

台灣風譜應用於離岸風機之風速歷時分析設計探討

簡慶文^{*,1} ** 張景鐘*** 余承哲*

*國立臺灣大學 工程科學及海洋工程學系

**國立臺灣大學 能源研究中心

***國立台灣海洋大學 河海工程學系

關鍵詞：時域分析; 台灣風頻譜; 線性濾波法

摘要

能源與環境的議題使風力發電技術迅速發展，離岸風電具有發展的潛力，因為它可以大規模高效發電。而要實現離岸風電商業化，需要提前高精度預測風況，海上實際測量風況需要大量的時間和金錢。因此，在這項研究中，以自迴歸法來預測與分析海上風況。而台灣有受颱風侵襲而達到彈塑性狀態破壞之風險，若欲發展大型 15MW 級風力發電機，其在風荷載作用下的動力反應分析就顯得尤為重要。頻域法是以線性假設為前提分析，因此要借助時域法才可對結構做較精準的非線性分析。在時域下的風機結構風振動力反應分析中，為了分析風機結構在時域內的風振動力反應，本文探討隨機過程與理論參考回歸台灣風頻譜之公式，以自迴歸法類比了風速時程樣本，並以 Matlab 程式實現台灣風頻譜應用於離岸風力機塔設計之風速歷時，再對部分參數的合理取值進行了討論跟建議。

前言

台灣之風力機塔大部份設立在濱海或離岸區域，易受颱風之侵襲達到彈塑性狀態而進入破壞 [1,13,19]，在臺灣亦有受颱風侵襲而造成風力機塔倒塌之實際案例[14]，例如 2015 年蘇迪勒颱風，造成石門以及台中共有 8 座風力發電機組折損，風電機塔約有 50m 高，如圖 1 因颱風側力之彎矩使機塔受壓側產生挫曲斷裂大多在 12~19.5m 處進而造成塔倒塌。IEC61400-1,3[9, 17]是由歐洲相關國家所訂定，並無颱風狀況，所以風力會比颱風小，台灣風力機 CNS15176-1,3[2, 18]，規定有抗颱風(T-Class)之等級。目前台灣離岸風力欲發展大型 15MW 級風力發電機，其在風荷載作用下的動力反應分析就顯得尤為重要。因此，要對結構進行較精確的非線性分析只能借助於時域法。進行時域分析必須要利用風速時程樣本，而風速時程樣本的獲取只能通過實際強風記錄、風洞實驗或數值模擬來得到。而實際量測與風洞試驗一般都需耗費大量的物力財力，不易實現，因此為了對海上風力發電塔進行時域內風振反應分析，風速時程的模擬是必要的關鍵技術。目前，對於擾動風速時程的模擬主要採用的方法有自迴歸法、諧波疊加法、逆傅利葉變換法、小波分析方法等。其中自迴歸 (Auto Regressive method) 法因計算量小、速度快，廣泛用於隨機振動的時域模擬。A. Kareem[6]將隨機脈動風速時程看作多點高斯隨機過程進行數值模擬，並對擾動風速時程數值模擬方法進行了較全面的總結[10]。簡慶文等曾引用台灣迴歸風頻譜[11, 13]應用歷時分析於耐風設

計，本文根據風機模型，進行案例 150m 海上機塔擾動風速時程數值模擬，比較 Kaimal、Jang [8]台灣颱風迴歸之風譜轉成風歷時對臺灣海上風力機塔之影響，並校驗了計算功率譜與目標譜的吻合度，驗證了本文方法的正確性，為類比台灣海上風機結構的擾動風速時程提出了可行的方法。

風場特性與風機受風分析

風速的特性主要為平均風速是穩定的，且隨高度而增加；不同高度之波動振幅幾乎是相同的；而瞬間風速的變化，看起來似乎不相關連；但若取一分鐘左右的時間觀察，其緩慢的變異性可看出各個記錄之間存在的相關性。



圖 1 石門風力機倒塌位置圖

¹ 聯絡作者 簡慶文 (chienw@ntu.edu.tw)

1. 風場的特徵分析

Davenport [4] 根據多次觀測資料整理出不同場地條件下的風剖面，提出平均風速沿高度變化的規律可用指數函數予以描述，其式如下：

$$\frac{U_{zg}}{U_z} = \left(\frac{Z_g}{Z}\right)^\alpha, 0 \leq Z \leq Z_g \quad (1)$$

U_{zg} 表示梯度風速 (m/sec)； U_z 表示高度 Z 之風速 (m/sec)； α 表示 10 分鐘平均風速之垂直分佈指數，與地況種類有關， Z_g 表示梯度高度； Z 表示任意高度；Davenport 將式(1)式做以下的假設：

(1) 高度必須在 Z_g 範圍之內；(2) Z_g 本身僅為 α 之函數。

風速標準差與平均風速的比率，由同一組風速測量數據樣本確定，並在指定時間段內取。不同之平均時間之風速可採用 Durst-Curve 圖或表 1 換算 [13]。

而在強風條件下，最準確的數學表達式為對數律方法，因此使用對數律來表示海洋風速的垂直分佈如下式：

$$U(Z) = \frac{1}{k} \cdot u_* \cdot \ln\left(\frac{Z - Z_d}{Z_0}\right) \quad (2)$$

其中 Z 為地面高度， $U(Z)$ 是高度 Z 處的風速， $k=0.4$ [16] 是卡爾曼(von Karman 常數)， $u_* = (\frac{\tau_0}{\rho})^{1/2}$ 為摩擦速度，

表波浪引起的阻力。 Z_0 是粗糙度長度，表示波的粗糙度， Z_d 是零風面位移。一般來說，海上的 Z_0 比陸地上的 Z_0 小，因此海上的平均風速高於陸地； Z_0 與 Z_d 零風面位移如表 2 所示(Simiu,1996 and Balendra, 1993) [7]。

圖 2 為分別以指數律與對數律作圖之平均風速剖面圖。

表 1 不同之平均時間之風速

平均風速時距	1hr	10min	5min	1min	30sec	5s	3s	瞬時
統計比值	0.94	1.0	1.07	1.20	1.26	1.39	1.48	1.50

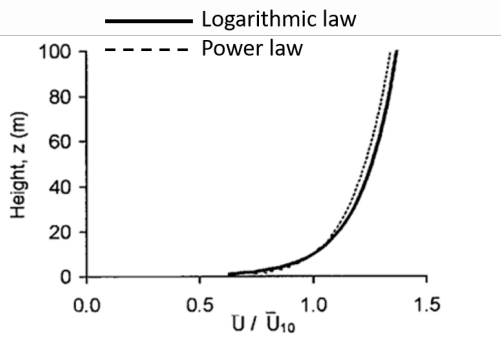


圖 2 以對數律($Z_0=0.02m$)與指數律($\alpha=0.128$)作圖之平均風速剖面比較圖 [21]

2. 擾動的風場與紊流的強度

大氣邊界層擾動風場具有非平穩隨機性，在中性大氣中擾動風場特性由地表粗糙度和海拔高度決定，地表粗糙度用地表粗糙度長度 Z_0 、零位移 Z_d 描述。風場運動是關於時間和空間相關的各向非均勻隨機過程，一般將其假定為具有零均值的三維多變量平穩隨機過程。而平均風速是描述風場運動是沿計算高度變化規律的重要指標，一般認為它符合對數律。紊流表現出三維的、不穩定的、週期性的運動，任何一點的風速都隨時間表現出短週期和長週期的變化。短週期變化是由紊流風引起的，而長週期變化是由大型風暴系統或季節性氣候事件引起的。由於紊流呈現三向維度，其不規則性和週期性的跳動軌跡，如圖 3 示[1, 3]。

擾動風場的特徵是以其各方向的功率譜密度函數來描述的，常用的功率譜模型有 Davenport 譜表 [5]、Kaimal 譜[7]。一般紊流強度為平均風速之瞬時擾流強度指標，定義為水平瞬間風速

樣本標準差與水平平均風速 \bar{U}_z 之比值，如下所述：

$$I_z = \sigma / \bar{U}_z \quad (3)$$

I_z 為局部區域的水平紊流強度， \bar{U}_z 為與 I_z 在同高度下量測之平均風速，水平瞬間風速樣本標準差 σ 計算方式如下：

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [U_i - \bar{U}]^2 \quad (4)$$

台灣風力規範[15]提出對於紊流強度之經驗公式，如下式所示：

$$I_z = c \cdot \left(\frac{10}{Z}\right)^{1/6} \quad (5)$$

其中 c 是地面粗糙度長度， \bar{z} 是在紊流強度之高度。從式(3)得知典型的紊流強度約 5%~20%，隨高度增加而遞減。但這與颱風之紊流強度不同，颱風因有颱風眼且時大時小關係所以颱風紊流強度會不同於規範與典型紊流強度。根據風機類別的不同，IEC 標準對最大耐風速有不同規定，其中 I 類風機標準約為每秒 70 公尺。圖 4 薔蜜颱風(2008)侵台時間之路徑，圖 5 薔蜜颱風(2008)之風速統計，1958-2017 年一些強的颱風，臺灣颱風之風速(3 秒之陣風速度)約有 15 次颱風風速大於 IEC-CLASS-I (3 秒之陣風風速)70 (m/s)。

表 2 地表面粗糙度長度 Z_0 (m) [7]

Type of Surfaces	Zero plane displacement Z_d (m)	surface roughness length Z_0 (cm)
Sand	-	0.01 ~ 0.1
Sea Surface	0	0.0003 ~ 0.5
Snow Surface	-	0.1 ~ 0.6
Mown Grass(-0.01m)	-	0.1 ~ 1
Low Grass, Steppe	0	1 ~ 4
High Grass	-	4 ~ 10
Outskirts of Town, Suburbs	5 ~ 10	20 ~ 40
Center of Towns	-	35 ~ 45
Center of Large Cities	15 ~ 25	60 ~ 80

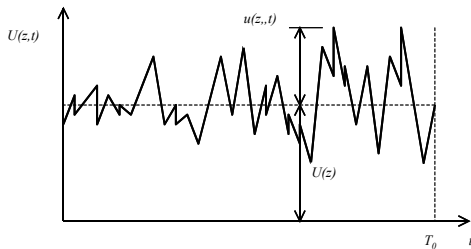


圖 3 縱向湍流和平均風速[1]



圖 4 蓄蜜颱風(2008)侵台時間與路徑[1]

3. 風機的受風分析

風機設計風速在 IEC 61400-1 輪轂高度 50 年極端風速 $V_{ref}=50\text{m/s}(10\text{min})$ ，轉換 3sec 陣風速輪轂高度 $V_{e50}=70\text{m/s}$ ，由於 IEC61400-1 是由歐洲相關國家所訂定，並無颱風狀況，所以會比颱風小，台灣風力機等級可參考 CNS15176-1 [2, 18]，其中抗颱風 T-Class 之等級，輪轂高度 50 年極端風速 (10min)=57m/s。另一方面，風之紊流擾動對風力機產生一種隨機之強迫振動，對於線性結構系統，紊流擾動引起之結構振動反應方根與紊流強度取成正比，即紊流強度大兩三倍，則結構動態反應或擾動風荷載之計算值亦成倍增加，目前典型之風力機抗紊流強度設計參數一般不超過 0.2，在 IEC 61400-1 風力發電機系統的安全等級，等級-I (Class-I) 最大風速，設計 A 類屬於較高的紊流特性，B 類屬於較低紊流特性。

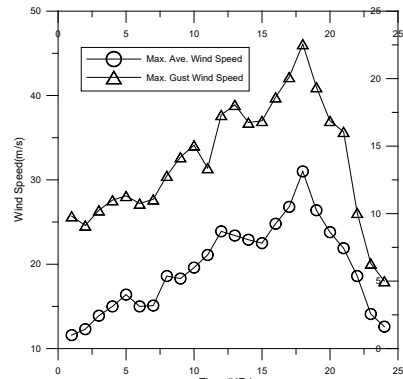


圖 5 蓄蜜颱風(2008)之風速統計[1]

擾動風(或稱陣風)速剖面(Gust Wind Velocity Profile)，是利用陣風因子(Gust Factor)與平均風速剖面可得到擾動風之風速剖面，陣風與平均風速可以下式關係式表示：

$$U_Z = \overline{U_Z} G = \overline{U_Z} (1 + g_v I_Z) \quad (6)$$

其中 G 等於陣風因子， g_v 等於尖峰因子，一般用 3.4~3.7。而 I_Z 是指在高度 z 之紊流強度； U_Z 是指在高度 Z 之擾動風風速剖面， $\overline{U_Z}$ 為在高度 Z 之平均風速剖面，依據這結果，紊流強度會隨高度之變化如下所式：

$$\frac{I_Z}{I_g} \Rightarrow \left(\frac{U_Z}{U_g} \right)^{-1} = \left(\frac{Z}{Z_g} \right)^{-\alpha} \quad (7)$$

聯合方程式(1)、(6)、(7)，擾動風速度在任何高度如下計算：

$$U_Z = \overline{U_g} \left[\frac{Z}{Z_g} \right]^\alpha \left[1 + g_v I_g \left[\frac{Z}{Z_g} \right]^{-\alpha} \right] \quad (8)$$

其中 $\overline{U_g}$ 等於平均梯度高度風速； Z_g 為梯度高度； I_g 等於梯度高之紊流強度； g_v 尖峰因子等於 3.7； α 等於 10 分鐘平均風速之垂直分佈指數(power exponent)。另外從中央氣象局之梧棲站資料，如圖 4，可得知，蓄蜜颱風 10m 高的最大 10 分鐘平均風速=32 m/s，最大瞬間風速=46.1 m/s，擾流強度是 44 %，而依式(3) 10m 高的紊流強度為 22 %。依式(8)，梧棲之 α 指數=0.15 可推得梧棲 50m 的陣風風速=63.85m/s (最大瞬間風速)，50m 處之 10 分鐘平均風速=40.7m/s，50m 處之擾流強度是 56.9%，若依風力規範式(5)計算，機塔之平均高的紊流強度為 16.7 %，但颱風時之紊流強度可能還是要以實際風速依式(3),(4)計算。表 3 列出了 VESTA V47-660 kw 風力渦輪機在 IEC 61400-1 標準中規定的現場條件下的 V_{e50} 限制。在這次調查中，最近十分鐘的平均風速為 56m/s，台電公司 (TPC) 測量了颱風 Jangmi 期間的最大暫態風速超過 70 m/s。

表 3 Vesta 風機之風速標準[1]

	Max. 10 min. mean	Max. 3 sec. mean	Gust max. acc.	Stop wind speed
V47 – 660 kw	50 m/s	70 m/s	10 m/s ²	25 m/s

風的歷時方法

海上風力發電具有未來發展的潛力，因為它可以大規模高效發電。海上風力發電要實現商業化，需要提前高精度地預測風況，而通過海上實際測量來預測風況需要大量的時間和金錢。因此，在這項研究中，時間序列法以自迴歸法來預測與分析海上風況。

1. 時間序列法(Time Series Method)

時間序列方法為使用風荷載模型的分析，其步驟如下所述：

第一步驟：可採迴歸之線性風速功率譜，如下式 (Simiu, 1996) [7]：

$$\frac{n \cdot S(Z, n)}{u_*^2} = \frac{200f}{(1 + 50f)^{5/3}} \quad (9)$$

其中折減頻率(reduced frequency)： $f = \frac{nZ}{U(Z)}$ 為一無

因次量， $U(Z)$ 為高度 Z 處之平均風速， n 為頻率 (Hz)， u_* 為摩擦速度，在工程應用上通常以 $f > 0.2$ 為佳。藉由此頻率值之步驟得到線性功率譜之風速，合於規範內之風速、高度。可採各風力規範如 ASCE-7 [12] 用於風速測量，線性風速功率譜之高度假設 10 公尺。

第二步驟：參考 ASCE-7 或其它風力規範作架構，展開風速時間序列，整個時間與高度產生一張風速分佈圖。

第三步驟：風速時間序列由每時間段風速產生組成，在這段頻率間隔內，包含有關能量總和之過程，產生許多餘弦曲線之幅度和頻率，把功率譜分成相等的頻率間隔，頻率間隔的增加量和中點頻率如下式：

$$\begin{aligned} \Delta n &= n_{i+1} - n_i \\ n_{mid} &= \frac{\Delta n}{2} + n_i \end{aligned} \quad (10)$$

n_i ， n_{i+1} 和 n_{mid} 分別是在頻率間隔下限的頻率，頻率間隔的上界，以及頻率間隔的中間點。功率譜位於中點頻率間隔然後使用線性內插作修改，只要那些頻率間隔小的足夠，因此那些功率譜在最低的和上界的那些頻率間隔的大約值。

這大約值如下：

$$S_{mid} = S_i + \left(\frac{S_{i+1} - S_i}{n_{i+1} - n_i} \right) \cdot \frac{\Delta n}{2} \quad (11)$$

S_i ， S_{i+1} 和 S_{mid} 分別在頻率間隔的下限功率譜值，頻率間隔的上界功率譜值，以及頻率間隔的中間點功率譜值。每段頻率間隔，式(9)和(10)的結果用在某一規定的時間段 t 獲得風速，對每一時間步驟是考慮整個功率譜， \bar{u} 平均風速是加在隨平均值之時間序列產生風速總和，一個隨機之相位角 ϕ 也被應用於求和。風速時間序列被計算作為，如下：

$$u(t) = \bar{u} + \sum_{ALL \Delta n} \sqrt{2S_{mid} \Delta n} \cos(2\pi n_{mid} t - \phi) \quad (12)$$

使用 Jang (2013) [8] 迴歸的台灣頻譜，詳圖 6 (與 Kaimal 相近)。

$$\begin{aligned} S_u(H, n) &= \frac{u_*^2}{n} \times \frac{222f}{(1.2 + 36f)^{5/3}} \\ &= \frac{2.17^2}{n} \cdot \frac{222 \times 1.2195n}{(1.2 + 36 \times 1.2195n)^{5/3}} \end{aligned} \quad (13)$$

$u_* = \left(\frac{\tau_0}{\rho} \right)^{1/2}$ 為摩擦速度， τ_0 為地表風之剪應力， n 為頻率(Hz)， f 為折減頻率。

2. 自迴歸法(Auto Regressive Method)

自迴歸法 (又稱 AR 法、線性濾波法) 是隨機風速時程模擬的一種經典方法。它是一類特殊的離散線性系統，即將現在時刻的影響值表示為過去若干時刻的反應與白噪聲的線性組合。自迴歸法或譜波疊加法都是用三角級數疊加的方法，模擬平穩高斯隨機過程。假設要模擬 m 個點的風速時程，則要得到 m 個變量零均值的平穩高斯隨機過程 $u_i^0(t) (i=1, 2, \dots, m)$ ，其互譜密度矩陣為：

$$S^0(\omega) = \begin{bmatrix} S_{11}^0(\omega) & S_{12}^0(\omega) & \dots & S_{1m}^0(\omega) \\ S_{21}^0(\omega) & S_{22}^0(\omega) & \dots & S_{2m}^0(\omega) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{m1}^0(\omega) & S_{m2}^0(\omega) & \dots & S_{mm}^0(\omega) \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中 $S_{ii}^0(\omega)$ 為自譜密度函數，為實數形式； $S_{ij}^0(\omega) (i \neq j) (i, j=1, 2, \dots, m)$ 為互譜密度函數，可表示成 $S_{ij}^0(\omega) = \sqrt{S_{ii}^0(\omega) S_{jj}^0(\omega)} \text{Coh}_{ij}(\omega)$ ； ω 為圓周頻率。

採用線性濾波法模擬多維風速時程時， m 個相關的隨機風速過程 $[u(t)] = [u^1(t), \dots, u^m(t)]^T$ 可由下式生成：

$$[u(t)] = \sum_{k=1}^p [\psi_k] [u(t-k\Delta t)]^T + [N(t)] \quad (15)$$

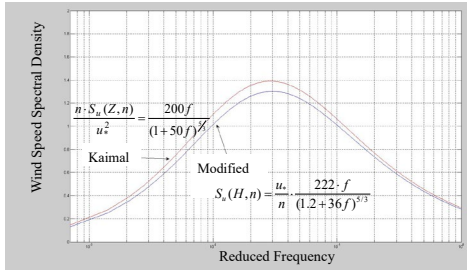


圖 6 回歸台灣颱風頻譜與 Kaimal 風頻譜[13]

式中， $[u(t-k\Delta t)] = [u^1(t-k\Delta t), \dots, u^m(t-k\Delta t)]^T$ ； $[N(t)] = [N^1(t), \dots, N^m(t)]^T$ ， $N^i(t)$ 為均值 0，具有給定協方差的常態分布隨機過程， $i=1, \dots, m$ ； $[\Psi_k]$ 為 $m \times m$ 階矩陣， $k=1, \dots, p$ ，自迴歸階數 p 的確定可以參考有關 AR 法的相關文獻，在此不再贅述。於是按照式 (15)，模擬風速時程的問題就歸結為求解 $[\Psi_k]$ 和 $[N(t)]$ 的過程。線性濾波法模擬多維風速時程可分為以下步驟：

步驟一：求解迴歸係數矩陣 $[\Psi_k]$ 。根據隨機振動理論，功率譜密度與相關函數（協方差）之間符合維納-辛欽公式，即

$$R_u^{ik}(j\Delta t) = \int_0^\infty S_u^{ik}(n) \cos(2\pi j\Delta t) dn, i, k = 1, \dots, m \quad (16)$$

式中， $S_u^{ik}(n)$ 為 i, k 兩點之間的互功率譜密度。對任一空間點 i ($i=1, \dots, m$) 具有時間差的隨機過程 $u^i(t)$ 與 $u^i(t-k\Delta t)$ 的協方差可以表示為：

$$R_u^i[k\Delta t] = E\left\{[u^i(t-k\Delta t) - E\{u^i(t-k\Delta t)\}][u^i(t) - E\{u^i(t)\}]\right\} \quad (17)$$

由於 $u^i(t)$ 與 $u^i(t-k\Delta t)$ 是均值 0 的平穩隨機風過程，其協方差的值為時間差的函數，式 (17) 可以改寫為

$$R_u^i[k\Delta t] = E\left[u^i(t-k\Delta t)u^i(t)\right] \quad (18)$$

將式 (15) 兩側同時右乘 $[u(t-k\Delta t)] = [u^1(t-k\Delta t), \dots, u^m(t-k\Delta t)]^T$ ，並兩邊同時取數學期望（均值），考慮到 $[N(t)]$ 的均值為 0，且與隨機風速過程 $u^i(t)$ 獨立，以及協方差 $R_u(j\Delta t)$ 為偶函數，可得到協方差與迴歸係數 Ψ_k 之間的關係，寫成矩陣形式，如下式

$$[R] = [\bar{R}][\Psi_k] \quad (19)$$

式中，

$$[R] = [R_u(\Delta t), \dots, R_u(p\Delta t)]^T, [\Psi_k] = [\Psi_1^T, \dots, \Psi_p^T]^T$$

求解 (19) 給出的線性方程組，可以得到迴歸係數矩陣 $[\Psi_k]$ 。

步驟二：求解 $[N(t)]$ 。對式 (15) 兩邊同時右乘 $[u(t)] = [u^1(t), \dots, u^m(t)]^T$ ，並兩邊同時取數學期望

（均值），考慮到 $[N(t)]$ 的均值為 0，且與隨機風速過程 $u^i(t)$ 獨立，以及協方差 $R_u(j\Delta t)$ 為偶函數，可得到協方差與迴歸係數 Ψ_k 之間的關係，寫成矩陣形式

$$[R_N] = [R_N(0)] - \sum_{k=1}^p [R_u(k\Delta t)] \quad (20)$$

根據式 (20) 求出 $[R_N]$ 後，再對 $[R_N]$ 作喬勒斯基分解（Cholesky 分解） $[R_N] = [L][L]^T$ ，則

$$[N(t)] = [L][n(t)] \quad (21)$$

其中， $[n(t)] = [n^1(t), \dots, n^m(t)]^T$ 為 m 個獨立滿足零均值，單位方差的隨機數向量。

步驟三：生成隨機風速時程。求出自迴歸係數矩陣 $[\Psi_k]$ 及 $[N(t)]$ 後，將式 (15) 按時間間隔 Δt 離散化，可得出 m 個具有空間相關性的時間間隔 Δt 的離散脈動風速時程向量。從用圖 7 的程序產生在特有的高度下是一單點的風速時間序列，因此，如果結構的高度沿著完整的相互空間關係，在時間序列裡的每單點的風速點可能也在其他點，因此是適合風速剖面，這樣就容易確定風速。

3. Matlab 步驟建立

- 輸入初始參數條件，選取截取頻率；截取頻率上限取到 3Hz 已包含總能量 95% 以上，超過 5 Hz 以後，所包含的能量已很少；
- 選取時間間隔與頻率採樣點數；
- 建立初始化 AR 模型（階數 $p=1$ ）計算 $S_{ij}(f)$ ，可得到迴歸係數 ψ ；
- 求出 R_N 後，對 R_N 做 Cholesky 分解，即可求出 $N(t)$ ；
- 將 $v(x, y, z, t)$ 按時間間隔 Δt 離散化求解出 M 個具有時間、空間相關，時間間隔為 Δt 的離散擾動風速過程向量，進而可得到擾動風速模型；
- 資料處理並顯示。

案例

台灣新竹某 15MW 海上風機，風機為 3 葉式，塔架出海平面 150 m，由於海下不受風力，針對海面上風力機塔筒化模型為 5 個質點 1~5，每段 30m，如圖 8 所示。假設當地海上 10 m 處平均風速為 32 m/s， $\alpha=0.11$ [20]， $k=0.4$ ，再由公式(1)、(2)可換算出地表粗糙度長度 $Z_0=0.02(m)$ 。並用 Kaimal(與 Jang 相近) 頻譜對 90m、150m 處的擾動速度時程進行了數值模擬，利用線性濾波法之分析程序，以 Matlab 程式進行模擬，校核了其計算譜與目標譜之間的關係。

在計算過程中計算頻率上限取 $\omega_u=10\pi$ ，風頻率分割份數 $N=1024$ ，時域上時間步長取 0.1 s ，模擬時長為 500 s 。根據上述參數，可得到風力機塔 150 m 高處之風速時間序列，圖 9~10 自迴歸法之風速時間序列(90, 150m 處)，90m 處最高風速可達 62 m/s ，150m 處最高風速可達 66 m/s ，這已大於 CNS15176-1 風力機 T-Class 等級(57 m/s)；圖 11~12 為 90m 和 150m 校核譜曲線。90m 和 150m 模擬風速時程之自功率譜和目標自功率譜大體趨勢是一致的。90m 和 150m 計算互功率譜和目標互功率譜在低頻區吻合較好，但是在高頻區吻合稍差。

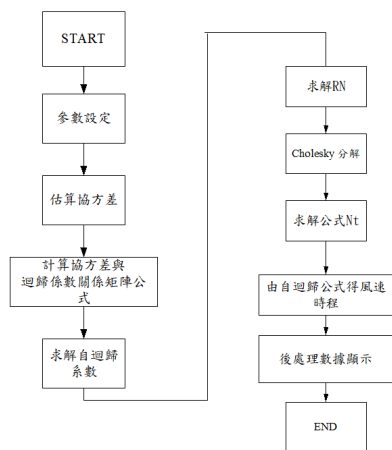


圖 7 風速歷時分析程序

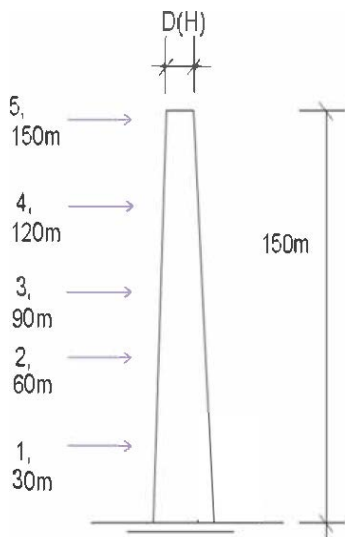


圖 8 150m 機塔高(出海面)受風之模擬

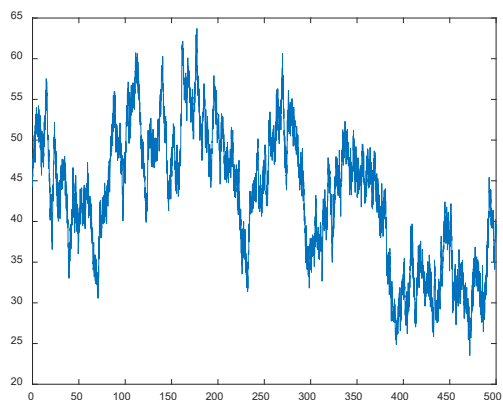


圖 9 自迴歸法之風速歷時(90m 處)

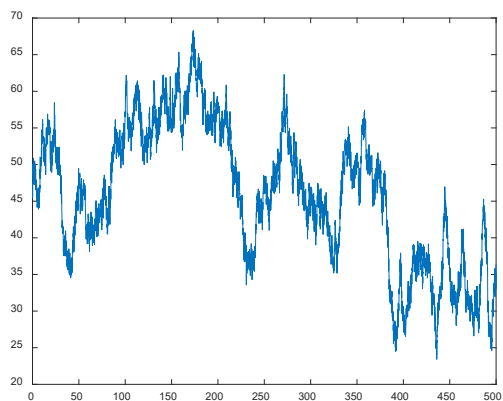


圖 10 迴歸法之風速歷時(150m 處)

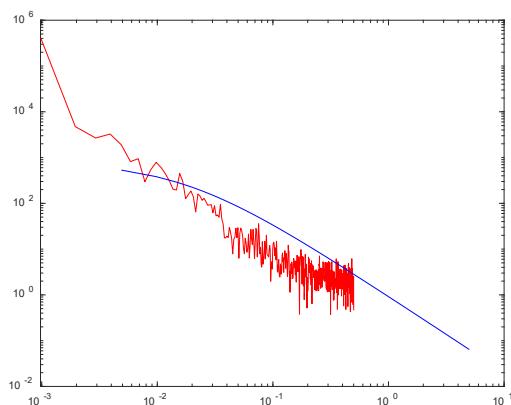


圖 11 自迴歸法與目標譜之校核(90m 處)

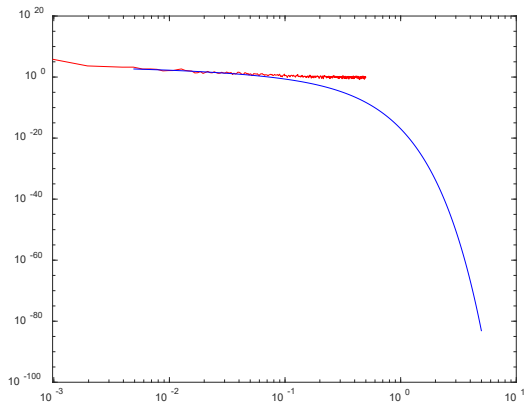


圖 12 自迴歸法與目標譜之校核(150m 處)

結論

離岸風電目前發展 15MW 級大型風機，因轉動慣量大，塔架與葉片柔性大等特性，使風機在風荷載作用下的動力反應分析設計顯得尤為重要。離岸風電要實現商業化，需要提前高精度預測風況，經上述研究與案例研討綜合結論如下：

1 自然環境：風的歷時分析圖因為颱風有不同於常時紊流影響，因此使其隨機特徵為不穩定狀態，風速圖型會隨颱風特徵、時間與空間而變，例如波浪高度造成的粗糙長度參數，因此模擬應接近自然風特性的時程樣本。

2 自迴歸法：是模擬隨機過程的一種離散的、近似的數值模擬方法，而通過計算譜與目標譜對比可以得出該方法精度在工程上是可以接受的。在採用自迴歸法的過程中，亂數的選取對於模擬結果影響較大，因此更加細緻的確定隨機數的選取原則是未來需要進一步探討的工作。

3 模擬風速關鍵技術：由於實際記錄到的強風作用過程應用於離岸風電實際還不能普遍實現，因此在沒有實測、風洞實驗資料的情況下，利用已知的頻域資訊通過 Matlab 程式可獲得人造風速與理論實現時間序列方法與 AR 模型類比的風速曲線比較。在模擬風速時程中，對時間步長和迴歸階數對模擬結果的影響很大。時間步長過大，會導致類比曲線失真；過低的迴歸階數會導致模擬的相關性低。而擾動風速所模擬的風與自然風在統計特性、時間相關性和空間相關性等方面是否一致，對於風速歷時的結果有較大的影響。

參考文獻

[1] C.W. Chien, and J. J. Jang, "A Study of Wind-resistant Safety Design of Wind Turbines Tower System," *7th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering*, November 8-12, Taipei, Taiwan, 2009.

[2] 中華民國國家標準, CNS15176-1 “風力機 第 1 部: 設計要求,” 2017.

[3] Van der Hoven, Isaac: “Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour”, *J. Meteor.*, 1957, No. 14, 160–164.

[4] A.G. Davenport, “The Relationship of Wind Structure to Wind Loading”, *Proceedings of the Symposium on Wind Effects on Buildings and Structures*, Vol. 1, National Physical Laboratory, Teddington, U.K., London, 1965, pp. 53-102.

[5] A.G. Davenport, “The dependence of wind load upon meteorological parameters”, *The International Research Seminar on Wind Effect on Buildings and structures*, Toronto, 1968.

[6] A. Kareem, “Nonlinear dynamic analysis of compliant offshore platforms subjected to fluctuating wind”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1983(142): 345-356.

[7] E. Simiu., R. H. Scanlan, *Wind Effect on Structure*, Third Edition, John Wiley and Sons, New York, 1996, pp 124-135.

[8] J.J. Jang. and C. W. Chien, “A Study of Gust Response Factor for Wind Turbine Towers Design,” *23th ISOPE, Int Offshore and Polar Eng Conf*, Alaska, USA, 2013.

[9] IEC 61400-1, International Electrical Commission, *Wind Turbine Generator Systems –Part1: Safety requirements*, 2005.

[10] A. Kareem, “Numerical simulation of wind effects : a probabilistic perspective”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, 2008, pp.1472-1497.

[11] 簡慶文, 張景鐘, “風速歷時分析應用於耐風設計之探討,” *第五屆全國風工程研討會*, 中壢, 台灣, 2014.

[12] ASCE-7, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, American Society of Civil Engineers, 2010.

[13] C.W. Chien, *A Study of Design and Reliability Analysis of Wind-Sensitive Structures*, Ph.D. Dissertation, School of Harbor and River Engineering, National Taiwan Ocean University, 2010.

[14] J. J. Jang, and C.W. Chien, “Damage Caused by Typhoon and Design of Wind Turbine Towers,” *20th Int Offshore and Polar Eng Conf*, Benjii, China, ISOPE, 2010, pp651-658.

[15] 中華民國內政部營建署: “建築物耐風設計規範及解說”, 營建雜誌社印行, 2006 年。

[16] Von Karman, T., 1948. “Progress in the Statistical Theory of Turbulence,” *Proceedings of the National Academy of Science*, Washington., D. C., pp. 530-539.

[17] IEC 61400-3, *International Electrical Commission, Wind Turbine Generator Systems –Part1: Safety requirements*, 2009.

[18] 中華民國國家標準, CNS15176-3 “風力機 第 3-1 部: 設計要求,” 2023.

[19] 簡慶文、張景鐘、簡孝東”台灣風電機塔破壞預測技術分析”, *台灣風能協會會員大會暨學術研討會與科技部成果發表會*, 彰化, 台灣, 2017

[20] 余柏宏, “新竹近海地區自然風場特性探討”, 2018。

[21] John D. Holmes, *Wind Loading of Structures*, 2003。

Taiwan Wind Spectrum for Offshore Wind Turbines: A Study on the Design of Time history Analysis of Wind Speed

*Ching-Wen Chien*** Jing-Jong Jang*** Cheng-Che Yu**

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

**Energy Research Center, National Taiwan University

***Department of Harbor and River Engineering, National Taiwan Ocean University

Keywords: Time Domain Analysis, Taiwan Wind Spectrum, Linear Filtering Method

ABSTRACT

The issue of energy and the environment has led to the rapid development of wind power technology, making offshore wind power have the potential for large-scale efficient power generation. To commercialize offshore wind power, precise forecasting of wind conditions is necessary, but actual measurements at sea require a significant amount of time and money. In this study, the Linear Filtering Method is used to predict and analyze offshore wind conditions. Taiwan is prone to typhoon-induced damage, and the development of large 15MW-class offshore wind turbines in Taiwan highlights the importance of analyzing the dynamic response under wind loading. Frequency domain analysis is based on linear assumptions, so nonlinear analysis of structures requires the use of time-domain methods for greater accuracy. In the time-domain wind-induced vibration response analysis of wind turbine structures, this study explores stochastic processes and references Taiwan's wind spectrum formula, analogizing wind speed time series samples using the Linear Filtering Method. The application of Taiwan's wind spectrum to offshore wind turbine tower design is implemented in Matlab, and discussions and recommendations are made on reasonable parameter values. The results in this case indicate that values in the low-frequency range are small, leading to significant rounding errors around spectrum peak positions, while values in the high-frequency range are relatively close. Further exploration is needed on the principles of detailed random number selection and obtaining parameters close to natural wind environments.