

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：992001INER054

受委託機關(構)：大葉大學

計畫主持人：吳佩學、紀華偉、張顧耀

核研所聯絡人員：吳鴻筠

聯絡電話：0933677014

E-mail address： pswu@mail.dyu.edu.tw

報告日期：99.11.29

目 錄

| | |
|-------------------------------|----|
| 中文摘要..... | 1 |
| 關鍵詞：風機，氣動力，視窗介面，翼型，最佳化..... | 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、 風機的氣動力分析與模擬..... | 7 |
| (一) 以 Xfoil 做二維翼型氣動力之計算..... | 7 |
| (二) 建立 NREL 程式空氣動力學計算之程序..... | 8 |
| (三) 以 CFD 軟體作氣動力計算的比較..... | 9 |
| 二、 風機葉片翼型氣動力設計的最佳化..... | 9 |
| (一) 最佳化方法選用與程式開發..... | 9 |
| (二) 類神經網路訓練與應用..... | 11 |
| 三、 計算程序與設計協助的視窗化..... | 12 |
| (一) 單一程式視窗化..... | 12 |
| (二) 系統整合..... | 13 |
| 參、主要發現與結論..... | 15 |
| 一、 風機葉片翼型氣動力設計的最佳化..... | 15 |
| (一) 類神經網路訓練..... | 15 |
| (二) 二維翼型最佳化設計..... | 16 |
| 二、 計算程序與設計協助的視窗化..... | 18 |
| (一) 單一程式視窗化..... | 18 |
| (二) 系統整合..... | 19 |
| 三、 氣動力分析與模擬..... | 21 |
| 肆、參考文獻..... | 26 |

中文摘要

為了人類的永續生存以及地球的環保，發展乾淨的新能源是世界各國努力的目標。在各種替代能源中，風力發電沒有燃料問題，沒有輻射與排放二氧化碳等公害，具有能源自主性之優點，是一項很值得發展的補充性電力。

風機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關鍵技術，它將影響後續所有機構設計的尺寸選擇與部品規格。為提升設計的能力與方便性，本計畫旨在建立一套風機氣動力系統分析與模擬的設計工具，並提供設計最佳化的計算方法，將葉片氣動力計算程序做成視窗介面，以方便風機研發人員作風力渦輪參數選擇與最佳化設計之使用。

本報告綜合陳述由本計劃成功開發的風機葉片氣動力計算視窗介面(命名為 DYUWT)與最佳化計算的方法。將此最佳化計算的方法應用在翼型的空氣動力性能(C_L/C_D)與升力係數(C_L)的最佳化，結果顯示在最佳化計算後，新翼型的空氣動力特性有明顯的提升。

關鍵詞：風機，氣動力，視窗介面，翼型，最佳化

英文摘要

For everlasting life of human beings and protection of the Earth, developing clean and sustainable energy has become a common goal of many countries. Among other possible choices of substitute energy, wind power has no fuel problem, nor does it have harmful emissions such as radiation or carbon dioxide. It is quite suitable to serve as an independent unit for supplementary electricity and is worthy of development.

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. To improve the capability and convenience for the design, this research aims at building up a design tool for wind turbine aerodynamic analysis and providing computational methods for optimization. The execution of the aerodynamics computational procedure is made with window interface to facilitate the researchers in the choice of the best set of parameters and conduct an optimal design for wind turbines.

This report summarizes the contents of the window interface program (named DYUWT) for the aerodynamics computation for wind turbine blades and the computational methods for optimization which were successfully

developed in this work. The computational methods were applied to the optimization of the aerodynamic performance (C_L/C_D) and the lift coefficient (C_L) for an airfoil. The results show that the aerodynamic performance of the new airfoil has remarkable improvement after optimization.

Keywords: wind turbine, aerodynamics, window interface, airfoil, optimization

壹、計畫緣起與目的

為了人類的永續生存以及地球環保的考量，乾淨的新能源以及能源的高效應用已經成為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，預估 2010 年風力發電將佔歐洲整體發電量一成以上。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。根據美國風力能源協會(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。

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]，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。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(blade)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(或簡稱翼型 airfoil)、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。

與葉片連接的軸殼內部傾角控制系統與軸承等機構，用來承受不同風況下葉片產生的負載；軸殼再與傳動主軸連接，主軸上有止推軸承，承受葉片產生的軸向推力等，並有制動器，當停機或維修時用來固定翼片；再透過聯軸器連接齒輪箱和發電機。以上機構固定在骨架上，透過轉向(YAW)機構與支桿或塔架連接，轉向系統內部包含轉向機構、轉向固定系統、轉向軸承、剎車機構等，當轉向系統啟動時要承受迴轉儀的(Gyroscopic)效應負載，最後所有作用力作用在支桿或塔架，這些支撐架需承受葉片的負載和本身受風的負載[4,5,6]。因此，

轉向結構多體動態模擬以及風機結構疲勞氣彈動態耦合分析，也成了風機設計的重要課題。

本研究著重在氣動力計算的部分，研究之目的乃在建立一套風機氣動力系統分析與模擬的設計工具，並提供翼型設計最佳化的計算方法。另一方面將氣動力計算做成視窗介面，提供協助功能，以方便設計者使用。本研究以美國國家再生能源實驗室(NREL)發展的程式作為氣動力計算的基礎，將計算程序包含 I/O (input/output)等做成視窗介面的功能需求，由資訊專業人員完成視窗製作，並由最佳化的專業人才提供最佳化的運算方法，以方便風機研發人員作最佳化設計之使用。為了驗證程式計算的正確性，在空氣動力負載的部份將以 FLUENT 軟體做部分選擇情形的比對。本研究結果除了能直接幫助提升風機設計的能力與速度外，也可望在將來繼續發展，延伸應用在三維葉片與結構設計最佳化、運轉邏輯設計最佳化、風機驗證工具之建立等重要項目。

貳、研究方法與過程

本研究主要分成風機的氣動力分析與模擬、風機葉片翼型氣動力設計的最佳化以及計算程序與設計協助的視窗化等三個部份。茲將每個部份的研究方法與過程分述如下。

一、風機的氣動力分析與模擬

此部分風機氣動力的計算又分成(一)以 Xfoil 做二維翼型氣動力之計算，(二)以 NREL 程式為基礎的空氣動力學計算，以及(三)以 CFD 軟體(如 Fluent)作氣動力計算的比較。

(一)以 Xfoil 做二維翼型氣動力之計算

Xfoil 是一個為設計與分析次音速二維翼型編寫的互動式的程式。它允許使用者做翼型參數的變化修改翼型，並快速計算二維翼型的升阻力係數。Xfoil 對於升力(L)或升力係數(C_L)的計算乃是利用二維板塊方法(panel method)做無黏性流分析。將翼型分割成多個直線板塊相連，每一板塊上的渦度(vorticity)分布假設為線性而且源強度(source strength)為定值，由疊代計算求出每塊板塊的渦度與源強度使得翼型為一條流線，然後利用環流(circulation)原理計算其升力。此法通常對於升力的計算省時而且有不錯的結果，但由於無黏性流無法產生摩擦阻力，因此對於阻力(D)或阻力係數(C_D)則使用板塊方法所得到的速度再用積分邊界層方法做計算。Xfoil 使用板塊方法求解二維翼型的升阻力，大幅縮減了計算實際黏性流流場所需要的時間，因此，它廣泛的被用在工業界與學術研究的翼型設計，然而，它對於失速點(最高升力點)的預測能力卻不是很好。

利用 Xfoil 計算所得的升阻力係數乃是提供三維葉片氣動力

計算的重要基礎，將三維葉片分成多段元素，每段元素有特定的翼型，每個翼型的氣動力由 Xfoil 提供，則三維葉片的氣動力可用葉片元素動量理論(Blade Element Momentum (BEM) theory)計算。另外，對於三維葉片外型的氣動力最佳化，也可先將各個二維翼型做最佳化再做成三維的堆疊組合[7]。類似的概念也可用於葉片與風機動力行為(dynamic behavior)分析與結構最佳化的計算[8]。本研究將 Xfoil 用在兩方面，一方面提供 NREL 程式做三維葉片氣動力分析(見第(二)小節)，另一方面則提供二維翼型氣動力最佳化的計算(見第二節)。

(二)建立 NREL 程式空氣動力學計算之程序

對於三維葉片氣動力分析的 NREL 程式主要包含 IECWIND、TURBSIM、AERODYN、和 YAWDYN 等程式，其中計算所需的各個翼型升阻力數據則由 Xfoil 提供。各個程式的基本功能略述如下：

1. IECWIND 是產生使用者指定的 IEC 風況(wind condition)的軟體，在 2005 年以後的版本其產生的風況已符合 IEC-61400-1 edition 3 的規範，其輸出也會與 AERODYN 與 YAWDYN 等軟體相容。實地風況的數據是做為風車設計與氣動力計算最佳化的重要基本資料。
2. TurbSim 是隨機、全風場、紊流風的模擬軟體。數值模擬一個點在垂直矩形網格中三維風速向量的時間序列。TurbSim 的輸出可以用在輸入以 AeroDyn 為基礎的程式。這個方法的基礎理論是假設穩態過程模擬時間序列。對於非穩態部分，TurbSim 也有能力在時間的序列上疊加產生紊流結構。
3. AERODYN 是元素層級(element-level)的風力渦輪空氣動力學分

析軟體，這套軟體並非獨立運作，而是被設計用來當成動力分析程式(如 YAWDYN)的介面，所提供的速度與位置資料、以及模擬的風況輸入資料，此軟體計算風力渦輪葉片各元素的空氣動力負載。計算所使用的 dynamic inflow 模型為 Generalized Dynamic Wake (GDW) model，該模型比 BEM 計算快速，對於功角快速變化的情形，其模擬結果比 BEM 好。

4. YAWDYN 對於水平軸風車(HAWT)具有良好剛性或可變形軸轂而且有兩片(含)以上葉片的情形，此軟體可以用來模擬其偏轉方向(yaw)的運動與負載，轉子的模擬可以採用穩態風速、離散時間序列風速、或全場三維紊流流場的風場。在風力渦輪的設計，這也是非常重要的部份。

將以上各程式的計算程序釐清後，提出 I/O 規格，以做為視窗化的依據。

(三)以 CFD 軟體作氣動力計算的比較

本研究採用 Fluent 做為 CFD 計算軟體，該軟體求解詳細的速度場與壓力場，再由面積分得到升阻力。這種計算一般相當費時，然而，其準確性也會受到分離流的數學模式是否恰當之影響。

二、風機葉片翼型氣動力設計的最佳化

本計畫開發二維翼型最佳化設計軟體，以進行 NACA 翼型之最佳化設計。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。

(一)最佳化方法選用與程式開發

本計畫風機之氣動力屬非線性可微分系統，考慮演算效率，其設計最佳化可以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，本計畫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，三種演算法，一種一維搜尋法互相搭配，於使用者介面上提供使用者選用。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。

1.最佳化演算法架構

(1) 策略層次(strategy):

最佳化策略為基本最佳化方法，用於處理限制條件。本計畫選用以處罰函數方式處理限制條件之 SUMT 法(Sequential Unconstrained Minimization Techniques with penalty concepts)、及拉格蘭吉乘數法(ALM, Augmented Lagrange Multiplier Method)二種策略。

(2) 最佳化演算層次(optimizer):

根據演算策略訂定有各種不同演算法可供選擇，演算層次主要決定搜尋方向。本計畫選用三種方法分別為用 Fletcher-Reeves 法、Davison-Fletcher-Powell (DFP) 法及 Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS)法等三種決定搜尋方向。

(3)一維搜尋(1-D Search):

當搜尋方向確定之後，須以一維搜尋法，沿方向找尋最佳點。常用一維搜尋法有黃金分割法(Golden Section Method)及多項式插值法(Polynomial Interpolation)，本計畫以黃金分割法進行一維搜尋。

2. 翼型最佳化數學模型

本研究選用 NACA 2412 翼型為初始翼型進行最佳化測

試，探討之設計目標有二；其一為 C_L 最大化(最大風車輸出功率)，其二為 C_L/C_D 最大化(最佳空氣動力性能)。設計變數有四，分別為新舊翼型前緣半徑比(x1)，翼型厚度(與弦長比值)(x2)，翼型弧度(camber) (與弦長比值) (x3)及攻角(x4)。另翼型前緣及後緣延伸曲線的摻合(blending)位置為固定參數，其值為 0.25。其最佳化設計模型可表為：

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & (1) f(x) = -C_L / C_D \quad (2) f(x) = -C_L \\ \text{S. t.} \quad & x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \end{aligned}$$

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 |
|------|-------|------|------|
| x1 | 前緣半徑比 | 0.5 | 2 |
| X2 | 翼型厚度 | 0.07 | 0.17 |
| X3 | 翼型弧度 | 0.00 | 0.09 |
| X4 | 攻角 | -5 | 14 |

(二)類神經網路訓練與應用

由於氣動力分析軟體 Xfoil 於特定條件下無法收斂(這已經是大家知道的缺點，如[7])，故無法使用於最佳化程式中做直接計算。本計畫以約略等間隔方式，選取各變數多個取樣點，並以 XfoilL 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，所得資料共 30541 點，依 3:1 比例分為訓練對及驗證對，進行類神經網路訓練。

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 8~40 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 $-C_L$ 或 $-C_L/C_D$ 。輸出層之激發函數為 pureline。

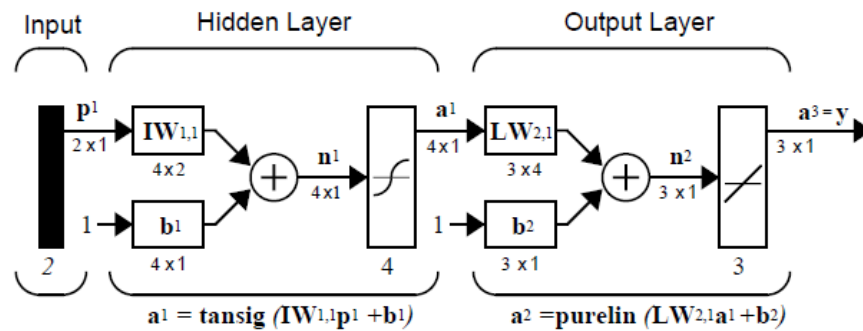


圖 1 類神經網路架構

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。

三、 計算程序與設計協助的視窗化

風機葉片氣動力計算相關程式的視窗化，是以不更動既有程式 (legacy system) 為原則，設計開發新的視窗程式來使用些這既有程式。除了程式之間溝通的技術之外，既有程式視窗化的步驟包括：

(一) 單一程式視窗化

對於單一程式而言，依照該程式輸入與輸出的方式，其視窗化的作法便會有所不同。

1. 若程式的輸入與輸出皆為文字檔，則表示該程式是屬於無狀態 (stateless) 的系統。這類程式視窗化的作法比較簡單，只要提

供一個新的以對話盒為基礎之視窗應用程式（dialog-based application），讀取該程式預設的輸入文字檔，並以其內容為對話盒的初始值；經使用者設定各項參數之後，將結果儲存成輸入文字檔；然後再透過視窗應用程式呼叫並執行該程式，即可得到輸出的文字檔。

- 2.若程式的輸入為使用者即時互動的輸入，而輸出為文字檔，則表示該程式是屬於有狀態（stateful）的系統。這類程式視窗化的作法比較複雜，必須要提供擁有相同狀態變化的視窗應用程式，並將即時的狀態變化，由視窗應用程式傳送至該程式。最後，再將結果儲存成輸入文字檔。以 IECWind 為例，使用者必須編輯文字輸入檔，並執行 IECWind 以產生輸出檔，如圖 2(a)所示。若使用其對應的視窗程式，也就是 WinIECWind，則該視窗程式會自動產生文字輸入檔，並執行 IECWind，得到相同的輸出結果，如圖 2(b)所示。

(二)系統整合

在完成單一程式的視窗化之後，本研究依循 Facade 設計樣式提供另一個整合程式-本研究團隊將之定名為 DYUWT，將這些個別視窗程式加以整合，如圖 3 所示；而整合之後，使用者只會直接面對 DYUWT，而不會察覺單一視窗程式的存在。該整合程式主要負責的功能有：

- 1.整體流程的掌控：對於所有單一視窗程式而言，彼此間是有一定先後執行次序的；而整合程式便必須控制這些視窗程式的執行流程。
- 2.專案觀念的引進：整合程式應該要對於每位使用者，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。換言之，對於

整合程式而言，使用者應該要可以新增專案或開啟已經存在的專案。

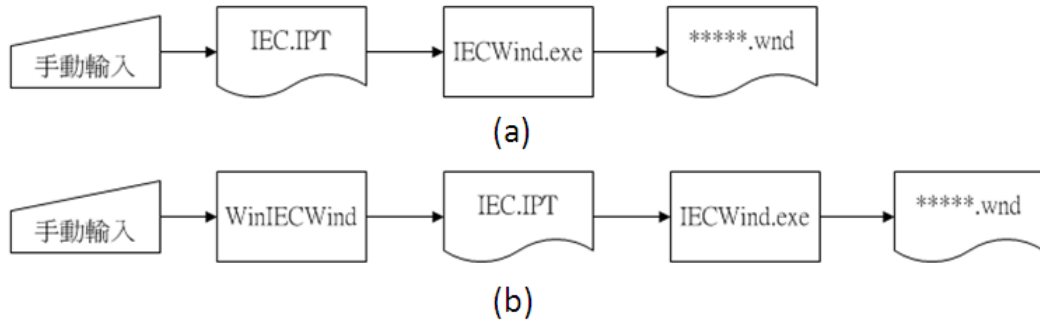


圖 2 (a) IECWind 的執行流程 (b) 加入 WinIECWind 視窗程式於原先的執行流程中

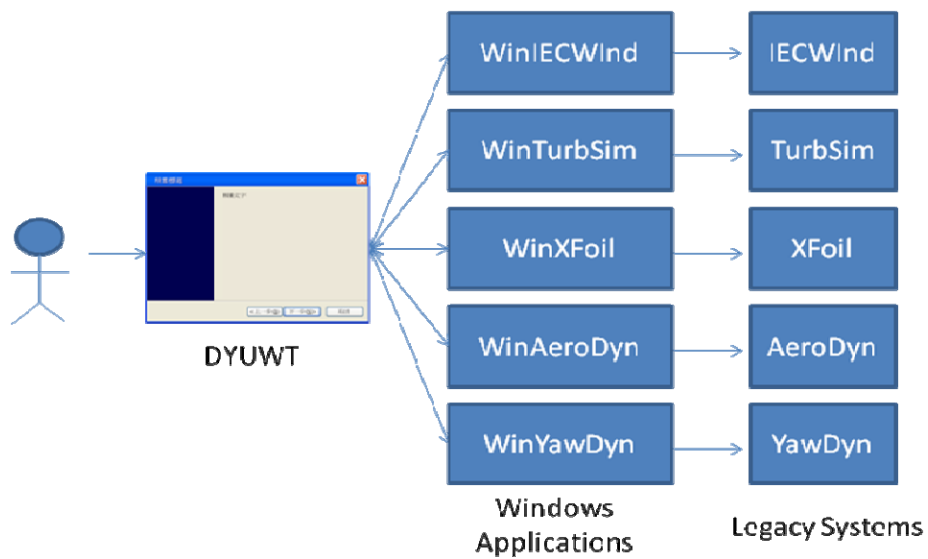


圖 3 系統整合架構圖

參、主要發現與結論

一、風機葉片翼型氣動力設計的最佳化

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 4 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。

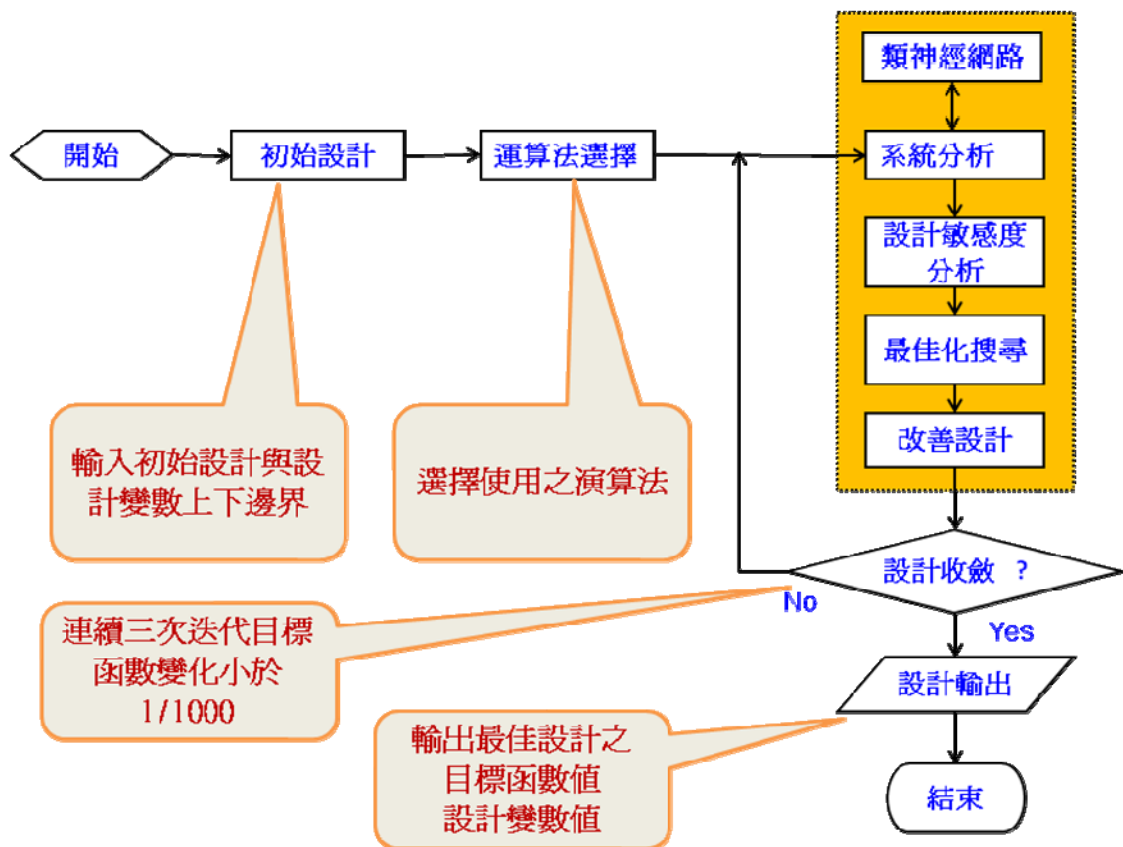


圖 4 二維翼型最佳化設計流程

(一) 類神經網路訓練

類神經網路訓練之訓練對由兩組資料構成，即輸入值及輸出目標值。本計畫分別對翼型之 C_L 及 C_L/C_D 進行最大化設計，故網路輸出值分別為 C_L 及 C_L/C_D 。為提升訓練品質，採個別訓練之。

1. C_L/C_D 網路訓練

C_L/C_D 網路有四個輸入，一個輸出。隱藏層神經元嘗試

8,12,16,....,40 個神經元。其中以 40 神經元訓練效果較佳。經 169 次疊代訓練後正規化之均方根誤差(MSE) 為 0.000868。其訓練收斂曲線及網路架構如圖 5 所示。

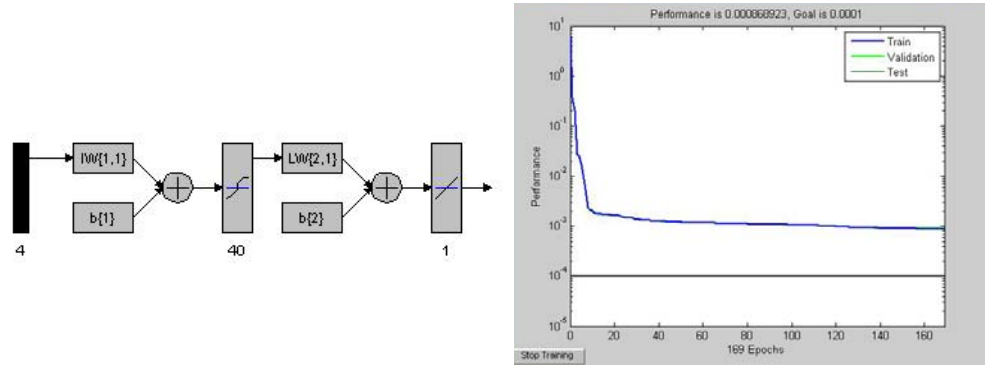


圖 5 C_L/C_D 網路架構及訓練收斂曲線

2. C_L 網路訓練

C_L 網路有四個輸入，一個輸出。隱藏層神經元嘗試 8,12,16,....,40 個神經元。其中以 32 神經元訓練效果較佳。經 176 次疊代訓練後正規化之均方根誤差(MSE) 為 0.0001。其訓練收斂曲線及網路架構如圖 6 所示。

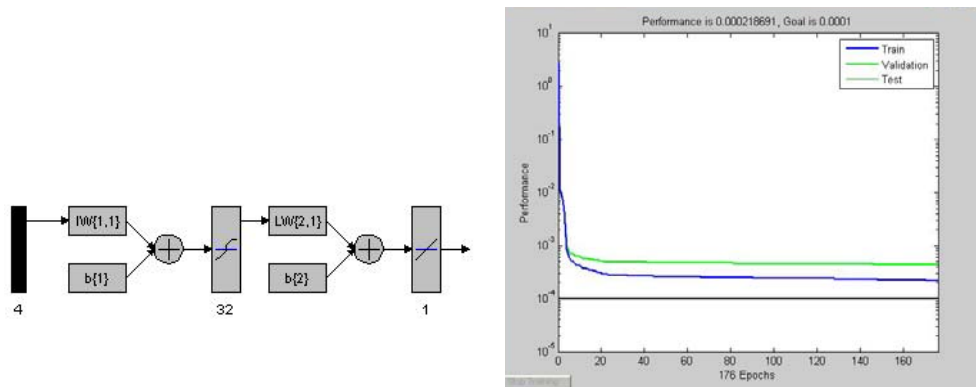


圖 6 C_L 網路架構及訓練收斂曲線

(二) 二維翼型最佳化設計

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 最佳化與 C_L 最佳化。本計畫開發之最佳化方法具有二種策略，三種演算法及一種一維搜尋法，共有 $2 \times 3 \times 1 = 6$ 種組合。使用

者可以於使用介面輸入選擇。

1. C_L/C_D 最佳化

使用本計畫之程式進行 C_L/C_D 最佳化設計，部分結果如表 2。

表 2 不同方法組合之 C_L/C_D 最佳化設計

| 最佳化方法 | 最佳值(類神經最佳化) | XFoil 值 |
|--------------------------------|---|---------|
| SUMT_F-R_Golden (exterior) | $C_L/C_D=155.765$ $X=(0.7975, 0.07, 0.0752, 2.0)$ | 157.96 |
| SUMT_BFGS_Golden (exterior) | $C_L/C_D=162.0695$ $X=(0.5, 0.07, 0.07605, 3.414)$ | 162.22 |
| ALM_F-R_Golden | $C_L/C_D=155.765$ $X=(0.7975, 0.07, 0.0752, 2.0)$ | 157.96 |
| ALM_BFGS_Golden | $C_L/C_D=162.0695$ $X=(0.5, 0.07, 0.07605, 3.414)$ | 162.22 |
| ALM_DFP_Golden | $C_L/C_D=161.21$ $X=(0.5, 0.07, 0.07902, 2.652)$ | 161.78 |

2. C_L 最佳化

使用本計畫之程式進行 C_L 最佳化設計，部分結果如表 3。

表 3 不同方法組合之 C_L 最佳化

| 最佳化方法 | 訓練後最佳值 | XFoil 值 |
|------------------|---|---------|
| SUMT_F-R_Golden | $C_L=2.124353$ $X=(1.837, 0.1439, 0.09, 14)$ | 2.1196 |
| SUMT_BFGS_Golden | $C_L=2.124353$ $X=(1.837, 0.1439, 0.09, 14)$ | 2.1196 |

| | | |
|-----------------|---|--------|
| ALM_F-R_Golden | $C_L=2.124353$ $X=(1.837, 0.1439, 0.09, 14)$ | 2.1196 |
| ALM_BFGS_Golden | $C_L=2.1219$ $X=(2.0, 0.1493, 0.09, 14)$ | 2.1162 |
| ALM_DFP_Golden | $C_L=2.1219$ $X=(2.0, 0.1493, 0.09, 14)$ | 2.1162 |

由表 2 可知訓練完成之神經網路有多個區域最佳點，不同起始點或演算法會得到不同最佳點，且類神經網路所估計之 C_L/C_D 與 Xfoil 計算值十分接近，表示類神經網路訓練結果不錯。另由表 3 可知 C_L 最佳化類神經估算值與 XFOIL 計算值很接近，也表示類神經網路訓練結果不錯。另不同演算法及起始點之最佳設計十分接近。目前所獲得之最佳設計值 $C_L/C_D=162.22$ ，出現於 $X=(0.5, 0.07, 0.07605, 3.414)$ 處； $C_L=2.12$ ，出現於 $X=(1.837, 0.1439, 0.09, 14)$ 。雖然 C_L 最佳化必然得到的攻角比較大，產生的輸出功率也比較大，但是，該攻角已接近失速點，阻力係數 C_D 也開始大幅增大。因此，考慮後續對於葉片與塔架的動態行為分析與結構最佳化，一般最佳的攻角乃採用 C_L/C_D 最佳化產生的攻角[5]。本研究翼型最佳化結果均顯示非常合理。

二、 計算程序與設計協助的視窗化

(一) 單一程式視窗化

我們成功將原先非視窗介面的既有程式，加以視窗化，包括 IECWind、TurbSim、Xfoil、AeroDyn 以及 YawDyn 等。視窗化之後，除了使用者介面更為友善之外，對於具有選擇性的參數設定，也透過選單的使用（使用者無法直接輸入），增加了輸入參數的正確性。

圖 7 為 IECWind 視窗化之後 - WinIECWind 的介面，由於 IECWind 本身是屬於無狀態系統，因此其視窗化後的介面較為單純，只是一些參數的設定，並沒有太多的選單或按鈕。而圖 8 則為有狀態系統 Xfoil 視窗化之後 - WinXfoil 的介面，使用者可以互動式地輸入或修改參數，以產生不同的翼型；同時，WinXfoil 也能將目前翼型資料的狀態直接在視窗上呈現，以方便使用者做即時的調整參數。

(二)系統整合

本計畫開發了一個整合程式（包括安裝程式），將上述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。

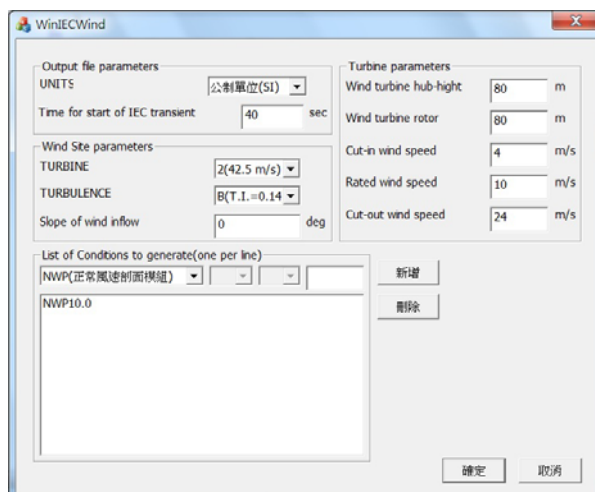
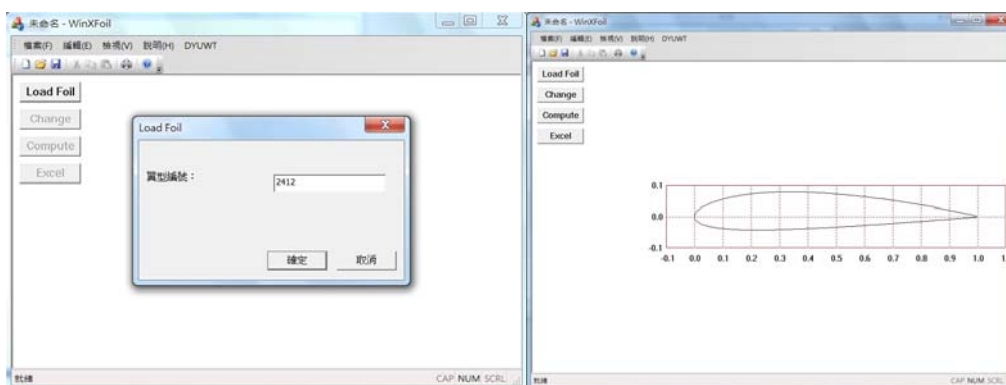
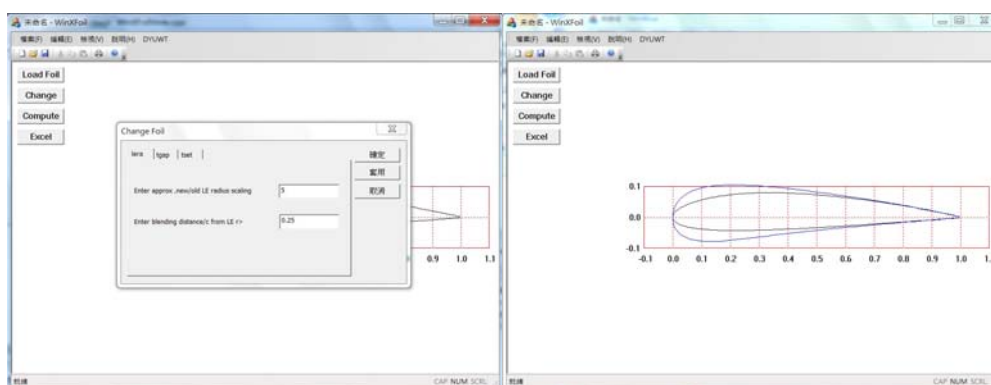


圖 7 IECWind 視窗化後的 WinIECWind 使用者介面



(a)

(b)



(c)

(d)

圖 8 XFoil 視窗化後的 WinXFoil 使用者介面 (a)使用者輸入原始翼型編號 –(NACA) 2412 (b)系統立即顯示(黑色) (c) 使用者輸入欲變更之參數值 (d) 系統立即顯示(藍色), 代表是為使用者修改參數調整後的結果。

三、 氣動力分析與模擬

除了檢驗上述三維葉片氣動力計算程式在視窗化之前與之後的計算結果相同無誤外。以下主要以 NACA2412 翼型升阻力之計算為例，檢視做 C_L/C_D 最佳化之結果所造成的改進情形。

圖 9、圖 10 與圖 11 顯示 NACA2412 原翼型在不同雷諾數利用 Xfoil 與 Fluent 的計算結果，並與 Abbott and von Doenhoff 的數據(取自[9])做比較。結果顯示，Xfoil 利用板塊法的計算與實驗數據有很好的吻合，Fluent 軟體對於 C_D 的預估偏高，分離流比實際提早發生 (C_L 在高攻角下降)，同時導致 C_L/C_D 值下降。這些結果受雷諾數的影響(只差 3.1 倍)不大。儘管如此，Xfoil 與 Fluent 在最佳攻角的預測則相吻合。

由於對 NACA2412 之計算以 Xfoil 之結果與實驗值較接近，以下繼續以 Xfoil 之計算做比較。圖 12、圖 13 與圖 14 顯示以 NACA2412 翼型為基礎做 C_L/C_D 最佳化之前(以 NACA2412 表示)與最佳化之後(以 NACA2412_OPT 表示)升阻力結果之比較。最佳化前後的翼型幾何形狀如圖 15 所示。這些結果顯示，最佳化後的翼型變薄，升力提高，在攻角不大的情形下， C_L/C_D 值也可以有不錯的提升。

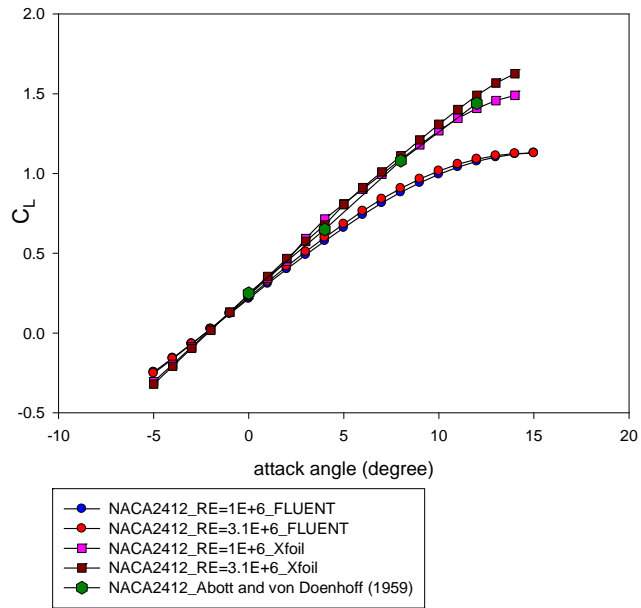


圖 9 NACA2412 翼型以 Xfoil 與 Fluent 計算的 C_L 結果比較

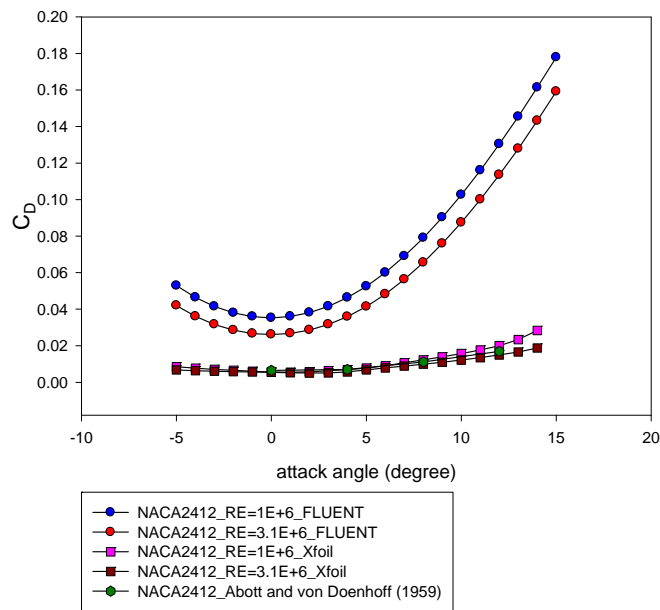


圖 10 NACA2412 翼型以 Xfoil 與 Fluent 計算的 C_D 結果比較

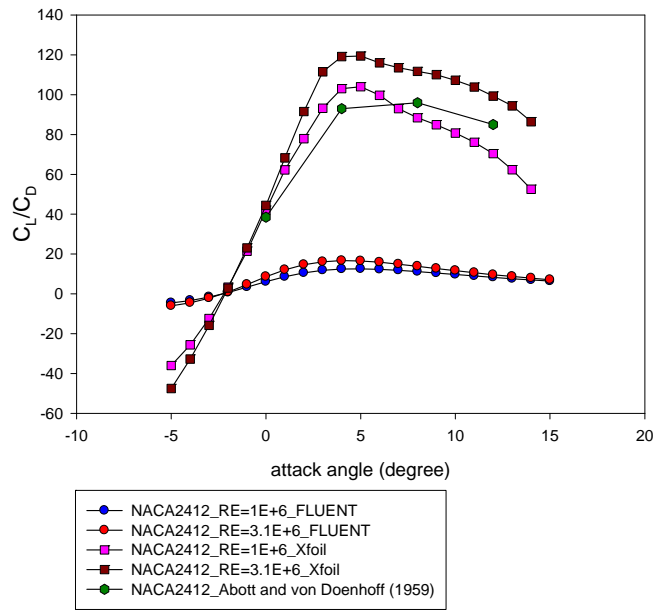


圖 11 NACA2412 翼型數以 Xfoil 與 Fluent 計算的 C_L/C_D 結果比較

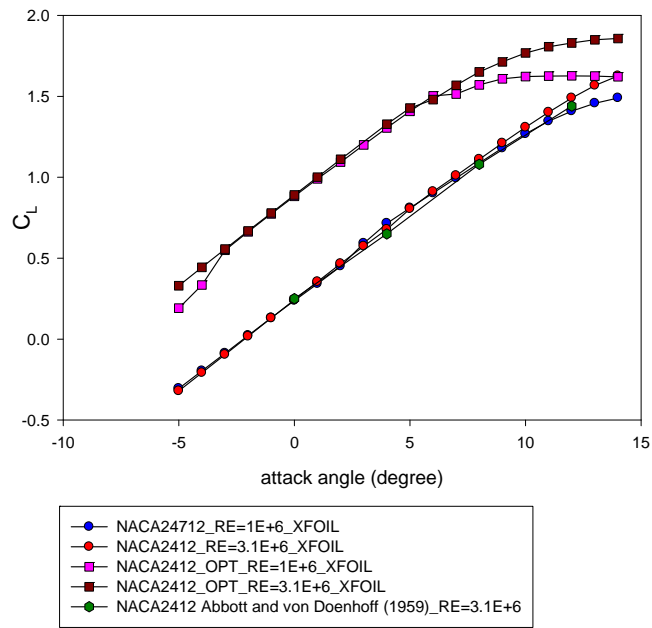


圖 12 NACA2412 翼型在最佳化前後的 C_L 結果比較

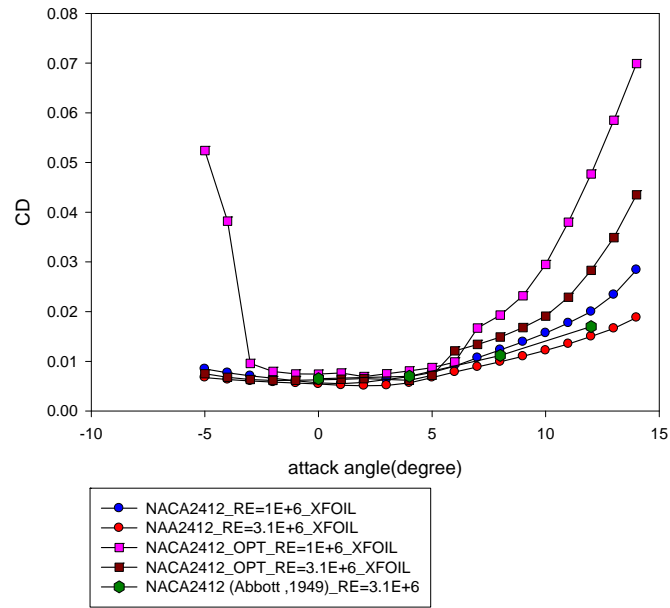


圖 13 NACA2412 翼型在最佳化前後的 C_D 結果比較

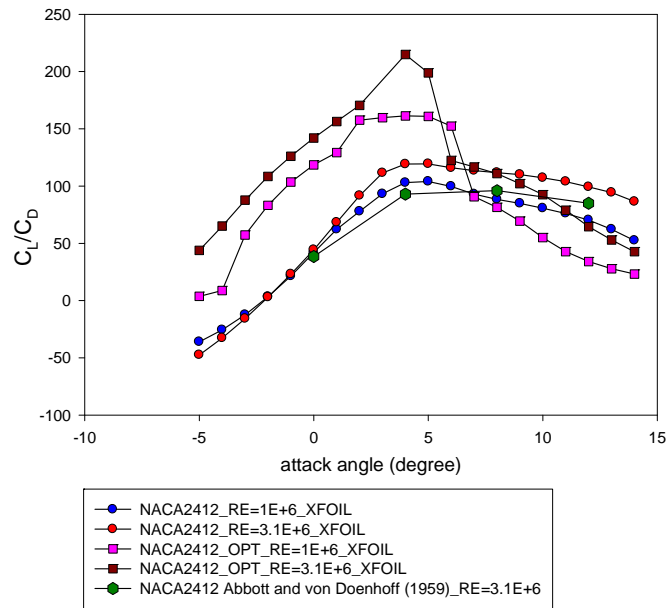


圖 14 NACA2412 翼型在最佳化前後的 C_L/C_D 結果比較

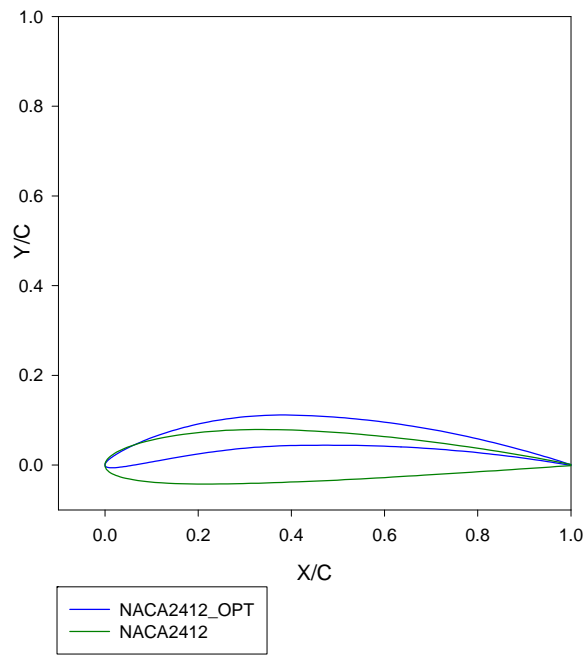


圖 15 NACA2412 最佳化前後的翼型幾何形狀

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.Manwell, J.F., McGowan, J.G., and Rogers, A.L., 2002, Wind Energy Explained, John Wiley & Sons Ltd.
- 5.Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., and Bossanyi, E., 2001, Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons Ltd.
- 6.牛山泉、三野正洋(共著)(賴耿陽譯著)，小型風車設計及製造，復漢出版社。
- 7.Cencelli, N.A., 2006, “Aerodynamic Optimization of a Small-scale Wind Turbine Blade for Low Windspeed Conditions,” Master thesis, University of Stellenbosch.
- 8.Jureczko, M., Pawlak, M., and Mezyk, A., 2005, “Optimisation of Wind Turbine Blades,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, pp. 463-471.
- 9.Anderson, J.D. Jr., 2007, Fundamentals of Aerodynamics, 4th ed., McGraw-Hill.