

自主小型水面載具複合電力系統之穩健設計研究

林俊成*¹ 張凱傑** 蘇晉承** 施武樵*** 盧建仲****

*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

***國防部海軍司令部後勤處

****海軍造船發展中心

關鍵詞：自主小型水面載具、複合電力系統、太陽能、充氣式橡皮艇、田口直交表、穩健設計

摘要

因應全球對自主小型水面載具的需求不斷增加，這些載具在現代海事、商業和軍事應用中扮演著關鍵的角色。相較於中、大型水面載具，小型水面載具擁有更輕巧的體積和更高的機動性，因此，廣泛應用於商業、海事、人道救援、水文研究和軍事等領域。此外，在船舶領域中，複合電力系統的發展日益受到關注，複合電力系統結合多種能源形式，包括風能、電池和太陽能等，使載具能夠在不同操作模式下靈活切換電力來源，而電池能源在複合電力系統中的應用更是未來船舶發展的重點，不僅可以降低溫室氣體排放，也能推動綠色船舶發展。本研究的主要目標是深入研究並優化自主小型水面載具的電力系統，特別關注於提高其續航力。研究的具體目標包括優化複合電力系統的設計、提高電力利用效率及推動綠色船舶的發展。本研究選擇以 340W 太陽能板和 12VDC 15Ah 鋰鐵電池來構建 12VDC 電源系統，同時配備自主導航系統，並將系統安裝在充氣式橡皮艇進行測試，透過田口實驗設計法探討太陽能板角度、方形環繞巡航路徑及續航時間等三項控制因子對於小型水面載具續航力是否具有影響性，並透過田口直交表、變異數分析等研究方法，找出提升電池利用效率的最佳參數設定。最終，透過卻確實驗驗證其性能改善及提升成效，達到穩健設計成效，期望為自主小型水面載具的複合電力技術提升和相關領域發展做出實質貢獻，促進更多複合電力系統在船舶領域更為先進、環保及創新研究目標。

1. 前言

在當今社會，小型自主水面載具因其體積輕巧和高度機動性，已成為海事 [1]、商業[2]、軍事 [3] 和科學研究 [4]等多個領域的重要工具。這些載具能夠在不同的水域環境中靈活操作，無需人員直接參與即可完成諸如巡邏、搜索、監視和戰術任務，從而降低人力成本和操作風險，提升任務效率。尤其在災難救援中，它們能迅速進入災區進行搜救和物資運輸，極大地提高了救援效率。此外，這些載具裝載的科學儀器可以長時間觀測海洋環境，為研究人員提供珍貴的數據資源。台灣等地區的發展策略指出 [5]，從投入小型、功能較為單一的載具開始，可逐步提升技術，滿足國家的具體需求，並以此發展成為不對稱作戰的重要工具 [6]，以最小的成本換取最大的效益。

另一方面，隨著全球對於節能減排的重視 [7]，複合電力系統在船舶領域的應用成為一個顯著的發展趨勢。這種系統結合了風能、太陽能和電池等多種能源，可根據船舶運行的不同模式靈活切換，以實現能源的最優化利用。特別是電池技術的應用，不僅能有效減少溫室氣體排放，提升船舶的環保性能，還推動了船舶行業向更環保、可持續的方向發展。各國正積極開發綠能自主船舶，旨在達到 2050 年的淨零排放目標。對於小型自主水面載具來說，電力系統的續航能力直接影響其在長期任務和遠程航行中的應用潛力。因此，通過複合電力系統改善續航里程，不僅能擴大其在軍事、商業、救援和科研領域的應用範圍，還能減少充電次數，提高能源效率，降低對環境的影響。總體來說，小型自主水面載具及其複合電力系統的發展，代表了向著更高效、更靈活、更環保的未來邁進的關鍵一步。

¹ 聯絡作者 林俊成 (lin112892@gmail.com)

2. 研究動機與目的

本研究目的在深入探討和改進小型自主水面載具的電力系統，尤其聚焦於提升其續航力。隨著技術進步和對長時段、遠程操作的需求增加，強化載具的續航力成為提升其實用性和應用範圍的關鍵。透過優化複合電力系統的設計，本研究致力於探索不同能源形式，如電池和太陽能的整合方式，以達到在各種應用場景下電力系統的最優效能。此外，研究將探討如何通過最佳路徑規劃來提高電力利用效率，確保電力系統在執行各種任務時的長時穩定運行。本項研究不僅關注於技術層面的提升，也致力於推動綠色船舶的發展，減少運輸過程中的碳排放，響應全球對綠色交通運輸的需求。達成這些目標，將對小型水面載具的電動化技術提升及相關領域的發展做出重要貢獻，並期待這些成果能激勵更多關於複合電力系統在船舶領域的創新研究，推進行業向更先進、更環保的方向發展。透過這一系列的研究努力，期望小型自主水面載具能在軍事、商業海事、人道救援和科學研究等領域發揮更大的作用，同時提高能源效率和降低環境影響，促進可持續發展目標的實現。

3. 研究方法

3.1 小型水面載具規格與操作環境

本研究採用迪卡儂高壓充氣式三人皮艇(如圖 1)作為實驗載具，長 410 公分、寬 102 公分，最大承載量 245 公斤(如表 1) [8]，特別適合各類水域使用。其高壓充氣底座增強了浮力和穩定性，並具備快速充放氣的便利性，方便收納與攜帶。然而，其對風敏感且耐用性相對較低，強風下容易偏航，增加電力消耗，且易因尖銳物損壞，這些局限需在使用時加以考慮。



圖 1 迪卡儂充氣式底座三人皮艇[8]

表 1 迪卡儂充氣式底座三人皮艇諸元表

諸元表	
充氣後尺寸	410x102 cm
折疊後尺寸	60x40x40 cm
重量	18 Kg
承重	245

3.2 複合電力系統組件選擇與評估

小型自主載具的電力系統主要分為純太陽能、混合式動力、純電池推進和發電機推進 [9]四種類型(圖 2)。純太陽能系統能實現零排放，但其發電效率受太陽角度和天氣影響較大，需搭配能量儲存設備以確保穩定供電。混合式動力結合了電池和太陽能，適合短程航行並可利用太陽能進行充電，提高續航能力。純電池推進雖提供了穩定的動力來源，但因儲能容量有限，每次使用後需重新充電，限制了其運用範圍。發電機推進結合了內燃機和電池或發電機的優點，解決了電力耗盡問題，但與電動船舶的安靜、清潔特性相悖，因此較少見。本研究聚焦於提升小型自主載具的續航力，選擇探索混合式動力系統，以克服有限儲能裝置容量的挑戰，增強其在各種應用場景下的可行性和效能。

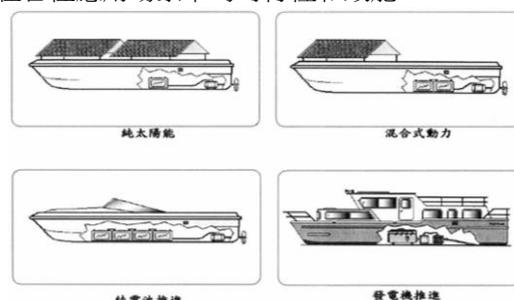


圖 2 中小型電動船舶動力類型[9]

3.3 儲能電池

綜合分析常見的二次蓄電池後，磷酸鋰鐵(LiFePO₄)電池以其廣泛的原料來源、低廉的成本和無環境污染特點脫穎而出。相比傳統鋰離子電池，磷酸鋰鐵電池在高溫下展現更佳的穩定性，具有長壽命、高安全性和低成本等優勢 [10]。此外，其優異的耐過充性能、高比能、穩定的額定電壓及低自放電率 [11]使其成為本研究所選擇的儲能電池，特別適合作為儲能系統使用。

3.4 太陽能電板搭配鋰電池儲能系統

太陽能板是將光能轉化為電能的裝置，透過吸收 0.4 μ m 至 1.1 μ m 波長的太陽光，直接將光能轉換為電能 [12]。作為一種乾淨、可再生的能源，太陽能發電能顯著減少環境影響和碳排放，但其效率受天氣條件影響較大，尤其在陰天或夜晚，發電效率會降低。為了克服這一缺陷，本研究使用兩片 340W 太陽能板並聯(圖 3、表 2)，配合 PWM 控制器調整電壓和電流輸出，並使用 12V15AH 鋰鐵電池儲存能量，以保證動力系統的電力供應。此外，本研究採用霍爾線圈量測儀(圖 4、表 3)非接觸式量測電池剩餘電量，具有較高的精度和較長的壽命。透過這套系統，能夠有效監測和管理太陽能板和電

池的電力狀態，確保電力供應的可靠性和效率，進而提高太陽能動力系統在實際應用中的可行性。



圖 3 雙片 340W 太陽能板

表 2 太陽能諸元表 [13]

太陽能板諸元表	
型號	TS60-6MH-340 H1
尺寸	1698x1002x40 mm
重量	20Kg
最大功率	340W
開路電壓	40.31V
短路電流	10.56A
最大功率電壓	33.73V
最大功率電流	10.09A
模組轉換效率	19.98%

標準測試條件(STC): 照射度 1000W/m²，模組表面溫度: 25 °C



圖 4 霍爾線圈量測儀[14]

表 3 霍爾線圈量測儀諸元表

霍爾線圈量測儀諸元表	
型號	WLS-PVA200
尺寸	75x40x22 mm
電壓範圍	5~90V
電流範圍	±200A
電容量範圍	0~999AH
功率範圍	0~999kW

3.5 動力系統

本研究選用 BlueRobotics 生產的 T-500 水下推進器(圖 5)作為動力系統，以滿足水面載具的動力及載重需求。T-500 的規格(表 4)為長 160mm、直徑 141mm、螺旋槳直徑 114.5mm，工作電壓範圍 12-24V，提供最大 16.1kgf 的正轉推力和 10.5kgf 的反轉推力 [15]，相較於先前使用的 T-200 型推進器(表 5)，在相同輸出電壓下擁有更高的推力且電流消耗較少，適合廣泛的水下應用，如水下機器人和無人載具。T-500 採用無刷直流電機，相比傳統直流有刷電機，減少了維護需求 [16]，提升了運行效率和靜音性，且更省電，提供了一個高效能、低維護成本的動力解決方案。



圖 5 BlueRobotics T-500 水下推進器

表 4 T-500 水下推進器諸元表

T-500 性能諸元表	
操作電壓	7~24 V
操作深度	300 m
12V 正/反轉推力	6.0/4.0 kg f
12V 全馬力輸出電流/轉速	16.9A/1900 RPM

表 5 T-500 及 T-200 水下推進器比較表

名稱	T-500	T-200
操作電壓	7~24 V	7~20 V
12V 正/反轉推力	6.0/4.0 kg f	3.71/2.92 kg f
12V 全馬力輸出電流	16.9A	17A

3.6 自主導航系統

為了達成小型水面載具的自主導航目標，本研究採用了鎮鑫科技開發的 ASS 自動巡檢系統(圖 6)，該系統集成了無線電遙控、Telemetry 模組、GPS 定位和三軸地磁感測器等多種硬體[17]裝置，能夠實時掌握載具的準確位置及其在水面上的動態狀態。此外，ASS 系統還提供了自主航行和遙控模

式的切換功能，以應對各種不同的操作需求。系統的核心基於 ArduPilot 這一開源平台進行開發，儘管使用了較易被破解的 MAVLink 通訊協定，但通過在地面控制站端實施的軟體加密技術，大大增強了數據安全性。即使在一般條件下（CPU i5）環境下，破解系統的機率極低，預計需超過三年時間才有可能被破解，確保了數據在政府或軍事應用中的安全無慮 [18]。



圖 6 ASS 自動巡檢系統

3.7 性能特性要因分析[19]

依據 2023 年黃星皓的研究，本研究深入探討了綠色能源在小型水面載具動力系統中的應用，特別是太陽能板的最優傾斜角度和巡航路徑的設定。透過田口實驗設計法和類神經網路分析，結果顯示，將太陽能板傾斜角度設定為 30 度，並將巡航路徑的迴轉半徑設定為 10 公尺，可以有效提高續航力。實驗亦發現，迴轉半徑對剩餘電量影響顯著，主要因為船舶需要多次變更航向，無法持續全速前進。為減少此一影響，本研究計畫將導航路徑點減少並改為方形環繞前進，以減少航向修正的需求，使得動力系統可以全速運作。此外，研究中亦考量了影響續航力的其他因素，如實驗環境、導航系統和行駛路徑等，選擇太陽能板角度和方形環繞路徑作為主要控制因子，進行更深入的分析 and 實驗，以期進一步優化小型水面載具的動力系統和續航性能。

3.8 控制因子及水準選擇

本研究中，透過因子要因圖(圖 7)選定以太陽能板架設角度(因子 A) (圖 8)、方形環繞邊長(因子 B)(如圖 9)及續航時間(因子 C)選擇作為控制因子(如表 6)，每個因子設定 3 水準，探討各因子水準之間對於品質特性的影響。本研究使用 L₂₇ 直交表進行全因子 27 組實驗，每個因子組合均執行 2 次重複實驗(共計 54 組)以增強實驗的可靠性，並以望大品質特性為目標，以期達到最佳的電池續航表現。

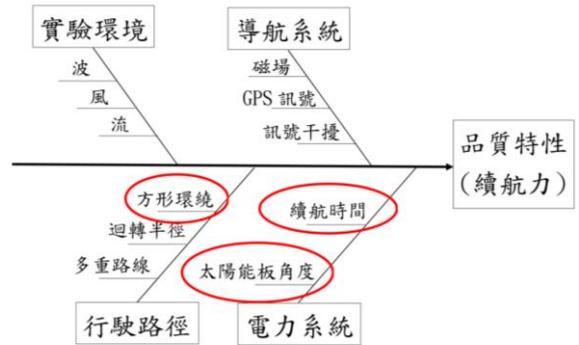


圖 7 因子要因分析圖

表 6 因子水準表

影響因子	名稱	單位	水準 1	水準 2	水準 3
A	太陽能板架設角度	度(°)	15	30	45
B	方形環繞邊長	公尺(m)	20	30	40
C	航行時間	分鐘(min)	40	50	60



圖 8 太陽能板架設角度示意圖



圖 9 方形環繞邊長設定示意圖

3.9 電池殘餘電量量測

電池殘電量 (State of Charge, SOC) 的測定方法對於確保無人載具的有效運行至關重要。其中，直接放電法雖為獲取 SOC 的直接方式，但由於操作繁瑣且需中斷電池供電，故不適合無人載具使用。開路電壓法受限於鋰離子電池特性的非線性變化，容易引起測量誤差。相對而言，安培小時法 [20] 通

過測量流入或流出電池的電流來估算 SOC，適合無人載具應用 [21]。此外，本研究引入感測計量法來監測太陽能板的總充電量，通過安裝於太陽能板控制器上的感測器記錄充電電流、功率及持續時間，以準確計算一定時期內的總充電量。這不僅能更精確評估電池 SOC，也有助於對複合電力系統的續航力進行有效預測。結合霍爾線圈測量剩餘電量和田口法靜態分析，本研究旨在深入探討複合電力系統中不同因素對續航力的影響，以及它們之間的交互作用關係，進而提升無人載具的運行效率。

3.10 陸上太陽能模擬測試

本研究在初期階段進行了非水下條件的模擬實驗，旨在通過調整太陽能板角度和模擬鋰鐵電池的充放電過程(圖 10)來仿真水下操作環境，確保水下實驗的準確性與可靠性。在學校戶外水槽進行的實驗中，使用 T-500 水下推進器在 12V 電壓下的輸出電流測試顯示，最大輸出電流約 14A，而平均運轉電流介於 1~4A。為模擬水下實際負載狀況，實驗中使用兩台電風扇來達到類似的最大輸出電流條件。此外，採用兩片太陽能板進行並聯，並設置 15 度、30 度和 45 度三種不同安裝角度進行 60 分鐘的實驗，每種設置重複測試三次，以霍爾線圈測量電池的剩餘電量，從而探索最佳的太陽能板安裝角度和模擬水下載具運行的電力需求。



圖 10 電風扇電校號電流示意圖

根據實驗數據分析得知(如表 7)，在進行的 9 組陸地模擬實驗中，有 4 組顯示電池剩餘電量為 100%，未發現電量消耗，顯示太陽能所產生的電量足以覆蓋電風扇的運作消耗，有時甚至會出現零或負電流的現象(圖 11)。此現象表明，若將電池的剩餘電量視為後續下水實驗的品質特性可能不夠準確。因此，為了更有效地評估實驗數據，後續實驗將忽略 T-500 水下推進器的電流消耗，而專注於太陽能的充電效率。透過這種方法，能夠更精確地了解太陽能在實際應用中對電池充電的貢獻，從而提供有價值的數據參考，優化載具的動力系統設計。

表 7 陸上實驗數據表

IHR	太陽能板	角度	天氣	輸出電流	殘餘電量(AH)	電量百分比(%)
IHR	雙片	15度	多雲	電風扇輸出14A	14.8	98.67
IHR	雙片	15度	多雲	電風扇輸出14A	14.3	95.33
IHR	雙片	15度	多雲	電風扇輸出14A	14.9	99.33
IHR	雙片	30度	晴	電風扇輸出14A	15	100.00
IHR	雙片	30度	晴	電風扇輸出14A	14.3	95.33
IHR	雙片	30度	晴	電風扇輸出14A	15	100.00
IHR	雙片	45度	晴	電風扇輸出14A	15	100.00
IHR	雙片	45度	晴	電風扇輸出14A	15	100.00
IHR	雙片	45度	晴	電風扇輸出14A	14.2	94.67



圖 11 霍爾線圈電流消耗示意圖

4. 結果與討論

4.1 三因子三水準實驗(L₂₇ 直交表)

本研究選定太陽能板架設角度、方形環繞邊長及續航時間作為控制因子(如表 8)，設定 3 個水準探討其對品質特性的影響。使用 L₂₇ 直交表，進行 27 組全因子實驗，每組因子組合重複執行 2 次，共 54 組實驗，以提高可靠性。實驗數據如表 9，並利用田口靜態分析方法，來探討不同因子之間的交互作用關係。

表 8 因子水準表

影響因子	名稱	單位	水準 1	水準 2	水準 3
A	太陽能板架設角度	度(°)	15	30	45
B	方形環繞邊長	公尺(m)	20	30	40
C	航行時間	分鐘(min)	40	50	60

表 9 實驗原始數據

太陽能架設角度(°)	方形邊長 (m)	航行時間 (Min)	太陽能充電量 (%1)	太陽能充電量 (%2)
15	20	40	40.45	40.14
15	20	50	50.36	52.56
15	20	60	61.01	62.93
15	30	40	39.38	28.68
15	30	50	42.92	37.60
15	30	60	43.26	44.98
15	40	40	36.80	14.79
15	40	50	43.72	16.17
15	40	60	48.09	16.93
30	20	40	28.95	21.97
30	20	50	37.47	25.46
30	20	60	46.61	27.77
30	30	40	39.67	26.59
30	30	50	46.94	27.45
30	30	60	54.52	27.80
30	40	40	16.60	32.18
30	40	50	18.82	37.75
30	40	60	21.51	42.15
45	20	40	30.40	27.19
45	20	50	38.97	33.97
45	20	60	47.98	40.52
45	30	40	41.62	30.80
45	30	50	52.69	36.77

4.2 S/N 分析

本研究首先透過量測到的實驗數據進行 S/N 分析，對各個控制因子之間對品質特性的影響進行評估。根據各因子 S/N 反應表(表 10)的分析結果，可初步判斷 B 因子(方形環繞邊長)對於品質特性的影響最為顯著。此外，透過各因子交互作用圖分析(如圖 12-17)，顯示 A 因子(太陽能板架設角度)和 B 因子(方形環繞邊長)之間存在著明顯的交互作用，而 AxC(太陽能板架設角度與航行時間)及 BxC(方形環繞邊長與航行時間)之間則無顯著的交互作用關係。

表 10 S/N 分析表

Response Table for Signal-to-Noise Ratios									
S/N	A	B	AxB_1	AxB_2	C	AxC_1	AxC_2	BxC_1	BxC_2
Level 1	30.764	31.470	31.353	31.415	28.987	30.247	30.340	30.129	30.066
Level 2	29.087	31.550	30.271	30.108	30.483	30.489	30.173	30.255	30.363
Level 3	31.095	27.925	29.322	29.422	31.475	30.209	30.433	30.560	30.517
Range	2.008	3.624	2.031	1.993	2.487	0.280	0.260	0.431	0.451
Rank	4	1	3	5	2	8	9	7	6

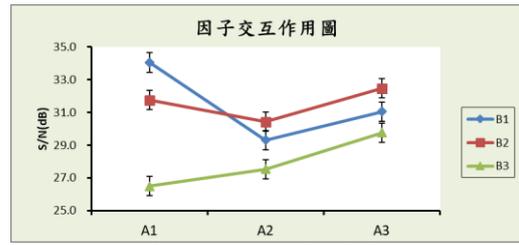


圖 12 AXB 交互作用圖(a)

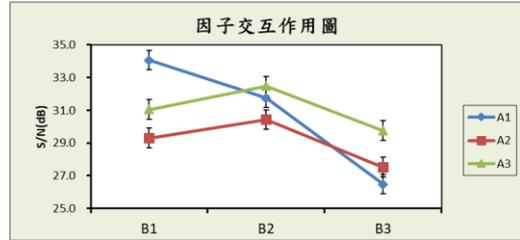


圖 13 AXB 交互作用圖(b)

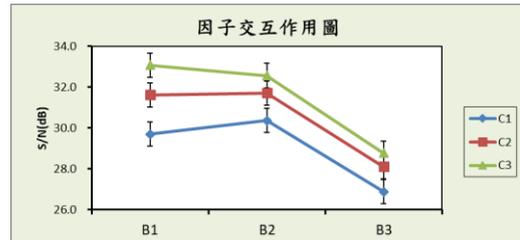


圖 14 BXC 交互作用圖(a)

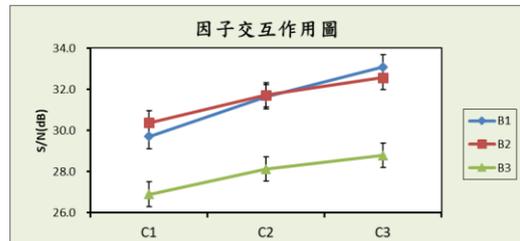


圖 15 BXC 交互作用圖(b)

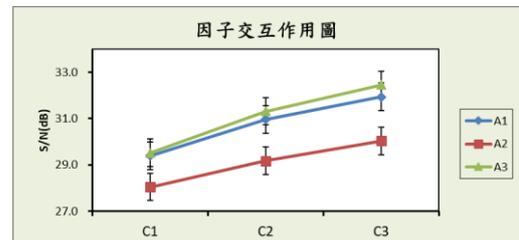


圖 16 AXC 交互作用圖(a)

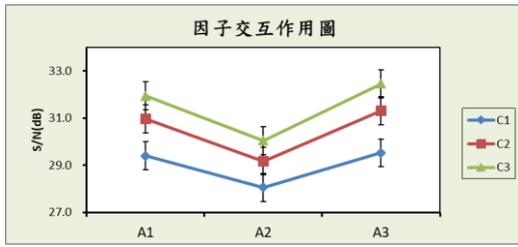


圖 17 AXC 交互作用圖(b)

4.3 變異數(ANOVA)分析

進一步透過變異數(ANOVA)分析對 S/N 進行詳細分析，在 95% 信心水準下，A、B、C 因子及 AxB 交互作用均顯示通過 F 檢定，且 P-value 遠低於 0.05 的顯著水平(表 11)，表示對品質特性具有顯著影響；相對地，AxC 及 BxC 交互作用均未通過 F 檢定，因此合併誤差變異數(Pooled Error Variance)後納入殘差之中(表 12)。經由柏拉圖(圖 18)可視化分析，B 因子(方形環繞邊長)貢獻度 46.01% 影響最顯著，其次依序為 AxB 交互作用貢獻度 21.82%，C 因子(航行時間)貢獻度 16.72%，A 因子(太陽能板架設角度)貢獻度 12.31%，而殘差值僅有 3.14%，顯示本研究結果具有高度的可靠性及穩健性。

表 11 ANOVA 分析-step1

ANOVA table for S/N-step1								
Source	SS	DF	MS	F ₀	F _{0.05}	P-value	SS'	Contribution
A	20.857	2	10.429	69.96	4.459	8.554E-06	20.559	12.31%
B	77.119	2	38.560	258.69	4.459	5.376E-08	76.821	46.01%
AxB	37.038	4	9.260	62.12	3.838	4.614E-06	36.442	21.82%
C	28.219	2	14.109	94.66	4.459	2.702E-06	27.920	16.72%
AxC	0.728	4	0.182	1.22	3.838	0.374	0.131	0.08%
BxC	1.829	4	0.457	3.07	3.838	0.083	1.233	0.74%
Error	1.192	8	0.149				3.875	2.32%
Total	166.982	26					166.982	100.00%

表 12 ANOVA 分析-step2

ANOVA table for S/N-step2								
Source	SS	DF	MS	F ₀	F _{0.05}	P-value	SS'	Contribution
A	20.857	2	10.429	44.507	3.634	2.904E-07	20.559	12.31%
B	77.119	2	38.560	164.566	3.634	2.133E-11	76.821	46.01%
AxB	37.038	4	9.260	39.518	3.007	4.211E-08	36.442	21.82%
C	28.219	2	14.109	60.216	3.634	3.578E-08	27.920	16.72%
AxC	(0.728)	(4)	—	—	—	—	—	—
BxC	(1.829)	(4)	—	—	—	—	—	—
Error	3.749	16	0.234				5.240	3.14%
Total	166.982	26					166.982	100.00%

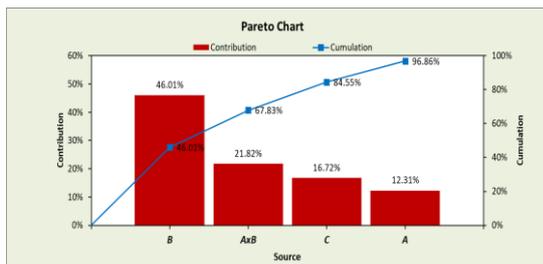


圖 18 S/N 柏拉圖

接續依據 S/N 主效果圖(圖 19)及平均值主效果圖(圖 20)分析，來找尋因子最佳組合，可判斷 A3(太陽能板架設角度 45°)、B2(方形環繞邊長 30m)及 C3(航行時間 60min)為顯著因子，A3B2C3 組合可產生最佳的品質特性(太陽能充電量)。

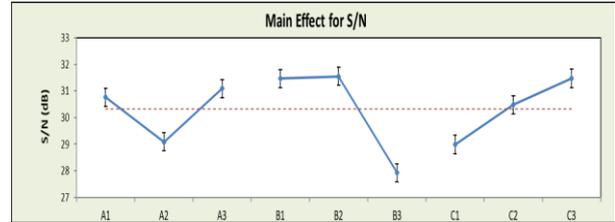


圖 19 S/N 主因子效果圖

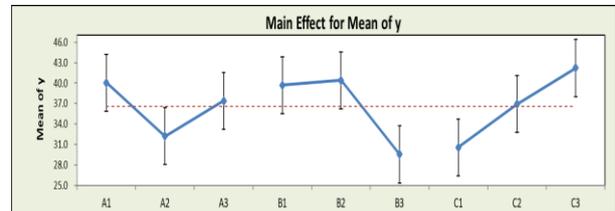


圖 20 平均值主因子效果圖

5. 結論

本研究針對小型自主水面載具的複合電力系統，透過實驗設計探討太陽能板安裝角度、方形環繞邊長及續航時間三個因子對於載具續航力的影響。採用 L₂₇ 直交表設計 27 組實驗，並進行了全面的數據分析，包括 S/N 比、變異數分析(ANOVA)以及主效果圖分析。研究結果顯示，方形環繞邊長(B 因子)對續航力影響最為顯著，其次是太陽能板架設角度(A 因子)與航行時間(C 因子)。此外，A 與 B 因子之間存在顯著的交互作用。最佳組合為太陽能板架設角度 45°、方形環繞邊長 30m 以及航行時間 60 分鐘，此配置可達到最佳的續航力表現。本研究進一步強調了在設計小型自主水面載具的複合電力系統時，合理配置太陽能板角度與考慮有效的運行路徑對於提高續航力具有重要的實際意義。透過此研究，不僅為小型水面載具的能源系統設計提供了實證基礎，也對於未來相關領域的研究提供了新的方向和思路。

參考文獻

1. “湛鬥機,” 臺灣湛藍海洋聯盟, [線上]. Available: <https://azurealliance.org/>. [存取日期: 28 2 2024].
2. 記者翁郁雯、朱俊傑, “溺水意外頻傳 義消首創無人救援船,” 三立新聞網, 4 7 2017. [線上]. Available:

- <https://today.line.me/tw/v2/article/14dfef5a87f3e1cc927318594e9b0c1ab4b2f23673636aac9c4b13591d3d450f>.
3. “澎科大自製無人船遠赴北極探勘研究,” 國立澎湖科技大學觀休系, 14 8 2023. [線上]. Available: <https://www.npu.edu.tw/latestevent/Details.aspx?Parser=9,3,27,,,9234>.
 4. “Mission-ready Defense and Security Solutions,” saildrone, [線上]. Available: <https://www.saildrone.com/solutions/maritime-defense-and-security>. [存取日期: 4 3 2024].
 5. 許智翔, “2022 國防科技趨勢評估報告-第三章 無人地面及水面 / 水下載具發展,” 財團法人國防安全研究院, 台北市, 2022.
 6. 徐康榮; 孫亦韜, “中共無人機對我海軍艦隊作戰之影響,” 海軍學術雙月刊第 52 卷 5 期, pp. Pp. 72-85, 10 2018.
 7. A. Bordianu and G. Samoilescu, “Electric and Hybrid Propulsion in the Naval Industry,” 於 2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania, 2019.
 8. 台灣迪卡儂有限公司. [線上]. Available: <https://decathlon.tw/dsm-177376.html>. [存取日期: 22 11 2023].
 9. 盧思穎、張筠崐、許瑜芳、陳彥豪、陳秉奇, “中小型綠能船舶發展趨勢介紹,” 船舶科技 42 期, pp. 頁 1-9, 2013.
 10. 黃星皓, 綠色能源應用於小型水面載具動力系統之研究, 國防大學理工學院造船及海洋工程碩士班, 2023.
 11. H. Wang, Y. Zhang and H. Li, “Design of small usv power system based on hybrid storage of wind and light storage,” 於 2019 5th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), Liverpool, UK, 2019.
 12. 黃永吉, 車用多電力量源融合探討與技術應用, 聖約翰科技大學機械與電腦輔助工程系碩士在職專班, 2022.
 13. “神盾 M 型模組規格書-單晶矽瓣切 6X10 鹽灘型太陽能模組,” 元晶太陽能科技股份有限公司, 新北市, 2019.
 14. “WLS-PVA200 Bluetooth 200A STN LCD Hall Coulomb Meter Voltage Current Meter Power Electricity Tester, ” [線上]. Available: <https://www.thanksbuyer.com/wls-pva200-bluetooth-200a-stn-lcd-hall-coulomb-meter-voltage-current-meter-power-electricity-tester-72030>. [存取日期: 6 12 2023].
 15. “Inc, Blue Robotics, ” [線上]. Available: <https://bluerobotics.com/store/thrusters/t100-t200-thrusters/t500-thruster/>. [存取日期: 22 11 2023].
 16. 高健翔, 長續航「傾轉翼綠能無人機」之研製, 宜蘭市: 國立宜蘭大學電機工程學系碩士論文, 2022.
 17. 陳俊宇, 應用田口實驗設計法提升燃料電池效率及自主導航之研究-以三體船為例, 國防大學理工學院造船及海洋工程碩士班, 2022.
 18. 鎮鑫科技股份有限公司, “無人船“水”市場,” 科技部南部科學園區管理局 109 年度推動園區智慧計器人創新自造基地補助計畫-計畫編號:AIS10908, 2021.
 19. 蘇朝墩, 品質工程:線外方法與應用, 新北市: 前程文化事業有限公司, 2013.
 20. Sabine Piller, Marion Perrin, Andreas Jossen, “Methods for state-of-charge determination and their applications,” *Journal of Power Sources*, pp. Volume 96, Issue 1,Pages 113-120, 2001.
 21. 邱永芳、郭振華、張富東、蔣敏玲, 智慧型太陽能遙控近岸測量船(2/4), 臺北市: 交通部運輸研究所, 2011.

Study on Robust Design of a Hybrid Power System for Autonomous Small Surface Vehicle

C. C. Lin C. K. Chang** C.C. Su** W.C. Shih*** J. J. Lu*****

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

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

***Logistics Division, Navy Command R.O.C.

****Naval Shipbuilding Development Center

Keywords: Autonomous Small Surface Vehicles, Hybrid Power Systems, Solar power, Inflatable rubber boat, Taguchi Orthogonal Array, Robust Design

ABSTRACT

The demand for autonomous small surface vehicles continues to increase around the world, as these vehicles play a key-role in modern maritime, commercial and military applications. Compared with medium and large surface vehicles, small surface vehicles are lighter, more maneuverable, and widely used in commercial, maritime, humanitarian rescue, hydrological research and military fields, etc. In addition, the development of hybrid power systems, such as combined multiple energy forms, including wind energy, batteries and solar power, vehicles could flexibly switch power sources in different operating modes for multi-missions. The application in hybrid power systems are the focus on future ship development. It can not only reduce greenhouse gas emissions, but also promote the development of green ships. The purpose of this study is to discuss optimize of hybrid power systems and improvement the endurance for the autonomous small surface vehicle. Therefore, this study chosen two of solar panels (each power is 340W) and Li-iron (12VDC 15Ah) battery to construct the hybrid power systems, equipped with an autonomous navigation system, and installed the system on an inflatable rubber boat for dynamic test on lake. The Taguchi orthogonal array applied to explore the solar panel angle and route surround. Whether the three control factors such as angle of solar panel, cruise route and endurance time, and through analysis of variation (ANOVA) and other study methods to find the best factor-level combination to improve hybrid power efficiency. Finally, the performance improvement confirmed and achieved the robust design in this study. It expected to make a substantial contribution to the improvement of hybrid power for autonomous small surface vehicles and application in relative fields.