

應用改良式基因演算法對離岸風機支撐結構最佳化設計 Optimization for Substructure of Offshore Wind Turbine Using Modified Genetic Algorithm

劉定朋¹、林宗岳²、吳凱洋²、范秉天²、鍾承憲³、張原譯³、黃心豪^{1*}

¹國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系

²財團法人中國驗船中心研發處

³財團法人船舶暨海洋產業研發中心工程規劃組

Ding-Peng Liu¹, Tsung-Yueh Lin², Yann Quémener², Bryan Nelson², Cheng-Hsien Chung³, Yuan-Yi Chang³, Hsin-Haou Huang^{1*}

¹Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University

²Research Department, CR Classification Society

³Engineering Planning Section, Ship and Ocean Industries R&D Center
hsinhaouhuang@ntu.edu.tw

摘要

根據設計規範，本研究建立極限風速的有限元素分析模型進行支撐結構最佳化設計，在考慮安全的限制條件的前提下，對支撐結構的厚度及半徑做最佳化設計，以降低支撐結構質量，減少離岸風電的建造成本。為了解決舊有的傳統型基因演算法計算效率不佳的問題，本研究在島嶼型的基因演算法加入決定性的最佳化方法—模型搜索法，並與粒子群算法同時尋值，將島嶼設計成各具不同功能的島嶼，繼而提出一種改良式基因演算法。

將此方法應用至工程實例—離岸風機支撐結構最佳化設計的計算中，取得較傳統方法更佳的结果，且具有更高的效率，可節省電腦的運算成本。因此本研究提出之改良式基因演算法可作為設計離岸風機支撐結構較具效率並可靠的最佳化方法。

關鍵詞：有限元素分析、最佳化設計、島嶼型基因演算法、離岸風機支撐結構、模型搜索法、粒子群算法。

Abstract

Referring to the design standards, we constructed the finite element models for offshore wind substructure optimization under extreme conditions. The goal of the optimization was to reduce the weight of the substructure by regenerating the thickness and radius of the truss members. Conventionally, the Genetic Algorithm (GA) is notorious for high computational cost. The hybrid method including the deterministic method and the GA was recognized as a feasible way for improving the efficiency. In this study, the Modified Genetic Algorithm (MGA) was proposed by adding the Pattern search (PS) and the Particle Swarm Optimization (PSO) methods into the Island Modeled Genetic Algorithm (IMGGA) whereas each island possesses its own function.

For demonstrating the application of engineering problems, we further applied the MGA for optimizing the wind turbine substructures and obtained an efficient design with light weight of the substructure. In summary, the MGA was shown to be robust and efficient for optimizing

the structural weight.

Keywords: Finite element analysis, Optimization, Island modeled genetic algorithm, Offshore wind turbine substructure, Pattern search, Particle swarm optimization.

I. 前言

離岸風機的力學分析須同時考慮多個複雜的負載環境，如風負載、波浪負載等，使用特定的數值模擬才能完成，因此其計算具有極高的複雜度。此種最佳化問題屬於非線性系統，不同的系統間亦有交互影響。

常見的最佳化問題多為數值最佳化，亦即在一個方程式或數據中尋找最佳數值解，較適用決定性的最佳化方法 (Deterministic Optimization Method)，而離岸風機的最佳化問題多需經過數值分析的步驟 (例如：有限元素法)，輸入參數，計算分析模型的結果，運算的過程我們無法很清楚地了解，被視為一種「黑箱最佳化 (Black-box Optimization)」，遊於參數之間的交互作用我們不容易得知，因此求解時較適用隨機性的最佳化方法 (Stochastic Optimization Method)。

隨機性的最佳化方法，如：基因演算法、啟發式搜索法等，有機會在隨機尋值的過程中得到全域的最佳解，不過缺點是耗費較多的計算時間，也較難應用於數值最佳化的問題。為了改良計算繁雜的問題，也有人加入了決定性最佳化方法的概念，融入隨機性最佳化方法的結構，簡化龐大的計算流程以提升效率。而在離岸風機支撐結構的設計流程中，多採用數值模擬作為最佳化設計的依據，為了減少繁複的計算，建立一套簡易、可靠並有效率的最佳化設計流程式相當的重要，除了設計的模擬條件設定，亦須考量安全性設計條件以及設計目標的選擇，設計合適的演算法。

從 1950，Turing 提出了基因演算法的基本概念 [1]，如演化、天擇應用在電腦計算的可能。接著在 1953 年，Metropolis 等人提出了隨機性最佳化方法的概念 [2]，基因演算法及模擬退火法 (Simulated Annealing, SA) 等概念相繼被提出，而詳細的基因演算法在 1988 年由 Goldberg 等人整理 [3]。

在 2006 年，Yoshida [4] 將之應用在離岸風機的塔柱

最佳化上，後續也持續被應用在各種離岸風機結構，如：葉片、支撐結構等[5]，基因演算法儼然成為離岸風電常用的最佳化方法。其他啟發式演算法例如蟻群演算法[6]也被應用至風場規劃，而梯度法等決定性的演算法亦被廣泛使用於支撐結構及葉片結構的最佳化設計，田口法屬於實驗規劃的方法，應用於葉片設計[7]，是初期設計時可靠的最佳化設計方法。

基因演算法從物種演化得到靈感，將資料進行基因編碼，使用類似交配的方法創造下一代的基因，並篩選出好的基因作為較佳結果，以此發展為最佳化方法[8]，被廣泛的應用在各種工程的最佳化問題中[9]。本研究將針對基因演算法進行改良，常見的改良方式是結合不同的最佳化方法，1988年Cary將隨機性的蒙地卡羅演算法加入其他局部的最佳化方法[10]以增加蒙地卡羅演算法的收斂速度，亦有人將決定性的最佳化方法融入基因演算法可增加基因演算法的效率，以更快速取得全域最佳解，像是1995年Gerstoft融合高斯-牛頓法與基因演算法，改良每一個世代的最佳化表現。加入田口法(Taguchi Method, TM)、粒子群算法等最佳化方法，也各有其對改良基因演算法的特點。[11, 12]

另有其他改良方式，例如對資料點範圍的選取方法，2015年Bi等人[13]引用啟發式抽樣法，在基因演算法的計算前界定參數的範圍，並求出初步最佳解及其鐘形分佈，再進行基因演算法，結果得到更快速、更正確的最佳解。亦有人提出一種智慧型基因演算法，可在各世代的運算過程中調配選取、交配、突變等基因演算法流程的操作方案，雖可能耗費更龐大的計算，但卻可得到更佳的結果，並能彈性的應用至各種最佳化問題中[14]。類似的方法也應用至其它的進化策略(Evolution Strategy, ES)中，融合多種進化的方式，以提升對多種問題求解的效能[15]。

本研究運用Python程式設計基因演算法，最佳化流程如下：

1. 基因編碼 (Gene arrange)

將所需要最佳化的幾何參數編碼成序列，我們將結構編成一串厚度及半徑的資訊[t1 t2 t3 t4 t5 t6 t7 t8 r1 r2 r3 r4 r5 r6 r7 r8]，作為一個體，並計算其適合度。

2. 目標函數 (Objective function)

期望達到的最佳化的目標，我們的目標若是降低結構的最大應力，目標函數即是結構的最大應力。

3. 選擇 (Selection)

將適合度較高的個體挑選出來作為母體，挑選方式大致分為天擇及人擇，前者依據適合度決定留下個體的比例，後者直接淘汰表現不良的個體，如何設計兩種方法的結合悠關最佳化系統的效率。我們將表現最好的幾個個體留下作為母體，其他個體直接刪去。

4. 複製 (Reproduction)

複製留下的母體，以進行交配，我們將母體依據適合度進行複製，適合度愈高，複製愈多。

5. 交配 (Cross-over)

常見的交配方式有單點交配、雙點交配、字單交配三種，交配方式的選定直接影響子世代產生的優異。

6. 突變 (Mutation)

有別於交配，突變是由單個母體發生，有一定的機率對某點的基因產生一隨機值。

對於支撐結構的最佳化設計主要對於桿件的厚度及半徑做改變，參考的因素有最大應力、局部挫曲、疲勞壽命、自然頻率、質量與建造成本等等，屬於多目標的最佳化問題，同時也是非線性的，具備多個局部解。使用的方法有梯度性的方法及基因演算法等，如何兼容決定性的方法及隨機性的方法的優點，在有限的計算成本得到最佳設計，是演算法設計努力的方向。

II. 研究方法

改良式基因演算法 (Modified Genetic Algorithm, MGA) :

改良式基因演算法從島嶼型基因演算法發想，在各個島嶼中加入不同的最佳化機制，有效率的運用各自的所長，合作解決最佳化問題，可視為一種島嶼型或是平行式的混合演算法，可是由於其遷移方式的特殊設計，使每個島嶼的個性性質不同，進而可代用不同的演算法，分工處理最佳化進程所需不同的工作，例如突變或是模型搜索等，像是一個組織的部門一般進行專業分工。以期在可以有效能的解決多種最佳化問題的前提下，更有效率的進行最佳化。

首先依據尋值範圍隨機產生個體，並將所有個體區分為三個小島，分別執行模型搜索(Pattern Search)、目標性突變(Objective Mutation)及粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)。

模型搜索法屬於隨機性的最佳化方法，但其產生下個世代個體的方式與基因演算法不同，首先於1961年被Hooke[16]等人提出，為一種應用於最佳化問題的直接搜索法(Direct Search)，每一次尋值只改變一個維度的變數，對資料點鄰近的方向移動一個擾動步距(Perturbation)，若成功繼續、失敗則降低步距，直到步距小於容忍值，搜索結束。隨著迭代次數減少步階，因此之中會隨著一個「模型」收斂至最佳化問題的最小值，是一種不需要梯度矩陣、較簡易且直觀的直接搜索法。

粒子群算法在1995年由Kennedy等人提出[17]，仿造鳥類尋找食物的機制，在整個社會群體中每個個體具有自我意識及社會意識，在尋找食物時，前進的方向也同樣受到自己的經驗和群體的建議影響。移動的參考式(1)如下：分為初向量參考項 v_i 、群體參考項 $(p_g - x_i)$ ，為全體最佳解與當前目標點的差值、自身參考項 $(p_i - x_i)$ ，為目標點在最佳化過程自身經歷的最佳解與當前的差值，差值透過式(2)移動至新的位置，如圖1。 φ_1, φ_2 為自行設定的常數，通常介於0.4~2之間。

$$v_{t+1} = v_i + \varphi_1 \beta_1 (p_i - x_i) + \varphi_2 \beta_2 (p_g - x_i) \quad (1)$$

$$x_{t+1} = x_i + v_{t+1} \quad (2)$$

其中 p_i 為自身經驗最佳解

p_g 為群體經驗最佳解

x_i 表示當前位置

x_{t+1} 表示移動後的新位置

v_i 表示當前的移動向量

v_{t+1} 表示新的移動向量

φ_1 為自身經驗參數

φ_2 為社會經驗參數

β_1, β_2 為從0~1的隨機值

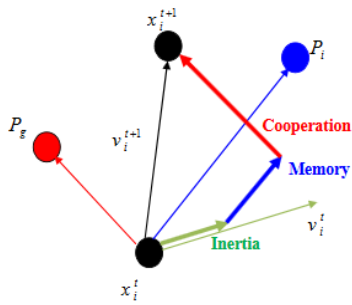


圖 1 粒子群算法移動示意圖[18]

將各個小島的最佳解遷移至模型搜索，並取最佳個體進行模型搜索。每個島嶼的最差解至目標性突變進行目標性突變，目標性突變依據整體情形以各變數的中位數將尋值範圍一分为二，並根據兩尋值範圍中個體的平均表現決定目標突變的範圍。

模型搜索完的個體有一定機率進入粒子群算，取代最差的粒子並對全部的粒子進行粒子群算，並以三個島嶼整體的最佳解作為粒子群算的全域參考點，其餘兩個島嶼執行交配及突變。本方法主要以模型搜索法輔助基因演算法及粒子群算法兩種方式求值，以互相配合提升演算法效率，同時也增加了突變的比例，維持其個體多樣性。

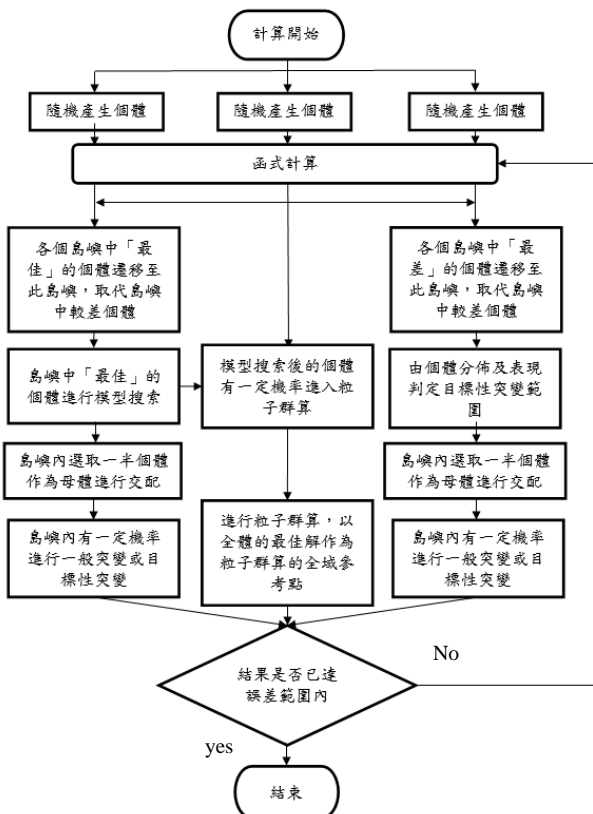


圖 2 改良式基因演算法流程圖

改良式基因演算法第一個世代隨機產生 50 組基因序列將總個體數分為三部分，結合了模型搜索法，可以較梯度式的尋值，幫助結果快速的收斂，加入粒子群算及目標性的突變幫助尋值更多樣化，期望能探索到更好的結果。在交配的運作方式與基因演算法相似，在每一

次的母體選擇中去掉相似性高的母體、以免重複計算，不過由於分島嶼進行，交配的規模較小，而突變則分為一般突變和目標性突變兩種，增加多樣性。相關的參數定義如下表：

表 1 應用部門式基因演算法進行最佳化參數設定

PS 步距(厚度/半徑)	PS 容忍值(厚度/半徑)	c ₁ for PSO	c ₂ for PSO	ω for PSO
4	1	0.1	0.1	0.5

對支撐結構質量最佳化設計：

對支撐結構的最佳化的設計除了可以參考建造的流程、材料、施工及維護方式進行最佳化降低成本[19]，也可以以降低結構質量為目標，在一定的安全限制條件下減少材料用量。本研究對最佳化的設計參考 Norsok 規範[20]規定桿件厚度至少須大於 6mm，直徑與厚度比須小於 120，變數定義如下，式 (3) 與 (4) 代表目標修改的桿件厚度與半徑，作為目標修改的幾何參數，式 (5) 與 (6) 假設厚度根據桿件種類設定最小厚度 $t_{lj}=6$ or 26mm 至最大厚度 $t_{uj}=46$ or 66mm 之間，對應最小半徑 $r_{lj}=90$ or 330mm 至最大半徑 $r_{uj}=690$ or 990mm 之間，若是半徑與厚度比違反式 (7) 的規範，半徑會自動設定為厚度的 60 倍。式 (8) 表示對最大應力值及局部挫曲標準值的限制條件，式 (9) 中 f 代表結構質量與安全條件形成之目標函數，最佳化減小目標函數。

$$\vec{t} = [t_1, t_2, t_3, \dots, t_n] \in R^n \quad (3)$$

$$\vec{r} = [r_1, r_2, r_3, \dots, r_n] \in R^n \quad (4)$$

$$t_{lj} \leq t_j \leq t_{uj}, \quad j = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$r_{lj} \leq r_j \leq r_{uj}, \quad j = 1, \dots, n \quad (6)$$

$$\frac{r_j}{t_j} \leq 60, \quad j = 1, \dots, n \quad (7)$$

$$\text{s.t. } g_1(\vec{t}, \vec{r}) < 355, \quad g_2(\vec{t}, \vec{r}) < 1 \quad (8)$$

$$\min f(\vec{t}, \vec{r}) \quad (9)$$

其中 \vec{t} 為目標修改的變數—厚度
 \vec{r} 為目標修改的變數—半徑
 g_1 表示最大應力限制條件
 g_2 表示局部挫曲限制條件
 f 為目標函數

本研究設計的最佳化流程包含參考台灣海峽的極端負載的有限元素分析，風機使用 NREL 5-mW 的風機，對美商設計之 TGC 支撐結構進行模擬。敏感度分析後選定修改的目標參數，進行基因演算法的最佳化設計，用 Python 程式語言直接在有限元素分析軟體 Abaqus 中自動取值計算限制條件中的局部挫曲標準及最大應力，並算出結構的質量作為目標函數。最佳化設計之流程圖 (圖 3) 如下：

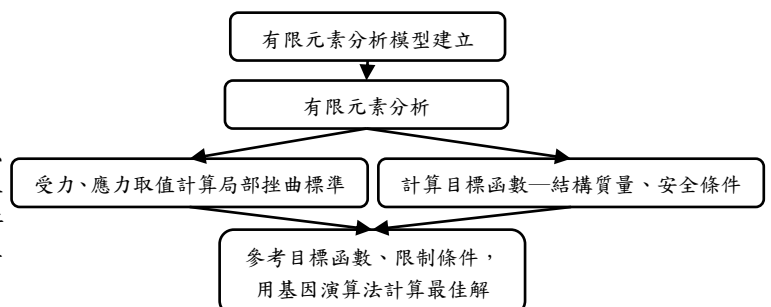


圖 3最佳化設計流程圖

有限元素分析：

圖 4 TGC 支撐結構有限元素模型由上至下分別為空氣區、波濺區及沉水區，並有靠外部的腳架及內部的支撐桿件兩種桿件，分別由上至下、由內而外標示桿件厚度及半徑分別為 $t_1 \sim t_8$ 及 $r_1 \sim r_8$ 共 16 個設計變數進行最佳化，並且所有的桿件模型厚度皆是原初設計厚度扣除腐蝕餘裕的結果（波濺區扣除 11mm，空氣區及沉水區 2.5mm）其高度 39.22 公尺，適用台灣海峽之水深。

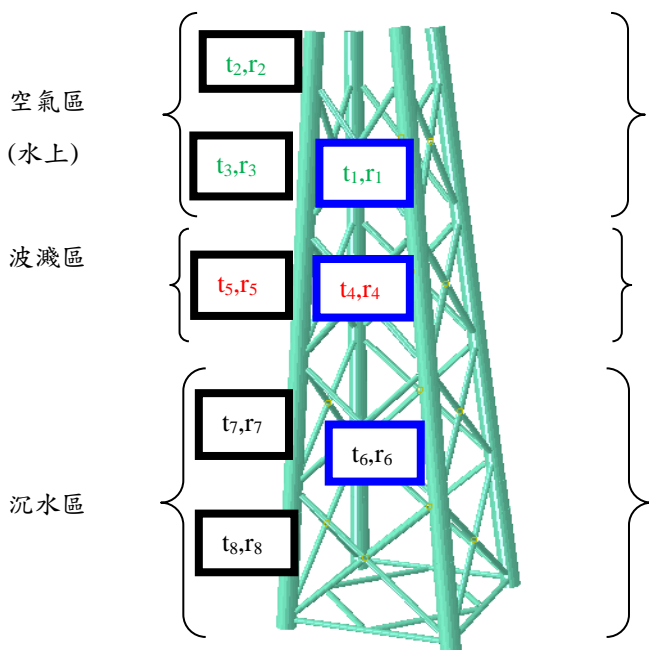


圖 4 TGC 支撐結構有限元素模型

有限元素分析的模型使用的風況為極限風況，在 IEC61400-1,3[21, 22]對離岸風機的規範中定義極限風速風況可為 50 年一遇或者 1 年一遇，分別設定 3 秒及 10 分鐘的模型，而其風負載的設定可為湍流模型或穩態模型。為了簡化模型及考量計算時間，本研究選用 3 秒的 50 年一遇風速 70m/s 穩態風速模型進行計算，風負載和波浪負載的方向皆為 45°，從四個腳柱的對角線方向施加以得最極端的負載狀況，而波浪浪高為 14.8m，作為設計標準。負載的時域關係圖如下，起初設定一段 5 秒預負載的爬升區，使風速慢慢增加至極限風速，避免動態模擬造成的誤差，以持續 3 秒的極限風速負載作為穩態風速模型，並在其中取值計算安全標準。風與水負載參數設定如表 1：

表 2 風與水負載參數

平均風速	陣風因子	陣風風速	波高	波浪周期
50m/s	1.4	70m/s	14.8m	12.7s

而隨著半徑的改變，水負載亦照著莫瑞森方程式 [23] 改變，主要分為式 (10) 中第一項之慣性力及第二項之拖曳力，其參考之流體體積及受力面積以式 (11) 對圓柱型結構的變化式，兩種力分別與半徑的二次方及

一次方成正比，在最佳化過程中水負載將藉著 Python 不斷的調整。

$$F = \rho C_m V \dot{u} + \frac{1}{2} \rho C_d A u |u| \quad (10)$$

$$F = \rho C_m \frac{\pi}{4} D^2 \dot{u} + \frac{1}{2} \rho C_d D u |u| \quad (11)$$

其中 F 為水負載總受力

ρ 為海水密度

C_m 為慣性係數

C_d 為拖曳係數

V 為海水體積

u 為海水流速

A 為桿件受力面積

D 為桿件直徑

目標函數：

文獻[24]中提及離岸風機的最佳化中常以建造成本或是發電效率作為目標函數，而支撐結構就佔了整體建造成本的 17% [25]，支撐結構的質量可視為最影響建造成本的材料成本之因素，因此本研究著重於以降低支撐結構的質量為目標，同時也是大部分的文獻所採用的方式。

除了以降低支撐結構質量為目標，同時也必須考量結構的安全性，因此式 (12) 中目標函數為支撐結構質量 (Mass)、局部挫曲規範加乘 (LC) 及最大應力規範加乘 (US) (分別設定如式 (13) 及式 (14)) 的疊加如下，若支撐結構違反安全限制條件目標函數會顯著提升，以篩選安全的結構：

$$f(\vec{x}) = Mass + LC + US \quad (12)$$

$$LC = \begin{cases} Mass * 5, & criteria > 1.5 \\ Mass * 3, & 1.5 > criteria > 1.0 \\ 0, & 1.0 > criteria \end{cases} \quad (13)$$

$$US = \begin{cases} Mass * 10, & stress > 355MPa \\ 0, & stress < 355MPa \end{cases} \quad (14)$$

參考 Norsok 對於海洋工程支撐結構之局部挫曲的規範[20]，由 Python 從模擬結果中讀取桿件受力及模型幾何、材料性質，自動判定結構是否發生局部挫曲。如式 (15) 及式 (16)：

$$\frac{N_{Sd}}{N_{c,Rd}} + \frac{\sqrt{M_{y,Sd}^2 + M_{z,Sd}^2}}{M_{Rd}} \leq 1.0 \quad (15)$$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{c,Rd}} + \frac{1}{M_{Rd}} \left\{ \left[\frac{C_{my} M_{y,Sd}}{1 - \frac{N_{Sd}}{N_{Ey}}} \right]^2 + \left[\frac{C_{mz} M_{z,Sd}}{1 - \frac{N_{Sd}}{N_{Ez}}} \right]^2 \right\} \leq 1.0 \quad (16)$$

其中 N_{Sd} 為桿件在斷面上所受軸向力

$N_{c,Rd}$ 為軸向壓縮抗性

$N_{cl,Rd}$ 為局部挫曲抗性

$M_{y,Sd}, M_{z,Sd}$ 分別為桿件在斷面上所受 y,z 方向彎矩

M_{Rd} 為桿件彎矩抗性

N_{Ey}, N_{Ez} 分別為桿件對 y,z 尤拉挫曲抗性

C_{my}, C_{mz} 分別為 y,z 方向削減係數

參考 DNV-OS-J101[26]對於海洋工程支撐結構之最大應力規範，桿件應力不得超過 NV-36 高強度鋼之材料降伏強度 355MPa，因此在對支撐結構的最佳化設計中將此項規範列入限制條件中。也有一些文獻加入疲勞

限制條件及特徵頻率條件[27]，但卻需要增加更多的計算量，不適合應用於基因演算法，因此本研究不列入考量。

III. 結果及討論

基因演算法及改良式基因演算法分別經過 20 及 12 世代達到收斂，大約皆在 1000 次的電腦模擬內得到最佳化結果。依照世代的演進，兩種演算法的質量下降比較如下圖：

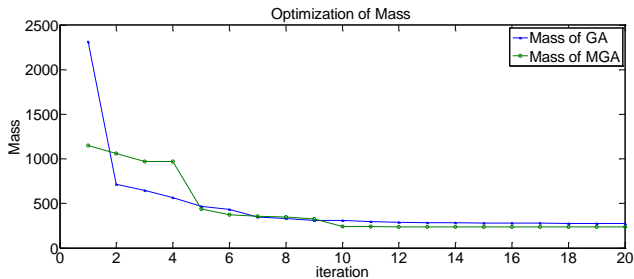


圖 5 質量最佳化過程比較

在最佳化的前期，兩種演算法所得的支撐結構設計皆無法符合安全限制條件，因此目標函數的數值很高，而基因演算法首先符合安全限制條件，雖然質量很大(約 700 公噸)。改良式基因演算法雖在約 320 次才符合安全條件，但在之後卻有較高的潛力得到更佳解。

在同樣的計算時間裡，改良式基因演算法最終所得的支撐結構質量收斂至 238 公噸，而基因演算法僅下降至 277 公噸，相較於最佳化前的支撐結構質量 300 公噸減少 23 公噸。若以支撐結構質量為標準，改良式基因演算法僅在第 9 世代，約 720 次電腦模擬就已收斂至 241 公噸，超越經過 20 個世代的基因演算法 1000 次電腦模擬所得的結果—281 公噸，其計算時間僅有基因演算法的 2/3，支撐結構質量的最佳化結果卻僅有基因演算法的 85%。收斂前的最佳化過程可參照下圖：

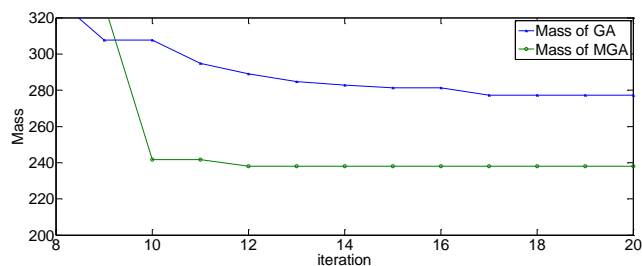


圖 6 收斂前質量最佳化過程比較

而最終的最佳化結果比較如下表：

表 3 最佳化結果比較

桿件	基因演算法		改良式基因演算法		最佳化前的結果		
	桿件厚度	桿件半徑	桿件厚度	桿件半徑	桿件厚度	桿件半徑	
空氣區	支撐桿件	32.0	347	24.4	339	18.9	203
	上部腳柱	64.0	322	55.4	472	42.5	600

	下部腳柱	49.0	562	38.1	482	37.5	600
波濺區	支撐桿件	8.0	120	6.4	111	12.8	228
	腳柱	29.0	613	31.8	518	34.0	600
沉水區	支撐桿件	7.0	140	8.0	122	18.9	203
	上部腳柱	42.0	525	60.0	405	42.5	600
	下部腳柱	41.0	887	31.6	851	67.5	650
支撐結構質量		277 公噸		238 公噸		300 公噸	

改良式基因演算法取得最佳結果，減輕支撐結構質量 62 公噸，僅為原來的 0.8 倍重，基因演算法結果介於兩者之間，僅減輕 23 公噸，達到成果為改良式基因演算法的 1/3，改良式基因演算法可有效的獲得較好的支撐結構設計。

其厚度配置與原本大致相同，腳柱皆比支撐桿件厚，不過經過最佳化後，空氣區的上部腳柱明顯增厚，沉水區的上部和下部腳柱厚度配置交換。而半徑的配置與原來最佳化前的結果並無太大的差別，除了空氣區的上部腳柱半徑大幅的減小。

IV. 結論

本研究提出一套自動化最佳化離岸風機支撐結構的最佳化流程，並應用自行設計的改良式基因演算法進行計算，取得較佳的最佳化成果，研究所得成果與結論條列如下：

1. 設計改良式基因演算法，結合決定性演算法及隨機性演算法做為更合用、更有效率的最佳化演算法。
2. 經由改良式基因演算法所設計之支撐結構質量為 238 公噸相較於基因演算法所得結果多減輕 39 公噸，較最佳化前減輕約 20%。
3. 應用改良式基因演算法的支撐結構最佳化，僅需 2/3 的計算時間即可達到與基因演算法所得結果更佳的质量。

參考文獻

- [1] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Poewr Electronic, Converters, Applications and Design*, Wiley, New York, USA, 1995.
- [2] Y. Y. Tzou, "DSP-based Fully Digital of a PWM DC-AC Converter for AC Voltage Regulation," *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Atlanta, USA, June 1995, pp. 138-144.
- [3] A. V. Jouanne, P. N. Enjeti, and D. J. Lucas, "DSP Control of High Power UPS Systems Feeding Nonlinear Loads," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 43, No. 1, Feb 1996, pp. 121-125
- [4] M. Muskulus and S. Schafhirt, "Design optimization of wind turbine support structures-a review," *Journal of Ocean and Wind Energy*, vol. 1, 2014, pp. 12-22.
- [1] A. M. Turing, "Computing machinery and intelligence," *Mind*, vol. 59, pp. 433-460, 1950.
- [2] N. Metropolis, A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth, A. H. Teller, and E. Teller, "Equation of state calculations by fast computing

- machines," *The journal of chemical physics*, vol. 21, pp. 1087-1092, 1953.
- [3] D. E. Goldberg and J. H. Holland, "Genetic algorithms and machine learning," *Machine learning*, vol. 3, pp. 95-99, 1988.
- [4] S. Yoshida, "Wind turbine tower optimization method using a genetic algorithm," *Wind Engineering*, vol. 30, pp. 453-469, 2006.
- [5] S. Schafhirt, D. Zwick, and M. Muskulus, "Reanalysis of jacket support structure for computer-aided optimization of offshore wind turbines with a genetic algorithm," in *The Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference*, Busan, Korea, 2014.
- [6] Y. Eroğlu and S. U. Seçkiner, "Design of wind farm layout using ant colony algorithm," *Renewable Energy*, vol. 44, pp. 53-62, 2012.
- [7] Y. Hu and S. S. Rao, "Robust design of horizontal axis wind turbines using Taguchi method," *Journal of Mechanical Design*, vol. 133, p. 111009, 2011.
- [8] C. D. Chapman, K. Saitou, and M. Jakiela, "Genetic algorithms as an approach to configuration and topology design," *Journal of mechanical design*, vol. 116, pp. 1005-1012, 1994.
- [9] V. Roberge, M. Tarbouchi, and G. Labonté, "Comparison of parallel genetic algorithm and particle swarm optimization for real-time UAV path planning," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, pp. 132-141, 2013.
- [10] P. Cary and C. Chapman, "Automatic 1-D waveform inversion of marine seismic refraction data," *Geophysical Journal International*, vol. 93, pp. 527-546, 1988.
- [11] J.-T. Tsai, T.-K. Liu, and J.-H. Chou, "Hybrid Taguchi-genetic algorithm for global numerical optimization," *IEEE transactions on evolutionary computation*, vol. 8, pp. 365-377, 2004.
- [12] M. H. Moradi and M. Abedini, "A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 34, pp. 66-74, 2012.
- [13] W. Bi, G. C. Dandy, and H. R. Maier, "Improved genetic algorithm optimization of water distribution system design by incorporating domain knowledge," *Environmental Modelling & Software*, vol. 69, pp. 370-381, 2015.
- [14] L.-n. Xing, Y.-w. Chen, and H.-p. Cai, "An intelligent genetic algorithm designed for global optimization of multi-minima functions," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 178, pp. 355-371, 2006.
- [15] S. Elsayed, N. Hamza, and R. Sarker, "Testing united multi-operator evolutionary algorithms-II on single objective optimization problems," in *Evolutionary Computation (CEC), 2016 IEEE Congress on*, 2016, pp. 2966-2973.
- [16] R. Hooke and T. A. Jeeves, "``Direct Search``Solution of Numerical and Statistical Problems," *Journal of the ACM (JACM)*, vol. 8, pp. 212-229, 1961.
- [17] J. Kennedy, "Particle swarm optimization," in *Encyclopedia of machine learning*, ed: Springer, 1995, pp. 760-766.
- [18] A. A. El-Sawy, Z. M. Hendawy, and M. A. El-Shorbagy, "Reference point based TR-PSO for multi-objective environmental/economic dispatch," *Applied Mathematics*, vol. 4, p. 803, 2013.
- [19] T. Ashuri, M. B. Zaaijer, J. R. Martins, G. J. Van Bussel, and G. A. Van Kuik, "Multidisciplinary design optimization of offshore wind turbines for minimum levelized cost of energy," *Renewable Energy*, vol. 68, pp. 893-905, 2014.
- [20] N. Norsok, "004, Design of steel structures," *Standards Norway, Rev*, vol. 2, 2004.
- [21] I. E. Commission, "IEC 61400-1," *Wind Turbines—Part 3: Design Requirements for Offshore Wind Turbines*, 2009.
- [22] I. TC88-MT, "Iec 61400-3: Wind turbines—part 1: Design requirements," *International Electrotechnical Commission*, Geneva, 2005.
- [23] M. AlHamaydeh, S. Barakat, and O. Nasif, "Optimization of Support Structures for Offshore Wind Turbines Using Genetic Algorithm with Domain-Trimming," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2017, 2017.
- [24] A. Chehouri, R. Younes, A. Ilinca, and J. Perron, "Review of performance optimization techniques applied to wind turbines," *Applied Energy*, vol. 142, pp. 361-388, 2015.
- [25] T. Delay and T. Jennings, "Offshore wind power: big challenge, big opportunity," *Carbon Trust CTC743*, London, UK, 2008.
- [26] O. Standard, "Design of Offshore Wind Turbine Structures," *DET NOR SKE VERITAS*, 2007.
- [27] K.-H. Chew, K. Tai, E. Ng, and M. Muskulus, "Analytical gradient-based optimization of offshore wind turbine substructures under fatigue and extreme loads," *Marine Structures*, vol. 47, pp. 23-41, 2016.