應中，正極會產生氧氣，可經由玻璃纖維中的氣體空隙，進到負極與鉛反應形成一氧化鉛，再與電解液反應形成硫酸鉛。上述反應式如下：(May *et al.*, 2018)





2.2.4 三元鋰離子電池簡介

鋰離子電池因具有高能量密度、較低記憶效應且有低自放率的特性，故已經在消費電子的應用中佔有一席之地。過去因鈷酸鋰正極材料價格較高，且難以應用在相對高溫和低溫的條件下，所以少應用於規模較大的儲能以及需要瞬間大電流的動力機械相關領域，目前開發許多替代鈷酸鋰的材料，雖未到充分開發，但已是汽車產業的首選，對於永續及減少碳排放方面具有很大的潛力 (May *et al.*, 2018)。

2.2.5 鋰離子電池結構

鋰離子電池結構上也與鉛酸電池大致相同，分為電極、電解液和隔離膜。而鋰電池在商業使用上較為廣泛，因此有各式不同尺寸，供給不同設備做使用，常見如 18650、21700 及 26500。

(1) 電極

正極粉末影響了功率以及能量表現，且關乎使用壽命、耐用性和成本。對於商用攜帶式電池而言，鈷酸鋰 (LiCoO_2) 仍是首選的基礎材料，但對於汽車工業以及農業機具來說則不然。因在使用條件更為嚴苛，其循環次數和可使用容量的限制更加明顯；此外，由於金屬鈷不是豐富的元素，在原物料供給上也是一大問題。在車輛工業中，目前能達最好的性能是基於鎳的氧化物，如： $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$ 、 $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$ 等含鋰化合物為最適合的材料。

正極的製作方法通常會先將含鋰化合物之粉末、導電碳黑及黏合劑混和均勻，再藉有機溶劑進行加工後，以非常薄的塗層和良好的質量負載為目標，均勻地塗佈在鋁箔基材上。

負極的材料選用碳素材料為主，利用其材料特性，因結構可嵌入鋰離子、接收鋰離子，避免過度沉積在負極上。為了能實現快速充放電，碳素材料必須可以輕易吸收來自電解液的鋰離子；且保護負極表面的電解液不被解離，關鍵在於生成穩定的固態電解質介面層 (Solid Electrolyte Interface, SEI)，以確保長期穩定之性能。



負極的製程與正極類似，將碳素材料與有機液體結合黏合劑混和成膠漆，均勻塗佈在銅箔上，若區域負載不均勻，可能會對後續之充放電循環過程產生不利影響 (Blomgren, 2016; Köhler, 2009; Tarascon, 2010)。

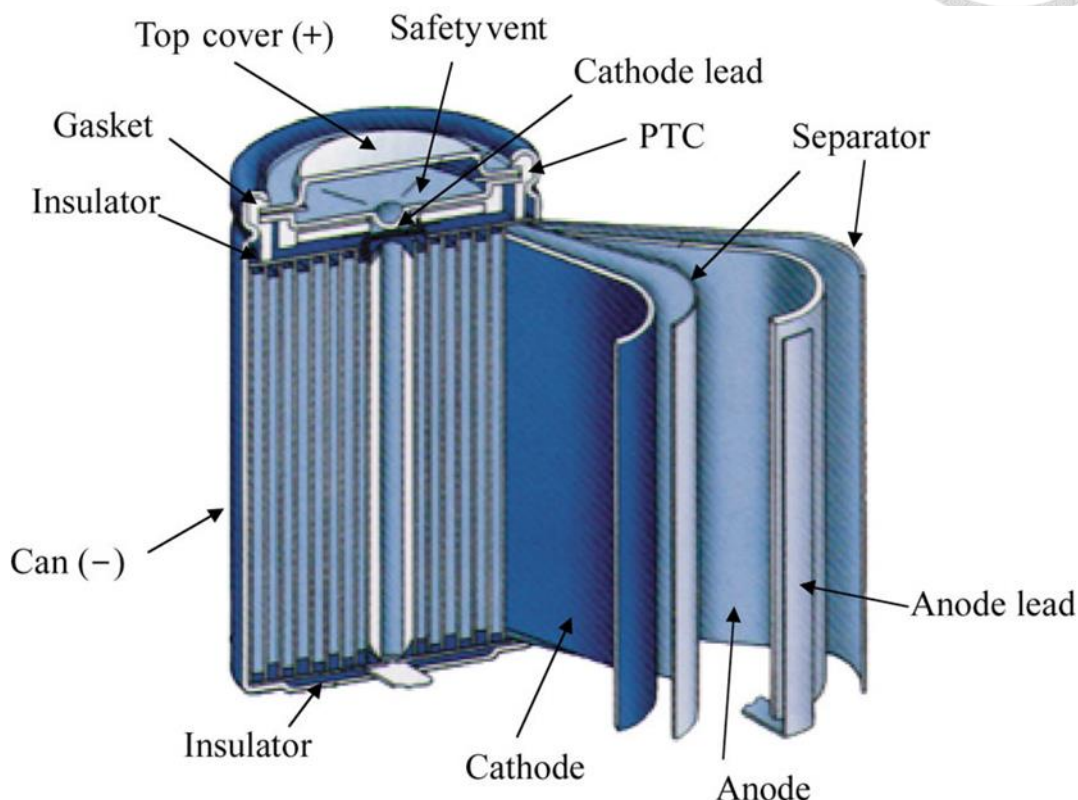


圖 2.3 鋰離子結構圖(Nishi, 2001)

(2) 電解液

選擇電解液的選擇上，主要使用碳酸酯類 (alkyl carbonates)，如：碳酸乙烯酯 (Ethylene Carbonate, EC)、碳酸丙烯酯 (Propylene Carbonate, PC)、碳酸二甲酯 (Dimethyl Carbonate, DMC)、碳酸二乙酯 (Diethyl Carbonate, DEC)、碳酸甲乙酯 (Ethyl Methyl Carbonate, EMC)以及六氟磷酸鋰 (LiPF_6) 等等。選擇碳酸酯類是因為它們在鋰離子電池中有很高的穩定性、且揮發性低、無毒、阻燃且成本低。選擇 LiPF_6 是一中折衷方案，當反應發生時會分解成 LiF 和 PF_5 ，後者會迅速水解而形成 HF 和 PF_3O ，此兩種對電極都有不良影響。其餘鋰鹽有太多不可使用的缺點，

LiAsF₆ 具有毒性、LiClO₄ 具爆炸性、LiSO₃CF₃ 則會形成導電度過低之溶液，故不選擇使用 (Aurbach *et al.*, 2004; Zhang, 2006)。

表 2.3 電解液溶劑的物理性質 (陳等人, 2019)

溶劑	分子量	熔點(°C)	沸點(°C)	黏度 (η/cp)	介電常數 (25°C)
EC	88	36.4	248	1.9(40°C)	87.78
PC	102	-48.8	242	2.53	64.92
DMC	90	4.6	91	0.59	3.107
DEC	118	-74.3	126	0.75	2.80
EMC	104	-53	110	0.65	2.95
LiPF ₆	152	200	-	-	18.50

(3) 隔離膜

隔離膜為一種多孔性材質，保持電極之間的絕緣，同時又允許鋰離子在電解液和隔離膜間進行交換。要注意的是，電極及隔離膜間的接觸和電解液的潤濕性是鋰離子電池的安全性和性能的重要特性，故不能輕易破裂，而導致內部短路的情形發生，增加隔離膜的熱穩定性，可以延緩隔離膜的熔化 (Francis *et al.*, 2020)。

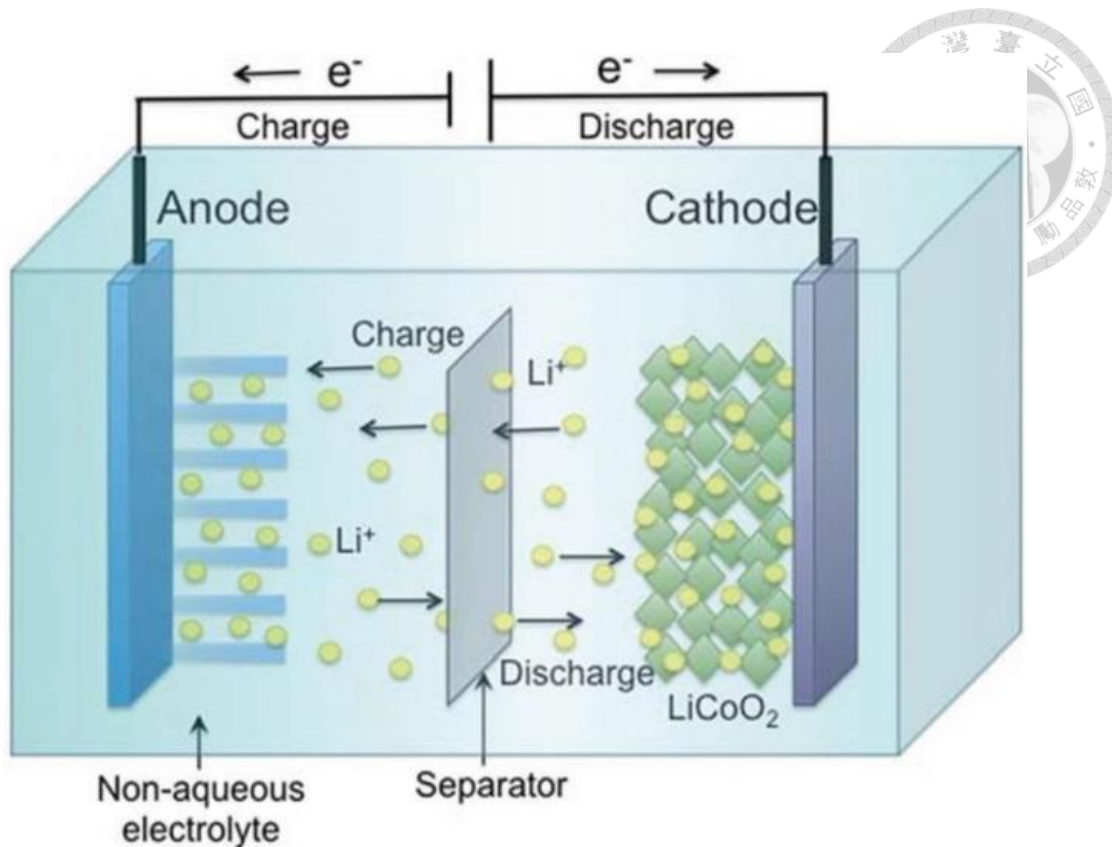
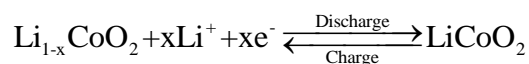


圖 2.4 鋰離子電池內部隔離膜(Francis *et al.*, 2020)

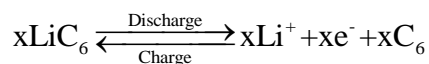
2.2.6 鋰離子工作原理

以鈷酸鋰電池為例，以下為其反應式：

陰極/正極：



陽極/負極：



當其充電時，鈷從 $\text{Co}^{3+} \rightarrow \text{Co}^{4+}$ ，放電時則相反，當電池在充滿電時，鋰離子會存放在能量較高的陽極，而在放電的過程中會移動到能量較低的陰極，並釋放出電能，鋰離子與電子就在陰、陽極間受到充放電的驅動而移動。



2.2.7 磷酸鋰鐵電池(LFP)簡介

由於鈷金屬的原料價格高昂，而磷、鋰和鐵資源充足。其高放電功率、循環次數相較於三元鋰電池長且可快速充電，在高溫環境下的穩定性高，加上其安全性，故常被視為最理想電力來源之選擇(Väyrynen and Salminen, 2012)。

2.2.8 磷酸鋰鐵電池結構

(1) 電極

與三元鋰電池使用以鎳為基礎的氧化物不同，磷酸鋰鐵電池選擇有橄欖石結構的過度金屬磷酸鹽作為正極材料，如： LiFePO_4 。因較差的電子導電性，必須在其表面活性顆粒上覆蓋碳，以克服此缺點。而在負極的材料選用上與三元鋰並無區別(Armand *et al.*, 2020)。

2.2.9 常用電池比較

各類電池之參數如表 2.4，三元材料之電池平均來說能量密度比鋰鐵電池高，對於使用者來說可以減少負荷，但也就是因其能量密度大，在安全性方面常受到質疑。在成本方面，因三元鋰電池之正極材料資源較少，且在循環次數上較鋰鐵電池少，故使用成本較高，相關優缺點如表 2.4。在電動車輛中，因快速充放電需求，常見的還是使用三元材料；而鋰鐵電池因為不易燃燒的特性，安全程度高於三元鋰電池，故則在能源儲備中佔有一席之地，另外像是耐久度及持續性等其餘特點如圖 2.5 所示。

表 2.4 各類電池之參數 (Väyrynen and Salminen, 2012)

	陽極化學式	能量密度 (Wh · kg ⁻¹)	循環次數 (次)	額定電壓 (V)
LCO	LiCoO ₂	170 ~ 185	500	3.65
NCM	LiCo _x Ni _y Mn _z O ₂	155 ~ 185	2000	3.7
NCA	LiNi _x Co _y Al _z O ₂	145 ~ 165	1000	3.65
LFP	LiFePO ₄	100 ~ 140	4000	3.2
LMO	LiMn ₂ O ₄	90 ~ 120	500	3.8
Lead-Acid	PbO ₂	25 ~ 35	500	2.1



圖 2.5 不同正極材料之鋰電池特性(Wen *et al.*, 2012)

2.3 電池基本特性與參數

本節針對使用特性的不同以及判斷電池老化的參數做探討。

2.3.1 能量型電池與動力型電池特性

大多數電子產品，不需要太大的充放電速率以及高量密度，而在電動車輛和農用機具的使用上則相反，需高能量及高功率密度，要能夠應對瞬間大電流充放之狀況，實現快速充放電等情形。兩者可由額定電壓來做簡單的判斷，若為動力型電池，則額定容量比能量型電池低，取而代之的是可以在大電流條件下進行操作(Kang *et al.*, 2006)。



2.3.2 電池電量狀態(State of Charge, SOC)

電池的一個重要指標為其耐用性，不管是在什麼條件下使用，必定會發生退化。再過高或者過低的工作溫度、過充過放以及長時間大電流的放電都加速老化，因可用鋰以及正負極活性材料的損失，造成容量的衰減和功率損失，隨著電池的使用，老化情況會越來越明顯。而從使用者的角度來說，會以循環壽命來當成耐久性的指標 (Birkl *et al.*, 2017; Zubi *et al.*, 2018)。

一般電池的電量狀態表示通常以百分比顯示，可以 SOC 表示，如 (2-3) 式，許多電池系統對於過充、過放等不正常的使用情況會破壞其效能，故需要充電狀態讓使用者可以判斷電池組的剩餘電量及使用時間和充電時機 (How *et al.*, 2019)。

$$SOC = \frac{Q_{now}}{Q_{max}} \cdot 100\% \quad (2-3)$$

2.3.3 電池健康狀態(State of Health, SOH)

汽車工業以及電動農機的商業化，對於循環次數高的電池需求逐漸增大。SOH 可用於識別電池持續或者突然的老化，並預防供電系統突發性故障。SOH 是以百分比形式描述電池狀態的參數，反映電池的健康狀況，100%代表全新電池，而當 SOH 逐漸下降至一定程度，表示應予以更換 (Berecibar *et al.*, 2016)。

2.4 電量估測方法

Han *et al.* (2014) 指出電池系統可以透過提供多少電力及電池中儲存了多少電量，也就是剩餘電量，用來更容易的判斷電池之壽命。電池管理系統可以對電池容量進行估計，並且推導其電池充電狀態。所以找出一套可以檢測電量及判斷電池的老化狀態變得十分重要，其中電池電量的估測方法有很多種，依照不同精確度需求，有不同的量測方式。



2.4.1 庫倫計量法

對電池組在受控的條件下，進行一次完整的放電，利用流出及流入電池的電荷並且持續記錄電流，計算出剩餘電量，此方法需要一個精確的電流感測器，量測通過的電流值對時間積分而得電池充電狀態，因此電流的量測以及電池出廠容量對於估計的結果至關重要，目前許多便攜式設備都使用此法。這種方法的優點是直接且準確，但缺點為耗時、且每一次測試就會消耗一次電池的使用壽命 (Ng *et al.*, 2009; Piller *et al.*, 2001)。

2.4.2 開路電壓法

開路電壓 (Open Circuit Voltage) 又稱端電壓法，指電池沒有接上負載時，量測兩極間所得之電壓，開路電壓法就是以此電壓作為估測電池剩餘電量的依據。在停止充放電的條件下，經過一段時間後，電池電壓會逐漸趨於穩定，即可使用開路電壓法，會以線性的方式與電池充電狀態有關，如圖 2.3 所示，可以利用測得之電壓，透過查表而得電池充電狀態。此方法雖然準確，但因電池使用後，需要很長一段時間測可進入穩定狀態，所以電池在充放電過程中，無法進行開路電壓法進行量測(Ng *et al.*, 2009; Piller *et al.*, 2001)。

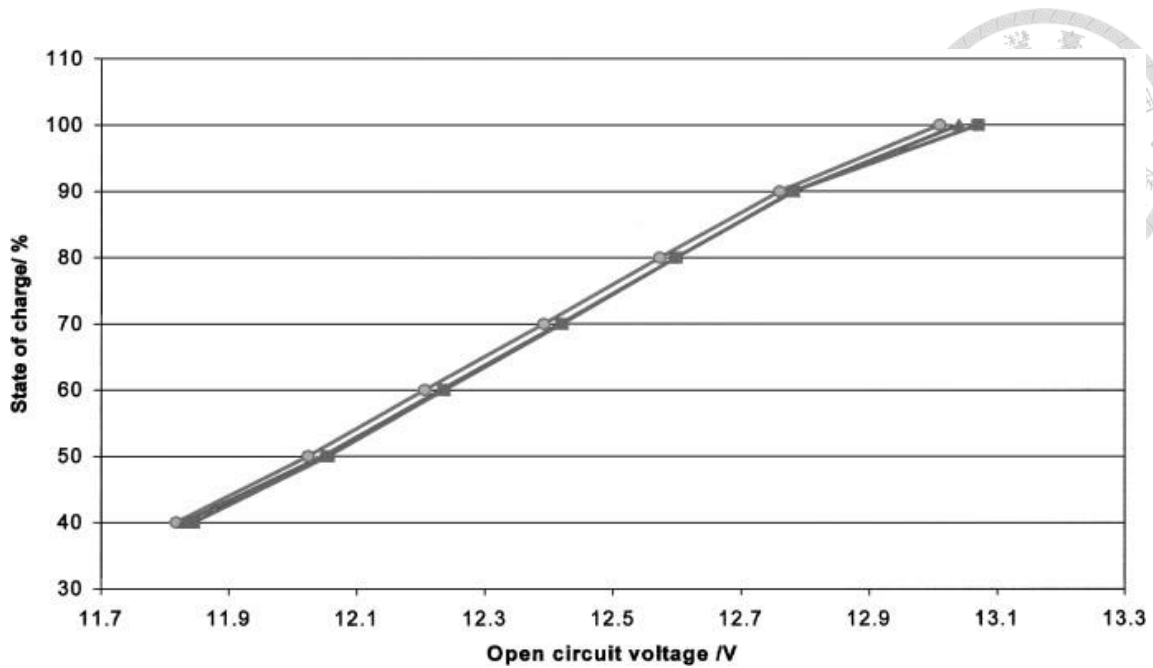


圖 2.6 鉛酸電池開路電壓與電池充電狀態之關係(Piller *et al.*, 2001)

2.4.3 電解質物理特性量測

在化學電池中，電解質在充放電的過程中會參與反應。在充放電時，可以從化學反應式中得知電解液中的酸性成分的濃度變化與電池的電量有關，故可藉由量測電解液的密度來判斷電池剩餘電量 (Piller *et al.*, 2001)。

2.5 電池健康狀態估測

主要分為直接測量方法和間接分析法。直接測量方法如：容量測試、阻抗測試直接測量電池健康指標；而間接分析需要數據分析和處理，找到和 SOH 相關的參數。

2.5.1 以容量估測

通過庫倫計量法在電池完全充放電的條件，得知目前可用容量，可以透過 (2-4) 式估算 SOH：

$$SOH = \frac{Q_{\max}}{Q_{\text{new}}} \times 100\% \quad (2-4)$$

其中 Q_{\max} 為當前最大可用容量， Q_{new} 則為初始額定容量。

根據此方程式，利用最大可用容量和初始額定容量之間的比例，可以得到電池的 SOH。SOH 越高，表示容量和性能與初始狀態越接近，當 SOH 降低至一定容量，就必須進行電池更換。根據使用情形和應用場景不同，可依狀況調整計算模型 (Xiong *et al.*, 2018)。

Ramadan *et al.* (2015) 提出當電池容量衰退為初始容量之 80% 時，其 SOH 定為 0%。

$$\begin{aligned}SOH = 100\% &\Leftrightarrow C = C_{IV} \\SOH = 0\% &\Leftrightarrow C = C_{EOL} = 0.8 \cdot C_{IV}\end{aligned}$$

其中 C_{IV} 為電池初始容量； C_{EOL} 為電池達生命週期 (End-of-Life, EOL) 之容量。以上可表達成 (2-5) 式。

$$SOH = \left(\frac{C}{C_{IV}} - 0.8 \right) \cdot 100\% \quad (2-5)$$

其中 C 為電池之可用容量。

2.5.2 以內電阻估測

Bao *et al.* (2018) 指出電池內阻可透過直流內阻量測 (Direct current internal resistance) 以及混合功率脈衝特性 (Hybrid Pulse Power Characteristic) 進行量測，但是以上傳統方法，因測試設備方面等限制，並不適合直接進行量測。

Kona (2016) 提出一般內阻在線量測大致分為兩種方法，直流法 (DC Method) 和交流法 (AC Method)。直流法在短時間放電過程中，量測電池的電壓變化以及負載的電壓變化，進而計算出電池的內阻大小。而交流法則是注入已知的交流訊號後觀察電壓及電流的變化，進而得知電池阻抗，而阻抗的量測值也會隨著交流訊號的頻率有所不同。

Feng *et al.* (2012) 提到在電池內阻量測技術中直流法是最可靠的量測方法，圖中電阻 r 和電阻 R 分別為電池的內阻、外接負載的電阻，而 K 則表示為繼電器的開關。在放電過程中，若將繼電器的開關打開，電池的電壓會有瞬間下降的現象發生，可以利用並聯之伏特計量測到電壓變化，因此可以利用電池電壓變化以及電池外接負載電壓的差值來計算電池的內阻值，如 (2-6) 式所示。

$$r = \frac{E - U}{U} \cdot R \quad (2-6)$$

式中 r 為電池內阻、 E 為電池沒有接上負載時的電阻、 U 為接上負載時的電壓， R 為負載的電阻。

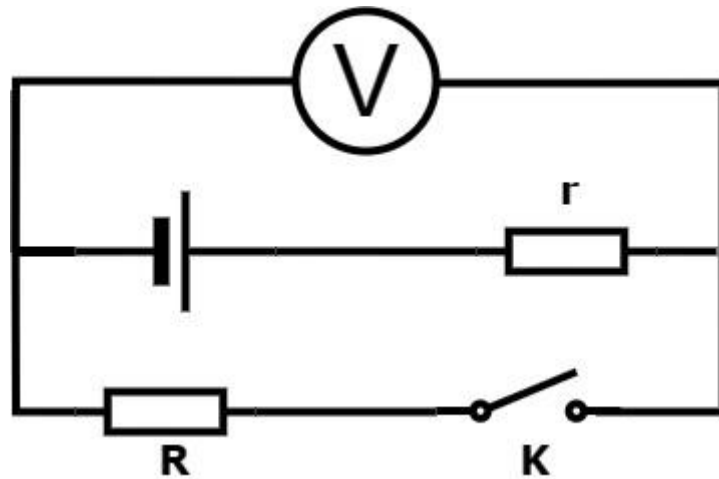


圖 2.7 直流法的電路模型

Ramadan *et al.* (2015) 提出以量化內電阻之方式估算電池 SOH，當電池內電阻達初始內電阻的兩倍時，代表以達生命週期 (End of Life, EOL)。

$$\begin{aligned} SOH = 100\% &\Leftrightarrow R = R_{IV} \\ SOH = 0\% &\Leftrightarrow R = R_{EOL} = 2 \cdot R_{IV} \end{aligned}$$

其中， R_{IV} 為電池初始內電阻； R_{EOL} 為電池達 EOL 之內電阻。以上說法可表達為 (2-7) 式。

$$SOH = (2 - \frac{R}{R_{IV}}) \cdot 100\% \quad (2-7)$$



其中， R 為實際量測之內電阻。

總的來說，以上評估電池電量以及健康狀態的技術的優缺點，由表 2.6 表示。

表 2.5 電池電量以及健康狀態檢測方法優缺點比較

方法	優點	缺點
庫倫計量法	簡單操作、準確性高、適用於各種電池。	無法即時量測。
開路電壓法	操作簡單、成本低廉、準確性高。	無法即時量測、耗時。
電解質物理特性量測	與 SOC 有線性關係。	電解液密度增減太少，導致量測誤差提高，無法精確預估剩餘電量。只適用於加水式電瓶中。
內阻法	與 SOH 有線性關係。	有部分電池之內阻值小，量測不易。

2.6 等效電路模型模擬

等效電路透過可變參數的電路元件，如電阻、電容和電壓源，模擬鋰離子電池的非線性工作特性。為了建立一個準確的等效電路模型，需要準確辨識等效電路中的電路元件參數。



2.6.1 分析電池等效電路模型

Jin *et al.* (2021) 使用二階等效電路模型，如圖 2.8 所示。由電壓源、電阻和兩個串連的 RC 電阻電容元件組成。 U_{oc} 為電池的開路電壓； R_0 為電池的歐姆電阻 (Ohmic resistance)； R_1 和 R_2 為極化電阻 (polarization resistor)； C_1 和 C_2 為極化電容。兩個電阻電容元件分別用來描述電化學極化特性以及濃度極化特性； I 是電流； U 是電池電壓； U_1 和 U_2 是兩個 RC 電阻電容元件的端電壓。

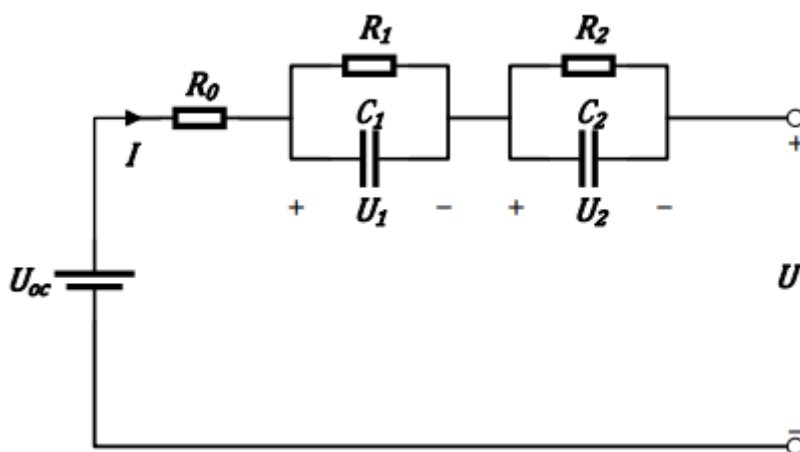


圖 2.8 二階等效電路模型(Jin *et al.*, 2021)

2.6.2 放電測試進行模擬

Jin *et al.* (2021) 以混和脈波功率特性測試 (Hybrid Pulse Power Characterization, HPPC)，可以獲得對應到圖 2.9 中每個元件之參數。

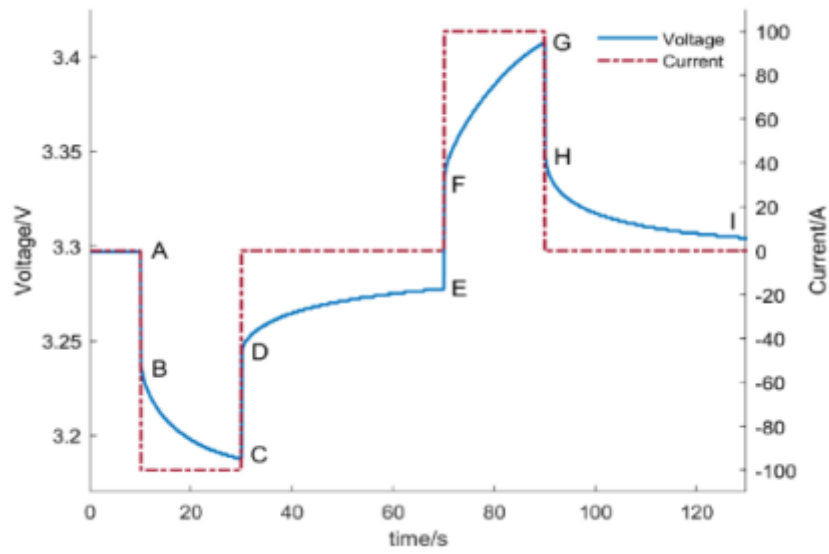


圖 2.9 混和脈波功率特性測試電壓電流曲線(Jin *et al.*, 2021)

歐姆電阻的計算公式如下：

放電過程:

$$R_0 = \frac{(U_A - U_B) + (U_D - U_C)}{2I} \quad (2-8)$$

其中 R_0 為歐姆電阻。

再以 (2-9) 式對電壓曲線 DE 段做擬合，接著計算出所有元件之參數。

$$U(t) = U_{oc} + U_1 e^{-t/\tau_1} + U_2 e^{-t/\tau_2} \quad (2-9)$$

極化電阻之參數計算公式如下：

$$R_1 = \frac{U_1(0)}{I(1 - e^{-T/\tau_1})} \quad (2-10)$$

$$R_2 = \frac{U_2(0)}{I(1 - e^{-T/\tau_2})} \quad (2-11)$$

$$\tau_1 = R_1 C_1 \quad (2-12)$$



$$\tau_2 = R_2 C_2 \quad (2-13)$$

其中， $U_1(0)$ 和 $U_2(0)$ 表示極化電容兩端之初始電壓； τ_1 和 τ_2 分別表示兩個 RC 電阻電容元件之時間常數； T 表示 BC 段放電時間。

2.7 機器學習

機器學習透過收集而得的數據集或者過去經驗來學習解決給定任務的模型，在大量的數據中，需針對問題對其進行特徵提取後續進行相關的分析。機器學習又分成三大部分：監督式學習 (supervised learning)、非監督式學習 (unsupervised learning) 和強化學習 (reinforcement learning)。當資料有進行標記，接著進行訓練，此為監督式學習；若資料未標記，就進行訓練則為非監督式學習；強化學習和非監督式學習一樣，不需要對資料進行標記，而是定義獎勵，利用疊代，做出最後決策 (Mahesh, 2020)。

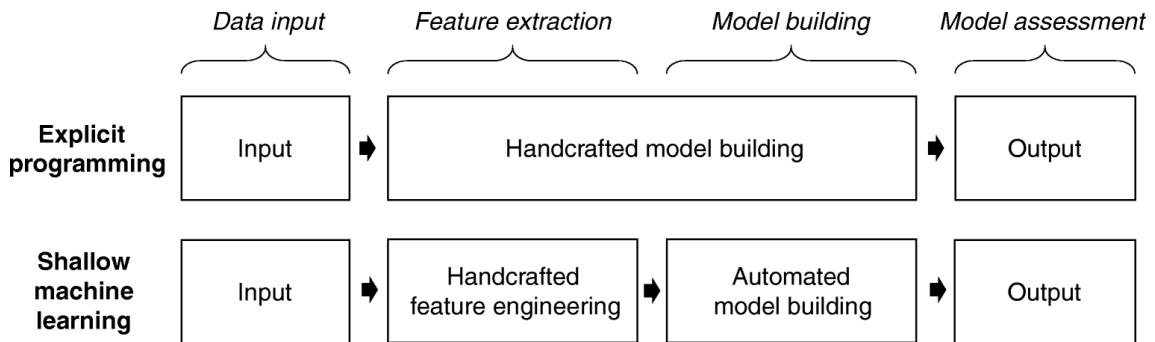


圖 2.10 機器學習之模型架構 (Janiesch *et al.*, 2021)

2.7.1 標準機器學習預測電池容量

由於電池內部的複雜性和工作環境的不確定性，很難建立一個準確表現電池動態特性的模型。對於基於數據的容量預測方法，不需要對電池的工作原理和等效模型有深入了解，僅依賴收集到的老化數據即可 (Xiong *et al.*, 2018)。

曾有研究指出 (Sui *et al.*, 2021) 為了對電池的容量及電池健康狀態進行預測，電池資料可使用公開可用資料集包括 NASA Ames 的 Prognostics Center of Excellence、牛津大學的電池老化資料集 (Oxford battery degradation database)、馬里蘭大學 Center for Advanced Life Cycle Engineering (CALCE) 的資料集和桑迪亞國家實驗室 (Sandia National Laboratories, SNL) 的公開資料集。將驗證資料與訓練資料分開，才可訓練出模型的真實可用性，將電壓、電流、時間及溫度當成輸入，使用標準的機器學習模型來進行預測。

其研究結果顯示，各模型預測結果如表 2.7，其 RMSE 大部分都落在 1% 或者更低。因各模型使用的資料集和測試條件有差異，並不能直接比較，但由 RMSE 來看，此法足以估算 SOH。

表 2.6 各模型之 RMSE (Sui *et al.*, 2021)

模型	RMSE
FNN	0.81%
RNN	0.46%
DDRN	0.11%
SVM	0.63%
RNN(LSTM)	0.96%
SBPM	1.38%
BN	1.15%
DBN	<5%



2.7.2 支援向量迴歸(Support Vector Regression, SVR)應用於電池

利用充放電時電壓與電流變化作為自變數，而容量或者內電阻則為應變數，SVR 將核心函數轉換到較高維度之特徵空間，可以用來解釋兩者間的非線性關係，以建立高預測精度的迴歸模型。

SVR 是以支援向量機 (Support Vector Machine, SVM) 做延伸，不同的是 SVM 是處理分類問題，針對二元分類所設計，如圖 2.11；而 SVR 則是專門處理迴歸問題，如圖 2.12。SVM 中將兩個不同集合分開之分隔線，稱為超平面 (Hyperplane)，SVM 是要使離超平面之最近資料點的距離最大，而 SVR 則是要使離超平面最遠的樣本點距離最小 (García-Gonzalo *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2021)。

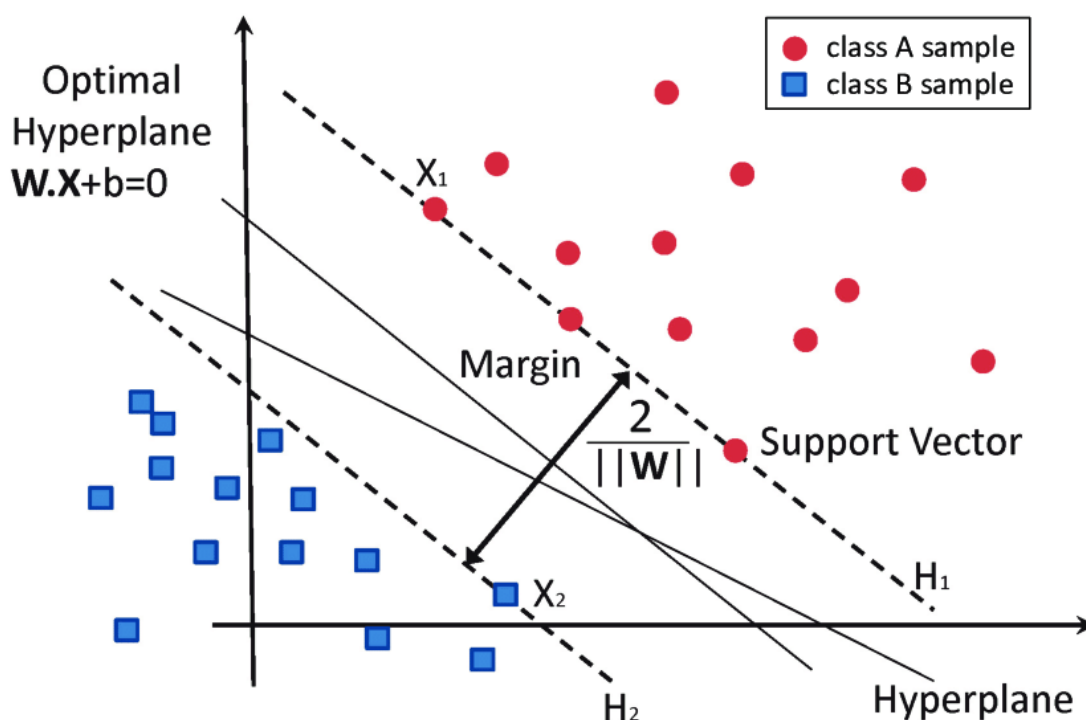


圖 2.11 SVM 示意圖(García-Gonzalo *et al.*, 2016)

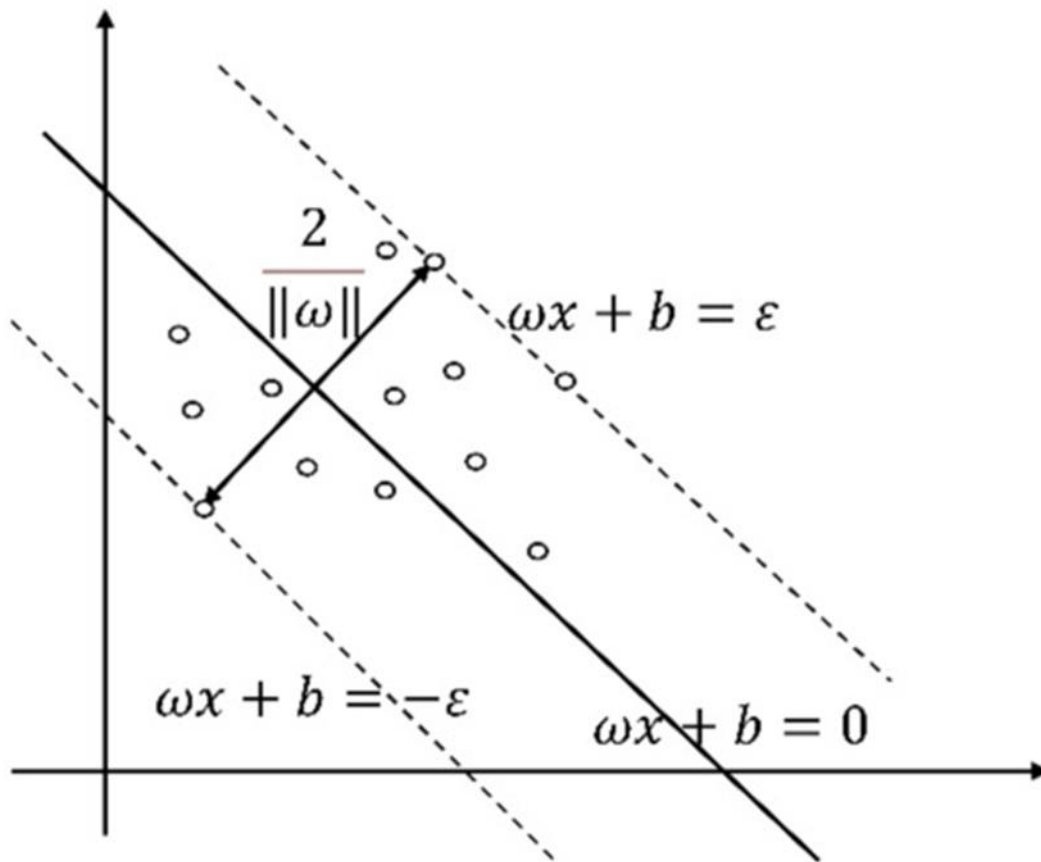


圖 2.12 SVR 示意圖(Xu et al., 2021)

SVR 的優化目標為：

$$\min_{w,b} \frac{1}{2} \|w\|^2 \quad (2-14)$$

其中位於容忍區間內的點滿足條件：

$$\left| y_i - (wx_i + b) \right| \leq \epsilon \quad (2-15)$$

不僅要最大化區間，同時要最小化損失，因此來確定參數 w 以及 b 。而 SVR 之代價函數為 (2-16) 式，所以 SVR 的優化問題可以轉變為 (2-17) 式。在容忍區間上加入損失，可以允許帶外存在資料點，但損失要越小越好。

$$\sum_{i=1}^m l_{\epsilon}(f(x_i), y_i) \quad (2-16)$$

$$l_{\epsilon}(z) = \begin{cases} 0 & \text{if } |z| \leq \epsilon \\ |z| - \epsilon & \text{otherwise} \end{cases}$$



$$\min_{w,b} \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^m l_{\epsilon}(f(x_i), y_i) \quad (2-17)$$

在實際問題中，會因為雜訊以及誤差的關係，很難直接確定合適的 ϵ ，故要確保大部分資料點都能在容忍區間內，而 SVR 希望所有訓練資料點都可在容忍區間內部，所以加入鬆弛變數 (Slack variable) ζ ，如圖 2.13，使函數的容忍區間的條件放鬆，允許一些資料點不在容忍區間內，加入後可將 (2-17) 式改寫為 (2-18) 式。

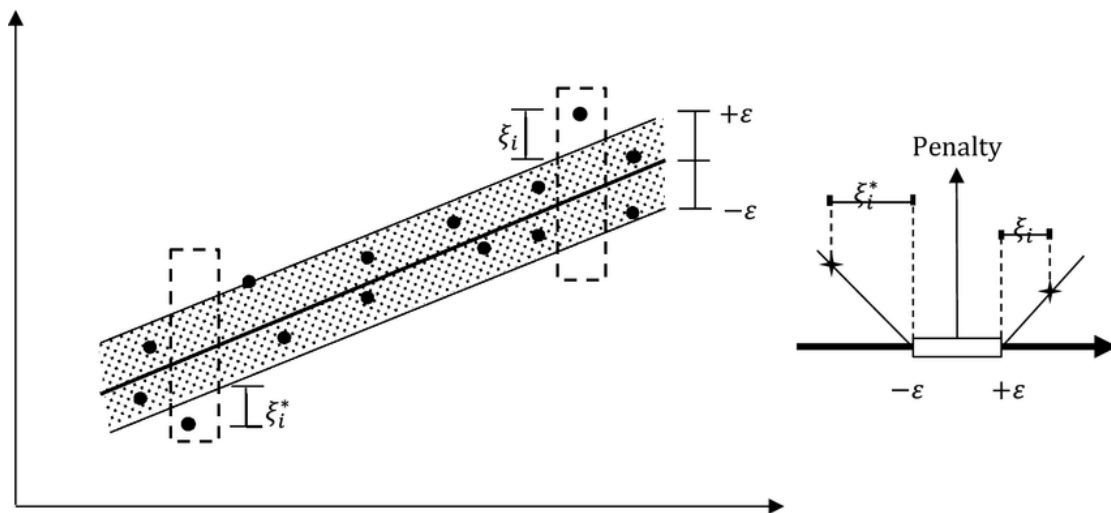


圖 2.13 使用鬆弛變數和損失函數之 SVR (Das and Choudhury, 2020)

$$\begin{aligned} \min_{w,b,\xi_i,\hat{\xi}_i} & \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^m (\xi_i, \hat{\xi}_i) \\ \text{s.t.} & f(x_i) - y_i \leq \epsilon + \xi_i \\ & y_i - f(x_i) \leq \epsilon + \hat{\xi}_i \\ & \xi_i \geq 0, \hat{\xi}_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (2-18)$$

當丟入特徵無法線性分割的情形下，SVR 會先在低維度的空間完成計算，而後映射至高維度特徵空間，使其能在高維空間中可以找出超平面，而將特徵分割或者迴歸。由 (2-19) 式得知 SVR 低維度模型式以內積表示，現在定義一個低維至高維的映射函數 ϕ ，替代內積表示，如 (2-20) 式。



$$y = w^T x + b \tag{2-19}$$

$$y = w^T \phi(x) + b = \sum_{i=1}^m \alpha_i y_i \phi(x_i)^T \phi(x) + b \tag{2-20}$$

當低維映射至高維時，直接計算 $\phi(x_i)^T \phi(x_j)$ 計算量變很大，所以利用不同核函數 (kernel function)，表示式為 (2-21) 式，以降低運算量。透過改變內積空間至另一核函數空間，將非線性轉換為線性，以達迴歸目的，各種不同核函數如表 2.8。

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i y_i \kappa(x, x_i) + b \tag{2-21}$$

表 2.7 不同核函數之表示式 (Yettou *et al.*, 2021)

名稱	表示式
Linear kernel	$\kappa(x, y) = x \cdot y + c$
Gaussian kernel	$\kappa(x, x_i) = \exp\left(\frac{-\ x - y\ ^2}{2\sigma^2}\right)$
Radial basis function	$f(x) = \sum_i^N \alpha_i y_i \exp\left(\frac{-\ x - x_i\ ^2}{2\sigma^2}\right) + b$
Polynomial kernel	$\kappa(x, x_i) = (\alpha_i \cdot y + c)^d$



第三章 研究方法

本研究提出以放電時間持續 10 秒之電壓變化估算出電池之 SOH 以及 SOC，以電壓、電流及溫度監控裝置收集電池充放電數據，以快速估算法、等效電路模型以及支持向量迴歸做為分析方法，估算出 SOH。

本章節會分四個部分進行說明，分別是電壓、電流、溫度監控裝置、SOH 和 SOC 之快速估算方法、等效電路模型之估算方法以及使用大數據預測電池容量，研究方法架構如圖 3.1。

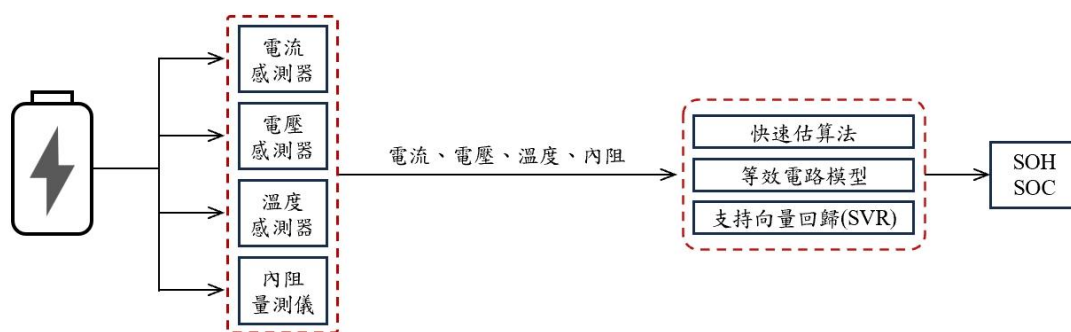


圖 3.1 研究方法架構圖

3.1 電壓、電流及溫度監控裝置

電池的充放電實驗中，為了記錄完整之電壓、電流以及溫度變化，本研究製作了具有能承受大電流能力的電壓、電流及溫度監控裝置，搭配 SD 卡模組，用以實現記錄完整充放電電壓曲線、電流和溫度，進而後續分析。



3.1.1 硬體選擇與架構

硬體的架構如圖 3.2 所表示。控制板選擇使用 Arduino nano 搭配 Arduino nano I/O shield，該控制板是基於 Atmel 所開發的 ATmega328P 低功率單晶片，與 Arduino Uno 性能相等，因其尺寸較小和易於使用的開發環境，適合用來控制以及擴充感測器。

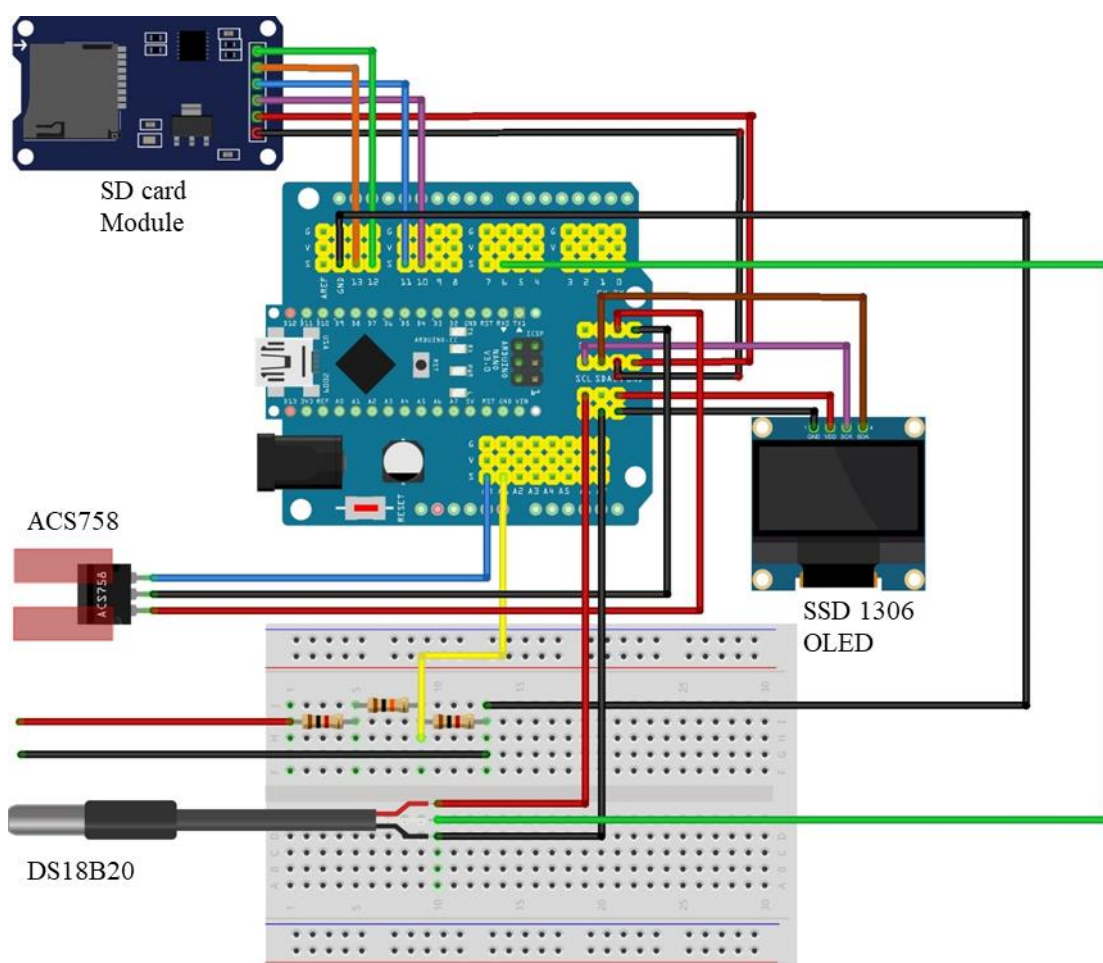


圖 3.2 電壓、電流及溫度監控裝置硬體架構圖



量測電壓時，此裝置利用電阻分壓的方法將待測電壓降低至控制板類比腳位可接受之範圍內，通常是 0 至 5 V。電阻分壓公式如 (3-1) 式：

$$V_{in} = V_{batt} \cdot \frac{R_2}{R_{total}} \quad (3-1)$$

其中， V_{in} 為控制板之輸入電壓； V_{batt} 為電池之輸出電壓，最大輸入電壓為 60 V； R_2 表示分壓電路接地端的電阻值； R_{total} 表示電阻總和。為確保電池在開路電壓和最大功率電壓下可以正常運作，本裝置使用了 2 個 100 k Ω 和 1 個 1 M Ω 的電阻串聯連接。在電池的輸出電路中，在經過 1.1 M Ω ，將剩餘的電壓輸入至控制板中，如圖 3.3 所示。透過選擇 R_2 為 100 k Ω ， R_{total} 為 1200 k Ω ，從而確保輸入至控制板的最大電壓不會超過 5V，避免對控制板的損壞，確保系統的安全運作。

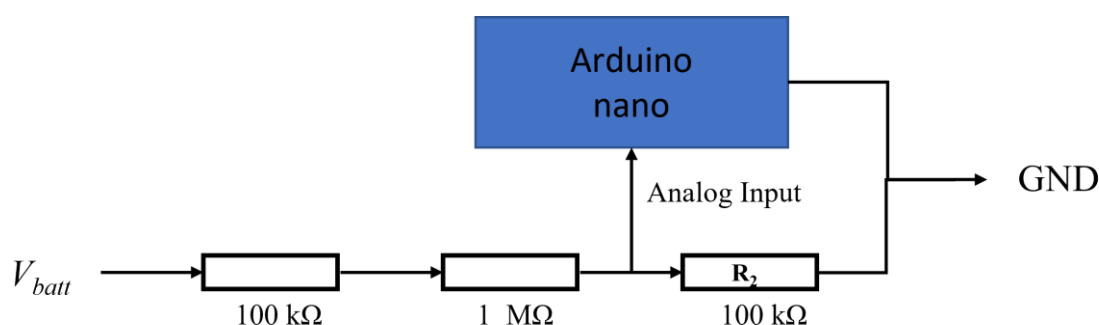


圖 3.3 分壓電路示意圖

此外，量測電壓使用的是精度 $\pm 1\%$ 之碳膜電阻，它能承受最大功率為 0.5 W。假設電壓最大輸入為 60 V，根據 (3-1) 式之分壓公式通過 100 k Ω 和 1 M Ω 電阻的電壓分別為 5 V 和 50 V，然後根據功率計算公式和歐姆定律可以得知，通過每個電阻的功率值遠小於 0.5 W，確保電阻在工作過程中不會燒壞，並提高電路的可靠性以及穩定性，延長感測器使用壽命。

量測電流使用 ACS758-50A 電流感測模組，此模組的量測範圍為 -50 A ~ 50 A，可承受電池充放電的最大電流，靈敏度為 40 mV/A。ACS758 基於霍爾效應 (Hall Effect)。當電流流經感測器，若電流與感測器磁場垂直時，會生成與電流與磁場強度乘積成正比的電壓，稱為霍爾電壓，其值輸入至控制板的類比腳位，利用已知的磁場資訊來計算電流大小，其計算公式如下：

$$I = \frac{(V - V_0)}{S} \quad (3-2)$$

其中 V 為輸入類比腳位之真實電壓 (V)， V_0 為當輸入電壓為 0 時，控制板所量測之原始電壓值 (V)， S 為 ACS758 之靈敏度， S 會因使用狀況而有所不同，在此 $S = 0.04V/A$ 。而 V 值得取得公式如下：

$$V = I_0 \cdot \left(\frac{5}{1024}\right) \quad (3-3)$$

其中 I_0 為輸入類比腳位之訊號值，輸入控制板最大電壓為 5V，且該腳位的分辨率為 1024，將 I_0 乘上 5V 再除以 1024，為真實之輸入電壓。

ACS758 將電流以 40 mV/A 的靈敏度轉為類比訊號，將 -50 ~ 50 A 的電流對應至電壓範圍 0 ~ 5 V 內。控制板接收類比訊號，將其轉換為相對應的電流值。

溫度量測模組選用 DS18B20，此模組感測範圍為 -55°C 至 125°C，元件上只有三條接線，它使用 1-wire 資料傳輸協定，只需一條線及可傳送資料至控制板，故只需電源線、接地線和資料線即可。1-wire 資料傳輸協定是達拉斯半導體之專利技術，用單一訊號線即可雙向傳輸時脈並同時傳輸資料，而每個 1-wire 裝感測器都擁有不同的 64-bits 序號，故允許同一匯流排上同時連接多個感測器，依然可分辨出彼此，可用多個感測器佈滿整個環境空間。因其使用較低的傳輸速率，通常是小型溝通裝置使用，如：數位溫度計。

使用 Arduino SD 卡模組儲存數據，此模組支援 SPI 介面，將逐秒記錄之電壓電流資料寫入記憶卡中。Arduino SSD1306 OLED 低功耗顯示模組，顯示當下量測到電壓及電流數據，此模組支援 I²C 通訊介面，只需兩個腳位即可完成傳輸。

Arduino nano I/O shield 擴充板可解決連接多感測器時腳位不足和佈線雜亂的問題，其接出所有的類比 I/O、數位 I/O 腳位和 I²C 腳位，每個 I/O 都有標配正負腳位，並且解決 I²C 設備的配置。因 Arduino nano 控制板之 USB 接頭供應電流只有 50mA，若需要大電流之設備會不太足夠，故此擴充板提供 DC 供電接口外接電源，保證設備穩定運作。

3.1.2 流程架構

Arduino nano 負責電壓、電流及溫度的訊號收集和計算，並且使用 SSD1306 OLED 螢幕顯示，並將每秒量測之電壓、電流及溫度記錄在記憶卡中，以便後續資料分析。

完整的運作流程架構如圖 3.4 所示，首先在啟動後，控制板會先完成初始化之設定，Arduino nano 會初始化類比腳位以及 I²C 通訊介面。

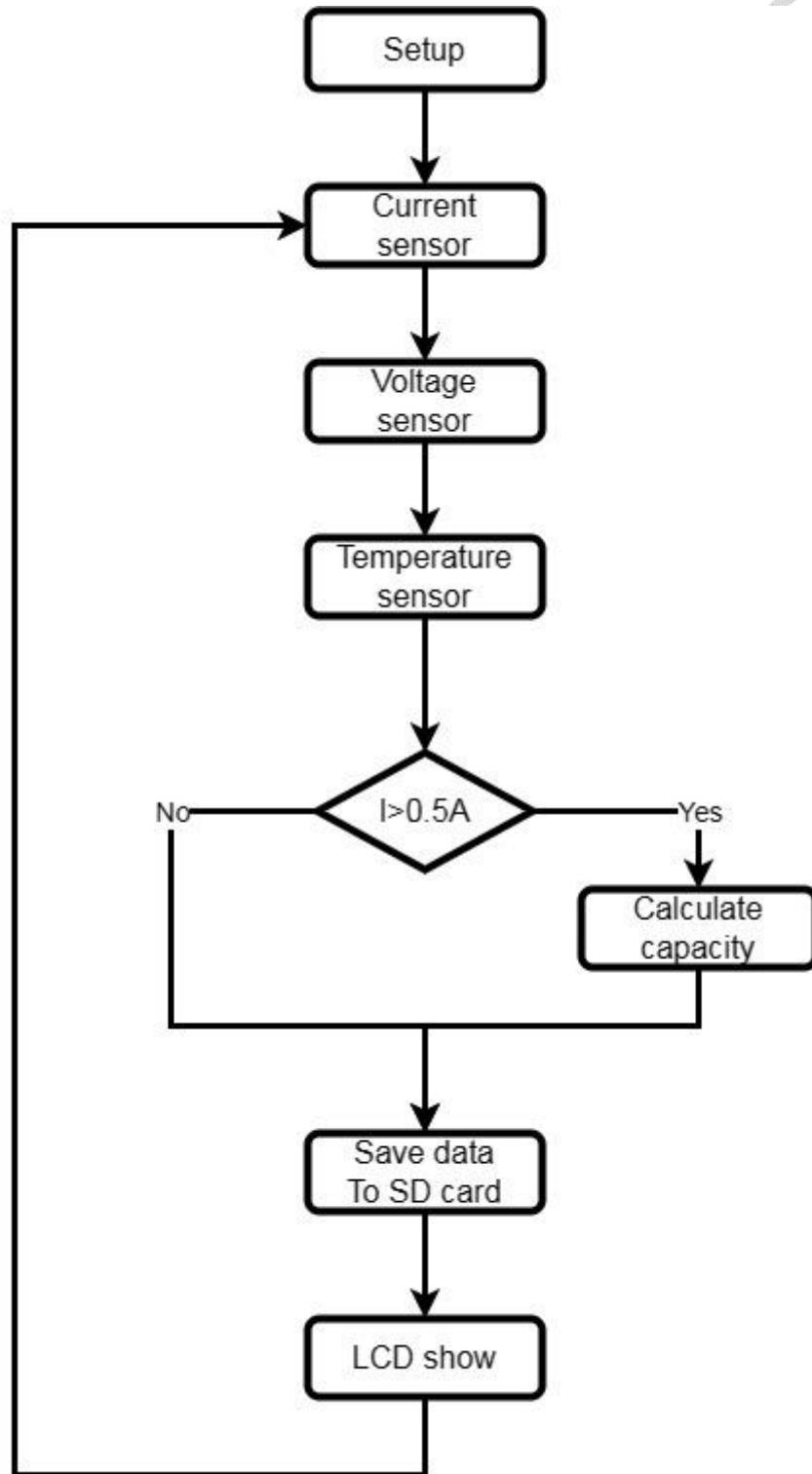


圖 3.4 電壓、電流及溫度監測裝置流程架構圖

此監控裝置啟動後，Arduino nano 會先做初始化，而後檢查有無安裝上 SD 卡，若無偵測到 SD 卡時必須重新啟動，以免資料遺失。接著會開始進行電壓、電流和

溫度的感測，將完整的記錄放電過程，電壓資料可繪製成放電曲線，而得知放電過程之電壓變化；而電流部分會判斷是否還在放電過程，若量測值 $I > 0$ ，表示其正在放電過程，藉由 2.4.1 小節中提到之庫倫計量法，如 (3-4) 式。因電壓電流監控裝置每秒記錄電流一次，故累加從 ACS758 流出之電流，如 (3-5) 式，進而計算得知電池之容量，最後將所有量測資料儲存至 SD 卡中，同時以 OLED 螢幕顯示數值。

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt \quad (3-4)$$

其中 Q 為電量， t_1 為起始時間， t_2 為終止時間。

$$Q = \sum I \cdot t \quad (3-5)$$

其中 I 為監控裝置量測之電壓， t 為 1 秒 (Ng *et al.*, 2009; Piller *et al.*, 2001)。

3.2 快速估算方法

如今電池已在日常生活中被廣泛使用，必須知道電池的健康狀態以及如何延長循環次數。本實驗以一種快速的方法，估算 SOH。在 10 秒 2C 電流進行放電後，根據其電壓變化，可以推導出內阻以及 SOH。利用電流和額定容量，可以找出兩個參數，推導出 SOH 與 SOC 之關係。



3.2.1 實驗儀器介紹

(1) 可調數控恆流電子負載

該電子負載之測試電壓範圍為 1~60 V、工作電流 0.01~10 A 且最大功率 150 W。可提供穩定的恆電流輸出，根據參數設定，可以在不同電流範圍下工作。具有 LCD 顯示螢幕，可以顯示電壓、電流、功率、容量以及啟動時間，且可設定截止電壓，保護待測電池，以免過放。在實驗中搭配電壓電流監控裝置即可以完整記錄其放電過程，以利後續分析。

(2) 電池內阻測試儀

為 NICJOY 耐杰生產，型號為 BRT808，該內阻測試儀之測試電壓範圍為 0~100 V，採用四線接線方式，輸入訊號 1 kHz 交流正弦波，其精確度為 $\pm 0.5\%$ 。

(3) 直流電源供應器

固緯電子 (Gwinstek) 生產，型號為 SPD-3606，該儀器提供高達 375 W 之功率，有三個獨立輸出及 CH1/CH2 雙輸出範圍 (30 V/6 A or 60 V/3 A)，搭配 OVP 過電壓保護、OTP 過溫度保護、過載保護以及定電壓/定電流模式。

(4) 多功能記錄電錶

台灣日置電機 (Hioki) 公司生產，型號為 DT4211，該儀器 DCV 量測範圍 420V~600V、ACV 量測範圍 420~600 V、電阻 420~42 M Ω 。

(5) 可程控直流電子負載

固緯電子 (Gwinstek) 生產，型號為 PEL-3041，如圖 3.5，該儀器操作電壓 (DC) 為 1.5~150 V、電流為 0~70A，功率 350 W。在操作模式上有 CC、CV、CR 和 CP。



圖 3.5 PEL-3041 可程控直流電子負載

(6) 可程控開關電源

固緯電子 (Gwinstek) 生產，型號為 PSW 80-27，如圖 3.6，該儀器額定輸出電壓為 80 V，額定輸出電流為 27 A 以及額定輸出功率為 720 W。



圖 3.6 PSW 80-27 可程控開關電源

(7) 1200W 高壓併網型逆變器

碩陽新能源科技 (SOYOSOURCE) 生產，型號 GTW-1200G96，該儀器光伏模式交流最大輸出功率為 1200 W，電池模式可設定輸出功率為 90 ~ 850 W，最大交流電流 10 A。



3.2.2 快速估算法實驗流程

實驗流程圖如圖 3.7，本研究是為了透過快速的方法來估算 SOH，使用 10 秒 2C 電流進行放電。通過觀察電池在放電過程中的電壓變化，我們可以推導出內阻和 SOH 的值。同時，我們利用電流和額定容量這兩個參數，找到了它們之間的關係，進一步推導出 SOH 與 SOC。

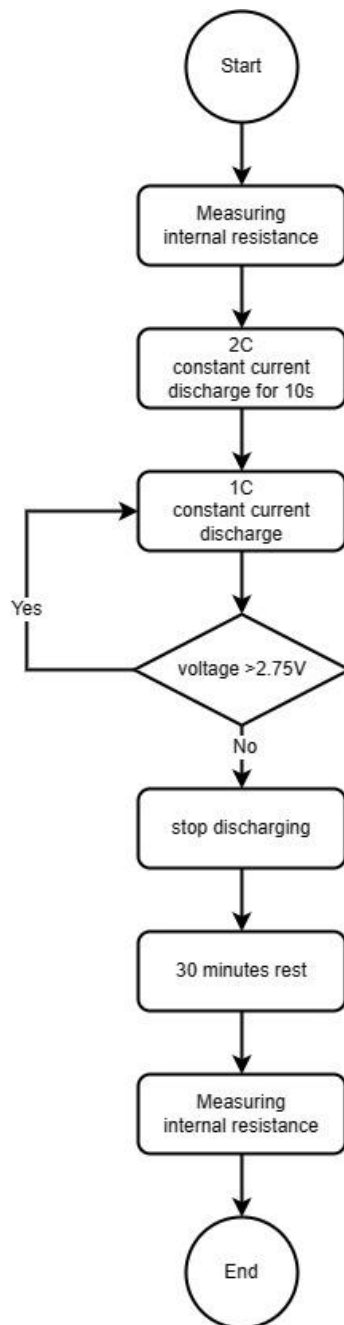


圖 3.7 放電實驗流程圖

3.2.3 放電方法

充放電率 (C-rate) 在充放電實驗中是常見且重要的參數，指的是電流大小與電池額定容量的比值，用來描述充放電速度，以 C 為單位。如果電池之容量比喻成水槽，其出水口越大代表水可以很快排出，也就表示電池的放電速率很高，電量

迅速下降。當額定容量可以在 1 小時內放電完成，也就稱為 1 C 放電。若 2 小時才能完成放電，則稱為 0.5 C。

進行放電測試前，需先量測內阻，記錄每次內阻的變化，以利用內阻變化估算 SOH。而接著進行大電流 (2 C) 放電，持續 10 秒，記錄電壓變化。在進行大電流放電後，以 1 C 的電流進行放電至截止電壓 2.75 V，目的為得知電池之目前最大可用電量。

在每次量測內阻前，若是剛進行充放電，因其內部化學反應尚未平衡之關係，故必須靜置一段時間，待平衡後，再進行電池之內阻量測，以減少內阻值劇烈跳動之誤差。

在此實驗中，以全新的電池做比較，透過將 10 秒電壓差除以放電電流並乘上一個係數 C，如 (3-6) 式，可以估算出舊電池之內阻。

記錄電池內阻及容量，以 (2-7) 式計算出電池之 SOH。而 Ramadan *et al.* (2015) 提到，當可用容量降至初始容量之 80% 時，其 SOH 為 0%，在本研究中，將用 (2-7) 式計算出的 SOH，推導出新的容量標準，如 (3-7) 式。

$$C \frac{\Delta V}{I} = R \quad (3-6)$$

$$SOH = \left(\frac{\frac{C}{C_{IV}} - y}{1 - y} \right) \cdot 100\% \quad (3-7)$$

其中 y 為當可用容量降至初始容量之 y% 時，其 SOH 為 0% (Ramadan *et al.*, 2015)。



3.2.4 充電方法

電池充電的部分利用電源供應器使用恆流恆壓充電 (Constant Current-Constant Voltage, CCCV)，恆流恆壓充電為鋰離子電池常見之充電方式，依據電池的電壓在以恆定電流充電以及以恆定電壓充電模式之間切換，如圖 3.8。

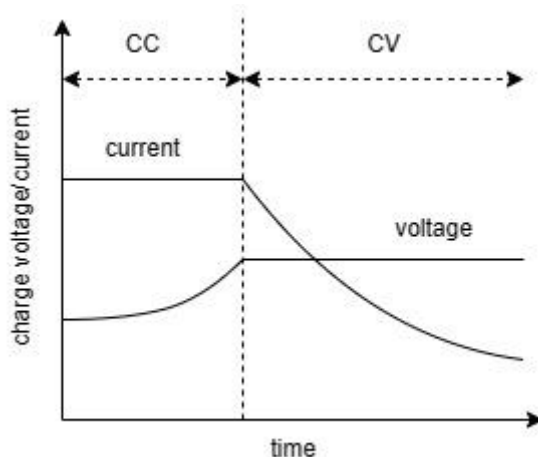


圖 3.8 恆流恆壓充電法示意圖

充電過程中會先以設定的電流值進行恆流充電，此時電池內部電壓緩慢上升；隨著充電過程繼續，電池電壓會逐漸到達其開路電壓。此時電供輸出電壓將達一開始設定之電壓上限，也就是電池之開路電壓，然後接著進入恆定電壓充電模式；進入恆壓模式後，電源對電池的輸出電流逐漸下降，而對電池的電壓則保持固定。

與一般定電壓充電不同的是，在充電初期使用定電壓充電，因電池之電壓較低，造成前期電流過大，容易造成電池的及板損壞及電池溫度過高，以至於減少電池壽命；而與定電流充電法的差異是，因電源提供定電流給電池，所以當電池完成充電，必須停止或切換至涓流充電模式，否則會導致電池過充，使極板損壞，減少其使用壽命。



本研究之充電流程如圖 3.9 所示：

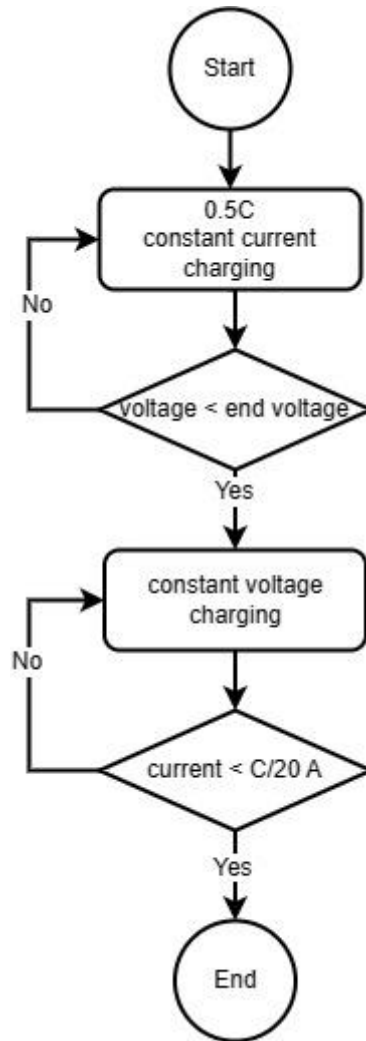


圖 3.9 18650 電池充電流程

所有 18650 電池都根據 P 廠牌提供之標準充電方法，首先以定電流 ($C/2$) 充電至電池之截止電壓，充至設定之截止電壓時，電源會切換至 CV 定電壓模式，浮充至電流降至 $C/20$ 後停止充電。



3.3 等效電路模型方法

本章節以等效電路模型模擬電池之放電情形，將大電流放電以一階等效電路進行計算出歐姆內阻和因極板之化學反應造成之極化內阻，下面章節將對此方法進行說明。

3.3.1 以大電流放電方法計算模型元件之參數

在 2.6 節中提到，前人(Jin *et al.*, 2021) 使用二階等效電路以混和脈波功率特性獲得每個元件之參數；使用二階等效電路可以更擬合電池之特性，而在本研究中，因描述電池 10 秒放電行為，其特性相對於混和脈波功率較不複雜，且因電池內部反應時間過短，對於極化內阻的影響不顯著，而後續只利用 R_0 計算 SOH，故將改為使用一階等效電路，如圖 3.10。以此方法計算出所有元件之參數。

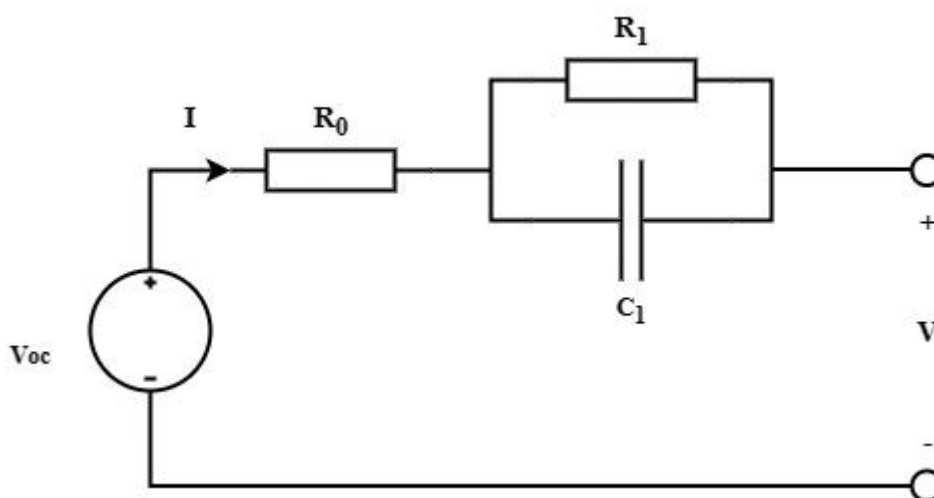


圖 3.10 一階等效電路

將放電曲線數據，以 (2-8) 式以及 (2-10) 式計算出其歐姆內阻和極化內阻；以 (2-9) 式擬合本研究之大電流放電實驗之電壓回升曲線，接著以 (2-12) 式計算出電容 C_1 ；以 (2-7) 式計算其 SOH，再以 (3-7) 式推導出其參數 y (Jin *et al.*, 2021; Ramadan *et al.*, 2015)。



3.4 以機器學習方法預測電池容量

在 2.7 節中提到電池內部的複雜性還有工作環境的不確定性，使用電池老化數據，對於容量進行預測。下面章節會對使用之電池老化資料集和訓練模型做進一步說明(Sui *et al.*, 2021; Xiong *et al.*, 2018)。

3.4.1 電池資料集介紹

在 2.7.2 小節中提到，前人 (Zhu *et al.*, 2022)使用不同機器學習之方法評估電池老化機制和老化衰退情形。使用的資料集為 130 個商業 18650 鋰三元電池，使用不同電流大小，在溫度控制箱中進行長期之充電循環。本研究也會使用此資料集做為訓練集，用於基本模型的訓練和測試，再使用本研究中使用之電池充電數據做為驗證，預測出電池容量。

3.4.2 電池資料集之特徵提取

在此大型的電池循環資料集中，其資料包含了充電完成後之鬆弛電壓 (relaxation voltage) 曲線和相對應之電池容量。鬆弛電壓指的是電池介電質的極化趨於穩態，也就是當電池不再被施加外部電流時，電池內部之電壓變化情形，反映電池在靜止狀態下的電化學行為和特性。通過分析鬆弛電壓曲線的形狀和特徵，可獲得有關電池之容量、內阻相關資訊。

在完成充電後，鬆弛時間為 30 分鐘，記錄每 30 秒之電壓，將每筆鬆弛電壓曲線轉換為六個統計特徵，即：變異數 (variance)、偏度 (skewness)、峰度 (kurtosis)、最大值、最小值和平均值 (mean)，如 (3-8) 至 (3-13) 式(Zhu *et al.*, 2022)。

$$\mu_2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3-8)$$

$$\mu_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x - \bar{x}}{\sqrt{\mu_2}} \right)^3 \quad (3-9)$$



$$\mu_4 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x - \bar{x}}{\sqrt{\mu_2}} \right)^4 - 3 \quad (3-10)$$

$$x_{\max} = \max\{x_i\} \quad (3-11)$$

$$x_{\min} = \min\{x_i\} \quad (3-12)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3-13)$$

3.4.3 基於支持向量迴歸 (SVR) 預測電池容量

基於支持向量迴歸預測電池容量的流程如圖 3.11 所示，將 3.4.1 節提到的電池資料集之特徵代入 2.7.2 節中，前人提出之 SVR 模型(García-Gonzalo *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2022)中進行訓練，並利用 3.2.4 節提出的充電方法收集的鬆弛曲線驗證此訓練模型。

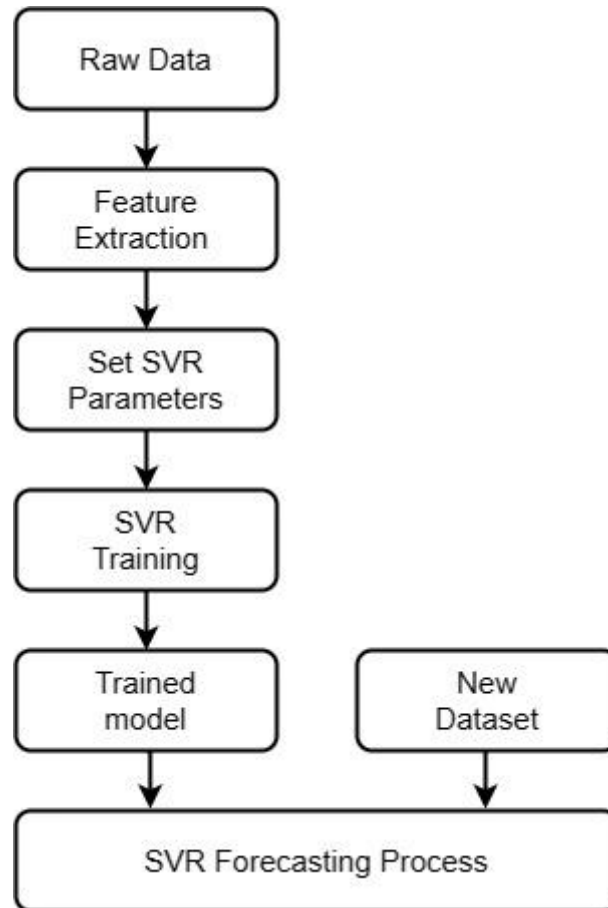


圖 3.11 SVR 訓練流程

第四章 結果與討論



4.1 電壓、電流及溫度監控裝置

4.1.1 電壓、電流及溫度監控裝置

電壓、電流及溫度監控裝置成品如圖 4.1 所示，將所有感測器的線路都以杜邦線連接至 Arduino nano shield 擴充板上。使用杜邦線容易插拔，使測試更加方便，且搭配擴充板可以擴增所需模組。上層擴充板承載控制板 Arduino nano，還有 ACS758 電流感測器、DS18B20 溫度感測器、OLED 螢幕顯示模組和 SD 卡模組。下層 PCB 板主要給分壓電阻做使用。

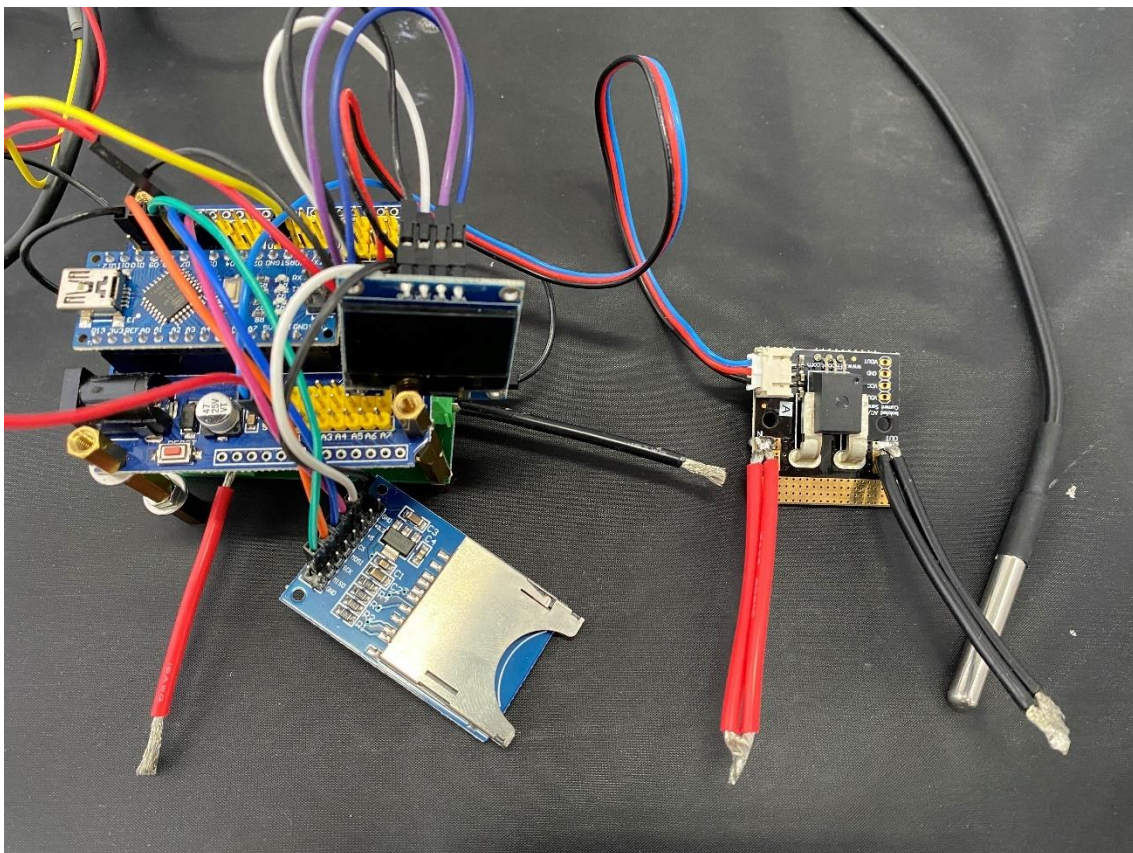



圖 4.1 電壓、電流及溫度監控器



在連接所有控制板和感測器模組時，需要確認感測器地線都共地。地線的主要功能是提供迴路和參考電位，才可使所有感測器有同一參考基準，使接收到的訊號被準確使用。

與電池相連接之線材則是選用美國線規 (American wire gauge, AWG) 16 多芯線做為導線，可在常溫下可以承受 10 A 的電流，所以在電流感測器上使用兩條 AWG 16 之導線並聯，加粗其線徑，以承受更大的電流輸入。

4.1.2 電壓、電流及溫度監控裝置校正

電壓、電流及溫度監控裝置完成後，需要對其量測進行校正。使用 SPD-3606 直流電源供應器做為校正依據，首先分別電壓和電流進行量測。表 4.1 和表 4.2 分別為電壓和電流的量測與校正結果。



表 4.1 無電流下電壓量測與校正之結果

電供電壓 (V)	電供電流 (A)	量測電壓 (校正前) (V)	量測電壓 (校正後) (V)
0.00	0.00	0.01	0.08
1.00	0.00	1.02	1.00
5.00	0.00	5.27	4.97
10.00	0.00	10.70	10.02
15.00	0.00	16.04	14.99
20.00	0.00	21.41	19.98
25.00	0.00	26.82	25.01
30.00	0.00	32.19	30.00
35.00	0.00	37.52	34.96
40.00	0.00	42.91	39.97
45.00	0.00	48.29	44.98
50.00	0.00	53.71	50.02
55.00	0.00	59.10	55.03



表 4.2 電流量測與校正結果

電供電壓	電供電流	量測電流 (校正前)	量測電流 (校正後)
(V)	(A)	(A)	(A)
3.70	1.00	1.00	0.99
4.00	2.00	1.94	2.01
4.70	3.00	2.83	2.98
5.00	4.00	3.76	3.99
5.80	5.00	4.68	4.99
6.80	6.01	5.60	5.99
7.60	7.01	6.55	7.02

透過線性迴歸，可以找出電供電壓和量測電壓之間的關係，(3-1) 式以及 (3-2) 式分別為電壓和電流的校正方程式。

$$V_c = 0.9299V_s + 0.0765 \quad (3-1)$$

$$I_c = 1.0863I_s - 0.0879 \quad (3-2)$$

其中， V_s 為初始量測電壓值， V_c 為校正電壓值； I_s 為初始量測電流值， I_c 為校正電流值。

經由 (3-1) 式與 (3-2) 式的校正後，電壓之平均誤差為 0.02V，電流之平均誤差為 0.01A，兩方程式都明顯的改善了量測結果。而由表 4.3 可觀察得知，電壓和電流同時量測，電壓之誤差逐漸變大。

因避免電壓量測時，電流會先經過電流感測器，而造成能量耗損，故電壓量測選擇並聯跨接在輸入兩端，而不受到電流感測器的影響，如圖 4.2。當電源供應器

之電壓和電流同時改變，電壓的平均誤差達 0.17V，與先前之校正結果有一定的差距。當流經電壓電流監控裝置的電流越大時，電壓量測之誤差也會隨之變大，推測其原因為導線造成之能量損失。此結果代表電壓的量測結果會被電流之大小所影響，而由表 4.3 可得之，電壓誤差和電流大小為正相關。

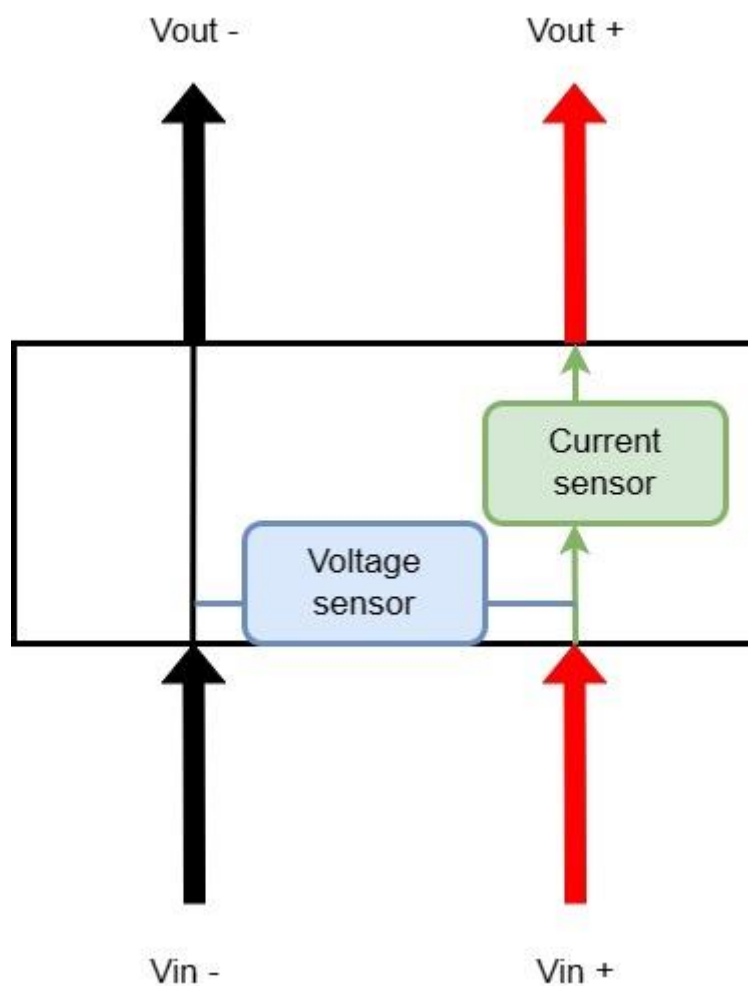


圖 4.2 電壓與電流感測器線路示意圖



表 4.3 電壓電流校正結果

電供電壓	電供電流	量測電壓 (校正後)	量測電流 (校正後)
(V)	(A)	(V)	(A)
3.70	1.00	3.57	0.99
4.00	2.00	3.86	2.01
4.70	3.00	4.53	2.98
5.00	4.00	4.81	3.99
5.80	5.00	5.60	4.99
6.80	6.01	6.57	5.99
7.60	7.01	7.37	7.02

根據上述推測之原因，故須再一次對於電壓做校正。在不同電流下，量測而得電壓之誤差，其結果如圖 4.3 所示，可觀察出電流大小和電壓誤差有線性關係。

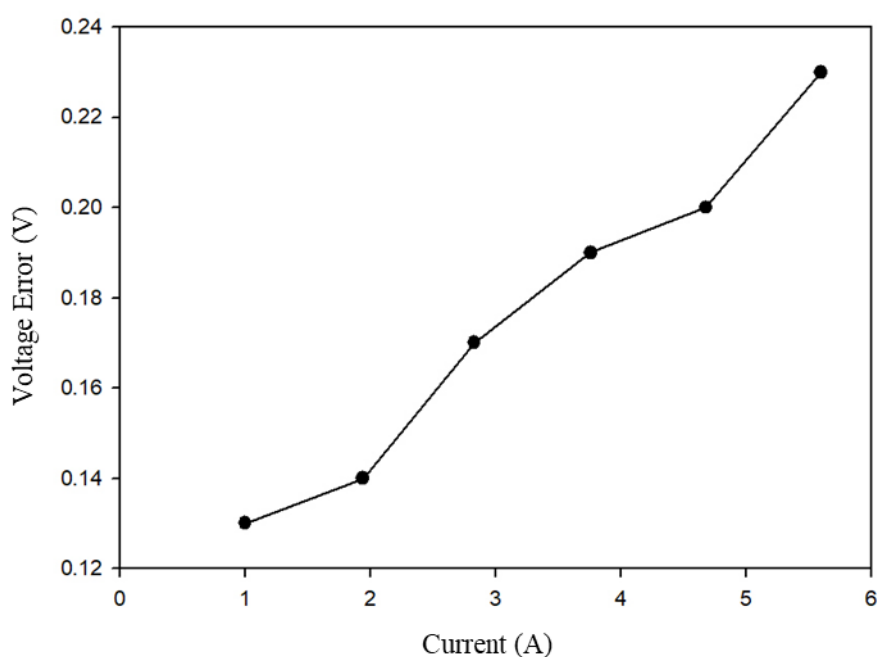


圖 4.3 電流與電壓誤差之關係圖

由電壓誤差和電流大小之線性關係，第二次電壓校正方程式如 (3-3) 式：

$$V_{c,new} = V_c + V_{err} \quad (3-3)$$

$$V_{err} = aI_s + b \quad (3-4)$$

其中， $V_{c,new}$ 為二次校正之電壓， V_c 為第一次校正的電壓， V_{err} 為導線造成之電壓誤差；而 a 為 0.0218 與 b 為 0.1048 是經由線性迴歸演算法而得係數， I_s 初始量測電流。

在未接上待測電源時，依然有訊號干擾的原因造成讀值有誤差，進而影響到校正的方程式而造成偏移。在沒有輸入時，電壓和電流讀值約為 0.01，所以設定當電壓和電流小於 0.05 時，將讀值判斷為 0。最後的校正判斷式如 (3-5) 式和 (3-6) 式。

$$V_c = \begin{cases} 0, & V_s < 0.05 \\ 0.9299V_s + 0.0218I_s + 0.1813, & I_s \geq 0.05 \end{cases} \quad (3-5)$$

$$I_c = \begin{cases} 0, & I_s < 0.05 \\ 1.0863I_s - 0.0879, & I_s \geq 0.05 \end{cases} \quad (3-6)$$

經過 (3-5) 式和 (3-6) 式校正後，再次對電壓和電壓進行同時量測，其量測結果如表 4.4 所示。電壓平均誤差為 0.02 V，電流平均誤差為 0.01 A。

表 4.4 二次校正後量測結果

電供電壓	電供電流	量測電壓 (二次校正後)	量測電流 (校正後)
(V)	(A)	(V)	(A)
1.20	1.00	1.18	0.99
2.00	2.00	1.98	2.01
3.10	3.00	3.11	2.98
4.10	4.00	4.09	3.99
5.20	5.00	5.22	4.99
6.20	6.01	6.22	5.99
7.00	7.01	7.02	7.02

4.1.3 電壓電流監控裝置結果

考慮到電路之間的訊號干擾、感測模組自身造成之量測誤差以及導線傳輸的能量損失，待所有電路安裝完成後，再進行校正，此量測結果與實際應用最為接近。

在實際運用上，如圖 4.4，記錄 A 廠牌鋰電池之放電情形。

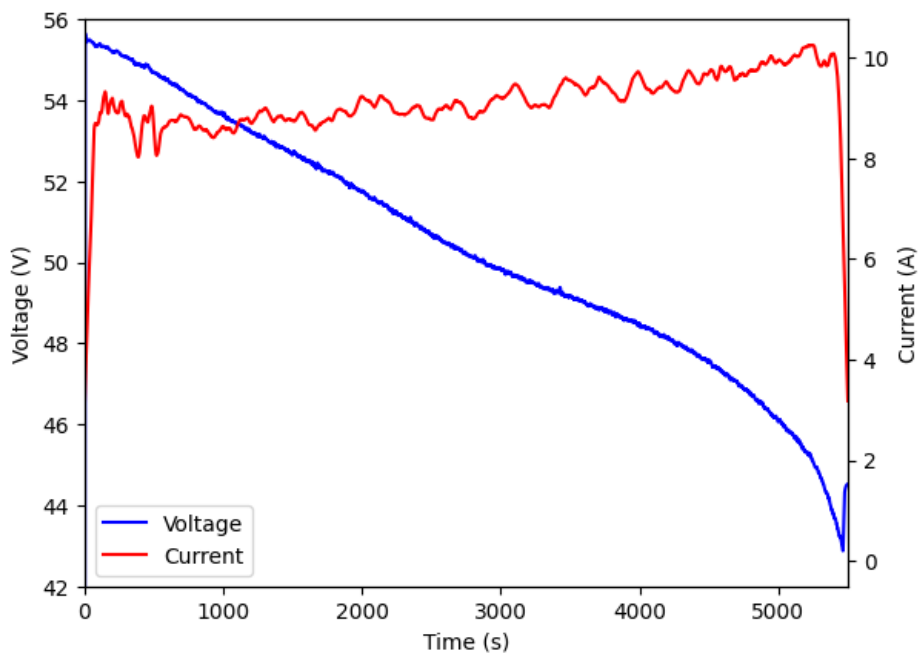


圖 4.4 A 廠牌鋰電池電壓、電流曲線

圖 4.4 為 A 廠牌鋰電池放電之電壓曲線圖，每秒記錄一筆資料，當放電至截止電壓時則停止放電，而後可以看到電壓回升的趨勢。在圖中的線段抖動是因為此放電過程是使用併網型逆變器，採用定功率放電，故電流會隨著電壓降低而變動。

當開始放電時，電流資料會比較緩慢的上升，此特性是因為使用的 ACS758 電流感測器類似滑動平均濾波之方式記錄電流。將數據中高頻雜訊過濾掉，達到輸入訊號平滑化的效果。

在放電過程中，使用耐高溫絕緣膠帶，將 DS18B20 溫度感測器固定於電池側面以記錄溫度變化。兩不同廠牌之鋰電池的溫度曲線如圖 4.5 所示。其中，LG 鋰電池最高溫達 36 °C，而 Hanlin 鋰電池最高溫則約 40 °C，觀察得知，電池性能較好，在放電的過程中，溫度升高的幅度較不明顯。

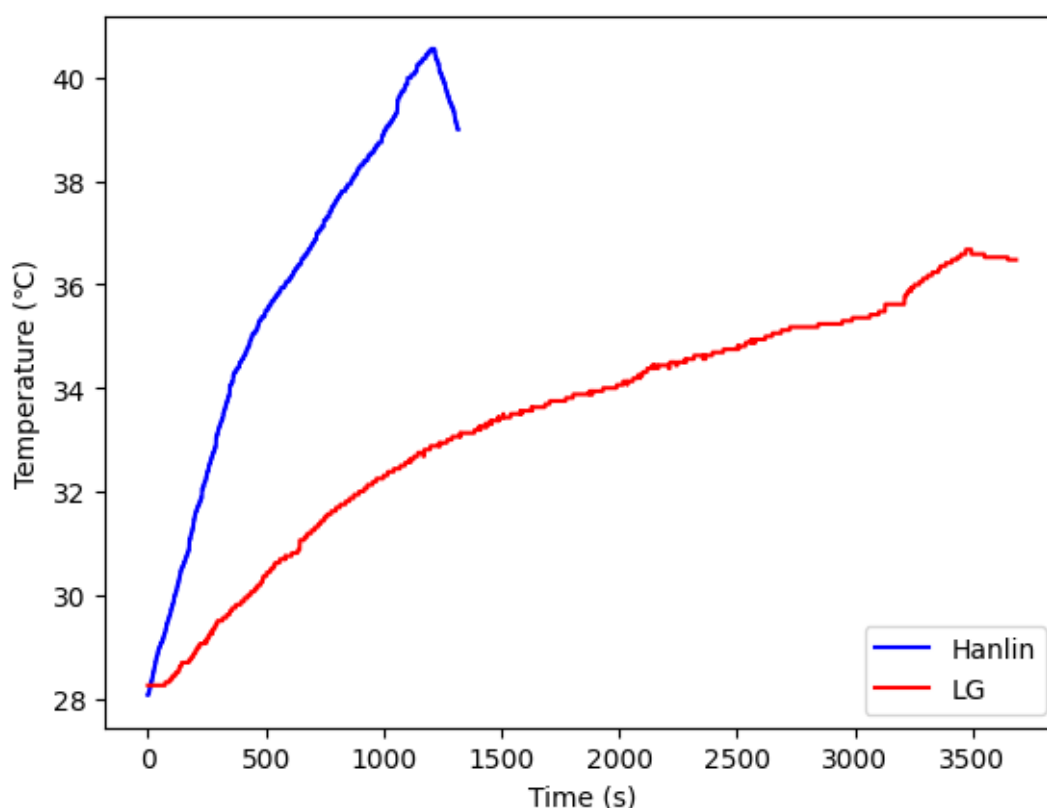


圖 4.5 電池放電之溫度曲線

在電池老化相關實驗中，必須詳細的記錄電池之電壓、電流及溫度，觀察其電壓下降幅度、記錄容量變化以及溫度變化。此裝置會持續的應用在後續電池之充放電實驗的數據記錄，了解電池的使用狀況，提供計算 SOH 和 SOC 之所需參數。

4.2 大電流放電實驗

4.2.1 大電流放電實驗

在剛開始進行實驗時，除了上節所提到之 INA219 電流感測器以外，原先考慮使用之 ACS712 霍爾效應電流感測器。當連接電子負載放電測試時，發現有電壓驟降情形，電壓迅速下降至截止電壓，而無法順利放電。當時推測原因是霍爾感測器與電子負載之間有訊號的電磁干擾，導致電子負載量測到的電壓並非電池真正的電壓。而將電流感測器換成 INA219 後，電壓下降的幅度有減緩，但依然無法正常放電。而後考慮整體實驗電路，發現原因為使用彈簧式電池盒，該電池盒再連接電池之正負極時，會因接觸不良，而導致電壓量測有誤，影響放電過程，故改為彈片式電池盒，如圖 4.6，即可改善放電測試之問題。



圖 4.6 彈片式電池盒



本研究使用 4 顆 2600mAh LG18650 鋰電池觀察內阻變化，在放電實驗前後都會以內阻量測儀記錄電池內阻，由圖 4.7 至圖 4.10 所示，可以觀察出放電後之內阻在一般狀況下都會比放電前高，造成此現象是因為放電時電池之溫度上升、極板發生化學反應和離子濃度改變，使得電池結構改變，導致內阻升高。

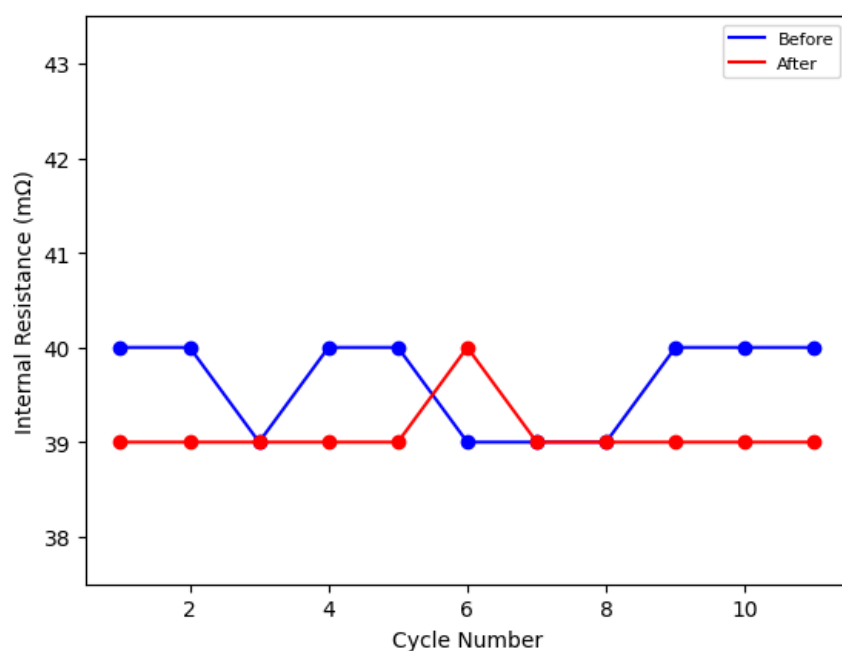


圖 4.7 LG_2600_1 內阻變化

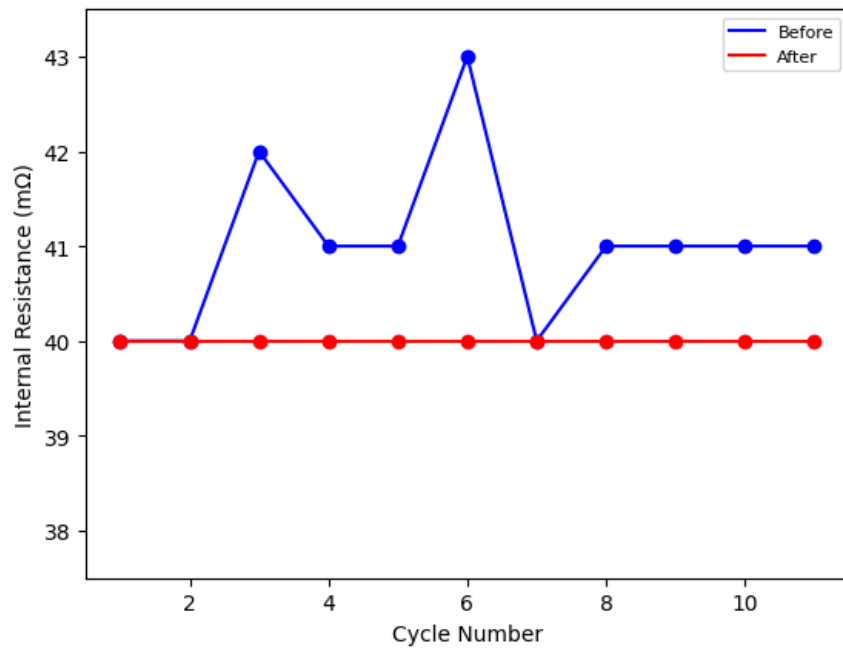


圖 4.8 LG_2600_2 內阻變化

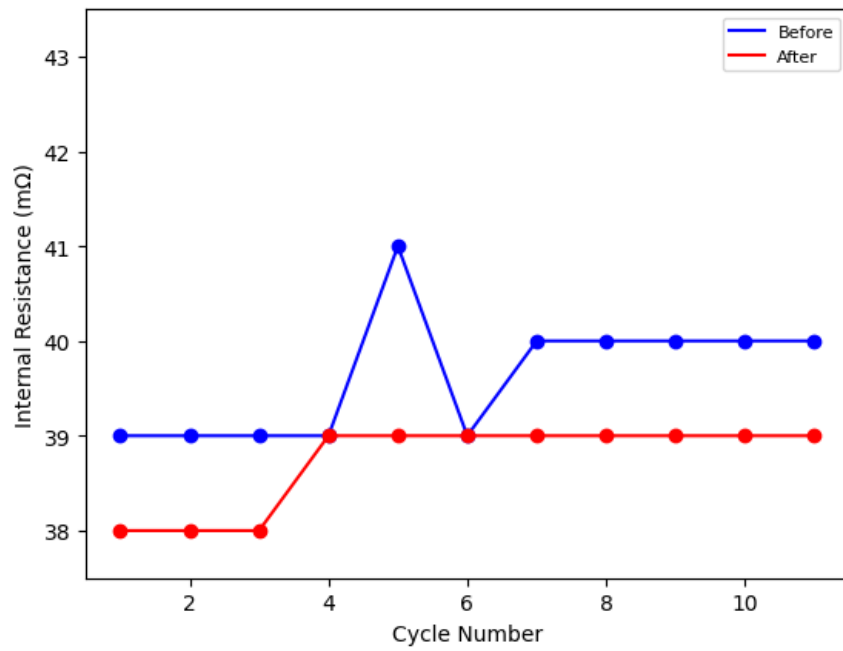


圖 4.9 LG_2600_3 內阻變化

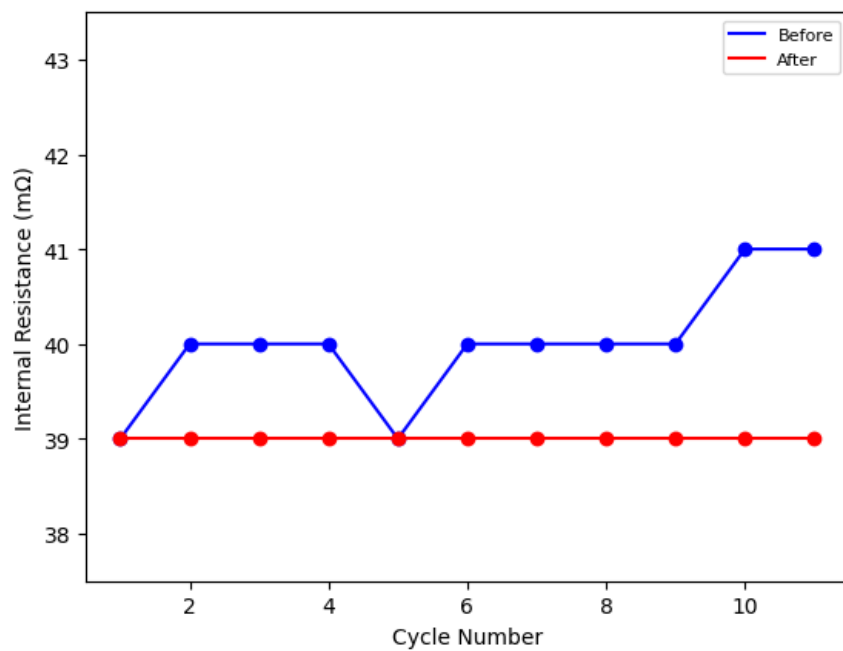


圖 4.10 LG_2600_4 內阻變化

而在 3400mAh LG18650 鋰電池的內阻變化來看，如圖 4.11 所示，大容量之電池，在放電前後內阻差距更大，造成此現象為電池之內部結構不同，容量大會更有更多活性材料層且不同濃度的電解液也會有顯著影響。

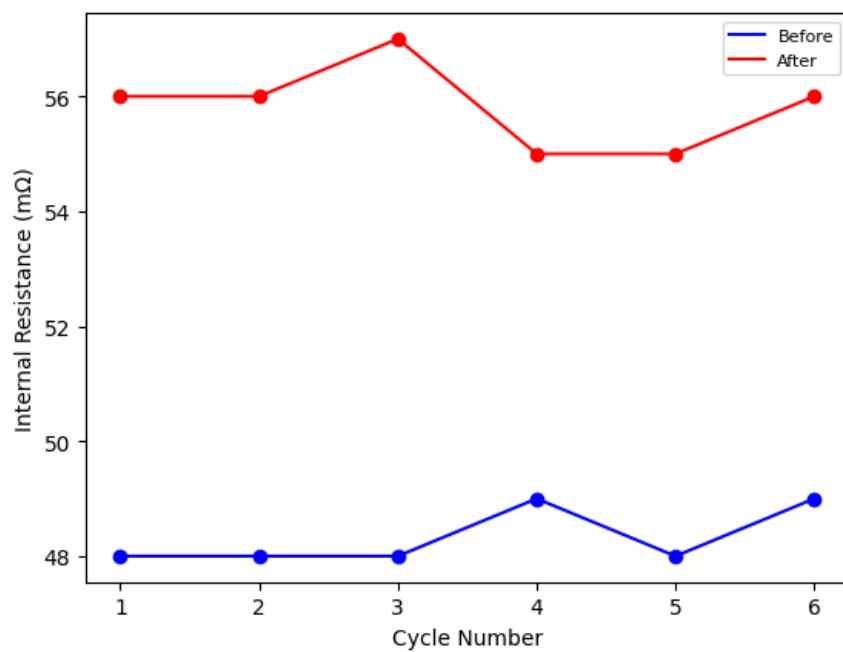


圖 4.11 LG_3400 內阻變化



不同材料之電池也有同樣趨勢之內阻變化，以下是 P 廠牌所製造之磷酸鋰鐵 (LFP) 18650 電池之內阻變化，如圖 4.12 和圖 4.13。

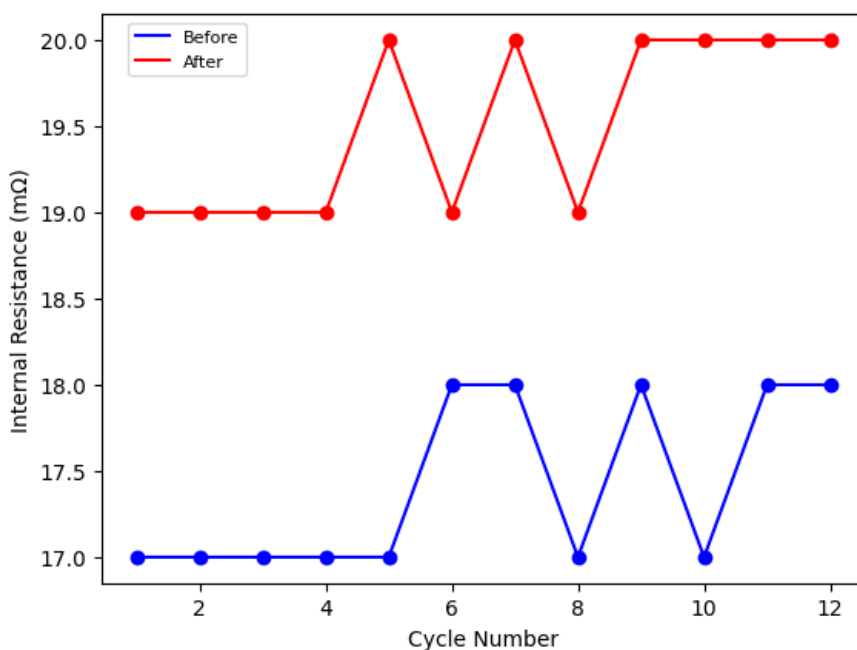


圖 4.12 P_LFP_1100 內阻變化

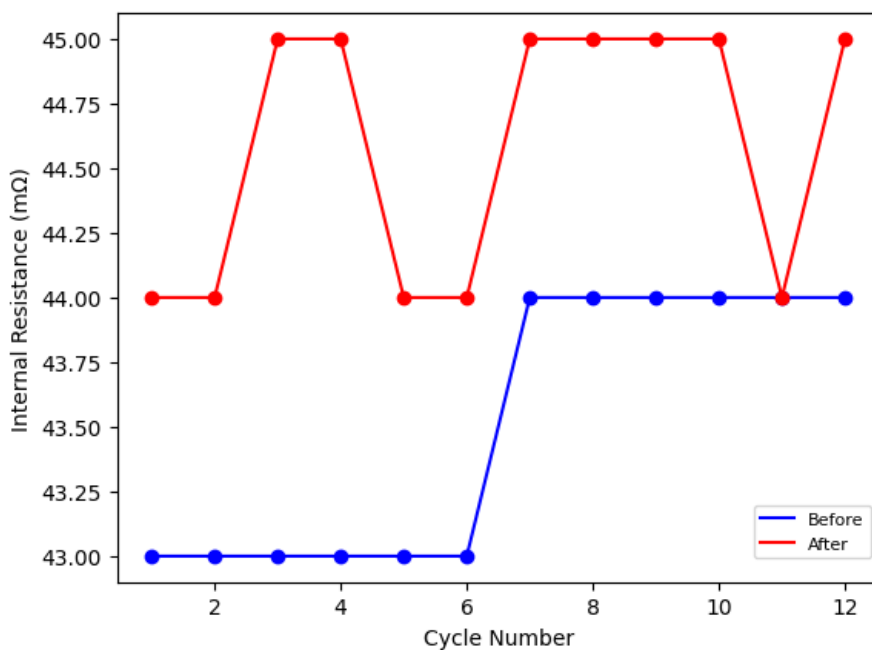


圖 4.13 P_LFP_1500 內阻變化



4.2.2 快速估算法

對於不同品牌及類型的電池，以新舊電池做為比較，使用大電流放電之方法進行測試，10 秒放電曲線如下圖 4.14 至圖 4.16 所示。

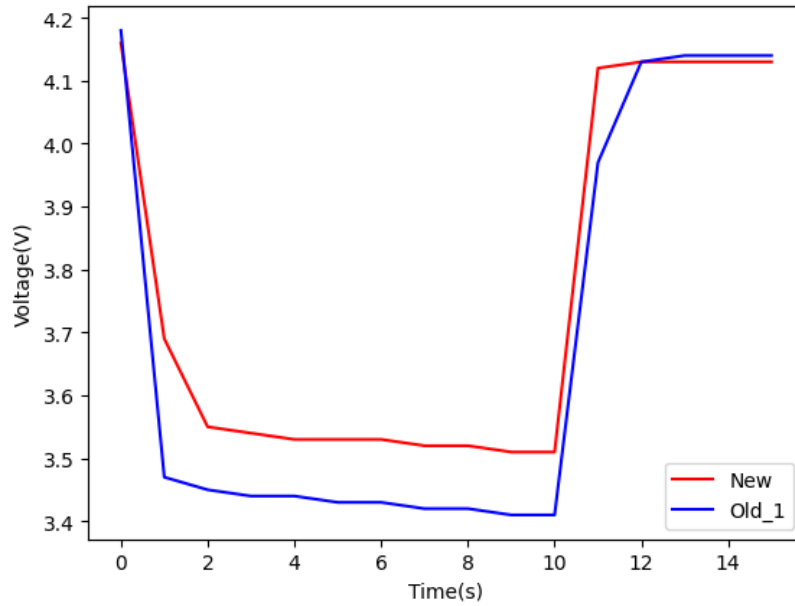


圖 4.14 LG_2600mAh 新舊電池放電曲線圖

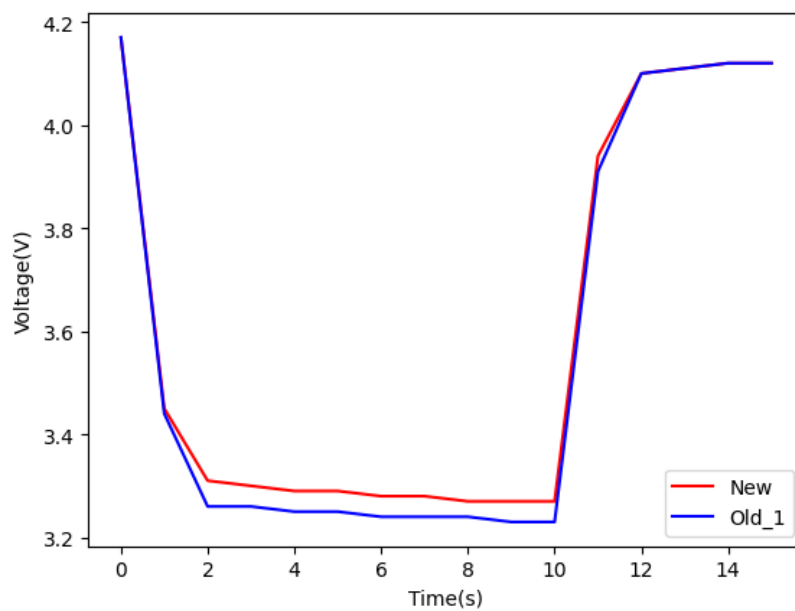


圖 4.15 LG_3400mAh 新舊電池放電曲線圖

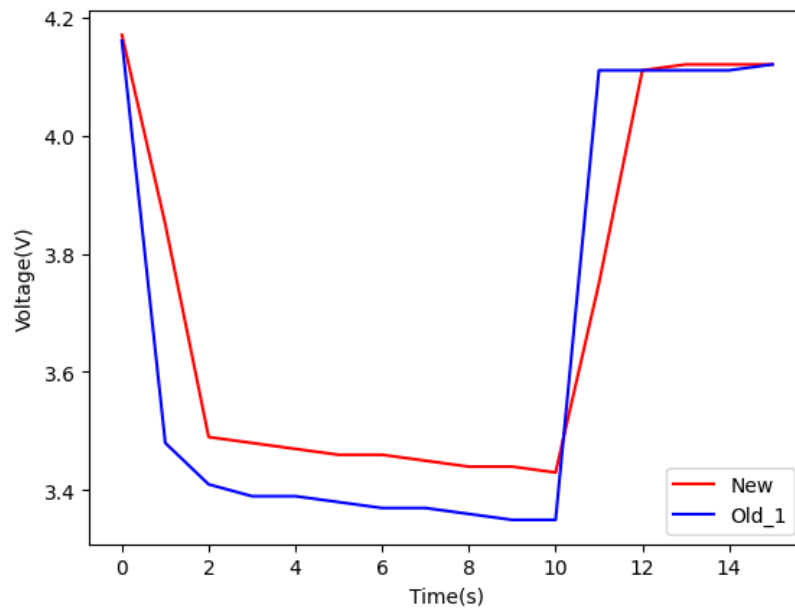
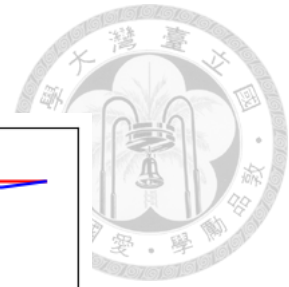
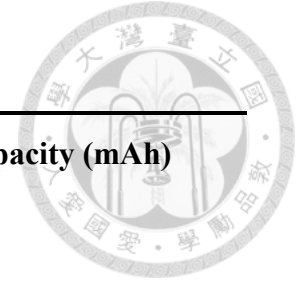


圖 4.16 Sanyo_2600mAh 新舊電池放電曲線圖

由放電曲線可以觀察出，舊電池因其內阻較大，在放電後電池電壓下降幅度相較於新電池更大。表 4.5 列出放電之電壓差、內阻和電池容量。

表 4.5 大電流放電測試之電池實驗結果



	ΔV (V)	Internal resistance (m Ω)	Capacity (mAh)
LG_2600_new	0.65	39.0	2438
LG_2600_old1	0.72	41.0	2378
LG_2600_old2	0.77	48.0	2249
LG_3400_new	0.90	48.0	2976
LG_3400_old	0.94	49.0	2932
Sanyo_2600_old1	0.74	41.0	2285
Sanyo_2600_old2	0.81	49.0	2071
Hanlin_2300_new	0.95	178.0	1342
Hanlin_2300_old	0.98	187.0	1303

對於 LG_2600 mAh 和 LG_3400 mAh 兩種系列電池，使用全新的電池做比較，以初始容量和內阻，根據 (2-6) 式、(3-6) 式以及 (3-7) 式，計算出每種電池之相關係數 C 和 y，如表 4.6。

表 4.6 LG_2600 和 LG_3400 之 C 和 y

	C	y
LG_2600	0.312	0.57
LG_3400	0.363	0.66



而 Sanyo 廠牌因無全新電池作為參考，無法提供 (2-6) 式、(3-6) 式以及 (3-7) 式所需要的值。故根據常見 18650 鋰電池之參數，對於初始容量以及內阻進行猜測，所計算出係數 C 以及 y 如表 4.7。

表 4.7 Sanyo_2600 之 C 和 y

	C	y
Sanyo_2600 (Rini= 30)	0.288	0.81 (retry)
Sanyo_2600 (Rini= 35)	0.315	0.59

當初使內阻假設為 30mΩ 時，可由 Sanyo_2600_old1 數據計算出 y 值為 0.81，此結果代入 (2-6) 式和 (3-7) 式後兩者之 SOH 差距甚大。而當內阻假設為 35mΩ 時，可以得出 y 為 0.59，若以 (2-6) 式和 (3-7) 式計算 SOH，兩者會十分接近。以 Sanyo_2600_old2 做驗證，代入 (2-6) 式和 (3-7) 式，其結果分別為 60.0% 以及 62.3%，因此認為猜測初始值是可以接受的。以此表示在參數不足時之作法。

本研究也利用此法對鉛酸電池也進行了測試，使用 12V/9A 之密封鉛酸電池，對於初始容量和內阻分別猜測為 6 Ah 和 14 mΩ，相關係數 C 以及 y 如表 4.8。

表 4.8 鉛酸電池之 C 和 y

	C	y
12V/ 9Ah	0.126	0.65

而 Hanlin 廠牌的電池與其他品牌有所不同，其 y 值明顯低於其他廠牌的電池，如表 4.9 所示。造成此差異的原因，推測是因為其容量和內阻的衰退速度不一致，其他廠牌之 y 大約在 0.6，可以由此判斷電池的容量和內阻的衰退速度會大致相同。

表 4.9 Hanlin_2300mAh 之 C 和 y

	C	y
Hanlin_2300	0.862	0.25

相關係數 C 以及 y 可利用 (3-6) 式及 (3-7) 式求得，而當因缺少全新電池數據時，也可利用假設內阻值初始值的方式，利用 (2-6) 式以及 (3-7) 式求得 SOH，以 10 秒 2C 放電之實驗流程，即可判斷電池之 SOH。

4.2.3 等效電路模擬

以下為使用固緯電子生產 PEL-3041 可程控直流電子負載，進行大電流放電實驗。如圖 4.17 至圖 4.19 為各廠牌電池之放電曲線。利用一階 RC 等效電路，如圖 3.10，模擬電池放電情形，計算出各元件之參數值。

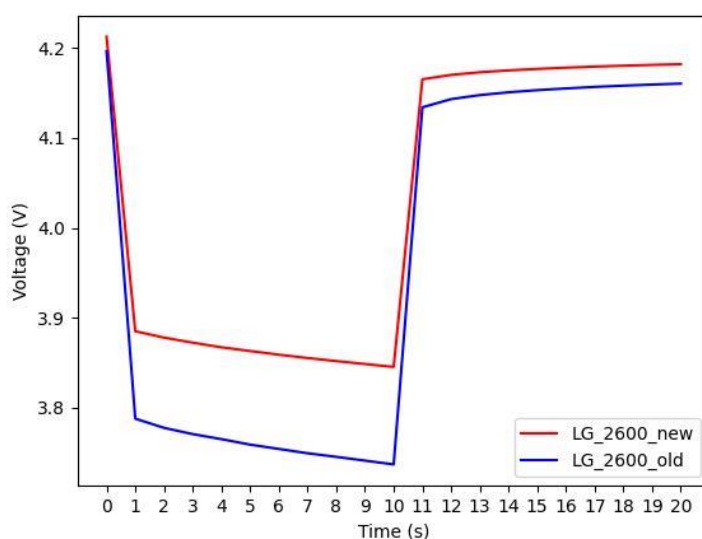


圖 4.17 使用 PEL-3041 之 LG_2600mAh 放電曲線

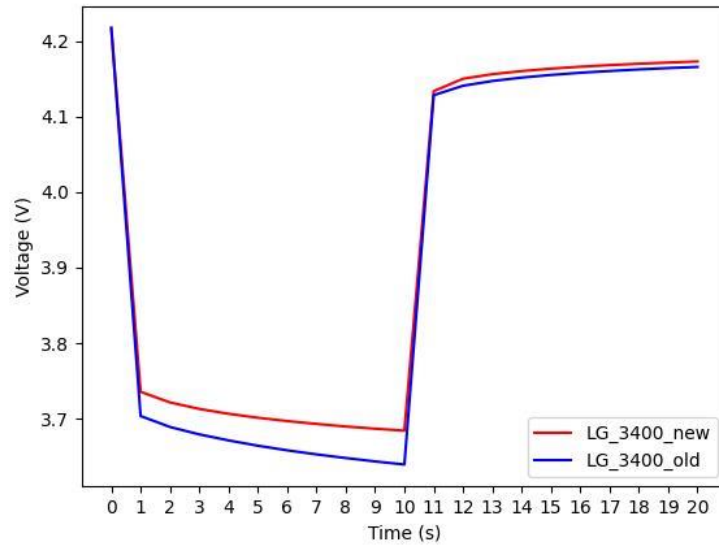


圖 4.18 使用 PEL-3041 之 LG_3400mAh 放電曲線

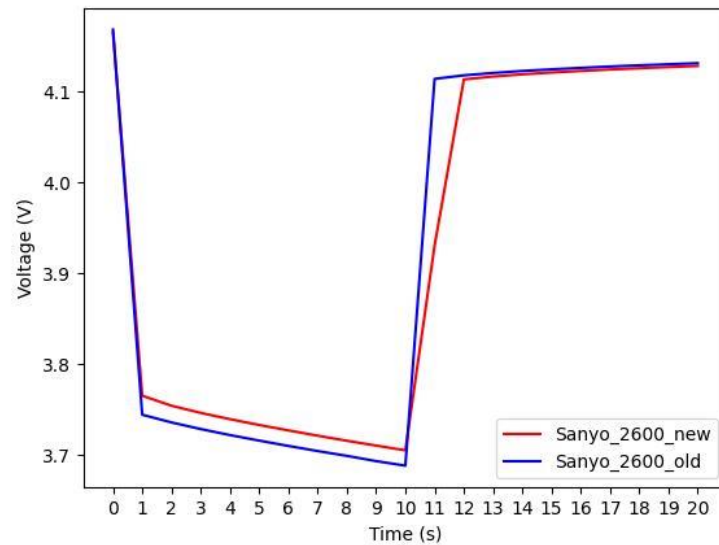


圖 4.19 使用 PEL-3041 之 Sanyo_2600mAh 放電曲線

根據 (2-7) 式計算得知歐姆電阻 R_0 ，再利用 (2-9) 式以及 (2-11) 式結合 Python 中 `scipy.optimize.curve_fit` 套件讓等效電路之中的元件擬合實驗的放電曲線，求得電路中之極化電阻 R_1 、時間常數 τ_1 與電容 C_1 ，其結果如表 4.9 所示。

表 4.10 一階等效電路各元件之參數值

	R_0 (m Ω)	R_1 (m Ω)	τ_1 (s)	C_1 (F)
LG_2600_new	62.0	77.0	11.91	15.47
LG_2600_old	78.0	77.0	10.94	14.24
LG_3400_new	67.0	60.0	9.70	16.22
LG_3400_old	73.0	59.0	10.21	17.24
Sanyo_2600_old1	60.0	76.0	11.64	15.26
Sanyo_2600_old2	82.0	76.0	12.94	17.09

在本研究中計算 SOH 之初始內阻值，是由電池內阻測試儀所量測，因其使用 1 kHz 之輸入訊號所能量測到的值為歐姆電阻，故以 R_0 作為後續計算 SOH 之參數。而極化內阻的值會被電池放電時內部之正負極板化學反應以及電解液的濃度差所影響，在本研究中各廠牌的新舊電池所獲得之 R_1 和 C_1 差異不大，推測原因為放電時間太短，濃度差異不顯著所導致。

將 R_0 之值，根據 (3-7) 式計算，得知其 y ，結果表 4.10 所示。

表 4.11 以等效電路模型所得之 LG 電池之 y

	y
LG_2600	0.70
LG_3400	0.83

使用快速估算法計算內阻值，再利用此內阻計算 SOH 的計算複雜度相較於使用等效電路模型模擬電池之放電行為簡單，且如表 4.11 所示，列出不同方法得知

內阻值，代入 (2-6) 式計算出 SOH，快速估算法所獲得結果與等效電路模型模擬方法之結果非常接近。以快速估算法與儀器量測之內阻代入 (2-6) 式計算 SOH 做比較，其 RMSE 為 3.0%；而等效電路模型計算出內阻與儀器量測之內阻代入 (2-6) 式計算 SOH 做比較，其 RMSE 為 3.8%。

表 4.12 不同方法獲得之內阻計算 SOH 之比較表

	量測內阻代入 (2-6) 式	快速估算法	等效電路模型
LG_2600	76.9%	81.5%	74.2%
LG_3400	95.6%	97.9%	91.0%
Hanlin_2300	96.9%	96.9%	-

4.3 SVR 預測電池容量

本實驗使用 5 顆 18650 鋰電池來驗證 SVR 訓練之模型，其預測結果如表 4.12。

表 4.13 SVR 預測結果

	真實容量 (mAh)	預測容量 (mAh)
LG_old1	2378	2183
LG_old2	2138	2086
LG_new	2429	2217
Sanyo_old1	2167	1994
Sanyo_old2	2026	2238

因訓練模型之資料集所使用的電池與本研究中之電池的廠牌不相同，SVR 的 6 個統計特徵可能有相同的情形，而對應到的電池容量有所不同，因為每家廠牌其內部材料的不同，例如電解液的配比、隔離膜的材料不相同等等原因。預測結果之 RMSE 為 178 mAh。在放電測試時，新電池的容量浮動在 30 mAh 以內，而老舊電池約 200 mAh，因此 SVR 迴歸方法適合運用在長期充放電操作條件下之電池，預測其容量，進而計算 SOH。

因資料數量不足，故以 LG_old1 與 LG_old2 之真實容量和預測容量，代入 (3-7) 式，分別計算出 SOH 如表 4.14，其 RMSE 為 5.7%。

表 4.14 以 SVR 預測容量與真實容量計算 SOH 結果

	真實容量之 SOH	預測容量之 SOH
LG_2600	75.6%	81.9%
LG_3400	71.4%	66.4%

由於有完整的電池的循環數據集，因此 SVR 方法可以用來估計長期使用的條件下，老化程度較大電池之 SOH；電池在老化的過程中，初期大致上會是線性的衰退，當循環次數過高，容量會急遽衰退，而不是線性率退，故快速估算法適合用在估計短期使用下電池之 SOH。

第五章 結論與建議



5.1 結論

隨著各方重視淨零碳排，農機電動化為重要的發展方向。其中電池與能源的管理相當重要，必須了解電池之壽命以及使用狀況，延長使用時間，達永續之目的。

本研究目的在於開發電池管理系統之評估 SOH 快速估算方法以及可用電量估測。其中包括電壓、電流及溫度監控裝置的製作、電池內電阻及 SOH 之計算、以大數據預測電池容量等方面。快速估算法藉由 2C 電流放電，觀察電壓下降幅度，計算電池之內阻，進而估算 SOH，以此法得知，大部分廠牌電池 SOH 為 0% 時，其容量約為原始容量之 60%。使用完整公開之電池資料集，經由訓練模型預測電池容量，因有完整的循環狀況，適用於老化程度較大之電池 SOH 估算。為了完成每次充放電數據記錄，故設計電壓、電流及溫度監控裝置，記錄電池之電壓、電流和溫度，了解電池充放電情形。

針對電動農機電池充放電管理系統，本研究完成了電池監控功能並對電池的性能進行探討。以下將對實際完成部分進行整理：

1. 充放電監控

完成電壓、電流及溫度監控裝置，已達成完整記錄電池之充放電情形。

2. 快速估算電池健康狀態與等效電路模型

提出一個快速且有效的估算法，以電壓降推算出內阻，不需要額外量測儀器，可在短時間得知電池之 SOH。快速估算法與儀器量測之內電阻計算 SOH，其 RMSE 為 3.0%；等效電路模型計算出內阻與儀器量測之內電阻計算 SOH，其 RMSE 為 3.8%。



3. 大數據預估電池容量

使用 SVR 訓練模型，預測結果之 RMSE 為 178 mAh。在老舊電池之容量浮動約 200mAh 的狀況，預測結果會較接近真實容量，此方法適合用於估測老化情形較嚴重之電池的容量，進而估算 SOH。LG_old1 與 LG_old2 之真實容量和預測容量計算 SOH，RMSE 為 5.7 %。

5.2 建議

經由本論文之實驗過程發現，使用不同的方法估算內阻以及電池健康度皆有待加強的部分與改善的空間，在此章節列出建議，期望可以使整套電池充放電管理系統更加完整。

1. 不同類型電池，以合適的方式，如點焊鍍片或者螺絲鎖，以牢固的接頭固定，減少導線連接造成的損耗以及干擾。
2. 將溫度感測器固定在電池表面時，須注意熱量散失，造成誤差。
3. 建立完整電池充放電老化過程，利用此資料集可以增加 SVR 之預測準確性。

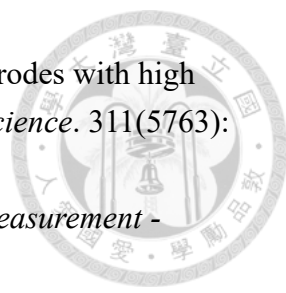
雖然本研究尚未開發成一套完整之電池管理系統，但相信對未來電動農機或者田間充電站之充放電管理系統的發展，可以提供一些實驗經驗以及數據，並產生更多研究想法和討論。

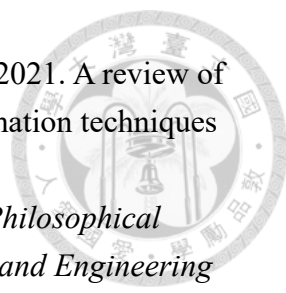
第六章 參考文獻



- 謝廣文，余志軒，吳文鑛，洪滉祐 2013。電動中耕除草機節能減碳效益及對操作者之影響。 *農林學報*。62(4): 319-329。
- 蘇忠楨，李汪盛，吳有恒，黃振康，臺灣農業使用永續能源之現況與展望， *中國工程師學會會刊*。2022。
- 陳祐頌，吳昱賢，張家欽，2019。鋰離子電池電解質-鋰離子傳遞的橋梁， *科學發展*。564。
- 方俊德，2023。台灣淨零碳排路徑初探。 *臺灣經濟研究月刊*。46(1):13-20。
- 周浩源，2022。電動農機的未來與挑戰。 *桃園區農業專訊*。(122):10-11。
- Armand, M., P. Axmann, D. Bresser, M. Copley, K. Edström, C. Ekberg, D. Guyomard, B. Lestriez, P. Novák, M. Petranikova, W. Porcher, S. Trabesinger, M. Wohlfahrt-Mehrens, and H. Zhang. 2020. Lithium-ion batteries – Current state of the art and anticipated developments. *Journal of Power Sources*. 479: 228708.
- Aurbach, D., Y. Talyosef, B. Markovskiy, E. Markevich, E. Zinigrad, L. Asraf, J.S. Gnanaraj, and H.-J. Kim. 2004. Design of electrolyte solutions for Li and Li-ion batteries: a review. *Electrochimica Acta*. 50(2): 247-254.
- Bao, Y., W. Dong, and D. Wang. 2018. Online Internal Resistance Measurement Application in Lithium Ion Battery Capacity and State of Charge Estimation. *Energies*. 11: 1073.
- Berecibar, M., I. Gandiaga, I. Villarreal, N. Omar, J. Van Mierlo, and P. Van den Bossche. 2016. Critical review of state of health estimation methods of Li-ion batteries for real applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 56: 572-587.
- Birkel, C.R., M.R. Roberts, E. McTurk, P.G. Bruce, and D.A. Howey. 2017. Degradation diagnostics for lithium ion cells. *Journal of Power Sources*. 341: 373-386.
- Blomgren, G.E. 2016. The development and future of lithium ion batteries. *Journal of The Electrochemical Society*. 164(1): A5019.
- Chaturvedi, N.A., R. Klein, J. Christensen, J. Ahmed, and A. Kojic. 2010. Algorithms for Advanced Battery-Management Systems. *IEEE Control Systems Magazine*. 30(3): 49-68.
- Chen, L., G. Msigwa, M. Yang, A.I. Osman, S. Fawzy, D.W. Rooney, and P.-S. Yap. 2022. Strategies to achieve a carbon neutral society: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 20(4): 2277-2310.
- Das, S. and S. Choudhury. 2020. Evaluation of effective stiffness of RC column sections by support vector regression approach. *Neural Computing and Applications*. 32.
- Dwipayana, I. Garniwa, and H. Herdiansyah. 2018. CO₂ Emission Reduction from Solar Power Plant in Rural Area (Study of Solar Power Plant in Sukaraksa

- 
- Village, Tanjung Sari Sub-District, Bogor Regency). *E3S Web of Conferences*. 65: 05017.
- Fankhauser, S., S.M. Smith, M. Allen, K. Axelsson, T. Hale, C. Hepburn, J.M. Kendall, R. Khosla, J. Lezaun, E. Mitchell-Larson, M. Obersteiner, L. Rajamani, R. Rickaby, N. Seddon, and T. Wetzer. 2022. The meaning of net zero and how to get it right. *Nature Climate Change*. 12(1): 15-21.
- Feng, Z., Z. Li, and W. Bin. 2012. Research on Integrated Method to Detect Internal Resistance of Substation Battery. *2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. 1-4.
- Francis, C.F., I.L. Kyratzis, and A.S. Best. 2020. Lithium-ion battery separators for ionic-liquid electrolytes: a review. *Advanced Materials*. 32(18): 1904205.
- García-Gonzalo, E., Z. Fernández-Muñiz, P.J. Garcia Nieto, A. Sánchez, and M. Menéndez. 2016. Hard-Rock Stability Analysis for Span Design in Entry-Type Excavations with Learning Classifiers. *Materials*. 9: 531.
- Gorjian, S., H. Ebadi, M. Trommsdorff, H. Sharon, M. Demant, and S. Schindele. 2021. The advent of modern solar-powered electric agricultural machinery: A solution for sustainable farm operations. *Journal of Cleaner Production*. 292: 126030.
- Han, X., M. Ouyang, L. Lu, and J. Li. 2014. A comparative study of commercial lithium ion battery cycle life in electric vehicle: Capacity loss estimation. *Journal of Power Sources*. 268: 658-669.
- Hepburn, C., Y. Qi, N. Stern, B. Ward, C. Xie, and D. Zenghelis. 2021. Towards carbon neutrality and China's 14th Five-Year Plan: Clean energy transition, sustainable urban development, and investment priorities. *Environmental Science and Ecotechnology*. 8: 100130.
- Herzog, H., B. Eliasson, and O. Kaarstad. 2000. Capturing greenhouse gases. *Scientific American*. 282(2): 72-79.
- How, D.N.T., M.A. Hannan, M.S.H. Lipu, and P.J. Ker. 2019. State of Charge Estimation for Lithium-Ion Batteries Using Model-Based and Data-Driven Methods: A Review. *IEEE Access*. 7: 136116-136136.
- Janiesch, C., P. Zschech, and K. Heinrich. 2021. Machine learning and deep learning. *Electronic Markets*. 31(3): 685-695.
- Jin, Y., W. Zhao, Z. Li, B. Liu, and L. Liu. 2021. Modeling and Simulation of Lithium-ion Battery Considering the Effect of Charge-Discharge State. *Journal of Physics: Conference Series*. 1907: 012003.
- Köhler, U., *APPLICATIONS – TRANSPORTATION | Hybrid Electric Vehicles: Batteries*, in *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, J. Garche, Editor. 2009, Elsevier: Amsterdam. 269-285.

- 
- Kang, K., Y.S. Meng, J. Breger, C.P. Grey, and G. Ceder. 2006. Electrodes with high power and high capacity for rechargeable lithium batteries. *Science*. 311(5763): 977-980.
- Kona, E., *Stationary VRLA battery health estimation by resistance measurement - comparison of dc and ac test methods*. 2016. 1-5.
- Lopes, P.P. and V.R. Stamenkovic. 2020. Past, present, and future of lead–acid batteries. *Science*. 369(6506): 923-924.
- Mahesh, B. 2020. Machine learning algorithms-a review. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. [Internet]. 9: 381-386.
- May, G.J., A. Davidson, and B. Monahov. 2018. Lead batteries for utility energy storage: A review. *Journal of Energy Storage*. 15: 145-157.
- Montzka, S.A., E.J. Dlugokencky, and J.H. Butler. 2011. Non-CO₂ greenhouse gases and climate change. *Nature*. 476(7358): 43-50.
- Moreda, G.P., M.A. Muñoz-García, and P. Barreiro. 2016. High voltage electrification of tractor and agricultural machinery – A review. *Energy Conversion and Management*. 115: 117-131.
- Ng, K., C.-S. Moo, Y.-P. Chen, and Y.-C. Hsieh. 2009. Enhanced Coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries. *Applied Energy*. 86: 1506-1511.
- Nishi, Y. 2001. The development of lithium ion secondary batteries. *The Chemical Record*. 1(5): 406-413.
- Pandey, D. and M. Agrawal, *Carbon Footprint Estimation in the Agriculture Sector*, in *Assessment of Carbon Footprint in Different Industrial Sectors, Volume 1*, S.S. Muthu, Editor. 2014, Springer Singapore: Singapore. 25-47.
- Pavlov, D., *Lead-acid batteries: science and technology*. 2011: Elsevier.
- Pavlov, D., G. Petkova, and T. Rogachev. 2008. Influence of H₂SO₄ concentration on the performance of lead-acid battery negative plates. *Journal of Power Sources*. 175(1): 586-594.
- Piller, S., M. Perrin, and A. Jossen. 2001. Methods for state-of-charge determination and their applications. *Journal of Power Sources*. 96(1): 113-120.
- Ramadan, M., B. Pramana, S. Widayat, L. Amifia, A. Cahyadi, and O. Wahyunggoro. 2015. Comparative Study Between Internal Ohmic Resistance and Capacity for Battery State of Health Estimation. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*. 6: 113.
- Smith, P., D. Martino, Z. Cai, D. Gwary, H. Janzen, P. Kumar, B. McCarl, S. Ogle, F. O'Mara, and C. Rice. 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical transactions of the royal Society B: Biological Sciences*. 363(1492): 789-813.

- 
- Sui, X., S. He, S.B. Vilsen, J. Meng, R. Teodorescu, and D.-I. Stroe. 2021. A review of non-probabilistic machine learning-based state of health estimation techniques for Lithium-ion battery. *Applied Energy*. 300: 117346.
- Tarascon, J.-M. 2010. Key challenges in future Li-battery research. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 368(1923): 3227-3241.
- Tuckett, R., *Greenhouse gases*, in *Encyclopedia of Analytical Science*. 2019, Elsevier. p. 362-372.
- Väyrynen, A. and J. Salminen. 2012. Lithium ion battery production. *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 46: 80-85.
- Wackernagel, M. and W. Rees, *Our ecological footprint: reducing human impact on the earth*. Vol. 9. 1998: New society publishers.
- Wen, J., Y. Yu, and C.-h. Chen. 2012. A Review on Lithium-Ion Batteries Safety Issues: Existing Problems and Possible Solutions. *Materials Express*. 2: 197-212.
- Wiedmann, T. and J. Minx. 2007. A Definition of ‘Carbon Footprint’. ISA-UK Research Report, 07-01. *ISAUK Research Consulting*.
- Xiong, R., L. Li, and J. Tian. 2018. Towards a smarter battery management system: A critical review on battery state of health monitoring methods. *Journal of Power Sources*. 405: 18-29.
- Xu, T., H. Yan, and Y. Bai. 2021. Air Pollutant Analysis and AQI Prediction Based on GRA and Improved SOA-SVR by Considering COVID-19. *Atmosphere*. 12: 336.
- Yettou, A., M. Laidi, A. Bey, S. Hanini, M. Hentabli, O. Khaldi, and M. Abderrahim. 2021. Ternary Multicomponent Adsorption Modelling Using ANN, LS-SVR, and SVR Approach – Case Study. *Kemija u industriji*.
- Zhang, S.S. 2006. A review on electrolyte additives for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*. 162(2): 1379-1394.
- Zhu, J., Y. Wang, Y. Huang, R. Bhushan Gopaluni, Y. Cao, M. Heere, M.J. Mühlbauer, L. Mereacre, H. Dai, X. Liu, A. Senyshyn, X. Wei, M. Knapp, and H. Ehrenberg. 2022. Data-driven capacity estimation of commercial lithium-ion batteries from voltage relaxation. *Nature Communications*. 13(1): 2261.
- Zubi, G., R. Dufo-López, M. Carvalho, and G. Pasaoglu. 2018. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 89: 292-308.