

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 地球科學科

佳作

030506

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

學校名稱：彰化縣立彰興國民中學

作者： 國二 陳弈霖 國二 李聞碩 國二 洪千雅	指導老師： 雷尚宸 吳思慧
---	-----------------------------

關鍵詞：太陽運行軌跡、太陽能發電

摘要

本科展作品，藉由理論計算、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，逐步探討固定型太陽能板最佳架設角度。我們依序進行 10 個實驗，最後成功驗證一套能依據太陽能板所在緯度、方位與全日空日照量來決定出固定型太陽能板最佳架設傾斜角的方法。並據此實驗成果，進一步成功研製一固定型太陽能板架設角度標示儀，能協助業者與 DIY 者輕易架設正確固定型太陽能板架設最佳角度。

名詞解釋：

名詞	解釋
固定型太陽能系統	指太陽能板的方位與傾斜角均固定不動，故堅固性強、成本低，為目前產業所大量採用。
追日型太陽能系統	指太陽能板的方位與傾斜角會隨太陽位置改變，機構容易毀損、維護不易，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。
東西向入射角	天頂角投影至東西向之角度，定義天頂位置為 0 度，東方為 90 度，西方為-90 度。
南北向入射角	天頂角投影至南北向之角度，定義天頂位置為 0 度，南方為 90 度，北方為-90 度。
傾斜角	指太陽能板與地平面之夾角。

壹、 研究動機

有沒有可能在不增加成本又不製造汙染下，每年增加一座核子反應爐的電量?這雖然是同學無心的玩笑話，聽起來也很天方夜譚，但這確實是我們的研究動機。

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，全球每年裝設非常有可能超過 120GW 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**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照角度，故**固定型太陽能板架設角度之最佳化，看似是工程問題，卻只能由天文知識來解決之**。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 0.6GW，約為一座核一廠一個核子反應爐的發電功率(0.6GW)[2]。假設太陽能每天發電 4 小時，在不增加成本又不製造汙染下，每年有機會增加 1/6 核一廠一個核子反應爐的發電量。

貳、 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。

參、研究設備及器材

太陽能發電板(260W)*4塊



指南針(手機)

電表

角度量測器



地球儀

投影機

光照計



肆、研究過程或方法

我們依序進行下表中所規劃的 10 個實驗，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，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 4-1 實驗步驟、內容與目的

	實驗內容	目的
實驗一	日照計製作	實現日照量的量測
實驗二	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
實驗三	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
實驗四	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
實驗五	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
實驗六	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
實驗七	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
實驗八	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
實驗九	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
實驗十	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
實驗十一	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

一、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 θ_{EW} 與南北向太陽入射角 θ_{SN} 來表示太陽的位置 $(\theta_{EW}, \theta_{SN})$ ，如圖 4-1(a)所示，而圖 4-1(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 4-2 所示，就可以求出所處位置之有效日照量 L ，單位為 W/m^2 ：

$$\begin{aligned}
 L &= 1000 \cdot \frac{L_{1a} \cdot L_{2a}}{L_{1h} \cdot L_{2h}} \\
 &= 1000 \cdot \cos(\theta_{EW}) \cos(\theta_{SN})
 \end{aligned}
 \tag{4-1}$$

其中 1000 是一般情況下，太陽光的能量視為 1000 W/m^2 。

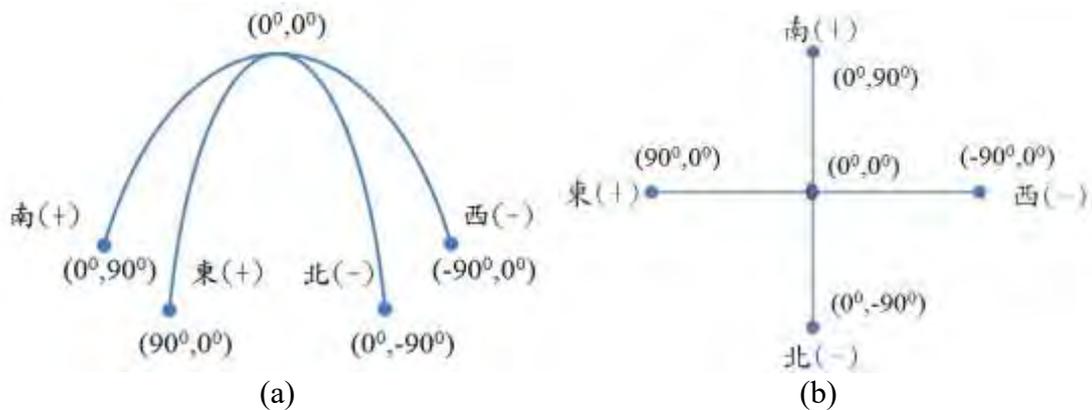


圖 4-1 (a)太陽入射角座標系示意圖，(b) 從天頂所看之太陽入射角座標平投影圖

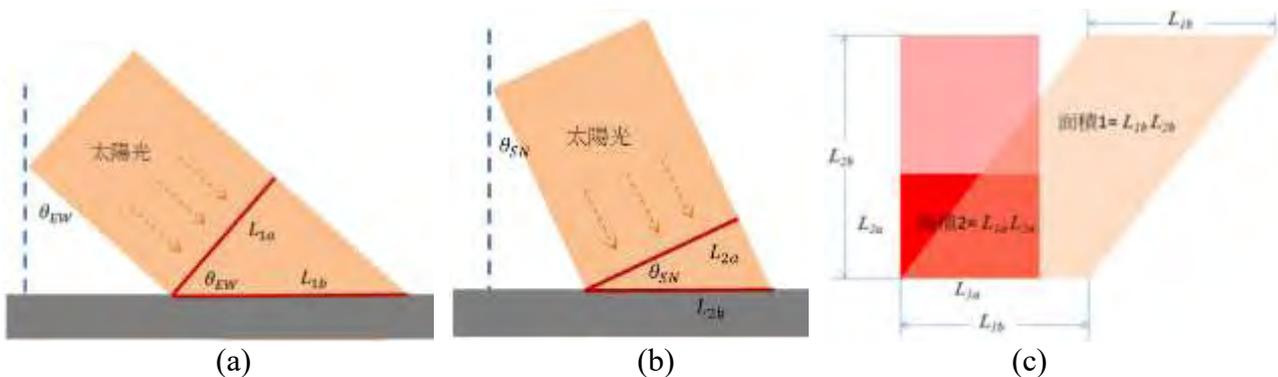


圖 4-2 投影法：(a)東西向投影，(b)南北向投影，(c)投影面積

若太陽能板傾斜角為 0 度，面積為 A ，轉換效率為 η ，則太陽能板發電量 P ，單位為 W ，可表示為：

$$P = 1000 \cdot A \cdot \eta \cdot \cos(\theta_{EW})\cos(\theta_{SN}) \quad (4-2)$$

而太陽能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：

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

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傾斜角。

下圖為在北緯 23.5° 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° 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 θ_{EW} 從 90° 變化至 -90°，而南北向入射角 θ_{SN} 會隨季節不同而改變。在春分與秋分時，南北向入射角 θ_{SN} 從 0° 變化至 23.5°，在夏至時，南北向入射角 θ_{SN} 從 -23.5° 變化至 0°，在冬至時，南北向入射角 θ_{SN} 從 23.5° 變化至 47°。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 4-4 所示。

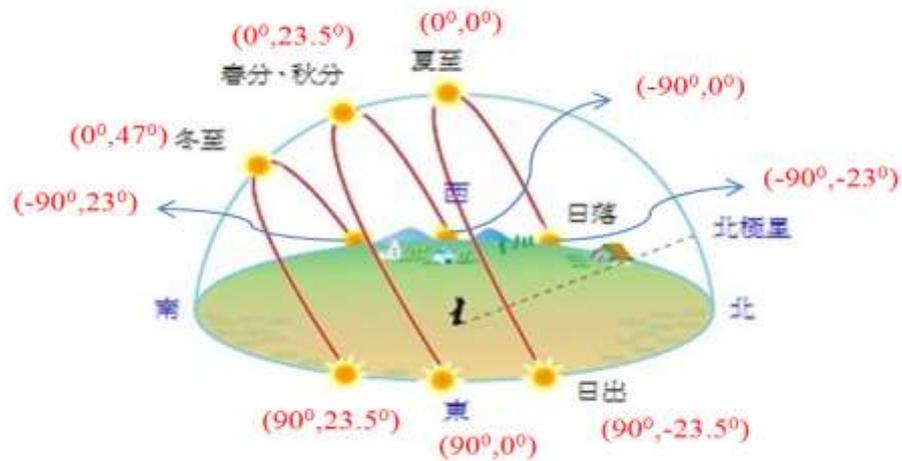


圖 4-3 在北緯 23.5° 位置之太陽入射角座標

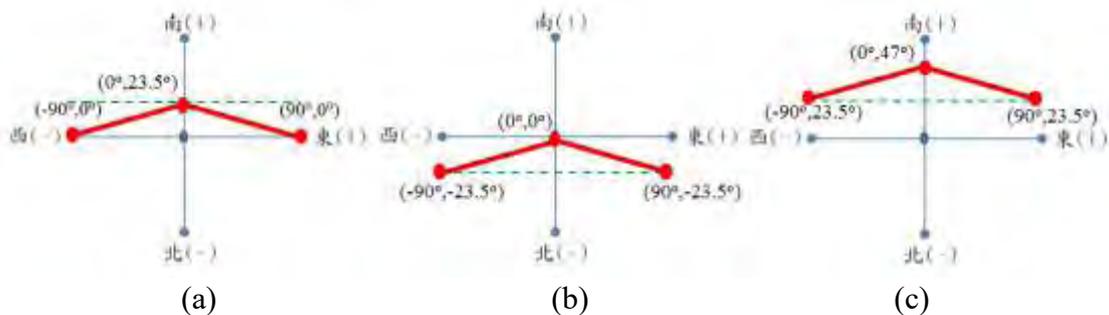


圖 4-4 在北緯 23.5° 位置之太陽入射角座標投影圖，(a)春分、秋分，(b)夏至，(c)冬至

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/m²)[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。

二、簡易光照計製作

為能夠量測照度以進行實驗，我們使用光敏電阻、LCD 顯示器與 BrainGo 控制板，作一簡易型光照計，如圖 4-5 所示。配合所製作之太陽運行軌跡模型，可以進行不同季節、不同時間下的太陽位置之入射角與光照度關係之實驗。



圖 4-5 簡易光照計

三、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 4-6、4-7 所示。



圖 4-6 太陽運行軌跡模型，(a)製作過程，(b)實驗中

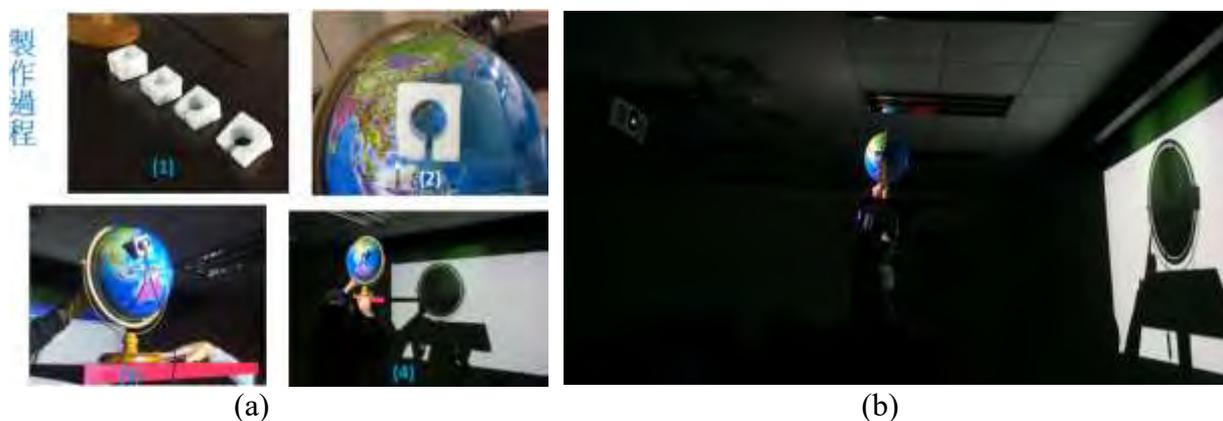


圖 4-7 太陽運行軌跡模型，(a)製作過程，(b)實驗中

四、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 4-8 所示。



圖 4-8 實際架設太陽能發電系統

五、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 4-9 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鍵入表中。接著，以均分法，算出每小時之東西向太陽入射角 θ_{EW} 與南北向太陽入射角 θ_{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	日落時刻	方位角
2018-01-21	06:42	112	12:08	46	17:35	249

		一月 台中彰化												
		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	(90)	88.00	82.82	66.26	49.69	33.13	16.56	0.00	-16.56	-33.13	-49.69	-66.26	-82.82	-88.00
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 4-9 使用 Excel 計算太陽能板發電量

六、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 4-10(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、Wi-Fi 模組、LCD 顯示器、馬達與雷射頭所構成。完成之實體照片如圖 4-10(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，並透過 Wi-Fi 模組將北緯與方位角數值傳給雲端伺服器。雲端伺服器會依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，並再透過 Wi-Fi 模組將最佳架設傾斜角回傳給 BrainGo 控制板。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，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傾斜角標示線，如圖 4-10(c)所示。在程式撰寫方面我們採用 Scratch 積木式程式。

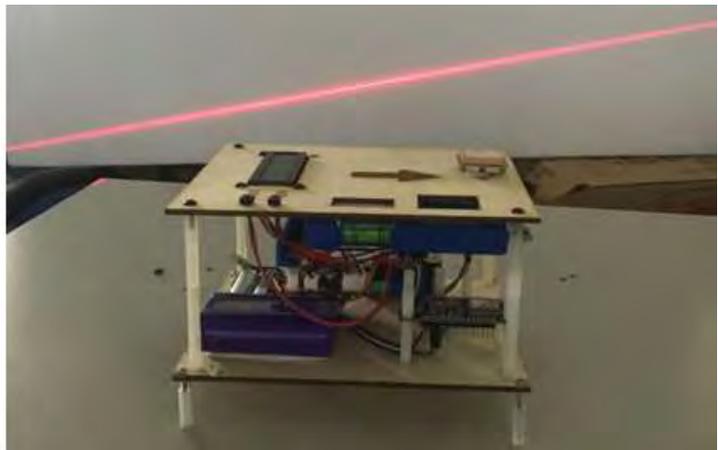
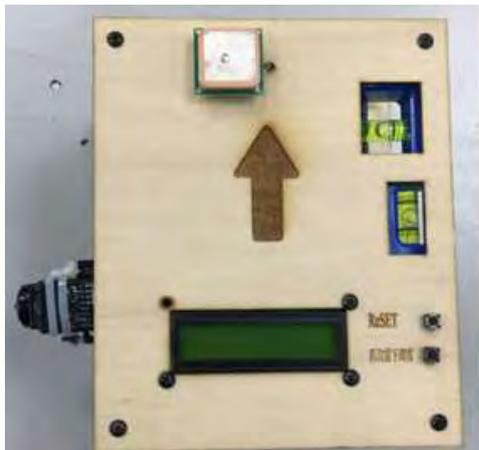
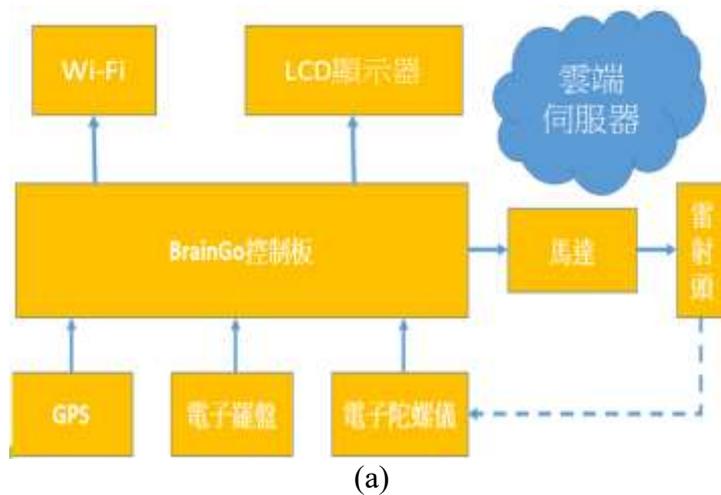


圖 4-10 固定型太陽能板最佳架設傾斜角標示儀，(a) 系統方塊圖，(b) 俯視照片，(c) 工作時照片

伍、研究結果與探討

一、簡易型光照計實驗

如圖 5-1(a)為量測光敏電阻於不同光照量下之電阻值，可發現光照量越大電阻越低，可利用此特性來實現簡易型光照計。我們採用電阻分壓電路如圖 5-1(b)所示，即可得出一電壓值並將其接至 BrainGo 控制板，如此將由內部類比/數位轉換器，即可得到數位值，最後使用 LCD 顯示將該數位值顯示出來。圖 5-1(c)為所製作的簡易型光照計所讀出數位值與照度之曲線圖，我們以用如此即可查表法或二次方程式得出光照量(W/m^2)。

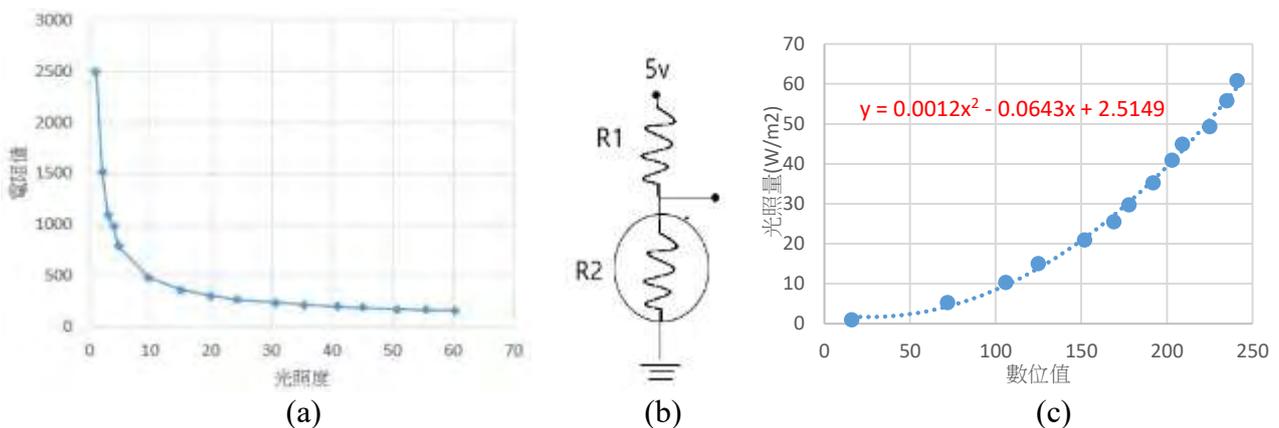


圖 5-1(a)光敏電阻電阻變化，(b)分壓電路，(c)數位值與光照度之曲線圖

二、太陽運行軌跡模型之光源實驗與探討

首先，我們使用如圖 4-6 所示之太陽運行軌跡模型，其量測結果如圖 5-2 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。

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

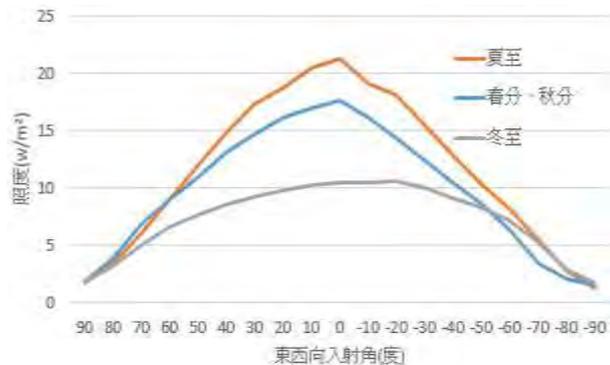


圖 5-2 使用太陽運行軌跡模型模擬春分、夏至、秋分與冬至之發電量

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 5-3(a) 所示。量測結果如圖 5-3(b)，並將其畫為照度分佈圖如圖 5-3(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 4-7 所示，來進行實驗。圖 5-4(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 5-4(b)，並將其畫為照度分佈圖如圖 5-4(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。

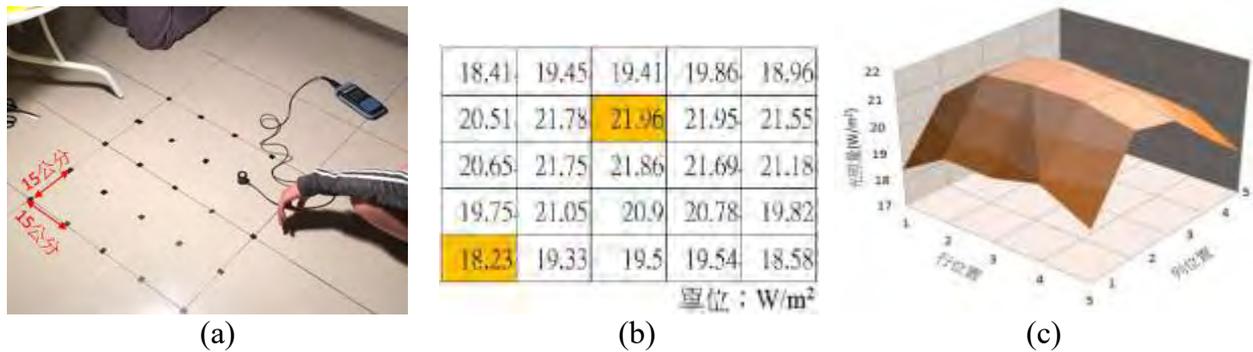


圖 5-3 使用鹵素燈(a)量測情形，(b)量測照度，(c)照度分佈圖

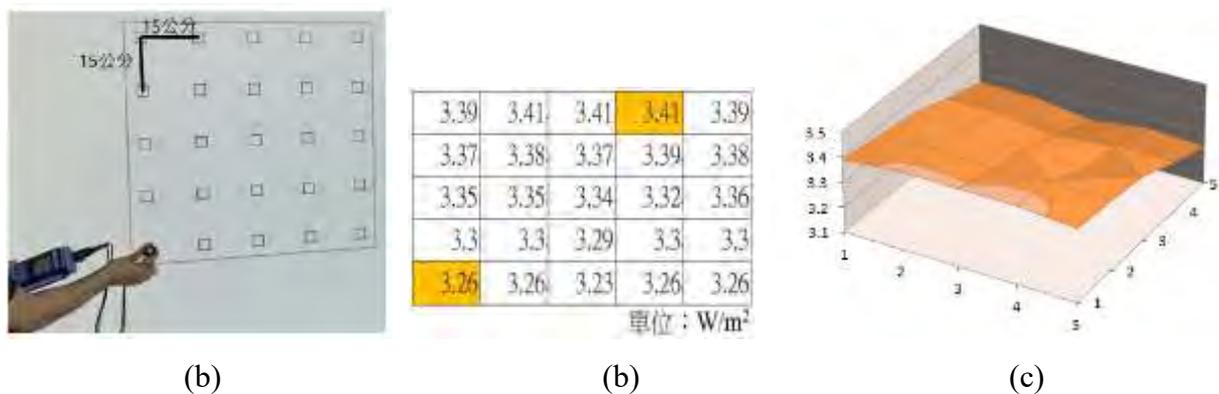


圖 5-4 使用投影機(a)量測情形，(b)量測照度，(c)照度分佈圖

三、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 4-7 所示，來模擬太陽在南北向太陽入射角 θ_{SN} 於 5° 至 50° 下，東西向太陽入射角 θ_{EW} 從 0° 每次遞增 5° 變化到 90° 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(5-1)所示。圖 5-5 為南北向太陽入射角 θ_{SN} 於 5° 、 15° 、 45° 與 50° 下其理論計算值(藍色線)與實驗量測值(紅色線)之曲線圖。

$$L = 28.2 \cdot \cos(\theta_{EW})\cos(\theta_{SN}) \quad (5-1)$$

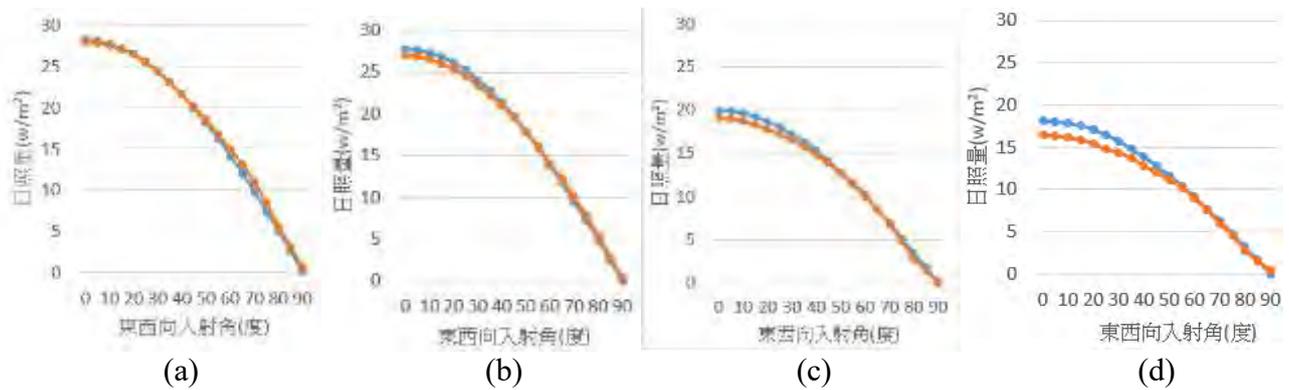
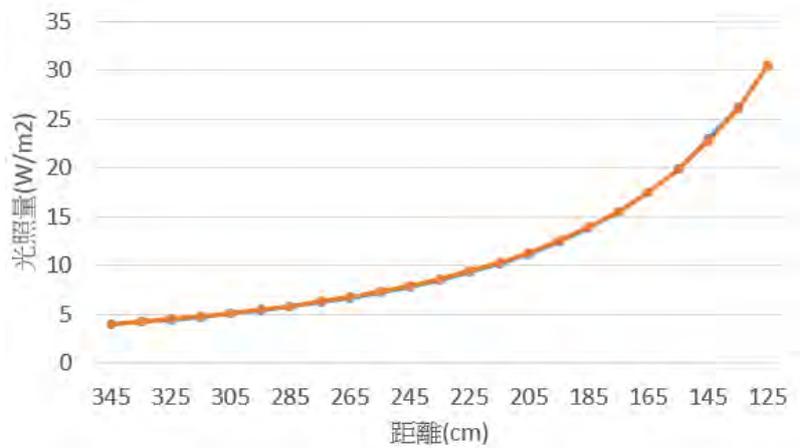
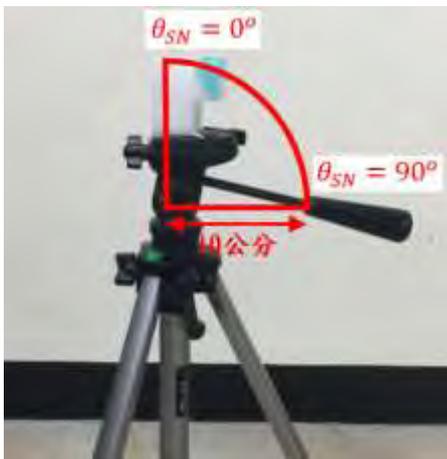


圖 5-5 不同南北向入射角(a)5 度、(b) 15 度、(c) 45 度、(d) 50 度之理論計算值(藍色線)與實驗量測值(橘色線)

探討:由圖 5-5 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 θ_{SN} 小時,如圖 5-5(a)與 5-5(b),兩者非常一致,但當南北向太陽入射角 θ_{SN} 大時,例如圖 5-5(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 5-6(a)所示,其在模擬東西向入射角 θ_{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 θ_{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 5-6(b)完全吻合。



(a)

(b)

圖 5-6 (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, (5-1)式修正為

$$L = \left[28.2 \cdot \left(\frac{D}{D+r \cdot (1-\cos(\theta_{SN}))} \right)^2 \right] \cos(\theta_{EW}) \cos(\theta_{SN}) \quad (5-2)$$

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 5-7 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。

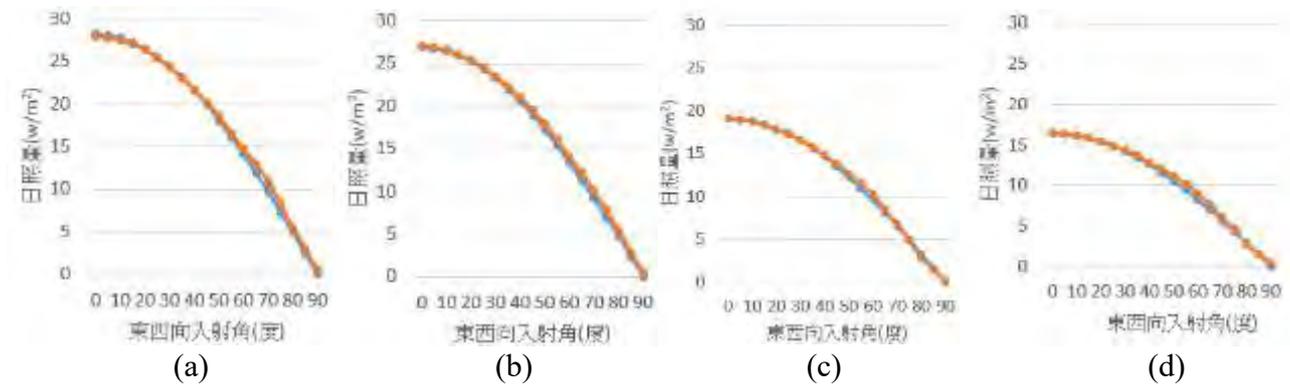


圖 5-7 考量旋轉半徑下在不同南北向入射角(a)5 度、(b) 15 度、(c) 45 度、(d) 50 度之理論計算值(藍色點)與實驗量測結果(橘色點)

四、地球自轉週期光照量實驗與探討

接著使用圖 4-9 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 θ_{EW} 與南北向太陽入射角 θ_{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 5-8(a)所示。

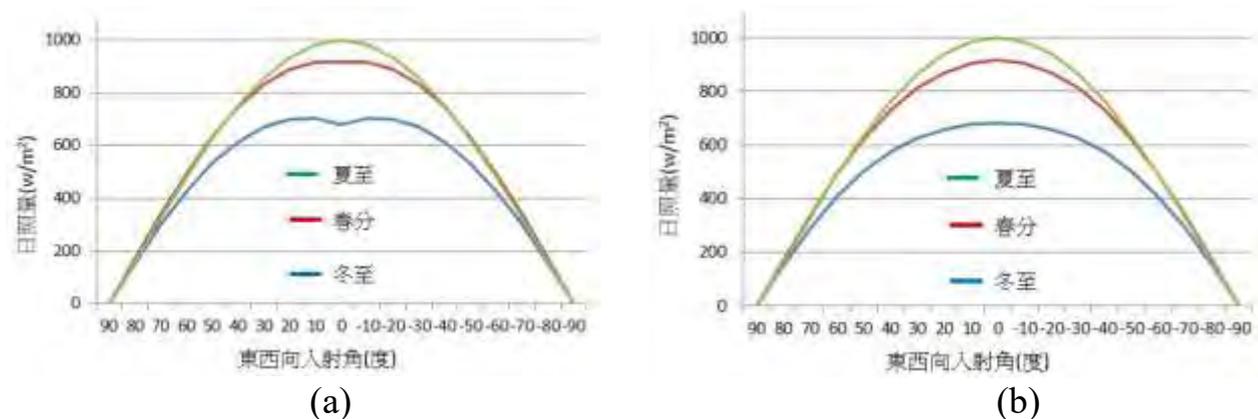


圖 5-8 地球自轉週期日照量數值計算探討(a)均分法，(b)圓周運動修正

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 4-6 太陽運行軌跡模型來量測南北向入射角 θ_{SN} 的變化，結果如圖 5-9(a)所示，可看出期關係洽為 \cos 。所以我們在計算時使用均分法來算出南北向入射角 θ_{SN} (如圖 4-4)是不對的，南北向入射角 θ_{SN} 的變化是呈 $\cos(\theta_{EW})$ 變化，應修正為圖 5-9(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 5-8(b)所示，可清楚看出明顯趨於合理。

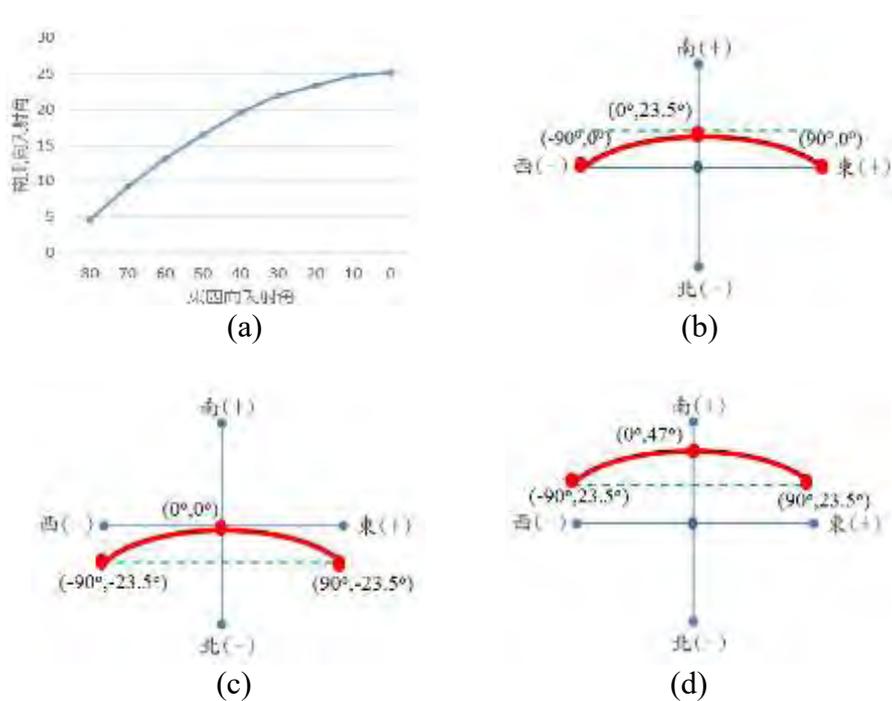


圖 5-9 在北緯 23.5° 位置之太陽入射角座標投影圖，(a)春分、秋分，(b)夏至，(c)冬至

五、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 θ_{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)式可修正如下即可探討不同太陽能傾斜角對發電量之影響：

$$P = P_{max} \cdot \cos(\theta_{EW})\cos(\theta_{SN} - \theta_{PV}) \quad (5-3)$$

接著，我們使用所研製之太陽運行軌跡模型，如圖 4-7 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(5-2)式的方式將(6)式加入距離變化的考量修正為

$$L = \left[16.1 \cdot \left(\frac{D}{D+r \cdot (1 - \cos(\theta_{EW}))} \right)^2 \right] \cos(\theta_{EW})\cos(\theta_{SN} - \theta_{PV}) \quad (5-4)$$

此時 r 應代地球儀半徑 16 公分。圖 5-10(a)為實驗量測值之曲線圖，圖 5-10(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。

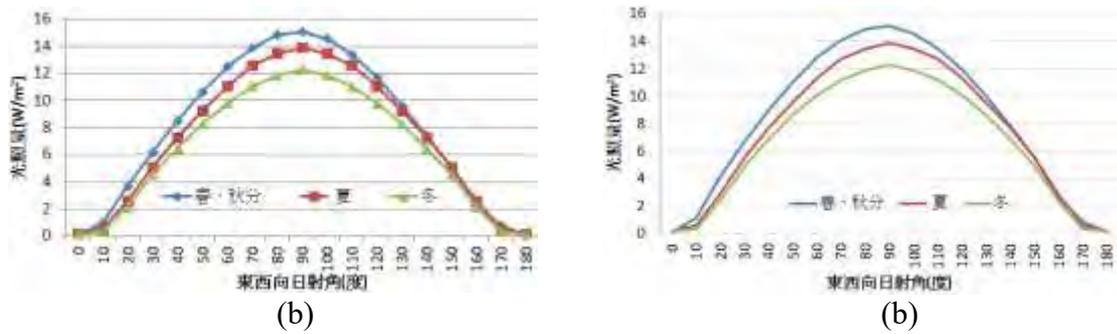


圖 5-10 (a)實驗量測值之曲線圖，(b)理論計算值之曲線圖

六、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

為進一步驗證之，我們找一天較無雲雨的日子(2019 年 3 月 1 日)，進行比較太陽能發電系統實際量測值與理論計算值，如圖 5-11(a)與(b)所示。由圖 5-11 (a)與(b)可看出，可看出兩者非常接近。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。

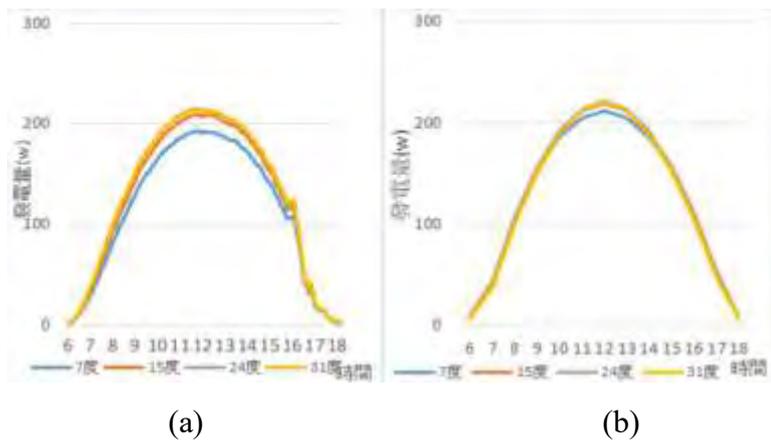


圖 5-11 一天電量曲線圖：(a) 實測結果，(b) 理論計算結果

探討 1：從圖 5-11 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。這是因為該架設傾斜角 7 度的太陽能板本身的發電效率(η)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 γ 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。

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

七、1 個月份太陽能發電系統實測與理論計算比較探討

我們參考中央氣象局網站 2018 年一月份台中觀測站每天之全日空日照量(MJ/m²)[4]以及中天時仰角[3]，數值計算結果如圖 5-12(a)所示。為了檢視所算之數值是否正確，將 1 個月份太陽能發電系統實測發電量整理如圖 5-12(b)所示。比較圖 5-12(a)與圖 5-12(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。由圖 5-12 可看出，理論計算值與實測值兩者非常近似，將其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。

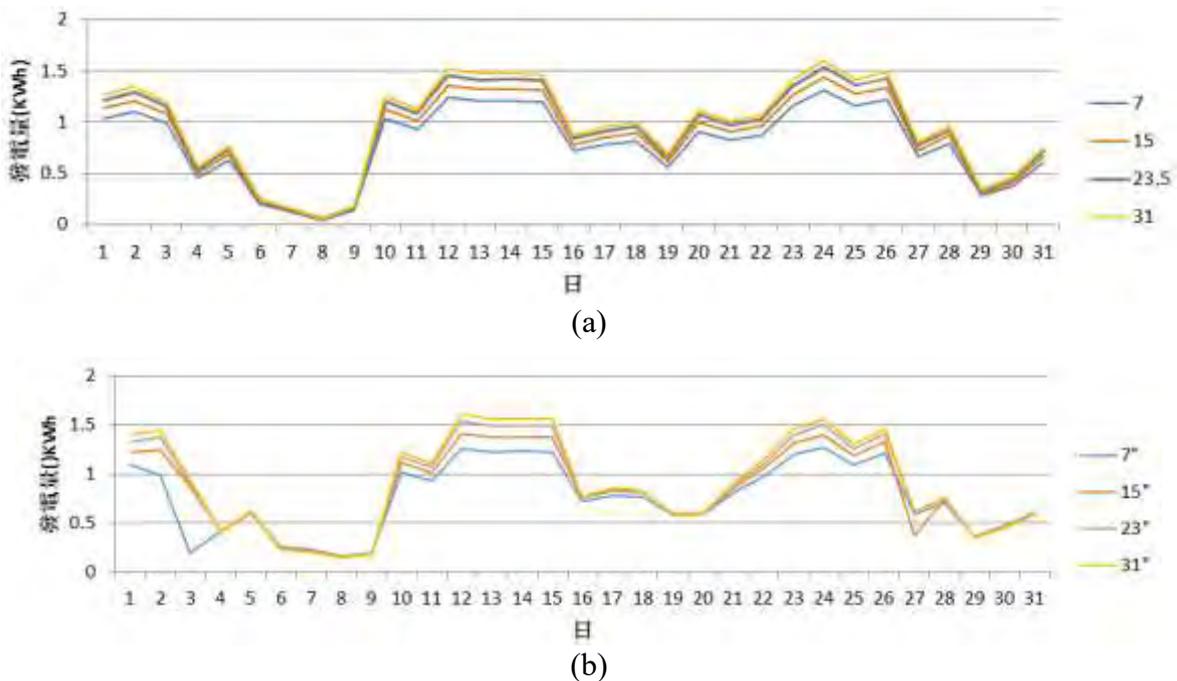


圖 5-12 2018 年 1 月份發電量：(a)使用氣象局全日空日照量的計算值，(b)實測值

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。

八、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 5-1 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 年全日光日照量平均值
		經典氣象年資料	東西向入射角、南北向入射角、經典氣象年全日光日照量
實際量測	實際系統架設 7,15,23 與 31 度	2018 年實際情形	

(一) 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 5-13(a) 為太陽 1 年圓形運行軌跡下每月份發電情況，而圖 5-13(b) 在不同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 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%。

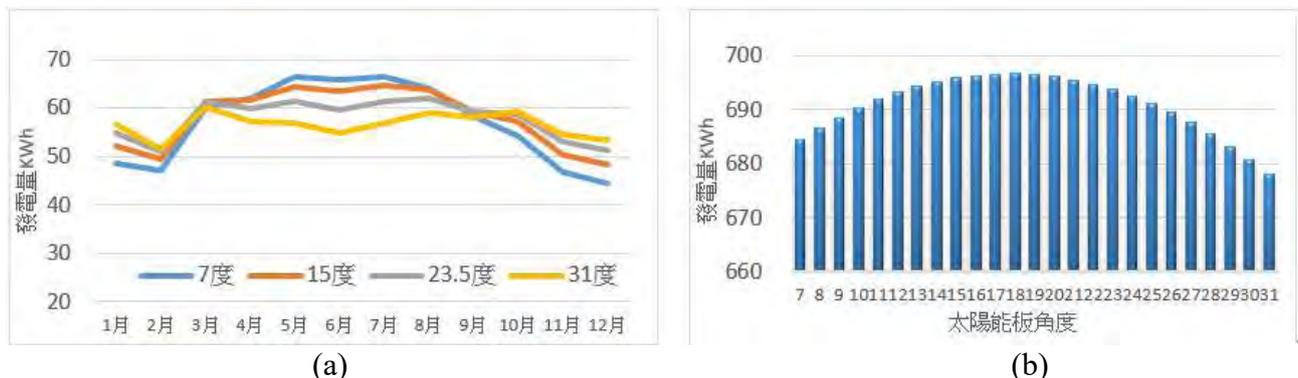


圖 5-13 太陽 1 年圓形運行軌跡：(a) 傾斜角度 7、15、23.5、31 度下每月發電量、(b) 不同架設傾斜角度下年累積發電量

(二) 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：

$$P = P_{\max} \cdot \left(\frac{14960}{R}\right)^2 \cdot \cos(\theta_{EW}) \cos(\theta_{SN} - \theta_{PV}) \quad (5-6)$$

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 5-2 所列。圖 5-14(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 5-14(b)在不同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 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 5-2 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%

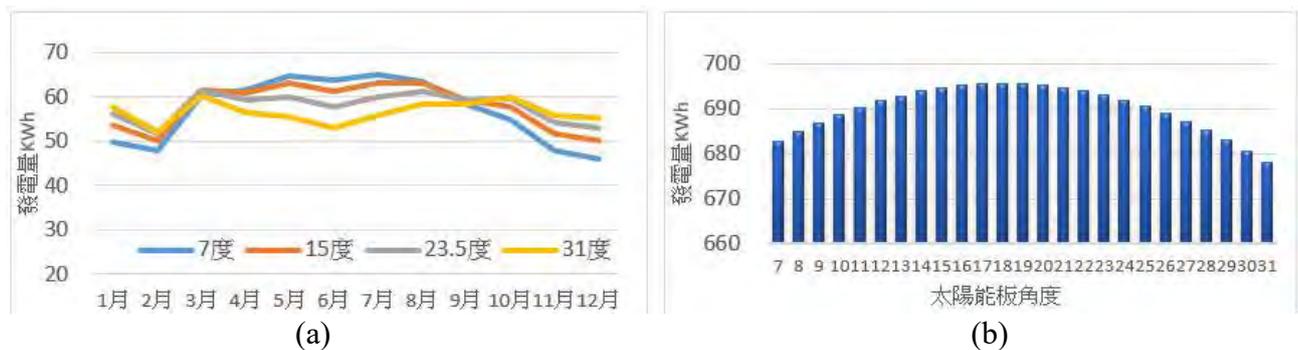


圖 5-14 太陽 1 年橢圓形運行軌跡：(a) 傾斜角度 7、15、23.5、31 度下每月發電量、(b)不同架設傾斜角度下年累積發電量

探討：比較圖 5-13 與圖 5-14 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 5-13(a)與圖 5-14(b)還是可發現，圖 5-14 在 6 月附近的發電量比圖 5-13 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 5-14 比圖 5-13 的略高，這是因為冬季是近日點。

(三) 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° 時，也就入射角為 0° 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 γ 的關係表達，即 $AM=1/\cos(\gamma)$ [5]，如圖 5-15 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(5-7)式。注意的是大氣層外的日照能量為太陽常數 1362 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 W/m^2 下所求得，故(5-7)式中，需乘上 1.362 的倍數。

$$P = 1.362 \cdot P_{\max} \cdot \left(\frac{14960}{R}\right)^2 \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\theta_{EW}) \cos(\theta_{SN} - \theta_{PV}) \quad (5-7)$$

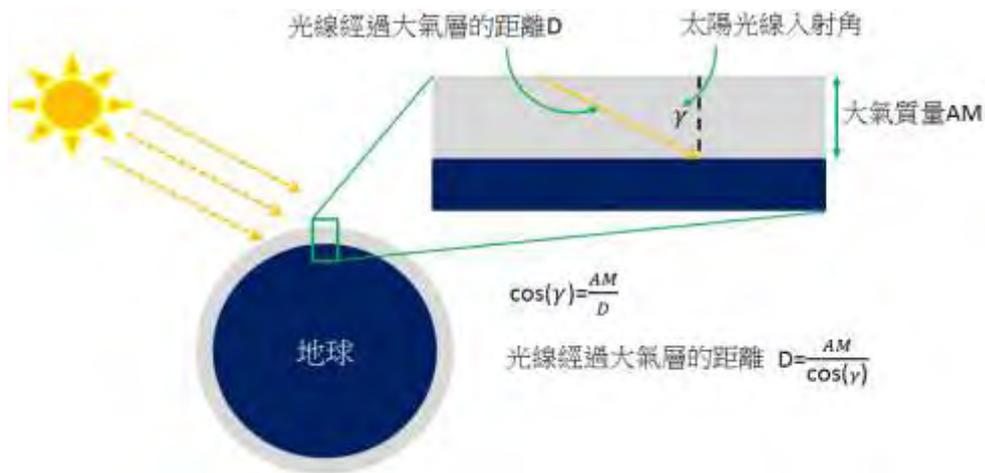


圖 5-15 大氣質量對日照量的影響

如圖 5-16(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 5-16(b)在不同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 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%。

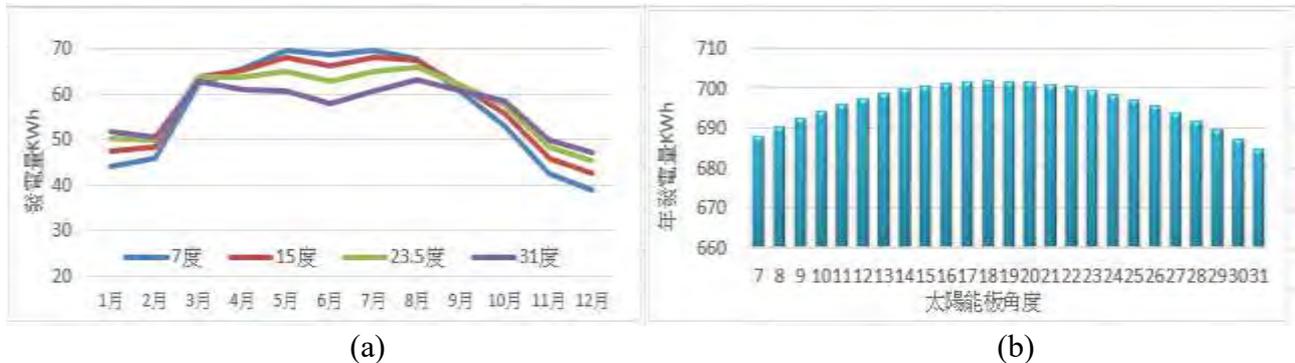


圖 5-16 太陽 1 年橢圓形運行軌跡並考量大氣質量：(a) 傾斜角度 7、15、23.5、31 度下每月發電量、(b)不同架設傾斜角度下年累積發電量

探討：比較圖 5-14(b)與圖 5-16(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 W/m^2 經過大氣層到地面約衰減為 1000 W/m^2 ，故在太陽能發電工程中常假設日照能量為 1000 W/m^2 是合理的。圖 5-17 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。

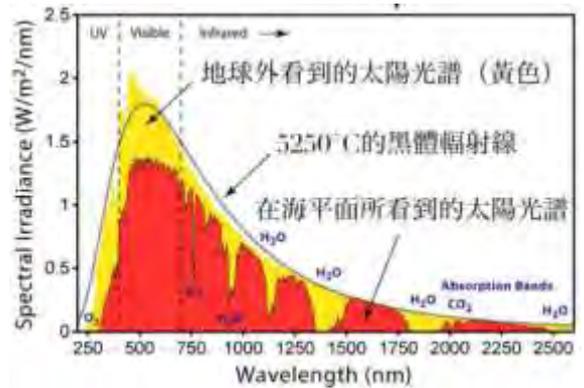


圖 5-17 太陽於大氣層外與地球表面的光譜

(四) 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^2)來考量，將台中的氣象觀測資料[4]如表 5-3 帶入，使用(5-3)式與(5-5)式進行數值計算。

表 5-3 2018 年全日空日照量

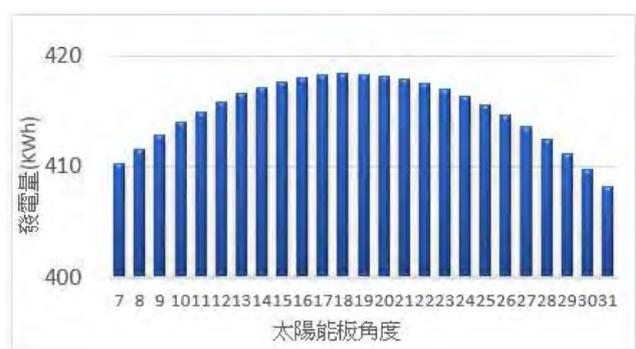
單位： MJ/m^2

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 5-18(a)為每月份發電情況，而圖 5-18(b)在不同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 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 418.370 KWh ，比架設傾斜角度為 24 度的 416.329 KWh 多 0.490%。



(a)



(b)

圖 5-18 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

(五) 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/m²)來考量，將台中的資料[4]如表 5-4 帶入，進行數值計算。

表 5-4 2010-2018 年平均全日空日照量 單位::MJ/m²

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 5-19(a)所示，為每月份發電情況，而圖 5-19(b)在不同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 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 377.797KWh，比架設傾斜角度為 24 度的 375.870KWh 多 0.513%。

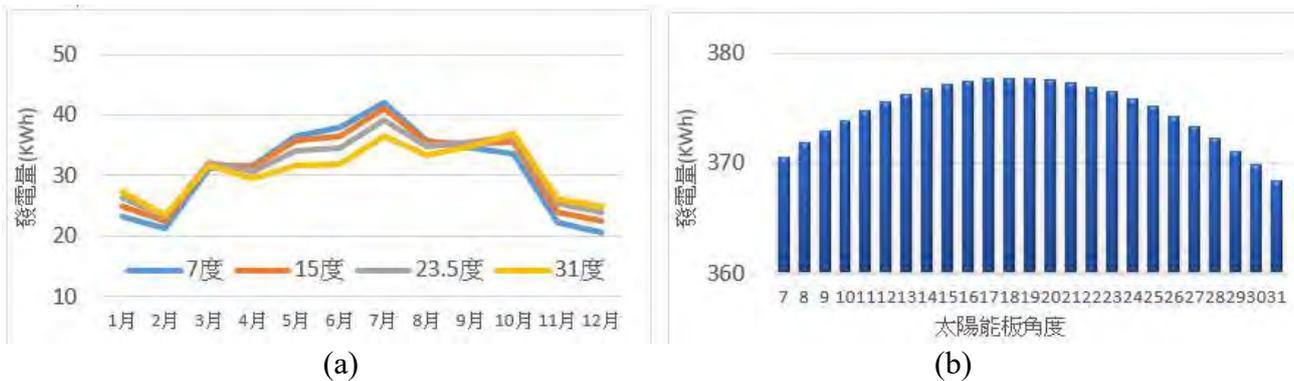


圖 5-19 太陽 1 年橢圓形運行軌跡並考量 2010-2018 年氣象資料：(a) 傾斜角度 7、15、23.5、31 度下每月發電量、(b)不同架設傾斜角度下年累積發電量

(六) 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/m²)[7]，如表 5-5，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 5-5 經典氣象年全日空日照量 單位::MJ/m²

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 5-20(a)所示，為每月份發電情況，而圖 5-20(b)在不同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 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%。

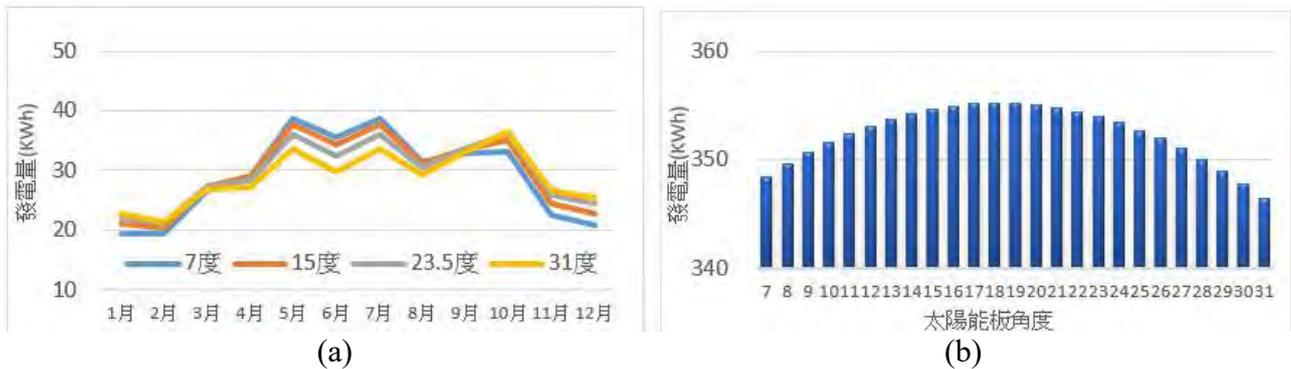


圖 5-20 太陽 1 年橢圓形運行軌跡並考量經典氣象年氣象資料：(a) 傾斜角度 7、15、23.5、31 度下每月發電量、(b) 不同架設傾斜角度下年累積發電量

(七) 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 5-21(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 5-21(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。

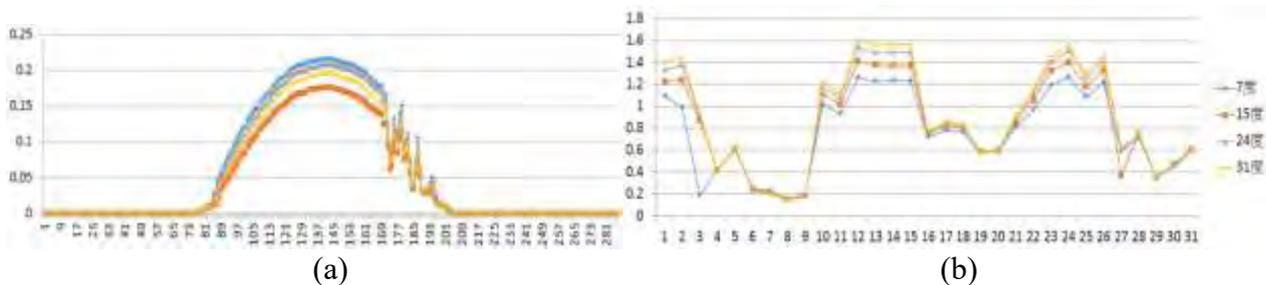


圖 5-21 實際太陽能板發電情況：(a) 2018 年 1 月 1 日，(b) 2018 年 1 月份

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 11 月的發電量算出，即可得到 2018 的發電量曲線，如圖 5-22(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。

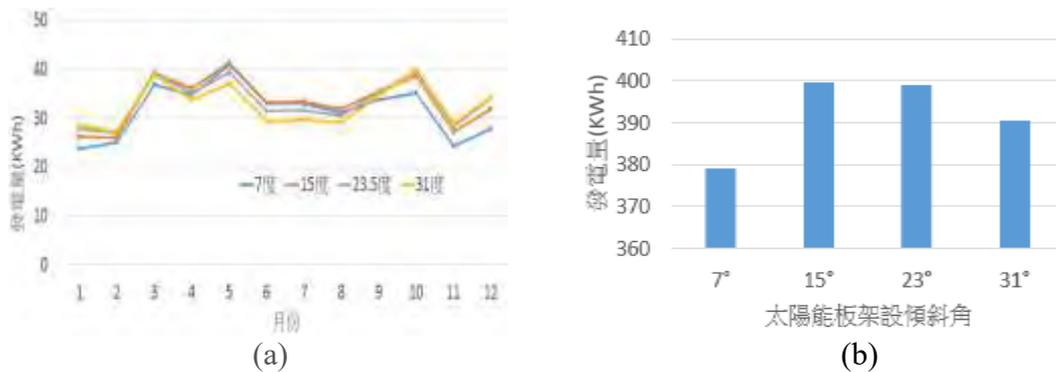


圖 5-22 (a)2018 年每月發電量；(b) 2018 年累計發電量

最後，我們分別將太陽能板傾斜 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 5-22(b)所示，可算出太陽能板架設 15 度的發電量比架設 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 5-22(b)，顯示 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，尤其是 7、8 月明顯高於其他月份。此說明，7、8 月之發電量較低之原因在於受氣候（陰雨天多）之影響。

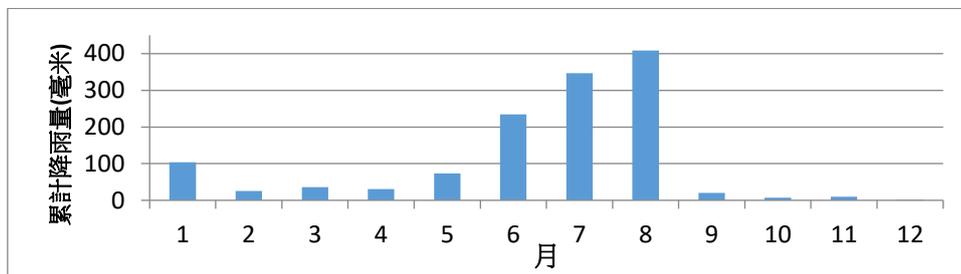


圖 5-23 2018 年台中累積降雨量

探討 2：比較考量氣候的三個數值計算結果，如圖 5-18、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，所以才會有此結果。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 5-6 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

九、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 θ_D ，架設傾斜角為 θ_{PV} ，則其東西向與南北向傾斜角 $\theta_{PV,EW}$ ， $\theta_{PV,SN}$ ，可表示為

$$\theta_{PV,EW} = \theta_{PV}\sin(\theta_D) \quad (5-7)$$

$$\theta_{PV,SN} = -\theta_{PV}\cos(\theta_D) \quad (5-8)$$

如此，則其發電功率可由下式求得：

$$P = P_{\max} \cdot \cos(\theta_{EW} - \theta_{PV,EW})\cos(\theta_{SN} - \theta_{PV,SN}) \quad (5-9)$$

為驗證其可行性，我們使用業者實際 2018 案場資料，如表 5-7 所示，來與數值計算比對。圖 5-24 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 5-7 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

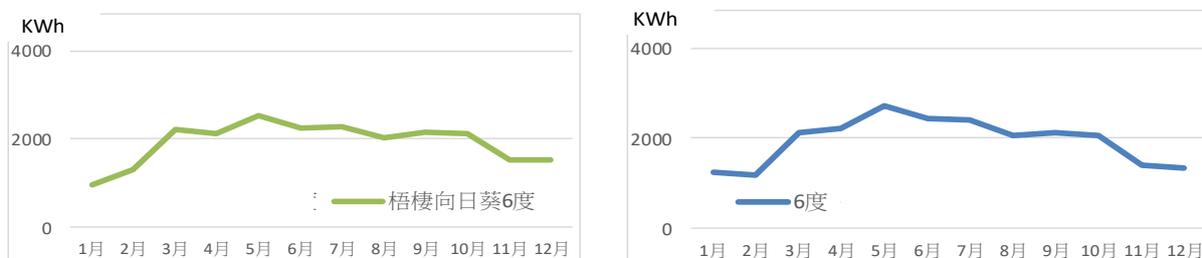


圖 5-24 業者實際案場(a)發電紀錄資料與(b)理論計算值

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 5-25(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 試算表得太陽能在不同方位角下的最佳架設傾斜角，如圖 5-25(b)所示。該圖可非常便利協助業者得知太陽能板最佳架設傾斜角。表 5-8 為採用圖 5-25(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%。

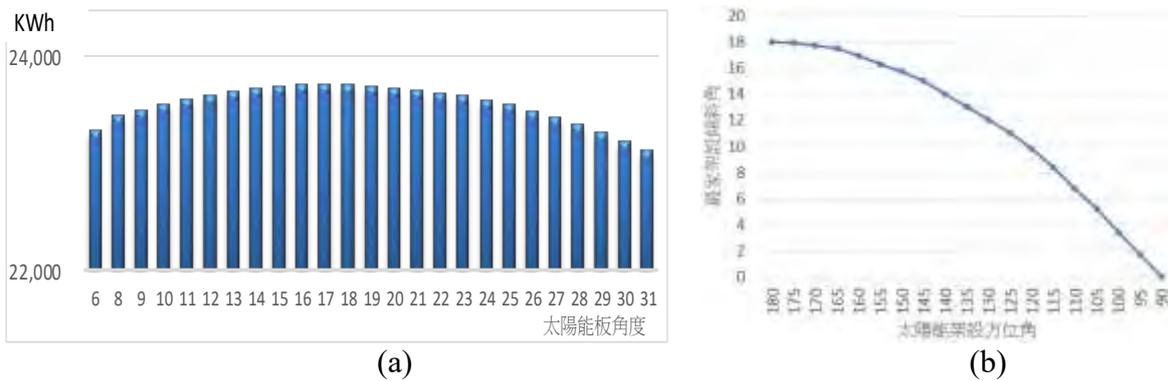


圖 5-25 (a)不同傾斜角下年累積發電量，(b)不同方位角下的太陽能板最佳架設傾斜角

編號	地點	裝置容量	方向角	實際傾斜角	最佳架設傾斜角	年發電量	改善
1	台中梧棲	16.38KW	203 度	6 度	17 度	23730kWh	1.8%
2	南投國姓	17.28 KW	45 度	6 度	-13.5 度	21794kWh	6.7%
3	雲林斗南	49.8 KW	130 度	9 度	13 度	69649kWh	1.0%
4	台南鹽水	29.76 KW	147 度	7 度	13.5 度	40347kWh	1.4%

十、任意緯度與方位角下太陽能板最佳架設傾斜角探討

由於我們所提之方法是由太陽的東西向入射角與南北向入射角來決定，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帶入即可得出最佳架設傾斜角。因此，我們另外取兩個地點東京與新加坡來嘗試，地理位置如圖 5-26 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)。我們將東京 2018 年的全日空日照量[8]代入，得到之結果如圖 5-27 所示。圖 5-27(a)顯示出所提方法可

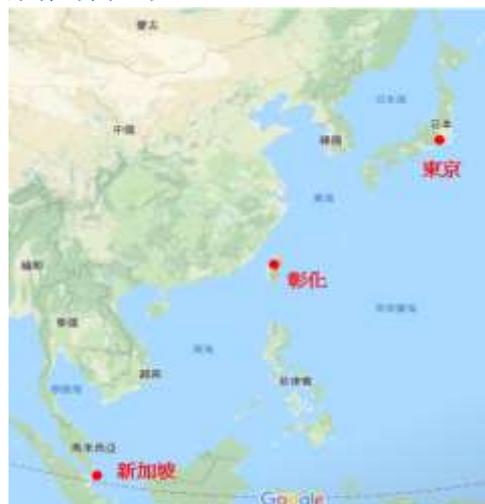


圖 5-26 東京、彰化與新加坡位置

以模擬計算出不同角度之發電量，而其年累計發電量如圖 5-27(b)所示，可看出在東京太陽能最佳架設傾斜角約為 24 度。

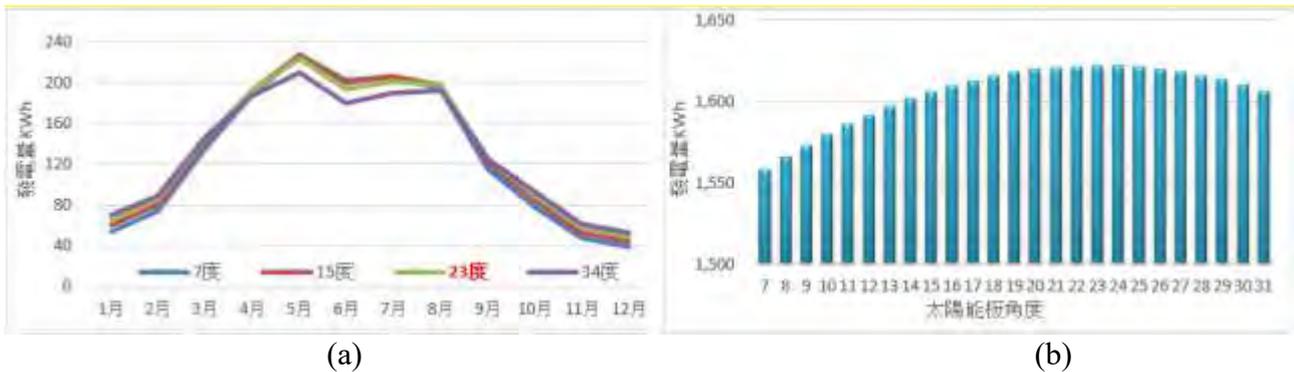


圖 5-27 東京 2018 年(a)理論計算發電量與(b)不同太陽能板傾斜角年累計發電量

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 5-28 所示。圖 5-28(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 5-28(b)所示。由圖 5-28(b)可看出，在新加坡最佳架設傾斜角約為 1 度。

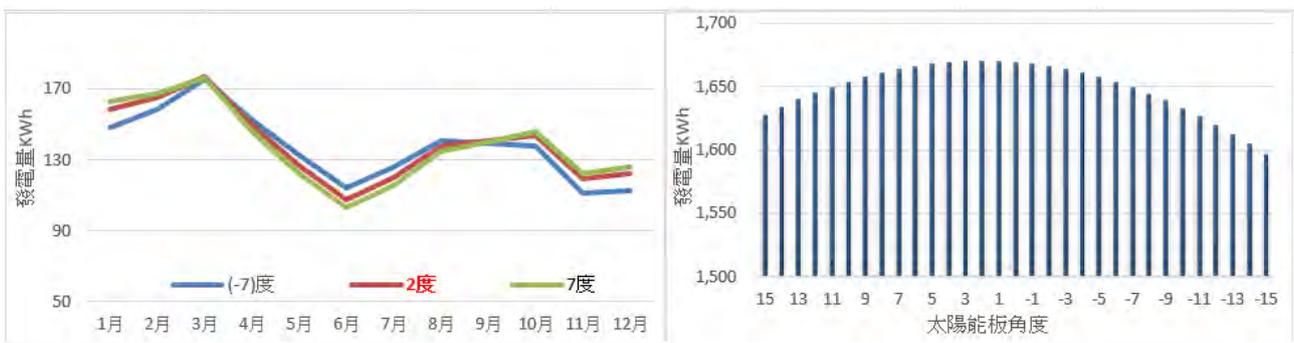


圖 5-28 新加坡 2018 年(a)理論計算發電量與(b)不同太陽能板傾斜角年累計發電量

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。

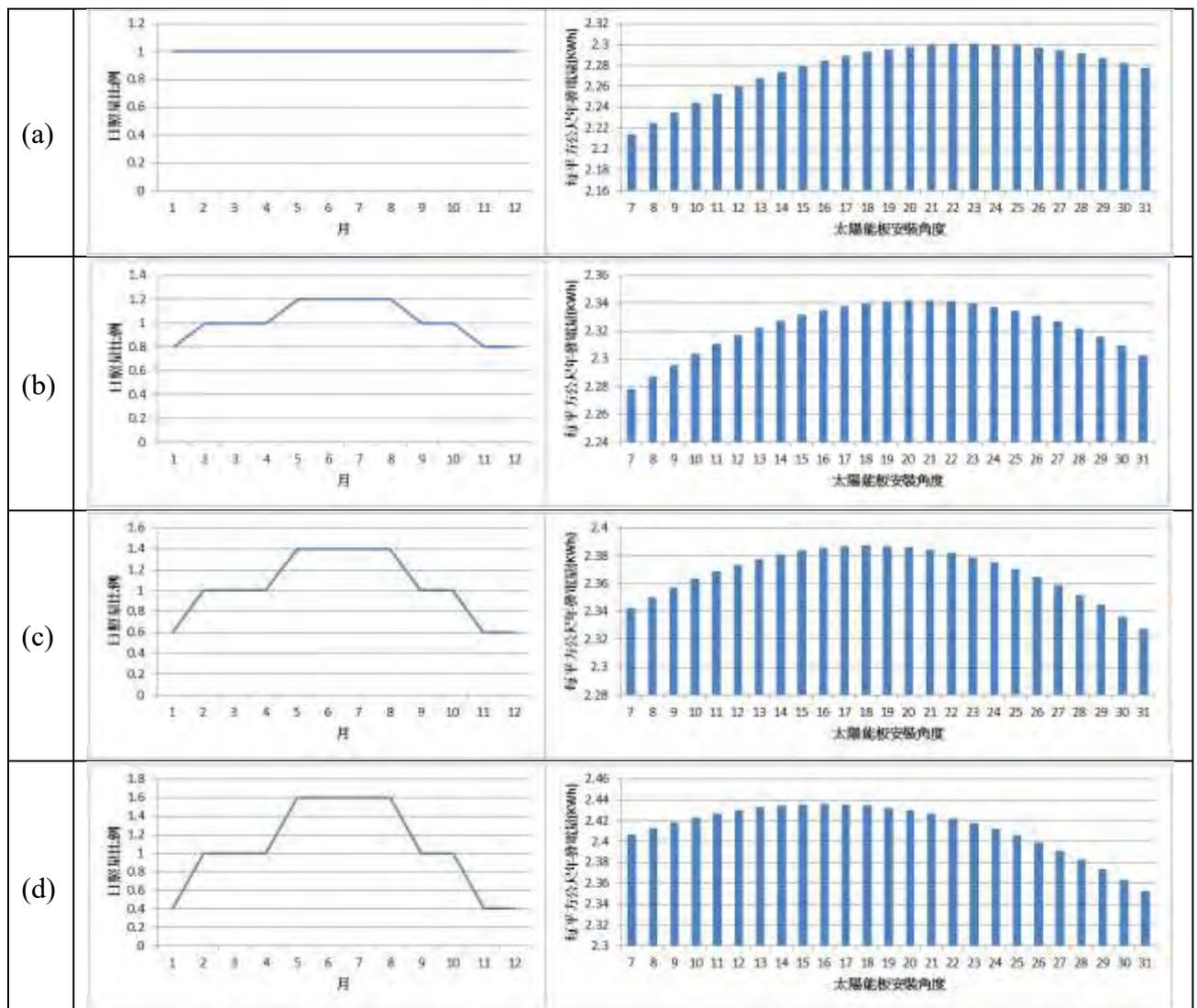
此部分我們正在多方嘗試取得資料，希望複審時來得即展現理論計算與實際發電資料之比較。

未來：研製太陽能發電系統警告器

利用所提的方法，搭配太陽能發電系統所在位置以及其架設方位角與傾斜角，我們只要帶入當天的全日空日照量即可估算出其發電量。若該太陽能發電系統真實發電量比所估算之發電量差距到一定程度，即可確認該發電系統有問題，立即通知業主前來處理。避免系統故障延後處理，造成長時間沒發電，降低發電收益。

陸、討論

1. 我們很疑惑為何在不同情境所計算出之結果與實測的結果，太陽能架設傾斜角不是 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(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 6-1 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 6-1(b)、6-1(c) 6-1(d) 6-1(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“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。



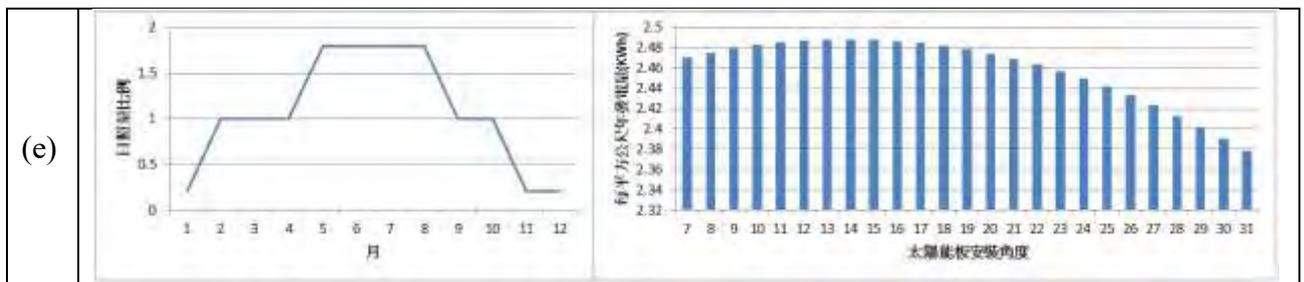


圖 6-1 四季不同日照量比之日照量與太陽能板不同傾斜角下之發電量：(a)0%、(b)20%，(c)40%，(d)60%，(e)80%

- 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。

柒、結論

- 我們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。
- 我們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。
- 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%。
- 我們實際架設 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%。
- 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“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。

6. 我們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. 我們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。
8. 我們正在研製太陽能發電系統警告器，帶入當天的全日空日照量即可估算出其發電量。若該太陽能發電系統真實發電量比所估算之發電量差距到一定程度，即可確認該發電系統有問題，立即通知業主前來處理。
9. 若新架設太陽能板時，全世界都能裝設到最佳角度，以一年新增 120GW 來計算，一年有機會在不增加成本下多出約 0.6GW 發電量。

捌、參考資料

- [1] http://apvi.org.au/wp-content/uploads/2018/04/IEA_PVPS-A_Snapshot_of_Global_PV-1992-2017.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/astrometry/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
- [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】 030506

本作品考量太陽軌跡、地理位置、大氣透光厚度等因素，探討固定型太陽能板最佳架設的傾斜角，並與實際測量驗證。實驗主題具特色、步驟明確，日誌記錄完整，關注了之前類似研究的結果，並提出優劣比較。宜注意圖表數據的完整與正確性，成果有潛力進一步發展出實用價值。

研究動機

- 常見的再生能源如太陽能、風能、海洋能甚至地熱能都與地球科學息息相關。但是為什麼絕大部分都由工程角度切入，而不是由地球科學的角度來探討？
- 當太陽能板面對正南方，其最佳傾斜角真的是23.5度嗎？又因建築物的地理位置受限，太陽能板不可能都能面對正南方，那固定型太陽能板最佳架設傾斜角要如何決定？

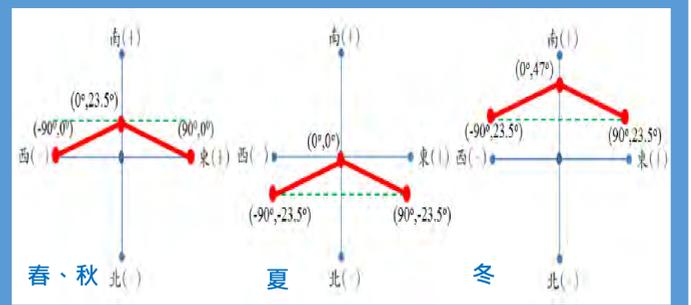
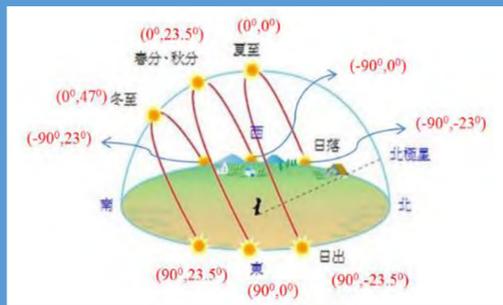
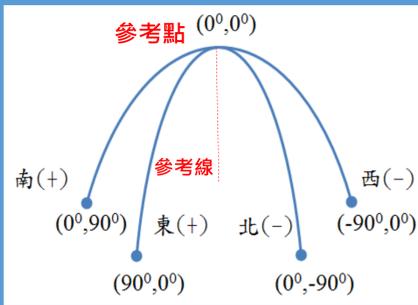
研究目的

- 以理論計算值、實驗數值以及實際系統量測值交互探討太陽能板最佳架設傾斜角。
- 實際架設太陽能發電系統，收集一整年發電資料驗證太陽能板最佳架設傾斜角。
- 研製固定型太陽能板架設角度標示儀，協助業者能輕易架設太陽能板最佳架設傾斜角。

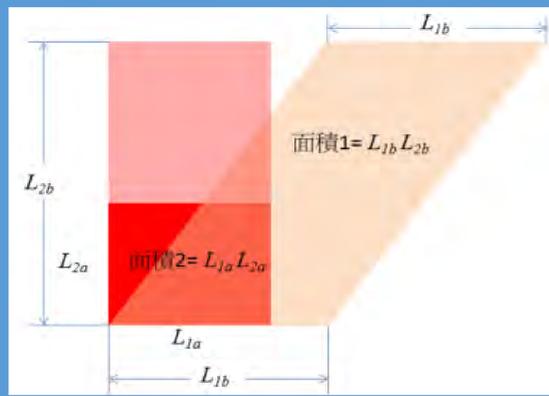
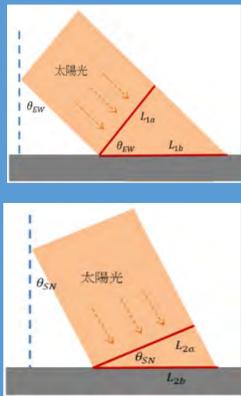
研究設備



太陽入射角座標



投影法



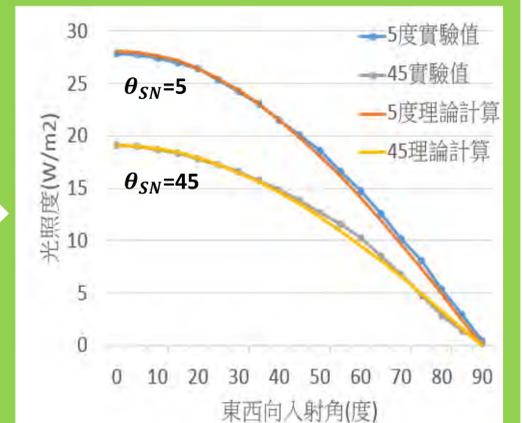
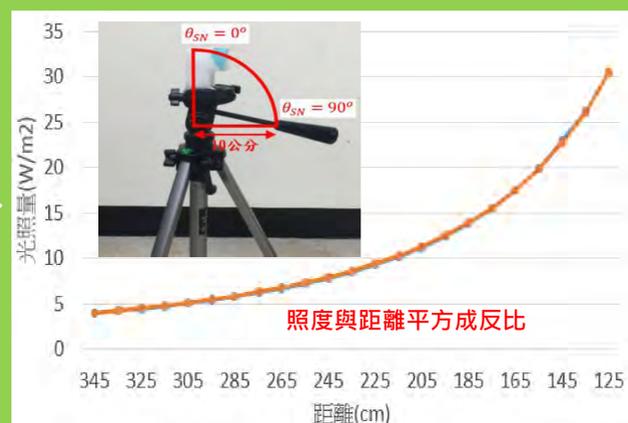
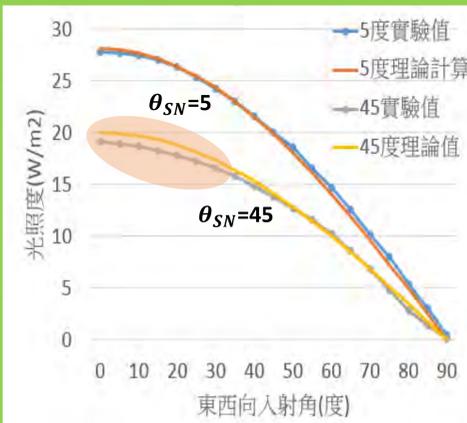
$$L_u = 1000 \cdot \frac{L_{1a} \cdot L_{2a}}{L_{1b} \cdot L_{2b}}$$

$$L_u = 1000 \cdot \cos(\theta_{EW}) \cos(\theta_{SN})$$

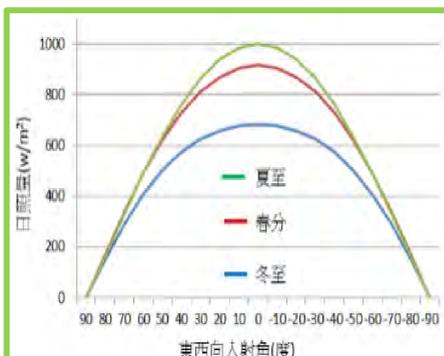
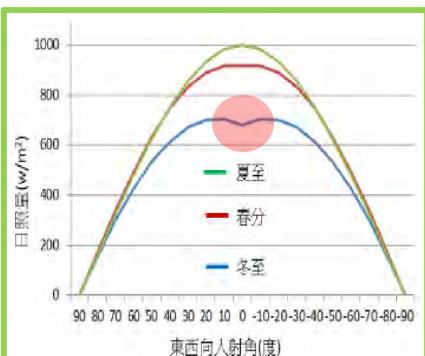
$$P = 1000 \cdot A \cdot \eta \cdot \cos(\theta_{EW}) \cos(\theta_{SN})$$

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

公式驗證 $P = 28.3 \cdot \cos(\theta_{EW}) \cos(\theta_{SN})$

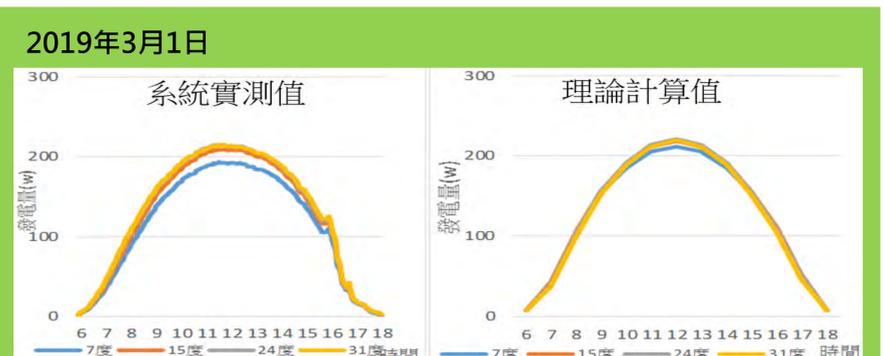
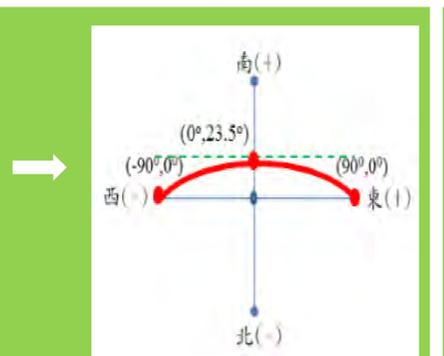
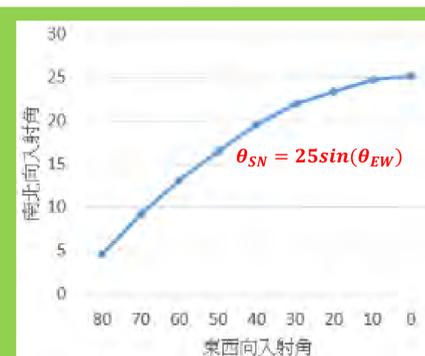


地球自轉週期(1天) 驗證 (使用Excel)



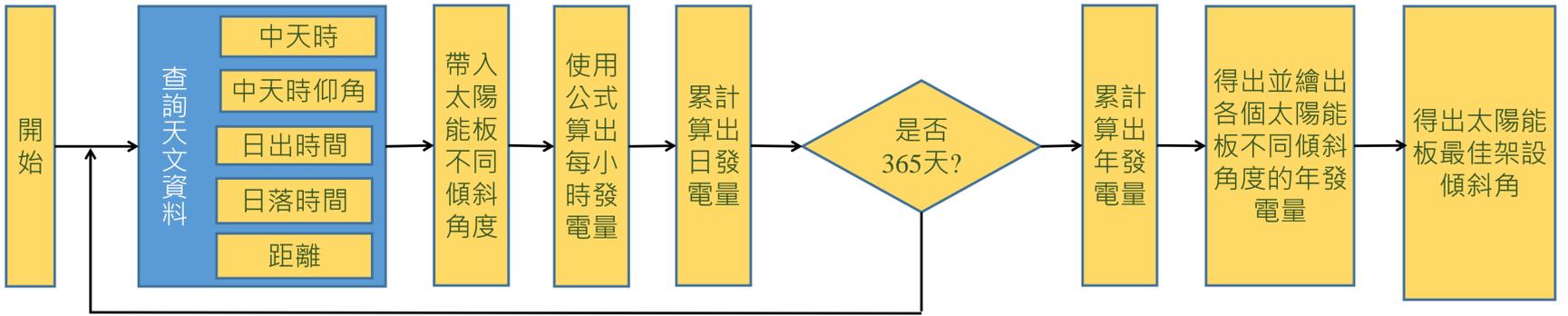
date	日出時刻	方位角	過中天	仰角	日沒時刻	方位角
2018-01-21	06:42	112	12:08	465	17:35	249

時間	東西向入射角	南北向入射角	架設角度	預估功率	預估總功率
06:42	88.00	20.50	7	0.01	0.01
07:08	82.82	22.37	7	0.03	0.03
08:08	66.26	26.70	7	0.10	0.10
09:08	49.69	31.02	7	0.15	0.15
10:08	33.13	35.35	7	0.19	0.19
11:08	16.56	39.67	7	0.21	0.21
12:08	0.00	44.00	7	0.21	1.595
13:08	-16.56	39.67	7	0.19	0.19
14:08	-33.13	35.35	7	0.15	0.15
15:08	-49.69	26.70	7	0.10	0.10
16:08	-66.26	22.37	7	0.03	0.03
17:08	-82.82	20.50	7	0.01	0.01



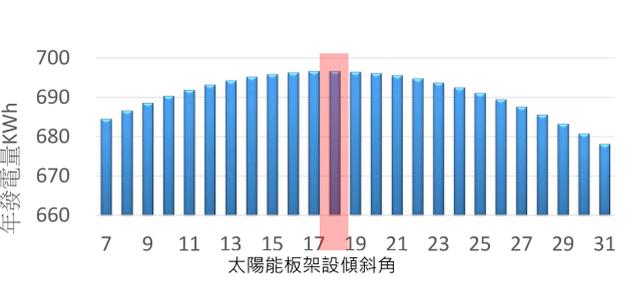
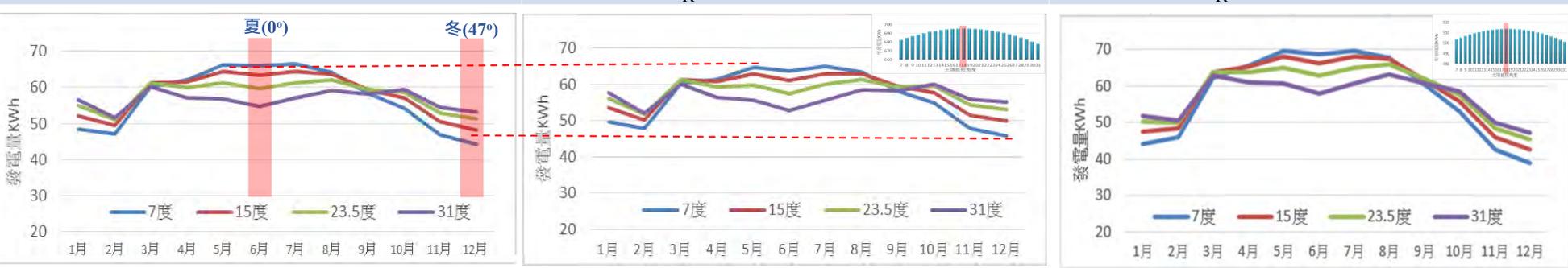
正南方地球公轉週期(1年)太陽能發電實驗與探討

影響太陽輻射強度因素	地理緯度	太陽角度	大氣透明度	海拔高度
本研究探討方法	太陽入射角座標		氣候	地平面

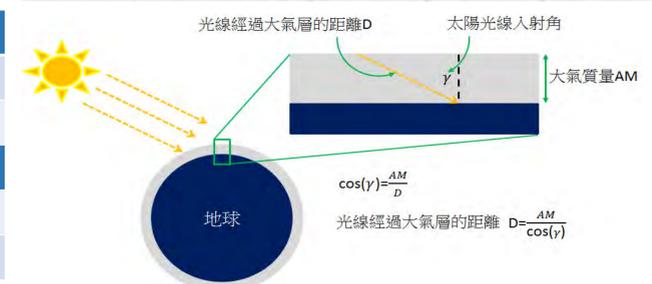


(一) 圓形軌跡 (二) 橢圓形軌跡 (三) 大氣質量

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

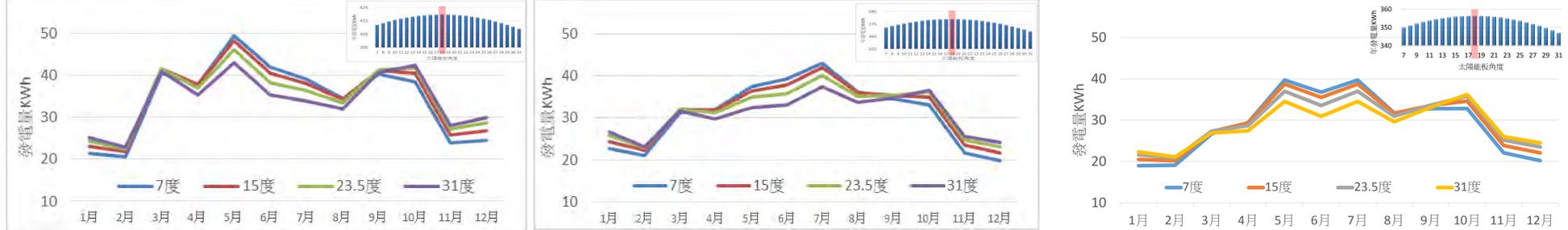


	1月	2月	3月	4月	5月	6月
萬公里	14,793	14,877	14,960	15,043	15,127	15,210
日照%	102.33%	101.17%	100.00%	98.83%	97.67%	96.50%
	7月	8月	9月	10月	11月	12月
萬公里	15,127	15,043	14,960	14,877	14,793	14,710
日照%	97.67%	98.83%	100.00%	101.17%	102.33%	103.50%

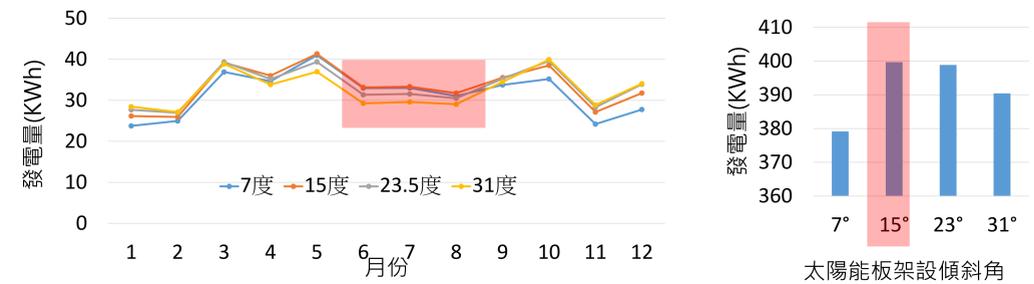


考量氣候因素(全日空日照量)

(四) 2018年 (五) 2010-2018年平均 (六) 經典氣象年



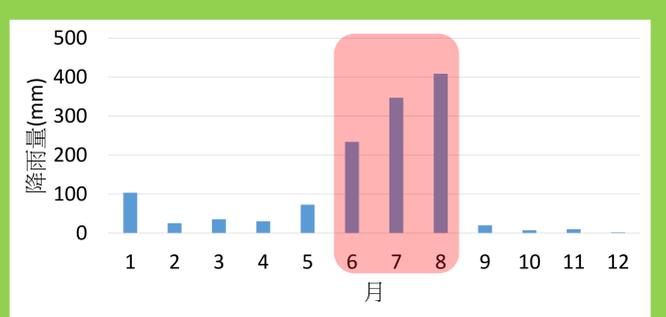
(七) 實際量測



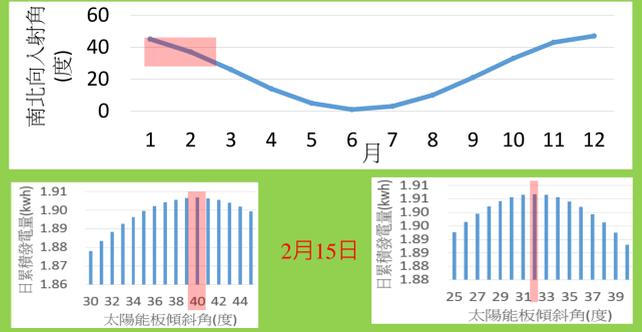
結果比較

	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	0.41	0.49	0.51	0.51	0.23
與[9]比之改善%	2.6	2.6	2.5	2.5	2.6	2.6	2.6

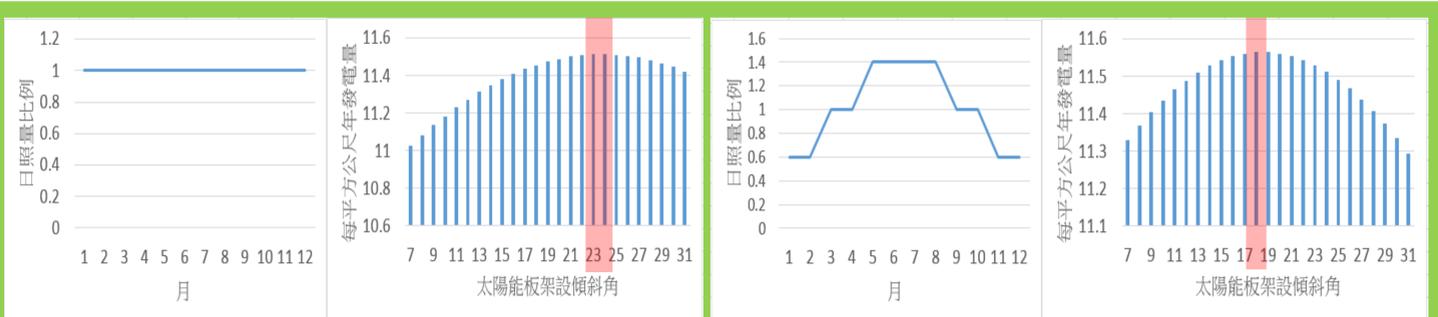
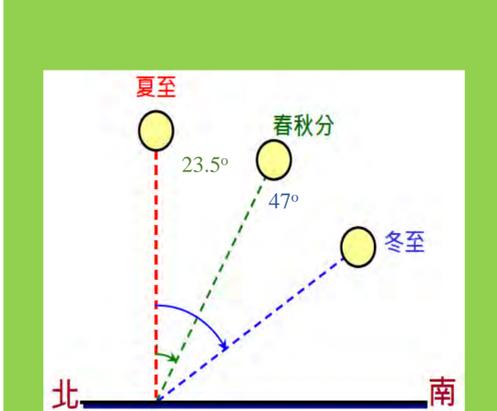
探討： 理論上夏天太陽日射量明顯大於其他季節，為何太陽能發電系統的量測資料7、8月之發電量較5月與10月低？



探討： 為何之前科展的實測數據指出最佳傾斜角約30-40幾度，和我們的研究數據不同？



探討： 為何一般的認為是：太陽能板最佳架設傾斜角為23.5度？

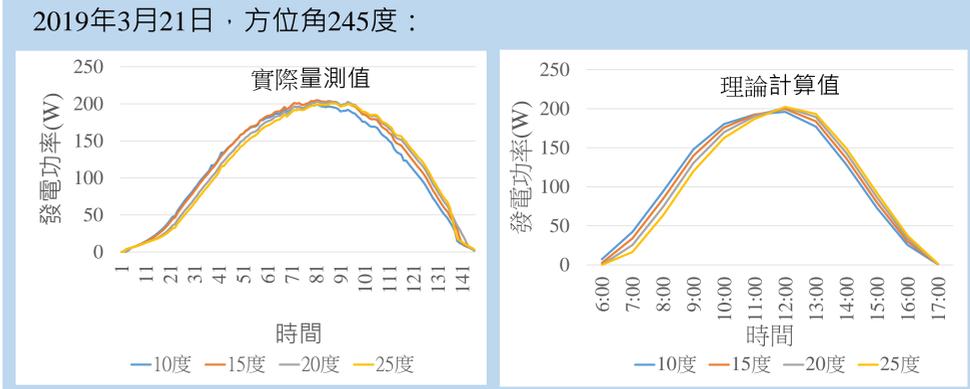
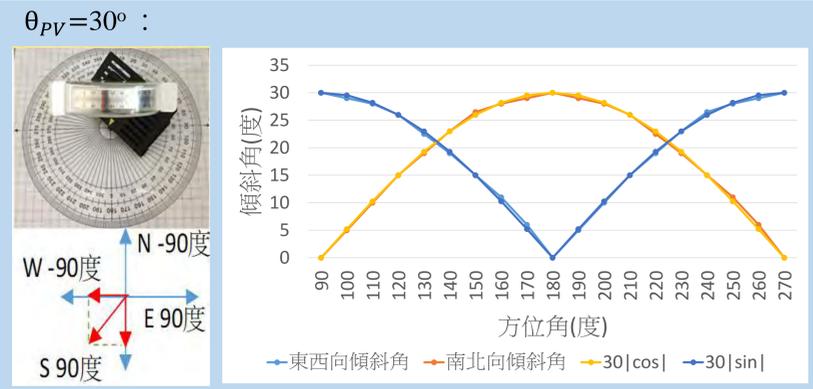


日照時間比較	春分	夏至	秋分	冬至	大氣質量比較	春分	夏至	秋分	冬至
2018年日出時間	6:01	5:10	5:45	6:36	2018年中天時南北向入射角	23.5°	0°	23.5°	47°
日照時間(分鐘)	728	820	728	628	大氣質量(AM)	1.09	1	1.09	1.47
和夏至之比	0.88	1	0.88	0.76	和夏至之比	0.92	1	0.92	0.68

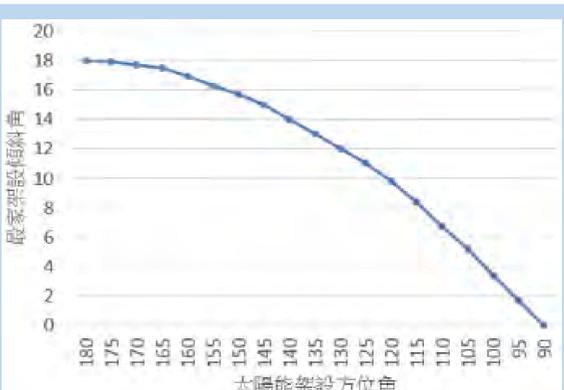
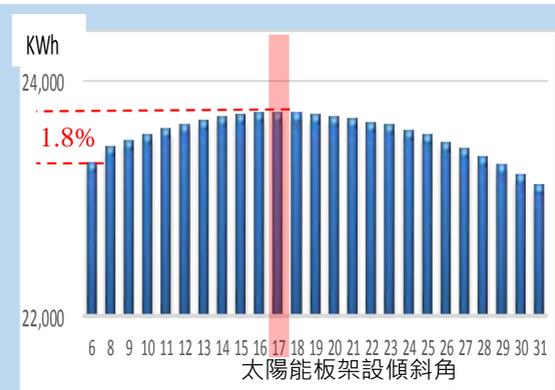
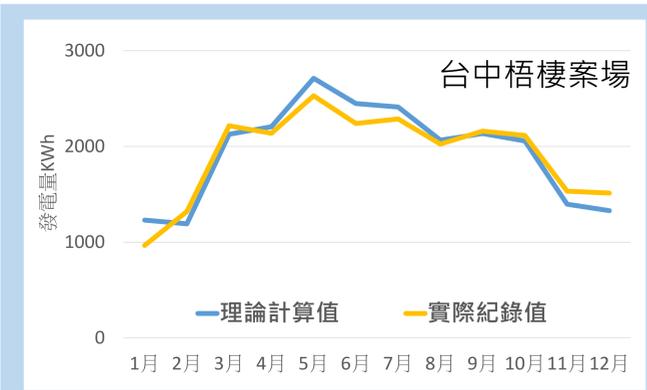
綜合上述討論，一般認知“在台灣，太陽能發電系統架設的傾斜角要等於23.5度”這句話是非常有疑慮。至少在本研究所作的分析與獲得數據中，它是不成立的。

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 θ_D ，架設傾斜角為 θ_{PV})

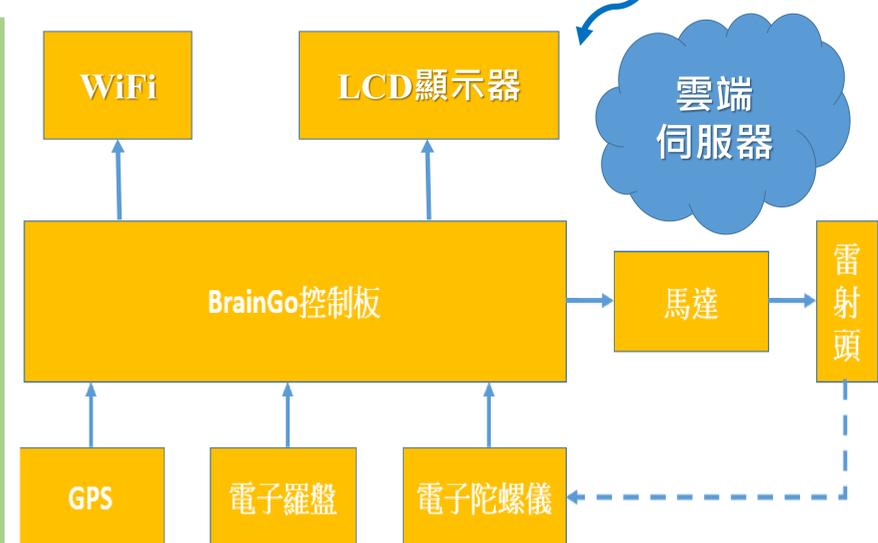
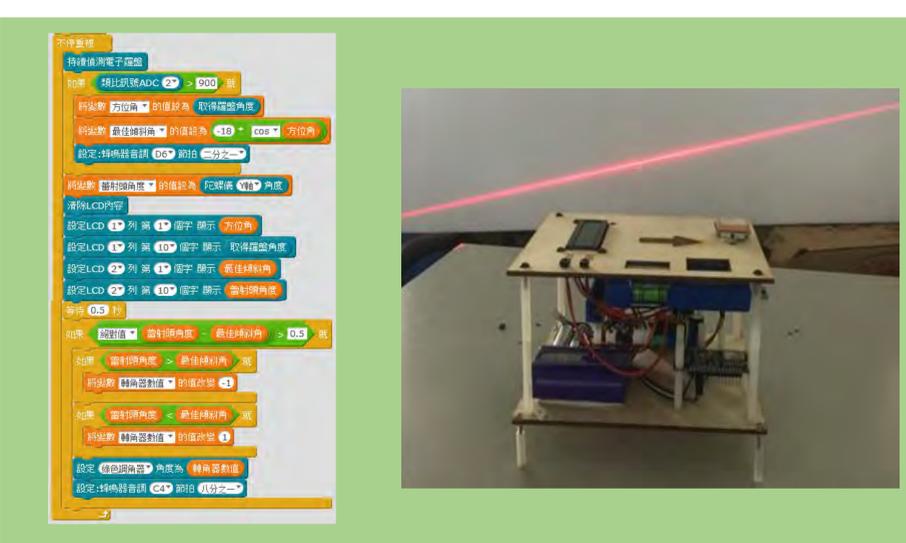
$$P = P_{max} \cos(\theta_{EW} - \theta_{PV,EW}) \cos(\theta_{SN} - \theta_{PV,SN}), \theta_{PV,EW} = \theta_{PV} |\sin \theta_D|, \theta_{PV,SN} = \theta_{PV} |\cos \theta_D|$$



編號	案場地點	裝置容量	方位角	傾斜角	最佳架設傾斜角	年發電量	改善
1	台中梧棲	16.38KW	203度	6度	17度	23730kWh	1.8%
2	南投國姓	17.28 KW	45度	6度	-13.5度	21794kWh	6.7%
3	雲林斗南	49.8 KW	130度	9度	13度	69649kWh	1.0%
4	台南鹽水	29.76 KW	147度	7度	13.5度	40347kWh	1.4%



結論



展望:
 若新架設太陽能板時，全世界都能裝設到最佳架設傾斜角度，以一年新增**120GW**裝置容量來計算，一年有機會在不增加成本下多出約**0.6GW**發電功率。假設太陽能板每天發電4小時，如此每年有機會增加**876GWh**電量(8.76億度電)，若以台灣108年度太陽光電發電設備最低躉購費率每度電4.0379元計算，每年經濟效益至少達**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**707.44億元**。

捌、參考資料及其他

- [1] http://apvi.org.au/wp-content/uploads/2018/04/IEA_PVPS-A_Snapshot_of_Global_PV-1992-2017.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/astrometry/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
- [9] 照過來!看我為太陽能板擺POSE, 第44屆全國中小學科展