

風力發電場規劃與發電機葉片設計在地理限制下之整合研究

陳力豪¹，詹魁元^{2*}

¹ 研究生, ² 副教授
國立成功大學機械工程學系

摘要

在科技不斷進步以及能源消耗量持續提升的今日，利用更永續的方式，例如風力，來產生電力已成為一大趨勢。良好的風力發電轉換效率必須搭配完善的風力發電場規劃、配電控制系統整合、塔架設計、風力葉片結構設計、及空氣動力性能評估等。考量風力發電場規劃與風力葉片設計的問題為一整合型的問題，此類型的問題為存在大量變數、大量的拘束條件、耗時的數學運算、及整合工程分析軟體的複雜系統設計問題。在以往文獻中，我們發現大部分學者只針對個別領域進行研究，鮮少有整合不同領域進行風場設計並探討各領域間相互之影響，本研究提出一套整合型風力發電場規劃與發電機葉片設計，採用解析目標傳遞法將複雜系統拆解成較小的子系統，降低了求解上的困難度，在求解的過程中透過子系統間的溝通協調，使整體系統可以達到與未拆解前系統相同的最佳值，同時本研究亦考量風場地理位置上的限制，針對地形限制及風速/風向之地理特性進行更完善的規劃。此外，本研究並與現行台灣實際風力發電場案例作比較，探討在各式風力發電機選擇下對於整體風場之影響，其中葉片設計需在結構不發生破壞下有好的空氣動力性能，以提升發電效率。

關鍵字：風力發電，風力發電場規劃，發電機葉片設計，葉片空氣動力學，最佳化設計

1 研究背景與相關文獻

在科技不斷進步以及能源消耗量持續提升的今日，全球各國紛紛致力於研究替代能源，再生能源中，風力發電不僅可以減少二氧化碳排放量，其建造費用較水力、火力發電便宜，加上取之不盡，用之不竭，因此我國近年來積極投入風力發電產業，台灣雖然土地面積狹小，但風力資源豐富，目前已有20座風力發電廠的設置。隨著台灣的風力發電產

業快速發展，如何在有限的土地配置風力發電機位置以達到最大發電效益變成了重大的課題，在配置風力發電機時需考量的因素有下：

地形限制 土地的面積及地形的高度會直接的影響到配置風力發電機時的難易度，同時也會有日後維護上的問題，因此以選擇方便維護及裝置風力發電機的地形為優先。

風速風向 影響風力發電的效益包含風速大小以及迎面風向，由於台灣盛行東北或西南季風，因此風力發電機以面向東北或西南較佳，此外以沿海地帶有較大風速。

土地成本 風力發電機的體積非常龐大，每支風力發電機平均占地約600~700平方公尺，因此在決定風力發電機設置地點時，常選擇土地取得成本較低的地方。

功率需求 風力發電產生的功率除了與風速大小有關外，也與風力發電機葉片半徑及空氣動力性能有關，因此在設計葉片時除了避免發生破壞之外還必須考量空氣動力特性以達到較好的發電效益。

結構強度 為了避免風力發電機發生破壞，風力葉片與塔架的設計需考量所能承受之最大應力，葉片的最大應力必須能夠承受當地最大風速所產生的應力，另外塔架需依照葉片的大小進行設計且避免發生破壞，因此風力發電機的結構強度也必須納為考量。

世界各國皆致力於再生能源產業，各地學者也積極投入研究，關於風力發電相關的文獻可歸納出以下幾類：

風力發電機設計問題：風力發電機是由許多的零組件組合而成，此類設計問題是針對不同零組件的組合或特定零組件進行研究，以找尋最佳零組件組合或效能設計 [1, 2]。在風力發電機設計問題相關研究中，大部分研究以風力葉片之外型設計為主，

* 通訊作者，chanky@mail.ncku.edu.tw

少部分研究針對其他零組件進行設計，本研究亦針對風力葉片之外型進行設計，期望風力葉片在不發生結構破壞下能有較好之空氣動力特性。

風力發電場規劃問題：計算多台風力發電機在風力發電場中的最佳位置，並考量地形上的限制、發電量及土地成本下之最佳組合位置是一個複雜且具挑戰性的問題，其中影響發電量的因素包含風力發電機之間的尾流效應，在下游的風機會因為尾流效應而使所受的風能減少，產生的功率也相對的減少 [3-5]。在風力發電場規劃問題之相關研究中，大部分學者考量風力發電機之間尾流效應之影響，配置風力發電機之最佳位置，並比較不同演算法之間的優缺點，卻忽略地形限制上的問題，也沒有一套整合其他設計問題之研究。

混和式發電轉換問題 探討如何結合多種不同能源來源發電，才能得到最經濟的發電成本，例如將風力發電、火力發電或水力發電甚至太陽能發電等做結合，如此一來在大氣中風力或太陽能不足時，還可以透過火力或水力彌補，或者可以透過太陽能與風力的結合創造更多的經濟效益，此類即為結合最佳發電組合與經濟效益問題 [6,7]。

綜合上述可知大部分文獻只針對單一領域進行研究，因此我們欲整合風力發電場規劃與風力葉片外型設計問題，在決定葉片半徑的同時必須考量到地形上的限制，而在選擇地形的同時考量土地的成本以及風速及風向，此類整合型的設計問題，在設計的同時還需要特定模擬分析軟體，且存在大量變數或拘束條件的情況，通常擁有此特性的設計問題我們稱為複雜系統設計問題或大尺度系統設計問題。複雜系統龐大的運算量使得工程師難以有效對其求解，因此當面臨此種問題時，可以將單一複雜系統拆解成多個子系統，如此一來在運算量、非線性程度或是設計維度都相較於原先單一系統簡化許多。此外，本研究亦與現行台灣實際風力發電場案例作比較，並探討在各種風力發電機配置下對於整體風場之影響。

2 系統與模型介紹

整合型風力發電場規劃與風力葉片設計最佳化問題可被拆解為三層系統的設計問題，共含四個子系統，如圖1所示，第一層為地理分析次系統，以風力發電機的位置以及半徑為設計變數，考量風力發電場尾流效應與地理條件，決定風力發電機最佳配置問題，第二層系統決定風力發電機之葉片外形及半徑，根據有限的成本決定風力發電機的種類，並達到所需的最小功率為拘束條件，目標函數為降低與上下層系統間之傳遞資訊的一致性，第三層負責

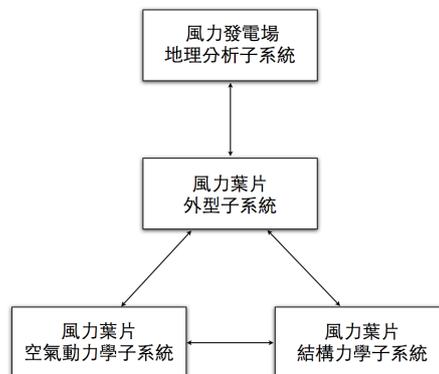


圖 1: 系統架構示意圖

葉片之空氣動力學與結構力學問題，在空氣動力學部分，將以葉片之攻角 α 為設計變數，最大的升、阻力係數比為最佳化目標，獲得良好空氣動力學特性的葉片外型，其外型變數包含葉片裝置角與弦長，為攻角的函數；在結構分析方面，以葉片半徑與弦長為設計變數，避免葉片結構發生破壞作為拘束條件，目標函數為降低與上層系統間的一致性為目標函數。

2.1 地理分析次系統

本範例中的地理分析子系統採用Jensen所提出的一套簡易尾流模型 [8]，假設有一風力發電場區域與已知風速及風向如圖2，為了得到最大的發電效益，每台風力發電機可藉由偏移裝置使旋轉面與風向垂直，為了避免風力發電機之間流場的干擾，風力發電機之間應保持適當距離，風場擾流與距離的關係如式1，隨著風力發電機之間距離越近，下游風力發電機之能量損失也越大。

我們以X-Y座標系統定義風力發電機之位置，並假設風為單一風向及風速，由圖2可知，當我們獲得風向 (θ) 與風速 (u_0) 資訊後，發現第二台風力發電機之所在位置 (x_2, y_2) ，在上游風力發電機之尾流效應影響範圍內，而第三台風力發電機不受尾流效應影響，因此我們可藉由相關公式與計算，獲得各台風力發電機所受風速，其中 u_1 為下游風機所受之風速， u_0 為初始風速， r 為上游風力發電機之葉片半徑， r_2 為下游受尾流效應影響之截距。

其中下游風機所受風速與下游受尾流效應影響之截

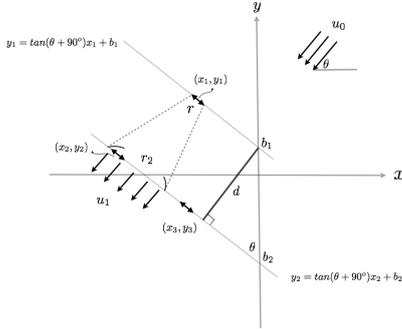


圖 2: 風力發電場示意圖

距計算如式(1)。

$$u_1 = u_0 \left(1 - \frac{2a}{1 + \beta(d/r_2)} \right), \quad r_2 = r \sqrt{\frac{1-a}{1-2a}} \quad (1)$$

風力發電機之間垂直距離 $d = |b_1 - b_2| \sin \theta$ 、環境影響因子 $\beta = 0.5 / \ln(H/H_0)$ 以及軸向感應因子 $a = (1 - \sqrt{1 - C_T}) / 2$ ，本研究所使用之參數值如表1所示，其中 H 為風力發電機之中心高度， H_0 為地面粗糙度， C_T 葉片之推力係數。

表 1: 地理分析次系統-參數表

β	H	H_0	u_0	θ	C_T
0.0944	60	0.3	12	135°	0.88

數學模型

在風力發電場環境中，風力發電機輸出功率與所受風速大小之三次方成正比，如式(2)，因此地理分析子系統之目標函數，為各台風力發電機所受風速大小之3次方總和，如式(3)，其中， N 代表風力發電機數目。

$$p = \frac{1}{2} \rho A u^3 \quad (2)$$

$$\max_{\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{r}} \sum_{i=1}^N u_i^3 \quad (3)$$

為了確保風力發電機整體機組不會超過可架設區域以及適當的風力葉片半徑，必須針對子系統設計變數加入適當拘束條件，任意兩風力發電機之間距離需大於兩風力發電機之半徑和，以確保風力葉片之間在偏移過程中不會發生干涉，由於此範例為大型

風力發電場範例，因此半徑必須在適當範圍內，在此定義為20~50公尺之間。由於風力發電機之範圍不可超過可架設區域，因此針對每台風力發電機之位置與葉片半徑，如圖3所示，其中 A_1 與 A_2 之座標需在可架設區域 R 內。

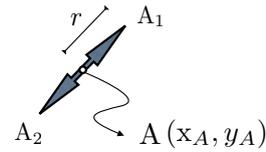


圖 3: 風力葉片範例:葉片俯視圖

因此在地理分析子系統的部分，我們以風力發電機之座標位置與葉片半徑為子系統設計變數，以各風力發電機所受風速之三次方和為目標函數，以及上述之拘束條件，定義數學模型如式(4)所示：

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{r}} \quad & \sum_{i=1}^N u_i^3(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{r}) \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{r}) \leq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

其中， \mathbf{x}, \mathbf{y} 代表風力發電機之座標位置， \mathbf{r} 代表風力發電機之半徑， \mathbf{g} 為上述提到，風力發電機位置與葉片半徑之拘束條件。

2.2 葉片外型次系統

在葉片外型次系統的部分，於地理分析子系統計算後之風力發電機，根據不同的地理位置會有不同的半徑和不同的風速，經由葉片外型子系統分析，以葉片半徑與弦長為設計變數，找出在有限成本內可滿足所需功率之葉片外型。由於風力葉片製作成本與葉片之體積成正比，如式(6)，我們以此公式近似風力葉片之體積，其中 r 為風力葉片之半徑， N 代表風力發電機數目， \bar{c} 為風力發電機各截面弦長之平均值，此範例取四個截面分別為 c_1 、 c_2 、 c_3 以及 c_4 。

$$\bar{c} = \frac{c_1 + c_2 + c_3 + c_4}{4} \quad (5)$$

$$\text{Cost} \propto N r \bar{c}^2 \quad (6)$$

風力發電機功率計算如式(7)，其中 C_p 代表功率轉換係數， ρ 代表空氣密度， A 代表葉片掃過面積。

$$\text{Power} = \frac{1}{2} \rho A u^3 C_p N \quad (7)$$

數學模型

在葉片外型子系統之數學模型部分，以風力發電機葉片半徑及弦長為設計變數，目標函數為確保上下層系統之間各風力發電機葉片半徑及弦長的一致性，以有限成本與最低功率需求作為拘束條件，故子系統之數學模型如式(8)所示。

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{r}, \mathbf{c}} \quad & \|\mathbf{w}^U(\mathbf{r} - \mathbf{r}^U)\|_2^2 + \|\mathbf{w}^L(\mathbf{r} - \mathbf{r}^L)\|_2^2 \\ & + \|\mathbf{w}^{L1} \circ (\mathbf{c} - \mathbf{c}^{L1})\|_2^2 + \|\mathbf{w}^{L2} \circ (\mathbf{c} - \mathbf{c}^{L2})\|_2^2 \\ & + \|\mathbf{w}^{L12} \circ (\mathbf{c}^{L1} - \mathbf{c}^{L2})\|_2^2 \\ \text{s.t.} \quad & \text{Cost} \leq \text{Cost}_{\max} \\ & \text{Power} \geq \text{Power}_{\min} \end{aligned} \quad (8)$$

此子系統使整體系統架構增多了一層，雖然增加了解析目標傳遞法在進行最佳化求解時的時間，卻可減少其他層子系統設計空間之複雜度，降低了子系統在進行最佳化求解時發生無法收斂狀況之機率。

2.3 葉片空氣動力學次系統

在空氣動力學的部分，主要目的為設計風力葉片之外型，包含弦長(chord)與旋轉角(twist angle)，藉由計算流體力學軟體模擬，得到最佳之升力、阻力係數比(C_l/C_d)。在此範例中選擇美國國家航空諮詢委員會制定之NACA4412二維翼型剖面，藉由計算流體力學軟體模擬出NACA4412翼型剖面在給定風速下之升力(C_l)與阻力係數(C_d)，進而找尋此翼型剖面擁有最大升力阻力係數比之設計攻角 α ，及得最佳弦長與旋轉角如式(9)所示 [9]。在此範例中

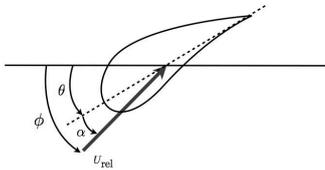


圖 4: 風力發電機葉片截面圖

將葉片分成四個等分，共有四個截面，其中 $\lambda_{r,i}$ 表示第 i 個截面之葉尖速度比， ϕ_i 為風力葉片第 i 個截面之旋轉平面與相對風速的最佳夾角， c_i 為風力葉

片第 i 個截面之最佳弦長，而 θ_i 為風力葉片第 i 個截面之最佳扭轉角。

$$\lambda_{r,i} = \lambda \frac{r_i}{r_{total}} \quad (9a)$$

$$\phi_i = \frac{2}{3} \tan^{-1}\left(\frac{1}{\lambda_{r,i}}\right) \quad (9b)$$

$$c_i = \frac{8\pi r_i}{3C_l}(1 - \cos \phi_i) \quad (9c)$$

$$\theta_i = \phi_i - \alpha, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (9d)$$

數學模型

為了能反映出葉片在真實條件下所受升力與阻力情況，我們利用CFD軟體模擬出葉片經由風能產生的升力與阻力狀況。升力、阻力係數比代表所受到升力的影響程度，比值越大代表所受升力越大而阻力越小，因此我們將以升力、阻力係數比做為空氣動力學子系統的目標函數，由於升力與阻力係數為攻角的函數，我們以攻角 α 為設計變數，本範例選擇NACA4412作為翼型剖面，空氣動力學子系統之數學模型如式(10)所示。

$$\begin{aligned} \min_{\alpha} \quad & -\frac{C_l(\alpha)}{C_d(\alpha)} \\ \text{s.t.} \quad & 0 \leq \alpha \leq 20 \\ & \text{Geometry} = \text{NACA4412 Airfoil} \end{aligned} \quad (10)$$

2.4 葉片結構力學次系統

在葉片結構力學子系統的部分，我們簡化了複雜的複合材料結構分析方法，假設截面為圓形，則慣性矩 $I_i = \frac{\pi}{64} c_i^4$ 、剛性 $K_i = \frac{3EI}{r_i^3}$ 、變形量 $\delta_i = \frac{F_N}{K_i}$ 以及承受應力 $\sigma_i = \frac{32Rr_i}{\pi c_i^3}$ ， $i = 1, 2, 3, 4$ ，並且將葉片分成四段。葉片截面受力分析如圖5所示其中 L 代表升力 ($L = \frac{1}{2} \rho \cdot u^2 \cdot c \cdot C_l$)， D 代表阻力 ($D = \frac{1}{2} \rho \cdot u^2 \cdot c \cdot C_d$)，其於垂直軸方向的分力 F_N 及水平軸方向的分力 F_T [9]，本範例中初始風速為12m/s。

數學模型

在葉片結構力學子系統中，目標函數為維持與上層子系統之間傳遞資訊一致性，以風力葉片半徑及弦長為設計變數，同時葉片之承受應力與形變須在允許應力及允許形變內。此系統之數學模型如式(11)，由於根部所受合力較大，為了確保越靠近根部其弦長越大，多加了一條拘束條件於最後一

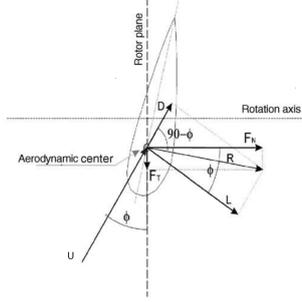


圖 5: 葉片受力分析圖

列。其餘詳細參數如表2所示。

$$\begin{aligned}
 \min_{r, c} \quad & \| \mathbf{w}^U \circ (\mathbf{r} - \mathbf{r}^U) \|^2 + \| \mathbf{w}^U \circ (\mathbf{c} - \mathbf{c}^U) \|^2 \\
 & + \| \mathbf{w}^{L12} \circ (\mathbf{c}^{L1} - \mathbf{c}^{L2}) \|^2 \\
 \text{s.t.} \quad & \sigma_i \leq \sigma_{allow} \\
 & \delta_i \leq \delta_{allow} \\
 & c_i \leq c_{i-1} \quad i = 1, 2, 3, 4
 \end{aligned} \tag{11}$$

表 2: 葉片結構次系統-參數表

E	σ_{allow}	δ_{allow}	ρ
70GPa	127MPa	0.2m	1.225kg/m ³

3 解析目標傳遞法

目前在複雜系統領域中，常被用來處理複雜系統最佳化設計問題的方法有兩種：其一是由航太工業發展出來的協同最佳化方法(Collaborative Optimization, CO) [10]，另一種是由汽車工業發展出來的解析目標傳遞法(A analytical Target Cascading, ATC) [11]。這兩種方法的基本概念都是將整體系統拆解成許多較整體系統簡單的子系統，透過各子系統的最佳化與互相傳遞資訊，獲得整體系統的最佳設計，而兩種方法之最大不同點在於系統拆解完後組成的架構以及資訊傳遞的方向。由與Michelena等人在2003年針對解析目標傳遞法提出了完整的收斂證明 [12]，因此本論文將以解析目標傳遞法作為處理複雜系統設計的方法。

解析目標傳遞法 (Analytical Target Cascading, ATC) 將複雜系統拆解成多層的階層狀架構，並令架構中的上下層子系統互相傳遞資訊，藉由資

訊的傳遞與各個子系統的最佳化，獲得整體系統的最佳近似解。在確定整體系統之設計目標後，此方法的運作流程如下：

- **整體系統拆解** 根據整體系統中變數的相關性或是分析模型所使用的軟體不同，將其拆解為多個子系統並將其重新組合成階層狀架構。
- **子系統模型建立** 依各子系統所需建立分析模型，並確認子系統間之訊息傳遞是否一致。
- **數學模型修正** 修改並確認各子系統的目標函數符合解析目標傳遞法之數學形式。
- **子系統最佳化求解** 分別對各子系統進行最佳化求解，藉由子系統間之訊息傳遞與溝通協調，求得與整體系統的最佳相似解。

解析目標傳遞法透過拆解整體系統成階層狀架構進行求解，而多層架構模型主要由子系統內部的分析模型與最佳化模型所組成，各子系統經由分析模型獲得的設計變數，透過最佳化模型維持子系統之間的一致性。

4 最佳風力發電規劃範例

4.1 固定風力發電機數目

本範例探討五台風力發電機之最佳化風場配置結果，並同時設計發電機之葉片外型。在假設可架設範圍為一半徑為1000公尺之圓形區域，風速為12m/s由西北方吹入(與x軸夾角135°)，在此區域內放置5台風力發電機，最低功率需求為15MW，並與不同風力發電機擺設位置作比較。在解析目標傳遞法中，我們設定資訊流一致性的容許誤差為10⁻⁴。

$$\begin{aligned}
 \min_{\kappa} \quad & - \frac{C_l(\alpha^*)}{C_d(\alpha^*)} \\
 \text{s.t.} \quad & 10 \leq \alpha^* \leq 20 \\
 & \text{Geometry} = \text{NACA4412}
 \end{aligned} \tag{12}$$

在風力發電機葉片外型部分，共有四個截面，利用五組設計點配合四次貝茲曲線(Bézier curve)方程式建造出整體葉片外型。四次貝茲曲線是由五組控制點P₀、P₁、P₂、P₃以及P₄所建立出來，其對應風力發電機葉片的設計點如圖6所示，而貝茲曲線上各點B(t)可由貝茲方程式B(t) =

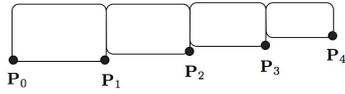


圖 6: 風力發電機葉片各控制點示意圖

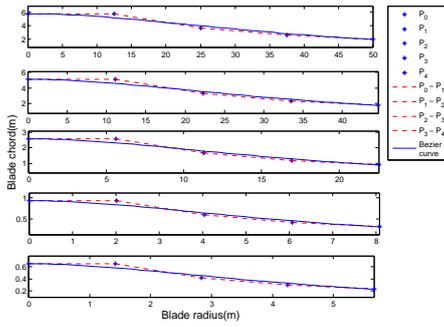


圖 7: 風力發電機葉片-貝茲曲線圖

$\sum_{i=0}^n \binom{n}{i} P_i (1-t)^{n-i} t^i$, $t \in [0,1]$ 計算出來，其中 $n=4$ 。

接下來我們觀察此範例在經過最佳化設計後，風力發電機的配置情形。圖8、9以及10分別為三種情況下之風力發電機最佳配置結果，由圖可明顯看出風向由西北方吹入，唯一不同的是，空氣動力學系統的未收斂狀況，對整體風力發電場規畫並無太大影響。

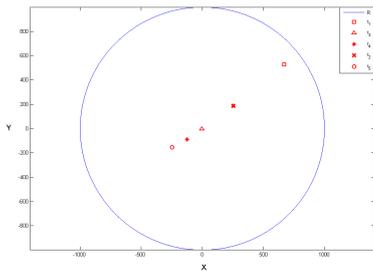


圖 8: 風力發電機配置圖($\alpha = 0.1$)

4.2 未定風力發電機數目

在先前的範例中，我們只固定五台風力發電機進行設計，然而整體風力發電設計時應該將風力

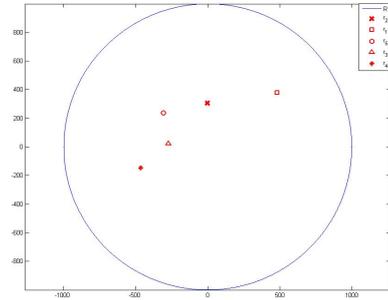


圖 9: 風力發電機配置圖 ($\alpha = 0.01$)

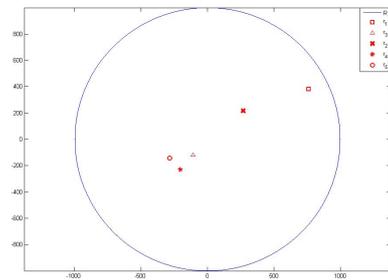


圖 10: 風力發電機配置圖 ($\alpha = 0$)

發電機之數目納為設計變數，並考慮到土地成本問題，不同的風力發電機數目會有不同的土地成本，由於不同的風力發電機亦會有不同的風力葉片半徑，因此土地成本並不會與風力發電機數目成正比，與風力發電機之葉片半徑有關。在此範例中假設風力發電機所佔土地面積與葉片半徑平方成正比，因此以各風力發電機之葉片半徑平方和作為目標函數，如式(13)，其中 r 為葉片半徑， N 為風力發電機數目，希望在最低功率需求下，風力發電機之數目與風力葉片之半徑，可使土地使用成本最低。

$$\text{Land cost} = \sum_{i=1}^N r_i^2 \quad (13)$$

由於整體風場之設計變數個數隨著風力發電機數目而改變，當風力發電機數目越大，則各系統的設計維度也會越大，因此本研究將整體設計流程拆解成兩個迴圈，分別為內迴圈與外迴圈。在內迴圈的部分，為原本解析目標傳遞法之系統架構，給定風力發電機之台數後，可求得滿足所需功率下，各風力發電機之葉片半徑，同時包含擁有良好空氣動力特性之葉片弦長與旋轉角。在外迴圈的部分，以風力發電機數目為設計變數，藉由內迴圈計算獲得之風

表 3: 風力發電場規劃與葉片設計範例

Blade (m)	c_1	c_2	c_3	c_4	$u(m/s)$
$r_1 = 32.40$	3.74	2.40	1.70	1.30	12
$r_2 = 32.40$	3.74	2.40	1.70	1.30	12
$r_3 = 32.40$	3.74	2.40	1.70	1.30	12
$r_4 = 32.40$	3.74	2.40	1.70	1.30	12
$r_5 = 32.40$	3.74	2.40	1.70	1.30	12
$r_6 = 30.43$	3.51	2.26	1.59	1.22	12
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	
	13.77	2.53	-2.04	-4.46	

力發電機葉片半徑，可計算出與土地成本相關之函數，並以此函數為外迴圈之目標函數，經由上述介紹，整體設計流程如圖11所示。

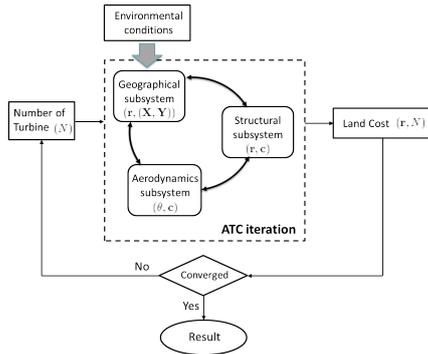


圖 11: 未定風機數之整體設計流程圖

此範例中，設定內迴圈解析目標傳遞法之資訊流一致性的容許誤差為 10^{-4} ，風力發電機之數目介於2~10之間，最低功率需求為18MW。風力發電場規劃與葉片設計其最佳值以及設計變數可由表3得知，各風力發電機位置如圖12所示，最終土地成本為 5.41×10^3 。

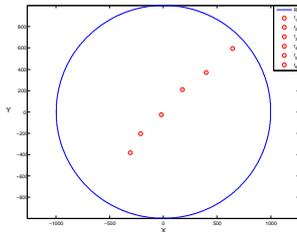


圖 12: 風力發電機最佳配置圖

經由運算後得到之最佳風力發電機數目為六台，各風力發電機半徑以及所受風速如表3所示：

4.3 結果與討論

本章節包含兩部分，首先利用固定之風力發電機數目展示最佳配置後結果，以及藉由貝茲曲線近似風力葉片之外型，也利用提出之修正策略修正子系統未收斂之狀況，改善了空氣動力學性能，增加了升力、阻力係數比。雖然最佳配置後之擺設可以

有最大輸出功率，但僅在此風向上，目前還無法找到一特定擺設，可使風力發電機在各種風向皆會有最大輸出功率。

接著對未定之風力發電機數目進行最佳化求解，在解析目標傳遞法部分沒有作任何改變，由於原解析目標傳遞法中之設計變數會隨著風力發電機數目增加，因此我們增加了一外迴圈，針對風力發電機數目進行最佳化求解，展示在一固定區域內，且滿足功率需求下有最低之土地成本。此方法的缺點是耗費之時間成本相當龐大，由於本身解析目標法要達到收斂條件已經需要一段時間，若再加上外迴圈演算法的收斂條件，會嚴重增加整體之運算時間以及計算成本。於下一章節我們將與實際風力發電場案例作比較並探討經由最佳配置後之結果。

5 結論

本論文整合風力發電場規劃與風力葉片設計，在風力發電場規劃中，除了考量地理上的限制外，亦考量尾流效應對風力發電機輸出功率的影響；在風力葉片的部分，針對葉片之空氣動力特性以及結構強度進行設計，確保葉片在不發生破壞情形下有好的空氣動力特性。對於此複雜系統設計問題，本研究應用解析目標傳遞法於此整合型範例中。本論文之研究貢獻如下：

1. 整合風力發電場規劃與風力發電機葉片設計結合風力發電場規劃與工程之多領域工程系統設計範例，考量風力發電場之尾流效應，並配合空氣動力學及葉片結構強度等工程設計。
2. 應用解析目標傳遞法於整合型風力發電範例利用解析目標傳遞法，對提出之整合型風力發電範例進行求解，將整體系統拆解成四個較容

易運算之子系統，子系統之間透過資訊傳遞並維持一致性，最後近似整體系統的最佳值。

3. 提出一套改善子系統無法收斂狀況之新策略經由拆解後之子系統，由於設計空間太過複雜或演算法本身之因素，使子系統無法收斂而得到不恰當之設計值，此時我們針對此子系統進行修正，透過其目標函數與拘束條件梯度方向，找到一最佳步長並利用此步長更新設計值後，可得到較佳之設計值。

References

- [1] M. Jureczko, M. Pawlak, and A. Mezyk. Optimisation of wind turbine blades. *Journal of Materials Processing Technology*, 167:463–471, 2005.
- [2] E. Benini and A. Toffolo. Optimal design of horizontal-axis wind turbines using blade-element theory and evolutionary computation. *Journal of Solar Energy Engineering*, 124:357–363, 2002.
- [3] G. Mosetti, C. Poloni, and B. Diviacco. Optimization of wind turbine positioning in large windfarms by means of a genetic algorithm. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 16:105–116, 1994.
- [4] S. A. Grady, M. Y. Hussainia, and M. M. Abdullah. Placement of wind turbines using genetic algorithms. *Renewable Energy*, 30:259–270, 2005.
- [5] M. Bilbao and E. Alba. Simulated annealing for optimization of wind farm annual profit. *Logistics and Industrial Informatics*, pages 1–5, 2009.
- [6] L. Soder. Reserve margin planning in a wind-hydro-thermal power system. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8:564–571, May, 1993.
- [7] E. Castronuovo and J. Peças Lopes. On the optimization of the daily operation of a wind-hydro power plant. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19:1599–1606, 2004.
- [8] N. Jensen. A note of wind generator interaction. Technical report, RISO National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1983.
- [9] J. F. Manwell, J. G. Mcgowan, and A. L. Rogers. *Wind Energy Explained Theory, Design and Application*. New York: John Wiley and Sons Ltd, 2nd edition, 2002.
- [10] R. Braun. *Collaborative Optimization: An Architecture for Large-scale Distributed Design*. PhD thesis, Stanford University, 1996.
- [11] H. Kim, N. Michelena, P. Papalambros, and T. Jiang. Target cascading in optimal system design. *Journal of Mechanical Design*, 125(3):474–480, 2003.
- [12] N. Michelena, H. Park, and P. Papalambros. Convergence properties of analytical target cascading. *AIAA Journal*, 41(5):897–905, 2003.

Wind Farm Optimization with Turbine Design Under Geographical Constraints

Li-Hao Chen¹, Kuei-Yuan Chan²
Department of Mechanical Engineering,
National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan

Abstract

The increase of energy consumption in all sectors calls for more sustainable sources of energy. In the pursue of green energy, wind turbines have the highest potential and are also the most implemented worldwid. Design and planning of wind energy require the integration of wind farm location and layout, wind turbine frame design, the aerodynamics of wind turbine blades, among many other cost and engineering considerations. The integrated wind farm and turbine blade design has a large number of variables, numerous constrains, and time-consuming engineering computer simulations. In the literature, most researchers consider only one aspect of the wind farm design while ignoring the rest. Since these disciplines are deeply coupled in nature, in this research we propose an integrated framework of both wind farm layout optimization and turbine blade design to improve the overall energy transformation efficiency while considering the aerodynamics of turbine blades and the wake effects of wind turbine placement. This complex problem is decomposed as a multi-level system and then solved using Analytical target cascading (ATC). By systematic coordination, ATC should provide comparable results as the all-in-one problem. Site-specific geographical constraints and the local wind characteristics are both considered in the wind farm planning. The result is a more rigorous all-around wind energy solution that fits local geographical characteristics. **Keywords** : Wind Farm, Turbine Blade Design, Sustainable Energy, Collaborative Optimization

¹Graduate Student

²Corresponding Author, Associate Professor, Fax : +886-6-2352973, chanky@mail.ncku.edu.tw