

結合反應曲面法與非線性時變粒子群演算法於 太陽能電池傾斜角之最佳化設計

張英彬

南開科技大學 電機與資訊技術系

通訊作者：張英彬

聯絡地址：南投縣草屯鎮中正路 568 號

電子郵件：cyp@nkut.edu.tw

投稿日期：2012 年 8 月

接受日期：2012 年 11 月

摘 要

目前石化能源逐漸短缺，環境污染問題日益嚴重，利用太陽能電池發電將是解決未來能源不足的重要途徑。為提高太陽能電池的輸出功率，其安裝角度應隨著裝設地點不同而調整。因此，本文選取台灣七個城市，利用儒略計時公式，再結合反應曲面法與非線性時變粒子群演算法求解太陽能電池的最佳傾斜角。反應曲面法常應用於問題的建模與數學統計分析，尤其在協助研究人員對工程案例中最佳化設計問題提供一套分析、求解程序。工程案例中大部分皆屬於非線性不可微分之最佳化問題，使用試誤法與傳統最佳化演算法，不僅耗時並且無法獲得理想最佳值。然而，反應曲面法只能搜尋區域最佳解，因此提出非線性時變粒子群演算法，能快速收斂至全域最佳解，為驗證所提方法之可行性，本文提出上述結合方法於太陽能電池傾斜角之最佳化設計。本文結果顯示，太陽能電池的最佳傾斜角以台北夏季之 -9.36° 及恆春全年之 20.34° 時發電量達最大值，同時計算其全天平均輻射量與太陽能電池最佳轉換效率，其結果可進一步推廣至建築整合型裝設時之角度評估。

關鍵詞：反應曲面法、非線性時變粒子群演算法、太陽能電池、傾斜角

壹、緒論

科技日益進步的現代社會中，實驗設計方法普遍應用於工業設計及許多領域，以往常利用傳統「試誤法」(trial and error) 以及「一次一因子法」(one-factor at a time) 的方式尋找實驗設計或作業條件中變數的最佳值。Andrews, Bishop, and Witte (1996) 學者提出「試誤法」是沒有透過任何的資料分析，卻以個人的經驗評估取得所需的值，所以不是一種有系統性的分析方法，而「一次一因子法」則是以較少的實驗變數組合，取得特定條件下有效的計算值，其缺點在於評估

時未能考慮各變數的交互作用而產生明顯的偏見分析，不僅耗時並且無法獲得最佳理想值。因此，為了改善上述的缺點，有一些最佳化的方法提出，如直交表 (orthogonal arrays)、田口法 (Taguchi method) 與反應曲面法 (response surface methodology, RSM) 等方法，並使用於不同操作條件下的最佳化。上述所提三種方法中，葉乃菁 (2011) 曾以反應曲面法可同時測定各變數間影響的反應值，此方法同時具有尋找區域最佳化條件功能，因此被廣泛於工程案例設計。

顧絨瑛 (2009) 則認為太陽能電池在先進國家已漸漸發展，主要是政府大力推廣，支持家庭興建太陽能電池建築整

合型。太陽能電池發電之優點為市電並聯可以提高電力品質、發電不足時可向電力公司購電、發電過剩時可賣給電力公司，如此誘因預期太陽能電池的發電，將是未來民生的主要能源。此外，目前石化能源逐漸短缺，環境污染問題日益嚴重，利用太陽能電池發電將是解決未來能源不足的重要途徑。Weiden, and Kil (1994) 分別以五種不同傾斜角度 (tilt angle) 及方位 (azimuth) 進行輸出功率量測，因系統中換流器具有最大功率追蹤功能，整個系統約減低 4% 能量損失，相對地輸出效率也大幅提昇。此外，Hideyuki et al. (1994) 等學者利用兩種不同方位角，模擬任何時間地點太陽的位置與天空晴朗時的日照強度變化，找出太陽能電池安裝時的最佳位置，文中將太陽能電池以串並聯組合方式量測輸出參數變化情形，若能配合實際量測資料與模擬結果來比較，整篇文章將更具完整性。同時，沈仲晃 (2005) 太陽運行位置的計算，計算出任何時間地點太陽運行的位置與軌跡，應用於模組日照強度的變化，模擬太陽能電池於任何傾斜角度或方位時之電力輸出，其結果可以提供大型固定式太陽能發電系統最佳安裝位置之參考或屋頂與樓房外牆安裝太陽能電池時之電力評估。

貳、方法

以往台灣地區，一貫採用北回歸線緯度 23.5° 面向南方做為安裝角度 (工研院建議)，但實際上台灣地區最南端墾丁緯度 22° ，最北端基隆 25° ，相差達 3° ，應隨各地區域溫度、時間及經緯度之條件不同，而造成日射量、功率輸出也不同，太陽能電池裝設角度應隨裝設地點不同做有效調整。

本文以中央氣象局氣候資料年報中具有完整的地面氣象資料之地區為研究對象，選取台北、台中、台南、高雄、恆春、花蓮及台東等七個重要地區，首先利用天文計算方式，模擬出於任何時間地點太陽的位置與天空晴朗時的日照強度變化，並考慮各地區全年月平均太陽能電池環境與模組溫度，以反應曲面法模擬出固定式太陽能電池的最佳傾斜角，進一步計算出各地區日照直射輻射量與太陽能電池之電能輸出，模擬時間分成每季與全年兩種時段。

一、太陽運行位置的計算

沈仲晃 (2005) 以太陽運行位置的計算，可決定任何時間地點太陽運行的位置與軌跡，應用於模組日照強度的變化，模擬太陽能電池於任何傾斜角度或方位時之電力輸出，其結果可以提供大型固定式太陽能發電系統最佳安裝位置參考。

(一) 儒略日 (Julian Day, JD)

蘇明俊 (2003) 應用儒略日年月之長期紀日法來計算太陽位置，方程式(1)~(16)推導可參考文獻蘇明俊之文獻，是天文計算中有關時間的重要引數，儒略日計算式為

$$JD=B+C+D+d-1524.5 \quad (1)$$

其中

$$B = 2 - A + \text{Int}(A/4) ;$$

$$C = \text{Int}[365.25 \times (y' + 4716)] ;$$

$$D = \text{Int}[30.6001 \times (m' + 1)] ;$$

$$A = \text{Int}(y'/100); \text{Int} : \text{取整數之意}$$

例如：y 年 m 月 d 日的儒略日，計算方法為：若月份是 1 月或 2 月，則 $m' = m + 12$ 、

$$y' = y - 1, \text{其餘月份 } m' = m, y' = y。$$

(二) 儒略日 (JD) 換算至時間 (JD1), JD1 計算式為

$$JD1 = JD - JD2000 \quad (2)$$

其中 JD2000 為公元 2000 年 1 月 1 日世界時零時儒略日。儒略世紀 (Julian Century, JC)

$$JC = JD1 / 36525 \quad (3)$$

(三) 太陽黃道經緯度 (λ, β)

距離春分點平均離角 ε 、近地點離角 ρ 、軌道偏心率 E 、近日點平均離角 M 之計算，如(4) 式~ (7) 式 所示，利用級數展開克卜勒方程式 (Kepler's equation) 可得近日點離角 v 與太陽的黃道經度 λ ，如(8) 式 與(9) 式所示，因太陽在黃道面上運動，故其黃道緯度 β 為 0 度

$$\varepsilon = 280.466457 + 0.985647358 JD1 + 0.000304 JC^2 \quad (4)$$

$$\rho = 282.937348 + 0.00004707624 JD1 + 0.00004569 JC^2 \quad (5)$$

$$E = 0.01670862 - 0.00004204 JC \quad (6)$$

$$M = \varepsilon - \rho \quad (7)$$

$$v = M + 360E \sin(M)/\pi + 900E^2 \sin(2M)/4\pi - 180E^3 \sin(M)/4\pi \quad (8)$$

$$\lambda = v - 360^\circ + \rho \quad (9)$$

(四) 赤道經緯度 (α, δ)

黃道赤道交角 I 為 23.4392° ，赤道經度 α 等於黃道經度 λ ，赤道緯度 δ 為

$$\delta = \sin^{-1}(\sin \beta \cos I + \cos \beta \sin \lambda \sin I) \quad (10)$$

(五) 太陽方位角 A_d 與仰角 h

格林威治平均恆星時之赤經值 $GMST$ 與地方平均恆星時之赤經值 $LMST$ 為

$$GMST = 6h41m50.4841s + 8640184.81266 \times (JD1/36525.24)s \quad (11)$$

$$LMST = GMST + \gamma + (LT - \text{時差}) \times 1.002738 \quad (12)$$

將太陽時轉換成恆星時的轉換常數為 1.002738。在地理經緯度 (γ 、 φ) 位置觀測太陽方位角 A_d 與仰角 h 為

$$A_d = \tan^{-1} \left[\frac{\sin(LMST - \alpha)}{\sin \varphi \cos(LMST - \alpha) - \cos \varphi \tan \delta} \right] \quad (13)$$

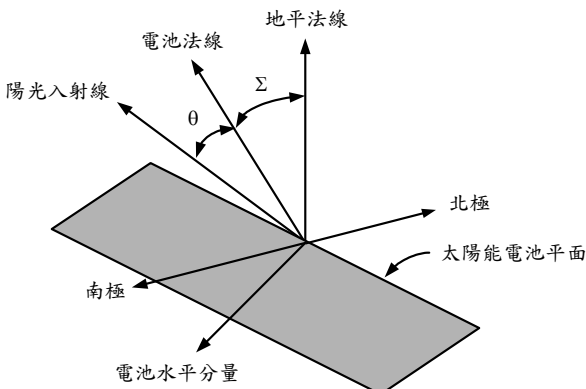
$$h = \sin^{-1} [\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos(LMST - \alpha)] \quad (14)$$

如圖一假設太陽能電池於地理緯度 φ 太陽赤緯 δ ，當傾斜角度 Σ ，其法線與陽光入射線夾角為 θ 時，電池之日照強度為

$$S = S_c [1 + 0.033 \cos(2\pi n / 365)] \cos \theta \quad (15)$$

其中 S_c ：太陽常數 = $1367W/m^2$ ；

n ：日序，即一年以 365 日計算，1 月 1 日之日序為 1，12 月 31 日為 365；



圖一 太陽能電池法線與陽光入射線的關係示意圖

$$\cos \theta = \sinh \cdot \sin(90 - \Sigma) + \cosh \cdot \cos(90 - \Sigma) \cos(A_d - \zeta) \quad (16)$$

ζ ：太陽電池方位角，單位為度，以正南方為 0 度，向西為正，向東為負。

二、太陽能電池的數學模式

太陽能電池為一種利用太陽光線照射在光電半導體薄片上產生電力的設備，其等效電路如圖二所示，以下方程式推導可參閱沈仲晃 (2005) 太陽運行位置的計算，太陽能電池的電流 I_{ph} 為

$$I_{ph} = \{I_{scr} + k_i(T - T_r)\} \frac{S}{100} \quad (17)$$

其中 I_{scr} ：太陽能電池工作於參考溫度 $25^\circ C$ 和日照條件下 ($1000W/m^2$) 所量測短路電流；

k_i ：太陽能電池短路電流溫度係數；

T ：模組溫度；

T_r ：參考溫度。

流通二極體的電流 I_d 為

$$I_d = n_p I_o \left[\exp \left\{ K_o \left(\frac{V}{n_s} + IR_s \right) \right\} - 1 \right] \quad (18)$$

其中 $K_o = \frac{q}{kTA}$ ；有關 q, T, A 定義可參閱沈仲晃 (2005) 太陽運行位置的計算；

n_p ：太陽能電池模組並聯個數；

n_s ：太陽能電池模組串聯個數；

其中逆向飽和電流 I_o 為

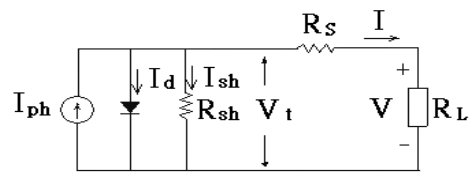
$$I_o = I_{or} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \exp \left\{ \frac{qE_G}{kA} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right\} \quad (19)$$

流經負載電阻 R_L 之電流 I 為

$$I \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) = n_p I_{ph} - n_p I_o \left[\exp \left\{ K_o \left(\frac{V}{n_s} + IR_s \right) \right\} - 1 \right] - \frac{(V/n_s)}{R_{sh}} \quad (20)$$

太陽能電池功率 P 為

$$P = n_p I_{ph} V - n_p I_o \left[\exp \left\{ K_o \left(\frac{V}{n_s} + IR_s \right) \right\} - 1 \right] V - \frac{\left(\frac{V}{n_s} + IR_s \right) V}{R_{sh}} \quad (21)$$



圖二 太陽能電池之等效電路圖

(一) 問題描述

太陽能電池所產生功率大小，取決於溫度之外，最主要關鍵在於太陽能電池安裝傾斜角。本文所探討太陽能電池傾斜角之最佳化設計是要讓輸出功率達最大值，並考慮太陽能電池電壓與傾斜角之限制條件，其表示如下：

1. 目標函數

太陽能電池傾斜角可用最佳化問題來表示

$$\text{Maximize } M(\Sigma) = P \quad (22)$$

其中

M : 目標函數;

Σ : 太陽能電池傾斜角;

P : 全年 (或全季) 太陽能電池輸出功率。

2.限制條件

太陽運行位置一年四季在改變，電池傾斜角也隨之調變，因此設定上下限為

$$\Sigma_{\max} > \Sigma > \Sigma_{\min} \quad (23)$$

電池電壓範圍應侷限於開路電壓與最低放電電壓之間，其上下限為

$$V_{\max} > V > V_{\min} \quad (24)$$

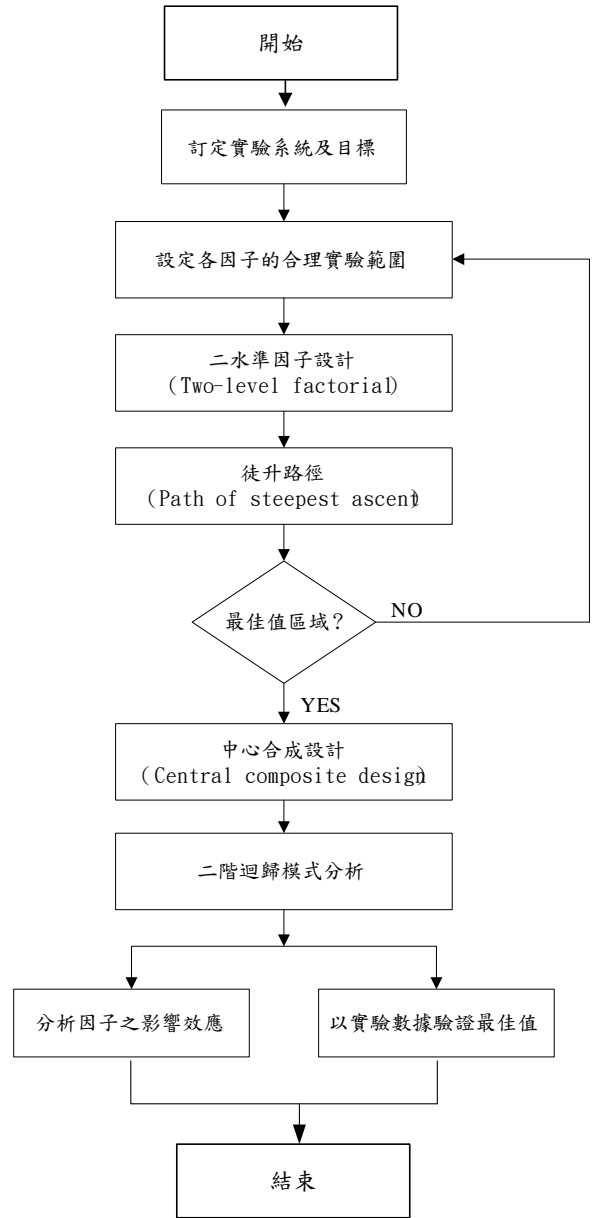
三、最佳化方法

本文採用兩種最佳化的方法分別為 (1)反應曲面法 (2)非線性時變粒子群演算法。說明如下：

(一) 反應曲面法

反應曲面法的設計概念是由 Box and Wilson (1951) 首先提出，基本構想為結合數學與統計分析方法所發展的方法論，根據實際的實驗數據，描述受測試因子與目標函數間相互關係的數學模式，進一步藉由此模式尋找極值點所在的位置。反應曲面法經由 Box 等學者長期的研究，此方法已發展得相當完整如圖三所示，而統整其最佳化步驟，主要包括以下五項主要功能：

- 1.極值點區域之逼近。
- 2.反應曲面數學模式之建立。
- 3.模式適切性之檢驗。
- 4.極值點之決定。
- 5.因子影響效應之分析。



圖三 反應曲面法實驗設計之流程圖

(二) 非線性時變粒子群演算法

粒子群演算法 (particle swarm optimization, PSO) 是一種進化計算技術，主要概念是源自於對動物群體行為的研究。傳統粒子群演算法缺點即在求解最佳化問題的搜尋初期收斂速度較快，到了後期搜尋階段隨著粒子群逐漸往群體最佳解的粒子靠近，因而喪失了整個群體的多樣性，導致搜尋後期收斂速度變慢且粒子易陷入局部最佳解。為了解決此一缺點，本文採用粒子群演算法進行修正，使其具有動態適應方法的研究，利用非線性時間變化的演算調整慣性權重與加速常數，改良現有粒子群演算法缺點並應用於濾波器最佳規劃，所提非線性時變粒子群演算法能調整慣性權重與加速常

數，利用五個著名的樣本函數，驗證所提出方法的效能，並且 Ko, Chang, and Wu (2007) 等學者已獲得具體的研究成果。最後利用更新法則來對每個粒子目前的位置做更新如下：

$$\mathbf{V}_i(t+1) = \omega(t) \cdot \mathbf{V}_i(t) + c_1(t) \cdot r_1 \cdot (\mathbf{P}_i^l(t) - \mathbf{P}_i(t)) + c_2(t) \cdot r_2 \cdot (\mathbf{P}^g - \mathbf{P}_i(t)) \text{ for } i = 1, 2, \dots, n \quad (25)$$

$$\mathbf{P}_i(t) = \mathbf{P}_i(t) + \mathbf{V}_i(t+1) \quad (26)$$

$$\omega(k) = \omega_{\min} + \left(\frac{\text{iter}_{\max} - \text{iter}}{\text{iter}_{\max}} \right)^\alpha \cdot (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \quad (27)$$

$$c_1(k) = c_{1\min} + \left(\frac{\text{iter}_{\max} - \text{iter}}{\text{iter}_{\max}} \right)^\beta \cdot (c_{1\max} - c_{1\min}) \quad (28)$$

$$c_2(k) = c_{2\max} + \left(\frac{\text{iter}_{\max} - \text{iter}}{\text{iter}_{\max}} \right)^\gamma \cdot (c_{2\min} - c_{2\max}) \quad (29)$$

$$\alpha, \beta, \gamma \in \{0, 0.5, 1, 1.5, 2\} \quad (30)$$

其中

- m : 種族粒子群數;
- k : 目前迭代數;
- $P_i(k)$: 在迭代 k 中第 i 個粒子的最佳位置;
- $P_i^l(k)$: 在迭代 k 中第 i 個粒子的最佳解;
- P^g : 全粒子的最佳解;
- $V_i(k)$: 在迭代 k 中第 i 個粒子的速度;
- $\omega(k)$: 第 k 疊代慣性權重;
- $c_1(k)$: 第 k 疊代認知參數;
- $c_2(k)$: 第 k 疊代社群參數;
- $(P^g - P_i(k))$: 現在位置和群體最佳值的距離;
- r_1, r_2 : 介於 0 和 1 之間的隨機常數。

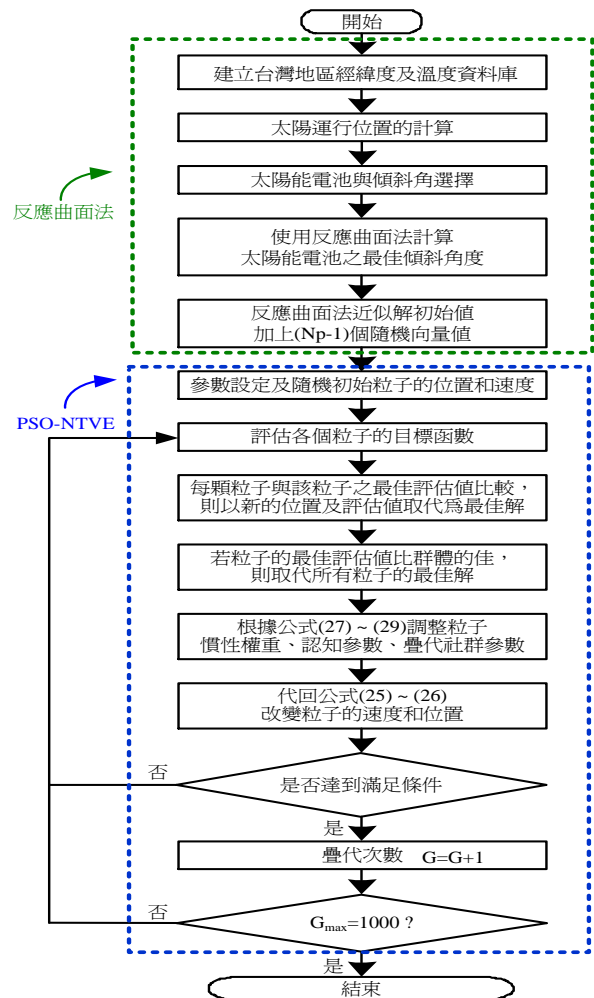
參、結果

為驗證所提方法可行性，因此應用於太陽能電池最佳傾斜角度最佳化設計，目標函數是以太陽能電池功率輸出及全天輻射量為最大化，主要是以中央氣象局氣候資料年報中具有完整的地面氣象資料之地區為研究對象，並選取台灣七個地區，其地理位置如表一所示，首先利用天文計算方式，模擬出於任何時間地點太陽的位置與天空晴朗時的日照強度變化，並考慮各地區全年月平均太陽能電池環境與模組溫度，而以反應曲面法模擬出太陽能電池的最佳傾斜角與太陽能電池之功率輸出，進一步使用非線性時變粒子群演算法求解計算出各地區直射輻射量、太陽能電池之電能輸出與太陽能電池轉換效率，模擬時間分成每季與全年兩種時段。

表一 台灣七個地區地理位置

地區	北緯	東經
台北	25°02'	121°30'
台中	24°09'	120°41'
台南	23°00'	120°14'
高雄	22°34'	120°18'
恆春	22°00'	120°44'
花蓮	23°59'	121°36'
台東	22°45'	121°09'

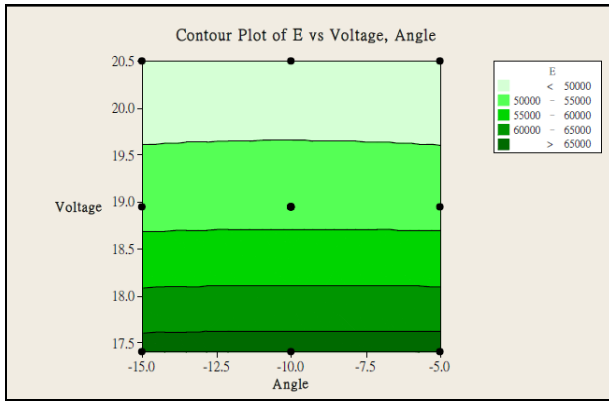
本文結合反應曲面法與非線性時變粒子群演算法，以二維空間為搜尋過程。首先以反應曲面法快速解出一個近似解，再以非線性時變粒子群演算法求出接近全域最佳解，因此不僅發揮反應曲面法的快速搜尋能力，而且能保有非線性時變粒子群演算法的隨機搜尋特性，其流程如圖四所示，值得一提，反應曲面法是以 Carver (2003) 所撰寫 Minitab 16 的軟體模擬分析，非線性時變粒子群演算法則以 MATLAB 7.7 程式語言撰寫。



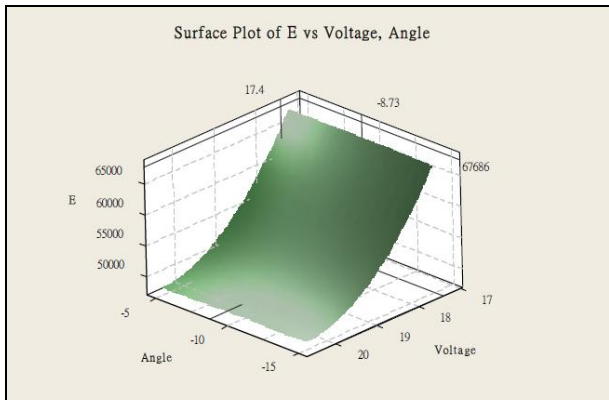
圖四 結合反應曲面法與非線性時變粒子群演算法應用於太陽能電池最佳傾斜角設計流程

1.反應曲面法模擬結果

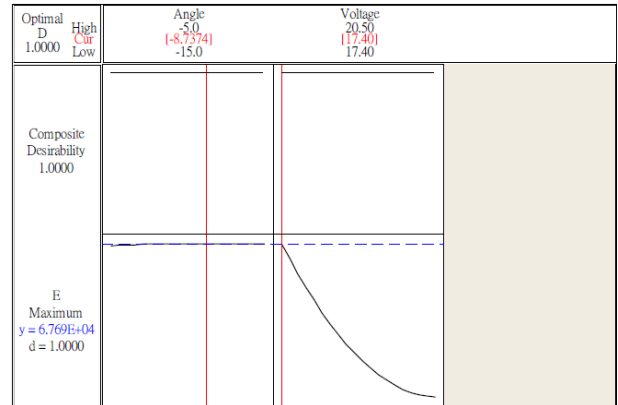
本文以台灣七個地區進行太陽能電池傾斜角最佳化設計，所提反應曲面法方法是以 Minitab 程式進行電腦模擬，其中台北地區分析，結果分別獲得如圖五及圖六之等高線及反應曲面圖，最後計算出最佳化之傾斜角 Σ 為 -8.7374° 與太陽能電池電壓 V 為 $17.4V$ ，目標函數之夏季發電量 E 為 $67686Wh/m^2$ ，結果如圖七所示。



圖五 台北夏季之太陽能電池電壓與傾斜角等高線分佈



圖六 台北夏季之發電量、太陽能電池電壓與傾斜角立體三度空間

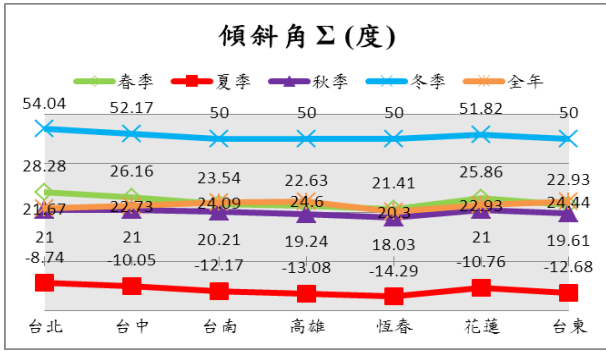


圖七 台北夏季之最佳化結果

如表二與圖八所示分別為計算出太陽能電池在全年及各季節的最佳傾斜角度 Σ 及太陽能電池發電量 E (Wh/m^2)，其中以春季時七個地區所計算的傾斜角大約介於 $21.41^\circ \sim 28.28^\circ$ 之間；其次夏季介於 $-2.74^\circ \sim -14.29^\circ$ 範圍；這段時間太陽位置在日出、日落時偏北方，亦即太陽電池若朝北會有最大發電量輸出，其中負角度代表太陽能電池角度面向北方，通常電池安裝方向是面向南方，主要原因是台灣在北回歸線附近，緯度約在 $22 \sim 25$ 度之間，因此安裝時太陽能電池需面對正南方，水平仰角與當地相同，即可在全年裡吸收最大能量，產出最大發電量。太陽能電池接受陽光照射才能發電，因此在各個時段、各個方位都需要避開遮蔭影響。其次，秋季大約是在 $18.03^\circ \sim 21^\circ$ 之間；而冬季是於 $50^\circ \sim 54.04^\circ$ 之間變動，因此一年四季皆以台北地區傾斜角最大，此外，最大發電量為夏季介於 $67572 \sim 67762$ (Wh/m^2)，以台北地區之最大輸出發電量達 67762 (Wh/m^2)，全年則是恆春地區出現最大發電量為 228406 (Wh/m^2)，主要原因是全年時段，恆春位於較低緯度且太陽位置偏南方時即能接收較高輻射量之故。

表二 使用反應曲面法模擬台灣七個地區之最佳太陽能傾斜角度與發電量

		地區	台北	台中	台南	高雄	恆春	花蓮	台東
Σ (度)	季節	春季	28.28	26.16	23.54	22.63	21.41	25.86	22.93
		夏季	-8.74	-10.05	-12.17	-13.08	-14.29	-10.76	-12.68
		秋季	21.00	21.00	20.21	19.24	18.03	21	19.61
		冬季	54.04	52.17	50.00	50.00	50.0	51.82	50.00
	全年	21.67	22.73	24.09	24.60	20.30	22.93	24.44	
E (Wh/m^2)	季節	春季	57430	56082	57485	57480	57473	57474	57481
		夏季	67762	67705	67641	67620	67572	67738	67630
		秋季	59540	59538	59537	59550	59558	59532	59546
		冬季	63245	63359	63526	63592	63596	63355	63590
	全年	228104	228247	228067	227881	228406	228227	227967	



圖八 使用反應曲面法模擬台灣七個地區
太陽能傾斜角度折線圖

2.非線性時變粒子群演算法模擬結果

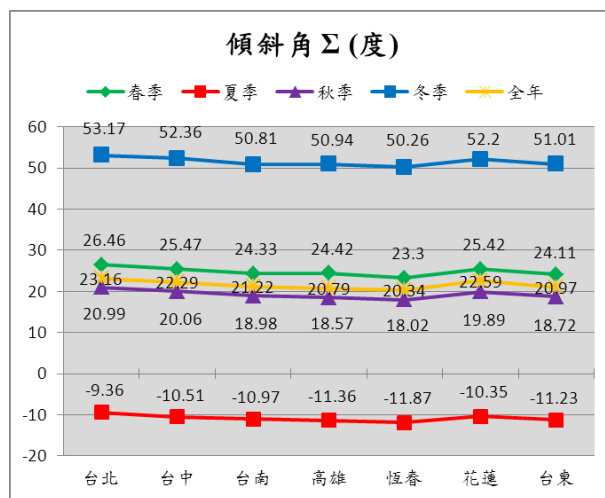
所提方法求解步驟，首先應用反應曲面法求出太陽能電池最佳傾斜角之最佳區域解，再將此值作為非線性時變粒子

群演算法初始值，以加速獲得最佳全域解，本文以七個地區為基礎，考慮四季與全年之不同時段之太陽能電池最佳傾斜角、發電量及全天平均輻射量最佳化設計。

最後，計算結果如表三及圖九所示，其中，台北地區之太陽能電池最佳化傾斜角為 -9.36° 與發電量 E 為 67767 Wh/m^2 最高。其次，花蓮地區最佳傾斜角為 -10.35° 與發電量為 67739 Wh/m^2 ，最低發電量位於恆春為 67635 Wh/m^2 ，而表四及圖十所示分別為台灣七個地區之太陽能輻射量與電池轉換效率與太陽輻射量折線圖，輻射量在所有地區以台北為最大，主要原因是夏季太陽位置偏北且台北有較高緯度，遠比其他六個地區有較長日照時數。太陽能電池電能發電量輸出與輻射量呈正相關，亦即用輻射量或用發電量輸出為目標函數所得最佳傾斜角相當接近。

表三 台灣七個地區之最佳太陽能傾斜角度與發電量

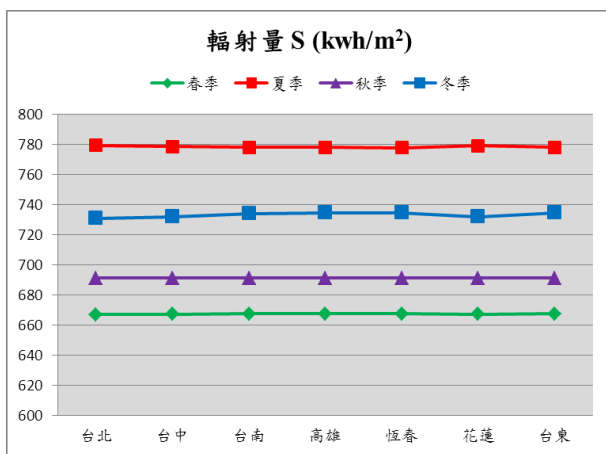
地區		台北	台中	台南	高雄	恆春	花蓮	台東	
Σ (度)	季節	春季	26.46	25.47	24.33	24.42	23.3	25.42	24.11
		夏季	-9.36	-10.51	-10.97	-11.36	-11.87	-10.35	-11.23
		秋季	20.99	20.06	18.98	18.57	18.02	19.89	18.72
		冬季	53.17	52.36	50.81	50.94	50.26	52.2	51.01
	全年	23.16	22.29	21.22	20.79	20.34	22.59	20.97	
E (Wh/m^2)	季節	春季	57461	57474	57491	57494	57510	57475	57493
		夏季	67767	67709	67657	67652	67635	67739	67653
		秋季	59551	59545	59551	59554	59557	59542	59553
		冬季	63253	63358	63541	63601	63597	63356	63603
	全年	228184	228253	228367	228395	228409	228242	228393	



圖九 台灣七個地區太陽能傾斜角度折線圖

表四 台灣七個地區之太陽能輻射量與電池轉換效率

地區		台北	台中	台南	高雄	恆春	花蓮	台東	
S (kwh/m ²)	季節	春季	667.23	667.37	667.56	667.61	667.76	667.39	667.58
		夏季	779.48	778.82	778.30	778.25	778.07	779.19	778.27
		秋季	691.23	691.30	691.37	691.4	691.43	691.27	691.39
		冬季	731.07	732.20	734.19	734.81	734.76	732.17	734.82
	全年	2656.28	2657.02	2658.19	2658.54	2658.69	2656.97	2658.53	
η (%)	季節	春季	13.117	13.117	13.117	13.117	13.117	13.117	13.117
		夏季	13.241	13.241	13.240	13.240	13.240	13.241	13.240
		秋季	13.122	13.119	13.119	13.119	13.119	13.119	13.119
		冬季	13.178	13.179	13.182	13.183	13.183	13.179	13.183
	全年	13.084	13.084	13.085	13.085	13.085	13.084	13.085	



圖十 台灣七個地區太陽輻射量折線圖

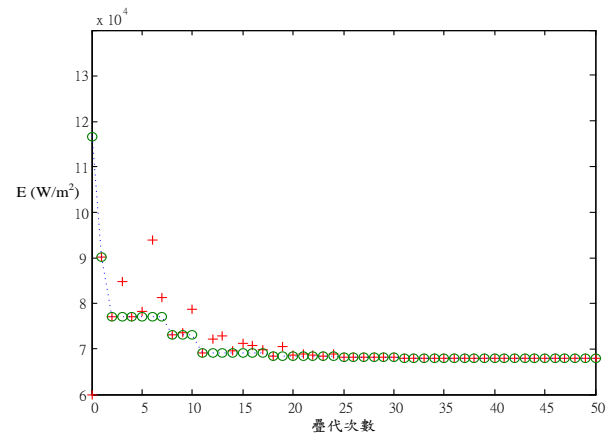
表五為應用三種最佳化方法結果比較，從表中得知若只採用反應曲面法所得發電量 E 為 67762 Wh/m^2 ，相較於非線性時變粒子群演算法的發電量 67765 Wh/m^2 為低，但結合上述兩種方法發電量卻達 67767 Wh/m^2 ，雖然所提方法發電量略大於上述各別兩種方法，主要原因是本系統模型應用於反應曲面法或非線性時變粒子群演算法，執行模擬時區域解與全域解較為接近緣故，若是系統變數數目較多時，必能顯示方法可行性與優越性，所以證明所提方法之太陽能電池發電量遠比只使用反應曲面法或非線性時變粒子群演算法為大。

表五 太陽能電池發電量比較

方法	發電量 E (Wh/m ²)	C_1	C_2	N_p
反應曲面法	67762	-	-	-
非線性時變粒子群演算法	67765	1	3	20
結合反應曲面法與非線性時變粒子群演算法	67767			

註： C_1 、 C_2 和 N_p 分別代表非線性時變粒子群演算法之區域解的學習因子、全域解的學習因子與族群數。

為驗證所提方法穩定性及計算效率，如圖十一所示為太陽能發電量的曲線收斂情形，利用反應曲面法與非線性時變粒子群演算法兩種方法結合之最佳化求解過程，從收斂曲線可以看出於第十九次疊代以後，目標函數 E 快速收斂於 $67766 \text{ (Wh/m}^2)$ 。



圖十一 台北夏季發電量的曲線收斂情形

肆、結論

綜合歸納所提最佳化方法比較，明顯得知，使用非線性時變粒子群演算法遠比只使用反應曲面法更能搜尋最佳解，然而，反應曲面法只能找尋區域解，因此再提出非線性時變粒子群演算法，能有效快速收斂至全域最佳解。

為驗證所提方法可行性，實際應用於太陽能電池的最佳傾斜角設計案例，結果以台北之夏季之 -9.36° 發電量 67767 Wh/m^2 最大，太陽能電池在全年及各季節的最佳傾斜角度 Σ 及太陽能電池發電量 $E \text{ (Wh/m}^2)$ ，其中以春季時七個地區所計算的傾斜角大約介於 $21.41^\circ \sim 28.28^\circ$ 之間；其次夏季介於 $-2.74^\circ \sim -14.29^\circ$ 範圍；並能計算全天平均輻射量與太陽能電池最佳轉換效率，獲得設計參數值可提供大型固定式太陽能發電系統最佳安裝角度之參考，同時可進一步推廣至建築整

合型裝設時之角度評估。

參考文獻

- 沈仲晃 (2005)。太陽能電池安裝角度與電能輸出之研究。
技術學刊，21卷1期，15-20頁。
- 葉乃菁 (2011)。以反應曲面法探討嗜熱厭氧菌產氫最適化之研究。未出版之碩士論文，台中市，東海大學環境科學與工程學系碩士班。
- 蘇明俊 (2003，3月18日)。太陽位置計算。資料引自8月27日，2012年，<http://home.kimo.com.tw/shpao5824/sun.htm>。
- 顧絨瑛 (2009)。台灣太陽能電池產業分析。未出版之碩士論文，桃園縣，國立中央大學產業經濟學系碩士班。
- Andrews, D., Bishop, M. T., & Witte, J. F. (1996). Harmonic measurement analysis and power factor correction in a modern steel manufacturing facility. *IEEE Transaction on Industry Applications*, 32(3), 617-624.
- Carver, R. H. (2003). *Doing data analysis with minitab 16*. London: Brooks/Cole, Thomson Learning.
- Hideyuki, T., K. K., Kholid, A. F. B., Akio, K., & Yoshihiro, H. (1994). *Simulation calculation of solar array output connecting two sub-array with different azimuth angles*. Paper presented in the IEEE on WCPEC Conf., Hawaii, U.S.A.
- Ko, C. N., Chang, Y. P., & Wu C. J. (2007). An orthogonal-array-based particle swarm optimizer with nonlinear time-varying evolution. *Applied Mathematics and Computation*, 191(1), 272-279.
- Weiden van der, T. C. J., & Kil, A. J. (1994). *Calculated effect of central DC/AC power conversion from PV generators with different orientations*. Paper presented in the IEEE on WCPEC Conf., Hawaii, U.S.A.

Application of Combined Response Surface Methodology and Particle Swarm Optimization Method with Nonlinear Time-Varying Evolution for Optimal Tilt Angle of PV Modules

Ying-Pin Chang

Department of Electrical and Information Engineering, Nan Kai University of Technology

Abstract

Due to the current shortage of fossil energy gradually, the increasingly serious problem of environmental pollution, the use of PV modules will be an important way to solve future energy problems. To improve the output power of PV modules, the tilt angle should be adjusted with the installed location. Next, in the case study, seven cities have been selected in Taiwan. The use of the Julian day combining with the optimal tilt angle of the PV modules has been used for solving the optimal tilt angle of PV Modules. The Response Surface Methodology (RSM) is often applied to the problem of modeling and mathematical statistics, especially in assisting researchers to provide a lot of analyses, and optimal design of the case study. The proposed case studies mainly majority belonging to non-linear and non-differential optimization problem, the use of both trial and error method and the traditional optimization algorithm method were not only time-consuming, but also unable to obtain the optimal value. However, the proposed RSM could only search local optimal solution, so the proposed particle swarm optimization method with nonlinear time-varying evolution (PSO-NTVE) could fast converge to the global optimum. In order to verify the feasibility of the proposed method, a combination of methods of optimal design for tilt angle on PV modules was presented in this paper. The paper results showed that the optimal tilt angle of the PV modules for the Taipei area was -9.36° in summer and Hengchun area was 20.34° in annual. The result could be further extended to the tilt angle when building-integrated photovoltaic (BIPV) installation of assessment.

Keywords: response surface methodology, particle swarm optimization nonlinear time-varying evolution, PV modules, tilt angle.