

國立臺灣大學工學院機械工程學系

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

以太陽能對電動腳踏車充電之可行性研究

Feasibility Study of Charging Electric Bicycle

by Solar Cell

陳冠名

Kuan-Ming Chen

指導教授：周賢福 博士

Advisor: Shyan-Fu Chou, Ph.D.

中華民國100年7月

July, 2011

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

以太陽能對電動腳踏車充電之可行性研究
Feasibility Study of Charging Electric Bicycle
by Solar Cell

本論文係陳冠名君（R98522304）在國立臺灣大學機械工程學系
完成之碩士學位論文，於民國 100 年 7 月 27 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：

周賢福	周賢福	(簽名)
	(指導教授)	
周賢福	周賢福	
黃振康	黃振康	
朱佳建	朱佳建	
系主任、所長	張所鎰	(簽名)

誌 謝

經過近兩年的磨練，努力終於有了成果，在此先感謝指導老師周賢福 教授的指導與包容，讓學生得以完成這篇論文，也感謝黃振康委員與朱佳建委員在口試時提供的寶貴意見，讓論文內容更完整充實。特別感謝財團法人自行車暨健康科技工業研究發展中心的莊惠宜專案經理及吳宏生協理協助提供電動腳踏車，也感謝新能源中心的葉忠福工程師提供實驗設備以及盈宏學長與家緯學長的熱情幫忙，讓研究得以順利進行，同時也要感謝格蘭富台灣分公司邊士杰總經理與周瑞仁經理給予的協助。學生也要感謝家人的全力支持與鼓勵，讓學生能夠平安快樂地成長與學習。最後，這兩年內曾經給予幫助的朋友在此也一併致謝。很榮幸能夠進入台大念書學習更高深的知識，學生也期許自己能夠運用所學為社會盡一份心力，讓社會變得更美好。

摘 要

本研究之目的在於探討以太陽能電池輸出之直流電直接對電動腳踏車充電之可行性。研究過程使用兩組 135W 與 205W 之六吋單晶矽太陽能模組建立輸出功率 340W 之太陽能充電站，並搭配串聯穩壓電路限制充電過程之最大電壓，充電之電動腳踏車質量 39.5kg，搭載電壓 36V、容量 15Ah 之鉛酸電池。本研究以開路電壓法評估充、放電後鉛酸電池之電量，在多雲(平均日照量 $310\text{W}/\text{m}^2$)之天氣狀態下，經過深度放電之電動腳踏車經過 7 小時充電可回復至 85% 以上之電量狀態，並在平均速度 17km/h 附近之平地騎乘狀態下提供 62km 以上之續航力。為了解太陽能充電站是否能長時間提供電動腳踏車足夠電力，本研究進行連續五天之充電與騎乘實驗，每日騎乘電動腳踏車作為通勤工具，並在抵達台大後進行充電，儘管後三天午後雲層增厚或者下雨，在第五天充電後仍可維持鉛酸電池電量在 90% 以上，檢視充電數據並進行估算後發現即使陰天(平均日照量在 $200\text{W}/\text{m}^2$ 以上)太陽能充電站仍然能提供足夠電力，滿足大部分騎乘狀況之需求。

關鍵字：太陽能電池、電動腳踏車、鉛酸電池、日照量、電量狀態

Abstract

The feasibility of charging electric bicycle with solar cell directly has been investigated in the present study. A solar charging station was constructed with domestic made PV modules having output of 340 watts. In order to prevent the batteries from being overcharged, a regulator was used to limit the maximum charging voltage. The tested electric bicycle weights 39.5kg and was equipped with a 36V, 15Ah VRLA battery. The state of charge (SOC) of the battery was estimated by measuring its open circuit voltage. When the average solar irradiation is more than 310W/m^2 , the completely discharged battery of the electric bicycle can be recharged to over 85% SOC in 7 hours. With that condition, the bicycle could run over 62km at an average speed around 17km/h. In order to determine whether the solar PV charging station could supply enough energy for long time period of testing, the electric bicycle has been ridden and then charged for five testing days. The SOC of the battery could reach 90% after recharged at the fifth day although the weather was cloudy or rainy in the late afternoon at last three days. From the test, the solar charging station should be able to supply enough energy for most riding condition when the average solar irradiation is higher than 200W/m^2 .

Key words: solar cell, electric bicycle, lead acid battery, solar irradiation, state of charge

目 錄

口試委員會審定書.....	I
致謝.....	II
中文摘要.....	III
英文摘要.....	IV
目錄.....	V
表目錄.....	VII
圖目錄.....	VIII
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機與目的.....	1
1.2 文獻回顧.....	2
1.3 論文架構說明.....	2
第二章 太陽能電池簡介.....	4
2.1 太陽能電池發電原理.....	4
2.2 太陽能電池輸出特性.....	4
第三章 電動腳踏車概述.....	7
3.1 簡介.....	7
3.2 電動腳踏車輸出特性.....	8
第四章 太陽能充電電路之設計.....	11
4.1 鉛酸電池電力特性.....	11
4.2 鉛酸電池充電技術.....	13
4.3 充電電路之設計.....	15
第五章 電動腳踏車充電與騎乘實驗.....	17
5.1 鉛酸電池剩餘電量之檢測.....	17
5.2 深度循環充電與騎乘實驗.....	18

5.2.1 充電實驗.....	18
5.2.2 騎乘實驗.....	20
5.3 連續充電與騎乘實驗.....	22
第六章 結語.....	25
6.1 結論與建議.....	25
6.2 未來展望.....	26
參考文獻.....	27



表 目 錄

表 2.1	太陽能模組輸出特性參數.....	28
表 3.1	電動腳踏車行駛相關參數.....	28
表 4.1	鉛酸電池 EVH12150F2 於不同放電電流情況下之建議終止電壓值.....	28
表 4.2	穩壓電路各元件之規格.....	29
表 5.1	7月7日與8日電動腳踏車騎乘實驗之數據.....	29
表 5.2	連續五天騎乘實驗之相關數據.....	30
表 5.3	連續五天充電之相關數據.....	30



圖 目 錄

圖 1.1	日本 Kyocera 公司所設置之電動腳踏車用太陽能充電站(圖片來源:【4】)	31
圖 2.1	二極體之基本構造	31
圖 2.2	自由電子—電洞對生成之示意	31
圖 2.3	矽基太陽能電池基本構造與發電原理	32
圖 2.4	太陽能電池之等效電路	32
圖 2.5	本研究使用之太陽能發電模組	33
圖 2.6	太陽能電池輸出電流與日照強度之關係	33
圖 2.7	太陽能輸出功率與日照強度之關係	34
圖 2.8	太陽能電池輸出電流與溫度之關係	34
圖 2.9	太陽能電池輸出功率與溫度之關係	35
圖 3.1	本研究騎乘之電動腳踏車外觀	35
圖 3.2	馬達基本結構	36
圖 3.3	PWM 控制原理	36
圖 3.4	平地行駛之電動腳踏車速度與蓄電池輸出電流之關係	37
圖 4.1	鉛酸電池之基本構造	37
圖 4.2	本研究測試之 EVH12150F2 電動腳踏車鉛酸電池(圖片來源:【10】)	38
圖 4.3	不同放電電流狀態下放電時間與終止電壓之關係(圖片來源:【10】)	38
圖 4.4	定電流充電之電壓與電流變化	39
圖 4.5	定電壓充電之電壓與電流變化	39
圖 4.6	定電壓定電流充電之電壓與電流變化	39
圖 4.7	脈衝充電之電壓與電流變化	40
圖 4.8	串聯穩壓電路之結構	40
圖 4.9	串聯穩壓電路各元件之功能	41
圖 4.10	Darlington 電路之結構	41

圖 4.11	完成之串聯穩壓電路.....	42
圖 5.1	鉛酸電池剩餘電量與開路電壓之關係(圖片來源:【10】).....	42
圖 5.2	分流器.....	43
圖 5.3	指針式電流表.....	43
圖 5.4	日照計.....	44
圖 5.5	HR1300 紀錄器.....	44
圖 5.6	充電電路之連結(正視).....	45
圖 5.7	充電電路之連結(側視).....	45
圖 5.8	大氣溫度計.....	46
圖 5.9	7月6日充電過程之日照量變化.....	46
圖 5.10	7月6日充電過程之大氣溫度變化.....	47
圖 5.11	7月6日充電過程之充電電壓變化.....	47
圖 5.12	7月6日充電過程之充電電流變化.....	48
圖 5.13	自行車碼表.....	48
圖 5.14	騎乘電動腳踏車當日之大氣溫度變化.....	49
圖 5.15	電動腳踏車行駛里程與開路電壓之關係.....	49
圖 5.16	電動腳踏車連續騎乘與充電之實驗流程.....	50
圖 5.17	不同平均騎乘速度下電池開路電壓與騎乘距離之關係.....	50
圖 5.18	7月11日充電過程之日照量變化.....	51
圖 5.19	7月11日充電過程之大氣溫度變化.....	51
圖 5.20	7月11日充電過程之充電電壓變化.....	52
圖 5.21	7月11日充電過程之充電電流變化.....	52
圖 5.22	7月12日充電過程之日照量變化.....	53
圖 5.23	7月12日充電過程之大氣溫度變化.....	53
圖 5.24	7月12日充電過程之充電電壓變化.....	54

圖 5.25	7 月 12 日充電過程之充電電流變化.....	54
圖 5.26	7 月 13 日充電過程之日照量變化.....	55
圖 5.27	7 月 13 日充電過程之大氣溫度變化.....	55
圖 5.28	7 月 13 日充電過程之充電電壓變化.....	56
圖 5.29	7 月 13 日充電過程之充電電流變化.....	56
圖 5.30	7 月 14 日充電過程之日照量變化.....	57
圖 5.31	7 月 14 日充電過程之大氣溫度變化.....	57
圖 5.32	7 月 14 日充電過程之充電電壓變化.....	58
圖 5.33	7 月 14 日充電過程之充電電流變化.....	58
圖 5.34	7 月 15 日充電過程之日照量變化.....	59
圖 5.35	7 月 15 日充電過程之大氣溫度變化.....	59
圖 5.36	7 月 15 日充電過程之充電電壓變化.....	60
圖 5.37	7 月 15 日充電過程之充電電流變化.....	60

第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

在上班時段的台北，只見汽機車從大街小巷不斷竄出，紛紛湧入大馬路，形成壯觀的車海景象，巨大的噪音劃破早晨的寧靜，排氣管排放的熱氣不斷地翻攪空氣，台北的一天就在迷濛嘈雜的氛圍中揭開序幕。

根據交通部統計處於民國 98 年的調查，台灣民眾外出使用之運具以機車為最，佔 49.1%，其次為自用小客車之 23.3%，而自行車僅佔 5.9%【1】；另一份調查則顯示有通勤(學)者使用機車通勤(學)所佔比例約為 56.9%，其次是汽車之 34.3%，自行車則佔 13.7%【2】。這些數據顯示民眾外出以騎乘機車為主，而方便為其主要原因，然而目前市面上排氣量 50cc 以上之機車幾乎使用汽油引擎，其排放之廢氣如碳氫化合物、氮氧化物、硫氧化物等物質不但汙染環境，大量排放之二氧化碳也可能助長氣候變遷。因此必須加快腳步研發使用潔淨能源之交通工具以取代不環保的內燃機。

隨著科技進步，電池與馬達之重量與體積逐漸縮減，有業者開始將蓄電池與電動馬達裝設在講求輕巧的自行車上，成為可利用電力驅動之電動腳踏車，降低騎乘之疲累感並延長行駛距離，在電力用盡後只需將蓄電池連結充電器便可以家用電力進行充電，相較於使用內燃機為動力源之車輛，騎乘電動腳踏車大幅降低對環境之衝擊。

然而電動腳踏車也存在若干缺點，目前電動腳踏車使用之蓄電池大部分為鋰離子電池與鉛酸電池，鋰電池具有高能量密度與無記憶效應等優點，然而其生產成本高，故提高電動腳踏車售價；相較之下鉛酸電池價格低廉甚多，但是其體積與重量卻限制電動腳踏車之性能，並造成充電上之不便，也因此降低大眾騎乘意願。但是如果能夠於路旁架設太陽能充電站供電動腳踏車騎士充電，不只大幅提升充電便利性，也增加騎乘距離，而太陽能板直接吸收潔淨之太陽光能，對於節能減碳也有所助益。此外，許多偏遠地區如深山油源取得不易，如果能於該處設

立太陽能充電站並以電動車代步，則可增加交通之便利性。

本研究將建立太陽能充電站，將太陽能電池輸出之電力調整成適當之電壓值後對電動腳踏車充電，研究不同天氣狀況對充電過程之影響，並實際進行道路騎乘測試，以評估利用太陽能對電動腳踏車充電之可行性。

1.2 文獻回顧

台灣具有良好之半導體製造技術，因此在製程相似之結晶矽太陽能電池製造上也具有優異水準，在環保意識興起與再生能源逐漸受到重視的背景下，太陽能電池之發展有加溫之趨勢，許多學者也爭相投入相關應用之研究。為了響應節能減碳政策，2010 年四月台南縣環保局設置小型太陽能充電站，該充電站採用總功率 2.1kW 之太陽能發電系統，除供電動腳踏車充電外，也提供夜間照明用電，該充電站並連接市電作為電力不足時之輔助【3】。

國外也開始推廣電動腳踏車用太陽能充電站，例如京瓷(Kyocera)公司於日本國內設置太陽能充電站，太陽能板呈垂直排列，如圖 1.1 所示，該充電站連結市電讓電動腳踏車也能在陰天或夜晚進行充電【4】。

儘管台南地區已設置電動腳踏車充電站，但利用該充電站充電必須連接原廠充電器將交流電轉換成適當電壓之直流電，不僅降低使用之便利性，太陽能電池輸出之直流電經換流器轉換成交流電後再經充電器轉換成直流電之過程也降低充電效率，故本研究針對測試之蓄電池選用適當輸出電壓的太陽能電池，以穩壓電路限制最大電壓後將輸出之直流電源直接對蓄電池充電，以降低能量損失。

1.3 論文架構說明

本研究探討以太陽能電池對電動腳踏車進行充電之可行性，在敘述研究動機與回顧太陽能充電站之發展近況後，第二章說明太陽能電池之結構、發電原理，以及輸出特性。第三章介紹電動腳踏車之定義與重要零組件，並探討續航力、騎

乘速度與蓄電池輸出之關係。第四章說明太陽能充電電路之設計，首先探討本研究使用之鉛酸電池電力特性，隨後說明蓄電池之充電技術與本研究使用之穩壓電路。第五章先介紹電池電量估測之方式，之後便開始進行電動腳踏車充電與騎乘實驗，紀錄在不同日照環境下充電之各項參數，並對實驗結果進行研討。第六章則對研究結果提出建議與未來展望。



第二章 太陽能電池簡介

2.1 太陽能電池發電原理

目前已商品化之太陽能電池主要以 p 型與 n 型半導體製成之二極體為基礎，利用光電效應(photoelectric effect)產生電力。二極體之結構如圖 2.1 所示，在矽晶體中分別加入三價與五價元素如硼與磷時，便形成 p 型半導體與 n 型半導體，p 型半導體中電洞(hole)為多數載子，而 n 型半導體中則以自由電子為多數載子，此二型半導體在接合前皆為電中性，然而在接合後因為電子與電洞濃度之差異，n 型半導體之自由電子往 p 型半導體擴散，使得擴散區域內之 n 型半導體帶正電，相對的 p 型半導體之電洞往 n 型半導體擴散，使得擴散區域內之 p 型半導體帶負電，此擴散區域之電荷變化即形成電場，在電場引導下，擴散區內之電洞往 p 型半導體移動，而自由電子則往 n 型半導體移動，單一載子無法在此區域停留，故此 p-n 接面形成之電荷變化區域稱為空乏區(depletion region)。

當入射太陽能電池之光子(photon)能量大於半導體材料之能隙(energy gap)時，便能使位於價電帶(valence band)之電子躍升至傳導帶(conduction band)形成自由電子，並於價電帶形成電洞，如圖 2.2 所示，自由電子在移動過程中可能因能量損失而與電洞復合，因此必須利用電場將自由電子與電洞分離，而藉由 p-n 接面空乏區產生之電場可使自由電子往 n 型半導體移動，電洞往 p 型半導體移動，進而產生電位差，再經由外部電路連結便能供應電力，如圖 2.3 所示。

2.2 太陽能電池輸出特性

太陽能電池之主體為 p-n 接面二極體，藉由光照射產生電流，故理想太陽能電池之等效電路可視為電流源與二極體之並聯電路，然而實際之太陽能電池不論是材料內部或各層接面皆存在電阻，故實際等效電路須接上串聯電阻(series resistance)與分流電阻(shunt resistance)，如圖 2.4 所示，從該電路與二極體特性可得到單一太陽能電池輸出至負載 R_L 的電壓 V 與電流 I 之關係式【5】【6】：

$$I = I_{ph} - I_D - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{nkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

相關符號說明如下：

I_{ph} ：太陽能電池之光電流，A

I_D ：二極體電流，A

I_0 ：p-n 接面之逆向飽和電流，A

R_s ：太陽能電池之串聯電阻， Ω

R_{sh} ：太陽能電池之分流電阻， Ω

q ：電子電荷量， $q=1.6 \times 10^{-19} \text{C}$

n ：p-n 接面之理想因子，介於 1 與 2 之間，在此設定 $n=1.5$

k ：Boltzmann 常數， $k=1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$

T ：太陽能板之溫度，K

一般而言，太陽能電池之串聯電阻值 R_s 極小，約為 0.5Ω 左右，而分流電阻 R_{sh} 值極大，利用此特性進而將 2.1 式簡化成 2.2 式：

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

太陽能電池之輸出特性主要受日照強度與溫度影響，其關係式如下：

$$I_0 = I_{0,r} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{nk} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.3)$$

$$I_{ph} = \frac{S}{S_r} [I_{sc,r} + K_i (T - T_r)] \quad (2.4)$$

E_g 為矽原子之能隙，約 1.12eV ，而 S 則是單位面積之日照強度， K_i 是短路電流之溫度係數， $I_{sc,r}$ 是參考狀態下之短路電流， $I_{0,r}$ 為參考狀態下之逆向飽和電流，一般而言，該參考狀態係指 $S_r=1000 \text{W/m}^2$ 以及 $T_r=298 \text{K}$ 之環境。利用 2.2 式至 2.4 式即可計算任意太陽能板溫度及日照強度下之太陽能板輸出電壓與電流值，而藉由 2.5 式則可得到輸出功率值：

$$P = IV \quad (2.5)$$

本研究使用兩組知光能源(Apollo Solar Energy)公司所生產之六吋單晶矽太陽能模組，如圖 2.5 所示，其型號與輸出特性如表 2.1 所示，該數據係在光源照射，空氣質量(air mass, AM)1.5，以及太陽能板溫度 298K 之參考狀態下測得。本研究將兩組太陽能模組串聯後對電動腳踏車之 36V 蓄電池充電，利用表 2.1 之數據代入 2.2 式至 2.5 式即可計算串聯後之模組在不同環境下之性能，由於表 2.1 之數據為太陽能電池串聯之結果，因此計算時代入之電壓值須除以串聯數量，以計算結果繪製之曲線如圖 2.6 至圖 2.9 所示，圖 2.6 與圖 2.7 為太陽能模組於 298K 溫度下之輸出曲線，短路狀態下太陽能模組輸出最大電流，稱為短路電流 I_{sc} ，隨著輸出電壓增加，電流微幅下降，當電壓增加至某程度後電流便快速下降，直到開路狀態時沒有電流輸出，此時電壓達到最大值，稱為開路電壓 V_{oc} ，此輸出特性使得太陽能模組輸出最大功率之電壓與電流值位於曲線轉折點附近，該點之電壓及電流值稱為最大功率電壓 V_{pm} 與最大功率電流 I_{pm} ，由於串聯之太陽能模組其最大功率輸出電壓與蓄電池電壓相近，因此預估充電過程太陽能模組運作於最大功率點附近，進而省略最大功率追蹤電路之安裝。隨著日照強度增加，開路電壓微幅增加，而短路電流則顯著增加，因此輸出功率也隨之增加。圖 2.8 與圖 2.9 顯示溫度對太陽能模組輸出之影響，在固定日照強度之情形下，模組溫度上升其短路電流雖然微幅增加，開路電壓卻快速下降，因此輸出功率亦隨之降低，而一般情況下日照強度之增加同時使模組溫度上升，進而降低其輸出效率，故太陽能模組必須具備良好之散熱機制才能提升其發電效率。

第三章 電動腳踏車概述

3.1 簡介

電動腳踏車係人力踩踏行進之二輪自行車加裝馬達驅動系統以作為額外動力之載具，如圖 3.1 所示，根據交通法規之定義【7】，此型載具可區分為電力驅動為主之電動自行車，以及以人力為主，電力為輔之電動「輔助」自行車，並限制此二類載具之最大行駛速率皆必須在 25km/h 以下，為簡化敘述，以下將此二類載具合稱為「電動腳踏車」。電動腳踏車之馬達驅動系統具備三項重要零件：直流馬達、蓄電池與控制器，此三項零件決定電動腳踏車之動力輸出表現。

直流馬達將輸入電能轉換成動力輸出，其基本構造如圖 3.2 所示，根據零件運動與否可將馬達內部結構區分為定子與轉子兩部分，藉由電磁感應原理，通電後之電樞線圈產生磁場，該磁場與磁鐵產生之磁場方向不同，進而產生力矩帶動轉子轉動。目前市面上之車型大都採用無刷直流馬達，相較於傳統有刷直流馬達以電刷轉換電樞之電流方向，無刷馬達以電子元件感測磁場之變化進行控制，此設計可減少轉子磨耗與雜訊，並縮小馬達體積，且更易於高速運轉。馬達輸出之力矩正比於電流量，而該電流量與電樞之端電壓值有關，因此控制電樞之電壓值即可控制馬達輸出轉矩之大小。

控制器用以接收電動腳踏車各部位感測零件回傳之訊號，並藉由感測訊號控制馬達之輸出轉矩，同時亦必須顯示蓄電池剩餘電量等重要訊息。目前電動腳踏車直流馬達之控制主要利用脈波寬度調變(pulse width modulation, PWM)技術，該技術藉由數位訊號來控制類比電路，其原理如圖 3.3 所示，輸入可調整數值之參考電壓與固定頻率之鋸齒波進行比較，當參考電壓值高於鋸齒波電壓即輸出高電位，相對的如果參考電壓值低於鋸齒波電壓即輸出低電位，因為鋸齒波頻率固定，輸出高電位時間和低電位時間之和為定值，即脈波之周期固定，而藉由調整高電位與低電位時間之比例即可控制輸出之電壓值。利用脈波寬度調變技術控制馬達之端電壓即可控制輸入之電流值，進而改變馬達輸出之轉矩。除了接收轉把或踏板

傳遞之訊號進而控制馬達輸出，控制器還須限制馬達輸出以維持電動腳踏車在適當之行進速度。此外，在電池電壓過低之狀況下控制器亦必須停止其繼續輸出電力以保護電池。電動腳踏車控制器之設計日益精進，除了提升騎乘安全也提升騎乘效率。

電動腳踏車大都以二次電池作為電源，二次電池即能經歷反覆充電與放電等循環過程之蓄電池，目前市面上常見之電動自行車用蓄電池有鉛酸電池、鎳氫電池以及鋰離子電池。鉛酸電池技術發展成熟，電極穩定性高且價格低廉，然而其單位質量之能量密度極低，36V 之鉛酸電池重量動輒超過十公斤，降低電動腳踏車之性能也造成充電之不便，而電池內部成分對環境之汙染也較大，因此需要新型態之電池來取代鉛酸電池。鎳氫電池能量密度較鉛酸電池高，然而其自放電率高，且記憶效應顯著，記憶效應即電池長時間未經過完全充電與放電循環而造成電池可利用電量降低之現象。鋰離子電池能量密度極高，幾乎沒有記憶效應的問題，且使用年限長，對環境之汙染亦較鉛酸電池低，故逐漸成為電動腳踏車市場主流，然而其生產成本亦極高，要普及化仍需一段時間。蓄電池之容量決定電動腳踏車之續航力，目前市面上之電動腳踏車蓄電池大都搭載電壓 24V 或 36V 之蓄電池，電量從 7Ah 至 15Ah 不等，再搭配輸出功率 250W 之直流馬達則可達到約 25km 至 50km 左右之續航力，受到騎乘習慣與環境之影響，上述值亦會有所改變。

3.2 電動腳踏車輸出特性

以馬達帶動電動腳踏車前進必須克服阻力，電動腳踏車前進過程與空氣摩擦產生空氣阻力 F_a ，而車輪轉動與地面摩擦時便產生車輪滾動阻力 F_r ，當電動腳踏車爬坡時則額外生成爬坡阻力 F_g ，在假設空氣靜止之情況下這三種阻力之數學式如下所示【8】【9】：

$$F_r = mg \cos \theta \quad (3.2)$$

$$F_a = \frac{1}{2} \rho C_D A_f v^2 \quad (3.3)$$

$$F_g = mgsin\theta \quad (3.4)$$

上式之 m 為電動腳踏車與騎乘者之質量， g 為重力加速度，約為 $9.81m/s^2$ ， μ 為滾動阻力係數， θ 為坡度， ρ 為空氣密度， C_D 為空氣阻力係數， A_f 為電動腳踏車與騎乘者迎風面之截面積，而 v 則為電動腳踏車相對於地面之速度。以上三種阻力之和即為電動腳踏車以速度 v 前進所需施加之最小力量 F ，如 3.5 式所示：

$$F = F_a + F_r + F_g \quad (3.5)$$

當馬達輸出力量大於 F 時便產生加速度。在固定路況與等速度前進的情形下電動腳踏車馬達輸出功率 P_{motor} 即馬達推動力量與電動腳踏車前進速度之乘積：

$$P_{motor} = Fv \quad (3.6)$$

在不考慮馬達與蓄電池內部能量損耗之情形下，馬達輸出功率等於蓄電池輸出功率，因此可以約略估計電動腳踏車以速度 v 前進時蓄電池輸出之電流量 $I_{batt.}$ ：

$$I_{batt.} = \frac{P_{motor}}{V_{batt.}} \quad (3.7)$$

其中 $V_{batt.}$ 為蓄電池連接負載時輸出之電壓值，若使用鉛酸電池作為電力來源， $V_{batt.}$ 會隨著輸出電流之不同而改變，而為了簡化計算，本研究之分析假設 $V_{batt.}$ 為定值。

將表 3.1 設定之參數代入 3.2 至 3.7 式即可計算不同路面坡度與騎乘速度下蓄電池所需輸出之電流量，平地行進之電動腳踏車其行駛速度與所需電流之關係如圖 3.4 所示，由於空氣阻力與速度平方成正比，行駛速度與電流之關係並非線性。

將蓄電池輸出功率對時間積分即可得知馬達輸出之能量 W ：

$$W = \int P_{motor}(t)dt = \int I_{batt.}(t)V_{batt.}dt \quad (3.8)$$

而在假設行駛環境與前進速度不變之情形下馬達輸出能量即力與位移之乘積：

$$W = FS_b \quad (3.9)$$

其中 S_b 即電動腳踏車之位移，因此利用 3.8 式與 3.9 式即可估算不同電量與行駛速度下電動腳踏車之續航力。

本研究測試之電動腳踏車為捷安特(Giant)公司生產之 Lafree E-432 電動輔助

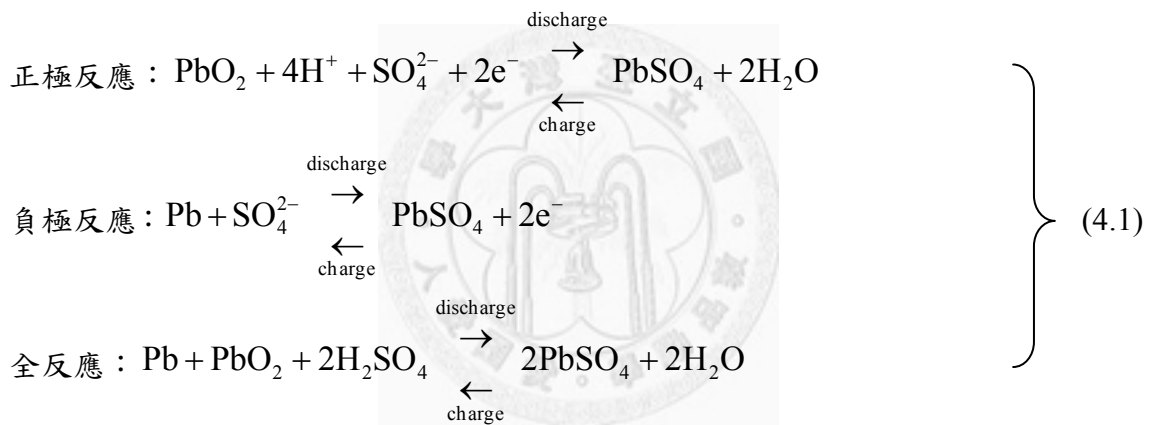
自行車，車重約為 39.5 公斤，搭載三洋(Sanyo)公司生產之無刷直流馬達以及電壓 36V，容量 15Ah 之鉛酸電池。Lafree E-432 之控制面板顯示電池電量以及行車模式等資訊，在靜止狀態必須藉由腳踩踏板方能啟動馬達提供部分動力，馬達啟動後便可藉由轉動電門控制轉把控制馬達輸出力量，此時若停止踩動踏板馬達仍然提供動力，當電門轉把固定一段時間，即馬達輸出固定，此時控制面板之定速燈號亮起，電動腳踏車進入定速模式，在此模式下馬達輸出穩定，即使放開電門轉把也不受影響，而電動腳踏車在無顛坡路面上亦等速度行駛。在定速模式下踩動踏板時控制面板之助踩指示燈開始閃爍，馬達便產生更大動力。不論是否進入定速模式，踩動踏板皆可使馬達產生輔助動力，當電動腳踏車控制面板顯示電池電量不足即不再供應馬達電力，此時便完全以人力騎乘前進。



第四章 太陽能充電電路之設計

4.1 鉛酸電池電力特性

鉛酸電池自一百五十多年前問世以來經過不斷改良，由於技術成熟且電池充放電穩定性高，並可進行大電流放電，目前仍然被廣泛應用，鉛酸電池主要元件包含電極、電解液、隔板，以及電解槽等部分，電池結構如圖 4.1 所示。鉛酸電池之正極材料為二氧化鉛(PbO_2)，負極則由鉛(Pb)所組成，將數片正、負電極板交錯配置浸泡在含有稀硫酸(H_2SO_4)電解液之電解槽中，並以絕緣隔板將正、負極板隔絕以避免短路，將同極之極板連結並延伸端子至槽蓋外，再裝上排氣閥後便形成電池單元，鉛酸電池藉由以下化學反應產生電能：



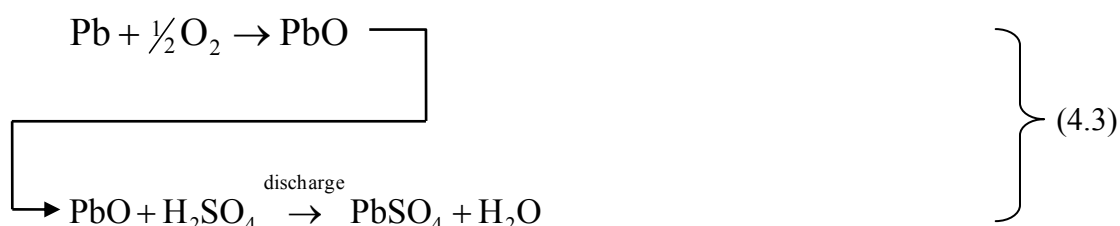
單一鉛酸電池單元之電壓約為 2V，將六個單元串聯後便組成 12V 之電池組，也就是市面上常見之規格。

鉛酸電池之電解液含有水分，在充電過程中會產生水的電解反應：



該電解反應便分別在正極與負極產生氧氣與氫氣，進而造成電池內部壓力上升，因此必須藉由排氣閥將多餘氣體排出以維持固定壓力，然而這也造成電解液水分之減少，進而降低儲電量，故電池使用一段時間後必須加水以穩定電解液之濃度，

此一步驟增加電池保養之困難度，而閥控式密閉鉛酸電池之研發則能解決此問題。閥控式密閉鉛酸(Valve Regulated Lead Acid, VRLA)電池利用負極板將充電時正極產生之氧氣吸收並還原成水，因此充電過程並不會造成水分之減少，省去加水之程序，其負極反應式如下【10】：



本研究測試之電動腳踏車採用台灣神戶電池(CSB Battery)公司推出之閥控式密閉鉛酸電池，其型號為 EVH12150F2，電壓 12V，20 小時率放電容量為 15Ah，外觀如圖 4.2 所示【10】，將此型電池三顆串聯後形成電壓 36V，容量 15Ah 之電池組以供應足夠電力驅動馬達。鉛酸電池之容量以安培小時(Ah)為單位，電荷量 Q 與電流 I 之關係式如下：

$$Q = \int I(t)dt \quad (4.4)$$

因此安培與小時之乘積即電荷量之單位。一般而言，該標準容量之數值部分會以 C 來表示，並作為電流表示之基準，以本研究測試之鉛酸電池為例，即 1C=15A，而 0.2C 即表示 0.2×15=3A 之電流量。電池容量並非定值，其量值受放電之電流量與電池溫度影響，如圖 4.3 所示【10】，在 25℃ 溫度下以 0.05C (0.75A) 定電流放電，電壓持續下降，放電 20 小時後降至終止電壓便停止放電，以避免過放電而降低電池容量與使用年限，此過程電池放電量為 0.75A×20h=15Ah，然而在同樣電池溫度下以 0.6C 電流放電僅 1 小時初即達到放電終止電壓，累積放電量不到 10Ah，而當溫度下降時達到終止電壓前之有效放電量也隨之下降，此現象與溫度對電化學反應之影響有關。電池之放電終止電壓隨著放電電流不同而改變，電流越大則電壓越低，EVH12150F2 放電終止電壓之建議值如表 4.1 所示。

放電過後之鉛酸電池必須藉由充電以回復電量，充電過程必須施加適當之電

壓與電流並且保持適當之溫度才能確保電池回復至 100%電量狀態(state of charge, SOC)，以本研究測試之電池為例，如果電池作為循環用途，在 25°C 溫度下建議充電電壓介於 2.40V/cell 與 2.50V/cell 之間，最大充電電流不超過 0.3C，即 4.5A；而作為備用電力，在相同溫度下則建議充電電壓介於 2.25V/cell 與 2.30V/cell 之間，最大充電電流亦不超過 0.3C。充電電壓過高可能產生過量氣體導致電池內部壓力升高，必須開啟排氣閥將多餘氣體排出，進而使得電解液之水分減少而降低電池電量；而充電電流過大則會因為電池內阻之消耗使電池溫度上升，過高溫度可能損壞電池，因此充電之電壓與電流必須加以限制。關於鉛酸電池之充電技術將於 4.2 節作詳細敘述。

在沒有連接負載之情況下鉛酸電池仍會因為內部化學反應而產生自放電，因此在電池保存一段時間後必須進行充電，一般而言，在 25°C 環境溫度下保存則 6 個月內必須充電，當環境溫度升高，電池之自放電速率亦增加，因此存放較短時間即必須充電，而溫度超過 30°C 便不適合存放電池，以避免深度自放電降低電池可用容量與使用年限。

4.2 鉛酸電池充電技術

鉛酸電池技術已發展多時，並衍伸出許多充電方式，除了恢復電量，充電時亦必須避免過高電壓與電流而損壞電池，而為了提升使用便利性，如何縮短充電時間亦是重要課題，以下對常見之充電方式作簡介。

(一) 定電流充電

定電流充電即以固定電流值對電池充電，此方式適合對串聯之電池組進行充電，使電量不一致之個別電池完全充電。定電流充電之電壓與電流變化如圖 4.4 所示，若採用大電流充電，充電後期電壓快速上升，容易造成過充電而損壞電池，因此必須採用分段充電，前期輸入大電流以縮短充電時間，後期則採取低電流充

電以避免過充電。

(二) 定電壓充電

定電壓充電即以固定電壓值對電池充電，其電壓與電流變化如圖 4.5 所示，充電初期電壓較低，電池接受較大電流，隨著電池電量增加電壓亦隨之提升，並抑制輸入之電流值，當電量接近100%時電壓趨近設定之穩定值。利用此方式充電需控制輸入電壓於適當值，輸入電流則由電池電量狀態決定，由於充電後期電流值極低，將電池充飽必須花費較多時間；此外，當電池電量過低時，充電初期可能輸入過大電流而造成電池溫度過高而損壞電池，故必須限制電流最大值。

(三) 定電壓定電流充電

此方式結合定電壓充電與定電流充電之優點，充電初期採用定電流充電，除限制電流最大值外，也縮短充電時間，當充電電壓上升至上限值後便採定電壓充電，以避免過充電，該充電方式之電壓與電流變化如圖 4.6 所示。

(四) 浮動充電

浮動充電適用於備用電力系統中，電源與電池及負載並聯，大部分時間負載電力由外部電源提供，並對電池進行充電以確保其電量在100%之狀態，而當外部電源電力不足時便由電池供應負載電力，由於電池長期處於充電狀態，相較於循環使用之充電狀態，必須以較低之電壓進行充電以避免過充電而損壞電池。

(五) 脈衝充電

脈衝充電係每充電短暫時間後作更短時間之休息，隨後再進行短時間充電而形成規律周期，此短暫休息時間能使電解液濃度分布更均勻，增加電能轉換成化學能之效率，因此能夠提高充電電流，縮短充電時間，脈衝充電之電壓與電流變

化如圖 4.7 所示。

4.3 充電電路之設計

本研究設計之太陽能充電系統直接以太陽能電池對鉛酸電池進行充電，並未並聯其他電源或電力儲存設備，因此夜間無法進行充電。鉛酸電池充電時必須限制充電後期之電壓以避免過充電而降低電池容量，因此本研究製做一穩壓電路以控制充電電壓於定適當範圍內，當充電電壓增加，充電電流便逐漸降低，由於最大充電電流不超過建議值(4.5A)，故不作額外控制。太陽能電池輸出電壓隨著日照強度變化而改變，當日照強度不足時太陽能板電壓可能低於鉛酸電池電壓而使鉛酸電池輸出電流至太陽能模組，因此必須連接防逆流二極體以避免逆向電流造成太陽能電池損壞，本研究使用之防逆流二極體型號為 SR806。電流在順向經過二極體時電壓會微幅下降，降幅約 0.3V 至 0.7V，視二極體種類而定，因此串聯防逆流二極體會造成太陽能板輸出電壓微幅下降。

本研究使用之穩壓電路為串聯穩壓電路，如圖 4.8 所示，此電路由電晶體、電阻，與 Zener 二極體組成，具有負回授控制機制，各元件之功能如圖 4.9 所示，取樣電路擷取輸出電壓之變化，比較電路則將取樣電路輸出之電壓與參考電壓 V_{ZD} 進行比較，並送出訊號至控制電路以穩定輸出電壓。輸出電壓 V_{out} 受 Zener 二極體之 V_{ZD} 與分壓電阻之電壓控制，因此改變可變電阻之電阻值 R_v 便可改變輸出電壓值，本研究所使用之鉛酸電池在循環充電狀況下建議充電電壓值介於 2.40V/cell 與 2.50V/cell 之間，因此設定最大充電電壓 V_{out} 約等於 43.20V，即建議電壓之下限。串聯穩壓電路構造簡單，成本低廉且穩定性高，然而電晶體 TR_1 長時間傳輸大電流且會造成部分電壓損失，因此該電路效率較低。

由於太陽能模組輸出數安培之電流，而單一電晶體 TR_1 之電流增益 β_1 不足以產生如此電流，因此可將兩個電晶體串聯形成 Darlington 電路，如圖 4.11 中 TR_1 與 TR_2 之組合，而此電晶體組合之總電流增益即個別電晶體電流增益之乘積：

$$\beta = \beta_1 \times \beta_2 \quad (4.5)$$

由於 TR_1 必須承受大電流，因此必須使用大功率電晶體，並加裝散熱片。在 TR_1 與之 TR_2 選擇上，本研究使用 TIP140 晶片，該晶片內建 Darlington 電路，如圖 4.10 之灰框所示【11】，因此單一 TIP140 晶片便包含 TR_1 與 TR_2 ，並且能承受 125W 之最大功率及 10A 之集極(collector)電流 I_C 。穩壓電路其餘電子元件規格如表 4.2 所示，而完成後之穩壓電路如圖 4.11 所示。



第五章 電動腳踏車充電與騎乘實驗

5.1 鉛酸電池剩餘電量之檢測

欲評估以太陽能對電動腳踏車充電之可行性必須能夠估測鉛酸電池之電量狀態，而主要之電池剩餘電量估測方法有以下數種，在此作簡單介紹。

(一) 開路電壓法

藉由量測鉛酸電池之開路電壓可以判斷電池之電量狀態，開路電壓即電池沒有連接負載情況下之電壓值，而電池電量與開路電壓約略呈線性關係，如圖 5.1 所示【10】。當鉛酸電池經過充放電後電解液濃度分布並不均勻，因此必須靜置一段時間待其內部物質穩定且電解液濃度均勻後方可量測開路電壓，而經過大電流放電後所需靜置時間也越長。由於藉由開路電壓估計電量，此方僅適合量測電池連結負載或電源前之初始電量，無法提供充放電過程中準確之電量訊息。

(二) 負載電壓法

此方法藉由量測鉛酸電池與負載連結時之電壓來評估電池之剩餘電量，由於鉛酸電池輸出電壓隨著放電電流不同而改變，當負載電流變化劇烈時以此方法估測之剩餘電量亦產生大幅變化，準確度極低，故負載電壓法僅適合輸出電流固定之運作狀態。

(三) 庫倫電量檢測法

根據 4.4 式，電量即電流對時間之積分，因此量測放電電流與時間即可估測電池剩餘之電量：

$$C_r(t) = C_0 - \int I(t) dt \quad (5.1)$$

C_r 為剩餘之電量，而 C_0 則為起始電量，故以庫倫電量檢測法估計剩餘電量必須知

道起始電量值。此外，放電過程中部分電能被鉛酸電池之內部電阻消耗，因此量測產生之誤差便逐漸累積，而隨著電池老化其容量亦逐漸下降，故必須作修正。

(四) 內電阻法

鉛酸電池在充放電之過程其內部電阻值亦隨之改變，電池放電則內阻值降低，因此量測電池內阻值便可估計電量，內部電阻受溫度、電流量、電池容量等因素影響，故量測內阻值即把環境變化之影響納入，而不需對此作額外修正。以內電阻法估測剩餘電量需先找出內阻與電量之函數關係。

(五) 比重法

鉛酸電池電解液之比重隨著充放電之進行而改變，放電過程中 H_2SO_4 與電極反應生成 PbSO_4 ，電解液比重降低，充電則電解液比重增加，因此可藉由量測電解液比重來估計電池剩餘電量。此方法量測必須將比重計伸入電池內部，因此不適用於密閉型鉛酸電池。此外，電解液在充放電過後必須花費一段時間才能擴散均勻，故亦比重法量測必須將鉛酸電池靜置一段時間。

藉由量測鉛酸電池之開路電壓即可約略估計充電前後之電量，因此本研究參考圖 5.1 以鉛酸電池之開路電壓作為判斷剩餘電量之參考。此外，藉由 3.2 式至 3.7 式計算以某平均速度騎乘電動腳踏車電池輸出之電流量，再利用 5.1 式亦可評估鉛酸電池之剩餘電量。

5.2 深度循環充電與騎乘實驗

5.2.1 充電實驗

本實驗利用太陽能電池模組搭配自製充電電路對深度放電之鉛酸電池進行充電，並紀錄長時間充電過程相關參數之變化，充電之相關實驗設備如下：

分流器：用以量測電流值。分流器即能承受大電流之低阻抗精密電阻，運用歐姆定律量測電流通過分流器產生之電位差即可推算電流值，本研究使用之分流器如圖 5.2 所示，其規格為 20A 對應 100mV，即 $5\text{m}\Omega$ 之電阻值。

指針式電流表：用以比較分流器量測之電流值，以確定紀錄器擷取之電流值無誤，該指針式電表可量測最大電流為 10A，最小刻度為 0.2A，如圖 5.3 所示。

日照計：其外觀如圖 5.4 所示，日照計用以量測太陽輻射強度，將太陽光能轉換成電壓訊號傳送至紀錄器。

T 型熱電偶：用以量測大氣溫度與兩組太陽能板背面溫度，量測太陽能板背面溫度之熱電偶分別黏貼在兩組太陽能板背面接近中間之位置。熱電偶經較正確認誤差在 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 之內。在校正熱電偶後發現擷取太陽能板背面溫度訊號之 HR1300 紀錄器紙匣固定卡榫異常，經判斷認為不影響列印之數據，並隨後更換紙匣。

HR1300 紀錄器：本實驗使用兩台 HR1300 紀錄器，如圖 5.5 所示，一台紀錄器擷取充電電壓、充電電流、日照強度，及太陽能板背面溫度等訊號，另一台紀錄器則擷取熱電偶傳回之大氣溫度訊號，兩台紀錄器在擷取訊號後將數據印出。

充電電路之連結如圖 5.6 與圖 5.7 所示，指針式電流表量測流入穩壓電路前之電流值，而分流器則連結在穩壓電路之後以直接量測流經鉛酸電池之電流 I_{out} ，由於流經穩壓電路內部之分電流值極低，因此指針式電流表量測之電流值與分流器量測值幾無差異。充電電壓 V_{out} 之量測迴路則直接從鉛酸電池之兩極連結至紀錄器。充電開始前先啟動紀錄大氣溫度之紀錄器，其取樣頻率為每十分鐘一次，量測大氣溫度之熱電偶延伸至室外之走廊上，並以通風之白色外罩覆蓋以避免陽光直射，如圖 5.8 所示，當第一筆大氣溫度數據被紀錄後，啟動另一台 HR1300 紀錄鉛酸電池之開路電壓，之後便按下開關開始充電，並紀錄充電過程之充電電壓、充電電流、日照強度、兩組太陽能模組背面溫度等數據，取樣頻率為三分鐘一次，充電結果如圖 5.9 至 5.12 所示。

在 7 月 6 日之充電實驗中，鉛酸電池充電前之開路電壓為 34.46V，充電開始

後電壓迅速上升，隨後便以穩定速度增加，由於充電初期電池電壓較低，在強度 500W/m^2 以上之日照下充入之電流可達到 3A 以上，充電電壓與電流隨著日照強度變化而振盪，電流變化尤其明顯，而隨著電池電量增加，充電電壓有增加之趨勢，充電電流則逐漸遞減。充電過程中紀錄之最大日照強度約為 700W/m^2 ，然而該時段紀錄之充電電流卻低於 2.2A ，除了受充電電壓影響外，太陽能板溫度過高是主要原因，在大氣溫度超過 30°C 且日照強度在 600W/m^2 以上時，太陽能板背面之溫度可超過 50°C ，甚至在日照強度 700W/m^2 以上時達到 60°C 以上，根據圖 2.8，在負載電壓不變之情形下，太陽能板溫度增加將使其輸出電流顯著降低，也使得太陽能電池發電效率大幅降低。在充電後期電壓快速增加，此時穩壓電路將其限制在 43.2V 左右，在充電電壓穩定之期間，充電電流緩慢下降，受日照量振盪之影響較不顯著，充電後隔天量測之鉛酸電池開路電壓為 39.12V ，利用 4.4 式以長方形法近似積分，在不考慮充電時電池內部損耗之情形下，估計本次充電回充電量約 11Ah ，為全部容量 15Ah 之 73.3% ，利用圖 5.1 以開路電壓估計充電後之電量狀態則超過 85% 。

5.2.2 騎乘實驗

在前一日以太陽能充電後，藉由實際騎乘電動腳踏車來了解其續航力以及行使距離與電池電量之關係，相關實驗設備如下：

自行車碼表：用以量測電動腳踏車之騎乘距離、騎乘時間，本研究使用 Echowell 公司生產之 Bri-3 碼表，如圖 5.13 所示。

T 型熱電偶：用以量測騎乘實驗當天之大氣溫度變化。

HR1300 紀錄器：一台紀錄熱電偶傳回之大氣溫度數據，另一台則用以量測鉛酸電池之開路電壓。

騎乘電動腳踏車前先啟動 HR1300 紀錄大氣溫度變化，取樣頻率為每十分鐘一次，接著量測騎乘前鉛酸電池之開路電壓，之後便開始騎乘實驗。本實驗於台大

校園內進行，騎乘員與電動自行車之質量和將近 120kg，啟動電動腳踏車開關後踩踏踏板產生初始速度以啟動馬達，待馬達產生動力便停止踩踏並轉動電門轉把使馬達成為唯一動力輸出並增加行駛速度，當達到適當速度後便固定電門轉把一段時間以啟動定速模式，待定速模式啟動後即放開電門轉把，此時馬達輸出固定，電動腳踏車在平坦路面上作等速度行駛。本實驗力求騎乘過程中能維持等速度行駛，但校園內人車往來較多，因此難免遇到減速之情形。由於電動腳踏車在電力充足時續航力可超過 60km，必須分數次進行騎乘，每次設定一期程距離，該距離可為 15km 或 10km，視電量而定，待騎乘該設定距離後便關閉電源並紀錄行駛距離與行駛時間，接著將鉛酸電池靜置至少 1 小時後紀錄其開路電壓，隨後進行下一次騎乘。當鉛酸電池開路電壓偏低，下次騎乘實驗便騎乘電動腳踏車至電量不足，馬達不再提供動力為止。本實驗之結果如表 5.1 與圖 5.14 及 5.15 所示，其中表 5.1 之開路電壓 34.31V 為 7 月 11 日充電前所量測。

經過前一日之充電，電動腳踏車之續航力達到 62.54km，根據圖 5.1 假設充電後之鉛酸電池回復至 90%之電量狀態，即剩餘 13.5Ah 之電量，並假設騎乘過程電池電壓維持固定且鉛酸電池所有剩餘電能完全轉換成動能，利用表 3.1 空氣密度以外之參數並假設空氣密度為 1.16kg/m^3 ，代入 3.8 式與 3.9 式即可計算電動腳踏車在 17.4km/h 之行駛速度下，其續航力約為 58.2km，與實際值接近，然而以充入之電能 1542kJ 來計算，其續航力僅 51.3km，推測此差異與騎乘之環境溫度有關，電池在高溫環境下放電反應效率較高，因此可輸出更多電能。而藉由圖 5.14 可發現在等速度騎乘狀態下，騎乘距離與鉛酸電池開路電壓約略為線性關係，因此騎乘距離與電池電量亦為線性關係，而後段開路電壓下降較快，推測與負載電壓快速下降有關，如圖 4.3 所示，電池之負載電壓在低電量時快速下降，而電動腳踏車在等速度行駛下消耗功率固定，因此藉由 3.7 式可得知電池輸出電流增加，進而加速電量消耗，並使得電池開路電壓快速下降。

5.3 連續充電與騎乘實驗

對電動腳踏車使用者而言，理想之太陽能充電站必須能夠在日照充足之環境下將電量不足之電動腳踏車充電至 100%之電量狀態，而在日照量不足之環境下亦能提供足夠之電力讓使用者繼續騎乘，並支持至日照量充足之時日再進行深度充電。為了解本研究所使用之太陽能充電站在天氣長時間變化下之充電能力，本實驗擬每日對電動腳踏車進行充電，並於充電後請測試員作為通勤之交通工具，如此重複充電與騎乘五天，實驗流程如圖 5.16 所示，騎乘路線與模式不作限制以符合一般民眾實際騎乘狀態，充電同時並紀錄大氣溫度數據，實驗結果如表 5.2、表 5.3 與圖 5.17 至 5.37 所示。

圖 5.17 為各次騎乘實驗之開路電壓與行使距離關係圖，其中紅色、藍色與紫色直線為同一測試員騎乘之結果，在此三條直線中，相同平均速度之直線其斜率極為接近，而平均速度較低之直線其開路電壓隨騎乘距離降低之程度也相對平緩，即馬達輸出功率較低。綠色直線為另一位測試員騎乘之結果，儘管平均騎乘速度較快，電池開路電壓下降之程度卻較為平緩，推測騎乘人員在騎乘過程施以較多力量踩動踏板。

圖 5.18 至圖 5.37 為各充電實驗之日照強度、大氣溫度、充電電壓、充電電流隨時間之變化。在 7 月 11 日之充電過程中，將經過深度放電之鉛酸電池進行長時間充電，當天日照量充足，充電電流曾達到 3.2A 以上，並在 6 小時內將電池充電至 90%以上之電量狀態。經過騎乘放電後，隔日充電前電池開路電壓為 38.41V，充電前期雲量偏多使得日照量不足，平均約 245W/m^2 左右，但充電電流仍維持在 1A 以上，由於充電前電池電量已在 70%以上，儘管日照量偏低，充電電壓仍然顯著增加，增加速度也逐漸加快，充電後期日照量增加，穩壓電路使充電電壓達到穩定，但是當日照不足使得太陽能板輸出電壓過低時仍會造成充電電壓振盪；在經過近 2.5 小時之充電後電池電量超過 90%。7 月 13 日雲層較為厚實，充電過程大部分時間日照量在 100W/m^2 以下，充電電流亦低於 0.8A，由於充電後期雲層增

厚且開始下雨，太陽能板產生之電力已非常微弱，故經過近 2 小時便停止充電，充電後鉛酸電池開路電壓為 38.78V，電池無法回復至騎乘前之電量狀態，本次充電估計增加約 13% 之電量。7 月 14 日雲量亦偏多，大部分時間日照量在 $300\text{W}/\text{m}^2$ 以下，而經過較長距離騎乘後使得充電前電池剩餘電量較低，約 40%，但是經過長時間充電後仍可將電池充滿；儘管充電後期日照強度僅 $100\text{W}/\text{m}^2$ 左右，當鉛酸電池電量接近 100% 時，充電電壓仍隨日照強度微幅變化而產生大幅度振盪，因此若不作電壓控制則容易造成過充電而損壞電池。在 7 月 15 日之充電過程中，日照量變化劇烈，充電初期日照量高達 $800\text{W}/\text{m}^2$ ，但是太陽能板背面溫度也接近 70°C ，大幅降低發電效率，因此僅輸出約 1.5A 之電流；隨著雲系發展，日照量大幅降低，後期甚至降至 $20\text{W}/\text{m}^2$ 以下，導致太陽能板無法發電，此時防逆流二極體發揮作用，防止鉛酸電池輸出電力損壞太陽能板，由於無法充電且開始下雨，因此停止充電，充電時間約為 2 小時，充電後電池開路電壓為 39.36V。

太陽能充電站從吸收太陽能到輸出電能至鉛酸電池之充電效率 η 可利用下列公式計算：

$$\eta = \frac{I_{\text{out}} V_{\text{out}}}{A_{\text{PV}} S} \times 100\% \quad (5.2)$$

其中 V_{out} 與 I_{out} 分別為充電時鉛酸電池之端電壓與充電電流， A_{PV} 為充電站之太陽能吸收面積，約為 2.2m^2 ，而 S 則為單位面積日照強度，經過計算可發現在低日照強度下充電效率較高，可達到 13.5% 以上，隨著日照量增加效率逐漸遞減，當日照量升至 $600\text{W}/\text{m}^2$ ，充電效率降至 7% 附近，太陽能板之輸出逐漸遠離最大功率輸出點，推測此現象與太陽能板溫度之增加以及穩壓電路之特性有關，而當日照量低於 $80\text{W}/\text{m}^2$ 時效率亦快速下降，此結果則是電壓之快速下降所造成。此外，當電池電量增加效率亦有減少之趨勢，此現象在電壓升至限制值後更為明顯，由於單晶矽太陽能電池發電效率可達到 14%，充電站之效率有許多提升空間。

經過連續五天之電動腳踏車騎程與充電實驗，儘管後三天午後雲層增厚甚至下雨，且曾經無法將電池充電至 90% 以上之電量狀態，但是在第五天仍可將不足

電量恢復。現假設電動腳踏車騎士體重 60kg，每日以 20km/h 之速度騎乘重 40kg 之電動腳踏車通勤 20km，將以上參數與表 3.1 質量以外之參數代入 3.2 式至 3.5 式與 3.9 式可估計單日鉛酸電池消耗約 570kJ 之能量，太陽能充電站平均充電效率約為 7.5%，因此在不考慮鉛酸電池內部損耗之情形下，太陽能充電站需吸收 7602kJ 以上之光能方能完全補充電池損失之能量，若要在 2 小時內將損失電力回復，平均日照量約為 480W/m^2 ，相當於多雲到晴之狀況，若在 5 小時內將電力回復，則平均日照量約為 192W/m^2 ，相當於陰天之狀況；在 7 月 11 多雲至晴之天氣環境下，5.5 小時內量測之累積日射量已超過 10MJ/m^2 ，平均日照量為 523W/m^2 ，而在 7 月 14 日多雲時陰之天氣型態下，5 小時累積之太陽能亦達到 4.1MJ/m^2 ，平均日照量約為 227W/m^2 ，皆足以供應上述騎乘狀況所需，因此推測本研究設計之太陽能充電站在陰天之天氣型態(平均日照量 200W/m^2 以上)亦能供應大部分電動腳踏車騎乘者充足電力使蓄電池維持穩定電量。



第六章 結語

6.1 結論與建議

實驗證明本研究建立之太陽能充電站可直接輸出直流電對電動腳踏車進行充電，並且在日照充足(單日累積日照能量在 $11MJ/m^2$ 以上)之環境下將電壓 36V，容量 15Ah，經過深度放電之酸電池回充至 90%以上之電量狀態。分析實驗數據後推測在陰天(平均日照量 $200W/m^2$ 以上)之天氣型態下，該充電站亦能提供騎乘者足夠電力使蓄電池電量維持穩定。然而此太陽能充電站亦存在若干缺點，在充電電路之設計方面，本研究使用電晶體控制之串聯穩壓電路，儘管其構造簡單且穩定性高，但電晶體在長期導通之狀態下消耗大量能量，使充電效率降低，且該穩壓電路也使得太陽能板在高日照量環境下之輸出逐漸遠離最大功率輸出點，進而降低發電效率。此外，由於並未加裝太陽能電池之散熱元件，太陽能板於高日照強度之環境下溫度過高，導致其發電效率大幅降低。而充電過程並未對電流作控制，儘管在日照充足之狀態下初期電流可超過 3A，但後期因鉛酸電池電量增加而逐漸降低輸入電流，進而降低充電效率並增加充電時間，也降低使用之便利性。而目前設計之充電站只能對容量 13Ah 以上、電壓 36V 之鉛酸電池進行充電，因此僅適合搭配該規格電池之電動腳踏車。

綜合以上缺點，建議使用更快速之充電技術與更高效率之控制電路，當前主流之太陽能發電系統係採用 PWM 控制技術【6】【12】，利用此技術控制電路中功率開關導通與開路之時間來控制輸出電壓與電流，由於功率元件並非長期導通，消耗之功率較低，故效率提高。而加裝太陽能電池散熱機構可有效提升充電站於高日照強度環境下之發電效率，例如於太陽能板背面裝置散熱鰭片，以自然對流方式散熱。此外，高溫環境下對鉛酸電池充電不只效率降低亦可能造成過充電，因此充電場合必須避免陽光直射蓄電池。由於太陽能充電站並非任何時刻都與電動腳踏車連結，因此可另外加裝蓄電池，當日照量充足且未與電動腳踏車連結時，便可將吸收之太陽能儲存，當日照量不足且須要替電動腳踏車充電時便能供應更

充足穩定之電力。除了太陽能之外，風力亦是重要之再生能源，目前台灣已發展結合太陽能與風力發電之技術【13】，若能運用此技術設立結合太陽能與風力之電動腳踏車充電站便能更有效地運用再生能源並提升充電功率，對更多電動腳踏車進行充電。

6.2 未來展望

太陽能可作為對電動腳踏車充電時之電力來源，台灣與其他國家皆開始設置電動腳踏車用太陽能充電站，相關設備之建立正位於萌芽階段。隨著材料科技之進步，太陽能電池之發電效率逐漸提高，新興充電技術之研發則逐步縮短充電時間，因此將來太陽能充電站亦可對更高輸出功率之電動載具進行快速充電，而藉由太陽能充電站之設置也與電動載具之使用亦能提升交通便利性，例如在加油不易之偏遠地區設立太陽能充電站並以電動載具作為交通工具即可提升對外聯絡之便利性，而太陽能板產生之部分電力亦可供應其他電力設備。

台灣民眾時常以機車作為代步之交通工具，儘管便利卻也產生大量汙染，藉由太陽能充電站之廣泛設置提高使用電動腳踏車等電動載具之便利性，進而提升電動載具之普及率，並逐步取代不環保之機車以降低對生態環境之破壞，給後代更乾淨的未來。

參考文獻

- 【1】 交通部統計處，「『民眾日常使用運具狀況調查』摘要分析」，中華民國 99 年，中華民國交通部網站(2011)，<http://www.motc.gov.tw/>
- 【2】 交通部統計處，「『自行車使用狀況調查』摘要分析」，中華民國 99 年，中華民國交通部網站(2011)，<http://www.motc.gov.tw/>
- 【3】 新聞剪報，「南縣/低碳樂活行 太陽能電動自行車充電最夯」，中華民國 99 年，行政院環境保護署網站(2011)，<http://www.epa.gov.tw/>
- 【4】 「Kyocera supplies solar PV electric bicycle charging in Japan」, renewable energy focus (2011), <http://www.renewableenergyfocus.com/>
- 【5】 翁敏航、楊茹媛、管鴻、晁成虎，「太陽能電池－原理、元件、材料、製程與檢測技術」，第三章，東華書局，中華民國 99 年
- 【6】 張建偉，「太陽能電池最大功率點追蹤之研究」，國立成功大學航空太空工程學研究所碩士論文，中華民國 98 年 1 月
- 【7】 「道路交通安全規則」，中華民國交通部網站(2011)，<http://www.motc.gov.tw/>
- 【8】 游恭豪，「電動機車動力系統之電腦模擬與參數設計」，國立台灣大學機械工程學研究所碩士論文，中華民國 88 年 6 月
- 【9】 Annette Muetze, Ying C. Tan, 「Electric Bicycles-A performance evaluation」, IEEE Industry Applications Magazine, volume 13, issue 4, pp.12-21, 2007.
- 【10】 台灣神戶電池網站(2011)，http://www.csb-battery.com/index_ch.php
- 【11】 統懋半導體股份有限公司(2011)，<http://www.mospec.com.tw/big5/index.html>
- 【12】 林佑星，「家用型太陽能發電系統之研製」，國立台灣科技大學電機工程系碩士論文，中華民國 97 年 6 月
- 【13】 王寶勝，「以數位信號處理器為基礎之具可控整流風力與太陽能複合發電系統之研製」，國立台灣科技大學電機工程系碩士論文，中華民國 98 年 7 月

型號	135G6S	205G6S
最大功率電壓(V_{pm})	17.54V	25.87V
最大功率電流(I_{pm})	7.70A	7.93A
開路電壓(V_{oc})	22.15V	33.64V
短路電流(I_{sc})	8.27A	8.32A
短路電流溫度係數(K_i)	0.03456%/K	0.03456%/K
串聯太陽能電池數量	36 片	54 片
太陽能吸收面積	1.31m ²	0.88m ²
於 1000W/m ² 強度之光源、AM1.5，以及太陽能電池溫度 25°C 之標準狀態下量測		

表 2.1 太陽能模組輸出特性參數

參數符號	設定值
空氣密度(ρ)	1.2kg/m ³
空氣阻力係數(C_D)	0.8
迎風面截面積(A_f)	0.6m ²
電動腳踏車與騎乘者質量(m)	120kg
滾動阻力係數(μ)	0.02
電池負載電壓($V_{batt.}$)	36V

表 3.1 電動腳踏車行駛相關參數

放電終止電壓(V/cell)	1.75	1.70	1.60	1.30
放電電流(A)	(A)<0.2C	0.2C<(A)<0.5C	0.5C<(A)<1.0C	1.0C<(A)

表 4.1 鉛酸電池 EVH12150F2 於不同放電電流情況下之建議終止電壓值

元件符號	元件規格
R_A	8.2k Ω
R_B	2.2k Ω
R_v	5k Ω
R_1	10k Ω
R_2	15.8k Ω
ZD	1N4748(22V)
TR ₃	2N2222A

表 4.2 穩壓電路各元件之規格

騎乘日期	7 月 7 日			7 月 8 日		
騎乘時平均大氣溫度(°C)	32.9			34.4		
騎乘前開路電壓(V)	39.12	38.14	37.40	36.68	35.96	35.14
開始騎乘時間	10:30	13:15	15:30	11:00	13:15	15:30
騎乘經歷時間(分)	51.40	34.33	34.43	34.33	34.47	26.13
騎乘距離(km)	15.00	10.00	10.00	10.00	10.00	7.54
平均騎乘速度(km/h)	17.5	17.5	17.4	17.5	17.4	17.3
騎乘後開路電壓(V)	38.14	37.40	36.69	35.96	35.14	34.31
累積騎乘時間(分)	215.10					
累積騎乘距離(km)	62.54					

表 5.1 7 月 7 日與 8 日電動腳踏車騎乘實驗之數據

測試員 A 質量(kg)	78			
測試員 B 質量(kg)	75			
騎乘時間	7/11 21:30 與 7/12 8:30	7/12 21:30 與 7/13 8:30	7/13 18:40 與 7/14 7:40	7/14 21:30 與 7/15 8:30
騎乘人員	測試員 A	測試員 A	測試員 B	測試員 A
騎乘前開路電壓(V)	39.46	39.52	38.78	39.62
騎乘距離(km)	12.22	17.04	27.40	12.07
騎乘經歷時間(分)	36.70	56.80	77.22	36.13
平均速度(km/h)	20.0	18.0	21.3	20.0
騎乘後開路電壓(V)	38.41	38.13	37.03	38.56

表 5.2 連續五天騎乘實驗之相關數據

充電日期	7 月 11 日	7 月 12 日	7 月 13 日	7 月 14 日	7 月 15 日
充電前開路電壓(V)	34.31	38.41	38.13	37.03	38.56
平均日照量(W/m ²)	522.7	352.7	104.2	226.7	241.4
累積充電能量(kJ)	1655.9	370.4	178.9	866.6	246.2
累積吸收太陽能(kJ)	23802.6	6564.5	1485.8	9065.6	3920.0
平均充電效率(%)	6.96	5.64	12.04	9.56	6.28
充電後開路電壓(V)	39.46	39.52	38.78	39.62	39.36

表 5.3 連續五天充電之相關數據



圖 1.1 日本 Kyocera 公司所設置之電動腳踏車用太陽能充電站(圖片來源：【4】)

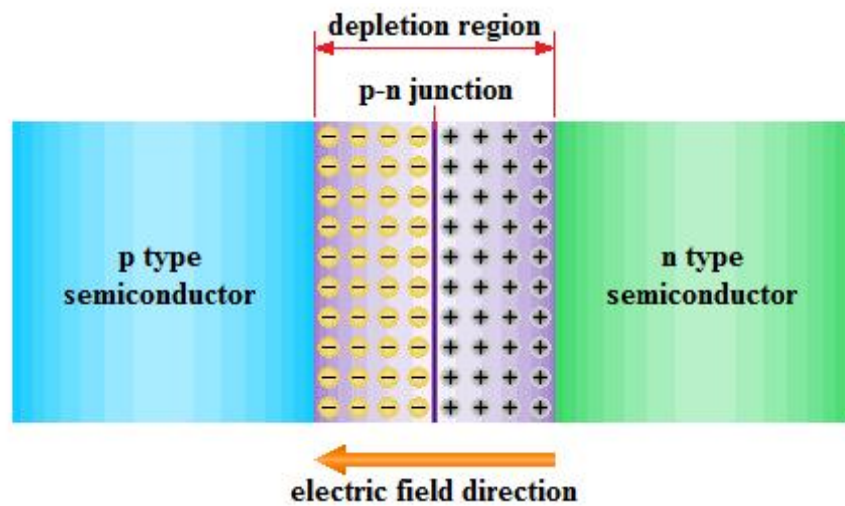


圖 2.1 二極體之基本構造

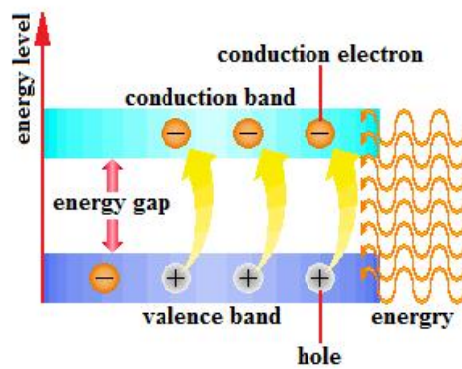


圖 2.2 自由電子—電洞對生成之示意

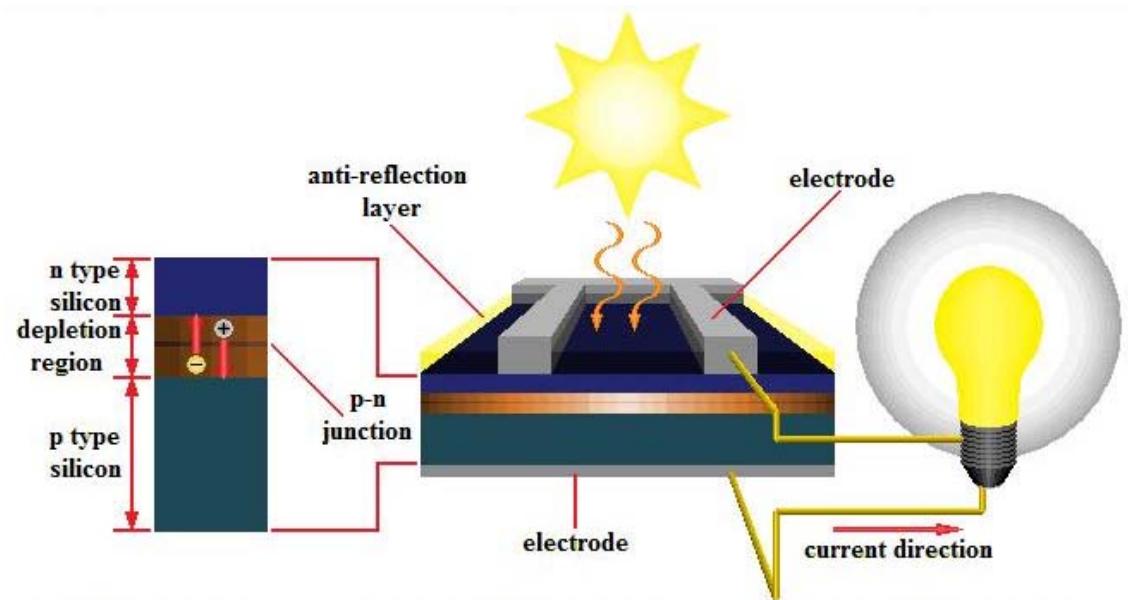


圖 2.3 矽基太陽能電池基本構造與發電原理

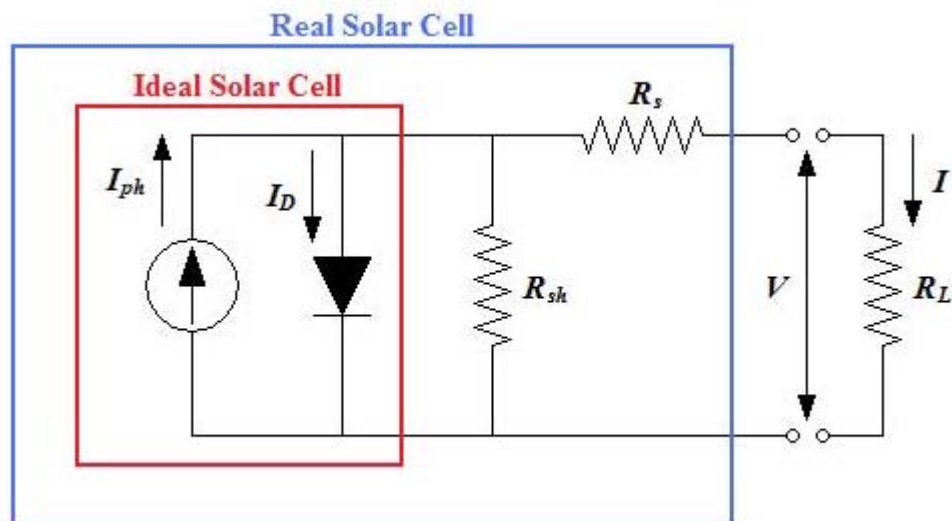


圖 2.4 太陽能電池之等效電路



圖 2.5 本研究使用之太陽能發電模組

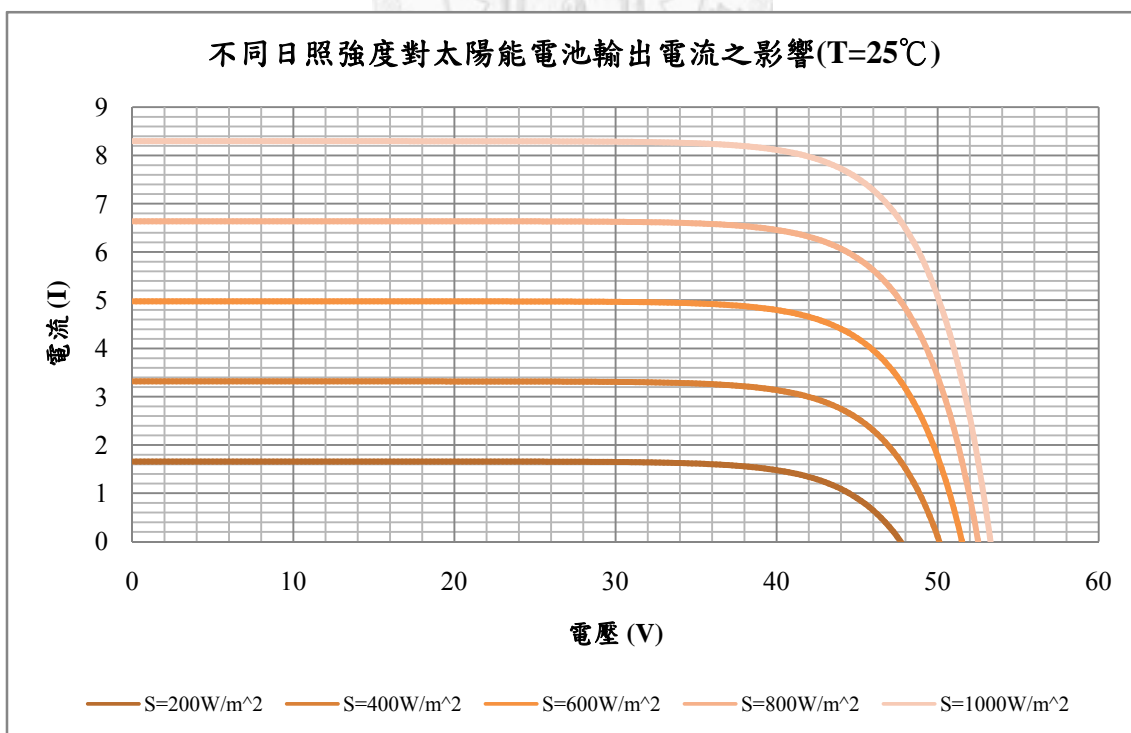


圖 2.6 太陽能電池輸出電流與日照強度之關係

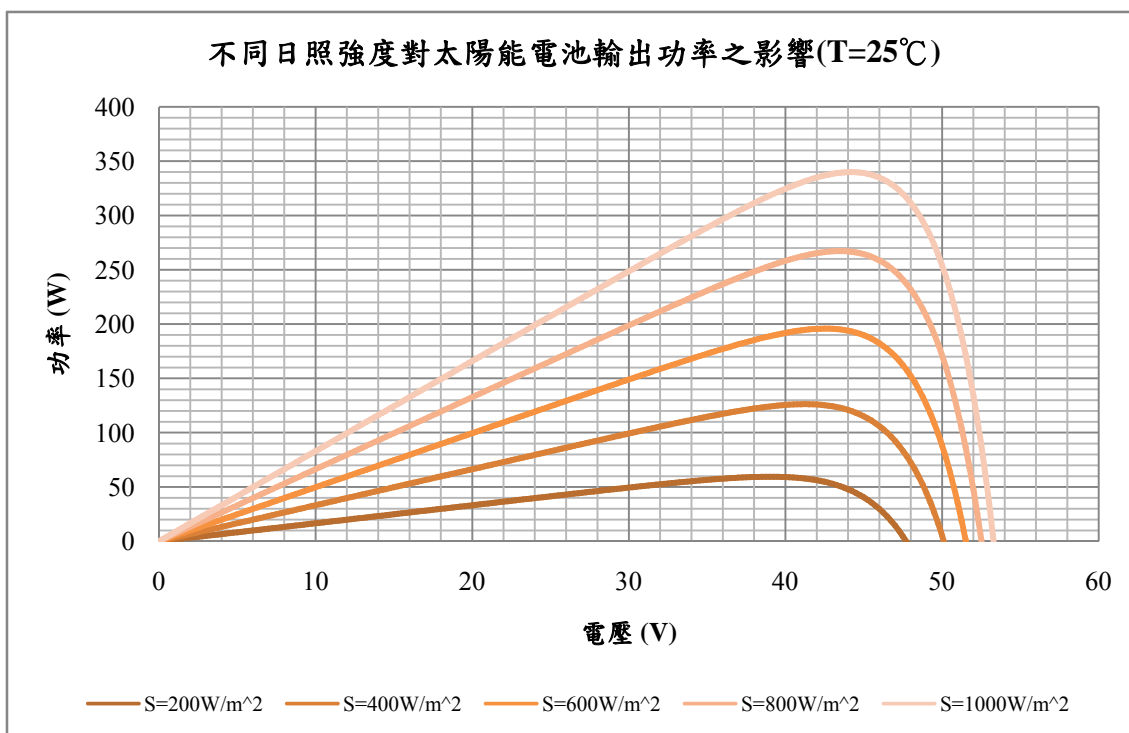


圖 2.7 太陽能輸出功率與日照強度之關係

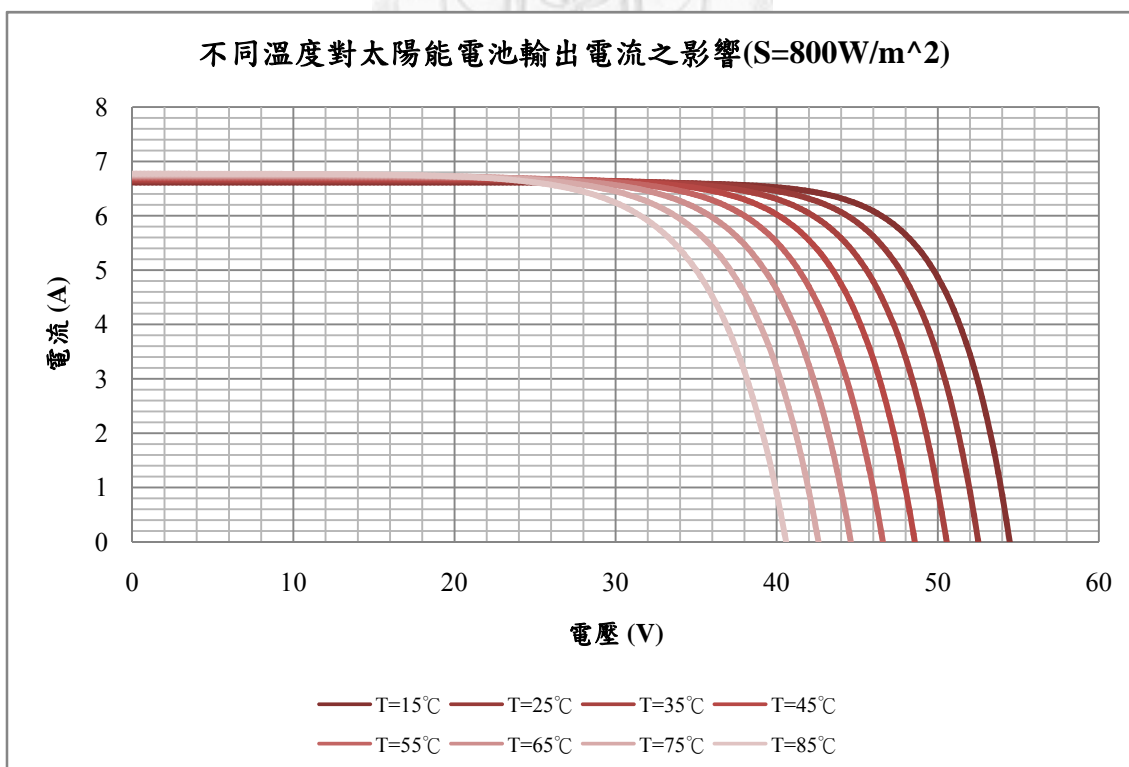


圖 2.8 太陽能電池輸出電流與溫度之關係

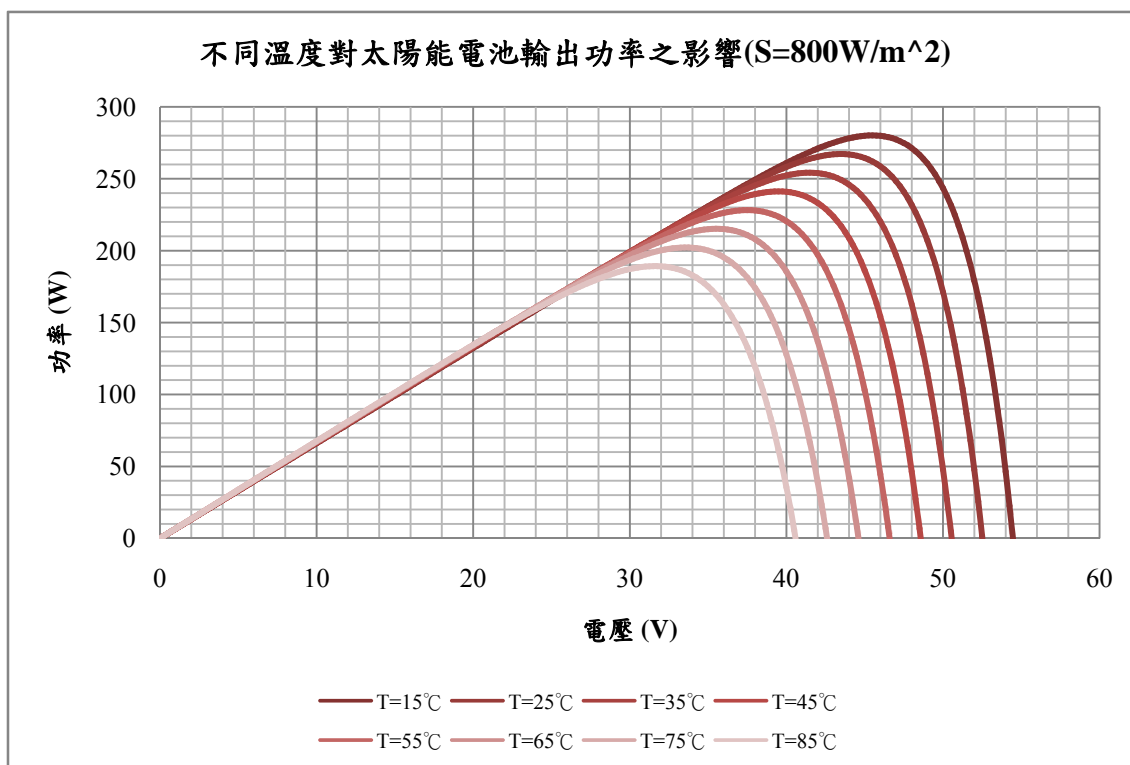


圖 2.9 太陽能電池輸出功率與溫度之關係



圖 3.1 本研究騎乘之電動腳踏車外觀

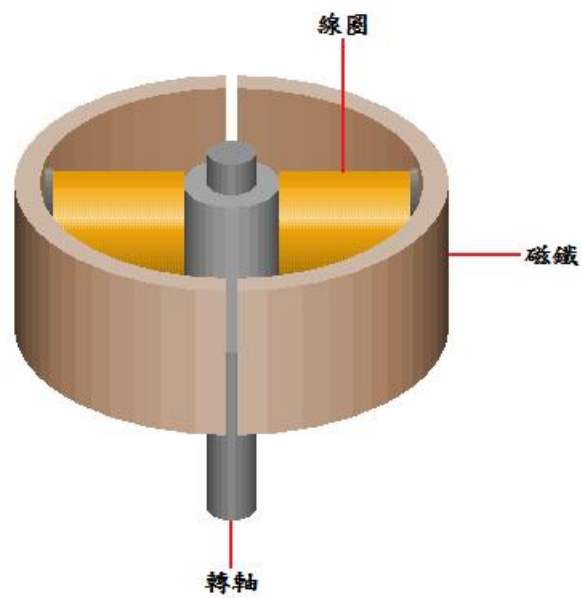


圖 3.2 馬達基本結構

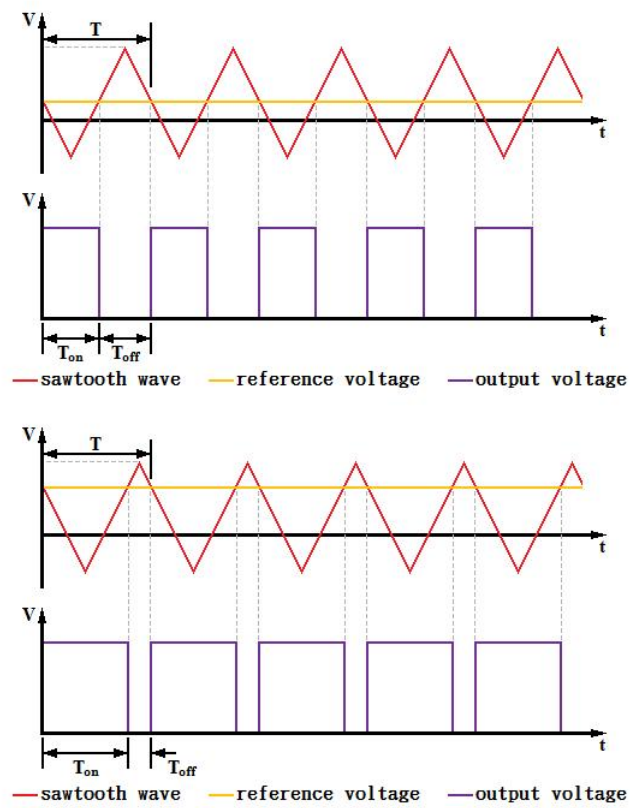


圖 3.3 PWM 控制基本原理

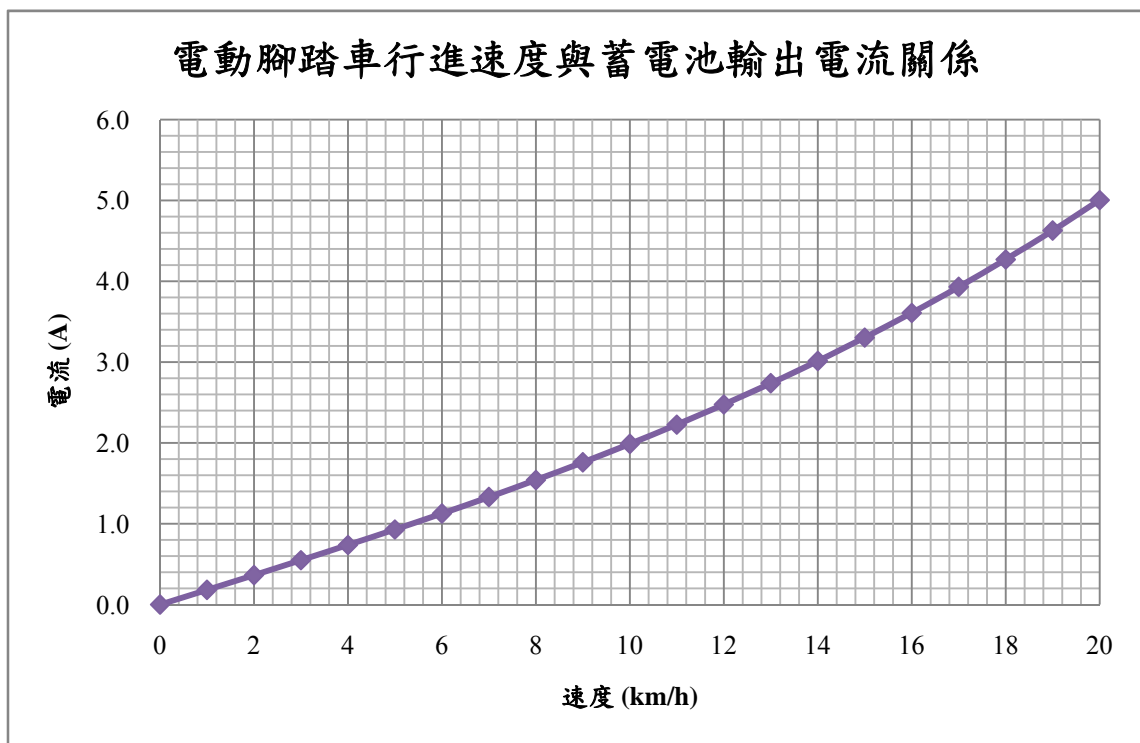


圖 3.4 平地行駛之電動腳踏車速度與蓄電池輸出電流之關係

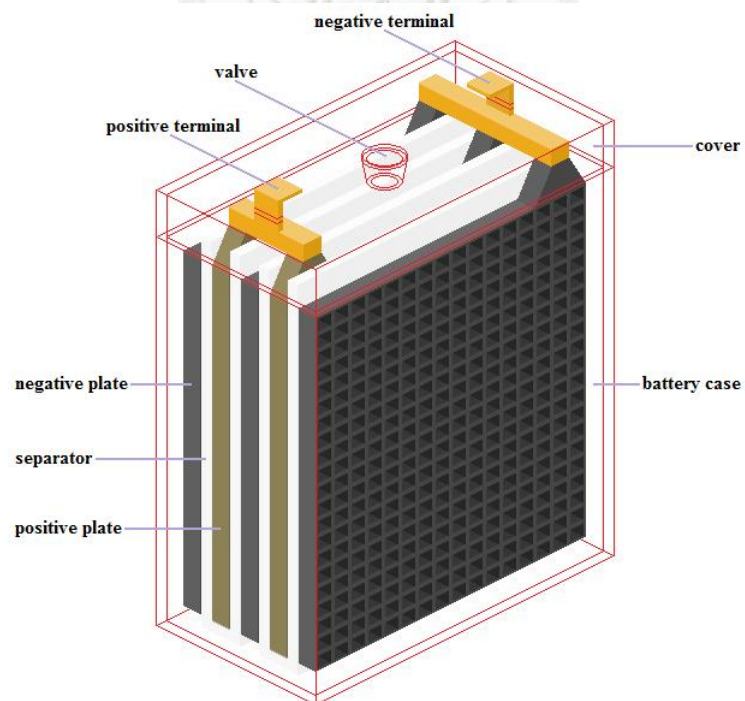


圖 4.1 鉛酸電池之基本構造



圖 4.2 本研究測試之 EVH12150F2 電動腳踏車鉛酸電池（圖片來源：【10】）

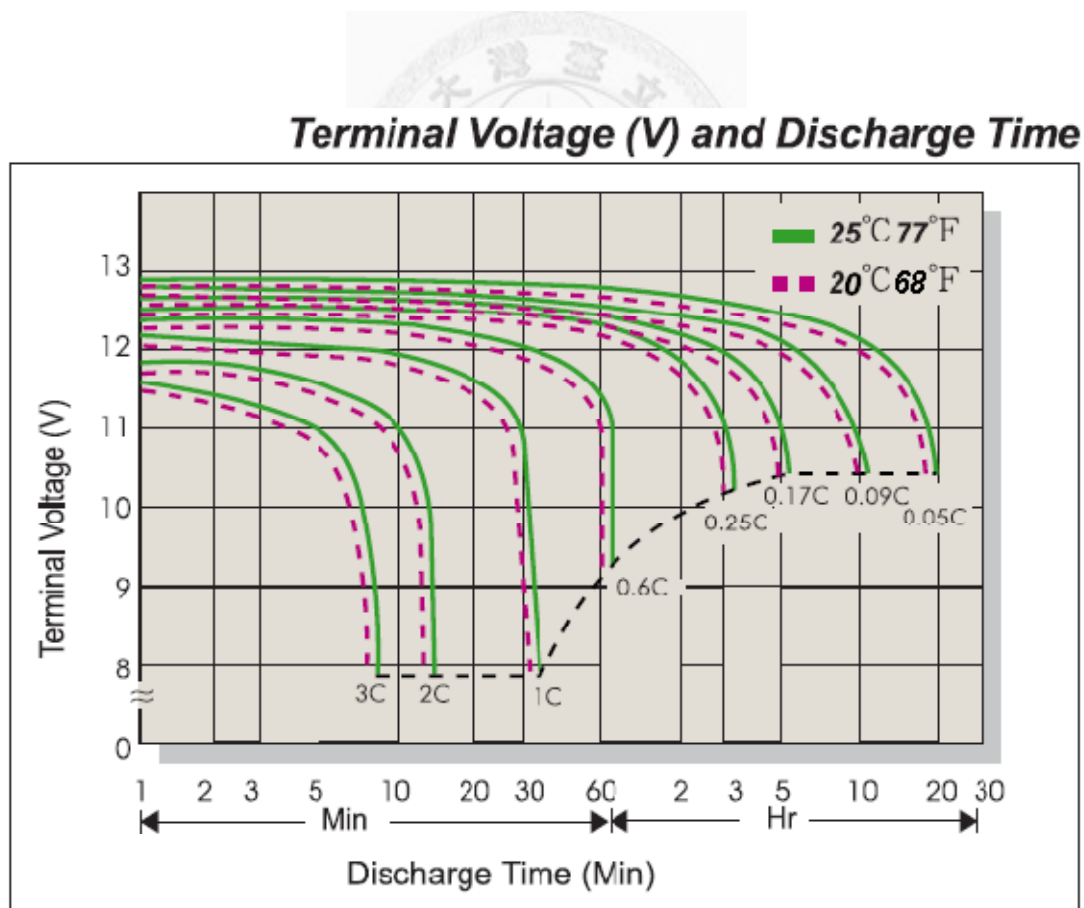


圖 4.3 不同放電電流狀態下放電時間與終止電壓之關係（圖片來源：【10】）

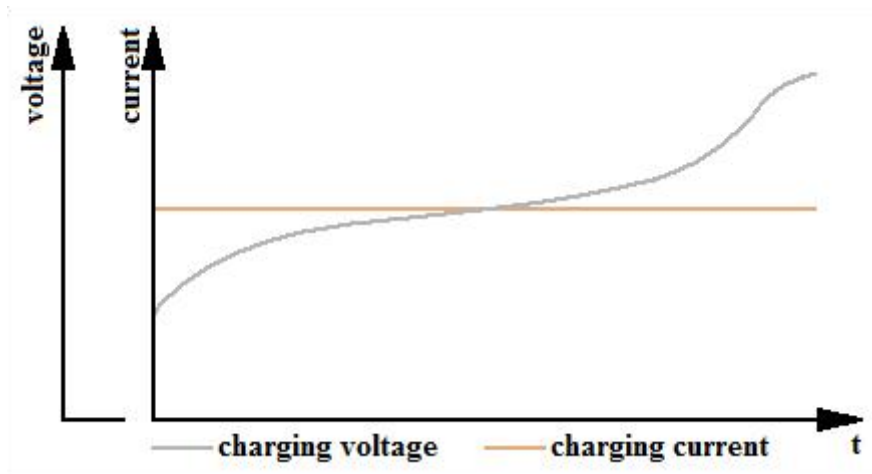


圖 4.4 定電流充電之電壓與電流變化

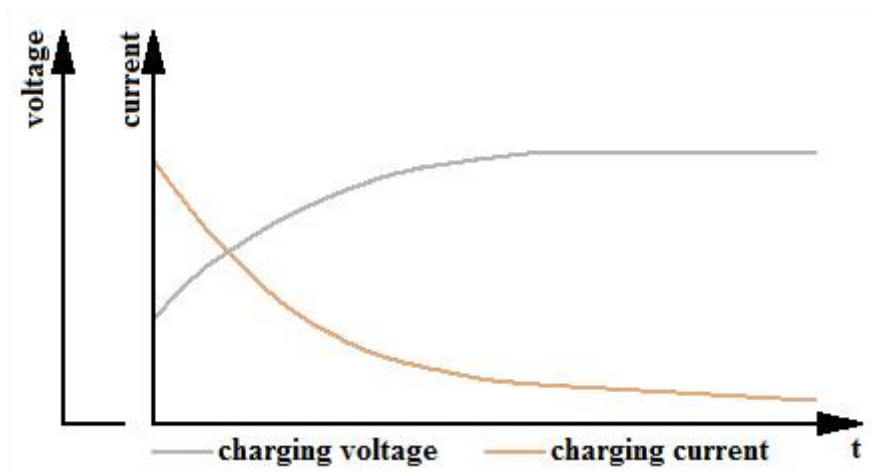


圖 4.5 定電壓充電之電壓與電流變化

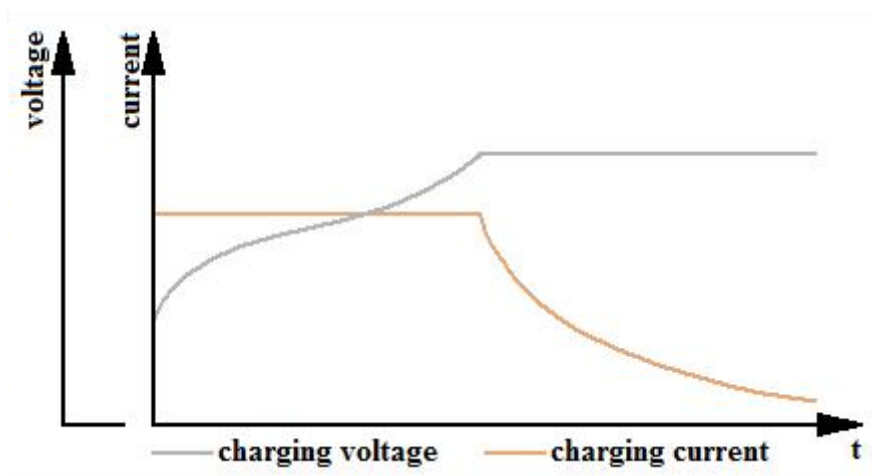


圖 4.6 定電壓定電流充電之電壓與電流變化

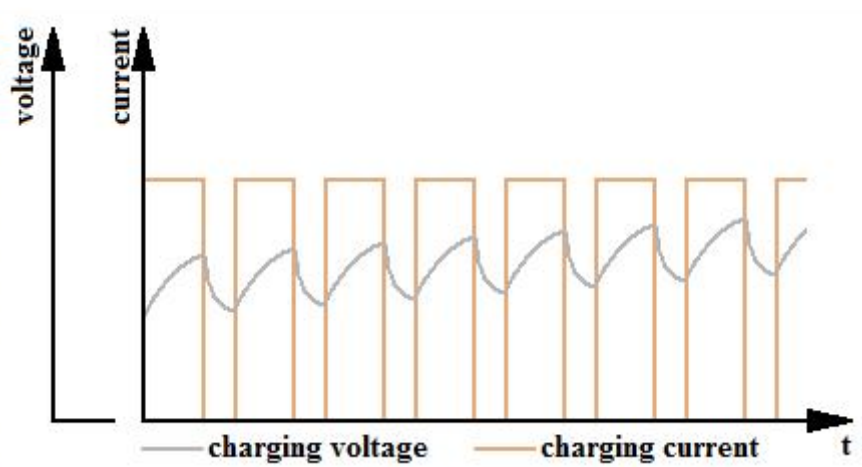


圖 4.7 脈衝充電之電壓與電流變化

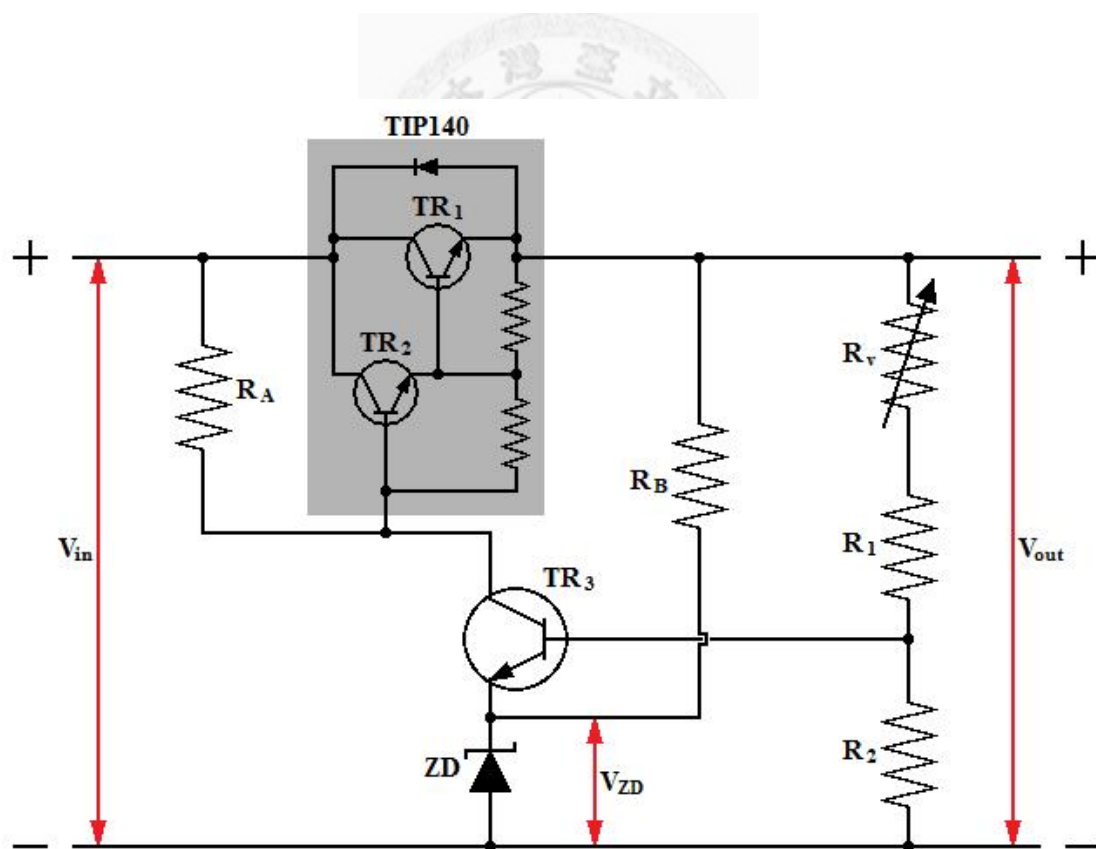


圖 4.8 串聯穩壓電路之結構

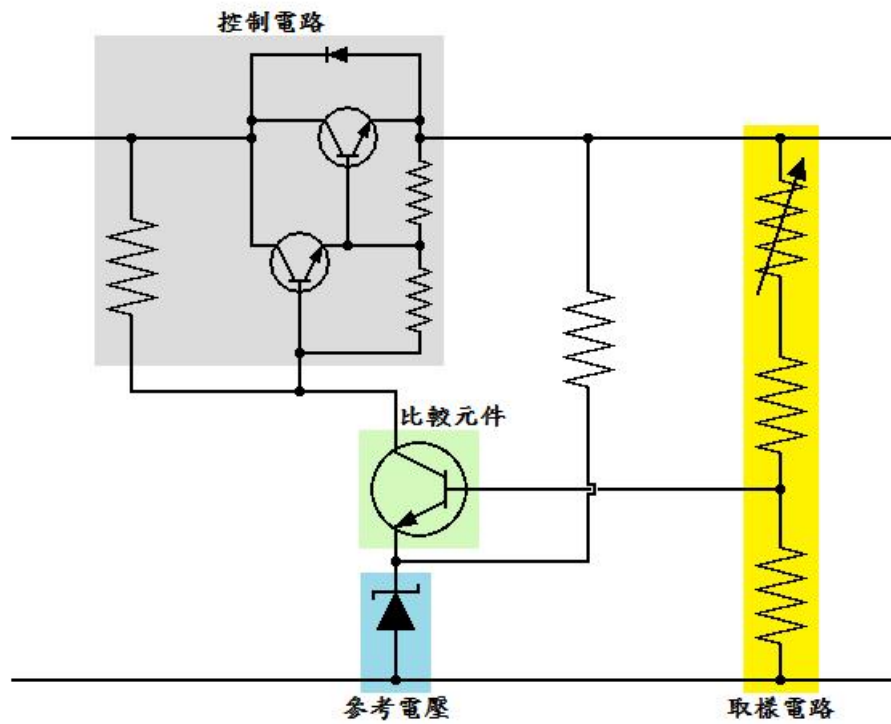


圖 4.9 串聯穩壓電路各元件之功能

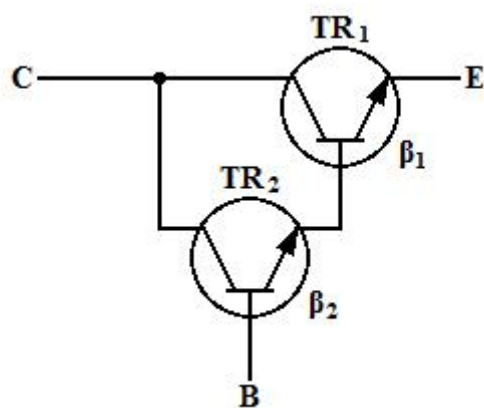


圖 4.10 Darlington 電路之結構

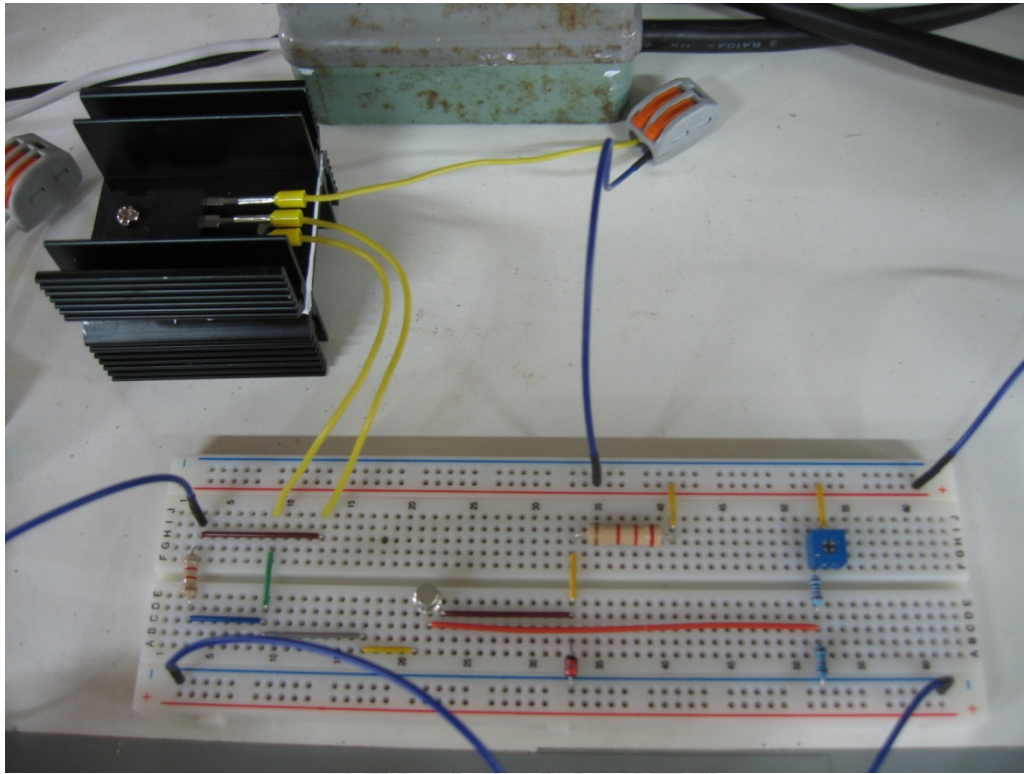


圖 4.11 完成之串聯穩壓電路

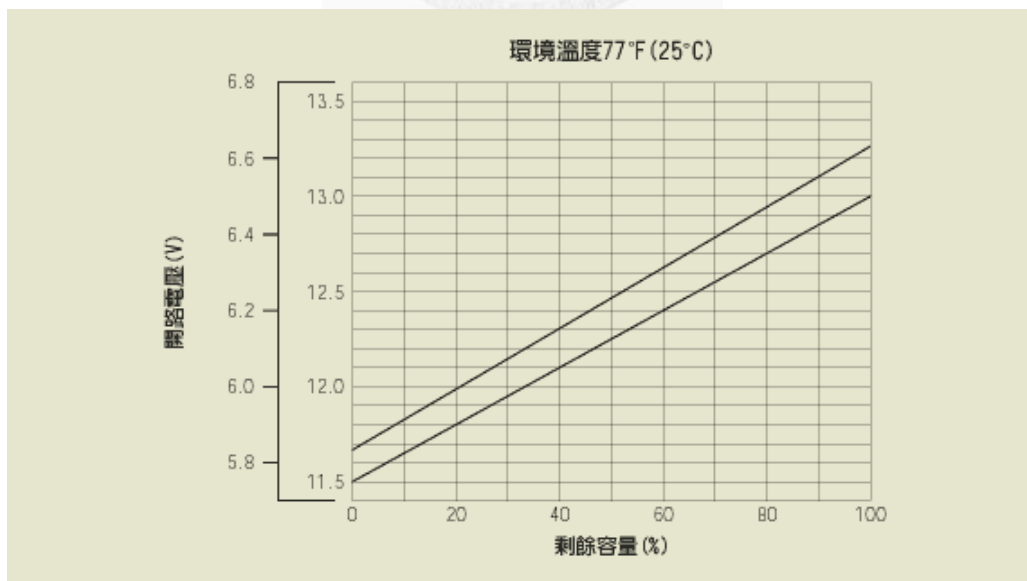


圖 5.1 鉛酸電池剩餘電量與開路電壓之關係 (圖片來源：【10】)

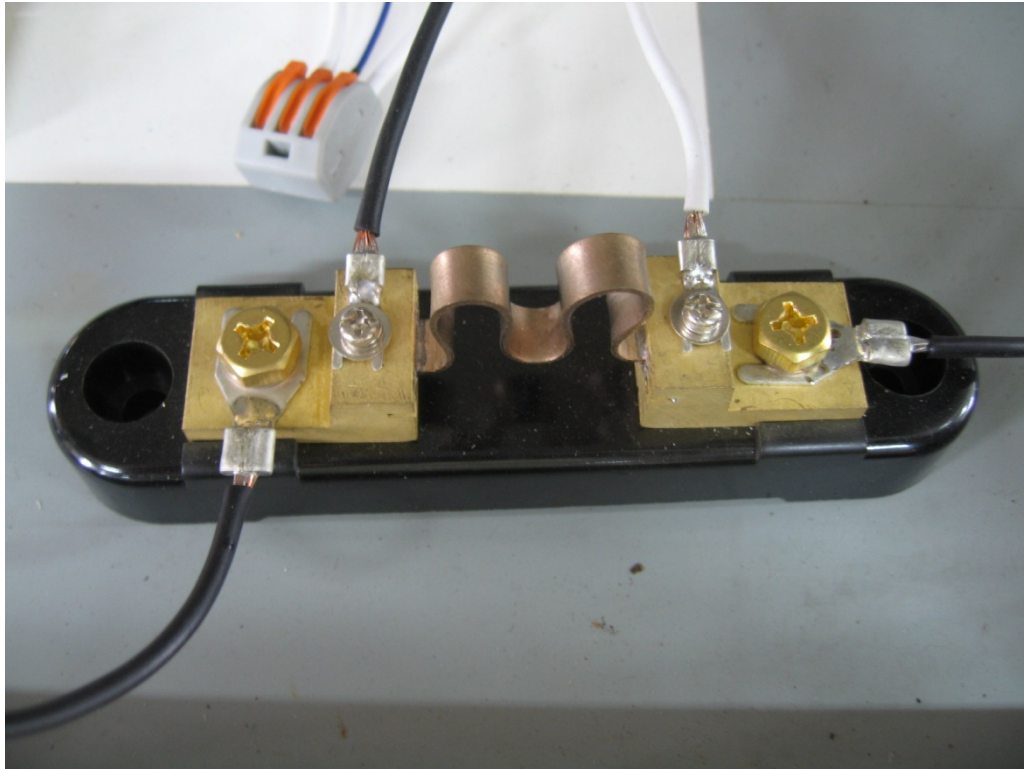


圖 5.2 分流器

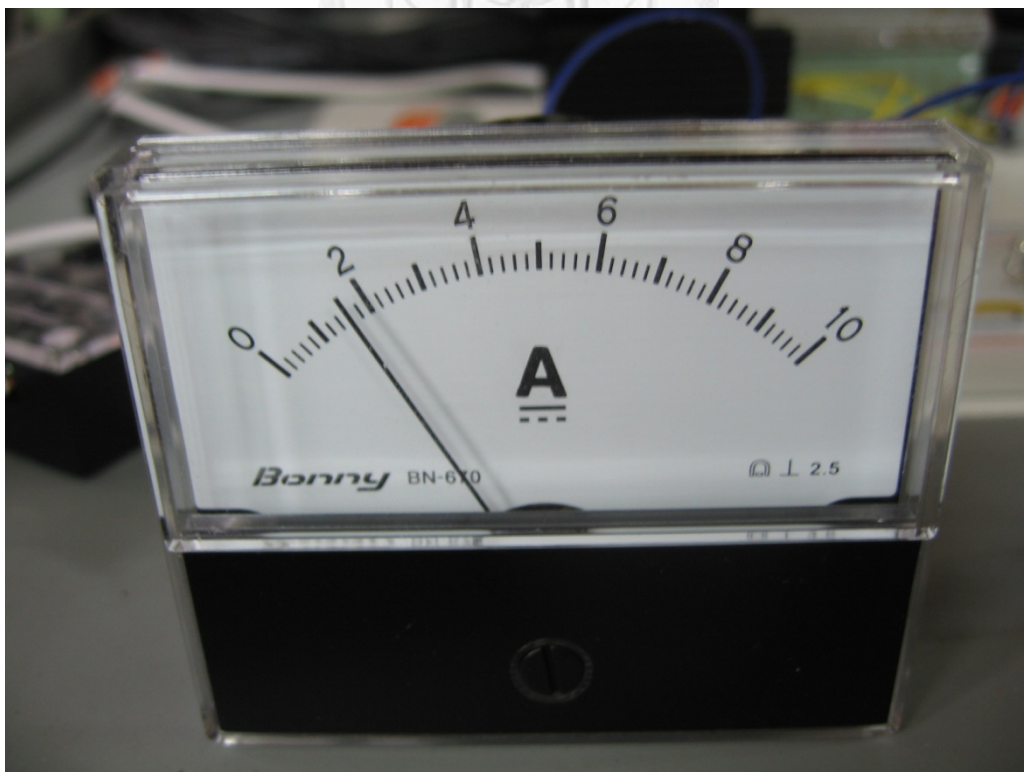


圖 5.3 指針式電流表



圖 5.4 日照計

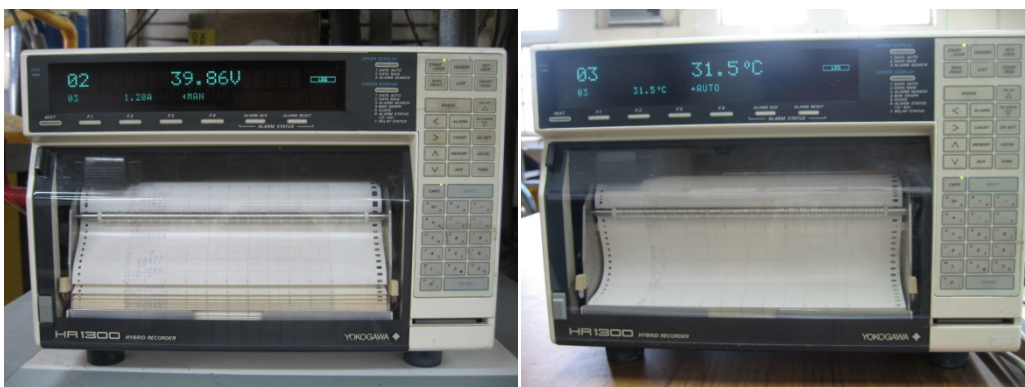


圖 5.5 HR1300 紀錄器

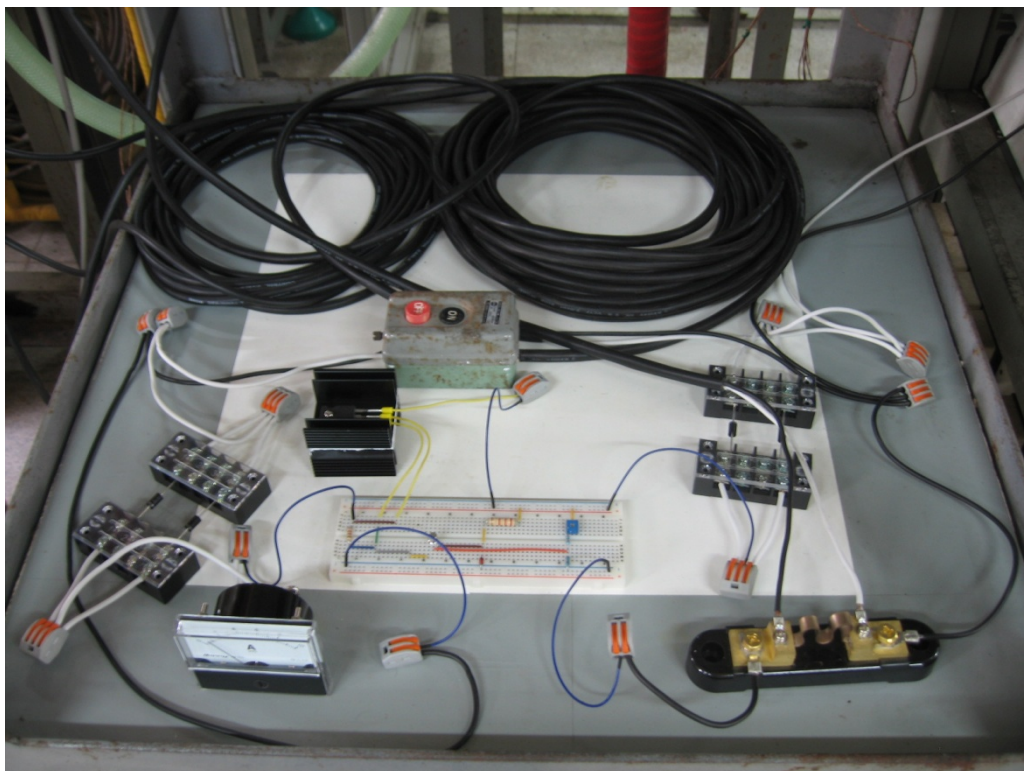


圖 5.6 充電電路之連結(正視)

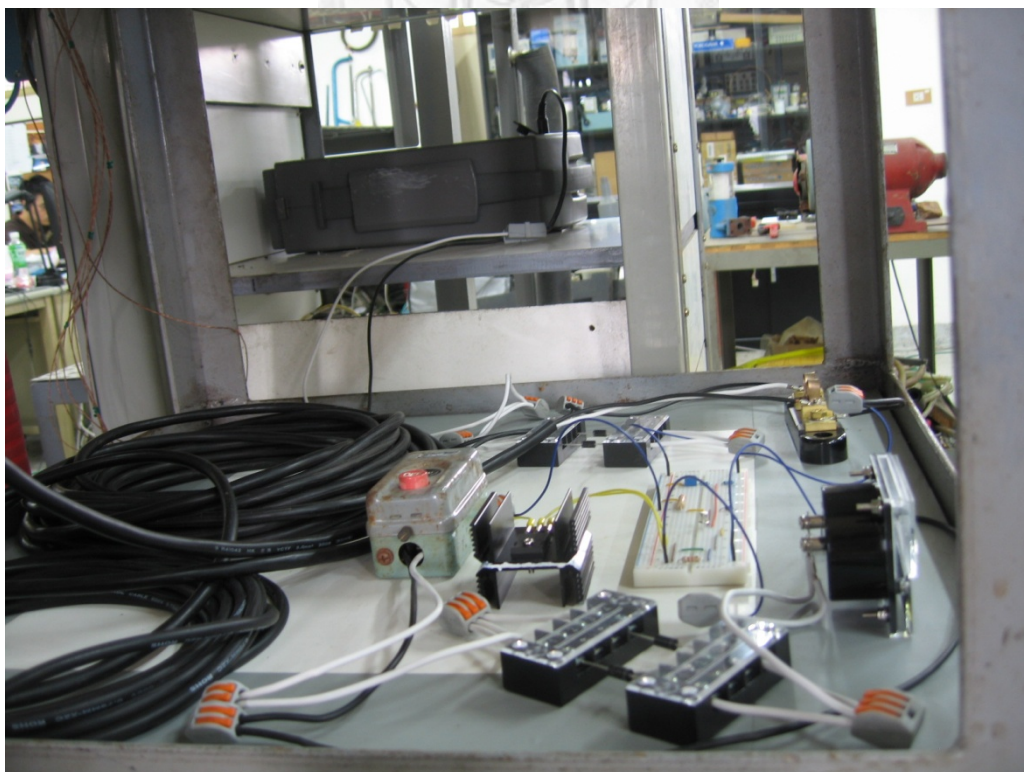


圖 5.7 充電電路之連結(側視)



圖 5.8 大氣溫度計

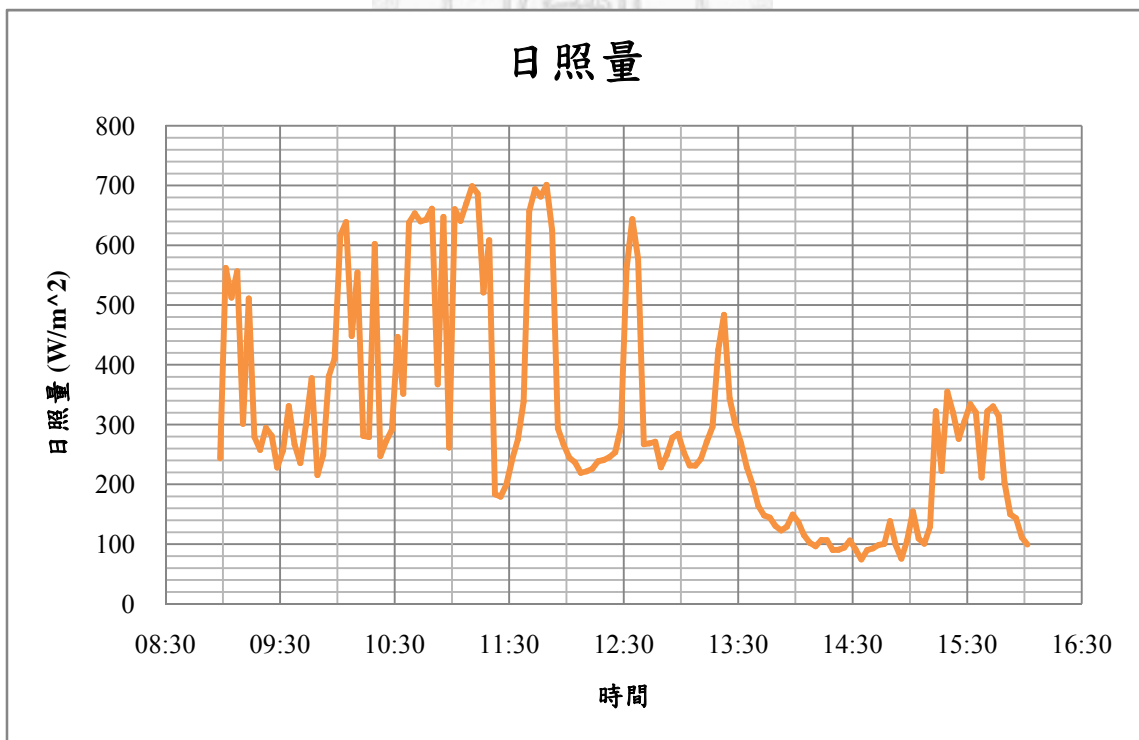


圖 5.9 7月6日充電過程之日照量變化

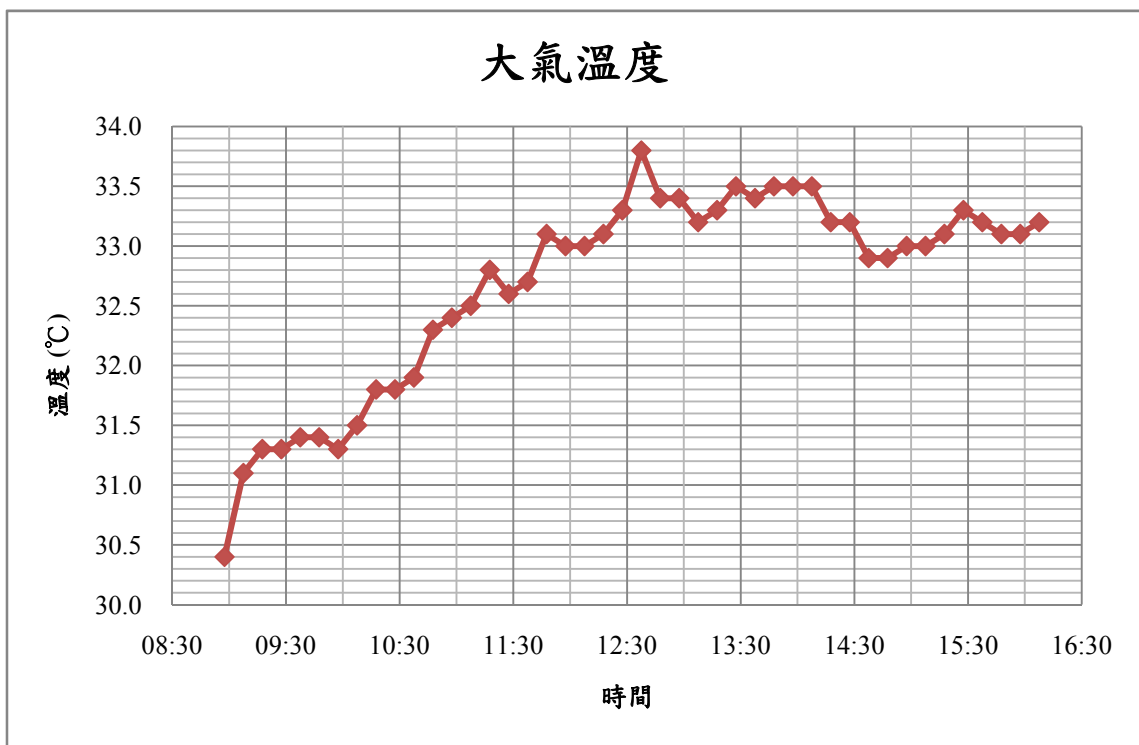


圖 5.10 7 月 6 日充電過程之大氣溫度變化

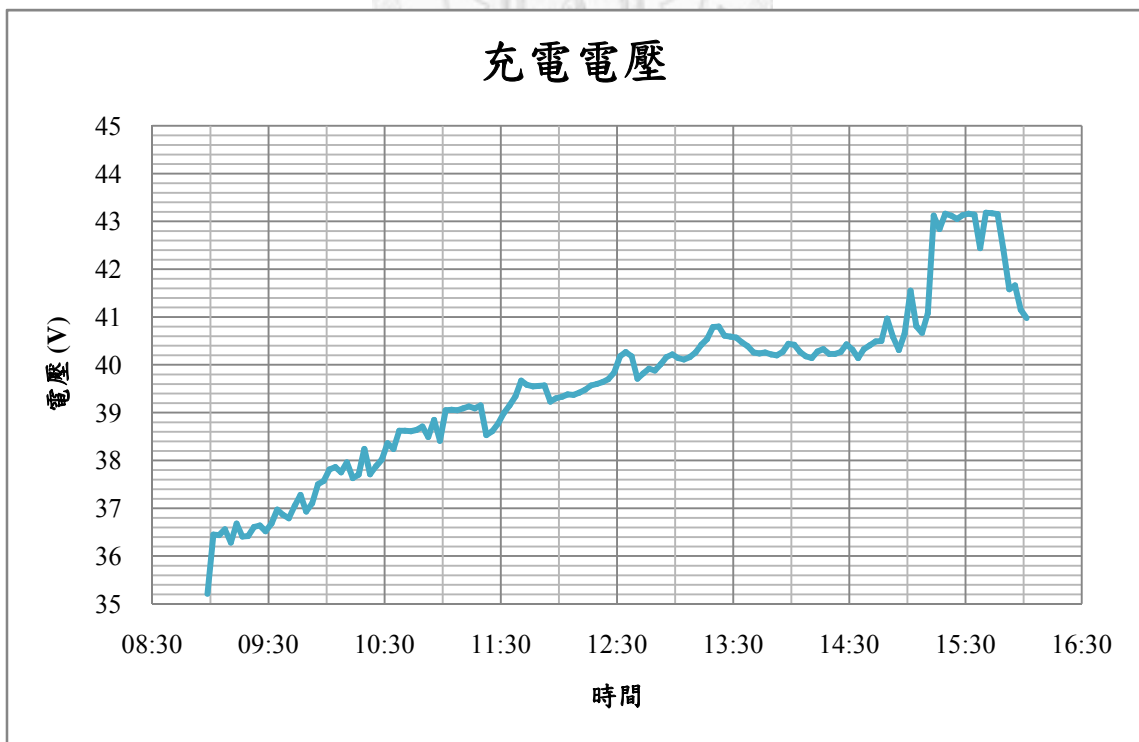


圖 5.11 7 月 6 日充電過程之充電電壓變化

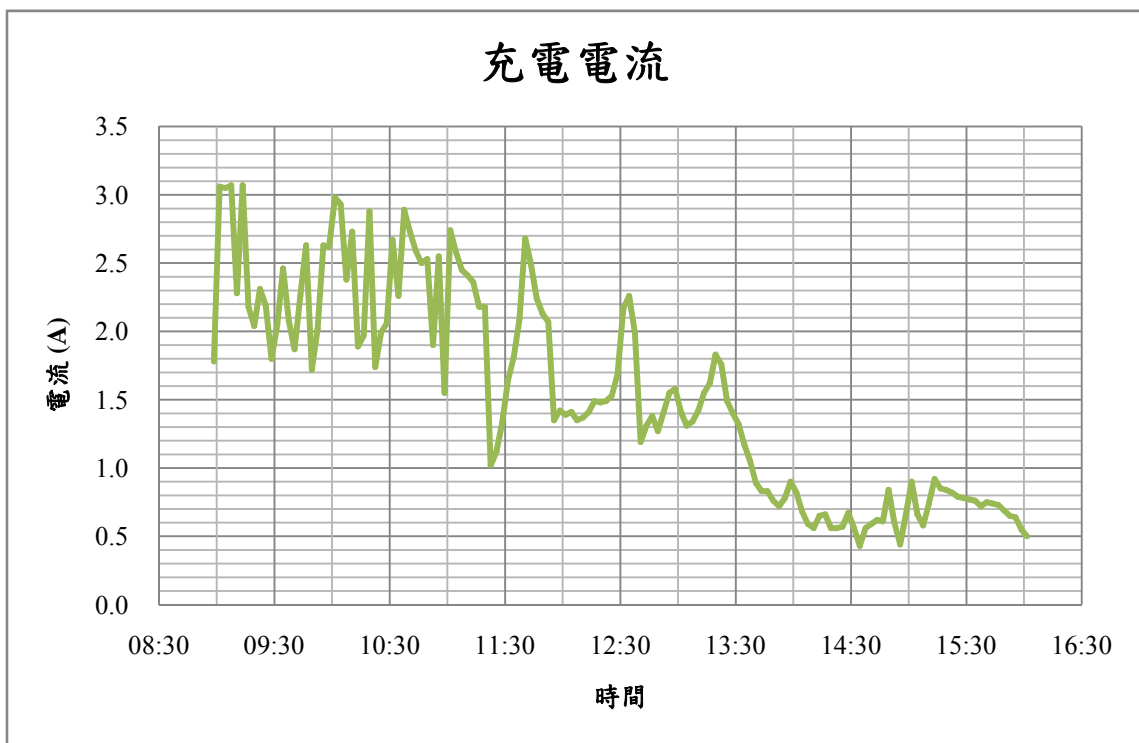


圖 5.12 7 月 6 日充電過程之充電電流變化



圖 5.13 自行車碼表

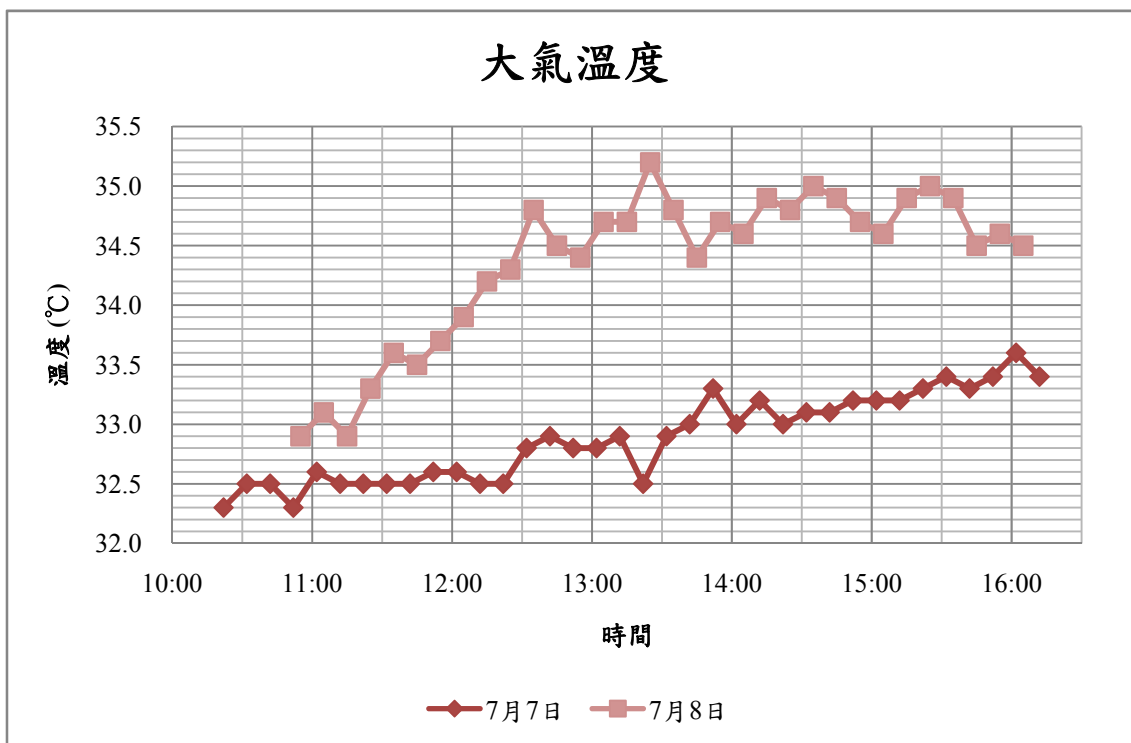


圖 5.14 騎乘電動腳踏車當日之大氣溫度變化

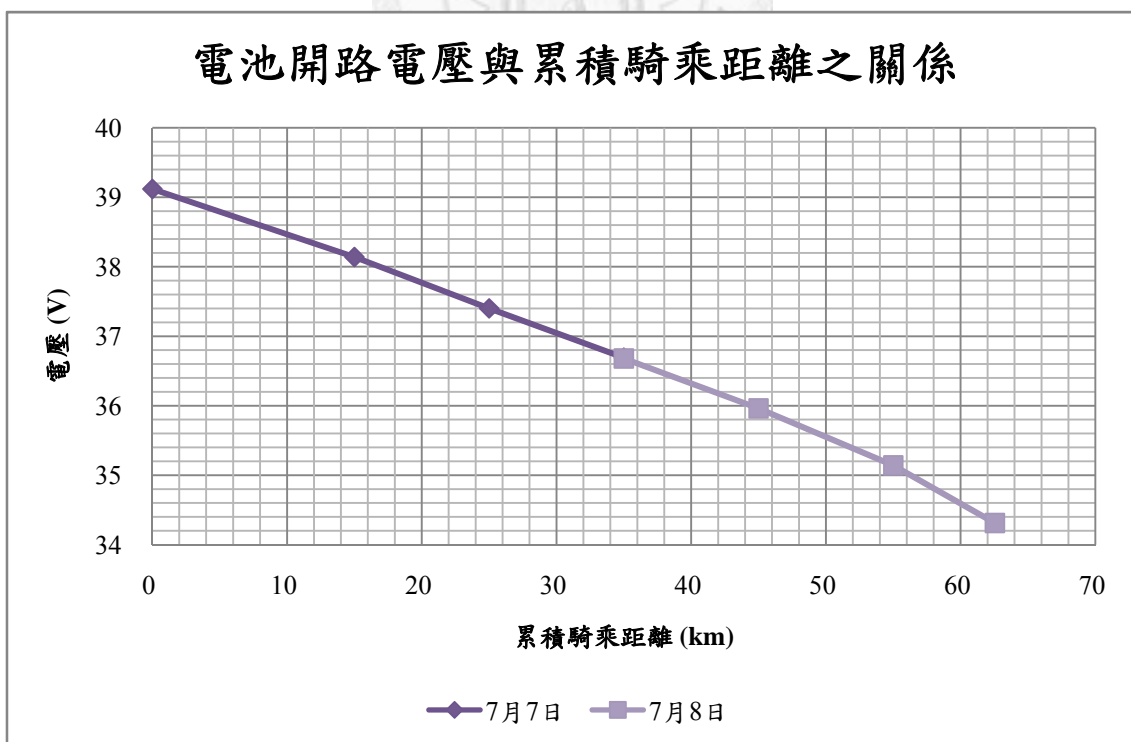


圖 5.15 電動腳踏車行駛里程與開路電壓之關係

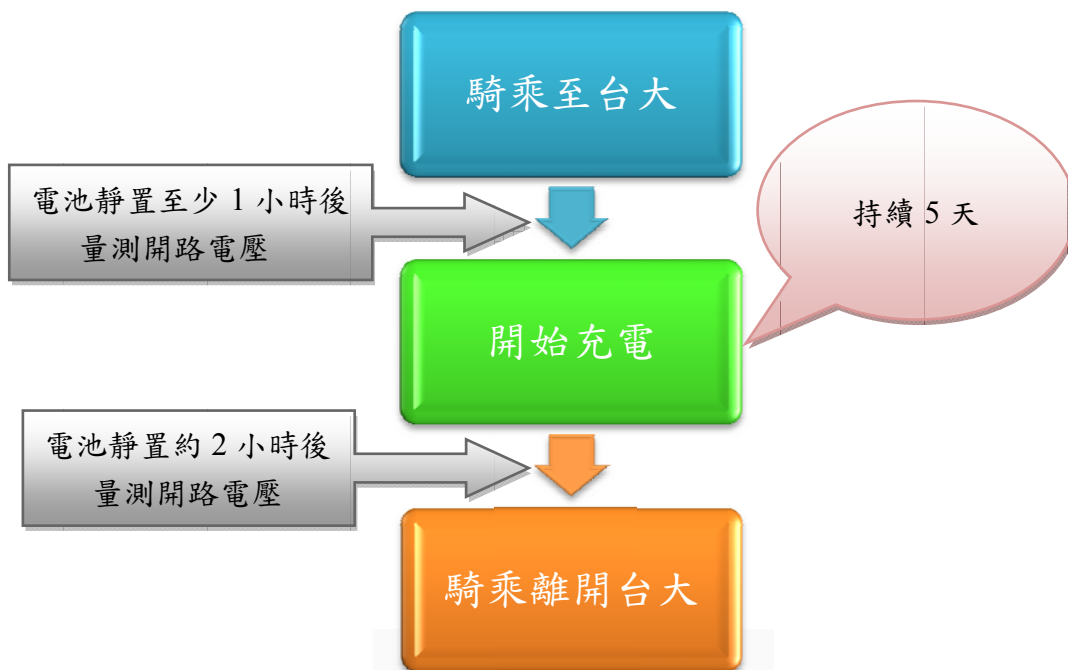


圖 5.16 電動腳踏車連續騎乘與充電之實驗流程

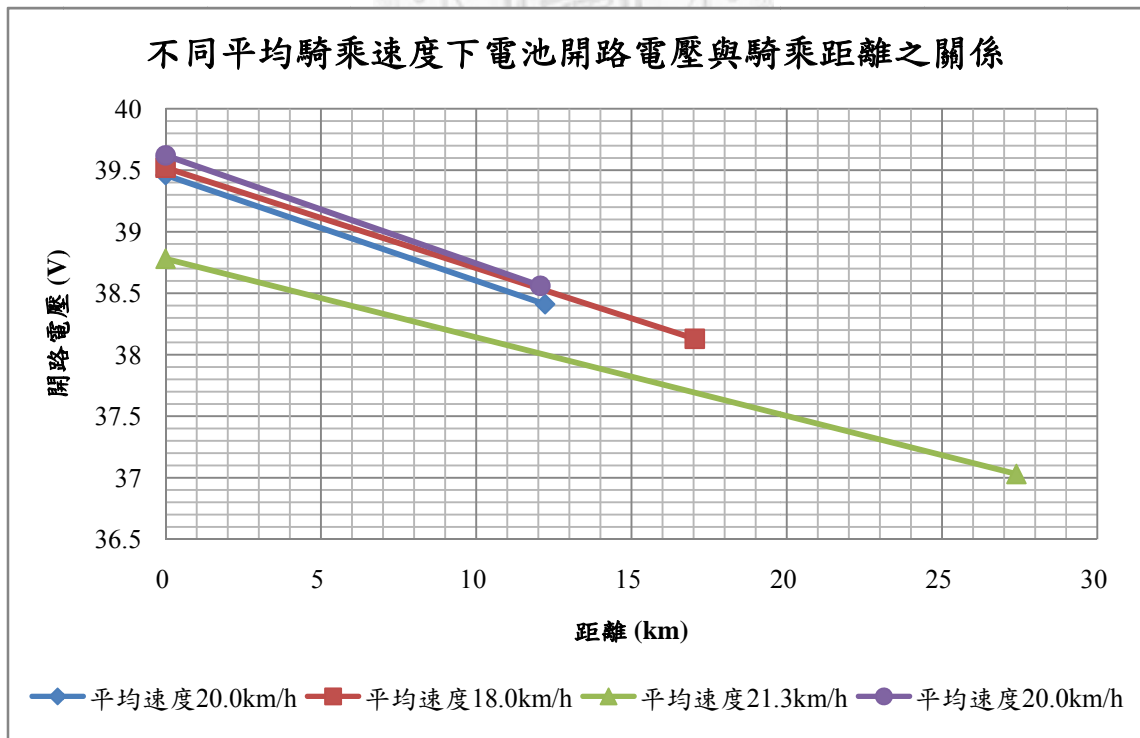


圖 5.17 不同平均騎乘速度下電池開路電壓與騎乘距離之關係

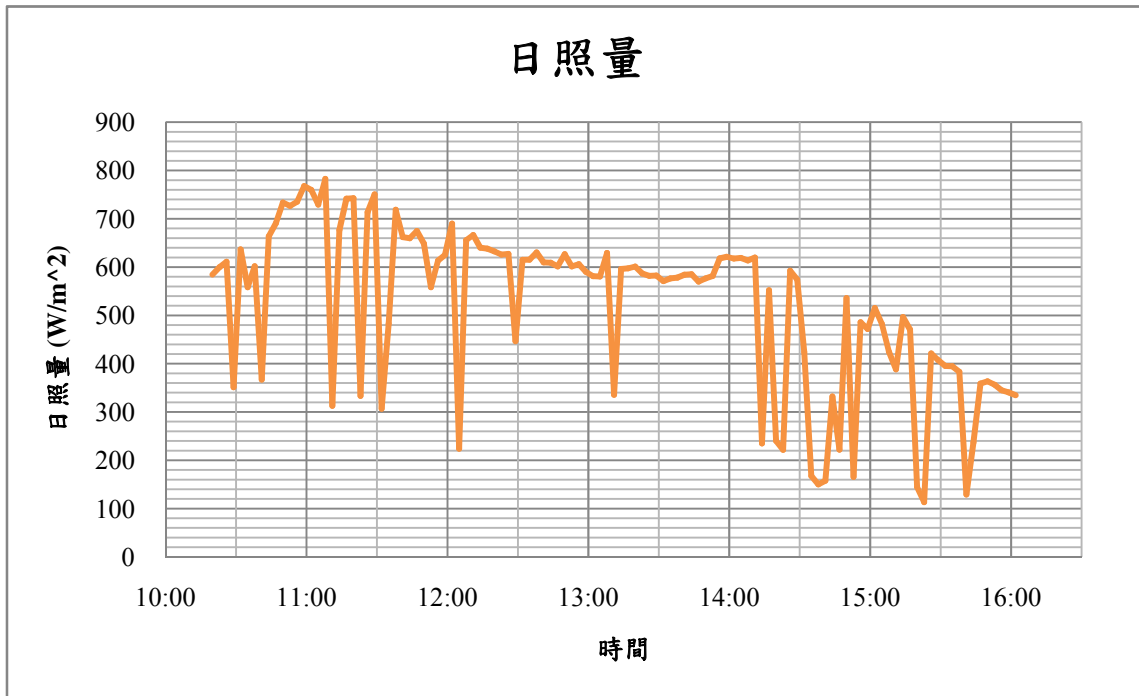


圖 5.18 7 月 11 日充電過程之日照量變化

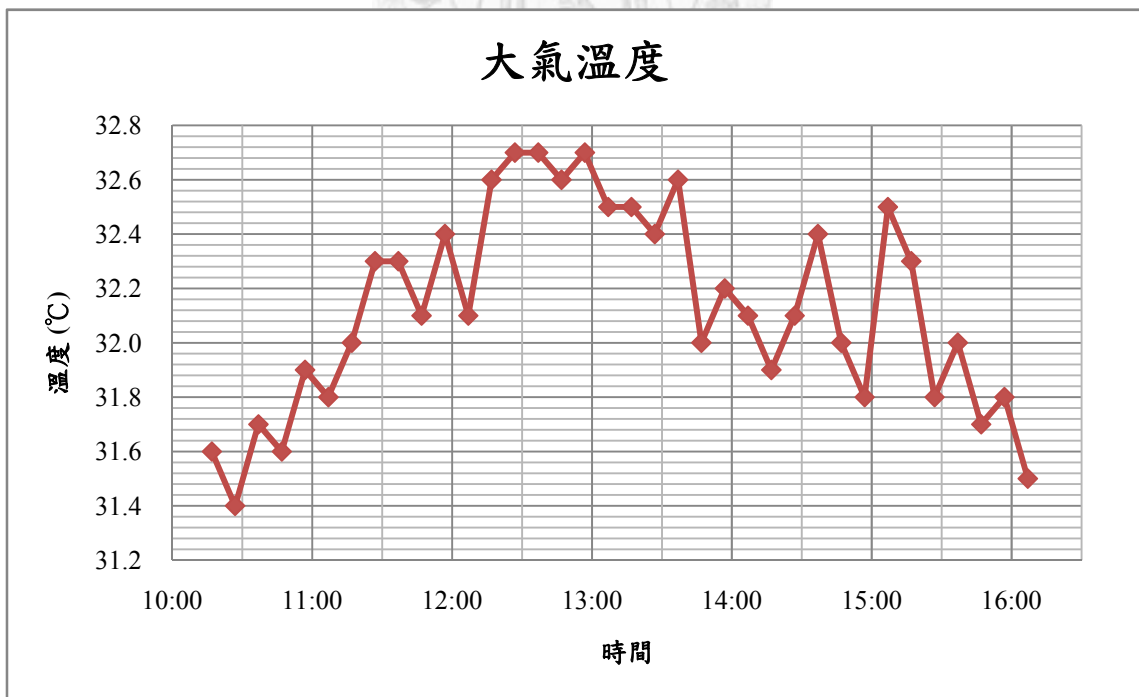


圖 5.19 7 月 11 日充電過程之大氣溫度變化

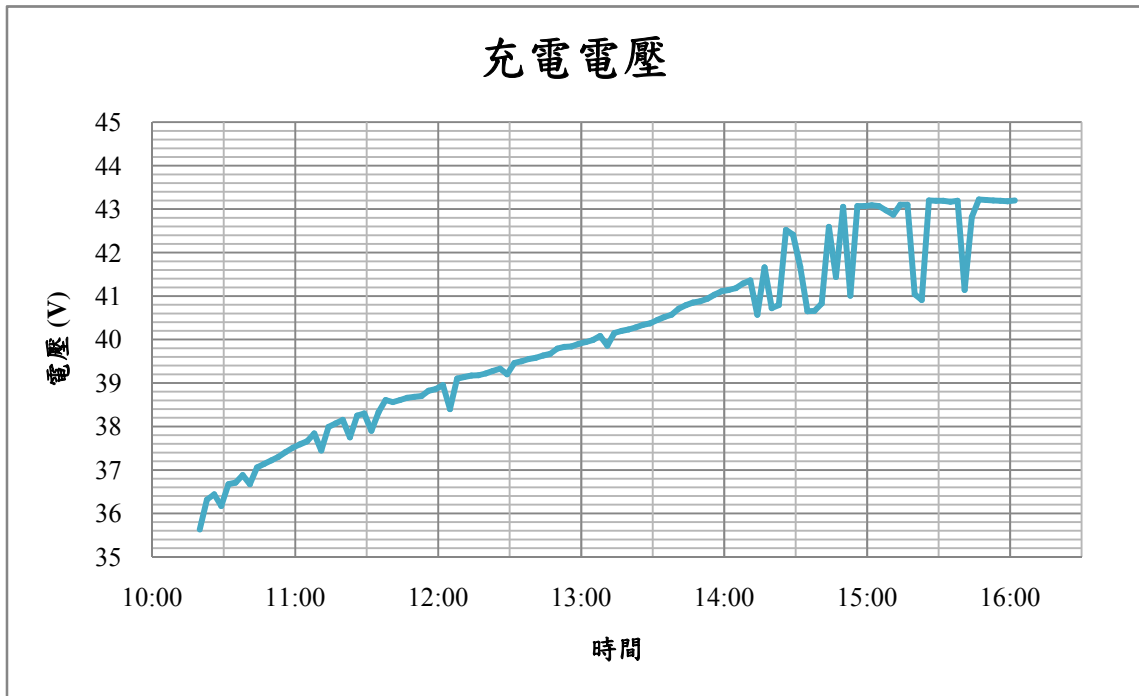


圖 5.20 7 月 11 日充電過程之充電電壓變化

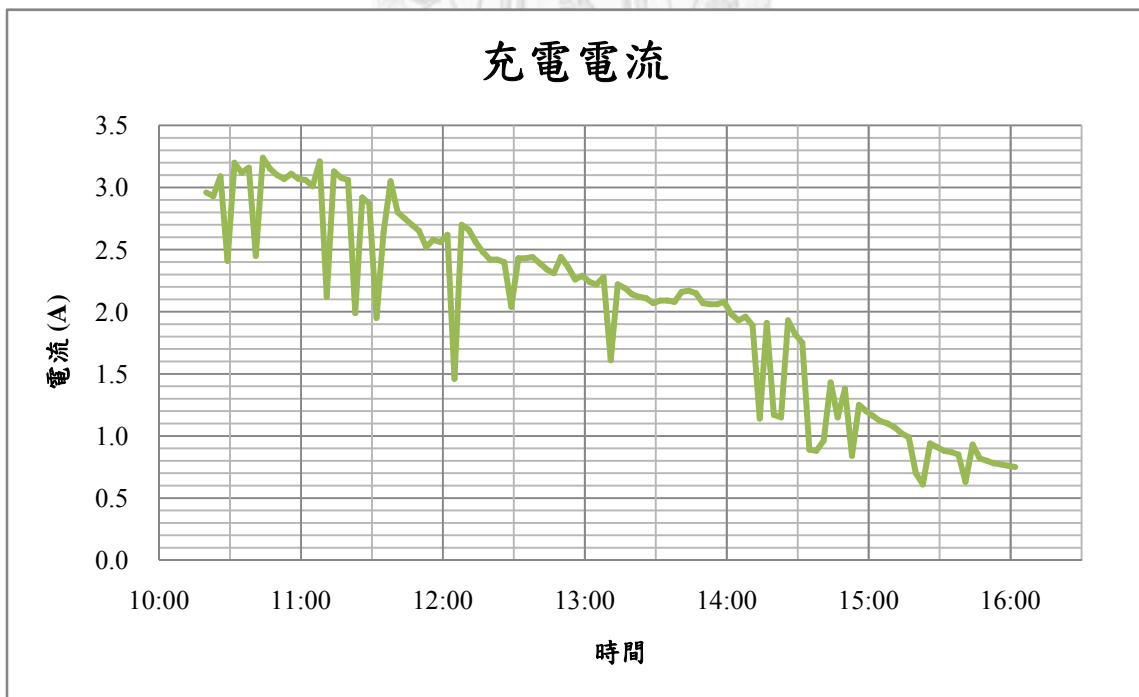


圖 5.21 7 月 11 日充電過程之充電電流變化

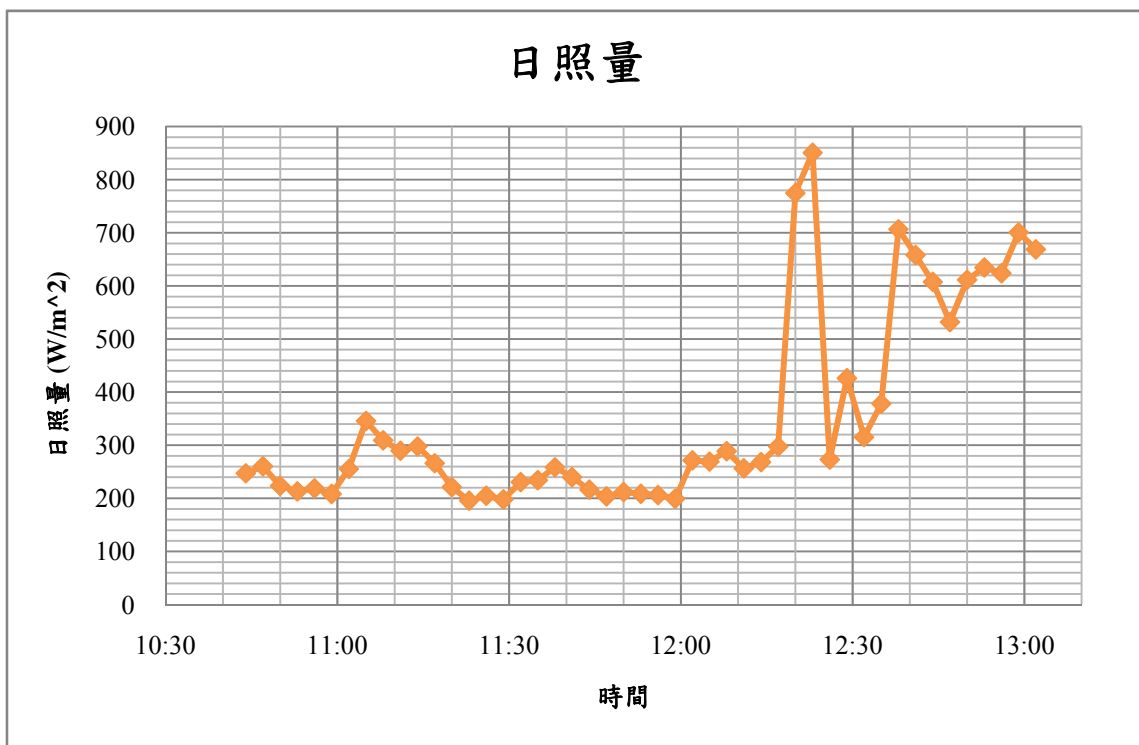


圖 5.22 7 月 12 日充電過程之日照量變化

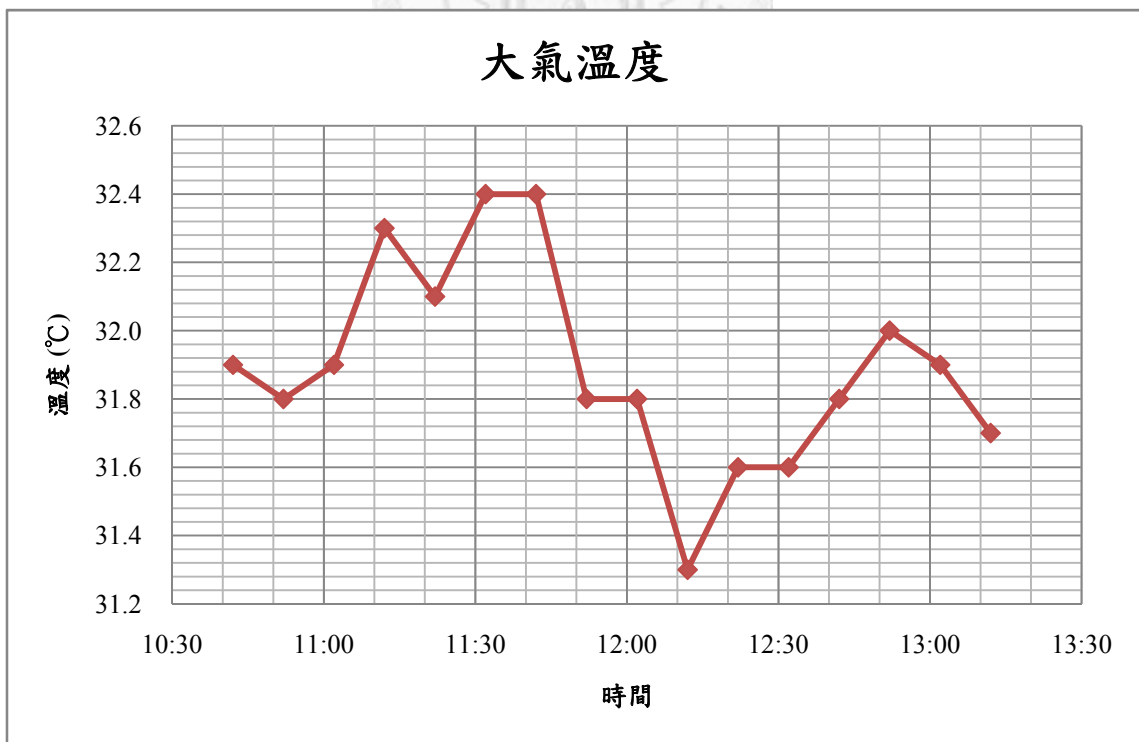


圖 5.23 7 月 12 日充電過程之大氣溫度變化

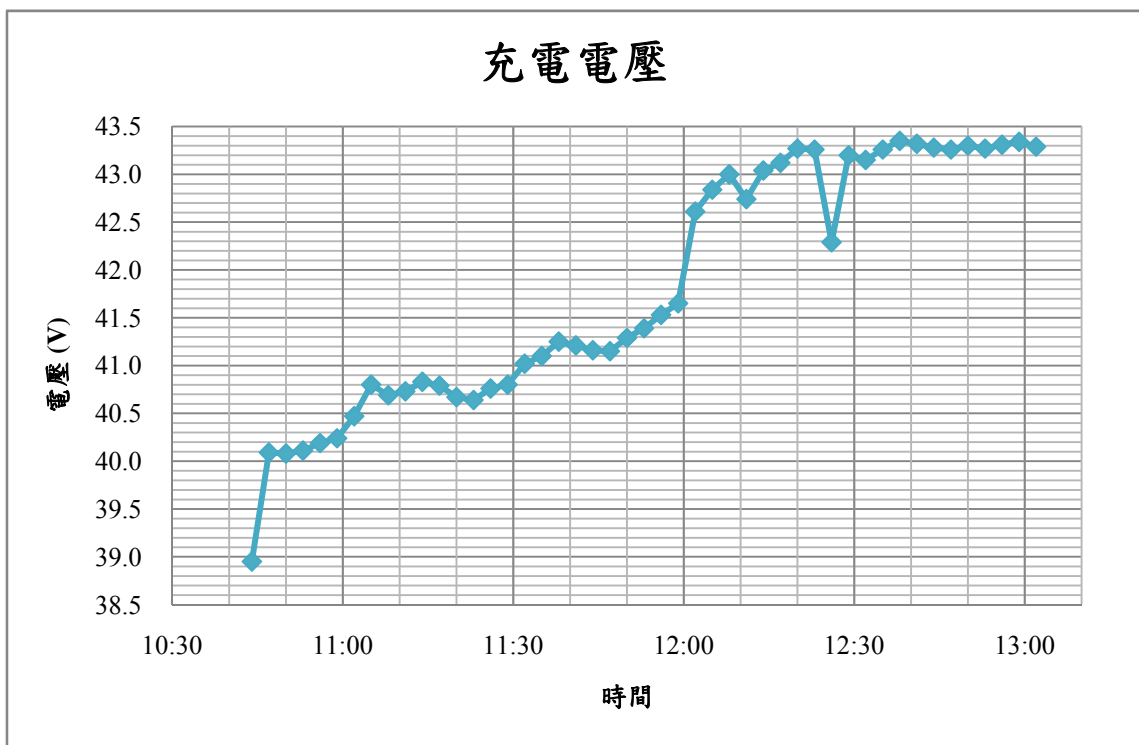


圖 5.24 7 月 12 日充電過程之充電電壓變化

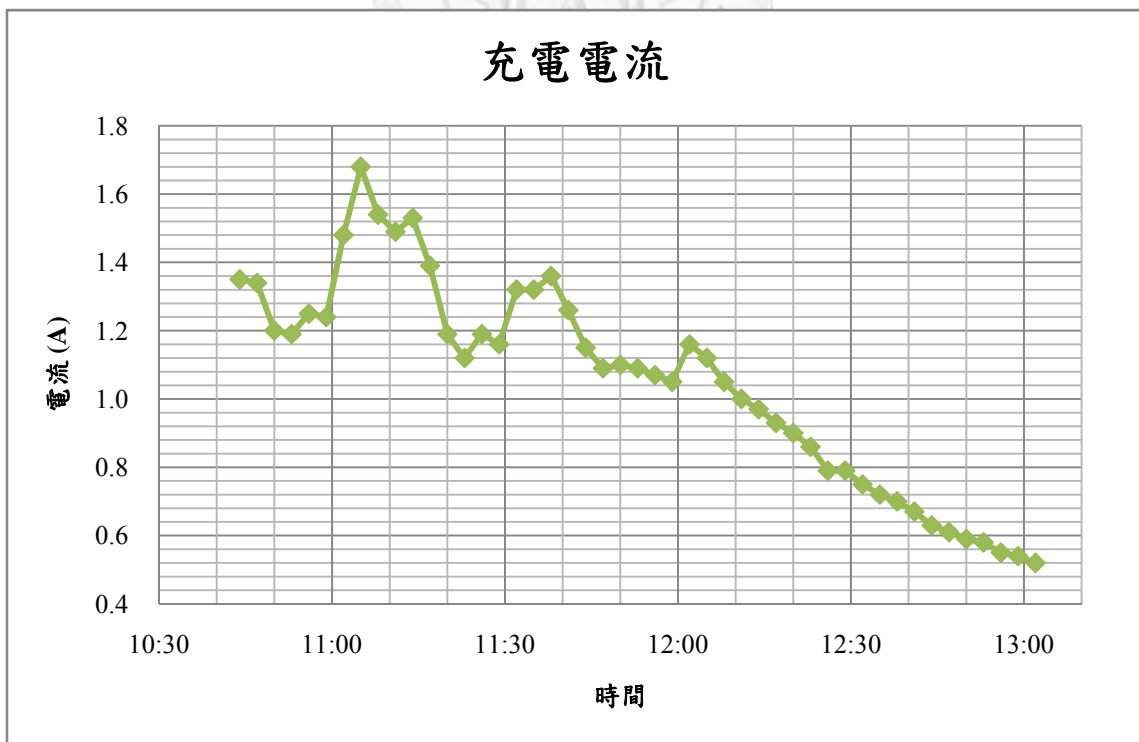


圖 5.25 7 月 12 日充電過程之充電電流變化

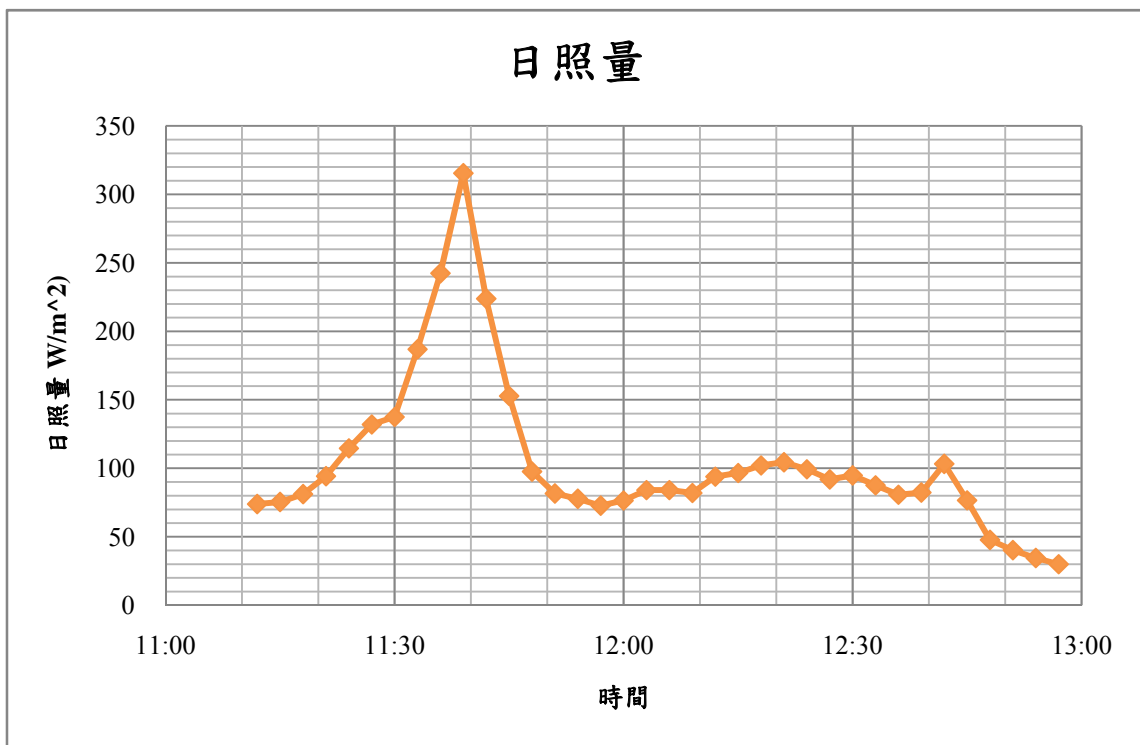


圖 5.26 7 月 13 日充電過程之日照量變化

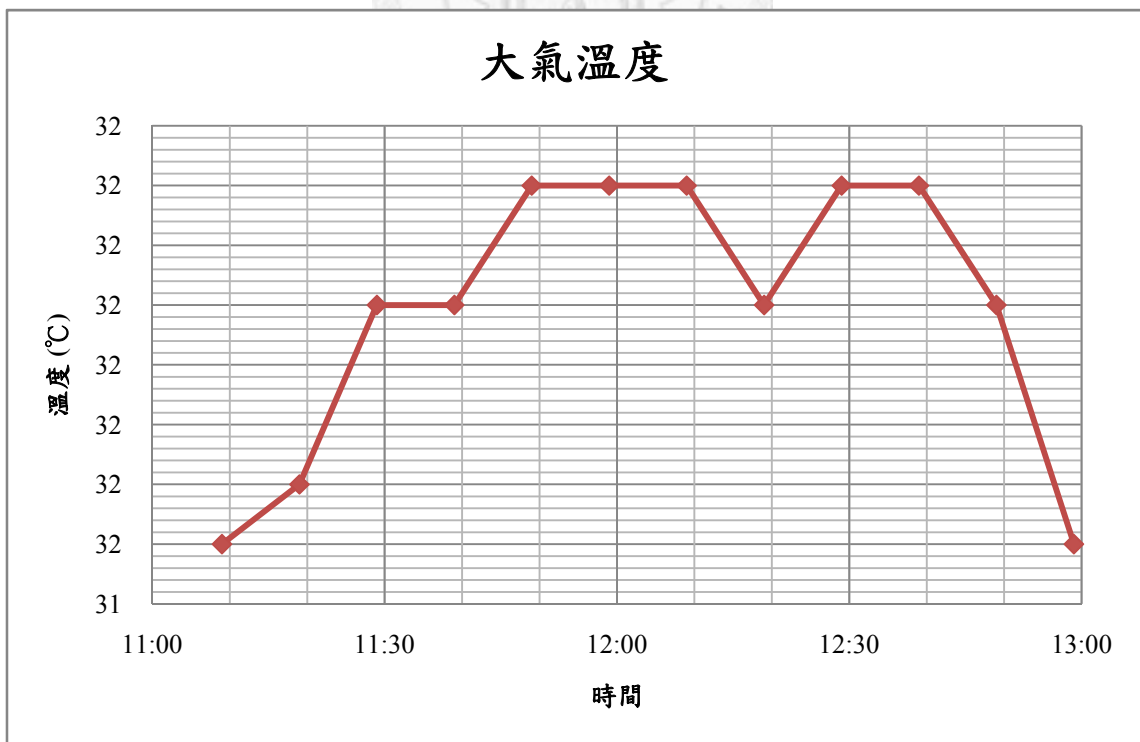


圖 5.27 7 月 13 日充電過程之大氣溫度變化

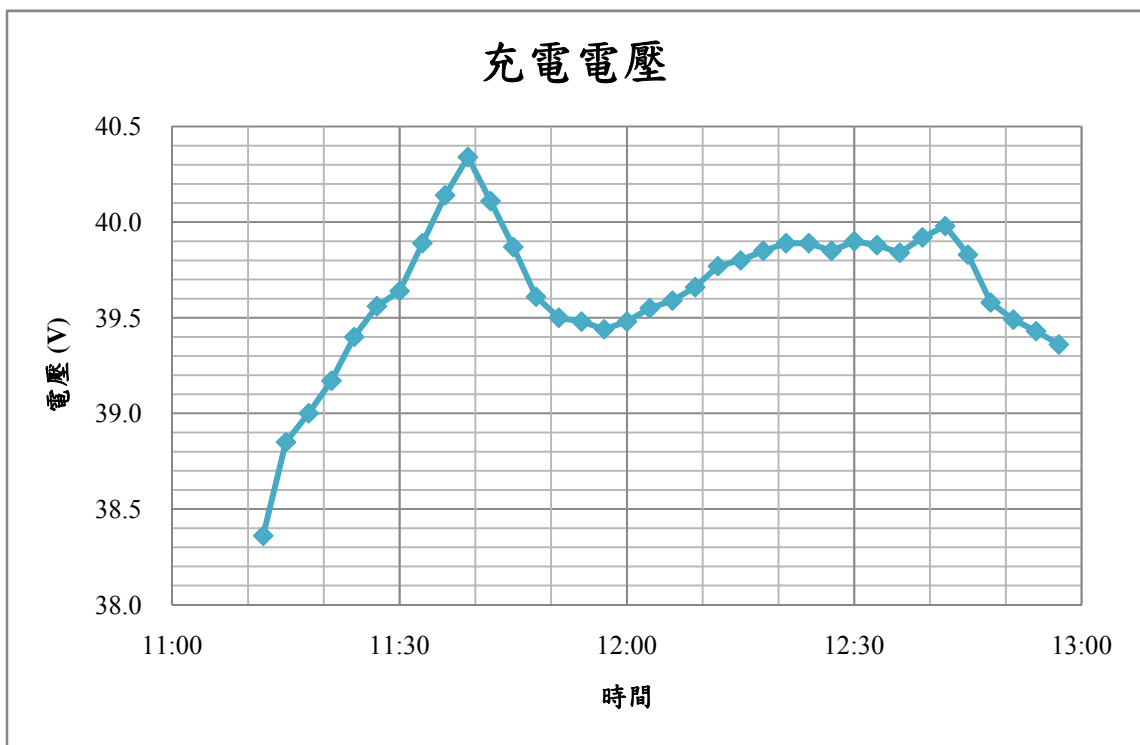


圖 5.28 7 月 13 日充電過程之充電電壓變化

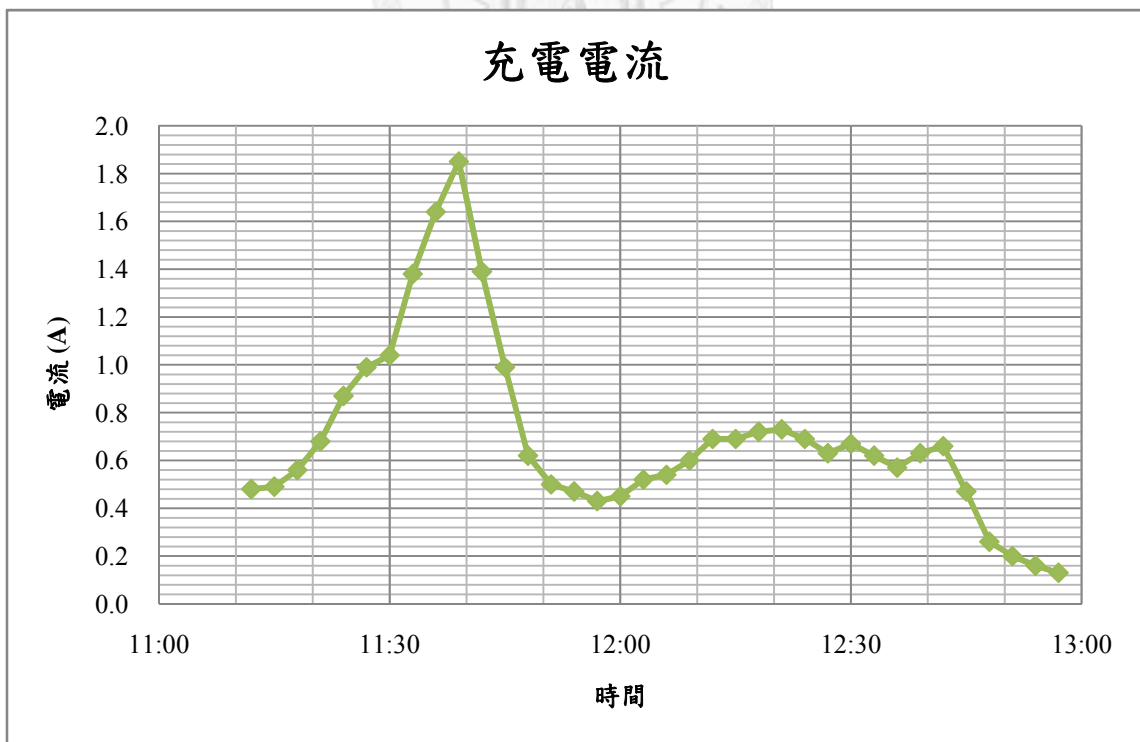


圖 5.29 7 月 13 日充電過程之充電電流變化

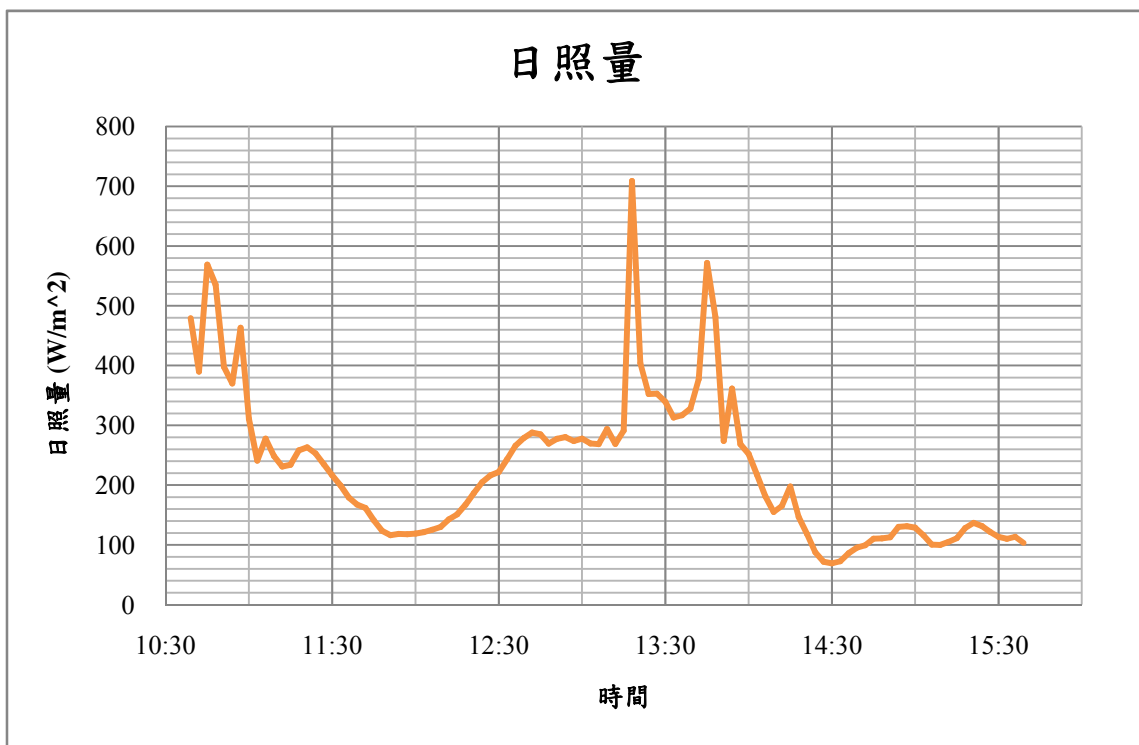


圖 5.30 7 月 14 日充電過程之日照量變化

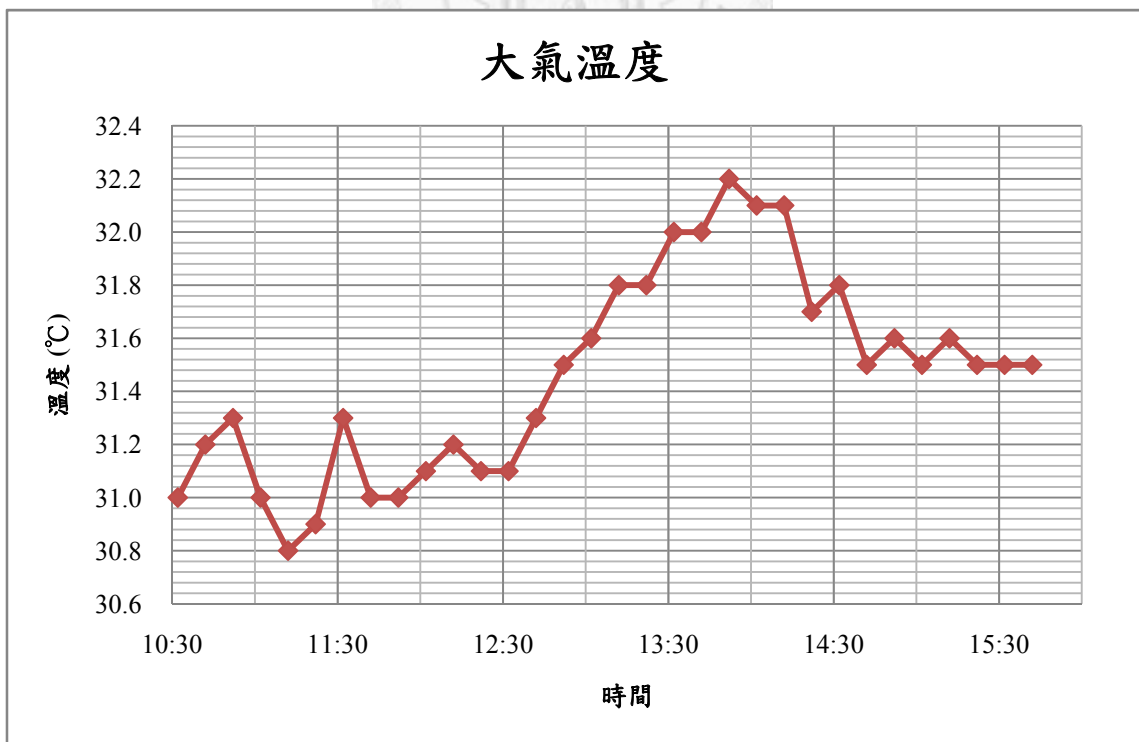


圖 5.31 7 月 14 日充電過程之大氣溫度變化

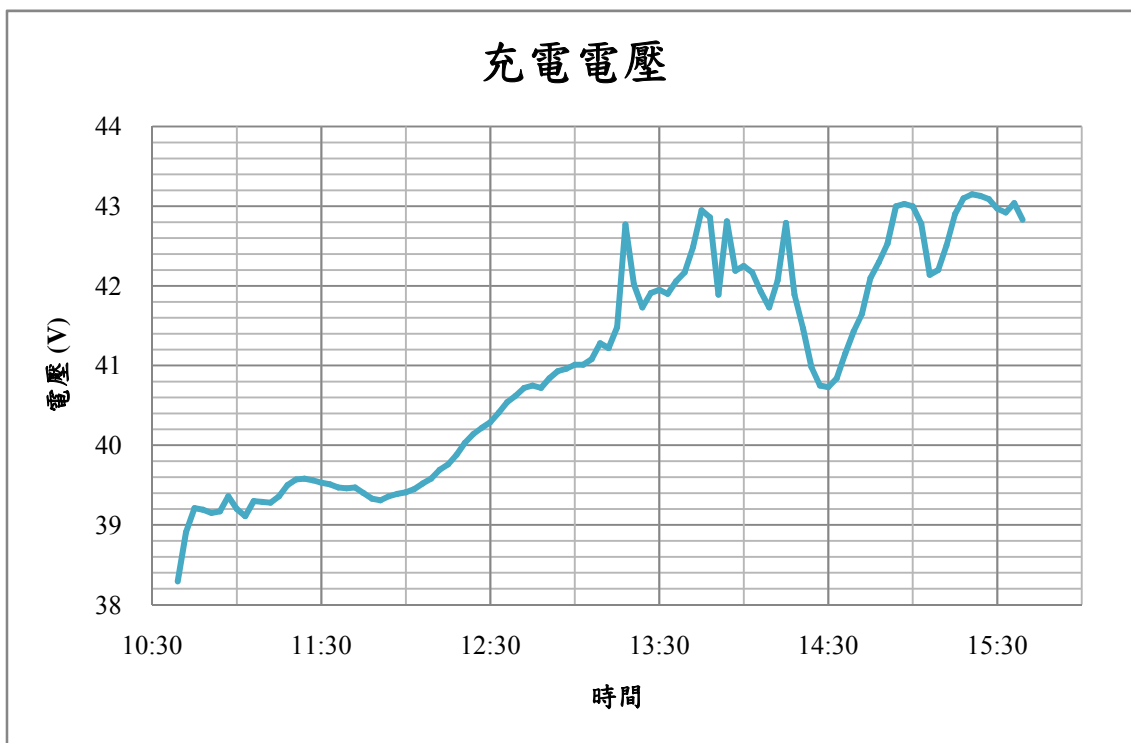


圖 5.32 7 月 14 日充電過程之充電電壓變化

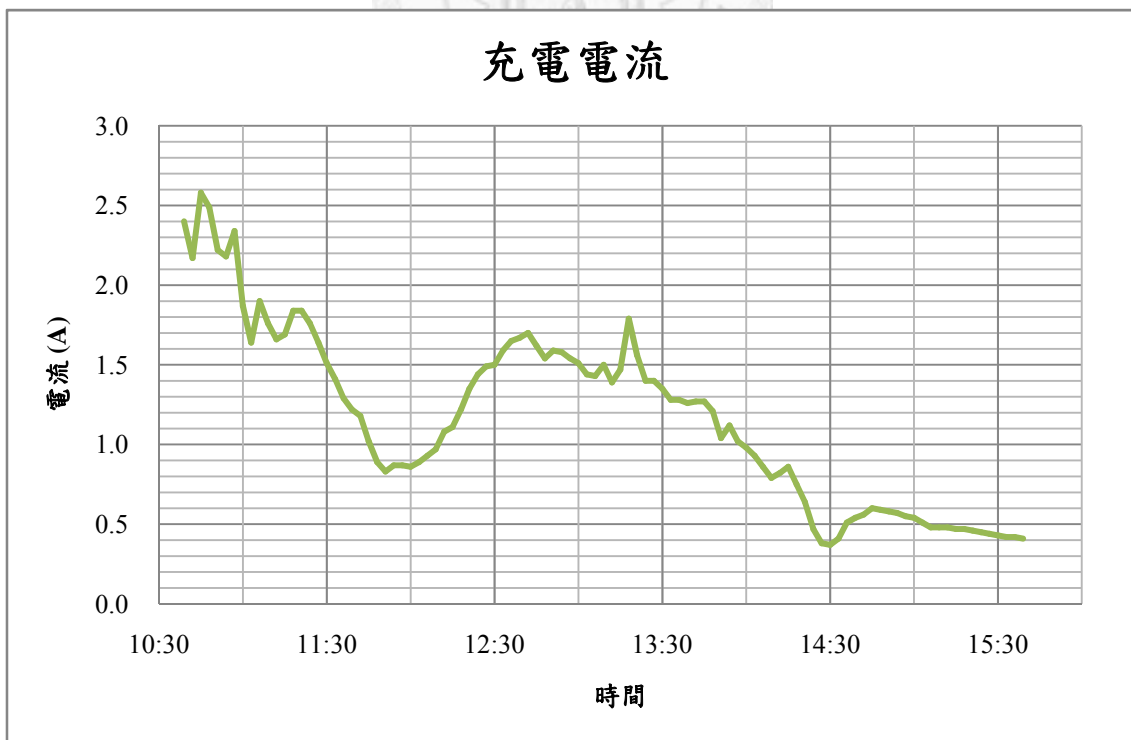


圖 5.33 7 月 14 日充電過程之充電電流變化

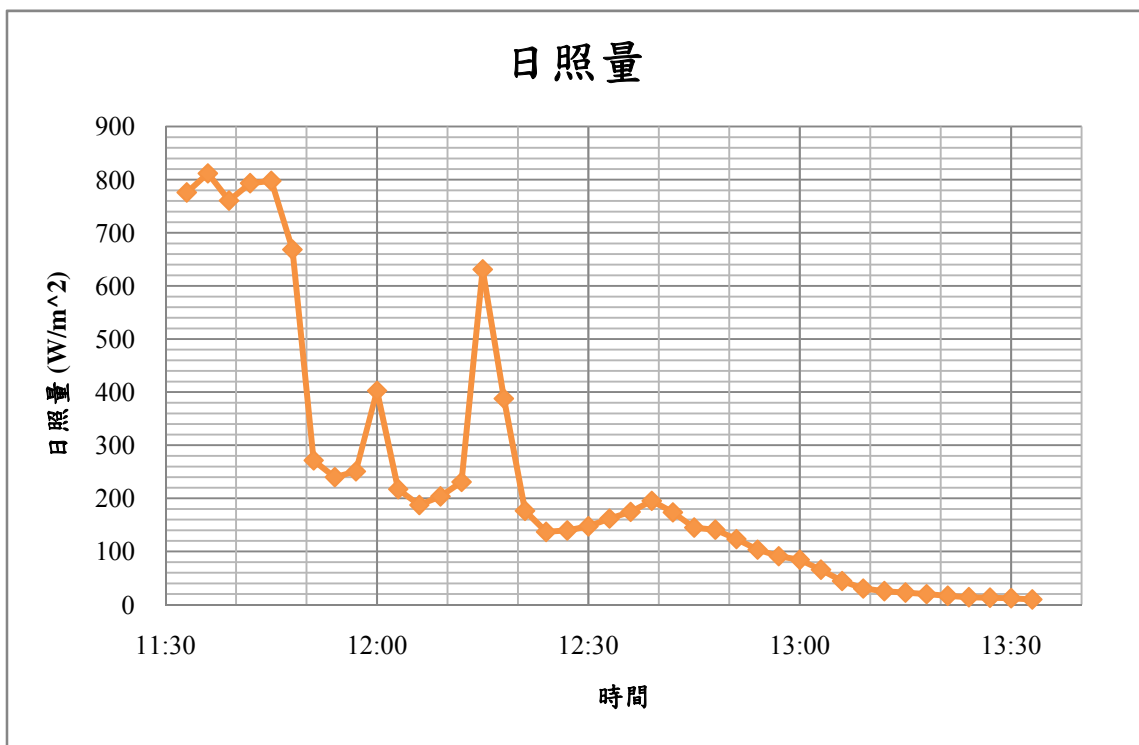


圖 5.34 7 月 15 日充電過程之日照量變化

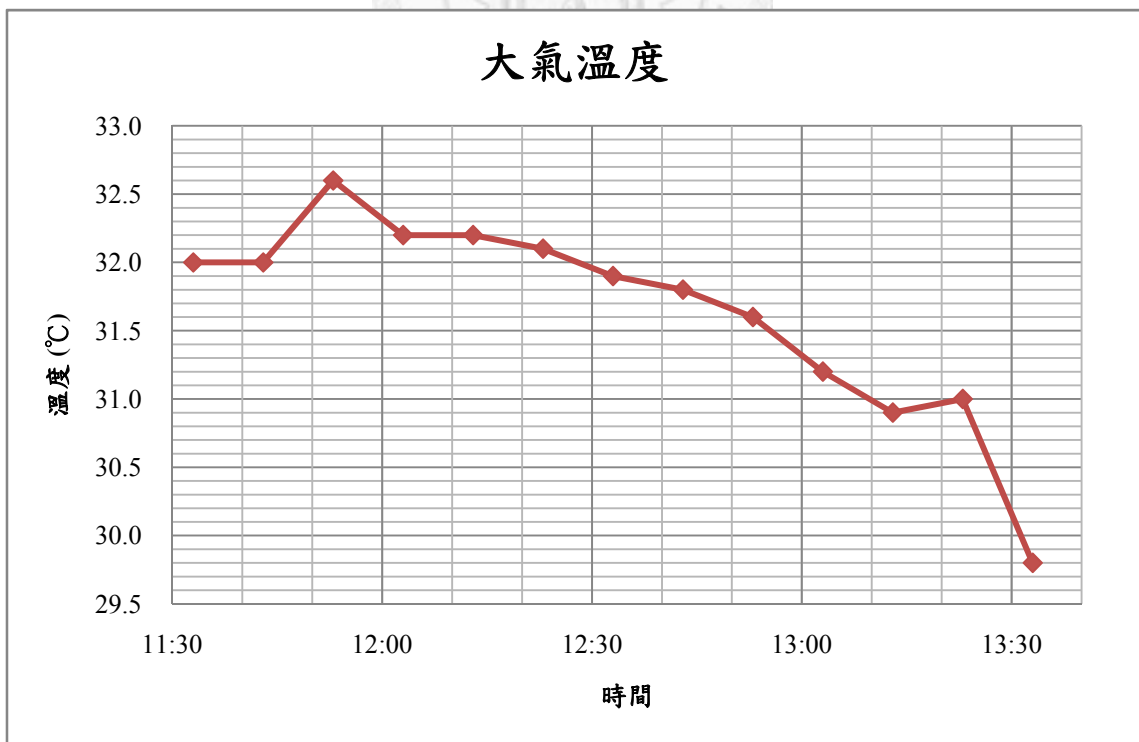


圖 5.35 7 月 15 日充電過程之大氣溫度變化

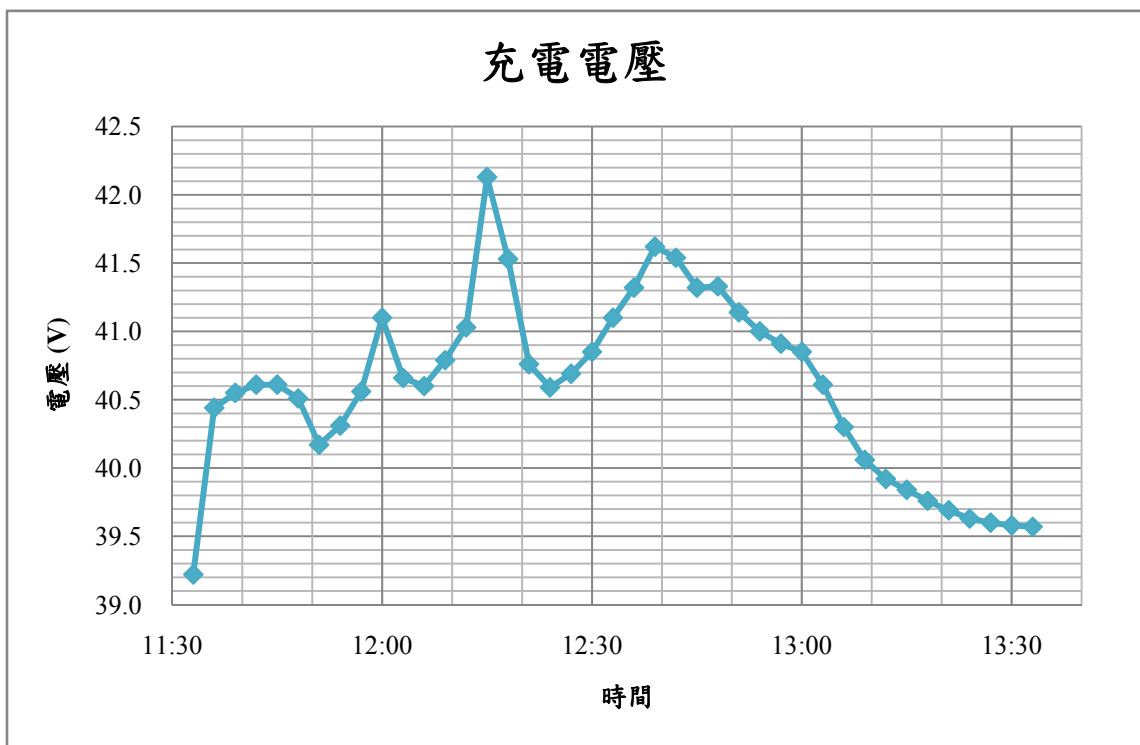


圖 5.36 7 月 15 日充電過程之充電電壓變化

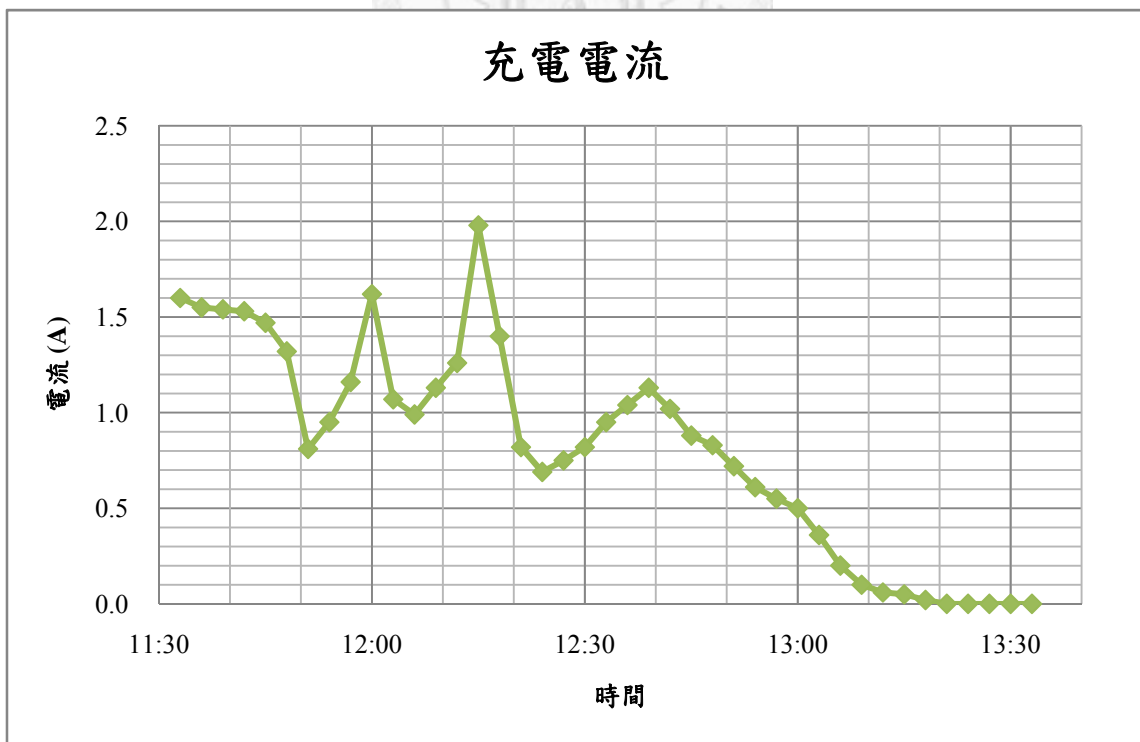


圖 5.37 7 月 15 日充電過程之充電電流變化