

# 小型水面載具自主導航系統發展及複合動力推進效率之研究

林俊成\*<sup>1</sup> 張凱傑\*\* 黃星皓\*\*

\*國防大學理工學院 動力及系統工程學系

\*\*國防大學理工學院 造船及海洋工程研究所

關鍵詞：小型水面載具，導航系統，複合動力系統，雙體船，變異數分析，田口實驗設計法，智慧型參數設計

國科會計畫編號：MOST 111-2221-E-606-005

## 摘要

隨著科技日益發展，人工智慧及深度學習已普遍應用於無人載具，就無人水面載具(Unmanned Surface Vehicles, USV's)而言，其需求亦趨增加，且已廣泛應用於海洋資料蒐集、水文量測、偵巡、掃雷、佈雷、反潛等商業及軍用途；其優點包括節省人力、降低人員作業風險、降低建造成本、並具方便佈署及多功能任務彈性與效能等。因此，本研究將分別針對小型水面載具之導航系統及複合動力系統設計進行相關研究，其中小型水面載具採用雙體船，船長 1.3 公尺，船速 5 節以下，作為導航系統設計發展之載台，探討小型水面載具於水域中進行直線、方形及圓形路徑尋跡之導航系統性能測試，以因子 A(規劃路徑)及因子 B(航行距離)，在信心水準 95% 條件下，進行變異數分析，分別透過 F 檢定及 P 檢定，確認兩因子之主效果及交互作用效果之貢獻度，其中因子 A(規劃路徑)的貢獻約 68.16%，因子 B(航行距離)的貢獻度約 25.52%，顯示兩因子之主效果對品質特性(即航行時間短、精準通過循航點)具顯著影響。就複合動力系統設計，單獨以鋰電池在小型水面載具航行期間，其續航力為 3.55 min/Ah，而以複合動力系統(鋰電池搭配太陽能電池)航行測試，其續航力之每安培小時可提升 18.5% 到 41.7% 之航行時間，確實達到續航力顯著增加之成效。並進一步透過田口實驗設計法及智慧型參數設計等研究方法，探討太陽能板傾斜角度及船舶迴旋半徑對複合動力續航力是否影響，經研究結果顯示，船舶迴轉半徑貢獻度約 67.09 %、太陽能板傾斜角度貢獻度僅 3.96 %，殘差貢獻為 21.35%；因此，小型水面載具之續航力跟迴轉半徑有很大關聯性，本階段研究利用田口穩健設計分析，雖外在環境因素影響甚大，但經結果分析後，取得最佳參數配置，實施確認實驗，結果皆落於 95 % 信賴區間內，驗證本研究具有穩健性、再現性之成效。

## 1. 前言

由於台灣四面環海，海洋是台灣的天然屏障，因此，海洋工程也是我國重要之國防及經濟發展命脈；然而，台灣目前在國防及外交上仍面臨嚴峻困境，其中以中國大陸威脅甚鉅，除政治及外交持續打壓我國國際發展空間外，在國防上不斷以軍艦、軍機繞行台灣周邊海域及領空進行例行戰備訓練，嚴重威脅我國土安全、民生及經濟；此外，我國南海漁權爭議紛擾未曾間斷，我國政府甚至派遣軍艦執行護漁任務；釣魚台主權歸屬亦牽動中國大陸、日本及台灣的政治敏感神經；因此，隨著科技日益精進，水面載具的無人化自動導控技術亦日趨成熟，近年來，各國正迅速發展無人水面載具(Unmanned surface vehicles, USV's)，並期望能在海洋資料收集、石油與天然氣等天然資源探勘、海洋與河川水

文量測、海洋環境監測、海底地形地貌繪製、水路調查、海洋打撈等工作，大幅降低人力需求，降低研究團隊及船務公司營運成本之目標；然而，將無人載具應用於軍事用途亦可執行偵巡、掃雷、佈雷、靶船及反潛等任務；歸納其優點計有節省人力、降低人為操作風險、減少高昂的船舶建造費用及任務執行方面增加作業彈性與效能等。因此，本研究將延續前一個計畫研究成果，透過船體構型設計及推進動力研究成果，採用雙體船(Catamaran)增加酬載空間，可配置全球定位系統(Global Positioning System, GPS)、慣性模組單元(Inertial Modular Unit, IMU)等導引設備，並考量採用複合電力系統提升無人水面載具之續航力。

## 2. 文獻回顧

<sup>1</sup> 聯絡作者 林俊成 (lin112892@gmail.com)

Robert Sutton [1]以 Springer 的 USV，其主要尺寸:長×寬×排水量分別為  $4\text{m} \times 2.3\text{m} \times 0.6\text{ton}$  及最大速率  $1.5\text{ m/s}$ ，搭配之導航系統計有 TCM2、KVH C100 及 HMR 3000 等三種，並配備水下計程儀及深度感測器，應用於河流、水庫中進行污染物追蹤、內河航道及近岸淺水區域之海底環境及水文勘測等；A. Alvarez 等[2]以實驗方式將水下滑翔機與自主式水下載具結合，開發名為“Fo`laga”之自主式水下載具，其主要尺寸:長×直徑×重量為  $30\text{m} \times 0.14\text{m} \times 30\text{kg}$  及最大速率 2 節，下潛深度為 0m-50m，並探討導航和控制系統設計；S. D. Lee 等[3]採用基於全球定位系統(GPS)的小型水面載具實施航跡控制，其自動駕駛設計採用內模組控制 (Internal Module Control, IMC) 方法，並透過 PID 控制器，經由不同的預設路徑來執行循跡任務；Bingquan 等[4]使用 GPS/IMU 模組提供船隻位置和速度資訊，其使用了延伸型卡爾曼濾波器(Extended Kalman Filter, EKF)為 GPS 資訊進行濾波；Lamont 等[5]以一個 20 赫茲更新頻率的 GPS 提供船隻的位置資訊，而航向角(Course Angle)、橫搖(Rolling)、俯仰(Pitching)、艏搖(Yawing)則由磁羅盤提供，惟磁羅盤雖然可提供信賴的旋轉資訊，但只要磁羅盤在載具上的安裝位置更改，就需要重新校正整個系統。Kang 等[6]結合 GPS 和慣性測量系統來實現導航、定位、和控制，以 GPS 針對大範圍的方式來修正和實現定位。João Carvalho Vasconcelos 等[7]於研究中以兩艘較小的 ASV (雙體船和單體船)設計成能夠執行標準和常規的科學性質研究任務，且它們具有高度酬載能力和自主性操控能力，可提供海洋研究人員進行更全面之海洋工程研究；Anderson 等[8]使用 GPS 作為導航主要感測器提供船舶位置和旋轉資訊，並搭配一個 RGB 攝像頭，將影像與 GPS 位置匹配於坐標系統中，另使用 2 赫茲雷射波光學雷達，對載具周圍進行掃描會成 3D 點雲，用來偵測水面上的障礙物。Peter H. Heins 等[9]應用數值模擬方式，將單體船之無人水面載具”Halcyon” 其主要尺寸:長×寬×吃水分別為  $11.2\text{m} \times 3.2\text{m} \times 0.7\text{m}$  及最大速率 25 節，進行耐海性及操控性之驗證，模擬結果可以呈現初略的現象與真實海試結果相符。H. Mousazadeh 等[10]為繪製港口水文地圖而開發名為“Morvarid-1”的雙體船，其主要尺寸:長×寬×吃水分別為  $1.97\text{m} \times 0.99\text{m} \times 0.04\text{m}$  及最大輸出功率為 305W 之複合式電力系統(鋰鐵電池及太陽能板)，並開發自主導航控制系統，應用擴展式卡爾曼濾波器(Extended Kalman Filter, EKF)及複合式演算法(Navigation Guidance Control, NGC Algorithm)，藉由推導動力學模型參數對障礙物的大小和不同方位進行迴避演算，以提高船舶航行時的機動性及可靠度。H.C. Wang 等[11]以小鴨船為研究

案例，利用三艘小鴨船同時於水域進行自動化海上運動，分別執行自動循跡、自動追蹤及避碰等三項水上任務；S.H. Lee 等[12]以實驗及數值模擬進行小型雙體船阻力研究及構型開發，經研究結果指出，此雙體船殼以 FRP 積層成型，當船長為 12 公尺、排水量為 9.77 噸，搭載 280 HP 及泵噴推進器(water jet)，其最大船速可達 23 節較原設計 25 節略低，其主因是船體超重 20%。N. Khare 等[13]應用混合型動力系統於小型無人載具，其中分別以太陽能、波浪能、蓄電池、燃料電池及柴油發電機等作為動力來源，經研究顯示其動力貢獻度分別為柴油發電機 35.25%、蓄電池 35.22%、太陽能 19.6%、波浪能 5.52%及燃料電池 4.41%，可供無人載具執行任務達 336 小時。R. Reabroy 等[14]以船長 4 公尺、船寬 1.235 公尺、吃水 0.417 公尺的小艇，應用 4 顆 24VDC 的蓄電池作為小艇推進動力，經實驗結果確認，其最大速率達 5 節時，需時約 1 分鐘，可航行距離達 1 公里。S. I. Sohn 等[15]透過開發氫燃料電池以驅動小型雙體船型無人水面載具 (FCUSV)，並驗證燃料電池為水面船舶提供動力之可行性，並搭配全球定位和慣性導航系統，作為自動控制系統，執行航點循跡(way point)、離靠(departure)、保持定位(station keeping)及迴旋(turning circle)等操控性。A. Makhsoos 等[16]以無人水面載具，其主要尺寸:長×寬×高分別為  $3.8\text{m} \times 2.4\text{m} \times 1.5\text{m}$ 、重量 700 公斤、船速 5 節，採用混合動力系統以太陽能與鋰鐵電池作為動力，歷經一年的實驗發現，太陽能板的表面積為 8 平方公尺可於每日產生 5.8kWh 的電力最佳，並搭配鋰鐵電池能量為 8kWh。Bingxi Liu 等 [17]提出了一種雙模態無人航行器(Petrel-Dual)，具水面和水下導航能力，以水下滑翔運動可以透過海洋能量來獲得載具運動之能源。Hao Cao 等[18]提出一種基於壓電和電磁效應的雙磁體耦合機構的風能系統，以增強風速頻寬並提高輸出功率，實驗結果顯示，雙磁體耦合機構可在低風速區有效提升風能系統，並應用於小型水面載具(船長 105cm)之電力系統。T.L. Liu 等[19]應用田口實驗設計法及智慧型參數設計法進行 SWATH 雙體船阻力試驗，利用調整雙體船間距及商用軟體 Fluent 數值模擬進行阻力分析，其結果得知雙體船船體間距大小對阻力距有顯著影響。C.C. Lin 等(2020)[20]探討單體船與三體船之構型設計，結合環流水槽研究能量，採用船模實驗獲得實驗數據後，應用田口實驗設計法的動態分析，以標準直交表( $L_9$ )進行兩個控制因子三水準之實驗，並以變異數分析(ANOVA)在 95%的信心水準下，進行各控制因子主效果及交互作用效果之分析，並透過相關係數(R)及判定係數( $R^2$ )作為後續元模型之選用標準；此外，為尋求全域最佳因子水準組合，亦採用智慧型參數設計法，以類神經網路

訓練及基因演算法，獲得尋優之因子水準組合。S.J. Wu 等[21]探討水下載具上浮及下潛運動的操作靈敏性，利用數值模擬方法進行相對運動之三維流場解算，並結合田口法動、靜態分析及統計原理，以水下載具進行上浮、下潛運動時各控制翼對重心產生之縱搖力矩(pitch moment)值及總阻力值等多目標進行優化設計。

### 3. 研究方法

#### 2.1 多功能小型水面載具導航系統設計及驗證:

關於小型水面載具自主導航系統及複合動力之研究，將區分為兩階段進行分析，第一階段為多功能小型水面載具導航系統設計及驗證，進行相關實驗，策略架構與自動導航系統配置如圖 1-2：

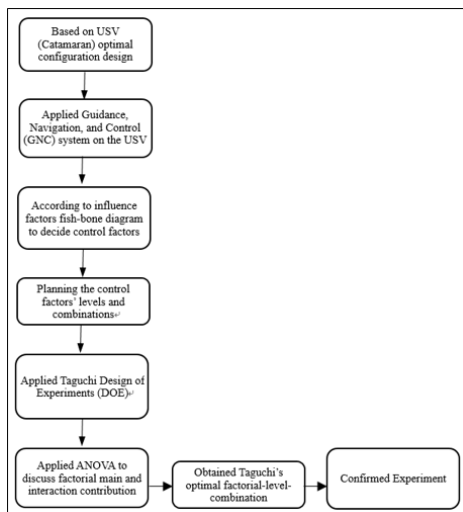


圖 1 多功能小型水面載具導航系統設計及驗證研究架構圖

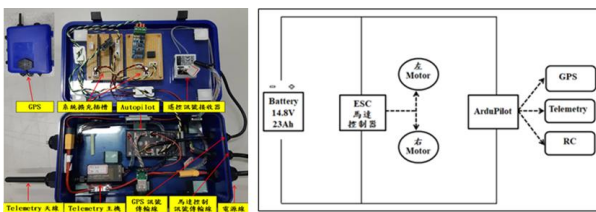


圖 2 自動導航系統配置規劃圖

#### 2.2 複合動力設計研究與效益評估設計:

本研究係採用技術成熟且價格相對燃料電池低廉之鋰鐵電池及太陽能電池做為複合動力研究發展，故本研究實船之主要電力將以此系統規劃，其研究步驟(如圖 3)；尋訪商用符合本研究電力規劃之鋰鐵電池規格(如表 1)，雙體船配置及主要尺寸諸元，如圖 4、表 2:

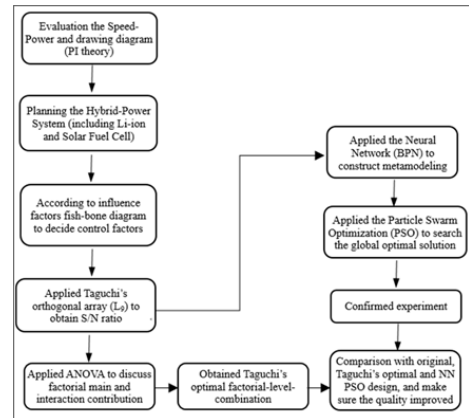


圖 3 小型水面艇複合動力系統設計研究架構圖

表 1 燃料電池與鋰電池規格對照表

	小型質子膜燃料電池	鋰離子聚合物電池
規格	200W-26Cells_15V-14.8A	340W/h -4Cells_14.8V- 23Ah
重量	37.35 公斤	1.1 公斤
尺寸	長×寬×高 0.85×0.9×0.3 公尺	長×寬×高 0.17×0.05×0.05 公尺
價格	NT 254,000 元	NT 13,000 元



圖 4 雙體船之船體製及酬載配置規劃圖

表 2 雙體船模諸元表

雙體船模諸元表	
船長	1.29 公尺
船寬	0.61 公尺
船高	0.21 公尺
吃水	0.08 公尺
重量	16.2 公斤
推進器	T200 Thruster 2 部
速率	2m/s(4 Knot)
導航系統	ArduPilot
動力來源	LiFePO4(12.8 V, 15 Ah) 100W 柔性太陽能板

本研究之實驗設計規劃係根據田口實驗設計法 [22]，定義品質特性為複合動力系統之最大續航力，以品質特性望大，透過訊噪比(Signal to Noise ratio, S/N)，S/N 值越大則代表該產品品質具有越大的穩健性，S/N 定義可表示為(式 1-3)：

$$\frac{S}{N} = 10 \times \log_{10} \left( \frac{\text{訊號強度}}{\text{雜訊強度}} \right) \quad (1)$$

$$\frac{S}{N} = 10 \times \log_{10}(MSD) \quad (2)$$

MSD(mean squared deviation)為偏離誤差值均方差。

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (3)$$

其中  $n$  為觀測值個數， $y_i$  為觀測值。

藉由文獻蒐整中，尋找出所有影響複合動力系統功率之參數，包含水域環境、電力系統、導航系統、控制模式及船體構型等，繪製影響因子魚骨圖，如圖 5:

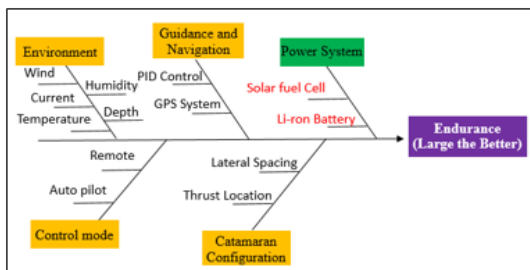


圖 5 影響複合動力系統功率之魚骨圖

## 4. 結果與討論

### 4.1 小型水面載具自動導航動態測試

本研究規劃複合電力系統以鋰電池(LiFePO4)作為主要動力，太陽能電池作為備用電力，於測試規劃分別以本院戶外水槽及桃園市龍潭區三坑自然生態公園湖泊進行測試，測試結果說明如後:

#### 4.1.1 動態測試(本院戶外水槽)

本研究團隊於戶外水槽以小型水面載具酬載複合動力系統及遙控方式進行直線、迴旋等路徑測試，以船速 5 節(含以下)、直線距離為 10-25 公尺、迴旋以半徑 1-2 公尺範圍進行測試，確認載具之航行運動姿態、操控性及耐海性等性能表現，確認載具是否上浪泛水、穩度不足等均可行無虞後，可做為下一階段開放式水域之動態測試依據，相關測試如圖 6:



圖 6 小型水面載具於水槽中高速(速率約 5 節)前進測試

#### 4.1.2 動態測試(桃園龍潭區三坑自然生態公園湖泊)

本研究團隊完成小型水面載具構型及複合電力系統配置，經第一階段戶外水槽動態測試確認小型水面載具性能無虞後，研究團隊前往桃園市龍潭區三坑自然生態公園湖泊進行第二階段開放式水域之動態測試，研究前置各項安全準備及相關導航測試規劃如圖 7:



圖 7 開放式水域之動態測試

#### 4.1.3 路徑設定:直線航行

本研究首先進行直線路徑航行動態測試，設定直線距離分別為 5m、10m、15m，三個水準進行實驗，並於控制電腦設定 6 個巡航點，小型水面載具會先以手動遙控模式到起點後，改以自動導航模式進行航點的自動循跡，依設定巡航點進行直線前進(如圖 8)，每次實驗依三個水準進行 10 次實驗，並量測完成時間進行後續分析，從實驗量測結果可知，每次實驗組合在不同日期進行，受到環境因素之風力、水流流速、流向影響甚為顯著，故將實驗數據採 5 次平均方式獲得，各組均有 2 個實驗平均數據，相關數據記錄如表 3:

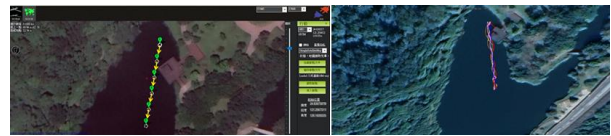


圖 8 設定直線航行巡航點示意及航行動態測試軌跡圖

表 3 進行 10 次直線航行動態測試紀錄表

次數	距離	5 m	平均	10 m	平均	15 m	平均
1		25.43		40.43		67.59	
2		20.85		50.78		66.78	
3		28	26.65 (s)	54.09	47.59 (s)	69.72	66.18 (s)
4		23.32		46.44		66.94	
5		35.65		46.22		59.86	
6		21.4		47.84		63.12	
7		18.55		41.22		69.75	
8		22.96	24.11 (s)	33.55	40.17 (s)	63.4	63.70 (s)
9		34.12		36.75		56.24	
10		23.5		41.5		65.99	

#### 4.1.4 路徑設定: 方形航行

本研究第二個進行方形路徑航行動態測試，設定方形邊長距離分別為 5m、10m、15m，三個水準進行實驗，並於控制電腦設定 9 個巡航點，小型水面載具會先以手動遙控模式到起點後，改以自動導航模式進行航點的自動循跡，依設定巡航點進行方形路徑測試(如圖 9)，每次實驗依三個水準進行 10 次實



驗，並量測完成時間進行後續分析，從實驗量測結果可知，每次實驗組合在不同日期進行，受到環境因素之風力、水流流速、流向影響甚為顯著，故將實驗數據採 5 次平均方式獲得，各組均有 2 個實驗平均數據，相關數據記錄如表 4:



圖 9 設定方形航行巡航點示意及航行動態測試軌跡圖

表 4 進行 10 次方形航行動態測試紀錄表

次數	距離	5 m	平均	10 m	平均	15 m	平均
1		73.55		81.09		126.46	
2		70.49		90.17		122.42	
3		81.18	72.29 (s)	86.1	87.52 (s)	108.62	118.41 (s)
4		73.28		92.3		115.95	
5		62.93		87.95		118.59	
6		57.13		82.64		115.03	
7		75.49		82		111.53	
8		79.17	67.78 (s)	92.55	84.73 (s)	111.26	114.74 (s)
9		67.79		85.33		117.11	
10		59.33		81.14		118.76	

#### 4.1.5 路徑設定: 圓形航行

本研究第三個進行圓形路徑航行動態測試，設定圓形半徑距離分別為 5m、10m、15m，三個水準進行實驗，並於控制電腦設定 17 個巡航點，小型水面載具會先以手動遙控模式到起點後，改以自動導航模式進行航點的自動循跡，依設定巡航點進行圓形路徑測試(如圖 10)，每次實驗依三個水準進行 10 次實驗，並量測完成時間進行後續分析，從實驗量測結果可知，每次實驗組合在不同日期進行，受到環境因素之風力、水流流速、流向影響甚為顯著，故將實驗數據採 5 次平均方式獲得，各組均有 2 個實驗平均數據，相關數據記錄如表 5:

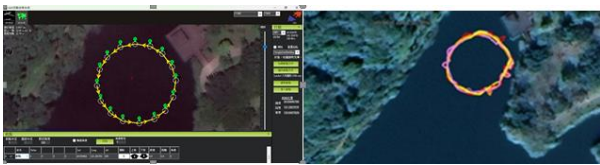


圖 10 設定圓形航行巡航點示意及航行動態測試軌跡圖

表 5 進行 10 次圓形航行動態測試紀錄表

次數	距離	5 m	平均	10 m	平均	15 m	平均
1		79.86		101.03		146.42	
2		97.84		114.11		117.2	
3		103.7	82.65 (s)	101.96	110.11 (s)	137.28	140.38 (s)
4		70.8		114.4		152.07	
5		61.05		119.03		148.92	
6		91.2		116.51		125.36	
7		96.94		97.89		87.61	
8		99.55	91.73 (s)	156.48	124.16 (s)	140.97	109.71 (s)
9		95.09		102.11		99.81	
10		75.87		147.8		94.78	

#### 4.1.6 導航測試分析

本研究依實驗設計法完成兩因子三水準之實驗設計規劃並記錄相關實驗數據(如表 6)，俾利後續進行變異數分析，探討兩因子間的主效果及交互作用效果是否顯著，相關分析及討論如後:

表 6 兩因子三水準之動態測試實驗數據表

		因子 B (距離) 單位:公尺					
		1 (5m)		2 (10m)		3 (15m)	
因子 A (路徑規劃)	1 (直線)	26.65(s)	24.11(s)	47.59(s)	40.17(s)	66.18(s)	63.70(s)
	2 (方形)	72.29(s)	67.78(s)	87.52(s)	84.73(s)	118.41(s)	114.74(s)
	3 (圓形)	82.65(s)	91.73(s)	110.11(s)	124.16(s)	140.38(s)	109.71(s)

經過實驗數據量測記錄後，本研究再以變異數分析，在信心水準 95%條件下，進行 F 檢定及 P 檢定，確認兩因子之主效果及交互作用效果之貢獻度(如表 7)，經分析結果得知，因子 A(規劃路徑)的貢獻約 68.16%，因子 B(航行距離)的貢獻度約 25.52%，顯示兩因子之主效果貢獻顯著(如圖 37)，但因子 A 與因子 B 無顯著交互作用(如圖 38)，且本研究條件下之殘差貢獻度僅約 6.32%。

表 7 自動導航之變異數分析

Factor	SS	DF	MS	F	F <sub>0.05</sub>	P-value	SS'	Contribution
A	13442.4	2	6721.2	90.98	4.26	0.0000	13294.6	68.16%
B	5124.5	2	2562.3	34.68	4.26	0.0001	4976.8	25.52%
AxB	272.2	4	68.1	0.92	3.63	0.4925	-	-
Error	664.9	9	73.9	S = 8.59505			1232.6	6.32%
Total	19504.0	17					19504.0	100.00%

#### 4.2 小型水面載具複合電力研究及測試

##### 4.2.1 太陽能板靜態測試

本研究將先行確認太陽能板之充放電能力，規劃將於本院軒轅館旁停車場進行日照充電及強力電風扇啟動後之放電測試，模擬小型水面載具於水面上已推進器耗電之效果，本研究已參考沈仲晃[23]，確認太陽能板傾斜角度與電能輸出之性能具有關聯性，文獻中以一整年的長期觀察太陽能進行日照充電，說明在台灣地區的太陽能板建議以傾斜角度約 22 至 25 度具有較佳能量吸收表現。由於太陽能板受太陽輻射影響，此實驗前將參考中央氣象局前一日預測桃園地區指外線強度，避免實驗誤差過大。首先，於地面進行太陽能板角度分析，鋰鐵電池 (12.8 V, 15 Ah) 並聯 100 W 太陽能板及 1500 W 直流轉交流逆變器，負載使用家用電風扇 (額定功率 70 W)，未經太陽能充電時，耗盡時間 2 小時 13 分 23 秒，本研究採傾斜角度 0、15、30、45 度，每 15 度為一間隔，得傾斜角於 45 度時具有最

佳表現（如表 8），其次為 30 度，此探討太陽能板傾斜角度對於電能輸出具有影響力。

表 8 太陽能板靜態測試表

日期	耗盡時間 (時'分'秒)	太陽能板傾 斜角度	時間增加 率(%)	氣溫	紫外線 強度	備註
2022/12/15	2'13'23					原型
2022/12/19	3'23'31	0°	52.6%	15-17 °C	4-5	
2022/12/20	3'32'47	15°	59.5%	18-21 °C	4-5	
2022/12/23	3'58'21	30°	78.7%	13-14 °C	4-5	
2022/12/27	4'20'12	45°	95.1%	16-17 °C	4-5	最佳

#### 4.2.2 複合電力系統動態測試

考量實驗階段必須為白天上午及中午時段日照相對強烈，且實驗期間必須考量船舶之操控性，可任意調整方向；故本研究所設計之控制因子 A 定義為太陽能板傾斜角度，以 15 度、30 度、45 度等三個水準；控制因子 B 定義為圓形環繞路徑之半徑，如此才不會因為太陽位置改變，造成太陽能板因日照位置不同吸收能量差異，故以迴旋半徑 10 公尺、20 公尺及 30 公尺作為三個水準，因子水準如表 9:

表 9 小型水面載具複合電力系統因子水準表

Code	Factor	Unit	Level 1	Level 2	Level 3
A	太陽能板 傾斜角度	度(°)	15	30	45
B	船舶迴轉半徑	公尺(m)	10	20	30

本研究為探討複合動力系統是否可有效提升小型水面載具之續航力，故以單一電力系統(鋰電池)電池規格 15Ah，航行 50 分鐘，利用霍爾線圈檢視電池剩餘電量為 0.9Ah，換言之，電池在小型水面載具航行期間共消耗 14.1Ah 之電量，代表每一安培小時可航行 3.55 分鐘(3.55 min/Ah)，進而依據田口直交表之(L<sub>9</sub>)之實驗規劃進行複合動力系統(鋰電池搭配太陽能電池)航行測試，經實驗結果得知，複合動力系統續航力之每安培小時可提升 18.5%-41.7%之航行時間(如表 10)，確實達到續航力增加之成效。

表 10 單一電力系統與複合動力系統續航力比較表

單一電力系統(鋰電池) 電池規格 15Ah，航行 50 分鐘；剩餘電量 0.9Ah					
續航力 (min/Ah)					
3.55					
複合動力系統: 鋰電池(15Ah)+太陽能電池(100W)					
No.	A	B	航行 50 分鐘後剩餘電量(Ah)	續航力 (min/Ah)	相較單一電池(鋰電池) 每 Ah 可增加續航時間(%)
1	1	1	4.60	4.81	35.6%
2	1	2	4.05	4.57	28.8%
3	1	3	3.10	4.20	18.5%
4	2	1	5.05	5.03	41.7%
5	2	2	3.20	4.24	19.5%
6	2	3	3.50	4.35	22.6%
7	3	1	4.20	4.63	30.6%
8	3	2	3.50	4.35	22.6%
9	3	3	3.20	4.24	19.5%
10	1	1	4.30	4.67	31.8%
11	1	2	3.80	4.46	25.9%
12	1	3	3.25	4.26	20.0%
13	2	1	4.55	4.78	34.9%
14	2	2	3.90	4.50	27.0%
15	2	3	3.60	4.39	23.7%
16	3	1	3.95	4.52	27.6%
17	3	2	3.15	4.22	19.0%
18	3	3	3.60	4.39	23.7%

#### 4.2.3 變異數分析

將實驗數據進行變異數分析(ANOVA) (如表 18)，在信心水準 85 % 條件下，進行 F 檢定及 P 檢定，從分析結果可發現船舶迴轉半徑(因子 B)之主效果貢獻度達 67.09 %，太陽能板傾斜角度(因子 A)之主效果貢獻度約僅 3.96 %，但因子 A 與因子 B 之交互作用效果貢獻度達 7.59 %，顯示本研究選定之控制因子(A 與 B)均有顯著影響；然而，本階段研究之殘差貢獻為 21.35%，代表天候環境及日照紫外線強度均對研究結果有一定程度影響；觀察各因子反應表(如表 11)及主效果圖(如圖 11)，可得知 A<sub>2</sub>(太陽能板傾斜角度 30°)及 B<sub>1</sub>(船舶迴轉半徑 10 m)為顯著因子，田口實驗設計法所建議之最佳 S/N 組合為 A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>。

表 11 田口直交表(L<sub>9</sub>表)S/N 之 ANOVA 分析表

Source	SS	DF	MS	F <sub>0</sub>	F <sub>0.15</sub>	P-value	SS'	Contribution
A	1.78	2	0.89	2.58	2.36	0.13	1.09	3.96%
B	19.13	2	9.57	27.72	2.36	0.00	18.44	67.09%
AxB	3.47	4	0.87	2.51	2.20	0.12	2.09	7.59%
Error	3.11	9	0.35				5.87	21.35%
Total	27.49	17					27.49	100.00%

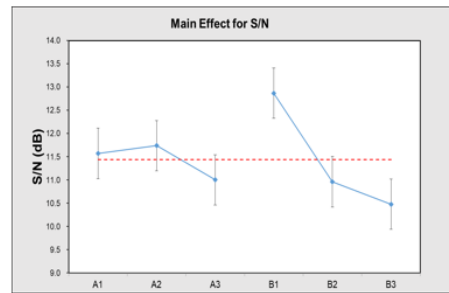


圖 11 田口直交表(L<sub>9</sub>表)主因子效果反應圖

#### 4.2.4 智慧型參數設計

本階段研究進行重複兩次實驗後，從所得樣本數據差異結果，透過 Matlab 程式語言撰寫程式，進行人工智慧(Artificial Intelligence, AI)之倒傳遞網路(Back-Progression Network, BPN)進行非線性反應曲面建模，其中本研究之訓練函數採用 trainbr，輸入參數為兩個控制因子:太陽能板傾斜角度(因子 A)與船舶迴轉半徑(因子 B)，輸出目標值為 S/N，本階段為輸入層 2 個、1 個隱藏層(驗證組 9 組、訓練組 27 組)、輸出層 1 個，其中隱藏層內神經元個數選擇，將參考 Yang 等[24]提出的方程式，得知神經元約需 7 個，透過試驗逐步增減 5~9 個神經元，記錄模型相關係數(R)、判定係數(R<sup>2</sup>)及均方根誤差(Root Mean Square Error, RMSE)，檢視網路其預測性能，如表 12 及圖 12:

表 12 小型水面載具複合電力系統 BPN 建模數據比較表

Network_BPN	R	R <sup>2</sup>	RMSE
2-5-1	0.95858	0.91876	0.34553
2-6-1	0.95973	0.92054	0.34172
2-7-1	0.96003	0.92166	0.33931
2-8-1 <sup>a</sup>	0.96004 <sup>a</sup>	0.92166 <sup>a</sup>	0.33931
2-9-1	0.96003	0.92164	0.33935

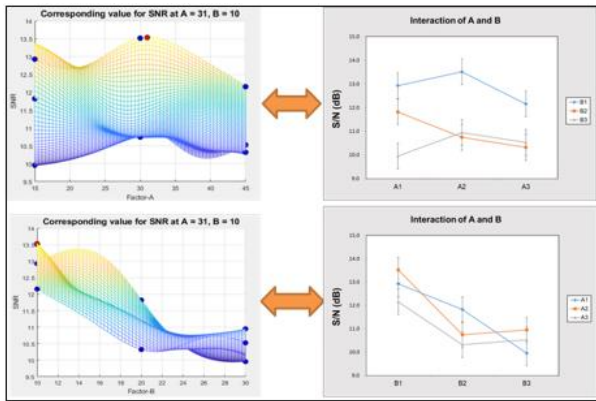


圖 12 S/N 反應曲面剖面圖對照 AxB 交互作用圖

應用粒子群演算法尋找模型中最佳參數組合，適應函數則選擇多目標函數，因本階段使用靜態分析，僅為單一目標，K1=1(Importance Weight)方式尋找剩餘電量(S/N)最大目標，經粒子群演算法尋優後，類神經網路最佳參數位置分別為太陽能板傾斜角度  $A = 31^\circ$ 、船舶迴轉半徑  $B = 10\text{ m}$ 。

## 5. 結果與建議

經完成本研究兩階段之實驗及分析，將分別針對小型水面載具之導航循跡及複合動力系統進行以下結論與建議：

### 5.1 小型水面載具之導航循跡

- (1) 本研究以因子 A(規劃路徑)及因子 B(航行距離)，在信心水準 95%條件下，進行變異數分析，分別透過 F 檢定及 P 檢定，確認兩因子主效果及交互作用效果之貢獻度，其中因子 A(規劃路徑)貢獻約 68.16%，因子 B(航行距離)貢獻度約 25.52%，顯示兩因子之主效果對品質特性(即航行時間短、精準通過循航點)具顯著影響。
- (2) 小型水面載具之自動導航控制與航行路徑規劃(因子 A)及航行距離(因子 B)具有顯著關聯性，本研究所採用之導航控制系統已於龍潭三坑自然生態公園湖泊、竹圍漁港及烏石港等水域完成精確度測試，經過每一個巡航點之誤差均可控制在一個船體寬度(約 0.8m)內。
- (3) 本研究採用之雙體船模尺寸較小(船長僅 1.3m)，酬載重量約 15 公斤，未來於研究應用須搭載無

線通訊系統、聲納設備、無人機起落降等，船舶穩度及耐海性將嚴重不足，無法有效執行相關研究測試，建議可將本研究之導航及推進系統搭載於較大型之無人載具(船長約 5-7m)，相信可有效執行更多應用研究及推廣任務遂行。

### 5.2 小型水面載具之複合電力系統

第二階段以小型水面載具複合電力系統作為研究對象，在完全自動導航情形下，以尋求最佳續航力，並了解各參數對續航力的影響，做為提升多功能小型水面載具續航力的參考，歸納結果：

- (1) 太陽能板傾斜角度與船舶迴轉半徑比較，太陽能板傾斜角度主效果貢獻度僅 3.96%，但具有交互作用關係，另文獻中場景為固定式太陽能板，本研究為安裝於船舶進行動態航行測試，與文獻顯示之太陽能板最佳傾斜角度略有差異。
- (2) 剩餘電量受船舶迴轉半徑影響甚大(貢獻度 67.09%)，研判在較小的船舶迴轉半徑(10m)中，因船舶須隨時改變航向前往設定點，且本小型載具以雙俾馬達不同轉速作為航向改變的動力，故在固定實驗時間中，多半未使用雙俾全馬力前進，進而造成剩餘電量較大之結果。
- (3) 本階段研究殘差(error)達 21.35%，因環境因素為不可控制之影響因子，實驗過程中，隨時可能因雲層飄動而遮蓋太陽，導致太陽能板無法有效產電，造成續航力下降。
- (4) 單獨以鋰電池在小型水面載具航行期間，其續航力為 3.55 min/Ah，而以複合動力系統(鋰電池搭配太陽能電池)航行測試，其續航力之每安培小時可提升 18.5%到 41.7%之航行時間，確實達到續航力顯著增加之成效。
- (5) 本階段研究利用田口穩健設計分析，雖外在環境因素影響甚大，但經結果分析後，取得最佳參數配置，實施確認實驗，結果皆落於 95%信賴區間內，得本實驗具有穩健性、再現性之表現。

## 參考文獻

1. Robert Sutton, "Design of the Multi-Role Springer Unmanned Surface Vehicle", School of Engineering, The University of Plymouth, Drake Circus, Plymouth PL4 8AA, UK. (2007)
2. A. Alvarez, A. Caffaz, A. Caiti\*, G. Casalino, L. Gualdesi, A. Turetta, R. Viviani), "Fo`laga: A low-cost autonomous underwater vehicle combining glider and AUV capabilities", Ocean Engineering, Vol. 36, pp. 24-38. (2009)
3. S.D. Lee, C.H. Yu, K.Y. Hsiu, Y.F. Hsieh, C.Y. Tzeng, Y.Z. Kehr, "Design and experiment of a small boat track-keeping autopilot", Ocean Engineering, Vol. 37, pp. 208-217. (2009)
4. S. Bingquan, T. S. Mei, T. Y. Heng, T. Teyagarajan, W. Yue, C. K. Lin, A. Theseira, D. Nguyen, M. W. Y. Ru, T.

- Xiao et al., "Nus unmanned surface vehicle: Sharky 2014."
5. R. Lamont, Z. R. Scott Nicholson, C. Dirkis, P. Smith, D. Jakes, J. Vanmali, S. Veitch, M. Dunbabin, "The endeavour asv: Hardware, sensor & software overview," (2014)
  6. M. Kang, S. Kwon, S. Yoon, S. Hong, J. Wang, J. Han, B. Yoo, T. Kim, J. Park, and J. Kim, "Development of kaist grey-duck usv for 2014 maritime robotx challenge". (2014)
  7. João Carvalho Vasconcelos), "Design of Autonomous Surface Vessels", Centre for Marine Technology and Engineering (CENTEC) – University of Lisbon - Instituto Superior Técnico - Av. Rovisco Pais 1049-001, Lisboa, Portugal. (2015)
  8. A. Anderson, E. Fischell, T. Howe, T. Miller, A. Parrales-Salinas, N. Rypkema, D. Barrett, M. Benjamin, A. Brennen, M. DeFillipo et al., "An overview of mitolin's approach in the auvsi robotx competition," in *Field and Service Robotics*. Springer, pp. 61–80. (2016)
  9. Peter H. Heins, Bryn Ll. Jones, Dominic J. Taunton, "Design and validation of an unmanned surface vehicle simulation model", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 48, pp. 749-774. (2017)
  10. Hossein Mousazadeh, Hamid Jafarbiglu, Hamid Abdolmaleki, Elham Omrani, Farshid Monhaseri, Mohammad-reza Abdollahzadeh, Aref Mohammadi-Aghdam, Ali Kiapei, Yousef Salmani-Zakaria, Ashkan Makhsoos, "Developing a navigation, guidance and obstacle avoidance algorithm for an Unmanned Surface Vehicle (USV) by algorithms fusion", *Ocean Engineering*, Vol. 159, pp. 56–65. (2018)
  11. Hsueh-Cheng Wang, Ni-Ching Lin, Yu-Chieh Hsiao, Yi-Wei Huang, Ching-Tung Hung, Tzu-Kuan Chuang, Pin-Wei Chen, Jui-Te Huang, Chao-Chun Hsu, Andrea Censi, Michael Benjamin, and Chi-Fang Chen, "Duckiepond: An Open Education and Research Environment for a Fleet of Autonomous Maritime Vehicles", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* Macau, China, November 4-8. (2019)
  12. Lee, SH, Lee, YG and Kim, SH, "On the development of a small catamaran boat", *Ocean Engineering*, Vol. 34, pp. 2061-2073. (2007)
  13. Neeta Khare and Pritpal Singh, "Modeling and optimization of a hybrid power system for an unmanned surface vehicle", *Journal of Power Sources*, Vol. 198, pp. 368-377. (2012)
  14. Rattakrit R, Yodchai T, Sathit P, Tewarat N and Phansak I, "The Possibility of using Electrical Motor for Boat Propulsion System", *Energy Procedia*, Vol. 79, pp. 1008-1014. (2015)
  15. Seok-In Sohn, Jung-Hwan Oh, Yeon-Seung Lee, Dae-Hwan Park, and Il-Kwon Oh, "Design of a Fuel-Cell-Powered Catamaran-Type Unmanned Surface Vehicle", *IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING*, Vol. 40, No. 2, pp. 388-396. (2015)
  16. Ashkan Makhsoos, Hossein Mousazadeh, Seyed Saeid Mohtasebi, Mohammadreza Abdollahzadeh, Hamid Jafarbiglu, Elham Omrani, Yousef Salmani, Ali Kiapey, "Design, simulation and experimental evaluation of energy system for an unmanned surface vehicle", *Energy*, Vol. 148, pp. 362-372. (2018)
  17. Bingxi Liu, Yanan Yang, Shuxin Wang, Yuhong Liu, "A dual-modal unmanned vehicle propelled by marine energy: Design, stability analysis and sea trial", *Ocean Engineering*, Vol. 247, 110702, (2022)
  18. Hao Cao, Minfeng Tang, Zutao Zhang, Alaeldin M. Tairab, Hidemi Mutsuda, Xiaoping Wu, "A magnetic coupling wind energy harvester for unmanned surface vehicles", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 257, 108543, (2023)
  19. Liu, TL, Wu, SJ, Yang, CM, and Lin, CC, "Parameter Optimization On Experiment And Numerical Simulation of a SWATH", *21st (2011) Int Offshore and Polar Eng Conf, Maui, U.S.A., ISOPE*, Vol. 3, pp. 680-686. (2011)
  20. Lin, Chun-Cheng and Hsiao, Yu-Chi, "Application of Experimental Design on Small Surface Boat for Resistance and Payload Study", *Proceedings of the ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, August 3-7, (2020)
  21. Sheng-Ju Wu, Chun-Cheng Lin, Tsung-Lung Liu, and I-Hsuan Su, "Robust design on the arrangement of a sail and control planes for improvement of underwater Vehicle's maneuverability", *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 12, pp. 617-635. (2020)
  22. Taguchi, G., S. Chowdhury, and Y. Wu. *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc. (2005)
  23. 沈仲晃, "太陽能電池安裝角度與電能輸出之研究", *技術學刊*, vol. 20, no. 1, pp. 15-20, (2005)
  24. T. Yang, H.-C. Lin, and M.-L. Chen, "Metamodeling approach in solving the machine parameters optimization problem using neural network and genetic algorithms: A case study," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 22, no. 4, pp. 322-331, (2006)



## **Study on Multi-functional Small Surface Vehicle Autonomous Navigation and Hybrid Power Propulsion Design**

*C. C. Lin\* K. C. Chang \*\* S. H. Huang \*\**

\* Department of Power Vehicle and Systems Engineering, CCIT, National Defense University

\*\* Master Program of Naval Architecture and Ocean Engineering, CCIT, National Defense University

*Keywords: Artificial Intelligence, Unmanned Surface Vehicle, Small Surface Vehicle, Navigation System, Hybrid-power Systems, Catamaran, Taguchi DOE, Intelligent Parameter Design*

### **ABSTRACT**

With the increasing development of technology, Artificial Intelligence (AI) and Deep-Learning have been widely used in unmanned vehicles. For Unmanned Surface Vehicles (USV's), their demand is also increasing, and they have been widely used in commercial and military purposes, such as marine data collection, hydrographic survey, reconnaissance, patrol, minesweeping, minelaying and anti-submarine, etc. Hence, its advantages include saving manpower, reducing personnel operation risks, reducing construction costs, and having convenient deployment and multi-functional mission more flexible. Therefore, this study will conduct relevant research on the navigation system and hybrid-power systems design of small surface vehicle. The small surface vehicle applied a catamaran with a length of 1.3 meter and speed less than 5 knots. The platform is used to explore the performance test of the navigation system of small surface vehicle for tracking straight, square and circular paths in the open water, using factor-A (planned path) and factor-B (navigation distance), under the confidence level of 95%. Carry out analysis of variation (ANOVA) and confirmed the contribution of the main effect and interaction effect of these two factors through F-value test and P-value test, respectively. Among them, the contribution of factor-A (planned path) is about 68.16%, and the contribution of factor-B (voyage distance) is about 25.52%, showing that the main effect of these two factors have a significant influent on quality characteristics (i.e. short sailing time, accurate passage of waypoints). In addition, the hybrid-power systems design, the endurance of a small surface vehicle only applied the lithium battery is 3.55 min/Ah. In the navigation test of the hybrid-power systems (lithium battery with solar cell), the endurance of per-amp-hour can be increased by 18.5% to 41.7%, indeed achieving a significant increase in endurance. Furthermore, through research methods such as Taguchi design of experimental (DOE) method and intelligent parameter design, we found that the incline-angle of the solar panel and the radius of gyration of the ship have an impact on the hybrid-power endurance. The study results shown that the contribution of the radius of gyration of the ship is about 67.09%, and the incline-angle of the solar panel contribution is only 3.96%, and the error contribution is 21.35%; therefore, the endurance is closely related to the radius of gyration, and also influenced by external environmental factors. However, in this study the optimal configuration design was obtained and confirmed experiment were performed the results all fell within the 95% confidence interval, verifying the robustness and reproducibility.