

國立臺灣海洋大學 電機工程系  
109 學年度 第 2 學期 實務專題  
專題成果報告

專題題目

以狼群優化演算法萃取太陽能電池特性  
參數之研究

組員：

姓名：李宜恩      學號：00853216

姓名：曾詠祥      學號：00853207

姓名：張凱翔      學號：00853208

指導老師：鄭于珊

## 摘要

本專題以狼群優化演算法(Grey Wolf Optimizer, GWO)為架構並使用數學軟體 Matlab 進行模擬，透過不斷的優化將太陽能電池所需的五個重要參數逼近實際測量的數值，並使太陽能電池輸出電流的實際值與程式模擬出來的計算值之間的均方根誤差(RMSE)達到最小，最終讓兩者的 I-U 特性曲線十分接近，完成本專題將太陽能電池實際運作結果以 Matlab 模擬呈現並取得參數之目標。

# 目錄

摘要.....	1
目錄.....	2
第一章 緒論.....	3
1.1 研究背景.....	3
1.2 研究動機.....	3
1.3 專題貢獻.....	4
第二章 研究方法.....	5
2.1 太陽能電池電氣特性.....	5
2.2 狼群優化演算法(Grey Wolf Optimization, GWO).....	8
2.3 均方根誤差(RMSE).....	8
2.4 主程式架構.....	8
第三章 研究成果.....	10
3.1 已完成項目.....	10
3.2 遭遇何種困難.....	11
3.3 克服方式.....	11
第四章 建議與結論.....	12
第五章 參考資料.....	13

# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景

早在 180 年前，因為工業革命使機械生產逐步地取代人力生產，導致大量的石化燃料隨之排放，進而使北半球大陸和海洋溫室氣體增加而開始暖化。隨著近年環保意識逐漸抬頭，台灣也在 2016 年由中華民國國家發展委員提出「綠能書面報告」，在 2025 年達到非核家園，以此作為台灣再生能源的發展目標。

隨著新的能源政策擴大再生能源發展，預計至民國 114 年時其發電量達到總發電量的 20%，其中太陽光電裝置容量佔再生能源發電量的 66.3%，目標裝置容量達 20GW，而所謂的再生能源，包含地熱能、潮汐能、風力能、生物能及太陽能等。因台灣位於亞熱帶氣候區，南部地區日照更是充足，相當適合太陽能發展。由經濟部發布的資訊圖 1.1 可知，總計至 110 年太陽光電於我國再生能源發電量位居第一，約占總再生能源發電量的 45%。除了台灣以外，需多國家也因為太陽能技術發展成熟，且成本低廉，極力鼓勵設置太陽能光電系統，期望能逐步實現能源轉型，減少時石化燃料依賴，達成環境永續發展的願景。

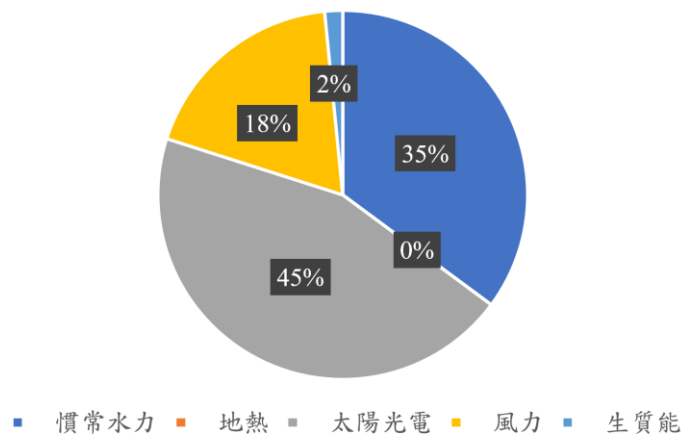


圖 1.1 民國 108 年 03 月至 110 年 03 月發電量總和百分比

## 1.2 研究動機

為了使太陽能板能有效設計成時時刻刻保持在最佳工作效率，需將太陽能電池的各個參數提出，在由參數值對太陽能電池進行調整，因此從實驗中得到正確的參數值對於太陽能電池設計至關重要。而以往要獲取太陽能電池之參數，需由通過串並聯電阻，再由改變後的 I-U 特性曲線取得參數值或者通過明暗對比測量得出，然而太陽能電池會因光罩強度、電池老化而及環境變化改變其參數值，因此通過上述方式獲取參數值十分費時費力。因此本專題利用 Matlab 進行模擬並使用狼群優化演算法(Grey Wolf Optimizer, GWO)，透過優化逼近實際測量的 I-U 特性曲線，最終取得太陽能電池的五個重要參數  $R_s$ 、 $R_{sh}$ 、 $I_{ph}$ 、 $I_s$ 、 $n$ 。通過模擬分析 1000 次結果表明，模擬值與實際值的均方根誤差 (RMSE) 逐漸收斂至 4% 以內。

### 1.3 專題貢獻

太陽能因其方便取得且太陽能板易於安裝之特性，使得太陽能在綠色能源中一直佔有重要地位。然而目前商用太陽能之轉換率僅有 20%，仍差強人意，加上太陽光因易受周遭環境之建築或植物等影響，並非全時皆處於全照度下，導致太陽能電池功率-電壓特性曲線變化，而為維持太陽能電池於最佳輸出狀態，須由每個太陽能電池的參數進行個別調整設計，本專題可由程式透過狼群優化演算法，進行多次迭代並不斷更新狼群位置，模擬 I-U 特性曲線，在 1 分鐘內可求出太陽能電池之參數，達到縮短獲取參數之時間及減少成本。

## 第二章 研究方法

### 2.1 太陽能電池電氣特性

太陽能電池之電氣特性為一非線性電源，其電壓與電流呈現一指數曲線的關係，因此當太陽能電池輸出電壓變動時，其輸出電流也會隨之變動。以下將以圖 2.1 太陽能電池等效電路圖來探討太陽能電池之特性，由圖 2.1 可得知太陽能電池輸出電壓與電流之關係式如式(2-1)所示。

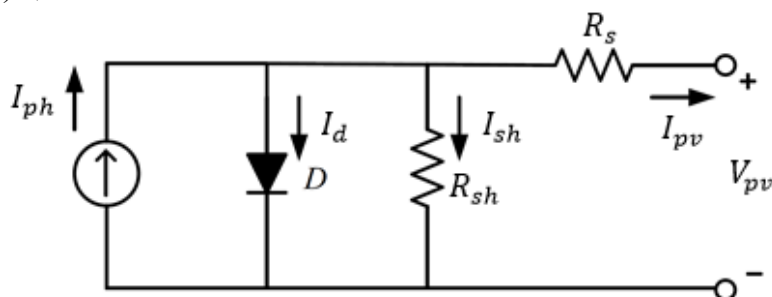


圖 2.1 太陽能電池等效電路圖

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left\{ e^{\left[ \frac{q \cdot (R_s \cdot I_{pv} + V_{pv})}{n \cdot K \cdot T} \right]} - 1 \right\} - \frac{R_s \cdot I_{pv} + V_{pv}}{R_{sh}} \quad (2-1)$$

表 2.1 太陽能電池等效電路符號表

$I_{pv}$	太陽能電池輸出電流	$I_{ph}$	光電轉換電流
$I_d$	二極體等效電流	$V_{pv}$	太陽能電池輸出電壓
$R_{sh}$	並聯等效電阻	$R_s$	串聯等效電阻
$q$	載子電荷量( $1.602 \times 10^{-19}$ C)	$n$	理想因子(1 至 2 之間)
$K$	波茲曼常數( $1.38065 \times 10^{-23}$ J/K)	$T$	絕對溫度
$I_s$	二極體 p-n 接面逆向飽和電流		

由於太陽能電池的並聯電阻之阻值遠大於串聯電阻之阻值，故可將式(2-1)化簡成式(2-2)

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left\{ e^{\left[ \frac{q \cdot (R_s \cdot I_{pv} + V_{pv})}{n \cdot K \cdot T} \right]} - 1 \right\} \quad (2-2)$$

為了方便觀察環境溫度與照度改變時對太陽能電池輸出特性曲線之影響，可將式(2-2)整理成式(2-3)

$$V_{pv} = \frac{n \cdot K \cdot T}{q} \cdot \ln \left( \frac{I_{ph} - I_{pv}}{I_s} + 1 \right) - I_{pv} \cdot R_s \quad (2-3)$$

依據太陽能電池模組標準測試條件(Standard Test Condition, STC)，將照度設定於  $1000 \text{ W/m}^2$  且溫度為  $25^\circ\text{C}$ ，利用式(2-2)可畫出太陽能電池於標準測試條件下之輸出特性曲線圖，如圖 2.2 所示。

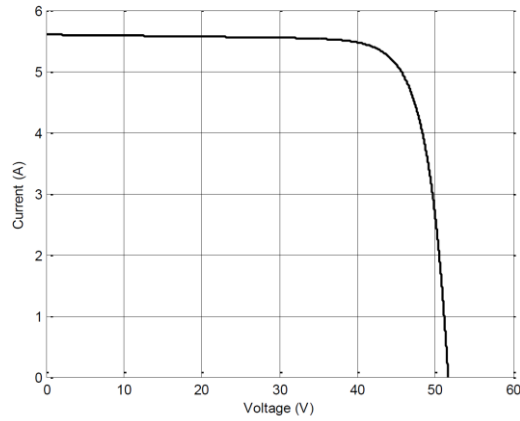


圖 2.2 太陽能電池於標準測試條件下之輸出特性曲線

當太陽光照度上升時，半導體因照入光能量增加使轉出的電能量增加，故太陽能電池之光電轉換電流隨之增加，可由式(2-2)得知，太陽能電池輸出電流與光電轉換電流成正比，因此照度增加時，太陽能電池輸出電流亦會有顯著的增加，又由式(2-3)可知，因自然對數之存在，故太陽能電池輸出電壓於照度上升時只有些微的變化，利用式(2-2)可畫出各種照度下之太陽能電池特性曲線，如圖 2.3 所示。

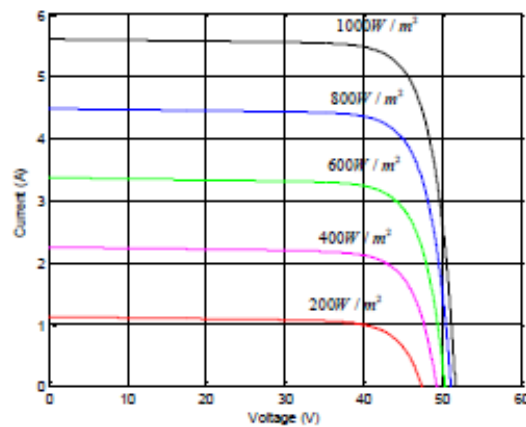


圖 2.3 太陽能電池於各照度下之輸出電流-電壓曲線圖

太陽能電池輸出特性曲線除了會隨著照度變動而隨之改變，環境溫度也會影響曲線的變化，由式(2-2)所示，當環境溫度上升時，等效二極體特性會使太陽能電池輸出電流略為上升，且由式(2-3)可知，環境溫度與太陽能電池輸出電壓成正比關係，而太陽能電池輸出電流也會隨溫度上升而隨之上升，如圖 2.4 所示。

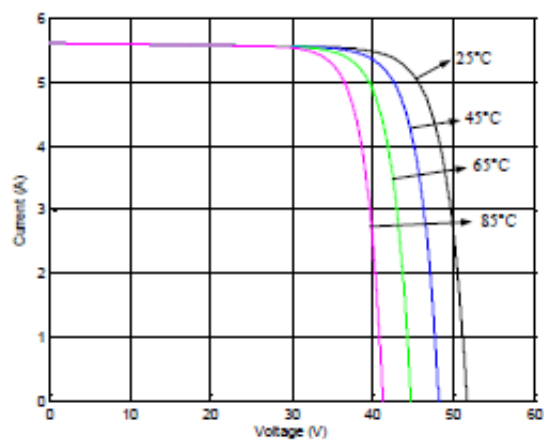


圖 2.4 太陽能電池操作於各環境溫度下之輸出電流-電壓曲線圖



## 2.2 狼群優化演算法(Grey Wolf Optimization, GWO)

將狼群的社會制度及獵捕行為以數學模型方式實現。該演算法計算各灰狼的適應度值，比較灰狼個體的適應值，保留前三佳的灰狼適應值( $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$ )及其位置，來找出最佳解，其演算步驟如下。

- (1) 狼群 $\vec{X}_p$ 在確定獵物的位置 $\vec{X}$ 後，首先要對獵物進行包圍，在此過程中獵物與灰狼之間的距離 $\vec{D}$ 可表示為

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (2-4)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (2-5)$$

其中 $\vec{C}$ 、 $\vec{A}$ 為係數向量， $\vec{X}(t+1)$ 為更新過後狼群的新位置。

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (2-6)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (2-7)$$

其中 $\vec{a}$ 是從2至0線性遞減， $\vec{r}_1$ 、 $\vec{r}_2$ 為0至1的隨機亂數。

- (2) 對獵物進行包圍後， $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$ 灰狼帶領狼群對獵物進行追捕，在追捕過程中狼群個體的位置會隨獵物的逃跑改變，而後可以根據 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$ 的更新後的位置式(2-9)來重新確定獵物(最佳解)的位置式(2-10)。

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}|, \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}|, \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (2-8)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\alpha, \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot \vec{D}_\beta, \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot \vec{D}_\delta \quad (2-9)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (2-10)$$

## 2.3 均方根誤差(RMSE)

為測量數值之間差異的量度，其數值為模擬預測的量或是被觀察到的估計量。透過狼群優化演算法的運算，計算太陽能電池輸出電流模擬值(Ipv)和測量值(Ipv0)之間的差異，找出最小的均方根誤差(RMSE)，並取得所相對應到的Rs、Rsh、Iph、Is、n參數值。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{pv_i} - I_{pv0_i})^2} \quad (2-11)$$

## 2.4 主程式架構

首先第一世代，把(Rs、Rsh、Iph、Is、n)在[1, 300, 10, 0.0001, 2]~[0.1, 288, 5, 0, 1]範圍裡以隨機數值初始化並給位置 X 矩陣存取，並取到小數後九位，接著更新式(2-6)和式(2-7)，代入評價方程式式(2-12)算出該世代 Ipv 並帶入式(2-11)求出適應值。分別找出前三小的適應值給( $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$ )存取其值和位置。之後透過式(2-8)和式(2-9)更新位置分別算出 $\vec{X}_1$ 、 $\vec{X}_2$ 、 $\vec{X}_3$ 使用式(2-10)求出新的位置 X 矩陣更新給下一世代及更新式(2-6)和式(2-7)。下個世代，比較( $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$ )，如果比前個世代前三小的適應值還大，則取代其值，同

樣地繼續更新位置給下一世代及更新式(2-6)和式(2-7)，經過 1000 次迭代運算，最後可求出最小的  $\alpha$ ，其值就是最佳的均方根誤差(RMSE)，而  $\alpha$  所存的位置則是所對應到的 (Rs、Rsh、Iph、Is、n)。程式流程圖如下：

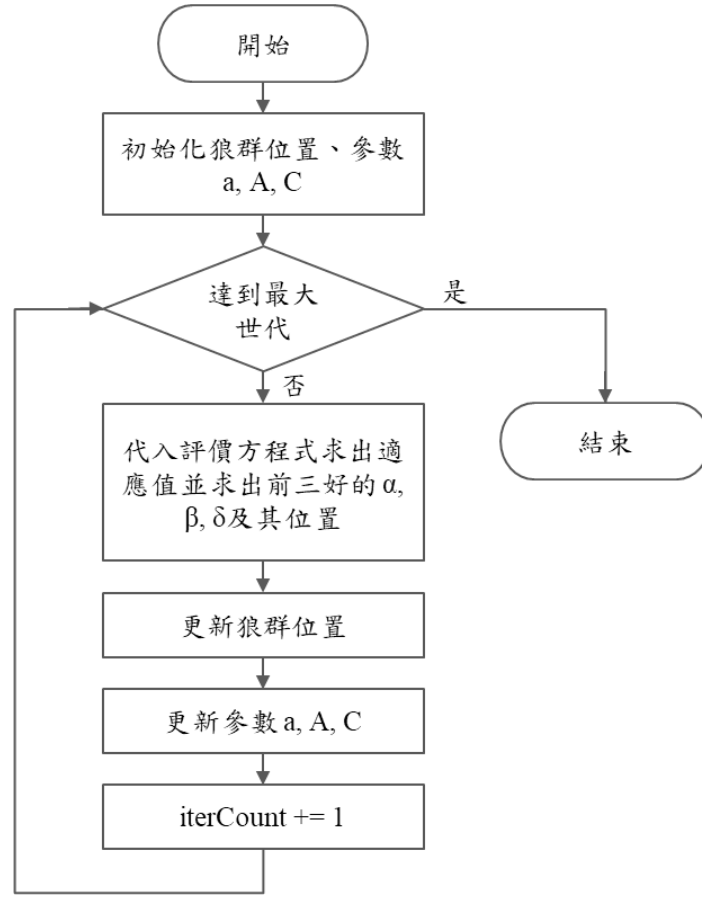


圖 2.5 程式流程圖

$$I_{pv} = \frac{R_{sh} \cdot (I_{ph} + I_s) - V_{pv}}{R_s + R_{sh}} - \frac{n \cdot V_t}{R_s} \cdot W(\theta_I) \quad \text{式(2-12)}$$

其中  $W$  = Lambert W – function， $\theta_I = \frac{(R_{sh}/R_s) \cdot I_s \cdot e^{\frac{R_{sh} \cdot R_s \cdot (I_{ph} + I_s) + R_{sh} \cdot V_{pv}}{n \cdot V_t \cdot (R_{sh} + R_s)}}}{n \cdot V_t}$

### 第三章 研究成果

本專題透過先前介紹之狼群演算法利用模擬軟體 Matlab 進行運算，並逐步找出五個參數  $R_s$ 、 $R_{sh}$ 、 $I_{ph}$ 、 $I_s$ 、 $n$  之最佳解使得實際值太陽能電池輸出電流與計算值太陽能電池輸出電流  $I_{pv}$  之間的均方根誤差(RMSE)最小化。

#### 3.1 已完成項目

Matlab 模擬參數計算值及均方根誤差(RMSE)結果如表 3.1 所示，由表 3.1 中可看出本專題實際值與模擬結果計算值五個重要參數中有四個參數  $R_s$ 、 $R_{sh}$ 、 $I_{ph}$ 、 $n$  差距極小，表示本專題之模擬數據有一定的正確性。

表 3.1 實際值與 Matlab 模擬計算值比較

	$R_s$ (m $\Omega$ )	$R_{sh}$ ( $\Omega$ )	$I_{ph}$ (A)	$I_s$ (A)	$n$	RMSE
實際值	0.89	289.18	6.11	1.76E-7	1.9831	
計算值	0.8913	288.4185	6.1125	2.4303E-7	2	0.0335
誤差	0.13%	-0.41%	0.05%	27.63%	0.84%	

經過 Matlab 模擬運算後得到四個重要參數模擬結果與實際值誤差在 1%之內，將取得的參數數值代入式(2.1)中計算出太陽能電池輸出電流  $I_{pv}$ ，再將其代入式(2.1)，計算出的均方根誤差(RMSE)結果如表 3.1，模擬結果與實際值之 I-U 特性曲線如圖 2.1，藍線部分為實際值，紅線部分為計算值，由於計算出的均方根值(RMSE)很小，所以得到的模擬特性曲線十分逼近實際特性曲線，可驗證本專題模擬結果之正確性。圖 2.2 為均方根誤差(RMSE)的收斂曲線，經過一千次的迭代運算，使均方根誤差(RMSE)收斂到極小值。

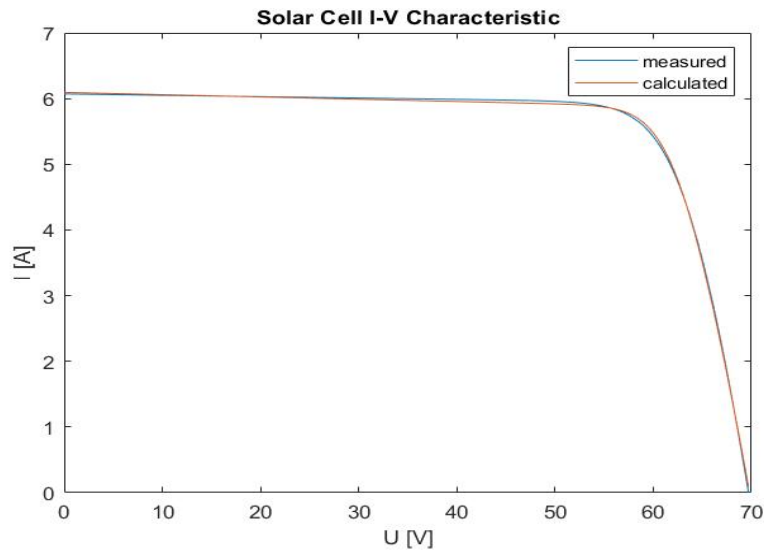


圖 3.1 太陽能電池實際值與計算值之 I-U 特性曲線

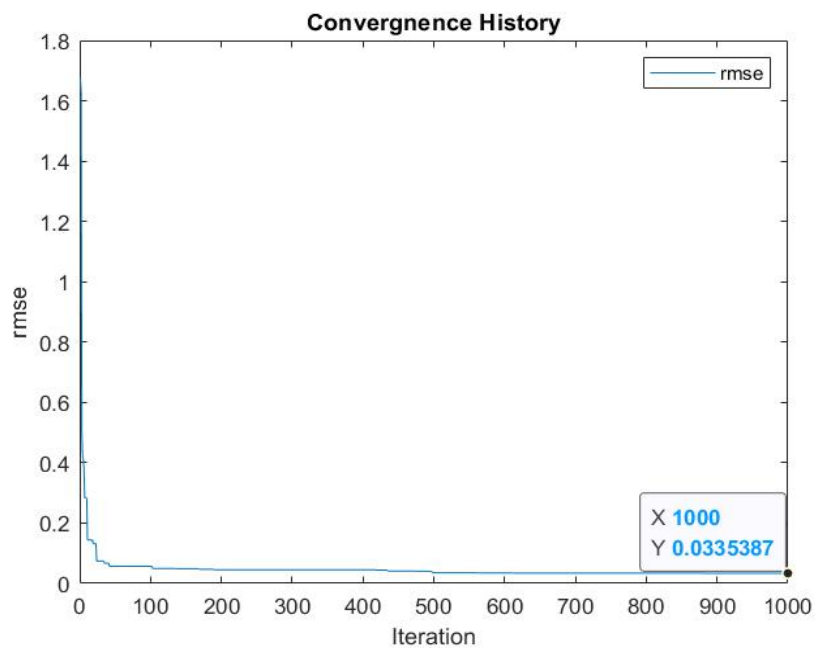


圖 3.2 均方根誤差(RMSE)收斂歷史曲線

### 3.2 遭遇何種困難

此次專題進行期間遇到的問題為無法使實際值與計算值間的 RMSE 最小化，以及程式執行完畢但未必能找到參數的最佳解。

### 3.3 克服方式

本次專題將世代數設為 1000，為了讓演算法能有更大的空間及能力搜索，也將每個世代的狼群數量提升，經多次實測後將每個世代的狼群數量設為 100 至 200 隻。並且改變  $r_1$ 、 $r_2$  數值使其每個元素皆有不同的 0 到 1 之間的隨機數值。

## 第四章 建議與結論

本次專題使用的狼群演算法雖然有良好的追蹤表現，但其缺點為若程式執行時未能找出程式最佳解則只能呈現程式執行結束當下所找到較好的解，如本專題搜尋的其中一個重要參數  $I_s$ ，搜尋範圍在 0 至  $10E-4$  之間，實際值為  $1.76E-7$ ，但最後求出的計算值為  $2.4303E-7$ ，誤差高達 27.63%，因此在要逼近的數值極小的情況下要如何模擬出接近的數值是本專題可以在繼續研究下去的一個點。

經過這次的專題，讓我們對 GWO 整個程式架構有深入的了解，懂得如何實際的應用在實際問題上，求出目標函數所對應的最佳解。未來可應用的領域很廣，是一個很實用的工具。

## 第五章 參考資料

- [1] Mirjalili, Seyedali, Seyed Mohammad Mirjalili, and Andrew Lewis. "Grey wolf optimizer." *Advances in engineering software* 69 (2014): 46-61.
- [2] Petrone, Giovanni, et al. *Photovoltaic sources modeling*. John Wiley & Sons, Incorporated, 2017.
- [3] Bouzidi, K., M. A. B. A. Chegaar, and A. Bouhemadou. "Solar cells parameters evaluation considering the series and shunt resistance." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 91.18 (2007): 1647-1651.
- [4] 倪鵬濤，「適用於太陽能發電系統之決定型杜鵑鳥搜尋最大功率追蹤法」，國立台灣科技大學電機工程系碩士學位論文，2016。
- [5] 經濟部能源局-能源統計資料查詢系統。檢自：<http://www.esist.org.tw/database>。