

中華民國第 54 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國小組 物理科

佳作

080109

航向未來－羅倫茲力電磁船

學校名稱：臺南市永康區崑山國民小學

作者：	指導老師：
小六 賴彥妤	沈聰男
小六 王柏鈞	羅俊男
小五 張庭梧	
小五 周秉陞	
小五 毛筠茜	

關鍵詞：電解、電極、羅倫茲力

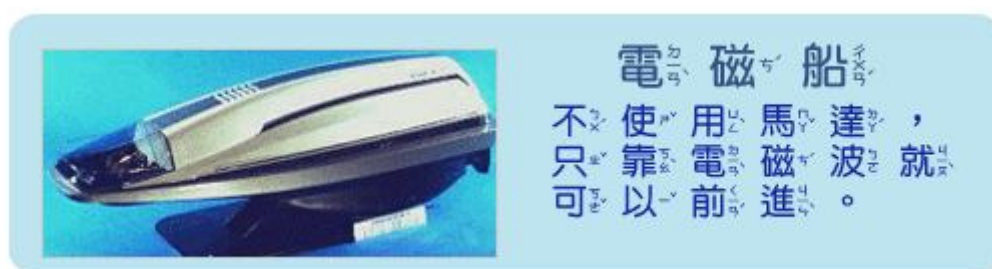
航向未來—羅倫茲力電磁船

摘要

電磁船是一種性能優異的未來船艦。在各個先進國家陸續展開電磁船研究的同時，我們也嘗試利用自己動手做的實驗模型、裝置來進行電磁船動力性能的探究、分析。實驗發現：電極材質的種類會造成電磁船推進力和電極損耗的差異。各種實驗材質中以鋁-銅電極的推進力最為理想；石墨-銅電極在損耗方面最具優勢。實驗變因中，電流、電極表面積、磁鐵數量都和推進力呈正相關；電極間距、電極寬/長比值和電磁推進力則呈負相關。其他的環境變因如海水鹽度、溫度以及船本身的推進角度對於電磁船的動力性能也都有一定程度的影響。

壹、研究動機

如果你看過宮崎駿的動畫崖上的波妞，相信你一定會被小男孩宗介手上的那一艘可愛的玩具船所深深吸引吧！打造一艘屬於自己的玩具船一直是大家的夢想，原本大家想要動手做一艘簡單的橡皮筋動力船，就在上網搜尋船艦造型的時候，無意中在臺灣港務股份有限公司花蓮港務分公司兒童版的「輪船的家」網頁裡發現了一艘造型相當奇特的「電磁船」模型。



圖一、電磁船模型(取自網站~<http://www.hlhb.gov.tw/child/main3-2.html>)

(※註：原網站資料有誤，應將說明中之電磁波改為→**電磁力**)

一開始，大家只是被它充滿未來感的酷炫外型所吸引，對於它的性能特點一無所知。直到上網搜尋更多相關的資料才知道，上圖的模型原來是全世界第一艘超導電磁船「大和一號」。自從 1992 年它在日本成功試航之後，美國、中國也陸續跟進，展開了超導電磁船的研究。

「電磁船」究竟有什麼樣獨特的魅力？為什麼上自科學界、下至武器迷都一致推崇電磁船的優異性能，看好它會成為未來新世紀船艦的主流？讓我們也來試著一探究竟吧！

貳、研究目的

- 一. 利用自製模型及實驗平台探討不同電極材質對於電磁船推進力的影響。
- 二. 探討不同電極材質對於電磁船電極損耗的影響。
- 三. 探討電極材質進行異質配對後對於電磁船推進力的影響。
- 四. 探討電極材質進行異質配對後對於電磁船電極損耗的影響。
- 五. 探討電流強度對於電磁船推進力的影響。
- 六. 探討不同的海水鹽度對於電磁船推進力的影響。
- 七. 探討不同的海水溫度對於電磁船推進力的影響。

- 八. 探討磁鐵數量對於電磁船推進力的影響。
- 九. 探討電極表面積對於電磁船推進力的影響。
- 十. 探討電極間距對於電磁船推進力的影響。
- 十一. 探討不同的電極形狀對於電磁船推進力的影響。
- 十二. 探討電磁推進角的大小對於電磁船推進力的影響。
- 十三. 綜合各項實驗結果，進行電磁船電極的效能評估。

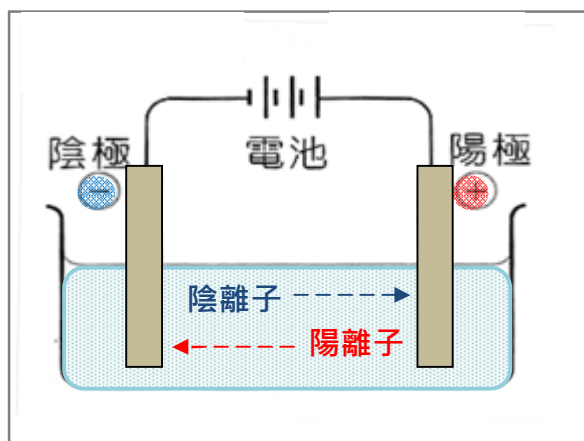
參、研究設備及器材表

模型電磁船主零件	保利龍板、電池、強力磁鐵、電極片(鋅、鋁、鎳、鐵、銅、石墨等材質)、銅質導線
實驗平台	壓克力水槽、直流電源供應器、三用電錶、碼錶、電子秤、砝碼、定滑輪、魚線、漆包線、溫度計
模擬海水	粗海鹽、瓶裝純水、磅秤

肆、研究過程、構想與問題解決

一. 相關文獻探討：

- (一) 在五下的「水溶液的性質」單元裡，我們已了解到食鹽水是一種電解質溶液，通電後可以傳導電流，讓 LED 發亮。
- (二) 海水的表面溫度分布在一 2°C ~ 40°C 之間；水中含有許多溶解鹽類，其組成以鹹味的氯化鈉和苦味的氯化鎂含量最多；而海水的鹽度則依海域的降雨量、蒸發量而略有不同，分布的範圍大致在 30‰~40‰之間。
- (三) 如果我們在食鹽水溶液中放入兩片導體當做電極板，再外加電源予以通電，則食鹽水裡被解離的陽離子(氫離子、鈉離子)以及陰離子(氯離子、氫氧根離子)便會因電性的吸引或排斥而分別往陰極和陽極移動，而這種帶有電荷的離子流動便使得食鹽水形成電流的通路，這也就是海水導電的原理。

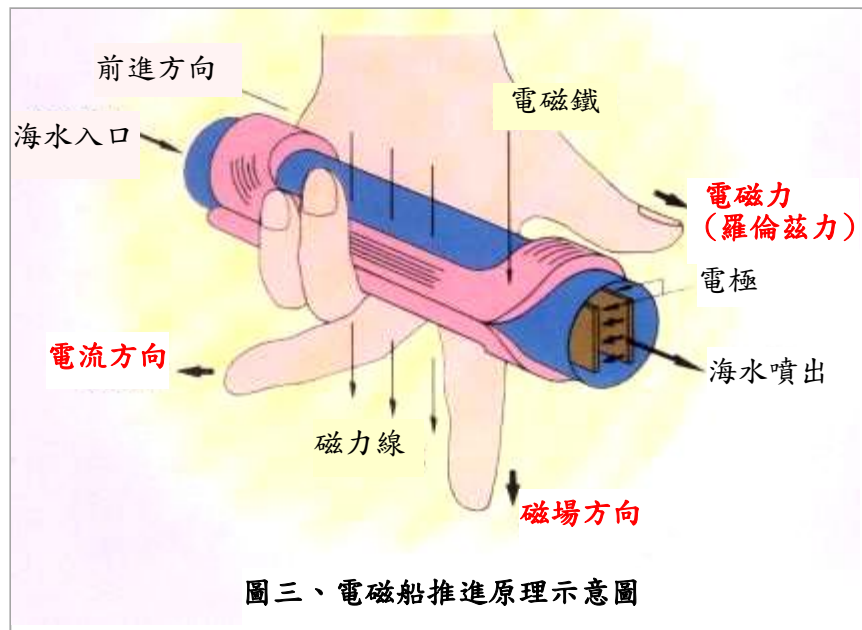


圖二、電解裝置圖

(四) 在六上「奇妙的電磁世界」單元中，我們已學過「安培右手定則」，了解到導線通電後會在導線周圍產生磁場，對於電磁鐵的原理也有了基本的認識。

(五) 電磁船的推進原理：

電磁船的設計原理來自「佛萊明左手定則」。利用了海水的導電特性，當電極通電以後，介於陽-陰兩極之間的海水就等同於一根根細微的通電導線，而這些電解海水所產生的電流，與船體下方垂直方向的磁場相互作用，就可對海水產生水平推進的電磁力(羅倫茲力)，推動海水而使船身前進。



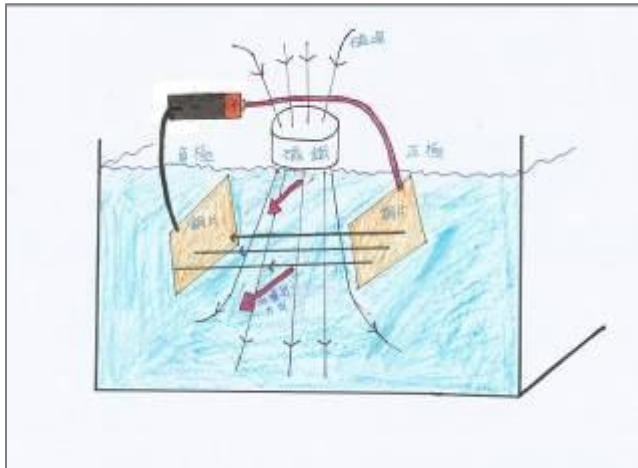
(原圖取自：<http://tw.knowledge.yahoo.com/question/question?qid=1010011103318>)

(六) 電磁船的優點：

1. 傳統船艦的故障以油電系統和機械故障最為常見；電磁船使用電能不用燃油，除了電路故障問題之外，發生機械故障的機率可說是微乎其微。
2. 由於取消了齒輪系、軸系等傳動部件，電磁船的航行過程極為安靜，沒有振動和噪音現象。
3. 只要能控制磁場強度和極板間電流的大小和方向，就能迅速控制船的航速和航向，減少海上事故發生的機會。

二. 實驗初步構想：

- (一) 瞭解電磁船的推進原理之後，我們發現：電磁船的結構其實比想像中簡單—只有「電磁推進器」和「船身」兩大部分。其中的「電磁推進器」就是電磁船的動力核心，它是由電源、電磁鐵和電極片所組成。
- (二) 一般線圈做成的電磁鐵即笨重、又耗電，那麼，我們利用鈎鐵硼強力磁鐵來替代是否可行？
- (三) 如果強力磁鐵可行的話，我們只要在磁鐵下方安裝兩片金屬片做為電極，並以絕緣膠帶將彼此的金屬部分隔離，以避免短路，就可組裝好一個簡單的電磁推進器了。



圖四(a)、電磁推進器構想圖



圖四(b)、簡易的電磁推進器

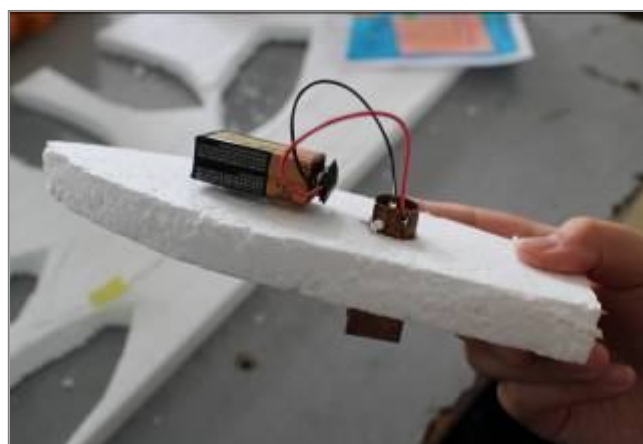
(四) 再將電磁推進器、9V 電池固定在保利龍船身上，一艘自製的電磁船就可大功告成了！問題是…構造這麼簡單的小船，它真的能在水中航行嗎？



圖五(a)、船身製作

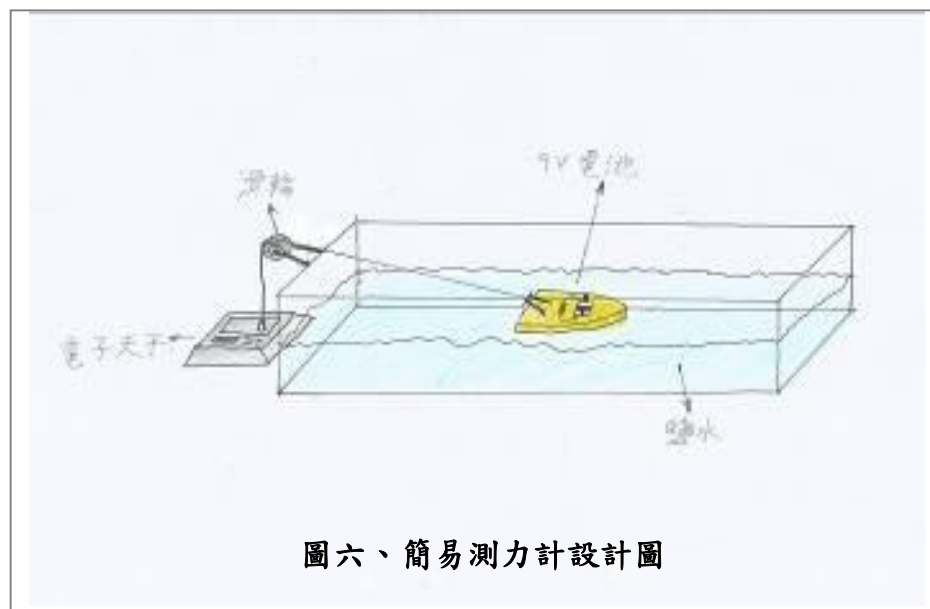


圖五(b)、組裝電磁推進器及電路



圖五(c)、完成的電磁船(原始版)

(五) 爲了測試電磁船的推進力，我們還需要一個壓克力水槽做爲實驗平台，水槽外必須加裝一組簡易測力計。它是由一個定滑輪、砝碼和電子秤所組成(構想圖如下)。



圖六、簡易測力計設計圖

(六) 雖然實際的海水鹽度只有 30‰~40‰，但如果增加鹽度能有效提昇電磁船的推力的話，未來在船隻的海水導入口加裝高速蒸發器來提高海水鹽度並非不可能。因此，我們將實驗的鹽度範圍設定在 30‰~80‰之間。

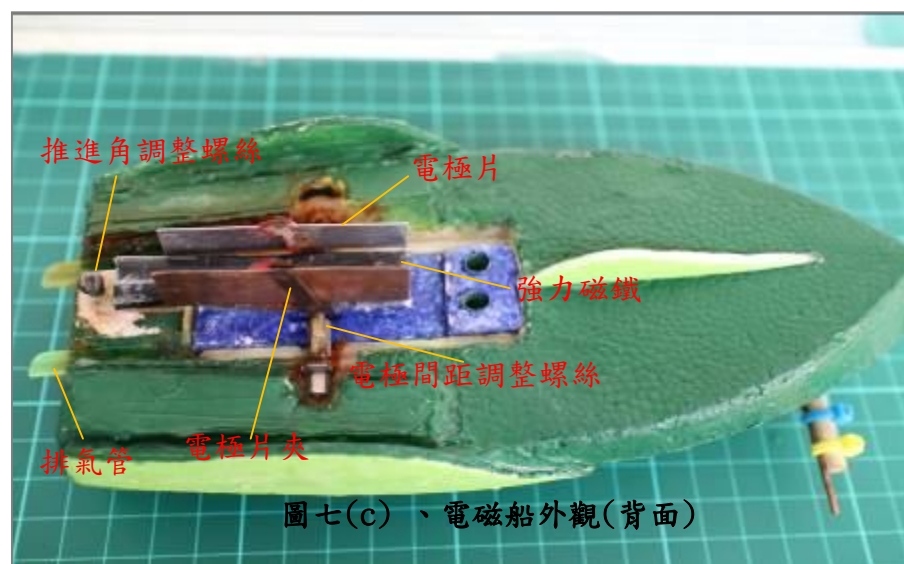
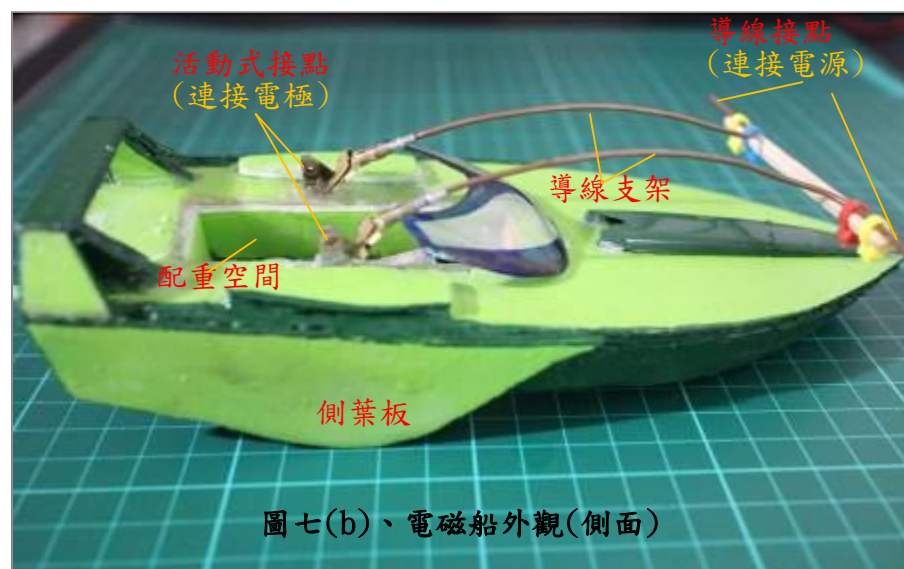
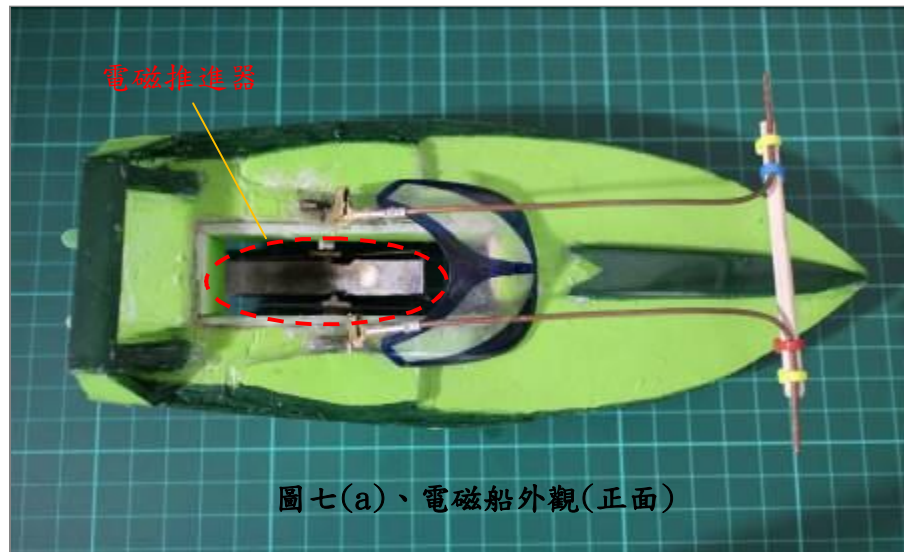
三. 實驗瓶頸與解決方案：

部件	問題點	解決方案
9V 電池	<ol style="list-style-type: none"> 電流量不足以驅動模型船 消耗量很大，實驗一段時間，電力輸出就明顯遞減 為了確保推力穩定，「大和一號」採用恆定電流源來控制電極的通電，但電池供應的電流無法維持恆定，也無法調控 電池本身的重量就重達 46 公克，對於船身而言，是一個沉重的負荷 	<ol style="list-style-type: none"> 串 / 並聯多個電池(過重，不可行) 電源改為外接式直流電源供應器 以細漆包線連接
電磁推進器	<ol style="list-style-type: none"> 只看得見電解反應的氣泡，但看不到明顯的推進效果 單一推進器效果較差 	<ol style="list-style-type: none"> 嘗試加大磁鐵尺寸 嘗試加大電極片面積 嘗試加大電源 改成雙推進器(未成功)
電極片材質	<ol style="list-style-type: none"> 網路資料查不到「大和一號」究竟使用何種材質的電極？ 合金的性質太複雜；金、銀、鉑等金屬太貴重 	<ol style="list-style-type: none"> 採用市面上容易取得的單質導體(鋁、銅、鋅…)

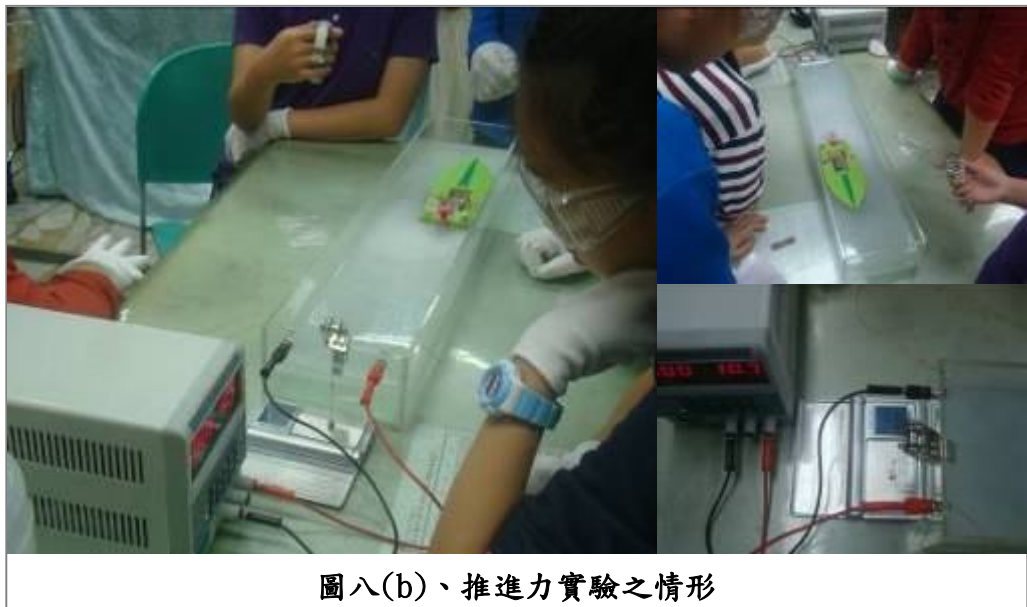
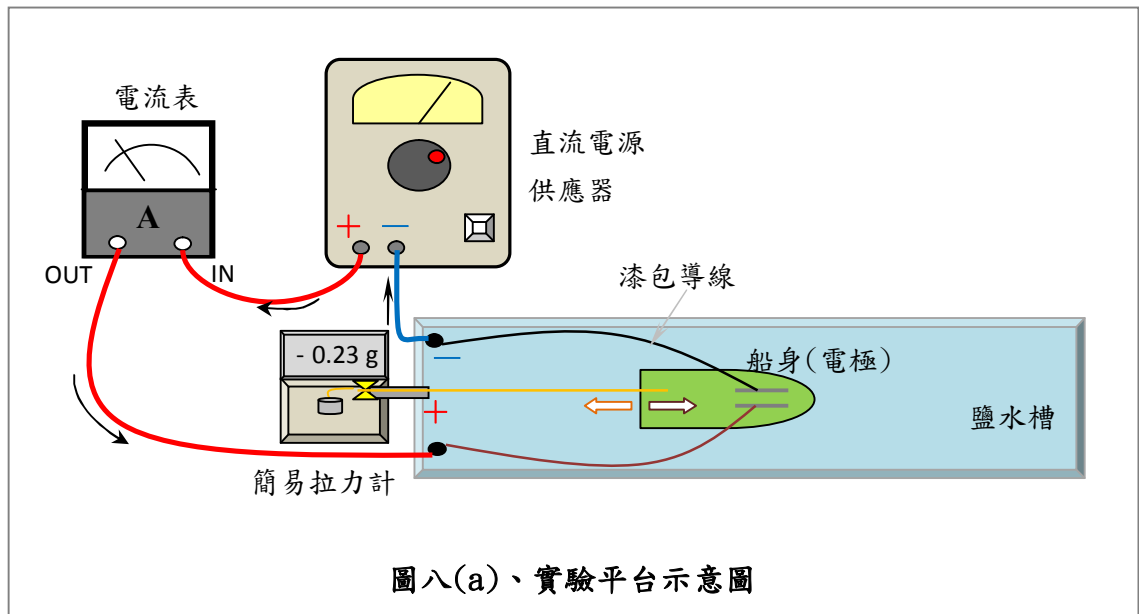
伍、研究方法與結果

一. 實驗架構：

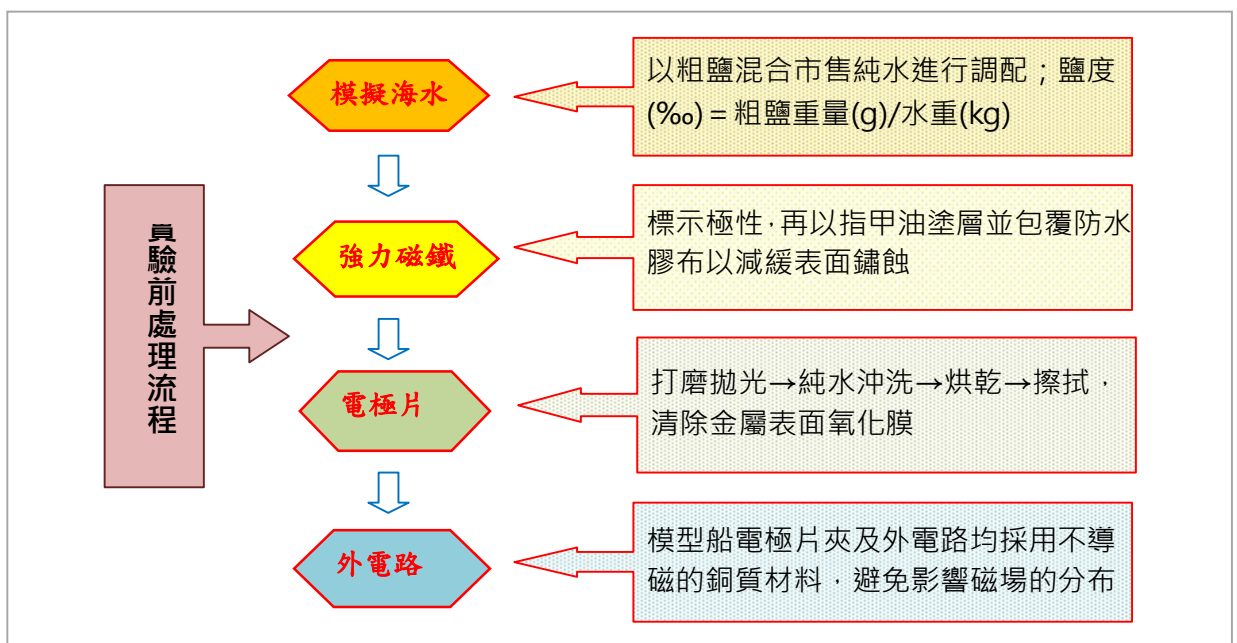
(一) 電磁船模型(實驗改良版)：

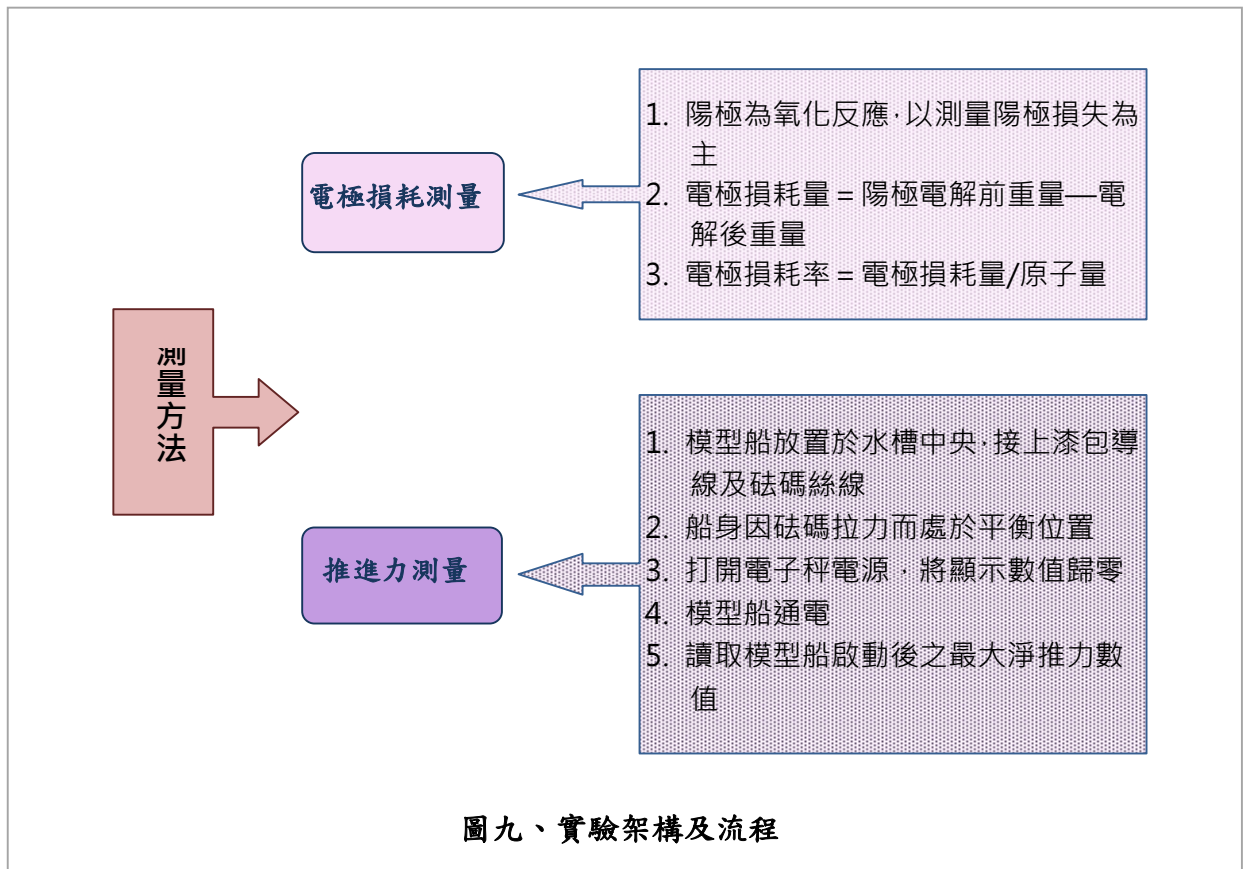


(二) 實驗平台：

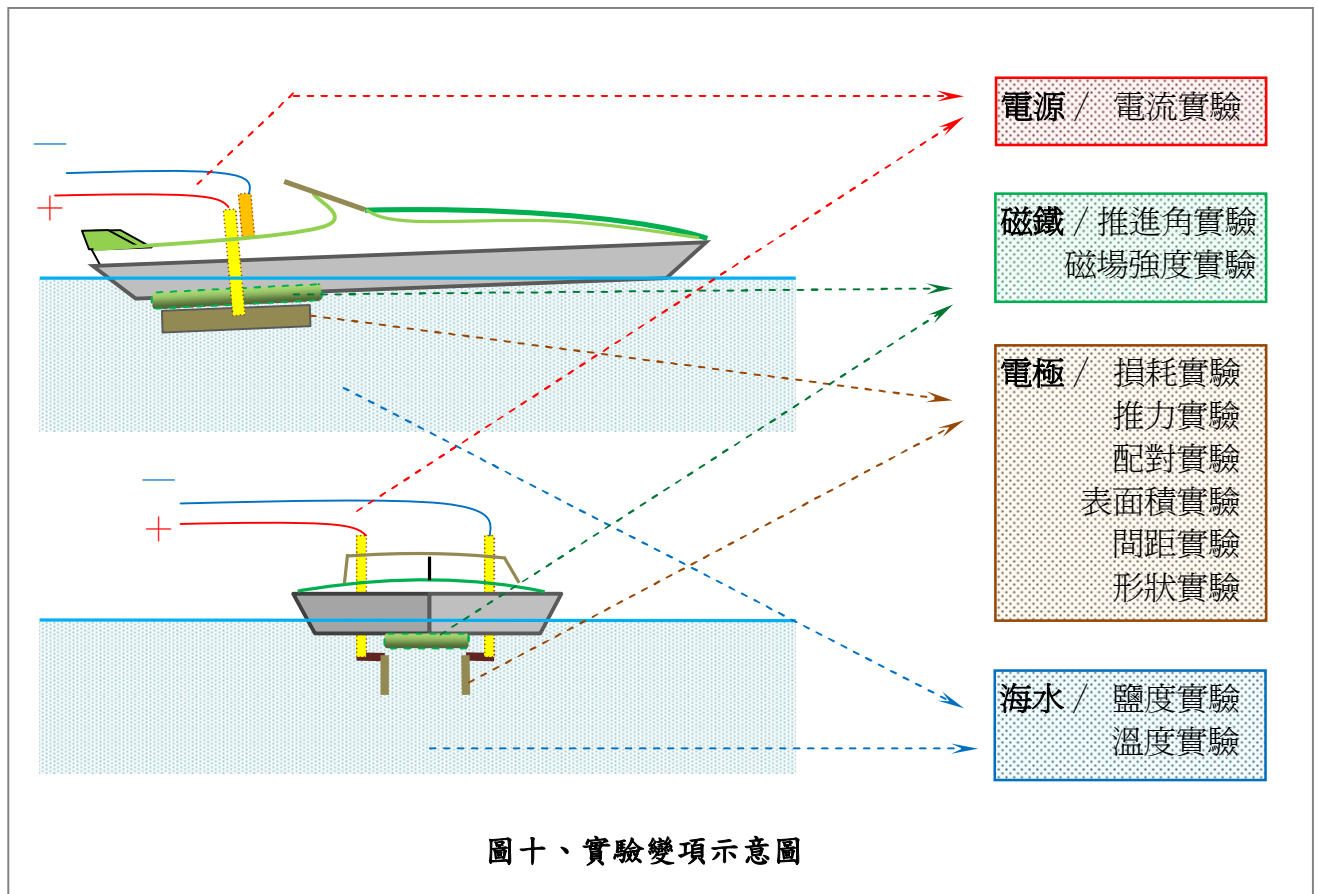


(三) 實驗流程：





二. 實驗變項：



編號	實驗主題	操作變項	控制變項	結果變項
1	不同電極材質 推力實驗	不同之電極片材質 (陽-陰極同質)	電流、海水鹽度、電極表面積、間距、 磁鐵型式、數量、船重、推進仰角	電磁船 推進力
2	電極損耗實驗	不同之電極片材質 (陽-陰極同質)	通電時間、電流、海水鹽度、電極表 面積、間距、磁鐵型式、數量	電極耗損量 耗損率
3	電極異質配對 推力實驗	不同之電極片材質 (陽-陰極異質配對)	電流、海水鹽度、電極表面積、間距、 磁鐵型式、數量、船重、推進仰角	電磁船 推進力
4	異質配對電極 損耗實驗	不同之電極片材質 (陽-陰極異質配對)	通電時間、電流、海水鹽度、電極表 面積、間距、磁鐵型式、數量	電極耗損量 耗損率
5	電流 - 推力實 驗	不同之通電電流	海水鹽度、電極材質、表面積、間距、 磁鐵型式、數量、推進仰角	電磁船 推進力
6	海水鹽度 - 推 力實驗	不同模擬海水之鹽 度	電流、電極材質、表面積、間距、磁 鐵型式、數量、推進仰角	''
7	海水溫度 - 推 力實驗	不同模擬海水之溫 度	電流、海水鹽度、電極材質、表面積、 間距、磁鐵型式、數量、推進仰角	''
8	磁鐵數量 - 推 力實驗	不同數量之強力磁 鐵	電流、海水鹽度、電極材質、表面積、 間距、磁鐵型式、船重、推進仰角	''
9	電極表面積 - 推力實驗	不同之電極面積	電流、海水鹽度、電極材質、間距、 磁鐵型式、數量、船重、推進仰角	''
10	電極間距 - 推 力實驗	不同之電極間距	電流、海水鹽度、電極材質、表面積、 磁鐵型式、數量、推進仰角	''
11	電極形狀 - 推 力實驗	不同之電極形狀	電流、海水鹽度、電極材質、表面積、 間距、磁鐵型式、數量、推進仰角	''
12	電磁推進角 - 推力實驗	不同之推進仰角	電流、海水鹽度、電極材質、表面積、 間距、磁鐵型式、數量	''

三. 實驗設計：

【實驗一】 不同的電極材質種類對於電磁船的推進力是否會有差異？

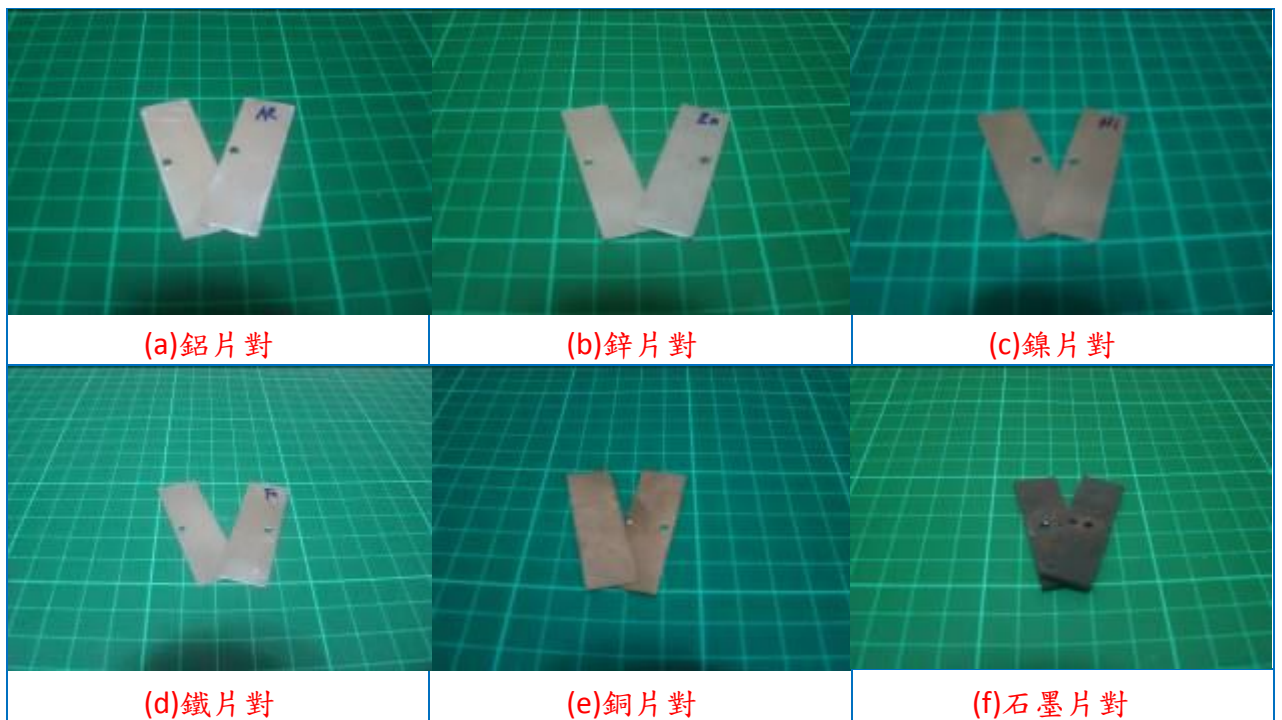
(一) 實驗方法：

1. 變因設定：

- (1) 操作變因：電極材質→ 銅片、鋁片、鎳片、鐵片、鋅片、石墨片等六種電極對，陽-陰極採用同質材料
- (2) 控制變因：A 電源→ 直流 5 安培，恆定電流輸出
B 模擬海水鹽度→ 40 ‰
C 電極片表面積→ 5 cm×1.5 cm

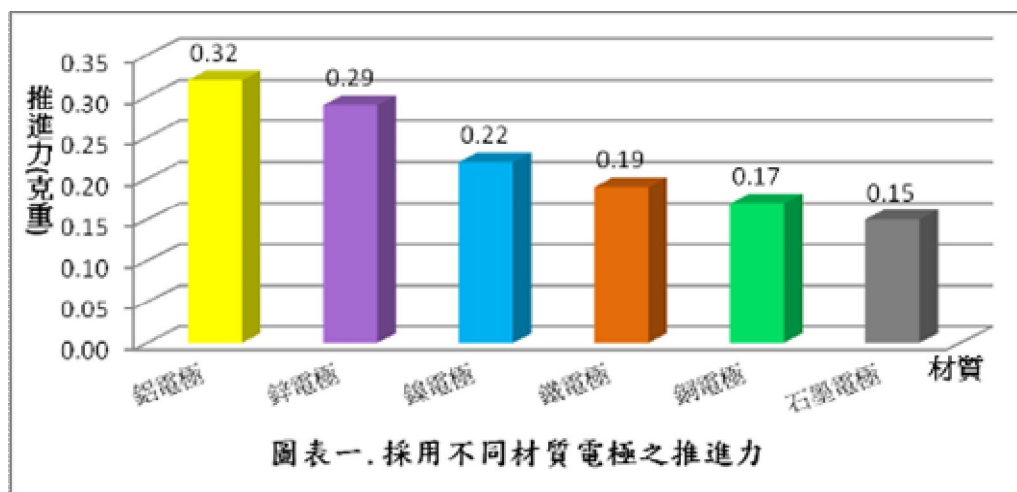
- D 電極片間距→ 1 cm
- E 強力磁鐵→ 6 cm×1 cm×0.4 cm 一枚
- F 電磁推進角→ 20°
- G 船重→ 均以砝碼配重至銅電極船等重

- (3) 結果變因：模型船淨推力；推力愈強航速愈快
2. 依上述變因設定，組裝模型船。
3. 將模型船放入實驗水槽中，架設好簡易測力計後，開始通電。
4. 測量各組最大淨推力。
5. 反復實驗三次，並求取各組淨推力平均值繪製成圖表。



圖十一、不同的電極材質

(二) 實驗結果：



不同電極材質之推進力：鋁電極 > 鋅電極 > 鎳電極 > 鐵電極 > 銅電極 > 石墨電極

(三) 分析：

1. 實驗結果大致與元素的活性(離子化傾向)排序相符，由此可知：活性大的金屬比較容易釋放出電子，使得電極之間的電荷密度較高，有利於動力性能的提升。
2. 鐵、鎳陽極本身都具有導磁性，可能使得磁鐵垂直向下的磁場受到干擾，導致電磁作用力方向的不一致，動力表現並沒有預期中的好。
3. 銅雖然導電率佳，但活性較弱，也影響了動力性能。
4. 石墨電極組的推力最微弱，應是和石墨材質的導電率較差，且本身不參與溶液的電解反應，導致鹽水中帶電粒子數較少有關。

【實驗二】 不同的電極材質種類對於電磁船的電極損耗是否會有差異？

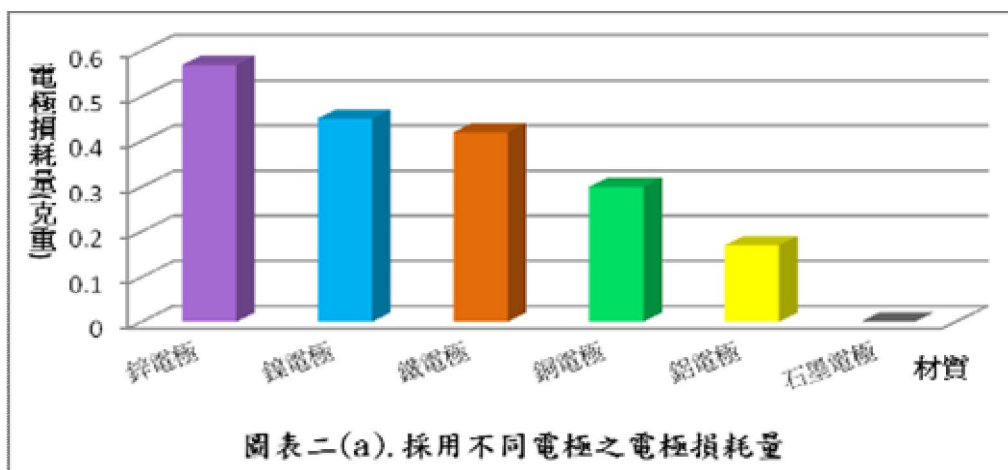
(一) 實驗方法：

1. 變因設定：

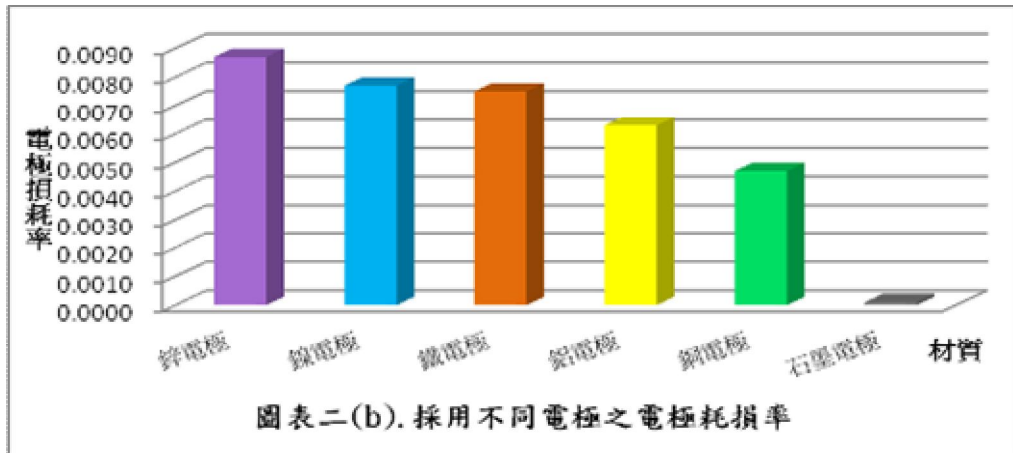
- (1) 操作變因：電極材質→ 銅片、鋁片、鎳片、鐵片、鋅片、石墨片等六種電極對，陽-陰極採用同質材料
- (2) 控制變因：A. 電源
B. 通電時間
C. 模擬海水鹽度
D. 電極片表面積
E. 電極片間距
F. 強力磁鐵
- (3) 結果變因：電極損耗率→ 陽極電極片在電解過程中的損耗量 / 原子量

2. 依上述變因設定完成模型船組裝。
3. 個別測量六組電極片通電前之初始重量，記錄後將電極片分別固定於模型船上。
4. 將模型船放入實驗水槽中，開始通電，計時 5 分鐘。
5. 通電結束，取下電極片，先以清水沖掉表面附著物，再用吹風機烘乾表面殘餘水分。
6. 量取通電後之電極片重量並記錄。
7. 反復實驗三次，並依實驗數據求取電極片之平均損耗

(二) 實驗結果：



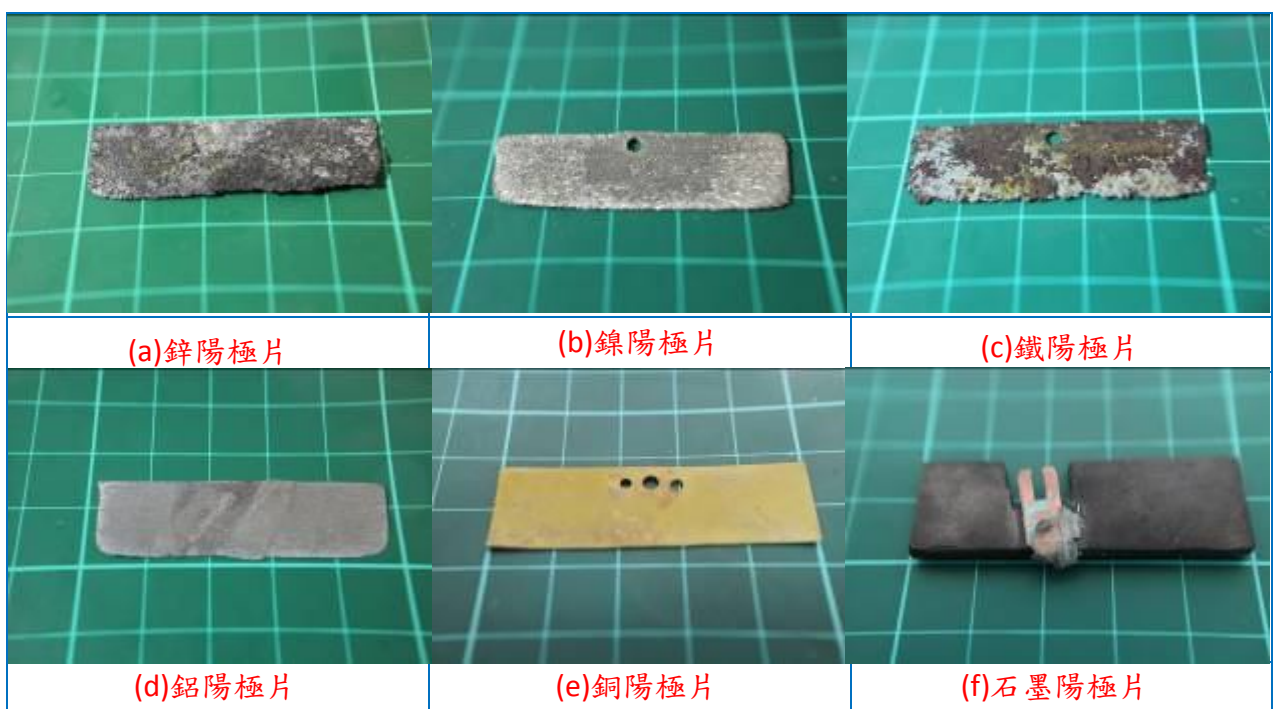
1. 就電極之重量損耗量而言：鋅電極 > 鎳電極 > 鐵電極 > 銅電極 > 鋁電極 > 石墨電極



2. 但因電極材料不同，它們本身帶電粒子的質量大小也不相同(例如鋅、銅原子質量大，鋁原子質量小)，所以應將重量損耗量進一步轉換為重量損耗率來比較，所得結果為：
電極之重量損耗率：鋅電極 > 鎳電極 > 鐵電極 > 鋁電極 > 銅電極 > 石墨電極

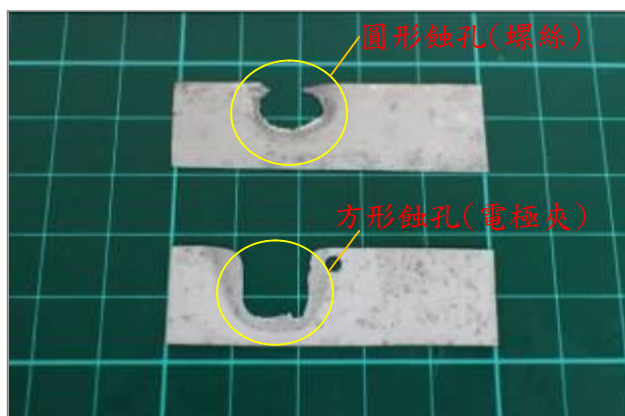
(三) 分析：

- 銅、鋁、鎳、鐵、鋅等金屬材質的陽極會因本身離子的參與電解反應而損耗；而石墨則屬於惰性電極，陽極只負責傳遞電子，本身並不參與溶液的電解反應，所以過程中沒有損耗的現象。
- 銅陽極的三次實驗結果差距頗大，其他材質則較為一致，分析其可能的原因為：
 - 經過觀察比對，發現電解過程後，石墨陽極表面沒有變化，銅陽極表面會附著一層黃綠色的氧化膜；而其它四種金屬陽極表面沒有明顯的氧化膜產生，但出現大量的細微蝕孔(如下圖十二所示)
 - 研判銅陽極的氧化膜造成表面電阻的增加，阻礙了電流的傳導，導致電解過程的不穩定；而其它四種金屬陽極的表面雖出現大量的蝕孔，卻可能因此增加了與鹽水之間的接觸表面積，所以電解的過程相對穩定。



圖十二(a)、電磁船長時間通電後不同材質陽極表面之情形

3. 雖然鋁的活性比較大，但陽極的損耗率並沒有比較多，這可能和鹽水溶液中的鋁離子帶電量比銅、鎳、鐵、鋅等金屬離子大有關。
4. 經過反復的實驗發現：雖然鋁、鋅電極推進力較強，但由於我們的電極夾並非處於懸空狀態，而是和電極片一起浸沒在鹽水裡的，長時間的通電下，陰極的電極夾接觸面附近居然也會出現局部的腐蝕現象，這是我們原先沒有預料到的情況。
5. 陰極腐蝕和陽極腐蝕發生的部位有很大不同，陽極腐蝕是由外而內的全面腐蝕；而陰極腐蝕只集中在電極夾接合部，其餘部位表面仍保持完整(如下圖十二. g)。



圖十二(g)、長時間通電後的鋁陰極表面

6. 經過上網查詢，我們推測上述的腐蝕現象可能和鋁、鋅的「兩性金屬」性質有關；這類金屬離子對於集中在兩極的酸、鹼性物質都能起反應。也因此，鋁、鋅雖是不錯的陽極材料，但並不適合做為陰極材料，實驗電極的選擇有必要進一步的調整或配對。

【實驗三】將不同材質的陽極與銅陰極異質配對，會不會影響電磁船的推進力？

【探究動機】

電池常利用活性差距比較大的金屬(例如碳-鋅)做為電極配對來增加輸出效能，那麼，電磁船是不是也可以這樣做呢？

(一) 實驗方法：

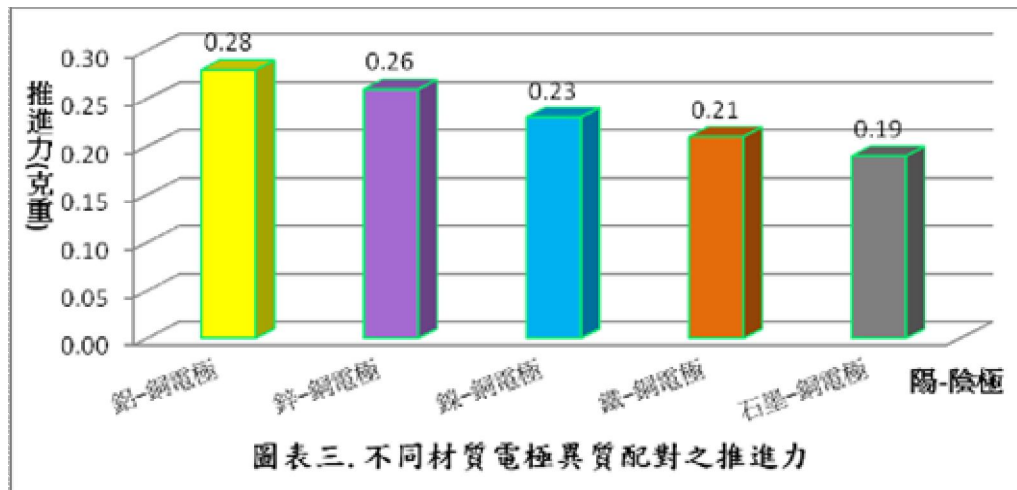
1. 變因設定：

- (1) 操作變因：電極材質→ 將陰極改成活性較小的銅片，陽極採用鋁片、鎳片、鐵片、鋅片、石墨片等五種材質，進行異質配對
- (2) 控制變因：A. 電源
B. 模擬海水鹽度
C. 電極片表面積
D. 電極片間距
E. 強力磁鐵
F. 電磁推進角
G. 船重→ 均以砝碼配重至鋅-銅電極船等重

(3) 結果變因：模型船淨推力

2. 其餘實驗步驟與【實驗一】相同。
3. 反復實驗三次，並求取各組淨推力平均值繪製成圖表。

(二) 實驗結果：



1. 和【實驗一】之結果相互比對，推進力和原先同質配對的數據差異並不大。鋁-銅電極組、鋅-銅電極組微幅減弱；鎳-銅電極組、鐵-銅電極組、石墨-銅電極組則有微幅增加。
2. 不同異質配對電極之推進力：鋁-銅電極 > 鋅-銅電極 > 鎳-銅電極 > 鐵-銅電極 > 石墨-銅電極。
3. 推進力之排序沒有受到影響。

(三) 分析：

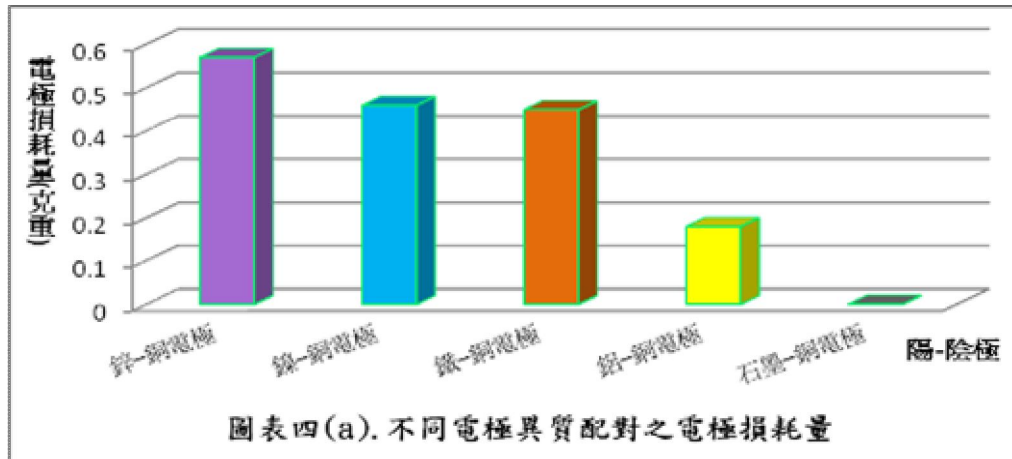
1. 電磁船極板間流動的電流主要是來自外加電源，而非來自極板材質間的自發性電化學反應，所以陽極-陰極的活性差對於電磁船的影響並不像電化學電池那麼樣的顯著。
2. 石墨-銅電極組增幅比較明顯，可能和陰極改為銅片後導電率的提升有關。

【實驗四】 將不同材質的電極異質配對，會不會影響電磁船的電極損耗？

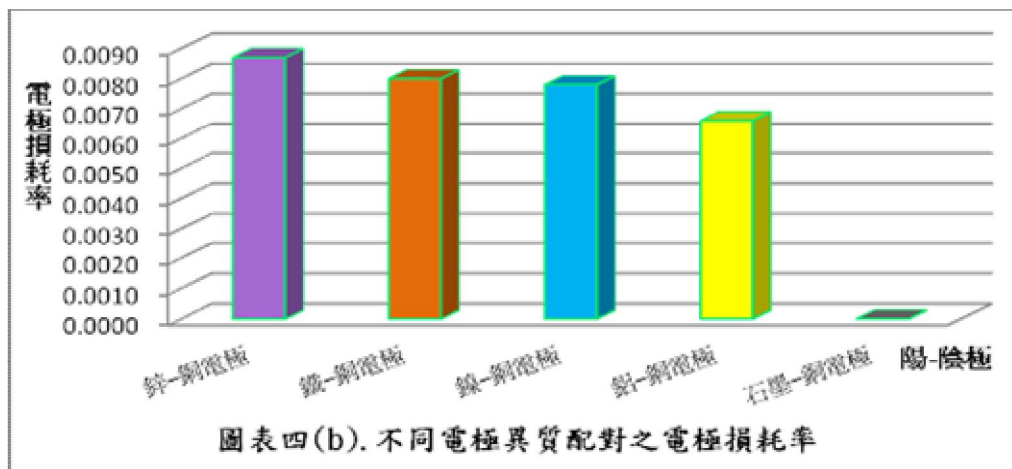
(一) 實驗方法：

1. 變因設定：
 - (1) 操作變因：電極材質→ 陽極採用鋁片、鎳片、鐵片、鋅片、石墨片等五種材質，分別和活性較低的銅片陰極異質配對
 - (2) 控制變因：A. 電源
B. 通電時間
C. 模擬海水鹽度
D. 電極片表面積
E. 電極片間距
F. 強力磁鐵
 - (3) 結果變因：電極損耗量、電極損耗率
2. 其餘實驗步驟與【實驗二】相同。
3. 反復實驗三次，並依實驗數據求取電極片之平均損耗。

(二) 實驗結果：



1. 電極之重量損耗量：鋅-銅電極 > 鎳-銅電極 > 鐵-銅電極 > 鋁-銅電極 > 石墨-銅電極



2. 電極之重量損耗率：鋅-銅電極 > 鐵-銅電極 > 鎳-銅電極 > 鋁-銅電極 > 石墨-銅電極，鎳-銅電極、鐵-銅電極兩組在排序上略有變動。
3. 和【實驗二】之結果比對，差異仍然不大。

(三) 分析：

- 陰極更換為銅片後，由於材質和電極片夾相同，鋁片組陰極不再有【實驗二】中的接觸腐蝕情形發生，但陽極損耗量有微幅增加。
- 綜合評估【實驗一】～【實驗四】的結果，我們歸納得出：鋁-銅電極推進力較明顯、損耗較穩定；石墨-銅電極雖然推進力弱，卻比較沒有損耗的問題。也決定後續採用這兩種配對電極來進行實驗的對照。

【實驗五】 不同的電流大小對於電磁船的推進力有何影響？

(一) 實驗方法：

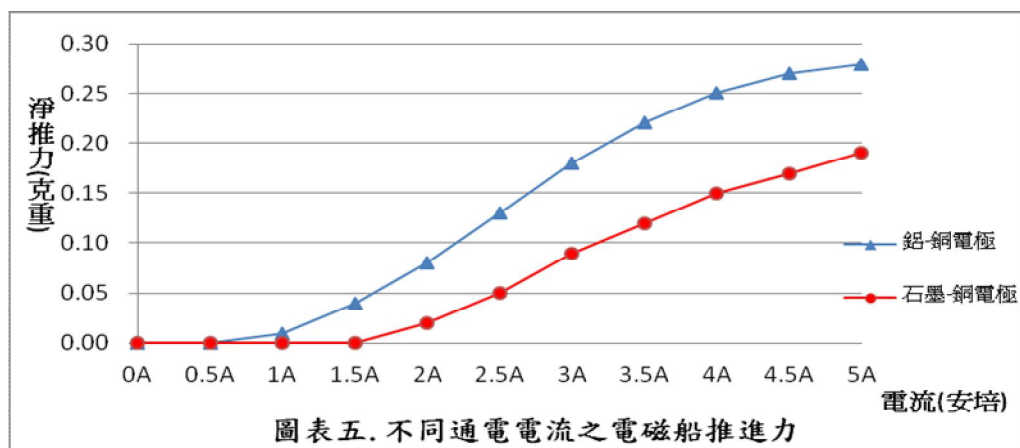
- 變因設定：
 - 操作變因：電源→ 直流 1~5 安培，每次遞增 0.5 安
 - 控制變因：A. 模擬海水鹽度
B. 電極片材質
C. 電極片表面積

- D. 電極片間距
- E. 強力磁鐵
- F. 電磁推進角

(3) 結果變因：模型船淨推力

2. 其餘實驗步驟與【實驗一】相同。
3. 依據三次實驗數據之平均值繪製「電流-推進力曲線圖」。

(二) 實驗結果：



(三) 分析：

1. 由上表曲線可得知電磁推進力與電流供應量呈正相關，通電電流愈大，電荷密度愈高，電磁船的推進力也愈強。
2. 對照兩組曲線，可看出電磁船的起動電流因電極材質的不同而有差異。鋁-銅電極的起動電流較小；石墨-銅電極則需要較大的起動電流。

【實驗六】 不同的海水鹽度對於電磁船的推進力有何影響？

【探究動機】

提升入口海水的鹽度(導電率)對於電磁船的推進力一定有幫助嗎？提高多少才適合？

(一) 實驗方法：

1. 變因設定：

(1) 操作變因：模擬海水鹽度 → 30‰ ~ 80‰，每次調升 10‰

(2) 控制變因：A. 電源

B. 電極片材質

C. 電極片表面積

D. 電極片間距

E. 強力磁鐵

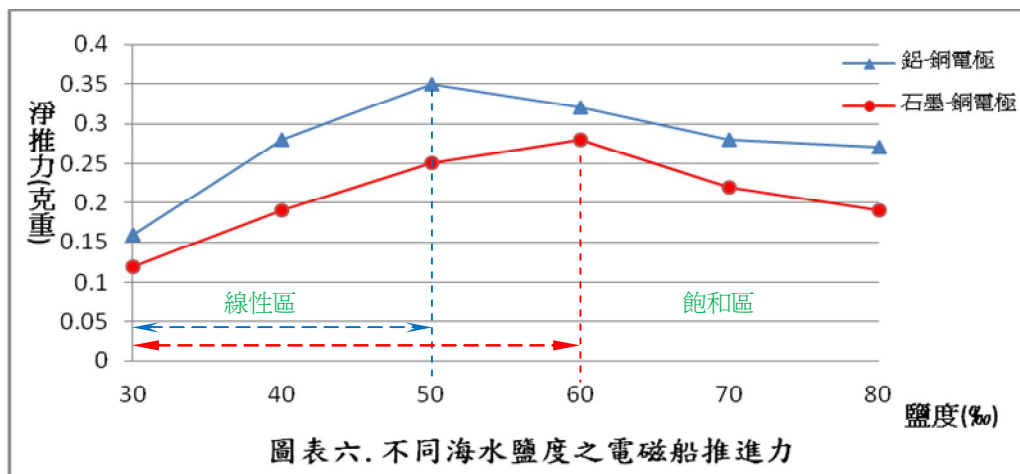
F. 電磁推進角

(3) 結果變因：模型船淨推力

2. 其餘實驗步驟與【實驗一】相同。

3. 依據三次實驗數據之平均值繪製「海水鹽度-推進力曲線圖」。

(二) 實驗結果：



1. 在恆定電流的情況下，海水鹽度對於電磁船推進力有相當大的影響，但卻不全然成正比。
2. 鋁-銅電極組在鹽度 50‰達到最大推進力，石墨-銅電極組則在 60‰達到最大推進力。

(三) 分析：

1. 理論上海水鹽度越高，離子數量越多，推進力應該越強才對。但我們卻發現：在最大電流被限定(5A)的情況下，鹽度超過臨界點時，推進力會呈現不升反降的反折現象。
2. 從推進力的反折曲線來看，推進力可能受到離子數量、電功率兩種複合因素影響。
3. 在線性區內，推進力隨離子數量增加而提升。
4. 鹽度超過線性區範圍後，電極間的離子數量趨向飽和，電荷作用力不再增加，且電阻持續下降。根據歐姆定律，電源供應器的輸出功率(電流平方×電阻)開始隨電阻降低而降低，造成推進力的不升反降。
5. 由推進力曲線可看出：在 5A 恆定電流的條件下，電極材質不同，出現最大推進力的臨界鹽度也不同；鋁-銅電極組在 50‰左右，石墨-銅電極組則在 60‰左右。
6. 在無法恆定電功率的情形下，適度調升入口海水的鹽度是一個可行的替代方案。

【實驗七】不同的水溫環境對於電磁船的推進力有何影響？

【探究動機】

我們知道，環境溫度的升高會削弱磁鐵的磁力，卻也可以提升電解質溶液的導電度。那麼，海水溫度對於電磁船究竟會造成什麼影響？

(一) 實驗方法：

1. 變因設定：

- (1) 操作變因：模擬海水溫度→ 5℃～ 45℃，每 10℃一間隔，分為兩個測量區段：

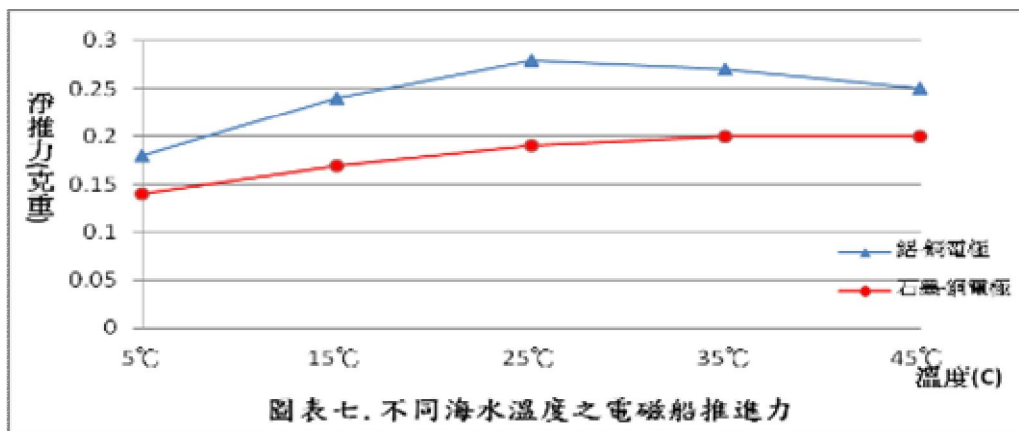
{	冰鹽水 5℃ ↑ ~ 常溫(約 25℃)，採自然升溫
	溫鹽水 45℃ ↓ ~ 常溫，採自然降溫

- (2) 控制變因：A. 電源

- B. 模擬海水鹽度
- C. 電極片材質 (鋁-銅、石墨-銅兩組對照)
- D. 電極片表面積
- E. 電極片間距
- F. 強力磁鐵
- G. 電磁推進角

- (3) 結果變因：模型船淨推力
- 其餘實驗步驟與【實驗一】相同。
 - 依據三次實驗數據之平均值繪製「海水溫度-推進力曲線圖」。

(二) 實驗結果：



(三) 分析：

- 環境溫度的變化會同時影響磁鐵的磁力(負相關)和鹽水的導電度(正相關)。
- 由於電磁船的推進力必須同時依賴磁場、電場的交互作用，這也使得電磁船的推力曲線變得較為複雜。在 5°C ~ 25°C 之間可能是鹽水導電度提升的效應比較明顯，曲線呈現正相關；35°C ~ 45°C 之間磁鐵磁力開始有消退跡象，造成曲線不再升高而微幅下滑。

【實驗八】 不同的磁鐵數量，對於電磁船的推進力有何影響？

【探究動機】

如果磁力的大小是正比於磁鐵數量的，那麼，電磁船安裝的磁鐵也是越多越好嗎？

(一) 實驗方法：

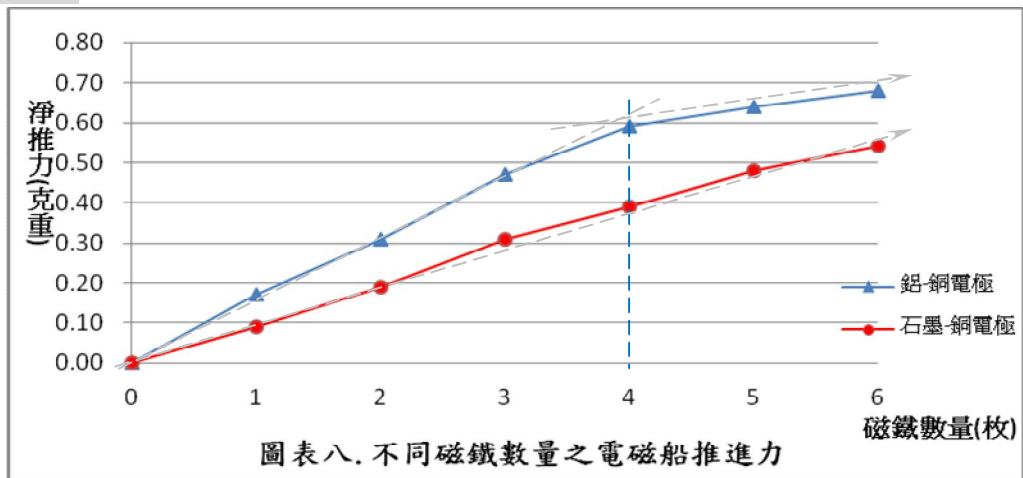
- 變因設定：
 - 操作變因：強力磁鐵 → 5 cm × 1 cm × 0.25 cm 規格之強力磁鐵 1~6 枚，採堆疊方式累加
 - 控制變因：
 - 電源
 - 模擬海水鹽度
 - 電極片材質
 - 電極片表面積
 - 電極片間距
 - 電磁推進角
 - 船重 (均以砝碼配重至 6 枚強力磁鐵之電磁船等重)



圖十三、電磁船配重之情形

- (3) 結果變因：模型船淨推力
2. 其餘實驗步驟與【實驗一】相同。
3. 依據三次實驗數據之平均值繪製「磁鐵數量-推進力曲線圖」。

(二) 實驗結果：



石墨-銅電極組呈現明顯的線性，斜率幾乎沒有變動；鋁-銅電極組在 4 枚強力磁鐵以內維持線性，超過 4 枚之後斜率開始變小，推進力的增加便明顯趨緩。

(三) 分析：

1. 以等重的電磁船而言，推進力原則是隨著磁場強度的增強而增大。但在電流、電極作用面積都維持恆定的情形下，電荷的數量和密度是固定、且受限制的；一旦超過這個限制，磁場的增強作用便會趨於飽和。
2. 由兩組曲線推論：在相同的磁場強度作用下，鋁-銅電極組比石墨-銅電極組更快達到推力飽和狀態。而兩組曲線的差異可能和兩組電極對在溶液中的電荷密度不同有關。
3. 由於磁鐵本身是有重量的，所以，我們可以推論：在超過推力飽和區的情形下，若再增加大量的磁鐵數量，將會使得電磁船推進力不增反減。

【實驗九】 不同大小的電極表面積，對於電磁船的推進力有何影響？

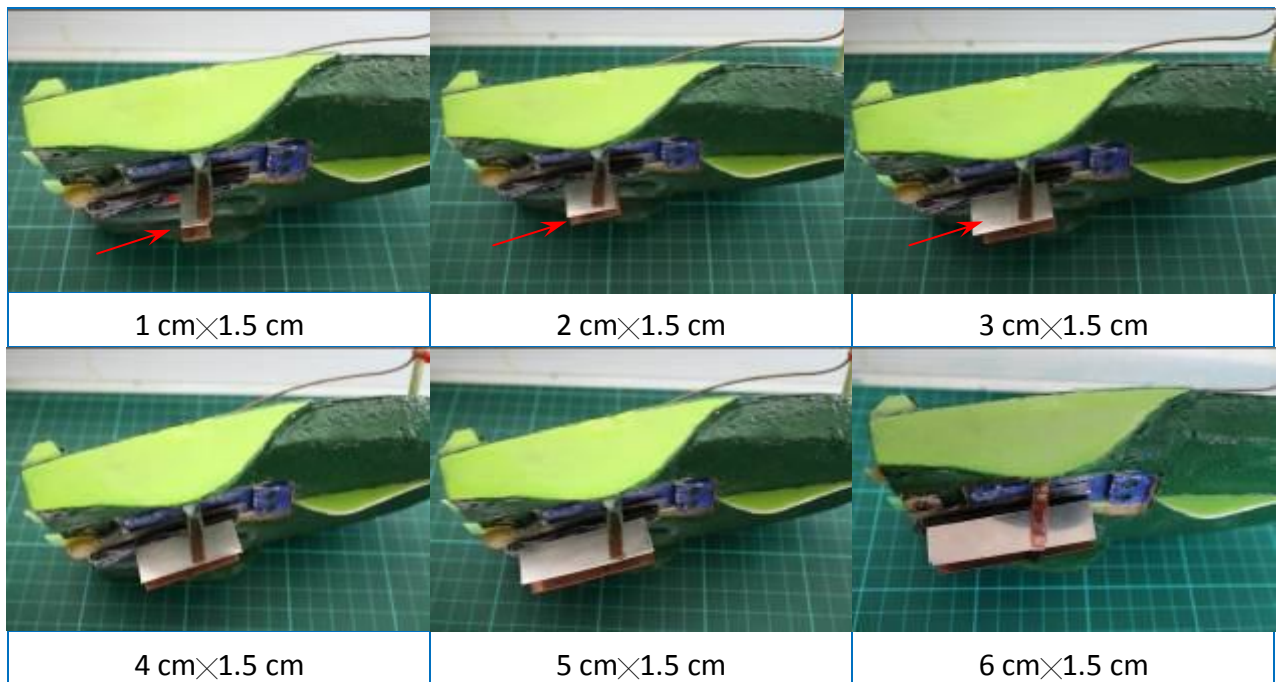
【探究動機】

加大電極面積可以讓電池產生較大的電力，那是不是也可以提升電磁船的推進力呢？

(一) 實驗方法：

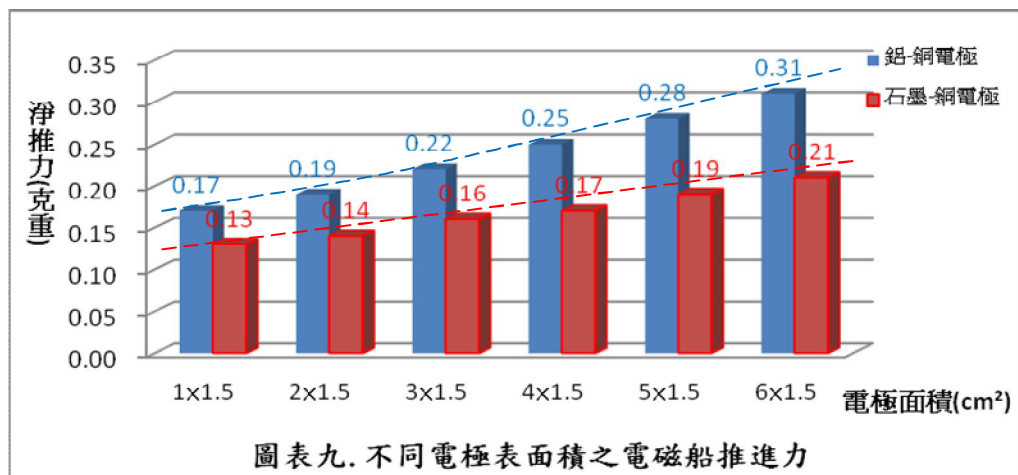
1. 變因設定：
 - (1) 操作變因：電極片表面積→ 長度由 1cm~6 cm，寬度均為 1.5 cm(表面積 1.5 cm²~9 cm²)
 - (2) 控制變因：A. 電源
B. 模擬海水鹽度
C. 電極片材質
D. 電極片間距
E. 強力磁鐵
F. 電磁推進角
G. 船重 (均以銅片配重至 9 cm² 模型船等重)
 - (3) 結果變因：模型船淨推力

- 其餘實驗步驟與【實驗一】相同。
- 依據三次實驗數據之平均值繪製「電極表面積-推進力曲線圖」。



圖十四、不同的電極表面積

(二) 實驗結果：



圖表九. 不同電極表面積之電磁船推進力

電磁船的推進力與電極表面積的大小呈現正相關。

(三) 分析：

- 在恆定電流模式下，即使各組電極片的表面積大小不同，通過電極片之間的電荷總數還是相同的，但是根據電阻定律，面積越小的導體電阻會越大，導電性變差，且切割磁場的作用面積相對縮小，造成電磁作用力的差異。

【實驗十】 不同的電極間距，對於電磁船的推進力有何影響？

【探究動機】 改變電極間距也會影響電池的性能，那電磁船呢？

(一) 實驗方法：

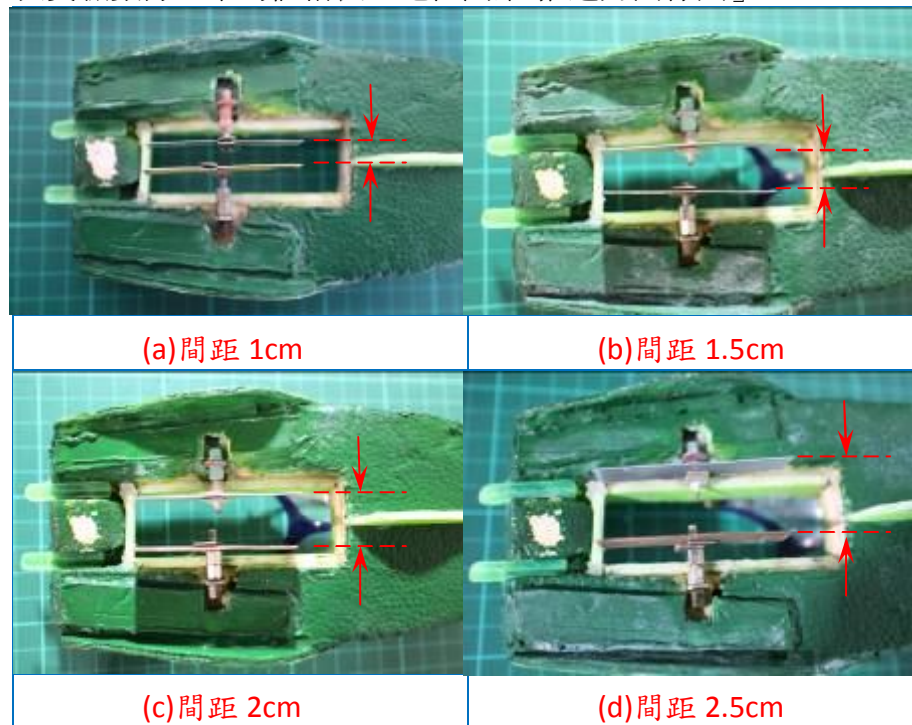
1. 變因設定：

- (1) 操作變因：電極片間距→ 1 cm～ 2.5cm，每 0.5 cm 遞增調整

- (2) 控制變因：A. 電源
 B. 模擬海水鹽度
 C. 電極片材質
 D. 電極片表面積
 E. 強力磁鐵
 F. 電磁推進角

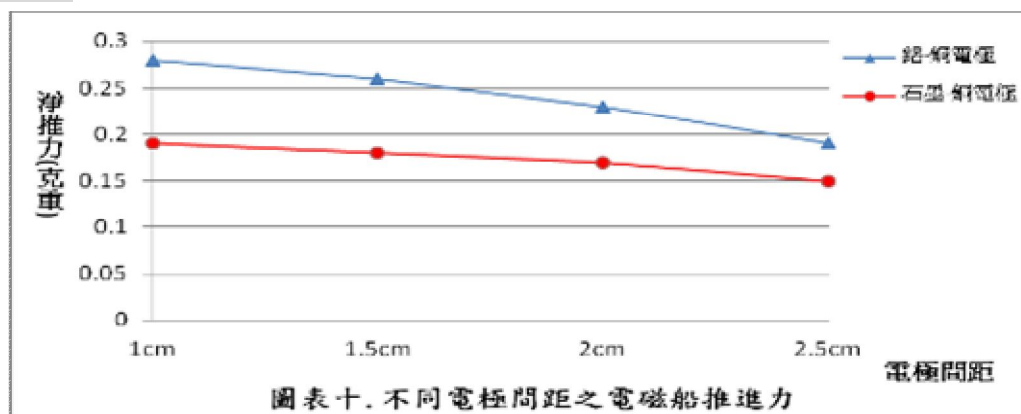
(3) 結果變因：模型船淨推力

- 其餘實驗步驟與【實驗一】相同。
- 依據三次實驗數據之平均值繪製「電極間距-推進力曲線圖」。



圖十五、不同電極間距的調整

(二) 實驗結果：



(三) 分析：

- 電極間距越大，電阻越大，導電性降低。所以電磁推進力與電極間距呈負相關。
- 由於電極間距的縮小也會同時影響磁力線和海水在電極間的流量，所以電磁推進器的設計必須兼顧到電極間距與海水流量之間的平衡。

【實驗十一】 不同的電極形狀，對於電磁船的推進力有何影響？

【探究動機】

既然電磁推進力是正比於電極的表面積，那麼，表面積相同但電極形狀不同的電磁船，它們的推進力是不是都一樣呢？

(一) 實驗方法：

1. 變因設定：

(1) 操作變因：電極片形狀→ 等表面積(均為 6 cm^2) 之長方形、倒三角形、倒梯形電極片

(2) 控制變因：A. 電源

B. 模擬海水鹽度

C. 電極片表面積

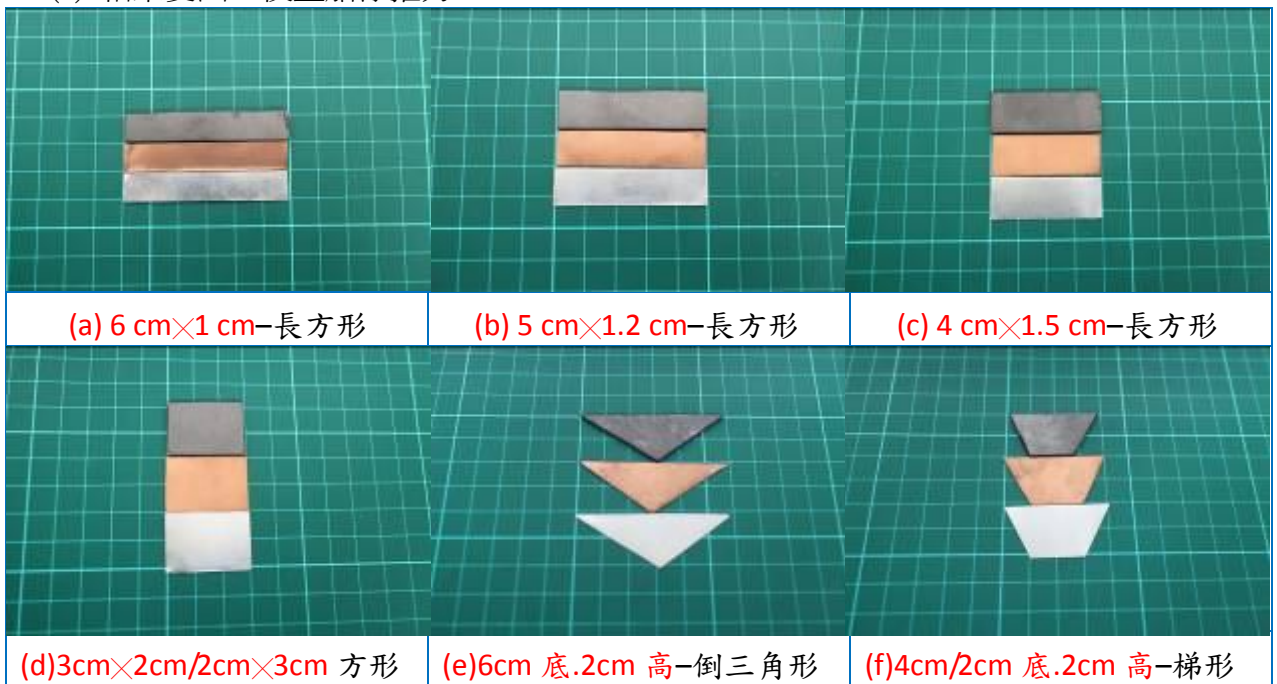
D. 電極片材質

E. 電極片間距

F. 強力磁鐵

G. 電磁推進角

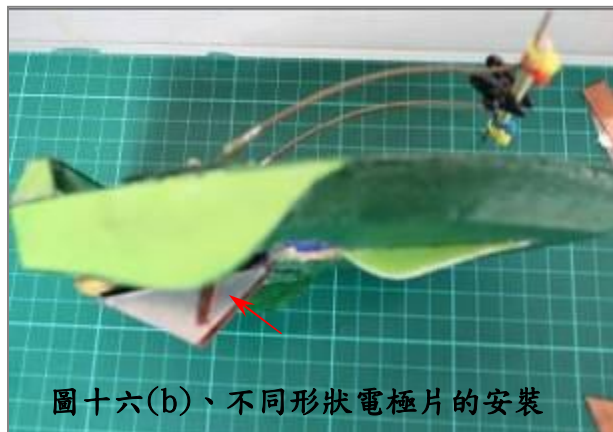
(3) 結果變因：模型船淨推力



圖十六(a)、不同形狀的電極片

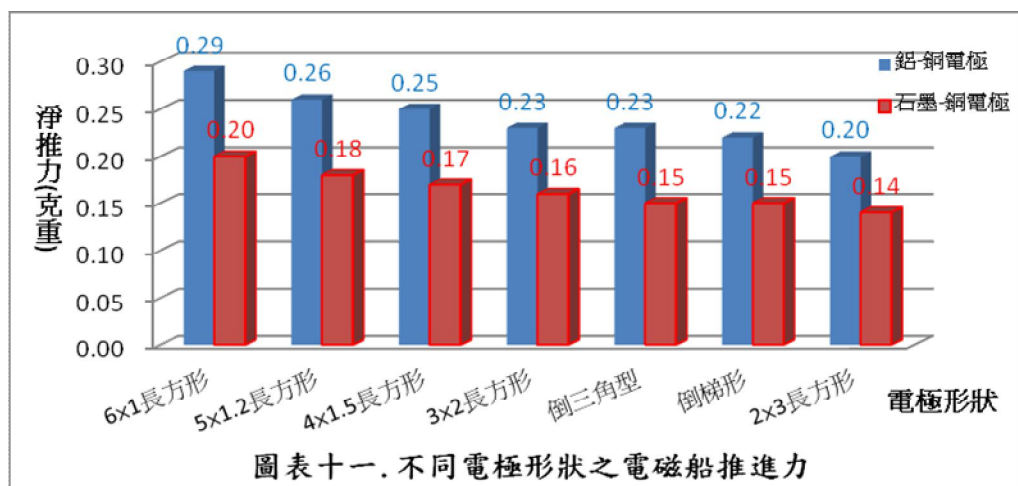
2. 其餘實驗步驟與【實驗一】相同。

3. 依據三次實驗數據之平均值繪製「電極形狀-推進力曲線圖」。



圖十六(b)、不同形狀電極片的安裝

(二) 實驗結果：



1. 推進力大小： 6×1 長方形 $>$ 5×1.2 長方形 $>$ 4×1.5 長方形 $>$ 3×2 長方形 $\approx 6 \times 2 \div 2$ 倒三角形 $\approx (4+2) \times 2 \div 2$ 倒梯形 $>$ 2×3 長方形。
2. 即使表面積相同，但各組推進力仍有差異，且排序和電極片的寬(深)度呈負相關。

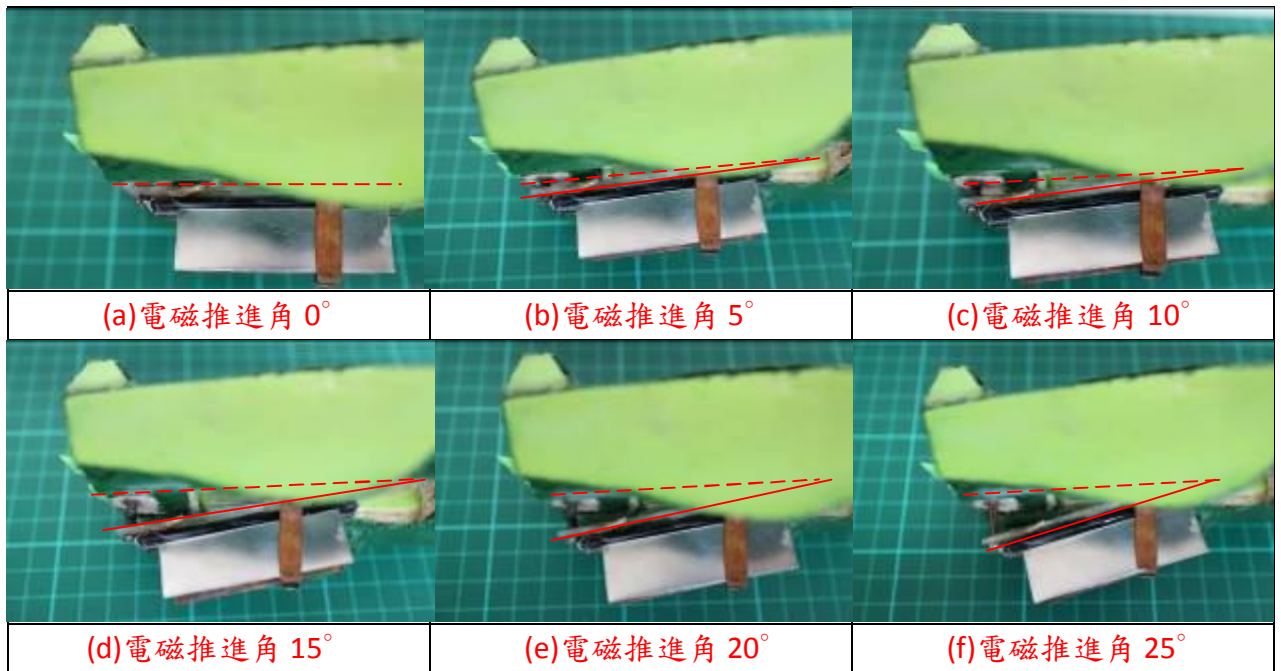
(三) 分析：

1. 在相同的電流、相同的通電面積下，六組電極的電流密度(電流 / 面積)雖然是一樣的，但磁作用力的強度卻是和帶電粒子的距離成反比的。也就是說，電極片靠近磁鐵一側的離子和遠離磁鐵一側的離子通過磁場時所接受到的磁作用力在強度上是有差異的。電荷的分布如果靠近磁鐵越密集會越有利於推進的作用；越遠離磁鐵推進力越弱。
2. 探討寬短長方形電極片推進力大幅減弱的主因，可能是因為長度縮短了，寬度相對變寬(入水變深)，切割磁力線的有效面積減少的緣故(分析請參閱【陸、討論八】)。
3. 對於直線式電磁推進器而言，細長條形電極推進效果最好，寬短長方形推進效果最差。

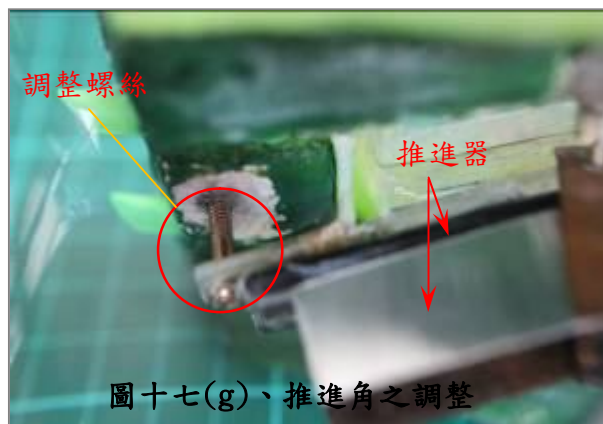
【實驗十二】 不同的電磁推進角對於電磁船的推進力有何影響？

(一) 實驗方法：

1. 變因設定：
 - (1) 操作變因：電磁推進角→ 利用調整螺絲調整電磁推進器與船底之夾角 $0^\circ \sim 25^\circ$ ，每 5° 一個測量間隔
 - (2) 控制變因：A. 電源
B. 模擬海水鹽度
C. 電極片材質
D. 電極片表面積
E. 電極片間距
F. 強力磁鐵
 - (3) 結果變因：模型船淨推力
2. 其餘實驗步驟與【實驗一】相同。
3. 依據三次實驗數據之平均值繪製「電磁推進角-推進力曲線圖」。

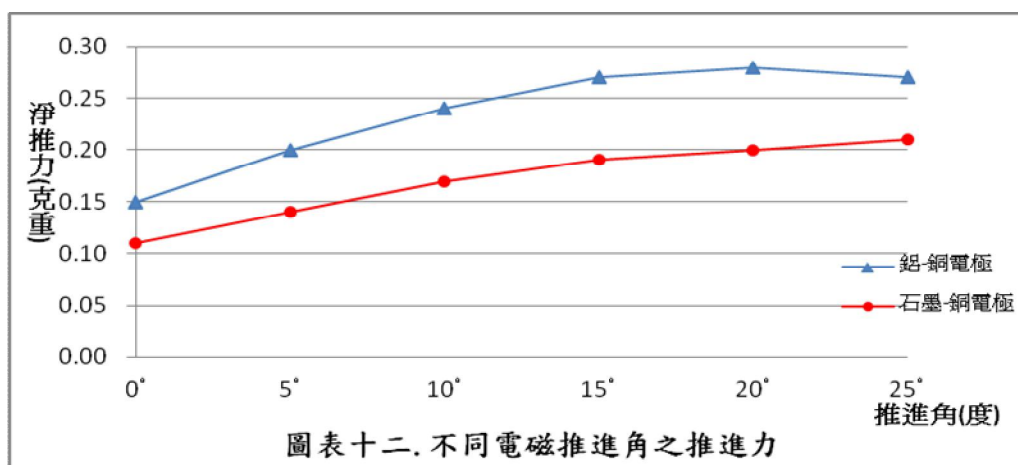


圖十七、不同的電磁推進角



圖十七(g)、推進角之調整

(二) 實驗結果：



電磁推進器的角度大小也會影響推進效果，曲線圖顯示角度在 20° ~ 25° 之間推進器可獲得較大推力。

(三) 分析：

1. 雖然推進器輸出的總推力是固定的，但如果全部都是水平分力的話，船身的上升力完全依賴本身的浮力，船頭面對的水阻力相對較大，前進會較為困難。

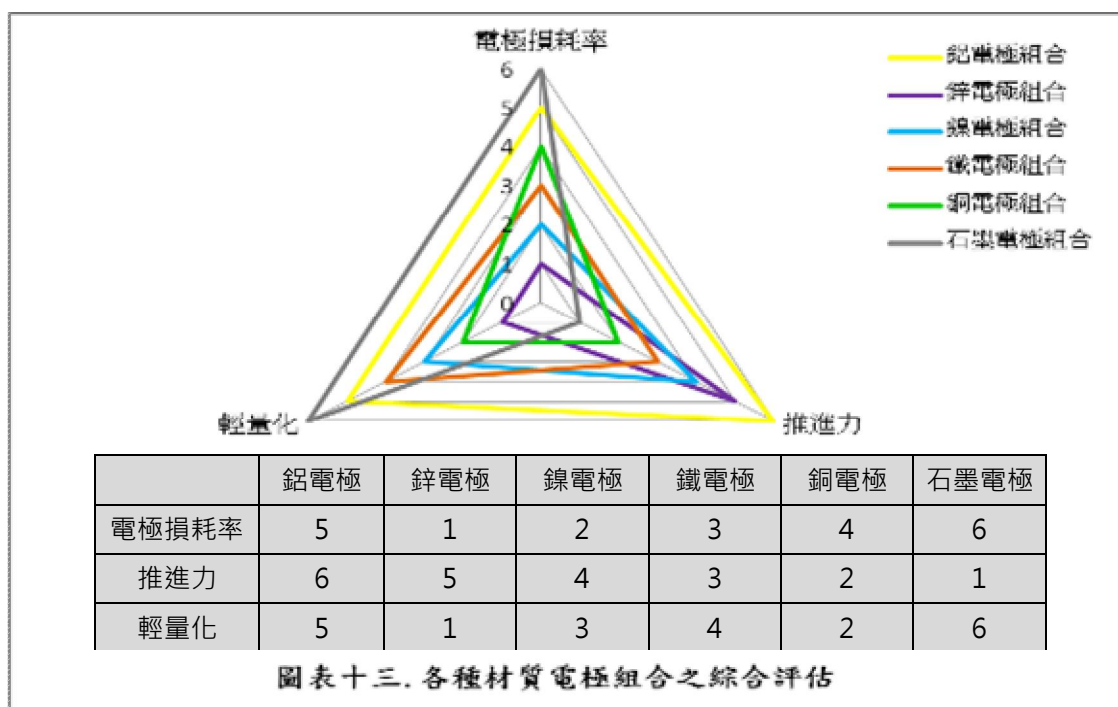
2. 推進器的角度也不是越大越好，如果作用力只有垂直分力的話，會造船身浮起，但沒有推進效果。

陸、討論

一、綜合【實驗一】～【實驗四】的結果，將電磁船使用各種不同材質電極的效果摘要如下：

電極材質 / 組合	測試效果
鋁-鋁 / 鋁-銅電極組合	(1) 推進力最佳，耗損率略小於其他金屬 (2) 不適合做為電磁船的陰極材料(陰極腐蝕現象)
鋅-鋅 / 鋅-銅電極組合	(1) 推進力次佳 (2) 耗損率高，較重
鎳-鎳 / 鎳-銅、 鐵-鐵 / 鐵-銅電極組合	(1) 推進力尚可，材質本身具有導磁性，可能造成磁力線分布的不均勻 (2) 鐵極易生鏽
銅-銅電極組合	(1) 推進力較其他金屬弱 (2) 不適合做為電磁船的陽極材料(陽極包覆氧化膜)
石墨-石墨 / 石墨-銅電極組合	(1) 推進力最微弱 (2) 無損耗，最符合成本效益

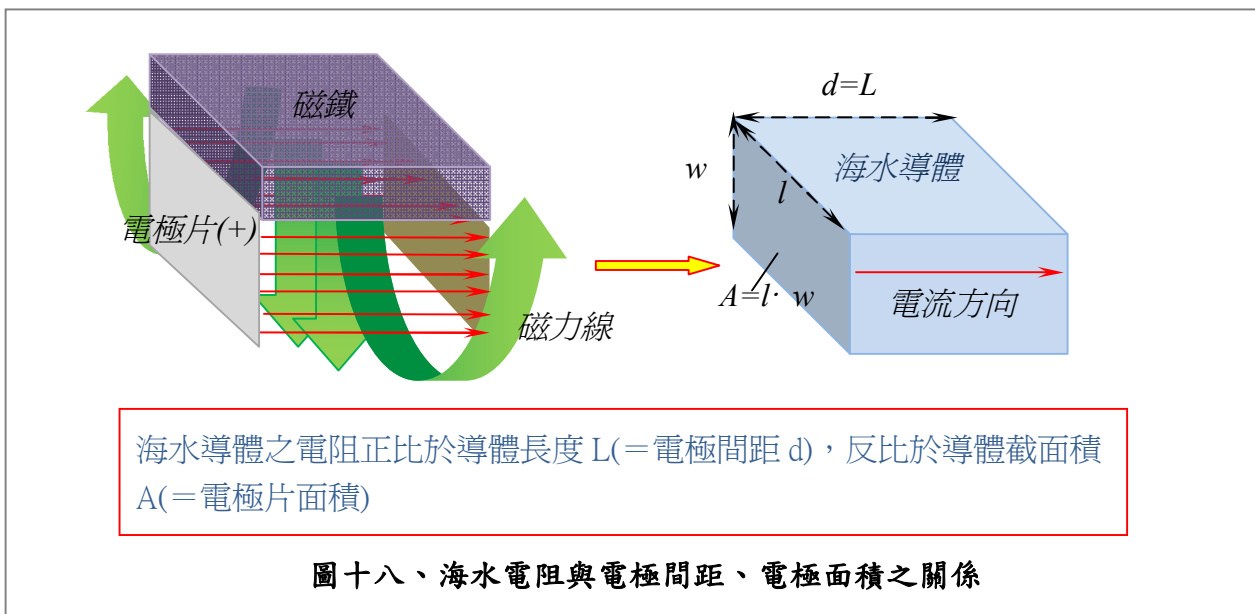
二、利用三向度六等第計分法，將各種電極材質運用於電磁船之效能進行歸納整理，其中以鋁電極組合、石墨電極組合表現最佳。



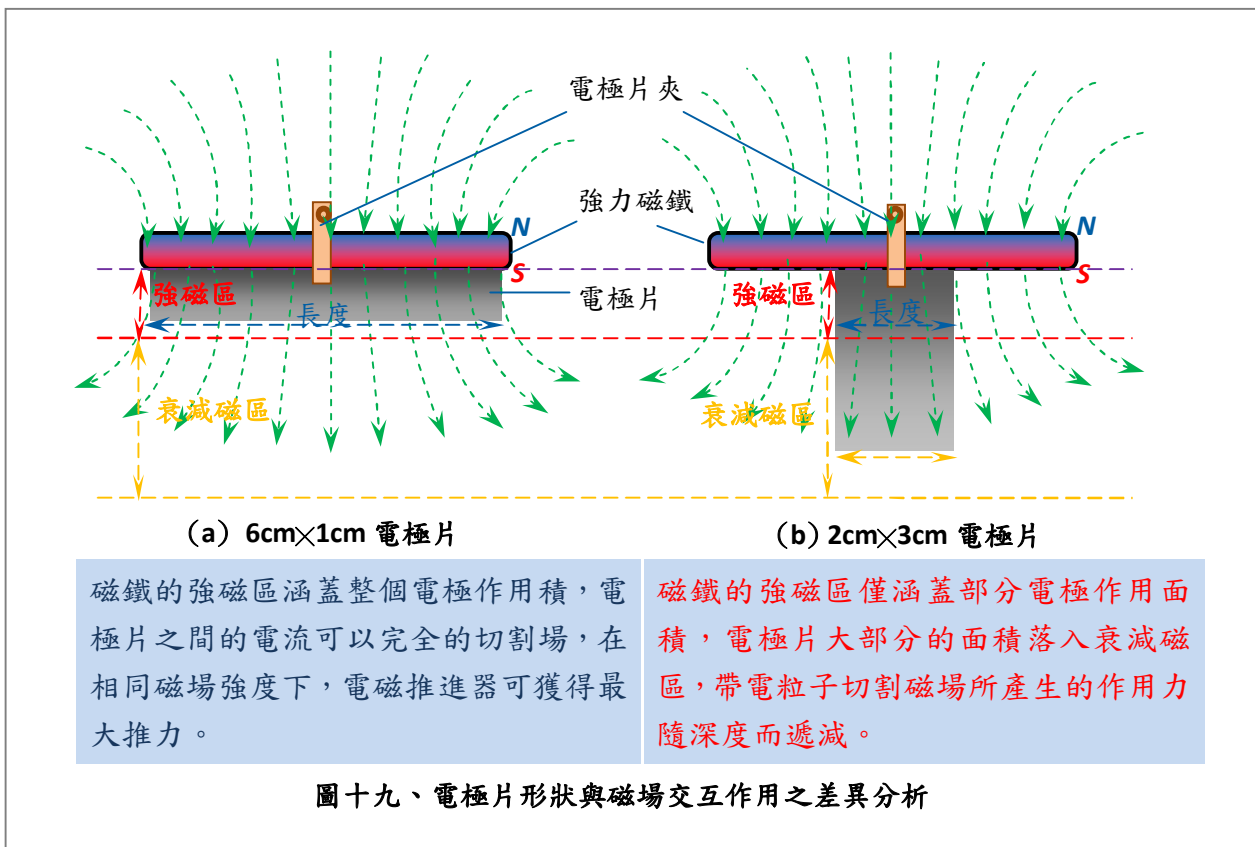
三、綜合【實驗五】～【實驗十一】的結果可充分說明：電磁推進力的大小取決於磁場與電場兩者之間的交互作用。如果能在限制的條件下同時提升二者的強度，電磁推進器就可以發揮最大的推進效能。

四、與磁場強弱有關的變因是「磁鐵數量」和「環境溫度」；而「電流」、所處環境的「鹽度」、「溫

- 度」、電極片的「材質」、「面積大小」、「形狀」、「間距」等變因則都與電場強弱有關。
- 五、實驗中的電流、電極面積、電極間距等變項都和推進力呈現明顯的線性相關；而鹽度、溫度、磁鐵數量等變項則受制於外加電流和磁作用力的限制，推進力曲線都不是單純的直線性，且呈現飽和或反折的情形。
- 六、綜合【實驗九】～【實驗十】的結果可知：除了電流強度之外，電場中的海水導電率變化對於電磁船的動力性能也扮演著相當關鍵的角色，以圖例說明如下：



- 七、電池可藉由電極材質的異質配對(活性差)來提升輸出效能；但對於電磁船所處的海水電解池而言，卻無法藉由電極材質的異質配對來提升電磁推進力。
- 八、在【實驗十一】中發現電極外形的寬 / 長比值越大，越不利於電磁船的推進力，分析如下：



九、回顧整個實驗過程，發現到一些可能會影響實驗準確性的因素，我們採取以下的方法來降低實驗誤差：

可能的誤差來源	解決方法
自製拉力計的輪軸摩擦力	實驗前在拉力計輪軸點上針車油
模擬海水電解一段時間後會在溶液中生成懸浮的反應物，這些微粒可能會造成溶液黏稠性的改變	每個實驗間隔先用滴管吸取懸浮物，儘量使溶液保持澄清
因電解海水而在船身底部產生氣泡堆積	在船身設置排氣孔道

柒、結論

- 一、電極材質不同，電磁推進力的大小也有差異。
- 二、推進力取決於陽極材質本身的活性，和陽極-陰極不同材質配對的活性差距沒有顯著關聯。
- 三、各種金屬材質的陽-陰極組合中，以鋁做為陽極推進效果最好，以銅做為陽極效果最差。相反的，銅可以做為陰極材料，但鋁並不適合做為陰極材料。
- 四、電流、電極表面積都和電磁推進力大小呈正相關。
- 五、電極間距和電磁推進力大小呈負相關。
- 六、鹽度對於恆流輸出的電磁船而言並非越大越好。而且電極材質不同，出現最大推進力的臨界鹽度也不同；鋁-銅電極組在 50‰左右，石墨-銅電極組則在 60‰左右。
- 七、溫度大致上和電磁推進力呈微弱正相關，但應避免磁鐵表面溫度升高後的退磁現象。
- 八、磁鐵數量和電磁推進力呈正相關，但不能無限制的增加。
- 九、在寬度未限定的情形下，即使電極表面積相同，推進力仍會因電極形狀不同而有所差異。
- 十、細長條形是最有利的電極形狀，且寬(深)度應加以限制，避免拉大與強磁區之間的距離。
- 十一、電磁推進器的角度大小也會影響推進效果，設計時應兼顧到水平分力與垂直分力的最佳化。

捌、參考資料及其他

- 一、黃鴻博。(民 103.2.) 國小自然與生活科技五下(第六冊)。南一書局。
- 二、施惠。(民 102.8.) 國小自然與生活科技六上(第七冊)。南一書局。
- 三、陳偉民、林金昇、江彥雄。(2004.3.30) 3D 理化遊樂場 I。天下遠見出版。
- 四、郭玉英。我的物理實驗書。教育測驗出版社。
- 五、電感與電磁。教育部數位教學資源入口網站。取自：http://content.edu.tw/vocation/control/tp_nh/ee/tp_nh/8/2.htm
- 六、中華民國第四十五屆中小學科學展覽會作品說明書—『極』有不同。國立臺灣科學教育館。取自：activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/45/high/0316/031615.pdf

【評語】 080109

1. 能自行設計製作實體船模型。
2. 能充分改變變因，探究結果。
3. 能清楚回答相關提問，可見準備很充分。