

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

複合材料螺槳之最佳化設計(2/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2611-E-002-003-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系暨研究所

計畫主持人：李雅榮

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 5 月 29 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 ☐ 成果報告 ☒ 期中進度報告

中進度
報告

複合材料螺槳之最佳化設計(2/3)

計畫類別：☒ 個別型計畫 ☐ 整合型計畫

計畫編號：NSC 91-2611-E-002-003

執行期間：91年 8月 1日至 92年 7月 31日

計畫主持人：李雅榮

共同主持人：

計畫參與人員：林敬傑、洪主頌

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：☒ 精簡報告 ☐ 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- ☐ 赴國外出差或研習心得報告一份
- ☐ 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- ☐ 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- ☐ 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

☐ 涉及專利或其他智慧財產權，☐ 一年☐ 二年後可公開

查詢

執行單位：國立台灣大學工程科學及海洋工程學系

中 華 民 國 92 年 5 月 23 日

行政院國家科學委員會專題研究計劃第二年度執行進度報告

複合材料螺槳之最佳化設計(2/3)

The Optimization of Composite Marine Propellers

計劃編號：NSC 91-2611-E-002-003

主持人：李雅榮(台大工程科學及海洋工程所)

研究人員：林敬傑、洪主頌

摘 要

近年來基因演算法(GA)已成為複合材料疊層最佳化的有力工具，但 GA 需要龐大的計算量也成為設計者的一大難題。本研究在 GA 中插入局部搜尋以提升收斂速度，而局部搜尋多出來的有限元素計算則由回歸分析取代，如此既可以提升收斂速度，又不會增加太多計算量。在本研究中採用特殊的基底函數進行回歸分析，可以由少量的取樣點得到準確的回歸式，增加局部搜尋的準確度。應用在複材螺槳最佳化，結果可以大幅增加搜尋效率，減少了一半以上的計算量。

關鍵字：複合材料、螺槳、基因演算法

Abstract

Interest in the application of genetic algorithms (GA) to the stacking sequence of composite laminates has grown in recent years. However, the huge calculation time of GA is a major problem for designers. In this study, a local improvement is inserted into a standard GA, and the real calculation, by finite element analysis (FEA) for example, required in the local search is replaced by a regression model. Accordingly, the improved GA converges much sooner than a standard GA and the calculation time is greatly reduced. The regression analysis applies chosen trigonometric functions as base functions, and estimates objective function values accurately using only few sample points. The GA with local improvement is then applied to a composite propeller, the amount of calculation is reduced by over half.

1. 緒論

複合材料積層板的設計在過去常被視為連續變數的最佳化問題，以疊層厚度及疊層角度作為主要設計變數。然而在實用上，疊層的厚度通常是固定的，而疊層角度則限制在少數的角度如 0, 90, ± 45 度等。於是複材積層板的最佳化設計變成是疊序最佳化的問題，而角度則為離散的選擇。近年來基因演算法(GA)常被

用來做離散變數的最佳化，非常適合用在複合材料設計，例如文獻[1-4]以基因演算法做疊層的最佳化。

但基因演算法的最大問題在於龐大的計算量，遇到複雜的問題時，需要相當長的時間來進行最佳化搜尋。有許多文獻嘗試以各種方法減少計算量，例如文獻[1]以樹狀目錄儲存資料，並針對挫曲特性進行局部搜尋，但這個方法只適用於挫曲的問題。文獻[4]則是使用 Spline approximation 來做連續函數的局部搜尋，但非連續變數的疊層最佳化仍然要耗費許多時間。在 GA 中進行局部搜尋，可以加速最佳化的收斂，但局部搜尋會增加更多的計算量。但若能以其他方式取代有限元素分析(FEA)，使其既可以達到局部搜尋的目的，又不會增加太多的計算量，如此就可以用最少的計算完成最佳化搜尋。本研究採用準確的回歸分析取代 FEA 進行局部搜尋，以很少的計算量可以達到局部搜尋的目標，有效減少最佳化搜尋的時間。

2. 回歸分析

本研究使用線性回歸取代有限元素分析。假設有一結構，其反應 y 決定於變數 $x_1, x_2, \dots, x_n$:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\mathbf{b} + \mathbf{e} \quad (1)$$

where,

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_k \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & x_{k1} & \cdots & x_{kn} \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{a}} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{a} = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}$$

其中 ε_i 表示未包含在函數內的其他因素，例如實驗量測誤差或數值收斂誤差。誤差 ε_i 這一項將被列為統計誤差，在線性回歸中，整體總平均誤差設為 0。我們要找出一組符合最小均方和的係數 $\mathbf{b}$ ，使 Eq. (2) 中的 L 達到最小值。

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \mathbf{a}^T \mathbf{a} = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - 2\hat{\mathbf{a}}^T \mathbf{X}^T \mathbf{y} + \hat{\mathbf{a}}^T \mathbf{X}^T \mathbf{X} \hat{\mathbf{a}} \quad (2)$$

最小均方和的係數須滿足 Eq. (3).

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \hat{\mathbf{a}}} \right|_{\mathbf{b}} = -2\mathbf{X}^T \mathbf{y} + 2\mathbf{X}^T \mathbf{X} \mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (3)$$

簡化為 Eq. (4)

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (4)$$

最後回歸模型為

$$= \mathbf{X}\mathbf{b} \quad (5)$$

真實的反應函數 f 是未知的，必須要以回歸分析來近似。通常使用多項式來做回歸分析，但在作者之前的研究[5]中發現，二次或三次多項式仍無法準確回歸出反應表面。考慮纖維角度的方向性與週期性，三角函數更適合作為基底函數，並且有相當不錯的結果。本文在回歸分析中使用基底函數為：

$$y = C_0 + \sum_{i=1}^{12} \left(C_i \sin x_i + D_i \cos x_i + E_i \sin 2x_i + F_i \cos 2x_i + \sum_{j=1}^{12} (G_{ij} \sin x_i \sin x_j + H_{ij} \cos x_i \cos x_j) \right)$$

(7)

其中

y = response of the structure

x_i = variables (ply angles, $i = 1$ to 12)

以 12 個變數來說，基底函數共有 181 項。以回歸分析來處理複合材料疊層角度問題有一大特點，對大部分問題來說每個變數的值都是固定的，但對疊層角度來說卻有不同的選擇。例如纖維角度-45 度與 135 及-225 度是相同的，但是在回歸分析上卻有不同的意義。改變變數值就改變了點的位置，同時也改變了曲線或曲面的形狀。因此，我們可以藉由變數值的選擇來使曲面更平滑。

3. 局部搜尋

在文獻[5]中回歸分析預估結果與實際計算結果很接近，但應用在最佳化設計上，要完全取代 FEM 等實際的計算還是有些問題。第一，取樣點過多。以 12 個疊層變數來說，通常需要 1000 個以上的取樣點，雖然略低於 GA 搜尋所需的計算量，但對複雜結構來說仍然是很大的計算量。第二，最大與最小值附近準確度較差，因為使用最小均方誤差和來作回歸分析會犧牲少數點數的準確度來使大部分的點預估準確。但通常最佳化搜尋時要找的就是最大或最小值，如此以回歸分析取代就會有較大誤差。

本文提出的局部搜尋正可以免除以上兩點問題，以最少的計算量做準確的回歸分析，同時也使最佳化目標附近的回歸分析更準確。在標準 GA 中加入局部搜尋的程序如圖 1 的流程圖所示。在本研究採用的標準 GA 中，使用菁英策略(elite strategy)、對決式選擇法(tournament selection)、單點基因互換(one point crossover)、以及單一基因突變(single gene mutation)。本研究中所使用的 GA 參數如表 1 所列。

首先指定特定世代(nlocal)後開始執行局部搜尋，當 GA 執行世代數(nngen)超過 nlocal 時，開始執行局部搜尋。在每個世代中，完成所有個體的目標函數計算後，可以得到該代最佳個體的基因，依據此基因進行局部搜尋，再把局部搜尋中

最好的個體插入原來的人口取代最差的個體，接著再進行選擇。

局部搜尋的程序如圖 2 所示，首先以至目前為止 FEM 計算過的個體為取樣，進行回歸分析後得到回歸式的係數。例如第 20 代做回歸時，就以 200 個 FEM 計算過的個體作為取樣求取回歸係數。接著找出該世代中最佳個體附近的個體，「附近」的定義將在稍後說明。然後以回歸式計算出附近個體的目標函數值，並取出其中最好的一個，以 FEM 計算後再插入該世代的個體中，以這個局部最佳個體取代原來人口中目標函數最低的個體。

在本研究中局部搜尋的範圍包括：(1)與最佳個體只有一個變數不同。例如最佳個體為 1 2 3 4，則 2 2 3 4、3 2 3 4、4 2 3 4 都是屬於第一種局部的範圍內。以 12 個變數，每個變數有 4 種選擇來說，此種局部包含 36 種疊層。(2)與最佳個體所有疊層角度相同，其中有兩個疊序互換。例如疊序 2 1 3 4、1 3 2 4 等都是第二種局部。以 12 個變數，每個變數有 4 種選擇來說，此種局部包含 66 種疊層。因此本研究中的局部搜尋共包含 102 種疊層。

使用局部搜尋必須注意的是開始使用的時機，越早開始發揮的功效就越大，但太早開始進行局部搜尋容易造成收斂在局部高點，而漏失了整體的最高點。另外，如果太早開始進行，FEM 計算累積的取樣點不夠多，回歸分析的結果會很差，無法正確預測最附近的值。如此，只是浪費時間在做回歸分析與局部高點的計算，而沒有發揮實際效用。所以開始使用的時機，值得進一步探討。

4. 應用於複合材料螺槳

在此選擇螺槳 DTNSRDC 4498 [6] 為例，表 2 列出螺槳的基本資料。Eq.(9) 定義了所使用的參數，其中 $n = 1708$ (rpm), $J = 0.889$ 時 $V_a = 7.716$ (m/s)。此螺槳的設計 J 值為 0.889， K_Q 為 0.05204。

$$\text{Advance coefficient } J = \frac{V_a}{nD} \quad \text{Torque coefficient } K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

(9)

where

D = diameter

V_a = axial velocity

n = rotational speed

ρ = fluid density

Q = propeller torque

螺槳的扭力與壓力分布使用麻省理工學院發展的 PSF2[7]來計算。此程式以升力面理論為基礎，發展成計算穩態與非穩態流場中螺槳特性的實用程式。在文獻 [7]中比較各種螺槳的計算結果與實測結果，都相當準確。

得到壓力分布後再輸入有限元素程式中計算變形量。圖 6 為螺槳的有限元素模型，全部使用 8 節點殼元素，共 225 個元素。螺葉根部固定以模擬真實螺槳的邊界條件。螺葉的根部比較厚而尾端比較薄，因此每個元素的積層厚度都不同，

如圖 7 所示。螺槳疊層上下對稱，各層由 0° , $\pm 45^\circ$ ，以及 90° 四種角度組合而成。表 3 列出螺槳使用的材料係數。

流體壓力分布隨著螺葉變形改變，在每次變形計算後壓力分布都要重新計算。如此重複直到得到平衡的壓力與變形量為止。圖 8 畫出計算結果，其中原始設計的曲線是把螺槳視為剛體不考慮變形量的結果。船隻常用的青銅螺槳略低於原始設計，因為壓力使螺槳的螺距變小。另外兩條曲線是 $[45_2/45_2/45_2/45_2]_{3s}$ 與 $[-45_2/-45_2/-45_2/-45]_{3s}$ 兩種疊層的計算結果，由圖可以看出螺槳性能曲線隨著疊層變化有很大的改變。在此搜尋最小 K_Q 的螺槳作為應用例，目標函數如 Eq. (10) 定義。

$$F_{obj} = 1 - 10K_Q \quad (10)$$

表 4 所列為找到最佳疊層所需要的世代數。在這些 GA 搜尋中，最後找到的最佳疊層有三組結果非常接近， $[45_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/45_2/45_2/0_2]$ ，其 K_Q 為 0.03757； $[45_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/45_2/45_2]$ ，其 K_Q 為 0.03772； $[45_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/45_2/0_2/45_2]$ ，其 K_Q 為 0.03773。三組疊層的差異很小，僅有兩個疊層互換的差別，都在本文定義的局部範圍內。然而其 K_Q 差異太小，最大與最小差別僅 0.43%，比回歸分析的誤差還小，因此用回歸分析做局部搜尋無法分辨出三個個體的結果。由於三個結果非常接近，在此認定找到任一個結果都視為完成搜尋。

由表 4 可以看出使用局部搜尋的計算量只有標準 GA 的三分之一，成效非常顯著。從第五代開始局部搜尋又比從第 10 代開始更好，從第五代開始局部搜尋應該是最有效率的。圖 9 所畫的是每代最佳目標函數值與世代數的關係圖，黑色線為使用局部搜尋， $n_{local}=5$ 的結果；灰色線為沒有使用局部搜尋的結果。使用局部搜尋的收斂相當快，標準 GA 每次跳升前都要經過長時間的搜尋，所以收斂速度非常慢。

6. 結論

本研究在 GA 中加入局部搜尋，並以回歸分析取代 FEM 節省局部搜尋的計算量，結果大幅提昇搜尋效率。在複材螺槳的應用上，搜尋到最佳解的計算量比未使用局部搜尋時減少一半以上。由以上分析可以得到以下結論：

1. 使用 GA 進行複合材料結構最佳化時，加入局部搜尋可以明顯加速收斂。
2. 以回歸分析取代實際計算做局部搜尋是可行的。
3. 局部搜尋開始的時機，在回歸分析準確度開始明顯提升時為最佳。太早使用因回歸準確度低而沒有效果，太晚使用則收斂較晚。本文的應用例中，在第五代開始局部搜尋效率最高。
4. 搜尋目標附近個體的目標函數值太相近可能會低於回歸誤差，此時以回歸

分析取代 FEM 做局部搜尋就沒有辦法分辨出真正的最佳個體。設計者可在最後以 FEM 進行一次局部搜尋，即可補回歸分析之不足。

Reference

- [1] N. Kogiso, L. T. Watson, Z. Gurdal, R. T. Haftka, Genetic Algorithms with Local Improvement for Composite Laminate design, Structural Optimization, Vol. 7, pp. 207-218, 1994.
- [2] Jung-Seok Kim, Chun-Gon Kim, Chang-Sun Hong, Optimum Design of Composite Structures with ply drop using genetic algorithm and expert system shell, Composite Structures, Vol. 46, pp. 171-187, 1999.
- [3] Boyang Liu, Raphael T. Haftka, Mehmet A. Akgun, Akira Todoroki, Permutation genetic algorithm for stacking sequence design of composite laminates, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 186, pp. 357-372, 2000.
- [4] Vladimir B. Gantovnik, Zafer Gurdal, Layne T. Watson, A genetic algorithm with memory for optimal design of laminated sandwich composite panels, Composite Structures, Vol. 58, pp. 513-520, 2002.
- [5] Ya-Jung Lee, Ching-Chieh Lin, Regression of the response surface of laminated composite structures. (reviewing, submitted to Composite Structures)
- [6] J. J. Nelka, Experimental Evaluation of a Series of Skewed Propellers with Forward Rake: Open-Water Performance, Cavitation Performance, Field-point Pressures, and Unsteady Propeller Loading, DTNSRDC Report 4113, July, 1974.
- [7] D. S. Greeley and J. E. Kerwin, Numerical Methods for Propeller Design and Analysis in Steady Flow, SNAME Trans 1982; 90:

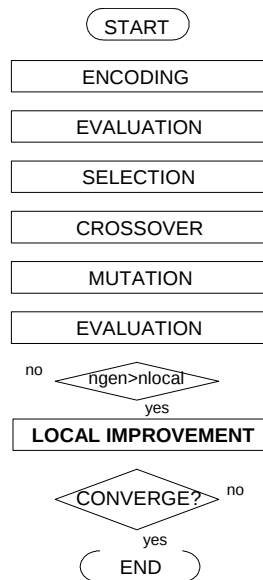


圖 1. Flow chart of GA with local improvement

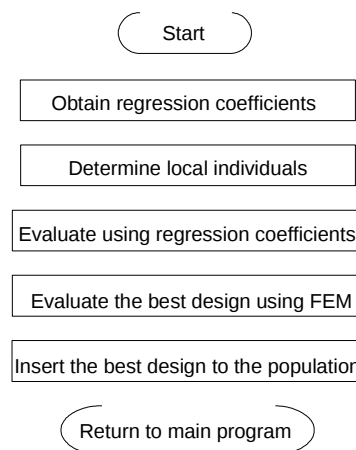


圖 2. Flow chart of local improvement

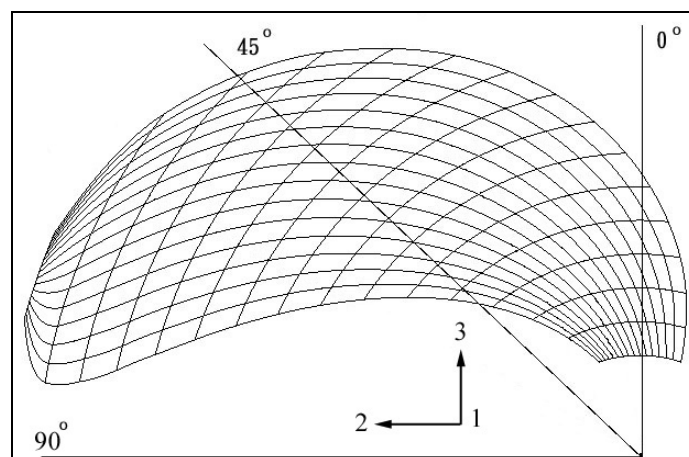


圖 6. Finite element model of the propeller

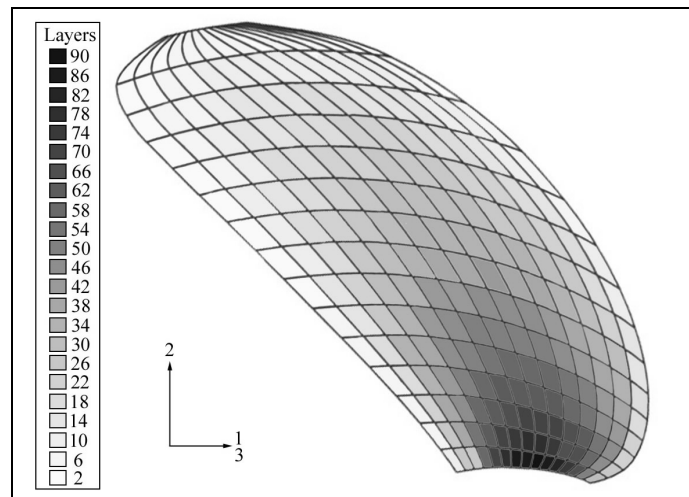


圖 7. Distribution of number of layers in elements

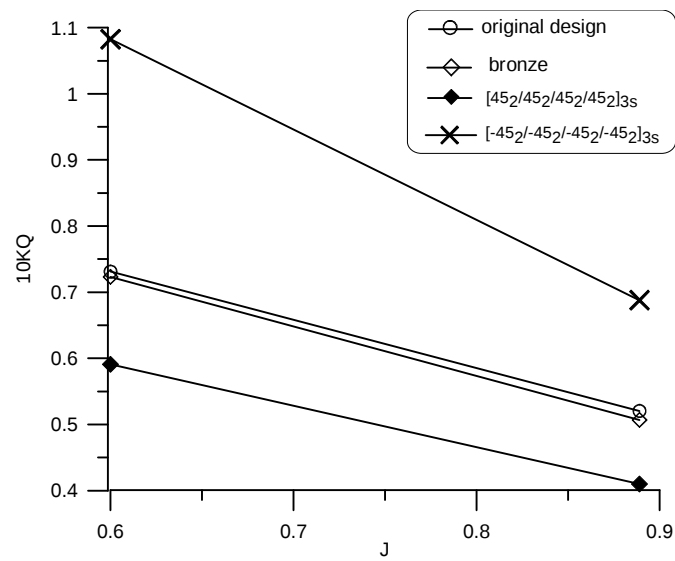


圖 8. Results of calculation

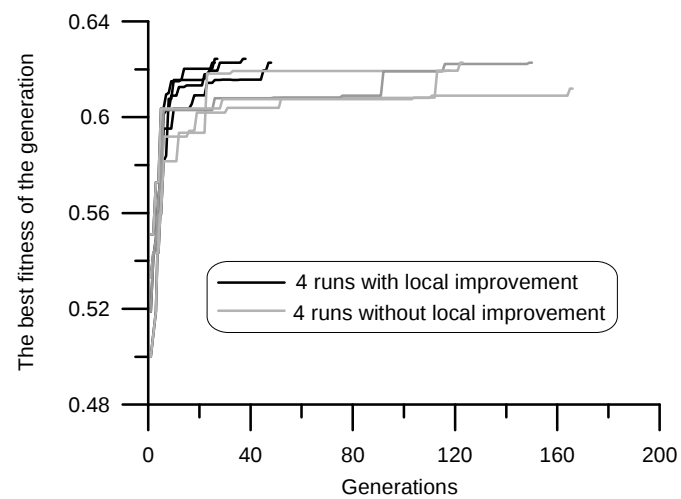


圖 9. Variation of the best fitness with generation

Table 1. Parameters in Genetic Algorithm

Population Size	10
Number of Variables	12
String Length	24
Probability of Mutation	0.06
Probability of Crossover	0.9
Number of Children for Each Pair	1

Table 2 Characteristics of the DTNSRDC Propeller 4498

Number of blades : 5	Diameter : 0.305 m
Hub-Diameter Ratio: 0.2	Expanded Area Ratio: 0.725
Section Meanline: NACA a=0.8	Section Thickness Distribution: NACA 66

	Chord	Pitch	Skew	Rake	Camber	Thickness
r/R	P/D	Rake/D	Degree	C/D	Camber/Ci	Thickness/D
0.2	1.566	0.	0.	0.174	0.0402	0.0434
0.25	1.539	0.	4.647	0.202	0.0408	0.0396
0.3	1.512	0.	9.293	0.229	0.0407	0.0358
0.4	1.459	0.	18.816	0.275	0.0385	0.0294
0.5	1.386	0.	27.991	0.312	0.0342	0.0240
0.6	1.296	0.	36.770	0.337	0.0281	0.0191
0.7	1.198	0.	45.453	0.347	0.0230	0.0146
0.8	1.096	0.	54.245	0.334	0.0189	0.0105
0.9	1.566	0.	63.102	0.280	0.0159	0.0067
0.95	1.539	0.	67.531	0.210	0.0168	0.0048
1.0	1.512	0.	72.000	0.000	0.0000	0.0029

Table 3 Material properties of IM6/Epoxy lamina

Young's modulus (longitudinal)	$E_1 = 2.03 \times 10^{11}$ Pa
Young's modulus (transverse)	$E_2 = 1.12 \times 10^{10}$ Pa
Shear modulus	$G_{12} = 8.4 \times 10^9$ Pa
Poisson's ratio	0.32
Ply thickness	$t = 2.8 \times 10^{-4}$ m

Table 4. Number of generations to achieve convergence for propeller optimization

Case	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Average
nlocal = 5	25	47	28	26	31.5

nlocal = 10	35	73	53	29	47.5
No local improvement	>200	>200	116	122	>159.5