

國立交通大學

光電系統研究所

碩士論文

新型太陽能電廠熱影像檢測系統研發

Research and Development on New Solar Power
Plant Thermal Imaging Detection System

研究 生：陳宥任

指 導 教 授：黃得瑞 教授

中華民國一〇七年六月

新型太陽能電廠熱影像檢測系統研發

研究 生：陳宥任

Student : Yu-Jen Chen

指導 教授：黃得瑞 教授

Advisor : Der-Ray Huang

國立交通大學
光電系統研究所
碩士論文

A Thesis
Submitted to Institute of Photonic System
College of Photonics
National Chiao Tung University
in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master
in

Photonic System
June 2018

Tainan, Taiwan, Republic of China

中華民國 107 年 6 月

新型太陽能電廠熱影像檢測系統研發

研究生：陳宥任

指導教授：黃得瑞 教授

國立交通大學 光電系統研究所碩士班

摘要

一般而言，大面積的太陽能電廠不易檢測和維修，其檢測過程需要花費大量的人力和大量的時間，勢必需要一個快速且有效的檢測方式，去因應目前這個綠色能源崛起的時代。截止自今，最快速的檢測方式是結合無人載具和熱像儀對太陽能電廠進行拍攝，當太陽能電池組件部分損壞時，太陽輻射能量不能成功轉化為電能，會以熱能的形式儲存，換言之，受損區域的溫度會升高。利用這種熱效應現象，使用熱像儀來檢測受損區域。並觀察拍攝出來的熱影像中的熱斑分布狀況，雖然可以觀察出熱斑的分部狀況但沒辦法直接從熱像片中看出模組的衰減程度和光電轉換效率[1]，仍需要對毀損模組去坐進一步的量測，例如使用電激發光(electroluminescence, EL)才能觀察到裂紋或更細的問題。

本論文研究係以調整熱影像拍攝高度以提升目前檢測的準確度，以及某種程度的量化分析之後，獲得更多量測技術上所需參數。以達成直接使用熱感應攝影機完成太陽能電廠檢測，不須再以人工方式做進一步的細部檢測，並結合無人載具、熱像儀、GPS 和影像無線傳輸系統，以實現快速方便的即時圖像檢測系統。

本研究將相同的條件未損壞的 PV 模組作為比對，探索其 MTD(平均溫度差)，毀損面積和效率。並開發了一個程式來分析損壞程度並估算發電量。

關鍵字:空拍機檢測、熱影像、光伏模組損傷

Research and Development on New Solar Power Plant

Thermal Imaging Detection System

Student : Yu-Jen Chen

Advisor : Dr. Der-Ray Huang

Institute of Photonic System
National Chiao Tung University

ABSTRACT

Generally, the damage detection process of PV modules in a large area of photovoltaic system needs to take a lot of manpower with long time. A quick and effective way to detect possible damaged PV modules is a very important issue for managing the large area photovoltaic system. Nowadays, the fastest way to detect solar power plants is combining UAV and thermal imaging cameras. When the solar module is partially damaged, the solar radiation energy cannot be successfully converted into electrical energy, and the temperature of the damaged area will be increased. Using this phenomenon of thermal effect, we can use thermal imaging camera to detect the images of damaged areas. And observe the distribution of hot spots in thermal images but it still need other equipment to measure the damaged degree of PV module, Such as EL (electroluminescence) .

In order to complete whole solar power plant detection by using thermal images, we adjusted the height of UAV to improve the accuracy of detection and get more temperature on each PV module, that is, there is not necessary to measure PV module efficiency with other equipment, and we combined UAV, thermal imaging camera, GPS and video wireless transmission systems to achieve rapid and convenient instant image detection.

In this experiment, we measure the same conditions for undamaged PV module as a reference, we can explore the relationship between MTD (mean temperature difference) 、 damaged area and efficiency. A designed program to analyze the degree of damage and estimate the amount of power generated has been developed.

Key Word:UAV detection 、 thermal image 、 defect of PV moudules

誌謝

來到交通大學光電學院攻讀研究所的碩士學位期間，雖然只是短短的兩年，但比起以往求學的路上卻是經歷更多，因此感觸以及要感謝的人也很多，在這兩年的碩士生涯中，首先要感謝指導教授黃得瑞老師的教導，老師對於我們不僅僅是在專業領域和研究上的悉心指導，平時在教學以及討論時也是非常地仔細和耐心，對於在進入社會前最後的學校學習過程中帶來非常多的幫助及認知，而這些都使我在學業、研究及往後要進入職場上受益良多。

此篇論文能夠順利完成，也要特別感謝實驗室中包括學長姊、同學、學弟妹的幫忙，其中要感官任賢、葛洛綺、林家偉、許宸銘、廖俊明、李征豫、張昭信和江維祥學長對於研究中如儀器架設、實驗以及其他許多事物都不吝給予協助，而面對問題時也能互相討論與扶持，此外也要特別感謝張世鼎、黃郁滋和謝雅祺綠能科學城的三位分別在不同部分中都提供非常多的支持和協助，這段大家一起的奮鬥的經歷讓我學到了很多，也相信能夠做為我未來的助力。

最後我也要感謝我的家人對於我的支持，才能順利完成我的碩士論文並且取得碩士的學位。



1896

目錄

摘要	i
ABSTRACT	ii
誌謝	iii
目錄	iv
表目錄	vi
圖目錄	vii
第一章 緒論	1
1.1 能源現況	1
1.2 文獻回顧	2
1.3 研究動機與目的	4
第二章 基礎原理	6
2.1 太陽能光譜	6
2.1.1 太陽光角度	8
2.2 太陽能電池之原理	10
2.2.1 太陽能電池之等效電路	12
2.3 太陽能電池的種類	15
2.3.1 單晶矽太陽能電池	17
2.3.2 多晶太陽能電池	18
2.3.3 非晶太陽能電池	19
2.3.4 化合物太陽能電池	20
2.4 紅外線熱像原理與技術	21
2.4.1 紅外線概述	21
2.4.2 紅外輻射基本理論	26
2.4.3 紅外線熱像技術	34
第三章 實驗儀器與實驗方法	35
3.1 實驗儀器	35
3.1.1 使用程式語言之簡介	41
3.2.1.1 Java	41
3.1.1.2 Eclipse	43

3.2 實驗方法	44
3.2.1 戶外環境監控實驗	44
3.2.2 新型太陽能電廠熱影像檢測系統研發	45
3.2.1.1 热像/即时图像显示	45
3.2.1.2 模組損傷計算	46
3.2.1.3 結果顯示	46
3.2.3 直接利用熱相片推算效率實驗流程及實驗方法	47
3.2.4 太陽能模組損壞種類分析流程及實驗方法	50
3.2.4.1 陰影效應 (Shadow effect)	50
3.2.4.2 蝸牛紋(Snail trails)	51
3.2.4.3 表面毀損 (PV module with broken front glass)	52
第四章 結果與討論	53
4.1 戶外環境監控實驗數據分析	53
4.2 新型太陽能電廠檢測系統實測	55
4.2.1 不同外界溫度對 MTD 影響實驗數據及分析	64
4.3 直接利用熱相片推算效率實驗數據分析	66
4.4 太陽能損壞種類實驗數據分析	71
4.4.1 陰影面積對太陽能模組的影響及分析	71
4.4.2 蝸牛紋對太陽能模組的影響及分析	79
4.4.3 表面毀損對太陽能模組的影響及分析	83
第五章 結語與未來研究發展	87
參考文獻	90
附件	93

表目錄

表 2.4.1-1 紅外輻射相關的物理常數.....	22
表 3.1-1 空拍機規格參數.....	35
表 3.1-2 热像儀規格參數.....	36
表 4.2-1 實際量測太陽能模組數據.....	63
表 4.2.1-1 不同大氣溫度對 MTD 影響實驗結果	65
表 4.3-1 溫度效率量測數據.....	67
表 4.3-2 利用熱相片估算發電量實驗結果.....	70
表 4.4.1-1 水平遮蔽方式實驗結果.....	72
表 4.4.1-2 鉛直遮蔽方式實驗結果.....	74
表 4.2.2-1 為蝸牛紋對太陽能模組的影響實驗結果.....	82
表 4.4.3-1 表面毀損對太陽能模組的影響實驗結果.....	85
表 4.4.3-2 毀損面積實驗結果.....	86

圖目錄

圖 1.2-1 手持熱感應攝影機拍攝圖	2
圖 1.2-2 PV Guider 公司拍攝的熱影像.....	3
圖 1.2-3 毀損太陽能模組 EL 影像[5]	3
圖 1.3-1 全球日照分布圖	5
圖 1.3-2 太陽能電廠熱影像空拍圖	5
圖 2.1-1 太陽光入射於地面之情形	6
圖 2.1-2 太陽光入射角與地表之間夾角	7
圖 2.1-3 太陽光輻射的波長分布圖	7
圖 2.1.1-1 太陽運行模式	8
圖 2.1.1-2 太陽仰角示意圖	9
圖 2.2-1 太陽能電池結構圖	10
圖 2.2-2 太陽能電池之內建電場示意圖	11
圖 2.2.1-1 太陽能電池之等效電路	12
圖 2.2.1-2 理想太陽能電池等效電路	14
圖 2.2.1-3 實際太陽能電池輸出 I-V 曲線	14
圖 2.3-1 太陽能電池的種類分類-以材料分類.....	15
圖 2.3.1-1 單晶矽太陽能電池	17
圖 2.3.2-1 多晶矽太陽能電池	18
圖 2.3.3-1 非晶矽太陽能電池	19
圖 2.3.4-1 化合物太陽能電池結構	20
圖 2.4.1-1 三種熱傳遞方式組合示意圖	22
圖 2.4.1-2 紅外線波段頻譜	24
圖 2.4.1-3 海平面水平路徑的大氣透射率(大氣窗口分布圖).....	25
圖 2.4.2-1 單位立體角與半球空間幾何關係	26
圖 2.4.2-2 不同溫度下黑體光譜輻射出射度	28
圖 2.4.2-3 紅外輻射入射、反射及吸收示意圖	31
圖 3.1-1 雷虎 Ghost+空拍機	35
圖 3.1-2 FLIR ONE PRO	36

圖 3.1-3 可調式支架	37
圖 3.1-4 減震球	38
圖 3.1-5 抗震螺母	38
圖 3.1-6 LP PYRA 03	39
圖 3.1-7 Delta OHM HD2102.2	39
圖 3.1-8 PROVA 11 電流勾表	40
圖 3.1-9 手持式風速計	40
圖 3.1.1.2-1 基本程式語言架構	43
圖 3.2-1 架設於國立成功大學歸仁校區頂樓的日射計	44
圖 3.2.2-1 程式流程圖	45
圖 3.2.3-5 估算發電量實驗流程圖	47
圖 3.2.3-6 溫度矩陣流程圖	48
圖 3.2.3-7 估算發電量簡易流程圖	49
圖 3.2.4.1-1 鉛直的遮蔽方式	50
圖 3.2.4.1-2 水平的遮蔽方式	50
圖 3.2.4.2-1 蠸牛紋圖片	51
圖 3.2.4.3-1 表面毀損嚴重的太陽能模組	52
圖 4.1-1 台南歸仁區 2015 年七月至 2018 六月 不同月分之平均日照量圖	54
圖 4.2-1 熱相片下的太陽能模組	55
圖 4.2-2 無毀損太陽能模組熱相片	56
圖 4.2-3 太陽能模組背面接線盒	56
圖 4.2-4 毀損太陽能模組熱相片	57
圖 4.2-5 溫度矩陣平面圖	58
圖 4.2-6 溫度矩陣立面圖	59
圖 4.2-7 溫度矩陣立面調整圖	60
圖 4.2-8 編撰程式截圖	61
圖 4.2-9 實際量測太陽能模組的熱相片	62
圖 4.2.1-1 外界溫度對 MTD 和最大溫差折線圖	65
圖 4.3-1 溫度-效率關係曲線	67
圖 4.3-2 各點光電轉換效率	68

圖 4.3-3 利用熱相片估算發電量實驗模組	69
圖 4.3-4 估算結果誤差直方圖	70
圖 4.4.1-1 水平遮蔽方式電壓和遮蔽面積關係圖	71
圖 4.4.1-2 水平遮蔽方式電流和遮蔽面積關係圖	72
圖 4.4.1-3 鉛直遮蔽方式電壓和遮蔽面積關係圖	73
圖 4.4.1-4 鉛直遮蔽方式電流和遮蔽面積關係圖	74
圖 4.4.1-5 兩種遮蔽方式電壓比較圖	75
圖 4.4.1-6 兩種遮蔽方式電流比較圖	76
圖 4.4.1-7 兩種遮蔽方式功率比較圖	76
圖 4.4.1-8 太陽能模組示意圖	77
圖 4.4.1-9 水平遮蔽太陽能模組示意圖	77
圖 4.4.1-10 鉛直遮蔽太陽能模組示意圖	78
圖 4.4.2-2 蝸牛紋 2D 热像圖	80
圖 4.4.2-3 蝸牛紋 3D 热像圖	80
圖 4.4.2-4 蝸牛紋面積跟光電轉換效率關係折線圖	81
圖 4.4.2-5 蝸牛紋模組熱相片	82
圖 4.4.3-1 表面嚴重毀損和未毀損太陽能模組熱相片	83
圖 4.4.3-2 表面嚴重毀損和未毀損太陽能模組可見光相片	84
圖 4.4.3-3 毀損和未毀損模組發電功率比較	84
圖 4.4.3-4 毀損模組毀損面積	85

第一章 緒論

1.1 能源現況

科技發展為人類生活帶來便利，同時也製造了許多問題。直到 1970 年代第一次能源危機爆發後，各國才開始認真思考對於石化能源過度使用與依賴所衍生的問題，並思考開發新的替代能源方案。然而，在石油危機結束後，由於開發成本的考量，新能源開發的計劃也隨之趨緩；而生態環境的破壞與石化能源的耗損，始終是不能被忽略的課題。京都議定書的制定與實施後，各國又紛紛尋找替代性能源，減少對高污染石化能源的依賴。美國再生能源實驗室（National Renewable Energy Laboratory, NREL）將太陽能、風能、地熱能、生質能以及氫氧燃料電池列為重點研究發展的再生能源。台灣為海島型國家，天然資源匱乏，所使用的能源超過 97% 均須仰賴國外進口[2]，故積極找尋有效的替代能源才是長久之計。不同於水力、地熱及風力等會受到地形地物之侷限，太陽能發電系統的特性為安靜、容易維修且系統簡單自動化、無污染與富量產特性，基於以上考量，太陽能電池有機會成為新世紀能源的最佳選擇。

1896

近年來太陽能電池技術進展與日俱增。時至今日，琳瑯滿目各式各樣不同種類的太陽能電池紛紛出籠：單晶矽太陽能電池效率可達 25%；多晶矽及非晶矽模組化效率也可以到達 21%；銻化鎘（CdTe）約 17% 的轉換效率與硒化銅銦鎵（Cu(InGa)Se₂）薄膜太陽能電池有將近 20%的轉換效率；有機太陽能電池轉換效率約 8%；而染料敏化奈米薄膜電池（Dye sensitized nanostructure materials）也有 11% 左右的轉換效率。

1.2 文獻回顧

使用紅外線熱影像拍攝太陽能電站是個熱門議題，尤其在歐洲已經逐漸成為電站驗收與維運的標準測試項目。因應這個趨勢，Bengt Jaeckel、Bernhard Weinreich、C. Buerhop 和 Ulrike Jahn 制定了熱影像檢測標準 IEC62446-3[3]，可見太陽能熱影像檢測已成為系統品質管控的必要測試。

手持式的熱影像檢測有高度不足的因素，導致紅外線影像在模組上半部以反射熱輻射為主，模組下方的熱影像才是真正模組溫度[3, 4]。由此可以看到角度偏差會對拍攝結果造成很大的影響。

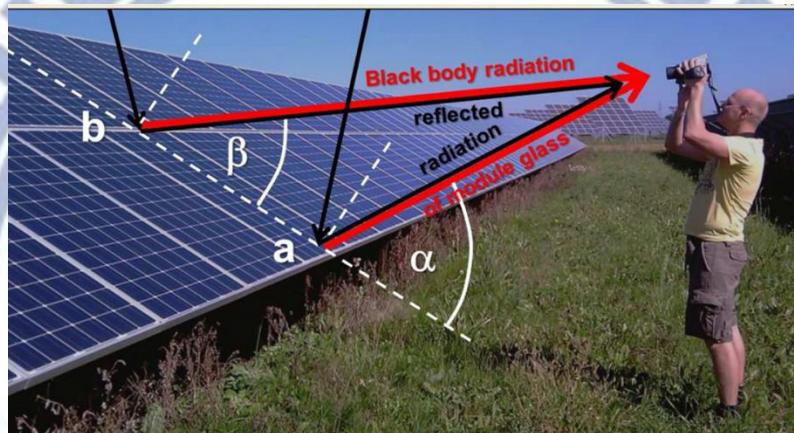


圖 1.2-1 手持熱感應攝影機拍攝圖[3]

2015 年後隨著無人機與熱感應攝影機的進步，許多公司開始研發結合無人機和熱感應攝影機的檢測方式，例如太陽能驗證權威德國萊因 TUV，對電激發光 (electroluminescence，EL) 跟 IR 都頗有研究的太陽能顧問公司 Fladung。

台灣起步較慢，去年才開始有第一個 IRUAV 團隊提供熱影像空拍，接著 PV Guider、工研院量測中心與德國萊因也都陸續開始提供熱影像空拍的服務。

熱感應檢測主要就是檢查是否有溫度異常的現象形成熱斑 (Hot Spot)，廣義的熱斑是指模組內有局部高溫，該位置溫度遠高於其他位置。造成熱斑的原因很多，可能是模組品質問題，可能是安裝、維護造成的問題。要釐清問題，通常還需要借助其他工具做進一步檢測，例如用 EL 才能看到裂紋或更細的問題[1]。圖 1.2-2 為 PV Guider 公司所拍攝的熱影像。圖 1.2-3 為 Saddam Ali1 的團隊所拍攝的三塊毀損程度不同的太陽能模組 EL 圖。

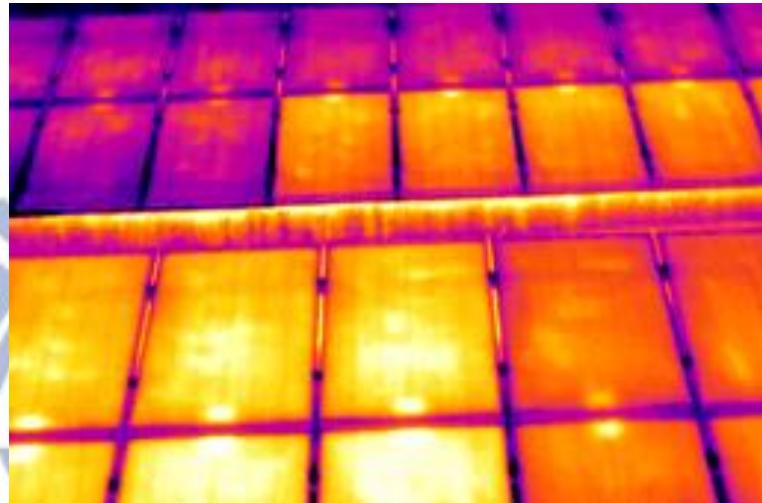


圖 1.2-2 PV Guider 公司拍攝的熱影像[4]



圖 1.2-3 毀損太陽能模組 EL 影像[5]

1.3 研究動機與目的

台灣位於亞熱帶季風氣候，日照量非常充足，每年約能擷取一百七十億千瓦-小時的太陽光能量，年日照量較許多發展太陽能的國家充裕，如圖 1.3-1 所示。再加上，節能減碳與非核家園議題發燒，因此陸陸續續有相當多的太陽能電廠在興建當中。一般而言，目前太陽能電廠的檢測方式，大都以人工的方式巡檢，但因電廠占地廣大，檢測過程中需要耗費相當多的人力與時間，故有必要發展一個快速且有效的檢測方式，去因應目前這個綠色能源崛起的時代。

截止自今，最快速的檢測方式是結合無人載具和熱像儀對太陽能電廠進行拍攝，並觀察拍攝出來的熱影像中的熱斑分布狀況，拍攝的熱像片如圖 1.3-2[4]，雖然可以觀察出熱斑的分部狀況但沒辦法直接從熱像片中看出模組的衰減程度和光電轉換效率[1]，仍需要對毀損模組去坐進一步的量測，例如使用電激發光（electroluminescence，EL）才能觀察到裂紋或更細的問題。

本論文研究係以調整熱影像拍攝高度以提升目前檢測的準確度，以及某種程度的量化分析之後，獲得更多量測技術上所需參數。以達成直接使用熱感應攝影機完成太陽能電廠檢測，不須再以人工方式做進一步的細部檢測，並結合無人載具、熱像儀、GPS 和影像無線傳輸系統，以實現快速方便的即時圖像檢測系統。

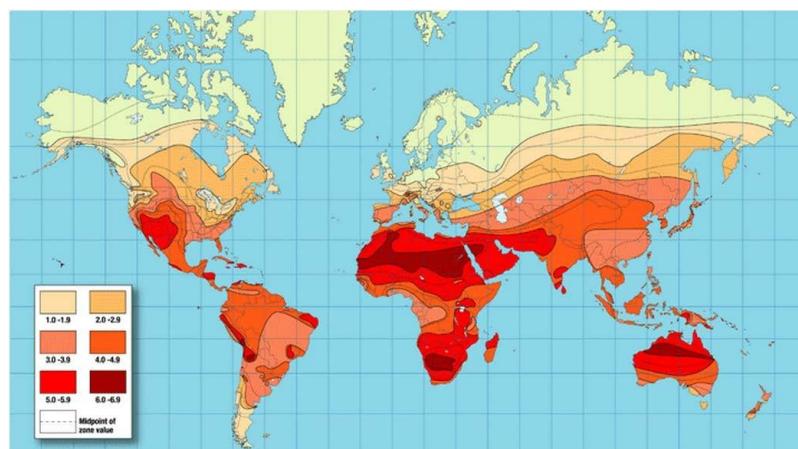


圖 1.3-1 全球日照分布圖

資料來源: National Renewable Energy Laboratory ,NREL

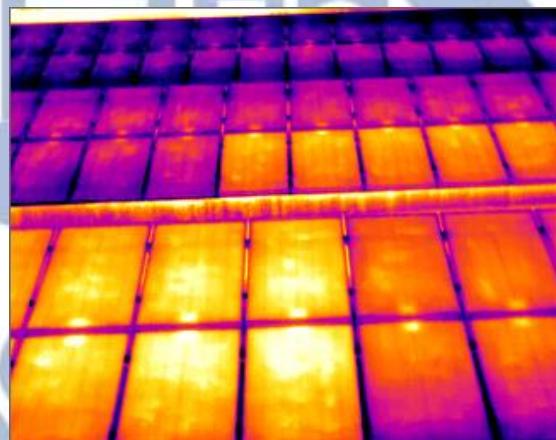


圖 1.3-2 太陽能電廠熱影像空拍圖

第二章 基礎原理

2.1 太陽能光譜

當太陽光照射大氣層的時候，會受到大氣中的氣體、雲、粉塵的吸收、散射以及反射，而改變光的行進方向，只有約 70%的太陽光能透過大氣層，以直射光或散射光到達地球表面。到達地球表面的太陽光一部分被表面物體所吸收，另一部分又被反射回大氣層。圖 2.1-1 為太陽光入射於地面之情形。

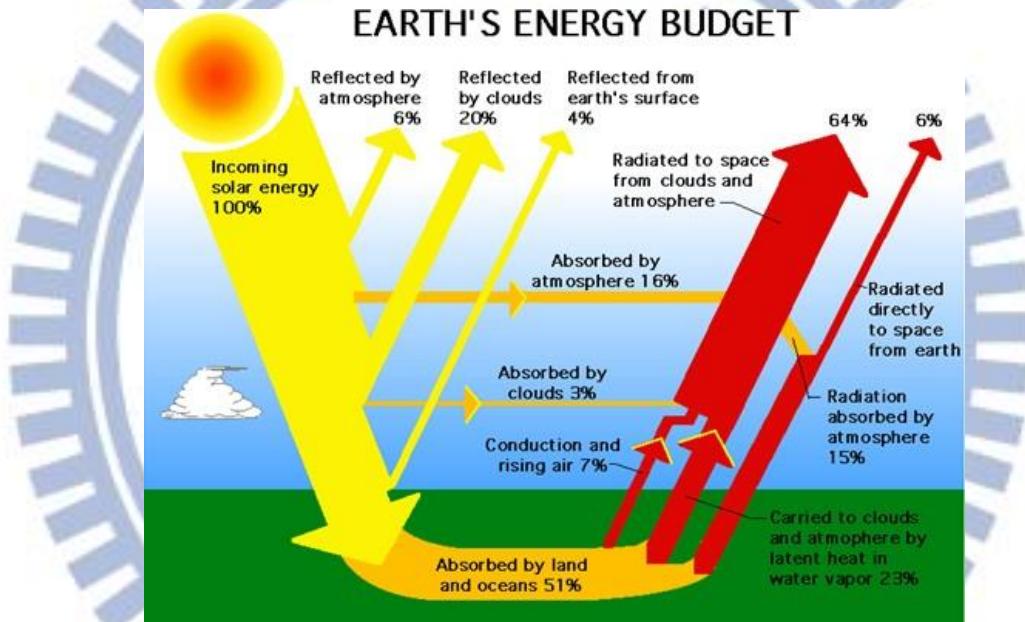


圖 2.1-1 太陽光入射於地面之情形

資料來源：美國國家航空航天局

在量測太陽能電池轉換效率之時，需要有一個固定的光強度，因此使用大氣質量（air mass，AM）[6]來表示。其定義為 $AM = \sec \theta$ ，其中 θ 為太陽光入射光與地表之夾角，如圖 2.1-2 所示。因在太空中太陽光線不受到大氣層之影響，故定義為 AM0[7]，其 AM0 的入射光強度約為 $1300W/m^2$ ；太陽入射光與地表的夾角為 90° 時，定義為 AM1，其 AM1 的入射光強度約為 $925W/m^2$ ；太陽入射光與地表的夾角為 48.2° 時，定義為 AM1.5，其 AM1.5 的入射光強度約為 $832W/m^2$ 。在國際規範(IEC 891、IEC 904-1)將 AM1.5 的太陽輻射強度定義為

1000W/m²。如圖 2.1-3 所示為 AM0 以及 AM1.5 的光譜圖。

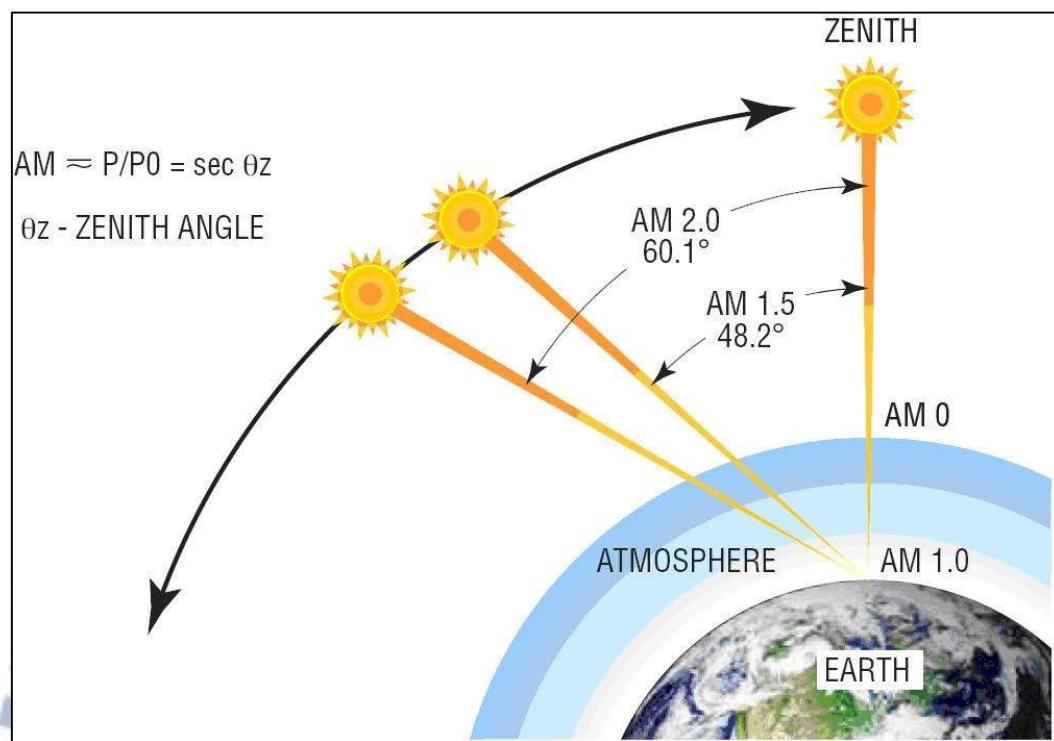


圖 2.1-2 太陽光入射角與地表之間夾角

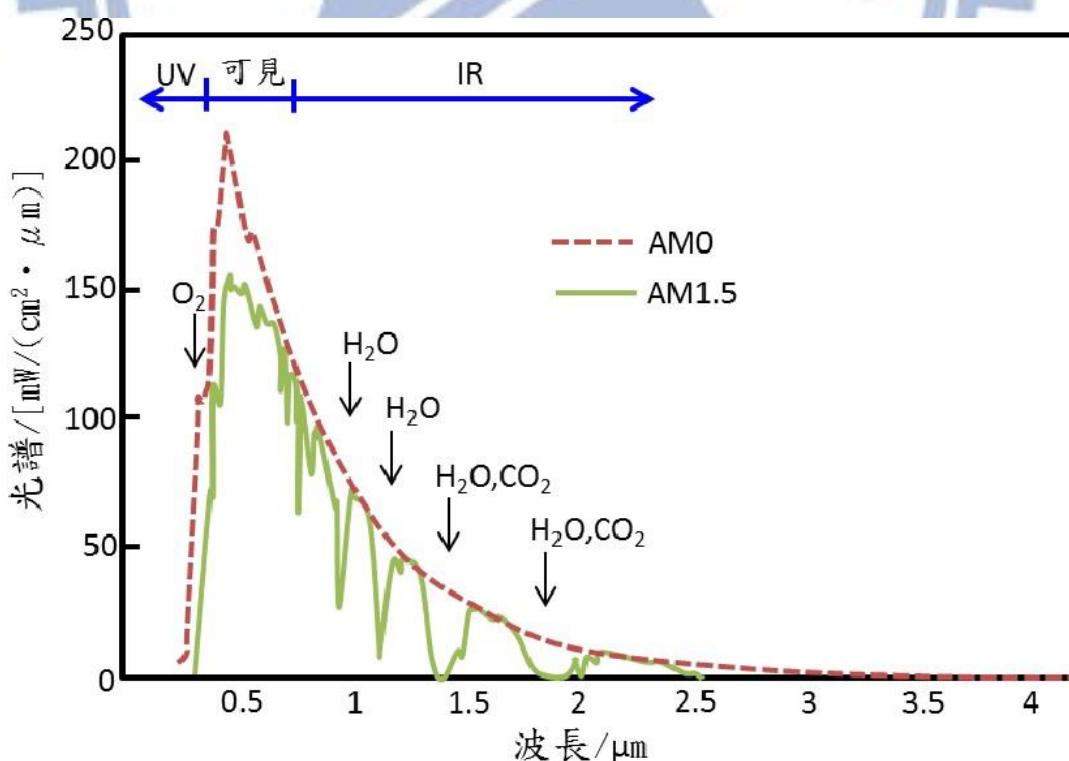


圖 2.1-3 太陽光輻射的波長分布圖

2.1.1 太陽光角度

地球是以太陽位置為中心，在軌道上以逆時針對太陽進行固定周期的公轉，公轉一周需要 365 日 5 時 48 分，約等於一年。地球同時繞著自轉軸由西往東自轉，自轉一周需要 23 時 56 分，約等於一天，且地球繞著太陽公轉之軌道平行的平面呈橢圓形，稱為黃道(ecliptic)。地球垂直南北極中心線為赤道，其中黃道與赤道面約有 $23^{\circ}26'$ (23.44°) 之傾斜角，當太陽在不同位置時對應黃道面的角度也就有所差別，因為太陽的遠近不同，故太陽光強度量也會變動，而使地球變化出一年四季的不同季節，如圖 2.1.2-1 所示。

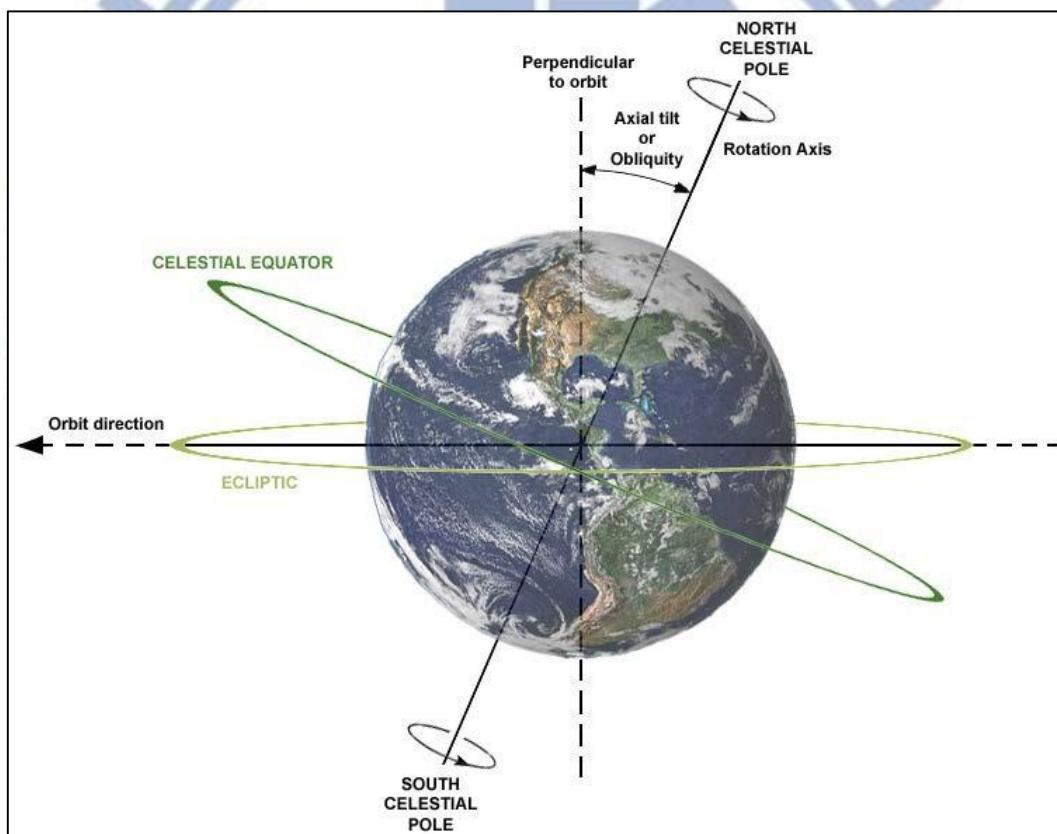


圖 2.1.1-1 太陽運行模式

地球繞著太陽公轉係以橢圓形的軌道運行，而非以圓形的軌跡進行。所以太陽光至地球表面的輻射能量與地球和太陽的距離之平方成反比關係，因此太陽到達地球表面的輻射能量 Q 如下公式所示

$$Q = S \times \left(\frac{R^0}{R}\right)^2 \quad (2.1.1-1)$$

其中， Q 為太陽到達地球表面的輻射能量， S 為太陽常數為 $1367 \pm 7 (\text{W/m}^2)$ ， R 為地球與太陽距離稱為日地距離。 R^0 為日地平均距離又稱天文單位，1 個天文單位為 $1.496 \times 10^8 (\text{km})$ ，日地距離最近日與最遠日分別為 0.983 個天文單位以及 1.017 個天文單位。

太陽仰角即為地面水平線與太陽的夾角，表示當下太陽所在高度為何，也可以使用天頂距(zenith angle, Z)表示，而天頂距為天頂與太陽的夾角，如圖 2.1.2-2 所示。本實驗研究所使用的是地面水平線與太陽的夾角，範圍為 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之間。

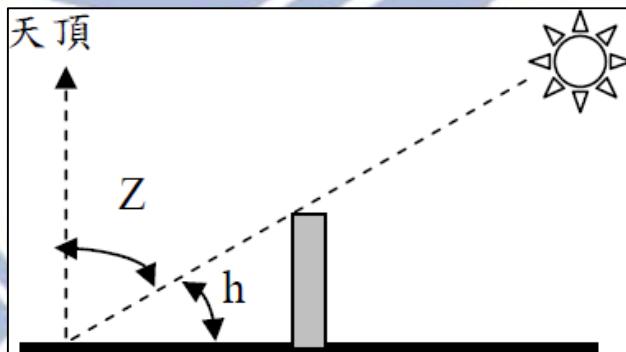


圖 2.1.1-2 太陽仰角示意圖

2.2 太陽能電池之原理

在太陽能電池製作技術中，通常將硼加入 CZ(czochralski) 製程的矽材料中，產生出 P 型晶圓。製作 N 型材料，最普遍的技術為載氣(carrier gas)，加入液態氯化磷(phosphorus oxychloride, POCl_3)，再將加熱爐管加熱到 $800^\circ\text{C} \sim 900^\circ\text{C}$ ，晶圓表面開始生成含磷的氧化層，磷得到溫度能量從氧化層擴散到矽中，當磷元素多過硼元素而形成 P-N 接面。然後，製作 N 型區與 P 型區的表面電極(metal contact)，大部分都採用蒸鍍法(vacuum vaporation) 製程來製作電極，將經過載氣製程後的太陽能電池，放進蒸鍍法儀器的腔體中，到達設定溫度與真空值，使其金屬融化並蒸發，以直線的方式到達太陽能電池表面。背電極覆蓋整個被表面，上電極需要製作成柵線形狀，因為要盡量使光進入太陽能電池，而不被上電極遮蔽陽光。最後，在太陽能電池表面沈積一層抗反射層(antireflection)，如圖 2.2-1 所示[8]

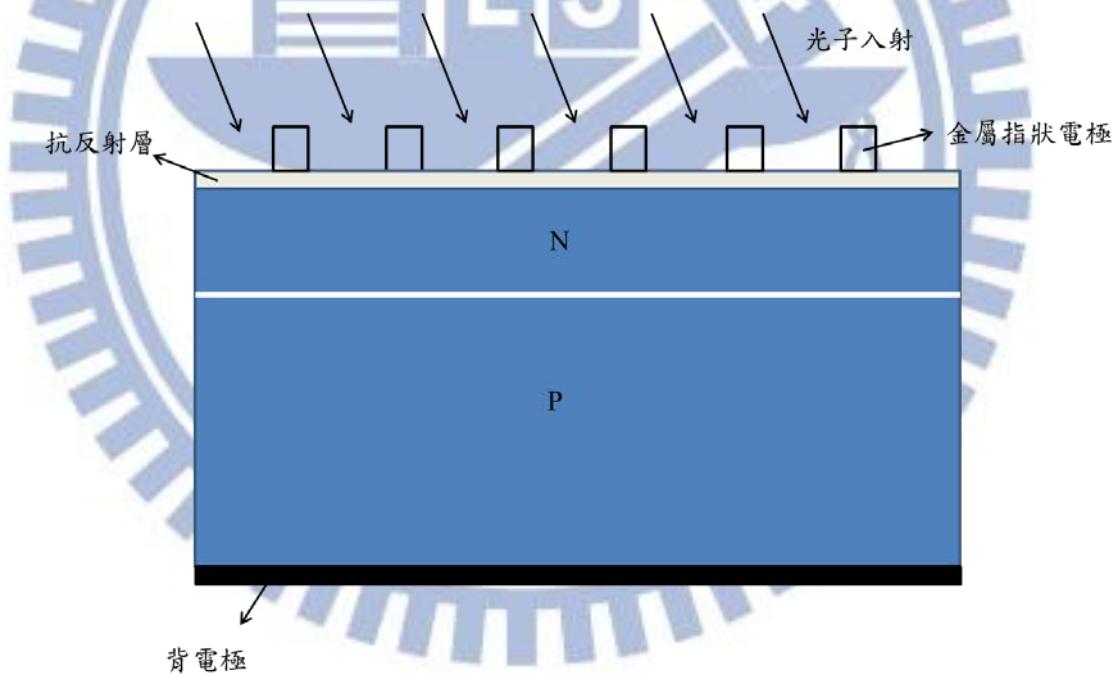


圖 2.2-1 太陽能電池結構圖

當光入射至太陽能電池半導體之 P-N 接面時，會使界面附近的價電子游離，產生光伏特效應(photo-voltage effect)之內部電場，即利用 P-N 接面之界面誘起電場，如圖 2.2-2 所示。從圖可知，在界面上有光透過之 N 型表層及 P 層裏層。由光照射所產生電子-電洞對，因 P-N 接面電場之作用，使電子往 上部電極方向集中，電洞往下部電極方向集中，分別被兩側的電極所收集而產生光電流。

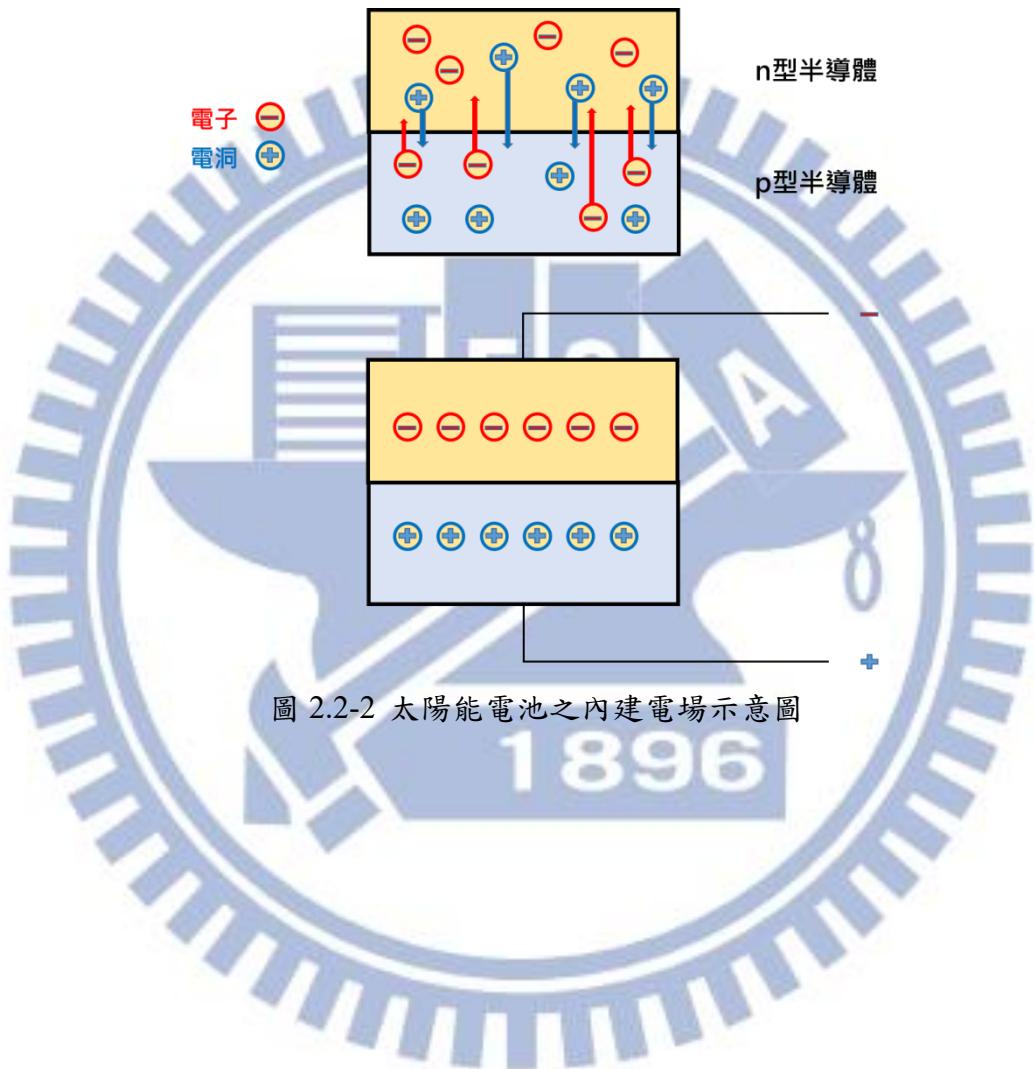


圖 2.2-2 太陽能電池之內建電場示意圖

2.2.1 太陽能電池之等效電路

無機半導體的太陽能電池系統，可以用一個簡單的等效電路表示，如圖 2.2.1-1 所示。包括一個理想的 P-N 接面二極體，一個電流源 I_{ph} ，串接電阻 R_s 以及並聯電阻 R_{sh} ， R_L 為太陽能電池的負載。由圖中太陽能電池兩端使用柯西荷夫電壓定律，可以得到電流 I 與電壓 V 的關係式：

$$I = I_{PH} - I_0 \left\{ e^{\left[\frac{q(V+R_s I)}{nKT} \right]} - 1 \right\} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (2.2.1-1)$$

I_{ph} 表示 P-N 接面在照光後所產生的光電流， R_s 為材料或製程上各因素所產生的串聯電阻，而 R_{sh} 表示半導體處缺陷與電子電洞對在結合中心較多時、或者是因為較大的漏電流情況。

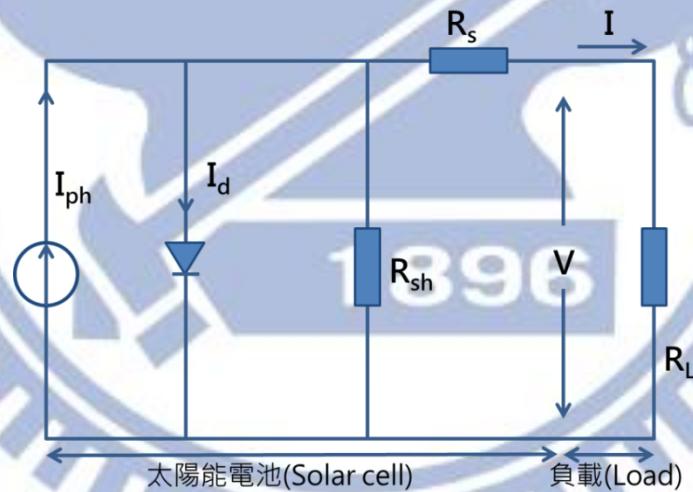


圖 2.2.1-1 太陽能電池之等效電路

一個理想的太陽能電池，串聯電阻非常小，幾乎可以忽略，而並聯電阻非常大，近乎成電路的狀態，因此可簡化(2.2.1-1)式成：

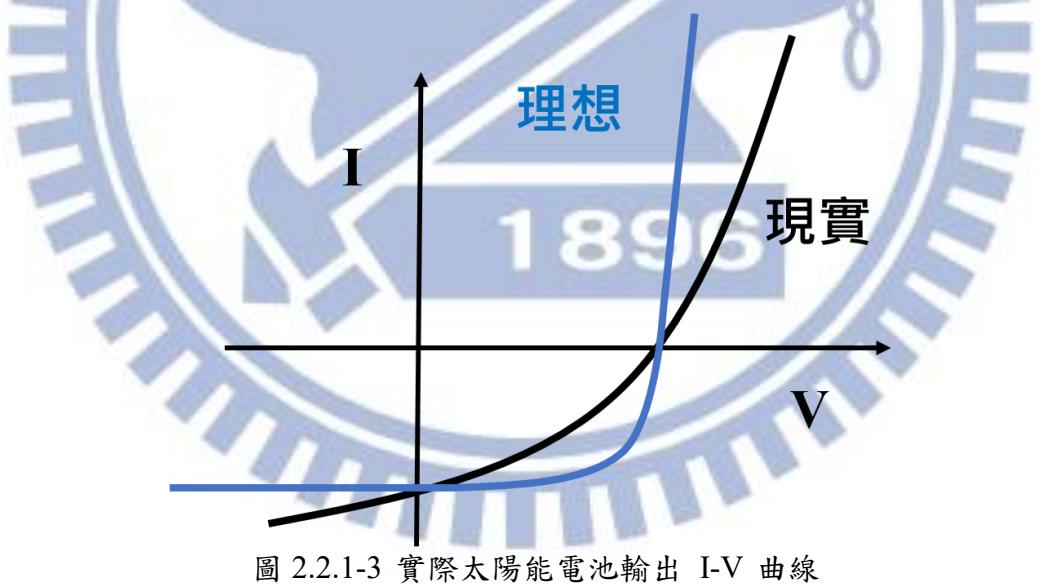
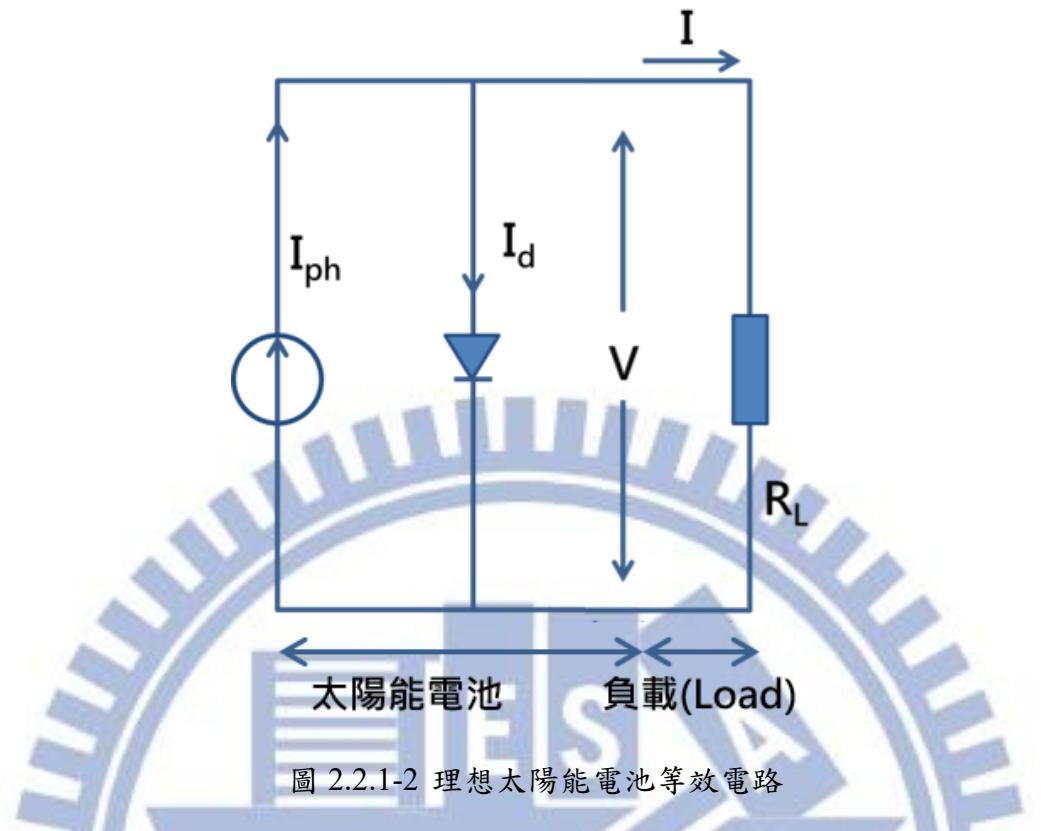
$$I = I_{PH} - I_d = I_{PH} - I_0 \left\{ e^{\left[\frac{qV_d}{kT} \right]} - 1 \right\} \quad (2.2.1-2)$$

其中 I_d 為暗電流(dark current)，為未照光情況下的二極體電流，其電流-電壓關係式如下：

$$I_d = I_0 \left\{ e^{\left[\frac{qV_d}{kT} \right]} - 1 \right\} \quad (2.2.1-3)$$

將太陽能電池加以簡化，如圖 2.2.1-2 所示的為理想太陽能等效電路， I_{ph} 為 P-N 接面在接收固定功率的光源所產生的光電流。圖 2.2.1-3 中可以比較出實際和理想太陽能電池 I-V 的特性曲線的差別。





2.3 太陽能電池的種類

太陽能電池的種類非常多，如果依照材料的形式來分類的話，可分為塊材和薄膜型的太陽能電池。塊材又可分為以矽和化合物半導體作為基底的太陽能電池；另外，薄膜的部分可分為矽、化合物半導體、其他有機的薄膜太陽能電池。以塊材來說，以矽為基底包含了單晶矽與多晶矽太陽能電池，化合物半導體則為砷化鎵(GaAs)為主；以薄膜來說，矽薄膜部分可分為非晶矽與微晶矽，化合物則可分為 CdTe 與 CIGS；最後，有機則以染料敏化太陽能電池為主。由上面分類圖可知，太陽能電池有許多種，圖 2.3-1 是以材料型式作分類，而以下將是按照世代分類來分別介紹[9, 10]



圖 2.3-1 太陽能電池的種類分類-以材料分類

矽晶型太陽能電池以矽為主要原料，利用摻雜技術去做出 P 型與 N 型半導體，再用上面所提到之原理將光能轉變成電能，依其矽晶的結晶型態又可分為單晶與多晶。單晶矽太陽能電池的光電轉換效率較高，使用年限也較長，多晶矽則是製程較簡單且成本較低廉。光電轉換率 15~20%為現今市場的主流，其優點為矽原料易取得、矽晶技術已經發展多年較為成熟、製程設備與半導體廠所用大都相同；其缺點為技術發展完整，轉換率也幾乎已到矽材料之極限，很難再有大幅進步。

薄膜型太陽能電池的製程，係在基板上分別鍍上 P 型及 N 型薄膜而形成半導體元件。同樣利用上述原理進行光電轉換，可依薄膜材料與結晶型態區分不同種類。配合串疊法，可使光電轉換率最高達到近 40%。但因製程較為複雜且單層電池轉換率較低，在市場上還比不上矽晶型太陽能電池。但薄膜型太陽能電池具有節省材料、可大面積製造、易塑型、發電成本低等優點，且技術還有很大的發展空間，因此未來的市場成長潛力不容忽視。

19 世紀末，奈米技術和染料敏化太陽能電池，科學家發現某些有機染料能夠延長鹵化銀照相膠捲對可見光的使用週期和效率，因而得知可見光可有效地激發有機染料分子與半導體銀鹵化物晶粒之間的電子或能量轉移機制，而此染料敏化效應即是現代攝影技術發展的主要運用原理。

2.3.1 單晶矽太陽能電池

單晶矽太陽能電池，其組成原子均按照一定的規格與周期性的排列。製作方法是把矽金屬熔於石英坩鍋中溫度控制在 1415°C ，然後將晶種放置矽液面中，以每分鐘 2~20 轉的速率旋轉，同時每分鐘緩慢往上拉引成長速率為 0.3~10 毫米形成矽晶柱，再將矽晶柱切割，即為單晶矽晶圓，使用不同的製程製作成單晶矽太陽能電池，如圖 2.3.1-1 所示。其效率可高達 20%~25% 且性能穩定[11]，相對的，因單晶矽成本昂貴所以單晶矽太陽能電池比其他太陽能電池昂貴。



圖 2.3.1-1 單晶矽太陽能電池

2.3.2 多晶太陽能電池

多晶矽是由多種不同的方向與排列的單晶矽所組成。在晶圓切割中多晶矽較單晶矽以及非晶矽難切割(因晶界問題)，但是因為多晶矽比單晶矽材料價格便宜且製程較為簡單，因此成本較低，接受度較高。單片多晶矽光電轉換電效率為 20%，如圖 2.3.2-1 所示。其製作成模組效率約 17%左右。一般在太陽能電池模組發電系統中，大都採用此種太陽能電池做為發電元件。[12]

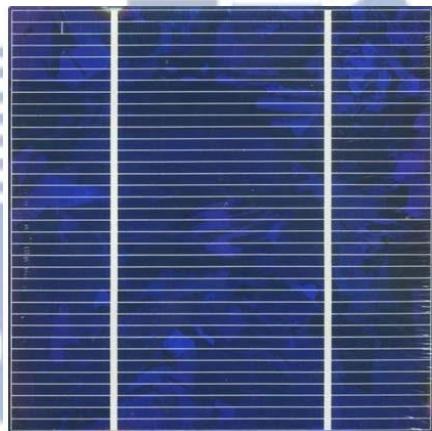


圖 2.3.2-1 多晶矽太陽能電池

2.3.3 非晶太陽能電池

非晶矽的組成原子不按一定的規格與周期性的排列。非晶矽的優點在於可見光譜的吸光能力很強(比單晶矽多 40 倍、多晶矽 500 倍)，只需要薄薄的一層(約 300 nm)就可以把光子的能量有效地吸收，且不需要使用昂貴的結晶矽基板，而用較便宜的玻璃、陶瓷或是金屬等基板即可。其利用濺鍍或是化學氣相沈積方式，便可在玻璃或金屬基板上生成薄膜，如圖 2.3.3-1 所示。其技術成熟且成本低廉，材料成本相對於其他化合物半導體材料便宜許多；不過，其缺點則有轉換效率低(約 5~7%)，以及會產生嚴重的光劣化現象(Staebler-Wronski effect)，所以較難導入太陽能發電市場，而多應用於小功率的消費性電子產品。



圖 2.3.3-1 非晶矽太陽能電池

2.3.4 化合物太陽能電池

化合物半導體太陽能電池可分為 III-V 族半導體和 II-VI 族半導體，前者為高聚光型太陽能電池，其優點為擁有高效率與耐熱性[13, 14]，這是矽太陽能電池所不能及的。而主要原理是利用不同材料性質吸收不同波段的太陽輻射光，藉以提升光電轉換效率。使用 III-V 族半導體化合物作為高效率集光型太陽能電池雖然其光電轉換效率很高，但因製造成本昂貴，如果要達到可接受的發電成本，集光條件至少要達到 400 倍(400Suns)以上才為可行。所以需要利用大面積集光之光學元件，減少太陽能電池的使用面積，降低發電成本。也需要追日系統精準追蹤太陽光以保持高發電效率。化合物太陽能電池結構如圖 2.3.4-1 所示。

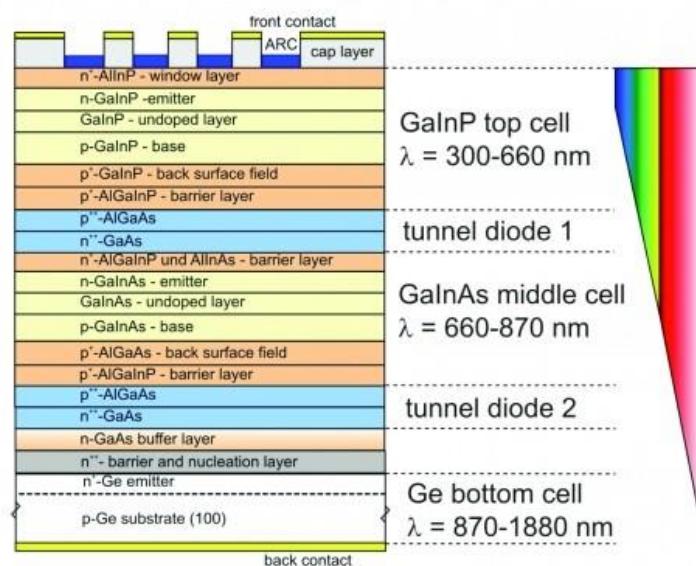


圖 2.3.4-1 化合物太陽能電池結構

2.4 紅外線熱像原理與技術

2.4.1 紅外線概述

紅外線是 1800 年英國天文學家赫謝耳(Herschel)在研究太陽光七色光譜的熱效應時所發現。他用分光棱鏡將太陽光分解成從紅色到紫色等各色單色光，依次測量不同顏色光的熱效應。發現當水銀溫度計移到紅光邊界之外時，在眼睛看不見光線的鄰近黑暗區，溫度反而比紅光區高。證明了在紅光外側，確實存在一種人眼看不見的「熱線」，後來稱之為「紅外線」。

溫度基本概念

正如上述，因為研究熱而導致紅外線的發現，而現代紅外線的應用反過來則是為了檢測物體的溫度。因此溫度是說明關鍵；目前有三種常用的溫度單位：克氏、攝氏及華氏單位，三種溫度關係如下：

$$T(^{\circ}C) = [T(^{\circ}F) - 32] \times \left(\frac{5}{9}\right) \quad (2.4.1-1)$$

$$T(^{\circ}F) = T(^{\circ}C) \times \left(\frac{9}{5}\right) + 32 \quad (2.4.1-2)$$

$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273.15 \quad (2.4.1-3)$$

其中 273.15 K 相當於攝氏溫度 0°C，將其定義為水的三相點(即該溫度時，水、冰和水蒸氣共存)，此一現象可以從冷卻的真空單元中純水觀察到它，因而也等於 273.15K。因為一組純物質的凍結點(如黃金)具有可高度重複的量性，因此取代了水的三相點溫度成為基礎溫標。

至於溫度的傳遞方式可分為固體的熱傳導、流體的熱對流以及不需介質即可傳遞的熱輻射三種方式，整體如圖 2.4.1-1 所示。

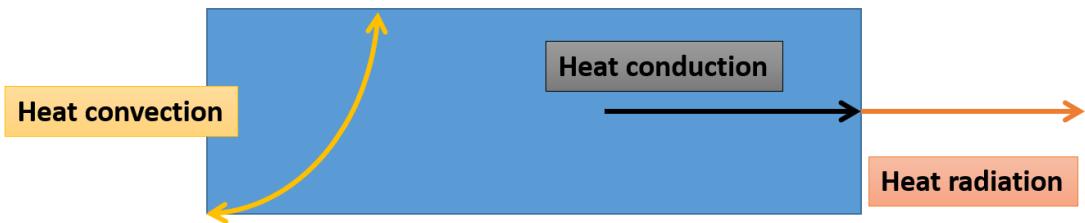


圖 2.4.1-1 三種熱傳遞方式組合示意圖

其中熱輻射的產生，是因為物質本身溫度造成粒子振盪所釋放的能量。而粒子本身可能是電子、離子、原子或分子；事實上，所有物質都會產生熱輻射。其中差異之一，是氣體的熱輻射是體積現象，亦即是氣體內顆粒所作出的輻射貢獻，而對於固體和液體而言，則是表面現象。

本論文研究所應用的部分就是屬於熱輻射的表面現象，也就是紅外線熱影像法的基礎。茲先摘列常用的紅外輻射相關的物理常數，如表 2.4.1-1

表 2.4.1-1 紅外輻射相關的物理常數

名稱	符號	值	單位
真空中光速	c	2.99792458×10^8	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
普朗克常數	h	6.6261×10^{-34}	J · S
波茲曼常數	k	1.3807×10^{-23}	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$
史蒂芬波茲曼常數	s	5.6703×10^{-8}	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-4}$
第一輻射常數 $C_1 = 2\pi hc^2$	C_1	3.7415×10^{-16}	$\text{W} \cdot \text{m}^2$
第二輻射常數 $C_2 = hc/k$	C_2	1.4388×10^{-2}	$\text{m} \cdot \text{K}$
第三輻射常數	C_3	2897.8	$\mu\text{m} \cdot \text{K}$

熱輻射的傳遞不需要有傳輸介值，有如光子發射一樣屬於能量粒子，其質量為零，其能量的離散量稱為量子。又可視為特定的電磁波頻率和能量一般；事實上，這兩個觀念是相關的，因為對特定的波長 λ ，其釋放的光子能量 W (單位為 joules)，是來自粒子內部的振動性質，二者關係為：

$$W = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.4.1-4)$$

其中 h 是普朗克常數， c 是光速(都為常數如表 2.4.1)；另一個有用的關係為波長與頻率(Hz)的電磁波公式：

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.4.1-5)$$



紅外線頻譜

紅外線也稱為紅外輻射，頻譜的範圍從可見光的紅光邊界開始，一直擴展到電子學領域中的微波區邊界。紅外輻射的波長範圍是 $0.75\text{~}1000\mu\text{m}$ ，是個相當寬的頻譜。

在光譜上，紅外線的波長介於可見光($0.38\text{~}0.75\mu\text{m}$)與微波之間，在可見光區中的紅光外，即波長超過 $0.75\mu\text{m}$ 之後開始的不可見光，稱為紅外線(Infrared，也稱為紅外輻射)，而繼續延伸到波長 $1000\mu\text{m}$ 的遠紅外線，之後才是微波(Microwave)的部份，在紅外線涵蓋的波長範圍內，依照應用領域的不同，有各種不同的分段方式，如圖 2.4.1-2。

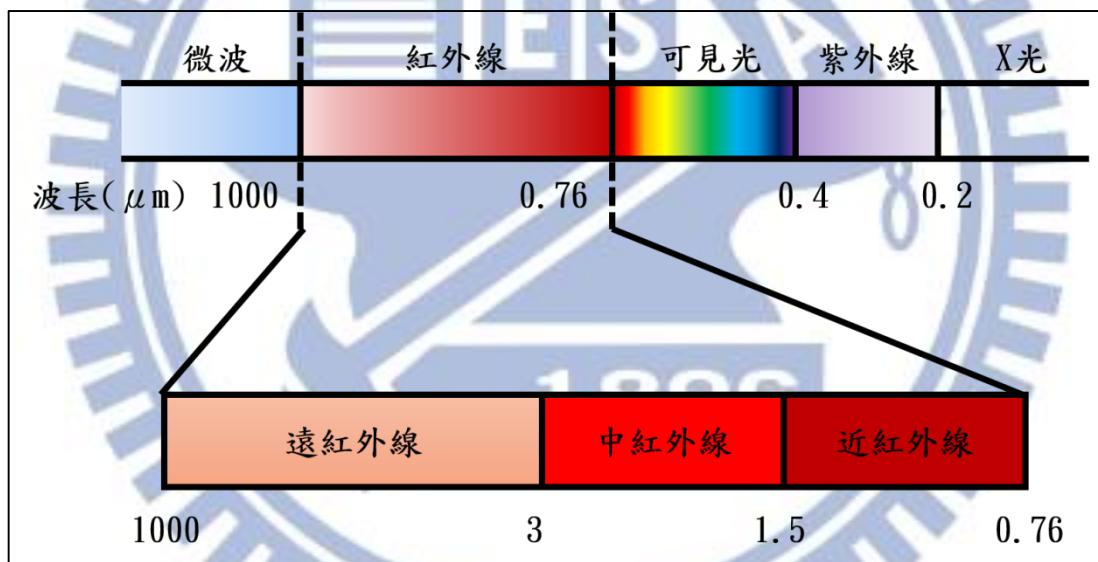


圖 2.4.1-2 紅外線波段頻譜

大氣窗口

因為紅外輻射在大氣中傳播，會受到水蒸氣、二氧化碳、臭氧的吸收，以及雲、霧、雨等等微粒的散射，導致某些特定波長的紅外線會被吸收，其中影響最嚴重的是水氣及二氧化碳所造成的吸收[15]；因此依上述紅外線波長區分的四段區域中，前三區域各包含有較不受影響的紅外線波長區域，稱為大氣窗口，分別為 $2\sim 2.5 \mu m$ 、 $3\sim 5 \mu m$ 、 $8\sim 12 \mu m$ ，如圖 2.4.1-3 所示。

不過，在熱像應用上，只將波長範圍分為 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 及 $8\sim 12 \mu\text{m}$ 兩個波段，通常將檢測波長 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 的熱像系統，稱為短中波段(SW)紅外線熱像儀；而接收波長 $8\sim 13 \mu\text{m}$ 的熱像儀，則稱為長波段(LW)紅外線熱像儀。

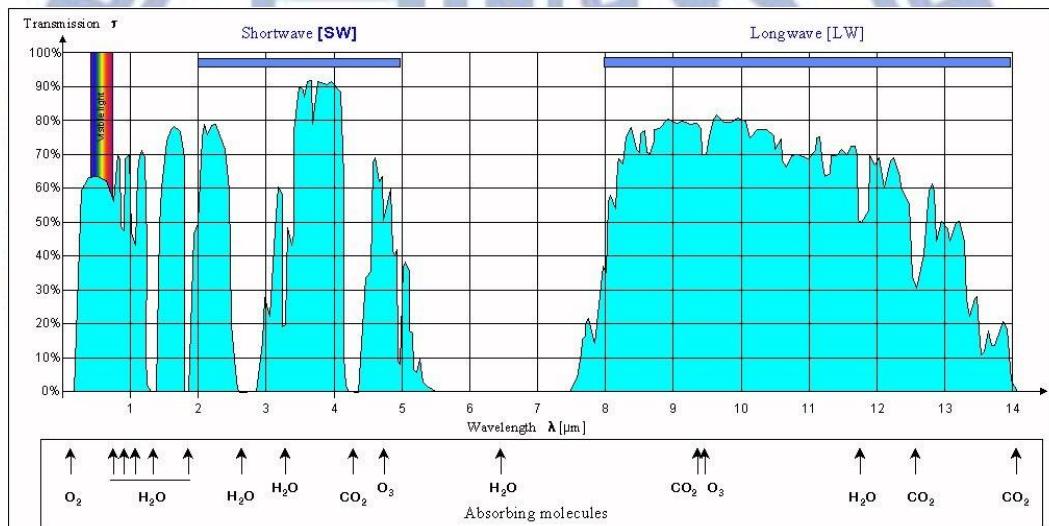


圖 2.4.1-3 海平面水平路徑的大氣透射率(大氣窗口分布圖)

2.4.2 紅外輻射基本理論

紅外輻射是一種電磁輻射，具有可見光相似的反射、折射、干涉等等特性，也同時具有以光量子形式被發射和吸收的粒子特性。此外，紅外輻射與普通可見光差異的特性有：對人眼不敏感，必須由儀器所檢測、光量子比可見光小、熱效應比可見光強，具傳遞熱的能力、更容易被物質吸收(對薄霧而言，長波紅外線反而更容易穿透)。但在介紹紅外輻射基本理論之前，應該首先說明“輻射”必要用到的概念及名詞。

輻射度學的基本概念

在紅外輻射理論中，首先是點源輻射所應用到的空間立體角概念；在三度空間中通常單位立體角來表示點源向某一方向空間所佔的大小，定義為：

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} = r^2 \sin \theta \, d\theta \, d\varphi = \sin \theta \, d\theta \, d\varphi \quad (2.4.2-1)$$

式中， dA 為球面上微小的單位面積， r 為球半徑，立體角球的單位為球面度 sr，則半球面上對球心所張立體角為 $2\pi(\text{sr})$ ；圖 2.4.2-1 中所示幾何關係為

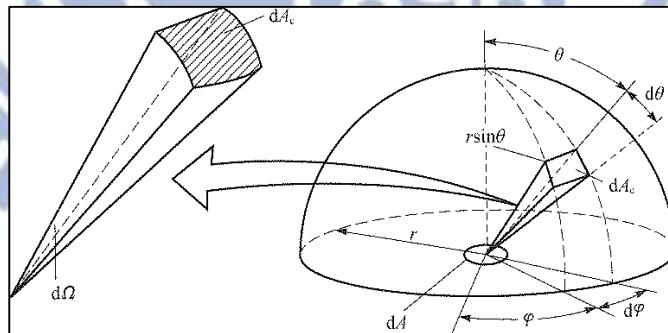


圖 2.4.2-1 單位立體角與半球空間幾何關係

紅外輻射的基本規律

歷經十九世紀好幾個世代的努力，基本建立了紅外輻射理論，其核心包含透射、反射及吸收，克希荷夫及普朗克輻射等三大定律，以及從實驗中得出的偉恩位移定律及史蒂芬-波茲曼定律等。

1. 普朗克定律

經過多人對黑體輻射的量測，及其實驗數據的分析研究後，1900 年普朗克(Planck)根據量子理論提出了在絕對溫度 $T(K)$ 、波長 λ 下黑體輻射出射度 $M_{\lambda b}$ 的公式：

$$M_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left(\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \right) = C_1 \lambda^{-5} \left[\exp \left(\frac{C_2}{\lambda T} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (2.4.2-2)$$

式中

c 為真空中光速， $c=3\times10^8 \text{ m/s}$ ；

h 為普朗克常數， $h=6.6256\times10^{-34} \text{ Js}$ ；

k 為波茲曼常數 $k=1.380658\times10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ ；

C_1 為第一輻射常數， $C_1=2\pi hc^2=3.7415\times10^{-16} \text{ Wm}^2$ ；

C_2 為第二輻射常數， $C_2=hc/k=1.4388\times10^{-2} \text{ mK}$ 。

最後得出 $M \lambda b$ 單位為 $\text{Wm}^{-2} \mu \text{m}^{-1}$ 。

如果將不同溫度代入上式，則可獲得黑體在不同溫度下出射輻射的光譜曲線

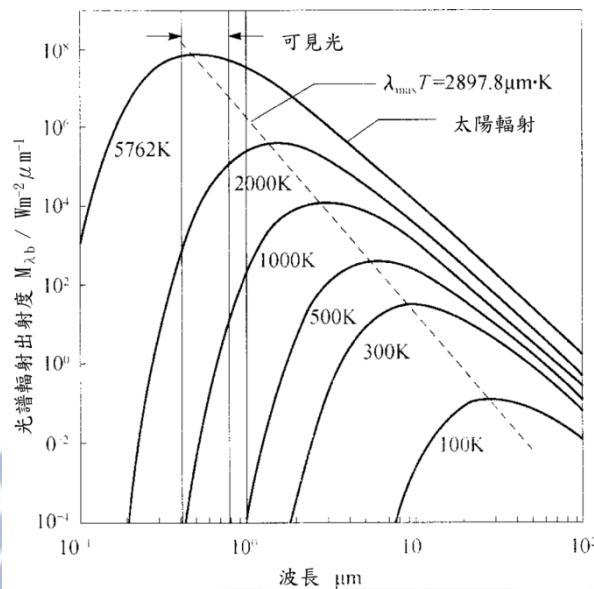


圖 2.4.2-2 不同溫度下黑體光譜輻射出射度

從普朗克定律及上圖曲線中可看出，黑體輻射的幾個特性：

- I. 說明物體受熱本身發射電磁輻射的基本規律，其波長範圍自紫外光、可見光、紅外光一直到毫米波等；從廣義上講物質原子、分子因熱震動產生的輻射都可以稱為熱輻射。
- II. 定律中可看出只要物體溫度高於絕對零度，物體就有電磁輻射發射。
- III. 從曲線圖中可看出，任何溫度下的黑體光譜輻射出射度隨波長變化，每一曲線都只有一極大值。
- IV. 從曲線圖中可看出各條曲線互不相交每條曲線下的面積，代表該溫度的全光譜輻射出射度；溫度越高，所有波長的光譜輻射出射度就越大，該光譜的全光譜輻射出射度也越大。

2. 偉恩位移定律

1893 年偉恩研究黑體實驗數據，得出光譜輻射出射度極大值相對應的波長 λ_m (俗稱峰值波長) 與其絕對溫度成反比，即：

$$\lambda_m T = 2897.8 \text{ } (\mu\text{m} \cdot K) \quad (2.4.2-3)$$

式中 2897.8 為第三輻射常數 C_3 。在紅外輻射技術中，常用偉恩位移定律計算出某一溫度下的峰值波長。

3. 史蒂芬-波茲曼定律

如果將普朗克公式對波長 $0 \sim \infty$ 積分，所確定的黑體全輻射出射度 M_b 與溫度 T 的關係即為史蒂芬-波茲曼定律：

$$M_b(T) = \int_0^{\infty} M_{b\lambda}(T) d\lambda = \int_0^{\infty} C_1 \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} d\lambda = \sigma T^4 \quad (2.4.2-4)$$

式中 $\sigma = 5.6703 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ，稱為史蒂芬-波茲曼常數；定律中指出黑體單位表面積發射的總輻射出射度與絕對溫度四次方成正比。實際也就指出了如果要降低環境中的紅外輻射能，最重要的就是降低溫外輻射能，最重要的就是降低溫度。

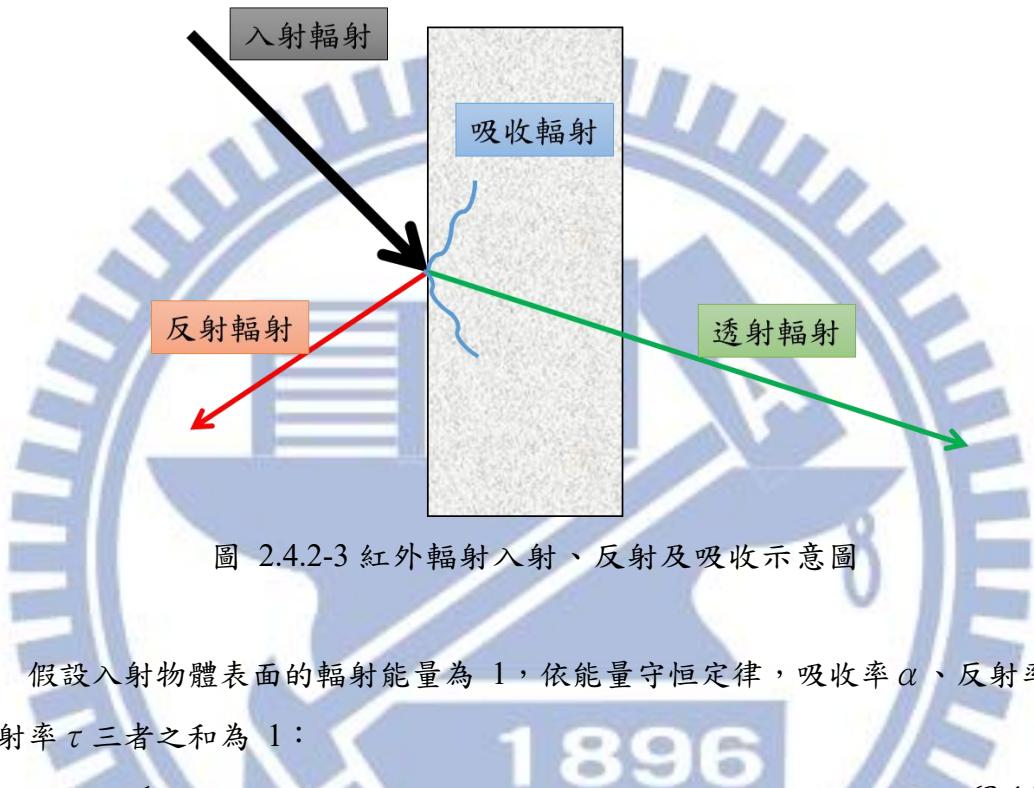
實際物體的紅外輻射規律

1.透射、反射及吸收定律

紅外輻射就是以熱能以輻射方式進行傳遞，如同可見光，紅外線也會從物體表面產生反射、被物體吸收甚至穿透物體的現象，也是各種物體或材料性質的特性之一；並且紅外線的總入射輻射量將等於反射、吸收及透射量的總和。

物體對入射其上的紅外輻射吸收量與入射量之比，即是吸收率(α)，為波長與溫度的函數。一般而言，吸收率還與材質的微觀結構具有複雜的關係。當輻射頻率與物質的原子或分子運動的固有頻率正好相等時，則物體的吸收率將會較高。此外，還會與物體的表面狀態、種類和溫度等相關；物體對入射其上的紅外輻射反射量與入射量之比，即是反射率(ρ)，也是波長與溫度的函數。物體的反射率也一樣隨著物體表面狀況不同而異，光潔度高者反射率高；物體對入射其上的輻射透射量與入射量之比，即是透射率(τ)，同樣也是波長與溫度的函數。某些物體對某些頻率，屬高透射率者，可以用來製作該頻率專用的濾波片，讓特定的頻譜通過進行檢測利用。

另外，物體本身溫度所能放射出熱輻射的能力，稱為放射率(ε)，為物質放射紅外輻射量，與相同溫度黑體所發射的紅外輻射量的比，也是波長與溫度的函數。一般而言，當溫度一定時入射到一物體表面的紅外輻射時，一部分的能量被吸收，一部分被反射，還有一部分穿過物體透射出去，及同時產生吸收、反射及透射三種現象，如圖 2.4.2-3 所示



2. 克希荷夫定律

1859 年克希荷夫(Kirchhoff)提出了實際物體與周圍環境處於熱平衡狀態時，物體吸收周圍環境的能量等於其輻射出的能量，即處於平衡狀態下的實際物體，其放射率等於吸收率；而所謂黑體，是假設入射的紅外輻射將完全被吸收，即 $\alpha=1$ ， $\rho=0$ ， $\tau=0$ ；雖然黑體只是一種理想化的抽象物體模型，但可用來說明黑體放射的紅外輻射隨溫度及波長變化的關係，因此：

$$M = f(\lambda, T) \quad (2.4.2-6)$$

也就是

$$\alpha = \frac{M}{M_b} = \varepsilon \quad (2.4.2-7)$$

式中， M 是物體的輻射出射度， λ 為波長， T 為溫度， M_b 是物體上的輻射量， α 為前述的放射率。並且此外，還可從上式可以看出吸收紅外輻射能力強的物體，同時也是放射紅外輻射能力強的物體。

1896

3. 實際物體的表面放射率

事實上放射率為材料表面性質，代表放射能量的能力，為真實物體表面放射的輻射與在相同的溫度、方向和特定波段條件下黑體輻射的比率。因此放射率是一個沒有單位的值，其範圍從 0 到 1。某些特殊的情況下，放射率與波長無關的物體稱為灰體，而放射率 ϵ 與所有波長、溫度、方向都相關則稱為色體；溫度測量時更需要對 ϵ 放射率有相關的認知，因此放射率的確定是紅外輻射測量主要關切的問題。經由大量物理與材料領域研究人員的努力，實驗並歸納出一般物體的放射率規律如下：

- I. 一般金屬的放射率較低，但會隨著溫度升高而變大。並且與其表面狀態密切相關，例如表面形成氧化層後，放射率便會 10 倍以上的增加。
- II. 非金屬的放射率比金屬高，一般大於 0.8，並隨溫度升高而減小。
- III. 物體的放射率除了隨溫度而變化外，也隨輻射波長變化而變化，但幅度不大，在某些局部波段範圍內甚至可視為常數。
- IV. 物體表面電鍍或塗覆其他材料後，物體的放射率僅與表面塗層材料輻射特性及厚薄相關，而與物體輻射性能無關。

2.4.3 紅外線熱像技術

利用紅外輻射原理進行溫度測量的儀器，是從簡單到複雜、從材料、光學、微機電、半導體等基礎到系統整合，以及其中各領域導入各種演算法進行數值轉換、校正的軟體等等，歷經近百年的發展；正如同其它先進科技，這些原理與技術最先也是因為軍事用途而開始，轉為民生工業的用途。

為了呈現物體表面完整的溫度分布，掃描偵測物體表面上不同位置所發射的輻射強度，將輻射源平面座標對應到感測器的相對位置，即構成所謂的「熱影像」。紅外線熱像儀就是偵測物體表面不同位置的輻射能，產生熱影像，結合影像處理技術，以各種方式呈現熱影像的儀器。由於熱像儀偵測紅外線而非可見光，理論上熱影像與色彩並無直接關係，但是為了凸顯物體表面溫度分佈的差異，常以人為方式將熱影像的溫度值，對應到一系列的色彩，稱為虛擬顏色(pseudo Color)，使人更易於分辨物體表面的溫度分佈情形。



第三章 實驗儀器與實驗方法

3.1 實驗儀器

雷虎 Ghost+空拍機

在無人載具的部份本實驗選用了雷虎 GHOST+空拍機如圖 3.1-1，利用其抗風性佳和操作距離遠的優點，其詳細規格如表 3.1-1。



圖 3.1-1 雷虎 Ghost+空拍機

表 3.1-1 空拍機規格參數

機體類型	4旋翼
遙控距離	1 Km
抗風等級	5級風 (10m/s)
滯空時間(空機)	25 Mins
最大載重	0.81 KG
對角線馬達軸距	450 mm
馬達定子尺寸	28x14 mm
螺旋槳尺寸	12" X 4.5"

熱像儀

在熱像儀的部分，本實驗選用了 FLIR ONE PRO 如圖 3.1-2，最大的特點是可以和手機連接，利用這個特性，結合手機和撰寫的應用程式連結手機、電腦和熱像儀達到 GPS 定位和影像無線傳輸系統，詳細規格如表 3.1-2。



圖 3.1-2 FLIR ONE PRO

表 3.1-2 热像仪规格参数

紅外線	MFi (iOS version), RoHS, CE/FCC, CEC-BC, EN61233
热解析度	640x480
量測範圍	-20 °C 到 400 °C (-4 °F 到 752 °F)
热敏度 (MRTD)	150 mK

可調式支架

當熱像儀和拍攝角度非垂直時，容易接收到其他角度的紅外線反射量而紅外線造成誤差，所以本實驗將支架設計成可調式機構(如圖 3.1-3)，可以配合量測電廠太陽能模組架設的角度去做調整。



圖 3.1-3 可調式支架

減震球/抗震螺母

為了增加拍攝時的穩定度，本實驗在空拍機底部和手機支架中加裝了減震球(如圖 3.1-4)，降低飛行時震動造成的影響，並將螺母替換成抗震螺母(如圖 3.1-5)，抗震螺母在底部加入了一層橡膠，可以有效避免因為飛行震動造成脫落的可能性。



圖 3.1-4 減震球



圖 3.1-5 抗震螺母

手持式日照計

圖 3.1-6 和圖 3.1-7 為手持式日照計，是一種設計用來專門測量太陽日射量的手持式日照計，量測單位為 W/m^2 。



圖 3.1-6 LP PYRA 03



圖 3.1-7 Delta OHM HD2102.2

電流勾表

圖 3.1-8 為電流勾表，是一種多功能的攜帶型量測工具，最大的特色是可以利用非接觸的方式量測直流/交流電流，可量測使用中的太陽能模組。



圖 3.1-8 PROVA 11 電流勾表

手持式風速計

圖 3.1-9 為手持式風速計，是一種設計用來測量風速大小的手持式儀器，可以量測平均風速、最大及最小風速，量測單位為 m/s。



圖 3.1-9 手持式風速計

3.1.1 使用程式語言之簡介

3.2.1.1 Java

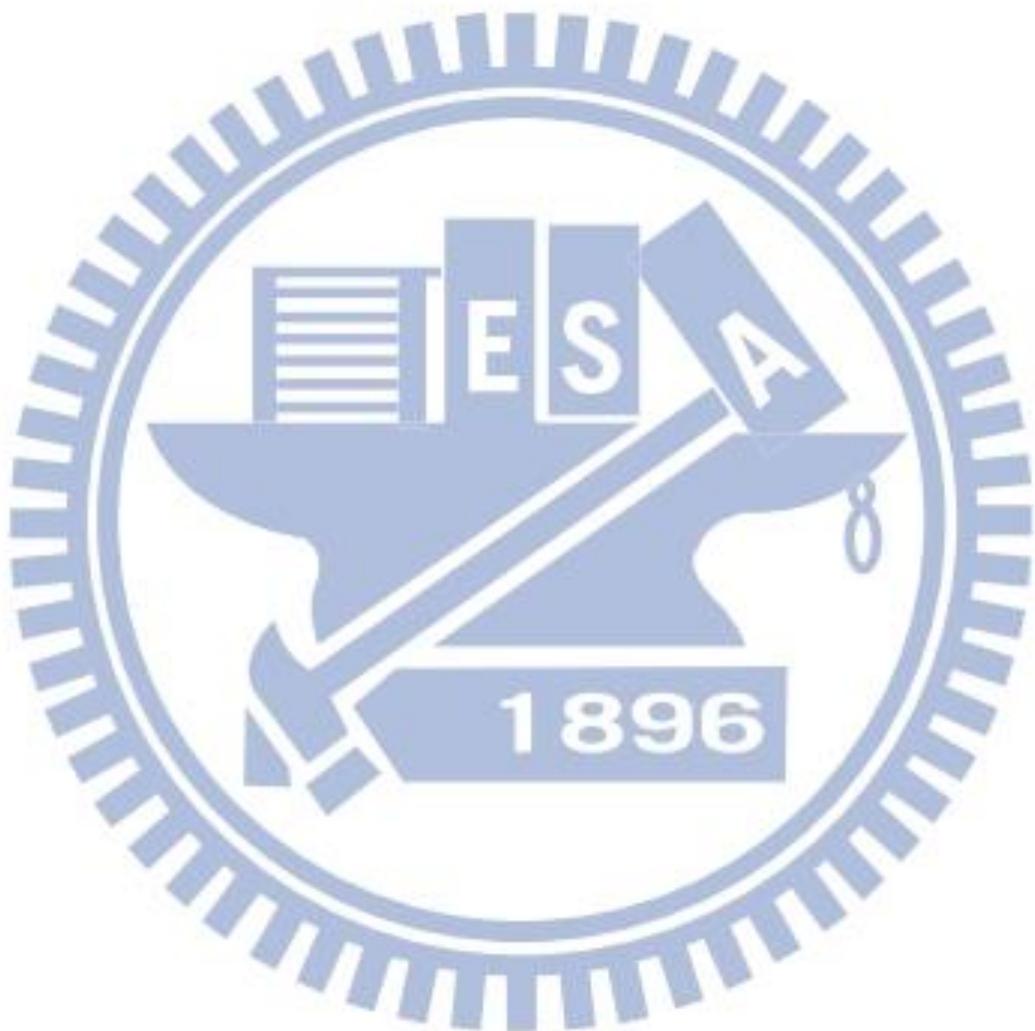
Java 是一種廣泛使用的電腦程式設計語言，擁有跨平台、物件導向、泛型程式設計的特性，廣泛應用於企業級 Web 應用開發和行動應用開發。

任職於昇陽電腦的詹姆斯·高斯林等人於 1990 年代初開發 Java 語言的雛形，最初被命名為 Oak，目標設定在家用電器等小型系統的程式語言，應用在電視機、電話、鬧鐘、烤麵包機等家用電器的控制和通訊。由於這些智慧型家電的市場需求沒有預期的高，Sun 公司放棄了該項計劃。隨著 1990 年代網際網路的發展，Sun 公司看見 Oak 在網際網路上應用的前景，於是改造了 Oak，於 1995 年 5 月以 Java 的名稱正式釋出。Java 伴隨著網際網路的迅速崛起而發展，逐漸成為重要的網路程式語言。

Java 程式語言的風格十分接近 C++ 語言。繼承了 C++ 語言物件導向技術的核心，Java 捨棄了 C++ 語言中容易引起錯誤的指標，改以參照取代，同時移除了 C++ 中的運算子多載和多重繼承特性，改用介面取代，增加垃圾回收器功能。在 Java SE 1.5 版本中引入了泛型程式設計、類型安全的列舉、不定長參數和自動裝/拆箱特性。

昇陽電腦對 Java 語言的解釋是：「Java 程式語言是個簡單、物件導向、分散式、解釋性、健壯、安全與系統無關、可移植、高效能、多執行緒和動態的語言」

Java 不同於一般的編譯語言或直譯語言。它首先將原始碼編譯成位元組碼，然後依賴各種不同平台上的虛擬機器來解釋執行位元組碼，從而實現了「一次編寫，到處執行」的跨平台特性。



3.1.1.2 Eclipse

一般來說，在撰寫 Java 程式時，由於需要注意的細節很多，因此通常要有一套 IDE (Integrated Development Environment；整合開發環境) 來協助我們開發 Java 程式。

Eclipse 最初是由 IBM 公司開發的替代商業軟體 Visual Age for Java 的下一代 IDE 開發環境，2001 年 11 月貢獻給開源社群，現在它由非營利軟體供應商聯盟 Eclipse 基金會 (Eclipse Foundation) 管理。

一般在撰寫程式時需要將自己的想法撰寫成 code，之後藉由 Eclipse 或類似功能的 IDE 尋找適合的編譯器翻譯成電腦可以讀取的 machine code 程式，設計流程如圖 3.1.1.2-1 所示。



Eclipse

圖 3.1.1.2-1 基本程式語言架構

3.2 實驗方法

3.2.1 戶外環境監控實驗

利用架設於國立成功大學歸仁校區頂樓的全天日射計(如圖 3.2-1)，監控戶外長期的氣象資料，例如每日平均日照量、每日平均溫度等背景值，便能夠了解到台灣南部的每月平均日照量。本實驗參考該量測數據，進行相關研究分析。

全天日射計係採用 Kipp & Zonen 公司的日射計，型號為 CMP 11，日照量測範圍 0 至 4000 W/m^2 ，光譜響應範圍 285 至 2800 nm，工作溫度範圍為 -40°C 至 80°C ，靈敏度範圍為 7 至 $14 \mu\text{V/W/m}^2$ 。收集量測數據經由傳輸線連接至電腦，使用對應軟體將數據接收且儲存至電腦當中，透過軟體可即時得知量測數據。



圖 3.2-1 架設於國立成功大學歸仁校區頂樓的日射計

3.2.2 新型太陽能電廠熱影像檢測系統研發

本研究所設計的新型太陽能電廠檢測系統主要分為兩大部分：第一部份為硬體的設計研製；第二部分為軟體程式設計。

在硬體的部分，為了達到一個快速且穩定的檢測方式，本實驗結合無人載具、熱像儀、GPS 和影像無線傳輸系統，實現快速方便的即時圖像檢測。如章節 3.1 所介紹。

在軟體的部分，本實驗主要分為三個部分，分別是熱像/即時圖像顯示、計算流程和結果顯示，大略的流程圖如圖 3.3.2-4 所示。

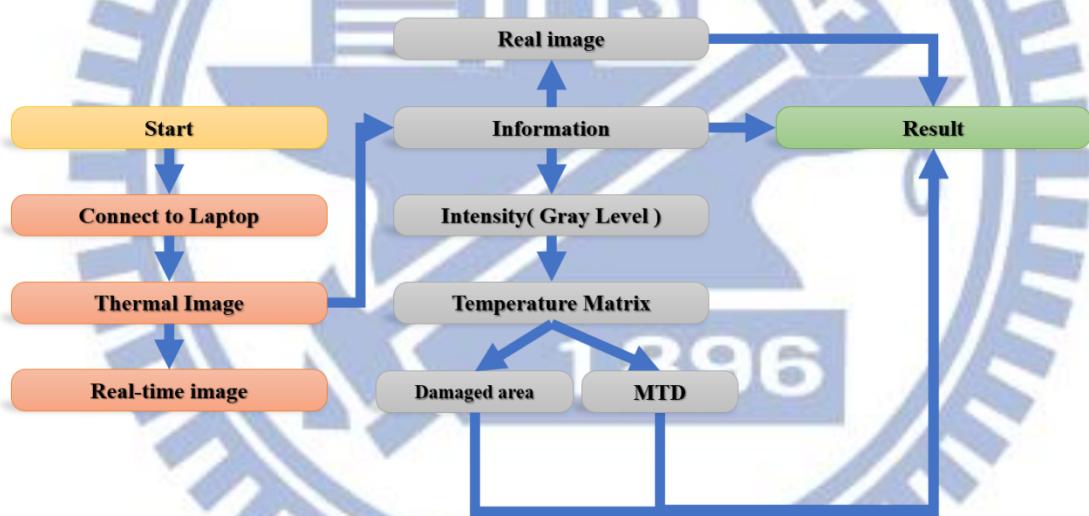


圖 3.2.2-1 程式流程圖

3.2.1.1 热像/即时图像显示

使用自行開發的程式經由無線網路連接行動電話和筆記型電腦，並使用該程式遠端遙控行動電話，使得與行動電話連結的熱像儀可以自動連續拍攝熱相片，然後經由網路傳送到筆記型電腦內，再利用程式讀取熱相片並不斷播放熱相片，將其顯示在程式畫面中，以達成飛行中的即時影像畫面。

3.2.1.2 模組損傷計算

當拍攝的熱相片回傳到電腦的時候，程式同時進行即時影像顯示和模組損傷計算。在模組損傷計算的部分，首先程式將讀取熱相片的信息，其中包括拍攝時間、熱相片儲存路徑、可見光影像和 GPS 座標，其次程式會將熱像轉換成強度（灰階影像），接著程式將每個元素經由溫度—強度的對應關係轉換成溫度參數，並存儲成溫度矩陣。

為了直接從熱相片中計算模組的毀損程度，本實驗參考了 Thompson, D. W. 對對數平均溫差的定義（logarithmic mean temperature difference）[16]，定義出平均溫度差（mean temperature difference）簡稱為 MTD。

其中

$$MTD = \frac{\sum(T_a - T_{normal})}{N_a}; \quad (3.2.1.2-1)$$

T_{normal} : 正常工作溫度 = T_{min} ；

T_a : 大於 T_{normal} 的溫度；

N_a : 溫度大於 T_{normal} 的元素數量。

研究中為了區分大面積受損和未受損的太陽能模組，我們定義了損壞區域

$$\text{損壞區域} = \frac{\text{numbers of temperature above } (T_{max} - \frac{MTD}{2})}{\text{total element}} \quad (3.2.1.2-2)$$

3.2.1.3 結果顯示

使用該程式來整理電廠所有熱圖像信息，並根據量測結果依據 MTD 從大到小做排列，顯示其 GPS、毀損面積、可見光圖像和工作溫度等。

3.2.3 直接利用熱相片推算效率實驗流程及實驗方法



- **開始檢測**

將 GHOST+空拍機開啟並將熱像儀安裝上去，等候其衛星定位超過 6 個以上，機身會呈現綠色狀態表示可以進行飛行，之後按下程式的”START”按鍵，熱像儀就開始持續地拍攝熱相片，最後以遙控器控制 GHOST+空拍機以固定 1.5 m 的飛行高度飛行，並開始檢測。

- **利用 GPS 讀取電廠模組資訊**

透過事先將電廠資訊輸入到程式中，在飛行的過程中，只要進入對應電場的 GPS 位置，即自動讀取其參數。

- **結束後按下 STOP**

檢測結束之後將飛機降落，按下程式的”STOP”按鍵，結束熱相片的連續拍攝。

- **讀取熱相片**

按下程式的 ” Thermal Image”按鍵，程式將剛剛拍攝的熱相片依照 MTD 和毀損面積去排列挑出毀損程度較大的太陽能模組。

- **轉換成溫度矩陣**

開啟電腦中的 Eclipse 程式，讀取分析相關程式檔案，按下”Run”鍵，應用程式視窗出現，讀取特定的熱相片按下”Analysis”按鍵，將熱相片轉換成強度(灰階影像)之後，透過溫度-強度的關係轉化成各點的溫度，最後將熱相片上所有的溫度以矩陣的方式儲存。詳細流程如圖 3.2.3-6 所示

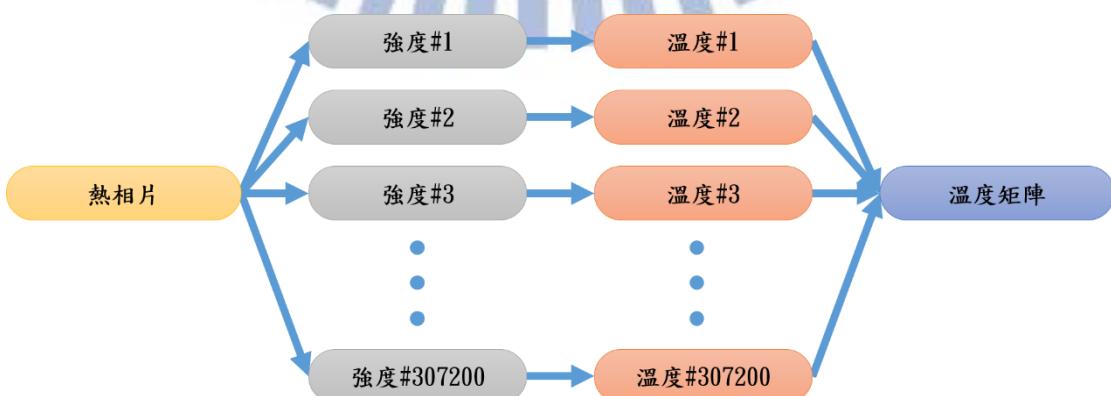


圖 3.2.3-6 溫度矩陣流程圖

- 輸入參數

在程式中輸入量測當天的日射強度和氣溫、風速等參數微調量測上的誤差。

- 運算

利用經由實驗得到的溫度-效率的關係曲線，程式將溫度矩陣中的每一點轉化成每一點的效率。

- 發電量

最後程式將每一點的效率、每一點的面積和日射強度相乘得到估算的發電量(如式 3.2.3-1)，簡易流程圖如圖 3.2.3-7 所示。

$$\text{Efficiency} \times dA \times Irradince = \text{Power generation per unit area} \quad (3.2.3-1)$$

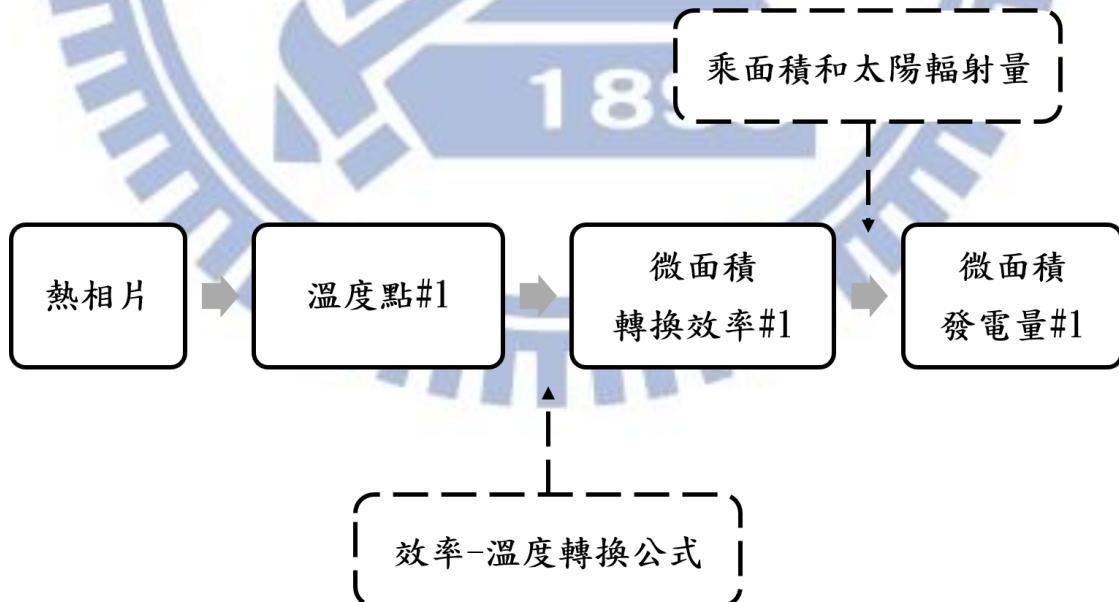


圖 3.2.3-7 估算發電量簡易流程圖

3.2.4 太陽能模組損壞種類分析流程及實驗方法

3.2.4.1 陰影效應 (Shadow effect)

Chaintreuil、Barruel、Le Pivert、Buttin 和 Merten 在他們針對單晶矽太陽光電陣列所提出的論文「Effects of shadow on a grid connected PV System」[17]中指出，根據陣列的連結方式，只要 2.6% 的陰影就能造成 16.7% 的總陣列電能損失，由此可知陰影效應對太陽能模組將產生巨大的影響。

本實驗將對陰影效應[18, 19]去做進一步的研究，實驗中選用 Winaico 公司出產的多晶矽太陽能模組 WSP-230P6 進行測試，首先連結太陽能模組和三用電表量測其電壓和電流，再以章節 3.2.3 的檢測流程拍攝熱相片，之後加入不同面積的遮蔽版量測其電壓電流，再拍攝熱相片重複這個實驗流程數次，取得不同遮蔽面積下太陽能模組的電壓電流值和其熱相片。

本實驗針對兩種不同的遮蔽方式[20-22]，分別為逐漸增加太陽能模組鉛直方向的遮蔽面積如圖 3.2.4.1-1 和逐漸增加太陽能模組水平方向的遮蔽面積如圖 3.2.4.1-2。

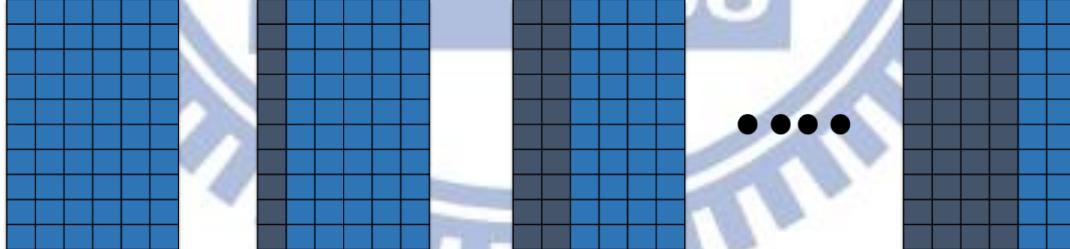


圖 3.2.4.1-1 鉛直的遮蔽方式

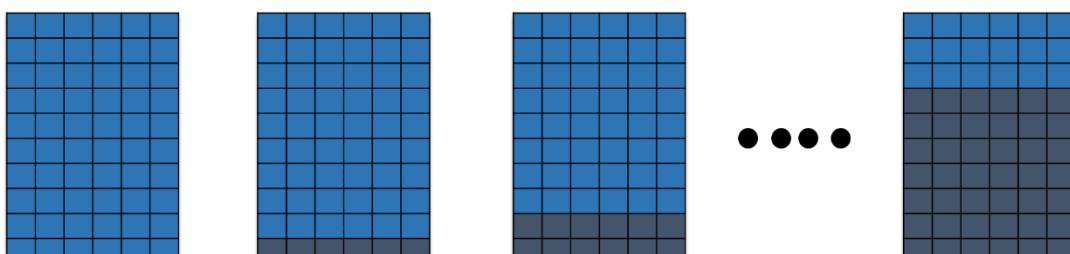


圖 3.2.4.1-2 水平的遮蔽方式

3.2.4.2 蝸牛紋(Snail trails)

當太陽光電模組機械強度不足，在外界應力作用下容易造成電池破片 (Cell Crack)，經陽光曝曬後，EVA 產生光氧化衰減而形成類似蝸牛爬行過痕跡，稱為蝸牛紋 (Snail Trail) 或閃電紋 [23]，圖 3.2.4.2-1 就是在交通大學光電學院頂樓的太陽能模組中實際拍攝到的蝸牛紋圖片。



圖 3.2.4.2-1 蝸牛紋圖片

本實驗另將探討蝸牛紋和太陽能模組發電效率之間的關係，經檢測該太陽能板，並挑出其中蝸牛紋較明顯的模組，再利用三用電表量測其電壓電流，並以章節 3.2.3 的檢測流程拍攝其熱相片，觀察其熱相片和太陽能模組發電效率的關係。

3.2.4.3 表面毀損 (PV module with broken front glass)

太陽能模組因安裝在戶外，常常會受到一些外力作用，導致模組的損傷而影響其模組的發電效率。

本實驗將針對表面毀損較為嚴重的太陽能模組，對其進行分析(如圖 3.2.4.3)，本實驗中將利用三用電表量測其電壓電流，再以章節 3.2.3 的檢測流程拍攝熱相片，並探討熱相片、平均溫度差 (MTD) 和太陽能模組發電效率的關係。



圖 3.2.4.3-1 表面毀損嚴重的太陽能模組

第四章 結果與討論

本研究所進行的各項實驗測試，包括戶外環境監控實驗、新型太陽能電廠檢測系統實測、直接利用熱相片推算效率實驗和常見太陽能損壞種類實驗等等利用設計的系統檢測的結果進行分析說明。

4.1 戶外環境監控實驗數據分析

為探討台南歸仁的平均日照量，經統計三年監控資料並分析。如圖 4.1-1 為 2015 年 7 月至 2018 年 6 月的平均日照量，2015 年 7 月至 2016 年 6 月的平均日照量為 4.536 kWh/m²/day；2016 年 7 月至 2017 年 6 月的平均日照量為 4.711 kWh/m²/day，而 2017 年 7 月至 2018 年 6 月的平均日照量為 4.704 kWh/m²/day。由圖 4.1-1 可以發現，每一年中相同月份的日照量差距不小，以三月為例，以 2017 年作為基準，2016 年的日照量低於 2017 年達 22%，其原因與台灣位於亞熱帶之高溫高濕的熱島型氣候相關，加上近幾年全球暖化影響加劇導致氣候異常，天氣極為不穩定，尤其六月至八月台灣常受到颱風的影響，但三年的平均日照量及平均溫度皆相差不多。另外，依據公式(4.1)我們可推算及分析戶外太陽能模組之年平均發電量，如以一片 245W 太陽能電池模組來計算，三年的年發電量分別為 392.0 kWh、421.6 kWh、421.2 kWh，相當於一般冷氣機(900W)可使用約 450 個小時，預計每年可為台灣減少約 280 公斤的二氧化碳排放量。而三年的等效日照時數(E.S.H)[24, 25]分別為 4.73 hrs、4.28 hrs 及 4.67 hrs，其中等效日照時數 (E.S.H)為當地之日射量換算為 1kW/m²/day 標準測試條件下之有效照射時間，也就是能達到太陽能電池模組全功率運轉的日照強度在一天中的總時數，一般情況 E.S.H.值在 3 hrs 以上是適合裝置太陽能發電系統，因此可以推斷台南歸仁地區是符合架設條件的。

$$E_p = P \times H \times K \times 365 \quad (4.1-1)$$

P : 太陽電池組列容量 (kW)

H : 等效日照時數 (hrs)

K : 綜合設計係數 (無單位, 一般慣例取 0.7)

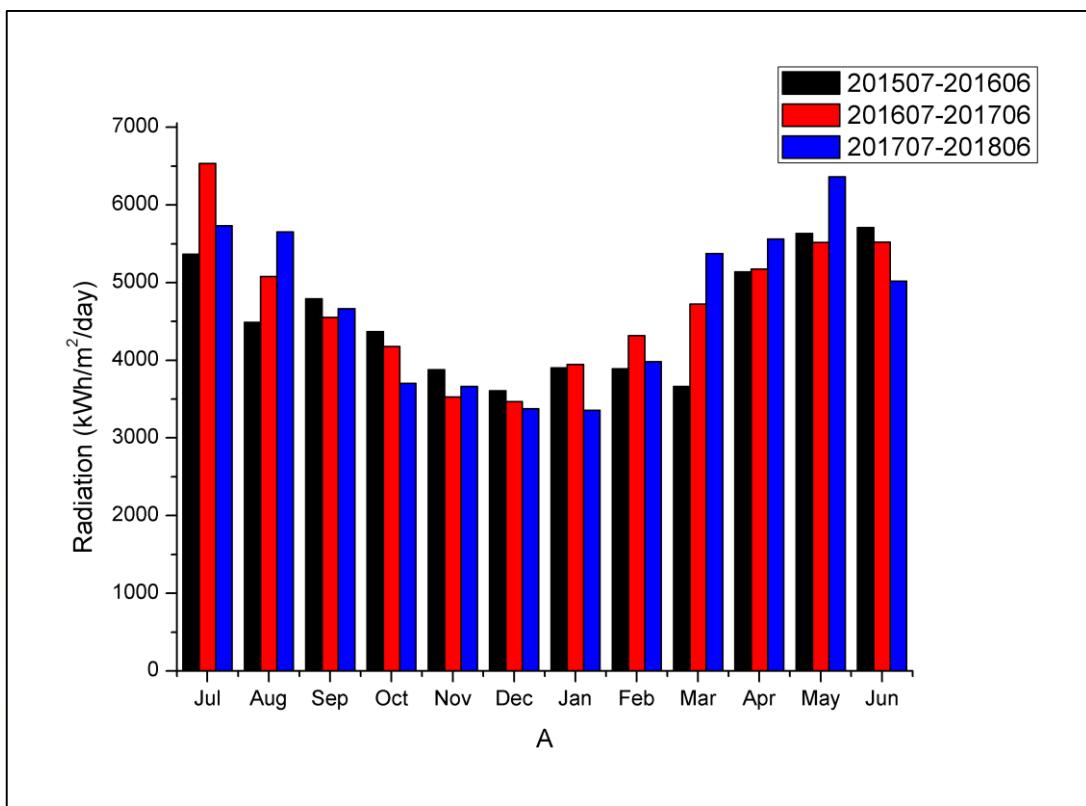


圖 4.1-1 台南歸仁區 2015 年七月至 2018 六月 不同月分之平均日照量圖

4.2 新型太陽能電廠檢測系統實測

本研究經過反覆的較佳化影像測試最清晰易辨識，最後決定將檢測高度定為 1.5 m、最大飛行速度為 3.6 m/s，因為量測高度較低使得拍攝時單片太陽能模組在熱相片上紀錄的溫度點數量大幅增加，使量測的精準度上升，可以去做進一步的分析。

圖 4.2-1 為使用章節 3.2.2 所設計的新型太陽能電廠檢測系統拍攝位於交通大學台南校區頂樓太陽能模組的熱相片，如圖所示每一張熱相片都會記錄其熱相片、GPS 定位和可見光影像。

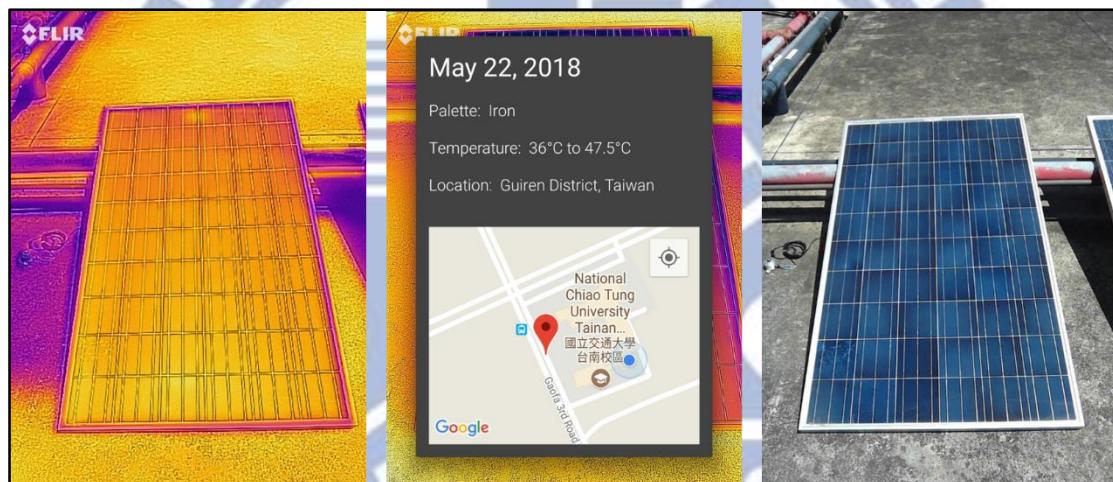


圖 4.2-1 热相片下的太阳能模组

圖 4.2-2 為全新剛拆封的 WINAICO WSP-240P6 模組，可以明顯地看到圖片中無毀損的太陽模組上方有一個熱斑，是因為太陽能模組經過光電轉換產生出來的電流統一彙整到接線盒中導致接線盒產生電流熱效應所以會檢測到相對的高溫。

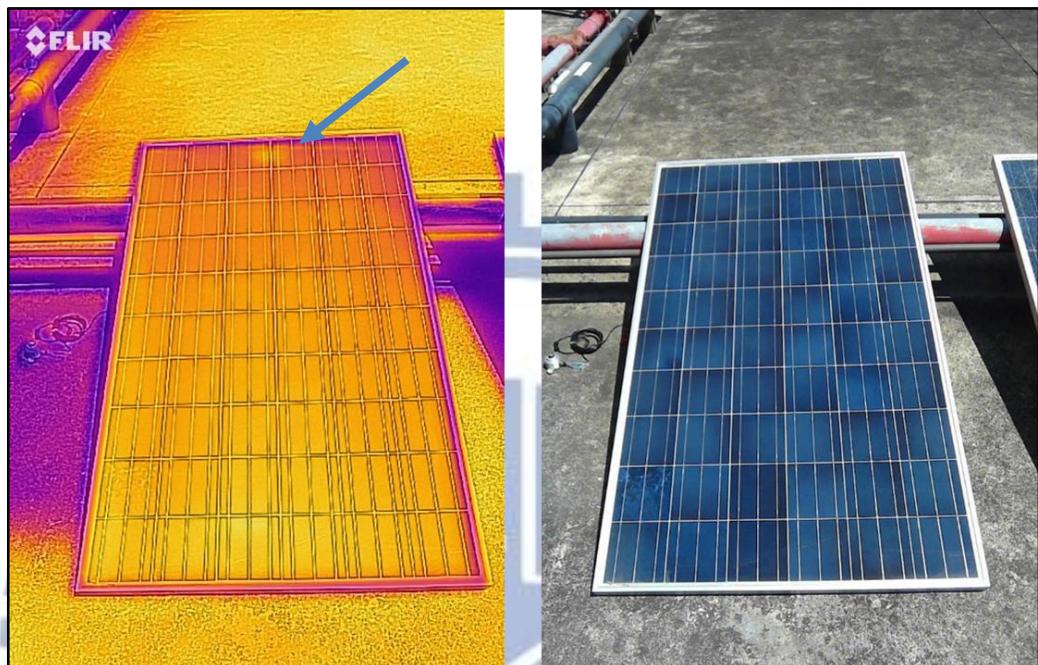


圖 4.2-2 無毀損太陽能模組熱相片



圖 4.2-3 太陽能模組背面接線盒

圖 4.2-3 為毀損的太陽能模組，從可見光影像來看就和一般的太陽能模組差異不大看不出任何毀損的跡象，不過相較從熱影像中可以明顯看出其熱斑的分布狀況，實際量測其電壓電流也可以發現熱斑會影響太陽能模組的發電效能，相關的量測數據和實驗會在章節 4.3 詳述。



圖 4.2-4 毀損太陽能模組熱相片

為了能更深入的探討太陽能板的損傷狀況，如同章節 3.2.1.2 所介紹本實驗參考了 Thompson, D. W. 對對數平均溫差的定義 (LMTD) [16]，定義出平均溫度差 (mean temperature difference) 簡稱為 MTD。

採用章節 3.2.3 所介紹的方法，將熱相片轉換成為溫度矩陣，並將圖 4.2-4 轉化為溫度矩陣，再利用 MATLAB 作圖並上色方便觀察其溫度分布，可以看出選定的太陽能模組有三處明顯得的熱斑如圖 4.2-5。同樣再利用 MATLAB 將溫度矩陣繪製成立面圖如圖 4.2-6 所示，溫度分布更加明顯也可以發現右下角的部分也有些許溫度上升的情況。

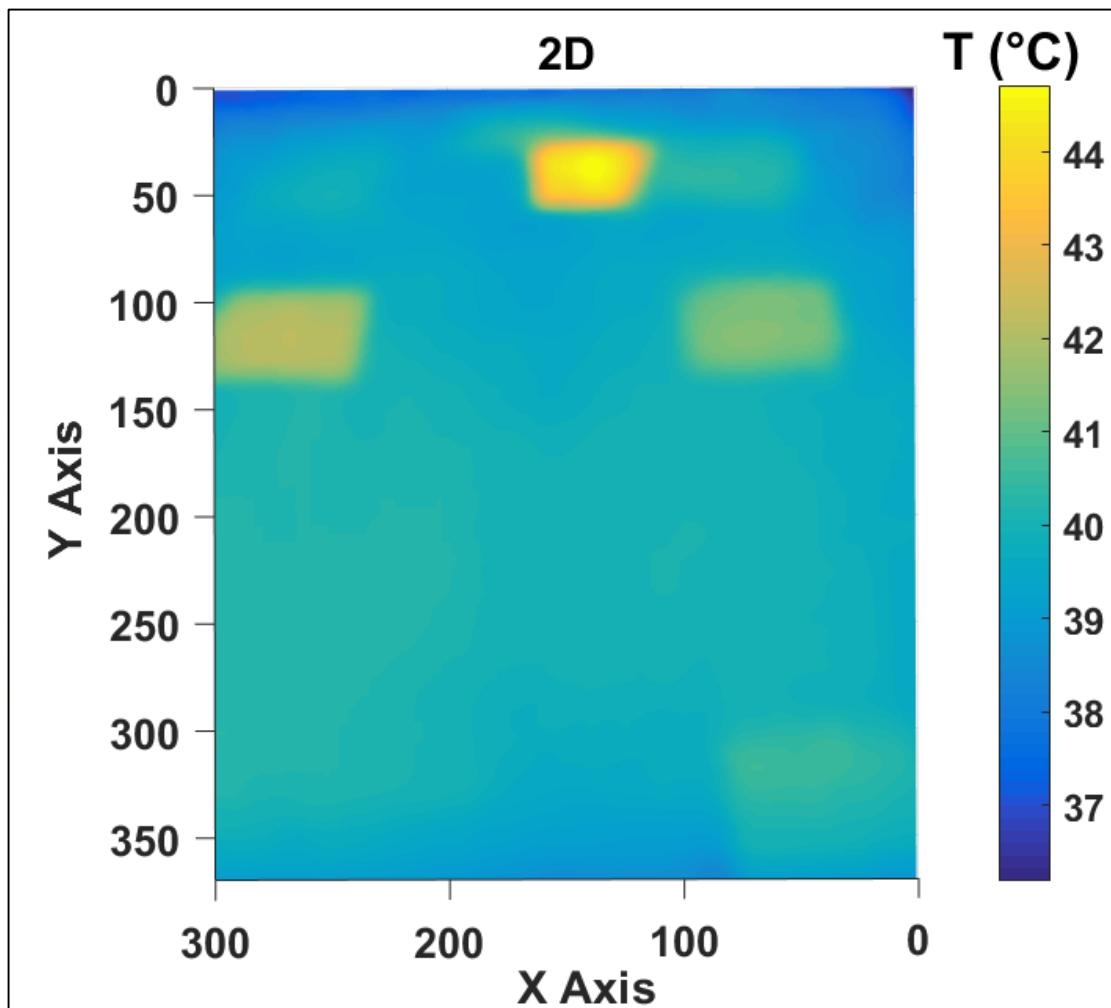


圖 4.2-5 溫度矩陣平面圖

接續採用章節 3.2.1.2 所介紹的方法，將太陽能模組光電轉換效率最好的點定為 T_{normal} (正常工作溫度)，即模組中溫度最低的點 T_{min} 。再把所有大於 T_{normal} 的溫度點的溫度和數量篩檢出來，並定義為 T_a 和 N_a ，並將所有大於正常工作溫度的溫度點溫度減去正常工作溫度，也就是 $T_a - T_{normal}$ 。

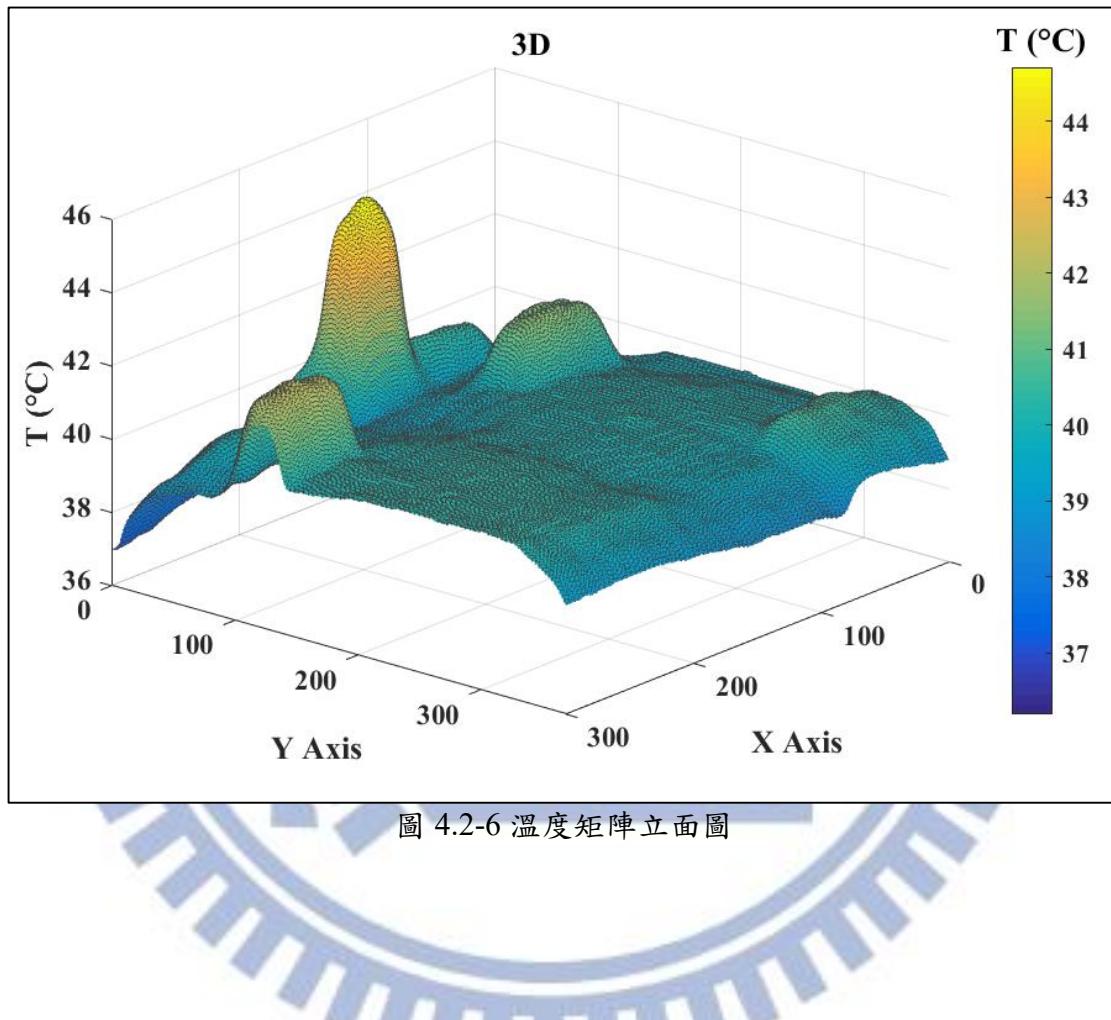


圖 4.2-6 溫度矩陣立面圖

以圖 4.2-5 為例，再該圖中的所有溫度點分布，將所有的溫度依據其最低溫 37.3°C (T_{normal}) 向下平移可以得到圖 4.2-7，圖中所顯示的為只剩下大於 37.3°C 的溫度點，可以明顯地看出每一個點跟 37.3°C (T_{normal}) 的溫度差，最後將所有的溫度差相加再除以大於 37.3°C (T_{normal}) 的溫度點數量，所得到的數值就是平均溫度差(MTD)。寫成數學式為：

$$MTD = \frac{\sum(T_a - T_{normal})}{N_a} \quad (4.2-1)$$

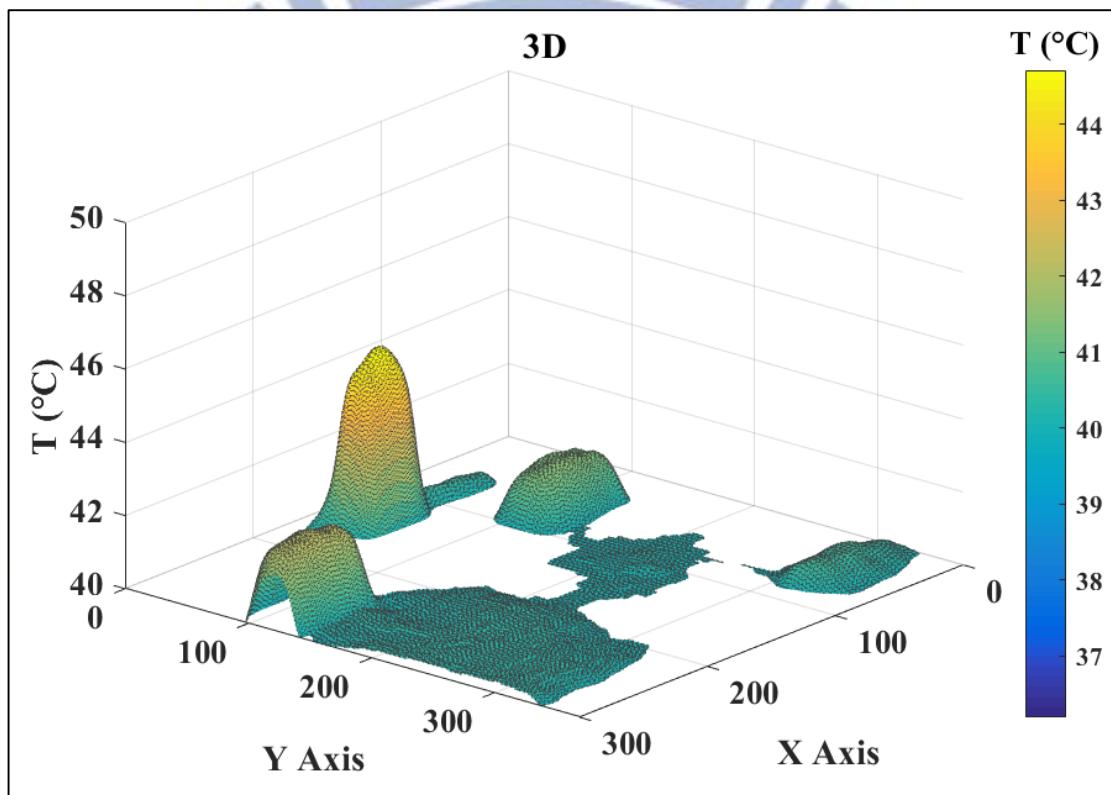


圖 4.2-7 溫度矩陣立面調整圖

圖 4.2-9 和表 4.2-1 為實際使用本研究設計的新型太陽能電廠檢測系統的實測結果，圖 4.2-8 為編撰程式的截圖。圖 4.2-9 標號 1 為未毀損的太陽能模組，可以從熱相片中看出整體的溫度分布相當的均勻，只有模組上部邊緣因為集線箱彙整電流造成高溫的熱斑。在圖 4.2-9 另可看出標號 2、標號 3、標號 4 的太陽能模組皆有溫度分布不均的熱斑現象，其中以標號 4 最為明顯，實際上程式運行的結果顯示標號 4 的 N_a 數值(大於工作溫度的溫度點數量)也是最高的。

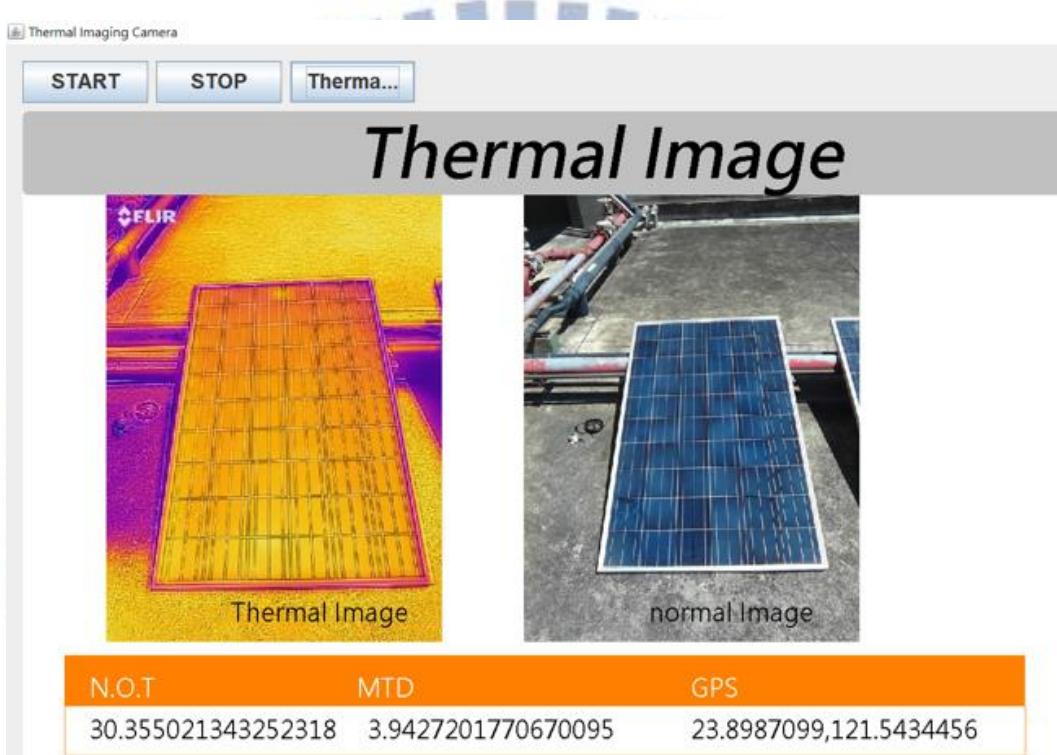


圖 4.2-8 編撰程式截圖

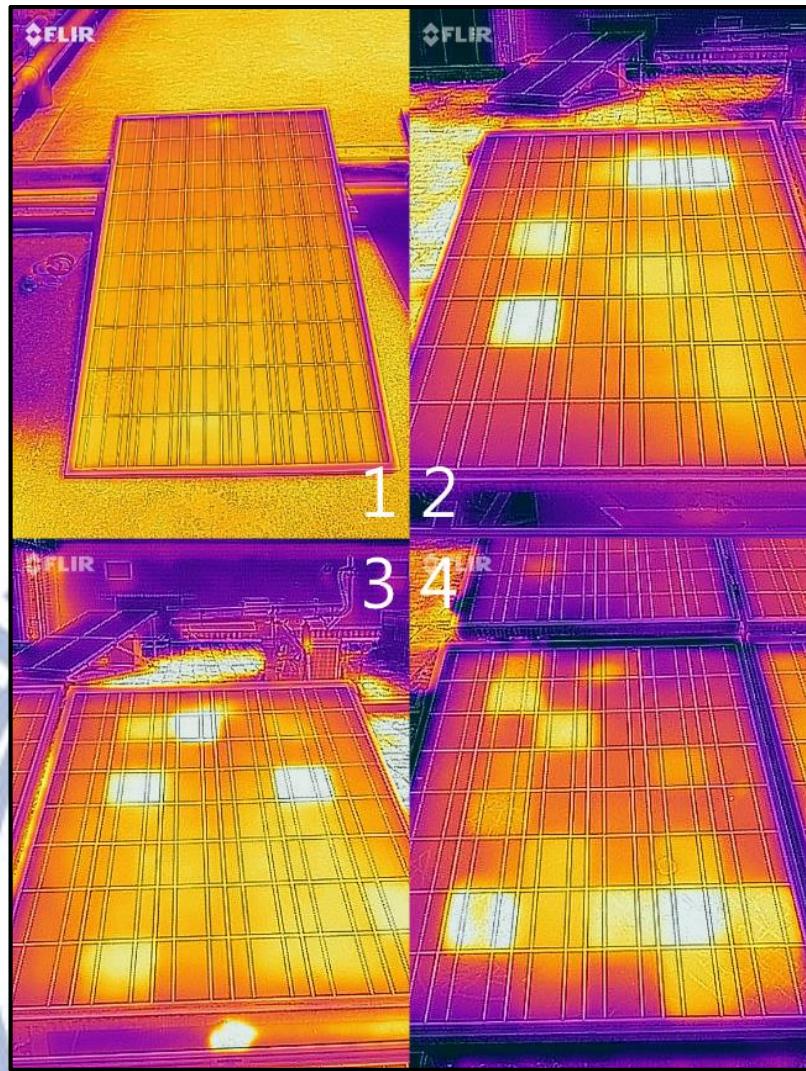


圖 4.2-9 實際量測太陽能模組的熱相片

由表 4.2-1 可以看到雖然損傷的程度不一，不過 4 片太陽能模組的電壓值相近分別為 25.2 V、25.3 V、25.4 V、25.3 V，這表示損傷的太陽能模組其電壓值並不會因為損傷而受到影響，主要影響的部分為光電轉換產生出來的電流分別為 8.38 A、8.01 A、7.83 A、7.04 A，進而影響到其功率並將標號 1 未損傷的太陽能模組作為基準計算出標號 2、標號 3、標號 4 的衰減程度分別為 4.036%、6.1925%、15.324%，最後經過程式計算可以得到標號 2、標號 3、標號 4 的 MTD 分別為 1.753、2.3042、3.566。

由熱相片和實際發電效率去比較，可以看出熱斑數量若是越多太陽能模組發電效率將會降低，並且由 MTD 和毀損程度來比較，可以得到當衰減的程度增加時，相對應的 MTD 也會跟著提高，由此可知，可以將 MTD 作為太陽能模組損壞程度的參考依據。

表 4.2-1 實際量測太陽能模組數據

Solar radiation	1004 W/m ²			
PV module	#1	#2	#3	#4
Current	8.38 A	8.01 A	7.83 A	7.04 A
Voltage	25.2 V	25.3 V	25.4 V	25.3 V
Power	211.18 W	202.65 W	198.1 W	178.816W
MTD	0.537	1.753	2.304	3.566
Decay	0	4.036%	6.1925%	15.324%

4.2.1 不同外界溫度對 MTD 影響實驗數據及分析

本研究探討了不同外界溫度對 MTD 的影響，挑選了數個太陽輻射強度約在 800W/m^2 但外界大氣溫度不相同的量測點，外界溫度分別為 $25.2\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $28.1\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $30.6\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $33.0\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $35.1\text{ }^\circ\text{C}$ ，並利用程式去執行得到相對應的 MTD，再計算個別的最大溫差也就是 $T_{\max} - T_{\min}$ 。表 4.2.1-1 為本實驗相關的量測數據，圖 4.2.1-1 左側 Y 軸為外界溫度對 MTD 之折線圖，MTD 在 $25.2\text{ }^\circ\text{C}$ 有最大值 3.311，之後隨著外界溫度上升而下降，在 $35.1\text{ }^\circ\text{C}$ 時有最小值 2.968。右側 Y 軸為外界溫度對最大溫度差之折線圖，最大溫差在 $25.2\text{ }^\circ\text{C}$ 有最大值 $6.31\text{ }^\circ\text{C}$ ，之後隨著外界溫度上升而下降在 $35.1\text{ }^\circ\text{C}$ 時有最小值 $5.42\text{ }^\circ\text{C}$ 。

由圖 4.2.1-1 可以明顯看出兩者的趨勢是相近的，推斷的理由如下，在相同太陽輻射量的情況下，當外界氣溫較高時太陽能模組光電轉換效率較差，造成部分熱能累積，因此增加了未毀損區域因照射太陽溫度升高的幅度，導致 $T_{\max} - T_{\min}$ 值稍微降低，也影響了 MTD 中的 T_{normal} ，使得 MTD 也稍微降低。

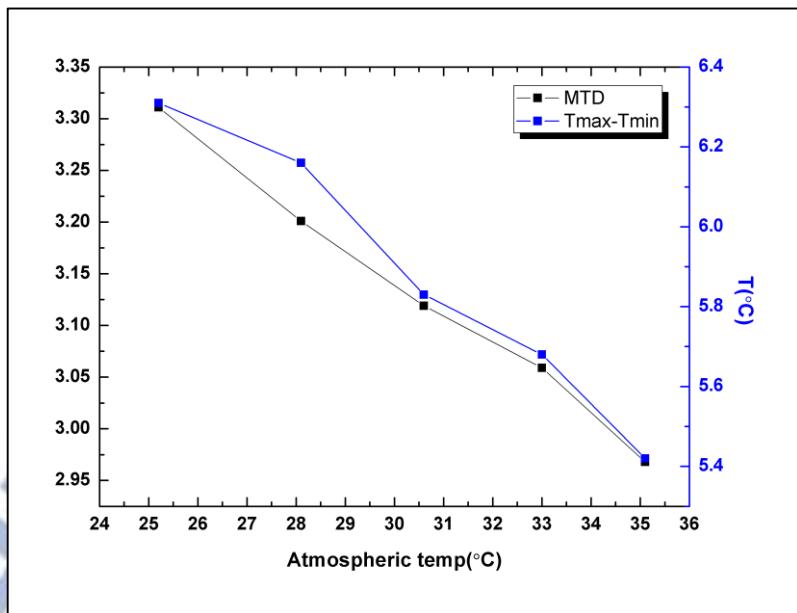


圖 4.2.1-1 外界溫度對 MTD 和最大溫差折線圖

表 4.2.1-1 不同大氣溫度對 MTD 影響實驗結果

Atmospheric temp (°C)	Solar irradiance ($W \cdot m^{-2}$)	P(W)	MTD	$T_{max} - T_{min}$ (°C)
25.2	796	187.04	3.311	6.31
28.1	803	185.85	3.201	6.16
30.6	801	182.15	3.119	5.83
33	802	187.05	3.059	5.68
35.1	804	182.01	2.968	5.42

4.3 直接利用熱相片推算效率實驗數據分析

太陽能模組的溫度越高，效率越低，此特性相似熱影像中觀察到的熱斑現象，為了探討兩者間的關係，本實驗做了多組太陽能模組表面溫度和其發電功率的量測。

溫度-效率轉換關係式

本實驗使用模組的型號為未受損的 WINAICO WSP-240P6，因室外的太陽輻射量會隨時間而改變，所以本研究探討的是其光電轉換效率，將量測的到的發電功率除以整片模組接收到的輻射量，如公式(4.3-1)所示，將量測到的電壓電流相乘可以得到模組的發電功率，之後再除去 WSP-240P6 的面積 1.663 m^2 和當下測量的太陽輻射量就可以得到當下的發電轉換效率，並使用熱像儀記錄其溫度，接著使用編寫的軟體讀取熱相片取得模組當下的平均溫度，並重複多次量測不同平均溫度下的發電效率，實驗結果如表 4.3-1 所示，並可以由圖 4.3-1 可得到溫度-效率之間的轉換關係式為(4.3-2)式。

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{\text{Solar radiation} * \text{Area}} \quad (4.3-1)$$

$$Eff = 0.17474 - (4.08592 * 10^{-4})T \quad (4.3-2)$$

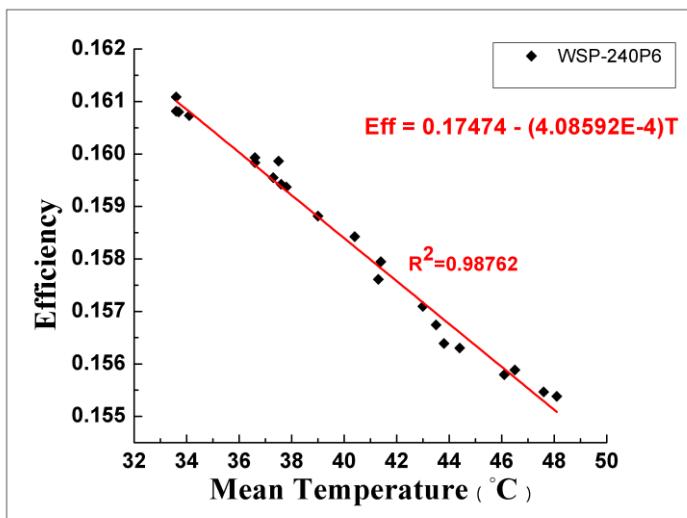


圖 4.3-1 溫度-效率關係曲線

表 4.3-1 溫度效率量測數據

I	V	P	Solar irradiance (W*m ⁻²)	T _{avg} (°C)	Area (m ²)	eff
3.97	33.8	134.190	510.75	41.4	1.663335	0.15795
4.00	33.7	134.800	511.55	40.4	1.663335	0.158424
3.96	33.6	133.060	510.35	43.5	1.663335	0.156742
3.94	33.5	131.990	507.4	43.8	1.663335	0.156391
4.09	33.7	110.270	414.5	36.6	1.663335	0.159933
3.83	33.4	103.540	394.95	41.3	1.663335	0.157611
2.76	33.6	74.189	277.35	33.6	1.663335	0.160816
3.03	33.5	80.903	304.85	37.3	1.663335	0.15955
3.05	33.4	82.164	309.85	37.6	1.663335	0.159423
3.00	33.4	80.494	303.65	37.8	1.663335	0.159371
4.40	33.1	145.64	563.5	48.1	1.663335	0.155384
2.25	33.6	75.6	282.65	33.7	1.663335	0.160803
5.06	33.5	169.51	652	44.4	1.663335	0.156303
4.63	33.4	154.64	596.4	46.5	1.663335	0.155887
4.45	33.1	147.3	569.6	47.6	1.663335	0.155467
1.74	33.1	57.594	214.95	33.6	1.663335	0.161087
2.77	33.8	93.626	350.2	34.1	1.663335	0.160731
3.27	33.7	110.2	414.5	36.6	1.663335	0.159836
2.71	33.4	90.514	340.4	37.5	1.663335	0.159862
2.55	33.0	84.15	318.55	39	1.663335	0.158817
3.14	33.3	104.562	400.15	43	1.663335	0.157098
1.74	31.7	55.158	212.85	46.1	1.663335	0.155796

熱相片估算發電量

首先將實驗用的太陽能模組 WINAICO WSP-240P6 的面積 1.663 m^2 除以熱像儀的解析度 640×480 , 可以得出每個像素的單位微面積為 $5.41341\text{E-}06\text{ m}^2$ 或 0.54 mm^2 , 再將每一個點的溫度帶入 4.3-2 式溫度-效率轉換關係式, 可以得到每一個溫度點的光電轉換效率, 利用程式重複約 30 萬次得到太陽能模組熱相片中每一個溫度點個別的效率, 如圖 4.3-2 所示, 該圖顯示毀損太陽能模組的熱相片經過轉換得到的各點效率, 圖中顏色較深的部分即為轉換效率較差的損傷部分。

最後利用

$$\text{光電轉換效率} \times \text{微面積} \times \text{太陽輻射量} = \text{單位面積下的發電量}$$

可以得到單位微面積下所產生的發電量, 再利用編寫的程式將所有微發電量疊加即可估算出整體的發電量。

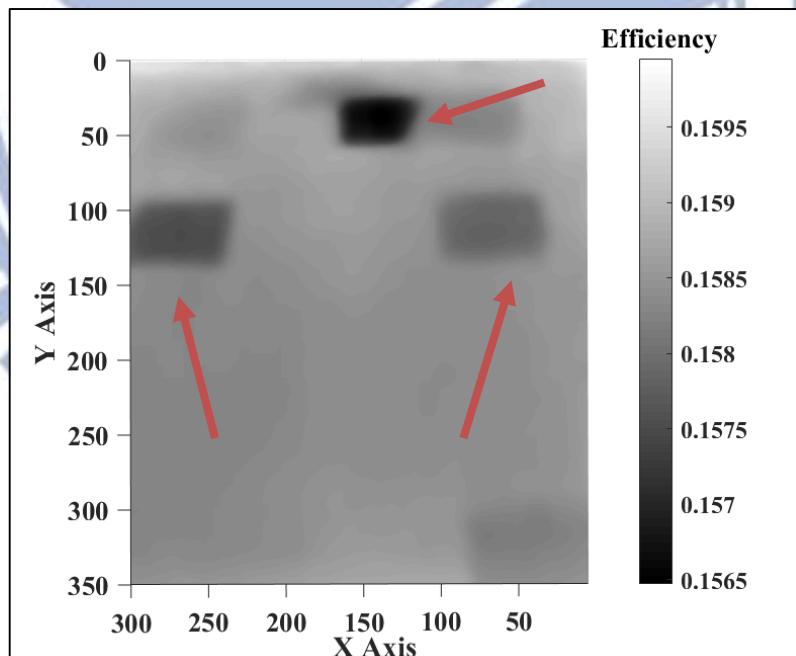


圖 4.3-2 各點光電轉換效率

圖 4.3-3 為估算發電量實驗所量測的三片 WSP-240P6 毀損模組，並將結果列在表 4.3-2，經過了二十次的估算，可以得到誤差皆落在 2 至 6 % 的範圍內，誤差介於 1 至 2 % 之間的有一筆數據、誤差介於 2 至 3 % 之間的有六筆、誤差介於 3 至 4 % 之間的有一筆數據、誤差介於 4 至 5 % 之間的有五筆數據、誤差介於 5 至 6 % 之間的有七筆數據，最小的誤差為 1.83%、估算的發電量和實際發電量相差 2.521 W，最大誤差為 5.79 %、估算的發電量和實際發電量相差 6.774 W。

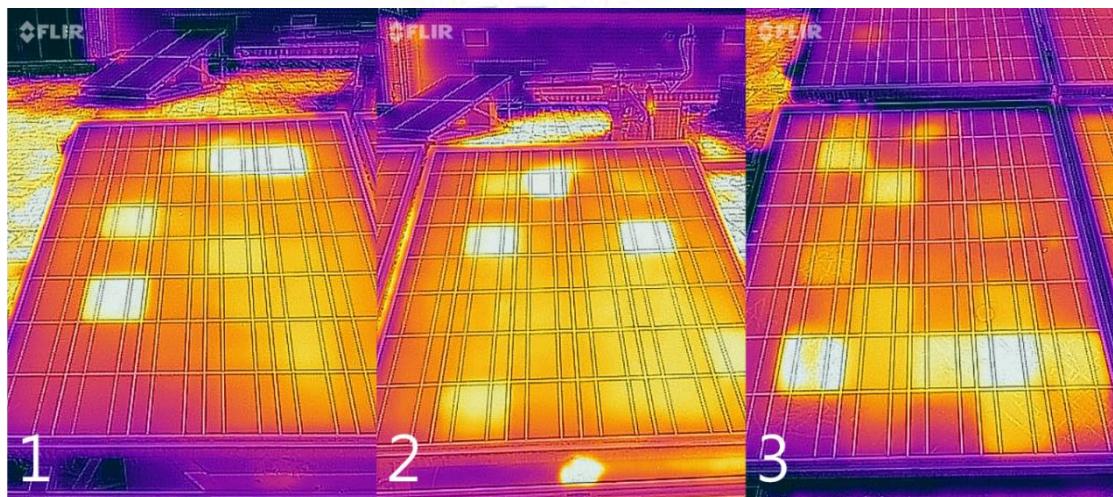


圖 4.3-3 利用熱相片估算發電量實驗模組



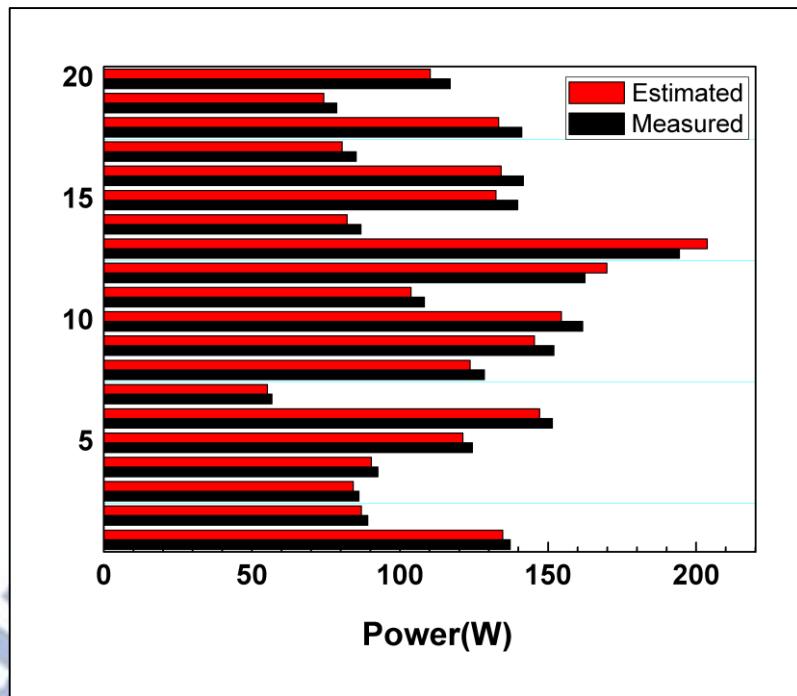


圖 4.3-4 估算結果誤差直方圖

表 4.3-2 利用熱相片估算發電量實驗結果

I(A)	V(V)	P(W)	Solar irradiance (W^*m^{-2})	Area (m^2)	Estimated power(W)	Error(%)
4.07	33.7	137.2	511.55	1.663335	134.637	1.83
2.70	33	89.1	332.10	1.663335	86.93285	2.43
2.61	33	86.1	318.55	1.663335	84.14363	2.30
2.77	33.4	92.5	340.40	1.663335	90.26224	2.44
3.76	33.1	124.5	457.30	1.663335	121.1979	2.62
4.56	33.2	151.4	569.60	1.663335	147.1282	2.81
1.79	31.7	56.7	212.85	1.663335	55.19635	2.72
3.87	33.2	128.5	474.95	1.663335	123.6484	3.76
4.59	33.1	151.9	563.50	1.663335	145.3611	4.32
4.84	33.4	161.7	596.40	1.663335	154.4966	4.42
3.24	33.4	108.2	394.95	1.663335	103.707	4.16
4.85	33.5	162.5	652.00	1.663335	169.8302	4.52
5.87	33.1	194.3	800.30	1.663335	203.7812	4.88
2.60	33.4	86.7	309.85	1.663335	82.14038	5.41
4.17	33.5	139.7	507.40	1.663335	132.3723	5.24
4.19	33.8	141.6	510.75	1.663335	134.0794	5.32
2.55	33.4	85.2	303.65	1.663335	80.4555	5.53
4.20	33.6	141.1	510.35	1.663335	133.246	5.57
2.34	33.6	78.6	277.35	1.663335	74.2787	5.52
3.47	33.7	116.9	414.50	1.663335	110.1645	5.79

4.4 太陽能損壞種類實驗數據分析

4.4.1 陰影面積對太陽能模組的影響及分析

水平遮蔽實驗

表 4.4.1-1 為水平遮蔽的實驗結果，實驗結果之電壓和遮蔽面積比例之關係如圖得到圖 4.4.1-1，由表 4.4.1-1 得知一開始未遮蔽時電壓為 33.9 V，在水平遮蔽實驗將遮蔽面積比例提高到 0.5 時電壓下降到 24.3 V(下降 28%)，再將遮蔽面積比例繼續提高到 0.7 時電壓下降到 19.8 V，太陽能模組在經過水平遮蔽實驗後電壓下降幅度達到 41 %。

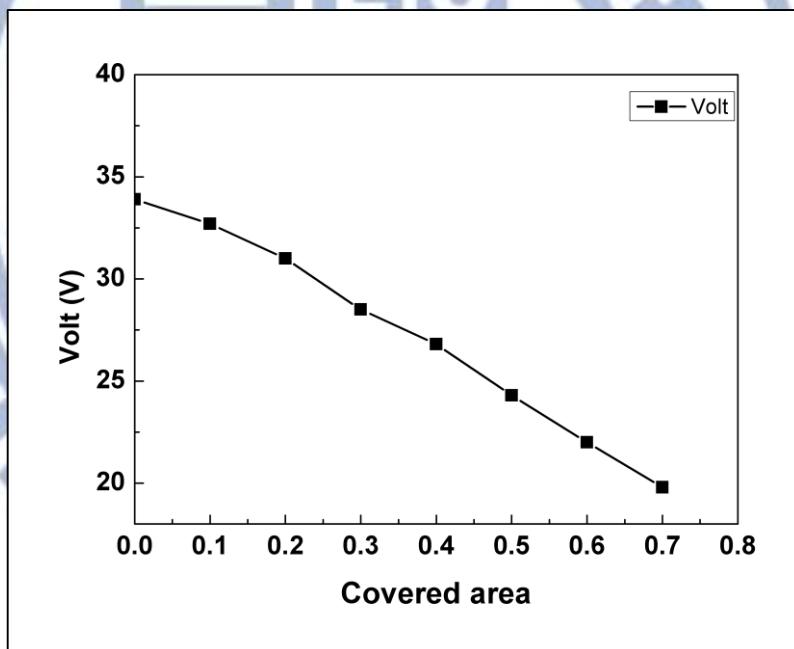


圖 4.4.1-1 水平遮蔽方式電壓和遮蔽面積關係圖

電流比例和遮蔽面積比例之關係如圖 4.4.1-2，由表 4.4.1-1 得知一開始未遮蔽時電流比例為 100 %，將遮蔽面積比例提高到 0.1 時電流比例就下降到 1.26 %，在水平遮蔽實驗將遮蔽面積比例繼續提高到 0.5 時電流比例下降到 0.06%，太陽能模組在經過水平遮蔽實驗後電壓下降幅度達到 99 %。顯示太陽能模組被水平遮蔽後，對電流的影響比例遠大於電壓。

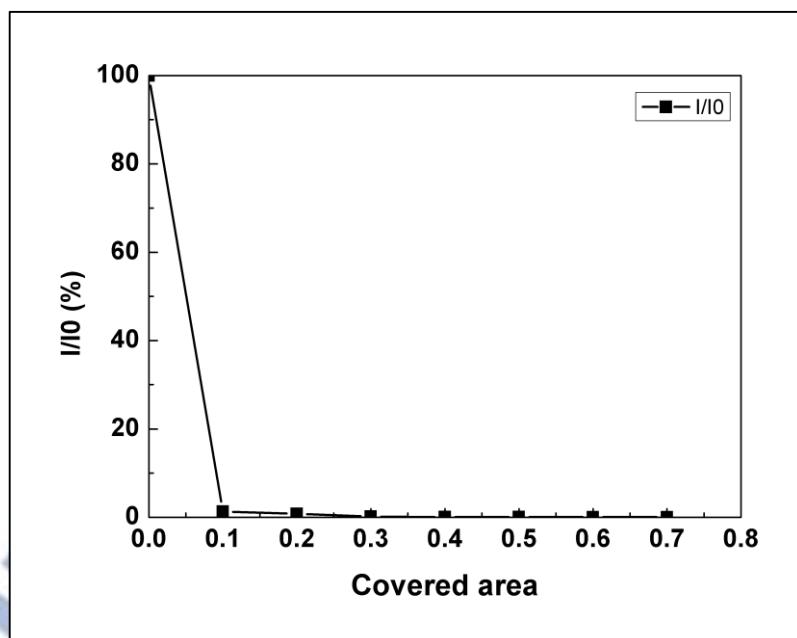


圖 4.4.1-2 水平遮蔽方式電流和遮蔽面積關係圖

表 4.4.1-1 水平遮蔽方式實驗結果

Covered area	V(V)	I(A)	P(W)	I/I_0 (%)
0	33.9	7.41	251.199	100
0.1	32.7	0.094	3.0738	1.268
0.2	31.0	0.058	1.798	0.7826
0.3	28.5	0.01	0.285	0.134
0.4	26.8	0.005	0.134	0.067
0.5	24.3	0.0045	0.1215	0.060
0.6	22.0	0.003	0.066	0.040
0.7	19.8	0.002	0.0396	0.026

鉛直遮蔽實驗

表 4.4.1-2 為鉛直遮蔽的實驗結果，並將實驗結果之電壓和遮蔽面積比例之關係如圖 4.4.1-3，由表 4.4.1-2 得知一開始未遮蔽時電壓為 33.1V，在鉛直遮蔽實驗將遮蔽面積比例提高到 0.167 時電壓下降到 31.8 V，將遮蔽面積比例繼續提高到 0.5 時電壓下降到 24.5 V，太陽能模組在經過鉛直遮蔽實驗後電壓下降幅度達到 25 %。

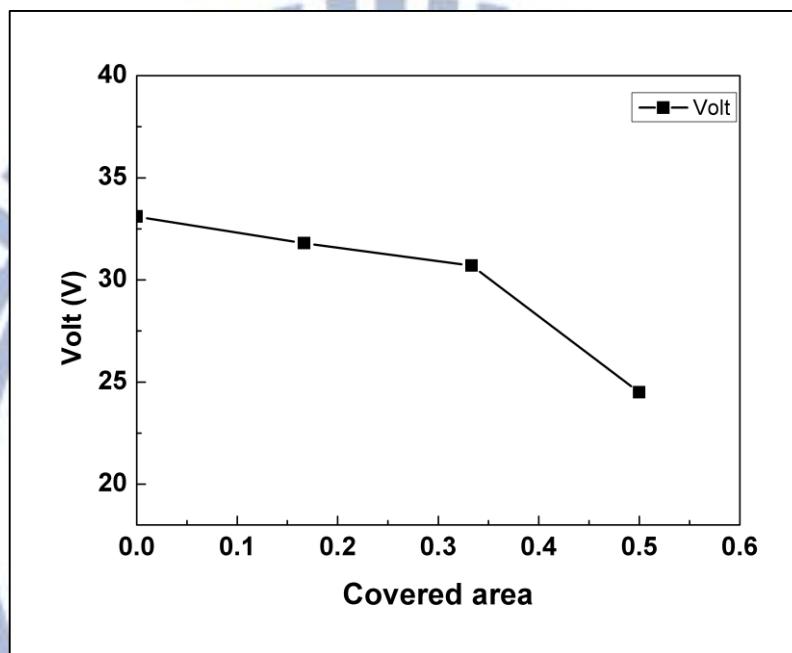


圖 4.4.1-3 鉛直遮蔽方式電壓和遮蔽面積關係圖

將實驗結果之電流比例和遮蔽面積比例之關係如圖 4.4.1-4，由表 4.4.1-2 得知一開始未遮蔽時電流比例為 100 %，將遮蔽面積比例提高到 0.167 時電流比例下降到 94.05 %，再將遮蔽面積比例繼續提高到 0.5 時電流比例下降到 73.67 %，太陽能模組在經過鉛直遮蔽實驗後電壓下降幅度達到 26.32%。顯示太陽能模組被鉛直遮蔽後，對電流的影響遠低於水平遮蔽的影響程度。

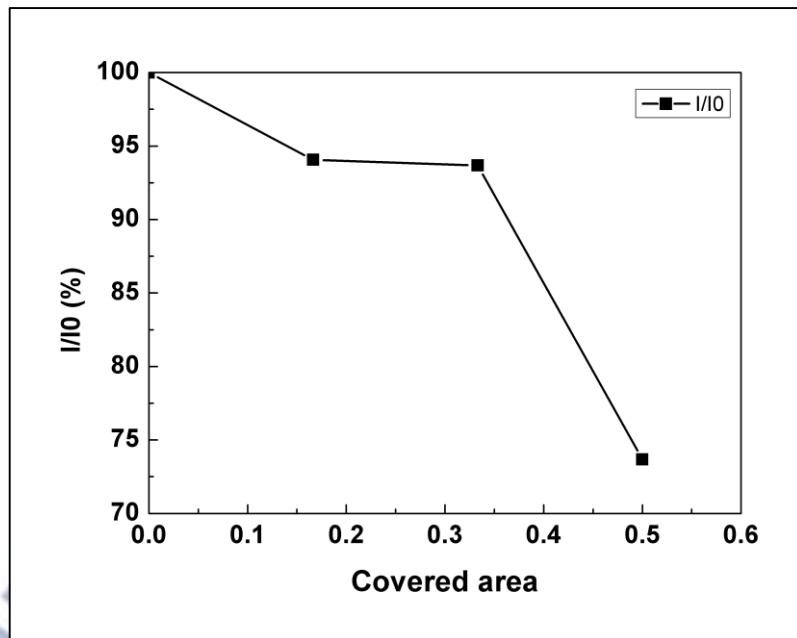


圖 4.4.1-4 鉛直遮蔽方式電流和遮蔽面積關係圖

表 4.4.1-2 鉛直遮蔽方式實驗結果

Covered area	V(V)	I(A)	P(W)	$I/I_0(\%)$
0	33.1	7.9	261.49	100
0.167	31.8	7.43	236.274	94.05
0.333	30.7	7.4	227.18	93.67
0.5	24.5	5.82	142.59	73.67

綜合討論

圖 4.4.1-5 至圖 4.4.1-7 為水平與鉛直遮蔽方式比較圖，分別為兩種遮蔽方式對電壓比較圖、兩種遮蔽方式對電流比較圖和兩種遮蔽方式對功率比較圖，由圖 4.4.1-6 可以看到水平遮蔽方式電流衰減率遠高於鉛直遮蔽方式。

推測的原因如下：一般太陽能電廠用的太陽能模組內部晶片串並聯的方式如圖 4.4.1-8 所示，先將三列晶片串聯提高電流，再將兩組串聯的晶片並聯以提高電壓[26]，圖 4.4.1-9 為水平遮蔽後的太陽能模組，由於電路串聯的電流全部相同，只要中間其中一片晶片受到影響，其他串聯的晶片也會有相同的電流值，這個就是水平遮蔽時電流驟降為零的原因，反觀鉛直遮蔽時如圖 4.4.1-10。在電壓的部分，遮蔽前後的差異並不大，導致遮蔽的模組發電功率主要受到電流的影響如圖 4.4.1-7。

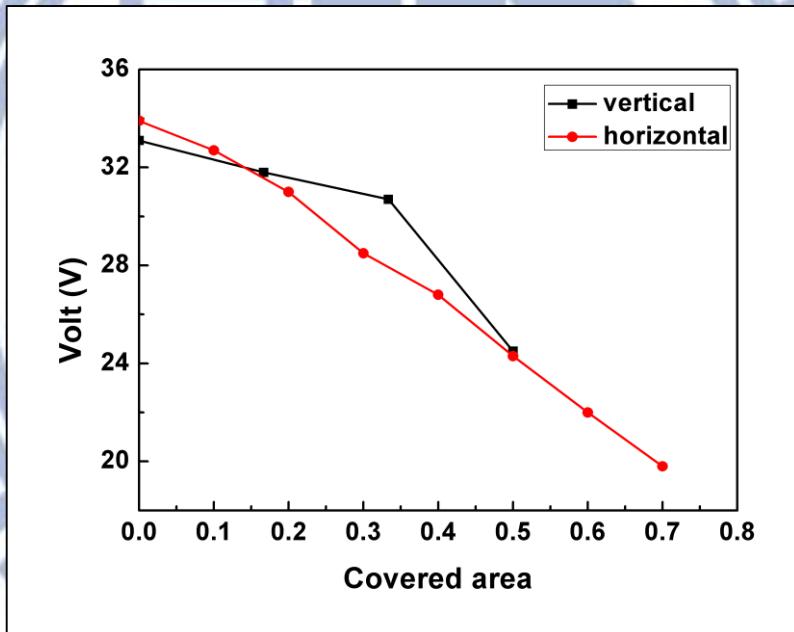


圖 4.4.1-5 兩種遮蔽方式電壓比較圖

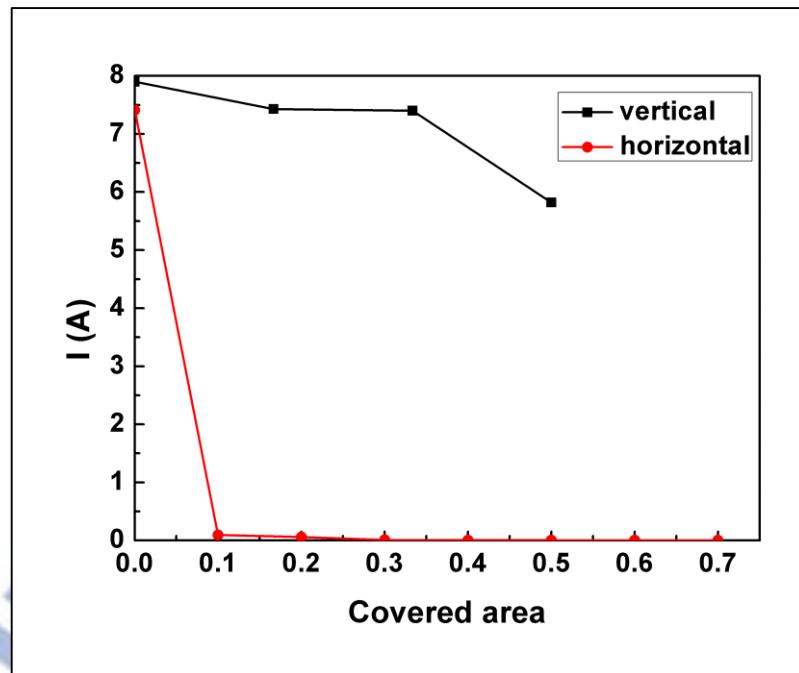


圖 4.4.1-6 兩種遮蔽方式電流比較圖

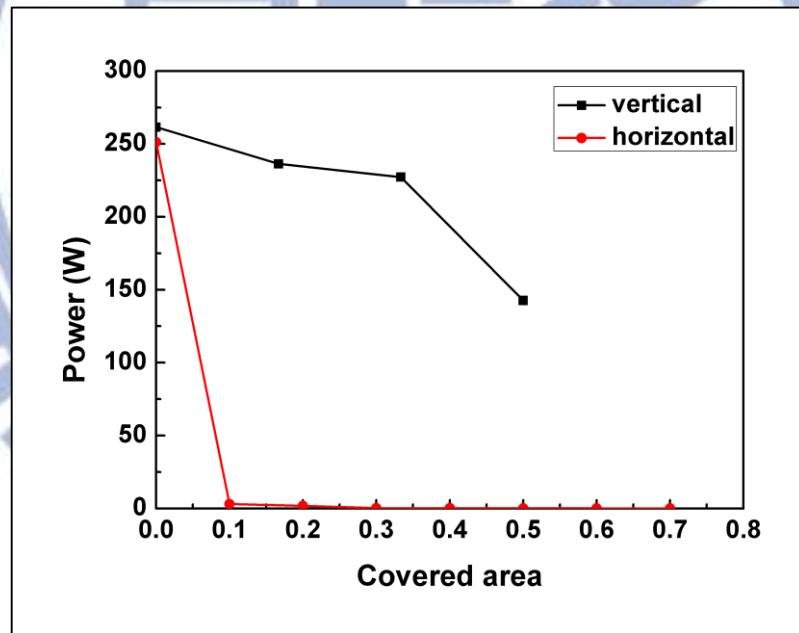


圖 4.4.1-7 兩種遮蔽方式功率比較圖

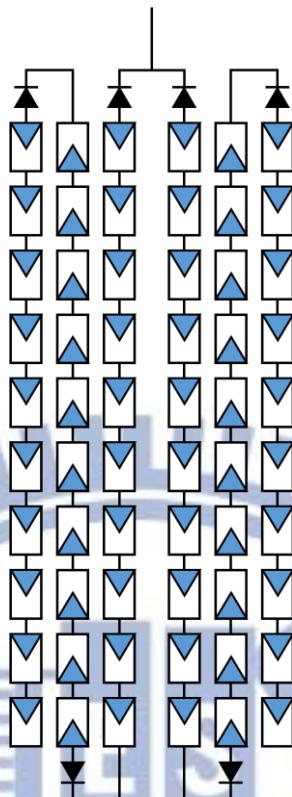


圖 4.4.1-8 太陽能模組示意圖

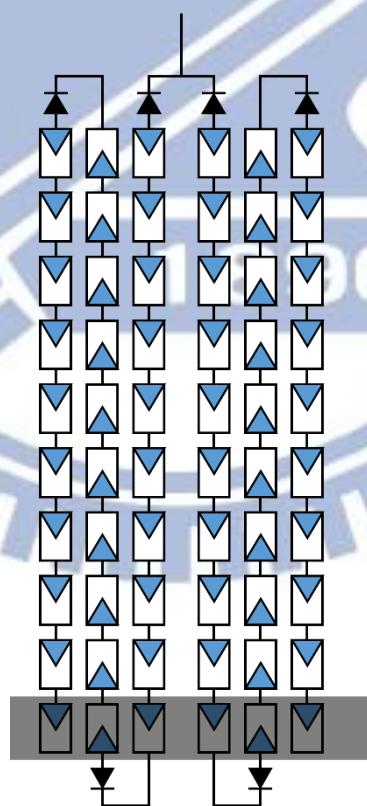


圖 4.4.1-9 水平遮蔽太陽能模組示意圖

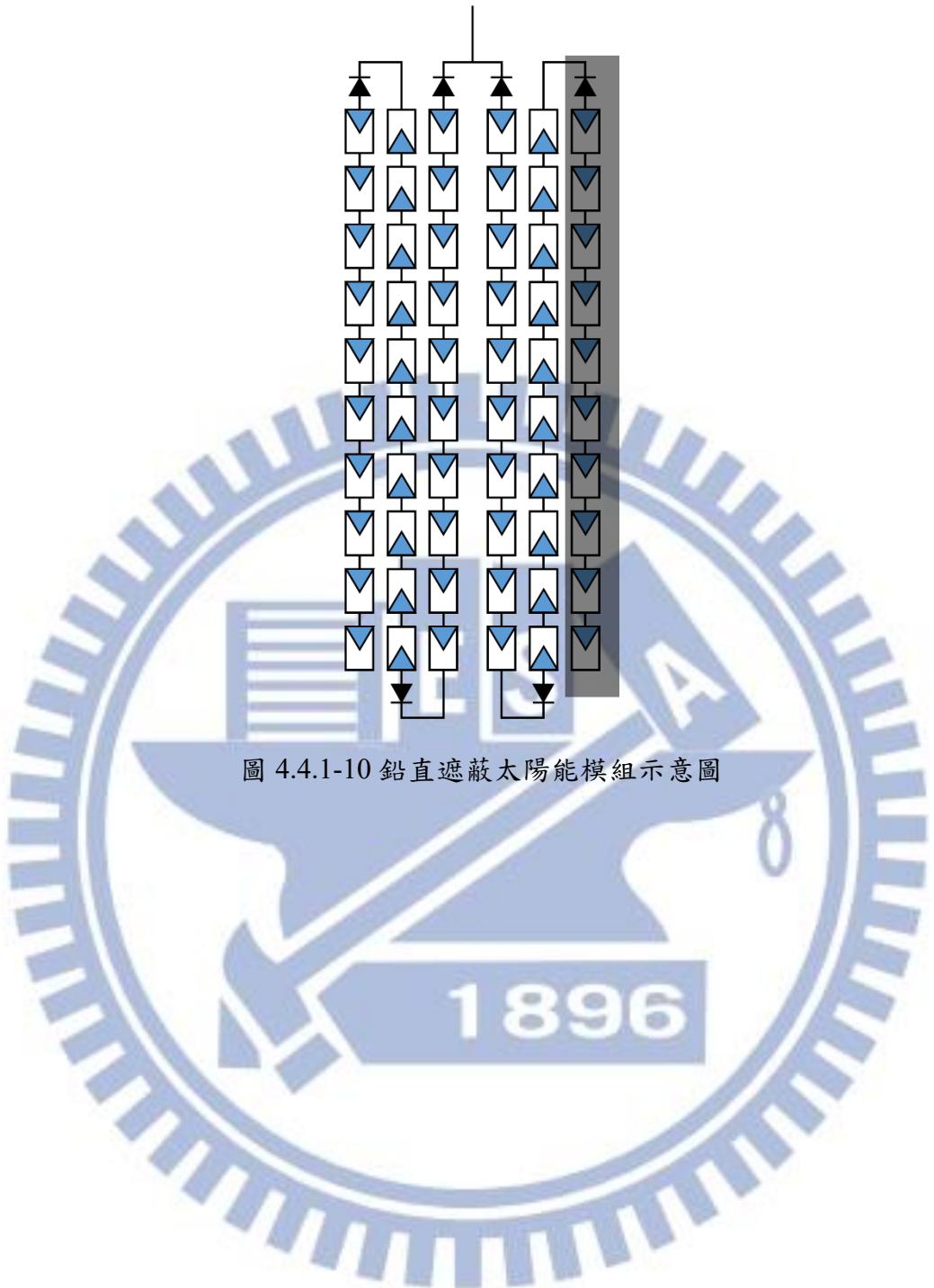


圖 4.4.1-10 鉛直遮蔽太陽能模組示意圖

4.4.2 蝸牛紋對太陽能模組的影響及分析

圖 4.4.2-1 為裝置在交通大學光電學院頂樓的出現蝸牛紋之太陽能模組，由可見光影像發現模組右下角的部分出現蝸牛紋，為了方便觀察將熱相片的數據重新上色如圖 4.4.2-2 和圖 4.4.2-3，從圖中比較正常區域 EL1 和蝸牛紋區域 EL2 的差異。EL1 的最高溫度、最低溫、平均溫度分別為 $51.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $49.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $50.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，EL2 的最高溫度、最低溫、平均溫度分別為 $54.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $53.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $53.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，比較後可以明顯看出 EL2 的最高溫度、最低溫、平均溫度皆高於 EL1，由上述結果可以得知出現蝸牛紋的部分太陽能模組的光電轉換效率是有影響的。

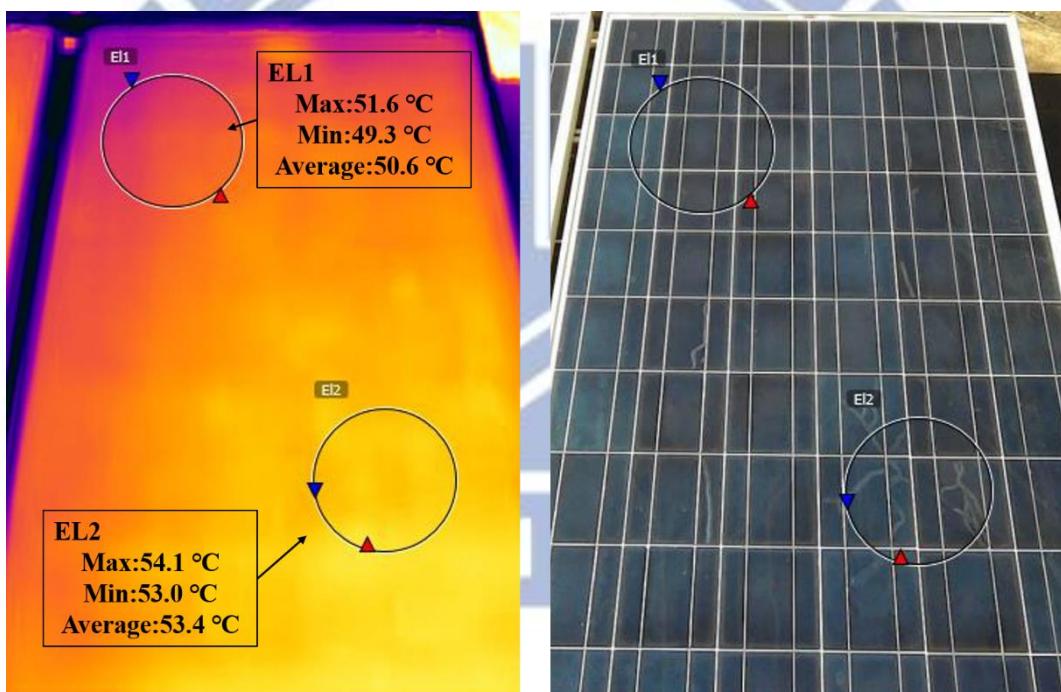


圖 4.4.2-1 蝸牛紋熱像和可見光對比圖

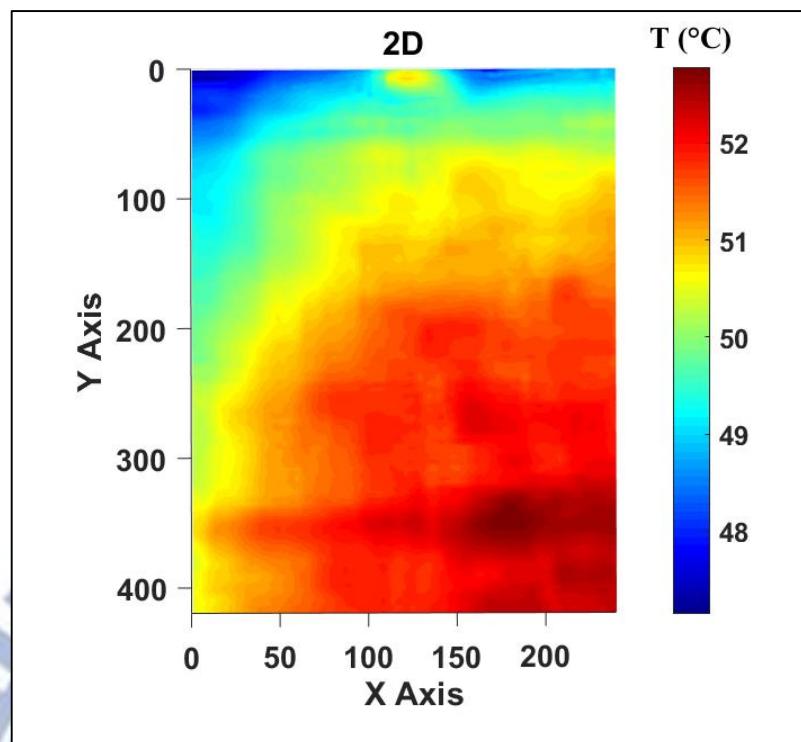


圖 4.4.2-2 蝸牛紋 2D 热像圖

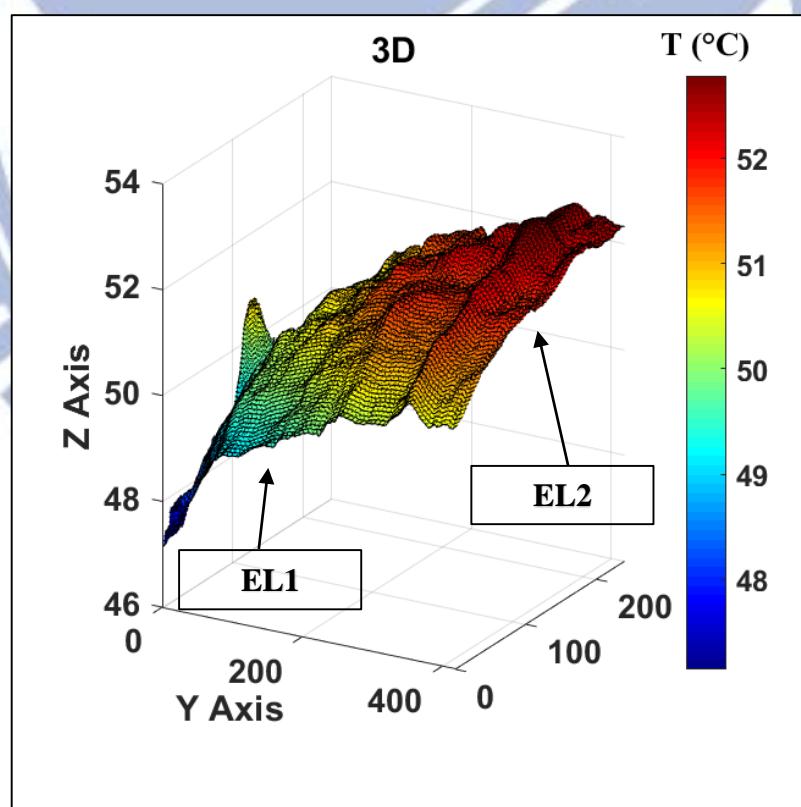


圖 4.4.2-3 蝸牛紋 3D 热像圖

蝸牛紋對太陽能模組的影響實驗用的模組為 AJP-M660，量測不同面積的蝸牛紋模及其光電轉換效率，並將全新的 WSP-230P6 模組的光電轉換參數訂為標準值計算其衰減狀況，結果如表 4.2.2-1 所示，當蝸牛紋面積為 1/60 時光電轉換效率為 14.4 %，當蝸牛紋面積為 2/60 時光電轉換效率提高為 27.8 %，當蝸牛紋面積為 4/60 時光電轉換效率又降為 18.3 %，當蝸牛紋面積增加為 7/60 時光電轉換效率為 19.2 %，由上述結果可得圖 4.4.2-4。

可以由圖 4.4.2-4 看出當蝸牛紋面積為 2/60 時有一個明顯的峰值，推測的原因如下：一般而言要形成蝸牛紋需要三大要素，分別為電池片裂紋存在、水汽由背面進入模組、水汽+銀膠+EVA 的化學反應產生黑色銀離子或銀粒子[27, 28]，量測的模組可能因為只有部分水氣進入模組內部造成只有部分蝸牛紋出現，但電池片中的裂紋依舊存在[29]，在熱影像中就可以很明顯的看出其熱斑分布狀況如圖 4.4.2-5 所示。若剔除蝸牛紋面積為 2/60 的數據可以看出衰減的比例隨蝸牛紋面積增加而增。

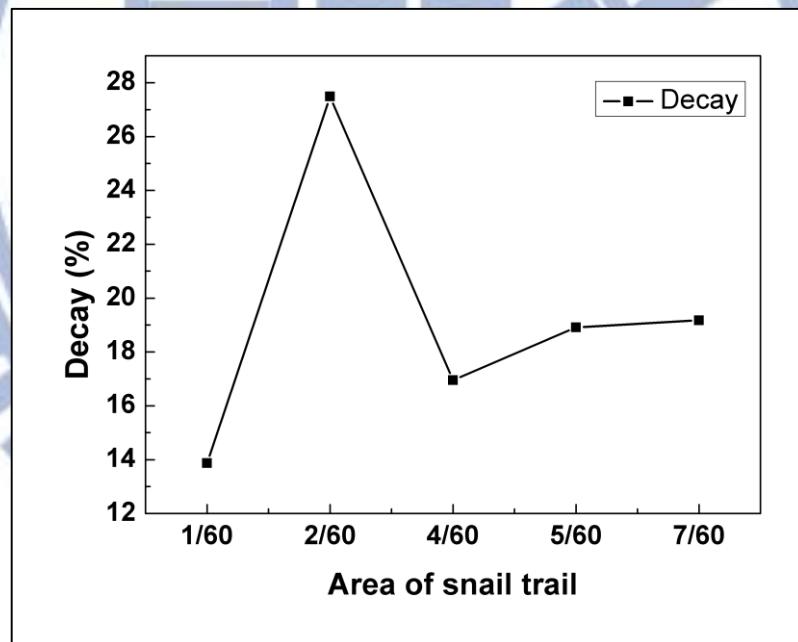


圖 4.4.2-4 蝸牛紋面積跟光電轉換效率關係折線圖

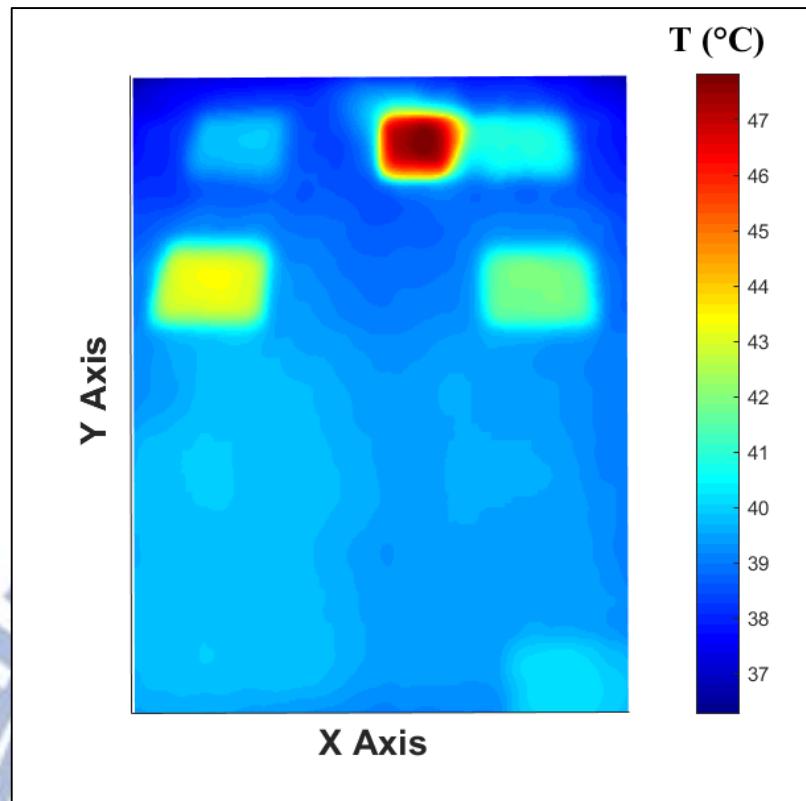


圖 4.4.2-5 蝸牛紋模組熱相片

表 4.2.2-1 為蝸牛紋對太陽能模組的影響實驗結果

Solar irradiance (W*m ⁻²)	V (V)	I(A)	P(W)	Decay(%)	Area of snail trail
800	32.3	5.84	188.6	non	non
802	32.3	5.03	162.5	14.4	1/60
803	33.2	4.12	136.8	27.8	2/60
801	32.1	4.88	156.6	18.3	4/60
805	32.2	4.75	152.9	18.9	5/60
800	33.0	4.62	152.5	19.2	7/60

4.4.3 表面毀損對太陽能模組的影響及分析

圖 4.4.3-1 和圖 4.4.3-2 為一表面嚴重毀損和未毀損 WAL SOLAR WS-250-G6P 模組熱影像和可見光影像對照圖，由圖 4.4.3-1 可得知在大面積毀損的狀況下兩者在熱影像中差異並不明顯，由章節 4.2 已知可將 MTD 作為太陽能模組損傷的相對參考，實際計算 MTD 和模組發電量，量測結果於表 4.4.3-1，由圖 4.4.3-3 可以看出在 848 W/m^2 的輻射量下毀損模組的光電轉換效率的衰減已經達到 71%，但兩者的 MTD 數值分別為 1.51 和 1.75，MTD 數值差異並不大き。

推測得原因如下，如章節 4.2 所提，計算 MTD 時需要太陽能模組正常工作溫度 T_{normal} ，模組損壞的區域會經由熱傳導的方式使其周圍溫度上升，當表面毀損的面積過大時會使得正常工作溫度也受到影響跟著提高，導致平均溫度差 MTD 的數值無法區別大面積毀損和未毀損的模組，為了解決這個現象本研究去計算模組的毀損面積來區分此狀況。

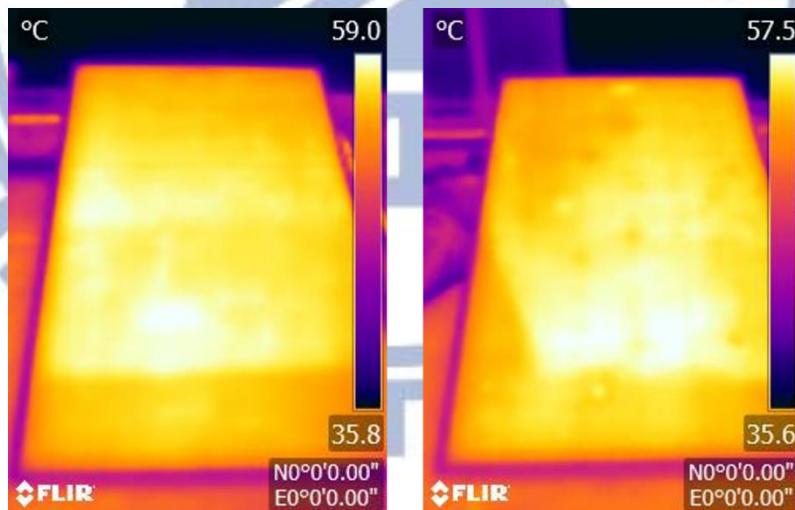


圖 4.4.3-1 表面嚴重毀損和未毀損太陽能模組熱相片



圖 4.4.3-2 表面嚴重毀損和未毀損太陽能模組可見光相片

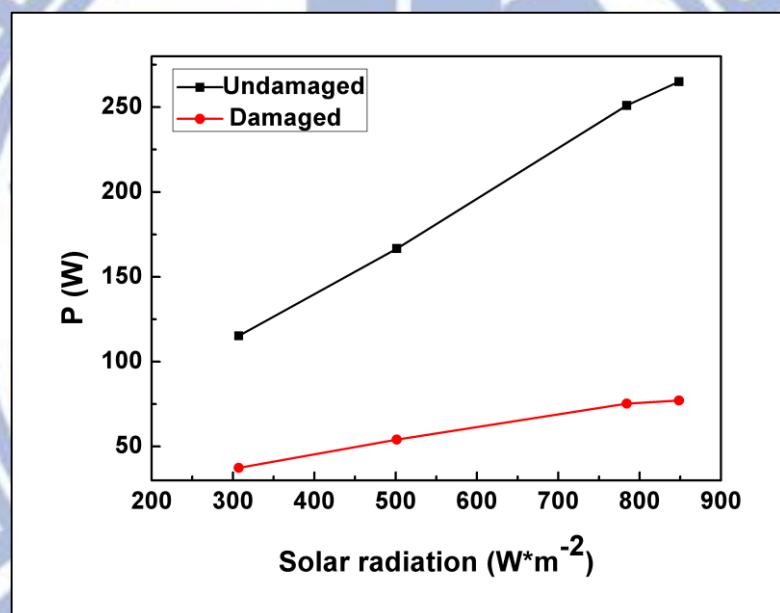


圖 4.4.3-3 毀損和未毀損模組發電功率比較

表 4.4.3-1 表面毀損對太陽能模組的影響實驗結果

	Undamaged				damaged			
Solar irradiance ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	848.3	784.15	501.3	307.15	848.3	784.15	501.3	307.15
V(V)	33.3	33.3	33.6	33.5	32.5	32.6	32.8	32
I(A)	7.96	7.54	4.96	3.44	2.37	2.31	1.65	1.17
P(W)	265.1	251.0	166.7	115.2	77.1	75.3	54.1	37.4
MTD	1.51	1.42	1.35	1.32	1.75	1.66	1.6	1.56

為了區分大面積毀損模組和未毀損模組在熱相片中無法區分的問題，在檢測過程中加入毀損面積的概念，並定義毀損面積為所有大於 $T_{max} - \frac{MTD}{2}$ 的溫度點除以全部模組的溫度點，如 4.4.3-1 式

$$\text{損壞區域} = \frac{\text{numbers of temperature above } (T_{max} - \frac{MTD}{2})}{\text{total element}} \quad (4.4.3-1)$$

經過程式分析上述的太陽能模組並對毀損區域上色可得圖 4.4.3-4，圖中紅色的部分為毀損面積，圖 4.4.3-4 左邊模組的毀損面積經程式分析為 1.47%，圖 4.4.3-4 右邊模組的毀損面積經程式分析為 83.54%。

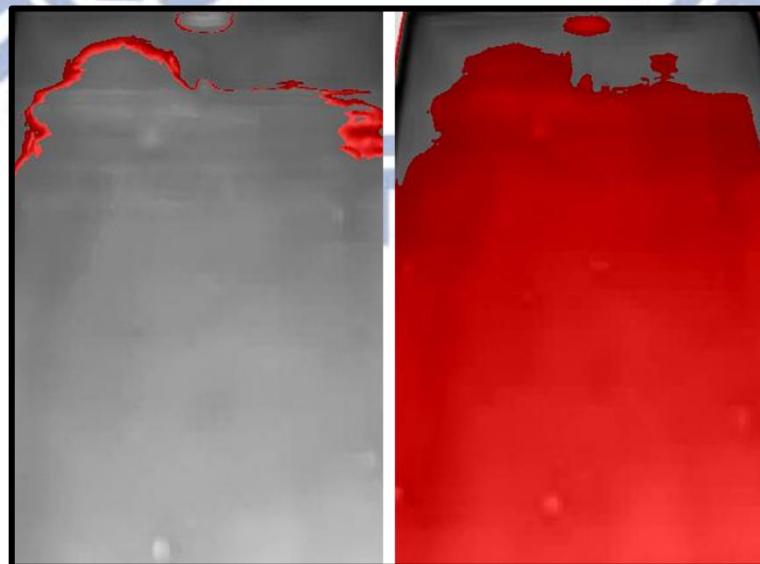


圖 4.4.3-4 毀損模組毀損面積

表 4.4.3-2 褶損面積實驗結果

	Undamaged				damaged			
Solar irradiance (W^*m^{-2})	848.3	784.15	501.3	307.15	848.3	784.15	501.3	307.15
V(V)	33.3	33.3	33.6	33.5	32.5	32.6	32.8	32
I(A)	7.96	7.54	4.96	3.44	2.37	2.31	1.65	1.17
P(W)	265.1	251.0	166.7	115.2	77.1	75.3	54.1	37.4
MTD	1.51	1.42	1.35	1.32	1.75	1.66	1.6	1.56
Damaged area	1.47 %				83.54 %			

綜合分析

可以由表 4.4.3-1 的實驗結果可以發現大面積的表面毀損會影響太陽能模組的產生的功率，其原因如下，一般而言太陽能模組表面會鍍上一層抗反射鍍膜[30, 31](Anti-reflective Coating)，以降低太陽能模組的反射太陽輻射，不過當表面玻璃產生裂痕或破碎時，會影響抗反射層的結構使其失去功用，導致太陽能模組接收到的太陽輻射量降低影響產生的電量，其二，表面毀損時大部分皆伴隨外力作用，會使模組內部產生如章節 4.4.2 提到的電池片裂紋，進而影響發電功率。

第五章 結語與未來研究發展

一般而言，大面積的太陽能電廠不易檢測和維修，其檢測過程需要花費大量的人力和時間，本研究結合無人載具、熱像儀、GPS 和影像無線傳輸系統，並降低掃描高度，進而提升精度以達成後續的分析檢測。本研究提供了兩個快速且有效的檢測方式，分別為計算平均溫度差和直接使用熱相片去估算發電量。且針對幾種常見模組損傷進行分析探討，研究結果，可歸納為以下幾點結論：

1. 經過實際量測的實驗結果，MTD 可作為太陽能模組損傷的參考依據，雖會因外界溫度而受到些微影響，當外界溫度越低的時候平均溫度差會提高，但一般檢測電廠時外界條件皆相同仍可用相對的平均溫度差作為判斷模組程度損傷的依據。
2. 空拍機進入電廠的 GPS 座標區域內時將自動讀取模組資訊，並直接利用拍攝的熱相片轉換成溫度矩陣去進行計算，估算出模組發電量。實際測試 20 筆估算結果，最小的誤差為 1.83%、最大誤差為 5.79%，可直接利用估算的發電量作為太陽能模組毀損程度的依據。
3. 在遮蔽實驗中，因為模組內部電池片串並聯的方式，陰影的遮蔽方式不同，會對模組發電量產生極大的影響，水平遮蔽方式只要遮蔽面積比例提高到 0.1 時電流比例就下降到只剩 1.26%，反觀在鉛直遮蔽實驗將遮蔽面積比例達到 0.167 時電流比例只下降到 94.05%，可以得知水平遮蔽對太陽能模組的影響相當大。

4. 一般蝸牛紋生成會伴隨內部裂紋，導致模組的光電轉換效率會降低，可以發現正常情況下蝸牛紋的面積和效率衰減是成正比，但可能會有部分蝸牛紋因為水氣未進入導致蝸牛紋未生成但裂紋存在的狀況，使裂紋面積不等於蝸牛紋面積，所以蝸牛紋不能單純的當作衰減的依據，需搭配熱相片觀察熱斑面積是否和蝸牛紋相似。
5. 一般太陽能模組表面都會有層抗反射鍍膜，表面毀損的部分會使抗反射鍍膜失效，導致入射輻射量降低，以致整體光電轉換效率降低。且可以發現大面積毀損的模組和未毀損的模組熱相片差異不大，可利用毀損面積的計算，克服熱相片不易區別毀損與否的問題。
6. 本研究除了完成硬體實驗架構研製外另完成設計一套兼具整合測試、控制與計算功能的軟體，對於後續精進熱相儀空拍量測研究或食物檢測提供案例參考。

未來研究發展

本次實驗中提供了兩個快速且有效的檢測方式，分別為計算平均溫度差和直接使用熱相片去估算發電量，並介紹了數種太陽能模組常見的損傷。影響太陽能模組的因素有很多種，希望往後研究在太陽能模組上能夠更詳細探討模組光電轉換效率降低的因素，再逐步優化，以便能夠更加準確的檢測太陽能模組的損傷。

在戶外量測時，可以控制的變因有限，太陽能模組光電轉換效率降低，並不一定只有單一因素，損傷的種類不同、損傷的位置不同、太陽能模組的種類不同，皆有可能影響估算出的發電量，皆為可以再深入探討的，希望日後能加入電腦模擬的部分，做出一個更完善的分析。再運用本實驗設計的系統加以佐證，希望未來能夠更加完善的將系統應用於太陽能電廠得檢測。



參考文獻

- [1] F. Grimaccia, S. Leva, and A. Niccolai, "PV plant digital mapping for modules; defects detection by unmanned aerial vehicles," IET Renewable Power Generation, vol. 11, no. 10, pp. 1221-1228, 2017.
- [2] 林全能，「我國能源情勢與能源政策之發展」，綠基會通訊，10-16 頁，民國 104 年。
- [3] B. Jaeckel, B. Weinreich, C. Buerhop, and U. Jahn, 「Outdoor Non-Destructive Infrared Thermography of Photovoltaic Modules and Plants for Inspection: IEC 62446-3」，32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 1741 - 1745 ,2016.
- [4] 林敬傑，“太陽能五四三，”
<http://solar543.blogspot.com/2017/03/irinspection.html> , Mar , 2017.
- [5] S. Ali *et al.*, 「A comprehensive study of 18-19 years field aged modules for degradation rate determination along with defect detection and analysis using IR, EL, UV, 」，IBCAST, pp. 28-35 ,2018.
- [6] M. Lee and A. Panchula, 「Spectral correction for photovoltaic module performance based on air mass and precipitable water」 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC) , pp. 1-6, 2017.
- [7] E. G. Laue, "The measurement of solar spectral irradiance at different terrestrial elevations "，Solar Energy, vol. 13, no. 1, pp. 43-57,1970.
- [8] J. Szlufcik, S. Sivoththaman, J. F. Nlis, R. P. Mertens, and R. V. Overstraeten, "Low-cost industrial technologies of crystalline silicon solar cells," Proceedings of the IEEE, vol. 85, no. 5, pp. 711-730, 1997.
- [9] S. K. Deb, “Thin-film solar cells: An overview ”，Renewable Energy, vol. 8, no. 1, pp. 375-379,1996.
- [10] H. Hoppe and N. S. Sariciftci “Organic solar cells: An overview”, Journal of Materials Research”, vol. 19, no. 7, pp. 1924-1945, 2011.
- [11] J. Zhao, A. Wang, M. Green, and F. Ferrazza,” 19.8% efficient “honeycomb” textured multicrystalline and 24.4% monocrystalline silicon solar cells,” Applied Physics Letters, vol. 73, no. 14, pp. 1991-1993, 1998.
- [12] A. Contreras Miguel *et al.*, “Progress toward 20% efficiency in Cu(In,Ga)Se2

- polycrystalline thin-film solar cells “Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 7, no. 4, pp. 311-316,1999.
- [13] A. Luque, G. Sala, and I. Luque-Heredia, “Photovoltaic concentration at the onset of its commercial deployment,” Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 14, no. 5, pp. 413-428,2006.
- [14] H. S. Lee, N. J. Ekins-Daukes, K. Araki, Y. Kemmoku, and M. Yamaguchi, 「Field test and analysis: the behavior of 3-J concentrator cells under the control of cell temperature」, the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 754-757,2005.
- [15] 林谷陶，「紅外線熱像技術檢測外牆磁磚系統界面缺陷之可行性研究」，國立臺灣海洋大學，博士論文，民國 103 年。
- [16] D. W. Thompson, “Fluid mechanics and transfer processes, J. M. Kay and R. M. Nedderman, 1985, 602 pages. Published by Cambridge University” The Canadian Journal of Chemical Engineering, vol.65,no. 3, pp. 526-527, 2009.
- [17] N. Chaintreuil, F. Barruel, X. Le Pivert, H. Buttin, and J. Merten, 「Effects of shadow on a grid connected PV system」, 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp.3417-3424 ,2008.
- [18] Y. Hu, W. Cao, J. Ma, S. J. Finney, and D. Li,“Identifying PV Module Mismatch Faults by a Thermography-Based Temperature Distribution Analysis” IEEE Transactions on Device and Materials Reliability,vol.14, pp.951-960,2015.
- [19] C. Deline, 「Partially shaded operation of a grid-tied PV system」, 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference,pp.1268-1273,2009.
- [20] C. Deline, J. Meydbray, M. Donovan, and J. Forrest, “Photovoltaic Shading Testbed for Module-Level Power Electronics”, NREL Technical Report, pp.1-28, 2012.
- [21] K. Hurayb, Y. Moumouni, F. A. Anon da Silva, and Y. Baghzouz, 「Evaluation of the impact of partial shading on the performance of a grid-tied photovoltaic system」, International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP) ,pp. 430-434,2015.
- [22] W. B. Xiao, F. Y. Hu, H. M. Zhang, and H. M. Wu, “Experimental Investigation of the Effects of Partial Shading on Photovoltaic Cells; Electrical Parameters”

International Journal of Photoenergy, vol. 2015, p.7-14, 2015.

- [23] X. Li, Q. Yang, Z. Chen, X. Luo, and W. Yan, “Visible defects detection based on UAV-based inspection in large-scale photovoltaic systems” IET Renewable Power Generation, vol. 11, pp.1234-1244 ,2017.
- [24] 鍾瑞永，李健，楊清富，“臺南區農業改良場太陽光電系統發電效率分析，” 臺南區農業改良場研究彙報,第 66 號, 68-76 頁, 民國 104 年.
- [25] 方紹宇，「日照條件分析與聚光型太陽能電池特性研究」，國立東華大學，碩士論文，民國 104 年。
- [26] 王种皓，「非破壊性暗鎖相熱成像法應用在太陽能電池串聯電阻空間分布之研究」，國立中央大學，碩士論文，民國 106 年。
- [27] S. Meyer *et al.*,” Silver nanoparticles cause snail trails in photovoltaic modules” , Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol.121, pp. 171-175 , 2014.
- [28] A. Dolara, G. C. Lazaroiu, S. Leva, G. Manzolini, and L. Votta, “Snail Trails and Cell Microcrack Impact on PV Module Maximum Power and Energy Production,” IEEE5 Journal of Photovoltaics, vol. 6, no. 5, pp. 1269-1277, 2016.
- [29] Z. Guangda, X. Xi, Z. Wei, L. Yafeng, S. Yan, and K. Zhining, 「Mechanism analysis of snail trails in photovoltaic modules, 」,42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), pp. 1-4 ,2015.
- [30] A. Al Shehri, B. Parrott, P. Carrasco, H. Al Saiari, and I. Taie, “Impact of dust deposition and brush-based dry cleaning on glass transmittance for PV modules applications,” Solar Energy, vol. 135, pp. 317-324,2016.
- [31] W. L. Lan, K. H. Chu, and C. C. Hsu, 「 Transparency and water-resistance enhancement of AR coating for the cover glass in the solar cell module 」, SICE Annual Conference, pp.1413-1418,2014.

附件

附件一 94



附件一

```
import java.awt.image.BufferedImage;
import java.io.File;
import java.io.IOException;

import javax.imageio.ImageIO;
//nfo=imfinfo('GE1.jpg')
//Im1=imread('GE1.jpg');
//J = immultiply(Im1,0.20952);
//T = imadd(J,19.86533); %溫度公式 T=0.20952x+19.86533
//Tavg = mean(T(:));      %整體平均溫度
//Nb = sum(T(:)<Tavg);   %小於平均溫度的數量
//Na = sum(T(:)>Tavg);   %大於平均溫度的數量
//Tbelow = Tavg-T;        %小於平均溫度的溫度
//Tabove = T-Tavg         %大於平均溫度的溫度
//Tnormal = Tavg-mean(Tbelow(:)); %太陽能板一般工作溫度
//MTD = sum(Tabove(:)-mean(Tbelow(:)))/Na;

public class TH_img {
    static String str,str2;
    static double Tavg,Tnormal,MTD;
    public static void imtransform()
    {
        BufferedImage img=null;
        File f=null;
        try
        {
            //          f=new File ("D:\\pic1.jpg");
            f=new File (str);

```



```
img=ImageIO.read(f);
} catch( IOException e)
{
    System.out.println(e);
}

int width=img.getWidth();
int height=img.getHeight();
double Tmg[][][] = new double [width][height][3];
double lr=0,lg=0,lb=0;
double r1,g1,b1,Tna,Tnb;
double r3,g3,b3;
long na=0,nb=0;
double STna=0,STnb=0;

for (int y=0; y<height;y++)
{
    for (int x=0; x<width;x++)
    {
        int p=img.getRGB(x,y);
        int a=(p>>24)&0xff;
        int r=(p>>16)&0xff;
        int g=(p>>8)&0xff;
        int b=p&0xff;
        // int avg=(r+g+b)/3;

        // r1=float(r)*0.20952+19.86533;
        r1=((double)r*0.20952)+19.86533;
        g1=((double)g*0.20952)+19.86533;
        b1=((double)b*0.20952)+19.86533;
        r3=r1;
        g3=g1;
        b3=b1;
        Tmg[x][y][0]=r3;
```

```
Tmg[x][y][1]=g3;  
Tmg[x][y][2]=b3;  
lr=lr+r3;  
lg=lg+g3;  
lb=lb+b3;  
p=(a<<24) | ((int)r3<<16) | ((int)g3<<8) |(int) b3;  
img.setRGB(x,y,p);  
}  
}  
}
```

```
Tavg=((double)(lr+lg+lb))/((double)(3*width*height));  
System.out.println(Tavg);
```

```
try {  
    f = new File(str2);  
    ImageIO.write(img,"jpg",f);  
} catch( IOException e )  
{  
    System.out.println(e);  
}
```

```
for (int y=0; y<height;y++)  
{
```

```
    for (int x=0; x<width;x++)
```

```
{
```

```
    for (int z=0; z<3;z++)
```

```
{
```

```
        if (Tmg[x][y][z]>Tavg)
```

```
{
```

```
            na=na+1;
```

```
            STna=STna+(Tmg[x][y][z]-Tavg);
```

```
}
```

```
        else
```

```
{
```

```
nb=nb+1;  
STnb=STnb+(Tavg-Tmg[x][y][z]);  
}  
}  
}  
}  
}  
System.out.println("na");  
System.out.println(na);  
System.out.println("nb");  
System.out.println(nb);  
Tnormal=Tavg-(STnb/nb);  
System.out.println("Tnormal");  
System.out.println(Tnormal);  
MTD=STna/na-(STnb/nb);  
System.out.println("MTD");  
System.out.println(MTD);  
}  
}
```

