

## 風力發電機結構受風之 CFD 模擬

張正興<sup>1\*</sup> 劉宗憲<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>淡江大學土木工程學系 教授

<sup>2</sup>淡江大學土木工程學系 研究生

### 摘要

本文主要是在探討計算流體力學 (CFD) 應用於風力發電機結構受風影響。在相同的邊界條件下，藉由比較風力發電機縮尺模型，在數值模擬和風洞試驗中所得的基底剪力和彎矩來找出一套較適合的參數設定，以預測實場的狀況。將風洞試驗裡的邊界條件，套用到數值模擬的設定中，將兩者以相同條件下得到的結果互相比較。經過反覆測試後，將模擬值與試驗值的誤差降至最低。再將此套數值模擬的參數設定，依照相似性的原理縮放，模擬實際尺寸的風力發電機，以便對實場的預測。

本研究在數值模擬中，透過不同的紊流模式，以滑動網格技術和動態網格技術進行模擬和探討。雖然文獻提到，滑動網格技術可應用在物體旋轉的模擬中，但其模擬的方式是利用分界面上，網格節點與節點之間的連結，進行數值的交互傳遞。而動態網格技術模擬的方式，是透過網格隨著物體移動的情形，進而將計算域整體的網格進行改變或重繪。所以利用動態網格技術模擬，應更能表現實際狀況。

結果顯示，利用動態網格技術和滑動網格技術的模擬下，動態網格技術所得到的數據較為趨近於試驗值。而在紊流模式為 k-e RNG model，使用動態網格技術模擬得到的結果中，My 的誤差值較大，約為 76.5%。但是在 Fx 的誤差值較小，約為 1.08%。由此可知，以數值模擬分析風力發電機受力的情形，使用動態網格技術會比滑動網格技術更為理想。而實場預測的部份，將模擬的結果以相似性的原理縮小，最後再和縮尺模擬的結果比較。可以得到，Fx 的誤差約為 15%，而 My 的誤差約為 13.5%。

**關鍵字:** 計算流體力學、風力發電機、動態網格、滑動網格

### 一、前言

臺灣是海島型國家，全年季風盛行，但因為缺乏石化能源，且全球能源危機的影響與環保意識的抬頭。近幾年來，再生能源逐漸開始受到全世界重視，也因為使用風力發電，所帶來的經濟效益遠比其他再生能源來的多。基於永續發展的理念，如何利用取之不盡的風力能源，是目前各國面臨的重要課題。雖然，風力發電機的建置對環境的衝擊，遠比傳統的發電（如火力發電、水力發電等）所帶來的問題還小。而且許多國家也開始大量的設置風力發電機，儘管廠商對風力發電機外型結構設計做過謹慎的分析，但外力

來源的評估方式，仍然沒有固定的評估流程。

現今風場的研究中，因為實場量測面臨許多的不便與困難，所以多數使用風洞試驗作為研究主軸。但是，目前以風洞模擬風力發電機時，所面臨的問題就是物理縮尺的滿足。希望能夠透過數值模擬和風洞試驗的相互比較，藉此探討出一套較適合的數值模擬設定，應用在預測實場的狀況。如此一來，即可利用數值模擬所帶來的便利性，減少風洞試驗和實場量測所耗費的資源。

在實際的應用上，(一)當風速大於啟動風速後，風力發電機便會開始啟動運轉；(二)當風速到達額定風速時，風力發電機便會以一個固定的電量輸出；(三)最後，當風速超過停機風速時，為了避免風速過大，而導致扇葉和發電機的損壞，此時風力發電機即會停止運轉。朱佳仁教授在”風工程概論” [1]裡提到非常多與風力發電機相關的分類和介紹。

## 二、風洞試驗

風洞試驗在目前學術研究的方面頗具公信力，因為風洞有良好的控制性，且可以重複測試，故可以解決許多有關風工程方面的問題。本試驗主要探討的是風力發電機縮尺模型受到風力的影響後，透過力平衡儀測量模型受到風力影響，因而在底部所產生的剪力和彎矩的情形。而所使用的是淡江大學大氣邊界層一號風洞試驗室，此風洞是屬於開放吸入式風洞。總長約 17 公尺、寬 2 公尺、高 1.5 公尺。動力系統則採用軸流式風車，試驗風速可透過控制風扇的轉速所調整。將空氣吸入由整流段經過收縮段，然後再進入實驗段，最後再經由風扇將空氣排出。

### 2.1 邊界層模擬

本研究則是使用無任何地況之空風洞作為試驗。目的是為了模擬一個平滑流場。然而，由於發展段的長度太長，氣流的黏滯力導致邊界層的形成，以至於在這種情況下，無法模擬真正的平滑流場，所以進而使用熱膜探針量測風速剖面 and 紊流強度且紊流強度約在 10% 以下，如圖一。

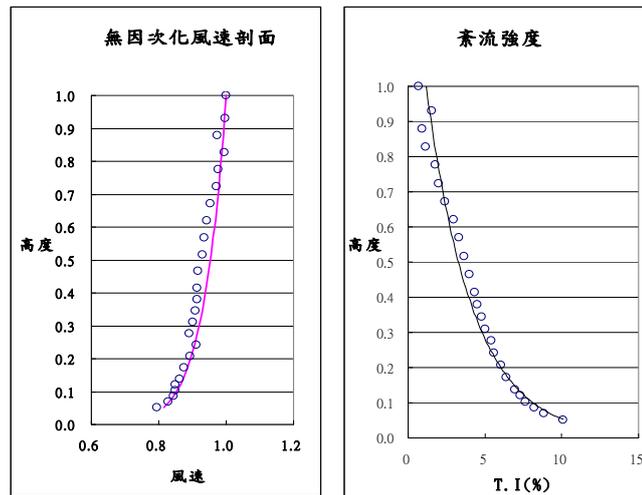
### 2.2 風力發電機之縮尺模型

本試驗所用之風力發電機模型，縮尺約為一百七十分之一。圖二所示，此模型扇葉長約為二十公分，柱高約為四十公分。

### 2.3 風力的量測

本試驗是採用力平衡儀量測系統進行風洞試驗之風力發電機縮尺模型的測量，如圖三。其是使用 Nitta 株式會社之六軸向剪力彎矩感應儀 (JR3 Universal Force-Moment Sensor System)，作為此試驗之力平衡儀。可同時取得模型之基底  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ 、 $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$  的試驗數據。此系統可分為三個部份：感應器 (monolithic six-degree-of-freedom force sensor)、訊號處理機 (Electronics enclosure)、電源供應器 (power supply)。其中訊號處理部份包括：類比訊號放大、類比式與數位式訊號濾波、類比/數位訊號轉換。透過序列

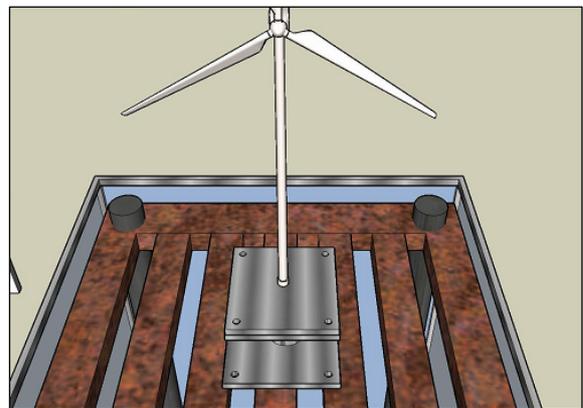
連接埠 (serial port) 與電腦連接為終端機，作為指令、訊息傳遞與儲存。力平衡儀具有高度靈敏性，將其置於風洞底部的圓形升降台中心位置，再將風力發電機縮尺模型固定於感應器上進行風洞試驗。架設同時需注意量測系統的水平及模型的順風面和風向呈垂直狀態。



圖一 空風洞之風速剖面和紊流強度



圖二 模型扇葉長實體圖



圖三 力平衡儀試驗的示意圖

### 3. 數值模擬

#### 3.1 風力發電機模型

在此是利用廠商所提供之風扇斷面的座標圖作為參考，先將扇葉上的最大斷面和斷面兩邊的接觸面座標點描繪出來，然後再將點連成線後，組成一個面。再由這三個面去連結成一個體積，藉此將風力發電機的扇葉繪製出來。然後，風力發電機機組和柱子的

部份，是參考縮尺模型的比例所繪製的，如圖四。

### 3.2 整體計算域

因為本研究所探討的問題是要和風洞試驗相比較，所以將按照縮尺模型和風洞的比例繪製。而風洞橫斷面的長為二公尺、寬為一點五公尺。至於平行於順風向的長度選擇，則是因為在此並不探討風力發電機模型的流場擾動情形，固將此長度設為三點五公尺，作為數值風洞的計算空間。

### 3.3 轉子體積和計算域體積（使用滑動網格技術時才會設置）

在風力發電機縮尺模型的扇葉外圍，建立一個圓餅體積，將整體的體積透過 interface，分為圓餅體積和計算域兩個體積，如圖五。此部分主要是為了扇葉轉動時，在兩個計算域交界面，便於網格格點相連接的設置。簡單來說，就是轉子與定子的交界面設置。

### 3.4 網格的繪製

先從扇葉的部份進行面的網格繪製，因為這個部份為變斷面，表面曲率變化比較大，必須細化表面區域的網格，所以使用較小三角形的網格。接著，再從機組和柱子進行面的網格繪製，而使用的也是三角形網格。最後，將整個計算域進行體積網格的繪製，也因為這個部份相較於風力發電機上的面積比還大，所以網格也相對較大，而使用的網格為非正交的四面體網格（三角錐）。

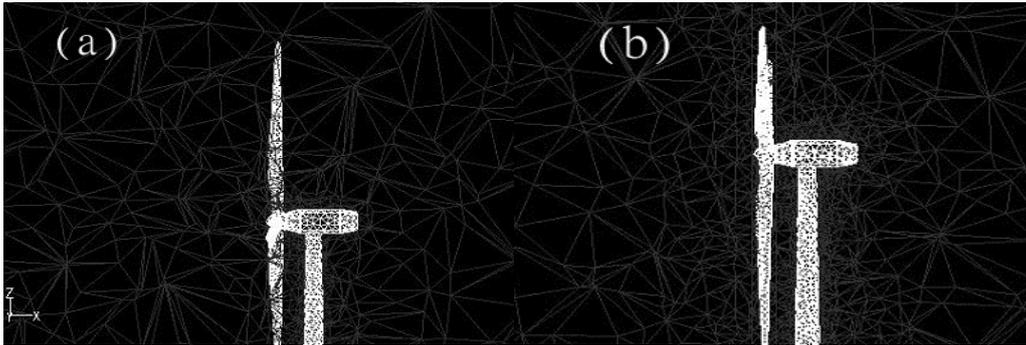
網格的繪製可算是在進行數值模擬前最重要的一個步驟，其繪製的好壞與種類，將決定求解時所耗費的時間長短以及數值的準確性。

### 3.5 邊界條件

將入流口設為速度入流（velocity inlet）、出流口設為壓力出口（pressure outlet）、四周壁面設為牆（wall）、風力發電機也設為牆的性質、整體計算域設為流體。

### 3.6 動態網格（Dynamic mesh）和滑動網格（Sliding mesh）

本研究主要是藉由數值模擬的方式，模擬風力發電機縮尺模型的受力情形。在此使用動態網格技術和滑動網格技術來進行模擬[5]。最後，將兩者在邊界條件相同下的模擬結果，互相比較誤差的來源和探討兩種方法的適用性。在使用動態網格技術進行模擬時，會因為網格格點的重繪，所以需要耗費電腦更多的資源，且計算迭代的時間較長。而在滑動網格技術下的模擬，因為只需要改變相鄰區域的網格格點的聯接位置，並不會讓網格重繪，所以在計算迭代的所耗費的時間與資源，也相對減少。但還是得透過兩者的數據比較，來探討使用的方便性與價值性。



圖四 Grid point setup image with (a) Dynamic Mesh Model. and (b) Sliding Mesh Model

#### 4. 結果與討論

本研究主要是延伸由許育誠所撰之”風力發電機對環境風場影響之評估” [2]，其內容主要是在探討風力發電機對週遭環境風場的影響。而本文所探討的是計算流體力學 (CFD) 軟體應用於風力發電機結構受風的可行性，目前先對單一風力發電機基底的受力情形，進行數值模擬和分析，然後再比較風洞試驗所得到的結果。

##### 4.1 靜態模擬

利用力平衡儀取得風力發電機基底中心位置的受力情形，並透過 MATLAB 計算剪力和彎矩。透過 Fluent 模擬 Steady 模式，理論上應等同於風力發電機在風洞試驗時風扇不轉動的情形。在計算迭代之後，達到收斂時所得到的答案，其基底剪力 (單位：n 和彎矩 (單位：n-m)，如表一、圖五。

Steady state(1)和 steady state(2)所使用的網格數不同，而 steady state (2)和 unsteady state (2)的網格數相同，差別在於模擬的時間設定上穩態與非穩態的不同。

由表一和圖五可以得知，在靜態模擬方面，順風向之  $F_x$  和風洞試驗所得到的數據相較後，誤差值約為 29.9%。而順風向所造成的彎矩  $M_y$ ，誤差值約為 29.3%。

##### 4.2 動態模擬

在 Unsteady 的模擬中，是透過不同的紊流模式為 RNG k-epsilon model 和 LES model，分別使用滑動網格技術和動態網格技術模擬，壓力和速度耦合為 SIMPLEC 法則，離散方程式是選用 Second Order Upwind 所模擬出來數據。實驗數據與數值模擬預測之比較如，表二、圖六。

缺少紊流模式為 LES model 下，使用動態網格技術模擬數值的原因，是因為在選用 LES model 模擬時，網格的要求非常的精細。而且在繪製風力發電機模型的網格時，因為模型的表面為變斷面，需要較小的網格。也因為網格變化的曲率過大，無法和計算域網格有較好的連結。導致在模擬初期就出現錯誤訊息，因此無法進行模擬和比較。

基本上，在風洞試驗時，風力發電機縮尺模型在順風向所受到風力的影響較大，而橫風向在理論上應該趨近於零。所以，在剪力方面的誤差率，應比較著重在  $F_x$ ，也就

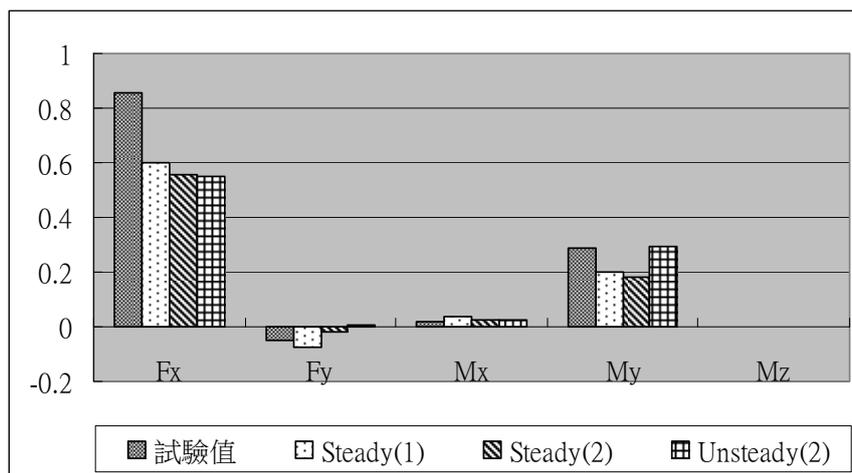
是順風向的合力；而在彎矩部分，也因為順風向的關係，所以比較著重在 My。而 Mz 是風力發電機 Z 軸(垂直地面)的扭轉。由表二和圖五，可以看到數值的差異性。

在滑動網格方面，順風向所影響的 Fx 和風洞試驗所得到的數據相比較，誤差值約為 33.8%。而順風向所影響的彎矩 My，誤差值約為 104%。在動態網格方面，順風向所影響的 Fx 和風洞試驗所得到的數據相比較，誤差值約為 1.08%。而順風向所影響的彎矩 My，誤差值約為 76.5%。

在動態模擬 (Unsteady) 的地方，誤差的比較方式是將數值模擬的結果，Fx 和 My 值中的負號消去，因為會相差一個負號的關係，是試驗與模擬之座標軸相反的關係。而動態模擬和靜態模擬 (steady state) 的模型是各別繪製的，所以會有正負號的差別；從上述中可以得知，在紊流模式為 RNG k-epsilon model 下，利用動態網格技術較滑動網格技術所模擬出來的數值還趨近試驗值。圖七 為數值模擬結果是意圖-壓力場和流場路徑線展示。

表一 風扇不轉動的試驗值和模擬值

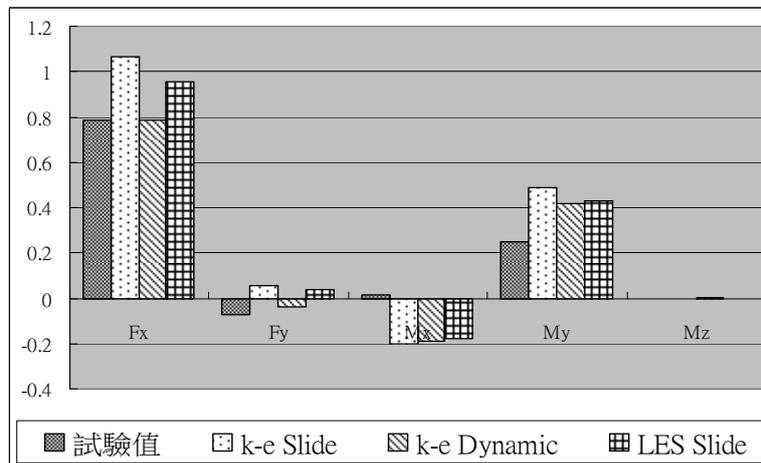
	Fx	Fy	Mx	My	Mz
風洞試驗值	0.8576	-0.0500	0.0196	0.2872	0.0016
Steady state(1)	0.6010	-0.0740	0.0356	0.2030	-0.0002
Steady state(2)	0.5570	-0.0195	0.0220	0.1820	0.0006
Un-steady(1)	0.5520	0.0055	0.0272	0.2920	0.0010



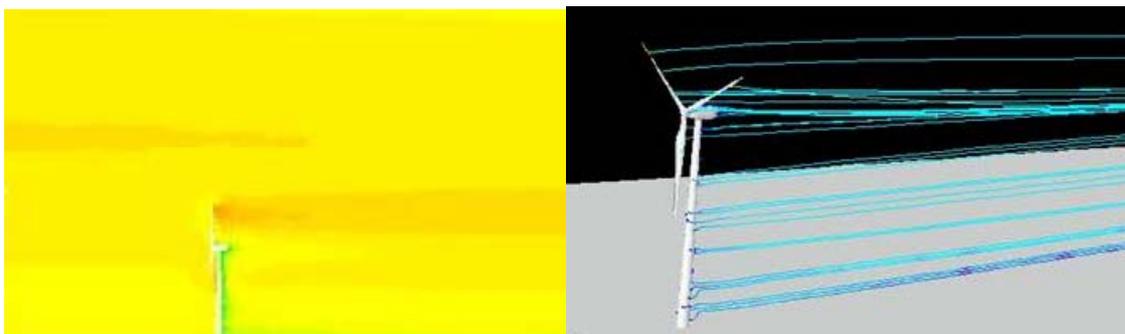
圖五 風扇不轉動的試驗值和模擬值

表二 風扇轉動的試驗值和模擬值

	<b>F<sub>x</sub></b>	<b>F<sub>y</sub></b>	<b>M<sub>x</sub></b>	<b>M<sub>y</sub></b>	<b>M<sub>z</sub></b>
風洞試驗值	0.8576	-0.0500	0.0196	0.2872	0.0016
RNG k-e model Sliding mesh(滑動網格)	1.0651	0.0540	-0.2007	0.4862	-0.0015
RNG k-e model Dynamic mesh(動態網格)	0.7875	-0.0408	-0.1870	0.4204	0.0017
Large Eddy Simulation Sliding mesh(滑動網格)	0.9564	0.0389	-0.1796	0.4295	-0.0001



圖六 數值模擬-扇葉轉動的數據比較



圖七 數值模擬結果-壓力場和流場路徑線展示

## 5. 結論

本研究主要是在探討計算流體力學 (CFD) 軟體應用於風力發電機結構受風影響的可行性。利用數值模擬的方式，模擬和風洞試驗的邊界條件相同下，模型基底中心受力

的情形。藉由降低模擬值和試驗值的誤差大小，探討最適合的參數設定，以便實場的預測。而研究中，雖然是針對單一風力發電機的影響所探討，倘若能將模擬與試驗的誤差降至可容許的範圍之內，則可以利用相同的邊界條件設定，對多座的風力發電機進行更多的研究與探討。

利用動態網格技術和滑動網格技術的模擬下，動態網格技術所得到的數據較為趨近於試驗值。而在紊流模式為 k-e RNG model，使用動態網格技術模擬得到的結果中，Fx 的誤差值較小，約為 1.08%。由此可知，以數值模擬分析風力發電機受力的情形，使用動態網格技術會比滑動網格技術更為理想。

### 參考文獻

- [1] 朱佳仁，”風工程導論”，科技圖書 (2006)
- [2] 許育誠，”風力發電機對環境風場影響之評估”，淡江大學土木工程研究所碩士論文 (2007)
- [3] GAMBIT 2.4 Documentation，<http://www.fluent.com/> (2004)
- [4] FLUENT 6.3 Documentation，<http://www.fluent.com/> (2004)