

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

水上發電機組浮動平台與其錨泊系統之技術開發
**Technology development of a floating platform and its mooring for
the floating photovoltaic system**

計畫編號：1042001INER016

受委託機關(構)：國立台灣大學

計畫主持人：張明輝

聯絡電話：(02)33661618

E-mail address：minghueichang@ntu.edu.tw

核研所聯絡人員：蔡家揚

報告日期： 104 年 11 月 30 日

目 錄

目 錄	I
中文摘要	1
ABSTRACT	2
壹、計畫緣起與目的	4
貳、研究方法與過程	6
一、 太陽能板浮動平台及錨碇系統設計	6
二、 一般條件的風場設定	9
三、 流場設定	10
四、 極端風場條件分析	11
五、 結構強度分析	12
參、主要發現與結論	15
一、 太陽能平台動態分析	15
二、 平台結構強度分析	19
三、 結論與建議	26
肆、參考文獻	28

中文摘要

將太陽能發電裝置設置於池塘、湖泊、水庫甚至海洋等水面上具有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。然而要將發電機組置於水面上,需面對浮動平台設計及其錨泊系統等技術性問題。延續第一年計畫成果,本研究模擬海上太陽能發電浮台在強風海況(風速~13.8 m/s)及颱風時期的極端風速海況(風速~51 m/s)的動態,包括風、浪、流的影響。浮體由 23 個 HDPE 材質的浮筒組成,長寬高分別為 3.5、2.5 及 0.5 公尺,其上配備太陽能板。水深為 20 公尺,錨碇設計為單點懸垂式及外加中繼緩衝浮球兩種,結果顯示,在強風海況下,40 公尺長的錨碇纜繩,平台水平移動約 12 公尺,平台傾角為 22° ,最大纜繩張力為 3700N,若將纜繩增長到 60 m,最大瞬時張力下降 21%,若加裝緩衝浮球可將張力降約 40%。在極端海況下,搖晃角度達到 32° ,最大瞬間張力為 24269N,為強風條件下的 6.5 倍,此時緩衝浮球並無效果,而最佳的緩衝就是”海水本身”,將纜繩加長到 60 公尺有較多纜繩表面與海水接觸面積,可減少瞬間張力 40%。本研究亦針對目前的系統平台設計以極端海況條件下進行結構應力分析,分析結果建議加厚連結浮筒與太陽能板間的導柱可避免系統因極端海況而損毀。

Abstract

The advantages of PV system installed on the floating platform in the pond, lake, reservoir, and even ocean are to avoid the issue of land shortage and artificial damage and to improve the efficiency of power generation. Therefore, the issues of the floating platform design and the mooring technology are raised. Based on the efforts in the first year of the project, stability of floating photovoltaic system under the sea conditions of strong wind (~ 13.8 m) and typhoon-induced extreme wind (~ 51 m/s) was numerically studied with the impacts of winds and surface waves and currents. The $3.5 \times 2.5 \times 0.5$ m floating platform equipped with a solar panel above consists of 23 HDPE buoys. The water depth is 20 m in the model. The platform was set to be moored by either a catenary cable between the anchor point and the platform or a buffer float positioned at the catenary cable. In strong wind condition, the platform with 40-m cable has surge, pitch and maximum cable tension of 12 m, 22° , and 3700N, respectively. The tension decreases 21% and 40% when the cable is lengthened to 60 m and when the buffer float is added, respectively. In extreme wind condition, the pitch is 32° and the maximum tension of the cable raises to 24269N, 6.5 times of that in strong wind condition. The buffer float appears to malfunction. Instead, our simulation reveals the best damper under the extreme sea condition is the friction between the surface area of the cable and the water. Therefore, the tension decreases 40% when the cable is lengthened to 60 m. The structural stress analysis based on the extreme sea condition was applied to the present platform. The results suggest that to thicken the conduit

pipes between the solar panel and the floating HDPE buoy can prevent the platform from being damaged.

壹、計畫緣起與目的

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，燃燒這些燃料所排放的二氧化碳正造成溫室效應、氣候變遷及酸雨等災害，核能發電雖是最有效率的發電方式，但其安全性一直是社會大眾的主要疑慮，在 2011 年日本福島核災後更是如此。發展綠能是為發展替代能源的主流之一，所謂綠能包括太陽能、風力能、海洋能(波浪、洋流、潮汐、溫差等)及地熱能。台灣位處亞熱帶地區，具有光照充足的優勢來發展太陽能，目前主要為傳統發電方法的輔助角色，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。

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。

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自然環境的威脅，也就是風、浪、及流的影響。在本計畫的第一年成果(已發表於張等 2015)，已針對核能研究所所設計之太陽能板-

浮動平台系統，成功以 ANSYS 公司所發展的 AQWA 工具進行數值分析平台系統於海表動態，設定三種海洋環境，即輕風(最大風速 3.3 m/s)、和風(最大風速 7.9 m/s)與強風(最大風速 13.8 m/s)條件下，風應力對平台之作用，另外，模式中也加入波浪影響，根據蒲福風級表，三種風速分別產生示性波高 0.2, 1, 及 3 公尺的波高，於懸垂式繫纜系統，該平台於強風狀態，平台在 surge 方向的運動變化於 90s 時間內移動距離可達 10.54 m，heave 方向上的運動振幅約 1.527 m，pitch 最大搖晃角度為 7.67 deg，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 1839 N。此模擬結果顯示，一般海況下，該平台系統之幾何設計及錨泊方式是可存活。為了趨近真實的自然環境狀態，此第二年研究計畫延續第一年的研究，將數值模擬(1)加入海流造成之影響、(2)加入極端海況條件(颱風時期)分析、(3)測試不同的錨碇方式、(4)進行平台結構強度分析。

貳、研究方法與過程

本計畫使用 ANSYS 公司所發展的 AQWA 工具進行模擬，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程度及其三維運動，常應用在船舶、波浪發電機與海事工程結構物之設計，包括單點附帶儲槽，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、流作用時平台之動力特性，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。顯然極為適用於本計畫之太陽能水上平台設計評估。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。詳細使用及設定方法已敘述於第一年計劃報告中，在此不再加以贅述，以下將介紹平台/錨碇設計及海洋環境因子設定。

一、太陽能板浮動平台及錨碇系統設計

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 kg/cm^3 ，厚度設定為 2 cm ；導柱設定為鋼材，密度約為 7.85 kg/cm^3 ，太陽能板重量為 88 kg 。經計算後，太陽能平台總重約 503.34 kg ，重心位置為 $(x, y, z)=(0.155 \text{ m}, 0 \text{ m}, 0.179 \text{ m})$ ，慣性矩 $(I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}) = (320.37 \text{ kgm}^2, 651.69 \text{ kgm}^2, 862.31 \text{ kgm}^2)$ 。將平台放置於密度為 1.025 kg/cm^3 的海水中時，由平台的切水面積 6.3756 m^2 可換算平台的沒水深度為 0.077 m 。

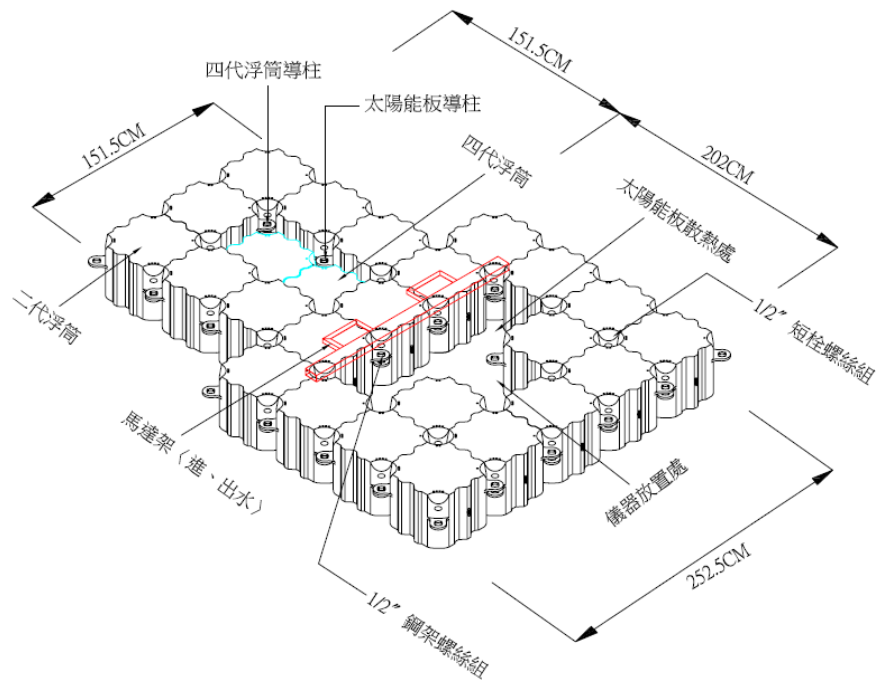


圖 1、載台設計圖(上)及太陽能板+載台實體(下)。

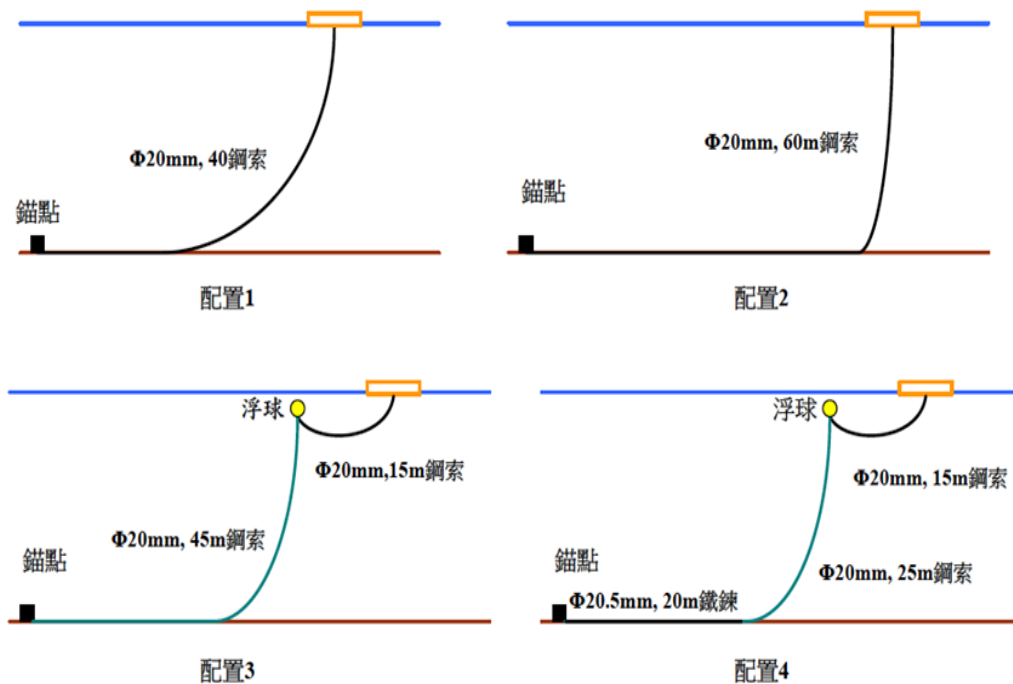


圖 2、四種錨碇系統配置

本研究所使用的四種錨碇系統配置如圖 2 所示，第一種配置為纜繩長度 40 m，材質為鋼索，即為張等(2015)所模擬的條件；第二種配置為纜繩長度 60 m，材質為鋼索。第三種配置為纜繩由兩段鋼索串接組成，第一段為連接平台繫纜點的 15 m 鋼索，第二段為連接錨點的 45 m 鋼索，兩段連接處配置一個浮力 40 kg 的浮球。第四種配置之纜繩由兩段鋼索與一段鐵鍊串接而成，第一段為長度 15 m 的鋼索，用以連接平台繫纜點，第二段為長度 25 m 的鋼索，第三段為長度 20 m 的鐵鍊，用以連接錨點，於兩段鋼索連接處配置一個浮力 40 kg 的中繼浮球。

二、一般條件的風場設定

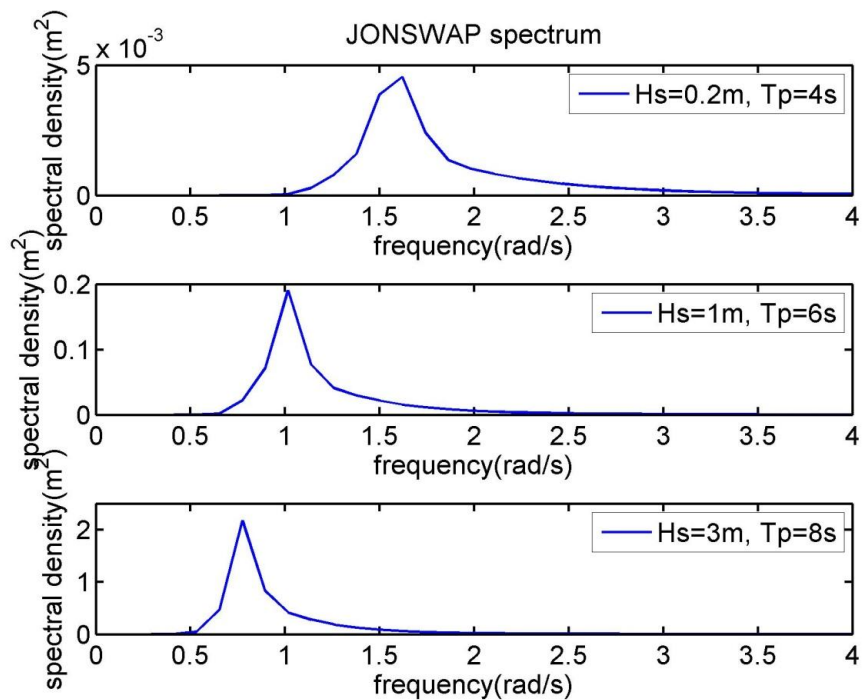


圖 3、在輕風(上)、和風(中)及強風(下)條件下的 JONSWAP 頻譜。
對應的波高及波週期皆標示其中。

海上的波浪屬於不規則波浪(irregular wave)，是由許多不同頻率波浪所組成，因此若僅以單一規則波(regular wave)來模擬平台運動與纜繩張力較不符合實際的物理現象，故本研究採用 JONSWAP 頻譜來模擬海上的不規則波浪，數學式如式(1)所示，波浪條件則延續第一年的設定(表1)，採用輕風、和風與強風三種條件，並給定對應的峰值周期 T_p 與示性波高 H_s ，而計算的 JONSWAP 頻譜如圖3及表1所示。

$$S_j = (1 - 0.287 \ln(\gamma)) \frac{5}{16} \cdot H_s^2 \omega_p^4 \cdot \omega^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \gamma^{\exp(-0.5 \left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma \omega_p}\right))}$$

$$\sigma = 0.07 \text{ for } \sigma \leq \sigma_p$$

$$\sigma = 0.09 \text{ for } \sigma > \sigma_p$$
(1)

其中， S_j 為代表JONSWAP頻譜， H_s 為示性波高， $\omega_p = 2\pi/T_p$ 為角峰值頻率， ω 為角頻率， γ 為峰值形狀參數。

條件	最大風速 (m/s)	示性波高 (m)	對應週期 (s)	表面流速 (m/s)	風向 (deg)
清風	3.3	0.2	4	0.101	0
和風	7.9	1	6	0.261	0
強風	13.8	3	8	0.455	0

表 1、在輕風(上)、和風(中)及強風(下)條件下的最大風速、示性波高(參考蒲福風級表)、對應週期(JONSWAP 頻譜)、表面流速、及風向(正東為 0，逆時針轉)。

三、流場設定

本研究進一步探討在海流作用下的平台的運動行為，海水表面受到風力的作用下，由於空氣與水體之間存在摩擦剪力係數(friction shear stress coefficient)，將使得在風吹的作用下，會引起水體表面產

生飄移流(surface drift current)。此現象在風速越大時，作用越顯著，而不可忽略其對平台運動的影響。

依據 Tsahalis(1979)文獻指出，由現場海域紀錄所量測的表面流速約為 $0.03U_{10}\sim 0.042U_{10}$ ， U_{10} 為水面上 10m 所記錄的風速，其中以 $0.033U_{10}$ 所分析之結果占多數(Van Dorn, Hughes, J.E.Smith)，因此本文採用風速的 0.033 倍來估算表面流速作為模擬條件，三種風況條件所引起的表面流速如表 1 所示，清風時表面流速為 0.101 m/s，和風表面流速為 0.261 m/s，強風流速為 0.455 m/s。

四、極端風場條件分析

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。本研究參考中央氣象局波浪統計資料庫與颱風歷史資料庫，查詢台灣北部與西部資料浮標(data buoy)的歷史資料，以做為評估極端條件之參考依據，參考之浮標包含龍洞、新竹、七股、小琉球共計四組。最大波高發生在 2013 年 7 月 13 日時(表 2)，由龍洞浮標所記錄到的最大示性波高為 $H_s=12.79\text{m}$ ，峰值週期 $T_p=15.1\text{s}$ ，而引起此大波浪的來源為颱風編號 201307 蘇力 (SOULIK) 通過台灣所致，其近中心最大風速為可達 51 m/s，因此本研究以此風速作為模擬條件，則對應的表面流速為 1.68 m/s。

月份	最大示性波高				平均週期 (秒)
	波高 (m)	尖峰週期 (秒)	波向 (度)	發生時間	
1	5.45	11.6	56	20110115	6.1
2	5.06	10.8	33	20120207	6.1
3	5.44	11.6	56	20060313	6
4	4.54	9.8	33	20130406	5.8
5	4.7	10.4	67	20110528	5.6
6	4.3	8.8	0	19990606	5.5
7	12.79	15.1	67	20130713	5.5
8	8.27	11.3	45	20120801	5.9
9	11.15	13.1	90	20080928	6
10	9.59	14.6	0	20131006	6.2
11	6.08	13.1	56	20071127	6.1
12	4.96	10.4	33	20051218	6.1

表 2、龍洞浮標資料自 1998-2014 年間，各月分紀錄到的最大波高，其中標示為黃色的區間為 2007 年蘇力颱風造成，作為本研究環境設定參考。

五、結構強度分析

本研究亦針對水上發電機組浮動平台進行初步結構強度分析，利用最佳化設計軟體 SmartDO 整合進行設計變更，提出符合強度之設計雛型。SmartDO 為一泛用型最佳化設計軟體，可與分析軟體流程整合進行自動最佳化設計，此專案所整合的分析軟體為 ANSYS 相關模組，其分析流程，如圖 4 所示。

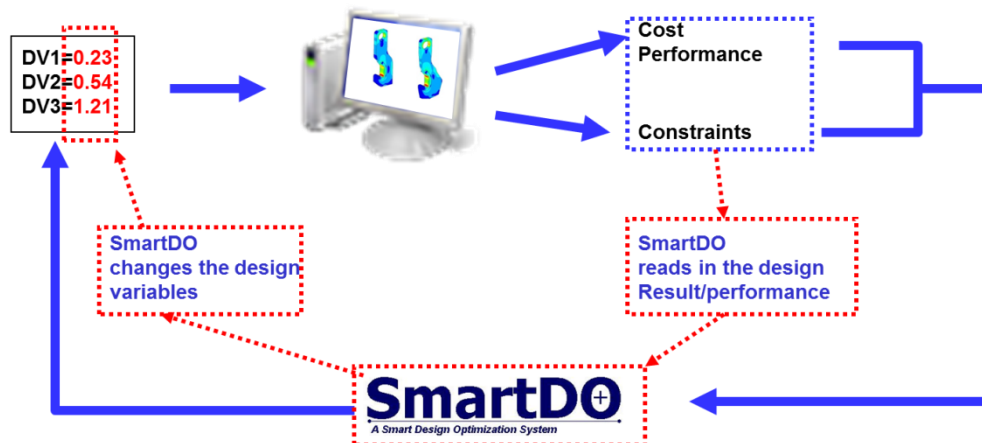


圖 4、SmartDO 整合 ANSYS 最佳化流程

如前所述，為確保平台與錨碇系統於極端風浪條件下操作而不發生損壞或故障，將以該海域的歷史極端風浪條件資料作為設計準則，本次水上發電機組浮動平台之極端條件，將使用表 2 龍洞浮標歷史資料的七月份最大示性波高為 $H_s=12.79\text{m}$ ，峰值週期 $T_p=15.1\text{s}$ 作為分析條件，其分析流程如下：

- (1) 使用 ANSYS DesignModeler 建立水上發電機組浮動平台幾何模型。
- (2) 使用 ANSYS AQWA 設定極端條件進行分析，將解析太陽能板浮動平台處於波的 8 個相位(圖 6)之結構壓力分佈。
- (3) 使用 ANSYS Mechanical 假設靜態線性結構分析，讀取壓力分佈作為邊界條件，進行分析。

由 ANSYS DesignModeler 建立之水上發電機組浮動平台幾何模型，各不同視角之模型如圖 5 所示，主體結構分為太陽能板模組、

導柱、浮筒平台等三個部分。太陽能板由核研所提供的資料，重量為 88 kg；導柱使用為 6061 鋁合金，密度為 2770 kg/m^3 ，降伏強度為 55 MPa (材料可承受之最大應力值)，厚度設定為 5 mm；浮筒平台採用 HDPE，密度為 950 kg/m^3 ，降伏強度為 25 MPa，厚度設定為 20 mm，分析結果將於下章說明。

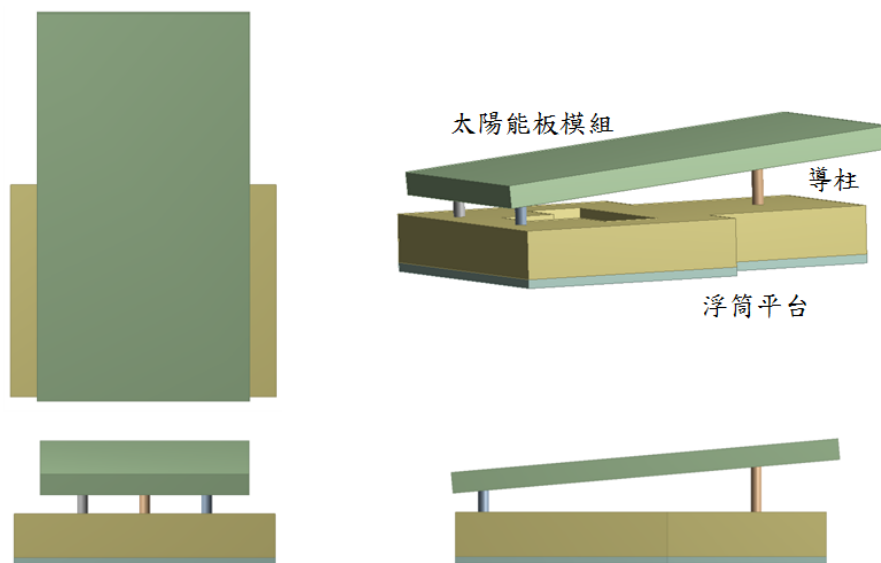


圖 5、水上發電機浮動平台基本幾何模型

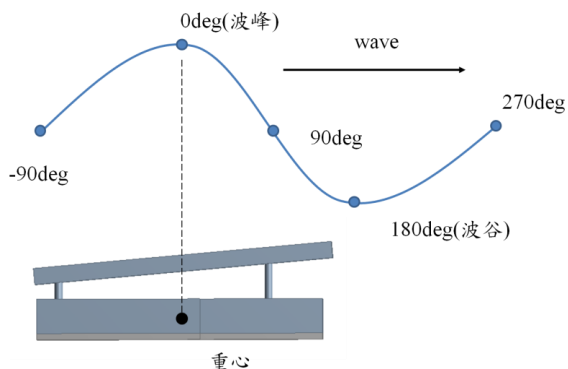


圖 6、波浪相位定義

參、主要發現與結論

本研究模擬在輕風、和風、強風及極端風速條件下，不同錨碇設計(圖 2)的太陽能平台動態及平台結構強度分析，在輕風及和風條件的分析如預期顯示，並未對平台造成重大的影響，在此不呈現模擬結果。以下將呈現強風及極端風速條件下的平台動態及平台結構強度模擬結果。

一、太陽能平台動態分析

隨風力增強，風與流也相對增強，平台之運動也越是激烈，圖 7 為錨碇配置 1(圖 2)於強風條件下的平台動態，圖中顯示，於水平移動、垂直移動與搖晃角度在有海流的情況稍微偏高，但差異並不明顯，水平位移大概於模擬開始後約 80 s，達到平衡值，約 9 公尺，當地水深 20 公尺，繩長 40 公尺，故纜繩是以垂懸狀態在水中，上下移動幅度在 0-3 公尺間，隨波浪週期變化，由於平台面積不大，平台搖晃度顯然對於 8 秒週期的波浪相當敏感，搖晃角度可達 20° 。海流效應，對整個系統最顯著的影響是纜繩張力，無流情況下，纜繩平均張力為 490N，瞬間張力最大值是 1830N，但於海流作用下，平均張力是 637N(表 3)，為無流情況的 1.3 倍，纜繩平均張力對於平台安全性而言，意義並不大，值得注意的是，流場作用下，瞬間張力最大可達 3700N，為無流情況的 2 倍。這說明了海流的主要作用在於使得纜繩呈現吃力狀態，當波浪作用於平台系統時，敏感性較高，可產生強大的瞬間張力。

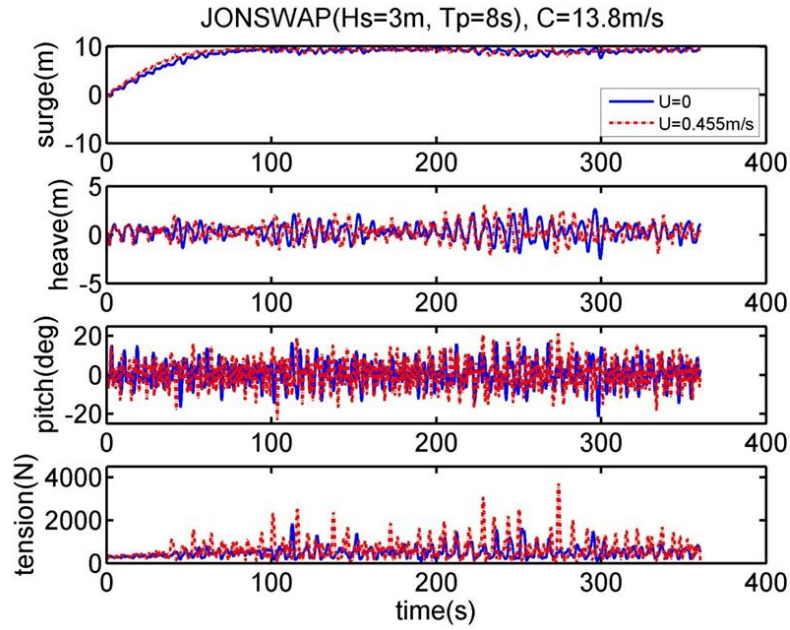


圖7、強風條件下平台動態時間序列。由上而下分別為水平移動 (surge)、垂直移動 (heave)、搖晃角度 (pitch) 及纜繩張力 (tension)。藍線與紅線分別表示不包含海流及包含海流之模擬。

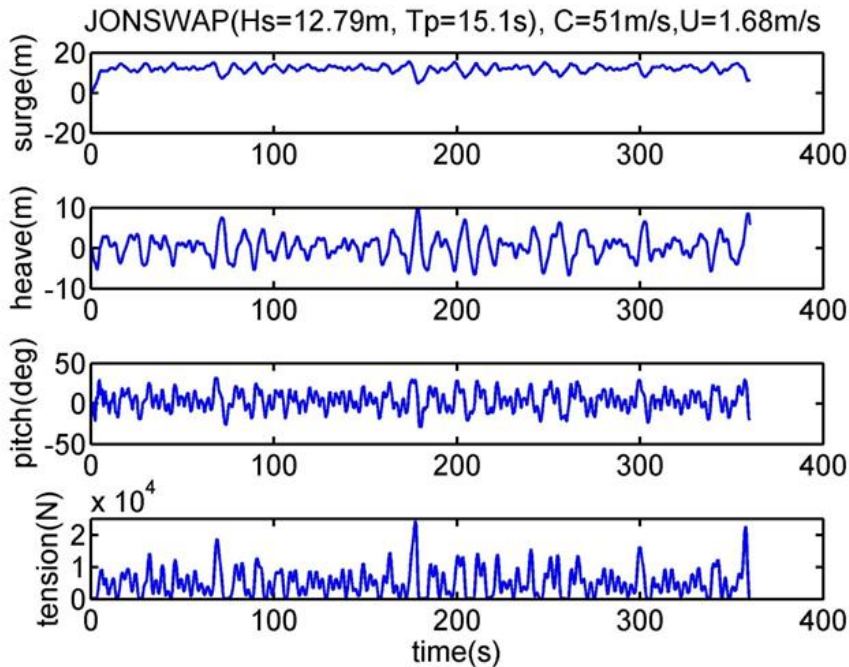


圖8、極端風速條件下平台動態時間序列(包含流場之影響)。

在極端風速條件下(圖 8)，錨碇配置 1 的平台運動面對了嚴峻的考驗，水平移動量相對於強風條件增幅不大，由 9 m 增加到 11 m，但垂直移動最高達到 10 m，搖晃角度達到 32°，纜繩平均張力達到 5078N，為強風條件下的 8 倍，最大瞬間張力為 24269N，為強風條件下的 6.5 倍。激烈升降搖晃可能對平台上設備造成損害，而驟升的纜繩張力可能造成斷纜之疑慮，此模擬提供之數據可提供平台裝備參考。

	縱移 (m)	平均傾角 (deg)	最大傾角 (deg)	平均張力 (N)	最大張力 (N)
1	9.24	5.79	23.08	636.79	3702.68
2	11.35	5.79	22.72	620.58	2918.06
3	13.59	5.72	21.13	364.83	2159.10
4	13.39	5.73	21.30	369.35	2245.80

表 3、四種錨碇系統比較(強風條件)

在強風條件下，四種錨碇方式的平台運動模擬結果如表 3 所示，配置 2 與先前的配置 1 差異在於將纜繩增長到 60 m(原來 40 m)，模擬結果顯示，平均張力降 3%，而最大瞬時張力下降頗為顯著，為 21%，顯示增加纜線長度，可減少強風下的瞬時張力。配置 3 與配置 4 皆於錨點與平台間加上額外浮球緩衝，兩者浮球與錨點間鋼纜長度分別為 45 m 與 25 m(圖 2)，分析顯示，加裝緩衝浮球可將平均纜繩張力降約 42%，瞬時張力降約 40%，配置 3 與 4 差異不大，但成效皆相當顯著。

	縱移 (m)	平均傾角 (deg)	最大 傾角 (deg)	平均張力 (N)	最大張力 (N)
1	11.58	10.16	32.39	5077.71	24269.08
2	15.79	9.80	33.35	4576.05	14231.09
3	15.82	9.78	32.46	4462.31	14494.64
4	15.43	9.74	32.60	4557.52	14704.98

表 4、四種錨碇系統比較(極端風速條件)

在極端風速條件下，四種錨碇方式的平台運動模擬結果如表 4 所示，配置 2、3、4 皆較配置 1 於減緩纜繩張力上有較好的成效，何者為優，差異不大，3 者皆可把平均張力降約 12%，把瞬時張力降約 41%。此結果顯示，在強風條件下，緩衝浮球作用顯著，但在極端風速下，緩衝浮球幾乎沒作用，而最好的緩衝就是”海水本身”。配置 2、3 與 4 與配置 1 的共同差異是纜繩較長，有較多纜繩表面與海水接觸的面積，表面積與海水的摩擦力是最佳的緩衝。以上成果已發表於 2015 年海洋工程研討會(張等,2015)，四種錨繫方式分析總結如下：

- (1) 在風浪條件較低的條件下，增加纜繩長度對於平台的運動與纜繩張力的影響不大，但於纜繩中加入中繼浮球可以將低纜繩所承受的張力。
- (2) 在風浪增強時，以強風為例，纜繩長度增加可降低平台最大傾角與纜繩的最大張力，但對於降低平均傾角與平均張力有限。當纜繩配置中繼浮球時，則可有效降平均張力。

- (3) 在極端條件時，由配置 2~4 可知道中繼浮球對於纜繩張力的影響不大，降低纜繩張力的主要因子為纜繩的長度，由此顯示若要抵抗極端條件，增長纜繩長度是必要的。
- (4) 配置 4 中在錨點端採用較重的鐵鍊，分析結果顯示其影響對於平台的擺動角度與纜繩張力影響不大。但錨點採用鐵鍊主要功能是要防止與底床之摩擦，雖無法降低張力，但實務上應有必要。

二、平台結構強度分析

在極端風速條件下，平台結構強度分析結果如表 5 所示，表中波浪相位定義圖如圖 6 所示，而本次結構分析最大應力發生相位在 180 度，也就是平台落於波谷的時候，其最大應力值分別為太陽能板模組 3380.32 MPa、導柱 53.24 MPa、浮筒平台 4.15 MPa，太陽能板、導柱及浮筒平台結構應力分布分別如圖 9~11 所示。

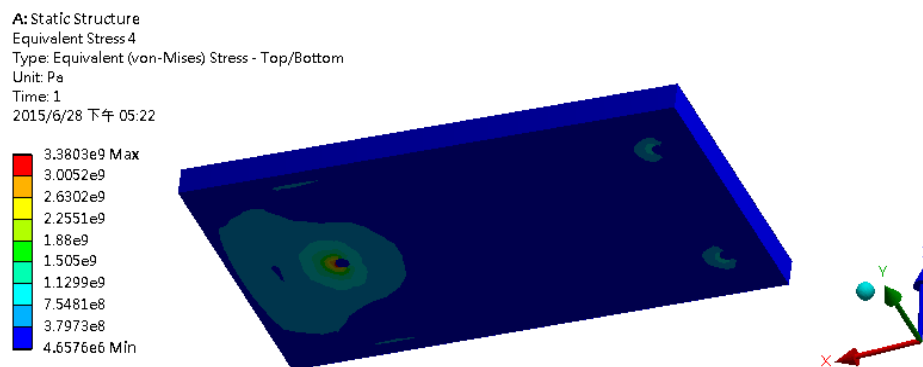


圖 9、太陽能板模組結構應力分布



圖 10、導柱結構應力分布

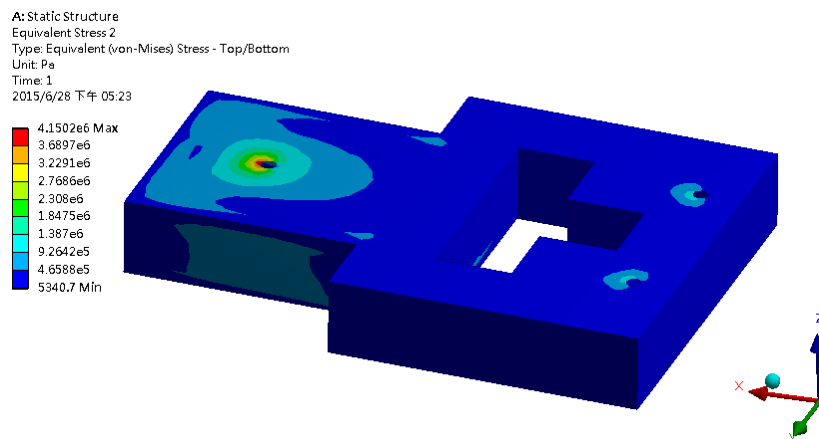


圖 11、浮筒平台結構應力分布

相位 (°)	太陽能板模組 (MPa)	導柱 (MPa)	浮筒平台 (MPa)
0	2612.41	39.12	3.20
45	2763.68	41.26	3.38
90	3051.26	45.53	3.73
135	3307.11	49.43	4.05
180	3380.32	53.24	4.15

225	3229.26	48.53	3.98
270	2941.16	44.25	3.63
315	2685.83	40.36	3.31

表 5、極端條件結構最大應力值，黃色區間標示最大結構應力值。

此模型結構強度分析顯示，無論是太陽能板模組或者是浮筒平台，最大應力發生位置在其本身與導柱之間的交界處，因此在設計上，需針對導柱與太陽能模組之間的連結加強設計。此分析結果也顯示，現行之系統設計是可以安然經過風暴之考驗，因為導柱與浮筒平台的最大應力值皆小於材料降伏強度。然而實務上，此平台需長時間工作於水上，持續的大自然營力可能使得材質結構疲乏，而海水也有強腐蝕性，因此有必要加入安全係數來評估結構強度，目前我們假設安全係數為 0.6，對應材料 6061 鋁合金之容許應力為 33 MPa、HDPE 之容許應力為 15MPa，而目前導柱分析最大應力值 53.24 MPa (表 5)明顯大於容許應力 33MPa，因此必須針對導柱進行設計變更，為避免提升安全性卻導致結構須大幅修改，造成製造成本預期外之增加，原則上設計變更後的重量不能與原始設計差異過大，因此我們使用最佳化設計軟體 SmartDO 來輔助我們進行設計。

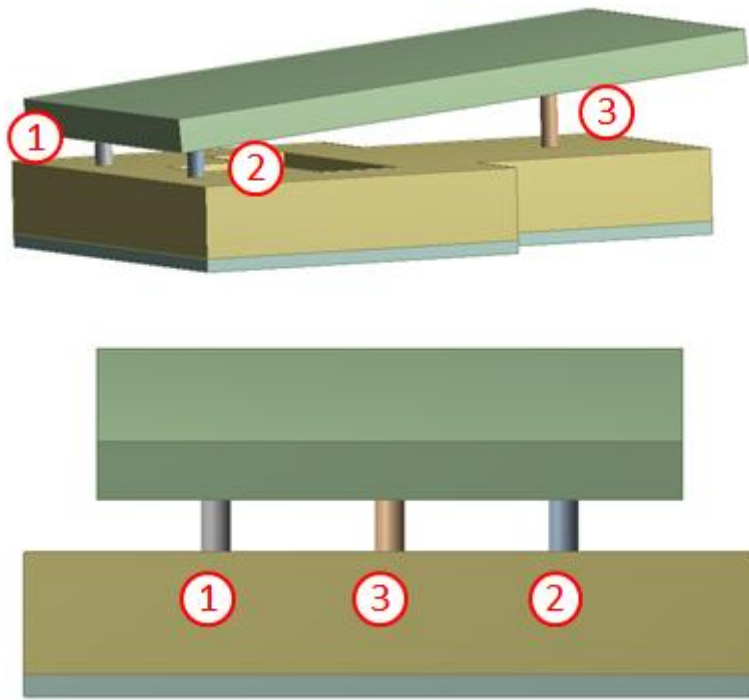


圖 12、導柱設計變數編號

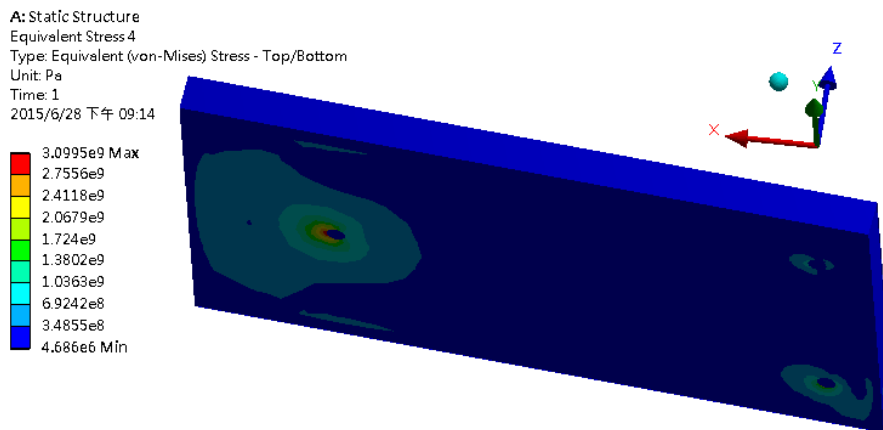


圖 13、太陽能板模組結構應力分布(最佳化)

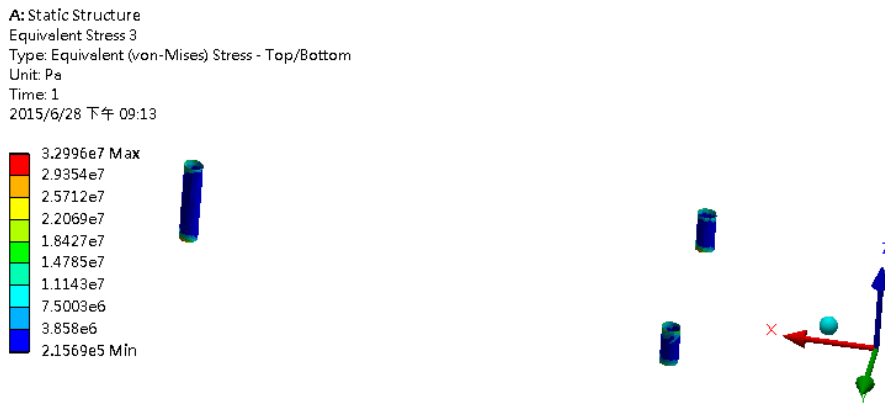


圖 14、導柱結構應力分布(最佳化)

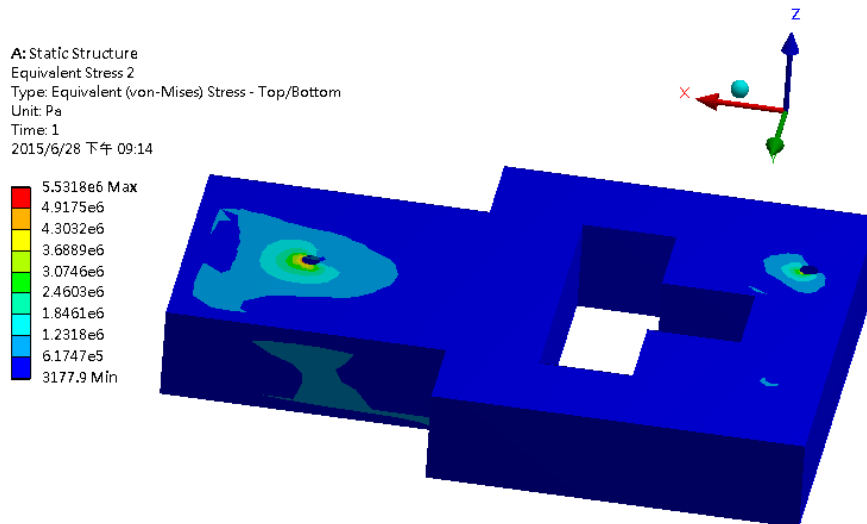


圖 15、浮筒平台結構應力分布(最佳化)

最佳化的設計變數分別為三個導柱的厚度，變數編號與其對應幾何，如圖 17 所示，標示為 1、2、3 分別為左後、右後及前導柱。導柱在設計變更後，其最大應力值必須小於容許應力 33MPa，同時，整體水上發電機組浮動平台的重量必須保持在原始設計重量的 99.5% 至 100.5% 之間，此計畫中我們以降低導柱最大應力為設計

目的。

	原始設計	最佳化設計
設計變數 1 (mm)	5	3.3636
設計變數 2 (mm)	5	6.0521
設計變數 3 (mm)	5	7.4495
導柱最大應 力 (MPa)	53.24	32.996
整體重量 (kgw)	408.63	409.45

表 6、導柱厚度最佳化與原始設計結果比較

最佳化設計與原始設計結果之比較，如表 6 所示，最佳化設計之應力分布，如圖 13~15 所示，其最大應力值分別為太陽能板模組 3099.49MPa、導柱 32.99MPa、浮筒平台 5.53MPa。

結果顯示透過最佳化設計軟體 SmartDO 輔助，可有效地將導柱的最大應力值降至 32.996MPa，已小於容許應力 33MPa，同時整體的重量改變不到 0.2%，將目前最佳化設計重新執行極端條件八個相位的結構分析，其結果如表 7 所示，其所有相位的導柱最大應力

值皆小於材料容許應力。

相位 (°)	太陽能板模組 (MPa)	導柱 (MPa)	浮筒平台 (MPa)
0	2347.72	26.22	4.29
45	2479.53	27.20	4.49
90	2754.32	29.59	4.93
135	3011.53	32.06	5.37
180	3099.49	33.00	5.53
225	2947.89	32.00	5.33
270	2692.59	29.61	4.89
315	2435.88	27.21	4.45

表 7、極端條件結構最大應力值(最佳化)

由目前的分析結果可知，應力較大的地方會在導柱與太陽能板模組的接合處，而其中又以與太陽能板接合處會承受較大的應力，然而目前由於幾何模型均經過簡化，應力集中現象可視為數值分析的奇異點 (singular point)，數值結果僅可就趨勢提供設計之參考建議，就結果而言，在後續設計時需針對太陽能板所需的安全規範進一步討論。

目前現行的主流太陽能板規範為 IEC61215、IEC61730、IEC61646，其所應用的太陽能板型式不同，且現行的規範是否適用於太陽能板於海面上的使用也需進一步探討，相關議題仍可進一步研

究。

三、結論與建議

- (1) 表面流在風浪較小時對平台擺動傾角與纜繩張力的影響不大，當風速增強時表面流速變快，則其對平台的影響則不可忽略。當處於強風狀態時，受到表面流的作用，纜繩最大張力幾乎為無表面流時的兩倍。
- (2) 本研究模擬了四種類型的錨碇系統配置方式，分析及果顯示在小風浪條件下，中繼浮球可有效降低纜繩張力與平台的擺動傾角，而增加纜繩長度則對結果影響不大；反之，當風浪提升致強風以上時，增加纜繩長度使得平台有更多的自由移動空間，可有效降低纜繩的最大張力，在極端條件下時降低幅度達 42%。
- (3) 鐵鍊在本次的分析中雖然對於模擬結果影響不大，然在工程實務上其扮演了一個抗磨擦的重要功能，由於受到波浪週期性的外力作用，底床上的纜繩會不斷往復滑動，使得與底床上的岩盤或沙質發生摩擦現象，在長時間的作用下，將導致纜繩表面磨損與直徑變小，而使得纜繩的抗拉強度減弱。鐵鍊相較於鋼索對於海底床有更佳的抗磨損性質，因此更取代鋼索用以銜接錨點，而在非接觸底床區域的繩索建議可使用鋼索以降低繩索重量對於平台的影響。
- (4) 平台佈放於海上時，在大風浪條件下，水位與平台之間的運動相位差與高程差可能會導致平台發生越波現象，和波浪拍擊平台與其上的太

陽能板的現象。越波現象將可會使海水溢流致平台表面，而波浪拍擊太陽能板產生的瞬間巨大衝擊力容易導致太陽能板與其固定架損壞，因此建議提高太陽能板的裝設位置，降低在大風浪條件下越波與拍擊現象直接作用在太陽能板上的發生頻率，以提升結構體的可靠度與使用壽命。

(5) 本年度已利用數值軟體完成平台運動與纜繩張力分析，並且得到初步成果與設計方向，後續則需從工程實務方面進行考量，尋找合適的錨碇材料如鋼索，鐵鍊、卸克與固定錨等材料，並於陸上進行平台與錨碇材料的假組裝測試作業；在平台下水之前，須擬定詳細的海上佈放與測試計畫書，並與配合的施工單位進行討論，確保在有限經費下所規劃的施工方案是具有可執行性的，以排除佈放過程中可能產生的風險，使海上測試作業可以順利執行。

(6) 由結構分析與最佳化結果可知，目前應力集中的部分主要都在導柱與太陽能板及平台的接合處，若此處接合的工法為焊接，則必須要確保焊接的品質。太陽能板通常均會搭配其支撐鋁框一同配置，鋁框及其支撐架的設計將會視後續重要的議題之一。

肆、參考文獻

1. 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.
2. 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.
3. Tsalhalis D. T. (1979), Theoretical and Experimental Study of Wind- and Wave-Induced Drift, *J. Phys. Oceanogr.*, 9, 1243–1257.
4. Jonkman, J. M. (2008), Influence of Control on the Pitch Damping of a Floating Wind Turbine, *ASME Wind Energy Symposium Reno, Nevada*.
5. 張明輝、洪瑋廷、蔡家揚、馬維揚、余基雄(2015) 「海表浮式太陽能板載台之穩定性模擬分析」，中央氣象局 104 年天氣分析與預報研討會。
6. 張明輝、洪瑋廷、蔡家揚、馬維揚、余基雄(2015) 「水上發電機組浮動平台與其錨泊系統之技術開發」，2015 海洋工程研討會。