

太陽追蹤器簡介

戴振宇 林志光

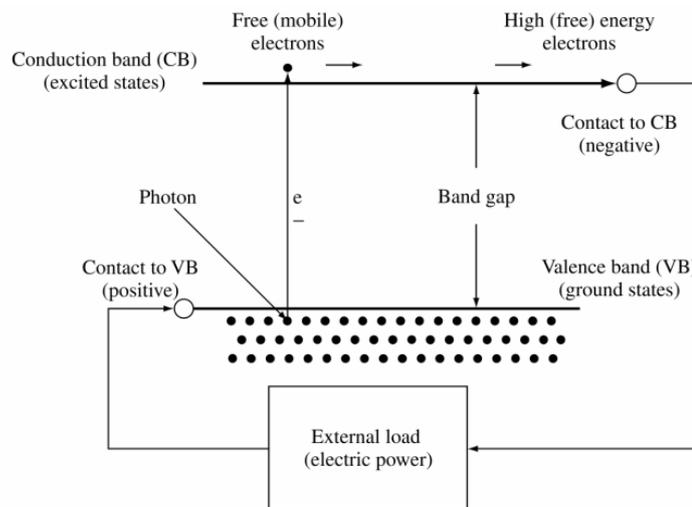
國立中央大學 機械工程學系

32001 桃園縣中壢市中大路 300 號

一、前言

由於石化能源近年來逐漸枯竭且大量消耗石化能源所產生的汙染日益嚴重，也為環境帶來巨大的傷害，因此，有效的利用再生能源以減少石化能源的消耗與汙染成為了各方所關注的議題。再生能源包括太陽能、風力、氫能、地熱等，來自於大自然中的能量皆是取之不盡的，在各種再生能源中，太陽能極具發展潛力，若以其分佈範圍與能量轉換的過程來看，太陽能可以說是最廣泛也是最基礎的能量形式。

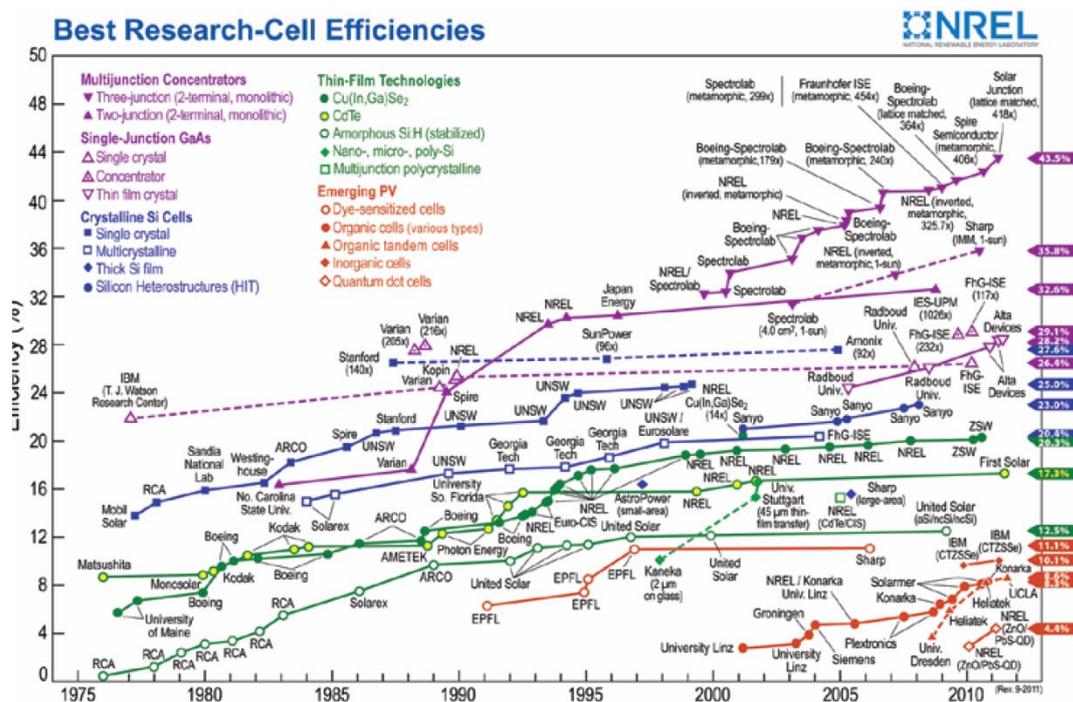
太陽能發電主要是利用太陽電池中的半導體材料將光能轉換成電能，如圖一[1]所示。



圖一、太陽電池發電過程[1]。

當太陽光照射到太陽電池，太陽光子撞擊太陽電池中的價電子，使價電子打破鍵結並激發至導電帶，在價電子放電過後又會回到未激發的狀態。由於一個太陽電池只能產生幾瓦的電力，因此太陽電池必須以串-並聯的方式來產生足夠的功率以應付高功率的應用。現今應用最廣的矽太陽電池(silicon-base solar cell)和效率最高的三五族多接

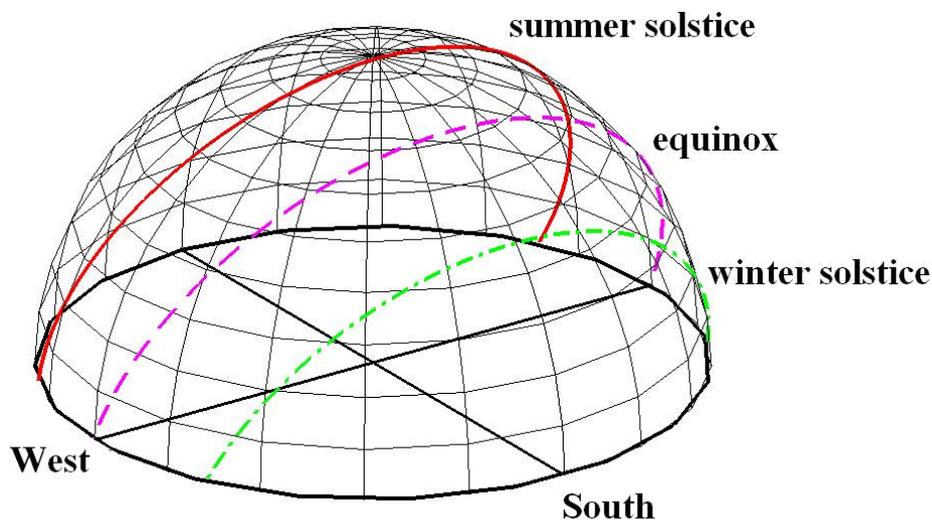
面太陽電池(III-V multi-junction solar cell)運用的都是上述的發電過程。圖二[2]展示了各種太陽電池的發展年帶與光-電轉換效率，以效率比較從較低的有機(organic)電池(8%)、染料敏化(dye-sensitized)電池(11.1%)、非晶矽電池(12%)、薄膜矽(thin-Si)電池(16%)、CdTe 電池(17.3%)、Cu(InGa)Se₂ 電池(20.3%)、多晶矽(20.4%)、單晶矽電池(27.6%)到效率最高的三五族多接面太陽電池(42.3%)，其中三五族多接面太陽電池自 1989 年以後的效率大幅躍升也遠高於其他太陽電池，因此最具有發展潛力 [2]。



圖二、各種電池的發展與效率紀錄[2]。

雖然太陽照射的範圍廣且不受區域的限制，但太陽能日照量不平均且隨時間不同而改變，圖三[3]以中壢地區為例呈現太陽位置於地平座標中的結果，日期分別為2009年夏至(6/21)、秋分(9/22)與冬至(12/21)，而春分的太陽位置與秋分類似故不列出，其時間設定範圍為當天的日出至日落時間[3]。若以固定式的太陽能發電系統，其輸出功率將會受到太陽光照射太陽電池模組的角度影響，導致太陽能發電系統無法持續產生最大的輸出功率，因此若要維持太陽電池模組長時間能保持最大發電效率，則必須

使太陽能電池模組隨不同季節與時間調整太陽光入射電池模組的角度，使其正對太陽的入射光。而太陽追蹤器則能有效的讓太陽光的入射角與太陽能電池模組受光面垂直，以減少入射光隨時間改變改變角度的影響，進而提升太陽能發電系統的總發電量。



圖三、中壢地區夏至、秋分與冬至時，太陽在天球地平座標中的位置[3]。

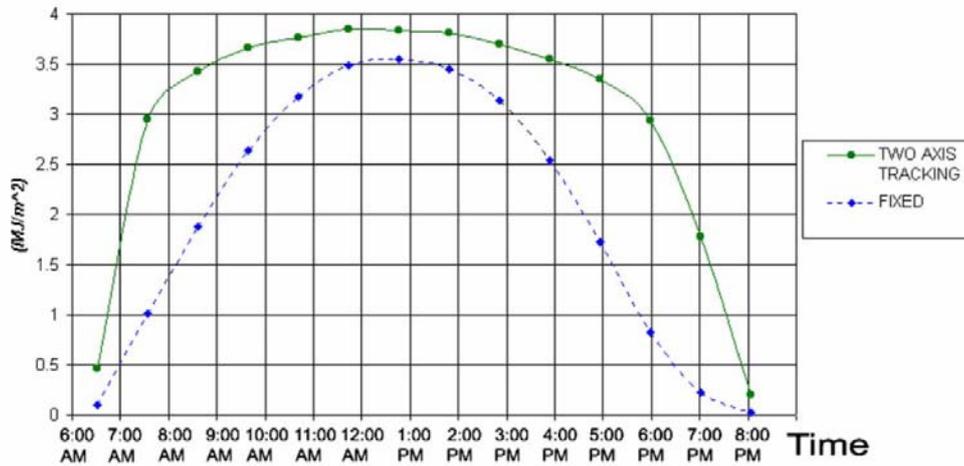
二、 太陽追蹤器介紹

太陽追蹤器主要是用來使太陽能電池維持在正對太陽光的方向，使太陽能電池維持在最大的發電效率，而太陽追蹤器的精度則對於發電效率具有相當大的影響。在設計階段，太陽追蹤器的控制法與太陽追蹤器的結構設計是兩個影響追蹤器精度的重要因素。

2.1 太陽追蹤器結構設計

太陽追蹤器的結構設計是根據轉軸的數量與定位、驅動類型與支撐結構來做區分，包括固定式、單軸、雙軸太陽追蹤器三類[4-7]。其中，雙軸式太陽追蹤器由於可以控制方位角及仰角追蹤太陽的位置，因此接收到太陽輻射的量是最大的。圖四為對固定式與雙軸式太陽能發電系統進行能量收集的比較[8]，其數據為架設於太陽發電系統上的日射強度計(pyranometer)實驗數據，由結果可以看出搭配雙軸式太陽追蹤器

可以有效增加照在太陽能板上的輻射量，其收集之總太陽輻射量約比搭配固定式的追蹤器所收集的高出40%。



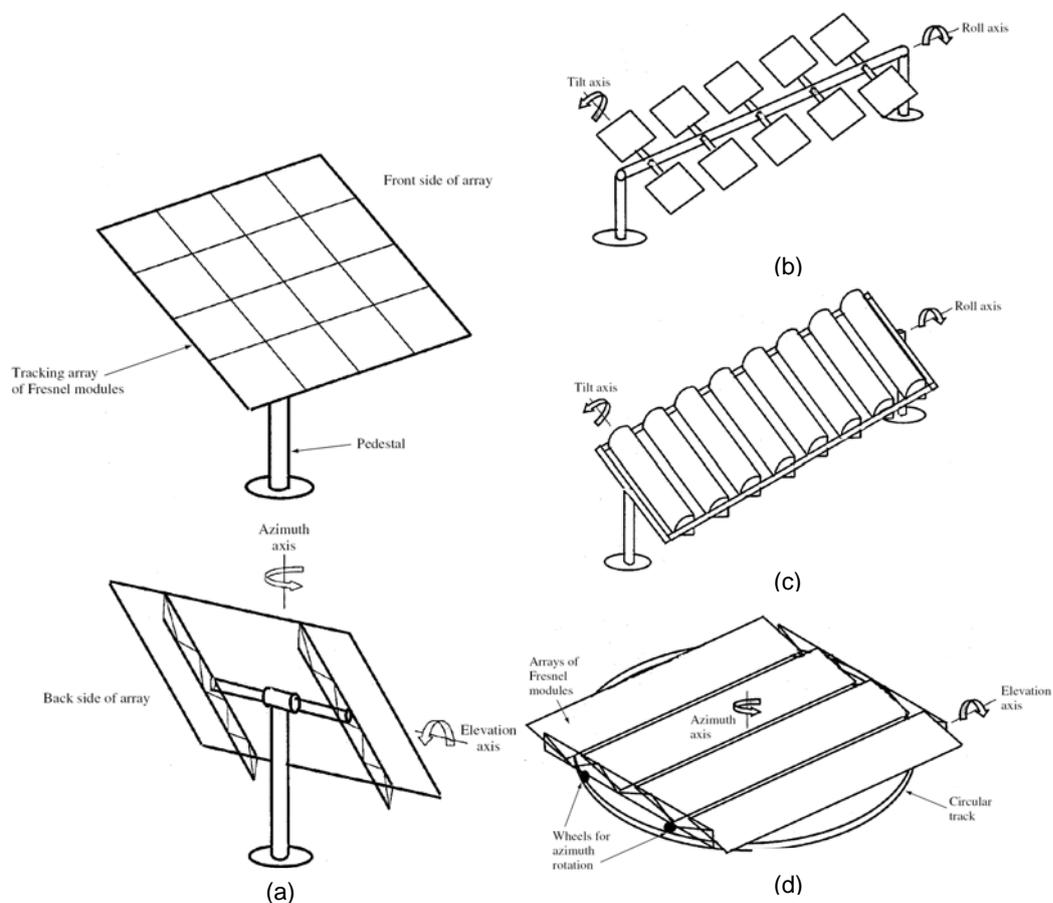
圖四、固定式與雙軸式太陽能發電系統進行能量收集之比較[8]。

較常見的雙軸式太陽追蹤器大致可分為三種，包括立柱式(pedestal form)追蹤機構、傾轉式(roll-tilt form)追蹤機構、圓盤式(turn table form)追蹤機構，如圖五所示[9]。第一種立柱式追蹤機構主要是在主柱和架在主柱上的扭力管上分別設置轉軸機構來達成方位角及仰角的追蹤方式[10]，如圖五(a)，雖然此種型式方便安裝，但在受風力影響時轉軸機構易產生一相當大的扭矩[11]。第二種為傾轉式追蹤機構，此類型的追蹤器上面可放置許多太陽能模組，其傾角轉軸(roll axis)必須安裝於平行地球極軸的方向，且傾角轉軸必須傾斜一個等於當地緯度的角度[9]，如圖五(b)及(c)，此種機構雖然受風力影響較小，但設計時需花費較多的軸承及材料。第三種為圓盤式追蹤機構，如圖五(d)，通常為大型機構使用，其高度遠小於其他兩種，因此其受風力影響最小[12]，但在安裝時有較複雜的安裝要求。

2.2 太陽追蹤器控制法

在太陽追蹤器的控制法方面，主要分為被動式追蹤及主動式追蹤。被動式追蹤是利用開迴路，而主動式追蹤是利用閉迴路[13]。開迴路是根據太陽與地球間的天體運

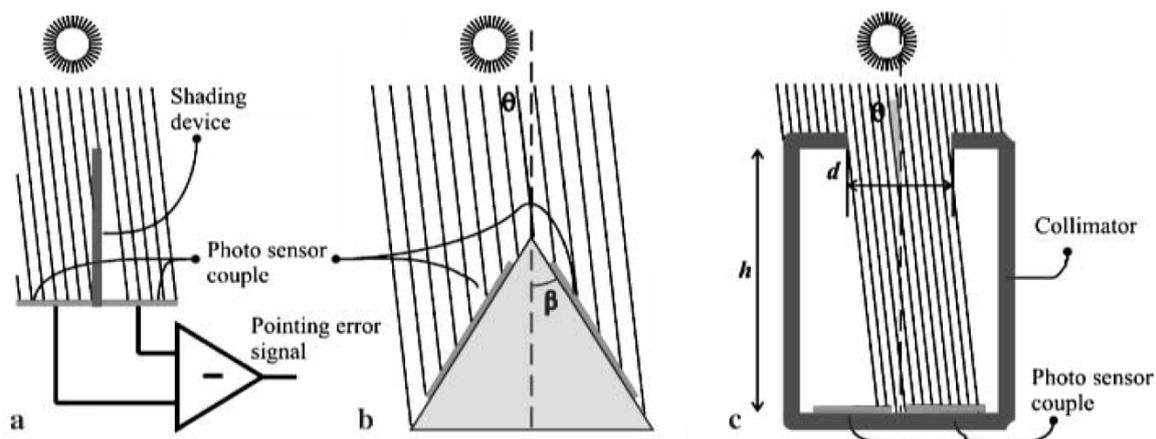
行關係，計算出各時間地點太陽在天球中的位置，以此計算結果命令追蹤器指向計算出的太陽位置，達到追蹤太陽的目的。開迴路的優點是不會因為天候狀況而影響到追



圖五、常見的三種雙軸型太陽追蹤器[9]。

蹤精度，也不須以人力定期維護感光器的清潔，但其追蹤精度易受到計算公式、追蹤誤差及馬達控制的影響而造成追蹤失準[12]。雖然目前太陽位置計算程式的運算結果精確度極高，但追蹤結構製造及安裝的誤差才是造成開迴路追蹤誤差的主要原因。而閉迴路是使用光感應器來尋找太陽在空中的位置，來達到追蹤太陽的目的，此追日方法較簡單。閉迴路的問題在於追蹤精度易受光感應器靈敏度(表面髒污)與天候狀況(雲層遮蔽)影響，在天候狀況不穩定時會引起不小的追日偏差[3]。圖六為三種光感應器的形式[12]，其皆是藉由追蹤器偏差時造成的光照射不平均來判斷驅動方向，使追蹤指向太陽，型式(a)中間放置一遮光元件來實現此設計[12]，型式(b)則以金字塔形狀來

增加光照差異度，型式(c)是讓光通過視準管照在其底部的感光面上，此設計可減少散射光的干擾。除了上述兩種之外，也可結合此兩種方法，使用光感應器追蹤太陽位置，當氣候不佳時切換為開迴路。或是先使用開迴路方法，命令追蹤器指向約略的太陽位置，再切換為閉迴路做小範圍的精確微調指向[4,10]。



圖六、閉迴路光感應器設計[12]。

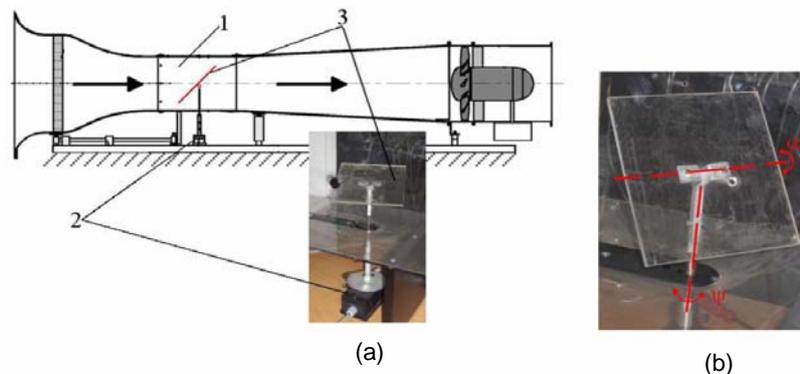
三、 太陽追蹤器結構分析

太陽追蹤器的追蹤精度對於太陽電池發電效率具有相當大的影響，以聚光型太陽發電系統(high concentrated photovoltaic)為例，太陽追蹤器的追蹤誤差一般應在 0.5° 之內，若追蹤誤差大於 0.5° ，則太陽電池的發電效率會低於最大發電效率的90%[10,12]。因此，對於太陽追蹤器的誤差評估在設計階段是一個十分重要的議題，而太陽追蹤器的誤差來源主要有追蹤器結構變形、減速齒輪的間隙、控制程式、安裝過程等方面所造成的誤差[4]。太陽能發電系統的重量與風力的作用是太陽追蹤器結構變形的兩大主要原因，由於太陽能發電系統的結構龐大造成本身的重量對太陽追蹤器結構是個相當大的負擔，使得追蹤器結構變形會影響追蹤精度，另外，在受風時由於太陽電池模組的迎風面積相當大，對轉軸機構易產生一相當大的扭矩，因此風壓對太陽追蹤器所造成的變形亦不容小覷。在分析追蹤器的結構變形時，太陽追蹤器的自重影響與風力的作用為主要的分析狀況，分析時會分為風場與結構兩個部分，首先將太陽能發電系

統放置於風場中，接下來觀察風壓在太陽能發電系統上的分布情況，最後將得到的風壓資料應用在結構分析當中，藉此求得太陽追蹤器的受力與變形情況，並以這些資料評估太陽追蹤器之追蹤誤差是否會影響此太陽能發電系統的發電效率。在分析太陽追蹤器的結構，實驗以及模擬的方法都有許多人做過嘗試。

3.1 追蹤器結構實驗分析

由於在自然界中，風向、風速、雷諾數、渦流、紊流強度等皆是隨時間變化且難以預估的，因此要在太陽追蹤器一般操作情況下，進行風力對太陽追蹤器的作用實驗是相當困難的，因此許多實驗皆在風洞中進行。Velicu等人[14]利用風洞實驗來做追蹤器的受力分析，在型號HM 170的風洞中放入等比例縮小的追蹤器模型，並於模型底部連接力量感測器來量測追蹤器模型不同方向的受力情況，模型的仰角及方位角可以隨實驗要求而變化，實驗構造如圖七所示。圖七(a)中1為量測區，2為力量感測器，3為縮小後的追蹤器模型。



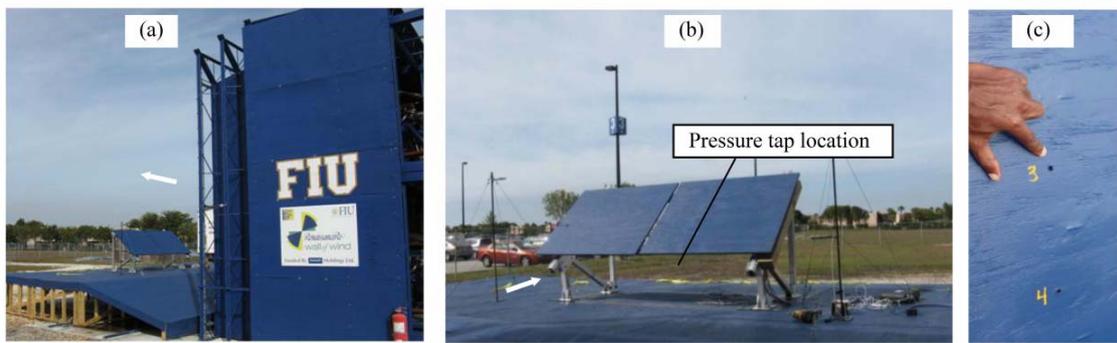
圖七、HM170風洞與追蹤器模型外觀[14]。

並定義力量係數：

$$c_f = \frac{F_n}{\frac{1}{2} \rho A_p v^2} \quad (1)$$

在式(1)中， F_n 為平板上的正向力， ρ 為空氣密度， A_p 為平板的面積， v 為實驗風速 [14]。由實驗結果可以發現當風速上升，力量係數會逐漸下降並趨於穩定，此外，當平板與風向間的夾角變大，不同角度的力量係數將彼此接近並且會出現較大的值 [14]。

除了用等比例縮小的模型外，Bitsuamlak 等人 [15] 亦利用原尺寸的模型來量測追蹤器受風時的風壓分布情況，如圖八所示，其利用模型上之測壓孔來量測各位置受風時的壓力，並將結果與 CFD (computational fluid dynamics) 軟體之分析結果做比較。



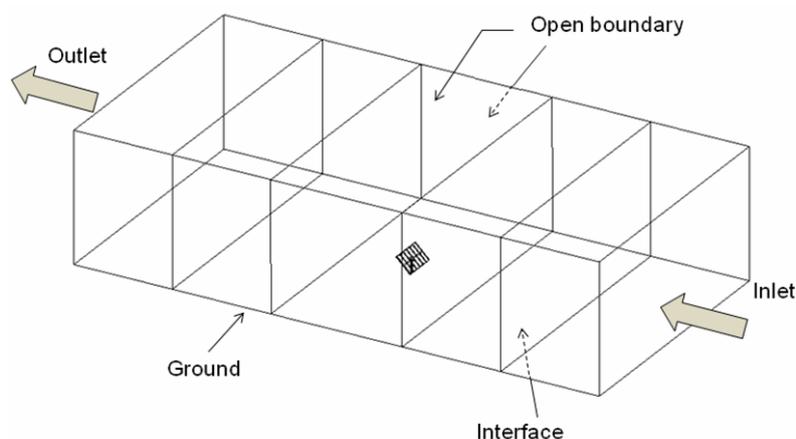
圖八、原尺寸風洞實驗(a)模型與風洞外觀；(b)測壓孔分布；(c)測壓孔外觀 [15]。

3.2 追蹤器結構模擬分析

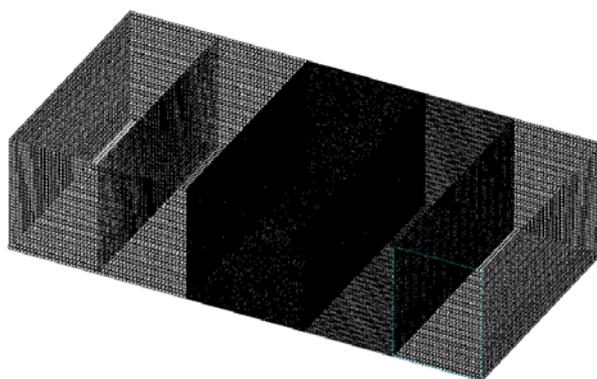
除了以風洞實驗來分析太陽追蹤器的結構外，由於近年來有限元素分析軟體日益成熟，因此以有限元素分析軟體來分析太陽追蹤器亦是可行的方法之一。以有限元素分析軟體來模擬太陽追蹤器，其優勢在於成本相較風洞實驗低且所花費的時間較風洞實驗亦少得多。以有限元素分析軟體來分析太陽追蹤器須先完成追蹤器在風場中的風壓模擬，再將模擬得到的風壓匯入結構模擬當中並加入重力作用，以此得到太陽追蹤器之受力情形，接下來將以一太陽追蹤器之模擬來做為流程說明。

首先在風場模擬部分可利用 CFD 軟體來做風壓分析，其邊界可設定為與太陽追蹤器實際操作狀況相同來做分析，不會因風洞的可操作範圍有所限制而造成與太陽追蹤器實際操作不符的情況出現，其邊界條件設定如圖九所示。圖中，Inlet 設定為風入口；Outlet 設定為風出口；底部設定為地面；其餘面由於太陽追蹤器在操作時皆在開放式

的空間，因此設定為Open boundary; Interface則是為了方便網格操作對風場切割所造成，並不影響分析結果。



圖九、太陽追蹤器之風場模擬邊界設定。

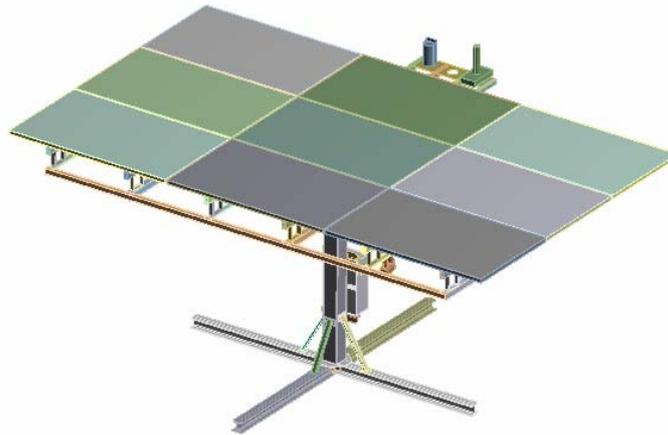


圖十、CFD模型網格分布情形。

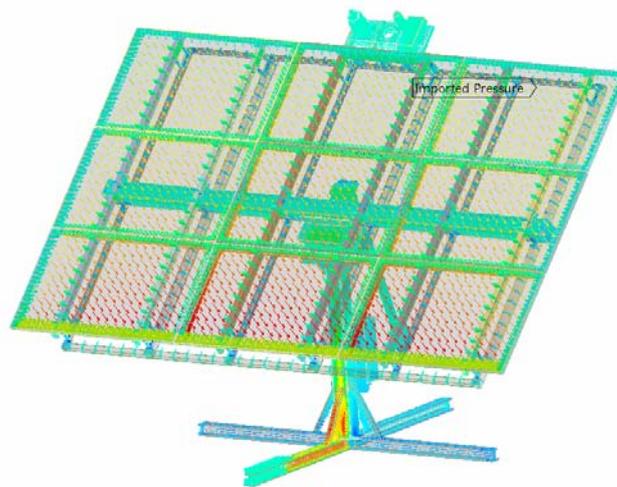
完成風壓分析後再將風壓匯入到太陽追蹤器結構模型(圖十一(a))當中，匯入後風壓於太陽追蹤器模型上之分布情況如圖十一(b)所示。藉此求出太陽追蹤器在受自重以及風力作用下的受力與變形情況，並以這些分析結果評估太陽追蹤器之追蹤誤差是否會影響此太陽能發電系統的發電效率。

四、 太陽追蹤器振動分析

風力對太陽追蹤器的影響除了風壓所造成的變形外，風是否會對此太陽追蹤器造成共振效應也是在設計階段必須討論的重點之一。共振是指當一結構體在特定頻率下，以最大振幅做振動的情形，此振動情況對結構體容易產生破壞。



(a)



(b)

圖十一、(a)太陽追蹤器結構分析用模型；(b)風壓於太陽追蹤器模型分布情況。

當結構體受外力作用，而此作用的外力突然消失，此結構將在其平衡位置上擺動，這種情況稱為結構體的自由振動，而此時的振動頻率稱為自然振動頻率(natural frequency)。太陽追蹤器在受風力作用下，若此時風的風向與頻率皆符合此太陽追蹤

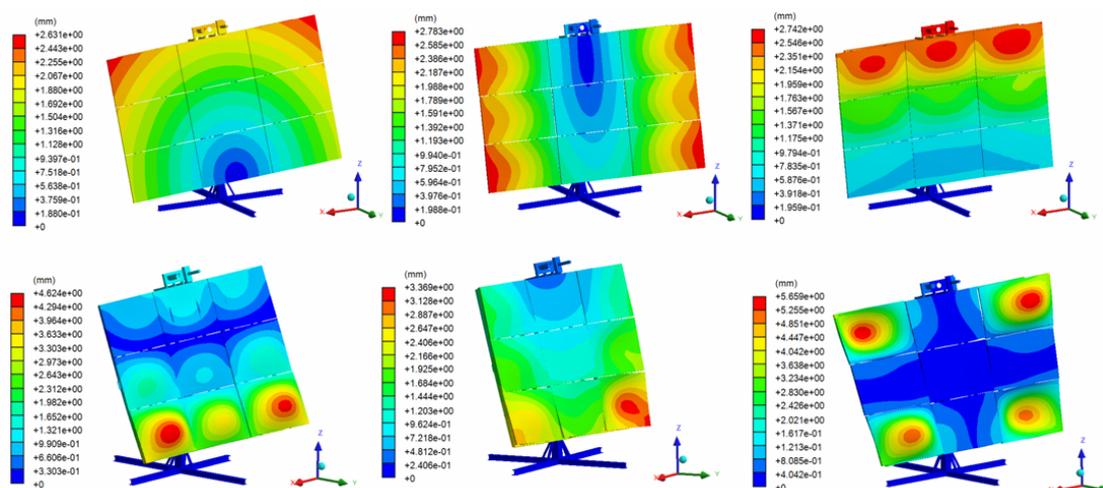
器的自然振動頻率，則此太陽追蹤器便有可能產生共振進而受到破壞，因此，太陽追蹤器的自然頻率必須避免與風的頻率落在同一範圍內。太陽追蹤器的運動方程式可表示如下[16]:

$$[m]\ddot{x} + [c]\dot{x} + [k]x = F(t) \quad (2)$$

式中， $[m]$ 、 $[c]$ 與 $[k]$ 分別為質量、阻尼與剛性矩陣， x 、 \dot{x} 與 \ddot{x} 分別為位移、速度以及加速度， $F(t)$ 為隨時間變化之外力。而在計算太陽追蹤器結構之自然振動時其阻尼與外力暫不考慮，因此運動方程式可簡化如下:

$$[m]\ddot{x} + [k]x = 0 \quad (3)$$

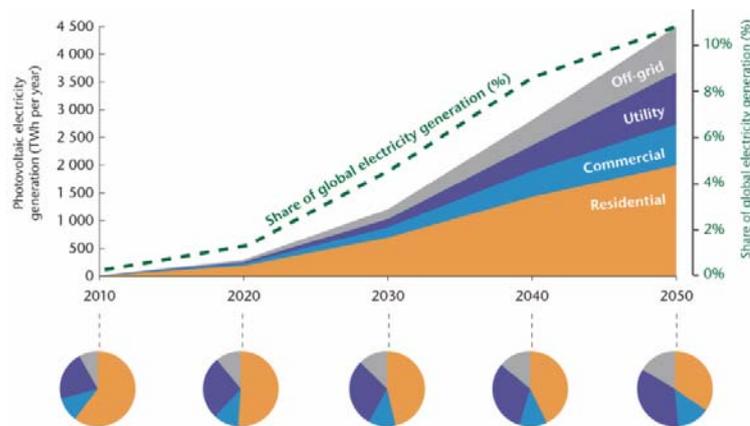
最後求出此方程式的特徵值與特徵向量，特徵值為此太陽追蹤器的自然振動頻率值，特徵向量為此追蹤器之振動模態。在求太陽追蹤器之自然振動頻率時，有限元素分析軟體為一相當有用的工具，圖十二為利用有限元素分析軟體所求得之一太陽追蹤器的振動模態(模態一至模態六)。



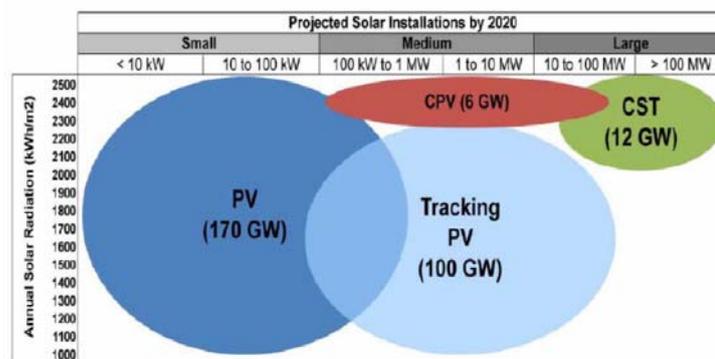
圖十二、有限元素分析軟體所求得之太陽追蹤器的振動模態。

五、 結語

根據 IEA(International Energy Agency)的預估至 2050 年全球將有 11%的發電量來自於太陽光電[17]，圖十三[17]為太陽光電的市場趨勢與不同用途的長期預估，如圖中所示，不論是哪種用途，利用太陽光電所產生的電力皆隨時間而不斷上升，可見太陽能為深具發展潛力的再生能源之一。圖十四為各種不同太陽能發電系統到 2020 年的預估安裝量[18]，根據太陽能發電系統所在地之年日照量不同，所安裝的發電系統亦有所不同，小、中、大發電量之發電系統預估量如圖十四所顯示，可以看出在中型太陽能發電系統的市場中，配備有太陽追蹤器的太陽能發電系統將會是市場的大宗。因此，高效率、高可靠度、易組裝、易維護及低成本是未來開發太陽追蹤器所要積極達成的目標，而結構設計與分析在這當中將扮演非常重要的角色。



圖十三、太陽光電的市場趨勢與用途的長期預估[17]。



圖十四、各種不同太陽能發電系統到 2020 年的預估安裝量[18]。

六、參考文獻

1. R. A. Messenger and J. Ventre, *Photovoltaic Systems Engineering*, 2nd Ed., CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 2003.
2. K. Ardani and R. Margolis, "2010 Solar Technologies Market Report," <http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/51847.pdf>, National Renewable Energy Laboratory, accessed on August 22, 2012.
3. 劉智維, "以指向誤差修正技術應用在追日精度改進," 國立中央大學能源工程研究所碩士論文, 2010.
4. F. R. Rubio, M. G. Ortega, F. Gordillo, and M. López-Martínez, "Application of New Control Strategy for Sun Tracking," *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, pp. 2174-2184, 2007.
5. P. Roth, A. Georgiev, and H. Boudinov, "Design and Construction of a System for Sun Tracking," *Renewable Energy*, Vol. 29, pp. 393-402, 2004.
6. P. Roth, A. Georgiev, and H. Boudinov, "Cheap Two Axis Sun Following Device," *Energy Conversion and Management*, Vol. 46, pp. 1179-1192, 2005.
7. N. H. Helwa, A. B. G. Bahgat, A. M. R. E. Shafee, and E. T. E. Shenawy, "Maximum Collectable Solar Energy by Different Solar Tracking Systems," *Energy Sources*, Vol. 22, pp. 23-34, 2000.
8. S. Abdallah and S. Nijmeh, "Two Axes Sun Tracking System with PLC Control," *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, pp. 1931-1939, 2004.
9. A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, England, 2003.
10. K. K. Chong and C. W. Wong, "General Formula for On-Axis Sun-Tracking System and its Application in Improving Tracking Accuracy of Solar Collector," *Solar Energy*, Vol. 83, pp. 298-305, 2009.
11. I. Lague-Heredia, P. H. Magalhães, G. Quéméré, R. Cervantes, J. M. Moreno, and O. Laurent, "CPV Tracking System: Performance Issues, Specifications and Design," in *Proceeding of the 4th International Conference on Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen*, San Lorenzo del Escorial, Spain, March 12-16, 2007.
12. A. L. Luque and V. M. Andreev, *Concentrator Photovoltaics*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2007.

13. A. Luque, G. Sala, and I. Lague-Heredia, "Photovoltaic Concentration at Onset of its Commercial Deployment," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol. 14, pp. 413-428, 2006.
14. R. Velicu, G. Moldovean, I. Scaletchi, and B.R. Butuc, "Wind Loads on an Azimuthal Photovoltaic Platform. Experimental Study," in *Proceeding of International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Granada, Spain, March 23-25, 2010.
15. G. T. Bitsuamlak, A. K. Dagnew, and J. Erwin, "Evaluation of Wind Loads on Solar Panel Modules Using CFD," in *Proceeding of the 5th International Symposium on Computational Wind Engineering*, Chapel Hill, North Carolina, USA, May 23-27, 2010.
16. S. S. Rao, *Mechanical Vibrations*, 4th Ed., Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA, 2004.
17. N. Tanaka, "Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy," http://www.iea.org/papers/2010/pv_roadmap.pdf, International Energy Agency, accessed on August 19, 2012.
18. N. Naeni and M. Yaghoubi, "Analysis of Wind Flow Around a Parabolic Collector: (1) Fluid Flow," *Renewable Energy*, Vol. 32, pp. 1898-1916, 2007.