

國立台灣大學工學院機械工程學研究所

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

以等效內阻法進行電池系統 SoC 損耗修正

Estimation and Modification Battery Power Loss by

Equivalent Internal Resistance Method



楊毅祥

Yi-Hsiang Yang

指導教授：鄭榮和 博士

Advisor: Jung-Ho Cheng, Ph.D.

中華民國 99 年 12 月

December, 2010



國立臺灣大學碩士學位論文  
口試委員會審定書

以等效內阻法進行電池系統 SoC 損耗修正

Estimation and Modification Battery Power Loss by  
Equivalent Internal Resistance Method

本論文係 楊毅祥 君 (R96522513) 在國立臺灣大學機械工程學  
研究所完成之碩士學位論文，於民國 99 年 12 月 07 日承下列考試委  
員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

鄭榮和

鄭榮和

陳錦明

陳錦明

黃明熙

黃明熙

系主任、所長

張所鎡

張所鎡

(簽名)



# 致謝

這篇論文的完成，首先需要感謝台達電子文教基金會對我們 Green Jumper 電動車計畫提供相當充分的資源，讓我們能夠順利將整台 Green Jumper 電動車從零到一完整的設計製作出來。也要感謝台達電子工作人員，除了提供馬達驅動器以外，也提供許多工程上的寶貴意見。

我非常感謝鄭榮和老師不厭其煩的諄諄教誨，從大一參與太陽能車專題至碩士班研究的共八年光陰，讓我獲得許多充實的經驗、鍛鍊與解決問題的能力，並學習到如何控制自己的情緒，同時提前瞭解到公司的團隊問題。最後總算順利完成本論文，也讓我學習態度和思考方式產生很大的轉變與成長。同時也要感謝擔任口試委員的北科大黃明熙老師、陳錦明先生給予寶貴的意見與指導。

在實驗上特別感謝有量科技提供電池芯進行測試。也感謝子庭、允捷、湮奇、殷偉、嘉成、俊志、桓毓、亦維、弘彥與其他實驗室同仁長久的陪伴與幫忙，方能完成這部電動車並進行測試。並感謝家人、同學與朋友們常常聽我抱怨，謝謝大家。

特別感謝張益隆學弟常常接到我一些無理的要求，陪我作一整天無聊的實驗，或是整理一堆亂七八糟的數據。也因此我才能順利的完成論文。雖然之後他選擇踏上不同的道路，還是希望他可以找到屬於自己的目標與方向。



# 摘要

本研究主要目的是建立一套可用於本研究室所研發的電動車”Green Jumper”的電池系統 SoC 估算技術。並以等效內阻估算電池芯於各種充放電條件下的效率損耗，以修正舊有的庫倫修正法因無法反應電池芯效率值而造成的計算誤差。

目前有許多方式可估算電池的 SoC 值，其中庫倫積分法常被使用於電動車輛等需要進行大功率變動輸出的電池系統。但由於電池芯的效率並非 100%，因此單純針對電流進行積分會於每次計算中產生誤差累積，造成估測精準度的下降。因此在使用庫倫積分法時需要對電池效率進行實驗與修正。但由於電池芯的效率與許多參數有關(如電流、溫度、壽命等)，各參數之間又會相互影響，所以必須要依照各種條件進行非常大量的實驗並建立複雜的查表程式，因而造成研究時間與成本的大幅增加。為了解決此問題，本研究建立一套新式的演算法，以即時估算的方式對電池芯的效率損耗進行估計，以減少估算電池效率時所需的實驗數目。

由於會影響電池芯放電效率的各項參數並非相互獨立，而這些參數的變化則會直接反應在電池芯的內阻值上，並產生 overpotential 的現象。因此本研究藉由即時量測電池芯充放電時的 overpotential 數值，以估算其等效內阻的變化與目前電池芯的效率損耗。在得出電池的效率損耗後，便可將其帶入庫倫積分法進行修正，計算出電池芯的 SoC 值。

本研究會先建立一套演算法用以估算電池的等效內阻與效率損耗。接著將此演算法寫入 BMS 內，並安裝至實驗機台進行放電測試。最後則是將其安裝至實際的電動車進行道路測試，以確認該演算法在複雜的使用環境下依舊可以有較好的 SoC 估測精度。在進行過上述實驗後，已證明本研究的等效內阻估測法可以確實修正電池芯的效率損耗值，並於大部分的放電條件下可將誤差值控制於 1% 以內。而且於實車道路測試的狀況下依舊可以正常作動，並且保有較佳的估測精準度。

關鍵字：電池 SoC 估計、等效內阻估算、電池管理系統、鋰電池、電動車





# Abstract

This paper describes a state of charge (SoC) indication method for the battery system of an electric vehicle “Green Jumper”, which has been developed in National Taiwan University. In this new SoC indication method, power loss computing algorithm, Coulomb counting and EMF-versus-SoC curve methods are combined to improve the accuracy. The core idea of this method is the power loss computing algorithm, which is calculated from battery equivalent internal resistance. Because the equivalent internal resistance of the battery cell varies from status and environment, thus it is designed in the proposed algorithm to be computed from its overpotential behavior in different charge or discharge states.

The SoC indication method in this paper corrects Coulomb counting method by calculating the power loss value and hence the accuracy of SoC indication can be improved. The algorithm has been installed in a battery managing system and tests have shown that the performance is in good agreement with the design target. The algorithm will be installed in a battery managing system in the Green Jumper EV for on road test.

**Keywords**—SoC indication, Battery internal resistance computing, Battery management system,

Lithium battery, Electric vehicle



# 目錄

摘要 .....	I
Abstract.....	III
目錄 .....	V
圖目錄 .....	IX
表目錄 .....	XIII
1. 第一章 緒論 .....	1
1.1 研究背景與動機 .....	1
1.2 研究目的 .....	2
1.3 研究方法與論文架構 .....	3
2 第二章 理論背景與文獻回顧 .....	7
2.1 電池系統特性 .....	7
2.1.1 電池芯種類 .....	7
2.1.2 鋰電池芯特性 .....	9
2.1.3 車用電池系統 .....	11
2.1.4 電池管理系統 (BMS) .....	13
2.2 文獻回顧 .....	15
2.2.1 SoC 發展歷史 .....	15
2.2.2 電動載具 SoC 估算法 .....	18
2.2.3 修正式庫倫積分法 .....	19
2.3 小結 .....	21

3.	第三章 等效內阻估測演算法 .....	23
	3.1 等效內阻估算 .....	23
	3.2 電池損耗估算 .....	25
	3.3 演算流程 .....	27
	3.4 小結 .....	30
4.	第四章 演算法實現與測試 .....	31
	4.1 實驗儀器介紹 .....	31
	4.1.1 鋰電池芯 .....	33
	4.1.2 Power supply .....	36
	4.1.3 電子負載 .....	37
	4.1.4 BMS .....	38
	4.1.5 Data logger .....	39
	4.2 測試 patent .....	39
	4.2.1 定 C 數放電測試 .....	43
	4.2.2 變 C 數放電測試 .....	44
	4.3 變溫度放電實驗 .....	45
	4.4 小結 .....	45
5.	第五章 單電池芯實測結果分析 .....	47
	5.1 定 C 數放電實驗結果 .....	47
	5.1.1 定 0.5C 放電 .....	48
	5.1.2 定 1C 放電 .....	49
	5.1.3 定 1.5C 放電 .....	50

5.1.4	定 2C 放電 .....	51
5.1.5	定 C 數放電結果分析 .....	52
5.2	變 C 數放電實驗結果 .....	53
5.3	變溫度放電實驗結果 .....	54
5.3.1	定 0.5C 變溫度放電 .....	55
5.3.2	定 1C 變溫度放電 .....	59
5.3.3	定 1.5C 變溫度放電 .....	63
5.3.4	定 2C 變溫度放電 .....	67
5.3.5	變溫度放電實驗結果分析 .....	71
5.4	小結 .....	71
6.	第六章 實車測試 .....	73
6.1	Green Jumper 電池系統規格簡介 .....	73
6.2	實車測試數據整理與分析 .....	77
6.3	小結 .....	82
7.	第七章 結論與未來發展方向 .....	83
7.1	研究成果總結 .....	83
7.2	未來研究方向 .....	84
8.	第八章 Reference .....	89



# 圖目錄

圖 1 台大機械鋰電池電動車 Green Jumper.....	2
圖 2 研究流程圖與對應論文章節 .....	3
圖 3 鋰離子電池芯[12] .....	9
圖 4 鋰高分子電池芯[13].....	10
圖 5 鋰電池 SoC vs. voltage 變化曲線圖[22] .....	16
圖 6 鋰電池 SoC vs. voltage 變化曲線圖[23] .....	16
圖 7 庫倫積分法示意圖 .....	18
圖 8 開路電壓查表法[22].....	19
圖 9 電池芯效率對溫度與放電 C 數變化圖[27].....	20
圖 10 電池芯簡易電氣模型 .....	24
圖 11 電池芯放電瞬間電壓變化 .....	25
圖 12 演算法流程圖 .....	27
圖 13 EMF vs. SoC 圖 .....	28
圖 14 電池放電測試用系統架構圖 .....	32
圖 15 鋰電池芯外觀 .....	33
圖 16 SoC vs. EMF 實驗流程圖 .....	35
圖 17 SoC vs. EMF 曲線圖 .....	35
圖 18 Power supply 外觀照片 .....	36
圖 19 電子負載外觀照片 .....	37
圖 20 BMS 外觀照片 .....	38

圖 21 Data logger 程式 .....	39
圖 22 放電實驗流程圖 .....	40
圖 23 電池芯電壓與時間變化圖 .....	41
圖 24 電池芯電壓與放電 cycle 變化圖 .....	41
圖 25 於放電循環內實際使用的 SoC 值 .....	42
圖 26 定電流放電對時間圖 .....	43
圖 27 變電流放電對時間圖 .....	44
圖 28 0.5C 放電 SoC 估算誤差比較 .....	48
圖 29 1C 放電 SoC 估算誤差比較 .....	49
圖 30 1.5C 放電 SoC 估算誤差比較 .....	50
圖 31 2C 放電 SoC 估算誤差比較 .....	51
圖 32 變 C 放電 SoC 估算誤差比較 .....	53
圖 33 0.5C 放電@25°C SoC 估算誤差比較 .....	55
圖 34 0.5C 放電@35°C SoC 估算誤差比較 .....	56
圖 35 0.5C 放電@45°C SoC 估算誤差比較 .....	57
圖 36 庫倫積分法 0.5C 放電 SoC 估算誤差比較 .....	58
圖 37 本研究 0.5C 放電 SoC 估算誤差比較 .....	58
圖 38 1C 放電@25°C SoC 估算誤差比較 .....	59
圖 39 1C 放電@35°C SoC 估算誤差比較 .....	60
圖 40 1C 放電@45°C SoC 估算誤差比較 .....	61
圖 41 庫倫積分法 1C 放電 SoC 估算誤差比較 .....	62
圖 42 本研究 1C 放電 SoC 估算誤差比較 .....	62



圖 43 1.5C 放電@25°C SoC 估算誤差比較.....	63
圖 44 1.5C 放電@35°C SoC 估算誤差比較.....	64
圖 45 1.5C 放電@45°C SoC 估算誤差比較.....	65
圖 46 庫倫積分法 1.5C 放電 SoC 估算誤差比較.....	66
圖 47 本研究 1.5C 放電 SoC 估算誤差比較.....	66
圖 48 2C 放電@25°C SoC 估算誤差比較.....	67
圖 49 2C 放電@35°C SoC 估算誤差比較.....	68
圖 50 2C 放電@45°C SoC 估算誤差比較.....	69
圖 51 庫倫積分法 2C 放電 SoC 估算誤差比較.....	70
圖 52 本研究 2C 放電 SoC 估算誤差比較.....	70
圖 53. 電池系統固定與散熱機構設計 .....	74
圖 54. 電池子系統 .....	75
圖 55. 電池 BMS 主電路與周邊保護電路.....	76
圖 56. 實車道路測試照片 .....	77
圖 57. 第 1 次低速測試電池系統電壓電流對時間變化圖 .....	78
圖 58. 第 2 次低速測試電池系統電壓電流對時間變化圖 .....	79
圖 59. 第 1 次加速性能測試電池系統電壓電流對時間變化圖 .....	80
圖 60. 第 2 次加速性能測試電池系統電壓電流對時間變化圖 .....	81



# 表目錄

表 1 各種電池性能比較[4, 5] .....	8
表 2 鋰電池正極材料比較表[16] .....	10
表 3 市售電動車比較表[17] .....	11
表 4 SoC 量測技術發展歷史[20, 21].....	15
表 5 各種 SoC 量測技術比較表[20].....	17
表 6 鋰電池芯基本規格 [22] .....	34
表 7 Power supply 規格表[30].....	36
表 8 電子負載規格表[31].....	37
表 9 定 0.5C 放電實驗誤差數據表 .....	48
表 10 定 1C 放電實驗誤差數據表 .....	49
表 11 定 1.5C 放電實驗誤差數據表.....	50
表 12 定 2C 放電實驗誤差數據表 .....	51
表 13 各放電 C 數下的誤差 RMS 值.....	52
表 14 變 C 數放電實驗誤差數據表 .....	54
表 15 定 0.5C 放電@25°C 實驗誤差數據表.....	55
表 16 定 0.5C 放電@35°C 實驗誤差數據表.....	56
表 17 定 0.5C 放電@45°C 實驗誤差數據表.....	57
表 18 0.5C 放電各溫度實驗誤差數據表 .....	58
表 19 定 1C 放電@25°C 實驗誤差數據表.....	59
表 20 定 1C 放電@35°C 實驗誤差數據表.....	60

表 21 定 1C 放電@45°C 實驗誤差數據表.....	61
表 22 1C 放電各溫度實驗誤差數據表 .....	62
表 23 定 1.5C 放電@25°C 實驗誤差數據表.....	63
表 24 定 1.5C 放電@35°C 實驗誤差數據表.....	64
表 25 定 1.5C 放電@45°C 實驗誤差數據表.....	65
表 26 1.5C 放電各溫度實驗誤差數據表 .....	66
表 27 定 2C 放電@25°C 實驗誤差數據表.....	67
表 28 定 2C 放電@35°C 實驗誤差數據表.....	68
表 29 定 2C 放電@45°C 實驗誤差數據表.....	69
表 30 2C 放電各溫度實驗誤差數據表 .....	70
表 31 變溫度放電實驗誤差數據整理表.....	71
表 32 電池系統基本規格列表 .....	73
表 33 第 1 次低速測試行車狀況 .....	78
表 34 第 1 次低速測試 SoC 估測結果 .....	78
表 35 第 2 次低速測試行車狀況 .....	79
表 36 第 2 次低速測試 SoC 估測結果 .....	79
表 37 第 1 次加速性能測試行車狀況 .....	80
表 38 第 1 次加速性能測試 SoC 估測結果 .....	80
表 39 第 2 次加速性能測試行車狀況 .....	81
表 40 第 2 次加速性能測試 SoC 估測結果 .....	81
表 41 實車測試結果 .....	82

# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景與動機

近年來，全球暖化與各種環境污染開始對世界各地的生態與氣候造成衝擊，過去科學家們所作的各種預測開始一一兌現。為了阻止人類扼殺地球的生態系統，世界各國紛紛投入大量的人力物力進行各種綠色能源、低污染系統以及製程等相關研究。在所有污染源之中，移動載具佔了相當可觀的比例，也因此成為最需要即刻處理的問題。迫於京都議定書開始履行、哥本哈根會議的減碳協定，以及消費者的環保意識抬頭，各大車廠皆致力於研發節能、低空污甚至零污染的移動載具。因此近年來各種混合動力與新能源車輛的相關研究如雨後春筍般的不斷增加。但由於各種新能源車輛的動力系統與舊有的汽油引擎有著相當大的差異性，例如驅動方式改成以馬達驅動、以電池進行能量儲存等。這些都是舊有的車輛陌生的領域，因此尚有許多可以研究與改進的空間。

對純電動載具而言，電池是其唯一的能量來源。因此駕駛者最關心的行車資訊之一是目前電池系統的電池殘電量(State of Charge, SoC)，如此方能掌握目前剩餘的里程數，並決定是否需要進行能量的補充。此外，對全車控制電腦(Vehicle Control Unit, VCU)的行車與能量管理策略而言，SoC 更是絕不能缺少的關鍵資訊。VCU 必須要依照 SoC 的數值判斷目前全車的殘餘能量，並以此修正對電控元件(如馬達驅動器)的命令詮釋，方能達到較佳的能量使用效率。

但是，由於電池的 SoC 並無法直接用儀器進行量測，只能根據實驗的結果，以電壓、內阻等方式進行間接的推估。因此當估算的方式不同時，SoC 的數值也會有所差異。而且如果使用不同廠商、規格或種類的電池芯時，如果使用傳統的 SoC 估測技術，必須要針對各電池芯的特性進行大量的實驗與建表，方能正確掌握其特性。而且電動車的電池系統需要使用數百，甚至數千顆電池進行串、並聯，

因此每顆電池的使用環境與周邊溫度也不盡相同，造成各串聯電池模組就算在相同充放電電流下，電池的效率也會有所差異。此外，在實際行車時，電池系統的充、放電電流也不是穩定的數值，進而影響電氣參數量測時的精準度。上述各項因素都會影響到 SoC 的估計精確度，進而增加 SoC 估測的困難度。

## 1.2 研究目的

為了解決上述的問題，本研究建立了一套新的 SoC 的估測方法。相較於一般需要進行大量實驗的 SoC 估算策略，本方法只需使用相對較少的電池特性參數，便可達到較佳的 SoC 估算精準度，因此可以大幅減少電池芯的各項特性實驗數目。此外，本研究的估測技術可以獨立針對各電池模組的使用狀況進行即時性的耗能估算，以應付電動載具大幅變動的環境與輸出特性，提升系統整體的可靠度。

本研究首先會針對各種電池 SoC 估測法進行文獻搜尋，納出車用 BMS (Battery Management System, 電池管理系統) 的 SoC 估測技術的限制。接著會針對舊有的 SoC 量測技術進行探討與整合，建構出一套適用於電動載具的 SoC 量測法。下一步則是進行演算法的建立，將本演算法撰寫至單電池芯的 BMS 之內，進行實際的電池芯放電實驗。並比較此演算法與既有演算法的準確性。之後則會將此演算法安裝至台大 Green Jumper(見圖 1) 的 BMS 內，於實車環境下測試其精確度。



圖 1 台大機械鋰電池電動車 Green Jumper

### 1.3 研究方法與論文架構

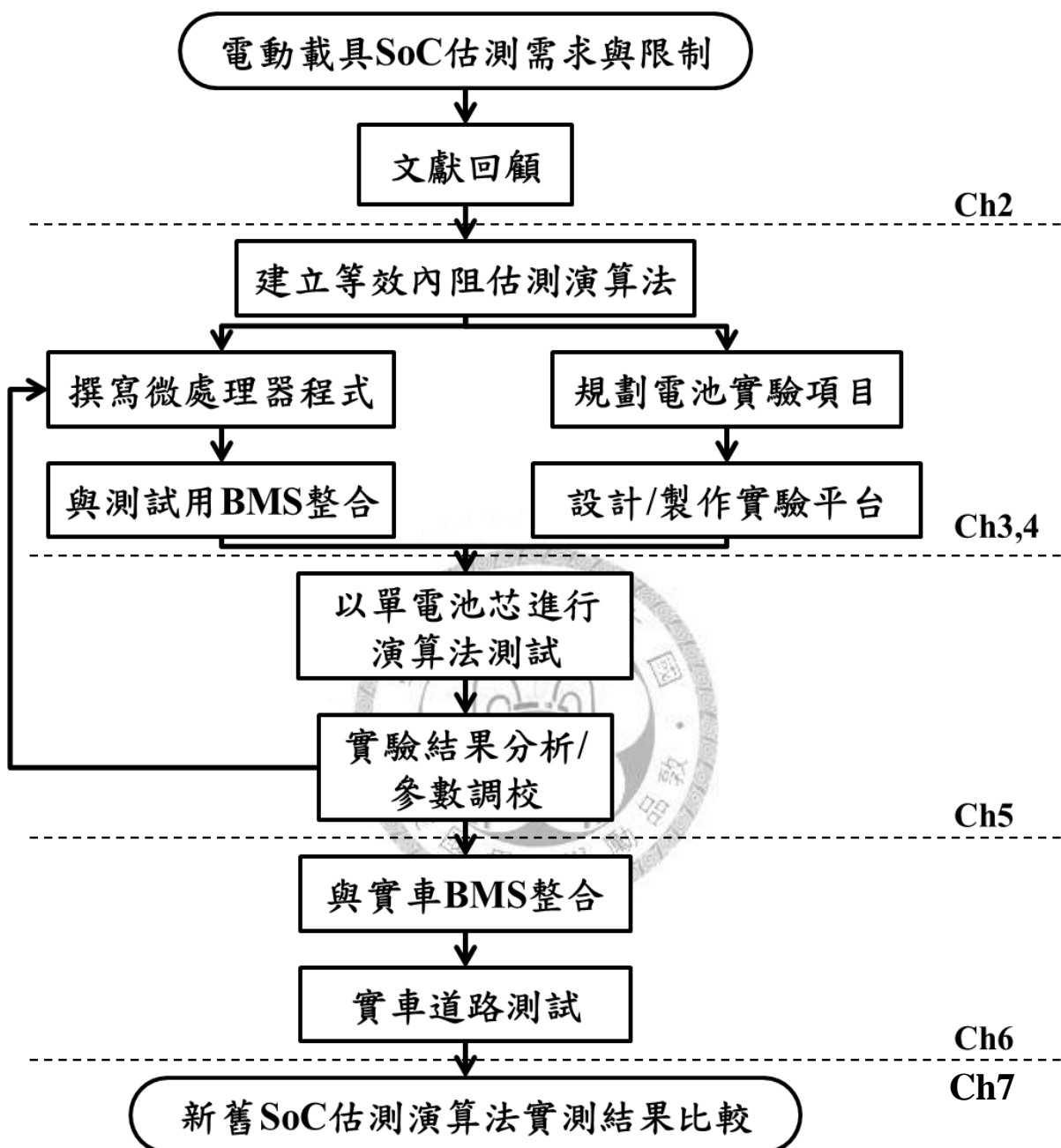


圖 2 研究流程圖與對應論文章節

本研究的研究流程與論文架構如圖 2 所示。以下會針對該流程與各章節所撰寫的內容進行簡述。

## 第一章 緒論

介紹本研究的動機、背景與研究目的。

## 第二章 理論背景與文獻回顧

整理鋰電池芯的基本電氣特性，以及要如何根據電動載具的環境限制進行 BMS 的設計需求與限制。並且針對鋰電池芯的 SoC 估測方式進行相關文獻的搜尋，以及針對這些文件進行整理，分析目前常用於電動載具的 SoC 估測方法的特性與優缺點。

## 第三章 等效內阻估測演算法

針對文獻回顧的結果，將既有的 SoC 量測法進行結合與修改。並介紹本研究所使用的 SoC 量測法基本概念。接著說明如何進行等效內阻的即時性量測，並針對電池芯在各種使用環境下的使用耗能進行估算，以及如何以此方式改善原本庫倫積分法的缺點。

## 第四章 演算法實現與測試

將本研究的 SoC 演算法撰寫至測試用的 BMS 之中，並使用此 BMS 偵測單電池芯在進行放電實驗時狀況。在進行實驗時，便可使用此 BMS 同時進行本研究的 SoC 估算法與原本的庫倫積分法運算，以比較兩者之間精準度的差異性。

## 第五章 單電池芯實測結果分析

針對等效內阻修正的 SoC 演算法用於單電池芯的實驗結果進行分析，並進行微處理器的控制參數調整。同時比較新舊演算法兩者準確度的差異性，以證明本研究演算法確實可提升 SoC 估測精度。



## 第六章 實車測試

將本演算法與電動車 BMS 結合，於實際行車時進行 SoC 的估算，並比較新舊演算法之間的精準度差異性。

## 第七章 結論與未來發展方向

將本研究的成果進行總結，並針對未來可以進行的相關研究與修改方向提出建議。





## 第二章 理論背景與文獻回顧

本章節主要目的是針對車用電池系統的設計需求與限制為出發點，探討車用電池系統的設計需求與限制，以及在此限制下所適用的 SoC 估測法需要具備哪些特性。

首先會針對電池芯的種類以及特性進行評比，說明為何鋰電池會被認為是未來電動載具能量儲存裝置的主流。接著則會探討鋰電池芯的特性以及估測其 SoC 值的難點。下一步則會針對電動車用電池系統進行探討，分析 BMS 設計需求與限制，以及在此環境下可能對電池 SoC 量測技術造成的限制。最後則會針對目前現有的各種電池 SoC 估測技術進行文獻回顧，並藉由前一項的設計限制探討有哪些 SoC 估測技術可適用於車用電池系統的 SoC 估測，以及這些技術的優缺點。

### 2.1 電池系統特性

自從電能被人類發現，並開始大量使用以來，如何將電力做有效的運送、儲存與管理一直是一項相當重要的課題。也因此從 19 世紀伏特發明電池之後，便陸續開始有各種不同種類的電池被發明與使用。但由於不同種電池的電極材料、電解液與構造都不盡相同，因此雖然其基本目的皆為儲存電能，但各種化學反應與電氣特性卻大相逕庭。限於篇幅，本研究主要會先針對各種常見的電池種類進行評比，最後會鎖定一項未來電動載具最有可能使用的電池種類作為研究主題，探討其特性以及量測 SoC 值的困難點。

#### 2.1.1 電池芯種類

目前常被使用於移動載具的二次電池有鉛酸電池、鎳鎘電池、鎳氫電池與鋰電池(見表 1)。其中鉛酸電池的使用已行之有年，在安全上有著相當高的可靠性。但其能量密度(Wh/kg)與功率密度(W/kg)都偏低，這造成電池組的重量偏高，體積

也相對變大。鎳鎘電池則會造成環境的汙染，目前已不再使用。鎳氫電池的能量密度與功率密度雖然高於鉛酸電池，但由於單電池的電壓偏低，相較之下需要較多的電池加以串連才能達到需要的系統電壓[1-3]。

表 1 各種電池性能比較[4, 5]

電池種類	鉛酸電池	鎳鎘電池	鎳氫電池	鋰電池
能量密度(Wh/Kg)	40	60	80	135
功率密度(W/Kg)	150	190	200	381
單電池電壓(V)	2	1.2	1.2	3.7
充、放電次數	300~500	500	500	>500
優點	安全性高、 價格低廉	安全性高、 價格低廉	能量與功率密 度較高	有最高的能量與 功率密度
缺點	能量與功率密度 偏低	有記憶效應、廢 電池有毒性	單電池電壓低	價格高、安全性 低

單從能量密度與功率密度的角度來看，鋰電池是目前最合適的選擇。而且鋰電池單電池的電壓高，可以有效減少串聯的電池數目。這與移動載具所需要的特性不謀而合，目前世界上的研究重點也著重於此。

由於鋰電池本身的活性大，使其在充、放電的效率與能量密度上有著優異的表現。相對的，一旦鋰電池過度充電，很可能會使電池本身損壞，甚至會造成起火、爆炸等問題[6, 7]。因此，目前市面上大部分的移動載具依舊選用安全度較高的鉛酸或鎳氫電池。但，隨著市場需求朝向輕量化、小型化的發展之下，有越來越多的電池廠商與車廠合作，投入大功率鋰電池系統的研發。更有車廠突破既有窠臼，製作出量產型的鋰電池電動車[8]，使鋰電池系統不再只用於概念車上，讓世界朝未來邁進了一大步。由此可知，大功率的鋰電池系統絕對是目前市場發展的主流[9, 10]。

## 2.1.2 鋰電池芯特性

鋰電池芯依照使用的電解液種類以及正極材料的差異，可以再細分成各種不同名稱與特性的產品。以下則針對其分類進行簡單的介紹。

首先，依照電解質的構成的差異性，可分為鋰離子電池與鋰高分子電池兩大類。其中鋰離子電池是使用液態電解液，一般是使用金屬外殼進行封裝。目前該種電池被大量使用於筆電或其他電子產品上。此外由於其外殼為金屬材料，單電池芯的完成度與對外界的自我防護能力較高。因此在進行大容量電池系統應用時，其整體外殼設計與物理性防護時較為容易[7, 9, 11]。



圖 3 鋰離子電池芯[12]

而鋰高分子則是使用半固態的高分子材料作為電解質，不需使用金屬材料製作外殼，因此一般是使用鋁箔進行真空密封包裝。由於高分子電解質相較於液態電解質較難被氣化，因此當電池芯被過度充電或短路時較不易發生爆炸或起火等現象，有較良好的安全性。但由於其外殼為鋁箔包裝，因此在進行大容量系統應用時需要特別針對電池芯的固定與防護進行較完善的考量[10, 11]。



圖 4 鋰高分子電池芯[13]

而在正負極材料的選擇上，鋰離子電池最常使用的負極材料為層狀石墨結構。而正極材料的使用則有較多不同的種類，各種材料之間的特性差異也較大。目前較常被使用的正極材料有鋰鈷、鋰鎳、鋰錳與磷酸鋰鐵這幾大類[4, 7, 14, 15]。其相關特性比較如表 2 所示。

表 2 鋰電池正極材料比較表[16]

	鋰鈷 $\text{LiCoO}_2$	鋰鎳 $\text{LiNiO}_2$	鋰錳 $\text{LiMnO}$	磷酸鋰鐵 $\text{LiFePO}$
平均工作電壓(V)	3.7	2.5~3.7	3~4	3.4
操作溫度	<180°C	<180°C	<180°C	<300°C
電容量 -mAh/g	140~160 (理論 275)	190~210 (理論 273)	100~120 (理論 148)	120~160
循環壽命	>500	>500	>500	>1000
特性	已有長時間使用	電容量高，但安全性較差	安全、穩定性佳	安全、穩定性佳
缺點	使用的情況已得到驗證 鈷金屬價格較高	合成不易 安全性疑慮	電容量較低	電容量較低 材料目前燒結困難故 成本較高 部份市場有專問題

資料來源：工研院 IEK(2009/09)

其中，鋰鈷與鋰鎳電池的能量密度較高，但能容許的最大充放電 C 數較低，因此較常被使用於手機等低功率的 3C 產品，較不適合電動車電池系統等同時需要高容量與高功率的應用。因此目前較常使用於電動載具之鋰電池芯為鋰錳電池以

及磷酸鋰鐵電池兩種。其中鋰錳電池能量密度較高，可有效延長電動車的行駛里程。因此目前大部分市售的電動車皆選擇鋰錳電池作為主要的電池系統(見表 3)。

表 3 市售電動車比較表[17]

企业	丰田	日产汽车	本田	三菱汽车	通用		戴姆勒	宝马	THINK	现代汽车
电动车辆的种类	PHEV	EV	HEV	EV	PHEV	HEV	HEV	HEV	EV	HEV
车名	普锐斯插电式混合动力车	绿叶	未定	i-MiEV	Volt	未定	S400 HYBRID	7系 ActiveHybrid	THINK City	Sonata Hybrid Blue Drive
外观										
电池供应商	PEVE	AESC	BEJ	LEJ	LG化学	HVE	JCS		EnerDel	LG化学
电池单元的种类	方型	层压型	方型	方型	层压型	圓筒型	圓筒型		层压型	层压型
电池的配备容量	5.2kWh	24kWh	未定	16kWh	16kWh	0.5kWh	0.8kWh		20kWh	1.4kWh
单元的电容量	5Ah	35Ah	6Ah	50Ah	約20Ah	4.4Ah	6.5Ah		20Ah	5.3Ah
正极材料	NCA系	Mn系	3元系	Mn系	Mn系	Mn系	Mn系		Mn系	Mn系
备注	2009年底限量销售600辆。估计沿用了面向HEV开发的单元	与雷诺合计在2012年投放50万辆EV	预计2011年投放市场	包括面向标致雪铁龙的供应在内，在2012年向市场投放5万辆	2010年12月上市	预定2010年内上市的HEV	2009年夏季在欧洲上市	2010年春季在欧洲上市	2010年在美国上市	2010年底在美国上市
PEVE: Primearth EV Energy AESC: Automotive Energy Supply BEJ: Blue Energy Japan LEJ: Lithium Energy Japan HVE: 日立车辆能源 JCS: Johnson Controls-Saft Advanced Power Solutions										

### 2.1.3 車用電池系統

對電動車而言，電池系統對整車的性能有著不容忽視的影響力。在相同的重量下，選用的電池芯能量密度越高，就能擁有較高的續航力。此外，電池系統是否能提供馬達所需的能量，則是決定了整車的加速性能與爬坡能力。而良好的電池管理系統能夠有效提升電池系統的效率，並延長電池的使用壽命。這些都將直接決定整車的性能表現。

從安全性的角度進行考量，可發現電池系統是電動載具所有元件中危險性最高的。不論是漏電、過熱、爆炸起火等都與電池脫離不了關係。換言之，若能確定電池安全無虞，便能有效確保行車的安全性。因此針對電動載具而言，必須在各層面的設計上皆考慮到要如何針對電池系統進行。在整車結構方面將對電池系統進行重點分析，以確保在行駛時不會因起步、煞車或轉彎時的應力而對電池造

成物理性的傷害。而漏電與電磁防護方面更針對電池系統作為主要監控目標。電池本身更需要各種電路設計進行保護，並使用特殊的材料與結構製做電池箱。而唯有此種全面性的設計考量之下，方能確保電池系統在實際運作時可以擁有足夠的安全性[3, 6]。

由於鋰電池系統是全車唯一的能量來源，因此在設計時需要考慮馬達與周邊電子元件的需求。諸如馬達所需要的電壓值、最大電流、周邊元件所需的電量等。因此必須要與其他組相互協調，方能訂出完整的電池規格。接著便可以此為依據決定電池的串、並聯數目。因此電池系統的設計與整車規格之間是息息相關，需要不斷的調整與配合，方能達到既定的設計需求。

目前鋰電池系統最大的疑慮是其安全性與可靠度。由於鋰的活性高，使其能量密度與放電效率遠高於其他二次電池。也因為其高活性，一旦鋰電池過度充電，很可能會使電池本身損壞，甚至可能會起火、爆炸。因此，若要使用鋰電池系統，便須對其進行各種電路與物理性的保護，以及各種嚴密的測試，方能確保其安全性。

當鋰電池處於下述狀態時可能會對電池造成損傷，甚至爆炸起火：

- ◆ 過度充、放電
- ◆ 充、放電電流過大
- ◆ 超過工作溫度
- ◆ 串聯電池模組電壓不平衡
- ◆ 電池老化
- ◆ 遭受物理性碰撞、刺穿、破壞等
- ◆ 電池漏電
- ◆ 電池內部短路



分析上述異常情形，便可歸納出電池系統所需要進行的保護項目。其中前三項可使用電子電路的方式加以偵測並預防。而串連電池模組之間電壓的不平衡則需要設計特殊的平衡電路 (Balance circuit)，當電池系統在非工作時間時調控各串連電池組的電壓，讓各電池電壓值相等。電池老化則可藉由紀錄電池充放電循環次數來加以判斷，便可適時的更換電池[18]。

而物理性的傷害則可使用電池模組外殼的設計、耐衝擊與耐火材料的選用，以及各種結構上的補強將其降至不會對電池造成傷害程度。在車體結構上也會對電池周圍進行重點分析，以確保結構件有足夠的剛性支撐電池系統。而整車的漏電防護也會對電池系統做重點偵測，當有漏電情形發生時將會提醒駕駛人，讓駕駛人可以停駛於路邊後進行斷電，以確保乘客的安全。

在上述異常狀態之中，僅有一種是無法使用外部電路或其餘裝置加以保護的，就是“電池內部短路”。此現象最常見的發生原因是電池芯品質不良。當電池在製作途中若是有金屬粉末落入正、負極板之間，當電池經過數次充放電循環時，金屬粉末便有可能在正負極板之間造成通路，而導致電池內部短路。或是電池極板的製作不良，當經過多次充放電循環後會造成其材料晶格變形，也可能會導致此結果。這便是前幾年造成數起鋰電池在非碰撞情形下自燃的主要元兇[11]。因此，在選用鋰電池芯時，必須要慎選廠商。最好是經過 UL 認證的廠商，方能確保其製程的安全性與產品品質。

#### **2.1.4 電池管理系統 (BMS)**

至於電池可靠度部份，則需要設計一連串相關實驗，並依照實驗結果與電動車需求設計出一套完整的 BMS，於行車過程中即時監控電池系統的各種狀態，方能確保系統整體的可靠度，並提升系統整體的安全性。以下是電池系統所需要進行的基本實驗[5, 19]：

- ◆ 電池充、放電曲線
- ◆ 不同工作電流下的充、放電效率
- ◆ 不同工作溫度下對充、放電效率影響
- ◆ 電池壽命對充、放電效率的影響
- ◆ 各種電氣與物理特性的極限測試

其中電氣與物理特性的極限測試則是做為各種電池保護的參考資料。當保護裝置完成後，會依據各種國際標準進行測試，以確保系統整體的可靠性。目前較常作為參考的國際標準有 SAE、JIS 與 UL 等。

而前四項的實驗主要目標是提升 SoC 計算的精準度。目前市面上使用電池的電器系統，對於 SOC 的計算大都有 5~10% 的誤差值。對於小型 3C 產品而言或許不會造成太大的障礙，但對於移動載具而言，便成為無法忽視的問題。對於移動載具而言，必須要有精確的 SoC 值，方能進行甚於里程的估計，並提供駕駛者足夠的資訊判斷是否要進行能量的補充。此外，全車控制系統必須要以 SoC 的數值作為判斷電池系統是否可以正常運作的依據。當電池系統容量過高時，需禁止馬達系統進行煞車回充的控制；而快沒電時必須要能先進行反應，進行能量的調配與控管工作，以免因全車瞬間抽載造成電池瞬間壓降，觸發不預期的低電壓保護。因此如何有效提升電池系統的 SoC 估測精準度，便成為電池系統的主要研究項目之一。

## 2.2 文獻回顧

以下將針對各種電池的 SoC 量測技術進行列表整理，並分析各種 SoC 估測技術的特點。接著介紹較常用於電動載具等高功率、大容量系統的 SoC 量測法，並分析其優缺點。

### 2.2.1 SoC 發展歷史

從電池被大量應用開始，為了可以有效提升電池系統的安全性與實用性，科學家便開始針對如何正確的量測估測電池芯的殘電量進行一連串的研究與實驗。

表 4 SoC 量測技術發展歷史[20, 21]

Year	Researcher/Company	Method
1938	Heyer	Voltage measurements
1963	Curtis	Voltage measurements and threshold in voltage levels
1970	Lerner	Comparison between two batteries (one with a known SoC)
1974	Brandwein	Voltage, temperature and current measurements
1975	Christianson	OCV
1975	Dowgiallo	Impedance measurements
1975	Finger	Coulomb counting
1978	Eby	OCV and voltage under load
1980	Kikuoka	Book-keeping
1981	Finger	Voltage relaxation
1984	Peled	Look-up tables based on OCV and T measurements
1985	Muramatsu	Impedance spectroscopy
1986	Kopmann	Look-up tables based on V, I and T measurements
1988	Seyfang	Book-keeping and adaptive system
1992	Aylor	OCV, OCV prediction and coulometric measurements
1997	Gerard	Voltage and current measurements, artificial neural networks
1999	Salkind	Coulomb counting, impedance spectroscopy, fuzzy logic
2000	Garche	Voltage and current measurements, kalman filters
2000	Bergveld	Book-keeping, overpotential, EMF, maximum capacity learning algorithm

早期對電池的基本電化學相關研究尚不夠完整且深入，因此只能夠針對電池電壓的上下限進行量測，並於超過此限制時進行警示，以此作為最基本的安全防護。但此方法並無法瞭解電池電壓值與殘電量之間的關係。為了可以估算電池芯的基本殘電量，因此便以內插的方式將電池電壓對上下限進行計算，推算出電池芯的殘電量。此方法主要概念是基於電池的電壓與殘電量之間的關係是成線性變化。但實際上大部分電池的電壓與殘電量之間的關係並無法簡單的用一條直線進行近似(如圖 5)。因此尚需針對各種電池芯的特性近行更多的考量。

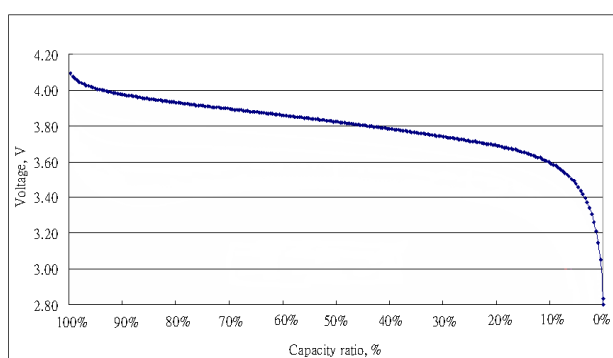


圖 5 鋰電池 SoC vs. voltage 變化曲線圖[22]

為了可以因應電池芯對電壓的非線性變化現象，SoC 相關研究方向便開始針對電池芯的基本電氣參數進行實驗與量測，並依照各種不同種類的電池芯建立出其專屬的曲線圖表。但電池芯的電壓曲線會隨著放電 C 數、溫度、壽命等狀況而有所改變(如圖 6)。因此如果處於複雜的使用環境下，尚需要進行各種實驗與修正，方能有較高的精準度。

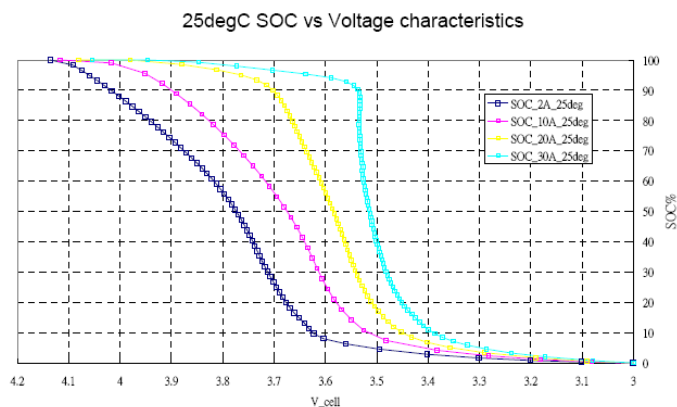


圖 6 鋰電池 SoC vs. voltage 變化曲線圖[23]

下表是針對目前常被使用的各種 SoC 量測技術進行列表整理與評比。可看出各種 SoC 量測技術皆有其適用場合與缺點。因此在選擇電池系統的 SoC 量測技術時，必須要從電池種類、系統設計限制、精度需求、成本等進行多方考量，方能得出一個合適的答案。

表 5 各種 SoC 量測技術比較表[20]

Technique	Field of application	Advantages	Drawbacks
Discharge test	Used for capacity determination at the beginning of life	Easy and accurate; independent of SoH	Offline, time-intensive, modifies the battery state, loss of energy
Coulomb counting	All battery systems, most applications	Accurate if enough re-calibration points are available and with good current measurements	Sensitive to parasite reactions; needs regular re-calibration points
OCV	Lead, Lithium, Zn/Br	Online, cheap, OCV prediction	Needs long rest time (current = 0)
EMF	Lead, Lithium	Online, cheap, EMF prediction	Needs long rest time (current = 0)
Linear model	Lead Photovoltaic	Online, easy	Needs reference data for fitting parameters
Impedance spectroscopy	All systems	Gives information on SoH and quality	Temperature sensitive, cost intensive
D.C. Internal resistance	Lead, NiCd	Gives information on SoH; possibility of online measurements	Good accuracy, but only for a short time interval
Artificial Neural Networks	All battery systems	Online	Needs training data of a similar battery, expensive to implement
Fuzzy logic	All battery systems	Online	Ask a lot of memory in real-word application
Kalman filters	All battery systems, PV, dynamic application	Online Dynamic	Difficult to implement the filtering algorithm that considers all features as <i>e.g.</i> nonnormalities and nonlinearities

## 2.2.2 電動載具 SoC 估算法

目前常被使用的 SoC 演算法大多是針對 3C 產品進行設計。由於此類產品對成本的要求較嚴苛，且對殘電量的誤差有著較大的容忍度，因此精準度較低。此外，由於此種量測法大多是根據小功率的穩定輸出進行設計。因此在電動載具這種大功率變動輸出的應用時其精度會降低。而其他高精度的演算法大多需要龐大的儀器方能進行估算，因此不適合用於移動式系統。

而用於大功率運用的 SoC 量測法主要是以庫倫積分法為主體，配合其他方法進行修正，以提高其估算精確度[24]。此方法主要是量測電池的使用電流，並將其與時間進行積分，算出該時間區塊的耗能。接著將此耗能對前一時間點進行積分，以算出其現在的 SoC 值。此方法十分直觀，當系統使用多少能量，便扣除多少殘電量(如圖 7)。因此就算在快速變動且不規則輸出的變動負載條件下，依舊可以有一定的精準度[25]。

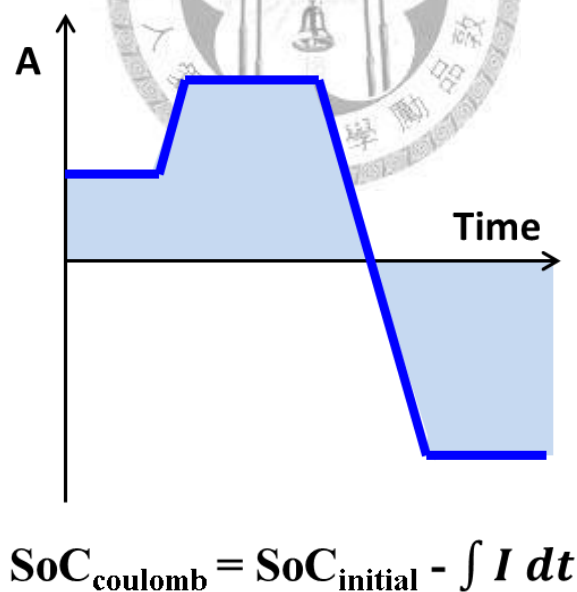


圖 7 庫倫積分法示意圖

但此方法有兩個主要問題需要克服。首先是庫倫積分法必須從一個初始值開始進行積分，因此其 SoC 初始值必須要夠準確，其後續積分的數值才會正確，否則會造成誤差值的累積。第二個問題是電池在進行充放電時會因溫度與內阻等因素造成效率並非是 100%。因此如果直接用電流對時間進行積分，便無法反應出此現象，如此會造成積分結果的不準確。因此尚需要針對這兩大問題進行修正，方能提升其精準度。

### 2.2.3 修正式庫倫積分法

為了解決上述的問題，由各種不同的修正法被提出以試著解決上述問題。首先是初始值的準確性問題。最常見的方式是使用開路電壓查表法是利用電池 SoC 會與電池芯 EMF 相關的特性。當電池芯在靜置一段時間不使用時，其 OCV (Open circuit voltage, 開路電壓) 值會趨近於 EMF 值。之後便可利用量測電池的 OCV 值並進行查表，得出電池芯的初始殘電量[26]。使用此方式便可以得到準確的初始 SoC 值。但在使用此量測法之前必須要先確定電池的靜置時間足夠，否則會產生極大的誤差值。

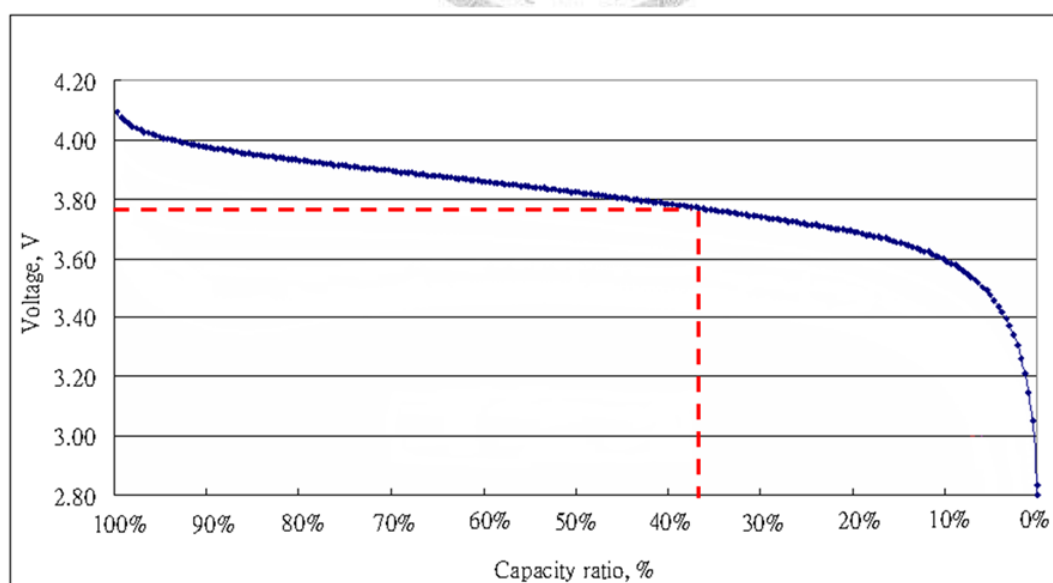


圖 8 開路電壓查表法[22]

而效率的部分，則有各種不同方式進行修正。例如 L. Conklin[20, 27]所提出的方法是針對同一規格的電池芯進行各種充放電條件下進行測試，並量測其效率後建成多維度的表，並將其撰寫至微處理器之內。當電池芯在使用時，系統會對其所處的放電條件進行即時性的量測，並以此為起始參數進行查表。在得出此刻的效率後便可以此對庫倫積分法的積分項加入效率項進行修正，提高其計算的準確性。

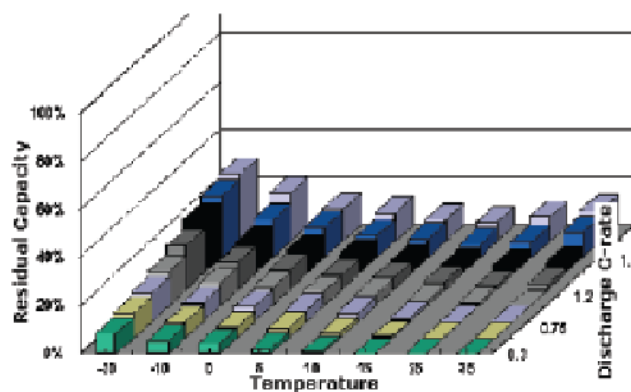


圖 9 電池芯效率對溫度與放電 C 數變化圖[27]

但是電池的溫度、電流、SoC、壽命等因素都會影響電池的效率值，而且各項參數並非相互獨立，而會相互影響。因此需要依照各種不同的放電條件進行測試，如此會需要進行十分龐大的實驗數目，並且建立複雜的查表程式，方能使用此方法。此外，由於目前電池芯的製程尚未完全成熟，因此每一顆電池芯的特性不會完全相同。但是電動載具需要使用大量的電池芯進行串並聯，如需針對每一顆電池進行測試，勢必須要使用大量的資源與時間。因此一般只能針對某些特定參數進行量測與製表，造成誤差值的增大。

除了針對電池芯電氣特性建立完整的多維度列表之外，Salkind 於 1999 年提出使用 fuzzy logic 作為查表法的輔助，透過電池實際充放電時的 SoC 量測精確度，改變各種環境參數的權重值，以因應同種電池芯個體的細微差異。同時藉由量測電池芯內阻的方式估算電池芯目前的剩餘壽命，以針對電池殘餘壽命進行補償[20,



28]。此方法可以減少在進行 SoC 估算時對電池詳細電氣參數的依賴，因此可以減少電池實驗的數目。但由於系統的權重必須針對電池芯的特性進行調整，因此必須要有一段學習與調整的時間。此外，此種演算法會大幅增加系統的運算負擔，因此系統必須要有較的演算能力方能正常運作。

在 2000 年時，Bergveld 則是提出當電池在進行充電或放電時量測其目前電壓值，並以查表的方式推估目前電池芯的 EMF 值。接著計算該電池芯 overpotential 的狀況，並以此進行查表的工作，得出目前電池的效率值，並將此效率值帶回至庫倫積分法進行修正，以提升 SoC 估算的精準度。此方法的優點是將原先各種會影響電池芯使用效率的參數，如溫度、放電 C 數、壽命等變因進行統整，只針對 overpotential 這項因素進行探討。由於上述各項變因都會反映在 overpotential 的數值變化上，因此可將其視為各種參數的交互影響結果。接著針對該數值進行效率實驗。在實際使用時只需帶入此數值進行查表，變可得到目前電池的使用效率值，而不需針對電池所有參數進行交互的效率測試，可有效減少電池特性實驗數目[19, 20, 29]。但由於進行電池 overpotential 的計算時，必須同時針對電池的 EMF 值與目前電壓值進行比較，而 EMF 值又需要從目前的 SoC 值進行回推。因此可能會因起使 SoC 值的偏移加上後續的計算誤差而導致 EMF 的推算結果有誤，造成 overpotential 的估算錯誤，最後形成惡性循環。此外，該量測法依舊需要針對電池的 overpotential 對效率值的影響進行大量的實驗與建表等工作，造成研發時間與成本的增加。

## 2.3 小結

在進行文獻搜尋後，可以發現目前已經有許多研究者針對適合用在電動載具的庫倫量測法進行研究，並提出各式各樣的修正法以改善其既有的問題。但是目前的修正方式大都需要輔佐大量的實驗，並建立多維度的資料表，方能完整表示電池芯在各種放電環境下的效率值。或是需要輔以複雜的計算式或是模糊邏輯等

演算法，方能提升庫倫積分法的精準度。這些都會在進行實際應用時大幅提升系統所需要的設計時間、成本與控制程式的複雜度。因此本研究希望可以針對這些問題進行探討，建立一套不需要進行大量電池電氣特性實驗與複雜的演算法，便可以提升原本庫倫積分法精準度的新式 SoC 演算法。該演算法主要是利用電池在使用中所估算的等效內阻的進行電池的 SoC 損耗估算，並加以修正。因此不需要針對電池芯於各種環境下的效率值進行實驗與建表，便可以有效針對庫倫積分法進行修正。下一章節會針對本研究所建立的演算法進行詳細的說明。



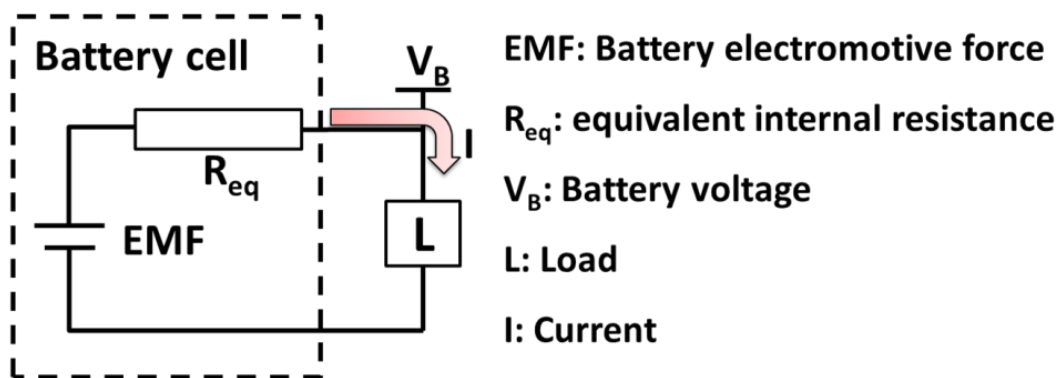
## 第三章 等效內阻估測演算法

本章節主要是針對本研究所提出的等效內阻估測法進行說明，並解釋為何該演算法可以有較高的 SoC 估測精度。此外則是說明要如何將該演算法進程式化，並與 BMS 進行結合，以便於進行後續的實驗。

為了可以改善庫倫積分法所無反映的電池充放電效率影響，以及既有的修正法需要進行大量電池電氣特性實驗或透過複雜演算法所衍生出的各項問題，本研究設計一套演算法以即時估算的方式計算電池在各種狀況下其因效率造成的損耗。本演算法基本概念是使用電池 over potential 的現象估算電池芯的等效內阻，並由該數值進一步推估電池芯使用時的損耗值。由於電池的等效阻抗值會因電池目前的壽命、溫度、放電 C 數、SoC 等因素而變動，而這些因素正是影響電池放電效率的主要參數。因此本研究希望藉由等效阻抗估算出電池芯的使用損耗值[19, 20, 29]。此外，由於等效阻抗是在電池芯使用時進行即時性的量測與估算，因此不需要針對各種不同的電池芯以及使用狀況進行測試與製表。如此便可以大幅減少針對電池芯特性的實驗數目。本研究會先針對等效內阻的量測與耗能估算建立一套專屬的演算法，以下便是針對該演算法的描述。

### 3.1 等效內阻估算

本演算法的主要概念是基於電池芯的基本電氣模型(如圖 10)。電對池芯而言，最重要的參數是 EMF 值與  $R_{eq}$ (等效內阻)值。其中 EMF 值會與電池的 SoC 與溫度有關，因此若能測出準確的 EMF 與電池溫度，便可以推算出目前電池芯的 SoC 值。但由於 EMF 值必須要在電池靜置後經過一段時間方能達到穩定值，因此難以在電池使用狀態下取得此數值。



$$EMF = f(\text{SoC, temperature})$$

$$R_{eq} = f(\text{Cycle times, temperature, C rate, SoC})$$

圖 10 電池芯簡易電氣模型

本研究主要是探討另一項參數“ $R_{eq}$ ”對電池使用時對效率造成的影響。由於電池芯在充電或放電時，其輸出電流會通過  $R_{eq}$  而造成壓降與損耗。而此損耗值也是造成電池使用效率下降的主要因素之一。因此若能得出電池芯在使用狀況下的  $R_{eq}$  值，如此便可以進一步推算出電池芯在各種狀況下的使用損耗值。但由於  $R_{eq}$  值會與電池的使用環境、SoC 值、充放電電流、壽命等因素相關，並不是一個定值。因此，為了取得較準確的電池  $R_{eq}$  值，必須針對此建立一套即時性的量測與演算法。

圖 11 是電池芯在進行放電瞬間的電壓變化狀況，由此電壓變化可看出當電池芯在放電時，電池芯的輸出端電壓會產生 Overpotential ( $\Delta V_B$ ) 的現象，造成電池芯的輸出電壓下降。此現象主要是因為電流流過  $R_{eq}$  所造成的。而此 Overpotential 的數值與電池芯的  $R_{eq}$  值之間的關係式如下：

$$R_{eq} = \Delta V_B / \Delta I$$

如上式所示，當電池芯的使用電流產生變化時，將瞬間電流的變化值除以電壓的變化值，便可以推算出在此狀況下電池芯的  $R_{eq}$  值。因此，只要能利用此現象，

量測電池芯在進行充電或放電時瞬間的電壓與電流變化，便可推算出電池芯目前的  $R_{eq}$  值。

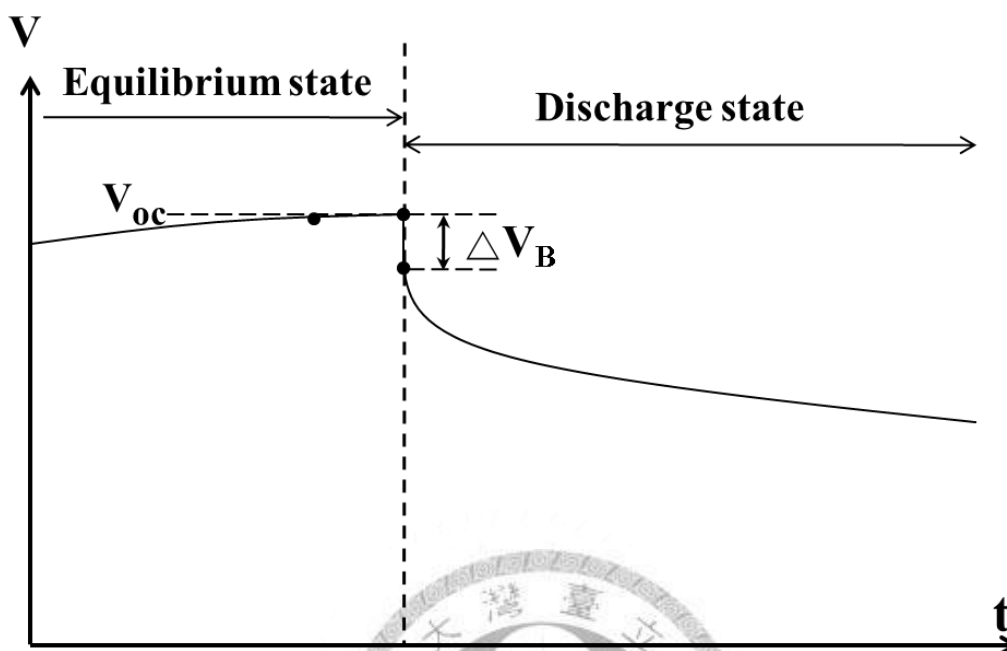


圖 11 電池芯放電瞬間電壓變化

### 3.2 電池損耗估算

在得出電池芯目前的  $R_{eq}$  值之後，便可使用此數值估算當電流流過此數值時所造成的損耗。下一步則是針對庫倫法進行修正，便可以得出較準確的 SoC 數值。下式是原本尚未修正前的庫倫積分法：

$$SoC_{coulomb} = SoC_{initial} - \int IV_B dt$$

在上述公式中， $I$  值代表目前使用電流，而  $V_B$  值代表目前電池芯的電壓值。舊有的庫倫法僅針對使用時的電流進行估算，但由於電池芯的效率不可能達到百分之百，而此公式無法反映出當電池芯處於不同使用環境、放電  $C$  數的效率值，因此會造成估算值與實際值之間的誤差。此外，由於積分法是取上一次計算結果做為本次計算的起始值，因此每次計算的誤差值會不斷被累積，造成最後 SoC 的

估算結果與實際數值產生極大的誤差。而以下的公式則是本研究的修正庫倫積分法：

$$\text{SoC}_{\text{this study}} = \text{SoC}_{\text{initial}} - \int IV_B + I^2 R_{\text{eq}} dt$$

本研究則在原先的積分式內加上  $R_{\text{eq}}$  的修正，做為電池芯使用時的效率修正項。此修正法主要是針對電流流過  $R_{\text{eq}}$  所造成損耗值進行計算，並針對時間項作積分。如此便可針對在各種使用條件下電池芯使用損耗進行即時性的估算，提升原本庫倫積分法的精準度。下一步便可列出本演算法的邏輯判斷式，並開始將此演算法程式化。



### 3.3 演算流程

在將演算法撰寫成程式之前，必須先撰寫出本演算法的流程圖，並確認其判斷邏輯是否正確，如此方能確保程式可以正常運作。下圖便是本演算法的判斷流程圖：

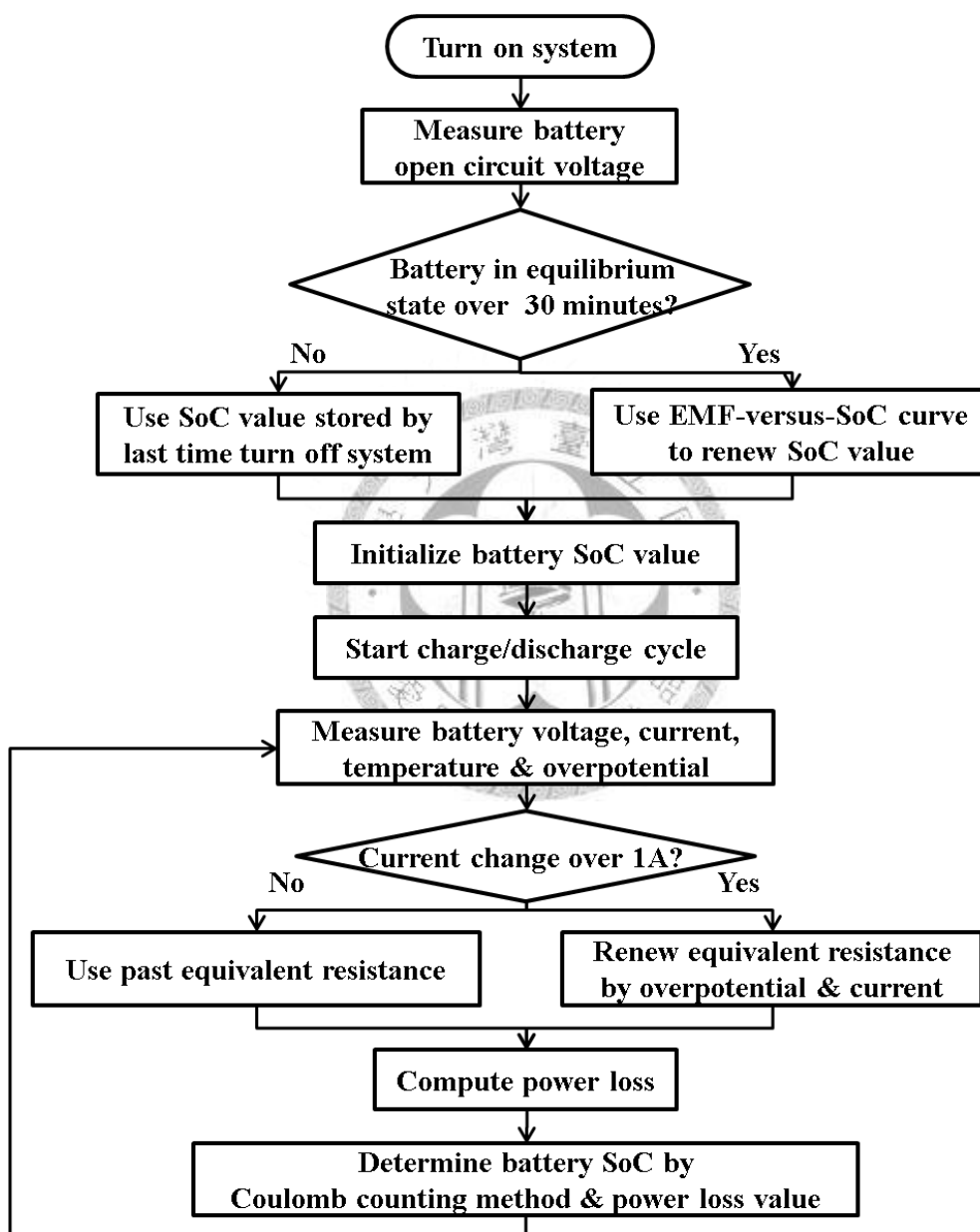


圖 12 演算法流程圖

如同一般的庫倫積分法，在開始進行計算之前，必須要先針對電池芯的  $SoC_{initial}$  (初始殘電量) 進行估測。為了可以得到較精確的  $SoC_{initial}$  值，本研究將會使用 EMF vs. SoC 的查表法估測其初始值。但由於電池芯在經過使用之後，必須要靜置一段時間，其開路電壓值才會近似於 EMF 值。因此在演算法的起始部分，必須先透過 EEPROM 讀取系統上次的關機時間，並將其與 RTC (Real Time Clock) 進行比較。如果本次系統啟動時間距離上次關機時間超過 30 分鐘以上，便將電池目前的開路電壓值視為近似於 EMF 值，並使用此數值進行查表，更新  $SoC_{initial}$  值(如圖 13)。

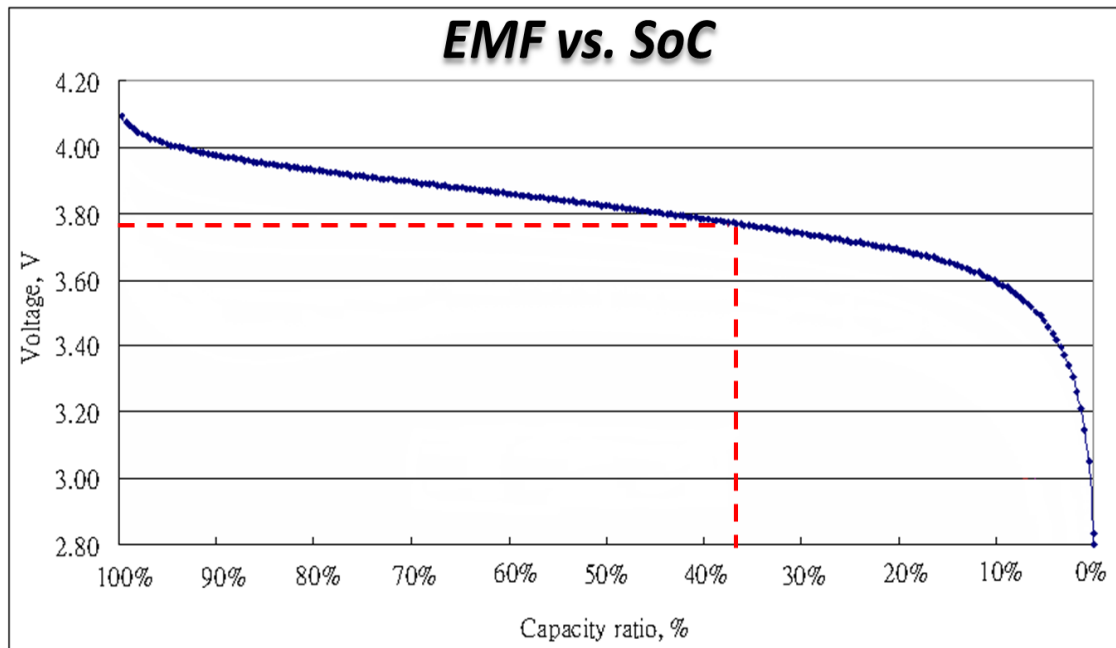


圖 13 EMF vs. SoC 圖

如果距離上次關機的時間未滿 30 分鐘，則會將上次紀錄時最後一筆的 SoC 值做為本次運算的  $SoC_{initial}$  值。如此主要是為了避免因使用不正確的電壓值進行查表，造成 SoC 起始值的誤差，進而影響到之後的計算。

在確定  $SoC_{initial}$  的數值之後，下一步便可允許電池芯進行充放電的應用。當電池芯在使用的同時，系統會針對電池芯目前的電壓、使用電流、溫度等資訊進行



即時性的量測。當系統量測完一個循環後，會先將目前的量測數值與上一個循環的數值進行比較。如果本次循環的電流值跟上一次循環相比，其差值大於一定值以上(在本研究中是取 1 安培，主要是考量到所使用的 Current sensor 在電流數大於 1 安培以上時方能有足夠的精準度)，則將此數據帶入以下公式內，計算  $R_{eq}$  的數值，並將此數值進行更新。

$$R_{eq} = \Delta V_B / \Delta I$$

如果兩筆數據相比較之後，發現兩者之間的電流值差距並未大於 1 安培，則繼續沿用上一次的  $R_{eq}$  估算結果，不重新進行計算。如此主要是考量到當電池系統在使用時，可能會因量測誤差、內部電容效應等因素造成電壓或電流的波動。而此現象並不是由  $R_{eq}$  所造成的，因此如果將此變化視為有效數據進行  $R_{eq}$  值的估算，可能會產生極大的誤差值，造成演算法的失效。因此，本演算法只將電流變化值大於 1 安培以上的數值視為有效數據，並以此進行  $R_{eq}$  的估算。如果變動值在此範圍之內，則繼續沿用先前的  $R_{eq}$  值，不進行重新計算。

在確定好  $R_{eq}$  值之後，下一步便是使用  $R_{eq}$  值帶入以下公式，計算電池芯在此運算循環的時間間隔之內，因電池芯的使用電流流經過等效內阻所造成的耗能數值：

$$\text{Power loss} = \int I^2 R_{eq} dt$$

本公式是將  $R_{eq}$  視為電阻，並以此進行電池使用時的耗能估算。在電流項的部分，由於本式是取電流平方做為計算值進行積分，因此不論電池目前是處於充電 ( $I < 0$ ) 或放電 ( $I > 0$ ) 的狀態，本公式的計算結果皆為正值。此意味著不論電池現在是處於充電或放電的狀態，電池本身皆會因內部的阻抗值造成損耗，因此造成電池使用效率的下降。

下一步則是將此數值加入原本的庫倫積分法內，配合既有的瓦數對時間的積分值，估算此時間點的電池 SoC 值。以下是其公式：

$$\text{SoC}_{\text{now}} = \text{SoC}_{\text{past}} - \int IV_B dt - \int I^2 R_{eq} dt$$

此公式主要分成兩大部分，分別是實際被使用能量的積分運算，以及使用時所造成的損耗值。在公式前半段的積分式主要是依照目前電池芯的電流方向與其量測到的電壓值進行積分，估算電池芯在本次循環的時間區段下所放出或充入的能量值，並將其加入或扣除原先的 SoC 值。公式後半段則是代入上一步驟所計算出的電池芯使用損耗值，並將其扣除。此部分主要是代表電池芯在此循環時間區段的損耗值，並將其扣除，以補足前半段的積分式內所無法反映的電池芯充放電效率值。在計算完此兩部分的數值之後，便可使用前一時間點所計算出的電池殘電量扣除目前所使用的能量以及電池芯效率損耗值。如此便可計算出目前電池芯所剩餘的殘電量。

在計算完此時間點的 SoC 值後，便可完成本次量測與計算循環。每次循環大約需要 100msec，因此等效內阻的每次更新間隔時間也大約為 100msec。之後則回歸到電池芯的電壓與電流量測部分，繼續進行下一循環的量測與估算。

### 3.4 小結

透過此演算法，本研究所建立的演算法可以針對電池芯的使用耗能進行即時性的估算，而不需要透過大量的實驗與查表方能得出系統在各種使用環境下的效率值。如此便可以有效減少 BMS 的建立時間、電池特性實驗數目以及程式執行時的運算量。

在建立本研究的演算法之後，下一步便可以將本演算法與 BMS 結合，進行實際的電池充放電實驗與 SoC 估測，並將本演算法與原先的庫倫積分法加以比較，證明本演算法的 SoC 估測精準度確實有所提升。

## 第四章 演算法實現與測試

本章節主要是介紹本研究所使用的實驗機台架構，以及所進行的單電池芯實驗項目、實驗步驟與目的。

在建立完演算法與程式的判斷邏輯後，接下來則是將此演算法程式撰寫至 BMS 內，並配合電池系統進行實際的放電測試，同時進行電池芯 SoC 的估算。為了可以比較不同演算法之間的精準度，本研究建立一套可以在進行充放電的同時使用不同演算法對相同電池芯進行 SoC 估算的實驗系統。

本實驗系統具備有 BMS 的功能，可以在電池系統過度充放電時進行保護，以及將測試時的電池芯狀態透過 CAN Bus 傳輸後進行紀錄。並針對電池芯同時使用庫倫積分法與本研究的等效內阻修正法進行 SoC 數值的估算，並將這兩種 SoC 估測法與 SoC vs. EMF 的查表法所得出的準確 SoC 值作為基準，以比較兩種 SoC 估測法的精準度。此外，該儀器可以依照實驗需求，控制電源供應器與電子負載的輸出值。如此便可製造出電池進行穩定或變動輸出的使用環境，並比較出不同 SoC 估測法在實際使用時的估測精準度。

### 4.1 實驗儀器介紹

下圖是實驗平台的架構圖。本實驗所使用的鋰電池芯會先連接到 BMS，在電池芯進行實驗時針對其電壓、電流與溫度進行監測。接著電池芯的正極會連接到兩個串接的 relay，控制電池芯是否要與後端負載進行連接，以及要與 power supply 連接進行充電，或是和電子負載連接進行放電。

此外，本測試系統的 BMS 本身雖有可以針對電池芯目前狀況進行監控的功能，但是無法將量測與計算結果進行長時間的紀錄。因此，本測試系統有設計一台 data logger 進行記錄。此 data logger 是透過 CAN Bus 與 BMS 進行訊號溝通。BMS 會

定時將目前電池的各項資訊(如電池電壓、電流、SoC 計算結果、等效內阻造成的損耗等)傳送給 data logger 進行記錄。

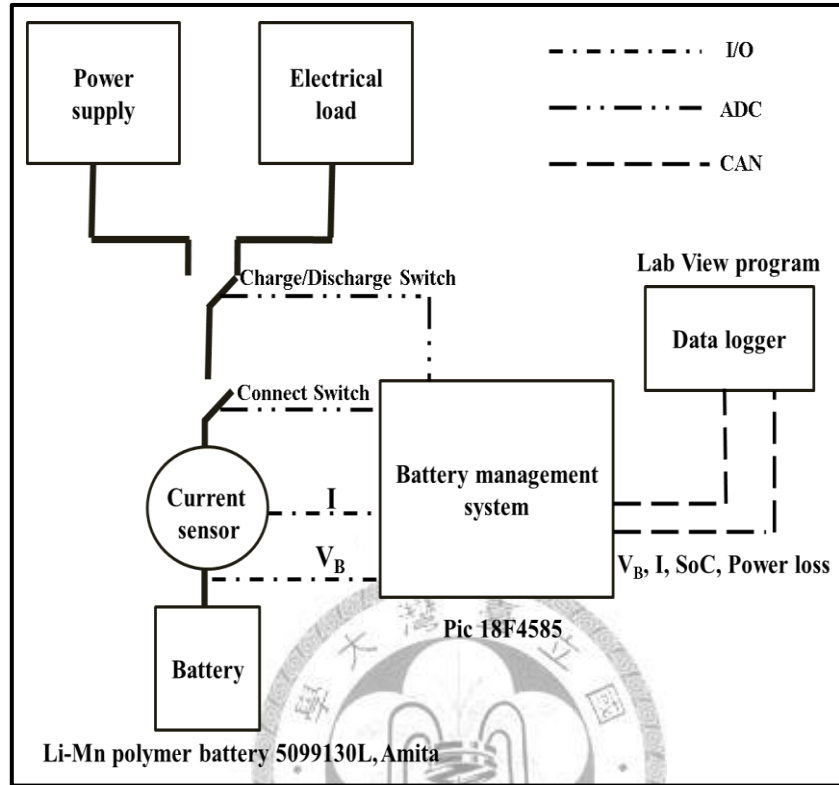


圖 14 電池放電測試用系統架構圖

以下是針對各項實驗儀器與受測電池芯進行介紹。

#### 4.1.1 鋰電池芯



圖 15 鋰電池芯外觀

本實驗所使用的鋰電池芯是有量科技所生產的 5099130L 鋰錳高分子電池芯。該電池芯主要是用於電動腳踏車或電動機車等電動載具的相關應用。該電池芯在能量密度與功率密度上也有著相當優秀的表現。此外，該電池芯的容量有 5 安培小時，較一般常見的 18650 電池封裝高出許多，因此將其使用於電動載具等需要高容量的電池系統時，可以減少許多並聯的電池芯，有效的簡化電池系統的設計。此外，本研究所選擇的實車測試對象”Green Jumper”的電池系統也是使用該電池芯。因此在進行單電池芯放電實驗時也是使用該電池芯進行測試。下表是該電池芯的基本資料。

表 6 鋰電池芯基本規格 [22]

電池芯種類	鋰高分子電池
正極材料	鋰錳
負極材料	石墨
Nominal voltage	3.8
Working voltage	2.8~4.2
容量	5 Ah
能量密度	139 Wh/kg
最大充電電流	5A (1C)
最大放電電流	15A (3C)
重量	140 g

由於本研究在進行實驗之前，必須要先針對電池芯的特性進行基本測試，建立 SoC vs. EMF 的曲線圖，以作為 SoC 估測的比較基準點。

下圖是進行 SoC 實驗的流程圖。為了可以得到較準確的 SoC vs. EMF，首先必須要使用較低 C 數的電流將電池充滿，以確定該電池開始實驗時 SoC 為 100%。接下來則是將充滿電的電池使用低 C 數的電流進行放電，以確定能將電池放電時的效率影響減至最低，在本研究中是使用 0.1C 的電流進行放電。下一步則是以定電流的方式進行放電，在每放完固定百分比後停止放電進行靜置，接著在靜置結束後針對電池芯的電壓進行量測，以得到該百分比下電池芯的 EMF 值。為了得到精度較高的 SoC vs. EMF 表，本實驗每次放電的百分比間隔取 1%，以確定可以得到該電池芯的詳細 SoC 曲線。

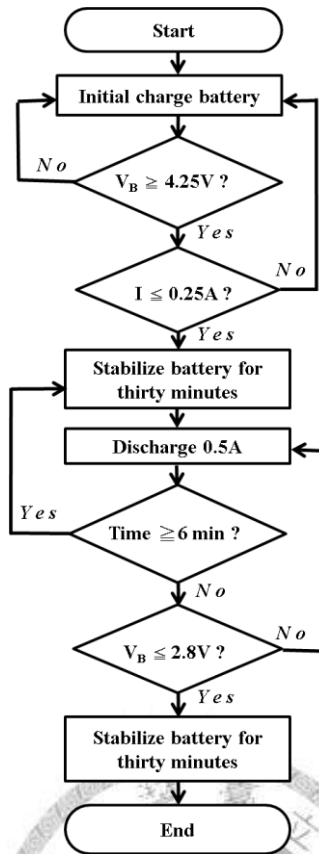


圖 16 SoC vs. EMF 實驗流程圖

在完成該實驗之後，便可以得到該電池芯的完整 SoC vs. EMF 曲線(如圖 17)。之後便可作為庫倫法與本研究的 SoC 估測法與比較基準點。

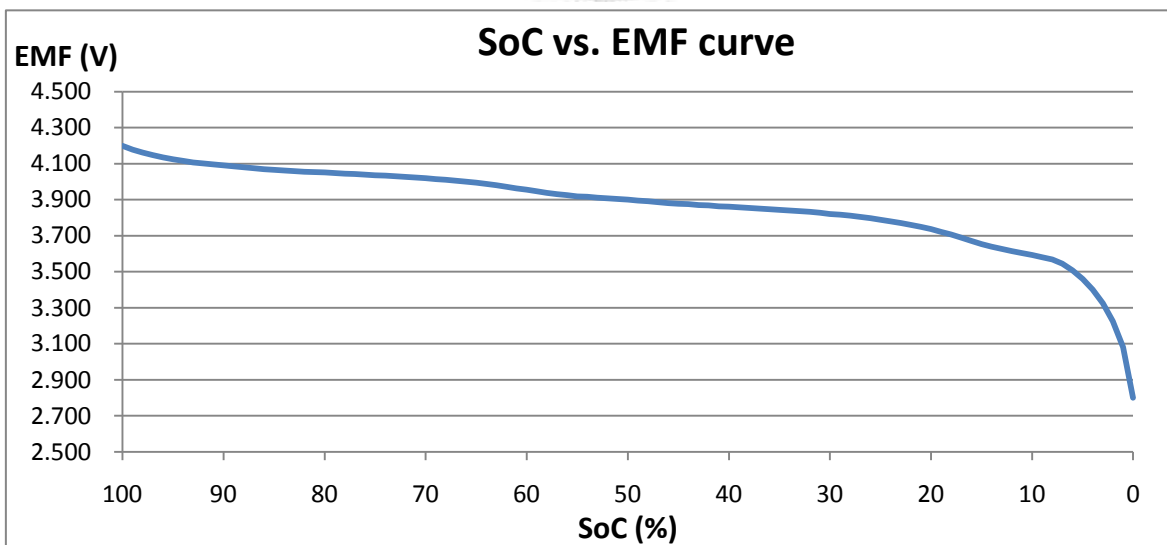


圖 17 SoC vs. EMF 曲線圖

## 4.1.2 Power supply



圖 18 Power supply 外觀照片

本研究所使用的 power supply 是 GW Instek 的產品(GPS-4303)。此外，可於開始輸出前設定電壓與電流限制，當電池芯充電至指定電壓時自動在 CC - CV mode 進行切換，以防止電池芯因過充而造成損壞。

表 7 Power supply 規格表[30]

SPECIFICATIONS									
		GPS-4303				GPS-3303		GPS-2303	
<b>OUTPUT MODE</b>									
	CH1	CH2	CH3	CH4	CH1	CH2	CH3	CH1	CH2
Voltage	0 – 30V	2.2 – 5.2V	8 – 15V	0 – 30V	5V Fixed	0 – 30V	0 – 30V	0 – 30V	0 – 30V
Current	0 – 3A	1A Max.	1A Max.	0 – 3A	3A Max.	0 – 3A	0 – 3A	0 – 3A	0 – 3A
Tracking Series Voltage	0 – 60V			0 – 60V			0 – 60V		0 – 60V
Tracking Parallel Current	0 – 6A			0 – 6A			0 – 6A		0 – 6A
<b>CONSTANT VOLTAGE OPERATION (CH1, CH2)</b>									
Line Regulation	≤ 0.01% + 3mV								
Load Regulation	≤ 0.01% + 3mV (rating current ≤ 3A) ≤ 0.02% + 5mV (rating current > 3A)								
Ripple & Noise	≤ 1mVrms, 5Hz – 1MHz								
Recovery Time	≤ 100 μS (50% Load change, Minimum load 0.5A)								
<b>CONSTANT CURRENT OPERATION (CH1, CH2)</b>									
Line Regulation	≤ 0.2% + 3mA								
Load Regulation	≤ 0.2% + 3mA								
Ripple & Noise	≤ 3mArms								
<b>TRACKING OPERATION (CH1, CH2)</b>									
Tracking Error	≤ 0.5% + 10mV of CH1								
Series Regulation	≤ 0.01% + 5mV								
Load Regulation	≤ 300mV								
Ripple & Noise	≤ 2mVrms, 5Hz – 1MHz								
<b>CH3 OPERATION (for GPS-3303/4303)</b>									
CH3 Voltage	GPS-4303 : 2.2V – 5.2V, GPS-3303 : 5V Fix								
Line Regulation	≤ 5mV								
Load Regulation	≤ 15mV								
Ripple & Noise	≤ 2mVrms, 5Hz – 1MHz								
Current Output	GPS-4303 : 1A, GPS-3303 : 3A								
<b>CH4 OPERATION (for GPS-4303)</b>									
CH4 VOLTAGE	8V – 15V								
Line Regulation	≤ 5mV								
Load Regulation	≤ 10mV								
Ripple & Noise	≤ 2mVrms, 5Hz – 1MHz								
Current Output	1A								
<b>METER</b>									
Digital	3 digits 0.5" LED display GPS-4303/3303 Out ON Accuracy ± (0.5% of rdg + 2 digits) GPS-4303/3303 Out OFF Accuracy ± (0.5% of rdg + 8 digits) GPS-2303 Accuracy ± (0.5% of rdg + 2 digits)								
<b>INSULATION</b>									
Chassis and Terminal	≥ DC 500V / 20MΩ								
Chassis and AC Cord	≥ DC 500V / 30MΩ								
<b>POWER SOURCE</b>									
AC 100V/120V/220V±10%, 230V(+10%–6%), 50/60Hz									
<b>DIMENSIONS &amp; WEIGHT</b>									
255(W) x 145 (H) x 265 (D) mm, Approx. 7 kg									



### 4.1.3 電子負載



圖 19 電子負載外觀照片

本研究使用的電子負載是 Chroma 的產品(63110A)。此電子負載最大電壓為 80V，最大電流 60A。用於本實驗的最大可達 12C 放電，足以滿足各種放電需求。此外，該機台可以使用編程輸出。因此也可對電池進行各種非定電流的放電測試。

表 8 電子負載規格表[31]

<b>Model</b>	<b>63110A (100Wx2)</b>	
Power	100W	
Current	0-0.6A	0-2A
Voltage*1	0-500V	
Min. Operating Voltage	6V@2A	
<b>LED MODE</b>		
Range	Operation Voltage: 0-100V/0-500V Current : 0-2A / Rd Coefficient : 0.001-1	
Resolution	VL : 4mV / VH : 20mV Io : 0.1mA / Rd Coefficient : 0.001	
<b>CONSTANT RESISTANCE MODE</b>		
Range	CRL: 3Ω -1kΩ (100W/100V) CRH: 10Ω -10kΩ (100W/500V)	
Resolution	CRL: 62.5μ mho CRH: 6.25μ mho	
Accuracy	1kΩ : 4m mho + 0.2% 10kΩ : 1m mho + 0.1%	
<b>CONSTANT VOLTAGE MODE</b>		
Range	0-500V	
Resolution	20mV	
Accuracy	0.05% ± 0.1%F.S.	
<b>CONSTANT CURRENT MODE</b>		
Range	0-0.6A	0-2A
Resolution	12μA	40μA
Accuracy	0.1%+0.2% F.S.	0.1%+0.2% F.S.
<b>MEASUREMENT SECTION</b>		
<b>VOLTAGE READ BACK</b>		
Range	0-100V	0-500V
Resolution	2mV	10mV
Accuracy	0.025%+0.025% F.S.	
<b>CURRENT READ BACK</b>		
Range	0-0.6A	0-2A
Resolution	12μA	40μA
Accuracy	0.05%+0.05% F.S.	

**NOTE\*1** : If the operating voltage exceeds 1.1 times of the rated voltage, it would cause permanent damage to the device.

#### 4.1.4 BMS

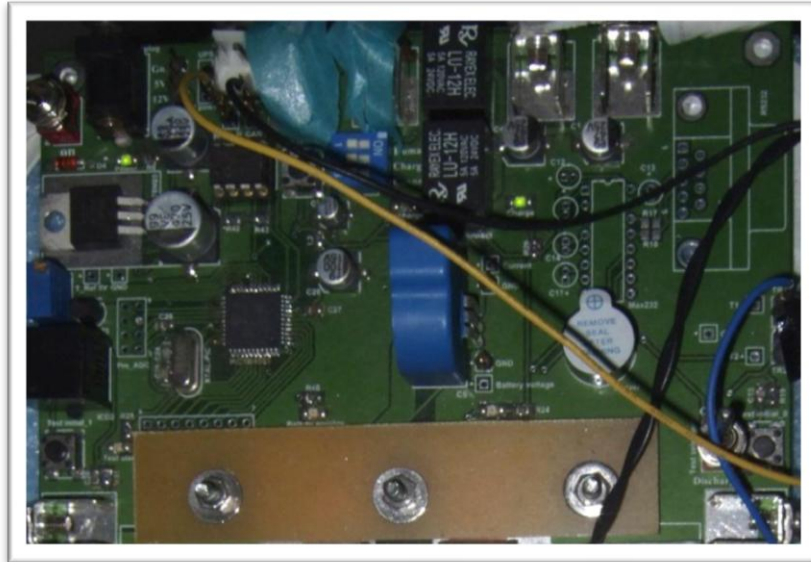


圖 20 BMS 外觀照片

BMS 是使用 Microchip 的 PIC18F4585 微處理器，並使用組合語言進行撰寫。其主要負責的功能是於實驗時量測電池芯目前的狀況、進行 SoC 的估測以及控制周邊電路等工作。由於本實驗主要目的是於電池芯進行各種不同放電條件的同時，使用兩種 SoC 估測法進行估算。並將 SoC 估測結果與 EMF 查表法進行比較，以得出其精準度。因此本系統的 BMS 必須具備以下幾項功能：

1. 量測電池芯電壓、電流、溫度等參數。
2. 控制電池芯目前是進行充放電或是靜置狀態，並依照設定時間進行迴路導通或切斷等工作。

- 內建多種 SoC 估測程式。當電池芯靜置結束後可使用 SoC vs. EMF 的查表法進行目前電池芯的準確 SoC 值估測，作為評比基準。當開始進行放電實驗時，則可同時進行庫倫積分法與本研究的等效內阻修正法兩種 SoC 估測法的運算。
- 具備 CAN Bus 功能，並且可以與 Data logger 進行連接與訊息傳輸等工作。

### 4.1.5 Data logger

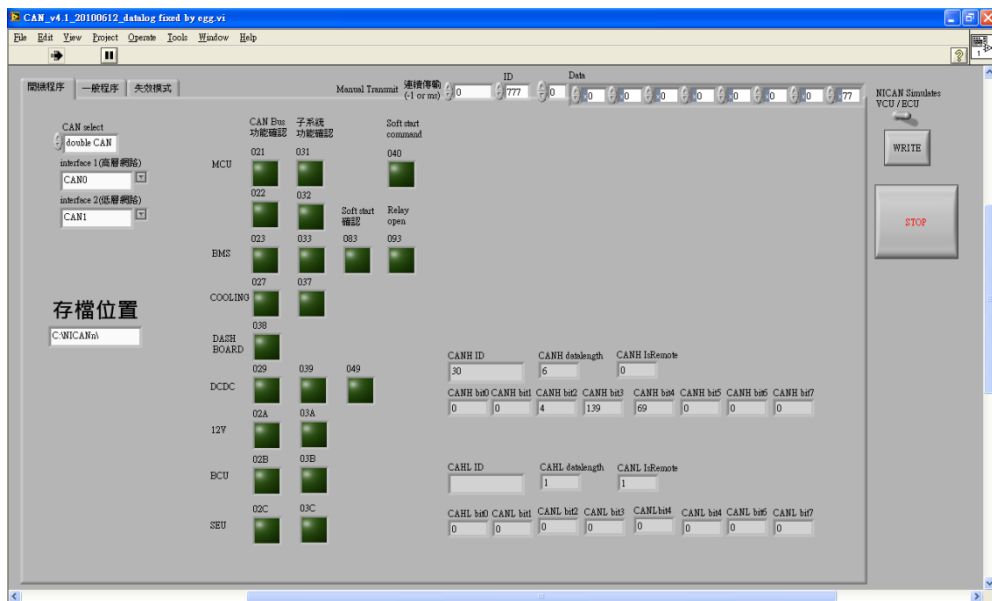


圖 21 Data logger 程式

由於 BMS 並無法針對量測與計算結果進行長時間記錄，因此需要一部 Data logger 與 BMS 連接，並負責進行記錄工作。本實驗的 data logger 是使用 Labview 進行撰寫，並透過 NI CAN 接收 BMS 所傳遞的電池芯目前狀況，以及 SoC 計算結果。其接收結果會顯示於筆記型電腦上，同時進行記錄的工作。

## 4.2 測試 patent

由於本實驗的目的是要比較當進行相同放電實驗時，使用庫倫法所推算出來的 SoC 值以及使用等效內阻修正法的結果，何者比較接近真實的電池 SoC 值。因此本實驗的進行方式並不同於一般的電池放電實驗，必須將電池芯進行階段性的

放電與靜置，並於靜置結束後進行查表，方能得到各放電循環中電池芯實際使用的電量。下圖是本實驗的實驗進行流程圖。

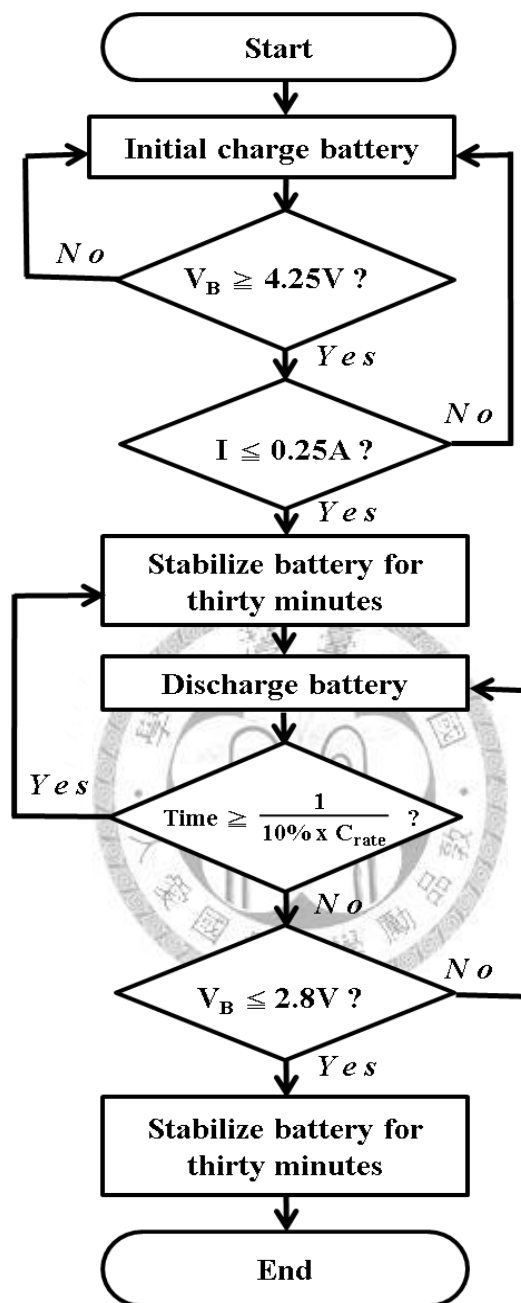


圖 22 放電實驗流程圖

實驗開始時會先由 BMS 控制 relay，切換到 power supply 的 channel 對電池進行充電。等充電完畢後則切斷 relay，讓電池靜置。當電池靜置三十分鐘後，其開

路電壓值會接近電池芯的EMF值(圖 23)。此時BMS會進行電池開路電壓的量測，並使用查表法得出電池芯的初始SoC值。

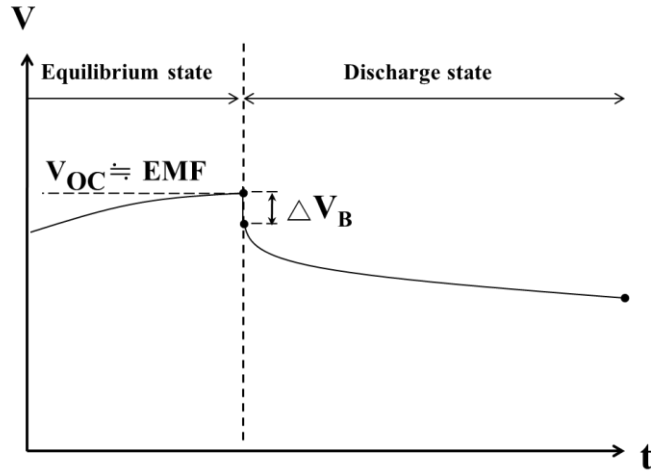


圖 23 電池芯電壓與時間變化圖

在確認電池芯的初始電壓值之後，下一步便是將電池芯與電子負載進行連接，開始進行放電循環。此時BMS會針對電池芯的電壓、電流與溫度等參數進行即時性的量測。同時會進行庫倫法與等效內阻修正法的SoC估算。當達到設定放電時間後，BMS會自動切斷電池芯與電子負載的連結並進行靜置。當電池靜置達三十分鐘後，BMS會量測電池芯的開路電壓值( $V_{OC\ after}$ )，並再次進行SoC查表的工作。

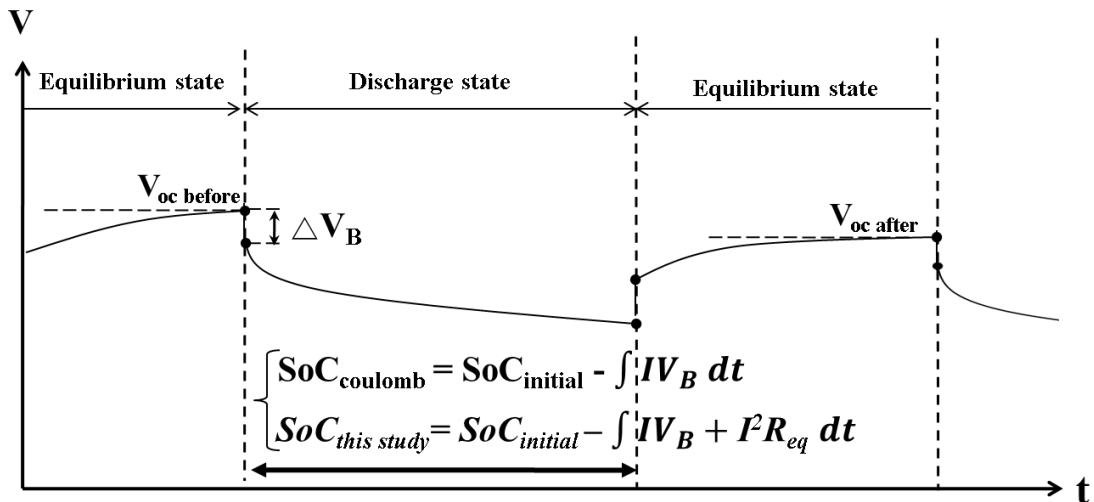


圖 24 電池芯電壓與放電 cycle 變化圖

在量測出本次放電循環後的電池開路電壓之後，便可利用查表法得出本次放電循環中電池芯所放出的 SoC 值(見圖 25)。

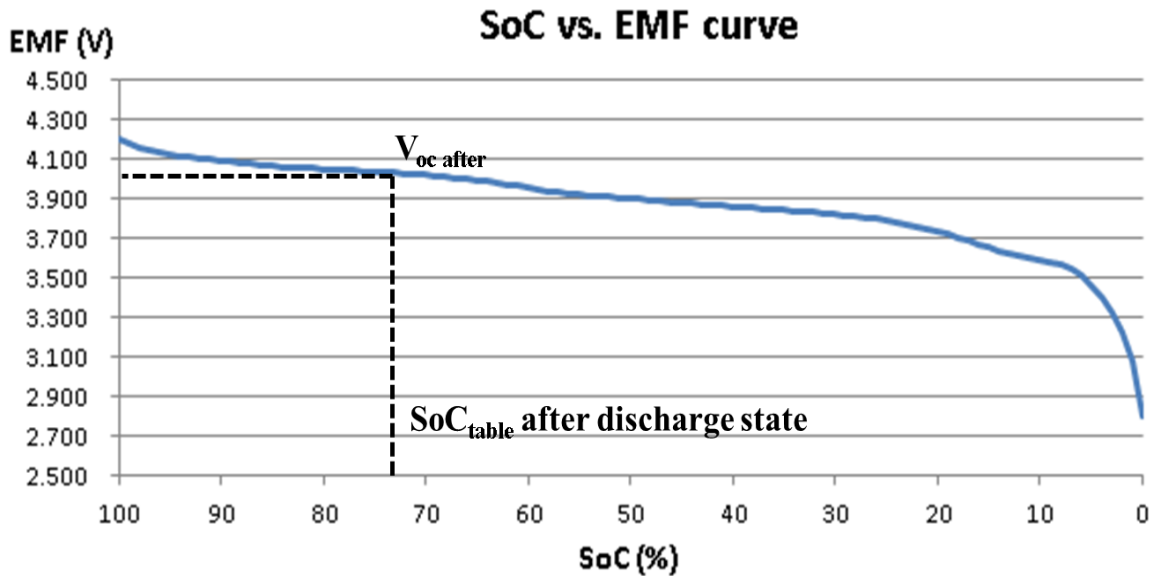


圖 25 於放電循環內實際使用的 SoC 值

將此數值與 SoC 估測法所計算出的結果加以比對，便可以得出兩種估測法的誤差值，進而得知本研究的 SoC 估測法的精準度是否確實高於原本的庫倫積分法。

$$\text{Error}_{\text{coulomb}} = \text{SoC}_{\text{coulomb}} - \text{SoC}_{\text{table}}$$

$$\text{Error}_{\text{this study}} = \text{SoC}_{\text{this study}} - \text{SoC}_{\text{table}}$$

在完成上述的比較後，便會開始進行下一次的放電循環，同時重複上述量測與計算動作，直到電池芯的電壓值達到設定的最低放電電壓為止(在此是設定為 2.8V)。當達到最低放電電壓時，則會自動停止繼續放電，以保護電池芯不會因為過度放電而受損。

為了確保本研究的量測法可以適用於各種不同的放電條件，本實驗會針對單一電池芯進行各種不同的放電測試，並比較各種放電環境下的誤差值是否接近，

以驗證本研究的量測法是可行的。以下則是針對實驗所進行的各種放電條件進行說明。

#### 4.2.1 定 C 數放電測試

定 C 數放電測試是將電子負載設定為固定的放電電流進行放電。當電池芯靜置完畢後，BMS 會將電池芯連接到電子負載，並使用固定的電流對該電池芯進行放電。每次放電時間設定為  $\frac{1}{0.1 \times C_{rate}}$  (約消耗電池容量 10% 左右)，接下來便進行 30 分鐘的靜置。該循環會不斷的重複，直到電池的電壓值小於等於 2.8V 為止。下圖是定電流放電實驗時電池輸出電流對時間的變化圖。

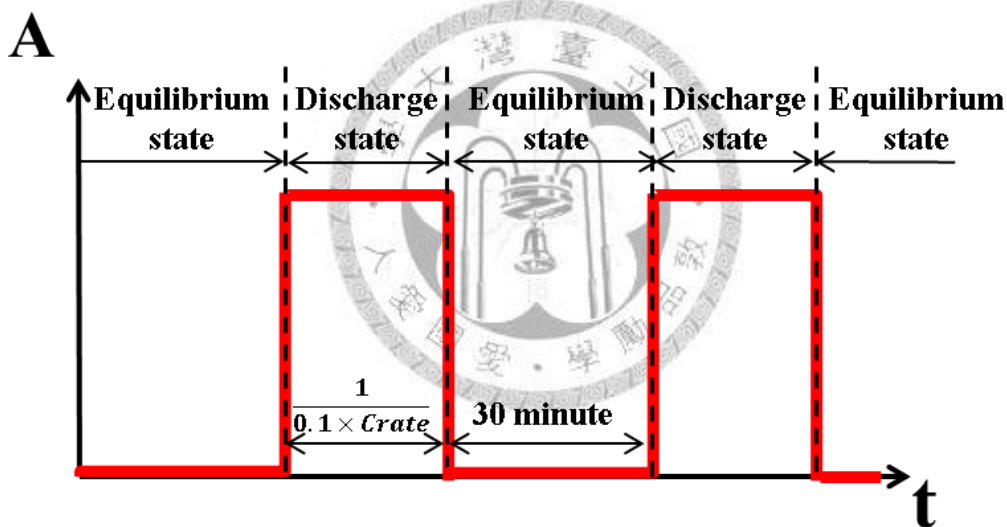


圖 26 定電流放電對時間圖

定電流放電一共會進行 0.5C、1C、1.5C、2C 這四種循環，並於放電結束後進行結果比較。主要目的是先屏除其他可能會影響電池放電效率的要素，以較單純的放電環境比較兩種 SoC 演算法之間的精準度差異性。

## 4.2.2 變 C 數放電測試

異於定 C 數放電實驗，變 C 數放電實驗是使用階梯狀放電的方式對電池芯進行放電。在結束靜置後會先使用 0.5C 的電流對電池芯進行放電 1 分鐘，接下來使用 1C 電流放電 1 分鐘...以此類推。當最後 2C 放電 1 分鐘之後便結束放電循環，進行 30 分鐘的電池靜置。此循環會不斷重複，直到電池芯的電壓值小於等於 2.8V 為止。下圖是變電流放電實驗時電池輸出電流對時間的變化圖。

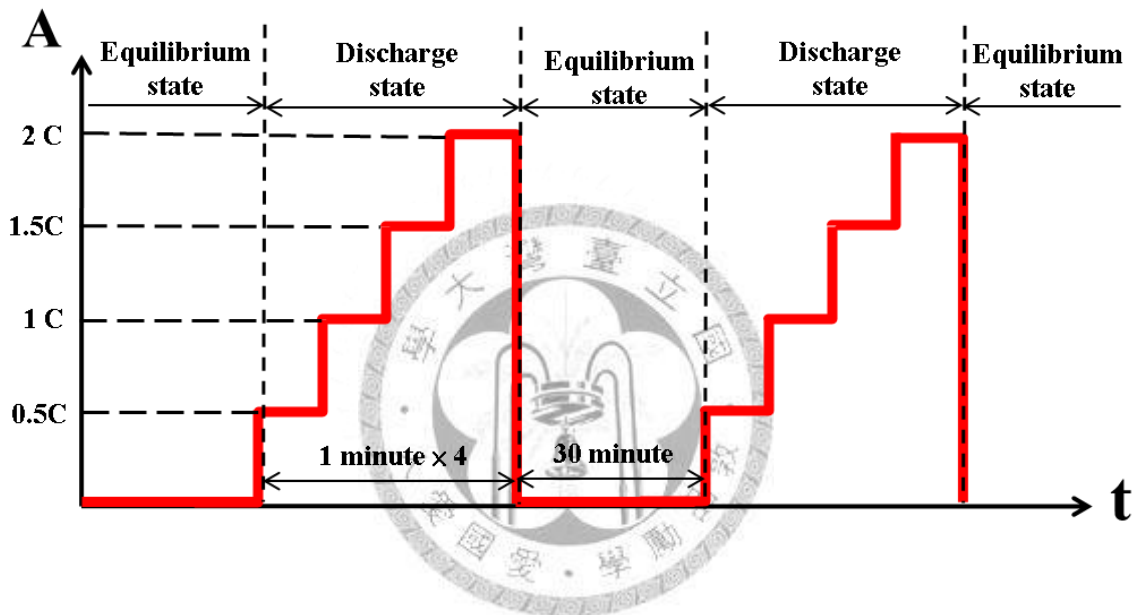


圖 27 變電流放電對時間圖

此部分測試主要是驗證在複雜的放電條件下，本研究的 SoC 估算法是否依舊能正常運作，且是否可以保有較佳的精準度。由於定 C 數放電測試的放電環境過於單純，因此就算在該實驗條件下本研究的演算法有較高的 SoC 估測精準度，也無法證明在實車應用時依舊可以有較好的表現。所以需要進行較多變動條件的變 C 數放電實驗，方能確實比較兩種演算法之間的差異性。



### 4.3 變溫度放電實驗

為了可以確實比較兩種 SoC 演算法的精準度，因此必須要盡量模擬實車測試時可能會對電池系統造成影響的各種放電條件。所以除了進行各種不同放電條件的測試之外，尚需針對電池芯在不同環境溫度下進行放電測試，並進行 SoC 的估算，以比較溫度對 SoC 量測精準度的影響。此部分實驗會將電池芯維持在 25°C、35°C、45°C 的環境之下，進行各種 C 數的定電流放電，並將兩種 SoC 演算法的估測結果進行比較。主要目的是測試本研究所提出的等效內阻修正法是否可以反應出溫度造成的影響並加以修正。

### 4.4 小結

在設計完整體架構、BMS 控制電路、程式撰寫，以及 data logger 撰寫之後，便可開始進行各儀器的組裝與連線工作。並開始依照預計的規畫進行各種不同狀況的電池放電實驗。以測試本演算法的精準度。





# 第五章 單電池芯實測結果分析

本章節主要是針對前一章所提出的各種定 C 數放電實驗、變 C 數放電實驗與變溫度放電實驗的結果進行說明與分析，並比較庫倫積分法與本研究的等效內阻修正法之間的精準度差異性。

## 5.1 定 C 數放電實驗結果

如前一章所述，定 C 數放電實驗的主要目的是先屏除其他可能會影響電池放電效率的要素，以較單純的放電環境比較兩種不同 SoC 演算法之間的精準度差異性。兩種 SoC 估測法的比較方式是以電池芯容量 10% 左右為一個循環點，每到一個循環點時會對電池芯靜置 30 分鐘。當靜置結束後便會使用電池的開路電壓對照 SoC vs. EMF 曲線，查出目前電池芯實際的 SoC 值。然後將 SoC 估測法的結果減去查表得出的實際 SoC 值，便可推算出其誤差值。

以下是針對定 0.5C、定 1C、定 1.5C、定 2C 這四種放電循環的實驗結果進行分析。



### 5.1.1 定 0.5C 放電

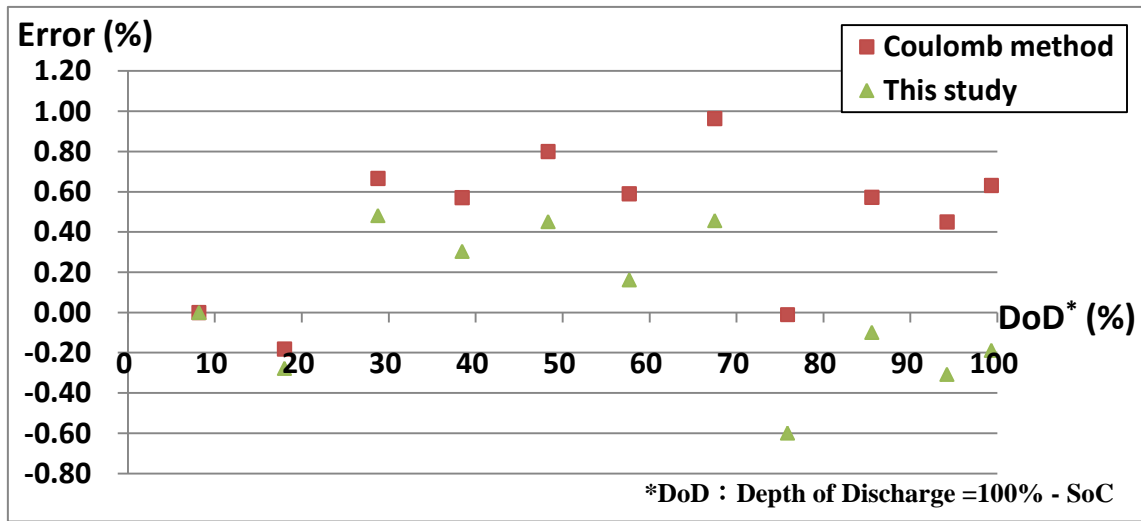


圖 28 0.5C 放電 SoC 估算誤差比較

上圖是電池芯於 0.5C 放電實驗中的 SoC 值估算誤差狀況。可看出大部分的時間庫倫積分法所估算出的數值是高於實際 SoC 值。而加入等效內阻修正後，誤差值有所降低，但在低放電 C 數的狀況下此誤差並不明顯。表 9 是上圖各點的數據。

表 9 定 0.5C 放電實驗誤差數據表

SOC <sub>table</sub>	SOC <sub>coulomb</sub>	Error	SOC <sub>this research</sub>	Error
91.83	91.83	0.00	91.83	0.00
82.00	81.82	-0.18	81.72	-0.28
71.25	71.92	0.67	71.73	0.48
61.56	62.13	0.57	61.86	0.30
51.67	52.47	0.80	52.12	0.45
42.33	42.92	0.59	42.49	0.16
32.50	33.46	0.96	32.96	0.46
24.13	24.12	-0.01	23.53	-0.60
14.43	15.00	0.57	14.33	-0.10
5.79	6.24	0.45	5.48	-0.31
0.68	1.31	0.63	0.49	-0.19
RMS value		<b>0.58</b>		<b>0.35</b>

Unit : %

### 5.1.2 定 1C 放電

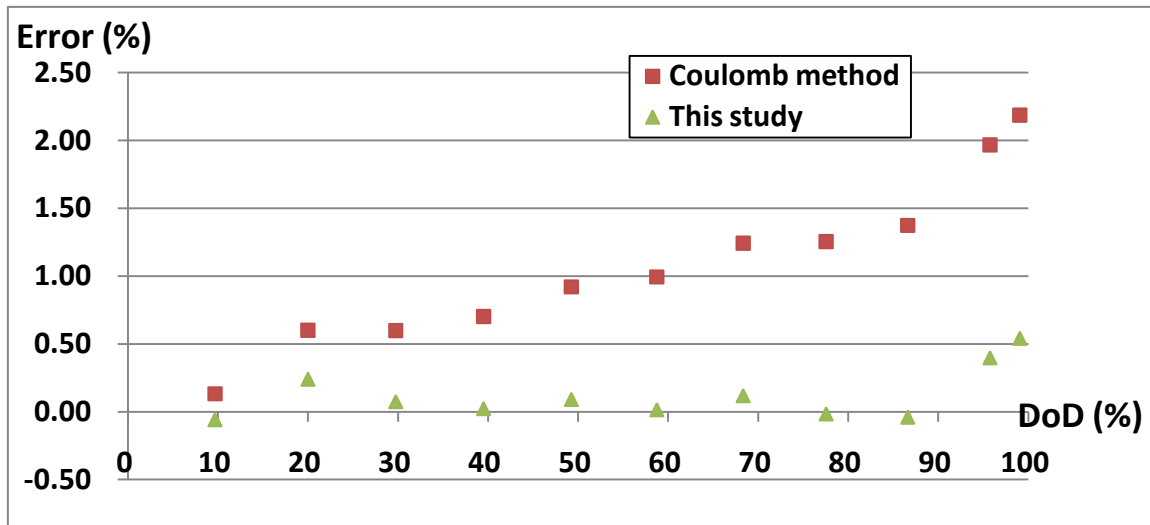


圖 29 1C 放電 SoC 估算誤差比較

上圖是 1C 的放電誤差狀況。在此可以明顯看出庫倫積分法的誤差值呈一穩定的斜率增加，表示誤差值是以近乎定值的方式進行增加。而在加上本研究的等效內阻修正法之後，便可有效降低誤差值。表 10 是上圖各點的數據。

表 10 定 1C 放電實驗誤差數據表

SOC <sub>table</sub>	SOC <sub>coulomb</sub>	Error	SOC <sub>this research</sub>	Error
90.33	90.46	0.13	90.27	-0.06
80.00	80.60	0.60	80.24	0.24
70.25	70.85	0.60	70.32	0.07
60.50	61.20	0.70	60.52	0.02
50.75	51.67	0.92	50.84	0.09
41.25	42.24	0.99	41.27	0.02
31.67	32.91	1.24	31.79	0.12
22.45	23.70	1.25	22.43	-0.02
13.38	14.75	1.37	13.34	-0.04
4.25	6.22	1.97	4.65	0.40
0.94	3.13	2.19	1.48	0.54
RMS value		<b>1.23</b>		<b>0.22</b>

Unit : %

### 5.1.3 定 1.5C 放電

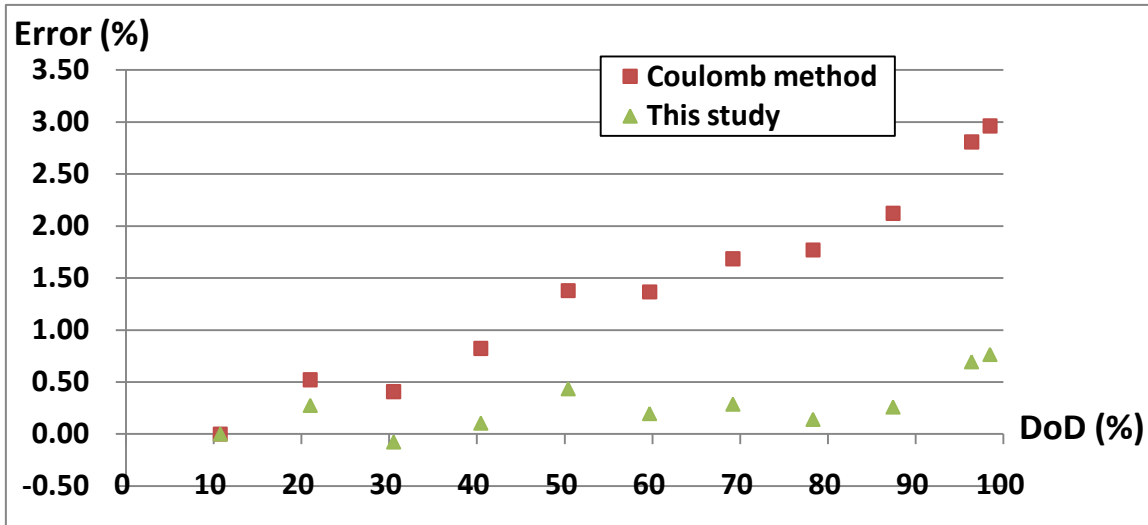


圖 30 1.5C 放電 SoC 估算誤差比較

上圖是 1.5C 的放電誤差狀況。庫倫積分法的誤差變化與 1C 放電時相似，但其誤差值有明顯的增加。而等效內阻的修正法一樣能反應此變化，有項降低其誤差值。表 11 是上圖各點的數據。

表 11 定 1.5C 放電實驗誤差數據表

SOC <sub>table</sub>	SOC <sub>coulomb</sub>	Error	SOC <sub>this research</sub>	Error
89.25	89.25	0.00	89.25	0.00
79.00	79.52	0.52	79.28	0.28
69.50	69.91	0.41	69.42	-0.08
59.56	60.38	0.82	59.66	0.10
49.60	50.98	1.38	50.04	0.44
40.33	41.70	1.37	40.53	0.20
30.83	32.52	1.69	31.12	0.29
21.70	23.47	1.77	21.84	0.14
12.58	14.70	2.12	12.84	0.26
3.63	6.44	2.81	4.33	0.70
1.53	4.49	2.96	2.30	0.77
RMS value		<b>1.71</b>		<b>0.38</b>

Unit : %

### 5.1.4 定 2C 放電

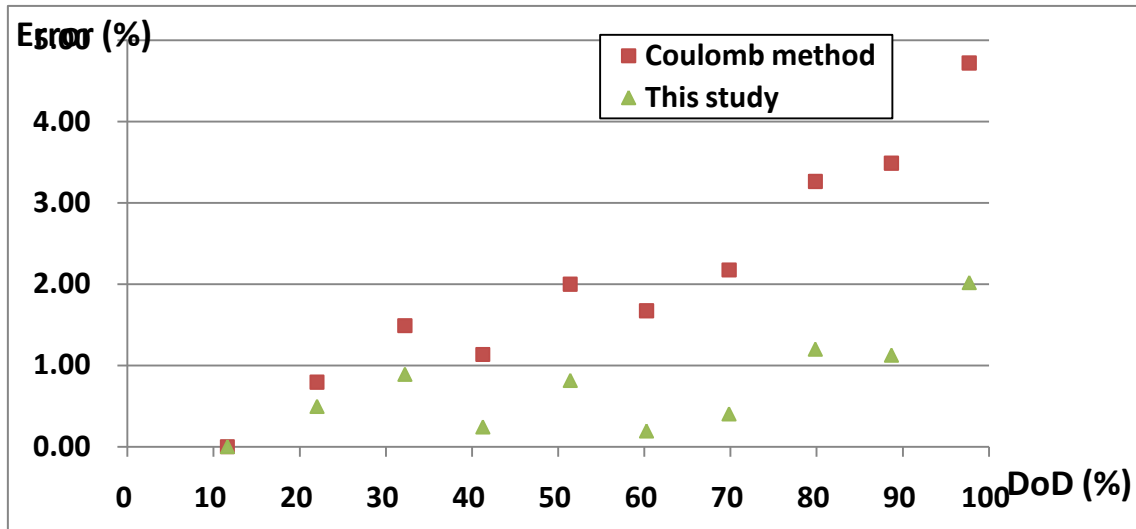


圖 31 2C 放電 SoC 估算誤差比較

上圖是 2C 放電的誤差變化圖。由圖上可以看出庫倫法於 2C 放電時誤差大幅增加，最後誤差值甚至達到接近 5% 左右。而本研究的修正法則可將大部分時間的誤差值限制在 1% 以下，有效增加 SoC 的量測精度。表 12 是上圖各點的數據。

表 12 定 2C 放電實驗誤差數據表

SOC <sub>table</sub>	SOC <sub>coulomb</sub>	Error	SOC <sub>this research</sub>	Error
88.40	88.40	0.00	88.40	0.00
78.00	78.79	0.79	78.49	0.49
67.80	69.29	1.49	68.69	0.89
58.75	59.88	1.13	58.99	0.24
48.60	50.60	2.00	49.41	0.81
39.75	41.42	1.67	39.94	0.19
30.17	32.34	2.17	30.57	0.40
20.15	23.41	3.26	21.35	1.20
11.31	14.80	3.49	12.43	1.12
2.28	7.00	4.72	4.30	2.02
RMS value		<b>2.46</b>		<b>0.93</b>

Unit : %

### 5.1.5 定 C 數放電結果分析

在將各放電 C 數下的誤差值列表(見表 13)比較後，可以發現原本庫倫積分法的誤差值會隨著放電 C 數的增大而明顯的增加，且在 1C 放電以上的狀況，其誤差值會高於 1% 以上。而在接近電池放電結束時，更可以明顯看出其誤差值隨著放電 C 數的增加。這證明了由於庫倫積分法是使用連續積分進行疊代運算，因此一旦於計算過程中發生誤差現象，此數值會被保留到下一次運算循環內。在計算最後會因這一連串的誤差沒有被修正，造成 SoC 的估算結果與查表得出的實際值會有極大的落差。

表 13 各放電 C 數下的誤差 RMS 值

SoC indication method	0.5 C	1 C	1.5 C	2 C
Coulomb method	0.55	1.18	1.63	2.35
This study	<b>0.33</b>	<b>0.21</b>	<b>0.36</b>	<b>0.89</b>

Unit : %

而本研究所提出的等效內阻修正法則可以有效改善此問題。由表 13 可看出，等效內阻修正法的誤差值明顯低於原先的庫倫積分法，於各種放電狀況下，其估算出來的誤差值皆可低於 1% 之內。主要是因為在進行疊代運算時，使用等效內阻可以針對各循環的損耗值進行估算與修正，降低每次計算的誤差值，因此可以有效減少整體誤差的累積。

但在進行定電流放電時發現一項問題：當電池芯的 SoC 低於 10% 以後，本研究的等效內阻修正效果會下降，造成誤差值上升。此現象主要是因為定電流放電是以方波的方式進行循環放電。但依照演算法的等效內阻估算方式，必須要在電流發生變化的瞬間方能進行等效內阻的計算與更新。而鋰電池在接近放電結束時，其等效內阻會急速上升，造成放電效率的下降。但在進行定電流放電實驗時，在



開始放電後便無法進行等效內阻的重新計算與數值更新。因此無法正確反應此現象，而造成放電耗能的低估。

## 5.2 變 C 數放電實驗結果

在進行過定 C 數放電實驗後，可以發現在單純的放電條件下，本研究的演算法的確可以有效增加 SoC 估算的準確性。因此下一步便是以較複雜的階梯狀放電進行變 C 數放電實驗，以確認本研究的等效內阻估測法可以用在較複雜的放電環境下。

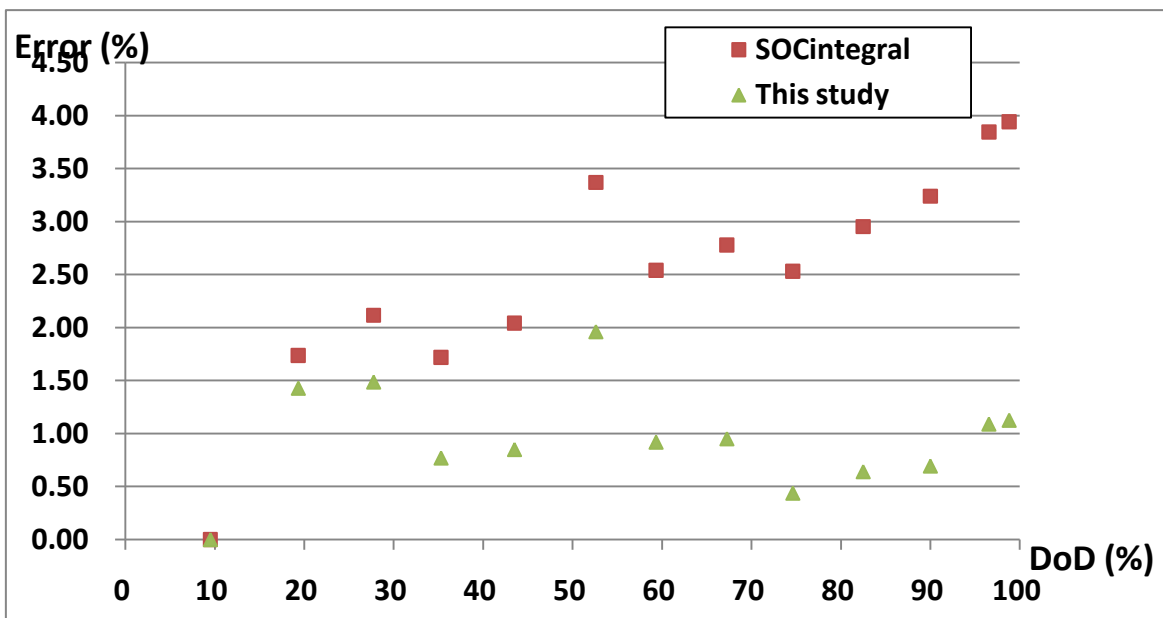


圖 32 變 C 放電 SoC 估算誤差比較

上圖是變 C 數實驗的結果，可以看出在變動 C 數的狀況下，兩種 SoC 估測法的誤差變化較不規律，而且誤差值也比單純的定 C 數放電高出許多。而庫倫積分法一樣會因誤差累積造成最後的誤差值遠高於實際值。且其整體誤差的 RMS 值為 2.72%(見表 14)，甚至高於 2C 定電流放電的 2.35%。這證明庫倫積分法不易應用於此種變動輸出的狀況。而本研究的估測法在此種放電環境下依舊可以有較高的精準度。此外，由於進行階梯狀放電時，可在放電循環中重新進行等效內阻的估

算與更新，因此可以確實反應出在電池接近放電結束時的內阻變化。所以在接近放電結束時，並不會有像先前定 C 數放電時誤差值明顯增大的現象發生。證明只要於放電途中確實針對電池的等效內阻值進行更新，便可以有效降低此現象。表 14 是上圖各點的數據。

表 14 變 C 數放電實驗誤差數據表

SOC <sub>table</sub>	SOC <sub>coulomb</sub>	Error	SOC <sub>this research</sub>	Error
90.50	90.50	0.00	90.50	0.00
80.67	82.41	1.74	82.10	1.43
72.25	74.37	2.12	73.74	1.49
64.71	66.43	1.72	65.48	0.77
56.50	58.54	2.04	57.35	0.85
47.40	50.77	3.37	49.36	1.96
40.67	43.21	2.54	41.59	0.92
32.75	35.53	2.78	33.70	0.95
25.38	27.91	2.53	25.82	0.44
17.51	20.46	2.95	18.15	0.64
10.00	13.24	3.24	10.69	0.69
3.46	7.31	3.85	4.55	1.09
1.19	5.13	3.94	2.32	1.13
RMS value		<b>2.72</b>		<b>1.06</b>

Unit : %

### 5.3 變溫度放電實驗結果

如上一章節所述，此部分實驗是先將電池芯與周邊環境溫度加溫至待測溫度後進行定電流放電測試，以比較溫度對兩種演算法的影響，以及本研究是否依舊能有較高的精準度。待測試溫度有 25°C、35°C、45°C 三種，並且會於各溫度進行 4 種 C 數的定電流放電測試。以下是實驗數據與結果整理。

### 5.3.1 定 0.5C 變溫度放電

#### 0.5C 放電@25°C

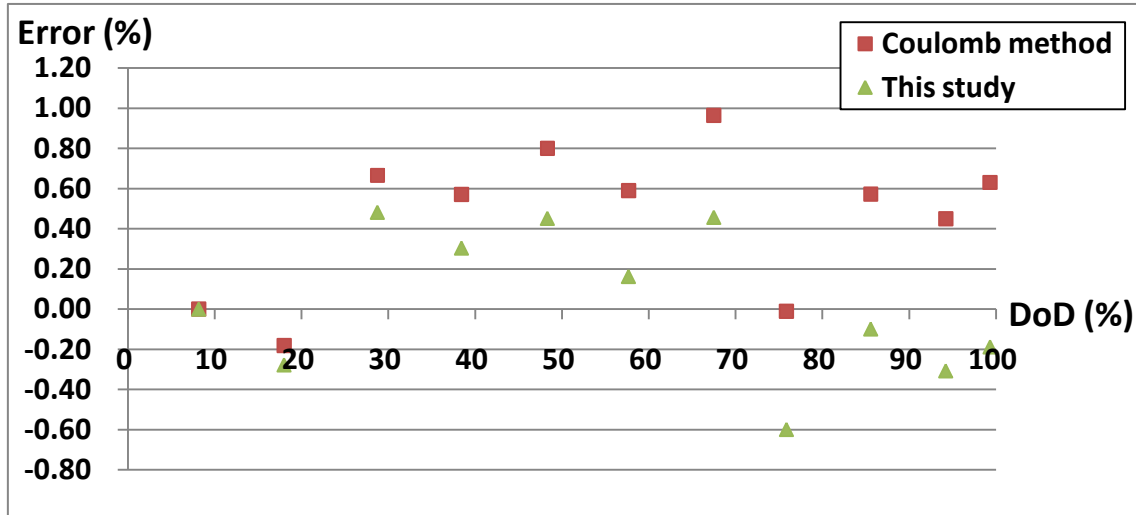


圖 33 0.5C 放電@25°C SoC 估算誤差比較

上圖是 0.5C 放電@25°C 的 SoC 值估算誤差狀況。數值同先前的定 C 數放電。

表 15 定 0.5C 放電@25°C 實驗誤差數據表

SOC <sub>table</sub>	SOC <sub>coulomb</sub>	Error	SOC <sub>this research</sub>	Error
91.83	91.83	0.00	91.83	0.00
82.00	81.82	-0.18	81.72	-0.28
71.25	71.92	0.67	71.73	0.48
61.56	62.13	0.57	61.86	0.30
51.67	52.47	0.80	52.12	0.45
42.33	42.92	0.59	42.49	0.16
32.50	33.46	0.96	32.96	0.46
24.13	24.12	-0.01	23.53	-0.60
14.43	15.00	0.57	14.33	-0.10
5.79	6.24	0.45	5.48	-0.31
0.68	1.31	0.63	0.49	-0.19
RMS value		<b>0.58</b>		<b>0.35</b>

Unit : %

### 0.5C 放電@35°C

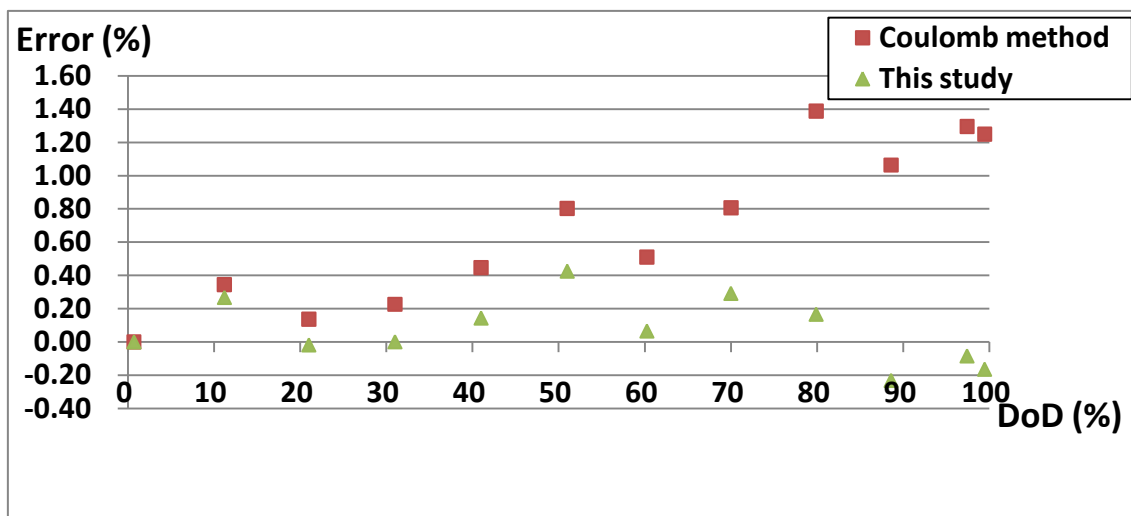


圖 34 0.5C 放電@35°C SoC 估算誤差比較

上圖是 0.5C 放電@35°C 的 SoC 值估算誤差狀況。可看出庫倫積分法的誤差值明顯增加。

表 16 定 0.5C 放電@35°C 實驗誤差數據表

SOC <sub>table</sub>	SOC <sub>coulomb</sub>	Error	SOC <sub>this research</sub>	Error
99.30	99.30	0.00	99.30	0.00
88.80	89.14	0.34	89.07	0.27
79.00	79.14	0.14	78.98	-0.02
69.00	69.23	0.23	69.00	0.00
59.00	59.45	0.45	59.14	0.14
49.00	49.80	0.80	49.43	0.43
39.75	40.26	0.51	39.82	0.07
30.00	30.81	0.81	30.29	0.29
20.10	21.49	1.39	20.27	0.17
11.40	12.46	1.06	11.17	-0.23
2.58	3.88	1.30	2.50	-0.08
0.54	1.79	1.25	0.38	-0.16
RMS value		<b>0.83</b>		<b>0.20</b>

Unit : %

### 0.5C 放電@45°C

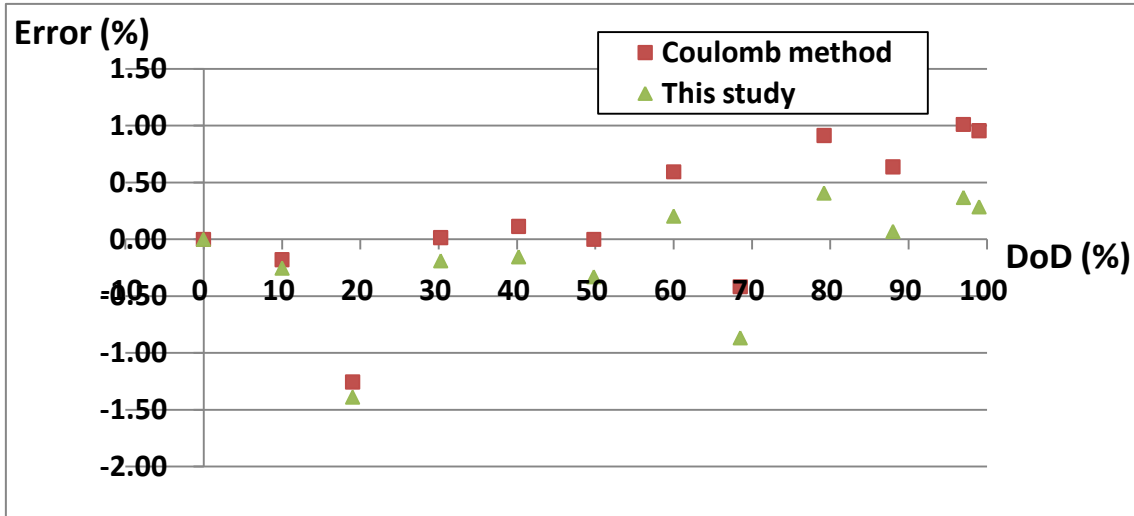


圖 35 0.5C 放電@45°C SoC 估算誤差比較

上圖是0.5C放電@45°C的SoC值估算誤差狀況。兩種演算法的誤差值皆上升，且呈同一趨勢變動。

表 17 定 0.5C 放電@45°C 實驗誤差數據表

SOC <sub>table</sub>	SOC <sub>coulomb</sub>	Error	SOC <sub>this research</sub>	Error
100.05	100.05	0.00	100.05	0.00
90.00	89.82	-0.18	89.75	-0.25
81.00	79.75	-1.25	79.61	-1.39
69.75	69.77	0.02	69.56	-0.19
59.80	59.91	0.11	59.65	-0.15
50.20	50.20	0.00	49.87	-0.33
40.00	40.59	0.59	40.20	0.20
31.50	31.08	-0.42	30.63	-0.87
20.80	21.71	0.91	21.21	0.41
12.00	12.64	0.64	12.07	0.07
3.00	4.01	1.01	3.37	0.37
1.00	1.96	0.96	1.29	0.29
<b>RMS value</b>		<b>0.67</b>		<b>0.53</b>

Unit : %

### 0.5C 放電數據整理

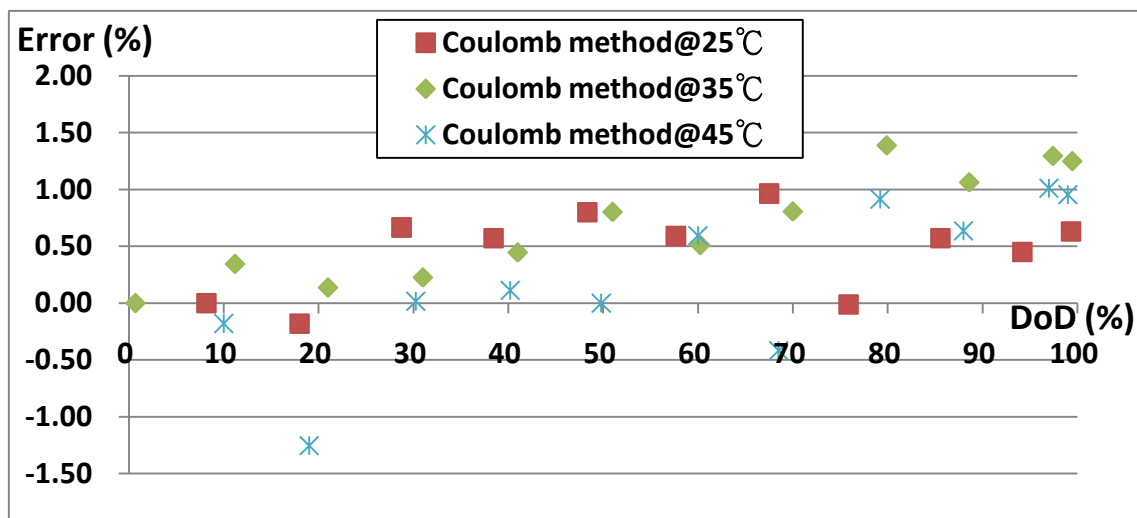


圖 36 庫倫積分法 0.5C 放電 SoC 估算誤差比較

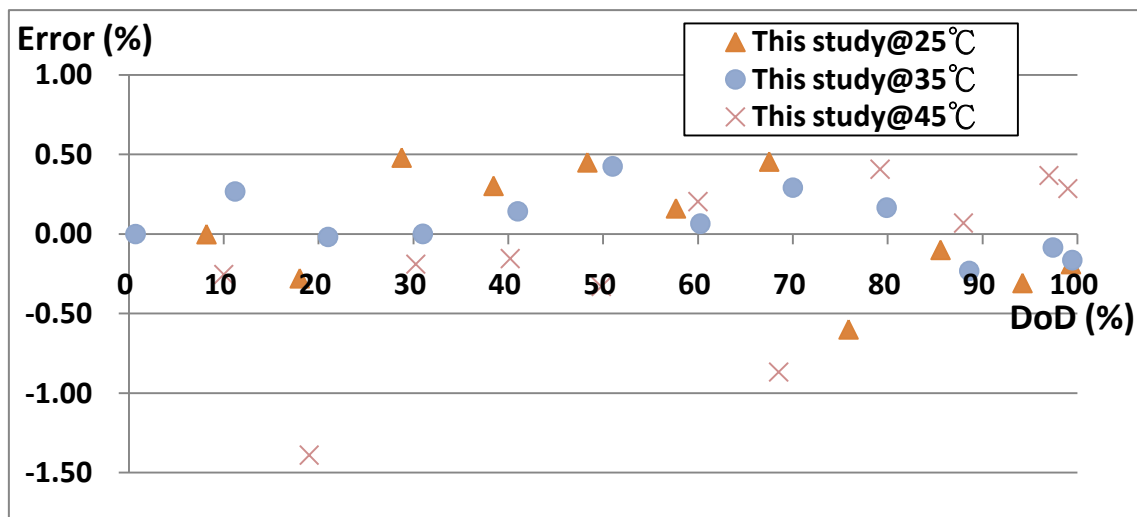


圖 37 本研究 0.5C 放電 SoC 估算誤差比較

表 18 0.5C 放電各溫度實驗誤差數據表

SoC indication method	25°C	35°C	45°C
Coulomb method error (RMS value)	0.58	0.83	0.67
This study error (RMS value)	0.35	0.2	0.53

Unit : %

從以上數據可看出庫倫積分法在各溫度之下誤差成長趨勢相似，可得知在 0.5C 的放電狀況下，溫度的提升對 SoC 誤差影響有限。而且在低放電 C 數時庫倫積分法誤差值不大，因此兩種演算法的差距並不明顯。但就整體誤差值以及對放電截止後 SoC 的準確度而言，本研究依舊可以有較高的準確性。

### 5.3.2 定 1C 變溫度放電

#### 1C 放電@25°C

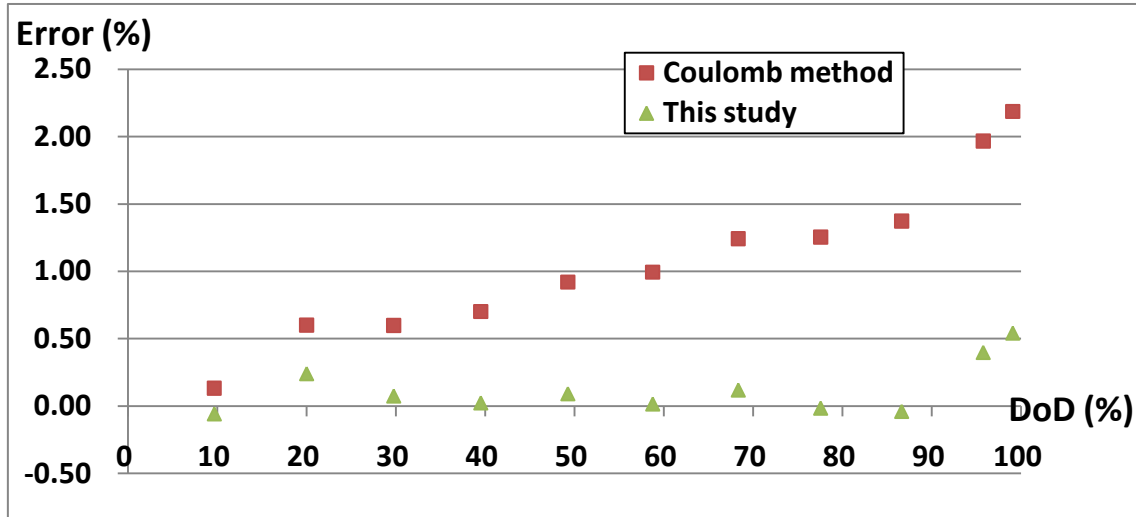


圖 38 1C 放電@25°C SoC 估算誤差比較

上圖是 1C 放電@25°C 的 SoC 值估算誤差狀況。數值同先前的定 C 數放電。

表 19 定 1C 放電@25°C 實驗誤差數據表

SOC <sub>table</sub>	SOC <sub>coulomb</sub>	Error	SOC <sub>this research</sub>	Error
90.33	90.46	0.13	90.27	-0.06
80.00	80.60	0.60	80.24	0.24
70.25	70.85	0.60	70.32	0.07
60.50	61.20	0.70	60.52	0.02
50.75	51.67	0.92	50.84	0.09
41.25	42.24	0.99	41.27	0.02
31.67	32.91	1.24	31.79	0.12
22.45	23.70	1.25	22.43	-0.02
13.38	14.75	1.37	13.34	-0.04
4.25	6.22	1.97	4.65	0.40
0.94	3.13	2.19	1.48	0.54
RMS value		<b>1.23</b>		<b>0.22</b>

Unit : %

### 1C 放電@35°C

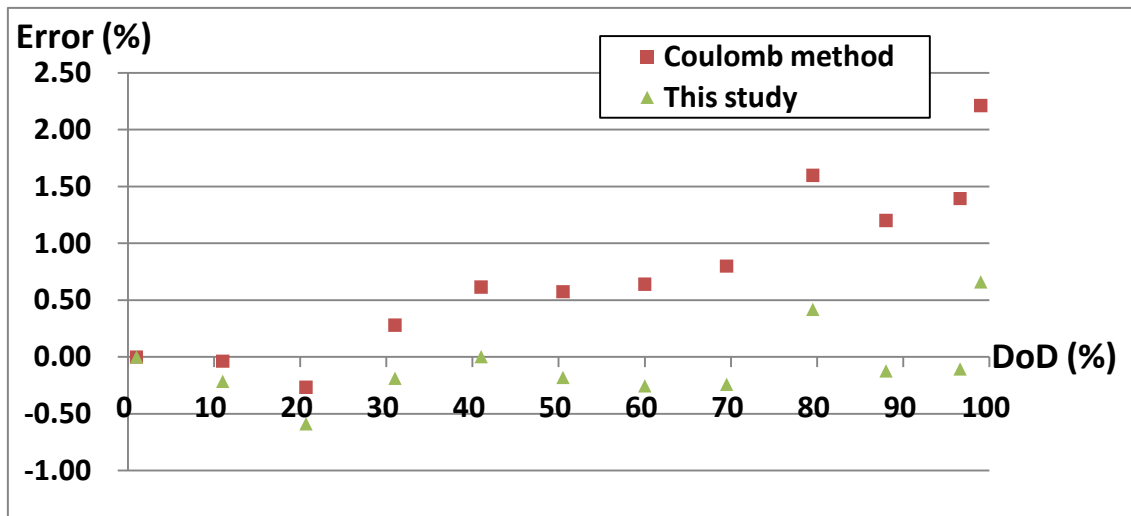


圖 39 1C 放電@35°C SoC 估算誤差比較

上圖是 1C 放電@35°C 的 SoC 值估算誤差狀況。兩種演算法的估測結果與先前 25°C 時相似。

表 20 定 1C 放電@35°C 實驗誤差數據表

SOC <sub>table</sub>	SOC <sub>coulomb</sub>	Error	SOC <sub>this research</sub>	Error
99.00	99.00	0.00	99.00	0.00
89.00	88.96	-0.04	88.79	-0.21
79.33	79.06	-0.27	78.74	-0.59
69.00	69.28	0.28	68.81	-0.19
59.00	59.62	0.62	59.00	0.00
49.50	50.07	0.57	49.32	-0.18
40.00	40.64	0.64	39.75	-0.25
30.50	31.30	0.80	30.26	-0.24
20.50	22.10	1.60	20.92	0.42
12.00	13.20	1.20	11.88	-0.12
3.40	4.79	1.39	3.29	-0.11
1.00	3.21	2.21	1.66	0.66
<b>RMS value</b>		<b>1.03</b>		<b>0.32</b>

Unit : %



## 1C 放電@45°C

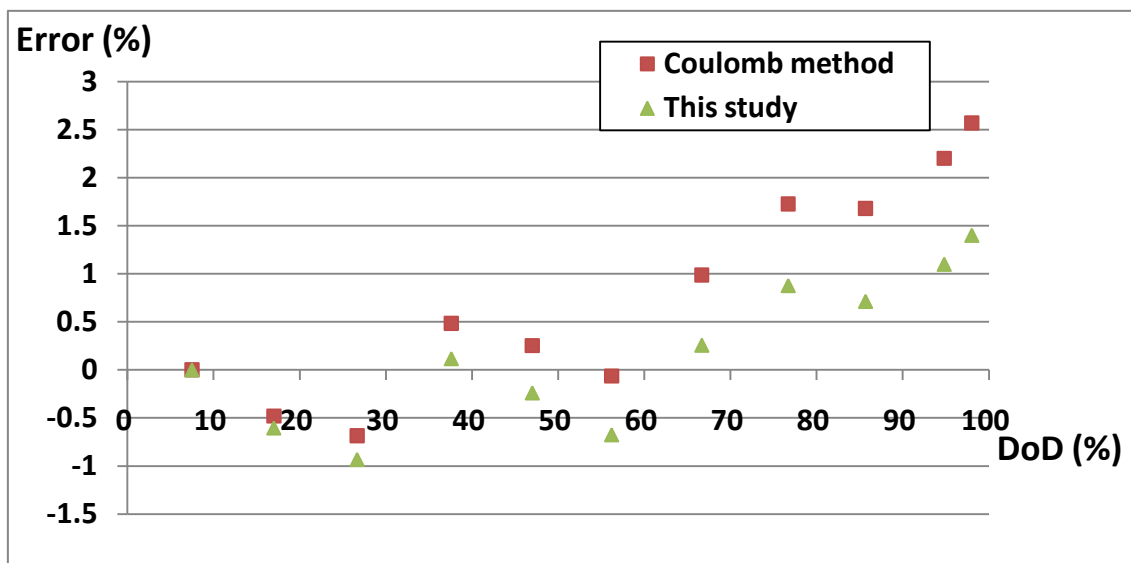


圖 40 1C 放電@45°C SoC 估算誤差比較

上圖是 1C 放電@45°C 的 SoC 值估算誤差狀況。相較於先前的放電狀況，兩種演算法的誤差值大幅上升，且誤差變動趨勢十分相似。

表 21 定 1C 放電@45°C 實驗誤差數據表

SOC <sub>table</sub>	SOC <sub>coulomb</sub>	Error	SOC <sub>this research</sub>	Error
92.50	92.50	0.00	92.50	0.00
83.00	82.52	-0.48	82.40	-0.60
73.33	72.64	-0.69	72.40	-0.93
62.40	62.88	0.48	62.52	0.12
53.00	53.25	0.25	52.76	-0.24
43.80	43.74	-0.06	43.12	-0.68
33.33	34.32	0.99	33.59	0.26
23.30	25.03	1.73	24.18	0.88
14.33	16.01	1.68	15.04	0.71
5.20	7.40	2.20	6.30	1.10
2.00	4.57	2.57	3.40	1.40
<b>RMS value</b>		<b>1.32</b>		<b>0.76</b>

Unit : %

## 1C 放電數據整理

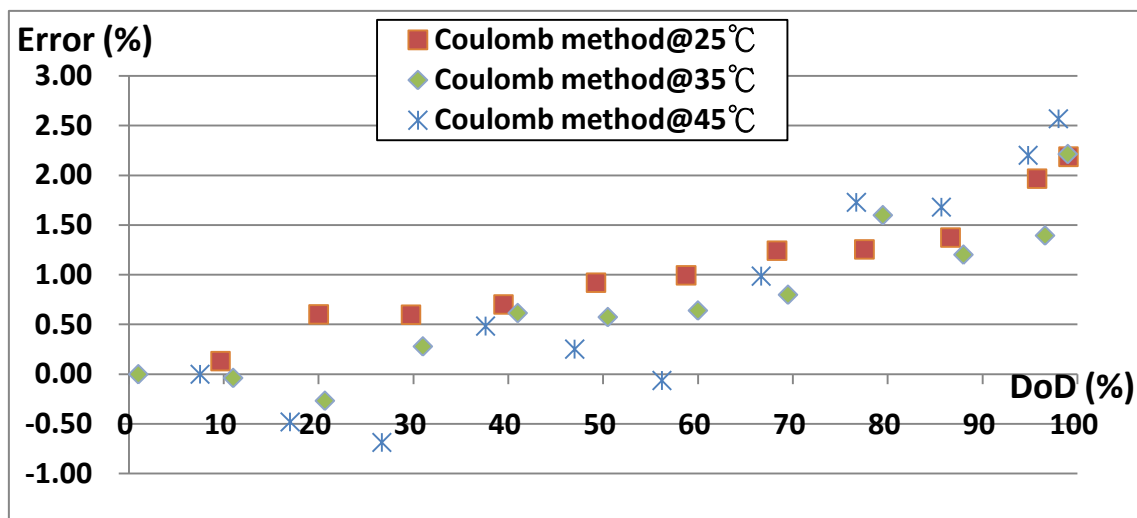


圖 41 庫倫積分法 1C 放電 SoC 估算誤差比較

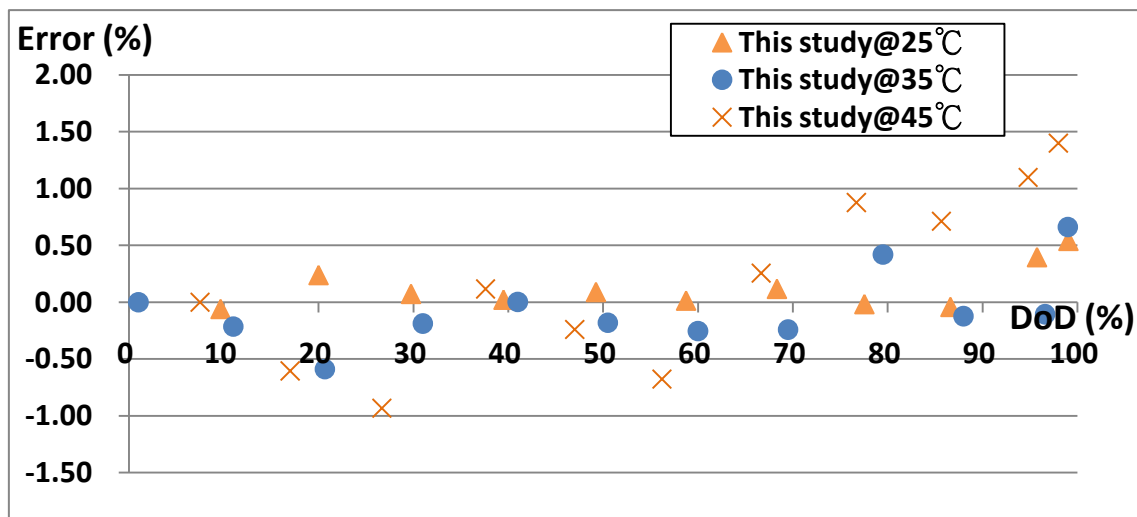


圖 42 本研究 1C 放電 SoC 估算誤差比較

表 22 1C 放電各溫度實驗誤差數據表

SoC indication method	25°C	35°C	45°C
Coulomb method error (RMS value)	1.23	1.03	1.32
This study error (RMS value)	0.22	0.2	0.76

Unit : %

從以上數據可看出庫倫積分法在各溫度之下誤差成長趨勢相似，此現象與 0.5C 的放電狀況相似。而本研究的量測法在前兩項實驗表現較佳，但於 45°C 時誤差值大幅增加。從其誤差變動趨勢與庫倫積分法相似這點可以看出此為 SoC vs. EMF 的表於 45°C 時部分變形，造成基準點變動的結果。

### 5.3.3 定 1.5C 變溫度放電

#### 1.5C 放電@25°C

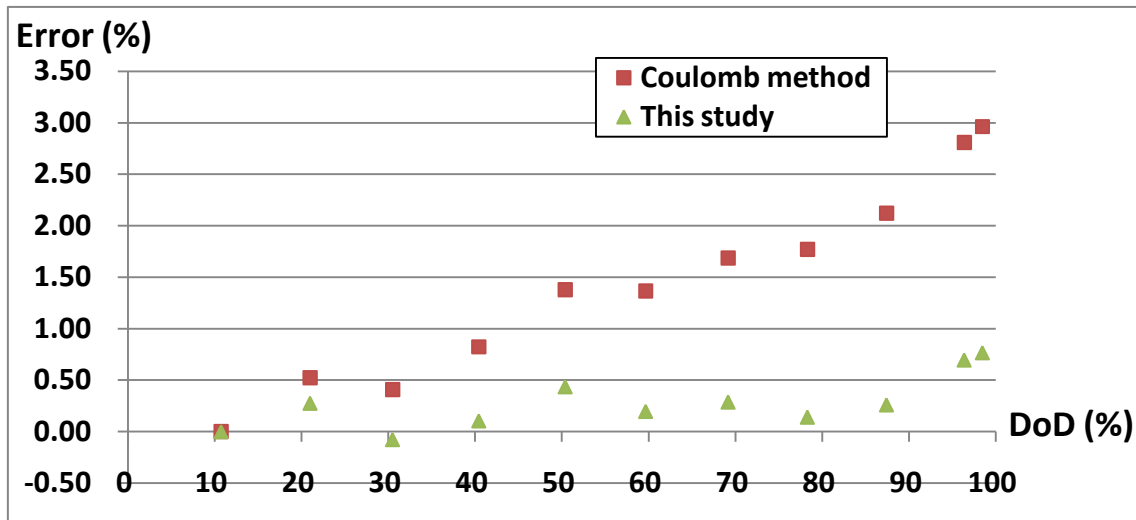


圖 43 1.5C 放電@25°C SoC 估算誤差比較

上圖是 1.5C 放電@25°C 的 SoC 值估算誤差狀況。數值同先前的定 C 數放電。

表 23 定 1.5C 放電@25°C 實驗誤差數據表

SOC <sub>table</sub>	SOC <sub>coulomb</sub>	Error	SOC <sub>this research</sub>	Error
89.25	89.25	0.00	89.25	0.00
79.00	79.52	0.52	79.28	0.28
69.50	69.91	0.41	69.42	-0.08
59.56	60.38	0.82	59.66	0.10
49.60	50.98	1.38	50.04	0.44
40.33	41.70	1.37	40.53	0.20
30.83	32.52	1.69	31.12	0.29
21.70	23.47	1.77	21.84	0.14
12.58	14.70	2.12	12.84	0.26
3.63	6.44	2.81	4.33	0.70
1.53	4.49	2.96	2.30	0.77
RMS value		<b>1.71</b>		<b>0.38</b>

Unit : %

### 1.5C 放電@35°C

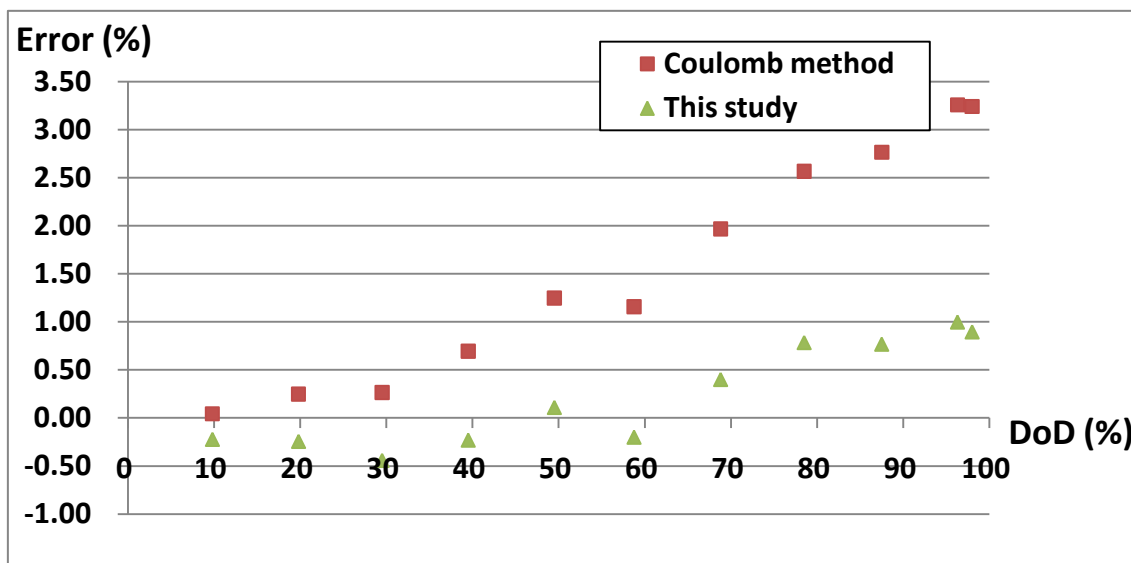


圖 44 1.5C 放電@35°C SoC 估算誤差比較

上圖是 1.5C 放電@35°C 的 SoC 值估算誤差狀況。

表 24 定 1.5C 放電@35°C 實驗誤差數據表

SOC <sub>table</sub>	SOC <sub>coulomb</sub>	Error	SOC <sub>this research</sub>	Error
100.20	100.20	0.00	100.20	0.00
90.20	90.24	0.04	89.98	-0.22
80.20	80.45	0.25	79.96	-0.24
70.50	70.76	0.26	70.06	-0.44
60.50	61.20	0.70	60.27	-0.23
50.50	51.75	1.25	50.61	0.11
41.25	42.41	1.16	41.05	-0.20
31.20	33.17	1.97	31.60	0.40
21.50	24.07	2.57	22.28	0.78
12.50	15.26	2.76	13.27	0.77
3.70	6.96	3.26	4.70	1.00
2.00	5.24	3.24	2.89	0.89
<b>RMS value</b>		<b>1.89</b>		<b>0.55</b>

Unit : %

### 1.5C 放電@45°C

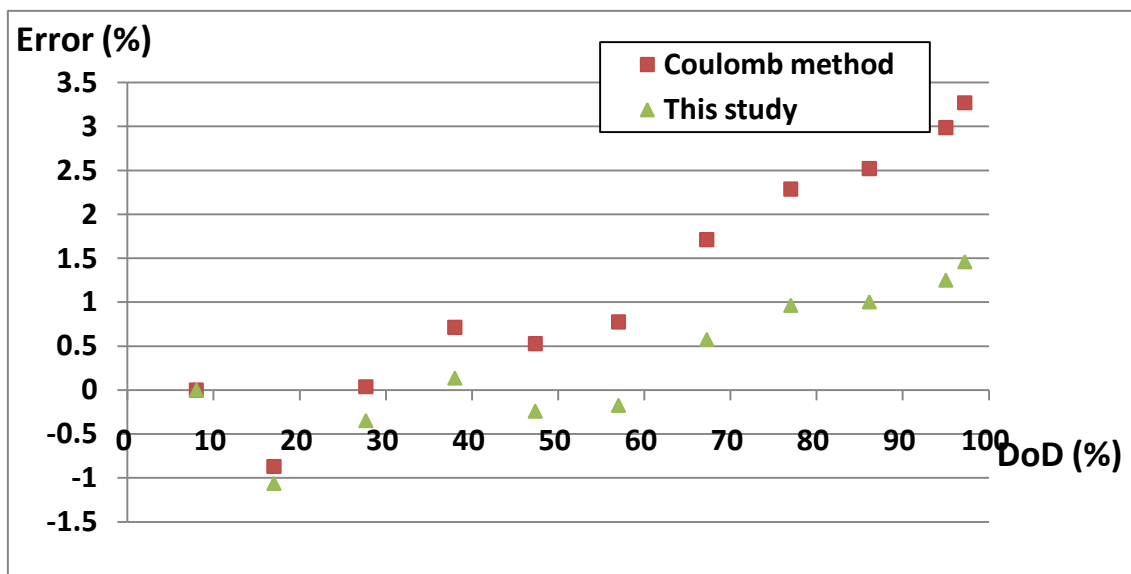


圖 45 1.5C 放電@45°C SoC 估算誤差比較

上圖是 1.5C 放電@45°C 的 SoC 值估算誤差狀況。相較於先前的放電狀況，兩種演算法的誤差值大幅上升，且誤差變動趨勢十分相似。

表 25 定 1.5C 放電@45°C 實驗誤差數據表

SOC <sub>table</sub>	SOC <sub>coulomb</sub>	Error	SOC <sub>this research</sub>	Error
92.00	92.00	0.00	92.00	0.00
83.00	82.13	-0.87	81.94	-1.06
72.33	72.37	0.04	71.98	-0.35
62.00	62.71	0.71	62.14	0.14
52.66	53.19	0.53	52.42	-0.24
43.00	43.78	0.78	42.83	-0.17
32.75	34.46	1.71	33.33	0.58
23.00	25.29	2.29	23.97	0.97
13.88	16.40	2.52	14.88	1.00
5.00	7.99	2.99	6.25	1.25
2.80	6.07	3.27	4.26	1.46
RMS value		<b>1.82</b>		<b>0.82</b>

Unit : %

### 1.5C 放電數據整理

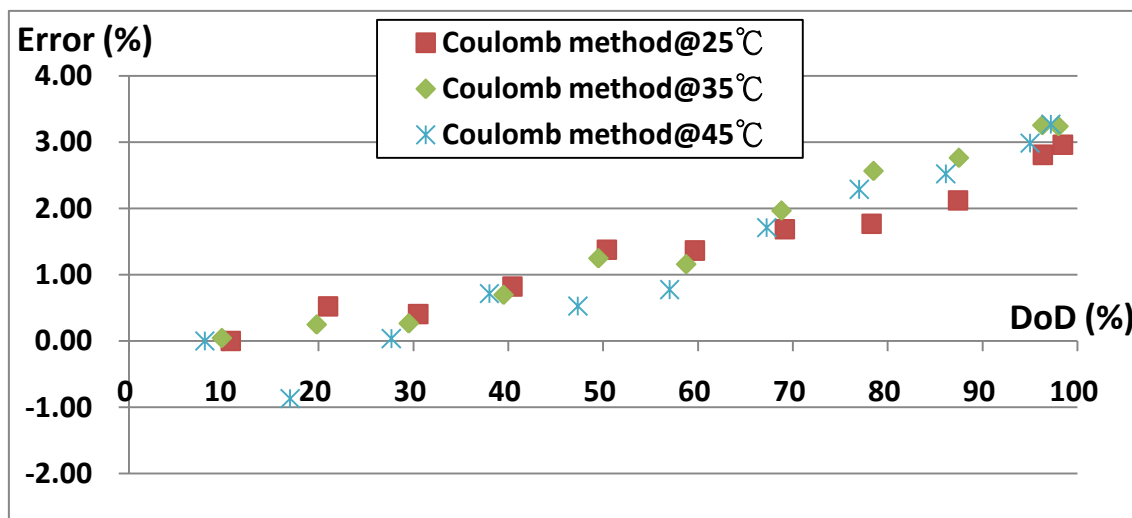


圖 46 庫倫積分法 1.5C 放電 SoC 估算誤差比較

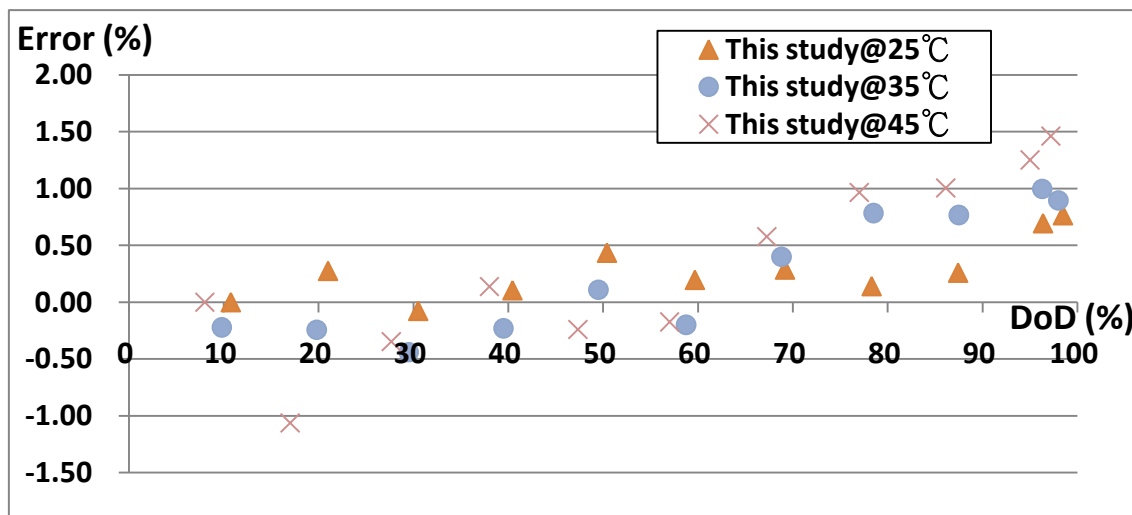


圖 47 本研究 1.5C 放電 SoC 估算誤差比較

表 26 1.5C 放電各溫度實驗誤差數據表

SoC indication method	25°C	35°C	45°C
Coulomb method error (RMS value)	1.71	1.89	1.82
This study error (RMS value)	0.38	0.55	0.82

Unit : %

庫倫積分法的部分於先前相似，在各溫度之下誤差成長趨勢相似。而本研究的結果也與 1C 實驗相似。而相較於庫倫積分法，本研究在整體精準度與放電終止值的估算依舊有較佳的表現。

### 5.3.4 定 2C 變溫度放電

#### 2C 放電@25°C

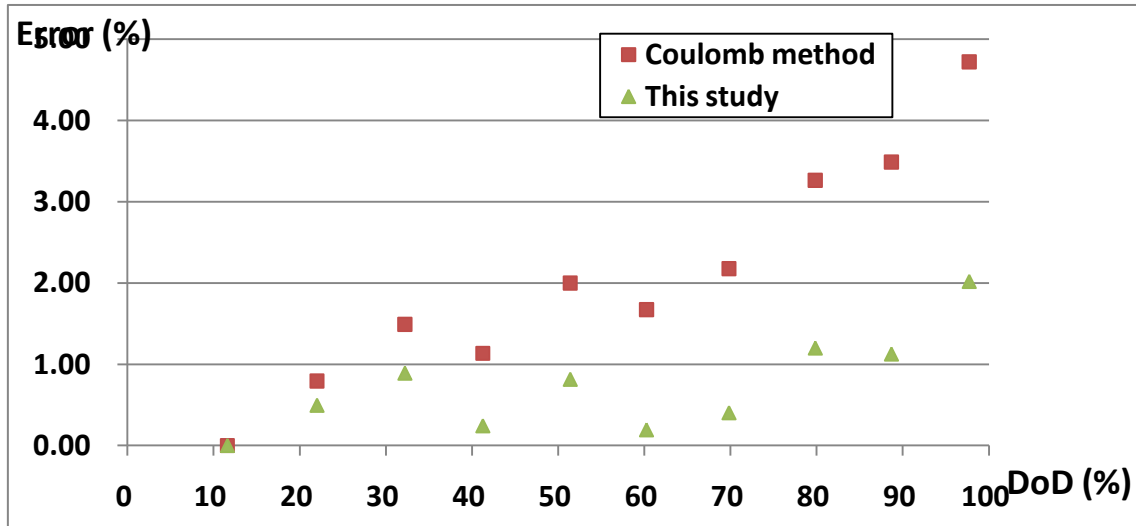


圖 48 2C 放電@25°C SoC 估算誤差比較

上圖是 2C 放電@25°C 的 SoC 值估算誤差狀況。數值同先前的定 C 數放電。

表 27 定 2C 放電@25°C 實驗誤差數據表

SOC <sub>table</sub>	SOC <sub>coulomb</sub>	Error	SOC <sub>this research</sub>	Error
88.40	88.40	0.00	88.40	0.00
78.00	78.79	0.79	78.49	0.49
67.80	69.29	1.49	68.69	0.89
58.75	59.88	1.13	58.99	0.24
48.60	50.60	2.00	49.41	0.81
39.75	41.42	1.67	39.94	0.19
30.17	32.34	2.17	30.57	0.40
20.15	23.41	3.26	21.35	1.20
11.31	14.80	3.49	12.43	1.12
2.28	7.00	4.72	4.30	2.02
<b>RMS value</b>		<b>2.46</b>		<b>0.93</b>

Unit : %

2C 放電@35°C

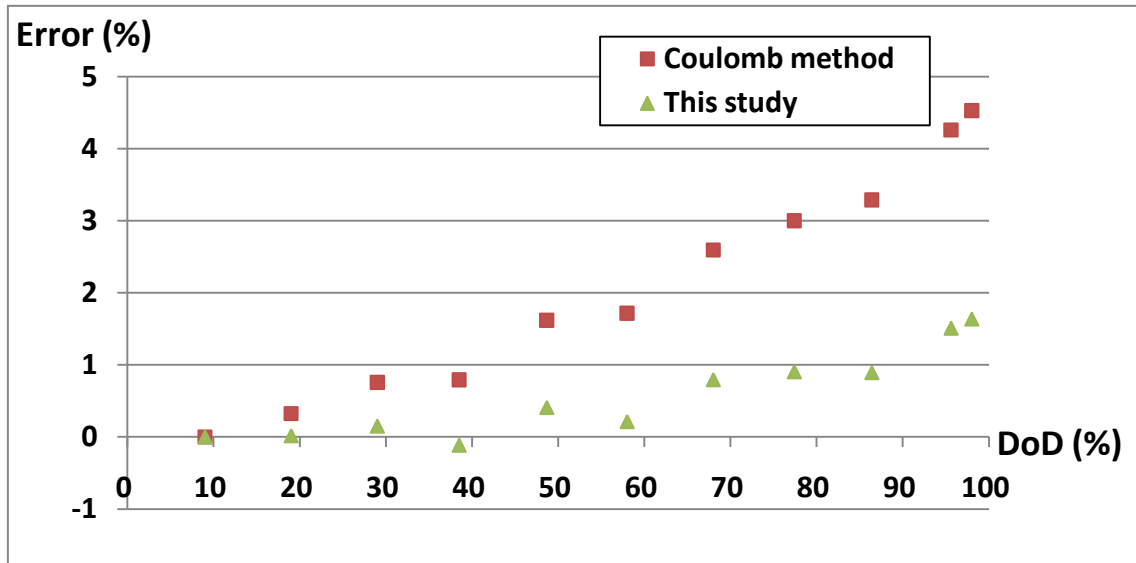


圖 49 2C 放電@35°C SoC 估算誤差比較

上圖是 2C 放電@35°C 的 SoC 值估算誤差狀況。兩種演算法的誤差成長趨勢與 25°C 十分相似，數值也相距不遠。

表 28 定 2C 放電@35°C 實驗誤差數據表

SOC <sub>table</sub>	SOC <sub>coulomb</sub>	Error	SOC <sub>this research</sub>	Error
91.00	91.00	0.00	91.00	0.00
81.00	81.32	0.32	81.02	0.02
71.00	71.76	0.76	71.15	0.15
61.50	62.29	0.79	61.38	-0.12
51.33	52.95	1.62	51.74	0.41
42.00	43.72	1.72	42.21	0.21
32.00	34.59	2.59	32.79	0.79
22.60	25.60	3.00	23.50	0.90
13.60	16.89	3.29	14.49	0.89
4.40	8.66	4.26	5.91	1.51
2.00	6.53	4.53	3.64	1.64
<b>RMS value</b>		<b>2.56</b>		<b>0.82</b>

Unit : %



## 2C 放電@45°C

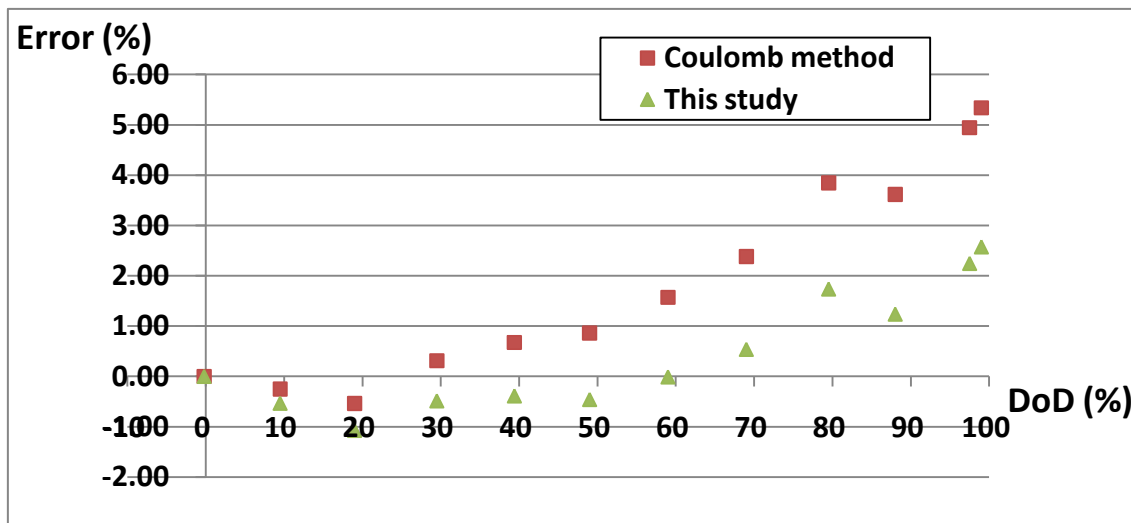


圖 50 2C 放電@45°C SoC 估算誤差比較

上圖是 2C 放電@45°C 的 SoC 值誤差。由於整體誤差值大幅增加，SoC 基準值偏移的現象較不明顯。但依舊造成本研究的誤差值上升。

表 29 定 2C 放電@45°C 實驗誤差數據表

SOC <sub>table</sub>	SOC <sub>coulomb</sub>	Error	SOC <sub>this research</sub>	Error
100.20	100.20	0.00	100.20	0.00
90.50	90.25	-0.25	89.97	-0.53
81.00	80.46	-0.54	79.93	-1.07
70.50	70.81	0.31	70.01	-0.49
60.60	61.27	0.67	60.21	-0.39
51.00	51.86	0.86	50.54	-0.46
41.00	42.57	1.57	40.99	-0.01
31.00	33.38	2.38	31.54	0.54
20.50	24.34	3.84	22.23	1.73
12.00	15.62	3.62	13.24	1.24
2.50	7.44	4.94	4.74	2.24
1.00	6.34	5.34	3.57	2.57
<b>RMS value</b>		<b>2.75</b>		<b>1.24</b>

Unit : %

## 2C 放電數據整理

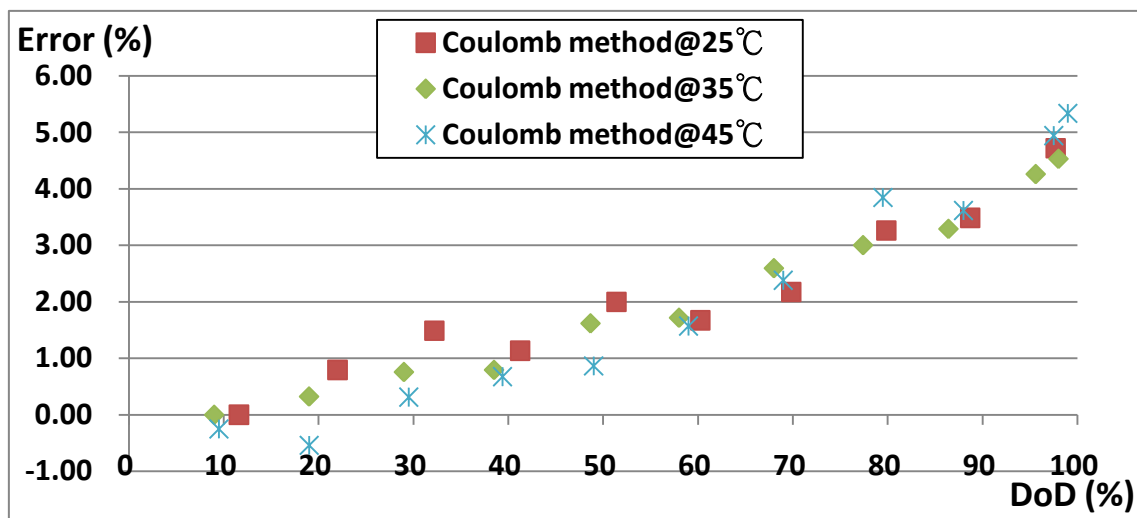


圖 51 庫倫積分法 2C 放電 SoC 估算誤差比較

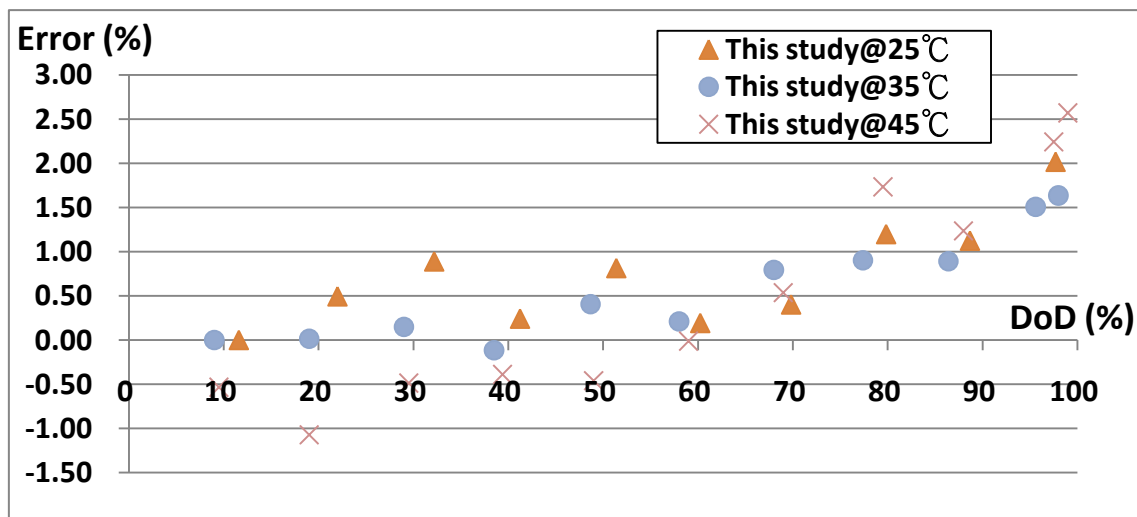


圖 52 本研究 2C 放電 SoC 估算誤差比較

表 30 2C 放電各溫度實驗誤差數據表

SoC indication method	25°C	35°C	45°C
Coulomb method error (RMS value)	2.46	2.56	2.75
This study error (RMS value)	0.93	0.82	1.24

Unit : %

庫倫積分法的誤差成長曲線十分一致，並不會因溫度而造成大幅度的改變。而本研究的誤差變化特徵也十分一致，但在 45°C 時的 SoC 曲線變動造成估算誤差增加的問題依舊十分明顯。而且在放電終點估算的問題與先前定 C 數放電相同，需要進行較頻繁的等效內阻值更新，方能增加其準確性。

### 5.3.5 變溫度放電實驗結果分析

在進行過各 C 數的放電實驗後，可以發現於庫倫積分法的部分其誤差變動與溫度的關聯性不高。而本研究的誤差變化狀況在 25°C 與 35°C 時相當接近，但是在 45°C 時會產生較大的誤差。主要原因是因為在進行變溫度放電實驗時，電池芯需要一直維持在設定的溫度下進行放電與靜置。而電池芯於 45°C 時，其 SoC vs. EMF 的曲線形狀會改變。因此當電池芯在 45°C 時進行查表法會造成偏差。而造成兩種演算法的誤差值會隨著此偏差而跳動，比較結果的誤差值也隨之增加。

表 31 變溫度放電實驗誤差數據整理表

SoC indication method	25°C	35°C	45°C	Average
Coulomb method error (0.5C)	0.58	0.83	0.67	<b>0.69</b>
Coulomb method error (1C)	1.23	1.03	1.32	<b>1.19</b>
Coulomb method error (1.5C)	1.71	1.89	1.82	<b>1.81</b>
Coulomb method error (2C)	2.46	2.56	2.75	<b>2.59</b>
This study error (0.5C)	0.35	0.2	0.53	<b>0.36</b>
This study error (1C)	0.22	0.2	0.76	<b>0.39</b>
This study error (1.5C)	0.38	0.55	0.82	<b>0.58</b>
This study error (2C)	0.93	0.82	1.24	<b>1.00</b>

Unit : %

透過上表的比較，可以看出本研究的等效內阻法於各種放電條件下，其精準度依舊高於原本的庫倫積分法。證明其可以針對溫度的變化進行反應與補償。

### 5.4 小結

在進行過電池定 C 數、變 C 數放電與變溫度放電實驗後，可以證明本研究的等效內阻修正法的 SoC 估算精準度於各種狀況皆高於原先的庫倫積分法。此外，針對各種不同的放電狀況，庫倫積分法於放電末期往往會高估目前電池芯的殘電量，這會造成系統與駕駛者對剩餘里程有錯誤的預期，而造成行車上的問題。而

本研究所提出的等效內阻修正法於放電末期時的誤差值較低，可以讓系統對目前剩餘里程有較佳的預測，進而提升行車時的可靠度。

下一階段的實驗則是將本演算法安裝至實車的電池 BMS，並進行實際的實車道路測試實驗，以驗證在實車行駛的複雜放電環境下，本研究是否依舊可以有較高的 SoC 估算精度。



# 第六章 實車測試

本章主要是針對台大機械所製作的電動車 Green Jumper 的電池系統相關規格進行介紹，以及如何將本研究的 SoC 估測技術安裝至實車的 BMS 進行應用。此外，會說明在進行時車道路測試時的系統表現，並分析等效內阻修正法是否依舊能維持較佳的 SoC 估測精準度。

## 6.1 Green Jumper 電池系統規格簡介

在開始進行電動車動力系統規格的訂定時，必須先針對全車的動力系統需求進行展開，並依照周邊各項電力系統的電氣規格限制進行設計，方能設計出一套合適的動力系統。而電池系統的規格主要會決定動力系統的兩大特性，分別是馬達系統的最大耗能需求與預定行駛里程。由於電動車最大的耗能需求是來自於馬達系統，因此電池系統的放電能力必須要能滿足馬達系統的需求，方能讓車輛發揮出既有的性能。此外，電池系統的充電能力也關係到進行煞車回充時能回收的電量。因此電池系統性能便需要滿足馬達系統的規格。

除此之外，里程也是決定電池系統規格的重要因素之一。由於電動車在行駛時所有的能量皆來自於電池系統，因此電池系統的容量大小便直接決定了行駛的里程數。為了滿足設定的里程數，便需要適度的調整電池系統的容量，使其可以達到既定的設計目標。以下則是針對本車電池系統的架構與設計重點進行說明。

表 32 電池系統基本規格列表

最大電壓(V)	369.6
工作電壓區間(V)	365.2~310
電池芯數目	352(4P88S)
最大放電瓦數(kW)	62
電池容量(Ah)	20

由於本車所選用的電池模組是有量科技的 BP20 電池模組，此為鋰錳高分子電池芯。此種電池芯並無金屬外殼包覆，在受到外部撞擊或振動時可能會造成其損壞或短路，因此必須要針對各電池芯進行固定與保護。此外，由於電池在進行充放電時會因化學反應以及內阻產生廢熱，造成電池芯的溫度上升。此時必須借助散熱機構將廢熱帶走，否則可能會因電池局部溫度過高造成電解質氣化，而造成電池壽命下降。甚至可能因電解液過度氣化造成電池內壓提升，而產生爆炸的疑慮。

為此，本系統使用鋁金屬製做電池系統的外殼，並於內部挖出井字型的方槽，底下則是設計水流道進行散熱。而電池模組則放入空格內後灌入散熱膠。當電池模組發熱時，其產生的熱量會透過散熱膠傳至各模組之間的鋁隔板，該隔板的效果類似於散熱用的鰭片，會將各模組產生的熱傳至底下的水冷流道。而電池模組上端的電極部分會設計一塊電木平台進行固定，以避免在電極在行車過程中被拉扯，並與外殼絕緣，同時固定最上層的子系統電路板。下圖是電池系統的機構與散熱設計。

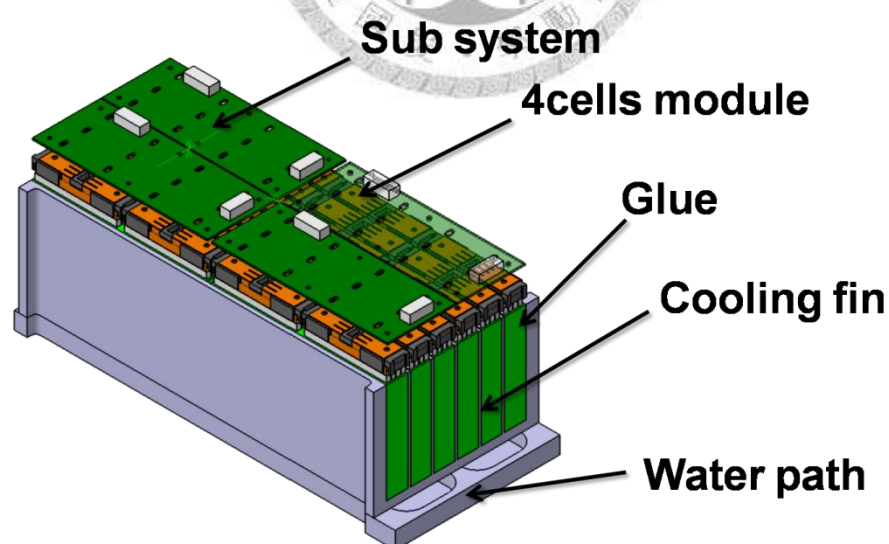


圖 53. 電池系統固定與散熱機構設計

在完成上述電路與外殼機構後，便可開始進行電池系統的組裝。在此之前必須先針對各電池模組的內阻值進行量測，並將電池內組相近的放置在同一子系統之內，以便於控管與監測。同時針對各模組進行平衡充電，以確保各模組的電壓是一致的。之後便將電池模組放置到已完成的電池系統外殼內，並置於真空箱內進行電池模組灌膠的動作。

在電控系統的部分，本系統是將 6 組電池模組進行串聯成一組子系統，並使用 TI 的 bq76pl536 晶片即時監控每組電池模組的電壓、溫度，以及監測各電池芯是否有任何的異常狀態發生。各子系統內建有放電式的平衡電路，當串聯電池模組之間的電壓不相等時，會自動針對電壓過高的電池模組進行放電，以免造成局部電池模組的過充或過放電。

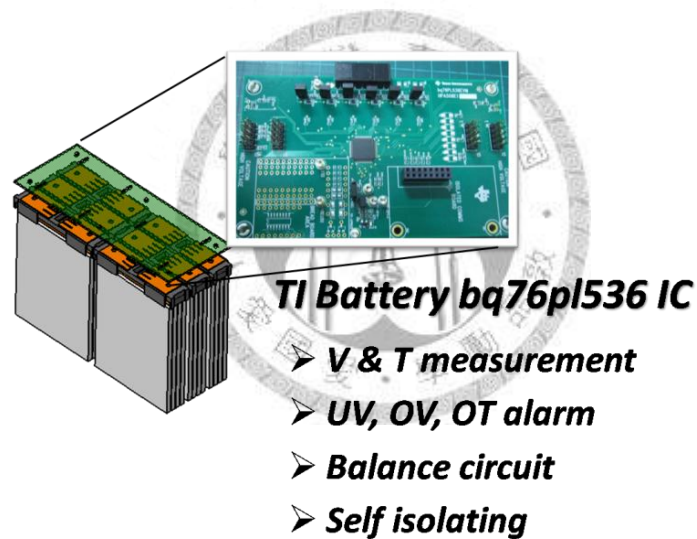


圖 54. 電池子系統

接著將各子系統進行串聯(全部共有 15 組子系統)，並將所有子系統使用 SM Bus 連接至 BMS 的主控制板。主控制板的工作是負責估算各電池模組的 SoC，並依照電池系統的現況判斷是否要進行保護。當系統處於異常時，會控制對外部輸出的 relay，並限制系統電流流動方向，以免造成危險。此外，主控制板還負責與

VCU (Vehicle Control Unit, 行車控制器)進行通訊，並執行其下達的各項控制命令。

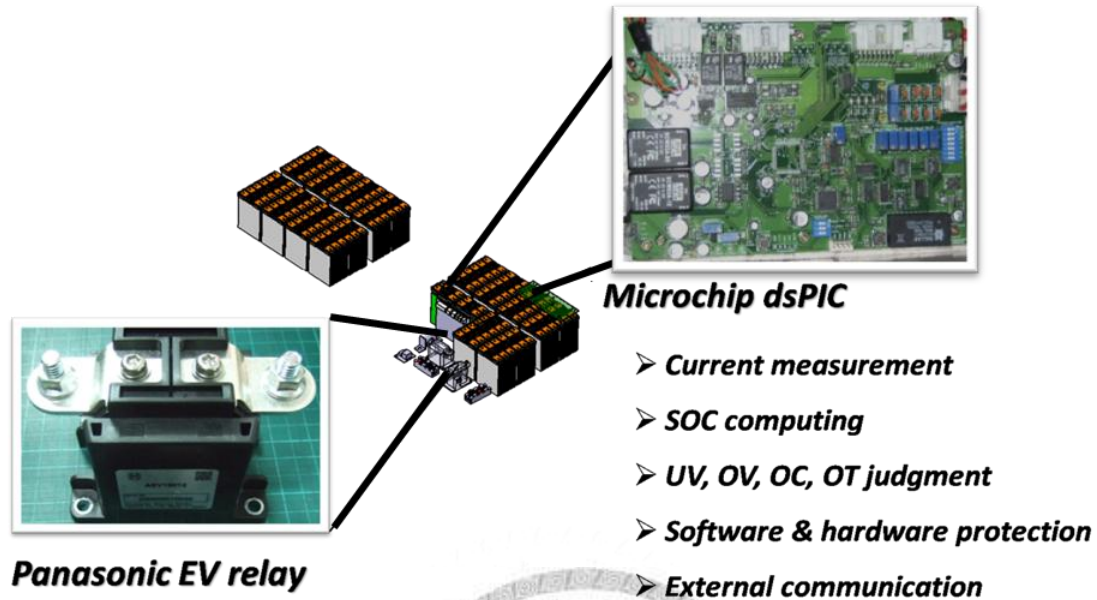


圖 55. 電池 BMS 主電路與周邊保護電路

本車 BMS 原先的 SoC 估算只使用無修正的庫倫積分法，並針對電池系統整體進行 SoC 的估算。而為了可以比較原本庫倫積分法與本研究的等效內阻修正法之間的差異性，便依照測試系統的程式架構將兩種 SoC 估測系統合併，一同撰寫至實車的 BMS 之內。此修改並不會影響到原先的 BMS 控制與保護程式，但為了確保行車時的安全性，原先各種需要參考 SoC 進行保護動作的判斷式會同時參考兩種 SoC 估測邏輯的計算結果，並採取較保守的數據進行保護。此外，在進行保護偵測的同時會使用電池電壓作為判準，以免因 SoC 估測錯誤而影響到行車的安全性。

在完成控制程式改寫後，便可將 BMS 安裝至車上開始進行實車道路測試，以測試在複雜的放電環境下兩種 SoC 估測法的精準度。



## 6.2 實車測試數據整理與分析

由於進行實車測試時並無法如同在機台測試時一般，可以於每段放電途中進行靜置，量測此時準確的 SoC 值。只能藉由每次行車開始前與測試結束靜置後得到的 SoC，來判斷與本次行車中實際消耗的電池電量。並以此數據和庫倫積分法與等效內阻修正法的估算結果進行比較，判斷何者的估算結果較接近實際值。因此以下的數據會先針對行車狀況進行簡述，畫出行車時的電池系統電壓與電流變化，並列出行車前與行車後查表得出的 SoC 值，以及兩種演算法的估測結果和誤差值。



圖 56. 實車道路測試照片

實車測試主要場地是在本校內的停車場與周邊道路進行測試。行駛狀況大多是進行加減速、定速行駛以及轉彎、爬坡等基本的行車測試。測試時並不會使用燈光等周邊設備，只單純將電池的能量用於行車相關的耗能輸出，如馬達驅動、電控系統散熱、供應控制電路電源等。此外，當本車在煞車時會有煞車回充的效果。以下將針對各次實車測試結果進行說明與分析。

## 第 1 次低速測試結果

此次測試主要是於停車場進行低速的行進與轉彎測試。並無大幅的加減速或爬坡等行車狀況。大部分行車狀況為短距離行駛後暫停的狀況。由於行車速度低，因此煞車回充的現象不明顯。以下是該次測試的詳細資料。

表 33 第 1 次低速測試行車狀況

測試日期	2010/9/28
測試時間	17:02~17:24
行駛距離 (km)	0.9
最高時速 (km/hr)	20
總耗能 (Wh)	211.2
平均電流 (A)	3.6
平均放電 C 數	0.18

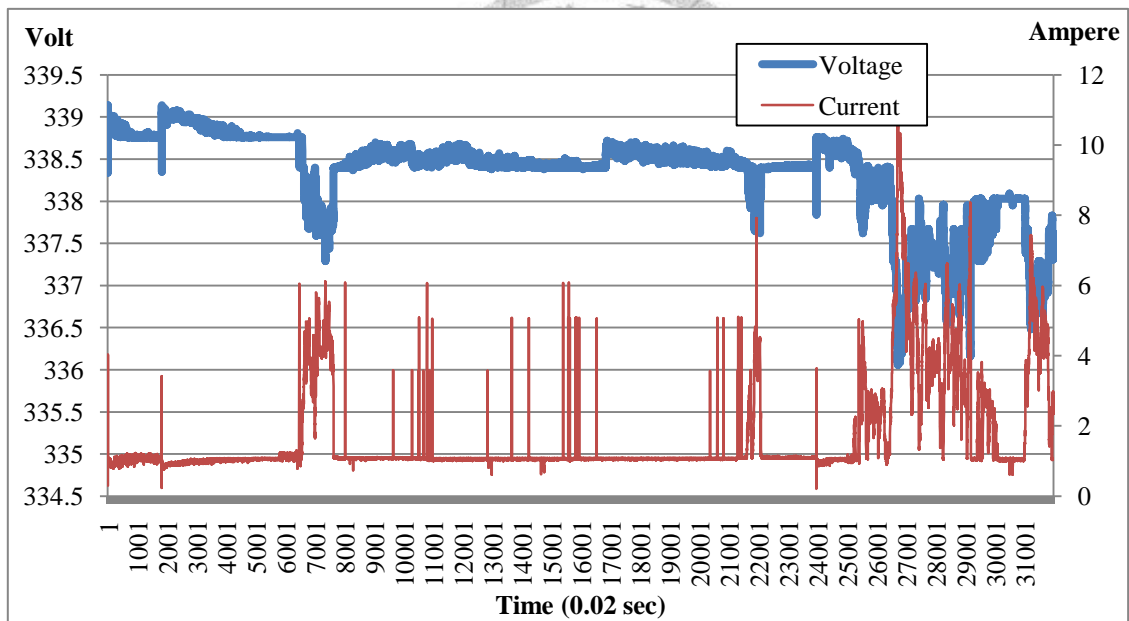


圖 57. 第 1 次低速測試電池系統電壓電流對時間變化圖

表 34 第 1 次低速測試 SoC 估測結果

查表結果		庫倫積分法		本研究	
起始 SoC	結束 SoC	SoC 估算值	誤差	SoC 估算值	誤差
39%	36.00%	36.24%	<b>0.24%</b>	36.13%	<b>0.13%</b>

## 第 2 次低速測試結果

此次測試條件與前一次相同，是於停車場進行低速的行進與轉彎測試，但增加整體平均行駛速度以及行車里程，以確認系統的穩定性。在某幾次煞車時有產生回充現象，但回緩電流不大，僅能負擔基本耗能，尚無法對電池產生充電現象。以下是該次測試的詳細資料。

表 35 第 2 次低速測試行車狀況

測試日期	2010/9/30
測試時間	9:29~9:51
行駛距離 (km)	1.5
最高時速 (km/hr)	25
總耗能 (Wh)	380.16
平均電流 (A)	3.9
平均放電 C 數	0.195

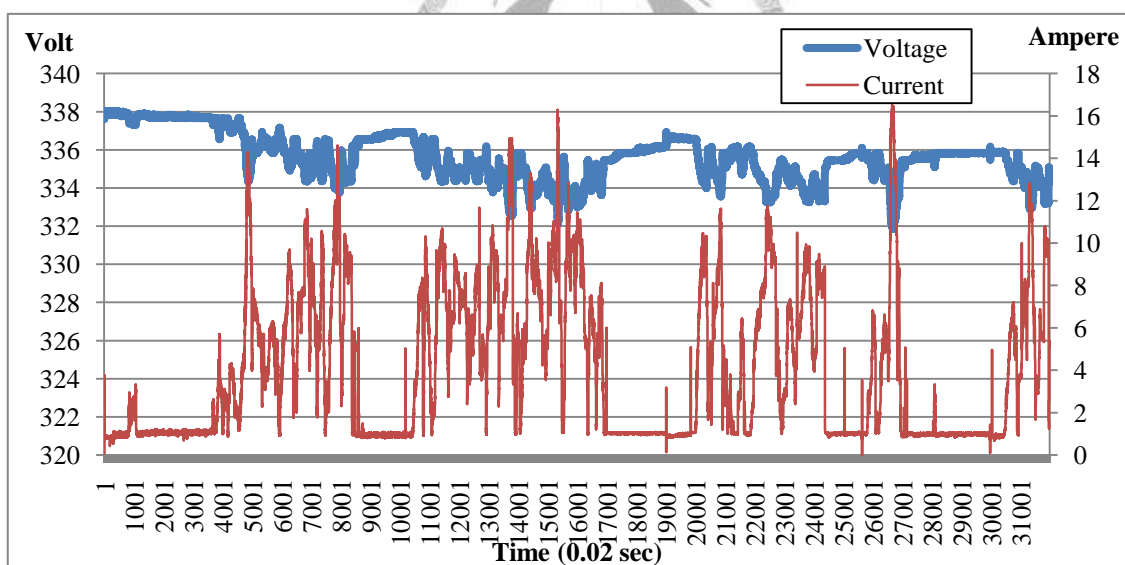


圖 58. 第 2 次低速測試電池系統電壓電流對時間變化圖

表 36 第 2 次低速測試 SoC 估測結果

查表結果		庫倫積分法		本研究	
起始 SoC	結束 SoC	SoC 估算值	誤差	SoC 估算值	誤差
35%	30.00%	30.23%	<b>0.23%</b>	30.06%	<b>0.06%</b>

## 第 1 次加速性能測試結果

此次測試是於直線道路進行加速測試，在起步時施以較大的踏板深度，以測試本車於起步時的加速性能，以及電池系統是否能滿足馬達需求輸出足夠的電流。在提升行車速度後，煞車回充現象更為明顯，但是一樣未能超過基本耗能值。以下是該次測試的詳細資料。

表 37 第 1 次加速性能測試行車狀況

測試日期	2010/10/15
測試時間	20:59~22:12
行駛距離 (km)	8.4
最高時速 (km/hr)	45
總耗能 (Wh)	2083.84
平均電流 (A)	6.8
平均放電 C 數	0.34

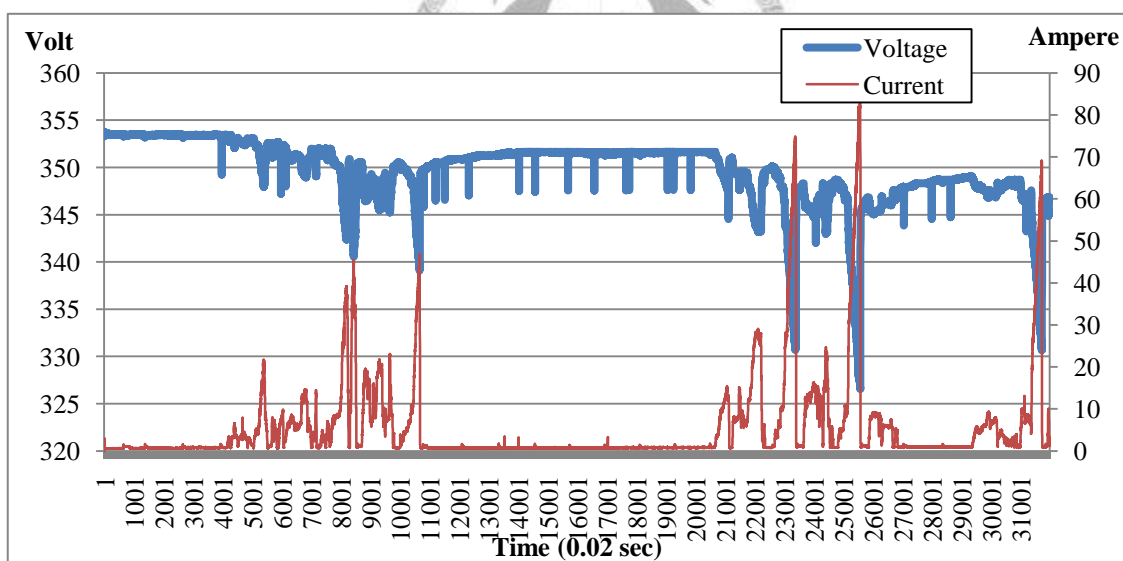


圖 59. 第 1 次加速性能測試電池系統電壓電流對時間變化圖

表 38 第 1 次加速性能測試 SoC 估測結果

查表結果		庫倫積分法		本研究	
起始 SoC	結束 SoC	SoC 估算值	誤差	SoC 估算值	誤差
69%	39.40%	41.73%	<b>2.33%</b>	40.08%	<b>0.68%</b>

## 第 2 次加速性能測試結果

此次測試與前次測試相似，主要是進行加速性能的測試。而本次測試中除了加速性能測試之外，也加入部分爬坡條件進行測試，以測試電池系統處於較長時間的大電流輸出時是否會有問題。以下是該次測試的詳細資料。

表 39 第 2 次加速性能測試行車狀況

測試日期	2010/10/28
測試時間	20:22~20:51
行駛距離 (km)	1.3
最高時速 (km/hr)	40
總耗能 (Wh)	387.2
平均電流 (A)	4.6
平均放電 C 數	0.23

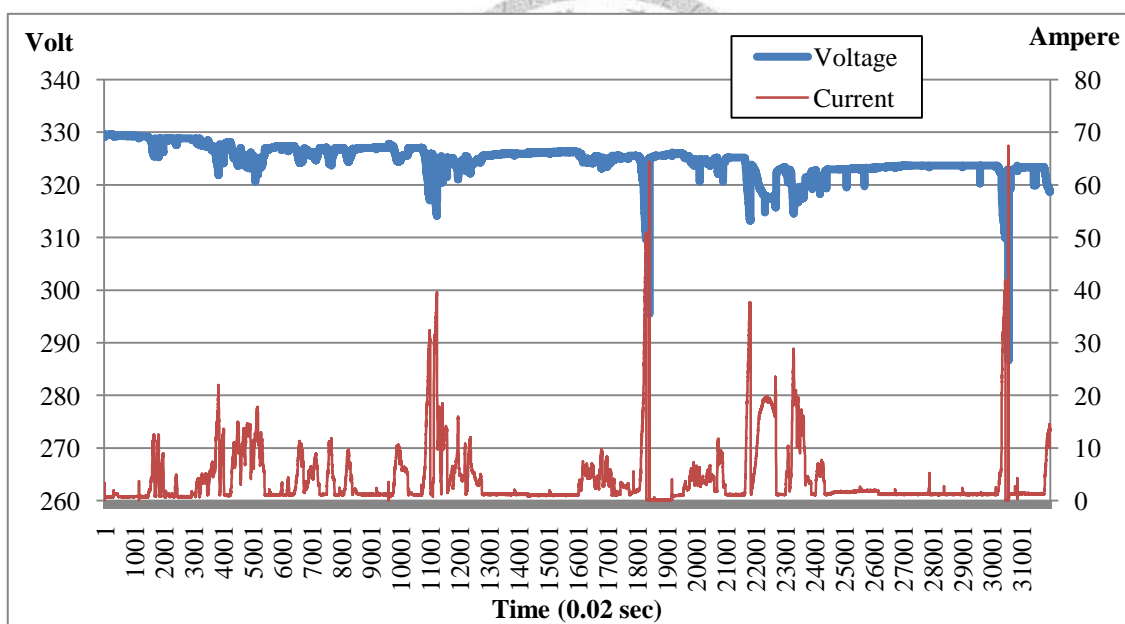


圖 60. 第 2 次加速性能測試電池系統電壓電流對時間變化圖

表 40 第 2 次加速性能測試 SoC 估測結果

查表結果		庫倫積分法		本研究	
起始 SoC	結束 SoC	SoC 估算值	誤差	SoC 估算值	誤差
20%	14.50%	15.34%	<b>0.84%</b>	14.85%	<b>0.35%</b>

### 6.3 小結

在經過各種條件的實車測試之後，可以發現相較於本研究的等效內阻修正法，庫倫積分法的誤差值明顯較高。而且比較低速測試與加速性能測試的結果可以發現，如果電池系統的輸出電流變化較大時，庫倫積分法的誤差值更會明顯的增加。這證明庫倫積分法對於此種輸出變動快速的系統較難正確反應出其耗能值，且其計算誤差會不斷被累積、放大。反觀本研究的等效內阻修正技術，可以發現其誤差值明顯較低，而且對於電流快速變動的狀況可以適時進行修正，有效提升系統估測的精準度。如此便可證明本研究的等效內阻估測法於實車道路測試的複雜放電條件下，依舊可以有較佳的表現。

表 41 實車測試結果

測試條件	查表結果			庫倫積分法		本研究	
	起始 SoC	結束 SoC	耗能	SoC 估算值	誤差	SoC 估算值	誤差
第 1 次 低速測試	39.00%	36.00%	3.00%	36.24%	<b>0.24%</b>	36.13%	<b>0.13%</b>
第 2 次 低速測試	35.00%	30.00%	5.00%	30.23%	<b>0.23%</b>	30.06%	<b>0.06%</b>
第 1 次 加速性能測試	69.00%	39.40%	29.60%	41.73%	<b>2.33%</b>	40.08%	<b>0.68%</b>
第 2 次 加速性能測試	20.00%	14.50%	5.50%	15.34%	<b>0.84%</b>	14.85%	<b>0.35%</b>

# 第七章 結論與未來發展方向

## 7.1 研究成果總結

在透過測試機台進行各種條件的放電測試後，可以證實依本研究的等效內阻進行修正，所得出的整體誤差值幾乎都在 1% 以內。並且於實車道路測試後，更可進一步證明本研究的演算法就算是處在實際電動車上的複雜放電條件下，依舊可以正常運作，並且有著較佳的估測精度。

但在研究與實驗過程中，也發現本演算法尚有以下幾項問題需要改善：

### 1. BMS 需要具備較高的 ADC 量測精度。

由於本演算法需要針對電池系統的電壓、電流值，並以此進行等效內阻與耗能估算。而鋰電池由於其電壓變動範圍非常小，因此 BMS 必須具備有精準度較佳的 ADC 功能，方能正確量測到此數值變化。本研究所使用的 ADC 精準度為 10 bit，因此其最小的量測單位僅有 5 mV，此數值若用於判斷初始 SoC 值的 EMF vs. SoC 查表程式，可能會造成查表結果偏差 1~2%，而此種誤差無法於計算過程中被消除，嚴重影響 SoC 計算精準度。在電池進行充放電測試時，其電壓變化往往也只有數十 mV，也會對計算結果造成一定的影響。因此必須要選用有較高精準度的微處理器，方能改善此問題。

### 2. 需針對電池 SoC vs. EMF 曲線進行溫度修正。

基於於先前的變溫度放電實驗結果，可以發現當電池芯如果處於高溫狀態下進行 SoC 值查表更新，會因曲線變動而產生偏差。因此在實際應用時因針對溫度影響對查表結果既行修正，以免因 SoC 初始值誤差造成估算結果錯誤。

3. 電池容量增加，電容效應的影響會增大，需要對電壓與電流的量測時間點進行修正。

在進行實車測試的數據整理時，發現相較於使用單一電池芯的實驗結果，實車系統的電壓會與電流值變化並非同時發生，而會有一段時間差(約為 40msec)。主要原因是由於相較於單一電池芯，電動車的單電池模組的容量較大，因此電容效應也比較明顯。因此需要針對訊號擷取時間、數值處理方式以及有效數據的判斷標準等進行修正，方能得到更正確的等效內阻估算結果。此部分預計會使用示波器與電流探棒等可以針對電氣訊號快速反應的儀器，對電池系統的電氣特性進行量測，以觀察其變化斜率。此外，尚需要針對實車的電壓、電流截取時間與後端驅動器的抽載頻率進行配合，方能量測出準確的 overpotential 現象，以及合適的截取頻率。

## 7.2 未來研究方向

由於透過本研究已可證明使用等效內阻修正電池效率損耗的概念是可行的，但尚需要針對以下幾點需要進行更深入的研究，方能證明本演算法的確有被廣泛應用於電動載具的價值：

1. 測試本演算法是否能修正電池壽命造成的影響。

在各種 SoC 演算法的修正參數之中，電池壽命是最難被修正的一項。其主要原因是因為電池芯的壽命並無一定的定義與量測標準，而且電池芯每次被使用時並不是每次都從 100% 的電量用到 0%，然後再充電回 100%。而是會依照系統與使用者的要求進行充放電。而這些使用條件之間彼此又會相互影響，因此更難以量化的方式表現出目前電池芯的殘餘壽命。但隨著電池芯的使用壽命減少，其等效內阻也會隨之增加，這證明了等效內阻的數值可以一定程度反映出電池芯目前的壽命。因此之後可針對此進行研究，將本演算法用於不同壽命的電池芯，測試是否能反映出其壽命影響並進行修正。



## 2. 測試將本演算法用於不同電池種類電池芯的表現。

由於本研究所使用的電池芯僅限於有量科技的 5099130L 鋰錳高分子電池芯，但理論上此演算法是利用電池芯的等效內阻值進行修正，與電池芯的種類無關。因此應可以適用於各種不同種類的電池芯。因此之後可將本演算法應用於各種不同種類的電池芯進行測試，以證明其應用的廣泛度與實用性。

## 3. 建立針對多串聯式電池系統的演算法。

在實車道路測試時，BMS 是將全車的電池系統視為一組電池進行 SoC 估算。但由於各組電池因壽命、溫度等周邊環境的差異性，並不能保證其殘電量的數值會一致。因此如果要能確實描述出電池系統目前的狀態，必須能針對每一個電池模組目前的狀況進行偵測與計算。而目前本研究的演算法尚未具備此功能，因此尚需要進行改良。





## 第八章 Reference

- [1] *Electric Vehicle Application Handbook For Genesis Sealed-Lead Battery*, 4th ed.: Hawker Energy Products Inc.
- [2] D. Howell, *et al.*, "An overview of current research projects on advanced energy storage technologies for transportation systems, funded by the U.S. department of energy," *EVS-22*, 2005.
- [3] A. Affanni, *et al.*, "Battery choice and management for new-generation electric vehicles," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, pp. 1343-1349, 2005.
- [4] 孫清華, *最新可充電電池技術大全(修訂版)*: 全華科技圖書股份有限公司, 2003.
- [5] D. R. Carroll, *The Winning Solar Car- A Design Guide for Solar Race Car Teams*, 2003.
- [6] B. Kennedy, *et al.*, "Use of lithium-ion batteries in electric vehicles," *Journal of Power Sources*, 2000.
- [7] 林振華 and 林振富, *充電式鋰離子電池：材料與應用*: 全華科技圖書股份有限公司, 2002.
- [8] *Tesla motor*. Available: <http://www.teslamotors.com>
- [9] J. Arail, *et al.*, "High-power and high-energy lithium secondary batteries for electric vehicles," *Hitachi Review*, vol. 53, pp. 182-185, 2004.
- [10] S. W. Kim, *et al.*, "high performance Lithium ion polymer battery for hybrid electric vehicle," *EVS-21*, 2005.
- [11] 騰堂安人, *次世代電池 2007/2008*: 日經 BP 社, 2007.
- [12] *AI23*. Available: <http://www.ai23systems.com>
- [13] *AESC(Automotive energy supply corporation)*. Available: <http://www.eco-aesc-lb.com/>
- [14] 芳尾真幸 and 小尺昭弥, *ウマイオン二次電池*, 2nd ed.
- [15] 王憲程、呂宗昕, "奈米科技與鋰離子二次電極材料," *國立台灣大學「台大工程」學刊*, vol. 84, pp. 129-135, 2002.

- [16] 大好前景 - 鋰電池材料發展分析 . Available: <http://edm.etri.org.tw/enews/epaper/9810/d01.htm>
- [17] 汽車與電子化：車載電池的命運掌握在電動汽車手上 . Available: <http://big5.nikkeibp.com.cn/news>
- [18] D. S. C. Martinez, R. Goodrich, L. Chandler and D. Magnuson, "Using Cell Balancing to Maximize the Capacity of Multi-cell Li-Ion Battery Packs," *Intersil Corporation*, 2005.
- [19] W. S. K. .J. Bergveld, P.H.L. Notten, *Battery Management Systems, Design by Modeling* vol. 1. Boston, 2002.
- [20] V. Pop, *et al.*, "Battery Management Systems Accurate State-of-Charge Indication for Battery - Powered Applications," in *Philips Research Book Series* vol. 9, ed, 2008.
- [21] V. Pop, *et al.*, "State-of-the-art of State- of-Charge determination," *Measurement Science and Technology Journal*, vol. 16, pp. R93–R110, 2005.
- [22] *Amita technologies Inc.* Available: <http://www.amitatech.com/>
- [23] "中大型低成本鋰電池開發及工電技術研究四年計畫," 工業技術研究院 2005.
- [24] G. R. E. Meissner, "Battery Monitoring and Electrical Energy Management Precondition for future vehicle electric power systems," *J.Power Source*, vol. 116, 2003.
- [25] E. P. Finger and E. M. Marwell, "Battery control system for battery operated vehicles," 1975.
- [26] C. C. Christianson and R. F. Bourke, "Battery state of charge gauge," 1975.
- [27] L. Conklin, "Smart battery data accuracy," *Intel Developer Forum*, 1999.
- [28] A. J. Salkind, *et al.*, "Determination of state-of-charge and state-of-health of batteries by fuzzy logic methodology," *J. Power Sources*, vol. 80, pp. 293-300, 1999.
- [29] H. F. H.J. Bergveld, J.R.G.C.M. Van Beek, "Method of predicting the state of charge as well as the use time left of a rechargeable battery," US Patent, 2000.
- [30] *GW Instek official webpage.* Available: <http://www.gwinstek.com/tw>

[31] *Chroma official webpage*. Available: <http://www.chroma.com.tw>

