

國立台灣大學工程科學及海洋工程學研究所

碩 士 論 文

指導教授：李 雅 榮 博士

高歪斜、高偏斜 FRP 船用螺槳

疊層最佳化探討

Study on the Optimization of Stacking Sequence of
High Skew and High Rake FRP Marine Propellers

研究生：洪 主 頌 撰

中華民國九十三年六月

摘要

本文主要探討具歪斜(Skew)以及偏斜(Rake)之 FRP 船用螺槳，經疊層最佳化後，對螺槳性能的影響。

基因演算法適合 FRP 的疊層角度這種多變數、離散變數等最佳化的問題，但計算量十分龐大；若利用反應表面法結合基因演算法，先得到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，可節省大量的計算時間；而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，能提高搜尋的準確度。

本文結合流力計算程式 PSF2 與結構計算程式 ABAQUS，得到螺槳性能；利用上述改良式基因演算法尋找最佳疊層的角度與順序，進一步使用預變形設計調整螺槳外型。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印證計算結果。由實驗可得知當入流速度變小時，螺距變小，螺槳扭力係數也隨之下降，與計算結果吻合。經疊層最佳化的複合材料螺槳的性能的確較傳統金屬材料螺槳優越。

Abstract

This thesis investigated the performance of highly-skewed and highly-raked FRP marine propellers with optimization of arranging the stacking sequence.

The application of genetic algorithms(GA) to the stacking sequence of composite laminates has grown in recent years, but GA always takes a lot of time because of huge calculation. To reduce calculation time, we insert a local improvement into GA, and the calculation by finite element analysis is replaced by a regression model. The GA with local improvement is applied to the composite propeller. It converges much sooner than a standard GA and the calculation time greatly reduced. So this thesis uses the improved GA to search for the optimal stacking sequence.

We get the performance and the deformation of FRP propeller by Combining with PSF2, ABAQUS, and the improved GA. The pre-deformed propellers conform to the demands of optimization. Finally, an experiment is made to verify the result of calculation. The performance and the deformation of the propeller are found to be close to the result of the calculation in this study. The pitch of the propeller is reduced when the axial inflow velocity is reduced. The optimized composite material propeller outperforms traditional metal propellers.

目 錄

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

頁次

第一章 導論.....	1
1-1 研究動機.....	1
1-2 文獻回顧.....	2
1-3 論文架構.....	3
第二章 理論基礎與最佳化方法.....	6
2-1 基礎理論.....	6
2-1-1 材料偶合效應.....	6
2-1-2 螺槳幾何.....	7
2-1-3 螺槳座標計算.....	8
2-1-4 由變形反算螺槳幾何參數.....	9
2-1-5 螺槳性能計算.....	10
2-2 最佳化方法.....	12
2-2-1 基因演算法.....	12
2-2-2 回歸分析.....	13
2-2-3 局部搜尋.....	15
第三章 最佳化分析.....	24
3-1 主機和螺槳之組合.....	24

3-2 預變形螺槳.....	26
3-3 疊層最佳化分析.....	27
第四章 螺槳製作與實驗.....	41
4-1 實驗規劃.....	41
4-2 螺槳製作.....	41
4-3 量測方法.....	42
4-4 實驗結果.....	43
第五章 結論與建議.....	70
5-1 結論.....	70
5-2 未來展望.....	70
參考文獻.....	72



圖 目 錄

頁次

圖 1-1 不同軸向速度之入流角.....	5
圖 2-1 積層板所受面內力之圖示.....	16
圖 2-2 積層板所受彎矩之圖示.....	16
圖 2-3 積層板疊層圖.....	16
圖 2-4 螺距示意圖[19]	17
圖 2-5 螺葉中央參考線及歪斜示意圖[19]	17
圖 2-6 螺葉偏斜示意圖[19]	17
圖 2-7 翼斷面橫剖面圖[19]	18
圖 2-8 NACA section 的厚度定義[19]	18
圖 2-9 葉片座標示意圖[19]	18
圖 2-10 葉片所在位置角度示意圖[19]	19
圖 2-11 翼斷面座標示意圖	19
圖 2-12 螺槳性能計算流程圖.....	20
圖 2-13 螺槳性能計算結果	20
圖 2-14 螺槳之有限元素模型.....	20
圖 2-15 各元素疊層數分佈.....	21
圖 2-16 基因演算法流程圖.....	21
圖 2-17 在 GA 中加入局部搜尋流程圖.....	21
圖 2-18 局部搜尋的流程圖.....	22
圖 3-1 引擎特徵曲線圖[19]	29
圖 3-2 預變形螺槳示意圖.....	29
圖 3-3 DTNSRDC-4383 最佳疊層搜尋收斂過程.....	30
圖 3-4 螺槳不變形以及變形後之扭力曲線	30

圖 3-5 DTNSRDC 4383 原始設計與最佳化後之扭力曲線圖.....	31
圖 3-6 DTNSRDC 4498 原始設計與最佳化後之扭力曲線[10]	31
圖 3-7 DTNSRDC 4497 原始設計與最佳化之扭力曲線[10].....	32
圖 3-8 DTNSRDC 4382 原始設計與最佳化後之扭力曲線.....	32
圖 3-9 DTNSRDC 4383 D=20cm 原始設計與最佳化後之扭力曲線.....	33
圖 3-10 DTNSRDC 4498 D=20cm 原始設計與最佳化後之扭力曲線.....	33
圖 4-1 DTNSRDC-4498 之鋁合金模具.....	46
圖 4-2 DTNSRDC-4383 之鋁合金模具.....	46
圖 4-3 纖維角度定義.....	47
圖 4-4 各層纖維形狀.....	47
圖 4-5 在 DTNSRDC-4498 的模具上積層.....	48
圖 4-6 在 DTNSRDC-4383 的模具上積層.....	48
圖 4-7 葉片於熱壓機中熱壓成形.....	49
圖 4-8 從模具上取下的葉片.....	49
圖 4-9 修整邊緣後的葉片.....	50
圖 4-10 加工製作完成之螺槳葉片.....	50
圖 4-11DTNSRDC-4498 完成圖.....	51
圖 4-12 DTNSRDC-4383 完成圖.....	51
圖 4-13 進行動力儀推力校正.....	52
圖 4-14 進行動力儀扭力校正.....	52
圖 4-15 空蝕水槽.....	53
圖 4-16 採用攝影方式觀察變形.....	53
圖 4-17 在軸上標劃刻度線.....	54
圖 4-18 拍攝靜止的螺槳.....	54
圖 4-19 拍攝運轉中的螺槳.....	55
圖 4-20 4383 最佳疊層之螺槳性能(n=7).....	56

圖 4-21 4383 最佳疊層之螺槳性能(n=13).....	56
圖 4-22 4498 最佳疊層之螺槳性能(n=7).....	57
圖 4-23 4498 最佳疊層之螺槳性能(n=13).....	57
圖 4-24 4383 最佳疊層實驗與計算結果比較(n=7).....	58
圖 4-25 4383 最佳疊層實驗與計算結果比較(n=13).....	58
圖 4-26 4498 最佳疊層實驗與計算結果比較(n=7).....	59
圖 4-27 4498 最佳疊層實驗與計算結果比較(n=13).....	59
圖 4-28 PSF2 的計算結果和實驗比較[2].....	60
圖 4-29 性能計算三種轉速之下 KT 與 KQ 的比較.....	60
圖 4-30 實驗量測 4383 在兩種轉速之下 KQ 的比較.....	61
圖 4-31 實驗量測 4498 在兩種轉速之下 KQ 的比較.....	61
圖 4-32 4383 與 4498 之實驗 KQ 曲線斜率比較(n=7).....	62
圖 4-33 4383 與 4498 之實驗 KQ 曲線斜率比較(n=13).....	62
圖 4-34 像素與長度換算.....	63
圖 4-35 靜止與運轉的相片重合.....	63
圖 4-36 4383 螺槳在 $n = 7$ rps 之下的變形量.....	64
圖 4-37 4383 螺槳在 $n = 13$ rps 之下的變形量.....	64
圖 4-38 4498 螺槳在 $n = 7$ rps 之下的變形量.....	65
圖 4-39 4498 螺槳在 $n = 13$ rps 之下的變形量.....	65

表 目 錄

頁次

表 1-1 幾種常用材料之材料性能比較表.....	5
表 2-1 DTNSRDC 4498 螺槳之幾何 [20].....	23
表 2-2 碳纖維 (graphite-epoxy)疊層之材料特性.....	23
表 3-1 直徑 30cm 之預變形螺槳幾何參數決定過程.....	34
表 3-2 直徑 20cm 之預變形螺槳幾何參數決定過程.....	35
表 3-3 DTNSRDC 4498 螺槳之幾何[20].....	36
表 3-4 DTNSRDC 4497 之螺槳幾何[20].....	37
表 3-5 DTNSRDC 4382 之螺槳幾何[20].....	38
表 3-6 DTNSRDC-4498 與 DTNSRDC-4383 扭力係數比較.....	39
表 3-7 DTNSRDC-4497 與 DTNSRDC-4382 扭力係數比較.....	39
表 3-8 DTNSRDC-4498 與 DTNSRDC-4383 (D=20cm) 扭力係數比較.....	39
表 3-9 DTNSRDC 4383 (D = 30 cm) 變形前與變形後的螺距變化.....	40
表 3-10 DTNSRDC 4498 (D = 30 cm) 變形前與變形後的螺距變化.....	40
表 3-11 DTNSRDC 4383 (D = 20 cm) 變形前與變形後的螺距變化.....	41
表 3-12 DTNSRDC 4498 (D = 20 cm) 變形前與變形後的螺距變化.....	41
表 4-1 DTNSRDC-4498 預變形螺槳幾何參數.....	66
表 4-2 DTNSRDC-4383 預變形螺槳幾何參數.....	67
表 4-3 DTNSRDC-4498 葉片製作記錄.....	67
表 4-4 DTNSRDC-4383 葉片製作記錄.....	68
表 4-5 4383 [45 ₂ /0 ₂ /45 ₂ /0 ₂ /45 ₂ /45 ₂ /0 ₂ /0 ₂ /0 ₂ /0 ₂ /0 ₂ /0 ₂] _s 疊層量測結果(n=7).....	68
表 4-6 4383[45 ₂ /0 ₂ /45 ₂ /0 ₂ /45 ₂ /45 ₂ /0 ₂ /0 ₂ /0 ₂ /0 ₂ /0 ₂ /0 ₂] _s 疊層量測結果(n=13).....	68
表 4-7 4498 [45 ₂ /90 ₂ /45 ₂ /45 ₂ /45 ₂ /45 ₂ /0 ₂ /0 ₂ /0 ₂ /0 ₂ /0 ₂ /45 ₂] _s 疊層量測結果(n=7).....	69
表 4-8 4498 [45 ₂ /90 ₂ /45 ₂ /45 ₂ /45 ₂ /45 ₂ /0 ₂ /0 ₂ /0 ₂ /0 ₂ /0 ₂ /45 ₂] _s 疊層量測結果(n=13).....	69

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
$\bar{Q}_{ij}$	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
$i_{Gp} = i_G$	螺槳偏斜
θ_s	螺槳歪斜角
$\theta = \theta_{nt}$	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

纖維強化塑膠材料(Fiber Reinforced Plastic, FRP)具有質量輕、比强度高及耐腐蝕等特性，近年來廣泛應用在各種結構物上。爲了因應結構物大型化、高速化、輕量化等等要求，採用 FRP 複合材料已成爲趨勢。載具如遊艇、飛機、賽車的外殼以及船用螺槳、直昇機旋翼；休閒運動器材如球拍、球桿、釣竿等皆可見到它良好的力學特性。而 FRP 複合材料另一個特點爲材料具有方向性，透過纖維角度的安排，構件可加強特定方向的強度，或往特定方向變形。

螺槳理論設計方法以升力線及升力面理論爲基礎[1][2]，可以充分考慮空蝕要求、不均勻入流等影響，設計所需的翼斷面、螺距、歪斜、偏斜以及展開面積比。近年來船舶對於振動和噪音的要求提高，爲了使流入螺槳各處的流體速度均勻，以及考慮螺槳運轉時本身的振動以及對船艙船殼產生的振動，螺槳通常都會採用歪斜或偏斜設計，使入流均勻以及降低噪音減緩振動[3]。

一般船用螺槳常用的材料爲錳青銅、鋁青銅、鑄鐵、鑄鋼、鎳鋁鋼及不鏽鋼等金屬材料，而 FRP 複合材料較金屬材料爲佳之處在於重量減輕且耐腐蝕性強，金屬材料和複合材料之性質如表 1-1[4][5]。由於 FRP 材料的剛性較低，變形量較金屬大，利用 FRP 複合材料特有的方向性，使螺槳隨著工作條件的變化而產生不同的變形量，即可降低螺槳承受的扭矩。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），當轉速不變而入流速度變慢時，則入流角變小如下圖，入流角變小使得攻角變大，攻角變大則葉片產生的升力變大，如此一來葉片所承受的壓力增加，使得轉動螺槳所需扭矩增加。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，如此可以減少所承受的扭矩。

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，或是結構受到扭轉外力時會產生彎曲變形。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[6]，此種特性在飛機上已有相關應用，例如使用在飛機之機翼表皮以控制機翼的變形[7]，以及應用在航空螺槳上[8]。而當 FRP 螺槳在水中運轉時，葉片承受壓力產生彎矩，因耦合效應同時也產生扭轉，如此一來螺槳的螺距會改變，推力、扭矩及效率等螺槳性能也會改變。1996 年林俊吉[9]針對此問題，進行 FRP 螺槳之耦合水彈特性分析。在 2003 年林敬傑[10]中則針對 FRP 螺槳因剛性較低變形量大，而使螺槳性能在設計速度之下無法維持在原始設計點上，採用了預變形設計。本文利用 FRP 複合材料特有的彎曲-扭轉耦合效應，安排疊層纖維角度，使螺槳葉片在運轉時有較大的變形，進一步改變螺距，成為一個具有自動微調螺距功能螺槳，同時也比較不同外型螺槳在進行疊層最佳化後的性能。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，扭矩降低。

1-2 文獻回顧

FRP 複合材料疊層的最佳化設計，在早期多把角度及疊層當作連續變數進行最佳化[11]，但考慮實際施工的情況，角度只有少數的選擇，如 0、90、45、-45 度等，並非連續變數，而且疊層數超過十層以上，每一層的角度當作一個變數，就有十個以上的不連續變數。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，相當適合以基因演算法進行最佳化搜尋。文獻[12]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[13]、求壓力殼的最佳疊層[14]、安排疊層使積層板具最大破壞強度[15]。

基因演算法雖然適合 FRP 複合材料積層板疊層最佳化，但計算量相當龐大，通常需要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。爲了減少計算量，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[16]，或對特定連續變數[17]。林敬傑[10]將反應表面法(Response Surface Methodology, RSM)與基因演算法結合，以回歸分析把結構的反應表面轉爲回歸模型，然後在基因演算法中以回歸模型取代實際計算，爲了配合回歸分析模型的使用，尚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。本文即利用此法快速得到 FRP 複合材料螺槳的最佳疊層。

在 FRP 複合材料螺槳的疊層最佳化過程中，首先要計算出螺槳的性能。本文使用 MIT 所發展的 PSF2 程式[1][2]計算螺槳扭矩、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。已有多篇文獻採用 PSF2 作爲計算工具，如 Jiang [18] 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爲止。1996 年林俊吉[9]結合有限元素法與非空蝕的升力面理論，成爲一耦合水彈性 (coupled hydroelastic) 螺槳性能分析理論。以幾何非線性九節點殼元素爲基礎，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。2003 年林敬傑[10]採用與 Jiang[18]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、扭矩等運轉性能，結合以

反應表面法改良的基因演算法，搜尋 FRP 複合材料螺槳的最佳疊層。本文即採用和林敬傑[10]相同的計算與搜尋方法。

1-3 論文架構

本文共有五章，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，繼而說明本文之研究主題及方法，並對研究步驟及內文架構作精簡說明。

第二章 理論基礎與最佳化方法

說明本文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、回歸分析數學模式以及局部搜尋機制。

第三章 最佳化過程與結果

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，達到本文目的。

第四章 螺槳製作與性能實驗

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。

第五章 結論與建議

爲本文之綜合整理與總結。

表 1-1 幾種常用材料之材料性能比較表

材料名稱	比重 ρ (g/cm ³)	拉伸強度(kg/mm ²)	彈性係數(kg/mm ²)
鑄鐵	7.6	23.5	10000
鑄鋼	7.85	45~50	21000
不鏽鋼	7.85	68	21000
鋁合金	2.8	22	7200
碳纖維(高強度)	1.74	300	23000
碳纖維(高剛性)	1.81	250	40000
E 玻璃纖維	2.59	250~350	7000

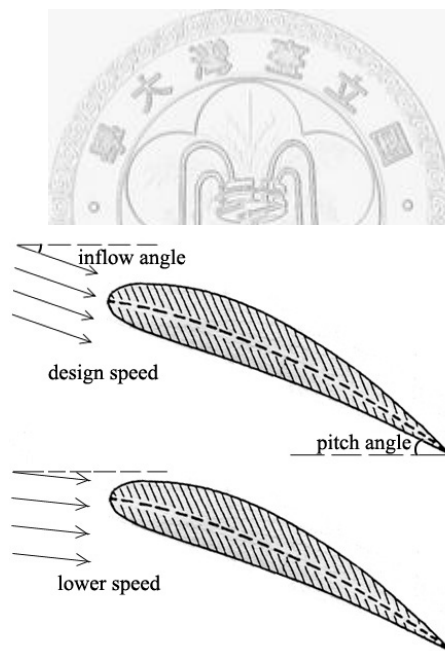


圖 1-1 不同入流速下之入流角

第二章 基礎理論與最佳化方法

2-1. 基礎理論

(1)材料耦合效應

複合材料積層板由兩片以上的單片纖維積層而成，每層使用的纖維角度可自行安排，而積層板的整體剛性可以由每一層的剛性矩陣推算出來[6]。如

(2-1)、(2-2)、(2-3)式所示。

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1^0 \\ \varepsilon_2^0 \\ \varepsilon_6^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_1 \\ \kappa_2 \\ \kappa_6 \end{Bmatrix} \quad (2-1)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1^0 \\ \varepsilon_2^0 \\ \varepsilon_6^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_1 \\ \kappa_2 \\ \kappa_6 \end{Bmatrix} \quad (2-2)$$

式中

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

Q_{ij} 為各層的剛性矩陣； N_x 、 N_y 、 N_{xy} 為單位長度之面內力， M_x 、 M_y 、 M_{xy} 為單位長度之力矩，如圖 2-1 和圖 2-2 所示， z 與 k 如圖 2-3 所示。 A 為面內剛性矩陣，為面內力與面內變形之關係； B 矩陣為耦合剛性矩陣，為面內力與積層板曲率間的關係以及彎矩與積層板面內應變間的關係； D 矩陣為彎曲剛性矩陣，為彎矩與積層板曲率間的關係。積層對稱的積層板， B 矩陣全部為零，

沒有面內變形與曲率變化的偶合效應；若每個角度的疊層都有一對應的疊層的積層方式，稱為平衡疊層，例如正負 45 度。此種疊層的積層板 D_{16} 與 D_{26} 為零，沒有彎曲與扭轉的偶合效應；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。運用此性質，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)螺槳幾何

以下為螺槳主要的幾何參數，給定這些參數便可以求出葉片上所有點的座標位置[19]：

螺距(Pitch)：

螺槳旋轉一圈所前進的距離，如圖 2-4 所示，葉片與轉動方向所夾的角度稱為螺距角 θ (Pitch Angle)，當螺葉轉動 2π 的距離時，沿著螺葉方向前進的距離就是螺距，螺距和螺距角之間的關係為 $P = 2\pi r \tan\theta$ 。

歪斜(Skew)：

螺葉中央參考線所歪斜的角度 θ_s ，如圖 2-5 所示。

偏斜(Rake)：

螺葉在軸向偏斜的量 i_{Gp} ，如圖 2-6 所示。

弦長(Chord Length)

由螺葉翼斷面的前緣(Leading Edge)至尾緣(Trailing Edge)的長度，如圖 2-7 所示。

拱線(Camber Line)與葉片厚度(Thickness)：

如圖 2-8 所示，在 NACA 翼斷面的定義中，葉片厚度是指與拱線(camber line)垂直方向的厚度。

(3) 螺槳座標計算

首先根據半徑、螺距、歪斜角、偏斜，算出中央參考線(reference line)上的座標點：

$$\begin{aligned} X_{c/2} &= -[i_g + r\theta_s \tan \phi_{nt}] \\ Y_{c/2} &= -r \sin(\phi - \theta_s) \\ Z_{c/2} &= r \cos(\phi - \theta_s) \end{aligned} \quad (2-4)$$

r = 半徑， i_g = 偏斜， θ_s = 歪斜角， ϕ_{nt} = 螺距角，如圖 2-9 所示

ϕ = 螺葉所在位置的角度，如圖 2-10。

接著由弦長決定葉片邊緣。前緣（leading edge）與尾緣（trailing edge）上的座標點：

前緣：

$$\begin{aligned} X_{LE} &= -[i_G + r\theta_s \tan \theta_{nt}] + \frac{c}{2} \sin \theta_{nt} \\ Y_{LE} &= -r \sin\left[\phi - \theta_s + \frac{90c \cos \theta_{nt}}{\pi r}\right] \end{aligned} \quad (2-5)$$

$$Z_{LE} = r \cos\left[\phi - \theta_s + \frac{90c \cos \theta_{nt}}{\pi r}\right]$$

尾緣：

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

$$Z_{TE} = r \cos\left[\phi - \theta_s - \frac{90c \cos \theta_{nt}}{\pi r}\right]$$

其中 c = 弦長

前緣與尾緣之間的座標點可利用拱線及厚度計算出，本文所使用的殼元素節點都在翼拱面（camber surface）上，所以只計算翼拱面的座標位置。翼拱面上的點座標可表示為：

$$\begin{aligned} X_p &= -[i_G + r\theta_s \tan \theta_{nt}] + (\frac{c}{2} - x_c) \sin \theta_{nt} + y_c \cos \theta_{nt} \\ Y_p &= r \sin \left[\theta_s - \frac{180[(0.5c - x_c) \cos \theta_{nt} - y_c \sin \theta_{nt}]}{\pi r} \right] \\ Z_p &= r \cos \left[\theta_s - \frac{180[(0.5c - x_c) \cos \theta_{nt} - y_c \sin \theta_{nt}]}{\pi r} \right] \end{aligned} \quad (2-7)$$

其中

X_c = 該點與前緣之距離

Y_c = 該點的拱高（如圖 2-11 所示）

(4)由變形反算螺槳幾何參數。

葉片受力後產生變形，欲計算變形後的螺槳性能，必須先找出新的幾何參數。假設有限元素計算出葉片導緣與殿緣上節點的新座標為 $(X'_{LE}, Y'_{LE}, Z'_{LE})$ 、 $(X'_{TE}, Y'_{TE}, Z'_{TE})$ ，則變形後葉片中央參考線座標點為：

$$\begin{aligned} X'_{c/2} &= (X'_{leading} + X'_{trailing})/2 \\ Y'_{c/2} &= (Y'_{leading} + Y'_{trailing})/2 \\ Z'_{c/2} &= (Z'_{leading} + Z'_{trailing})/2 \end{aligned} \quad (2-8)$$

變形後半徑為：

$$r' = \sqrt{Y'^2_{c/2} + Z'^2_{c/2}} \quad (2-9)$$

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

$$\theta'_s = \phi + \sin^{-1} \left(\frac{Y'_{c/2}}{r'} \right) \quad (2-10)$$

再代入(2-6)式，求出螺距角 θ'_{nt}

$$\theta'_{nt} = \cos^{-1} \left\{ \frac{\pi r'}{90c} \left[\sin^{-1} \left(\frac{Y'_{c/2}}{r'} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{Y'_{LE}}{r'} \right) \right] \right\} \quad (2-11)$$

因爲葉片的變形量很小，上式中假設葉片變形後弦長 c 不變。將 θ'_s 及 θ'_{nt} 再代入(2-5)式求出偏斜 i'_G

$$i'_G = -X'_{c/2} - r\theta'_s \tan \theta'_{nt} \quad (2-12)$$

最後把所有變形後的節點座標代入(2-8)式求出變形後的拱高 y'_c

$$y'_c = \frac{[i'_G + r\theta'_s \tan \theta'_{nt}] - \left(\frac{c}{2} - x_c\right) \sin \theta'_{nt} + X'_p}{\cos \theta'_{nt}} \quad (2-13)$$

(5)螺槳性能計算

本文使用有限元素軟體 ABAQUS 配合螺槳性能計算程式 PSF2，以疊代的方式計算螺槳葉片的變形量、應力分佈以及 KT、KQ 等性能。計算流程如圖 2-12 所示。首先以 PSF2 計算出葉片上的壓力分佈，然後把壓力分佈輸入到有限元素計算軟體 ABAQUS 中，計算出葉片的變形，而變形後的壓力分佈也隨之改變；再將新的螺槳幾何輸入到 PSF2，求出新的壓力分佈後再輸入 ABAQUS 求出變形，直到最後得到平衡的壓力分佈與變形量，計算終止。本文的收斂標準爲兩次疊代結果 K_Q 相差低於 2%，然後以最後兩個疊代結果平均當做最終解。

(2-14)式爲螺槳性能參數定義，其中轉速 n 固定爲 1708 rpm，當前進係數 $J = 0.889$ 時，軸向速度 $V_a = 7.716$ (m/s)，當 $J = 0.6$ 時， $V_a = 5.208$ (m/s)。螺槳的設計 J 值爲 0.889，此時扭力係數 $K_Q = 0.05060$ 。 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。當軸向速度變小時，入流角會變小而攻角變大，螺葉所受的壓力也隨之增加。

$$\begin{aligned}
\text{前進係數 } J &= \frac{V_a}{nD} \\
\text{扭力係數 } K_Q &= \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \\
\text{推力係數 } K_T &= \frac{T}{\rho n^2 D^4} \\
\text{效率 } \eta &= \frac{TV_a}{2\pi nQ} = \frac{K_T}{K_Q} \cdot \frac{J}{2\pi}
\end{aligned} \tag{2-14}$$

其中 D =直徑， V_a =軸向速度， n =轉速， ρ =流體密度， T =推力， Q =扭力。

螺槳性能計算的結果如圖 2-12 所示，銅（bronze）螺槳原始設計性能是不考慮螺槳變形的計算結果，與文獻[2]的計算結果相同。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性能曲線。45 度的疊層的螺槳螺距減少，曲線下移；而-45 度的疊層使螺槳螺距變大，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，最終曲線遠高於原始設計曲線。由此可以看出疊層角度的影響，若沒有妥善安排疊層角度，螺槳性能與原始設計有很大的差別，無法達到原始設計而與主機不能搭配。除了達到原始設計的需求，更進一步我們希複合材料螺槳的性能更優於一般金屬螺槳。

本文以高歪斜（high skew）、高偏斜(high rake)螺槳 DTNSRDC 4383[20]為主要探討對象，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。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。疊層纖維方向有-45、0、45、90 四種，其方向定義如圖 2-14 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，螺葉導緣(leading edge)與殿緣(trailing edge)也較薄。根部中央為最厚，共有 90 層，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]s。

2-2. 最佳化方法

(1)基因演算法

基因演算法是模仿「物競天擇，適者生存」，所建立的演算法。其主要架構最早在 1975 年由 Holland 提出[21]。基因演算法的流程如圖 2-15 所示。首先將所有設計參數轉換為基因碼，例如把纖維角度-45、0、45、90 轉為二進位的 00、01、10、11 或是 1、2、3、4，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，依照問題需要，個體數可從數個至數千個。接著算出所有個體的目標函數值，選取較優良的個體。被選出的個體再互相交換基因產生下一代個體。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，計算量大；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，它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，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。

(2) 回歸分析

為節省最佳化搜尋的計算量，必須找出可減少有限元素分析次數等計算的方法。回歸分析是一個可行的方法，若能得到準確的回歸模型，就可以減少實際計算量，大幅減少最佳化所需的計算時間。

在說明回歸分析之前，先定義反應表面（response surface）。當給定所有變數值後，可以得到一個結果，這個結果就是反應表面上的一點。而所有變數值與其反應結果所形成的表面，就是反應表面。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，若要得到整個表面則要經過大量的計算。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，如此可以節省計算量。

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。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(2-15)式，

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (2-15)$$

其中

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

y_i 是結構反應，如結構變形量等。 x_{ij} 是變數值，在本文中為疊層角度。 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(2-16)式

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \varepsilon^T \varepsilon = y^T y - 2\beta^T X^T y + \beta^T X^T X \beta \quad (2-16)$$

我們要找一組係數當 $\beta = b$ 時使平方差為最小，此係數必須滿足(2-17)式， L 對 β_i 微分之值為零

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \beta} \right|_b = -2X^T y + 2X^T X b = 0 \quad (2-17)$$

因此可得最小平方差的係數為(2-18)

$$b = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (2-18)$$

最終回歸模型可表示為(2-19)

$$\hat{y} = Xb \quad (2-19)$$

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。文獻[10]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。

(3)局部搜尋

文獻[10]提出的局部搜尋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 2-16 所示。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中取代最差的個體，接著再進行選擇。

局部搜尋的程序如圖 2-17 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。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。

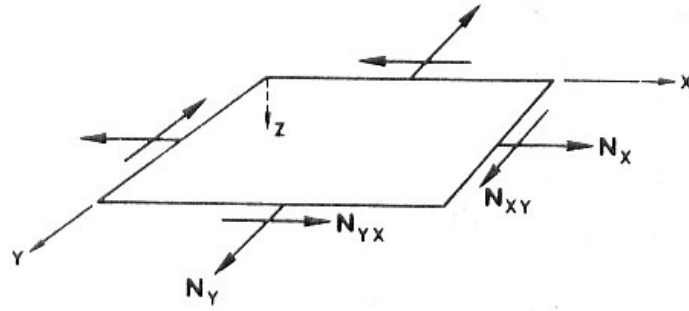


圖 2-1 積層板承受面內力

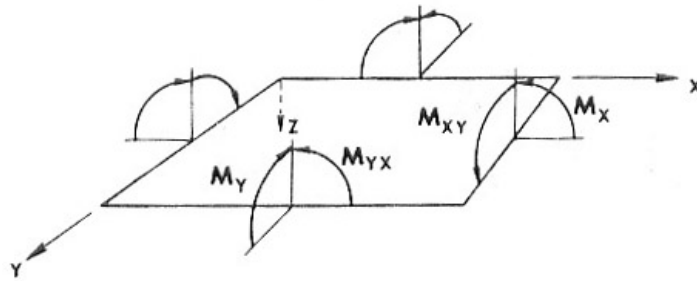


圖 2-2 積層板承受彎矩

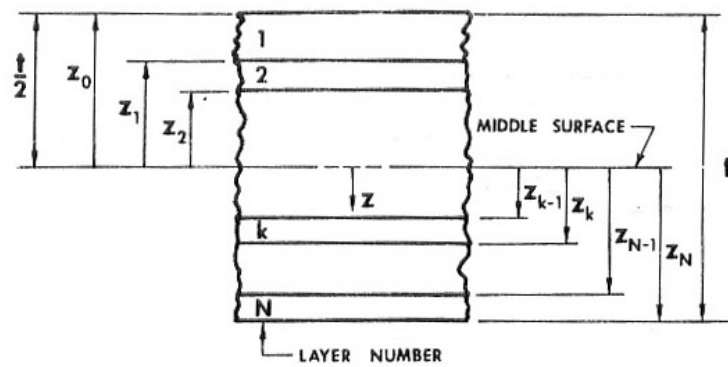


圖 2-3 積層板疊層圖

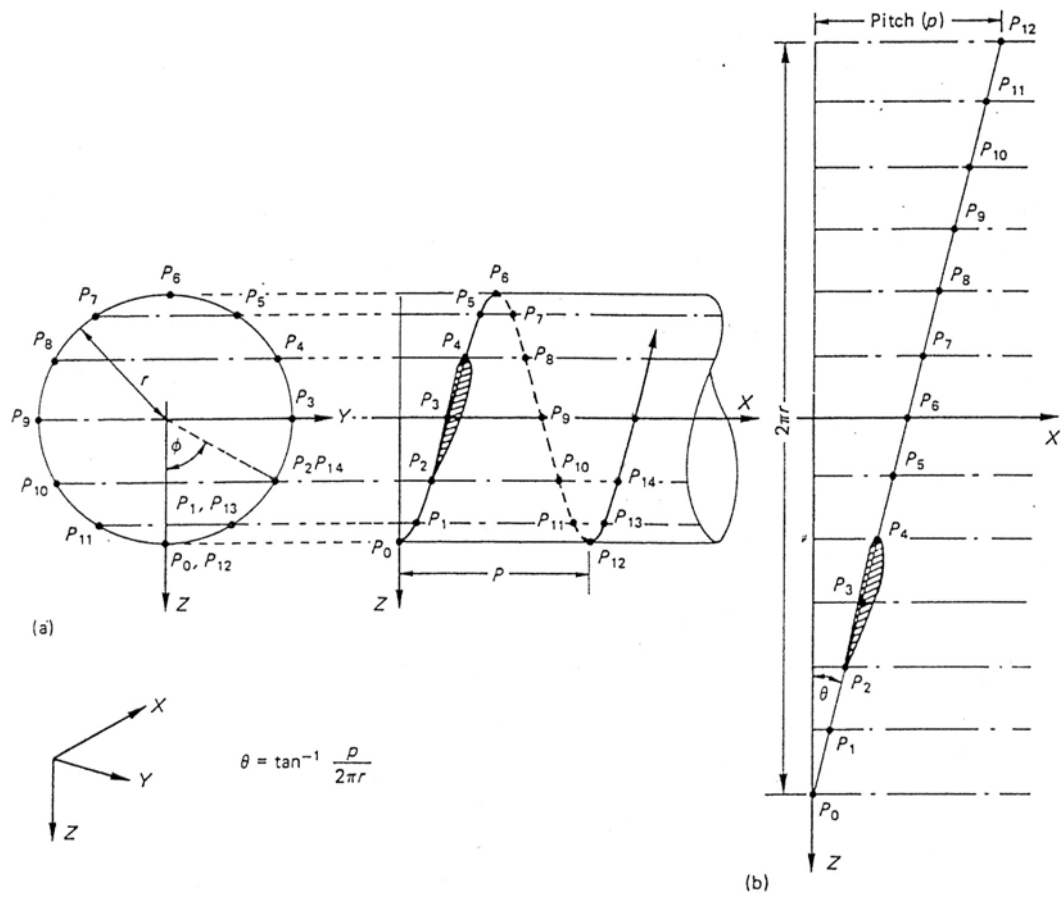


圖 2-4 螺距示意圖

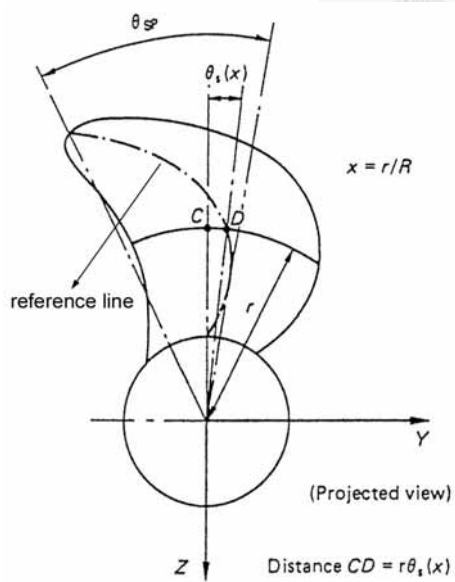


圖 2-5 中央參考線及歪斜示意圖

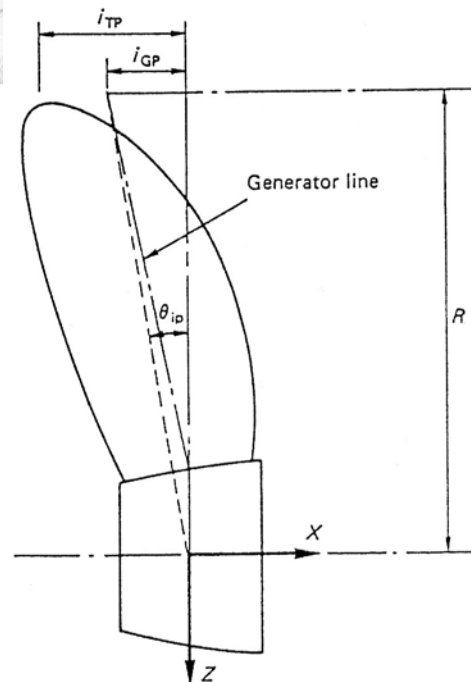
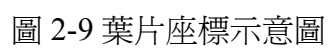


圖 2-6 偏斜示意圖



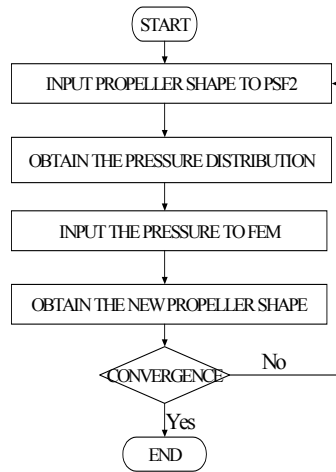


圖 2-12 螺槳性能計算流程圖

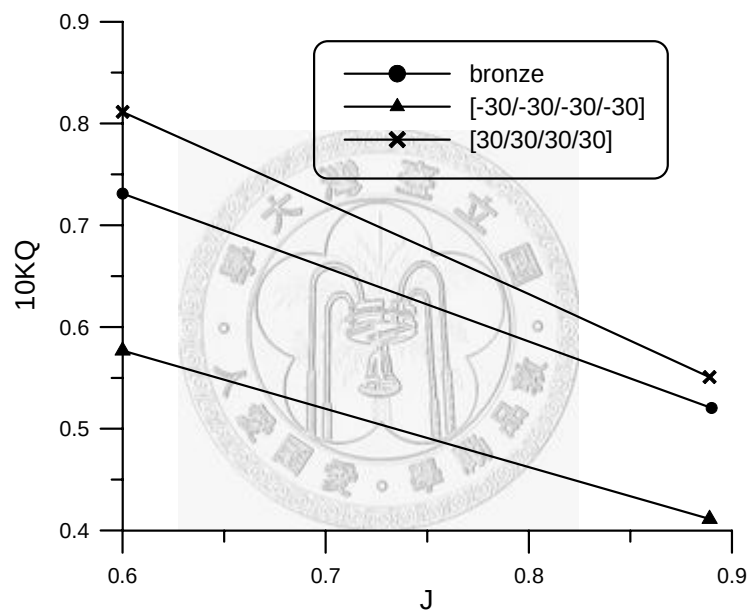


圖 2-13 螺槳性能計算結果比較

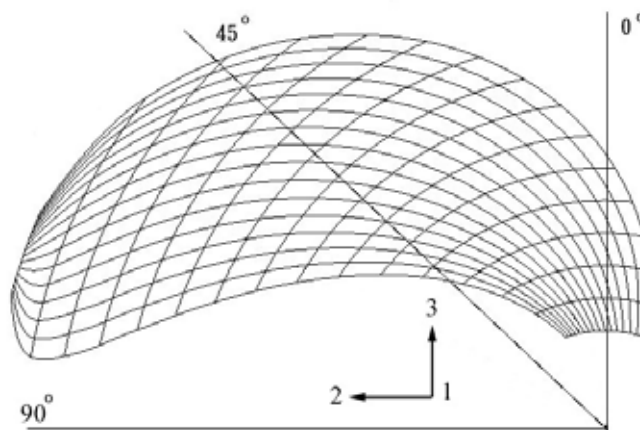


圖 2-14 螺槳之有限元素模型

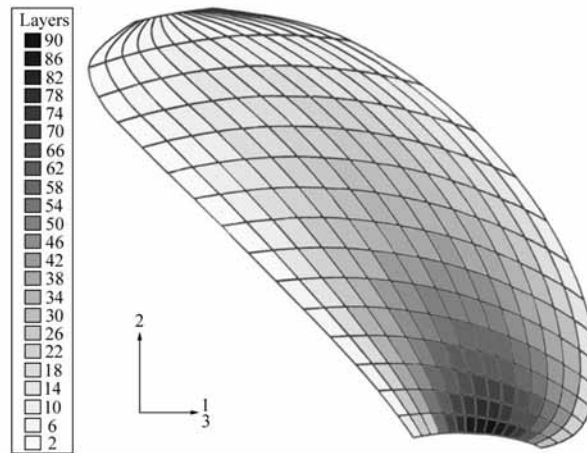


圖 2-15 各元素疊層數分佈

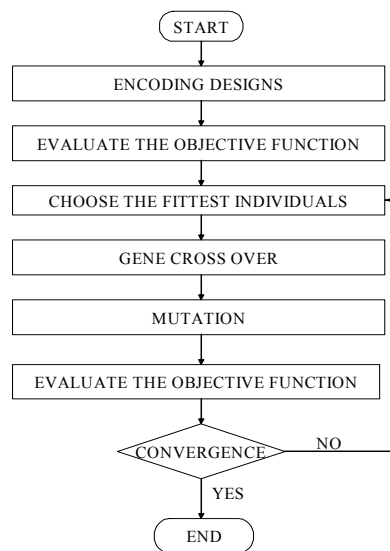


圖 2-16 基因演算法流程圖

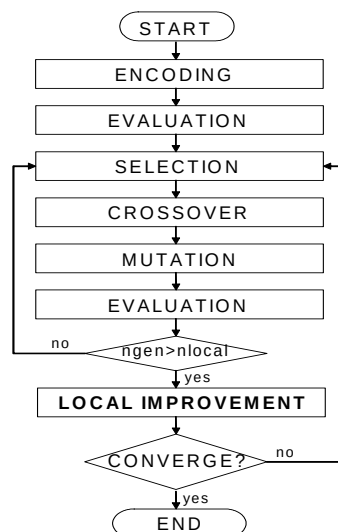


圖 2-17 在 GA 中加入局部搜尋的流程圖

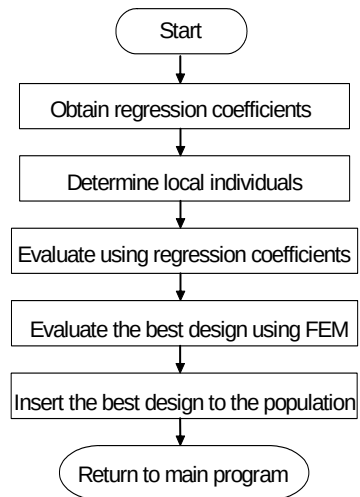


圖 2-18 局部搜尋的程序



表 2-1 DTNSRDC 4383 螺槳之幾何

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	Xm/D	Degree	C/D	Camber/Ci	Thickness/D
0.2	1.566	0.	0.	0.174	0.0402	0.0434
0.25	1.539	0.0119	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

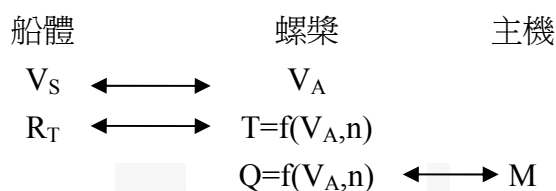
表 2-2 碳纖維 (graphite-epoxy) 疊層之材料特性

Young's modulus (longitudinal)	$E1 = 1.12 \times 10^{11} \text{ Pa}$
Young's modulus (transverse)	$E2 = 1.05 \times 10^{10} \text{ Pa}$
Shear modulus	$G12 = 8.4 \times 10^9 \text{ Pa}$
Poisson's ratio	0.32
Ply thickness	$t = 1.55 \times 10^{-4} \text{ m}$

第三章 最佳化分析

3-1.主機與螺槳之組合

螺槳是一種吸收主機轉矩，將螺槳翼斷面所產生的升力化為推力，克服船舶阻力，達到設計速度的推進器。螺槳入流速度 V_A ，以及轉速 n 決定了螺槳產生的推力 T 和轉矩 Q ，產生的推力 T 應和阻力 R_T 匹配，產生的轉矩 Q 應和主機的轉矩 M 匹配，而船速 V_S 和主機之轉速又決定 V_A 及 n ，三者之間循環的關係就如下圖所示：



主機的選擇，必須考慮排水量、船速、減速比、工作條件等等需求。而選定的主機，必須是以最經濟的效率產生足夠的馬力。在一艘船中與螺槳關係最密切的就是主機，螺槳與主機屬於推進系統，主機產生的馬力由軸承傳至螺槳而產生推力，而螺槳承受的扭力關聯著主機的轉速與輸出馬力。因此，螺槳所需的轉速、輸出馬力等必須在主機的適當工作範圍內，使主機能在最佳運轉效能下運轉。

圖 3-1 是柴油引擎的特性曲線，以及螺槳的性能曲線圖。引擎運轉的範圍在幾條限制曲線內，其中曲線 1 和曲線 2 為固定扭力的曲線，曲線 2 是引擎扭力上限，而曲線 1 為留有餘裕的扭力。曲線 3 和曲線 4 為固定轉速曲線，曲線 4 為轉速上限，曲線 3 為留有餘裕的轉速。曲線 6 是引擎性能的極限，而曲線 5 則是距離上限留有餘裕的曲線。引擎在曲線 1、3、5 的範圍內運轉，在曲線 1、3、5 和曲線 2、4、6 的範圍內為引擎的餘裕。而通過圖中 A、B 兩點的曲線為螺槳性能曲線，螺槳性能曲線代表螺槳和主機連接後，主機輸出的馬力。當螺槳所需馬力比設計值高，螺槳性能曲線會向左上偏移，轉速下降而輸出馬力上升，直到引擎扭力上限為止；若螺槳所需的功率比設計值低，則螺槳性能曲線

向右下偏移，轉速上升而輸出馬力降低，直到引擎轉速上限為止。

因此，要讓主機維持在設計點上運轉，螺槳運轉時所需的馬力應保持在一定值。螺槳一般都只針對一個的前進係數進行設計，主機轉速固定，而船速在設計速度下前進時，螺槳就在螺槳性能曲線上的設計點上運轉，主機的運作也會在設計點上。若主機在相同的轉速下，而船速產生改變，螺槳運轉時所承受的扭力也隨之變化，連帶的造成主機運作點改變，使輸出馬力變小而達到轉速上限，或使輸出馬力變大而達到引擎的扭力上限，如此主機無法在最經濟的情況下運轉，而且容易減少主機的壽命。因此，本文的 FRP 螺槳針對主機和螺槳的搭配關係做為設計目標，當螺槳轉速固定時，不同的船速變化所引起的扭力變化為最小。

本文主要選定的螺槳幾何為 DTNSRDC 4383，其設計前進係數為 $J = 0.889$ ，設計扭力係數為 $K_Q = 0.05060$ ；針對相同轉速而不同的軸向速度的情況，計算另一個前進係數 $J = 0.6$ ，其對應的扭力係數 $K_Q = 0.07146$ ；而這都是不考慮螺葉變形的結果。本文的目的是希望 FRP 螺槳在變形後，在船速較低時，螺槳的扭力係數能比原來的扭力係數更小，最好能接近設計值 0.05060 ，如此螺槳運轉所承受的扭力變化量就變小，而在船速較低時，變形後的螺槳螺距能變小，所承受的扭力也隨之下降；在設計速度下，螺槳應該維持在原來的設計點上工作，而主機也能維持在設計點運轉。根據以上所述，最佳螺槳的定義分為以下兩點：

1. 當 $J = 0.889$ 時， K_Q 能維持在 0.05060 。
2. 當 $J = 0.6$ 時， K_Q 曲線斜率為最小。

3-2.預變形螺槳

FRP 複合材料的剛性比金屬材料小得多，因此變形量會比較大。螺槳變形後整體幾何完全改變，如此會使螺槳性能偏離原始設計。所以本文使用預變形

何參數為 7~9 列 (predeform 1)。Predeform 1 受力變形後的幾何參數及扭力係數列為 10~12 列，採用預變形設計的緣故，其變形後的形狀逐漸接近原始設計。再將 predeform 1 的變形量再加入到原始幾何上，產生新的幾何 predeform 2。重覆操作後產生 predeform 3 的螺槳，其變形後的扭力係數幾乎和原始設計值一樣，最後採用 predeform 3 的預變形螺槳幾何參數。

圖 3-5 是 DTNSRDC-4383 的最佳疊層，配合預變形設計與沒有配合預變形設計的最佳化性能比較圖，最下方的扭力值曲線是採用最佳疊層，但沒有使用預變形設計的結果。不但偏離了原始設計值，扭力曲線的斜率也沒有明顯變小；而採用了預變形設計的螺槳，很明顯地優於沒有預變形的螺槳，不但沒有偏離原始設計點，扭力曲線的斜率也明顯變小，符合上述最佳螺槳條件。

針對偏斜量對螺槳性能的影響，將文獻[10]的計算例 DTNSRDC-4498 螺槳和本文所用的 DTNSRDC-4383 進行比較。4498 和 4383 兩種螺槳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，4498 的幾何參數如表 3-3 所示。4498 的最佳疊層為 $[45_2/0_2/45_2/45_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/45_2/45_2]_s$ ，也是 0 度和 45 度為主的疊層，其扭力係數曲線如圖 3-6，兩者的扭力曲線斜率變化如表 3-6。表 3-6 中的 ΔK_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 3-6 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。

接著比較不同幾何外型的螺槳性能：偏斜量較 DTNSRDC-4383 少的 4382，以及和 4382 幾何相同但沒有偏斜的 4497，兩者的幾何參數如表 3-4 和表 3-5。4497 的最佳疊層為 $[0_2/45_2/90_2/45_2/45_2/45_2/45_2/45_2/45_2/45_2/45_2]_s$ ，扭力係數曲線如圖 3-7；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 3-8。兩者扭力係數曲線斜率變化如表 3-7。兩者的纖維疊層角度非常相似，幾乎都是 45 度疊層。文獻[10]提到 4497 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。

再來就是螺槳螺距的變化，螺距變化會反應到螺槳所承受的扭力。螺距變大，螺槳承受扭力就變大，扭力係數 K_Q 會變大；螺距變小，螺槳所承受的扭力就會變小，則扭力係數 K_Q 會變小。觀察性能變化較為明顯的 DTNSRDC-4383 以及 DTNSRDC-4498 這兩顆螺槳，兩者的螺距變化如表 3-9 和 3-10 所示，兩者的螺距都有變小，這就表示螺槳所承受的負荷變小，符合本文所說的最佳螺槳的條件。

因為螺槳性能取決於螺槳幾何外型、船速以及主機的轉速，因此當這些條件有改變時，最佳疊層和變形量也會有所改變，因此必須針對不同的條件進行最佳疊層搜尋，以及針對不同的變形量進行預變形幾何參數的決定。依照前述的方法，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，其預變形幾何參數決定過程如表 3-2，其扭力係數曲線如圖 3-9；4498 搜尋到的最佳疊層為 $[45_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/45_2/45_2/45_2/45_2/90_2/45_2]_s$ [10]，扭力係數曲線圖如圖 10，而 4498 和 4383 兩者所計算出的扭力和扭力曲線斜率變化如表 3-8。實驗用螺槳的直徑、所受外力、產生的變形量比較小，由表 3-5 來看兩者的扭力係數曲線斜率還是會較原始設計的小，觀察實驗用螺槳所計算出來的螺距變化，如表 3-11 和表 3-12 所示，兩者的螺距變化都不大；而在螺槳性能方面，雖然 4383 的扭力係數變化值還是比 4498 來得大，但是就不會非常明顯。

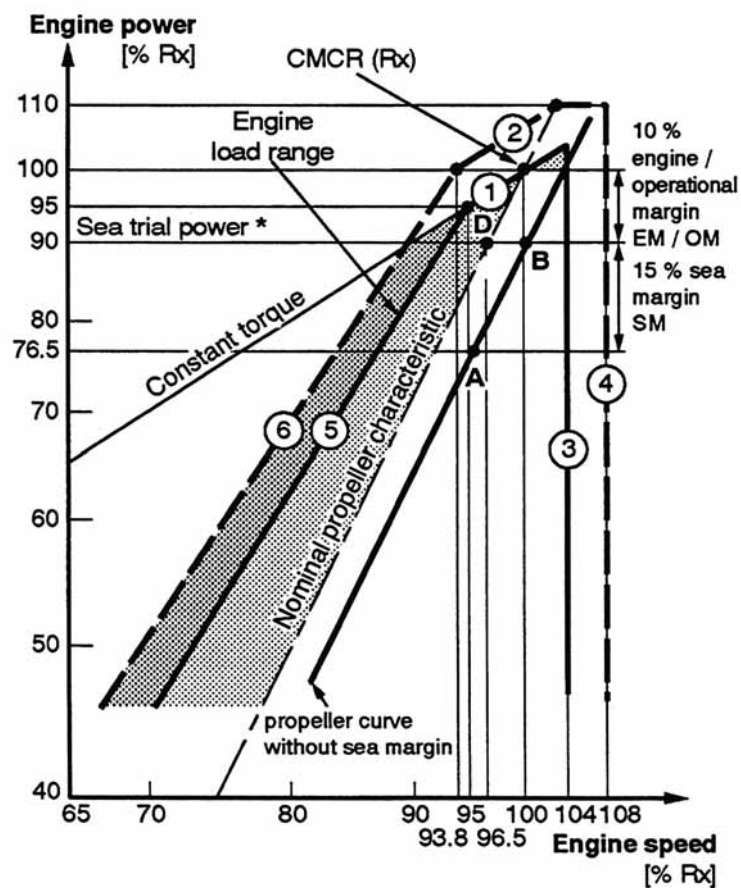


圖 3-1. 柴油引擎特性曲線[22]

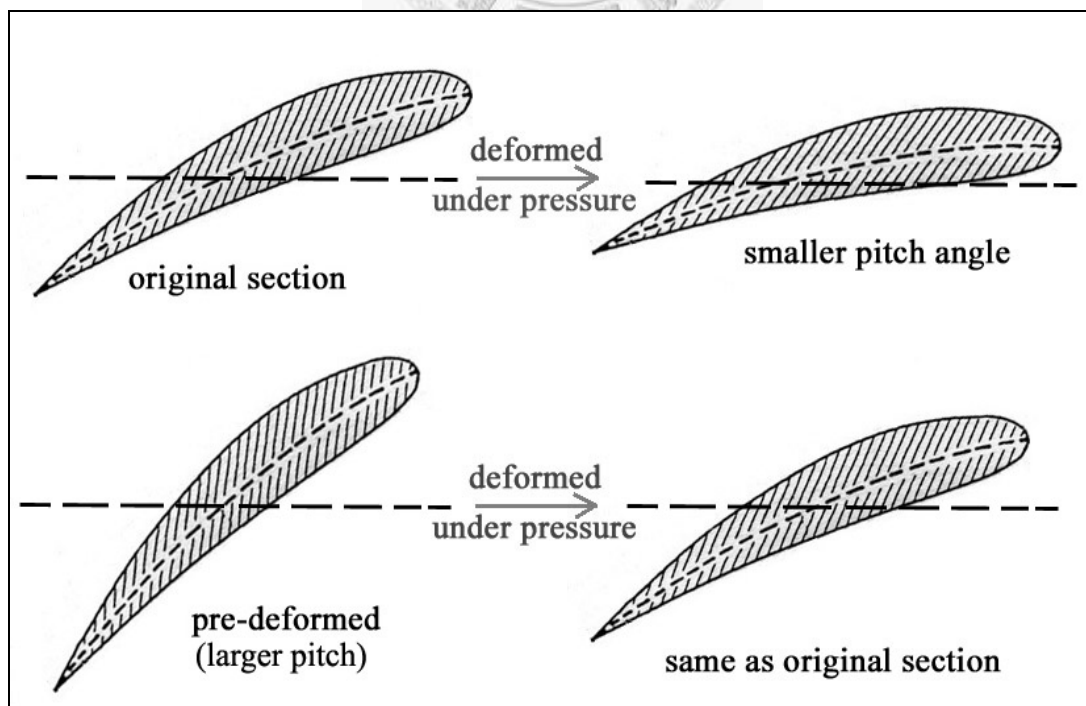


圖 3-2. 預變形螺槳示意圖

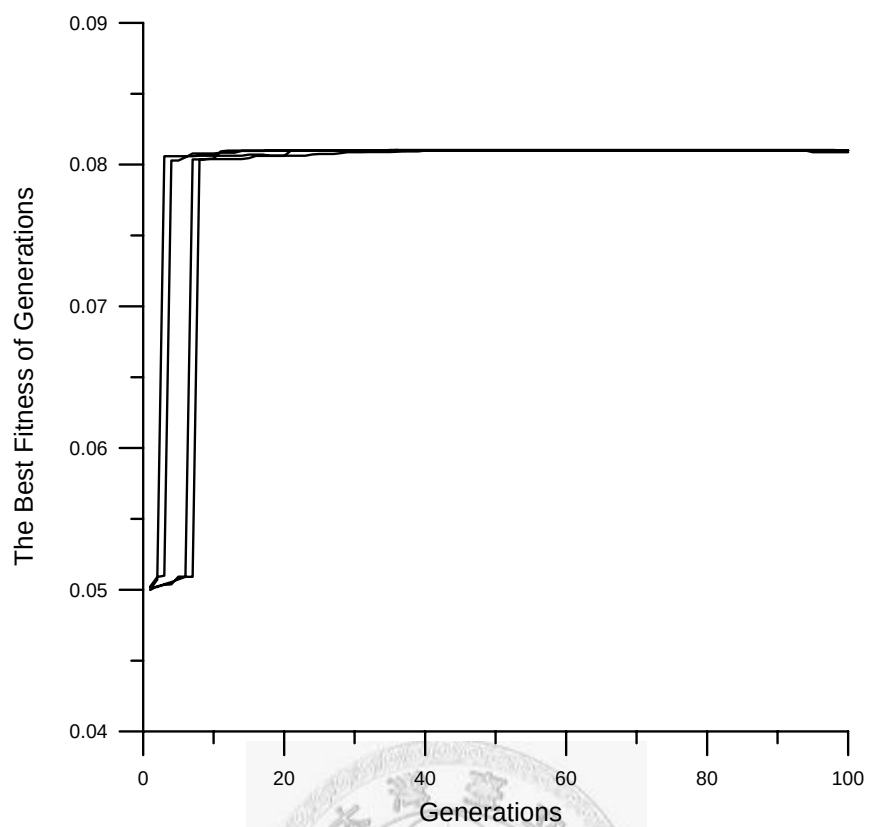


圖 3-3. DTNSRDC4383 最佳疊層搜尋收斂過程

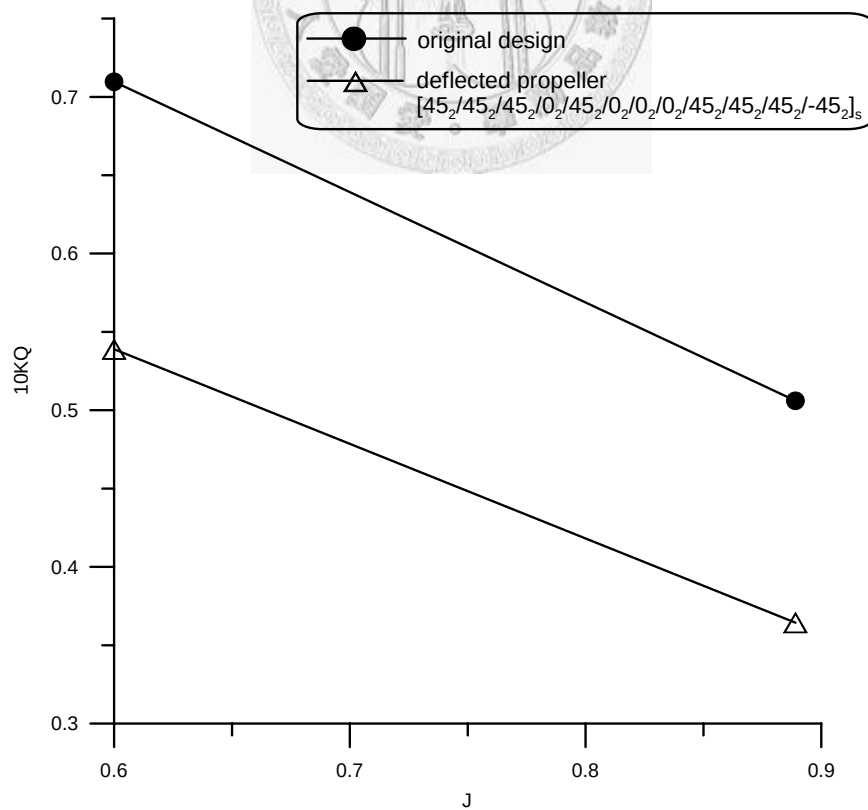


圖 3-4. 螺槳不變形以及變形後之扭力曲線

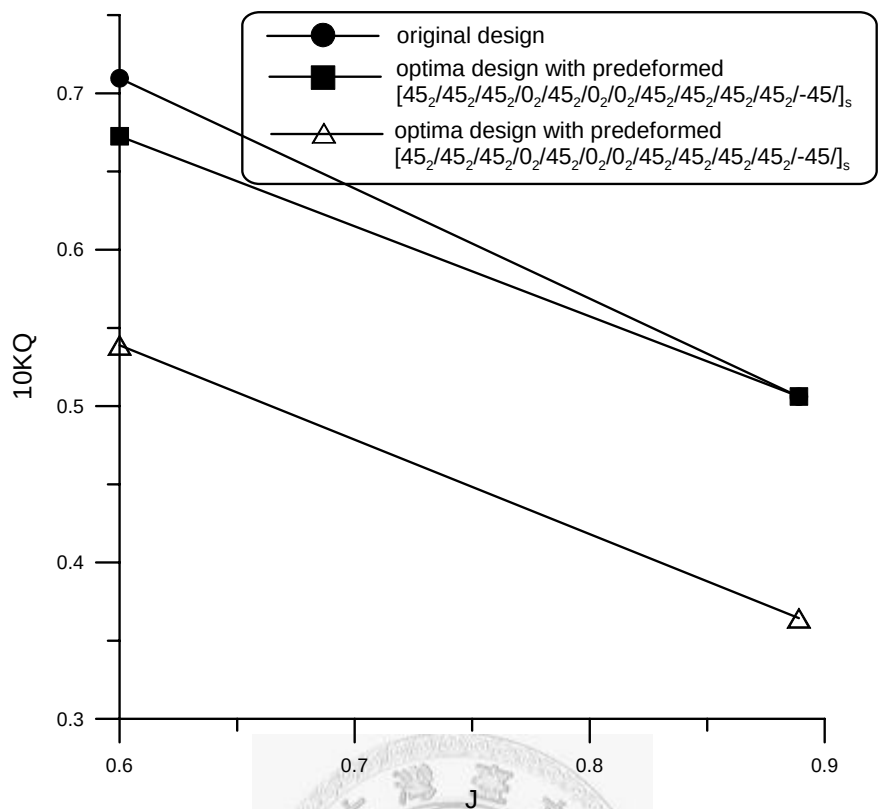


圖 3-5. DTNSRDC4383 原始設計與最佳化後之扭力曲線

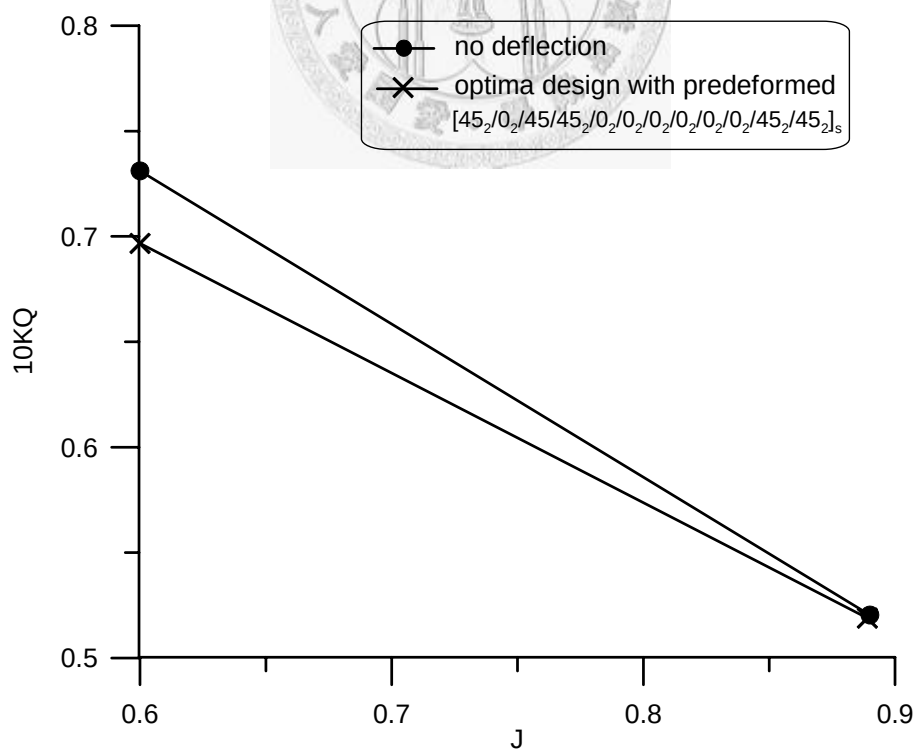


圖 3-6 DTNSRDC 4498 原始設計與最佳化後之扭力曲線[10]

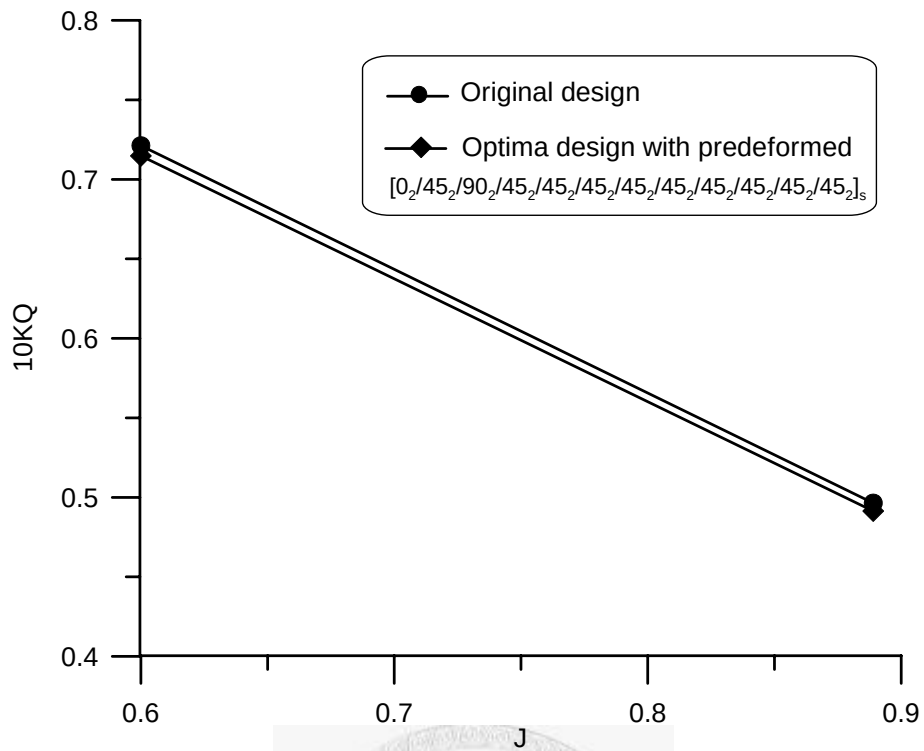


圖 3-7. DTNSRDC 4497 原始設計與最佳化之扭力曲線[10]

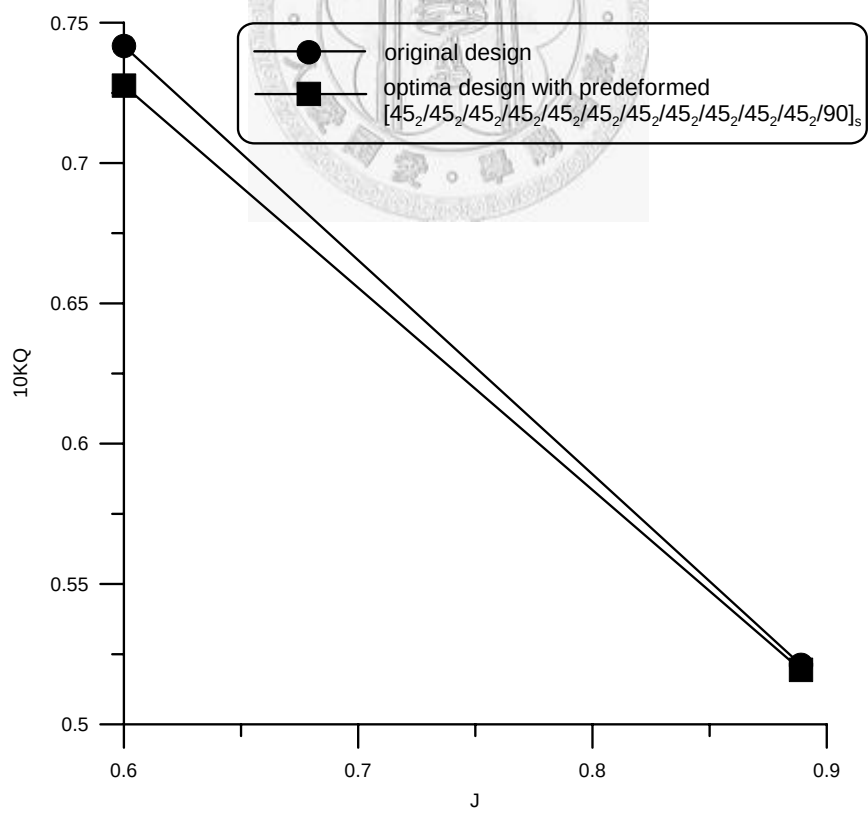


圖 3-8. DTNSRDC4382 原始設計與最佳化後之扭力曲線

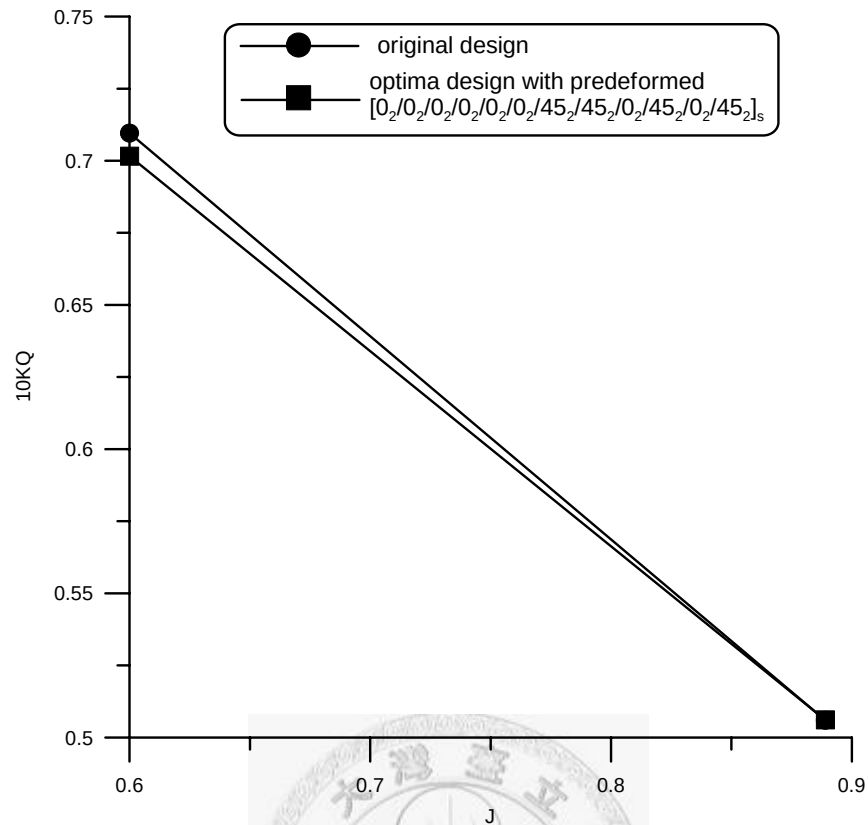


圖 3-9. DTNSRDC 4383 D=20cm 原始設計與最佳化後之扭力曲線

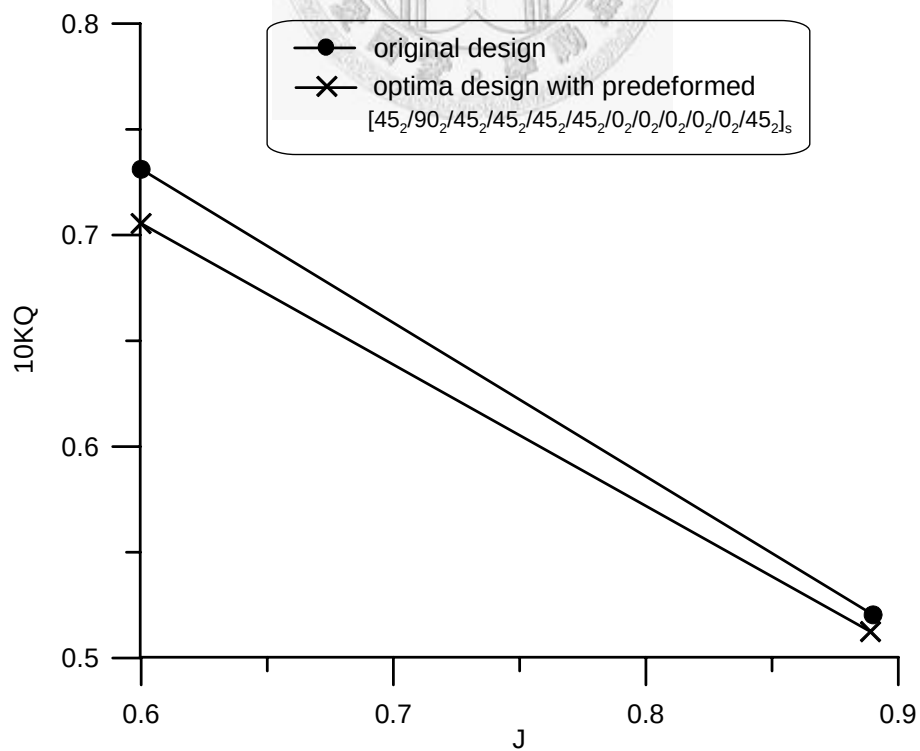


圖 3-10. 4498 D=20cm 之原始設計和最佳化後之扭力[10]

表 3-1. 直徑 30cm 之預變形螺槳幾何參數決定過程

	r/R	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	1	D(ft)	KQ0889	KQ06	dKQ
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	1	0.05060	0.07096	0.02036
	rake/D	0	0.0199	0.039	0.0763	0.1078	0.1324	0.1512	0.1651	0.1745	0.1773	0.179				
	skew	0	4.647	9.293	18.816	27.991	36.77	45.453	54.245	63.102	67.531	72				
deflected	P/D	1.5562	1.535	1.5075	1.4407	1.3447	1.2231	1.0848	0.9316	0.7684	0.6831	0.6002	1.015	0.03644	0.05389	0.01745
	rake/D	0.0001	0.0189	0.0365	0.0717	0.1026	0.1281	0.1499	0.1696	0.1883	0.197	0.2037				
	skew	-0.0361	5.0168	9.871	19.7553	29.237	38.2823	47.158	56.006	64.7809	69.136	73.575				
predeform 1	P/D	1.57776	1.5438	1.5174	1.48096	1.4356	1.38348	1.3338	1.2933	1.26912	1.2593	1.2488				
	rake/D	-0.0001	0.0211	0.042	0.08182	0.114	0.13756	0.1528	0.1597	0.15794	0.1537	0.1494				
	skew	0.04332	4.2032	8.5994	17.6888	26.496	34.9552	43.407	52.132	61.0873	65.605	70.11				
deflected	P/D	1.5669	1.5484	1.52445	1.47945	1.4154	1.3299	1.2271	1.1003	0.95715	0.8832	0.8175	1.013	0.03978	0.05241	0.01263
	rake/D	0	0.0196	0.0381	0.0748	0.105	0.12805	0.146	0.162	0.17735	0.1843	0.1885				
	skew	0.0233	4.5722	9.2515	18.7381	27.92	36.727	45.488	54.477	63.5927	68.148	72.762				
predeform 2	P/D	1.57903	1.5335	1.50354	1.46081	1.4102	1.3603	1.3261	1.3276	1.32036	1.3463	1.3625				
	rake/D	-0.0001	0.0218	0.04368	0.08472	0.1186	0.14381	0.1593	0.1624	0.15121	0.1406	0.132				
	skew	0.02402	4.2042	8.51048	17.5569	26.282	34.6439	42.956	51.432	60.0955	64.48	68.817				
deflected	P/D	1.56955	1.5398	1.51375	1.4612	1.3917	1.3074	1.2186	1.1229	1.0026	0.9635	0.9424	1.01	0.04858	0.06442	0.01584
	rake/D	0	0.02	0.0395	0.07715	0.1089	0.1335	0.1515	0.1643	0.1693	0.1689	0.1639				
	skew	-0.0003	4.5873	9.16555	18.6404	27.752	36.4674	45.09	53.864	62.6784	67.128	71.674				
predeform 3	P/D	1.57927	1.5302	1.49771	1.45846	1.4119	1.37005	1.3485	1.3425	1.34087	1.3409	1.3432				
	rake/D	-0.0002	0.0224	0.04485	0.0869	0.1214	0.14684	0.1621	0.1625	0.14917	0.1377	0.1345				
	skew	0.03405	4.1108	8.3759	17.2991	25.933	34.2172	42.465	50.841	59.4861	63.823	68				
deflected	P/D	1.56955	1.5398	1.51375	1.4612	1.3917	1.3074	1.2186	1.1229	1.0026	0.9635	0.9424	1.005	0.05061	0.06706	0.01644
	rake/D	0	0.02	0.0395	0.07715	0.1089	0.1335	0.1515	0.1643	0.1693	0.1689	0.1639				
	skew	-0.0003	4.5873	9.16555	18.6404	27.752	36.4674	45.09	53.864	62.6784	67.128	71.674				

表 2. 直徑 20cm 之預變形螺槳幾何參數決定過程

	r/R	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	1	D(cm)	KQ0889	KQ06	dKQ
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	20	0.0506	0.07096	0.02036
	rake/D	0	0.0199	0.039	0.0763	0.1078	0.1324	0.1512	0.1651	0.1745	0.1773	0.179				
	skew	0	4.647	9.293	18.816	27.991	36.77	45.453	54.245	63.102	67.531	72				
deflected	P/D	1.56713	1.5424	1.51661	1.46298	1.3891	1.2965	1.1938	1.0827	0.96738	0.9076	0.8519				0
	rake/D	0.0001	0.0196	0.0383	0.0751	0.1063	0.1308	0.1498	0.1646	0.1763	0.1808	0.1838				
	skew	-0.02	4.6662	9.3604	18.9046	28.125	36.9344	45.663	54.487	63.3886	67.847	72.361				
predeform 1	P/D	1.56487	1.5356	1.50739	1.45502	1.3829	1.2955	1.2022	1.1093	1.02462	0.9824	0.9381				
	rake/D	-0.0001	0.0202	0.0397	0.0775	0.1093	0.134	0.1526	0.1656	0.1727	0.1738	0.1742				
	skew	0.02	4.6278	9.2256	18.7274	27.857	36.6056	45.243	54.003	62.8154	67.215	71.639				
deflected	P/D	1.5655	1.5365	1.5101	1.4554	1.3808	1.289	1.1909	1.0892	0.9917	0.9425	0.8956	20.01	0.04891	0.06834	0.01943
	rake/D	0	0.0199	0.0392	0.0764	0.1081	0.1328	0.1517	0.1656	0.1745	0.177	0.178				
	skew	0.0101	4.6732	9.30025	18.8511	28.037	36.8328	45.506	54.289	63.1066	67.508	71.947				
predeform 2	P/D	1.56512	1.5378	1.50821	1.45847	1.389	1.3051	1.2139	1.1242	1.04209	1.001	0.9546				
	rake/D	-0.0001	0.0203	0.0397	0.07784	0.1095	0.13408	0.1525	0.1651	0.17198	0.1729	0.1738				
	skew	0.01386	4.5835	9.18849	18.6428	27.74	36.4519	45.085	53.846	62.6944	67.121	71.57				
deflected	P/D	1.56205	1.538	1.5099	1.4583	1.3864	1.29925	1.2026	1.1035	1.0076	0.9579	0.9086		0.05038	0.06998	0.0196
	rake/D	-0.0001	0.0201	0.0392	0.0768	0.1083	0.1328	0.1515	0.1651	0.17395	0.1765	0.1782				
	skew	0.0156	4.6404	9.27305	18.7835	27.928	36.6756	45.346	54.137	62.9949	67.426	71.859				
predeform 3	P/D	1.56968	1.5387	1.50997	1.4592	1.3891	1.30302	1.2216	1.1258	1.04339	1.0037	0.9582	20.008			
	rake/D	0.00012	0.0197	0.039	0.07582	0.1076	0.1324	0.1514	0.1657	0.17516	0.1779	0.1787				
	skew	-0.0021	4.5787	9.19153	18.6472	27.765	36.5016	45.139	53.895	62.7414	67.164	71.653				
deflected	P/D	1.5682	1.5397	1.5109	1.45805	1.3857	1.29585	1.2088	1.1053	1.0105	0.9642	0.9153		0.05061	0.07016	0.01955
	rake/D	0.0001	0.0195	0.0385	0.0749	0.1065	0.1313	0.1507	0.1658	0.17695	0.1809	0.1826				
	skew	0.0044	4.6214	9.27605	18.7829	27.953	36.74	45.404	54.181	63.0318	67.449	71.921				

表 3-3 DTNSRDC 4498 螺槳之幾何[20]

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.	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 3-4. DTNSRDC 4497 之螺旋幾何[20]

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.	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.	13.948	0.312	0.0342	0.0240
0.6	1.296	0.	18.378	0.337	0.0281	0.0191
0.7	1.198	0.	22.747	0.347	0.0230	0.0146
0.8	1.096	0.	27.145	0.334	0.0189	0.0105
0.9	0.996	0.	31.575	0.280	0.0159	0.0067
0.95	0.945	0.	33.788	0.210	0.0168	0.0048
1.0	0.895	0.	36.0	0.000	0.0000	0.0029

表 3-5. DTNSRDC 4382 之螺槳幾何[20]

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 3-6. 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
ΔKQ	0.01778	0.02107	0.01644	0.02136
ΔKQ 變化量	0.00329		0.00492	

表 3-7. 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
ΔKQ	0.02234	0.02248	0.02077	0.02202
ΔKQ 變化量	0.00014		0.00125	

表 3-8. DTNSRDC-4498 與 DTNSRDC-4383 (D=20cm) 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	0.051245	0.05214	0.05061	0.05061
J = 0.6	0.070545	0.07311	0.07016	0.07196
ΔKQ	0.0193	0.02107	0.01955	0.02136
ΔKQ 變化量	0.00177		0.00181	

表 3-9 DTNSRDC 4383 (D = 30 cm) 變形前與變形後的螺距變化

r/R	螺槳未變形時的 P/D	螺槳變形後的 P/D
0.2	1.5793	1.5696
0.25	1.5302	1.5398
0.3	1.4977	1.5138
0.4	1.4585	1.4612
0.5	1.4119	1.3917
0.6	1.3701	1.3074
0.7	1.3485	1.2186
0.8	1.3425	1.1229
0.9	1.3409	1.0026
0.95	1.3409	0.9635
1.0	1.3432	0.9424

表 3-10 DTNSRDC 4498 (D = 30 cm) 變形前與變形後的螺距變化

r/R	螺槳未變形時的 P/D	螺槳變形後的 P/D
0.2	1.5525	1.5616
0.25	1.5096	1.5310
0.3	1.4795	1.5035
0.4	1.4450	1.4595
0.5	1.4016	1.3905
0.6	1.3583	1.3140
0.7	1.3279	1.2354
0.8	1.3259	1.1610
0.9	1.3709	1.0970
0.95	1.4100	1.0674
1.0	1.4795	1.0441

表 3-11 DTNSRDC 4383 ($D = 20$ cm) 變形前與變形後的螺距變化

r/R	螺槳未變形時的 P/D	螺槳變形後的 P/D
0.2	1.5697	1.5682
0.25	1.5387	1.5397
0.3	1.5100	1.5109
0.4	1.4592	1.4581
0.5	1.3891	1.3857
0.6	1.3030	1.2959
0.7	1.2216	1.2088
0.8	1.1258	1.1053
0.9	1.0434	1.0105
0.95	1.0037	0.9642
1.0	0.9582	0.9153

表 3-12 DTNSRDC 4498 ($D = 20$ cm) 變形前與變形後的螺距變化

r/R	螺槳未變形時的 P/D	螺槳變形後的 P/D
0.2	1.5637	1.5707
0.25	1.5267	1.5377
0.3	1.4984	1.5089
0.4	1.4565	1.4617
0.5	1.3942	1.3934
0.6	1.3207	1.3086
0.7	1.2412	1.2148
0.8	1.1730	1.1240
0.9	1.1170	1.0327
0.95	1.0861	0.9802
1.0	1.0588	0.9161

第四章 螺槳製作與實驗

4-1 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[20]，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 4-1 和表 4-2 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： $[45_2/90_2/45_2/45_2/45_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/45_2]_s$ ，(2)DTNSRDC-4383 進搜尋得到的最佳疊層： $[45_2/0_2/45_2/0_2/45_2/45_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2/0_2]_s$ 。所以本次實驗共有兩組螺槳，將會分別在轉速 $n = 7\text{rps}$ 和 $n=13\text{rps}$ 的情況下，量測不同入流速度之下的性能。

4-2 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 4-1 和圖 4-2 所示)，然後依據模具上的螺槳葉片形狀、纖維角度定義(如圖 4-3 所示)，剪裁出各層纖維預浸材葉片(如圖 4-4 所示)；接下來將碳纖維預浸材貼於模具上進行積層(如圖 4-5 和圖 4-6 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 4-7)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 4-8)，將超出邊緣的纖維修整(圖 4-9)，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 4-10)。表 3 和表 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 4-11 與圖 4-12)。

4-3 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 4-13 和 4-14 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 4-15 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 (4-1) 式的伯努力定律與 (4-2) 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 (4-3) 式所示。

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 \quad (4-1)$$

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (4-2)$$

$$V_2 = \frac{\sqrt{\Delta P}}{2.112} \quad (4-3)$$

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 4-16 所示，首先在軸上標劃刻度線(圖 4-17)，每轉動 5 度拍攝一張靜止的螺葉照片(圖 4-18)。然後在實驗中拍攝轉動中的螺槳(圖 4-19)，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。

4-4 實驗結果

實驗量測的結果如表 4-5~4-8 及圖 4-20~4-23 所示。圖 4-24 與圖 4-25 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 4-26 與圖 4-27 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 4-28 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[20]，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[20]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 4-29。而實驗結果如圖 4-30 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 4-31 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 4-32 與圖 4-33 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 4-5~表 4-8 則記錄兩種螺槳在兩種不同轉速之下的 ΔK_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 4-34~圖 4-39 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 4-34 先求長度和像素的比為 $10\text{mm} = 485\text{pix}$ ，然後圖 4-35 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。圖 4-36 和 4-37 為 DTNSRDC-4383 的變形量比對圖。圖 4-38 和 4-39 為 DTNSRDC-4498 的變形量比對圖。由四張圖比對的結果可看出，兩個螺槳的螺距均有變小，轉速越高，變形量越大；而且所量測到的變形量都和計算的結果很接近，。

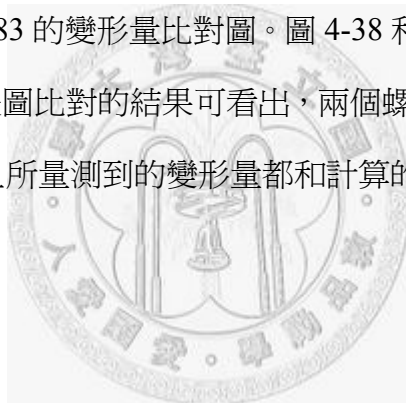




圖 4-1. DTNSRDC-4498 之鋁合金模具



圖 4-2. DTNSRDC-4383 之鋁合金模具

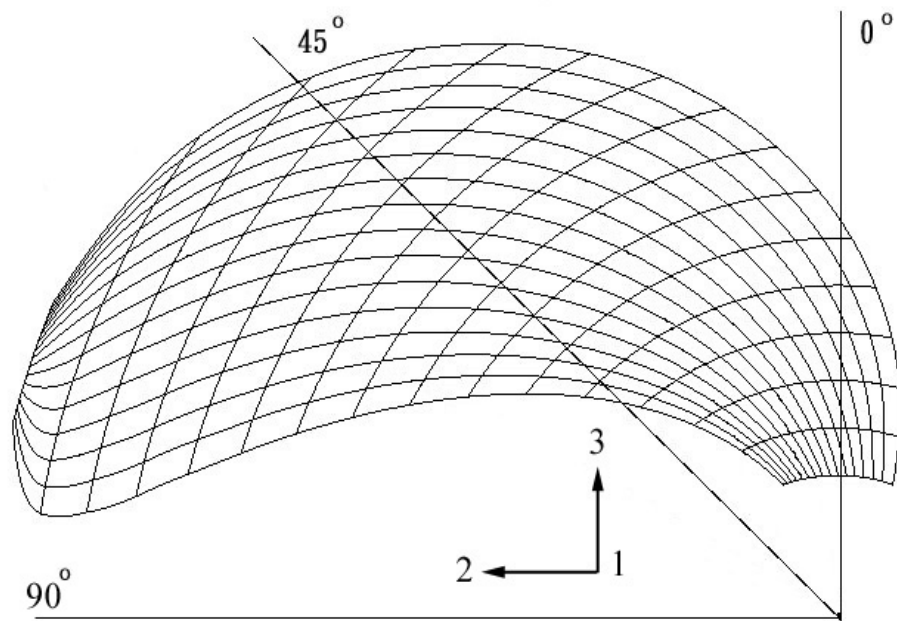


圖 4-3. 纖維角度定義



圖 4-4. 各層纖維形狀



圖 4-5. 在 DTNSRDC-4498 的模具上積層



圖 4-6. 在 DTNSRDC-4383 的模具上積層



圖 4-7. 葉片於熱壓機中熱壓成形



圖 4-8. 從模具上取下的葉片



圖 4-9. 修整邊緣後的葉片



圖 4-10. 加工製作完成之螺槳葉片



圖 4-11. DTNSRDC-4498 完成圖



圖 4-12. DTNSRDC-4383 完成圖



圖 4-13. 進行動力儀推力校正



圖 4-14. 進行動力儀扭力校正

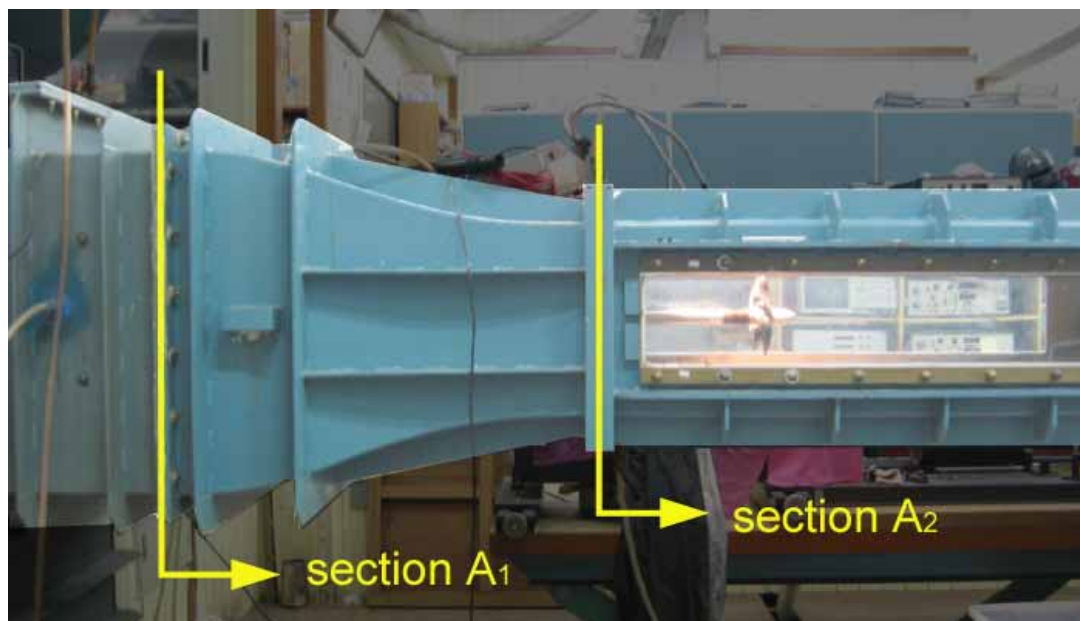


圖 4-15. 空蝕水槽

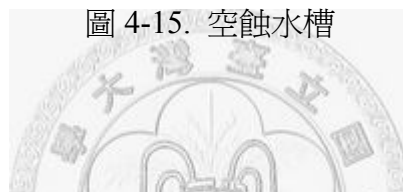


圖 4-16. 採用攝影方式觀察變形



圖 4-17. 在軸上標劃刻度線



圖 4-18. 拍攝靜止的螺槳



圖 4-19. 拍攝運轉中的螺槳



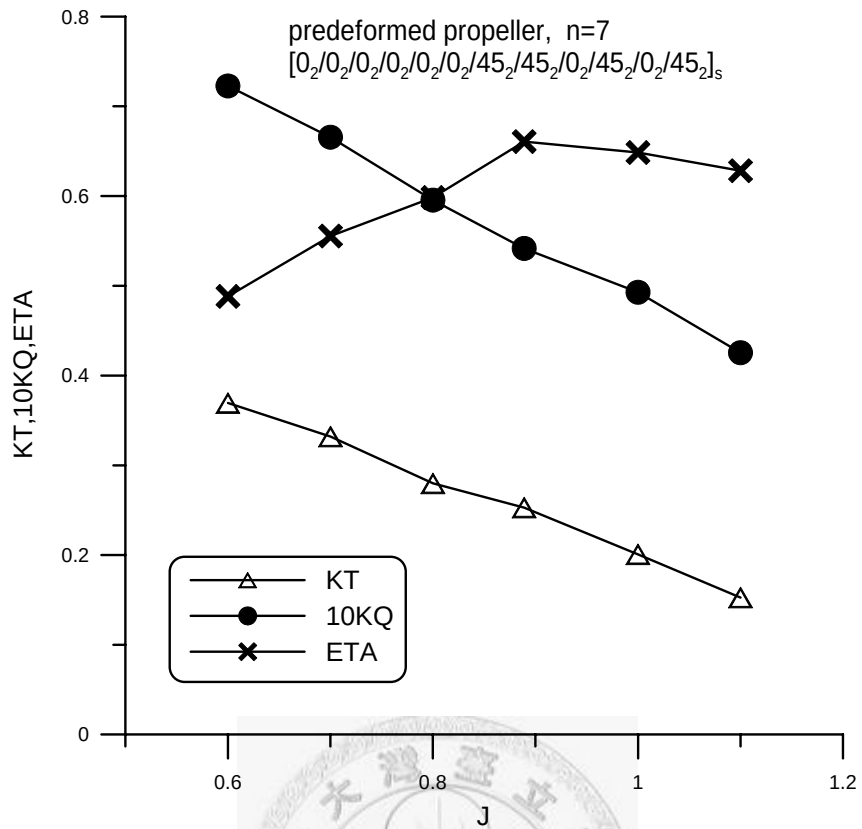


圖 4-20. 4383 最佳疊層之螺槳性能($n=7$)

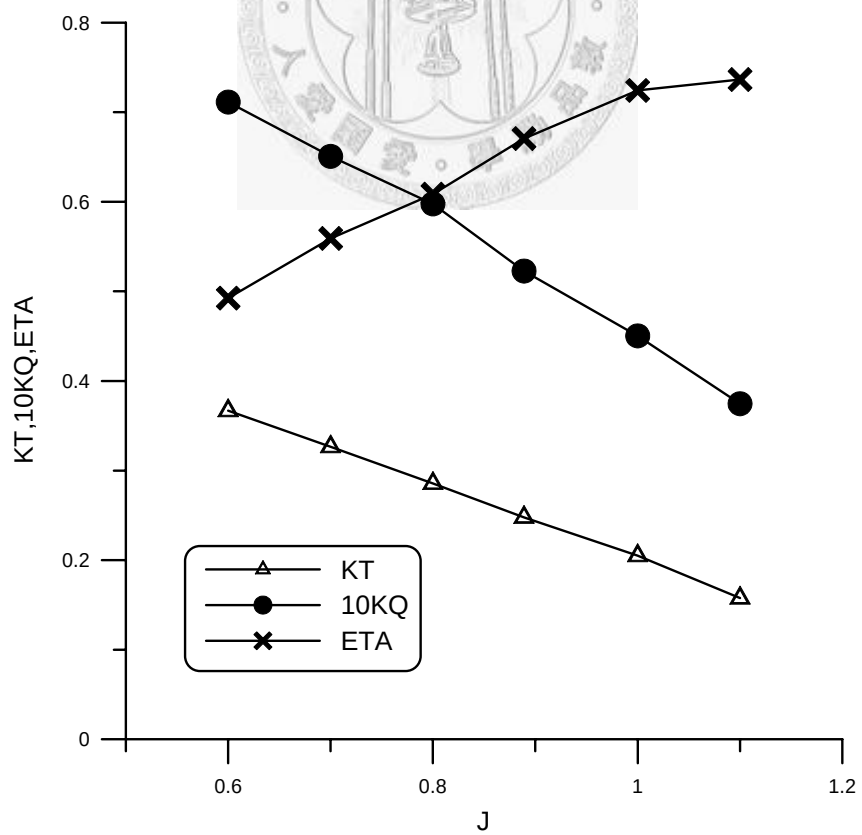


圖 4-21. 4383 最佳疊層之螺槳性能($n=13$)

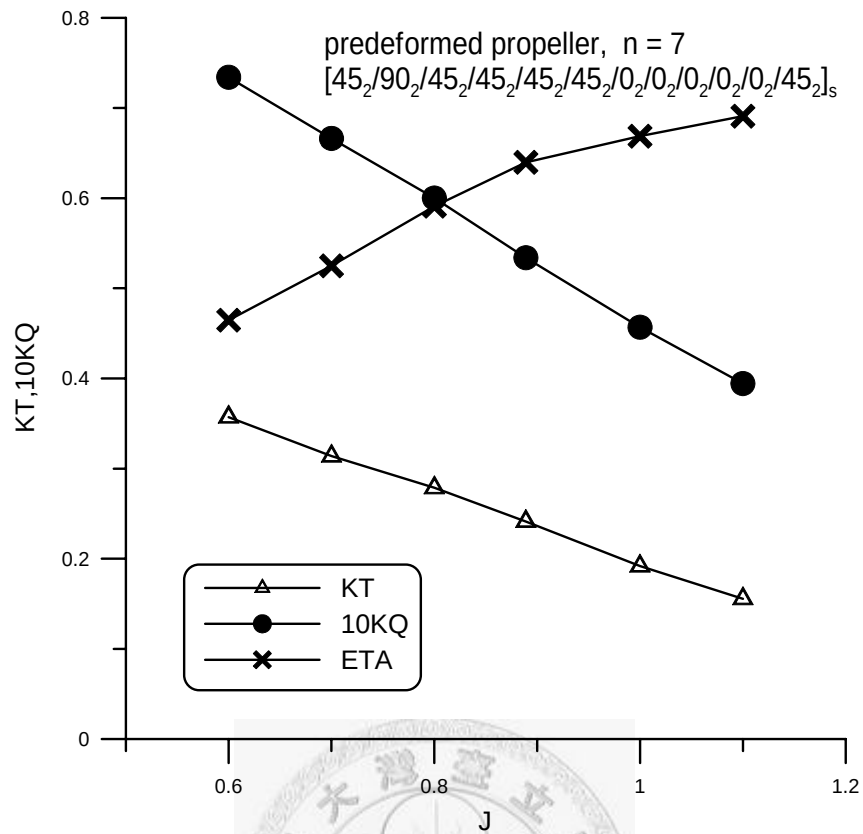


圖 4-22. 4498 最佳疊層之螺槳性能($n=7$)

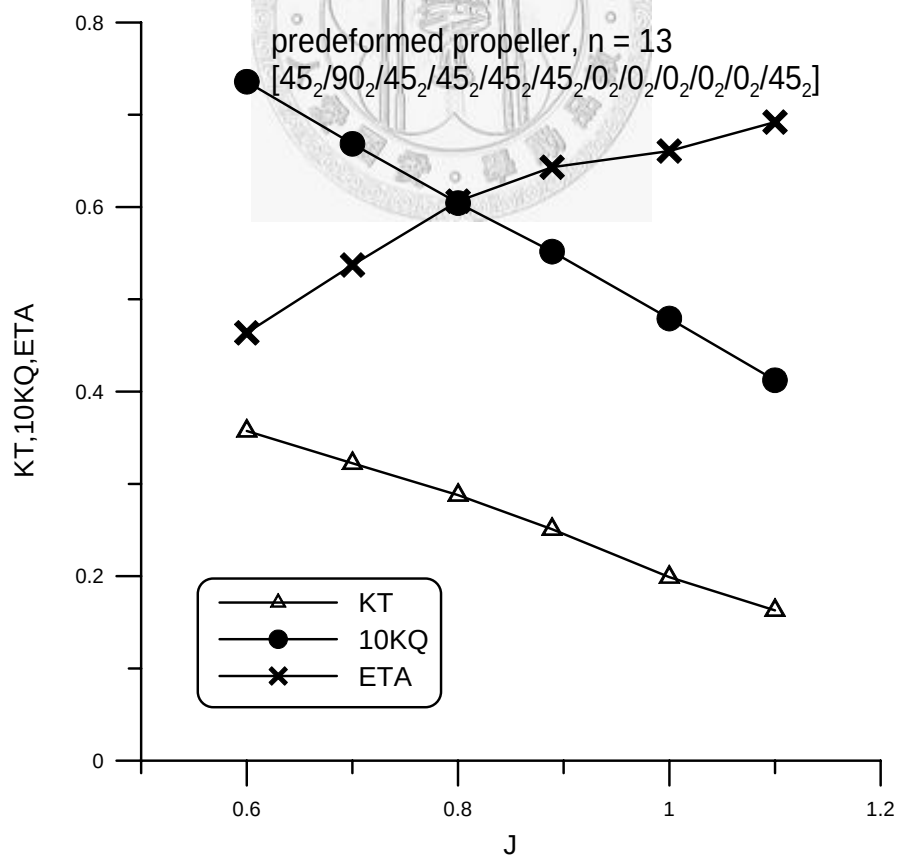


圖 4-23. 4498 最佳疊層之螺槳性能($n=13$)

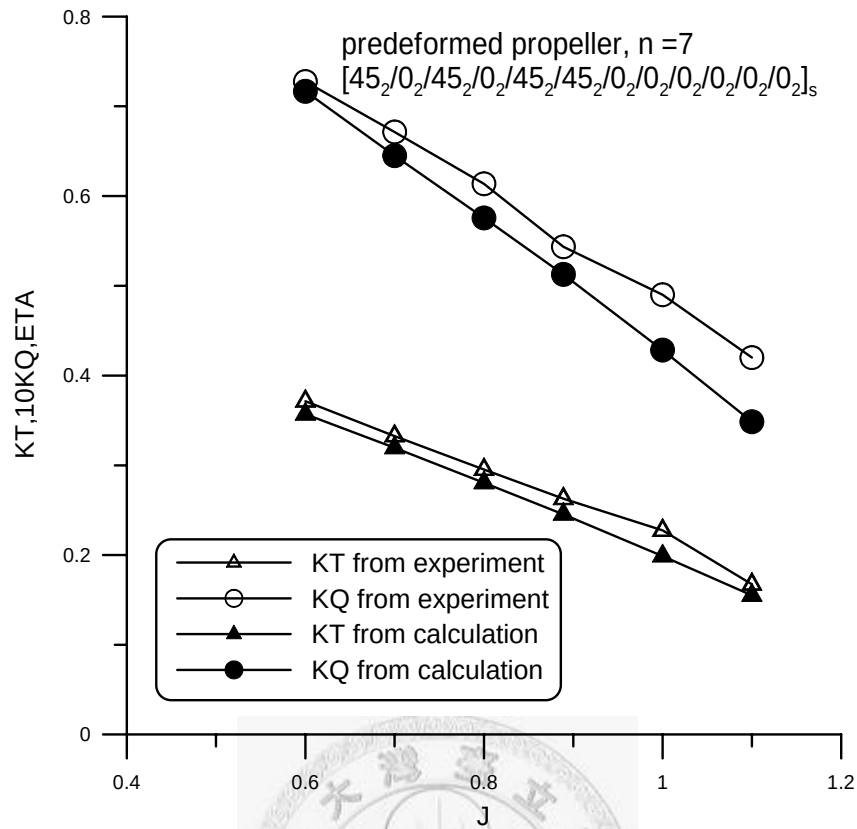


圖 4-24. 4383 最佳疊層實驗與計算結果比較($n=7$)

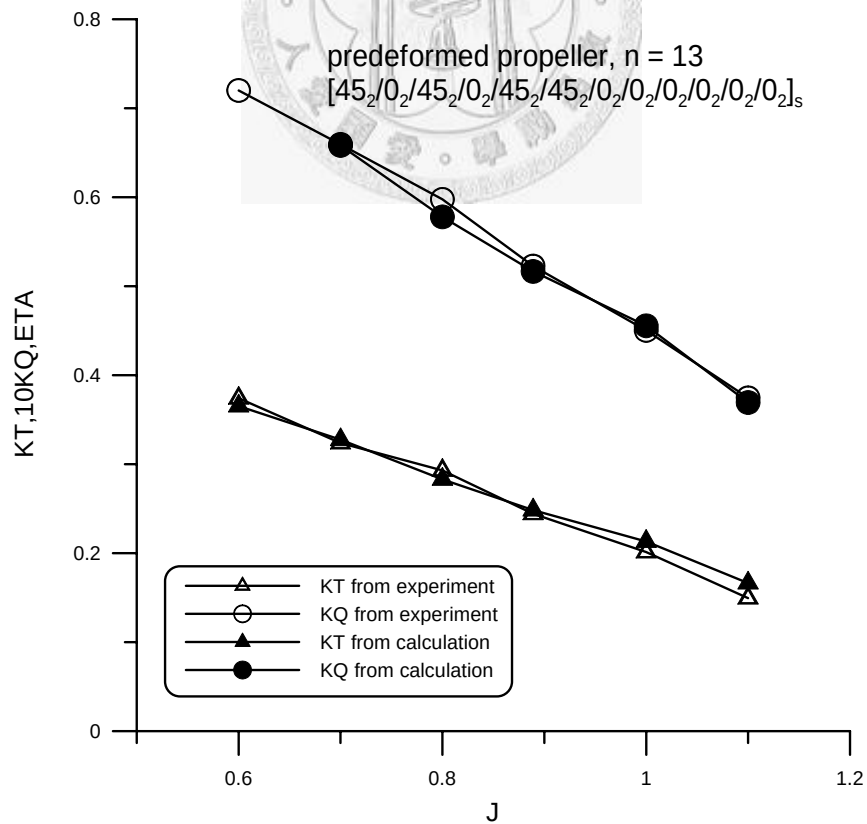


圖 4-25. 4383 最佳疊層實驗與計算結果比較($n=13$)

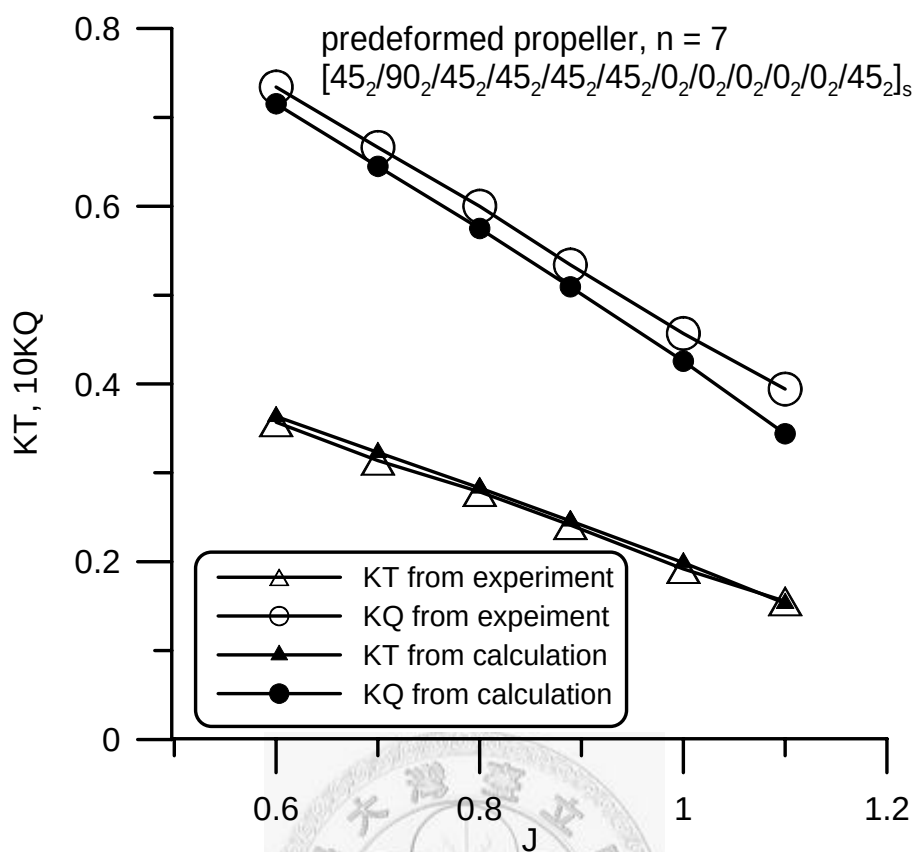


圖 4-26. 4498 最佳疊層實驗與計算結果比較($n=7$)

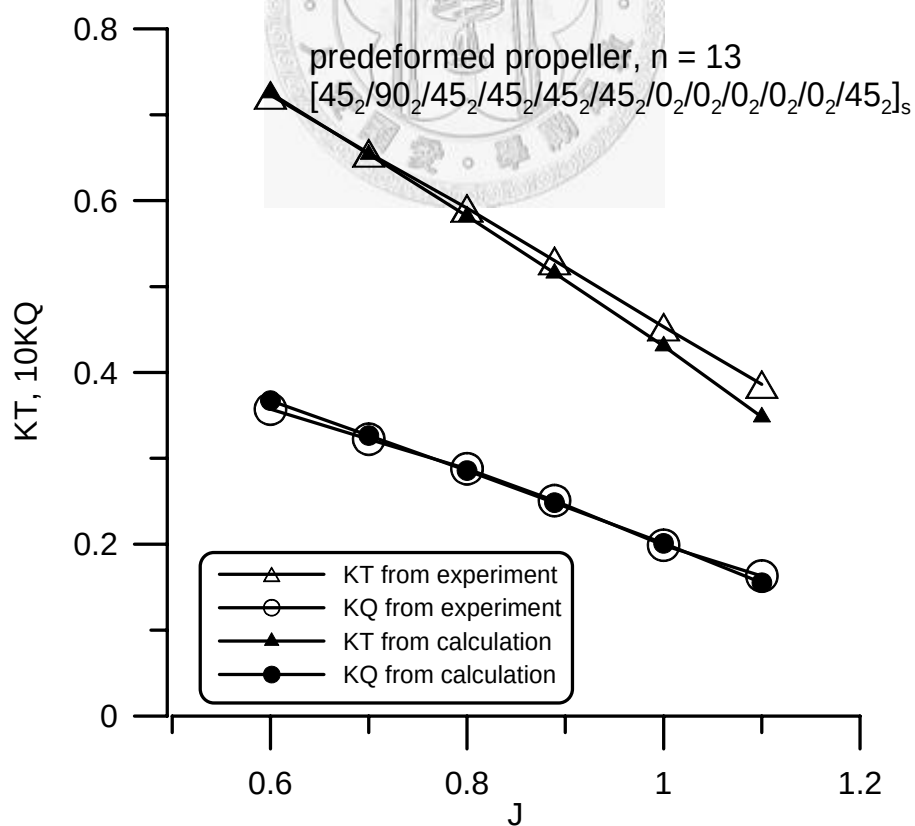


圖 4-27. 4498 最佳疊層實驗與計算結果比較($n=13$)

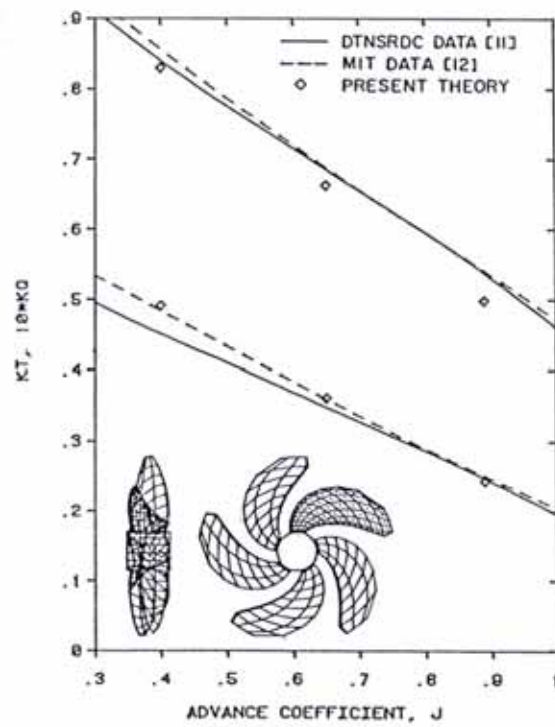


圖 4-28 PSF2 的計算結果和實驗比較[2]

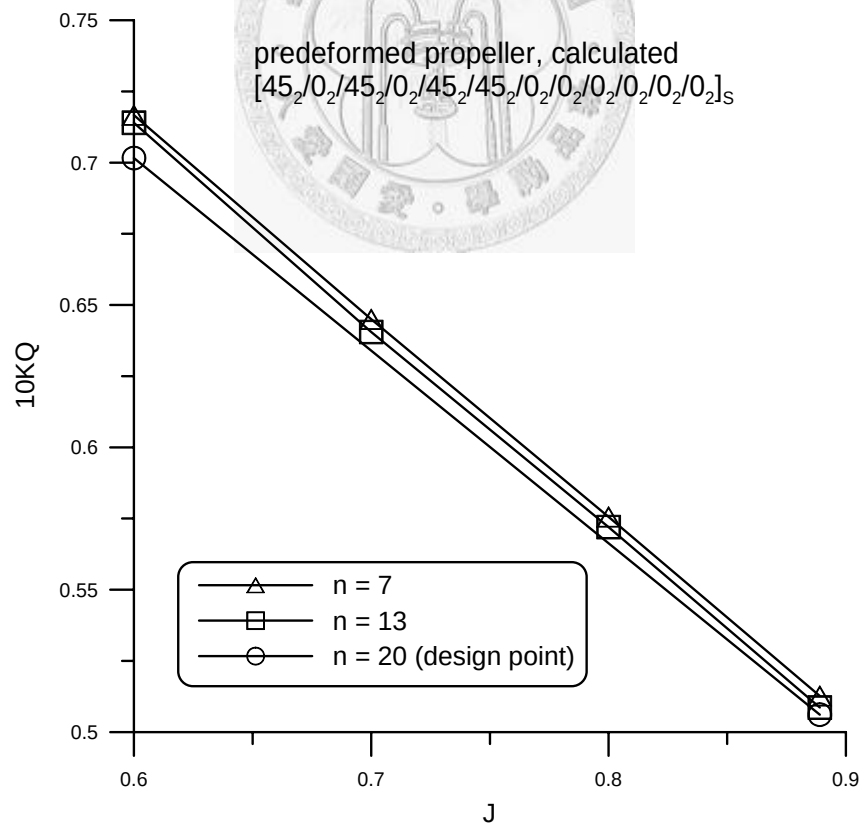


圖 4-29. 性能計算 4383 在三種轉速之下 KQ 的比較

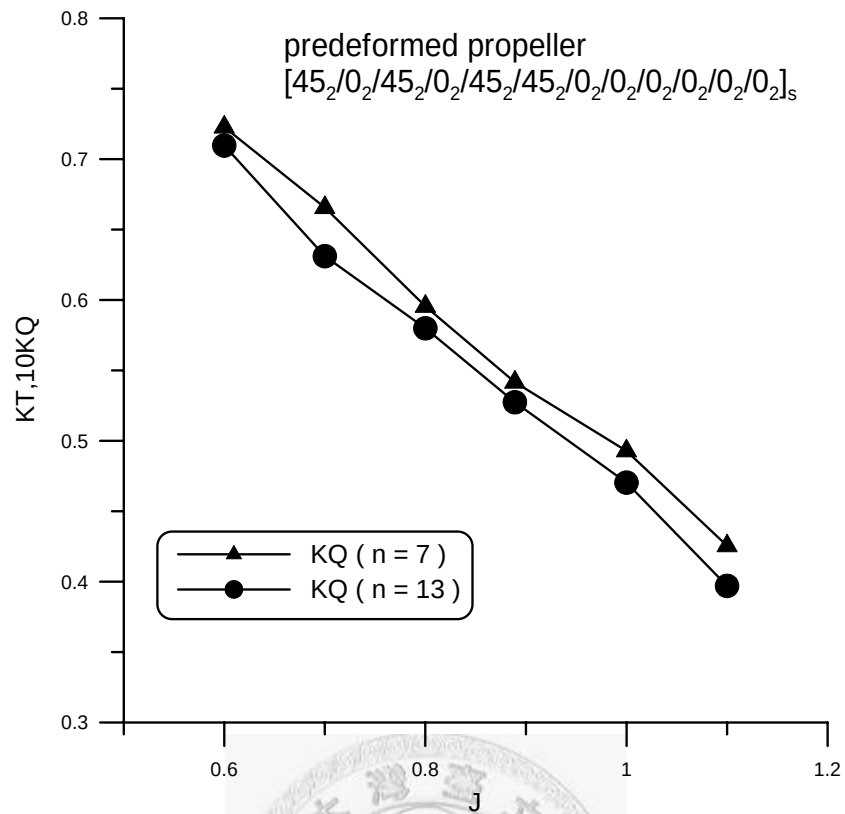


圖 4-30. 實驗量測 4383 在兩種轉速之下 KQ 的比較

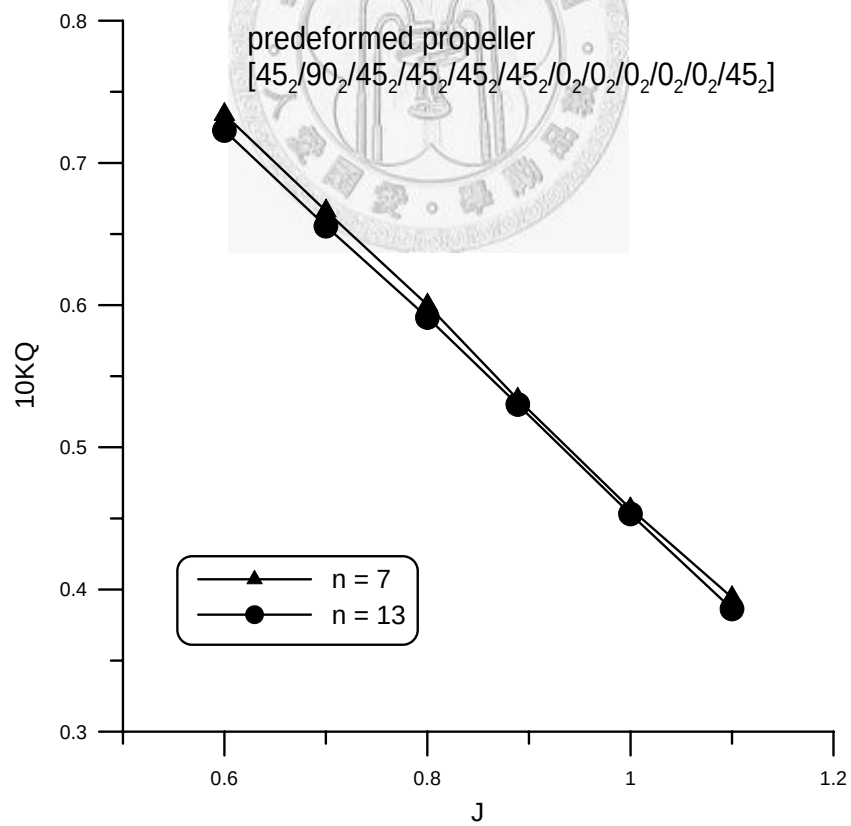


圖 4-31. 實驗量測 4498 在兩種轉速之下 KQ 的比較

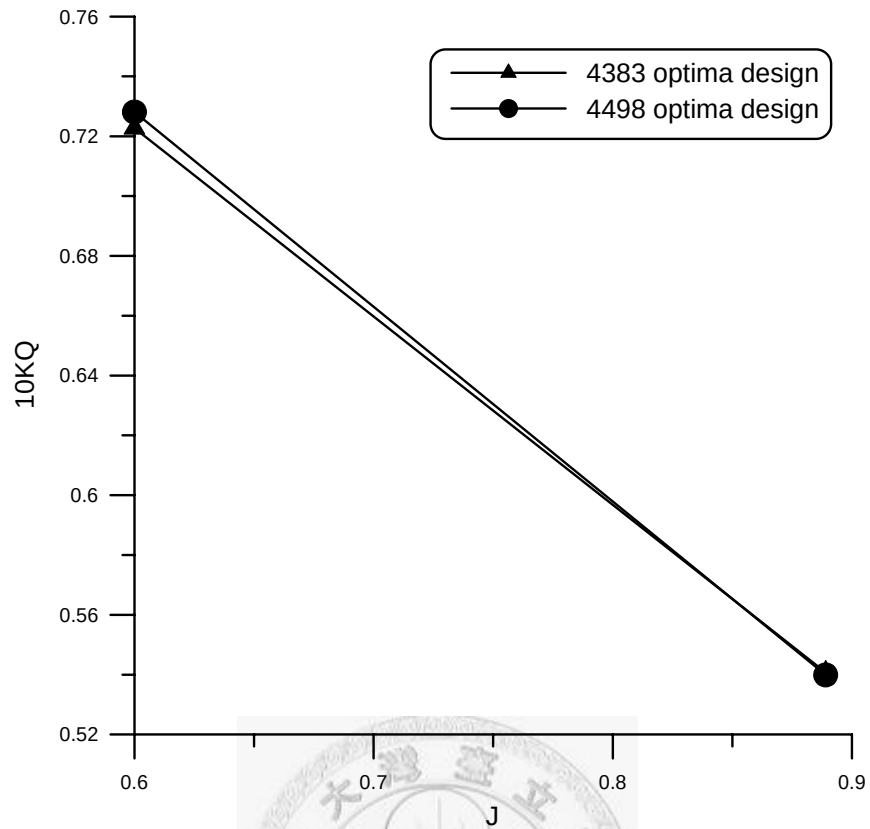


圖 4-32. 4383 與 4498 之實驗 KQ 曲線斜率比較(n=7)

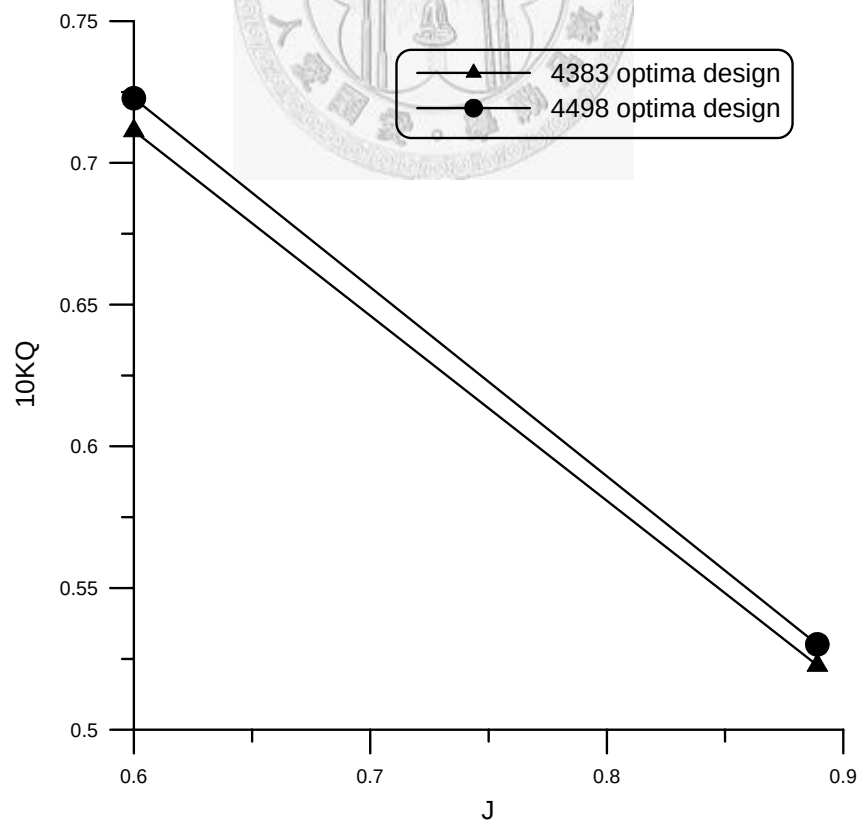


圖 4-33. 4383 與 4498 之實驗 KQ 曲線斜率比較(n=13)

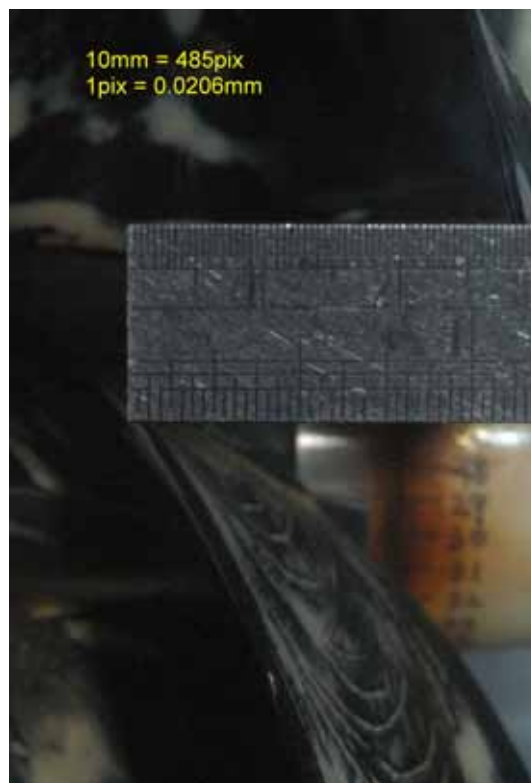


圖 4-34. 像素與長度換算

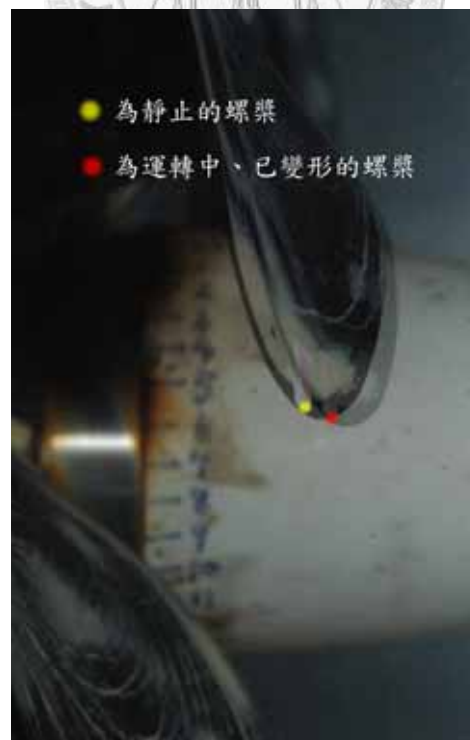


圖 4-35. 靜止與運轉的相片重合



圖 4-36. 4383 螺槳在 $n = 7$ rps 之下的變形量

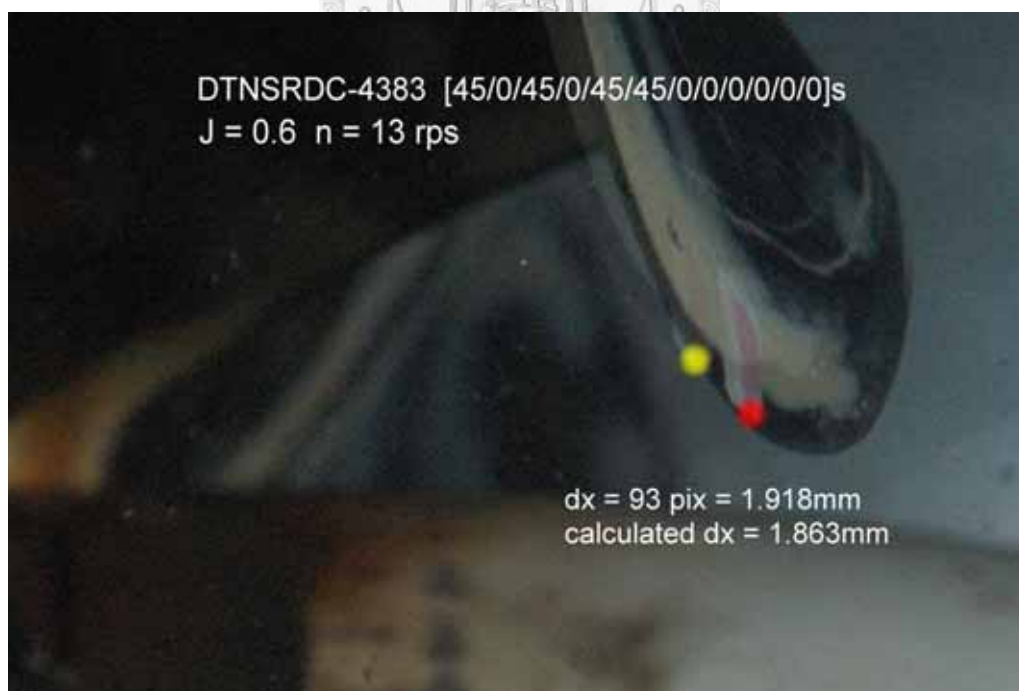


圖 4-37. 4383 螺槳在 $n = 13$ rps 之下的變形量

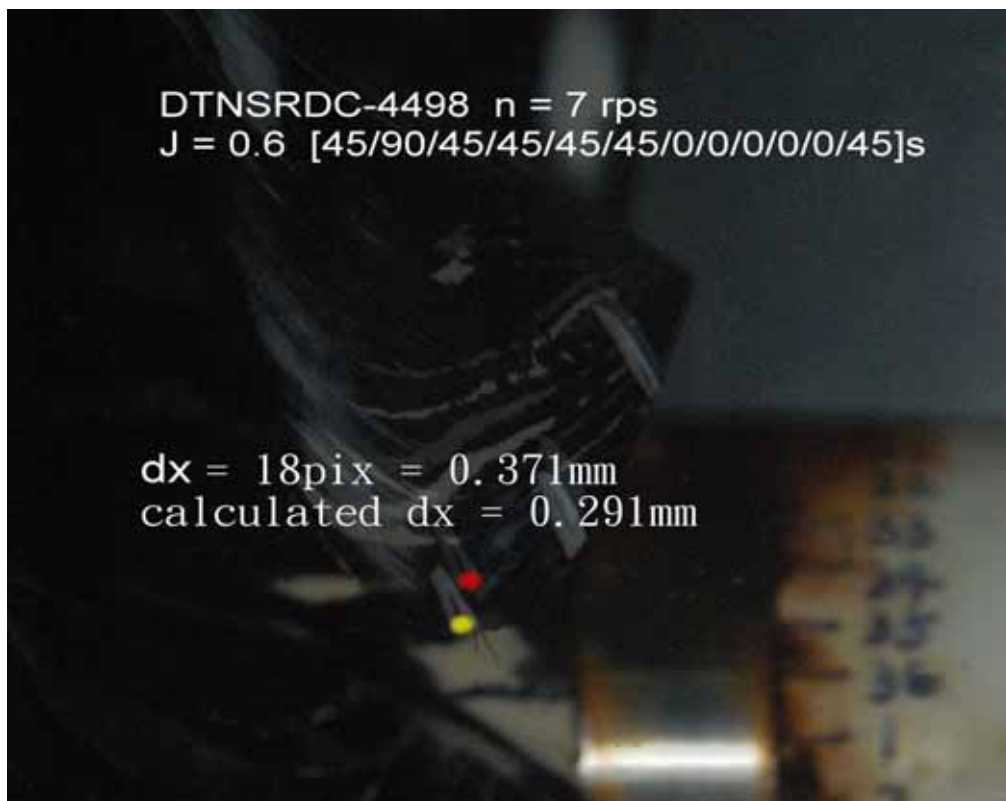


圖 4-38. 4498 螺槳在 $n = 7$ rps 之下的變形量

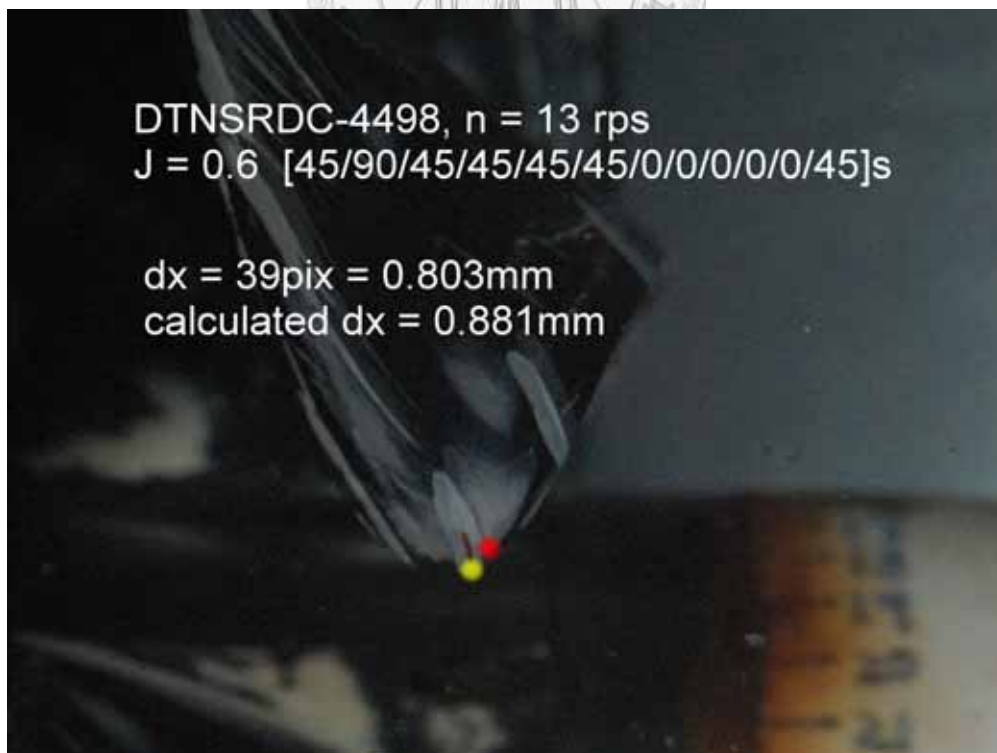


圖 4-39. 4498 螺槳在 $n = 13$ rps 之下的變形量

表 4-1. 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 4-2. 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 4-3. 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 4-4. 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 4-5. 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
$\Delta KQ(J_{0.6}-J_{0.889})$				0.182	

表 4-6. 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
$\Delta KQ(J_{0.6}-J_{0.889})$				0.188	

表 4-7. 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
$\Delta KQ(J_{0.6}-J_{0.889})$				0.188	

表 4-8. 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
$\Delta KQ(J_{0.6}-J_{0.889})$				0.193	

第五章 結論與未來展望

5-1 結論

FRP 材料不僅具有質量輕、比强度高、耐腐蝕等優點，更可以透過纖維方向的安排來控制組成結構的變形。針對 FRP 複合材料螺槳進行疊層最佳化搜尋，找出最佳的疊層順序，使其能有優於傳統金屬的螺槳性能。同時，也針對不同的螺槳幾何外型進行探討，發現同時具有歪斜和偏斜設計的螺槳，經過疊層最佳化搜尋之後，在入流速度較低的情況下，扭力係數下降的幅度比僅有歪斜設計的螺槳來得多，更能達到本文所說的「最佳螺槳」的目的。

以下為本文結論：

1. FRP 複合材料用在同時具高歪斜和高偏斜的螺槳，和只具高歪斜的螺槳比較起來，更能使性能明顯優於傳統金屬材料。因為高歪斜和高偏斜的外形，讓螺葉上的壓力對根部產生更大的扭矩，使螺距變小。
2. 高歪斜螺槳以及同時具高歪斜和高偏斜設計的螺槳，兩者經過疊層最佳化搜尋，得到的疊層角度絕大部份為 45 度及 0 度，這兩個角度的纖維讓葉片容易產生扭轉變形，而不易產生彎曲變形，能使得螺槳的螺距有明顯的變化。同時透過彎曲與扭轉的偶合效應，使螺距變小。
3. 最佳疊層配合預變形螺槳的效果在實驗中獲得驗證，不但可使螺槳的螺距下降、扭力係數曲線斜率降低，且在設計速度下接近設計值；同時也驗證了同時具高歪斜和高偏斜設計的螺槳，其扭力係數曲線斜率降得更低、變形量更大，也能維持在原始設計值上。

5-2 未來展望

本文所使用的 FRP 複合材料螺槳為碳纖維預浸材所製，而螺槳性能計算和實驗均考慮螺槳單獨實驗的情況，未來研究可朝以下方向繼續進行：

1. 碳纖維複合材料的剛性較其他複合材料的剛性來得高，變形量相對就比較小。雖然同時具有高歪斜和高偏斜的螺槳的變形量較大，但未來應該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. 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，甚至針對實船所使用的螺槳，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。
3. 直徑大的螺槳變形量大，扭力係數曲線的斜率下降量也較大，未來的實驗規劃可以考慮採用直徑更大的螺槳，其變形量會更大而性能變化的效果也會更明顯。



參考文獻

- [1] J. E. Kerwin and C. S. Lee, Prediction of Steady and Unsteady Marine Propeller Performance by Numerical Lifting-Surface Theory, SNAME Transaction Vol. 86, 1978, pp 218-253
- [2] D. S. Greeley and J. E. Kerwin, Numerical Methods for Propeller Design and Analysis in Steady Flow, SNAME Transaction Vol. 90, 1982, pp 415-453
- [3] J. C. Bruggeman and A. Huisman, Acoustic Performance of the Highly Skewed Propeller of a Ro-Ro Container Ship, Propellers '88 Symposium, pp 4-1~4-18 ,1988
- [4] 陳重盛,「船用 FRP 之原材料(一)」,強化塑膠廣用新知季刊, pp 143
- [5] 藍玉錦,「複合材料船用螺槳之應力分析」,國立台灣大學工程科學與海洋工程研究所碩士論文,民國八十二年
- [6] C. T. Herakovich, Mechanic of Fibrous Composites, John Wiley & Sons, INC., 1998
- [7] T. A. Weisshaar, “Aeroelastic Tailing of Forward Swept Composite Wings”, Journal of Aircraft, Vol. 18, 1981, pp. 669-676.
- [8] M. K. Abdul “Effects of Bend-Twist Coupling on Composite Propeller Performance”, Mechanics of Composite Materials and Structures, Vol. 7, 2000, pp. 383-401.
- [9] 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。
- [10] 林敬傑,「FRP 船用螺槳之最佳化研究」,國立台灣大學工程科學與海洋工程研究所博士論文,民國九十二年。
- [11] R. T. Haftka, Z. Gurdal, M. P. Kamat, “Elements of Structural Optimization”, Kluwer Academic Publishers, U. S. A., 1990.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] A. Muc, “Transverse Shear Effects in Discrete Optimization of laminated compressed cylindrical shells”, Composite Structures, Vol. 38, No. 1-4, 1997, pp. 489-497.

- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] J. S. Carton, *Marine Propellers and Propulsion*, Butterworth-Heinemann Ltd, U.K., 1994.
- [20] 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
- [21] J. H. Holland, "Adaptation in natural and artificial systems", Ann Arbor: The University of Michigan Press.
- [22] *Engine Selection and Project Manual of Sulzer RTA84C and RTA96C*, July 1998