

# 2020 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 100013  
參展科別 工程學  
作品名稱 真的是 23.5 度嗎？—以天文及氣象資料探討固定型太陽能板最佳架設傾斜角  
得獎獎項 大會獎：三等獎

就讀學校 彰化縣立彰興國民中學

指導教師 張道民、陳楷文

作者姓名 李聞碩、陳弈霖

關鍵詞 太陽運行軌跡、太陽能發電

## 作者簡介



**李聞碩：**聞碩今年 15 歲，從小就對科學及體育有濃厚興趣，代表學校參與游泳及各項學科競賽表現優異，2018 年代表台灣參加 WRO 足球機器人大賽獲得世界冠軍🏆，對程式設計與機械結構的熱忱高；本次太陽能研究中，發揮細膩的思考能力、團隊合作的執行力，從太陽能板設置、資料分析、機構把握、程式設計反覆驗證，探討出一個造福社會的成果。聞碩雖然平時較沉穩寡言，但在報告時表達清楚台風穩健，是資質良好具潛力的學生，也自我期許他日能成為如同東尼史塔克（鋼鐵人）般的台灣科學家。

**陳弈霖：**弈霖今年 15 歲，從小就參加許多科學營隊，也引發他對於自然科學與工程科技的興趣。弈霖對科學的興趣是顯而易見的，在其他同學為了地球科學感到頭疼難解的時候，他與隊友已經能夠藉由仔細觀察後質疑大家普遍的認知台灣位於北緯 23.5 度，因此架設角度應為 23.5 度是不合理的，而後進行一系列研究，以一位國中生而言，這樣的表現是相當少見的。弈霖的個性溫和親切，期許自己以後能成為優秀的科學家或工程師。

## 摘要

太陽能板一架設完成就要發電 20 年，若架設角度不正確，會嚴重影響長達 20 年整體發電量。那太陽能板最佳架設角度為何?又如何確保施工時能正確架設該最佳角度?為解決上述問題，本科展作品，藉由理論計算、電腦模擬實驗與實際系統量測交互比較驗證，依據太陽運行軌跡與氣候資料，逐步探討出固定型太陽能板最佳架設角度。我們依序進行 9 個實驗，成功驗證一套能依據太陽能板所在緯度與方位角來決定出固定型太陽能板最佳架設傾斜角的方法。更進一步使用數值方法以曲線揉合 (curve fitting) 法來得出公式，使其不需大量運算即可算出固定型太陽能板最佳架設傾斜角。最後，本科展作品使用 BrainGo 控制板、直線雷射、GPS、電子羅盤與陀螺儀，成功研製一固定型太陽能板架設角度標示儀，能有效幫助業者與 DIY 者輕易架設正確固定型太陽能板架設最佳角度，有效確保 20 年的太陽能系統發電效率。

## Abstract

*When the PV panels are installed, they will generate electricity power for 20 years. If the installation angle is not correct, it will seriously affect the overall PV power generation for 20 years. What is the optimal installation angle of the PV panel? How to ensure that the optimal installation angle can be correctly set during construction? To solve the above problems, this project proposed a method to decide the optimal installation angle according to the sun trajectory and climate data. The method is verified by theoretical calculation, computer simulation and actual system measurement. 9 experiments are conducted in sequence, successfully. Further, the numerical method is used to obtain a formula by a curve fitting method, so that the optimum installation angle of the PV panel can be calculated without a large number of calculations. Finally, a PV panel installation angle indicator is designed and implemented, successfully. The PV panel installation angle indicator is mainly constructed by a BrainGo control board, a linear laser, a GPS, an electronic compass and a gyroscope. Experimental results show that the developed PV panel installation angle indicator can effectively help the industry and DIY to easily set up the correct installation angle of PV panels.*

# (一)、前言

## 1. 研究動機

太陽能板一架設完成就要發電 20 年，若架設角度不正確，會嚴重影響長達 20 年整體發電量。那太陽能板最佳架設角度為何?又如何確保施工時能正確架設該最佳角度?解決上述問題就是本研究動機。

查詢資料發現，全世界 2017 年一年就新設了 98GW 的太陽能發電系統，且每年以約 20% 的成長速度增加[1]，也就是說從 2018 年開始，全球每年裝設應該都會超過 100GW 的太陽能發電系統。另從所查詢的資料得知，太陽能發電系統之架設方式，其可分為追日型與固定型。然追日型長久以來有兩大問題：第一，機構容易毀損、維護不易，第二價格昂貴。因此，追日型已退出主流商業市場，目前僅見於示範系統或一些特殊應用。由此可知，改進固定型太陽能發電系統才能對全球太陽能發電量起作用。上網搜尋後發現，固定型太陽能板架設最佳方向為正南方，傾斜角(太陽能板與地平面之夾角)為 23.5 度(也就是所在位置的緯度)。然而我們好奇的是，其最佳傾斜角真的是 23.5 度嗎?又若不是面對正南方，那固定型太陽能板最佳架設傾斜角是多少?

因太陽能發電量主要取決於日照量與日射角度，故固定型太陽能板架設角度之最佳化，看似是工程問題，卻需藉由天文知識來探討之。而自然與生活科技課本有介紹到恆星與周日運動、地球公轉與四季、地球自轉與晝夜，故希望建立一套能依據太陽能板所在緯度與方位來決定出太陽能板架設最佳傾斜角的系統方法，嘗試能在不增加成本下，藉由固定型太陽能板架設角度之最佳化來增加發電量，如此只要改善 0.5% 就有機會每年增加  $100\text{GW} \times 0.5\% = 0.5\text{GW}$ ，約為一座核一廠一個核子反應爐的發電功率(0.6GW)[2]。最後，亦研製一固定型太陽能板架設角度標示儀，確保業者與 DIY 者施工時能正確架設該最佳角，有效確保 20 年的太陽能系統發電效率。







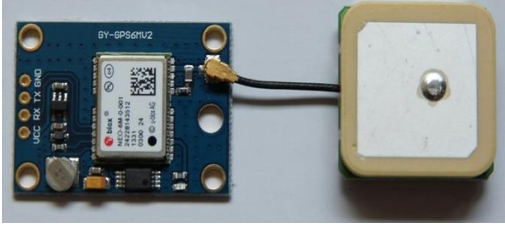


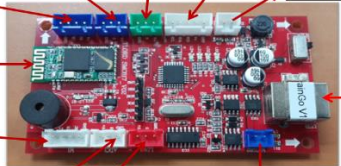
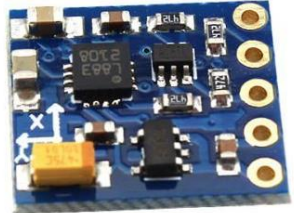
## 2. 研究目的

- (1). 了解太陽運行軌跡，並嘗試以從天球外看地球的角度，提出太陽入射角座標系，使探討與計算太陽能板發電量變得簡易可行。
- (2). 設計並製作太陽運行軌跡模型進行模擬實驗，用以驗證所提方法的可行性與正確性。
- (3). 實際架設太陽能發電系統，並完整收集 1 年的地球公轉週期實際量測值發電量進行理論、實驗與實測數據之比較探討。
- (4). 建立一套能依據太陽能板所在緯度與方位來決定出太陽能板架設最佳傾斜角的系統方法。
- (5). 研製固定型太陽能板架設角度標示儀，協助業者與 DIY 者輕易架設正確固定型太陽能板架設最佳角度。



## (二)、研究方法與過程

### 1. 研究設備及器材

<p>太陽能發電板(260W)*4 塊</p>  		
指南針(手機)	電表	角度量測器
		
地球儀	GPS 模組	光照計
		
陀螺儀	BrainGo 控制板	
	 <p>紅外線感測器、轉角器、數位開關 其他類比訊號感測器 超音波感測器 WiFi通訊 GPS全球定位 藍芽 影像處理模組、LCD螢幕 3D陀螺儀、電子羅盤 PM2.5、顏色感測器 直流馬達 電源 直流馬達</p>	
	 <p>電子羅盤</p>	

## 2. 研究方法

如圖 3-0 所示為本研究流程與步驟。首先提出太陽入射角坐標系，用以探討太陽軌跡下之日照強度，並以太陽運行軌跡模型與實際太陽能發電系統驗證其可行性與準確性。接著，以電腦數值運算與太陽能發電系統實測值依序探討：1. 太陽能發電系統面向正南方(方位角 180 度)時之最佳架設傾斜角、2. 太陽能發電系統面向任意方位角時之最佳架設傾斜角、3. 太陽能發電系統於任意緯度與方位角下時之最佳架設傾斜角。最後可得出太陽能板最佳架設傾斜角之系統方法，並據此研製太陽能板架設\角度標示儀。

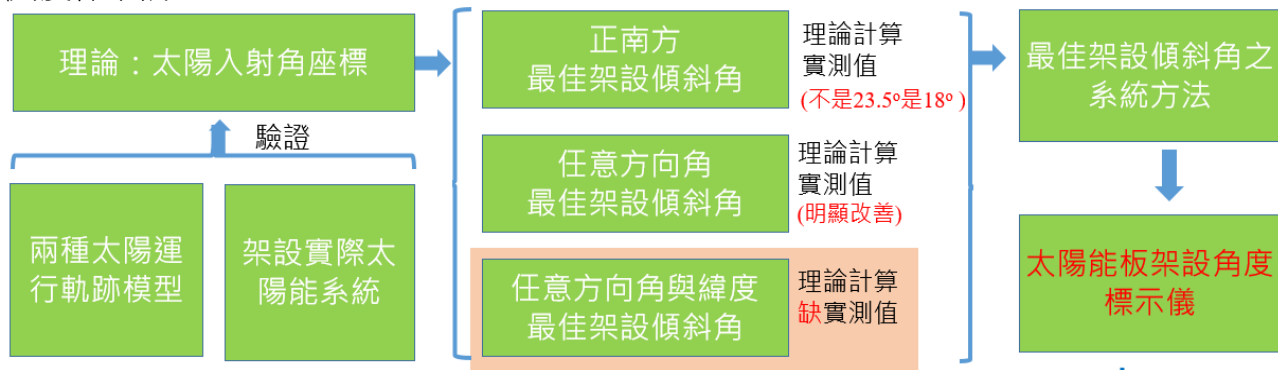


圖 3-0 研究流程與步驟

表 3-1 為所規劃的 9 個實驗(實驗一至實驗九)，藉由理論計算、模擬實驗與實際系統量測，逐步探討太陽能板最佳架設角度，最後並建立一套能依據太陽能板所在緯度與方位來決定出太陽能板架設最佳傾斜角的系統方法，並研製固定型太陽能板架設角度標示儀(實驗十)，協助業者與 DIY 者輕易架設正確固定型太陽能板架設最佳角度。

表 3-1 實驗步驟、內容與目的

	實驗內容	目的
實驗一	太陽運行軌跡模型製作與實驗	模擬太陽運行軌跡與探討太陽入射角關係
實驗二	太陽入射角座標系與光照量實驗	驗證太陽入射角與光照量關係
實驗三	地球自轉週期光照量實驗	依太陽運行軌跡修正日照量公式
實驗四	地球自轉週期(1 天)太陽運行軌跡模擬實驗	模擬太陽自轉並驗證太陽入射角座標可行性
實驗五	地球自轉週期(1 天)太陽能發電系統實測與理論計算比較	驗證太陽入射角座標於計算 1 天發電量的正確性
實驗六	1 個月份太陽能發電系統實測與理論計算比較	驗證太陽入射角座標於計算 1 個月發電量的可行性
實驗七	地球公轉週期(1 年)太陽能發電實驗與探討	驗證太陽入射角座標於計算 1 年發電量的可行性，並探討 6 種不同考量下的最佳傾斜角
實驗八	任意方位角下太陽能發電實驗與探討	驗證所提方法適用於任何方位角下得出太陽能板最佳架設傾斜角
實驗九	任意緯度與方位角下太陽能發電模擬與探討	提出一適用任意緯度與方位角下的太陽能最佳架設傾斜角的決定方法
實驗十	研製固定型太陽能板架設角度標示儀	使業者施工時能簡易快速得出最佳傾斜角

## (1)理論探討

由國中課本中之地球自轉與晝夜、恆星與周日運動、地球公轉與四季等章節可得知，太陽的運行軌跡可使用天球模型來描述之，其是觀測者在天球內觀察太陽的方位角與仰角來描述太陽的運行軌跡。但我們要的是太陽與太陽能板入射角關係，如此才能直覺且容易探討日照量與發電量。經與老師討論，我們嘗試以從天球外看地球的角度，如此，看到的就是太陽與太陽能板之入射角關係，進而定義一太陽入射角座標系。在描述太陽運行軌跡方面，我們使用太陽東西向入射角 $\theta_{EW}$ 與南北向太陽入射角 $\theta_{SN}$ 來表示太陽的位置 $(\theta_{EW}, \theta_{SN})$ ，如圖 3-1(a)所示，而圖 3-1(b)為從天頂所看之太陽入射角座標平投影圖。如此，在知道太陽入射角座標 $(\theta_{EW}, \theta_{SN})$ 下，使用投影法，如圖 3-2 所示，就可以求出所處位置之有效日照量 $L$ ，單位為 $W/m^2$ ：

$$L = 1000 \cdot \frac{L_{1a} \cdot L_{2a}}{L_{1b} \cdot L_{2b}}$$

$$= 1000 \cdot \cos(\theta_{EW}) \cos(\theta_{SN}) \quad (3-1)$$

其中 1000 是指太陽光的能量在地球表面視為  $1000 \text{ W/m}^2$ 。

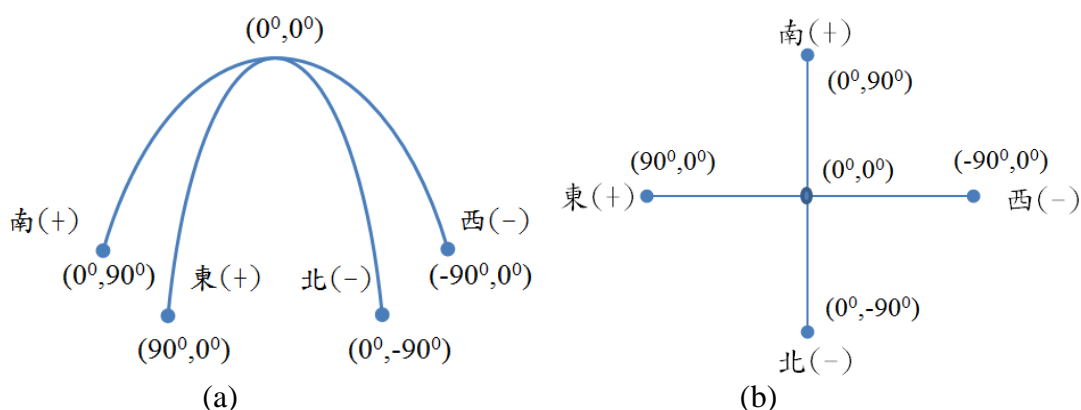


圖 3-1 (a)太陽入射角座標系示意圖，(b) 從天頂所看之太陽入射角座標平投影圖

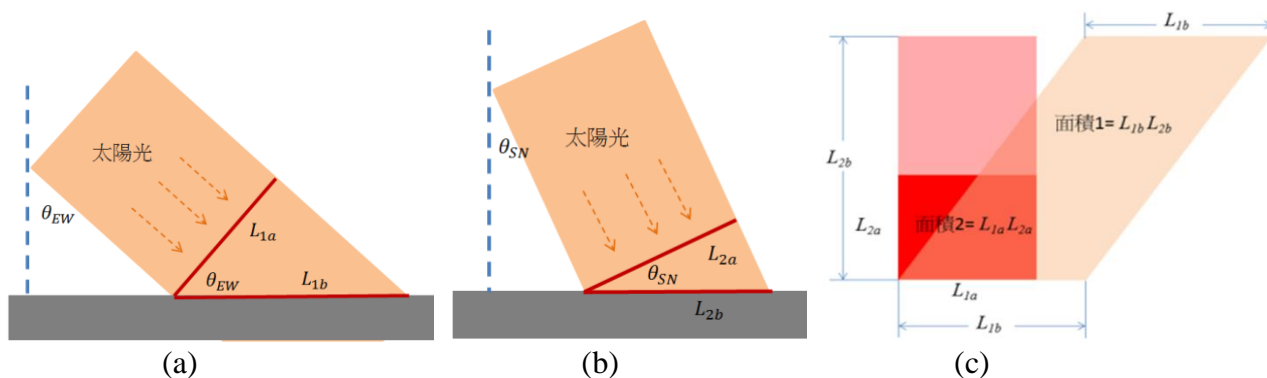


圖 3-2 投影法：(a)東西向投影，(b)南北向投影，(c)投影面積

若太陽能板傾斜角為 0 度，面積為  $A$ ，轉換效率為  $\eta$ ，則太陽能板發電功率  $P$ ，單位為  $W$ ，可表

示為：

$$P = 1000 \cdot A \cdot \eta \cdot \cos(\theta_{EW})\cos(\theta_{SN}) \quad (3-2)$$

而太陽能板規格書中所寫之最大發電功率  $P_{max}$  就是  $1000 \cdot A \cdot \eta$ ，故(4-2)式太陽能板發電量  $P$  也可以表示為：

$$P = P_{max} \cdot \cos(\theta_{EW})\cos(\theta_{SN}) \quad (3-3)$$

由(4-3)式可看出，使用所提之太陽入射角座標系，可直接算出太陽能板發電功率。所以只要將太陽運行軌跡以太陽入射角座標系來描述之，即可完整探討 1 整年的太陽能板發電量。有關太陽日出時刻、日沒時刻，中天時仰角與方位角等資料，我們可直接參考中央氣象局中天文星象的資料[3]，並使用(4-1)式與(4-3)式即可算出有效日照量與太陽能板發電量，用以探討最適合的太陽能板架設傾斜角。

下圖為在北緯  $23.5^\circ$  位置，在春、夏、秋、冬於日出、中天與日落時之太陽入射角座標。太陽入射角座標的原點定在所處位置，也就是與地面成  $90^\circ$  垂直之法線處。地球自轉一圈，每天太陽東昇西落，故每天東西向入射角  $\theta_{EW}$  從  $90^\circ$  變化至  $-90^\circ$ ，而南北向入射角  $\theta_{SN}$  會隨季節不同而改變。在春分與秋分時，南北向入射角  $\theta_{SN}$  從  $0^\circ$  變化至  $23.5^\circ$ ，在夏至時，南北向入射角  $\theta_{SN}$  從  $-23.5^\circ$  變化至  $0^\circ$ ，在冬至時，南北向入射角  $\theta_{SN}$  從  $23.5^\circ$  變化至  $47^\circ$ 。如此，春夏秋冬的太陽運行軌跡投影在太陽入射角座標系如圖 3-4 所示。

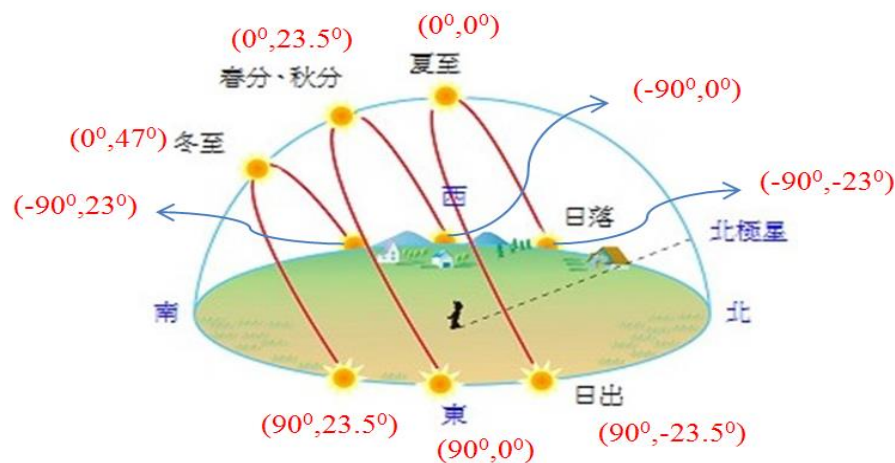


圖 3-3 在北緯  $23.5^\circ$  位置之太陽入射角座標



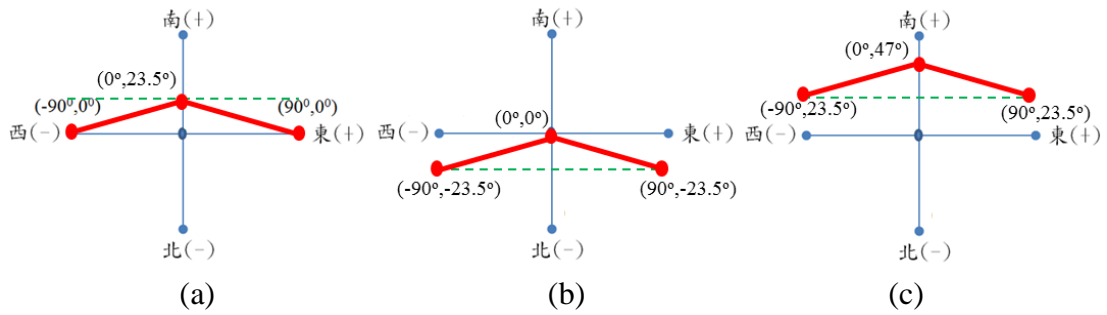


圖 3-4 在北緯 23.5° 位置之太陽入射角座標投影圖，(a)春分、秋分，(b)夏至，(c)冬至

另由關於太陽日射量，我們上網有找到以年或月為時間單位的資料，其中文獻以計算出經典氣象年之全日空輻射量(MJ/m<sup>2</sup>)[7]，我們直接採用，另並同時使用 2011-2018 年的平均全日空輻射量來探討比較之。

## (2)設計並製作太陽運行軌跡模型

為驗證所提方法之可行性與正確性，我們設計並製作了兩種太陽運行軌跡模型，並同時使用鹵素燈與投影機當光源，同時使用照度計量測並記錄太陽運行軌跡下之照度，如圖 3-6、4-7 所示。



圖 3-6 太陽運行軌跡模型，(a)製作過程，(b)實驗中

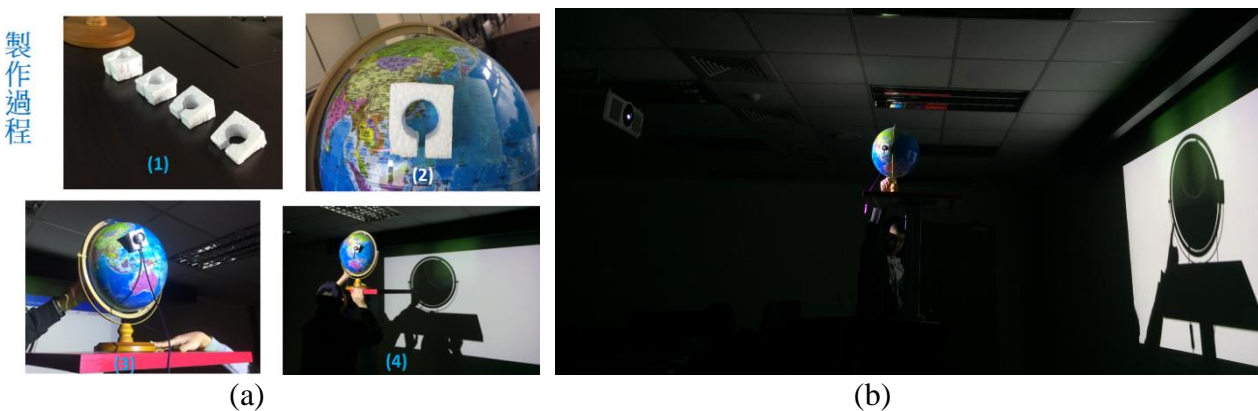


圖 3-7 太陽運行軌跡模型，(a)製作過程，(b)實驗中

### (3) 架設實際太陽能發電系統

為驗證所提方法之可行性與正確性，我們實際架設 4 塊不同傾斜角度的太陽能板，其傾斜角度分別為：7°、15°、24° 與 31°，並花 1 年時間紀錄完整太陽運行軌跡下之發電量，如圖 3-8 所示。



圖 3-8 實際架設太陽能發電系統

### (4) 數值計算與實驗資料整理

為方便計算，我們使用 Excel 來計算一天中每小時發電量(kWh)，如圖 3-9 所示，以 1 月 21 日為例。首先，由中央氣象局網站[3]，可查出 1 月 21 日日出、中天與日落時間為 6:42、12:08 與 17:35，中天時之仰角為 46 度(也就是入射角 44 度)，並將其建入表中，以及太陽能板傾斜角度也建入表中。接著，以均分法，算出每小時之東西向太陽入射角 $\theta_{EW}$ 與南北向太陽入射角 $\theta_{SN}$ 。再來使用太陽能板發電量公式即可算出太陽能板每小時發電量，最後將其累計即可得到日發電量 1.595 度(kWh)。另實驗量測資料與實際系統發電資料也使用 Excel 來彙整，並製作圖表來進行比較與探討。

date	日出時刻	方位角	過中天	仰角	日沒時刻	方位角
2018-01-21	06:42	112	12:08	46°	17:35	249

一月													
台中彰化													
太陽能板最大功率0.26KW	06:42	07:08	08:08	09:08	10:08	11:08	12:08	13:08	14:08	15:08	16:08	17:08	17:35
東西入射角	88.00 (90)	82.82	66.26	49.69	33.13	16.56	0.00	-16.56	-33.13	-49.69	-66.26	-82.82	-88.00 (-90)
南北入射角	20.50	22.37	26.70	31.02	35.35	39.67	44.00	39.67	35.35	31.02	26.70	22.37	20.50
架設角度	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
預估功率	0.01	0.03	0.10	0.15	0.19	0.21	0.21	0.21	0.19	0.15	0.10	0.03	0.01
預估總功率	1.595												

$=H5-23.5$   
 $=C4-(90/326)*60$   
 $=F5+(23.5/326)*60$   
 $=0.26 * \text{COS}(\text{RADIANS}(I4)) * \text{COS}(\text{RADIANS}(I6-I5))$

圖 3-9 使用 Excel 計算太陽能板發電量

### (5) 研製固定型太陽能板最佳架設傾斜角標示儀

最後我們研製固定型太陽能板架設角度標示儀，系統方塊圖如圖 3-10(a)所示，其主要由 Arduino 控制器(BrainGo 控制板)、GPS、電子羅盤、電子陀螺儀、LCD 顯示器、馬達與雷射頭所構成。完成

之實體照片如圖 3-10(b)所示。系統由 GPS 得知所在位置之北緯，由電子羅盤得知太陽能板所面朝之方位角，並根據北緯與方位角來運算出固定型太陽能板最佳架設傾斜角。BrainGo 控制板控制馬達旋轉並藉由電子陀螺儀來得知馬達的真實旋轉角度，並據此來進行回授控制，最後由馬達所帶動之雷射頭標示出一最佳太陽能架設傾斜角標示線，如圖 3-10(c)所示。

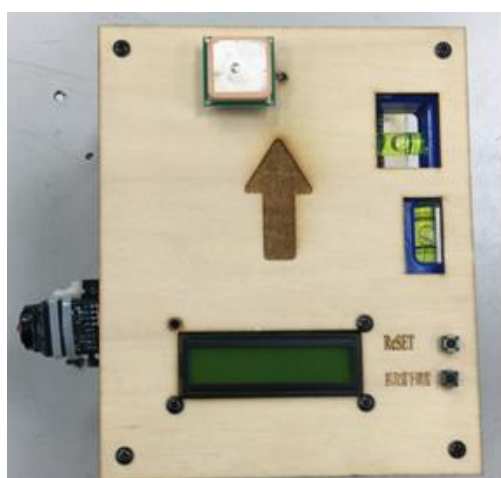
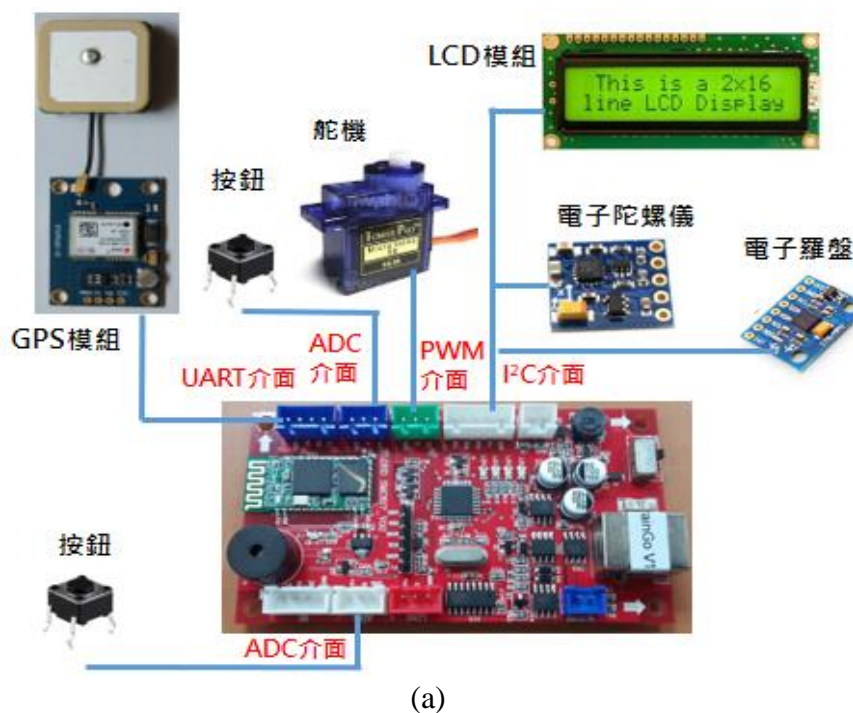


圖 3-10 固定型太陽能板最佳架設傾斜角標示儀，(a) 系統方塊圖，(b)俯視圖，(c)工作時照片

在程式撰寫方面我們採用 Scratch 積木式程式，而其主程式及其說明如圖 3-11 所示。首先，BrainGo 控制板判斷有無按鈕？若有按鈕，則讀取電子羅盤數值當為太陽能板之方位角，並算出太陽能板架設傾斜角。同時 BrainGo 控制板控制蜂鳴器發出 D6 二分之一拍聲響，表示設定完成。接著，BrainGo 控制板清除 LCD 顯示內容，用以在 LCD 第一行顯示太陽能板方位角與儀器的方位角，第二行顯示太陽能板最佳架設傾斜角與雷射頭傾斜角。最後，BrainGo 控制板會讀取陀螺儀角度，用以判斷雷射頭角度與最佳架設傾斜角誤差是否大於 0.5 度？若大於 0.5 度且雷射頭角度大於最佳架設傾斜角，則轉角器數值減 1。若雷射頭角度小於最佳架設傾斜角，則轉角器數值加 1。同時 BrainGo 控制板控制蜂鳴



器發出發出 1/8 聲響，用以表示在調整雷射頭角度中。

The code is structured as follows:

- Loop Start:** 不停重複 (Repeat Forever)
- Button Check:** 持續偵測電子羅盤 (Continuously detect electronic compass). If 類比訊號ADC 2 > 900 (Analog signal ADC 2 > 900), then:
  - 將變數 方位角 的值設為 取得羅盤角度 (Set variable 方位角 to 取得羅盤角度)
  - 將變數 最佳傾斜角 的值設為  $-18 * \cos$  方位角 (Set variable 最佳傾斜角 to  $-18 * \cos$  方位角)
  - 設定:蜂鳴器音調 D6 節拍 二分之一 (Set: Buzzer tone D6, beat 1/2)
- Angle Calculation:** 將變數 雷射頭角度 的值設為 陀螺儀 傾斜 角度 (Set variable 雷射頭角度 to 陀螺儀 傾斜 角度)
- Display:** 清除LCD內容 (Clear LCD content).
  - 設定LCD 1 列 第 1 個字 顯示 方位角 (Set LCD row 1, column 1 to display 方位角)
  - 設定LCD 1 列 第 10 個字 顯示 取得羅盤角度 (Set LCD row 1, column 10 to display 取得羅盤角度)
  - 設定LCD 2 列 第 1 個字 顯示 最佳傾斜角 (Set LCD row 2, column 1 to display 最佳傾斜角)
  - 設定LCD 2 列 第 10 個字 顯示 雷射頭角度 (Set LCD row 2, column 10 to display 雷射頭角度)
- Wait:** 等待 0.5 秒 (Wait 0.5 seconds)
- Error Check:** 如果 絕對值 雷射頭角度 - 最佳傾斜角 > 0.5 就 (If absolute value 雷射頭角度 - 最佳傾斜角 > 0.5, then):
  - 如果 雷射頭角度 > 最佳傾斜角 就 (If 雷射頭角度 > 最佳傾斜角, then):
    - 將變數 轉角器數值 的值改變 -1 (Change variable 轉角器數值 by -1)
  - 如果 雷射頭角度 < 最佳傾斜角 就 (If 雷射頭角度 < 最佳傾斜角, then):
    - 將變數 轉角器數值 的值改變 1 (Change variable 轉角器數值 by 1)
  - 設定 綠色調角器 角度為 轉角器數值 (Set 綠色調角器 angle to 轉角器數值)
  - 設定:蜂鳴器音調 C4 節拍 八分之一 (Set: Buzzer tone C4, beat 1/8)

1.判斷有無按鈕?  
2.若有按鈕，則讀取電子羅盤數值當為太陽能板之方位角，  
3.並算出太陽能板架設傾斜角。  
4.發出D6二分之一拍聲響，表示設定完成。

1.清除LCD顯示內容。  
2.LCD第一行顯示太陽能板方位角與儀器的方位角。  
3.LCD第二行顯示太陽能板最佳架設傾斜角與雷射頭傾斜角。  
4.等待0.5秒降低LCD閃爍。

1.判斷雷射頭角度與最佳架設傾斜角誤差是否大於0.5度?  
2.若大於0.5度且雷射頭角度大於最佳架設傾斜角，  
則轉角器數值減1。  
3.若雷射頭角度小於最佳架設傾斜角，則轉角器數值加1。  
4.驅動轉角器動作  
5.發出1/8聲響，用以表示在調整雷射頭角度中。

圖 3-11 固定型太陽能板最佳架設傾斜角標示儀主程式及其說明

### 3. 研究結果與討論

#### (1) 太陽運行軌跡模型之光源實驗與探討

首先，我們使用如圖 3-6 所示之太陽運行軌跡模型，其量測結果如圖 4-2 所示，可發現其雖可看出春分、夏至、秋分與冬至之不同變化，但亦可看出其數值曲線頗為粗糙。

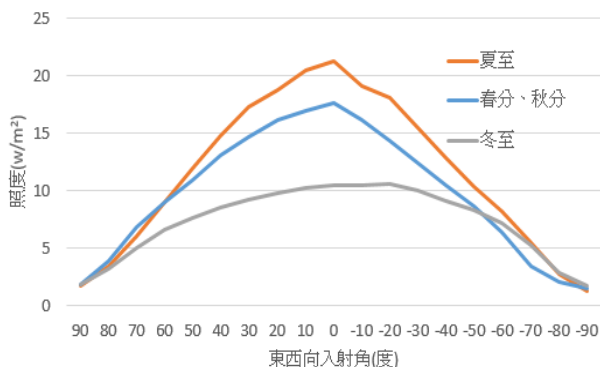


圖 4-2 使用太陽運行軌跡模型模擬春分、夏至、秋分與冬至之發電量

**探討：**誤差頗大的原因可能是光源晃動或本身鹵素燈的光分佈就不平均，無法有效模擬出如太陽般均勻的平行光。為此，我們以

60cm\*60cm 正方形面積，每間格 15cm 量測一點，來測定所使用鹵素燈的光均勻性，如圖 4-3(a)所示。量測結果如圖 4-3(b)，並將其畫為照度分佈圖如圖 4-3(c)所示，可看出鹵素燈的光均勻性很差，最亮與最暗差約 20.5%。我們改用投影機，並將太陽運行軌跡模型修正如圖 3-7 所示，來進行實驗。圖 4-4(a)所示，直接將要量測的位置投影至牆壁進行量測。量測結果如圖 4-4(b)，並將其畫為照度分佈圖如圖 4-4(c)所示，可看出投影機的光均勻性相對好很多，最亮與最暗僅差約 4.6%，明顯優於鹵素燈。

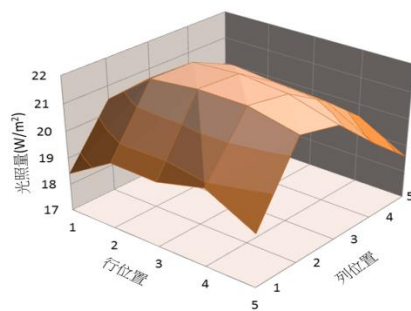


(a)

18.41	19.45	19.41	19.86	18.96
20.51	21.78	21.96	21.95	21.55
20.65	21.75	21.86	21.69	21.18
19.75	21.05	20.9	20.78	19.82
18.23	19.33	19.5	19.54	18.58

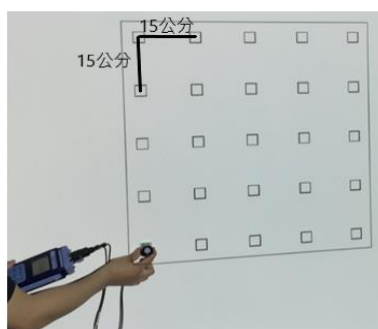
單位：W/m<sup>2</sup>

(b)



(c)

圖 4-3 使用鹵素燈(a)量測情形，(b)量測照度，(c)照度分佈圖

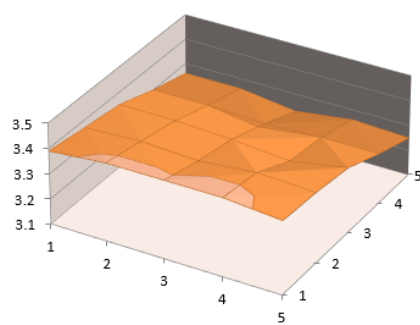


(a)

3.39	3.41	3.41	3.41	3.39
3.37	3.38	3.37	3.39	3.38
3.35	3.35	3.34	3.32	3.36
3.3	3.3	3.29	3.3	3.3
3.26	3.26	3.23	3.26	3.26

單位：W/m<sup>2</sup>

(b)



(c)

圖 4-4 使用投影機(a)量測情形，(b)量測照度，(c)照度分佈圖



## (2) 太陽入射角座標系與光照量實驗與探討

首先，我們使用所研製之太陽運行軌跡模型，如圖 3-7 所示，來模擬太陽在南北向太陽入射角 $\theta_{SN}$ 於 $5^\circ$ 至 $50^\circ$ 下，東西向太陽入射角 $\theta_{EW}$ 從 $0^\circ$ 每次遞增 $5^\circ$ 變化到 $90^\circ$ 度之情形，並量測其光照量且紀錄之。同時並使用公式(4-1)計算出其理論值加以比較。注意!因為使用投影機當作太陽，所以公式(4-1)中之 $1000W/m^2$ 需修正為 $28.2W/m^2$ ，如(4-1)所示。圖 4-5 為南北向太陽入射角 $\theta_{SN}$ 於 $5^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $45^\circ$ 與 $50^\circ$ 下其理論計算值(藍色線)與實驗量測值(紅色線)之曲線圖。

$$L = 28.2 \cdot \cos(\theta_{EW})\cos(\theta_{SN}) \quad (4-1)$$

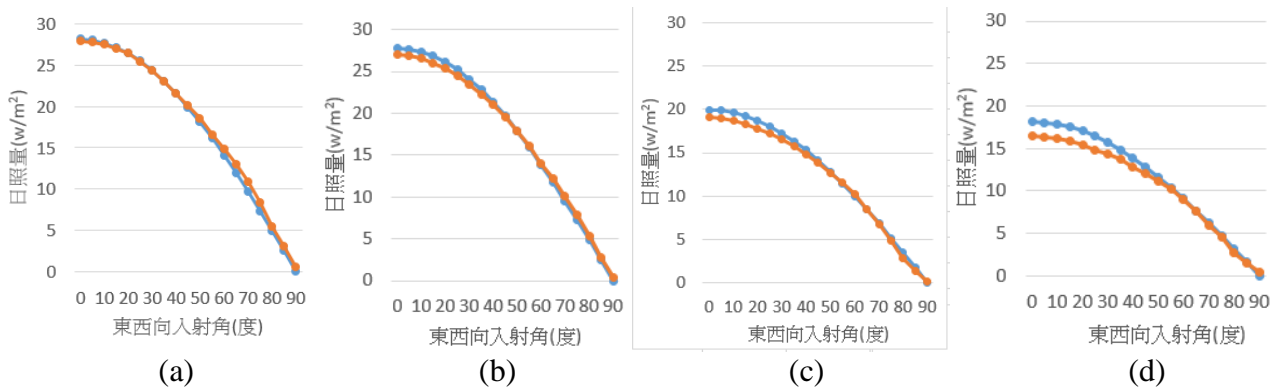
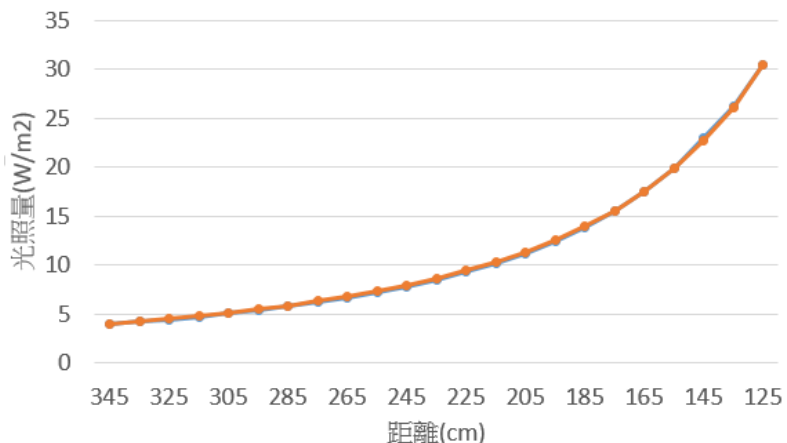
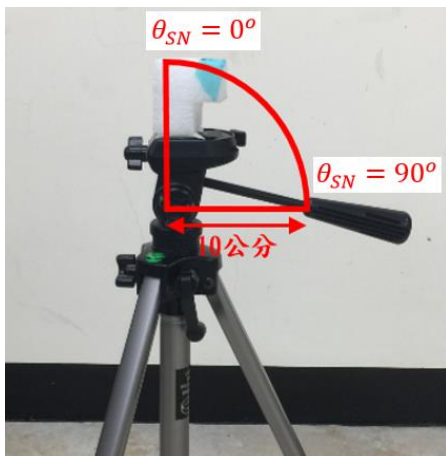


圖 4-5 不同南北向入射角(a)5 度、(b) 15 度、(c) 45 度、(d) 50 度之理論計算值(藍色線)與實驗量測值(橘色線)

**探討：**由圖 4-5 可清楚看出，理論計算值與實驗量測值在南北向太陽入射角 $\theta_{SN}$ 小時，如圖 4-5(a)與 5-5(b)，兩者非常一致，但當南北向太陽入射角 $\theta_{SN}$ 大時，例如圖 4-5(c)與 5-5(d)就有明顯誤差出現。究其原因，是因為我們所使用之三角架的結構在轉動時所造成，如圖 4-6(a)所示，其在模擬東西向入射角 $\theta_{SN}$ 時，在軸心上轉動，所以與投影機之距離不變。但在模擬南北向入射角 $\theta_{SN}$ 時，會有一旋轉半徑 10cm，故造成光照度的降低。為探討此現象，我們量測不同距離的光照度，如圖 13(b)所示。上網查詢可知光照量與距離平方成反，與所量測之結果圖 4-6(b)完全吻合。



(a)

(b)

圖 4-6 (a)三角架旋轉半徑，(b)距離與光照量之關係

若將三角架旋轉半徑的因素考量下去，(4-1)式修正為

$$L = \left[ 28.2 \cdot \left( \frac{D}{D+r \cdot (1-\cos(\theta_{SN}))} \right)^2 \right] \cos(\theta_{EW}) \cos(\theta_{SN}) \quad (4-2)$$

其中， $D$  為光源到量測點的距離， $r$  為三角架旋轉半徑長度。修正結果如圖 4-7 所示，可清楚看出理論計算值(藍色線)與實驗量測值(橘色線)兩者非常一致，此直接證明所提太陽入射角座標系之方法確實正確可行。

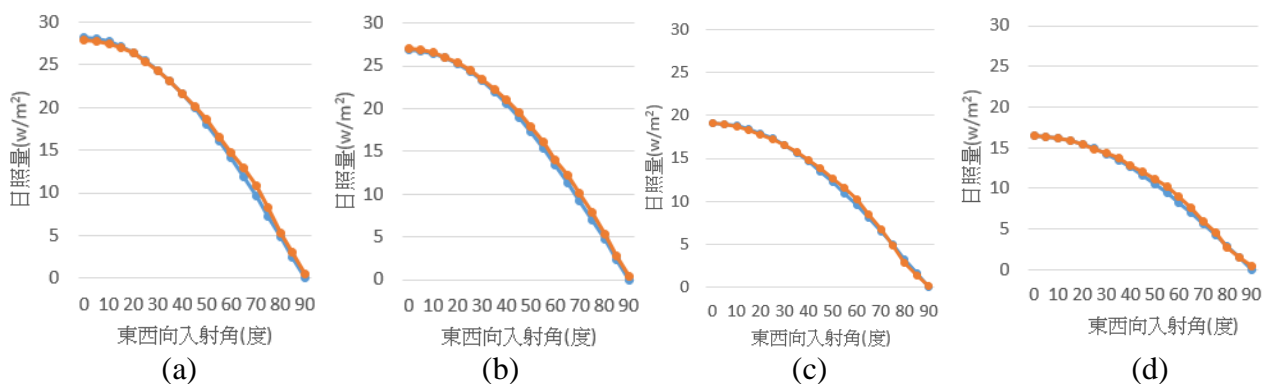


圖 4-7 考量旋轉半徑下在不同南北向入射角(a)5 度、(b) 15 度、(c) 45 度、(d) 50 度之理論計算值(藍色點)與實驗量測結果(橘色點)

### (3)地球自轉週期光照量實驗與探討

接著使用圖 3-9 所示之 Excel 試算表，以均分法，算出每小時之東西向太陽入射角 $\theta_{EW}$ 與南北向太陽入射角 $\theta_{SN}$ 。再使用(4-1)式即可算出太陽能板在春分、夏至與冬至之日射量，如圖 4-8(a)所示。

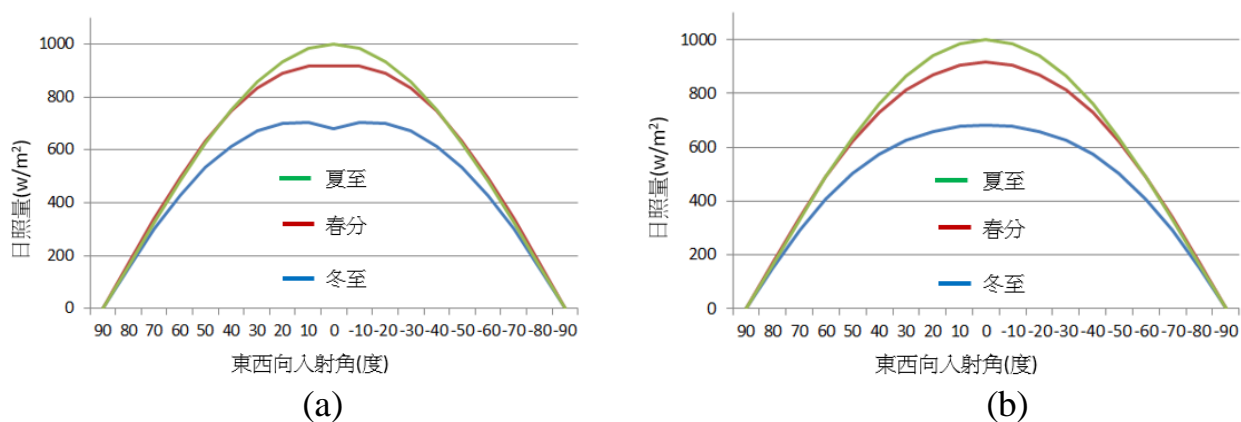


圖 4-8 地球自轉週期日照量數值計算探討(a)均分法，(b)圓周運動修正

**探討：**令人疑惑的是在冬至時，太陽日射量在中天時反倒較低，與生活經驗不符。於是我們使用圖 3-6 太陽運行軌跡模型來量測南北向入射角  $\theta_{SN}$  的變化，結果如圖 4-9(a)所示，可看出關係恰為  $\cos$ 。所以我們在計算時使用均分法來算出南北向入射角  $\theta_{SN}$  (如圖 3-4)是不對的，南北向入射角  $\theta_{SN}$  的變化是呈  $\cos(\theta_{EW})$  變化，應修正為圖 4-9(b)-(d)才對。經過此修正後，地球自轉週期在春分、秋分，夏至，冬至的日照量數值計算如圖 4-8(b)所示，可清楚看出明顯趨於合理。

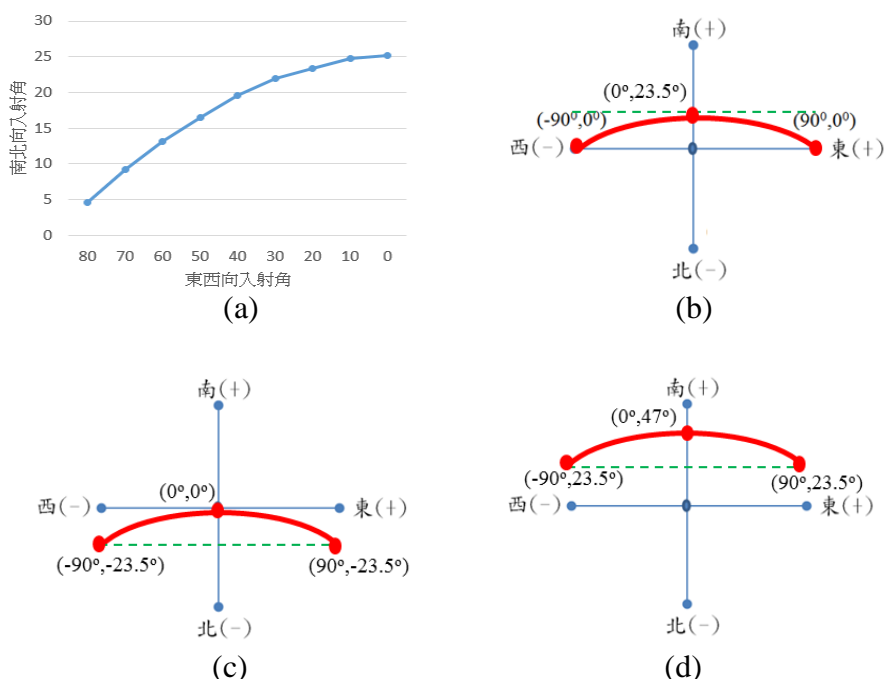


圖 4-9 在北緯 23.5° 位置之太陽入射角座標投影圖，(a)春分、秋分，(b)夏至，(c)冬至

#### (4)地球自轉週期(1 天)太陽運行軌跡模擬實驗與理論計算比較探討

假設太陽能板面對正南方，且其傾斜角度為  $\theta_{PV}$ ，因其面對正南方所以太陽與太陽能板之南北向入射角為  $\theta_{SN} - \theta_{PV}$ ，故(4-3)式可修正如(4-3)式即可探討不同太陽能傾斜角對發電量之影響：

$$P = P_{\max} \cdot \cos(\theta_{EW})\cos(\theta_{SN} - \theta_{PV}) \quad (4-3)$$

接著，我們使用所研製之太陽運行軌跡模型，如圖 3-7 所示，來模擬太陽能板於北緯 23.5 度，面對正南方，傾斜角 23.5 度於春秋分、夏至與冬至之發電情形。同時並依據(4-2)式的方式將(4-3)式加入距離變化的考量修正為

$$L = \left[ 16.1 \cdot \left( \frac{D}{D+r \cdot (1-\cos(\theta_{EW}))} \right)^2 \right] \cos(\theta_{EW})\cos(\theta_{SN} - \theta_{PV}) \quad (4-4)$$

此時  $r$  應代地球儀半徑 16 公分。圖 4-10(a)為實驗量測值之曲線圖，圖 4-10(b)為實驗量測值之曲線圖，可看出，兩者之間是相當一致，這說明使用太陽入射角坐標系可正確算出一天發電的情形。

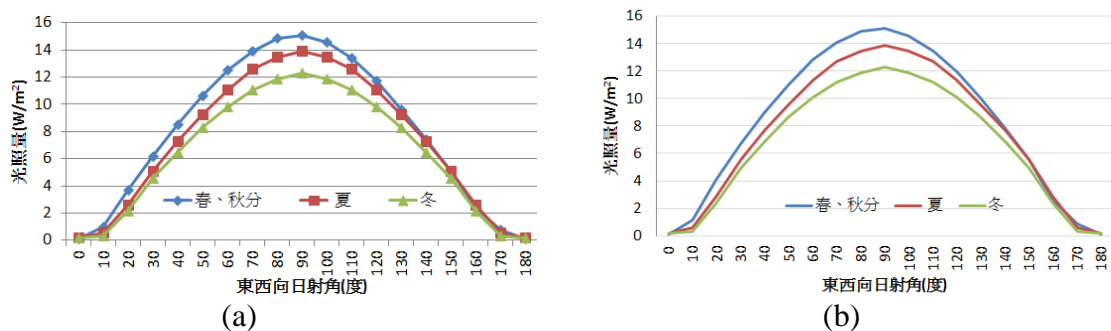


圖 4-10 (a)實驗量測值之曲線圖，(b)理論計算值之曲線圖

### (5)地球自轉週期(1 天)太陽能發電系統實測與理論計算比較探討

接著選擇一天較無雲雨的日子(2019 年 3 月 1 日)，進行太陽能發電系統實際發電量與理論計算值比較，如圖 4-11(a)與 5-11 (b)所示。由圖 4-11 (a)與(b)可看出，可看出實際發電量與理論計算值曲線非常接近。如將其累加即可得到日發電量，此直接說明所提方法確實可用於日發電量之估算。

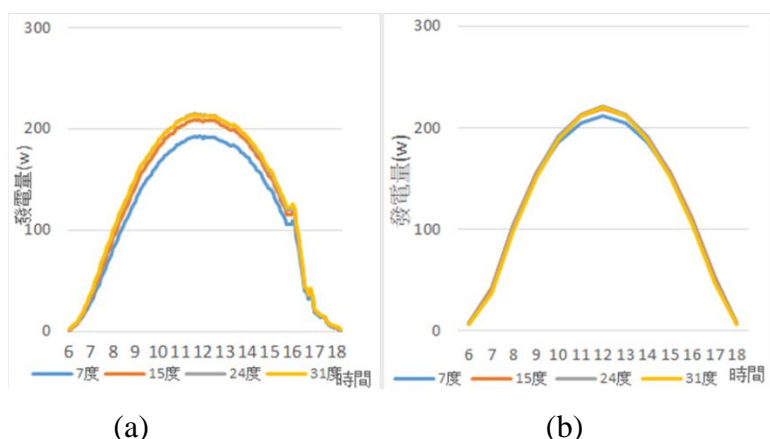


圖 4-11 一天電量曲線圖：(a) 實測結果，(b) 理論計算結果

**探討 1：**從圖 4-11 的實測結果與理論計算結果可看出，架設傾斜角 7 度的太陽能板其實際發電量明顯小於理論計算值。經在同樣光照量實測後發現，該架設傾斜角 7 度的太陽能板本身的發電效率( $\eta$ )比其他 3 塊來低。

**探討 2：**在無雲大晴天下，實測值與理論計算值是吻合的，但無法將陰雨天的變因納入公式內計算，於是我們借助氣候資料來嘗試解決之。我們可以利用氣象資料中的全日空日照量  $L_{GR}$  (單位： $MJ/m^2$ )來修正太陽的日照量  $P$  (單位： $KW/m^2$ )。因全日空日照計是水平安裝，我們利用入射角 $\gamma$ 將其回推至原本太陽的日照量，並將單位百萬焦耳 MJ 轉換為千瓦 KW，如下式所示。

$$P = \frac{L_{GR}}{3.6 \cdot \cos(\gamma)} \quad (4-5)$$

## (6) 1 個月份太陽能發電系統實測與理論計算比較探討

圖 4-12(a)為參考中央氣象局網站台中觀測站每天之全日空日照量(MJ/m<sup>2</sup>)[4]以及中天時仰角[3]於 2018 年 1 月份資料，太陽能板架傾斜角 7 度、15 度、23.5 度與 31 度下數值計算結果。圖 4-12(b)為 2018 年 1 月份太陽能發電系統實測發電量。比較圖 4-12(a)與圖 4-12(b)可發現，理論計算值與實測值除了 2 日、3 日與 27 日外，兩者非常一致，此直接說明所提方法確實可用於月發電量之估算。累加即可得到月發電量，此直接說明所提方法確實可用於月發電量之估算。

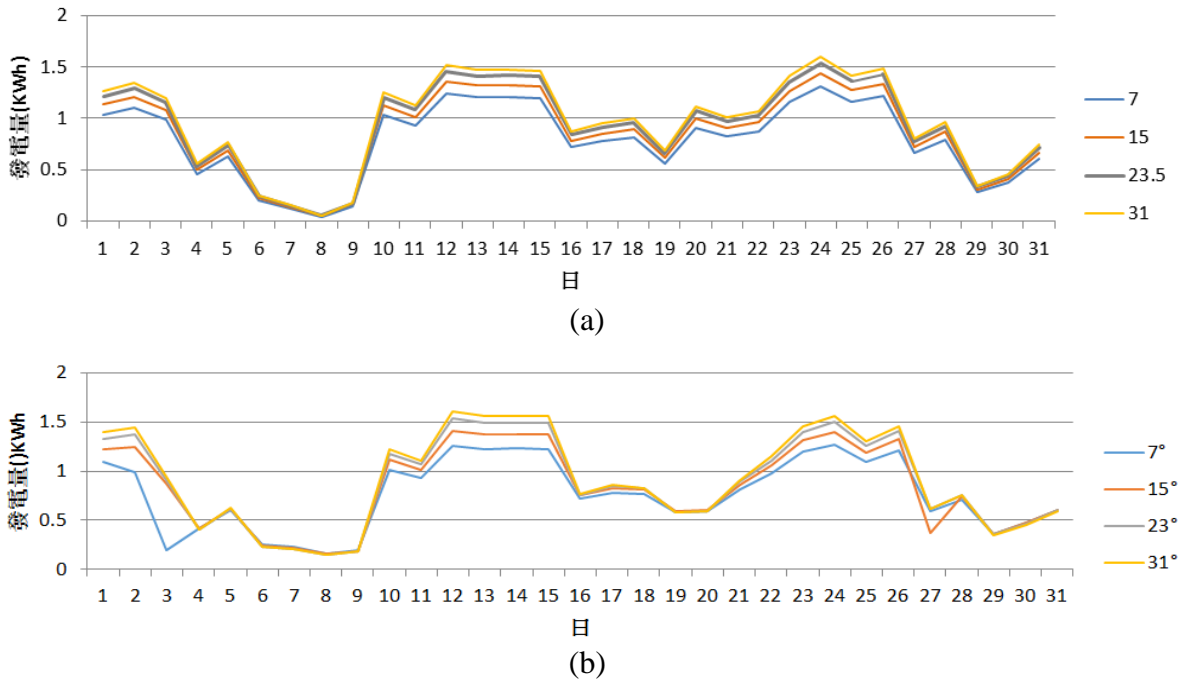


圖 4-12 2018 年 1 月份發電量：(a)使用氣象局全日空日照量的計算值，(b)實測值

**探討：**2 日、3 日與 27 日之誤差，經審視發電記錄資料發現 2 日及 3 日 7 度太陽能板的發電資料部分沒記錄到，27 日 15 度太陽能板的發電資料部分也沒記錄到，故造成紀錄的發電量比實際發電量來低。

## (7) 地球公轉週期(1 年)太陽能發電實驗與探討

由以上的探討得知，將 12 個月發電量累計起來即可得出完整一個太陽運行軌跡週期下的發電量，進而可以探討固定式太陽能發電系統的最佳架設傾斜角度。接下來，我們將以下表所列 7 種方式來探討架設朝向正南方之太陽能板在不同架設傾斜角的發電情況。



表 4-1 地球公轉週期(1 年)太陽能發電實驗與探討

		探討方式	帶入變數
數值計算	不考慮氣候	太陽 1 年圓形運行軌跡	東西向入射角、南北向入射角、日出時間、日落時間
		太陽 1 年橢圓形運行軌跡	東西向入射角、南北向入射角、日出時間、日落時間、太陽與地球距離
		太陽 1 年橢圓形運行軌跡 + 大氣質量	東西向入射角、南北向入射角、日出時間、日落時間、太陽與地球距離、大氣質量
	考慮氣候	2018 年氣象資料	東西向入射角、南北向入射角、2018 年全日空日照量
		2010-2018 年氣象資料	東西向入射角、南北向入射角、2010-2018 年全日日照量平均值
		經典氣象年資料	東西向入射角、南北向入射角、經典氣象年全日日照量
實際量測	實際系統架設 7,15,23 與 31 度	2018 年實際情形	

### ①太陽 1 年圓形運行軌跡

首先，考量一整年太陽與太陽能板間之角度變化，來探討最佳架設傾斜角。如圖 4-13(a)為太陽 1 年圓形運行軌跡下每月份發電情況，而圖 4-13(b)為太陽能板在不同架設傾斜角度下所累計之發電量。由圖中可看出，當太陽能板架設傾斜角度約在 17-19 度有較高之發電量。數值顯示，最佳架設傾斜角度為 18 度，發電量為 696,671KWh，比架設傾斜角度為 24 度的 693.132KWh 多約 0.51%。

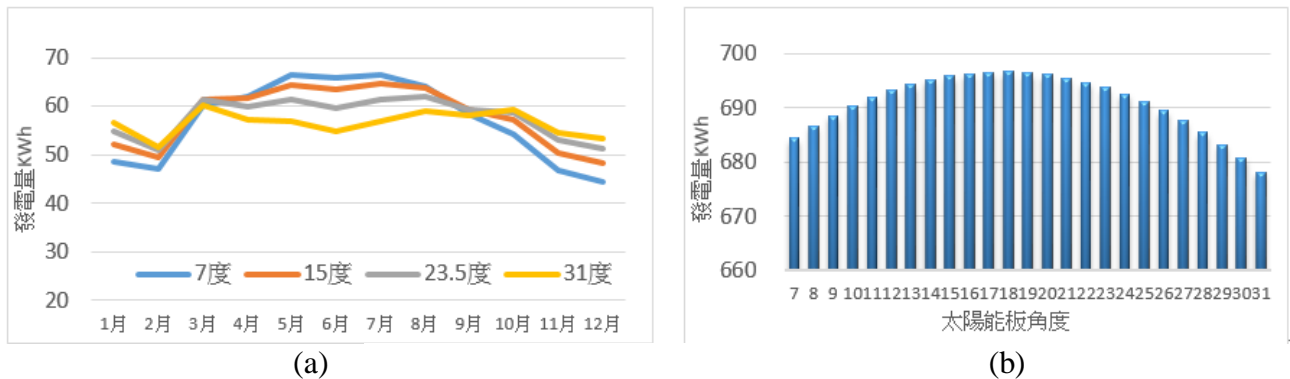


圖 4-13 太陽 1 年圓形運行軌跡：(a) 傾斜角度 7、15、23.5、31 度下每月發電量、(b) 不同架設傾斜角度下年累積發電量

### ② 太陽 1 年橢圓形運行軌跡

考量太陽的運行軌跡是橢圓形，故將每月太陽與地球之距離變化考量進去。我們使用下式計算：

$$P = P_{\max} \cdot \left(\frac{14960}{R}\right)^2 \cdot \cos(\theta_{EW}) \cos(\theta_{SN} - \theta_{PV}) \quad (4-6)$$

其中，14960為太陽到地球的平均距離 14960 萬公里，R為太陽到地球的真正距離。每個月的距離與其造成日照量的改變如表 4-2 所列。圖 4-14(a)為太陽 1 年橢圓形運行軌跡之 1 整年每月份發電情況，而圖 4-14(b)為太陽能板在不同架設傾斜角度下所累計之發電量。由圖中可看出，當太陽能板架設傾斜角度約在 17-19 度有較高之發電量。數值顯示，最佳架設傾斜角度為 18 度，發電量為 695.525KWh，比架設傾斜角度為 24 度的 692,388KWh 多 0.453%。

表 4-2 每個月距離與日照量修正

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月
萬公里	14,793	14,877	14,960	15,043	15,127	15,210
日照%	102.33%	101.17%	100.00%	98.83%	97.67%	96.50%
	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
萬公里	15,127	15,043	14960	14,877	14,793	14,710
日照%	97.67%	98.83%	100.00%	101.17%	102.33%	103.50%

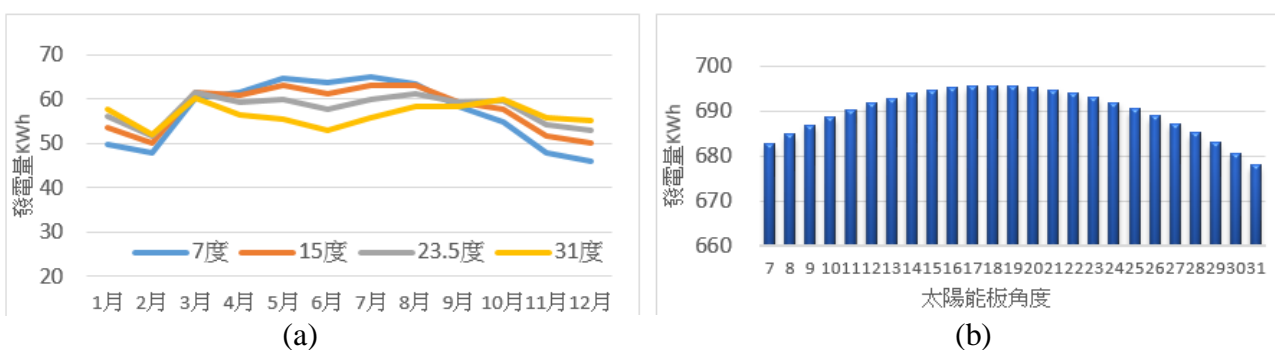


圖 4-14 太陽 1 年橢圓形運行軌跡：(a) 傾斜角度 7、15、23.5、31 度下每月發電量、(b) 不同架設傾斜角度下年累積發電量

**探討：**比較圖 4-13 與圖 4-14 可發現，兩者幾乎一樣，這說明在探討太陽能發電時，太陽與地球因橢圓形運行軌跡所造成的距離變化影響不大。仔細觀察圖 4-13(a)與圖 4-14(b)還是可發現，圖 4-14 在 6 月附近的發電量比圖 4-13 的略低，這是因為夏季是遠日點。而在 1、12 月附近的發電量圖 4-14 比圖 4-13 的略高，這是因為冬季是近日點。

### ③ 太陽 1 年橢圓形運行軌跡並考量大氣質量

由於太陽入射角不同，穿過大氣層的厚度隨之也會不同，通常用大氣質量 (air mass, AM) 來表示。並規定太陽入射光與地面的夾角為  $90^\circ$  時，也就入射角為  $0^\circ$  時，是大氣質量為 AM1。其他入射角的大氣質量可以用太陽光入射角  $\gamma$  的關係表達，即  $AM=1/\cos(\gamma)$  [5]，如圖 4-15 所示。也就是說，若考量大氣質量，太陽能板發電量公式應修正為(4-7)式。注意的是大氣層外的日照能量為太陽常數  $1362 \text{ W/m}^2$ ，而本文之前所探討之  $P_{\max}$  是在假設地球表面日照能量  $1000 \text{ W/m}^2$  下所求得，故(4-7)式中，需乘上 1.362 的倍數。

$$P = 1.362 \cdot P_{\max} \cdot \left(\frac{14960}{R}\right)^2 \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\theta_{EW}) \cos(\theta_{SN} - \theta_{PV}) \quad (4-7)$$

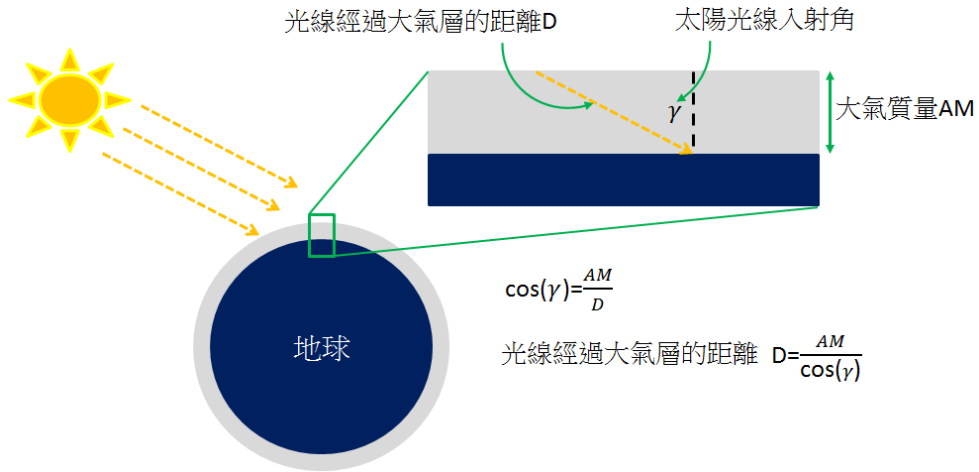


圖 4-15 大氣質量對日照量的影響

如圖 4-16(a)所示，為太陽 1 年橢圓形運行軌跡並考量大氣質量之 1 整年每月份發電情況，而圖 4-16(b) 為太陽能板在不同架設傾斜角度下所累計之發電量。由圖中可看出，當太陽能板架設傾斜角度約在 17-19 度有較高之發電量。數值顯示，最佳架設傾斜角度為 18 度，發電量為 701.766KWh，比架設傾斜角度為 24 度的 698.381KWh 多 0.48%。

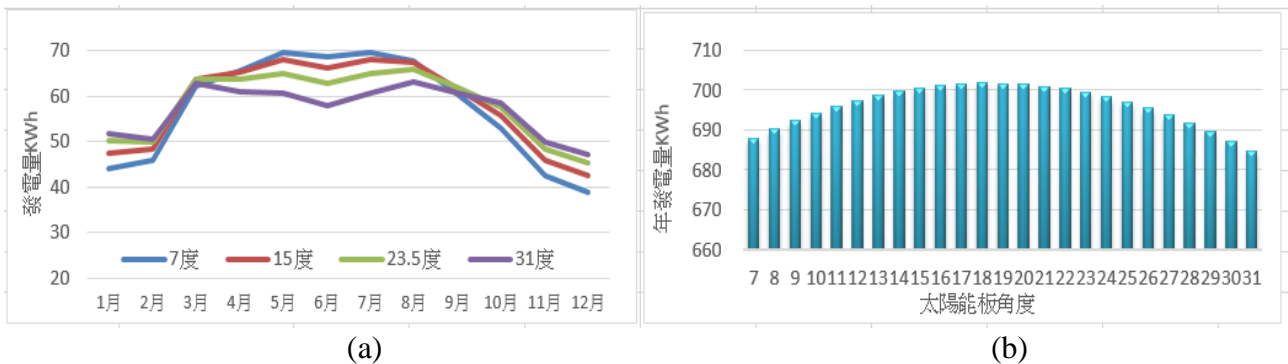


圖 4-16 太陽 1 年橢圓形運行軌跡並考量大氣質量：(a) 傾斜角度 7、15、23.5、31 度下每月發電量、(b)不同架設傾斜角度下年累積發電量

**探討：**比較圖 4-14(b)與圖 4-16(b)可發現，年發電量幾乎一樣，以太陽能板架設傾斜角 18 度與 24 度之年累積發電量而言，兩者差異小於 0.9%。此結果間接說明大氣層外的日照能量  $1362 \text{ W/m}^2$  經過大氣層到地面約衰減為  $1000 \text{ W/m}^2$ ，故在太陽能發電工程中常假設日照能量為  $1000 \text{ W/m}^2$  是合理的。圖 4-17 為太陽於大氣層外與地球表面的光譜，可發現經過大氣層後，光能量確實明顯衰減。

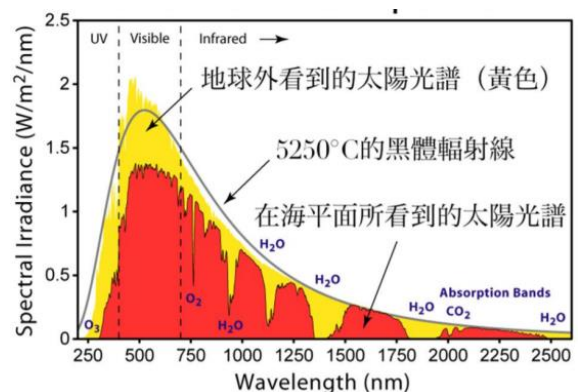


圖 4-17 太陽於大氣層外與地球表面的光譜

#### ④太陽 1 年運行軌跡並考量 2018 年氣象資料

接著我們以 2018 年之全日空輻射量(MJ/m<sup>2</sup>)來考量，將台中的氣象觀測資料[4]如表 4-3 帶入，使用(4-3)式與(4-5)式進行數值計算。

表 4-3 2018 年全日空日照量

單位::MJ/m<sup>2</sup>

月份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
日照量	340.8	351.2	566.6	530.0	658.3	560.5	519.0	465.7	581.6	564.5	393.8	420.8

圖 4-18(a)為每月份發電情況，而圖 4-18(b) 為太陽能板在不同架設傾斜角度下所累計之發電量。由圖中可看出，當太陽能板架設傾斜角度約在 17-19 度有較高之發電量。數值顯示，最佳架設傾斜角度為 18 度，發電量為 418.370KWh，比架設傾斜角度為 24 度的 416.329KWh 多 0.490%。

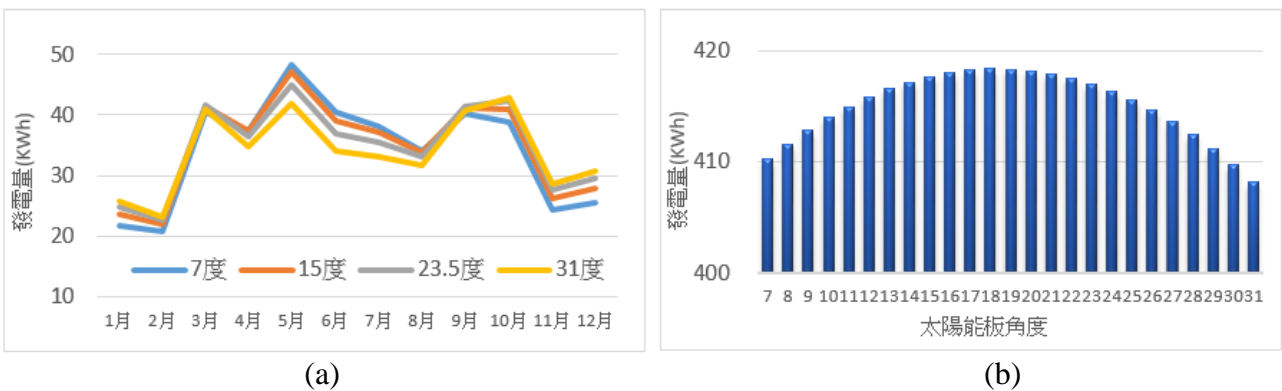


圖 4-18 太陽 1 年橢圓形運行軌跡並考量 2018 年氣象資料：(a) 傾斜角度 7、15、23.5、31 度下每月發電量、(b)不同架設傾斜角度下年累積發電量

#### ⑤太陽 1 年運行軌跡並考量 2010-2018 年氣象資料

接著我們以 2010-2018 年的平均全日空輻射量(MJ/m<sup>2</sup>)來考量，將台中的資料[4]如表 4-4 帶入，進行數值計算。

表 4-4 2010-2018 年平均全日空日照量

單位::MJ/m<sup>2</sup>

月份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
日照量	361.1	357.8	437.7	448.1	499.1	525.5	573.3	489.6	499.0	488.9	359.6	340.5

如圖 4-19(a)所示，為每月份發電情況，而圖 4-19(b) 為太陽能板在不同架設傾斜角度下所累計之發電量。由圖中可看出，當太陽能板架設傾斜角度約在 17-19 度有較高之發電量。數值顯示，最佳架設傾斜角度為??度，發電量為 377.797KWh，比架設傾斜角度為 24 度的 375.870KWh 多 0.513%。

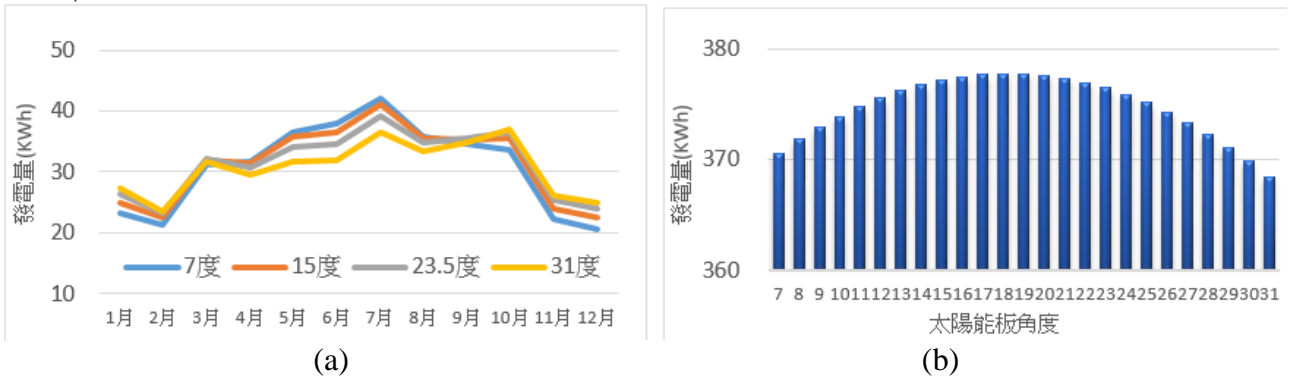


圖 4-19 太陽 1 年橢圓形運行軌跡並考量 2010-2018 年氣象資料：(a) 傾斜角度 7、15、23.5、31 度下每月發電量、(b)不同架設傾斜角度下年累積發電量

### ⑥ 太陽 1 年運行軌跡並考量經典氣象年氣象資料

接著我們以經典氣象年的平均全日空輻射量(MJ/m<sup>2</sup>)[7]，如表 4-5，進行數值計算。注意!此表的數值為每月中每一天的全日空輻射量，非整月的累積。

表 4-5 經典氣象年全日空日照量 單位::MJ/m<sup>2</sup>

月份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
日照量	9.77	11.60	12.02	13.73	17.07	16.40	17.05	13.89	15.79	15.59	12.18	11.16

如圖 4-20(a)所示，為每月份發電情況，而圖 4-20(b) 為太陽能板在不同架設傾斜角度下所累計之發電量。由圖中可看出，當太陽能板架設傾斜角度約在 17-19 度有較高之發電量。數值顯示，最佳架設傾斜角度為 18 度，發電量為 355.217KWh，比架設傾斜角度為 24 度的 353.413KWh 多 0.51%。

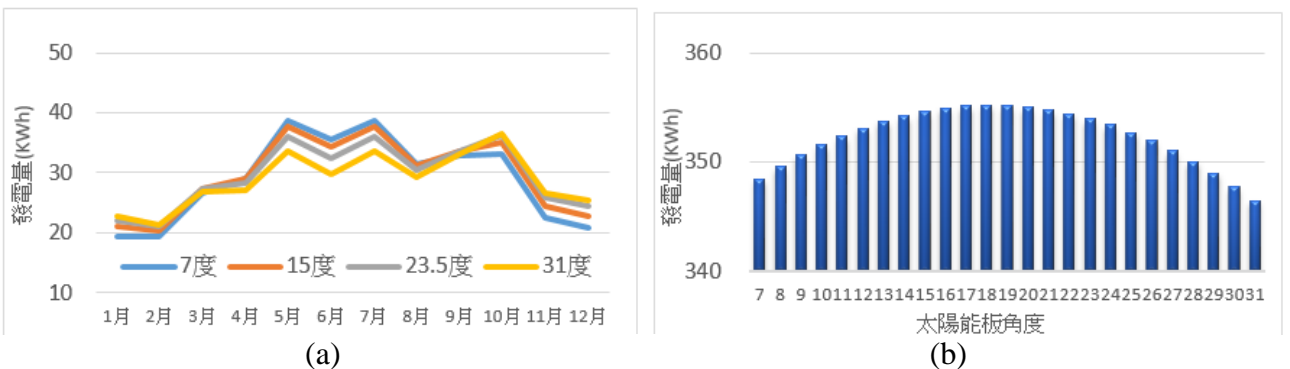


圖 4-20 太陽 1 年橢圓形運行軌跡並考量經典氣象年氣象資料：(a) 傾斜角度 7、15、23.5、31 度下每月發電量、(b)不同架設傾斜角度下年累積發電量

### ⑦ 實際太陽能發電系統於架設傾斜角 7,15,23 與 31 度實測結果

在實際量測資料中，我們可將每 5 分鐘所量測的資料用 Excel 用曲線圖繪出，如圖 4-21(a)所示。可看出，在 1 月 1 日當天因太陽在中天時之仰角為 43 度，故發電量的大小依序為太陽能板傾斜 31°、24°、15° 與 7° 是合理的。接著，我們將該天的發電功率乘上時間並累加起來，就可得到當天的發電量。



重複上面的步驟，也可將 1 月 2 日到 1 月 31 日的發電量算出，即可得到 1 月份的發電量曲線，如圖 4-21(b)所示。從 1 月份的發電量曲線可看出，當日照充足時，太陽能板傾斜 31° 的發電量明顯最大，接著依次為 24° 與 15°，7° 最小。

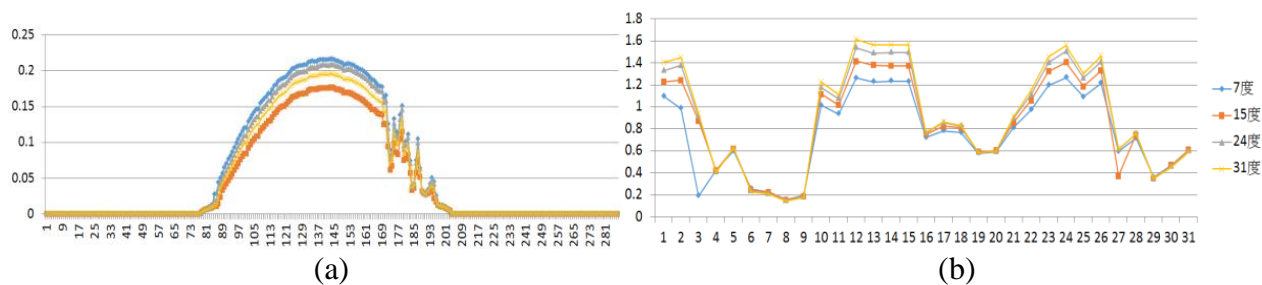


圖 4-21 實際太陽能板發電情況：(a)2018 年 1 月 1 日，(b) 2018 年 1 月份

接下來，我們將該月的發電量累加起來，就可得到 1 月份的發電量。重複上面的步驟，也可將 2 月到 12 月的發電量算出，即可得到 2018 的發電量曲線，如圖 4-22(a)所示。從圖中我們可觀察太陽能板傾斜 31 度與 7 度的曲線可清楚看出，在春秋兩季(例如 4 月、9 月)兩者發電量差異不大，然在冬季(例如 10 月、11 月)，太陽能板傾斜 31 度的發電量明顯高於 7 度的發電量，而在夏季(例如 5-7 月)，太陽能板傾斜 7 度的發電量明顯高於 31 度的發電量。以上說明了太陽的運行軌跡，確實直接影響不同太陽能傾斜角的發電量。

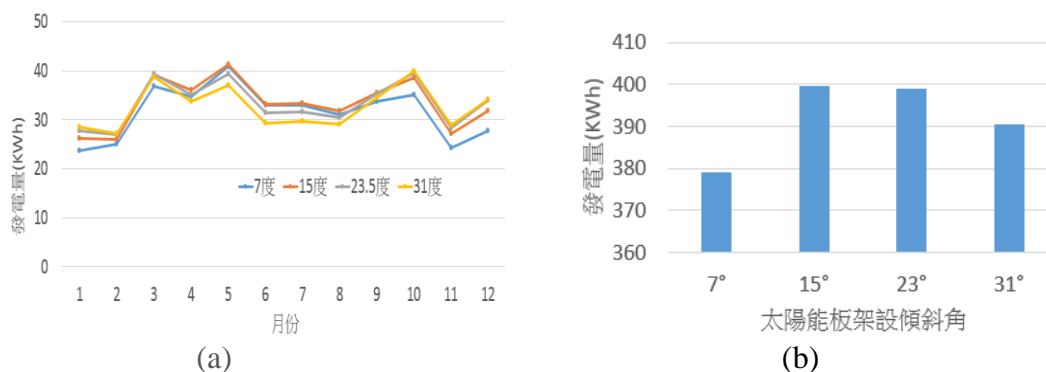


圖 4-22 (a)2018 年每月發電量；(b) 2018 年累計發電量

最後，我們分別將太陽能板架設傾斜角 7°、15°、24° 與 31° 在 2018 年的發電量累計，可得出其發電量分別為 337.1 kWh、399.7 kWh、398.80 kWh、390.4 kWh，如圖 4-22(b)所示，太陽能板架設傾斜角 15 度的發電量比架設傾斜角 24 度多出 0.23% 發電量。

**探討 1：**理論上夏天太陽日射量明顯大於其他季節，為何太陽能發電系統的量測資料，如圖 4-22(a)，顯示 6、7、8 月之發電量較 5 月與 10 月低？我們找出今年 108 年之降雨資料，如下圖所示，可看出在 6、7、8 月之降雨量明顯高於其他月份。此說明，6、7、8 月之發電量較低之原因在於受氣候（陰雨天多）之影響。

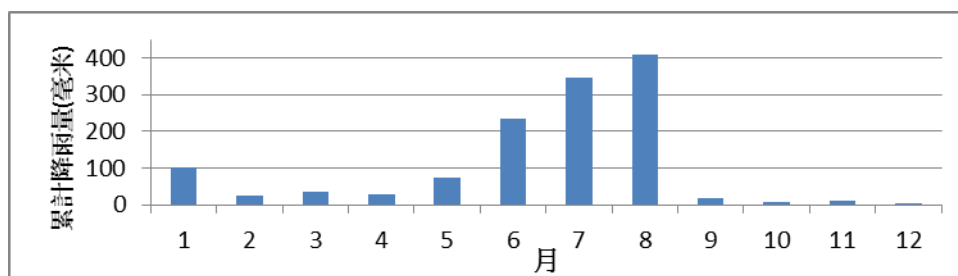


圖 4-23 2018 年台中累積降雨量

**探討 2：**比較考量氣候的三個數值計算結果，如圖 4-18、5-19 與 5-20，可看出，年發電量有非常的不同，此說明氣候對太陽能系統的發電量有非常大的影響。另亦可看出，太陽能板的最佳傾斜角都為 18 度，非所在位置的緯度 24 度。

**探討 3：**為何之前科展的實測數據指出最佳傾斜角約 30-40 幾度[9]，和我們的研究數據不同？因該實驗是量測 1 天 24 小時短周期的發電量，又加上是在冬季或春季作實地量測，此時太陽的仰角均偏低，所以才有此結果。而本研究是以一整年長周期的總發電量來判斷，故不同。

**探討 4：**綜合數值計算結果與實際量測結果，彙整如下表。一般認知的“太陽能發電系統架設的傾斜角要等於所處位置的緯度”這句話是非常有疑慮。至少在本研究所獲得數據中，它是不成立的。最佳架設傾斜角應為 18 度，與 24 度架設傾斜角改善約 0.5%。若與 31 度架設傾斜角(參考文獻[9]指出最佳傾斜角約 30-40 幾度)比較，改善約 2.5%。

表 4-6 一年太陽運轉周期發電結果改善表

	方式(一)	方式(二)	方式(三)	方式(四)	方式(五)	方式(六)	方式(七)
最佳角度	18	18	18	18	18	18	15
與 24 度比之改善%	0.51	0.45	0.48	0.49	0.51	0.51	0.23
與 31 度比之改善% (參考文獻[9])	2.6	2.6	2.5	2.5	2.6	2.6	2.6

### ⑧任意方位角下太陽能板最佳架設傾斜角探討

假設太陽能板架設的方位角為  $\theta_D$ ，架設傾斜角為  $\theta_{PV}$ ，則其東西向與南北向傾斜角  $\theta_{PV,EW}$ ， $\theta_{PV,SN}$ ，可表示為

$$\theta_{PV,EW} = \theta_{PV} \sin(\theta_D) \quad (4-7)$$

$$\theta_{PV,SN} = -\theta_{PV} \cos(\theta_D) \quad (4-8)$$

如此，則其發電功率可由下式求得：

$$P = P_{\max} \cdot \cos(\theta_{EW} - \theta_{PV,EW}) \cos(\theta_{SN} - \theta_{PV,SN}) \quad (4-9)$$

為驗證其可行性，我們使用業者 2018 年實際案場資料，如表 4-7 所示，來與數值計算比對。

圖 4-24 為案場的實測與模擬結果，可明顯看出，所提方法確實能模擬出發電量。

表 4-7 業者實際案場資料

地點	裝置容量	方位角	傾斜角
梧棲(北緯 24.24 度)	16.38kW	203 度	6 度

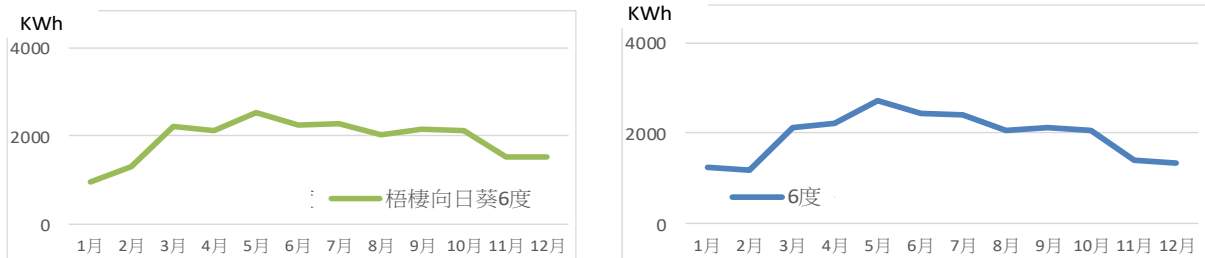


圖 4-24 業者實際案場(a)發電紀錄資料與(b)理論計算值

**探討 1：**我們更進一步使用 Excel 試算表得出不同傾斜角下年累積發電量，如圖 4-25(a)，其最佳架設傾斜角應為 17 度，若該案場架設為最佳架設傾斜角度，2018 應可多發 4222KWh，約改善 1.8%。

**探討 2：**我們更進一步使用 Excel 試算表得太陽能板在不同方位角下的最佳架設傾斜角，如圖 4-25(b)所示。該圖可非常便利協助業者得知太陽能板在任意方位角下之最佳架設傾斜角。採用曲線揉合(curve fitting)法可發現，最佳架設傾斜角 $\theta_{PV,optimal}$ 與方位角 $\theta_D$ 的關係為

$$\theta_{PV,optimal} = 18\cos(180 - \theta_D) \quad (4-10)$$

利用此式子，我們可以使用一般微控制器即可算出太陽能板在不同方位角下的最佳架設傾斜角，使得攜帶式太陽能板架設角度標示儀的製作變為可行。

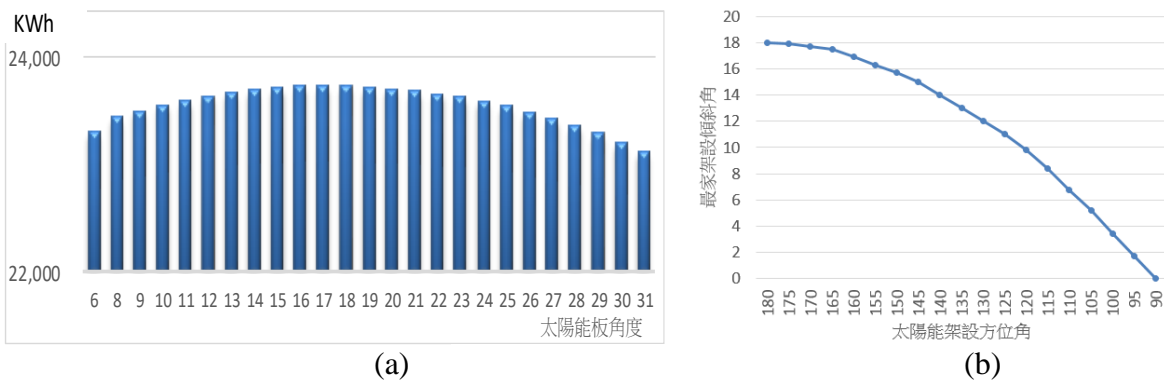


圖 4-25 (a)不同傾斜角下年累積發電量，(b)不同方位角下的太陽能板最佳架設傾斜角

表 4-8 為採用圖 4-25(b)的最佳架設傾斜角與 4 個業者實際案場的比較表，可看出最佳架設傾斜角的發電量改善 1.0%至 6.7%。

表 4-8 業者實際案場發電資料之比較

編號	地點	裝置容量	緯度	方向角	實際傾斜角	年發電量	最佳架設傾斜角	年發電量	改善
1	台中梧棲	16.38KW	24.24	203 度	6 度	23307 kWh	16.5 度	23730kWh	1.81%
2	南投國姓	17.28 KW	23.04	45 度	6 度	20432 kWh	-13 度	21794kWh	6.67%
3	雲林斗南	49.80 KW	23.66	130 度	9 度	68992 kWh	13 度	69649kWh	0.95%
4	台南鹽水	29.76 KW	23.294	143 度	7 度	39790 kWh	14 度	40347kWh	1.40%

### ⑨任意緯度與方位角下太陽能板最佳架設傾斜角探討

由於所提之方法是由太陽的東西向入射角  $\theta_{EW}$  與南北向入射角  $\theta_{SN}$  來決定，故雖然所在位置的緯度不一樣，只要將其影響的南北向入射角  $\theta_{SN}$  帶入即可得出太陽能板最佳架設傾斜角。因此，另外取兩個地點東京與新加坡來嘗試，地理位置如圖 4-26 所示，東京位於高緯度(約北緯 36 度)，新加坡位於低緯度(約北緯 1 度)。將東京 2018 年的全日空日照量[8]代入，得到之結果如圖 4-27 所示。圖 4-27(a)顯示出所提方法可



圖 4-26 東京、彰化與新加坡位置

以模擬計算出不同角度之發電量，而其年累計發電量如圖 4-27(b)所示，可看出在東京太陽能最佳架設傾斜角約為 24 度。

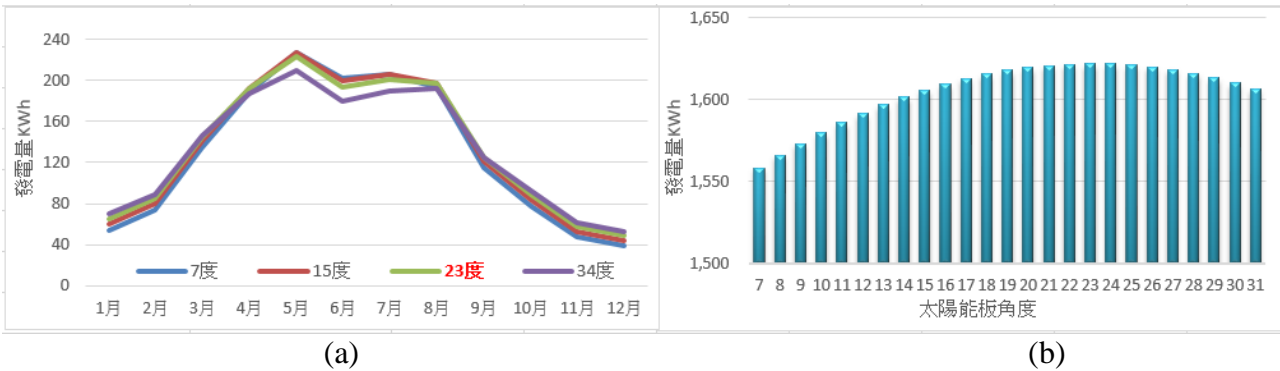


圖 4-27 東京 2018 年(a)理論計算發電量與(b)不同太陽能板傾斜角年累計發電量

我們也將新加坡 2018 年的全日空日照量代入，得到之結果如圖 4-28 所示。圖 4-28(a)顯示出所提方法可以模擬計算出不同角度之發電量，而其年累計發電量如圖 4-28(b)所示。由圖 4-28(b)可看出，在新加坡最佳架設傾斜角約為 1 度。

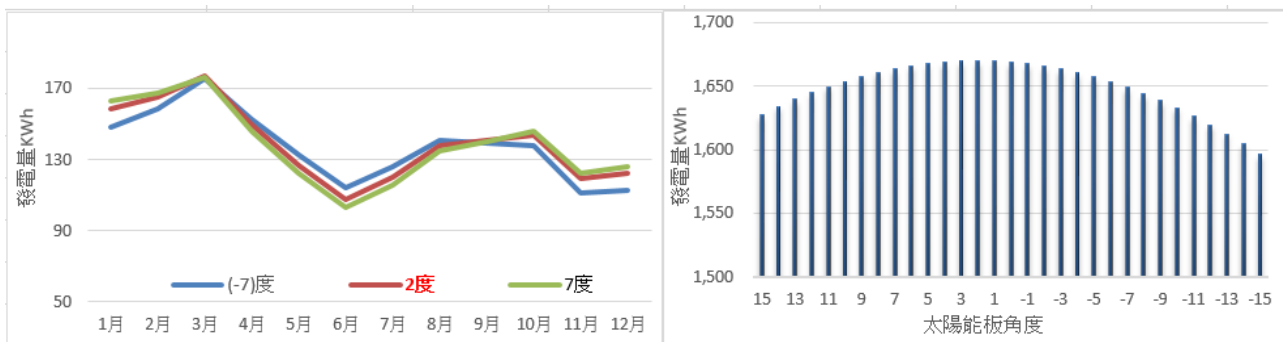
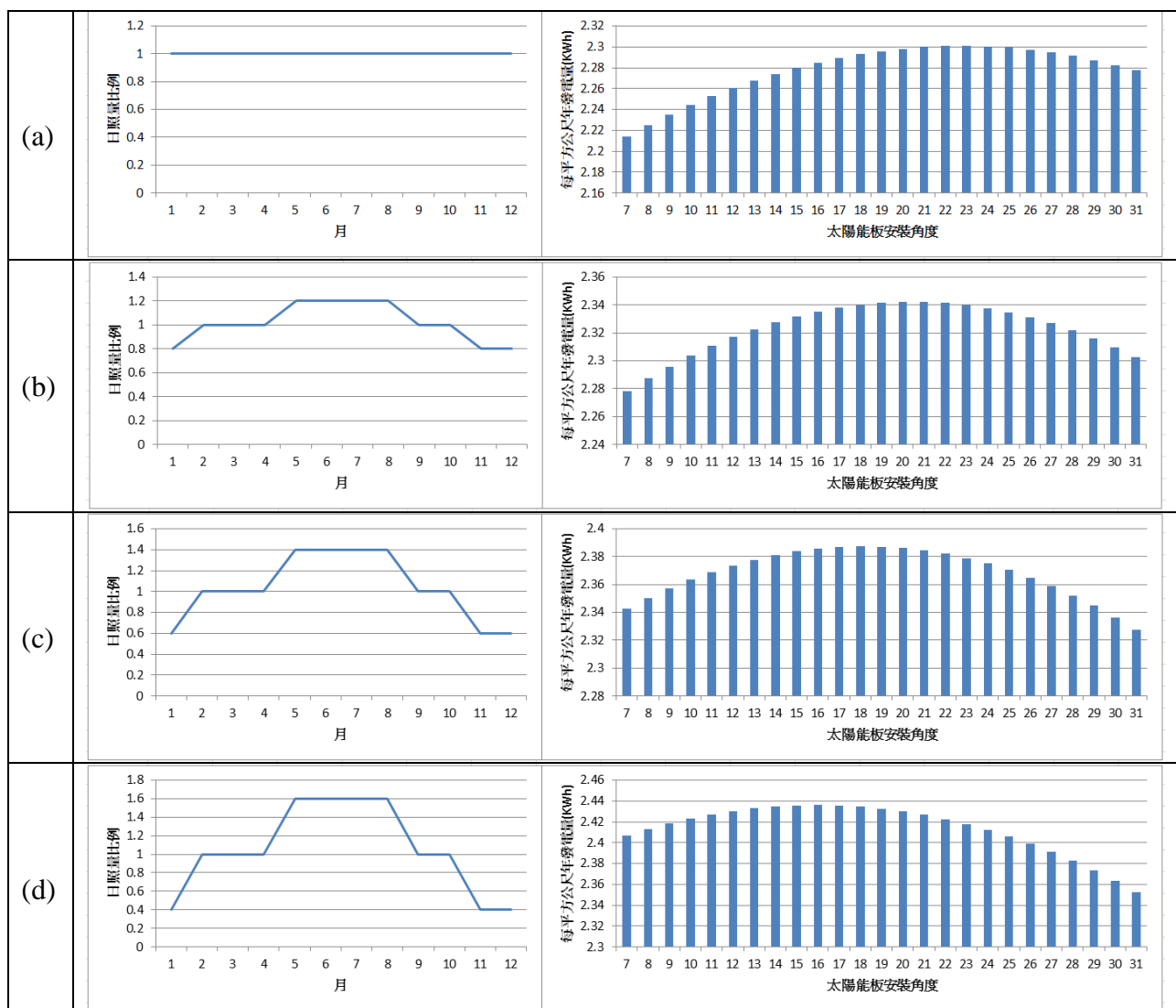


圖 4-28 新加坡 2018 年(a)理論計算發電量與(b)不同太陽能板傾斜角年累計發電量

**探討：**東京與新加坡的最佳架設角度我們已計算出來，然無當地實際案場的發電資料來驗證。此部分我們正在多方嘗試取得資料，希望複審時來得即展現理論計算與實際發電資料之比較。

## (8) 討論

- 我們很疑惑在不同情境所計算出之結果與實測的結果，太陽能板最佳架設傾斜角不是 23.5 度附近，而是 18 度。一般的認為是：以台灣所在緯度而言，太陽南北向入射角一年四季的變化從 0 度變化到 47 度，故取中間值 23.5 度當太陽能板架設傾斜角，如此能兼顧一年四季的太陽角度變化，所以 23.5 度為最佳。但此假設沒考量到一年四季的日照量是不一樣的。我們假設春秋季(2,3,4,9,10 月)日照量為 1 單位，夏季(5,6,7,8 月)與冬季(11,12,1 月)各乘上一固定百分比來探討之，結果如圖 4-29 所示。可看出當一年四季的日照量都一樣時，如圖 6-1(a)，其最佳角度確實是 23 度。但當考量夏冬季日照量的變化各增減 20%，40%，60%，80%時，如圖 4-29 (b)、4-29 (c)、4-29 (d)、4-29 (e)，其最佳角度會移至 21 度、18 度、16 度、14 度。而實際氣候，一年四季的日照量是不一樣的，故“在台灣太陽能發電系統架設的傾斜角要等於 23.5 度”這句話是非常有疑慮。





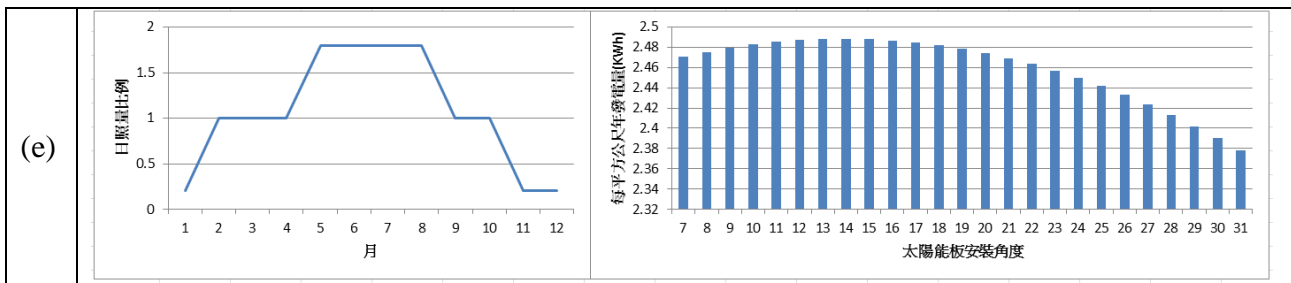


圖 4-29 四季不同日照量比之日照量與太陽能板不同傾斜角下之發電量：(a)0%、(b)20%、(c)40%、(d)60%、(e)80%

2. 我們的理論計算與實測結果都指出 23.5 度不是固定型太陽能板的最佳架設傾斜角，然最佳架設角度與 23.5 度的發電量僅改善約 0.5%，使我們也不敢妄下結論，於是我們訪問三家太陽能廠商，摘要如下：

施工業者	內容摘要
A 業者，已有超過 10 年經驗	以前有架設 23.5 度，但近幾年都安裝在 10 度左右，甚至有些小於 8 度，從發電情況來看，感覺有比 23.5 度好。另一原因是受風面小，比較安全。
B 業者，已有約 5 年經驗	以我的經驗，角度由好至差依序是 15 度左右、23 度左右、10 度左右。
C 業者，已有約 8 年經驗	雖然工研院跟我們說 23.5 度，但我們公司架設是以 12 度為主，若建築物朝北會架到接近 0 度

這透露出：第一即是使是業者也沒有一套方法來決定其最佳架設傾斜角度。第二經過眾多案場的經驗學習，現在已很少架設 23.5 度。

### (三)、結論與應用

#### 1. 結論

- (1) 成功以從天球外看地球的角度，定義一太陽入射角座標系，看到的就是太陽與太陽能板之入射角關係。如此，可以很用很簡單的數學探討太陽能發電的問題。
- (2) 實際研製太陽運行軌跡模擬系統，用以驗證所提太陽入射角座標系的可行性與正確性。由實驗與數值計算結果得知，實驗與數值計算結果非常吻合，證明所提方法確實可行。
- (3) 我們使用了 6 種不同考量，使用 Excel 試算表得出太陽能板在不同架設傾斜角的一整年累積發電量比較。結果發現，太陽能板朝向正南方時，當架設傾斜角 18 度時，約比 24 度的高約 0.5%。
- (4) 實際架設 4 塊朝向正南方不同傾斜角度的太陽能板，其傾斜角度分別為：7°、15°、24° 與 31°，並花 1 年時間紀錄完整太陽運行軌跡下之發電量。實測結果顯示傾斜角 15 度的發電量比 24 度的高約 0.24%。

- (5) 綜合第 3 與第 4 點結論，數值計算結果與實際量測結果。一般認知的“在台灣太陽能發電系統架設的傾斜角要等於 23.5 度”這句話是非常有疑慮。至少在本研究所獲得數據中，它是不成立的。
- (6) 使用所提方法的估算值與太陽能業者的發電資料進行比較，發現兩者非常吻合，證明所提發法可輕易應用至任意緯度與方位角的太陽能系統，用以得出最佳架設傾斜角。
- (7) 成功研製固定型太陽能板架設角度標示儀，能有效協助業者與 DIY 者輕易架設正確固定型太陽能板架設最佳角度。

## 2. 作品應用

太陽能板一架設完成就要發電 20 年，若架設角度不正確，會嚴重影響長達 20 年整體發電量。而本作品能有效協助業者與 DIY 者輕易架設正確太陽能板架設角度，確保 20 年整體發電量。

## 3. 經濟效益

若全世界在新架設太陽能板時，能裝設到最佳架設傾斜角度。依國際能源組織年報[1]指出，2017、2018 年太陽能一年新增約 100GW 裝置容量。一年有機會在不增加成本下多出約 0.5GW 發電功率。假設太陽能板每天發電 4 小時，如此每年增加  $0.5G \times 4hr \times 365day = 876GWh$  電量(8.76 億度電)，若以率每度電 4.0379 元計算，每年經濟效益可達  $8.76 億 \times 4.0379 = 35.372 億元$ 。若以太陽能板壽命 20 年計，其整個經濟效益約可達  $35.372 億 \times 20 年 = 707.44 億元$ 。而使用本固定型太陽能板架設角度標示儀輔助，能確保業者與 DIY 者輕易架設正確固定型太陽能板架設最佳角度，使上述經濟效益變為有機會實現。

## (四)、參考資料

[1][http://apvi.org.au/wp-content/uploads/2018/04/IEA\\_PVPS-A\\_Snapshot\\_of\\_Global\\_PV-1994-2017.pdf](http://apvi.org.au/wp-content/uploads/2018/04/IEA_PVPS-A_Snapshot_of_Global_PV-1994-2017.pdf)

[2] <https://zh.wikipedia.org/wiki/第一核能發電廠>

[3] 中央氣象局-天文星象 <https://www.cwb.gov.tw/V7/astronomy/sunrise.htm>

[4] <https://e-service.cwb.gov.tw/HistoryDataQuery/index.jsp>

[5] 大氣質量 AM <https://www.itsfun.com.tw/am/wiki-987235-021205>

[6] 太氣層吸收 <https://www.learnmode.net/upload/flip/book/7c/7c72037b0c21ca7f/b9206b5a1236.pdf>

[7] 張克勤、嚴偉倫、劉家維，《國內 2004-2013 年間經典氣象年之日射量調查分析》臺灣能源期刊，第三卷、第一期、第 89-101 頁，中華民國 105 年 3 月

[8] [http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/nml\\_sfc\\_ym.php?prec\\_no=44&block\\_no=47662](http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/nml_sfc_ym.php?prec_no=44&block_no=47662)

[9] 照過來!看我為太陽能板擺 POSE, 第 44 屆全國中小學科展

## 【評語】 100013

1. 本作品針對固定式太陽能電池的裝置，探討空間位置、氣候、日照等進行探討，值得鼓勵。
2. 建議應該針對理論計算、模型實驗、與實地實驗之間的數據，進一步進行比較與差異探討。
3. 建議應探討數據互相驗證之間的差異原因與如何校正。