

單軸追蹤型太陽光電系統性能的模擬與實測

黃明輝^{1*} 簡睿彬²

摘要

太陽光電是再生能源的重點，固定型太陽光電系統受到餘弦效應，其發電功率會隨著太陽角度而變化；追蹤型太陽光電系統可以改善這效應，但代價是額外的能源消耗和較高的機械複雜性與較差耐候性。為了得到最大的太陽光電系統發電量，本研究以模擬及實測比較固定型與單軸追蹤型的太陽光電系統的發電量。在模擬上，使用SG2計算太陽位置，再計算大氣質量、日照度及太陽光電板輸出功率。使用此數值模型計算太陽能電池板最大年能量的最佳仰角。本研究所在的苗栗市(緯度24.54°)的最佳仰角範圍為13.0°至29.4°。在實測部分，建立一套固定型與一套追蹤型的太陽能系統，各自以一個Arduino模組執行系統控制、數據記錄和回傳網絡數據庫。成果分析上首先比較兩系統在相同角度與晴天狀況下的日輸出功率，校正兩系統的效率。其次，比較實測日照度與模型預測值，確認兩者誤差約在±5%。實驗的主體是測量不同旋轉角度(3、5、7)下的淨電能產生；並計算實測與模擬發電量的比率。在晴天轉動次數越多，則比值越趨近理想的最大值。結果歸納出一個以雲量控制追蹤的簡便條件。實際應用時，考慮不同的雲量變化，轉動5次的平均增益已達到穩定高峰，且性價比最大。

關鍵詞：太陽光電系統發電量，太陽光電板仰角，日照度模型，系統優化，追蹤型太陽能

1. 前言

為阻止氣候變遷加劇，將全球升溫控制在1.5°C以內，各國積極研擬減量計畫，以達成《巴黎協定》中零排放的目標。我國開始評估及規劃在2050年達到淨零目標的方式(鍾佑貞，2021)。行政院(2021)規劃在2025年目標為太陽光電總裝置容量20 GW，但直到2021年底僅有7.7 GW，遠低於預期目標(能源局，2022a)；2021年太陽光電發電量7.92 GWh僅佔全體發電

量290.9 GWh的2.72%(能源局，2022b)。能否在2050達成目標是個很大的疑問。

目前的太陽光電系統多為固定型系統，其發電量隨著太陽角度而變。在有限的土地面積限制下，可依靠兩個方式增加發電量：提升光電轉換效率或是減少餘弦效應的衰減。光電效率仰賴材料科技的進步，能提升的數值僅約數%，效果非常有限。追蹤型太陽光電系統降低餘弦效應的損耗，能提升15%~45%；使用追蹤型可以大幅度的提升系統發電量與減碳效果。

¹ 國立聯合大學能源工程學系 副教授

² 國立聯合大學能源工程學系 碩士生

*通訊作者，電話：037-382388，電郵：mahuang@nuu.edu.tw

收到日期: 2022年03月04日

修正日期: 2022年07月19日

接受日期: 2022年08月08日

相對於固定型系統，追蹤型太陽光電系統增加了機構的複雜度與設備，例如追蹤用的感測器(日照計、太陽追蹤器)與驅動設備。龐大的太陽能板可能受風擺動，需要足夠強度的支架與傳動機構；整體設備必須能耐得住颱風與東北風的考驗，耐候性影響整體設備的使用壽命。此外，追蹤型系統增加馬達消耗的能量。考慮系統淨發電量時，必須扣除系統追蹤所消耗的能量。

前述追蹤型的複雜機構，無法一次全部解決。本研究聚焦於追蹤型的基本原理的模擬與驗證其實際績效；希望開發出使用最少設備就能獨立完成複雜的模擬與控制的方式。

第2節簡述日照度相關的文獻與回顧追蹤型的設計。第3節建立一套由太陽位置、大氣質量、日照度、發電功率的模型。然後以此模型，找出全年日射能最佳的太陽光電板的仰角。第4節先敘述實驗的兩套獨立型太陽光電系統，然後比較兩系統的效率。第5節說明實驗過程，比較兩系統的淨發電量，及其與模擬發電量的比值；最後歸納出一套系統控制的方法。第6節總結前述四個重要結果。

2. 文獻探討

2.1 照度模擬

日照度模型廣泛應用於全球氣候模擬、太陽能產業、建築採光設計、農業生產等領域中。在地面的日照度模型中，許多學者提出了各種不同的模型，簡單的僅含可見光強度，複雜的則分成不同頻帶寬的分光光譜。Gueymard (2012)比較了18種模型，建議較優的有五種。Badescu *et al.* (2013)等人整理了54種，將較好的模型分成三類，最好的四個、第二好的三個、第三好的九個。Antonanzas-Torres *et al.* (2019)

比較了70種不同的模型，推薦較優的8個。

綜合這些回顧性論文，公認較佳的模型有Gueymard的 REST2 model version 8.1、Ineichen model、Bird model以及ESRA model-3rd version。以Gueymard為例，早期的ASHRAE model (Gueymard, 1987)是許多日照度模型的基礎；初期此模型沒有大氣的參數、只能計算出最簡單的日照度。直到Gueymard (2008)發布的新日照度模型REST2，加入許多參數，例如：地面的反照率、大氣壓力、臭氧濃度、二氧化碳濃度、雲層厚度、波長指數、大氣濁度指數、氣溶膠反射率等！以上敘述的優良模型，多已開發成為商業化的產品，其程式碼並不公開。許多模型需要多個氣象參數，若要在太陽光電廠使用，則需新增不少設備；廠商不僅增加成本，也因太複雜而不便於使用。因此本研究嘗試開發一套簡單方便、又具有適當準確性的模型，最後決定使用Meinel and Meinel (1976)的模型。

2.2 追蹤型太陽光電

太陽能系統依運轉方式分為固定型與追蹤型系統。目前常見的太陽能系統安裝方式主要採用固定型，優點為結構簡單、成本低廉。當太陽光線與太陽能板的法線之間的夾角(θ)，太陽光電的發電量正比於 $\cos\theta$ ；稱為餘弦效應。當夾角為 60° 時，發電量會衰減至50%。

追蹤型系統每隔一段時間就調整角度，縮小夾角 θ ，減少餘弦效應所造成的損失。追蹤型系統依照轉動軸數目分成單軸與雙軸追蹤。單軸又按極軸的方向分垂直、水平、傾斜三類。雙軸式追蹤器有兩個旋轉軸，可改變方位角、仰角，因此可正對太陽，得到 $\cos\theta$ 的最大值。追蹤型的效益或增益(Gain, G)定義為追蹤型的功率或能量超越固定型的比例。

Racharla and Rajan (2017)也回顧多種追蹤

型的效益與成本，考量成本與效益後，認為性價比最佳的是單軸追蹤。Nsengiyumva *et al.* (2018)回顧多種追蹤型的機構形式、控制法、效益等；結論中強調對日照度的模擬的重要性，最後推薦可提供最大增益的二維追蹤。Awasthi *et al.* (2020)回顧追蹤型的各種形式，並彙整21篇二維追蹤的論文，列出其方法與增益。整體而言，追蹤型比固定型系統可增加約15%~50%的發電量。

國內學者中，黃秉鈞等人(Huang and Sun, 2007；Huang *et al.*, 2011)提倡一套傾斜單軸式系統，將太陽能板設定在三個固定的時間轉到三個固定角度(1 axis 3 positions，簡稱為1A3P)。Huang *et al.* (2011)從在臺灣大學的實驗結果，推測年發電量可增加約23.6%。

前述三個回顧論文中都提到太陽位置追蹤器與系統控制的問題，許多論文提到複雜與創新的感測器與控制方法。從眾多論文中可歸納出單軸追蹤只比雙軸追蹤低約5%的增益，成本上不只可減少一軸的驅動機構與維修，還可簡化控制系統。考量系統的複雜度與增加的收益，本研究決定採用折衷的傾斜單軸式結構。

3. 太陽照度模型與優化模擬

3.1 太陽位置

太陽位置的計算根據天文學原理，不同的程式碼採用的運算法不同，造成準確度與計算速度的差異。太陽位置計算模型(Solar Geometry 2, SG2)為法國巴黎高等礦業學校(MINES ParisTech)開發的第二代快速演算法(Blanc and Wald, 2012)。輸入日期時間、經緯度、海拔高度，可得到太陽的仰角(γ_s)以及方位角(α_s)；適用於1980年至2030年，精準度約為0.005°。原作者提供的程式有C及Matlab兩語

言，本研究將其轉譯為Python語言。為比較此程式碼的準確性，比照原網站提供的檢測法，計算2013年2月1日太陽位置。比對兩組數據，標準誤為 $1.3 \times 10^{-5}^\circ$ ，遠低於SG2宣稱的精度0.005°，可視為兩程式計算的數據是相同的。其次與中央氣象局的日出日落時間及方位角做比較，以此程式計算的結果誤差也在網頁顯示數字的最小單位之內。兩驗證都證實此python程式是正確的。

3.2 大氣質量

光線通過大氣時與大氣分子、氣溶膠與微塵產生散射。日照度的衰減量正比於光線經過大氣的光程厚度(Optical depth, X，空氣密度對厚度的積分)。定義大氣質量(Airmass，以下簡稱AM)為式(1)

$$AM = \frac{X(\theta)}{X(0^\circ)} \quad (1)$$

$X(0^\circ)$ 為陽光垂直地面的光程厚度， $X(\theta)$ 為陽光從天頂角 θ 照射地面時的光程厚度。大氣密度隨高度而變，且氣溶膠的濃度也隨高度與位置而變；因此有很多種的AM模型。當天頂角 $\theta < 70^\circ$ 時，各模型相差不大。本研究採用Kasten and Young (1989)提出的大氣質量的模型，如式(2)

$$AM(\theta) = \frac{1}{\sin(\gamma) + 0.50572(\theta + 6.07995)^{-1.6364}} \quad (2)$$

其中 γ 為仰角(radian)、 θ 為仰角 γ 轉換成degree值。圖1以2021/1/24為例，將SG2計算的太陽仰角代入公式(2)的大氣質量數據(藍色數據點與左側縱座標)。

3.3 日照度模擬

在外太空(AM0)沒有大氣散射，平均照度

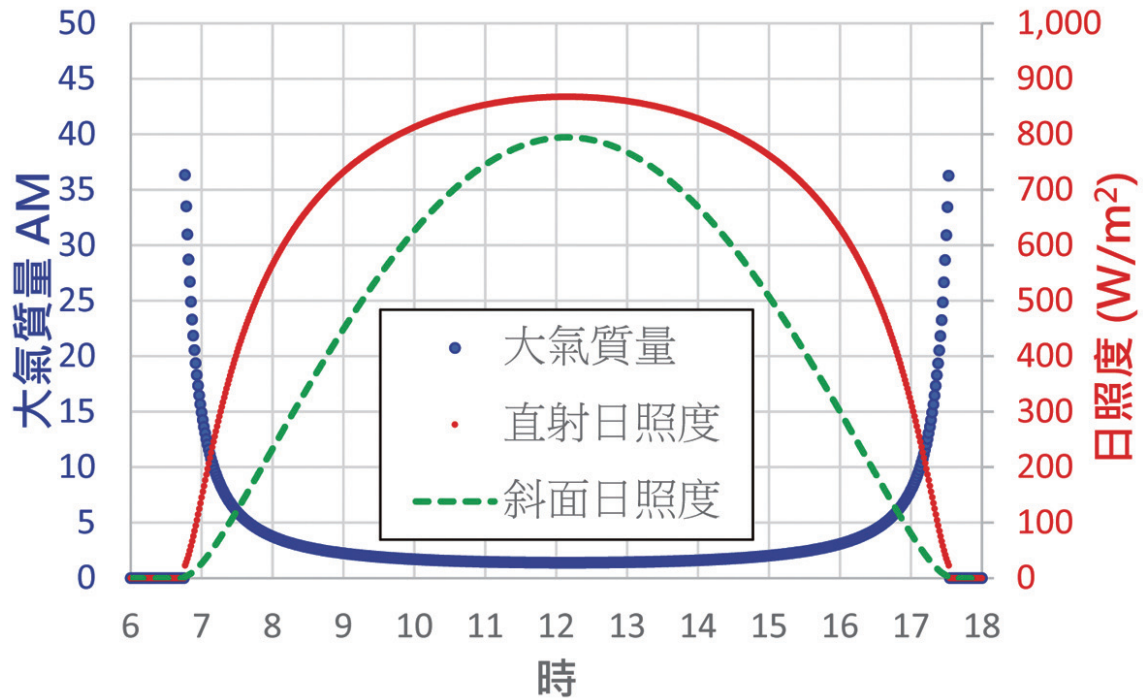


圖1 大氣質量與日照度的模型。以2021/1/24為例，橫軸為當地的時間；藍色點為大氣質量 (Airmass)，使用左側縱座標。紅色點為模擬直射日照度，綠色虛線為仰角22.7°傾斜面的模擬日照度，照度都使用右側縱座標。

稱為太陽常數，約為 $1,367 \text{ W/m}^2$ ，但隨太陽黑子活動與公轉軌道的距離而微幅變動。本研究所用分析方法均為同一日的比值，太陽常數會抵消，故此研究假設不變的太陽常數。

地面上測量的光線分為直射(Beam)、漫射(Diffuse)、與鄰近物體或地面的反射(Reflected)。直射光具有餘弦效應，漫射光則無顯著方向性。日照度受AM影響最大，使用Meinel & Meinel (1976)的經驗模型：

$$I_B = I'_0 \times 0.7^{(AM^{0.678})} \quad (3)$$

由大氣質量AM來計算直射照度。 I'_0 使用 $1,353 \text{ W/m}^2$ (意義類似AM0的日照度)，係數0.7則表示太陽光照射通過大氣層整體衰減率約為70%。由散射造成的漫射光 I_d 約為直射光的10%，但隨雲量有很大的變化。圖1的紅點為

2021/1/24計算的模擬直射日照量 I_B 。

3.4 轉動面的照度

本研究使用單軸傾斜式追蹤。以下推導一個三維角度轉換公式以計算太陽相對於板面的座標。定義 X_0 軸指向東方， Y_0 軸指向北方， Z_0 軸指向天頂，如圖2所示。由SG2的方位角(α_s)與仰角(γ_s)轉換成(X_0, Y_0, Z_0)，如式(4)

$$(X_0, Y_0, Z_0) = (\cos\gamma_s \times \sin\alpha_s, \cos\gamma_s \times \cos\alpha_s, \sin\gamma_s) \quad (4)$$

安裝時方位角可能不完全正確，太陽能板的長軸(Y)可能偏離正南方的 Y_0 軸角度 ω (正值南偏東，負值南偏西)，如圖2(a)所示。接著繞X軸轉動Y軸的仰角 ε ， Y' 為傾斜過後的極軸(北偏上)，如圖2(b)所示。傾斜後使太陽能板繞極

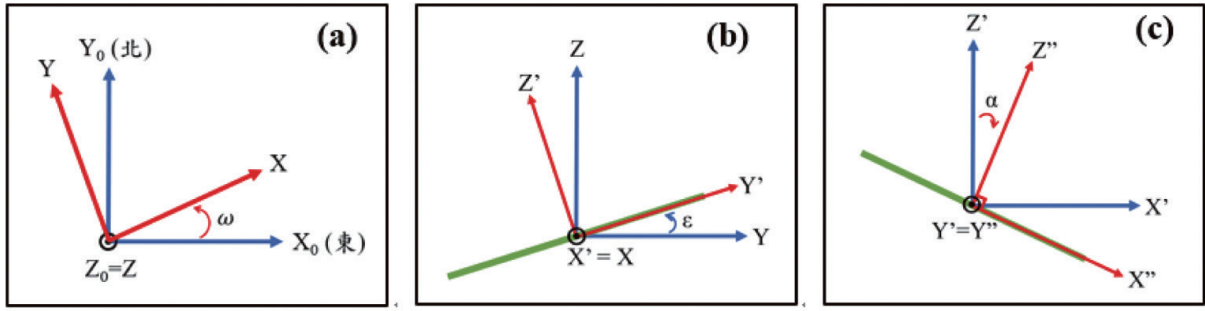


圖2 追蹤型座標轉換的三個角度的示意圖。(a)方位角調整。(b)仰角調整。(c)轉動角調整。

軸($Y' = Y''$)轉動 α (正值偏東方、負值偏西方)，
如圖2(c)所示。將三個轉換矩陣整合為式(5)

$$\begin{pmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha \cos\omega - \sin\alpha \sin\omega \sin\varepsilon & \cos\alpha \sin\omega + \cos\omega \sin\alpha \sin\varepsilon & -\sin\alpha \cos\varepsilon \\ -\cos\varepsilon \sin\omega & \cos\varepsilon \cos\omega & \sin\varepsilon \\ \sin\alpha \cos\omega + \cos\alpha \sin\omega \sin\varepsilon & \sin\alpha \sin\omega - \cos\alpha \sin\varepsilon \cos\omega & \cos\alpha \cos\varepsilon \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

此式將SG2計算出的太陽位置在(東、北、天頂)的座標(X_0 、 Y_0 、 Z_0)，轉換到追蹤型板面(橫軸、縱軸、法線)的座標(X'' 、 Y'' 、 Z'')。 Z'' 的計算如式(6)

$$\begin{aligned} Z'' &= X_0 (\sin\alpha \cos\omega + \cos\alpha \sin\varepsilon \sin\omega) \\ &\quad + Y_0 (\sin\alpha \sin\omega - \cos\alpha \sin\varepsilon \cos\omega) \\ &\quad + Z_0 \cos\alpha \cos\varepsilon \end{aligned} \quad (6)$$

Z'' 為太陽與太陽能板法線之間夾角的cos函數，此時追蹤型板面的預測日照度 I_m 如式(7)。圖1的綠色虛線為一個傾斜 22.7° 的平面上的模擬日照度 I_m 。

$$I_m = I'_0 \times 0.7^{(AM^{0.678})} \times Z'' \quad (7)$$

3.5 PV發電量的模擬

太陽能板的發電功率 P 與直射日照度 I_b 、晶圓面積 A 、轉換效率 μ ，及陽光方向與板面法線的夾角 θ 有關。假設只有直射光時，其關係為

$$P(W) = I_b (W/m^2) \times A(m^2) \times \mu \times \cos\theta \quad (8)$$

本研究使用的全空日照計裝在固定型系統，平行其板面。故實測日照度 I_e 已經是直射日照度及漫射光投影在板面的有效日照度， $I_e = I_b \times \cos\theta + I_d$ 。由於沒有漫射日照計或直射日照計，無法區分兩者的貢獻。本研究比照Meinel & Meinel (1976)的模型，將漫射光的貢獻設定為10%，直接以下式模擬固定型太陽能系統的功率。

$$P(W) = I_e (W/m^2) \times A(m^2) \times \mu \quad (9)$$

3.6 全年最佳仰角模擬

每日的日射能為將照度 I_e 對時間 t 做積分， $E(d) = \int I_e(t) dt$ ， t 從日出到日落。為瞭解最佳的固定型太陽能板安裝角度，以實驗所在地苗栗市(緯度 24.54°)為例，設定朝正南方的平板型($\omega = \alpha = 0$)，調整不同仰角(ε)，計算每日的日射能，再累計全年的總日射能。圖3為在2021年總日射能在仰角約 21° 附近的比較；仰角 21.1° 的年總日射能最高，此為當地安裝太陽能板最佳的仰角。此最佳仰角與年份無關，但與緯度有關。其他地區可用當地緯度減 4.44° 為約略的最佳仰角。

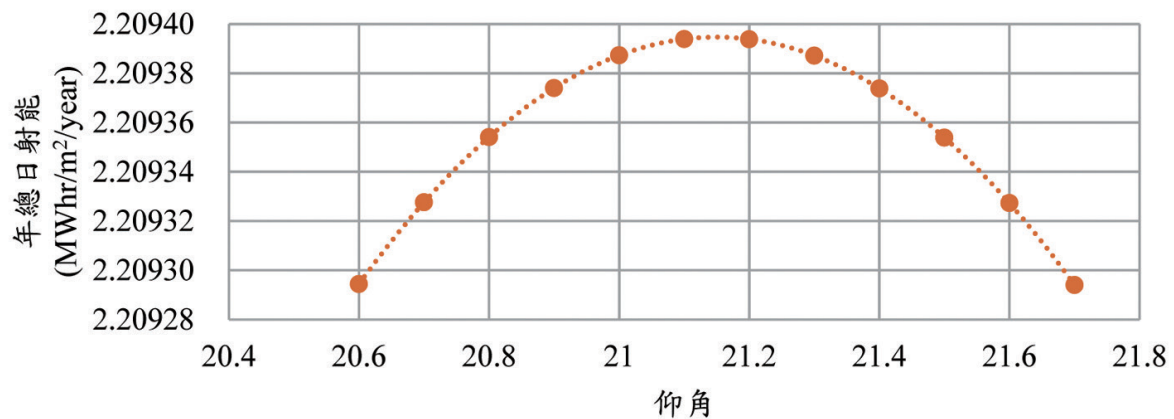


圖3 不同仰角年總日射量比對圖(以2021年及苗栗市為例)

總日射能相對於最大值的99%的仰角分別為 13.0° 與 29.4° 。這些角度的差別在於季節性的變化。圖4為2021年每天的日射能在三個角度的分布圖，橫軸為日期從1到365日。相對於最佳的 21.1° ，當仰角為 13° 時，在夏至時可以得到最多的日射能；在冬至時卻得到最少的日射能。當仰角為 29.4° 時，日射能在春秋分時最高；但冬季時是三個仰角中最高的。

本研究設計一套固定型太陽光電系統當對照組，與一套追蹤型太陽光電系統當實驗組。後續分析中，下標 f 代表固定型(fix)、t 代表追蹤型(tracking)。兩套設備都是獨立型，採用相同規格的50 W多晶矽太陽光電板(模組尺寸為 $615\text{ mm} \times 515\text{ mm}$)、最大功率追蹤器、電池(12 V 100 Ah)、負載(12 V 40 W鹵素燈與風扇)。負載24小時開放，直到追蹤器判斷電池無法繼續放電為止。兩套系統分別由一套Arduino晶片組控制與讀取系統的電壓、電流、日照計、加速規等數據；然後將數據傳送至網路資料庫。

固定型太陽能系統安裝時將模組裝設於角鋼所製成的支架，架設在無遮掩物的陽台上，

4. 實測設備

4.1 設計與製造固定型與追蹤型

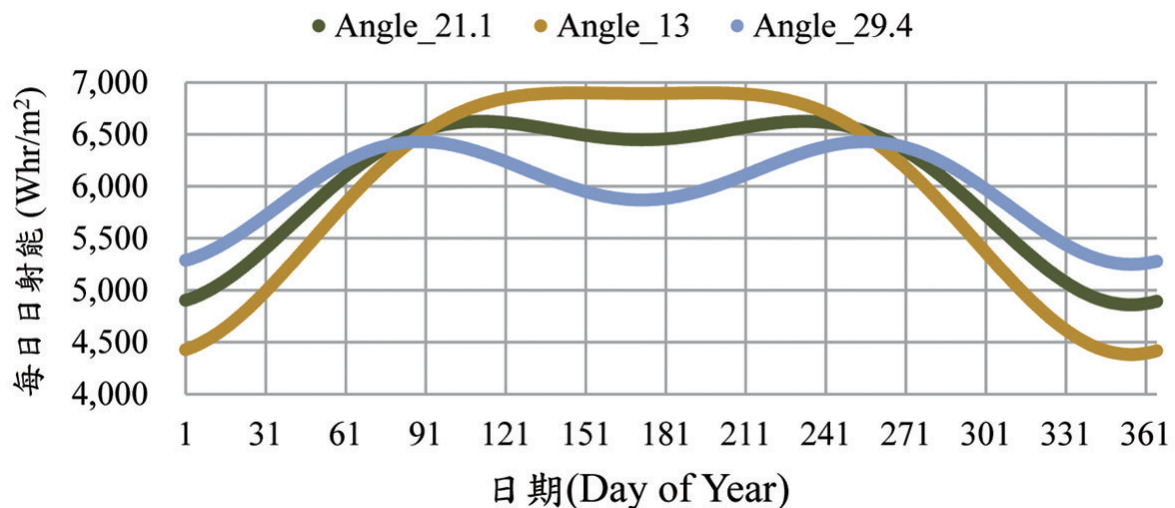


圖4 2021年每天的日射能在三個仰角 21.1° 、 13.0° 、 29.4° 之分布圖

其尺寸如圖5所示。由於角鋼孔位的限制，仰角(ε)的實測值為 22.7° (圖1所模擬的傾斜面)；非常接近最佳仰角的 21.1° 。南北向的長軸在安裝時僅由指北針判斷，然後由實測數據調整方位角誤差 ω 為南偏東 3.5° 。固定型的板面旁架設一個全空日照計(廠牌型號：LP PYRA 03 AC (2021))。

追蹤型太陽能的機構採用類似Huang *et al.* (2011)的傾斜單軸式。安裝時極軸約平行於南北向，仰角實測值為 $\varepsilon=21.7^\circ$ ，約與固定型系統相同。方位角校正採用跟固定型相同方式， ω 為南偏東 1.75° 。

驅動部分採用類似iPVTracker (2021)的鋼索拉扯方式轉動，如圖6。太陽能板固定於金

屬背板上，再銜接極軸；透過直流馬達帶動繩索使太陽能板繞極軸進行轉動。轉動角度 α 最大可達到 120° ，足以應用在8~16時之間面對太陽。極軸尾端安裝一個三維加速規(GY-61 ADXL335, 2021)，可測量重力加速度的三維分量，推算板面旋轉角度 α 。

4.2 校正固定型與追蹤型

兩套太陽能系統雖然採用相同的產品，但光電轉換效率仍可能不同。本研究先測量兩者的效率，並推導出後續比較兩系統發電功率的校正倍率。實驗時日照計安裝在固定型太陽能系統的旁邊，位於同一平面。測量當時的日照度 I_t 與發電的功率 P 。將太陽位置轉換至固定型

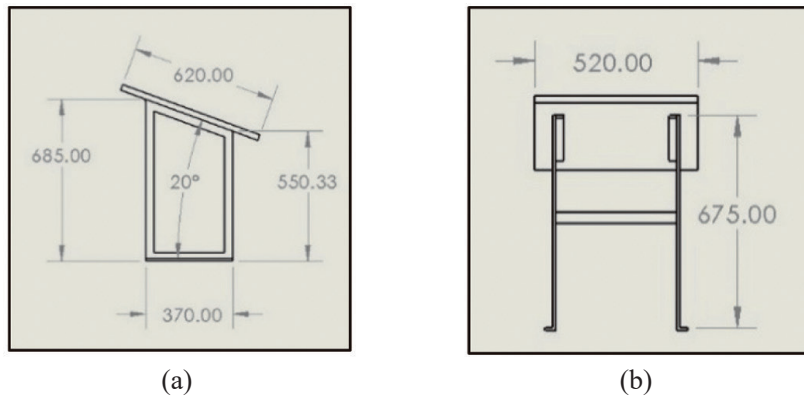


圖5 (a)固定型太陽能系統側視圖。(b)後視圖(長度單位：mm)

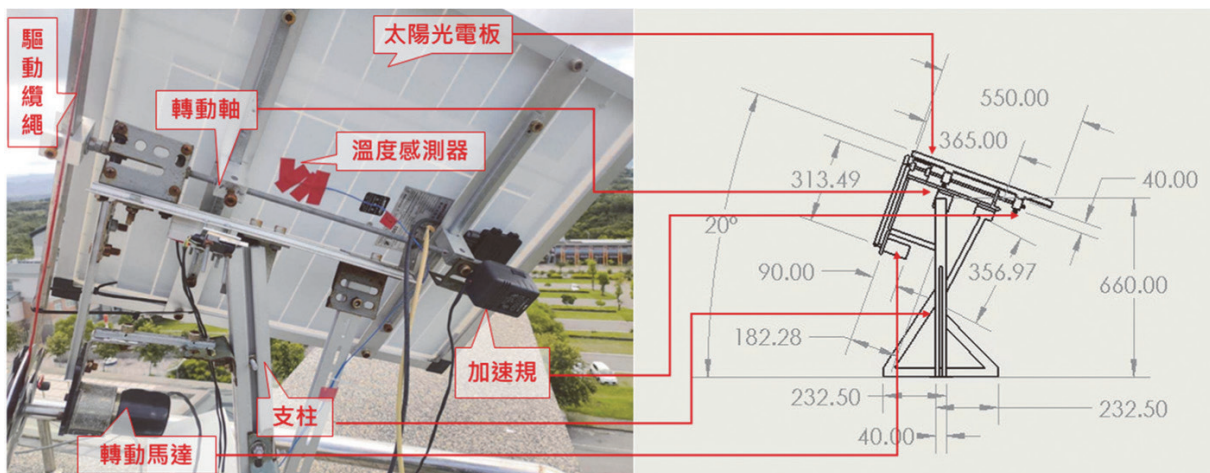


圖6 追蹤型系統實際裝置與設計圖(單位：mm)

太陽能板板面的座標(X'' , Y'' , Z'')。 Z'' 就是太陽與太陽能板法線的夾角的 $\cos\theta$ 。假設轉換效率 μ 、面積 A 、則發電功率 P 為

$$P = IA\mu Z'' \quad (10)$$

有效日照度就是 $I_e = IZ''$ 。將 P 與 I_e 做正比回歸，即可計算太陽能板的轉換效率 μ 。

此項校正實驗將追蹤型的板面轉動角 α 設為 0° ，也就是跟固定型一樣的角度，參閱表1與圖7。此實驗總計進行16天的實驗，選取晴朗無雲且實測日照度大於 120 W/m^2 的條件下，總計採用8,818筆數據。兩套系統的數據分析如下。

如圖7左，藍色線條為正比回歸的直線， R^2 為0.998，斜率為0.05385。代入晶圓的面積 A ，推算固定型太陽能板轉換效率 μ_f ，如式(11)

$$\mu_f = \frac{0.05385}{A} = \frac{0.05385}{0.2736} = 0.1968 = 19.68\% \quad (11)$$

如圖7右側，藍色線條為正比回歸的直線，推算追蹤型太陽能板轉換效率 μ_t ，如式(12)

$$\mu_t = \frac{0.05095}{A} = \frac{0.05095}{0.2736} = 0.1862 = 18.62\% \quad (12)$$

圖7的照度或功率偏離正比關係式的標準差約5%，代表系統測量數據的統計不確定度。

為了探討追蹤型所帶來的效益，必須假設兩系統的轉換效率一致。透過上述效率的測量，可以將追蹤型的輸出調整至與固定型相同。第一種方式是直接用效率的比值，如式(13)

$$\frac{\mu_f}{\mu_t} = \frac{0.1968}{0.1862} = 1.0569 \quad (13)$$

第二種方式是將兩組功率8,818筆數據直接做正比回歸，得到的 R^2 為0.999，其關係為式(14)

$$P_f(W) = P_t(W) \times 1.0565 \quad (14)$$

表1 校正時兩套系統角度參數表

角度名稱	ω	ε	α
固定型	1.87°	22.7°	0°
追蹤型	3.35°	21.7°	0°

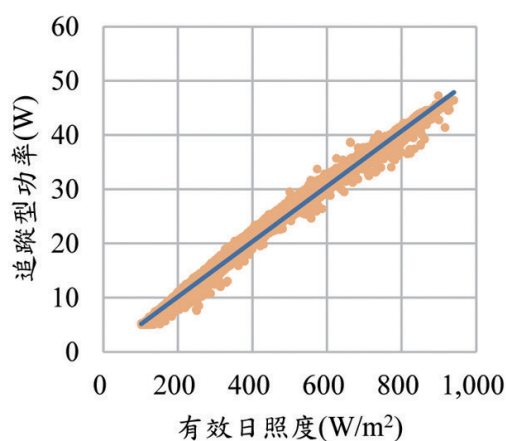
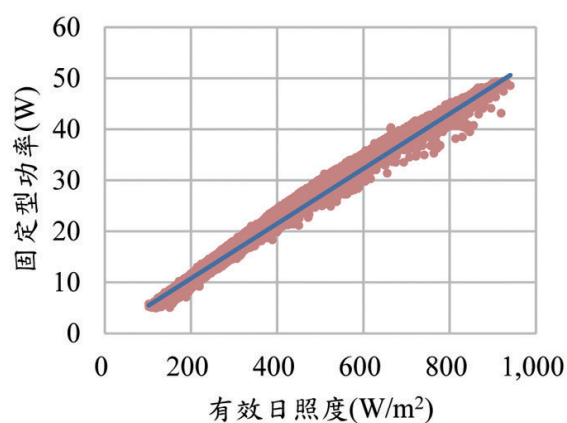


圖7 固定型與追蹤型太陽能板的有效日照度與功率的散布圖

兩方式的差異可以當成系統不確定度，約為0.0004或0.04%，遠低於統計不確定度5%，故兩方法是一致的，後續研究將採用式(14)。

4.3 轉動三/五/七次實驗

為了解追蹤型發電量的效益，本研究設計不同轉動次數的實驗；各實驗轉動角度數與實驗日期及天數參閱表2。前述校正實驗，兩系統板面平行，屬於在相同基礎的單一角度(沒有旋轉)的實驗。而後實驗每日旋轉3/5/7個不同角度，表2顯示三組實驗的角度 α 的設定值。三角度轉動的數值參考Huang *et al.* (2011)所提到的追蹤角度設計，上午與下午的角度為對比正

中午太陽能板法線的夾角($\alpha = 50^\circ$)。五與七角度的角度間隔則選擇方便計算的 30° 與 20° 。靠近日出與日落的兩小時 $|\alpha| > 60^\circ$ ，對應的大氣質量大、日照度小、且容易受地形與雲層影響，故不列入追蹤的區段，直接使用第一或最後的角度。

角度轉換的時間是由模擬程式計算不同角度的板面上的日照度，當兩角度日照度交叉時就是轉換的時間。圖8以五角度為例，本實驗的各角度模擬的日照度，紅色線為兩角度模擬日照度交叉點，控制系統會送出啟動信號。在時間5.3時的信號為日出時刻，此時太陽能板從西極限轉動至東極限。

表2 追蹤型系統轉動角度的設定值與實驗日期天數(實驗年份為2021年)

角度數	轉動角 α 的設定值	實驗日期	實驗日數
一	0°	3/23 ~ 4/9	17
三	$\pm 50^\circ$ 、 0°	4/10 ~ 5/3	18
五	$\pm 60^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 、 0°	5/4 ~ 5/17	14
七	$\pm 60^\circ$ 、 $\pm 40^\circ$ 、 $\pm 20^\circ$ 、 0°	5/18 ~ 6/3	17

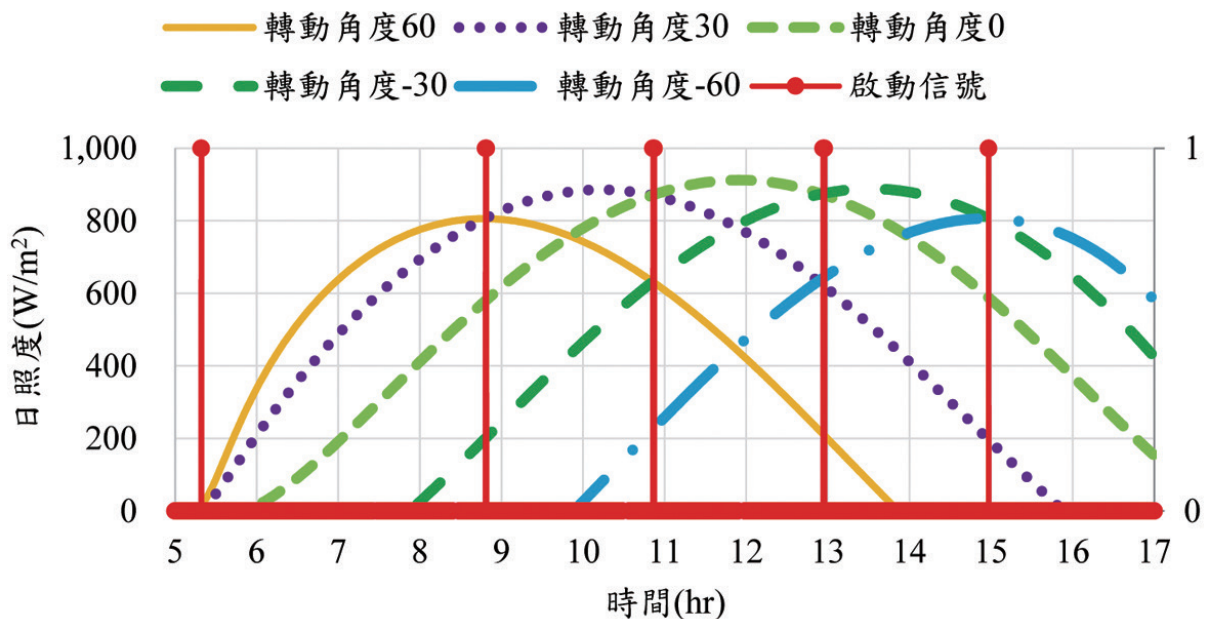


圖8 轉動五角度日照度模型與馬達啟動信號

5. 成果分析

為了得知追蹤型系統角度變化所帶來的效益，本研究分成數個階段逐步建立完整的證據。首先利用實測日照度來驗證日照度模型的準確度。其次探討一天轉動3、5、7個角度與總發電功率變化的關係；另外用模擬方式，計算理想狀況下(全日無雲時)的預期數值。最後再推論出最佳增益的轉動方式。

5.1 日照度模型與實測值的比較

首先比較日照度的模型預測值與實測值。圖9顯示2021/3/25的實測與模擬的日照度，及兩者比值的關係；綠色點為實測日照度 I_e ，紅

色點為預測日照度 I_t ，藍色數據點為瞬間日照度比值 $R_t = I_e / I_t$ 。圖10顯示在時間從日出到7.0時以及從17.0時到日落的兩段時間，實測值大於預測值。可能因素是此兩時段直射陽光經過的大氣質量較大，造成環日(circumsolar)散射光比例較高(Blanc *et al.* (2014))，而預測模型主要是直射光。圖10將大氣質量與比值 R_t 並陳，可發現兩者有關。為了有效的去除比值較大(比值 > 1.3 倍)的區域，將比值每0.05為一區段，其數據點的次數分布如圖11所示；原數據為每分鐘一筆，故次數正比於時間。

從圖11中可看到比值在0.95~1.05的機率約為71%，或可說大部分(71%)的時間實測日照度與預期日照度是一致的，誤差小於5%。比照世

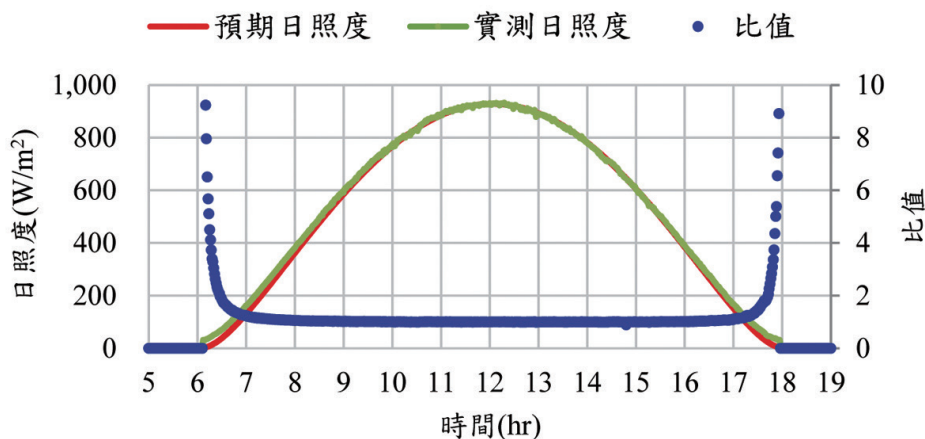


圖9 2021/3/25實測日照度、預測日照度與比值

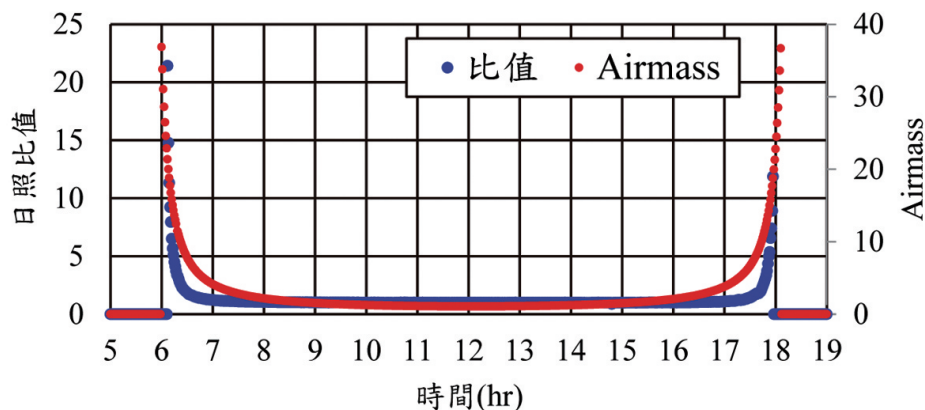


圖10 日照度比值(左側縱軸)與大氣質量(右側縱軸)對比圖

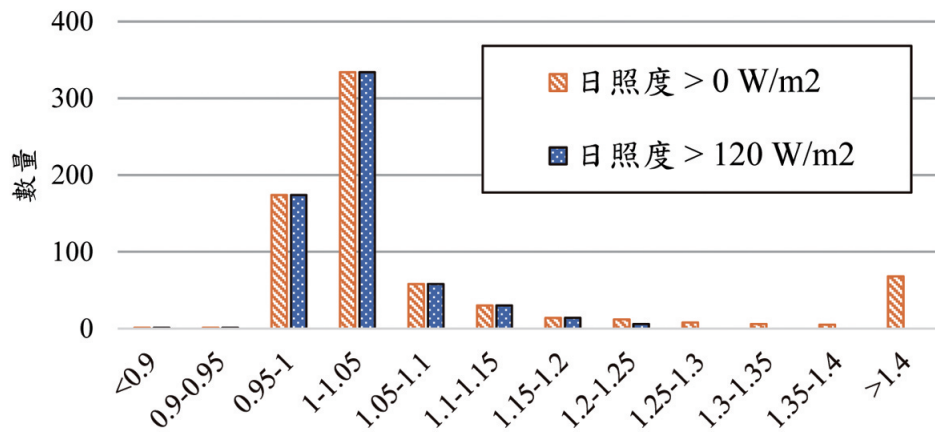


圖11 日照度比值分布長條圖

界氣象組織與氣象局定義日照時數的方式，只取照度 $>120 \text{ W/m}^2$ 時的數據做分析。對於大氣質量較大的數據，透過此條件可去除93個差異較大的數據。通過篩選的數據中，82%的數據點位於日照度比值0.95~1.05之間，本研究的所有數據將使用相同的條件(預測日照度 $>120 \text{ W/m}^2$)作為篩選數據的標準。

5.2 轉動耗電量測量

追蹤馬達啟動時需要較大的功率，轉動會在1至2秒內完成，接下來會進行角度的校正，校正時間最長可達1分鐘。最耗電的方式是全天24小時連續追蹤，約耗費電量為1.17 Wh；相較於轉動三角度來說，追蹤馬達的耗電量僅為發電量的0.464%。實際運作上，轉動追蹤中每一天只啟動3/5/7次，總消耗電量僅只有0.0068 Wh/0.0127 Wh/0.0257 Wh。注意此轉動耗能為本系統使用的裝置，不同轉動機構消耗能量也不同。但本研究設計的方式僅每日數次、每次約小於一分鐘，相對於全系統發電量仍屬於很低的比例；此特性仍適用於其他系統。

5.3 雲量的估計與分布

將每日的模擬日照度 I_t 與實測日照度 I_e 對時間 t 做積分，並計算預測日射能 E_t 以及實測

日射能 E_e 的比值 R_{ES} ，定義如下：

$$R_{ES} = \frac{E_{ex}}{E_{th}} = \frac{\int I_e dt}{\int I_t dt} \quad (15)$$

預測照度為晴朗無雲時，故 R_{ES} 可代表當日雲量的比例； R_{ES} 越小，表示被雲層遮蔽的區域越大、時間越久。將實驗期66天的 R_{ES} 分成每0.1為一個區間做統計，如圖12。定義 $R_{ES} > 0.8$ 為「無雲」、綠色區域約占42.4%； $0.5 \leq R_{ES} < 0.8$ 為「少雲」、橘色區域約占33.3%； $R_{ES} < 0.5$ 為「多雲」、紅色區域約占24.2%。

5.4 PV功率與發電量的比較

表2列出本研究的不同轉動次數的實驗日期。實驗中記錄實測的固定型發電功率 P_f 與追蹤型發電功率 P_t ，圖13為三個示範的案例，選擇接近於全天晴朗的日期。發現晴朗時追蹤型可以保持在約40 W的峰值，上下午都明顯超出固定型的發電功率。圖13中有許多數據點的發電功率突然下降，可能原因有兩種。(1) 雲層遮住太陽的直射光；可由同一時間照度與兩型的功率同步下降判斷。(2) 電池已經充飽，最大功率控制器調降產電功率以避免電池過度充電；照度數據沒有同步下降的屬於此類。圖13(A)三角度中有數個數據點追蹤型的功率明顯低於固

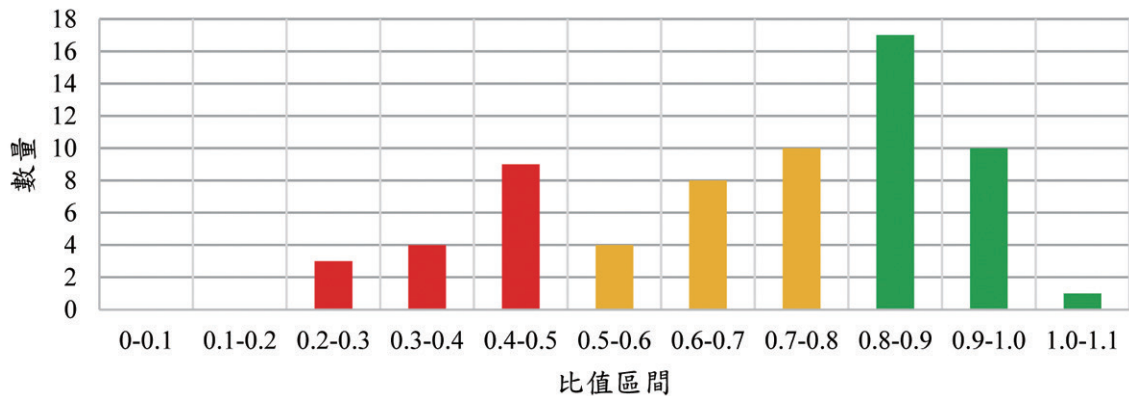


圖12 日射能比值區間統計圖

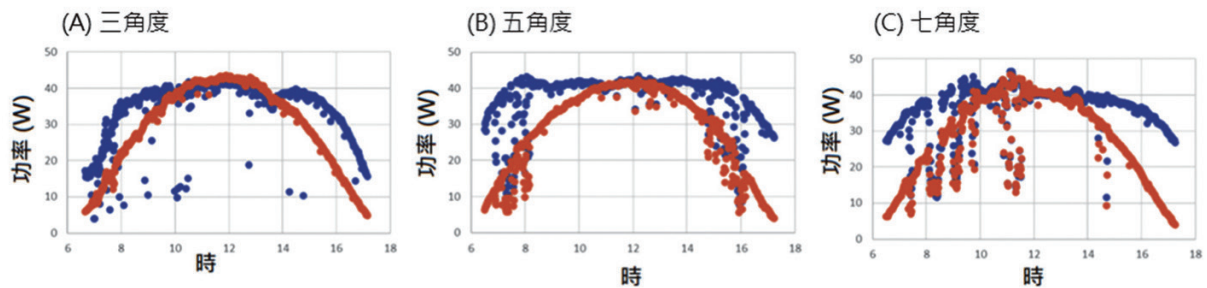


圖13 不同轉動角度的實測數據(此為三個較為晴朗的天氣。紅色點為固定型，藍色點為追蹤型)

定型，這些屬於第(2)類的案例。在2021年四月底發現這問題後，增加負載放電時間，以避免類似問題。圖13(B)與(C)中僅在中午附近曾經出現數次短暫(小於1分鐘)的這種案例。其他的下降突波都屬於雲層造成的現象。

5.5 設定追蹤條件

從圖13可發現雲層較多時固定型與追蹤型所產生的發電量大部分相同；追蹤型若繼續追蹤，不僅無法產生更多的發電量，還會多耗費轉動機構的能量以及降低機構的壽命。本節探討在哪個條件下追蹤才能相較於固定型系統帶來實際的效益。

將每日的追蹤型和固定型系統的發電量與時間做積分，對兩系統的轉換效率做校正(公式16)，如式(16)，定義兩系統淨發電量比 R_{Eff} 為：

$$R_{\text{Eff}} = \frac{\int P_t dt}{\int P_f dt} \left(\frac{\mu_f}{\mu_t} \right) \quad (16)$$

圖14探討不同追蹤角度的 R_{ES} 與 R_{Eff} 的關係，綠色點為轉動三角度、紫色點為轉動五角度、橘色點為轉動七角度。追蹤型的效益 R_{Eff} 必須大於1才值得追蹤的，我們設定的閾值是 $R_{\text{ES}} > 1.1$ ，也就是說追蹤型所增加的電能必須比固定型多出10%。從圖14的分布可以發現，設定 $R_{\text{ES}} > 0.55$ ，就大致可以滿足 $R_{\text{Eff}} > 1.1$ 的需求，值得啟動追蹤模式。如此只使用一個變數就知道是否需要追蹤，形成最簡單、最經濟的控制法。

為了解這個控制法的信度，採用百分比一致性(percent agreement，簡稱PA)與信度係數 κ (Cohen's kappa) (余民寧，2002)。將圖14的數據點數目轉成表3，並利用此表來計算PA與 κ 。

PA為正確篩選的百分比， $PA = (A+D) / N$ ，

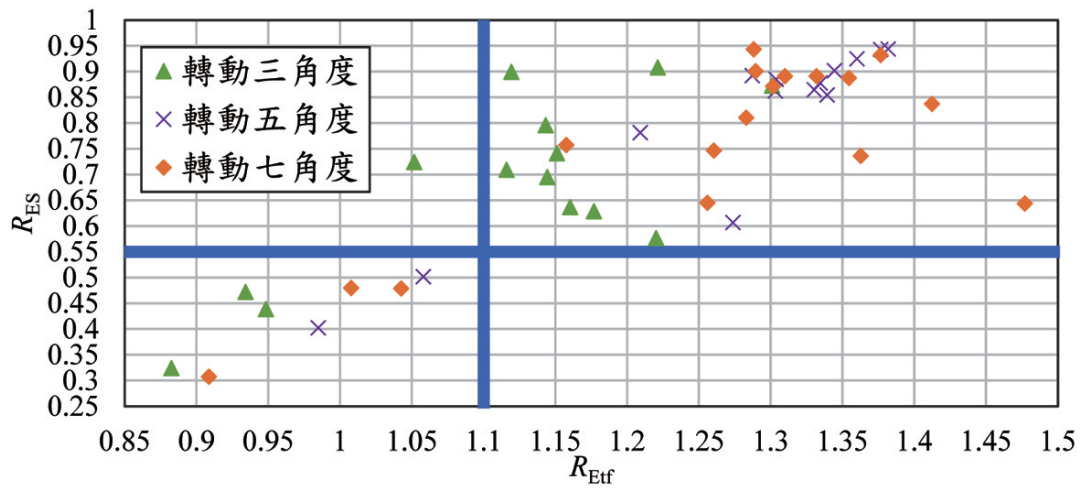
圖14 不同追蹤角度與 R_{ES} 、 R_{Eff} 的分布

表3 信度分析數據點分區數量表

	$R_{Eff} < 1.1$	$R_{Eff} \geq 1.1$
$R_{ES} \geq 0.55$	1 (B)	36 (A)
$R_{ES} < 0.55$	8 (D)	0 (C)

N 為數據點總數。計算得到 $PA = (36 + 8) / 45 = 0.978$ 。此百分比的期望值為 P_C

$P_A = 0.978$ 與 $\kappa = 0.928$ 都表示 $R_{ES} > 0.55$ 的篩選法的信度非常高。

$$PC = \left(\frac{A+B}{N} + \frac{A+C}{N} \right) + \left(\frac{C+D}{N} + \frac{B+D}{N} \right) = 0.693 \quad (17)$$

則Cohen's信度係數 κ 計算如下：

$$\kappa = \frac{P_A - P_C}{1 - P_C} = \frac{0.978 - 0.693}{1 - 0.693} = 0.928 \quad (18)$$

5.6 追蹤型的增益

在上述的 $R_{ES} > 0.55$ 的狀況下，統計三組實驗兩型的平均值與最大值列於表4。定義追蹤型的增益(Gain, G)為追蹤型超越固定型的比例，

$$G_{exp} = \frac{E_t - E_f}{E_f} = (R_{Eff} - 1) \times 100\% \quad (19)$$

表4 固定型與追蹤型的性能比較表

角度數	固定型日發電量(Wh)		追蹤型日發電量(Wh)		實測增益平均值(G_{exp})	模擬增益 G_{th}
	平均值	最大值	平均值	最大值		
一	282.58	353.99	281.78	349.53	0.0%	0.0%
三	245.99	309.88	286.40	378.45	16.40%	38.30%
五	283.13	315.29	370.8	434.03	32.00%	42.17%
七	248.73	312.09	325.29	414.83	31.85%	42.87%

計算每日的增益後，再取全組實驗的平均值 $\overline{G_{exp}}$ ，列在表4的第6欄。同樣的定義，改用數值模型推算的模擬增益 G_{th} 列在表4的第7欄；這是假想晴朗無雲的理想狀況，故為增益的理論最大值。圖15顯示 G_{exp} 的分布及與 G_{th} 的比較。

在 $R_{ES} > 0.55$ 的狀況下，從表4看到轉動三角度，平均增益量為16.04%，約為 G_{th} 的42%。考慮到三角度實驗時，可能有小部分數據有電池充飽而降低發電功率的狀況，其持續時間不超過3%。扣除這些有疑慮的區段，對發電量的減少 ΔE_t 稍微大於 ΔE_r (追蹤型發電量較多，故電池較易充飽。)但平均增益量為比值，僅能提高約1%。相對於整體數據的分布，此變化並不顯著。

轉動五角度的平均增益32%，約為三角度的2倍；平均值約為 G_{th} 的76%。從圖15的實測或模擬值都可看出五角度增益顯著的高於三角度。

轉動七角度時平均增益量為31.86%；平均值約為 G_{th} 的74%。雖然在轉動七角度時，有一天實測最大值超越理論最大值，但仍在系統誤差的5%範圍。七角度的績效略低於五角度，主要因素是五角度實驗期間 R_{ES} 集中在0.9附近

(晴天的比例較多)；而五角度實驗期間 R_{ES} 比較分散(陰晴天數接近)，造成整體功率平均值下降。

持續增加轉動的數量與減少每個轉動角度的間距，還是可以在晴朗無雲時更接近理論最大值。隨著轉動次數的增加，增益趨近於飽和值，但轉動機構的耗能增加，與機械壽命降低。綜合考慮這些因素後，本研究歸納出轉動五角度已經到達實際增益的高峰區，不需要再做更多的轉動。

6. 結 論

本研究首先建立日照度模型，並找出太陽能板的最佳仰角。接著建立一套固定型與一套追蹤型太陽光電系統。然後測量不同轉動次數時，兩系統發電量的比值。綜合本研究的主要成果如下：

- (1) 建立日照度模型：整合太陽位置、大氣質量及日照度的模型，可模擬出在不同轉動角度下的日照度。此模型的預測日照度模型在無雲的情況下與實測日照度誤差約 $\pm 5\%$ 。
- (2) 優化：依照模型的模擬，在苗栗市(緯度 24.54°)固定型太陽光電板的最佳仰角為

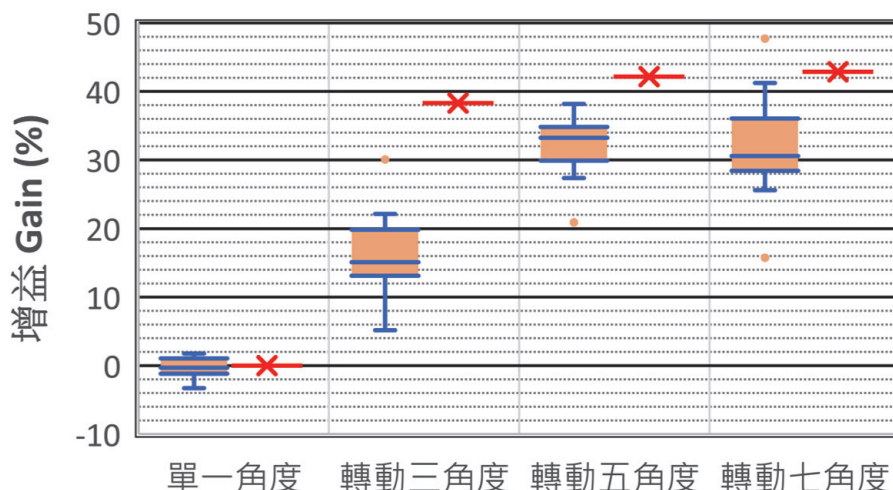


圖15 兩系統實測增益盒鬚圖與理論值(紅線與符號X)的比較

21.1°；與最佳值相差1%的區間為13°~29.4°。臺灣地區不同縣市可比照緯度的差值做調整。

- (3) 追蹤系統控制參數：實測日照度相對模型預測日照度的比值 R_{ES} 代表當日的雲量多寡。追蹤的條件為「預測日照度需大於120 W/m²且 $R_{ES} > 0.55$ 時才啟動追蹤」。
- (4) 最佳追蹤方式：比較轉動次數與發電量增益的關係，發現最佳追蹤方式是每日轉動五角度、間距30°；根據前述追蹤條件，平均增益可達35%。

本研究整體的結論可適用於臺灣地區。不過仍有未考慮周全的因素，例如：直射與漫射光的比例、太陽能板的溫度效應、大氣壓力以及溫濕度對於日照度模型的校正等。這些都需要額外的儀器設備，對商業經營的太陽光電廠而言會增加額外的費用與營運的困難。因此本研究採用最精簡的方式，即使沒有這些繁複的模型與設施，本研究的五角度轉動的設計案仍可以達到平均增益約35%，大幅提升太陽光電發電量與減碳效果，值得推廣使用。

致 謝

本研究之器材均為作者所屬之能源工程系採購之教學用設備，無其他研究經費補助。作者感謝三位審查委員的指教，使本文益增完善。

參考文獻

- 加速規，2021。<https://www.analog.com/en/products/adx1335.html>。搜尋日期：2021年8月10日。
- 全空日照計LPPyra-03AC，2021。<https://www.deltaohm.com/product/lppyra03-series-spectrally-flat-class-c-pyranometers/>。搜尋日期：2021年8月10日。
- 行政院，2021。綠能科技產業創新推動方案，<https://www.ey.gov.tw/achievement/212C54ECAD28A29E>。搜尋日期：2021年8月10日。
- 余民寧，2002。《教育測驗與評量：成就測驗與教學評量》，臺北：心理出版社股份有限公司。
- 能源局，2022a。《能源統計月報，11-2再生能源裝(設)置容量》。https://www.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/web_book/WebReports.aspx?book=M_CH&menu_id=142。搜尋日期：2022年2月13日。
- 能源局，2022b。《能源統計月報，10-4發電量_歷年》。https://www.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/web_book/Webreports.aspx?book=M_CH&menu_id=142。搜尋日期：2022年2月13日。
- 鍾佑貞，2021。《蔡總統：評估規劃2050年淨零碳排目標》，中央社新聞2021/4/22。<https://www.cna.com.tw/news/aip/202104220101.aspx>。搜尋日期：2021年8月10日。
- ADXL335，2021。<https://www.analog.com/en/products/adx1335.html#product-documentation>。搜尋日期：2021年8月10日。
- Antonanzas-Torres, F., R. Urraca, J. Polo, O. Perpiñán-Lamigueiro and R. Escobar, 2019, *Clear sky solar irradiance models: A review of seventy models*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 107: 374-387.
- Awasthi, A., A.K. Shukla, S. R. Murali Manohar, S. Dondariya, K. N. Shukla, D. Porwal and G. Richhariya, 2020. *Review on sun tracking technology in solar PV system*, Energy

- Reports, 6: 392-405
- Badescu, V., C. A. Gueymard, S. Cheval, C. Oprea, M. Baci, A. Dumitrescu, F. Iacobescu, I. Milos and C. Rada, 2013. *Accuracy analysis for fifty-four clear-sky solar radiation models using routine hourly global irradiance measurements in Romania*, Renewable Energy, 55: 85-103.
- Blanc, P., B. Espinar, N. Geuder, C. Gueymard, R. Meyer, R. Pitz-Paal, B. Reinhardt, D. Renné, M. Sengupta, L. Wald and S. Wilbert, 2014. *Direct normal irradiance related definitions and applications: The circumsolar issue*, Solar Energy, 10: 561-577.
- Blanc, P. and L. Wald, 2012. *The SG2 algorithm for a fast and accurate computation of the position of the Sun for multi-decadal time period*, Solar Energy Elsevier, 88: 3072-3083.
- Gueymard, C. A., 2012. *Clear-sky irradiance predictions for solar resource mapping and large-scale applications: Improved validation methodology and detailed performance analysis of 18 broadband radiative models*, Solar Energy, 86: 2145-2169.
- Gueymard, C., 1987. *An anisotropic solar irradiance model for tilted surfaces and its comparison with selected engineering algorithms*, Solar Energy, 38: 367-386.
- Gueymard, C. A., 2008. *REST2: High-performance solar radiation model for cloudless-sky irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation – Validation with a benchmark dataset*, Solar Energy, 82: 272-285.
- Huang, B. J., W. L. Ding and Y. C. Huang, 2011. *Long-term field test of solar PV power generation using one-axis 3-position sun tracker*, Solar Energy, 85: 1935-1944.
- Huang, B. J. and F. S. Sun, 2007. *Feasibility study of one axis three positions tracking solar PV with low concentration ratio reflector*, Energy Conversion and Management, 48: 1723-1280.
- iPVTracker, 2021。繩索機構。 <http://www.ipvtracker.com/>。搜尋日期：2021年 8 月 10 日。
- Kasten, F. and A. T. Young, 1989. *Revised optical air mass tables and approximation formula*. Applied Optics, 28(22): 4735.
- Meinel, A. B. and M. P. Meinel, 1976. *Applied solar energy*. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Co.
- Nsengiyumva, W., S. G. Chen, L. Hu and X. Chen, 2018. *Recent advancements and challenges in Solar Tracking Systems (STS): A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81-1: 250-279.
- Racharla S. and K. Rajan, 2017. *Solar tracking system– a review*, International Journal of Sustainable Engineering, 10: 2, 72-81, DOI: 10.1080/19397038.2016.1267816.

附錄：彙整每日實驗數據

欄位說明：

1. 角數：追蹤型轉動角度次數
2. E_{Pf} ：固定型的日累積發電量，以Wh為單位；公式(16)之分子。
3. E_{Pt} ：追蹤型的日累積發電量，以Wh為單位；公式(16)之分母。
4. R_{Etf} ：發電量比值，公式(16)。
5. E_{ex} ：實測日射能，以Wh為單位；公式(15)之分子。
6. E_{th} ：理論預測日射能，以Wh為單位；公式(15)之分母。
7. R_{ES} ：日射能比值，公式(15)。

編號	角數	月	日	E_{Pf} (Wh)	E_{Pt} (Wh)	R_{Etf}	E_{ex} (Wh)	E_{th} (Wh)	R_{ES}
1	1	3	23	69.2	78.1	0.886	1120.1	3437.7	0.326
2	1	3	24	53.2	53.8	0.989	605.1	2098.3	0.288
3	1	3	25	349.5	354.0	0.987	6457.1	6393.2	1.010
4	1	3	26	315.2	315.3	0.999	5878.2	6401.4	0.918
5	1	3	27	302.3	297.1	1.018	5572.8	6371.1	0.875
6	1	3	28	271.5	268.4	1.012	5037.6	6394.6	0.788
7	1	3	29	240.3	238.7	1.006	4386.9	5952.3	0.737
8	1	3	30	136.9	137.3	0.997	2427.4	5720.9	0.424
9	1	3	31	167.3	167.3	1.000	2961.8	6057.2	0.489
10	1	4	1	85.6	86.2	0.993	1291.3	4222.5	0.306
11	1	4	2	289.3	284.9	1.015	5361.9	6432.0	0.834
12	1	4	3	233.6	234.9	0.995	4307.4	6259.7	0.688
13	1	4	4	189.0	188.4	1.003	3346.5	6128.4	0.546
14	1	4	5	295.3	299.1	0.987	5448.0	6447.1	0.845
15	1	4	6	312.0	322.5	0.967	5946.2	6444.8	0.923
16	1	4	7	208.8	210.8	0.991	3772.2	6458.8	0.584
17	1	4	9	62.8	66.7	0.941	993.2	4411.8	0.225
18	3	4	10	86.6	134.4	0.645	2251.5	5528.4	0.407
19	3	4	11	93.8	152.2	0.616	2656.3	6023.0	0.441
20	3	4	13	265.3	231.8	1.144	4265.5	6137.5	0.695
21	3	4	14	92.7	105.0	0.882	1721.6	5311.6	0.324
22	3	4	15	133.7	206.7	0.647	3697.5	6085.8	0.608
23	3	4	16	246.7	234.6	1.052	4245.6	5861.1	0.724
24	3	4	17	233.8	198.7	1.177	3554.4	5654.0	0.629
25	3	4	18	153.4	164.2	0.934	2827.8	5991.4	0.472
26	3	4	19	271.7	243.5	1.116	4502.9	6347.8	0.709
27	3	4	20	378.4	309.9	1.221	5898.0	6495.2	0.908

28	3	4	22	271.9	236.2	1.151	4401.7	5938.7	0.741
29	3	4	23	218.9	179.4	1.220	3196.0	5541.0	0.577
30	3	4	24	343.8	307.1	1.119	5741.7	6384.8	0.899
31	3	4	29	51.6	70.0	0.738	1067.9	4449.3	0.240
32	3	4	30	346.5	266.3	1.301	4975.1	5701.5	0.873
33	3	5	1	261.6	225.5	1.160	4117.2	6465.4	0.637
34	3	5	2	311.8	272.8	1.143	5070.3	6370.7	0.796
35	3	5	3	144.8	152.7	0.948	2561.1	5839.4	0.439
36	5	5	4	162.3	153.4	1.058	2691.6	5367.6	0.501
37	5	5	5	109.5	111.2	0.985	1785.0	4437.6	0.402
38	5	5	6	378.1	293.7	1.287	5550.2	6222.5	0.892
39	5	5	7	389.1	291.6	1.334	5531.3	6300.0	0.878
40	5	5	8	211.3	165.9	1.274	2851.3	4697.5	0.607
41	5	5	9	318.7	263.6	1.209	4951.6	6338.2	0.781
42	5	5	10	385.0	289.4	1.330	5526.0	6392.0	0.865
43	5	5	11	382.2	293.2	1.304	5620.2	6353.2	0.885
44	5	5	12	434.0	315.3	1.377	6036.0	6401.6	0.943
45	5	5	13	402.0	299.1	1.344	5719.3	6341.0	0.902
46	5	5	14	373.0	278.5	1.339	5274.8	6173.6	0.854
47	5	5	15	415.2	305.3	1.360	5881.2	6360.1	0.925
48	5	5	16	433.2	313.5	1.382	6030.1	6388.3	0.944
49	5	5	17	375.8	288.4	1.303	5463.0	6336.4	0.862
50	7	5	18	291.7	252.0	1.158	4761.8	6288.5	0.757
51	7	5	19	382.3	291.9	1.310	5602.4	6288.1	0.891
52	7	5	20	315.2	250.1	1.260	4689.2	6281.2	0.747
53	7	5	21	336.7	247.1	1.363	4627.7	6286.5	0.736
54	7	5	22	277.1	220.6	1.256	4075.9	6317.6	0.645
55	7	5	23	392.0	294.3	1.332	5594.0	6278.2	0.891
56	7	5	24	402.0	312.1	1.288	5982.6	6344.4	0.943
57	7	5	25	396.8	293.0	1.354	5625.8	6339.0	0.888
58	7	5	26	414.8	301.4	1.377	5837.9	6264.0	0.932
59	7	5	27	384.6	298.3	1.289	5702.7	6330.4	0.901
60	7	5	28	325.4	250.0	1.302	4735.1	5433.1	0.872
61	7	5	29	101.5	68.7	1.477	1029.2	1598.9	0.644
62	7	5	30	98.3	97.6	1.008	1526.7	3183.1	0.480
63	7	5	31	35.2	38.7	0.909	534.5	1739.3	0.307
64	7	6	1	159.6	153.1	1.042	2675.0	5590.0	0.479
65	7	6	2	345.5	269.3	1.283	5085.7	6276.3	0.810
66	7	6	3	188.3	133.3	1.412	2488.9	2972.7	0.837

Simulation and Measurement of the Performance of A Single-Axis Tracking Photovoltaic System

Ming-Huey A. Huang^{1*} Rui-Bin Jian²

ABSTRACT

Solar power is an essential source of renewable energy. Fixed-tilt photovoltaic systems are affected by the cosine effect and consequently, their power varies with the angle of the sun. This problem can be addressed with tracking-type systems at the cost of additional energy consumption, increased mechanical complexity, and reduced weather resistance. To maximize the electricity production of photovoltaic systems, this study conducted simulation and actual experiments for comparing fixed-tilt and single-axis solar tracking systems. In the simulation, the SG2 algorithm was used to calculate the sun position, followed by determining the air mass, solar irradiance, and solar panel output power. The simulation model was then used to compute the optimal elevation angle for maximizing the annual production of solar panels. The research site was located in Miaoli City, Taiwan (latitude of 24.54°), where the optimal elevation angel ranged between 13.0° and 29.4°. Regarding the actual experiment, a fixed-tilt system and a single-axis solar tracking system were built, each of which were controlled with an Arduino module for data collection and transmission to a network database. The result analysis first compared the daily power output of the two systems under the same elevation angle and weather condition (sunny) to calibrate the system efficiency. Next, the measured irradiance was compared with the simulated value to ensure that the error between them was approximately $\pm 5\%$. The goal of the experiment was to measure the net electricity production under different rotation times (3, 5, and 7) and compute the ratio between the measured and simulated production. The results revealed that this ratio approximated the ideal maximum value as the number of rotations in a sunny day increased. Accordingly, a simple condition for controlling the tracking system based on cloud cover was proposed. In practice, the mean gain and cost–performance ratio generated from five rotations peak stably under different levels of cloud cover.

Keywords: Photovoltaic system power production, Solar irradiance models, Solar panels elevation angle, System optimization, Tracking solar energy.

¹ Associate Professor, Department of Energy Engineering, National United University.

² Master student, Department of Energy Engineering, National United University.

*Corresponding Author, Phone: +886-37-382388, E-mail: mahuang@nuu.edu.tw

Received Date: March 4, 2022

Revised Date: July 19, 2022

Accepted Date: August 8, 2022