



# 陸域風力機支撐結構監測及系統識別之實踐

國立臺北科技大學兼任助理教授、離岸風電工程研究中心計畫經理 / 蘇進國  
國立臺北科技大學特聘教授、離岸風電工程研究中心主任 / 宋裕祺  
國立臺北科技大學土木工程系博士生 / 陳儀諺  
國立臺北科技大學土木工程系碩士生 / 陳致融  
達德能源集團工程規劃部總監 / 林世豪

關鍵字：風力機支撐結構、模態分析、系統識別、健康診斷

## 摘要

本研究利用光纖感測器執行陸域風力機支撐結構的監測工作，希冀有效掌握支撐結構的模態振型與振動頻率變化。研究過程首將簡述陸域風力機之基本組成和規格，並提前進行支撐結構的有限元素模態分析，俾利規劃監測系統各項感測器布設位置與用途。待說明風力機原有運轉監控資料後，隨即針對場址風速超過額定風速之時段，進行塔柱頂部加速度歷時的快速傅立葉轉換，期能求得支撐結構的關鍵振動頻率，後將該時段之加速度歷時進行正規化均方根值運算，藉此比對場址風速、轉子機艙總成方位角與加速

度歷時之關聯性。再者，本研究亦將簡介隨機子空間識別法的基本理論，俾利採用有別於一般結構數值分析方法，另以直接量測所得之訊號評估結構振動反應，完成風力機支撐結構系統識別，並綜合檢討有限元素分析、頻率域頻譜及時間域系統識別之成果，完成陸域風力機健康診斷研究。

## 一、前言

因應全球氣溫急速上升的氣候變化，2021年COP26研擬之氣候協議中[1]，為達成2050淨零碳排的全球共識，已要求世界各國明確提出低碳政策，藉由碳排放占比、碳

中和規劃及方案、減碳機制、列舉優先減碳產業等方式，提升再生能源發電效能及生活產品的低碳供應鏈產量，冀能減少溫室氣體排放並減緩氣候變遷。經濟部能源局於西元2000年發布「風力發電示範系統設置補助辦法」[2]，鼓勵官方及民間企業積極投資陸域風電產業，並於2004年開放民營電廠，而全台至2020年約有400部風力機，迄今已成為重要的再生能源發電來源。惟毋論陸域或離岸風力機，其使用年限多為20~25年，隨著澎湖中屯台電陸域風力機即將於2023年屆齡退役事件發生，對於先期設置之陸域風力機而言，已逐漸面臨設備汰換之議題，而風力機支撐結構之安全性能、運轉維護、除役或延役等事項，實則蔚為現今重要研究課題。

爰此，本研究主要針對陸域風力機支撐結構，進行運轉與服役階段之即時監測研究，期能經由感測器的系統識別方法，完成風力機支撐結構健康診斷之目標，以保障本土化風力發電再生能源的永續經營與發展。

## 二、陸域風力機簡介暨監測系統規劃

### (一) 陸域風力機之組成

如圖1所示，國內常見之陸域風力機若由外觀進行分別，可略分為轉子葉片、輪轂、機艙、塔架、艙門和基礎結構。轉子葉片、輪轂和機艙內部機構常統稱為轉子機艙總成(Rotor-Nacelle Assembly, RNA)；塔架及基

礎結構則是風力機的主要支撐結構。相關組成構件簡述如下：

1. 轉子葉片：國際常見為二葉式與三葉式翼型葉片，惟因輪轂結構平衡力及機械疲勞之穩定性等問題，國內常採三葉式翼型葉片。
2. 輪轂：輪轂位於葉片前方，由轉子連接至機艙，為風力發電設備的重要零件。
3. 機艙：機艙內部由傳動發電機、齒輪調速器、轉向控制系統和相關機電設備組成，常被稱作是「風力機的心臟」，組裝完成重達數百噸。

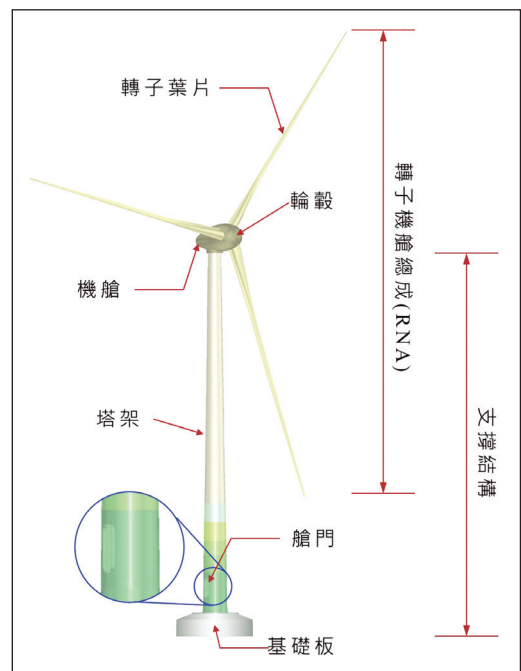


圖 1 陸域風力機組成構件圖



4. 塔架：由不同厚度與直徑之巨型鋼管結構組成，為利葉片轉動，塔架高度常高達數十公尺。
5. 艙門：位於塔架底部，提供運轉維護人員進入風力機內部進行檢修工作。
6. 基礎結構：又稱基座，由鋼筋混凝土構造組成，提供風力機底部完整支承力。

## (二) 監測目標之規格及基本性能

本研究監測對象為市售2.35 MW陸域風力機，該風力機之RNA系統採用直接驅動式之環狀同步發電機（Direct-Drive Annular Synchronous Generator），除有別於大量傳動軸承接連，其內部無齒輪箱之配置，因此旋轉過程中可降低磨耗次數。此外，該系統僅需兩個慢速滾珠軸承，即可使葉片於一般

風況下轉動，並得以直接推動後方發電機組，大幅降低齒輪箱系統造成之耗材磨損及能量損耗等問題。

本研究監測之陸域風力機位於臺灣北部西側沿海地區[3、4]，其結構尺寸與基本性能如表1所示。其中，輪轂高度為68.91公尺，轉子葉片掃掠面積約6,648平方公尺，切入風速為2 m/s、切出風速為28~34 m/s，而額定風速達13 m/s時之輸出功率為2,350 kW。

## (三) 有限元素結構分析求取模態振型與頻率

為瞭解支撐結構振動特性，本研究提前透過有限元素軟體進行分析，探討結構振動模態變化與反曲點概略位置，分析結果如圖2所示。根據初步分析結果顯示，風力機之正向（Fore-Aft）與側向（Side-Side）結構頻率

表 1 本研究監測目標之規格及基本性能

項目	內容說明
風力機類型	陸域
額定功率 (Rated power)	2,350 kW
輪轂高度 (Hub height)	68.91 m
輪轂高度可承受之極端風速	3 秒最大陣風：59.5 m/s
轉子直徑 (Rotor diameter)	92 m
轉子葉片掃掠面積 (Swept area)	6,648 m <sup>2</sup>
葉尖速度 (Tip speed)	81.89 m/s
轉子速率 (Rotor Speed)	5~17 rpm
切入風速 (Cut-in wind speed)	2 m/s
額定風速 (Rated wind speed)	13 m/s
切出風速 (Cut-out wind speed)	28~34 m/s (暴風情境)

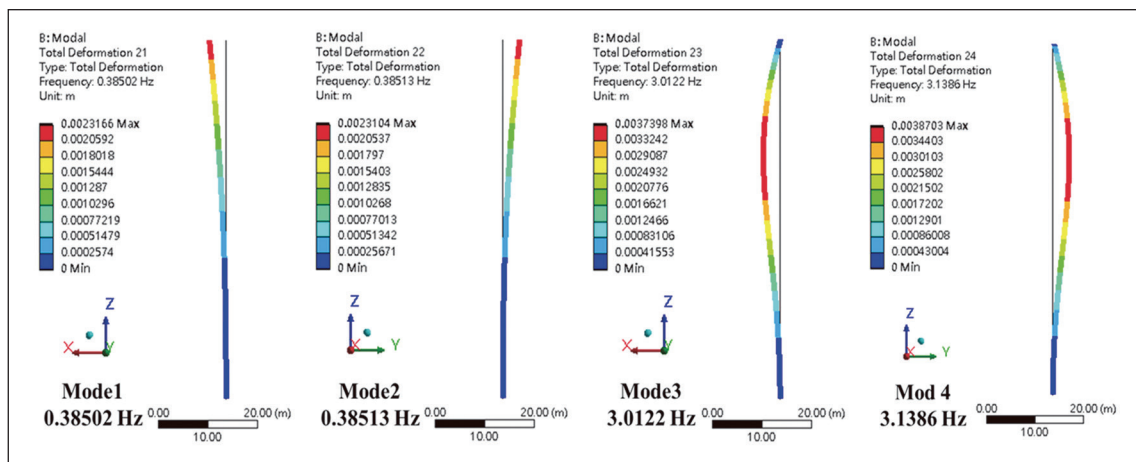


圖 2 風力機支撐結構梁元素模態分析結果

為0.38502 Hz及0.38513 Hz，可定義為風力機塔架的雙向第一振動模態；雙向第二模態各為3.0122 Hz及3.1386 Hz，且反曲點約為塔架結構之2/3~3/4處。

據此，本研究進行監測儀器布設前，冀能藉由監測數據研析風力機支撐結構的前兩個振動模態，而風力機塔柱高度約為67.335公尺，艙門底部距地表約3.514公尺，艙門進入後已擺放各式機構且無安置儀器空間，因此監測點布設以能夠裝設的最低和最高為基礎，儘量均布架設各式儀器，俾求完整量測各振動模態振型，並求得相對應的振動頻率。

#### (四) 陸域風力機支撐結構監測系統規劃

根據前述陸域風力機之組成可知，其主

要支撐結構為鋼製塔架及混凝土基座。鋼製塔架聳立於高空中，相關振動模態與振動頻率近似於單柱式結構的動態行為，惟須特別考量RNA追風轉向、偏心載重變化和不同轉子葉片轉速改變所造成的轉動慣量。基於前述因素，本研究參考國際期刊所示之案例，於塔架不同高度的塔身處，設置五個不同高程點位的兩向（又稱為X、Y向）加速度計，監測點①之高程為EL. 59.535 m、監測點⑤之高程為EL. 10.48m，此五點位置均以人力所能觸及並且不干擾風力機正常運維動線為主，亦儘量由塔柱底部至頂部均勻分布，監測點位與距地面高程關係如表2所示。其中，監測點⑤中的儀器配置，除雙向加速度計之外，亦設置一組溫度計和四組應變計（如圖3），溫度計用於記錄塔柱內部溫度變化，應變計則裝設於塔柱底部間隔90度之方位，除可用於觀察鋼材之應變變化，亦可藉由偏



表 2 監測儀器配置總表

項目	距地面高程	儀器配置
監測點①	59.535 m	X、Y 向加速度計
監測點②	44.55 m	X、Y 向加速度計
監測點③	28.57 m	X、Y 向加速度計
監測點④	18.255 m	X、Y 向加速度計
監測點⑤	10.48 m	X、Y 向加速度計、四組應變計、溫度計

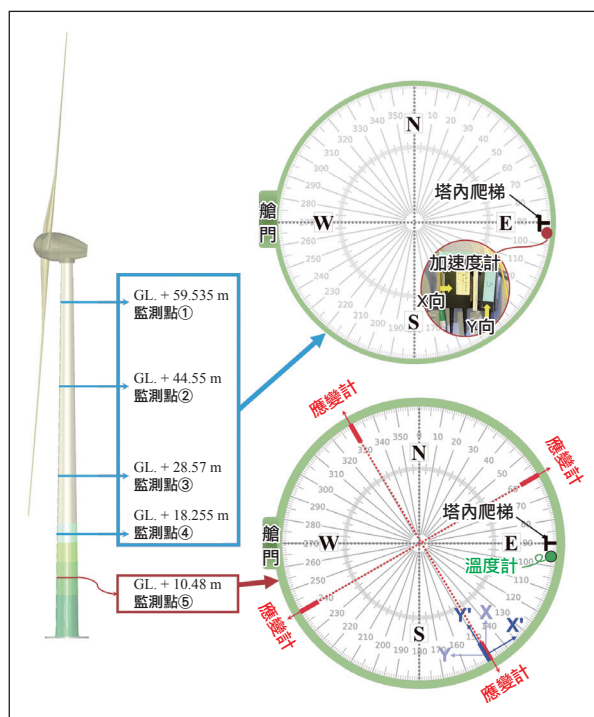


圖 3 監測儀器裝設位置

心載重位置的推估過程，間接求得RNA的轉向方位。

此外，針對監測儀器與設備部分，有別於一般電子式儀器，本研究主要採用光纖光柵(Fiber Bragg Grating, FBG)感測器進行規劃，包含加速度計、應變計和溫度計等共15

個感測器（如表3）。於現地即時監測取得數據後，本研究透過資料擷取器將FBG感測器資訊先儲存於現地工業電腦，後由4G網路傳送至雲端監測系統，俾利監測人員即時取得監測資料。另為保障工業電腦及資料擷取器之正常運作，現地電力系統配置不斷電設備，並將資料擷取器、工業電腦和不斷電系

表 3 監測儀器及設備統計

編號	儀器與設備品名	數量
1	光纖光柵加速度計(單軸向)	10 個
2	光纖光柵應變計	4 個
3	光纖光柵溫度計	1 個
4	工業電腦(含 CPU 及監測資料儲存碟)	1 台
5	4G 網路模組	1 組
6	不斷電系統	1 台
7	資料擷取器	1 台
8	不鏽鋼觀測箱	1 個

統放置於不鏽鋼觀測箱中，同步保障設備財產安全。

### 三、監控及監測數據分析及比對

#### (一) 運轉監控資料說明與分析

常見之市售陸域風力機均設置資料採集與監控系統(Supervisory Control and Data Acquisition System, SCADA)，其可視為風力機之「神經中樞」，主要用於監控風力機的運轉狀態。SCADA常以每 10 分鐘為間隔，記錄風力機場址風速、轉速、發電功率、RNA轉向、累積產能時數和異常狀態等資料，除提供歷史紀錄外，亦得供為風力機製造商日後研發或修訂產能曲線的重要依據，並為控制機艙轉向和葉片角度的主要來源。綜觀相關參數定義中，又以風力機的切入風速、額定風速和切出風速等規格最為重要。

根據前述監測目標之規格及基本性能可知，待測風力機之切入風速為2 m/s、額定風速達13 m/s，因此本研究先將SCADA記錄得之場址風速(Wind Speed, WS)進行分類如下：

#### 1. WS1：0 < WS ≤ 2 m/s。

該場址風速下，風力機呈現怠速狀態，此時葉片角度未控制轉動，風力機亦無產能。

#### 2. WS2：2 < WS ≤ 13 m/s。

風力機藉由場址風速提高而開始轉動，風能轉換器亦開始運轉並產出能源。

#### 3. WS3：WS > 13 m/s。

場址風速達到額定風速，RNA內部各項控制器藉由管制轉速、葉片旋轉角或煞車系統等，控制風力機穩定發電。

分類說明完成後，本研究針對本土冬季

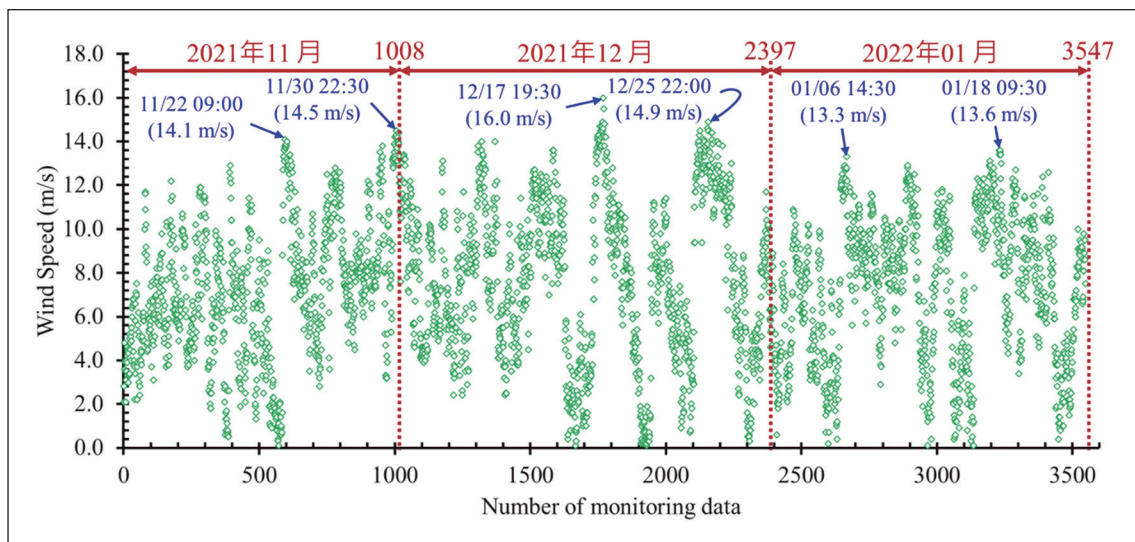


圖 4 SCADA 記錄得之監測期間場址風速分布圖

監測期間（2021年11月~2022年1月）之運轉監控資料進行場址風速彙整，可求得如圖4所示之隨時間推進的風速變化分布圖。觀察圖中可發現：(1) 2021年11月份共記錄有效資料1,008筆資料；(2) 2021年12月份記錄1,389筆、總累積筆數為2,397；(3) 2022年1月份記錄1,150筆、總累積筆數為3,547。再者，場址於各月份之最大風速中，11月份為14.5 m/s、12月份為16 m/s、1月份為13.6 m/s，顯示場址於冬季的每月最大風速都超過額定風速，並達到前述WS3分類狀態。

## (二) 場址風速超過額定風速之塔柱頂部加速度監測數據分析

本節將針對圖4所示之6個場址風速超過

額定風速時段，利用前述監測點位①的X向加速度監測數據，進行快速傅立葉轉換（Fast Fourier Transform, FFT），並說明陸域風力機器的各種振動頻率反應。

首先，本研究監測數據的取樣頻率為100 Hz，以SCADA每10分鐘間隔之監控資料為例，相對應之10分鐘監測數據有 $100 \times 60 \times 10 = 60,000$ 筆，數據資料量十分龐大。為利數值分析成效，本研究採用VBA（Visual Basic for Applications）進行資料批次處理與分析，經資料切割、擷取與執行FFT研析後，可求得6個場址風速超過額定風速期間（如圖5所示）的塔柱頂部振動頻率與振幅關係圖。值得注意的是，由圖中可發現三個具有物理意義的主要振動頻率，依序分別為0.284 Hz、

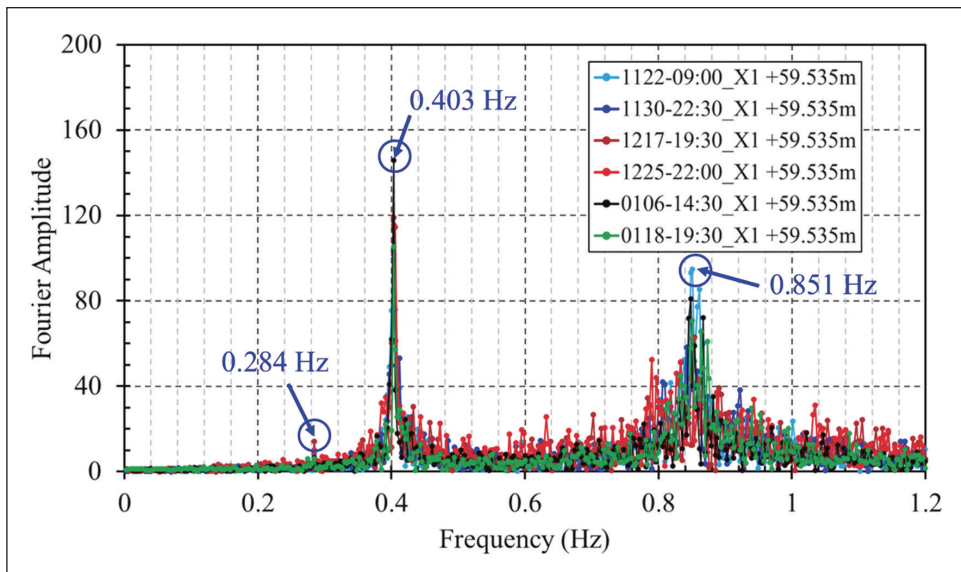


圖 5 監測點①加速度歷時經快速傅立葉轉後結果

0.403 Hz 和 0.851 Hz，相關說明如下：

1. 0.284 Hz：根據風力機之規格及基本性能顯示，其轉子速率介於 5~17 rpm 之間，轉子所造成之振動頻率（Rotor Frequency，又稱為 1P）約為 0.083~0.283 Hz。此分析結果顯示，當場址風速超過額定風速時，風力機的 1P 振動頻率上限值大概可藉由塔頂加速度反應求得。
2. 0.403 Hz：此振動頻率稱為塔柱模態（Tower Mode），其值與前述由有限元素結構分析初步求得之正向與側向結構第一振態頻率（0.38502 Hz 及 0.38513 Hz）相近，亦可由後續系統識別結果求得，並可藉此相互驗證監測成果的正確性。

3. 0.851 Hz：如同前述說明，風力機轉子速率介於 5~17 rpm 之間時，三個葉片轉動一圈所造成的塔柱屏蔽振動頻率（Blade-Passing Frequency，又稱為 3P）約為 0.250~0.850 Hz。因此，該頻率係為 3P 振動頻率之上限值。

### （三）塔柱頂部兩向加速度監測數據與場址風速監控資料比對

為觀察塔柱振動加速度及場址風速之關聯性，本節利用第 3.1 節的場址風速分類原則，先將監測及監控資料進行劃分，俾利研析風力機於惰轉至高速運轉下的振動反應。分析比對前，為避免感測器量測單位之影響，本研究針對場址風速監控資料，以不同





風速區間之監控平均值為基準，進行無因次正規化運算。另一方面，對於塔柱頂部兩向加速度監測數據，則是參考國際研究之作法，採用加速度的均方根值（Root Mean Square, RMS）進行計算，其後亦以不同風速區間之加速度均方根值的平均值為基準，對監測資料再次執行無因次正規化運算，俾利

尋求兩者的關聯性。其中，加速度的均方根值計算公式如下：

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_{n-1}^2 + x_n^2}{n}} \quad (1)$$

圖6~8為不同風速範圍下，塔柱頂部水平兩向加速度監測數據經均方根及正規化

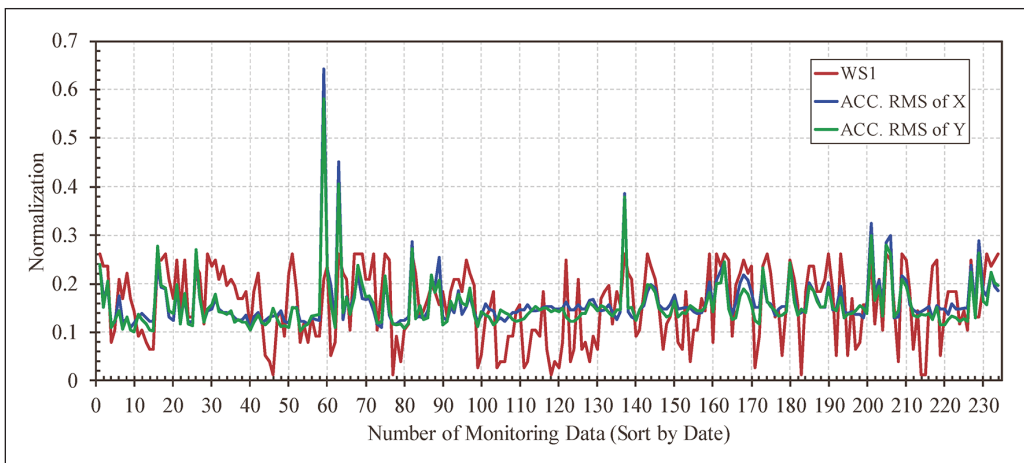


圖 6 WS1 風速範圍下之塔柱頂部加速度監測數據與風速監控數值趨勢比對

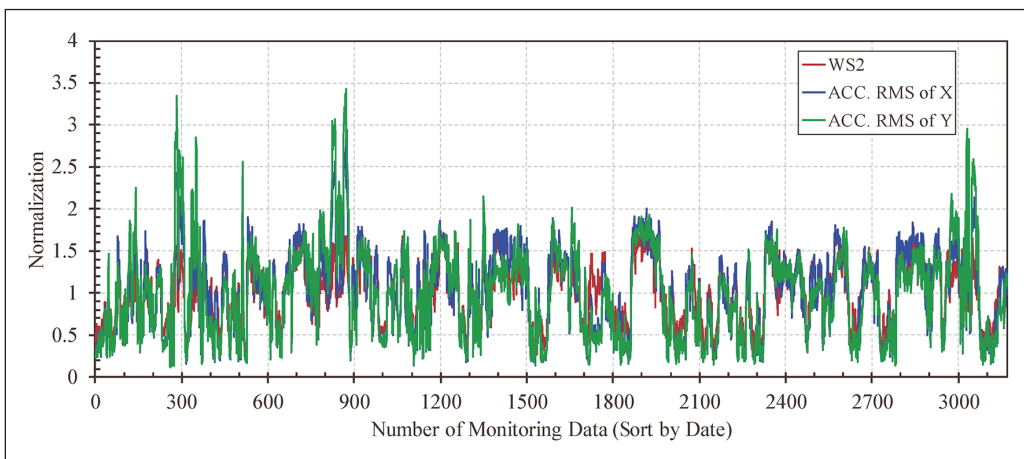


圖 7 WS2 風速範圍下之塔柱頂部加速度監測數據與風速監控數值趨勢比對

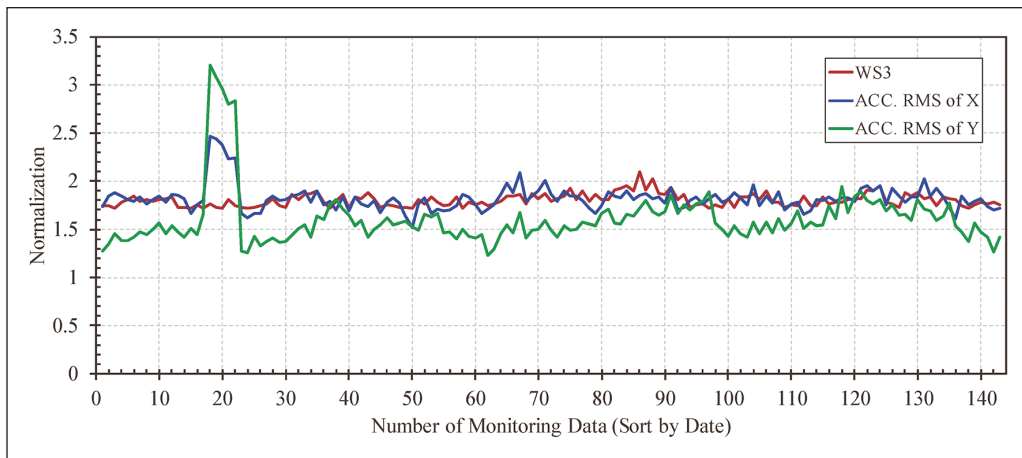


圖 8 WS3 風速範圍下之塔柱頂部加速度監測數據與風速監控數值趨勢比對

運算後（圖例編號為ACC. RMS of X and Y），與正規化風速分布趨勢（圖例編號為WS1~WS3）之套疊比較圖。於圖6中，當場址風速為WS1： $0 < WS \leq 2$  m/s時，風力機未發電，塔柱頂端水平兩向加速度反應相近，但與風況變化未具明顯相關性；另於圖7中，當場址風速為WS2： $2 < WS \leq 13$  m/s時，風力機以不同功率進行發電，除塔柱頂端水平兩向加速度反應相近之外，亦與風況變化產生極度正相關；而圖8顯示，當場址風速為WS3： $WS > 13$  m/s時，風力機以穩定的額定功率進行發電，雖塔柱頂端水平兩向加速度數值略有差異之外，其發展趨勢仍與風況維持相當的關聯性。

#### （四）塔柱頂部加速度監測數據與 RNA 方位角監控資料比對

本節利用前節所述之塔柱頂部兩向加速

度監測數據的RMS，以及SCADA監控資料所記載之RNA方位角，疊代至圖9所示的羅盤方位，冀能窺探本土風力機於冬季捕風的方向性。

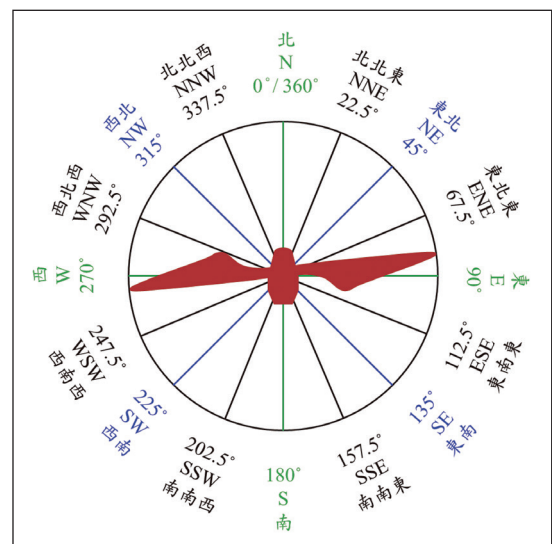


圖 9 陸域風力機俯視圖-16個羅盤方位與真方位角



圖10~12為不同風速範圍下，塔柱頂部水平兩向加速度監測數據經均方根運算後（圖例編號為ACC. RMS of X and Y），與RNA方位角分布趨勢（圖例編號為WS1~WS3）的套疊比較圖。於圖10中，當場址風速為WS1： $0 < WS \leq 2$  m/s時，機艙方位角顯示風向來自四面八方，與塔柱頂部兩向加速度無明顯關聯性；另於圖11中，當場址風速為WS2： $2 < WS \leq 13$  m/s時，因風力機之設計係採迎風策略，資料顯示RNA遍佈於 $0^\circ \sim 120^\circ$ 的方向（正北至東南東方向），塔柱頂端水平兩向加速度反應亦與RNA角度發展趨勢一致；而圖12顯示，當場址風速為WS3： $WS > 13$  m/s時，RNA方位角集中於 $15^\circ \sim 45^\circ$ 的方向（北北東至東北方向），塔柱頂端水平兩向加速度與其方位角呈現趨勢一致。

此外，根據監測結果顯示，風力機的

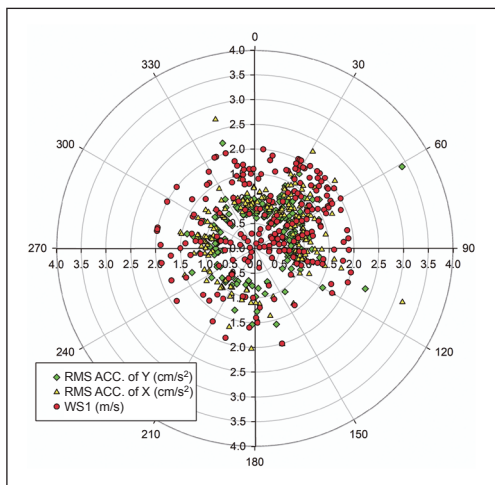


圖 10 WS1 風速範圍下之塔柱頂部加速度監測數據與 RNA 方位角關係圖

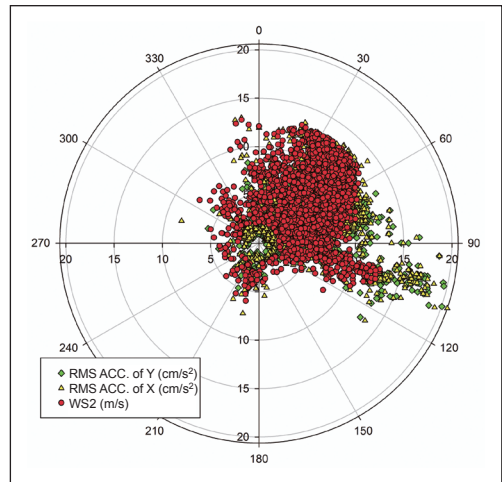


圖 11 WS2 風速範圍下之塔柱頂部加速度監測數據與 RNA 方位角關係圖

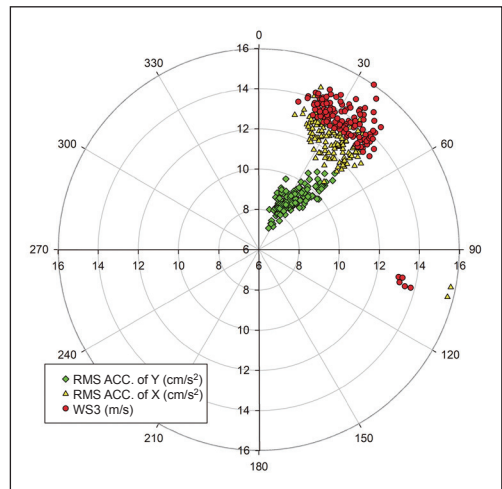


圖 12 WS3 風速範圍下之塔柱頂部加速度監測數據與 RNA 方位角關係圖

RNA方位角與本土冬季風況特性相近，當風速很小時（ $WS \leq 2$  m/s），風可能來自各個方向，但伴隨風速加大時，風向大多來自東北方，符合西部沿海地區於冬季東北季風侵襲期間的氣候特性。



#### 四、隨機子空間識別法於結構監測之應用

##### (一) 隨機子空間識別法基本理論

隨機子空間識別法 (Stochastic Subspace Identification, SSI) 係從統計學、線性代數和系統理論等發展而來，主要用於時間域分析，可直接利用量測所得之訊號，評估待測物體的結構振動反應，與經由結構分析所得振動模態的傳統方法不同，適合用於結構細部資訊不明或變數過多的模態分析之上[5]。

根據Brincker和Andersen [6]研究指出，當系統的隨機反應定義為時間的函數時，連續時序下的系統反應 $y(t)$ 可表示為：

$$y(t) = \begin{Bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_m(t) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中， $m$ 為量測通道數 (Number of measurement channels)。若以 $M$ 、 $D$ 和 $K$ 分別代表質量、阻尼和勁度矩陣，另以 $f(t)$ 代表載重向量 (也是系統輸入值)，則由結構動力學的經典公式，可將多自由度的結構系統表示如下：

$$M\ddot{y}(t) + D\dot{y}(t) + Ky(t) = f(t) \quad (3)$$

為將此連續時間之公式帶入離散時間域，可適當引用狀態時間方程式：

$$x(t) = \begin{Bmatrix} y(t) \\ \dot{y}(t) \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中，已帶入系統工程的概念，而 $x(t)$ 代表狀態，其與系統的輸入 $f(t)$ 不同。若將連續時間的系統矩陣 $A_c$ 和載重轉換矩陣 $B$ 帶入 $x(t)$ 的一次微分，並以 $C$ 為輸出影響矩陣，則可求得：

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + B f(t) \quad (5)$$

$$f(t) = C x(t) \quad (6)$$

式中， $A_c$ 和 $B$ 可表示為：

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}D \end{bmatrix} ; B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

此公式之優點為通解可直接求得，例如Kailath [7]提出：

$$x(t) = \exp(A_c t)x_0 + \int_0^t \exp(A_c(t-\tau))Bf(\tau)d\tau \quad (8)$$

前式的第一項次係為齊性解 (Homogeneous Solution)，第二項次屬於特殊解 (Particular Solution)。為於離散時間域使用該方程式，可帶入變數 $y_k = y(k\Delta t)$ ，則齊性解可表示為：

$$x_k = \exp(A_c k\Delta t)x_0 = A_d^k x_0 \quad (9)$$

$$A_d = \exp(A_c \Delta t) \quad (10)$$

$$y_k = C A_d^k x_0 \quad (11)$$

式中， $A_d$ 為離散時間的系統矩陣。另一方面，在漢克爾矩陣 (Hankel Matrix) 的定



義中，離散時間下的系統反應常由資料矩陣 (Data Matrix) 表示如下：

$$y(t) = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_N] \quad (12)$$

上式中， $N$  為資料點數。若移除最後  $k$  個資料點，資料矩陣可表示為  $Y_{(1:N-k)}$ ；同理，若移除一開始的  $k$  個資料點，資料矩陣可表示為  $Y_{(k:N)}$ 。則  $k$  個時間延滯時的可信賴矩陣運算可表示如下：

$$\hat{R}_k = \frac{1}{N-k} Y_{(1:N-k)} Y_{(k:N)}^T \quad (13)$$

值得討論的是，SSI中的區塊漢克爾矩陣  $Y_h$  (Block Hankel Matrix) 僅為一系列矩陣的集合，主要透過移動資料矩陣為主，常表示如下：

$$Y_h = \begin{bmatrix} Y_{(1:N-2s)} \\ Y_{(2:N-2s+1)} \\ \vdots \\ Y_{(2s:N)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{hp} \\ Y_{hf} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中， $Y_{hp}$  代表過去輸出矩陣， $Y_{hf}$  代表未來輸出矩陣， $2s$  代表區塊的列數， $N-2s$  為行數，而總量測通道數  $m$  下的列數為  $2sM$ 。再者，進行隨機反應分析時，常將未來輸出矩陣投影至過去輸出矩陣之上：

$$O = E(Y_{hf} | Y_{hp}) \quad (15)$$

此公式可利用協方差 (Covariance) 改寫如下：

$$O = Y_{hf} Y_{hp}^T (Y_{hp} Y_{hp}^T)^{-1} Y_{hp} \quad (16)$$

一般而言，投影矩陣  $O$  的大小為  $sM \times sM$ ，若利用公式(9) ~ (11)之計算方式，可另將投影矩陣  $O$  之每行  $O_{col}$  表示為：

$$O_{col} = \Gamma_s x_0 = \begin{bmatrix} C \\ CA_d \\ CA_d^2 \\ \vdots \\ CA_d^{s-1} \end{bmatrix} x_0 \quad (17)$$

式中， $\Gamma_s$  稱為觀測矩陣。在卡爾曼狀態 (Kalman State) 中，簡化投影矩陣  $O$  每行的初始條件，並假設  $X_0$  矩陣代表無時間遲滯 (Time Lag) 的卡爾曼狀態，可得：

$$O = \Gamma_s X_0 \quad (18)$$

當觀測矩陣  $\Gamma_s$  為已知時，即可利用此公式求得所有的卡爾曼狀態，但觀測矩陣  $\Gamma_s$  為未知時，則需進一步利用奇異值分解法 (Singular Value Decomposition, SVD) 完成投影矩陣  $O$  分解：

$$O = USV^T \quad (19)$$

式中， $U$  為左奇異向量矩陣， $S$  為奇異值對角矩陣， $V$  為右奇異向量矩陣。藉由此式所得之奇異值分解結果，若再執行狀態空間分析，即可求得觀測矩陣與卡爾曼狀態：

$$\hat{\Gamma} = US^{1/2} \quad (20)$$

$$\hat{X}_0 = S^{1/2}V^T \quad (21)$$

而離散時間狀態空間的系統矩陣 $A_d$ 和輸出影響矩陣 $C$ ，即可藉由觀測矩陣的區塊運算求得：

$$\hat{\Gamma}_{(2:s)} \hat{A}_d = \hat{\Gamma}_{(1:s-1)} \quad (22)$$

$$\hat{C} = \hat{\Gamma}_{(1:1)} \quad (23)$$

最後於結構模態分析和實際運算部分，經針對系統矩陣 $A_d$ 進行特徵值分解：

$$A_d = \Psi[\mu_i]\Psi^{-1} \quad (24)$$

式中， $\Psi$  為特徵向量矩陣， $\mu_i$  為離散時間極點， $[\mu_i]$  代表  $A_d$  之特徵值矩陣。則連續時間極點  $\lambda_i$  可由下式求得：

$$\mu_i = \exp(\lambda_i) \quad \lambda_i = \ln(\mu_i) / \Delta \quad (25)$$

則角速度 $\omega_i$ 、頻率 $f_i$ 及模態的阻尼比 $\xi_i$ 可計算如下：

$$\omega_i = |\lambda_i| \quad (26)$$

$$f_i = \omega_i / 2\pi \quad (27)$$

$$\xi_i = \text{Re}(\lambda_i) / |\lambda_i| \quad (28)$$

最後，系統模態振形 $\Phi$ 即可由輸出影響矩陣 $C$ 與特徵向量矩陣 $\Psi$ 求得：

$$\Phi = C\Psi \quad (29)$$

## (二) 模態分析基本原理與說明

模態分析之目的係為求得待測結構的自然振動頻率、阻尼比和模態振型，常見方法有實驗模態分析（Experimental Modal Analysis, EMA）和操作模態分析（Operational Modal Analysis, OMA）。

EMA主要假設結構為彈性且其性質不隨時間發生變化，並利用外力激發結構產生振動反應，藉由外力的輸入訊號及結構反應之輸出訊號即可完成分析。分析過程需利用快速傅立葉轉換，將輸出訊號由時間域轉為頻率域，再由頻率域輸出訊號除以輸入訊號，藉此計算系統轉換函數，並得以評估結構模態相關參數。此方法的主要限制條件為輸入與輸出訊號均需同步量測，對於外力來源不明或難以量測者，仍具有發展空間。

OMA最大優勢為不需外力等之輸入訊號，僅利用結構反應的輸出訊號即可進行分析，惟其針對模態參數之求取難度較高，亦需投入相當學術理論和分析經驗。採用OMA前，因量測結構反應的輸出訊號常受各種環境因素影響，其訊號可能存在一定程度的誤差，故需要進行訊號的前處理工作，如零平均（Zero-Mean）、自相關函數（Autocorrelation Function）計算、交叉相關函數（Cross-correlation Function）計算等，之後再利用快速傅立葉轉換，將時間域的量測資料轉換至頻率域，或直接採用前述SSI之



方法，可求得結構振動模態及相關資訊。

本研究待測目標為陸域風力機，現地裝設監測儀器時，根據安全作業標準，整體風力機必須停機方能進入塔柱內部施工。爰此，結構反應的輸出訊號係由RNA不轉動開始記錄，對於參考OMA精神所進行之SSI模態分析，具有一定的助益。

### (三) 隨機子空間識別法之未加權主成分擴展

常見的隨機子空間識別法之中，時間域的資料導向分析方法有5種[8]：(1)未加權主成分（Unweighted Principal Components, UPC）；(2)未加權主成分擴展（Extended Unweighted Principal Components, UPCX）；(3)主成分（Principal Components, PC）；(4)典型相關分析（Canonical Variate Analysis, CVA）；(5) UPC合併資料集。本研究主要採用未加權主成分擴展進行分析，並將該法簡稱為SSI-UPCX。

主成分分析（PC）主要係針對多維數據進行降維動作，同時保留資料集貢獻最大的特徵，進而有效尋找資料中的關鍵元素和主結構，隸屬一種應用分差分解的分析方法，而UPC則是未使用權重進行評估。SSI-UPCX係藉由增加自然振動頻率、阻尼比和複雜模態振型信賴界（Confidence Bounds）等之不確定性的計算，擴展了UPC的功能，並具有

以下三點優勢：

1. 相較於傳統採用數據平均值(mean value)概念，此法可更準確掌握模態參數。
2. 可有效過濾雜訊所引致的誤導模態（Noise Mode）和不穩定模態（Unstable Mode）。
3. 因加入不確定性分析計算過程，可使結構模態參數及健康診斷的可靠度提升。

爰此，本研究將採用SSI-UPCX，針對前述加速度光纖感測器於現地量測陸域風力機之監測成果，進行時間域加速度歷時分析，俾利求得風力機於運轉過程的可信賴模態振型。

## 五、基於隨機子空間識別法之系統識別

### (一) 系統識別結果表列說明

為釐清監測期間風力機之第一、第二振動頻率，本節將延續第3.2節做法，針對圖4所示之6個場址風速超過額定風速之時段，先將各時段不同高程之加速度數據區分為X向與Y向資料集，並各自採用SSI-UPCX進行系統識別（如表4、表5所示），待確認各頻率之範圍後，再將SCADA記錄之場址風速結合監測期間SSI-UPCX頻率識別結果進行研析比對。

表 4 高風速時段 X 向 SSI-UPCX 分析結果

高風速時段		2021 11/22 09:00	2021 11/30 22:30	2021 12/17 19:30	2021 12/25 22:00	2022 01/06 14:30	2022 01/18 09:30
區段	頻率範圍 (Hz)	SSI-UPCX 計算所得振動頻率					
1	0.4~0.5	0.403	0.405	0.403	0.404	0.403	0.404
2	0.8~0.9	0.847	0.845		0.828	0.846	0.851
3	1.6~1.7	1.699	1.694			1.685	
4	1.7~1.8			1.711	1.718		1.707
5	1.8~1.9		1.852				
6	1.9~2.0	1.984			1.934		
7	2.5~2.6	2.553	2.568		2.595	2.554	2.552
8	2.6~2.7			2.601			
9	2.7~2.8	2.729	2.74	2.776	2.723	2.759	2.709
10	3.0~3.1	3.049	3.06	3.098		3.066	3.057

表 5 高風速時段 Y 向 SSI-UPCX 分析結果

高風速時段		2021 11/22 09:00	2021 11/30 22:30	2021 12/17 19:30	2021 12/25 22:00	2022 01/06 14:30	2022 01/18 09:30
區段	頻率範圍 (Hz)	SSI-UPCX 計算所得振動頻率					
1	0.4~0.5	0.403	0.406	0.399	0.407	0.408	0.405
2	0.8~0.9	0.872	0.875	0.868	0.861	0.855	0.878
3	1.7~1.8	1.703		1.762		1.714	1.733
4	1.8~1.9	1.82			1.823		
5	1.9~2.0	1.936					1.944
6	2.1~2.2	2.115		2.14			
7	2.2~2.3					2.243	
8	2.5~2.6	2.544	2.579	2.534		2.549	2.522
9	2.7~2.8	2.783	2.781	2.773	2.77	2.772	2.708
10	2.9~3.0			2.941			2.954
11	3.0~3.1	3.06	3.023	3.07	3.053		3.099

表4為6個高風速時段X向SSI-UPCX分析結果，若以0.1 Hz頻率間格區分振動頻率範圍，每個高風速時段均具有高識別率的頻率範圍可被過濾並求得：(1)區段1，頻率範圍為0.4~0.5 Hz，6個時段均可求得；(2)區段2，頻率範圍為0.8~0.9 Hz，5個時段可求取；

(3)區段7，頻率範圍為2.5~2.6 Hz，5個時段可求取；(4)區段9，頻率範圍為2.7~2.8 Hz，6個時段均可求得；(5)區段10，頻率範圍為3.0~3.1 Hz，5個時段可求取。

透過X向SSI-UPCX分析結果，在區





段1中，可發現各時段的振動頻率約為0.403~0.405 Hz，近似於有限元素模態分析中的第一模態，亦與前述快速傅立葉轉換所得之塔柱模態結果一致。在區段2中，可發現各時段的振動頻率約為0.828~0.851 Hz，其近似於三個葉片轉動一圈所造成的塔柱屏蔽振動頻率（3P）上限值（0.850 Hz）。在區段7與區段9中，兩者於各高風速時段的振動頻率約為2.552~2.595 Hz和2.709~2.776 Hz。在區段10中，可發現各時段的振動頻率約為3.049~3.098 Hz，近似於有限元素模態分析中的第二模態。

另根據表5之Y向SSI-UPCX分析結果顯示，每個Y向具有高識別率的頻率範圍為：

- (1)區段1，頻率範圍為0.4~0.5 Hz，6個時段均可求得；
- (2)區段2，頻率範圍為0.8~0.9 Hz，6個時段均可求得；
- (3)區段8，頻率範圍為2.5~2.6 Hz，5個時段可求取；
- (4)區段9，頻率範圍為2.7~2.8 Hz，6個時段均可求得；
- (5)區段11-頻率範圍為3.0~3.1 Hz，5個時段可求取。

透過Y向SSI-UPCX分析結果，可發現具有高識別率的5個頻率區段，其結果與X向結果相近。首先，於區段1之各時段的振動頻率，近似於有限元素模態分析中的第一模態及FFT轉換所得之塔柱模態。再者，區段11之各時段的振動頻率，與有限元素模態分析的第二模態相近，另外在區段2、區段8、區段9之各時段的振動頻率，亦與表4中區段2、

區段7、區段9結果相近。據此，可驗證本研究布設之X向與Y向加速度感測器能有效量測風力機實際振動反應，並得與有限元素模態分析結果交互比對，求出風力機之第一、第二振動頻率。

## （二）場址風速資料與X向SSI-UPCX頻率識別之關係

根據前節高風速時段之頻率區間分析結果，本研究透過SCADA記錄之風速資料以及監測期間之SSI-UPCX頻率結果進行彙整，可得圖13監測期間風速與振動頻率之關係圖。其中，0.35~0.45 Hz淡紅色透明區域，係為風力機支撐結構之第一振動頻率；另當場址風速達到額定風速後，圖中顯示3P之振動頻率約於0.850 Hz，與圖5之FFT研析成果吻合。此外，在縱軸3.0~3.2 Hz區間，亦可觀察到風力機支撐結構之第二振動頻率，此頻率隨風速增加而有遞增之現象。

## 六、結論與建議

本研究採用光纖感測器監測陸域風力機支撐結構於冬季之振動反應，除利用傳統的有限元素法進行結構模態分析之外，亦由加速度歷時的FFT結果求取頻率域上主要振動頻率，並以加速度歷時均方根值比對場址風速特性，確保監測數據的正確性。最後，利用驗證後之監測數據，以SSI-UPCX系統識別法求取支撐結構的主要振動頻率與振型。相

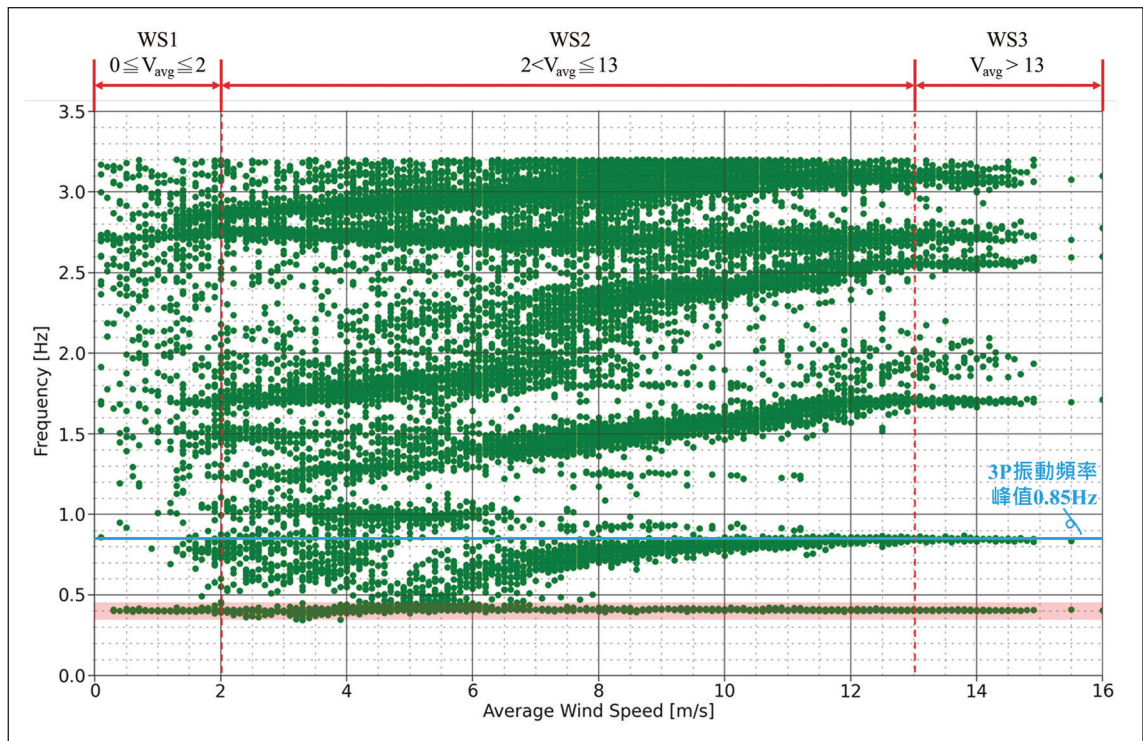


圖 13 場址風速資料與 X 向 SSI-UPCX 之頻率關係 (0~5 Hz)

關結論與建議彙整如下：

1. 風力機轉子速率介於5~17 rpm之間，轉子所造成之振動頻率（1P）約為0.083~0.283 Hz，而三個葉片轉動一圈所造成的塔柱屏蔽振動頻率（3P）約為0.250~0.850 Hz。
2. 根據支撐結構的有限元素模態分析結果顯示，塔柱正向與側向第一振態頻率為0.38502 Hz及0.38513 Hz，而兩向第二模態各為3.0122 Hz及3.1386 Hz，且第二模態振型的反曲點高度約為塔架2/3~3/4處。
3. 風力機正常運轉發電狀態下，塔柱頂部水平兩向加速度歷時之正規化均方根值與場址風速及RNA方位角分布趨勢高度相似，可驗證監測資料的正確性。
4. 經由監測資料的SSI-UPCX分析結果可知，當場址風況達額定風速時，X向與Y向所識別之振態區間，與塔柱第一振態頻率（0.385 Hz）、3P上限值（0.850 Hz）和塔柱第二振態頻率（3.01 Hz）結果相近，然而透過監測期間之SSI-UPCX頻率分析以及SCADA風速資料所彙整之結果，可更加瞭



解陸域風力機於冬季東北季風吹拂下之運轉頻率變化。。

5. 陸域風力機的塔架內部構造中，艙門塔層及其上、下方通常布設儀控、冷卻設備和電梯設施等，可能造成塔底感測器訊號過於複雜，並導致塔底模態振型系統識別誤差，另因1P頻率過於低頻，亦難以藉由系統識別過程求得。

#### 參考文獻

1. United Nations, “The 26th UN Climate Change Conference of the Parties (COP26)”, Glasgow UK, 31 October-13 November 2021.
2. 經濟部，「風力發電示範系統設置補助辦法」，民國八十九年三月二十二日經能字第 89314400 號令訂定發布全文 13 條，民國九十二年廢止。
3. 陳致融、陳儀諺、陳致源、賴明俊、蘇進國、宋裕祺、張家銘、楊卓諺、林世豪、翁偉誠，「陸域風力機支撐結構監測與分析」，中國土木水利工程學刊-強震預警與結構健康診斷特刊，第 34 卷第 4 期（已接受），民國 111 年。
4. 周肇昱、張家銘、莊奕婕、楊卓諺、宋裕祺、蘇進國、林世豪、翁偉誠，「基於模態特徵之風力機監測可行性研究：以一林口風力機為例」，中國土木水利工程學刊-強震預警與結構健康診斷特刊，第 34 卷第 4 期（已接受），民國 111 年。
5. 羅俊雄、趙書賢、曾敏軒，“結合感測、系統識別及健康診斷技術探討橋梁結構破壞預警模式及機制 (II)”，交通部中央氣象局精簡報告。
6. Rune Brincker, Palle Andersen (2006), “Understanding Stochastic Subspace Identification”, International Modal Analysis Conference, IMAC-XXIV.
7. T. Kailath, “Linear Systems”, Prentice Hall Inc., 1980.
8. ARTEMIS Modal Help, “SSI-UPCX”, Structural Vibration Solutions.