建築整合式模組化小型風力機開發
Development of Building-integrated Modular Small Wind Turbines

胡斯遠
Ssu-yuan Hu
工業技術研究院 能源與環境研究所
台灣 新竹縣
Energy & Environment Research Laboratories
Industrial Technology Research Institute
Chutung, Taiwan
kosh@itri.org.tw

李宜宸
Yi-Chen Li
工業技術研究院 能源與環境研究所
台灣 新竹縣
Energy & Environment Research Laboratories
Industrial Technology Research Institute
Chutung, Taiwan
liyichen@itri.org.tw

顏文治
Wen-Jyh Yan
工業技術研究院 能源與環境研究所
台灣 新竹縣
Energy & Environment Research Laboratories
Industrial Technology Research Institute
Chutung, Taiwan
wenjyh@itri.org.tw

摘要

本研究目的在於改善傳統垂直軸式風力機與建築物結合方式，以節省塔架成本並降低危險性，並針對都市風場特性設計低起動轉矩之專用葉片，以期能開發出一成本低廉、安全穩定、可商業化、且能在短期內應用於住家廠房等環境之新型風力發電系統。本研究首先利用商用軟體進行 CFD (計算流體力學) 分析及檢驗，之後製作實物模型，並進行簡化的風洞測試實驗，結果顯示本研究之新式葉片配置與傳統設計相比，確能有效降低起動風速，不但製造成本大幅降低，同時由於零件設計簡化，降低組裝及維護的困難，故能有效達到安全應用於住宅區的主要目標。

關鍵詞：小型風力機，垂直軸，建築整合

Abstract

In this study, a brand new vertical-axis wind turbine is proposed with specially designed blades and integration with building for adaptation of urban utilization. The aim of this development is to create a new wind energy system with low cost and high stability, so it can be quickly commercialized and applied in urban environment. CFD analyses are first utilized for verification and tuning of the sketch design, followed by simplified wind tunnel experiment to confirm the idea. The results reveal that the proposed design with new blade configuration does exhibit lower starting wind speed while the cost, assembly and maintenance are also much easier than traditional products.

Keywords: small wind turbine, vertical axis, building integration

I. 研究背景

隨著商用大型風力機不斷朝向更高更大的模式發展，我國對於風能的應用發展也愈顯得相對落後。在經濟景氣低靡及全球暖化的雙重刺激之下，開發新的綠色能源市場已成為最新且最迫切的研究方向[1]。以台灣的工業技術層次及產業類型分布而言，中小型風力機顯然是相對門檻較低且較具競爭力的研發標的。但因台灣本島地狹人稠，都市建築狹窄凌亂，故導致風力機效率不彰，裝置風力發電系統的效益往往不如預期，致使一般民眾對此望而卻步，小型風力機的市場因此遲遲無法打開[2]。

都會用風力機與傳統小型風力機相比，其設計訴求與市場區隔皆有所不同，若需在人口密集的都市地區仍能裝設運轉，為滿足消費者的直接感受，則風力機的價格、安全性、穩定性以及維修便利性等，將遠比風力機本身的發電效率要來得更為重要[3]。本研究針對台灣都市的空間限制及市場需求雙管齊下，研發低成本且適用於都市建築環境之小型風力機。除考慮城市風場紊亂及風速偏低等先天限制之外，同時亦顧慮風力機之視覺衝擊性對於消費者購買意願之影響，最終期能設計一售價低廉、功能穩定、運轉安全且外型低調具親和力之風力發電裝置。

II. 設計流程與分析方法

垂直軸式的風力機，因其具有無方向性的優點，同時葉片配置內斂，可降低視覺上的威脅性，雖然效率較水平軸式略低，但對小型風力機市場而言接受度反而較高[4]，且與水平軸式風力機相比，更適用於屋頂或外牆等住宅環境[5]。因此本研究首先以垂直軸式的小型風力機作為設計的出發點，由此尋求創新的發展空間。

垂直軸與水平軸風力機之間的差別，其學理上的真正定義方式，應取決於流體行進方向與風力機葉片旋轉軸方向的夾角，而非如傳統誤解，直接取旋轉軸與地面夾角的判別方式。本研究之風力機與傳統風力機最明顯的差別，首先就在於其葉片配置雖屬於垂直軸風力機，但其旋轉軸卻與地面平行，故整體成臥式配置。此一設計具有多項優點，首先以水平方式安裝於建築物上，則可立即消除塔架的成本，同時相較於傳統的垂直安裝，臥式風機因重心較低，更具安全及平穩的性質，故可提升住戶的接受度及安全感。根據本研究實際設計製造出的風力機運轉情形，不論在安裝或維修上都更為便利迅捷，同時在視覺上也能提供使用者更高的穩定感[6]。

在葉片設計方面，由於傳統 Darrieus 式葉片僅中段約 1/3 長度有實際發電效益，故本研究之設計改採用 H-type 的垂直葉片[7]。直線形葉片構造簡單，製造相對較為容易，與 Darrieus 式打蛋器形葉片或是 Gorlov 式螺旋形葉片相比，不但成本較為低廉，而且可降低量產開模的複雜度及精度要求[8,9]。為善用直線型葉片構造簡單的特色與優點，本研究採用鋁擠型的方式，配合 NACA 8610 翼截面製作葉片外型。NACA 8610 屬於相對低風速高升力的 Cambered 系列輪廓外型，配合擠長處理複雜不規則外型的鋁擠型工法，可適用於迅速量產的製造需求，故符合本研究的發展方向。

圖 1：配合 NACA 8610 輪廓之鋁擠型模具截面

然而，H-type 的直線形葉片亦有其先天上的缺陷，也就是在低風速時容易出現無法自行起動的問題。由於直線形葉片之翼截面沿軸向固定不變，因此固定攻角在特定位置會出現鎖死狀態。為改善此一問題，故透過計算流體力學的模擬來了解此設計方案與傳統設計在靜止下的起動轉矩進行比較。本研究採用 Fluent 商用軟體進行模擬，該軟體使用有限體積法求解不可壓縮穩態 Navier-Stokes 方程組，本文在計算方法上選用二階上風法，利用 SIMPLEC 解決壓力與速度耦合的問題，紊流的模擬採用 Realizable k-ε 模式，壁面的處理採用考量壓力梯度影響的增強型壁面處理方法。

模擬所使用的幾何與計算域如下圖所示，圖中所顯示不同顏色的表面 (邊界) 網格代表不同的邊界型態，其中淺藍色的表面網格代表該區域的邊界為入口邊界條件，綠色表面網格代表出口邊界條件，深藍色表面網格代表對稱邊界條件，黑色表面網格代表壁面邊界條件亦即代表風力機。在入口邊界條件上給定 1m/s 的風速，出口邊界條件給定固定壓力，壁面邊界條件為無滑動邊界條件。所模擬的計算域在經計算資源與計算精度的評估取捨後網格數為 1,430,000 格 (Cell)。

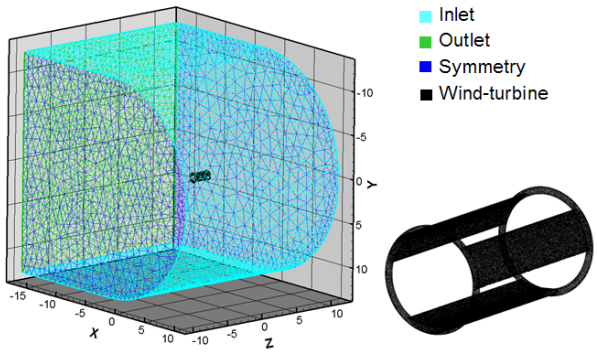

圖 2：垂直軸臥式風力機流場計算域與網格分佈圖

流體流動時遇到阻礙物便會繞流過去，而如果該阻礙物為斜置時繞流過去的流體會產生一縱向之渦旋 (longitudinal vortex)，而此一縱向渦旋會使得流體打在阻礙物的其中一側表面，而使得該阻礙物受流體衝擊的一面與其相反面有較大的壓力差。若將這樣的概念應用到風力機的設計上，阻礙物變為風力機之葉片，則勢必能增大起動的轉矩。

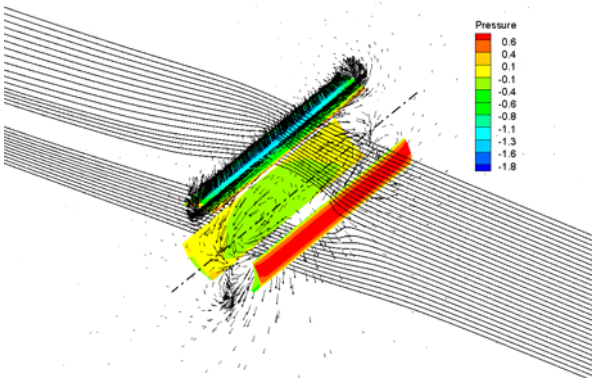

圖 3：垂直軸臥式風力機流場徑線與二次流向量圖及葉片表面壓力分佈

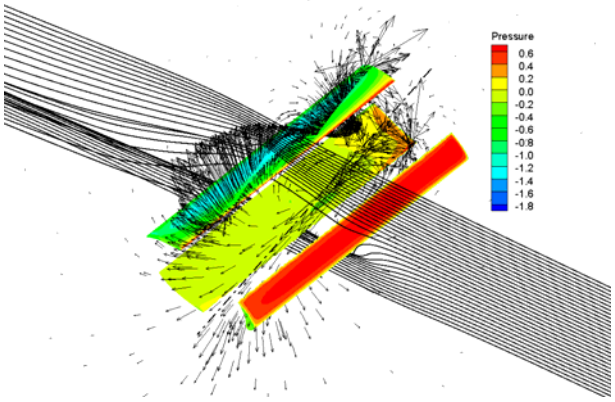

圖 4：斜軸非對稱臥式風力機流場徑線與二次流向量圖及葉片表面壓力分佈

圖 3 和圖 4 顯示臥式風力機流場徑線與二次流向量圖及葉片表面壓力分佈，其中圖 3 為對稱式的風力機，而圖 4 為斜軸式的風力機。比較圖 3 與圖 4 主流方向徑線，可以發現流體經過斜軸式風力機後確會產生縱向渦旋，此種縱向渦旋會使得風力機後的尾流影響範圍較大，然而本臥式風力機的串接是沿著軸線方向連接，尾流範圍較大對於此種風力機的配置影響不大。另外比較切過軸心的二次流流場更可以明顯看出前述流體經過阻礙物之流體繞流情形，在斜軸式風力機之二次流可以明顯的看到渦旋衝擊風力機葉片上表面的情形，而此種狀態類似於傳統對稱式風力機在靜止下給予初始之推力，以克服最大靜摩擦力的阻礙，因此斜軸式風力機的設計有助於風力機從靜止下起動。

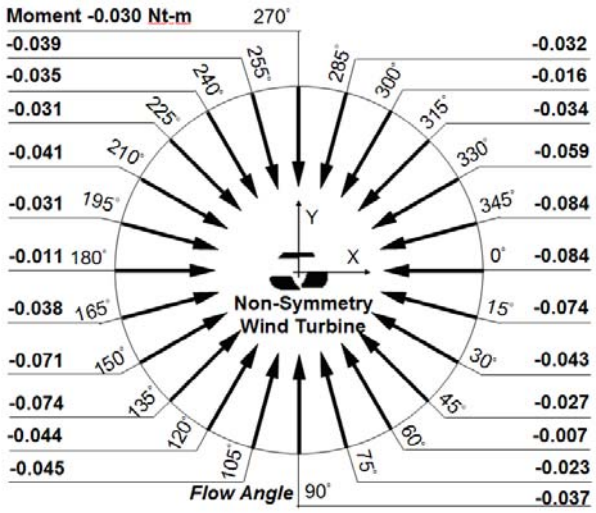

圖 5：斜軸非對稱臥式風力機不同角度之起動轉矩

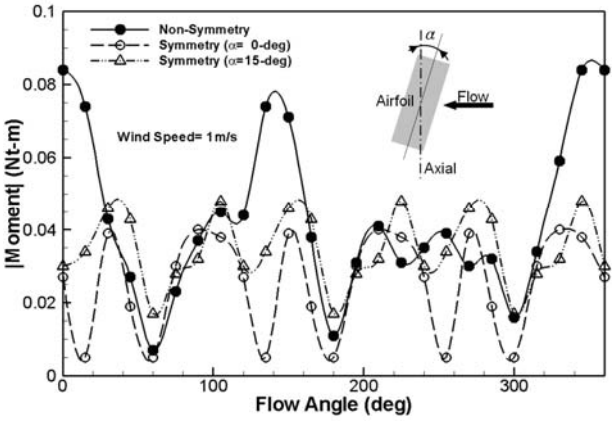

圖 6：不同葉片擺放型式之臥式風力機在不同靜止位置下之起動轉矩比較圖 (Non-symmetry 為本研究發明, α=0° 為 H-type, α=15° 為 H-type 之改良型)

圖 5 為斜軸式風力機在不同靜止下的角度之起動扭矩，而圖 6 是將前述之扭矩取絕對值與對稱式風力機 (包含葉片攻角為 0 與 15 度兩組) 之比較。而由圖 6 的結果可以發現斜軸式風力機較對稱式風力機容易從靜止下起動，而同樣為對稱式風力機來說，則以具 15 度攻角之葉片較 0 度攻角之葉片容易從靜止下起動。

根據以上模擬結果顯示，斜軸式風力機在低風速靜止下相較於傳統對稱式風力機設計有較大的起動扭矩，因此相較於先前傳統設計更易於在低風速下自行旋轉，故本研究依此研發出新式葉片配置方式，令葉片長軸與葉片旋轉軸間存在一夾角，此項配置與傳統的裝置方式完全不同，經模擬及實驗證實葉片產生之二次流明顯提高，故可有效提高靜止起動時的扭矩，故此新提出的葉片同時兼具開模簡單及易於自行起動的優點，可有效降低製造成本及起動轉矩，提升葉片的使用效率。

III. 原型製作與實驗測試

經確認非對稱式的葉片配置確能提升起動效率後，本研究即搭配選定之鋁擠型葉片，規劃適用於此設計之葉片偏轉角度及葉片截斷工法，以得到可直接裝配應用之葉片外型尺寸。由於葉片截面輪廓並無對稱性，故每組葉片中各支切法角度均有不同，需經精密計算方能吻合組裝，此為製造過程中難度極精確度要求較高且需密切注意的關鍵。然而當此風力機進入量產時，因切削角度可固定重複使用，故此一問題應能有效獲得改善。

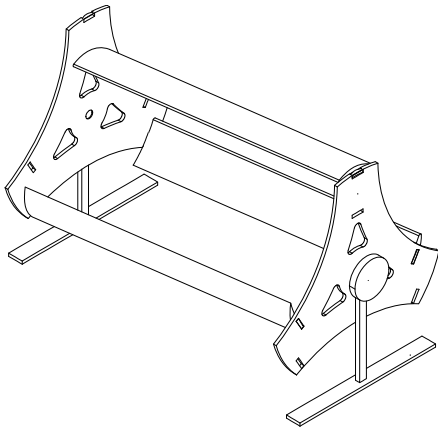

圖 7：非對稱式葉片配置 - 等角視圖

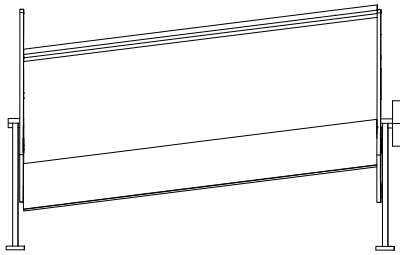

圖 8：非對稱式葉片配置 - 正視圖

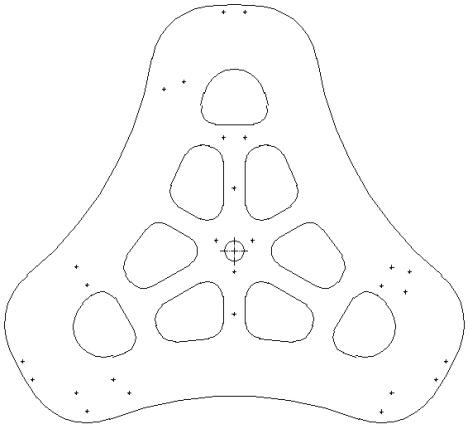

圖 9：葉片座外型及孔位設計

由於葉片座之外型輪廓較為複雜，可考慮採用 CNC 控制之雷射加工或水刀切割等方式製作，但因雷射加工可能因過熱而有表面變質或熱變形等問題，故雖材料之厚度較薄，最後仍決定採用水刀切割方式製作葉片座。目前台灣的水刀加工技術已非常成熟，以此方式製作之板材不但外形精準、成本低廉，加工過程中亦不會產生高溫，而且最重要的是水刀加工可一次處理極厚的材料，故亦利於未來量產製造之需求。

將上述各零件加以組合裝配後，最後即可得到本研究所產出之小型垂直軸風力機模組，並以此實物進行

風洞測試以驗證其性能。此一模組化風力機可用多台並鎖的方式共軸運轉以提升效能並降低成本，但因受經費的限制，本研究尚無法對模組進行完整的風洞測試，僅能利用現有之送風機性能測試系統進行風力機之起動性能檢驗。因該系統主要用於測試具有明確出入口外形之軸流風扇，故在測試本研究之風力機前須先替出風口加上集風罩的設計。俟集風罩加裝完成後，其作用儼然一短距離之風洞隧道，可將風力機置入，並利用輔助風扇推送之穩定氣流模擬強風吹拂之狀況。

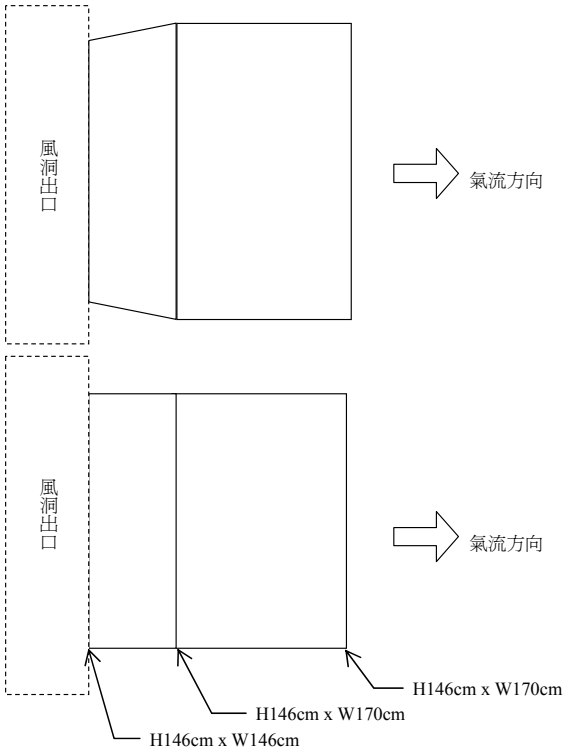

圖 10：配合風洞出口之集風罩設計 (上) 上視圖 (下) 側視圖

風洞測試之實際狀況及風力機配置如下列照片中所示。為比較本研究研發之風力機與傳統風力機之差別，測試時另行準備一組以同樣零件配置，僅改變葉片長軸與旋轉軸間夾角為 0 度所得到之 H-type 式風力機，以此作為對照組，作為比較本研究風力機起動性能提升程度之用。此測試系統原本主要用於測試軸流風扇，其送風量最高為 1000m^3/min，但加裝集風罩後實際測得之送風量僅達 881m^3/min，故用於測試相對較大型之風力機時風量略嫌不足，以集風罩截面積 146cm x 169cm 相當於約 2.5m^2 估算，此風洞之風速最高僅能達 6m/s，其實並不適用於風力機的性能測試，但由於本研究主要目的在於開發相對低風速起動之風力機，故可先經由此一系統確認風力機之起動性能，待此關鍵性能確定之後，再針對其他性質進行更進一步的詳細測試。

圖 11：加裝集風罩之送風機性能測試系統

圖 12：進行測試之風力機模組

圖 13：作為對照組比較之 H-type 對稱式風力機

IV. 結果與討論

根據實地測試結果，送風系統以極速運轉時風速為 6m/s，此時兩組風力機均能由靜止狀態順利自行起動運轉。當送風系統之功率調降為 75% 時，送風量下降為 790m^3/min，相對應風速約為 5.3m/s 時，本研究所研發之非對稱式風力機仍能順利自行起動，但對照組之 H-type 風力機則完全無法起動，顯見本研究之研發成果確實優於傳統設計。當送風系統功率繼續調降為 70% 時，送風量下降為 747m^3/min，相對應風速為 5m/s，此時不論本研究之風力機或對照組之風力機皆無法自行起動。然而若以外力提供初速度，則起動後兩者皆可穩定持續運轉。

下表為本研究研發風力機測試所得之規格列表，但因經費限制缺乏足夠高速的大型風洞系統，故部分數

據仍須待未來繼續進行實驗，方能得到更準確之結果。爾後除以裸機進行葉片性能檢驗外，亦將配合發電機之研發設計，測試搭配之機械結構性能及電力系統特性等，以獲得更完備之整體性能效率數據，持續開發能源轉換效率更高之風力驅動裝置。

表 1：本研究風力機規格之測試結果

項目	性質
尺寸	L160cm x W90cm x H100cm
重量	50kg
功率	400W
轉速	46rpm@6m/s
起動風速	5.3m/s
額定風速	N/A
發電機	三相永磁直驅發電機
葉片	NACA 8610 鋁擠型

本研究之模組化風力機設計具有低安全風險、低成本、低視覺衝擊、低環境影響、低起動風速、低複雜度等特色，其主要市場亦與一般風力機略有不同，主要適用於住家、大樓、建築物、廠房、公共設施、偏遠地區等場所，可與建築物或結構物整合，以降低裝置風力裝置可能產生的突兀感[10]。由於都會區的風電發展最終還是取決於風能本身的大小及其可利用性[11]，故未來本研究將持續朝向輕量化及降低起動風速的設計目標邁進，藉由材質材料的削減而達到降低成本的主要目標，以提升風力機的應用性與接受度。之後還可將風力機以並聯運轉的方式與公共工程結合[12]，如下圖所示，利用橋樑或公路等狹長型建物裝置大量的臥式風力機，以擴展其應用範圍。

圖 14：風力機應用示意 － 公路

圖 15：風力機應用示意 － 工廠橋樑

目前全球面臨經濟不景氣的衝擊，自給自足的零耗能建築 (ZEB, Zero Energy Building) 逐漸成為最新的節能概念。零耗能建築不但具有不受市場價格波動影響的特性，而且多半以綠色能源作為動力來源，可同時達到零排放零污染的環保效果，可說一舉數得，極有潛力成為後石化能源時代的新寵兒。而在各種替代性的再生能源當中，成本相對最低的風能正是零耗能建築不可或缺的電力來源，因此若能以建築物作為風力發電裝置發展的標的，將可開創大型風力機之外的新市場，並提供台灣本土產業在能源危機時代轉型的發展出路。

參考文獻

[1] "Guided Tour on Wind Energy," DWIA
[2] http://pepei.pennnet.com/articles/article_display.cfm?article_id=213018
[3] "新高風車創造潔淨能源的藍海戰略", http://www.hi-energy.com.tw/
[4] Gerald Müller, " Vertical axis resistance type wind turbines for use in buildings," Renewable Energy 34 (2009) 1407–1412
[5] Sandra Eriksson, "Evaluation of different turbine concepts for wind power," Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 (2008) 1419–1434
[6] Becker, "Wind Turbine Device," 美國專利 US-7132760
[7] Kelland, "Wind Turbine," 美國專利 US-4456429
[8] Gorlov, "Unidirectional Helical reaction turbine operable under reversible fluid flow for power system," 美國專利 US-5451137
[9] Cochrane, "A vertical axis wind turbine," 英國專利 GB-2404227
[10] Dannecker, "Investigations of a building-integrated ducted wind turbine module," Wind Energy, vol. 5, Issue 1, pp.53-71
[11] A.S. Bahaj, "Urban energy generation: Influence of micro-wind turbine output on electricity consumption in buildings," Energy and Buildings 39 (2007) 154–165
[12] Bill Holdsworth, "Options for microwind generation: part two," renewable energy focus May/June 2009, 42-45