

風機葉片二維翼型氣動力最佳化分析與性能改進

紀華偉¹ 吳佩學^{1,*} 張顧耀² 吳鴻筠³ 卓岳樺¹ 劉美伶¹ 陳柏瑜¹

¹大葉大學機械與自動化工程學系

²大葉大學資訊工程學系

51591 彰化縣大村鄉學府路 168 號

³行政院原子能委員會核能研究所

32546 桃園縣龍潭鄉佳安村文化路 1000 號

摘要

風力渦輪葉片之空氣動力學分析與葉片參數的最佳化設計，乃是風力發電機開發前期的關鍵技術，為提升設計的能力與方便性，本研究對葉片二維翼型建立最佳化設計方法與工具，作為三維葉片外型最佳化設計的基礎。

本研究成功開發二維翼型氣動力改進方法與計算視窗介面，利用 Xfoil 程式與類神經網路模型作為建立氣動力資料庫與最佳化搜尋之工具。本文以 Naca2412 作為初始翼型作最佳化設計，分別針對升力係數(C_L)最佳化或氣動力性能(C_L/C_D)最大化進行最佳化設計；設計變數有四，分別為翼型前緣半徑比(X1)，翼型厚度與弦長比值(X2)，翼型弧度(X3)以及攻角(X4)。最佳化設計前後翼型之氣動力分析也以 Fluent 模擬作相對比較。結果顯示在使用本研究之最佳化計算程序後，新二維翼型的空氣動力性能有明顯的提升。

關鍵詞：最佳化，二維翼型，類神經網路，氣動力

Optimization Analysis and Performance Improvement of Aerodynamics for the 2D Airfoils of a Wind Turbine Blade

HUA-WEI CHI¹, PEY-SHEY WU^{1,*}, KU-YAW CHANG², HUNG-YUN WU³,

YUE-HUA JHUO¹, MEI-LING LIU¹ and KAMIRU CHEN¹

¹Department of Mechanical and Automation Engineering, Da-Yeh University

²Department of Computer Science and Information Engineering

No. 168, University Rd., Dacun, Changhua 51591, Taiwan, R.O.C.

³Institute of Nuclear Energy Research, Atomic Energy Council, Executive Yuan

No. 1000, Wenhua Rd., Jiaan Village, Longtan Township, Taoyuan County 32546, Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

Aerodynamic analysis and the optimization of design parameters for wind turbine blades are important procedures in the early stages of developing wind-power generation systems. To improve

the capability and design convenience, the study constructed a design tool for the aerodynamic analysis of 2D airfoils and provides computational methods for their optimization. This procedure forms the foundation for designing optimal 3D wind turbine blades.

This study developed methods for improving the aerodynamic of 2D airfoils, as well as constructing window interface programs for the computation. The Xfoil program and a neural network were used to construct the aerodynamics database and to search for optimization. Two single-objective functions were tested, resulting in either the lift coefficient C_L or the aerodynamic performance C_L/C_D . Four design variables were considered. These included the leading edge radius ratio (X1), thickness-to-chord ratio (X2), camber (X3), and the angle of attack (X4). The aerodynamics of the airfoils before and after the optimization were computed with Fluent software for relative comparisons. Results showed that the aerodynamic performance of the new airfoil that was obtained using the proposed procedure demonstrated remarkable improvement following optimization.

Key Words: optimization, 2D airfoil, neural network, aerodynamics

一、前言

近年來各種替代性潔淨新能源的研究與發展，是世界各國關注與努力的目標，而進口能源幾乎占了本國能源的98%，油價的上漲，更凸顯再生能源發展的迫切性。在各種新能源中，風力發電沒有燃料的問題，也沒有輻射以及二氧化碳排放的公害，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，具有能源再生、容量巨大、無污染、管理成本低等優點，是一項很值得發展的補充性能源。風力發電在歐洲多國早已行之多年，如瑞典、丹麥、西班牙，技術早已成熟，美國、英國等更是投注大批資金致力於風能的發展；根據全球風能協會（Global Wind Energy Council）的統計，全球風力發電裝置在1996年僅有6,100MW，2000年達到31,100MW，2005年達到59,091MW，2010年總裝置容量已達到197,039MW[5]，幾乎是指數函數的增加，可見發展的快速。在裝置容量上，中國大陸已經超越美國而居世界之冠。根據最樂觀的估計，2030年前全球風力發電裝置容量將可達將近2,342GW[6]。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，有中小型風力發電機的機潛在市場；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，風力發電機的設計與製造技術，尚屬於萌芽階段，並落後許多先進國家，依照目前的趨勢，實在有必要加速我國內自行設計與製造的能力，才能夠與其他國家競爭，並與世界接軌。

影響風力渦輪效益的因素包含有葉片剖面形狀(或稱二

維翼型)、葉片漸縮、葉片扭轉、葉片尺寸與數量等等諸多因素[8,9]。本研究著重在二維翼型氣動力的計算，目的在建立一套風機氣動力系統分析與模擬的設計工具與二維翼型設計最佳化的計算方法，並建立視窗化計算介面。本文以Naca2412作為初始翼型作最佳化設計，利用Xfoil程式與類神經網路模型作為建立氣動力資料庫與最佳化搜尋之工具，計算二維翼型之最佳氣動力。本研究針對兩個單目標進行最佳化設計，其一為升力係數(C_L)最大化，其二為氣動力性能(C_L/C_D)最大化，以求得此條件下之最佳翼型參數。可望在將來繼續發展，延伸應用在三維葉片堆疊組合[3,7]的最佳化設計。

二、二維翼型氣動力之計算

本研究利用Xfoil作二維翼型氣動力計算之基本工具。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，其對於升力(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[2,4]，大幅縮減了計算實際黏性流場所需要的時間，因此，它廣泛的被用在工業界與學術研究的翼型設計，然而，它對於失速點的預測能力卻不一定準確。

為了使用者之方便與減少錯誤，本研究利用有狀態系統的視窗化方法，將程式做成視窗化介面，其使用過程之一的視窗介面如圖1所示。

風機葉片二維翼型氣動力最佳化分析與性能改進

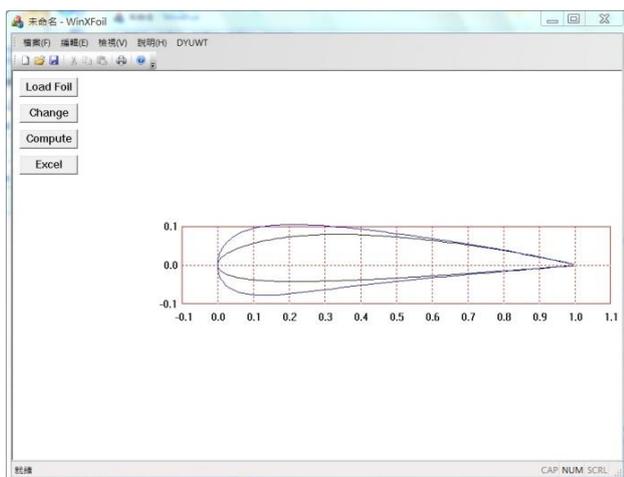


圖 1. Xfoil 之視窗化介面

Xfoil 常會有在某些攻角無法收斂的情形，尤其是對於非標準翼型，這已經是大家知道的問題[3]。因此，要直接將此程式納入最佳化程式之計算非常困難。為了解決此問題，本研究利用建立升阻力資料庫，並導入了類神經網路的最佳化搜尋做法。

三、類神經網路

本研究使用 Matlab 軟體內建的類神經網路訓練工具作訓練，網路種類為 multilayer feed-forward back-propagation network (MLP)，網路分為三層，分別為輸入層、隱藏層、及輸出層，如圖 2 所示。

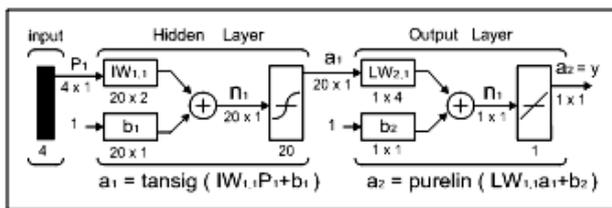


圖 2. 類神經網路架構

輸入層為變數輸入層，因為有四個變數，所以有四個神經元，隱藏層採用 tansig 函數激發，輸出層僅一個神經元，為函數之輸出，即 $-C_L$ 或 $-C_L/C_D$ ；輸出層的激發函數為 pureline。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。

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。本研究分別對翼型之 C_L 或 C_L/C_D 進行最大化設計，故網路輸出值分別為 C_L 或 C_L/C_D 。為提升訓練品質，採個別訓練方式。

C_L/C_D 網路有四個輸入，一個輸出。隱藏層神經元嘗試用 8、12、16...、40 個神經元，其中以 40 個神經元訓練效果較佳，經過 169 次疊代訓練後正規化的訓練均方根誤差 (MSE) 為 0.000868，如表 1；其訓練收斂曲線及網路架構如圖 3。

表 1. C_L/C_D 類神經網路訓練比較表

神經層	MSE
4 x 40 x 1	0.000868

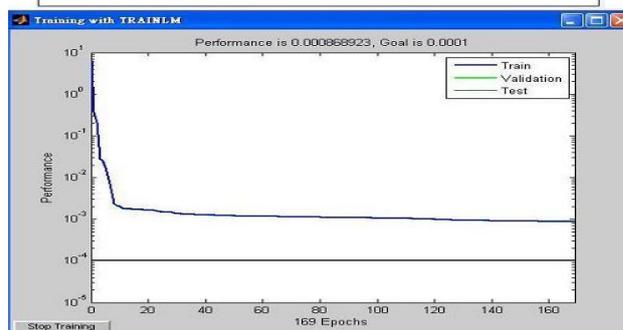
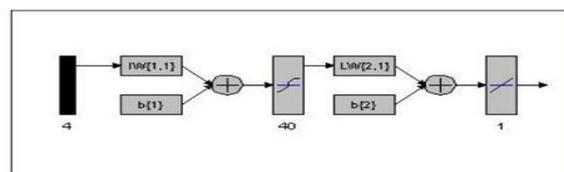


圖 3. C_L/C_D 訓練收斂曲線及網路架構圖

C_L 網路有四個輸入，一個輸出；隱藏層神經元嘗試用 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 0.000144，如表 2；其訓練收斂曲線及網路架構如圖 4。

表 2. C_L 類神經網路訓練比較表

神經層	MSE
4 x 32 x 1	0.000218

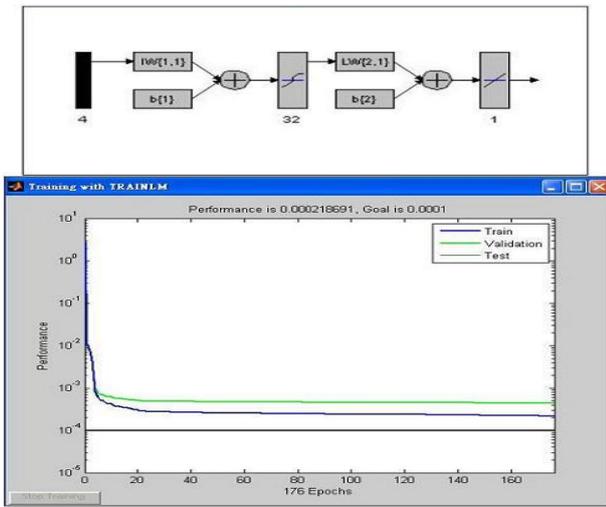


圖 4. C_L 訓練收斂曲線及網路架構圖

四、最佳化計算

本研究風力渦輪葉片二維翼型之氣動力屬於非線性可微分系統，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)。本研究針對氣動力系統選擇二種策略，三種演算法，一種一維搜尋法互相搭配，除了可以兼顧運算效率與穩定性外，更可作為最佳設計點比較與最後設計之選擇。

(一) 最佳化演算法架構

最佳化策略為基本最佳化方法，用於處理限制條件。本研究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) 以及增大拉格蘭吉乘數法 (Augmented Lagrange Multiplier Method, ALM) 二種策略。

根據演算策略訂定各種不同演算法供選擇，演算層次主要在決定搜尋方向。本研究選用三種方法，分別為用 Fletcher-Reeves 法、Davison- Fletcher-Powell (DFP) 法、以及 Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) 法等三種以決定搜尋方向。

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) 及多項式內插法 (Polynomial Interpolation)，本研究以黃金分割法進行一維搜尋。

(二) 翼型最佳化數學模型與計算

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 (最大升力)，其二為 C_L/C_D 最大化 (最佳空氣動力性能)，分別進行單目標設計最佳化；設計變數有四分別為新舊前緣半徑比 (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)。另外，本研究計算中，翼型前緣及後緣延伸曲線的摻合 (blending) 位置設為固定參數，其值為 0.25。因此，最佳化設計模型可表示為

$$\text{Min } f(x) = C_L/C_D \tag{1}$$

$$\text{Subject to } XiL \leq Xi \leq XiU$$

亦或

$$\text{Min } f(x) = C_L \tag{2}$$

$$\text{Subject to } XiL \leq Xi \leq XiU$$

其中設計變數邊界限制如表 3。

表 3. 二維翼型最佳化設計變數及其邊界

設計變數	名稱	下邊界	上邊界
X1	前緣半徑比	0.5	2.0
X2	翼型厚度	0.07	0.17
X3	翼型弧度	0.00	0.09
X4	攻角	-5	14

使用本研究之程式進行 C_L/C_D 最佳化計算，類神經網路訓練所得最佳結果與在該最佳參數組合條件下用 Xfoil 計算結果比較如表 4。同樣，對 C_L 最佳化計算，類神經網路訓練所得最佳結果與在該最佳參數組合條件下用 Xfoil 計算結果比較如表 5。兩表顯示，類神經網路所估計之 C_L 與 C_L/C_D 與 Xfoil 計算值十分接近，表示類神經網路訓練結果相當接近，最大相差不會超過 1.5%。雖然在翼型氣動力的改進中，主要目標在於得到氣動力性能 (C_L/C_D) 的最大化，而同時提升 C_L/C_D 與 C_L 將是比較理想的設計，然而表 4 與表 5 的結果顯示這兩者最佳化的參數條件明顯不同。因此，以下對於 C_L/C_D 最大化的探討，也將了解 C_L 與 C_D 的個別變化特性。

風機葉片二維翼型氣動力最佳化分析與性能改進

表 4. 不同方法組合之 C_L/C_D 最佳化設計

最佳化方法	最佳值(類神經網路訓練後)	Xfoil 計算值
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

表 5. 不同方法組合之 C_L 最佳化設計

最佳化方法	最佳值(類神經網路訓練後)	Xfoil 計算值
SUMT_F-R_Golden (exterior)	$C_L = 2.124353$ $X=(1.837,0.1439, 0.09,14)$	2.1196
SUMT_BFGS_Golden (exterior)	$C_L = 2.124353$ $X=(1.837,0.1439, 0.09,14)$	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

五、氣動力分析結果與討論

本研究以 NACA2412 為基礎翼型，利用以上最佳化程序計算，氣動力性能最佳化前、後的翼型如圖 5 所示，其

中原始翼型以 NACA2412 表示，將攻角列為變化參數的氣動力性能最佳化結果（對任意攻角氣動力性能 C_L/C_D 最佳化）以 NACA2412_OPT 表示，對於表 3 所有攻角範圍尋求氣動力性能總和最佳化所得的翼型以 NACA2412_OPT_AA 表示。該圖顯示，兩種最佳化的翼型都變得比較彎曲，但是對任意攻角尋求最佳化氣動力性能（ C_L/C_D ）時，翼型厚度變得最小。

圖 6、圖 7 與圖 8 顯示 NACA2412 原翼型在不同雷諾數利用 Xfoil 與計算流體力學軟體 Fluent 的計算結果，並與 Abbott and von Doenhoff 的數據（取自[8]）做比較。其中 Fluent 的模擬中，前處理所用到的計算區域、網格建立，以及計算紊流數學模型與後處理等，都是使用廣被採用的方法，可詳見[1]的敘述。結果顯示，對於 C_L 的計算方面，Xfoil 利用板塊法結果與實驗數據有很好的吻合；然而，Fluent 軟體雖然在低攻角（5 度以下） C_L 的計算與實驗數據吻合，當攻角大於 5 度時就開始與實驗數據偏離（圖 6）。在阻力係數方面，Fluent 對於 C_D 的預估普遍偏高（圖 7），尤其是在高攻角的情形，Fluent 對於 C_D 的計算結果遠高於實驗數據以及 Xfoil 的預估結果，而後兩者則仍然有良好的吻合。此乃因為 Fluent 預估的分離流比實際提早發生（ C_L 在高攻角實比實驗值下降許多）（圖 6），同時導致 C_L/C_D 值下降。須注意的是，一般對於翼形的空氣動力特性， C_D 的數值比 C_L 的數值小很多，因此 C_L/C_D 比值對 C_D 的變化很敏感（圖 8）。這些結論受雷諾數的影響不大。儘管如此，圖 8 顯示 Xfoil 與 Fluent 計算對於最佳攻角值（亦即 C_L/C_D 最大值發生的攻角）的預測結果（約在 4 度）則大致相吻合。

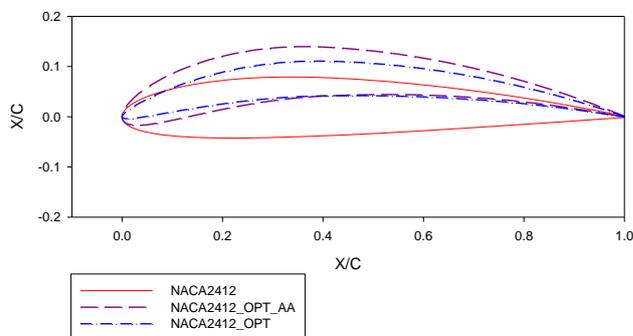


圖 5. 最佳化前、後的翼型

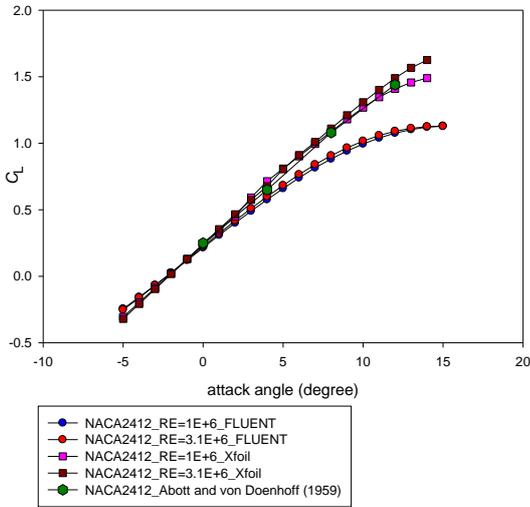


圖 6. NACA2412 翼型以 Xfoil 與 Fluent 計算 C_L 結果比較

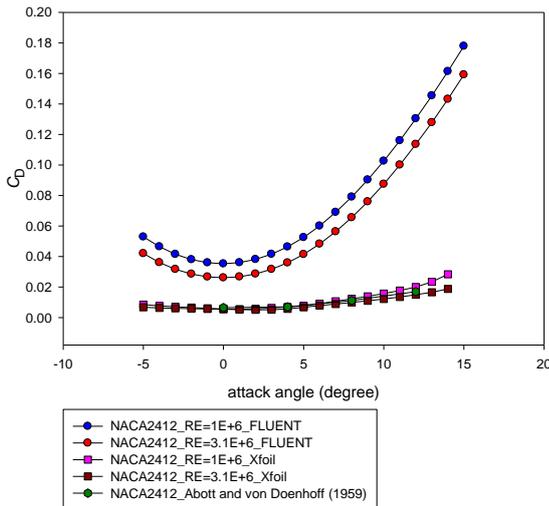


圖 7. NACA2412 翼型以 Xfoil 與 Fluent 計算的 C_D 結果比較

由於 Fluent 在 C_D 的計算偏離較多，因此以下以 Xfoil 之氣動力計算繼續做最佳化結果的驗證。圖 9、圖 10、與圖 11 乃以 NACA2412 翼型為基礎做最佳化前後的氣動力計算結果之比較，Abbott and von Doenhoff 對原翼型的實驗數據也顯示其中。圖 11 顯示，由任意攻角尋找氣動力性能 (C_L/C_D) 最佳化，雖然可以得到所有表 3 參數組合內最高的 C_L/C_D 值，但是在偏離發生該值的攻角時， C_L/C_D 會迅速的下降，這通常會發生在前緣半徑小而且厚度薄的翼型。詳細對照圖 9 與圖 10 的結果可知，將攻角也當成最佳化參數以尋找氣動力性能最佳化所得的翼型，其 C_L/C_D 發生最高點

的原因乃是 C_D 的減少，而非 C_L 的提升。由於 C_D 值通常很小，其值稍微的變化對於 C_L/C_D 的結果非常敏感，因此，對任意攻角氣動力性能 C_L/C_D 最佳化的結果應該小心的應用。

由於在實際風況下，風速與風吹角度均有可能隨時間有所變化，除非風車機構對於攻角調整可以非常快，否則很難讓葉片運轉一直維持在最佳的 C_L/C_D 。因此，對於所有攻角的氣動力性能總和的最佳化有其重要的意義。圖 11 顯示對所有攻角作氣動力性能總和的最佳化結果曲線比較平緩，雖然 C_L/C_D 的最高點比攻角也當成參數的結果較低，但是在大部分的攻角範圍可以維持在比較高的 C_L/C_D 值。圖 9 與圖 11 均顯示，對所有攻角作氣動力性能總和的最佳化結果的翼型，在升力係數 C_L 與氣動力性能 C_L/C_D 均有顯著得提升。

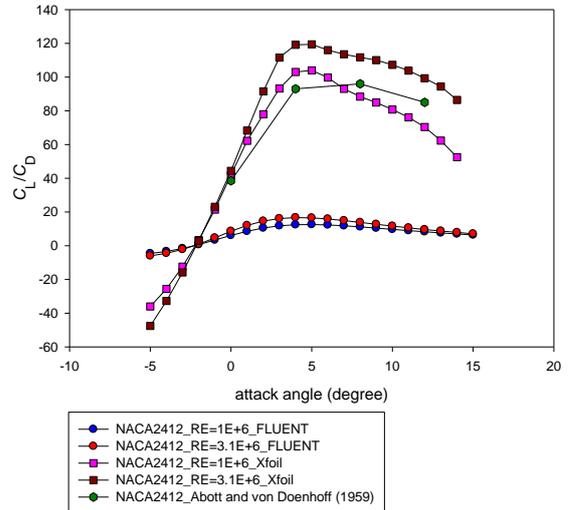


圖 8. NACA2412 翼型以 Xfoil 與 Fluent 計算 C_L/C_D 結果比較

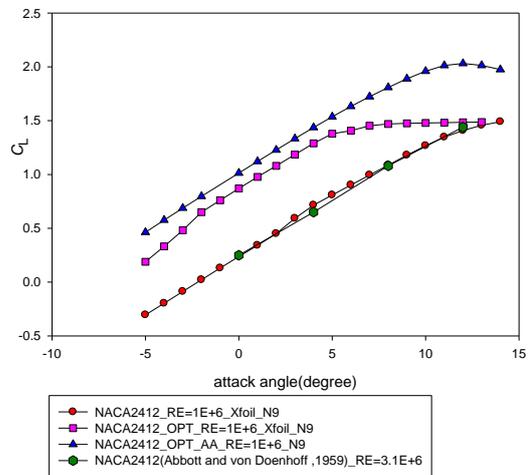
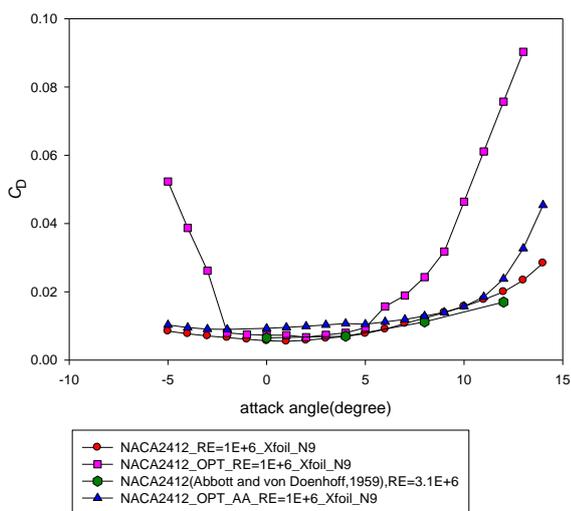
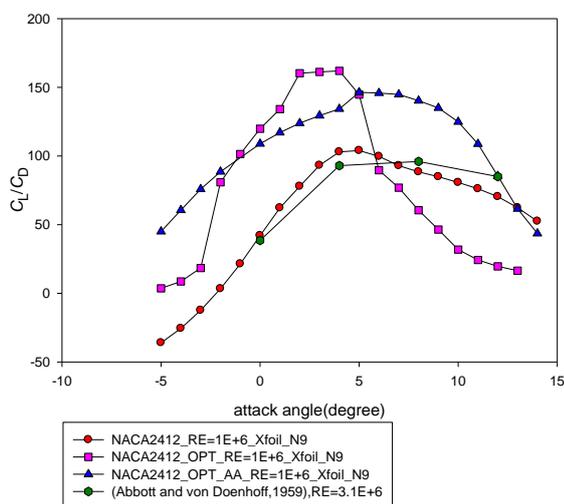


圖 9. NACA2412 翼型做最佳化前後的 C_L 結果比較

風機葉片二維翼型氣動力最佳化分析與性能改進

圖 10. NACA2412 翼型做最佳化前後的 C_D 結果比較圖 11. NACA2412 翼型做最佳化前後的 C_L/C_D 結果比較

六、結論

本研究成功開發二維翼型氣動力計算方法與計算視窗介面，利用 Xfoil 程式與類神經網路模型作為建立氣動力資料庫與最佳化搜尋之工具。本文以 Naca2412 作為初始翼型作最佳化設計，對 C_L (升力係數) 或 C_L/C_D (氣動力性能) 做最大化。最佳化設計前後翼型之氣動力分析也以 Fluent 模擬作相對比較。本研究結果可得下列結論：

- (1) 類神經網路所估計之 C_L 與 C_L/C_D 與 Xfoil 計算值十分接近，表示類神經網路訓練結果相當可信。
- (2) Xfoil 與 Fluent 對於最佳攻角值 (C_L/C_D 最大值的發生攻角) 的預測則大致相吻合。Fluent 對於 C_D 預測偏高，導致 C_L/C_D 預測偏低。

(3) 由於 C_D 值通常很小，其值稍微的變化對於 C_L/C_D 的計算非常敏感。對任意攻角氣動力性能 C_L/C_D 最佳化的結果應該小心的應用。

(4) 在使用本研究之最佳化計算程序後，新翼型在升力係數 C_L 與氣動力性能 C_L/C_D 均有顯著的提升。

誌謝

本研究承蒙行政院原子能委員會核能研究所補助，計畫編號 992001INER054，特此致謝。

參考文獻

1. 龔棉英 (民 95)，新型風力渦輪於設計階段之空氣動力特性數值探討，大葉大學機械工程研究所碩士論文。
2. Anderson, J. D. (2007) *Fundamentals of Aerodynamics*, 4th Ed., McGraw-Hill, New York, NY.
3. Cencelli, N. A. (2006) *Aerodynamic Optimization of a Small-scale Wind Turbine Blade for Low Windspeed Conditions*. Master Thesis. University of Stellenbosch, Stellenbosch, South Africa.
4. Drela, M., XFOIL, Retrieved October 2, 2011, from <http://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/>.
5. GWEC (2011), Global Wind Report – Annual market update 2010, *Global Wind Energy Council*, eds. S. Sawyer and K. Rave. Retrieved April 12, 2012, from <http://www.gwec.net/index.php?id=180>.
6. GWEC (2011), Global Wind Energy Outlook 2010, *Global Wind Energy Council*, K. Rave, S. Teske, and S. Sawyer. eds. Retrieved April 12, 2012, from <http://www.gwec.net/index.php?id=181&L=0%2525B4>.
7. Jureczko, M., M. Pawlak, and A. Mezyk (2005) Optimisation of wind turbine blades. *Journal of Materials Processing Technology*, 167, 463-471.
8. Lakshminarayana, B. (1996) *Fluid Dynamics and Heat Transfer of Turbomachinery*, John Wiley & Sons Ltd., New York.
9. Tester, J. W., E. M. Drake, M. J. Driscoll, M. W. Golay and W. A. Peters (2005) Wind Energy. In: *Sustainable Energy – Choosing Among Options*, 613-646, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.