

當佛萊明碰上法拉第一電磁

無聲引擎的研究

國中組應用科學科第一名

台北市立天母國民中學

作者：朱承啓

指導教師：王禮章、李奕宏

一、研究動機

由於磁浮技術的長足進步，使得磁浮系統即將成為陸上交通工具的明日之星，而推進磁浮列車所運用的線形驅動器，則是另一種形式的電磁動力，不同於傳統的旋轉電機，惟其作用力仍依照弗來明左手定則產生直線運動。線形驅動技術除了應用在磁浮系統外，還有沒有其他方面的應用呢？它可以用於航空器或船隻嗎？它能否取代一般的旋轉電機或者內燃機械（引擎）嗎？

二、研究目的

由弗來明左手定則知電磁的作用力係垂直於磁場與電流所交互作用的平面上，在磁浮系統所應用的線形驅動器，是由定部磁場對動部（車體）磁場，依照弗來明左手定則產生推斥或吸引的作用而移動。然而電磁船係浮在水裡，無法像磁浮系統般在陸地上設置固定的定部磁場來牽引驅動，因此電磁船是如何推進運作的，其磁場、電流和作用力三者間關係為何？由於可供參考的資料闕如，只有自行研製模型來實驗探究之。

其次電磁船係運用電解液中移動之電荷在磁場中產生流體推力，依據羅倫茲作用力 $F = Q \text{（電量）} \times V \text{（電荷移動速度）} \times B \text{（磁通密度）} = I \text{（電流強度）} \times t \text{（時間）} \times V \times B$ ，得到船之推力將正比於電流強度和磁場強度。然而永久磁鐵受限於磁通量小而體積和重量大之缺點，因此在實際的應用上仍是以電流感應方式來產生磁場，大和一號運用超導電磁就是這個道理，所以電流的產生和控制將是電磁船推進器裡非常重要的一環，其重要性不可言喻，因而在本次的實驗裡電流控制的研究也就成為一項重要目標。

由於現今資訊科技的進步，因此在推進控制的單元裡加入了電腦界面並撰寫控制程式，擬藉由電腦操控做為本次研究的完整目標。

三、研究過程和方法

關於電磁船的研究分為下列五大部分：

- A. 電磁推進器本體。 B. 電化學分析。 C. 電流控制單元。
- D. 電腦界面電路。 E. 電腦控制程式。

A. 電磁推進器本體：

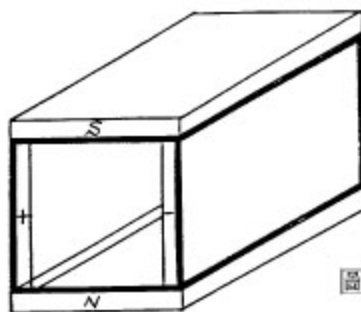
（一）根據牛頓第三運動定律知任何物體會發生運動現象，係受到作用力或反作用力之影響。電磁船雖不用槳（螺旋槳），但可確定的是由電磁作用所產生的力仍應施向水中，才能驅動船體。

（二）為使電磁產生作用力，首先必須建構磁場與電流互為作用的面，由於電磁力係發生於磁場與電流作用面的垂直方向，因此將此作用面垂直置於水裡，就會和水發生作用力和反作用力的效應而產生水平推力。

（三）在建構磁場與電流所作用的平面時，要注意的是磁場和電流的兩個向量要互為垂直以獲得最大作用力。

（四）電磁船推進器由磁極提供磁力線以構成固定的磁場，這個場相當於一般電動機的定部磁場，而傳動部分則是電磁船推進的關鍵。由於電磁船推進器的動部，並非真正的可動機械，所以電極的通路必須藉助於有導電性的液體來傳導，而海水正好具備導電性，因此電極上的電位可經由海水的導電而傳導流動。

（五）電磁推進器模型的構造示意如圖A-1，由壓克板黏合成方管框架（圖中粗線條所示），框架外側上、下分別固定S、N極性的永久磁鐵（片狀），構成磁力線向上的磁場；框架內側左、右分別固定極板做為正、負電極並引出導線，整組模型的重量要配合模型船的浮力，至於極板的尺寸，則由通電電流的大小和電解液的導電度來考量決定。



圖A-1 推進器模型構造

B. 電化學分析：

由於現今資訊科技的進步，電磁船發生電磁作用的電流係利用海水做為媒介，由於電極上所通的是直流電，因而會發生電解化學反應，這些反應會有什麼影響，以下將詳細探討。

（一）所謂導體係指一種可以自由傳導電流或移動電荷的物體。導體可分為兩類，第一類為電子導體，例如金屬、石墨等，在導電過程中未發生任何化學變化。第二類為離子導體，例如電解質溶液，但是在導電過程中會發生化學變化，電磁船的電流傳導就是屬於這一類型。

（二）離子是一種帶有電荷的粒子，係由原子或原子團失去或得到電子而形成。帶有正電荷者為正離子，帶負電荷者為負離子。電解質在熔化或溶解後產生自由移動離子而具有導電特性，海水因具備導電性能，所以成為電磁船產生動力的重要介質。

（三）依照海水的成分，氯化鈉（NaCl）佔了所含物質的78%成為主要成分。當海水通入直流電後會發生電解反應，氯離子（負離子）會向正電極移動，並在正電極表面發生氧化反應形成氯氣。鈉離子（正離子）會向負電極移動，而在負電極表面發生還原反應。

（四）氧化與還原，凡物質與氧化合的反應稱為氧化，在電化學中係指物質失去電子的反應。還原係從氧化物中拿走氧的反應，在電化學中還原則指物質獲得電子的反應。

（五）在電化學反應過程中，有一個非常重要的現象，就是離子在電解液中移動，當到達電極時，可能

1. 沈澱於電極上，或
2. 在電極上冰電然後被溶解，或
3. 形成氣體而發散

這是英國物理學家法拉第在實驗中所發現的現象，並且在1834年提出一個很重要的結果：在電解電路中所通過的電量Q與電極上因化學反應所生成的物質的質量M成正比關係，這是法拉第非常著名的電解定律。

$$M \propto Q$$

$$M = Z \cdot Q$$

Z為一比例係數，稱為電化當量，其定義為：當電量為1C（庫侖）時，電極上發生化學反應所生成物質的質量。

其中 $Q = It = \text{電流(A)} \times \text{時間(秒)}$

$$\text{所以 } M = Z It$$

由此可得電極因化學反應所產生之生成物或被溶解之質量，其變化之速度係與電流和時間成正比。

(六) 電極除了因電解反應會發生溶解性的耗損問題外，在某些反應中電極表面會因作用而產生雜質或氧化膜等阻礙物，或電極附近的電解質濃度不同形成梯度，使得電流無法順利流通，必須靠提高電位來突破此一障礙，但是提高電位後不但未能改善反而更增大阻力，這種惡性循環的現象稱為極化。

(七) 在電極的溶解和極化問題之外，還必須探討海水的導電能力。假使海水的導電能力差亦即電阻值大，將會形成功率損耗而浪費能源。

$$\text{由 } R(\text{電阻}) = \rho(\text{電阻係數}) \times \frac{l(\text{兩電極間的距離})}{A(\text{電解液與電極接觸的截面積})}$$

$$\begin{aligned}\text{而 } L(\text{電導}) &= \text{電阻的倒數} = \frac{1}{R} \\ &= \frac{1}{\rho} \times \frac{A}{l} \\ &= K(\text{電導係數}) \times \frac{A}{l}\end{aligned}$$

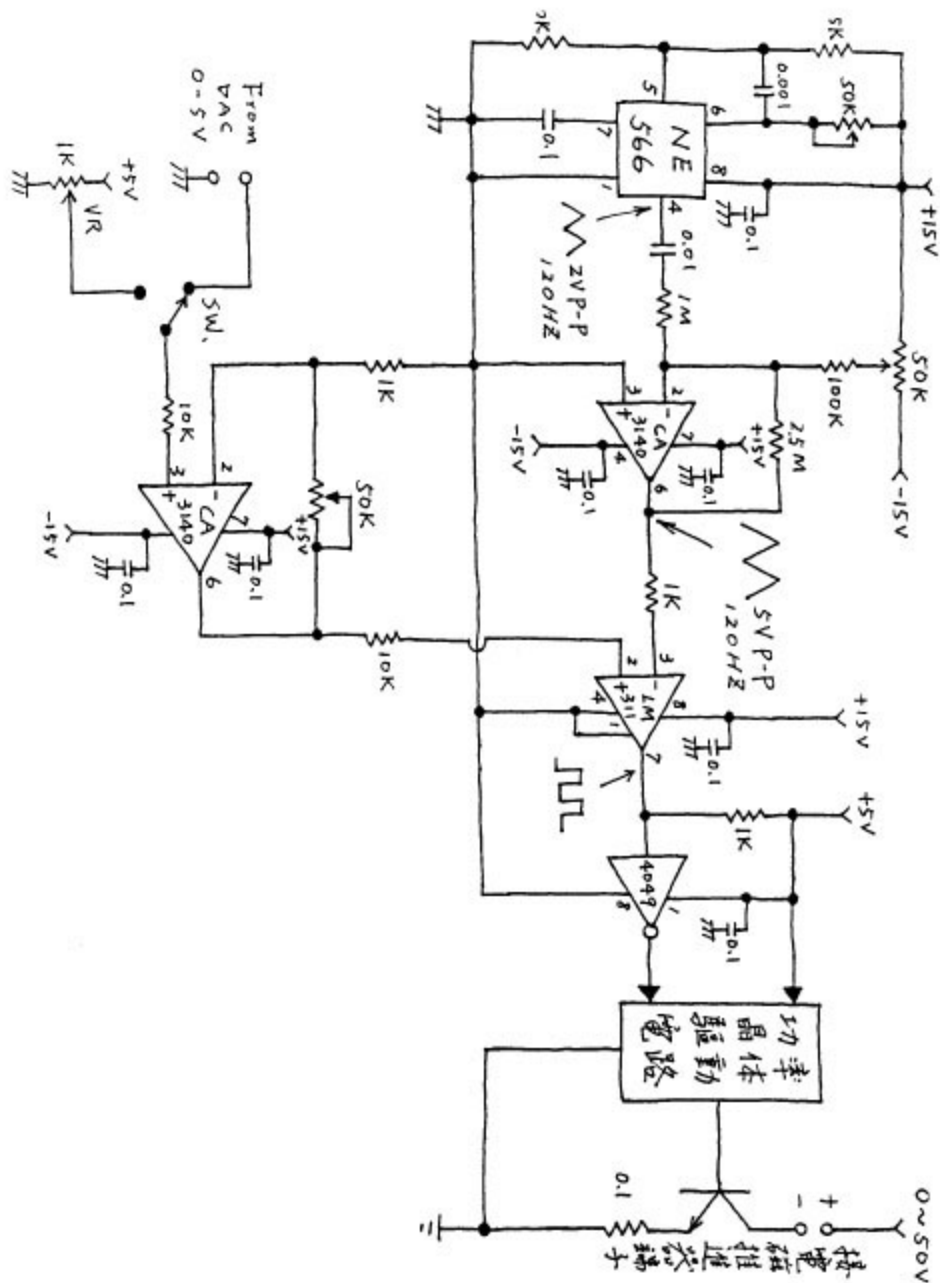
因此欲提高海水的導電率，可由加大電極極板的面積或減小兩電極間的距離來改善。

C. 電流控制單元：

這個部分是電磁船推進動力的核心，雖然在前節中我將電極電流比喻成由電池電位所供給的能量，但在實際的應用上並非如此單純，通常船上的電能會由引擎發電或核電裝置提供，但電磁船所需的直流電流還需經變流設備轉換，因此電力的效能和電流轉換的效率，都將是運轉成本應考量的。對於電流的控制係運用效率極高的PWM(Pulse Width Modulation)脈波寬度調變技術來操作功率晶體做Switching(開關式切換)控制。

(一) PWM的工作原理：首先利用波形產生IC，例如NS之NE566來產生三角波或者鋸齒波電壓，並輸入至比較器的反相輸入端(-)，而比較器的非反相輸入端(+)則輸入控制電壓，控制電壓為了配合下節電腦的控制，設計成0-5V的電壓位準。當控制電壓的電位超過了鋸齒波或三角波的電位時，比較器的輸出端將會輸出約等於+Vcc的電壓值，而控制電壓在低於鋸齒波或三角波的電位部分，比較器是無電壓輸出(零電位)，因此在鋸齒波或三角波的周期裡比較器輸出端的有效電壓值即等於脈波寬度所佔的比例值，當控制電壓為2.5V時，比較器輸出端的有效電壓脈波寬度佔了全周期的 $\frac{1}{2}$ ，因而有效電壓等於 $\frac{1}{2} V_{cc}$ 。

(二) 本實驗所製作的電流控制器之完整電路設備如圖C-1。



圖C—1 電流控制器電路圖

D. 電腦界面電路：

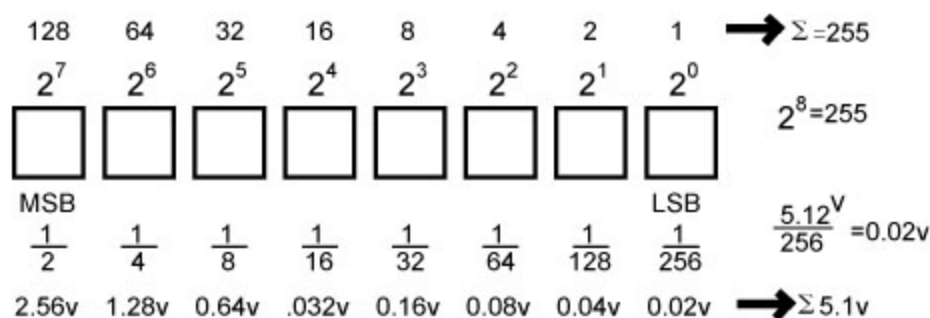
關於界面電路可分為下列三個單元：

1. PPI(Programmable Peripheral Interface)可規劃週邊界面。
2. DAC(Digital To Analog Converter)數位類比轉換器。
3. ADC(Analog To Digital Converter)類比數位轉換器。

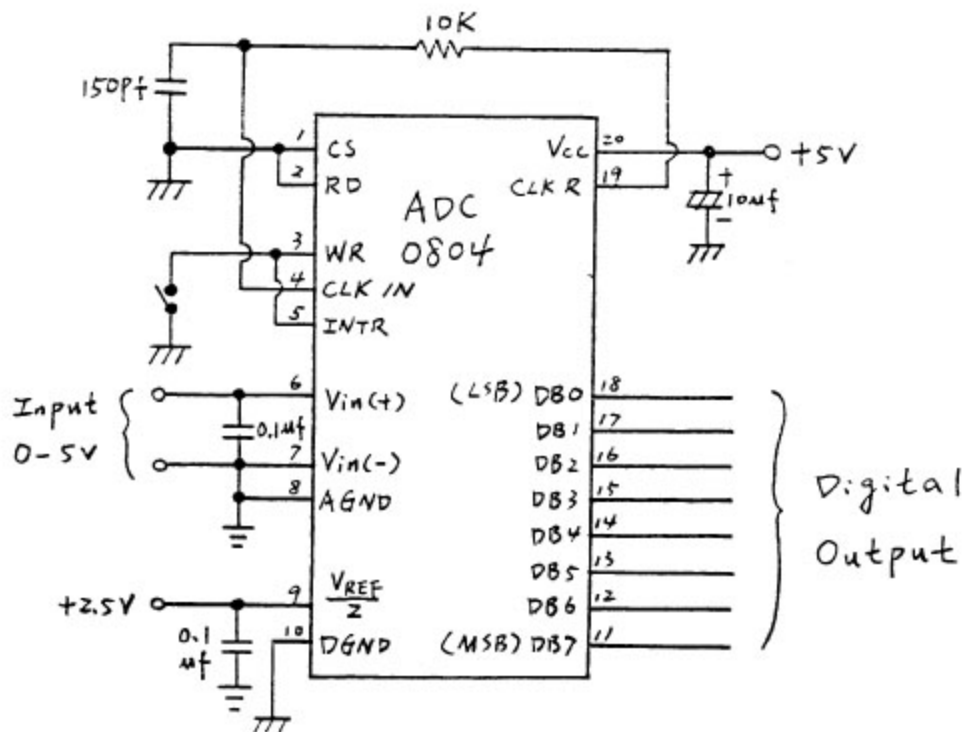
(一) PPI單元：PC等微電腦系統想要與週邊裝置聯繫或控制時，必須透過輸入／輸出的通道(I/O Port)來處理。在本PPI的製作單元，我採用兩顆Intel公司所開發生產的界面IC 8255，它是一顆並列式的I/O晶片，有A、B、C三個埠，可彈性規劃成輸入或輸出。在第一顆8255的A埠設定成輸出，以做為程式輸出電磁船的控制電壓。B埠設定成輸入，以便監視電流控制器上的控制電壓值。C埠設定成輸出埠，以控制電磁船的前進或後退。第二顆8255只用B埠並設定成輸入，並監看電磁船推進的電流值。

(二) DAC單元：因為電腦只能處理數位訊號，而日常生活中舉凡溫度、壓力、重量、速度、電壓等均屬類比訊號，所以想要由電腦對類比訊號做控制，必須透過DAC的轉換才能達成。由於本電磁實驗船的控制電壓為0-5V，而所使用的DAC為NS公司的八位元R-2R階梯式的DAC(0800)，所以8位元會有 $2^8=256$ 階LSB(Lowest Significant Bit)，每一個LSB的電壓解析度為 $\frac{5V}{256-1} = 0.0196V$ ，此為執行電腦程式的重要數值。

(三) ADC單元：電腦系統既然只能處理數位訊號，如果要處理類比式的訊號時，必須由DAC的轉換。在電磁船推進實驗裡，為了能監視控制電壓的狀態和推進電流的數據，分別製作了兩組ADC電路。在ADC元件部分係使用NS公司的八位元逐次漸近式IC(ACD0804)，其工作原理如圖D-2a，電路圖如D-2b。



圖D—2a 八位元ADC轉換原理



圖D—2b 八位元ADC 0804電路圖

E. 電腦控制程式：

在程式部分我用C語言(Turbo C 2.0)寫了兩支程式，分別命名為Updown及Output。Updown程式的功能好比油門和換檔，利用鍵盤↓↑鍵來操作縱電磁船加速或減速，由F.R鍵做前進或後退，並透過感測轉換電阻將控制電壓值和推進器驅動電流值傳回程式做為監視之用。Output的程式則可直接下達驅動電流值來驅動船，為了避免誤鍵數值造成驅動電流過大，因此在程式裡加上了回授控制，使得驅動電流被限制在安全範圍而獲得保護。

四、研究結果

A. 導電度實驗：

這個部分係就容易取材的銅和鋁金屬做為電極，進行海水導電測試，觀察其阻抗的變化情形，以做為電流設計的主要依據。

(一) 電極均裁切成寬度1.2cm長度8cm厚度1.5mm之長條形狀，取海水1200cc，置於15cm×10cm×8cm的容器中，電極在測試時將沈浸於溶液中5cm，以符合所設計製作的電磁推進器的極板實際接觸溶液的面積。

(二) 銅片電極在濃度3.5%之海水中水溫24.3℃，電極間距分別為1~5cm時量測並經換算成電阻值。由此可看出當電流逐步提升（每階0.1A）至2.3A左右時，電流出現不穩定現象，其電阻值呈現上下不規則變化，電流再繼續上升至3A左右時電流立刻下降而中斷，經觀察電極上有很嚴重的化學反應生成物，這個現象就是由電極極化所造成，因此銅電極將不適合做為海水之導電極。

(三) 鋁片電極在上述條件下所測得之電阻數據，並將其轉繪成電流—電阻圖形以便於觀察，由此可見電阻值的變化非常平緩漸近，顯示其導電性良好，電流通平順沒有極化反應，因此鋁電極可做為本實驗船的導電極。

(四) 為了進一步了解為何銅極在海水中會有極化作用，究係銅構造的因素，抑或海水成分所造成，因此再進行其他導電液—硝酸鉀的電解實驗。

(五) 鋁片電極和銅片電極在0.5M濃度之硝酸鉀溶液中之電阻值，同時也轉繪成曲線圖5-2，由此可看出銅極並無極化現象。

B. 電極溶解速率實驗：

這個部分針對電極在導電過程中，因電解反應所發生溶解耗損之量測。

(一) 鋁電極在海水中通電5A經25分鐘所溶解質量之速率：

$$3.1\text{g}-2.2\text{g}=0.9\text{g}$$

$$0.9/5\times 25=0.0072\text{g/A}\cdot\text{min}$$

(二) 鋁電極在硝酸鉀溶液通電5A經25分鐘所溶解質量之速率：

$$3.1\text{g}-2.15\text{g}=0.95\text{g}$$

$$0.95/5\times 25=0.0076\text{g/A}\cdot\text{min}$$

(三) 銅電極在硝酸鉀溶液通電5A經25分鐘所溶解質量之速率：

$$16.9\text{g}-14.7\text{g}=2.5\text{g}$$

$$2.5/5\times 25=0.02\text{g/A}\cdot\text{min}$$

(四) 由此實驗可比對出鋁電極除了不會與海水發生極化作用外，其溶解速率亦較銅電極為優只有銅的三分之一，至於其他導電性能更佳而溶解耗損更少的材料或合成金屬等，將是日後可繼續找尋和研究的目標。

C. 在磁場作用下之導電實驗：

電磁船推進器利用海水傳導電流，但在磁場的作用下產生流體推力，因此海水在電極間是流動的，在此情況下其導電度、阻抗變化和電極的溶解速率等是否和先前所做靜態實驗有所差異，經由本項實驗可獲得印證。

(一) 依照前節圖A-1的架構，構成一支無磁場的電極導管和另一支有磁場(約2500高斯)的電磁導管，分別置於海水容器裡。

(二) 通入直流電後，由於電解反應所產生的氫氣在導管內形成氣泡影響電流流動，因此阻抗的變化較不平順。但是在有磁場作用的電磁導管裡，因為流體的推力使得氣泡較易排出，因此電流變動的幅度較小。

(三) 由於電極在導管內與海水接觸的面積受限於導管開口的面積，因此其阻抗值較前開放式實驗之數據為高。

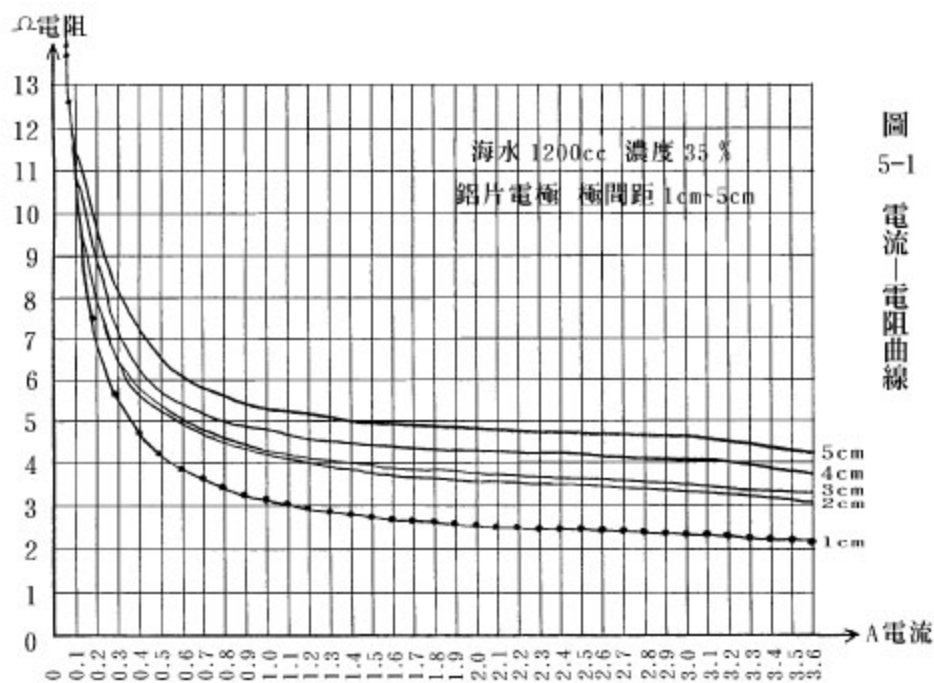
(四) 兩隻導管上的電極(鋁)在通電5A經12分35秒所溶解之速率同為：

$$3.6\text{g}-3.15\text{g}=0.45\text{g}$$

$$12\text{分}35\text{秒}=12.58\text{分}$$

$$0.45/5 \times 12.58 = 0.00715\text{g/A-min}$$

與前節靜態測試之 0.00712g/A-min 幾乎相同，由此可印證法拉第之電解定律。



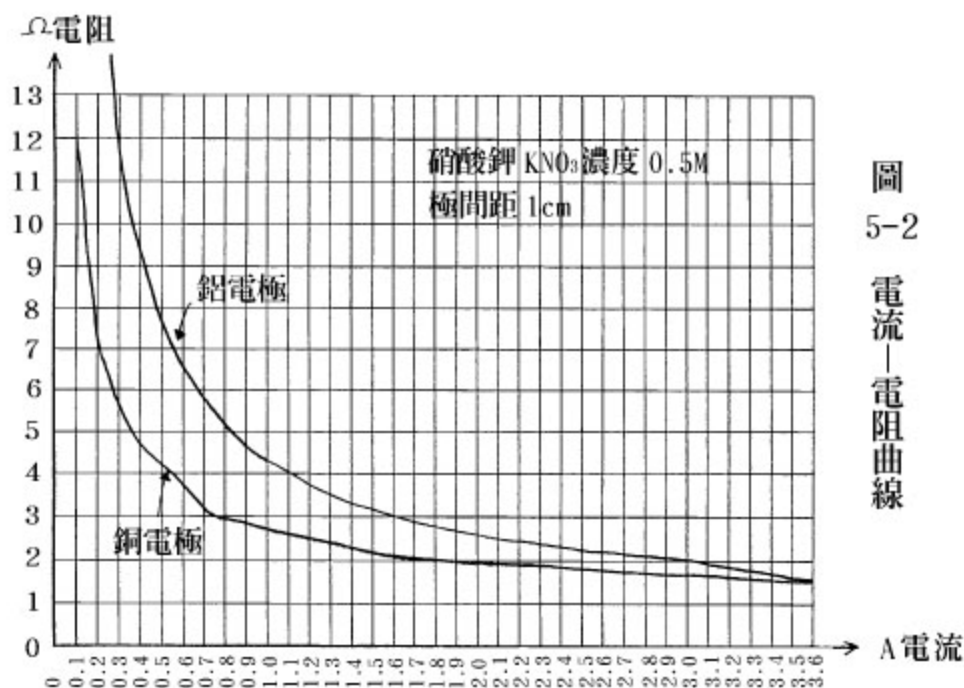


圖 5-2
電流—電阻曲線

D. 推進實驗：

(一) 第一組推進器之導管開口截面積為 $1.3\text{cm} \times 1.6\text{cm}$ ，長度為 7.2cm ，磁極磁通約為3000高斯，鋁片電極之導電面積（與海水接觸面積）為 $1.3\text{cm} \times 4\text{cm}$ ，重量為108g。

(二) 第二組推進器之導管開口截面積為 $1.3\text{cm} \times 1.6\text{cm}$ ，長度為 5cm ，磁極磁通約為3000高斯，鋁片電極之導電面積（與海水接觸面積）為 $1.3\text{cm} \times 3\text{cm}$ ，重量為103g。

(三) 將以上兩組推進器分別固定於玩具船之船殼底部，船殼長度為 17.5cm ，寬度為 7cm ，深度為 3cm ，重量為45g。

(四) 推進實驗所使用之水槽示意如圖，船體以 10cm 之集電連桿套於水槽中心的導電軸上，當導電軸通入電流後，船體將依電流大小繞軸心快慢行進。

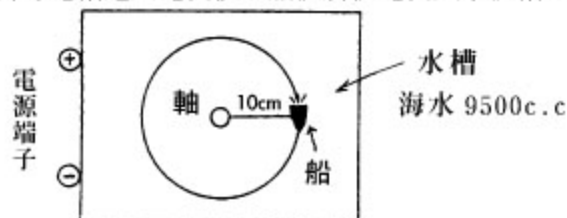
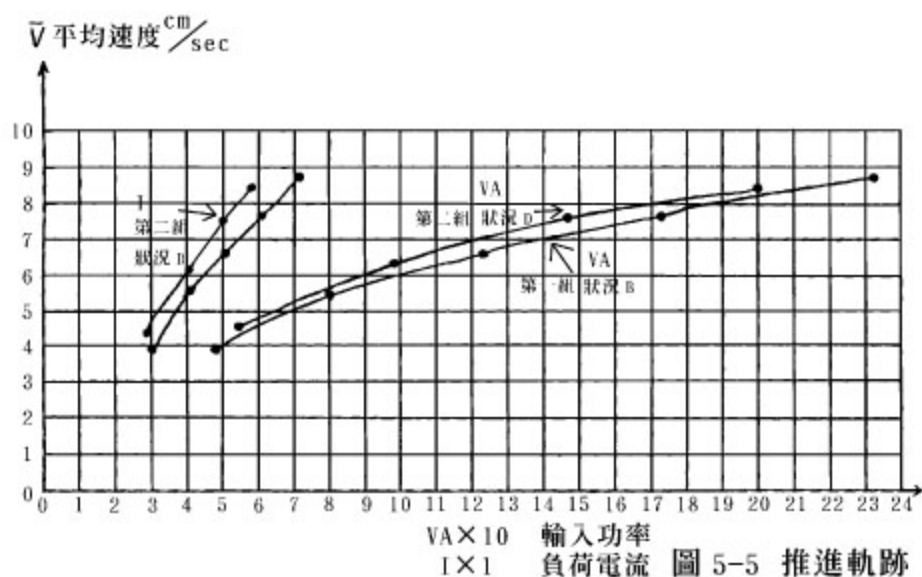
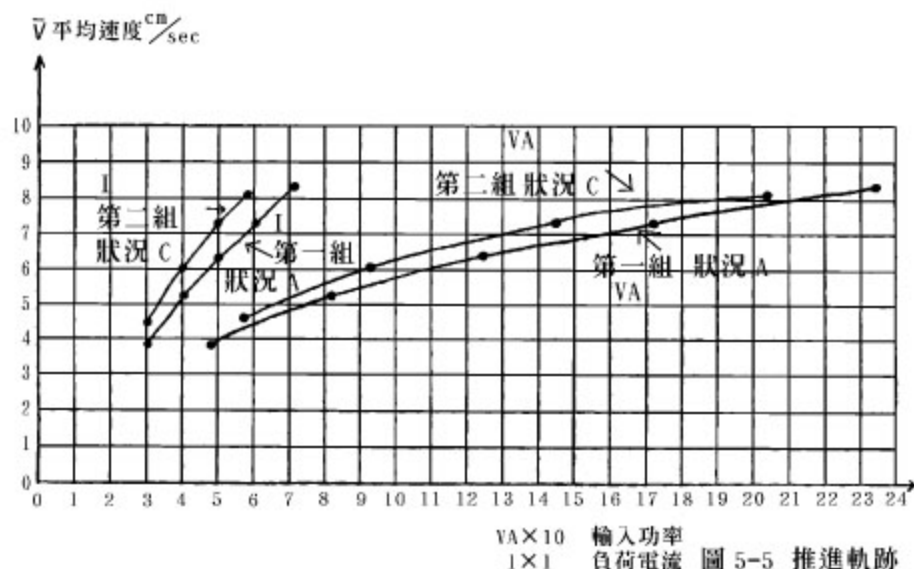


圖5-3推進實驗水槽示意

(五) 兩組推進器分別就正轉（順時鐘方向）和反轉（反時鐘方向）依不同電流值進行速度量測。

(六) 將量測數據描繪成圖5-4及圖5-5之電流—速度和功率—速度圖形，從圖中可看出電流—速度的軌跡幾乎成直線性變化，若將本實驗中船可能遭遇的各項阻力排除不計，意即理想狀況，因此由速度與電流所呈現之線性關係，進而可得出推力亦與電流呈線性正比之結論，即使在此次的實驗由於缺乏推力量測儀器以致無法正確的量度推力數據以便推導或驗證相關的公式。

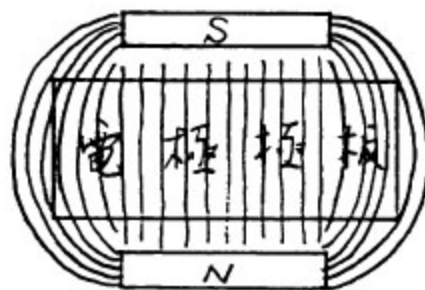


五、討論

(一) 在前節中曾經談論到電極因直流電的電解作用，引起電極表面產生氧化膜或其他雜質，以致電阻值增加形成電阻極化，或者因電極附近的電解質濃度不均勻形成梯度而造成濃度極化，這些現象惡性循環終至電流無法流通而失效，因此改善電極極化的研究將是一項非常重要的課題，惟此可能涉及深奧的材料科學，非我目前能力所能及，只能就此表述期望能有專家教授不吝指導。除此外尚有一點是可以思考和嘗試的，就是極化原因既因直流電所產生，那麼採用交流的方式如何？由於交流電流係隨時間由正值到負值交替變化，因此在正負周期裡電流與磁場作用所產生的作用力因為互為反向而抵消，所以無動力輸出，假使將磁場改為交變方式並和電流取得同步時應該可以解決極化問題。

(二) 銅具備良好的導電性能（軟銅導電率100%，硬銅97%），所以電的傳導大多用銅做為導體，因此在本製作時便很自然的成為電極材料，然而由於極化的作用影響了電流的導通無法產生作用力，因此相關的工作無法進行，幾乎宣告失敗，然在準備放棄前嘗試以鋁做為電極而獲突破，鋁之導電率只有61%不及於銅，卻能順暢地導通電流也無極化現象，究其原因係因鋁與銅皆為金屬其活性皆大於溶液中之任何離子，而在電解質導電時，負極由外界得到電子，所以正極必須失去電子以維持平衡，此一過程便由金屬極板來完成。失去電子的銅原子，便形成藍色的銅離子溶於溶液中，銅離子在與水中的氫氧根結合，形成氫氧化銅，氫氧化銅為一藍色不導電黏稠狀物質，附著於極板表面造成極板與水的接觸面積減少，此現象即為極化現象，漸漸地極板間就無法再導通電流，由此可知銅在本實驗中並非良好的極板材質。鋁原子在電解反應成鋁離子與水中的氫氧根結合，形成氫氧化鋁，氫氧化鋁為一白色狀滑膩固體（泡沫滅火器的主要成份），不會附著於正極極板上產生極化作用，因此電流通路流暢。

(三) 從推進軌跡圖5-4及圖5-5，可看出第二組的軌跡位於第一組的上方，顯示在相同速度下，第二組可較第一組使用較少的電流，例如第一組狀況A和第二組狀況C，分別用6.11A和5A之電流驅動正轉，卻得到相同的速度（7.23cm/sec和7.28cm/sec），這項結果豈不違反了速度（推力）應與電流成正比的定律。經檢討第一組的極板面積為1.3cm×4cm，第二組為1.3cm×3cm，第一組雖較第二組多出1.3cm×1cm之面積，但是這個部分超出磁極涵蓋範圍，以致磁極與電流非正切角度，如下圖，所以無法產生最大推力，反而浪費功率，因此電流和磁場在配置和分佈上亦是非常重要的。



極板與磁極配置

七、結論

電磁船推進器係憑藉著海水的導電性，使得離子可以定向移動而傳輸電荷，因此電流在電極和海水間形成連續，進而與磁場交互作用產生電磁力推動海水而行進。利用電磁力做為船舶動力，因其不需使用螺旋槳類的旋轉機構，所以不會發生震動和噪音，前進和後退的控制只需輕易的改變電流或磁場的方向即可。由於電與磁反應快速操控靈敏，是非常理想而值得研發的新種力，若是應用在潛艦方面更是具有軍事價值的。

在航空器方面，由於空氣非屬導電物質，似乎不具可行性，但是天下事沒有絕對的能與不能，而在於對自然和未知現象的探索與發覺，就以去年獲得諾貝爾物理獎的崔琦教授為例，他以「分數量子霍爾效應」的電磁研究獲獎外，尚在進行一項利用微波解決「接面電阻」的研究，使得電力傳輸可以不必經由導線而由空氣傳送，假使這項研究有朝一日成為可行，那麼電磁航空動力的應用也不無可能，相信電磁的研究會有無限發展的空間。

最後由於這次電磁船推進器的研究牽涉範圍甚廣，它包含了電磁學、電化學、力學、電子電路、電腦界面和程式寫作等，使得研究過程和時間相當緊湊備感壓力，所幸終究能達成預期目標，完成了一次豐富的研究之旅。

八、參考資料

- (一) 電化學—熊楚強、王月主編文京圖書公司。
- (二) 電工原理—樊哲智譯—東華書局。
- (三) 物理—林樹枝編著—文京圖書公司。
- (四) Turbo C徹底剖析—洪錦魁—文魁出版社。
- (五) 微電腦I/O與介面控制實務—鄭美珠、林永裁編著—益眾資訊公司。

(六) 圖解類比IC大全—白中和譯—建興出版社。

(七) NS Databook。

(八) 牛頓雜誌第60期及107期。

評語

本作品係以固定磁場與電解液中電荷之作用力，產生對船體之推力，將此原理在模型船上實作印證，並設計電腦作驅動控制之硬軟體，製作完整，且能具體展示其功能。此作品之觀念新穎，研究過程中還對導電度、電極溶解速度、及推力等進行實驗，符合科學研究精神。以國中程度而能完成這種頗具難度的研究，確是難能可貴。

