

陸域風場中考慮地形影響的風機跡流模擬

趙修武¹ 林宗岳² 范秉天²

¹國立臺灣大學 工程科學及海洋工程學系

²財團法人中國驗船中心 研究處研發組

關鍵詞：地形，跡流，風場，風機，數值模擬

摘要

本研究目的為考慮陸域風場中地形對於風機跡流干涉現象，建立描述陸域風機周圍三維紊流場的致動盤模型，得以評估陸域風場的發電效率。基於地表為光滑壁面假設，本研究求解連續方程式、動量方程式以及紊流模型，以獲得陸域風場中風機周圍三維跡流場，同時利用致動盤模型產生風機對於風場的等效干擾效應。使用致動盤模型的主要目的在於降低風機跡流場模擬所需巨量數值計算需求以及相對應模擬方法的複雜度，因此在離散風機流場計算空間時不使用風機的實體幾何外形，而利用等效物體力模型獲得風機轉子對於風機周圍流場的影響，也就是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致動盤。這種做法不但能避免生成包覆於複雜幾何外形葉片外部網格的難題，亦不需使用移動網格方式模擬風機轉子的空間運動，僅需要生成結構性網格系統，然後將等效物體力適當地分佈於葉片轉子通過的空間網格內部，因此能使用較為簡易的模擬方法進行流場模擬，達到有效地縮短流場分析時間之目的。本研究使用貼壁式的結構性網格系統，得以考慮陸域風場中地形效應對於風機跡流的影響。本研究首先分析台灣西部沿岸陸域目標風場，獲得不同風況下地形對於風況的影響，接著討論突起地形高度對於兩前後排列風機功率的影響，並討論地形對於風機跡流的干涉特性。

前言

風機陣列排列方式主導了陸域與離岸風場中風機陣列的跡流干涉效應，但陸域風場中風機陣列的跡流特性，亦有可能進一步受到局部地形與特殊地貌的影響而發生顯著變化。本研究團隊基於卡氏網格系統，利用結合計算流體力學方法的致動盤模型[1]，比較單風機周圍流場的致動面與完整流體力學模型的差異，並分析五座前後直線排列離岸風機陣列的功率特性，以及模擬竹南風場的風機陣列跡流干涉現象。接著本研究團隊以相同的數值模型，計算不同風向條件下 5x5 風機陣列功率輸出與風速的關係[2]。基於驗證本研究團隊所提出數值方法的可靠度，[3]成功地比較了特定風向數值模擬結果與 Horns Rev 風場風機陣列的實驗觀測值，並同時分析台灣西部目標離岸風場的兩個風機陣列案例，分別考慮風機間距兩鋒相對於風機陣列輸出功率特性的影響。為了了解台灣西北部目標離岸風場風機陣列設計的功率特性，[4]分別模擬目標離岸風場三個造成風機前後排列情形的風況，預測各風機的等效入流風速以及功率輸出。因為本研究團隊的現有致動面流體力學模型必須使用卡式網格進行流場模擬，僅能分析具平坦海域的離岸風場，無法進行具有地形起伏特徵的陸域風場分析。因此本研究將基於本研究團隊的先前研究成果，以貼壁網格系統取代卡式網格系統，建立基於貼壁網格的致動面流體力學模型，得以模擬具有地形變化的陸域風場中風機陣列功率輸出特性。

研究方法

1. 風機流場模型

假設風機流場為穩態且不可壓縮，使用雷諾平均化方法描述流場，本研究的流場統御方程式為連續方程式與動量方程式：

$$\nabla \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \frac{1}{\rho} (\mathbf{f} - \nabla p) + \nu \nabla^2 \mathbf{u} - \nabla \cdot (\overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'}) \quad (2)$$

$$\overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'} = -\nu_t (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \quad (3)$$

其中 \mathbf{u} 為流場平均速度， ρ 為流體密度， \mathbf{f} 為單位體積物體力， p 為流場平均壓力， ν 為流體等效動黏滯係數 ($\nu_m + \nu_t$)， ν_m 為流動動黏滯係數， ν_t 為紊流動黏滯係數。本研究使用 $k - \varepsilon$ 紊流模型求解紊流模型的紊流動能 k 以及其消散率 ε 的關係：

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (k u_j) = + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\varepsilon u_j) = + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_{\varepsilon 1} P_k \frac{\varepsilon}{k} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

其中 σ_k 、 σ_ε 、 $c_{\varepsilon 1}$ 、 $c_{\varepsilon 2}$ 與分別為 k 與 ε 傳輸方程式的紊流模型常數， P_k 為紊流動能生成項。本研究採用二階精確之有限體積法離散統御方程式，利用 SIMPLE 法分式離壓力與速度的耦合關係。本研究建立的風機流場求解器流程如下：首先基於現有的速度場建立致動盤物體力模型，利用求解動量方程式獲得流場速度分佈進而更新流場邊界流量；接著以連續方程式求解流場壓力修正量，更新流場速度

場與壓力場；然後求解紊流模型。單次完成求解所有的流場統御方程式視為流場計算的外循環疊代，內循環疊代則為求解各個線性化的統御方程式。圖 1 為求解風機流場的流程。

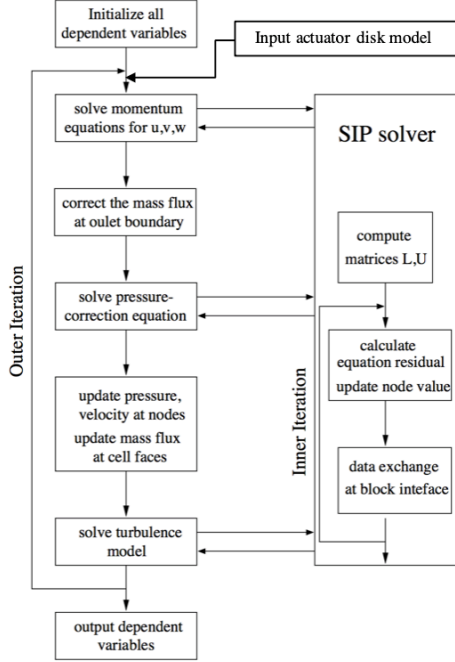
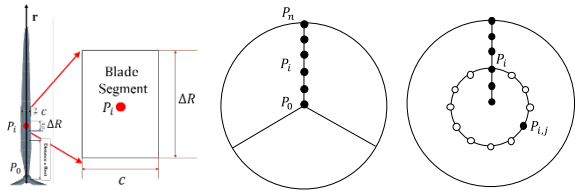


圖 1 求解風機流場的流程



(a) 葉片單元 (b) 葉片單元中心點 (c) 致動盤節點
圖 2 葉片單元、其中心點與致動盤節點的關係

本研究定義轉子掃掠範圍的軸向特徵風速為 V_c ，此時風機輸出功率為 P ，轉速為 ω ，轉子直徑為 D 。根據[5]的研究結果，作用於葉片的氣動力大致上可以使用兩條不同幕次的曲線加以描述，本研究作用於葉片的軸向力 f_a 與切向力 f_t 可分別以式(7)與(8)表示。

$$f_a = \begin{cases} f_{a,max}(r/r_a)^{a_1}, & 0 \leq r \leq r_a \\ f_{a,max}(1 - r/r_a)^{a_2}, & r_a \leq r \leq D/2 \end{cases} \quad (7)$$

$$f_t = \begin{cases} f_{t,max}(r/r_t)^{b_1}, & 0 \leq r \leq r_t \\ f_{t,max}(1 - r/r_t)^{b_2}, & r_t \leq r \leq D/2 \end{cases} \quad (8)$$

其中 r 為徑向長度， r_a 為軸向力最大值 $f_{a,max}$ 的徑向位置， (a_1, a_2) 為軸向力曲線的幕次方， r_t 為切向力最大值 $f_{t,max}$ 的徑向位置， (b_1, b_2) 為切向力曲線的幕次方。本研究基於等效物體力觀念發展以暫態致

動線為基礎的穩態致動盤模型。首先依照葉片翼形截面分佈將葉片分為數個彼此相鄰的葉片單元，其中 ΔR 為葉片單元間距以及 c 為葉片單元平均弦長。在本研究的等效物體力模型中，假設風機葉片單元受力集中於葉片單元中心點 P_i 上，即氣流作用於葉片的外力沿徑向分佈於葉片單元中心點，接著將物體力模型的 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 $P_{i,j}$ 上，圖 2 說明致動盤節點位置的分佈關係。本研究採用貼壁網格離散計算空間，因此物體力模型由致動盤節點 $P_{i,j}$ 佈放至三維貼壁網格單元內，如圖 3 所示。為了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：

$$\eta_\epsilon(d) = \frac{1}{\epsilon^2 \pi^{3/2}} \exp\left[-\left(\frac{d}{\epsilon}\right)^2\right] \quad (9)$$

其中 ϵ 為給定的等效物體力作用區域， d 為卡氏網格中心點與致動盤節點的距離。因此考慮葉片影響的致動面物體力模型可表示為

$$f_c(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^B \int_0^R f_{2D}(s) \eta_\epsilon(|\mathbf{x} - s\mathbf{e}_i|) ds \quad (10)$$

其中 \mathbf{x} 為致動盤節點座標， s 為葉片徑向長度， B 為葉片數目， R 為葉片半徑， f_{2D} 為葉片單元的氣動力， \mathbf{e}_i 為葉片徑向單位向量。

本文使用六面體網格建構結構式貼壁網格系統，離散風機流場計算空間，如圖 4 所示：計算空間左方入流邊界使用考慮地表摩擦的風剖面分佈：

$$V = V_{Hub} \left(\frac{z}{z_{Hub}}\right)^\alpha \quad (11)$$

其中 V 為離地高度位置 z 的水平入流風速， V_{Hub} 為輪轂高度位置的參考風速， z_{Hub} 為輪轂離地高度， α 為風速分佈的幕次指數（本研究 α 取為 0.1）；計算空間右方出口邊界使用速度梯度消失的邊界條件；計算空間前後及上方使用對稱面條件；計算空間下方為地表，假設為光滑壁面，給定速度為零。

本文所使用目標風機為 V80。輪轂中心前沿高度為 80 m，風機轉子直徑為 80 m，目標風機運轉額定風速為 14.5 m/s，風機額定轉速為 (ω_R) 16.7 RPM，風機運轉額定功率 (P_R) 為 2 MW。

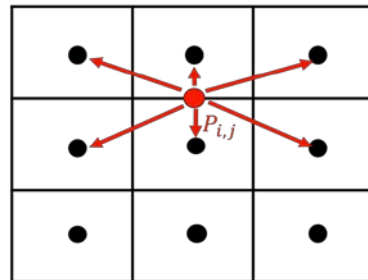


圖 3 物體力由致動盤節點佈放至三維網格單元

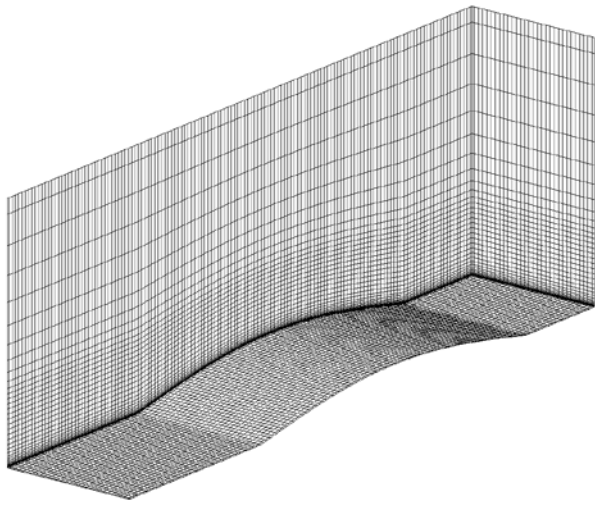


圖 4 風機流場計算空間

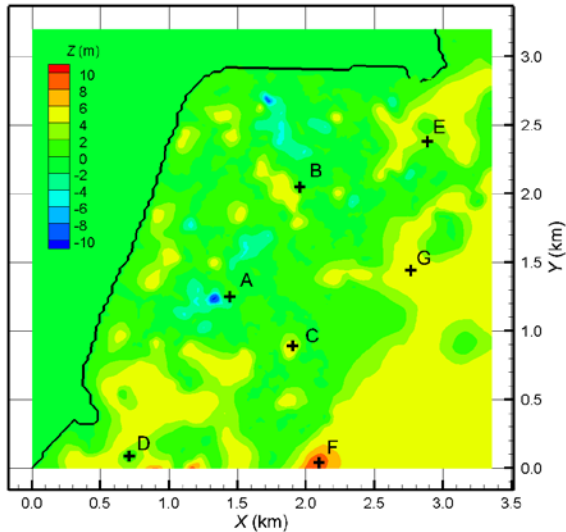


圖 5 台灣西部某濱海風場地形

計算結果

1. 考慮地形風場模擬

圖 5 為台灣西部某濱海風場地形，圖中右方粗黑線標示海岸線位置，等高線說明該地區地形高度分佈，海岸線區域地形較為平坦，地形往東南方逐漸升高。本節討論左向來風的風場風況，此時在 80m 高的水平風速為 11.4m，如圖 6 所示。圖 7 比較圖 5 中所標示 7 個位置為平坦與實際地形的水平風速差異，其中風速高度皆以地表為參考基準：圖 7(a)比較位置 A 在考慮與忽略前方低窪地形的風速沿高度方向分佈，計算結果顯示前方低窪地形對於後方風速分佈影響不顯著；圖 7(b)比較位置 B 在考慮與忽略前方突起地形的風速沿

高度方向分佈，計算結果顯示前方突起地形對於後方風速在高度 50m 以下具有些微加速效應；圖 7(c)比較位置 C 在考慮與忽略突起地形的風速沿高度方向分佈，計算結果顯示突起地形對於風速具有小幅度減速效應；圖 7(d)比較位置 D 在考慮與忽略四周突起地形的風速沿高度方向分佈，計算結果顯示四周突起地形對於風速在高度 50m 以下具有些微加速效應，在高度 50m 以上具有些微減速效應；圖 7(e)比較位置 E 在考慮與忽略三方突起與單方開闊地形的風速沿高度方向分佈，計算結果顯示三方突起與單方開闊地形對於風速在高度 50m 以下變化不明顯，在高度 50m 以上具有些微加速效應；圖 7(f)比較位置 F 在考慮與忽略突起地形的風速沿高度方向分佈，計算結果顯示地形突起程度對於風速減速效應具有正向關係；圖 7(g)比較位置 G 在考慮與忽略高原地形的風速沿高度方向分佈，計算結果顯示高原地形對於風速具有小幅度加速效應。

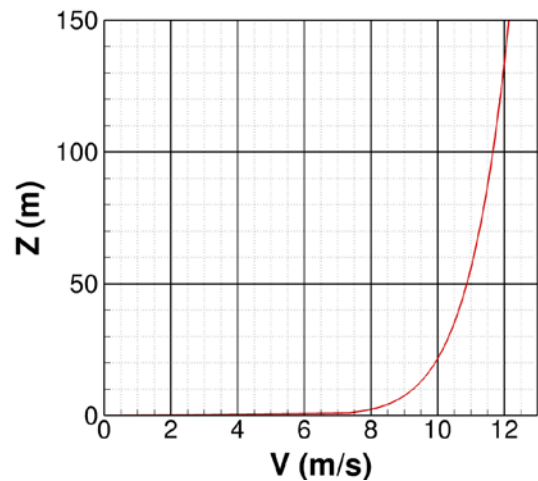
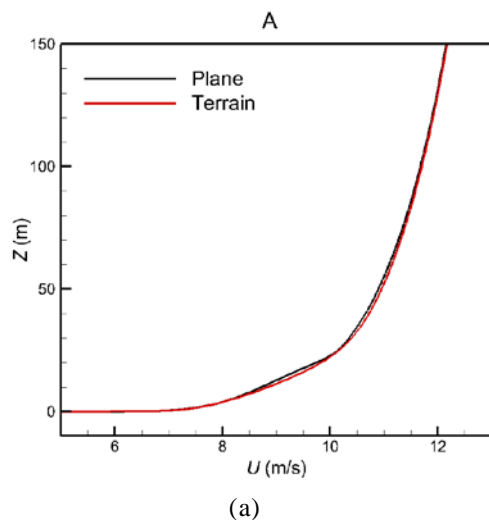
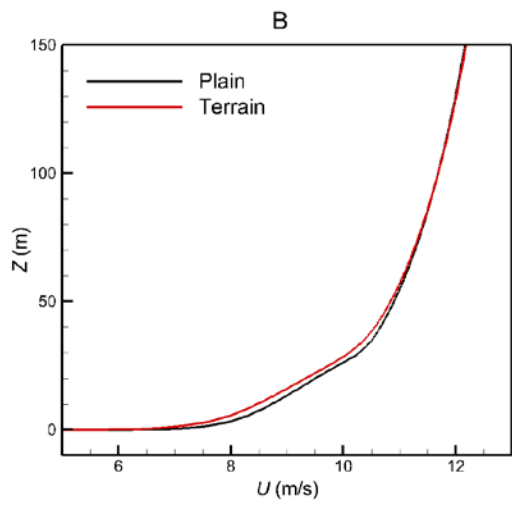
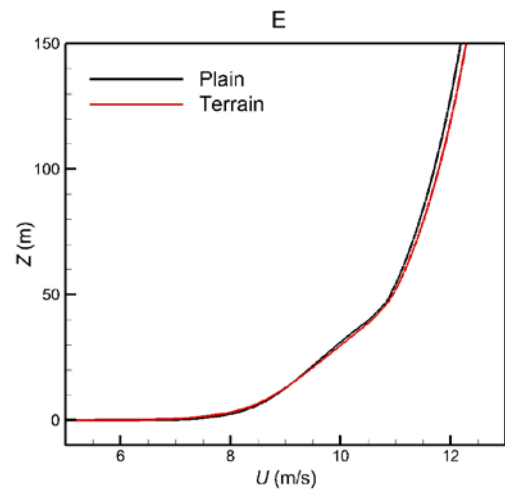


圖 6 水平入流風速與高度的關係

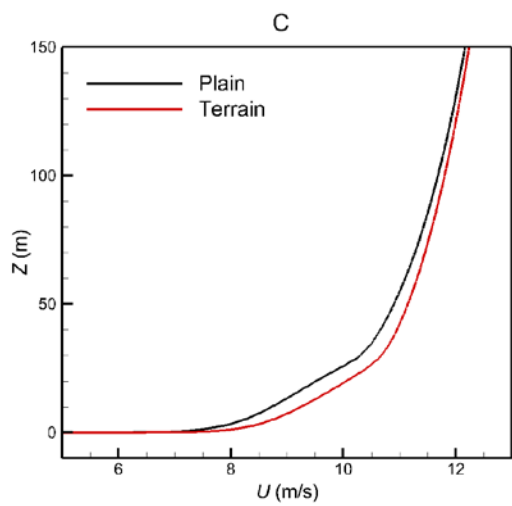




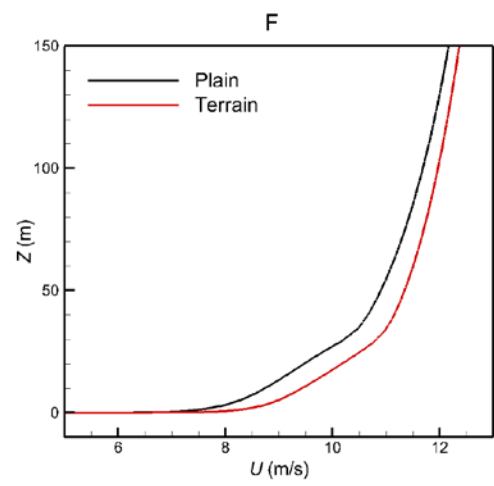
(b)



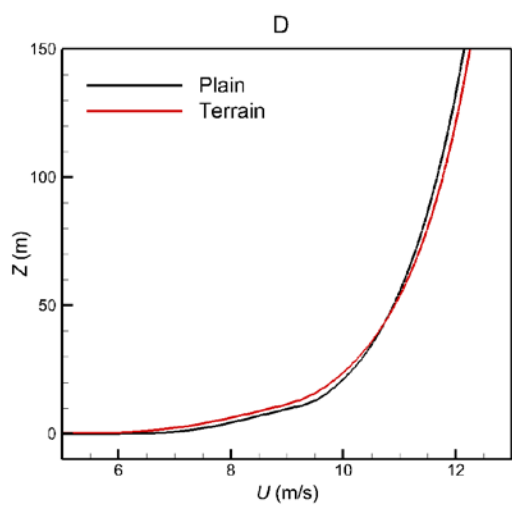
(e)



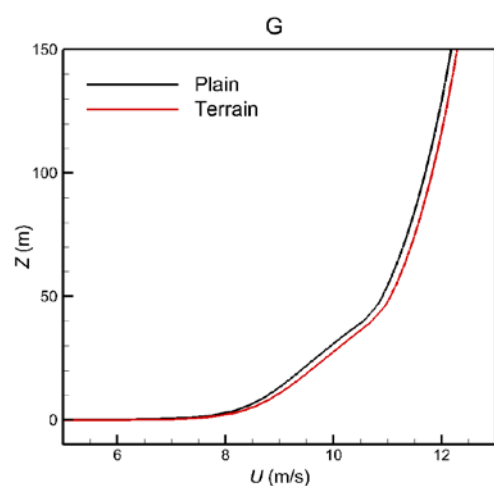
(c)



(f)



(d)



(g)

圖 7 平坦與實際地形的風速差異

2. 考慮地形風機風場模擬

本節討論在入流風速 12 m/s 條件下地形對於兩前後直線排列風機風況與功率輸出的影響。圖 8 為本節分析案例的示意圖，其中風機間距為 $S=640\text{m}$ ，地形簡化為兩風機間的一個突起，突起外形可由下式描述

$$y = H_h \sin\left(\frac{\pi x}{S}\right)$$

其中 H_h 為突起最高點高度。圖 9 為兩前後直線排列風機橫剖面速度分布，計算結果顯示氣流通過風機後軸向顯著速度下降，而切向速度明顯增大，接著沿下游方向切向速度逐漸減小。圖 10 比較不同突起高度兩前後直線排列風機縱剖面軸向速度分布。模擬結果顯示，當突起地形高度增加，突起地形上方的局部高速區亦隨之成長，同時伴隨著高流速區的向下延伸，使得前方風機跡流區域內的風速明顯增大。圖 11 為風機平均風速、輸出功率與 H_h 的關係，其中風機平均風速為通過風機轉子平面的風速平均值。數值模擬顯示 7 前方風機的功率與平均風速與 H_h 無關，然而後方風機的功率與平均風速與 H_h 呈現正向關係。當 H_h 達到 1/2 輪轂高度，後方風機的功率與平均風速分別增加 4.7% 與 3.3%，顯示地形突起可提高跡流區風速。

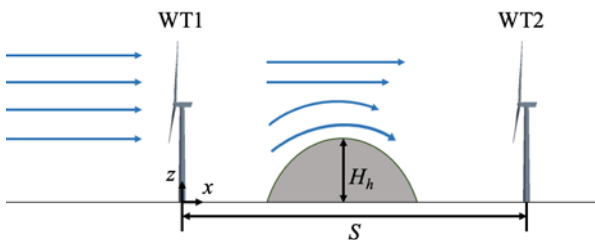


圖 8 兩前後直線排列風機與地形突起的關係

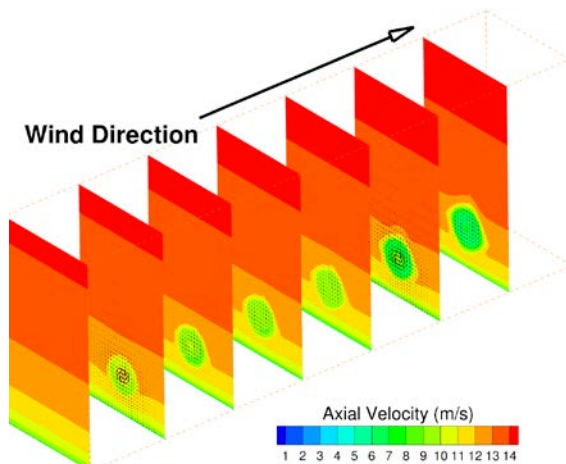


圖 9 風機橫剖面速度分布

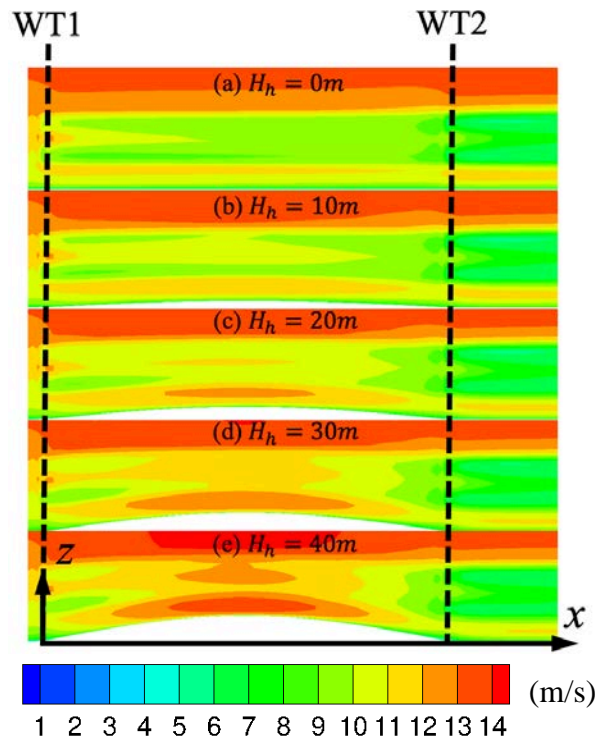


圖 10 風機縱剖面軸向速度分布

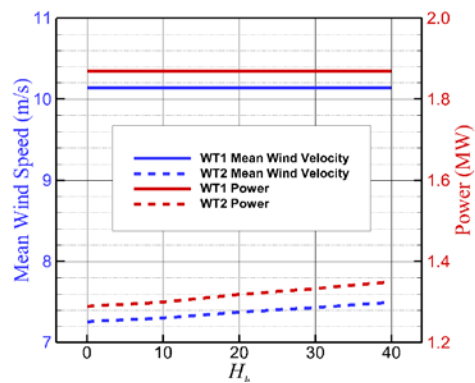


圖 11 風機平均風速、輸出功率與 H_h 的關係

結論

本研究考慮陸域風場中地形對於風機跡流干涉現象，建立基於貼壁網格系統的致動盤模型。利用求解連續方程式、動量方程式以及紊流模型，以獲得陸域風場中風機周圍三維跡流場。使用致動盤模型的主要目的在於降低風機跡流場模擬所需巨量數值計算需求以及相對應模擬方法的複雜度，因此在離散風機流場計算空間時不使用風機的實體幾何外形，而利用等效物體力模型獲得風機轉子對於風機周圍流場的影響，也就是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致動盤。這種做法不但能避免生成包覆於

複雜幾何外形葉片外部網格的難題，亦不需使用移動網格方式模擬風機轉子的空間運動，僅需要生成結構性網格系統，然後將等效物體力適當地分佈於葉片轉子通過的空間網格內部，因此能使用較為簡易的模擬方法進行流場模擬，達到有效地縮短流場分析時間之目的。本研究使用貼壁式的結構性網格系統，得以考慮陸域風場中地形效應對於風機跡流的影響。本研究首先分析台灣西部沿岸陸域目標風場，發現風機位於隆起地形具有較高的入流風速。接著分析突起地形高度對於兩前後排列 V80 風機功率的影響，在兩風機相距 8 個轉子直徑與 12 m/s 入流風速的條件下，發現後方風機的功率與平均風速與 H_h 呈現正向關係。當 H_h 達到 1/2 輪轂高度，後方風機的功率與平均風速分別增加 4.7% 與 3.3%，顯示地形突起有利於提高跡流區風速。本研究中地形跡流加速效應的原因主要來自僅考慮地表高度變化而未納入實際地表粗糙度的影響。實際地表會因粗糙度與障礙物類型產生不同程度的減速效應。

參考文獻

1. Lee, K.C., Nelson, B., Lin, T.Y., Chau, S.W., "Wake Flow Prediction of an Offshore Wind Farm via Turbulent Flow Modeling", The 6th Cross-Strait Conference of Hydrodynamics, Kaohsiung, 2017.
2. 李可榭、范秉天、林宗岳、趙修武，「風場中風機跡流數值模擬」，2017 年台灣風能學術研討會，彰化，2017。
3. Lee, K.C., Chau, S.W., "Wind Farm Wake Modeling Using an Actuator Disk Model", Proceedings of 8th PAAMES and AMEC 2018, Busan, Korea, 2018.
4. 趙修武、江衍成、陳春良，「以致動盤方法預測前後連續排列之風機陣列功率輸出」，2018 台灣風能學術研討會，台南，2018。
5. Chuang, Y.H., Chau, S.W., "Aerodynamic and Aeroacoustic Prediction of Wind Turbine Rotor for a 2MW Horizontal-Axis Design under the Rated Condition", The 6th International Symposium on Energy Challenges and Mechanics, Inverness, Scotland, 2016

WAKE MODELING OF WIND TURBINES LOCATED ON NON-HOMOGENEOUS TERRAIN

S. W. Chau* T. Y. Lin** B. Nelson**

*Department of Engineering Science and Ocean Architecture, National Taiwan University

**Research Department, CR Classification

Keywords: Terrain, wake, wind farm, wind turbine, numerical modeling

ABSTRACT

This paper proposes a three-dimensional, turbulent flow approach coupled with an actuator disk model to describe the flow field around wind turbines on non-homogeneous terrain as well as to predict the 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 code. The influence of terrain is considered by introducing a body-fitted grid system. The structured 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 effects of rotor motion. The body force representing the aerodynamic loading on the rotor blade is estimated via a prescribed equation that is suggested by numerical simulations employing the complete blade geometry. The actuator disk defined by the rotor swept region is used to assign the aerodynamic loading contributed by the rotor blades. The flow field without wind turbines is first analyzed for a target wind farm site on the west coast of Taiwan to disclose the terrain effects on the wind conditions. The wake modeling of two aligned wind turbines is conducted, where a nontrivial bump is located halfway between them. The impact of the bump height on the wind condition of as well as the power delivered by the second wind turbine is quantitatively discussed.