

國立中正大學機械工程學系  
專題報告

微型聚焦式追日系統設計與控制

學生：余邦瑋、李晉碩

指導教授：楊翰勳

中 華 民 國 1 1 1 年 0 8 月 3 1 日

## 摘要

近年來能源危機已成為不容忽視的問題，而太陽能為大家近幾年開始發展的新再生能源，但由於能量轉換效率低，因此如何提高轉換效率一直是研究的重點，本研究目標為開發微型聚焦式太陽能發電系統，機構設計為雙軸式追日器，根據日照方位不同，控制機構的方位角和仰角，使陽光直射聚光器達到發電最大效率。本系統使用 Arduino 微控制器做為控制核心，加上太陽能板感測日照強度，微調聚光器角度使誤差降低，並用步進馬達驅動追日機構。

在設計上，我們觀察了非常多的影片以及市面上出現的追日器，並自己與老師討論了非常多的設計，包括公差的計算以及經費的考量，最後才完成了我們的設計，而加工部分我們也找了非常多專業的廠商，整體的材料大致上以不鏽鋼和鋁為主，而碟面的加工我們採用 3D 列印的方式。

在機構設計及製造完成後，因為我們當初考慮的較為仔細，所以組裝上沒有遇到甚麼困難，組裝完後就開始了實驗的測試，拿去戶外實測時，我們發現焦點確實的聚焦在了理想位置，且聚焦溫度在短時間內也能迅速達到 300 度左右。

未來會配合上實驗室的史特靈引擎來使整個發電系統更加完善，進而達到我們的最終目的。

關鍵字:追日系統、太陽熱能發電、聚焦式發電

# 目錄

摘要.....	1
一、 前言.....	3
1.1 背景介紹.....	3
1.2 研究動機.....	3
1.3 太陽能熱發電系統.....	4
二、 追日系統的設計.....	5
2.1 概念設計.....	5
2.2 外型設計.....	5
2.3 細部設計.....	6
2.3.1 碟型聚光器設計.....	6
2.3.2 骨架設計.....	7
2.3.3 傳動設計.....	8
2.4 機構組裝.....	11
三、 追日系統的控制.....	12
3.1 太陽運行軌跡計算.....	12
3.2 機構控制.....	14
3.3 功能介紹.....	18
四、 結果與討論.....	19
4.1 未來整合.....	19
4.2 功能測試.....	19
4.3 困難與解決.....	20
五、 參考文獻.....	22

# 一、前言

## 1.1 背景介紹

隨著科技與經濟的進步，生活中對於能源的需求量越來越高，天然氣、煤炭和石油供不應求，能源短缺連帶造成全球物價提高、通貨膨脹惡化以及貨運成本大幅增加等全球性影響，化石燃料的燃燒過程會產生許多懸浮粒子，不僅對環境生態有害，甚至威脅到人類的健康，除此之外還會帶來氣候暖化的問題，隨著環保意識抬頭，燃燒化石燃料造成溫室氣體的排放，加劇溫室效應導致全球暖化，海平面上升和極端氣候也更頻繁的出現，已經成為不容忽視的問題，近年來各國也意識到再生能源的重要性，開始發展替代能源，追求永續發展成為全球面臨的重大課題。

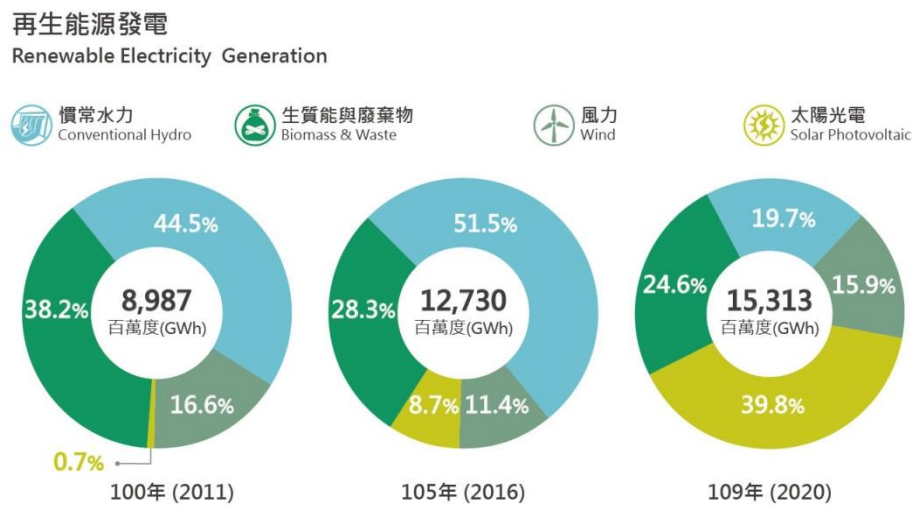


圖 1 台灣再生能源發電概況[1]

## 1.2 研究動機

台灣目前能源供給概況仍有 97.8%仰賴進口能源，為了減少對進口能源的依賴，除了使用較穩定的火力及核能發電，也正在積極發展綠色能源。再生能源有低污染和可循環再利用的優點，主要的來源包括太陽能、水力、風力、地熱、生

質能，台灣位置處於亞熱帶地區，日照充足擁有發展太陽能發電的良好條件，隨著太陽能電池的進步，即使在陰天的條件下它們也能夠發電，所以太陽能發電量出現激增，同時在政策積極的推動下，太陽能逐漸成為主要的再生能源之一。

目前太陽能發電大多使用太陽能板，由於太陽能能量密度較低，通常都需要大面積才符合經濟效益，因此成本會大幅增加，此外太陽還會受到地球自轉、季節變換和天氣因素等諸多因素影響，為了改善這些缺點達到更好發電效率，本研究目的在於開發微型聚焦式太陽能發電系統，能根據日照方位改變追日器角度，聚光面的部分採用碟型設計，能將陽光更好的集中，達到更高的轉換效率。

### 1.3 太陽能熱發電系統

聚光太陽能熱發電是一個集熱式的太陽能發電廠的發電系統，它使用反射鏡或透鏡，利用光學原理將大面積的陽光匯聚到一個相對細小的集光區中，由光熱轉換原理令太陽能換化為熱能，熱能通過熱機作功驅動發電機，從而產生的電力。聚光技術存在四個常見的形式，即拋物線槽型，斯特林碟型，聚光線性菲涅爾反射鏡型，和太陽能發電塔型。

碟式太陽能聚熱發電系統中已知具有最高效率的熱機是史特靈引擎，碟狀結構可以持續追蹤太陽。能量轉化器包括兩個部分，即熱能接收器和引擎。熱能接收器可以吸收聚焦後的太陽光之中的能量，將其轉化為熱能，並儲存在熱空氣或熱水之中，然後再將熱量輸送到引擎，引擎/發電機子系統利用熱能接收器採集的熱能來發電。[2]

## 二、追日系統的設計

### 2.1 概念設計

追日系統分為單軸式和雙軸式系統這兩種系統，單軸追日系統只有一個傳動器，只能沿東西向轉動，根據不同緯度可以選用平單軸或斜單軸，系統需依裝設地點的陽光角度變化選用，由於單軸追日系統結構較簡單，成本較低但是精準度不佳，雙軸追日系統則有兩個傳動器，能控制仰角和方位角的方向，因此較單軸有更好的發電效率。

考量到台灣的光照會根據四季變化，本研究選擇開發雙軸式追日器，控制方式為使用太陽運行軌跡公式先找到初始位置，然後再用四個方位的光感應器做閉迴路控制，因為閉迴路控制會不斷產生回授訊號，能根據光照的實際狀況和公式計算出來的誤差修正角度，更精準地使太陽直射聚光器，達到最大的發電效率。

以下是所使用的概念設計：

- (1)雙軸式追蹤，能個別控制仰角和方位角。
- (2)能搭載 3kg 的引擎。
- (3)利用步進馬達作為動力來源，能量來源為 110V、60Hz 的一般市電。
- (4)能架設光感應器、控制器。

### 2.2 外型設計

我們選擇製作雙軸立柱式追日器，在設計追日器時，必須注意避免機構運動干涉，設計時使用 3D 繪圖軟體 Solidworks 來繪製，此軟體能夠模擬機構旋轉時的運動分析，旋轉時若產生干涉情形能及時修改，此外透過爆炸圖的功能，能將整個機構拆解，模擬整個機構的組裝順序，對於設計時很有幫助。

底座選擇使用鋁擠型支撐，未來也可以加裝腳座或輪子，鋁擠型的好處是外型極其堅固，體積小質量輕，為了避免頭重腳輕的情況發生，設計時需在底部配點重量。

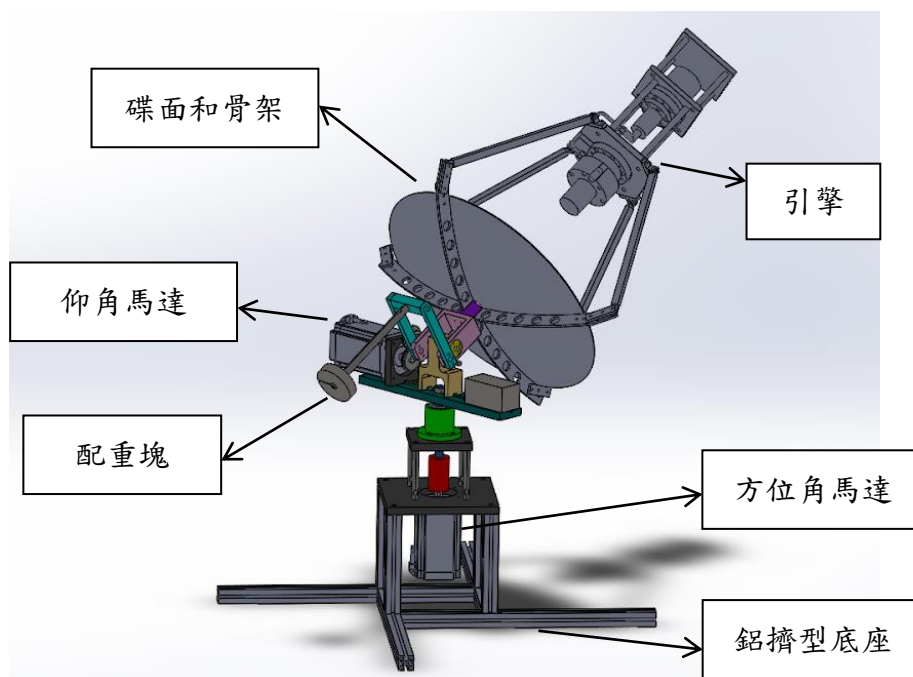


圖 2 完整機構設計圖

## 2.3 細部設計

在確定外型設計方向後，著手進行細部設計，從草圖設計開始，尺寸的計算和動態分析，設計時要考慮組裝問題，公差的配合也相當重要，機械零件及材料的選擇，最後與機電整合完成最終設計。

### 2.3.1 碟型聚光器設計

設計碟面時首先要求出曲面座標，這裡使用拋物線公式計算曲率，並使用 Excel 軟體求出曲線的各座標點，得到所有座標點之後匯入 Solidworks 繪圖軟體，

然後根據我們的需求畫出直徑五十公分的碟面，完成設計圖之後委託加工廠製作，製作方式採用 3D 列印製造，最後表面貼上鏡面反光片來達到聚光效果。

3D 列印碟面：



圖 3 未貼反光片



圖 4 貼反光片後

### 2.3.2 骨架設計

骨架需承受引擎重量，故選擇高強度的材料，鋁具有高強度和易加工的特性，因此選擇使用鋁當作骨架材料。在細部設計的部分，骨架邊緣兩端鑽孔，目的是要連接固定引擎的支撐桿，而靠近中心的十個大孔是為了防止骨架過重，減輕重量所做的設計，此處的孔洞在整理線時還可以纏繞在附近，避免轉動時捲進機構裡。中間的凹槽處是設計給骨架和卡榫互相接合用的，在接合處有加工螺紋孔，鎖上螺絲後接合處會更緊密。由於骨架外型為曲線，一般車床和銑床不易加工，因此找做線切割的廠商製造，實際拿到的成品加工精度很準確，組裝也進行的很順利。





圖 5 骨架與卡棒設計

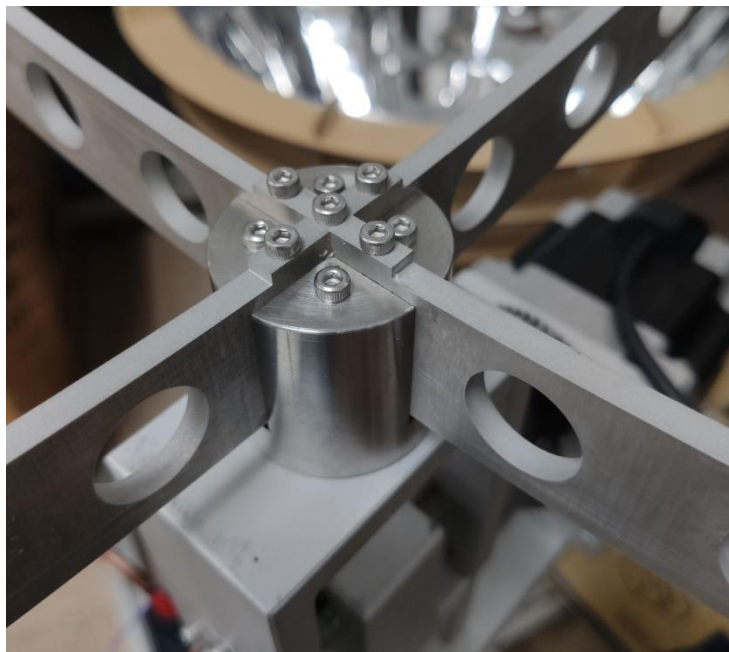


圖 6 骨架組裝圖

### 2.3.3 傳動設計

設計完主要結構和外型後，進行傳動系統的設計。機械傳動有分為齒輪傳動、帶傳動、鏈傳動和輪系傳動等等。我們選擇使用齒輪傳動的方式，齒輪傳動具有的優點有傳動比準確、穩定、效率高，且工作壽命長可靠性高，在選擇齒輪時需同時考慮馬達的扭矩，若使用低扭矩的馬達，在齒輪搭配上則要選擇高減速比才能驅動機構，為了減少馬達轉動的扭矩因此有設計配重塊，搭配齒輪驅動上方旋轉軸。

整個機構有兩根旋轉軸，材料選擇使用 S45C 中碳鋼，中碳鋼具有良好的強度與韌性，表面鍍鎳加熱處理硬化後，機械力學性能會更良好。上方旋轉軸負責控制碟面仰角移動，下方旋轉軸控制方位角移動，考慮到組裝方便旋轉軸採用階梯式設計，在組裝零件時較不會受到公差影響而無法組裝，公差設計成留隙配合，根據 CNS 公差等級表對應，使用 H7g6 的配合公差下去設計。上方軸承呈水平擺放，由於只需承受來自上方的徑向力，所以選擇滾珠軸承安裝在自己設計的固定座上。

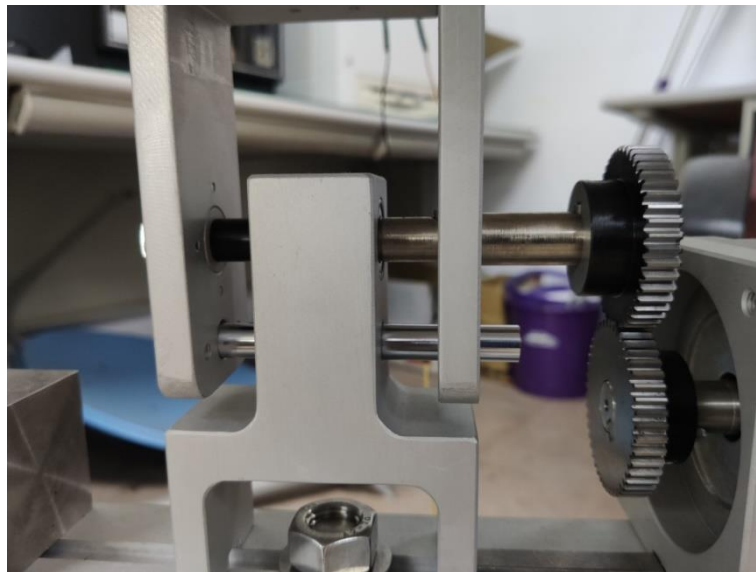


圖 7 上方旋轉軸和固定座



圖 8 仰角馬達和齒輪

下方的軸承呈垂直擺放，因為需承受上方的重量，在挑選上要使用可以承受軸向力的軸承，所以使用圓錐滾子軸承，此種軸承可同時承受徑向與軸向的負荷，因現有軸承座規格較少所以我們自己設計，材料使用 SUS304 不鏽鋼，不鏽鋼堅硬且抗氧化不易生鏽，為常見的軸承座材質，軸下方接聯軸器與馬達相連。

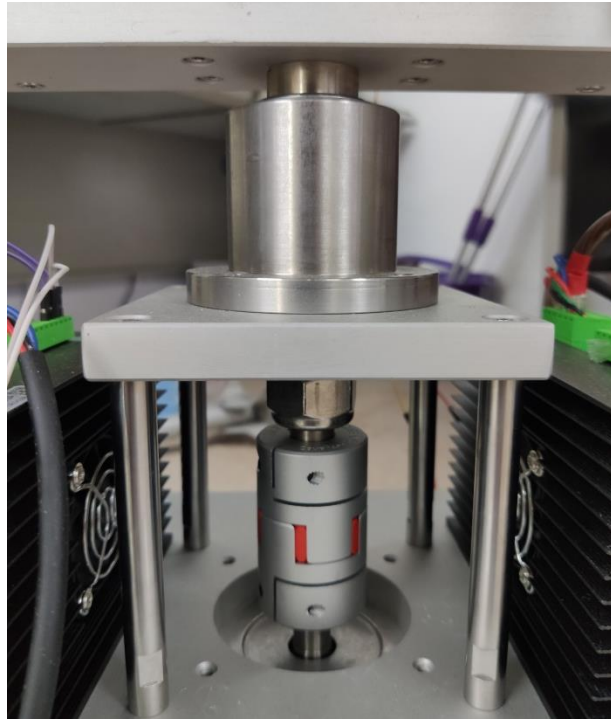


圖 9 下方旋轉軸和軸承座

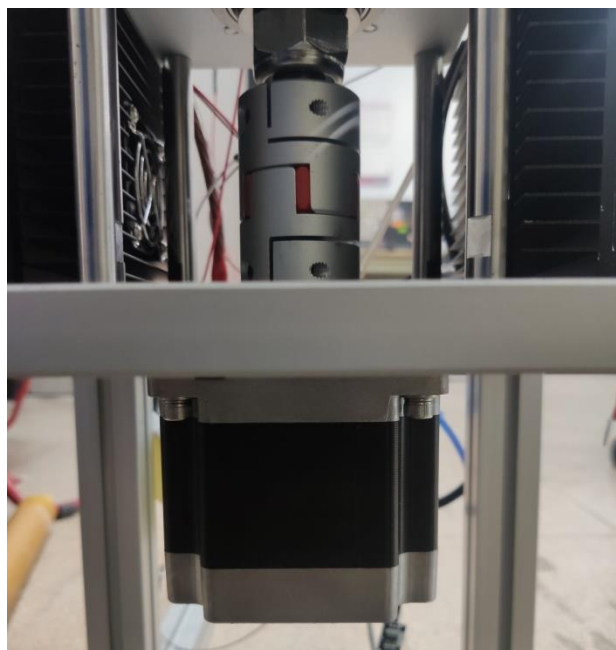


圖 10 方位角馬達和聯軸器

## 2.4 機構組裝

加工零件與組裝圖：



圖 11 加工零件

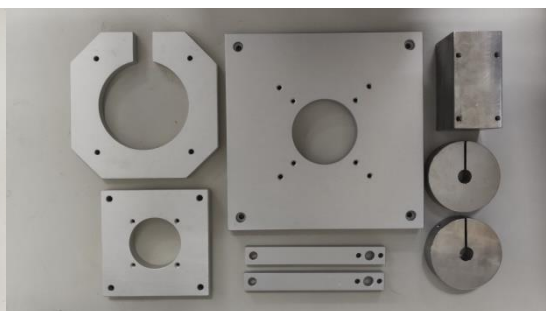


圖 12 加工零件



圖 13 加工零件



圖 14 追日器側視圖



圖 15 追日器俯視圖

### 三、追日系統的控制

這一章我們會開始介紹我們追日所使用的控制方法，我們除了基本的主動式追蹤之外，還新增了以軌跡來跟蹤太陽的被動式追蹤，以及手動調整還有數值監控的功能，以因應我們不同的需求。

#### 3.1 太陽運行軌跡計算

因為要製作一個追蹤太陽的控制系統，我們首先要先知道不同時候太陽大致上會出現在哪一個位置，所以查詢到非常多關於太陽位置的公式。

##### (1) 赤緯角 $\delta$

是地球赤道平面與太陽和地球中心的連線之間的夾角，每天的值都在變化，而且一年的變化呈現 sin 曲線(如圖 2-1 所示)。變化範圍在 $\pm 23^{\circ}27'$ 。

$$\delta = 23.45^{\circ} * \sin\left(360^{\circ} * \frac{284 + n}{365}\right) \quad (3-1)$$

n 為日期序號，介於 1-365(or366)之間，n=1 表示 1/1 號。

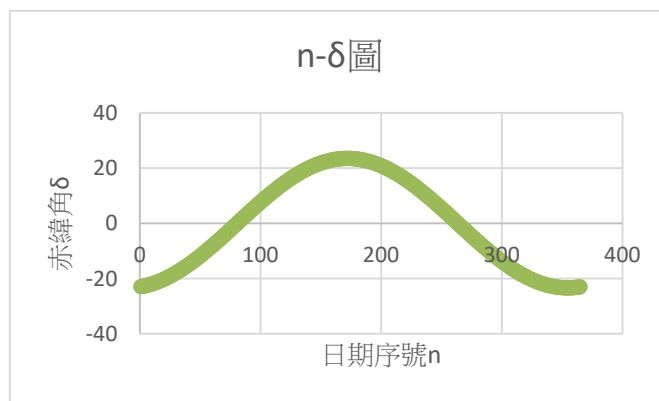


圖 16 赤緯角

##### (2) 太陽時(AST)

是一種基於太陽在空中運動的計時時間，當在太陽時(AST)午時的時候，太陽的位置會在一天的最高點，而我們平常使用的時間是當地標準時間(LST)。

$$AST = LST + ET - 4(SL - LL) \quad (3-2)$$

註: ET 為修正值、SL 為標準時間參考經度、LL 為當地經度，均以分鐘為單位

上述公式中，ET(分鐘)為誤差修正值，為了修正太陽繞日公轉及轉速產生的誤差，可由(圖 2-2)觀察 ET 一年的變化曲線。

$$ET = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B) \quad (3-3)$$

其中  $B = 360^\circ * (n - 81)/364$

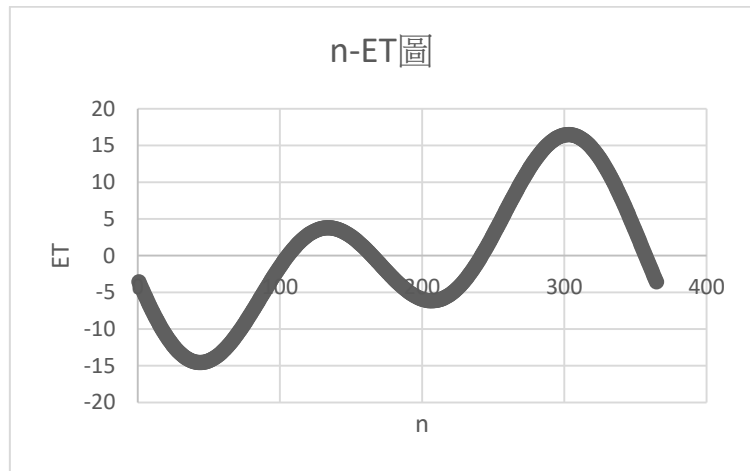


圖 17

### (3) 太陽時角( $\omega$ )

日面中心的時角，當在太陽時(AST)午時的時候， $\omega=0^\circ$ 。

$$\omega = 0.25^\circ * (AST - 720) \quad (3-4)$$

### (4) 太陽高度角( $\alpha$ )

地平線到太陽高度的仰角。

$$\alpha = 90^\circ - \cos^{-1}(\cos\delta * \cos\psi * \cos\omega + \sin\delta * \sin\psi) \quad (3-5)$$

註:  $\phi$  為當地緯度

### (5) 太陽方位角( $\gamma$ )

太陽在地面的投影跟正南方的夾角。

$$\gamma = \cos^{-1} \left( \frac{\sin \delta * \cos \psi - \cos \delta * \cos \omega * \sin \psi}{\cos \alpha} \right) - 180^\circ \quad (3-6)$$

註:  $\phi$  為當地緯度

式中, if( $\sin \omega > 0$ )=> 則  $\gamma = -\gamma$

## 3.2 機構控制

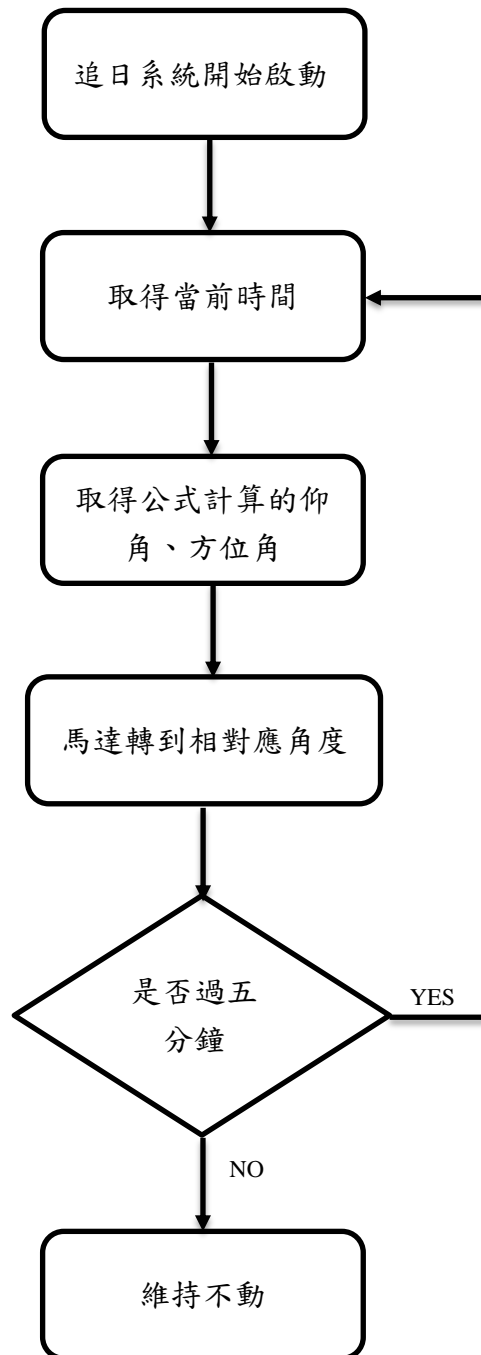
我們機構採取兩種不同的控制方法,分別為被動式追蹤以及主動式追蹤,被動式追蹤就是使用太陽軌跡的公式來定位太陽位置得一種開迴路控制,由於目前對太陽軌跡的公式已經非常成熟,對太陽的角度也是誤差極小,所以我們才會將這種控制方法引入我們的機構中,而為了節省馬達耗電量,程式中我們使控制器每五分鐘更新一次機構位置,而不是不間斷的移動。

### 被動式追蹤的優點:

- 機構只須按照固定軌跡來移動,馬達的負擔較小,且不須光感測器,整體系統耗電量較低。
- 在雲較多的天氣當中,光感測器數值較不穩定,容易定位失誤,被動式追蹤則不會有此問題。

**被動式追蹤的缺點：**

- 精度較差，因為是開迴路控制，所以較容易失準。



**圖 18 被動式追蹤流程圖**



而主動式追蹤則是當我們機構開始運轉時，我們會先使用之前的公式得到太陽此時的大略位置，並傳送給 Arduino 來驅動馬達轉動到相對應的角度，並使用太陽能板作為光感應器來形成閉迴路控制，追蹤時分別檢測相對應的兩塊太陽能板所讀取到的電壓，如果誤差過大，則代表沒有準確追蹤到太陽位置，則控制器利用誤差來微調追日系統的角度，使他能不停地追蹤太陽，並達到最大的聚光效果。

#### **主動式追蹤的優點：**

- 由於是閉迴路控制，所以精度會比被動式追蹤來的精準，也比較不會有累加誤差的問題。

#### **主動式追蹤的缺點：**

- 系統會不斷地比較兩側太陽能板的值，並依值做出微調，所以耗電量會較大。
- 對天氣要求較高，例如雲過多時有可能造成定位產生失誤。

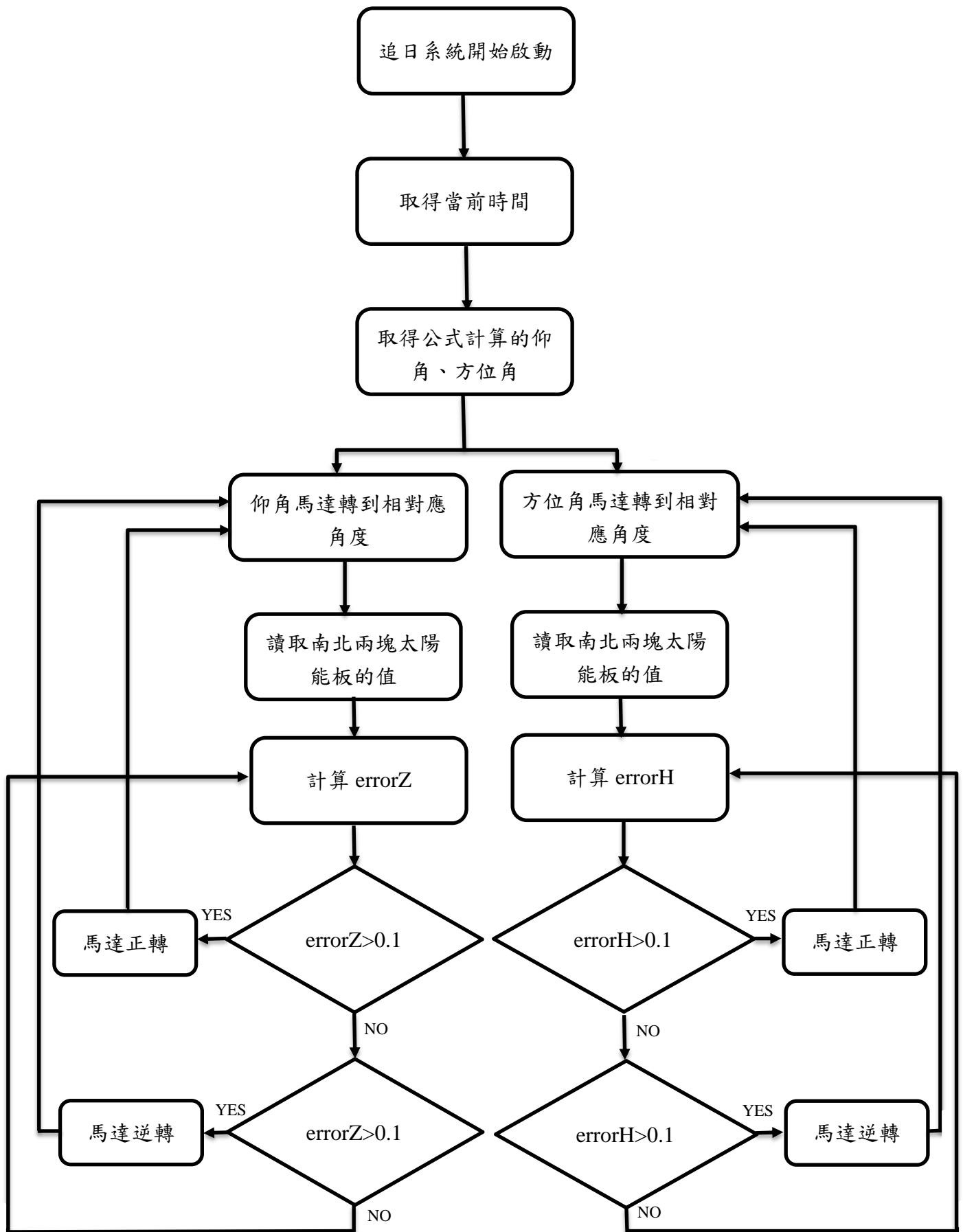


圖 19 主動式追蹤流程圖

### 3.3 功能介紹

因為我們希望機構能隨時根據我們的需求做調整，所以除了主動式、被動式追蹤，我們還使用紅外線遙控器以及手機藍芽增添除了能手動調整外還能隨時監控到一些參數，使得在控制追日系統時能更方便的做出調整。

#### 其餘功能：

##### (1) 手動調整碟面位置：

在啟動之後，我們先將藍芽連接到手機，並利用上下左右的方式來控制碟面的角度，並切換到手動模式，也就是這時候主動式及被動式追蹤不會執行，也是為了避免功能產生衝突導致機構不受控制，也可使我們在更換零件時能更加方便。

##### (2) 監控馬達角度以及太陽能板電壓：

在接上藍芽之後，我們可以透過手機知道馬達現在的角度以及讀取太陽能板電壓，並大致上可以知道目前太陽的位置，或是像太陽能板電壓數值有異常，也不需要將線路拆開用三用電表慢慢檢查，就使我們及時發現異常。

##### (3) 選擇目前的追蹤太陽模式：

可選擇的追蹤模式有三種，分別為主動式、被動式追蹤以及手動調整，可以根據目前的天氣或需求做出調整，並且為了避免衝突，一次只能啟用一種模式來控制。

## 四、結果與討論

### 4.1 未來整合

未來我們的追日系統將會跟史特靈引擎做結合，引擎會裝載在我們碟面聚焦的光點上，利用聚光的溫度來使引擎運作，最後產生電以供我們使用，以達到我們的最終目的。

#### 未來整合

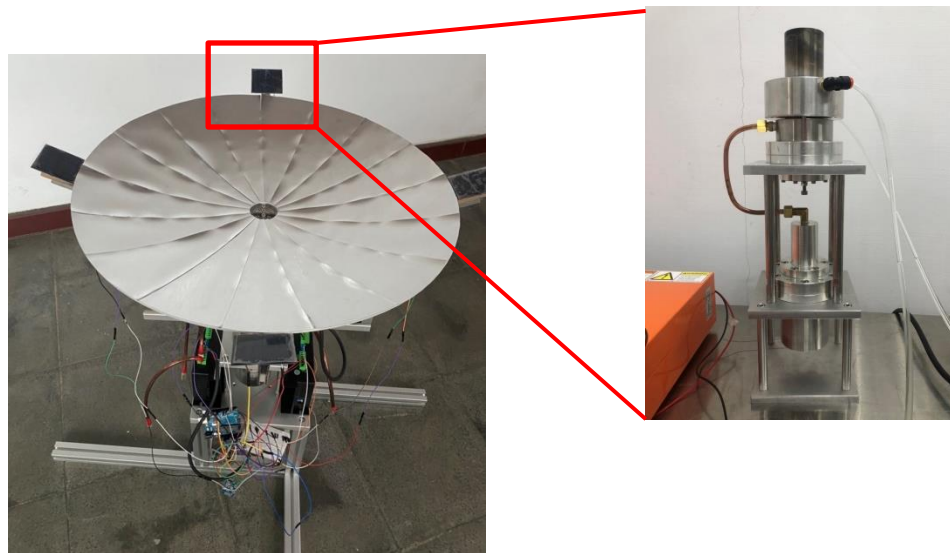


圖 20 史特靈引擎與追日器未來整合

### 4.2 功能測試

在組裝完成之後，我們緊接著就接著開始了我們程式的測試，並依照實際情況，調整程式的一些參數，並確保功能都能正常運作。

- 手動控制機構角度以及手機監測
- 被動式追蹤
- 主動式追蹤
- 碟面焦點的確認
- 太陽能板的敏感度

### 4.3 困難與解決

#### (1) 馬達的選擇及控制:

對於馬達的選擇我們猶豫了很久，因為在設計時馬達的尺寸需要一起考慮進去，但我們只能利用電腦初步估算出來大概需要的扭力，所以遲遲無法決定馬達的型號，但我們後來做了一個配重塊的設計來預防馬達扭力不夠，而且我們不太需要高速的移動，為了節省經費，最後才決定選擇步進馬達，並配合驅動器以及電源供應器成功驅動馬達。

	伺服馬達	步進馬達
響應	長距離響應速度快(因加速快) 定位響應慢(因過衝overshot)	長距離響應速度慢(因加速慢) 定位響應快(無過衝overshot)
扭矩	額定轉速內皆為額定扭矩	靜止時有最大的扭力，隨著速度增加，扭力快速減少，不適合高速負荷
速度	速度範圍廣，不因速度轉矩有變化	適合中低速(1000rpm內轉矩較高)
失步	無失步問題(閉迴路控制)	有失步問題(開迴路控制)
定位	停止時有定位時間，不適合頻繁短距離移動	不須定位時間，適合頻繁短距離移動

圖 21 伺服 vs. 步進[3]

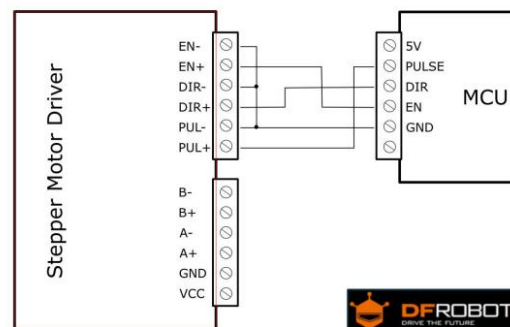


圖 22 驅動器共陰極接法[4]

#### (2) 組裝上的困難:

即使在設計時已經做的比較鬆了，在組裝零件時還是會因為公差問題導致組裝困難，解決方式就是使用砂紙加潤滑油磨掉粗糙的部分，通常稍微磨掉軸的插

入端就比較好組裝了。此外在裝設軸承時由於缺乏專業工具，只能靠身邊有的工具來加以利用，先用治具夾住後再用槌子敲，最後也是順利組裝完成。

### (3) 加工零件錯誤:

當初讓廠商加工完的第一批零件，在檢查時發現有些地方加工錯誤，本來應該貫穿的螺絲孔沒有完全貫穿，只好把零件寄回去請廠商再加工一次，後來才知道他們的攻牙刀沒有那麼長，跟廠商討論問題之後，因為表面不太重要所以選擇把表面挖一些掉，就能讓整個貫穿了。

### (4) 齒輪的改善:

在初次設計時未裝上引擎時可以順利轉動，但加上引擎會導致齒輪帶動馬達的情形產生，原因為平齒輪沒有自鎖功能無法單向傳動，應該使用渦輪渦桿齒輪，由於渦輪渦桿傳動比大只能單向傳動，因此具有自鎖的效果，所幸當初設計馬達座為可拆卸式，可將原齒輪拆卸替換成渦輪渦桿齒輪。

### (5) 主動式追蹤精確度:

主動式追蹤的精確度，往往跟感測器的靈敏度有很大的關係，由於我們是使用四塊太陽能板作為光感測器，而每一塊太陽能板的精度還是略有不同，這間接影響到了我們追蹤的精度，所以日後我們希望以鏡頭的方式來追蹤太陽，進而提高我們的精度。

## 五、參考文獻

- [1] [https://www.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/content/Content.aspx?menu\\_id=14437](https://www.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/content/Content.aspx?menu_id=14437)
- [2] <https://zh.m.wikipedia.org/zh-tw/%E8%81%9A%E5%85%89%E5%A4%AA%E9%98%B3%E8%83%BD%E7%83%AD%E5%8F%91%E7%94%B5>
- [3] [https://startat123.blogspot.com/2021/03/blog-post\\_29.html](https://startat123.blogspot.com/2021/03/blog-post_29.html)
- [4] <https://www.dfrobot.com.cn/images/upload/File/DRI0043/20161012102520yg1obn.pdf>