

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

垂直軸式層狀型風力發電系統之研製--子計畫一：垂直軸 式層狀風力發電機氣動力設計與實驗之研究(II) 研究成果報告(完整版)

計畫類別：整合型
計畫編號：NSC 100-2623-E-009-002-ET
執行期間：100年01月01日至101年03月31日
執行單位：國立交通大學機械工程學系(所)

計畫主持人：崔燕勇

公開資訊：本計畫涉及專利或其他智慧財產權，1年後可公開查詢

中 華 民 國 101 年 05 月 21 日

中文摘要： 本計畫係針對一結合升力型與阻力型風機特性的新型式垂直風機進行氣動力、性能與流場結構的研究。此種風機之葉輪具有三個 S 型葉片與兩個翼形葉片，並可將數個葉輪堆疊進而得到較佳的性能。為瞭解其氣動力特性，利用計算流體力學進行數值模擬，數值方法採用有限體積法，並利用移動網格處理風機葉片的旋轉，搭配 RNG 紊流模式進行暫態模擬。除數值模擬外，另進行實驗予以驗證模擬之準確性。前期計畫的計算係假設風機在某轉速下、固定在數個特定旋轉角度，進行擬暫態的二維模擬，此可視為一種定性分析。而本期計畫進行的是全暫態的二維與三維計算。結果顯示全暫態分析的預測在定性上與擬暫態的結果相近，其扭矩係數與風機葉尖速度比呈線性遞減關係，而功率係數則與葉尖速度比呈二次式關係。與單層葉輪的實驗結果比較，可發現二維擬暫態低估扭矩輸出，這應與此種模擬方式忽略了流體的慣性有關。二維全暫態的計算則高估了扭矩的輸出，而三維全暫態的計算與實驗結果相當吻合。從流場中可發現，自風機後緣流出的氣流，在二維全暫態計算中形成一週期性變化的渦流，此渦流逐漸往下游逸散，三維計算中則呈現一穩定的流場，這表示在三維模擬中，風輪上下方的流場有穩定風機尾流的效果，此三維效應是二維模擬無法反應的。此外，結果亦顯示，將葉輪堆疊而成的多層風機，較之同高度的單層風機具有稍高的輸出功率，其增量並不明顯，但扭矩隨時間的變化則隨風機層數的增加而較為平順，因此對於穩定風機旋轉有相當大的助益。

中文關鍵詞： 再生能源，風能發電，垂直式風機，數值模擬，扭矩量測

英文摘要：

英文關鍵詞： renewable energy, wind power, vertical axis wind turbine, numerical simulation, torque measurements

垂直軸式層狀型風力發電系統之研製---子計畫一：

垂直軸式層狀風力發電機氣動力設計與實驗之研究(II)

計劃編號：NSC 100-2623-E-009-002-ET

執行期限：100 年 1 月 1 日至 101 年 3 月 31 日

主持人：崔燕勇 國立交通大學機械系教授

摘要

本計畫係針對一結合升力型與阻力型風機特性的新型式垂直風機進行氣動力、性能與流場結構的研究。此種風機之葉輪具有三個 S 型葉片與兩個翼形葉片，並可將數個葉輪堆疊進而得到較佳的性能。為瞭解其氣動力特性，利用計算流體力學進行數值模擬，數值方法採用有限體積法，並利用移動網格處理風機葉片的旋轉，搭配 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模式進行暫態模擬。除數值模擬外，另進行實驗予以驗證模擬之準確性。

前期計畫的計算係假設風機在某轉速下、固定在數個特定旋轉角度，進行擬暫態的二維模擬，此可視為一種定性分析。而本期計畫進行的是全暫態的二維與三維計算。結果顯示全暫態分析的預測在定性上與擬暫態的結果相近，其扭矩係數與風機葉尖速度比呈線性遞減關係，而功率係數則與葉尖速度比呈二次式關係。與單層葉輪的實驗結果比較，可發現二維擬暫態低估扭矩輸出，這應與此種模擬方式忽略了流體的慣性有關。二維全暫態的計算則高估了扭矩的輸出，而三維全暫態的計算與實驗結果相當吻合。從流場中可發現，自風機後緣流出的氣流，在二維全暫態計算中形成一週期性變化的渦流，此渦流逐漸往下游逸散，三維計算中則呈現一穩定的流場，這表示在三維模擬中，風輪上下方的流場有穩定風機尾流的效果，此三維效應是二維模擬無法反應的。此外，結果亦顯示，將葉輪堆疊而成的多層風機，較之同高度的單層風機具有稍高的輸出功率，其增量並不明顯，但扭矩隨時間的變化則隨風機層數的增加而較為平順，因此對於穩定風機旋轉有相當大的助益。

關鍵字：再生能源，風能發電，垂直式風機，數值模擬，扭矩量測

Abstract

A new vertical-axis wind turbine which combines the merits of the lift type and drag type wind turbines is studied in this project. It consist of three S-type and two airfoil-type turbine blades. Several stages of these turbine blades can be stacked together to achieve better performance. The aerodynamic characteristics and performance are investigated by using computational fluid dynamics. The numerical

scheme is based on the finite volume method. The moving-mesh technique is adopted to tackle the rotation of the turbine wheel. With use of the RNG $k-\varepsilon$ model to characterize turbulence, fully unsteady calculations are undertaken. Experiments are also conducted to assess the accuracy of the numerical simulation.

In the last project, the wind turbine, rotating at certain speeds, was fixed at some specified angular positions in the simulation and the flow was assumed to be two-dimensional and quasi-unsteady. This kind of calculation only provides a qualitative analysis. In the present study, fully unsteady, two-dimensional and three-dimensional calculations are conducted. It is shown that after non-dimensionalization, the resulting moment coefficient is a linearly decreasing function of the tip speed ratio and the power coefficient becomes a quadratic function of the tip speed ratio. These relationships are similar to those obtained in the last project. Comparison with experimental measurements for the one-stage wind turbine indicates that the torques and powers are under-predicted by the 2-D quasi-unsteady calculations, which can be attributed to the ignoring of the flow inertia in this kind of simulation. In contrast, the torques and powers are over-predicted by the 2-D fully unsteady calculations. Good agreement with experiments is obtained by the 3-D fully unsteady simulation. It can be detected from the flow field that after the flow passing the turbine, a periodic shedding vortex is formed in 2-D unsteady calculations while a relatively steady flow is observed in 3-D calculations. This implies that the flows beyond the upper and lower sides of the wind turbine have an effect of stabilizing the flow in the near wake of the turbine. This 3-D effect cannot be accounted for in 2-D calculations.

Comparing with the single-stage wind turbine, only slightly higher power performance can be obtained by stacking several stages of turbines together. However, the variation of the torque with respect to time becomes smoother as the number of stages increase. This character helps stabilize operation of the wind turbine.

Keywords: renewable energy, wind power, vertical axis wind turbine, numerical simulation, torque measurements

1. 前言

風能來自於太陽能，雖由太陽輻射能轉換成風能的比例極低，但估算全球風能總量相當是全球總發電量的 8 倍，約為地表可開發之水能資源的 10 倍，而目前已開發的僅是其中一小部份，若 1% 的風能可供利用，則可減少全球 3% 的能源消耗，產生全球 8~9% 的總發電量[1]。

要有效的將風能轉換為機械能，風機葉片的設計式其中一個關鍵，風機葉片依空氣作用力的方式分為升力式與阻力式兩種，升力式風機的葉片截面為類似機翼之流線型，當氣體流經葉片表面時，因兩翼面間的壓差而產生升力，進而產生

力矩，使風機轉動，而一典型的阻力型風機葉片成 S 型，當氣流衝擊葉片時，因形狀差異產生不同的壓力差，而產生力矩。

風機又依旋轉軸的方向分為水平軸與垂直軸兩種。其中以水平軸升力式風機具有較佳的效率，而垂直軸風機的優點在於設計簡單，可將機械變速系統及發電機系統至於地面，且不需如水平風機一般，隨風吹方向調整角度以求正對風向。

本計畫所討論的改良式垂直風機系統，如圖一所示，每一風輪具有三個彎曲的 S 型葉片與兩個翼形葉片，若僅考慮 S 型葉片，則類似阻力型風機，但又包含翼形葉片，因此兼具升力型與阻力型風機的特性。

一般風機氣動特性研究需使用大型風洞進行實驗[2, 3]，但這在一般學術機構難以達成，因此本計畫主要採用計算流體力學(CFD)進行研究，並輔以簡易實驗，藉以驗證數值計算的準確性。

2. 研究方法

2.1 數值方法

針對風輪的旋轉採用移動網格加以處理，風輪掃過的區域以定速旋轉，外圍區域則是靜止不動。紊流模型則使用 RNG $k-\varepsilon$ model，求解二維與三維暫態流場。則其統御方程式可表示如下：

連續方程式

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_{\partial V} \rho (\bar{u} - \bar{u}_g) \cdot d\bar{A} = 0$$

動量方程式

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \bar{u} dV + \int_{\partial V} \rho \bar{u} (\bar{u} - \bar{u}_g) \cdot d\bar{A} = \int \Gamma \nabla \bar{u} \cdot d\bar{A}$$

其中， $\bar{u}_g$ 為網格移動速度，於旋轉區域內由給定的角速度 $\bar{\omega}$ 決定，旋轉區域外網格速度設為零。

渦流黏滯模式(eddy viscosity model)中，其紊流黏滯係數可由紊流動能(turbulent kinetic energy) k 及紊流消散速率(turbulence dissipation rate) ε 來決定，此二紊流性質的輸送方程式由可適用於低雷諾數的 RNG $k-\varepsilon$ 模式表示。

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho k + \nabla \cdot (\rho \vec{v}_t k) = \nabla \cdot \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right] + P - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \varepsilon + \nabla \cdot (\rho \vec{v}_t \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

其中 P 代表紊流產生項：

$$P = \mu_t \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial V_i}{\partial x_j}$$

ε 輸送方程式中的係數 $C_{2\varepsilon}^*$ ：

$$C_{2\varepsilon}^* \equiv C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right)}{1 + \beta \eta^3}$$

對上述統御方程式採用有限體積法離散，並利用非結構性網格的技巧使之能應用於複雜幾何外型的流場。在連續方程式、動量方程式及紊流方程式間的耦合採用 SIMPLE 法則。在一個時步中疊代到收斂或疊代次數超過設定值，再進到下一個時步。計算係利用 ANSYS™ 的 FLUENT™ 進行。

2.2 實驗方法

風機效能實驗分為兩種，簡易示意圖可見附圖二。兩種實驗方法大致相同，皆使用一大型工業風扇作為風源，其差異在於方法一(附圖二 A)在作為風源的風扇與風輪間放置一由蜂巢結構構成之風管，使風輪迎風面上的風速分佈較為均勻，而方法二，如附圖二 B 所示，則是取消該風管的設置，使風輪迎風面上的平均風速較大，除了風管的有無外，並與不同的風源與風輪間距離(0.6, 0.7, 0.8m)進行搭配，使在相似風速分佈情況下產生不同的入口風速。

風速分佈係利用風速計量測風輪迎風面上等間距格點的各點風速，將此風速分佈加以平均則求得風輪的平均入口風。

風機旋轉軸連接至一扭力計，再連接到一發電機，利用改變可變電阻施加於發電機的負載使風機轉速隨之產生變化，並利用轉速計量測風機旋轉速度，扭力計所測得的扭力值則藉由訊號擷取卡輸出。

3. 結果與討論

考慮的風機如圖一所示，有單階與多階之分，每一葉輪包含三個 S 型葉片與兩個翼形葉片，二維的流場計算範圍如圖三 A 所示，左側假設為一流速為 U_0 的均勻流入口，右側則假設為出口，上下設為對稱邊界。圖三 B 則為在三維流場在風輪高度方向延伸的示意圖，邊界條件與二維流場類似。

3.1. 單階葉輪風機

首先考慮只具有單階葉輪的風機，風輪高度(H)為 1m，半徑(R)為 0.5m，計算範圍的 L 為 100 倍風輪半徑，L'則為 L 的一半。以下主要針對網格數約為 56 萬的三維全暫態模擬進行討論，網格示意圖見圖四。

(1) 流場結構

圖五為在入口風速 $U_0 = 8 \text{ m/s}$ ，風機轉速 $N = 120 \text{ rpm}$ 的情況下的扭矩係數 (Moment coefficient, C_m)與時間之關係圖， C_m 定義如下：

$$C_m = \frac{\tau}{\frac{1}{2} \rho U_0^2 A R}$$

其中 τ 代表風機產生之扭矩(n-m)，A 代表風機受風面積(m^2)，R 則是風機半徑(m)。每週期平均為針對每一週期(0.5 秒)的 C_m 個別平均，自第五秒末累計平均則是從第五秒末(第 10 個週期)起，對 C_m 值累計平均。

圖六則為該條件下 10 到 10.5 秒間當 C_m 為極值時風輪中央平面的流線圖，從圖中可發現風輪中心部份的流體隨著風輪以順時針方向旋轉，自左上緣流入風輪內的流體則在右側下方流出，並與流過風輪下方的流體混和，進而形成小渦流，在整個週期中，此流場結構並不隨著葉片位置改變而有太大的變化。

(2) 風機轉速 N 對扭矩的影響

圖七為入口風速 $U_0 = 8, 16 \text{ m/s}$ ，風機轉速 $N = 15, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 \text{ rpm}$ 的條件下所產生的扭矩與風機轉速關係圖，由此圖可知不論入口風速為何，扭矩與轉速幾乎呈一線性遞減關係。此外，在入口風速 $U_0 = 8 \text{ m/s}$ ，風機轉速 N 約為 120 rpm 時，扭矩近乎為零，這代表在入口風速 $U_0 = 8 \text{ m/s}$ 時，此風機的自由旋轉速度約為 120 rpm 。

(3) 入口風速 U_0 對扭矩的影響

圖八為風機轉速 $N = 60, 120 \text{ rpm}$ ，入口風速 $U_0 = 4, 8, 12, 16, 18, 20 \text{ m/s}$ 時的扭矩與入口風速的關係圖，由圖中可以發現在入口風速較小時，以風機轉速 $N = 60 \text{ rpm}$ 的情況為例，約是入口風速 $U_0 < 16 \text{ m/s}$ ，扭矩隨入口風速而增加，但增量隨之減少，且當 $U_0 > 16 \text{ m/s}$ ，當入口風速增加時，扭矩反隨之下降，之後將證明兩者呈二次關係。

(4) 風輪半徑 R 對扭矩的影響

圖九為入口風速 $U_0 = 8 \text{ m/s}$ ，風機轉速 $N = 90, 120 \text{ rpm}$ ，風輪半徑為 $0.25, 0.5, 0.75, 1 \text{ m}$ 的條件下所產生的扭矩與風輪半徑關係圖，觀察此圖可發現，在風輪半徑大於等於 0.5 m 的情況下，隨著風輪半徑增加，扭矩值隨之下降，但兩者間並不呈線性關係，之後將證明兩者呈三次式關係。

(5) 平均扭矩係數 $\overline{C_m}$ 與葉尖速度比 TSR 間的關係

葉尖速度速度比(Tip Speed Ratio, TSR)為討論風機性能所需的一個重要無因次參數，定義為葉片尖端速度與入口風速的比值：

$$TSR = \frac{2\pi R N / 60}{U_0}$$

將扭矩與風機轉速及入口風速的關係無因次化可得無因次化的平均扭矩係數

$\overline{C_m}$ 與葉尖速度比 TSR 的關係，如圖十，由此圖可發現兩者呈一線性遞減關係：

$$\overline{C_m} = -aTSR + b$$

上式中的 a, b 皆為正值，三維模擬的結果可得 $a = 0.572$ ， $b = 0.513$ ，若將 $\overline{C_m}$ 與 TSR 的定義帶入，則可得有因次參數間的關係：

$$\tau = -\frac{a\pi}{60} \rho U_0^2 A R^2 N + \frac{b}{2} \rho U_0^2 A R$$

風機受風面積 $A = 2RH$ ， H 為風機高度，因此上式又可改寫為：

$$\tau = -\frac{a\pi}{30} \rho U_0 R^3 H N + b \rho U_0^2 R^2 H$$

由上式可證明前述現象：扭矩與風機轉速呈線性遞減關係、入口風速呈二次式關係、與風輪半徑呈三次式關係。

(6) 功率係數 C_p 與葉尖速度比 TSR 間的關係

功率係數(Power coefficient, C_p)為評估風機效能所需的一個重要無因次參數，定義如下：

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U_0^3 A}$$

P 代表風機之功率， $P = \tau \omega$ ， $\omega = 2\pi/60 N$ ，也就是風機的角速度，比較 C_m 與 C_p 的定義可得兩者的關係：

$$C_p = C_m \cdot TSR$$

將 $\overline{C_m}$ 與 TSR 的關係帶入上式便可得 C_p 與 TSR 的關係式：

$$C_p = -a \cdot (TSR)^2 + b \cdot TSR$$

由上式可知 C_p 與 TSR 呈二次式關係(見圖十一)，故存在一使 C_p 發生最大值的最佳 TSR 值：

$$TSR|_{optimum} = \frac{b}{2a}$$

此時的 C_p 最大值為：

$$C_p|_{MAX} = \frac{b^2}{4a}$$

將由模擬結果所得之 a 與 b 值帶入以上二式，便可得到最佳 $TSR = 0.448$ ，最大 C_p 值為 0.115。

(7) 二維與三維暫態模擬的比較

為評估有限風輪高度對模擬的影響，另進行二維計算，其網格(8040)與三維計算中單一平面所使用的相同。

圖十二為二維暫態模擬在 23 到 23.5 秒間的流線圖，與前面三維暫態模擬(圖六)的結果比較，可發現有很大的差異，圖六中流體自葉輪流出後與流經葉輪下方外圍的氣流匯合，呈一近似穩態的流場。而圖十二中可看出氣流自葉輪後方流出後即刻形成渦流，此渦流隨著氣流往下游逸散，整體而言，呈現一週期性的非穩態結構。此二者間的差異性可能歸因於在實際三維流場中，風機上下外圍的氣流較為穩定，因而壓抑近風機之不穩定渦流的形成，而在二維流場中，因無此機制，因此呈現不穩的週期性型態。

圖十三則為兩者在入口風速 $U_0 = 8\text{m/s}$ ，轉速 $N = 120\text{rpm}$ 條件下單一週期之 C_m 與時間關係圖，由圖中可以發現兩者皆與 $\sin$ 函數有類似的趨勢，但極值的

大小與出現時間有些許的不同，而二維模擬所觀察到的較不穩定流場有利於較高極值，此外，二維模擬結果在 C_m 上升至快接近零時出現一小段持平的現象，此現象在三維模擬的結果中並沒有出現，因此推論這些不同點可能是二維模擬無法完全反應實際是三維的流場性質所致。

圖十四為二維與三維的扭矩係數 C_m 與 TSR 的關係比較，將 C_m 轉換為 C_p 則可得圖十五。由圖十四可發現，不論是二維或三維， C_m 與 TSR 呈現一線性遞減關係，且不論 TSR 為多少，二維計算所得的 C_m 均較三維的高，此現象與圖十三單一週期的結果相似，可能同樣是由於二維模擬無法完全反應三維流場性質有關，因此二維模擬所計算出的 C_m 值較相同 TSR 下的三維計算結果為高。

(8) 模擬與實驗結果的比較

使用風源為 0.5HP 的工業風扇，量測條件共有四組，兩組不含風管，風扇與風源距離分別為 0.6 與 0.7 公尺(0.5HP 0.6m、0.5HP 0.7m)，另外兩組則是包含風管，風扇與風源間的距離為 0.7 與 0.8 公尺(0.5HP+風管 0.7m、0.5HP+風管 0.8m)。

量測風速的平面為包含風輪與風源的最近點，與風管平行的平面，以風輪為基準，由水平方向距風輪左側外緣 10 公分，垂直方向距風輪下緣 7 公分處作為起始點，接著在水平與垂直方向以 10 公分為單位取點，水平方向共取 13 個點，垂直方向則取 5 個點，共取 65 個取樣點，如圖十六，對各個取樣點分別量取風速，便可得到入口風速分佈，圖十七即為 0.5HP 風扇在距離風機 0.7 公尺(0.5HP 0.7m)條件下的風速分佈圖。由於採用取樣方式量測風速，因此平均風速設為所有量測點的風速平均，以上四種實驗條件之平均風速見表一。

	0.5HP 0.6m	0.5HP 0.7m	0.5HP+風管 0.7m	0.5HP+風管 0.8m
入口風速 U_0 m/s	4.9	4.4	3.2	3.0

表一 不同實驗條件之平均入口風速

圖十八為將以上五種實驗方法所測得的扭矩與轉速無因次化後所得的 C_m 與 TSR 的關係圖，再將 C_m 轉換為 C_p 則可得到 C_p 與 TSR 之關係圖(圖十九)，同時包括前面所提的二維及三維全暫態模擬以及前期計畫中二維擬暫態的結果。由圖中可發現二維擬暫態的結果較實驗值低，可歸因於此種模擬忽略了風機慣性影響，二維全暫態模擬則高估了輸出扭矩，應與二維模擬無法完全表現三維流場現象所致，而三維全暫態的計算結果與實驗最為接近。

3.2. 多層葉輪風機

除了以上的單層風機，亦考慮二層、三層及四層風機，且不論風機層數多寡，總高度皆與單層風機相同，同為一公尺，個別階層的高度亦相同，各階層角度差總和 180 度，且與相鄰階層的角度差值為定值，對於二層風機其角度差為 90 度，三層風機為 60 度，四層風機則為 45 度。

圖二十、二十一與二十二為入口風速 8 m/s，風機轉速 60 rpm 下的二層、三層與四層風機在 9 到 10 秒的各層與總和之扭矩與時間關係圖。觀察圖二十可發現，對二層風機而言，其個別階層的葉輪所產生的扭力曲線相當相似，只是有

180 度的相位差，值得一提的是，由於每一層風輪中葉片的安排具有幾何上的對稱性，因此其扭力曲線的週期只有風機旋轉週期的一半。

而由圖二十一與圖二十二可發現，此一個別階層葉輪之扭矩與時間關係曲線的相位差關係亦存在於三層與四層風機，值得一提的是，其中間層的葉輪(即三層風機的第二階及四層風機的第二與第三階) 較外側兩層有稍高的扭力峰值。

圖二十三 A 為與前述的一層、二層、三層與四層風機在 9 到 10 秒的總和扭矩與時間關係比較圖，比較一到四層風機的結果可以發現，其振幅隨層數增加而減少，也就是風機轉動更加平順，但比較三層與四層風機(圖二十三 B)，扭矩變化的差異已不明顯，因此三層應已能得到平順的扭矩曲線。

圖二十四為單層與多層風機的 C_m -TSR 比較圖，從圖中可以發現，與單層風機相似，多層風機的 C_m 與 TSR 亦呈線性關係，且在相同 TSR 值下，不論風機層數如何，其 C_m 值之變化不大。圖二十五則為單層與多層風機的 C_p -TSR 比較圖，圖中亦可發現，多層風機與單層風機之變化曲線相當類似，且數值上的變化也相當的小，這應與不論單層或多層風機的總受風面積並沒有改變，因此同一 TSR 下的單層與多層風機之 C_p 並沒有明顯變化，但隨著層數改變 C_p 值仍略有變化，層數與最大 C_p 值的比較見表二。

	1-stage	2-stage	3-stage	4-stage
$C_{p _{MAX}}$	0.115	0.131	0.131	0.136
$TSR _{optimum}$	0.448	0.462	0.475	0.491

表二 不同層數風機的最大 C_p 值與最佳 TSR 值

從表二可以發現，對與此四種風機配置， C_p 極值最大的是四層風機，最小的是單層風機，但兩者的 C_p 極值差值僅為 0.021，且最佳 TSR 值也只相差 0.043，對於效能提昇並沒有顯著的效果，且由於最佳 TSR 值的差異也不明顯，對於改變操作條件亦沒有明顯的幫助，但多層風機之總和扭矩曲線的振幅較單層風機明顯較小，因此對於改善風機旋轉的穩定度有相當大的助益。

4. 結論

在本計畫中我們利用計算流體力學探討一新型式垂直風機的特性與性能，並利用實驗量測的結果證實三維全暫態的計算條件下數值模擬能準確的預測，二維的擬暫態與全暫態模擬雖不能準確的預測風機性能，但可在較短的時間內進行定性的分析，仍有其價值存在。

由結果可看出，不論單階或多階風輪，此風輪的平均扭矩係數 C_m 與葉尖速度比 TSR 皆呈一線性遞減關係，而其功率係數 C_p 則與 TSR 呈一二次式關係，而有因次參數方面，扭矩與風機轉速呈線性遞減關係，與入口風速呈二次式關係，與風輪半徑呈三次式關係。

比較二維與三維全暫態計算所得的流場可以發現，二維計算中，在風輪後方的尾流呈一不穩定並向下游逸散的型態，但在三維計算中則為一相對較穩定的型態，這顯示在實際三維的流場中，其風輪上下外側的流場有助於其尾流的穩定性。

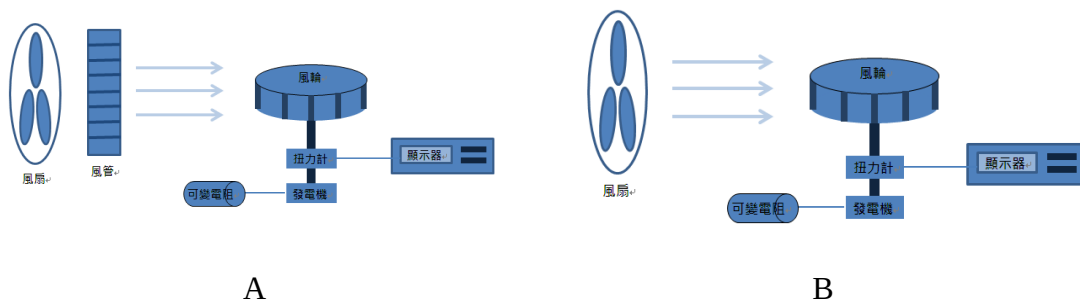
而對於單階與多階風輪，由於其受風面積相同，因此多階風機的性能雖有提昇，但改善幅度有限，不過由於多層風機之總和扭矩曲線振幅較單層風機明顯較小，有助於改善風機旋轉的穩定度。

References

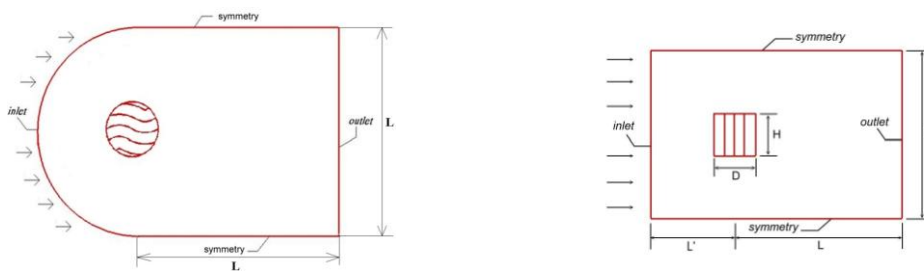
1. 馬振基。風能與風力發電技術，台北市，五南出版公司，2009, 10。
2. Simms D, Schreck S, Hand M, Fingersh LJ. NREL unsteady aerodynamics experiment in the NASA Ames wind tunnel: a comparison of predictions to measurements. NREL/TP-500-29494. NREL, Golden, Co, 2001.
3. Ebert PR, Wood DH. The near wake of a model horizontal-axis wind turbine-I. experimental arrangements and initial results. Renewable Energy 1997;12:225-243
4. 崔燕勇。垂直軸式層狀型風力發電系統之研製子計畫一：垂直軸式層狀風力發電機氣動力設計與性能監測之研究國科會計劃編號：NSC 99-2623-E-009-009-ET，2010。



圖一 改良式垂直風機



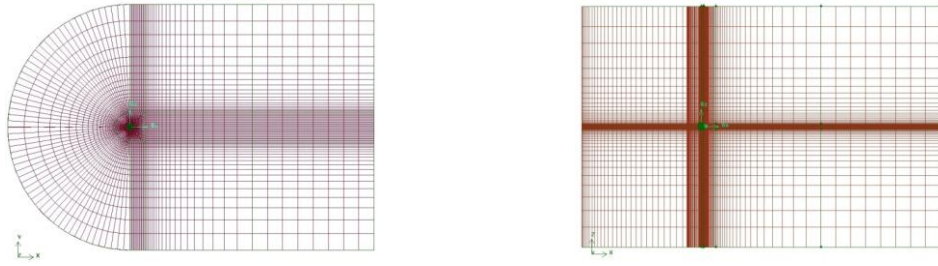
圖二 實驗配置示意圖



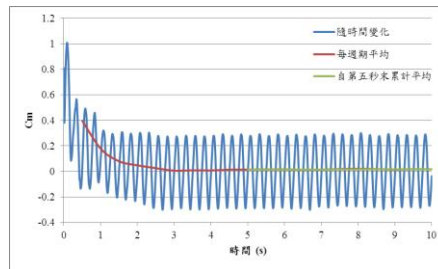
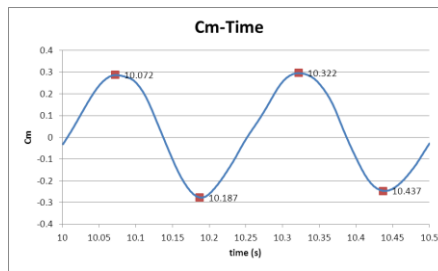
A

B

圖三 流場計算範圍示意圖



圖四 計算網格示意圖

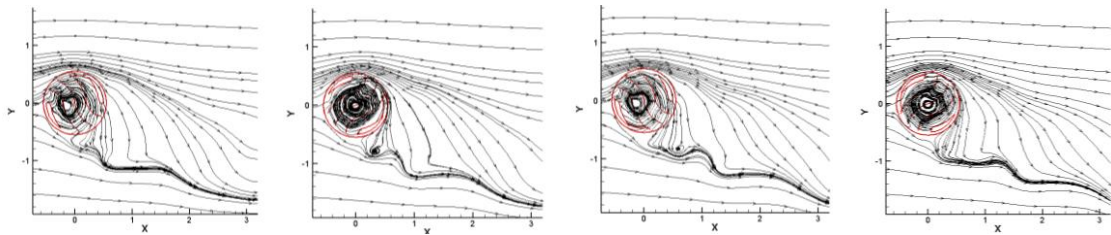
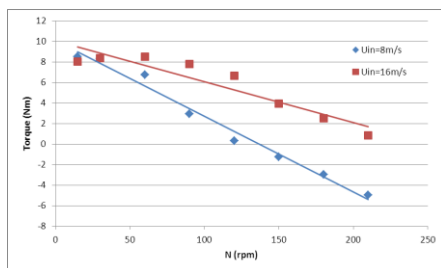
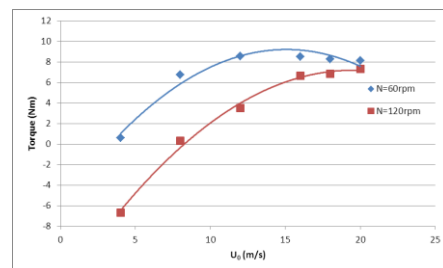
圖五 $U_0 = 8 \text{ m/s}$, $N = 120 \text{ rpm}$, C_m 與時間關係圖

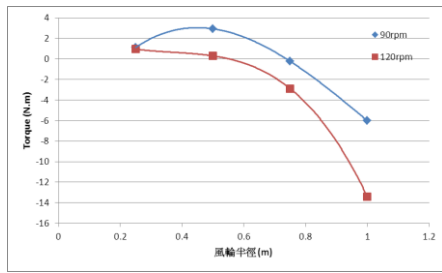
10.072s

10.187s

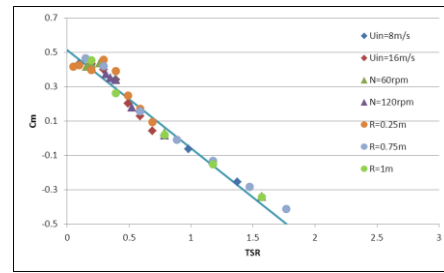
10.322s

10.437s

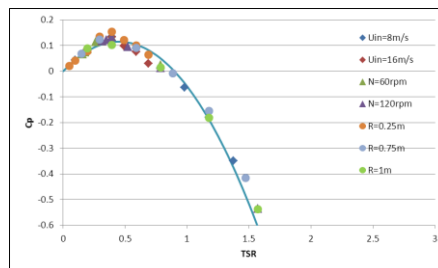
圖六 在 10~10.5 秒， C_m 為極值時的風輪中央流線圖圖七 入口風速 $U_0 = 8, 16 \text{ m/s}$ 時，扭矩與風機轉速 N 之關係圖圖八 風機轉速 $N = 60, 120 \text{ rpm}$ 時，扭矩與入口風速 U_0 之關係圖



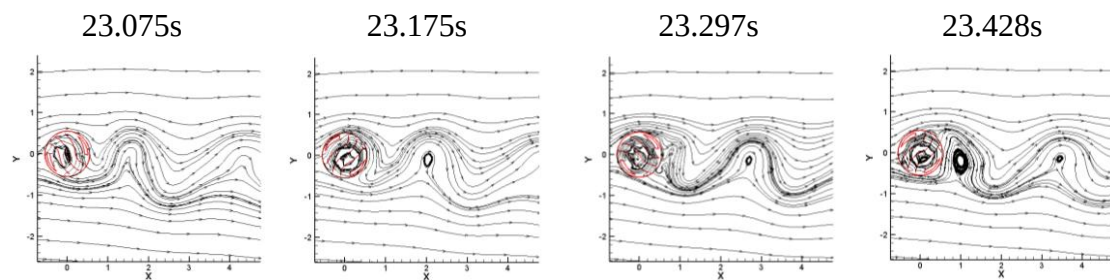
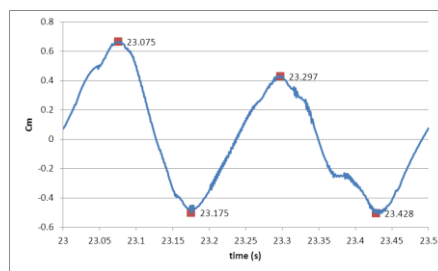
圖九 入口風速 $U_0 = 8 \text{ m/s}$ ，風機轉速 $N = 90, 120 \text{ rpm}$ 時，扭矩與風機轉速 N 之關係圖



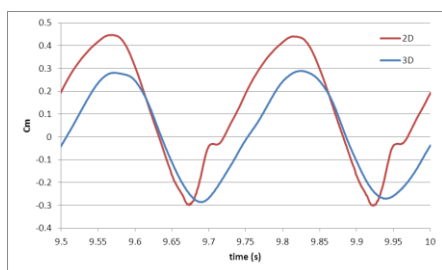
圖十 單階風機之 $\bar{C}_m$ 與 TSR 關係圖



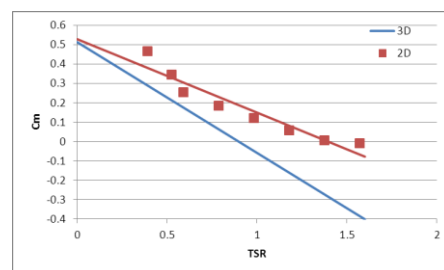
圖十一 單階風機之 C_p 與 TSR 關係圖



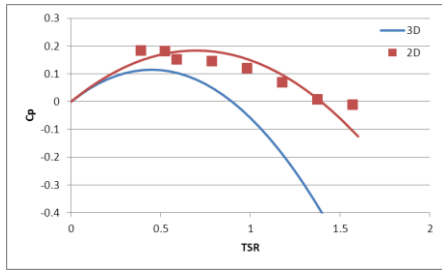
圖十二 在 23~23.5 秒， C_m 為極值時二維的流線圖



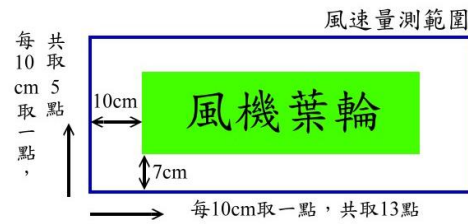
圖十三 三維與二維模擬在入口風速 $U_0 = 8 \text{ m/s}$ ，轉速 $N = 120 \text{ rpm}$ 下單一週期之 C_m 與時間關係圖



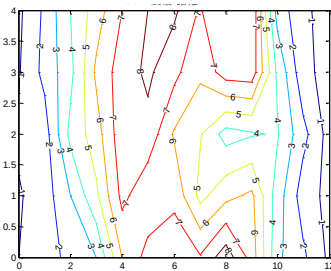
圖十四 三維與二維模擬結果的 C_m -TSR 關係圖



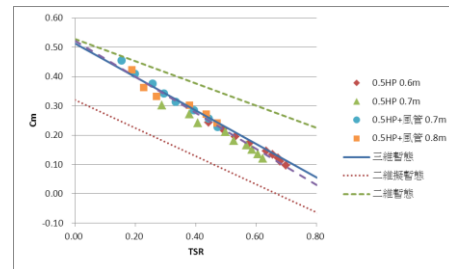
圖十五 三維與二維模擬結果的
Cp-TSR 關係圖



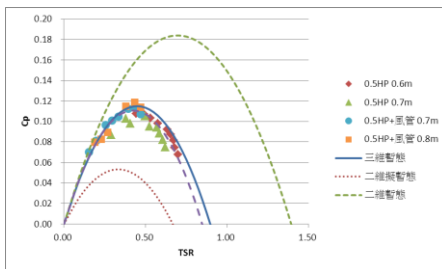
圖十六 風速量測示意圖



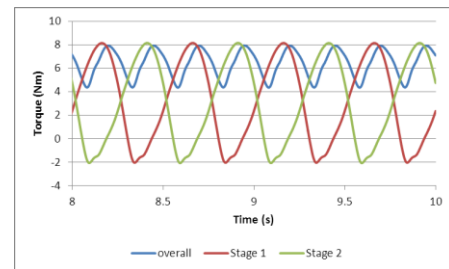
圖十七 風扇距離風機 0.7 公尺情況下
的等風速線圖



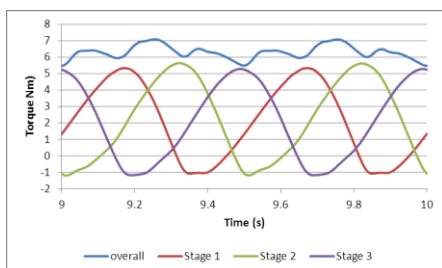
圖十八 模擬與實驗之 Cm-TSR 比較圖



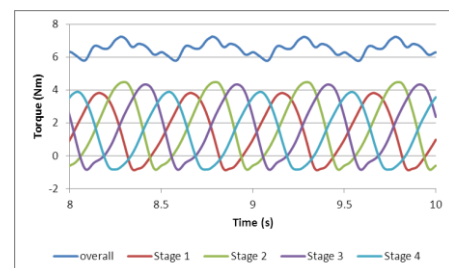
圖十九 模擬與實驗之 Cp-TSR 比較圖



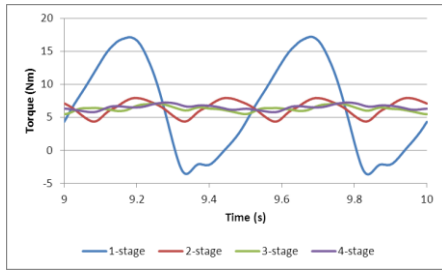
圖二十 二層風機在轉速 $N = 60 \text{ rpm}$ ，入口風速 $U_0 = 8 \text{ m/s}$ 的扭矩與時間關係



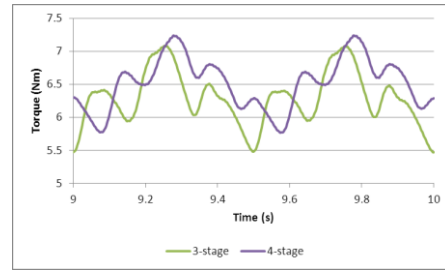
圖二十一 三層風機在轉速
 $N = 60 \text{ rpm}$ ，入口風速 $U_0 = 8 \text{ m/s}$ 的扭
矩與時間關係



圖二十二 四層風機在轉速
 $N = 60 \text{ rpm}$ ，入口風速 $U_0 = 8 \text{ m/s}$ 的扭
矩與時間關係

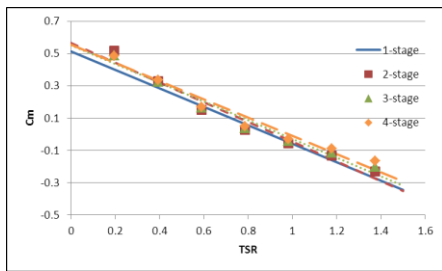


A

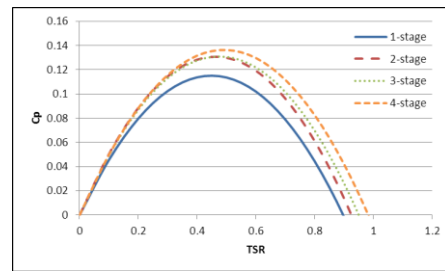


B

圖二十三 不同層數風機在轉速 $N = 60 \text{ rpm}$ ，入口風速 $U_0 = 8 \text{ m/s}$ 的總和扭矩與時間關係比較



圖二十四 單層與多層風機的 C_m -TSR 比較圖



圖二十五 單層與多層風機的 C_p -TSR 比較圖

無研發成果推廣資料

100 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：崔燕勇			計畫編號：100-2623-E-009-002-ET				
計畫名稱：垂直軸式層狀型風力發電系統之研製--子計畫一：垂直軸式層狀風力發電機氣動力設計與實驗之研究(II)							
成果項目			量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）
			實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數(含實際已達成數)	本計畫實際貢獻百分比		
國內	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（本國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		
國外	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%	章/本	
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（外國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		

其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)	無
---	---

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科 教 處 計 畫 加 填 項 目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與（閱聽）人數	0	

國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

☒ 達成目標

☐ 未達成目標（請說明，以 100 字為限）

☐ 實驗失敗

☐ 因故實驗中斷

☐ 其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文：☐ 已發表 ☒ 未發表之文稿 ☐ 撰寫中 ☐ 無

專利：☐ 已獲得 ☐ 申請中 ☒ 無

技轉：☐ 已技轉 ☐ 洽談中 ☒ 無

其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

本計畫係針對一結合升力型與阻力型風機特性的新型式垂直風機進行氣動力、性能與流場結構的研究。此種風機之葉輪具有三個 S 型葉片與兩個翼形葉片，並可將數個葉輪堆疊進而得到較佳的性能。為瞭解其氣動力特性，利用計算流體力學進行數值模擬，數值方法採用有限體積法，並利用移動網格處理風機葉片的旋轉，搭配 RNG 紊流模式進行暫態模擬。除數值模擬外，另進行實驗予以驗證模擬之準確性。

前期計畫的計算係假設風機在某轉速下、固定在數個特定旋轉角度，進行擬暫態的二維模擬，此可視為一種定性分析。而本期計畫進行的是全暫態的二維與三維計算。結果顯示全暫態分析的預測在定性上與擬暫態的結果相近，其扭矩係數與風機葉尖速度比呈線性遞減關係，而功率係數則與葉尖速度比呈二次式關係。與單層葉輪的實驗結果比較，可發現二維擬暫態低估扭矩輸出，這應與此種模擬方式忽略了流體的慣性有關。二維全暫態的計算則高估了扭矩的輸出，而三維全暫態的計算與實驗結果相當吻合。從流場中可發現，自風機後緣流出的氣流，在二維全暫態計算中形成一週期性變化的渦流，此渦流逐漸往下游逸散，三維計算中則呈現一穩定的流場，這表示在三維模擬中，風輪上下方的流場有穩定風機尾流的效果，此三維效應是二維模擬無法反應的。此外，結果亦顯示，將葉輪堆疊而成的多層風機，較之同高度的單層風機具有稍高的輸出功率，其增量並不明顯，但扭矩隨時間的變化則隨風機層數的增加而較為平順，因此對於穩定風機旋轉有相當大的助益。