

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

高可靠太陽光追蹤最大功率追蹤控制技術研發
Development of Highly Reliable Maximum-Power Tracking Control
Technique for Sun Trackers

計畫編號：**992001INER040**

受委託機關(構)：國立台灣海洋大學

計畫主持人：容志輝

核研所連絡人員：葉宏易

聯絡電話：02-2462-2192#6232

E-mail address：yung@mail.ntou.edu.tw

報告日期：99/11/30

目 錄

目 錄.....	I
中文摘要.....	1
英文摘要.....	2
壹、計畫緣起與目的.....	3
貳、研究方法與過程.....	4
一、分析感測器特性.....	4
二、雲層遮蔽及光照強度對系統的影響以及改善策略.....	13
三、風力對系統的影響以及改善策略.....	21
四、設計控制器.....	24
五、模擬情況.....	43
參、主要發現與結論.....	57
肆、參考文獻.....	58
附件一 台灣各地時間太陽位置仰角和方位角的角度.....	61
附件二 MATLAB 程式碼:.....	62
附件三 DAQ 內部設定.....	64

中文摘要

本計劃研究高可靠太陽光追蹤最大功率追蹤控制技術研發。完成以下工作：

- 一、 分析感測器特性。
- 二、 用光敏電阻來改善雲遮所造成感測器輸出信號衰減問題。
- 三、 實際測量光感測器補償後的資料數據，建立其特性曲線。
- 四、 研究外來干擾(風)對系統之影響。
- 五、 設計高可靠度控制器，抑制風及雲對追蹤效能之影響。
- 六、 以 Matlab/Simulink 軟體模擬驗證控制器效能。

關鍵字: 太陽追蹤器、光敏電阻、偏移補償、強健控制、高可靠。

Abstract

The project develops highly reliable maximum-power tracking control technique for sun trackers. The main achievements of the project are summarized in the following.

1. Analyze the characteristics of sensors.
2. Use photoresistors to compensate the effects of nonlinearity of sensors that is inclined to saturate and the effects of susceptibility to the intensity of light.
3. Measure the data of the compensated sensors to establish their characteristic curves.
4. Investigate the effects of exogenous disturbances (wind) on dynamical behavior of system.
5. Design highly reliable, lower-cost, maximum-average-power, accurate tracking controllers to compensate the effects on dynamical behavior of system caused by wind and cloud.
6. Use Matlab/Simulink to simulate and verify the robustness and performance of the tracking controllers.

Keyword: sun tracker, photoresistors, H-infinity control, compensated sensors , highly reliable controllers.

壹、計畫緣起與目的

近來太陽能產業蓬勃發展，太陽能電池生產成本雖逐步下降，但民間設置太陽能設備的意願仍低，主因在其單位電能的生產成本過高。要降低單位電能成本，除了改善太陽能電池特性外，另可改善太陽追蹤精度以提昇轉換效率。大面積太陽能板極易承受風力偏轉造成追蹤誤差影響轉換效率，也易因雲層遮蔽造成追蹤誤差，需有設計良好的追蹤控制器方能讓太陽能板在各種情況下得到最大輸出功率。另外系統會因機械老化造成參數偏移，需進行適當校正。

文獻上關於太陽追蹤控制器的設計主要以 PID 控制及模糊控制為主，原因是整個太陽追蹤系統的動態模式不易得到。[7]中以查表法可以知道任何時間太陽位置，設計開回路控制器將太陽能板轉到對應位置。[6]中是以 ON-OFF 控制雙軸太陽追蹤系統。[1]，[2]，[4]，[5]，[10]是以比例(P)、比例積分(PI)、或類似微分(D)的方法控制單軸或雙軸的太陽追蹤系統。[3]，[8]，[9]，[11]則是以模糊控制法則設計控制器以控制雙軸太陽追蹤系統。本計畫主要研究對象是聚光型 III-V 族太陽能電池，主要進行以下幾個工作項目：首先針對感測器對陽光強度變化過於敏感及線性區間太小易飽和之非理想特性做深入分析與進行補償。以簡化控制器之設計；接著將風與雲的影響視為外來雜訊(noise)，以強健控制理論技巧設計控制器以降低雲與風的影響；我們將找出雲層遮蔽與風力如何影響系統動態行為，其影響有些什麼樣的數學特徵，據以設計控制器去克服其影響；最後設計高可靠度追蹤系統控制器克服其問題，讓太陽追蹤系統在長時間運作下，以最小維護成本得到最大平均功率輸出。

貳、研究方法與過程

本計畫所採研究方法可分為實測、理論分析、軟體模擬等。首先針對感測器對陽光強度變化過於敏感及線性區間太小易飽和之非理想特性作深入分析與進行補償，接著將雲與風的影響視為外來雜訊(noise)，以強健控制理論技巧設計控制器以降低雲與風的影響；我們將找出雲層遮蔽與風力如何影響系統動態行為，其影響有些什麼樣的數學特徵，據以設計控制器去克服其影響；最後設計高可靠度追蹤控制器克服這些問題，讓太陽追蹤系統在長時間運作下，以最小維護成本得到最大平均功率輸出。

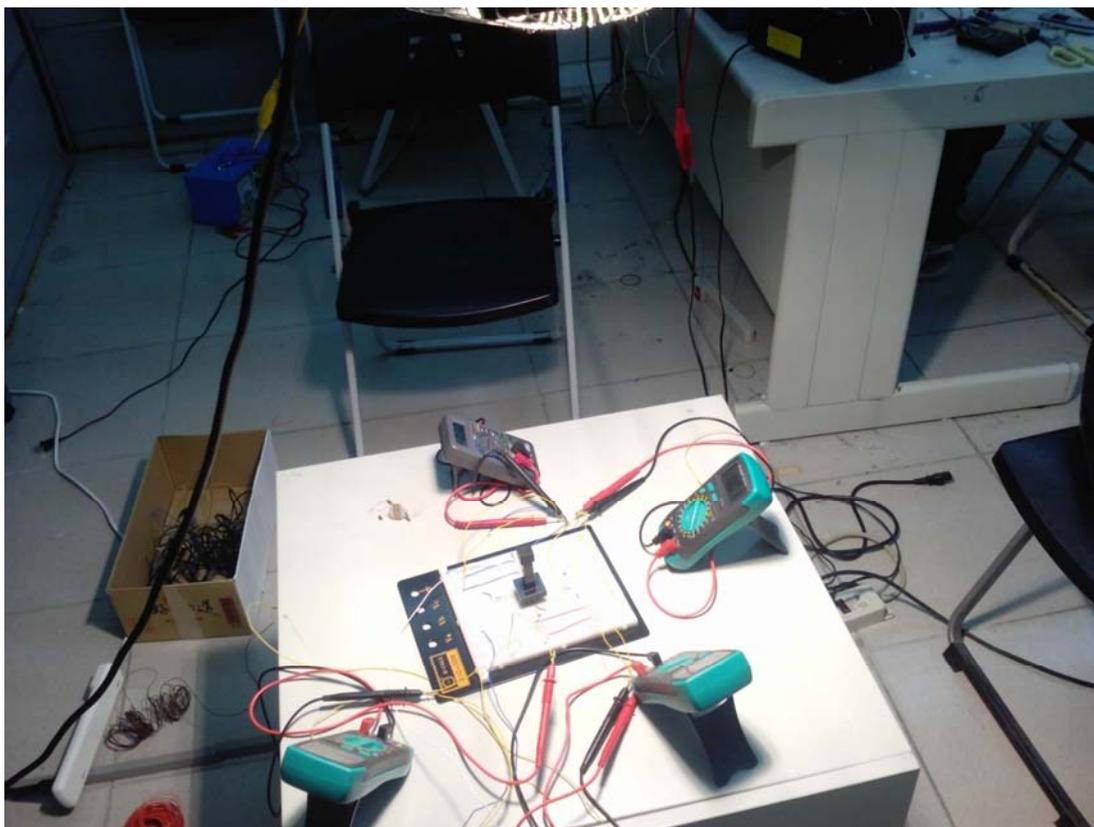
一、分析感測器特性

工作內容為量測太陽移動軌跡對感測器的特性，此量測數據是太陽偏移角度對感測器的影響，量測結果可用來作為第二季對風和雲干擾特性的一個比對及參考資料，因為無法得到較為精準的感測器特性，所以工作重點則是量測太陽軌跡小角度偏移內的感測器特性，以其得到較為精準的感測器特性。我們分為室內量測、室外量測來分析光照移動軌跡對感測器的特性。

(一)室內量測

本次的實驗是用 500W 的探照燈直接照射光感測器作實驗，初步的概念是拿紅、黃、藍、綠四種不同顏色的玻璃紙來表示雲對光感測器所造成的影響。而用不同的玻璃紙來隔絕光線對光感測器作測試，後來發現光感測器量測到的數值前後沒有多大的變化。改用電阻 6.8K、68K、100K、150K 歐姆做測試，而探照燈向光感測器東、西、南、北移動來量測數據。

首先，我們在感測器上方架設一組探照燈，之後移動感測器的麵包板，而以移動距離來量測數據，之後將移動的距離轉換成太陽偏移的角度，感測器距離探照燈 62 公分，換算成角度約 $1\text{CM} = 0.726$ 度，並同時量測相對應方向之感測器數據做比較。



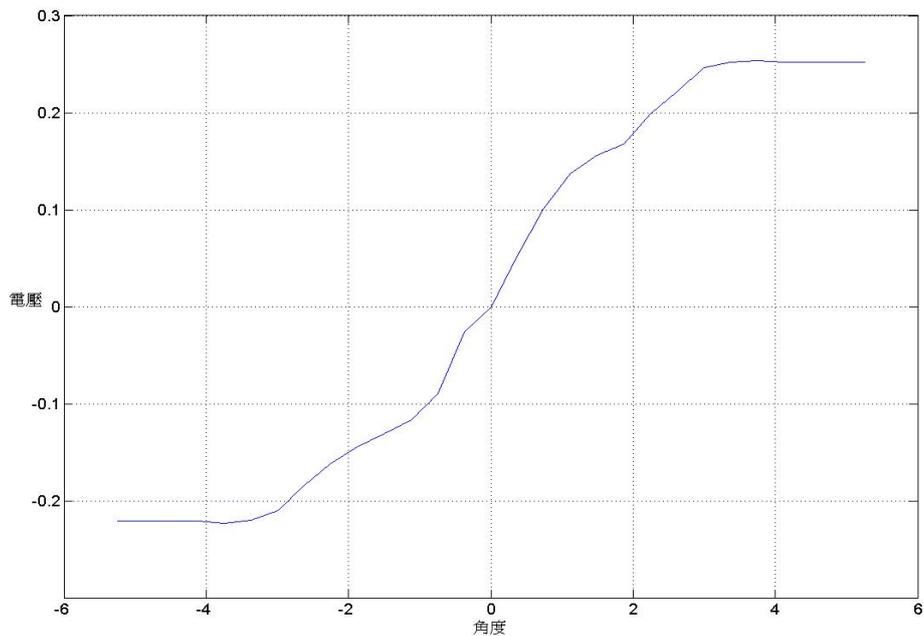
圖一 室內量測

下面是室內量測數據與特性曲線；

表一為電阻 6.8K 歐姆，光源南北向移動，光感測器所量測到的數據：(1CM=0.726 度，電壓單位：伏特)

表一

光源	往南	往北	光源	往南	往北
公分	電壓差	電壓差	公分	電壓差	電壓差
1	0	0	8	0.222	-0.185
2	0.052	-0.026	9	0.246	-0.21
3	0.101	-0.09	10	0.252	-0.22
4	0.137	-0.117	11	0.254	-0.223
5	0.156	-0.131	12	0.252	-0.221
6	0.168	-0.145	13	0.252	-0.221
7	0.199	-0.162	14	0.252	-0.221



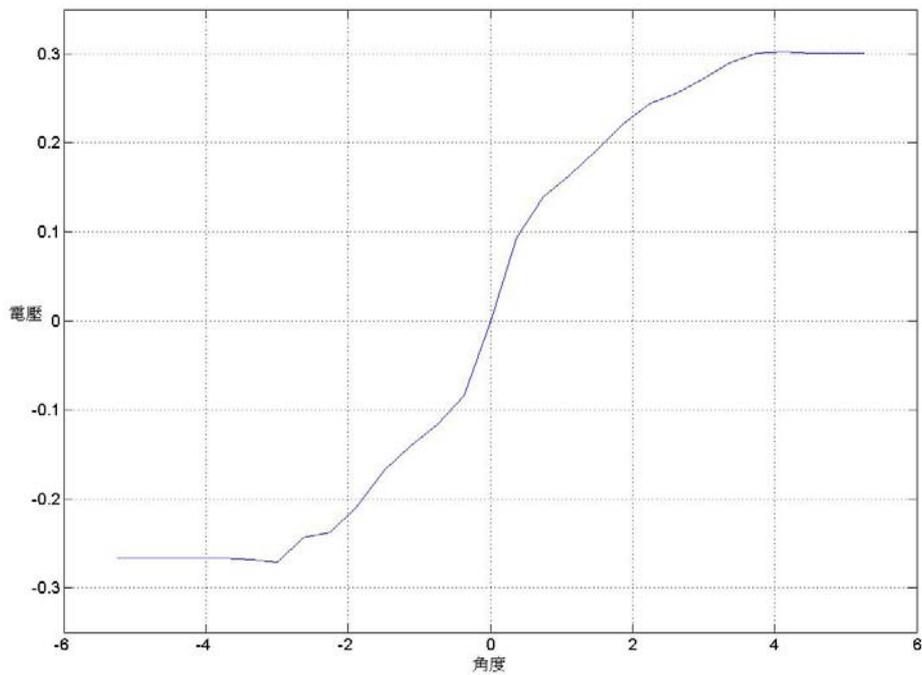
圖二 電阻 6.8K 光感測器南-北電壓差圖

將以上數據相減後所繪製的圖形(X-光源移動的角度,Y-南北邊電壓差),可以發現探照燈光照移動了 10 公分,轉換角度也就是光源偏移了 3.5 度,感測器輸出電壓就已經達飽和了。

表一為電阻 6.8K 歐姆,光源東西向移動,光感測器所量測到的數據:(1CM=0.726 度,電壓單位:伏特)

表二

光源	往南	往北	光源	往南	往北
公分	電壓差	電壓差	公分	電壓差	電壓差
1	0	-0.001	8	0.256	-0.223
2	0.093	-0.084	9	0.272	-0.271
3	0.139	-0.116	10	0.29	-0.268
4	0.164	-0.14	11	0.301	-0.266
5	0.192	-0.168	12	0.303	-0.266
6	0.221	-0.209	13	0.301	-0.266
7	0.244	-0.238	14	0.301	-0.266



圖三 電阻 6.8K 光感測器西-東電壓差圖

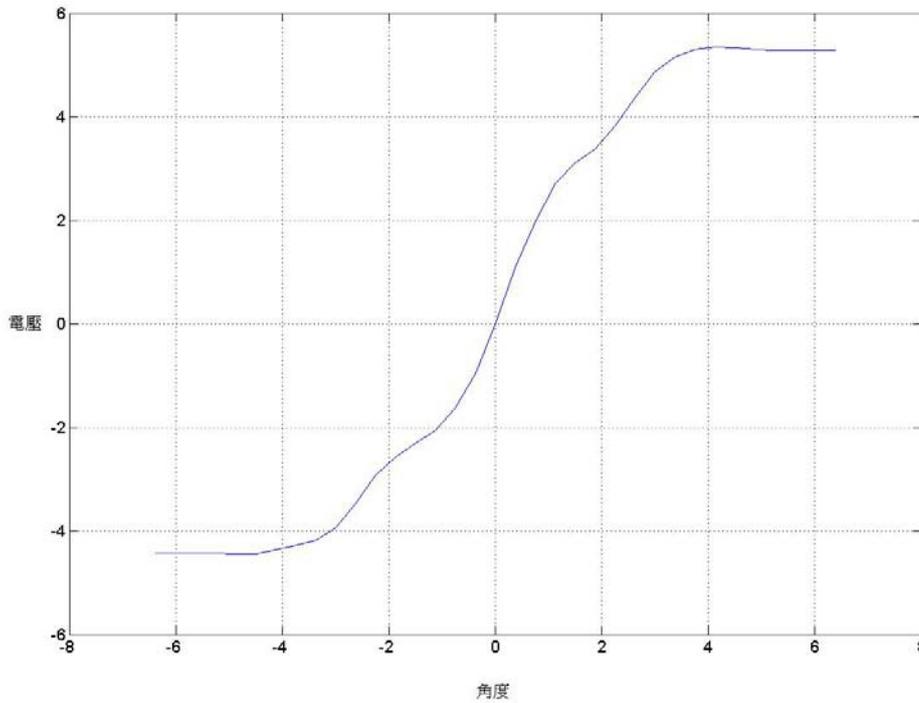
將以上數據相減後所繪製的圖形(X-光源移動的角度，Y-東西邊電壓差)，可以發現探照燈光照移動了 10 公分，轉換角度也就是光源偏移了 3.5 度，感測器輸出電壓就已經達飽和了。

表三為電阻 150K 歐姆，光源南北向移動，光感測器所量測到的數據：(1CM=0.726 度，電壓單位：伏特)

表三

光源	往南	往北	光源	往南	往北
公分	電壓差	電壓差	公分	電壓差	電壓差
1	0	0	8	4.38	-3.47
2	1.08	-0.95	9	4.88	-3.93
3	1.99	-1.63	10	5.15	-4.18
4	2.71	-2.06	11	5.3	-4.28
5	3.11	-2.3	12	5.35	-4.36
6	3.37	-2.56	13	5.34	-4.44

7	3.84	-2.93	14	5.3	-4.45
---	------	-------	----	-----	-------



圖四 電阻 150K 光感測器南-北電壓差圖

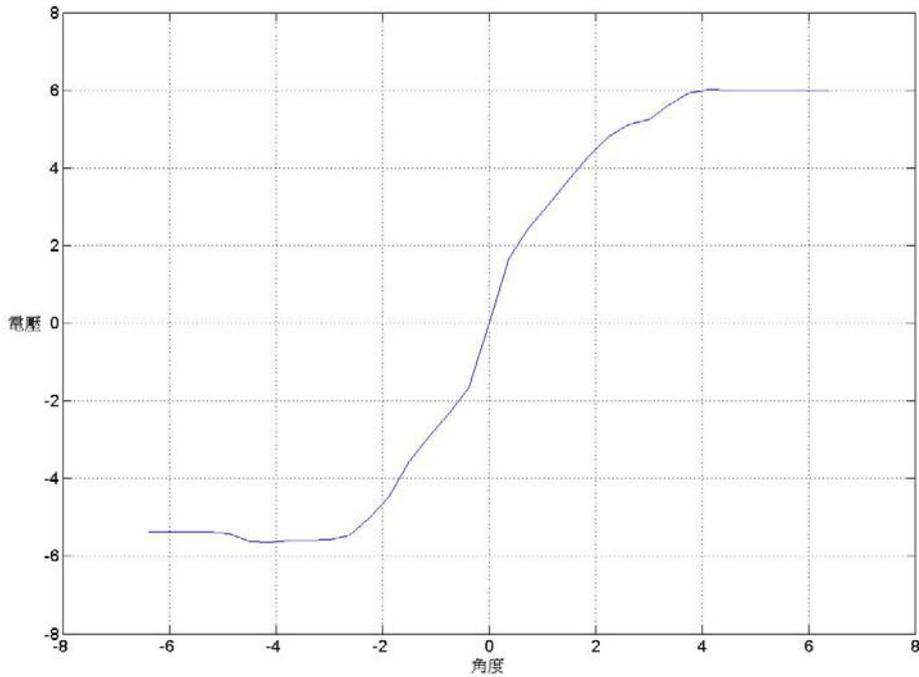
將以上數據相減後所繪製的圖形(X-光源移動的角度，Y-北南電壓差)，可以發現探照燈光照一樣移動了 10 公分，轉換角度也就是光源偏移了 3.5 度，感測器輸出電壓已經達飽和了，輸出電壓有變大。

表四為電阻 150K 歐姆，光源東西向移動，光感測器所量測到的數據：(1CM=0.726 度，電壓單位：伏特)

表四

光源	往南	往北	光源	往南	往北
公分	電壓差	電壓差	公分	電壓差	電壓差
1	0	0	8	-5.47	5.11
2	-1.66	1.66	9	-5.58	5.25
3	-2.32	2.46	10	-5.59	5.62
4	-2.93	3.05	11	-5.59	5.92
5	-3.56	3.72	12	-5.65	6.02

6	-4.48	4.31	13	-5.62	6
7	-5.03	4.81	14	-5.43	6

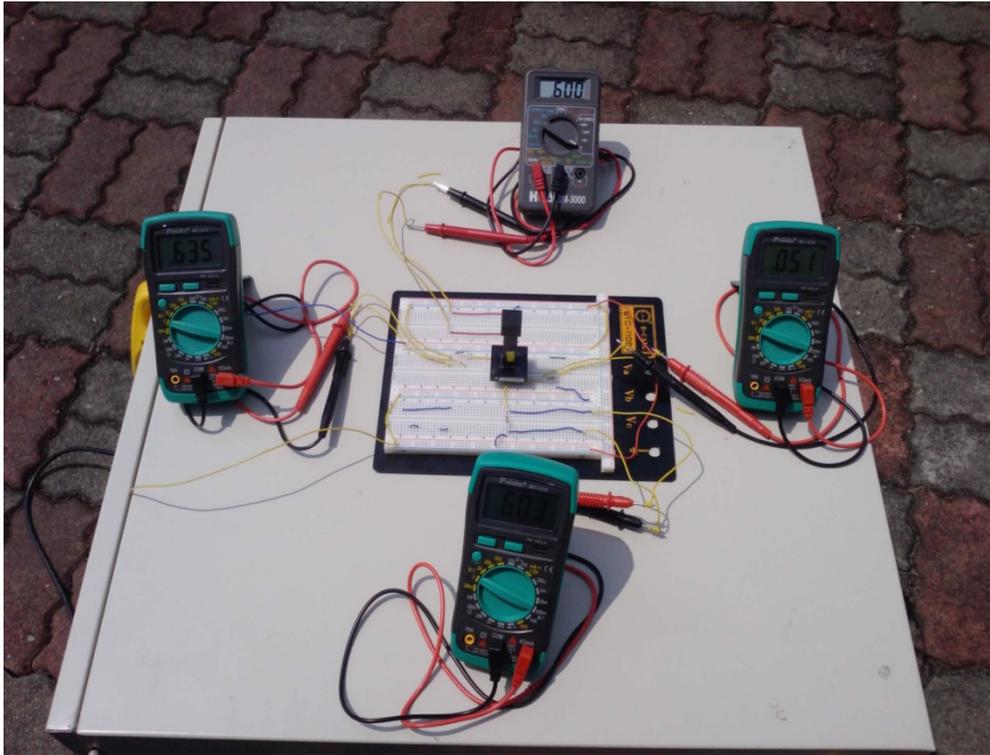


圖五 電阻 150K 光感測器西-東電壓差圖

將以上數據相減後所繪製的圖形(X-光源移動的角度，Y-東西電壓差)，可以發現探照燈光照一樣移動了 10 公分，轉換角度也就是光源偏移了 3.5 度，感測器輸出電壓就已經達飽和了，但輸出電壓有變大。

(二)室外量測

本次室外的實際量測，是以中央氣象局提供的資料來進行，並同時量測相對應方向之感測器的數據做比較，在依中央氣象局所提供的資料來計算俯仰角，由以上數據的量測描繪出太陽偏移角度對感測器之特性曲線，但因感測器對外來的干擾(例如雲的遮蔽)非常靈敏使得太陽偏移角度之特性曲線不佳，且在不同的天氣下，電壓的變化量會有明顯的改變，所以我們選三天天氣狀況不同的情形下做室外量測，以下有大晴天、晴天、陰天的測量數據及特性曲線。

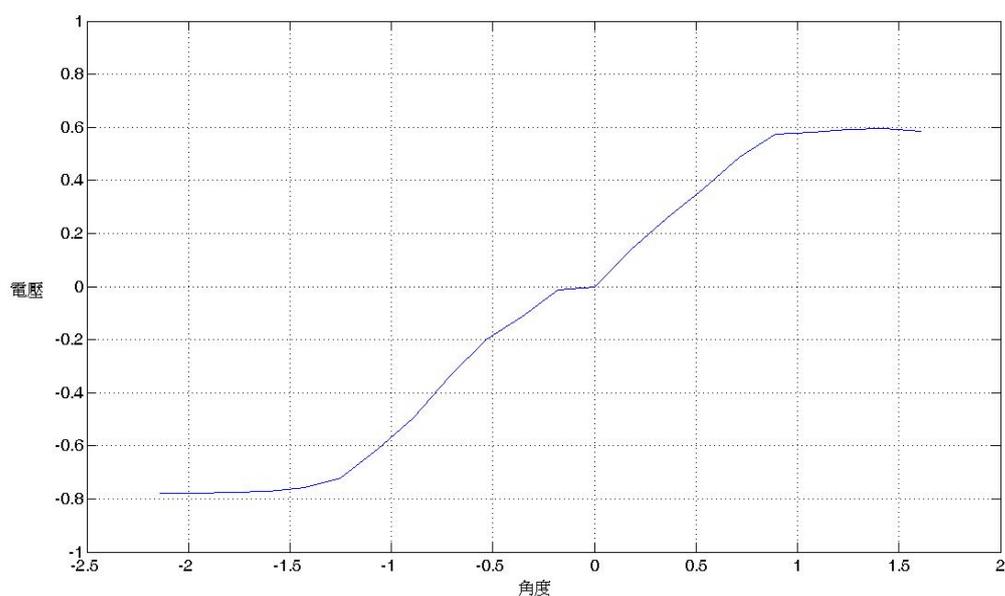


圖六 室外量測

表五為室外量測數據與特性曲線，時間為4月14號，天氣狀況：晴時多雲，電壓單位：毫伏特(mV)

表五

感測器	東	西	東-西	感測器	東	西	東-西
時間	0.671	0.086	0.585	11:42	0.649	0.66	-0.011
11:33	0.682	0.088	0.594	11:43	0.658	0.771	-0.113
11:34	0.685	0.092	0.593	11:44	0.6	0.8	-0.2
11:35	0.678	0.096	0.582	11:45	0.464	0.803	-0.339
11:36	0.674	0.101	0.573	11:46	0.322	0.816	-0.494
11:37	0.675	0.188	0.487	11:47	0.188	0.8	-0.612
11:38	0.676	0.308	0.368	11:48	0.107	0.83	-0.723
11:39	0.691	0.433	0.258	11:49	0.093	0.85	-0.757
11:40	0.67	0.532	0.138	11:50	0.079	0.852	-0.773
11:41	0.65	0.65	0	11:51	0.078	0.853	-0.775



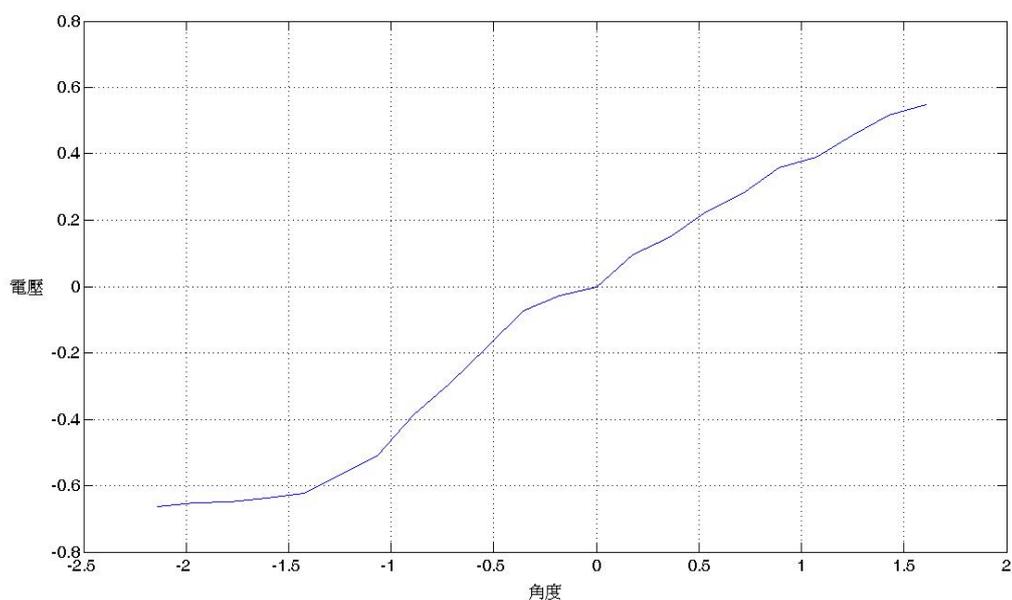
圖七 4月14號 感測器東-西的特性曲線

將以上數據相減後所繪製的圖形(X-光源移動的角度，Y-東西電壓差)，太陽偏移角度大概1度左右，感測器輸出電壓就達飽和。

表六為室外量測的數據，時間為4月15號，天氣狀況：晴天，電壓單位：毫伏特(mV)

表六

光感測器	東	西	東-西	光感測器	東	西	東-西
時間	0.782	0.235	0.547	11:55	0.658	0.732	-0.074
11:45	0.792	0.276	0.516	11:56	0.546	0.73	-0.184
11:46	0.788	0.332	0.456	11:57	0.43	0.722	-0.292
11:47	0.785	0.395	0.39	11:58	0.364	0.75	-0.386
11:48	0.798	0.44	0.358	11:59	0.231	0.741	-0.51
11:49	0.789	0.507	0.282	12:00	0.195	0.762	-0.567
11:50	0.778	0.552	0.226	12:01	0.154	0.778	-0.624
11:51	0.763	0.615	0.148	12:02	0.144	0.781	-0.637
11:52	0.745	0.649	0.096	12:03	0.136	0.785	-0.649
11:53	0.72	0.72	0	12:04	0.135	0.788	-0.653
11:54	0.712	0.74	-0.028	12:05	0.134	0.798	-0.664



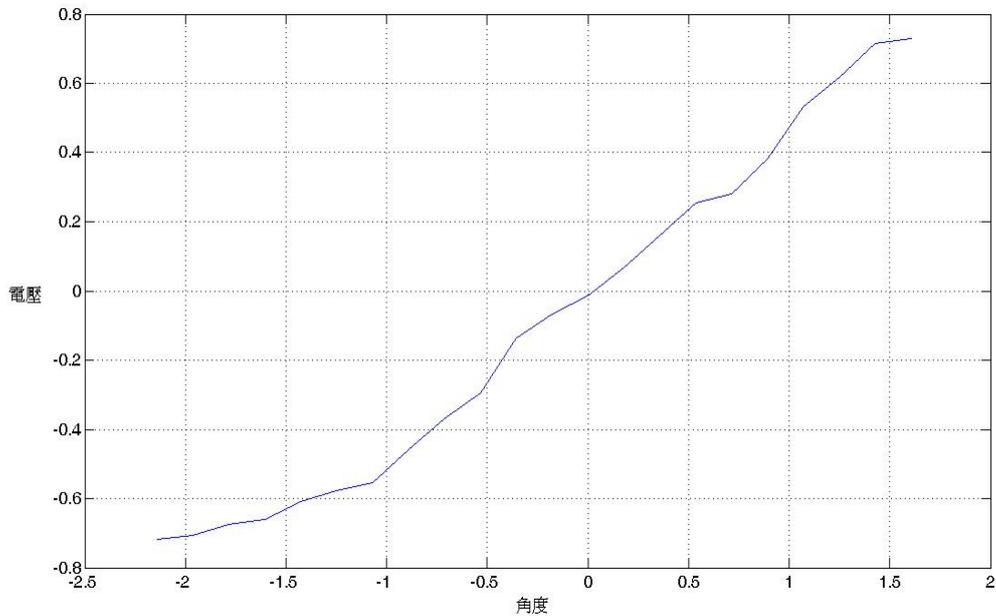
圖八 4月15號 感測器東-西的特性曲線

將以上數據相減後所繪製的圖形(X-光源移動的角度，Y-東西電壓差)，太陽偏移角度大概 1.5 度左右，感測器輸出電壓就達飽和。

表七為室外量測的數據，時間為 4 月 16 號，天氣狀況：大晴天，電壓單位：毫伏特(mV)

表七

光感測器	東	西	東-西	光感測器	東	西	東-西
時間	0.803	0.073	0.73	12:03	0.575	0.712	-0.137
11:53	0.804	0.089	0.715	12:04	0.458	0.753	-0.295
11:54	0.802	0.186	0.616	12:05	0.412	0.783	-0.371
11:55	0.798	0.263	0.535	12:06	0.299	0.758	-0.459
11:56	0.734	0.352	0.382	12:07	0.246	0.799	-0.553
11:57	0.716	0.434	0.282	12:08	0.226	0.804	-0.578
11:58	0.715	0.459	0.256	12:09	0.202	0.812	-0.61
11:59	0.724	0.563	0.161	12:10	0.145	0.805	-0.66
12:00	0.699	0.632	0.067	12:11	0.131	0.806	-0.675
12:01	0.645	0.657	-0.012	12:12	0.097	0.804	-0.707
12:02	0.631	0.699	-0.068	12:13	0.086	0.805	-0.719



圖九 4月16號感測器東-西的特性曲線

將以上數據相減後所繪製的圖形(X-光源移動的角度，Y-東西電壓差)，從來可以看出太陽偏移角度大概1.5度左右，感測器輸出電壓就已經達飽和。

二、雲層遮蔽及光照強度對系統的影響以及改善策略

接續98年計畫之成果，我們知道太陽追蹤控制器所面臨最大的挑戰是必須在具高度不確定性外在干擾(風與雲)影響下，仍能保持系統的穩定性並達到精密的追蹤，以獲得良好的轉換效率。外在干擾雲層則會導致太陽光受到遮蔽，使感測器無法正確判斷太陽位置，誤判狀況造成追蹤失準。而目前本系統另外一個問題在於感測器對太陽光照強度變化過於敏感，即使在相同的偏差角下，陽光強度變化對感測器的輸出電壓之影響太大，以致於偏差角難以判斷，亦影響追蹤性能，為了增加系統的可靠度，讓感測器的輸出電壓在不同時間下電壓差不會太大，故我們加入光敏電阻來補償。

(一)光敏電阻

常用的光敏電阻是用硫化鎘光敏電阻，它是由半導體材料製成的。光敏電阻的電阻值隨入射光線（可見光）的強弱變化而有所改變，在弱光條件下，它的電阻值可達 1~10MΩ；在強光條件下，它電阻值僅有幾百至數千歐姆。



圖十 光敏電阻

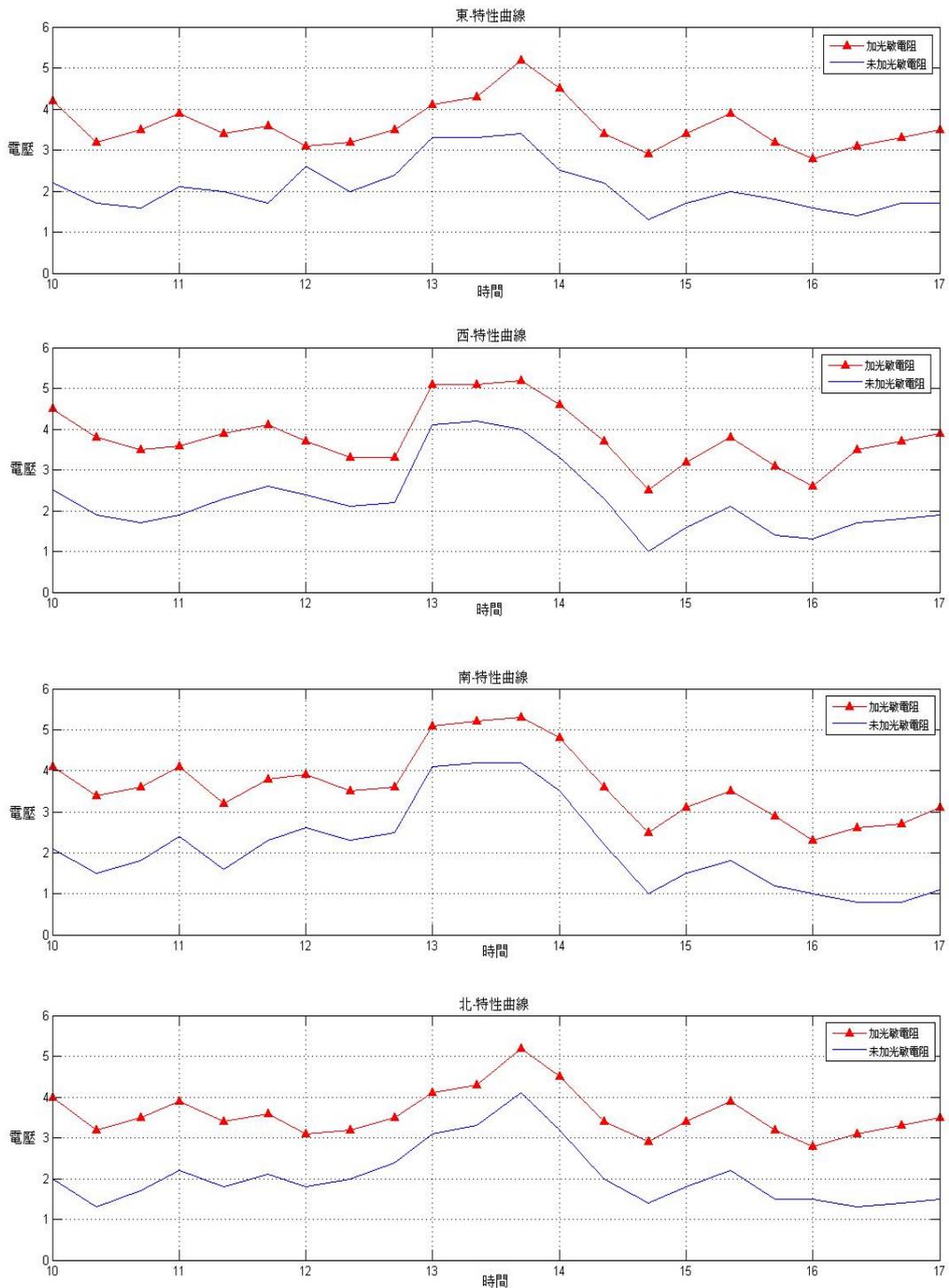
(二) 實地戶外量測

本次的實驗，是因為光感測器如果被雲遮蔽，光感測器輸出的電壓就會非常小，為改善這種因光線強弱所造成的電壓差，以原先的電路再加入光敏電阻，利用光敏電阻對光照強弱的特性讓感測器之輸出電壓差縮小，抵制雲層對光感測器的影響。並同時量測相對應方向之感測器的電壓數據來做比較，由以上數據的量測描繪出感測器在不同時間下輸出電壓之特性曲線。我們選三天不同天氣狀況下測量，分別是陰天、晴天、晴時多雲實地戶外量測數據，以下是我們的測量數據與特性曲線。

表八為實地戶外量測的數據，時間為 5 月 13 號，天氣狀況：
陰天，電壓單位：毫伏特(mV)

表八

光感測器	加光敏電阻				未加光敏電阻			
	南	北	東	西	南	北	東	西
時間	電壓	電壓	電壓	電壓	電壓	電壓	電壓	電壓
10:00	5.6	5.7	5.4	4.1	3.1	3.2	2.9	1.6
10:20	4.2	4.5	4.6	3.8	1	1.3	1.4	2
10:40	6.6	6.9	7	4.3	4.7	5	5.1	2.4
11:00	5.5	5.4	5.6	4.2	2.3	2.2	2.4	3
11:20	8	8.1	8.5	5.7	6.6	6.7	7.1	4.3
11:40	8.8	9	8.9	7.1	7.7	7.9	7.8	6
12:00	6.1	6.3	6.4	5.4	2.9	3.1	3.2	2.2
12:20	10.1	10.5	10.1	10.2	9.7	10.1	9.7	9.8
12:40	9.4	9.8	9.3	9.3	9	9.4	8.9	8.9
13:00	7.9	8.3	8.4	8.8	5.9	6.3	7.4	6.8
13:20	8.7	8.4	7.3	8.6	8	7.7	6.6	7.9
13:40	8.1	8	6.5	8.1	7.2	7.1	5.6	7.2
14:00	7.8	7.7	4.3	7.6	6.8	6.7	3.3	6.6
14:20	4.3	4.6	4.6	4.3	1.1	1.4	3.2	1.1
14:40	7.1	7.3	4.5	7.5	5.9	6.1	3.3	6.3
15:00	6.9	6.5	4.1	6.9	5.6	5.2	2.8	5.6
15:20	6.7	6.8	3.9	6.4	5.3	5.4	2.5	5
15:40	5.8	5.4	4.3	5.3	4.3	3.9	2.8	3.8
16:00	4.5	4.2	4.2	4.1	1.6	1.3	2.6	1.2
16:20	4.7	4.9	4	4.7	3.7	3.9	3	3.7
16:40	3.9	3.8	4.1	3.7	2.1	2	2.3	1.9
17:00	4.1	4	3.7	4.2	2	1.9	1.6	2.1



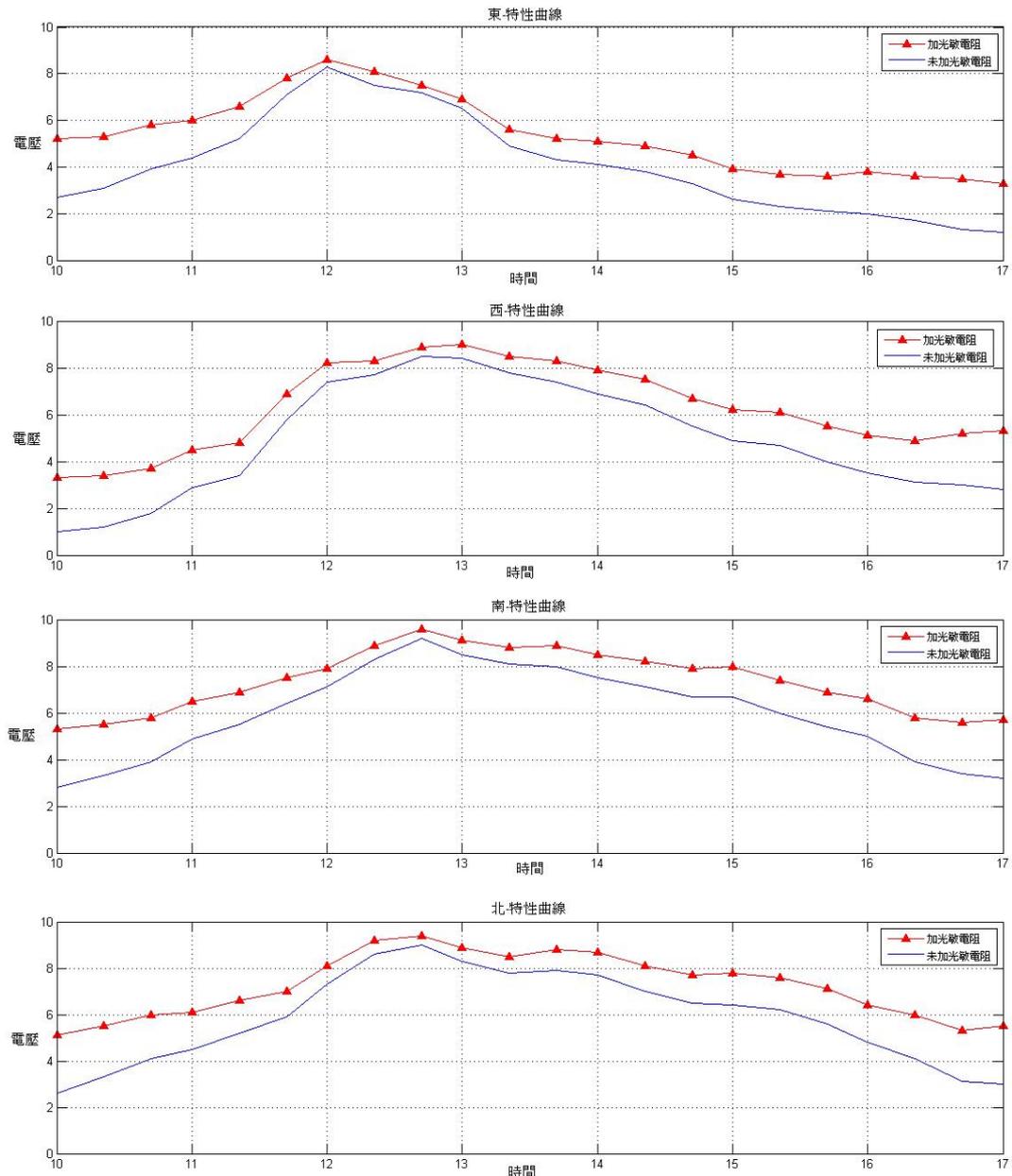
圖十一 5月13號 感測器-東西南北特性曲線

5月13號天氣狀況陰天，每個時段太陽光照都一樣，因此光敏電阻的電阻值並不會上升或下降，就好比一顆固定電阻一樣，電壓會比未加光敏電阻來的高，從圖一的特性曲線圖可以知道。

表九為實地戶外量測的數據，時間為5月14號，天氣狀況：晴天
電壓單位：毫伏特(mV)

表九

光感測器	加光敏電阻				未加光敏電阻			
	南	北	東	西	南	北	東	西
時間	電壓	電壓	電壓	電壓	電壓	電壓	電壓	電壓
10:00	5.3	5.1	5.2	3.3	2.8	2.6	2.7	1
10:20	5.5	5.5	5.3	3.4	3.3	3.3	3.1	1.2
10:40	5.8	6	5.8	3.7	3.9	4.1	3.9	1.8
11:00	6.5	6.1	6	4.5	4.9	4.5	4.4	2.9
11:20	6.9	6.6	6.6	4.8	5.5	5.2	5.2	3.4
11:40	7.5	7	7.8	6.9	6.4	5.9	7.1	5.8
12:00	7.9	8.1	8.6	8.2	7.9	7.3	8.3	7.4
12:20	8.9	9.2	8.1	8.3	8.7	8.6	7.5	7.7
12:40	9.6	9.4	7.5	8.9	9.2	9	7.2	8.5
13:00	9.1	8.9	6.9	9	8.5	8.3	6.5	8.4
13:20	8.8	8.5	5.6	8.5	8.1	7.8	4.9	7.8
13:40	8.9	8.8	5.2	8.3	8	7.9	4.3	7.4
14:00	8.5	8.7	5.1	7.9	7.5	7.7	4.1	6.9
14:20	8.2	8.1	4.9	7.5	7.1	7	3.8	6.4
14:40	7.9	7.7	4.5	6.7	6.7	6.5	3.3	5.5
15:00	8	7.8	3.9	6.2	6.7	6.4	2.6	4.9
15:20	7.4	7.6	3.7	6.1	6	6.2	2.3	4.7
15:40	6.9	7.1	3.6	5.5	5.4	5.6	2.1	4
16:00	6.6	6.4	3.8	5.1	5	4.8	2	3.5
16:20	5.8	6	3.6	4.9	3.9	4.1	1.7	3.1
16:40	5.6	5.3	3.5	5.2	3.4	3.1	1.3	3
17:00	5.7	5.5	3.3	5.3	3.2	3	1.2	2.8



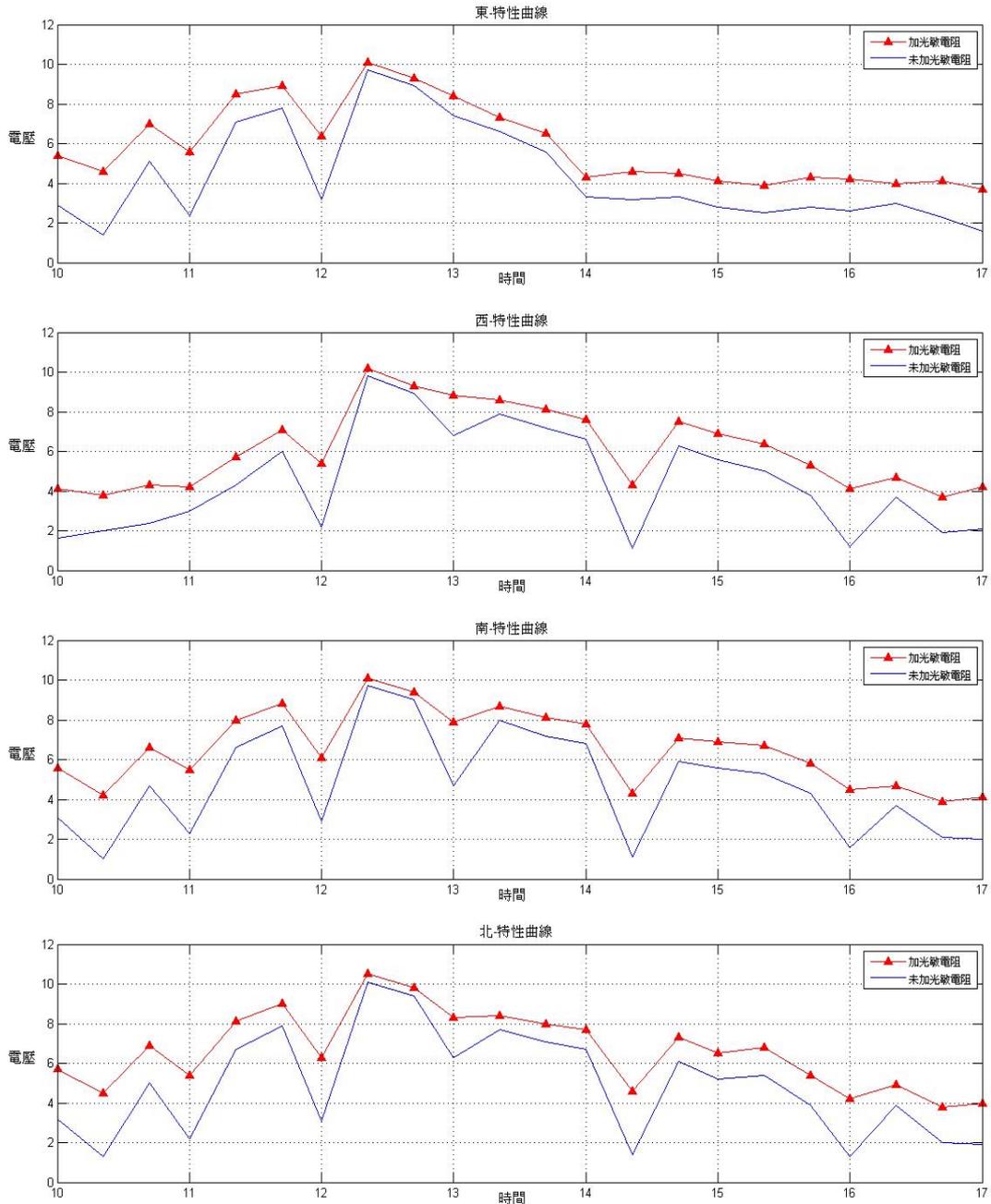
圖十二 5月14號 感測器-東西南北特性曲線

5月14號天氣狀況晴天，早上、下午的太陽光照強度比較弱，光敏電阻的電阻值會隨著光照強度變弱而上升，而中午的太陽光照強度較強，光敏電阻的電阻值會隨著光照強度變強而下降，從圖二我們可以看到藍色線是未加光敏電阻的特性曲線，早上、中午、下午三個時段的電壓差相當大，紅色線是加入光敏電阻之後的特性曲線，可以發現在早上、中午、下午不同光照強度情況下，電壓差值變小，光敏電阻有達到改善的效果。

表十為實地戶外量測的數據，時間為5月17號，天氣狀況：晴時多雲，電壓單位：毫伏特(mV)

表十

光感測器	加光敏電阻				未加光敏電阻			
	南	北	東	西	南	北	東	西
時間	電壓	電壓	電壓	電壓	電壓	電壓	電壓	電壓
10:00	5.6	5.7	5.4	4.1	3.1	3.2	2.9	1.6
10:20	4.2	4.5	4.6	3.8	1	1.3	1.4	2
10:40	6.6	6.9	7	4.3	4.7	5	5.1	2.4
11:00	5.5	5.4	5.6	4.2	2.3	2.2	2.4	3
11:20	8	8.1	8.5	5.7	6.6	6.7	7.1	4.3
11:40	8.8	9	8.9	7.1	7.7	7.9	7.8	6
12:00	6.1	6.3	6.4	5.4	2.9	3.1	3.2	2.2
12:20	10.1	10.5	10.1	10.2	9.7	10.1	9.7	9.8
12:40	9.4	9.8	9.3	9.3	9	9.4	8.9	8.9
13:00	7.9	8.3	8.4	8.8	5.9	6.3	7.4	6.8
13:20	8.7	8.4	7.3	8.6	8	7.7	6.6	7.9
13:40	8.1	8	6.5	8.1	7.2	7.1	5.6	7.2
14:00	7.8	7.7	4.3	7.6	6.8	6.7	3.3	6.6
14:20	4.3	4.6	4.6	4.3	1.1	1.4	3.2	1.1
14:40	7.1	7.3	4.5	7.5	5.9	6.1	3.3	6.3
15:00	6.9	6.5	4.1	6.9	5.6	5.2	2.8	5.6
15:20	6.7	6.8	3.9	6.4	5.3	5.4	2.5	5
15:40	5.8	5.4	4.3	5.3	4.3	3.9	2.8	3.8
16:00	4.5	4.2	4.2	4.1	1.6	1.3	2.6	1.2
16:20	4.7	4.9	4	4.7	3.7	3.9	3	3.7
16:40	3.9	3.8	4.1	3.7	2.1	2	2.3	1.9
17:00	4.1	4	3.7	4.2	2	1.9	1.6	2.1



圖十三 5月17號 感測器-東西南北特性曲線

5月14號天氣狀況晴時多雲，我們故意選在一天有雲的天氣到戶外做量測，看加入光敏電阻之後感測器對雲的干擾有沒有改善，從圖三可以看出是一條鋸齒狀的特性曲線圖，低電位的時候是因為那時段有雲層經過，當雲層經過的時候，電壓會急遽下降，但光照強度變弱導致光敏電阻的電阻值會上升，讓在有雲層干擾的情況下，電壓不會下降太快，藉由光敏電阻來達到對雲的干擾。

三、風力對系統的影響以及改善策略

太陽聚光板受風面積十分龐大，強風時施加於太陽能板的力矩十分大，造成太陽能板偏轉，無法對準太陽以至轉換效率變差，甚至可能造成整體機構的變形以致需作重新調校。設計高可靠太陽能面板追蹤系統，考慮風的干擾對系統的影響，將風是為外來干擾(noise)。我們將針對風的部分根據數據及運算方程式，推算出風的數據模組及數值。

(一) 風力的計算

風速所產生的力量，主要分為兩個部分，固定風力(F_m)及變化的風力(F_w)。(單位:牛頓 N)

$$F = F_m + F_w \quad (1)$$

則可變的風力的變化量是(10%~20%)的固定風力。

$$F_m = k_F v^2 \quad (2)$$

根據文獻[25]， k_F 為固定風力的增益係數，如下：

$$k_F = \begin{cases} 0.00223 & N/(m/s)^2 \\ 0.001 & lbf/(mph)^2 \\ 3.2283 \times 10^{-7} & lbf/(in/s)^2 \end{cases}$$

由(2)式，根據 Taylor 級數得知 $F_w = (\partial F_m / \partial v)|_{v=v_m} \Delta v$ ，且

$$(\partial F_m / \partial v)|_{v=v_m} = 2k_F v_m$$

因此得到以下式子：

$$F_w = 2k_F v_m \Delta v \quad (3)$$

然後，將 $\Delta v = \alpha v_m \Delta v_0$ 代入(3)式，得到以下式子：

$$F_w = 2K_F \alpha v_m^2 \Delta v_0 \quad (4)$$

在(4)式裡 $\alpha = \sqrt{6k}$ ， k 為表面阻力係數。

接著我們得到：

$$F_w = k_f \Delta v_0 \quad (5)$$

k_f 為風力的增益係數， Δv_0 為風速的變化量，由(5)式得到以下式子：

$$k_f = 2k_F \alpha v_m^2 \quad (6)$$

我們假設太陽能面板長和寬各為 6m， k (表面阻力係數) 為 0.0178， α 為 0.327，設 k_F 為 $0.00223 \text{ N}/(\text{m}/\text{s})^2$ ，我們得到：

$$k_f = 0.00146 v_m^2 \quad (7)$$

因此我們假設 $v_m = 8.94 \text{ m}/\text{s}$ ，代入(7)式得到：

$$k_f = 0.11669 \text{ N}/\text{m} \quad (8)$$

然後，將(8)式代入(5)，得到下面結果：

$$F_w = 0.11669 \Delta v_0 \quad (9)$$

由(9)式可以知道，因 Δv_0 為實際風速計測得的變化量為不固定的值，則 F_w 會隨 Δv_0 的變化而有所不同。

(二) 因風力所產生的轉矩

風的轉矩通式為(T_m 為固定轉矩): (單位: $\text{N} \cdot \text{m}$)

$$T_m = k_T v_m^2 = c_t A D p_n \quad (10)$$

$$p_n = \alpha_p v_m^2 \quad (11)$$

(11)式中， c_t (c_t 為無因次的係數，藉由風洞實驗模擬所假設的值，其值取決於風向和太陽能板間的夾角位置，其係數範圍為-0.05 到 0.25)其值假設為 0.25， A 為太陽能板的面積， D 為太陽能板的長和寬，則(12)式中 α_p 為靜態空氣密度其值為 $0.6126 \text{ N}/\text{s}^2/\text{m}^4$ ，將(12)式代入(11)式得到

$$T_m = c_t A D \alpha_p v_m^2$$

然後我們根據(11)式及(12)式我們得到：

$$k_T = c_t \alpha_p A D$$

因此我們將 $c_t = 0.25$ ， D 為 6m， $A = D^2$ ， $\alpha_p = 0.6126 \text{ N}/\text{s}^2/\text{m}^4$ ，代入上式得到固定的轉矩增益係數：

$$k_T = 33.0804 \text{ N} \cdot \text{s}^2 / \text{m}$$

根據文獻[25]得知，可變轉矩(T_w):(單位: $N \cdot m$)

$$T_w = \frac{\Delta T}{N_p} = \frac{2k_T v_m}{N_p} \Delta v$$

且 $\Delta v = \alpha v_m \Delta v_0$ ，得到:

$$T_w = \frac{2k_T \alpha v_m^2}{N_p} \Delta v_0$$

因此

$$T_w = k_t \Delta v_0$$

由以上式子中，我們可以得到以下的結果:

$$k_t = \frac{2k_T \alpha}{N_p} v_m^2$$

N_p 、 N_q 為太陽能面板方位角以及俯仰角的齒輪比，我們知道方位角的齒輪比(N_p)為 76，俯仰角的齒輪比(N_q)為 58，假設 $v_m = 8.94 \text{ m/s}$ 代入上式得知，可變的轉矩增益係數為:

$$N_p = 76 \text{ (方位角)}, \text{ 得到 } k_t = 22.7515 \text{ Nm}$$

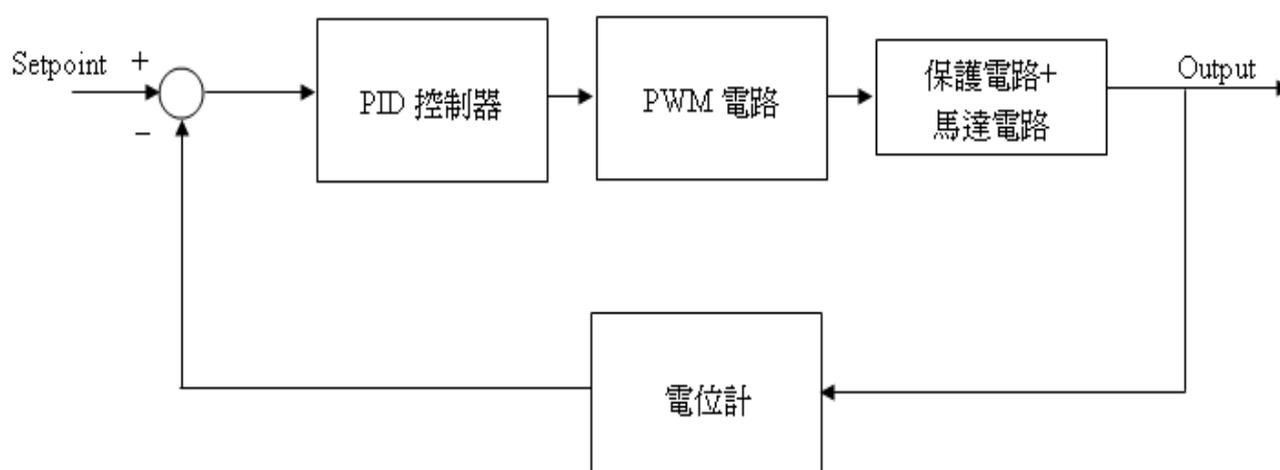
$$N_q = 58 \text{ (俯仰角)}, \text{ 得到 } k_t = 29.8123 \text{ Nm}$$

求得方位角與俯仰角的可變轉矩係數，接著就可以得到其轉矩 T_w ，我們可以將 T_m 和 T_w 視為太陽能追蹤控制系統的外來干擾雜訊 (noise)，來做探討及改善。

四、設計控制器

(一)PID 控制器設計

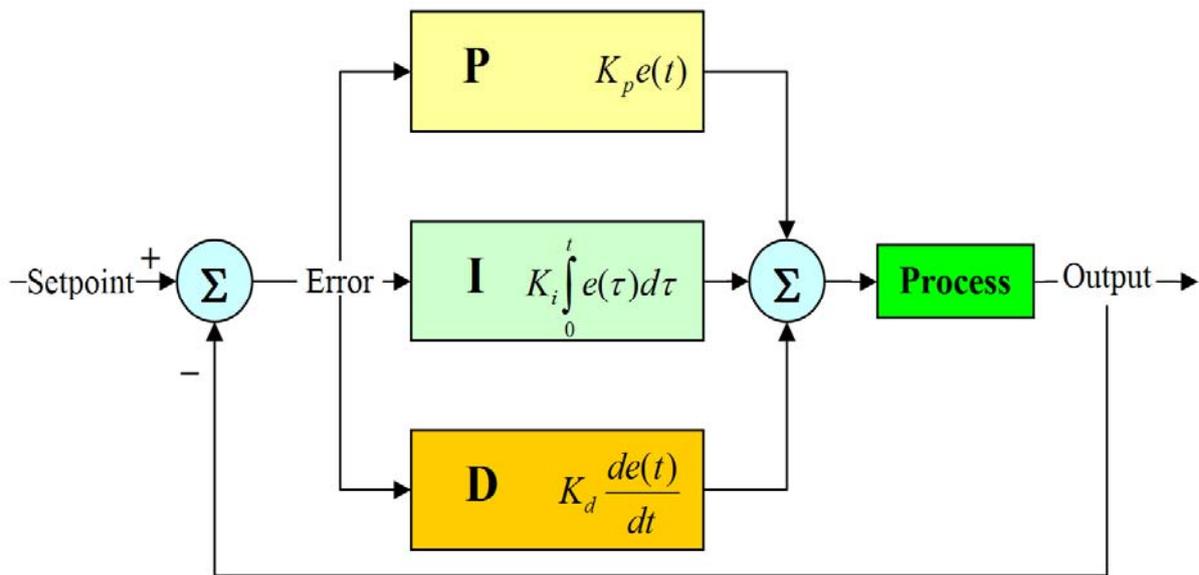
我們先對硬體的基本架構做詳細的解說，先設定 Setpoint(馬達旋轉的角度)此時輸入訊號先經由 NI-DAQ 卡來擷取訊號，再利用 Labview 內部的 PID 模組調整 K_p 、 K_i 和 K_d 三個參數的設定進而達成 PID 控制器設計。調整完後再輸出給 PWM (Pulse-width modulation) 電路來產生方波訊號，方波訊號會依輸入的訊號而改變馬達轉速。在通過馬達保護電路，以避免產生瞬間 H-bridge 上下電晶體同時導通，電源直接接地，電流無限大之狀況發生。馬達轉動時電位計的訊號也會同步回傳給 NI-DAQ 卡和 Setpoint 做比較，讓馬達運轉到我們設定的位置已達到精準的控制，以下就是結構圖：



圖十四 系統結構圖

(二)PID 控制器介紹

PID 控制器(比例 proportional-積分 integral-微分 derivative 控制器)，由比例單元 P、積分單元 I 和微分單元 D 組成。通過 K_p 、 K_i 和 K_d 三個參數的設定。PID 控制器主要適用於基本線性和動態特性不隨時間變化的系統。圖十五為典型 PID 控制結構圖



圖十五 PID 控制結構圖

在產業生產製程控制系統中的發展歷程中，PID 控制是歷史最悠久的。這個控制器把收集到的數據和一個參考值進行比較，然後把這個差值用於計算新的輸入值，這個新的輸入值的目的是可以讓系統的數據達到或者保持在參考值。和其他簡單的控制運算不同，PID 控制器可以根據歷史數據和差別的出現率來調整輸入值，這樣可以使系統更加準確，更加穩定。可以通過數學的方法證明，在其他控制方法導致系統有穩定誤差或過程反覆的情況下，一個 PID 反饋迴路卻可以保持系統的穩定。

一個控制迴路包括三個部分：

1. 系統的感測器得到的測量結果
2. 控制器作出決定
3. 通過一個輸出設備來作出反應

控制器從感測器得到測量結果，然後用需求結果減去測量結果來得到誤差。然後用誤差來計算出一個對系統的糾正值來作為輸入結果，這樣系統就可以從它的輸出結果中消除誤差。在一個 PID 迴路中，這個糾正值有三種演算法，消除目前的誤差，平均過去的誤差，和透過誤差的改變來預測將來的誤差。

PID 控制器轉移函數如下

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s}$$

K_p 是比例增益係數，其控制效果是減小響應曲線的上升時間及穩態誤差，但無法做到消除穩態誤差，一般不會單獨使用。 K_i 是積分增益係數，其控制效果是消除穩態誤差，但它會延長調整時間，增加超越量，甚至影響系統的穩定性，因此，一般也不會單獨使用。 K_d 是微分增益係數，其控制效果是增強系統的穩定性，減小調整時間，減小超越量。 K_p 、 K_i 和 K_d 與系統時域性能指標關係表大約如下：

表十一

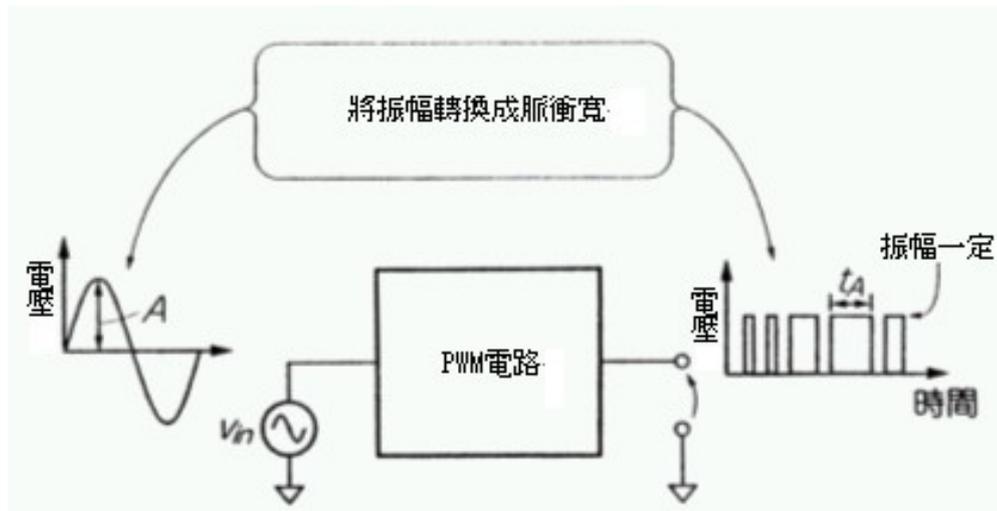
參數	上升時間	超越量	調整時間	穩態誤差
K_p	減小	增大	微小變化	減小
K_i	減小	增大	增大	消除
K_d	微小變化	減小	減小	微小變化

此圖表的意義是 PID 參數增大時各系統性能指標的變化狀況。當然，各參數與性能指標之間的關係不是絕對的，只是表示一定範圍內的相對關係。因為各參數之間還有相互影響，一個參數變了，另外兩個參數的控制效果也會跟著改變。在此提出文獻上 PID 控制參數的調整方法。

(三) PWM 電路

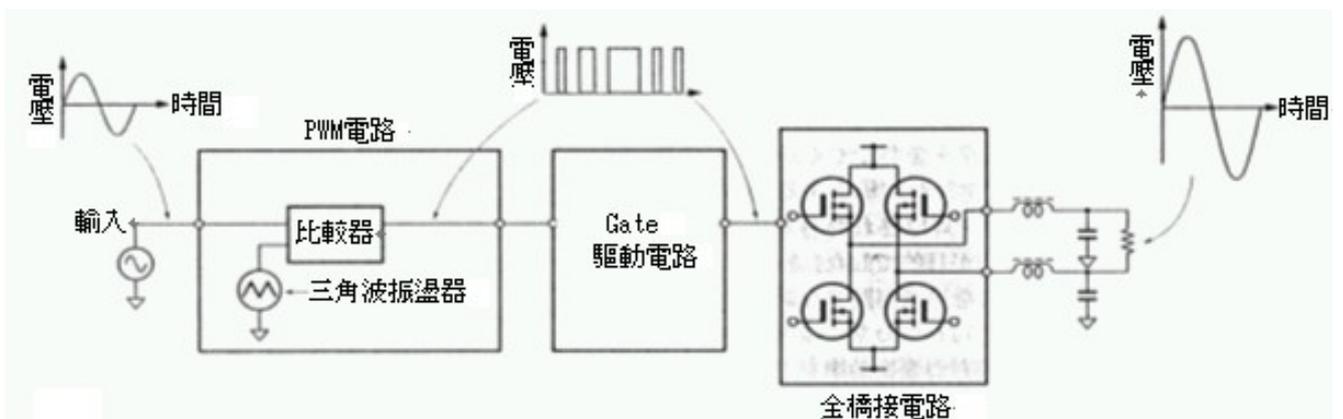
脈衝寬度變調(PWM:Pulse Width Modulation)電路除了可以監控功率電路的輸出狀態之外，同時還提供功率元件控制信號，因此廣泛應用在高功率轉換效率的 switching 電源、馬達 Inverter、音響用 D 極增幅器、DC-DC Converter、UPS 等各種高功率電路。

如圖十六 所示 PWM 電路主要功能是將輸入電壓的振幅轉換成寬度一定的脈衝，換句話說它是將振幅資料轉換成脈衝寬度。一般 switching 輸出電路只能輸出電壓振幅一定的信號，為了輸出類似正弦波之類電壓振幅變化的信號，因此必需將電壓振幅轉換成脈衝信號。



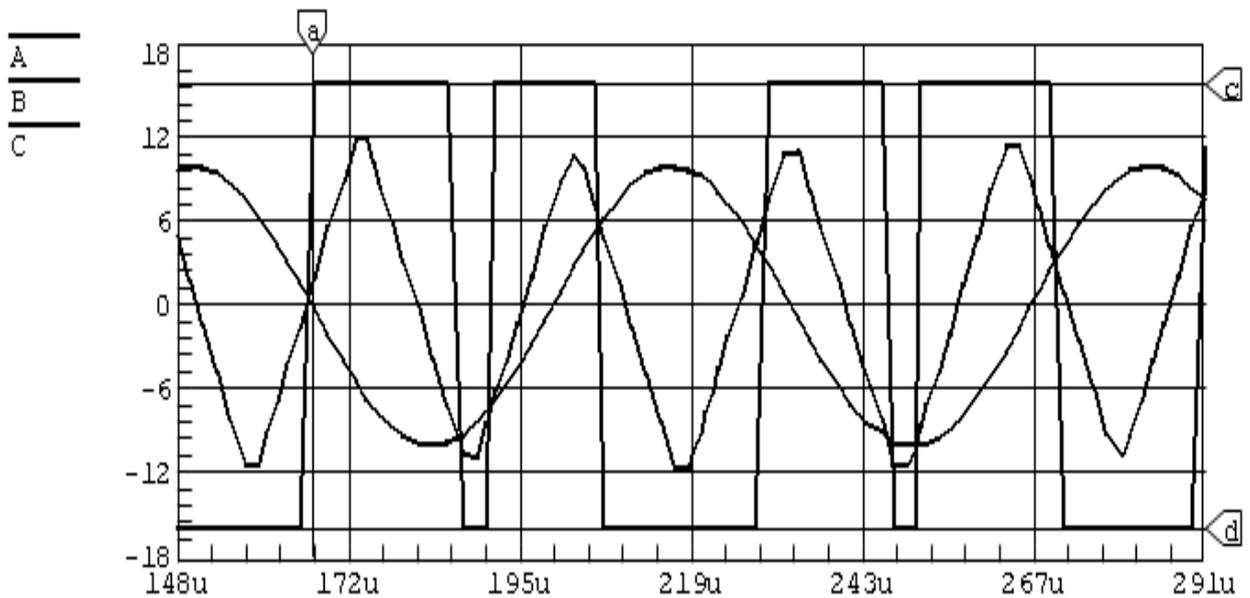
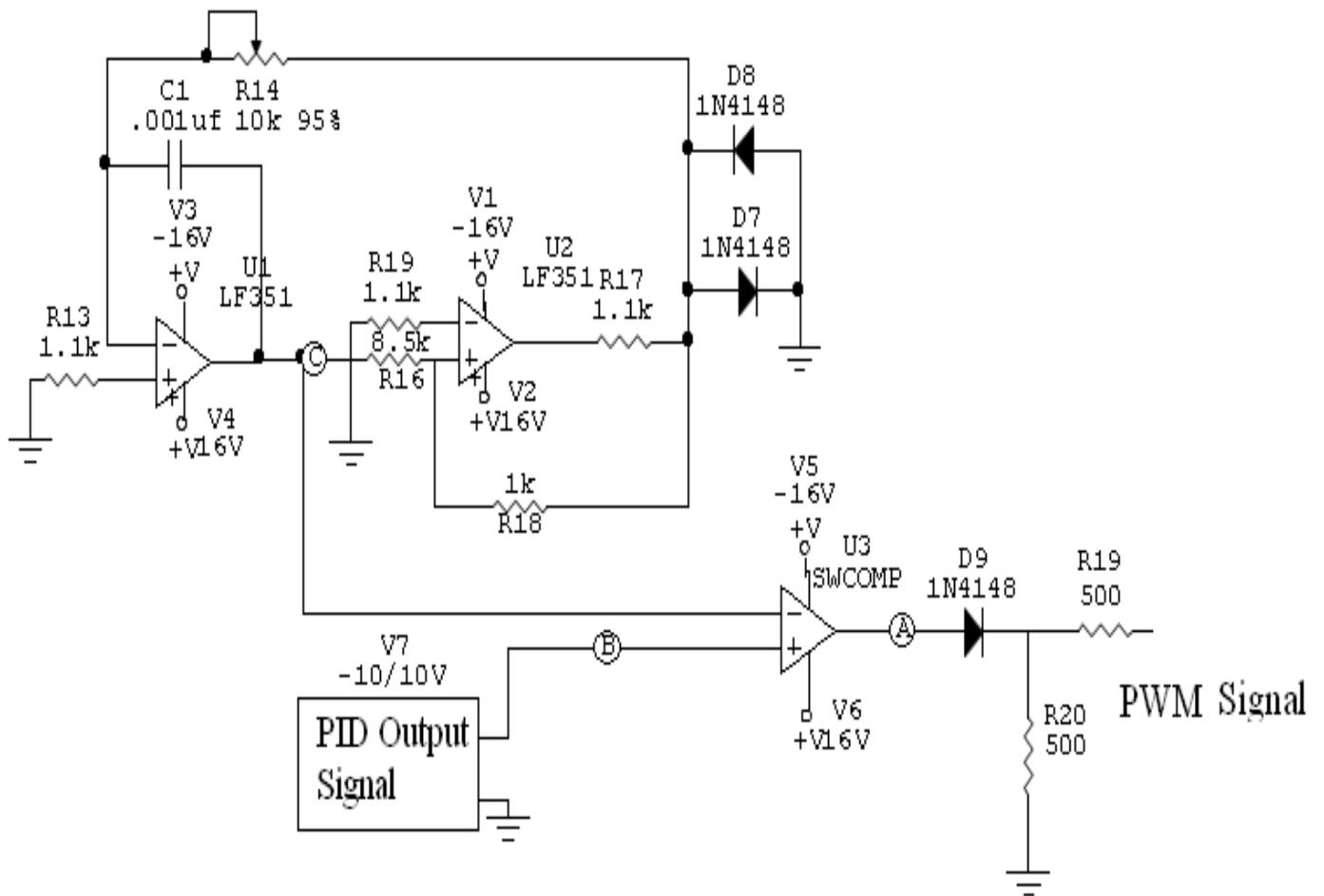
圖十六 PWM 電路主要功能

如圖十七所示高功率電路分別由 PWM 電路、Gate 驅動電路、Switching 輸出電路構成，其中 PWM 電路主要功能是使三角波的振幅與指令信號進行比較，同時輸出可以驅動功率 MOSFET 的控制信號，透過該控制信號控制功率電路的輸出電壓。



圖十七 PWM 電路在高功率電路中的扮演的角色

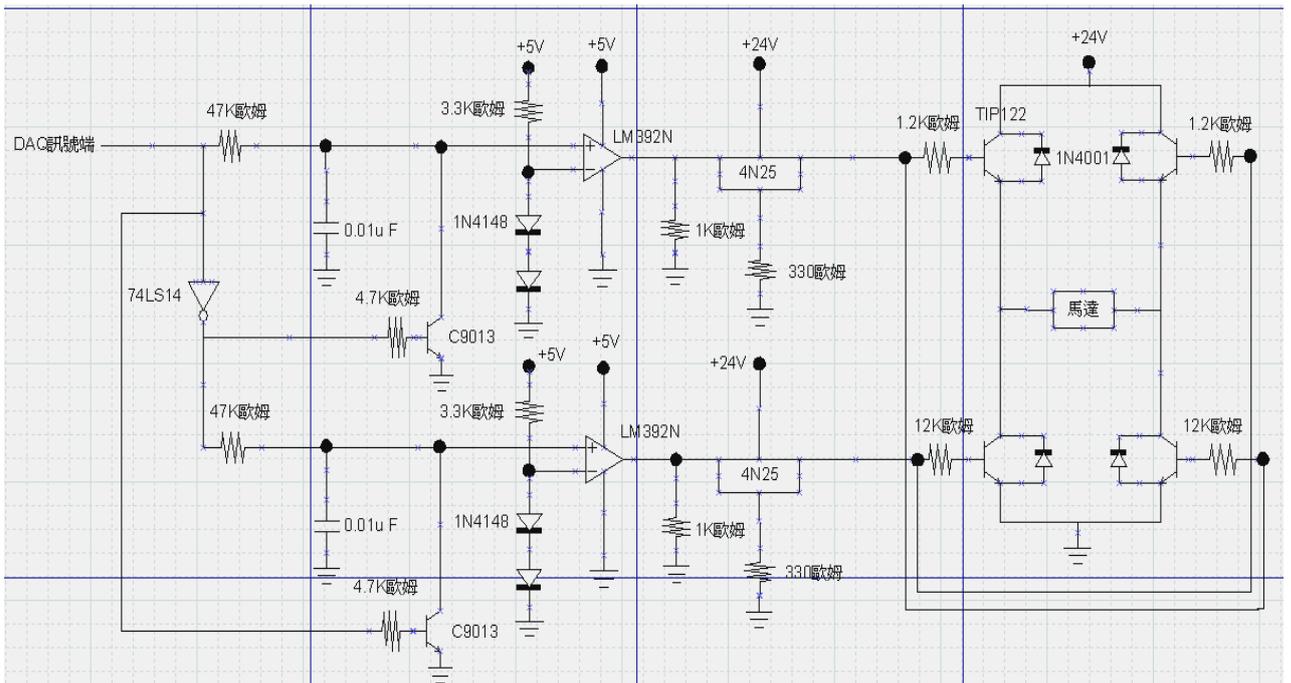
為了把 PID 輸出的訊號轉換成方波訊號，因此增加了 PWM 電路如圖十八 所示，圖中的 C 點是用 LF351(IC)產生三角波訊號和 B 點 PID 輸出訊號做比較產生 A 點的方波訊號，而 R14 用可變電阻以方便改變三角波的週期



圖十八 PWM 電路

(四)保護電路與馬達電路

PWM 電路完成後製作保護電路(如圖十九)。藉由保護電路中的 RC 充放電以延遲訊號，避免產生瞬間 H-bridge 上下電晶體同時導通，電源直接接地，電流無限大之狀況發生。保護電路中，RC 充放電延遲時間需要計算電阻及電容值，反向器採用 HD74LS14。在反向訊號輸出端可能有訊號衰減之情況，但幅度不大，所以需要視情況再加入放大電路，比較器部份總共試過 3 種型號 LM311、LM339、LM392，使用 LM311 及 LM339 均會使訊號不穩定，並衰減甚至無法使用，所以最後採用 LM392。H-bridge 中達靈頓電晶體使用 TIP122，此電晶體可耐受最大電流可到 5A，但有鑑於長期運轉可能產生高溫，所以我們加裝散熱器。亦可以改用 TIP140 這型可耐受 10A 高電流的電晶體。



圖十九 保護電路圖

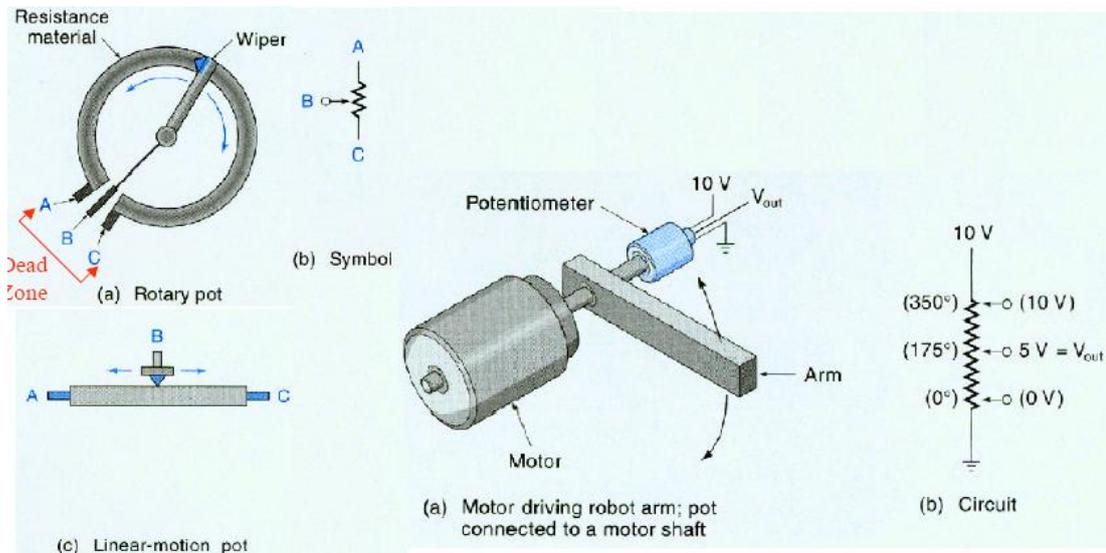
(五)電位計

電位計(Potentiometer)或分壓器(Pot)通常用來將角位移或線位移轉換成電壓量，比較像是 360 度的可變電阻，主要是安裝在馬達上當馬達旋轉時阻值會相對的變動，此時電位計會回傳電壓給

NI-DAQ 裡讓我們能夠精確的控制馬達。

舉例：若外加電壓為 10V 旋轉角度為 82 度(如圖二十的 Circuit 所示)，則電位計輸出電壓為：

$$\text{電位計電壓} = \frac{10}{350^\circ} \times 82^\circ = 2.34\text{V}$$



圖二十 電位計圖解

而本系統所使用的電位計是日本 COPAL 公司製造，為線繞單圈精密電位器，其特色為長壽命、高可靠性、超低噪音。型號為 J50S-310，規格如下：

1. 日本 COPAL 線繞單圈精密電位器，長壽命，高可靠性，超低噪音
2. JxxS 為繞線式，使用壽命為 5 百萬次 Cycle
3. 阻值：10K
4. 直徑：50.8φ，柄長：20mm，柄直徑：6φ
5. 有效電角：355°±1.5°
6. 機械角：360°
7. 額定功率：1.5W 40°C
8. 電介質強度：1000Vrms 1 min



圖二十一 電位計(圖來源 <http://shop.cpu.com.tw/product/1139/info/>)

(六)資料擷取

資料擷取是為了擷取輸入訊號以讓 Labview 軟體做 PID 的調整。資料擷取的目的是量測電子或物理現象，如電壓、電流、溫度、壓力或聲音。以 PC 進行的資料擷取結合電腦、界面電路、及資料擷取軟體，將量測自動化，並讓資料得以用於分析。雖然每一個資料擷取系統皆根據其應用需求而特別定義，但是所有的系統都具備相同的目標，就是擷取、分析及呈現資料。完整的資料擷取系統結合訊號、感測器、或致動器、訊號處理、資料擷取裝置、以及軟體。

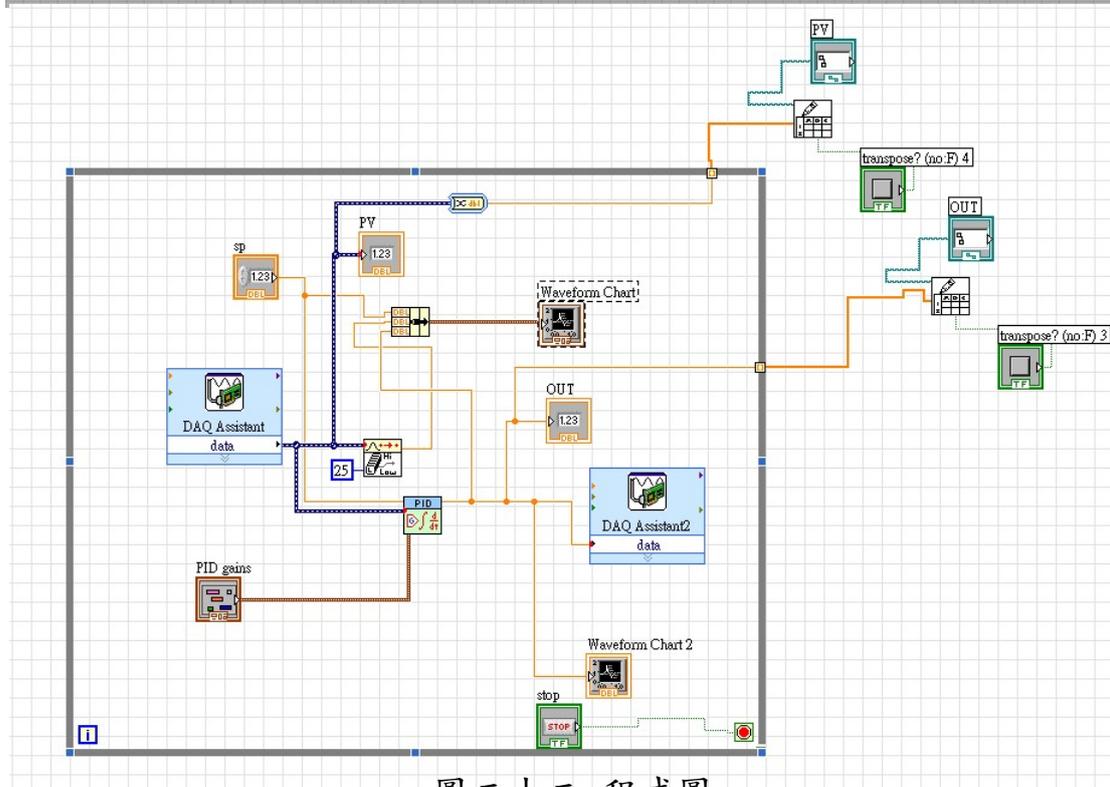
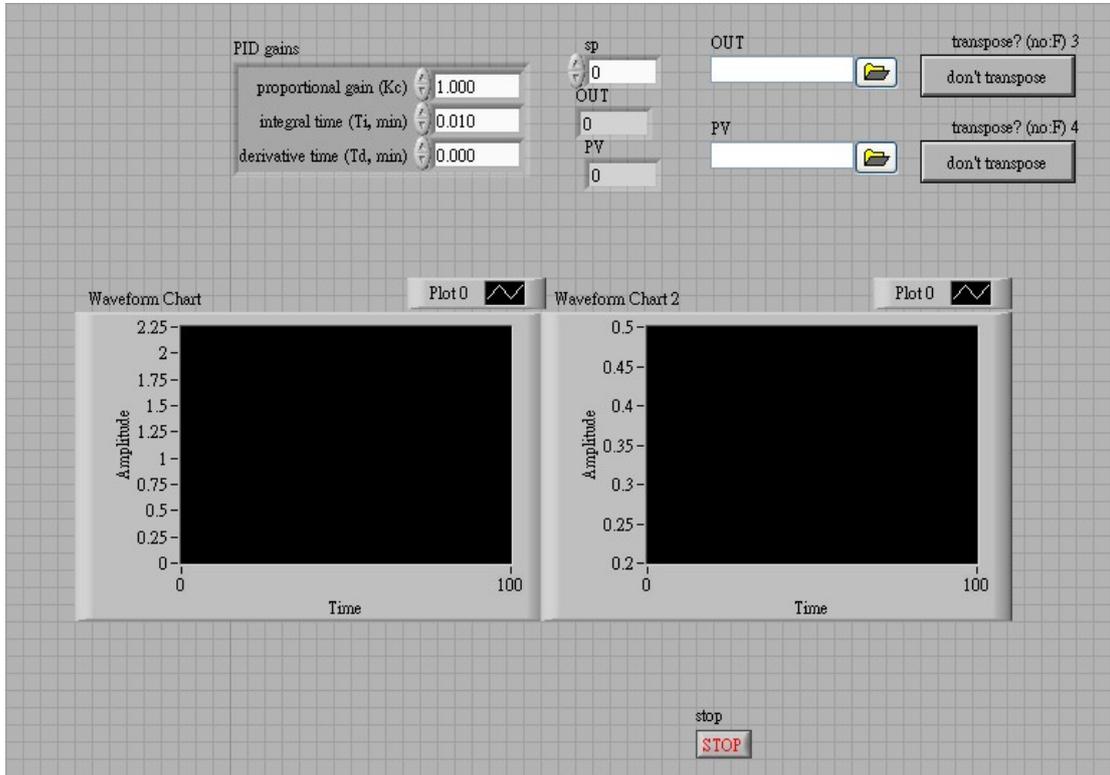
我們的系統架構分為以下四部份：

- 1.軟體: NI Labview 8.0
- 2.使用平台: 桌上型 PC
- 3.DAQ: NI PCI-6221
- 4.感測器: 電位計

以 LabVIEW 軟體擷取電位計回授訊號，經由 NI-DAQ PCI-6221 多功能界面卡將訊號何輸入訊號做減法的動作，相減的輸出訊號給 PID 控制器做調整，以驅動馬達運轉。

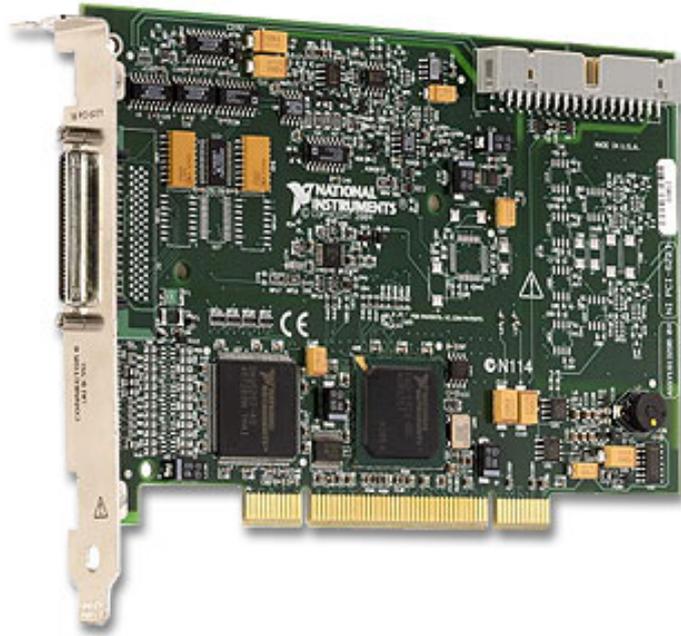
1. 軟體:NI LabVIEW 2009

(1)程式圖(DAQ內部設定如附件三)



圖二十二 程式圖

(2) DAQ:NI PCI-6221



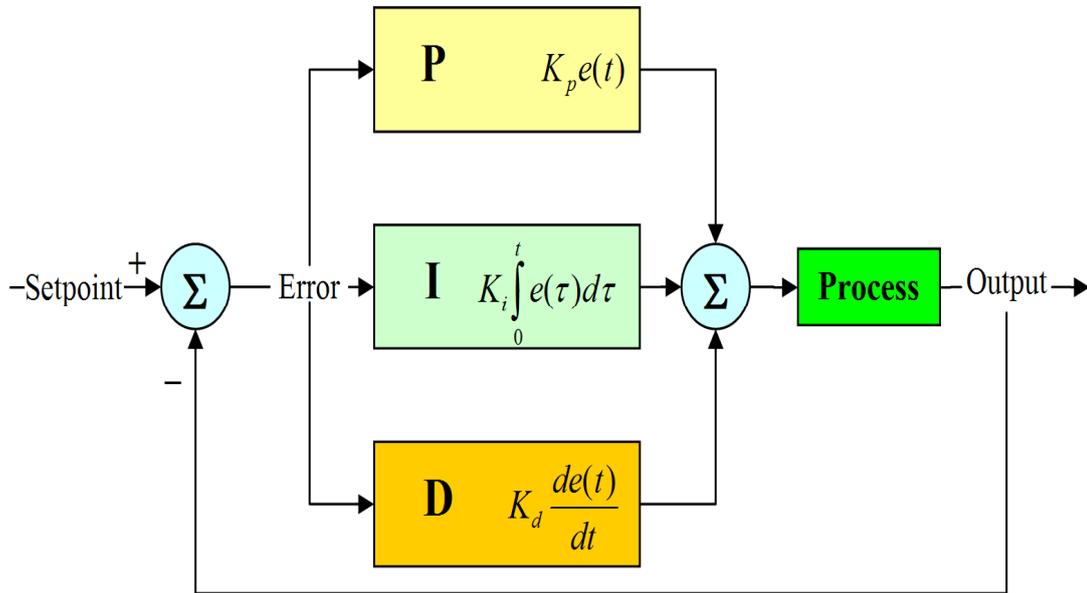
圖二十三 DAQ:NI PCI-6221

產品特色：

- 2 個 16 位元類比輸出 (833 kS/s 取樣率)；24 個數位 I/O；32 位元計數器。
- 可追蹤的 NIST 校準證明書，和超過 70 種訊號處理的選擇
- 相關 DIO (8 個時脈通道、1 MHz)。
- 可提升量測精確度的 NI-MCal 校準技術。
- 可選擇 5 倍取樣率的高速 M 系列，或選擇 4 倍解析度的高精確度 M 系列。
- NI-DAQmx 驅動軟體與 NI Labview SignalExpress 互動式資料記錄軟體。

(七) PID 控制響應模擬圖

PID 控制器基本的形式如圖 24:



圖二十四 PID 控制結構圖

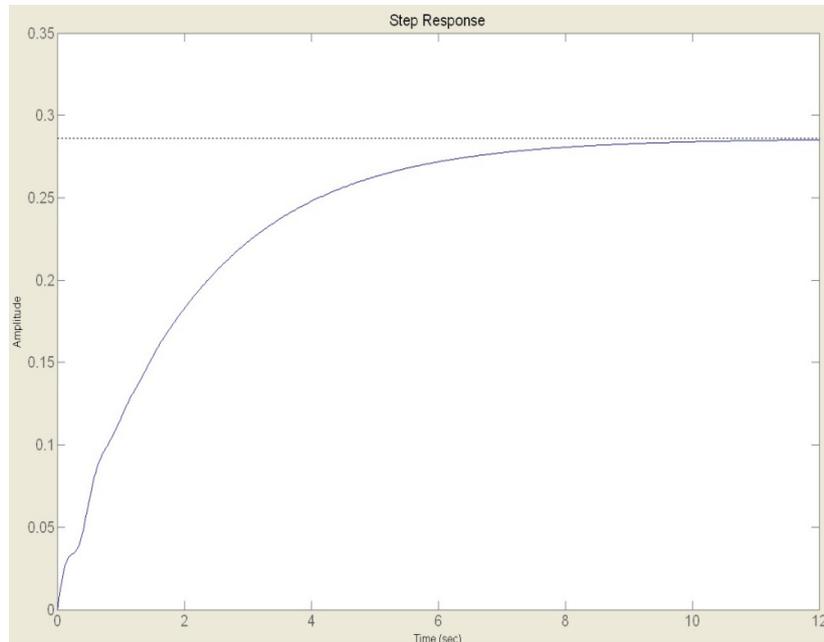
調整的方法如下：

1. 一開始先設定 $K_p = 1$ 、 $K_i = 0$ 和 $K_d = 0$ 。
2. 增加 K_p 直到 rise time 達到所預期的值。
3. 增加 K_d 以減少 overshoot，直到 overshoot 到可接受的範圍。
4. 增加 K_i 以消除 steady-state error。
5. 重複 2~3 的動作直到想要的結果。

利用上面的法則調整 PID 控制器參數以找出最佳控制器，而調整的 Model 分為方位角和俯仰角，以下圖形是分別調整 K_p 、 K_i 和 K_d 輸出的圖形：

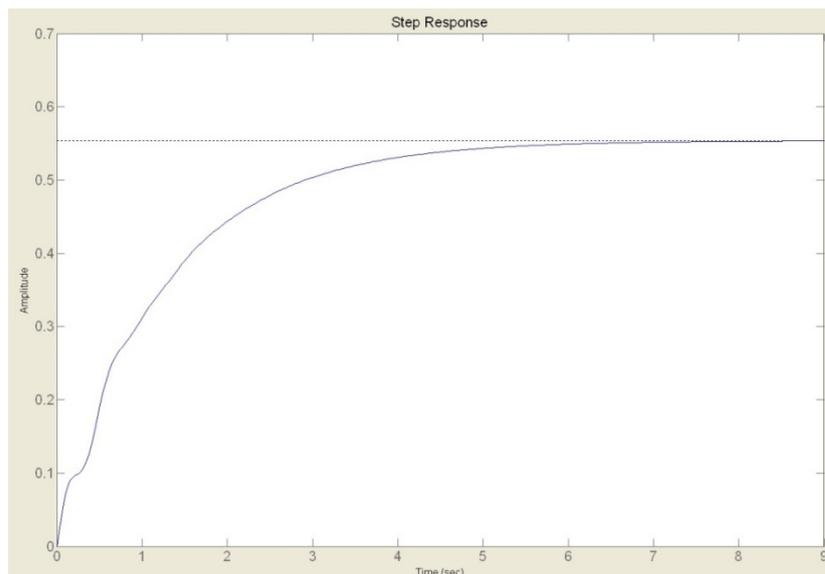
1. 方位角 PID 控制器

(1) 方位角 $K_p = 1$ 、 $K_i = 0$ 和 $K_d = 0$ 的步階響應圖如下，由步階圖可知無 overshoot，而 rise time 為 4.44 秒，setting time 為 7.81 秒。



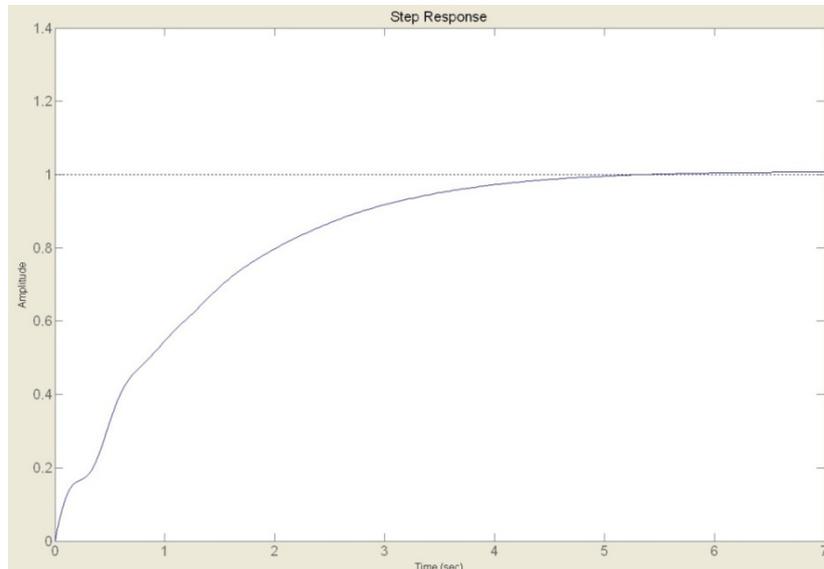
圖二十五 方位角步響應圖

(2) 方位角 $K_p = 3.2$ 、 $K_i = 0$ 和 $K_d = 0$ 的步階響應圖如下，由步階圖可知無 overshoot，而 rise time 為 2.8 秒，setting time 為 4.93 秒。



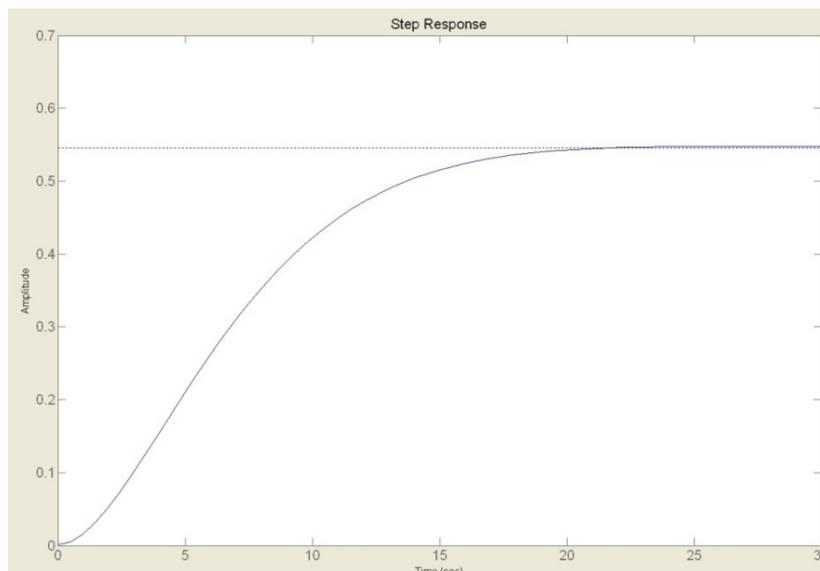
圖二十六 方位角 K_p 調整響應圖

(3) 方位角 $K_p = 3.2$ 、 $K_i = 2.1$ 和 $K_d = 0$ 的步階響應圖如下，由步階圖可知 Overshoot 為 0.66%，而 rise time 為 2.72 秒，setting time 為 4.24 秒。



圖二十七 方位角 K_p 、 K_i 調整響應圖

(4) 方位角 $K_p = 3.2$ 、 $K_i = 2.1$ 和 $K_d = 0.45$ 的步階響應圖如下，由步階圖可知 Overshoot 為 0.335%，而 rise time 為 11.1 秒，setting time 為 17.7 。



圖二十八 方位角 K_p 、 K_i 和 K_d 調整響應圖

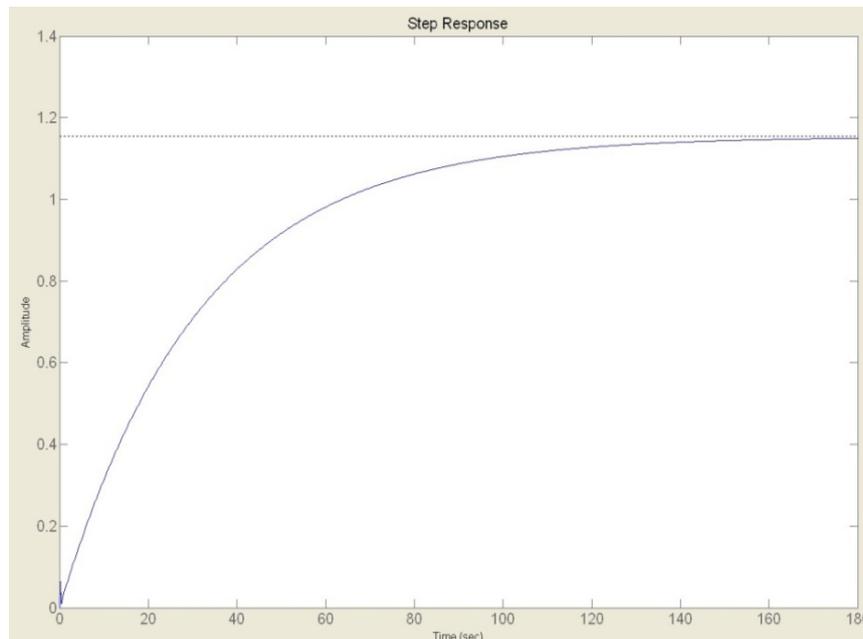
表十二

調整參數	Overshoot	rise time	setting time
無	0%	7.81 秒	4.44 秒
K_p	0%	2.8 秒	4.93 秒
K_p 、 K_i	0.66%	2.72 秒	4.24 秒
K_p, K_i, K_d	0.335%	11.1 秒	17.7 秒

由表十二知調整 K_p 、 K_i 雖然 overshoot 從 0 增加到 0.66% 但是 rise time 從 7.81 秒減少到 2.72 秒和 setting time 從 4.44 秒減少到 4.24 秒，而調整 K_p, K_i, K_d 雖然 overshoot 有改善但 rise time 和 setting time 無改善，因此在設計控制器方面選擇 PI 控制器。

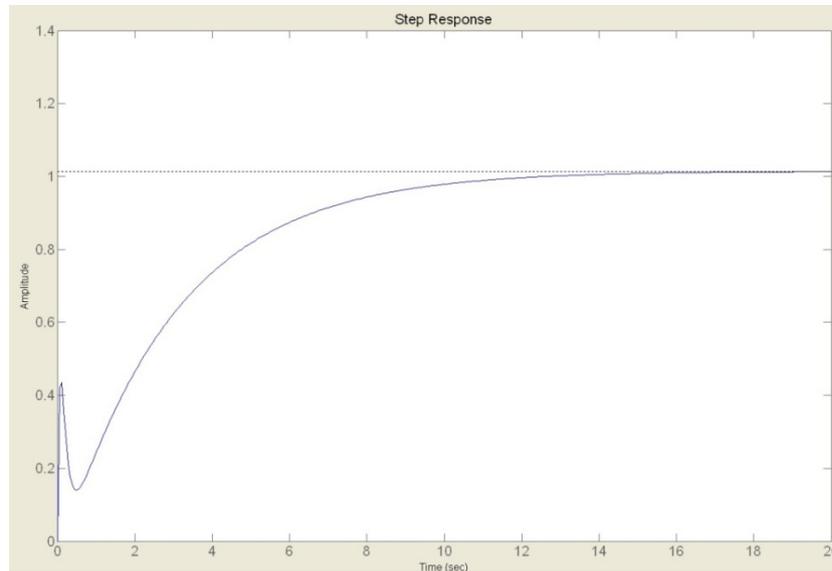
2. 俯仰角 PID 控制器

(1) 俯仰角 $K_p = 1$ 、 $K_i = 0$ 和 $K_d = 0$ 的步階響應圖如下，由圖二十九可知無 overshoot，而 rise time 為 69.4 秒，setting time 為 124 秒。



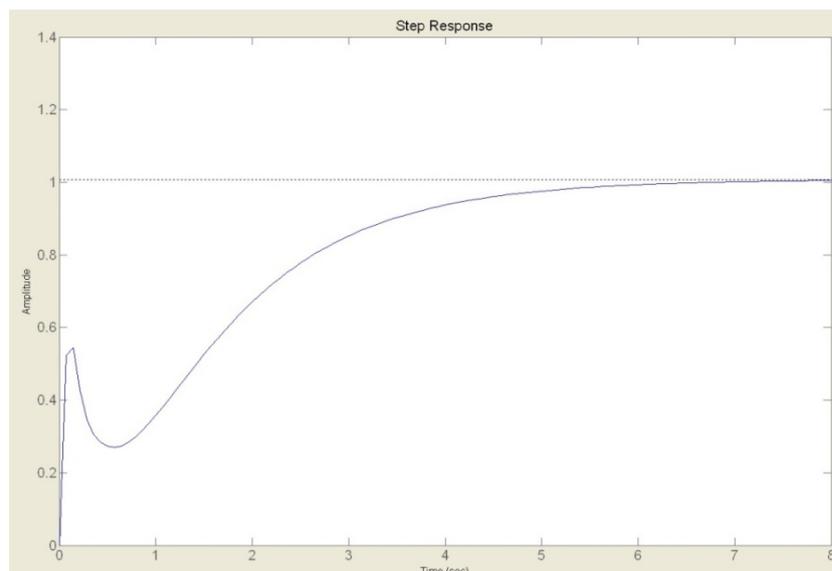
圖二十九 俯仰角步階響應圖

(2) 俯仰角 $K_p = 5.6$ 、 $K_i = 0$ 和 $K_d = 0$ 的步階響應圖如下，由圖三十可知無 overshoot，而 rise time 為 6.94 秒，setting time 為 11.8 秒。



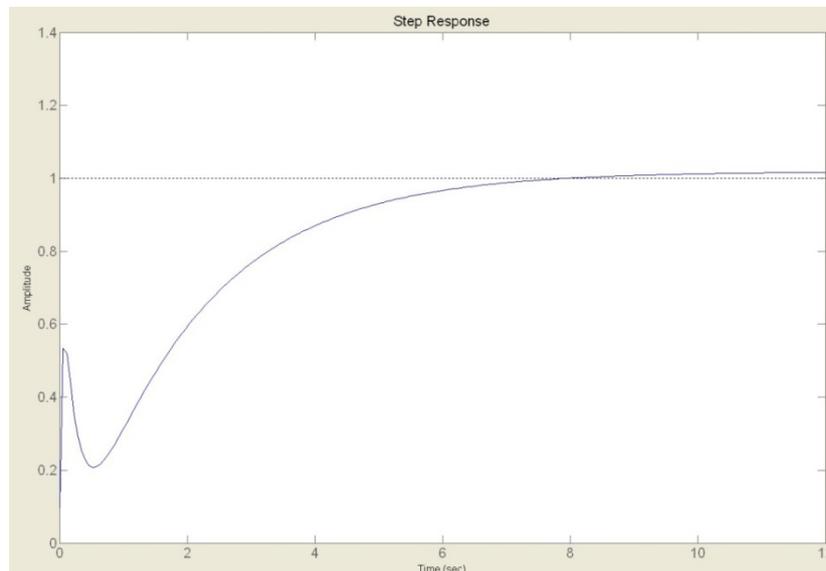
圖三十 俯仰角 K_p 調整響應圖

(3) 俯仰角 $K_p = 5.6$ 、 $K_i = 3.2$ 和 $K_d = 0$ 的步階響應圖如下，由圖三十一可知 Overshoot 為 0%，而 rise time 為 3.54 秒，setting time 為 5.57 秒。



圖三十一 方位角 K_p 、 K_i 調整響應圖

(4) 俯仰角 $K_p = 5.6$ 、 $K_i = 3.2$ 和 $K_d = 0.15$ 的步階響應圖如下，由圖三十二可知 Overshoot 為 1.79%，而 rise time 為 4.59 秒，setting time 為 6.67 秒。



圖三十二 俯仰角 K_p 、 K_i 和 K_d 調整響應圖

表十三

調整參數	Overshoot	rise time	setting time
無	0%	69.4 秒	124 秒
K_p	0%	6.94 秒	11.8 秒
K_p 、 K_i	0%	3.54 秒	5.57 秒
K_p 、 K_i 、 K_d	1.79%	4.59 秒	6.67 秒

由表十三知調整 K_p 、 K_i 無 overshoot，且 rise time 從 69.4 秒減少到 3.54 秒，而 setting time 從 124 秒減少至 5.57 秒，但調整參數 K_p 、 K_i 、 K_d 在 overshoot、rise time 以及 setting time 均無顯著改善，因此在設計控制器方面，我們選擇 PI 控制器。

在本章的一開始有說明如何調整 PID 控制器參數，較高的 K_p 值可加快馬達系統響應但同時導致 overshoot 過大及振盪的不穩定性；增加 K_d 可降低因高加速度而在馬達目標位置產生的來回震動； K_i 值調整可增加位置精確度，進一步消除穩態誤差；經調整後發現不管是方位角或是俯仰角都用 K_p 、 K_i 調整就足夠了，增加 K_d 對系統沒有明顯的改善，控制器的設計讓本系統更快達到我們要求的狀態。

(八) 現場實測

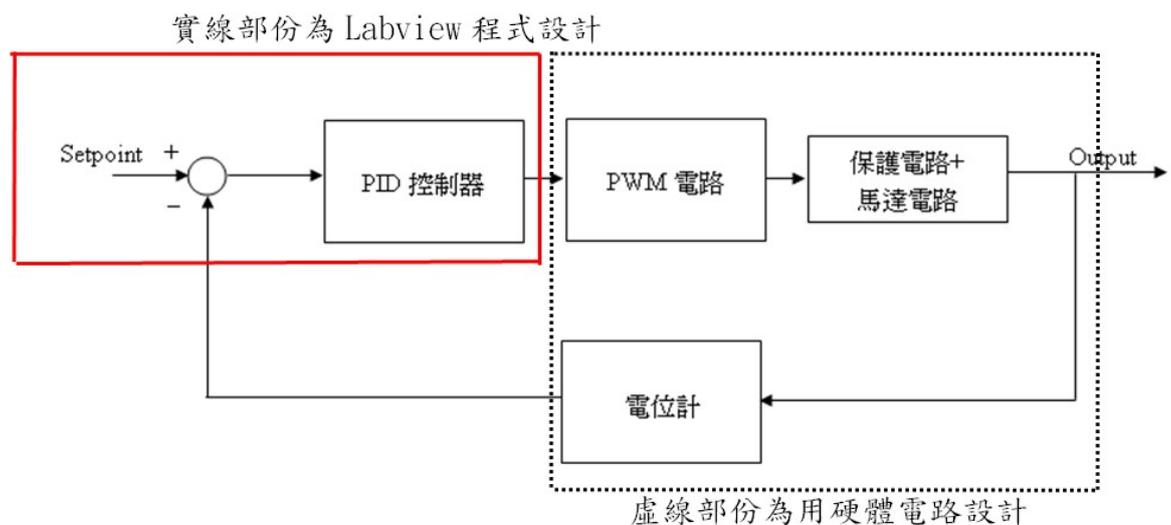
上面的軟體模擬是根據去年實地量測所得資料，再利用 Matlab 軟體之 System Identification toolbox 建立太陽能發電系統方位角與俯仰角的數學模型，為了讓現場實地測試更加順利，所以我們先用軟體模擬調整 PID 控制器參數。

經過軟體模擬之後，有了調整 PID 控制器參數的經驗，發現軟體模擬出來的結果，overshoot 震盪的幅度並不會很大，而 setting time 在調整控制器參數時有很明顯的改善，在模擬後發現俯仰角調整

K_p 、 K_i 參數就足夠了，有了上述的調整經驗在到中科院現場實測，

現場實際調整 PID 參數時會依經驗法則調整 K_p 、 K_i 參數，以下是實

做的整套系統設計架構：



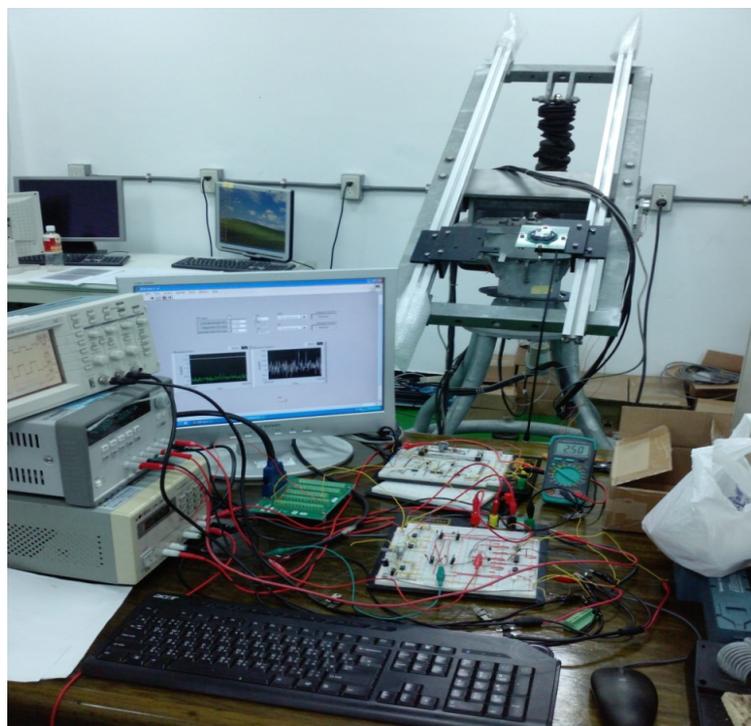
圖三十三 系統設計架構圖

PID 控制器的設計，用 Labview 內部的 PID 控制模組，再配合 NI-DAQ PCI-6221 的資料擷取卡讀取電位計資料，而經 PID 調整後的資料再經由 NI-DAQ 輸出給 PWM 電路產生訊號給馬達。

以下是現場太陽能機台、實際電路測試連接圖：

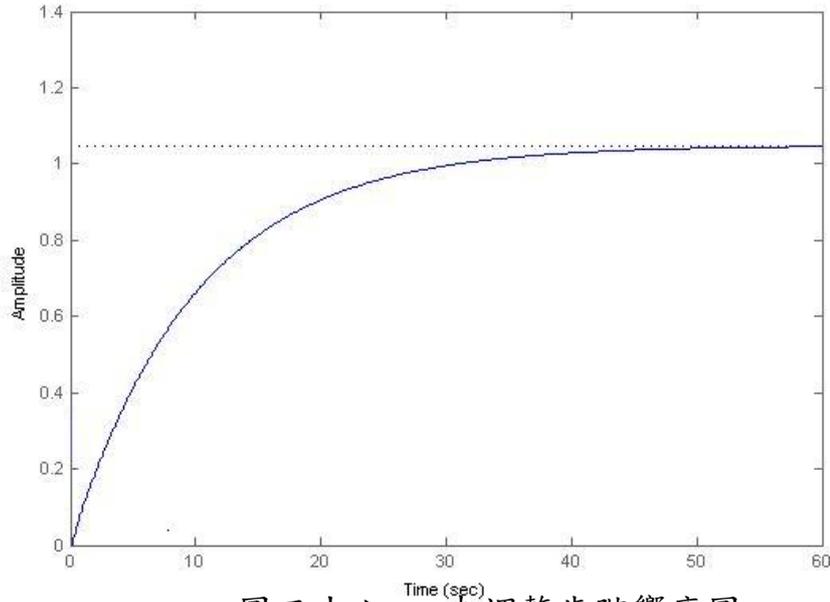


圖三十四 太陽能面板機構



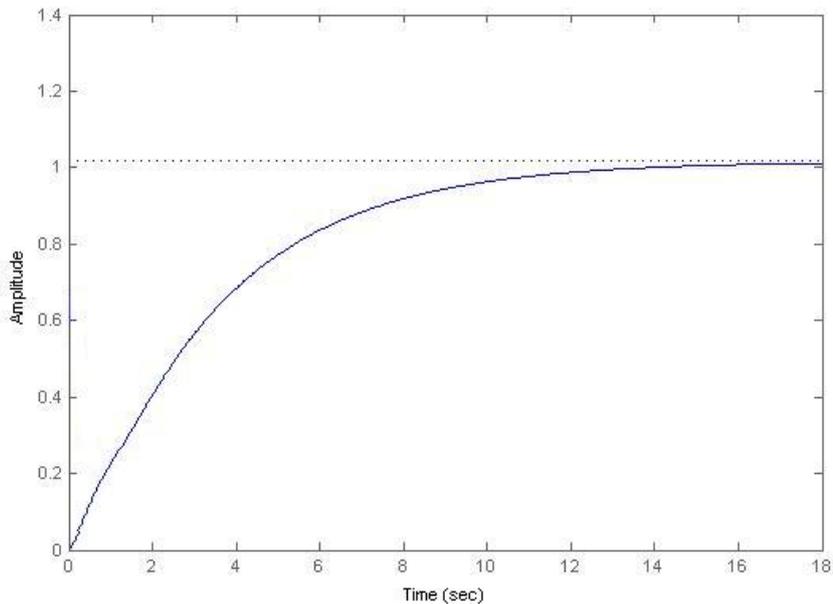
圖三十五 實際電路測試連接

調整俯仰角 $K_p = 1$ 、 $K_i = 0$ 和 $K_d = 0$ 的步階響應圖



圖三十六 未調整步階響應圖

調整俯仰角 $K_p = 18.5$ 、 $K_i = 14$ 和 $K_d = 0$ 的步階響應圖



圖三十七 調整後步階響應圖

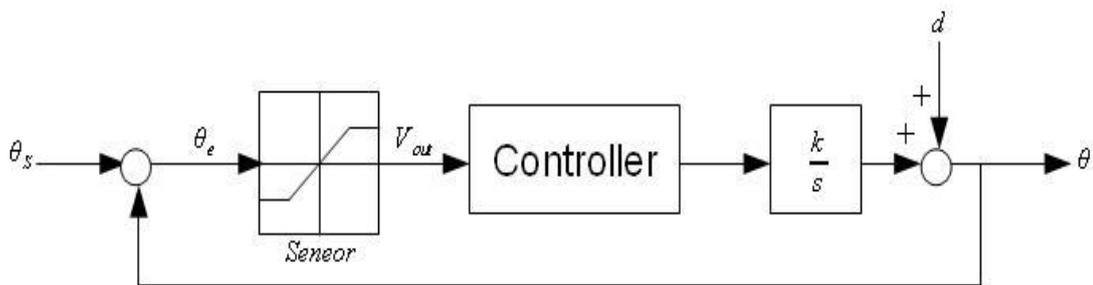
PID 控制器讓系統響應無 overshoot，而 setting time 從 40 秒降到 13 秒，調整後對系統特性有很大的改善。傳統控制器參數不容易調整得到最佳值，而前述電腦模擬與現場調整並未考慮外來干擾（風、系統參數變動）影響，下一章節將設計具 PI 架構且滿足 H^∞ 性能

之高可靠度控制器。

五、模擬情況

將前目所探討的問題，我們將在 Matlab 上建構出一個完整的模組來進行模擬，求得最佳的改善策略。

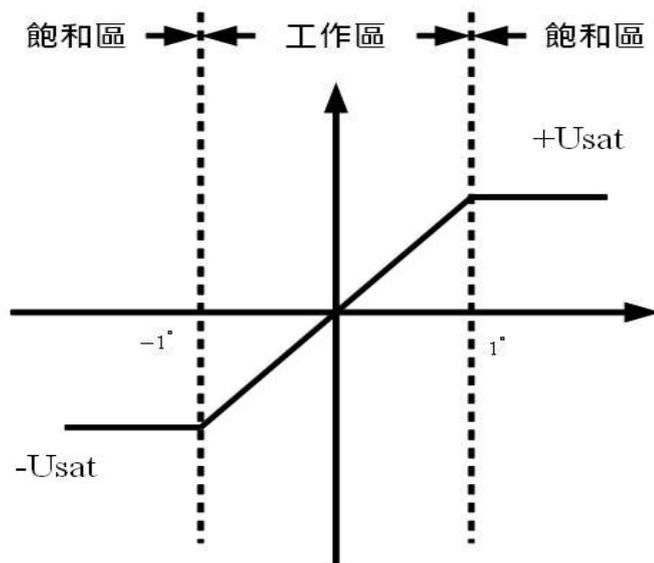
下圖為太陽能面板追蹤系統模擬方塊圖，目前為加入干擾訊號的系統： θ_s 為太陽照射實際的角度， θ 為太陽能板之真正角度， θ_e 為實際照射值與回授值經減法器的差值角度，因為太陽能板馬達轉速比大導致太陽能板移動緩慢所以我們以積分器來近似追蹤系統動態 k/s 為太陽能面板追蹤系統， k 為馬達轉一圈太陽能板所移動的角度， d 為風雲的干擾訊號)：



圖三十八 太陽能面板追蹤系統模擬方塊圖

(一)一階控制器

控制器主要分成上臨界飽和區、工作區、下臨界飽和區如下圖：



圖三十九 控制器設計狀態圖

在上、下臨界飽和區 $|\theta_e| > 1^\circ$ 時，太陽能面板為全速運轉，在工作區 $|\theta_e| \leq 1^\circ$ 時，為由控制器來控制太陽能板追蹤系統來進行追蹤

$$u = \begin{cases} +u_{sat} & \theta_e > 1^\circ \\ K_p \cdot V_{out} = K_p \cdot m \cdot \theta_e & |\theta_e| \leq 1^\circ \\ -u_{sat} & \theta_e < -1^\circ \end{cases} \quad (u \text{ 為控制器的輸入訊號})$$

根據模擬方塊圖得知控制器為 (k 為馬達轉一圈太陽能板所移動的角度， d 為風雲的干擾訊號)：

$$\dot{\theta}_e = ku + d \quad (1)$$

考慮輸入控制器條件，假設太陽能面板追蹤系統正在做追蹤太陽的動作代表 $|\theta_e| \leq 1^\circ$ ，控制器在線性工作區內，那輸入訊號為：

$$u = K_p \cdot m \cdot \theta_e$$

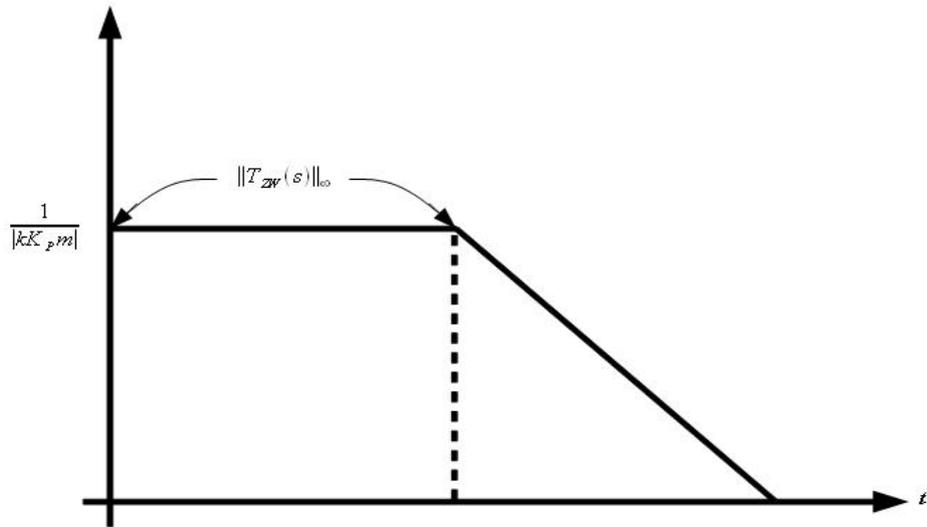
將其代入(1)式，得到：

$$\dot{\theta}_e = k \cdot K_p \cdot m \cdot \theta_e + d$$

令控制器輸出為：

$$z = \theta_e$$

則由 d 至 z 之轉移函數波德圖如下圖所示：



圖四十 轉移函數波德圖

下式為 d 至 z 之閉迴路轉移函數:

$$\frac{\theta_e(s)}{d(s)} = \frac{1}{s - kK_p m}$$

由轉移函數波德圖可以看出，我們希望 $\|T_{zw}(s)\|_{\infty} < \gamma$:

因為

$$\|T_{zw}(s)\|_{\infty} = \frac{1}{-kK_p m} < \gamma$$

則

$$K_p < -\frac{1}{\gamma km}$$

(二) PI 控制器

K_p 是比例增益係數，其控制效果是減小響應曲線的上升時間及穩態誤差，但無法做到消除穩態誤差。 K_i 是積分增益係數，其控制效果是消除穩態誤差。所以加入積分增益係數 K_i 使得輸入訊號為:

$$u = K_p \cdot m \cdot \theta_e + K_i \int m \cdot \theta_e + d$$

代入到 $\dot{\theta}_e = ku + d$ ，得到

$$\dot{\theta}_e = k \cdot K_p \cdot m \cdot \theta_e + k \cdot K_i \cdot m \int \theta_e + d$$

$$\ddot{\theta}_e = k \cdot K_p \cdot m \cdot \dot{\theta}_e + k \cdot K_i \cdot m \cdot \theta_e + \dot{d}$$

令 $\theta_e = x_1$ 、 $\dot{\theta}_e = x_2$ ，得到

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \ddot{\theta}_e = k \cdot K_p \cdot m \cdot x_2 + k \cdot K_i \cdot m \cdot x_1 + \dot{d} \end{cases}$$

假設所考慮系統的狀態方程式表示為：

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 u \\ z = C_1 x + D_{11} w + D_{12} u \\ y = x \end{cases}$$

其中 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ ， $B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.005 \end{bmatrix}$ ， $B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.005 \end{bmatrix}$ ， $C_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ ， $D_{12} = 0$ ， $D_{11} = 0$

(馬達每轉一圈太陽能面板移動 0.006° (即 $0.006^\circ/\text{圈}$)，斜率 m 根據我們實際測試為 2)。

令 $u = \hat{F}x$ 得閉回路系統動態方程式為：

$$\begin{cases} \dot{x} = (A + B_2 \hat{F})x + B_1 w \\ z = (C_1 + D_{12} \hat{F})x + D_{11} w \end{cases}$$

$$\text{代入得到} \begin{cases} \dot{x} = \left(\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.005 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_i & K_p \end{bmatrix} \right) x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.005 \end{bmatrix} w \\ z = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} x \end{cases} \quad (2)$$

(三) LMI 解 H_∞

H_∞ 控制是一種強健控制理論，從理論上講，它可以在保證內部系統穩定性的條件下，使得閉回路系統對外部干擾具有相當大的抗拒力。因為它可以降低外部干擾，藉由調整 γ 來降低 $\|T_{zw}\|_\infty$ 可以有效抑制風對太陽能板的偏移角，所以可以針對其特性來降低風對太陽能面板追蹤系統的影響。

考慮系統(2)根據文獻[24]的結果，我們得知：若存在正定矩陣 $X \in R^{2 \times 2}$ 及矩陣 $M \in R^{1 \times 2}$ 滿足以下矩陣不等式：

$$\begin{bmatrix} AX + XA^T + B_2M + M^T B_2^T & B_1 & XC_1^T + M^T D_{12}^T \\ B_1^T & -I & D_{11}^T \\ C_1X + D_{12}M & D_{11} & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0$$

及

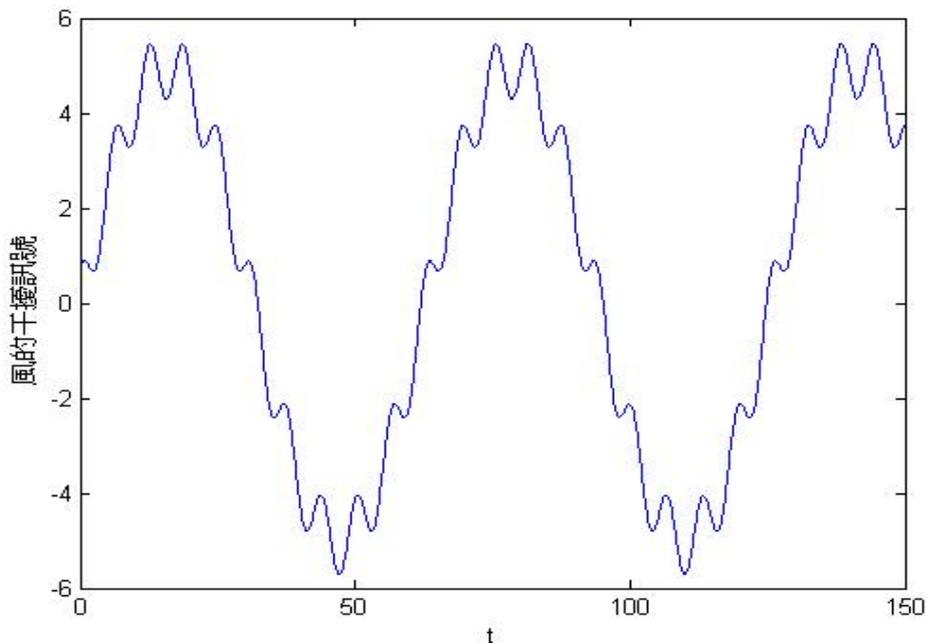
$$\begin{bmatrix} \rho I & M^T \\ M & I \end{bmatrix} > 0$$

則存在控制器 $u = \hat{F}X$ ，使得閉迴路系統內部穩定，且滿足 $\|T_{zw}(s)\|_\infty < \gamma$ 且 $\hat{F} = MX^{-1}$ 為一解。

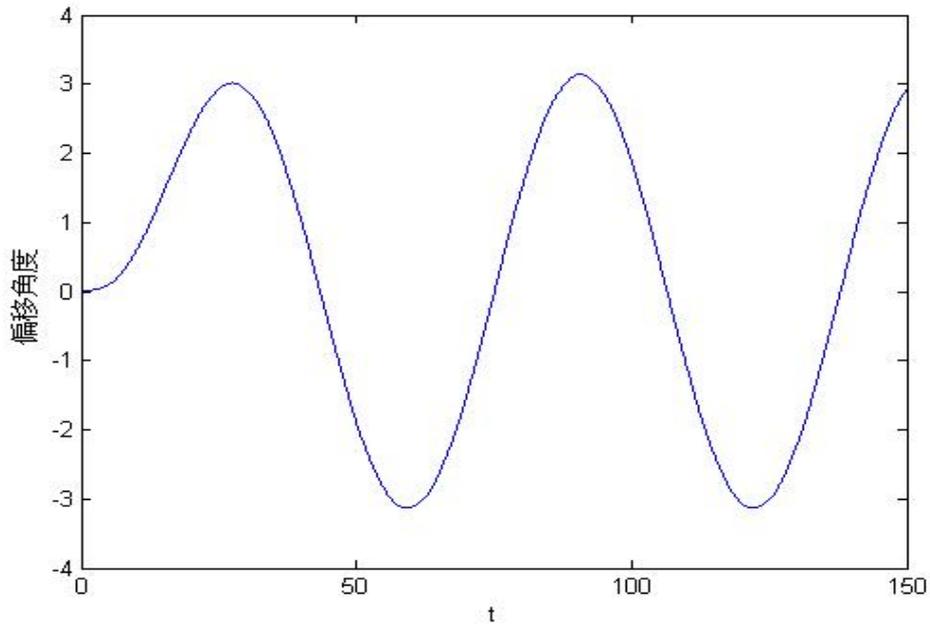
運用 MATLAB 中的 LMI Toolbox 來求解 X 及 M ，得到控制器參數 $\hat{F} = MX^{-1}$ ，可以藉由調整以上系統方程式中的 γ 可以壓低外部干擾對系統的影響， γ 越小越佳。由於 \hat{F} 太大調整 ρ 來可以有效下降 \hat{F} 中的參數，來求得 X 和 M 的最佳解。

(四) MATLAB 運行結果:

令輸入為 $w = 5 \cdot \sin(0.1 \cdot t) + 0.7 \cdot \cos(t)$ ，下圖為 MATLAB 上輸入的波形圖及未加控制器之輸出:



圖四十一 輸入響應圖



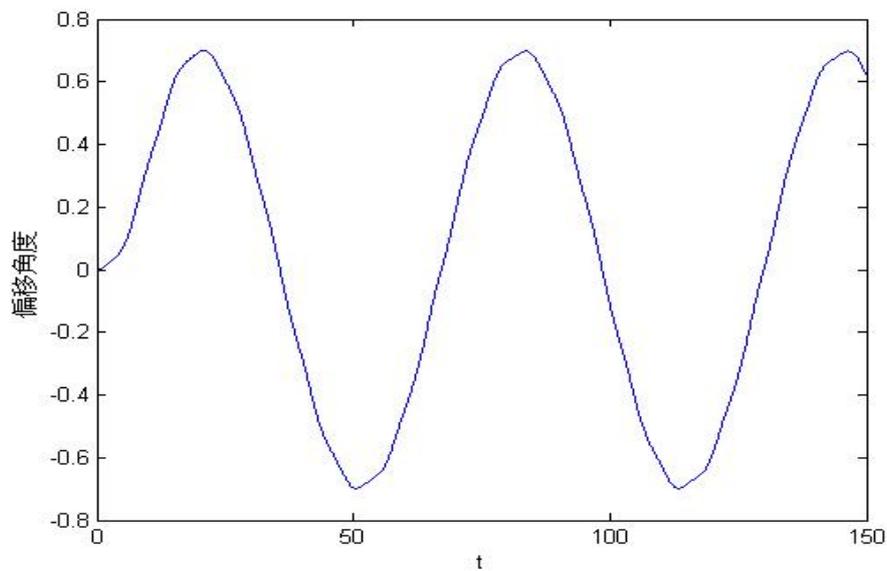
圖四十二 未加控制器之輸出

我們根據 γ 與 ρ 的調整來求得 M 、 X 、 \hat{F} 、 $\|T_{zw}\|_{\infty}$ ，及繪製出響應圖：

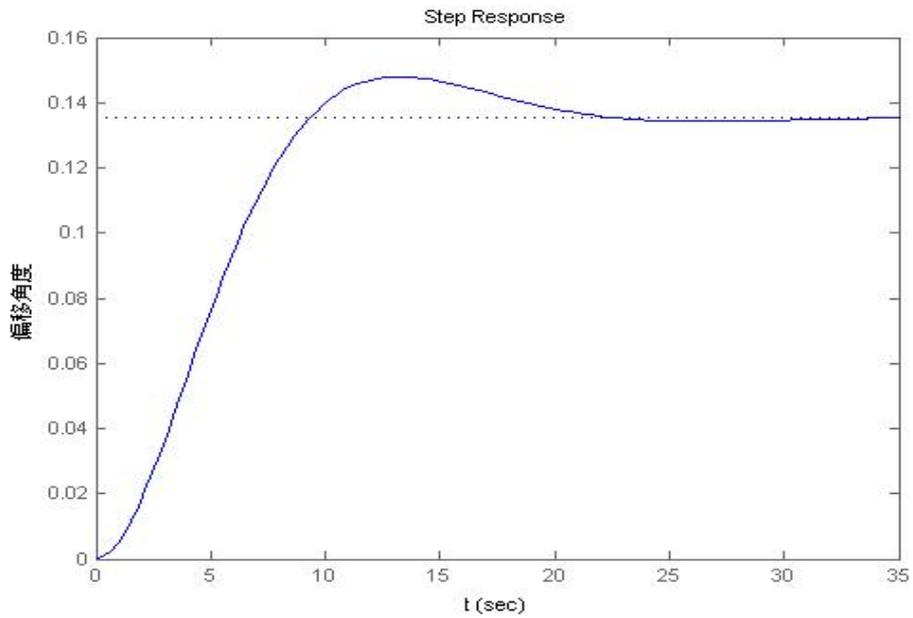
(1) 當 $\gamma = 0.35$ 、 $\rho = 0.005$ ，我們得到結果為：

$$M = \begin{bmatrix} -0.0126 & -0.0503 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 0.0382 & -0.009 \\ -0.009 & 0.0039 \end{bmatrix}$$

$$\hat{F} = \begin{bmatrix} -7.3884 & -29.8801 \end{bmatrix} \quad \|T_{zw}\|_{\infty} = 0.1394$$



圖四十三 輸出響應圖

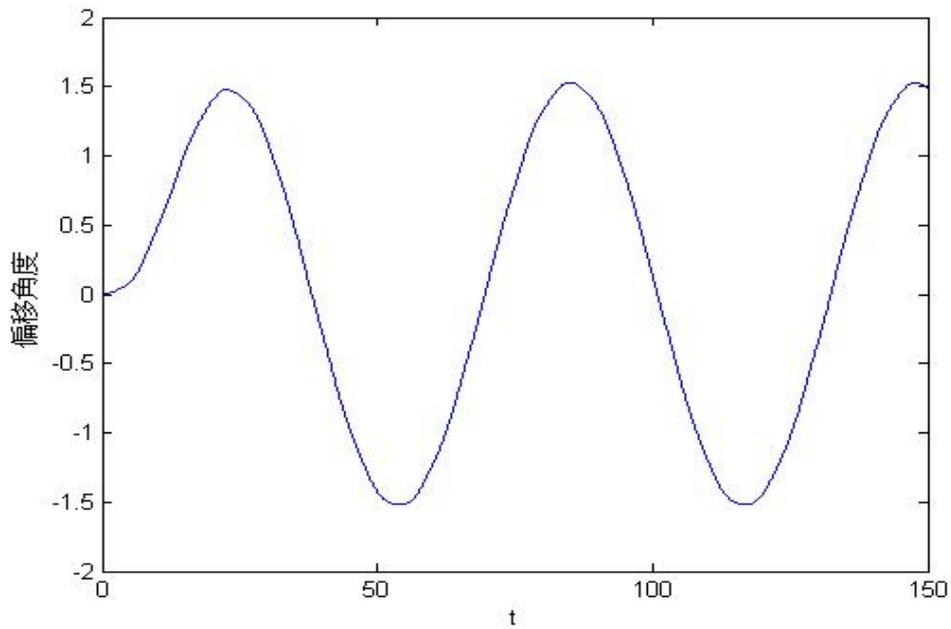


圖四十四 步階響應圖

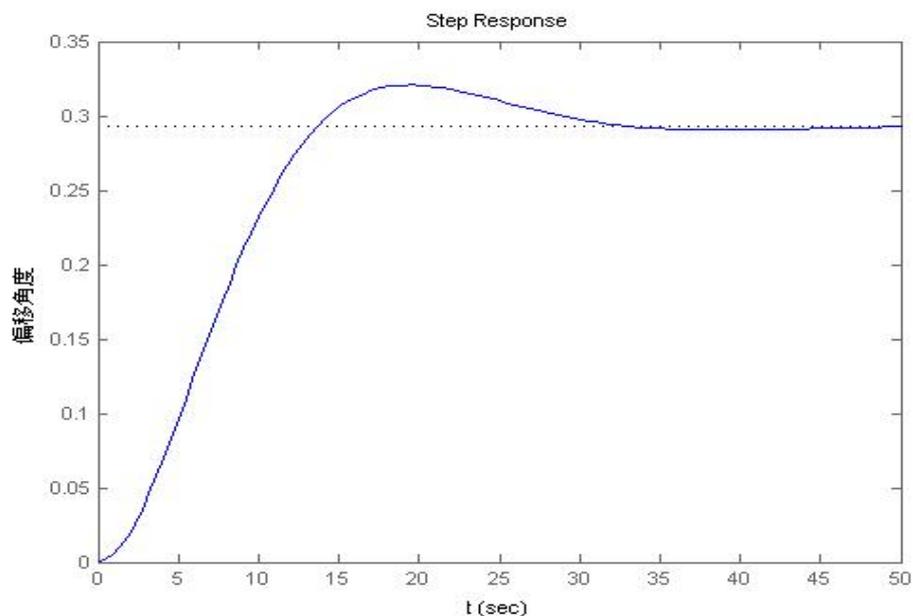
(2) 當 $\gamma = 0.35$ 、 $\rho = 0.0005$ ，我們得到結果為：

$$M = \begin{bmatrix} -0.0066 & -0.0187 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 0.0015 & -0.0008 \\ -0.0008 & 0.0011 \end{bmatrix}$$

$$\hat{F} = \begin{bmatrix} -20.0614 & -30.4303 \end{bmatrix} \quad \|T_{zw}\|_{\infty} = 0.0722$$



圖四十五 輸出響應圖

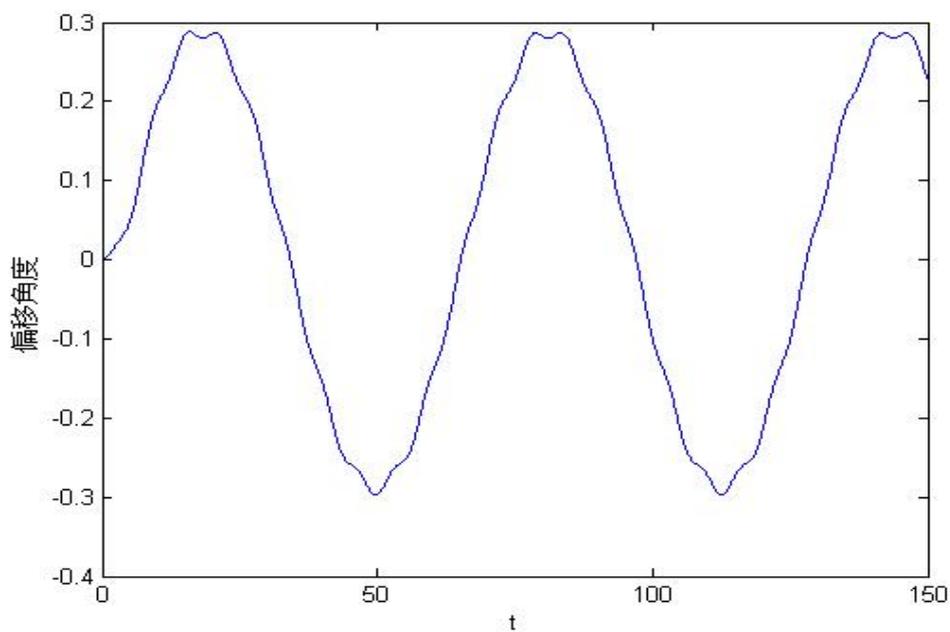


圖四十六 步階響應圖

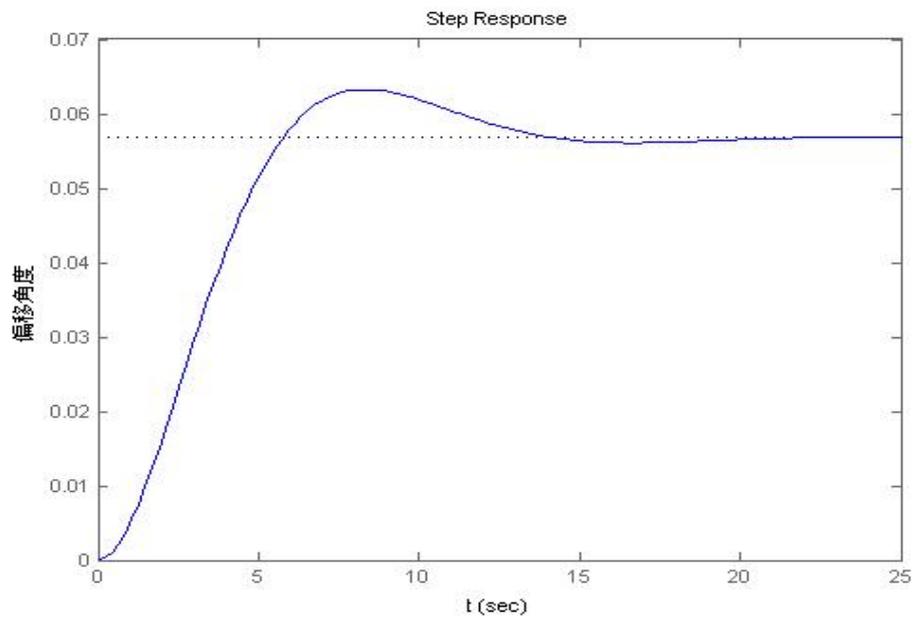
(3) 當 $\gamma = 0.14$ 、 $\rho = 0.005$ ，我們得到結果為：

$$M = [-0.0158 \quad -0.0508] \quad X = \begin{bmatrix} 0.0095 & -0.0035 \\ -0.0035 & 0.0026 \end{bmatrix}$$

$$\hat{F} = [-17.6014 \quad -43.6164] \quad \|T_{zw}\|_{\infty} = 0.0607$$



圖四十七 輸出響應圖

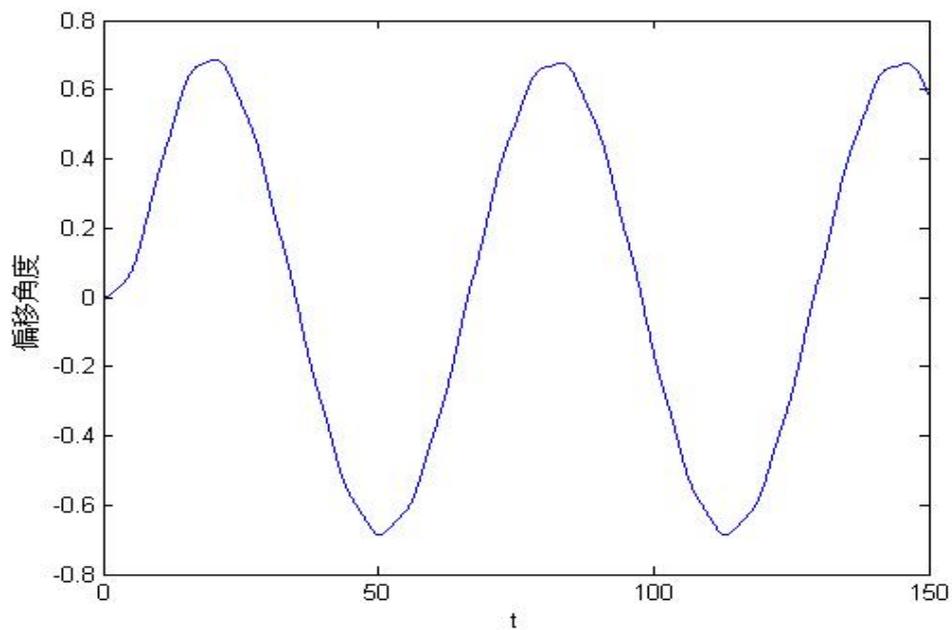


圖四十八 步階響應圖

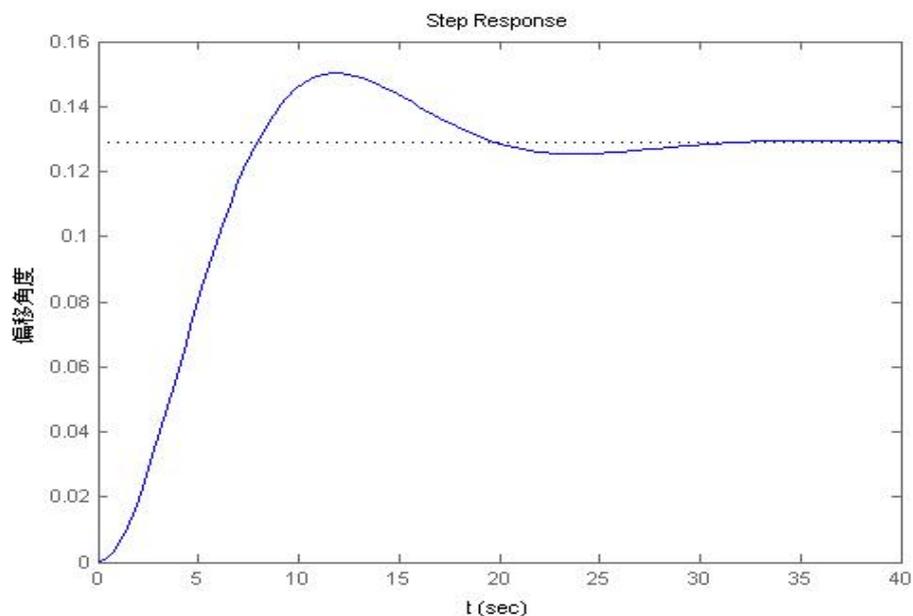
(4) 當 $\gamma = 0.14$ 、 $\rho = 0.0005$ ，我們得到結果為：

$$M = [-0.0088 \quad -0.0223] \quad X = \begin{bmatrix} 0.01 & -0.0027 \\ -0.0027 & 0.0017 \end{bmatrix}$$

$$\hat{F} = [-7.7579 \quad -25.2896] \quad \|T_{zw}\|_{\infty} = 0.1492$$



圖四十九 輸出響應圖

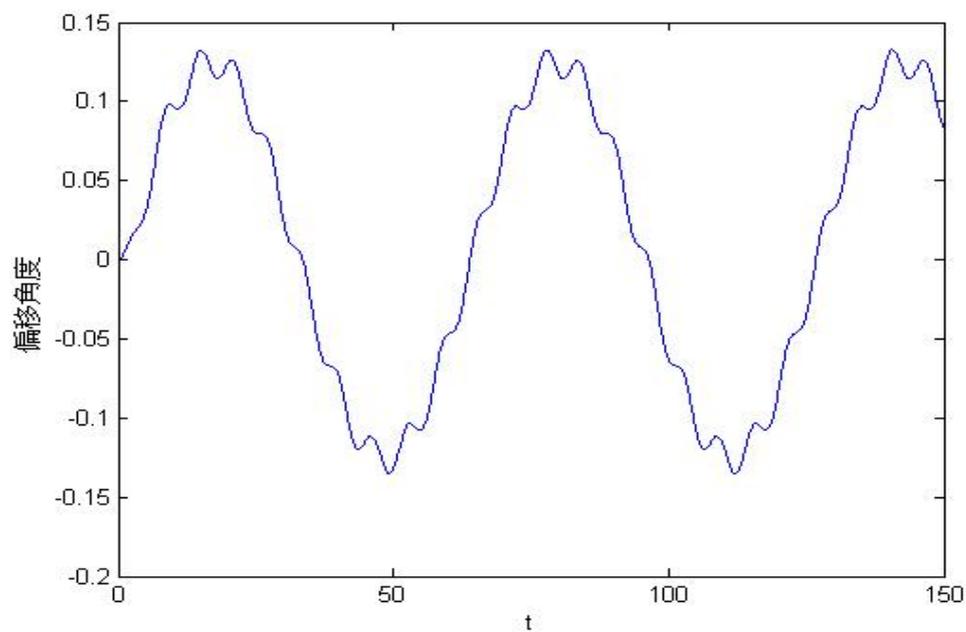


圖五十 步階響應圖

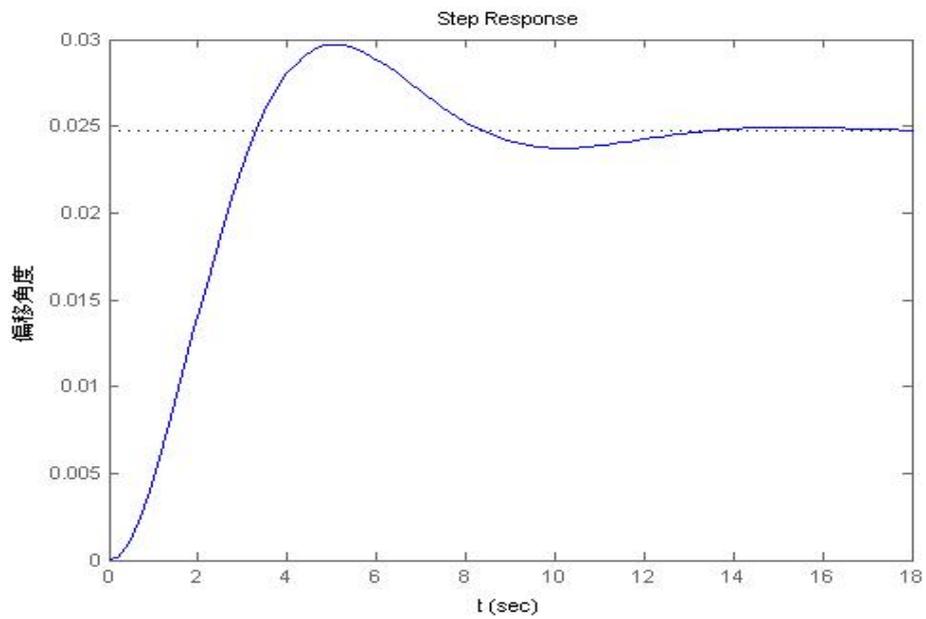
(5) 當 $\gamma = 0.061$ 、 $\rho = 0.005$ ，我們得到結果為：

$$M = [-0.0425 \quad -0.0544] \quad X = \begin{bmatrix} 0.003 & -0.0015 \\ -0.0015 & 0.0022 \end{bmatrix}$$

$$\hat{F} = [-40.4356 \quad -52.8008] \quad \|T_{zw}\|_{\infty} = 0.0305$$



圖五十一 輸出響應圖

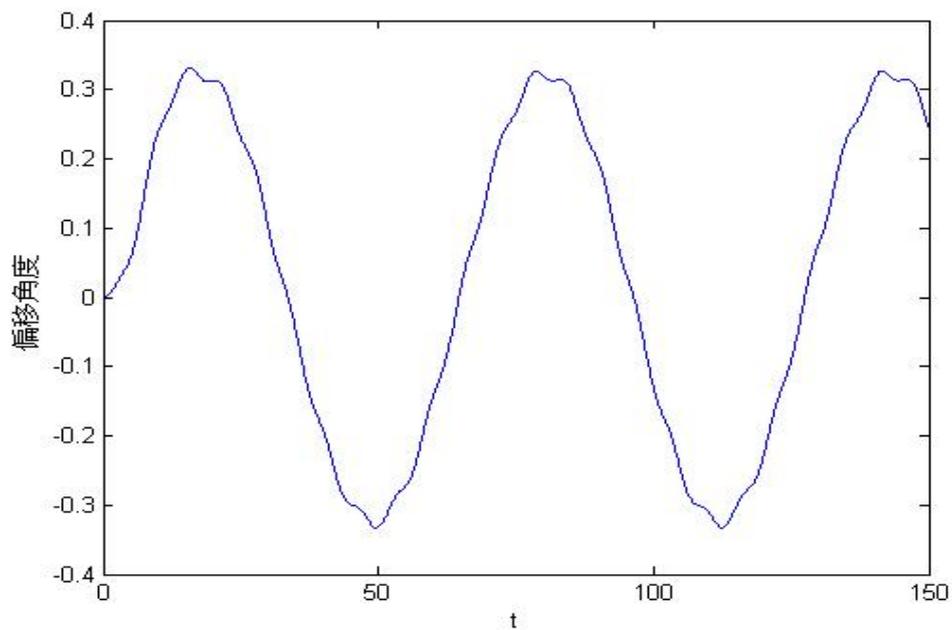


圖五十二 步階響應圖

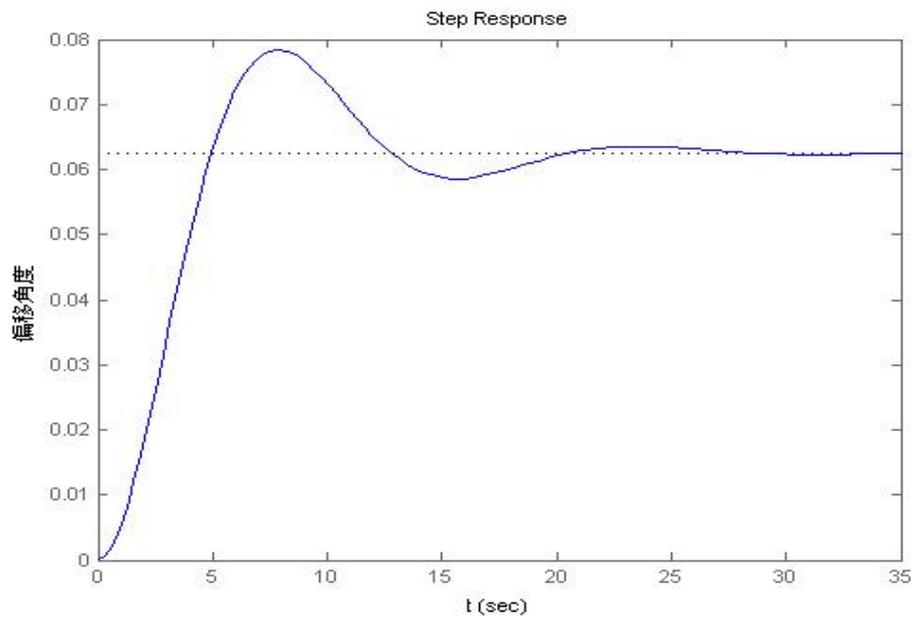
(6) 當 $\gamma = 0.061$ 、 $\rho = 0.0005$ ，我們得到結果為：

$$M = \begin{bmatrix} -0.0102 & -0.0212 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 0.0028 & -0.0012 \\ -0.0012 & 0.0014 \end{bmatrix}$$

$$\hat{F} = \begin{bmatrix} -15.9806 & -29.2862 \end{bmatrix} \quad \|T_{zw}\|_{\infty} = 0.0851$$

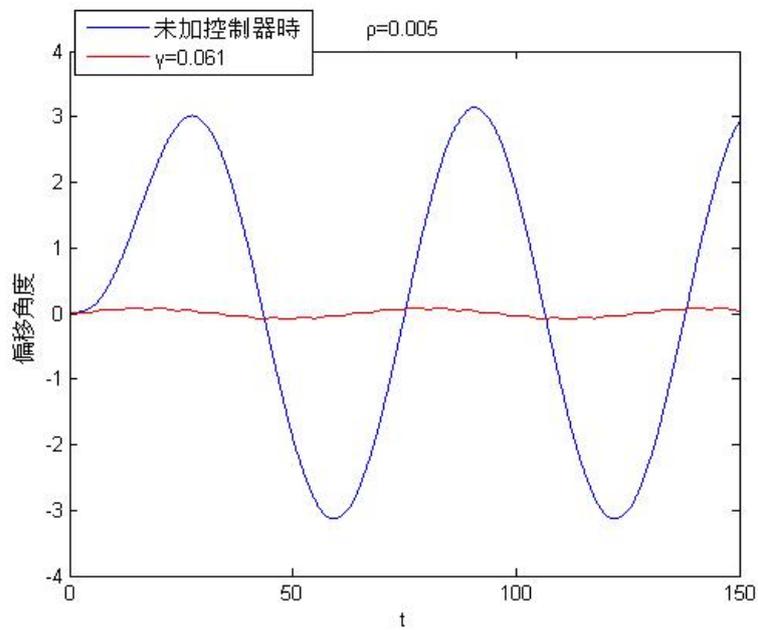


圖五十三 輸出響應圖

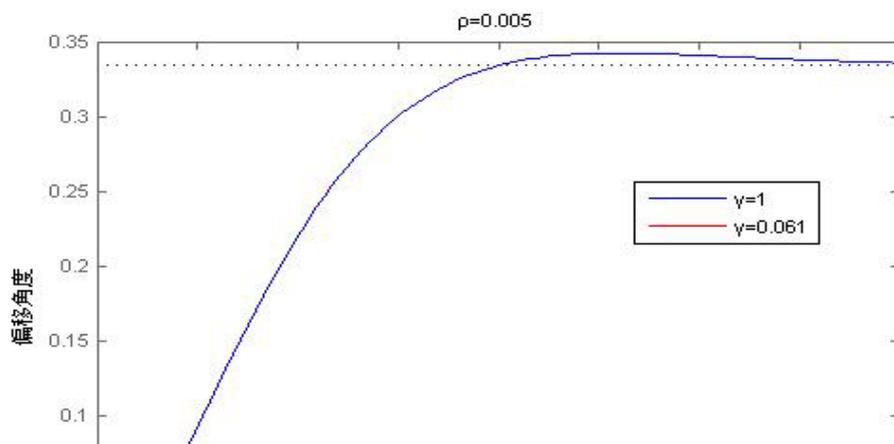


圖五十四 步階響應圖

(五)模擬總結論



圖五十五 輸出響應之比較



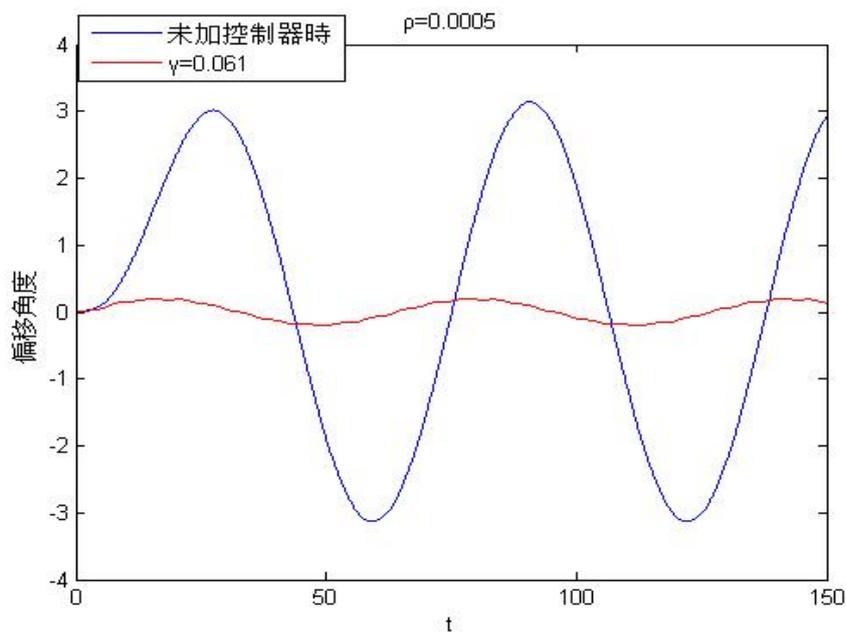
圖五十六 步階響應圖之比較

由以上圖響應圖我們將未加控制器之響應圖和加入我們設計之高可靠 H_{∞} 控制器 $\gamma=0.061$ 之響應圖做比較，可以看出控制器將風與雲干擾所產生的偏移角有明顯的下降，系統穩定時間也有下降，代表控制器有助系統抑制外部的干擾。

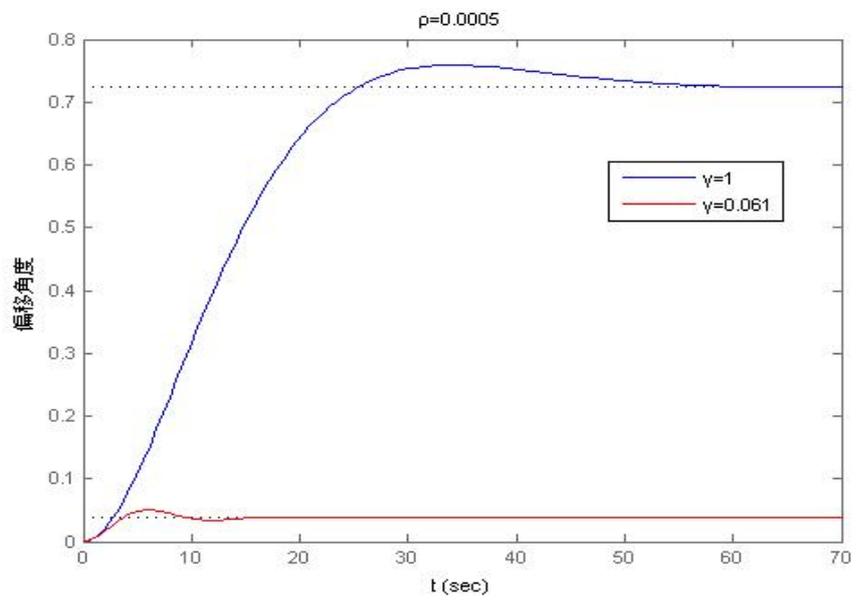
接著，因為經調整發現 \hat{F} 參數過大所以我們將 ρ 值下降 10 倍後，可以看出以下結果：

$$\gamma = 0.061 \text{ 時， } \hat{F} = \begin{cases} \rho = 0.005 \Rightarrow [-40.4356 & -52.8008] \\ \rho = 0.0005 \Rightarrow [-15.9806 & -29.2862] \end{cases}$$

得知 ρ 下降能將 \hat{F} 中的 K_p 與 K_i 值下降，可以得到系統最佳參數。



圖五十七 輸出響應之比較



圖五十八 步階響應圖之比較

參、主要發現與結論

藉由實際量測資料以及整體系統電腦模擬，我們有以下發現。

- 一、因現有感測器對太陽光照強度變化過於靈敏，在不同的偏移角度下，感測器輸出電壓很快達飽和，使線性工作區過小，故建議研發新一代感測器。即使在相同的偏移角下，陽光強度變化對感測器的輸出電壓之影響還是太大，這方面加入光敏電阻補償，從圖 3 可以看出特性曲線有明顯改善。
- 二、在模擬時發現傳統 PID 控制器可符合我們的設計要求，但傳統的 PID 控制器無法保證具高可靠度，且其參數調整不易(需經驗法則)，故我們更進一步設計具有 H^∞ 性能之高可靠度 PI 控制器來解決外來干擾影響。
- 三、將控制調整到最佳時，可以看出控制器將風與雲干擾所產生的偏移角有明顯的下降，系統穩定時間也有下降，代表我們設計之高可靠 H_∞ 控制器有助系統抑制外部的干擾。

肆、参考文献

- [1] A. A. Khalil and M. El-Singaby, "Position control of sun tracking system" *Proceedings of the 46th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, Vol. 3, pp. 1134–1137, Dec. 2003.
- [2] R. J. Wai and W. H. Wang, "Grid-Connected Photovoltaic Generation System," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, Vol. 55, pp. 953-964, 2008.
- [3] H. A. Yousef, "Design and implementation of a fuzzy logic computer-controlled sun tracking system," *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Vol. 3, pp. 1030-1034, 1999.
- [4] R. J. Wai, W. H. Wang, C. Y. Lin, "High-Performance Stand-Alone Photovoltaic Generation System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 1, pp. 240-250, 2008.
- [5] D. Pritchard, "Sun tracking by peak power positioning for photovoltaic concentrator arrays," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 3, No. 3, pp. 2-8, 1983.
- [6] C. Aracil, J. M. Quero, L. Castaner, R. Osuna, and L. G. Franquelo, "Tracking system for solar power plants," *The 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, pp. 3024-3029, 2006.
- [7] I. Anton, F. Perez, I. Luque, and G. Sala, "Interaction between Sun tracking deviations and inverter MPP strategy in concentrators connected to grid," *Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 1592-1595, 2002.
- [8] M. Taherbaneh, H.G. Fard, A. H. Rezaie, and S. Karbasian,

- “Combination of Fuzzy-Based Maximum Power Point Tracker and Sun Tracker for Deployable Solar Panels in Photovoltaic Systems,” *IEEE International Fuzzy Systems Conference*, pp. 1-6, 2007.
- [9] J. S. Choi, D. Y. Kim, K. T. Park, C. H. Cho, and D.H. Chung, “Design of Fuzzy Controller based on PC for Solar Tracking System,” *International Conference on Smart Manufacturing Application*, KINTEX, Korea, April 2008.
- [10] F. R. Rubio, M. G. Ortega, F. Gordillo, M. Lopez-Martinez, “Application of new control strategy for sun tracking,” *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, pp. 2174–2184, 2007.
- [11] M. Alata, M. A. Al-Nimr, Y. Qaroush, “Developing a multipurpose sun tracking system using fuzzy control,” *Energy Conversion and Management*, Vol. 46, pp. 1229–1245, 2005.
- [12] R. J. Veillette, “Reliable Linear-quadratic State-feedback Control,” *Automatica*, Vol. 31, No. 1, pp. 137-143, 1995.
- [13] M. Vidysagar and N. Viswanadham, “Algebraic Design Techniques for Reliable Stabilization,” *IEEE Trans. On Automatic Control*, Vol. 27, No. 5, pp. 1085-1095, 1982.
- [14] G. H. Yang, Y. J. Lam, and J. L. Wang, “Reliable H_∞ Control for Affine Nonlinear Systems,” *IEEE Trans. On Automatic Control*, Vol. 43, No. 8, pp. 1112-1117, 1998.
- [15] G. H. Yang, J. L. Wang, and Y. C. Soh, “Reliable H_∞ Controller Design for Linear Systems with Sensor Failures,” *Proc. On the 37th IEEE Conference on Decision & Control*, pp. 2822-2827, 1998.
- [16] G. H. Yang, J. L. Wang, and Y. C. Soh, “Reliable LQG Control with Sensor Failures,” *Proc. On the 38th IEEE Conference on Decision & Control*, pp. 3564-3568, 1999.

- [17] G. H. Yang, Y. J. Lam, and J. L. Wang, "Reliable Guaranteed Cost Control for Uncertain Nonlinear Systems," *IEEE Trans. On Automatic Control*, Vol. 45, No. 11, pp. 2188-2192, 2000.
- [18] A. S. Willsky, "A Survey of Design Methods for Failure Detection in Dynamic Systems," *Automatica*, Vol. 12, pp. 601-611, 1976.
- [19] D. D. Suljak, "On Reliability of Control," *Proc. Of CDC*, pp.687-694, 1978.
- [20] D. D. Suljak, "Dynamic Reliability Using Multiple Control Systems," *Int. J. Control*, Vol. 31, pp. 303-315, 1980.
- [21] Y. W. Liang, D. C. Liaw, and T. C. Lee, "Reliable Control of Nonlinear Systems," *IEEE Trans. On Automatic Control*, Vol. 45, pp. 706-710, 2000.
- [22] W. Gawronski. "Antenna Control Systems: From PI to H-infinity," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol.43, No.1, pp. 52-60, 2001.
- [23] Yuri I. Abramovich, "Adaptive switched antenna control: from radar to MIMO applications" *IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop*, pp. 494-498, 2004.
- [24] Chilali, M., and P. Gahinet, " H_∞ Design with Pole Placement Constraints: an LMI Approach," to appear in *IEEE Trans. Aut. Contr.*, 1995.
- [25] W. Gawronski, B. Bienkiewicz, and R.E. Hill. "Wind-Induced Dynamics of a Deep Space Network Antenna." *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 178, pp 67-77, 1994.

(附件一)：台灣各地時間太陽位置仰角和方位角的角度

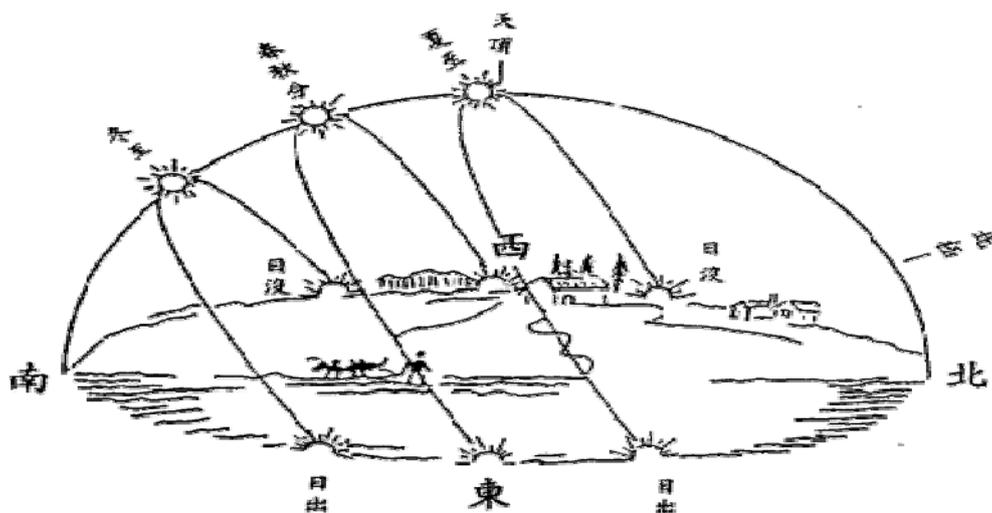
1. 各時間太陽位置仰角和方位角的角度

台 北 (北緯25.03度, 東經121.5度)															
季節	時	6	7	8	9	10	11	中天	12	13	14	15	16	17	18
夏至	仰角	11.3	24.1	37.3	50.7	64.2	77.8	88.5	87.8	74.7	61.1	47.6	34.2	21.1	08.4
	方位	069.1	074.1	078.6	082.9	087.4	094.4	180.0	226.4	267.8	273.7	278.1	282.4	287.0	292.1
春分	仰角	01.9	15.1	28.5	41.3	53.0	61.9	65.0	64.9	60.2	50.4	38.4	25.4	12.1	
	方位	090.7	097.3	104.7	114.2	128.2	150.9	180.0	184.1	215.4	235.6	248.3	257.2	264.3	
冬至	仰角		04.2	15.6	25.9	34.3	39.8	41.5	41.4	38.8	32.6	23.6	13.1	01.7	
	方位		118.3	125.9	135.7	148.3	164.1	180.0	182.1	199.8	214.9	226.8	236.0	243.2	

台 中 (北緯24.15度, 東經120.68度)															
季節	時	6	7	8	9	10	11	中天	12	13	14	15	16	17	18
夏至	仰角	10.3	23.1	36.4	49.8	63.4	77.1	89.3	88.9	75.4	61.8	48.2	34.7	21.5	08.7
	方位	068.7	073.5	077.7	081.6	085.4	090.0	180.0	232.4	269.3	275.1	278.9	282.8	287.0	292.0
春分	仰角	01.3	14.5	28.0	41.0	52.9	62.3	65.8	65.8	61.3	51.5	39.4	26.3	12.9	
	方位	090.4	096.7	103.8	112.9	126.4	148.5	180.0	182.3	214.9	235.7	248.4	257.2	264.1	
冬至	仰角		04.0	15.5	26.0	34.6	40.4	42.3	42.3	39.9	33.7	24.8	14.1	02.6	
	方位		117.9	125.3	134.8	147.2	162.9	180.0	181.1	199.1	214.5	226.5	235.7	242.9	

表四(資料來源:中央氣象局<http://www.cwb.gov.tw/>)

2. 台灣四季太陽仰角與方位圖



臺灣四季太陽仰角與方位圖說

圖六十 台灣四季太陽仰角與方位圖

(附件二)： Matlab 程式碼：

```
A=[0 1;0 0];
```

```
B2=[0;0.012];
```

```
B1=[0;0.012];
```

```
C1=[1 0];
```

```
D=0;
```

```
setlmis([])
```

```
X=lmivar(1,[2,1]);
```

```
M=lmivar(2,[1 2]);
```

```
lmiterm([1 1 1 X],A,1,'s');
```

```
lmiterm([1 1 1 M],B2,1,'s');
```

```
lmiterm([1 1 2 0],B1);
```

```
lmiterm([1 1 3 X],1,C1');
```

```
lmiterm([1 2 2 0],-1);
```

```
Gamma=0.05;
```

```
lmiterm([1 3 3 0],-(Gamma*Gamma));
```

```
lmiterm([-2 1 1 X],1,1);
```

```
lmiterm([2 1 1 0],0.001);
```

```
L=0.005
```

```
lmiterm([-3 1 1 0],L);
```

```
lmiterm([-3 1 2 -M],1,1);
```

```
lmiterm([-3 2 2 0],1);
```

```
lmisys=getlmis;
```

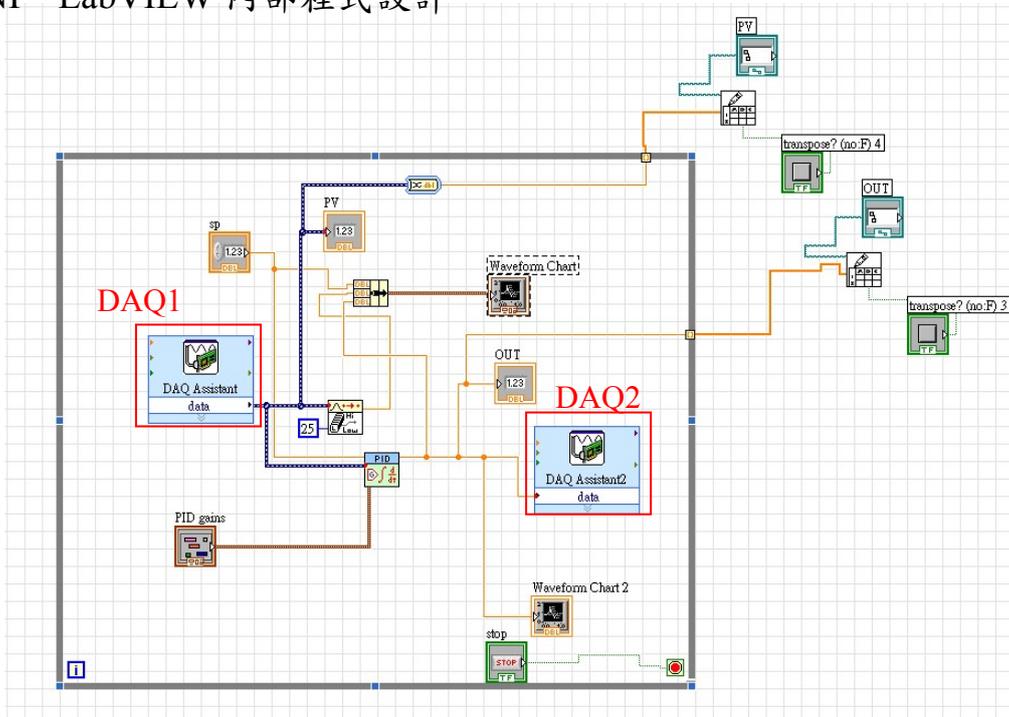
```

[tmin,xopt]=feasp(lmisys)
Tmin=tmin
X=dec2mat(lmisys,xopt,X)
M=dec2mat(lmisys,xopt,M)
F=M*inv(X)
B3=B2*F
A1=A+B3
[num,den]=ss2tf(A1,B2,C1,D)
sys = ltisys('tf',num,den)
G=tf(num,den)
norminf(sys)
t=[0:0.1:150]';
w=5*sin(0.1*t)+0.7*cos(t);
z=lsim(G,w,t);
figure;    plot(t,z);
title('輸出響應');
xlabel('t');
ylabel('太陽能板移動角度');
figure;    plot(t,w);
title('輸入響應');
xlabel('t');
ylabel('風的干擾訊號');
figure;    step(G);

```

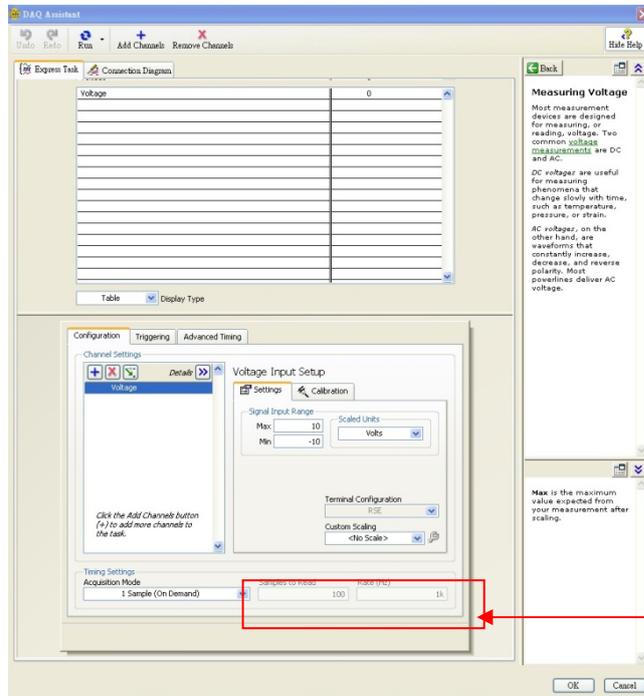
(附件三) : DAQ 內部設定

NI LabVIEW 內部程式設計



圖六十一 LabVIEW 內部程式

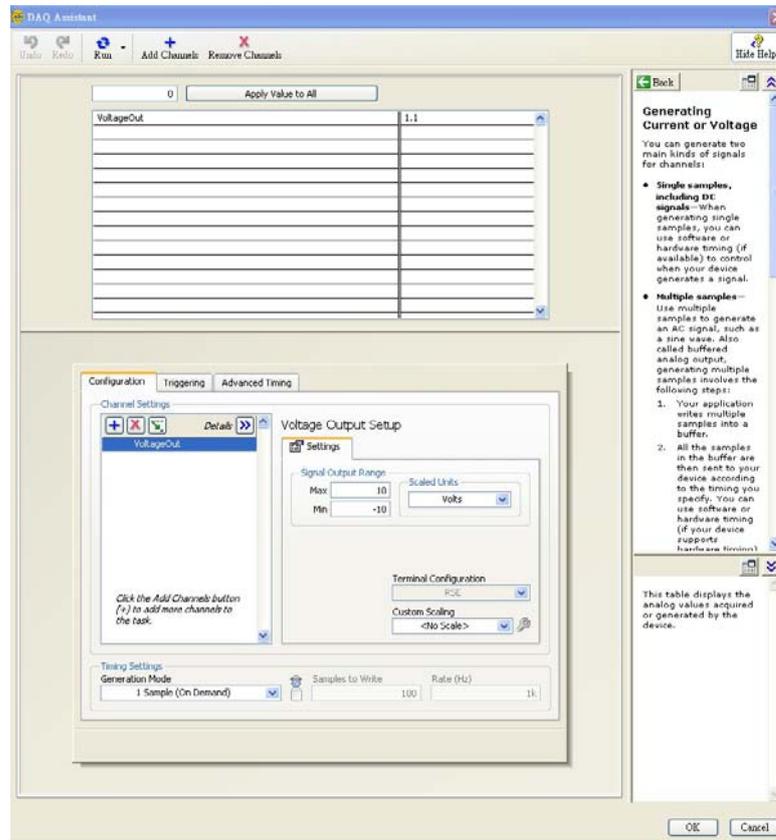
DAQ1 內部設定如下(DAQ1 主要是設定為擷取外部輸入電壓)



頻率設定為 1K、取樣率為 100(1 秒 1000 筆、100 筆取一次)，就是 0.1 秒

圖六十二 DAQ1 內部設定

DAQ2 內部設定如下(DAQ2 主要是設定為輸出電壓)



圖六十三 DAQ2內部設定