

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

風機氣動力系統的分析與模擬

Analysis and Simulation of Aerodynamic System for Wind Turbines

計畫編號：1002001INER071

受委託機關(構)：大葉大學

計畫主持人：吳佩學、紀華偉、張顧耀

聯絡電話：0933677014

E-mail address：pswu@mail.dyu.edu.tw

核研所聯絡人員：吳鴻筠

報告日期：100年11月30日

目 錄

目 錄.....	I
中文摘要.....	1
英文摘要.....	2
壹、計畫緣起與目的.....	4
貳、研究方法與過程.....	7
一、風機的三維葉片氣動力分析與模擬.....	7
二、風機葉片氣動力的最佳化計算.....	9
三、氣動力計算程序與設計協助的視窗化.....	12
參、主要發現與結論.....	14
一、氣動力計算程序與設計協助的視窗化.....	14
二、風機的三維葉片氣動力最佳化分析與模擬.....	16
肆、參考文獻.....	27

中文摘要

由於風力發電系統乃藉由風力渦輪葉片擷取風的動能帶動發電機產生電能，風力渦輪與其葉片的空氣動力性能對於風力發電系統的成本效益，具有重要的決定性影響。葉片的空氣動力學分析與葉片參數的最佳化設計，乃是風機開發前期的重要關鍵技術，它不但影響後續所有機構設計的尺寸選擇與部品規格，此最佳化設計技術的建立，也將可提升國內自我開發風機的品質與速率。

基於本研究團隊對於二維翼型已建立的氣動力最佳化能力，本研究對三維葉片與風力渦輪之氣動力最佳化建立一套計算程序與方法，以利於提升風力渦輪擷取風能的比例。

本論文陳述由本研究成功開發的風機三維葉片氣動力最佳化計算的程序與方法。將此最佳化的計算方法應用在先前 25kW 風力渦輪的葉片改進，結果顯示，新設計的三維葉片的氣動力性能有明顯的提升。

關鍵詞：風力渦輪，三維葉片，氣動力，最佳化，計算方法

Abstract

Since a wind-power generation system uses wind turbine blades to convert the kinetic energy of wind to drive a generator which in turn yields electricity, the aerodynamic performance of the wind turbine blades and the rotor has decisive effect on the cost benefit of the whole system. The aerodynamic analysis and the optimization of design parameters for the wind turbine blades are key techniques in the early stage of the development of a wind-power generation system. It influences the size selection of connecting mechanisms and the specification of parts in the design steps that follows. The establishment of the optimization techniques may also build up domestic ability in improving the quality and the speed of the development of wind power generation systems.

Based on the previously established ability of the research group in managing aerodynamics optimization for two-dimensional airfoils, a computational procedure and method for aerodynamics optimization was established in this study for three-dimensional blades and the rotor of a wind turbine. It is helpful in improving a wind turbine to increase the percentage of extracting wind energy.

This paper describes the aerodynamics optimization procedure for

three-dimensional blades and the methods. The procedure was applied to improving a previously studied 25kW wind turbine rotor design. Results show that the aerodynamic performance of the new three-dimensional blades has remarkable improvement after optimization.

Keywords: wind turbine, three-dimensional blade, aerodynamics, optimization, computational methods

壹、計畫緣起與目的

為了克服化石燃料逐漸缺乏的能源問題，並顧及地球的環保，發展永續的(sustainable)潔淨能源(clean energy)是世界各國努力的目標。在各種新能源當中，風力發電沒有燃料問題，沒有輻射與排放二氧化碳等公害，可以增加能源自主性，減少受到進口油價攀升與波動變化之壓力，是一項很值得發展的補充性電力。根據全球風能協會（Global Wind Energy Council）統計，2004 年全球風力發電裝置容量增加 7,976MW，總裝置容量達到 47,314MW[1]。全球 2008 年的風能累計裝置容量已達 122GW，近五年來平均成長率約 25%，足見發展的快速。樂觀估計 2020 年前全球風力發電裝置容量將達 1,245GW(2008 年的風能展望有將數字往下修為 1,081GW)，其中中小型風機市場可達三分之一強，屆時全球超過 10%的電力將來自風力，且每年可大幅降低二氧化碳的排放量。風力發電在歐洲早就掀起熱潮，例如西班牙風力發電量平均就高達西班牙所有電力需求的百分之二十八。北歐和中東歐地區也早已興起風力發電熱，英國未來十年內預定對風力發電投資 60 億英鎊。近年來美國在風能的發展迅速，目前累計裝置容量已為全球之冠。中國大陸近年來也急起直追，有與美國爭霸之趨勢。根據美國風力能源協會（American Wind Energy Association, AWEA）估計，美國風力發電量在 2020 年約可達到全國電力需求量的 6%。目前美國、英國、日本、韓國等國家對於小型風機發展政策都有等同於太陽能光電系統的補助，有助於風力發電產業的發展。台灣以及金門與澎湖等離島地區四周環海，有充分的風能密度可供利用。預估台灣離島約有 20-30MW 再生能源的潛能，而

在台灣本土的遊樂區與農莊也有合計約 40MW 的中小型風機潛在市場。隨著世界風力發電技術的日漸成熟，風力發電的成本也在下降。在台灣，風力發電機(以下簡稱風機，或廣泛的用語為風車)的設計與製造技術，尚屬於萌芽階段，落後先進國家至少有 15 年以上。依照目前的趨勢，實有必要加速國內自我設計與製造的能力，才能夠與其他國家競爭，並與世界接軌。

除了局部小型發電採垂直軸風車以外，一般均以水平軸風車為主。本研究也將針對水平軸風車之設計作考慮。一般在風機大小目前的分類，基本上發電量在 50kW 以下者為小型，50kW~500kW 為中型，而 500kW~5000kW 為大型[2]。水平軸風力發電機系統包含轉子葉片、軸殼、齒輪箱、軸承、軸承箱、低速與高速傳動主軸、骨架、制動器、YAW 機構、支桿或塔架等；風力渦輪葉片擷取風的動能轉換成轉子的動能，經齒輪箱等傳動機構帶動發電機產出電能，因此葉片的設計是非常重要的基礎技術。影響風力渦輪效益的因素包含有葉片切面形狀、葉片漸縮、葉片扭轉、葉片尺寸與數量等等諸多因素[2,3]。雖然葉片外型與尺寸決定氣動力負載，然而葉片的受力也會造成其變形而影響風力渦輪效益，因此在風力渦輪設計上造成了氣彈耦合的複雜問題。葉片外型與尺寸決定氣動力負載，為了達到最佳效率，除小型風機為了成本考量以外，一般設有葉片傾角控制機構，依照不同風況調變葉片傾角，以達到最佳效率並獲得足夠扭力帶動發電機發電。

由於風力發電系統乃藉由風力渦輪葉片擷取風的動能帶動發電機產出電能，其效益是年度內在各種風況下所可產生的發電總

量。因此，風力渦輪與其葉片的空氣動力性能對於風力發電系統的成本效益，具有重要的決定性影響。葉片的空氣動力學分析與葉片參數的最佳化設計，乃是風機開發前期的重要關鍵技術，它不但影響後續所有機構設計的尺寸選擇與部品規格，葉片氣動力最佳化設計技術的建立，也將可提升國內自我開發風機的品質與速度。

文獻中對於風力發電機葉片的最佳化設計，大都採現有二維翼型做混合或給定的三維葉片做扭轉，設計上比較針對結構的最佳化(如[4,5,6])，對於氣動力設計的改進結果，缺乏確切深入的探討。本研究之目的乃基於先前建立二維翼型氣動力最佳化之基礎[7]，先確定各個選定位置的二維翼型為該位置的最佳翼型後，再建立三維葉片氣動力最佳化之計算程序與外型，以期能有效提升風力渦輪的功率係數。

貳、研究方法與過程

風力渦輪藉由葉片抽取風能轉換成轉子的轉動能，此能量轉換的比例稱為該風力渦輪的功率係數(power coefficient C_p)。理論上，風力渦輪功率係數的最大值為 0.5926 (= 16/27)稱為貝茲極限(Betz limit)，當考慮尾流旋轉(wake rotation)時，此理論值更低，隨著尖端速度比(tip speed ratio)下降，此理論極限值降得越多。在實際應用的情形，最大可獲得的功率係數會受到轉子後方尾流、葉片數量、葉尖損失與空氣動力摩擦損失等因素的影響，其值比貝茲極限更低。本研究風機氣動力最佳化的主要目的乃在於建立一套風機葉片氣動力分析與模擬的設計工具，使風力渦輪的性能係數往貝茲極限盡量提升。此關鍵設計步驟決定了葉片外形(也決定了風力渦輪性能係數)，也將作為後續應力結構分析與最佳化以及後續機構設計的重要基礎。本研究分成風機的三維葉片氣動力分析與模擬、風機葉片氣動力的最佳化計算以及氣動力計算視窗化等三個部份。

一、風機的三維葉片氣動力分析與模擬

本研究三維葉片氣動力的計算主要以葉片元素動量理論(BEM theory)為基礎，並輔以 NREL 程式為基礎的空氣動力學計算作比較。此三維葉片乃是由二維翼型堆疊而成。然而，與文獻中他人研究最大不同之處，乃是本研究各個二維翼型依其安排的位置，依照本團隊發展出來的二維翼型最佳化計算程序決定其最佳外形，而非直接採用 NACA 現有的翼型做混合。雖然二維翼型氣動力計算的部分也是利用 Xfoil 程式來得到升力、阻力係數(C_l 與 C_d)，而且本團隊也已經將該程式操作介面成功的轉

成視窗化，但是 XFoil 經常會有計算無法收斂的情形而必須做一些人為的調整輸入。本團隊已經成功的克服此問題，改成用 XFoil 建立升阻力係數資料庫後，作類神經網路訓練，在二維翼型最佳化計算程序中改用類神經網路搜尋，確保計算過程不會中斷。

從二維翼型堆疊成三維葉片，乃依照各個二維翼型安排的位置與設計攻角，計算其最佳的安裝角與弦長。最後以 BEM 理論計算風力渦輪的功率係數。參考[8,9]以及 NREL 氣動力計算之內容，本研究設計計算的步驟如下：

1. 依據風況選定設計風速與功率，算出風力渦輪半徑。為了後續比較，本研究選定先前探討過的 25kW 風力發電機的設計參數，設計風速為 12m/s。
2. 選擇尖端速度比 λ 。發電用的風力渦輪尖端速度比一般選在 4 到 10 之間。本研究選用 $\lambda = 4$ ，因此，渦輪轉速應為 72rpm。
3. 依據尖端速度比選擇葉片數量 (B)。考慮奇數葉片有較好的動力平衡特性[10]，本研究選用 3 片葉片 ($B = 3$)。
4. 將葉片分成若干段葉片元素 (N)，並依據葉片空氣動力特性選定每段葉片元素長度 ($\Delta r_j, j = 1, \dots, N$) 與各葉片元素中點之半徑位置 ($r_j, j = 1, \dots, N$)。本研究分 6 段 ($N = 6$)，除根部第一段為圓形截面，其餘 5 個截面依下一步驟做二維翼型最佳化。
5. 選用一個最佳化計算的初始翼型(本研究採用 NACA4412)，對每一截面翼型給予適當的最佳化限制條件(constraints)，依據先前建立二維翼型氣動力最佳化之計算程序[7]，找出該截

面位置最佳翼型，並求得最佳氣動力性能 $C_{l,design} / C_{d,design}$ 。此步驟之計算包含使用 Xfoil 之氣動力資料庫建立，類神經網路之建立與訓練，以及各種最佳化計算方法的計算比較，詳見下一節之敘述。

6. 利用最佳轉子理論計算每段葉片元素中點位置(翼型最佳化位置)之轉速比 $\lambda_{r,j}$ 、安裝角 φ_j 與弦長 c_j ，計算公式如下：

$$\lambda_{r,j} = \lambda(r_j / R) \quad (1)$$

$$\varphi_j = \frac{2}{3} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_{r,j}} \right) \quad (2)$$

$$c_j = \frac{8\pi r_j}{BC_{l,design,j}} (1 - \cos \varphi_j) \quad (3)$$

7. 利用葉片元素動量理論(BEM theory)計算風力渦輪的功率與功率係數。
8. 利用 SolidWork 建立三維葉片之外形。

二、風機葉片氣動力的最佳化計算

本計畫將三維風機葉片翼型分為五個二維翼型截面並針對各截面以 NACA4412 變化翼型之 C_l / C_d 進行最大化設計。計畫主要分為兩部分，其一為最佳化方法選用與程式開發；其二為利用類神經網路取代 Xfoil 氣動力分析。

考慮及演算效率，本研究風機之氣動力設計最佳化可用梯度為搜尋基礎之運算法為之。此類演算法可分為三個層次：策略層次(strategy)，最佳化演算層次(optimizer)，一維搜尋(1-D Search)。由於各種方法組合對特定之問題各有其不同穩定性與

效率，本研究針對氣動力系統測試各種方法，依其穩定性及計算效率選擇二種策略 (SUMT 及 ALM)，三種演算法 (Fletcher-Reeves 法、DFP 法及 BFGS 法)，一種一維搜尋法(黃金分割法)互相搭配[11-13]。除可兼顧效率與穩定性外，更可作為最佳設計點比較與最後設計之選擇。

本研究將三維葉片分成 6 個截面翼型，除根部翼型(截面 0)為圓形截面外，其餘 5 個翼型(Section 1-5)先設計好安置的截面半徑位置，再以 NACA 4412 翼型為初始翼型進行最佳化，探討 C_L/C_D 最大化。設計變數有四，分別為新舊翼型前緣半徑比 (x_1)，翼型厚度(與弦長比值) (x_2)，翼型弧度(與弦長比值) (x_3)及攻角(x_4)。考量葉片承受風力負載時，靠近根部需要承受較高的應力，而葉片中段到葉尖須要有較好的升力係數以提升抽取風能的性能，因此，每個翼型氣動力最佳化的參數限制條件給予不同的設定(詳見完整報告)。然而，每個翼型氣動力最佳化的數學計算模型都可表示為：

$$\text{Min } f(x) = -C_l / C_d \quad (4)$$

$$\text{S. t. } x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad (5)$$

其中設計變數邊界限制如表 1。

表 1 二維翼型設計最佳化變數及其邊界

設計變數	名稱	下邊界	上邊界
x_1	前緣半徑比	0.4	2.5
x_2	翼型厚度	0.05	0.30
x_3	翼型弧度	0.00	0.09
x_4	攻角	-5	20

由於氣動力分析軟體 XFOil 於特定條件下無法收斂，故無法直接用於最佳化程式中呼叫。本計畫以約略等間隔方式，選取各變數多個取樣點，並以 XFOil 進行氣動力分析，擷取 C_l 及 C_d 值組合成類神經網路訓練資料庫，依 3:1 比例分為訓練對及驗證對，進行類神經網路訓練[14]。訓練後的類神經網路供以上氣動力最佳化計算使用，以確保計算過程中程式運算不會中斷。

本計畫使用 Matlab 進行類神經網路訓練。網路種類為 multilayer feed-forward back-propagation network (MLP)，分為三層，分別為輸入層，隱藏層及輸出層如圖 1。輸入層為變數輸入層，因有四個變數，故有四個神經元，隱藏層採 tansig 函數激發，神經元數量需依函數複雜度決定，本計畫嘗試 30~40 神經元，再選出最佳網路。輸出層僅一個神經元，為函數之輸出，即 $-C_L/C_D$ 。輸出層之激發函數為 pureline。圖 1 類神經網路架構網路訓練方式採 Levenberg-Marquardt algorithm (trainlm)，並加入驗證對以避免網路過度訓練。另由於四個輸入變數差異百倍以上(2 orders)，故訓練對輸入網路前均施以(-1,+1)正規化，即輸出及輸入經正規化後介於-1 至+1 間。

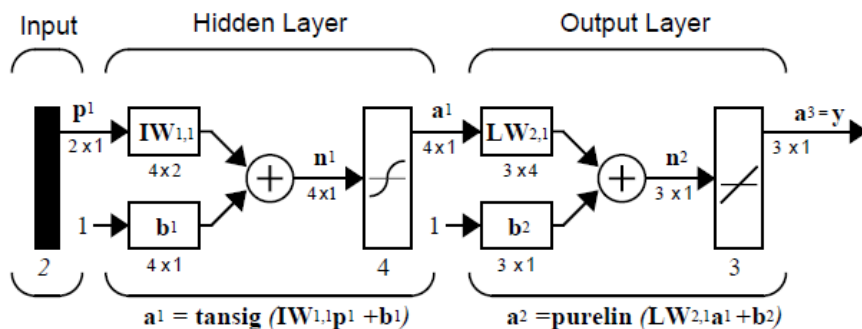


圖 1 類神經網路架構

三、氣動力計算程序與設計協助的視窗化

風機葉片氣動力設計相關程式的視窗化，是以不更動既有程式為原則。本研究繼續對 Fast 程式做視窗化，使用者必須編輯文字輸入檔，並執行 Fast 以產生輸出檔，如圖 1(a)所示。若使用其對應的視窗程式-WinFast，則該程式會提供圖形化的介面讓使用者設定相關的參數，產生文字輸入檔，並執行 Fast，得到最後的輸出結果，如圖 2(b)所示。在完成單一程式的視窗化之後，再依循 Facade 設計樣式提供另一個整合程式，將這些個別視窗程式加以整合。整合程式主要負責的功能有「整體流程的掌控」以及「專案觀念的引進」，後者提供各自的專案設定，用來記錄該使用者的狀態與參數設定。NREL 程式視窗化後的系統整合如圖 3 所示。

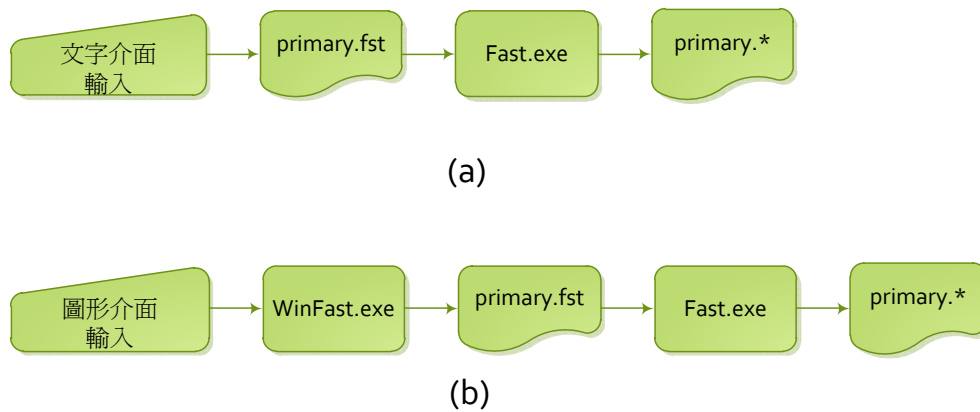


圖 2 (a) 原 Fast 的執行流程 (b) WinFast 視窗程式的執行流

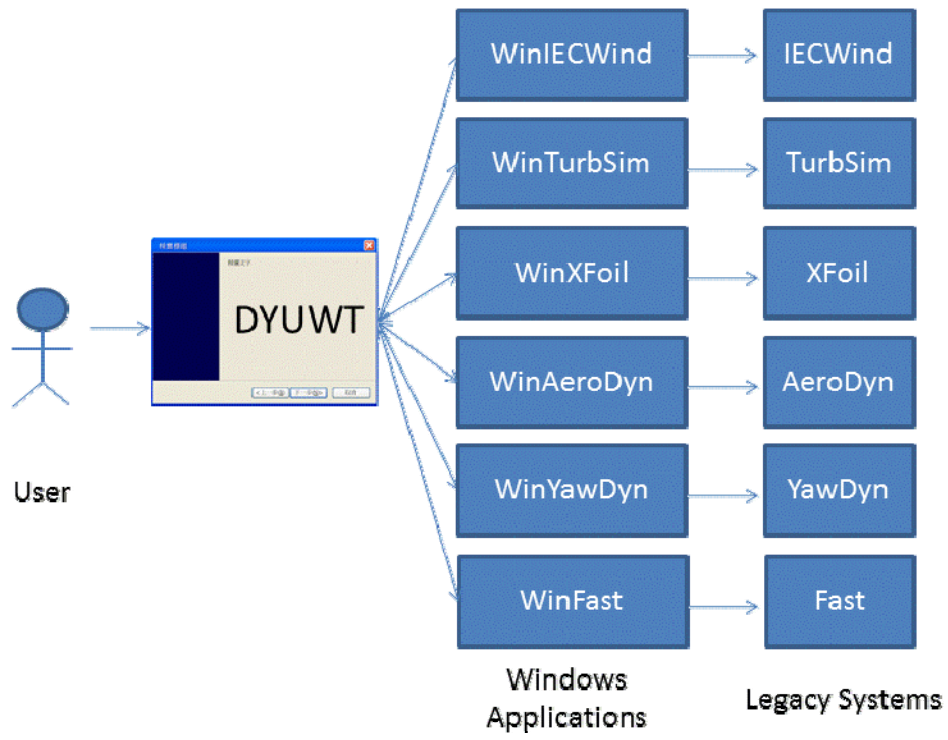


圖 3 視窗化系統整合架構圖

參、主要發現與結論

本研究 NREL 程式視窗化整合結果與三維葉片最佳化設計計算結果分述如下。

一、氣動力計算程序與設計協助的視窗化

本計畫將 NREL 程式視窗化後，開發了一個整合程式 DYUWT (包括安裝程式)，將視窗化後的程式加以整合，並導入專案設定的觀念，讓不同使用者皆可以有屬於自己的狀態與設定；在實作上，系統以一個資料夾來代表專案，並將所有的相關檔案置於該資料夾之下。

圖 4 為 DYUWT 安裝之畫面。在安裝完成並執行主程式後，使用者必須決定是否要產生新的專案或是選擇已經存在的專案，如圖 5 所示；接著 DYUWT 便會依據該專案資料夾的資料執行，如圖 6 與圖 7 所示；而圖 8 則為 Fast 的輸出文字檔案的顯示。

在本研究的設計中，一般使用者不但可以直接面對整合之後的程式-DYUWT，也可以個別使用單一化的視窗程式。因此，對於風機葉片氣動力設計相關程式的使用，將更為方便與省時。

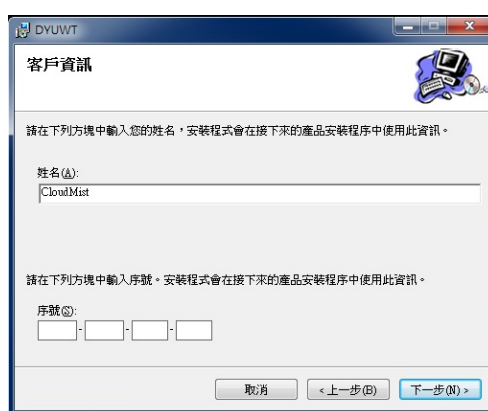
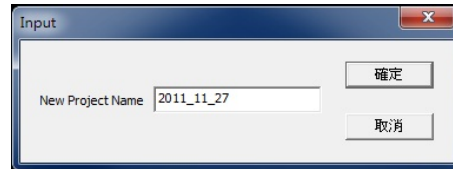


圖 4 DYUWT 的安裝畫面



(a)



(b)

圖 5 (a)選擇專案所在的路徑 (b)輸入欲新增專案之名稱

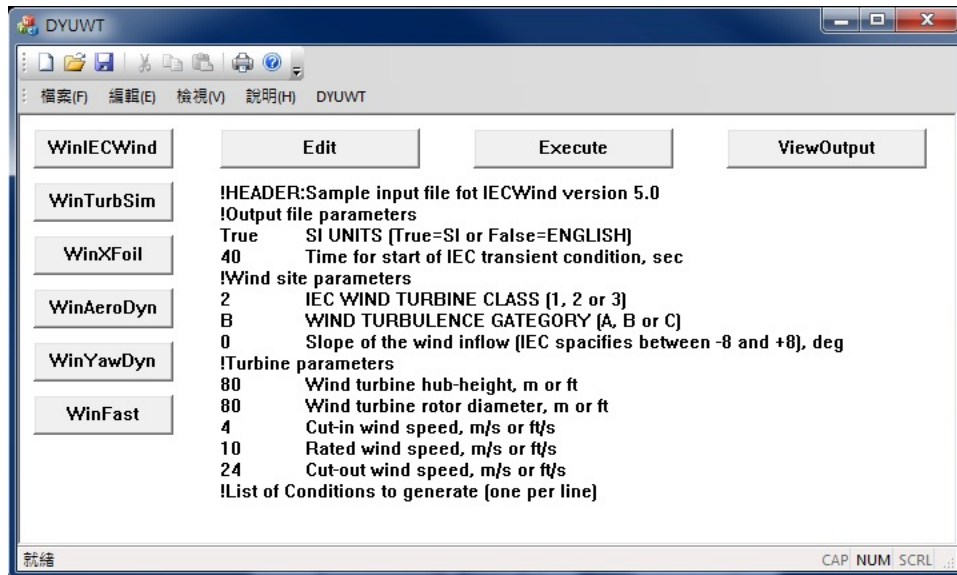


圖 6 DYUWT 的執行畫面

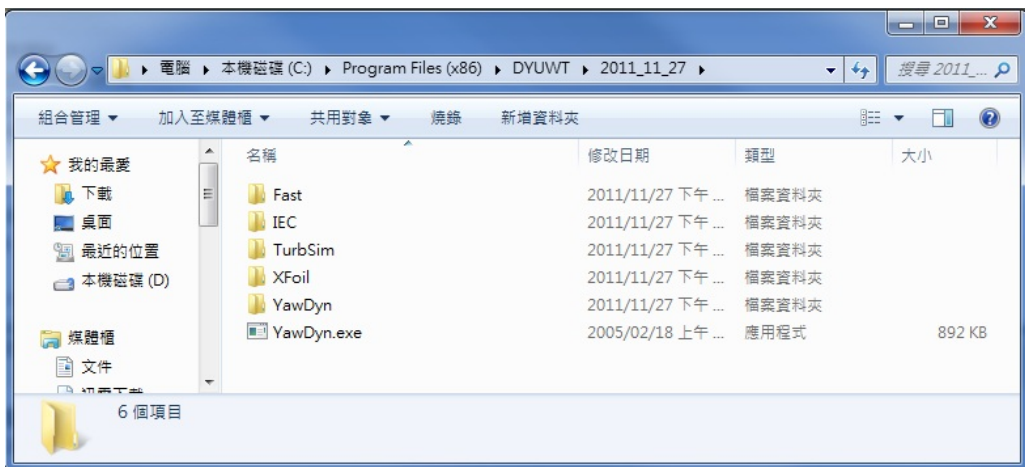


圖 7 每個專案有一個資料夾與之對應，並包含各子程式的資料夾。

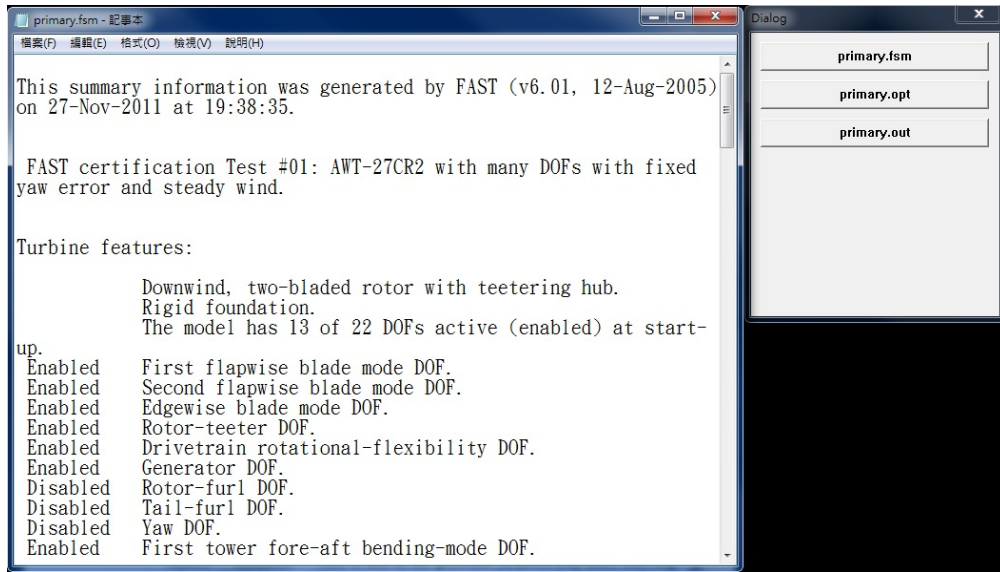


圖 8 WinFast 輸出內容的檢視。

二、風機的三維葉片氣動力最佳化分析與模擬

以類神經網路取代風機氣動力分析之二維翼型最佳化設計流程如圖 9 所示。其中初始設計及運算法選擇，使用者可於使用者介面直接輸入，最佳設計結果並會顯示於使用者介面。

類神經網路訓練之典型結果，以第一截面之 C_l/C_d 網路訓練為例，使用 40 個神經元，經 126 次疊代訓練後正規化之均方根誤差(MSE) 為 0.0001985。其訓練收斂曲線如圖 10 所示。以第三截面之 C_l/C_d 計算為例，使用 34 個神經元，經 200 次疊代訓練後正規化之均方根誤差(MSE) 為 0.00020269。其訓練收斂曲線如圖 11 所示。

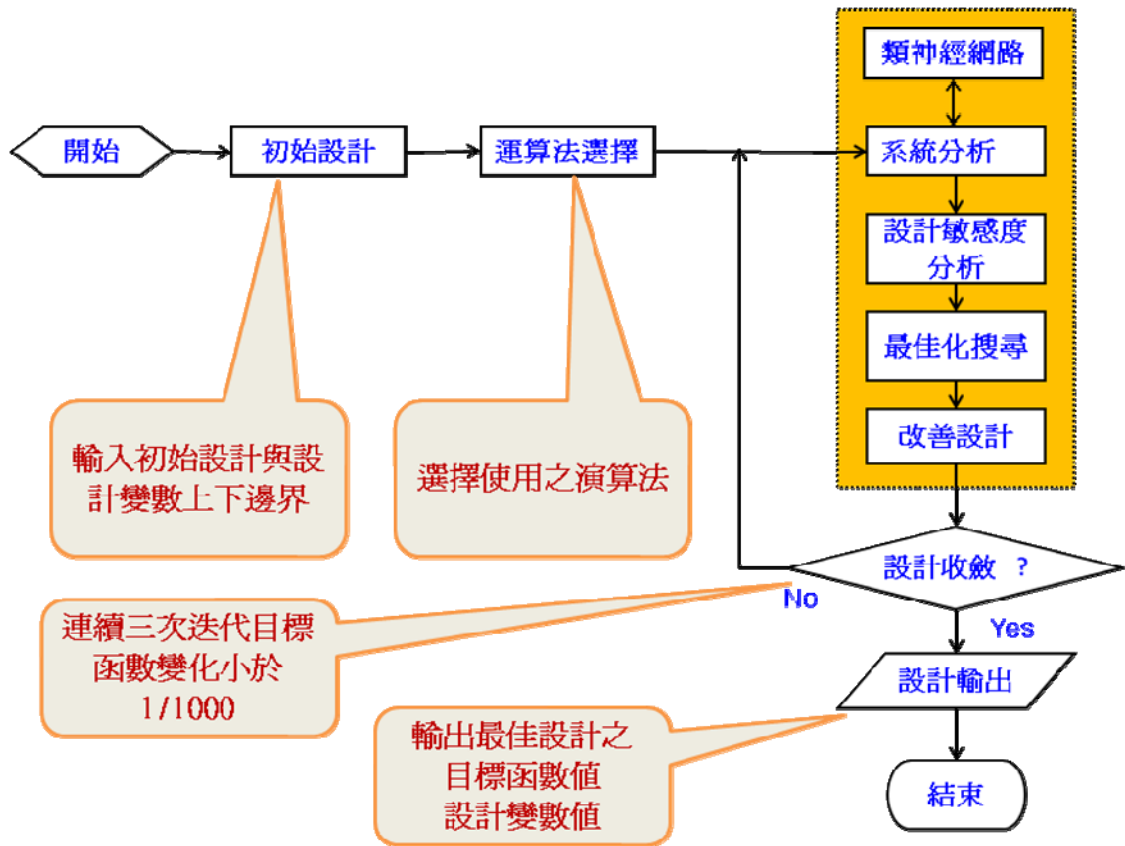


圖 9 二維翼型最佳化設計流程

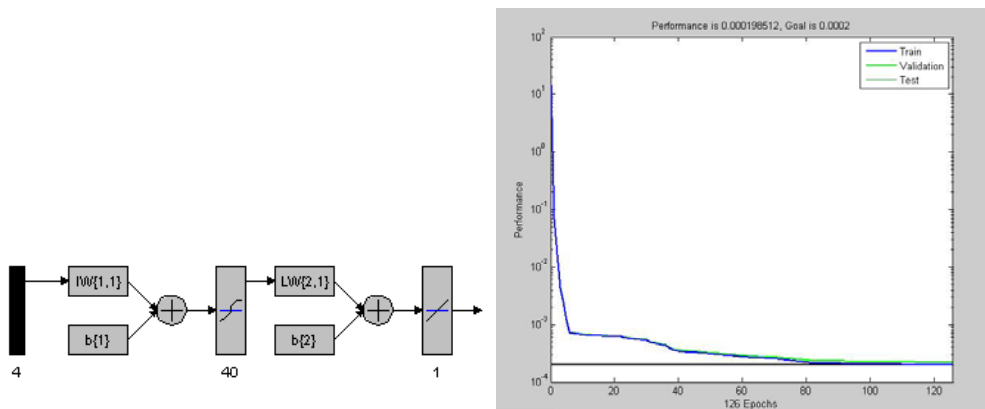


圖 10 第一截面 C_L/C_D 網路架構及訓練收斂曲線

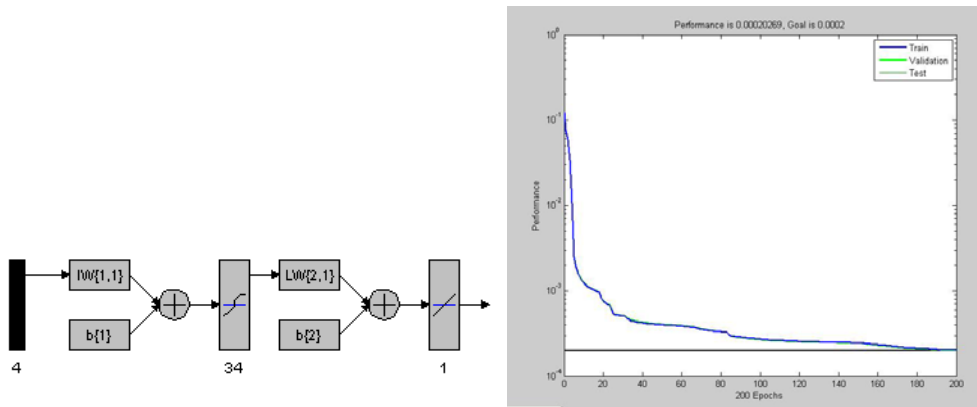


圖 11 第三截面 C_L/C_D 網路架構及訓練收斂曲線

另外，第二截面使用 36 個神經元，經 130 次疊代訓練後正規化之均方根誤差(MSE) 為 0.0001999。第四截面使用 36 個神經元，經 110 次疊代訓練後正規化之均方根誤差(MSE) 為 0.00019965。第五截面使用 40 個神經元，經 79 次疊代訓練後正規化之均方根誤差(MSE) 為 0.000198771。

利用訓練完成之類神經網路取代 XFOIL 之氣動力分析，進行 C_l/C_d 最佳化。對以上所提三維葉片的 5 個截面翼型最佳化結果如表 2。

本研究也使用本計畫之程式進行全攻角 C_l/C_d 平均值最大化，部分結果如表 3 至表 8。

表 2 不同截面二維翼型氣動力最佳化結果

截面	最佳化方法	最佳值	XFOIL 值
1	SUMT_F-R_Golden (exterior)	$C_l/C_d = 151.0328$ $X = (2.5, 0.12, 0.08, 6.145)$	149.475

2	SUMT_BFGS_Golden (exterior)	$C_l/C_d = 165.1388$ $X=(2.5,0.10,0.09,5.871)$	164.0260
3	SUMT_BFGS_Golden (exterior)	$C_l/C_d = 191.2681$ $X=(2.5,0.08,0.09,5.837)$	189.8387
4	ALM_F-R_Golden	$C_l/C_d = 211.0682$ $X=(2.5,0.06,0.09,4.268)$	210.6472
5	ALM_DFP_Golden	$C_l/C_d = 219.8327$ $X=(2.5,0.05,0.09,4.051)$	219.2145

由表 2 可知訓練完成之神經網路所估計之 C_l/C_d 與 Xfoil 在相同的最佳化參數條件下計算值十分接近，表示類神經網路訓練結果不錯。

表 3 第一截面不同方法組合之全攻角 C_l/C_d 平均值最佳化

最佳化方法	最佳值(類神經最佳化)
SUMT_F-R_Golden (exterior)	C_l/C_d (AVG)= 75.21628 $X=(2.0004, 0.12, 0.0589)$
SUMT_DFP_Golden (exterior)	C_l/C_d (AVG)= 75.67319 $X=(2.5, 0.12, 0.0601)$
SUMT_BFGS_Golden (exterior)	C_l/C_d (AVG)= 75.67319 $X=(2.5, 0.12, 0.0601)$
ALM_F-R_Golden	C_l/C_d (AVG)= 74.92503 $X=(1.0, 0.12, 0.0578)$
ALM_DFP_Golden	C_l/C_d (AVG)= 75.04210 $X=(0.4678, 0.12, 0.0529)$

ALM_BFGS_Golden	C_l/C_d (AVG)= 75.67319 X= (2.5, 0.12, 0.0601)
-----------------	---

表 4 第二截面不同方法組合之全攻角 C_l/C_d 平均值最佳化

最佳化方法	最佳值(類神經最佳化)
SUMT_F-R_Golden (exterior)	C_l/C_d (AVG)= 73.26115 X=(2.0002, 0.1, 0.0716)
SUMT_DFP_Golden (exterior)	C_l/C_d (AVG)= 73.35052 X= (2.5, 0.1, 0.0726)
SUMT_BFGS_Golden (exterior)	C_l/C_d (AVG)= 73.67590 X= (0.4, 0.1, 0.0571)
ALM_F-R_Golden	C_l/C_d (AVG)= 73.26437 X= (1.5999, 0.1, 0.0681)
ALM_DFP_Golden	C_l/C_d (AVG)= 73.54655 X= (0.4452, 0.1, 0.0501)
ALM_BFGS_Golden	C_l/C_d (AVG)= 73.67590 X= (0.4, 0.1, 0.0571)

表 5 第三截面不同方法組合之全攻角 C_l/C_d 平均值最佳化

最佳化方法	最佳值(類神經最佳化)
SUMT_F-R_Golden (exterior)	C_l/C_d (AVG)= 85.1885 X=(1.0, 0.08, 0.0681)
SUMT_DFP_Golden (exterior)	C_l/C_d (AVG)= 86.6376 X= (2.5, 0.08, 0.09)
SUMT_BFGS_Golden	C_l/C_d (AVG)= 86.6376

(exterior)	$X = (0.4, 0.08, 0.09)$
ALM_F-R_Golden	C_l/C_d (AVG)= 85.4588 $X = (1.6001, 0.0800, 0.0746)$
ALM_DFP_Golden	C_l/C_d (AVG)= 86.6376 $X = (0.4, 0.08, 0.09)$
ALM_BFGS_Golden	C_l/C_d (AVG)= 86.6376 $X = (0.4, 0.08, 0.09)$

表 6 第四截面不同方法組合之全攻角 C_l/C_d 平均值最佳化

最佳化方法	最佳值(類神經最佳化)
SUMT_F-R_Golden (exterior)	C_l/C_d (AVG)= 97.38091 $X = (2.0010, 0.0600, 0.0823)$
SUMT_DFP_Golden (exterior)	C_l/C_d (AVG)= 97.91554 $X = (2.5, 0.06, 0.09)$
SUMT_BFGS_Golden (exterior)	C_l/C_d (AVG)= 97.91554 $X = (2.5, 0.06, 0.09)$
ALM_F-R_Golden	C_l/C_d (AVG)= 97.38091 $X = (2.001, 0.06, 0.0823)$
ALM_DFP_Golden	C_l/C_d (AVG)= 97.91554 $X = (2.5, 0.06, 0.09)$
ALM_BFGS_Golden	C_l/C_d (AVG)= 97.91554 $X = (2.5, 0.06, 0.09)$

表 7 第五截面不同方法組合之全攻角 C_l/C_d 平均值最佳化

最佳化方法	最佳值(類神經最佳化)
-------	-------------

SUMT_F-R_Golden (exterior)	C_l/C_d (AVG)= 104.68279 X=(1.2793, 0.05, 0.09)
SUMT_DFP_Golden (exterior)	C_l/C_d (AVG)= 104.68279 X=(1.2793, 0.05, 0.09)
SUMT_BFGS_Golden (exterior)	C_l/C_d (AVG)= 104.68279 X=(1.2793, 0.05, 0.09)
ALM_F-R_Golden	C_l/C_d (AVG)= 104.68279 X=(1.2793, 0.05, 0.09)
ALM_DFP_Golden	C_l/C_d (AVG)= 104.68279 X=(1.2793, 0.05, 0.09)
ALM_BFGS_Golden	C_l/C_d (AVG)= 104.68279 X=(1.2793, 0.05, 0.09)

表 8 各截面之全攻角 C_l/C_d 平均值最佳化設計

截面	最佳化方法	最佳值
第一截面	SUMT_DFP_Golden (exterior)	C_l/C_d (AVG)= 75.67319 X= (2.5, 0.12, 0.0601)
第二截面	ALM_BFGS_Golden	C_l/C_d (AVG)= 73.67590 X= (0.4, 0.1, 0.0571)
第三截面	SUMT_BFGS_Golden (exterior)	C_l/C_d (AVG)= 86.6376 X= (0.4, 0.08, 0.09)
第四截面	SUMT_DFP_Golden (exterior)	C_l/C_d (AVG)= 97.91554 X= (2.5, 0.06, 0.09)
第五截面	ALM_DFP_Golden	C_l/C_d (AVG)= 104.68279 X=(1.2793, 0.05, 0.09)

表 3-8 的結果乃基於不同風速發生機率為相同之下所做的計算。實際情形的最佳化應該有現場風速數據(包含各風速大小與發生機率)，計算出來的最佳化比較合理。

根據表 2 各二維翼型最佳化結果，整理成表 9 以提供三維葉片之 BEM 計算之用。並利用以上最佳化所得參數，畫出各截面的翼型，以單位弦長表示所得的結果如圖 12。該圖顯示，除了根部截面為圓形外，從葉片根部到尖端，翼型從較厚變化到較薄的外型；由表 9 也顯示，高氣動力性能的部分集中在葉片中段到葉尖的部分。這些結果有助於兼顧葉片結構強度與功率係數的提升。

表 9 各截面翼型規畫與葉片元素氣動力基本數據

Section	No.0	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
Location	0.1	0.16	0.35	0.55	0.75	0.95
R/L range	0.08~0.12	0.12~0.2	0.2~0.5	0.5~0.6	0.6~0.9	0.9~1
r/r ₀	circular	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Thickness/chord		0.12	0.1012	0.08	0.06	0.05
Camber		0.08	0.09	0.09	0.09	0.09
Attack angle		6.145	5.871	5.837	4.268	4.051
C_l		1.5656	1.6419	1.6478	1.5293	1.4512
C_d		0.01047	0.01001	0.00868	0.00728	0.00662
C_l/C_d		149.475	164.026	189.8387	210.6472	219.2145

以上的最佳化設計結果以風速 12 m/s、轉速 72 rpm、風力渦輪半徑(R) 6.3 m 的情形，計算各截面翼型最佳安裝角與最佳弦長結果如表 10。利用以上二維最佳化翼型與其規畫的位置，

以及利用最佳轉子理論計算出的弦長、扭轉角等，在 SolidWork 中建構三維葉片，所有翼型之間做平滑化處理後所得的三維葉片如圖 13 所示。由圖可見，葉片的弦長與厚度均有隨葉片伸展方向減小，也可看到葉片從根部到葉端的扭轉(twist)情形。一般而言，靠近根部的翼型前緣(LE)迎向風向，葉端翼型的前緣遠離風向。

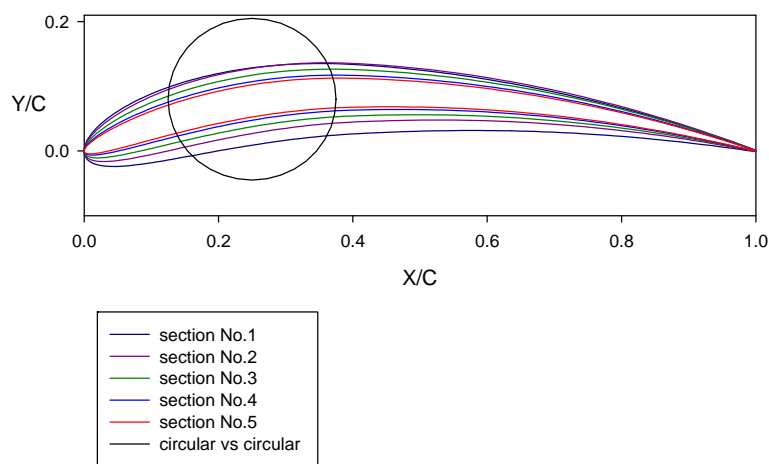


圖 12 各截面最佳化翼型與堆疊情形

表 10 最佳安裝角與最佳弦長分布

Section	Location (R)	局部周速比	相對角 (deg)	攻角 (deg)	安裝角 (deg)	Chord (m)
1	0.16	0.633	38.4	6.1	32.3	1.178
2	0.35	1.385	23.9	5.9	18.0	0.939
3	0.55	2.177	16.4	5.8	10.6	0.742
4	0.75	2.969	12.4	4.3	8.1	0.601
5	0.95	3.760	9.9	4.1	5.9	0.516

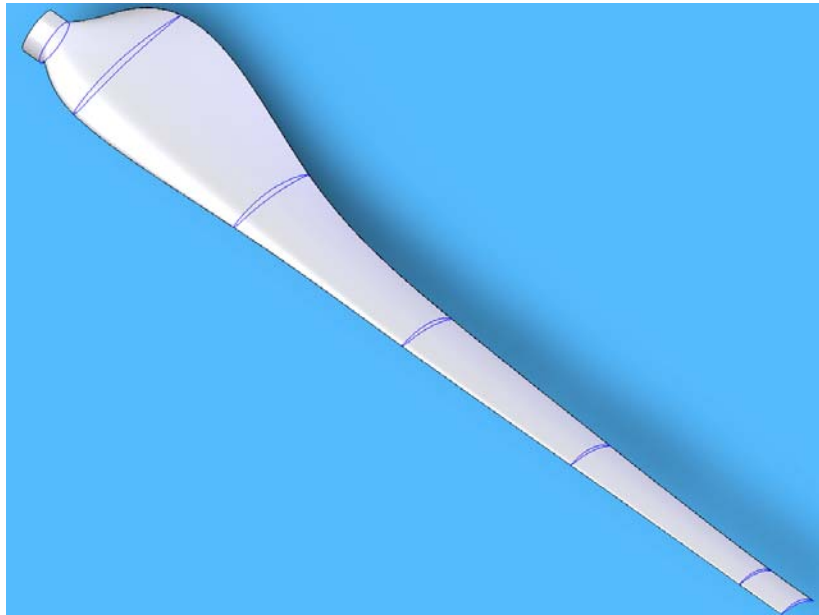


圖 13 利用最佳化翼型與最佳轉子理論得到的三維葉片

利用表 9 與表 10 數據做 BEM 計算，所得風力渦輪功率係數為 $C_p = 0.51$ ，與先前 25kW 風機葉片(圖 14)[15]在相同設計條件之下功率係數 $C_p = 0.15$ 相比較，顯示結果有非常好的提升。

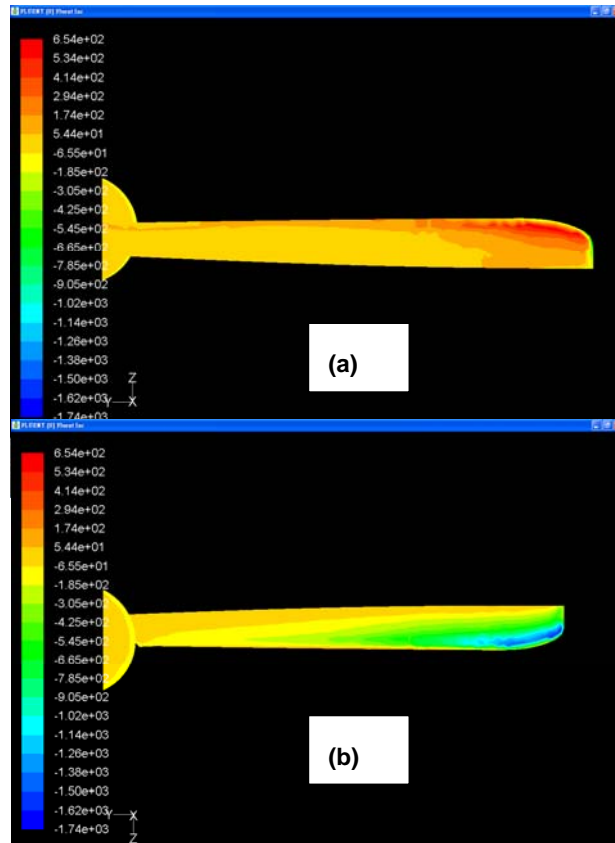


圖 14 先前 25kW 風機葉片外型與壓力分佈(a)壓力面(下蒙皮) (b)吸力面(上蒙皮) [15]

肆、參考文獻

1. 洪國琮，”論全球風力發電產業的現況與前景”，台灣師範大學_能源教育資訊網，網址 <http://energy.ie.ntnu.edu.tw/>
2. Tester, J.W., Drake, E.M., Driscoll, M.J., Golay, M.W., and Peters, W.A., 2005, Sustainable Energy – Choosing Among Options, MIT Press, pp. 613-646.
3. Lakshminarayana, B., 1996, Fluid Dynamics and Heat Transfer of Turbomachinery, John Wiley & Sons Ltd.
4. 邱榮權、陳昆男、流上其、陳品揚，2010，”風力機葉片結構多目標最佳化設計”，2010 臺灣風能學術研討會，12 月 17 日，臺灣、澎湖，論文集 pp. 230-235。
5. Jureczko, M., Pawlak, M., and Mezyk, A., 2005, “Optimisation of wind turbine blades,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, pp. 463-471.
6. Narayanan, S., Azarm, S., 1999, ”On improving Multiobjective Genetic Algorithm for design optimization,” *Structural Optimization*, 18, pp. 146-155.
7. 吳佩學、紀華偉、張顧耀，2010，”風機氣動力系統的分析與模擬”，99 年度行政院原子能委員會委託研究計畫研究報告，2010 年 11 月 29 日，計畫編號：992001INER054
8. Manwell, J.F., McGowan, J.G., and Rogers, A.L., 2002, Wind Energy Explained, John Wiley & Sons Ltd.
9. Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., and Bossanyi, E., 2001, Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons Ltd.
10. Lakshminarayana, B., 1996, Fluid Dynamics and Heat Transfer of Turbomachinery, John Wiley & Sons Ltd.

11. Vanderplaats, G. N., 1993, Numerical Optimization Techniques for Engineering Design, McGraw-Hill.
12. Arora, J. S., 2004, Introduction to Optimum Design, Elsevier Academic Press.
13. Demuth, H., Beale, M., Hagan, M., 2010, Neural Network Toolbox-User's Guide, The MathWorks, Inc.
14. Haykin, S., 2001, Neural Networks, Prentice Hall.
15. Wu, P.S., Kung, M.Y., Wu, H.Y, and Chang, C.J., 2010, "Numerical Investigation of Aerodynamic Characteristics of a New Wind Turbine," IEEE 3CA 2010 Vol. 1, pp. 367-370.