

# 海表浮式太陽能板載台之穩定性模擬分析

張明輝<sup>1</sup> 洪瑋廷<sup>1</sup> 蔡家揚<sup>2</sup> 馬維揚<sup>2</sup> 余基雄<sup>3</sup>

台灣大學海洋研究所<sup>1</sup> 行政院原子能委員會核能研究所<sup>2</sup> 崑崙山有限公司<sup>3</sup>

## 摘要

將太陽能發電裝置設於池塘、湖泊、水庫甚至海洋等水面上可避免土地使用短缺問題,較佳的發電效率及避免人為破壞的優點。要將發電機組置於海面上,需考量海象變化來設計浮動平台及錨泊系統,以避免平台因大自然力量毀損。本研究成功以ANSYS AQWA分析軟體,設計出一組3.5公尺x2.5公尺的浮動載台,主體由數個中空的浮筒單元所集合而成,浮筒彼此間由導柱、鋼架螺絲組、短螺栓組與側面固定栓來鎖固,其上裝設一套尺寸相當的太陽能板,採用系統中心單點懸垂式底繫。於靜態情況下,系統定頃高度顯示可穩定浮於水面,動態環境下,成功模擬出在輕風、和風及強風的海象下(波高分別為0.2 m, 1 m及3 m)平台系統的姿態及動態,該系統仍可穩定不致損毀翻覆。未來將配合現場實驗進行驗證。

關鍵字：海上浮動平台、太陽能

## 一、前言

能源取得方式為攸關國家工商發展與民生的議題,然而目前能源取得方法幾乎無可避免的對我們的生活環境造成衝擊,在帶來經濟發展與生活便利的同時,卻是以破壞我們生存的自然環境為代價。例如,國內目前發電方式高達70%的電力是藉由燃燒煤、天然氣及輕/重油而來的火力發電,除了這些石化燃料總蘊藏量正日益短缺外,值得憂心的是,燃燒這些燃料所排放的物質(如二氧化碳)正造成溫室效應、氣候變遷及酸雨等環境失衡的災害。核能發電是全世界目前最有效率的發電方式,但在2011年日本福島核災後,世界各國皆已重新審視其能源取得策略。

在保護環境的大前提下,發展綠能是為發展替代能源的主流之一,所謂綠能是指潔淨的,在其生產過程中,對環境低污染甚或無污染的能源,在強調安全與環保的前提下,包括太陽能、風力能、海洋能(波浪、洋流、潮汐、溫差等)及地熱能等綠能的開發也逐漸受到重視,其發展也被視為突破目前傷害環境的發電方式的指標。台灣位處亞熱帶地區,具有光照充足的優勢來發展太陽能,且發電過程不會帶來環境汙染,目前有部分民生及科學運用(如太陽能熱水器),但主要為傳統發電方法的輔助角色,且仍未普及化及大量生產,部分原因是太陽能模組成本不低,另外,發電裝置太陽能光電板常需要無遮蔽物的大面積的土地,此關係到發電效率。故將太陽能發電裝置設置於湖泊、河流、水庫甚至海洋等水面上等水表有助於太陽能發電的進一步推

廣,因為(1) 全球有半數以上的人口是居住在距離水岸約數至數十公里距離範圍內,方便供電輸送。(2) 台灣地狹人稠,可用地短缺,此作法可解決大面積用地需求的問題,且需較少的能源基礎建設需求。(3) 水面無遮蔽物且具有設備冷卻效果,有較高的發電功率,法國開發商Ciel el Terre公司的經驗顯示,由於水的有效冷卻效果,其發電效率可比裝置於陸地多10% (Choi et al., 2013a; 2013b)。(4) 水域提供設備與人的隔離,可避免人為破壞。但要將太陽能發電機組置於水面上,需面對浮動平台及其錨泊系統設計等技術性問題,類似的問題也發生在波浪發電系統、海表風力發電系統、海流發電系統,需有適當的錨繫方式及平台設計來抵抗風、浪、及流。

本研究使用為ANSYS公司所發展的AQWA工具來設計並評估浮動平台及錨碇系統。此軟體發展約已30多年,可進行複雜浮動平台幾何圖形的建立並計算平台運動及錨繩受力度及其三維運動,常應用在船舶、波浪發電機與海事工程結構物之設計,例如單點附帶儲槽,浮式生產儲存卸載系統,半潛式平台,張力腳平台等海上石油天然氣卸油平台,以及船舶,再生能源系統(包括波浪發電機,潮流發電機,海上風力發電機),防波堤等。可以計算錨繫平台在海中的靜水特性以及受到風、波浪、流作用時平台之動態特性,並可計算多體系統受到入射波作用時繞射及輻射效應的影響。應用AQWA作為水上能源平台評估過去已有先例,例如美國能源部的國家再生能源實驗室(National Renewable Energy Laboratory)就以AQWA模擬海上風力發電系統的浮體平台運動(Jonkman, 2008),並獲得良好結果。

## 二、建立數值模型

### (一)、浮式太陽能板載台模型

平台三維模型如圖1所示，主體由數個中空的浮筒單元所集合而成，浮筒彼此間由導柱、鋼架螺絲組、短螺栓組與側面固定栓來鎖固成一平台，平台總長度353.5 cm，寬度252.5 cm、高度50 cm。太陽能板則配置於平台上方，由太陽能板導柱連接於平台上。在AQWA模型繪製作業中，本研究進行了初步的簡化作業，將平台視為一個單一個體，忽略浮筒外觀鋸齒條紋的特徵，並且考量螺絲與部分導柱等元件相對於平台屬於微小型特徵元件，於計算平台水動力係數上可以忽略不計，將其排除於模型上(圖2)。在完成模型建立作業後，為能提供給AQWA在進行運算時所需要的重量、重心與慣性矩資料，將3D模型資訊匯入ANSYS STATIC STRUCTURE中。平台材質採用HDPE，密度約為 $0.95 \text{ kg/cm}^3$ ，厚度設定為2 cm；導柱設定為鋼材，密度約為 $7.85 \text{ kg/cm}^3$ ，太陽能板重量為88 kg。經計算後，太陽能平台總重約503.34kg，重心位置為(x, y, z)=(0.155m, 0m, 0.179m)，慣性矩(Ixx, Iyy, Izz) = (320.37  $\text{kgm}^2$ , 651.69  $\text{kgm}^2$ , 862.31  $\text{kgm}^2$ )。將平台放置於密度為 $1.025 \text{ kg/cm}^3$ 的海水中時，由平台的切水面積 $6.3756 \text{ m}^2$ 可換算平台的沒水深度為0.077m。

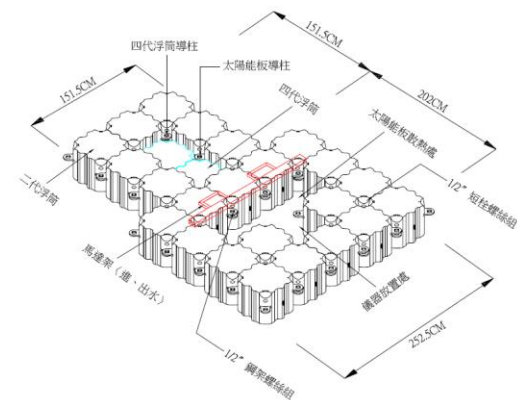


圖1 載台系統設計圖(上)及實體(下)。

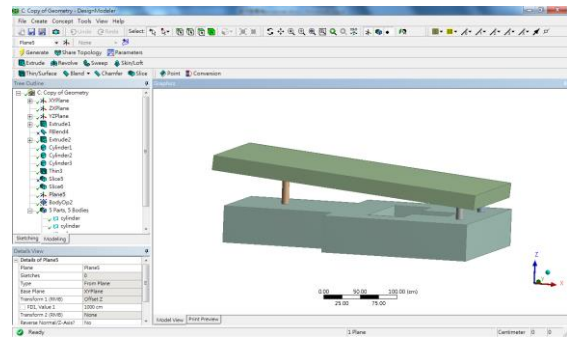


圖2 數值中簡化的模型。

### (二)、錨碇系統設定

本研究採用單點懸垂式繫纜型態(single point catenary mooring)，主要考量原因包含，第一，水位變化(一般湖泊的枯/豐水期變化及海水漲退潮)的影響將導致水深差異可達1~2m，若採用緊拉式設計，則可能導致水位蓋過平台，第二，纜繩過短，受到波浪水位起伏的影響，容易導致波浪直接拍擊平台上的太陽能板與相關設備裝置，導致儀器功能的損壞與失效，且在有水流的作用下，其在纜繩緊拉狀態時之下拉力會將平台拖入水中。第三，以纜繩張力的觀點來看，採用懸垂式繫纜設計時，平台可以隨波浪起伏與縱移之運動，纜繩不易因發生瞬間緊拉現象導致繩索產生極大的張力而斷裂(breaking)。AQWA 可提供使用者設定懸垂式錨碇系統，本研究以鋼索作為纜繩類型，鍍鋅鋼索直徑採用20 mm，空氣中單位長度重量為 $1.76 \text{ kg/m}$ ，破斷強度為約23公噸。水深設定為20 m，纜繩設定長度取2倍水深計40 m，整體設定如圖3所示。

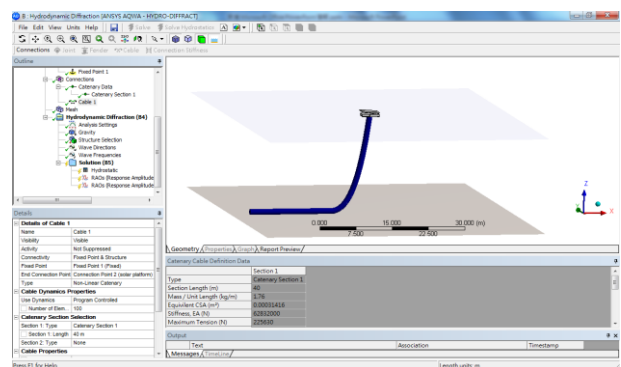


圖3 單點懸垂式繫纜

### (三)、海洋環境:風與波浪

本研究探討環境因子來源有兩個，第一個為波浪力，第二個為風力，藉由AQWA分析在兩者外力作用下，平台的運動行為與纜繩的拉力大小。波

浪方向 $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 間距 $45^{\circ}$ (圖4),波浪頻率採用等週期間距方式設定,周期範圍 $3\sim 10\text{s}$ ,間距為 $0.5\text{s}$ 。一般來說,當風持續吹動下,會使海面發生擾動而醞釀成波浪,風速愈快浪高愈大,參考蒲福風級表中波浪和風速的關係,本研究選用輕風(風速 $1.6\sim 3.3\text{ m/s}$ ,浪高 $0.2\sim 0.3\text{ m}$ )、和風(風速 $5.5\sim 7.9\text{ m/s}$ ,浪高 $1\sim 1.5\text{ m}$ )與強風(風速 $10.8\sim 13.8\text{ m/s}$ ,浪高 $3\sim 4\text{ m}$ )三種風速條件,分別模擬在風速與對應的波高作用下浮體的運動特性。為簡化問題的複雜度,本研究假設波浪屬於規則波(regular wave),設定波浪方向為 $0$ 度及代表正X軸。

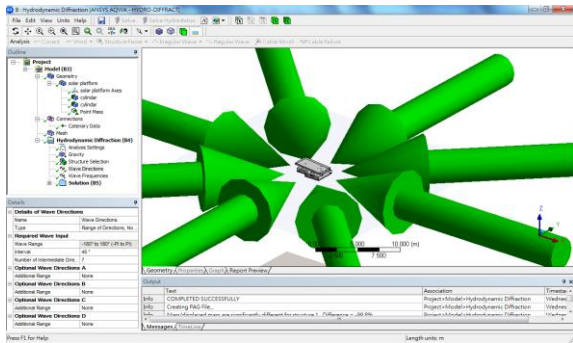


圖4 波浪方向設定

### 三、模擬結果

#### (一)、靜態穩定性分析

在微小角度搖晃下,預判斷浮體在靜止水域中之穩定性(stability)可由計算浮體定傾高度(metacenter height)決定之,以下簡稱GM,定義為重心(gravity)與傾心(metacenter)兩點之間的相對距離。當浮體GM值為正值時,浮體屬於穩定系統,即於靜水狀態下給其一外力使其傾斜後,浮體將產生一反方向的回復力矩(Restoring Moments),在移除外力作用後,浮體可以自由擺盪回到初始位置而不發生翻覆現象,反之若GM值為負值,則浮體屬於一不穩定狀態,於外力作用下會因為無足夠回復力矩扶正下容易發生翻覆。由AQWA計算結果,浮體繞x軸方向旋轉的GMX為 $5.88\text{m}$ ,單位角度水體的回復力矩為 $8.85\text{ N}\cdot\text{m}^{\circ}$ ;繞Y軸方向旋轉的GMY為 $13.71\text{m}$ ,單位角度水體的回復力矩為 $20.62\text{ N}\cdot\text{m}^{\circ}$ ,由GMX與GMY皆為正值可初步判斷現階段所設計的浮體是屬於穩定系統狀態。

#### (二)、動態反應分析

太陽能板及浮動平台之運動狀態包括移動與轉動,共有六個維度,分別用六個參數表示之,包括

Surge (縱移,沿著x軸移動)、Sway (橫移,沿著y軸移動)、Heave (起伏,沿著z軸移動)、roll (橫搖,沿x軸轉動)、pitch (俯仰,沿著y軸轉動)、yaw (平擺,沿著z軸轉動)。太陽能板平台在輕風、和風與強風的風速與波浪作用下之時序分析結果如圖5、圖6、圖7所示,將平台在surge、heave、pitch與纜繩張力的動態反應以時序列方式呈現,在本模式設定下,sway、roll與yaw方向無作用力因此即不再繪製呈現,平台運動狀態如圖8所示。

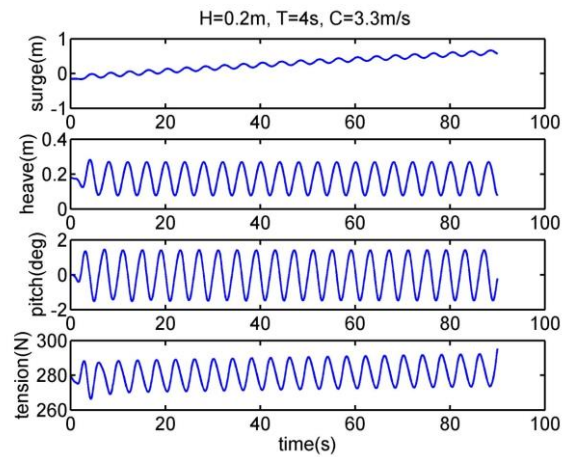


圖5 輕風條件下,平台動態時序

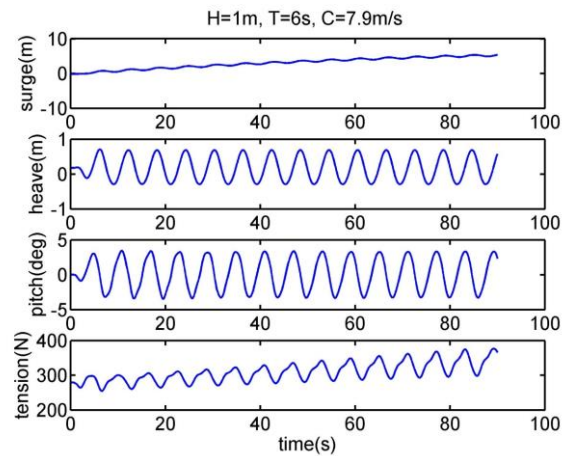


圖6 和風條件下,平台動態時序

在輕風條件下,平台整體的動態行為大致上具入射波浪具有相同的震盪周期,平台在surge方向的運動變化於 $90\text{s}$ 時間內移動量約為 $0.9\text{m}$ ,heave方向上的運動振幅約 $0.095\text{m}$ ,pitch最大搖晃角度為 $1.4\text{deg}$ ,纜繩最大張力約為 $290\text{N}$ ,由以上之動態反應來看,平台對輕風作用下的動態反應不大。在和風條件下,受到波浪週期與風速增大的影響,平台在surge方向的運動變化於 $90\text{s}$ 時間內移動距離可達 $5.23\text{m}$ ,heave方向上的運動振幅約 $0.476\text{m}$ ,pitch最大搖晃角度為 $3.33\text{deg}$ ,纜繩最大張力隨時間逐漸增加可達



376.6N，由以上之動態反應來看，於風速較大的和風作用下的平台的動態反應明顯的增加。

在強風條件下，此時風速已達13.8 m/s，平台在surge方向的運動變化於90s時間內移動距離可達10.54m，heave方向上的運動振幅約1.527m，pitch最大搖晃角度為7.67deg，纜繩張力呈現狀似孤立波的突增現象，最大張力隨時間逐漸增加可達1839N，值得注意的在高風速與大浪高的作用下，平台的pitch搖晃角度呈現鋸齒狀的波形現象，此原因主要來自波高增大效應所致。為避免纜繩容易發生瞬間緊拉現象，本模擬採用長度40m之的鋼索，在強風作用下，建議之纜繩可承受張力至少需大於1839N。

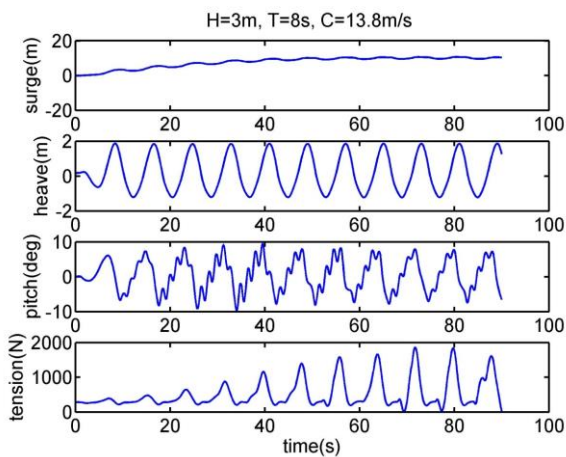


圖7 強風條件下，平台動態時序

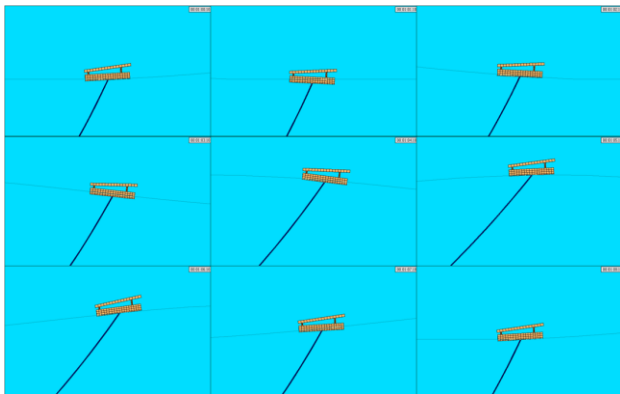


圖8 強風條件下平台運動連續圖

## 五、討論與結論

(一)本研究採用ANSYS AQWA作為模擬軟體，其功能頗為實用，具有簡單的介面化的操作，可協助開發者有效率的進行太陽能板平台的設計與分析，並且可透過模型的參數化建立，協助使用者進行平台的最佳化設計。由於海洋相關的綠能開發，皆同樣

面對浮動平台設計及錨碇系統設計的問題，未來值得擴大應用，但仍須以實測來驗證。

(二)本研究分別採用輕風、和風與強風三種條件進行浮體的動態特性模擬，初步結果顯示，當風速與浪高增強時，浮體在水體中的搖晃角度越大，且當波高越大時，將會產生一個較入射波頻率高頻的微小震動現象，在長時間作用下，此一現象將可能導致平台螺絲與螺絲連接處之結構處容易發生鬆脫與疲勞現象，值得注意。

(三)本研究採用規則波浪與固定風速為假設條件模擬實際海域上的風與浪的現象，然而實際海域上的波浪與風的型態屬於不規則性質，未來可進一步將風譜與波浪頻譜導入模式當中，以模擬實際海域風與浪作用下平台的動態行為。

(四)依據國際船協在海上結構設計準則與指引中指出，當平台長時間工作於海上時，由於可能遭受巨大風浪如颱風或颶風之侵襲，因此實用上，通常會以該海域的極端風浪條件作為設計標準，以確保平台與錨碇系統可以抵抗極端風浪條件下而不發生損壞或故障。未來可依據中央氣象局所記錄的歷年來颱風侵襲台灣的路徑、風速與浪高，作為推測平台未來佈放之海域可能發生的極端條件參考與平台動態分析模擬條件之依據。

## 致謝

本文之研究工作為行政院原子能委員會核能研究所所補助。

## 參考文獻

- Choi, Y. -K., N. -H. Lee, and K. -J. Kim (2013), Empirical Research on the efficiency of Floating PV systems compared with Overland PV Systems, Proceedings, The 3rd International Conference on Circuits, Control, Communication, Electricity, Electronics, Energy, System, Signal and Simulation., Vol. 25, pp. 284 – 289.
- Choi, Y. -K., N. -H. Lee, A. -K. Lee and K. -J. Kim (2013), A study on major design elements of tracking-type floating photovoltaic systems, International Journal of Smart Grid and Clean Energy, vol. 3, no 1.
- Jonkman, J. M. (2008), Influence of Control on the Pitch Damping of a Floating Wind Turbine, ASME Wind Energy Symposium Reno, Nevada.