

建立自航電動船之船舶操縱運動模型與分析

葛潔耘* 蔡順峯*¹

* 國立臺灣海洋大學 輪機工程學系

關鍵詞：MMG數學模型、船舶操縱系統、BMS電池管理系統、蓄電池

摘要

本文以雙螺槳無舵船為研究對象，使用MATLAB®中的 Simulink模組發展出自航電動船操縱模擬，來探討自航電動船的運動操縱模擬。參考日本造船協會所提出的船舶運動數學模式組，假設無波浪級風的影響下，並忽略船舶俯仰 (pitching)、滾轉 (rolling)與起伏 (heaving)下再加上 鋰鐵電池之BMS電池管理系統和，建立出縱移(surging)、橫移 (swaying)與偏航 (yawing)等三自由度，並進行迴轉、直線後迴轉試驗及電池放電率結果分析。

前言

在國際間提倡2050淨零碳排和各國對綠色船舶積極制定相關政策與法規及因應國際間海運技術發展，目前船舶仍然以透過燃油引擎燃燒為大宗，而燃燒後所產生的二氧化碳等溫室氣體不利於減碳排的目標，因此各國和國際海事組織(IMO)等國際組織開始針對減少海運業所造成的碳排提出解決方法及一連串政策，各家航商也提出節能設備、船型設計上減少阻力增加航行速度、更換低碳排的燃料等方法。國際海事組織(IMO)近年來推行綠色船舶的重要理念，從造船開始，船型設計、設備選用、燃料選用等在整個生命週期達到低能耗、低排放、低污染、高效能等特點，並符合SOLAS和MARPOL公約。在我國政策上不只針對大型航運船舶有相對應政策，在國內的休閒交通船和離島間的交通船也成為積極輔導改裝或建造新船來減少碳排，以我國現況而言小型船舶大多改裝成雙燃料複合動力或電動船，本研究針對小型的電動船舶為研究對象。

本研究之主要目的在利用無舵雙螺槳的船型及船模流體動力導數，利用船舶操縱公式建立操縱性能模型，配合不同的轉速及迴旋運動之變化，並透過模擬建立出船舶操縱運動反應，驗證本研究之數值評估所分析之實用性及正確性；以及利用蓄電池和電池管理系統的模擬推論出適當的電池消耗性能、發電機轉速。

文獻探討

1977年，葛西宏直、湯室彰規提出舵力影響MMG方程式的因子並建議除了水槽試驗還需做實船試驗對數據證明。[1]

1988年，日本李承建、藤野正龍等人提出Twin-propeller Twin-rudder(TPTR)形式的MMG數學模型，並發現螺槳位置會影響有效尾流係數，針對此情況提出新的數學公式。[2]

2014年，H.Yasukuwa和Y.Yoshimuru等人，提供詳細得數學模型建立的基本觀念及所需的參數設定。[6]

2018年，Dongdong Mu,Guofeng Wang等人，提出Unmanned Surface Vehicle(USV)船型雙螺槳無舵的ZIG-ZAG試驗方法及公式，實驗結果與理論相符合。[8]

2019及2021年，Chunyue li與Gongxing WU分別提出Unmanned Surface Vehicle(USV)船型雙螺槳無舵的MMG數學模型公式，Chunyue li提出使用馬達轉效率不同產生不同轉速來推動船舶。[9][11]

2021年，KUN Dai, Yunbo Li等人，提及大多數單體船水動力係數參數使用經驗公式取得，由於Small Waterplane Area Twin Hull(SWATH)因為是特殊船型，因此在過去十幾年間大多使用CFD數值模擬及實驗結果互相比對吻合，產生出水動力係數。[12]

2012年，L.Corredor,L.Baracaldo等人，改良插電式混合電動船藉由電池連接驅動舷外電動機，使用simulink的物理模塊模擬出巡航速度可知道放電時間，也可估計充電時間、提高效率。[3]

2012年，李建興、周晏伸、鄭植文等人，提出完整的小型電動船的資訊整理，對推進功率的評估、蓄電池電力計算，模擬出是適當的電動船舶設計及設備選用。[4]

2013年，Low Wen Yao,Aziz J.A.等人，使用SIMULINK詳細擬出電路系統並模擬出鋰鐵電池的電壓及電流情況，此方法也可使用在鉛酸電池及鎳基電池。[5]

研究方法

本研究使用Matlab中的Simulink 使用數學運算模塊建立船體子系統及螺槳子系統，並使用固定步長(Fixed step)中ode5(Dormand prince)仿真算法，透過採用當前狀態值和中間點的逼近狀態導數的顯函數來計算模型在下一個時間步的狀態進行驗證，再加入由Simscape物理模塊組建電力系統後依據模擬出的不同情形與轉速的迴轉運動試驗確認導入參數是否需要修正。

BMS 電力系統

船舶推進系統可依主機形式分為柴油機、氣輪機、燃氣渦輪機、核動力裝置、柴油機電力推進裝置(電推裝置)等，而本文中的電動船則藉由蓄電池組提供的電力驅動電動機來產生船舶所需要的動力，並利用BMS進一步確定電池組SOC充放電狀態將此信息提供給船舶操縱人員，用以監控電動船舶航行安全狀況。電力系統分為五個部分，電池、三相電源轉換器、永磁同步電動機、霍爾傳感器及PID程序控制：

1.蓄電池 & BLDC電動機

電池選用台塑新智能的鋰鐵(lithium -iron)蓄電池，電動機選用[5]到的舷外機使用的電動機PERM motor PMG 132系列，在電力系統所需的參數，如圖[4]、圖[5]、圖[6]：

基本規格	電壓	鋰鐵電池	
	尺寸 (L*W*H)	約 35mm * 22mm * 210mm	
	重量	約 120g	
環境	操作溫度	min -30°C~10°C	充電模式
		MAX 55°C~40°C	放電模式
	儲存溫度	min -20°C	
		MAX 55°C	數據來源: 原廠

圖1 鋰鐵電池特性

規格	項目	24V		48V		備註
		3000h	2000h	2000h	2000h	
電壓	標定電壓	28.4V	32.0V	32.0V	35.6V	截止電壓
	最大電壓	38.4V	42.0V	42.0V	45.6V	5.50V
	最小電壓	28.4V	32.0V	32.0V	35.6V	4.50V
充電	充電電壓	CC-CV				
	充電電流	28.4V	32.0V	32.0V	35.6V	0.50V
放電	標定放電電流 I _{DC}	15.0A	13.0A	6.0A	10.0A	13.0A
	最大放電電流 I _{DC}	10.0A	10.0A	5.0A	10.0A	10.0A

圖2 鋰鐵電池參數



Technical Specs PMG 132

Voltage	24 V	36 V	48 V	60 V	72 V
Operation mode	S 1	S 1	S 1	S 1	S 1
Current	110 A	110 A	110 A	110 A	110 A
Power	2.5 kW	3.5 kW	4.74 kW	5.97 kW	7.22 kW
rpm	1080 min-1	1700 min-1	2300 min-1	2870 min-1	3480 min-1
torque	20 Nm				
inertia	0,025 kgm²				
inductance	0,019 mH				
resistance	16 mOhm				
protection	IP 20				
weight	11 kg				
Short time operation	200 A	S2 10 min			
peak torque	38 Nm				

圖3 BLDC參數

2. 霍爾傳感器

BLDC控制方式需要一組驅動電路將直流轉換成三相電流，可使用霍爾感知器(Hall Sensor)產生轉子位置訊號控制馬達速度，訊號可再藉由MOSFET或IGBT傳入BLDC。BLDC有三個霍爾感知器各占120度，可根據霍爾傳感器信號的組合，就能決定換向的精確順序，且每次換向，都有一個繞組連到控制電源的正極，第二個繞組連到負極，第三個處於失電狀態。以下為霍爾傳感器換向組合。

ha	hb	hc	emf a	emf b	emf c
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	-1	+1
0	1	0	-1	+1	0
0	1	1	-1	0	+1

1	0	0	+1	0	-1
---	---	---	----	---	----

表1 霍爾傳感器邏輯閘表示法

3. PID控制

在本研究採直接給予轉速並用PID控制方式經由電動機後所產生的轉速連接至螺槳子系統，PID程序控制是由比例單元(Proportional)、積分單元(Integral)及微分單元(Derivate)所組成，P是控制目前誤差、I是控制過去累積誤差、D是控制目前誤差，PID演算法可以用下式表示：

$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

其中

K_p : 比例增益，是調適參數

K_i : 積分增益，也是調適參數

K_d : 微分增益，也是調適參數

e : 誤差=設定值(SP) - 回授值(PV)

t : 目前時間

T : 積分變數，數值從0到目前時間

K_p	K_i	K_d
0.042155	0.35686	0.01

表2 PID 係數[4]

4. 電力系統模型建立

電力系統由Matlab®中的Simscape 建立：

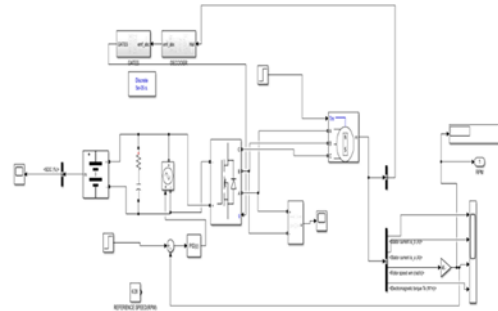


圖4 電力系統模型

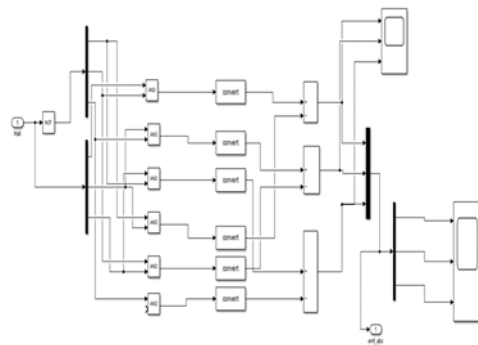


圖5 霍爾傳感器模型

[在此鍵入][在此鍵入][在此鍵入]

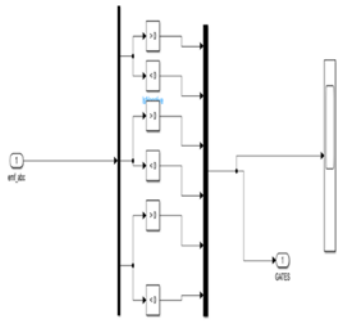


圖6 邏輯閘模型

數學船模

本研究選用 unmanned surface vehicles (USV) 船型, unmanned surface vehicles (USV) 稱為無人駕駛水面艦艇, 也被稱為無人艦艇、水上無人機或海面無人機, 可以在沒有船員的情況下在水面進行運行有多種自主運行模式, 從遠程控制到完全自主, 在應用上目前大多使用在海洋學的研究、氣候監測或在軍事上的使用, 在海洋學的應用上可以降低對人的風險及研究成本等, 本研究船模由[10]所提供的船模尺寸:

特性	符號象徵	尺寸
全長	LO	1.5m
水線長	L	1.3m
吃水	D	0.125m
船寬	W	0.9m
螺旋槳直徑		0.27m
兩螺旋槳間距離	B	0.52m
重量	MASS	50kg
USV速度(max)	-	1.5m/s

表3數學船模主要尺寸[10]
運動方程式

本文採用船舶操縱縱運動方程式以日本拖曳水槽委員會提出的數學模型, 以三個自由度縱(Surging)、橫移(Swaying)、平擺(Yawing)以模擬船體運動。本研究使用三維自由度(Surge、Sway、Yaw)利用以物地球為基準和物體為基準的座標系轉換成船舶運動方程式, 其中Surge代表符號為X、Sway代表符號為Y、Yaw代表符號為N:

$$\begin{aligned} X_0 &= m\ddot{X}oG \\ Y_0 &= m\ddot{y}oG \\ N_0 &= Iz\ddot{\phi}oG \end{aligned} \quad (1)$$

m: 船體質量;
X₀: 作用於船體外力合力在O-X₀軸上分量
Y₀: 作用於船體外力合力在O-Y₀軸上分量
N: 船體繞過G-Z軸的平擺力矩
以地球為基準的坐標系以牛頓第二公式建立運動方程式

$$\begin{aligned} X &= Fx = m(\dot{u} - v\dot{\phi}) \\ Y &= Fy = m(\dot{v} + u\dot{\phi}) \\ N &= Mz = Iz\ddot{\phi} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} M\dot{v} + C(v)v + D(v)v &= \tau; \\ M &= \\ \begin{bmatrix} m & -Xu & 0 & 0 & 0 & m \\ & Yv & mxg & -Yr & 0 & m \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \end{bmatrix} \\ V &= [uvr]^T; \\ C(v) &= \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & - & (m - Yv)V & - & (mxg - Yr)r \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \end{bmatrix} \\ D(v) &= \\ \begin{bmatrix} - & Xu & 0 & 0 & 0 & - \\ & Yv & - & Yr & 0 & - \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \end{bmatrix} \\ \tau &= [\tau u, \tau v, \tau r]^T \end{aligned} \quad (3)$$

MMG MODEL

MMG Model (Manoeuvring Mathematical model) 由日本造船協會在1976~1980年間發展出的船舶操縱模擬的數學模型, 而後各國學者針對不同船型及模擬需求針對基礎的MMG Model作改良, 本研究使用雙螺旋槳無舵船型的MMG Model。MMG Model將受力於船體的力分為船體、螺旋槳兩個模組:

$$\begin{aligned} X &= X_H + X_P; \\ Y &= Y_H; \\ N &= N_H + N_P; \end{aligned} \quad (4)$$

其中H代表船體, P代表螺旋槳

1. 船體模組

由[9]中提到假設USV是對稱且重心是船身固定框架的中心, 可以把運動方程式中的X_G=0、Y_r=0、N_v=0、Y_r=0、N_r=0; 另外, 附加質量與附加慣性和加速度基本相同流體動力學導數具有相互對應關係, 因此, mx~-Xu、my~-Yv、Jz~-Nr, 在此研究中水動力係數使用[11], 如表

m-Xu	m-Yv	Xu
50.05	84.36	151.57
Yv	Iz-Nr	Nr
132.5	17.21	34.56

表4水動力係數

根據[12]力和力矩可用泰勒級數展開表示, 公式中u、v、r稱為水動力導數, 以下為無因次化的泰勒級數展開船殼運動方程式:

$$\begin{aligned} XH &= X(u) + X_{vv}v^2 + X_{vrv} + X_{rr}r^2; \\ YH &= Y_vv + Y_r r; \\ NH &= N_vv + N_r r; \end{aligned} \quad (5)$$

2. 螺旋槳模組

本研究使用雙螺旋槳, 故以下常見運動方程式為:

$$Xp = \rho[(1-tp(s))n^2(s)Dp^4(s)K_T(s) + (1-tp(p))] \quad (6)$$

$$Np = \rho [yp(s)(1-tp(s)n^2(s)Dp^4(s)K_T(s) + yp(p)(1-tp(p))n^2(p)Dp^4(p)K_T(p)]$$
 在(6)中(s)代表左舷(starboard)和(p)代表右舷(port side), 其中假設 $tp(p)=tp(s)$
 在[10]中提到不同的表示公式:

$$\begin{aligned}
 Xp &= cVn + d|n|n; \\
 Xp &= cv(n_1 + n_2) + d(|n_1|n_1 + |n_2|n_2); \\
 Np &= [cv(n_1 - n_2) + d(|n_1|n_1 - |n_2|n_2)] * dp;
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

當 $c=(1-tp)(1-w)\rho D^3 a_2, d=(1-tp)\rho D^3 a_2$;
 公式中 a_2 為 $KT=a_1 + a_2 * J$

$$\begin{aligned}
 Xp &= T * \cos\delta; \\
 Yp &= T * \sin\delta; \\
 Np &= XI * T * \sin\delta;
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

X1:螺槳到船中心線距離

δ :在此作為推力角

如 δ 很小, 則 $\sin\delta=\delta, \cos\delta=1$

3.數學模型建立

船舶操縱性能模型使用Matlab®中的Simulink建立, 先對所需的公式及參數進行整理, 再依照公式一步一步建模, 模型中模塊大多使用數學運算模塊建模, 模型主要分為船體及螺槳這兩部分, 並形成閉迴路系統; 先針對轉速不同進行迴轉運動驗證, 再連接電力系統進行電力系統可行性證驗。

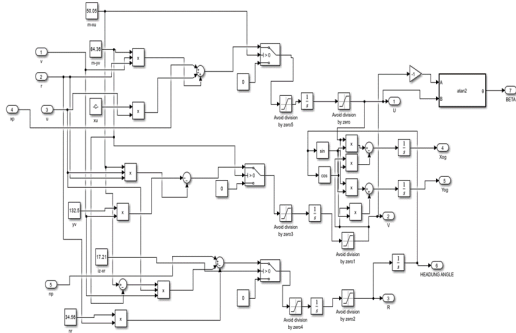


圖7 船體數學模型

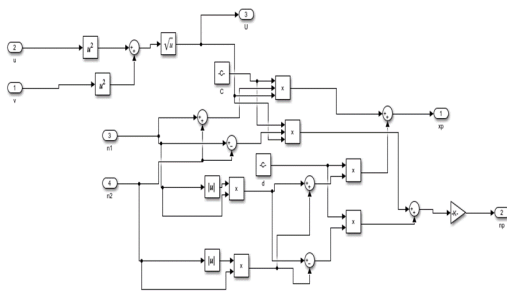


圖8 螺槳數學模型

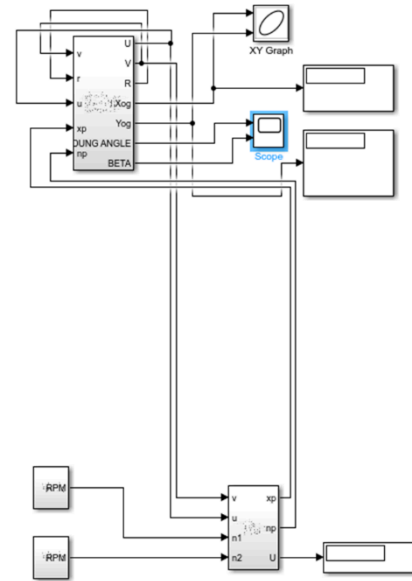


圖9完整模型

模擬驗證結果

本研究根據第十五屆「國際船模試驗會議 (International Towing Tank Conference, ITTC) 所定義的固有操縱性概念, 在開放條件, 並不依賴外界環境條件(如風、海浪等)下採靜水條件進行船舶操縱模擬, 模擬方式分為迴轉、直線後迴轉、Z行試驗等三種模式。均先進行一般動力船模擬, 再進行小型電動船模擬。

1.迴轉試驗

無舵船型無法以舵角操縱達到迴旋試驗, 以[12]中的參考方法, 使用不同左舷與右舷的轉速差, 由表[5]可知當轉速差越大, 船速越快, 迴旋直徑越小; 由表[5]、表[6]分析之小型電動船的結果船速增加, 迴轉直徑減小。

左舷 rpm	右舷 rpm	轉速差	船速 (knot)	迴轉直徑 (m)
120	90	30	1.451	6.3
180	120	60	3.018	4.56
300	180	120	7.892	3.7255
630	330	300	32.6	3.1

表5

一般動力船不同轉速差比較

[在此鍵入][在此鍵入][在此鍵入]

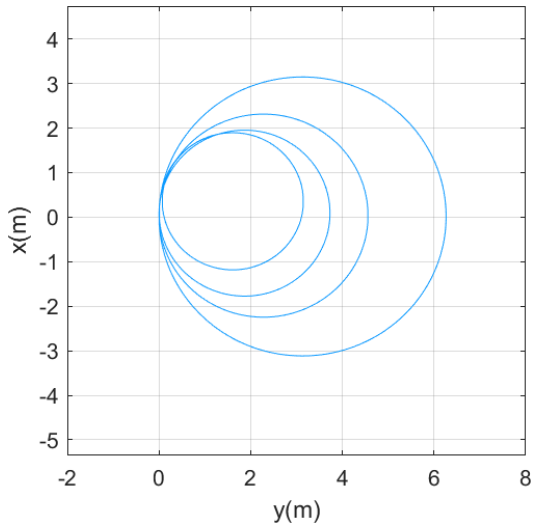


圖10一般動力船不同轉速差比較

左舷 rpm	右舷 rpm	轉速差	船速 (knot)	迴轉直徑(m)
120	90	30	1.751	5.7
180	120	60	3.604	4.55
300	180	120	9.37	3.75
630	330	300	37.04	2.94

表6

小型電動船不同轉速差比較

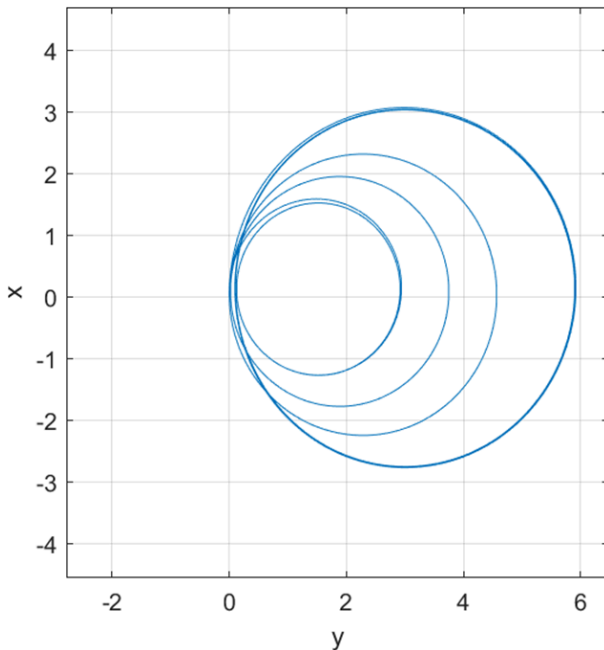


圖11小型電動船不同轉速差

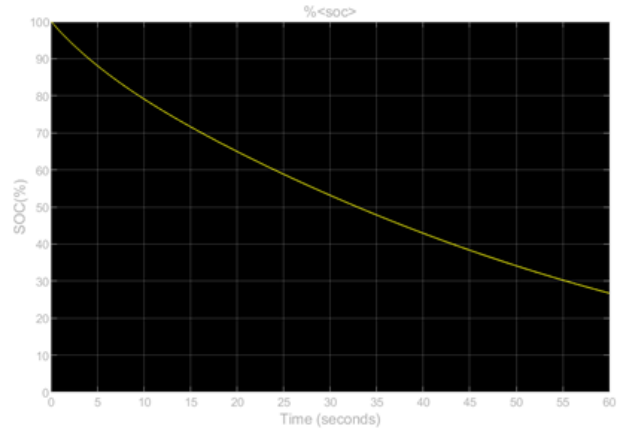


圖12轉速差30左舷放電率示意圖

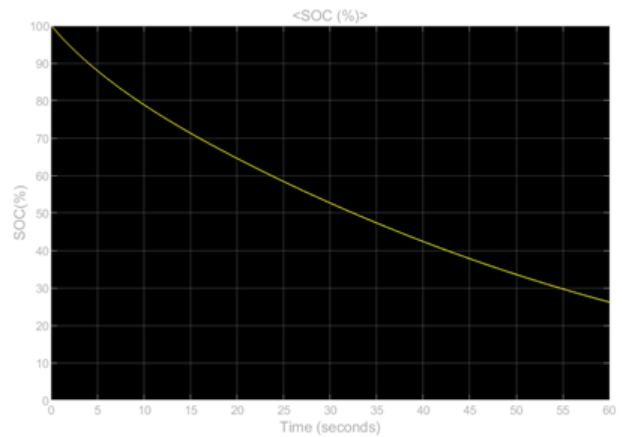


圖13轉速差30右舷放電率示意圖

2.直線後迴轉試驗

分別以10S、20S、30S左右舷同為120RPM的轉速均速前進，均速後以左舷180RPM、右舷120RPM轉速前進，由表[7]可知模擬結果中直線前進距離增加，但是不影響迴旋直徑。表[7]、表[8]分析之小型電動船直線前進距離增加，迴轉直徑減少。

	左舷180(rpm)	右舷120(rpm)	轉速差60
	直線前進距離(m)	迴轉直徑(m)	
10S	9.5	4.55	
20S	19	4.55	
30S	28.5	4.55	

表7一般動力船前10s/20s/30s 120rpm等轉速

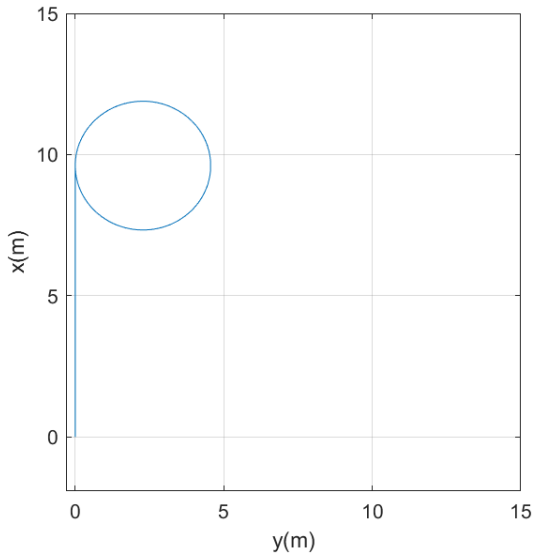


圖14一般動力船前10s120rpm等轉速

左舷180右舷120轉速差60		
	直線前進距離(m)	迴轉直徑(m)
10S	11.5	4.3
20S	23	4.3
30S	34.5	4.3

表8

小型電動船前10s/20s/30s 120rpm等轉速加電力系統

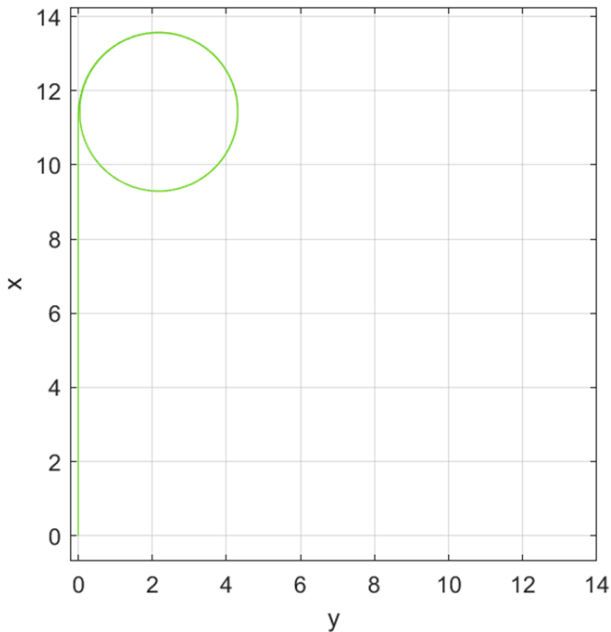


圖15小型電動船前10s 120rpm等轉速加電力系統

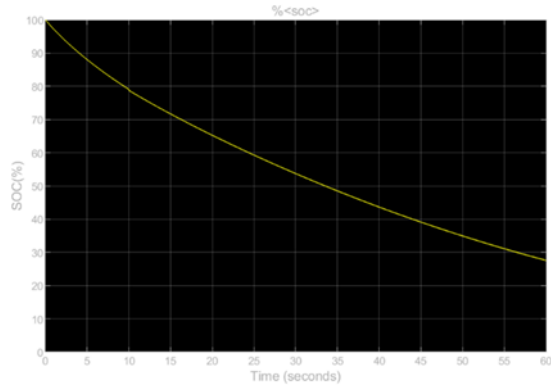


圖16前10S 120rpm等轉速 左舷放電率示意圖

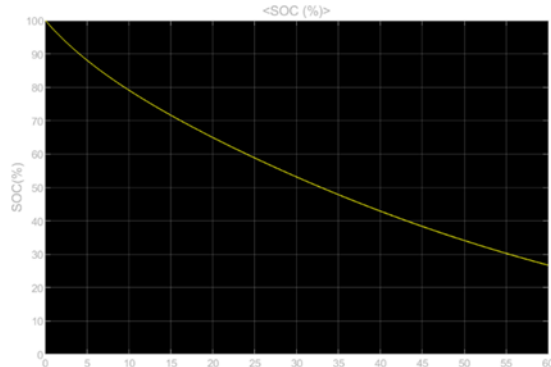


圖17前10S 120rpm 等轉速 右舷放電率示意圖

3.Z行試驗

Zig-zag路徑試驗及誤差結果，由結果可知PID係數、K、T、轉速變化設定均影響結果穩定性，此期望路徑為

$\{X = t, y = \sin t\}$ ，時間設定60s，轉速設定130rpm和122rpm， $K=2.641$ 、 $T=0.498$

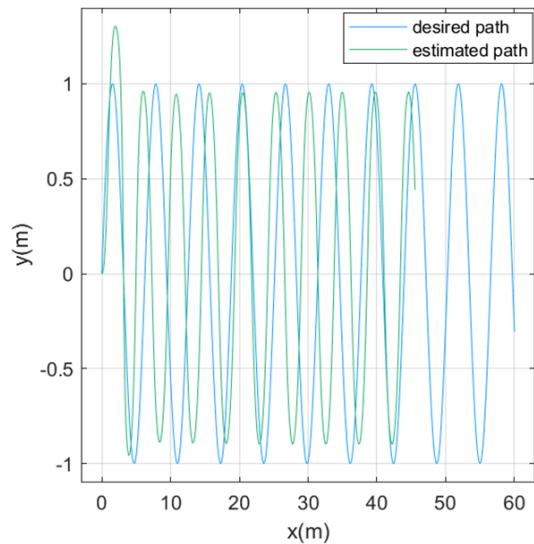


圖18一般動力船 Zig-zag Desired Path&Estimated Path比較示意圖

[在此鍵入][在此鍵入][在此鍵入]

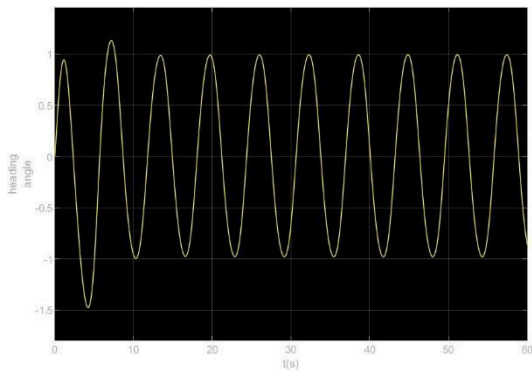


圖19一般動力船 heading angle示意圖

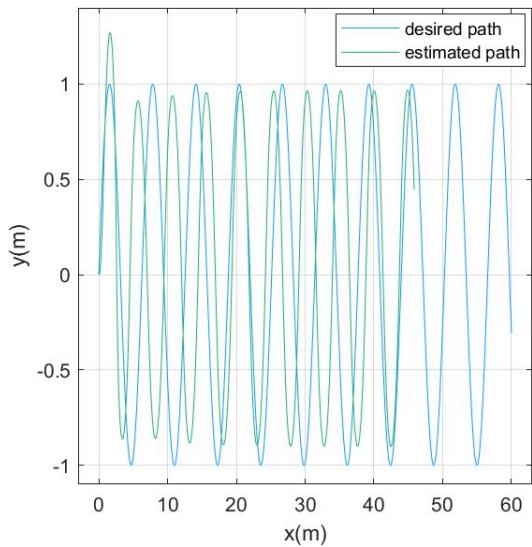


圖20小型電動船 Zig-zag Desired Path&Estimated Path比較示意圖

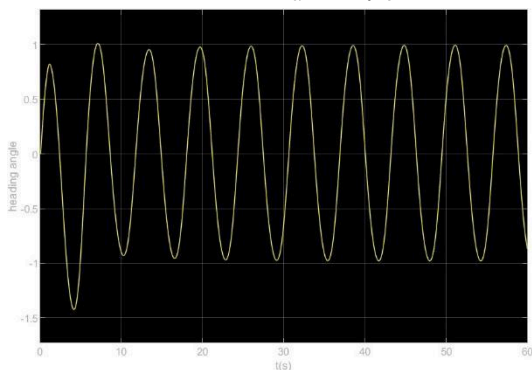


圖21小型電動船 heading angle變化

結論

本研究利用軟體模擬完成MMG Model結合電力系統三種試驗之可行性，透過一般動力船及小型電動船之結果比較，可知電力系統影響迴轉直徑，也使之直線運動後迴轉試驗的直線距離變大，在Z行試驗的模擬結果與理想路線誤差值較一般動力船較大。

參考資料

1. 葛西宏直、湯室彰規，MMG報告-III 舵に作用するカと船

体・プロペラとの干渉，日本造船学会誌578巻p358-372，1977

2. Seung Keon Lee , Masataka Fujino , Toichi Fukasawa , A Study on the Manoeuvring Mathematical Model for a TWIN-Propeller TWIN-Rudder Ship ,TRAN ,1988

3. Ye Li ,The simulation of ship maneuvering and courde keeping with escort tug ,B.Eng. ,Shanghai Jiaotong University P.R.CHINA(p105-110),2000

4. Corredor,L.Baracaldo,L.Jaramillo,J.Gutierrez,D.Jimenez,A comprehensive energy analysis of a hybrid motorization for small /medium boat,ICREPO'12 Spain,28th to 30th,2012

5 李建興，周晏伸，鄭植文，小型電動船之電力計算，Journal of Taiwan Society of Naval Architects and Marine Engineer,Vol.31.No.4.pp.215-226,2012

6 S. Abdel-latif , M. Abdel-geliel , and E. Eldin Zakzouk , Simulation of Ship Maneuvering behavior Based onthe Modular Mathematical Model ,TRAN. ASAT-15-113-CT,2013

7.Yasukawa • Y. Yoshimura, Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions, 8 November 2014 JASNAOE 2014

8. Surendar V. , Mohankumar V. ,Anand S., Prasanna Vadana D., Estimation of State of Charge of a Lead Acid Battery Using Support Vector Regression, SMART GRID Technologies, August 6-8,2015

9. Dongdong Mu ,Guofeng Wang ,Yunsheng Fan ,Xiaojie Sun and Bing bing Qiu ,Modeling and Identification for Vector Propulsion of an Unmanned Surface Vehicle: Three Degrees of Freedom Model and Responce Model, Sensors 2018, 18, 1889

10. Chunyue Li, Jiajia Jiang ,Fajie Duan ,Wei Liu, Xianquan Wang, Lingran Bu, Zhongbo Sun and Guoliang Yang, Modeling and Experimental Testing of an Unmanned Surface Vehicle with Rudderless Double Thrusters, Licensee MDPI, Basel, Switzerland.,2019

11.Rafael Guardedeño , Manuel J. López , Jesús Sánchez and Agustín Consegliere , AutoTuning Environment for Static Obstacle Avoidance Methods Applied to USVs, Licensee MDPI, Basel, Switzerland,2020

12 Gongxing Wu , Mingyuan Zhao , Yu Cong , ZhiWen Hu and Guofu Li , Algorithm of Berthing and Maneuvering for Catamaran, y. J. Mar. Sci. Eng.2021, 9, 289. <https://doi.org/10.3390/jmse9030289>

13 un Dai, Yunbo Li, EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION ON MANEUVERING PERFORMANCE OF SMALL WATERPLANE AREA TWIN HULL, ISSN 0007-215X eISSN 1845-5859, Number 2, 2021

14 MO, EXPLANATORY NOTES TO THE STANDARDS FOR SHIP MANOEUVRABILITY,MSC,2022

DEVELOPEMENT AND ANALYSIS OF MANOEUVRING SHIP MOTION MODEL FOR AUTONOMOUS ELECTRIC BOATS

J.-Y.Ge S.-F.Tsai**

***Department of Marine Engineering, National Taiwan Ocean University**

Keywords: MMG Model , Ship Maneuverability ,BMS System ,Storage Battery

ABSTRACT

This paper studies the maneuverability of a small electric boat with dual propellers for autonomous navigation, focusing on establishing a lithium battery management system and the development of a motion model for the boat's degrees of freedom. It establishes motion in three degrees of freedom: surging, swaying, and yawing, conducts turning, straight-line reversing, and zigzag tests, and analyzes the discharge rate results of the battery management system. The research method adopts the standard Maneuvering Modeling Group (MMG) mathematical model. It uses MATLAB®'s Simulink to develop a lithium-ion battery boat discharge module to simulate and discuss the motion of the battery-powered autonomous boat. The results indicate that incorporating the lithium battery discharge model shows differences in the autonomous navigation turning, straight-line reversing, and zigzag test simulations compared to conventional power boats.