

# 離岸風場跡流制動盤模型數值模擬

李可掬<sup>1</sup> 范秉天<sup>2</sup> 林宗岳<sup>2</sup> 趙修武<sup>1</sup>

(1. 臺灣大學，臺北，10617; 2. 中國驗船中心，臺北，104)

**摘要** 本文採用結合制動盤理論的計算流體力學模型進行離岸風場中風機陣列三維穩態紊流場干涉模擬，並預測不同風況條件下的風場功率輸出，其中風機周圍紊流場以自行開發之三維平行化求解器聯立求解流場連續方程式、動量方程式以及紊流模型後獲得。風機轉子對於流場擾動的效應以物體力形式分佈於所採用的卡氏座標系統以降低流場模擬的複雜度，因此不需要使用移動式邊界吻合網格系統。代表風機轉子對於流場擾動效應的物體力徑向分佈函數，則使用葉片元素理論估算或得自使用邊界吻合配合移動式網格系統的暫態風機周圍紊流場模擬結果。本研究首先藉由與完整風機暫態模擬結果比較，驗證制動盤模型的可靠度，接著分析五組前後排列風機的風場跡流效應對風機功率之影響，最後分析竹南離岸風場可能選址方案的功率特性。

**關鍵字** 跡流、風場、風機、制動盤、流場模擬

## 1. 前言

鑒於世界前二十名優良風場中即有 16 處位於台灣海峽[1]，因此台灣離岸風電較陸域風電更具發展潛力。隨著 2016 年 10 月完成建置在台灣竹南風場之首批兩座 4MW 離岸風機 (Siemens SWT-4.0-120 ) [2]，掀起了台灣離岸風電產業的序幕。在過去先前研究中，本研究團隊已分析額定條件下葉片方位角對於大型水平軸 2MW 風機葉片氣動力負荷特性的影響，獲得葉片受力、葉片轉矩、葉片彎矩、葉片轉子轉矩與葉片方位角的關係[3,4]，以及對於陣風條件進行暫態風場模擬[5,6]與緊急停機過程風機氣動力特性進行分析[7]。同時使用雙向流固耦合方式，預測風機葉片變形對於運轉狀態水平軸風機氣動力與噪音的影響[8-10]，並將該研究成果應用於開發預兆式離岸風機營運維修系統[11,12]。此外，台灣為颱風好發地區，本團隊亦評估了台灣地區颱風造成風力發電機倒塌之風險[13]及 NREL 5MW 風機於台灣彰濱外海地區極限風速下之氣動力負荷[14]，並探討在颱風風況下風向角與方位角對於大型水平軸風機 Z72 氣動力負荷特性的影響，獲得葉片轉矩、機艙平擺力矩、風機轉子轉矩與風向角、方位角的關係[15]。基於考量風機跡流效應是台灣離岸風場建置之關鍵課題之一，本研究團隊以模擬現役臺灣西海岸前後排列之 2MW 三葉水平軸風機周圍流場為起點，預測前後兩風機氣動力負荷，得以了解前方風機跡流對於後方風機的影響[16]。

惟現行利用計算流體力學方法進行移動式邊界吻合網格系統之暫態風機跡流模擬耗費巨

量計算時間與能量，使得模擬方法變得相對複雜，故本文以開發較為簡易的模擬方法進行流場模擬，藉由有效縮短流場分析時間及降低計算需求，符合工業應用的目的。本研究首先藉由與完整風機暫態模擬結果比較，驗證制動盤模型的可靠度，接著分析五組前後排列風機的風場跡流效應對風機功率之影響，最後分析竹南離岸風場可能選址方案的功率特性。

## 2. 計算方法

本研究使用雷諾平均化納維爾史托克斯方程式描述風機周圍的穩態不可壓縮流場，如下所示：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

其中 $\rho$ 為流體密度， $u_i$ 為流場平均速度 $u$ 在座標 $i$ 方向上流場速度分量， $p$ 為流場壓力， $\nu$ 為流體等效動黏滯係數( $=\nu_m + \nu_t$ )， $\nu_m$ 為流體動黏滯係數， $\nu_t$ 為紊流動黏滯係數。本研究同時使用 $k-\varepsilon$ 紊流模型，以求解紊流模型中之紊流動能 $k$ 以及其消散率 $\varepsilon$ 的關係：

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (k u_j) = + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\varepsilon u_j) = + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_{\varepsilon 1} P_k \frac{\varepsilon}{k} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

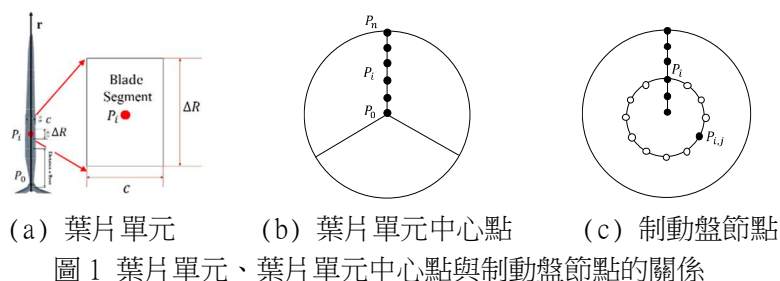
$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

其中 $\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$ 、 $c_{\varepsilon 1}$ 、 $c_{\varepsilon 2}$ 與分別為 $k$ 與 $\varepsilon$ 傳輸方程式的紊流模型係數， $P_k$ 為紊流動能生成項。

本研究採用具有二階精確度有限體積法離散統御方程式[17]，並利用 SIMPLE 法分離雷諾平均化納維爾史托克斯方程式中壓力與速度的耦合關係，以及使用 MPI 程式庫達到平行計算之目的。本研究首先基於現有的速度場建立驅動盤之物體力模型，接著求解動量方程式以獲得流場速度分佈，在更新流場邊界流量後，以連續方程式求解流場壓力場修正量，根據壓力修正量更新流場之速度場與壓力場，然後求解紊流模型，如此完成流場外循環疊代。而內循環疊代則為以 SIP 法[18]求解各個線性化的統御方程式。

由於葉片為運轉中風力發電機之最大受力貢獻來源，因此本研究將三維轉子葉片在空間中的掃掠區域簡化為具備等效物體力的制動盤，利用葉片元素理論預測此制動盤於不同入流風速下之等效物體力。本研究將葉片分為數個彼此相鄰的葉片單元，將上述之物體力模型沿徑向分佈至相對應之 $n$ 個葉片單元中心點上，再將上述物體力模型之 $n$ 個葉片單元中心點以同心圓方式平均分配至周向的 $m$ 個節點上，其中 $m$ 為周向方位角分割總數。在進行三維風機跡流場計算前，物體力模型須由制動盤節點 $P_{i,j}$ 的負載 $f_{i,j}$ 佈放至三維卡式網格單元內。為避免產生數值計算的奇異性，本研究使用高斯分佈的物體力佈放函數[19]。本研究假設流場為穩態，使用長方體定義計算流場區間，入流邊界使用考慮地表或海平面粗糙度之風剖面分佈。出口邊界使用速度梯度消失的邊界條件，流場上方及側方使用對稱面條件，下方為地表或海平面，給定速度為

零。本研究使用的目標風機轉子具有三組葉片，葉片長度 43m，機艙高度 87m，其額定功率為 2MW，計算案例分別為單一風機、五支前後排列的風機陣列以及台灣海峽竹南風場的可能選址方案。本研究的計算空間大小根據[19]建議決定，並使用三維卡氏網格系統離散計算空間。



### 3. 計算結果

#### 3.1 單一風機

圖 2 的流場縱剖面圖說明平面物體力佈放的區域與大小，氣流經過風機位置後產生顯著的減速效應。風剖面風速入流的風機跡流區域內高度與軸向流速呈現正向關係，若與完整風機幾何模擬之風機周圍流場軸向速度分佈(圖 3)比較，兩者具有定性與定量的一致性。圖 4 比較移動式網格與制動盤理論的風機後方跡流場橫剖面分佈 ( $X=17.5m$ )，兩者皆顯示呈現與風機旋轉方向相反的渦流運動現象以及轉子直徑內上半區域的軸向速度略高於下半區域，發現兩者具有定性與定量的相似度，驗證本研究使用之制動盤模型之可靠度。

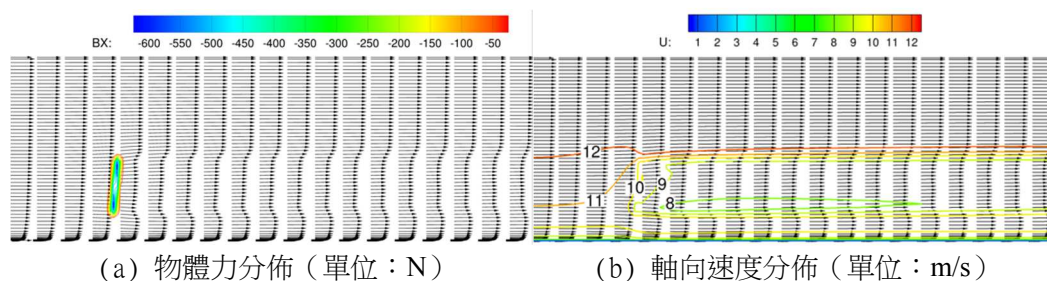


圖 2 單一風機流場縱剖面圖

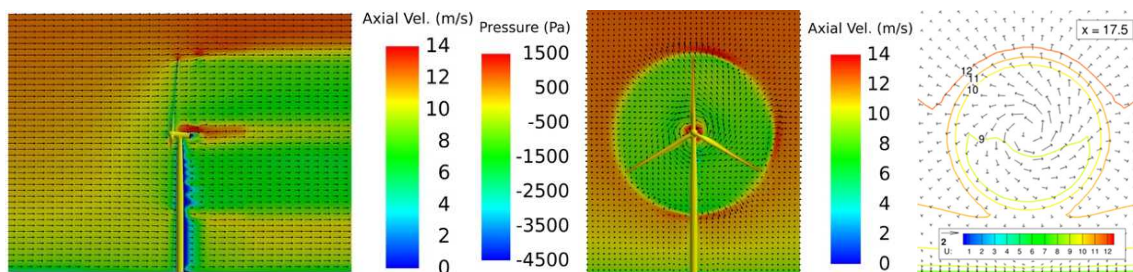
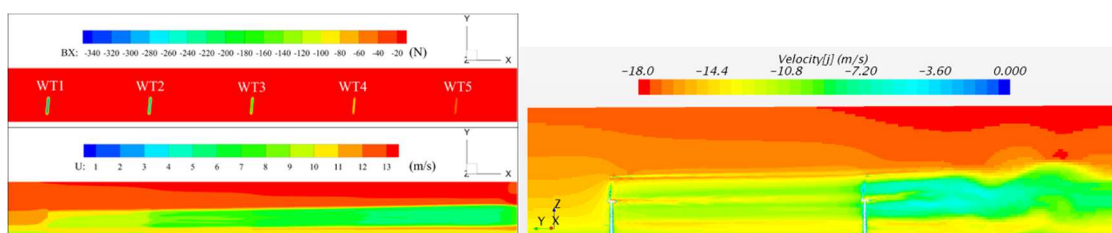


圖 3 風機縱剖面軸向速度分佈

圖 4 風機後方軸向速度分佈

#### 3.2 五組前後排列風機

五組前後排列風機使用風剖面入流條件，風機間距為轉子直徑的 5.8 倍。圖 5 分別說明縱剖面 ( $Z=0$ ) 物體力佈放的區域以及軸向速度分量的縱剖面分佈。計算結果顯示，以指數型態分佈的氣流在經過前方風機後，被風機吸收部分能量，在風機後方產生明顯的跡流區，此時風速的軸向速度分量向失去與高度方向的相依性，並同時導入額外的切向速度分量。前方風機跡流與後方風機作用後，氣流再次產生減速效應，此時跡流效應更趨明顯。比較制動盤模型與移動式網格模型的計算結果，可以觀察兩者具有定性與定量的一致性，再次驗證本研究物體力模型之可靠度。圖 6 比較五組風機後方跡流場橫剖面分佈，顯示不同排列順序風機皆呈現與風機旋轉方向相反的渦流流動現象，且此旋向速度在經過風機時明顯增加，顯示運轉中風機吸收軸向入流轉為切向速度之特性。比較風機跡流軸向速度，前兩組風機後方跡流在轉子直徑內上半區域的軸向速度略高於下半區域，後方風機則趨於均勻入流。比較五組風機輸出功率，第二組風機尚具有約九成額定功率，符合完整風機幾何模擬之結果[16]；受前方風機跡流影響，同軸線排列之風機功率顯著下降，第三組風機僅具有五成功率，而第五組僅剩下一成的功率輸出。這個結果說明風機選址位置與風場總輸出功率的相關性。



(a) 制動盤模型

(b) 移動式網格模型

圖 5 風機縱剖面流場軸向速度分佈

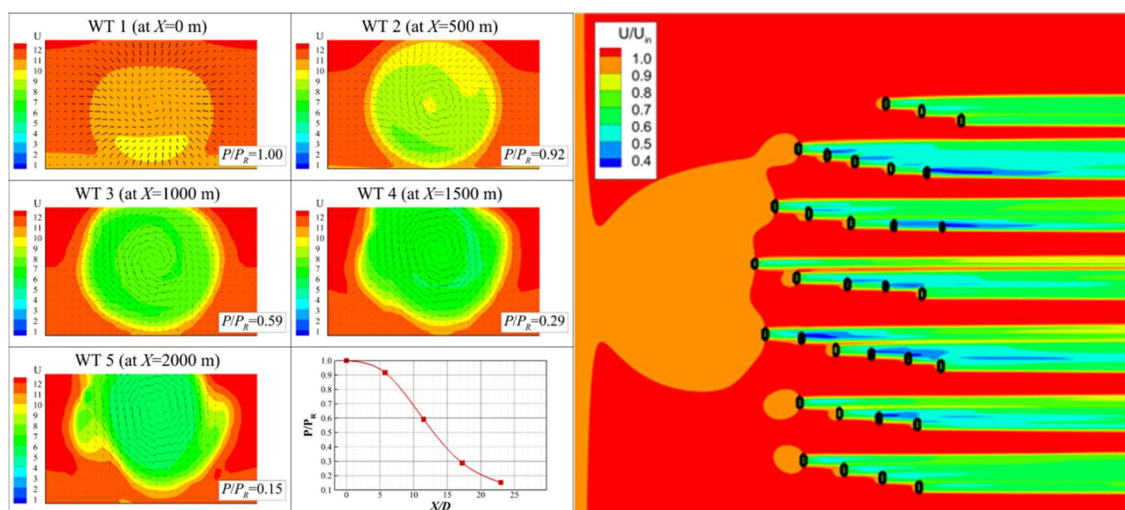


圖 6 風機後方流場軸向與切向速度分佈

圖 7 竹南風場跡流場分佈

### 3.3 竹南風場

本研究使用東風入流條件進行竹南風場的風機跡流分析，圖 7 為轉子高度之正規化軸向風速分布，其中正規化軸向風速定義如下：

$$U^* = \frac{U_x}{U_{in}} \quad (6)$$

其中 $U_x$ 為風場中軸向( $x$ 向)速度, $U_{in}$ 為目標風機之額定入流風速。計算結果顯示,氣流經過前排風機時,被風機吸收部分能量,並在後方產生明顯跡流。其中坐落在跡流區內之後排風機,對氣流再次產生減速作用,跡流效應更為明顯。由該圖可以發現,在有限風場空間以及有限風機總數下,根據風向的風機有效排列能顯著減少覆蓋於跡流中之風機,進而顯著提升風場總體發電效率。

## 參考文獻

- 1 <http://www.gwec.net/about-winds/wind-energy-faq/>
- 2 <http://technews.tw/2016/11/06/台灣首座離岸風力發電明年運轉,能供電8000戶家庭/>
- 3 李文傑、江俊明、趙修武,“運轉狀態下風力發電機之氣動力負荷數值研究”,第二十五屆中國造船暨輪機工程研討會,台北,2013。
- 4 莊岳祥、趙修武,“額定條件運轉風機葉片氣動力特性計算”,第二十八屆中國造船暨輪機工程研討會,台北,2016。
- 5 郭真祥、趙修武、楊淳宇、李文傑,“考慮陣風條件之暫態風機周圍風場模擬”,第二十四屆中國造船暨輪機工程研討會,台北,2012。
- 6 郭真祥、趙修武、楊淳宇、張智章,“濱海複雜地形之風場模擬”,第二十四屆中國造船暨輪機工程研討會,台北,2012。
- 7 郭真祥、趙修武、楊淳宇、李岱柏、林宇、李仲凱,“水平軸離岸風機緊急停機過程氣動力特性分析”,第二十六屆中國造船暨輪機工程研討會,基隆,2014。
- 8 趙修武、江俊明,“考慮流固耦合效應之水平軸風力發電機氣動力特性數值研究”,2013年台灣風能學術研討會,基隆,2013。
- 9 趙修武、林宇、李念澤,“水平軸離岸風機雙向流固耦合氣動力特性分析”,2014年台灣風能學術研討會,台北,2014。
- 10 趙修武、李念澤,“大型水平軸風機運轉葉片之氣動力噪音計算”,第二十七屆中國造船暨輪機工程研討會,高雄,2015。
- 11 蔡進發、郭真祥、蔡國忠、王昭男、趙修武、周亞諄、李仲凱、林宗岳、郭家齊、湯耀期、李念澤,“預兆式離岸風機營運維修系統之開發(1/3)”,2014年台灣風能學術研討會,台北,2014。
- 12 蔡進發、蔡國忠、王昭男、趙修武、葉柏廷、楊其昌、詹勳智、陳泰瑜、湯耀期、秦正宇,“預兆式離岸風機營運維修系統之開發(2/3)”,2015年台灣風能學術研討會,台北,2015。
- 13 郭真祥、蔡國忠、趙修武、楊淳宇、李文傑,“台灣地區颱風造成風力發電機倒塌風險之研究”,2012台灣風能學術研討會,台南,2012。
- 14 郭真祥、蔡國忠、趙修武、楊淳宇、李仲凱、李岱柏,“NREL 5MW 風機於台灣彰濱外海地區極限風速下之氣動力負荷數值模擬研究”,2013年台灣風能學術研討會,基隆,2013。
- 15 李可掬、趙修武,“額定條件運轉風機葉片氣動力特性計算”,第二十八屆中國造船暨輪機工程研討會,台北,2016。

- 16 李可掬、趙修武，“前後排列風機之氣動力負荷數值研究”，2016 台灣風能學術研討會，基隆，2016。
- 17 Chau, SW. Numerical Investigation of Free-Stream Rudder Characteristics Using a Multi-Block Finite Volume Method. Universität Hamburg. (1997)
- 18 Stone, HL. Iterative Solution of Implicit Approximation of Multidimensional Partial Differential Equations. *SIAM Journal of Numerical Analysis*, Vol. 5, pp.530-558. (1968)
- 19 Troldborg, N. Actuator Line Modeling of Wind Turbine Wakes. PhD Thesis. Technical University of Denmark. (2008)

## Wake Flow Prediction of an Offshore Wind Farm via Turbulent Flow Modeling

LEE Ke-chu<sup>1</sup>, NELSON Bryan<sup>2</sup>, LIN Tsung-yueh<sup>2</sup>, CHAU Shiu-wu<sup>1</sup>

(1. Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University, Taipei, 10617, Taiwan;

2. R/D Section, CR Classification Society, Taipei, 104, Taiwan)

**Abstract:** This paper employs a three-dimensional, turbulent flow approach coupled with an actuator disk model to describe the flow field of an offshore wind turbine array as well as to predict its power output under prescribed wind conditions, where the continuity equation and the momentum equations together with a two-equation turbulence model are solved via an in-house parallelized code. A Cartesian grid discretization integrated with an appropriate body force distribution is adopted to reduce the modeling complexity, where no body-fitted grid is required to resolve the rotor geometry and a stationary grid is sufficient to capture the effect of rotor motion. The body force representing the aerodynamic loading on the rotor blade is estimated by means of the blade element method, whereas the lift and drag characteristics of the blade foils at different radii are also calculated by the same turbulent flow approach proposed for the wind farm flow. The actuator disk defined by the rotor swept region is used to assign the aerodynamic loading contributed by the rotor blades. Three test cases with different number and arrangement of wind turbines are calculated with the proposed approach, which is proven to deliver significant efficiency with the required accuracy.

**Keywords:** Wake flow, wind farm, wind turbine, actuator disk, turbulent flow modeling