

中華民國第 62 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 物理科

030107

以離子推進系統為例－探討電暈反應在離子通路中推力、性質變動之研究

學校名稱：新北市立土城國民中學

作者：	指導老師：
國二 顏于喆	蕭聖益
國二 邱程熙	廖煌銘
國二 莊詠元	

關鍵詞：離子推進、電暈、離子通路

摘要

本研究由高壓電和火箭得到靈感，嘗試自製一離子推進器模型。本組亦嘗試以不同金屬針、間距、金屬針種類及銅管長度、數量來觀察其離子推進器推力大小，找出推力最佳的組別和其狀態，並試圖探討高壓離子通路間距不同之電暈性質。實驗後發現，離子引擎推力最佳設計為正極為 6.5 公分長不鏽鋼針、負極為 3.5 公分長銅管七根、間距 0.3、0.5、0.6 公分較佳，推測是由於離子通路反應方式、氧化面光潔程度及極端表面積影響推力變化。亦發現部分金屬針有氧化情形，希望能找出不易氧化的方式。為探討推力與通路電學性質，本研究亦設計一套電路，了解高壓離子通路電阻、電壓、電流關係，並和推力實驗比對。未來我們將探討不同種金屬針離子通路性質。

壹、前言

一、研究動機

在先前的專題課上，同學們討論的主題火箭的應用，而我們則是有關高壓電，兩者都獲得不錯的迴響。這時我便思考：能否將這兩個似乎不相干的主題組合呢？在進行本研究之前，透過網路搜尋目前國際間常見的火箭種類，我們發現其中的離子推進器的運作完全不同於其他化學火箭，是以物理方式，將氣體電漿化推進的。雖然現階段離子推進器的推力極小，目前無法廣泛使用，但僅需少量可供離子化的氣體和電源供應系統即可長時間使火箭持續加速前進，深具發展潛力。我們希望以一系列的實驗，找出使離子推進器推進效能最佳的模式，並推論其背後的原理。

二、研究目的

本實驗的主目的有兩項：

(一) 製作出一離子推進器並熟悉其情形

1. 製作出一離子推進實驗裝置
2. 測量本裝置變壓器供應電壓
3. 測量間距對網格靜電型離子推進器通過電流之影響

(二) 增加離子推進器模型推力

1. 探討不同材質的金屬針對網格靜電型離子推進器推力的影響
2. 探討改變網格靜電型離子推進器正負極之表面積及間距對推力的影響

三、文獻回顧

何謂離子推進系統？離子推進系統泛指以電力推進的航天器。它通過用電加速離子來

產生推力。目前主流離子推進器分為靜電式與電磁式，雖主流開發中的離子推進器主要為電磁式（由於不會腐蝕電極），然而我們考量實驗環境及可得之文獻數量，我們決定採用網格靜電離子推進器。本組的離子推進裝置經實際觀察後，發現實際反應式與電暈反應有關，而反應時會產生類似於電漿、陰極射線的反應。電暈反應是指在高壓電場下的一種放電形式。在本實驗中，因電壓較高，導致正極端附近產生正離子，並不斷被推斥，受電場加速撞向負極，使負極原子射出高能電子，形成類陰極射線。產生之電子受正極吸引移動到正極，形成重複脈衝式電暈電流。前述移動中的電子受電場加速撞擊電中性原子，產生正離子與另一帶能量的加速電子，並產生連鎖反應，形成電漿。而藉由電漿中帶電粒子之碰撞，可產生一固定之離子通路，藉由各帶電粒子之慣性，使其在經過中和極端後產生電中性之”風”。

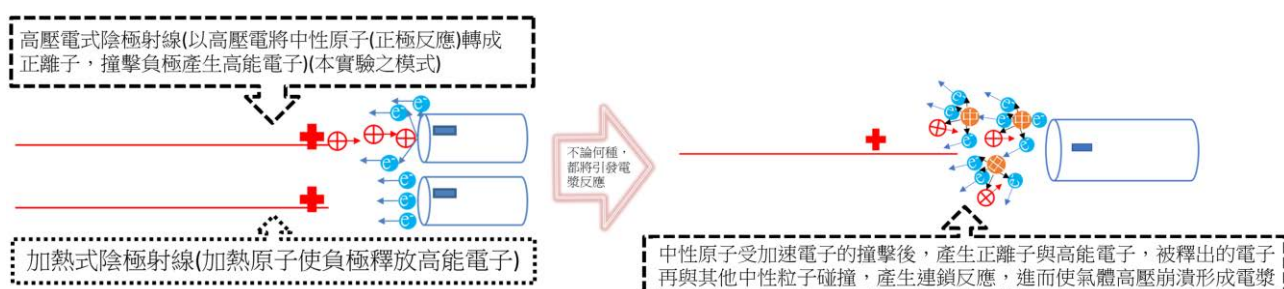


圖 1 本組離子通路推力反應原理

根據網路上的影片（極創意 MAXIDEA，2019），美國太空總署新一代離子引擎 X3 比原本的霍爾推進器的推力高上數倍，因為其極端表面積增加了三倍，我們因此認為表面積也是影響推力的原因。而根據「第 60 屆中小學科學展覽會 高級中等學校組 離子推進器之探索」，其研究也探討有關電壓、間距對離子通路推力的影響，我們因此也認為電壓、間距對離子通路之推力有所影響

貳、研究設備及器材

耗材：銅針（ $\varnothing 1\text{mm}$ ）、鋁針（ $\varnothing 1\text{mm}$ ）、不鏽鋼針（ $\varnothing 1\text{mm}$ ）、鎢針（ $\varnothing 1\text{mm}$ ）、銅管（外徑 10mm,5mm）、電線、焊錫、海綿

工具：3D 列印機、數位相機（手機）、紙、筆、鱷魚夾、斜口鉗、帶鋸機、尺、熱熔膠、美工刀、電子秤、電源供應器、變壓器（6v 轉 600.03V）（實測結果）、電烙鐵、伏特計。

軟體：123D 繪圖軟體（Autodesk）、WORD 2019、Excel

部分器材如下表：

表 1 部分實驗器材整理表

文字敘述	圖片	文字敘述	圖片
電子秤(1)		銅管	
銅針			
鋁針			
鎢針			
不鏽鋼針			
海綿、電子秤(2)		尖嘴鉗、斜口鉗	
熱熔膠、焊錫		變壓器	

詳細安裝過程於研究過程與方法中說明

參、研究過程與方法

一、實驗流程與擺設

(一) 實驗架構圖

以下實驗架構圖：

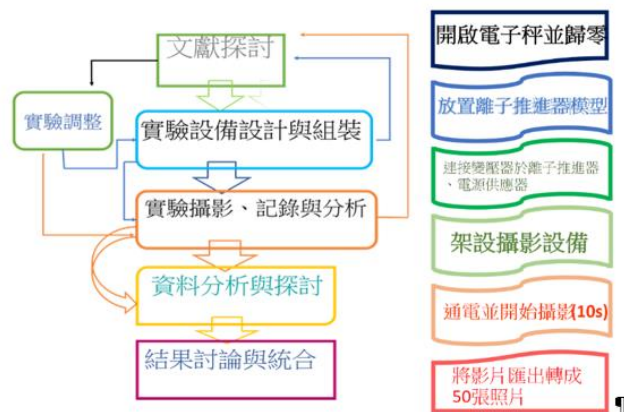


圖 2 研究實驗架構圖與實驗流程 (左：實驗架構圖，右：實驗流程圖)

(二) 實驗裝置與擺設

1. 初期研究裝置

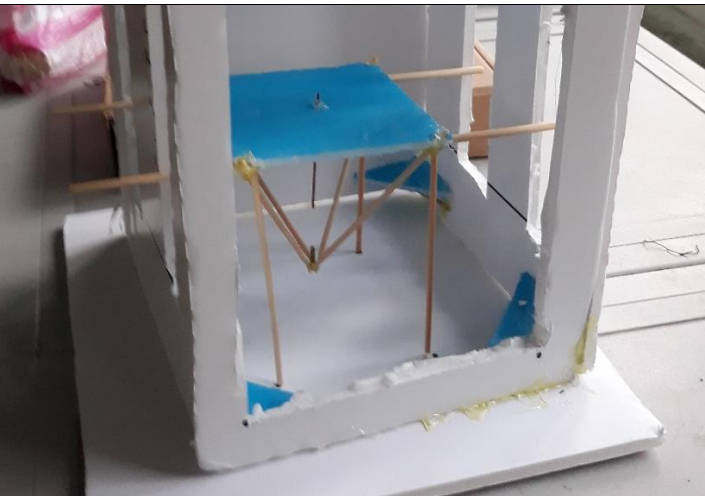
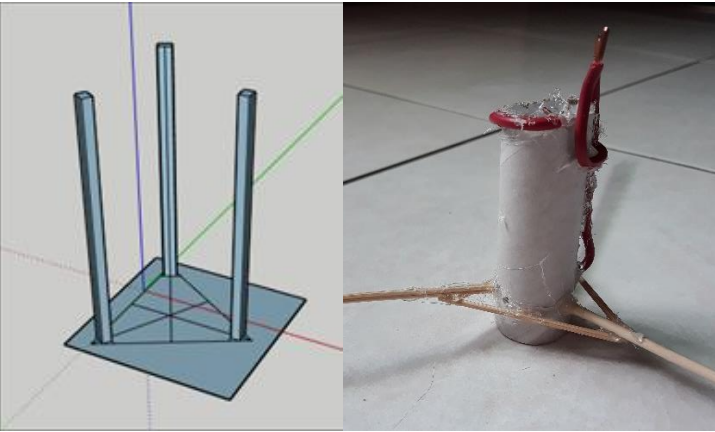
最初開始研究時，離子推進器主要以可飛行為設計標準，並以單純風扣板、木材與熱熔膠進行結構設計。後因組裝不便、推力微弱與測力精準度不足而不斷修正，並最終設計為目前之研究裝置。

2. 目前研究裝置

目前研究裝置實驗方式則改為在電子秤上做測試，以自製木架架高，並將離子推進引擎至於上端。本組之實驗木架具有一孔供銅管通過，高 2.5 公分。本組之實驗離子推進器外殼由玉米塑膠（聚乳酸）製成，並以 3D 列印繪圖程式預先繪成。我們亦新增電壓測量裝置。

我們將各代離子推進器圖片整理成下表：

表 2 各代離子推進器照片比較表

文字敘述	示意
<p>第一代離子推進器裝置</p> <p>實驗裝置：</p> <p>飛行塔：風扣板</p> <p>離子推進模型：熱熔膠、竹籤、風扣板、銅管(1mm)、銅針</p> <p>問題與解決方案：過於脆弱→改善為第二代離子推進器裝置</p>	
<p>第二代離子推進器裝置</p> <p>實驗裝置：</p> <p>飛行塔：風扣板</p> <p>離子推進模型：熱熔膠、竹籤、紙管、銅管(1mm)、銅針</p> <p>問題與解決方案：難以組裝→改善為第三代離子推進器裝置</p>	

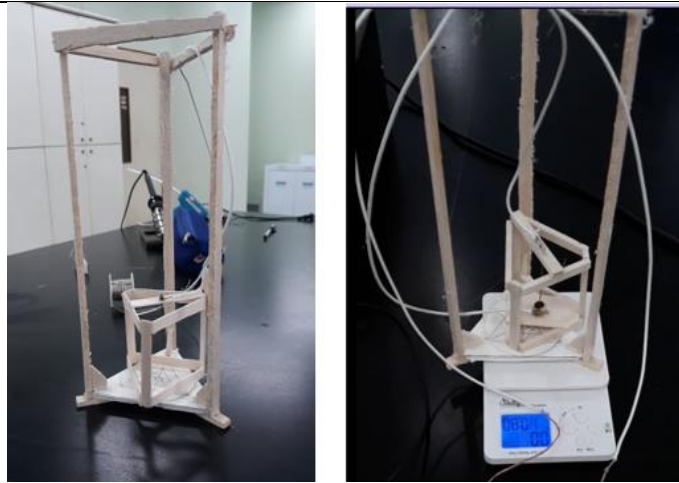
第三代離子推進器裝置

實驗裝置：

飛行塔：木板

離子推進模型：熱熔膠、木片、銅管(1cm)、銅針

問題與解決方案：無法測得推力→改善為第四代離子推進器裝置（目前研究裝置）



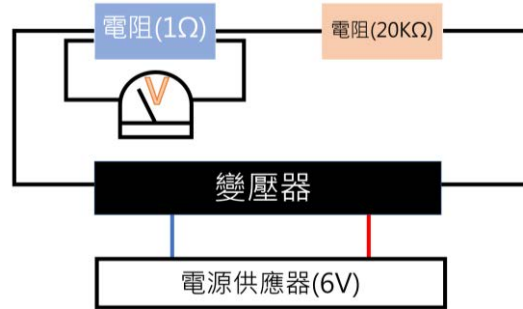
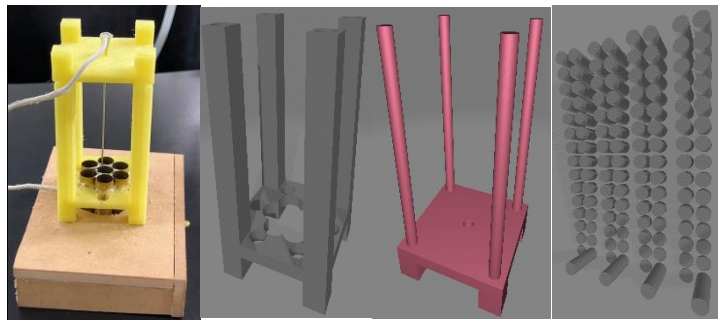
目前研究實驗裝置：

離子推進模型：聚乳酸塑膠、銅管、金屬針、電線、熱熔膠

木架：纖維板、熱熔膠

測量電壓裝置：1Ω 電阻、20000Ω

電阻、變壓器、電源供應器（6V 定壓）、伏特計



二、 研究方法、過程與結果

（一）實驗數據蒐集與分析

1. 實驗記錄

在實驗一到實驗二之二，我們以手機的快拍功能紀錄實驗開始後較穩定的數據，約在開始實驗後五到十秒（紀錄時間六秒）。但由於此做法僅記錄實驗時一部份的實驗數據，無法紀錄從開始到結束的完整變化過程，因此實驗二之三到實驗五皆採取錄影，再將錄影中 50 個影格的影像數據紀錄下來。影片時長為十秒，從開始通電到十秒結束。

2. 資料處理

（1）實驗一處理方式

完成 30 張照片快拍後，手動輸入至 excel。我們將各組數據以銅針為母體，進行 T 檢

定，並判斷實際推力大小順序。接著，我們使用 STDEV.S 計算標準差。之後將各組推力數據平均，並除以極端質量（金屬針+銅管），並繪成長條圖，在長條圖上新增標準差，進行觀察。我們亦將各組 30 張照片數據製成折線圖觀察。

(2)實驗 2-1、實驗 2-2 處理方式

完成 30 張照片快拍後，手動輸入至 excel，將各組推力數據平均，並除以極端質量（金屬針+銅管），並繪成折線圖。我們亦將各組 30 張照片數據製成折線圖觀察。

(3)實驗 2-3~實驗五處理方式

完成錄影後，將影片轉為 50 張照片，並手動輸入 excel 分析。之後將各組第一張照片到第 50 張進行平均。之後我們使用 LARGE 和 SMALL 函數，去比較各組推力、吸力或電流，找出表現最佳的數據。之後，將最佳值除以三，並人為比較各組從何時刻開始實驗數據大於或等於這個值，並平均從該張照片到第 50 張之數據。之後將這三個值(未進行資料處理的平均值、計算“穩定推力時期”的平均值(進行資料處理)、各組推力最大值)繪製成折線圖，並觀察其趨勢。部分實驗搭配部分組別 50 張照片所有數據的折線圖一併觀察。

三、實驗組別設計

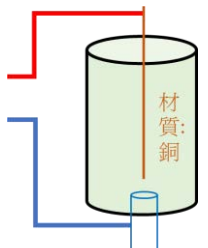
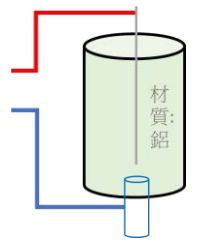
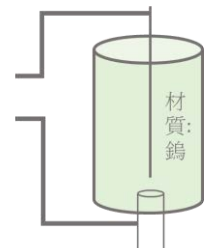
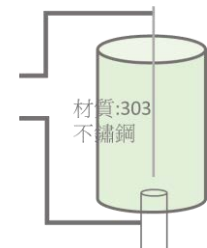
我們的實驗組別如下：

實驗一. 探討不同材質的金屬針對尖端放電型離子推進器推力的影響

實驗變因：金屬針種類

我們的實驗組別與其變因的資料如下：

表 3 實驗一實驗組別內容示意表

銅針組	鋁針組	鎢針組	不鏽鋼針組
金屬：銅	金屬：鋁	金屬：鎢	金屬：303 不鏽鋼
			
銅管長度：1 公分			
金屬針長度：五公分			
預設間距：0.5cm			

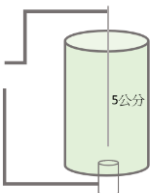
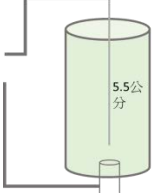
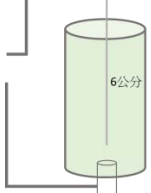
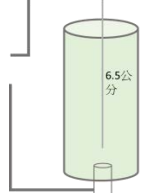
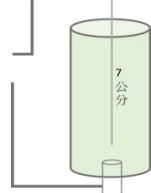
實驗二. 探討改變尖端放電型離子推進器金屬針、銅管表面積、間距及正負極

位置對推力的影響

實驗變因：銅管長度、金屬針長度、銅管與金屬針的距離、正負極位置

我們的實驗組別與其變因的資料如下：

表 4 實驗 2-1 實驗組別內容示意表

組別 1	組別 2	組別 3	組別 4	組別 5
長度：5cm	長度：5.5cm	長度：6cm	長度：6.5cm	長度：7cm
				

金屬針金屬：沿用實驗一之離子推進器加速度最大之組別金屬(以下皆同)

金屬管長度：1公分

表 5 實驗 2-2 實驗組別內容示意表

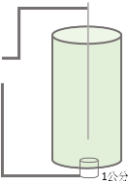
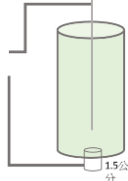
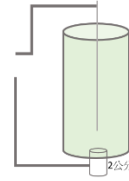
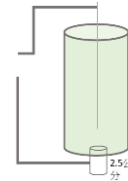
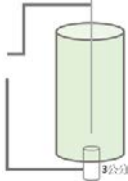
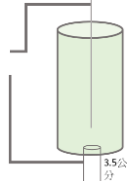
組別 1	組別 2	組別 3	組別 4	組別 5	組別 6
銅管長： 1cm	銅管長： 1.5cm	銅管長： 2cm	銅管長： 2.5cm	銅管長： 3cm	銅管長： 3.5cm
					

表 6 實驗 2-3 實驗組別內容示意表

組別	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
間距 (mm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

銅管長度：3.5 公分；不鏽鋼針長度：6.5 公分

說明：實驗 n-1 為「未顛倒金屬針正負極」之組別

實驗 n-2 為「顛倒金屬針正負極」之組別

實驗 n-3 為「未顛倒金屬針正負極」且「加入中和極端」之組別

實驗 n-4 為「顛倒金屬針正負極」且「加入中和極端」之組別

實驗 n-5 為「未顛倒金屬針正負極」且離子引擎倒置測試之組別

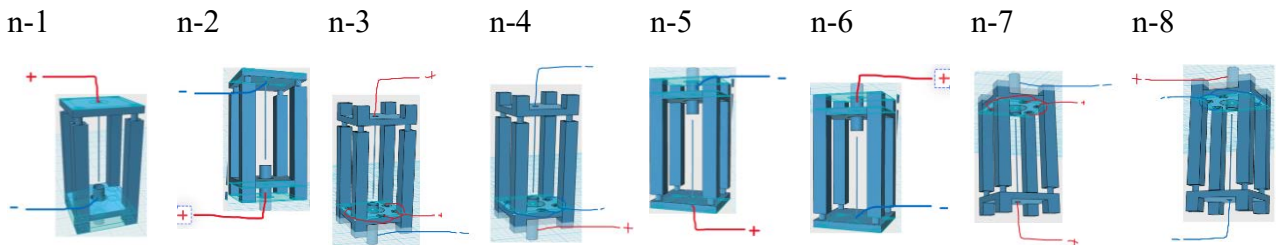
實驗 n-6 為「顛倒金屬針正負極」且離子引擎倒置測試之組別

實驗 n-7 為「未顛倒金屬針正負極」且「加入中和極端」且離子引擎倒置測試之組別

實驗 n-8 為「顛倒金屬針正負極」且「加入中和極端」且離子引擎倒置測試之組別

各組別皆含 n-1 n-2 n-3 n-4 n-5 n-6 n-7 n-8

註：中和極端為 0.5 公分寬，0.5 公分長，距離主銅管中心 2 公分，共六個

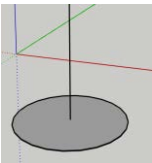
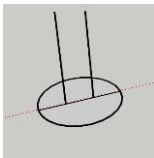


實驗三. 探討將金屬針換成表面積更大的其他設計對離子推進器推力的影響

實驗變因：正極端之表面積

我們的實驗組別與其變因的資料如下：

表 7 實驗 3-1 實驗組別內容示意表

主旨：探討「增加金屬針數量」對推力的影響	
組別 1	組別 2
數量：1	數量：2
	

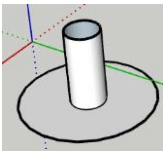
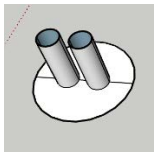
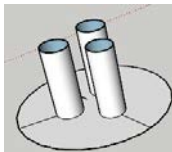
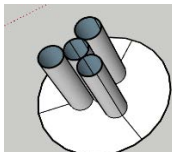
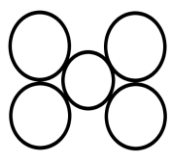
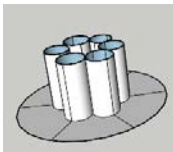
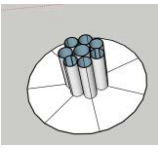
說明：間距為 0.6 公分、銅管長度為 3.5 公分、不鏽鋼針長度為 6.5 公分（以下實驗皆同）

實驗四. 探討改變負極端的表面積對離子推進器推力的影響

實驗變因：原為單一銅管該端之表面積

我們的實驗組別與其變因的資料如下：

表 8 實驗 4-2 實驗組別內容示意表

主旨：探討「增加銅管數量」對推力的影響						
組別 1	組別 2	組別 3	組別 4	組別 5	組別 6	組別 7
數量：1	數量：2	數量：3	數量：4	數量：5	數量：6	數量：7
						

另一端設計：實驗三[離子推進器可得加速度]最大之設計(以下皆同)

實驗五. 探討改變離子通路長度對離子推進器通過電流之影響

實驗變因：間距長度

我們的實驗組別與其變因的資料如下：

表 9 實驗五實驗組別內容示意表

組別	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
間距	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
(mm)															

實驗輸入電流：6.0V

實驗輸出電流：600.03V

實驗裝置設計：與實驗 4-2 第七組相同

測量數據：輸入端電流（電源供應器顯示之數位資料）

(三)實驗擺設與重要數據

以下是我們的實驗擺設概念圖

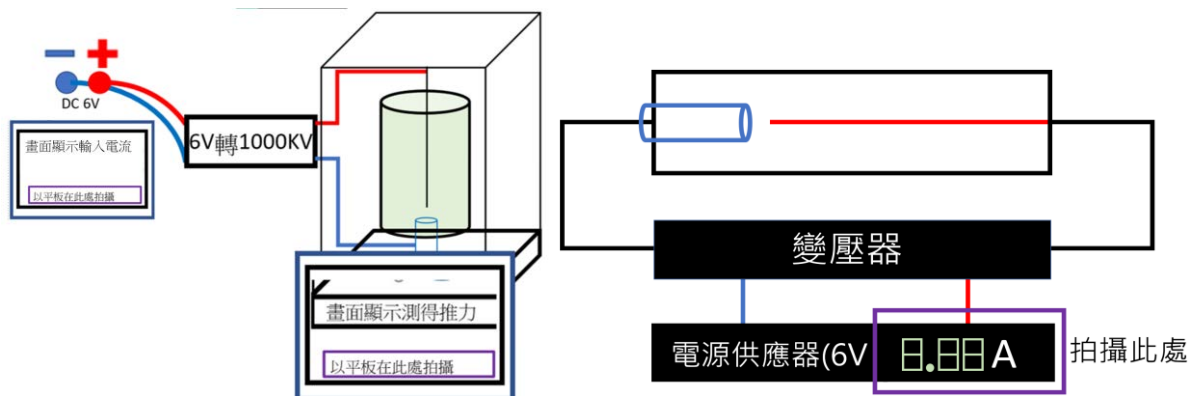


圖 3 實驗擺設概念圖（左為推力實驗、右為電流實驗）

以下是我們的實驗觀測重要數據：

- 推力值 (gw)
- 數據標準差 (gw)
- 單位質量推力 (gw/g)
- 電流 (A)
- 電壓 (V)
- 電阻 (Ω)

肆、研究結果

一、針對研究目的之一”離子推進器的裝置”、”測量本裝置變壓器供應電壓”

（一）我們在使用 123D 繪圖軟體製作出一離子模型實驗裝置後，調整離子模型之間距，並裝上金屬針、銅管，以熱熔膠固定，並連上電線，製作出一簡易離子引擎。自製離子引擎模型及 3D 列印設計如下圖：

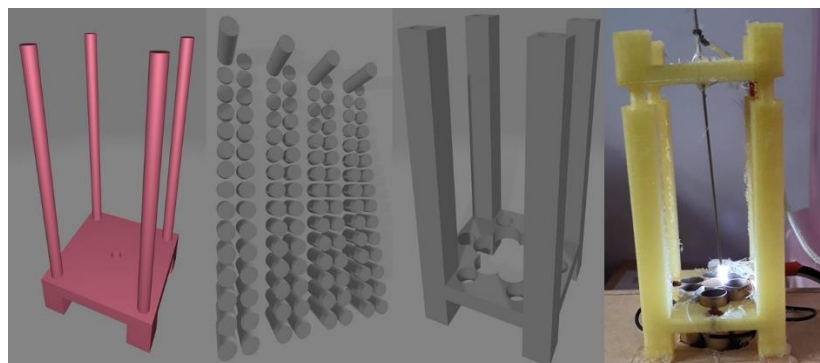


圖 4 自製離子引擎模型及設計圖（左 1：金屬針端設計圖；左 2：調高圓盤設計圖；右 1：銅管端設計圖；右 2：完整離子引擎實驗情形（實驗 4-1））

（二）在透過測量實驗裝置中 1Ω 處電壓後，以 Arduino 板類比腳位接收，發現電壓

並非定值。當設定為每毫秒量測一次時，其脈衝電流最大值為 0.03V，透過公式： $V_{total} = V_{1K\Omega} \times R_{total} / R_{1K\Omega}$ ，我們可以算出其電壓值為： $0.03 \times 20001 / 1 = 600.03V$ 。

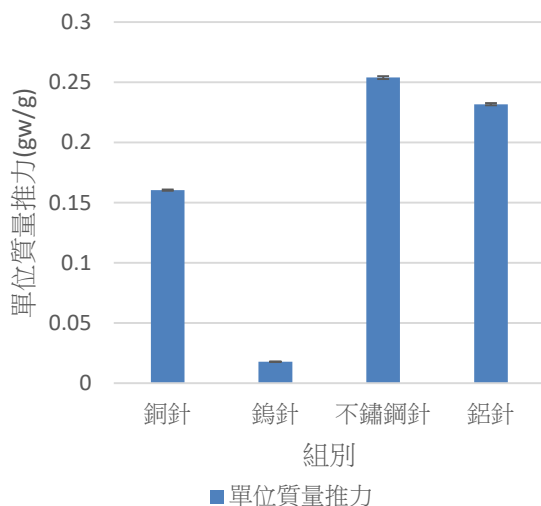
二、針對研究目的二

(一) 實驗一：探討不同材質的金屬針對尖端放電型離子推進器推力的影響

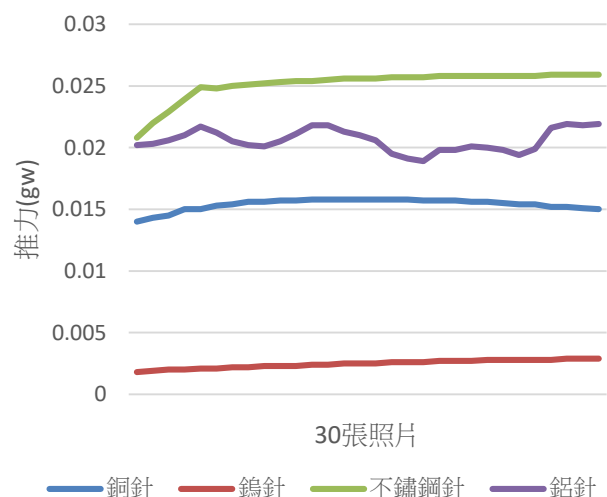
我們將實驗一實驗數據整理成下表，並將部分數據繪製成下圖：

表 10 實驗一實驗數據

	銅針	鎢針	不鏽鋼針	鋁針
30 張平均推力(gw)	0.01539	0.00247	0.02514	0.02058
極端質量(g)	0.94	1.36	0.97	0.87
推進器單位質量推力(gw/g)	0.16044	0.01779	0.25399	0.23182
標準差(gw)(30 張照片 推力)	0.00047	0.00032	0.00121	0.00089



5A



5B

圖 5 實驗一部分數據圖表 (5A：實驗一推力數據比較長條圖；5B：實驗一推力數據折線圖)

如上圖，我們可以發現，不鏽鋼針在任何時刻推力值皆大於鋁針、鎢針、銅針；鋁針在任何時刻推力值皆大於鎢針、銅針；銅針在任何時刻推力值皆大於鎢針。

(二) 實驗二：探討改變尖端放電型離子推進器金屬針、銅管表面積、間距及正負極

我們將實驗二之二之一實驗數據整理成下表，並將部分數據繪製成下圖：

表 11 實驗二之一實驗數據

	5cm	5.5cm	6cm	6.5cm	7cm
平均推力(gw)	0.00907	0.01861	0.02063	0.02375	0.01772
極端質量(g)	0.97	1	1.03	1.06	1.09
單位質量推力(gw/g)	0.0916350	0.1823780	0.1962854	0.2119575	0.1593174

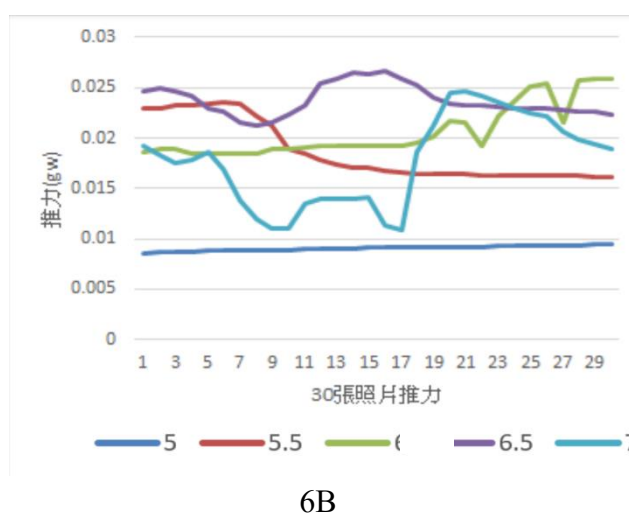
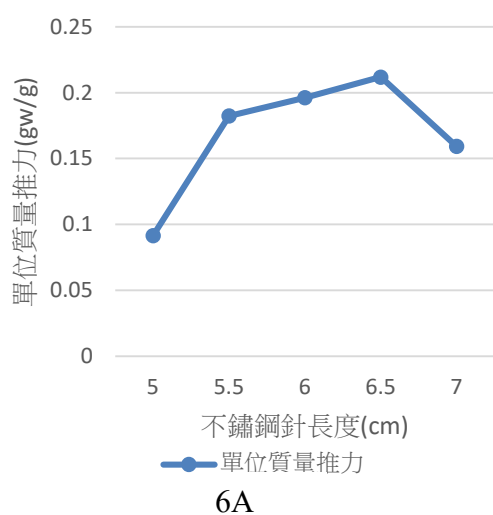


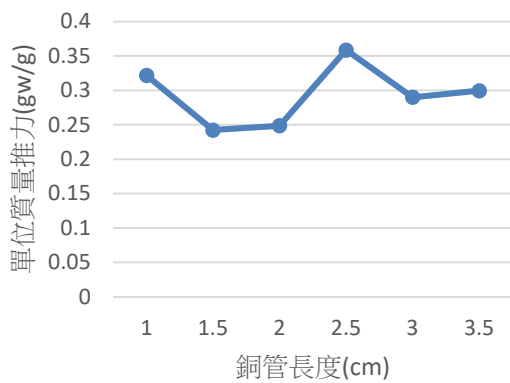
圖 6 實驗二之一部分數據圖表（6A：實驗二之一推力數據比較折線圖；6B：實驗二之一推力數據折線圖）

如上圖，可以發現，6.5 公分組在一開始大於所有組別，隨後被 5.5 公分組超越，但 5.5 公分組隨後下降。一段時間後，7 公分組推力超越其他組別，亦隨後下降。5.5 公分組一開始推力為第二，在超越 6.5 公分組後，推力持續下降，穩定後保持第三，並在 7 公分組超越後位居第四。7 公分組一開始位居第三，隨後快速下降到第四，在一段時間後快速上升到第一，又隨後下降至第三。6 公分組一開始位居第三，後來超越 5.5 公分組。在 7 公分組開始加速時，曾位居第三，後來又超越所有組別。5 公分組不論何時皆位居第五。

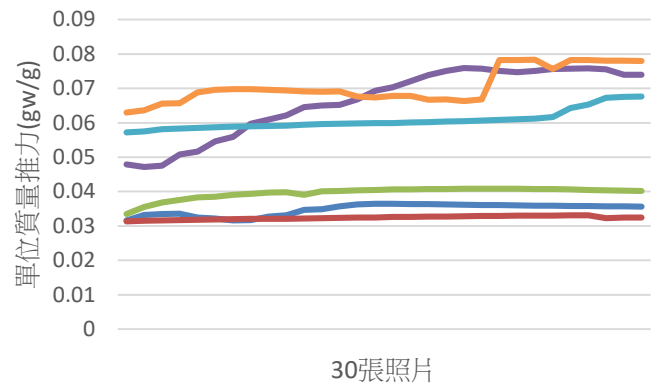
我們將實驗二之二實驗數據整理成下表，並將部分數據繪製成下圖：

表 12 實驗二之二實驗數據

	1	1.5	2	2.5	3	3.5
平均推力(gw)	0.034807	0.03239	0.039587	0.066253	0.060954	0.070613
極端質量(g)	1.06	1.31	1.56	1.81	2.06	2.31
單位質量推力(gw/g)	0.3218006	0.2423069	0.2486875	0.3587179	0.2899753	0.29957030



● 單位質量推力
7A



— 1 — 1.5 — 2 — 2.5 — 3 — 3.5
7B

圖 7 實驗二之二部分數據圖表（7A：實驗二之二推力數據比較折線圖；7B：實驗二之二推力數據折線圖）

根據上圖可以發現，1.5 公分組不論何時推力皆位居第六；1 公分組推力不論何時皆位居第五；2 公分組推力不論何時皆位居第四，但由於其推力並未隨質量比例增加，在左圖仍被視為下降。3 公分組一開始位居第二，在遭 2.5 公分組超越後位居第三。2.5 公分組一開始位居第三，隨後不斷超越各組，最後又被 3.5 公分組超越，位居第二。3.5 公分組一開始推力位居第一，後來遭 2.5 公分組超越，隨後亦超越 2.5 公分組，位居第一。

在實驗二之三之一中：

我們將實驗紀錄的五十張照片數據記錄於下表中，並製作成下圖：

表 13 實驗二之三之一實驗數據

組別	平均推力(gw)	組別	平均推力(gw)	組別	平均推力(gw)
1	0.01382	6	0.04307	11	0.01918
2	0.01961	7	0.02969	12	0.00807
3	0.03290	8	-0.00192	13	0.01310
4	0.03212	9	0.00849	14	0.00605
5	0.03653	10	-0.0102	15	0.00948

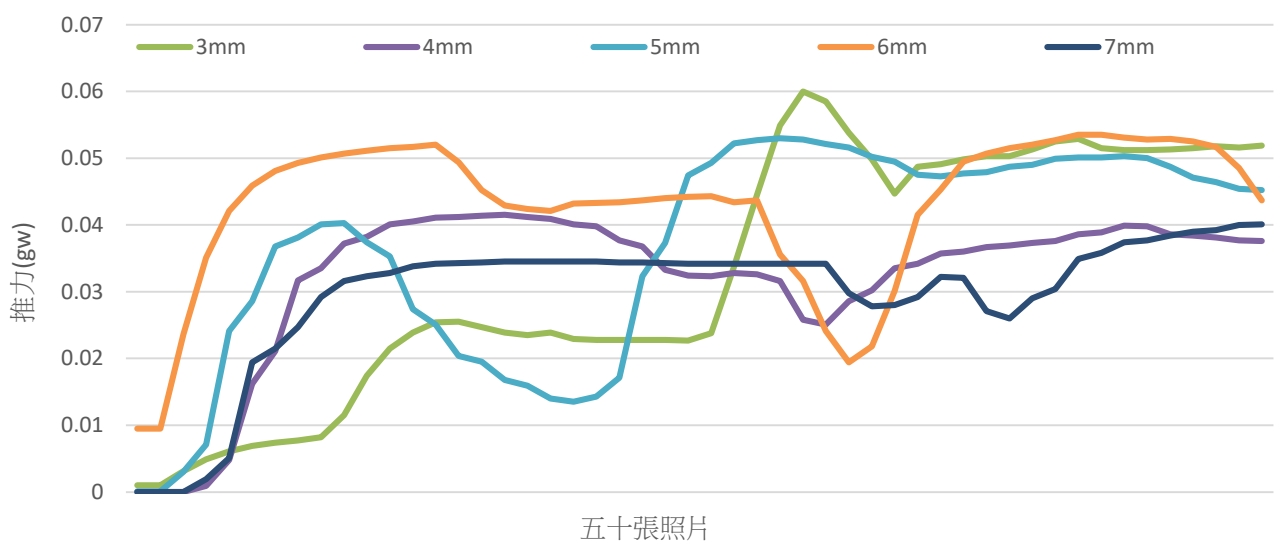
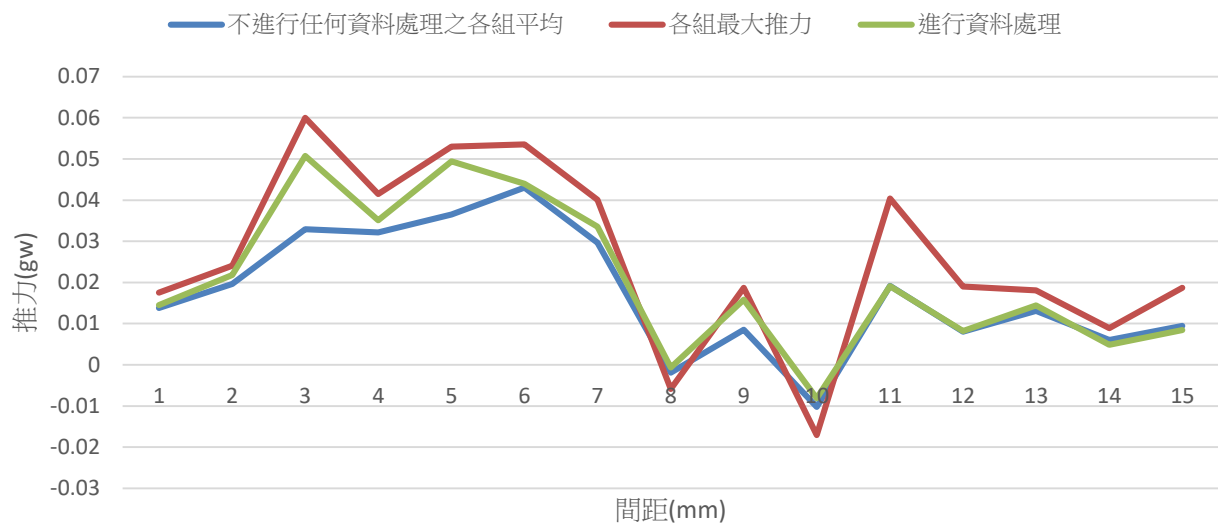


圖 8 實驗二之三之一部分數據圖表（上：實驗二之三之一各組平均推力比較折線圖；下：實驗二之三之一部份組別推力數據折線圖）

綜觀而言，6mm 組推力前段為第一，在中間段下降，3mm 組推力達到最高，最後推力 5mm 組小於 3mm、6mm 組。在各組穩定後，3mm 組平均推力最大；在穩定前（0~5 秒），6mm 組推力最大。如上圖我們可以發現，雖 6mm 組整體平均推力大於 3mm 組，然其最大推力及穩定後推力皆小於 3mm 組。

在實驗二之三之二中：

我們將實驗紀錄的五十張照片數據簡記於下表中，並製作成下圖：

表 14 實驗二之三之二實驗數據

組別	平均推力(gw)	組別	平均推力(gw)	組別	平均推力(gw)
1	-0.02633	6	-0.00798	11	-0.06368
2	-0.00994	7	-0.02159	12	-0.06574
3	0.01049	8	-0.03809	13	-0.05864
4	0.00382	9	-0.00681	14	-0.09745
5	0.00096	10	-0.01476	15	-0.08972

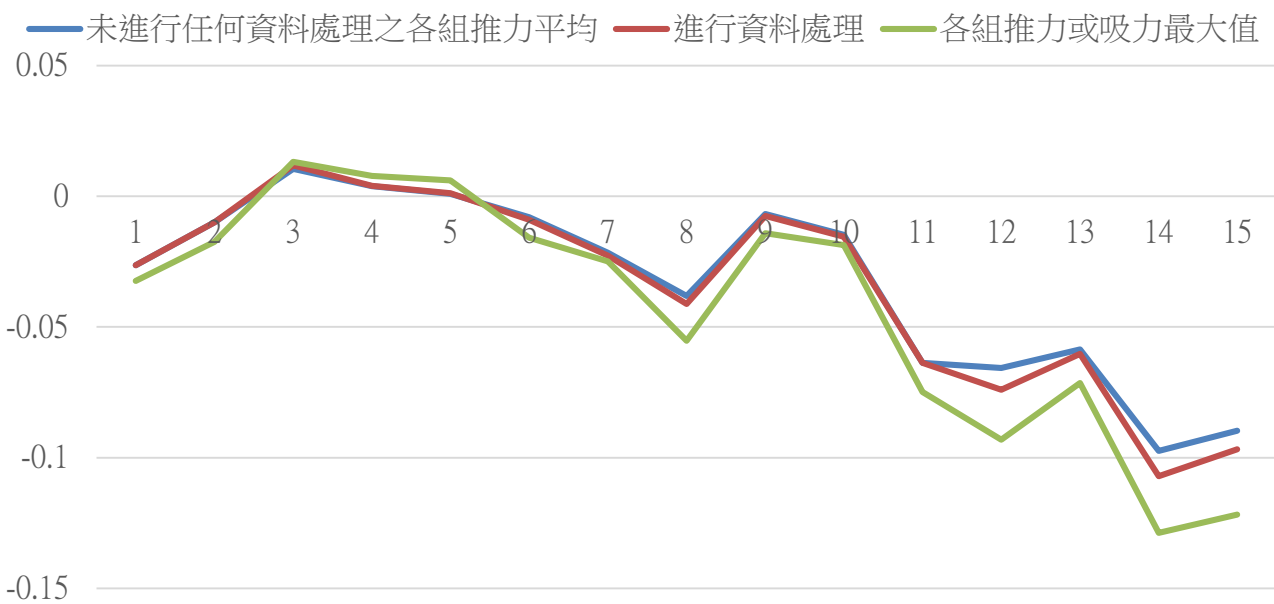


圖 9 實驗二之三之二各組平均推力比較折線圖

在實驗二之三之三中：

我們將實驗紀錄的五十張照片數據記錄於下表中，並製作成下圖：

表 15 實驗二之三之三實驗數據

組別	平均推力(gw)	組別	平均推力(gw)	組別	平均推力(gw)
1	0.02298	6	0.02195	11	0.00668
2	0.02567	7	0.01181	12	0.00465
3	0.02329	8	0.00825	13	0.00290
4	0.02106	9	0.01325	14	0.00163
5	0.02187	10	0.00851	15	-0.02364

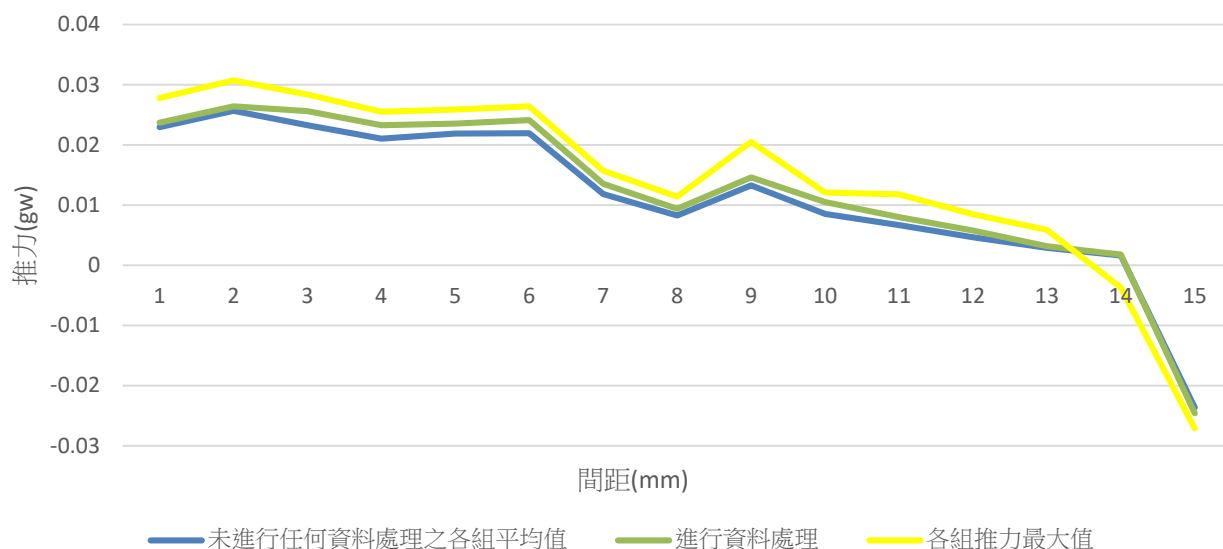


圖 10 實驗二之三之三各組平均推力比較折線圖

在實驗二之三之四中：

我們將實驗紀錄的五十張照片數據記錄於下表中，並製作成下圖：

表 16 實驗二之三之四實驗數據

組別	平均推力(gw)	組別	平均推力(gw)	組別	平均推力(gw)
1	-0.025062	6	-0.00909	11	-0.01554
2	-0.033934	7	-0.00692	12	-0.01707
3	-0.028664	8	-0.00787	13	-0.00767
4	-0.013926	9	-0.00968	14	-0.00692
5	-0.0163	10	-0.00834	15	-0.00815

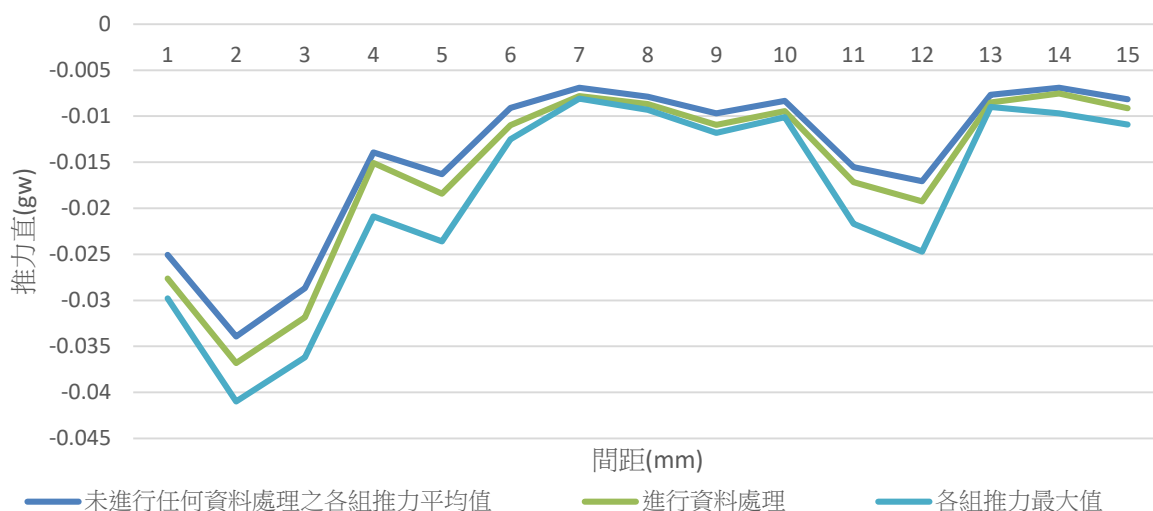


圖 11 實驗二之三之四各組平均推力比較折線圖

在實驗二之三之五中：我們將實驗紀錄的五十張照片數據記錄於下表中，並製作成下圖：

表 17 實驗二之三之五實驗數據

組別	平均推力(gw)	組別	平均推力(gw)	組別	平均推力(gw)
1	0.009251	6	-0.00397	11	0.00308
2	0.001206	7	0.009798	12	0.012834
3	0.005529	8	0.011994	13	0.013894
4	0.008929	9	-0.00187	14	0.015814
5	0.009176	10	-0.01204	15	0.021773

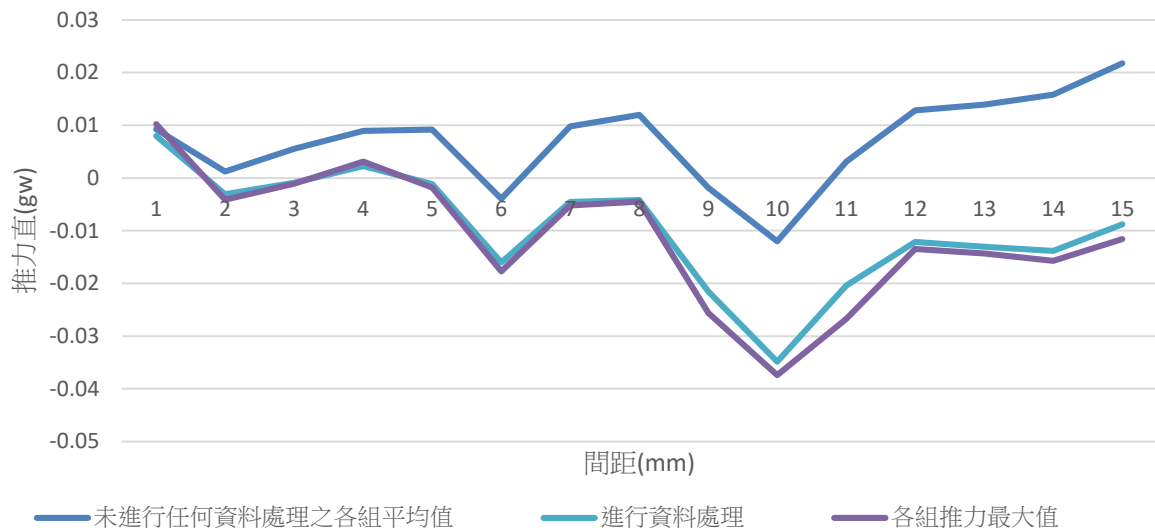


圖 12 實驗二之三之五各組平均推力比較折線圖

在實驗二之三之六中：

我們將實驗紀錄的五十張照片數據記錄於下表中，並製作成下圖：

表 18 實驗二之三之六實驗數據

組別	平均推力 (gw)	組別	平均推力 (gw)	組別	平均推力(gw)
1	-0.01003	6	-0.00816	11	-0.00662
2	-0.00886	7	-0.00736	12	-0.0045
3	0.00021	8	-0.00202	13	-0.02302
4	-0.00589	9	-0.00632	14	-0.00764
5	-0.00886	10	-0.0025	15	-0.01747

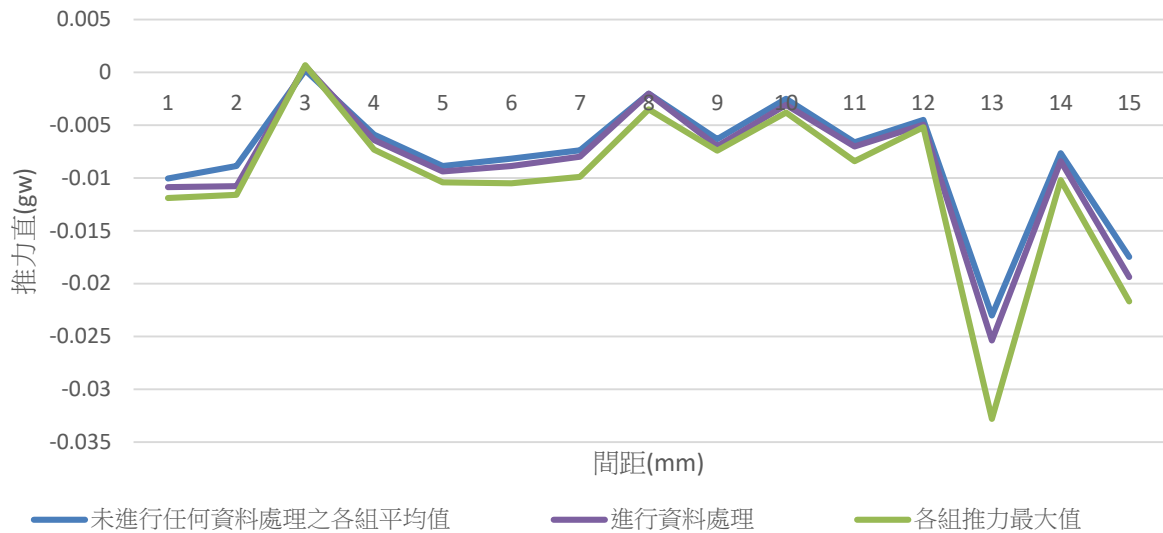


圖 13 實驗二之三之六各組平均推力比較折線圖

在實驗二之三之七中：

我們將實驗紀錄的五十張照片數據記錄於下表中，並製作成下圖：

表 19 實驗二之三之七實驗數據

組別	平均推力(gw)	組別	平均推力(gw)	組別	平均推力(gw)
1	-0.00613	6	-0.00243	11	-0.01065
2	-0.00049	7	-0.00118	12	0.00088
3	-0.00153	8	-0.00246	13	-0.01064
4	-0.00016	9	-0.01012	14	-0.00297
5	0	10	0	15	-0.00919

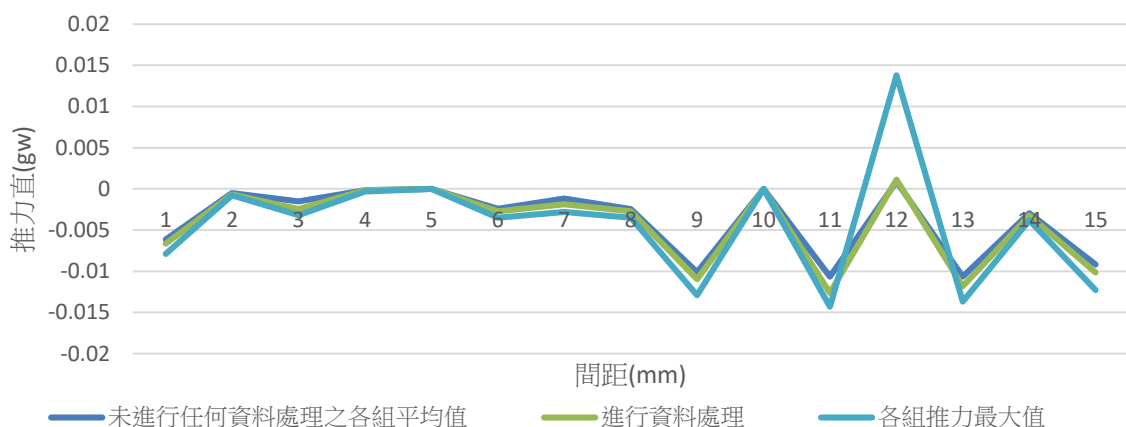


圖 14 實驗二之三之七各組平均推力比較折線圖

如圖，我們發現當間距為 12mm 時，推力最大值約為 0.15gw，然而由於整體推力不佳，其穩定後推力及全體平均推力皆小於 0.005gw。

在實驗二之三之八中：

我們將實驗紀錄的五十張照片數據記錄於下表中，並製作成下圖：

表 20 實驗二之三之八實驗數據

組別	平均推力(gw)	組別	平均推力(gw)	組別	平均推力(gw)
1	-0.00593	6	-0.01053	11	-0.00691
2	-0.00377	7	-0.01576	12	-0.0072
3	-0.00693	8	-0.01105	13	-0.00701
4	-0.00838	9	-0.00984	14	-0.00648
5	-0.00955	10	-0.01278	15	-0.00647

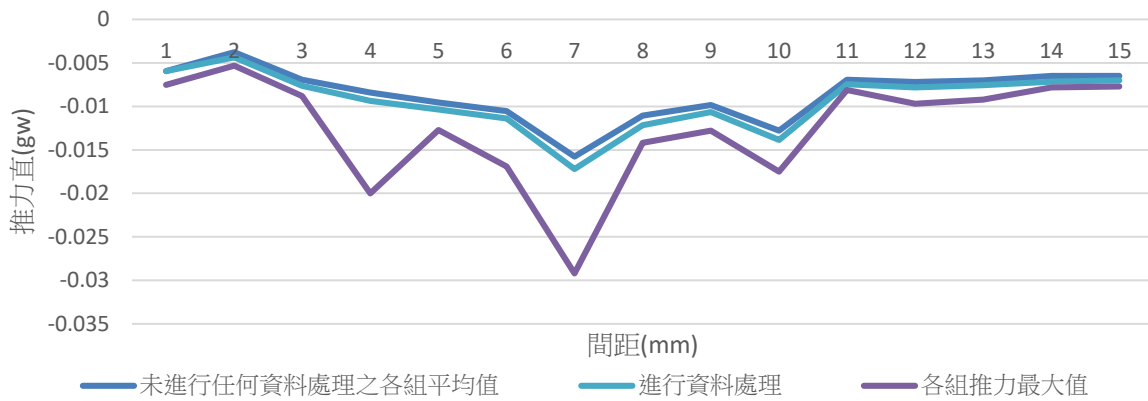


圖 15 實驗二之三之八各組平均推力比較折線圖

如圖，我們發現，各組推力最大值皆與其平均及穩定後推力值有一定差距

實驗三：探討將金屬針換成表面積更大的其他設計對離子推進器推力的影響

我們將實驗三實驗數據整理成下表，並將部分數據繪製成下圖：

表 21 實驗三之一實驗數據

實驗三之一實驗數據		
組別	一根	二根
平均推力(gw)	0.025118	0.000158

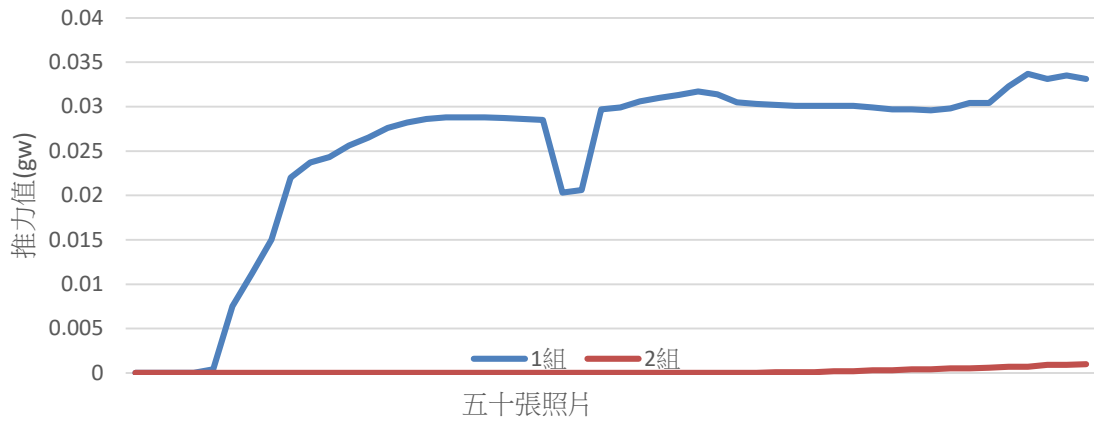


圖 16 實驗三推力數據折線圖

實驗四：探討改變負極端的表面積對離子推進器推力的影響

我們將實驗四實驗數據整理成下表，並將部分數據繪製成下圖：

表 22 實驗四實驗數據紀錄表

實驗四實驗數據							
組別	一根	兩根	三根	四根	五根	六根	七根
推力(gw)	0.0133	-0.00928	-0.01551	-0.07664	0.011714	0.008668	0.028104

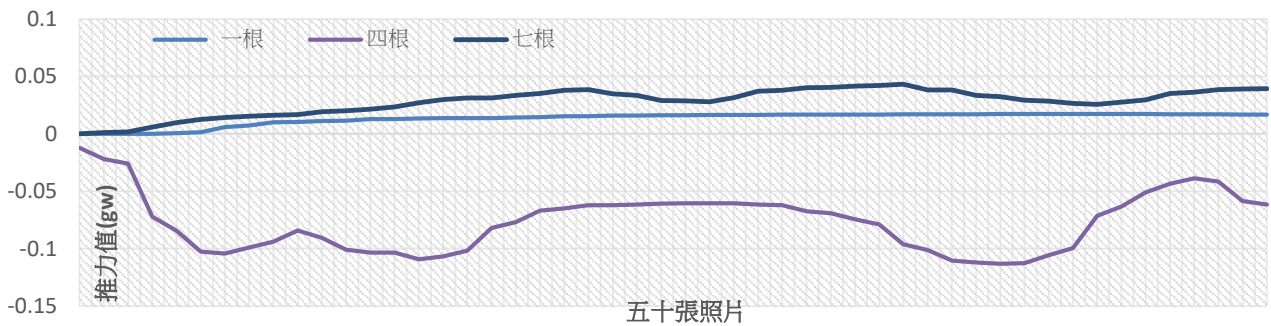
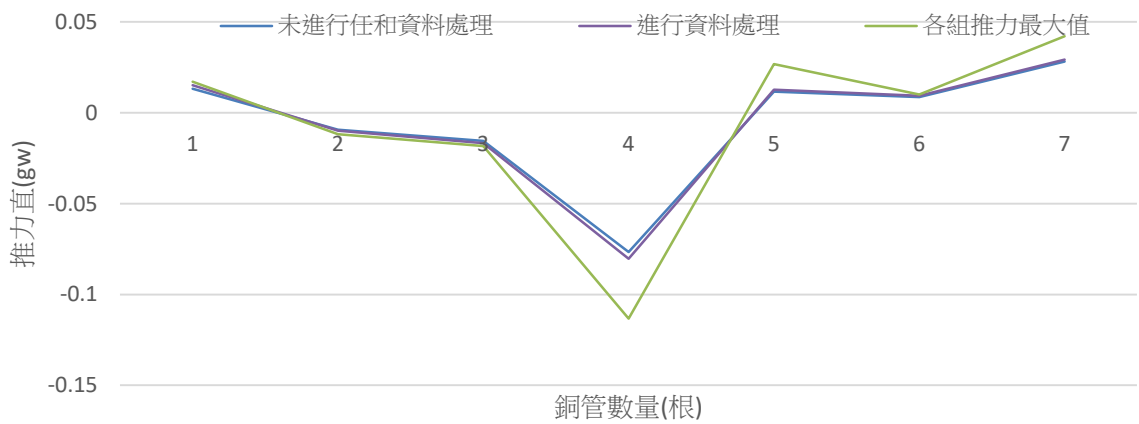


圖 17 實驗四推力數據折線圖（上：實驗四各組推力平均折線圖；下：各組五十張照片推力數據折線圖）

二、針對研究目的—”測量間距對網格靜電型離子推進器通過電流之影響”

實驗五：探討改變離子通路長度對離子推進器通過電流之影響

我們將實驗五實驗數據整理成下表，並將部分數據繪製成下圖：

表 23 實驗五實驗數據

組別	電流(A)	組別	電流(A)	組別	電流(A)
1	2.9748	6	2.8984	11	2.846
2	2.957	7	2.8964	12	2.8096
3	2.8892	8	2.8824	13	2.8192
4	2.918	9	2.8904	14	2.844
5	2.9146	10	2.879	15	2.7486

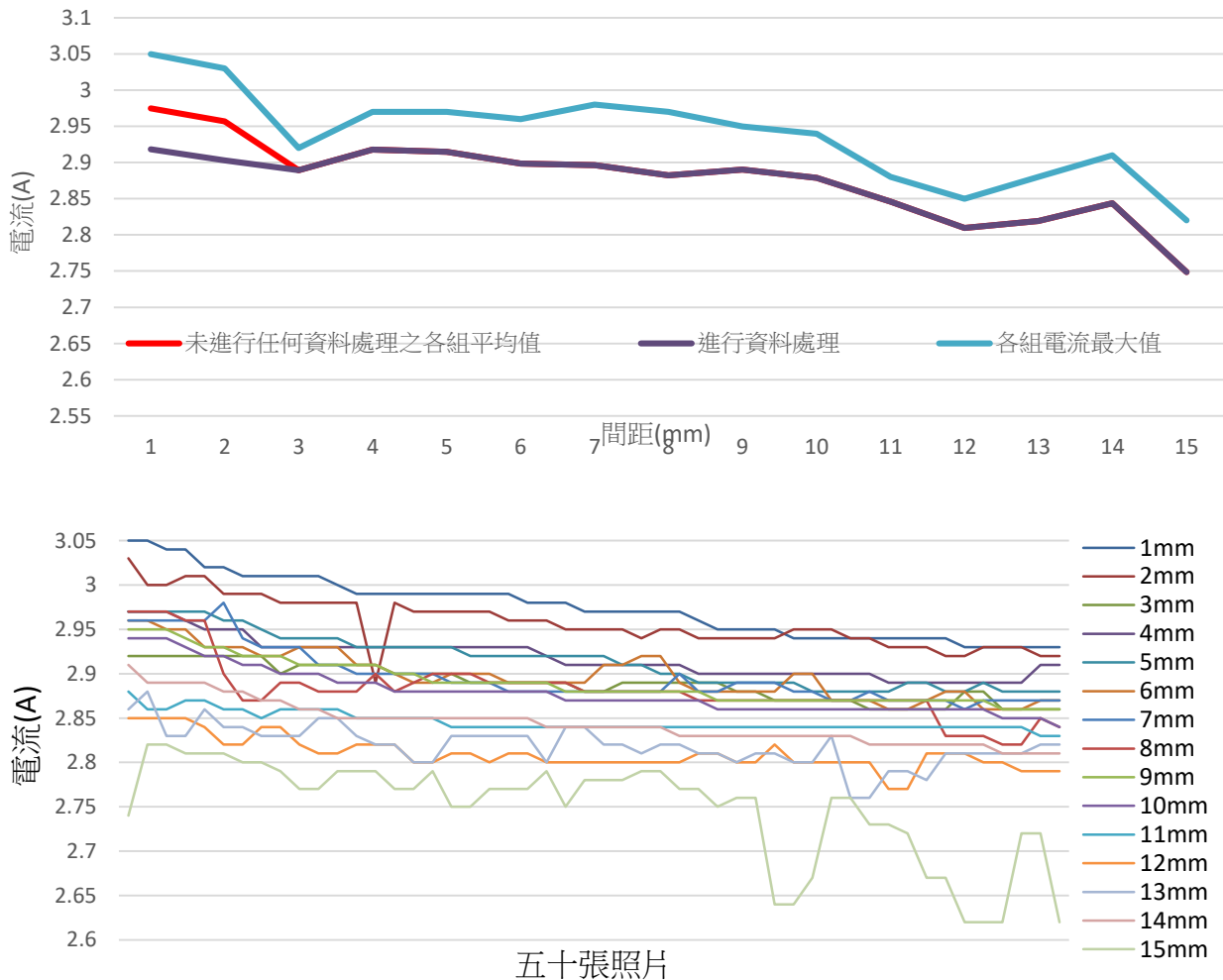


圖 18 實驗五各組實驗數據折線圖（上：實驗五各組電流比較折線圖；下：實驗五各組五十張照片電流數據折線圖）

伍、討論

- 一、在實驗時，我們發現在做實驗時電子儀器會受到功能干擾，不過在鎢針組時特別嚴重，試了多次手機都會被自動關閉、跑出亂碼，因此推斷鎢針會導致儀器失準，不適合用在精密儀器上。
- 二、在所有的實驗中我們皆發現，離子推進器的推力並非一開始就處於高峰，而是有一段”加速期”，而各組加速時長不同。我們推測是因為高壓崩潰後，空氣的電阻迅速下降形成電暈，使反應更加順利，使推力值上升。
- 三、觀察實驗一實驗數據，可以發現各組標準差值極小，推力穩定。因此，為了區分何者推力較佳，我們將實驗一各種金屬針進行 T 檢定檢查後，發現各組推力與銅針 $p \ll .001$ ，有顯著差異，確定不鏽鋼針、鋁針推力確實大於銅針，鎢針推力確實小於銅針。我們再將不鏽鋼針與鋁針進行 T 檢定檢查（與不鏽鋼針比較），發現 $p \ll .001$ ，有顯著差異，確定不鏽鋼針推力確實大於鋁針。綜合以上，我們發現不鏽鋼針推力最佳，適合用在離子引擎中。
- 四、根據實驗二之一推力數據比較折線圖，我們發現 6.5 公分組平均推力優於其他組別，推測是由於其表面積較大，可以更有效率地產生電漿。而七公分組效能會低於 6.5 公分組，在觀察實驗二之一推力數據折線圖後，發現其組別推力十分不穩定，有時也高於 6.5 公分組。我們推測是因為其表面積過大，雖增加反應面積，卻導致電荷無法集中於較靠近尖端的地方，使其平均效能下降。
- 五、根據實驗二之二推力數據比較折線圖，我們發現 3.5 公分組應該為最適合使用在離子引擎中的組別。雖然 2.5 公分組推力大於任何組別，但其加速過程較久，且最終穩定推力小於 3.5 公分組。我們推測是由於 3.5 公分組表面積較大，可以更有效率地將離子加速，中和離子。
- 六、在實驗時我們發現，某部分組別（實驗二之三之七 5mm、10mm 組）過程中長時間推力為 0，推測是由於反應環境不利於產生離子風。而在實驗二之三之七、實驗二之三之八中，實驗過程時推力極為微小，實驗時推力最大值與穩定後推力數據有些差距，且取出實驗裝置時疑似聞到鐵鏽味和漂白水味，推測亦是因反應難以進行，與金屬針、熱熔膠、電線產生化學反應。
- 七、根據實驗資料，可以發現推力的變化並不會隨著間距出現直接的正相關或負相關。我們將推測的推力變化原因記錄於下：

(一) 實驗二之三之一、二之三之五

1. 在間距為 1mm~6mm 時，尖端放電反應為主要反應，部分電子因運行方向不同，正負極有時各有推力（1mm、4mm），主要是推力由正離子向負極移動產生，部分與電子抵銷。
2. 在間距為 7mm~8mm 時，隨著間距增加，部分離子進行遠場反應，抵銷推力，使反應測得推力減少，並使正極端負推力減少
3. 在間距為 9mm~10mm 時，隨著間距再度增加，遠場反應及尖端放電難度增加。雖由於距離增加，個別離子所得加速距離增加，但亦因遠場反應、粒子量減少使推力由正轉負（9mm→10mm）（2-3-1）
4. 在間距為 11mm~15mm 公分時，隨著距離增加，遠場反應雖持續進行，但由於空氣阻力使反應式微，推力轉正，以尖端離子通路為主

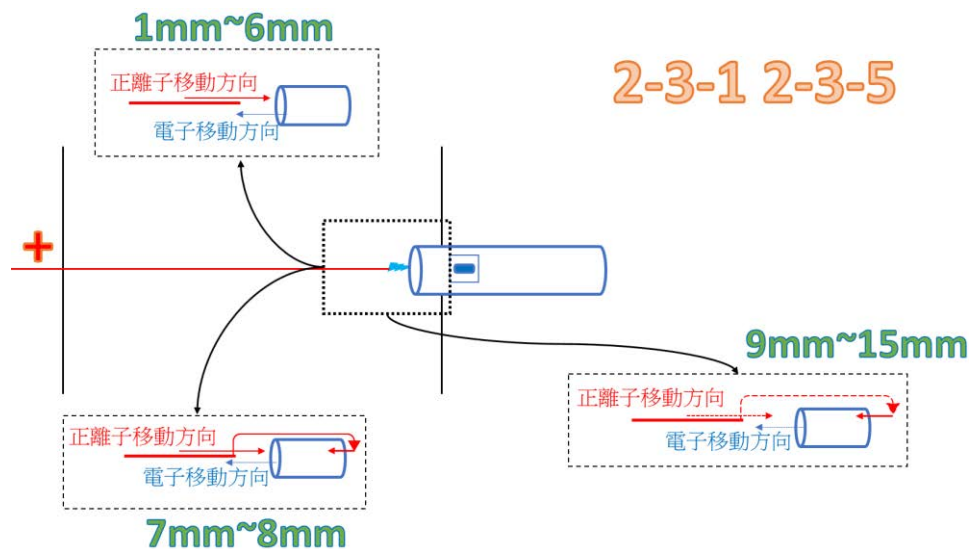


圖 19 實驗二之三之一、二之三之五理論說明圖

(二) 實驗二之三之二、二之三之六

1. 在間距為 1mm~2mm 時，尖端放電反應為主要反應，反應與實驗二之三之一相似。然，由於負極端表面積較小，電荷擠壓較嚴重，電子產生效率增加，推力絕對值較二之三之一大（以 2-3-2 角度）。但由於正極端孔洞較小，且負極端反應在銅管邊緣，使推力不明顯。電子移動為遠場反應加尖端放電，使推力為負（2-3-6 角度）
2. 在間距為 3mm 時，由於磁場減弱，電子主要集中於金屬針端產生，使推力轉正。部分正離子與電子碰撞，還原成中性，受重力場影響，使其向電子秤移動。
3. 在間距為 4mm~8mm 時，隨著間距增加，因正離子遠場反應不如實驗二之三之

一，推力最主要受到重力場、電子風、正離子風影響。隨著離子加速距離增加，推力轉為負值，推力絕對值持續增加。

4.在間距為 9mm~15mm 時，隨著距離增加，正離子亦開始遠場反應，尖端放電粒子數減少，使推力絕對值減少。由於距離增加，電子與正離子還原成中性粒子，使推力兩端皆負。當間距為 15mm 時，雖反應離子減少，但由於每個帶電粒子動能增加，推力絕對值增加（以 2-3-2 角度）。由於金屬針端較為封閉，主要偵測推力為遠場，受到間距影響，推力絕對值不斷變化

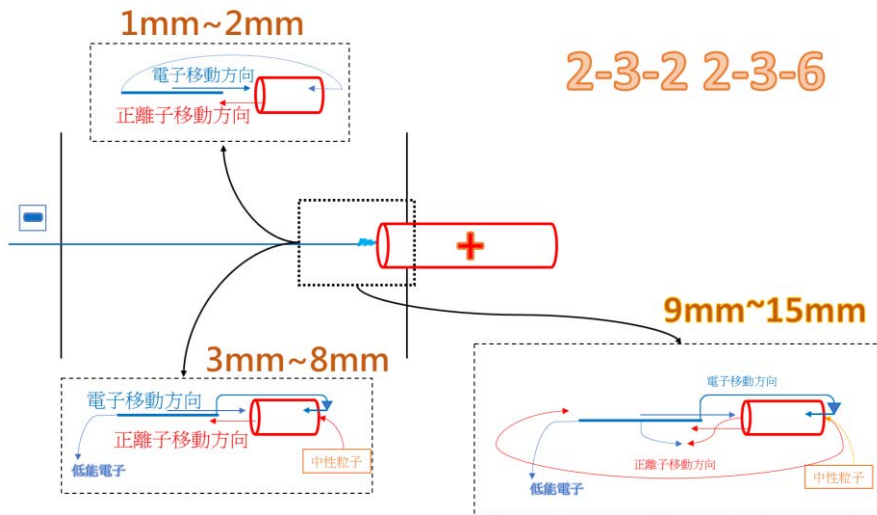


圖 20 實驗二之三之二、二之三之六理論說明圖

(三) 實驗二之三之三、二之三之七

主要的反應與實驗二之三之一相同，但由於有輔助銅管協助吸收電子，減少電子所帶來的反向推力。但也因為輔助銅管位於連接離子引擎內外端，使遠場反應更加劇烈，導致推力不斷隨間距增加而減少。由於金屬針端孔洞較小，且主要反應集中在銅管、輔助銅管附近，使部分組別數據持續為零。

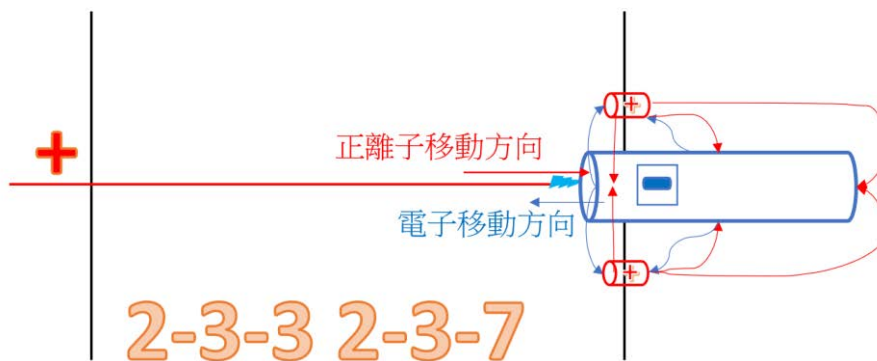


圖 21 實驗二之三之三、二之三之七理論說明圖

(四) 實驗二之三之四、二之三之八

主要反應與實驗二之三之二相似，不過由於電子來源是輔助銅管及金屬針，使電子的來源更加不固定，基本上來自金屬針尾端與尖端、輔助銅管兩端、以及電漿。因為如此，使推力雖為負值，卻因間距變化而產生巨大起伏。在最初開始時，主要由尖端放電主導，此時推力負值最大（2-3-4 角度）而金屬針末端亦有電子向銅管移動，進行遠場反應。當間距增加時，部分低能量電子與正離子還原成中性粒子，減少反應粒子。而輔助銅管雖未和銅管產生電漿，亦產生離子通路，使推力產生變化。因其最主要反應位於離子引擎外，使推力減少，成為負值。隨著間距不斷增加，主要反應為輔助銅管及銅管（負值）（2-3-4 受影響），但因其高低差不大，使推力絕對值較小。

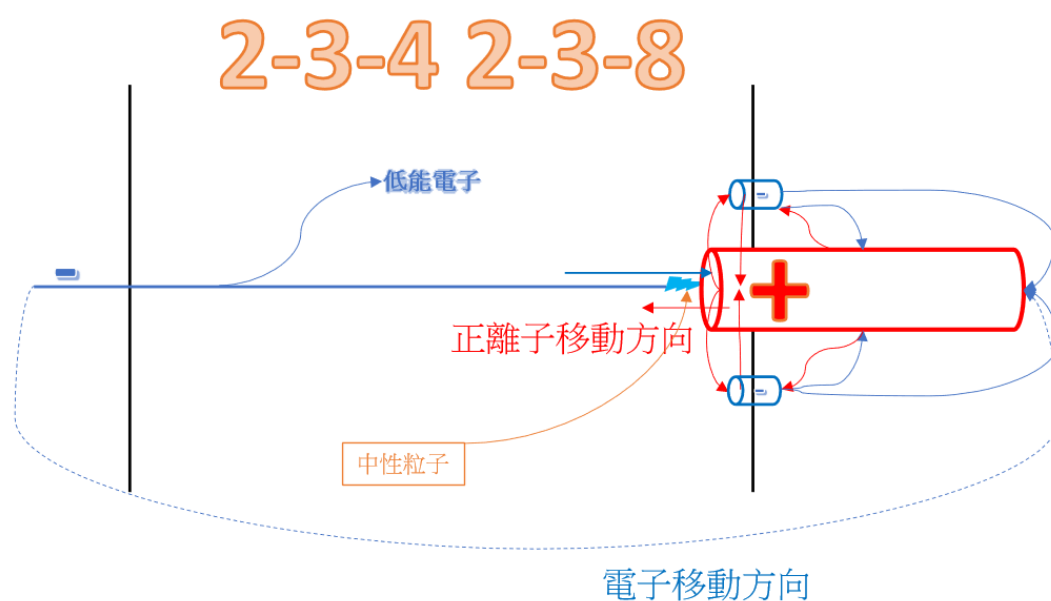


圖 22 實驗二之三之四、二之三之八理論說明圖

九、根據實驗二之三各組實驗結果，我們發現，當間距為 6mm 時，前十秒平均推力優於其他組別其他組別；而當間距為 3mm 時，其最高推力優於其他組別，且推力穩定後平均推力大於其他組別，亦在本組出現全數實驗推力最大數據。考量本組實驗裝置之限制（變壓器穩定供電時間為十秒），我們認為 6mm 的間距較適合應用在本組後續實驗中，而 3mm 的間距長較適合使用於離子推進系統中。

十、在實驗三時，發現兩根金屬針幾乎沒推力，僅在後期有些微上升。後來，本組嘗試將金屬針改為表面積更大的銅板時，發現推力轉負，推測是表面積大於銅管，產生類似實驗二之三之六實驗模式。而根據實驗三推力數據圖可明顯發現，當金屬針數量為一時，推力最大。

十一、根據實驗四實驗數據圖表，可以發現，當銅管數由一增加為二時，推力轉為吸力，推測是因為為了放入銅管，破壞了離子引擎內外間隔，導致遠場反應加劇，使推力與吸力抵銷。隨著銅管數持續增加，負極反應面積增加，使尖端放電反應速率增加，並同時隔離離子引擎內外空間，使推力再度變大。

十二、根據實驗五實驗數據圖表，發現當間距增加時，電流供應器輸出的電流下降，而在實驗時，電流亦隨實驗時間增加而減少。觀察實驗情形，我們發現，當間距增加時，每秒產生之電弧次數逐漸減少（1mm~11mm 穩定發光，產生電弧頻率>3Hz；12mm~15mm 時產生頻率約 3Hz），推測是因為當間距變大時，空氣阻力增加，帶電粒子通過難易度增加，使電阻變大（可視離子通路一電阻，長度增加時其電阻亦增加）。而在實驗中電流逐漸減少，或許是因為本組實驗變壓器效能不穩定導致（於前述，故本實驗時長限制為十秒內）。

十三、彙整以上討論，我們將對於本實驗之原理想法統合，整理成下圖：

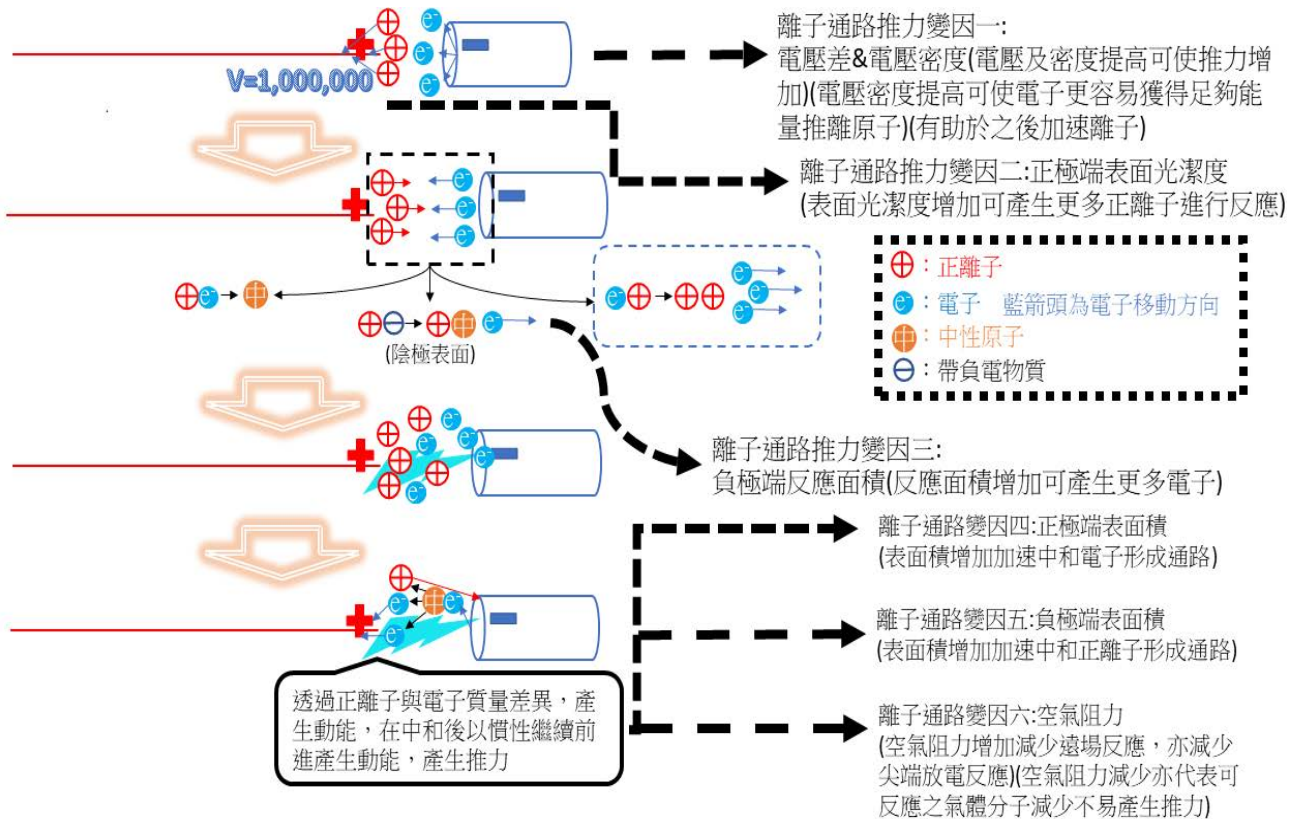


圖 23 本組實驗理論圖

陸、結論

一、目前研究結論

- (一) 我們所設計之離子推進模型採乳酸塑膠製成，並置入不銹鋼針、銅管，以熱熔膠、電線連接，總重約 100 公克。將其置於電子秤中進行推力測試，其推力效果優良，惟噪音問題有待解決。目前以海棉包覆電子秤，有效減少噪音。
- (二) 本實驗之變壓器經過測量，發現為一 6V 轉 600.03 伏特的變壓器。
- (三) 進行實驗時，我們發現使用鎢針進行離子通路實驗時會干擾電子裝置，不適合用在精密電子儀器上。
- (四) 根據實驗一實驗結果，我們發現 303 不鏽鋼針推力優於其他金屬針，適合用在離子引擎中。
- (五) 根據實驗二之一實驗結果，我們發現 6.5 公分長的金屬針在離子通路中平均推力優於其他組別，適合用在離子引擎中。
- (六) 根據實驗二之二推力數據比較折線圖，我們發現 3.5 公分長的銅管在離子通路中平均推力優於其他組別，適合用在離子引擎中。
- (七) 根據實驗二之三各組實驗結果，當間距為 3mm 時，穩定後效能最佳，適合運用在離子推進器上；當間距為 6mm 時，10 秒內推力值平均最佳，適合使用於實驗中。
- (八) 根據實驗三實驗結果，發現當金屬針數量維持為一的時候推力最大，適合用在離子引擎中。
- (九) 根據實驗四實驗結果，發現當銅管數量為七時，推力值最大，適合用在離子引擎中。
- (十) 根據實驗五實驗結果，發現當間距增加時，整體而言，電源供應器供應電流逐漸減小。

二、研究限制

本組實驗受限於電磁波之干擾，雖已將實驗電子秤升級，但使用之手機有時仍備受影響。本組變壓器亦容易在實驗時因反應不易燒毀，導致各組實驗變壓器不同，數據產生些微落差。本組在製作實驗器材時，由於材料及經費問題，無法每組實驗皆使用最新之金屬針及銅管，使推力受到些微影響。在討論中我們亦有提到，實驗時有聞到鐵鏽味及漂白水味，有實驗器材分解之情形，影響微觀離子通路反應。本組進行電流實驗時因觀察之數據來自電流

供應器，並非離子推進器實際通過電流，無法準確推算間距與電流的關係，僅能看出趨勢。

三、未來展望

我們未來的目的如下：

- (一) 探討對氣體施予一固定方向的磁場方向對尖端放電型離子推進器推力的影響。
- (二) 探討調整尖端放電型離子推進器供電電壓及電流對推力的影響。
- (三) 探討改變尖端放電型離子推進器供電頻率對推力的影響。
- (四) 探討改變間距對離子推進器內部電流、電阻變化之影響。
- (五) 探討不同金屬針對離子通路內通過電流大小之影響。

柒、參考文獻資料

Make:(2015, August 28). Build An Ionic Thruster: [Video file]. 查詢日期：2022/6/14。檢自

<https://makezine.com/projects/ionic-thruster/>

Science Theater 2020. (2015, September 14). ION engine: [Video file]. 查詢日期：2022/6/14。檢

自 https://www.youtube.com/watch?v=1nmBTE_Y8-E

Tech Shift. (2021, January 19). Electric Plasma Jet Engine: The Future Of Aircraft: [Video file]. 查

詢日期：2022/6/14。檢自 <https://www.youtube.com/watch?v=DK7OxoRgakE>

The Action Lab. (2021, March 08). These Planes Are Propelled With Ionic Thrust: [Video file]. 查

詢日期：2022/6/14。檢自 <https://www.youtube.com/watch?v=VSYwaesDQBw>

吳珮瑜（2017）。電場中的小晶靈-高電壓電場中液滴的結晶現象。國立台灣科學教育館。

查詢日期：2022/6/14。檢自 [https://www.ntsec.edu.tw/Science-](https://www.ntsec.edu.tw/Science-Content.aspx?cat=1110&a=6822&fld=&key=&isd=1&icop=10&p=1&sid=13397)

[Content.aspx?cat=1110&a=6822&fld=&key=&isd=1&icop=10&p=1&sid=13397](https://www.ntsec.edu.tw/Science-Content.aspx?cat=1110&a=6822&fld=&key=&isd=1&icop=10&p=1&sid=13397)

科普講堂（無日期）。奇妙的電漿與電漿的應用。國家實驗研究室。查詢日期：

2022/04/05。檢自

[https://www.narlabs.org.tw/xcscience/cont?xsmsid=0I148638629329404252&qcat=](https://www.narlabs.org.tw/xcscience/cont?xsmsid=0I148638629329404252&qcat=0I164512522332344267&sid=0J123382852944198982)

[0I164512522332344267&sid=0J123382852944198982](https://www.narlabs.org.tw/xcscience/cont?xsmsid=0I148638629329404252&qcat=0I164512522332344267&sid=0J123382852944198982)。

徐冠東（2010）離子推進器之探索。國立台灣科學教育館。查詢日期：2022/6/14。檢自

<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/60/pdf/NPHSF2020-051819.pdf?875>

彭靖文（2004）。電離轉輪。國立台灣科學教育館。查詢日期：2022/6/14。檢自
[https://www.ntsec.edu.tw/Science-
Content.aspx?cat=&a=0&fld=&key=&isd=1&icop=10&p=1078&sid=2835](https://www.ntsec.edu.tw/Science-Content.aspx?cat=&a=0&fld=&key=&isd=1&icop=10&p=1078&sid=2835)

趙怡欽、許紘璋（2011）。微波電漿推進器之研發。行政院國家科學委員會：計畫編號
NSC99-2221-E006-051-MY3。查詢日期：2022/6/14。檢自
<https://www.grb.gov.tw/search/planDetail?id=2212847>

【評語】 030107

1. 研究主題：議題相當新穎，能夠由研究獎助計畫出發，持續研究改進至參與科展，難能可貴。
2. 創意、學術或實用價值：離子引擎的相關實驗設計與研究方式相當不易，本作品在有限的條件下，盡量的克服限制，並使用數學方法分析數據，相當值得鼓勵。可惜結果呈現圖表不易了解，若能再由讀者角度設計製圖必更佳。
3. 科學方法之適切性：分析討論方式有可取之處，但繳交之實驗日誌僅是實驗結果的手寫版本，無法追溯研究過程的突破或反思，極為可惜。
4. 展示及表達能力；尚可，若能將 30 張，50 張照片如何和各種量測連結說清楚，就更棒了！

作品簡報

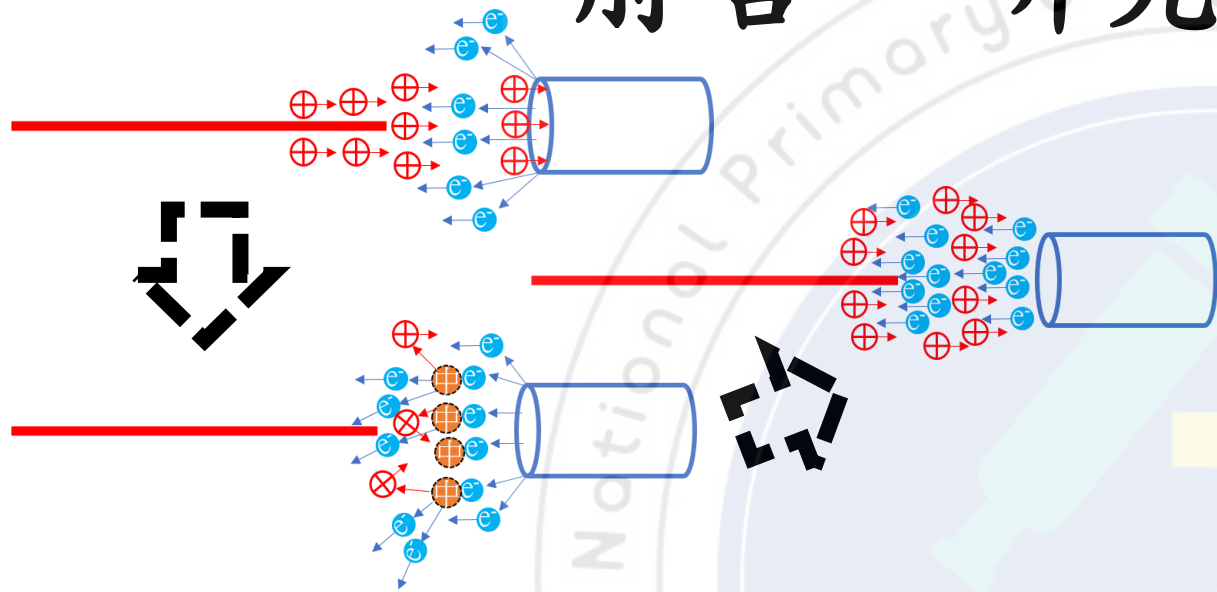
以離子推進系統為例 - 探討電暈反應在離子通路中 推力、性質變動之研究

組別：國中組

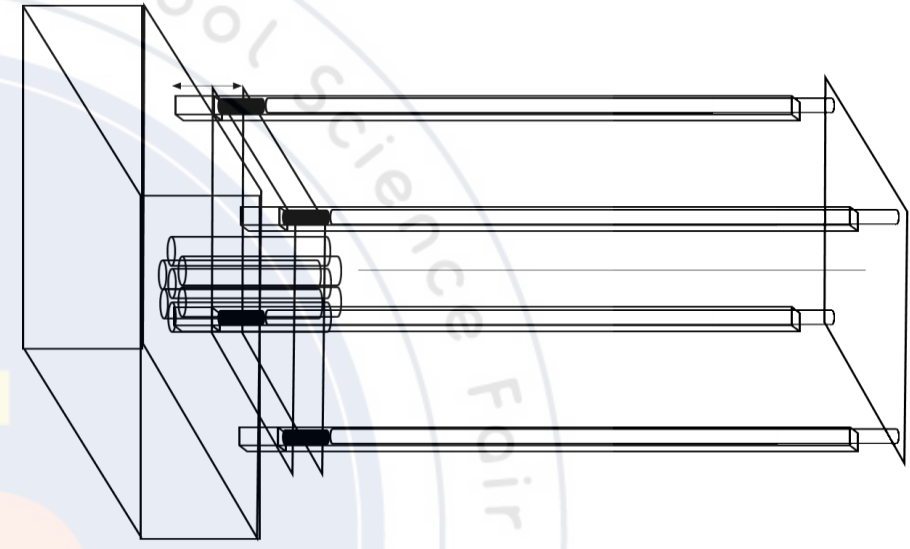
科別：物理科

編號：030107

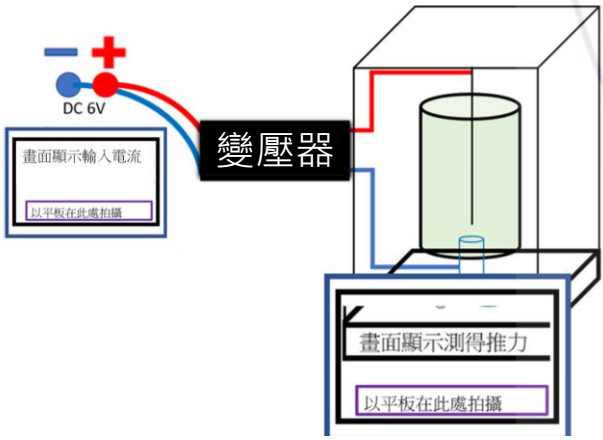
前言、研究過程及方法



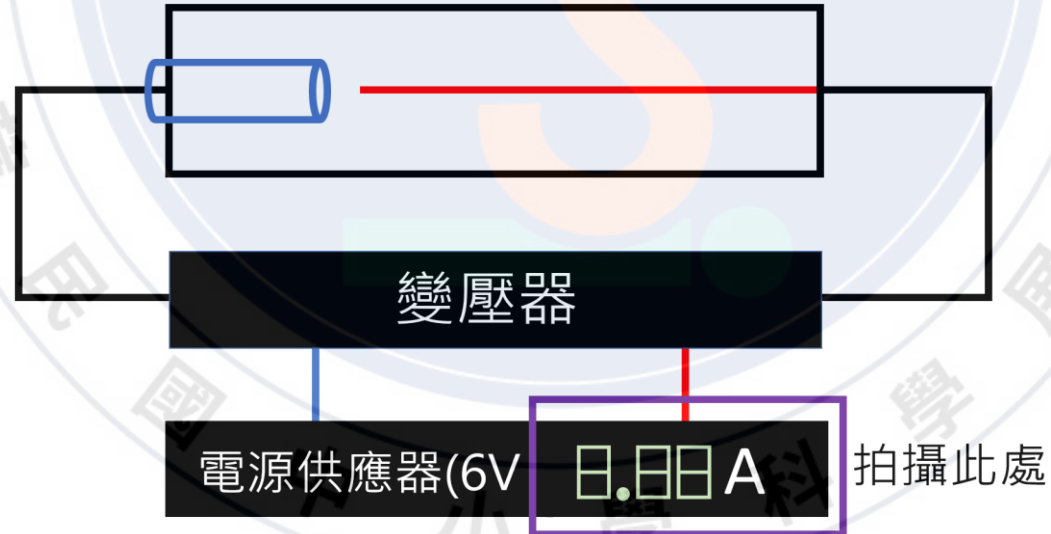
圖一 大氣中的電漿反應、陰極射線反應說明圖



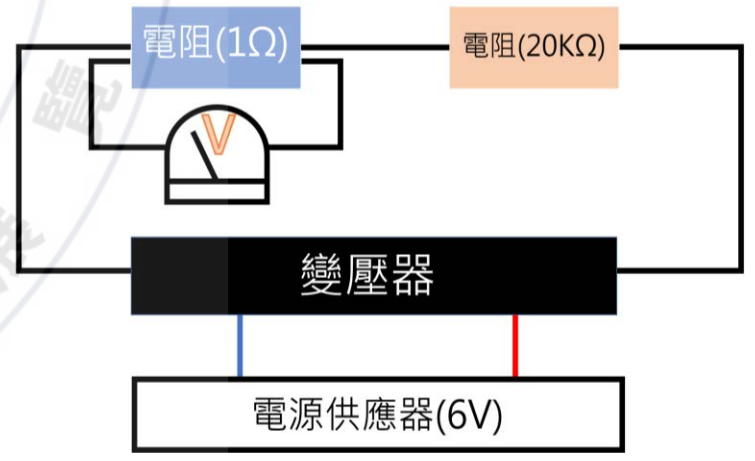
圖二 離子推進裝置草圖



圖三 實驗一~四實驗方式

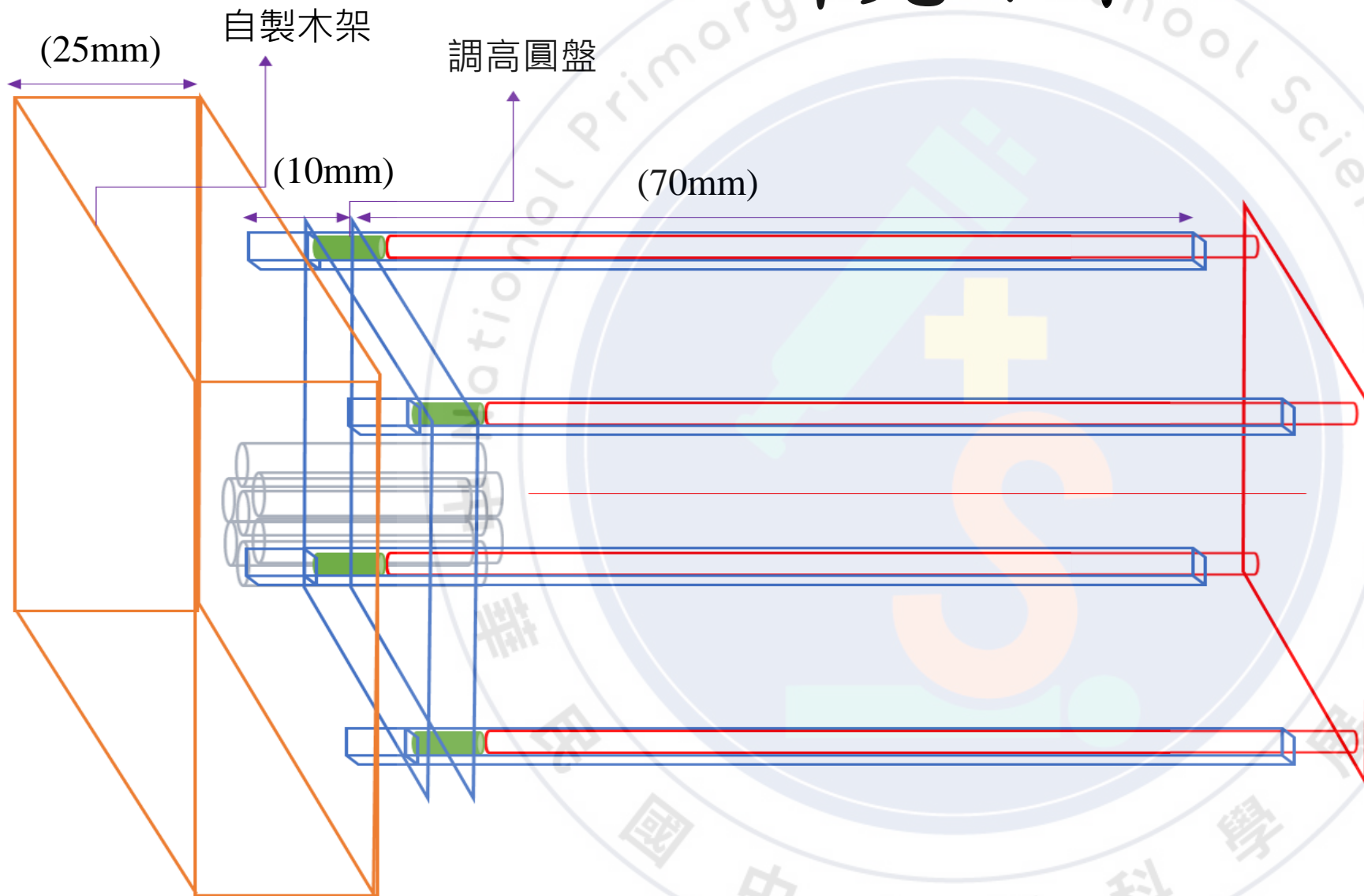


圖四 實驗五實驗方式

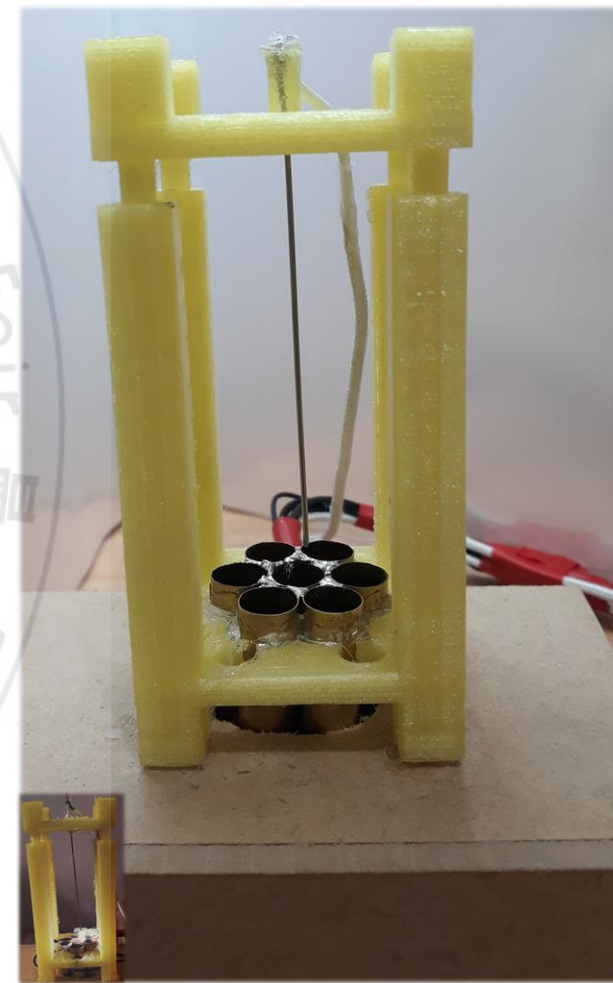


圖五 變壓器電壓測量裝置圖

研究結果

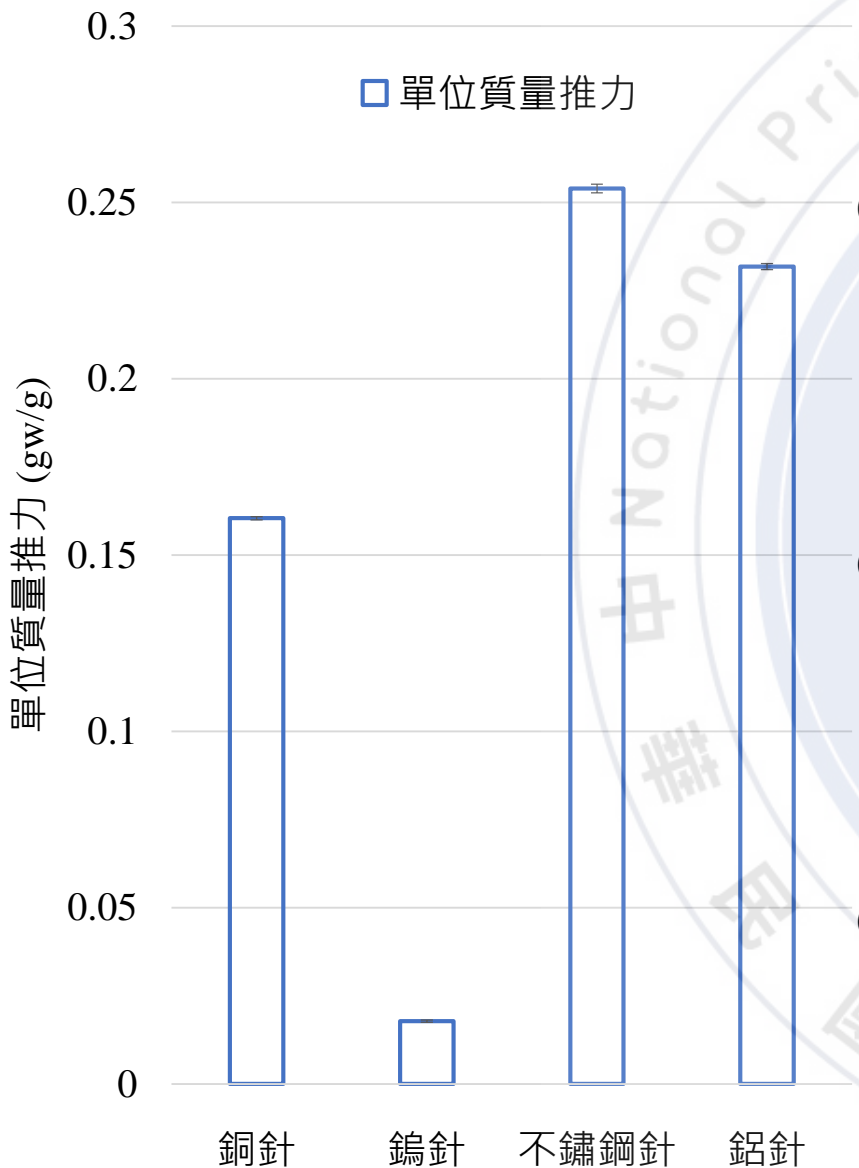


圖六 離子推進裝置結構設計圖

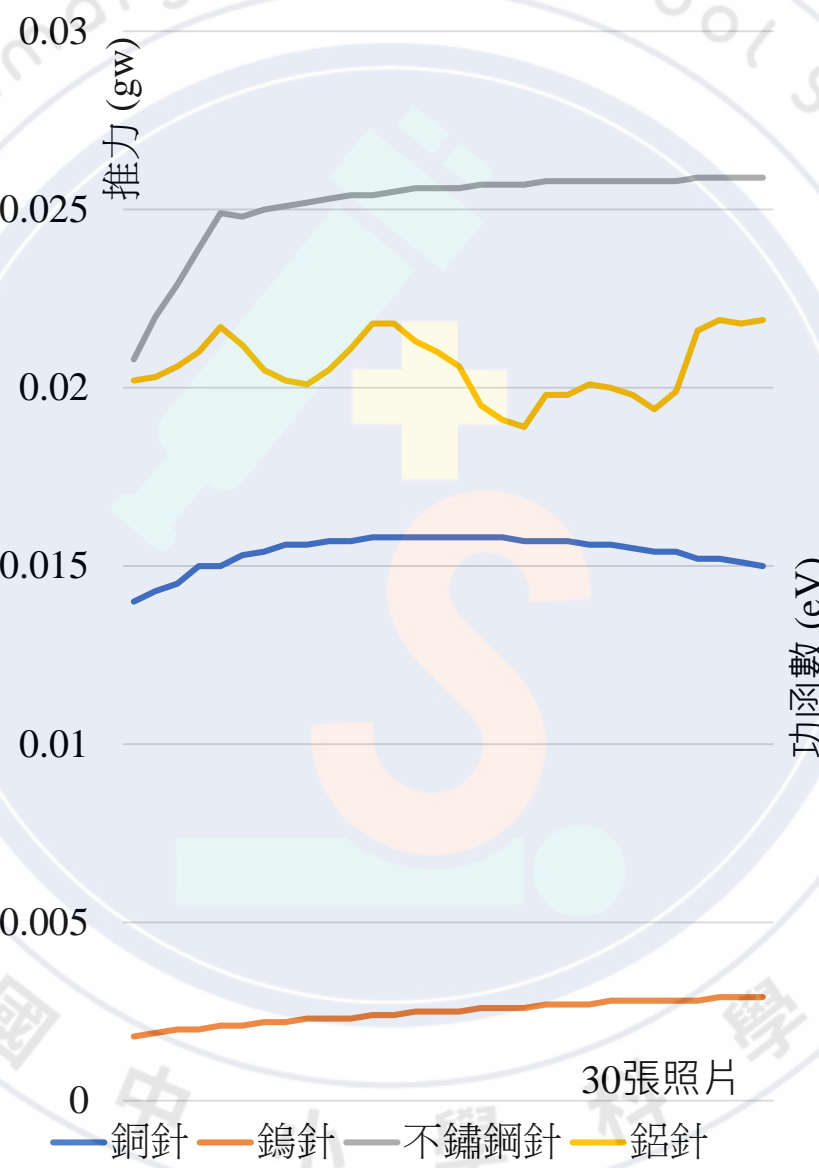


圖七 實驗裝置圖

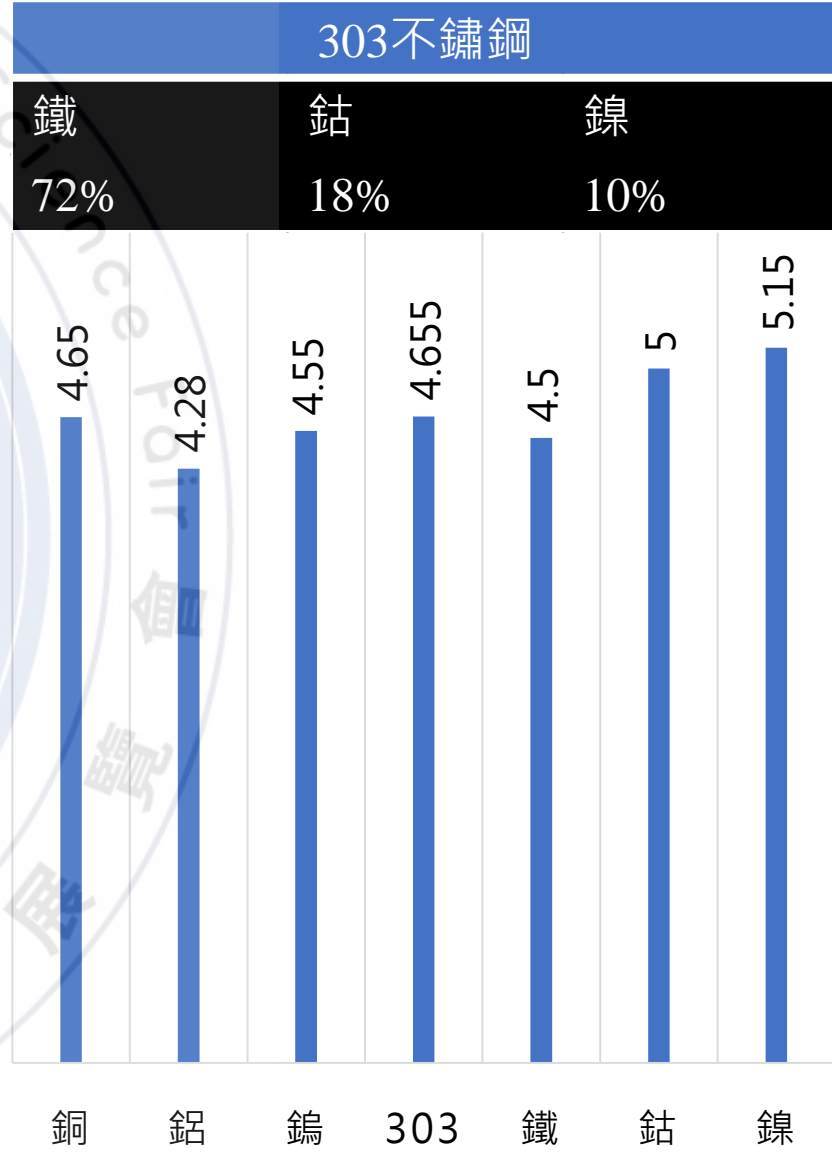
研究結果與討論



圖八 實驗一推力數據長條圖

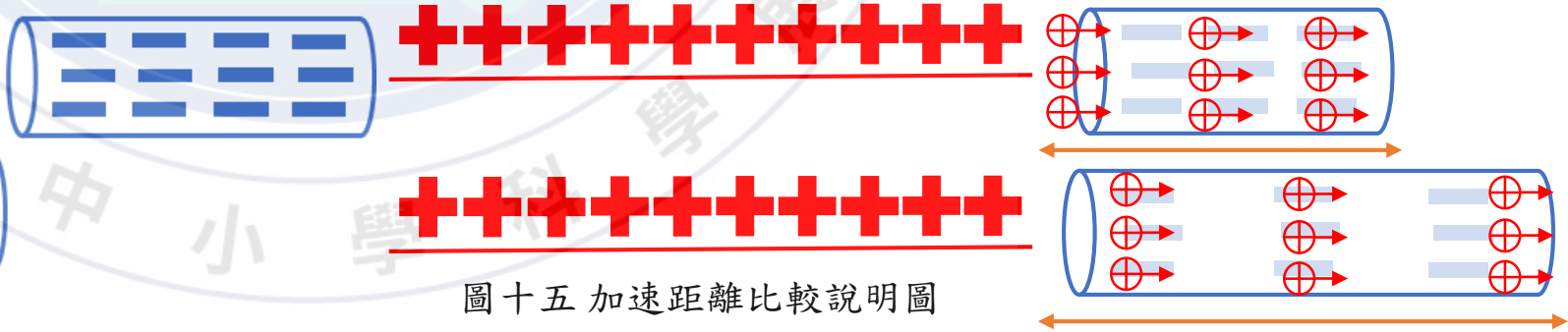
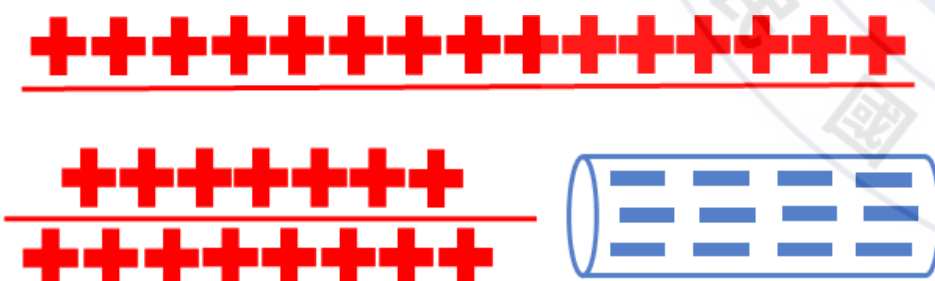
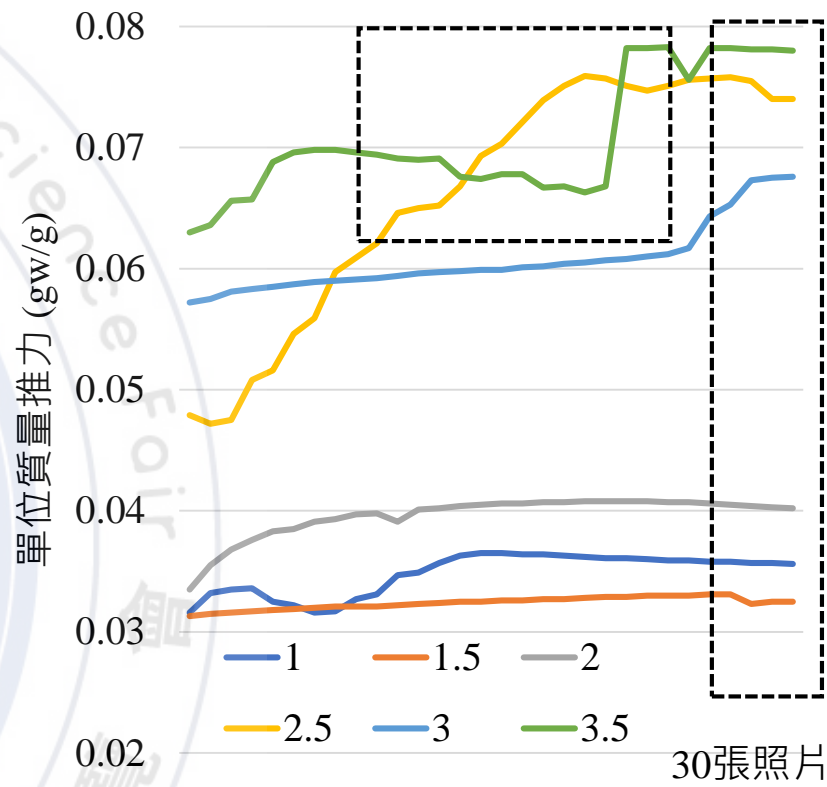
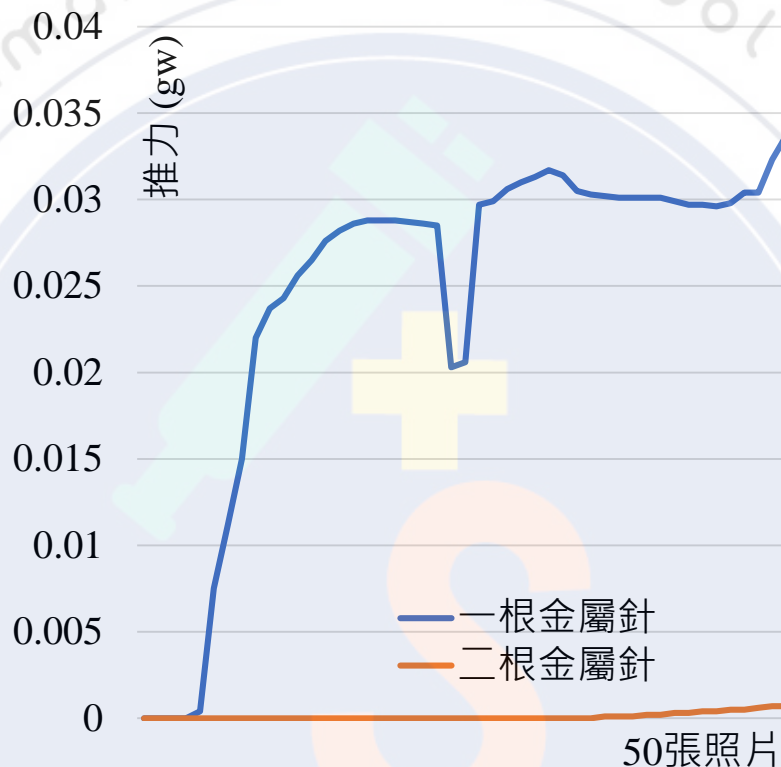
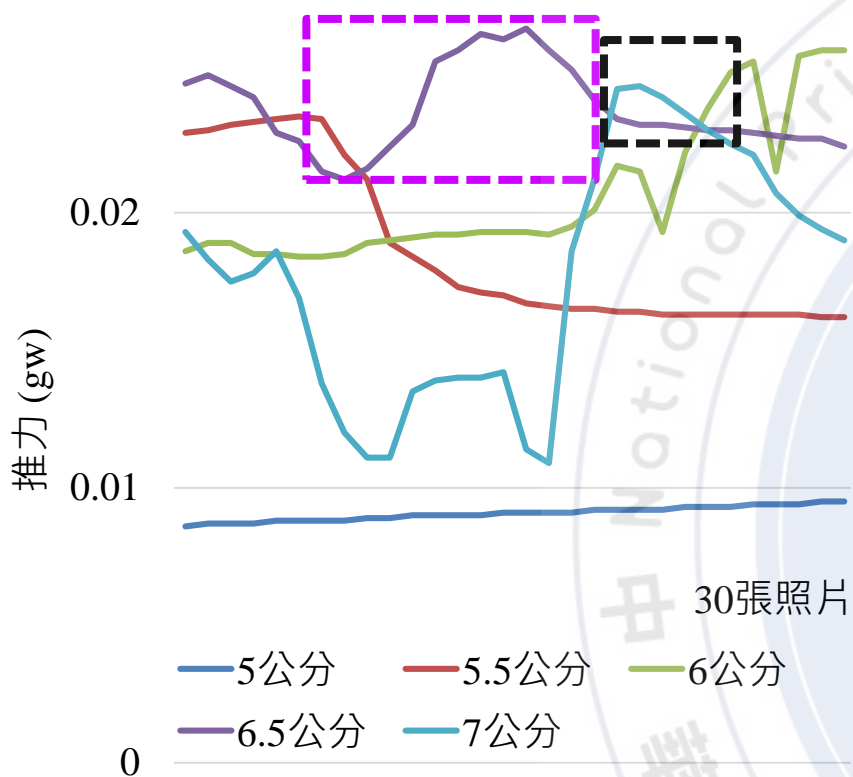


圖九 實驗一數據折線圖

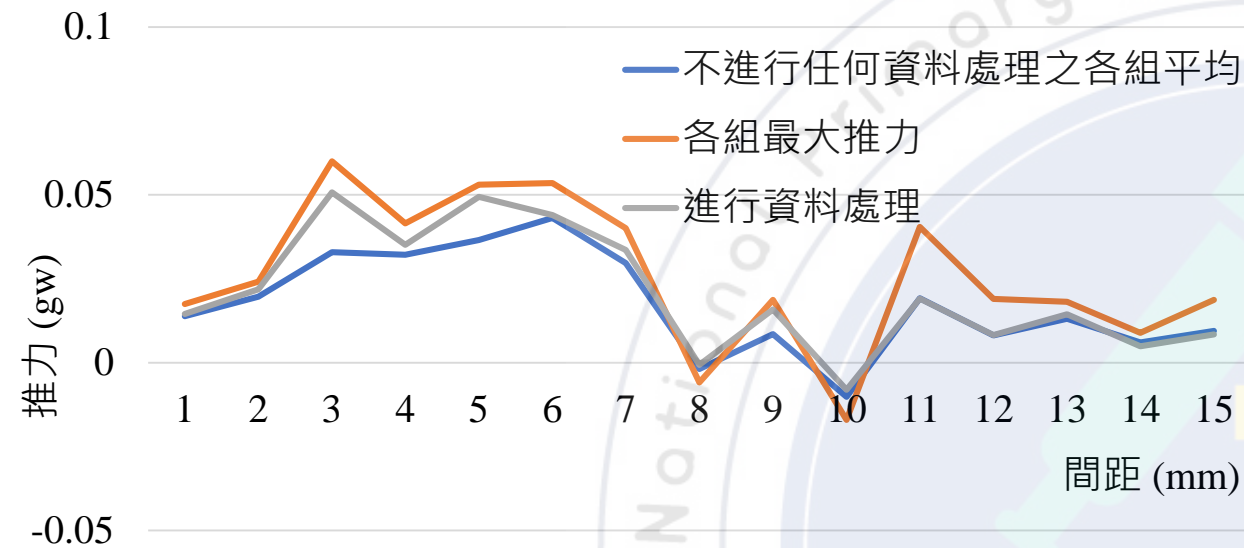


圖十 實驗一各組金屬功函數長條圖

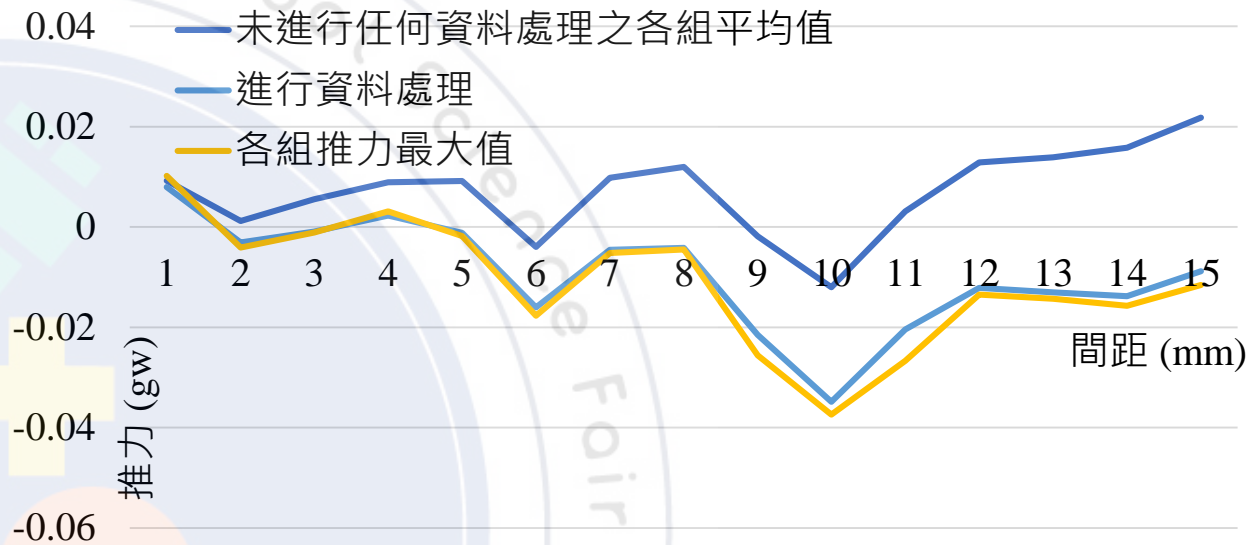
研究結果與討論



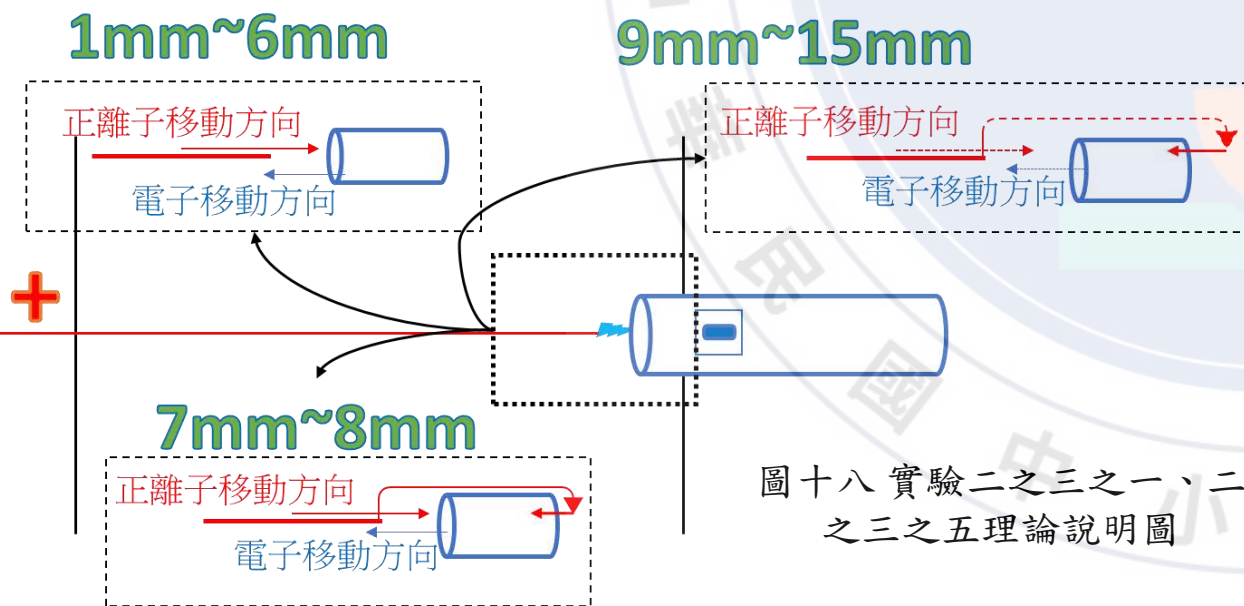
研究結果與討論



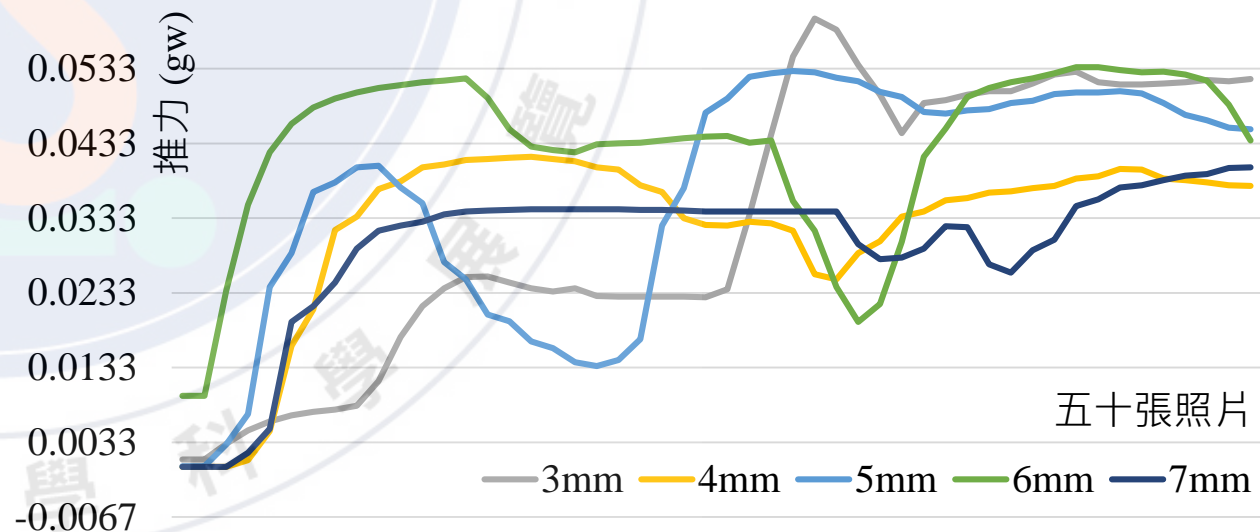
圖十六 實驗二之三之一各組平均推力比較折線圖



圖十七 實驗二之三之五各組平均推力比較折線圖

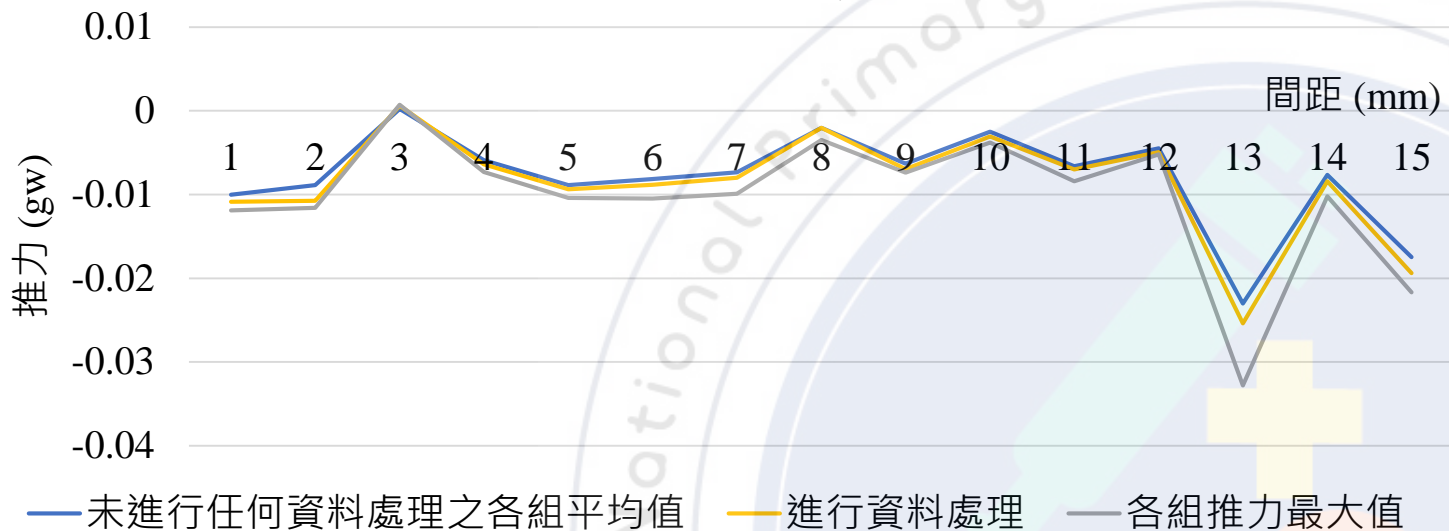


圖十八 實驗二之三之一、二、三之五理論說明圖

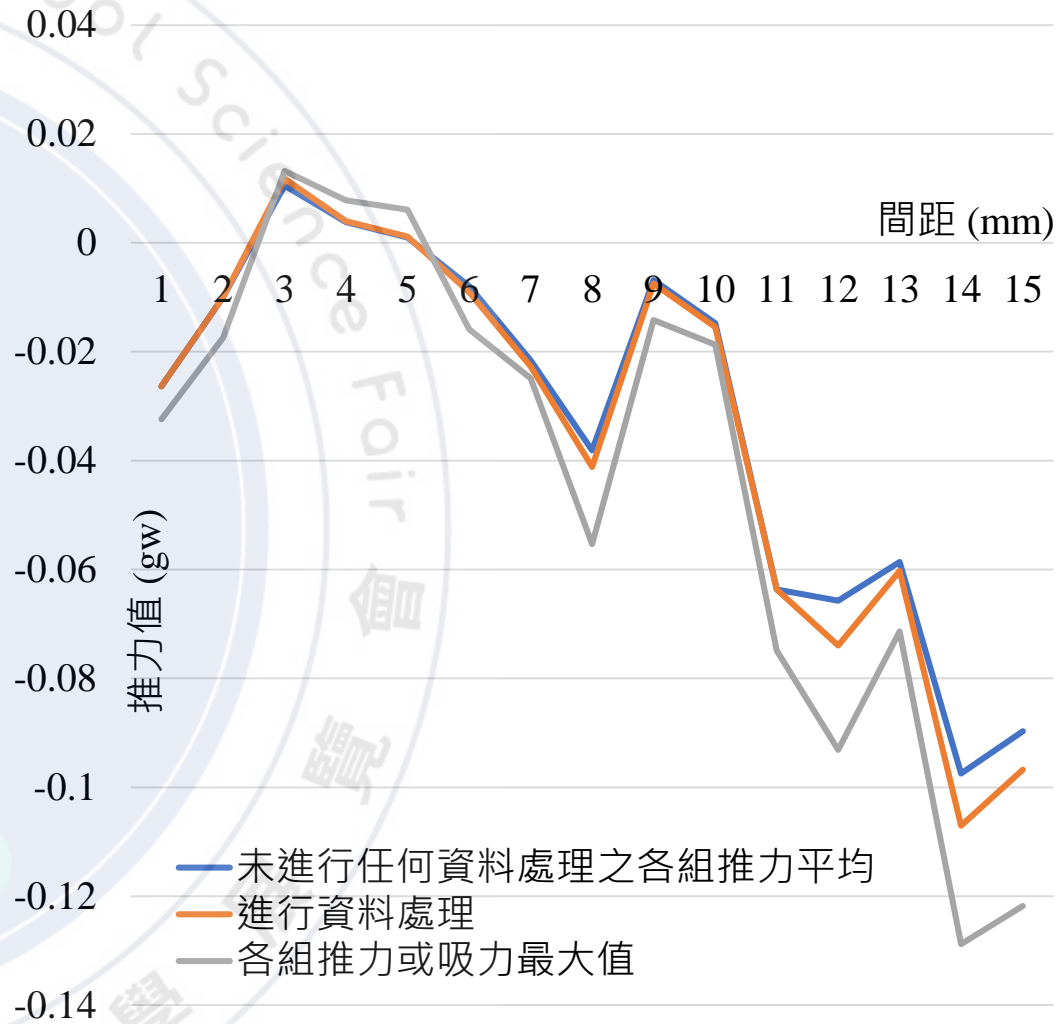


圖十九 實驗二之三之一部份組別推力數據折線圖

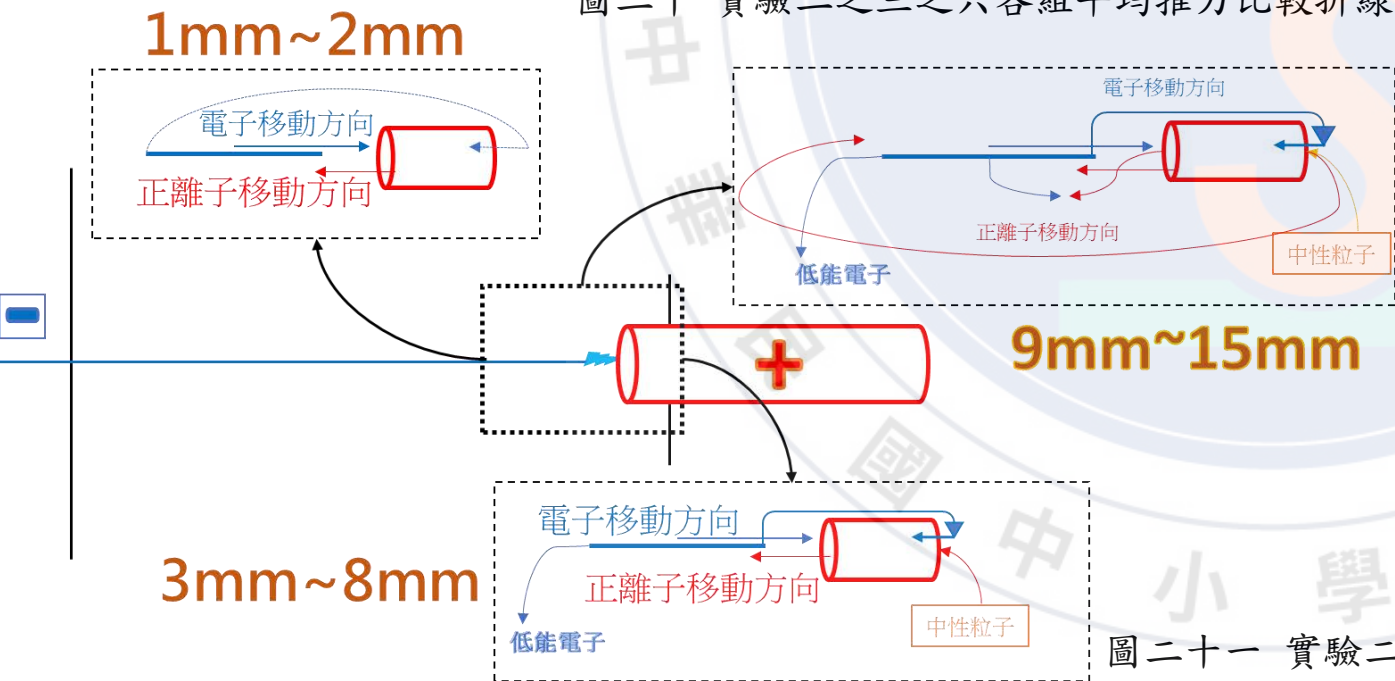
研究結果與討論



圖二十 實驗二之三之六各組平均推力比較折線圖

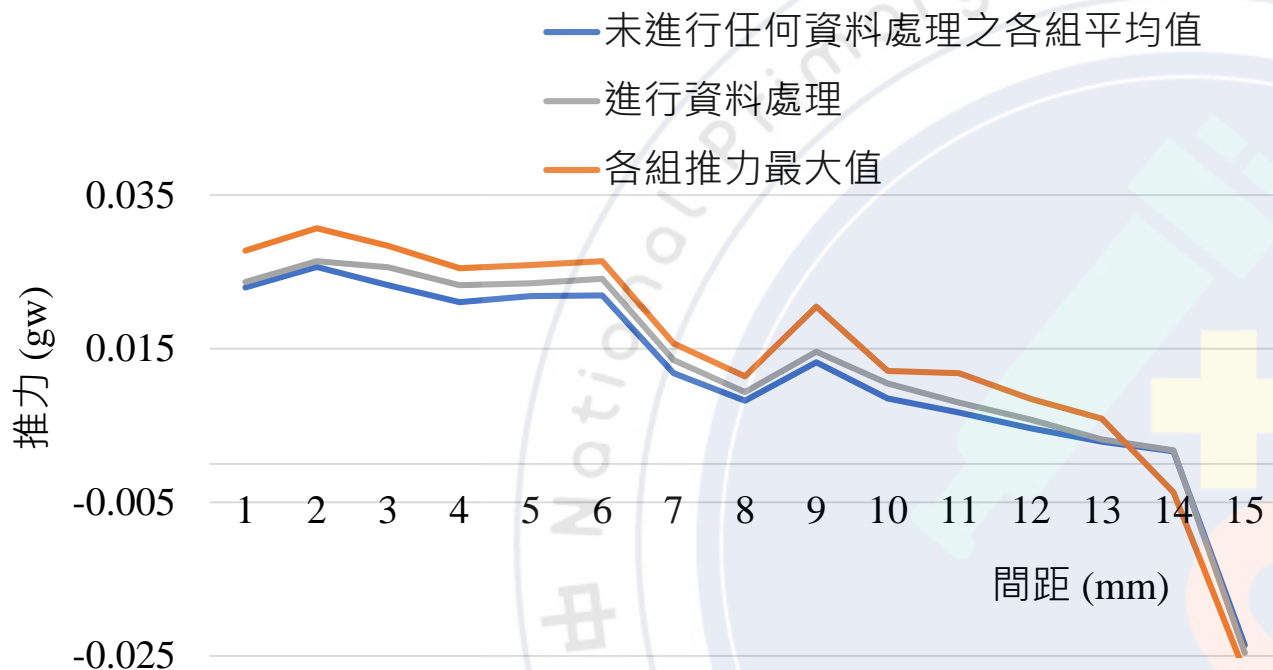


圖二十二 實驗二之三之二各組平均推力比較折線圖

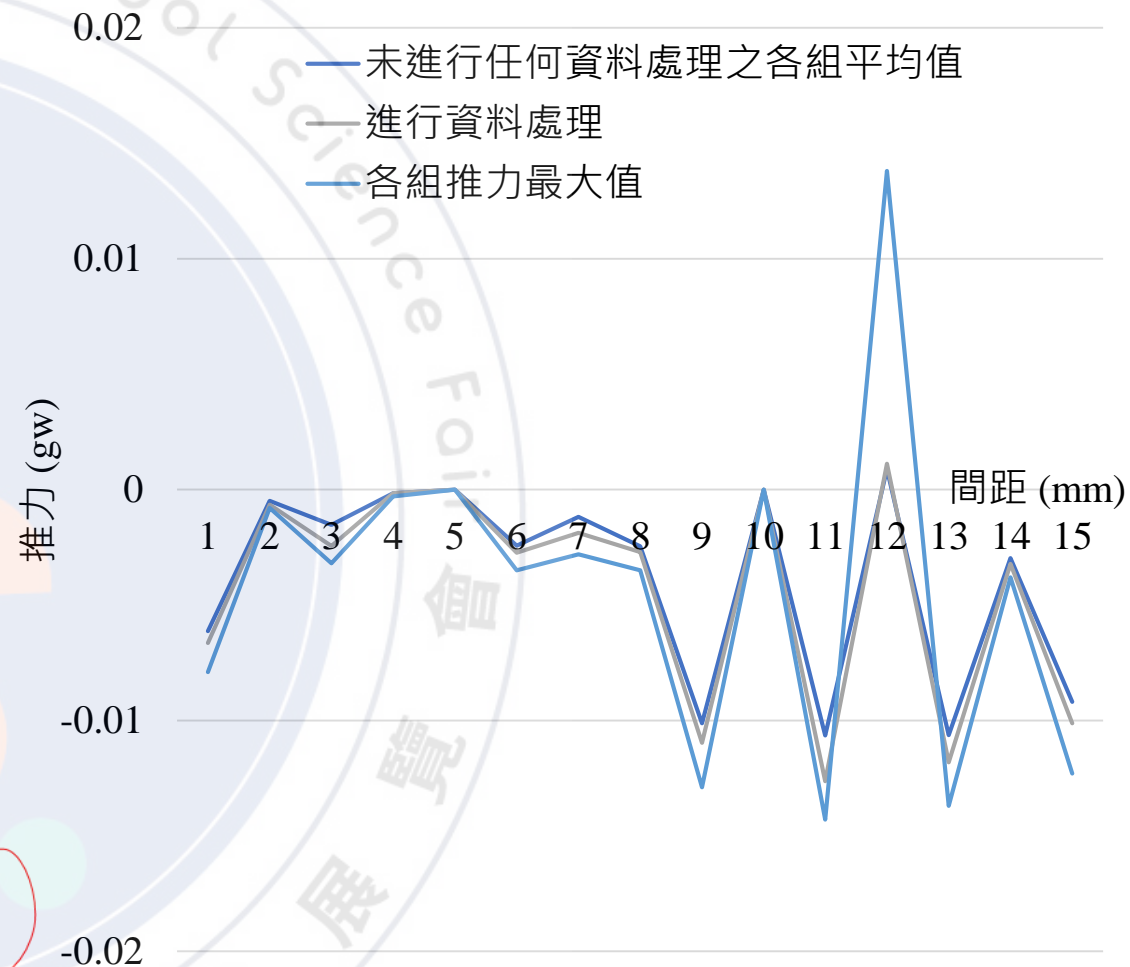


圖二十一 實驗二之三之二、二之三之六理論說明圖

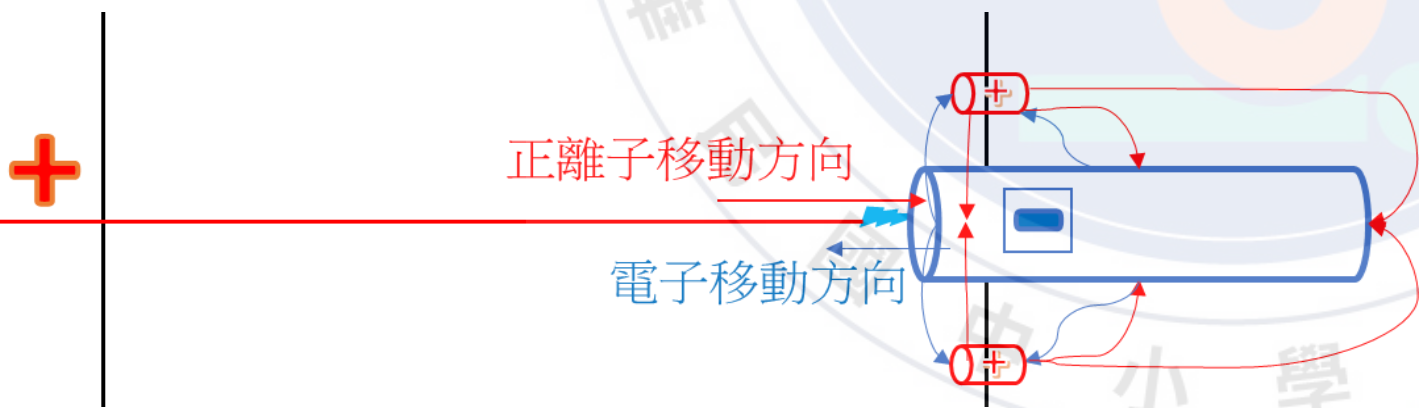
研究結果與討論



圖二十三 實驗二之三之三各組平均推力比較折線圖

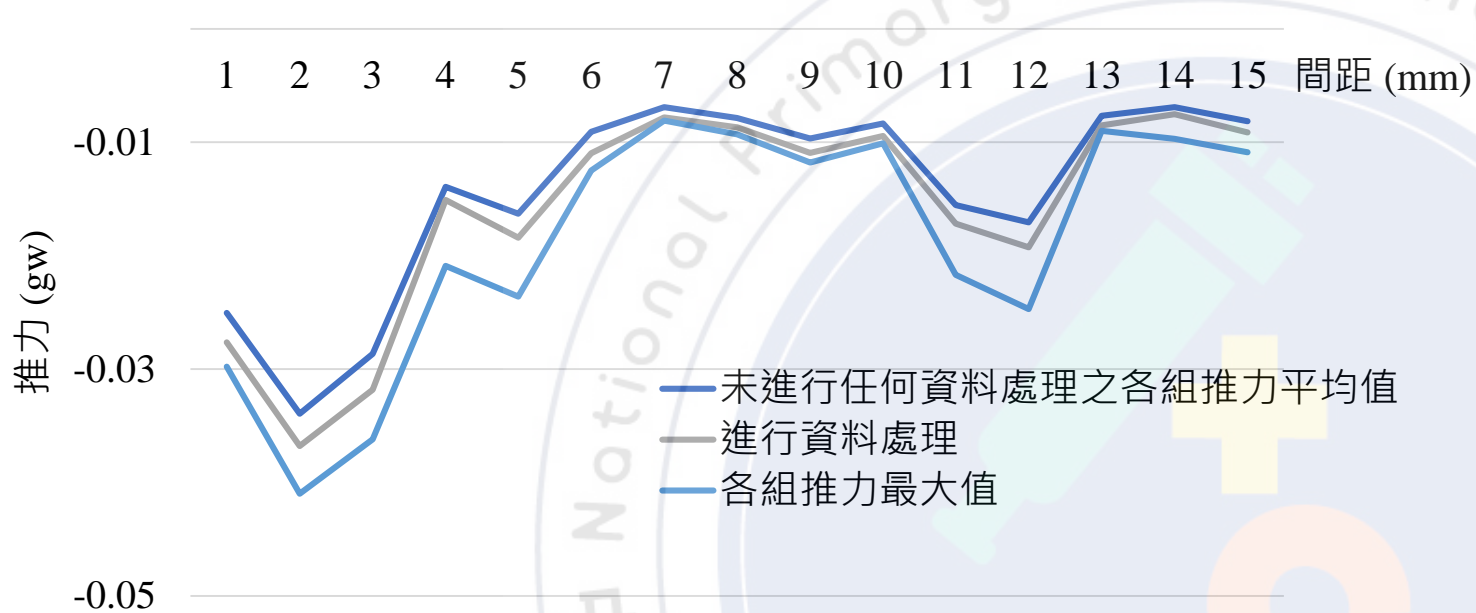


圖二十五 實驗二之三之七各組平均推力比較折線圖



圖二十四 實驗二之三之三、二之三之七理論說明圖

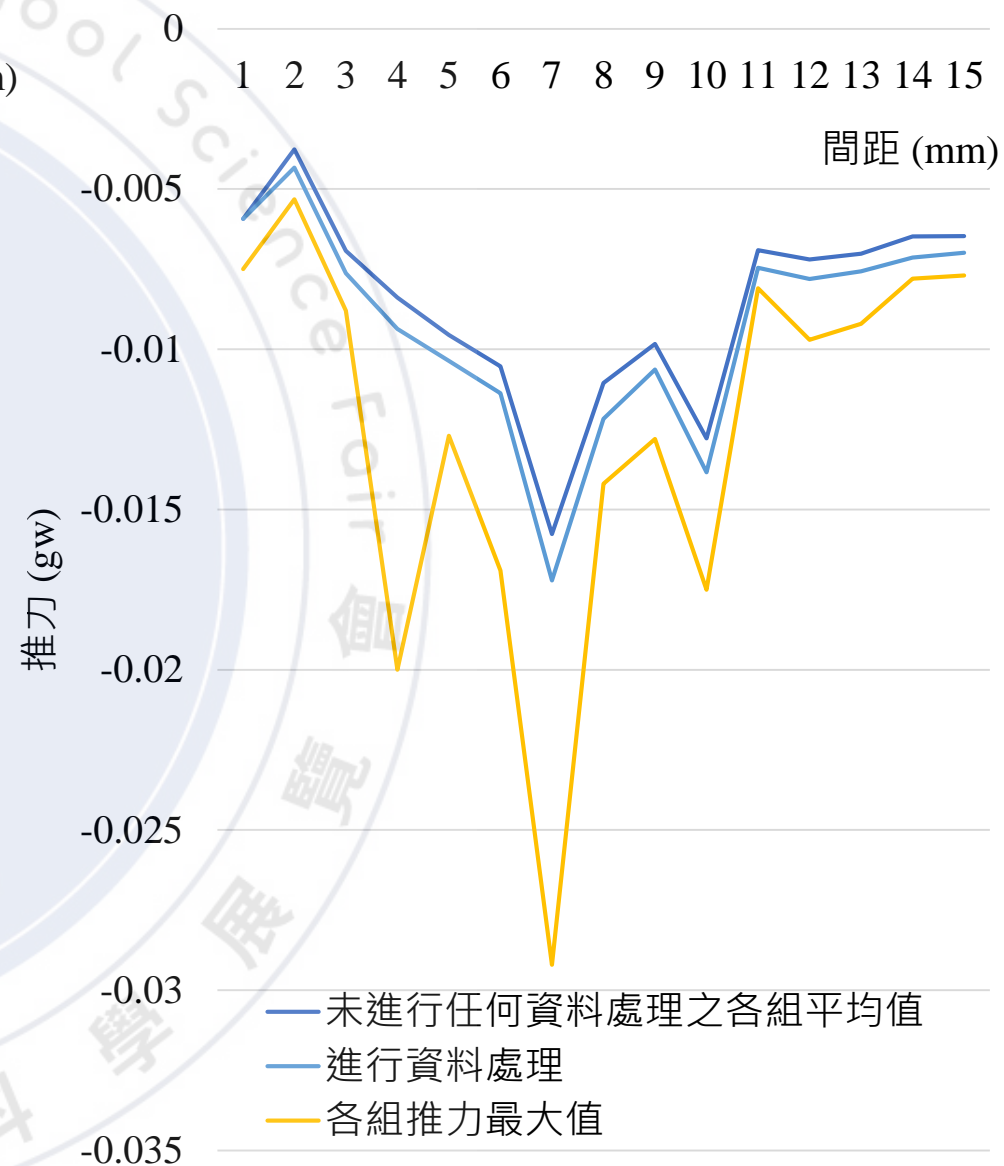
研究結果與討論



圖二十六 實驗二之三之四各組平均推力比較折線圖

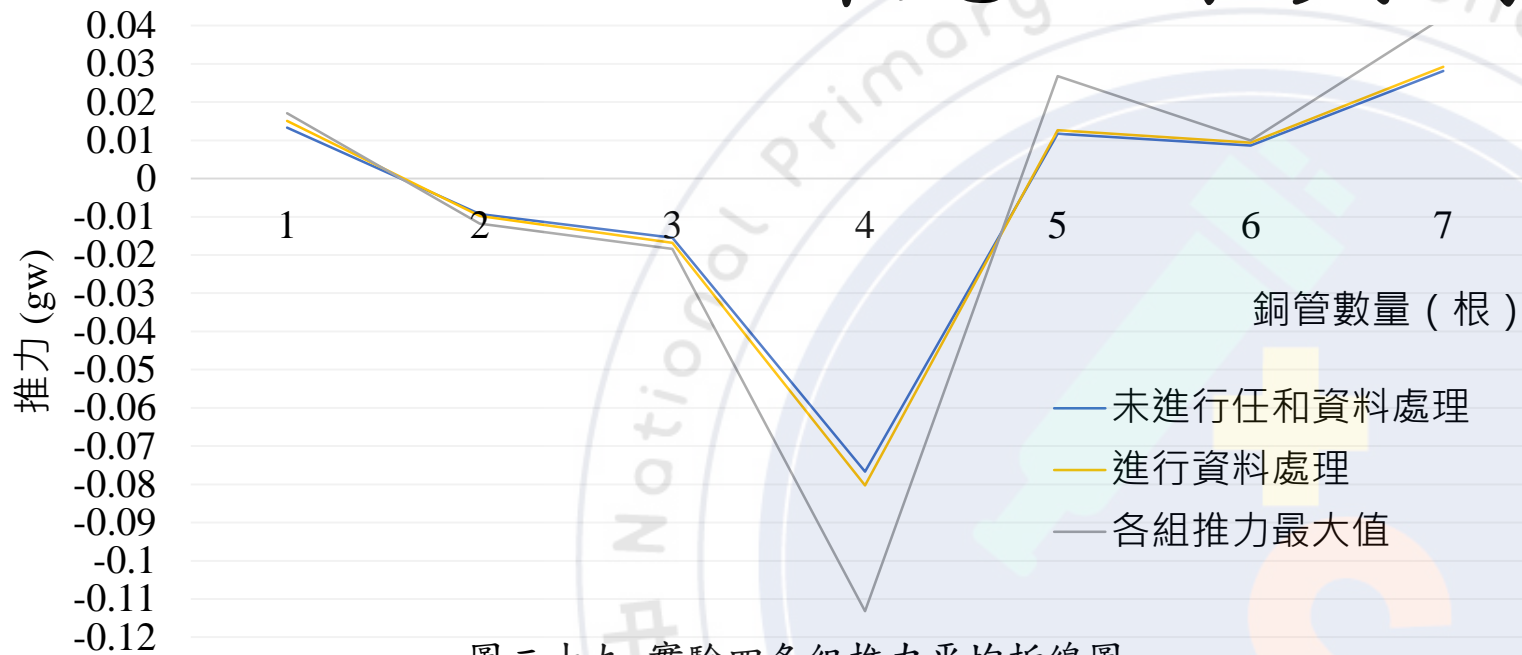


圖二十七 實驗二之三之四、二 之三之八理論說明圖

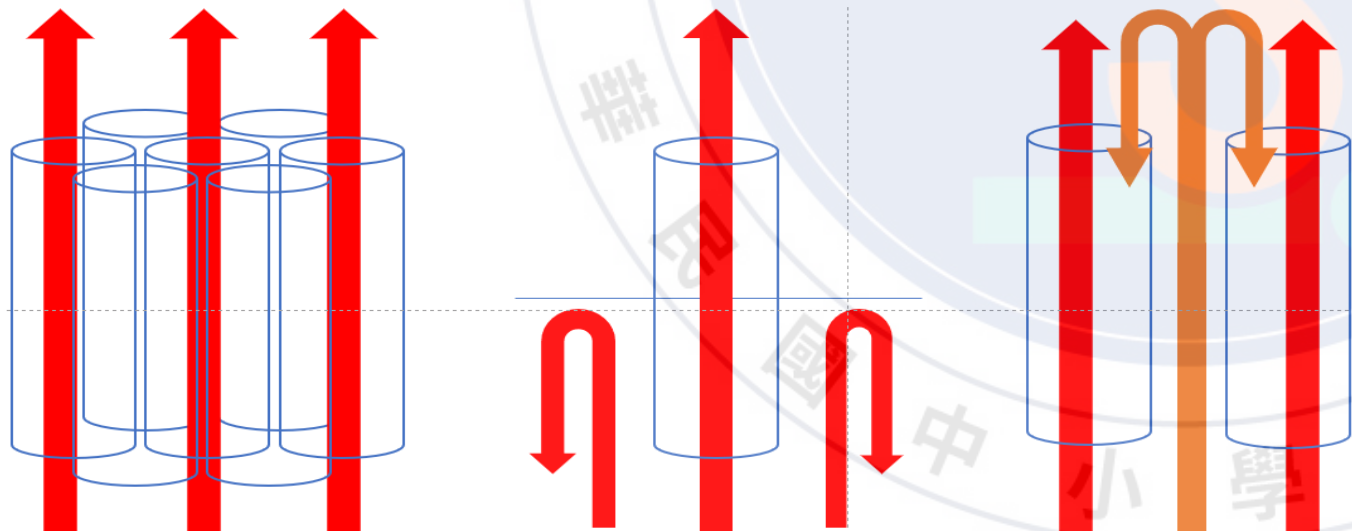


圖二十八 實驗二之三之八各組平均推力比較折線圖

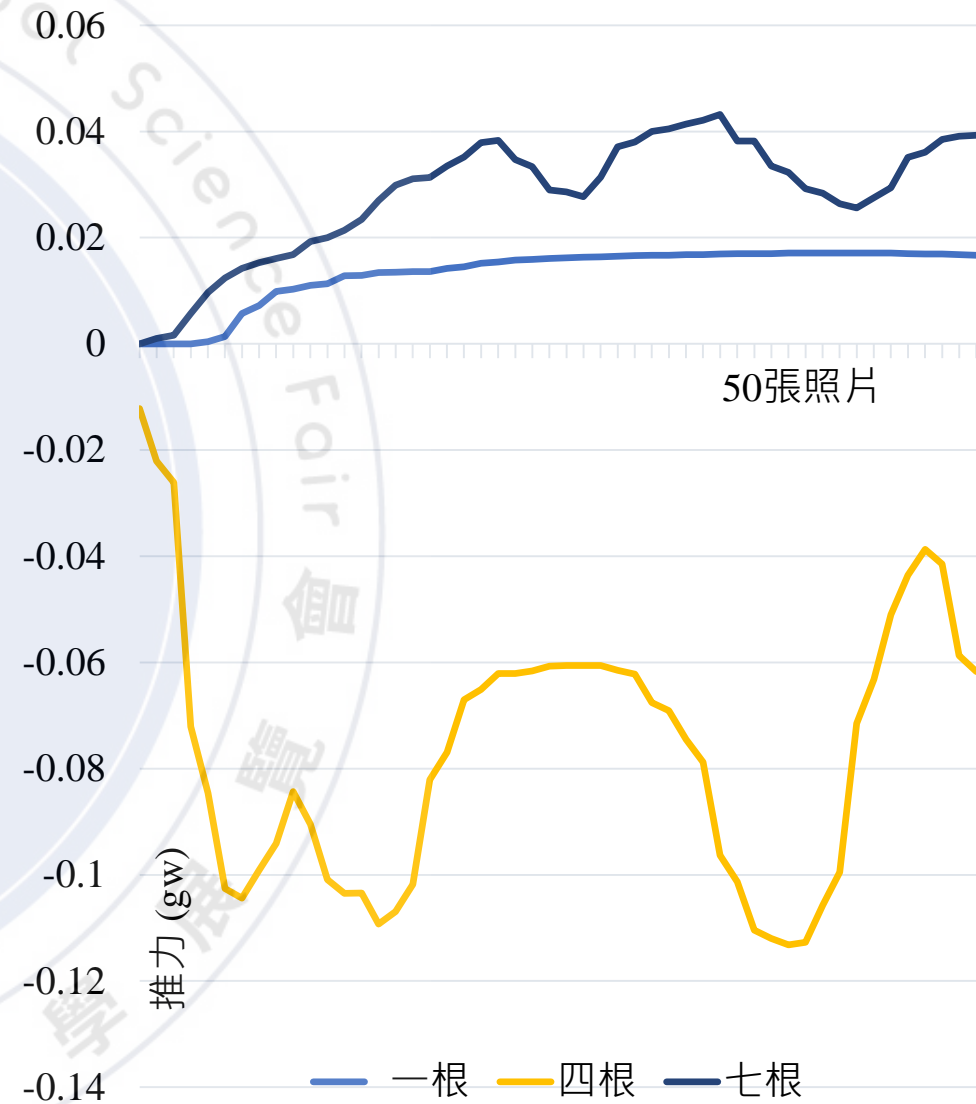
研究結果與討論



圖二十九 實驗四各組推力平均折線圖

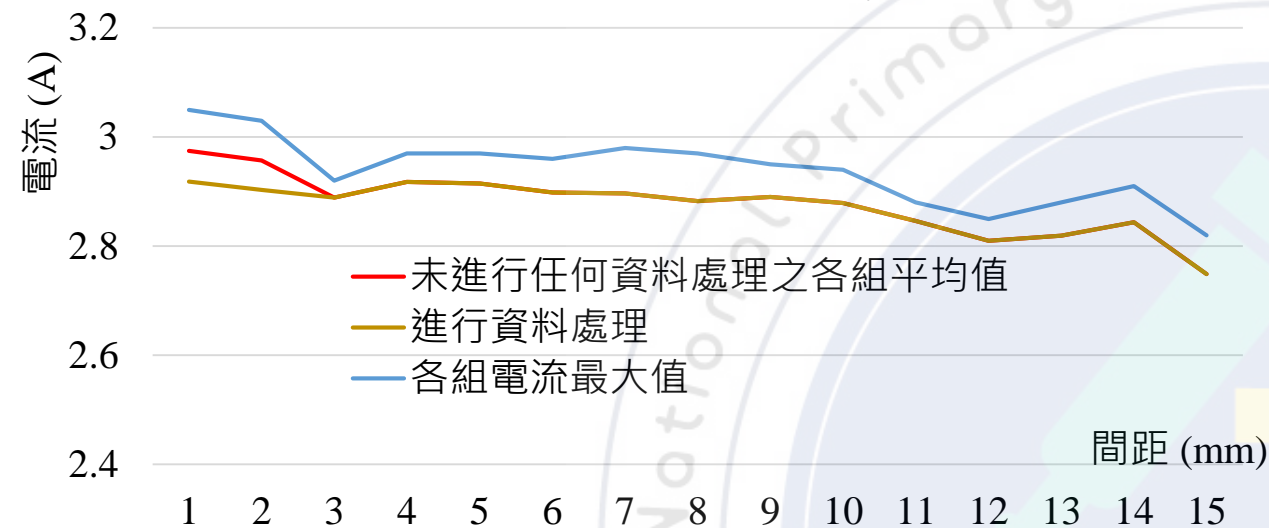


圖三十 遠場反應說明圖

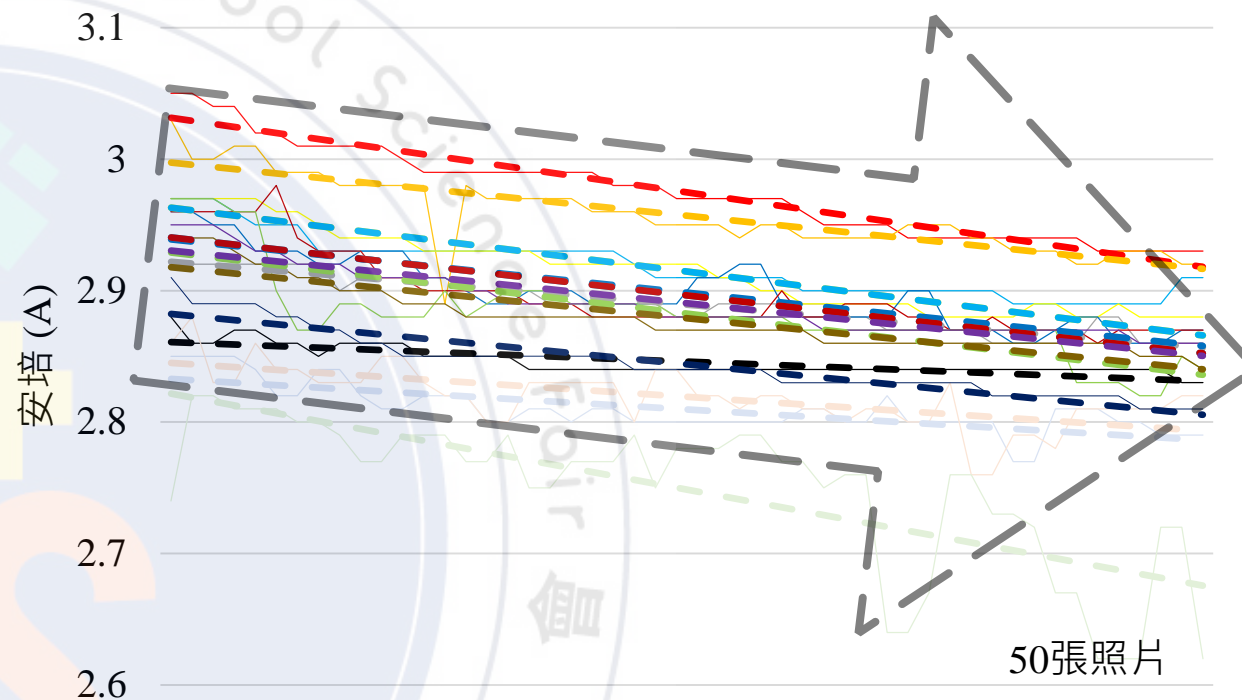


圖三十一 實驗四部份組別推力數據折線圖

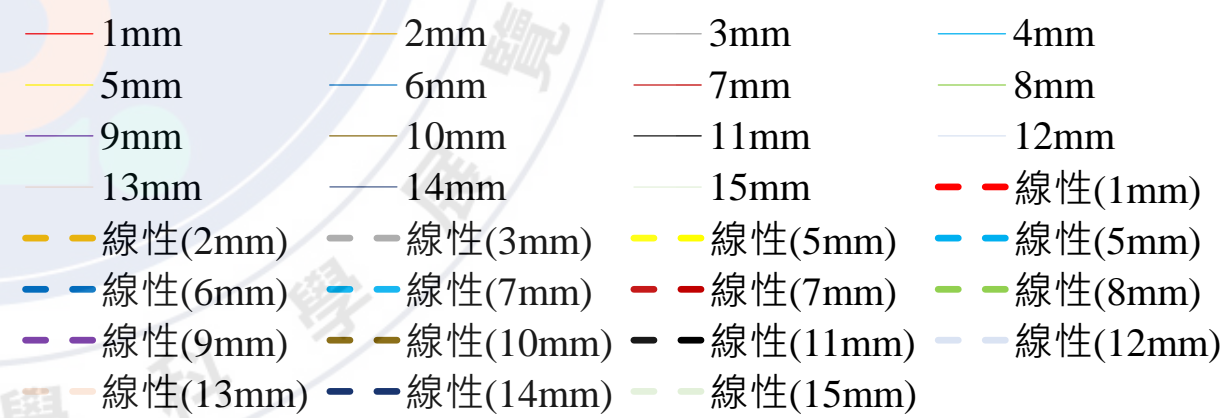
研究結果與討論



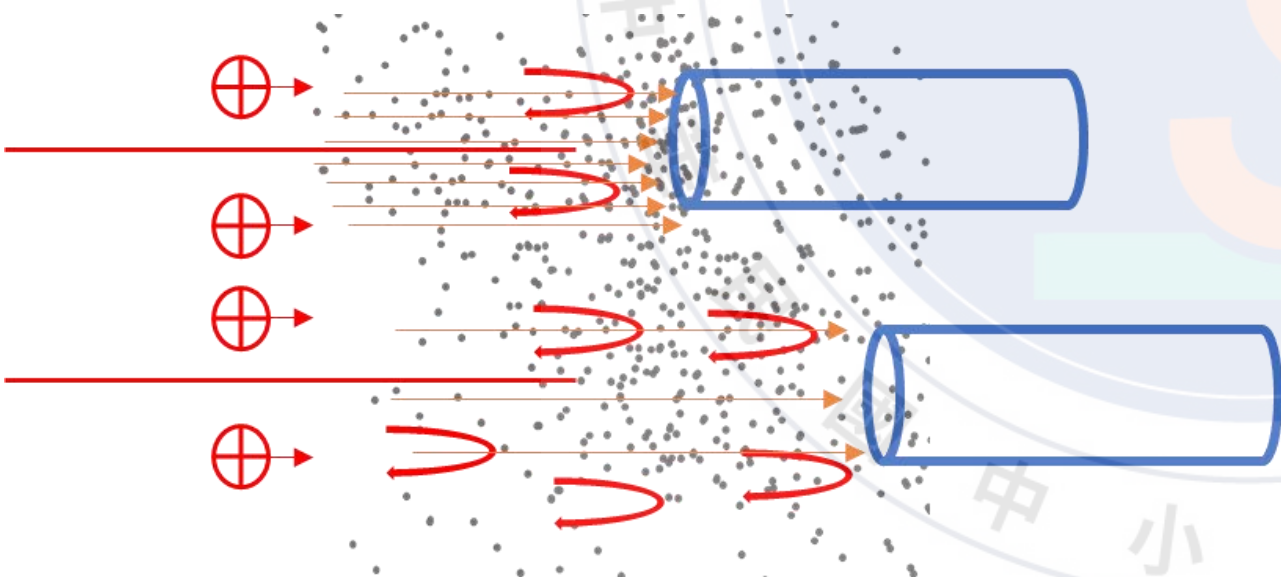
圖三十二 實驗五各組電流比較折線圖



50張照片

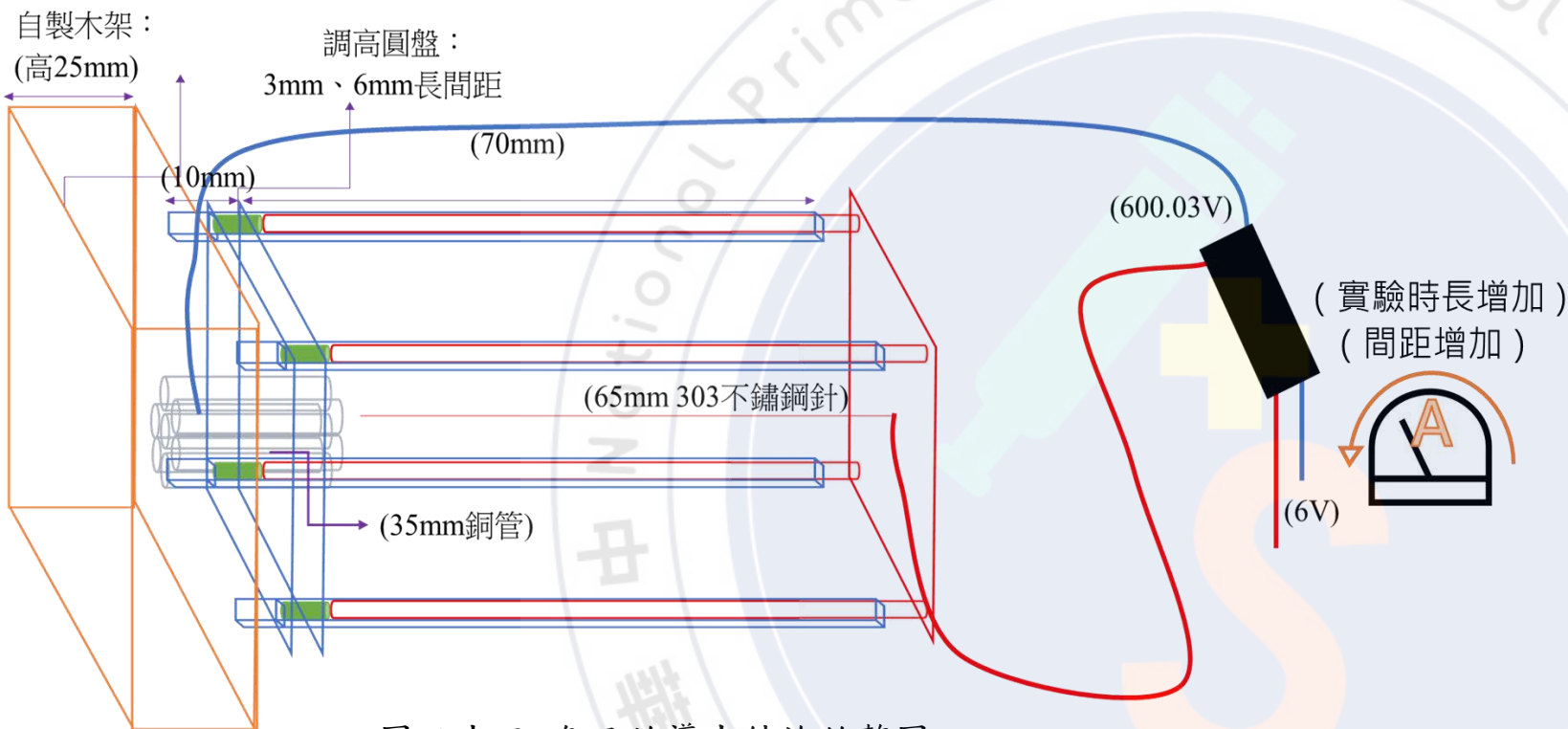


圖三十四 實驗五各組50張照片電流數據折線圖

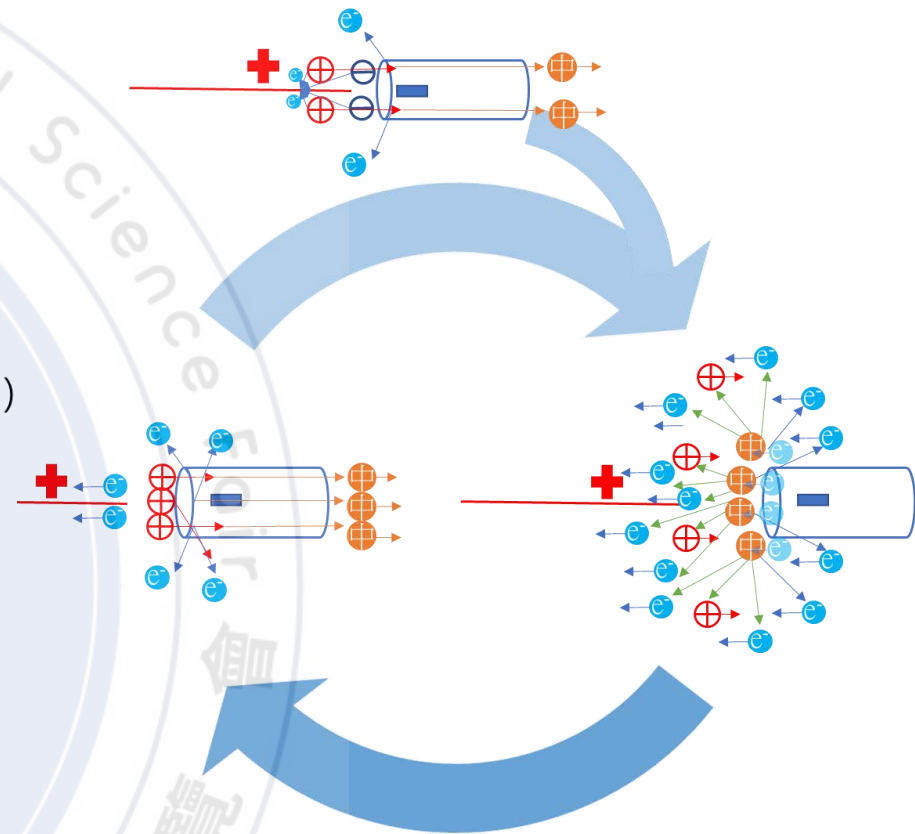


圖三十三 空氣阻力對推力、電阻大小影響說明圖

討論與結論



圖三十五 各目的導出結論統整圖



圖三十六 實驗理論統整模型

重要參考資料

徐冠東 (2010)。離子推進器之探索。國立台灣科學教育館。

趙怡欽、許紘璋 (2011)。微波電漿推進器之研發。