

行政院國家科學委員會專題研究計劃完整報告

複合材料螺槳之最佳化設計

The Optimization of Composite Marine Propellers

計劃編號：NSC 92-2611-E-002-019

執行期限：90.8.1 93.9.30

主持人：李雅榮(台大工程科學及海洋工程學系)

研究人員：鍾承憲、洪主頌、羅光閔

本計畫已發表之 SCI 期刊論文：

1. Y. J. Lee and C. C. Lin, "Regression of the response surface of laminated composite structures", Composite Structures, Vol. 62, pp91-105, 2003. (SCI)
2. Y. J. Lee and C. C. Lin, "Optimized Design of Composite Propeller", Mechanics of Advanced Materials and Structures, Vol.11, No.1, pp17-30, 2004. (SCI).
3. C. C. Lin, Y. J. Lee, "Stacking sequence optimization of composite laminates using genetic algorithm with local improvement", Composite Structures, Vol. 63, pp339-345, 2004. (SCI)

摘 要

FRP (Fiber Reinforced Plastic) 複合材料因質量輕、強度高、耐腐蝕等優點，近年來廣泛應用於各種結構中。而 FRP 複合材料另一個特點在於材料的方向性，透過纖維方向的安排可以加強結構特定方向的強度，進而可以控制結構的變形。本計畫利用 FRP 特有的彎曲扭轉耦合效應，設計一個具有自動微調螺距功能的智慧型螺槳。此螺槳在設計速度下可以維持原始設計性能，而在軸向速度變低時，螺距則會自動變小，使螺槳角度更接近入流角。

由於 FRP 的疊層角度與順序是多個離散變數的組合，難以用一般最佳化方法搜尋最佳解。基因演算法是一種新興的最佳化方法，特別適合多變數、離散變數等難以用傳統方法最佳化的問題，因此很適合作為 FRP 結構最佳化的搜尋工具。然而基因演算法的最大問題在於計算量龐大，每次最佳化搜尋需要針對不同變數做數千次的計算，如何提升搜尋效率也是最佳化設計中的重要課題。

本計畫以反應表面法結合基因演算法，首先以回歸分析得到反應表面，亦即設計變數與最終反應值之間的關係。然後以反應表面的函數取代原來費時的計算，節省了大量的計算時間。另外，為了提高搜尋準確度，在基因演算法中加入局部搜尋，以局部的反應表面取代原來的計算，既可提高準確度，又不會增加太多的計算量，成功使搜尋計算量降低到原來的一半以下。此一改良法不僅適用於本計畫，也可應用在其他 FRP 疊層最佳化問題上，使 FRP 結構最佳化更為容易。

本計畫整合流力與結構計算，以得到變形後的螺槳性能，然後以改良式基因演算法尋找最佳的疊層角度與順序，使螺槳達到自動調整螺距的目的。然而本計劃發現，僅調整疊層角度順序無法達到此一目的，必須配合調整螺槳外型，因此提出預變形螺槳，配合疊層角度的選擇，完成智慧型螺槳的設計。最後進行 FRP 螺槳性能實驗，以碳纖維複合材料製作螺槳，在空蝕水槽中運轉以量測推力、扭力等螺槳性能，並以攝影的方式觀測螺葉在軸向的變形量。實驗結果發現疊層對螺槳性能與變形的影響與模擬計算的趨勢相吻合，在軸向速度較小的情況下螺距也跟著變小，使其扭力變化比金屬螺槳更小，而使螺槳能夠運作在更穩定的狀態下。

Abstract

Traditional propellers are made of high-stiffness metal material. They deform only slightly and are usually designed to work at a constant speed, operating at reduced efficiency at other speeds. This project designs a composite propeller that operates over a wider range of speeds. The deformation of propeller is determined by arranging the stacking sequence to produce propellers that are more efficient than those made of metal. 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 project, 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 the composite propeller, and the amount of calculation is reduced by over half.

In the optimization of composite propeller, the optimal stacking sequence sought by the GA does not outperform a metal propeller, and a pre-deformed design is then used to solve this problem. A smallest pitch stacking sequence is obtained using a GA first, and then the propeller is displaced in the opposite direction to form a pre-deformed propeller. The pre-deformed propeller finally meets the demands of optimization and outperforms the traditional metal propeller. Finally, an experiment is made to verify the result of calculation. The characteristics and the deformation of the propeller is found to be concord with the result of the integrated calculation in this study. The pitch of the propeller is reduced when the axial inflow velocity is reduced. The propeller outperforms traditional metal propellers.

目 錄

摘要.....	I
目錄.....	III
圖目錄.....	V
表目錄.....	IX
符號表.....	XI

頁次

第一章 導論.....	1
1-1 研究動機.....	1
1-2 文獻回顧.....	3
1-3 本計劃研究方向.....	4
1-4 內容架構.....	5
第二章 理論基礎與數值分析方法.....	8
2-1 材料偶合效應.....	8
2-2 螺槳幾何.....	9
2-2-1 決定螺葉座標.....	9
2-2-2 由變形量反算螺槳幾何參數.....	11
2-3 螺槳性能計算.....	12
2-4 基因演算法.....	14
2-5 回歸分析.....	15
第三章 FRP 複合材料結構最佳化方法之改良.....	26
3-1 反應表面之回歸分析.....	26
3-1-1 三明治板之回歸分析.....	27
3-1-2 變數值的選擇.....	29

3-1-3 複合材料螺槳之回歸分析.....	30
3-2 具局部搜尋功能的基因演算法.....	32
第四章 FRP 複合材料螺槳之最佳化.....	50
4-1 原始設計螺槳.....	50
4-2 預變形螺槳.....	52
4-3 局部剛性加強.....	54
第五章 FRP 複合材料螺槳性能實驗.....	69
5-1 螺槳製作.....	69
5-2 實驗設備.....	70
5-3 實驗結果與分析.....	71
第六章 結論與建議.....	92
6-1 結論.....	92
6-2 未來研究建議.....	93
參考文獻.....	94

圖 目 錄

頁次

圖 1-1 不同軸向速度之入流角.....	7
圖 2-1 積層板所受面內力之圖示.....	18
圖 2-2 積層板所受彎矩之圖示.....	18
圖 2-3 積層板疊層圖.....	18
圖 2-4 螺距之定義[31]	19
圖 2-5 螺葉中央參考線及歪斜角示意圖[31]	19
圖 2-6 螺葉偏斜之定義[31]	20
圖 2-7 螺葉弦長之定義[31]	20
圖 2-8 螺葉橫剖面圖[31]	21
圖 2-9 螺葉厚度定義[31]	21
圖 2-10 螺葉座標決定示意圖[31]	21
圖 2-11 螺葉上座標點示意圖[31]	22
圖 2-12 螺槳性能計算疊代流程.....	22
圖 2-13 螺槳之有限元素模型.....	23
圖 2-14 各元素疊層數分佈.....	23
圖 2-15 螺槳性能計算結果.....	24
圖 2-16 基因演算法流程圖.....	24
圖 3-1 三明治板之有限元素模型.....	37
圖 3-2 三明治板的反應曲線.....	37
圖 3-3 取樣點與測試點分布圖.....	38
圖 3-4 以第一組函數回歸模型所推估的點.....	38
圖 3-5 以第二組函數回歸模型所推估的點.....	39

圖 3-6 以第三組函數回歸模型所推估的點.....	39
圖 3-7 以第四組函數回歸模型所推估的點.....	40
圖 3-8 以第五組函數回歸模型所推估的點.....	40
圖 3-9 預估取樣點的誤差分布.....	41
圖 3-10 預估測試點的誤差分布.....	41
圖 3-11 變數值改變後的反應曲線.....	41
圖 3-12 選擇變數值後預估取樣點的誤差分布.....	42
圖 3-13 選擇變數值後預估測試點的誤差分布.....	42
圖 3-14 選擇變數值後以第五組函數回歸模型所推估的點.....	42
圖 3-15 取樣點數目對取樣點預估的影響.....	43
圖 3-16 取樣點數目對測試點預估的影響.....	43
圖 3-17 複合材料螺槳的反應曲線.....	43
圖 3-18 預估螺槳取樣點的誤差分布.....	44
圖 3-19 預估螺槳測試點的誤差分布.....	44
圖 3-20 第四組基底函數預估螺槳性能結果.....	44
圖 3-21 螺槳取樣點數目對取樣點預估的影響.....	45
圖 3-22 螺槳取樣點數目對測試點預估的影響.....	45
圖 3-23 以回歸模型取代計算的最佳化搜尋過程.....	46
圖 3-24 標準基因演算法加入局部搜尋.....	46
圖 3-25 局部搜尋程序.....	47
圖 3-26 三明治板最佳化搜尋過程.....	47
圖 3-27 第一次局部搜尋時回歸分析的誤差分布.....	48
圖 3-28 螺槳 K_Q 最小化搜尋過程.....	48
圖 4-1 引擎特徵曲線圖[31]	58
圖 4-2 原始幾何螺槳疊層最佳化過程.....	58
圖 4-3 原始幾何最佳疊層螺槳之扭力係數曲線.....	59

圖 4-4 疊層與曲線變化關係.....	59
圖 4-5 螺葉所受壓力差分佈圖.....	60
圖 4-6 預變形螺槳示意圖.....	60
圖 4-7 最小螺距疊層搜尋過程.....	61
圖 4-8 最小螺距及預變形螺槳之扭力係數曲線圖.....	61
圖 4-9 預變形與沒有預變形螺槳性能比較圖.....	62
圖 4-10 最小螺距及預變形螺槳之扭力係數曲線圖 (D = 20cm)	62
圖 4-11 DTNSRDC 4497 螺槳之扭力係數曲線圖.....	63
圖 4-12 DTNSRDC 4496 螺槳之扭力係數曲線圖.....	63
圖 4-13 DTNSRDC 4383 原始設計與最佳化後之扭力曲線.....	64
圖 4-14. DTNSRDC4382 原始設計與最佳化後之扭力曲線.....	64
圖 5-1 圖 5-1. DTNSRDC-4498 之鋁合金模具.....	78
圖 5-2 圖 5-2. DTNSRDC-4383 之鋁合金模具.....	78
圖 5-3 纖維角度定義.....	79
圖 5-4 各層纖維形狀.....	79
圖 5-5 在 DTNSRDC-4498 的模具上積層.....	80
圖 5-6 在 DTNSRDC-4383 的模具上積層.....	80
圖 5-7 葉片於熱壓機中熱壓成形.....	81
圖 5-8 從模具上取下的葉片.....	81
圖 5-9 修整邊緣後的葉片.....	82
圖 5-10 加工製作完成之螺槳葉片.....	82
圖 5-11DTNSRDC-4498 完成圖.....	83
圖 5-12 DTNSRDC-4383 完成圖.....	83
圖 5-13 進行動力儀推力校正.....	84
圖 5-14 進行動力儀扭力校正.....	84
圖 5-15 空蝕水槽.....	85

圖 5-16 採用攝影方式觀察變形.....	85
圖 5-17 在軸上標劃刻度線.....	86
圖 5-18 拍攝靜止的螺槳.....	86
圖 5-19 拍攝運轉中的螺槳.....	87
圖 5-20 4383 最佳疊層之螺槳性能(n=7).....	88
圖 5-21 4383 最佳疊層之螺槳性能(n=13).....	88
圖 5-22 4498 最佳疊層之螺槳性能(n=7).....	89
圖 5-23 4498 最佳疊層之螺槳性能(n=13).....	89
圖 5-24 4383 最佳疊層實驗與計算結果比較(n=7).....	90
圖 5-25 4383 最佳疊層實驗與計算結果比較(n=13).....	90
圖 5-26 4498 最佳疊層實驗與計算結果比較(n=7).....	91
圖 5-27 4498 最佳疊層實驗與計算結果比較(n=13).....	91
圖 5-28 PSF2 的計算結果和實驗比較[2].....	92
圖 5-29 性能計算三種轉速之下 KT 與 KQ 的比較.....	92
圖 5-30 實驗量測 4383 在兩種轉速之下 KQ 的比較.....	93
圖 5-31 實驗量測 4498 在兩種轉速之下 KQ 的比較.....	93
圖 5-32 4383 與 4498 之實驗 KQ 曲線斜率比較(n=7).....	94
圖 5-33 4383 與 4498 之實驗 KQ 曲線斜率比較(n=13).....	94
圖 5-34 像素與長度換算.....	95
圖 5-35 靜止與運轉的相片重合.....	95
圖 5-36 4383 螺槳在 $n = 7$ rps 之下的變形量.....	96
圖 5-37 4383 螺槳在 $n = 13$ rps 之下的變形量.....	96
圖 5-38 4498 螺槳在 $n = 7$ rps 之下的變形量.....	97
圖 5-39 4498 螺槳在 $n = 13$ rps 之下的變形量.....	97

表 目 錄

頁次

表 2-1 DTNSRDC 4498 螺槳之幾何 [32].....	25
表 2-2 碳纖維 (graphite-epoxy)疊層之材料特性.....	25
表 3-1. Kevlar/Epoxy 疊層之材料係數.....	49
表 3-2 基因演算法使用參數值.....	49
表 3-3 搜尋到三明治板最佳疊層所需世代數.....	49
表 3-4 搜尋到螺槳最佳疊層所需世代數.....	49
表 4-1 $[90_2/-45_2/90_2/0_2//45_2/-45_2/0_2/90_2/0_2/90_2/0_2/90_2]_s$ 螺槳在 $J=0.889$ 下 , 變形後的螺槳幾何參數.....	65
表 4-2 $[90_2/-45_2/90_2/0_2//45_2/-45_2/0_2/90_2/0_2/90_2/0_2/90_2]_s$ 螺槳在 $J=0.6$ 下 , 變形後的螺槳幾何參數.....	65
表 4-3 $[45_2/0_2/45_2/45_2//0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/45_2/45_2]_s$ 螺槳在 $J=0.889$ 下 , 變形後的螺槳幾何參數.....	66
表 4-4 $[45_2/0_2/45_2/45_2//0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/45_2/45_2]_s$ 螺槳在 $J=0.6$ 下 , 變形後的螺槳幾何參數.....	66
表 4-5 預變形螺槳幾何參數決定過程.....	67
表 4-6 直徑 20 公分預變形螺槳幾何參數決定過程.....	68
表 4-7 Characteristics of the DTNSRDC Propeller 4497 [32]	69
表 4-8 Characteristics of the DTNSRDC Propeller 4496 [32]	70
表 4-9 Characteristics of the DTNSRDC Propeller 4383 [32]	71
表 4-10. Characteristics of the DTNSRDC Propeller 4382 [32]	72
表 4-11. DTNSRDC-4498 與 DTNSRDC-4383 扭力係數比較.....	73
表 4-12. DTNSRDC-4497 與 DTNSRDC-4382 扭力係數比較.....	73

表 5-1 DTNSRDC-4498 預變形螺槳幾何參數.....98

表 5-2 DTNSRDC-4383 預變形螺槳幾何參數.....99

表 5-3 DTNSRDC-4498 葉片製作記錄.....99

表 5-4 DTNSRDC-4383 葉片製作記錄.....100

表 5-5 4383 [45₂/0₂/45₂/0₂/45₂/45₂/0₂/0₂/0₂/0₂/0₂]_s 疊層量測結果(n=7).....100

表 5-6 4383[45₂/0₂/45₂/0₂/45₂/45₂/0₂/0₂/0₂/0₂/0₂]_s 疊層量測結果(n=13).....100

表 5-7 4498 [45₂/90₂/45₂/45₂/45₂/45₂/0₂/0₂/0₂/0₂/45₂]_s 疊層量測結果(n=7).....101

表 5-8 4498 [45₂/90₂/45₂/45₂/45₂/45₂/0₂/0₂/0₂/0₂/45₂]_s 疊層量測結果(n=13).....101

符 號 表

J	螺槳前進係數
K_T	螺槳推力係數
K_Q	螺槳扭力係數
η	螺槳效率
$\overline{Q}_{ij}$	各層的應力應變關係矩陣
ε_x^0	X 方向之應變
ε_y^0	Y 方向之應變
γ_{xy}^0	XY 方向之剪切應變
κ_x	X 方向之曲率
κ_y	Y 方向之曲率
κ_{xy}	XY 方向扭轉之曲率
u_0 、 v_0 、 w_0	板中央面之變形量
r	螺槳半徑
c	螺葉弦長
i_G	螺槳偏斜
θ_s	螺槳歪斜角
θ_{nt}	螺槳螺距角
r'	變形後螺槳半徑
i'_G	變形後螺槳偏斜
θ'_s	變形後螺槳歪斜角
θ'_{nt}	變形後螺槳螺距角

ϕ	螺葉所在位置角度
y_c	螺槳翼拱高度
y_c	變形後螺槳翼拱高度
X_{LE} , Y_{LE} , Z_{LE}	螺葉前緣座標
X_{TE} , Y_{TE} , Z_{TE}	螺葉後緣座標
X_P , Y_P , Z_P	螺葉中央參考線座標
D	螺槳直徑
V_a	螺槳軸向速度
n	螺槳轉速
ρ	流體密度
T	螺槳推力
Q	螺槳扭力
$K_Q^{0.6}$	$J = 0.6$ 時的扭力係數值
$K_Q^{0.889}$	$J = 0.889$ 時的扭力係數值
ε	回歸分析誤差
β	回歸模型之係數
L	回歸分析之誤差平方和
E_1	1 方向之楊氏彈性係數
E_2	2 方向之楊氏彈性係數
G_{12}	12 方向之剪切彈性係數
t	疊層厚度
n_{local}	開始進行局部搜尋之世代
f_{obj}	目標函數

第一章 導論

1-1 研究動機

纖維強化樹脂(Fiber Reinforced Plastic, FRP)因為質量輕、強度高及耐腐蝕等特性，近年來廣泛應用在各種結構物上。各種運輸載具為提高性能，可攜式產品為了減輕重量，採用 FRP 複合材料已成為趨勢。船舶、飛機、車輛的外殼結構、直昇機旋翼、壓力容器、印刷電路板及相機等皆可見到它卓越的力學特性表現。而 FRP 複合材料另一個特點在於材料的方向性，透過纖維方向的安排可以加強結構特定方向的強度，或者使結構往特定方向變形。

一般船用螺槳常用的材料為錳青銅、鋁青銅、鑄鐵、鑄鋼、鎳鋁鋼及不鏽鋼等金屬材料，而以 FRP 複合材料取代一般金屬最大的優點在於重量輕且耐腐蝕。除此之外，由於 FRP 複合材料的剛性低，變形量較金屬大，若能利用材料的方向性，使螺槳隨著速度變化有不同的變形，即可提升螺槳的性能。如圖 1-1 所示，上圖是螺槳在設計速度下運轉，其入流角接近螺槳的螺距角 (pitch angle)，當轉速不變而軸向速度變慢時，則入流角變小如下圖，螺葉承受的壓力增加，使轉動螺槳所需扭力增加，而效率降低。若能利用 FRP 複合材料特性使螺槳在軸向速度變小時，螺距角跟著變小而接近入流角，如此可以減少扭力輸出，提升螺槳的效率。

彎曲-扭轉耦合效應是 FRP 複合材料特有力學特性，當結構受到彎曲外力時，會產生扭轉變形。當 FRP 複合材料疊層為對稱且平衡時，不會產生彎曲-扭轉耦合效應，只有在疊層為不平衡時，積層板會產生此耦合效應[1]。在航空之氣動力學方面已有許多相關研究及應用，例如以此耦合效應改善空氣動力之不穩定情形，如振顫(flutter)、剝離(divergence)等問題[2][3]，或使用在前掠翼(forward swept wing)型飛機之機翼表皮以控制機翼的變形[4]，以及應用在航空螺槳上[5]。同樣地，當螺槳在水中運轉時，螺葉承受了流體壓力而產生彎矩，藉由耦合效應同時也產生扭轉角，如此將改變螺槳的螺距，也改變了推力、扭矩及效率等螺槳性能。文獻[6]針對此問題，進行 FRP 螺槳之耦合水彈特性分析。本計畫就是利用 FRP 複合材料特有的彎曲-扭轉耦合效應，特別安排疊層纖維角度，設計一個具有自動微調螺距功能的智慧型螺槳，使螺槳的形狀可以隨入流角改變而變化。此螺槳在設計速度下可以維持原始設計

性能，而在軸向速度變低時，螺距則會自動變小，使螺槳角度更接近入流角。

關於 FRP 複合材料疊層最佳化的問題，早期多把角度及疊層當作連續變數進行最佳化[7]，然而在實際應用上，疊層厚度多為固定，而角度則只有少數的選擇，如 0、90、45、-45 度等，太精細的數字如 37.5 度，在實際施工上很難達到。因此，疊層最佳化的問題變成了角度選擇與順序安排的問題。由於疊層數往往超過十層以上，每一層的角度當作一個變數的話，就有十多個不連續變數。一般的最佳化方法很難處理這麼多不連續變數的最佳化，通常設計者只能憑著經驗來設計如[8-11]，或者發展特殊的最佳化方法如 Fang[12]發展的蒙地卡羅法 (Monte Carlo Method)，以隨機取樣的方式進行三明治板的最佳化，但其效率並不理想。近年來基因演算法在 FRP 疊層最佳化的應用上逐漸受到重視。基因演算法是利用「物競天擇，適者生存」的自然法則，淘汰不適合的設計，最後找出最適合的結果。基因演算法特別適合離散或不連續變數及多變數的最佳化問題，而 FRP 複合材料疊層最佳化正是一個離散且不連續的多變數問題，故相當適合以基因演算法進行最佳化搜尋。最早在 1992 年 Negendra 等[13]嘗試用基因演算法做積層板的最佳化問題，接著又有各種應用及改良方法，例如在特定負荷狀態下，尋找最薄且適合的積層角度[14]，求壓力殼的最佳疊層[15]，安排疊層使積層板具最大破壞強度[16]，積層板在不同邊界條件下積層數與積層角度最佳化[17]，文獻[18]、[19]則企圖改良基因演算法以適合積層板疊序最佳化。

基因演算法雖然適合 FRP 複合材料積層板結構作疊層最佳化，但其最大的問題在於計算量相當龐大，通常需要反覆計算數千次才能找到最佳疊層，對較複雜結構來說計算時間太長，其方便性也大為降低。為了減少計算量，有許多研究針對 FRP 複合材料進行基因演算法改良，但其改良法只能針對特定受力狀態[20]，或對特定連續變數[21]，或者可適用性高但效果有限[22-23]。為了提升最佳化效率，本計畫將尋求一個廣泛適用且有效減少計算量的方法，以反應表面法(Response Surface Methodology, RSM)與基因演算法結合，使 FRP 複合材料結構的最佳化更為快速方便。

所謂反應表面就是結構在不同變數值之下，其反應結果所形成的表面。反應表面法[24]是利用回歸分析得出問題的局部反應表面，然後再沿著斜率最大的方向找到最高點。然而反

應表面法無法處理多變數問題，因此可以用基因演算法來補其不足。例如 Khoo[25]利用反應表面法與基因演算法整合做製程最佳化，Toropov[26]則利用反應表面法與基因演算法做最佳化設計。在本計畫中，首先以回歸分析把結構的反應表面轉為回歸模型，然後在基因演算法中以回歸模型取代實際計算（如有限元素計算等），如此可以節省大量的計算時間。為了配合回歸分析模型的使用，本計畫在基因演算法中加入了局部搜尋的機制，使最佳化搜尋所需的世代數比原來減少達一半以上，效果非常顯著。此一改良式基因演算法可以廣泛應用在 FRP 複合材料結構的疊層角度最佳化上，本計畫即利用此法快速得到 FRP 複合材料螺槳的最佳疊層。

1-2 文獻回顧

在 FRP 複合材料螺槳的最佳化過程中，首先要計算出螺槳的性能。本計畫使用 MIT 所發展的 PSF2 程式[27-28]計算螺槳扭力、推力、效率等性能。PSF2 採用升面力理論（lifting-surface theory），以數值計算模擬穩定流與不穩定流中的螺槳運作。在計算中首先將螺葉轉換為翼拱面（camber surface）上的源（source）與渦旋（vortex），如此便可以模擬螺葉複雜的幾何形狀如歪斜（skew）、偏斜（rake）以及沿半徑方向的螺距（pitch）變化。與實驗量測結果相比，其計算結果與實驗相當一致[28]，可以用來模擬計算螺槳的性能。已有多篇文獻採用 PSF2 作為計算工具，如 Jiang [29] 使用 PSF2 以及有限元素計算軟體 NASTRAN 來探討螺葉表面壓力分佈與螺葉變形的交互關係。其使用非耦合的（uncoupled）流體-結構計算法，以疊代（iterative）的方式計算出變形後螺槳的性能（ K_T 、 K_Q ）。首先以 PSF2 計算出螺葉所受壓力分佈，然後以 NASTRAN 計算螺葉變形量，接著再回到 PSF2 計算變形後的螺槳性能及壓力分佈，如此循環疊代直到螺槳變形收斂為止。1996 年林俊吉[6]結合有限元素法與非空蝕的生力面理論，成為一耦合水彈性（coupled hydroelastic）螺槳性能分析理論。以幾何非線性九節點殼元素為基礎，配合 PSF2 並以穩態伯努力方程式（steady Bernoulli equation）及平均黏阻力觀念，推導流體-結構之間的耦合矩陣。本計畫將採用與 Jiang[29]相同的疊代

法，以 PSF2 及有限元素軟體 ABAQUS 計算複合螺槳的變形量及推力、扭力等運轉性能。

在最佳化搜尋方面，本計畫採用基因演算法作為搜尋工具。基因演算法[30]自 1970 年代提出後，到 1980 年代已廣為應用在各領域中，但應用在 FRP 複合材料積層最佳化則始於 1990 年代，如文獻[13]。由於基因演算法計算量非常大，所以大多數的研究都致力於減少搜尋所需的計算量。Kogiso 等[20]以基因演算法進行受挫曲壓力之積層板的最佳化，同時使用局部搜尋來加速收斂。該文利用挫曲特徵值做為局部搜尋的依據，可以大幅減少計算量，但此方法只適用於受挫曲之積層板最佳化，且只有平板等可以快速得到理論解的結構才有顯著效果。Liu 等[22]針對 FRP 複合材料積層疊序最佳化提出新的突變模式與修復模式，使搜尋效率大為提升，但此法也只適用於受面內壓力之積層板。Tabakov[23]使用新的編碼與選擇模式以提升搜尋效率，雖然有效但效果相當有限。Gantovnik 等[21]將三明治板的芯材厚度變數以 spline 曲線內差，取代有限元素計算以減少計算量，但僅適用於連續變數。由以上的回顧可知，在 FRP 複合材料結構最佳化方面仍欠缺一個適用性廣且計算量小方法，本計畫將針對此點改良基因演算法，使 FRP 複合材料積層板結構的最佳化更為快速容易。

1-3 本計畫研究方向

本計畫研究方向主要可分為以下四部分：

1. 整合流體與結構計算。
2. 基因演算法之改良。
3. FRP 複合材料螺槳之最佳化設計。
4. FRP 複合材料螺槳實驗。

在整合流體與結構計算方面，使用有限元素軟體 ABAQUS 配合螺槳性能計算程式 PSF2，以疊代法計算螺槳的 K_T 、 K_Q 等性能，以及螺槳的變形、應力分佈等。計算出螺槳的性能後，即可用基因演算法作為最佳化搜尋工具，找出 FRP 複合材料螺槳的最佳角度疊層。

以基因演算法搜尋的主要問題在於計算量龐大，尤其對複雜結構而言，做一次最佳化搜

尋所需時間可能要超過一個禮拜。針對於此，本計畫以基因演算法結合反應表面法將基因演算法加以改良，可以更快找到最佳解同時也能維持其準確性。首先以特殊的三角函數作為基底函數，進行回歸分析得出結構之反應表面，然後以回歸分析模型取代實際計算。由於回歸結果非常準確，不僅節省大量的計算時間，也維持了搜尋的準確性。其次，針對回歸不易準確的部分如最大值或最小值附近，本計畫另提出局部搜尋的方法，克服了回歸分析極端值的問題，同時也省下更多的計算。

接著以上述改良式基因演算法搜尋 FRP 複合材料螺槳之最佳疊層，發現在不改變螺槳幾何的狀況下，僅透過疊層安排並無法使複材螺槳的性能比一般金屬螺槳更好，甚至還要更差。因此，本計畫採用預變形螺槳的作法，螺槳製作時先給予反方向的預變形，使螺槳受力其變形後的幾何形狀在最佳狀態，如此可以使複材螺槳性能超越一般金屬螺槳，達到微調螺距的作用。最後進行螺槳性能實驗，實際製作 FRP 複合材料螺槳在空蝕水槽中運轉。在實驗中觀測的結果發現疊層變化與其 K_T 、 K_Q 值之間的關係，以及螺葉變形趨勢變形與理論計算的趨勢相符，可以印證理論計算的正確性。而在變形量的觀察上，實驗中量測到的變形量都比計算結果小，顯示計算趨勢雖然正確，但是準確性仍有待進一步探討。

1-4 內容架構

本文內容共有六章，分述如下：

第一章 導論

敘述問題背景及研究動機，回顧前人之研究成果，繼而說明本計劃之研究主題及方法，並對研究步驟及內文架構作一精簡說明。

第二章 理論基礎與數值分析方法

說明本計畫所應用之理論與方法，包含材料偶合效應之原理、結構與流體整合之螺槳性能計算、基因演算法原理與方法、以及回歸分析的數學模式。

第三章 FRP 複合材料結構最佳化方法之改良

首先以平板為例，建立 FRP 複合材料結構回歸分析之方法。透過特殊基底函數選擇，可以達到相當準確的回歸模型，然後以回歸模型取代實際計算，以節省計算時間。接著在基因演算法中加入局部搜尋機制，在局部搜尋中以回歸模型取代實際計算，既可加速收斂效率，又可以用最少的取樣點進行準確回歸分析。改良後的基因演算法，即使應用在回歸不易準確的極值附近搜尋，也能達到快速準確的效果。

第四章 FRP 複合材料螺槳之最佳化

將改良式基因演算法應用在 FRP 複合材料螺槳的最佳化上，搜尋最佳疊層角度。在不改變螺槳幾何外型的情況下，所搜尋到的最佳疊層只能使螺槳性能與金屬螺槳相當，在低速下則比金屬螺槳更差。因此，提出預變形螺槳的作法，在螺槳製作時先給予反方向預變形，使螺槳受力變形時到達最佳位置，如此 FRP 複合材料螺槳的性能便能超越一般金屬螺槳，達到本計畫的目的。

第五章 FRP 複合材料螺槳性能實驗

以單向預浸纖維布製作碳纖維螺槳，在水槽中運轉測量其 K_T 、 K_Q 等性能，同時以攝影的方法量測螺葉的軸向變形量。最後將實驗結果與理論計算比較，以驗證理論計算的正確性。

第六章 結論與建議

為本計畫之綜合整理與總結，並對未來研究方向提出建議。

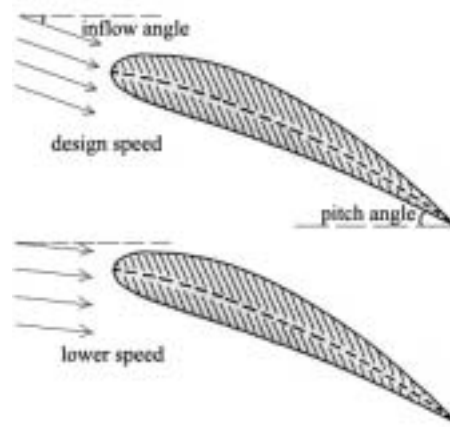


圖 1-1 不同軸向速度之入流角

第二章 理論基礎與數值分析方法

2-1 材料偶合效應

複合材料積層板由單層的纖維布堆疊而成，每一層的材料或纖維方向可由設計者自行安排，而積層板的整體剛性可以由每一層的應力應變關係矩陣推算出來。文獻[1]推導積層板的整體剛性矩陣如（2-1）（2-2）式所示。

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2-1)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2-2)$$

其中

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \\ B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \\ D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \end{aligned} \quad (2-3)$$

$\bar{Q}_{ij}$ 為各層的應力應變關係矩陣

$$\begin{aligned} \epsilon_x^0 &= \frac{\partial u_0}{\partial x}, \quad \epsilon_y^0 = \frac{\partial v_0}{\partial y}, \quad \gamma_{xy}^0 = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \\ \kappa_x &= -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}, \quad \kappa_y = -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}, \quad \kappa_{xy} = -2 \cdot \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{aligned} \quad (2-4)$$

u_0 、 v_0 、 w_0 為中央面之變形量

N_x 、 N_y 、 N_{xy} 為單位長度之面內力，如圖 2-1 所示。 M_x 、 M_y 、 M_{xy} 為單位長度之力矩，如圖 2-2 所示， z 與 k 如圖 2-3 所定義。 A 矩陣所代表的是面內力與面內變形之關係， B 矩陣代表的是面內力與積層板曲率變化間的關係或彎矩與積層板面內應變間的關係， D 矩陣則為

彎矩與積層板曲率間的關係。

當所有疊層對中央面對稱時，B 矩陣全部為零，因此沒有面內變形與曲率變化的偶合效應。當積層板中每個角度 θ 的疊層都有一個對應的 $-\theta$ 疊層，稱為平衡疊層，例如[30/-30/-30/30]。此種疊層的積層板 D_{16} 與 D_{26} 為零，也就是沒有彎曲與扭轉的偶合效應。相反的，當疊層為不平衡疊層時，積層板就具有扭轉與彎曲的偶合效應。本計畫就是利用此一性質，當螺槳承受彎矩時同時產生彎曲與扭轉變形，使螺槳的螺距改變，也改變了螺槳的運轉性能。最佳化的目的就是在選擇適當的疊層角度，控制螺槳的螺距變化，使複合材料螺槳的性能比一般金屬螺槳更佳。

2-2 螺槳幾何

2-2-1 螺葉座標

螺槳主要幾何參數有螺槳半徑、螺距 (pitch)、歪斜角 (skew)、偏斜 (rake)、弦長 (chord length)、翼拱 (camber) 及螺葉厚度等，給定這些參數就可以決定螺槳上所有點的位置[31]。螺距為螺槳旋轉一圈所前進的距離，如圖 2-4 所示，螺葉與轉動方向間有一個螺距角 (pitch angle)，當螺葉轉動 $2\pi r$ 的距離時，沿著螺葉方向前進的距離就是螺距。歪斜角為螺葉中央參考線所歪斜的角度，如圖 2-5 所定義。偏斜是螺葉在軸向偏斜的量，如圖 2-6 所定義。弦長是螺葉由前緣 (leading edge, L.E.) 到後緣 (trailing edge, T.E.) 的長度，如圖 2-7 所示。翼拱與螺葉厚度如圖 2-8 所示，在 NACA 的定義中，螺葉厚度是指與弧線 (camber line) 垂直方向的厚度，如圖 2-9 所示。

首先由半徑、螺距、歪斜角及偏斜決定螺葉中央參考線 (reference line) 上的點[31]：

$$X_{c/2} = -[i_G + r\theta_s \tan \theta_{nt}]$$

$$Y_{c/2} = -r \sin(\phi - \theta_s) \quad (2-5)$$

$$Z_{c/2} = r \cos(\phi - \theta_s)$$

其中

r = 半徑, i_G = 偏斜, θ_s = 歪斜角, θ_{nt} = 螺距角, 如圖 2-10 所示。

ϕ = 螺葉所在位置角度, 如圖 2-7 所示。

接著由弦長決定螺葉外緣的位置, 前緣 (leading edge) 與後緣 (trailing edge) 的座標:

前緣

$$\begin{aligned} X_{LE} &= -[i_G + r\theta_s \tan \theta_{nt}] + \frac{c}{2} \sin \theta_{nt} \\ Y_{LE} &= -r \sin \left[\phi - \theta_s + \frac{90c \cos \theta_{nt}}{\pi r} \right] \\ Z_{LE} &= r \cos \left[\phi - \theta_s + \frac{90c \cos \theta_{nt}}{\pi r} \right] \end{aligned} \quad (2-6)$$

後緣

$$\begin{aligned} X_{TE} &= -[i_G + r\theta_s \tan \theta_{nt}] - \frac{c}{2} \sin \theta_{nt} \\ Y_{TE} &= -r \sin \left[\phi - \theta_s - \frac{90c \cos \theta_{nt}}{\pi r} \right] \\ Z_{TE} &= r \cos \left[\phi - \theta_s - \frac{90c \cos \theta_{nt}}{\pi r} \right] \end{aligned} \quad (2-7)$$

其中

c = 弦長

決定前緣與後緣間的點需要考量翼拱及厚度, 本計畫使用的殼元素節點都在翼拱面 (camber surface) 上, 所以只要計算翼拱面的座標位置即可。翼拱面上的點座標可表示為:

$$\begin{aligned} X_p &= -[i_G + r\theta_s \tan \theta_{nt}] + \left(\frac{c}{2} - x_c\right) \sin \theta_{nt} + y_c \cos \theta_{nt} \\ Y_p &= r \sin \left[\theta_s - \frac{180[(0.5c - x_c) \cos \theta_{nt} - y_c \sin \theta_{nt}]}{\pi r} \right] \\ Z_p &= r \cos \left[\theta_s - \frac{180[(0.5c - x_c) \cos \theta_{nt} - y_c \sin \theta_{nt}]}{\pi r} \right] \end{aligned} \quad (2-8)$$

其中

x_c = 該點與前緣之距離

y_c = 該點的翼拱高度 (如圖 2-11 所示)

2-2-2 由變形量反算螺槳幾何參數

螺槳受力後產生變形，欲計算變形後的螺槳性能，必須先找出新的螺槳幾何參數。設有限元素計算出螺葉前緣與後緣節點的新座標為 $(X'_{LE}, Y'_{LE}, Z'_{LE})$ 、 $(X'_{TE}, Y'_{TE}, Z'_{TE})$ ，則變形後螺葉中央參考線座標為

$$\begin{aligned} X'_{c/2} &= (X'_{LE} + X'_{TE}) / 2 \\ Y'_{c/2} &= (Y'_{LE} + Y'_{TE}) / 2 \\ Z'_{c/2} &= (Z'_{LE} + Z'_{TE}) / 2 \end{aligned} \quad (2-9)$$

變形後半徑為

$$r' = \sqrt{Y'^2_{c/2} + Z'^2_{c/2}} \quad (2-10)$$

將(2-9)式與(2-10)式代入(2-5)式，求出變形後的歪斜角 θ'_s

$$\theta'_s = \phi + \sin^{-1} \left(\frac{Y'_{c/2}}{r'} \right) \quad (2-11)$$

再代入(2-6)式，求出螺距角 θ'_{nt}

$$\theta'_{nt} = \cos^{-1} \left\{ \frac{\pi r'}{90c} \left[\sin^{-1} \left(\frac{Y'_{c/2}}{r'} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{Y'_{LE}}{r'} \right) \right] \right\} \quad (2-12)$$

由於螺葉變形量很小，在上式中假設螺葉變形後弦長 c 不變。將 θ'_s 及 θ'_{nt} 再代入(2-5)式
求出偏斜 i'_G

$$i'_G = -X'_{c/2} - r\theta'_s \tan \theta'_{nt} \quad (2-13)$$

最後把所有變形後的節點座標代入(2-8)式求出變形後的翼拱 y'_c

$$y'_c = \frac{[i'_G + r'\theta'_s \tan \theta'_{nt}] - \left(\frac{c}{2} - x_c\right) \sin \theta'_{nt} + X'_p}{\cos \theta'_{nt}} \quad (2-14)$$

2-3 螺槳性能計算

本計畫使用有限元素軟體 ABAQUS 配合螺槳性能計算程式 PSF2，以疊代法計算螺槳的變形量、應力分佈以及 K_T 、 K_Q 等性能。首先以 PSF2 計算出螺葉上的壓力分佈，然後把壓力分佈輸入到 ABAQUS 中，計算出螺葉的變形。螺葉變形後，其壓力分佈也隨之改變，於是再把新的螺槳幾何輸入到 PSF2，求出新的壓力分佈，然後再輸入 ABAQUS 求出變形。如此反覆的疊代如圖 2-12 所示，直到最後得到平衡的壓力分佈與變形量，計算即可終止。本計劃採用的收斂標準為兩次疊代結果 K_Q 相差低於 2%，然後以最後兩個疊代結果平均作為最終解，若收斂標準提升至 1%，則計算量約提升兩倍。由於最佳化的計算量龐大，為節省計算量必須犧牲計算的準確性，而降低收斂標準。在基因演算法最佳化搜尋中，只要能夠判斷兩個個體間的優劣即可，準確性不需要太高，而相差 2% 已足以作為判斷依據，因此採用為 2% 為收斂標準。

本計畫主要先以高歪斜 (high skew) 螺槳 DTNSRDC 4498 [32] 為計算對象，其螺槳幾何參數列於表 2-1。螺槳之有限元素模型如圖 2-13 所示，由八節點殼元素組成，共有 225 個元素，所有節點都在翼拱面 (camber surface) 上。螺槳材料為 Toho HTA1200 碳纖維/ACD8801 環氧樹脂，材料係數如表 2-2 所示，為材料實驗結果。疊層纖維方向有 -45、0、45、90 等四種選擇，其方向定義如圖 2-13 所示。疊層對中央面為對稱，由於螺葉上每個元素的厚度不同，其疊層數也不同，如圖 2-14 所示。螺葉根部較厚，越往末端疊層數越少，而隨著翼斷面形狀變化，螺葉前緣 (leading edge) 與後緣 (trailing edge) 也較薄。根部中央為最厚，共有 90 層，為減少設計變數，每兩層限制為相同疊層角度，共 12 個變數。後 8 個變數為靠近中央面的 16 個疊層角度，超過 16 層以上則其後之疊層以四個變數循環。例如疊層變數值為 [12/11/10/9/8/7/6/5/4/3/2/1] 的螺槳，其中厚度為 60 層的元素之實際疊層為 [11₂/10₂/9₂/12₂/11₂/10₂/9₂/8₂/7₂/6₂/5₂/4₂/3₂/2₂/1₂]。so。

(2-5) 式列出本計畫使用的螺槳性能參數定義，其中 n 固定為 1708 (rpm)，當

$J=0.889$ 時 $V_a = 7.716$ (m/s)，當 $J = 0.6$ 時， $V_a = 5.208$ (m/s)。螺槳的設計 J 值為 0.889，

此時 $K_Q = 0.05204$ 。J 值所代表的是軸向速度與轉動方向速度的比值，在固定轉速下，J 就代表軸向速度的變化。當螺槳在設計速度下運轉時，流體的入流角接近螺槳的螺距角，如圖 1-1 所示。當軸向速度變小時，入流角會變小，螺葉所受的壓力也隨之增加。

前進 係數	$J = \frac{V_a}{nD}$	(2-15)
扭力 係數	$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$	
推力 係數	$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$	
效率	$\eta = \frac{TV_a}{2\pi nQ} = \frac{K_T}{K_Q} \cdot \frac{J}{2\pi}$	

其中

$D =$ 直徑 $V_a =$ 軸向速度

$n =$ 轉速 $\rho =$ 流體密度

$T =$ 推力 $Q =$ 扭力

螺槳性能計算的結果如圖 2-15 所示，螺槳原始設計性能是不考慮螺槳變形的計算結果，與文獻[28]的計算結果相同。鑄銅 (bronze) 螺槳的變形量小，所以曲線與原始設計曲線非常接近，但因為螺槳為高歪斜，流體壓力使螺距變小，所以曲線稍低於原始設計曲線。另外兩條曲線為全部 45 度疊層與全部-45 度疊層的複合材料螺槳之性能曲線。全部 45 度疊層的螺槳螺距大幅減少，所以曲線也跟著下移；而全部-45 度疊層的螺槳螺距變大，螺槳所受的流體壓力也跟著變大，增加的壓力又使螺距變得更大，惡性循環之

下最終曲線遠高於原始設計曲線。由這兩條曲線可以看出疊層角度的影響很大，若沒有妥善安排疊層角度，螺槳性能可能與原始設計有很大的差別，無法達到原始設計的要求而與船舶主機不能搭配。除了達到原始設計的需求，更進一步我們希望能找出特別的疊層，使複合材料螺槳的性能更優於一般金屬螺槳。

2-4 基因演算法

基因演算法是模仿大自然「物競天擇，適者生存」的法則，所建立的演算法。其主要架構最早在 1975 年由 Holland 提出[33]，其後又有許多相關研究印證或改良其功能，目前已廣泛應用在各領域中。基因演算法的流程如圖 2-16 所示，首先將所有設計參數轉換為一長串的基因碼，例如把纖維角度-45、0、45、90 轉為 1、2、3、4 或二進位的 00、01、10、11。然後隨機給定基因碼產生初始族群，族群大小由設計者指定，從數個個體到一兩千個個體依問題需要而定。接著算出所有個體的目標函數值，根據目標函數值來選取較優良的個體。選出的個體再互相交換基因產生下一代個體，如同生物的交配行為。在決定下一代個體基因時，有一定比例的基因發生突變，使新的基因可以不斷加入。突變發生率由設計者自訂，訂得高搜尋範圍廣，但可能要多做很多不必要的計算；訂得低則要擔心收斂在局部最佳點的問題。下一代個體的基因都決定後，再計算其目標函數值，然後回到選擇的步驟，再選出優秀個體以產生下一代。如此循環直到達到收斂標準為止，停止搜尋的標準可以是達到某個目標函數值，或搜尋超過指定的世代數，或者超過多少代以上沒有更好的個體出現，設計者依問題需要決定其收斂標準。

基因演算法是一種簡單但功能強大的最佳化工具，文獻[30]列出其與一般最佳化工具的差異在於：

1. 基因演算法對基因碼做搜尋而非對變數本身搜尋。因此不論變數多寡，變數本身的性質如何，都可以在轉換基因碼時同時考慮。例如變數值有上下限，可以在編碼時把範圍限定在上下限之間。離散性的變數如排序問題，也可以轉換成基因碼來進行最佳化搜尋。
2. 基因演算法由整個族群的個體搜尋，而非由單一點搜尋。因此基因演算法比較不容易

收斂在局部的最佳點，而且可以同時找到多於一個的最佳點。

3. 基因演算法直接利用目標函數值來搜尋，而不使用微分或其他更複雜的方法。很多複雜問題難以用微分等數學方法來做最佳化，基因演算法則不需要這些數學方法。甚至不需要太多關於問題本身的資訊，只要能得到目標函數值就可以進行最佳化。
4. 基因演算法使用隨機法則 (probabilistic transition rules)，而非決定法則 (deterministic rules)。其利用隨機選擇作為工具，引導搜尋趨向最佳化。

由於以上異於一般最佳化方法的特質，基因演算法特別適合於以下最佳化問題：

1. 多變數、不連續變數或離散變數問題。
2. 最佳點不只一個，或欲搜尋全面的 (global) 最佳點。
3. 問題無法以微分方法最佳化，或者甚至無法以數學式表示的問題。

複合材料積層最佳化問題，早期多把角度及疊層當作連續變數進行最佳化[7]，然而在實際應用上，疊層厚度多為固定，而角度則只有少數的選擇，如 0、90、45、-45 度等。而每一層就是一個變數，通常會有超過 10 個以上的變數。疊層順序的問題，則是離散的變數問題，無法以數學方法進行最佳化。因此，基因演算法非常適合用於複合材料積層結構的疊層角度、順序最佳化。

雖然基因演算法適合複合材料的最佳化問題，但目前最大的問題在於計算量大。因為每一代的所有個體都要計算其目標函數值，做一次最佳化搜尋可能需要執行數千次的有限元素分析，對複雜結構來說計算量非常大。因此，本計畫提出一個簡化的方法，可以大幅提昇搜尋效率且減少計算量，而又能夠兼顧搜尋的正確性。

2-5 回歸分析

在說明回歸分析之前，在此首先定義反應表面 (response surface)，當給定所有變數值後，可以得到一個反應結果，這個結果就是反應表面上的一個點。而所有變數值與其反應結果所形成的表面，就是反應表面。在結構的設計上，通常要經過有限元素分析等計算才能得到反

應表面上的一個點。若要得到整個表面的資訊則要經過大量的計算，才能窺得表面的全貌。回歸分析則是改以一個方程式來表示反應表面，使這個回歸模型的反應表面與原來的反應表面非常接近，如此可以避開大量的計算。進行回歸分析時，首先給定取樣點，然後利用最小平方差法（least square error）求取回歸方程式。取樣點與回歸曲面上的點之距離為誤差值，最小平方差法就是找出一組最適當的係數使誤差值的平方和為最小值。文獻[24]以線性回歸為例，推導回歸分析模型，首先將輸入變數與輸出關係假設如(2-16)式，

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2-16)$$

其中

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}$$

y_i 是結構反應，如結構變形量等。 x_{ij} 是變數值，在本計畫中為疊層角度。 ε_i 為誤差值， β_i 則是我們要求的係數。接著使用最小平方差法來決定回歸係數，平方差之和定義如(2-17)式

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - 2\boldsymbol{\beta}^T \mathbf{X}^T \mathbf{y} + \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{X}^T \mathbf{X} \boldsymbol{\beta} \quad (2-17)$$

我們要找一組係數當 $\boldsymbol{\beta} = \mathbf{b}$ 時使平方差為最小，此係數必須滿足(2-18)式， L 對 β_i 微分之後值為零

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{\beta}} \right|_{\mathbf{b}} = -2\mathbf{X}^T \mathbf{y} + 2\mathbf{X}^T \mathbf{X} \mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (2-18)$$

因此可得最小平方差的係數為(2-19)

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (2-19)$$

最終回歸模型可表示為(2-20)

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X}\mathbf{b} \quad (2-20)$$

一般線性回歸多使用多項式作為回歸分析的基底函數，若模型較為複雜，可以使用次數較高的多項式來模擬，或以其他函數來模擬。本計畫考慮纖維方向的角度週期性特性，嘗試以三角函數來模擬，與一般多項式的結果比較，準確度提高許多。

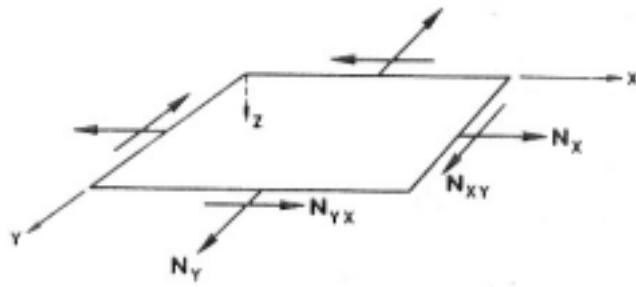


圖 2-1 積層板所受面內力之圖示

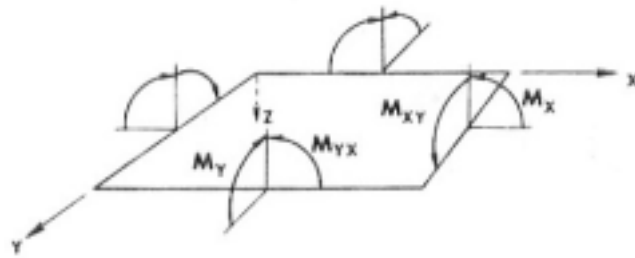


圖 2-2 積層板所受彎矩之圖示

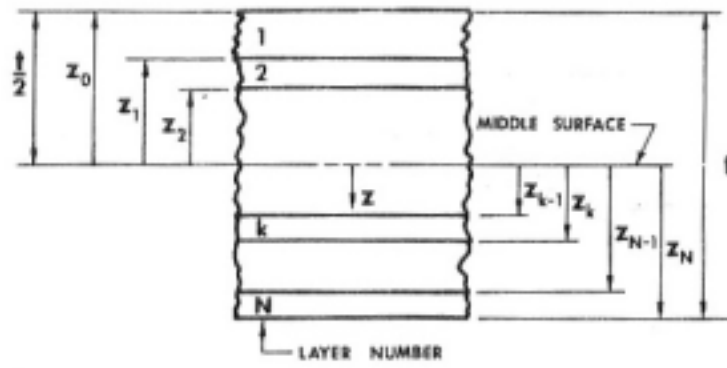


圖 2-3 積層板疊層圖

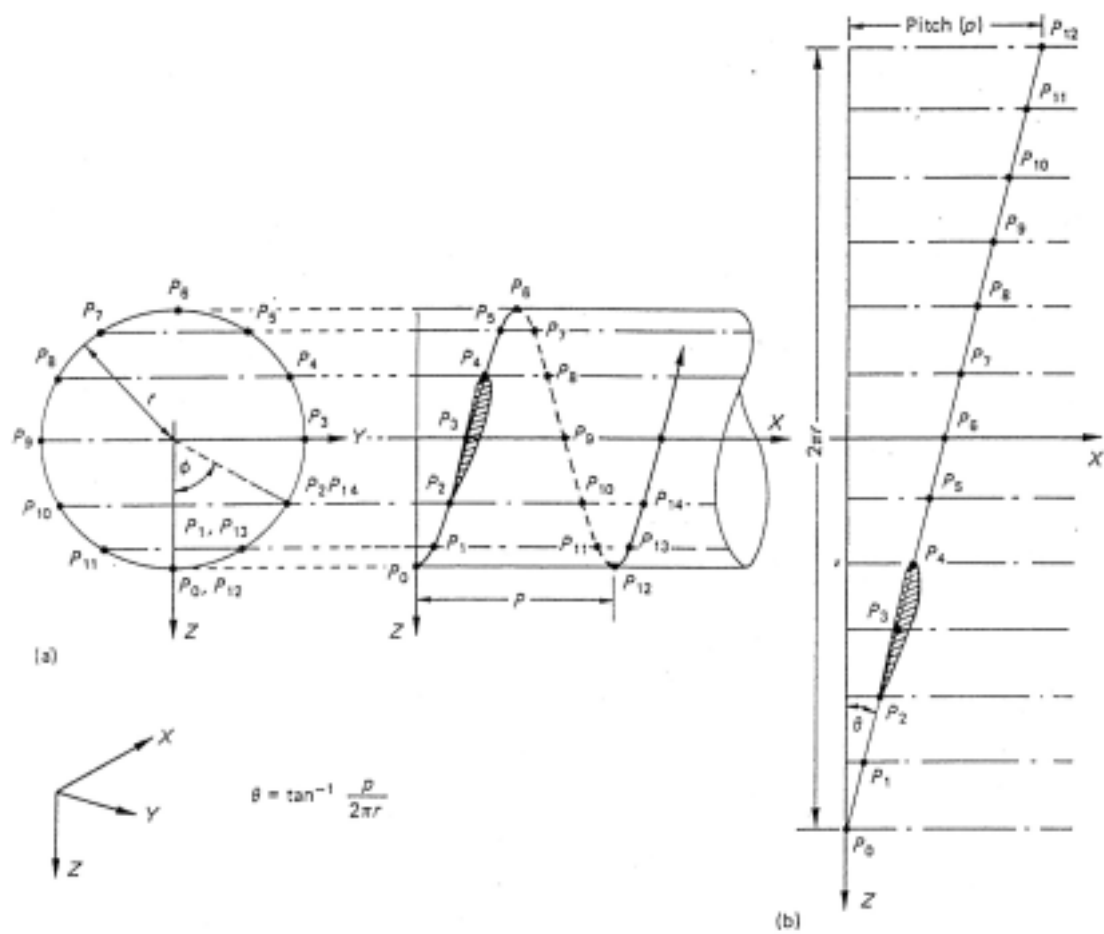


圖 2-4 螺距之定義[31]

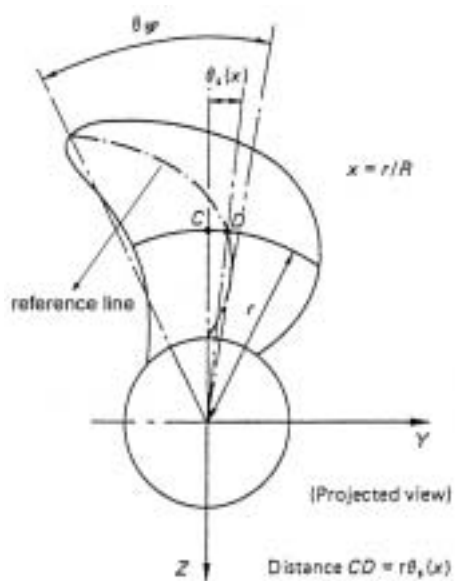


圖 2-5 螺葉中央參考線及歪斜角示意圖[31]

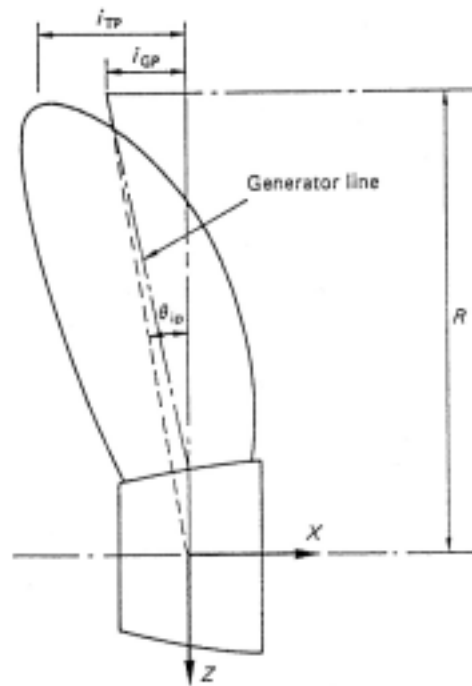


圖 2-6 螺葉偏斜之定義[31]

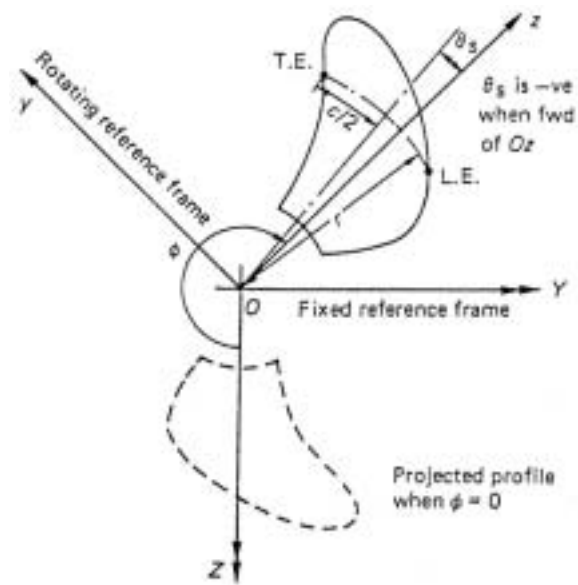


圖 2-7 螺葉弦長之定義[31]

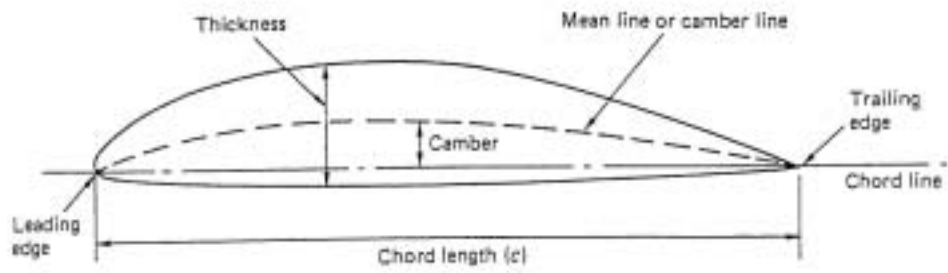


圖 2-8 螺葉橫剖面圖[31]

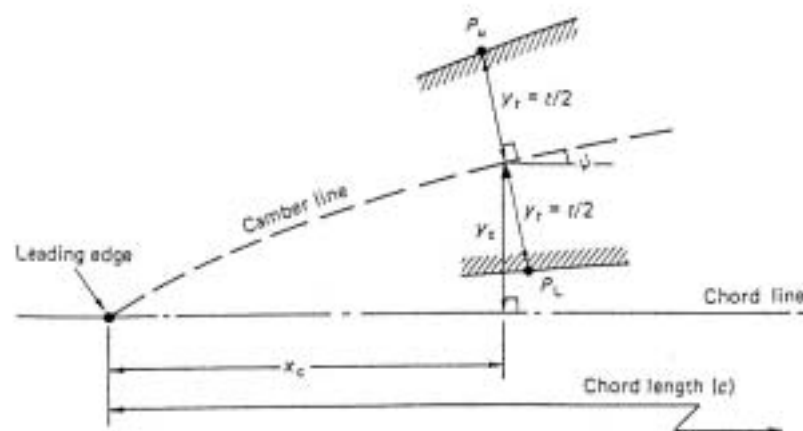


圖 2-9 螺葉厚度定義[31]

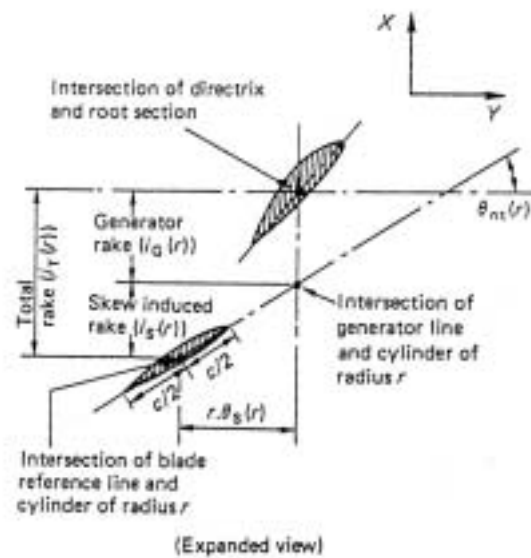


圖 2-10 螺葉座標決定示意圖[31]

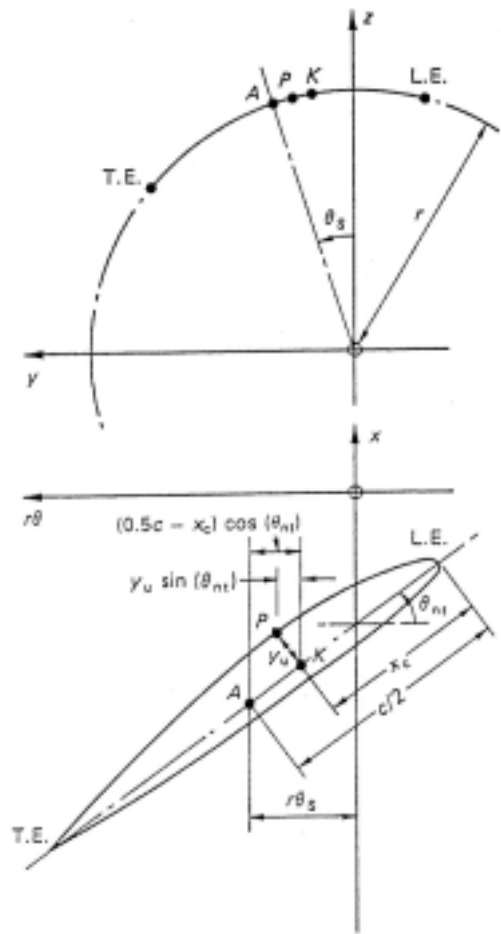


圖 2-11 螺葉上座標點示意圖[31]

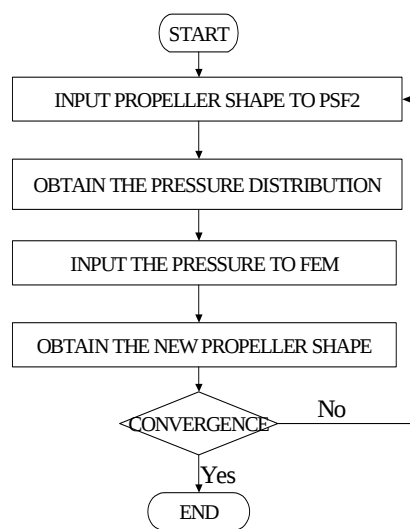


圖 2-12 螺槳性能計算疊代流程

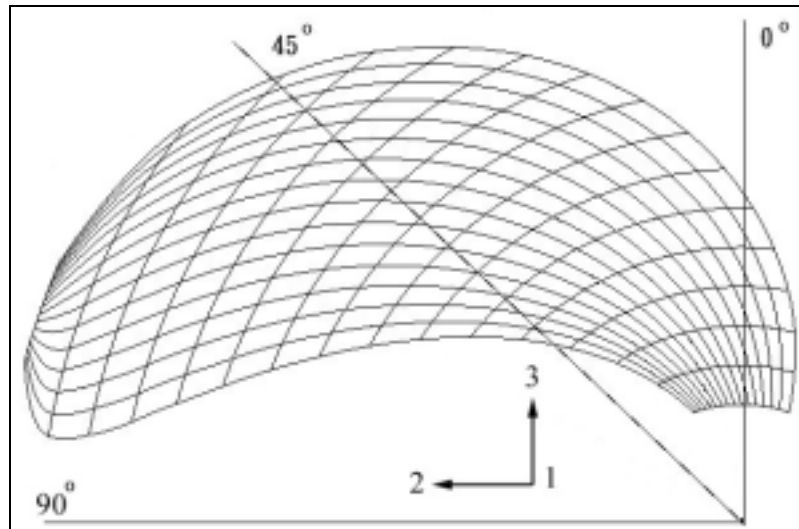


圖 2-13 螺槳之有限元素模型

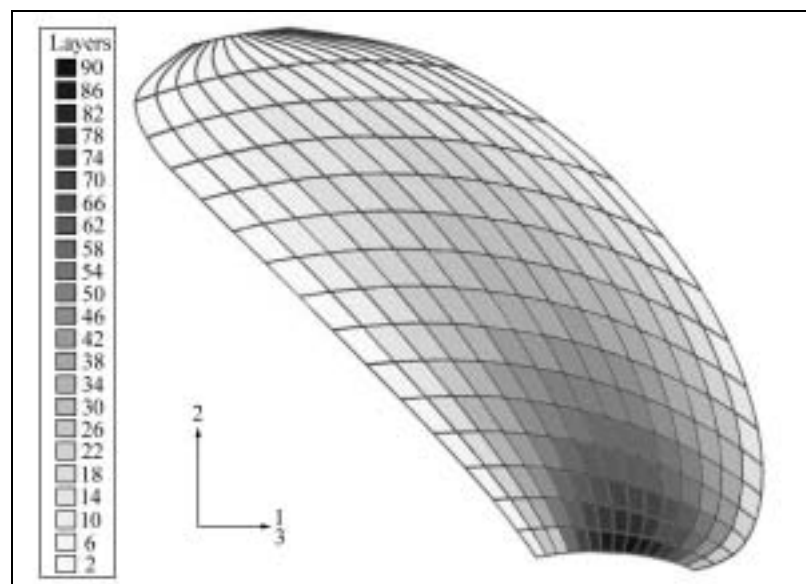


圖 2-14 各元素疊層數分佈

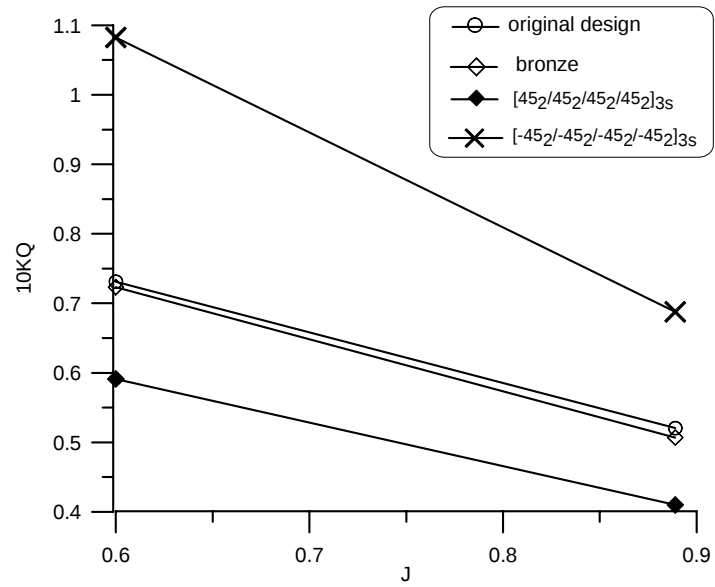


圖 2-15 螺槳性能計算結果

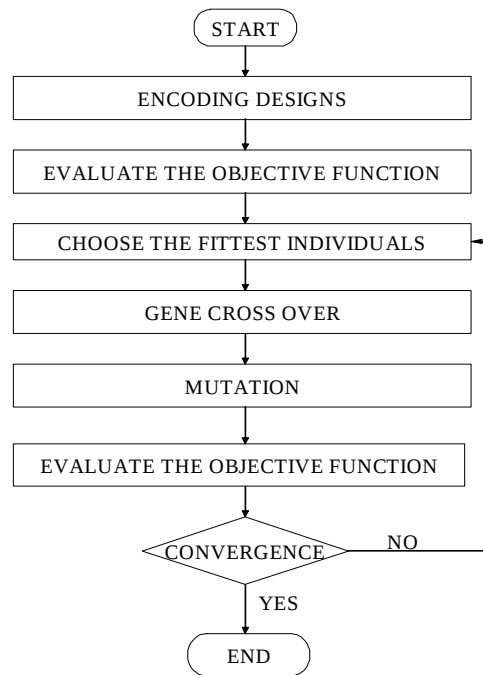


圖 2-16 基因演算法流程圖

表 2-1 DTNSRDC 4498 螺槳之幾何 [32]

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

	Pitch	Rake	Skew	C h o r d	Camber	Thickn ess
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	0.996	0.	63.102	0.280	0.0159	0.0067
0.95	0.945	0.	67.531	0.210	0.0168	0.0048
1.0	0.895	0.	72.000	0.000	0.0000	0.0029

表 2-2 碳纖維 (graphite-epoxy)疊層之材料特性

Young's modulus (longitudinal)	$E_1 = 1.12 \times 10^{11} \text{ Pa}$
Young's modulus (transverse)	$E_2 = 1.05 \times 10^{10} \text{ Pa}$
Shear modulus	$G_{12} = 8.4 \times 10^9 \text{ Pa}$
Poisson's ratio	0.32
Ply thickness	$t = 1.55 \times 10^{-4} \text{ m}$

第三章 複合材料結構最佳化方法之改良

3-1 反應表面之回歸分析

為減少最佳化搜尋的計算量，必須尋求取代有限元素分析等計算的方法。回歸分析是一個可行的方法，若能得到準確的回歸模型，就可以取代實際計算，大幅減少最佳化所需的計算時間。考慮纖維方向的角度週期性特性，且結構剛性與其三角函數值有關，本計畫嘗試以三角函數來作回歸分析的基底函數，並與一般多項式的結果做比較。以下為本計畫所使用的五組基底函數：

第一組：二次多項式

$$y = C_0 + \sum_{i=1}^{12} \left(C_i x_i + \sum_{j=1}^{12} D_{ij} x_i x_j \right) \quad (3-1)$$

第二組：三次多項式

$$y = C_0 + \sum_{i=1}^{12} \left(C_i x_i + \sum_{j=i}^{12} \left(D_{ij} x_i x_j + \sum_{k=j}^{12} E_{ijk} x_i x_j x_k \right) \right) \quad (3-2)$$

第三組：兩種頻率的三角函數

$$y = C_0 + \sum_{i=1}^{12} (C_i \sin x_i + D_i \sin 2x_i + E_i \cos 2x_i) \quad (3-3)$$

第四組：兩種頻率三角函數，加上變數間偶合效應

$$y = C_0 + \sum_{i=1}^{12} \left(C_i \sin x_i + D_i \sin 2x_i + E_i \cos 2x_i + \sum_{j=i}^{12} (F_{ij} \sin x_i \sin x_j + G_{ij} \cos x_i \cos x_j) \right) \quad (3-4)$$

第五組：兩種頻率三角函數，加上兩種頻率函數的變數間偶合效應

$$y = C_0 + \sum_{i=1}^{12} (C_i \sin x_i + D_i \sin 2x_i + E_i \cos 2x_i) + \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=i}^{12} (F_{ij} \sin x_i \sin x_j + G_{ij} \cos x_i \cos x_j + H_{ij} \sin 2x_i \sin 2x_j + I_{ij} \cos 2x_i \cos 2x_j) \quad (3-5)$$

其中

$y =$ 結構反應

$x_i =$ 變數值 ($i = 1$ to 12)

第一組基底函數選用回歸分析最常使用的二次多項式，12 個變數共有 91 項。第二組是三次多項式，共 388 項。第三組函數是兩個不同頻率的三角函數的組合，共 49 項。第四組是第三組再加上不同疊層間偶合項，共 181 項。第五組是第四組再加上不同頻率的偶合項，共 313 項。值得一提的是， $\sin x$ 與 $\cos x$ 項同時納入函數中可以除去相位差的問題，如(3-6)式所示，相位差可隱含在未知的係數裡。但在第三、四、五組函數中， $\cos x_i$ 項並沒有包含在裡面，因為 $\cos x$ 已經包含在 $\sin x$ 及 $\sin 2x$ 項裡面，如(3-7)式所示，所以不需要再使用 $\cos x$ 項。若在基底函數中使用 $\cos x$ 項，其係數會等於零，所以預先剔除以減少計算量。

$$\sin(x+\phi) = \cos\phi \sin x + \sin\phi \cos x = C_1 \sin x + C_2 \cos x \quad (3-6)$$

$$\text{代入 } \cos x = \frac{\sin 2x}{2 \sin x}$$

$$C_1 \sin x + C_2 \cos x + C_3 \sin 2x = C_1 \sin x + \left(\frac{C_2}{2 \sin x} + C_3 \right) \sin 2x = C_1 \sin x + C'_3 \sin 2x \quad (3-7)$$

3-1-1 三明治板之回歸分析

首先以結構簡單的三明治板為例，建立回歸分析方法。由於結構簡單，可以快速計算出大量的取樣點與測試點，待回歸方法建立後再應用到螺槳上。本計畫使用的三明治板有限元素模型如圖 3-1 所示，由 18 個元素組成，長 50cm，寬 10cm。芯材厚度為 10cm，楊式彈性

係數為 1.5×10^8 Pa。上下面材疊層為對稱，各 12 層 Kevlar/Epoxy，材料係數列於表 3-1。纖維方向有四個選擇，(1)-45 度 (2)0 度 (3)45 度以及(4)90 度。板的左端是固定邊界，右端為自由邊界，受 3 方向外力而產生變形。接下來我們將探討自由端變形(y)與疊層角度間的關係。

圖 3-2 所繪的是三明治板的變形與角度關係，面材內部 11 層角度固定，只變化最外面一個疊層。五條曲線分別是以以下五種疊層：1. $[\theta/-45/-45/90/0/0/0/0/0/-45/45/45]$ 、2. $[\theta/0/-45/-45/45/-45/-45/90/0/0/45/90]$ 、3. $[\theta/45/-45/45/-45/90/45/-45/0/-45/45/0]$ 、4. $[\theta/90/0/-45/90/45/-45/90/90/-45/-45/90]$ 以及 5. $[\theta/45/45/45/-45/45/90/-45/-45/-45/-45/90]$ 的結果，這五條曲線顯示最外層疊層角度的變化對結構變形量的影響有相似的趨勢。由於曲線平滑而且具有相似的趨勢，若以回歸分析來模擬這個曲線應該會有不錯的結果。

進行回歸分析時，先以有限元素法計算三明治板自由端的變形量，在此隨機計算 1000 種疊層作為取樣點，用以建立回歸模型。另外隨機計算 3000 種疊層做為測試點，用以測試回歸模型的推廣能力。回歸分析使用的取樣點與測試點分布如圖 3-3 所示，上圖是取樣點分布，下圖是測試點分布圖。縱軸為 y 值，橫軸為所有取樣點（或測試點）的排序。由於疊層為隨機選取的，其 y 值也應該是隨機跳動的，但為觀察方便在此把所有的點依照 y 值大小排列，所以上圖最左側第一個點就是取樣點中最小的點，排序第 1000 的點在最右端，是 y 值最大的點。大部分的點都在 $y=0.5\text{cm}$ 到 0.8cm 之間，超過 0.9 的點較少，所以顯得稀疏。回歸分析的結果如圖 3-4 3-8 所示，推估點跟相對的取樣點（或測試點）在同一個橫軸位置上。例如排序第 500 的取樣點在 $x=500$ 的位置上，透過回歸分析得到的推估點也會在 $x=500$ 的位置上，只是 y 值可能與取樣點的 y 值不同，兩者 y 值的差就是誤差值。所以在圖 3-4 3-8 中，推估點越接近取樣點跟測試點，表示其回歸的效果越好。在所有的回歸分析中，第一組函數的結果最差，因為二次多項式無法有效模擬反應曲線。第二組函數的結果比較好，三次多項式比較適合於本問題。第三組函數的結果雖然也接近實際點，但缺乏變數間的偶合項使函數變得斷斷續續。第四組與第五組函數的模擬結果比較好，但在 y 值最大跟最小的兩端模擬結果比較差。這是因為使用最小平方差來決定回歸模型，最終模型傾向使大部分預估準確，而犧牲

少數偏離較大的點，本問題中極大值與極小值附近的點比較少，因此在回歸分析中較不容易準確。

五組函數的誤差比較顯示在圖 3-9 與圖 3-10，圖 3-9 是模擬取樣點的誤差分佈，圖 3-10 則是模擬測試點的誤差分佈。由於回歸模型是針對取樣點而建立的，所以對取樣點的預估結果會比較準確。測試點則是用來測試回歸模型的推廣能力，若測試點的預估準確表示對其他點的預估也會有差不多的準確度。由圖中可以看出第一組函數在取樣點與測試點的模擬都很不好，誤差大於 7% 的點都超過五成，顯示二次函數不足以建立本問題的回歸模型。第二組函數在取樣點的表現較好，但在測試點的結果卻很差，誤差超過 7% 的也有四成多，顯示其對於取樣點外的其他點通用性很差。第三組函數的推估結果又更好一些，但如前所述，其連續性較差。模擬結果最好的是第五組函數，在取樣點中誤差小於 1% 將近有三成，誤差超過 7% 的也不到百分之五。在測試點的結果稍差，但誤差小於 1% 也有將近兩成，誤差超過 7% 的只有一成多，顯示此種基底函數的模擬結果推廣能力最好。整體看來，使用三角函數的三組函數表現都優於使用多項式的基底函數，顯示三角函數確實較適合作為積層板結構的回歸分析。

3-1-2 變數值的選擇

在一般的回歸分析中，變數值是固定的，沒有調整的空間。但對積層板的變數-疊層角度來說，其數值卻是可以選擇的。例如纖維方向-45 度其實也等於 135 度，也可以是 315 度。這些纖維方向對積層板來說會造成相同的結果，但是對回歸分析來說，變數值不同會造成點的位置改變，會使整個曲線形狀完全改變。因此，我們可以藉由改變變數值來使曲線更平滑，模擬的結果會更好，這是積層板在回歸分析時特有的好處。各種角度間的變換整理如下：

$$-45^{\circ} \Leftrightarrow 135^{\circ} \Leftrightarrow -225^{\circ}$$

$$0^{\circ} \Leftrightarrow 180^{\circ} \Leftrightarrow -180^{\circ} \quad (3-8)$$

$$45^{\circ} \Leftrightarrow 225^{\circ} \Leftrightarrow -135^{\circ}$$

$$90^{\circ} \Leftrightarrow -90^{\circ} \Leftrightarrow 270^{\circ}$$

若將第一種角度-45 度改為-225 度，第二種 0 度仍為 0 度，第三種 45 度改為 225 度，第四種 90 度改為 270 度，則疊層角度與變形量的關係由圖 3-2 變成如圖 3-11，是一個更平滑的曲線。回歸結果的誤差統計如圖 3-12、3-13 所示，與圖 3-9、3-10 相比，準確度比之前大幅提昇。在取樣點的模擬上，五組函數的模擬結果都有進步，其中第五組函數的表現仍然是最好的。其預估誤差低於 2%的有七成左右，誤差高於 7%的也只有 1.1%。在測試點方面，表現最好的第五組函數誤差低於 2%的超過五成，誤差高於 7%的也只有 3.3%。第五組函數預估點分布顯示在圖 3-14，都非常接近實際值。這一組變數值使模擬的準確度明顯提升，由此可見變數值選擇的重要性。另外，值得一提的是第二組函數在取樣點的準確度還不錯，但是在測試點的結果卻很差，顯示此種基底函數的推廣能力較差，不適合於本問題的模擬。

圖 3-15、圖 3-16 所示為取樣點數目對回歸結果的影響，由圖 3-15 可看出取樣點越少越容易模擬，但從測試點來看推廣能力會比較差。在測試點的模擬結果，取樣點超過 1500 點之後，誤差低於 1%的比例不再增加，而誤差高於 7%的比例也沒有減少，回歸分析的準確度不再提升，因此最適當的取樣點應為 1500 點。

3-1-3 複合材料螺槳之回歸分析

複合材料螺槳最外層疊層角度與 K_Q 間的關係如圖 3-17 所示，圖中三種疊層為 1. $[\theta/-45/45/-45/0/90/90/-45/45/90/-45/-45/-45/\theta]_s$ ， 2. $[\theta/0/90/45/0/45/0/90/-45/90/90/90]_s$ ， 3. $[\theta/0/0/45/45/45/-45/0/45/90/0/0/\theta]_s$ 。由圖上可以看出曲線相當平滑，不需要再調整變數值即可模擬得很好。由於螺槳的疊層角度對 K_Q 的影響並不直接，所以 K_Q 的變化不是很劇烈且相當一致，因此曲線平滑很適合作回歸分析。對複合材料螺槳性能做回歸分析的另外一個好處是，消除計算上的收斂誤差。本計畫中螺槳性能計算，是透過流力與結構分析循環疊代所得到的，每一個計算最後都會有些微的收斂誤差。而回歸分析使用最小平方差來求得回歸模型，其中的誤差也包含了收斂誤差，因此可以使回歸點更接近正確的曲面，回歸結果甚至可能比原來計算結果更準確。回歸分析的結果如圖 3-18、圖 3-19 所示，取樣點的回歸結果非常好，第二、

四、五組函數的誤差低於 1%的都有七成以上，誤差大於 5%以上的點非常少。但在測試點的結果只有第三、四、五組函數表現較好，誤差低於 1%的測試點超過五成。第二組函數在測試點的表現遠不如在取樣點，顯示其推廣能力不足，不適合本問題之模擬。第四組與第五組函數的模擬結果都很好，但第五組的結果並沒有明顯優於第四組，在計算成本的考慮下，選取第四組函數作為回歸分析的基底函數可減少計算量。圖 3-20 為第四組函數回歸模型預估取樣點與測試點的結果，預估點大都很接近真實值，只有極大值與極小值附近比較差一些。

圖 3-21、圖 3-22 所示為取樣點數目對回歸結果的影響，取樣點越少越容易模擬，但推廣能力會比較差。從測試點來看，取樣點超過 1000 點之後，回歸分析的準確度不再提升，考量計算成本的因素下，最適當的取樣點應為 1000 點。由於結構反應變化不大，曲線也相當平滑，需要的取樣點也比較少，甚至取樣點只有 250 點也可以有不錯的結果。

接著測試以回歸模型取代實際計算的效果，以基因演算法來搜尋最佳疊層。在此使用基本的基因演算法，選擇時使用對決式選擇法，基因演算法中使用的各種參數值列於表 3-2 中。搜尋目標為：在 $J=0.889$ 時， K_Q 最接近設計值 0.5204，目標函數定義如(3-9)式：

$$f = 0.2 - |0.05204 - K_Q| \quad (3-9)$$

搜尋過程如圖 3-23 所示，橫軸為世代數，縱軸為每個世代中最佳個體的目標函數值，當 K_Q 達到目標值即停止計算。最佳化搜尋在第 76 代達到收斂值，最佳疊層為 $[0/-45/45/0/45/-45/45/90/45/45/90/90]_s$ ，回歸分析計算的 K_Q 值為 0.05204，實際計算結果為 0.05180，兩者間的誤差為 0.4%。使用回歸分析大大縮短了計算時間，而又能同時保持其準確度。

3-2 具局部搜尋功能的基因演算法

雖然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，雖然低於基因演算法搜尋所需的計算量，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。因為在回歸分析中使用最小平方差法來決定回歸模型，因此回歸結果會犧牲少數點的準確度來使大部分的點預估準確。但最佳化搜尋時經常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。

為解決這兩個問題，本計畫在標準基因演算法中加入局部搜尋，而在局部搜尋中以回歸分析取代實際計算，如此可以使用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。在標準基因演算法中加入局部搜尋的程序如圖 3-24 的流程圖所示。

首先指定在特定世代(nlocal)之後開始執行局部搜尋，當基因演算法執行世代數(ngen)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，依據此基因在此一個體附近進行局部搜尋，再把局部搜尋中最好的個體插入原來的人口中取代最差的個體，接著再進行選擇。

局部搜尋的程序如圖 3-25 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模型。例如每代有 10 個體，那麼第 20 代做回歸時，就以 200 個 FEM 計算過的個體作為取樣，求得回歸模型。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值最低的個體。

在本計畫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，但其中有兩個疊序互換。例如最佳個體為 1 2 3 4，則疊序 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。因此本計畫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，無法正確預測最高點附近的值。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。

3-2-1 應用在三明治板

首先以簡單的三明治板為例，進行最佳化搜尋。三明治板模型如圖 3-1 所示，使用與 3-1 節中相同的材料。纖維角度有四種選擇，(1) -45 (2) 0 (3) 45 以及 (4) 90。板的左端固定，右端為自由邊界受 557 牛頓 3 方向的力。在此要以基因演算法來搜尋最佳疊層角度，使自由端變形量為最小。目標函數定義如(3-10)式，搜尋目的為目標函數最大值。依據我們對複合材料特性的瞭解，結果已知是全部 0 度的疊層可以得到最小的變形量，此時的變形量為 0.4339 cm，目標函數值為 0.5661。為了評估搜尋效率，在此以基因演算法搜尋到全部為 0 度疊層所需的世代數來作為評估依據。

$$F_{obj} = 1 - \Delta \quad (3-10)$$

其中 Δ 是自由端的變形量

表 3-3 列出搜尋到最佳解所需的世代數，第一列是從第二代開始執行局部搜尋，第二列是從第五代開始，第三列是從第十代開始，第四列則沒有使用局部搜尋。由於基因演算法是一種機率式的搜尋，所需要的世代數會隨著初始族群的不同而有不同，所以每一種模式都執

行基因演算法搜尋四次，最後再取所需世代數的平均值。搜尋結果中，沒有使用局部搜尋者平均需要 71.5 代才能找到最佳解，而使用局部搜尋可以降至 30 代以下，其中以 $n_{local} = 5$ 的結果最好，平均 22.5 代就可以找到最佳解。圖 3-26 所畫的是基因演算法搜尋的過程，橫軸為世代數，縱軸為每個世代中的最佳目標函數值。黑色線為第五代開始使用局部搜尋的結果；灰色線為沒有使用局部搜尋的結果。由圖上可以看出，使用局部搜尋的曲線快速向上提升，很早就找到最佳解。沒有使用局部搜尋的曲線上升速度緩慢，每一次跳升都要經過很長的搜尋。即使很早就找到最佳解附近的個體，但要憑著基因演算法無方向性機率式的搜尋找到最佳解，仍需耗費許多時間。

圖 3-27 所繪的是第一次執行回歸分析時，預估局部範圍 102 個個體時的誤差分布。 $n_{local} = 2$ 時，取樣點只有 20 點，回歸分析的結果並不理想，有 40.9% 的回歸誤差超過 7%，而僅有 28.43% 的點誤差低於 1%。由於回歸不準確，局部搜尋等於是盲目尋找，找到的局部最佳個體很可能錯得離譜，除了浪費計算時間還可能誤導搜尋方向。隨著取樣點增加，回歸分析的預測就越準確， $n_{local} = 10$ 的取樣點有 100 點，預測結果有超過 50% 的點誤差低於 1%，而誤差大於 7% 的點也減少到 29.41%。 $n_{local} = 5$ 使用的取樣點有 50 個，回歸分析的準確度介於 $n_{local} = 2$ 與 $n_{local} = 10$ 之間。儘管 $n_{local} = 10$ 的第一次回歸準確率最高，但從表 3-3 可以看出， $n_{local} = 10$ 所需的世代數並不是最少的，反而是 $n_{local} = 5$ 所需要的世代數最少。由此可以推論局部搜尋的功能在第五代至第十代之間已經開始發揮作用，到第十代才使用則晚了一點。圖 3-27 中顯示 $n_{local} = 2$ 與 $n_{local} = 5$ 的回歸分析結果並沒有差很多，所以局部搜尋在第二代跟第五代之間的效果較差，要到第五代之後回歸分析準確度提升，局部搜尋才能往正確的方向搜尋。因此，局部搜尋的開始時機應該在回歸分析準確度開始提升之時，其搜尋效率為最高。在這個例子中，從第五代開始局部搜尋是一個適當的時機。

3-2-2 應用在螺槳

為了探討回歸分析與局部搜尋在搜尋極大或極小值的效果，在此以搜尋最小 K_Q 的螺槳作為應用例，目標函數如 Eq. (3-11) 定義。

$$F_{obj} = 1 - 10K_Q$$

(3-11)

表 3-4 所列為找到最佳疊層所需要的世代數，第一列是從第五代開始執行局部搜尋，第二列是從第十代開始，第三列則沒有使用局部搜尋。在這些基因演算法搜尋中，最後找到的最佳疊層有三組結果非常接近， $[0_2/45_2/45_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/45_2]$ ，其 K_Q 為 0.03757； $[45_2/45_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/45_2]$ ，其 K_Q 為 0.03772； $[45_2/0_2/45_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/45_2]$ ，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，都在本計畫定義的局部範圍內。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 3-4 可以看出使用局部搜尋的計算量少於標準基因演算法的三分之一，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，如同前面的三明治板，從第五代開始局部搜尋應該是最有效率的。圖 3-28 所畫的是每代最佳目標函數值與世代數的關係圖，黑色線為第五代開始使用局部搜尋的結果；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，而標準基因演算法每次跳升前都要經過長時間的搜尋，所以收斂速度非常慢。

本章在基因演算法中加入局部搜尋，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。在三明治板及複材螺槳的應用上，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。由以上分析可以作下述歸納：

1. 使用基因演算法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。本計畫的應用例中，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。

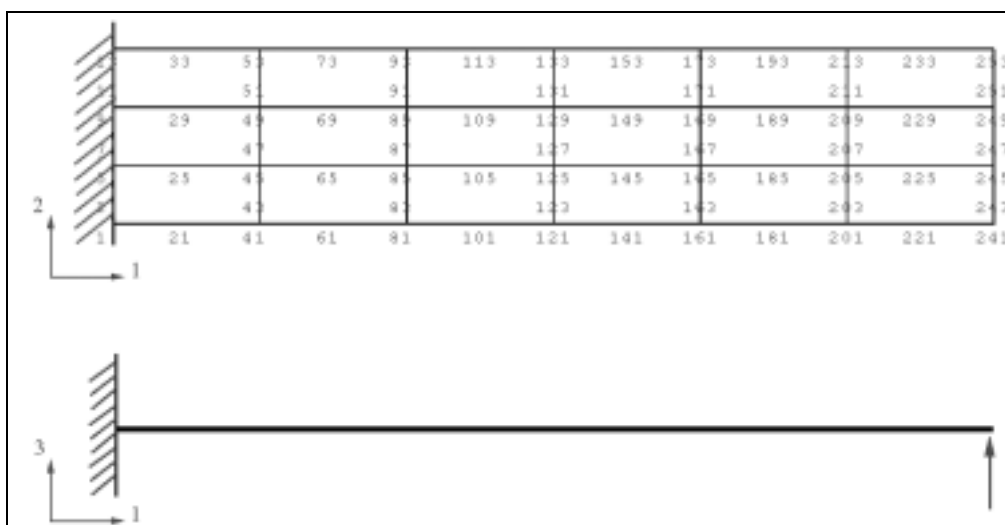


圖 3-1 三明治板之有限元素模型

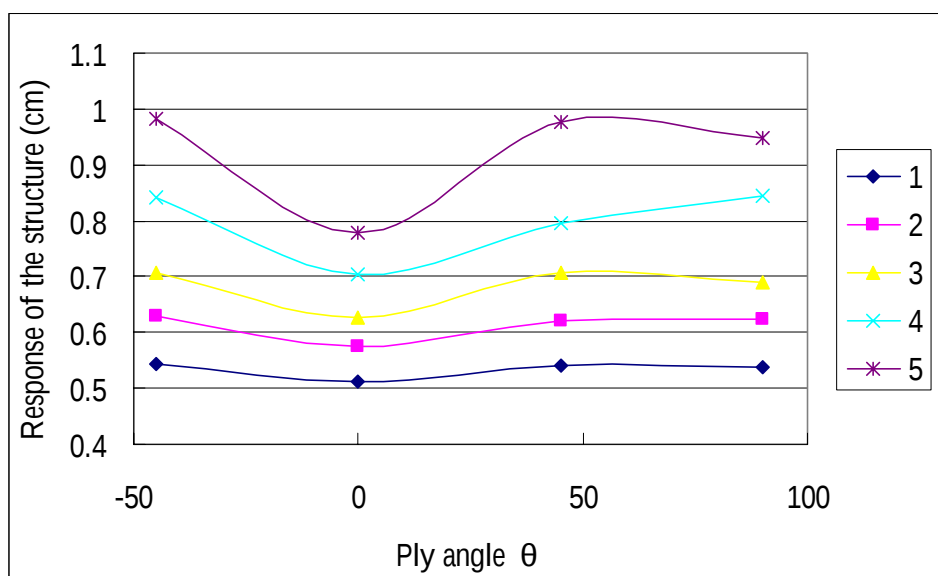


圖 3-2 三明治板的反應曲線

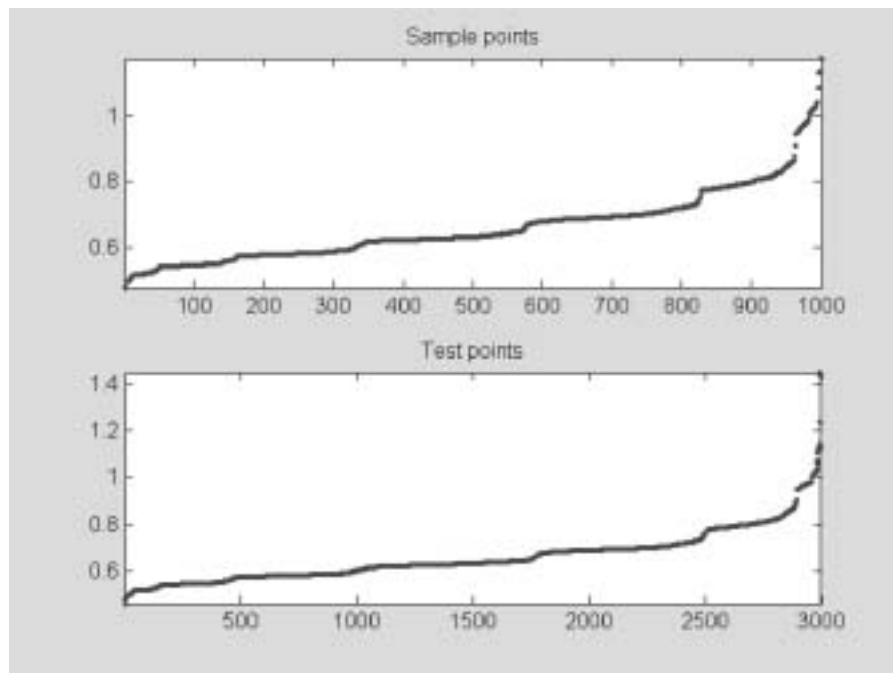


圖 3-3 取樣點與測試點分布圖

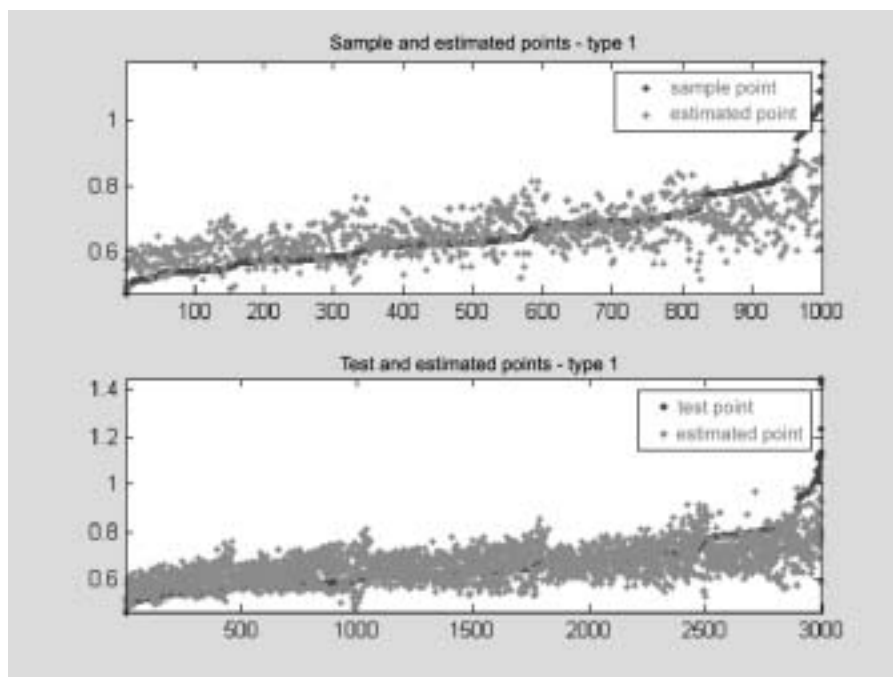


圖 3-4 以第一組函數回歸模型所推估的點

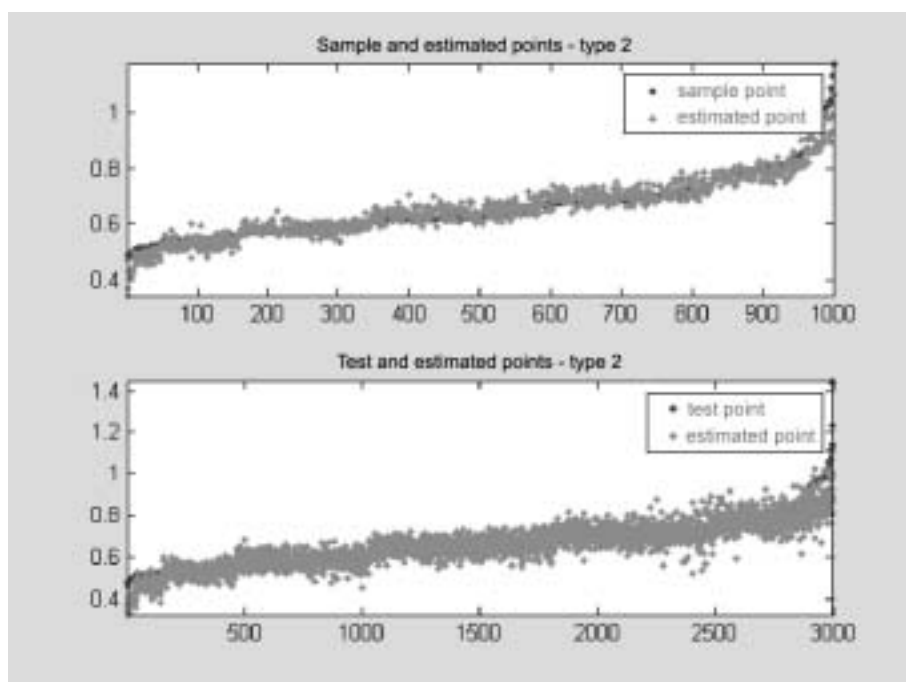


圖 3-5 以第二組函數回歸模型所推估的點

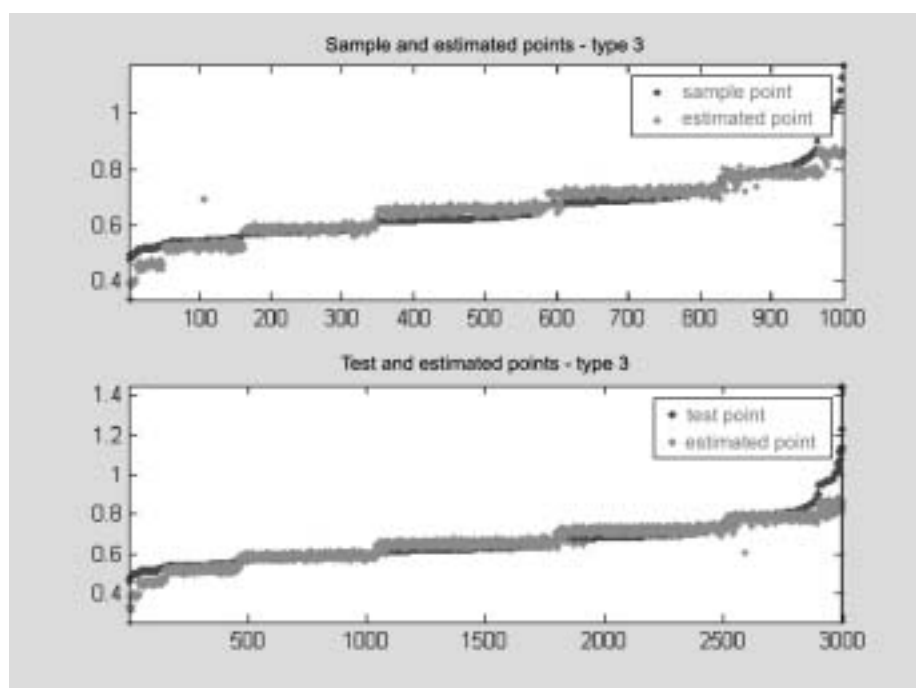


圖 3-6 以第三組函數回歸模型所推估的點

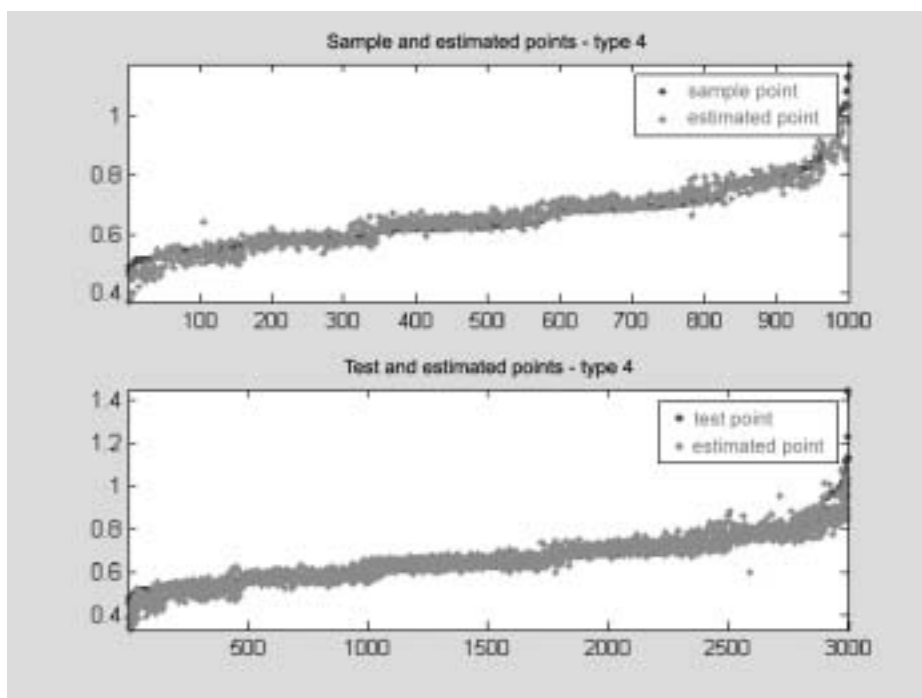


圖 3-7 以第四組函數回歸模型所推估的點

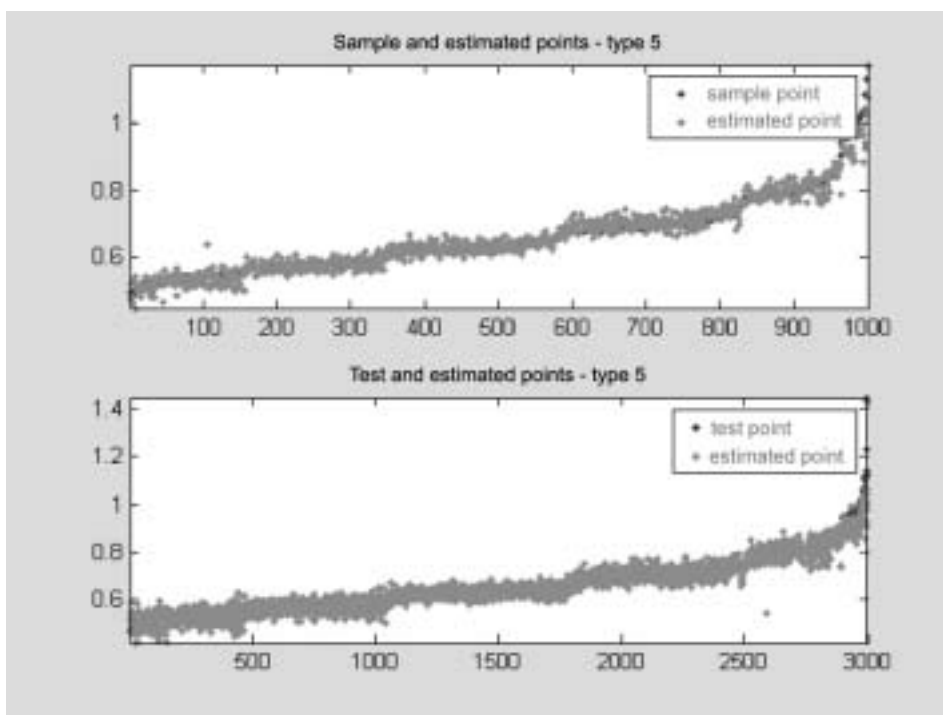


圖 3-8 以第五組函數回歸模型所推估的點

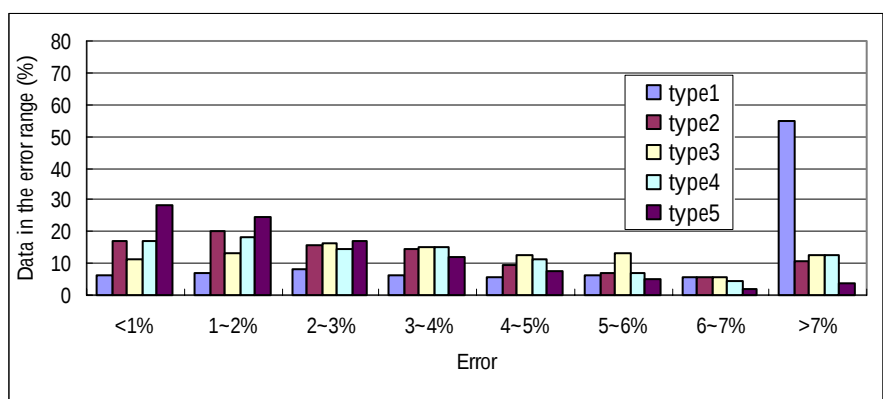


圖 3-9 預估取樣點的誤差分布

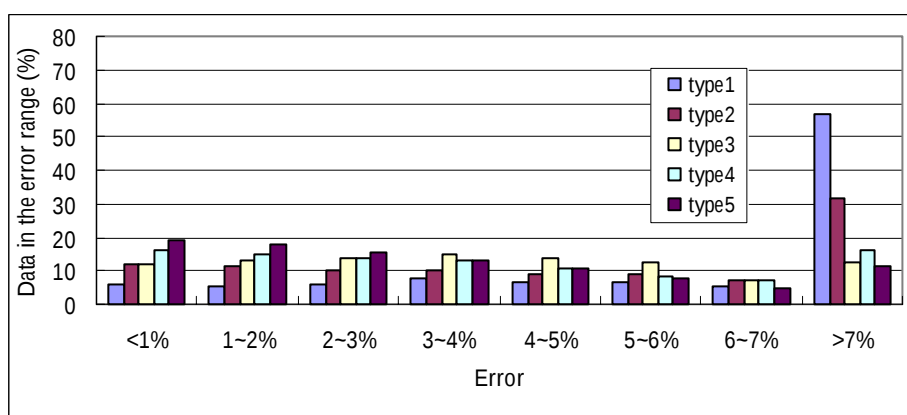


圖 3-10 預估測試點的誤差分布

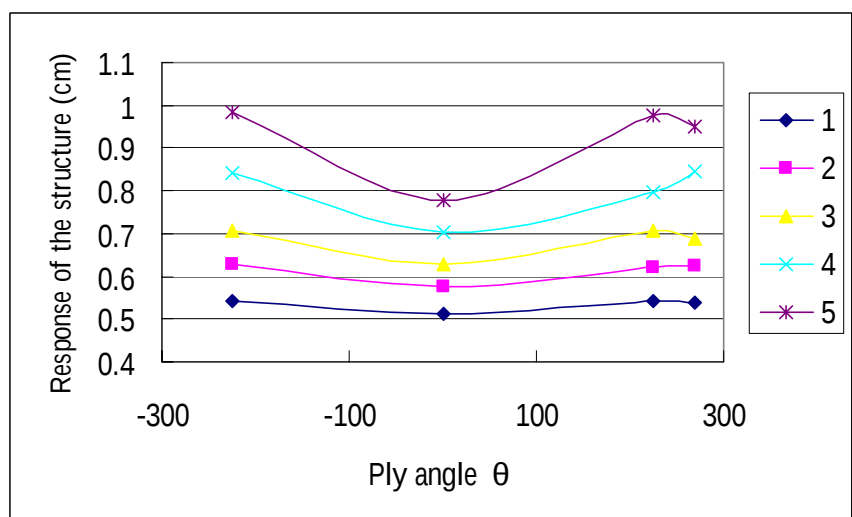


圖 3-11 變數值改變後的反應曲線

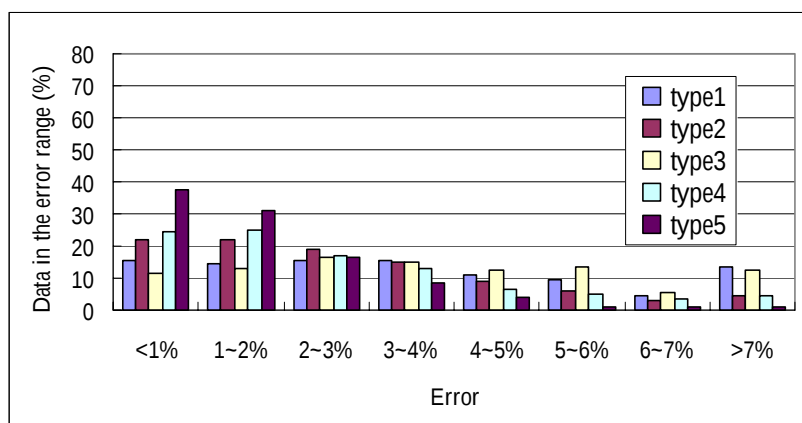


圖 3-12 選擇變數值後預估取樣點的誤差分布

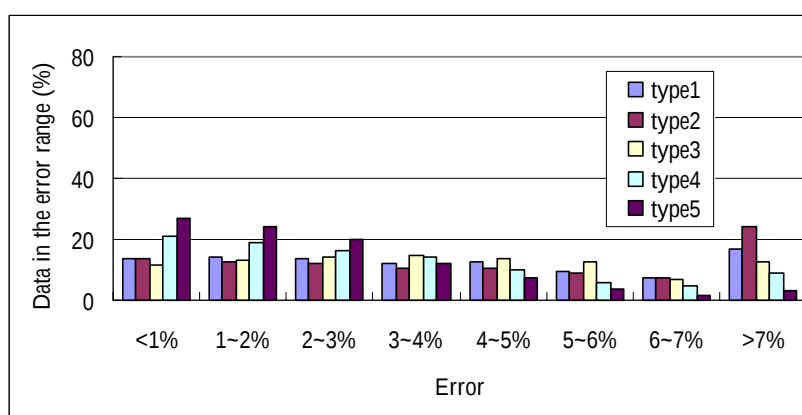


圖 3-13 選擇變數值後預估測試點的誤差分布

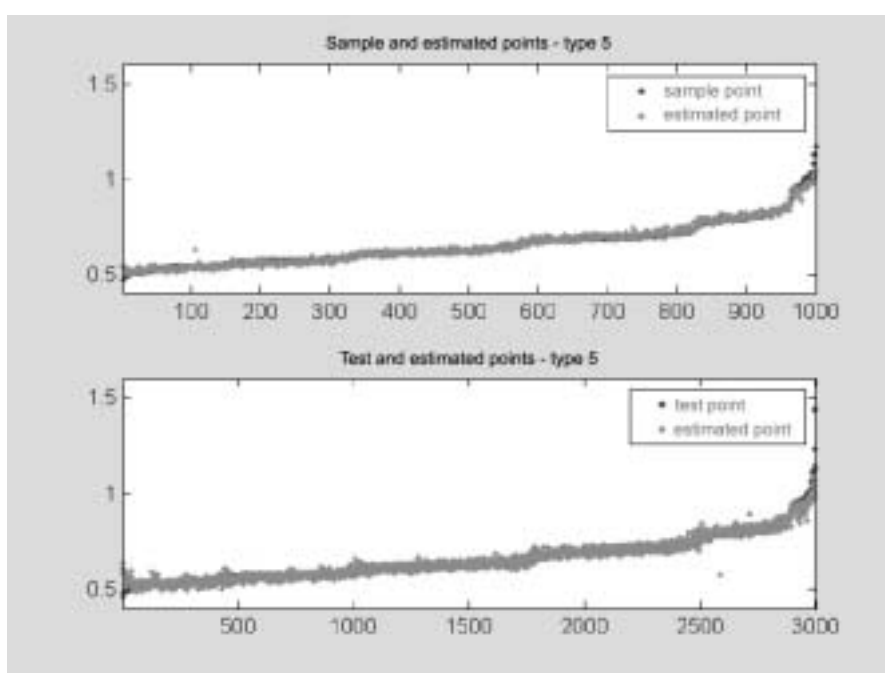


圖 3-14 選擇變數值後以第五組函數回歸模型所推估的點

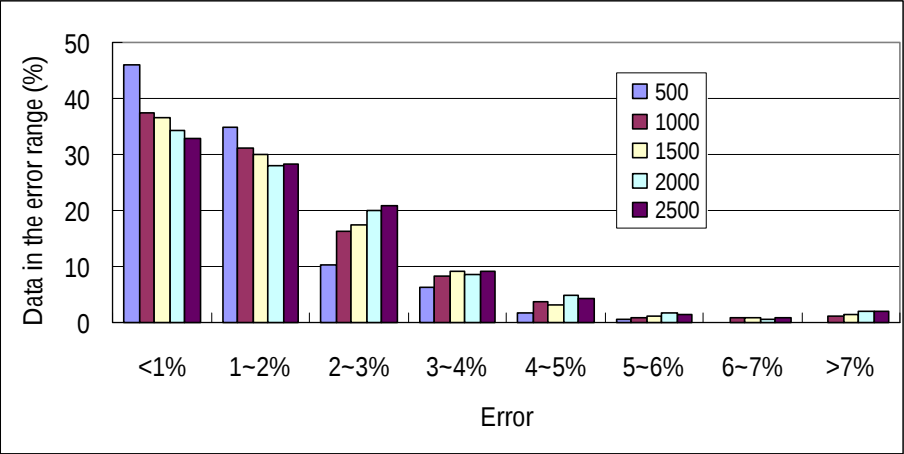


圖 3-15 取樣點數目對取樣點預估的影響

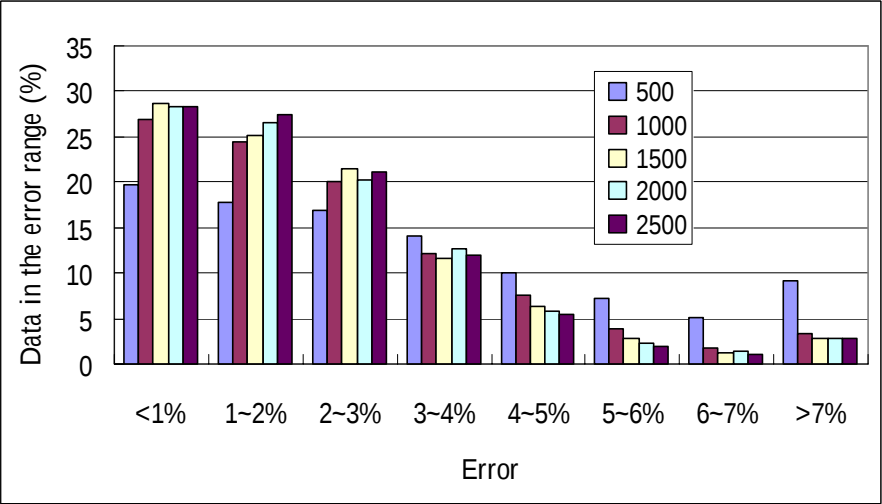


圖 3-16 取樣點數目對測試點預估的影響

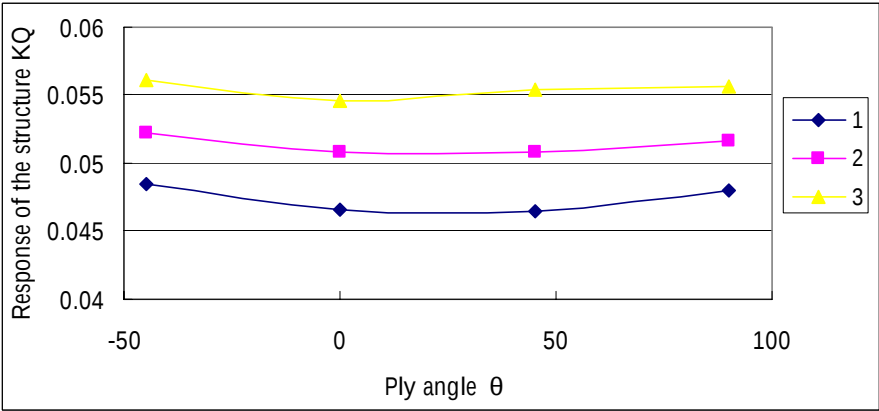


圖 3-17 複合材料螺槳的反應曲線

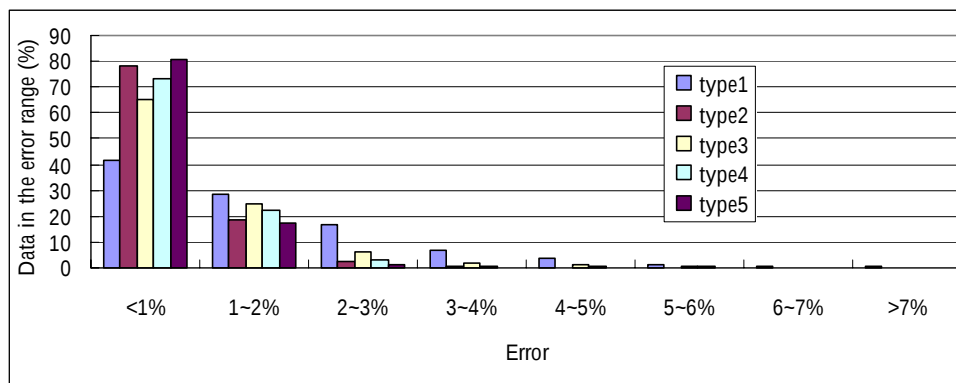


圖 3-18 預估螺槳取樣點的誤差分布

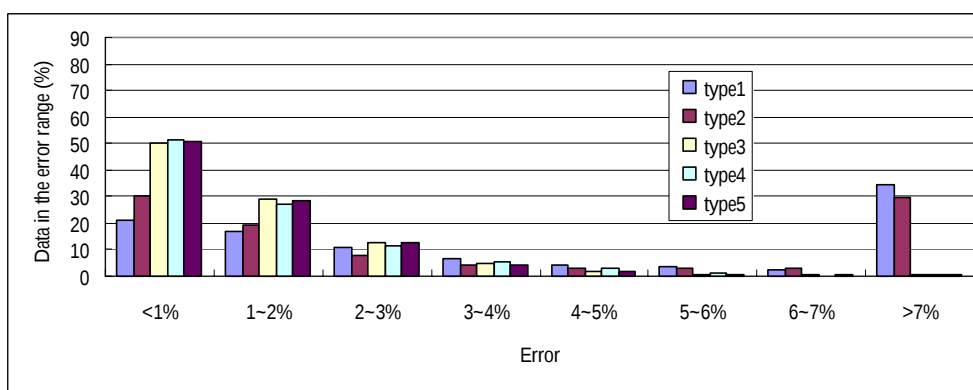


圖 3-19 預估螺槳測試點的誤差分布

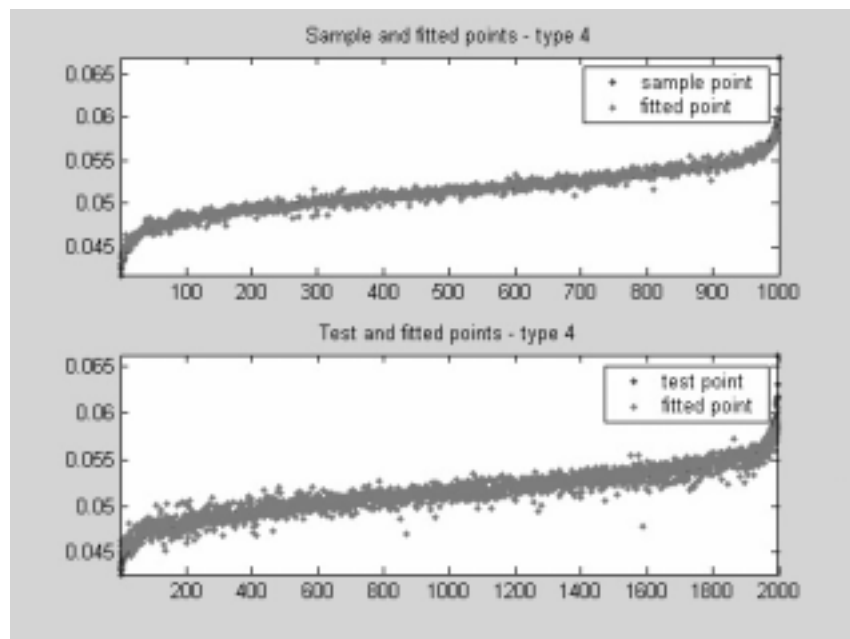


圖 3-20 第四組基底函數預估螺槳性能結果

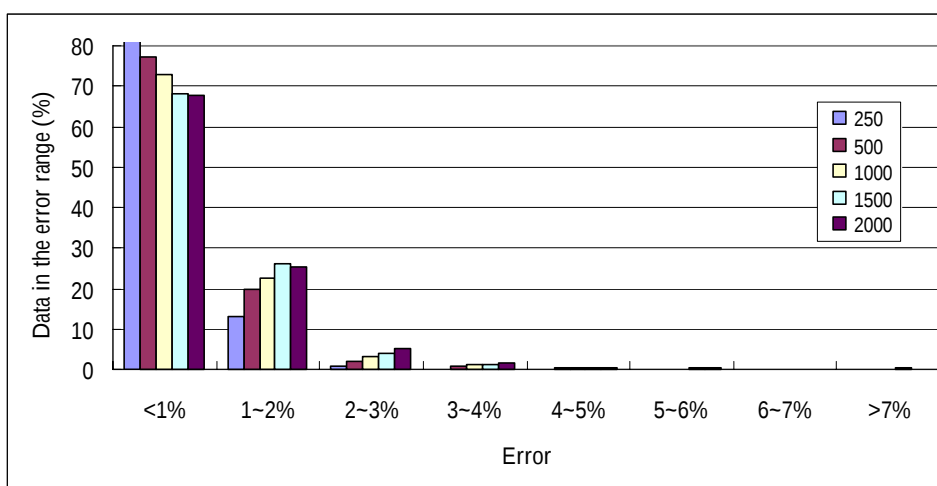


圖 3-21 螺槳取樣點數目對取樣點預估的影響

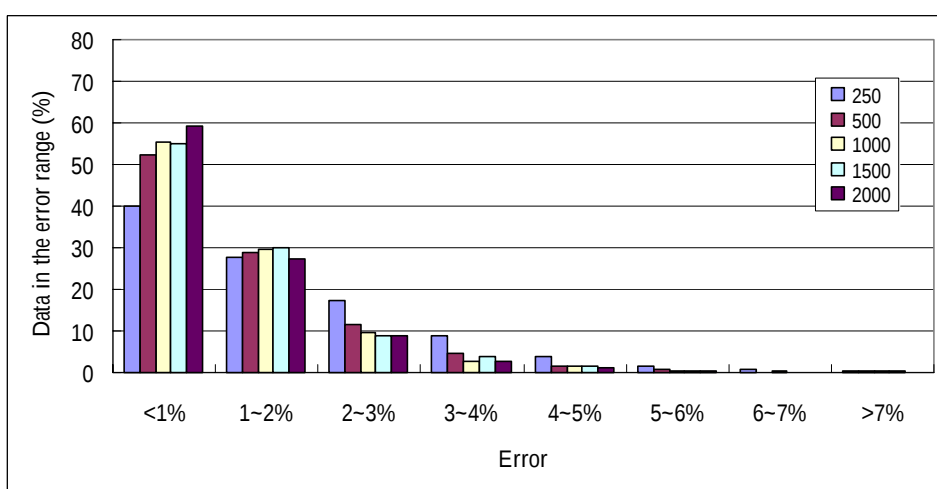


圖 3-22 螺槳取樣點數目對測試點預估的影響

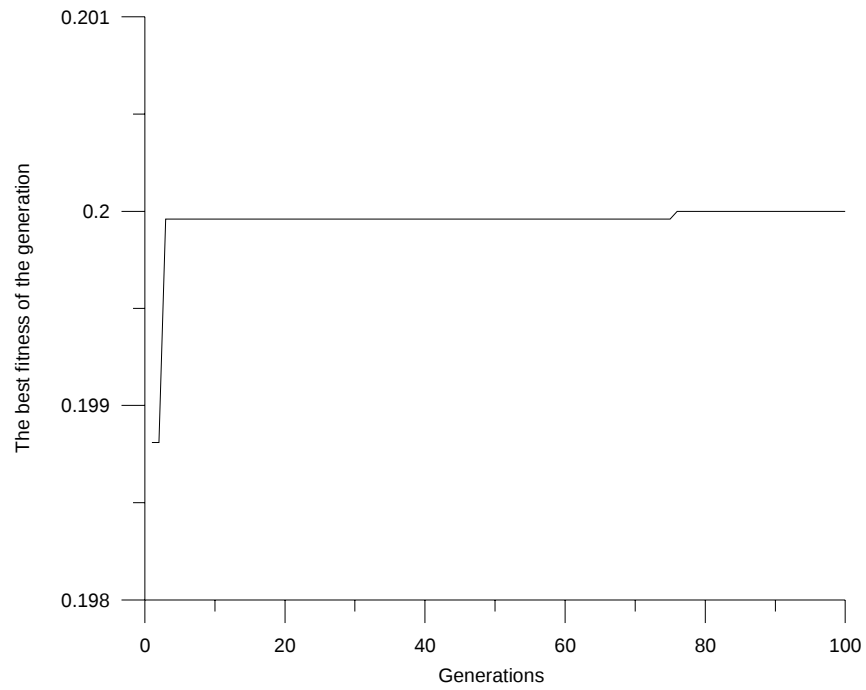


圖 3-23 以回歸模型取代計算的最佳化搜尋過程

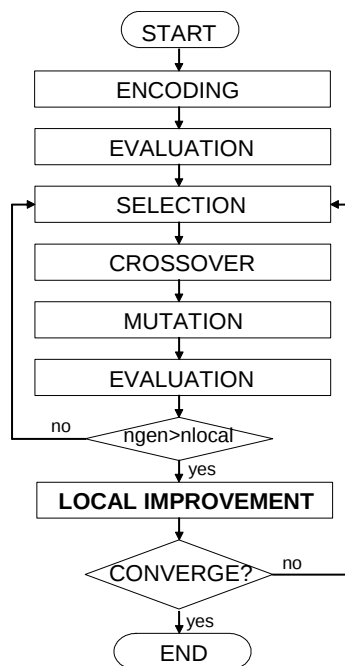


圖 3-24 標準基因演算法加入局部搜尋

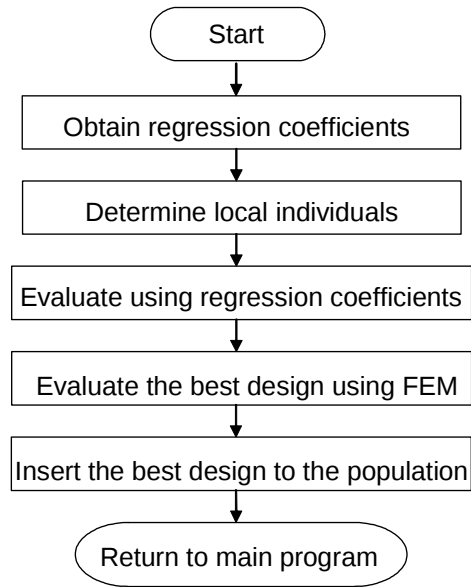


圖 3-25 局部搜尋程序

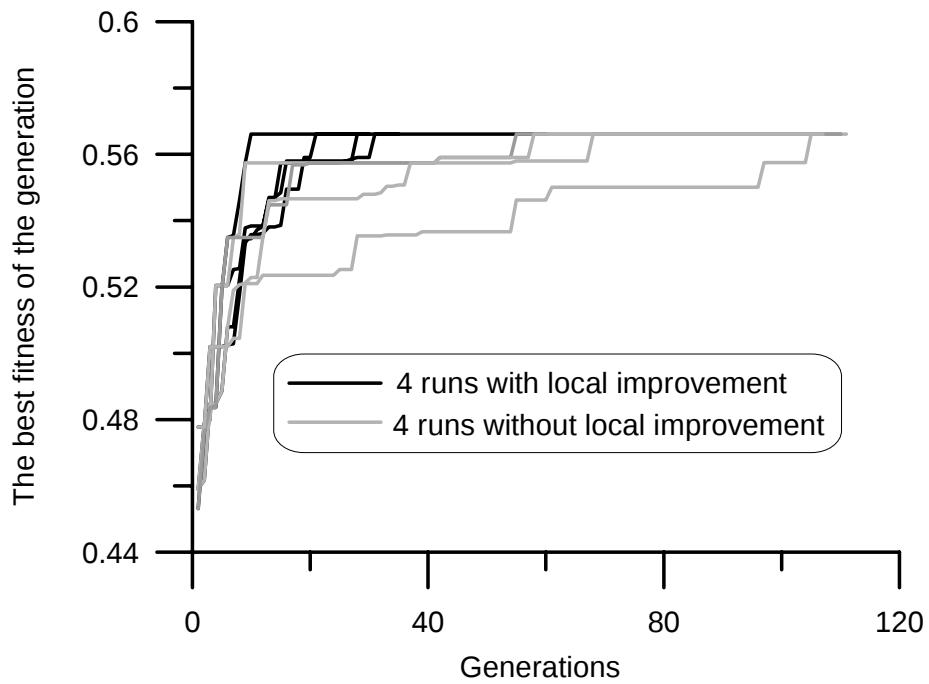


圖 3-26 三明治板最佳化搜尋過程

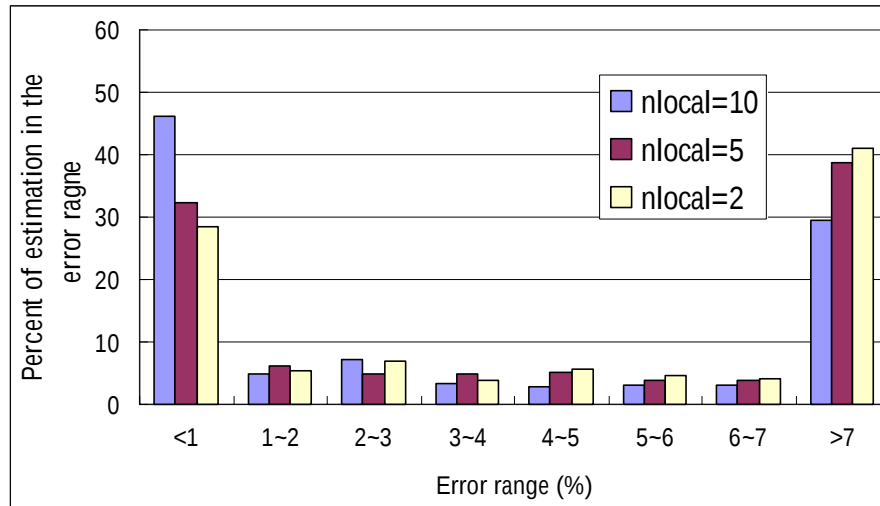


圖 3-27 第一次局部搜尋時回歸分析的誤差分布

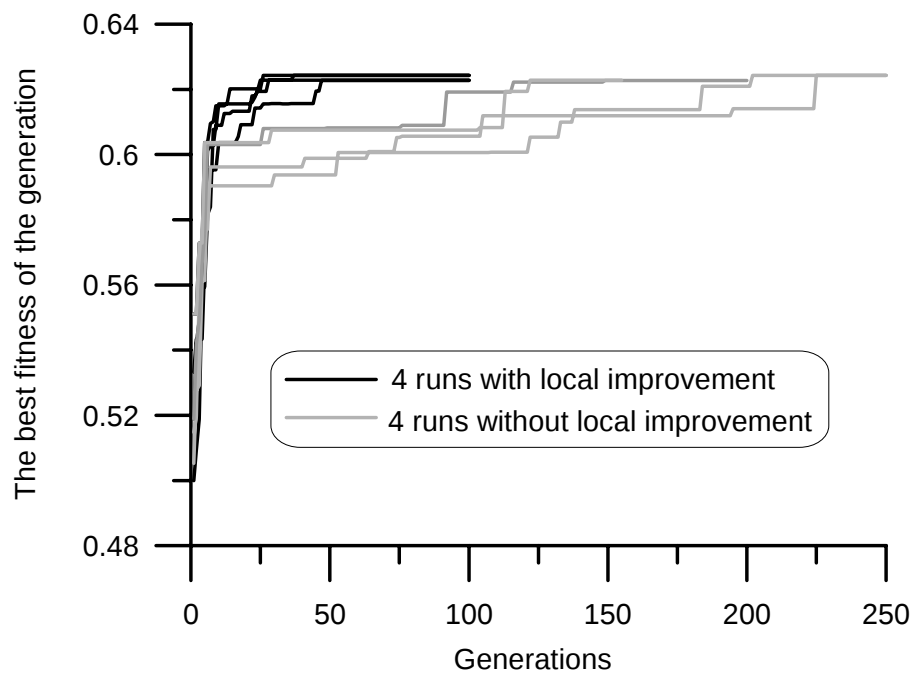


圖 3-28 螺槳 K_Q 最小化搜尋過程

表 3-1. Kevlar/Epoxy 疊層之材料係數

Young's modulus (longitudinal)	$E_1 = 7.6 \times 10^{10} \text{ Pa}$
Young's modulus (transverse)	$E_2 = 5.5 \times 10^9 \text{ Pa}$
Shear modulus	$G_{12} = 2.3 \times 10^9 \text{ Pa}$
Poisson's ratio	0.34
Ply thickness	$t = 2.8 \times 10^{-4} \text{ m}$

表 3-2 基因演算法使用參數值

每代人口數	20
變數數目	12
基因碼長度	24
突變率	0.06
交配率	0.9
每對個體產生下一代數目	1

表 3-3 搜尋到三明治板最佳疊層所需世代數

Case	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Average
nlocal = 2	22	28	25	42	29.25
nlocal = 5	31	28	10	21	22.5
nlocal = 10	22	37	32	21	28
No local improvement	68	105	55	58	71.5

表 3-4 搜尋到螺槳最佳疊層所需世代數

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	202	225	116	122	166.25

第四章 FRP 複合材料螺槳之最佳化

4-1 最佳螺槳之定義

一艘船是由許多的系統組合而成，船舶中任何一項改變，都可能牽動其他系統的改變。例如船舶選擇使用的主機時，必須考慮許多因素，如船的排水量、載重、速度以及選用的螺槳等，綜合各種需求再選出最適合的主機。在這樣重重考量下選出來的主機，必須要以最經濟的效率產生足夠的功率與推進力。而船用螺槳的選擇，同樣也必須配合船上其他的系統，其中與螺槳關係最密切的就是主機。螺槳與主機同屬推進系統，主機產生的功率透過轉軸傳遞至螺槳而產生推進力，而螺槳所需的扭力也牽動著主機的轉速與輸出功率。因此，螺槳所需的轉速、輸出功率等必須在主機的運轉範圍內，最好能達到主機的最佳運轉效能。

圖 4-1 是一般柴油引擎的特徵曲線，以及螺槳的需求曲線圖。引擎運轉的範圍在幾條限制曲線內，其中曲線 2 為固定平均有效壓力（Mean Effective Pressure, MEP）的曲線，是引擎扭力上限，曲線 1 亦為固定 MEP 的曲線，距離扭力上限有一段餘裕。曲線 4 為轉速上限，而曲線 3 為距離轉速上限有段餘裕的固定轉速曲線。曲線 6 是引擎熱效率的上限，而曲線 5 則是距離上限留有餘裕的曲線。引擎只能在曲線 2、4、6 所圍成的區域內運轉，但必須要留有餘裕，所以實際運作在曲線 1、3、5 的範圍內。設計點通常取圖中 A 點的位置，當螺槳所需的功率比設計值高曲線會向左偏移，轉速下降而輸出功率上升，直到受到引擎扭力上限的限制為止；若螺槳所需的功率比設計值低則曲線向右偏移，轉速上升而輸出功率降低，直到受到引擎轉速上限的限制。

因此，要讓引擎保持在設計點上運作，螺槳運轉時所需的功率應盡量保持穩定。通常螺槳都針對一特定的前進係數來設計，當主機轉速固定，船速維持在設計速度下前進時，

就在螺槳性能的設計點上運轉，主機的運作也會在設計點上。然而若在相同的轉速下，船速發生變化，則轉動螺槳所需的扭力亦隨之變化，連帶的造成主機運作點改變，使輸出功率變小而達到轉速上限，或使功率變大而達到引擎的扭力上限，不但降低主機效率而且長久下來容易對主機造成傷害。因此，本計畫設計的 FRP 螺槳針對螺槳與主機的搭配關係作為設計目標，當在螺槳轉速固定下，使螺槳在不同的船速下所需的扭力變化為最小，讓主機的運作點可以更接近設計點。

本計畫選定的螺槳為 DTNSRDC 4498，其設計前進係數為 $J = 0.889$ ，設計扭力係數為 $K_Q = 0.05204$ 。同樣轉速而不同的軸向速度下，考量另一個前進係數 $J = 0.6$ ，其對應的扭力係數 $K_Q = 0.07311$ 。前述的扭力係數值都是將螺槳視為剛體，不考慮螺葉變形的結果，而本計畫則希望 FRP 螺槳在變形後，能有更好的性能，因此 FRP 螺槳應符合以下要求：首先在設計速度下，螺槳應該有跟原始設計一樣的扭力係數值，如此在設計船速下運轉時，螺槳才能在原來的設計點上，而主機的運作也能維持在設計點。其次在船速較低時，螺槳的扭力係數應該盡量接近設計值 0.05204，如此螺槳運轉所需的扭力變化小，對主機運轉更為有利。我們希望在船速較低時，變形後的螺槳螺距變小，流體入流角更接近螺距角，所需的扭力也隨之下降。

綜合上述需求，本計畫將最佳螺槳的定義分為兩部分：

1. 當前進係數為設計值 $J = 0.889$ 時， K_Q 最接近設計值 0.05204。
2. 當前進係數為 $J = 0.6$ 時， K_Q 最接近 0.05204，也就是使扭力係數曲線斜率為最小。

4-2 原始設計螺槳

依據前節所述的最佳螺槳定義，最佳化搜尋的目標函數訂為：

$$f_{\text{obj}} = C - \left(w_1 (K_Q^{0.6} - K_Q^{0.889}) + w_2 |K_Q^{0.889} - 0.05204| \right) \quad (4-1)$$

其中

$K_Q^{0.6}$ 為 $J = 0.6$ 時的扭力係數值

$K_Q^{0.889}$ 為 $J = 0.889$ 時的扭力係數值

$C = 0.1$, $w_1 = 1.0$, $w_2 = 10.0$

搜尋的目標是要找到使 $(K_Q^{0.6} - K_Q^{0.889})$ 與 $(K_Q^{0.889} - 0.05204)$ 最小的疊層，前者是兩種速度下的扭力係數差，後者是設計速度下的扭力係數與原始設計值之差。 w_1 與 w_2 為兩者的權重，在此以第二項為重，可以達到設計速度下的扭力係數，再尋求最小的曲線斜率，所以 w_1 設為 1 而 w_2 設為 10。雖然我們要使這兩項的值越小越好，但在基因演算法中，一般還是搜尋最大的目標函數值，所以在這兩項前面加上負號，再加入一個常數使目標函數值為正。

使用本計畫第三章所建立的最佳化方法來搜尋，共執行三次以減少遺漏最佳解的機率，最佳化搜尋過程如圖 4-2 所示，橫軸為搜尋世代數，縱軸為各世代最佳值。三次最佳化的結果不完全相同，最好的是 $[90_2/-45_2/90_2/0_2//45_2/-45_2/0_2/90_2/0_2/90_2/0_2/90_2]_s$ ，目標函數值 0.077165，另兩次搜尋結果同為 $[0_2/90_2/90_2/-45_2//0_2/-45_2/0_2/0_2/90_2/90_2/0_2/45_2]_s$ ，目標函數值 0.077020。由於最佳疊層並不是唯一，有相當多的個體也位於目標函數最大值附近，彼此間目標函數值相差非常微小，所以要找到真正最大值不容易，但所搜尋到的疊層及目標函數值都很接近。

最佳疊層大都由-45、0 及 90 度等角度組成，少有 45 度的疊層。由圖 2-2 可以看出，45 度比較接近螺葉歪斜的方向，這個方向的纖維讓螺葉易於扭轉而不易於彎曲，要使螺槳隨速度改變螺距角，則應該使用較多的 45 度疊層，使螺葉易於扭轉改變螺距角。但搜尋結果與我們的預估大不相同，最佳化的結果卻幾乎沒有使用到 45 度的疊層，反而使用不易扭轉的 90 度與-45 度疊層。圖 4-3 所繪為最佳疊層螺槳的扭力係數曲線，以及原始設計曲線（不考慮螺葉變形之結果）。在設計速度下（ $J=0.889$ ），最佳螺槳的扭力係數為 0.05204，與原始設計點重合，符合最佳螺槳定義的第一個條件。在低速下（ $J=0.6$ ），最佳螺槳的扭力係數接近 0.075，不但沒有減少，反而比原始設計還要大。

檢視搜尋過程中計算過的個體，可以發現一個現象：若安排的疊層使 $K_Q^{0.889}$ 接近設計值，則 K_Q 曲線的斜率會比初始設計更高（如圖 4-4 最佳疊層曲線）；若安排的疊層使 K_Q 曲線的斜率降低（如 $[45_2/0_2/45_2/45_2//0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/45_2/45_2]_s$ ），則 $K_Q^{0.889}$ 值會比設計點低（如圖 4-4 最下方曲線）。也就是說符合第一個最佳化條件的疊層就無法滿足第二個條件要求，而符合第二個條件者也無法滿足第一個條件，同時滿足兩個最佳化條件的疊層似乎不存在。

再檢視圖 4-5 的螺葉壓力分布，圖中有十對曲線，由左至右分別是在 $r/R=0.257, 0.333, 0.410, 0.486, 0.562, 0.638, 0.714, 0.790, 0.867$ 以及 0.943 等十個位置的壓力分佈。每一條曲線由左至右所描繪的是從螺葉前緣（leading edge）到後緣（trailing edge）的壓力分佈。圖中可以發現在低速時螺葉前緣的壓力差遠大於其他位置，而在設計速度下則壓力差分布較為平均，後緣的壓力略高於前緣。截然不同的壓力分布造成不同的變形趨勢，設計速度下的變形傾向螺距角變小，而低速時則傾向使螺葉向上翻揚加大螺距角。因此，若選擇的疊層使螺葉在設計速度下維持原來形狀，則在低速下螺葉必然向上翻揚螺距變

大，螺槳扭力係數也隨之增加。表 4-1 與表 4-2 為 $[90_2/-45_2/90_2/0_2//45_2/-45_2/0_2/90_2/0_2/90_2/0_2/90_2]_s$ 的螺槳在 $J=0.889$ 與 $J=0.6$ 時，變形後的螺槳幾何參數。在 $J=0.889$ 時，幾何參數接近原始設計的螺槳（表 2-1），但在 $J=0.6$ 時螺距略為增加，所以扭力係數變大。相反的，若選擇的疊層使螺葉在低速下螺距變小，則在設計速度下螺距亦跟著變小，螺槳無法達到設計的扭力而脫離設計點。表 4-3 與 4-4 為 $[45_2/0_2/45_2/45_2//0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/45_2/45_2]_s$ 的螺槳在 $J=0.889$ 與 $J=0.6$ 時，變形後的螺槳幾何參數。由表中可以看到，低速下（ $J=0.6$ ）螺距變小，使螺距角更接近入流角，但設計速度下的螺距也跟著變小，使得扭力係數比設計值小而不符合設計條件。縱上所述，同時符合兩個最佳化條件的疊層果然不存在，僅透過疊層安排是無法改良螺槳性能的。因此，本計畫提出預變形螺槳，配合疊層的安排，使螺槳變形後能夠同時達到兩個最佳化要求。

4-3 預變形螺槳

預變形設計常見於變形量大的結構如機翼或土木結構，傳統金屬螺槳因為變形量小而沒有需要。FRP 複合材料的變形量較大，變形後可能會使螺槳性能偏離原始設計，但加入預變形設計反而成為改良性能的契機。預變形設計就是在給定初始幾何形狀時，即給予反方向的變形量，當結構受力而變形時，剛好回到我們所需要的外型，而能維持所需的設計性能。

在前節中提到，安排的疊層使扭力係數曲線斜率變小，同時也會使設計速度下的扭力係數變小，但若使用預變形螺槳，則可以使設計速度下的扭力係數回到設計點。圖 4-6 所繪的是預變形螺槳的示意圖，左上的螺葉截面是原始設計外型，運轉中受壓力而變形為右上方螺距角較小的截面。左下圖是給予反向預變形的螺葉截面，當它在運轉中受壓力

時螺距角變小，會變為右下圖的截面。這個變形後的螺葉恰好與原始設計的螺葉外型相同，因此螺槳性能如推力、扭力等也會與原來設計值相同。因此，我們仍然可以選用使扭力係數曲線斜率變小的疊層，再以預變形設計使螺槳在設計速度下其回到設計的性能

進行預變形螺槳的最佳化時，首先要尋找會使螺距變小的疊層。目標函數設為：

$$f_{obj} = C - (K_Q^{0.6} - K_Q^{0.889}) \quad (4-2)$$

其中

$K_Q^{0.6}$ 為 $J = 0.6$ 時的扭力係數值

$K_Q^{0.889}$ 為 $J = 0.889$ 時的扭力係數值

$C = 0.1$

搜尋到的最佳疊層為 $[45_2/0_2/45_2/45_2//0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/45_2/45_2]_s$ ，搜尋過程如圖 4-7 所示。與前次的搜尋結果相反，45 度疊層使用最多，其餘都是 0 度疊層。由纖維方向與螺葉形狀的關係來看，這兩種角度傾向使螺葉容易扭轉而縮小螺距，但不容易產生彎曲變形。圖 4-8 中虛線所繪的是這個最小螺距螺槳的扭力係數曲線，因為螺距變小，所以與原始設計相比曲線向下移，斜率也變得更小些。

接著給予螺槳預變形，使其在設計速度下 ($J=0.889$) 回到設計的螺槳性能。表 4-5 列出決定預變形螺槳的過程，第 1~3 列為螺槳原始幾何參數，以及不考慮變形下的扭力係數值。第 4~6 列為 $[45_2/0_2/45_2/45_2//0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/45_2/45_2]_s$ 螺槳變形後的螺槳幾何參數及扭力係數值。其中變化比較大的是螺距 (P/D)，由於螺距變小使扭力係數變小。接著給予螺葉反向預變形，轉換成幾何參數列於第 7~9 列 (predeform 1)。Predeform 1 受力變形後的幾何參數及扭力係數列於第 10~12 列，由於有預變形的緣故，其變形後的形狀

已經比較接近原始設計，扭力係數也提升至 0.04509。但因為預變形螺槳的變形量比原來大，所以變形後的螺距仍然小於原始螺槳，需要給予更大的預變形才能回到原始螺槳的位置。接著把 predeform 1 的變形量再加入到原始幾何上，產生螺距更大的 predeform 2。如此反覆運作再產生 predeform 3 的螺槳，其變形後的幾何已經接近原始螺槳，扭力係數值也接近設計值，最後以 predeform 3 的螺槳幾何參數作為最終預變形螺槳的幾何參數。

預變形螺槳之扭力係數曲線如圖 4-8 所示，最下方的曲線是沒有預變形而使用 $[45_2/0_2/45_2/45_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/45_2/45_2]_s$ 疊層的結果，斜率雖小但在 $J=0.889$ 時偏離設計點很多。使用預變形螺槳則斜率維持較小，但在 $J=0.889$ 時的扭力係可以達到設計值。圖 4-9 是使用預變形與沒有使用預變形的最佳化結果比較圖，預變形螺槳明顯優於沒有預變形的螺槳，確實符合兩個最佳化條件。

預變形螺槳的外型決定於螺槳的變形量，與螺葉所受的壓力有很大的關係，因此當螺槳直徑改變或運轉的轉速改變時，必須針對各個螺槳進行預變形設計。本計畫實驗中使用的螺槳為直徑 20 公分，運轉狀態為每秒 20 轉，設計軸向速度為每秒 3.55 公尺。依照前述步驟進行最佳化，搜尋最佳疊層為 $[45_2/90_2/45_2/45_2/45_2/0_2/0_2/0_2/0_2/45_2]_s$ ，與之前的結果類似，都是以 0 度跟 45 度為主。預變形螺槳幾何參數決定過程如表 4-6 所列，其扭力係數曲線如圖 4-10 所示。由於半徑較小，且轉速也較低，所以變形量比之前計算的螺槳還小，表現在螺槳性能上就是斜率下降較少。

再應用到不同外型之螺槳，先以 DTNSRDC Propeller 4496 與 4497[32]為例，搜尋扭力係數曲線斜率最小的疊層。DTNSRDC Propeller 4497 螺槳幾何參數如表 4-7 所列，其與之前計算的 DTNSRDC Propeller 4498 的差異只在歪斜角度大小不同，4498 的最大歪斜角為 72 度而 4497 的最大歪斜角只有 36 度，其他幾何參數都完全相同。搜尋到的最佳

疊層為 $[0_2/45_2/90_2/45_2/45_2/45_2/45_2/45_2/45_2/45_2/45_2]_s$ ，幾乎都是 45 度疊層。扭力係數曲線如圖 4-11 所示，變形後的曲線位置與原來的曲線很接近，斜率也幾乎沒有變化。這是因為螺槳歪斜角度較小，螺葉所受的壓力無法給予根部足夠的扭矩，所以螺葉的螺距變化很小。

DTNSRDC Propeller 4496 螺槳幾何參數如表 4-8 所列，同樣與之前計算的 DTNSRDC Propeller 4498 的差異只在歪斜角度大小不同，4496 完全沒有歪斜。搜尋到的最佳疊層為 $[0_2/45_2/90_2/90_2/45_2/45_2/45_2/45_2/-45_2/90_2/90_2/90_2]_s$ ，比之前的螺槳多用了很多 90 度疊層。扭力係數曲線如圖 4-12 所示，圖中顯示最小斜率的曲線比設計值還要高，斜率也比原來大。這是因為沒有螺槳歪斜角，所以沒有使螺距變小的扭矩，再加上壓力重心在螺葉前緣，使得螺葉往上翻揚，螺距上升導致曲線上升。由 4496 及 4497 兩個螺槳可以看出，要使螺葉在低速下降低螺距必須要配合螺葉外型，高歪斜的螺葉配合疊層的安排才能使螺距變小，使 FRP 螺槳有優於傳統金屬螺槳的性能。

最後針對偏斜量對螺槳的影響，針對 DTNSRDC Propeller 4383 進行最佳化搜尋。4498 和 4383 兩者的幾何外型差別在於 4383 有偏斜設計 4498 則無，其他的幾何參數兩者皆相同，4383 的幾何參數如表 4-9 所示。4383 最佳疊層為 $[45_2/45_2/45_2/0_2/45_2/0_2/0_2/0_2/45_2/45_2/45_2/-45_2]_s$ ，也是 0 度和 45 度為主的疊層，其扭力係數曲線如圖 4-13，兩者的扭力曲線斜率變化如表 4-11。表 4-11 中的 K_Q 是 $J = 0.889$ 和 $J = 0.6$ 的 K_Q 差值，也就是表示扭力係數曲線的斜率大小，越小表示曲線斜率越低。從表 4-11 可以看出，4498 和 4383 的螺槳扭力係數曲線的斜率均會比原始設計的扭力係數的斜率來得低，而有歪斜和偏斜設計的 4383，其 K_Q 下降量比僅有歪斜設計的 4498 來得多。

比較不同偏斜量的螺槳：偏斜量較少的 4382，以及相同幾何參數但沒有偏斜的 4497，4382 的幾何參數如表 4-10。4382 最佳疊層為 $[45_2/45_2/45_2/45_2/45_2/45_2/45_2/45_2/45_2/45_2/90_2]_s$ ，扭力係數曲線如圖 4-14。兩者扭力係數曲線斜率變化如表 4-12。兩者的纖維疊層角度非常相似，幾乎都是 45 度疊層。前面提到因為螺槳歪斜角度較小，螺葉所受的壓力無法給予根部足夠的

扭矩，所以螺葉的螺距變化很小。變形後的曲線位置與原來的曲線很接近，斜率也幾乎沒有變化。4382 因為有偏斜設計，螺槳的變形量較大，使得螺距就有較大的變化，如此一來經過預變形設計的螺槳不但能接近原始設計點，而且扭力係數的曲線斜率也變得較小。

因為 4383 的性能變化更明顯，於是選擇 4383 和 4498 進行實驗。依前述方法，搜尋性能實驗用的螺槳的最佳疊層。實驗用螺槳直徑為 20 公分，轉速為每秒 20 轉，入流軸向速度為每秒 3.55 公尺。4383 螺槳所搜尋出來的最佳疊層為 $[0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/45_2/45_2/45_2/45_2/0_2/45_2]_s$ ，與前述的螺槳相似，以 0 度和 45 度兩種疊層為主。

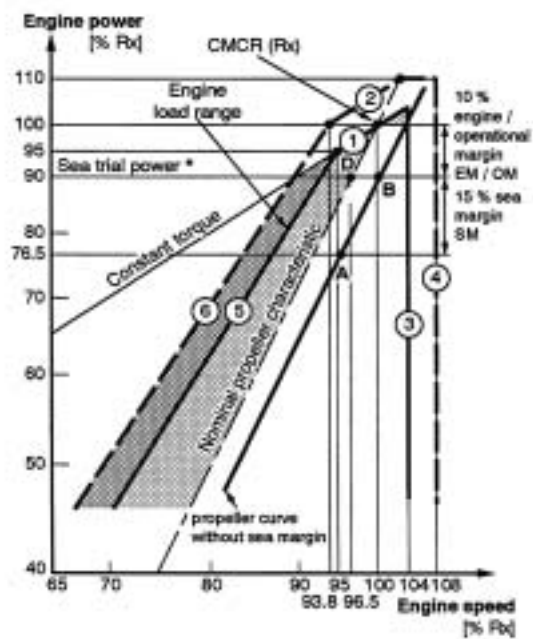


圖 4-1 引擎特徵曲線圖[34]

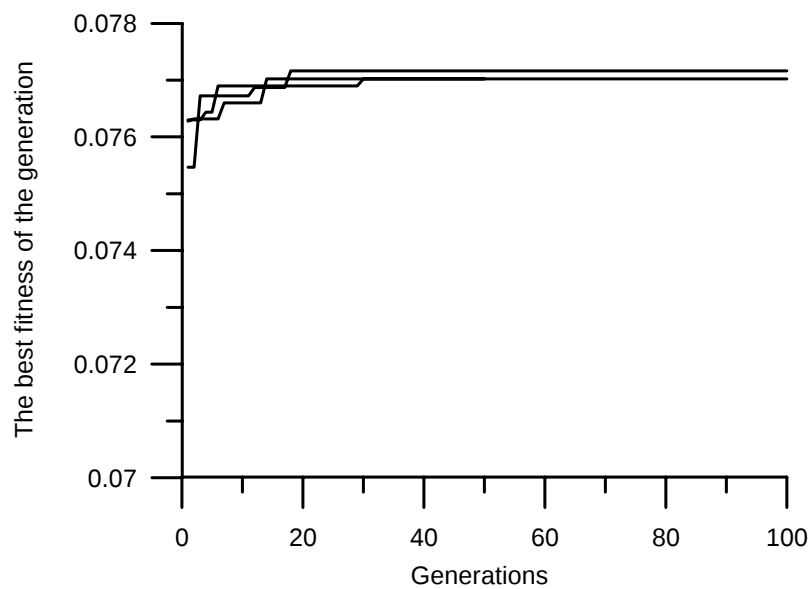


圖 4-2 原始幾何螺槳疊層最佳化過程

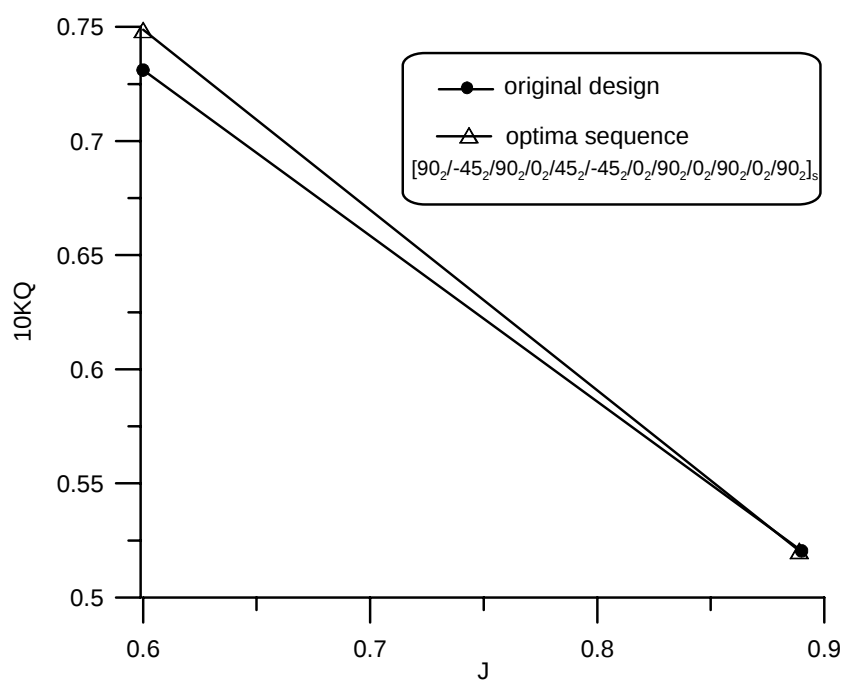


圖 4-3 原始幾何最佳疊層螺槳之扭力係數曲線

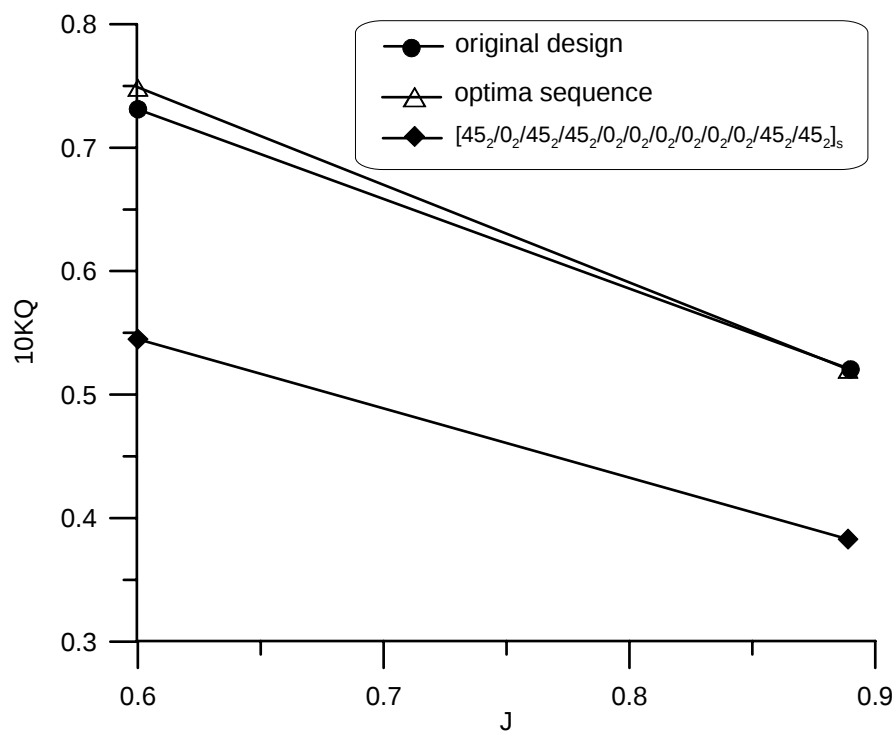


圖 4-4 疊層與曲線變化關係

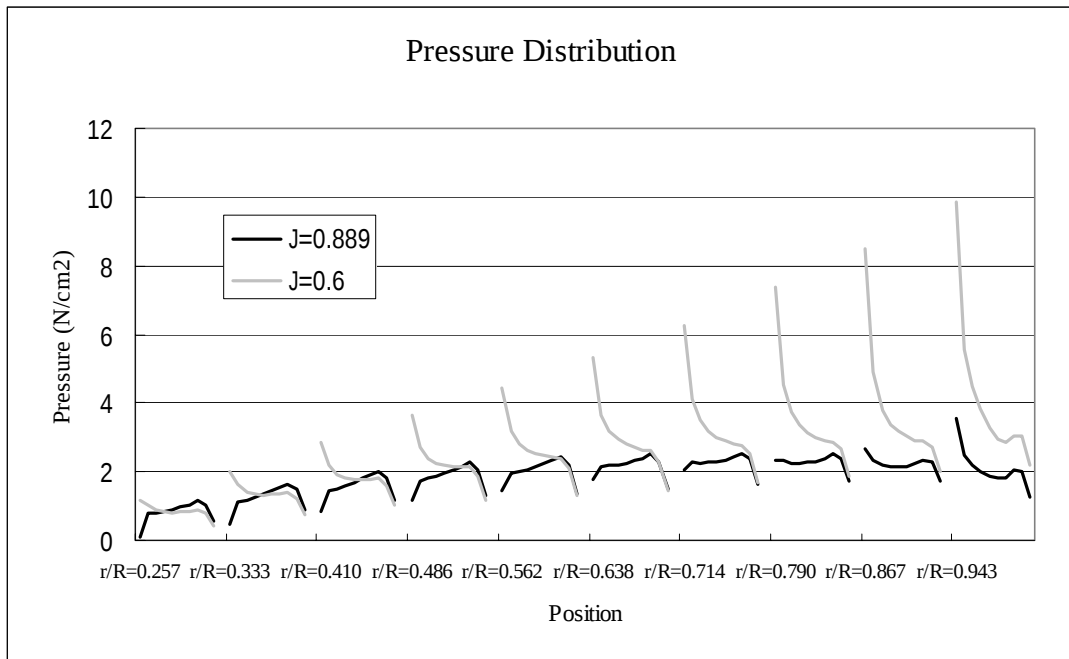


圖 4-5 螺葉所受壓力差分佈圖

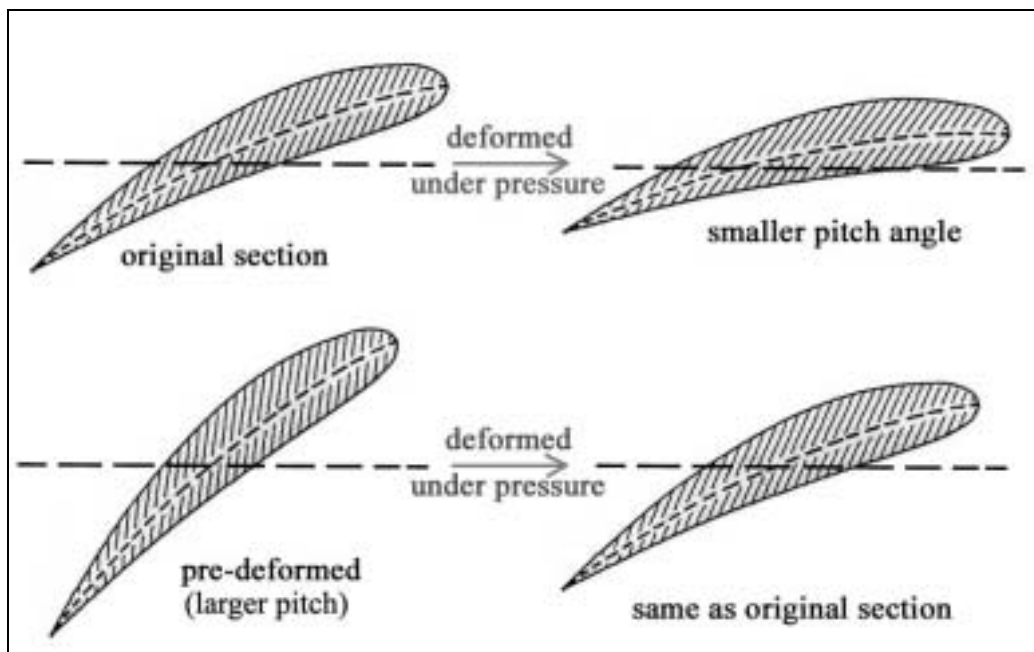


圖 4-6 預變形螺槳示意圖

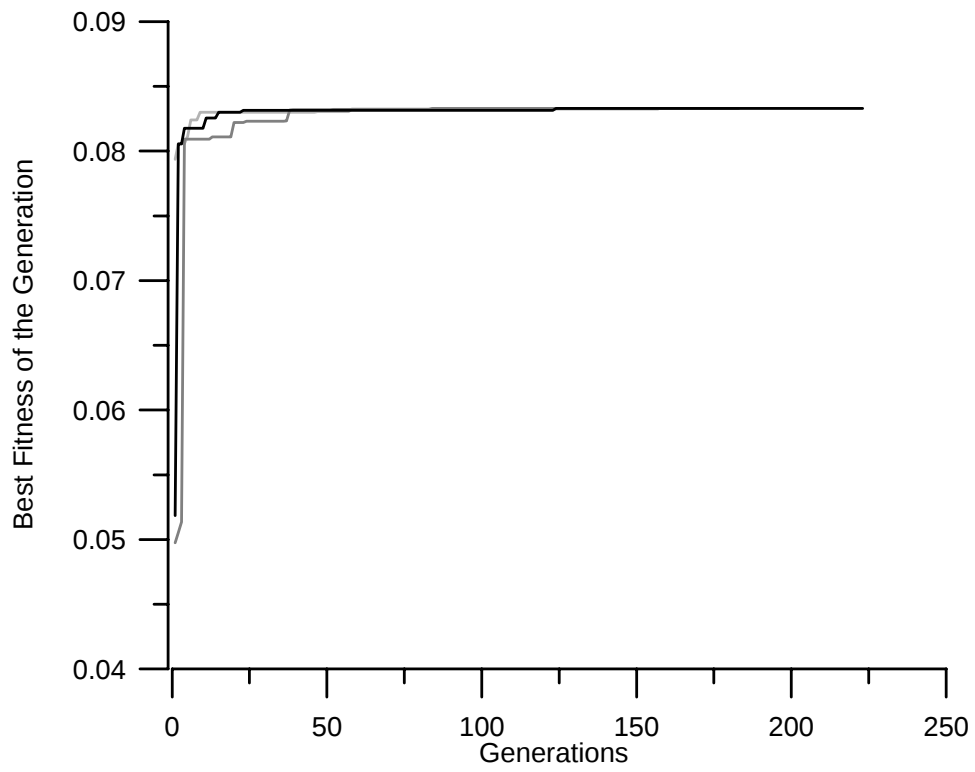


圖 4-7 最小螺距疊層搜尋過程

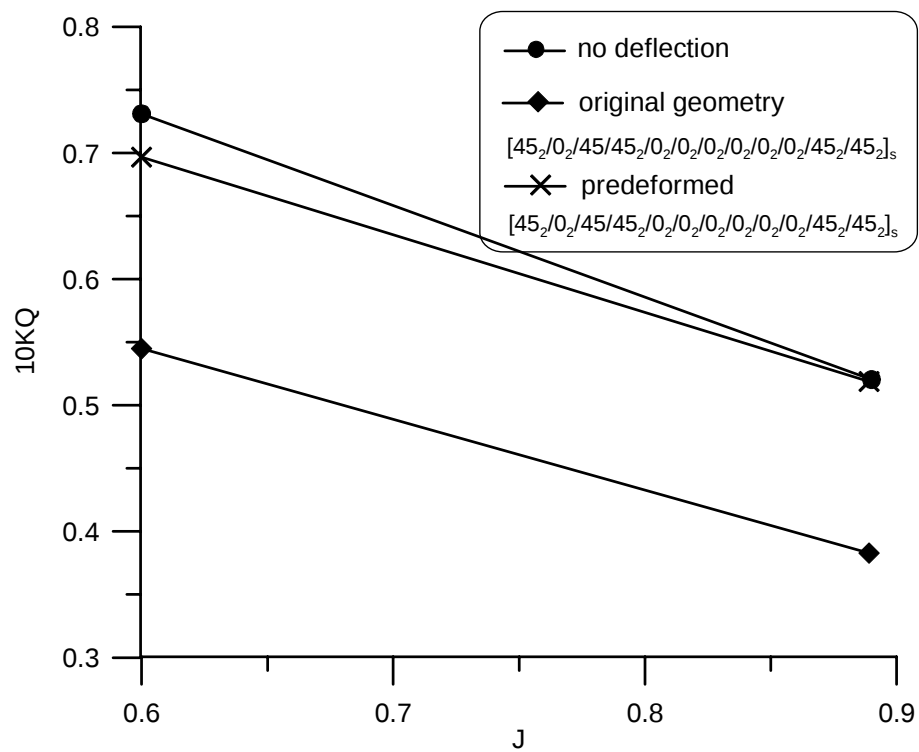


圖 4-8 最小螺距及預變形螺槳之扭力係數曲線圖

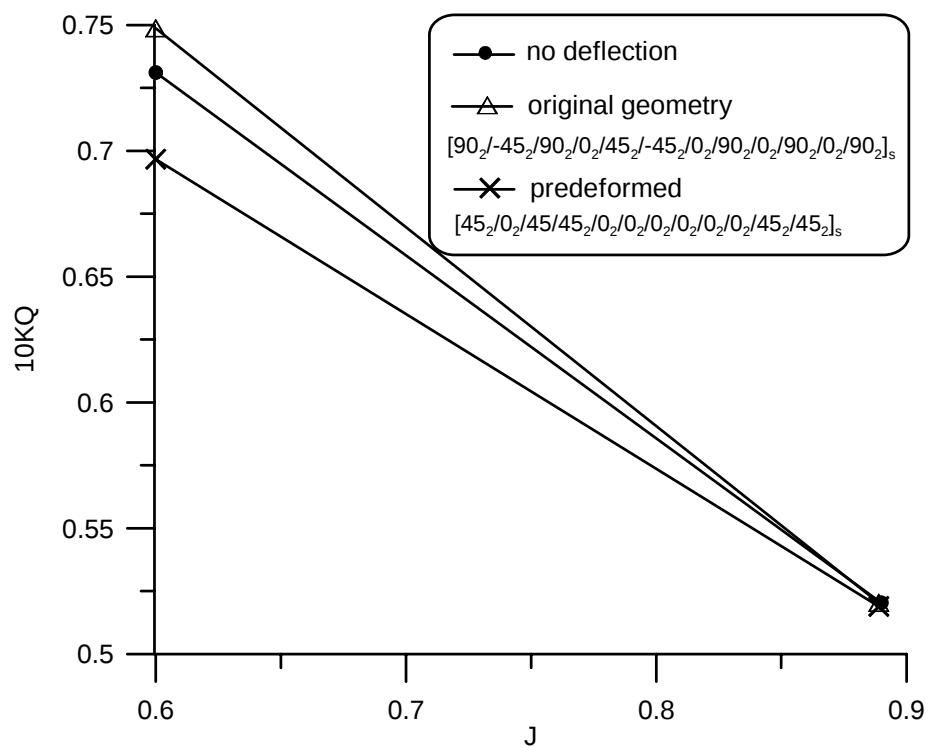


圖 4-9 預變形與沒有預變形螺槳性能比較圖

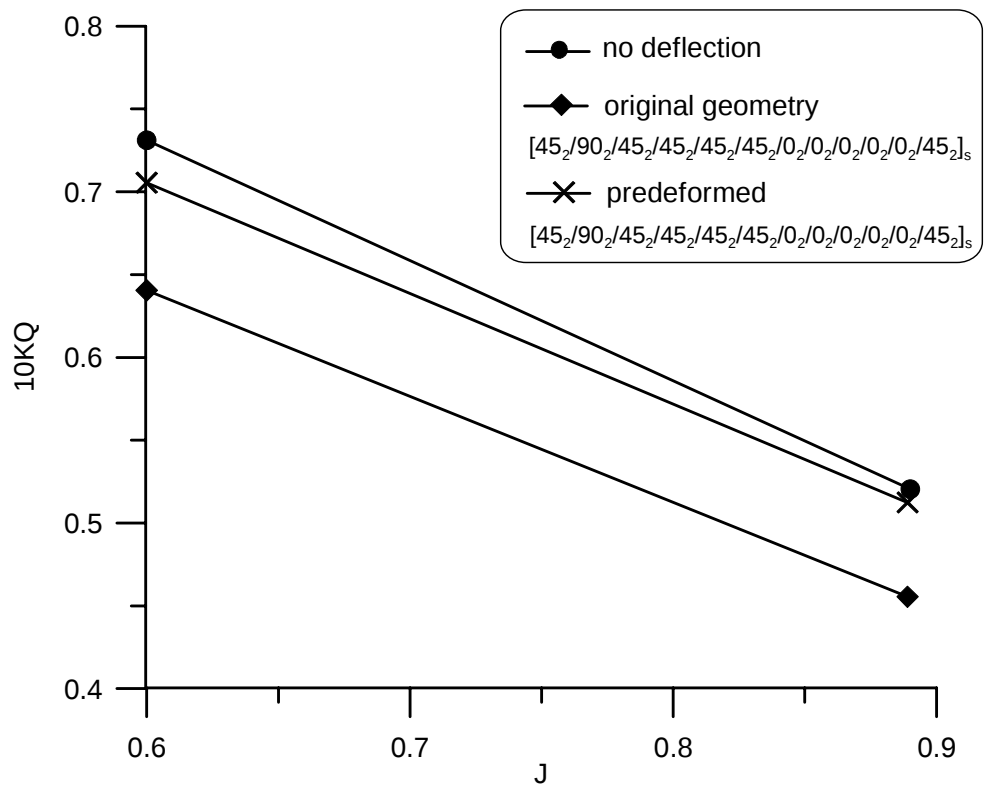


圖 4-10 最小螺距及預變形螺槳之扭力係數曲線圖 (D = 20cm)

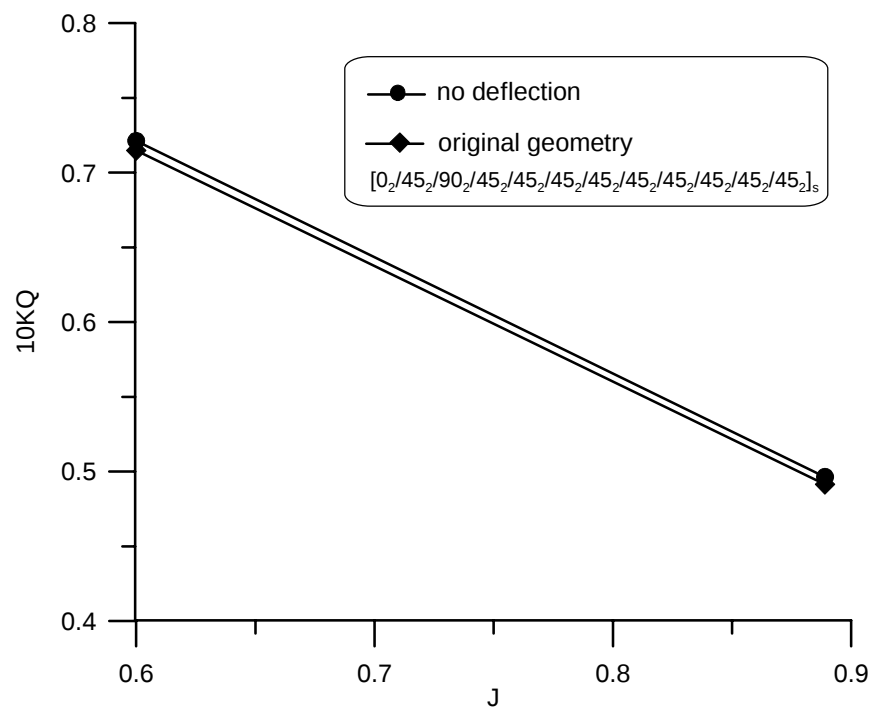


圖 4-11 DTNSRDC 4497 螺槳之扭力係數曲線圖

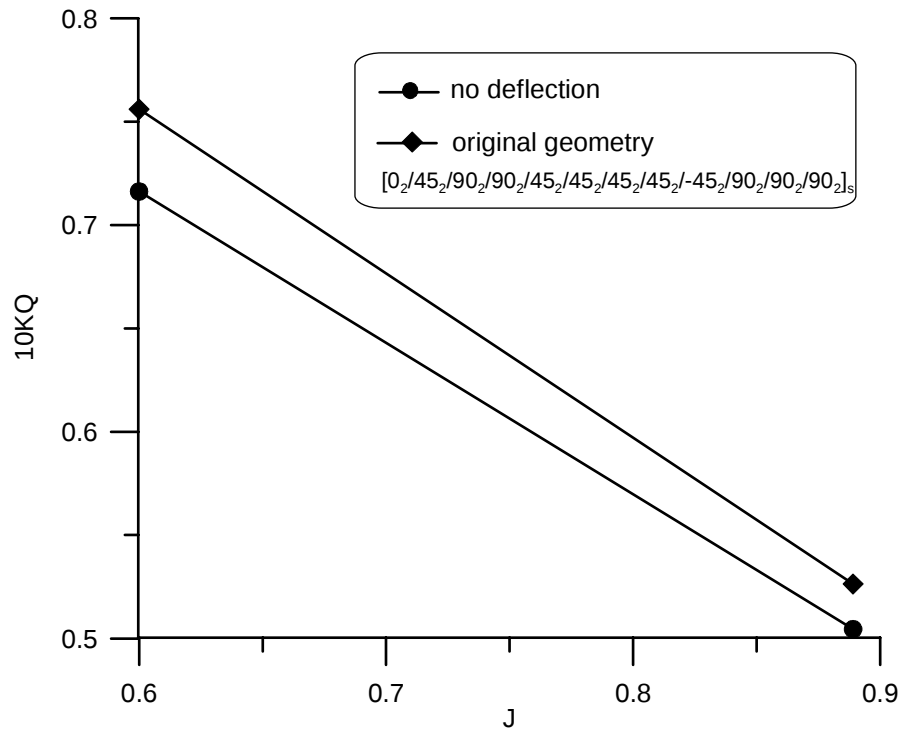


圖 4-12 DTNSRDC 4496 螺槳之扭力係數曲線圖

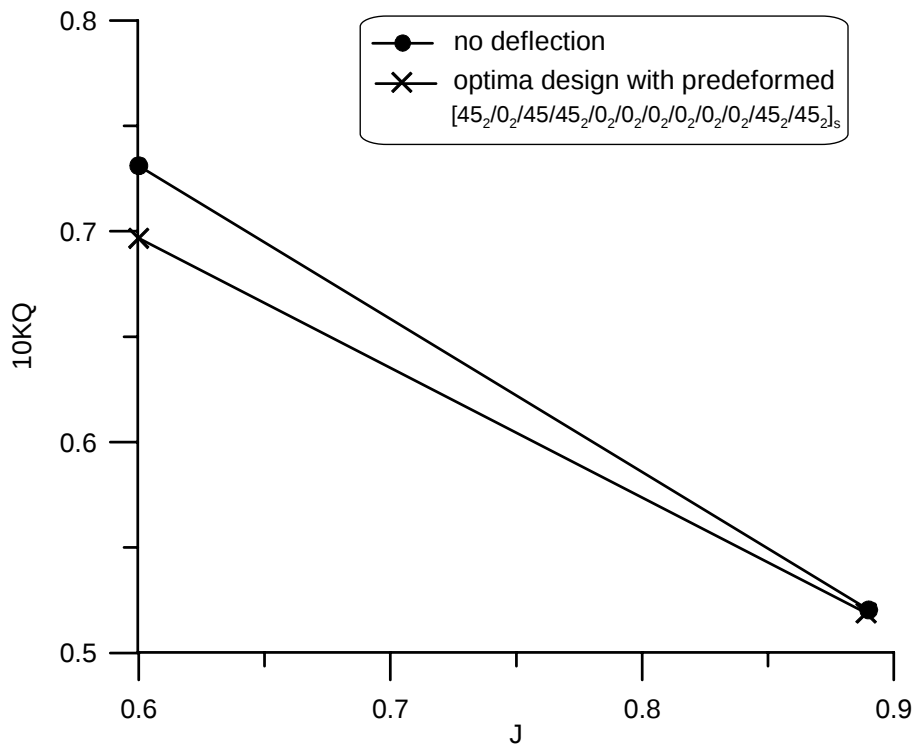


圖 4-13 DTNSRDC 4383 原始設計與最佳化後之扭力曲線

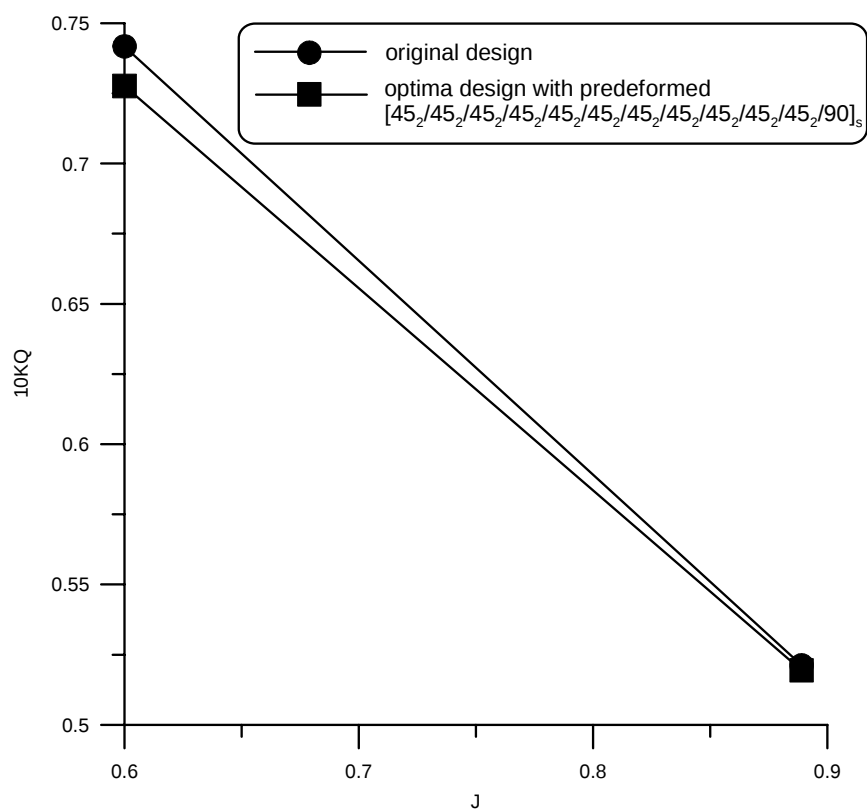


圖 4-14. DTNSRDC4382 原始設計與最佳化後之扭力曲線

表 4-1 $[90_2/-45_2/90_2/0_2//45_2/-45_2/0_2/90_2/0_2/90_2/0_2/90_2]_s$ 螺槳在 $J=0.889$ 下變形後的螺槳幾何

參數

R/RO	P/D	RAKE/D	SKEW
0.2	1.579	0.000	-0.018
0.25	1.562	-0.002	4.760
0.3	1.541	-0.004	9.653
0.4	1.489	-0.006	19.498
0.5	1.415	-0.008	28.902
0.6	1.322	-0.009	37.862
0.7	1.220	-0.010	46.703
0.8	1.108	-0.010	55.689
0.9	0.989	-0.008	64.817
0.95	0.934	-0.008	69.435
1	0.885	-0.009	74.271

表 4-2 $[90_2/-45_2/90_2/0_2//45_2/-45_2/0_2/90_2/0_2/90_2/0_2/90_2]_s$ 螺槳在 $J=0.6$ 下變形後的螺槳幾何參數

r/R	P/D	RAKE/D	SKEW
0.2	1.585	0.000	-0.018
0.25	1.573	-0.003	4.784
0.3	1.556	-0.005	9.805
0.4	1.504	-0.009	19.800
0.5	1.430	-0.012	29.302
0.6	1.338	-0.014	38.340
0.7	1.235	-0.015	47.255
0.8	1.122	-0.015	56.333
0.9	0.999	-0.014	65.599
0.95	0.940	-0.013	70.323
1	0.890	-0.014	75.371

表 4-3 $[45_2/0_2/45_2/45_2//0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/45_2/45_2]_s$ 螺槳在 $J=0.889$ 下變形後的螺槳幾何參數

R/RO	P/D	RAKE/D	SKEW
0.2	1.576	0.000	-0.018
0.25	1.555	-0.001	4.740
0.3	1.531	-0.003	9.562
0.4	1.469	-0.005	19.357
0.5	1.381	-0.005	28.764
0.6	1.270	-0.005	37.723
0.7	1.142	-0.002	46.542
0.8	0.999	0.003	55.466
0.9	0.838	0.013	64.489
0.95	0.747	0.021	69.046
1	0.631	0.034	73.955

表 4-4 [45₂/0₂/45₂/45₂//0₂/0₂/0₂/0₂/0₂/0₂/45₂/45₂]_s 螺槳在 J=0.6 下變形後的螺槳幾何參數

R/RO	P/D	RAKE/D	SKEW
0.2	1.581	0.000	-0.018
0.25	1.564	-0.002	4.767
0.3	1.541	-0.004	9.689
0.4	1.476	-0.007	19.622
0.5	1.383	-0.008	29.131
0.6	1.264	-0.007	38.165
0.7	1.128	-0.004	47.039
0.8	0.974	0.003	56.022
0.9	0.802	0.014	65.135
0.95	0.705	0.023	69.773
1	0.584	0.036	74.910

表 4-5 預變形螺槳幾何參數決定過程

列數		r/R	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	1	KQ0889	KQ06	dKQ
1	original	P/D	1.566	1.539	1.512	1.459	1.386	1.296	1.198	1.096	0.996	0.945	0.895	0.05204	0.07311	0.02107
2		rake/D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
3		skew	0	4.647	9.293	18.816	27.991	36.77	45.453	54.245	63.102	67.531	72			
4	deflected	P/D	1.57615	1.555	1.5308	1.46905	1.3813	1.26975	1.1423	0.9986	0.83825	0.7471	0.6309	0.03829	0.05449	0.0162
5		rake/D	0.0001	-0.001	-0.0027	-0.0045	-0.0052	-0.0046	-0.002	0.0032	0.013	0.0209	0.0337			
6		skew	-0.0176	4.7395	9.56175	19.3566	28.764	37.7233	46.542	55.466	64.4891	69.046	73.955			
7	predeform 1	P/D	1.5567	1.5191	1.4924	1.4494	1.3935	1.3287	1.2667	1.2147	1.1846	1.181	1.1949			
8		rake/D	0.0001	0.0015	0.003	0.0048	0.0056	0.0048	0.0018	-0.004	-0.0154	-0.0243	-0.0362			
9		skew	-0.0176	4.5508	8.9989	18.2143	27.15	35.7397	44.262	52.893	61.5509	65.827	69.92			
10	deflected	P/D	1.5672	1.5393	1.5152	1.4596	1.3843	1.2902	1.1874	1.0767	0.9642	0.909	0.85	0.04509	0.06163	0.01654
11		rake/D	0.0001	-1E-04	-0.0004	-0.0009	-0.001	-0.001	-7E-04	0.0003	0.002	0.0027	0.0036			
12		skew	-0.016	4.6603	9.3537	18.9297	28.158	36.9897	45.701	54.525	63.4147	67.857	72.438			
13	predeform 2	P/D	1.55025	1.5087	1.4778	1.4437	1.3998	1.35375	1.317	1.303	1.3266	1.353	1.4124			
14		rake/D	0	0.0024	0.0051	0.00855	0.0099	0.0087	0.0038	-0.007	-0.0261	-0.0405	-0.0597			
15		skew	-0.0024	4.4828	8.7608	17.7429	26.479	34.895	43.295	51.798	60.3063	64.485	68.224			
16	deflected	P/D	1.5599	1.5297	1.50105	1.4537	1.3887	1.30925	1.2242	1.1388	1.05885	1.0209	0.9949	0.05022	0.06757	0.01735
17		rake/D	0	0.0007	0.0015	0.0025	0.0029	0.00245	0.0012	-0.001	-0.0049	-0.0075	-0.0117			
18		skew	-0.0036	4.6151	9.15985	18.5183	27.572	36.2667	44.892	53.627	62.4163	66.772	70.952			
19	predeform 3	P/D	1.55249	1.5096	1.47945	1.445	1.4016	1.3583	1.3279	1.3259	1.37085	1.41	1.4795			
20		rake/D	0	0.0025	0.00504	0.00847	0.0099	0.00875	0.0036	-0.008	-0.0298	-0.0462	-0.0672			
21		skew	0.00168	4.4617	8.73433	17.7304	26.46	34.8497	43.216	51.684	60.148	64.329	68.181			
22	deflected	P/D	1.56155	1.531	1.50345	1.4595	1.3905	1.314	1.2354	1.1607	1.097	1.0674	1.0441	0.05189	0.06967	0.01778
23		rake/D	0	0.0007	0.0013	0.0022	0.0026	0.0022	0.0007	-0.003	-0.0084	-0.0125	-0.0171			
24		skew	-0.007	4.603	9.1523	18.5105	27.596	36.2649	44.874	53.584	62.3531	66.716	70.994			

表 4-6 直徑 20 公分預變形螺槳幾何參數決定過程

列數		r/R	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	1	KQ0889	KQ06	dKQ
1	original	P/D	1.566	1.539	1.512	1.459	1.386	1.296	1.198	1.096	0.996	0.945	0.895	0.05204	0.07311	0.02107
2		rake/D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
3		skew	0	4.647	9.293	18.816	27.991	36.77	45.453	54.245	63.102	67.531	72			
4	deflected	P/D	1.5728	1.5487	1.5209	1.465	1.3854	1.2853	1.173	1.0499	0.9208	0.8516	0.7708	0.04555	0.064055	0.018505
5		rake/D	0.0002	-6E-04	-0.0014	-0.0022	-0.0027	-0.0024	-0.001	0.0012	0.0059	0.0094	0.0156			
6		skew	-0.0347	4.6798	9.4457	19.0734	28.371	37.2367	46.006	54.864	63.8104	68.313	72.967			
7	predeform 1	P/D	1.5592	1.5293	1.5031	1.453	1.3866	1.3067	1.223	1.1421	1.0712	1.0384	1.0192			
8		rake/D	-0.0002	0.0006	0.0014	0.0022	0.0027	0.0024	0.0013	-0.001	-0.0059	-0.0094	-0.0156			
9		skew	0.0347	4.6142	9.1403	18.5586	27.611	36.3033	44.9	53.627	62.3936	66.749	71.033			
10	deflected	P/D	1.565	1.5398	1.5135	1.4589	1.3852	1.294	1.1953	1.0907	0.9876	0.9363	0.8882	0.04898	0.068165	0.019185
11		rake/D	-0.0002	-1E-04	-0.0001	-0.0003	-0.0002	-0.0003	-3E-04	0	0.0003	0.0003	-0.0004			
12		skew	0.0295	4.6488	9.2947	18.8579	28.035	36.8398	45.511	54.328	63.1975	67.627	72.092			
13	predeform 2	P/D	1.5602	1.5285	1.5016	1.4531	1.3874	1.3087	1.2257	1.1474	1.0796	1.0471	1.026			
14		rake/D	0	0.0007	0.0015	0.0025	0.0029	0.0027	0.0016	-0.001	-0.0062	-0.0097	-0.0152			
15		skew	0.0052	4.6124	9.1386	18.5167	27.567	36.2335	44.842	53.544	62.2981	66.653	70.942			
16	deflected	P/D	1.5674	1.5398	1.5121	1.4589	1.3859	1.2956	1.1965	1.0943	0.9928	0.9395	0.8876	0.04966	0.068725	0.019065
17		rake/D	0.0002	0	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	0.0001	0.0001	0.0003	0.0008	0.0011			
18		skew	-0.0304	4.649	9.307	18.8334	28.007	36.7828	45.467	54.265	63.1185	67.551	72.023			
19	predeform 3	P/D	1.5637	1.5257	1.49635	1.45345	1.3902	1.3157	1.2352	1.166	1.109	1.0776	1.0498			
20		rake/D	0.0007	0.0011	0.00185	0.00355	0.0036	0.00375	0.0027	-0.001	-0.0073	-0.0108	-0.0138			
21		skew	-0.0981	4.6061	9.13265	18.3701	27.414	35.9892	44.637	53.254	61.9639	66.316	70.62			
22	deflected	P/D	1.57085	1.5361	1.50645	1.45895	1.3897	1.30435	1.2095	1.1181	1.03155	0.9827	0.9298	0.051	0.07037	0.01937
23		rake/D	0.0009	0.0004	0.00035	0.00105	0.0007	0.0009	0.001	-4E-04	-0.002	-0.0022	-0.0006			
24		skew	-0.0348	4.644	9.2991	18.681	27.845	36.5317	45.244	53.953	62.7714	67.193	71.655			
25	predeform 4	P/D	1.5637	1.5267	1.49835	1.45645	1.3942	1.3207	1.2412	1.173	1.117	1.0861	1.0588			
26		rake/D	0	0.0007	0.0015	0.0025	0.0029	0.0027	0.0016	-0.001	-0.0062	-0.0097	-0.0152			
27		skew	0.0052	4.6124	9.1386	18.5167	27.567	36.2335	44.842	53.544	62.2981	66.653	70.942			
28	deflected	P/D	1.5707	1.5377	1.5089	1.4617	1.3934	1.30855	1.2148	1.124	1.03265	0.9802	0.9161	0.051245	0.070545	0.0193
29		rake/D	0.0002	-5E-05	0	0.00005	-0.0001	-0.0001	-1E-04	-3E-04	-5E-05	0.0006	0.0025			
30		skew	-0.0346	4.6495	9.3047	18.8219	28.001	36.7777	45.465	54.259	63.1286	67.557	71.974			

表 4-7 Characteristics of the DTNSRDC Propeller 4497 [32]

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

	Pitch	Rake	Skew	Chord	Camber	Thickn ess
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.	2.328	0.202	0.0408	0.0396
0.3	1.512	0.	4.655	0.229	0.0407	0.0358
0.4	1.459	0.	9.363	0.275	0.0385	0.0294
0.5	1.386	0.	13.94 8	0.312	0.0342	0.0240
0.6	1.296	0.	18.37 8	0.337	0.0281	0.0191
0.7	1.198	0.	22.74 7	0.347	0.0230	0.0146
0.8	1.096	0.	27.14 5	0.334	0.0189	0.0105
0.9	0.996	0.	31.57 5	0.280	0.0159	0.0067
0.95	0.945	0.	33.78 8	0.210	0.0168	0.0048
1.0	0.895	0.	36.0	0.000	0.0000	0.0029

表 4-8 Characteristics of the DTNSRDC Propeller 4496 [32]

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

	Pitch	Rake	Skew	Chord	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.	0.	0.202	0.0408	0.0396
0.3	1.512	0.	0.	0.229	0.0407	0.0358
0.4	1.459	0.	0.	0.275	0.0385	0.0294
0.5	1.386	0.	0.	0.312	0.0342	0.0240
0.6	1.296	0.	0.	0.337	0.0281	0.0191
0.7	1.198	0.	0.	0.347	0.0230	0.0146
0.8	1.096	0.	0.	0.334	0.0189	0.0105
0.9	0.996	0.	0.	0.280	0.0159	0.0067
0.95	0.945	0.	0.	0.210	0.0168	0.0048
1.0	0.895	0.	0.	0.000	0.0000	0.0029

表 4-9 Characteristics of the DTNSRDC Propeller 4383 [32]

Number of blades, k : 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

Design Advance coefficient, JA : 0.889

r/R	P/D	X_m/D	Degree	C/D	Camber/ C_i	Thickness/ D
0.2	1.566	0.	0.	0.174	0.0402	0.0434
0.25	1.539	0.0119	4.647	0.202	0.0408	0.0396
0.3	1.512	0.0390	9.293	0.229	0.0407	0.0358
0.4	1.459	0.0763	18.816	0.275	0.0385	0.0294
0.5	1.386	0.1078	27.991	0.312	0.0342	0.0240
0.6	1.296	0.1324	36.770	0.337	0.0281	0.0191
0.7	1.198	0.1512	45.453	0.347	0.0230	0.0146
0.8	1.096	0.1651	54.245	0.334	0.0189	0.0105
0.9	0.996	0.1745	63.102	0.280	0.0159	0.0067
0.95	0.945	0.1773	67.531	0.210	0.0168	0.0048
1.0	0.895	0.1790	72.000	0.000	0.0000	0.0029

表 4-10. Characteristics of the DTNSRDC Propeller 4382 [32]

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

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	0.0093	2.328	0.202	0.0408	0.0396
0.3	1.512	0.0185	4.655	0.229	0.0407	0.0358
0.4	1.459	0.0367	9.363	0.275	0.0385	0.0294
0.5	1.386	0.0527	13.948	0.312	0.0342	0.0240
0.6	1.296	0.0656	18.378	0.337	0.0281	0.0191
0.7	1.198	0.0758	22.747	0.347	0.0230	0.0146
0.8	1.096	0.0838	27.145	0.334	0.0189	0.0105
0.9	0.996	0.0901	31.575	0.280	0.0159	0.0067
0.95	0.945	0.0924	33.788	0.210	0.0168	0.0048
1.0	0.895	0.0942	36.0	0.000	0.0000	0.0029

表 4-11. DTNSRDC-4498 與 DTNSRDC-4383 扭力係數比較

	KQ			
Propeller	最佳化 4498	原始設計 4498	最佳化 4383	原始設計 4383
J=0.889	0.05189	0.05204	0.05061	0.05060
J=0.6	0.06967	0.07311	0.06706	0.07196
KQ	0.01778	0.02107	0.01644	0.02136
KQ 變化量	0.00329		0.00492	

表 4-12. DTNSRDC-4497 與 DTNSRDC-4382 扭力係數比較

	KQ			
Propeller	最佳化 4497	原始設計 4497	最佳化 4382	原始設計 4382
J = 0.889	0.04914	0.04964	0.05169	0.05212
J = 0.6	0.07148	0.07212	0.07246	0.07414
KQ	0.02234	0.02248	0.02077	0.02202
KQ 變化量	0.00014		0.00125	

第五章 螺槳製作與實驗

5-1 實驗規劃

此實驗目的是有限元素分析及最佳化設計的結果和實際情況的比較，所以實驗的重點是量測螺槳性能與觀察螺槳的變形。首先必須先決定在那一種實驗水槽進行實驗，在拖曳水槽中進行實驗可以使用直徑較大的螺槳，而且可以量測較高的扭力與推力，但是很難觀測到葉片的變形量；在空蝕水槽中進行實驗較容易觀察到葉片的變形量，但只能使用直徑較小的螺槳，推力、扭力的量測也會受到限制。最後決定在空蝕水槽進行，利用動力相似的概念，僅量測較低轉速的量測數據，再以變形量的觀察輔之。

實驗採用兩種不同幾何外型的螺槳，分別是 DTNSRDC-4498 以及 DTNSRDC-4383[32]，兩種均為經過疊層最佳化設計的預變形螺槳，其幾何參數如表 5-1 和表 5-2 所示。此兩種外型所採用的最佳疊層，分別是 (1)DTNSRDC-4498 搜尋得到的最佳疊層： $[45_2/90_2/45_2/45_2/45_2/0_2/0_2/0_2/0_2/45_2]_s$ ，(2)DTNSRDC-4383 進搜尋得到的最佳疊層： $[45_2/0_2/45_2/0_2/45_2/45_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2]_s$ 。所以本次實驗共有兩組螺槳。

5-2 螺槳製作

螺槳葉片材料使用 Toho HTA1200 碳纖維/ACD8801 環氧樹脂的預浸材，材料係數如表 2-2 所示。實驗所用的螺槳葉片與車轂分開製作，螺槳葉片製作完成後便夾入金屬車轂中。首先根據兩種不同的螺槳外型製作鋁合金模具(如圖 5-1 和圖 5-2 所示)，然後依據模具上的螺槳葉片形狀、纖維角度定義(如圖 5-3 所示)，剪裁出各層纖維預浸材葉片(如圖 5-4 所示)；接下來將碳纖維預浸材貼於模具上進行積層(如圖 5-5 和圖 5-6 所示)，為了避免葉片與車轂交接處的纖維不連續，積層時纖維必須延伸至車轂內，再以纖維碎屑將車轂部份填滿。積層完成後送入熱壓機(圖 5-7)加壓加熱至攝氏 150 度，壓力 30 psi。加熱一小時後取出冷卻再脫膜取出螺葉(圖 5-8)，將超出邊緣的纖維修整(圖 5-9)，表面以補土填平，最後將表面磨平磨滑即完成螺葉的製作(圖 5-10)。表 5-3 和表 5-4 分別記錄兩種葉片製作時的注意事項及較為困難的部份，

其中最困難的部分在於脫膜，雖然使用脫膜劑，仍然會產生纖維黏在模具表面上以及葉片尖端斷裂的情況，必須利用碳纖維預浸材與鋁合金模具不同的熱膨脹係數，給予冷卻以及急速加溫，才能使葉片順利離膜。最後把葉片根部夾入金屬車轂中，即完成螺槳的製作(圖 5-11 與圖 5-12)。

5-3 量測方法

螺槳的推力和扭力由動力儀量測，首先進行動力儀的推力以及扭力校正(如圖 5-13 和 5-14 所示)。利用逐漸加大外力的方式，分別記錄推力及扭力所對應電壓值，求出推力扭力和電壓的關係曲線和曲線斜率。如此一來，螺槳運轉時產生的推力與扭力，可從動力儀所量到的電壓值以及關係曲線的斜率換算，進一步可以求出推力係數、扭力係數以及效率。

實驗在空蝕水槽中進行，圖 5-15 為空蝕水槽的外型，水流由截面積較大的 A_1 進入截面積較小的 A_2 ，螺槳所在位置的截面 A_2 長寬為 40 cm × 40 cm。為了量測 A_2 截面的流速，兩個截面各有一個流通管接到壓力計以量測兩個截面的壓力差。由 (5-1) 式的伯努力定律與 (5-2) 式的流量恆等式，再加上已知截面積比 A_1/A_2 為 2.86，可以從壓力差計算出流速 V_2 如 (5-3) 式所示。

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 \quad (5-1)$$

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (5-2)$$

$$V_2 = \frac{\sqrt{\Delta P}}{2.112} \quad (5-3)$$

螺槳在轉動中很難用位移計量測變形量。即使可用雷射位移計在螺槳轉到特定位置時量測，也因為變形方向無法掌握而難以量測螺葉上特定點的位移量。排除使用位移計的可行性，決定採用攝影來測量螺葉的變形。攝影機架設如圖 5-16 所示，首先在軸上標劃刻度線(圖 5-17)，每轉動 5 度拍攝一張靜止的螺葉照片(圖 5-18)。然後在實驗中拍攝轉動中的螺槳(圖 5-19)，拍得變形後螺葉的照片再找出之前拍攝相同位置的靜止照片，以圖像處理軟體將兩者以軸的刻度為基準重疊，即可看出變形前後位置差。

5-4 實驗結果

實驗量測的結果如表 5-5 5-8 及圖 5-20 5-22 所示。圖 5-23 與圖 5-24 為轉速 $n = 7$ rps 下,最佳疊層進行預變形設計的計算以及實驗量測的結果,圖 5-25 與圖 5-26 為轉速 $n = 13$ rps 下,最佳疊層進行預變形設計的計算以及實驗量測的結果,其中在 $n = 7$ rps 下的 K_T 接近計算結果而 K_Q 則略高, $n = 13$ rps 下的 K_T 和 K_Q 則相當接近,但 K_Q 仍微微高於計算結果。又,圖 5-27 為文獻[2]中,PSF2 計算結果與實驗比較。圖中實線為 DTNSRDC 的實驗資料[32],虛線為 MIT 實驗結果[1],方形的點為 PSF2 計算結果。其結果顯示在 $J = 0.6$ 到 1.0 的範圍內,計算得到的 K_Q 都小於實驗值,本實驗結果與文獻[32]相同。

接著觀察變形量對螺槳性能的影響, $n = 13$ rps 轉速為 $n = 7$ rps 的 1.86 倍,壓力則為 $1.86^2 = 3.45$ 倍,變形量也大得多。在不考慮螺槳變形的情況下,PSF2 計算 DTNSRDC-4383 的結果為 $K_Q^{0889} = 0.0506, K_Q^{06} = 0.07146$;計算 4498 的結果為 $K_Q^{0889} = 0.05204, K_Q^{06} = 0.07311$ 。在採用預變形設計下,4383 在 $n = 7$ rps 時,最佳疊層的計算結果為 $K_Q^{0889} = 0.05127, K_Q^{06} = 0.07167$;而在 $n = 13$ rps 之下的計算結果為 $K_Q^{0889} = 0.05086, K_Q^{06} = 0.0710$ 。不同轉速之下的扭力係數曲線如圖 5-28。而實驗結果如圖 5-29 所示, $n = 13$ rps 的曲線確實比 $n = 7$ rps 的低,逐漸往原始設計點接近。而 4498 最佳疊層在採用預變形設計下,隨著轉速增加,曲線也逐步下降如圖 5-30 所示, K_Q 曲線一直往下降,而且斜率也越來越小,顯示我們預測的螺距變小確實發生。綜合以上的比較,實驗中變形量對螺槳性能的影響確實與計算的趨勢相符。而圖 5-31 與圖 5-32 分別畫出 $n = 7$ rps 以及 $n=13$ rps 之下,4383 和 4498 的最佳疊層螺槳的 K_Q 曲線比較,而表 5-5 表 5-8 則記錄兩種螺槳在兩種不同轉速之下的 K_Q 。從圖表我們可以發現在不同轉速之下,4383 螺槳的曲線斜率均低於 4498 螺槳,與第三章所得到的結果相符。

圖 5-33 圖 5-38 為螺槳變形量比對方法以及比對結果,分別在 $n = 7$ rps, $J = 0.6$ 以及 $n = 13$ rps, $J = 0.6$ 的情況下之觀測螺槳的變形。圖 5-33 先求長度和像素的比為 $10\text{mm} = 485\text{pix}$,然後圖 5-34 則是將螺槳靜止和運轉中的照片疊合,由於標示的紅線是在同一個半徑上,由前

後緣變形量差可以得知螺距的變化。比對的結果可看出，兩個螺槳的螺距的確有變小，而且變形量都和計算的結果很接近。



圖 5-1. DTNSRDC-4498 之鋁合金模具

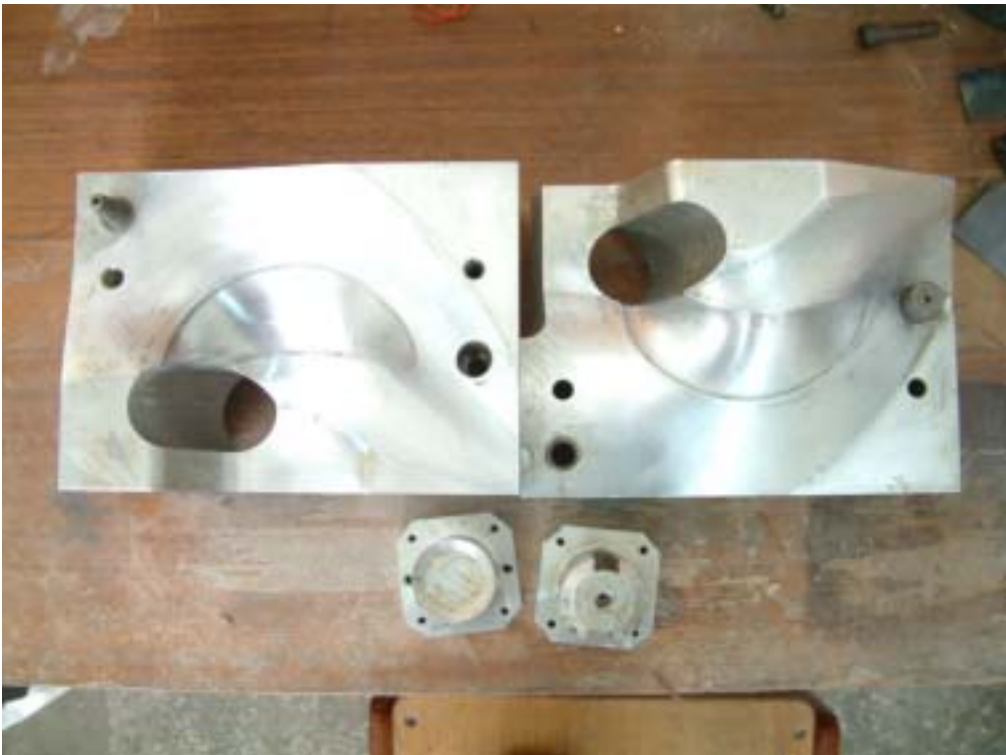


圖 5-2. DTNSRDC-4383 之鋁合金模具

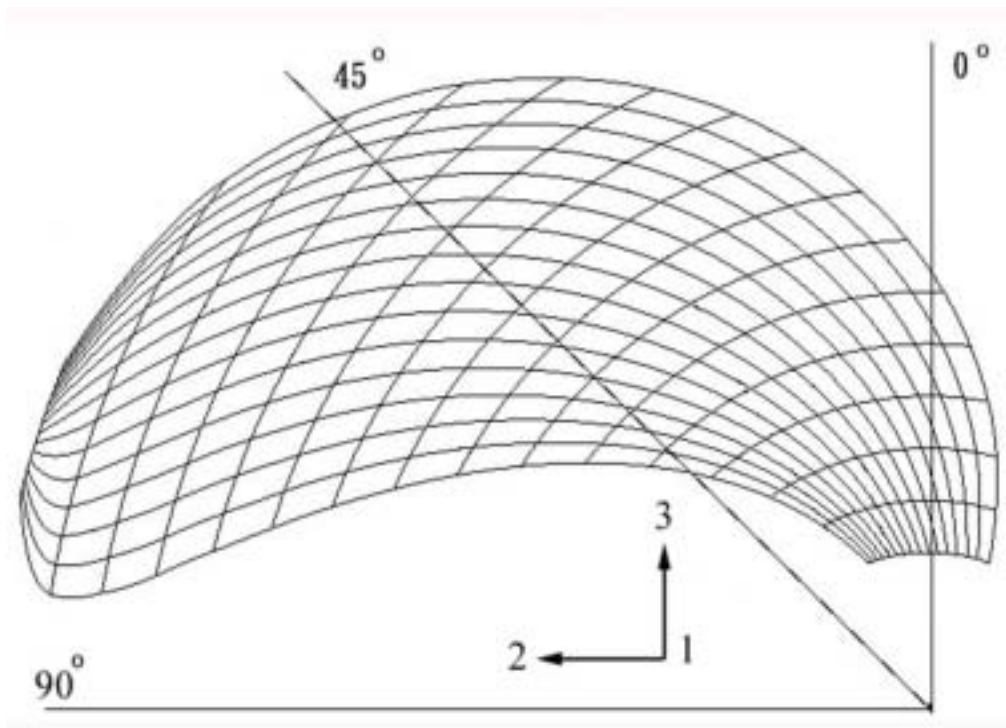


圖 5-3. 纖維角度定義



圖 5-4. 各層纖維形狀

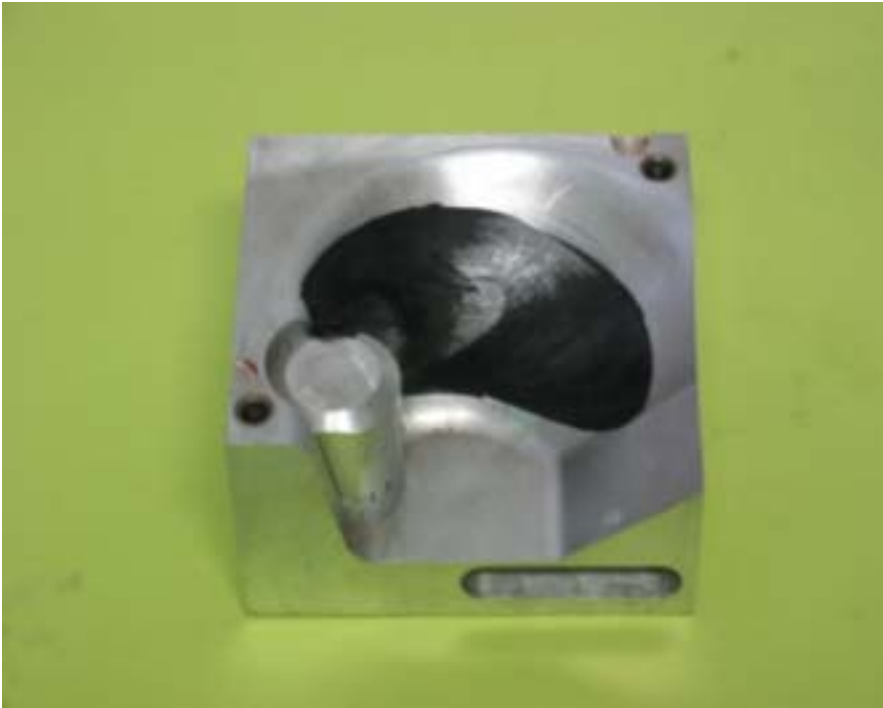


圖 5-5. 在 DTNSRDC-4498 的模具上積層



圖 5-6. 在 DTNSRDC-4383 的模具上積層



圖 5-7. 葉片於熱壓機中熱壓成形



圖 5-8. 從模具上取下的葉片



圖 5-9. 修整邊緣後的葉片



圖 5-10. 加工製作完成之螺槳葉片



圖 5-11. DTNSRDC-4498 完成圖



圖 5-12. DTNSRDC-4383 完成圖



圖 5-13. 進行動力儀推力校正



圖 5-14. 進行動力儀扭力校正

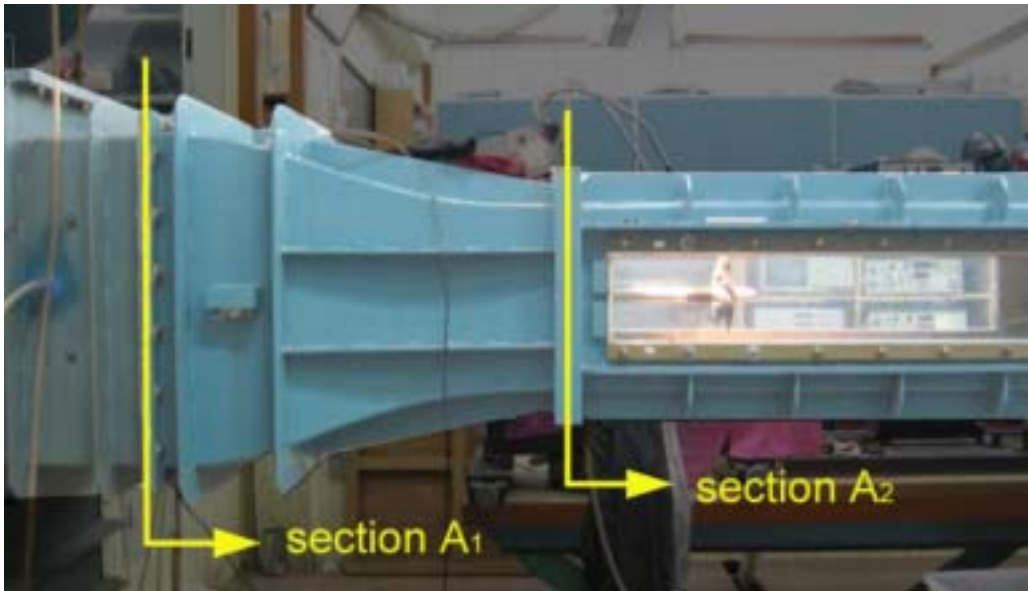


圖 5-15. 空蝕水槽



圖 5-16. 採用攝影方式觀察變形



圖 5-17. 在軸上標劃刻度線



圖 5-18. 拍攝靜止的螺槳

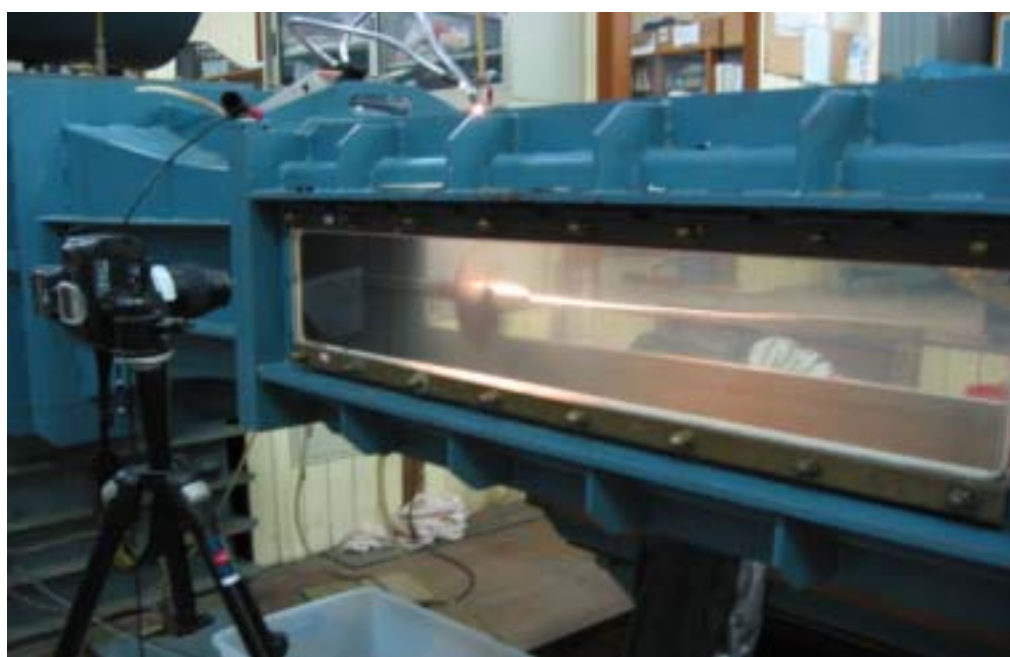


圖 5-19. 拍攝運轉中的螺槳

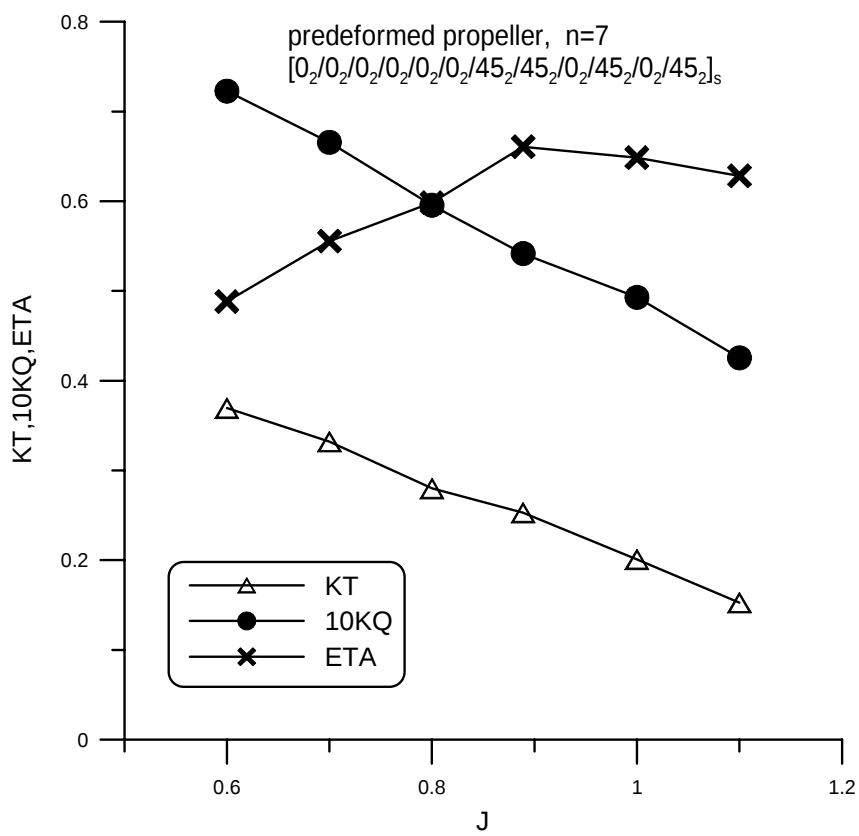


圖 5-20. 4383 最佳疊層之螺槳性能(n=7)

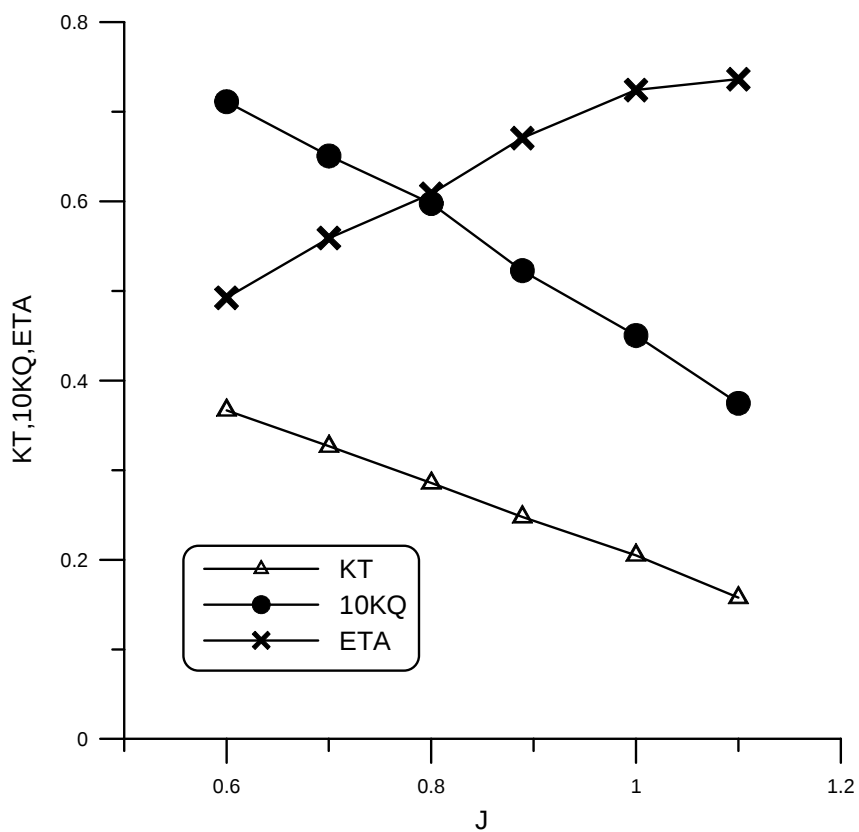


圖 5-21. 4383 最佳疊層之螺槳性能(n=13)

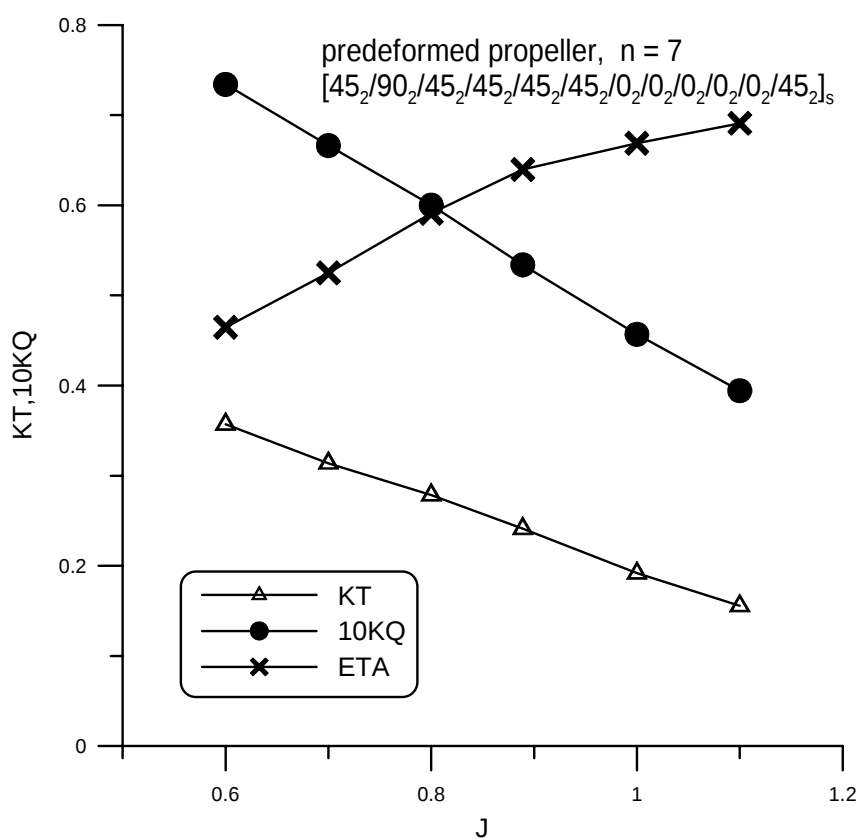


圖 5-22. 4498 最佳疊層之螺槳性能(n=7)

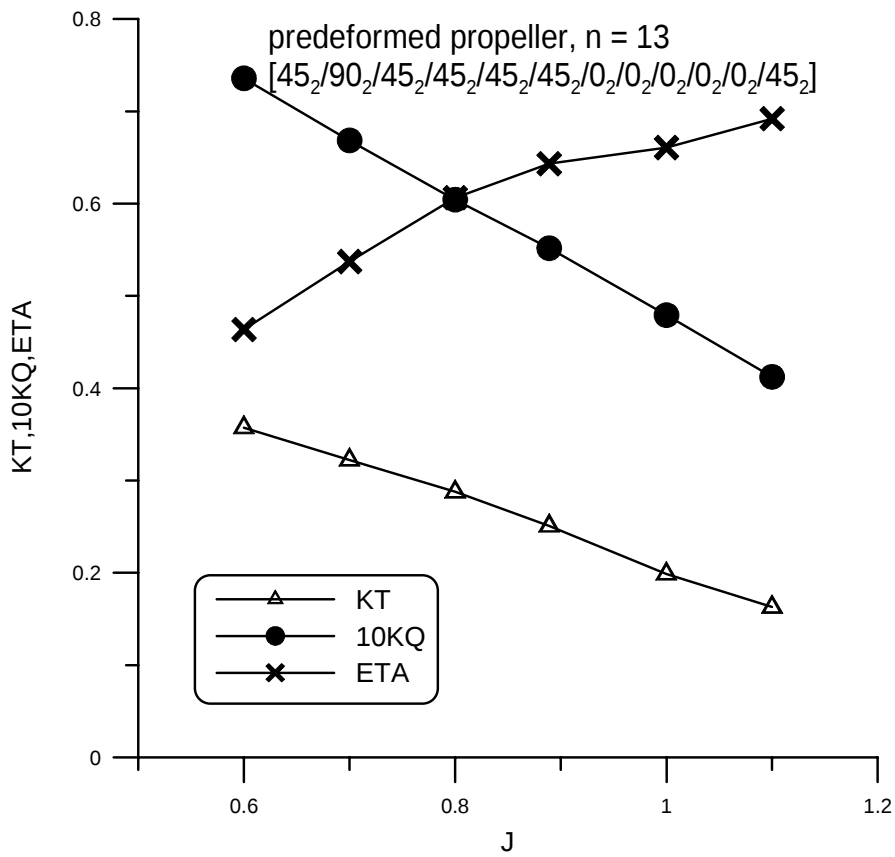


圖 5-23. 4498 最佳疊層之螺槳性能($n=13$)

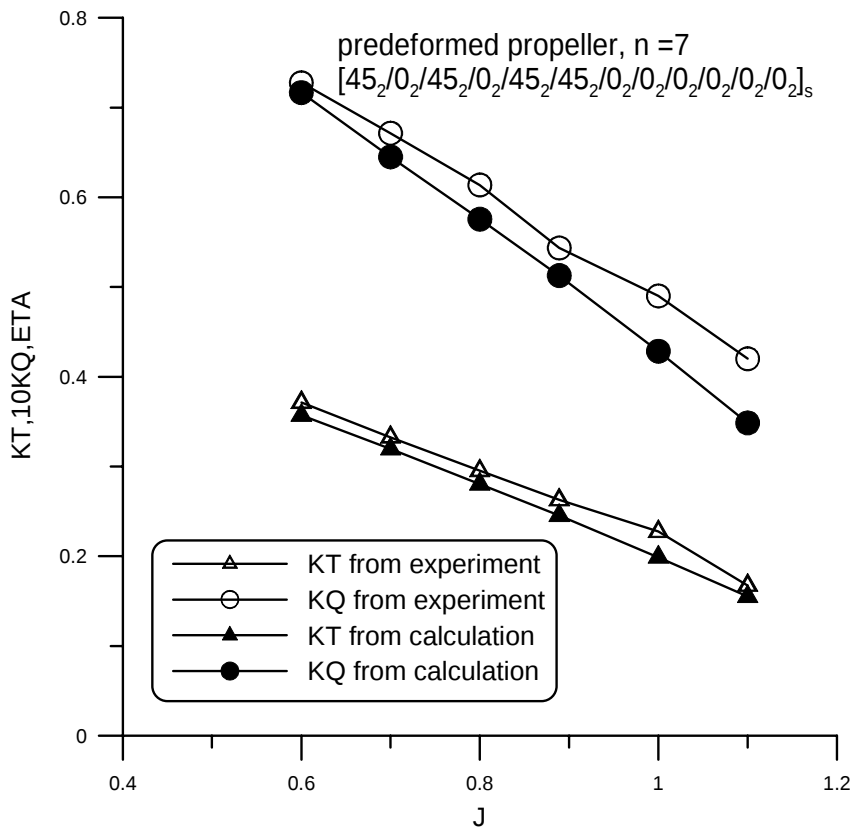


圖 5-24. 4383 最佳疊層實驗與計算結果比較($n=7$)

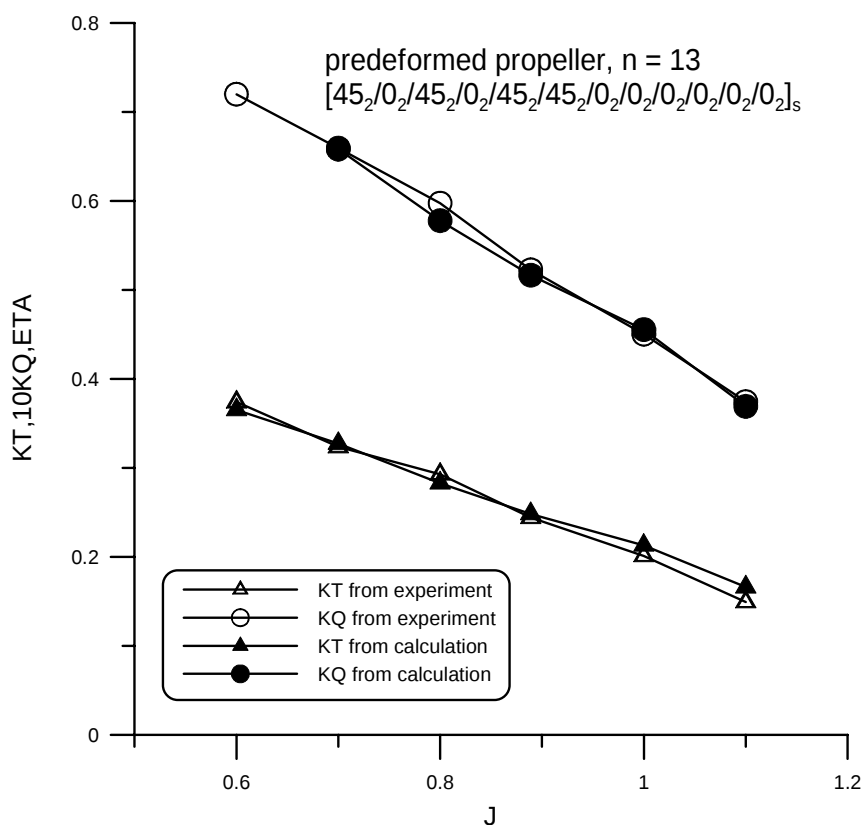


圖 5-25. 4383 最佳疊層實驗與計算結果比較($n=13$)

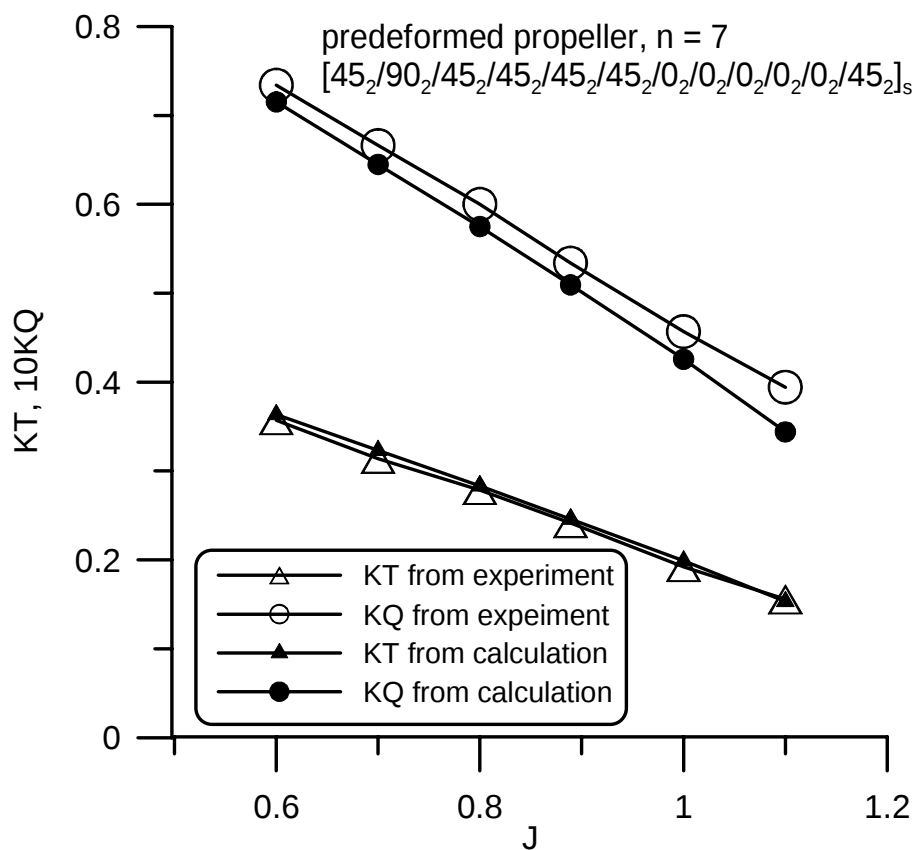


圖 5-26. 4498 最佳疊層實驗與計算結果比較($n=7$)

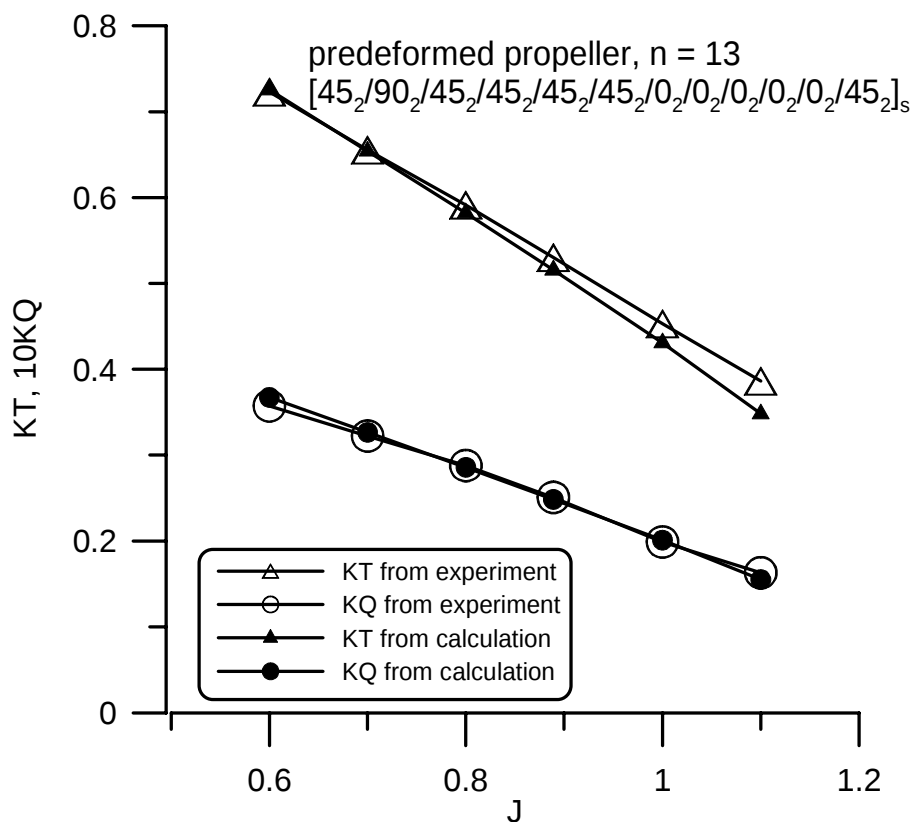


圖 5-27. 4498 最佳疊層實驗與計算結果比較($n=13$)

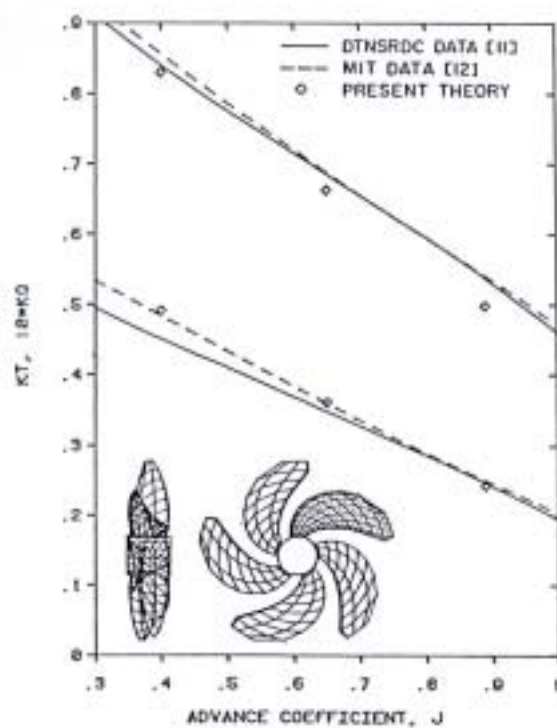


圖 5-28 PSF2 的計算結果和實驗比較[2]

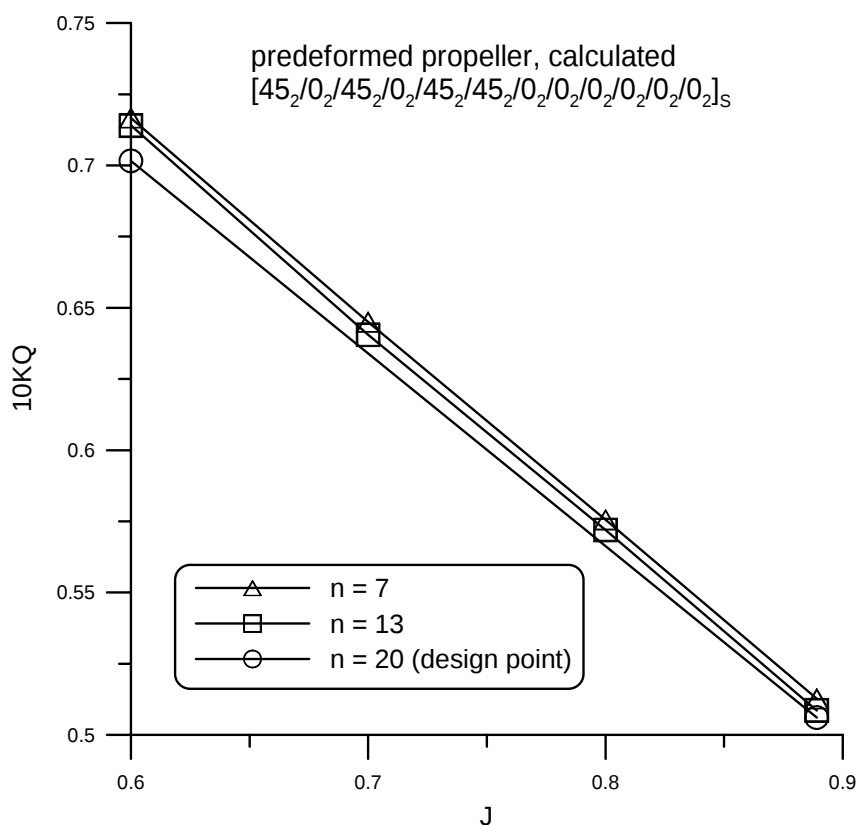


圖 5-29. 性能計算 4383 在三種轉速之下 KQ 的比較

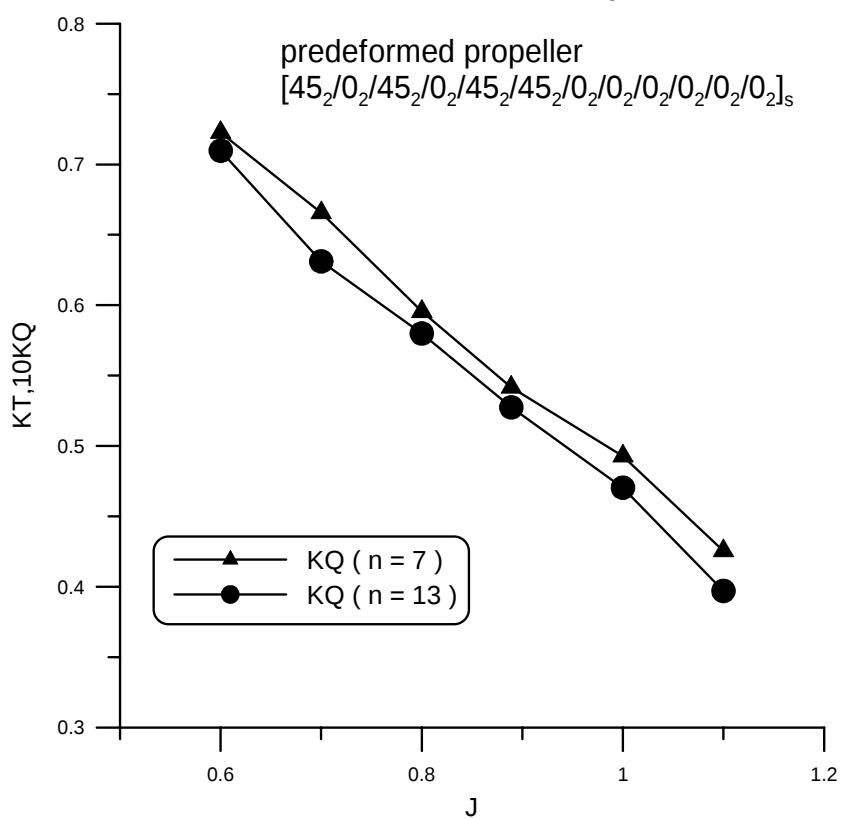


圖 5-30. 實驗量測 4383 在兩種轉速之下 KQ 的比較

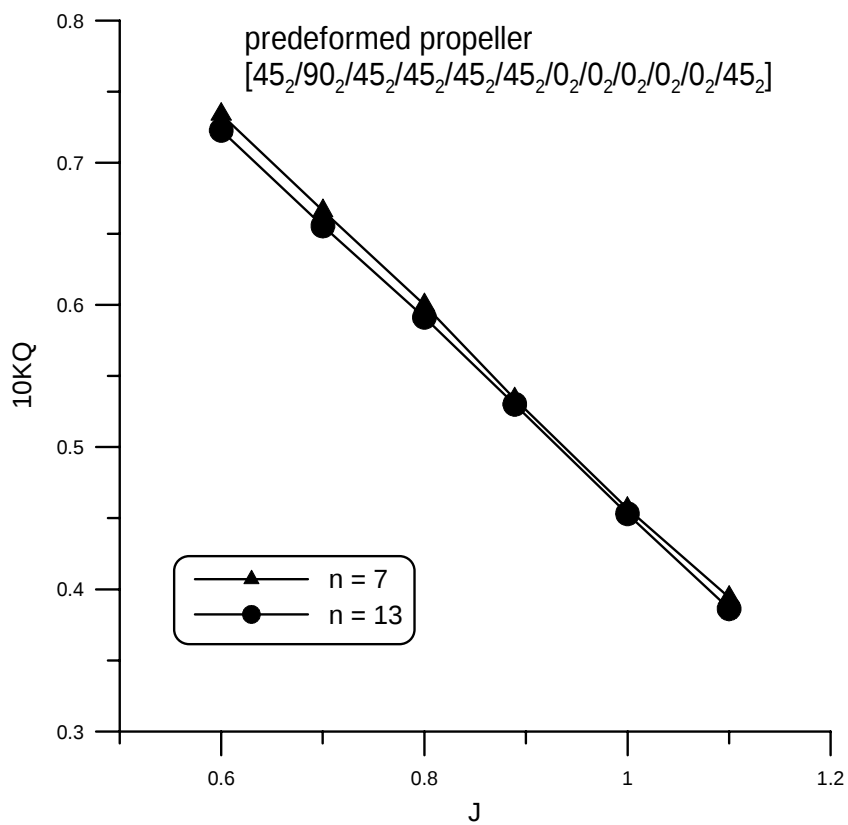


圖 5-31. 實驗量測 4498 在兩種轉速之下 KQ 的比較

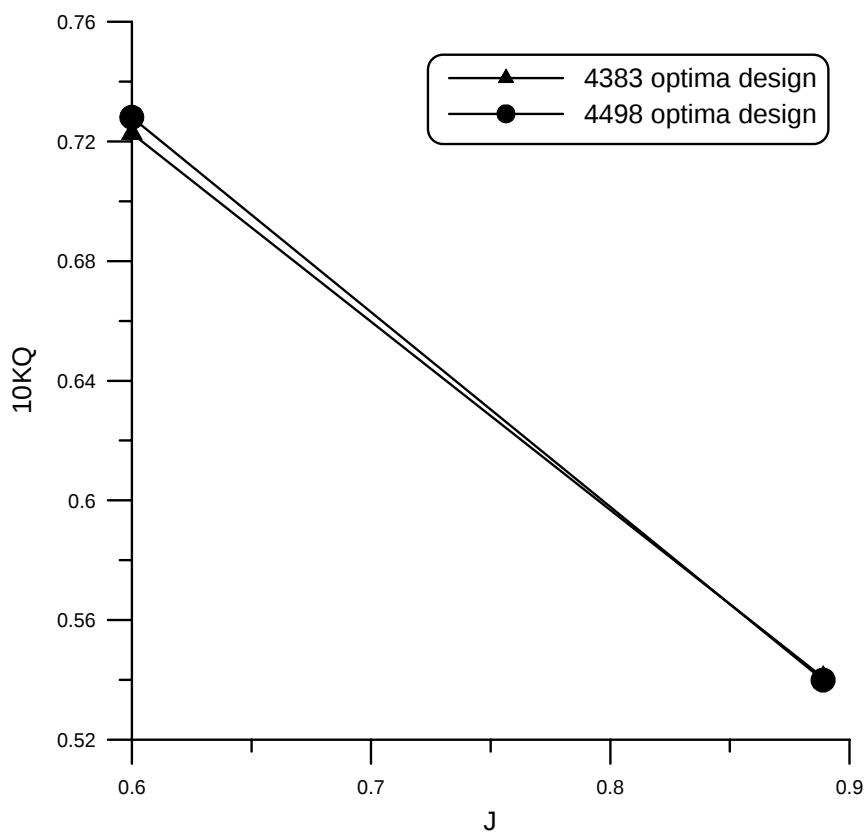


圖 5-32. 4383 與 4498 之實驗 KQ 曲線斜率比較(n=7)

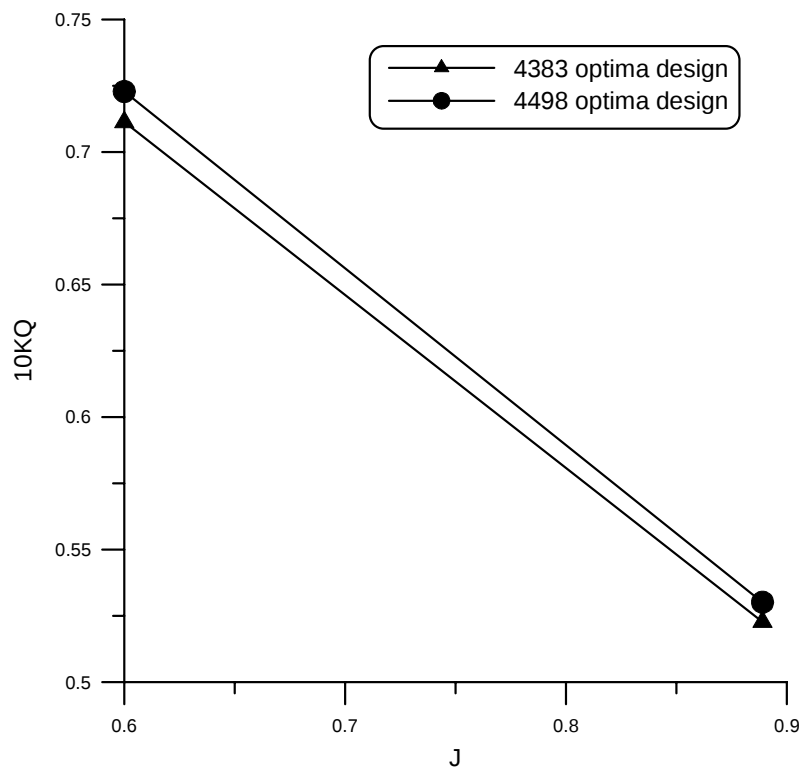


圖 5-33. 4383 與 4498 之實驗 KQ 曲線斜率比較(n=13)

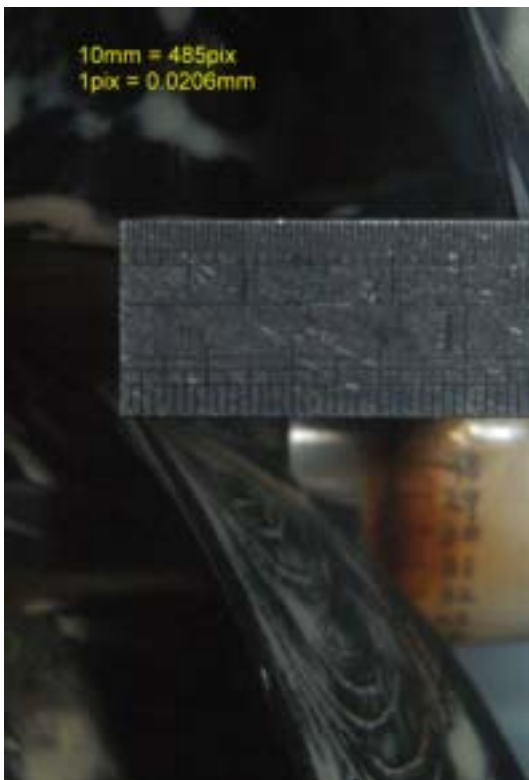


圖 5-34. 像素與長度換算



圖 5-35. 靜止與運轉的相片重合



圖 5-36. 4383 螺槳在 $n = 7$ rps 之下的變形量



圖 5-37. 4383 螺槳在 $n = 13$ rps 之下的變形量

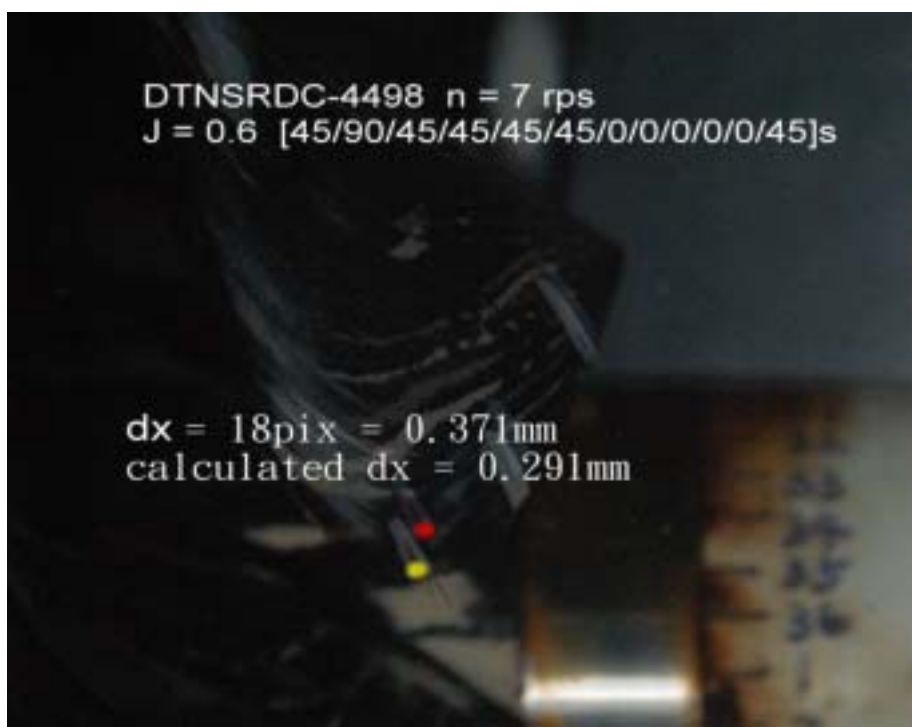


圖 5-38. 4498 螺槳在 $n = 7$ rps 之下的變形量



圖 5-39. 4498 螺槳在 $n = 13$ rps 之下的變形量

表 5-1. DTNSRDC-4498 預變形螺槳幾何參數

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

	Pitch	Rake	Skew	Chord	Camber	Thickness
r/R	P/D	Rake/D	Degree	C/D	Camber/Ci	Thickness/D
0.2	1.571	0.000	0.035	0.174	0.0402	0.0434
0.25	1.538	0.000	4.650	0.202	0.0408	0.0396
0.3	1.509	0.000	9.305	0.229	0.0407	0.0358
0.4	1.462	0.000	18.822	0.275	0.0385	0.0294
0.5	1.393	0.000	28.001	0.312	0.0342	0.024
0.6	1.309	0.000	36.778	0.337	0.0281	0.0191
0.7	1.215	0.000	45.465	0.347	0.023	0.0146
0.8	1.124	0.000	54.259	0.334	0.0189	0.0105
0.9	1.033	0.000	63.129	0.28	0.0159	0.0067
0.95	0.980	0.001	67.557	0.21	0.0168	0.0048
1	0.916	0.003	71.974	0	0	0.0029

表 5-2. DTNSRDC-4383 預變形螺槳幾何參數

Number of blade , K : 5

Hub-Diameter Ratio : 0.2

Expanded Area ratio : 0.725

Section Meanline : NACA a = 0.8

Section Thickness Distribution : NACA 66 (Modified)

	Pitch	Rake	Skew	Chord	Camber	Thickness
r/R	P/D	Rake/D	Degree	C/D	Camber/Ci	Thickness/D
0.2	1.570	0.0000	-0.002	0.174	0.0402	0.0434
0.25	1.539	0.0197	4.579	0.202	0.0408	0.0396
0.3	1.510	0.0390	9.192	0.229	0.0407	0.0358
0.4	1.459	0.0758	18.647	0.275	0.0385	0.0294
0.5	1.389	0.1076	28.765	0.312	0.0342	0.024
0.6	1.303	0.1324	36.502	0.337	0.0281	0.0191
0.7	1.221	0.1514	45.139	0.347	0.023	0.0146
0.8	1.126	0.1657	54.895	0.334	0.0189	0.0105
0.9	1.043	0.1752	62.741	0.28	0.0159	0.0067
0.95	1.004	0.1779	67.164	0.21	0.0168	0.0048
1	0.958	0.1787	71.653	0	0	0.0029

表 5-3. DTNSRDC-4498 葉片製作記錄

試片	溫度	壓力(psi)	根部	葉片面積	葉尖	表面	脫模
p1	150	30	密實	超出多	良好	光滑	良好
p2	150	30	密實	超出多	良好	光滑	微量沾黏
p3	150	30	密實	超出多	良好	光滑	微量沾黏
p4	150	30	密實	超出多	不足	光滑	良好
p5	150	30	密實	超出多	良好	光滑	嚴重沾黏
p6	150	30	密實	超出多	良好	光滑	少量沾黏
p7	150	30	密實	超出多	良好	光滑	良好
p8	150	30	密實	超出多	良好	光滑	良好
p9	150	30	密實	超出多	不足	光滑	少量沾黏
p10	150	30	密實	超出多	良好	光滑	良好

表 5-4. DTNSRDC-4383 葉片製作記錄

試片	溫度	壓力(psi)	根部	葉片面積	葉尖	表面	脫模
p1	150	30	密實	超出少	斷裂	光滑	良好
p2	150	30	密實	超出少	良好	光滑	良好
p3	150	30	密實	超出少	良好	光滑	良好
p4	150	30	密實	超出少	良好	光滑	良好
p5	150	30	密實	超出少	斷裂	光滑	良好
p6	150	30	密實	超出少	良好	光滑	良好
p7	150	30	密實	超出少	良好	光滑	良好
p8	150	30	密實	超出少	斷裂	光滑	良好
p9	150	30	密實	超出少	良好	光滑	良好

表 5-5. 4383 [45₂/0₂/45₂/0₂/45₂/45₂/0₂/0₂/0₂/0₂/0₂]_S 疊層量測結果(n=7)

J	T(Kg)	Q(Kg-cm)	KT	10 * KQ	ETA
0.6	2.945	11.513	0.369	0.723	0.488
0.7	2.646	10.604	0.332	0.666	0.556
0.8	2.231	9.487	0.280	0.596	0.598
0.889	2.016	8.614	0.253	0.541	0.662
1.0	1.601	7.850	0.201	0.493	0.649
1.1	1.217	6.776	0.153	0.425	0.628
KQ(J _{0.6} -J _{0.889})				0.182	

表 5-6. 4383[45₂/0₂/45₂/0₂/45₂/45₂/0₂/0₂/0₂/0₂/0₂]_s 疊層量測結果(n=13)

J	T(Kg)	Q(Kg-cm)	KT	10 * KQ	ETA
0.6	10.080	39.092	0.367	0.711	0.493
0.7	8.973	36.241	0.327	0.659	0.552
0.8	7.848	32.845	0.286	0.598	0.609
0.889	6.808	28.730	0.278	0.523	0.671
1.0	5.631	24.748	0.205	0.450	0.724
1.1	4.330	20.589	0.158	0.375	0.736
KQ(J _{0.6} -J _{0.889})				0.188	

表 5-7. 4498 [45₂/90₂/45₂/45₂/45₂/45₂/0₂/0₂/0₂/0₂/45₂]_s 疊層量測結果(n=7)

J	T(Kg)	Q(Kg-cm)	KT	10 * KQ	ETA
0.6	2.847	11.600	0.357	0.728	0.468
0.7	2.502	10.613	0.314	0.666	0.525
0.8	2.221	9.560	0.279	0.600	0.591
0.889	1.924	8.601	0.241	0.540	0.633
1.0	1.530	7.420	0.192	0.466	0.656
1.1	1.241	6.282	0.156	0.394	0.691
KQ(J _{0.6} -J _{0.889})				0.188	

表 5-8. 4498 [45₂/90₂/45₂/45₂/45₂/45₂/0₂/0₂/0₂/0₂/45₂]_s 疊層量測結果(n=13)

J	T(Kg)	Q(Kg-cm)	KT	10 * KQ	ETA
0.6	9.819	39.725	0.357	0.723	0.472
0.7	8.858	36.027	0.322	0.656	0.548
0.8	7.908	32.496	0.288	0.591	0.620
0.889	6.893	29.132	0.251	0.530	0.670
1.0	5.466	24.905	0.199	0.453	0.699
1.1	4.479	21.230	0.163	0.386	0.739
KQ(J _{0.6} -J _{0.889})				0.193	

第六章 結論與建議

6-1 結論

FRP 複合材料除了質量輕、強度高、耐腐蝕等優點，更可以透過纖維方向的安排來控制其變形。本文針對 FRP 複合材料螺槳進行最佳化，找出最佳的疊層安排使其能有優於傳統金屬的螺槳性能。同時，也針對基因演算法及反應表面法在 FRP 複合材料結構的應用進行探討，將基因演算法加以改良，加入局部搜尋機制，使最佳化搜尋能夠快速收斂至最佳解，減少的計算量達三分之二以上。以下歸納本文於分析及實驗過程中所採取的策略與心得，作為本文的結論。

在最佳化技巧方面：

1. 基因演算法是一種新興的最佳化方法，非常適合多變數、不連續變數及離散變數的最佳化問題，因此很適合用在 FRP 複合材料結構的疊層最佳化。但其最大問題在於龐大的計算量，本文在演算法中加入局部搜尋，可以明顯加速收斂，收斂世代數可以減少三分之二以上。
2. 雖然局部搜尋可以加速收斂，但局部搜尋本身也需要大量的計算，比起原來的作法並沒有減少太多計算。本文提出以回歸分析取代實際計算進行局部搜尋，可以準確又快速的得到目標函數值，讓局部搜尋增加的計算量非常微小。
3. 對複合材料疊層進行回歸分析時，要注意變數值的選擇。雖然-45 度跟 135 度代表的是相同方向的纖維，但是點在曲線中的位置卻大不相同。透過變數值的選擇可以使曲線變得更平滑，回歸分析的誤差會更小。
4. 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。但在未知最佳使用時機時，早開始比晚開始好，過早開始的負面影響並不大。
5. 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。

在 FRP 複合材料螺槳最佳化方面：

1. 以 FRP 複合材料製作螺槳，只有用高歪斜或高偏斜的螺槳才有可能使其性能優於傳統金屬材料。因為高歪斜或高偏斜的外形，讓螺葉上的壓力對根部產生螺距變小的扭

矩，有這個扭矩的存在才有使低速下螺距變小的可能。

2. 同時具高歪斜和高偏斜的 FRP 螺槳，和只具高歪斜的 FRP 螺槳比較起來，更能使性能明顯優於傳統金屬材料。
3. 在不改變螺葉外型下，只透過疊層的安排要改良螺槳性能是無法做到的。必須要找出最小斜率的疊層，配合預變形的外型才能使螺槳達到最佳化的要求。
4. 高歪斜螺槳以及高歪斜、高偏斜螺槳，兩者最佳化結果得到的疊層角度多為 45 度及 0 度，這兩個角度的纖維讓螺葉易於扭轉而不易彎曲，有助於其螺距變化。同時透過彎曲與扭轉的偶合效應，使螺距變小。
4. 疊層安排與螺槳性能間的關係在實驗中獲得驗證，本文所搜尋的最佳疊層可使螺槳的螺距下降，扭力係數曲線也跟著下降。以預變形螺槳配合最佳疊層，可以使扭力係數曲線斜率降低，且在設計速度下接近設計值。

6-2 未來研究之建議

本文之研究成果仍有未盡完美之處，在此提供未來研究之建議，以使 FRP 複合材料螺槳之最佳化設計更為完善。

1. 碳纖維複合材料剛性較高，相對的變形量也比較小，因此透過纖維方向來控制變形的效果就不明顯。未來可以考慮剛性更小的材料，以較大的變形產生較大的性能變化。
2. 低速下螺葉前緣的壓力較大，會使螺葉向上翻揚增加螺距。若能使前緣的剛性增加抵抗前緣的壓力，讓螺葉後緣的變形大於前緣，即可降低螺距。
3. 未來實驗規劃應採用直徑更大的螺槳，其變形量更大性能變化的效果也會更明顯。
4. 螺槳性能計算和實驗僅考慮螺槳單獨實驗的情況，未來可以使用考慮船艏跡流影響的螺槳，搜尋其最佳疊層；而實驗可進行自推實驗，驗證疊層最佳化的效果。

參考文獻

- [1] R. M. Jones, "Mechanics of Composite Materials", Scripta Book Company, Washington, D. C., U. S. A., 1975.
- [2] T. A. Weisshaar, "Divergence of Forward Swept Composite Wings", Journal of Aircraft, Vol. 17, 1980, pp. 442-448.
- [3] K. Wilkinson, J. Markowitz, E. Lerner, D. George and S. M. Batill, "FASTOP: A Flutter and Strength Optimization Program for Lifting Surfer Structure", Journal of Aircraft, Vol. 14, 1997, pp. 581-587.
- [4] T. A. Weisshaar, "Aeroelastic Tailing of Forward Swept Composite Wings", Journal of Aircraft, Vol. 18, 1981, pp. 669-676.
- [5] M. K. Abdul "Effects of Bend-Twist Coupling on Composite Propeller Performance", Mechanics of Composite Materials and Structures, Vol. 7, 2000, pp. 383-401.
- [6] 林俊吉, "FRP 複合材料螺槳之偶合水彈特性分析", 國立台灣大學造船及海洋工程學研究所博士論文, 民國八十五年。
- [7] R. T. Haftka, Z. Gurdal, M. P. Kamat, "Elements of Structural Optimization", Kluwer Academic Publishers, U. S. A., 1990.
- [8] J. P. H. Webber, S. K. Morton, "Uncertainty Reasoning Applied to the Assessment of Composite Materials for Structural Design", Engineering Optimization, Vol. 16, 1990, pp. 43-77.
- [9] S. K. Morton, J. P. H. Webber, "Heuristic Methods in the Design of Composite Laminate Plates", Composite Structures, Vol. 19, 1991, pp. 207-265.
- [10] K. P. Rao, S. Viswanath, S. S. Murthy, J. C. Issac, and C. Jayatheertha, "An Expert System Approach for the Design of Composite Laminates", Journal of the Indian Institute of Science, Vol. 70, 1990, pp. 231-248.
- [11] D. L. Graesser, Z. B. Zabinsky, M. E. Tuttle, and G. I. Kim, "Designing Laminated Composites Using Random Search Techniques", Composite Structures, Vol. 18, 1991, pp. 311-325.
- [12] C. Fang, G. S. Springer, "Design of Composite Laminates by a Monte Carlo Method", Journal of Composite Materials, Vol. 27, No. 7, 1993, pp. 721-753.
- [13] S. Nagendra, R. T. Haftka, and Z. Gurdal, "Stacking Sequence Optimization of Simply Supported Laminates with Stability and Strain Constraints", AIAA Journal, Vol. 30, No. 8, 1992, pp. 2132-2137.
- [14] R. Le Riche, R. T. Haftka, "Improved Genetic Algorithm for Minimum Thickness Composite Laminate Design", Composite Engineering, Vol. 5, No. 2, 1995, pp. 143-161.

- [15] A. Muc, "Transverse Shear Effects in Discrete Optimization of laminated compressed cylindrical shells", *Composite Structures*, Vol. 38, No. 1-4, 1997, pp. 489-497.
- [16] J. H. Park, J. H. Hwang, C. S. Lee, W. Hwang, "Stacking Sequence Design of Composite Laminates for Maximum Strength Using Genetic Algorithms", *Composite Structures*, Vol. 52, 2001, pp. 217-231.
- [17] J. S. Kim, C. G. Kim, C. S. Hong, "Optimum design of composite structures with ply drop using genetic algorithm and expert system shell", *Composite Structures*, Vol. 46, 1999, pp. 171-187.
- [18] S. Nagendra, D. Jestin, Z. Gurdal, R. T. Haftka, and L. T. Watson, "Improved Genetic Algorithm for the Design of Stiffened Composite Panels", *Computers and Structures*, Vol. 58, No. 3, 1996, pp. 543-555.
- [19] G. Soremekun, Z. Gurdal, C. Kassapoglou, D. Toni, "Stacking Sequence Blending of Multiple Composite Laminates Using Genetic Algorithms", *Composite Structures*, Vol. 56, 2002, pp. 53-62.
- [20] N. Kogiso, L. T. Watson, Z. Gurdal, R. T. Haftka, "Genetic algorithms with local improvement for composite laminate design", *Structural Optimization*, Vol. 7, 1994, pp. 207-218.
- [21] V. B. Gantovnik, Z. Gurdal, L. T. Watson, "A genetic algorithm with memory for optimal design of laminated sandwich composite panels", *Composite Structures*, Vol. 58, 2002, pp. 513-520.
- [22] B. Liu, R. T. Haftka, M. A. Akgun, A. Todoroki, "Permutation genetic algorithm for stacking sequence design of composite laminates", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 186, 2000, pp. 357-372.
- [23] P. Y. Tabakov, "Multi-dimensional design optimization of laminated structures using an improved genetic algorithm", *Composite Structures*, Vol. 54, 2001, pp. 349-354.
- [24] R. H. Myers and D. C. Montgomery, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley & Sons, Inc., U. S. A.
- [25] L. P. Khoo, C. H. Chen, "Integration of Response Surface Methodology with Genetic Algorithms", *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 18, 2001, pp. 483-489.
- [26] V. V. Toropov, L. F. Alvarez, "Application of Genetic Programming and Response Surface Methodology to Optimization and Inverse Problems", *Inverse Problems in Engineering Mechanics*, 3rd, 1998, pp. 551-560.
- [27] J. E. Kerwin and C. S. Lee, *Prediction of Steady and Unsteady Marine Propeller Performance by Numerical Lifting-Surface Theory*, SNAME Transactions, Vol. 86, 1978, pp. 218-253.
- [28] D. S. Greeley and J. E. Kerwin, *Numerical Methods for Propeller Design and Analysis in*

Steady Flow, SNAME Transactions Vol 90, 1982, pp. 415-453.

- [29] C. W. Jiang, T. T. Hung, N. Raymond, and Y. S. Shin, Propeller Hydrodynamic Loads and Blade Stresses and Deflections during Backing and Crash Operations, Trans. SNAME on the Propeller's 88 Symposium No. 8, 1988.
- [30] D. E. Goldberg, "Genetic algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Addison Wesley Longman, U. S. A., 1989.
- [31] J. S. Carton, Marine Propellers and Propulsion, Butterworth-Heinemann Ltd, U.K., 1994.
- [32] 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.
- [33] J. H. Holland, "Adaptation in natural and artificial systems", Ann Arbor: The University of Michigan Press.
- [34] Engine Selection and Project Manual of Sulzer RTA84C and RTA96C, July 1998.