

太陽能追日系統之研究：第二篇：雙軸及單軸追日系統

Study on a solar tracking system: part II: the two-axis and one-axis tracking system

林文德 劉宏益 黃聖澤 林俊銘 李明博 卓胡誼
Jiun-Ming Lin Hung-Yi Liu Sheng-Tse Huang Jiun-Ming Lin Ming-Po Li Yi Jwo-Hwu

崑山科技大學電機系
Department of Electrical Engineering
Kun Shan University of Technology

摘要

本文將前一篇論文所整理歸納出太陽磁偏角、時角、入射角以及方位角的計算公式，應用於雙軸及單軸追日系統，用以提升太陽能發電系統的效率。

Abstracts

In this paper, the calculation formulas for the solar declination, the hour angle, the zenith angle, and azimuth angle are applied to the two-axis and one-axis tracking system in order to increase the efficiency of the photovoltaic solar energy system.

關鍵詞：太陽軌跡，雙軸追日系統，單軸追日系統

Keywords: The solar trajectories, the two-axis tracking system, the one-axis tracking system

一、實驗系統簡介

太陽能追日系統的主要目的是隨時讓太陽能光電板與陽光保持垂直，以便於在單位面積內能吸收到最多的太陽能。為了達到此一目的，我們製作了如圖一所示的實驗系統，共有三個可以調整的軸，X 軸主要是調整太陽能光電板呈水平，或是朝南傾斜，Y 軸主要是調整太陽能光電板呈水平，或是朝東傾斜，或是朝西傾斜，Z 軸主要是調整太陽能光電板正面朝南，或是往東旋轉，或是往西旋轉。雖然本實驗系統設計了三個可以調整的軸，但是，事實上，只要調整 X 軸與 Z 軸，就可以達到使太陽能光電板與陽光保持垂直的目的。不過，調

整 X 軸與 Y 軸並不需要負擔整個系統的重量，較為省能，而調整 Z 軸，則必須把整個系統旋轉，需要負擔整個系統的重量，較為耗能。因此，本實驗系統特別設計了三個可以調整的軸，以便進行不同軸的追日方式，比較其優劣點，供後續相關研究者做為參考。

因為電阻消耗的功率為電壓的平方除以電阻值，而本實驗系統採用的是 100Ω 純電阻的固定負載，因此，發電量與電壓的平方成正比，所以，為了方便起見，以量測跨於電阻上的電壓來進行實驗。

雖然參考文獻[6]已經突顯於不同日照強度時，適當調整負載值可獲較大發電量，不過，一方面礙於經費有限，另一方面，為了簡化問題的複雜度，因此，在本研究中，只考慮固定負載的情況。

二、X 軸與 Z 軸的追日模式

參考文獻[10]已經推導得知：只要將 X 軸調整到入射角，Z 軸調整到方位角，就可以達到使太陽能光電板與陽光保持垂直的目的。雖然我們可以一直進行調整，不過，因為太陽能光電板的重量相當重，一片可發電 100W 的太陽能光電板約重達 10 公斤，1KW 的系統，再加上支架之後，其重量將超過 100 公斤，如果採用一直進行調整的方式，則增加的發電量可能反而比為了調整所耗費的電量還少。因此，在本節的實驗中，採用每一個小時調整一次的方式。此外，為了瞭解追日的效益，將與固定系統進行比較，一般認為固定系統採朝南，傾斜角與當地緯度相同較佳，而台南的緯度為 23 度，因此，基準模式為：朝南，傾斜角 23 度的固定系統。

現以七月二十四日所測量的 X、Z 軸追日模式與朝南，傾斜角 23 度固定系統的基準模式進行比較。由前一篇論文所推導的公式，可計算出七月二十四日每一個小時的入射角、方位角與時角，詳列於表一。表二則為每一個小時 X、Z 軸追日模式與基準模式的電壓值，以及電壓平方和的值，用來代表發電量。結果顯示，X、Z 軸追日模式的發電量(1920.53)是基準模式發電量(1347.09)的 1.43 倍。與參考文獻[3]所稱具追日功能的系統比固定式系統增加約 50%發電量的結論相當吻合。

三、X 軸與 Y 軸的追日模式

雖然在上一節的實驗結果顯示 X、Z 軸追日模式可增加約 43%的發電量，但是，如前所述，調整 Z 軸，則必須把整個系統旋轉，需要負擔整個系統的重量，較為耗能。因此，本節考慮較省能的 X、Y 軸追日模式，看看是否能達到與 X、Z 軸追日模式一樣的效果，如果可行，則能大幅節省雙軸追日的耗能。在 X、Y 軸追日模式，我們將 X 軸調整到入射角，Y 軸調整到時角。

現以八月七日所測量的 X、Y 軸追日模式與朝南，傾斜角 23 度固定系統的基準模式進行比較。由前一篇論文所推導的公式，可計算出八月七日每一個小時的入射角、方位角與時角，詳列於表三。表四則為每一個小時 X、Y 軸追日模式與基準模式的電壓值，以及電壓平方和的值，用來代表發電量。結果顯示，X、Y 軸追日模式的發電量(1355.78)是基準模式發電量(1297.88)的 1.04 倍，顯示此一追日模式的效果不佳。

四、Z 軸追日模式

雙軸追日需要兩個馬達，成本較高也較耗電，因此，考慮單軸追日，首先，採用 Z 軸追日模式，每一小時將 Z 軸調整到方位角。八月七日每一個小時的方位角請參考表三，電壓值列於表五，結果顯示，Z 軸追日模式的發電量(1629.05)是基準模式發電量(1297.88)的 1.26 倍，雖然比 X、Z 軸追日模式的 1.43 倍少一些，但也相對減少一個馬達的成本與耗能，顯示此一追日模式的效果也是不錯。

五、Y 軸追日模式

如前所述，調整 Z 軸，則必須把整個系統旋轉，需要負擔整個系統的重量，較為耗能。因此，本節考慮較

省能的 Y 軸追日模式，看看是否能達到與 Z 軸追日模式一樣的效果，如果可行，則能大幅節省單軸追日的耗能。在 Y 軸追日模式，我們每一個小時將 Y 軸調整到時角。八月七日每一個小時的時角請參考表三，電壓值列於表六，結果顯示，Y 軸追日模式的發電量(1645.1)是基準模式發電量(1297.88)的 1.27 倍，與 Z 軸追日模式的 1.26 倍差不多，但是不必負擔整個系統的重量，比 Z 軸追日模式更省能，顯示此一追日模式非常值得採用。

六、X 軸追日模式

既然 Y 軸追日模式效果很好，我們也嘗試 X 軸追日模式，看看是否有相同的效果。在 X 軸追日模式，我們每一個小時將 X 軸調整到入射角。七月二十四日每一個小時的入射角請參考表一，電壓值列於表七，結果顯示，X 軸追日模式的發電量(1220.72)是基準模式發電量(1347.09)的 0.91 倍，顯示此一追日模式的效果不佳。探究其原因，Y 軸及 Z 軸主要是東西向的調整，與每天太陽由東往西的移動較接近，而 X 軸則是朝南仰角的調整，當太陽偏東或偏西時，將造成和我們希望使太陽能光電板與陽光保持垂直的目的相去較遠的情況。

七、一天三次追日模式

如前所述，太陽能光電板的重量相當重，如果採用一直進行調整的方式，則增加的發電量可能反而比為了調整所耗費的電量還少。因此，在上述的實驗中，採用每一個小時調整一次的方式。不過，基本上，太陽在上午偏東南方，在中午朝向正南方，在下午則偏西南方。因此，在本節中，我們提出只在上午(6:00~10:00)，中午(10:00~14:00)，下午(14:00~18:00)，也就是一天只調整三次的追日模式，與每一個小時調整一次(一天 12 次)的方式比較，一天只調整三次可以大幅降低調整所耗費的電量達 75%。限於篇幅，無法詳細列出各種模式的所有數據，在此僅以 Y 軸一天三次追日模式為例加以說明。表八列出十月十二日的測量結果。結果顯示，Y 軸一天三次追日模式在上午(6:00~10:00)，若固定於 9:00 的角度，則發電量為

$$(0.75)^2 + (5.19)^2 + (11.85)^2 + (13.98)^2 + (14.05)^2 = 56076$$

而 Y 軸追日模式(即表八的對角線部份)的發電量

則為

$$(0.61)^2 + (5.21)^2 + (12.06)^2 + (13.98)^2 + (14.16)^2 = 568.91$$

結果如表十所示，Y 軸一天三次追日模式(每四個小時調整一次)在上午(6:00~10:00)，若固定於 9:00 的角度，則發電量為 Y 軸追日模式(每一個小時調整一次)的 0.986 倍，亦即減少 1.4%。由於設備與時間的關係，無法取得同時間基準模式(固定不調整)的數據，但由第五節顯示，Y 軸追日模式的發電量約為基準模式發電量的 1.27 倍，因此，經由換算，Y 軸一天三次追日模式在上午(6:00~10:00)，若固定於 9:00 的角度，則發電量為基準模式發電量的(0.986)(1.27)=1.252 倍，亦即增加 25.2%，如表十括號內所示。同理，中午(10:00~14:00) 若固定於 12:00 的角度，則發電量比 Y 軸追日模式減少 4.3%(但比基準模式增加 21.5%)。下午(14:00~18:00) 若固定於 15:00 的角度，則發電量比 Y 軸追日模式減少 0.1%(但比基準模式增加 26.9%)。至於其他模式的情形，因限於篇幅，僅整理於表十，在此不再一一詳列。

八、固定系統的最佳仰角

參考文獻[5,6]分別探討了嘉義與中壢地區固定系統的最佳仰角，本文亦將八月十八日的實測結果列於表九，顯示在八月期間，台南地區固定系統的最佳仰角為 10° 朝南。不過，20° 朝南的發電量(1351.68)與 10° 朝南的發電量(1382.02)，差異極微，顯示在臺南地區的固定式系統，若將仰角固定與緯度相同(23°)，仍是相當不錯的選擇。

九、結論

各種追日模式的成效與優缺點整理於表十，其中，X 軸與 Z 軸的追日模式效果最好，但成本較高，耗能較多，Y 軸追日模式兼具低成本與高效能，但耗能稍多，

Y 軸一天三次追日模式則兼具低成本、高效能與耗能少的優點，非常值得採用。

十、致謝

感謝國科會計畫編號 NSC 93-2815-C-168-016-E 予以經費補助。

十一、參考文獻

1. 「核能發電天龍八部」、台灣電力公司，中華民國 86 年 3 月。
2. 「太陽能應用推廣說明巡迴列車講義」、經濟部能源委員會，中華民國 90 年。
3. P.Batlas, M. Tortoreli and P. Russell ,”Evaluation of Power Output for Fixed and Step Tracking Photo -Voltaic” ,Solar Cells,Vol.37, No.2, pp. 147-163,1986
4. 李東諭、王耀諱 “日射量機率模型之建立” 中華民國第 21 屆電力研討會 pp. 1231-1235, 2000.
5. 吳旭晉、陳耀銘 “固定式太陽能電池最佳安裝角度之研究” 中華民國第 21 屆電力研討會 pp. 967-971, 2000.
6. 何金滿、包濤璋 “中壢地區太陽光發電系統運轉性能評估” 中華民國第 24 屆電力研討會 pp. 419-420, 2003.
7. 紀捷聰、鐘明政 “應用太陽能位置站追蹤法提高太陽能板輸出功率之研究” ，中華民國第 23 屆電力工程研討會 pp. 294-298, 2002.
8. 紀捷聰 “太陽能熱水器集熱板之改善暨智慧型追日機構裝置之研究” ，中華民國第 24 屆電力研討會 pp. 1627-1631, 2003.
9. Walraven,R.,” Calculation the Position of the Sun ”,Solar Energy,20,pp.393-397,1978.
10. Braun, J. E.and Mitchell, J.C ., ”Solar Geometry for Fixed and Tracking Surfaces” , Solar Energy,31, pp. 439-444, 1983.
11. M.Cucuno , D. Kaliakatsos ,and V. Marinelli, “General Calculation Methods for Sorlar Trajectories”, Renewable Energy , Vol. 11,No.2,pp.223-234,199

表一 七月二十四日每一個小時的入射角、方位角與時角(單位：度)

時間	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
入射角	82.47	69.18	55.62	41.91	28.11	14.37	3.4	14.37	28.11	41.91	55.62	69.18	82.47
方位角	108.15	103.21	98.69	94.19	88.79	79.14	0	-79.14	-88.79	-94.19	-98.69	-103.1	-108.15
時角	90	75	60	45	30	15	0	-15	-30	-45	-60	-75	-90

表二 七月二十四日每一個小時 X、Z 軸追日模式與基準模式的電壓值(單位：伏特)，以及電壓平方和的值(代表發電量)

時間	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	電壓平方和 (代表發電量)
X、Z 軸 追日模 式	4.12	10.02	13.74	14.42	12.32	14.89	14.78	14.92	14.51	14.45	12.79	2.49	1.66	1920.53
基準模 式	1.35	3.87	8.43	13.26	11.64	13.97	14.95	14.15	13.26	9.53	7.5	1.88	1.61	1347.09

表三 八月七日每一個小時的入射角、方位角與時角(單位：度)

時間	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
入射 角	83.83	70.33	56.64	42.84	29.09	15.78	7.04	15.78	29.09	42.84	56.64	70.33	83.83
方位 角	104.75	99.53	94.48	88.94	81.46	66.19	0	-66.19	-81.46	-88.94	-94.48	-99.53	-104.75
時角	90	75	60	45	30	15	0	-15	-30	-45	-60	-75	-90

表四 八月七日每一個小時 X、Y 軸追日模式與基準模式的電壓值(單位：伏特)，以及電壓平方和的值(代表發電量)

時間	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	電壓平方和 (代表發電量)
X、Y 軸 追日模 式	1.68	3.87	9.66	13.3	13.71	13.42	14.63	12.59	13.56	10.44	5.22	2.52	0.84	1355.78
基準模 式	1.52	3.66	7.73	12.52	13.81	12.31	14.62	12.24	13.45	10.41	7.51	3.52	1.34	1297.88

表五 八月七日每一個小時 Z 軸追日模式與基準模式的電壓值(單位：伏特)，以及電壓平方和的值(代表發電量)

時間	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	電壓平方和 (代表發電量)
Z 軸 追日模 式	2.71	5.2	10.45	13.65	14.26	12.84	14.62	13.13	14.55	13.84	9.84	6.49	1.61	1629.05
基準模 式	1.52	3.66	7.73	12.52	13.81	12.31	14.62	12.24	13.45	10.41	7.51	3.52	1.34	1297.88

表六 八月七日每一個小時 Y 軸追日模式與基準模式的電壓值(單位：伏特)，以及電壓平方和的值(代表發電量)

時間	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	電壓平方和 (代表發電量)
Y 軸 追日模 式	3.02	6.16	11.43	14.22	14.66	12.98	14.62	12.94	13.72	12.83	10.95	5.15	1.15	1645.1
基準模 式	1.52	3.66	7.73	12.52	13.81	12.31	14.62	12.24	13.45	10.41	7.51	3.52	1.34	1297.88

表七 七月二十四日每一個小時 X 軸追日模式與基準模式的電壓值(單位：伏特)，以及電壓平方和的值(代表發電量)

時間	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	電壓平方和 (代表發電量)
X 軸 追日模 式	1.46	3.37	7.67	12.21	10.61	14.81	14.78	14.75	12.32	7.53	4.36	1.68	1.04	1220.72
基準模 式	1.35	3.87	8.43	13.26	11.64	13.97	14.95	14.15	13.26	9.53	7.5	1.88	1.61	1347.09

表八 Y 軸一天三次追日模式十月十二日的電壓值(單位：伏特)

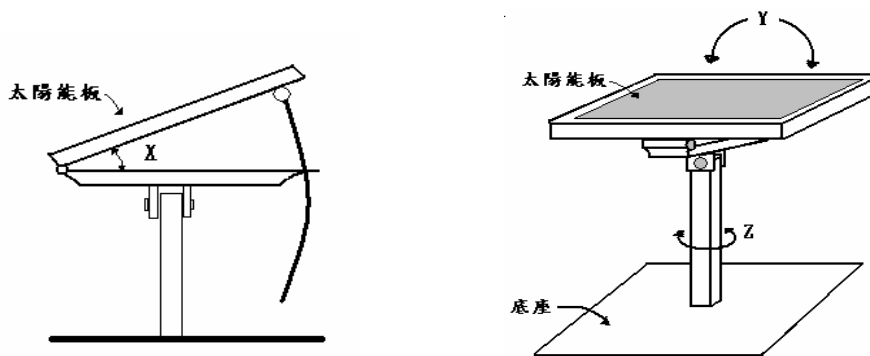
	6:00 的時角 90 度	7:00 的時角 75 度	8:00 的時角 60 度	9:00 的時角 45 度	10:00 的時角 30 度
測量時間 6:00	0.61	0.67	0.72	0.75	0.76
測量時間 7:00	4.88	5.21	5.31	5.19	4.72
測量時間 8:00	10.75	11.69	12.06	11.85	11.19
測量時間 9:00	11.62	13.22	13.85	13.98	13.63
測量時間 10:00	10.61	12.35	13.39	14.05	14.16
電壓平方和(代表發電量)	387.35	491.54	545.27	560.76	534.35
	10:00 的時角 30 度	11:00 的時角 15 度	12:00 的時角 0 度	13:00 的時角 -15 度	14:00 的時角 -30 度
測量時間 10:00	14.16	13.83	13.59	12.17	10.84
測量時間 11:00	13.95	14.02	14.10	13.46	12.53
測量時間 12:00	12.98	13.71	14.03	13.92	13.47
測量時間 13:00	11.53	13.17	13.77	14.02	13.93
測量時間 14:00	8.02	10.07	11.87	12.55	12.71
電壓平方和(代表發電量)	760.85	850.65	910.85	877.11	811.54
	14:00 的時角 -30 度	15:00 的時角 -45 度	16:00 的時角 -60 度	17:00 的時角 -75 度	18:00 的 -90 度
測量時間 14:00	12.71	12.68	12.22	11.38	10.03
測量時間 15:00	9.12	9.47	9.37	9.00	8.08
測量時間 16:00	5.11	5.33	5.29	5.06	4.64
測量時間 17:00	0.84	0.86	0.85	0.78	0.71
測量時間 18:00	0.024	0.021	0.019	0.017	0.014
電壓平方和(代表發電量)	271.54	279.61	265.83	236.72	187.92

表九 八月十八日不同時段不同仰角的電壓值實測結果(單位：伏特)

時間\角度	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
06:00	1.45	1.34	1.27	1.21	1.11	1.06	0.97	0.89	0.79	0.73
07:00	5.58	5.46	5.38	5.14	5.1	4.64	4.23	3.88	3.39	3.25
08:00	6.08	6.3	6.32	6.19	5.92	5.55	5.2	4.68	4.21	3.77
09:00	10.85	11.07	11.12	10.86	10.39	9.91	8.75	7.91	6.68	5.76
10:00	14.12	14.05	14	13.72	13.57	12.72	11.61	10.45	8.57	7.1
11:00	14.55	14.71	14.25	13.98	13.72	13.11	12.36	11.23	10.53	8.01
12:00	14.39	14.63	14.39	14.37	13.54	12.97	12.17	10.74	9.27	7.19
13:00	14.2	14.3	14.23	13.96	13.6	12.84	11.67	10.37	8.74	6.87
14:00	12.34	12.52	12.39	12.02	11.48	10.55	9.37	8.22	7.04	5.95
15:00	9.47	10.99	10.98	10.63	10.02	9.34	8.33	6.85	6.03	5.36
16:00	8.44	8.46	8.26	7.4	7	6.28	5.63	4.86	4.21	3.57
17:00	2.38	2.45	2.42	2.33	2.2	2.05	1.9	1.7	1.5	1.28
18:00	0.86	0.87	0.86	0.81	0.76	0.73	0.68	0.63	0.59	0.55
電壓平方和代表發電量	1327.31	1382.02	1351.68	1287.52	1197.52	1061.13	887.25	699.91	527.35	350.77

表十 各種追日系統的成效與優缺點

模式	成效	優點	缺點
X 軸與 Z 軸	比基準模式增加約 43%	完全與入射光垂直	一、需要兩個馬達，成本較高 二、需要負擔整個系統的重量較為耗能
X 軸與 Y 軸	比基準模式增加約 4%	不需要負擔整個系統的重量，較為省能	一、需要兩個馬達，成本較高 二、無法完全與入射光垂直
Z 軸	比基準模式增加約 26%	只要一個馬達，成本較低	一、需要負擔整個系統的重量較為耗能 二、無法完全與入射光垂直
Y 軸	比基準模式增加約 27%	一、只要一個馬達，成本較低 二、不需要負擔整個系統的重量，較為省能	無法完全與入射光垂直
X 軸	比基準模式減少約 9%	一、只要一個馬達，成本較低 二、不需要負擔整個系統的重量，較為省能	無法完全與入射光垂直
Y 軸一天三次	比 Y 軸(基準)模式 上午減少約 1.4% (增加約 25.2%) 中午減少約 4.3% (增加約 21.5%) 下午減少約 0.1% (增加約 26.9%)	一、只要一個馬達，成本較低 二、不需要負擔整個系統的重量，較為省能 三、減少調整所需耗能的 75%	無法完全與入射光垂直
X、Y 軸一天三次	比 X 軸與 Y 軸(基準)模式 上午增加約 14.5% (增加約 19.1%) 中午增加約 4.2% (增加約 8.4%) 下午增加約 10.0% (增加約 14.4%)	一、不需要負擔整個系統的重量，較為省能 二、減少調整所需耗能的 75%	一、需要兩個馬達，成本較高 二、無法完全與入射光垂直
X、Z 軸一天三次	比 X 軸與 Z 軸(基準)模式 上午增加約 1.4% (增加約 57.9%) 中午減少約 4.6% (增加約 36.4%) 下午減少約 1.1% (增加約 41.4%)	減少調整所需耗能的 75%	一、需要兩個馬達，成本較高 二、無法完全與入射光垂直
Z 軸一天三次	比 Z 軸(基準)模式 上午增加約 2.2% (增加約 28.8%) 中午減少約 3.9% (增加約 21.1%) 下午減少約 2.1% (增加約 23.4%)	一、只要一個馬達，成本較低 二、減少調整所需耗能的 75%	一、需要負擔整個系統的重量較為耗能 二、無法完全與入射光垂直
X 軸一天三次	比 X 軸(基準)模式 上午增加約 9.1% (減少約 0.7%) 中午增加約 2.5% (減少約 6.7%) 下午增加約 15.8% (增加約 5.4%)	一、只要一個馬達，成本較低 二、不需要負擔整個系統的重量，較為省能 三、減少調整所需耗能的 75%	無法完全與入射光垂直



圖一 實驗系統圖