



高苑科技大學電機工程研究所

碩士論文

太陽能電池輔助電動自行車之研究

A Study on Solar Cells Assisted Electric Bicycle

研究生：許智鈞

指導教授：劉又齊 博士

中華民國一〇一年六月

高苑科技大學碩士班研究生
論文口試委員審定書

電機工程研究所許智鈞君所提之論文
太陽能電池輔助電動自行車之研究
經本委員會審議，認定符合碩士資格標準。

學位考試委員會

召集人 陳邦家

委員 陳邦家
張恩誌

徐瑞隆
劉又嘯

指導教授 劉又嘯 簽章

研究所所長 高志威 簽章

中華民國 101 年 6 月 28 日

A Study on Solar Cells Assisted Electric Bicycle

By

Chih-chun Hsu

A Thesis Submitted to the Graduate Division in Partial
Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master
of Science

Department of Electrical Engineering, Kao Yuan University
Kaohsiung, Taiwan, Republic of China

2012.6.28

Approved by:

Pang-Chia Chen
Chih-Chun Hsu

Juei-Leng Shyr
Yow-Chan Liu

Thesis Advisor : Yow-Chan Liu

Institute Director : Chih-Cheng Kao

中文摘要

本論文提出使用太陽能電池來輔助電動自行車電力，以改善電動自行車騎乘里程短及充電時間長之缺點。雖然受限於太陽能電池轉換效率，以及無法在電動自行車上安裝大面積的太陽能板，但其可以作為動力輔助或控制系統之電力。

為減輕電動自行車之重量，太陽能電池板採用薄膜型光伏陣列，平時收納、用時展開，展開時既可遮陽又可發電。太陽能電池之輸出功率受到日照度及溫度的影響，當環境條件改變時，太陽能電池之最大輸出功率亦隨之改變，為提高發電效率，因此需有最大功率追蹤控制之功能，本論文採用增量電導法作為最大功率之追蹤控制器，並以 PIC16F877A 單晶片為控制核心，整合鋰離子電池以防止電池過充問題，藉由單晶片內建的 A/D 轉換器量測太陽能電池輸出電壓及電流，及 PWM 模組驅動昇壓型 DC/DC 轉換器，以簡化電路及降低成本，實現 15~20W 太陽能電池輔助電動自行車。

關鍵字：太陽能電池、電動自行車、最大功率追蹤、增量電導法。

Abstract

The electric bicycle is applied with solar cells to empower an electric vehicle in order to overcome the limitations of short-distance riding and a long charging time. The thin-film photovoltaic array was used to reduce the weight of electric bicycle. This paper proposes a new design of solar cells for electric vehicle, which is easy to fold up and to expand.

When the solar cells were expanded, they have functions of a sun shade for the bicycle and power generation. The incremental conductance algorithm was adopted to achieve the maximum power point tracking (MPPT) algorithm when the atmospheric environment changed. A single-chip PIC16F877A was used to implement the control algorithms of the proposed system. It combined lithium-ion battery capacity to prevent over-charging. In order to simplify the circuit and reduce costs, the single-chip built-in A/D converters were used to measure the output voltage and current of solar cells, and built-in PWM module was used to drive DC/DC boost chopper. Finally, a 15~20W solar cells assisted electric bicycle was implement.

Keywords : solar cell, electric vehicle, maximum power point tracking, incremental conductance algorithm.

致謝

本論文承蒙國科會計畫案號 NSC98-2218-E-244-001、NSC 99-2218-E-244-001 之經費支持，謹此致謝。

論文得以完成，首要必須感謝的是指導教授 劉又齊 博士，無論是在研究上、研究資源的協助以及專業的知識領域，老師均給予多方的指導，所以對他誠摯的感謝。

論文研究的過程中也很感謝各位同學們和學長及學弟的互相幫助，最重要是上屆學長-李秉家的實際經驗指導才得以順利的完成研究。



目錄

中文摘要.....	I
Abstract.....	II
致謝.....	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	VII
表目錄.....	X
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 文獻回顧.....	3
1.4 論文架構.....	12
第二章 電動自行車電源系統介紹.....	13
2.1 電動自行車電源系統.....	13
2.1.1 鋰離子電池.....	13
2.2 太陽能發電系統.....	15
2.3 再生煞車發電.....	15
2.4 無線充電系統.....	16
第三章 鋰電池介紹.....	17
3.1 鋰電池.....	17
3.1.1 鋰金屬電池.....	18
3.1.2 鋰離子電池.....	18

3.1.3 高分子鋰電池	24
3.2 電池等效電路.....	27
3.3 鋰離子電池容量.....	27
第四章 太陽能輔助電源系統	31
4.1 太陽能電池之基本原理	31
4.2 最大功率追蹤控制.....	36
4.3 單晶片控制.....	39
4.3.1 單晶片的 PWM 功能介紹	39
4.3.2 單晶片的 A/D 轉換功能介紹	40
4.3.3 單晶片-最大功率追蹤	43
4.4 電力電子昇壓型轉換器設計	44
4.4.1 Boost 轉換器電感之設計	46
4.4.2 Boost 轉換器電容之設計	47
4.5 電池定電壓控制方法	50
4.6 太陽能電池摺疊設計	52
4.7 光源產生器.....	52
第五章 硬體設計.....	53
5.1 系統硬體設計.....	53
5.2 控制器.....	55
5.3 驅動模組.....	56
5.4 直流-直流轉換器	57
5.5 回授模組.....	58

第六章 實測結果.....	59
第七章 結論.....	64
參考文獻.....	65
作者簡介.....	68



圖目錄

圖 1.1 電壓回授法方塊圖.....	4
圖 1.2 功率回授法方塊圖.....	5
圖 1.3 擾動觀察法方塊圖.....	7
圖 1.4 增量電導法方塊圖.....	9
圖 1.5 直線近似法方塊圖.....	10
圖 1.6 實際量測法方塊圖.....	11
圖 2.1 電動自行車電源架構圖	14
圖 2.2 電池等效電路.....	14
圖 3.1 鋰離子電池放電過程中剩餘電量與端電壓關係曲線.....	22
圖 3.2 鋰離子電池電容量與內電阻的關係	24
圖 3.3 鋰離子電池容量與放電電流之係關圖	28
圖 3.4 鋰電池實體圖.....	30
圖 4.1 太陽能電池等效電路.....	31
圖 4.2-1 分層吸收太陽光示意圖	33
圖 4.2-2 太陽光譜	33
圖 4.3 各種日照強度下電壓對電流曲線圖	34
圖 4.4 各種不同溫度下的電壓對電流曲線圖	34
圖 4.5 太陽能薄膜電池板實體圖	35
圖 4.6 為太陽能電池之電流對電壓及功率對電壓特性曲線圖	36
圖 4.7 增量電導法控制流程圖	38
圖 4.8-1 脈波寬度調變圖	39

圖 4.8-2 PWM 輸出.....	40
圖 4.9 內嵌 A/D 轉換器方塊圖.....	42
圖 4.10 太陽能輔助電動自行車系統架構圖.....	43
圖 4.11 昇壓型直流-直流轉換器.....	44
圖 4.11-1 開關導通.....	45
圖 4.11-2 開關截止.....	45
圖 4.12 在 CCM 與 DCM 邊界下肢電感電壓和電流波形.....	46
圖 4.13 二極體電流與輸出電壓波形.....	48
圖 4.14 昇壓型 DC/DC 轉換器.....	49
圖 4.15 太陽能電池輔助電動自行車的動作流程圖.....	50
圖 4.16 電池定電壓充電之控制方塊圖.....	51
圖 4.17 太陽能電池板之摺疊與展開.....	52
圖 5.1 硬體架構.....	53
圖 5.2 電源電路方塊圖.....	54
圖 5.3 電源電路板實體圖.....	54
圖 5.4 脈波寬度調變訊號電路圖.....	55
圖 5.5 脈波寬度調變訊號輸出波形圖.....	55
圖 5.6 驅動器電路圖.....	56
圖 5.7 控制器與驅動器輸出波形圖.....	56
圖 5.8 直流昇壓型轉換器電路圖.....	57
圖 5.9 轉換器輸出波形圖.....	57
圖 5.10 回授系統電路圖.....	58

圖 6.1 太陽能輔助電源系統雛型	59
圖 6.2 V_{GS} 及太陽能電池輸出電壓及電流波形	60
圖 6.3 V_{GS} 及太陽能電池輸出電壓及電流波形	60
圖 6.4 太陽能電池輸出電壓及電流之動態波形	61
圖 6.5 太陽能發電板展開時之實際圖	62
圖 6.6 太陽能發電板摺疊收納時之實際圖	63
圖 6.7 電源驅動電路板的配置箱	63



表目錄

表 3-1 鋰離子電池分類表	19
表 3-2 各類二次電池綜合比較表	26
表 3-3 CELL SPECIFICATIONS	29
表 4.1 太陽能薄膜電池板電器規格	35



第一章 緒論

1.1 前言

電動車沒有排放廢氣問題，有對環境污染較小的優點，因此是目前公認最環保的交通工具，不過電動車有其缺點如續航力差、電池充電時間長而遭人詬病。因此一些輔助性或替代性的方法衍生而出，如太陽能電池、燃料電池等逐漸受到重視。由於太陽能為大自然中取之不盡、用之不竭的能源，故本論文採用太陽能電池來輔助電動自行車電力，以改善電動自行車騎乘里程短及充電時間長之缺點。不論電動自行車在騎乘中或停放時，只要有陽光皆可對電池充電。雖然受限於太陽能電池的轉換效率，目前效率只有 14~26% 之間，以及無法在電動自行車上安裝大面積的太陽能板，致使馬達趨動之電力無法完全由太陽能電池提供，但其可以作為動力輔助或控制系統之電力。

1.2 研究目的

由於太陽能電池之輸出電壓及電流特性曲線受到日照強度及環境溫度的影響，當環境條件改變時，太陽能電池之最大輸出功率將隨之改變，因此必須隨工作環境改變太陽能電池之工作點，亦即改變太陽能電池輸出電壓及電流，以獲得最大的輸出功率，此種控制方法稱為最大功率之追蹤 MPPT(Maximum Power Point Tracking)，最大功率的追蹤在文獻上有許多種如電壓回授法[1]、功率回授法[2]、擾動觀察法(Perturb and Observe Algorithms)[3]-[4]、增量電導法(Incremental Conductance Algorithm)[5]-[7]、直線近似法[8]、實際測量法[9]等，上述方法中最常被應用的為增量電導法及擾動觀察法。擾動觀察法雖然具有結構簡單、量測參數較少之優點，但其會在最大功率點附近震盪、降低太陽能電池效益之缺點，本文採用增量電導法作 MPPT 控制。

1.3 文獻回顧

由於太陽能電池的輸出功率會受日照量、溫度、元件老化、光電材料及製作過程等因素影響，也就是會隨著環境條件而有內外因素等等之變化而受到影響。必須使太陽能板總是能輸出其最大的功率，因此必須控制太陽能電力系統的功率等級，使其能在各種不同工作環境條件下皆能從太陽能電池汲取最大功率為目的，此控制方法即所謂的最大功率追蹤法。

本節將針對已提出之最大功率追蹤法加以探討分析，並且分別解說其工作原理及優缺點。關於太陽能電池的最大功率追蹤法則，先前已有許多文獻論述並證實這方面的相關研究，就其判斷原理和實現方法而言，可將其歸納為下列幾種方法，分別為電壓回授法[1]、功率回授法[2]、擾動觀察法[3]-[4]、增量電導法[5]-[7]、直線近似法[8]、實際量測法[9]-[10]。以下將就這六種最大功率點追蹤法的工作原理加以說明：

(1) 電壓回授法

電壓回授法[1]，電壓回授法是最簡單的一種最大功率點追蹤法，如圖 1.1 所示。此方法是經由事先的測試結果，而得知太陽能電池在某日照量及溫度下之最大功率點的電壓大小，藉由調整太陽能電池之端電壓，使其能與事先測試之電壓相符，來達到最大功率點追蹤的效果。不過，此控制方法的最大缺點即是當大氣條件大幅改變時，系統不能自動地追蹤到太陽能電池的另一最大功率點，因此造成相當多的能量損耗。

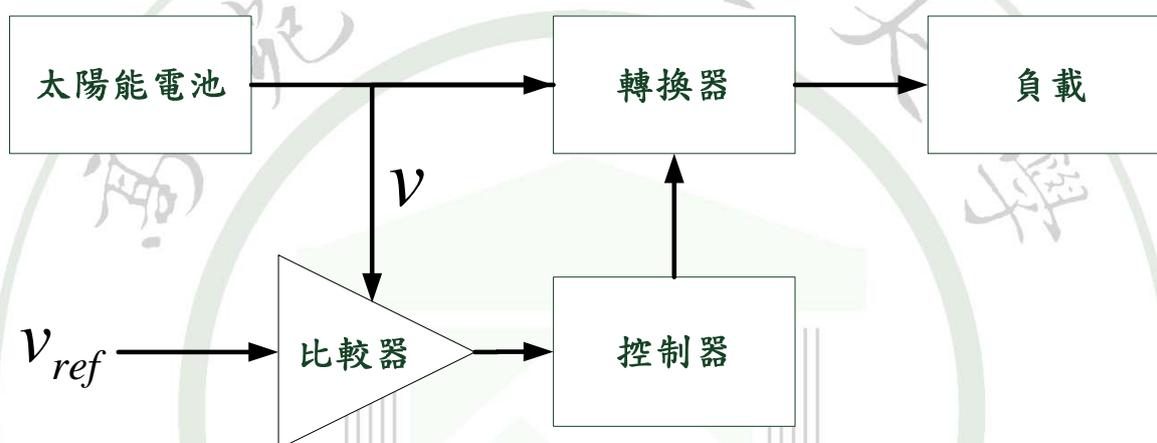


圖 1.1 電壓回授法方塊圖

電壓回授法的優缺點比較：

其優點是架構簡單，成本低，容易建構。缺點則是系統不能自動地追蹤到太陽能板的另一最大功率點，因此會造成能量的損耗。

(2) 功率回授法

功率回授法[2]，功率回授法與電壓回授法很類似，如圖 1.2 所示，但由於電壓回授法無法因應瞬息萬變的大氣條件下作自動最大功率點的追蹤，因此功率回授法加入了輸出功率對電壓變化率的邏輯判斷式，以便能因應大氣的變化而達到最大功率點追蹤。其判斷方程式為當 $\frac{dP}{dV}=0$ 時，即是太陽能電池達到最大功率工作點，配合控制流程即可動態地追蹤太陽能電池在不同日照量及溫度下之最大功率點。與電壓回授法比較，此方法雖然較為複雜且需較多繁複的運算過程，但其在最大功率的追蹤執行上是有減少能量損耗及提升整體效率的效果，因此這個方法遠優於前述之電壓回授法。

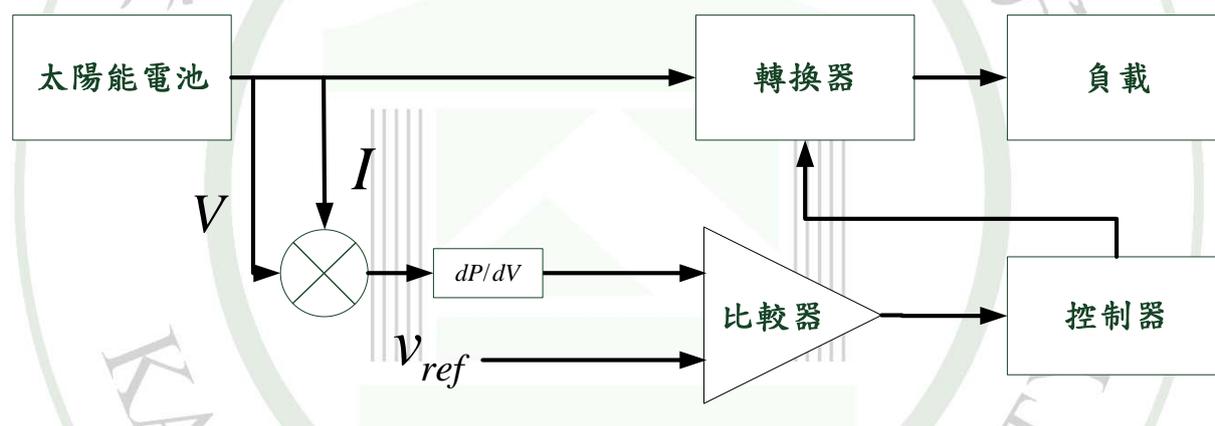


圖 1.2 功率回授法方塊圖

功率回授法的優缺點比較：

其優點是減少能量損耗以及提升整體的效率，比電壓回授法為佳。

缺點則是與電壓回授法相較，較為複雜且需較多判斷式的運算過程。

(3)擾動觀察法

擾動觀察法[3]-[4]，如圖 1.3 所示，由於其與電壓回授法及功率回授法相比較，能更有效的追蹤到最大功率點，且需要量測的參數為太陽能電池的電壓、電流，與功率回授法一樣，所以它被普遍地應用在太陽能電池的最大功率點追蹤上。擾動觀察法是藉著週期性地增加或減少負載的大小，以改變太陽能電池的端電壓及輸出功率，並觀察比較負載變動前後的輸出電壓及輸出功率的大小以決定下一步的增減載動作。假使輸出功率較變動前大，則將負載繼續朝同一方向變動，反之，若輸出功率較變動前小的話，則表示我們需要在下一週期改變負載變動的方向。如此反覆地擾動觀察及比較，使太陽能電池達到其最大功率點，這就是擾動觀察法的基本動作原理。

然而，此方法是藉著不斷變動太陽能電池的輸出電壓及輸出功率來追蹤最大功率點，當到達最大功率點 P_{\max} 附近之後，其擾動並不會停止，而會在 P_{\max} 點左右振盪，因此造成能量損失並降低太陽能電池的效率，尤其是在大氣環境變化緩慢時，能量損耗的情況更為嚴重，此為擾動觀察法的最大缺失。雖然我們可以縮小每次擾動的幅度，以降低在 P_{\max} 點的振盪幅度來減少能量損失，不過當溫度或日照量有大幅變化時，這種作法會使追蹤到另一最大功率點的速度變慢，此時將有大量的能量被浪費掉，因此當我們採用擾動觀察法時，擾動幅度的大小就需由使用者來做考量取捨。

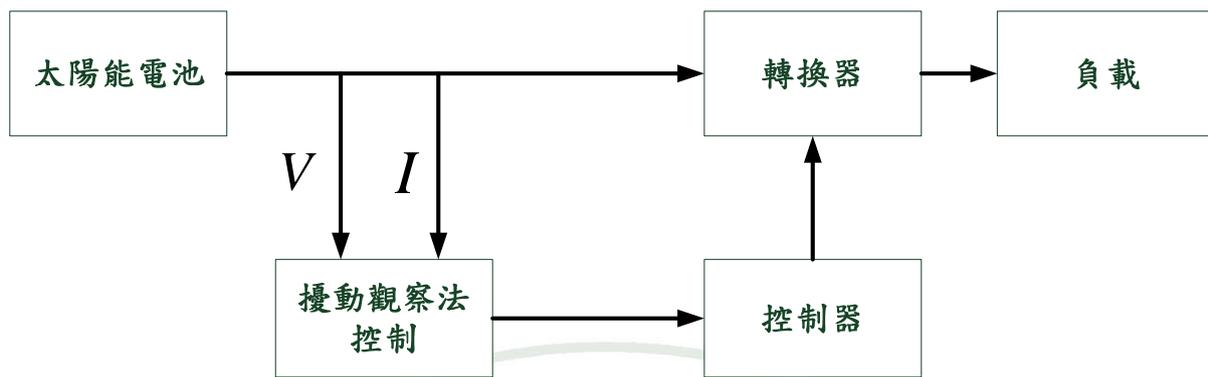


圖 1.3 擾動觀察法方塊圖

擾動觀察法的優缺點比較：

其優點是結構簡單，實現也容易，亦比電壓回授法和功率回授法有效率的達到最大功率點。

缺點則是會在點 P_{\max} 左右振盪，如果就控制器的程式執行而言，會造成記憶體負擔與反應時間的延長；而且會造成能量損失並會降低太陽能板的效率。

(4)增量電導法

增量電導法[5]-[7]，如圖 1.4 所示，它基本理念與功率回授法是相同的，其出發點為 $\frac{dP}{dV}=0$ 這個邏輯判斷式，其中的功率 P 可以由電壓 V 與電流 I 表示，而將 $\frac{dP}{dV}=0$ 改寫成：

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (1-1)$$

將上式整理後可得

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (1-2)$$

在式(1-2) 中 dI 表示增量前後量測到的電流差值，同理， dV 表示增量前後量測到的電壓差值。因此，藉著量測增量值 $\frac{dI}{dV}$ 與瞬間太陽能電池的電導值 $\frac{I}{V}$ ，可以決定下一次的變動，當增量值與電導值符合式(1-1) 的要求時，表示已達到最大功率點不進行下一次擾動，此即為增量電導法的基本工作原理。雖然增量電導法仍然是以改變太陽能電池輸出的電壓來達到最大功率點 P_{\max} ，但藉著修改邏輯判斷式來減少在 P_{\max} 點附近的振盪現象，使其更能適應瞬息萬變的大氣環境。就理論上而言，此法的理論推導是完美的，但是當感測器無法達到非常精密的量測時，其誤差是不可避免的，因此式(1-2) 發生的機率是極微小的，這意謂此法在實際應用時仍有很大的誤差存在。

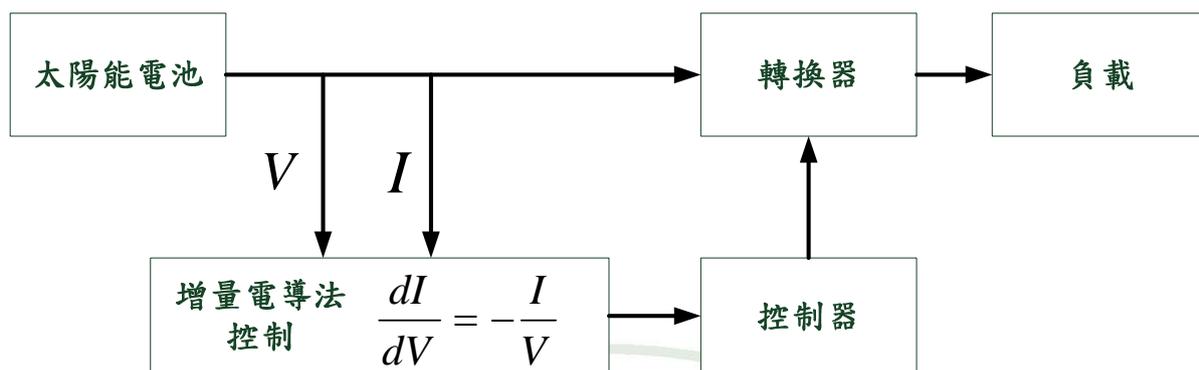


圖 1.4 增量電導法方塊圖

增量電導法的優缺點比較：

其優點是以改變太陽能板輸出電壓來達到最大功率點，更由藉著修改增量電導法的邏輯判斷式來減少在 P_{\max} 點附近的振盪現象；在於控制器程式的架構撰寫上比較方便，使其更能適應瞬息萬變的大氣環境而達到最大功率的追蹤。

缺點則是當感測器無法達到非常精密的量測時，會有誤差產生，因此能符合 $I + V \frac{dI}{dV} = 0$ 的機率是極微小的，這意謂著此法在實際應用時仍有一定的誤差存在。

(5) 直線近似法

直線近似法[8]，其方塊圖如圖 1.5 所示，基本理念為利用 $\frac{dP}{dI} = 0$ 這個邏輯判斷式，並利用一直線來近似太陽能電池在某一溫度下各種不同日照量的最大功率點，只要控制輸出電流在此直線上即可輕易地實現最大功率點追蹤。太陽能板的 $P-V$ 曲線，由圖中可以看出針對不同的日照量，其最大功率點的變化幾乎接近一直線，因此，取一直線來近似是非常合理的，此最大功率點追蹤法不但簡單，且具有在一個固定的溫度下，能得到各太陽光日照量的相對最大功率點。但由於此法是以數學模型的推導為出發點來求出最大功率點的近似直線，因此等效模型以及太陽能板之各項參數的正確性，是以此法來實現最大功率點追蹤時所需注意的地方。

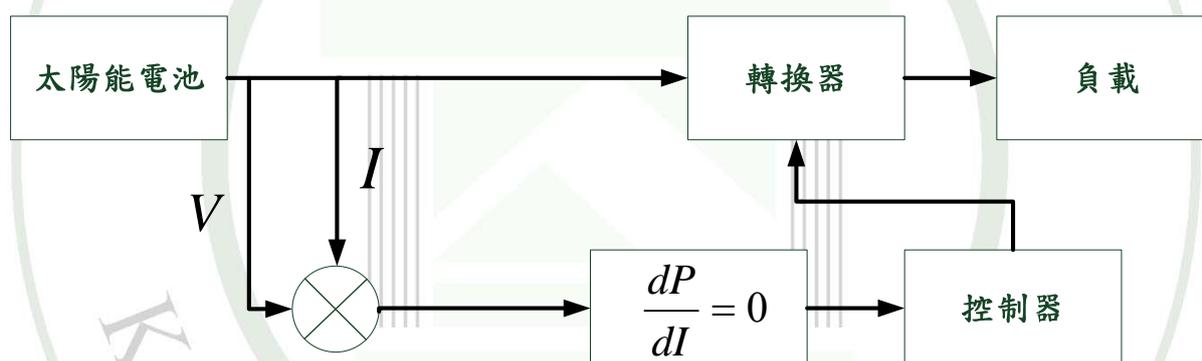


圖 1.5 直線近似法方塊圖

直線近似法的優缺點比較：

其優點是容易實現，架構簡單，只要將工作點控制在此直線上即可輕易地實現最大功率點追蹤。

缺點則是容易因太陽能板及元件的老化而失去其原有的準確度，並且只能針對某一溫度下的最大功率點追蹤。

(6) 實際量測法

實際量測法如圖 1.6 所示，主要是利用一片額外的太陽能板，每隔一段時間即量測此太陽能板的開路電壓與短路電流，用以建立太陽能板在此日照量及溫度下的參考模型，並求出在此大氣條件下的最大功率點之電壓和電流，配合控制電路使太陽能板工作在此電壓(或電流)下，即可達到最大功率點追蹤的效果。此方法之最大優點在於藉由實際量測而建立的參考模型，因此可避免因太陽能板及元件老化而導致參考模型失去準確度的問題。此外，由於此法需要額外的太陽能板及一些偵測電路，因此適用於較大功率之太陽能供電系統。對其他小功率系統而言，較不能符合成本上的需求。

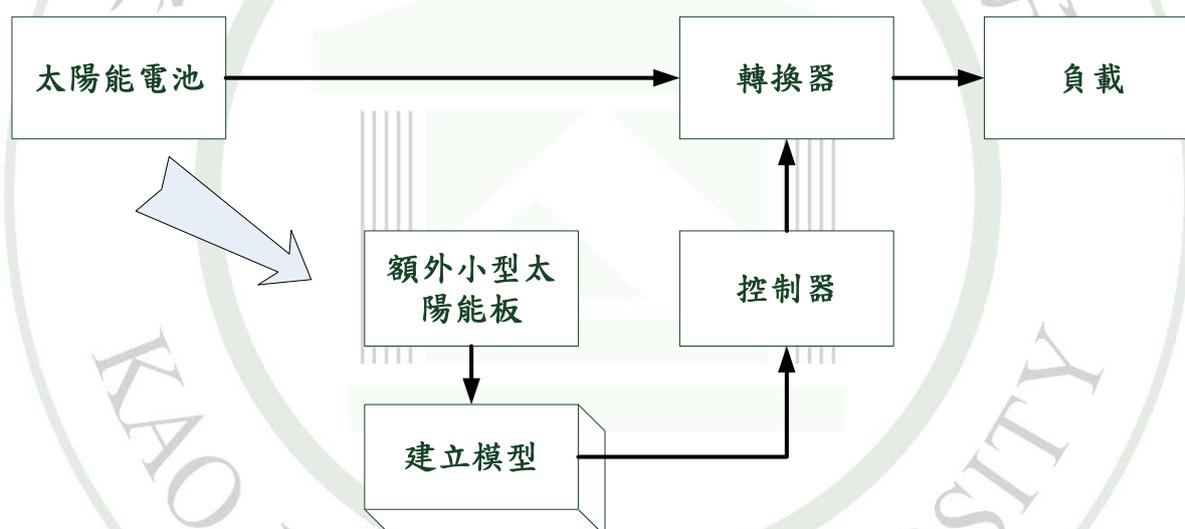


圖 1.6 實際量測法方塊圖

實際量測法的優缺點比較：

其優點是可避免因太陽能板及元件老化而導致參考模型失去準確度的問題。

缺點則是需要額外的太陽能板及一些偵測電路，因此在實驗的成本上較高是否會使用這個方法則看個人取捨。

1.4 論文架構

本論文共分為七章，第二章介紹電動自行車電源系統，劃分出主供電系統與輔助充電系統的架構，以及利用太陽能薄膜型電池板作為輔助充電器的材料。第三章介紹鋰電池的特性與比較並說明它的原理以及其模型架構。第四章介紹太陽能發電的原理以及太陽能最大功率追蹤的法則，藉由此而瞭解太陽能電池的種類及特性。並說明太陽能電池電壓及電流的特性會受照度和溫度的影響。再依循已發表的文獻中的太陽能最大功率追蹤法，採納使用並搭配單晶片控制來達到最大功率的追蹤。進而分析系統的動作流程和介紹太陽能薄膜電池板的摺疊設計等等。第五章硬體設計，說明硬體架構以及控制器、驅動模組、直流轉換器、回授模組的系統硬體。第六章說明實驗參數與實驗結果。第七章為結論與貢獻。



第二章 電動自行車電源系統介紹

2.1 電動自行車電源系統

2.1.1 鋰離子電池

鋰離子電池為本文主供電系統；鋰離子電池研發的歷史極短，但其優異的特點包括能量密度高、操作電壓高、輸出功率大、放電平穩、工作溫度區間大、充放電循環可 500 次以上、自放電低、儲存壽命長，被視為目前最主要的二次電池，現今的問題主要集中在於價格較高以及安全性較低。鋰離子電池是從鋰金屬二次電池改良而來，是以碳材作為負極材料。在充電過程中，鋰離子經由電解液的傳導嵌入負極的層狀或隧道結構，因而沒有鋰金屬的析出，大幅改善安全性的問題。因為在整個反應過程中沒有鋰金屬的存在，因此稱之為鋰離子電池。此類電池依其隔離層系統的不同，又區分為鋰離子電池與鋰高分子二次電池，兩者均以碳材為負極，配合鋰鈷氧化物 (LiCoO_2)、鋰錳氧化物(LiMn_2O_4) 或鋰鎳氧化物 (LiNiO_2)等正極活性物質。

圖 2.1 為本論文電動自行車電源之架構圖，電動自行車之充電器包括主充電器及輔助充電器，主充電器採用降壓式轉換器之設計，外接市電 110V，以 24V/1~3C 充電，能在 0.5 小時~1.5 小時充滿一個 24V/5.6AH 的鋰離子電池組。本計劃使用 Molicel IBR26700A(24V/11.2AH) 鋰離子電池組，鋰離子電池組是定製規格，採用 IBR26700A 鋰離子電池，其單一顆電池 3.75V/2.8AH，重量能量密度為 105Wh/kg，體積能量密度為 270Wh/l，電池電壓範圍為 2.5V~4.2V，最大輸出電流 40A，本文使用 28 顆電池串並聯，其中 14 顆電池串聯一組，然後再將兩組並聯組合成 24V/11.2AH 鋰離子電池組。

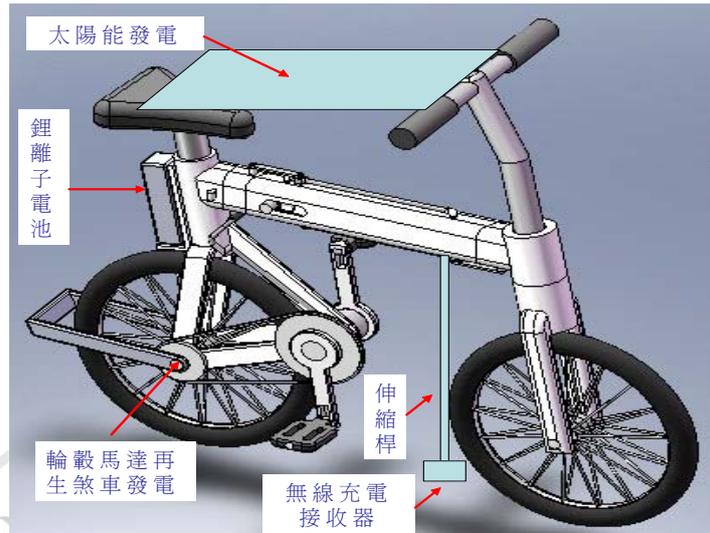


圖 2.1 電動自行車電源架構圖

圖 2.2 為電池等效電路[11]。電池內阻及電容會隨著充放電電流、電池溫度、老化情況及電池剩餘電量的改變而有不同的數值。在圖 2.2 中，電容 R_1 為電極電阻與電解液電阻的等效電阻、 R_2 為電極與電解液的介面電阻、 C 為電極與電解液的介面極化電容、 E_{oc} 為電池內電勢、 V_{bc} 為電池端電壓。

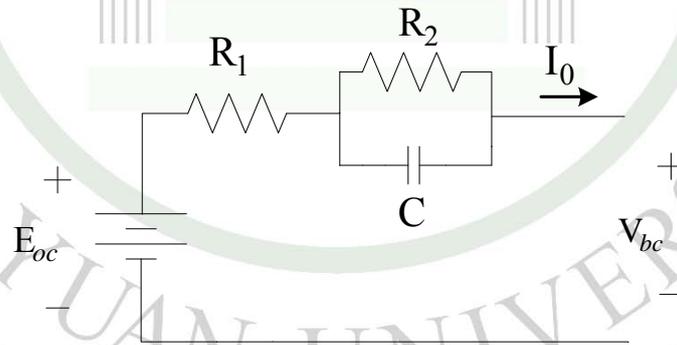


圖 2.2 電池等效電路

根據電池等效電路，可得電池端電壓 V_{bc} 如方程式(2-1)所示，其中 I_0 為放電電流、 V_{C0} 為電容 C 的初始電壓。

$$V_{bc} = E_{oc} - (R_1 + R_2)I_0 + R_2 I_0 e^{(-t/CR_2)} - V_{C0} e^{(-t/CR_2)} \quad (2-1)$$

為了增加電動自行車之續航力，因此增加輔助充電器，包括太陽能發

電系統、再生煞車發電及無線充電等等。

2.2 太陽能發電系統

本論文將以 PIC 單晶片實現 15W~20W 太陽能電池輔助 電動自行車系統之研製，本系統之特色如下：

(a)採用光伏陣列組成遮陽板之設計，既可遮陽又可發電。

(b)太陽能電池輸出功率約 15W~20W。

若增加太陽能板之安裝面積，本電路可擴充至 100W。

(c)採用單晶片微控制器作為控制電路核心。

(d)具備最大功率之追蹤控制器 MPPT。

(f)利用單晶片內建 A/D 轉換器量測太陽能輸出電壓及電流。

(g)量測鋰離子電池端電壓及電流以防止電池過充問題。

2.3 再生煞車發電

電動自行車行駛時之功率需求可分為三個模式：

(a)加速運轉及爬坡路段：所需之功率最大，將消耗大量電量。

(b)定速度運模式：所需之功率較小，將消耗較小電量。

(c)減速運轉及下坡路段，可以輸出再生煞車電力。

第一模式及第二模式電動自行車將消耗電量，而第三模式則可對電池或超級電容充電。當電動自行車緩慢的煞車或下坡時，再生煞車電力將儲存於電池中，當緊急煞車時，則將再生煞車電力將儲存於超級電容中。超級電容可以快速的充放電，所以當緊急煞車時，將瞬間之大電力由超級電容吸收，如此將可充分利用再生煞車電力，以增加移動載具之續航力，並可避免電池受大電流衝擊。若在短時間內對電池輸入較大之電流或電容量，往往會對電池內部之材料造成傷害，導致電池的使用壽命降低。

2.4 無線充電系統

無線充電是一種利用非接觸式電力傳輸方法將電能傳送至電池的充電方法，無線充電系統包括車上無線充電模組及地下無線充電站。地下無線充電站設置於都市之紅綠燈停車處，內含三組主要設備：二極體整流器、諧振換流器及高頻變壓器一次線圈，二極體整流器將市電轉換為高壓直流電，諧振換流器利用 LC 諧振方式將高壓直流電轉變為高頻高壓交流電，此高頻交流電經由高頻變壓器一次線圈形成磁場，若高頻變壓器二次線圈靠近即能產生磁場耦合而感應高頻電壓。車上無線充電接收模組，內含四組主要設備：高頻變壓器二次線圈、阻抗匹配電路、高頻二極體整流器及濾波器，高頻變壓器二次線圈由磁交鏈感應高頻電壓而接收充電站傳來之能量，為使能量有效傳送至負載，須有阻抗匹配使電路達成最大功率傳輸，高頻二極體整流器及濾波器則將高頻交流電轉換為直流電成為充電器之電力來源。

第三章 鋰電池介紹

3.1 鋰電池

本論文的電動自行車主供電系統是一個鋰電池組；由於它的電池特性較適合用於電動自行車上，但為何使用鋰電池以及它的優缺點比較將歸納介紹出鋰電池於下。

鋰電池是一顆近乎理想的電池，應具備高輸出密度、高重量能量密度、高體積能量密度、低價位、低自放電率、快速充電、高能量轉換率、高深度放電、循環壽命長、寬廣的工作溫度範圍。而鋰電池可說是二次電池領域中，不管在各方面，都優於其他種類的電池。

二次鋰電池是一種統稱，正確的說法應是二次鋰系電池。二次鋰電池並不意味著一定使用鋰金屬做為負極材料，多數鋰電池只是在電解質中，以鋰離子為主要的傳導離子。電池材料中會使用鋰元素，主要是因為其有兩大特點：

- (1)在化學標準電位表中，鋰元素的氧化性最強，即其電位為最負值。當鋰金屬搭配適合的正極材料時，其電池單體電位很容易便能超過 3.5V 以上。
- (2)鋰元素是原子量最輕的金屬元素，且其進行電化學反應的速率很快。

因為以上兩項重要特點，能量密度高、重量輕、體積小就成為鋰系電池的特徵。電池中使用到鋰元素的主要有三個種類，分別為鋰金屬電池、鋰離子電池、高分子鋰電池，以下將分別介紹。

3.1.1 鋰金屬電池

A. 電池原理

最早使用鋰元素做為電池材料的是鋰金屬電池，鋰金屬的結構是以鋰金屬為負極，以有機液體（如 Ethylene carbonate, EC、Propylene carbonate, PC）加上鋰鹽類（如 LiClO_4 ）做為電解質。而正極材料則為層狀結構的 LiCoO_2 。鋰金屬電池單體的開路電壓可高達 4V 以上，其可儲存的重量能量密度高達 200wh/kg。

B. 鋰金屬電池的優、缺點

鋰金屬電池的優點就是擁有極高的能量密度（200Wh/kg）。但鋰金屬電池有一項致命的缺點。鋰金屬電池以有機溶液做為電解質，化學反應過程中，易堆積形成樹枝狀的鋰金屬。而此樹枝狀結構會在電池產生內部短路，危險性極高。因此，雖然鋰金屬電池具有高能量密度，卻不適合用來做為電力來源。

為了改善鋰金屬電池內部短路的缺點，後來將負極材料改為碳系材料，以代替原來的鋰金屬。將鋰金屬電池的負極材料置換為碳系材料後，即為現在大家所熟悉的鋰離子電池。

3.1.2 鋰離子電池

A. 電池原理

因為鋰金屬電池的安全性堪慮，促成了鋰離子電池問世。近十年來鋰離子電池受到很多的重視，西元 2000 年在小型二次電池市場，已有 1/3 的佔有率。鋰離子電池於 1990 年由日本 SONY 公司商品化成功，1991 年開始上市。日本 10 家廠商，幾乎囊括全球市場，由於其擁有更高的體積/重量能量密度，使其在超小型產品的使用更加看好，目前已成為行動電話、筆記型電腦主要使用的二次電池。

鋰離子電池正極使用鋰離子與金屬氧化物，負極使用石墨或焦炭，電解液使用溶解鋰鹽的非質子（non-proton）性有機溶液。鋰離子電池的正極材料主要有三種：鈷系（ LiCoO_2 ）、錳系（ LiMn_2O_4 ）、鎳系（ LiNiO_2 ）使用不同的正極材料，其能量密度也就不同，表 3-1 列出三種陽極材料的比較[12]。

表 3-1 鋰離子電池分類表

陽極種類	能量密度	優點	目前技術瓶頸
LiCoO_2	1650mAH 130WH/kg 385WH/L	(1) LiCoO_2 材料穩定。 (2) 具 3.6V 工作電壓、高能量密度、使用壽命較 NiMH 為優。	(1) 需保護電路，造成電池組的容量降低 (2) 怕過充放電。 (3) 長期儲存容量衰退。
LiNiO_2	1800mAH 135WH/kg 400WH/L	(1) 成本較 LiCoO_2 低。 (2) 具 3.6V 工作電壓、高能量密度、使用壽命較 NiMH 為優。	(1) LiNiO_2 合成較複雜。 (2) 怕過充放電。 (3) 長期儲存容量衰退。
LiMn_2O_4	1100mAH 110WH/kg 285WH/L	(1) 成本最低。 (2) 具 3.8V 工作電壓、高能量密度、使用壽命較 NiMH 為優。	(1) 材料尚不穩定。 (2) 容量偏低。 (3) 高溫壽命較不理想。

鋰離子電池的內部結構利用高分子隔離膜將正極與負極分開，在其中填以具鋰離子導電性的液態電解液。鋰離子電池的正極與負極間，由鋰離子的往來運動而產生電能，並非藉由電解液參與電化學反應而產生電能，

只是藉著電子的移動所引起的氧化還原反應來產生電能，亦即藉由局部化學（Topochemical）的反應產生電能。

以下為鋰離子電池放電時的化學反應式，將反應式中的箭號顛倒，即為充電時的反應式。反應式中的 Ma、Mb 為參雜金屬。

正極：



負極：



全式：



在充電過程中，充電器將電子從正極取出來，經由外部電路送到負極的碳質材料，於是電池內部的鋰離子便由正極移動到負極。在放電時，鋰離子由負極移動到正極，電子便由負極輸出。

B. 鋰離子電池充、放電特性

單體鋰離子電池的公稱電壓值分為 3.6V 與 3.7 V 兩種，而其對應的最大電壓為 4.1V 與 4.2V。所以對鋰離子電池進行充電動作時，必須先行確定該鋰離子電池公稱電壓屬於哪一量值，否則會發生電池電能無法充飽或電池過充電的情況。而典型鋰離子電池的適宜充電電流在 0.1 C~1.5C 之間，充電電流太小會拉長充電時間；若充電電流太大，會破壞電池內部材料結構。

鋰離子電池的氣化電壓 (Gassing voltage) 為 4.5V。在充電過程中，若鋰離子電池端壓超過 4.5V 以上，電解液濃度飽和，輸入的電能無法再轉換為化學能，而電能會轉換為熱能，使得電池內部溫度上升。上升的溫度會將電解液分解為氣體，導致電池內部壓力上升，最後安全壓力閥打開，導致漏液。由於電解質為可燃性的有機溶劑，因此過充、放電都會造成燃燒爆炸的危險，所以鋰離子電池一定要加裝防過充電、防過放電的保護電路。

鋰離子電池的輸出特性較易受到輸出電流值以及溫度的影響。當電池進行定電流放電時，若以小電流輸出，則電池的可輸出電容量會較大；而在放電過程中，環境溫度越低，鋰離子電池的可輸出電容量就越小。每一種類的電池都有這樣的情況，但鋰離子電池受影響的程度較大。

圖 3.1 為兩顆負極材料不同的鋰離子電池，進行定電流放電實驗的電池端電壓與剩餘電量關係曲線[13]。兩顆電池除了負極材料不同外，其餘初始條件與放電方式皆相同，且可由圖中看出兩條電壓曲線的特性並不相同。當改變鋰離子電池的負極材料時，可以得到不同的電池端電壓輸出特性。鋰離子電池的負極材料分為焦炭與石墨兩大類。若鋰離子電池負極材料使用焦炭，在對電池做持續定電流放電動作時，電池閉迴路端電壓會呈現似線性傾斜下降；而當負極使用時墨時，電池閉迴路端電壓會呈現似水平狀態。這兩種放電特性並無絕對好壞之分，較水平的放電電壓曲線適合運用於需穩定電壓的電器；而傾斜下降的放電電壓曲線，因為其放電電壓近似線性的特性，較利於發展準確的電容量檢測技術。

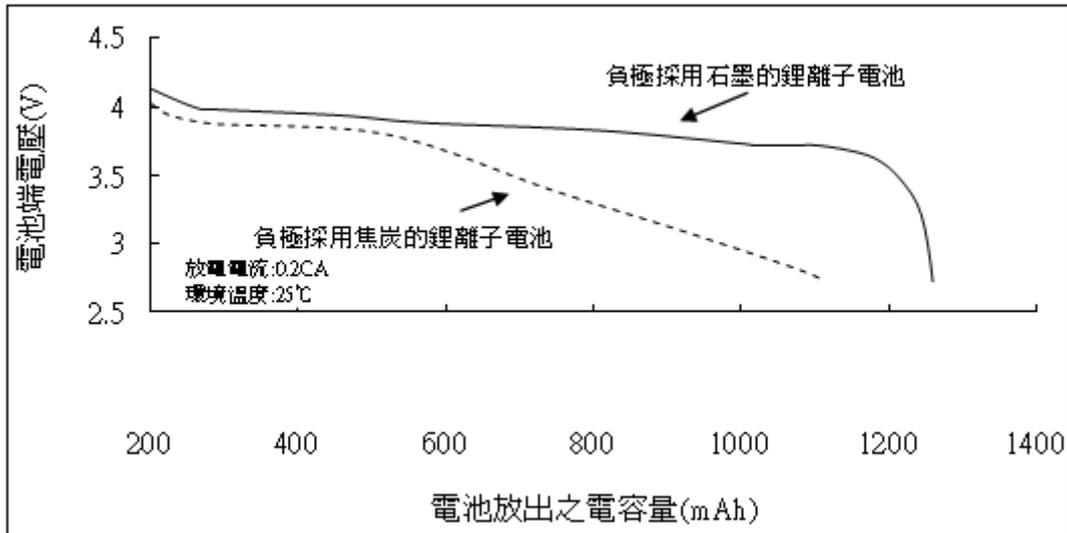


圖 3.1 鋰離子電池放電過程中剩餘電量與端電壓關係曲線

C. 鋰離子電池的優、缺點

綜觀整個二次電池領域，不論以何種性能特性為比較目標，鋰離子電池都擁有最好的表現。以下條列出鋰離子電池的優點：

(1) 單體電池端電壓高：

公稱電壓值為 3.6V，為鎳氫電池的 3 倍，需串聯三顆鎳氫電池才可得到的電壓。此特性在商業應用上，為鋰離子電池的絕對優勢。在商業上常需要高輸出電壓的電池，但因為鎳氫電池的公稱電壓值只有 1.2V，故往往需靠多個鎳氫電池串聯而成，所組合成的電池組體積大、重量重。但今以鋰離子電池代替鎳氫電池，可有效減少所需電池數目，進而增加電池組的體積能量密度與重量能量密度。且以較少數目的電池單體組成電池組，可以降低電池組的故障率。

(2) 高能量密度：

一顆典型鋰離子電池體積能量密度約為 300Wh/L，此量值為鎳氫電池的 1.5 倍、為鎳鎘電池的 2 倍。典型鋰離子電池的重量能量密度約為 125 Wh/kg，此量值為鎳氫電池的 2 倍、為鎳鎘電池的 2 倍~3 倍。

(3) 自放電率低：

自放電率低的二次電池適合作長時間備用電池。鎳鎘電池在室溫下的自放電率為 1%/日，鎳氫電池約為 3%/日，鋰離子電池約為 0.5%/日。

(4) 循環使用壽命高：

正常使用情況下，在循環使用 500 次之後，可輸出電容量約為全新電池電容量的 80%。

(5) 無公害：

不含任何重金屬材料，不會對環境造成污染。

以上為鋰離子電池的優點。鋰離子電池與其他電池做比較，唯有在重量能量密度上略遜於高分子鋰電池。典型鋰離子電池的重量能量密度約為 125Wh/kg，而高分子鋰電池為 150Wh/kg。此乃因為鋰離子電池使用鹼性電解質，所以其電池封裝必須使用鐵皮，而不能用鋁箔封裝，所以其重量密度無法有效提昇。

鋰離子電池有另一項特點，就是其內電阻值相當小，且內電阻值不易隨著電池充放電而變動[12]，無論電池電容量為何，電池內電阻值幾乎保持不變。圖3.2為鋰離子二次電池在充電過程中的內電阻變化曲線。圖中有兩條曲線，代表有兩顆不同規格的鋰離子電池，可見到在電池充電過程中，電池的內電阻值幾乎沒有改變。

站在電源供應的立場，鋰離子電池內電阻不易改變的特性是優點，如此就不會在電流傳遞的過程中消耗過多的電能，且可做大功率的輸出動作。但站在電池電容量檢測的立場，卻是項缺點，因為如此一來，就無法藉由鋰離子電池內電阻的量測得知電池電容量。

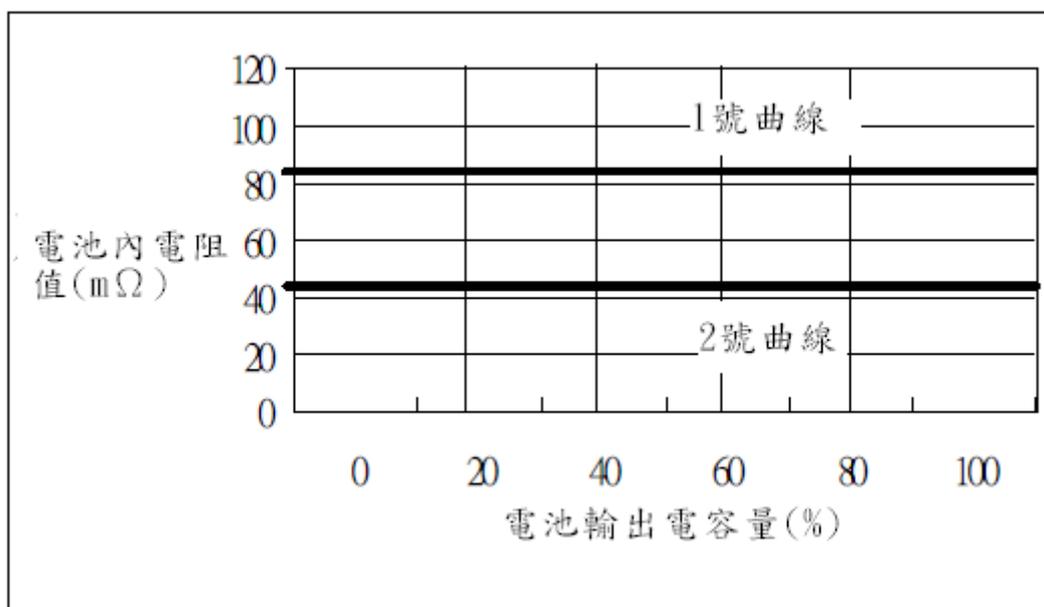


圖 3.2 鋰離子電池電容量與內電阻的關係

3.1.3 高分子鋰電池

高分子鋰電池最大的市場訴求在薄型化，電池外型可隨產品變化，且有更高的能量密度，雖然高分子鋰電池在溫度特性及循環壽命上表現不佳，但其外型可塑性高的特點卻是產品朝向超小型化的關鍵所在，所以全球的廠商無不大舉投入此領域，希望搶得市場先機，避免再被日系廠商獨占。

A. 電池原理

高分子鋰電池的結構與鋰金屬電池相似，負極以超薄型的鋰金屬箔片當作鋰的來源及電流收集器 (Current collector)，正極材料則是具有可逆性的嵌入式化合物 (Intercalation collector)。兩電極中間是以具有鋰離子導電的高分子薄膜當作固態電解質 (Solid electrolyte)。高分子電解質是將鋰鹽溶於高分子結構中，形成離子導體。高分子電解質的電阻較高，所以若要維持良好的電池內部導電率，需將溫度維持於 60°C~80°C。

高分子鋰電池通常由五層的薄層材料所組成，包括最上層的絕緣材料，第二層為鋰金屬負極箔片，第三層為固態高分子電解質，第四層為金屬氧化物正極，最底層為金屬電流收集層。雖由五薄層材料所組成，高分子鋰

電池的厚度可低於 100 μm 。典型的高分子鋰電池組性能規格如下所標示：
重量能量密度 155Wh/kg、體積能量密度 220Wh/L。

B. 高分子鋰電池的優、缺點

- (1) 電池形狀可針對需要做各種設計，如圓柱型、平板式折疊設計、平板式疊層設計等。電池形狀可以配合電器產品內部空間做設計，而非產品來配合電。
- (2) 因其採用固態電解質，所以沒有其他二次電池電解液外漏的現象產生。
- (3) 不須以金屬封裝，可採用鋁箔封裝達到輕量化的目的。

優點主要來自於其使用固態電解質，但其缺點主要也來自其使用固態電解質。因為固態電解質的離子移動速度較液態慢，所以其能量密度比鋰離子電池要低。且目前高分子鋰電池的成本亦高於鋰離子電池甚多。

不同種類的電池有不同的輸出入特性，各有其優缺點，每一種電池最適合的使用方式與使用條件也不盡相同。唯有掌握所需電池的使用方式、使用環境與成本限制，決定出最適合的電池。而一般在評鑑電池的好壞時，主要指標包括：電池單體電壓、重量能量密度、體積能量密度、自放電率、可循環使用次數、適用溫度範圍、大電流輸出能力。表 3-2 整理出目前主流二次電池的特性[12]，數據上皆取該種類電池的典型數值。

表 3-2 各類二次電池綜合比較表

電池種類	鉛酸電池	鋰離子電池	高分子鋰電池
公稱電壓	2.2V	3.6V	3.8V
正極材料	PbO ₂	鎳鈷氧化物	鎳錳氧化物
負極材料	鉛	碳素	碳素
能量密度	35Wh/kg	120Wh/kg	100~120Wh/kg
優點	<p>(1)產品歷史久，相關應用發展成熟。</p> <p>(2)可瞬間放出大電流，適用於引擎發動。</p> <p>(3)成本低廉、易製造、回收處理容易。</p>	<p>(1)高能量密度。</p> <p>(2)高電池單體電壓。</p> <p>(3)長循環使用壽命。</p> <p>(4)無記憶效應。</p>	<p>(1)高能量密度。</p> <p>(2)電池外型可依需要而改變。</p> <p>(3)輕薄化電池的代表。</p>
缺點	<p>(1)能量密度高。</p>	<p>(1)成本高。</p> <p>(2)有機電解質具毒性，易揮發，有漏液的可能性。</p> <p>(3)電池內電阻值大。</p> <p>(4)不適於大電流輸出。</p>	<p>(1)成本高。</p> <p>(2)電池內電阻值大。</p> <p>(3)不適於大電流輸出。</p>

3.2 電池等效電路

一般在分析電池電特性時，通常將電池視為一理想的電壓源，也就是輸出電壓保持不變。然而電池內部化學材料特性易受多種因素的影響，使得電池並不是單純的電壓源。因此，不管是欲設計準確的電池電容量檢測方法，或是欲建構正確的電池模型，必須將電池的自放電現象、電池內電阻、因變換電流輸出狀態而變動的閉迴路電壓值、溫度的影響等因素考慮進去。

在電池進行放電動作時，電池的端電壓並不會保持定值，以定電流放電為例，電池的端電壓會持續下降。當系統對於電池端電壓漂移的容忍度低時，用簡單的電池模型做電路模擬時，就無法看出真正的問題。但若使用一能完整、真實呈現電池特性的模型，就可以針對真實的問題作預先的防範。例如，可以預先在電池端電壓的兩端加上穩態電路。

到目前為止，有五種電池模型較常被人們所採用，分別為理想模型、線性模型、戴維寧等效模型、等校電容模型以及 Pspice 模型[14]。

3.3 鋰離子電池容量

圖 3.7 為 Molicel 2.9AH 鋰離子電池放電電流與輸出電量之關係圖。當輸出電流為 0.5C 時，鋰離子電池可輸出容量約為額定的 98%；當輸出電流為 1~2C 時，鋰離子電池可用容量約為額定的 97%。由於鋰離子電池之內阻小，且其不易受輸出電流大小或 SOC (State of Charge) 高低之影響，故放電電流對鋰離子電池輸出容量之影響非常小。

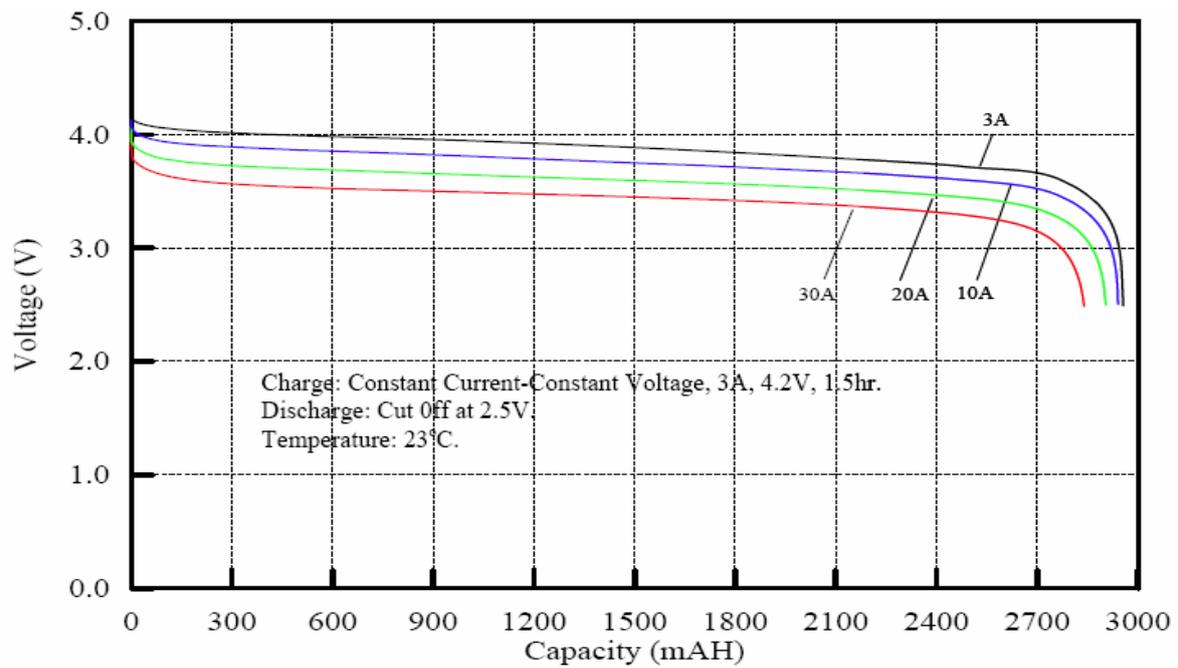


圖 3.3 鋰離子電池容量與放電電流之係關圖

本論文所使用的鋰電池組為能元科技(E-ONE MOLI ENERGY CORP.)
 的鋰離子電池產品[15]，其電器規格如下表 3-3 CELL SPECIFICATIONS

表 3-3 CELL SPECIFICATIONS

電氣規格		
標準容量		2800mAh
最小容量		2650mAh
額定電壓		3.75V
充電電壓		4.2±0.05V
充電電流		小於 8.4A
充電時間		1.5hr
最大放電電流		40A
放電截止電壓		2.0V
溫度	充電	0°C~45°C
	放電	-20°C~60°C
	存放	<35°C
重量		101g
尺寸	直徑(D)	2.64mm(Max)
	高度(H)	70.5mm(Max)
能源密度	體積	270Wh/l
	重量	105Wh/kg



圖 3.4 鋰電池實體圖

本實驗採用 Molicel IBR26700A(24V/11.2AH)鋰離子電池，將使用 28 顆電池做串並聯，將其搭配並聯成 24V/11.2AH 鋰離子電池組，如圖 3.8 所示。

第四章 太陽能輔助電源系統

4.1 太陽能電池之基本原理

太陽能電池的主要功能在於光能轉換為電能，此現象稱為光伏效應 (Photovoltaic Effect)，圖 4.1 為太陽能電池等效電路[1]，太陽能電池之輸出電壓及電流方程式如(4-1)式所示。

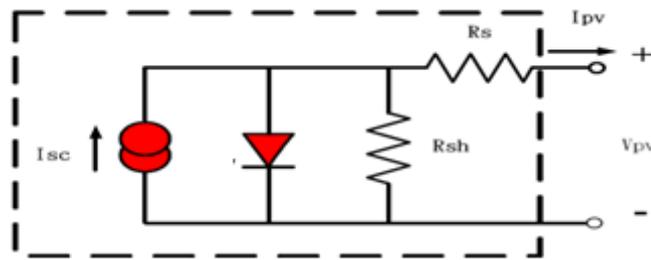


圖 4.1 太陽能電池等效電路

$$I_{PV} = I_{SC} - I_s \left[\exp\left(\frac{V_{PV} + I_{PV}R_s}{nV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + I_{PV}R_s}{R_{sh}} \quad (4-1)$$

其中：

I_{PV} 為太陽能電池之輸出電流

I_{SC} 某日照度太陽能電池短路電流

V_{PV} 為太陽能電池之輸出電壓

I_s 為二極體之逆向飽和電流

$V_T = kT/q$ 為熱電壓 (Thermal Voltage)

k 為波茲曼常數 (1.3807×10^{-23} J/K)

T 為絕對溫度

q 為載子電荷量 (1.60218×10^{-19} C)

n 為介電常數 (決定於半導體材料及製程特性，多半介於 1~2 之間)

R_s 為太陽能等效串聯電阻

R_{sh} 為並聯電阻

太陽能電池光電轉換效率如(4-2)式所示，其中：

P_m 為太陽能電池輸出功率

P_{in} 為太陽光日照功率 (W/m^2)

A_c 為太陽能電池面積 (m^2)

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in} \times A_c} \times 100\% \quad (4-2)$$

太陽能電池可分成堆疊型(Bulk Type) 和薄膜型 (Thin Film Type)。堆疊型太陽能電池又可分成單晶矽 太陽光電池、多晶矽太陽光電池及 III-V 族化合物半導體太陽光電池等。薄膜型太陽光電池可分為非晶矽太陽能電池、II-VI 族化合物半導體 [如二硒化銅銻($CuInSe_2$)、碲化鎘($CdTe$) 及硫化鎘(CdS)太陽能電池等]、色素敏化染料太陽能電池(Dye-Sensitized Solar Cells)、有機導電高分子太陽能電池(Organic/Polymer Solar Cells)、銅銻硒化物(CIGS)太陽能電池等。

薄膜太陽電池可以使用在價格低廉的玻璃、塑膠、陶瓷、石墨，金屬片等不同材料當基板來製造，形成可產生電壓的薄膜厚度僅需數 μm ，由於薄膜型太陽能電池使用材料較少，每一模組的成本較堆疊型太陽能電池來的小，製造程序上所需的能量也較堆疊型太陽能電池為小，並擁有整合型式的連接模組，故其可省下了獨立模組所需在固定和內部連接的成本。

本文使用薄膜型太陽能電池以減輕電動自行車之重量。薄膜型太陽能電池的厚度較結晶矽太陽能電池的厚度來的小，結晶矽太陽能電池的厚度約 200~350 μm 而薄膜型太陽能電池的薄膜約 0.5 μm 。為提高發電效率，使用三複合層薄膜型太陽能電池[16]，其為三明治結構設計法，頂層使用非晶矽材料，光學能階間隙達 1.8eV，利於吸收藍光；中層使用非晶矽與 10-15% 之鍍合金材料，光學能階間隙達 1.6eV，利於吸收綠光；底層使用非晶矽

與 40-50%之鍍合金材料，光學能階間隙達 1.4eV，可吸收紅光與遠紅外光。三複合層薄膜型太陽能電池採用分層吸收太陽光譜(圖 4.2-1)，故能將 太陽能光中的紅,綠,藍等不同波長光譜有效吸收，因此可轉換並產出更多的太陽能。太陽光譜如圖 4.2-2 所示。

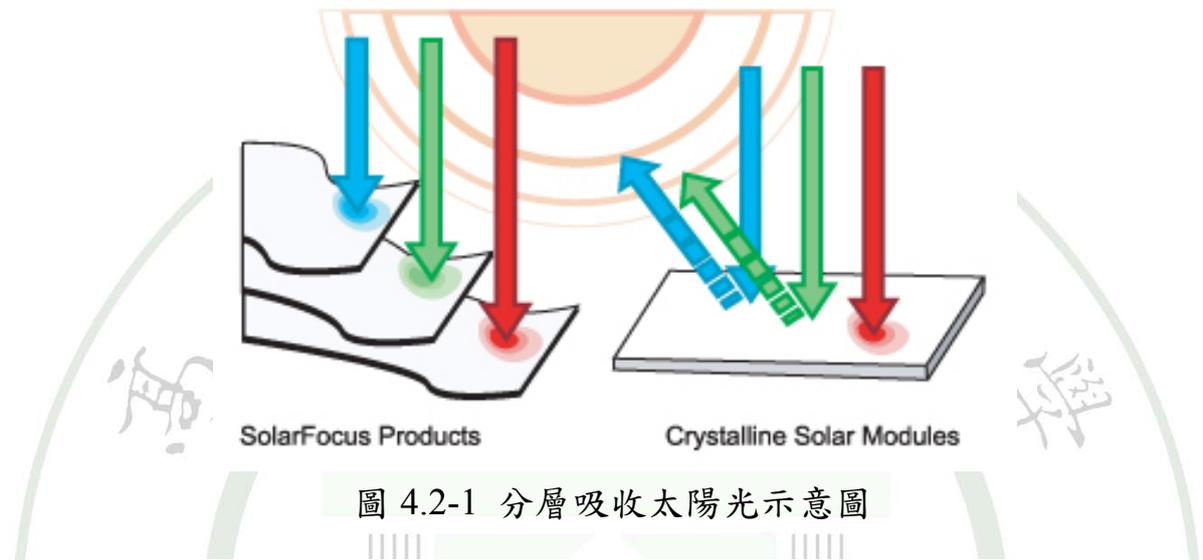


圖 4.2-1 分層吸收太陽光示意圖

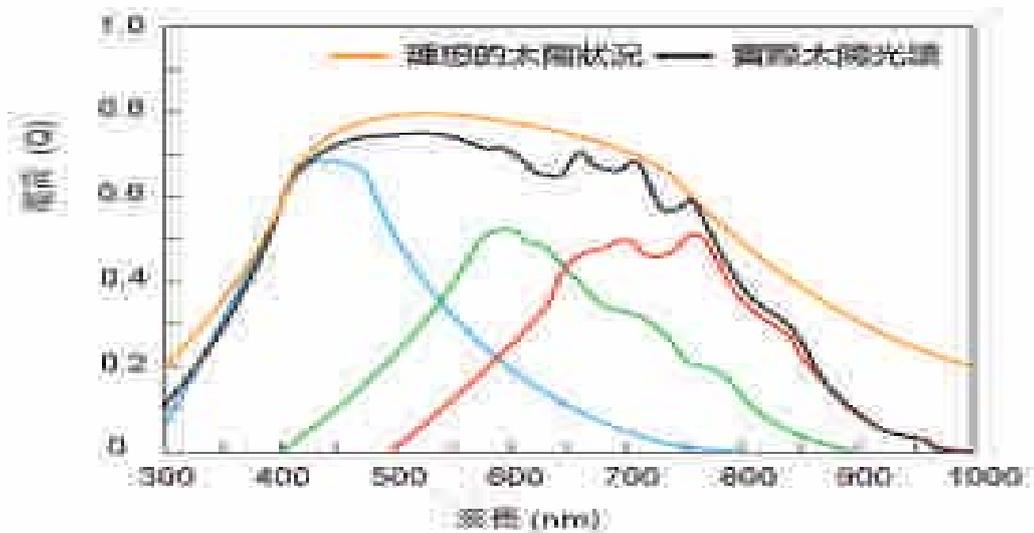


圖 4.2-2 太陽光譜

因此，不同的條件也會對太陽能電池的曲線造成改變如圖 4.3 所示[16]，在不同的照度下電壓對電流的曲線會有所變化，因此最大功率點也會隨之改變。

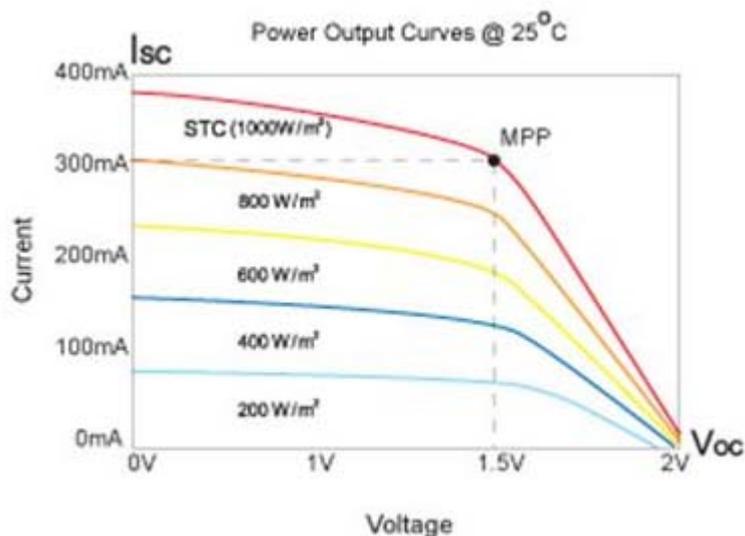


圖 4.3 各種日照強度下電壓對電流曲線圖

在不同環境溫度下，太陽能電池板電壓對電流曲線也會隨之變化，例如圖 4.4 所示，為不同溫度下的電壓對電流曲線圖。

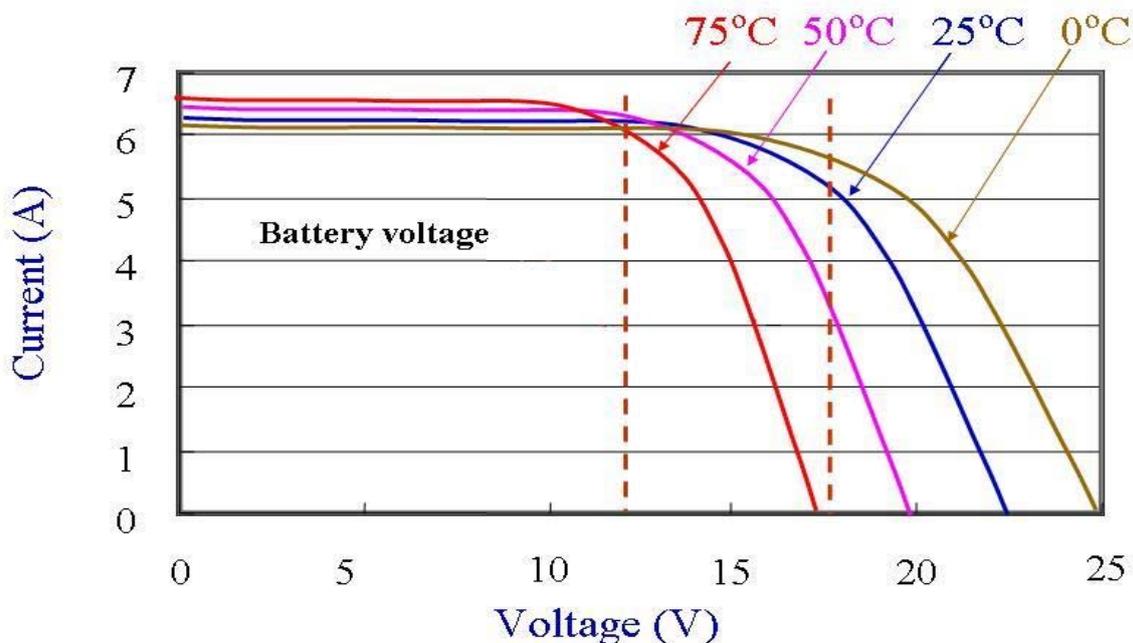


圖 4.4 各種不同溫度下的電壓對電流曲線圖

表 4.1 為太陽能薄膜電池板電器規格，以及薄膜型太陽能電池板單片的實體圖(圖 4.5)



圖 4.5 太陽能薄膜電池板實體圖

表 4.1 太陽能薄膜電池板電器規格

最大輸出功率(W)	1.68
開路電壓(V)	4
短路電流(mA)	420
標準工作功率(W)	0.9 + 15%
工作電壓 V_{mpp} (V)	3.0 + 11%
工作電流 I_{mpp} (mA)	300 + 4%
重量(g)	40
尺寸(mm)	195*140*1.1
面積(m^2)	0.021

4.2 最大功率追蹤控制

圖 4.6 為太陽能電池之電流對電壓及功率對電壓特性曲線圖，其中 I_{sc} 為太陽能電池短路電流、 V_{oc} 為太陽能電池開路電壓，當太陽能電池工作電壓 V_{pv} 低於最大功率點電壓時，其輸出功率會隨電池工作電壓上升而遞大；反之當太陽能電池工作電壓 V_{pv} 高於最大功率點電壓時，其輸出功率會隨電池工作電壓上升而遞減從圖中得知當工作電壓為 V_{mpp} 時，則太陽能將能達到最大功率 P_{max} 。

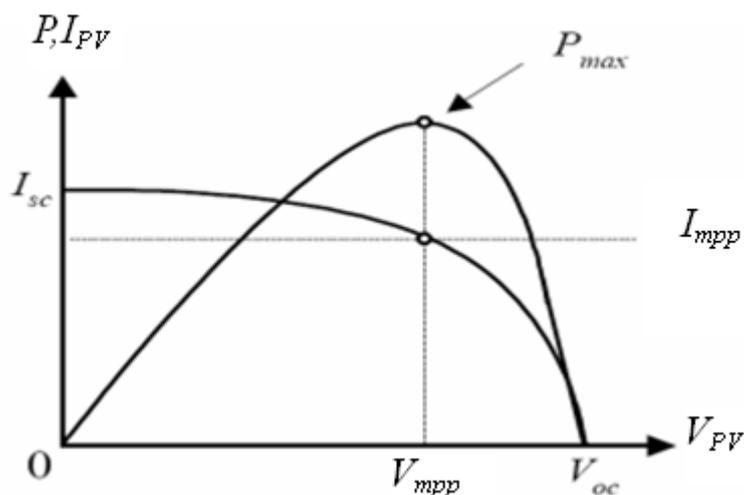


圖 4.6 為太陽能電池之電流對電壓及功率對電壓特性曲線圖

增量電導法之基本概念為 $dP_{pv} / dV_{pv} = 0$ ，即最大輸出功率點之斜率為零。

$$dP_{pv} / dV_{pv} = d(I_{pv} V_{pv}) / dP_{pv} = V_{pv} dI_{pv} / dV_{pv} + I_{pv} = 0 \quad (4-3)$$

將上式整理後可得：

$$dI_{pv} / dV_{pv} = -I_{pv} / V_{pv} \quad (4-4)$$

其中 dI_{pv} 代表增量前後的電流差， dV_{pv} 代表增量前後的電壓差。

藉由量測增量值 (dI_{pv}/dV_{pv}) 與太陽能電池之電導值 (I_{pv}/V_{pv}) 來決定 DC/DC 轉換器工作週期。當 $dI_{pv}/dV_{pv} < -I_{pv}/V_{pv}$ 時，表示功率曲線斜率為負，太陽能電池之工作點在最大輸出功率點之右側，因此必須要增加 DC/DC 轉換器工作週期來達到最大功率；若 $dI_{pv}/dV_{pv} > -I_{pv}/V_{pv}$ 時，則表示功率曲線斜率為正，即工作點在最大輸出功率點之左側，因此必須要減少 DC/DC 轉換器工作週期來達到最大功率。當增量值 (dI_{pv}/dV_{pv}) 與太陽能電池之電導值 (I_{pv}/V_{pv}) 相同時，即達到最大輸出功率，而不需改變 DC/DC 轉換器工作週期，減少不必要之擾動，此即為增量電導法的基本工作原理。圖 4.7 實際應用增量電導法以實現最大功率追蹤控制之流程圖。

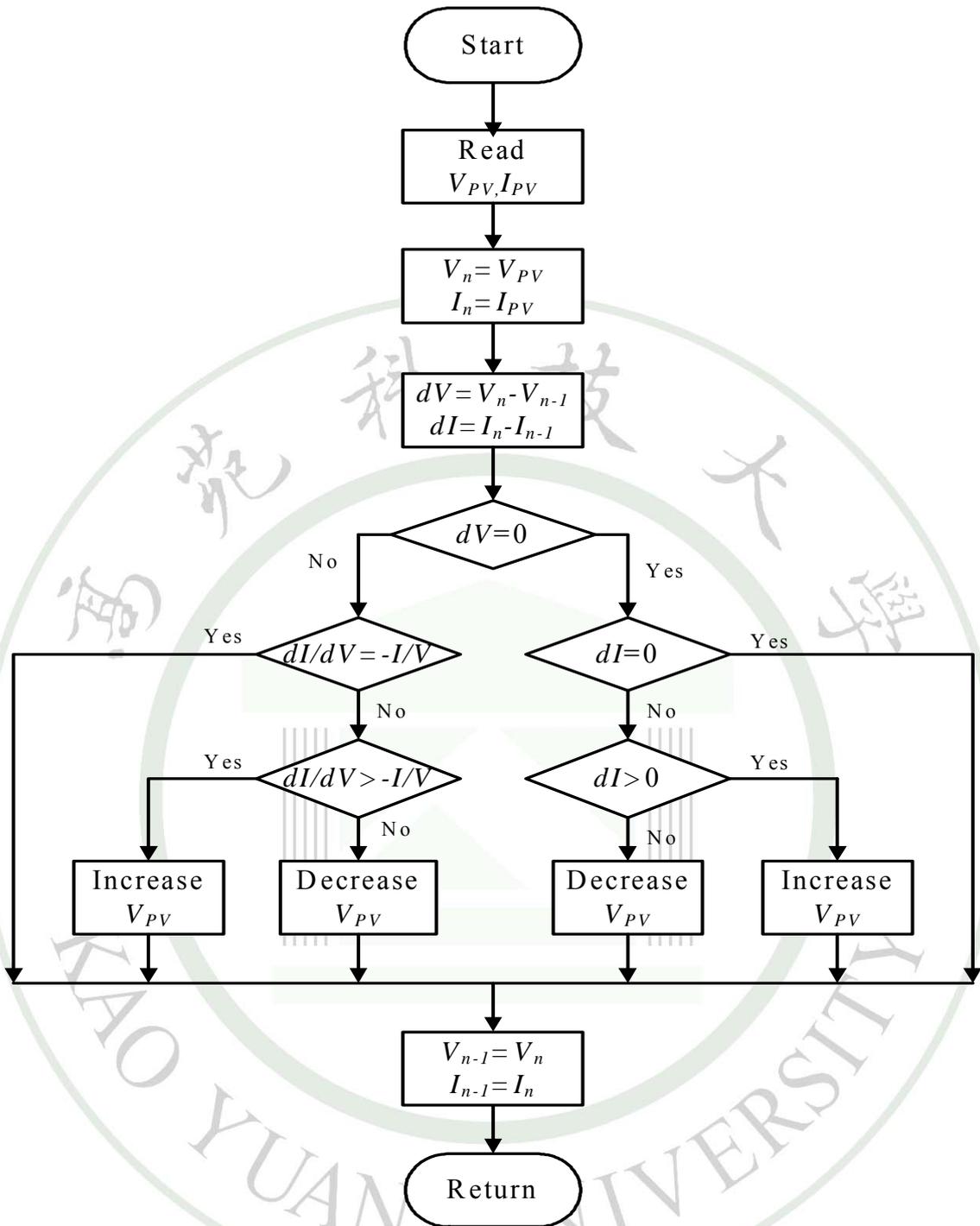


圖 4.7 增量電導法控制流程圖

4.3 單晶片控制

4.3.1 單晶片的 PWM 功能介紹

PWM (Pulse Width Modulation)稱為脈波寬度調變(如圖 4.8-1 所示)；PWM 是常用於直流馬達的控制、電源變壓器之穩壓控制、甚至是直流轉換交流弦波的控制等，是微處理機極為重要的控制功能[17]-[18]。

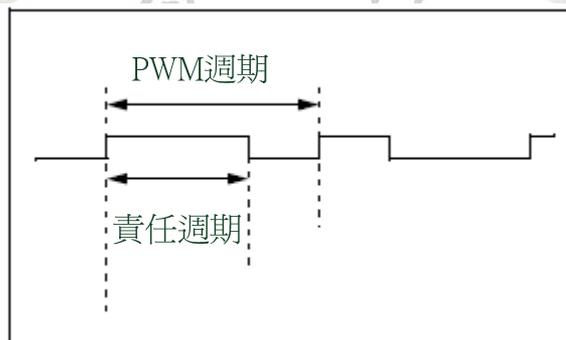


圖 4.8-1 脈波寬度調變圖

PIC16F877A 具有內嵌 PWM 的單晶片微處理器，只要透過幾個簡單的暫存器設定，就可以有兩組 10 位元的精密 PWM 輸出，其最短時間單位為 $(4/f_{osc})$ ，而且微處理器在設定完成後，可以讓 PWM 自行獨立運作，使用起來相當方便。

PIC16F877A 內嵌的 PWM 功能總共有兩組輸出，分別接在微處理器 RC2/CCP1 與 RC1/T1OSI/CCP2 兩隻接腳上面。而兩組 PWM 輸出雖然可以獨立運作，分別由暫存器 CCPR1H 以及 CCPR2H 來控制 PWM 的 Duty Cycle(如圖 4.8-2)，但兩者週期都由 PR2 來控制，因此兩組 PWM 輸出週期必須都是相同的。

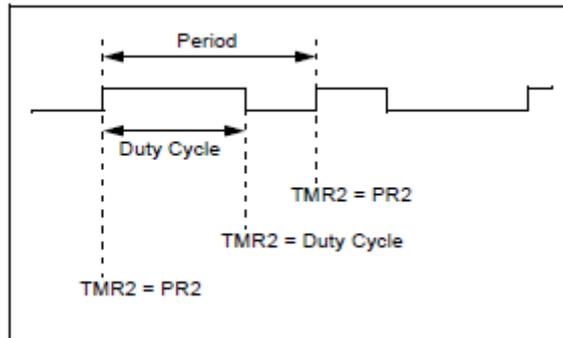


圖 4.8-2 PWM 輸出

PWM 週期：主要由 PR2 暫存器決定

PWM 週期的實際計算公式如下：

$$\text{PWM period} = [(PR2) + 1] \times 4 \times T_{osc} \times (\text{TMR2 Prescale Value}) \quad (4-5)$$

$$\text{PWM Frequency} = 1 / (\text{PWM period}) \quad (4-6)$$

Duty cycle：主要由 CCPR1L：CCP1CON<5:4>決定

Duty cycle 部分是由 10 位元決定，其中高 8 位元為 CCPR1L，低的兩個位元為 CCP1CON 暫存器的 bit5 及 bit4，詳細計算公式如下：

$$\text{PWM duty cycle} = (\text{CCPR1L} : \text{CCP1CON} \langle 5:4 \rangle) \times T_{osc} \times (\text{TMR2 Prescale Value}) \quad (4-7)$$

其中 CCPR1L:CCP1<5:4>為暫存器 CCR1L 的 8 個位元，和 CCP1CON 的第四、第五個位元合併使用，構成 10 個位元的 PWM 脈波寬度控制，因為是 10 個位元，因此，單晶片 PIC16F877A 解析度可高達 1024。

4.3.2 單晶片的 A/D 轉換功能介紹

由於微處理器屬於數位電路，因此無論輸入如何變化，都離不開數位訊號，然而需要類比訊號輸入的時候，微處理器內部有附加了功能不錯的類比數位轉換器(A/D converter)，使微處理器可以「直接」使用類比信號輸入作處理。

如圖 4.9 所示，單晶片 PIC16F877A 內嵌一個 10 位元的類比數位換器，

類比數位轉換器的輸出結果因為超過 8 個位元，所以分成兩個暫存器來儲存分別是 ADRESH 和 ADRESL；ADRESH 被分配在 BANK0，而 ADRESL 則被分配在 BANK1。

此類比數位轉換器可以接受高達 8 個通道的類比訊號，不過，同一時間只能允許一組訊號輸入。類比數位轉換器的參考電壓可以由使用者自行選擇直接接到微處理器的電源(Vdd 與 Vss)、或是接到其應用電路的參考電源[19]。上述各選項的選擇方法皆集中在兩個暫存器上面；ADCON0 與 ADCON1。

ADCON0：主要在於控制類比數位轉換器的 ON/OFF、轉換速率、以及選擇通道之用。

ADCON1：主要掌管的是 10 位元的類比數位轉換結果、與兩個輸出暫存器總共 16 位元之間的調整問題，8 位元的通道要打開幾個以及 A/D 轉換時參考電壓的來源等等。

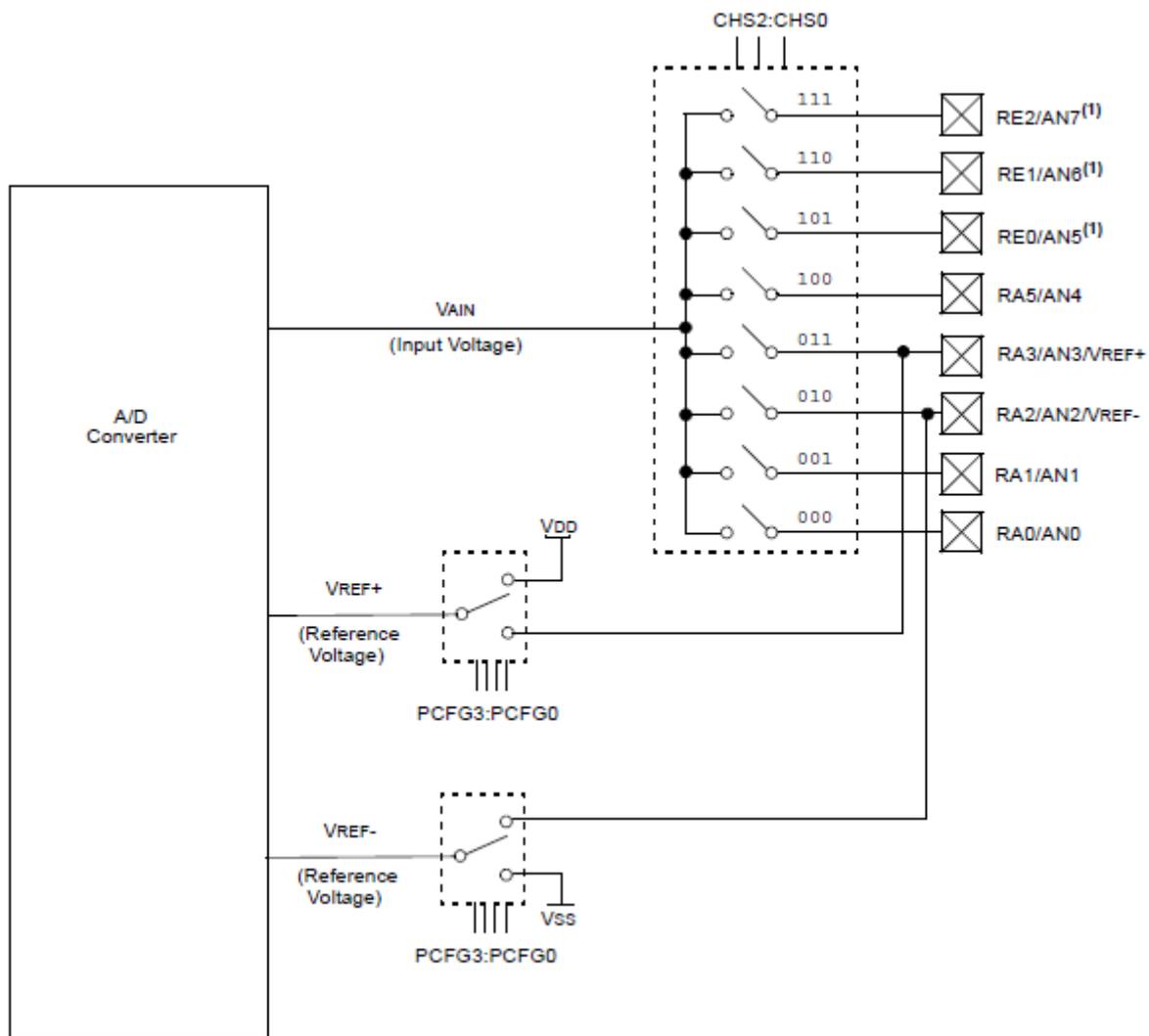


圖 4.9 內嵌 A/D 轉換器方塊圖

綜合以上介紹，歸納出單晶片 PIC16F877A 之 A/D 轉換器的操作步驟依序如下：

- (1) 設定 A/D 模組，規劃 ADCON1
- (2) 規劃 ADCON0
- (3) 如果使用到 A/D 中斷的話，則須清除 ADIF，並設定 ADIE、GIE 等為 1。
- (4) 等待類比數位轉換器之取樣電容至少 20uS。
- (5) 將 ADCON0 的第 2 個位元(GO/DONE)設定為 1，使 A/D 轉換器開始轉換。
- (6) 檢查上述位元(GO/DONE)是否變成 0，以等待 A/D 完成，或者是讓 A/D

轉換器在轉換完成之後，自動對微處理器產生中斷。

(7)如果不更換類比輸入的通道，則只需重複步驟 3~5，就可以做下一次的對比數位轉換。而如果輸入通道必須改變，則必須回到步驟 1。

4.3.3 單晶片-最大功率追蹤

最大功率追蹤之控制，因為需要計算功率，並比較前後功率之差異，以及前後電壓、電流之大小，若以類比電路來設計控制器時，則需要使用昂貴的乘法器、延遲電路及比較器等電路。為減少電路複雜度、功率損失及降低成本，故本文採用 Microchip 公司所設計的 8 位元單晶片 PIC16F877A 作為控制核心，來實現太陽能電池模組最大功率追蹤控制器。利用單晶片內建 A/D 轉換器，提供太陽能電池輸出電壓及電流之類比訊號轉換用，以及鋰離子電池端電壓及電流之類比訊號轉換用。利用單晶片內建 PWM 模組，並將輸出頻率設計為 20 kHz，以驅動昇壓型 DC/DC 轉換器。本系統除了具有最大功率追蹤控制之功能外，而且還有監控鋰離子電池狀態的功能，可有效地避免鋰離子電池過度充電之情形發生，以有效地延長電池之使用壽命。由於使用單晶片設計，故讓本太陽能電池輔助電源系統之硬體電路更簡單，太陽能輔助電動自行車系統架構圖如圖 4.10 所示。

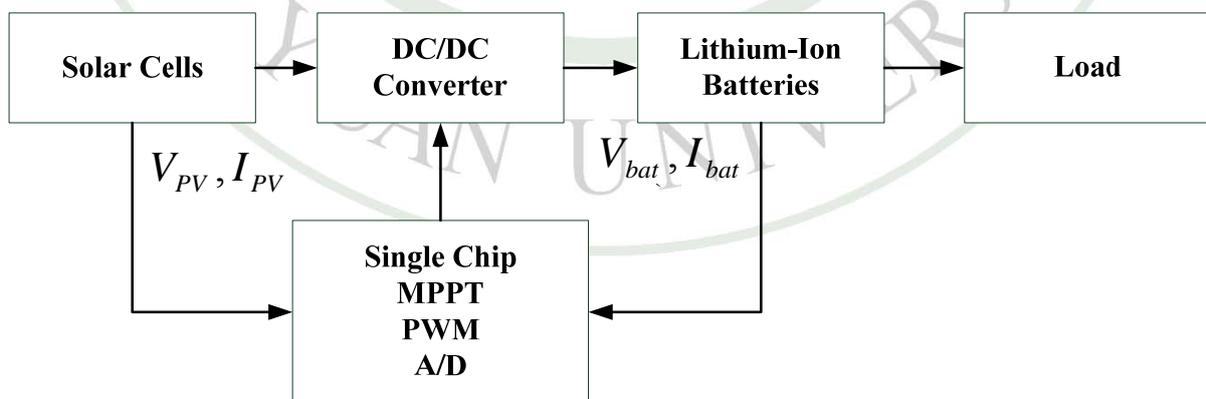


圖 4.10 太陽能輔助電動自行車系統架構圖

4.4 電力電子昇壓型轉換器設計

昇壓型轉換器(boost converter)[20][21]，是所有直流對直流轉換器中的基本架構之一。由於輸出直流電壓 V_o 高於輸入直流電壓值 V_{in} ，故稱為昇壓型直流對直流轉換器；與傳統轉換交流電壓用的昇壓變壓器功能很類似。

圖 4.11 所示即為昇壓型直流對直流專換器的基本電路，亦由四個基本電路元件所構成：功率半導體切換開關 S 、二極體 D 、電感器 L 、電容器 C 。當開關導通時，二極體反向偏壓，輸入電能儲存於電感，負載由電容提供；當開關截止時，負載吸收輸入及儲存於電感中的電能。同前，假設輸入電容非常大在穩態下 $v_o(t) \cong V_o$ 。

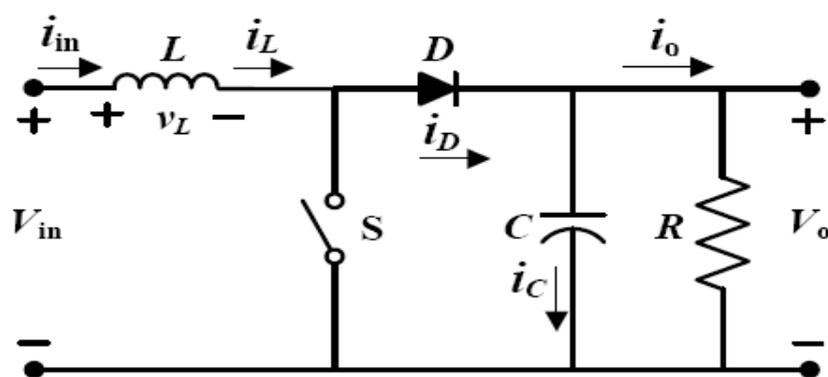


圖 4.11 昇壓型直流-直流轉換器

圖 4.11 所示為電感電流在連續 $[i_o(t) > 0]$ 之穩態工作波形。由穩態下電感電壓一週期之平均值為 0 可得，

$$V_{in}t_{on} + (V_{in} - V_o)t_{off} = 0 \quad (4-8)$$

等號兩側除以 T_s ，重新整理可得，

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1-D} \quad (4-9)$$

假設電路為無損失， $P_{in} = P_o$ ，

$$\therefore V_{in} I_{in} = V_o I_o$$

$$\text{且 } \frac{I_o}{I_{in}} = (1 - D) \quad (4-10)$$

圖 4.11-1 及圖 4.11-2 中的 SW 可以用短路及開路兩種狀態來分別代表 SW 在 ON 及 OFF 下的電路動作。

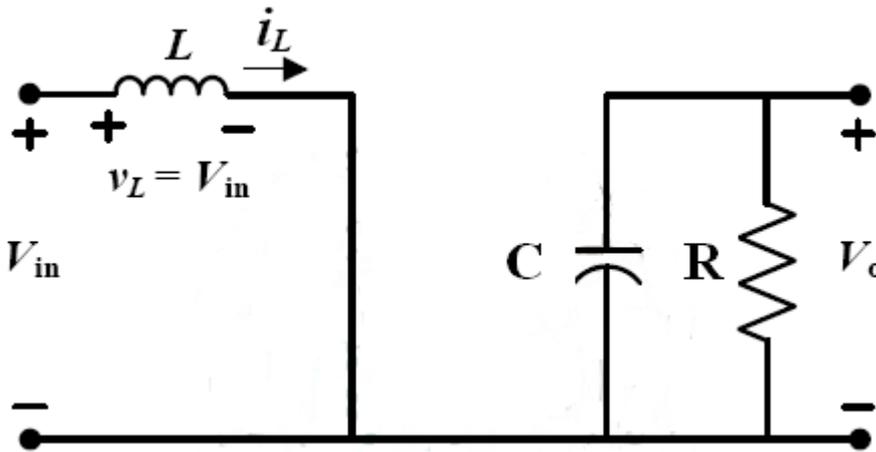


圖 4.11-1 開關導通

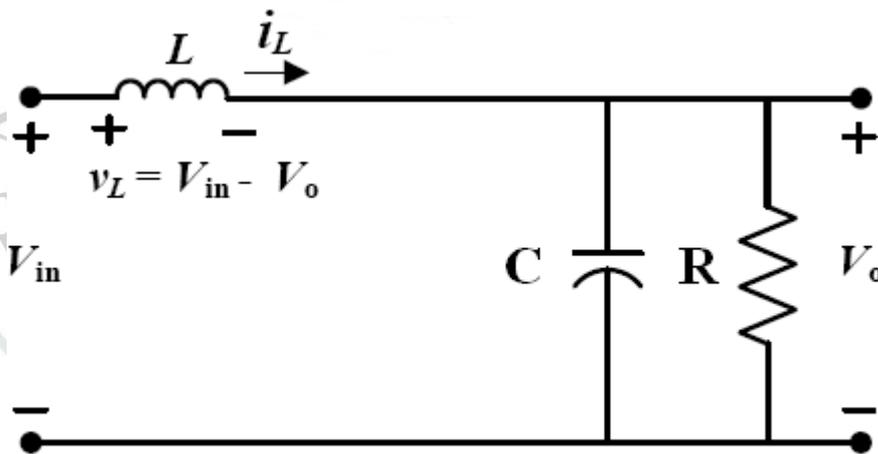


圖 4.11-2 開關截止

4.4.1 Boost 轉換器電感之設計

Boost 轉換器是一種昇壓型轉換器[22]，其電感值之決定是電路設計中非常重要的一環；昇壓型轉換器中(如圖 4.11)在 CCM 與 DCM 的操作邊界下其電感電壓與電流波形如圖 4.12 所示。

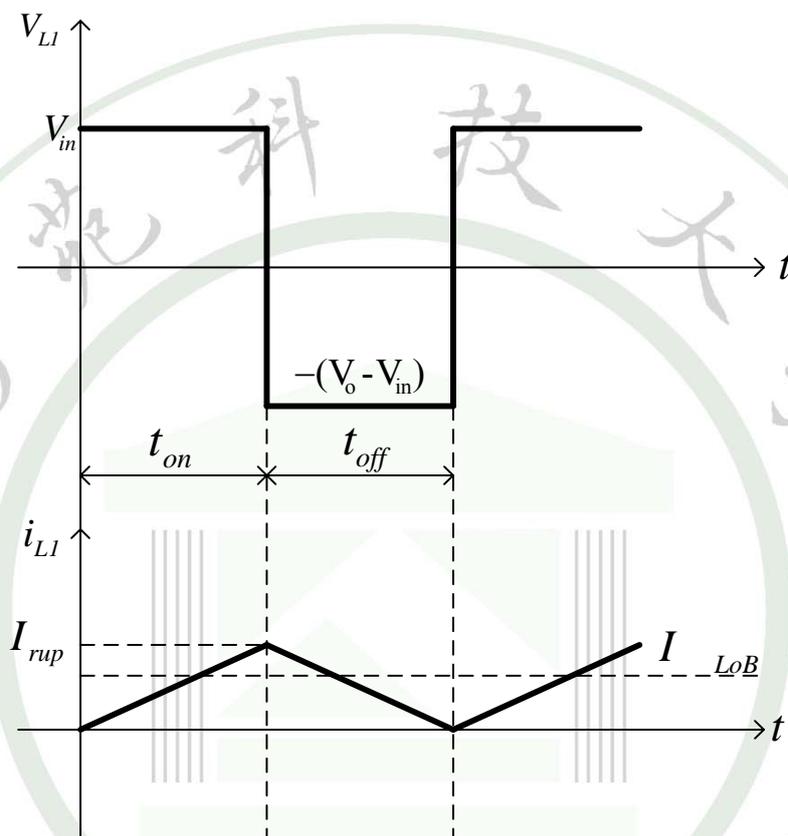


圖 4.12 在 CCM 與 DCM 邊界下肢電感電壓和電流波形

由圖 4.12 可得知，在 CCM 與 DCM 邊界下之平均電感電流 I_{LoB} 剛好等於一半的漣波電流 I_{rup} ，即為

$$I_{LoB} = \frac{1}{2} I_{rup} \quad (4-11)$$

$$= \frac{V_{in}}{2L_1} t_{on} = \frac{V_{in}}{2L_1} DT_s \quad (4-12)$$

$$= \frac{V_o - V_{in}}{2L_1} t_{off} = \frac{V_o - V_{in}}{2L_1} (1 - D)T_s \quad (4-13)$$

由式(4-12)之 Boost 轉換器輸出特性可以推導出輸出電流的平均值

$$I_{OB} = I_{LoB}(1-D) = \frac{V_{in}T_s}{2L_1}D(1-D) \quad (4-14)$$

又由於 $V_o = \frac{V_{in}}{(1-D)}$ ，因此式(4-14)可以改寫成

$$I_{OB} = \frac{V_oT_s}{2L_1}D(1-D)^2 \quad (4-15)$$

當輸出電流大於臨界電流時，轉換器則操作在連續導通模式，即

$$I_o > I_{OB} = \frac{V_oT_s}{2L_1}D(1-D)^2 \quad (4-16)$$

最大的 I_{OB} 發生在 $D = D_{\min}$ ，也就是當輸入電壓最高時。在這些條件下，電感值必須大於 L_B 以確保 CCM 操作，亦即

$$L_1 > L_B = \frac{V_oT_s}{2I_{OB}}D_{\min}(1-D_{\min})^2 \quad (4-17)$$

4.4.2 Boost 轉換器電容之設計

由於 Boost 轉換器的輸出電容必須濾除掉很大的漣波電流，其重要性比 Buck 轉換器的輸出電容來的高出許多。在穩態方面，電容器的容值選擇主要是依據所允許的最大輸出電壓漣波而定；不過如果有 Hold-up 時間的考量，則從其思量[22]。如圖 4.13 所示為轉換器操作在 CCM 之二極體電流和輸出電壓波形，若假設只有平均電流會流到輸出負載，則所有漣波電流將會流入電容，因此根據安培-秒平衡原理，可知 $Q_A = Q_B$ ，而且電容之電壓漣波 V_{rp} 可求得為

$$V_{rp} = \frac{Q_A}{C_o} = \frac{I_oDT_s}{C_o} \quad (4-18)$$

$$= \frac{V_o}{R_o} \cdot \frac{DT_s}{C_o} \quad (4-19)$$

由式(4-19)可將電壓漣波百分比表示為

$$\frac{V_{rp}}{V_o} \times 100\% = \frac{DT_s}{R_o C_o} \times 100\% \quad (4-20)$$

若已知電壓漣波 V_{rp} 之值，則可求得電容值為

$$C_o = \frac{I_{o,max} D_{max} T_x}{V_{rp}} \quad (4-21)$$

在此要特別指出，由於在 Boost 的輸出端是由二極體控制電流，是屬於脈衝型的電流，所以流過電容的電流會很大，也因此電容之 ESR 對輸出漣波的影響就很大。一般而言，要選用低 ESR 之電容，一方面對降低漣波很有助益，一方面對降低電容溫升也有幫助，所以也常採用多顆電容並聯的方式來降低 ESR 和分散熱源。

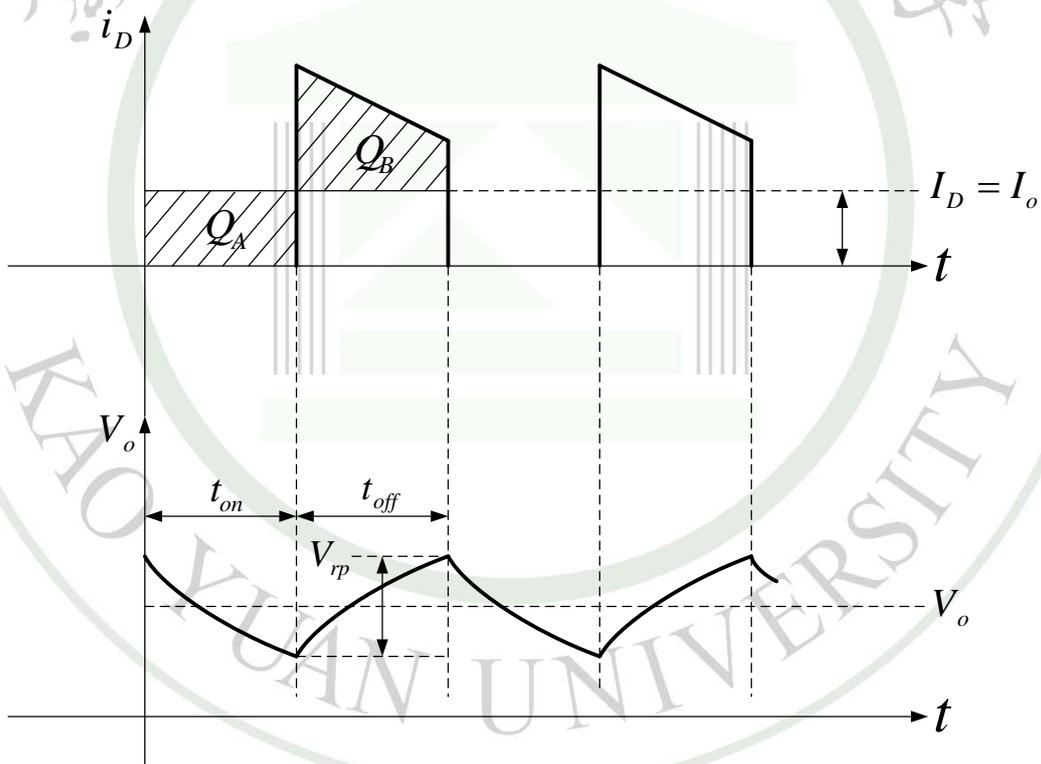


圖 4.13 二極體電流與輸出電壓波形

圖 4.14 為昇壓型 DC/DC 轉換器，採用 MOSFET 取代昇壓型 DC/DC 轉換器之二極體，藉由同步整流來減低功率損耗。由於二極體因 PN 接面關係，導通時有順向偏壓，約 0.6V~0.7V，所以二極體導通時將會產生相當大的導通損耗，且其亦需要較大的散熱片以供冷卻。同步整流器基本上是利用 MOSFET 內部既有的特性，導通時將存在著相當低的導通電阻，故可提高 DC/DC 轉換器之效率。

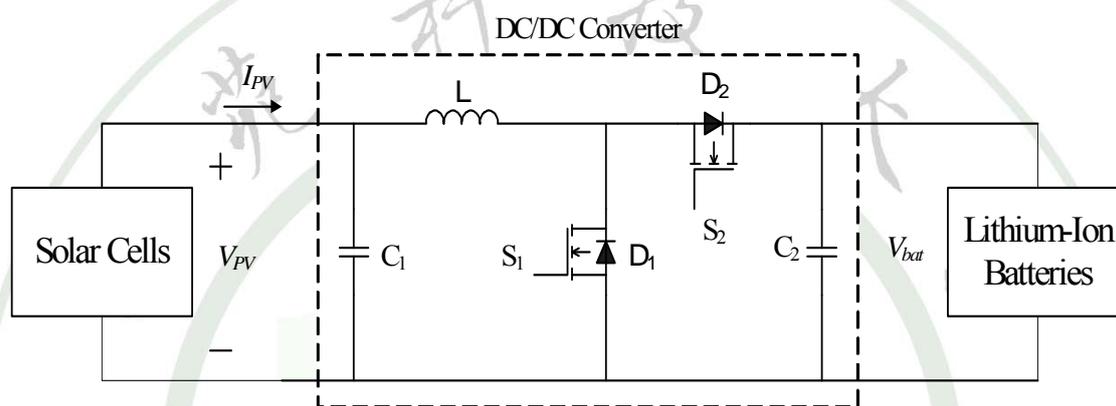


圖 4.14 昇壓型 DC/DC 轉換器

本文所提之太陽能電池輔助電動自行車的動作流程圖如圖 4.15 所示。當太陽能電池輸出電壓 V_{PV} 小於太陽能電池輸出電壓所設定值之最小值 V_{PV_min} 時，代表太陽能電池所產生的功率過小，沒有發電效益，那麼則不進行能量之轉換，此時系統將繼續讀取電壓值，然後再做判斷。

若太陽能電池輸出電壓 V_{PV} 大於 V_{PV_min} 時，將再比較其是否大於鋰離子電池之最大充電電壓限制值 V_{bat_max} ，若小於鋰離子電池之最大充電電壓限制值 V_{bat_max} ，則系統開始進入最大功率追蹤之模式，否則將進入電池定電壓控制之模式。

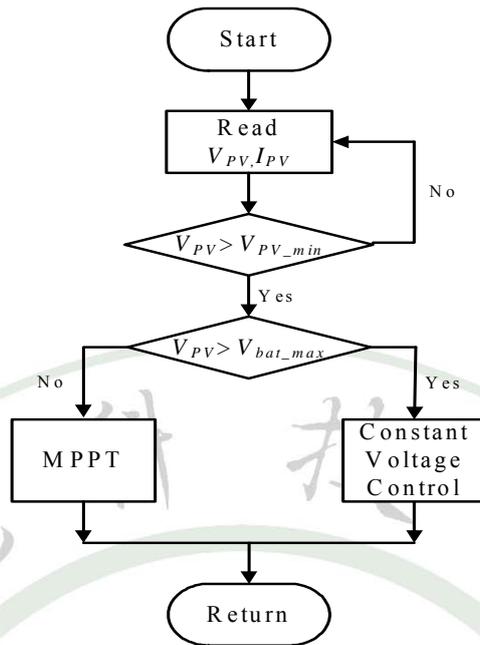


圖 4.15 太陽能電池輔助電動自行車的動作流程圖

4.5 電池定電壓控制方法

當鋰離子電池在充電初期或尚未接近充飽狀態時，太陽能電池將以 MPPT 的方式來對鋰離子電池進行充電，以發揮太陽能電池之最大效益。而當鋰離子電池接近充飽狀態時，鋰離子電池電壓達到充電電壓限制時，必須降低充電電流，以避免鋰離子電池過度充電，故將太陽能電池之控制方式，由 MPPT 改為定電壓輸出之控制模式。單一顆鋰離子電池充飽電時之電壓約為 4.1V 或 4.2V，耗電時電壓會下降，放電截止電壓為 2.5V 或 3V。

太陽能電池之放電電流命令值 I_{PV}^* ，可由鋰離子電池之電壓充電命令值 $V_{bat_set}^*$ 與實際值 V_{bat} 之誤差再經由比例-積分電壓調節控制器 G_v 而得，其中 k_p 及 k_i 分別為電壓調節控制器之比例及積分控制器增益。電池之放電電流命令值 I_{PV}^* 可表示為

$$I_{PV}^* = G_v \times (V_{bat_set}^* - V_{bat}) \quad (4-22)$$

$$G_v = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (4-23)$$

電感電流之變換率如方程式(4-24)所示，其中 T_s 為功率半導體開關之切換週期。

$$\frac{d}{dt} I_{PV} \approx \frac{1}{T_s} \times (I_{PV}^* - I_{PV}) \quad (4-24)$$

$$L \frac{d}{dt} I_{PV} = V_{PV} - (1 - d_{S1}) \times V_{bat} \quad (4-25)$$

將(4-24)式代入(4-25)式可得

$$d_{S1} = 1 - \frac{1}{V_{bat}} \times \left[V_{PV} - \frac{L}{T_s} (I_{PV}^* - I_{PV}) \right] \quad (4-26)$$

根據(4-26)式可得鋰離子電池定電壓充電之控制方塊圖如圖 4.16 所示

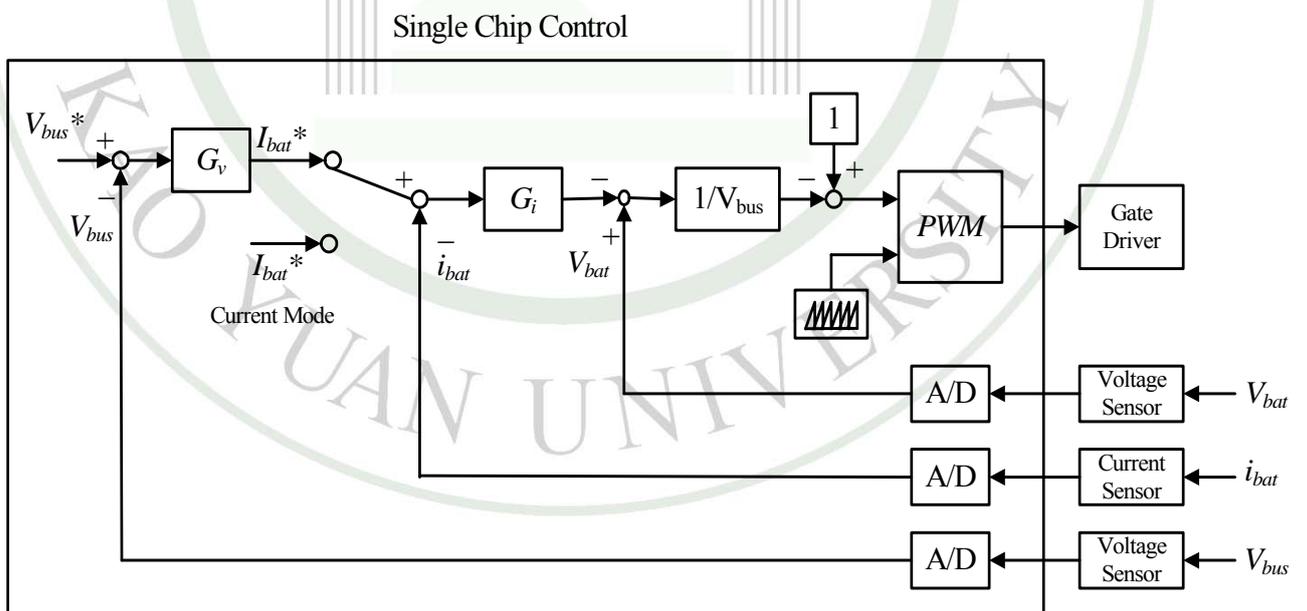


圖 4.16 電池定電壓充電之控制方塊圖

4.6 太陽能電池摺疊設計

太陽能電池板以薄膜型光伏陣列組成，於騎乘期間或不使用太陽能電池時，可以將太陽能電池板摺疊起來，並收納於座椅後方。當要使用太陽能電池時，再予展開，展開時既可遮陽又可發電。太陽能電池板之摺疊與展開如圖 4.17 所示。



圖 4.17 太陽能電池板之摺疊與展開

4.7 光源產生器

為了追蹤太陽能電池之最大功率點，因此在本實驗中製作了一個模擬光源以提供太陽能電池使用。雖然接近太陽光的模擬光源是為氙氣燈泡，但本實驗只是要得到可供參考的光源，以方便做最大功率追蹤控制器之設計，故在成本考量下，使用一般的白熾燈泡做為模擬光源。並搭配日照計做日照強度的測量以提高實驗模擬太陽光日照時的精準度。由於其與太陽光光源特性仍有差異，因此本光源產生器僅在設計階段初期使用，至於之後有一章節之紀錄實測數據，並以實測資料依照實際太陽光做實驗，並紀錄日照度大小。

第五章 硬體設計

5.1 系統硬體設計

硬體電路分成四個部份，控制器、驅動模組、直流-直流轉換器與回授模組等，硬體架構如圖5.1所示。

開始由控制器輸出PWM訊號，經過驅動模組來驅動直流轉換器後，將回授模組量測的電壓送回控制器，持續作循環檢測。

如圖5.2所示，電源由電池24V供應，經DC-DC轉換器成正、負15V，供應驅動模組、控制器、回授模組，再用編號為 L7805 穩壓IC成5V，供應驅動模組、控制器。由電池24V供應，再用編號為 L7815 穩壓IC成15V，供應光耦合器作隔離使用。

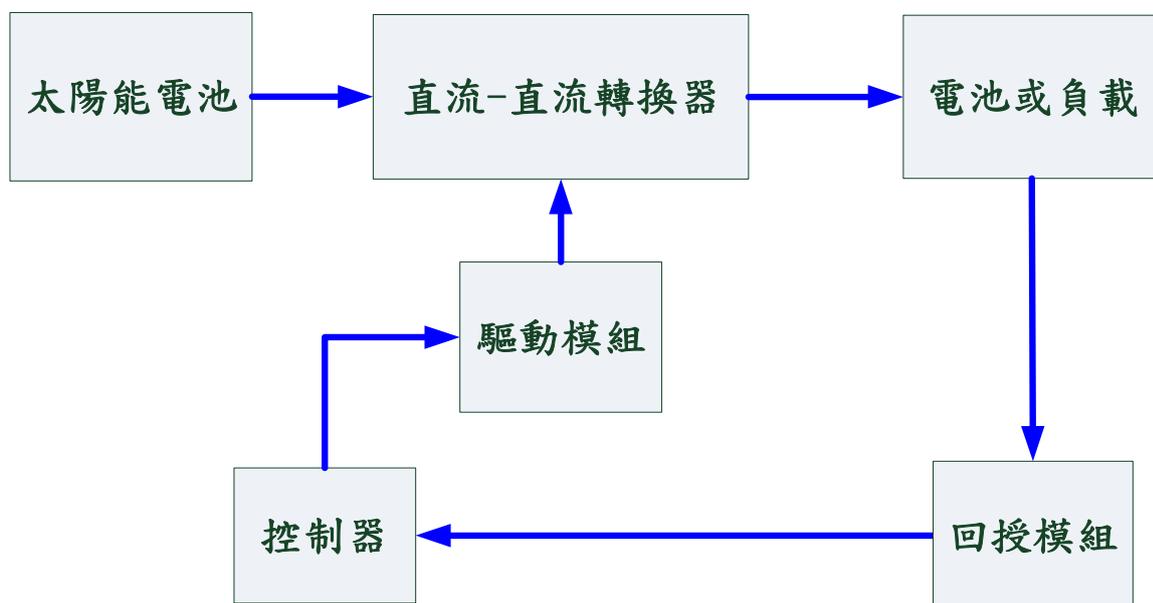


圖 5.1 硬體架構

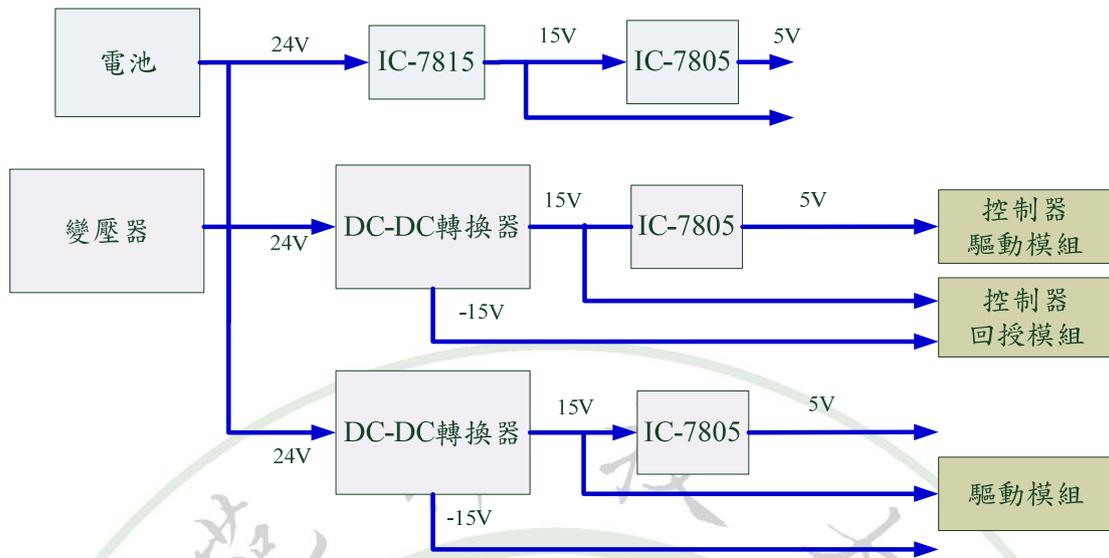


圖 5.2 電源電路方塊圖



圖 5.3 電源電路板實體圖

5.2 控制器

由圖4.4所示，利用編號為 TL074 是高速的J - FET輸入運算放大器結合良好的匹配，來製作出一個鋸齒波，功率半導體切換頻率25kHz，電壓值為12V，週期為40us，如圖5-5(CH1)所示，具有高轉換率，低輸入偏置和失調電流以及低失調電壓溫度係數。再用編號為 LM311 可以系統地隔離，到地面上，正電源或負電源，輸出可以驅動負載提頻閃功能失調的平衡和提供和輸出可絲或操作，用比較器方式輸出脈波寬度調變訊號，功率半導體切換頻率25kHz，電壓值為12V，如圖5.5(CH2)所示。

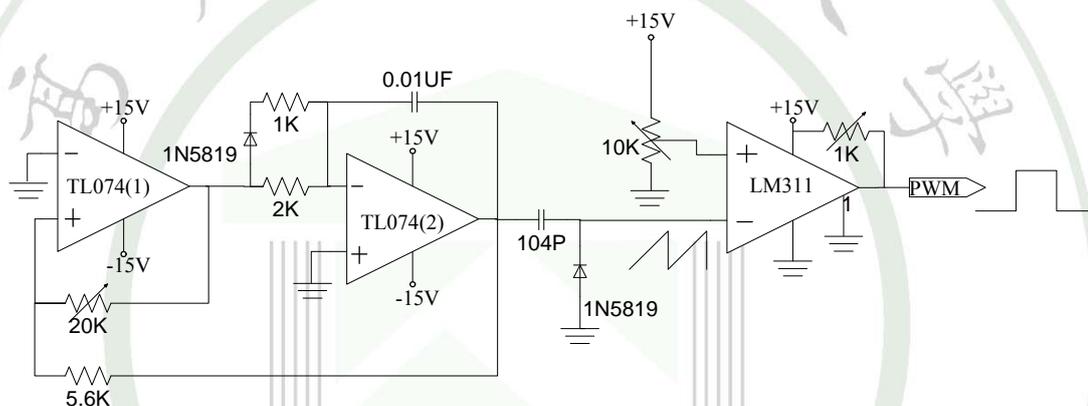


圖 5.4 脈波寬度調變訊號電路圖

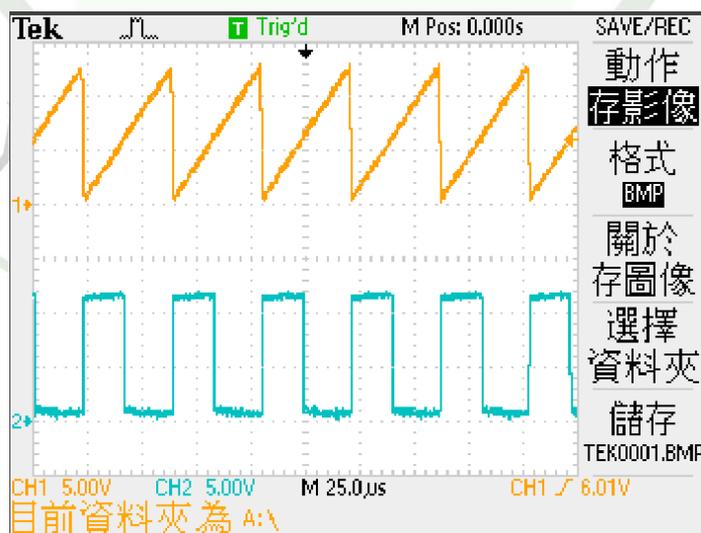


圖 5.5 脈波寬度調變訊號輸出波形圖

5.3 驅動模組

由圖5.6所示，將控制器輸出的脈波寬度調變訊號，由圖5.7(CH1)所示，輸入到高速光耦合編號為 HCPL2601 進行訊號隔離。以編號為 IR2110 之閘級輸出放大器，目的為提升驅動電流，進而驅動一個N通道功率電晶體開關，如圖5.7(CH3)所示。

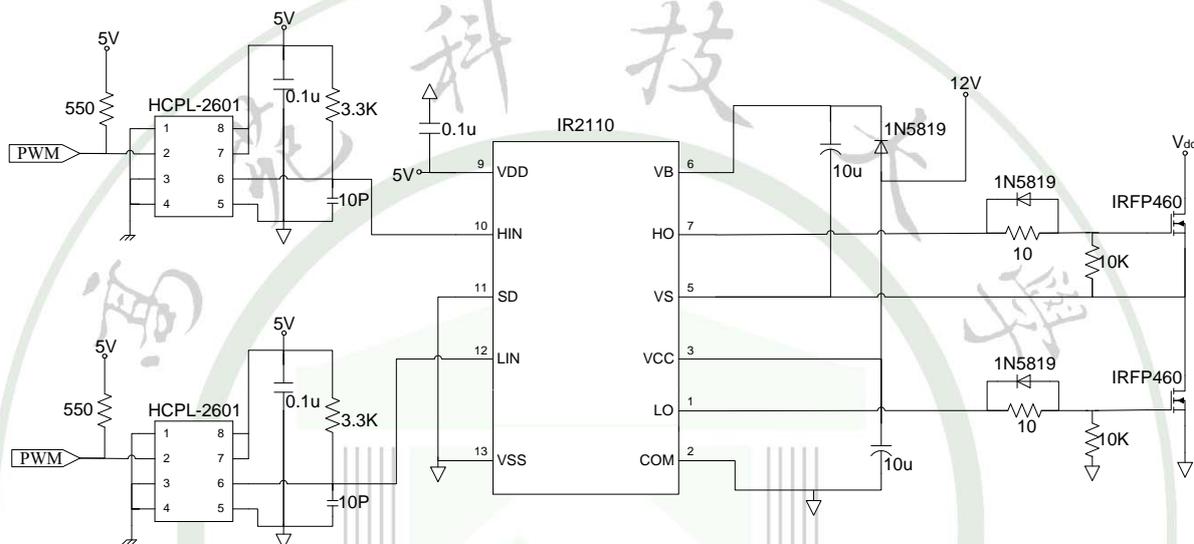


圖 5.6 驅動器電路圖

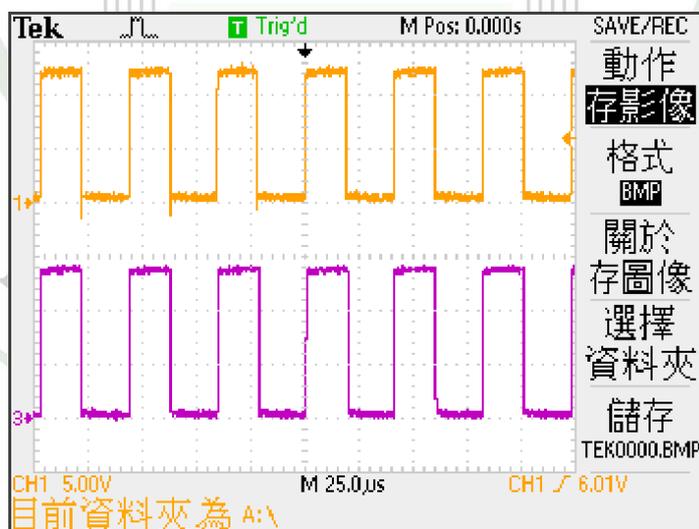


圖 5.7 控制器與驅動器輸出波形圖

5.4 直流-直流轉換器

直流-直流轉換器之核心電路如圖5.8此轉換器也稱升壓型轉換器，其作用是將低輸入電壓轉換成高輸出電壓，輸出電壓(V_o)由開關切換之責任比(D)決定[23]-[24]。

直流-直流轉換器之輸出電壓為：

$$V_o = \frac{1}{1-D} \times V_{IN} \quad (5-1)$$

D為開關切換之責任比：

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (5-2)$$

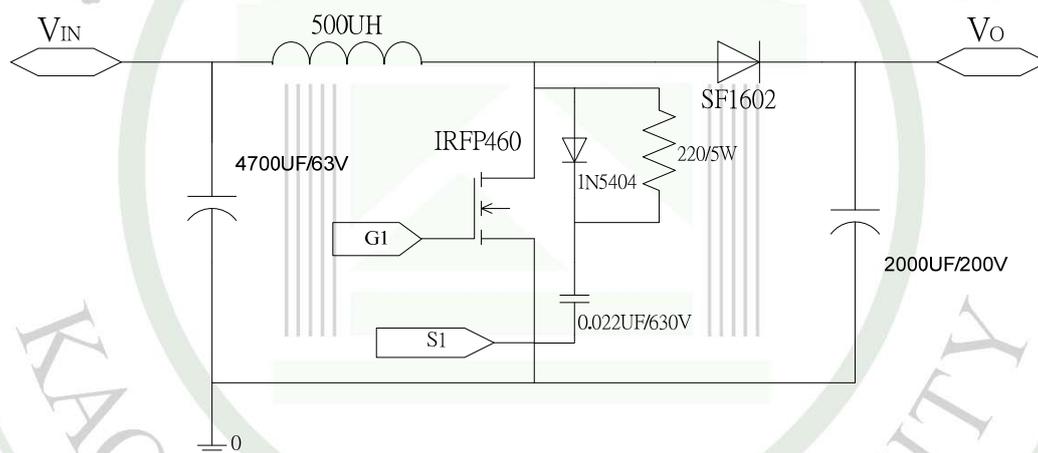


圖 5.8 直流昇壓型轉換器電路圖

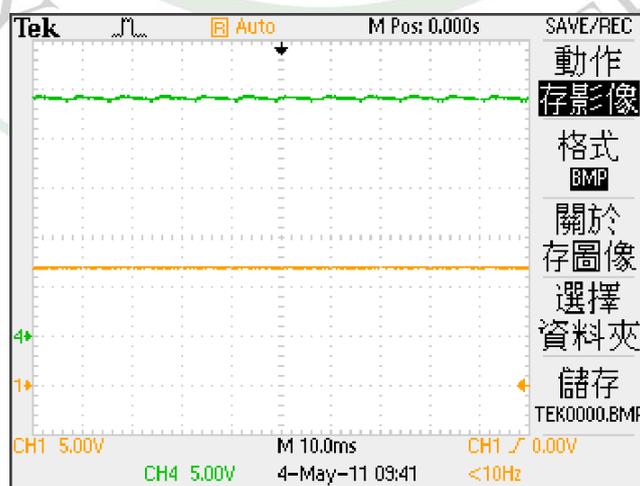


圖 5.9 轉換器輸出波形圖

5.5 回授模組

圖5.10電壓回授電路，此為分壓電路之運算放大器，圖中利用 R_1 調整輸出電壓 V_o 跟開迴路時輸出電壓一樣，即可做成閉迴路系統。

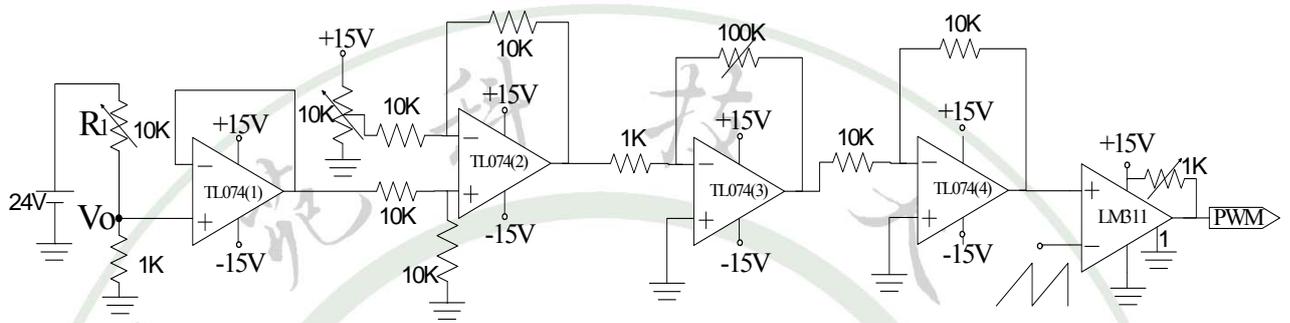


圖 5.10 回授系統電路圖

第六章 實測結果

本實驗採用 18V/0.9A 太陽能電池組，重量約為 720g，輸出功率 16.2W。其是由小片的太陽能電池板所組成，本實驗使用 18 片太陽能電池板作串並聯。

單一片太陽能電池板之標準工作功率 0.9 W、操作電壓 (V_{mpp}) 3V、操作電流 (I_{mpp}) 0.3A、重量 40g、尺寸 19.5×14×0.1cm、面積 0.021 m^2 [16]。本文所設計之太陽能輔助電源系統雛型如圖 6.1 所示，其中，昇壓型 DC/DC 轉換器之規格及參數如下：輸出電流 5A、功率半導體切換頻率 20kHz、單晶片為 PIC16F877A、L 為 500uH、C1 為 2200uF/35V、C2 為 470uF/50V、MOSFET 為 IRFP460。

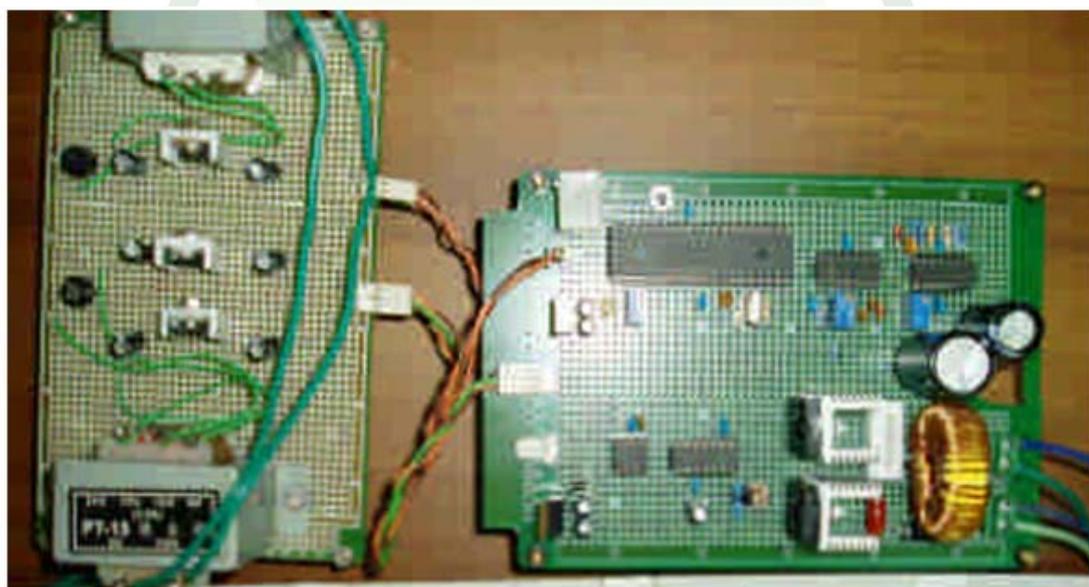


圖 6.1 太陽能輔助電源系統雛型

圖 6.2 為系統追蹤太陽能電池之最大功率點的結果，此時日照度 $520W/m^2$ ，鋰離子電池之電壓為 28V，圖中顯示太陽能電池輸出電壓、電流及昇壓型 DC/DC 轉換器之 V_{GS} 波形，最佳工作電壓值為 17.5V、電流值為 0.5A、功率為 8.75W。

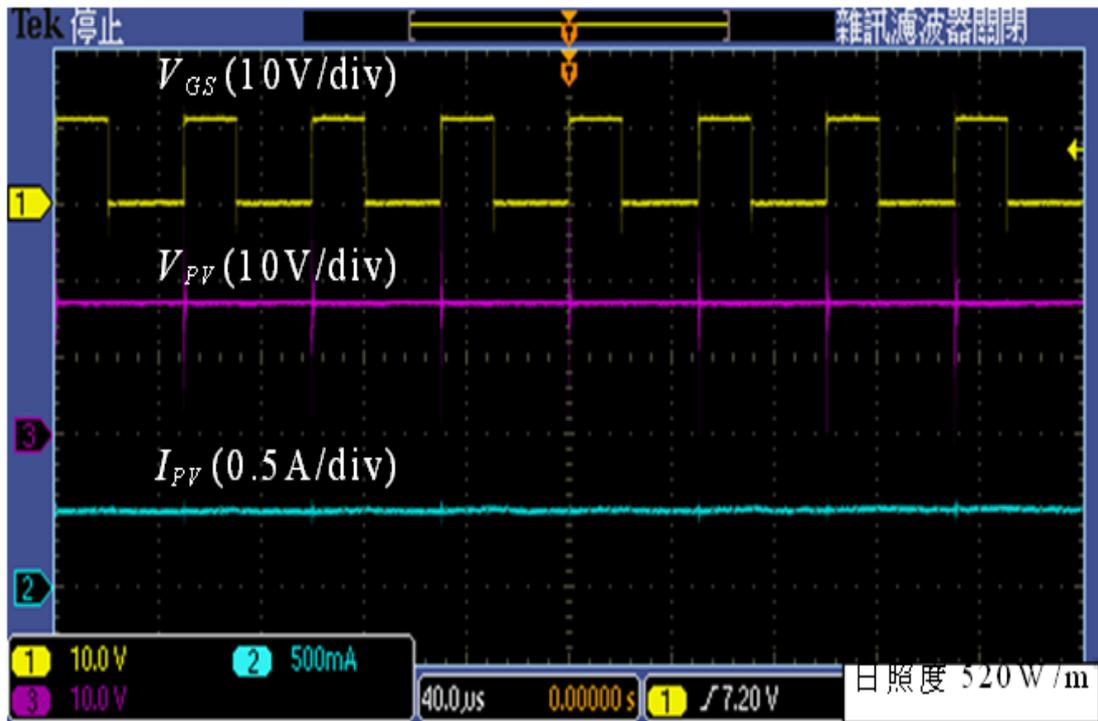


圖 6.2 V_{GS} 及太陽能電池輸出電壓及電流波形

圖 6.3 為太陽能電池操作於日照度在 $710\text{W}/\text{m}^2$ 時之輸出電壓、電流及昇壓型 DC/DC 轉換器 V_{GS} 波形圖，最佳工作電壓值為 17.8V 、電流值為 0.78A 、功率為 13.9W 。

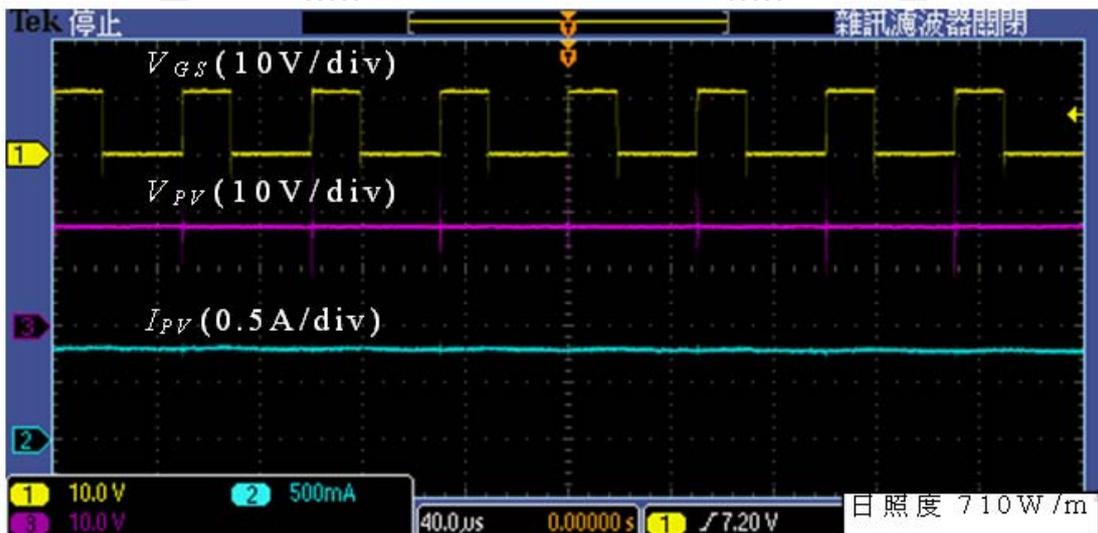


圖 6.3 V_{GS} 及太陽能電池輸出電壓及電流波形

圖 6.4 為大氣環境變化時，系統追蹤太陽能電池之最大功率點之動態波形，從圖顯示本系統可以很快追蹤到最大功率點。

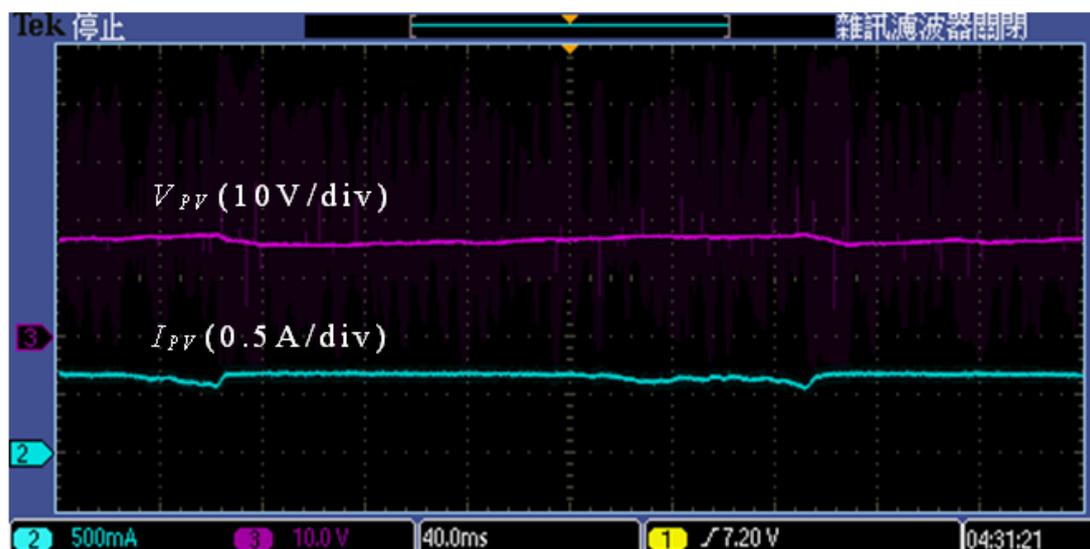


圖 6.4 太陽能電池輸出電壓及電流之動態波形

KAO YUAN UNIVERSITY

圖 6.5 為太陽能板在電動自行車上的整體配置圖，將 14 片太陽能薄膜電池板作串並聯使用；展開時的實際圖(圖 6.5)與折疊後的收納圖(圖 6.6)，以及電源驅動電路板的配置箱(圖 6.7)。此系統可以依照不同種類的電動自行車做適當的調整規劃；規劃其電源動力箱的空間分配以及其動力需求，若往後有市面上有發展出更高效率水準的太陽能電池板，定能將其功率大大的提升，未來更可以將驅動昇壓電路模組微型化，以節省空間，如此一來，將會使此系統變得更加完善。



圖 6.5 太陽能發電板展開時之實際圖



圖 6.6 太陽能發電板摺疊收納時之實際圖



圖 6.7 電源驅動電路板的配置箱

第七章 結論

本論文使用太陽能電池來輔助電動自行車電力，以改善電動自行車騎乘里程短及充電時間長之缺點。本論文提出一個新的可摺疊式之設計構想，使太陽能電池板易於摺疊及展開，其平時收納、用時展開，展開時既可遮陽又可發電。本論文採用增量電導法作為最大功率之追蹤控制器，並以 PIC16F877A 單晶片為控制核心，整合鋰離子電池以防止電池過充問題，藉由單晶片內建的 A/D 轉換器量測太陽能電池輸出電壓及電流，及 PWM 模組驅動昇壓型 DC/DC 轉換器，以簡化電路及降低成本。雖然受限於電動自行車上可安裝太陽能電池板之面積範圍，在初期僅完成 15~20W 太陽能電池輔助電動自行車系統，但現有系統電路能可擴充至 100W。

目前坊間電動自行車的充電模組只有車燈進行供電且面積較小，本論文所研究太陽能充電系統是對電動自行車動力電池模組進行充電，實驗所使用的太陽能薄膜版不僅可以增加接受太陽光的面積並可摺疊易收納，更減輕了原本太陽能板笨重的不方便，綜合以上條件這是電動自行車一項創新的突破。

參考文獻

- [1] Z. Salameh, F. Dagher, and W. A. Lynch, "Step-down Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic System," *Solar Energy*, Vol.46, No.1, pp.278-282, 1991.
- [2] P. Midya, P. T. Kerin, R. J. Turnbull, R. Reppa, and J. Kimball, "Dynamic Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Applications," *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Vol.2, pp.1710-1716, 1996.
- [3] P. Midya, P. T. Kerin, R. J. Turnbull, R. Reppa, and J. Kimball, "Dynamic Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Applications," *IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1996, PESC 1996 Record., 27th Annual, Vol. 2*, pp. 1710-1716.
- [4] L. Zhang, A. A. Amoudi and Y. F. Bai, "Real-Time Maximum Power Point Tracking for Grid-Connected Photovoltaic Systems," *Power Electronics and Variable Speed Drives*, No. 475, pp. 124-129, 2000.
- [5] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, and N. C. Voulgaris, "Development of a Microcontroller-Based Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 16, No. 1, January 2001, pp. 46-54.
- [6] H. S. H. Chung, K. K. Tse, S. Y. R. Hui and C. M. Mok, "A Novel Maximum Power Point Tracker for PV Systems," *IEEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, pp. 321-327, 2001.
- [7] K. H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, and M. Osakada, "Maximum Photovoltaic Power Tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric condition," *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 142, No. 1, January 1995, pp. 59-64.
- [8] S. J. Chiang, K. T. Chang, and C. Y. Yen, "Residential Photovoltaic Energy Storage System," *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, Vol. 45, No. 3,

pp. 385-394, 1998.

- [9] H. Kobayashi, K. Takigawa, E. Hashimoto, A. Kitamura and H. Matsuda, "Method for Preventing Islanding Phenomenon on Utility Grid with a Number of small PV System," Proceedings of IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 1991, pp. 695-700.
- [10] Takigawa, Kiyoshi (Central Research Inst of Electric Power Industry (CRIEPI)); Kobayashi, Hiromu Source: Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, v 1, 1994 1st World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion, 1994, pp. 1081-1084.
- [11] G. Nagasubramanian, E. P. Roth and D. Ingersoll, "Electrical and electrochemical performance characteristics of small commercial Li-ion cells", Battery Conference on Applications and Advances, pp. 91-96, 1999.
- [12] Shih-Jung Lai "Study on Estimation of Intelligent Residual Capacity of Li-ion Batteries" 2004
- [13] M. Gonzlaez, M. A. Perez, J. C. Viera, C. Carballo and A. Garrido, "A new, reliable and easily implemented NiCd/NiMH battery state estimation method", IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Vol. 2, pp. 1260-1264, 1999.
- [14] H. L. Chan, "A new battery model for use with battery energy storage systems and electric vehicles power systems", IEEE Power Engineering Society, Vol. 1, pp. 470-475, 2000.
- [15] <http://www.molicel.com/tw/about/aboutus1.htm> 首頁>型錄下載>動力電池>IBR27600A
- [16] <http://www.solarmio.com> 首頁>Standard Solar Cards>2SC1
- [17] 趙春棠, PIC 單晶片學習秘笈, 全威圖書有限公司, 2007
- [18] 盧春林, PIC1687X 微處理器技術精解, 標高電腦股份有限公司, 2006

[19] Microchip PIC16F87X Data Sheet 28/40-Pin 8-Bit CMOS FLASH

Microcontrollers

[20]Mohan.Undeland.Robbins/原著，江炫樟/翻譯，John Wiley&Sons,Inc

全華圖書股份有限公司,2007

[21] 王醴，電力電子學，高立圖書有限公司，2006

[22]EPARC 著，電力電子學綜論，全華圖書有限公司，2011

[23] M. J. Isaacson, M. E. Daman and R. P. Hollandsworth, “Li-ion batteries for space applications”, Energy Conversion Engineering Conference, pp. 31-34, 1997.

[24] T. Yanagihara and A. Kawamura, “Residual capacity estimation of sealed lead- acid batteries for electric vehicles”, Power Conversion Conference,Vol. 2, pp.943 -946, 1997.

