

Design of a Galvanostat for Lithium-Ion Battery Development

Meng-Lin Yang, and Chun-Yueh Huang*

Department of Electrical Engineering, National University of Tainan, 70005, Taiwan

*E-mail: cyhun@gm2.nutn.edu.tw

Abstract

In this paper, a Galvanostat designed by field programmable gate array (FPGA) is proposed for Lithium-Ion batteries development. The proposed Galvanostat can be acted as a constant current analyzer for charging and discharging battery under different currents: such as 0.2C, or 0.5C corresponding to battery specification. The proposed Galvanostat consists of an FPGA, three operational amplifiers (OPA), a 12-bit digital-to-analog converter (DAC), a 12-bit analog-to-digital converter (ADC), a differential amplifier circuit, a RELAY switch, and two sets of NPN BJTs and two sets of PNP BJTs. The FPGA is used to control DAC and ADC, and control the RELAY to select the resistor for the current converter. According to setting charging or discharging current, DAC will be programmed to generate the excitation signal to the differential amplifier circuit. In the meantime, the RELAY switch will be set on, and the current converter resistor will be selected. The charging or discharging current will flow through the battery based on the feedback circuit of operational amplifiers. The BJTs are used as a current buffer for large charging or discharging currents. The Lithium-Ion battery voltage is measured by ADC to monitor the state of the battery. The battery's voltage will be sent to the personal computer through the FPGA, and the charging and discharging status will be displayed on the LABVIEW.

In terms of system verification, the galvanostat will use two different currents to charge and discharge Lithium-Ion batteries with three different capacities at a constant current and compare the results with the test data of commercial instruments. The experimental results show that the measured results by the proposed system have the same trend as those measured by the commercial ones.

Keywords: FPGA, human-computer interface, galvanostat, Lithium-Ion Battery

* Corresponding author: cyhun@gm2.nutn.edu.tw

應用於鋰離子電池開發之恆電流儀設計

楊孟霖 黃俊岳

國立臺南大學電機工程學系

摘要

本論文使用可規劃邏輯陣列(FPGA)設計一個可應用於鋰離子電池開發之恆電流儀。文中所設計的鋰離子電池恆電流儀可以設定不同大小的電流進行充放電:0.2C、0.5C 充放電電流。所提出之恆電流儀是由一個 FPGA、三個運算放大器(OPA)、一個 12bit 的數位類比轉換器(DAC)、一個 12bit 的類比數位轉換器(ADC)、一個差動放大器電路及充放電電路、一個 RELAY、一組 110V 轉 12V 變壓器、兩組 npn 型 BJT 以及兩組 pnp 型 BJT 所組成。其中 FPGA 是用來控制 DAC、ADC、以及 RELAY 的電阻選擇，DAC 是用來產生差動放大電路所需要的激發信號，此定電流將透過運算放大器之回授電路流經電池，進行充電或是放電，鋰離子電池電壓則透過 ADC 進行量測用以監測電池之狀態，此電池電壓將經由 FPGA 傳送到個人電腦，並將充放電狀況呈現在 LABVIEW。

在系統驗證方面，本恆電流儀將使用兩種不同的電流，對三種不同容量的鋰離子電池進行定電流充放電，並將結果與商業儀器測試數據進行比較，實驗結果顯示，所提出的量測數據與商業儀器的量測數據有相同的趨勢。

關鍵字：可規劃邏輯陣列、恆電流儀、鋰離子電池、人機介面

1.緒論

近年來，各大汽車廠牌對於推行電動汽車不遺餘力。2022 年更是電動車進入主流市場的一年。雖然不是每個人都擁有，但購買電動汽車成為許多消費者的選擇。在相關政策的推行，以及汽車製造商龐大資金的投資下，電動汽車產業可說是日漸茁壯[1]。

目前被廣泛討論的電動車，指的是電池電動車（BEV），即完全以電池作為動力，並用馬達和變流器取代原有變速箱的傳動功能的車輛。除此之外，現今被廣泛討論的新能源車不只是電動車，其實還包括了油電混合車（HEV）及燃料電池電動車（FCEV），這些車輛的設計有相當程度的不同。例如油電混合車，其實並不算是電動車，主要還是以內燃機驅動，而電動馬達只有在低速行駛時才使用[2]。

燃料電池電動車則是以氫和氧作用的化學能來轉換成電能，並排出水。雖然原理上並不難，但要商業化，仍還有許多問題要克服，且造價高昂。此外，磷酸鐵鋰在高能量的運作模式下較為穩定，對於安全性需求高(例如：電動車)或是儲存龐大能量的應用中是更有潛力的選擇[3]。一台純電動車的成本組成電池佔了約 40%、底盤 15%、內飾 16%、汽車電子 10%、電機 8%、電控 6%、車身 5%，相較之下電池佔了極高的成本，是重要零件之一。雖然最近固態電池與鈉離子電池的討論度有逐漸上升的趨勢，但因為目前主流的電池材料仍為鋰離子電池，且就取得材料的方便性以及容量的大小，因此本文主要探討為鋰離子電池。

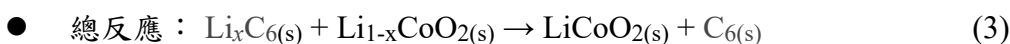
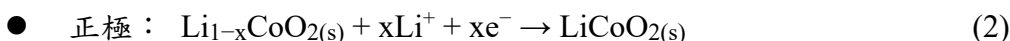
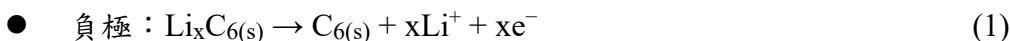
2.研究方法

2.1 鋰離子電池充放電

一般人很容易將鋰離子電池和鋰電池混為一談，雖然只增加離子二字，意義卻相差甚遠。前者強調在電池裡鋰元素是以鋰離子的形式存在，而後者則是使用鋰金屬在電池內充作陽極(氧化電極)。目前鋰電池無法做到可以重複充放電使用，仍限制在一次電池產品的階段[4]。基本原理上，鋰離子電池主要構成要素有三樣：

- 正極：LiCoO₂ 二氧化鋰鈷 或 LiMn₂O₄ 四氧化鋰二錳
- 隔膜：導電電解質聚合物 (例如：聚乙二醇、聚丙烯腈)
- 負極：鋰或鋰炭嵌入化合物

放電反應式:



2.2 恆電流儀

本論文是採用對鋰離子電池進行恆電流充放電，控制恆定的電流流入電池的正極進行充電；或是控制恆定的電流流出電池的正極進行放電。在充放電的實驗中，藉由 RELAY 的控

制去決定所需要的電阻，在已知的固定輸出電壓下，透過(4)式，即可得恆定電流的大小，藉此來控制充放電速度。

$$I = \frac{V}{R} \quad (4)$$

電池的容量估算方式很多種，但基本上都脫離不了 $C=I \times T$ 的計算方式。電池放電時流過電池的電流大小為 $I = \frac{V}{R}$ ， V 是電池的端電壓， R 是負載電阻，電池的放電容量就是 $C = IT = \frac{V \times T}{R}$ ， T 是時間。電池的電壓是隨著放電時間的長短而逐漸降低的，要估算出比較準確的放電容量的方法，就是採用積分方式，從開始放電起到電壓降至終止電壓為止這段期間內，每一個時間點上的電壓值換算成電流之後對時間積分起來，即可得到較為準確的放電容量。同理，也可藉此得到準確的充電容量。本系統所設計的恆電流儀可以產生的電流範圍從 5mA 至 500mA，電壓的量測可從 0V 量測至 5V。

3. 電路架構設計與分析訊號控制

3.1 電路架構介紹

本論文提出的恆電流儀架構如圖 1，是由一個 FPGA、一個 12bit 的數位類比轉換器(DAC)、一個 12bit 的類比數位轉換器(ADC) 以及一組 110 轉 12V 變壓器。電源部分由 FPGA 供給 5V，以及變壓器所提供。

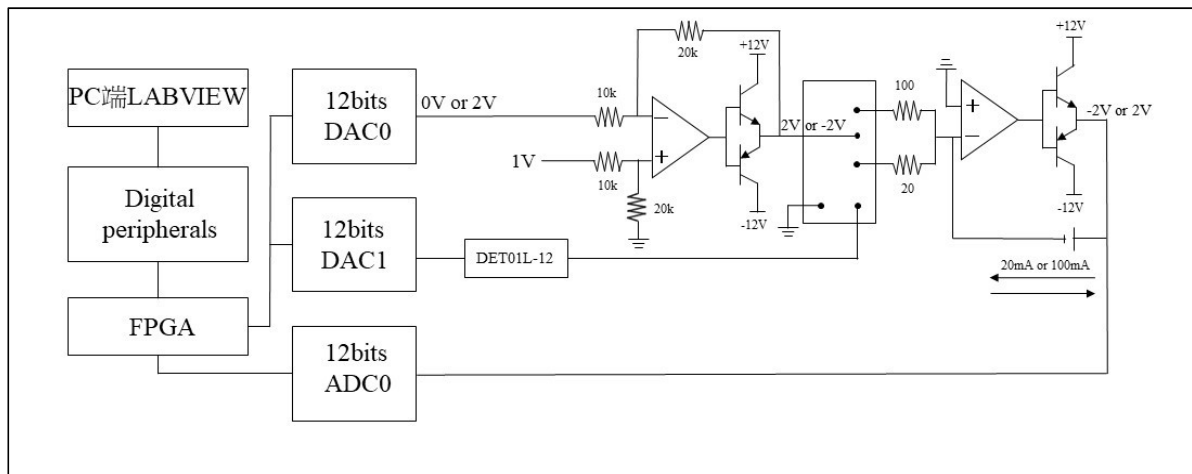


圖 1 恆電流儀系統電路架構

首先必須由 FPGA 控制 DAC0 輸出 2V 電壓，由於 DAC 無法輸出負電壓，所以必須先輸出一個固定的電壓，另外再由電源分壓出一個 1V 的電壓來進行位準遷移，在電路中進行放大或縮小都要有一個固定的位準。圖 2 為差動放大器用來將 DAC 輸出電壓轉換為正負電壓，有了 -2V 後，再透過放大器偏壓到雙極性接面型電晶體(BJT)，經 RELAY 控制所需要的電阻後，

便可很直觀的根據(4)式即可得到一固定電流。

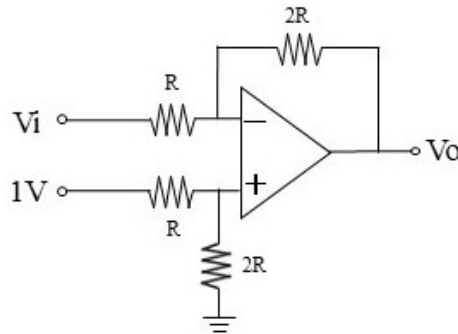


圖 2 差動放大器

由於經過第一個放大器的輸出電壓約為 $-2V$ ，再經反相放大器後，鋰離子電池正極所得到的充電電壓就會大約是 $2V$ ，並藉由 RELAY 控制電阻所得到的固定電流，對電池進行恆電流充電。同理，由 FPGA 所控制的 DAC0 以輸出 $0V$ 的電壓，經過位準遷移後得到 $2V$ ，再透過放大器偏壓到雙極性接面型電晶體(BJT)，經 RELAY 控制所需要的電阻後，根據(5)式即可得到一固定電流。由於經過第一個放大器的輸出電壓約為 $2V$ ，再經反相放大器後，鋰離子電池正極所得到的放電電壓就會大約是 $-2V$ ，並藉由 RELAY 控制電阻所得到的固定電流，對電池進行恆電流放電。之後透過 FPGA 控制的 ADC 來讀取該電壓值，透過 TTL 轉 USB 訊號轉換線將 FPGA 與個人電腦連接，將數位資料傳送至 LabVIEW 後，利用其圖形化程式編譯平台進行數據儲存與繪圖，完成此次鋰離子電池開發之恆電流儀的架構設計。

本論文採用了可規劃邏輯陣列(FPGA)，控制外部的 DAC 與 ADC 模組。由於 DAC 只有雙通道輸出，且雙通道均有用途，ADC 無法接收負電壓，在此電池充放電實驗中，需要有雙向的電流流向，為了克服這個問題，必須先經過一個差動放大電路產生正負電壓。

由於過充電時，鋰離子電池會有過熱的危險性，過放電時電池性能會受損，因此鋰離子電池大都會附有電池管理系統(Battery Management System, BMS)來確保電池使用的安全及性能。圖 3 為實際電路硬體製作照片圖。圖 4 為本實驗中所用到的鋰離子電池，由上至下依序為 $25mAh(301015)$ 、 $100mAh(402020)$ 以及 $200mAh(402030)$ 。這三個鋰離子電池的最大充電電流為 $0.5C$ ，最大放電電流為 $1C$ 。

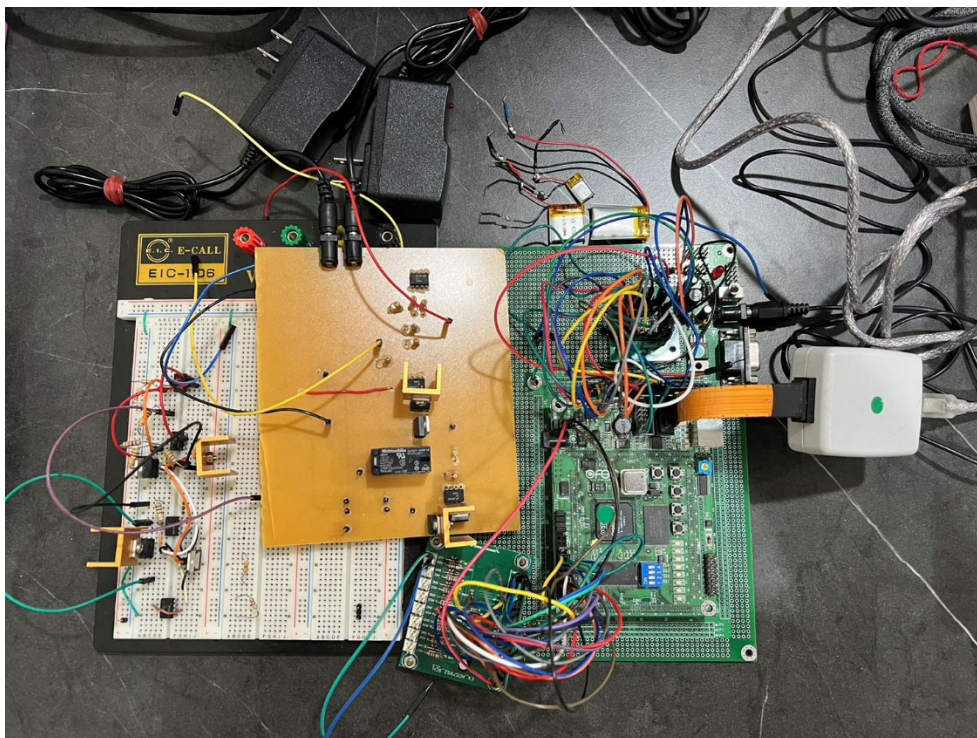


圖 3 本論文實際電路硬體製作照片圖

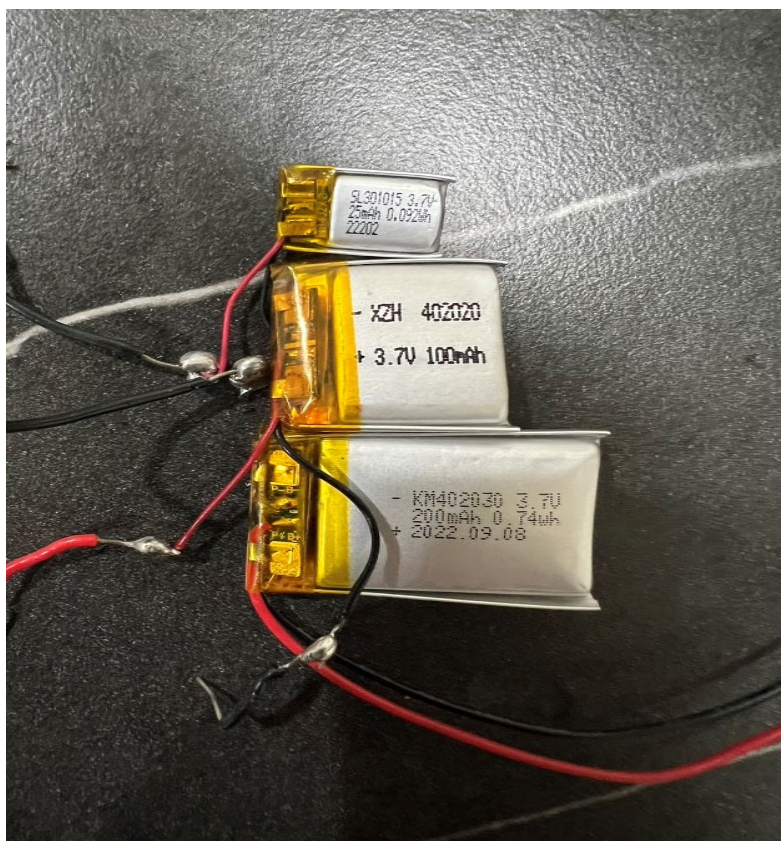


圖 4 本論文實際用到的鋰離子電池照片圖

3.2 LabVIEW 軟體程式與人機介面

LabVIEW 中，在圖 5 的左上角區域選擇正確的 USB port 腳(VISA resource name)與鮑率後才能使通訊相互連接。當 ADC 收到資料後，同時傳送至 LabVIEW 中進行計算並轉換成電壓值。之後將得到的電壓值後透過權重數位濾波器將誤差較大的數值濾除掉使曲線更平滑，再將數值呈現在圖表中即時觀看測量的結果，最後再將數據資料匯出成 Excel 檔進行最後的整理作圖與分析。

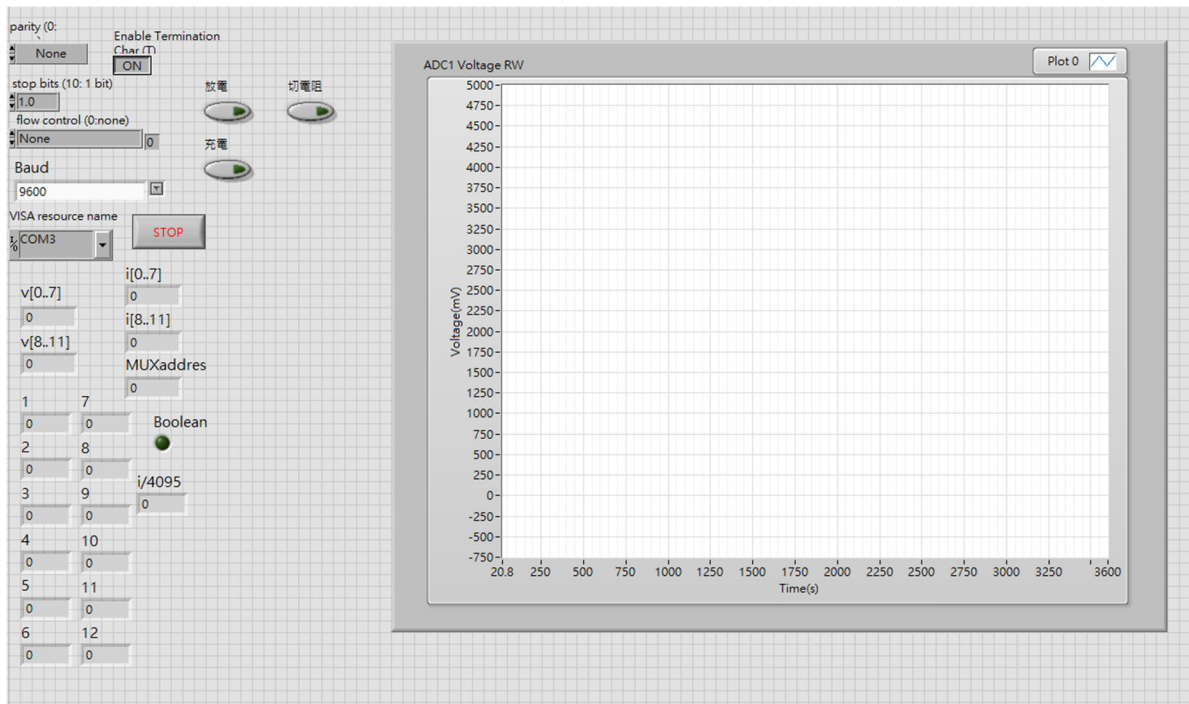


圖 5 LabVIEW 人機介面圖

3.3 自動充放電系統

為了能夠讓電池自動進行充放電，我們使用了數位多工器去控制 DAC 的輸出電壓。圖 5-1 為自動充放電的 verilog 程式，我們設定一開始的狀態為充電，當一開始 ADC 量測到電壓約為 4V 時，控制 DAC2 輸出 5V 去控制 RELAY 進行切換電阻的動作。之後，當 ADC 量測到的電壓值為 4.2V 時，控制 DAC1 輸出 0V，經過設計的電路系統後轉換成 -2V，藉由(4)式可得到一固定電流，藉此去對電池進行放電。等到 ADC 量測到的電壓值為 2.8V 時，再控制 DAC1 輸出 2V，經過設計的電路系統後轉換成 2V，藉由(4)式可得到一固定電流，並藉此去對電池進行充電。

```

if (dacout1=='d0')
begin
if (adc_data<=2294) //<2.8V
begin
dacout1<='d683; //輸出2V
end
if (adc_data>=3200)
begin
dacout2<='d0; //
end
end
if (dacout1=='d683) //充電
begin
if (adc_data>=3280) //4V
begin
dacout2<='d4095; //輸出5V切換電阻
end
if (adc_data>'d3440) //>4.2V
begin
dacout1<='d0; //輸出-2V
dacout2<='d0; //
end
else
begin
dacout1<='d683;
end
end

```

圖 5-1 自動充放電程式圖

4. 實驗結果與討論

實驗過程中分別以不同容量的鋰離子電池進行測量以增加結果的準確性。並假設所有條件參數對實驗結果造成的影響可忽略不計。

4.1.1 以 0.2C、0.5C 電流充電 25mAh 電池

實驗以定電流充電法針對 25mAh 電池進行 2 種不同大小電流的充電測試，實驗結果如圖 6，初始電壓約為 2800mV 開始，完全充飽電壓約為 4200mV。由於鋰離子過度充電[7]會引起電池損壞或發生危險，所以電池在出廠時就有電路保護機制。圖 6(a)中，以 0.2C (5mA)電流進行充電，理論上約需 5 小時可充飽電，實驗測量約為 20000 秒，經換算後約為 5 小時，與理論相符。同理，圖 6(b)中，以 0.5C (12.5mA)電流進行充電，理論上約需 2 小時可充飽電，實驗測量約為 7200 秒，經換算後約為 2 小時，與理論相符。

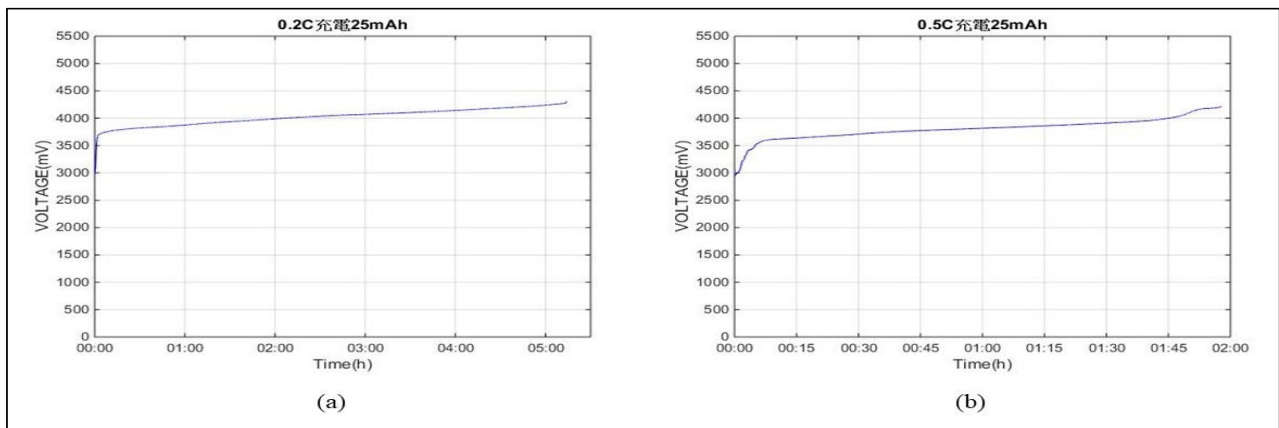


圖 6 (a)0.2C 電流、(b)0.5C 電流，分別對 25mAh 電池充電

4.1.2 以 0.2C、0.5C、1C 電流放電 25mAh 電池

實驗以定電流放電法針對 25mAh 電池進行 3 種不同大小電流的放電測試，實驗結果如圖 7，初始電壓約為 4200mV 開始，終止電壓（Cut-off discharge voltage）約為 2800mV。由於鋰離子過度放電會引起電池損壞或發生危險，所以電池在出廠時就有電路保護機制。圖 7 中，可以看到當電壓為終止電壓時，電池會啟動電路保護機制，此時 ADC 量測到的電壓值會急遽下降，可藉此判斷電池已達到完全放電的狀態。圖 7(a)中，以 0.2C(5mA)電流進行放電，理論上約需 5 小時可完全放電，實驗測量約為 17500 秒，經換算後約為 5 小時，與理論相符。同理，圖 7(b)中，以 0.5C(12.5mA)電流進行放電，理論上約需 2 小時可完全放電，實驗測量約為 7000 秒，經換算後約為 2 小時，與理論相符。實驗中，圖 7(c)以 1C(25mA)電流進行放電，理論上約需 1 小時即可完全放電，實驗測量約為 3500 秒，經換算後約為 1 小時，與理論相符。

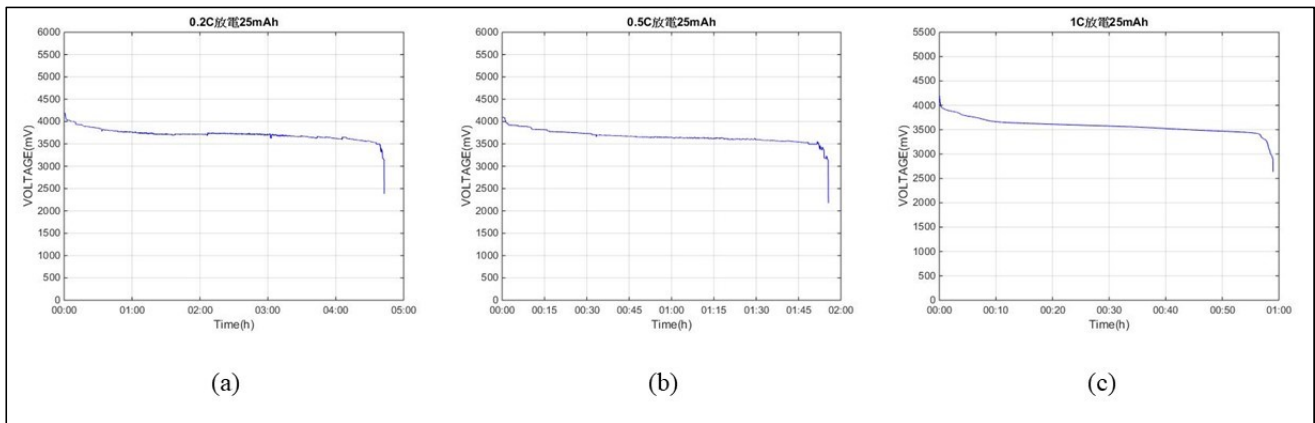


圖 7 (a)0.2C 電流、(b)0.5C 電流、(c)1C 電流，分別對 25mAh 電池放電

4.1.3 以 0.2C、0.5C、1C 電流分別對 25mAh 電池充放電

由圖 8(a)中，可看出使用 0.5C(12.5mA)電流進行充電時，其充電速率約為使用 0.2C(5mA)電流的兩倍多。由圖 8(b)中，可看出使用 1C(25mA)電流進行放電時，有最快的放電速率。

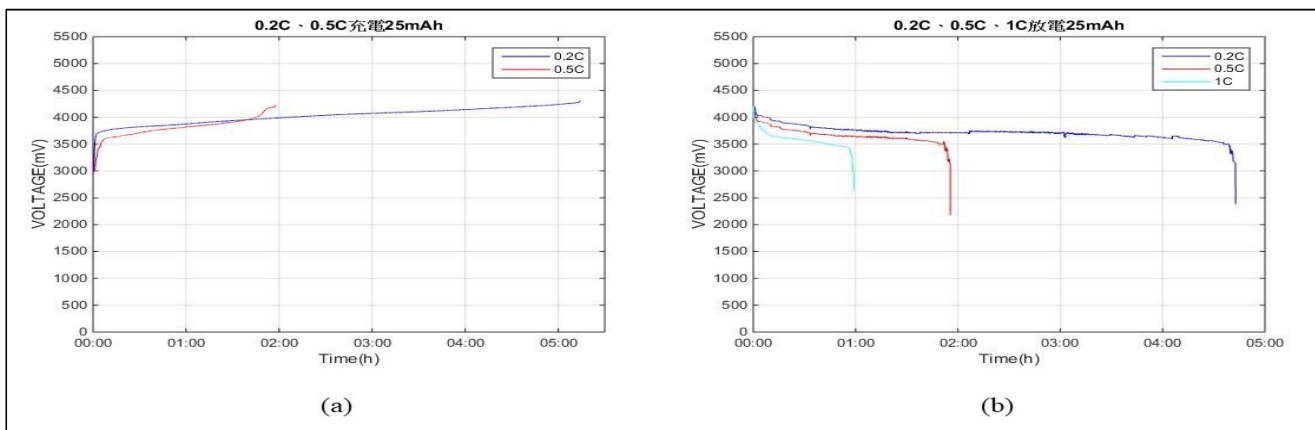


圖 8 (a)0.2C、0.5C 電流(b)0.2C、0.5C、1C 電流，分別對 25mAh 電池充放電

4.2.1 以 0.2C、0.5C 電流充電 100mAh 電池

實驗以定電流充電法針對 100mAh 電池進行 2 種不同大小電流的充電測試，實驗結果如圖 5-1，初始電壓約為 2800mV 開始，完全充飽電壓約為 4200mV。由於鋰離子過度充電[7]會引起電池損壞或發生危險，所以電池在出廠時就有電路保護機制。圖 9(a)中，以 0.2C(20mA)電流進行充電，理論上約需 5 小時可充飽電，實驗測量約為 16500 秒，經換算後約為 5 小時，與理論相符。同理，圖 9(b)以 0.5C(50mA)電流進行充電，理論上約需 2 小時可充飽電，實驗測量約為 6600 秒，經換算後約為 2 小時，與理論相符。

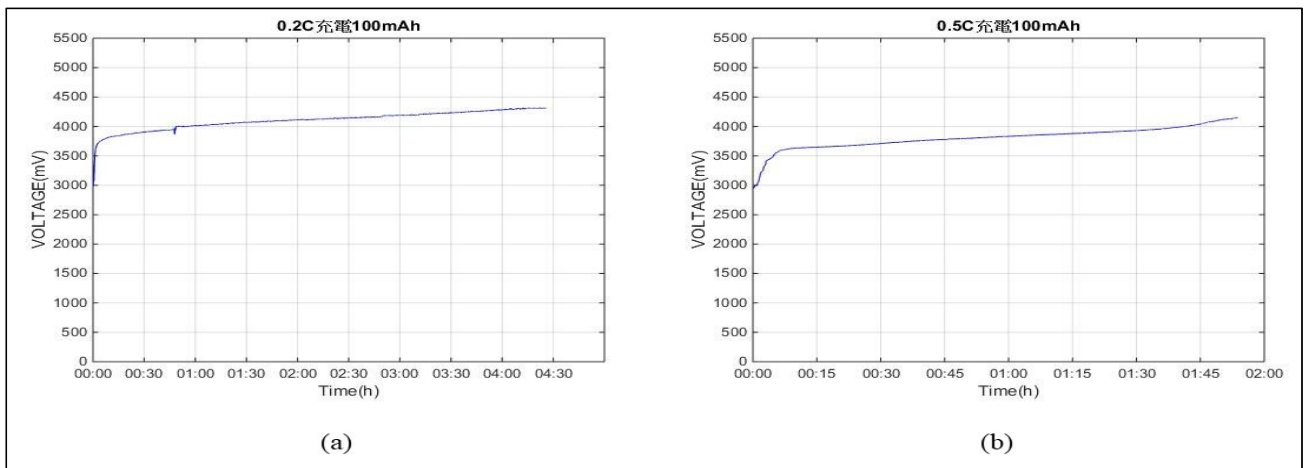


圖 9 (a)0.2C 電流、(b)0.5C 電流，分別對 100mAh 電池充電

4.2.2 以 0.2C、0.5C、1C 電流放電 100mAh 電池

實驗以定電流放電法針對 100mAh 電池進行 3 種不同大小電流的放電測試，實驗結果如圖 10，初始電壓約為 4200mV 開始，終止電壓 (Cut-off discharge voltage) 約為 2800mV。由於鋰離子過度放電會引起電池損壞或發生危險，所以電池在出廠時就有電路保護機制。圖 10 中，可以看到當電壓為終止電壓時，電池會啟動電路保護機制，此時 ADC 量測到的電壓值會急遽下降，可藉此判斷電池已達到完全放電的狀態。圖 10(a)中，以 0.2C(20mA)電流進行放電，理論上約需 5 小時可完全放電，實驗測量約為 17000 秒，經換算後約為 5 小時，與理論相符。同理，圖 10(b)中，以 0.5C(100mA)電流進行放電，理論上約需 2 小時可完全放電，實驗測量約為 6700 秒，經換算後約為 2 小時，與理論相符。實驗中，圖 10(c)以 1C(100mA)電流進行放電，理論上約需 1 小時即可完全放電，實驗測量約為 3620 秒，經換算後約為 1 小時，與理論相符。

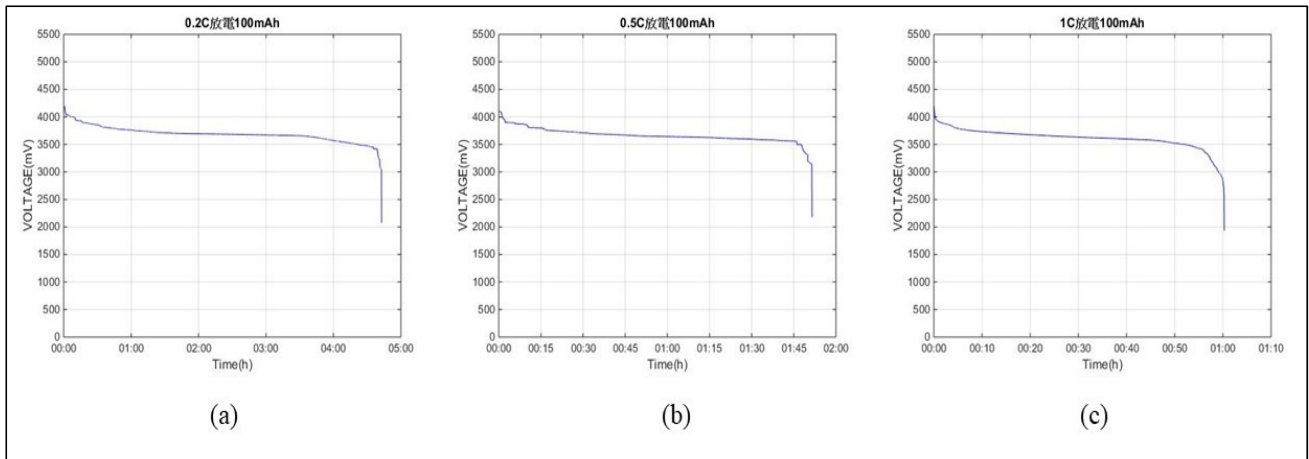


圖 10 (a)0.2C 電流、(b)0.5C 電流、(c)1C 電流，分別對 100mAh 電池放電

4.2.3 以 0.2C、0.5C、1C 電流分別對 100mAh 電池充放電

由圖 11(a)中，可看出使用 0.5C(50mA)電流進行充電時，其充電速率約為使用 0.2C(20mA)電流的兩倍多。由圖 5-3(b)中，可看出使用 1C(100mA)電流進行放電時，有最快的放電速率。

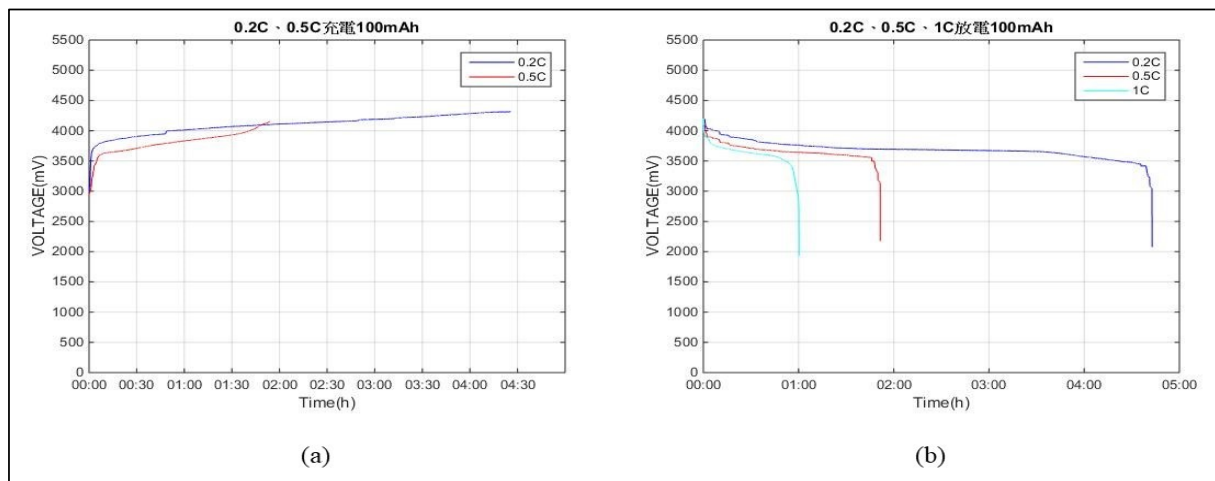


圖 11 (a)0.2C、0.5C 電流(b)0.2C、0.5C、1C 電流，分別對 100mAh 電池充放電

4.3.1 以 0.2C、0.5C 電流充電 200mAh 電池

實驗以定電流充電法針對 200mAh 電池，進行 2 種不同大小電流的充電測試，實驗結果如圖 12，初始電壓約為 2800mV 開始，完全充飽電壓約為 4200mV。由於鋰離子過度充電[7]會引起電池損壞或發生危險，所以電池在出廠時就有電路保護機制。圖 12(a)中，以 0.2C(40mA)電流進行充電，理論上約需 5 小時可充飽電，實驗測量約為 18200 秒，經換算後約為 5 小時，與理論相符。同理，圖 12(b)中，以 0.5C(100mA)電流進行充電，理論上約需 2 小時可充飽電，實驗測量約為 7800 秒，經換算後約為 2 小時，與理論相符。

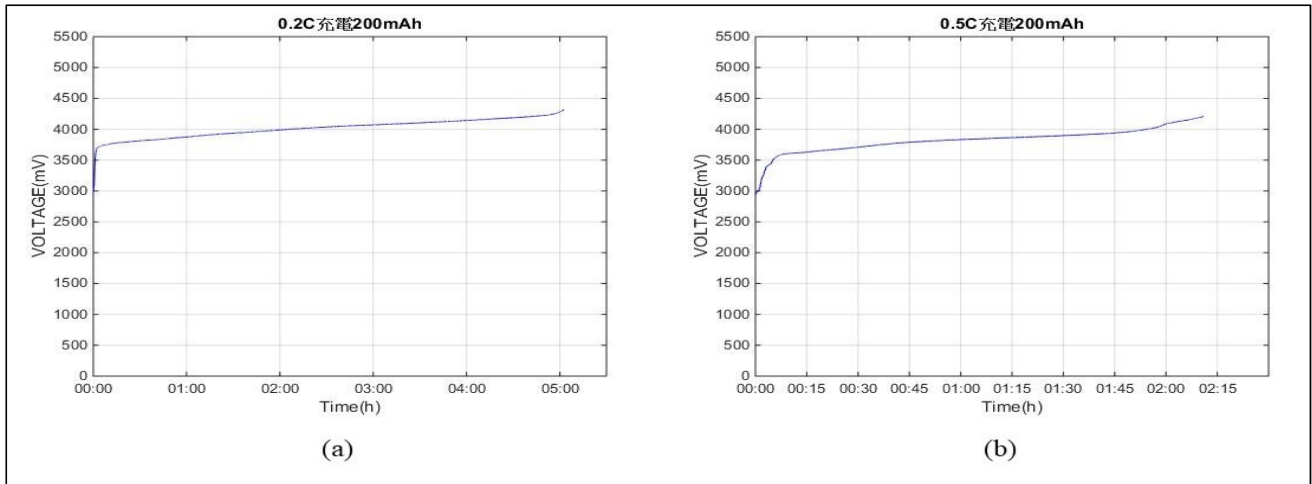


圖 12 (a)0.2C 電流、(b)0.5C 電流，分別對 200mAh 電池充電

4.3.2 以 0.2C、0.5C、1C 電流放電 200mAh 電池

實驗以定電流放電法針對 200mAh 電池進行 3 種不同大小電流的放電測試，實驗結果如圖 13，初始電壓約為 4200mV 開始，終止電壓（Cut-off discharge voltage）約為 2800mV。由於鋰離子過度放電會引起電池損壞或發生危險，所以電池在出廠時就有電路保護機制。圖 6-2 中，可以看到當電壓為終止電壓時，電池會啟動電路保護機制，此時 ADC 量測到的電壓值會急遽下降，可藉此判斷電池已達到完全放電的狀態。圖 13(a)中，以 0.2C(40mA)電流進行放電，理論上約需 5 小時可完全放電，實驗測量約為 17500 秒，經換算後約為 5 小時，與理論相符。同理圖 13(b)中，以 0.5C(100mA)電流進行放電，理論上約需 2 小時可完全放電，實驗測量約為 6800 秒，經換算後約為 2 小時，與理論相符。實驗中，圖 13(c)以 1C(200mA)電流進行放電，理論上約需 1 小時即可完全放電，實驗測量約為 3400 秒，經換算後約為 1 小時，與理論相符。

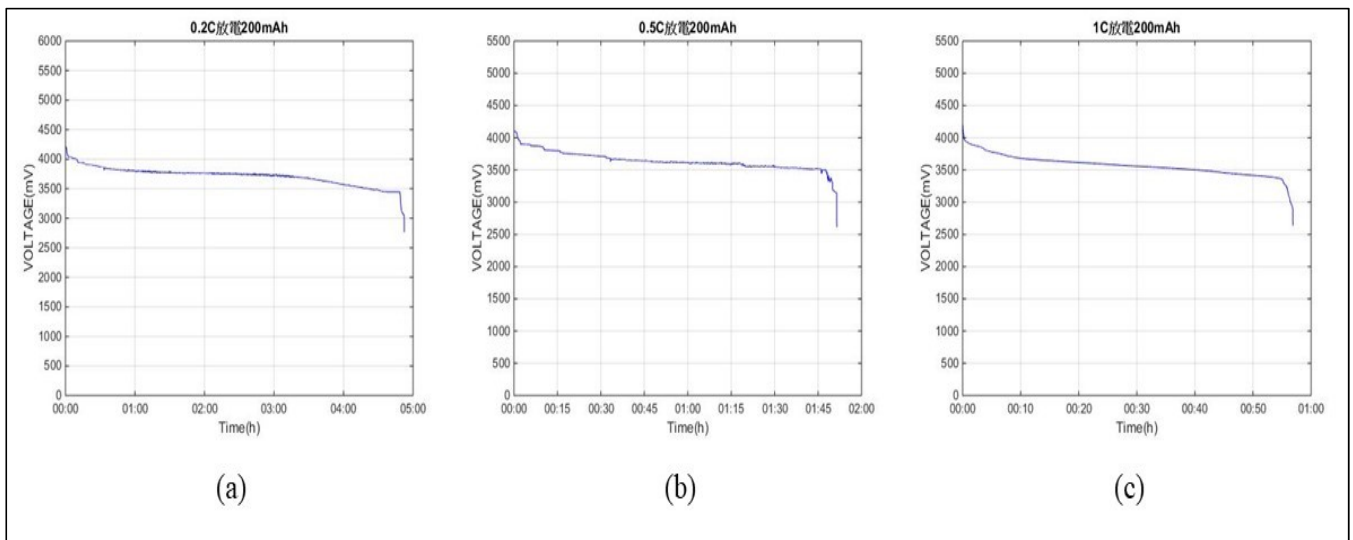


圖 13 (a)0.2C 電流、(b)0.5C 電流、(c)1C 電流，分別對 200mAh 電池放電

4.3.3 以 0.2C、0.5C、1C 電流分別對 200mAh 電池充放電

由圖 14(a)中，可看出使用 0.5C(100mA)電流進行充電時，其充電速率約為使用 0.2C(40mA)電流的兩倍多。由圖 14(b)中，可看出使用 1C(200mA)電流進行放電時，有最快的放電速率。

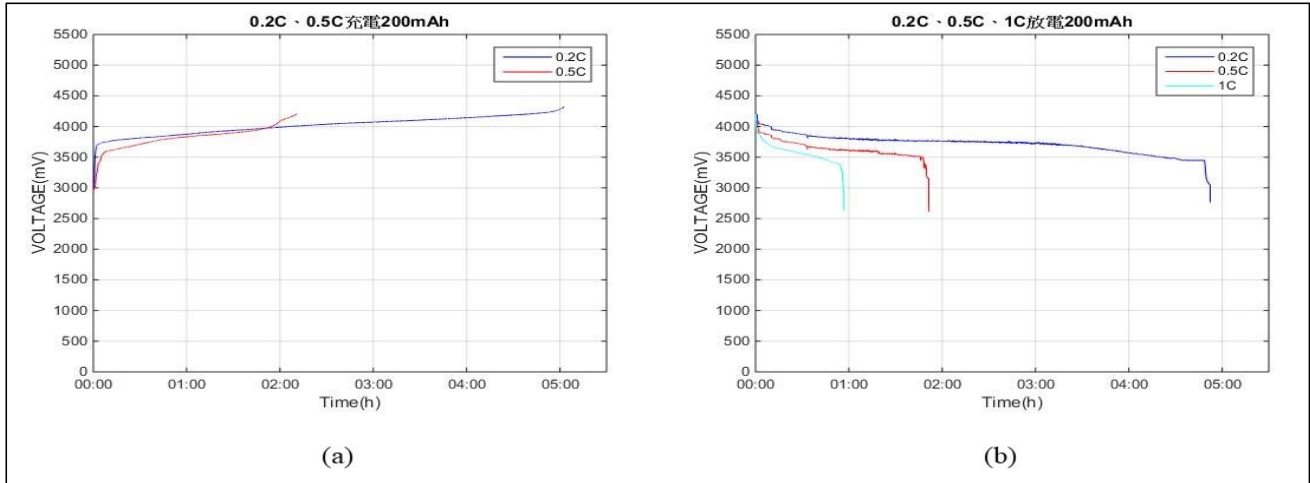


圖 14 (a)0.2C、0.5C 電流(b)0.2C、0.5C、1C 電流，分別對 200mAh 電池充放電

4.4 以 0.5C 電流進行連續充放電

本次實驗設定以 0.5C(100mA)充電電流對 200mAh 電池充到 4.2V 後，立即切換成 0.5C(100mA)放電電流去放電至 2.8V。由圖 15 中，對電池進行三次連續充放電，可看出本次實驗花費將近 12 小時，與理論上相符，本實驗之目的在於電池材料開發過程，需要對電池進行多次充放電來研究電池特性。

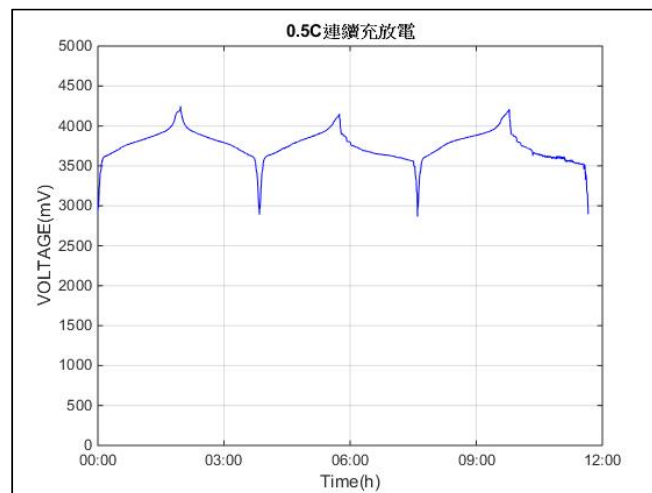


圖 15 以 0.5C 電流對 200mAh 電池充放電

4.5 實驗結果與商用儀器數據比較

圖 16 中可以觀察到，本次實驗所設計提出的鋰離子電池開發之恆電流儀，其量測結果雖

然沒有辦法完美呈現出鋰離子電池充放電曲線，但是截止電壓與完全飽和電壓均為正確的電壓值。量測曲線也與商業儀器測試數據有相同的趨勢及相近的數值，在經比對下，說明本系統在測試鋰離子電池的充放電量測上具有一定的判別性，且在實用方面已獲得初步的證明。

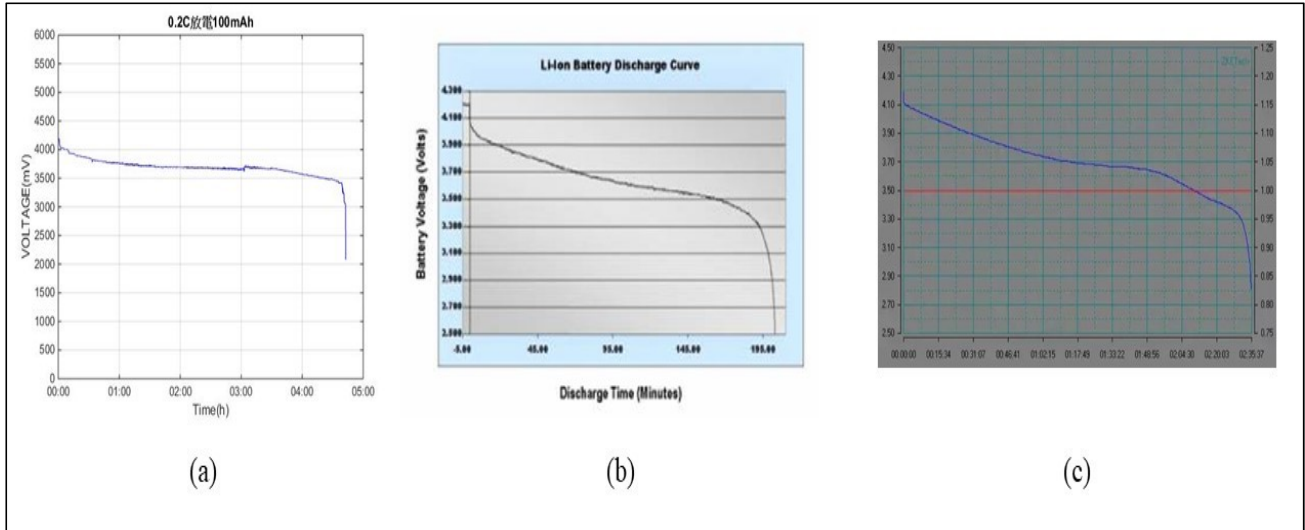


圖 16 (a)本系統與(b)德州儀器[5](c)三洋[6]測試數據比較圖

5. 結論

電路設計方面則使用 FPGA，透過外部的 DAC 與 ADC 來實現用不同大小的電流對電池充電，並使用市售的鋰離子電池來做相關實驗，結果顯示與市面上鋰離子充放電曲線具有一定的相似度[5]-[6]。不僅如此，FPGA 更具有可編程的特點，可以隨時改變充放電電流大小。隨著未來之趨勢，未來可結合藍芽、Wi-Fi、等模組進行資料傳輸，擺脫過去量測距離的限制；此外，在統計數據方面，能夠藉由雲端 Excel 進行數據處理。

為因應氣候變遷，2023 年 2 月 14 日歐洲議會正式通過法案，自 2035 年起全面禁售燃油車。鋰離子電池應用日趨多元，舉凡 3C 產品、智慧電網、再生能源、電動車等都有它的身影；隨著氣候變遷加劇，為邁向 2050 年淨零排放願景，綠色運輸成為全球趨勢，電動車相關技術發展備受矚目，從汽車大廠、工業集團到新創公司，都積極投入下世代電池的開發，帶動動力鋰電池市場爆發性成長。電池被稱為是電動車的心臟，占電動車成本將近四成。鋰電池的開發除了在能量密度、循環壽命、續航力、成本等面向外，安全性提升也是備受關注的關鍵技術。相較於傳統的鋰電池充放電系統，本系統擁有多種電流切換的模式，若將電路重新整合後體積也能縮小，大幅提升可攜帶性。之後可以應用在其他種電池上，在未來發展非常具有開發潛力。

6. 參考文獻

- [1] 王珮羽, “2023 電動車市場將大爆發! 專家估有超過 400 款新車, 5 大趨勢一次看,” 經理人, <https://www.managertoday.com.tw/articles/view/66241>, Jan. 2023.
- [2] 星島網, “電動車 5 大類型—BEV、HEV、PHEV、EREV、FCEV 純電混能車款分別一文看清,” 星島網, <https://std.stheadline.com/supplement/article/2499611>, Nov. 2022.
- [3] 國立臺灣大學科學教育發展中心, 鋰電池怎麼充放電? 來源: <https://case.ntu.edu.tw/blog/?p=25889>
- [4] 洪為民, “鋰離子電池的發展、應用與未來,” 臺灣網路科教館, <https://www.ntsec.edu.tw/LiveSupply-Content.aspx?a=6829&fld=&key=&isd=1&icop=10&p=1&sid=16318>
- [5] Michael Day, Bill Johns, “電源管理—便攜式系統的降壓—升壓轉換器解決方案,” TEXAS INSTRUMENTS, <https://www.ti.com.cn/general/cn/docs/gencontent.tsp?contentId=50688>
- [6] 科技材料製造, “鋰電池放電曲線全面解析,” KKNews, <https://kknews.cc/digital/42jzorv.html>, May. 2019.
- [7] 電動產業的世界, “電池的常用技術術語,” <https://blog.xuite.net/joh3622/johnason/112606675#>, May. 2009.
- [8] 吳宏諺, 應用於電化學生物感測器之恆電流儀設計, 國立臺南大學電機工程學系碩士班, 2019
- [9] Haochen Gong, Jie Sun, "Phosphorus-based nanomaterials for lithium-ion battery anode," *IEEE Encyclopedia of Nanomaterials*, Vol. 2, pp. 533-549, 2023.
- [10] H. Qiao, Q. Wei, "10 - Functional nanofibers in lithium-ion batteries," *IEEE Woodhead Publishing Series in Textiles*, pp. 197-208, 2012.
- [11] Joe Buxton, "Li-Ion Battery Charging Requires Accurate Voltage Sensing," *Analog Dialogue*, <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/li-ion-battery-charging-accurate-voltage-sensing.html>, Apr. 1997.
- [12] UL Research Institute, "What Are Lithium-Ion Batteries? ", UL Research Institute, <https://ul.org/research/electrochemical-safety/getting-started-electrochemical-safety/what-are-lithium-ion>, Sep. 2021.
- [13] Marco T. F. Rodrigues, Seoung-Bum Son, Andrew M. Colclasure, Ilya A. Shkrob, Stephen E. Trask, Ira D. Bloom, and Daniel P. Abraham, "How Fast Can a Li-Ion Battery Be Charged? Determination of Limiting Fast Charging Conditions", ACS PUBLICATIONS, <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acsaem.0c03114>, Jan. 2021.
- [14] Jianlin Li, Claus Daniel, David Wood, "Materials processing for lithium-ion batteries," *IEEE Journal of Power Sources*, Nov. 2010.
- [15] Melissa Pistilli, "6 Lithium-ion Battery Types," INN Investing News, <https://investingnews.com/daily/resource-investing/battery-metals-investing/lithium-investing/6-types-of-lithium-ion-batteries>, Jul. 2022.

