

離岸風電人員運輸船之運動統計評估模式研究

方志中¹ 詹淳皓

國立台灣海洋大學 系統工程暨造船學系

關鍵詞：離岸風電人員運輸船；二維截片理論；倒傳遞類神經網路；多變量迴歸分析；耐海性能

國科會計畫編號：NTSC 111-2221-E-019-032

摘要

近年來本土化離岸風場發展同時，所面對到的問題為離岸風場營運及維修工程船無法妥適根據海氣象資料，分析評估各型工程船在不同海氣象下之耐海性能及操作範圍，安全並有效達成本土化離岸風場之工程維護安全需求。本研究使用二維截片理論，快速計算三型人員運輸船(300T、500T與1000T)在規則波中的運動反應振幅算子(Response Amplitude Operator; RAO)，並使用Bretschneider波譜計算三型人員運輸船於短期非規則波中之運動反應。為評估人員運輸船於長期非規則波中之運動反應，需要大量計算短期非規則波的運動反應統計值，本研究使用倒傳遞類神經網路(BPNN)與多變量迴歸分析(SPSS)兩種統計評估技術，透過七項船舶參數(排水量、水線長、水線寬、有義波高、尖峰波週期、航速和航向角)，建立預估短期非規則波中單體船舶運動反應之統計評估模式，以評估遭遇海況中的船舶運動反應。本研究之成果為：依據離岸風場海氣象長期分佈資料，分析臺灣海域三型人員運輸船之耐海性能，並建立迴歸統計分析模式，此為評估離岸風電人員運輸船隊運輸風險之核心技術。

一、緒論

近年來全球重視再生能源開發，台灣擁有優秀離岸風電開發潛力，隨著離岸風場正逐步完成建設，維護工作成為下一步關注重點。離岸風電運維船隊是由多種不同大小與功能各異船舶所組成，本研究重點為人員運輸船，此船專門支援人員及貨物對風機場地進行快速補給，其船舶長度依設計從9m到61m左右不等，這使在運輸任務中，配合海況調配最適合執行運輸任務的船舶成為核心技術。離岸風電運維船隊在非規則長峰波中的運動反應，需要大量的計算工作，此方法不但耗時，且計算均依賴專業船舶運動計算軟體，此對於離岸風電維護單位，在不同海洋環境下，無法快速且精確求得數值預估，據以進行離岸風電人員運輸船之運輸風險評估，本研究將利用倒傳遞類神經網路與多變量迴歸分析(SPSS)兩種統計評估工具，以專業船舶運動計算軟體之龐大數值計算資料，進行統計評估模式建立，使在不依賴專業船舶運動計算工具下，可快速且精確求得人員運輸船在非規則波中的運動反應，應用於評估在運輸任務短期海況中，不同大小噸位之人員運輸船短期運動反應，以供營運團隊作為運輸船舶派遣風險之參考。本研究將利用三艘不同大小的單體排水型人員運輸船，分析在台灣西部海域中波浪運動對人員運輸船所產生的運動反應整體

特性，並建立船體耐海性能統計評估模式，目前國內仍缺乏相關研究。

Noble Denton之離岸風電運維船隊運輸基準[2]主要為橫搖、縱搖與垂向加速度運動反應，船體運動計算最早研究可從1955年Korvin-kroukovsky[3]將船體運動反應為線性假設並將船體視為細長體提出二維截片理論(Ordinary Strip theory)計算船體於規則波中所產生起伏(Heave)與縱搖(Pitch)之耦合運動，以此為基礎，亦有運用其原理改進的截片理論，例如：Salvesen N.[4]等學者提出新截片理論(New strip theory)，計算船舶在斜浪中船體運動與船體結構波浪負荷；Kim[5]以繞射原理求解船舶於斜浪中船體運動反應；方銘川等[6]使用二維截片理論解析小水面雙體船(SWATH)於波浪中運動反應特性。1986年方銘川和Kim[7]針對海上平行之兩船體進行相對運動研究，發展截片理論，並考慮船速效應之影響，藉此預測斜浪中兩艘船舶之間流體動力耦合運動反應。1998年吳華桐與方志中[8]使用二維截片理論計算船艇於斜浪中運動與波浪負荷之分析，並經由SSPA實驗驗證數值計算之正確性。1999年方志中與呂崇湧[9]使用二維截片理論計算船艦在斜浪中運動性能，並於針對船舶在海象五級中直升機起降操縱性能進行評估與分析，1999年方志中與陳生平[10]使用二維截片理論針對四型船艦進行廣泛的耐海性能計算與評估，並以不同船

長、船型與抗橫搖裝置為變量，分析船艦在海浪中運動性能。2016年吳華桐等[12]使用二維截片理論計算高速離島交通船之耐海性能，並與實船海試資料進行比對，2016年梁晏豪等[12]使用二維截片理論計算三型高速艇之耐海性能，並與實船海試資料進行比對計算結果。二維截片理論已廣泛且成功的運用在計算船體在波浪中運動反應分析，雖然二維截片理論忽略流體於自由液面中前進速度的影響，但相較於複雜且運算量龐大的三維理論而言，二維截片理論仍是預估船體運動相當實用之工具[24]。

1805年的Legendre [14]與1809年的Gauss [15] 使用迴歸離型最小平方法從天文觀測中確定關於太陽系中彗星的軌道的問題。1821年Gauss [16] 發表了最小平方法理論的進一步發展，建立最小平方法估計方法。而迴歸兩字最早由Francis Galton[17]提出，其從親子身高之研究中，提出子女身高雖會遺傳自父母，但皆會逐漸迴歸人類平均身高。而在1950年代和60年代，經濟學家使用機械電子桌面計算器來計算經濟趨勢之迴歸，使迴歸分析計算開始普及。而類神經網路第一步是由心理學家Warren McCulloch 與數學家Walter Pitts[18]基於數學演算法，共同建立世界上第一個人工神經元模型。第二次世界大戰後，類神經網路計算得到了發展，在1949年Donald Olding Hebb[19]對神經元間連結強度提出修改規則，提出一種非監督學習法則(Hebb學習定律)，掀起類神經網路計算探討。在1958年生物學家Frank Rosenblatt[20]透過研究蒼蠅複眼，提出第一組具有學習能力的感知器網路模型。1969年 Seymour Papert 與 Marvin Minsky[21]在著作中提出感知器神經模型運算，無法處理複雜的邏輯問題，也無法調整學習訓練更複雜的網路，使得類神經網路的研究被學術界冷落。但藉由電腦開始普及及新的概念被提出，在1986年David E. Rumelhart和James McClelland[22]等學者提出倒傳遞演算法(Back-propagation algorithm) 可以訓練多層的神經元網路，也解決了 1969年Papert與Minsky所質疑問題，使得類神經網路的研究再次興起。在船舶數據之統計評估研究，2013年方志中與蔡坤遠[23]使用多變量迴歸分析軟體SPSS，分析船舶船速變化與操舵因子相關關係，並轉換為快速計算的線性公式。2016年梁晏豪[23]使用MATLAB的倒傳遞類神經網路工具，將ISO人員暈船率經驗公式計算結果，轉換成能快速評估人員暈船率模型，2018年蔡坤遠[13] 使用多變量迴歸分析軟體SPSS，將海洋環境變化與操舵因子相關關係，並轉換為快速計算的線性公式。

本研究船舶運動分析方法使用二維截片理論，理論中將船舶視為一剛體，忽略了船體縱向截片間的非相互作用及前進速度效應。完整計算三艘人員運輸船於不同海況中的運動反應，需數萬次的計算，計算量負荷十分大，故本研究採用二維截片理論而不是較耗時的三維小板法作為數值計算工具。船舶在波浪中的運動屬於複雜數學問題，需要透過假設邊界、簡化問題、建立模型來計算，這也限制了非專業訓練工程人員的使用，為使離岸風場營運及維修管理者，快速得知不同船舶的海域運作風險，據以採取安全之運輸對應決策，利用二維截片理論計算所獲得三型船運動反應數據，利用MATLAB的倒傳遞類神經網路(BPNN)與SPSS的多變量迴歸分析兩種統計評估工具，建立能快速獲得依不同海洋環境所產生的船舶運動反應評估模型。本研究之成果為：依據離岸風場海氣象長期分佈資料，分析臺灣海域三型人員運輸船之耐海性能，並建立迴歸統計分析模式，此為評估離岸風電人員運輸船隊之運輸風險核心技術。

二、研究方法、進行步驟及執行進度

本研究使用USDDCMO(2D)船體運動分析理論，進行三型運輸船於斜浪規則波中之船體運動反應分析比較。O-xyz 為一右手座標系統，如圖1，座標原點O則位於靜止水面上，x軸為平行船體且指向船艏為正，y軸通過原點O垂直於x軸且指向左舷為正，z 軸穿過重心(G; Centre of Gravity)與原點O且往上為正，而入射波角β為波浪方向與船舶前進方向之夾角(頂浪時航向角β=180°)

假設船舶以一固定速度(U)在自由液面上航行，受入射規則波浪之激振影響，船體產生線性且頻率為 ω_e

之周期性之六個自由度運動 ξ_k ，其中k=1, 2, 3, 4, 5, 6 分別代表船舶的縱移(Surge)、橫移(Sway)、起伏(Heave)、橫搖(Roll)、縱搖(Pitch)和平擺(Yaw)運動。

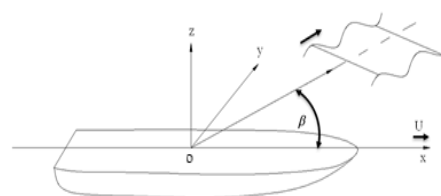


圖1 船舶運動座標系統

船舶航行於海洋中，波浪作用合力將與船體本身的慣性力成動態平衡，因此船舶剛體(Rigid body)運動方程式可表示為：

$$\sum_{k=1}^6 \{ (M_{jk} + A_{jk}(\omega_e)) \ddot{\xi}_k + B_{jk}(\omega_e) \dot{\xi}_k + C_{jk} \xi_k \} = \zeta_0 F_j(\omega_e) e^{i\omega_e t}; j=1 \quad (1)$$

其中 $\ddot{\xi}_k$ 和 $\dot{\xi}_k$ 分別代表船體運動的加速度與速度， M_{jk} :代表重心船體質量矩陣， A_{jk} :代表附加質量矩陣， B_{jk} :代表阻尼係數矩陣， C_{jk} :代表流體回復力係數矩陣， F_j :代表單位入射波振幅之波浪激振力， ζ_0 :代表入射波振幅，引數j代表流體作用力方向，k代表六個自由度運動。

在船體重心位於(0,0, Z_G)時船體質量矩陣 M_{jk} 可表示為：

$$M_{jk} = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 & 0 & MZ_G & 0 \\ 0 & M & 0 & -MZ_G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -MZ_G & 0 & I_{44} & 0 & -I_{46} \\ MZ_G & 0 & 0 & 0 & I_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I_{64} & 0 & I_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

本研究中使用二維截片法，故 A_{j1} 及 B_{j1} 值均為0，縱移運動方程式僅考量縱搖運動之影響。假設船舶於波浪中運動反應為線性，則可根據運動方程式(1)得到運動反應算子(Response Amplitude Operator; RAO)，以顯示船舶於規則波中運動反應特性，RAO表示如方程式(3)：

$$RAO_k = \left| \frac{\bar{\zeta}_k}{\zeta_0} \right|; k=1,2,\dots,6 \quad (3)$$

垂向加速度

經由二維截片理論，可得船舶在規則波中，重心位置的六個自由度運動反應，再經由船體絕對運動公式，配合重心處之垂向加速度計算公式，即可得到重心處的垂向(Z軸)加速度，其公式為：

$$a_z = -\omega_e^2 \bar{\zeta}_3 \quad (4)$$

船體運動反應主要為波浪所引致的效應，海洋波並非單一特性波浪，實際海洋波浪變化極為不規則，其頻率、振幅、波長、方向皆不斷變化，不同時間所觀察之情況也不相同。在線性假設下，可以將無數個不同頻率、振幅、相位之正弦或餘弦規則波疊加產生出不規則之波形，經由式(5)將規則波浪由第1組加總至第n組進行波形線性疊加，可獲得非規則波波形。

$$\zeta_T(t) = \sum_{i=1}^n \zeta_{0i}(\omega_i) \cos(-\omega_i t + \varepsilon_i) \quad (5)$$

海洋波浪隨時間變化，通常以波譜描述海洋波浪之特性，波譜中每個頻率都可以對應至一個波振幅，而波浪能量與波振幅平方成正比，因此波譜可以稱為波浪能譜(Wave Power Spectrum)，波浪能譜曲線底下之積分面積(均方值： m_0)，即代表該海域當時海象所包含的能量。

$$m_0 = \int_0^\infty S(\omega_0) d\omega_0 \quad (6)$$

波譜是由眾多規則波加總組合而成的非規則波，經由傅立葉轉換，將波浪時間域訊號轉換至頻率域中，不同頻率所對應之成份波波振幅如下所示：

$$\zeta_{0i}(\omega_0) = \sqrt{2S(\omega_0) \Delta\omega_0} \quad (7)$$

其中

$\Delta\omega_0$: 第i個頻率變化量

$S(\omega_0)$: 第i個頻率於波譜中的值

$\zeta_{0i}(\omega_0)$: 第i個頻率所對應之波浪振幅

由從波譜中求得規則波之振幅，將不同頻率、振幅、相位角之規則波經由線性疊加後，可得非規則波浪訊號，為驗證產生之非規則波訊號無誤，可藉由獲得時域中非規則波振幅均方值，並與波浪頻譜均方值 m_0 進行驗證，以確認波浪頻譜與規則波訊號之間轉換無誤。

$$m_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \zeta_{0i}^2(t) = \int_0^\infty S(\omega_0) d\omega_0 \quad (8)$$

其中

ζ_{0i} : 為時域中非規則波中第i個振幅

本研究所選用的設計波譜為Bretschneider雙參數波

譜，此波譜描述於開闊海域，因風力影響所產生之波譜

，此波譜包含雙參數，一個為 ω_m : 尖峰波週期(Modal frequency; rad/s)，一個為 $H_{1/3}$: 有義波高(Significant wave height; m)

$$S(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \exp\left(-\frac{B}{\omega^4}\right) \quad (m^2s) \quad (9)$$

其中：

$$A = 0.3125 * H_{1/3}^2 * \omega_m^4$$

$$B = 1.25 * \omega_m^4$$

$$\omega_m = \frac{2\pi}{T_0}$$

(rad/s)

T_0 : 尖峰波週期(s)

假設船體運動六自由度反應RAO為線性，非規則波中之船舶運動反應之均方根值可由規則波運動反應RAO與波譜線性疊加而成：

$$\sqrt{m_k} = \sqrt{\int_0^\infty \left| \frac{\zeta_k}{\zeta_0}(U, \beta, \omega_0) \right|^2 S(\omega_0) d\omega_0} \quad (10)$$

其中

ζ_k : 為船體運動量六自由度運動反應

$\sqrt{m_k}$: 為均方根值(Root Mean Square Value; RMS)

倒傳遞類神經網路 (BPNN)

倒傳遞類神經網路架構分成兩個部分，由正向傳遞的多層感知器(Multi Layer Perceptron, MLP)及反向傳遞的學習演算法為誤差倒傳遞演算法(Error Back Propagation, EBP)，由正向與負向兩種傳遞組合的類神經模型稱為倒傳遞類神經網路(Back-propagation neural network, BPNN)。倒傳遞類神經網路為多層前饋式網路，以監督式學習的方式，處理輸入輸出之間的非線性問題。

一般常用的多層感知器架構如圖2所示，在輸出層與輸入層間有由一層增至數層的隱藏層組成，輸入層與輸出層用來表現輸入參數與輸出值，而隱藏層的神經元數目依照問題的形式來決定，一般所需神經元數目則須以試誤法 (trial and error)來決定。其神經元數目多寡將大幅影響類神經網路，若神經元數目不足，容易造成計算出現較大誤差；神經元數目過多，雖可以減小誤差，但有可能導致計算時間過長。

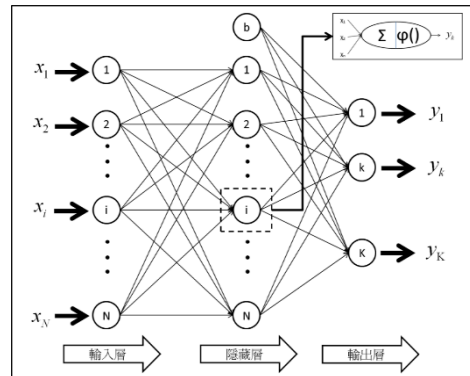


圖2多層感知器

倒傳遞演算法的學習過程，是由正向傳播與負向

傳播所組成，如圖3，在正向傳播的過程中，輸入訊息經由正向傳播從輸入層經由隱藏層初步加權後，透過活化函數轉換，最後傳向輸出層輸出網路計算值；但在輸出層計算結果不能得到預計目標誤差，則進行反向傳播，將誤差訊號回傳回隱藏層，透過回傳的誤差量修改神經元間的權重與偏權值，使誤差達到容許值而停止。

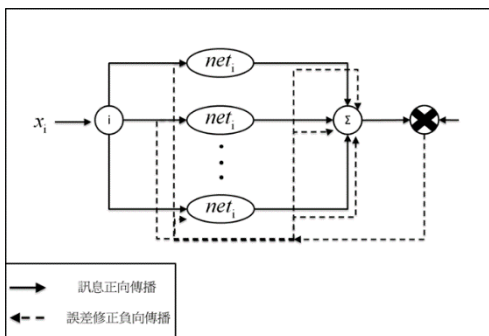


圖3 誤差倒傳遞演算法

多變量迴歸分析 (SPSS)

迴歸分析(Regression Analysis)是一種在統計學中常見的分析研究數據的工具，此方法以設定或觀察的條件的自變數與分析或調查結果的應變數組成，迴歸分析常用於解釋與預測兩種用法，解釋是從外部收集的實驗樣本，通過程式推導出分析數據的迴歸公式；預測則是利用迴歸公式的線性原理，透過改變自變數數值，預測出應變數之變化，迴歸分析又分為簡單線性迴歸與多變量迴歸，簡單線性迴歸(Simple Regression) 即一組應變數只對應一組自變數，如式(11)；多變量迴歸(Multiple Regression)即一組應變數可以對應上多組自變數，如式(12)

$$Y_i = \alpha_0 + \alpha_i X_i \tag{11}$$

$$Y_i = \alpha_0 + \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_3 X_3 + \dots + \alpha_i X_i \tag{12}$$

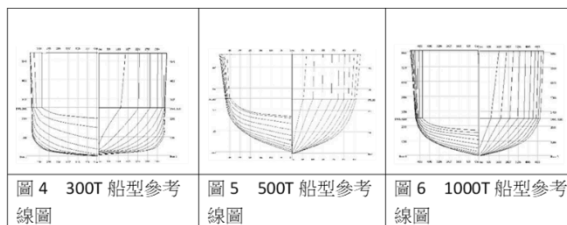
其中 Y_i 為第i個觀察目標的應變數； X_i 為第i個觀察目標的自變數； α_i 為第i個觀察目標的自變數之係數； α_0 為常數項

三、結果與討論

本研究利用二維截片分析法對三艘不同噸位之排水型人員運輸船進行規則波中船舶運動反應計算，藉由分析船舶於斜浪規則波中運動反應，來了解波浪對船舶運動之影響，並探討船舶在不同海況條件下運動反應。本研究擇選三艘具實績之排水型船舶(編號為300T、500T與1000T)於規則波中之運動數值分析。船舶基本資料如表1，船舶參考線圖如圖4至6。

表1 300T、500T與1000T船型基本資料

船舶編號	300T	500T	1000T
Loa(m)	44.50	61.41	73.50
Lwl(m)	35.20	57.40	64.00
B (m)	7.60	9.50	11.00
D (m)	4.90	5.10	6.80
Draught(m)	2.80	2.80	3.20
Δ (tons)	495.00	689.82	1040.00
LCG(m aft F.P.)	18.68	31.17	34.90
KG(m)	3.12	3.67	4.21
GM(m)	0.90	1.44	1.44
Roll Period(sec)	7.73	6.24	7.14
Roll Frequency(rad/sec)	0.81	1.01	0.88
Block coefficient	0.64	0.44	0.45



人員運輸船在非規則波中運動反應分析

船舶受到波浪作用船體產生六個自由度運動，計算出規則波中船舶單位波幅運動反應，假設船體的六自由度運動反應為線性，則非規則波中船舶運動反應之均方根值可由規則波運動反應與波譜線性疊加而成。使用雙參數Bretschneider 波譜計算，此波譜為長波峰不規則波，是只考慮單一航向角方向之波浪，因此計算數值是單一航向角所產生的結果，能更明顯觀察不同方向航向角所產生的船體特性，最後再把不同船速、航向角計算得到的均方根值繪成極座標反應圖。短期運動反應結果，將以極座標圖表示之，由圓圈中心到外圈不同半徑代表船速0節至25節，圓周代表航向角0度到360度，0度為從船艏來之隨浪，90度為從船右舷來之橫浪，180度為從船艉來之頂浪。

圖7為300T在海象六級(Hs =4.87 m, Tm = 9 s)之橫搖運動反應，在橫浪時橫搖運動反應隨船速升高而降低，其最大值發生於船速0節橫浪航況(β=90°)，最小值發生於船速25節頂浪與隨浪航況(β=180°與0°)，橫搖運動反應隨著航向角由艏浪航況轉至橫浪航況而逐漸增加，於橫浪航況時橫搖運動反應達到最高，而過橫浪航況後橫搖運動反應隨航向角增加遞減。

圖8為500T在海象六級(Hs =4.87 m, Tm = 9 s)之橫搖運動反應，在橫浪時橫搖運動反應隨船速升高而降低，其最大值發生於船速0節橫浪航況(β=90°)，最小值發生於船速25節頂浪與隨浪航況(β=180°與0°)，橫搖運動反應隨著航向角由艏浪航況轉至橫浪航況而逐漸增加，於橫浪航況時橫搖運動反應達到最高，而過橫浪航況後橫搖運動反應隨航向角增加遞減。

圖9為1000T在海象六級(Hs =4.87 m, Tm = 9 s)之橫搖運動反應，在橫浪時橫搖運動反應隨船速升高而降低，其最大值發生於船速0節橫浪航況(β=90°)，最小值發生於船速25節頂浪與隨浪航況(β=180°與0°)，橫搖運

動反應隨著航向角由艏浪航況轉至橫浪航況而逐漸增加，於橫浪航況時橫搖運動反應達到最高，而過橫浪航況後橫搖運動反應隨航向角增加遞減。

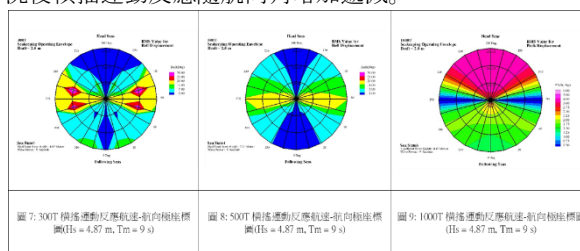


圖10為300T在海象六級($H_s = 4.87\text{ m}$, $T_m = 9\text{ s}$)之縱搖運動反應，在縱搖運動反應隨船速升高而增加，其最大值發生於船速25節頂浪航況($\beta=180^\circ$)，最小值發生於船速0節橫浪航況($\beta=90^\circ$)，縱搖運動反應隨著航向角由橫浪航況轉至艏浪或艉浪航況而逐漸增加，於頂浪航況縱搖運動反應達到最高。

圖11為500T在海象六級($H_s = 4.87\text{ m}$, $T_m = 9\text{ s}$)之縱搖運動反應，在縱搖運動反應隨船速升高而增加，其最大值發生於船速25節頂浪航況($\beta=180^\circ$)，最小值發生於船速0節橫浪航況($\beta=90^\circ$)，縱搖運動反應隨著航向角由橫浪航況轉至艏浪或艉浪航況而逐漸增加，於頂浪航況縱搖運動反應達到最高。

圖12顯示1000T在海象六級($H_s = 4.87\text{ m}$, $T_m = 9\text{ s}$)之縱搖運動反應，在縱搖運動反應隨船速升高而增加，其最大值發生於船速25節頂浪航況($\beta=180^\circ$)，最小值發生於船速0節橫浪航況($\beta=90^\circ$)，縱搖運動反應隨著航向角由橫浪航況轉至艏浪或艉浪航況而逐漸增加，於頂浪航況縱搖運動反應達到最高。

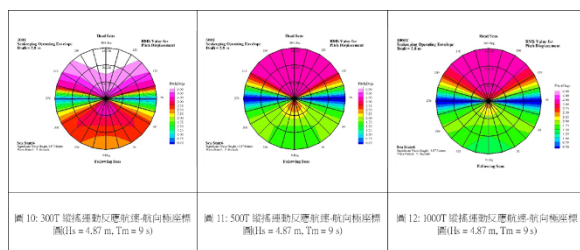
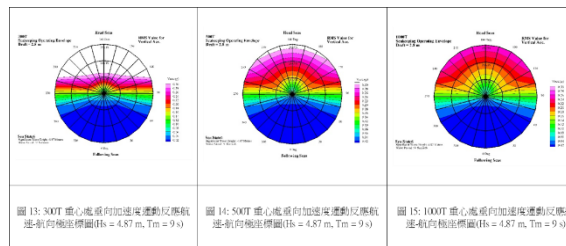


圖13為300T在海象六級($H_s = 4.87\text{ m}$, $T_m = 9\text{ s}$)之重心處垂向加速度運動反應，在艏浪時重心處垂向加速度運動反應隨船速升高而增加，其最大值發生於船速25節頂浪航況($\beta=180^\circ$)，最小值發生於船速25節橫浪航況($\beta=30^\circ\sim 60^\circ$)，重心處垂向加速度運動反應隨著航向角由艉浪航況轉至艏浪或航況而逐漸增加，於頂浪航況重心處垂向加速度運動反應達到最高。

圖14為500T在海象六級($H_s = 4.87\text{ m}$, $T_m = 9\text{ s}$)之重心處垂向加速度運動反應，在艏浪時重心處垂向加速度運動反應隨船速升高而增加，其最大值發生於船速25節頂浪航況($\beta=180^\circ$)，最小值發生於船速25節橫浪航況($\beta=30^\circ\sim 60^\circ$)，重心處垂向加速度運動反應隨著航向角由艉浪航況轉至艏浪或航況而逐漸增加，於頂浪航況重心處垂向加速度運動反應達到最高。

圖15為1000T在海象六級($H_s = 4.87\text{ m}$, $T_m = 9\text{ s}$)之重心處垂向加速度運動反應，在艏浪時重心處垂向加速度運動反應隨船速升高而增加，其最大值發生於船速25節頂浪航況($\beta=180^\circ$)，最小值發生於船速25節橫浪航況($\beta=30^\circ\sim 60^\circ$)，重心處垂向加速度運動反應隨著航向角由艉浪航況轉至艏浪或航況而逐漸增加，於頂浪航況重心

處垂向加速度運動反應達到最高。



人員運輸船運動統計評估模式

本研究利用二維切片法所計算三型船舶在非規則波中的運動反應均方根值(RMS)成果，進行建立短期非規則波運動之迴歸分析統計評估模式，迴歸分析需將學習組的輸入與輸出值帶入學習工具以建立模型，本研究擬訂輸入特徵參數七項，分別為三型船舶之排水量、水線長、水線寬、有義波高、尖峰波週期、航速和航向角(表2)，資料庫將有9594組學習資料，而統計評估中，將學習數值正規化(Normalization)將有助於迴歸中學習效率。

表2 迴歸分析與船舶運動反應之參數對應

	迴歸分析變數	船舶運動反應特徵參數
1.輸入值	x_i	1.排水量 2.水線長(Lwl) 3.水線寬(Bwl) 4.有義波高(H_s) 5.尖峰波週期(T_m) 6.航速(U) 7.航向角(β)
2.輸出值	y_k	船舶運動反應(RMS)

倒傳遞類神經網路分析人員運輸船三種運動模式，隱藏層層數與神經元數透過網路增長法增加數目，從一次次的訓練取得最佳數值，本研究以均方差為訓練標準。多變量迴歸分析人員運輸船三種運動模式結果如式13, 14, 15所示，其中三種運動反應迴歸模型建立，第一階段對人員運輸船的七項參數進行單變數分析，用於判斷七項輸入參數的變化，如每項參數的次方、指數、對數與倒數的變化對三種運動反應相關性，第二階段針對三艘人員運輸船的七項參數及其變化項對三種運動反應進行曲線迴歸，由因子分析計算結果，第三階段將七項參數中的次方、倒數與指數變化進行交互作用，將顯著性較低的項目去除，所得到判定係數最高的運動反應迴歸模型：

其橫搖運動公式如下：

$$\begin{aligned} \ddot{z}_{4(rms)} = & -4.961L_{WL}^3 + 27.432H_s + 49.571H_s^3 + 18.736T_m - 40.14T_m^2 + 22.058T_m^3 \\ & - \frac{7.548}{e^{\beta\pi}} - 5.533U - 20.399\beta^2 + 26.115\beta^3 + 19.297\sin(\beta \cdot \pi) \\ & + 5.449\sin^{10}(\beta \cdot \pi) - 11.028L_{WL}^3 H_s + 4.105L_{WL}^3 T_m^3 + 8.327 \frac{L_{WL}^3}{e^{\beta\pi}} \\ & + 1.369L_{WL}^3 U - 2.083L_{WL}^3 \sin(\beta \cdot \pi) - 3.537L_{WL}^3 \sin^{10}(\beta \cdot \pi) \\ & - 19.993H_s T_m^3 - 25.094H_s U + 69.44H_s \beta^2 - 69.838H_s \beta^3 \\ & + 24.123H_s \sin(\beta \cdot \pi) + 13.936H_s \sin^{10}(\beta \cdot \pi) + 28.404H_s^2 U \\ & - 12.632H_s^2 \sin(\beta \cdot \pi) - 6.382H_s^2 \sin^{10}(\beta \cdot \pi) - 126.142 \frac{H_s^3}{e^{\beta\pi}} \\ & - 13.292H_s^3 U + 6.188T_m^3 U + 18.311T_m^3 \beta^2 - 21.393T_m^3 \beta^3 \\ & - 10.219T_m^3 \sin(\beta \cdot \pi) - 4.46T_m^3 \sin^{10}(\beta \cdot \pi) + 10.972 \frac{U}{e^{\beta\pi}} \\ & - 8.17 \frac{\beta^3}{e^{\beta\pi}} - 13.88 \frac{\sin(\beta \cdot \pi)}{e^{\beta\pi}} - 7.071 \frac{\sin^{10}(\beta \cdot \pi)}{e^{\beta\pi}} + 25.866U \beta^2 \\ & - 20.807U \beta^3 - 14.749U \sin(\beta \cdot \pi) - 14.883U^2 \beta^2 \\ & + 25.287U^2 \sin^{10}(\beta \cdot \pi) + 9.743U^3 \beta^2 \\ & + 6.004U^3 \sin(\beta \cdot \pi) - 22.57U^3 \sin^{10}(\beta \cdot \pi) \end{aligned} \quad (13)$$

其縱搖運動公式如下：

$$\begin{aligned} \ddot{z}_{5(rms)} = & 0.024H_s^2 - 0.0004H_s^3 + 2.94 \log H_s + \frac{0.57}{H_s} - 0.0007T_m^2 - \frac{1.84}{T_m} \\ & - 0.338\sin^{10}(\beta) + 0.4\cos^{10}(\beta) - 0.428L_{WL}^3 + 12.614H_s + 7.75T_m \\ & - 14.302T_m^2 + 7.166T_m^3 - \frac{1.667}{e^{\beta\pi}} + 1.277\beta^2 - 1.308\beta^3 \\ & + 0.435\sin(\beta \cdot \pi) + 3.717V^3 H_s^2 - 3.013V^3 H_s^3 - 0.185V^3 T_m^3 \\ & + 0.428V^3 \beta^3 + 0.079V^3 \sin(\beta \cdot \pi) - 4.298L_{WL}^3 H_s \\ & + 1.403L_{WL}^3 H_s^3 + 1.01L_{WL}^3 T_m^3 - 1.144L_{WL}^3 \beta^3 \\ & + 0.281L_{WL}^3 \sin(\beta \cdot \pi) - 0.08L_{WL}^3 \sin^{10}(\beta \cdot \pi) - 5.063H_s T_m^3 \\ & + 10.568H_s \beta^2 - 5.364H_s \beta^3 - 5.732H_s \sin^{10}(\beta \cdot \pi) - 2.521H_s^2 \beta^2 \\ & - 5.184H_s^2 \sin(\beta \cdot \pi) + 3.888H_s^2 \sin^{10}(\beta \cdot \pi) + 1.844T_m \beta^3 \\ & - 0.931T_m \sin(\beta \cdot \pi) - 1.378T_m \sin^{10}(\beta \cdot \pi) - 1.813T_m^3 \beta^2 \\ & + 1.722T_m^3 \sin^{10}(\beta \cdot \pi) \end{aligned} \quad (14)$$

其重心處垂向加速度運動公式如下：

$$\begin{aligned} \ddot{z}_{3(oms)} = & 0.136H_s + 0.103T_m - 0.234T_m^2 + 0.163T_m^3 \\ & - 0.071U + 0.05\beta + 0.013V^3 \beta^3 - 0.081L_{WL}^3 H_s \\ & + 0.03L_{WL}^3 T_m^3 - 0.024L_{WL}^3 U^3 - 0.069L_{WL}^3 \beta^3 \\ & + 0.008B_{WL} \sin^{10}(\beta \cdot \pi) - 0.151H_s T_m^3 \\ & + 0.067H_s U + 0.331H_s U^3 + 0.203H_s \beta \\ & + 0.512H_s \beta^3 - 0.545H_s^2 U^3 + 1.286H_s^2 \beta^2 \\ & - 2.032H_s^2 \beta^3 + 0.325H_s^3 U^3 - 0.237H_s^3 \beta \\ & + 0.625H_s^3 \beta^3 - 0.139T_m^3 \beta + 0.032T_m^3 \beta^3 \\ & + 0.056 \frac{U^3}{e^{\beta\pi}} - 0.14 \frac{\beta^3}{e^{\beta\pi}} + 0.10U \beta + 0.216U^2 \beta^2 \\ & - 0.507U^3 \beta + 1.077U^3 \beta^2 - 0.732U^3 \beta^3 \end{aligned} \quad (15)$$

在不依賴專業船舶運動計算軟體 USDDCMO(2D) 複雜計算下，可依不同船舶水線長、有義波高、尖峰波週期、船速與航向角等特徵參數輸入後，便可快速求得人員運輸船於非規則波中的運動反應。本研究使用前述兩種統計評估工具，建立三船非規則波中的運動反應預估模式，為驗證此兩種計算模式對三型船舶非規則波中的運動反應的性能預估，本節利用300T、500T與1000T在不同海況下之 USDDCMO(2D) 數值計算結果與倒傳遞類神經網路及多元分析計算結果比對，用以驗證兩種計算模型之正確及實用性。

圖16~18為部分統計評估模式計算比較：圖16為500T於15節在海象四級 (Hs = 2.01 m) 時重心處垂向

加速度運動反應計算結果。倒傳遞類神經網路模型計算與USDDCMO(2D)計算非常接近，而多變量迴歸評估公式計算結果與USDDCMO(2D)計算結果趨勢一致。圖17為1000T於15節在海象五級 (Hs = 3.05 m) 時橫搖運動反應計算結果。倒傳遞類神經網路模型計算與USDDCMO(2D)計算非常接近，而多變量迴歸評估公式計算結果與USDDCMO(2D)計算結果趨勢一致。圖18為300T於15節在海象三級 (Hs = 3.05 m) 時縱搖運動反應計算結果。倒傳遞類神經網路模型計算與USDDCMO(2D)計算非常接近，而多變量迴歸評估公式計算結果與USDDCMO(2D)計算結果趨勢一致。

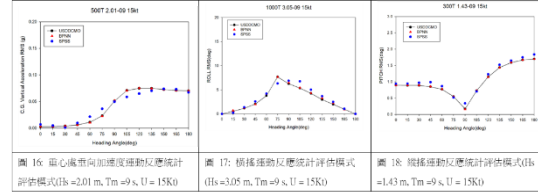


圖 16：重心處垂向加速度運動反應統計評估模式(Hs=2.01 m, Tm=9 s, U=15K) 圖 17：橫搖運動反應統計評估模式(Hs=3.05 m, Tm=9 s, U=15K) 圖 18：縱搖運動反應統計評估模式(Hs=3.05 m, Tm=9 s, U=15K)

經過比較發現三種運動反應計算模型中，倒傳遞類神經網路模型計算結果與USDDCMO(2D)計算結果非常接近，倒傳遞類神經網路模型缺點為其訓練模型時間長，且強烈依賴專門的 MATLAB 軟體；多變量迴歸評估公式計算結果與USDDCMO(2D)計算結果趨勢一致，雖其精準度雖不如倒傳遞類神經網路，但其利用SPSS迴歸分析後之公式可大幅縮短預估時間，此兩種模式應符合工程設計上應用，可用於預估人員運輸船在設計海域中船舶於非規則波中的運動反應。

本計畫完成下列工作項目及成果：

1. 蒐集離岸風電人員運輸船運動分析研究相關文獻，及三型人員運輸船(300T、500T與1000T)分析模型建立。
2. 進行計算三型人員運輸船(300T、500T與1000T)在規則波中的運動反應振幅算子(RAO)，在不同船速、不同入射波頻率及不同航向角規則波下，三型人員運輸船運動數值分析。
3. 計算三型人員運輸船在不同船速、航向及不同海象下，對非規則波中之運動以極座標反應圖進行離岸風電人員運輸船運動反應統計值特性探討。
4. 使用倒傳遞類神經網路(BPNN)與多變量迴歸分析(SPSS)兩種統計評估技術，透過七項船舶參數，建立預估短期非規則波中單體船舶運動反應之統計評估模式，以評估遭遇海況中的船舶運動反應。

離岸風電運維船隊在非規則波中的運動反應，需要大量的計算工作，此方法不但耗時，且計算均依賴專業船舶運動計算軟體，此對於離岸風電維護單位，在不同海洋環境下，無法快速且精確求得數值預估，據以進行離岸風電人員運輸船之運輸風險評估，本研究利用倒傳遞類神經網路(BPNN)與多變量迴歸分析(SPSS)兩種統計評估工具，以專業船舶運動計算軟體之龐大數值計算資料，進行統計評估模式建立，使在不依賴專業船舶運動計算工具下，可快速且精確求得人員運輸船在非規則波中的運動反應，應用於評估在運輸任務短期海況中，不同大小噸位之人員運輸船短期運動反應，以供營運團隊作為運輸船隊派遣風險之參考。本研究將利用三艘不同大小的單體排水型人員運輸船，分析在台灣西部海域中波浪運動對人員運輸船所產生的運動反應整體特性，並建立船體耐海性能統計評估模式，目前國內仍缺乏相關研究。

參考文獻

1. National Maritime Research Institute, 日本海上技術安全研究所 http://www.nmri.go.jp/oldpages/wwjapan/namikaze_main_e.html.
2. Noble Denton, "Default Motion Criteria", TECHNICAL POLICY BOARD GUIDELINES FOR MARINE TRANSPORTATIONS, 0030/ND, 32-33.
3. Korvin-Kroukovsky, B.V., "Investigation of Ship Motions in Regular Waves," SNAME Trans., Vol.63, pp.386-435, 1955.
4. Salvesen, N., E.O. Tuck and O. Faltinsen, "Ship Motions and Sea Loads," SNAME Trans., Vol.78, pp.250-287, 1970.
5. Kim, C.H., F.S. Chou and O. Faltinsen, "Motions and Hydrodynamic Loads of a Ship Advancing in Oblique Waves," SNAME Trans, Vol. 78, pp225-256, 1980.
6. Fang, M. C., W.J. Shyu, "On the Add Resistance of a SWATH Ship Advancing in Head Waves," International Shipbuilding Progress, Vol.41, No. 425, pp55-72, 1984.
7. Fang, M.C., and C.H. Kim, "Hydrodynamically Coupled Motions of Two Ships Advancing in Oblique Waves," Journal of Ship Research, Vol.30, No.3, pp.159-171, 1986.
8. 吳華桐、方志中, "船艇在斜浪中之運動與波浪負荷分析-二維線性截片法之應用", 第十一屆中國造船暨輪機工程研討會, 台南、走馬瀨, 1998.
9. 方志中、呂崇湧, "船艦在斜浪中運動性能研究", 第七屆軍艦工程研討會, 桃園, 1999.
10. 方志中、陳生平, "船艦耐海性能分析", 第七屆軍艦工程研討會, 桃園, 1999.
11. 吳華桐、朱俊翰、許家豪、游原章, "高速離島交通船時海域耐海性能量測", 第二十八屆中國造船暨輪機工程研討會論文集, 2016.
12. 梁晏豪, "三型船艇之人員暈船率預估", 國立台灣海洋大學系統工程暨造船學系碩士論文, 2016.
13. 蔡坤遠, "船舶在不同海洋環境下操航與避碰安全e化輔助系統之研究", 國立成功大學系統及船舶機電工程學系博士論文, 2018.
14. A.M. Legendre, "Sur la Méthode des moindres carrés", Nouvelles méthodes pour la détermination des orbites des comètes, Paris, 1805.
15. C.F. Gauss., "method of least squares", Theoria Motus Corporum Coelestium in Sectionibus Conicis Solem Ambientum, 1809.
16. C.F. Gauss., Theoria combinationis observationum erroribus minimis obnoxiae, 1821.
17. Galton, Francis., "method of least squares", Statistical Science, 1989, 4 (2): 80 - 86.
18. McCulloch, Warren S. and Walter Pitts, "A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity," Bulletin of Mathematical Biophysics, 5: 115-133, 1943.
19. Hebb D. O., "The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory," New York: Wiley, 1949.
20. Rosenblatt, F., "The Perception, a Probabilistic Model for Information Storage and Organization in Brain", Psychological Review, Vol.62, 386-408, 1958.
21. Minsky, M.L., and S. A. Papert, Perceptrons, Cambridge, MA: MIT Press, 1969.
22. Rumelhart, D. E., and J. L. McClelland, "Learning internal representation by error propagation", Parallel Distributed Processing, Vol.1, 318-362, Cambridge, MA: MIT Press, 1986.
23. 蔡坤遠, "貨櫃迴旋特性於操船避碰之研究", 國立台灣海洋大學運輸科學系碩士論文, 2013.
24. 詹淳皓, "離岸風電人員運輸船之運輸風險評估", 國立台灣海洋大學系統工程暨造船學系, (2021)

The Study of Seakeeping Statistical Evaluation Model of Offshore Wind Power Crew Transfer Vessels

Chih-Chung Fang Chun-Hao Zhan

Department of Systems Engineering and Naval Architecture, National Taiwan Ocean University, Taiwan

Keywords: Offshore Wind Power Crew Transfer Vessel, Two-dimensional Strip Theory, Back Propagation Neural Network, Multivariate Regression Analysis, Seakeeping Response.

ABSTRACT

Taiwan owns the excellent offshore wind power development potential. With the construction of offshore

wind farms being gradually completed in recent years, maintenance work of offshore wind farms will become the next focus issue. In this research, numerical study has been carried out by calculating the ship motion responses of the offshore wind power Crew Transfer Vessels in waves. The Response Amplitude Operators (RAO) of three Crew Transfer Vessels (300T, 500T and 1000T) in regular waves have been calculated through the two-dimensional strip theory. The Bretschneider spectrum is employed to predict the seakeeping responses caused by three Crew Transfer Vessels in short-term irregular waves. In order to evaluate the motion response of Crew Transfer Vessels in long-term irregular waves, two statistical evaluation tools, back propagation neural network (BPNN) and multivariate regression analysis (SPSS), have been used to establish the statistical evaluation model of ship motion response in short-term irregular waves by seven ship parameters (displacement, waterline length, waterline width, significant wave height, wave period, ship speeds and heading angles). This is the key technique for evaluating the probability of ship motion responses on transportation risk assessments of the offshore wind power Crew Transfer Vessels in waves.