

# 使用臺大浮台設計15MW浮式風機水動力特性研究

蔡博彥 趙修武<sup>1</sup>

國立臺灣大學 工程科學及海洋工程學系

關鍵詞: 臺大浮台、浮式風機、勢流理論、黏性效應、水動力特性

## 摘要

本研究預測15MW半潛式浮式風機考慮黏性效應的水動力特性，其中浮式風機使用臺大浮台搭載IEA-15MW風機。先以Ansys Aqwa計算基於勢流理論的水動力特性，再透過STAR-CCM+計算浮式風機考慮黏性效應下，不同頻率六自由度運動附加質量以及輻射阻尼。將考慮黏性效應的水動力特性，以三階木條曲線擬合函數，預測黏性效應影響下之附加質量以及阻尼的曲線。計算結果顯示：附加質量的非黏性分量與總附加質量的平均比值為0.916；輻射阻尼的非黏性分量與總輻射阻尼的平均比值為0.289，顯示非黏性效應對於附加質量有較大影響；在起伏、橫搖、縱搖運動中，附加質量的非黏性分量與總附加質量的比值在頻率為0.0238 Hz時分別為0.806、0.682、0.694；在縱移、橫移及平擺運動中，附加質量的非黏性分量與總附加質量的比值皆大於0.823，表示非黏性效應對總附加質量造成的影響較大；在起伏、橫搖及縱搖運動中，輻射阻尼的非黏性分量與總輻射阻尼的比值在頻率大於0.2467 Hz時比值接近0，顯示非黏性效應在高頻造成的影響較低。

---

<sup>1</sup> 聯絡作者 趙修武 (chausw@ntu.edu.tw)

## 前言

如今面臨全球能源短缺、資源不足之問題，再生能源的開發必然成為今後首要的課題。而近年來風力發電更是再生能源開發的方向。臺灣海峽具有優良的風能潛力[1]，例如我國新竹以及苗栗外海可作為發展離岸風力發電的重要場址，但是部分區域水深達到70 m，為了符合經濟效益，故必須使用浮式風機系統。為發展能適應臺灣海峽海氣象條件的浮式風機系統，本研究以使用臺大團隊設計的臺大浮台、IEA 15-MW離岸風機作為研究目標。為獲得考慮黏性效應下的水動力特性，本研究先以Ansys Aqwa預測非黏性水動力特性。因黏性修正量隨頻率改變，本由究計算六自由度中十個不同頻率點，並以計算流體力學軟體STAR-CCM+對浮式風機進行強制運動，計算具有黏性的水動力特性，再將所得出之十個不同頻率點的水動力特性結果以木條曲線[2]擬合，期望考慮不同運動頻率後，能更準確預測水動力特性曲線，使後續發電功率及運動響應等計算結果更佳精確。

## 浮式風機系統設計

本研究使用臺大浮台[3]作為參考浮台，特徵長度約為81.6 m，吃水為20 m，平台幾何尺寸如圖1所示，浮台規格如表1所示。本研究使用IEA 15-MW離岸風機[4]作為參考風機，輪轂高度為150 m，切入、額定、切出風速為3 m/s、10.59 m/s、25 m/s。其詳細風機尺寸如圖2所示，風機規格如表2所示。

表1 臺大浮台規格

吃水 (m)	20	
(含風機)系統總質量 ( $10^3$ t)	21.222	
(含風機)系統重心位置 (m)	(4.9429, 0, -1.961)	
對重心慣性矩 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )	$I_{xx}$	$5.900 \times 10^{10}$
	$I_{yy}$	$6.144 \times 10^{10}$
	$I_{zz}$	$2.753 \times 10^{10}$
	$I_{xy}$	$1.470 \times 10^7$
	$I_{xz}$	$-1.121 \times 10^{10}$
	$I_{yz}$	$7.538 \times 10^6$

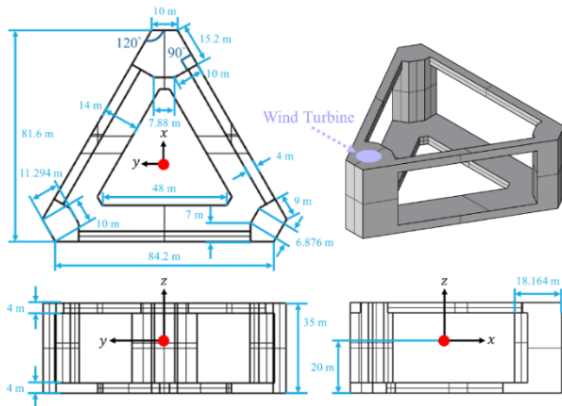


圖1 臺大浮台尺寸[5]

表2 IEA 15-MW風機規格

額定功率 (MW)	15
轉子方向/配置	迎風/3葉片
塔柱高度 (m)	150
切入/額定/切出風速 (m/s)	3/10.59/25
切入/額定轉子速度 (RPM)	5/7.56
懸伸 (m)	11.35
轉軸傾斜/葉片前傾角度 (°)	6/4
轉子及機艙質量 (t)	1016.6
塔柱質量 (t)	860

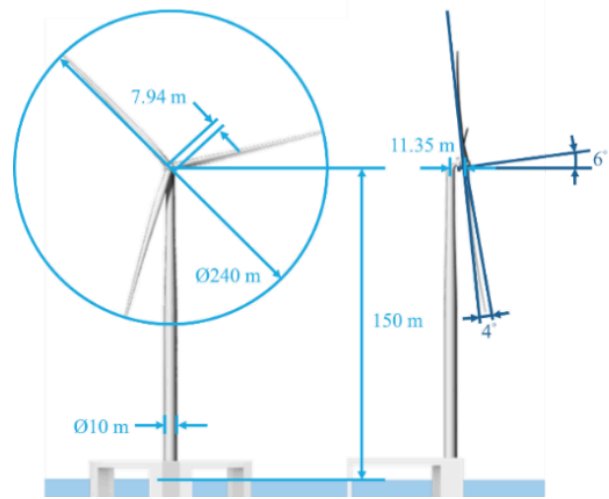


圖2 IEA 15-MW風機尺寸

## 研究方法

### 1. 勢流理論模擬

本研究使用Ansys Aqwa，在線性低振幅波的假設下，以基於三維勢流理論的小板法求得浮式風機系統在不受黏性效應影響下的水動力特性。在勢流理論中，假設流場為非黏性、非旋性以及不可壓縮[6~8]。

### 2. 黏性流模擬

本文探討了黏性效應對浮式風機系統水動力特性的影響。採用STAR-CCM+[9]進行數值模擬，並以VOF (Volume of Fluid) [10]模型模擬浮台在特定頻率下的運動負荷。考慮到自由液面可能對水動力行為產生顯著的效應，因此在計算時將接近自由液面的部分以更為精細的加密網格，期望能捕捉到更準確的浮式風機系統運動負荷。此時假設流體不可壓縮，以使用SST  $k-\omega$ 紊流模型求解動量方程式(雷諾平均納維-斯托克斯方程)中的雷諾應力。為了確保浮台運動的數值精確度，本文選擇使用嵌套網格 (Overset Mesh) 以模擬浮式風機系統的運動主要由兩部分網格組成，即

佈置在整個計算域的背景網格及佈置在嵌套範圍的部件網格，其中嵌套範圍為嵌套邊界與運動物件邊界之間的範圍，模擬時整個部件網格進行強制運動。本文設置浮體的表面及計算域的下邊界被設置為無滑移邊界，而其他五個邊界為壓力出流。為了模擬浮台的強制運動，我們根據下列公式設定浮式風機系統的運動速度：

$$V_f = \zeta \omega \sin \sin(\omega t) \quad (1)$$

其中 $V_f$ 為浮台強制運動速率， $\omega$ 為運動角頻率， $t$ 為時間。 $\zeta$ 為運動振幅，在縱移、橫移及起伏中為1 m，橫搖、縱搖及平擺中為1°。浮台表面網格如圖3所示，邊界條件如圖4所示，自由液面網格如圖5所示。

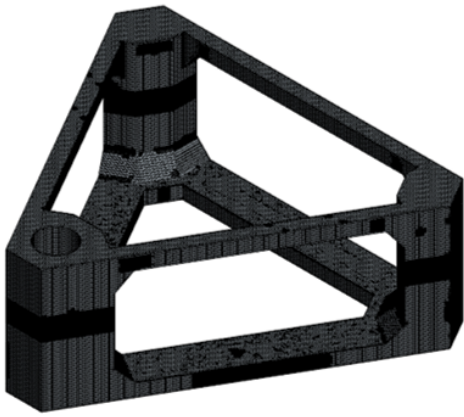


圖3 浮台表面網格

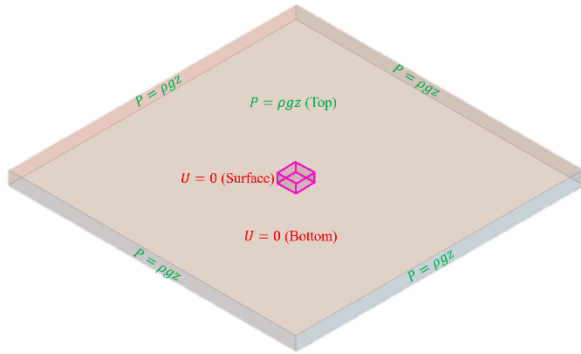


圖4 邊界條件設置

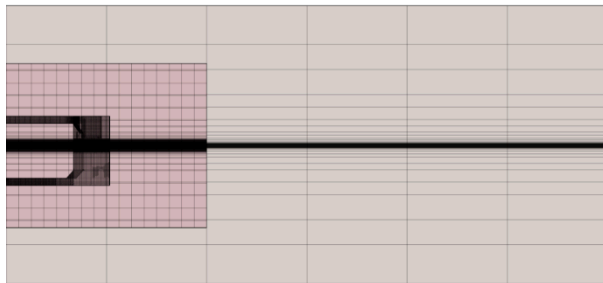


圖5 自由液面網格

### 3. 水動力特性預測

由於Ansys Aqwa計算的水動力特性沒有考慮黏性效應的影響，為計算黏性效應下的水動力特性，使用STAR-CCM+模擬浮台在黏性效應下的強制運動，再以浮台受力響應求解考慮黏性的水動力特性。在STAR-CCM+的數值模擬設定中，將初始流場狀態設置為0 m/s。而浮台則按照式(1)進行強制運動。由於初始流場速度被設為靜止，浮台所受的力量不包括波浪激振分量。因此，作用在浮台上的力量可主要劃分為輻射力和水靜力，而輻射力包括了附加慣性力和輻射阻尼力。基於以上討論，浮體總受力 $F_{i,1}$ 可表示為：

$$F_{i,1} = A_i \ddot{x}_1 + B_i \dot{x}_1 + C_i x_1 \quad (2)$$

其中 $A_i$ 為附加質量， $B_i$ 為阻尼， $C_i$ 為浮體剛性，並給定速度 $\dot{x}_1$ ，得出加速度 $\ddot{x}_1$ 及位移 $x_1$ ，其中 $\dot{x}_1$ 可表示為：

$$\dot{x}_1 = \zeta \omega \sin \sin(\omega t) \quad (3)$$

再將 $F_{i,1}$ 曲線向右平移四分之一週期，如圖6所示，得出受力曲線 $F_{i,2}$ ，速度 $\dot{x}_2$ ，得出加速度 $\ddot{x}_2$ 及位移 $x_2$ ，其中 $F_{i,2}$ 及 $\dot{x}_2$ 可分別表示為：

$$F_{i,2} = A_i \ddot{x}_2 + B_i \dot{x}_2 + C_i x_2 \quad (4)$$

$$\dot{x}_2 = \zeta \omega \cos \cos(\omega t) \quad (5)$$

由於浮體剛性為已知，分別將加速度、速度及位移帶入 $F_{i,1}$ 及 $F_{i,2}$ ，即可求解 $A_i$ 及 $B_i$ ，分別可表示為：

$$A_i = \frac{F_{i,1} \cos \cos(\omega t) - F_{i,2} \sin \sin(\omega t) + C_i \zeta}{\zeta \omega^2} \quad (6)$$

$$B_i = \frac{F_{i,1} \sin \sin(\omega t) + F_{i,2} \cos \cos(\omega t)}{\zeta \omega} \quad (7)$$

假設 $A_i$ 由 $A_{i,p}$ 和 $A_{i,v}$ 組成， $B_i$ 由 $B_{i,p}$ 和 $B_{i,v}$ 組成。 $A_{i,p}$ 、 $B_{i,p}$ 和 $C_i$ 由Ansys Aqwa計算獲得。 $A_{i,v}$ 和 $B_{i,v}$ 為以STAR-CCM+模擬結果由前述方法預測。 $A_{i,v}$ 和 $B_{i,v}$ 來自黏性效應，由 $A_i$ 和 $B_i$ 減去 $A_{i,p}$ 和 $B_{i,p}$ 所得。本研究分別在10種頻率，分別為0.15 rad/s、0.35 rad/s、0.55 rad/s、0.75 rad/s、0.95 rad/s、1.15 rad/s、1.35 rad/s、1.55 rad/s、1.75 rad/s及1.95 rad/s，即對應0.0238 Hz、0.0557 Hz、0.0875 Hz、0.1193 Hz、0.1512 Hz、0.1830 Hz、0.2148 Hz、0.2467 Hz、0.2785 Hz、0.3103 Hz，模擬六自由度運動。

### 研究結果

本研究模擬臺大浮台分別在10種頻率，即0.0238 Hz、0.0557 Hz、0.0875 Hz、0.1193 Hz、0.1512 Hz、0.1830 Hz、0.2148 Hz、0.2467 Hz、0.2785 Hz及0.3103 Hz下，進行縱移、橫移、起伏、橫搖、縱搖、平擺強制運動，預測考慮黏性效應下的附加質量及阻尼，並以三階木條曲線擬合函數，預測黏性效應影響下之附加質量以及阻尼的曲線。 $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ，分別代表縱移、橫移、起伏、橫搖、縱搖、平擺運動。

### 1. 附加質量修正量

臺大浮台六自由度的附加質量修正量如表3、表4與圖6所示，其中藍線代表附加質量的非黏性結果，紅點代表特定頻率下黏性結果，紅線代表紅點以三階木條函數擬合之曲線。 $A_{i,p}/A_i$ 代表在特定頻率及運動下非黏性附加質量與總附加質量的比值，此數值越大代表非黏性效應對附加質量的影響越大。結果顯示縱移運動下，在頻率為0.1193 Hz時有最大比值1.069，在頻率為0.2148 Hz時有最小比值0.762，在其餘頻率時比值介於0.823與1.005之間，顯示附加質量在黏性與非黏性下差異不大；橫移運動下，在頻率為0.1830 Hz時有最大比值1.258，在頻率為0.3103 Hz時有最小比值0.838，在其餘頻率時比值介於0.850與1.072之間，顯示附加質量在黏性與非黏性下差異不大；起伏運動下，在頻率為0.2148 Hz時有最大比值0.923，在頻率為0.0557 Hz時有最小修正比率0.764，且附加質量在各頻率中總附加質量皆較非黏性附加質量大；橫搖運動下，在頻率為0.1193 Hz時有最大比值1.079，在頻率為0.0238 Hz時有最小修正比率0.682，顯示出在低頻率中黏性效應造成影響較大，在高頻率時則趨於平穩；縱搖運動下，在頻率為0.1193 Hz時有最大比值0.993，在頻率為0.0238 Hz時有最小比值0.694，顯示出在低頻率中黏性效應造成影響較大，在高頻率時則趨於平穩；平擺運動下，在頻率為0.1193 Hz時有最大比值1.145，在頻率為0.3103 Hz時有最小比值0.856，在其餘頻率時比值介於0.869與1.079之間，顯示附加質量在黏性與非黏性下差異不大。

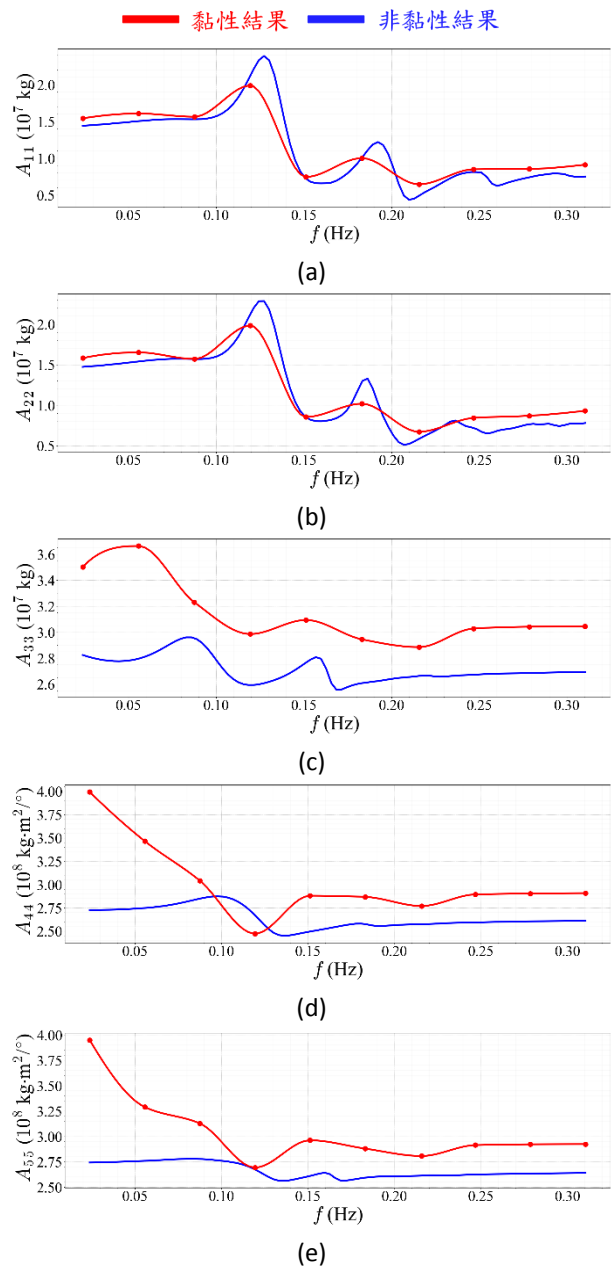
表1 縱移、橫移、起伏運動總附加質量以及非黏性附加質量與總附加質量比值

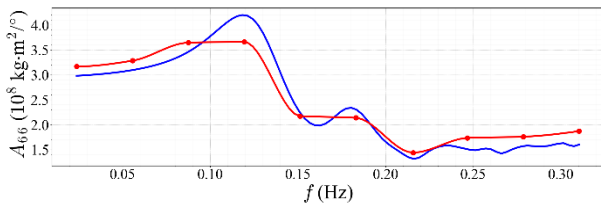
頻率 (Hz)	$A_1$ ( $10^7$ kg)	$\frac{A_{1,p}}{A_1}$	$A_2$ ( $10^7$ kg)	$\frac{A_{2,p}}{A_2}$	$A_3$ ( $10^7$ kg)	$\frac{A_{3,p}}{A_3}$
0.0238	1.543	0.935	1.582	0.931	3.503	0.806
0.0557	1.609	0.935	1.654	0.932	3.665	0.764
0.0875	1.564	0.978	1.572	0.999	3.231	0.914
0.1193	1.939	1.069	1.942	1.072	2.986	0.869
0.1512	0.751	0.968	0.859	0.997	3.091	0.894
0.1830	1.011	1.005	1.034	1.258	2.946	0.886
0.2148	0.647	0.762	0.674	0.872	2.886	0.923
0.2467	0.849	0.955	0.833	0.850	3.029	0.883
0.2785	0.859	0.867	0.872	0.880	3.043	0.883
0.3103	0.912	0.823	0.931	0.838	3.045	0.885

表4 橫搖、縱搖、平擺運動黏性附加質量以及非黏性附加質量與總附加質量比值

頻率 (Hz)	$A_4$ ( $10^8$ kg $\cdot$ $m^2 / ^\circ$ )	$\frac{A_{4,p}}{A_4}$	$A_5$ ( $10^8$ kg $\cdot$ $m^2 / ^\circ$ )	$\frac{A_{5,p}}{A_5}$	$A_6$ ( $10^8$ kg $\cdot$ $m^2 / ^\circ$ )	$\frac{A_{6,p}}{A_6}$
0.0238	3.995	0.682	3.953	0.694	3.165	0.941
0.0557	3.467	0.793	3.290	0.839	3.286	0.943

0.0875	3.041	0.937	3.129	0.888	3.641	0.949
0.1193	2.492	1.079	2.702	0.993	3.664	1.145
0.1512	2.879	0.867	2.961	0.881	2.187	1.032
0.1830	2.868	0.898	2.881	0.900	2.133	1.079
0.2148	2.770	0.930	2.807	0.931	1.439	0.915
0.2467	2.896	0.896	2.915	0.901	1.721	0.869
0.2785	2.904	0.897	2.922	0.901	1.762	0.893
0.3103	2.908	0.898	2.924	0.903	1.870	0.856





(f)

圖6附加質量曲線:(a)縱移運動、(b)橫移運動、(c)起伏運動、(d)橫搖運動、(e)縱搖運動、(f)平擺運動

## 2. 阻尼修正量

臺大浮台六自由度的阻尼修正量如表5、表6與圖7所示，其中藍線代表附加質量的非黏性結果，紅點代表特定頻率下黏性結果，紅線代表紅點以三階木條函數擬合之曲線。 $B_{i,p}/B_i$ 代表在特定頻率及運動下非黏性阻尼與總阻尼的比值，此數值越大代表非黏性效應對阻尼的影響越大。結果顯示縱移運動下，在頻率為0.1512 Hz時有最大比值1.051，在頻率為0.0238 Hz時有最小比值0.025，在其餘頻率時比值介於0.158與0.703之間，整體趨勢在低頻率時，黏性效應影響較大，而在0.1512 Hz時非黏性阻尼較總阻尼大；橫移運動下，在頻率為0.1512Hz時有最大比值0.998，在頻率為0.0238 Hz時有最小比值0.025，在其餘頻率時比值介於0.162與0.819之間，整體趨勢在低頻率時，黏性效應影響較大，而在0.1512 Hz時非黏性阻尼與總阻尼相近；起伏運動下，在頻率為0.0238 Hz時有最大比值0.248，在頻率為0.2785及0.3103 Hz時有最小比值0.001，在其餘頻率時比值介於0.002與0.223之間，且在高頻率時黏性效應有較大影響；橫搖運動下，在頻率為0.1193 Hz時有最大比值0.591，在頻率為0.2785及0.3103 Hz時有最小比值0.001，在其餘頻率時比值介於0.003與0.119之間，整體趨勢隨頻率升高而遞減；縱搖運動下，在頻率為0.0238 Hz時有最大比值0.521，在頻率為0.2785及0.3103 Hz時有最小比值0.001，在其餘頻率時比值介於0.005與0.391之間，整體趨勢隨頻率升高而遞減；平擺運動下，在頻率為0.1512 Hz時有最大比值0.990，在頻率為0.0238 Hz時有最小比值0.001，在其餘頻率時比值介於0.002與0.878之間，整體趨勢呈現頻率較低時比值較低。

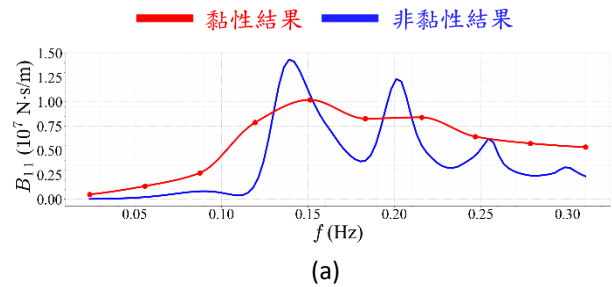
表2 縱移、橫移、起伏運動總阻尼以及非黏性阻尼與總黏性阻尼比值

頻率 (Hz)	$B_1$ ( $10^6 N \cdot s/m$ )	$\frac{B_{1,p}}{B_1}$	$B_2$ ( $10^6 N \cdot s/m$ )	$\frac{B_{2,p}}{B_2}$	$B_3$ ( $10^6 N \cdot s/m$ )	$\frac{B_{3,p}}{B_3}$
0.0238	0.481	0.025	0.488	0.025	0.750	0.248
0.0557	1.342	0.162	1.392	0.162	2.375	0.026
0.0875	2.683	0.298	2.848	0.321	6.649	0.159
0.1193	7.511	0.158	8.019	0.205	5.608	0.223
0.1512	10.334	1.051	9.841	0.998	8.256	0.050

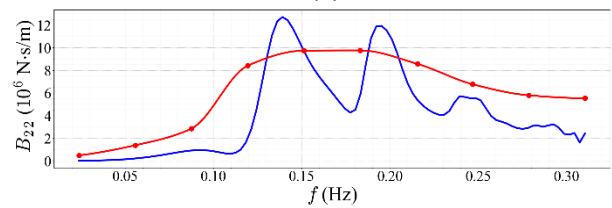
0.1830	8.271	0.479	9.920	0.600	8.619	0.063
0.2148	8.332	0.656	8.522	0.624	14.220	0.012
0.2467	6.446	0.703	6.772	0.819	11.560	0.002
0.2785	5.708	0.422	5.853	0.512	13.226	0.001
0.3103	5.343	0.439	5.539	0.436	14.837	0.001

表3 橫搖、縱搖、平擺運動總黏性阻尼以及非黏性阻尼與總黏性阻尼比值

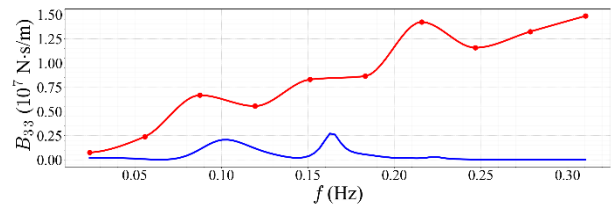
頻率 (Hz)	$B_4$ ( $10^7 N \cdot m \cdot s/°$ )	$\frac{B_{4,p}}{B_4}$	$B_5$ ( $10^7 N \cdot m \cdot s/°$ )	$\frac{B_{5,p}}{B_5}$	$B_6$ ( $10^7 N \cdot m \cdot s$ )	$\frac{B_{6,p}}{B_6}$
0.0238	0.224	0.004	0.022	0.521	0.648	0.001
0.0557	1.769	0.003	1.159	0.080	1.650	0.002
0.0875	5.750	0.059	3.837	0.133	3.454	0.080
0.1193	4.598	0.591	3.829	0.391	14.088	0.565
0.1512	5.884	0.119	5.350	0.094	19.703	0.990
0.1830	6.482	0.099	6.246	0.049	19.725	0.878
0.2148	11.401	0.016	11.069	0.015	18.443	0.779
0.2467	8.621	0.005	8.437	0.005	13.787	0.821
0.2785	9.799	0.001	9.628	0.001	11.563	0.626
0.3103	10.985	0.001	10.821	0.001	10.279	0.566



(a)



(b)



(c)

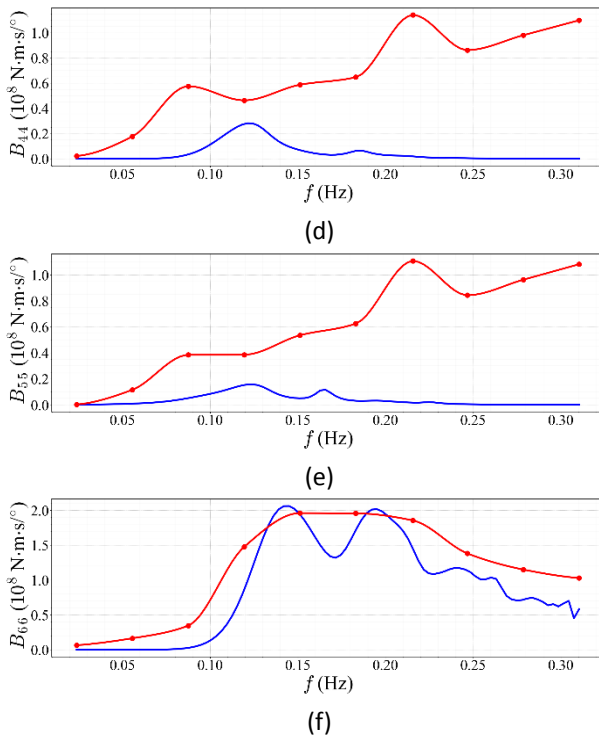


圖7阻尼曲線:(a)縱移運動、(b)橫移運動、(c)起伏運動、(d)橫搖運動、(e)縱搖運動、(f)平擺運動

### 總結

本文考慮黏性效應的影響，提出預測浮式風機附加質量和阻尼的方法。研究採用臺大浮台，搭載IEA 15-MW風機。本文使用Ansys Aqwa預測基於勢流理論的水動力特性，接著透過STAR-CCM+模擬浮式風機系統在不同頻率的六自由度強制運動，並以三次木條曲線擬合，最終預測考慮黏性效應的水動力特性曲線，並比較與勢流理論下的差異。研究總結如下：

1. 六自由度運動以及十個不同頻率下附加質量的非黏性結果與總附加質量的平均比值約為0.916，阻尼的非黏性結果與總阻尼的平均比值約為0.289，顯示非黏性效應對於附加質量有較大影響。
2. 在起伏、橫搖、縱搖運動中，附加質量的非黏性結果與總附加質量的比值在頻率為0.0238 Hz時分別為0.806、0.682、0.694；在頻率為0.0557 Hz時分別為0.764、0.793、0.839，明顯較其他頻率小。

3. 在縱移、橫移及平擺運動中，附加質量的非黏性結果與總附加質量的比值皆大於0.823，顯示上述運動中非黏性效應對附加質量造成的影響較大。
4. 在起伏、橫搖及縱搖運動中，阻尼的非黏性結果與總阻尼的比值在頻率大於0.2467 Hz時比值接近0，顯示在此運動中非黏性效應造成的影響甚微。

### 參考文獻

1. "Global Wind Report," Global Wind Energy Council, 2023.
2. Maindl, T. I. "Introduction to Cubic Spline Interpolation with Examples in Python," Dept. Astrophysics, University of Vienna, 2018.
3. Hsu, I. J., Ivanov, G., Ma, K. T., Huang, Z. Z., Wu, H. T., Huang, Y. T. and Chou, M. *Optimization of Semi-Submersible Hull Design for Floating Offshore Wind Turbines*. Proceedings of the ASME 2022 41<sup>st</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2022.
4. Gaertner, E., Rinker, J., Sethuraman, L., Zahle, F., Anderson, B., Barter, G., Abbas, N., Meng, F., Bortolotti, P., Skrzypinski, W., Scott, G., Feil, R., Bredmose, H., Dykes, K., Shields, M., Allen, C. and Viselli, A. Definition of the IEA Wind 15-Megawatt Offshore Reference Wind Turbine. NREL/TP-5000-75698. National Renewable Energy Laboratory, U.S.A, 2020.
5. Tong, H, Y. *Normal Operating Performance Study of 15MW Floating Wind Turbine System Using Semi-Submersible Taida Floating Platform in the Hsinchu Offshore Area*. Master thesis, Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University, Taiwan, 2020.
6. Haskind, M. D. (1946). The oscillation of a ship in still water. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Otd. Tekh. Nauk, 1*, 23-34.
7. Haskind, M. D. (1946). The hydrodynamic theory of ship oscillations in rolling and pitching. *Prikl. Mat. Mekh, 10*, 33-66.
8. Haskind, M. D. (1946). The hydrodynamic theory of ship oscillations in rolling and pitching. *Prikl. Mat. Mekh, 10*, 33-66.
9. *Simcenter STAR-CCM+ User Guide, ver. 2206*, Siemens, Berlin, Germany, 2022.
10. Hirt, C. W. and B. D. Nichols, "Volume of Fluid Method for the Dynamics of Free Surface," *Journal of Computational Physics*, vol. 39, pp. 201-225, 1981.

## **Hydrodynamic Property Calculation of a 15MW Floating Wind Turbine Using Semi-Submersible Taida Floating Platform**

*P. Y. Tsai and S. W. Chau*

Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University

*Keywords: TaidaFloat, Floating Offshore Wind Turbine, Potential Flow Theory, Viscous Effect, Hydrodynamic Properties*

### **ABSTRACT**

This study predicts the hydrodynamic properties of a 15-MW floating wind turbine equipped with a semi-submersible TaidaFloat platform, an IEA 15-MW offshore wind turbine considering the viscous effect. Ansys Aqwa is used to calculate the hydrodynamic properties based on potential flow theory. STAR-CCM+ is used to predict the hydrodynamic properties with viscous effect of floating offshore wind turbine in 6 degrees of freedom motion in different frequencies. The curves of hydrodynamic properties with viscous effect are obtained through cubic spline curve. The results indicate that the average ratio of the inviscid induced added mass to the total added mass is 0.916, average ratio of the inviscid induced damping to the total damping is 0.289, showing more impact of inviscid effects on damping. For heave, roll, and pitch motions, the ratios of the inviscid induced added mass to the total added mass at frequencies of 0.0238 Hz are 0.806, 0.682, and 0.694, respectively. For surge, sway, and yaw motions, the ratios of the inviscid induced added mass to the total added mass are all more than 0.823, indicating a larger influence of inviscid effects on added mass. For the heave, roll and pitch motions, the ratio of inviscid induced damping to the total damping is about 0 at frequencies larger than 0.2467 Hz, showing a lesser influence of inviscid effects.