

國立臺灣師範大學工業教育學系

碩士論文

指導教授：洪翊軒 博士

具溫度效應之鋰電池即時動態模型建立

The real-time modeling of lithium battery with thermal effect



研究生：余宗駿 撰

中華民國 101 年 6 月

摘要

論文名稱：具溫度效應之鋰電池即時動態模型建立

頁數: 64

校名：國立臺灣師範大學

系所名：工業教育學系碩士班 能源應用與車輛技術組

畢業時間：一百學年度第二學期

學位：碩士

研究生：余宗駿

指導教授：洪翊軒

關鍵詞：鋰電池、類神經網路、溫度效應、倒傳遞演算法、綠能動力

本論文目的為研究與建立具有溫度效應之鋰電池即時動態模型。研究中使用 3.2V/11.5Ah 之磷酸鋰鐵電池。本研究主要分為三階段；第一階段為熱動態響應量測；透過二步驟量測法，在不同電池操作溫度下，依照電池在恆溫室中絕緣與一般對流，可求得電池單元之比熱與熱對流係數。第二階段為電池等效電路特性量測。主要作法為透過交流阻抗(AC Impedance)技術，在頻率 0.1-1000 Hz 的範圍下，針對不同溫度(10°C、20°C、30°C、40°C)、不同放電電流(0.5C、1C、2C)、不同電池電量(state-of-charge, SOC)，進行等效電路之元件參數量測。第三步驟為建立具溫度動態之高非線性電池即時模型；透過一具有隱藏層(hidden layer)之類神經網路，將電池溫度、SOC 作為網路之 2 變數輸入向量，等效電路參數值(三電阻、一電容)作為網路之 4 變數輸出向量。經過倒傳遞法(back propagation)之神經元權重(weighting)訓練後，便可求得代表目標鋰電池之即時模擬等效電路。本模型未來可供系統整合與載具車應用。

ABSTRACT

Title : The real-time modeling of lithium battery with thermal effect Page: 63

School : National Taiwan Normal University

Department : Energy Applications and Vehicle Technology, Department of Industrial Education.

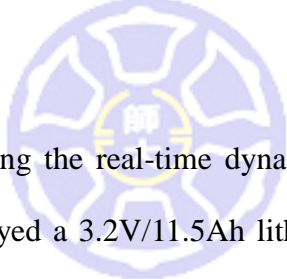
Time : June, 2012

Degree : Master

Researcher : Tzung-Jiun Yu

Advisor : Yi-Hsuan Hung

Keywords : lithium battery 、 neural network 、 thermal effect 、 back propagation 、 green power source



This thesis aims at studying the real-time dynamic model of a lithium battery with thermal effect. We employed a 3.2V/11.5Ah lithium-iron-phosphate battery for our research. This research is separated into three stages. The first stage is to measure the thermal dynamics. By using a two-step measurement method, the heat capacity and heat transfer coefficient under various temperatures can be derived by tested under adiabatic and normal conditions in an incubator. The second stage is for the characteristics of the equivalent circuit of the cell. By using the AC impedance technique, within the frequency of interest within 0.1-1000 Hz, parameters of the equivalent circuit were measured under various temperatures ($10^{\circ}C$, $20^{\circ}C$, $30^{\circ}C$, $40^{\circ}C$), various discharge currents (0.5C, 1C, 2C) and various battery state-of-charge. The third step is to establish a highly-nonlinear real-time model with thermal dynamics. By adopting a neural network with hidden layers, the battery temperature and SOC were two variables for the input vector, while the values of parameters (2

resistance, 1 inductance and 2 capacitors) formed a 5-variable output vector. The neural-network weights were trained by the back-propagation method. Hence, an electric circuit for real-time simulation of the target lithium battery was derived. This research provides the further applications for battery system integration and the vehicle integrations.



誌謝

兩年的研究所充實的日子轉眼間就過去了，從初期建置實驗室的日子直到現在整個汽車工廠、研究室以及學術研究走上軌道，花費了不少時間與心血，雖然時程上有點倉促，但能在兩年後的今天順利完成學業也算是值得了。

首先要感謝指導教授—洪翊軒教授。雖然老師公務繁多又有許多研究與計畫同時進行著，但總是很關心學生，就像的大學長一樣實驗室帶領實驗室的大家。在這要感謝老師碩士論文期間的耐心指導，使得論文能在期限內完成，在此致上最高的謝意與敬意。

接著是口試期間，承蒙口試委員吳建勳博士以及鄧敦平教授給予論文的建議與細心的指導，這些寶貴的意見使得論文能更趨完善，在學術上能有所貢獻。特別要感謝國立臺灣師範大學冷凍工場鄧敦平教授的能源與奈米實驗室給予設備與技術上的支援，使本論文的實驗能順利的完成。

研究所兩年的期間，感謝李景峰教授、董雲春教授、鄭慶民教授、鄧敦平教授在課業上的指導；感謝綠能動立實驗室的所有夥伴們—學長顯章、同學俊鴻、學弟宏緯、哲瑋、泓志以及文傑；同為能車組同學皓文；系辦一起打工討生活費的育正、克勤、方哲、建成、晏如、翊在、安秀；冷凍工場的學長叔億、柏谷、大學同學朝傑、俊硯、學弟承蔚；E-Lab 一起聊天講是非的伯任、政宏、昆燁、夢麟、寰緯、洪賜、品淳；515Lab 的育碩、鉅凱；工教系辦的美女助教雅琦、淳安、書媛、主蘋，感謝大家這段時間的鼓勵與支持，使得兩年的研究所生活增添許多色彩，過的豐富與充實，在此一併致謝。

最後感謝我最愛的家人，感謝這些年來爸媽跟姊姊的栽培，總是給我足夠的空間做自己想做的事情，讓我能專心地完成學業。謝謝以上在求學路上幫助我、支持我、鼓勵我的每一位貴人，能認識你們是我最大的收穫。

目 錄

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
誌謝.....	V
目 錄.....	VI
表目錄.....	VIII
圖目錄.....	IX
符號列表.....	XI
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究目的.....	4
1.3 研究方法.....	4
1.3 文獻回顧.....	6
1.3.1 鋰離子電池系統建模.....	6
1.3.2 交流阻抗分析.....	7
1.3.3 鋰離子電池之熱效應.....	9
第二章 理論分析.....	11
2.1 鋰離子電池簡介.....	11
2.2 交流阻抗原理與等效電路.....	13
2.3 電池殘電量估測.....	21
2.4 類神經網路倒傳遞法.....	23
2.5 熱動態模型之參數建立.....	30
第三章 實驗設計與即時模型建立.....	31
3.1 實驗架構.....	31
3.2 充放電實驗.....	37
3.3 交流阻抗與熱效應實驗.....	39
3.4 類神經元權重訓練.....	41
3.4.1 倒傳遞網路的限制.....	43

3.5 即時鋰電池模型架構建立.....	44
第四章 結果與討論.....	45
4.1 鋰電池具熱效應時域分析.....	45
4.2 鋰電池具熱效應交流阻抗分析.....	49
4.3 系統參數之類神經網路訓練.....	55
4.4 鋰電池即時動態模型.....	57
第五章 結論與未來工作.....	60
5.1 結論.....	60
5.2 未來工作與建議.....	61
參考文獻.....	62



表目錄

表 1.1 二次電池的種類及規格.....	2
表 2.1 元件阻抗對照表.....	17
表 2.2 各種 SOC 測定法之比較.....	22
表 3.1 磷酸鋰鐵電池規格表.....	32
表 3.2 可程式恆溫試驗機規格.....	33
表 3.3 ZENNIUM 阻抗分析儀規格表.....	34
表 3.4 PLZ1004W 直流電子負載儀規格表.....	35
表 3.5 SPD-3606 直流電源供應器規格表.....	36
表 3.6 輸入矩陣及目標矩陣.....	43



圖目錄

圖 1.1 鋰電池動態模型建立之研究架構圖.....	5
圖 1.2 鋰電池電壓特性圖.....	6
圖 1.3 鋰電池的理想交流阻抗頻譜.....	8
圖 1.4 鋰電池理想交流阻抗頻譜之相對應等效電路.....	8
圖 1.5 Gomez 等人提出的鋰電池等效電路模型.....	10
圖 2.1 阻抗 Z 於複數平面示意圖.....	13
圖 2.2 系統在特定操作點的交流阻抗測試.....	14
圖 2.3 交流阻抗分析研究流程圖.....	15
圖 2.4 電阻、電容、電感在 s 域之等效電路示意圖.....	16
圖 2.5a 電阻、電容串聯得到的奈氏圖阻抗頻譜.....	18
圖 2.5b 電阻、電容串並聯得到的奈氏圖阻抗頻譜.....	18
圖 2.5c 電阻、電容串並聯得到的奈氏圖阻抗頻譜.....	19
圖 2.5d 電阻、電容串並聯得到的奈氏圖阻抗頻譜.....	19
圖 2.5e 複合連接電路所得到的奈氏圖阻抗頻譜.....	20
圖 2.6 常用的活化函數.....	25
圖 2.7 倒傳遞類神經網路示意圖.....	26
圖 2.8 倒傳遞演算法流程圖.....	29
圖 3.1 實驗系統架構圖.....	31
圖 3.2 磷酸鋰鐵電池.....	32
圖 3.3 可程式恆溫試驗機.....	33
圖 3.4 ZENNIUM 阻抗分析儀規格表.....	34
圖 3.5 PLZ1004W 直流電子負載儀.....	35
圖 3.6 SPD-3606 直流電源供應器.....	36
圖 3.8 放電實驗接線示意圖.....	38
圖 3.9 鋰電池之等效電路模型.....	39
圖 3.10 鋰電池交流阻抗分析實驗接線圖.....	40
圖 3.11 Matlab NNtool 編輯流程圖.....	42

圖 3.12 倒傳遞類神經網路架構圖.....	42
圖 3.13 鋰電池模型架構示意圖.....	44
圖 4.1 不同放電深度之電池表面溫度上升比較(隔絕熱傳).....	45
圖 4.2 不同放電深度鋰電池表面溫度上升比較(未隔絕熱傳).....	46
圖 4.3 不同工作溫度與不同放電電流的電量比較.....	47
圖 4.4 鋰電池於不同工作溫度下 0.5C 放電比較.....	47
圖 4.5 鋰電池於不同工作溫度下 1C 放電比較.....	48
圖 4.6 鋰電池於不同工作溫度下 1C 放電比較.....	48
圖 4.8 20°C 時，鋰電池各 SOC 的交流阻抗頻譜.....	50
圖 4.9 30°C 時，鋰電池各 SOC 的交流阻抗頻譜.....	51
圖 4.10 40°C 時，鋰電池各 SOC 的交流阻抗頻譜.....	51
圖 4.12a 不同溫度及 SOC 底下的等效電路元件參數值－電感.....	52
圖 4.12b 不同溫度及 SOC 底下的等效電路元件參數值－串聯電阻.....	52
圖 4.12c 不同溫度及 SOC 底下的等效電路元件參數值－並聯電阻.....	53
圖 4.12d 不同溫度及 SOC 底下的等效電路元件參數值－並聯電容.....	53
圖 4.12e 不同溫度及 SOC 底下的等效電路元件參數值－Warburg 電阻.....	54
圖 4.11 修正後的鋰電池等效電路.....	54
圖 4.15 具熱效應之鋰電池模型.....	57
圖 4.16 鋰電池模型所得出的鋰電池 SOC 及溫度.....	58
圖 4.17 鋰電池模型之等效電路輸出參數.....	58
圖 4.18 鋰電池模型之輸出電壓及功率.....	59

符號列表

A	鋰電池表面積(m^2)
C	電容(F)
C_b	鋰電池的熱容量($J \cdot ^\circ C^{-1}$)
C_N	鋰電池的總電量(Ah)
D	擴散效率
ESR	鋰電池的等效電阻($mohm$)
h	鋰電池的熱傳導係數($W/m^2 \cdot ^\circ C^{-1}$)
$i(t)$	時域上的電流
I_{batt}	通過鋰電池的電流(A)
I_{loss}	損失的電流(A)
L	電感(H)
\dot{Q}_b	鋰電池產生的熱量(W)
R	電阻(R)
R_d	擴散電阻(ohm)
sL	電感在 s 域上的阻抗
sR	電阻在 s 域上的阻抗
sC	電容在 s 域上的阻抗
SOC	鋰電池即時電量($\%$)
SOC_0	鋰電池起始電量($\%$)
T_{amb}	室溫($^\circ C$)
T_b	鋰電池即時溫度($^\circ C$)
$v(t)$	時域上的電壓(V)
Z_C	電容阻抗

Z_L	電感阻抗
Z_R	電阻阻抗
Z_{wa}	擴散層阻抗無限長時 Warburg 的阻抗
Z_{wal}	擴散層阻抗有限長時 Warburg 的阻抗
τ	擴散時間常數
δ	擴散時間常數



第一章 緒論

1.1 前言

工業革命後人類的文明產生巨大的衝擊，各式各樣的發明使得生活更加便利，大量的器械都必須仰賴各種形式的能源推動，隨之而來的負面影響則是造成環境的破壞—全球暖化，以及化石燃料的日趨短缺，國際原油價格持續攀升，近十年的國際原油平均價格由 2002 年的每桶 23.894 美元上漲至 2011 的每桶 105.917 美元，漲幅近 4.5 倍[1]，對運輸產業造成的衝擊可一目了然。

為因應油價及氣候所帶來的影響，許多車廠也開始轉換研發方向，由傳統純內燃機引擎驅動轉變為複合動力車輛(Hybrid vehicle)、純電動車輛(Electric vehicle)，電動車輛所需要的動力來源種類繁多，舉凡燃料電池(Fuel cell)、二次電池(Rechargeable battery)、超級電容器(Supercapacitor)等，皆是目前電動車之動力源選擇。台灣為世界主要的速克達機車產國，研發電動車輛也行之有年，目前開發之電動車輛的動力源選擇以二次電池為主，市面上尚見的種類有鉛酸電池(lead-acid)、長效鹼性電池(Alkaline long-life)、碳鋅電池(Carbon-zinc)、鎳氫電池(NiMH)、鎳鎘電池(NiCad)及鋰離子電池(Lithium-ion)、鋰離子聚合物電池(Li polymer)等，其規格如表 1.1。

表 1.1 二次電池的種類及規格[2]

Type	Voltage	Energy density			Eff	E/\$	Disch	Cycles	life
	V	MJ/kg	Wh/kg	Wh/L	%	Wh/\$	%/month	#	years
Lead -acid	2.1	0.11-0.14	30-40	60-75	70%-92%	5-8	3%-4%	500-800	5-8
Alkaline	1.5	0.31	85	250	99.90%	7.7	<0.3	100-1000	<5
Ni -cadmium	1.2	0.14-0.22	40-60	50-150	70%-90%		20%	1500	
NiMH	1.2	0.11-0.29	30-80	140-300	66%	1.37	20%	1000	
Ni-zinc	1.7	0.22	60	170	66%	2-3.3		100-500	15+
Li ion	3.6	0.58	160	270	99.90%	2-8.5	5%-10%	1200	15+
Li polymer	3.7	0.47-0.72	130-200	300	99.8%	2.8-5.0		500~1000	2-3
LiFePO4	3.25		80-120	170		0.7-1.6		2000+	

其中，鋰離子電池是當前最常被拿來使用與討論的儲能裝置，其應用在電動車輛具備以下優點：

1. 鋰離子電池的能量密度相較其他種類的電池高。標準的鋰離子電池可以達到 160 Wh/kg 的儲能標準，而鎳氫電池為 30~80 Wh/kg，鉛酸電池則只有 30~40 Wh/kg。
2. 鋰離子電池的自放電率較低。鋰離子電池的自放電率約為 5~10%/month，而鎳氫電池則有 20%/month。
3. 鋰離子電池沒有記憶效應，故不須擔心電池在電量上的操作問題。
4. 鋰離子電池壽命較長，可以承受大於 1000 次的充放電循環。

操作鋰離子電池的過程中則須注意以下幾點：

1. 鋰離子電池容易受溫度影響。當電池在高溫的工作環境下，會使電池的能力衰退，導致其效率不如正常運作時，故熱管理相當重要。
2. 過度放電會對電池造成傷害，造成電池的壽命減短。
3. 鋰離子電池模組都會裝有電池管理系統，用以監控各分電池的運作情形，

其系統電路在沒有運作時仍然放電。

4. 操作在極度嚴苛的環境下，有可能會使電池起火燃燒或爆裂。

車輛在行駛中必須應付不同路況及各種不同駕駛的使用習慣，故續航力、能量密度、功率密度、能提供瞬間大功率，此為整車設計時必須考量之重點，以目前的純電動車輛可搭配的二次電池中，以鋰離子電池最為優良。

由於近年來電腦運算速度大幅提升，以及產品的推陳出新的週期縮短，目前各大車廠透過即時模擬技術，用以減少車輛開發時的人力、物力、時間等相關開發成本，並加速產品的更新率。其中電動車之動力源模擬對於動力系統開發則相當重要，準確估測電池的電量、續航力、健康狀態、操作溫度以及溫度對於電池即時動態的影響等，都是必須納入考量的。

鋰離子電池的工作溫度介於-10到40°C之間，當電池在環境溫度低於0°C時，會使電池的性能下降，影響層面包含充放電效率、循環壽命、內阻、電容量等[6]，因此在建立電池模型時，也必須將溫度的因素納入考量，使即時動態的模擬模型更佳準確。

本研究欲透過類神經網路之即時參數運算，建置一極具工業應用價值之據有溫度效應鋰離子電池即時模擬器。

1.2 研究目的

本論文具體的研究目的如下：

1. 鋰電池溫度效應
2. 針對磷酸鋰鐵電池進行交流阻抗測量與分析
3. 鋰電池等效電路建立與倒傳遞類神經網路訓練
4. 磷酸鋰鐵電池的動態量測與分析
5. 磷酸鋰鐵電池動態模型建立與誤差分析

1.3 研究方法

本論文採用文獻探討、理論分析與實驗研究等三種方式進行研究。主要分為鋰電池基本特性量測與建模等，兩大部分進行研究與探討。在基本特性研究分析上，透過理論分析與實驗研究來探討不同溫度之下對於電池的性能影響，並與相關文獻進行分析與比較；建立動態模型部分則藉由鋰電池特性實驗的結果，透過倒傳遞類神經網路訓練後，與實驗的結果作比對，反覆驗證以求降低誤差，獲得一最佳化的模型。其研究架構如圖1.1所示。

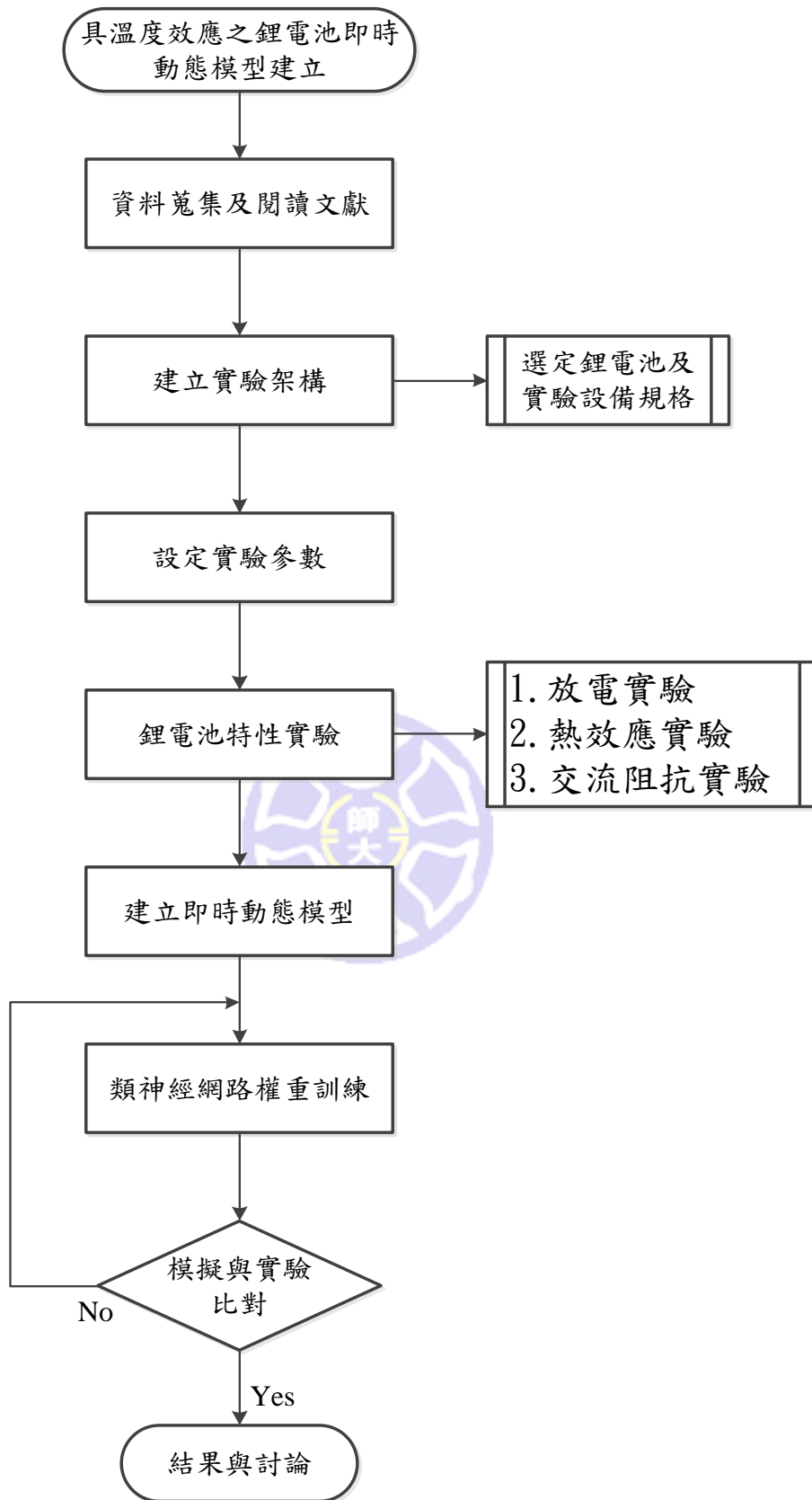


圖 1.1 鋰電池動態模型建立之研究架構圖

1.3 文獻回顧

1.3.1 鋰離子電池系統建模

Pop V. 等人在 2005 年的研究中指出，電池的 SOC(state of charge)對於系統建模會造影響，實驗進行中維持電池的 SOC 在準確的數值。正確的 SOC 測定法及準確的殘電量顯示，讓使用者依靠這些數據，正確的使用電池，使其增加效能及延長使用壽命。但仍然會有例外，其關鍵在於使用者的使用方法。時常對電容量尚充足的電池充電，雖可使充放電的次數增加，但也會造成電容量提早衰退。反過來說，經常過度充電或過度放電，則會使電池的循環壽命降低[3]。

Barsoukov 與 Macdonald[4]於 2005 年發現電池在連續放電的狀態下，會使得電位連續下降，而電位下降幅度會受到溫度、放電電流及電池的剩餘電量影響，若只考慮電壓，則電量的估測的準確度是不可靠的，故建模時，將各項變異數加入參考，對於模型的準確度提昇會有正面的作用。

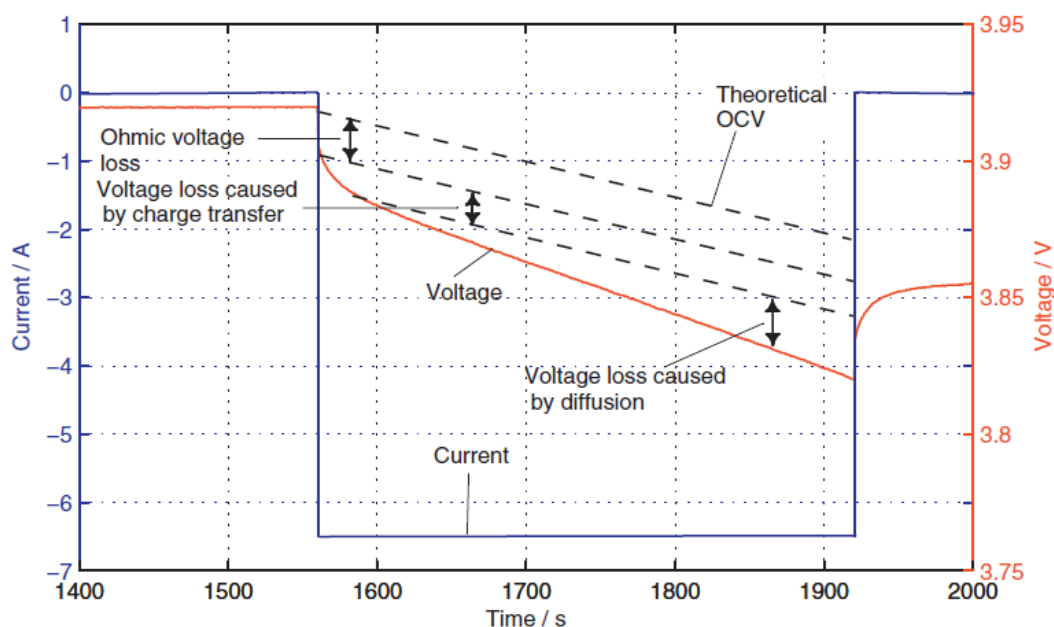


圖 1.2 鋰電池電壓特性圖[8]

1.3.2 交流阻抗分析

使用電化學阻抗頻譜，獲得電池動態是一項專門的工具。其原理是透過一個微小的弦波訊號激發待測系統，得到電池在特定工作點的狀態為何，且其精確度不會受到電化學上的非線性或長時間閒置影響[8]。

鋰電池的交流阻抗頻譜理論曲線用奈氏圖表示，如圖 1.3。鋰電池之阻抗頻譜受到電池特定的動態過程影響，如圖所示可分成五個區塊。第一區為超高頻區域，主要顯示為電池及線路所引起的電感行為。第二區從 0 至頻譜與實軸的交越點，為電池的等校電路中的串聯電阻值，串聯電阻中包含了活性材料、電解液及隔離膜所產生的電阻值。第三區為頻譜中第一個半圓，此現象與循環過程中在正極形成的固態電解質層有關[9,10]。第四區為頻譜中第二個半圓，代表電極的雙層電容和介電層的電阻[10,11]。第五區為頻譜中的低頻區，為電極中的活性物質電荷轉移的擴散情形[12]。

Andre 等人[19]在 2011 年的研究中，利用兩種不同的等效電路模型模擬阻抗頻譜時發現，使用簡單的 RC 模型無法模擬出與實驗數值吻合的阻抗頻譜，圖 1.4 對應到圖 1.3 的 5 個區塊分別表示 5 種不同的等效電路模型。

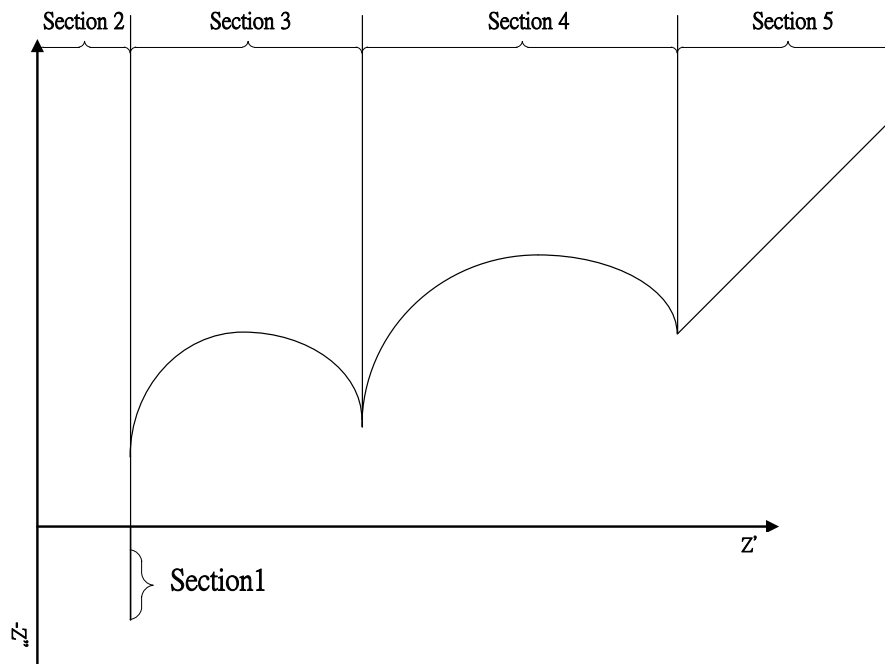


圖 1.3 鋰電池的理想交流阻抗頻譜[8]

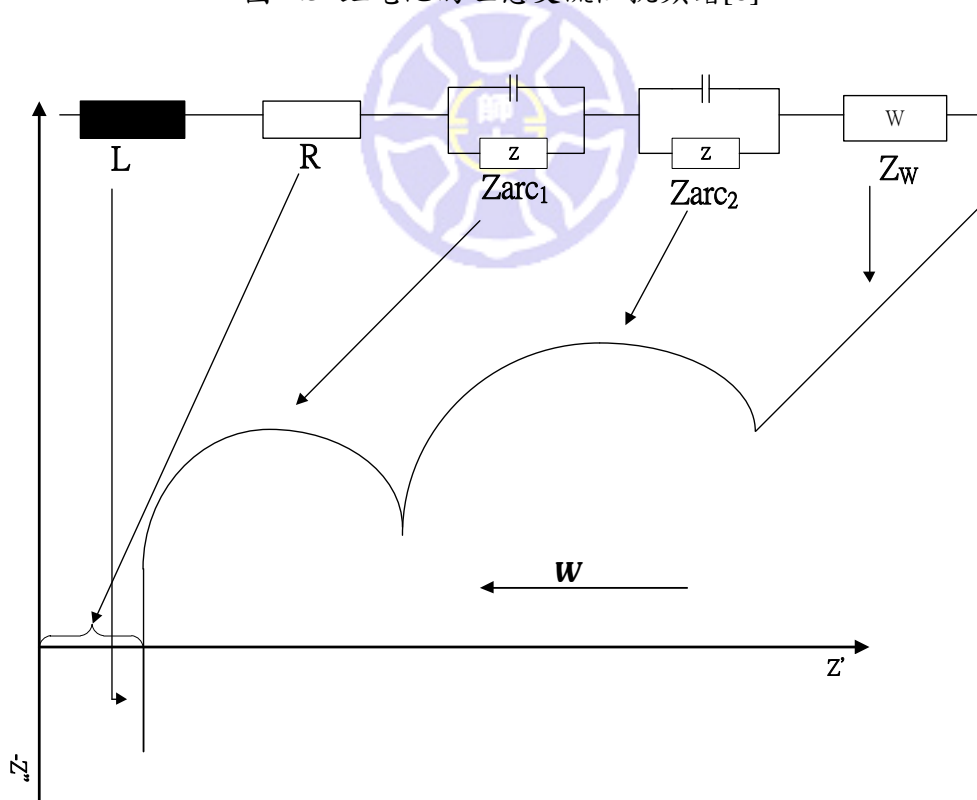


圖 1.4 鋰電池理想交流阻抗頻譜之相對應等效電路[8]

1.3.3 鋰離子電池之熱效應

對於研究鋰電池在放電過程中發熱與散熱的行為，對於研究中的鋰電池系統建立相對應的數學模型，詳細解析鋰電池內的內部構造、幾何形狀、介面性質以及材料特性，將可以獲得精準的計算結果[14,15,16]。此外，將複雜的數學模型加以簡化，使之擁有優良的計算效率，並保有可接受的精確度，而能廣泛的應用在一般的電池輔助設計之上[15,17]。這些技術將被用來分析鋰電池的操作條件與設計因子對電池安全性以及散熱效率的影響[18]。

蓄電設備的操作溫度顯著地影響電量儲存與操作效率。在尚未設計冷卻系統以前，首先必須建立電池熱能模型，建立一個 3 維熱模型來探討鋰離子電池的暫態行為，並模擬在不同負載電流的狀況下，其表面溫度的分佈情形；此外，利用一個簡單的鋰電池模型與實驗量測參數[15,16]，研擬出一階函數與電阻餘熱模型，模擬充電與放電過程；建立 2 維熱傳輸暫態模型，藉以探討散熱過程，並利用模擬來比較自然對流與強制對流結果；分析探討熱能管理系統-氣冷式與水冷式設計，並模擬暫態及穩態行為並比較其冷卻效果[17,18]。

Suresh 等人[6]於 2002 年的研究發現，鋰電池從 -10°C 到 40°C 的交流阻抗頻譜測試中發現，高頻域時的等校串聯電阻測試結果，並未產生直接的動態關係，而在低頻時，發現電池電量和電池溫度對等校串聯電阻有直接的影響。

Andre 等人[19]於 2011 年的研究發現，將電池的溫度從 -30°C 到 50°C 做交流阻抗測試，溫度對電池內阻有顯著的影響。當溫度下降時，電池的內阻會隨著溫度降低而減少。

Gomez 等人[20]於 2011 年研究熱效應及 SOC 對高功率鋰電池的影響。圖 1.5 為 Gomez 等人提出的等效電路模型，其結果發現，當電池本體溫度由 30 度增加至 50 度，SOC 由 0% 增加至 100%，Warburg 的常數會增加。電解質與電荷轉移的電阻在高溫時會比低溫時下降幅度更明顯。當溫度升高時也會使 Warburg 常數增加。

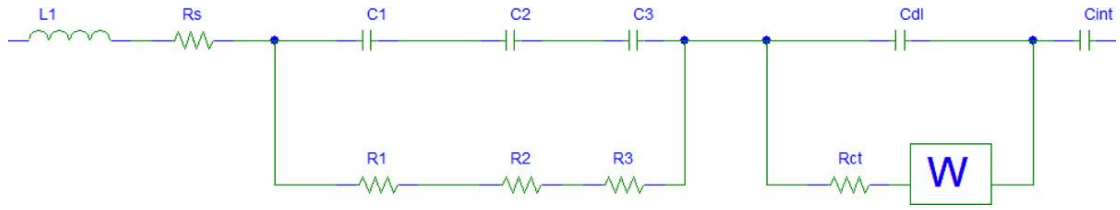


圖 1.5 Gomez 等人提出的鋰電池等效電路模型[20]

根據上述文獻，本研究目的為研究與建立具有溫度效應之鋰電池即時動態模型。研究中使用 3.2V/11.5Ah 之磷酸鋰鐵電池。本研究主要分為三階段；第一階段為熱動態響應量測；透過二步驟量測法，在不同電池操作溫度下，依照電池在恆溫室中絕緣與一般對流，可求得電池單元之比熱與熱對流係數。第二階段為電池等效電路特性量測。主要作法為透過交流阻抗(AC Impedance)技術，在頻率 0.1-1000 Hz 的範圍下，針對不同溫度(10°C、20°C、30°C、40°C)、不同放電電流(0.5C、1C、2C)、不同電池電量(State-of-Charge, SOC)，進行等效電路之元件參數量測。第三步驟為建立具溫度動態之高非線性電池即時模型；透過一具有隱藏層(Hidden layer)之類神經網路，將電池溫度、SOC 作為網路之 2 變數輸入向量，等效電路參數值(三電阻、一電容)作為網路之 4 變數輸出向量。經過倒傳遞法(Back Propagation)之神經元權重(weighting)訓練後，便可求得代表目標鋰電池之即時模擬等效電路。

第二章 理論分析

2.1 鋰離子電池簡介

鋰電池是一種由鋰金屬或鋰合金為負極材料，使用非水電解質溶液的電池。由於鋰金屬的化學特性非常活潑，使得鋰金屬在加工、保存及使用上，對環境的要求非常高。以往鋰電池之發展皆集中在 3C 產業上，但近年來由於氣候變遷、能源短缺、減少碳排放等議題，各先進國家界致力於發開新能源之市場，鋰電池的應用也轉往市場經濟更大的儲能和動力電池（瞬間需要較大電流）市場，主要包含了純電動車、油電混合車、中大型 UPS、太陽能、大型儲能電池、電動手工具、電動機車、電動自行車、航太設備與飛機用電池等領域[5]。

鋰離子電池為二次電池，容易與下面兩種電池混淆：(1) 鋰電池：存在鋰單質。(2) 鋰離子聚合物電池：用多聚物取代液態有機溶劑，主要有錳酸鋰($LiMn_2O_4$)、鈷酸鋰($LiCoO_2$)以及磷酸亞鐵鋰電池等。鋰離子電池為可充電電池，是用含有鋰元素的材料作為電極的電池，其正極或負極必須具有類似海綿的物理結構，已釋放或接收鋰離子。在充電時，鋰離子從負極材料移出至電解液，在如水進入海綿一樣地進入正極材料，這個過程被稱為嵌入(Intercalation)[7]。反之，放電的過程則完全相反。

鋰離子電池中的電解液可以是凝膠體、聚合物(鋰離子/鋰聚合物電池)、凝膠體與聚合物的混合物。但目前仍未發現在室溫下有效傳送鋰離子的聚合物，大多塑膠封袋的鋰離子/鋰聚合物電池仍都是結合凝膠體和聚合物的混合型電池。

鋰鎳鈷電池($LiNi_{\frac{1}{5}}Co_{\frac{1}{5}}O_2$)是鋰鎳電池和鋰鈷電池的固溶體(綜合體)，兼具鋰鎳和鋰鈷的優點，曾一度被產業界認為是最有可能取代鋰鈷電池的新正極材料，但鈷正極電池放電過程中會形成金屬鋰，金屬鋰具有易燃的特性，若安全措施失效或操作不當，容易引發金屬鋰的燃燒，在安全性上的仍無法有更大突破。

因此，當前鋰電池相關業的發展主力集中在，以錳或磷酸鐵的正極材料電池，如：鋰鎳電池(LiNiO_2)、鋰鎳鈷電池($\text{LiNi}_{\frac{4}{5}}\text{Co}_{\frac{1}{5}}\text{O}_2$)、鋰錳電池(LiMn_2O_4)、鋰鎳鈷錳電池($\text{LiNi}_{\frac{1}{3}}\text{Co}_{\frac{1}{3}}\text{Mn}_{\frac{1}{3}}\text{O}_2$)及磷酸鋰鐵(Lithium iron phosphate, LiFePO_4 , LFP)電池等，以提升安全性，相對來說卻使蓄電量下降及電池老化速度加快[14,15]。

鋰錳電池的成本低且安全性比鋰鈷電池佳，但循環壽命欠佳，且在高溫環境下的循環壽命受影響更大，高溫時會出現錳離子溶出的現象，造成高溫自放電嚴重，以致儲能特性差[5]。

鋰鎳電池的成本較低且電容量高，不過，製作過程困難且材料性能的一致性和再現性差，最嚴重的是依然有安全性的問題[20]。

磷酸鋰鐵電池則同時擁有鋰鈷、鋰鎳和鋰錳的主要優點，但不含鈷等貴重元素，原料價格低。且磷、鋰、鐵存在於地球的資源含量豐富，不會有原料供應的問題，且工作電壓適中(3.2V)、電容量大(170mAh/g)、高放電率、可快速充電且循環壽命長，在高溫與高熱環境下穩定性高，是目前產業界認為較符合環保、安全和高性能要求的鋰離子電池。

2.2 交流阻抗原理與等效電路

交流阻抗(AC impedance)分析的原理，是對系統輸入不同頻率的小振幅正弦電壓訊號 $V(\theta)$ ，量測系統輸出的電流訊號 $I(\theta)$ ，對應在不同頻率的輸入電壓與輸出電流關係，進行交流阻抗分析時，對系統輸入正弦訊號(Sinusoidal input)，量測系統的穩態響應，即為研究系統的頻率響應，經由式(2.1)計算可得到系統在該頻率的阻抗值。

$$Z(\omega) = \frac{\Delta E(\omega)}{\Delta I(\omega)} \quad (2.1)$$

對於不同的系統，輸入電壓與輸出電流會有相位差，因此阻抗值以複數方式呈現，如圖 2.1 所示：

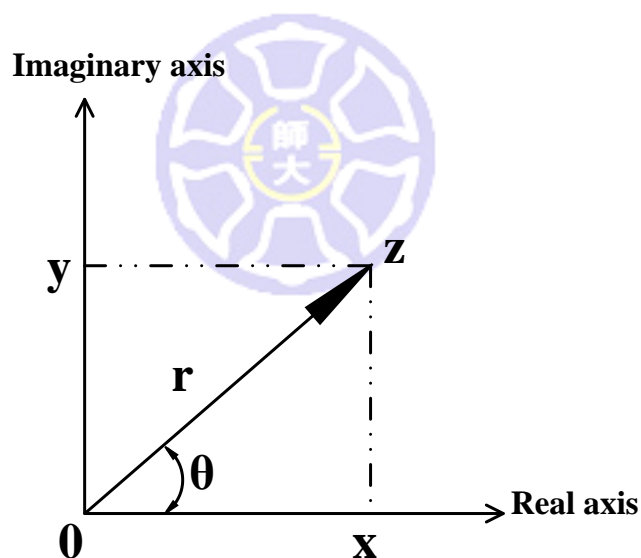


圖 2.1 阻抗 Z 於複數平面示意圖

阻抗值表示方法有三種型式，Rectangular form $z = x + iy$ 、Polar form $z = r\angle\theta$ 、Exponential form $z = re^{j\theta}$ 。

由圖 2.1 得知 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 、 $x = r\cos\theta$ 、 $y = r\sin\theta$ ，因此阻抗值可改寫為式(2.2)

$$z = x + jy = r\angle\theta = r(\cos\theta + jsin\theta) \quad (2.2)$$

阻抗分析結果表示方式有兩種，較常使用的為複數平面圖(Complex plane plot)，不同頻率下計算出來的阻抗值分為實部、虛部，分別對應到複數平面上的實軸、虛軸，再將所有頻率下得到的阻抗值連結起來，即為奈氏圖(Nyquist Plot)；另一種型式為波德圖(Bode plot)，將阻抗值得大小(複數平面上與原點的距離)以 dB 為單位，相位值(複數平面上與實軸的夾角)已度為單位，分別對頻率的對數 $[\log(f)]$ 作圖，即可得到此系統的阻抗頻譜圖。以奈氏圖方式呈現系統的阻抗分析，較容易探討系統電化學上的現象，而以波德圖方式呈現則較方便分析與建立系統的模型。

圖 2.2 為進行交流阻抗分析時，量測系統在不同負載電壓下的阻抗，必須施加系統一個預測式的電位值，使系統穩定的維持在該操作電壓後，開始進行交流阻抗分析，輸入一個小振幅的正弦電壓訊號，在輸出端量測輸出電流訊號，經由計算後，可以得到該操作點的阻抗值。

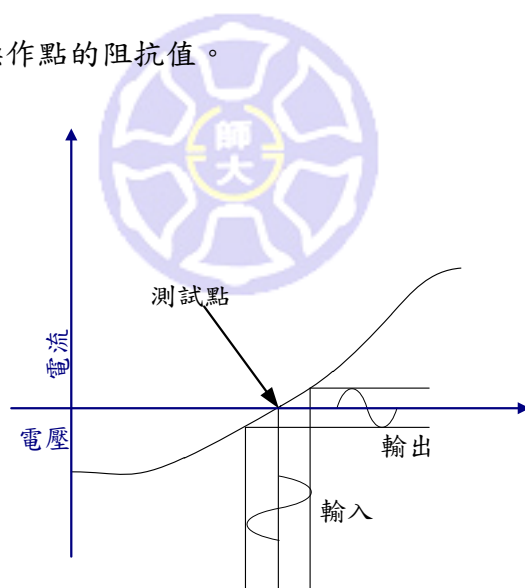


圖 2.2 系統在特定操作點的交流阻抗測試

圖 2.3 為交流阻抗分析研究的流程圖，首先進行帶測系統的交流阻抗分析，觀察得到的頻譜圖，透過理論與典型的電化學系統模型，建立起可能的系統模型，再推出數學模型，並與推論出的等效系統電路模型相互對照，經由 curve fitting 相互比較，確定所建立系統的正確性。

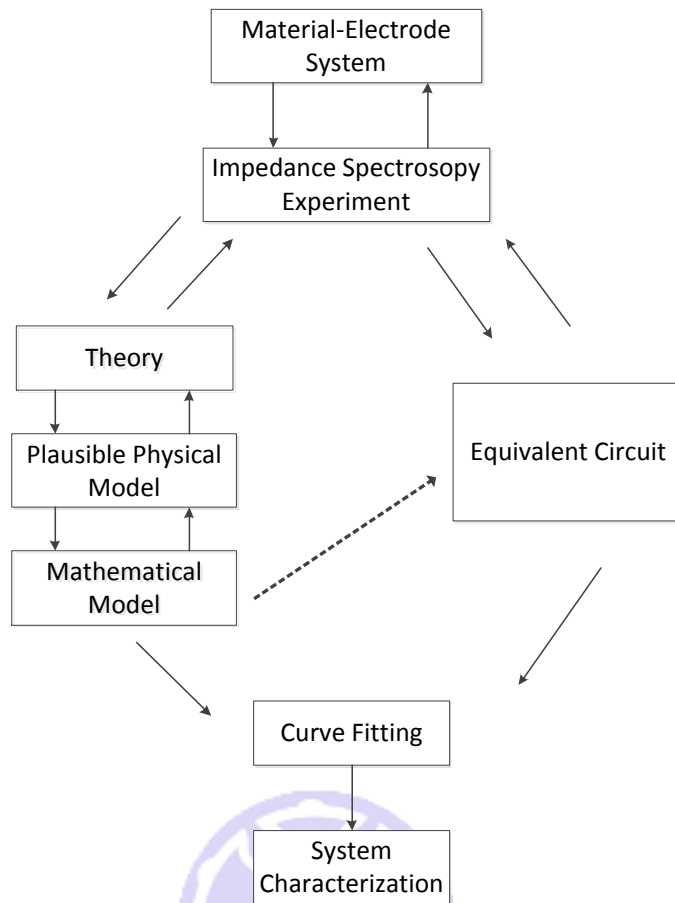


圖 2.3 交流阻抗分析研究流程圖

等效電路

以等效電路來描述電化學的行為，將電化學系統特性建立出等效動態模型，以利進一步的研究。基本電路元件電阻 $R(\Omega)$ 、電感 $L(H)$ 與電容 $C(F)$ ，根據基本電路理論，在時域(Time domain)上與電壓 $v(t)$ 、電流 $i(t)$ 的關係分別為：

$$\text{電阻 } R: v(t) = R \cdot i(t) \quad (2.4)$$

$$\text{電感 } L: v(t) = L \cdot \frac{d}{dt} i(t) \quad (2.5)$$

$$\text{電容 } C: i(t) = C \cdot \frac{d}{dt} v(t) \quad (2.6)$$

以拉式轉換將電阻 R 、電感 L 與電容 C 轉換到 s 域(s -domain)，與電壓 $V(s)$ 、電流 $I(s)$ 的關係分別為：

$$\text{電阻: } V(s) = R \cdot I(s) \quad (2.7)$$

$$\text{電感: } V(s) = L \cdot [sI(s) - I(0)] \quad (2.8)$$

$$\text{電容: } I(s) = C \cdot [sV(s) - V(0)] \quad (2.9)$$

若令初始值為零，則電阻 R 、電感 L 與電容 C ，在 s 域等效電路關係可如下圖所示：

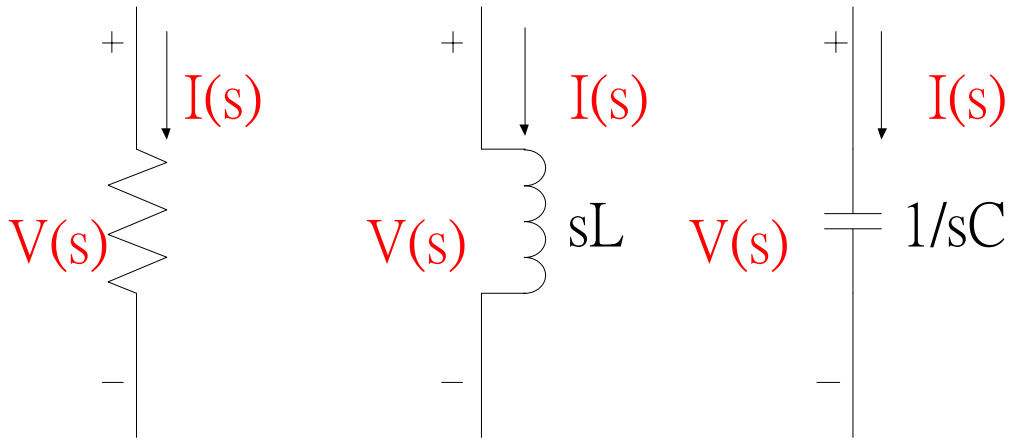


圖 2.4 電阻、電容、電感在 s 域之等效電路示意圖

因此， R 、 sL 、 $1/sC$ 分別定義為電阻 R 、電感 L 與電容 C ，在 s 域上的阻抗 (Impedance)。

若以阻抗的觀點來解釋，可將電阻 R 、電感 sL 、電容 $1/sC$ ，解釋為隨頻率改變的電阻，換言之可將其視為一個隨著輸入電流的頻率改變而改變其電阻值的電阻元件。將電阻、電容、電感串並聯後，在交流阻抗分析頻譜圖的結果會有所不同，如圖 2.4 所示。

(1) 電阻 (R)

電路元件中電阻 R 的阻抗為 $Z = R$ ，阻抗只受到頻率的影響且沒有虛部，此時電壓與電流沒有相位差。在奈氏圖中，高頻狀態下的阻抗數據與實軸的交叉點會得到一個歐姆電阻。

(2) 電容 (C)

電路元件中電容 C 可表示成頻率的函數，且只有虛部部分，可表示成 $Z_C = \frac{1}{j\omega C}$ 。電容的阻抗會因頻率的增加而減少，當電流以 -90° 的相位通過電容時會反映電壓。

Constant Phase Element, CPE

透過理想電容對電化學現象建模必須假設其表面為理想均勻的狀態。孔洞的同質性與 CPE 可表示為 $Z_{CPE} = \frac{1}{(j\omega C)^\alpha}$ ，C 為理想電容， α 為經驗常數介於 0 到 1 之間。當 $\alpha = 1$ 時 CPE 則為理想電容。

(3) Warburg Impedance, Z_{wa}

在電化學系統當中，不同介面間有離子擴散的情形相當常見，Warburg 阻抗用來表示此現象。假定有無限大的擴散層，則阻抗可表示成： $Z_{wa} = \frac{R}{\sqrt{j\omega}}$ ；若假定擴散層的厚度有限，則阻抗可表示成： $Z_{wal} = R \frac{\tanh\sqrt{j\omega\tau}}{\sqrt{\tau}}$ ， $\tau = \frac{\delta^2}{D}$ 。R 為擴散電阻； τ 為擴散時間常數； δ 為擴散時間常數；D 為擴散效率。

(4) 電感(L)

電感的阻抗可表示成： $Z_L = j\omega L$ 。電感的阻抗會隨著頻率增加。在阻抗頻譜上，如同電容一樣，只會表示在虛部部分的阻抗，不同的是，電流必須轉移到+90 度的相位下才會反映出電壓。表 2.1 為各個電路元件所代表的阻抗。

表 2.1 元件阻抗對照表

電路元件	阻抗
電阻 (R)	R
電容 (C)	$Z_C = \frac{1}{j\omega C}$
電感 (L)	$Z_L = j\omega L$
CPE	$Z_{CPE} = \frac{1}{(j\omega C)^\alpha}$
擴散層無限長時的阻抗 (W)	$Z_{wa} = \frac{R}{\sqrt{j\omega}}$
擴散層有限長時的阻抗 (W)	$Z_{wal} = R \frac{\tanh\sqrt{j\omega\tau}}{\sqrt{\tau}}$ ， $\tau = \frac{\delta^2}{D}$

上述幾項元件為等效電路模組建立的主要項目，依照電路的串聯或並聯相接可以得到不

同現象的阻抗頻譜，如圖 2.5(a-e)。

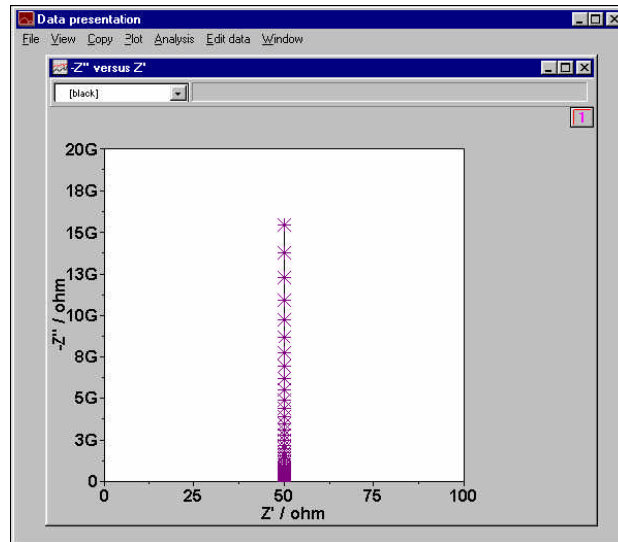


圖 2.5a 電阻、電容串聯得到的奈氏圖阻抗頻譜[24]

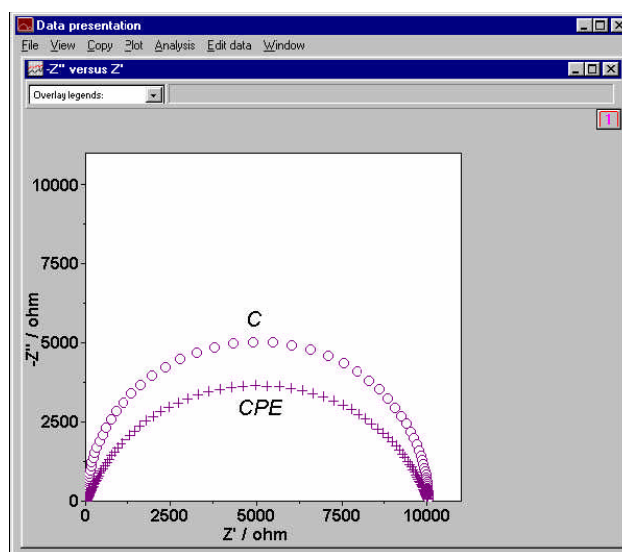
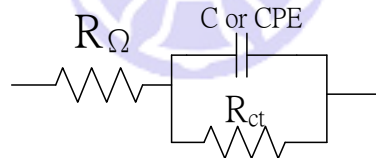


圖 2.5b 電阻、電容串並聯得到的奈氏圖阻抗頻譜[24]

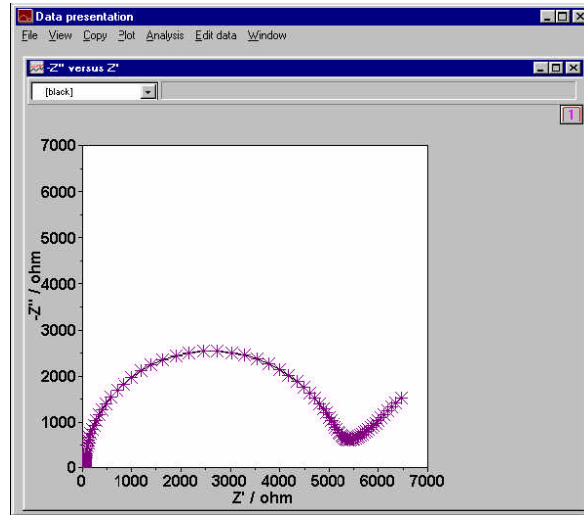
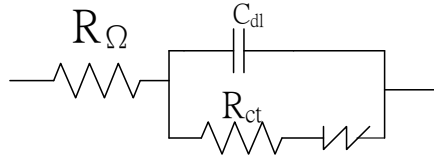


圖 2.5c 電阻、電容串並聯得到的奈氏圖阻抗頻譜[24]

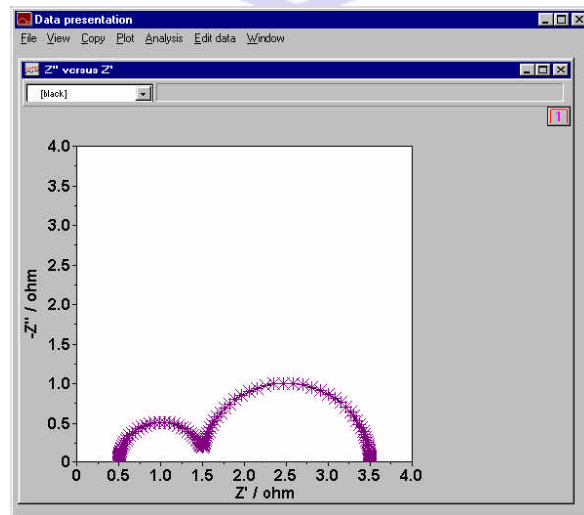
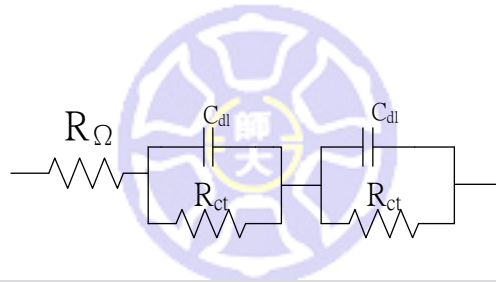


圖 2.5d 電阻、電容串並聯得到的奈氏圖阻抗頻譜[24]

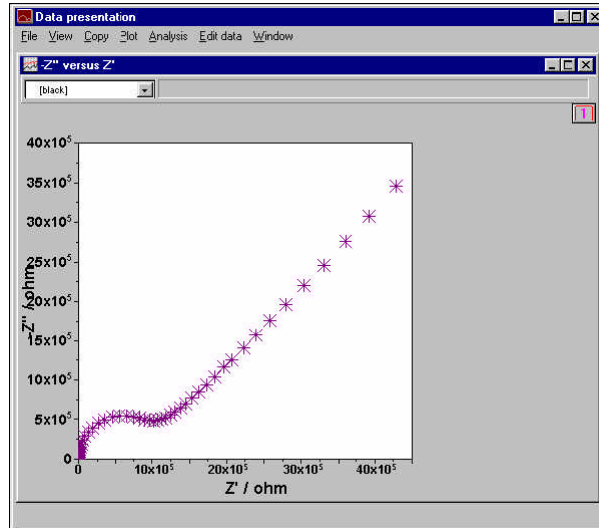
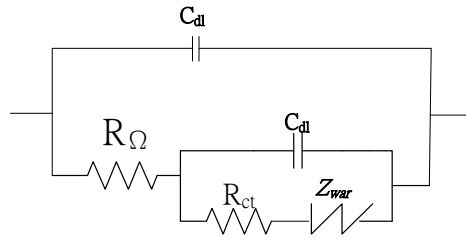


圖 2.5e 複合連接電路所得到的奈氏圖阻抗頻譜[24]



2.3 電池殘電量估測

系統建模時，電池殘電量對於模擬結果會造成影響，為使鋰電池模型更加貼近實際電池的即時動態，電池殘電量之估算將是本論文重點之一。計算電池殘電量，目前有幾項運用於此的技術，其優劣如表 2.2。

1. 放電測試法

放電測試法通常用於測定電池 SOC 的最佳方法，準確度佳。大多運用於新製程的電池，用以測定電池電量，但完成一組測試必須要從頭到尾不間斷的放電，造成實驗過程耗時費功；另一方面，測試過程中系統的能量也會被浪費。

2. 電流積分法

電流積分法為最普遍運用於測量電池 SOC 的技術，此次定法必須知道系統的測試點電量，結果與電池充電和放電的電流息息相關。假設起始測量點為 (SOC_0)，其計算充放電後的 SOC 如公式 2.10 所示。 C_N 所表示的為電池總電量， I_{batt} 為電池的充、放電電流， I_{loss} 則為系統響應時流失的電量，本論文將以電流積分法透過 Matlab 即時運算鋰離子電池之單電池電量，但系統響應所流失的電量於本論文的測試中極小，即時運算及模擬時，將忽略不計。

$$SOC = SOC_0 + \frac{1}{C_N} \int_{t_0}^t (I_{bat} - I_{loss}) d\tau \quad (2.10)$$

3. 電壓量測

電壓量測法目前在手機電池上被廣泛應用，其透過量測即時電壓轉換成電池的殘餘電量，此方法簡單且成本低，也可減少 CPU 運算時的消耗，但運用在大型電動載具上，因電壓的變動大，使得準確度並非最佳，若單靠電壓量測值估測電池即時狀態是非常不可靠的，若要減少誤差，則測試放電曲線時必須把放電電流和溫度兩者考慮進去。

4. 開路電壓(EMF)

據研究指出，EMF 是用來測定鋰電池 SOC 的最佳方法，由於溫度對於 EMF 的影響很小，且電池在電量低時 EMF 與 SOC 兩者之間的關係也不會因此受到影

響，只有電池接近完全放電及完全充電時會有例外。

5. 阻抗頻譜及類神經網路

透過交流阻抗的實驗得知電池的品質及健康程度，並可建立一阻抗頻譜，記錄各個頻率區間的狀態，常用的圖形有奈氏圖及波德圖。溫度對實驗結果的影響非常敏感，必須在長時間在穩定的實驗環境中測試，獲得大量數據後可利用類神經網路訓練，建立一即時的動態模型。透過此方法則可以得知單一電池的動態及電池的健康狀況，並可針對不同溫度下阻抗的變化，使得各變數的數據更加完整，建立一組準確度更加的具溫度效應之鋰電池即時參數鑑別動態模型。

表 2.2 各種 SOC 測定法之比較[4]

量測技術	運用範圍	優點	缺點
放電測試	用於新製成電池的電量檢測	簡單且正確 可獨立檢測電池優劣	非即時、耗時、會改變電池的狀態且耗費能量
電流積分法	所有電池系統	校正點夠多且電流值夠精準，數值是準確的	易受周邊系統影響、需要定期校正量測點
開路電壓(OCV)	鉛酸電池、鋰電池、溴化鋅	即時、低成本、可預期性高	必須在無負載時，靜置長時間才能量測
EMF	鉛酸電池、鋰電池	即時、低成本、可預期性高	必須在無負載時，靜置長時間才能量測
阻抗頻譜	所有電池	可以得知電池品質及當前狀態	易受溫度影響 成本高
類神經網路	所有電池系統	即時	需要目標系統大量數據提供訓練 昂貴

2.4 類神經網路倒傳遞法

類神經網路(artificial neural network)，或譯為人工神經網路，是指模仿生物神經網路的資訊處理系統[22]。類神經網路較精確的定義為：「類神經網路是一種計算系統，包括軟體與硬體，它使用大量簡單的相連人工神經元模仿生物神經網路的能力。人工神經元是生物神經元的簡單模擬，他從外界環境或者其他人工神經元取得資訊，並加以非常簡單的運算，並輸出其結果到外界環境或者其它人工神經元。」

類神經網路是由許多的人工神經細胞(artificial neuron)所組成，人工神經細胞又稱為類神經元、人工神經元、處理單元(processing element)每個處理單元的輸出以扇狀送出，成為其他許多處理單元的輸入。處理單元其輸出值與輸入值的關係式，一般可用輸入值的加權成績和之函數來表示：

$$Y_j = f(\sum_i W_{ij}X_i - \theta_j) \quad (2.11)$$

其中：

Y_j = 模仿生物神經元的模型的輸出訊號。

f = 模仿生物神經元的模型的轉換函數 (transfer function)，是一個用從其他處理單元輸入的輸入值之加權成績和轉換成處理單元輸出值的數學公式。

W_{ij} = 模仿生物神經元模型的神經節強度，又稱連結加權值。

X_i = 模仿生物神經元模型的輸入訊號。

θ_j = 模仿生物神經元模型的閾值。

介於處理單元間的訊號傳遞路徑稱為連結 (connection)。每一個連結上有一個數值的加權值 W_{ij} ，用以表示第 i 處理單元對第 j 個處理單元之影響強度。目前類神經網路模式種類繁多，依照不同的模式可以將這些網路分成下列四類：

1. 監督式學習網路 (Supervised learning network)

從問題領域中取得訓練範例 (有輸入變數值，也有輸出變數)，並從中學習輸入

變數與輸出變數的內在對應規則，以應用於新的案例（只有輸入變數值，而需推論輸出變數值的應用）。

2. 無監督是學習網路 (Unsupervised learning network)

從問題領域中取得訓練範例（只有輸入變數值），並從中學學習範例的內在具類規則，以應用於新的案例（有輸入變數值，而需推論它與那些訓練範例屬於同一句類的應用）。

3. 聯想式學習網路 (Associate learning network)

從問題領域中取得訓練範例（狀態變數值），並從中學學習範例的內在記憶規格則，以應用於新的案例（只有不完整的狀態變數值，而需推論其完整的狀態變數值的應用）。

4. 最佳化應用網路 (Optimization application network)

類神經網路除了「學習」應用外，還有一類特殊應用—最佳化應用；對一問題決定其設計變數值，使其在滿足設計限制下，使設計目標達最佳狀態的應用。設計應用與排程應用屬之。此類應用的網路架構大都與聯想式學習網路的架構相似。

其中以倒傳遞類神經網路 (back-propagation network, BPN) 應用最為普遍。倒傳遞類神經網路包含許多層，如圖 2.5，每一層包含若干個處理單元

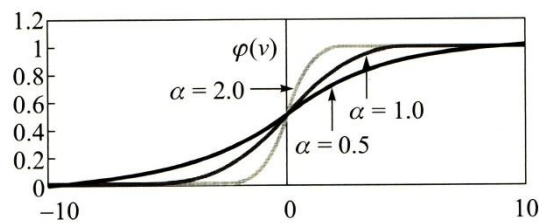
- (1). **輸入層**：主要功用為處理單元用以輸入外在環境的訊息，用以表現網路的輸入變數，其處理單元數目依問題而定。使用線性轉換函數，即 $f(x) = x$ 。
- (2). **隱藏層 (hidden layer)**：提供類神經網路表現處理單元間的交互作用，其處理單元數目並無標準方法可決定，經常需以試驗方式決定其最佳數目。通常每一層處理單元均有連結與相鄰層的處理單元連接。網路可以不只一層隱藏層，也可以沒有隱藏層。
- (3). **輸出層**：用以表現網路的輸出變數，其處理單元數目依問題而定，使用非線性轉換函數。

網路中藉由相關權重連結各層間之神經元，輸入值由輸入層直接傳入隱藏層，經加

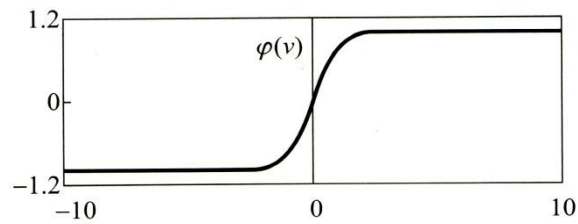
權累計後再透過活化函數轉換可得一輸出值，同理再傳入輸出層。常使用的活化函數型式如 S 型函數：

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-\alpha x}} \quad (2.11)$$

由於 S 型函數之活化函數可微分，我們可以利用最陡坡降法在學習過程中修正權重與偏權值，使誤差值逐次減小，達到學習的目的，圖 2.4 為常用活化函數之型態。此函數當自然變數趨於正負無限大時，函數值趨近於常數，其函數值域再[0, 1]之間。



(a) S 形函數 ($\alpha = 0.5, 1$ 和 2)



(b) 雙曲線函數

圖 2.6 常用的活化函數[21]

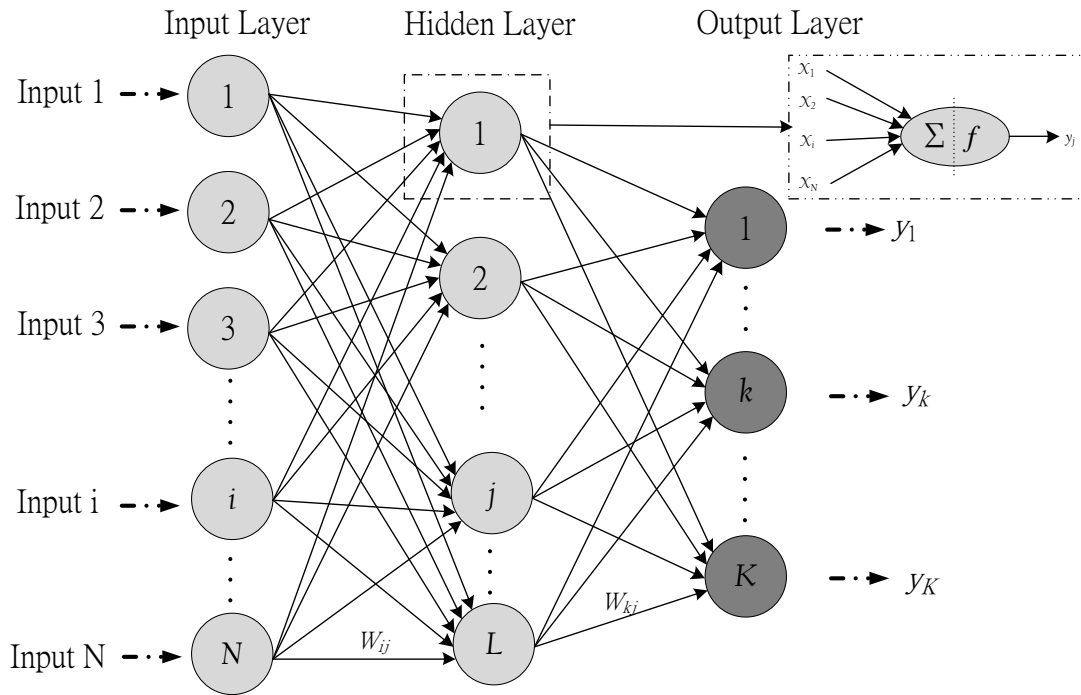


圖 2.7 倒傳遞類神經網路示意圖

倒傳遞演算法的學習過程，是由正向傳播與負向傳播所成，在正向傳播過程中，輸入訊息從輸入曾經由隱藏層加權運算，透過活化函數轉換處立後，再傳向輸出層計算出網路輸出值，每一層神經元只影響下一層神經元的狀態；若再輸出層不能得到目標輸出值，則轉為反向傳播，將訊號延原來的連接通路回轉，透過修改各層神經元的權重與偏權值，期能使誤差值達到容忍誤差範圍之內而停止。

倒傳遞類神經網路中，第 n 層地 j 層個神經元的輸入值為第 $n-1$ 層神經元輸出值的非線性函數：

$$y_j^n = f(\text{net}_j^n) \quad (2.12)$$

式中 y_j^n 為第 n 層的輸出值，對第一層來說為輸入值， f 為活化函數， net_j^n 為第 $n-1$ 層輸出值的權重累加值，可表示為式(2.12)：

$$\text{net}_j^n = \sum_i w_{ji}^n y_i^{n-1} + b_j^n \quad (2.13)$$

式中 w_{ji}^n 為第 n 層地 j 個神經元與第 $n-1$ 層第 i 個神經元的連結權重， b_j^n 為第 n 層第 j 個神經元的偏權值。由於倒傳遞類神經網路數監督式學習，其學習的目的在降低網路輸出值與目標輸出值間的差距，誤差函數 E 定義為

$$E = \frac{1}{2} \sum_k (d_k - y_k)^2 \quad (2.14)$$

式中 d_k 為第 k 個神經元的目標輸出值， y_k 為輸出層第 k 個神經元的網路輸出值。

因此，網路的學習過程，即為使誤差函數 E 最小化的過程，在此我們利用最陡坡降法來搜尋 E 的最佳解，也就是最小的誤差平方和。每當輸入一筆訓練資料，網路就稍微調整家全值的大小，調整的幅度和誤差函數對權重連結值得敏感程度成正比，也就是和誤差函數對權重數值的導函數大小成正比：

$$\Delta w_{ji} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ji}} \quad (2.15)$$

式中 η 為學習速率，其大小決定了最陡坡降法修正的步幅，而 $\frac{\partial E}{\partial w_{ji}}$ 可用微積分學的連鎖律(chain rule)得：

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial net_j^n} \frac{\partial net_j^n}{\partial w_{ji}} = \frac{\partial E}{\partial y_j^n} \frac{\partial y_j^n}{\partial net_j^n} \frac{\partial net_j^n}{\partial w_{ji}} \quad (2.16)$$

將 (2.12) 式代入 $\frac{\partial y_j^n}{\partial net_j^n}$ 得

$$\frac{\partial y_j^n}{\partial net_j^n} = f'(net_j^n) \quad (2.17)$$

將 (2.13) 式代入 $\frac{\partial net_j^n}{\partial w_{ji}}$ 可得

$$\frac{\partial net_j^n}{\partial w_{ji}} = \frac{\partial}{\partial w_{ji}} (\sum_i w_{ji}^n y_i^{n-1} + b_j^n) = y_i^{n-1} \quad (2.18)$$

(2.15) 式的 $\frac{\partial E}{\partial y_j^n}$ 可分成兩種情況：

1. 若第 n 層為最終層，即網路的輸出層：

此時， $j = k$ ；將 (2.13) 式與 $j = k$ 帶入 $\frac{\partial E}{\partial y_j^n}$ 得

$$\frac{\partial E}{\partial y_j^n} = \frac{\partial}{\partial y_j^n} \left[\frac{1}{2} \sum_k (d_k - y_k)^2 \right] = -(d_j - y_j^n) \quad (2.19)$$

2. 第 n 層不是最終層，也就是網路的隱藏層之一，可用連鎖律得

$$\frac{\partial E}{\partial y_j^n} = \sum_k \left(\frac{\partial E}{\partial net_k^{n+1}} \frac{\partial net_k^{n+1}}{\partial y_j^n} \right) \quad (2.20)$$

將式 (2.13) 代入 $\frac{\partial net_k^{n+1}}{\partial y_j^n}$ 可得

$$\frac{\partial net_k^{n+1}}{\partial y_j^n} = \frac{\partial}{\partial y_j^n} (\sum_i w_{ki} y_i^n - b_k) = w_{kj} \quad (2.21)$$

$$\text{令 } \frac{\partial E}{\partial net_k^n} = -\delta_k^n \quad (2.22)$$

再將 (2.21)、(2.22) 帶入(2.20)式可得：

$$\frac{\partial E}{\partial y_j^n} = -\sum_k (\delta_k^{n+1} w_{kj}) \quad (2.23)$$

總結上述 $\frac{\partial E}{\partial w_{ji}}$ 可分為兩種情形：

1. w_{ji} 處於輸出層與隱藏層之間

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ji}} = -(d_j - y_j^n) f'(net_j^n) y_i^{n-1} \quad (2.24)$$

將 (2.18)、(2.22) 式代入(2.16)式：

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ji}} = -\delta_j^n y_i^{n-1} \quad (2.25)$$

比較(2.24)與(2.25)式得

$$\delta_j^n = (d_j - y_j^n) f'(net_j^n) y_i^{n-1} \quad (2.26)$$

2. w_{ji} 處於隱藏層與隱藏層之間

$$\delta_j^n = [-\sum_k \delta_k^{n+1} w_{kj}] f'(net_j^n) y_i^{n-1} \quad (2.27)$$

將(2.18)、(2.22)式代入(2.16)式：

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ji}} = -\delta_j^n y_i^{n-1} \quad (2.28)$$

比較(2.27)式與(2.28)式得：

$$\delta_j^n = [\sum_k \delta_k^{n+1} w_{kj}] f'(net_j^n) y_i^{n-1} \quad (2.29)$$

因次不論 w_{ji} 在隱藏層與隱藏層之間，或 w_{ji} 處於輸出層與隱藏層之間，均可寫成

通式：

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ji}} = -\delta_j^n y_i^{n-1} \quad (2.30)$$

式中 $-\delta_j^n$ 為將(2.30)式代入(2.15)式可得

$$\Delta w_{ji} = \eta \delta_j^n y_i^{n-1} \quad (2.31)$$

此式即到傳遞演算法之關鍵公式，每輸入一組訓練範例（也就是有輸入項與目標輸出值），各個連結的權重可依此調整。倒傳遞演算法流程如圖 2.8。

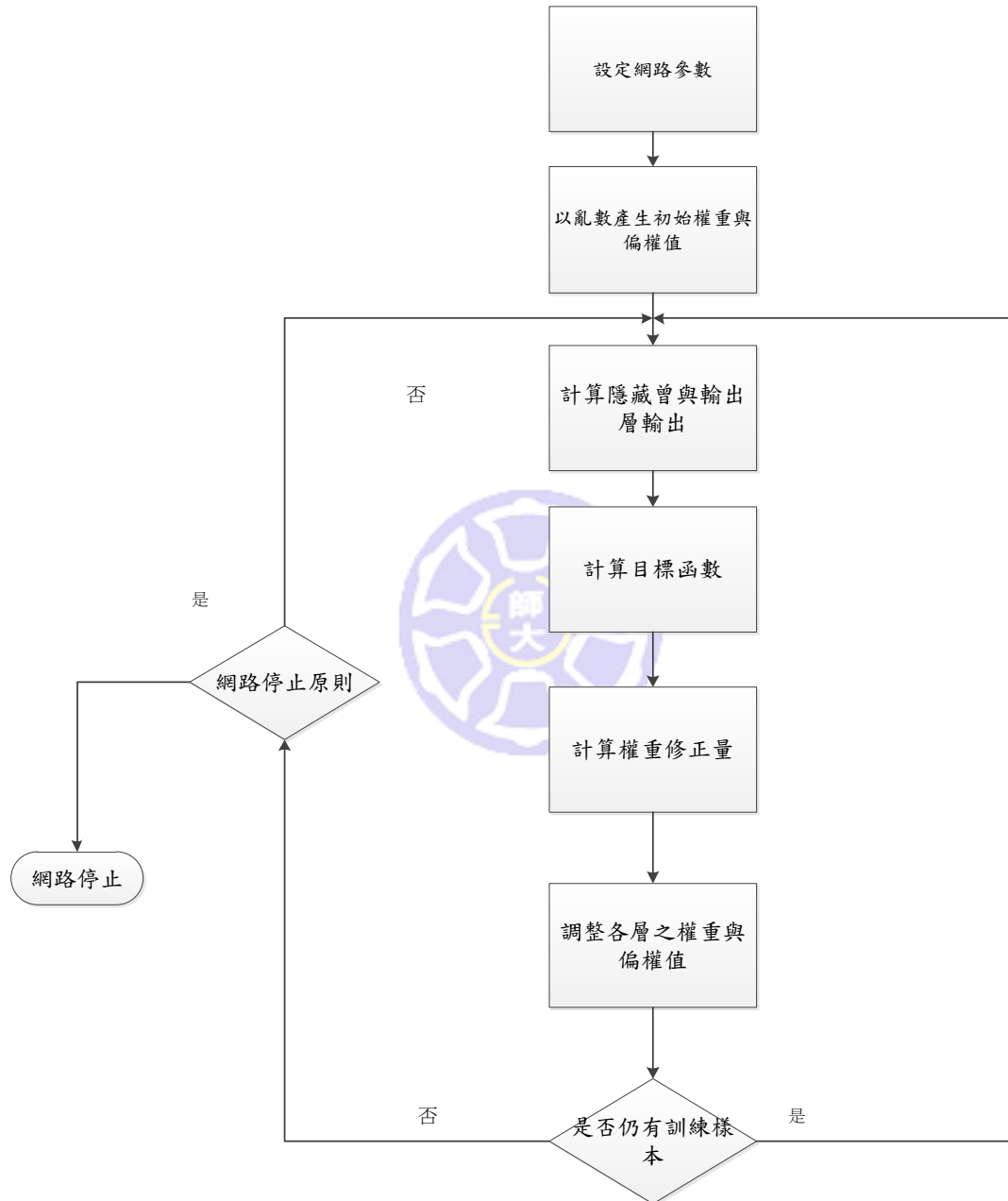


圖 2.8 倒傳遞演算法流程圖

2.5 熱動態模型之參數建立

鋰電池運作過程中，會因內部電解液化學變化產生熱量。產生的熱量為不可逆的焦耳熱及可逆熱(熵)的總和。電流經過等效串聯電阻(ESR)所產生的焦耳熱，為不可逆之能量，造成能量以熱的型式產生並且於電池內部累積使溫度升高。公式 2.31 可計算一電路於作用時產生的熱量，為時間的函數，作用的時間越長則產生的熱量越多；ESR 為等效串聯電阻值，隨著電池電量的不同，等效串聯電阻亦會受到影響。 R_n 為等效電路中與串聯電阻並聯之其他部件的電阻的總和。

$$\frac{dQ(t)}{dt} = P_{loss}(t) = i(t)^2 ESR + \sum_{k=1}^n i_k(t)^2 R_n \quad (2.31)$$

熱容量(Heat capacity)可表示為式(2.32)：

$$C_b = \frac{Q}{\Delta T} \quad (2.32)$$

C_b 為鋰電池上升 1°C 所需要的熱量；系統所生的熱量可表示為式(2.33)：

$$\dot{Q} = Ah(T_b - T_{amb}) \quad (2.33)$$

h 為熱傳係數、 A 為鋰電池表面積，將公式 2.32 及 2.33 帶入 2.31 可得到公式 2.34，此為本研究之熱動態模型之參數建立關鍵公式。

$$C_b \frac{dT}{dt} = i(t)^2 ESR + \sum_{k=1}^n i_k(t)^2 R_n - Ah(T_b - T_{amb}) \quad (2.34)$$

第三章 實驗設計與即時模型建立

3.1 實驗架構

本研究將使用昇陽國際半導體製造的磷酸鋰鐵電池，在不同的工作溫度及條件下進行實驗，實驗架構如圖 3.1。實驗完成後將各項參數加以分析整理，而後透過各項參數的蒐集，帶入類神經網路進行鋰電池模組建立。實驗中使用的電池容量為 3.2V 11.5Ah，如圖 3.2 所示，規格如表 3.1。

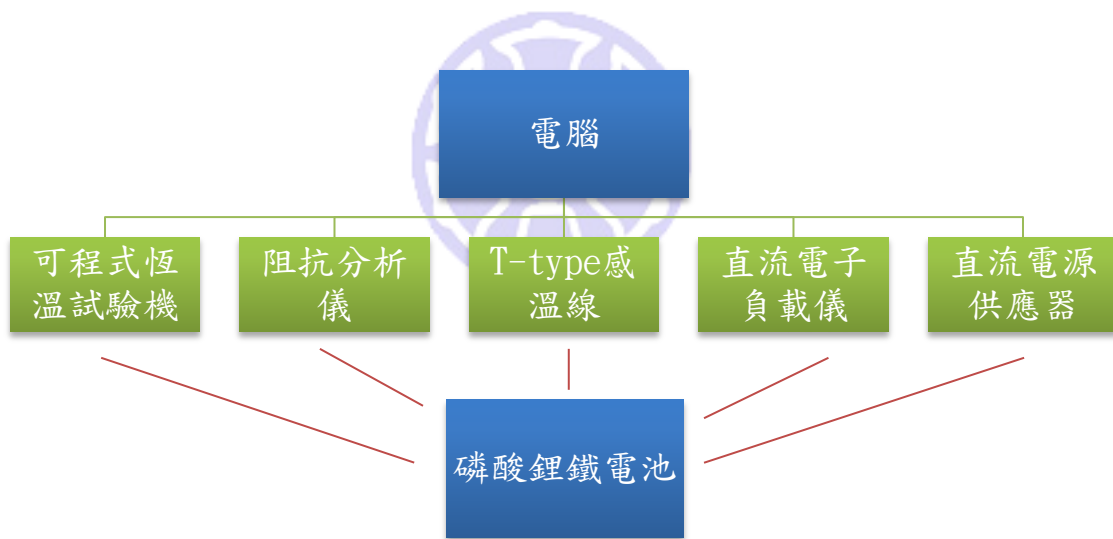


圖 3.1 實驗系統架構圖



圖 3.2 磷酸鋰鐵電池

表 3.1 磷酸鋰鐵電池規格表

Item	Specification
Capacity	11500 mAh(0.2c Charge/0.2c Discharge)
Charge Voltage	3.65 V
Typical Voltage	3.20 V
Charging Method	CC/CV (Constant Current/Constant Voltage)
Cut-off Discharge Voltage	2.1 V
Max. Discharge Current	continuous 120 A 18s pulse 140 A
Max. Charge Current	36 A
Cycle Life (minimum)	1000 Cycle (Capacity \geq 80%)
Operating Temperature	Charge 0 ~ 45°C Discharge -10 ~ 55°C
Storage Temperature	Short Period (1 month) 0 ~ 45°C Long Period (6 month) 0 ~ 35°C

Energy Density	Volumetric Energy Density (Wh / L) > 210 Gravimetric Energy Density (Wh / kg) > 105
Power Density(100% SOC,18s peak)	Volumetric Energy Density (W / L) > 177 Gravimetric Energy Density (W / kg) > 845
Weight of Bare Cell	376±10 g

GCT-120-40-SP-AR 可程式恆溫試驗機

GCT-120-40-SP-AR 可程式恆溫試驗機也可稱為環境試驗機，其功能在提供一穩定的環境狀態或模擬各種不同的環境條件，藉以了解待測物在不同環境狀態下的影響，可以提供使用者修正帶測物的誤差。可程式恆溫試驗機如圖 3.3 所示，規格如表 3.2。



圖 3.3 可程式恆溫試驗機

表 3.2 可程式恆溫試驗機規格

機器型號	GCT-120-40-SP-AR
內部尺寸	40 x 60 x 50 cm (W x H x D)
外部尺寸	85 x 60 x 50 cm (W x H x D)

溫度範圍	-40°C to 100°C
溫度控制精度	±0.3°C
溫度分佈均勻度	±0.5°C

ZENNIUM 阻抗分析儀

ZENNIUM 阻抗分析儀，分析交流阻抗時，頻率可由 10μHz 掃描至 4 MHz，更可以自行加上直流偏壓，直流 0 到±10V，電流為±2.5A，振幅從 0.001~1V，提供多種電化學測量技術，涵蓋了循環伏安、恆電位、庫倫法、電位法、交流阻抗等。其阻抗分析儀具有四個電極，分別為工作電極(Working Electrode, WE)、感測電極(Sense Electrode, SE)、反向電極(Counter Electrode, CE)、參考電極(Reference Electrode, RE)。由工作電極量測通過待測系統的電流；感測電極補償工作電極上的電位；反向電極提供電流到待測系統；參考電極設定工作電極上的電為參考點。ZENNIUM 阻抗分析儀如圖 3.4 所示，其規格如表 3.3 所示。

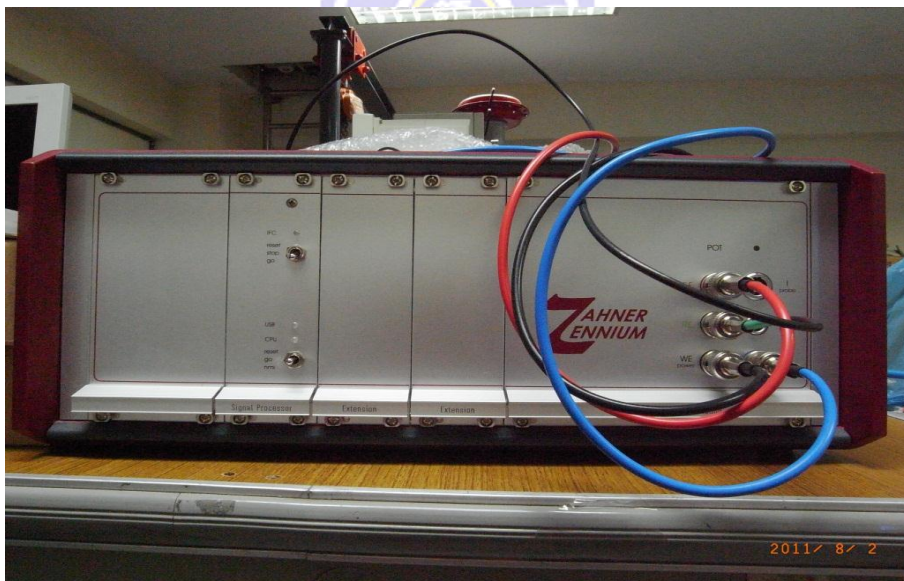


圖 3.4 ZENNIUM 阻抗分析儀規格表

表 3.3 ZENNIUM 阻抗分析儀規格表

Frequency	Range: 10uHz~4Hz Resolution: 0.01%
-----------	---------------------------------------

	Accuracy: <0.01%
AC-amplitude	1mV~1V
Potential Range	±4V
Current Range	±2.5A
Impedance Range	30uohm~100Gohm
Ambient Temp.	10 to 30°C
Dimensions	364 x 160 x 376mm
Weight	12kg

PLZ1004W 直流電子負載儀

PLZ1004W 直流電子負載儀可承受 150V/200A/1000W 之上限負載，並提供定電流(CC)，定電阻(CR)，定電壓(CV)，定功率(CP)，定電流同時定電壓(CC+CV)，定電阻同時定電壓(CR+CV)等六種模式，用以模擬各種不同的電力裝置之負載需求。圖 3.5 為 PLZ1004W，規格如表 3.4 所示。



圖 3.5 PLZ1004W 直流電子負載儀

表 3.4 PLZ1004W 直流電子負載儀規格表

Model	PLZ1004W
Operating Voltage, DC	1.5V~150V
Maximum Current	200A
Wattage(W)	1000W

Operation Modes	CC, CR, CV, CP, CC+CV, CR+CV
-----------------	------------------------------

SPD-3606 直流電源供應器

SPD-3606 直流電源供應器，主要作為鋰電池充電時的供電裝置，其最高可達到 120V/3A 的連續直流電源輸出。



圖 3.6 SPD-3606 直流電源供應器

表 3.5 SPD-3606 直流電源供應器規格表

Model	SPD-3606 DC Power Supply
Mode	Output range
CH1/CH2 Independent Mode	0~30V/0~6A or 0~60V/0~3A for each channel
CH1/CH2 Tracking Series Mode	0~120V/0~3A or 0~60V/0~6A
Tracking series with common terminal	0~60V/0~3A or 0~30V/0~6A for CH1~COM 0~-60V/0~3A or 0~-30V/0~6A for CH1~COM

3.2 充放電實驗

鋰電池充電實驗如圖 3.7，為了達到每次充進電池中的電量能穩定，充電時將電池置於恆溫箱中，待電池表面溫度達到 25°C 時才開始充電，充電過程中利用 CC(constant current)/CV(constant voltage)的方式將電池充電至電壓 3.55V 後，則不再對電池充電。

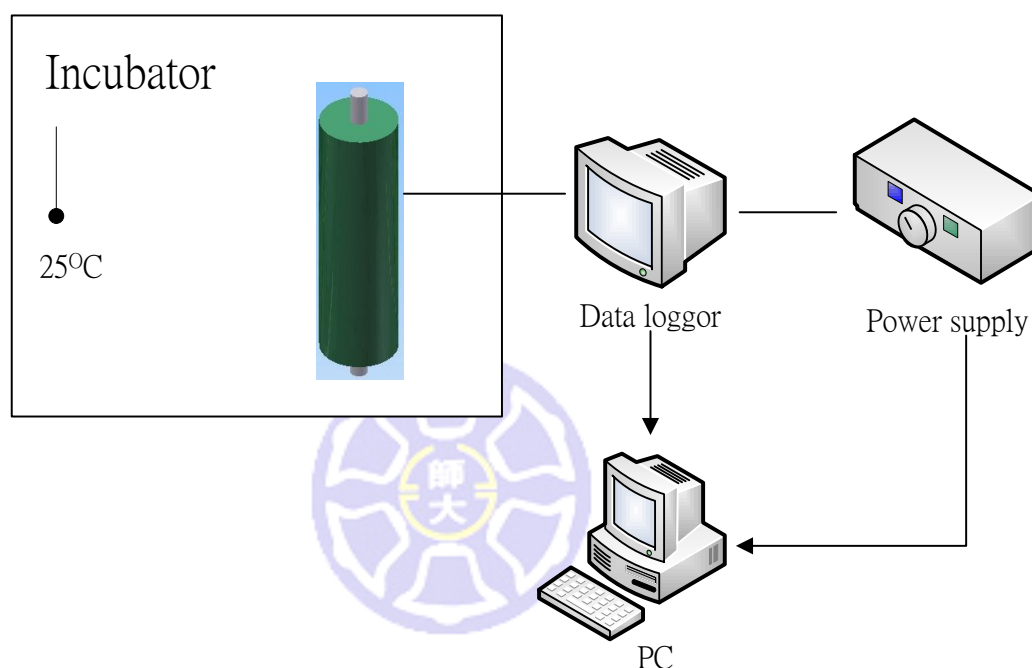


圖 3.7 充電實驗接線示意圖

電池放電實驗分為三部分，第 1 部分對電池隔絕及為隔絕熱傳兩種，分別以 0.5C (5.75A)、 1C (11.5A)、 2C (23A)的電流對電池連續放電，電池之起始溫度控制於室溫 25°C ，觀察三種不同的放電深度及有無隔絕熱傳，對於電池發熱的影響，並藉由公式 2.35 計算出電池的 h 及 C 。第 2 部分則對電池採間歇性放電不隔絕熱傳，並將電池放置於 $0\sim 40^{\circ}\text{C}$ 的環境下紀錄 14 個 SOC 的開迴路電壓(open circuit voltage, OCV)，用以觀察不同的放電狀態及溫度下，對電池電量的影響，如表 3.6。由於鋰電池之特性曲線在 SOC 70%~30%為電壓較穩定的區間，從 SOC 30%以下則為電池無法提供有效電力的區域[20]，故實驗中在這兩個區間中將拉

大實驗間距。第三部分為電量測試，分別設定放電電流 0.5C、1C、2C 採用連續放電，並改變放電時的電池溫度，溫度的設定分別有攝氏 10 度、20 度、30 度、40 度，終止電壓設定在 2.1V，紀錄總放電時間以計算電量。間歇放電實驗中設定電池本體溫從攝氏 10 度到 40 度及 0.5C、1C、2C 等，3 種放電深度，以間歇是分批次放電，以 SOC100、95、90、85、80、75、70、60、50、40、30、20、10、0 等，共計 14 個量測點作為停止放電的位置，經 15 分鐘的靜置後，使電池回到穩定的狀態再進行放電。透過上述的實驗參數，預計將可得到 12x14 的矩陣，作為後續建模的實驗比對值。

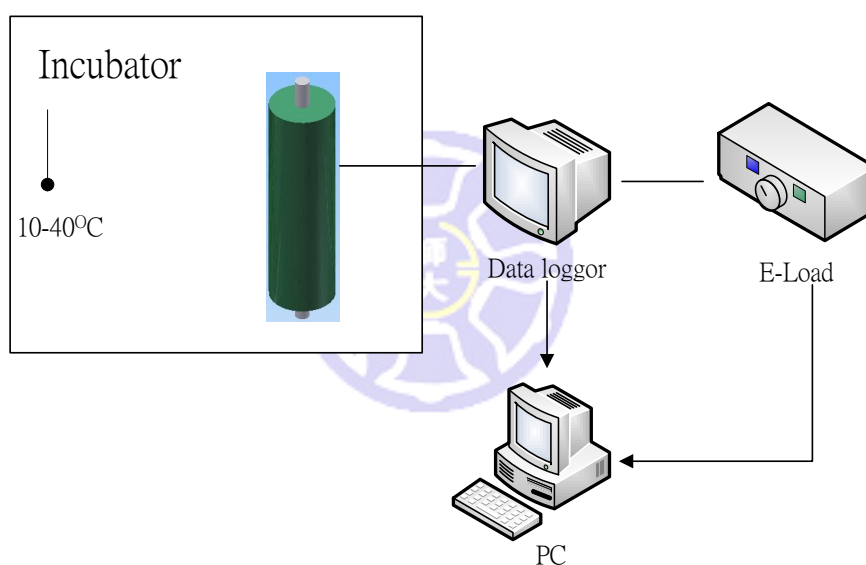


圖 3.8 放電實驗接線示意圖

3.3 交流阻抗與熱效應實驗

本實驗目的為得出在不同的工作溫度下，鋰電池之交流阻抗特性，並藉由大量數據，提供後續類神經網路訓練之參考依據。本實驗參數將控制電量、電池工作溫度以及電池放電後的靜置時間。

首先工作溫度部分，先調整環控箱溫度設定置目標溫度，同時將鋰電池放置於環控箱內使其達到設定的工作溫度。鋰電池之本體溫度控制以每間隔攝氏 10 度一筆，共 10 度、20 度、30 度、40 度，共有 4 種溫度變化，觀察不同溫度下的電池性能曲線。

電量部分，電池總電量為 11.5Ah，故實驗中之電量將以此為基準，並同時參考電池使用手冊之終止電壓為 2.1V，計算電池在不同溫度及放電電流下，所受到的影響，當電池放電至 2.1V 時，就不再對電池放電，實驗中電池電量的控制依照間歇放電的 SOC 設定，分成 14 次量測交流阻抗，再利用圖 3.7 之等效電路模型分析各個元件數據，作為類神經網路訓練的目標矩陣。

本實驗為得到各個不同百分比的 SOC 下，穩定的交流阻抗實驗結果，將於每一次放電結束後，將電池靜置 15 分鐘，使電池之開迴路電壓(OCV)能達到相對穩定之於剛放電完後的狀態，而後才依當時之開迴路電壓(OCV)設為交流阻抗之參數，施以交流阻抗實驗量測，交流阻抗實驗施測方式如圖 3.10。

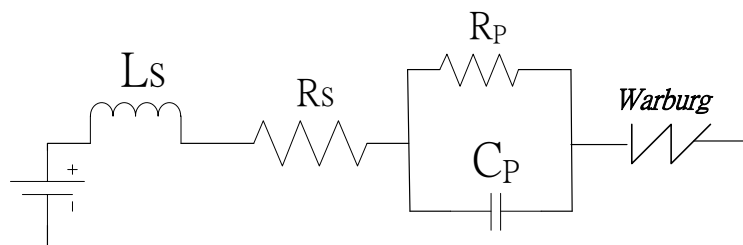


圖 3.9 鋰電池之等效電路模型

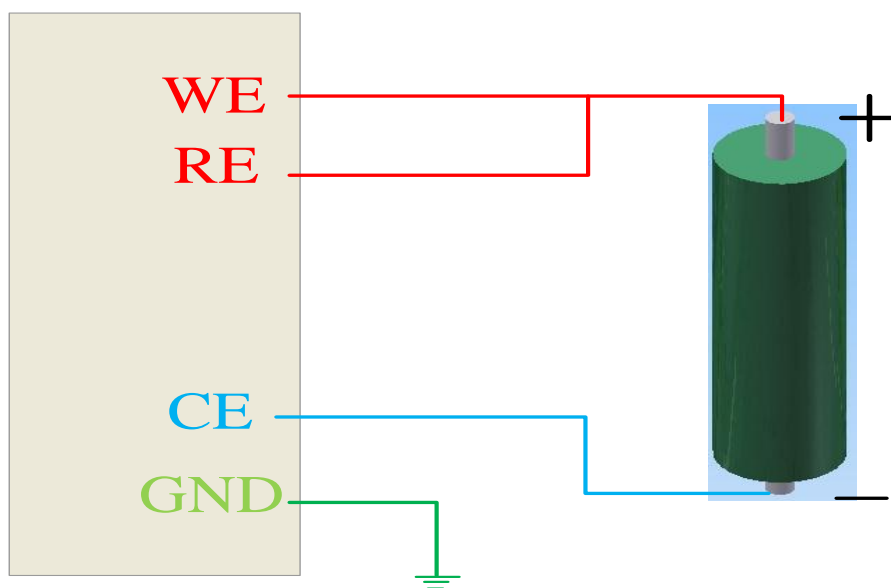


圖 3.10 鋰電池交流阻抗分析實驗接線圖

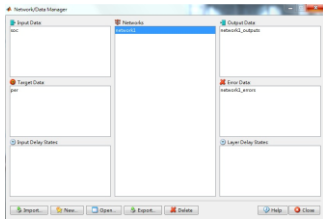


3.4 類神經元權重訓練

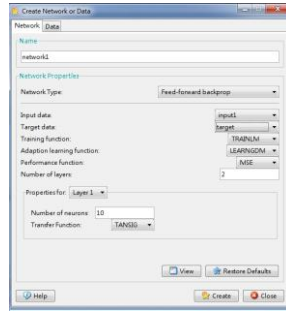
本研究將運用 MathWorks 公司所推出的 Matlab/Simulink/NNtool 之類神經系統編輯軟體來建立具熱效應之鋰電池動態模型。其中 NNtool 的編輯流程主要分成幾個區塊，如圖 3.11。數值整理(Data manager)、建立網路資料(Create Network Data)、網路結構(Network)、網路訓練(Network Training)。數值整理為整理輸入矩陣、輸出矩陣及編輯類神經網路的內部參數，輸入及輸出矩陣如表 3.9。輸入矩陣及輸出矩陣的輸入與輸出項數必須相對應；透過建立網路資料設定，選擇要使用的網路類型(Network type)、輸入函數、目標函數、訓練函數(Training function)、適應性學習函數(Adaption learning function)、性能函數(Performance function)、輸入網路層數(Number of layers)、神經元的數目(Number of neurons)、轉移函數的類型(Transfer function)等項目，建立完整的倒傳遞類神經網路。

表 3.6 為輸入矩陣及目標矩陣，使用動量和適應性學習率的梯度下降倒傳遞權重訓練(Trainlm)做為轉移函數，輸入層使用正切雙曲轉移函數(Tansig)，線性轉移函數(Purelin)用於輸出層。若輸出層使用雙曲轉移函數，網路的輸出將被限制在很小的範圍內；但使用線性轉移函數，則網路的輸出就能夠取任意值[22]。訓練次數固定在 5000 次，神經元數量為 30 個，隱藏層為 2 層，網路之整體架構如圖 3.12。

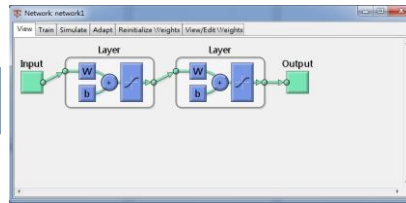
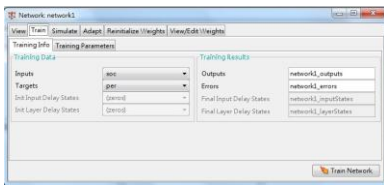
DATA Manager



Create Network Data



Network Training



Training results

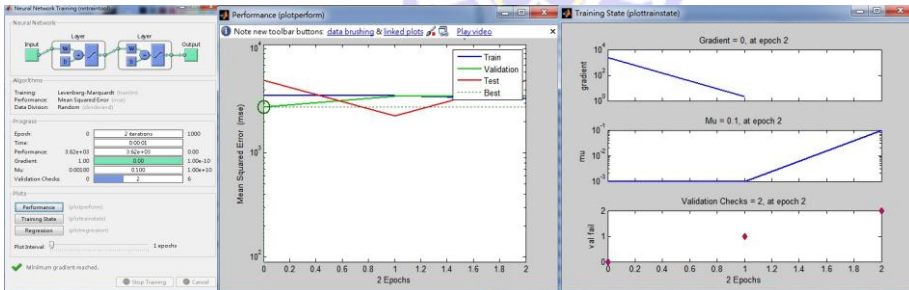


圖 3.11 Matlab NNtool 編輯流程圖

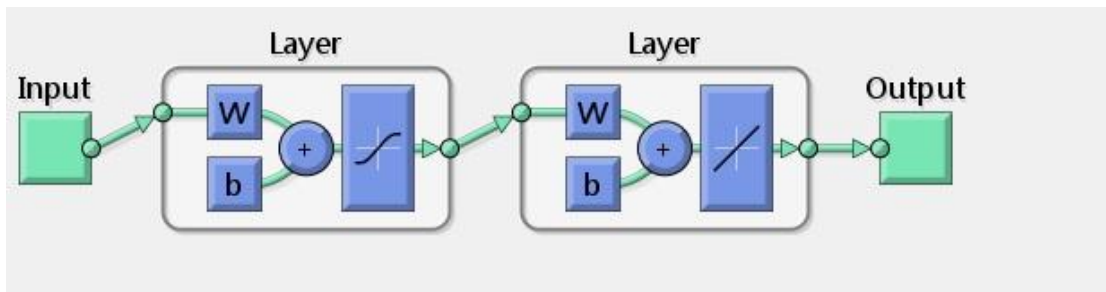


圖 3.12 倒傳遞類神經網路架構圖

表 3.6 輸入矩陣及目標矩陣

輸入矩陣	
SOC	
T_b	
目標矩陣	
R_s	
R_p	
C_p	
R_w	

3.4.1 倒傳遞網路的限制

1. 梯度下降演算法的速度一般來說較慢，若要用於穩定的學習，必須使用較小的速率；動量變化演算法通常比簡單梯度下降快，因為在學習速率較快的狀態下仍可維持穩定度。這兩種方法只有用在逐次訓練才是正常的。
2. 多層網路具有執行任何線性或非線性的計算能力，並且能夠隨意逼近任何有理函數，如此網路克服了感知器和線性網路的問題。
3. 非線性網路的學習速率的決定具有挑戰性。正如同使用線性網路，太大的學習速率導致不穩定的學習；反之，太小的學習速率則會使訓練時間過長。
4. 網路對隱藏層神經元的數目也很敏感。神經元太少會導致無法配適；神經元過多則會過度配適。

第四章 結果與討論

4.1 鋰電池具熱效應時域分析

圖 4.1、4.2 為電池在不同的放電電流下進行實驗，將電池放置於室溫條件下，施予隔絕熱傳及未隔絕熱傳的環境下連續放電，由 SOC 100% 到 0%，紀錄 3 種不同放電深電流下(0.5C、1C、2C)鋰電池的溫度上升情形。於隔熱狀態放電電流 0.5C 時，電池表面上升 6.6°C ；放電深度 1C 時，電池表面上升 11°C ；放電深度 2C 時，電池表面上升 14.65°C 。於未隔絕熱傳放電電流 0.5C 時，電池表面上升 2°C ；放電深度 1C 時，電池表面上升 6°C ；放電深度 2C 時，電池表面上升 12.7°C 。由圖可見，當輸出的電流愈大，電池上升的斜率會增加，當電池電量越低時，會因電池內阻提升，電池溫度上升的斜率也會增加。

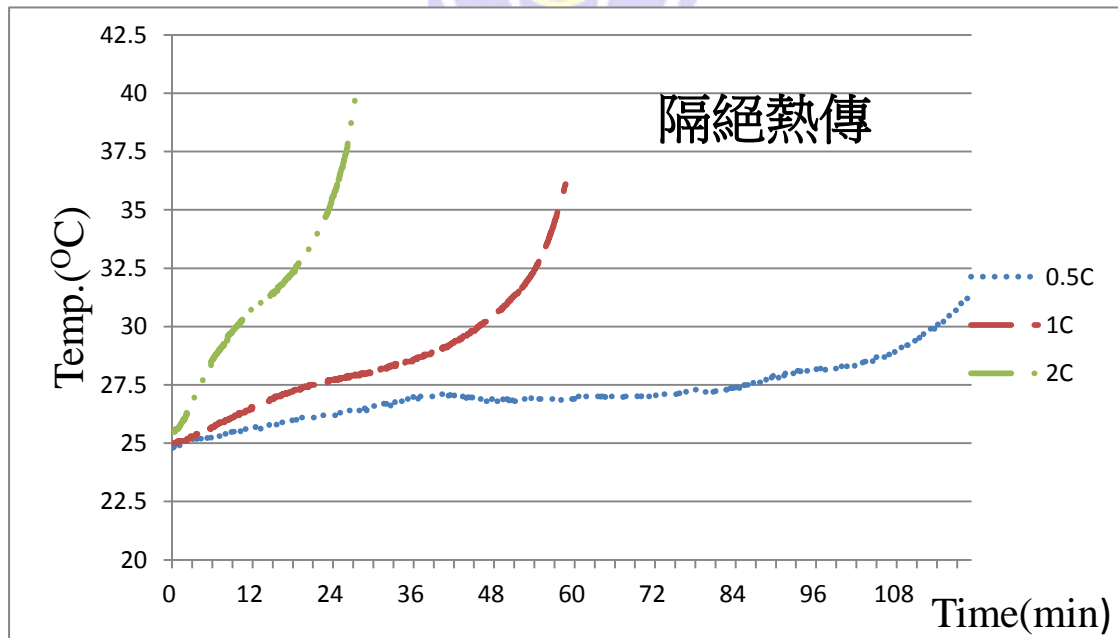


圖 4.1 不同放電深度之電池表面溫度上升比較(隔絕熱傳)

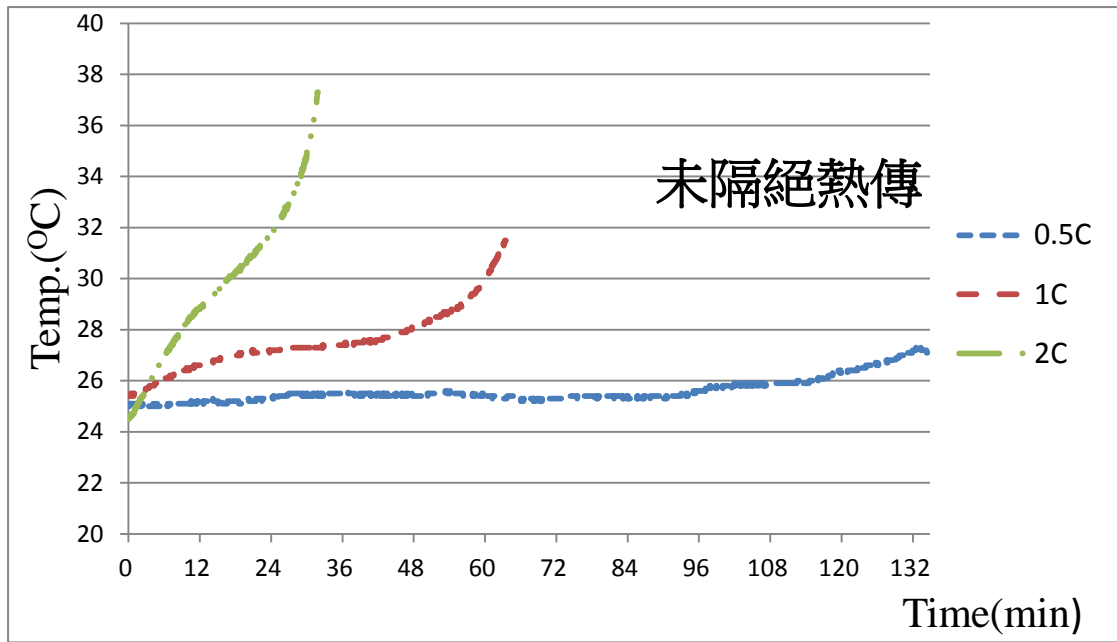


圖 4.2 不同放電深度鋰電池表面溫度上升比較(未隔絕熱傳)

圖 4.3 為鋰電池於 10-40°C 時，0.5C-2C 放電時的電池電量比較，電量最高時可達到 11.39Ah，最低為 8.64Ah。由圖 4.3 可見，溫度及放電電流與電池電量成正相關。電池於 10°C 時明顯低於 40°C 放電時所釋放的電量；隨著放電電流的增加，電池所能釋放的電量也會減少。由此可知，溫度及放電電流的大小，會對電池的性能造成影響。

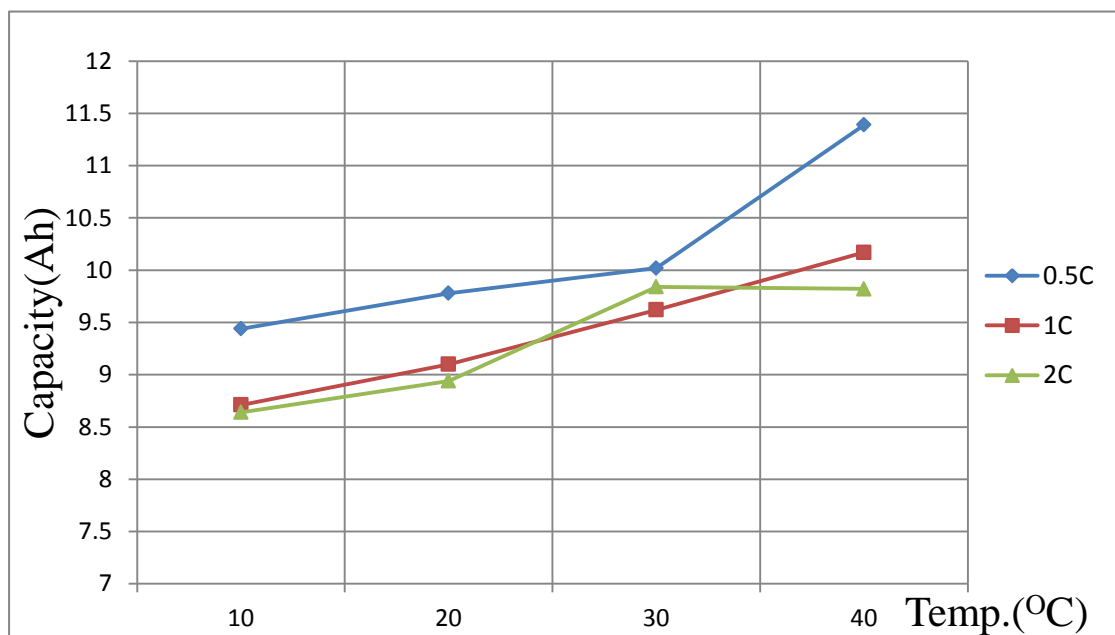


圖 4.3 不同工作溫度與不同放電電流的電量比較

圖 4.4 至 4.6 為鋰電池於不同溫度下，相同放電電流的壓降比較，分別為 0.5C、1C、2C，放電流程如表 3.6。電池於 10°C 時，0.5C 的壓降在 0.101-0.986V 間、1C 在 0.193-1.099V 間、2C 在 0.265-1.0106 間。在 40°C 時，0.5C 的壓降在 0.067-0.561V 間、1C 在 0.087-0.495V 間、2C 在 0.148-0.838V 間。當電池的 SoC 下降時，電壓降幅會越大；將電池的溫度提高時，則會使得電壓降的幅度變小。在輸出電流相同的情況下，輸出電壓越低會使輸出功率下降。將兩者相比較，當溫度接近理想工作溫度時，電池有較佳的性能表現；當溫度下降，會使電池的性能降低；而連續的是使用大電流對電池放電則會使可用得電量減少，放電電流降低時則反之。

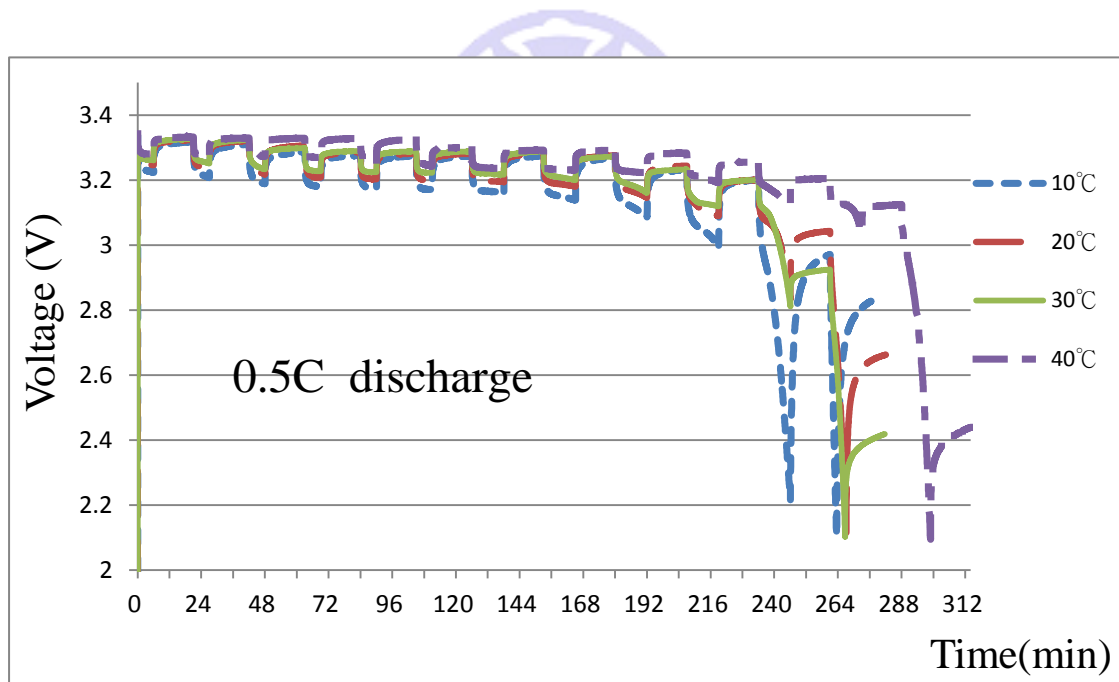


圖 4.4 鋰電池於不同工作溫度下 0.5C 放電比較

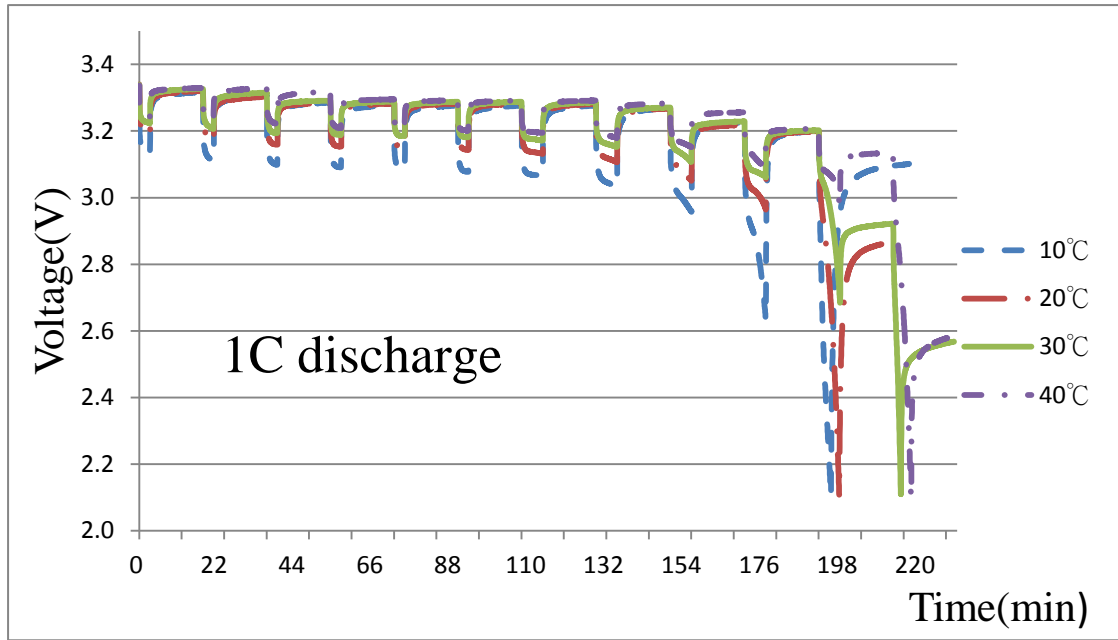


圖 4.5 鋰電池於不同工作溫度下 1C 放電比較

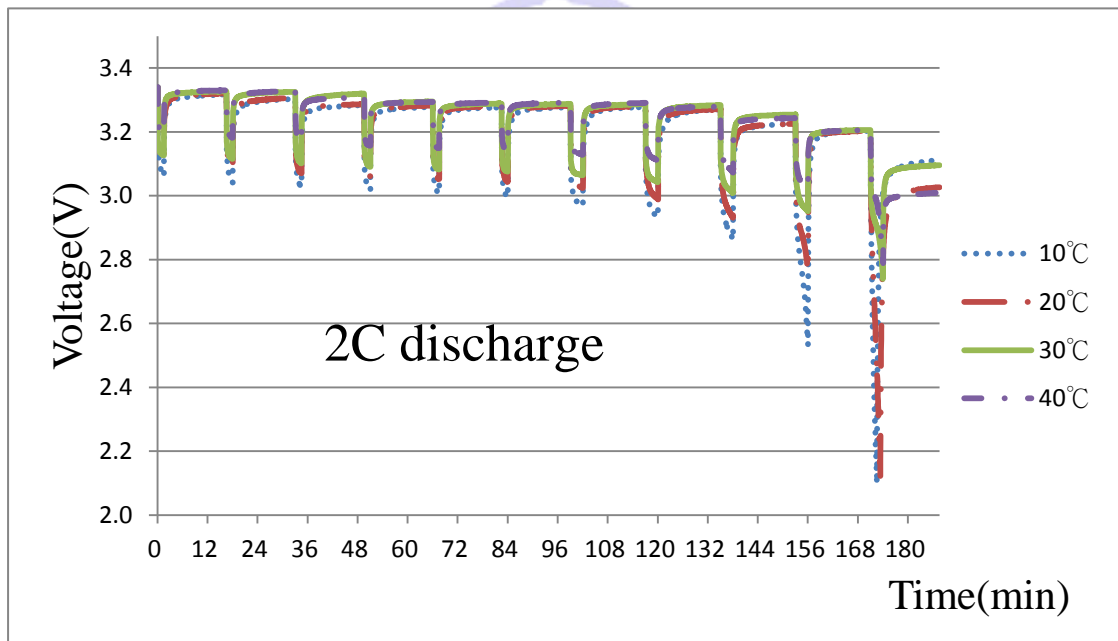


圖 4.6 鋰電池於不同工作溫度下 1C 放電比較

4.2 鋰電池具熱效應交流阻抗分析

圖 4.7 為 10°C 時各 SOC 的交流阻抗結果，由圖可發現不論在何種溫度下，阻抗頻譜呈現出的結果都是非線性，再將這些阻抗頻譜利用圖 3.7 的等效電路分析後，可得圖 4.12-4.16 的結果。

圖 4.12a-e 為等效電路中各元件於 Curve fitting 後所得到的結果。圖 4.12a 為電感，代表鋰電池的電極於測量時與儀器之量測夾具所造成的電感現象，不論在何種狀況下，其結果都在 500nH 以下，對於等效電路的模擬影響甚低，在模型終將不把電感的效應放入等效電路中。圖 4.12b 為串聯電阻的參數值，為等效電路中對電池內阻影響較大的元件，當溫度越低時，元件的結果變動的狀況會越大，越接近工作溫度時，阻抗的結果則會趨於穩定。圖 4.12c 與 4.13d 為並聯電阻及並聯電容在不同溫度下的表現。當 SOC 下降時，並聯電阻的值越低，並聯電容則有上升的趨勢；當溫度降低時，並聯電阻及並聯電容的變化會越大，當溫度升高時，則兩者的結果，在各個 SOC 底下都會趨於穩。圖 4.12e 為 Warburg 的阻抗結果，當溫度越高時，阻抗會越小，當 SOC 降低時，則會增加，溫度越低，增加的趨勢會越早。

將結果整理後，修正後的等效電路模型，如圖 4.11。類神經網路將以此四種元件(三電阻、一電容)作為類神經網路的目出矩陣，進行訓練。

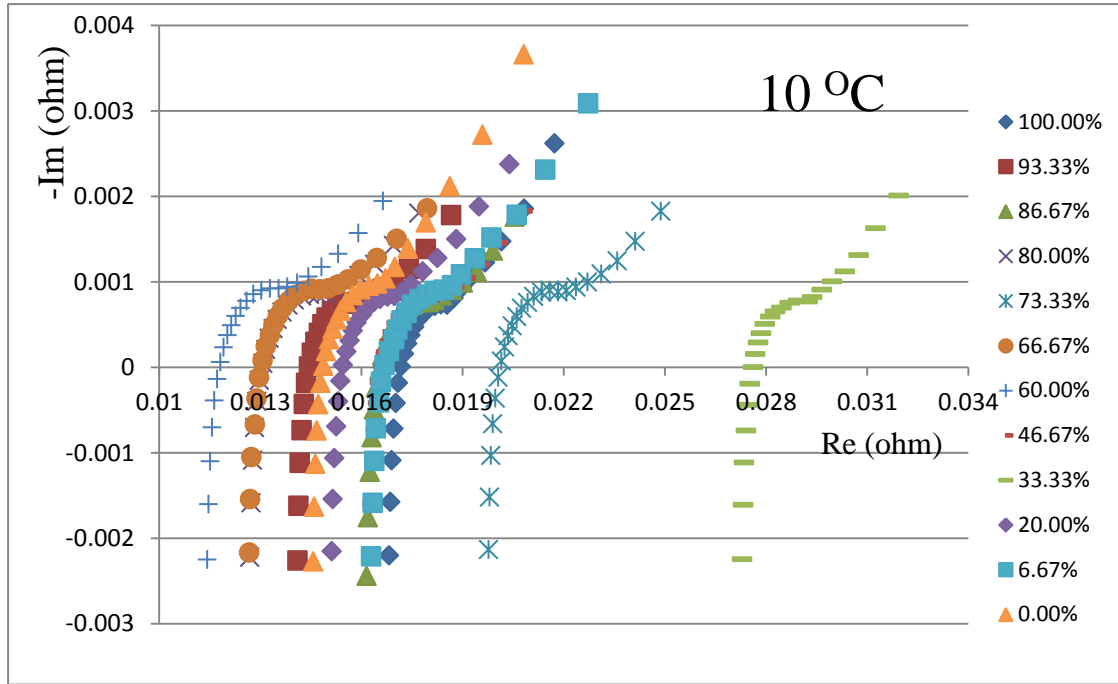


圖 4.7 10°C時，鋰電池各 SoC 的交流阻抗頻譜

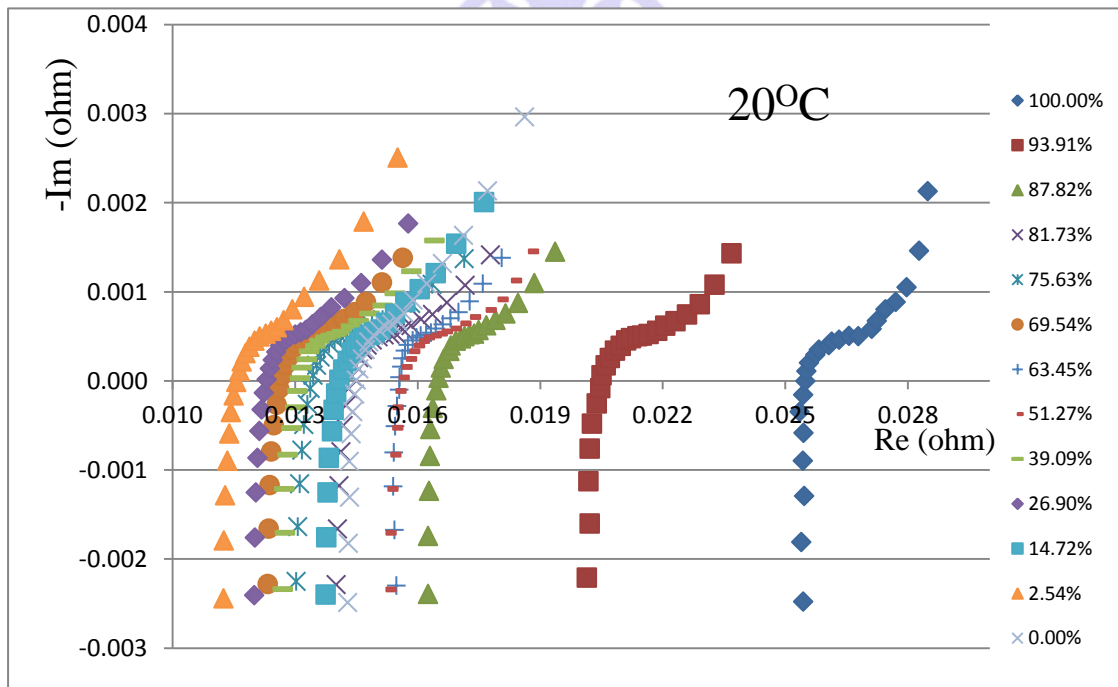


圖 4.8 20°C時，鋰電池各 SOC 的交流阻抗頻譜

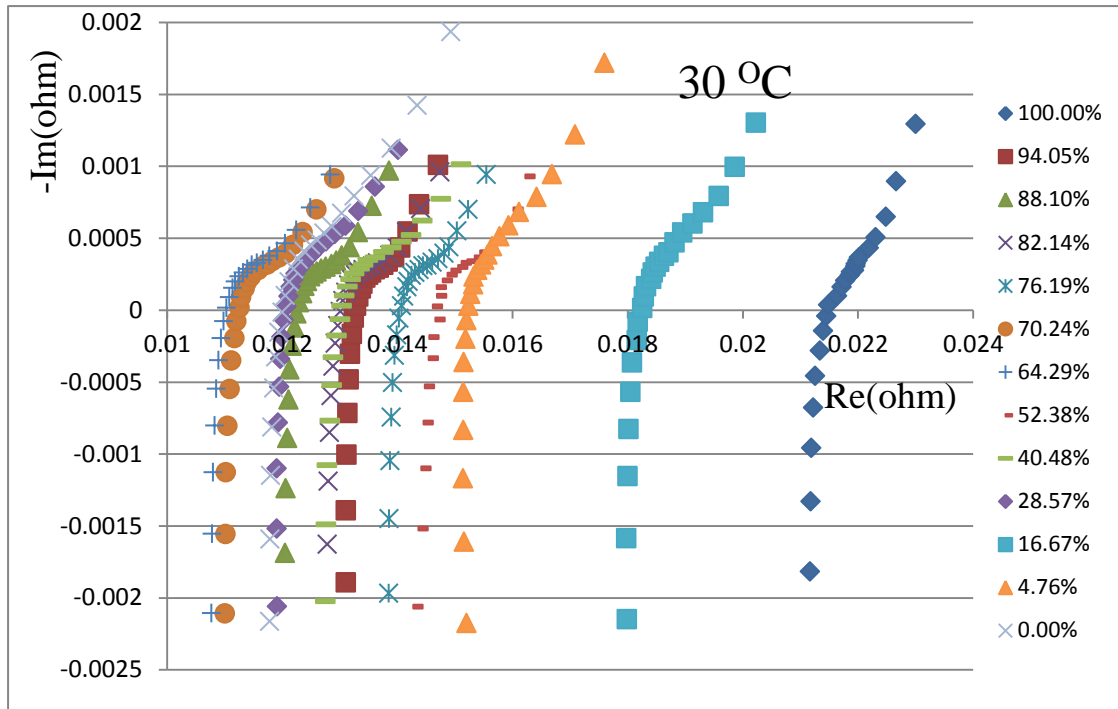


圖 4.9 30°C時，鋰電池各 SOC 的交流阻抗頻譜

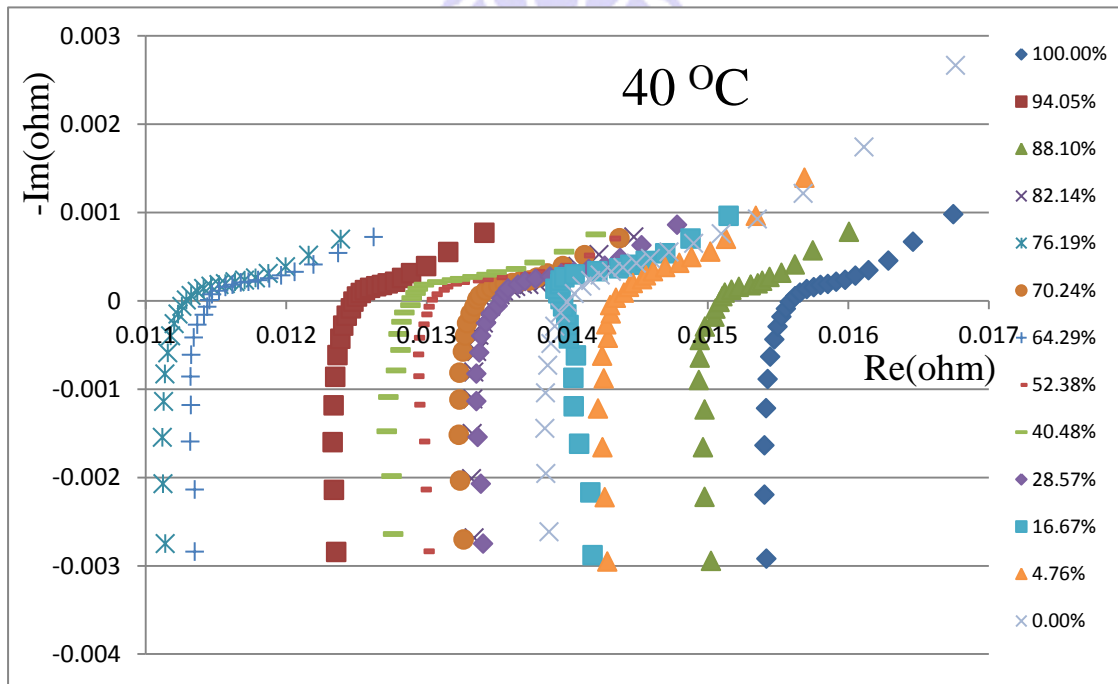


圖 4.10 40°C時，鋰電池各 SOC 的交流阻抗頻譜

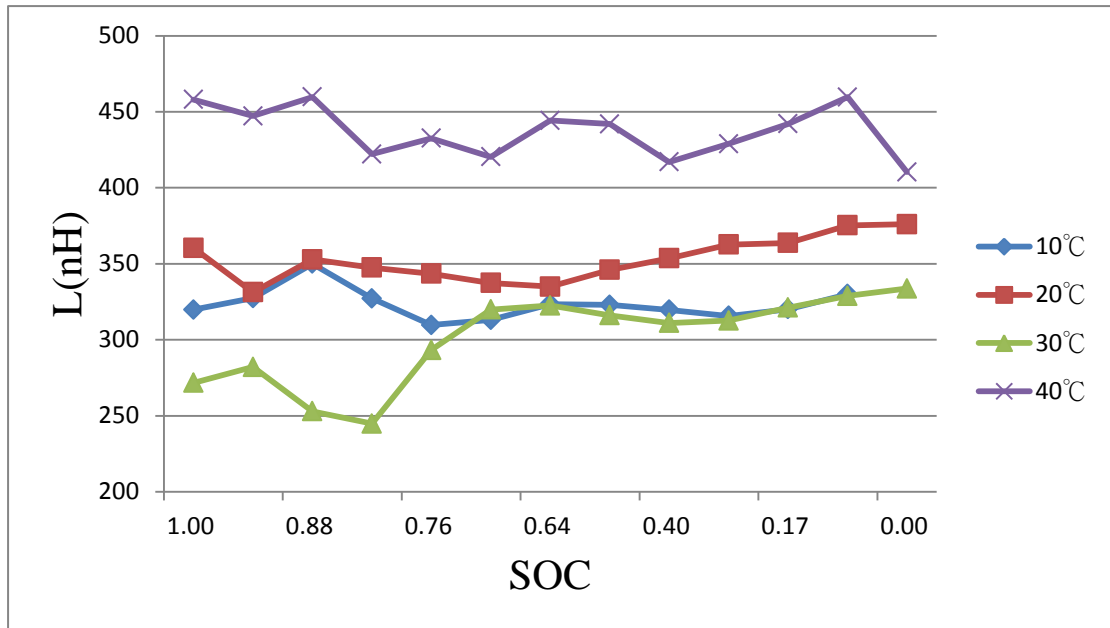


圖 4.12a 不同溫度及 SOC 底下的等效電路元件參數值—電感

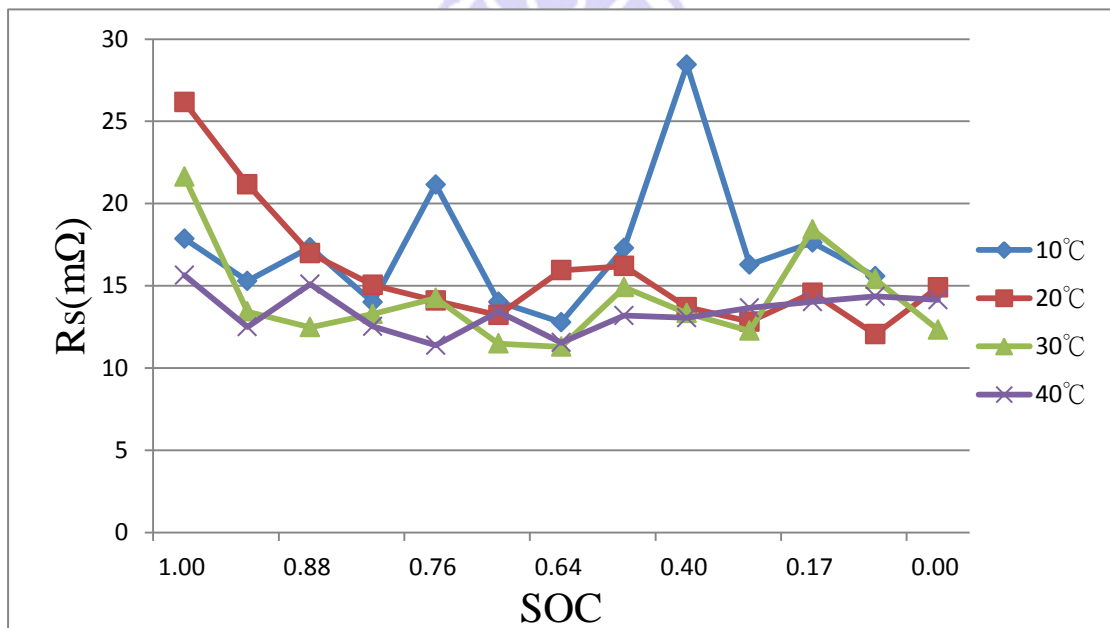


圖 4.12b 不同溫度及 SOC 底下的等效電路元件參數值—串聯電阻

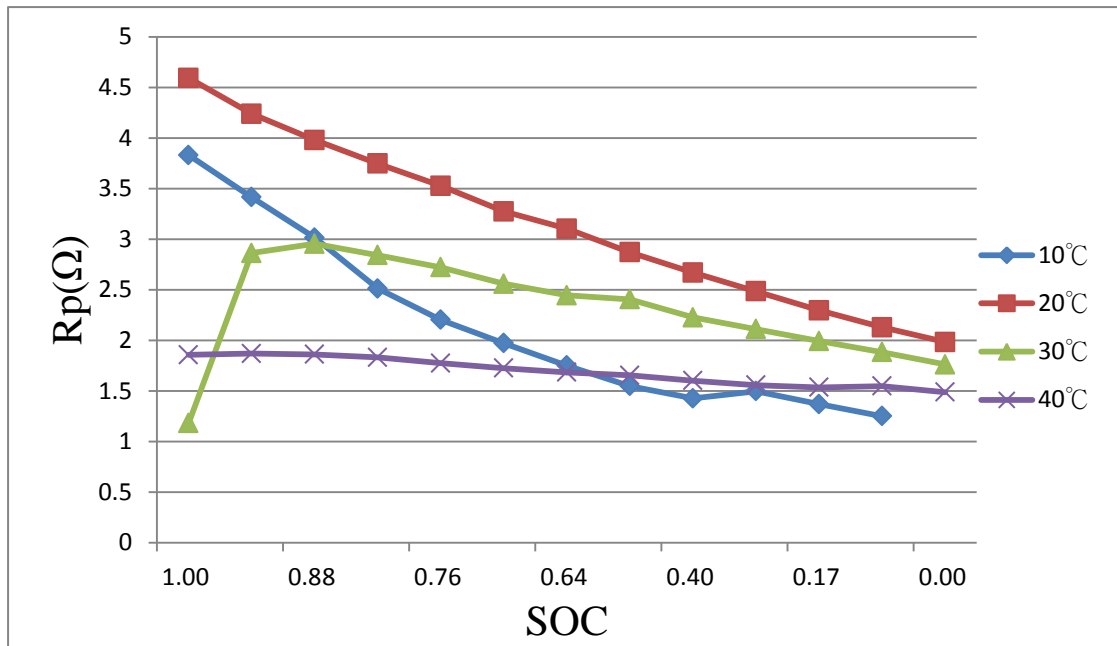


圖 4.12c 不同溫度及 SOC 底下的等效電路元件參數值—並聯電阻

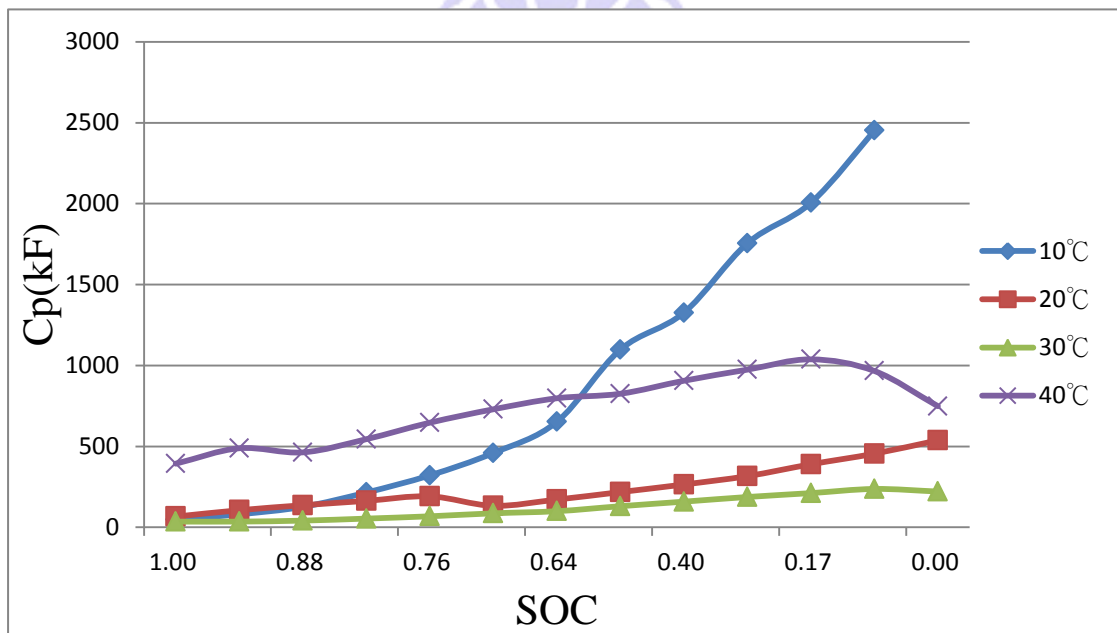


圖 4.12d 不同溫度及 SOC 底下的等效電路元件參數值—並聯電容

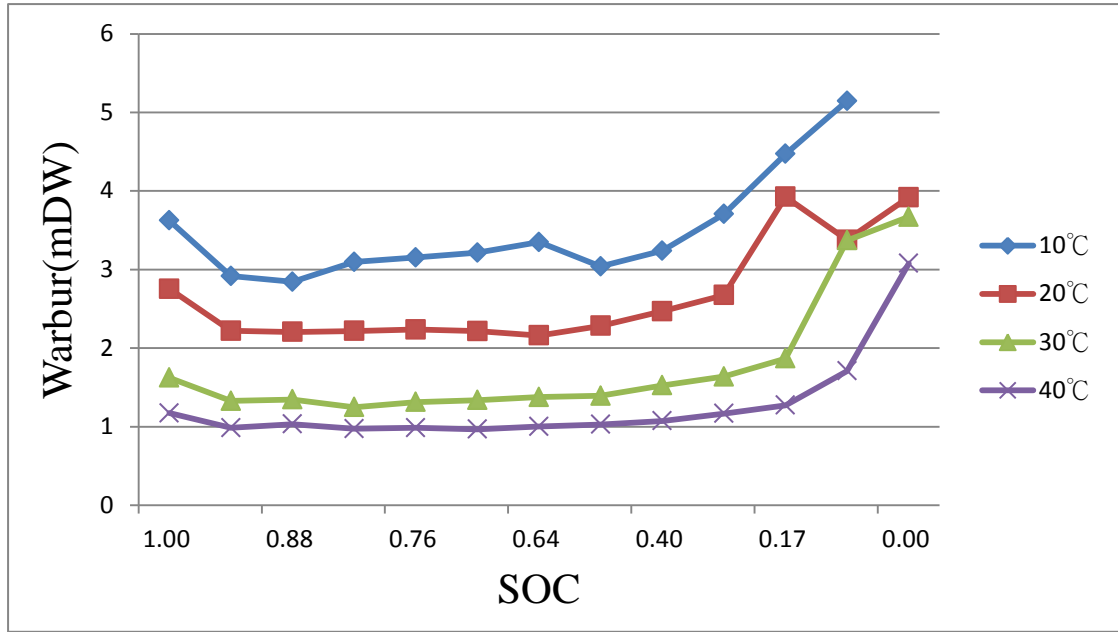


圖 4.12e 不同溫度及 SOC 底下的等效電路元件參數值—Warburg 電阻

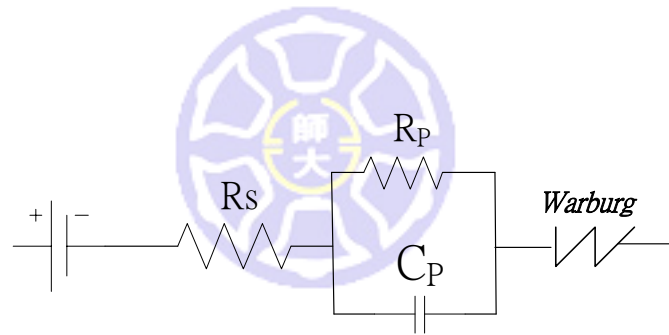


圖 4.11 修正後的鋰電池等效電路

4.3 系統參數之類神經網路訓練

本研究利用 Matlab/nntool 以鋰電池之 SOC 及溫度作為鋰電池 model 的輸入矩陣，等效電路的四項主要元件，Rs(串聯電阻)、Rp(並聯電阻)、Cp(並聯電容)、Rw(Warburg 電阻)，作為類神經網路的目標矩陣，經過訓練後的結收斂結果如圖 4.13。經過 5000 次的訓練後，經過訓練的結果經迭代過後，誤差會收斂至 6.23×10^{-6} ，表示已訓練完成，可帶入模型驗證。

本研究已成功建立一類神經網路模型，當鋰電池 SOC 及溫度改變時，類神經網路模型的輸出的四個元件值也隨之變動，模型架構如圖 4.14，經訓練後的類神經網路，輸入為溫度及 SOC 輸出則為等效電路四項元件參數值。圖 4.15 為鋰電池模型所模擬的等效電路各元件參數值，當 SOC 及溫度變化時，其輸出也會隨之改變。



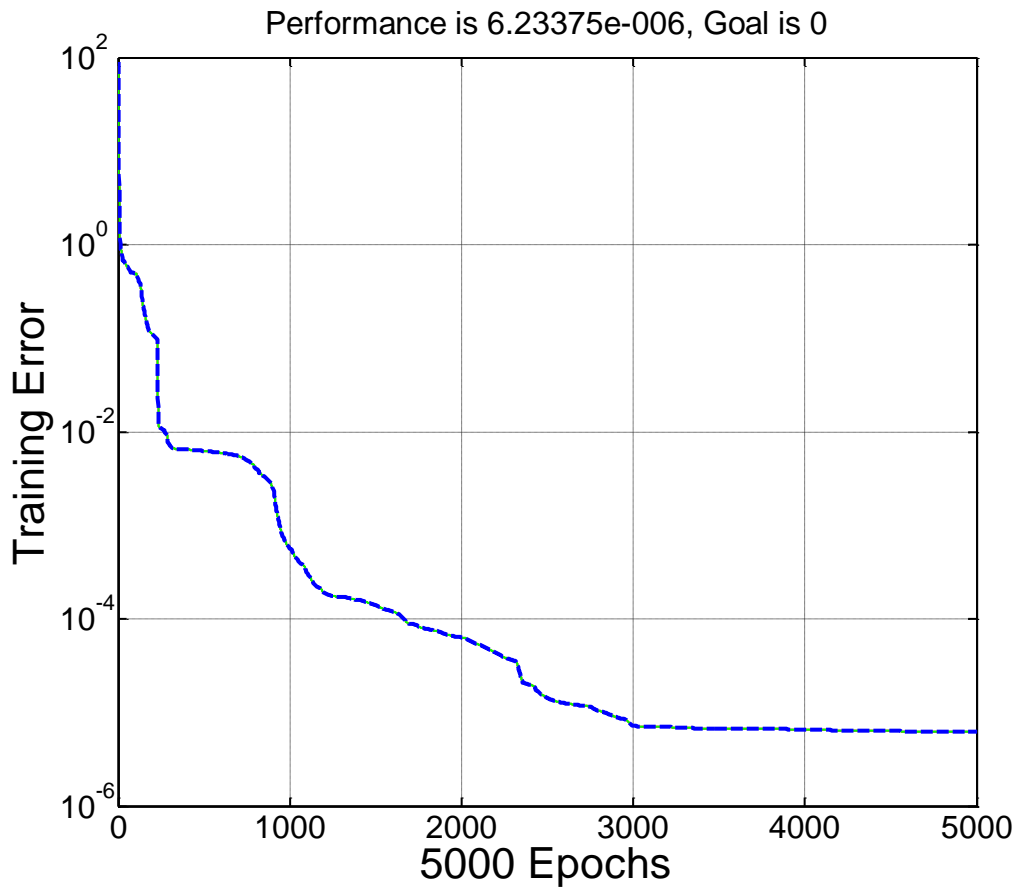


圖 4.13 類神經網路訓練結果

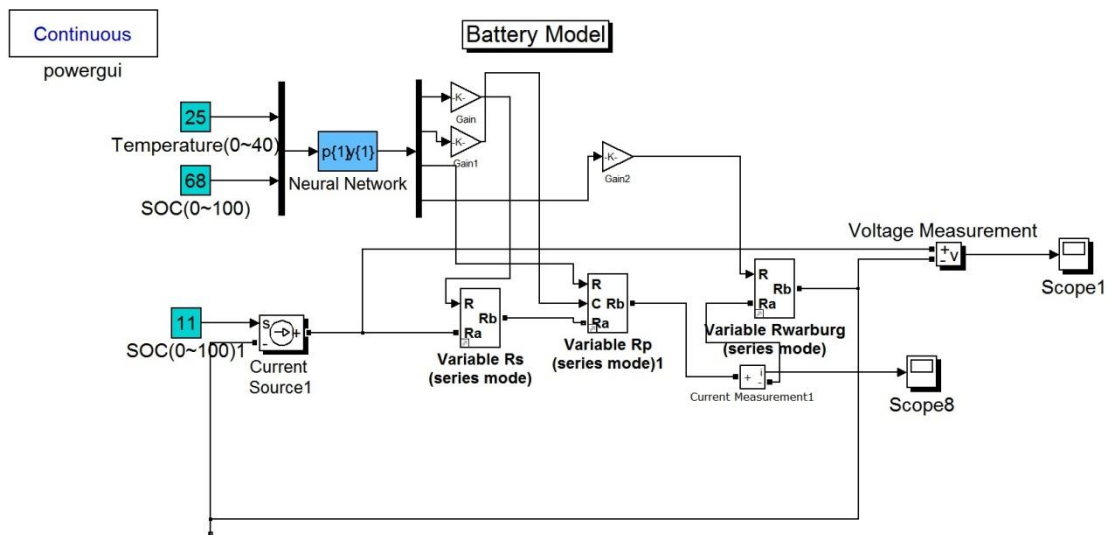


圖 4.14 類神經網路模型

4.4 鋰電池即時動態模型

本研究根據鋰電池之溫度、交流阻抗及 SOC 之實驗數據，建立一鋰電池即時動態模型之結果。提供系統一穩定的間歇放電電流訊號，模型即開始進行模擬，先計算出 SOC 及溫度的變化如圖 4.16。放電的過程中，經過電流積分後，電量會下降，電池的溫度會隨的時間上升，得到 SOC 及電池溫度後數據會送至類神經網路當作輸入訊號源，進行運算，模擬出等效電路結果，當 SOC 變化時，等效電路的各個元件也會隨著 SOC 的改變，分別有不同的模擬結果如圖 4.17。將各元件值送至等效電路模型中，經由電流訊號響應後，產生依連續的電壓，再與電池之開迴路電壓加減後，即為電池模型的模擬輸出電壓及輸出功率，如圖 4.18。當放電時間增長，SOC 下降時，電壓降也會隨之增加，與鋰電池之實驗特性相近。

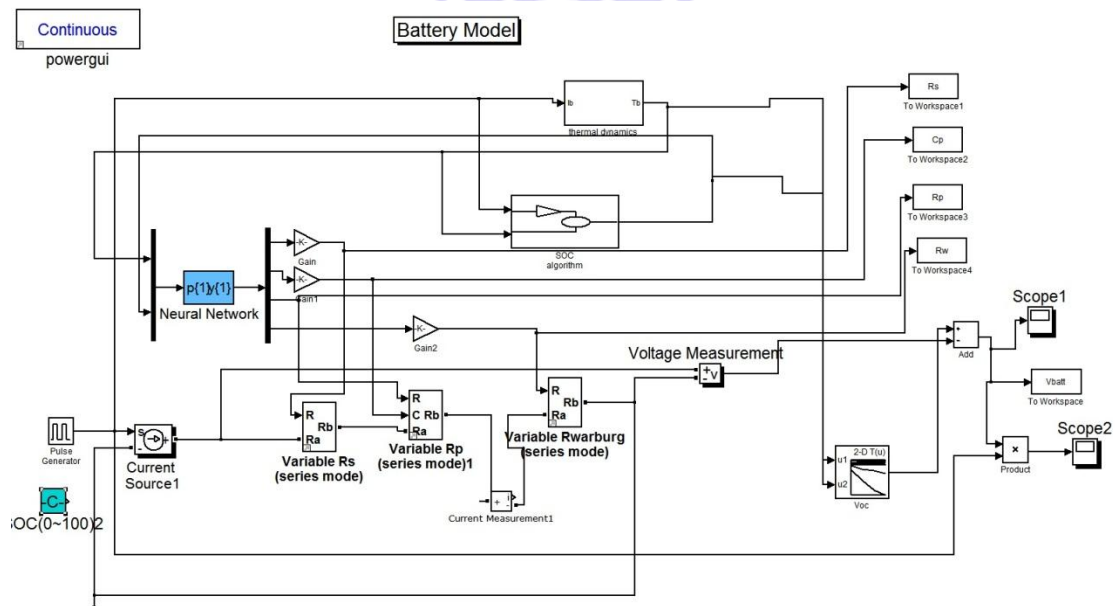


圖 4.15 具熱效應之鋰電池模型

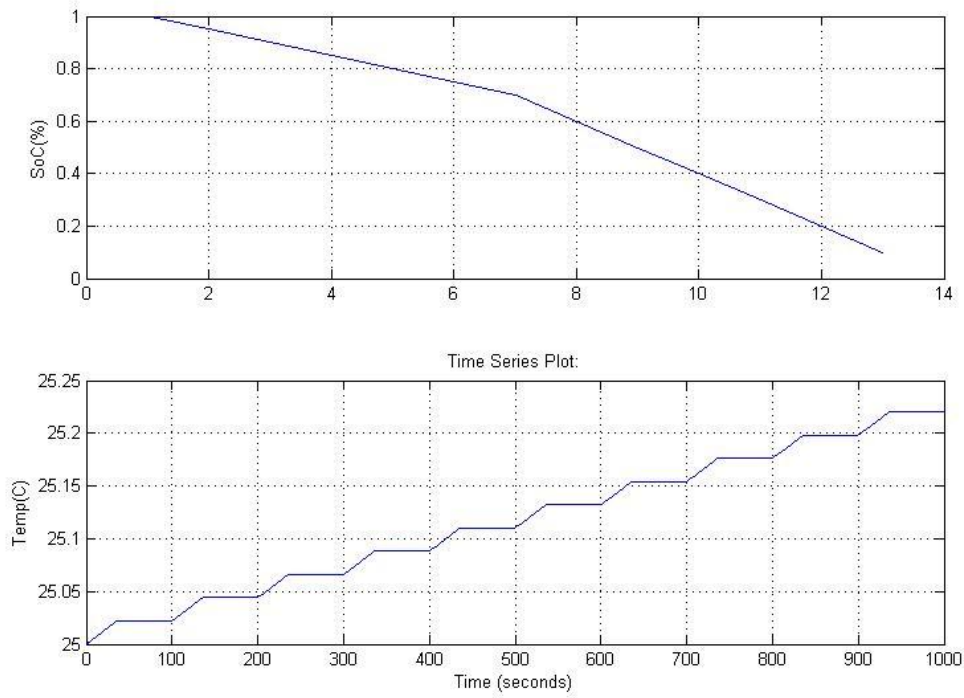


圖 4.16 鋰電池模型所得出的鋰電池 SOC 及溫度

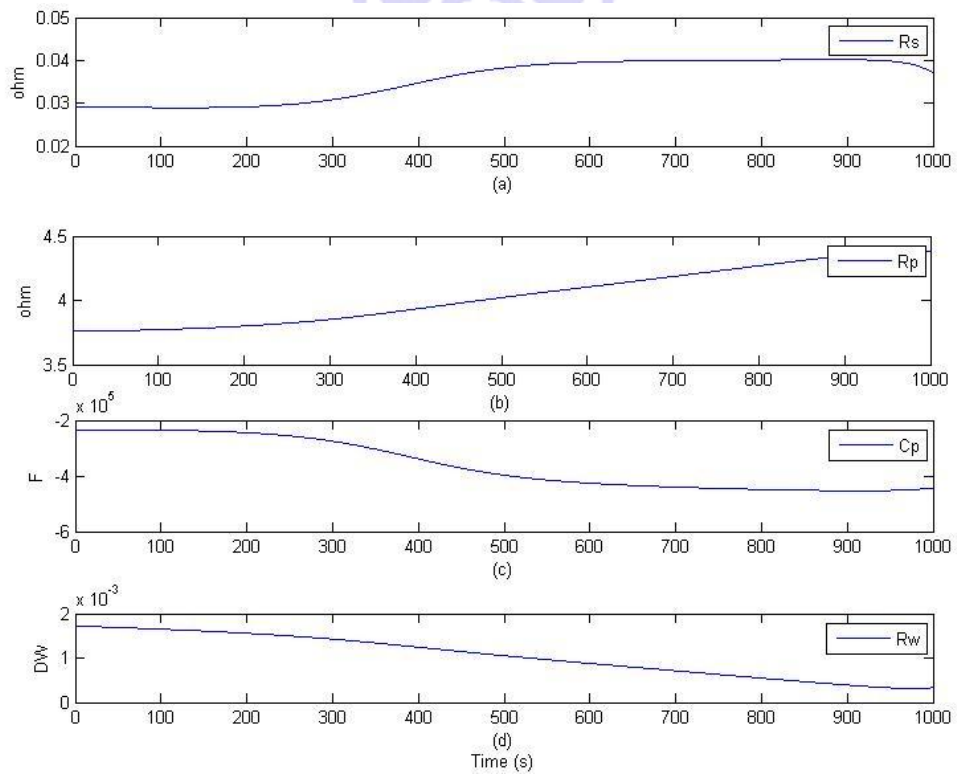


圖 4.17 鋰電池模型之等效電路輸出參數

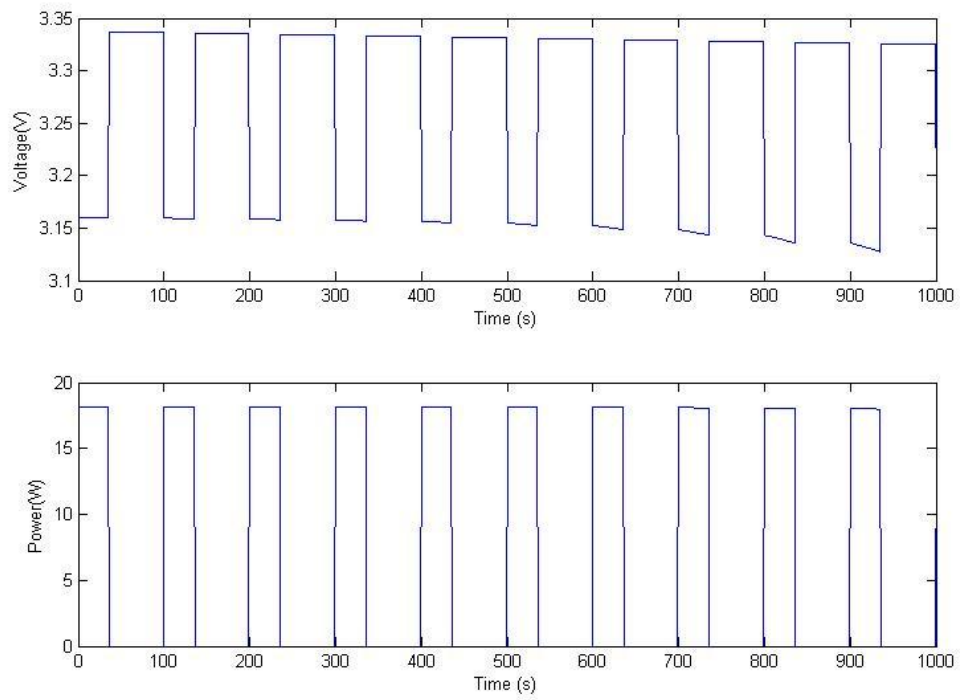


圖 4.18 鋰電池模型之輸出電壓及功率



第五章 結論與未來工作

5.1 結論

本實驗針對 11.5Ah 之磷酸鋰鐵電池在不同 SOC、溫度及不同 C 的放電電流下，探討放電時之各種動態效應，收集電壓、電量及放電動態數據，並量測不同 SOC 與溫度下之交流阻抗，建立一四原件等效電路模型，用以模擬本實驗之測試樣品。

本研究建立兩隱藏層之雙輸入四輸出之及時參數鑑別類神經網路，將實驗中獲得的動態結果，透過倒傳遞類神經網路，訓練神經元之權重，獲得即時電路元件參數值。

透過雙步驟熱動態測試法，分別量取單電池不同 C 與溫度之熱容量及熱傳導係數值，以作為即時建模之參數輸入。

結合上述熱動態模型、SOC 估測，以及類神經網路即時調變之四元件等效電路，可即時模擬出，電池在變動負載電流下之溫度與 SOC 變化，以及實際電壓與功率輸出，可作為未來電池研發人員在開發電池前之先期研究參考，以解省大量人力物力與時間。

5.2 未來工作與建議

綜合上述結論，提出下列幾點供後續研究發展之建議與參考：

1. 本研究利用類神經網路建立出 11.5Ah 具有熱效應之鋰電池模型，未來此模型可由單電池模型發展至具熱效應之電池模組，作為電動車零組件業者在開發電池模組之先期參考，以節省大量人力、物力與時間。
2. 未來將執行充電測試，執行不同的 C 與溫度，測量不同條件下之鋰電池動態特性，並透過類神經網路進行及等效電路進行即時動態模擬及驗證。
3. 未來將以本模型與其他綠能動力源(如燃料電池、超級電容器)並聯，並以本論文之同樣研究方法求取混合動力系統之即時等效電路模型，以供混合動力系統開發業者，進行先期研究參考。



參考文獻

- [1] 經濟部能源局，油價資訊管理與分析系統。 <http://210.69.152.10/oil102/>
- [2] [Source: http://en.wikipedia.org/wiki/Rechargeable_battery] 維基百科
- [3] Pop V., Berveld H. J., Notten P. H. L. and Regtien P. P. L., 2005, “State-of-the-art of battery state-of-charge determination,” Measurement science and Technology, Vol.16, p.p. 93-110.
- [4] Barsoukov E., Macdonald J. R., 2005, Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Application, Second Edition; John Wiley & Sons
- [5] C. R. Pals and J. Newman, “Thermal Modeling of the Lithium Polymer Battery: 11. Temperature Profiles in a Cell Stack,” Journal of Electrochem. Soc., vol.142, pp.3282, 1995.
- [6] P. Suresh, A.K Shukla, N Munichandriah, 2002, “Temperature dependence studies of a.c. impedance of lithium-ion cells,” Journal of Applied Electrochemistry, Vol. 32, p.p. 267-273.
- [7] A Simplified Version of the Federal Urban Driving Schedule for Electric Vehicle Battery Testing. Electric & Hybrid Propulsion Battery Test Working Force, EG&G, Idaho, Inc., DOE/ID-10146, 1988.
- [8] Stephan Buller, Marc Thele, Eckhard Karden, “Impedance-based non-linear dynamic battery modeling for automotive applications,” Journal of Power Sources, vol. 113, pp.422-430, 2003.
- [9] M.D. Levi, K. Gamolsky, D. Aurbach, U. Heider, R. Oesten, On “Electrochemical impedance measurements of $\text{Li}_x\text{Co}_{0.2}\text{Ni}_{0.8}\text{O}_2$ and Li_xNiO_2 intercalation electrodes,” Electrochim. Acta 45, pp.1781-1789, 2000.

- [10] J. Vetter, P. Novak, M. Wanger, C. Veit, K.-C. Moller, J. Besenhard, M. Winter, M. Wohlfahrt-Mehrens, C. Volger, A. Hammouche, "Ageing mechanisms in lithium-ion batteries," *J. Power Sources*, pp.269-281, vol.147, 2005.
- [11] J. Li, E. Murphy, J. Winnick, P.A. Kohl, "Studies on the cycle life of commercial lithium ion batteries during rapid charge–discharge cycling ," *J. Power Sources*, vol.102 pp.294–301, 2001.
- [12] G. Ning, B. Haran, B.N. Popov, "Capacity fade study of lithium-ion batteries cycled at high discharge rates," *J. Power Sources*, vol.117 pp.160–169, 2003.
- [13] J. Gerschler, D.U. Sauer, EET-2007 European Ele-Drive Conference, Bruxelles, 2007.
- [14] Electric Vehicle Battery Test Procedures Manual, United States Advanced Battery Consortium. July, 1994.
- [15] P. A. Nelson, V. S. Battaglia, and G. L. Henriksen, "Thermal Control of Electric Vehicle Batteries", *The American Society of Mechanical Engineers*, Vol. 3, pp.267-270, 1995.
- [16] D. F. Gosden, "Battery Requirements for Electric Vehicles," *Journal of Power Sources*, pp.45-61, 1993.
- [17] G. G. Botte, V. R. Subramanian, and R. E. White, *Journal of Electrochem. Acta*. 45, 2595 .Thermal Modeling, 2000.
- [18] S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation, New York 1980.
- [19] D. Andre, M. Meiler, K. Steiner, Ch. Wimmer, T. Soczka-Guth, D.U. Sauer, 2011, "Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. I. Experimental investigation,"

Journal of Power Sources, vol. 196, pp. 5334-5341

- [20] D. Andre, M. Meiler, K. Steiner, H. Walz, T. Soczka-Guth, D.U. Sauer, 2011, “Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. I. Modelling,” Journal of Power Sources, vol. 196, pp. 5349-5356.
- [21] J. Gomez, R. Nelson, E. E. Kalu, M. H. Weatherspoon, J. P. Zheng, 2011 Equivalent circuit model parameters of a high-power Li-ion battery: Thermal and state of charge effects. Journal of Power Sources, Vol. 196, pp. 4826-4831.
- [22] 張斐張、張麗秋，類神經網路，東華書局，民國 94 年 9 月。
- [23] 鄭有良，類神經網路於鋪面評估之應用，國立成功大學土木工程研究所碩士論文，民國 92 年 6 月。
- [24] 阮成戰，磷酸鐵鋰電池充電狀態之交流阻抗動態模擬與分析，國立清華大學動力機械工程學系碩士論文，民國 98 年 6 月。
- [25] 孫永明，混成燃料電池車超級電容器動態分析與整車動力控制系統設計，國立清華大學動力機械工程學系碩士論文，民國 97 年 6 月。