

「電流啪嚓，子彈一發」

-電磁線圈炮提升射程性能之探討

研究者：張子晏
指導老師：許瓊云

研究摘要

在第一次看到電磁炮的實驗時，覺得電磁炮很神奇，因為有學過以及了解可以將線圈通電進而產生磁力，但在應用方面看到網路上可以將電磁線圈拿來做如同電磁炮的作用，讓我眼前為之一亮，在這次實驗中，我選了不同於其他人的變因，例如：子彈形狀、電容種類以及充電時間等，在實驗期間，我們發現高電壓的大電容，才可以有最完美的射擊效果，但因為製作的工藝問題，會因為電容量跟電壓量都上升的話，體積也會直線上升，但是需要足夠的電容量加上電壓才能將鐵珠射出，於是我們在查詢過後使用大小適中，並且電容量電壓量都有達標的電容作為實驗使用的電容器，最後我們發現各種可以加強電磁砲作用在子彈上的力度以及提升整體射出的距離的幾種方式，像是使用長條形子彈比起圓形子彈更符合磁力線的方向，以及將發射物前端稍微放入線圈中能增加電磁作用力進而表現在射擊距離上，當電容充了一定的容量，達到一定的電壓以及電容量，充電速度會變慢，也就是電容中的電壓以及容量並無太大的變化，所以導致射程增加的狀態並不明顯。

第一章 緒論

一、研究動機

我在 youtube 上，看到一個知名科學網紅-佑來了，他做了關於電磁線圈炮的實驗，我覺得很酷，因為裝置看起來很複雜，因此我想在獨立研究上，做有關電磁炮的實驗，探討電容種類、子彈形狀對電磁線圈炮射程和速率的影響。

二、研究目的

1. 探討不同電容種類對電磁線圈炮射程的影響。
2. 探討不同充電時間(電壓)電磁線圈炮射程的影響。
3. 探討子彈和線圈的相對距離對電磁線圈炮射程的影響。
4. 找出增加電磁線圈炮射程的方法。

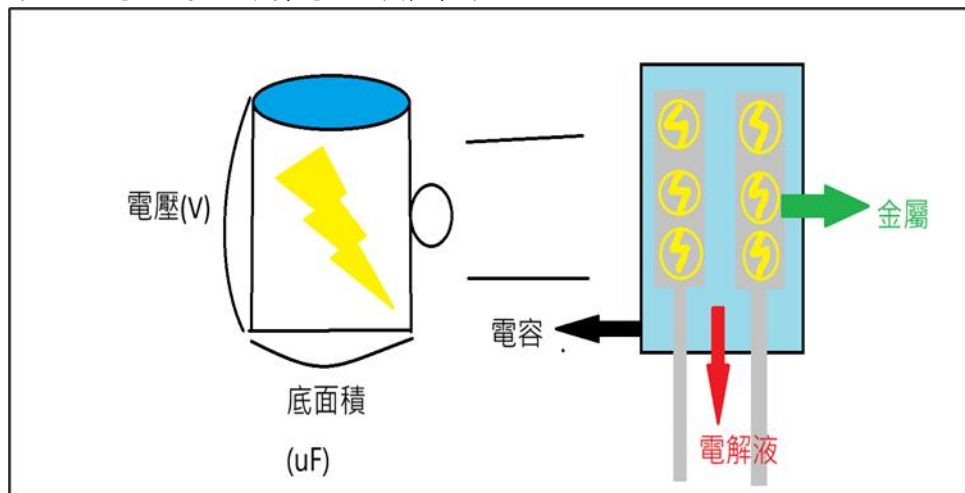
三、研究問題

1. 為何能量比較大的電容(高壓低容量)射不出去，能量比較小的電容(低壓高容量)反而射得出去？
2. 充電時間(電壓)和電容會對電磁炮射程產生什麼影響？
3. 為何有一個特定的位置能使電磁炮射程最遠？
4. 為何同重量的長條形子彈射得比球形還遠？
5. 電磁炮的作用原理？

四、名詞解釋

1. 電容

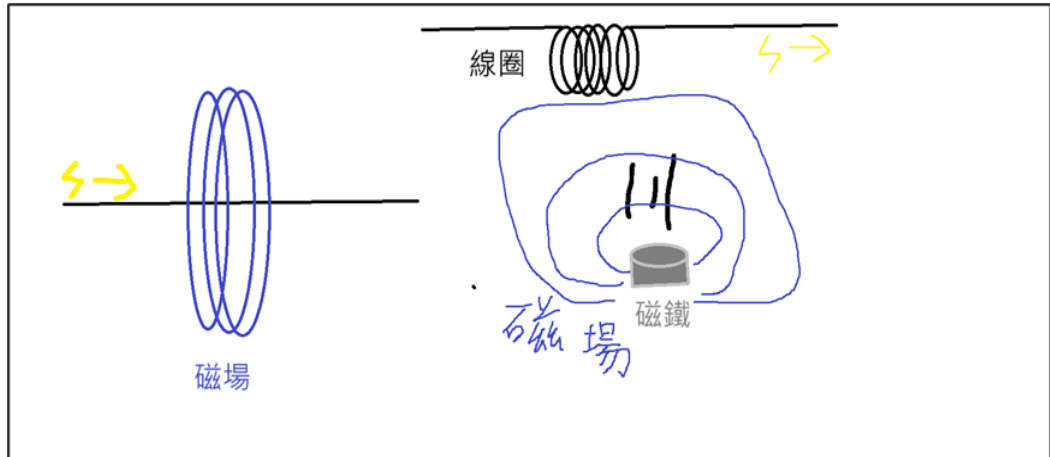
是一種可儲存電的電子元件，兩極是可以儲存電的金屬片，中間是無法通電的電解液，或是像樹木的年輪一樣，由金屬電極和絕緣體交疊而成，它與電池差不多，可以儲存電，但電池是慢慢放出它儲存的電，而電容是瞬間放出它儲存的電，電容上通常會標示最大儲存電壓(V)和電容量(μF)，把電容想成水杯，電容量就是底面積，最大儲存電壓就是水杯的高，一但儲存的水超過最大儲存水量，就會滿出來，而電容超過崩潰電壓則會爆炸。



圖一、電容之示意圖

2. 電磁感應定律

當有電力產生時，也會產生變動的磁力，相反的，當有磁場變動時也會產生電力，利用此原理，可以將電轉成磁，進而產生動力，例如：電風扇、電磁鐵，而磁生電的例子，則是發電機，本次實驗利用電容產生的瞬間高壓電，產生強大的磁力。

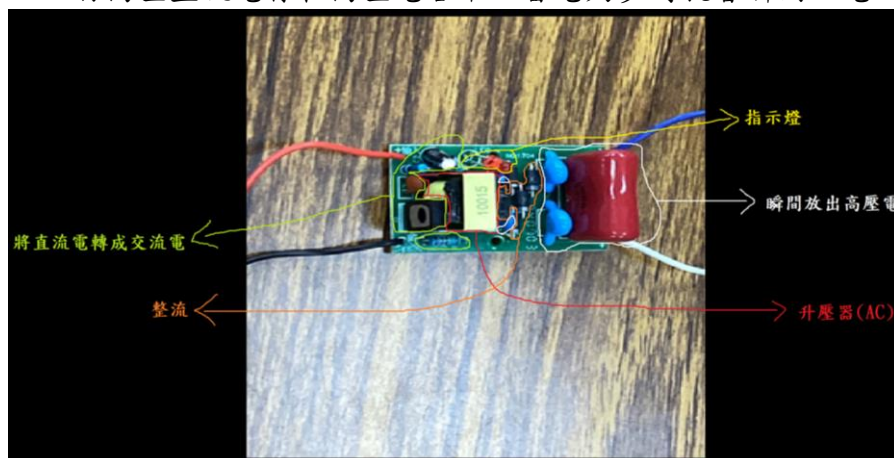


圖二、線圈生成磁場之示意圖

3. 升壓模組-電蚊拍型

為了供應電容高電壓的需求，因此需要升壓模組提升電壓，才能用較快的速度幫電容充電，我選用瞬間高壓直流電產生器，利用電容儲存，再使用電容的瞬間放電產生高壓電作用在線圈上，升壓過程分成幾個步驟：

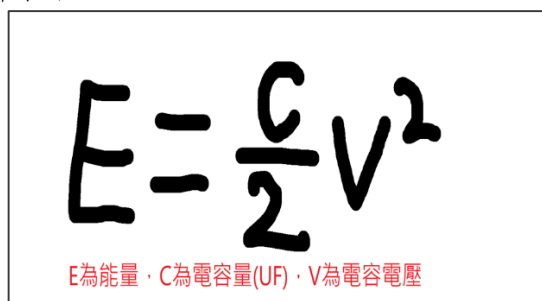
- 先用震盪電路轉直流電(自電源)轉成類似交流電(交流電比較容易升壓)的高頻震盪訊號(快速的開關開關)。
- 用逆變器將交流電升壓。
- 將高壓交流電用二極體整流成高壓直流電。
- 將高壓直流電存在高壓電容中，當電夠多時就會瞬間放電。



圖三、升壓器

4. 電容放電能量公式

用於計算電容放電能量，公式為 $E = \frac{1}{2}CV^2$ 解說如下：此公式顯示，若要增加電磁炮威力，應增加電壓較好，因為根據此公式，若電容量(C)增加 2 倍，則能量(E)增加 2 倍，為等比例增加，但如果是電壓(V)增加 2 倍，那麼能量(E) 則增加 4 倍，是指數性的上升，相較之下增加電壓的效率較佳。


$$E = \frac{C}{2} V^2$$

E為能量，C為電容量(UF)，V為電容電壓

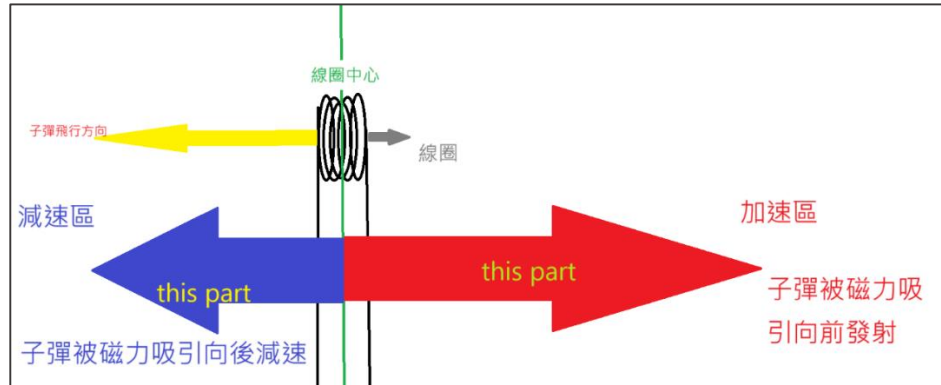
圖四、能量與電容電壓關係式

第二章 文獻探討

在實驗設計前，我找了與我的獨立研究主題相似的科展作品，進行探討。

一、「磁」母手中線—探討電容放電時間常數對電磁炮發射的影響

1. 子彈質心到達線圈中心的時間，應等於電容放電時間，如果子彈的質心超過線圈中心後，電容仍持續放電，那麼子彈就會被吸回來。



圖五、線圈與子彈相對位置關係

2. 螺線圈匝數多、線徑大、則發射速度快。螺線圈長度會影響子彈加速區、以及電流，兩相作用下會先上升而後下降。
3. 一顆電容量固定的電容，有一固定電壓使其發射子彈速度最快，一旦超過此電容量，將導致速度變慢，或折返發射等情況。

二、無聲動力—線圈炮的發射分析與應用

1. 當電容電容量超過 $3300\mu\text{F}$ 時，子彈初速會大幅下降，因此用低電容量、高壓電容會有較好的效果。
2. 子彈通過線圈後，會因線圈的磁力而被磁化，可能影響下一次實驗結果，所以子彈在發射後，必須消磁。
3. 整理發現：電容量超過 $3300\mu\text{F}$ ，發射初速會下降，子彈在發射前需消磁。

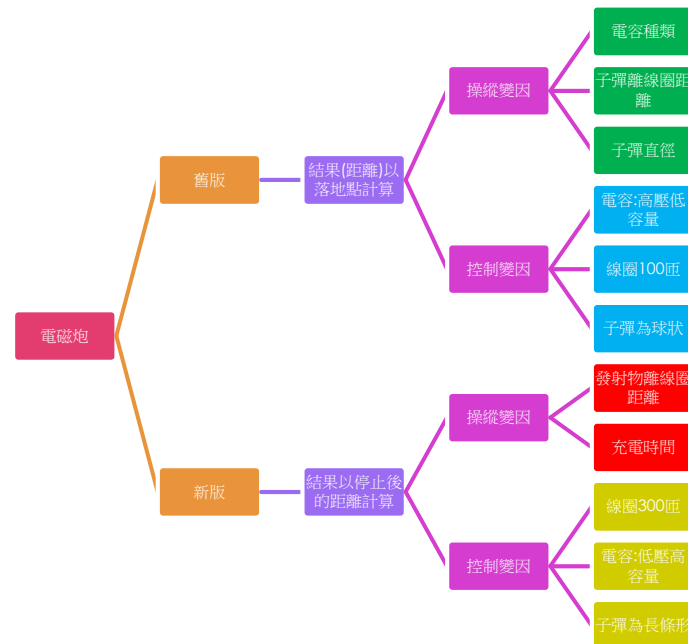
三、電磁炮

1. 使用階梯狀線圈，能增加加速區的長度。
2. 當最快速度發生地點在管內，表示子彈受到磁化。
3. 整理發現：使用階梯狀線圈，可以加速。

回顧以上幾篇研究報告書，我得知「會有一定的數值，使電磁炮達最高速度」、「用階梯狀線圈，可以加速」、「子彈在發射前需消磁」，並且將在接下來的實驗過程中進行設計與調整。

第三章 研究方法

一、研究架構圖

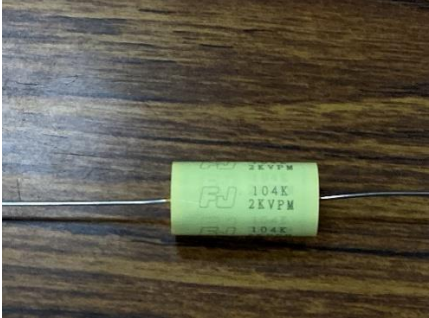
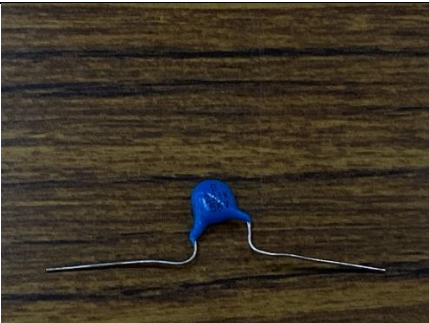


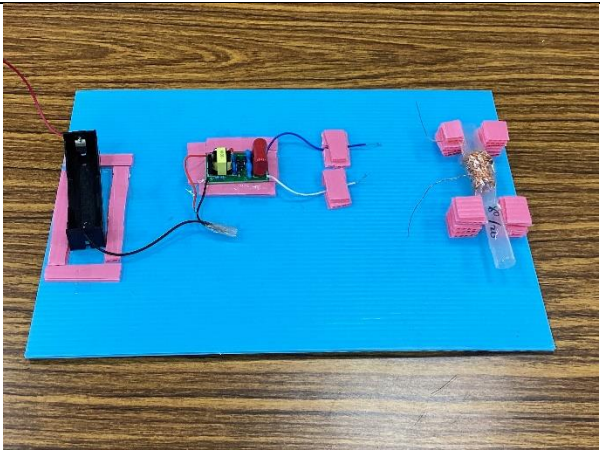
二、研究方法

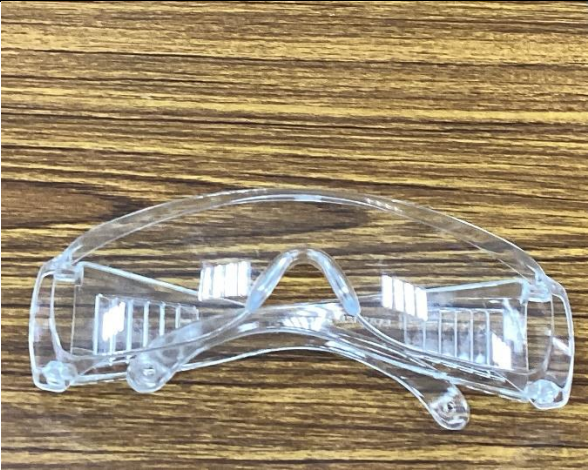
- 舊版：將高壓低容量的電容充電後，把電容接到線圈(100 圈)上，線圈內的子彈為球狀，直徑有 1, 2, 8mm，子彈射出後以落地點作為實驗結果
- 新版：將低壓高容量電容充電，充電前先注意正負極，充電時間固定，等充完電之後，將電容接到線圈上，線圈內的子彈為迴紋針(長寬 2.7cm, 0.5cm)，線圈圈數 300 圈，從前端到後端共 2cm，迴紋針射出後，測量它停下來的地點距起點線的距離。

三、實驗器材

器材	照片/用途
麥拉電容	 圖七、麥拉電容，瞬間放電用

油質高壓電容	 圖八、油質高壓電容，瞬間放電用
18650 鋰電池	 圖九、鋰電池，作為電源
升壓板 1800V	 圖十、升壓板，升高電壓
陶瓷電容 (實驗中使用 並聯電容)	 圖十一、陶瓷電容，瞬間放電用  圖十二、陶瓷電容串聯，瞬間放電用

1mm 鋼珠	 圖十三、1mm 鋼珠，當作發射物
2mm 鋼珠	 圖十四、2mm 鋼珠，當作發射物
8mm 鋼珠	 圖十五、8mm 鋼珠，當作發射物
裝置圖 (原版)	 圖十六、砲台裝置

護目鏡	 圖十七、護目鏡，保護眼睛
防電手套 12kV	 圖十八、防電手套，防止被電
階梯狀線圈 依序為 75:25 70:30 80:20 (匝數比)	 圖十九、階梯狀線圈，產生磁力

四、專家老師諮詢

在進行舊版電磁炮操作時，發現一直無法成功，除了推論原因及調整各種變因外，我們也諮詢了專家老師，針對所遇到的問題進行討論，並進行新版的實驗裝置製作與實際操作實驗，最終能夠成功發射電磁炮。

- 專家老師：周祐呈 老師
- 經歷：國立陽明交通大學光電工程學系研究所



第四章 研究結果

一開始認為高電壓電容利用電容能量換算公式算出來的能量較低壓電容大，但後來經過測試沒有任何一個高壓電容接線圈能將子彈(球狀)射出，和老師討論後，發現要讓電磁炮成功的發射出去問題不在於電壓高低，雖然高壓電容可放出的能量較低壓電容高，但因為電容量太小放電時間太短，加上放出來的電太少，以至於無法把鐵珠射出，反過來看低電壓電容，雖然電壓小，但因為容量比較大放電時間較長，且電量多，所以可以有足夠的力量把鐵珠吸過來。雖然最主要的問題出在電容，但因為鐵珠整體的質量對於線圈以及所選定的電容電壓值來說重量過大，為了讓子彈射程更遠，改變的因素如下。

檢討

第一次實驗失敗後，我先用電池對新線圈短暫通電，居然能讓鋼珠射出去，原理和電容放電一樣，先讓線圈產生磁力，把鋼珠吸過去，當鋼珠到中間時，電源斷電，讓鋼珠保持原速飛出。(如果在鋼珠被吸過去後仍持續通電，線圈就會因持續通電而有磁力，那麼會在鋼珠在飛過線圈後，就會被線圈的磁力吸回來。)

由此可知，問題出在電容，因線圈以及子彈都無變動，將電容換成電池，也就是大容量低電壓的電容，竟可以正常讓彈珠擊出，此外除了電容，我也對器材做了一些更動。

1. 電容改變

高壓電容雖然電壓高(1800~2000V)，但電容量不足(最高 0.1 μ F)，導致流過的電量太少，無法產生足夠的磁力讓鋼珠發射出去。

- 解決方案：
換低壓大容量電容(400V, 330 μ F)。

2. 線圈匝數不足

線圈匝數太少(100 匝)導致產生的磁力過小而無法發射，因為磁場強度跟線圈的匝數以及通過的電流量大小成正比，並且線圈越少匝，磁場分佈的空間會比較集中、短暫，彈丸能夠被加速的區域也比較短，並且線圈匝數少時，產生的磁場線分佈不集中，不容易形成「導向式」的磁力線，導致推力發散、效果變差。

- 解決方案：
增加匝數(至 300 匝)。

3. 球型子彈射不出去

初步判定為子彈太大，重量過重，在實驗中得知，因線圈所產生勞倫茲力的磁場力有各種不同的方向，導致發射時不只有向砲彈發射方向的力，還因為球體本身會有旋轉的力，進而造成力量不足無法強力擊出。

- 解決方案：
將直徑 8mm 子彈改為直徑 2mm 的子彈，降低整體重量。將子彈換成迴紋針(長條型)就可以射得更遠，長條形的鐵，因為形狀較符合電磁線圈的走向而不會產生旋轉的力，並且迴紋針本身也不適合旋轉，讓力線更集中在子彈上。

4. 迴紋針離線圈太遠，無法被射出

因迴紋針離可作用的範圍過遠，子彈無法接收到線圈的電磁力，就已經放電完畢。因為可作用的線圈範圍小，未達到最佳射擊的距離，無法完整使用所有的電磁力。

- 解決方案：

將操縱變因迴紋針距離線圈 1、3、5cm 改為 1、2、3cm。

5. 實驗改變的條件——新電容(330 μ F, 400V)照片如下



圖二十、新電容皆為 330 μ F、400V

雖然長寬高不同，但電容量都一樣，差別在耐溫的不同，皆可以用來瞬間放電。

6. 實驗距離測量判定以及變動

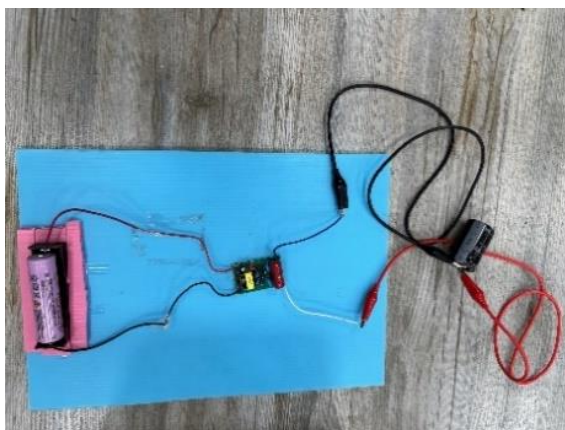
對於落地點做設定，子彈射擊出作為數據改為停下的地點為數據，並且以距離發射地點的射擊方向距離為主，並不考慮橫移方向，這樣測量會較為統一，因每個迴紋針摩擦力都差不多，可忽略不計。

因電容從小容量電容換成大容量電容後需要限壓，因為在電壓與電容皆上升時會因為製作工藝而導致體積不斷變大，為了符合正常實驗以及操作便利，因為需要使用有限壓的電容，所以必須要用到電壓表及碼表來計算充電時間和電壓，以免電容因為超過限壓值過多而損壞。

跟老師討論後，原本想說要使用電阻，避免有限壓電容燒壞，因為我們和科學網紅佑來了都是使用電蚊拍的升壓器充電，所以將電阻與電容串聯，再將電壓表與電容並聯，原本想使用分壓限流的方式來增加安全性，因為以電容本身作為電阻充電在電路電子學上並不是一個好選擇，但後來發現，不用加電阻，電容也不太會燒壞，因為限壓電容夠大且電容量足夠，在電壓上升時電容的變化也可以視為電阻，所以後來就決定不使用電阻，直接將店注入電容。

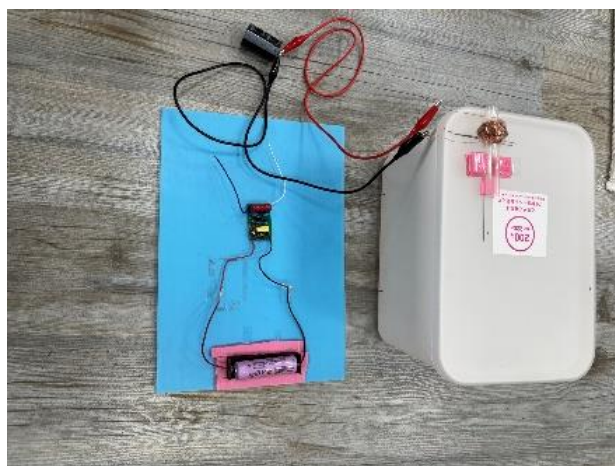
原實驗架構，是將電壓表與電容並聯，但發現因為電路的關係，推測電壓表測到的可能是電池的電壓，於是我們決定不使用電壓表與電容並聯，此外因為所使用的電壓表有上限，接近 120V 上下，但我們是使用 400V，遠超過電壓表的測量範圍，改成以充電時間計算。

➤ 以下是新設備照片



圖二十一、新設備架設圖

這是電容在充電中的照片，我使用鱷魚夾將電容接在升壓模組的輸出端上充電，充電時必須注意正負極是否連接正確(電容有標記的地方是負極)及充電時間是否過長(之前用電壓表測過，大約充電 30 秒)，以免電容爆開。



圖二十二、電容與砲台接線放電圖

這是電容放電時的照片，將電容的兩極接到線圈上，線圈產生磁力，將迴紋針射出。此時不需注意正負極



圖二十三、實驗整體架設圖

這是一張包含所有器材的照片，碼表用來計充電時間，布尺測射程，發射端對齊繩子起點，射程以迴紋針停下後和起點線的距離為準。

實驗結果如下：

1. 改變迴紋針離線圈位置

✓ 充電 30 sec，線圈圈數 300 圈，以迴紋針離線圈較遠線圈端為準

迴紋針離線圈位置 cm	射程 cm
1 cm	155 cm
2 cm	411.5 cm
3 cm	23.1 cm

2. 改變充電時間

✓ 線圈圈數 300 圈，迴紋針離線圈較遠線位置 2 cm 為基準

充電時間 sec	電壓 V	射程 cm
5 sec	49.2 V	40.15 cm
10 sec	77.1 V	56.8 cm
15 sec	106 V	167.8 cm
20 sec	132 V	301.1 cm
25 sec	133 V(電壓表上限)	355.5 cm
30 sec	133 V(電壓表上限)	448.2 cm

第五章 結論與建議

一、研究結論

1. 電磁炮的作用原理

先將電容充電，然後將電容接到線圈上，電容會瞬間放電，產生強大電流，使線圈產生磁力，吸引管內的鐵製品，在鐵製品到達線圈中央左右時，電容放電完畢，鐵製品依照慣性沿著砲管方向飛出，但在此期間若持續通電，鐵製品在通過線圈後，會被線圈的磁力吸回來，所以必須使用如電容、開關此類可以瞬間放電的設備。

2. 砲彈擺放最佳位置

實驗的過程為將迴紋針一小部分放在線圈中，其餘部分置於外面，因為在查詢的資料以及影片中有說明電磁鐵中塞入鐵棒後，能讓磁力變強，因此，將迴紋針的一部分留在線圈裡面，可以讓磁力變強，在迴紋針的其中一個部分沒有超出線圈外面的情況下，尾端離線圈越遠越好，這可以讓迴紋針加速移動距離加長，若電容容量太大，則需考慮將迴紋針後移，免迴紋針飛過線圈後，電容的電仍未放完，導致迴紋針被吸回。

3. 不同形狀造成的效果

在我們實驗過程中迴紋針和鐵珠，迴紋針飛得很遠，鐵珠卻射不出去，我們可將迴紋針的形狀視為長條形，而鐵珠是球形，球形物體受到的力，會因勞倫茲力中的磁場力作用下，使球體有許多方向而旋轉，而讓子彈減少速度，長條形受到的勞倫茲力，本身的形狀使其在單一方向，也就是依炮口的切線方向為主，不會將力分散至旋轉以及橫移上，因此速度較快。

4. 不同電壓

當電壓改變時，射程也會改變， $E = \frac{1}{2}CV^2$ ， E 為磁場， C 為電容量， V 為電壓，由算式得，電壓愈大，電流愈大，磁力愈強，吸力愈強，射程愈遠，但更容易因焦耳熱而導致器材損壞，電容量(C)上升，也會形成較大的磁場，吸力更強，射程更遠，但也會使放電時間變長，須更精確控制放電時間。

5. 電容選用

並且我們也在實驗中得知，電容應選用低壓高容量電容，如果使用高壓低容量電容，容易因放電時間過短及放電量過少而導致發射物無法被吸引。此外子彈不宜過重，否則會無法發射($F=ma$ ，質量越大，總加速度越小)。充電時間和電壓成正比，但是電容的電壓越高，充電速度越慢，射程則是越來越遠。

二、研究建議(未來展望)

1. 誤差精進

電容充完電後，必須將電線連到線圈上，這段時間中，電容的電會耗損，而且每次間隔的時間都不同，導致最終電壓不一樣，可用固定間隔時間之後才將電容接到線圈上改善，並使用開關控制發射電磁炮，可以省下重新連線的時間，降低損耗與誤差。電容在充電時，開關為手動斷電，因此每次斷電的時間都會有些微的誤差，導致每次電壓會不一樣，可使用通電後固定時間斷電的晶片減少誤差。

2. 設備架設穩定

可用3秒膠固定砲台，讓砲台更穩定，避免砲台因電磁吸引力或人為因素滑動。以及用鱷魚夾連接，防止被電到，也可以增加接觸面積。在實驗中，若我使用電蚊拍的升壓板充電，如果時間控制不好就會爆炸，如果能自己做升壓器，讓升完的電壓小於電容的崩潰電壓。

3. 加強效果

最後若想達更強力或是更顯著效果的電磁砲，可以將2個電磁砲合在一起，中間加裝紅外線遮斷器，變成重組砲，當第一個電磁砲射出子彈，經過紅外線遮斷器後，會啟動第二個電磁砲裝置，讓子彈再加速一次，增強威力。

三、研究心得

這是我第一次踏入電學領域，在這之前，我的獨立研究大多以化學主題(就像大象牙膏之類的)為主，有一天，我無意看了一個關於電學影片，我覺得很有趣，因為，我發現電子零件就像積木，每一格零件都有不同的功能，只要按特定的方式組裝，就能發揮用途，於是，我就選電磁砲為研究主題了。在這次獨立研究中，我發現了很多關於電學的知識，電學對於我不再陌生，我在研究中遇到各種挫折，但因為資優班導有請專家幫忙，才得以解決，在這次獨研中最大的一個問題是高壓電容無法讓子彈發射出去，(因為它放出來的電不夠多，所以無法把鐵珠射出去)雖然表面上看來只要換電容就好，但換完電容後會衍生出更多問題，例如需要特別控制電壓，以免爆炸，這讓我花了非常久的時間籌備器材，才能開始做實驗，在做這個實驗中雖然總是不順，但也因為過程艱辛刻苦，所以無數次失敗後的成功(電磁砲成功發射)讓我有很大的成就感，因為平常只能在螢幕上看到的物品，現在就在我眼前。做完這次獨立研究，我發現原來要接電路並不是一件容易的事，不但要一直檢查電路，避免正負極接反或發生其他問題，還要按照步驟操作，而且不小心就會出現嚴重的後果(例如：電容爆炸、零件燒壞)，我希望以後還能繼續研究電學。

參考文獻

一、影片

1. 佑來了 電磁炮
<https://www.youtube.com/watch?v=sKcb1Mlayts>
2. 佑來了 電容
<https://www.youtube.com/watch?v=eH6ensqVQTW&t=217s>

二、書籍

1. 木村誠聰（著）。（2012）。電子電路。瑞昇文化事業股份有限公司。

三、網頁

1. 電容
<https://www.digikey.tw/zh/articles/fundamentals-understand-the-characteristics-of-capacitor-types0>

四、歷屆科展優勝作品

1. 「磁」母手中線—探討電容放電時間常數對電磁砲發射的影響
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/60/pdf/NPHSF2020-080102.pdf?15>
2. 中華民國第 50 屆中小學科學展覽會---電磁砲
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/50/pdf/040111.pdf>
3. 無聲動力—線圈砲的發射分析與應用
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/51/pdf/030111.pdf>