

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 物理科

探究精神獎

080102

「磁」母手中線—探討電容放電時間常數對電
磁砲發射的影響

學校名稱：新北市中和區秀山國民小學

作者： 小六 陳韶寧 小六 楊國睿 小六 林品喬 小六 莊承諺 小六 莊凡毅	指導老師： 葉松儒
---	------------------

關鍵詞：電磁效應、線圈砲、coligun

摘要

透過文獻整理，我們發現大部分的研究結果顯示出電壓、電容、螺線圈的粗細、匝數以及子彈質心位置等變因會影響發射威力。在電容的研究中，有提到當電容量增大時，發射速度會上升；但是電容量再更大，速度則會下降。我們覺得這個現象很奇怪，為什麼不是電容量大速度就無限上升呢？實驗後我們發現，在固定電壓時，電容量在一定範圍內，發射速度有極值。若此時再提高電壓充電，不僅發射速度會下降，繼續增加電容還會有子彈反向射出、折返後再射出的情形發生，亦即發射速度會隨著電容大小而振盪。就我們所知，這是以往的科展研究中從沒被發現過的現象，經過我們設計實驗仔細測量與分析，我們認為這與電容放電的時間常數有關。

壹、研究動機

在網路影片中看到了介紹電磁砲的功能而引發興趣。剛好六年級的課程中也有關於電磁鐵的單元，我們發現研究電磁砲除了很好玩之外，還可以配合學校的單元認識電磁鐵的更多知識。接著開始收集資料，有許多科展都已做過電磁砲，但對於電容更大時反而速度會下降的物理機制，都只停留在以放電時間做推論，並沒有實驗數據可以佐證，我們很想知道他們的推論是否正確，因此想做電磁砲實驗來確認，也希望能透過這實驗驗證來找出製作電磁砲的最佳條件。

貳、研究目的

- 一、瞭解電磁線圈砲的原理：電容充電與放電特性
- 二、自製電磁線圈砲發射器與測量方法
- 三、充電電壓與螺線圈匝數、線徑、長度對發射的影響
- 四、電容放電時間常數對電磁砲發射的影響
- 五、發射威力與子彈質心位置之關係

參、研究設備與器材

一、儀器設備：

光電計時器、光電閘、示波器、直流電源供應器、電錶、電子秤，如下圖 3-1(a)。

二、實驗器材：

漆包線、熱熔槍、粗細吸管、雷射切割木板零件材料（包含：發射台、螺線圈組、捲尺軌道及開關外殼等）、電子零件（電線、杜邦線、鱷魚夾、單芯線、開關等）、電容（4.7 mF 耐伏 63 V、1 mF 耐伏 100 V 若干）、麵包板、剝線鉗、尖嘴鉗、固定架、尺、捲尺、砂紙，如下圖 3-1(b)。

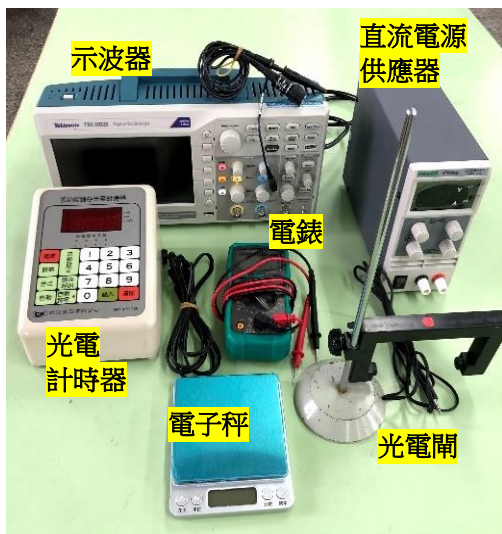


圖 3-1(a)：儀器設備

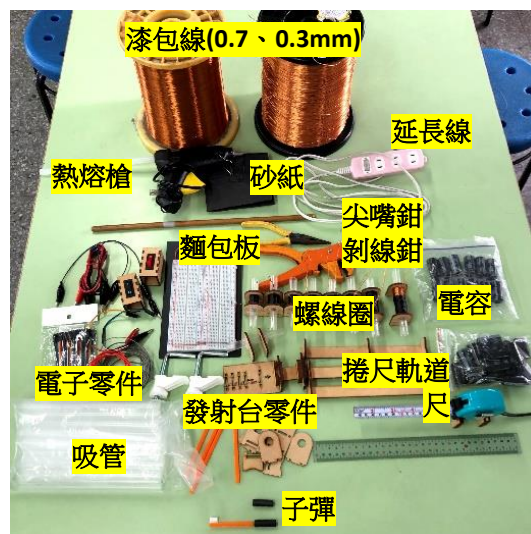


圖 3-1(b)：實驗器材

三、子彈規格：

子彈#1：直徑 0.9 cm、長 3 cm、重 14.75 g 之圓柱鐵條。

子彈#2：直徑 0.9 cm 長 3 cm 之圓柱鐵條加吸管與紙片裝置，重約 15.70 g 之圓柱鐵條。



圖 3-1(c)：子彈#1 和子彈#2

肆、研究過程與方法

一、瞭解電磁線圈砲的原理：電容充電與放電特性

(一) [文獻探討一]：線圈砲發射原理片

1、電磁線圈砲的發射原理是由於螺線圈通以直流電使線圈產生磁場，用磁力將作為子彈的磁性物質吸入線圈產生強大的速度飛出。

2、若持續通電，螺線圈所產生的磁力會將子彈吸回來，來回震盪後會吸住。

3、電容放電特性是一次性瞬間放電。適合當作線圈的電力來源，接通後放電可將鐵製品順利發射出去。

4、影響線圈砲發射的原因很多，主要有電容量、發射物位置、充電電壓、線圈等因素。

(二) [文獻探討二]：電容相關知識

1、我們所使用的電容為電解電容，標示『1000 μF ，100 V』，電容值為 1000 μF (微法拉)(圖 4-1)，耐伏 100 V 表示最高充電電壓可至 100 伏特。如下圖，電容的導針有分長短腳，分別是正負極。側邊也有顯示負極的符號。電解電容中有電解液，在電壓正常使用時，電容內部會呈現斷路狀態，不會讓電流通過但是有充電效果，可是一旦接反，就變成通路了！電解液被電流形成通路後會產生大量氣體，導致電容爆炸，因此要格外的小心。



圖 4-1：電解電容

2、電容的並聯：總電容值=電容 1+電容 2+.....，而電壓則同為充電時的電壓，但電壓不能高過最小耐伏值，以免發生危險。

3、電容單位換算：1000 μF

(三) [文獻探討三]：歷屆科展對電容的相關研究結果

1、固定電壓下，電容量在一定範圍內，發射物有最高速表現。若電容量過大或過小，發射物的速率會減慢。而電容量愈小，若要最佳發射，所需要的電壓愈大。

2、電容量越大，電壓所能及的最大速度越小。

3、電容量較小(390 μF ~1800 μF)，發射速率與電壓成正相關，電壓愈大，磁力愈大，發射物速度愈大。但電容量增大為 3300 μF 以上，發射物的發射初速會下降，表示電容量一旦

過大，會受到減速區的影響。因此電容量只要適當大小，配合高電壓，即可讓發射物有較佳的發射初速。

小結：歷屆科展都有提到電容量增加會有減速的特性，但沒有做實驗測量其原因，只有推論放電時間的影響，所以我們想做實驗證明這樣的推論是否正確。

(四) 探討電容的充電與放電特性

1、利用電池串聯來對電容充電(圖 4-2(a))

(1)串聯數個乾電池後接上電容(4.7 mF, 63 V)將其充電。

(2)用電表檢測電容電壓並記錄。



圖 4-2(a)：電容充電中

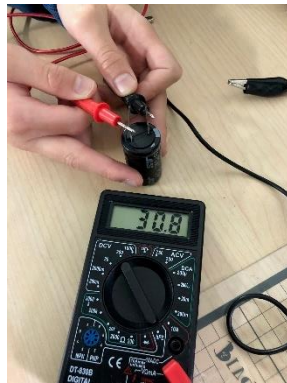


圖 4-2(b)用電錶測電壓



圖 4-2(c)：電壓緩緩下降

電壓值會隨著時間慢慢變小。我們發現電容的充電速度還滿快的，充電電壓會隨著輸入電壓而改變。當電容停止充電時，電壓會緩緩下降，如上圖 4-2(b)、圖 4-2(c)所示。

2、利用直流電源供應器充電

(1)將直流電源供應器接上電容(4.7 mF, 63 V)並調整輸出電壓進行充電

(2)用電表檢測電容電壓並記錄(圖 4-3(a)和(b))



圖 4-3(a)：電容充電前



圖 4-3(b)：電容充電後



圖 4-3(c)：迴紋針發射示意圖

3、利用漆包線螺線圈將電容放電，如圖 4-3(c)。

(1)將漆包線纏繞於吸管 300 圈

(2)將兩頭的漆磨掉後接上鱷魚夾

- (3)將迴紋針至於吸管内當作發射物測試。
- (4)利用鱷魚夾接到電容的兩極
- (5)發射候用電錶測量電容電壓

二、自製電磁線圈砲發射器與測量方法

(一) 自製電磁線圈砲發射器(圖 4-4)

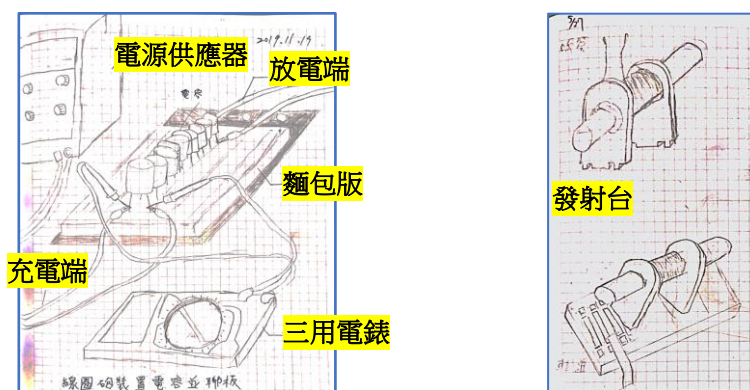


圖 4-4：(左)線圈砲充放電裝置；(右)螺線圈發射台構想設計圖

1、將雷射切割好的板材用熱熔膠固定在吸管上，纏繞實驗所需的螺線圈組，最後用電氣膠帶做固定，如圖 4-5。



圖 4-5：(左)手工纏繞螺線圈；(右)螺線圈組示意圖

表 1：螺線圈組之編號與詳細規格說明表

編號	線徑 (mm)	匝/cm	長度 L (cm)	纏繞物體
【A1】	0.7	25	2	纏繞在內徑 12mm 之吸管上
【A2】		50	2	
【A3】		75	2	
【A4】		100	2	
【A2<3>】	0.7	50	3	
【A2<4>】		50	4	
【A2<5>】		50	5	
【a4】	0.3	100	2	

- 2、將螺線圈組組裝在相對應的底版，如下圖 4-6
- 3、接上電源、電容、麵包板與線圈組完成實驗裝置。

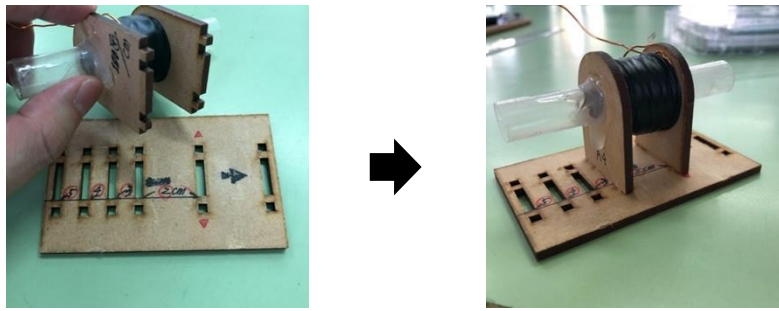


圖 4-6：(左)螺線圈發射台抽換；(右)組裝完成示意圖

(二) 麵包板的電容並聯應用

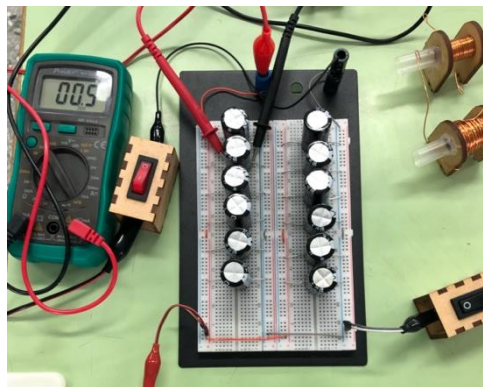
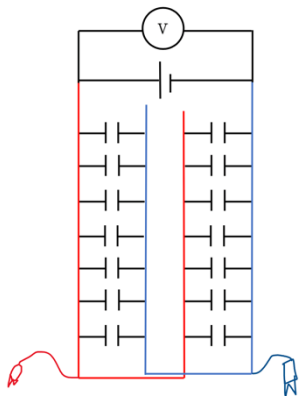


圖 4-7：(左)麵包板電路示意圖；(右)：12 mF 電容組

- 1、接上電表可以監測電容的電壓。
- 2、設計開關在充電(紅開關)與放電(黑開關)更方便操作。如上圖 4-7。
- 3、在麵包板上調整串接電容數量可以調整總電容。

(三) 設計測量電磁線圈砲威力的工具

➤ **測量方法①**：利用捲尺作為鐵條滑行軌道測量發射距離(圖 4-8)

- 1、用木材架高捲尺軌道
- 2、接上電磁線圈砲發射器並調整距離
- 3、測量鐵條發射滑行的距離

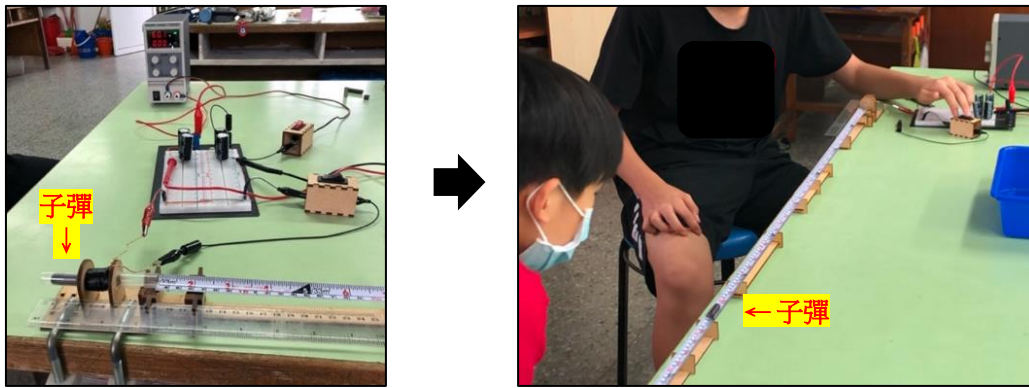


圖 4-8：測量子彈滑行距離示意圖。子彈的位置(左)發射前；(右)發射後。

➤ 測量方法②：用光電閘與光電計時器測量鐵條的發射速度（圖 4-9）

- 1、將光電閘設定在發射器的發射口，並使用緩衝容器接子彈
- 2、將光電閘接至光電計時器，並設定功能為物體通過紅外線之時間模式
- 3、將距離（鐵條長度）除以時間，求出鐵條經過光電閘的速度



圖 4-9：(左)測量子彈發射速度裝置；(右)光電閘設置在螺線圈出口處

三、充電電壓與螺線圈匝數、線徑、長度對發射的影響

(一) 充電電壓實驗：

- 1、調整直流電源充電電壓 10 V 並對電容充電
- 2、將鐵條質心放置於線圈口
- 3、將電容接上螺線圈發射並使用測量方法②紀錄實驗數據，如圖 4-8。
- 4、將步驟 2 的電壓調整為 20、30、40、50、60 V 重複步驟 1~3。

《備註：電容量 3 mF；螺線圈組【A4】；子彈#1》

(二) 線圈對發射速度之實驗步驟：(圖 4-10)

- 1、調整直流電源充電電壓為 60 V 對電容充電
- 2、將鐵條質心放置於線圈口
- 3、將電容接上螺線圈發射並使用測量方法②紀錄實驗

數據。

◇ 螺線圈匝數實驗：

- 1、重複步驟 1~3
- 2、改變不同螺線圈組【A1~A4】並記錄。

《備註：螺線圈組編號請參考表 1；電容量 2 mF；子彈#1》

◇ 螺線圈線徑實驗：

- 1、重複步驟 1~3
- 2、改變不同螺線圈組【A4、a4】並記錄。

《備註：螺線圈組編號請參考表 1；電容量 2 mF；子彈#1》

◇ 線圈長度實驗：

- 1、重複步驟 1~3
- 2、改變不同螺線圈組【A2、A2<3>、A2<4>、A2<5>】並記錄。
- 3、改變電容量為 2、4、6、8 mF 重複實驗並記錄。

《備註：螺線圈組編號請參考表 1；子彈#1》

四、電容放電時間常數對發射速度的影響

(一) 發射速度與電容量之關係實驗：(圖 4-11)

◇ 實驗一：

- 1、將直流電源供應器輸出電壓設定為 40 V
- 2、對並聯的電容組充電
- 3、將鐵條質心放置於線圈口
- 4、將電容接上螺線圈發射並使用測量方法②紀錄

實驗數據。

- 5、改變電容量為：1、2、3、...、7、8 mF，並重複步驟 1~4 並記錄數據。



圖 4-10：螺線圈實驗示意圖

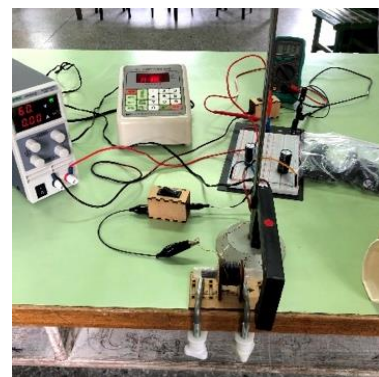


圖 4-11 電容實驗示意圖

◇ 實驗二：

- 1、將步驟 1 的輸出電壓改為 60 V
- 2、重複實驗一的步驟 2~4
- 3、改變電容量為：1、2、3、...、11、12 mF，紀錄實驗數據。

《備註：螺線圈組【A4】；子彈#1》

(二) 電容放電時間常數的測量步驟：(圖 4-12)

- 1、設定直流電源供應器輸出電壓
- 2、對並聯的電容組充電至後停止充電
- 3、將示波器接到電容正負極
- 4、將電容接上螺線圈組【A4】後放電
- 5、利用示波器截圖回傳至電腦進行分析。

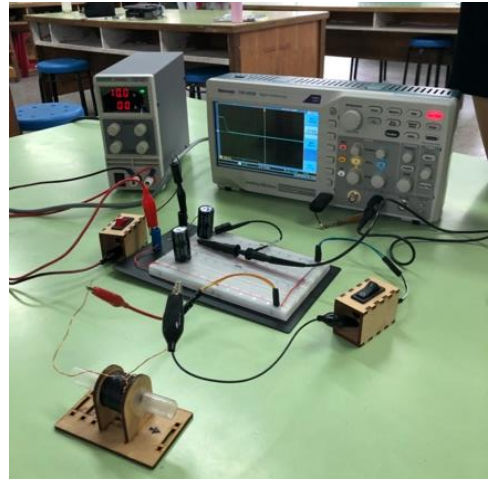


圖 4-12 示波器量測放電時間

◇ 測量不同充電電壓之放電時間常數：

- 1、重複放電時間實驗步驟 1~5
- 2、將步驟 1 的充電電壓調整為 20、40、60 V
- 3、步驟 4 的電容量為 2 mF

◇ 測量不同電容量之放電時間常數：

- 1、重複放電時間實驗步驟 1~5
- 2、將步驟 1 的充電電壓調整為 60 V
- 3、將步驟 4 電容量調整為 1、2、3、...、11、12 mF

(三) 子彈質心到線圈中心所需之時間測量

◇ 自製實驗裝置並測量：

1、設計說明：如圖 4-13 中，①表示子彈質心從線圈口至線圈中心的距離；後方使用與①同長度的小紙片（本實驗使用 2 cm 長的螺線圈，其線圈口到線圈中心為 1 cm）。子彈發射到線圈中間時，小紙片也會跟著移動②(1 cm)的距離，只要用光電閘測量紙片通過時間，即為鐵條到線圈中心的時間。

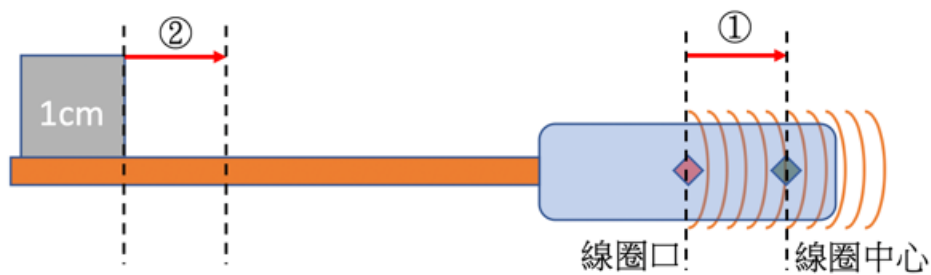


圖 4-13：子彈#2 的工作原理示意圖

◇ 測量一（固定電壓 40V）：

1、將鐵條一端用熱熔膠、吸管、小紙片等材料加工成一個末端帶有一個寬度 1 cm 小旗幟的特殊子彈我們稱為子彈#2，如圖 4-14(左)。

2、將直流電源供應器調整為 **40 V**，接上螺線圈組【A4】對其充電

3、電容量分別為 1、2、3、4 mF

4、將子彈#2 的鐵條質心放置於線圈口（實際質心會後移，由於鐵條後面所加工的吸管紙片不到 1 g，比鐵條輕很多，對質心位置的影響很小，所以我們直接以鐵條的質心位置進行實驗）

5、將光電閘定位在小紙片前端，測量小紙片通過的時間就可以得出鐵條質心至螺線圈中心之時間。如圖 4-14(右)。

6、重複做步驟 2~5 紀錄 10 次數據取平均

◇ 測量二（固定電壓 60V）：

1、將步驟 2 之充電電壓調整至 **60 V**，重複步驟 2~5，記錄實驗數據

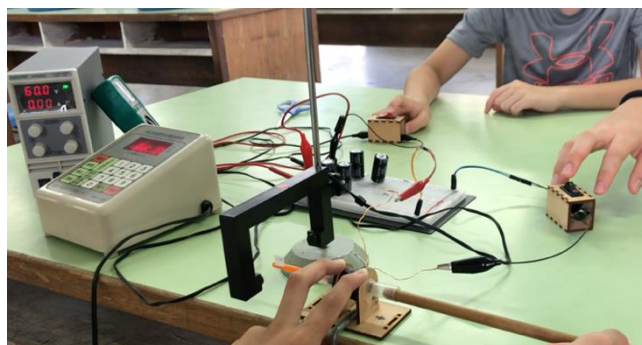


圖 4-14：(左)用電子秤測量子彈#2 重量；(右)實驗示意圖(60 V、4 mF)

五、發射威力與子彈質心位置之關係

(一) 發射威力與質心位置之關係

◇ 實驗一：

- 1、將直流電源供應器輸出電壓設定為 60V
 - 2、對電容充電至實驗電壓後停止充電
 - 3、改變子彈質心發射時初始位置：利用木棒與直尺將子彈質心調整至（線圈口外 2.5 cm 到線圈中心，再到另一端線圈外 2.0 cm）的位置
 - 4、將電容接上螺線圈發射並使用測量方法①紀錄子彈滑行距離。
 - 5、重複步驟 1~4 數次，去掉最大與最小值，留下 5 次數據取平均，減少誤差。
- 《備註：電容量 4 mF；螺線圈組【A2】；子彈#1》

◇ 實驗二：

- 1、重複實驗一的實驗配置
- 2、子彈質心發射時初始位置改為（線圈口外 1.6 cm 到線圈中心再到另外一端線圈口）
- 3、將電容接上螺線圈發射並使用測量方法②紀錄實驗數據。
- 4、重複步驟 1~3 並記錄。
- 5、將子彈通過光電閘的時間數據用電腦換算成速度。

(二) 電容量與質心位置組合對發射速度之影響

◇ 實驗一：

- 1、將直流電源供應器輸出電壓設定為 60 V
 - 2、對 3 mF 電容充電至實驗電壓後停止充電
 - 3、改變子彈質心發射時初始位置：切齊線圈口、線圈口外 0.2 cm、線圈口外 0.4 cm、...、到線圈口外 1.2cm
 - 4、將電容接上螺線圈組【A4】發射並使用光電閘紀錄發射時間
 - 5、重複步驟 1~4 取 10 次數據平均，減少誤差。
- 《備註：子彈#1》

◇ 實驗二：

- 1、將實驗一的步驟 2 的電容改為 4 mF
- 2、重複實驗步驟 1~4 取 10 次數據平均，減少誤差。

伍、研究結果

(詳細的實驗數據，請見附錄 p.26)

一、充電電壓與螺線圈匝數、線徑、長度對發射的影響

(一) 充電電壓實驗：測量不同充電電壓時，子彈發射的速度

《電容量 3 mF、螺線圈組【A4】 100 匝/cm，L=2 cm、子彈#1》

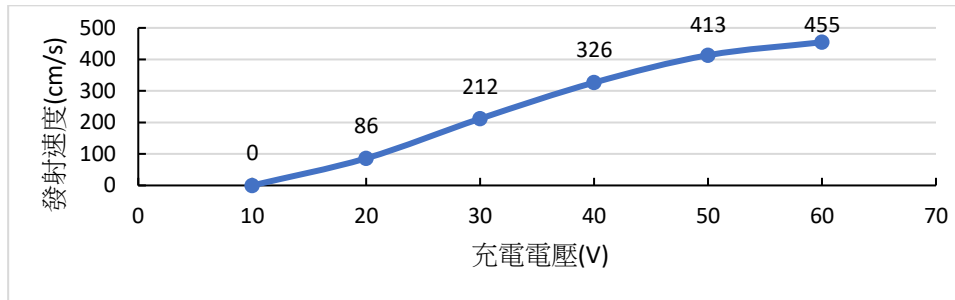


圖 5-1：發射速度與充電電壓關係圖

(二) 螺線圈匝數實驗：測量不同匝數的螺線圈發射的速度

《充電電壓 60 V、電容量 2 mF、螺線圈 L=2 cm、子彈#1》

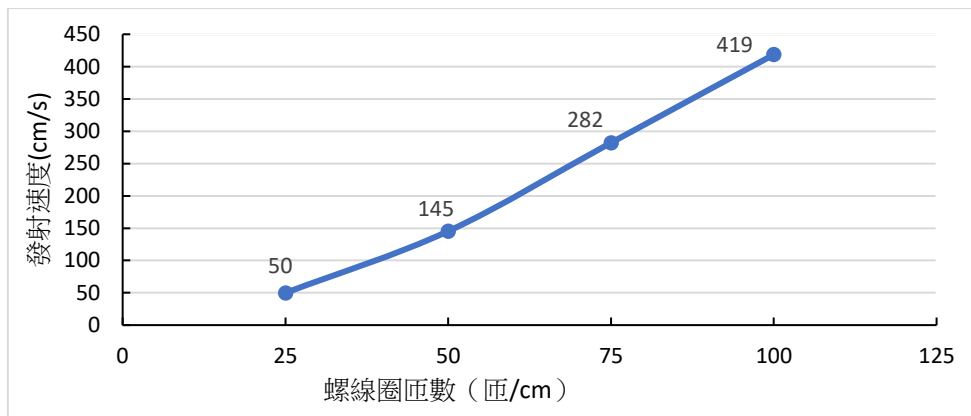


圖 5-2：發射速度與螺線圈匝數關係圖

(二) 螺線圈線徑實驗：測量不同線徑的螺線圈發射的速度

《充電電壓 60 V、電容量 2 mF、螺線圈 L=2 cm、子彈#1》

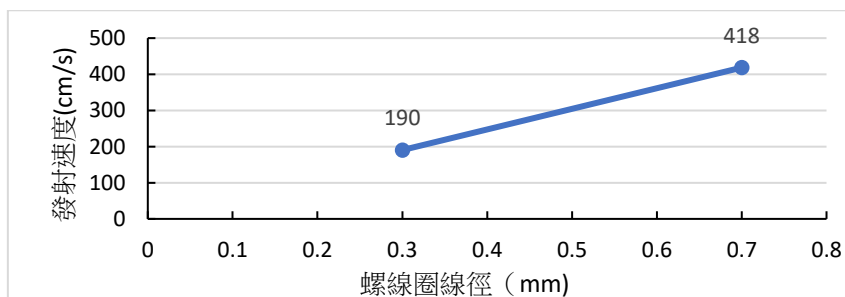


圖 5-3：發射速度與螺線圈線徑關係圖

(三) 螺線圈長度實驗：測量不同長度的螺線圈在不同電容量時的發射的速度

《充電電壓 60 V、螺線圈 50 匝/cm、子彈#1》

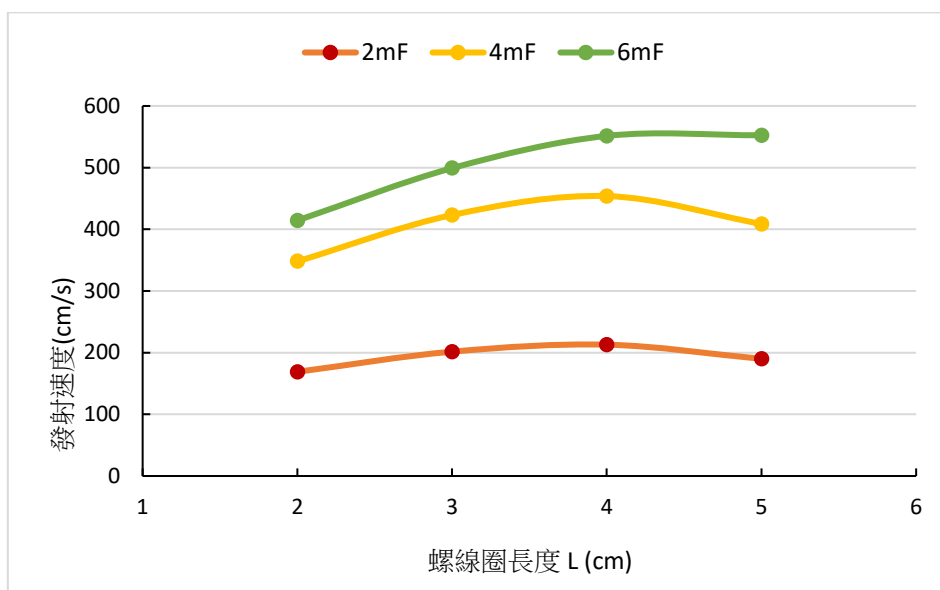


圖 5-4：發射速度與螺線圈長度 L 關係圖

二、電容放電時間常數對發射速度的影響

(一) 發射速度與電容量之關係實驗：

1、電容量實驗一：測量不同電容量時，子彈發射的速度

《充電電壓固定 40V、螺線圈 100 匝/cm，L=2 cm、子彈#1》

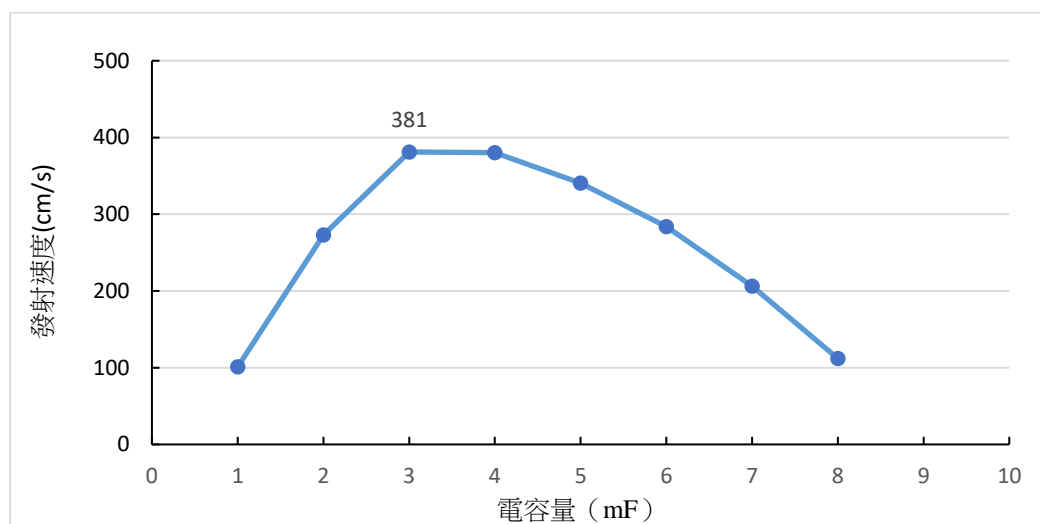


圖 5-5：發射速度與電容量之關係圖（充電電壓固定 40 V）

2、電容量實驗二：測量不同電容量時，子彈發射的速度

《充電電壓固定 60 V、螺線圈 100 匝/cm，L=2 cm、子彈#1》

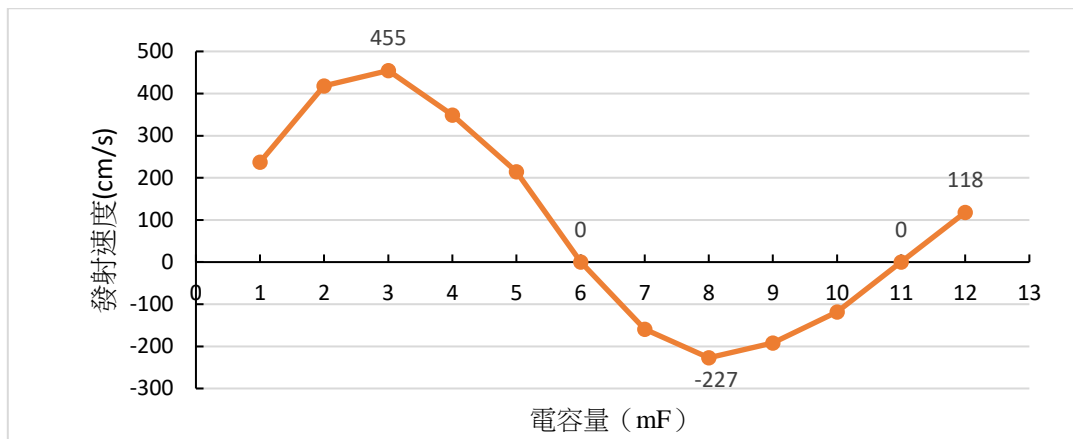


圖 5-6：發射速度與電容量之關係圖（充電電壓固定 60 V）

(二) 電容放電時間常數 τ 之量測

1、不同充電電壓之放電時間常數 τ 之量測：

《電容量 2 mF、螺線圈 100 匝/cm， $L=2$ cm》

放電時間常數 τ 為最高電壓(V)下降至 $(V) \times e^{-1} \approx (V) \times 0.37$ 所經過之時間。

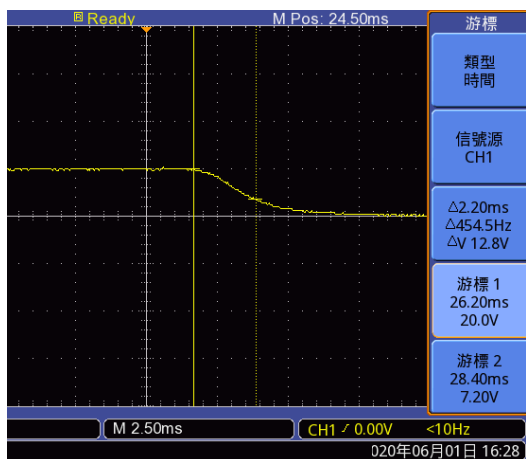


圖 5-7(a)：20V 電容放電波形

$$(20\text{ V}) \times e^{-1} \approx (20\text{ V}) \times 0.37 = 7.4\text{ V}$$

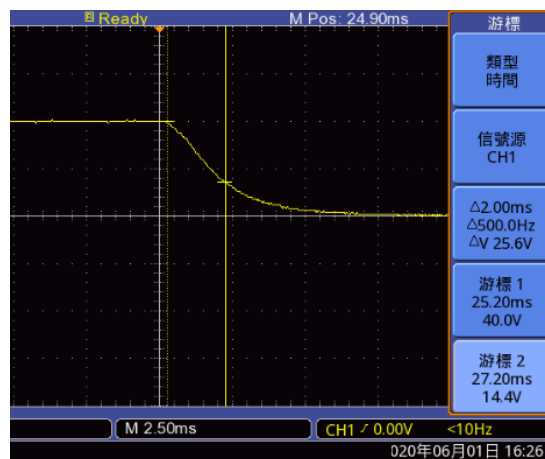


圖 5-7(b)：40V 電容放電波形

$$(40\text{ V}) \times e^{-1} \approx (40\text{ V}) \times 0.37 = 14.8\text{ V}$$

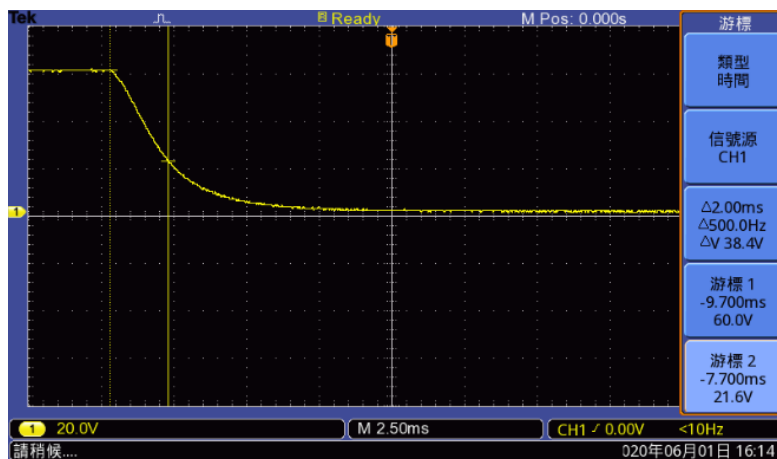


圖 5-7(c)：60 V 波形 $(60\text{ V}) \times e^{-1} \approx (60\text{ V}) \times 0.37 = 22.2\text{ V}$

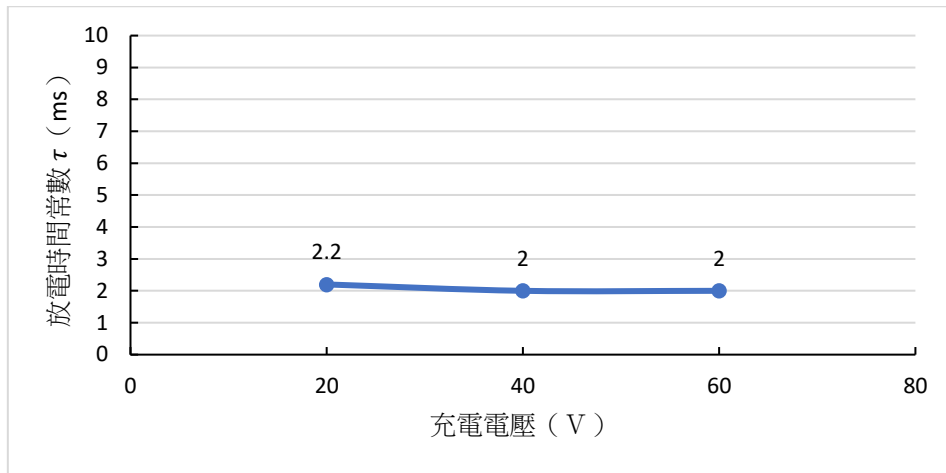


圖 5-8：放電時間常數 τ 與充電電壓關係圖

2、不同電容量之放電時間常數 τ 之量測

《電壓 60 V、螺線圈 100 匝/cm， $L=2$ cm》

放電時間常數 τ 約等於最高電壓 (60 V) 下降至 $(60 \text{ V}) \times e^{-1} \approx (60 \text{ V}) \times 0.37 = 22.2 \text{ V}$ 所經過之時間。圖 5-9(a)~(m) 為 1 mF 到 12 mF 的電容放電波形

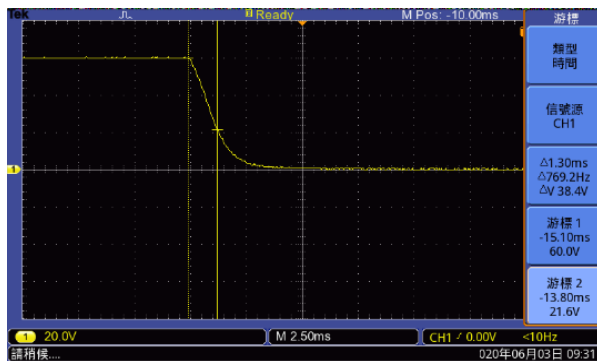


圖 5-9(a)：1 mF 電容放電波形

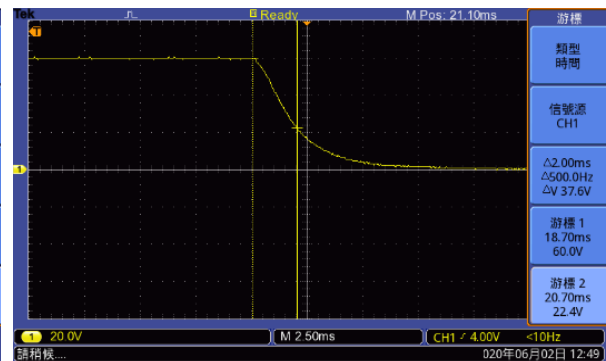


圖 5-9(b)：2 mF 電容放電波形

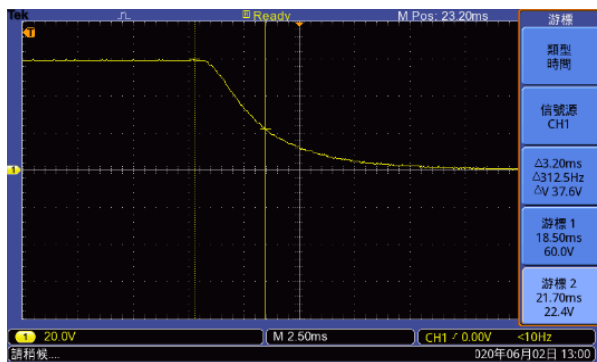


圖 5-9(c)：3 mF 電容放電波形

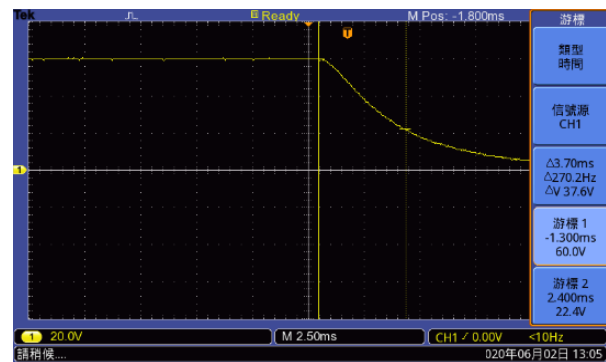


圖 5-9(d)：4 mF 電容放電波形

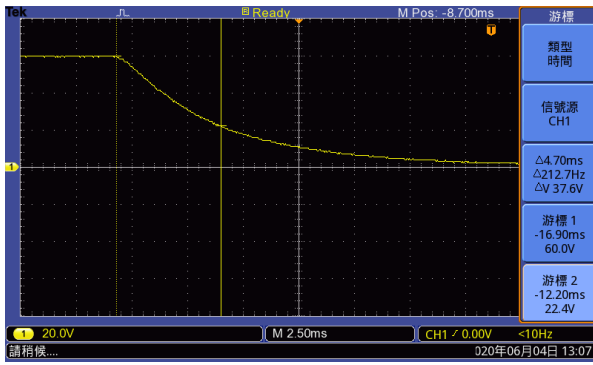


圖 5-9(f) : 5 mF 電容放電波形

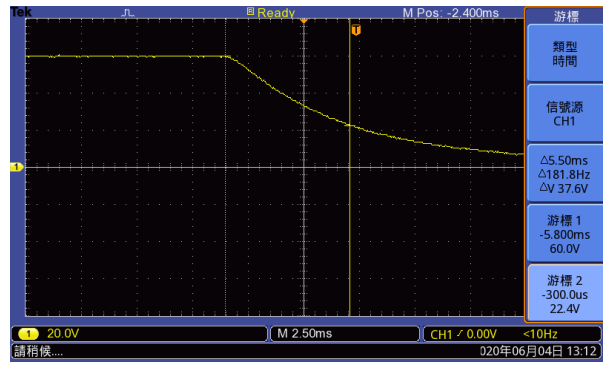


圖 5-9(g) : 6 mF 電容放電波形

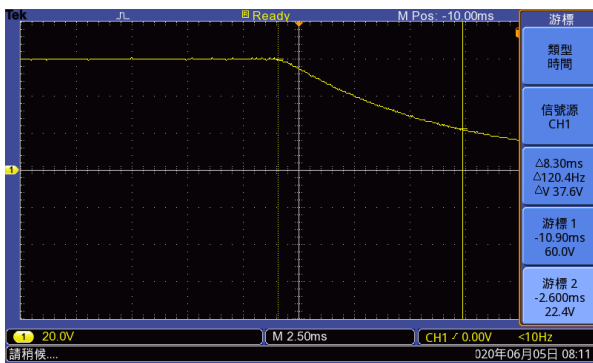


圖 5-9(h) : 7 mF 電容放電波形

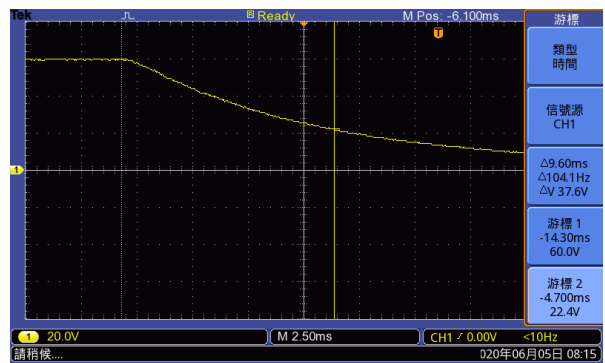


圖 5-9(i) : 8 mF 電容放電波形

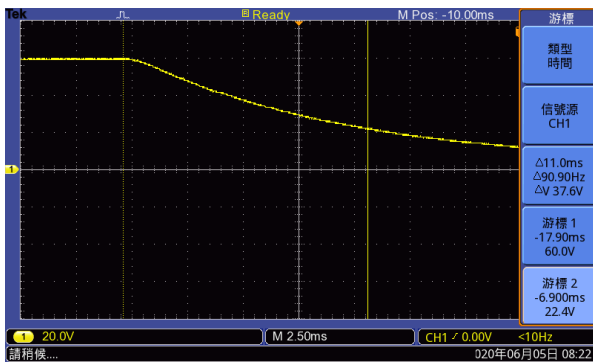


圖 5-9(j) : 9 mF 電容放電波形

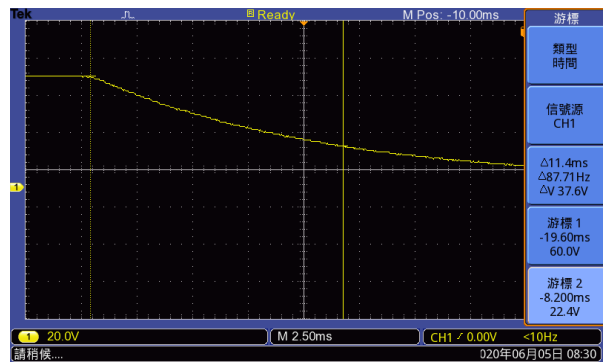


圖 5-9(k) : 10 mF 電容放電波形

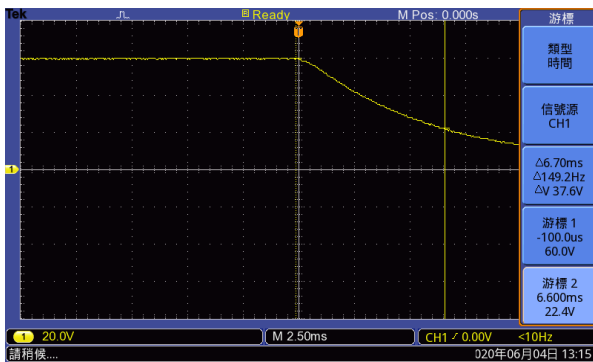


圖 5-9(l) : 11 mF 電容放電波形

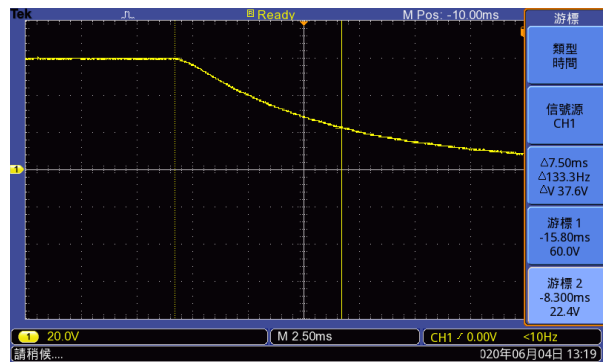


圖 5-9(m) : 12 mF 電容放電波形

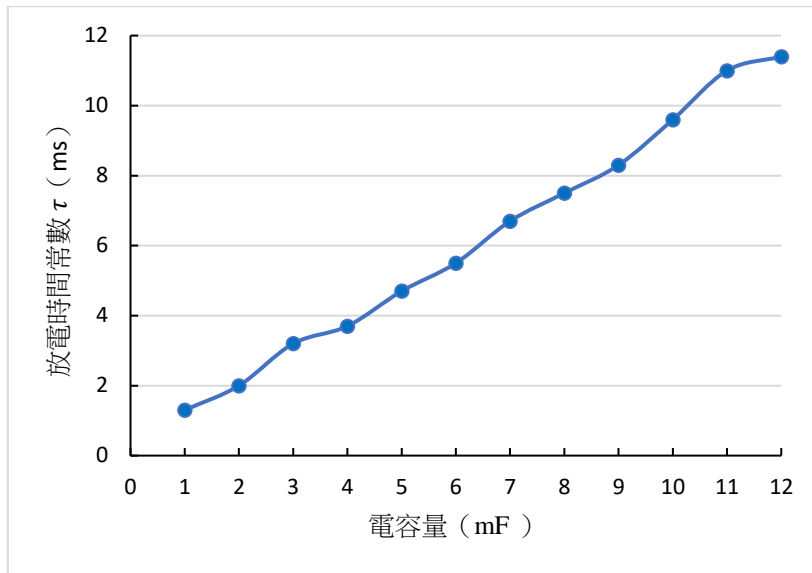


圖 5-10：放電時間常數 τ 電容量關係圖

(三) 子彈質心到線圈中心所需之時間與電容量之關係

《螺線圈 100 匝/cm，L=2 cm》

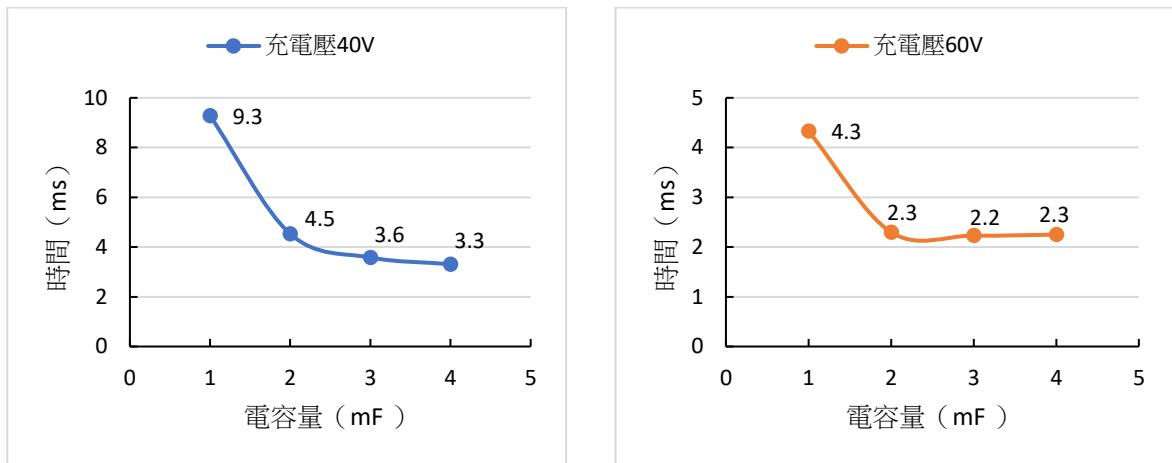


圖 5-11：子彈質心到線圈中心所需之時間。充電電壓分別為 (左) 40 V 與 (右) 60 V

三、發射威力與子彈質心位置之關係

(一) 發射威力與子彈質心位置實驗

1、實驗一：測量子彈於不同位置發射時，在軌道滑行的距離：

《充電電壓 60 V、電容量 4 mF、螺線圈組【A2】50 匝/cm，L=2 cm、子彈#1》

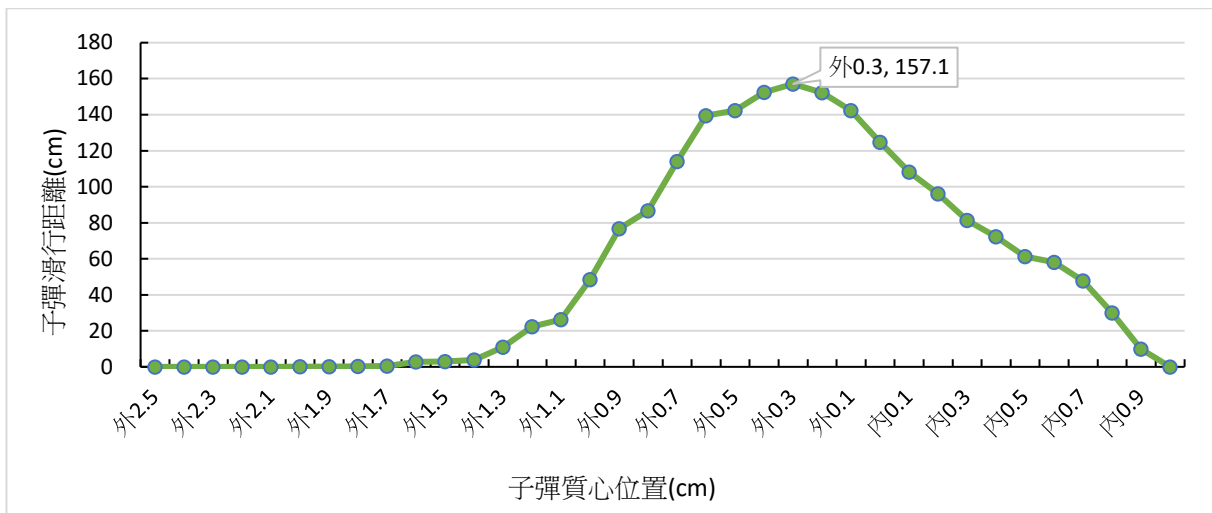


圖 5-12：發射距離與子彈質心位置關係圖

2、實驗二：測量子彈於不同位置發射時，發射的速度：

《充電電壓 60 V、電容量 4 mF、螺線圈組 50 匝/cm，L=2 cm、子彈#1》

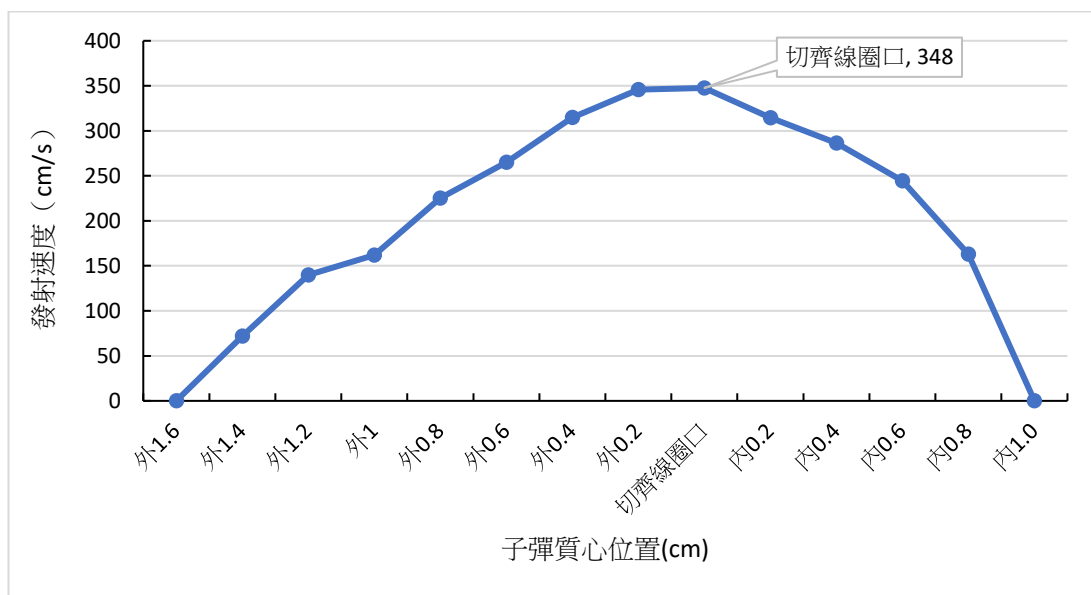


圖 5-13：發射速度與子彈質心位置關係圖

(二) 電容量與質心位置組合對發射速度之影響

1、實驗一、實驗二：測量質心位置往線圈口後移時，子彈發射的速度

《充電電壓 60 V、螺線圈 100 匝/cm，L=2 cm、子彈#1》如圖 5-14。

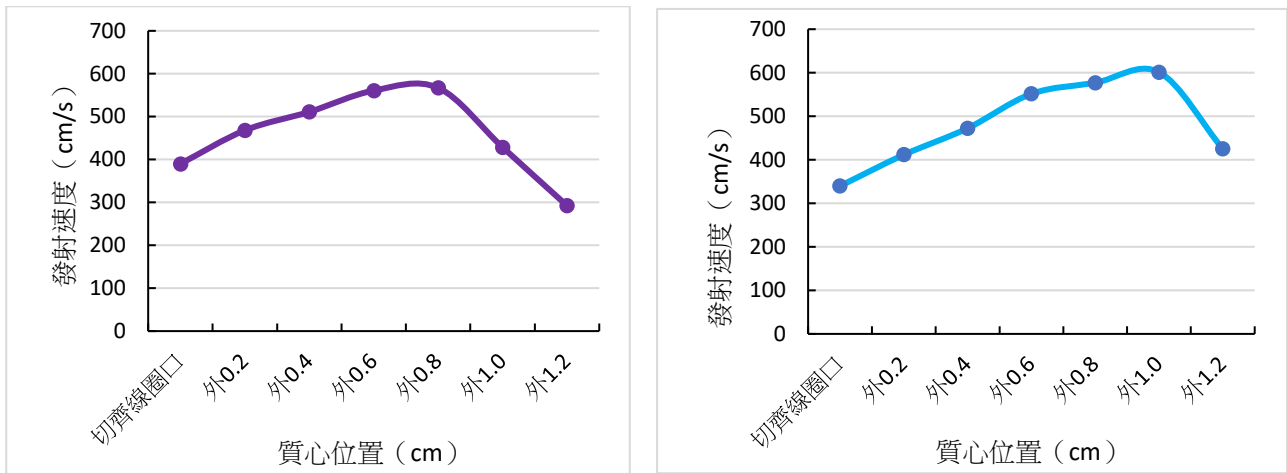


圖 5-14：發射速度與質心位置關係圖。電容分別固定為(左) 3 mF 與(右) 4 mF。

陸、討論

一、實驗討論

(一) 發射威力與質心位置實驗：

1、從圖 5-12、圖 5-13 中，兩種測量方式，都顯示出當子彈質心在線圈口外一點點到切齊線圈口這之間有最大的威力，越遠離線圈口附近的地方，威力就下降。

2、子彈質心位置在①、③切齊線圈口時，子彈受的磁力會指向中心且有對稱性。如下圖左；而質心位置在②螺線圈中心時，所受磁力合力為零，如圖 6-1 所示。

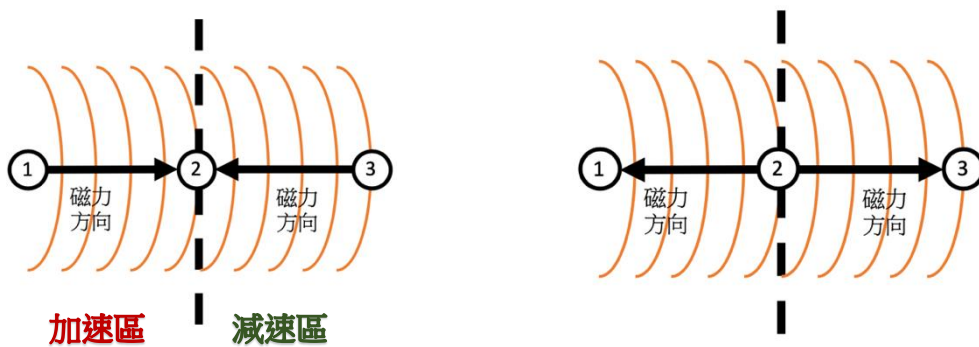


圖 6-1：(a)質心在①和③位置時所受磁力作用；(b)質心在②位置時所受磁力作用

3、子彈質心位置若在①到②時，受到的磁力向右，加速向右(線圈砲口)，故子彈會加速，我們把這段區域稱為**加速區**；而在②到③時，受到的磁力向左，加速向左(與線圈砲口相反方向)，故子彈會減速，我們稱為**減速區**。

4、我們使用的兩種實驗測量方法中，方法①測量子彈滑行距離的量測誤差會比較大，因為滑行距離變長，會提高軌道摩擦力的影響。然而方法②利用光電閘測量脫離螺線圈時的發射速度，其他外力的影響比較少，故之後的實驗皆採用方法②。

（二）發射速度與充電電壓實驗：

從圖 5-8 不同電壓之放電時間 τ ，我們得知固定電容時，提高充電電壓增加並不會影響電容放電時間。當電容量固定時，充電電壓越高，電量會越大，所以在同樣的時間內，用高電壓充電的電容會放出更多電量，亦即電流增大、所以磁力會變強，圖 5-1 數據的結果也證實我們的想法。

（三）螺線圈匝數、線徑、長度對發射速度影響之實驗：

1、從圖 5-2 和圖 5-3 的結果顯示提升匝數、螺線圈線徑都會提高發射速度，因為螺線圈產生的磁場 $B = \mu_0 n I$ 正比於匝數與電流，所以提升匝數可以直接提高磁場，而線圈線徑增加時，線圈的電阻會下降，使得電流上升，因此也會提高磁場。因此提升匝數、螺線圈線徑都能提高發射速度。

2、從圖 5-4 則是可發現螺線圈長度增加時，2~6 mF 的發射速度都是上升到一個最高值之後開始下降，我們認為這與增加線圈長度會提高電阻有關，因為本實驗固定螺線圈為 50 匝數/cm，長度增加時總匝數會增加，因此提高了螺線圈的電阻，造成電流下降。原本提高螺線圈的長度可以增加子彈的加速區，但此時電流也會下降，在這兩因素同時作用下，造成發射速度先上升而後下降。

（四）發射速度與電容量實驗：

1、固定充電電壓 40V 在電容量增加時速度變化會先上升再下降(圖 5-5)，我們認為這與子彈的質心通過線圈中心所需的時間有關。電容儲存的電量 $q = CV$ ，正比於電容值，故較大的電容可提高子彈的速度，縮短子彈質心通過線圈中心所需的時間；又電容上升時放電時間也會增加，一旦子彈的質心通過線圈中心進入減速區時，電容尚未放電完畢，則子彈會開始減速，故速度下降。

2、固定充電電壓 60V 的實驗中(圖 5-6)，我們還發現速度會隨著電容大小而震盪，就我們所知，這是以往的科展研究中從未被發現的。我們嘗試將所量測到的震盪粗略分為 5 個區來討論。為了方便討論我們將子彈運動的方向分為正向與負向。第 1 區為正向加速區、第 2 區

為正向減速區、3區為負向加速區、4區為負向減速區、5區為第二次正向加速區。如圖 6-2 所示。

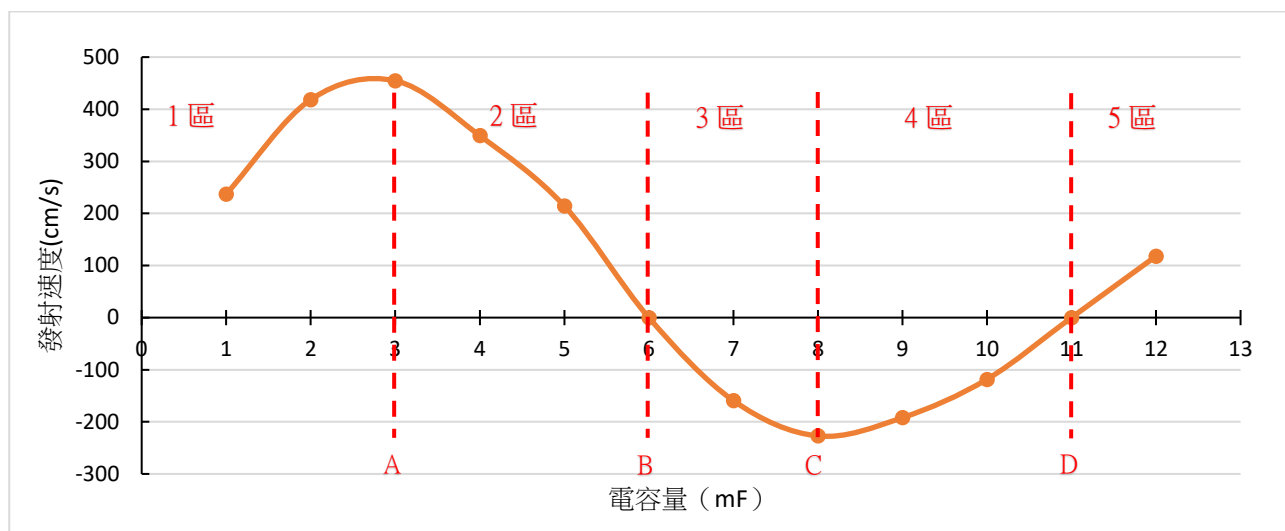


圖 6-2：發射速度與電容量之分析(充電電壓 60V)

3、為了解釋各個區域交界發生什麼事，我們設計實驗去測量固定電壓 60 V 時不同電容量的放電時間常數、也測量在虛線 A 前後 (1~4 mF) 子彈的質心發射到螺線圈中心的時間。

(五) 「放電時間常數 τ 」與「子彈鐵條質心到線圈中心所需時間」之比較：

1、我們將圖 5-11 和圖 5-12(右)整理成圖 6-3，進行「放電時間常數 τ 」與「子彈鐵條質心到線圈中心所需時間」之比較。

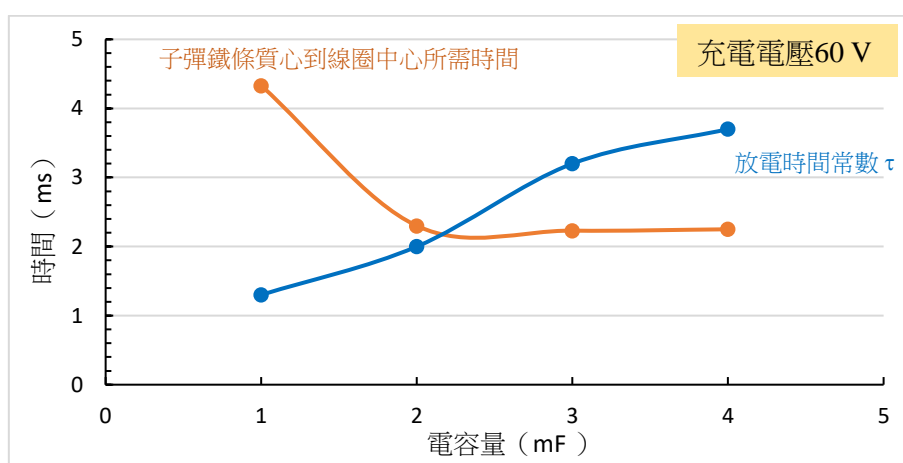


圖 6-3：「放電時間常數 τ 」與「子彈鐵條質心到線圈中心所需時間」比較圖

注意在電容量 1 mF 和 2 mF 時，子彈質心發射到中心的時間都比電容放電的時間常數 τ 還要長，故子彈只受到加速區作用；但是當電容達 3 mF 時，子彈質心發射到中心的時間大於時間常數 τ ，這表示子彈發射到螺線圈中心時，螺線圈導線還在持續放電，因此可以確

定子彈有受到減速區作用影響而減速。這個發現可以證明圖 5-6 發射速度與電容量之關係圖的結果是正確的。

2、我們推論圖 6-2 中的分界線 A ~ D 分別表示電容放電完畢時，子彈質心的位置恰好在某些特定點附近，我們將這些特定點相對於螺線圈的位置繪製成圖 6-4。

(注意！我們所謂的電容放電完畢是以放電時間常數 τ 來估算，因為放電時間超過時間常數時，電容所剩的電量已不多，對子彈運動的影響已不大)

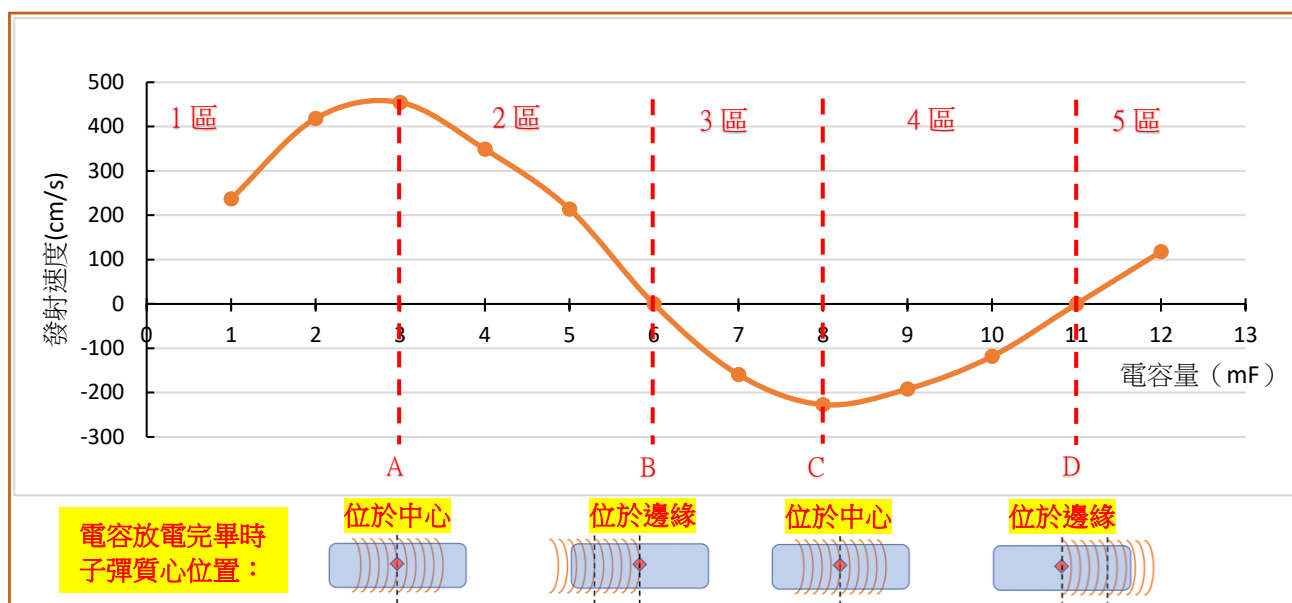


圖 6-4：子彈質心位置分界線說明圖

界線 A：電容放電完畢時，子彈的質心恰好位於於螺線圈的中心附近，正向減速的影響很小，所以有最大的正向發射速度；

界線 B：子彈質心進入正向減速區減速至零時，質心恰好位於螺線圈的邊緣附近，此時電容剛好放電完畢；

界線 C：有最大的負向速度，這表示電容放電完畢時，子彈的質心恰好位於螺線圈的中心附近，負向減速區的影響很小，所以有最大的負向發射速度；

界線 D：表示子彈質心進入負向減速區減速至零時，質心恰好位於螺線圈的邊緣附近，此時電容放電完畢。

3、整體而言，放電時間尚未超過時間常數，則子彈不會射出，它會不斷在線圈內來回反彈，因此我們推論，若繼續提高電容可以造成第二次、第三次、第四次...的子彈反彈，所以速度會繼續震盪。

4、將圖 5-6 的發射速度與電容量之關係圖（充電電壓固定 60V）與圖 5-10 的電容量與放電時間 τ 關係圖做交叉分析，繪製如圖 6-5 所示。

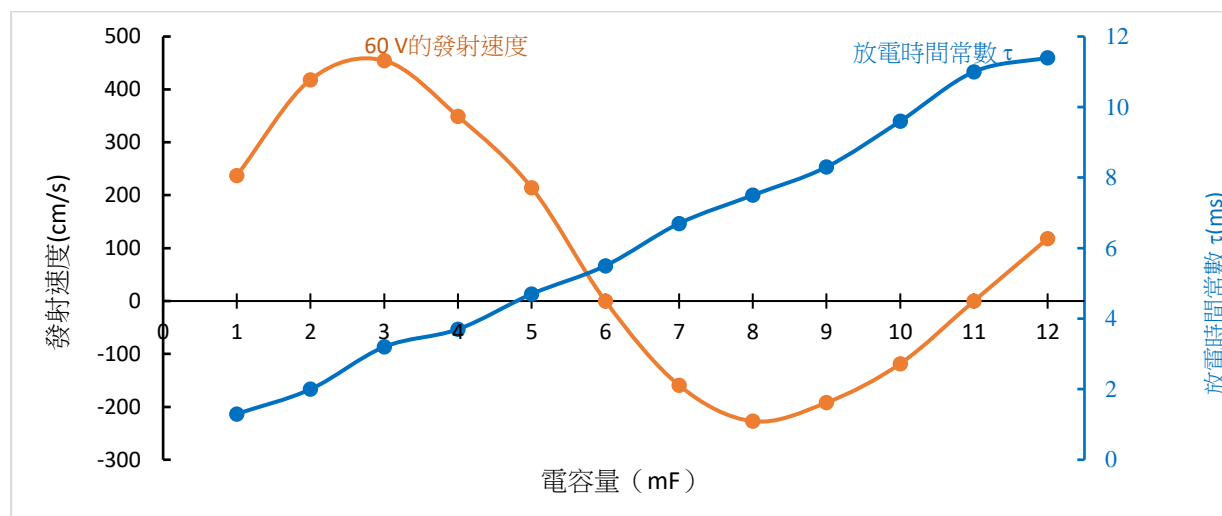


圖 6-5：電容量與發射速度關係、放電時間常數 τ 分析圖

固定電壓時，增加電容量，電容的放電時間常數會越大，導致螺線圈產生磁力的時間變久，造成子彈在線圈內產生震盪的情形。從上圖 6-5 中也可以合理的推論，若是電容量持續增加，子彈震盪的次數會增加。所以在固定電壓下，想要得到最佳的發射效果，需要考慮到放電時間常數剛好等於子彈質心發射至線圈中心的時間，這樣就可以避免子彈進入減速區時還有磁力作用造成減速。

（六）發射速度與質心位置之關係實驗：

1、了解到「子彈質心位置到線圈口的時間」與「放電時間常數」兩者之間的關聯性這個重要關鍵點之後，我們思考除了電容量、電壓兩個變因之外，是否還有其他方式可以讓子彈發射的更快？於是我們透過將質心往後移的方式，看看是否能增加子彈質心位置到線圈口的時間，我們成功地在質心位置向後移之後，提升了子彈的發射速度(如圖 5-14)，但如果往後移動太多，則會因為距離線圈太遠，磁力太弱無法拉動子彈前進。

（七）綜合以上（一）~（六）的實驗分析與討論我們認為想要得到最大的威力，在相同條件下，我們要使放電時間常數剛好能讓子彈從出發點移動到線圈中心，這樣的配置子彈可以獲得最多的加速作用而達到最高速。

柒、結論與建議

一、結論：

(一) 電容是一種可以儲存電量，並且可以瞬間放電的電子器材，可以應用在電磁線圈砲的放電裝置。電磁線圈砲的發射原理是透過瞬間電流產生的磁力，將鐵製品吸入並利用慣性發射出去。線圈內部可以從中間分成加速區與減速區。

(二) 自製的電磁線圈砲要考慮到使用的方便性與安全性，我們成功設計出可方便抽換實驗器材、兼顧安全性的線圈砲發射裝置。

(三) 實驗結論：

- 1、子彈質心與螺線圈的相對位置會影響發射速度，質心位置越靠近螺線圈兩端，獲得磁吸引力越大且方向相反。
- 2、電容量越大則放電時間常數越大；而電壓大小並不會影響放電時間常數 τ 。
- 3、相同條件時，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。
- 4、相同條件時，電容量在一定範圍內，發射速度有極值。此時若提高電壓充電，不僅發射速度會下降，繼續增加電容還會有子彈反向射出、折返兩次後射出的情形發生，亦即發射速度會隨著電容大小而振盪。就我們所知，這是以往的科展研究中從沒被發現過的現象，經過我們設計實驗仔細測量與分析，我們認為這與電容放電的時間常數有關。
- 5、電容放電時間 τ 、與鐵條質心發射至線圈中心的時間 t 有密切關係：若 $\tau \leq t$ 則鐵條不會受到減速區的阻力影響，威力較強；若 $\tau > t$ ，則鐵條會受到減速區的阻力影響，威力會下降。
- 6、不管電磁砲的各項變因為何，最重要的關鍵是放電時間要剛好等於子彈質心發射至線圈中心的時間 t (即 $\tau = t$)。

二、建議：

(一) 透由本次的實驗結論，可以提供學校在六年級電磁鐵的單元，當作延伸教材 diy，可以使用較粗的漆包線（0.7mm 以上）當作材料效果較明顯，配合課本實驗的變因如：電壓、線圈匝數等來製作不同的線圈砲，再利用線圈砲發射威力的強弱，驗證課本的實驗結果。也可以透過製作線圈砲的過程，讓同學思考怎麼樣才能做出威力最強的線圈砲，當作比賽。

(二) 若有興趣要研究線圈砲，可以選用耐壓值 100V 以內的電容開始入手，價格較為便宜，在我們的實驗中，想要增加發射威力，提升電壓會比電容更有效。（ $E = \frac{1}{2}CV^2$ ）

捌、參考資料及其他

一、參考資料：

- 1、佑來了（民 108 年 8 月 22 日）。【Fun 科學】超·電磁砲(噴飛的硬幣)。取自 <https://www.youtube.com/watch?v=sKcblM1ayts>
- 2、佑來了（民 108 年 8 月 29 日）。【Fun 科學】衝擊擺的威力(含電容爆炸實驗)。取自 <https://www.youtube.com/watch?v=eH6ensqVQTW>
- 3、中華民國第 50 屆中小學科學展覽會-高中物理科-電磁砲
<https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/50/pdf/040111.pdf>
- 4、中華民國第 51 屆中小學科學展覽會-國中物理科-無聲動力—線圈砲的發射分析與應用 <https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/51/pdf/030111.pdf>

二、附錄：實驗數據表

表 2：發射速度與充電電壓之關係實驗數據

電壓 (V)	test1	test2	test3	test4	test5	test6	test7	test8	test9	test10	平均 (s)	速度 (cm/s)	SD
10	無通過光電閘										-	0	-
20	0.035	0.035	0.035	0.036	0.034	0.035	0.034	0.034	0.034	0.037	0.0348	86	8.09E-04
30	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.015	0.015	0.015	0.014	0.014	0.0142	212	3.60E-04
40	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.0092	326	8.76E-05
50	0.007	0.008	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008	0.007	0.007	0.007	0.0073	413	1.71E-04
60	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.006	0.007	0.007	0.007	0.006	0.0066	455	1.25E-04

表 3-1：發射速度與螺線圈匝數之關係實驗數據

規格 (匝/cm)	test1	test2	test3	test4	test5	test6	test7	test8	test9	test10	平均 (s)	速度 (cm/s)	SD
25	0.057	0.059	0.058	0.064	0.061	0.058	0.074	0.053	0.057	0.062	0.0602	50	5.60E-03
50	0.024	0.023	0.021	0.021	0.017	0.024	0.021	0.018	0.018	0.021	0.0206	145	2.51E-03
75	0.011	0.012	0.010	0.011	0.011	0.011	0.010	0.012	0.012	0.010	0.0106	282	7.42E-04
100	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.0072	419	3.82E-05

表 3-2：發射速度與螺線圈線徑之關係實驗數據

線徑 (mm)	test1	test2	test3	test4	test5	test6	test7	test8	test9	test10	平均 (s)	速度 (cm/s)	SD
0.3	0.0153	0.0166	0.0152	0.0150	0.0147	0.0159	0.0174	0.0160	0.0163	0.0152	0.0158	190	8.4E-04
0.7	0.0071	0.0071	0.007	0.0071	0.0075	0.0071	0.0072	0.0073	0.0071	0.0072	0.0072	418	1.4E-04

表 3-3(a)：發射速度與螺線圈長度之關係實驗數據（電容量 2 mf）

線圈長度 (cm)	test1	test2	test3	test4	test5	test6	test7	test8	test9	test10	平均 (s)	速度 (cm/s)	SD
2	0.018	0.018	0.018	0.017	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.0178	169	2.59E-04
3	0.016	0.016	0.015	0.014	0.014	0.014	0.016	0.014	0.016	0.014	0.0149	202	7.66E-04
4	0.013	0.014	0.014	0.014	0.015	0.014	0.015	0.015	0.015	0.014	0.0141	213	6.90E-04
5	0.016	0.016	0.015	0.016	0.015	0.016	0.017	0.016	0.016	0.016	0.0158	190	5.93E-04

表 3-3(b)：發射速度與螺線圈長度之關係實驗數據（電容量 4 mf）

線圈長度 (cm)	test1	test2	test3	test4	test5	test6	test7	test8	test9	test10	平均 (s)	速度 (cm/s)	SD
2	0.009	0.009	0.009	0.008	0.008	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.0086	348	1.81E-04
3	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.0071	423	1.52E-04
4	0.006	0.007	0.007	0.007	0.007	0.006	0.007	0.006	0.007	0.007	0.0066	454	1.79E-04
5	0.007	0.007	0.008	0.007	0.007	0.008	0.007	0.007	0.007	0.007	0.0073	409	2.12E-04

表 3-3(c)：發射速度與螺線圈長度之關係實驗數據（電容量 6 mf）

線圈長度 (cm)	test1	test2	test3	test4	test5	test6	test7	test8	test9	test10	平均 (s)	速度 (cm/s)	SD
2	0.007	0.007	0.007	0.008	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008	0.007	0.0072	414	2.37E-04
3	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.0060	499	8.76E-05

4	0.005	0.005	0.005	0.006	0.006	0.005	0.006	0.006	0.005	0.006	0.0054	551	6.99E-05
5	0.006	0.006	0.005	0.005	0.006	0.005	0.005	0.006	0.005	0.005	0.0054	552	1.25E-04

表 4-1：發射速度與電容量之關係實驗一數據（充電電壓 40 V）

電容量 (mF)	test1	test2	test3	test4	test5	test6	test7	test8	test9	test10	平均 (s)	速度 (cm/s)	SD
1	0.029	0.030	0.031	0.032	0.029	0.028	0.029	0.030	0.029	0.030	0.0297	101	1.05E-03
2	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.010	0.011	0.0110	273	3.96E-04
3	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.0079	381	1.82E-04
4	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.0079	380	1.85E-04
5	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.0088	340	1.92E-04
6	0.010	0.011	0.011	0.010	0.011	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.0106	284	4.48E-04
7	0.015	0.017	0.014	0.013	0.016	0.014	0.014	0.014	0.013	0.016	0.0146	206	1.34E-03
8	0.024	0.025	0.028	0.030	0.021	0.029	0.025	0.026	0.032	0.030	0.0268	112	3.43E-03

表 4-2：發射速度與電容量之關係實驗二數據（充電電壓 60 V）

電容量 (mF)	test1	test2	test3	test4	test5	test6	test7	test8	test9	test10	平均(s)	速度 (cm/s)	SD
1	0.012	0.013	0.013	0.012	0.012	0.014	0.012	0.013	0.013	0.012	0.0127	237	7.12E-04
2	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.0072	418	1.42E-04
3	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.006	0.007	0.007	0.007	0.006	0.0066	455	1.25E-04
4	0.008	0.008	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.0086	349	3.00E-04
5	0.014	0.014	0.015	0.015	0.015	0.013	0.014	0.014	0.013	0.013	0.0140	214	8.33E-04
6	無通過光電閘										-	0	-
7	-0.019	-0.019	-0.019	-0.020	-0.019	-0.017	-0.019	-0.019	-0.021	-0.019	-0.0188	-159	9.62E-04
8	-0.014	-0.013	-0.013	-0.013	-0.013	-0.013	-0.014	-0.014	-0.013	-0.013	-0.0132	-227	3.07E-04
9	-0.016	-0.015	-0.016	-0.015	-0.015	-0.016	-0.015	-0.016	-0.016	-0.016	-0.0156	-192	5.77E-04
10	-0.026	-0.026	-0.025	-0.023	-0.027	-0.024	-0.025	-0.024	-0.026	-0.028	-0.0253	-118	1.59E-03
11	無通過光電閘										-	0	-
12	0.024	0.023	0.023	0.025	0.027	0.027	0.027	0.027	0.025	0.025	0.0254	118	1.57E-03

表 5-1：不同充電電壓之放電時間常數量測數據

電壓(V)	最高電壓 V 時刻	最高電壓 $V \times e^{-1}$ 時刻	時間(ms)
20	26.2	28.4	2.2
40	25.2	27.2	2
60	-9.7	-7.7	2

表 5-2：不同電容量之放電時間常數量測數據

電容(mF)	最高電壓 V 時刻	最高電壓 $V \times e^{-1}$ 時刻	時間(ms)
1	-15.1	-13.8	1.3
2	18.7	20.7	2.0
3	18.5	21.7	3.2
4	-1.3	2.4	3.7
5	-16.9	-12.2	4.7
6	-5.8	-0.3	5.5
7	-0.1	6.6	6.7
8	-15.8	-8.3	7.5

9	-10.9	-2.6	8.3
10	-14.3	-4.7	9.6
11	-17.9	-6.9	11
12	-19.6	-8.2	11.4

表 6-1：子彈質心到線圈中心所需之時間與電容量之關係實驗一數據（充電電壓 40 V）

電容(mF)	test1	test2	test3	test4	test5	test6	test7	test8	test9	test10	平均 (s)	平均 (ms)	SD
1	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.0093	9.3	0
2	0.005	0.005	0.005	0.005	0.004	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.0045	4.5	0
3	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.0036	3.6	0
4	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.0033	3.3	0

表 6-2：子彈質心到線圈中心所需之時間與電容量之關係實驗二數據（充電電壓 60 V）

電容(mF)	test1	test2	test3	test4	test5	test6	test7	test8	test9	test10	平均 (s)	平均 (ms)	SD
1	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.0043	4.3	0
2	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.0023	2.3	0
3	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.0022	2.2	0
4	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.0023	2.3	0

表 7-1：發射距離與子彈質心位置之關係實驗（測量方法①）

質心距離線圈口距離 (cm)	test1	test2	Test3	Test4	Test5	平均 (cm)	SD	質心距離線圈口距離 (cm)	test1	test2	Test3	Test4	Test5	平均 (cm)	SD
	外 2.5	0	0	0	0	0	0		0	外 0.6	146	145	127.3	136.5	142.6
外 2.4	0	0	0	0	0	0	0	外 0.5	141	146.3	139.6	140.1	145	142.4	3.04
外 2.3	0	0	0	0	0	0	0	外 0.4	155.8	160.7	147.9	148.3	149.6	152.5	5.60
外 2.2	0	0	0	0	0	0	0	外 0.3	156	159.5	162.3	152.5	155	157.1	3.86
外 2.1	0	0	0	0	0	0	0	外 0.2	151.9	153.3	149.9	158.4	148	152.3	3.96
外 2.0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.05	外 0.1	142.7	134.3	133.2	153.7	147.7	142.3	8.75
外 1.9	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.00	0	133	124.4	123.6	123.8	118.6	124.7	5.20
外 1.8	0.4	0.3	0.2	0.3	0.1	0.3	0.11	內 0.1	105.6	102.8	108.9	111.5	112	108.2	3.93
外 1.7	0.4	0.5	0.5	0.6	0.4	0.5	0.08	內 0.2	100	95.5	94.3	91.6	99.1	96.1	3.47
外 1.6	1.9	3.6	2.6	3.1	2.4	2.7	0.65	內 0.3	86.9	73.2	79.2	85.1	82	81.3	5.39
外 1.5	3.1	2.6	4.5	2.7	1.7	2.9	1.02	內 0.4	80.3	70.7	67	72	71.6	72.3	4.88
外 1.4	4.1	4.8	2.7	3.8	3.6	3.8	0.76	內 0.5	59	64.2	59.5	54	69.2	61.2	5.76
外 1.3	13.7	9.6	10	12.6	8.8	10.9	2.10	內 0.6	56.8	64.7	53.4	57.1	58.5	58.1	4.14
外 1.2	24.4	22	23	16.9	25.6	22.4	3.35	內 0.7	54.5	45	44.2	57.9	36.8	47.7	8.49
外 1.1	24.9	23.2	21.7	22.8	38.4	26.2	6.92	內 0.8	29.3	33.5	29.2	25	33.2	30	3.49
外 1.0	54.3	35.4	54.5	52	46.4	48.5	8.03	內 0.9	8.8	13.5	8.1	6.8	12	9.8	2.80
外 0.9	73.1	91.3	78.3	75.3	65.6	76.7	9.41	內 1.0	0	0	0	0	0	0	0.00
外 0.8	77.9	80.3	90	86.9	98.1	86.6	8.05	備註：質心距離線圈口 0 表示恰好切齊線圈口；質心距離線圈口內 1.0 表示恰好在線圈中心							
外 0.7	125.3	104.4	121.3	107.2	112.3	114.1	8.98								

表 7-2：發射速度與子彈質心位置之關係實驗（測量方法②）

質心距離線圈口距離(cm)	test1	test2	test3	test4	test5	test6	test7	test8	test9	test10	平均 (s)	速度 (cm/s)	SD
外 1.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
外 1.4	0.041	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.041	0.0417	72	2.6E-04
外 1.2	0.022	0.021	0.021	0.022	0.022	0.021	0.022	0.021	0.021	0.022	0.0215	140	2.0E-04
外 1	0.019	0.018	0.019	0.019	0.018	0.019	0.018	0.019	0.019	0.018	0.0185	162	2.5E-04
外 0.8	0.013	0.014	0.013	0.013	0.013	0.014	0.013	0.013	0.013	0.013	0.0133	225	1.7E-04
外 0.6	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.0113	265	7.9E-05
外 0.4	0.009	0.010	0.010	0.010	0.010	0.009	0.010	0.009	0.010	0.010	0.0095	315	1.6E-04
外 0.2	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.0087	346	1.4E-04
切齊線圈口	0.009	0.009	0.009	0.008	0.008	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.0086	348	1.8E-04
內 0.2	0.010	0.010	0.010	0.010	0.009	0.009	0.010	0.009	0.010	0.009	0.0095	314	2.2E-04
內 0.4	0.010	0.011	0.010	0.011	0.010	0.011	0.010	0.010	0.011	0.011	0.0105	287	8.2E-05
內 0.6	0.012	0.012	0.013	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.0123	244	2.3E-04
內 0.8	0.018	0.019	0.018	0.018	0.018	0.019	0.018	0.018	0.019	0.019	0.0184	163	2.2E-04
內 1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 8-1：發射速度與質心位置之關係實驗（固定電容 3 mF）

質心距離線圈口距離 (cm)	test1	test2	test3	test4	test5	test6	test7	test8	test9	test10	平均 (s)	速度 (cm/s)	SD
切齊線圈口	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.0077	390	8.8E-05
外 0.2	0.007	0.006	0.006	0.006	0.007	0.007	0.006	0.006	0.006	0.006	0.0064	468	1.2E-04
外 0.4	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.0059	511	1.5E-04
外 0.6	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.0054	561	5.3E-05
外 0.8	0.005	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.0053	567	1.1E-04
外 1.0	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.0070	429	8.2E-05
外 1.2	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.0103	292	1.6E-04

表 8-2：發射速度與質心位置之關係實驗（固定電容 4 mF）

質心距離線圈口距離 (cm)	test1	test2	test3	test4	test5	test6	test7	test8	test9	test10	平均 (s)	速度 (cm/s)	SD
切齊線圈口	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.0088	340	8.2E-05
外 0.2	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.0073	412	5.7E-05
外 0.4	0.007	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.007	0.007	0.007	0.0064	472	2.1E-04
外 0.6	0.006	0.006	0.005	0.005	0.006	0.005	0.005	0.005	0.006	0.005	0.0054	551	8.4E-05
外 0.8	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.0052	577	4.7E-05
外 1.0	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.004	0.005	0.005	0.0050	601	3.0E-04
外 1.2	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.0071	425	1.6E-04

【評語】 080102

磁母手中線是要探討電容放電時間長短對電磁炮發射的影響，同學能自製器材控制與調整變因，討論充電電壓與螺線圈匝數、線徑、長度及電容放電時間常數對發射的影響，關注在電容放電對電磁砲效能影響。

僅關注「電容放電時間常數」與炮彈的運動，論述上比較薄弱。實驗討論是就單個電容獨立以示波器測其「電容放電時間常數」， $\tau = RC$ ，也就是”其他科展”所謂的電容的影響，比較沒有看到新的創見。整個電磁砲電路的重點在線圈與磁鐵，線圈的電感 L 與電阻 R 連同電容 C 形成一個 RLC 電路，其”放電常數”與獨立的電容截然不同，另外圓柱形的鐵炮彈在通過螺線管，還有電磁感應現象，也是影響整個炮彈運動的重要關鍵，宜針對這些變量做比較深入的探討。

摘要

透過文獻整理，發現大部分的研究結果顯示出電壓、電容、螺線圈的粗細、匝數以及子彈質心位置等變因會影響發射威力。在電容的研究中，有提到當電容量增大時，發射速度會上升；但是電容量再更大，速度則會下降。我們覺得這個現象很奇怪，為什麼不是電容量大速度就無限上升呢？實驗後我們發現，在固定電壓時，電容量在一定範圍內，發射速度有極值。若此時再提高電壓充電，不僅發射速度會下降，繼續增加電容還會有子彈反向射出、折返後再射出的情形發生，亦即發射速度會隨著電容大小而振盪。就我們所知，這是以往的科展研究中從沒被發現過的現象，經過我們設計實驗仔細測量與分析，我們認為這與電容放電的時間常數有關。

研究動機

在網路影片中看到了介紹電磁砲的功能而引發興趣。剛好六年級的課程中也有關於電磁鐵的單元，我們發現研究電磁砲除了很好玩之外，還可以配合自然課的單元認識電磁鐵的更多知識。接著開始收集資料，有許多科展都已做過電磁砲，但對於電容更大時反而速度會下降的物理機制，都只停留在以放電時間做推論，並沒有實驗數據可以佐證，我們很想知道他們的推論是否正確，因此想做電磁砲實驗來確認，也希望能透過這實驗驗證來找出製作電磁砲的最佳條件。

研究目的

- 一、瞭解電磁線圈砲的原理：電容充電與放電特性
- 二、自製電磁線圈砲發射器與測量方法
- 三、充電電壓與螺線圈匝數、線徑、長度對發射的影響
- 四、電容放電時間常數對電磁砲發射的影響
- 五、發射威力與子彈質心位置之關係

研究過程與方法

- 一、瞭解電磁線圈砲的原理：電容充電與放電特性

(一)文獻探討 (二) 電容充電、放電實驗

- 二、自製電磁線圈砲發射器與測量方法

(一)自製電磁線圈砲發射器

(二)設計測量電磁線圈砲威力的工具

➢ 測量方法①：用捲尺作為鐵條滑行軌道測量發射距離

➢ 測量方法②：用光電閘與光電計時器測量鐵條發射速度

- 三、充電電壓與螺線圈匝數、線徑、長度對發射速度的影響

- 四、電容放電時間常數對發射速度的影響

(一)測量不同電容量時，子彈發射的速度：

◆ 實驗一：充電電壓固定40 V

1.對並聯的電容組充電

2.將鐵條質心放置於線圈口

3.將電容接上螺線圈發射並使用測量方法②紀錄10次實驗數據後取平均。

4.改變電容量為：1、2、3、...、7、8 mF，重複步驟1~3並記錄數據。

◆ 實驗二：充電電壓固定60 V

1.重複實驗一的步驟1~3

2.改變電容量為：1、2、3、...、11、12 mF，紀錄10次實驗數據後取平均。

『歷屆科展提到電容量增加會有減速的特性，只推論是放電時間的影響但沒做實驗測量，我們想做實驗證明這樣的推論是否正確。』

(二)電容放電時間常數的測量步驟：

1.設定直流電源供應器輸出電壓

2.對並聯的電容組充電至後停止充電

3.將示波器接到電容正負極

4.將電容接上螺線圈組【A4】後放電

5.利用示波器截圖回傳至電腦進行分析。

◆ 測量不同充電電壓之放電時間常數 τ

將步驟1的充電電壓調整為20、40、60 V

◆ 測量不同電容量之放電時間常數 τ

將步驟4電容量調整為1、2、3、...、11、12 mF

(三)子彈質心到線圈中心所需之時間測量

◆ 自製實驗裝置並測量：

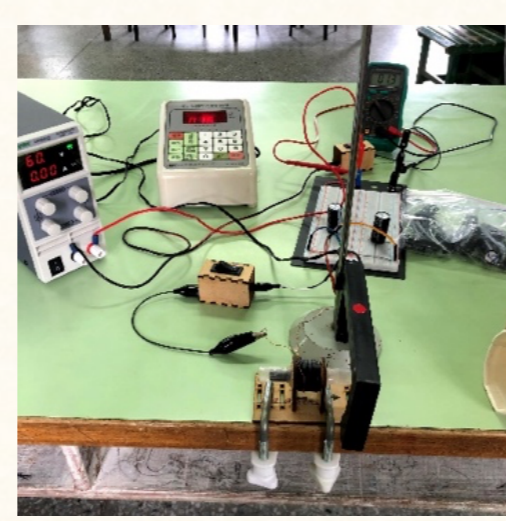


圖2-1

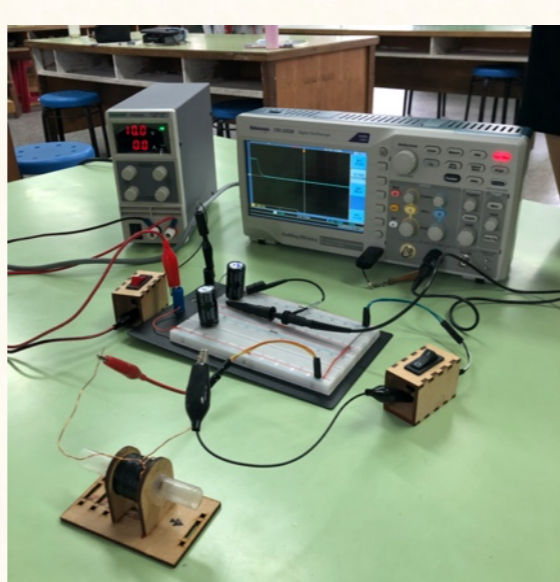


圖2-2

◆ 測量一（固定電壓40V）：

1.將鐵條一端用熱熔膠、吸管、小紙片等材料加工成一個末端帶有一個寬度1 cm小旗幟的特殊子彈我們稱為子彈#2，如圖2-4。

2.將直流電源供應器調整為40 V，接上螺線圈組【A4】對其充電

3.電容量分別為1、2、3、4 mF

4.將子彈#2的鐵條質心放置於線圈口（實際質心會後移，由於鐵條後面所加工的吸管紙片不到1 g，比鐵條輕很多，對質心位置的影響很小，所以我們直接以鐵條的質心位置進行實驗）

5.將光電閘定位在小紙片前端，測量小紙片通過的時間就可以得出鐵條質心至螺線圈中心之時間。如圖2-5。

6.重複做步驟2~5紀錄10次數據取平均

◆ 測量二（固定電壓60V）：

1.將步驟2之充電電壓調整至60 V，重複步驟2~5，記錄實驗數據

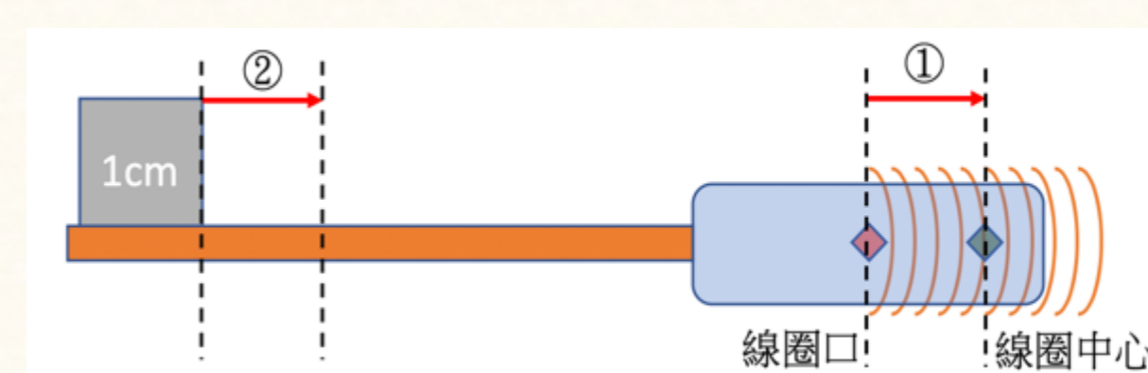


圖2-3：子彈#2的工作原理示意圖

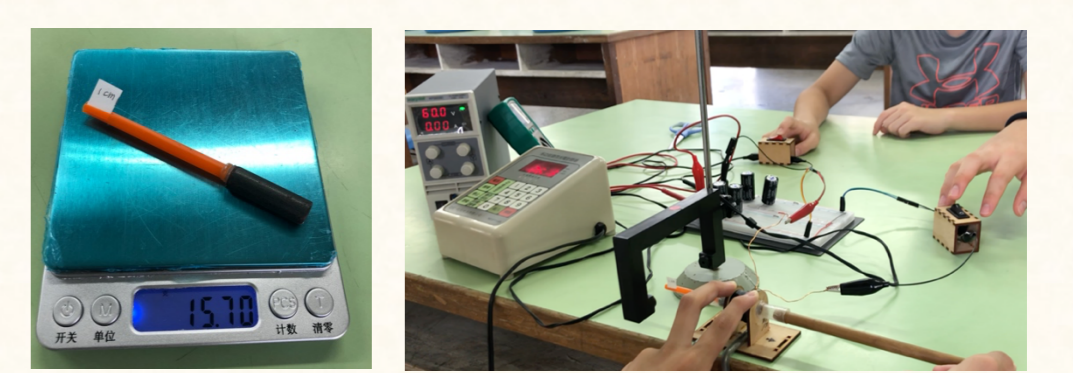


圖2-4

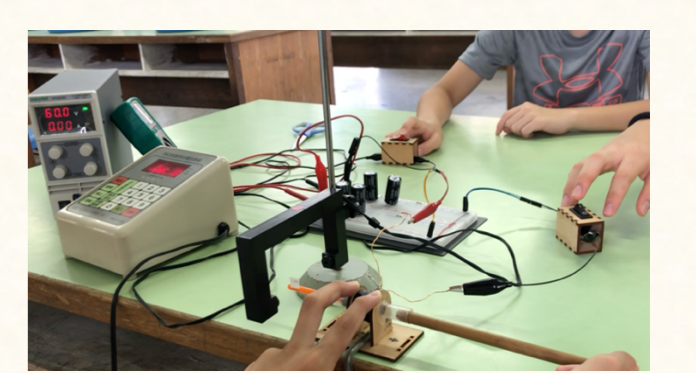


圖2-5：實驗示意圖

- 五、發射威力與子彈質心位置之關係

(一)發射威力與質心位置之關係

◆ 實驗一：測量子彈於不同位置發射時，在軌道滑行的距離

◆ 實驗二：測量子彈於不同位置發射時，發射的速度

(二)電容量與質心位置組合對發射速度之影響

◆ 實驗一：

1.將直流電源供應器輸出電壓設定為60 V

2.對3 mF電容充電至實驗電壓後停止充電

3.改變子彈質心發射時初始位置：切齊線圈口、線圈口外0.2 cm、線圈口外0.4 cm、...、到線圈口外1.2cm

4.將電容接上螺線圈【A4】發射並使用光電閘紀錄發射時間

5.重複步驟1~4取10次數據平均，減少誤差。

◆ 實驗二：

1.將實驗一的步驟2的電容改為4 mF

2.重複實驗步驟1~4取10次數據平均，減少誤差。

研究設備與器材



圖1(a)：儀器設備

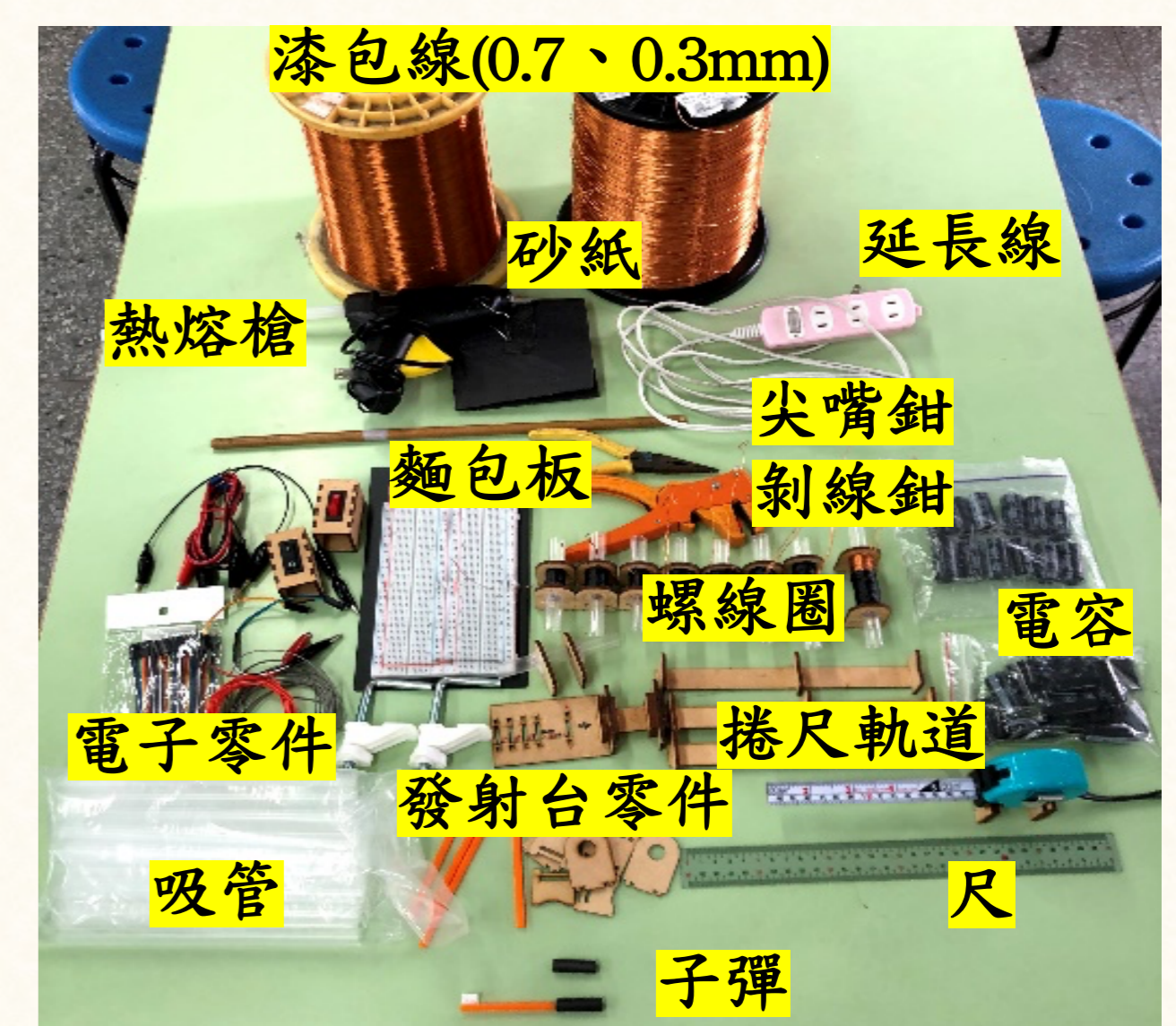


圖1(b)：實驗器材

研究結果與討論

(一) 發射速度與充電電壓之關係實驗

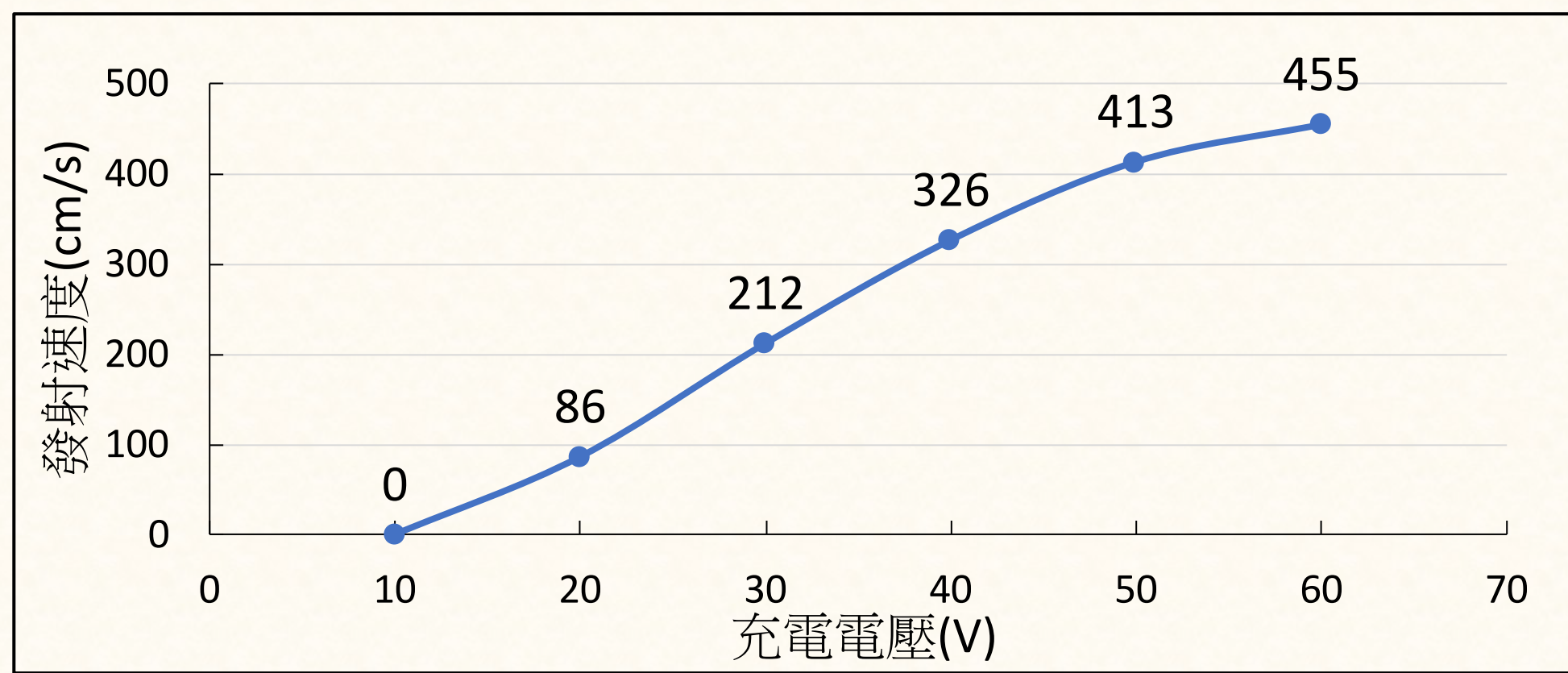


圖3-1：發射速度與充電電壓關係圖

- 左圖3-1數據的結果顯示當固定電容時，**充電電壓越大**，子彈發射速度越快。
- 從下圖3-8：**放電時間常數 τ 與充電電壓關係圖**的實驗結果，我們得知固定電容時，充電電壓增加並不會影響電容放電時間。當電容量固定時，充電電壓越高，電量會越大，所以在同樣的時間內，用高電壓充電的電容會放出更多電量，亦即電流增大、所以磁力會變強。

(二) 發射速度與螺線圈匝數、線徑、長度之關係實驗

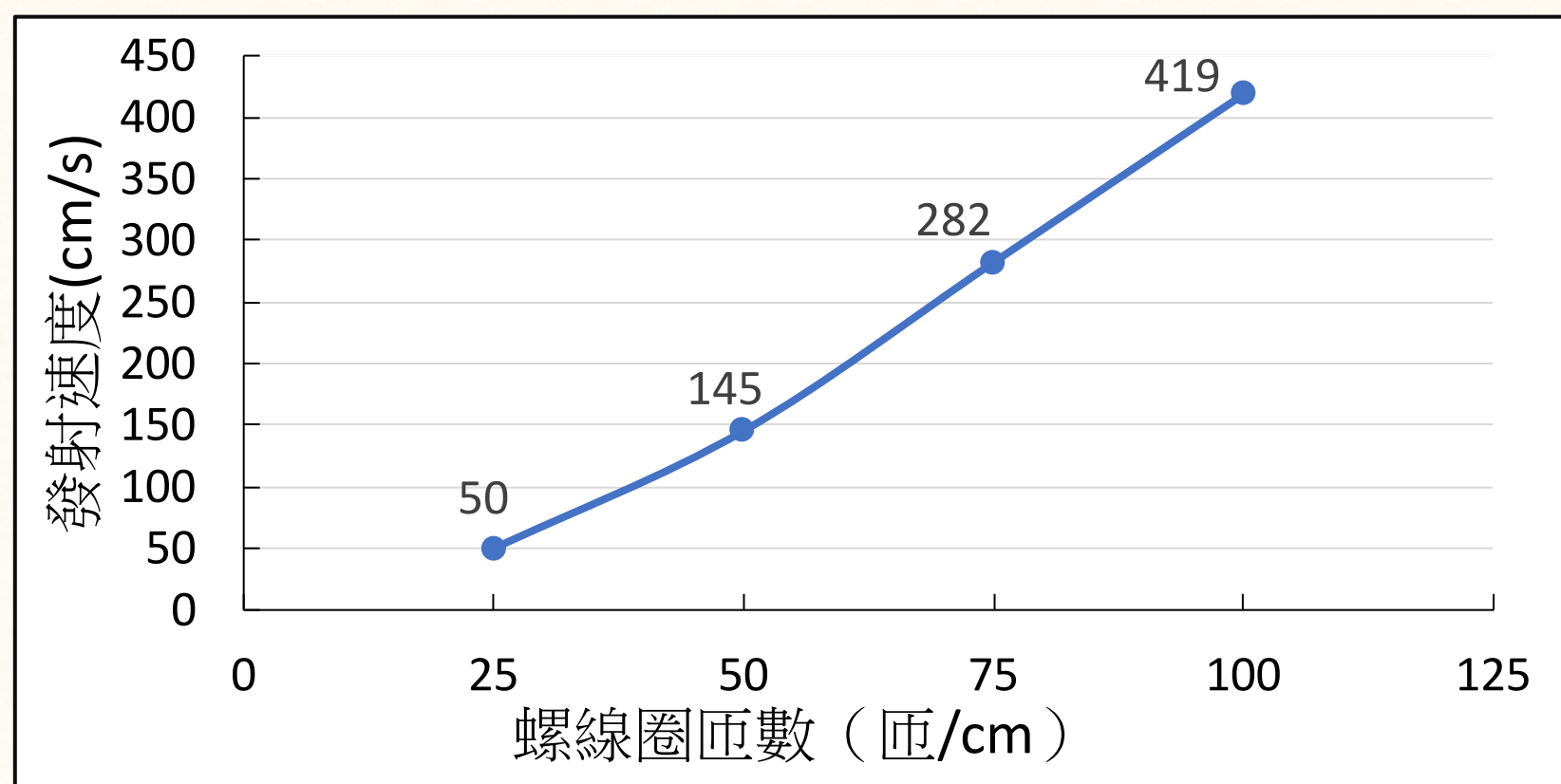


圖3-2：發射速度與螺線圈匝數關係圖

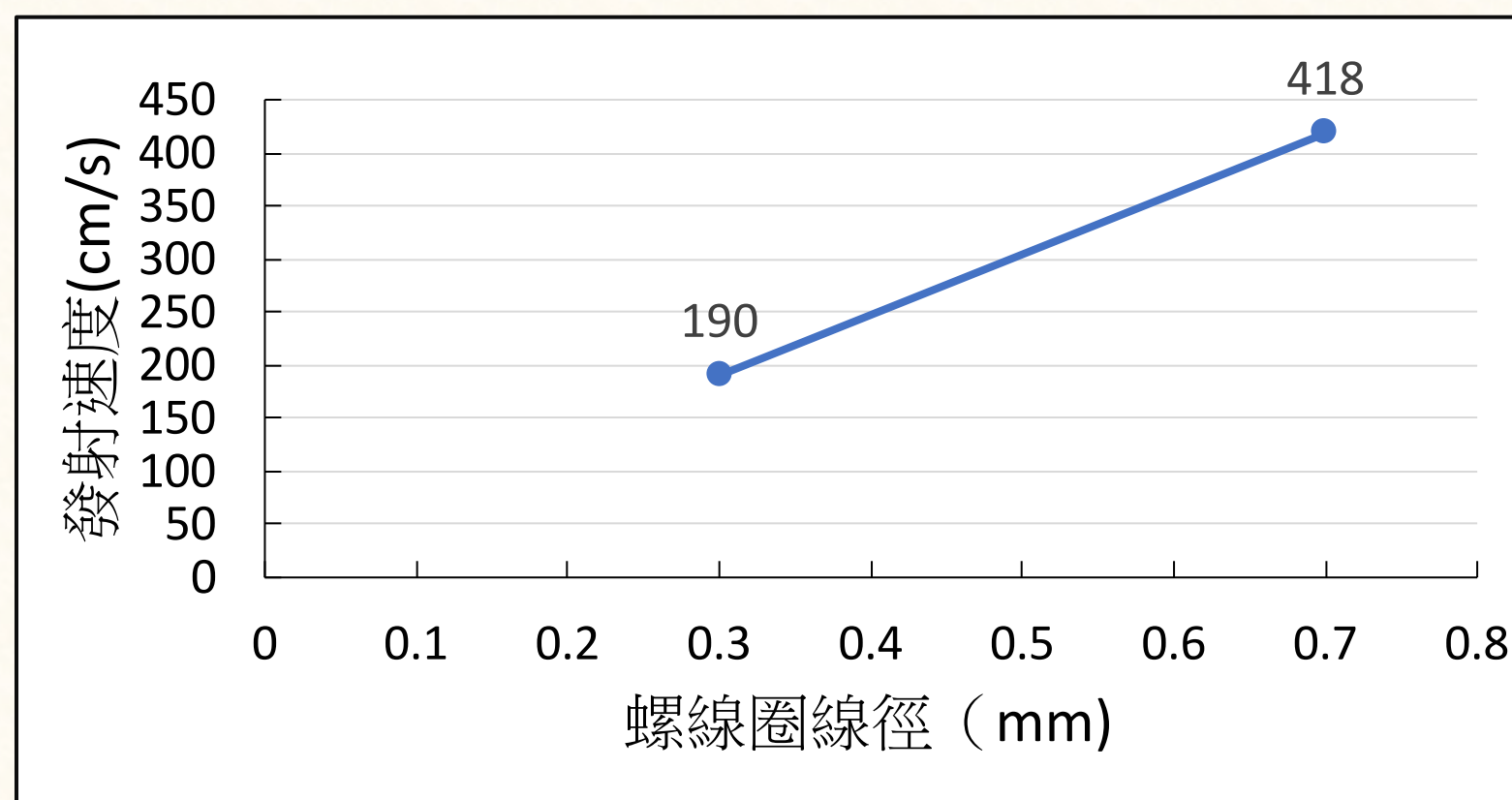


圖3-3：發射速度與螺線圈線徑關係圖

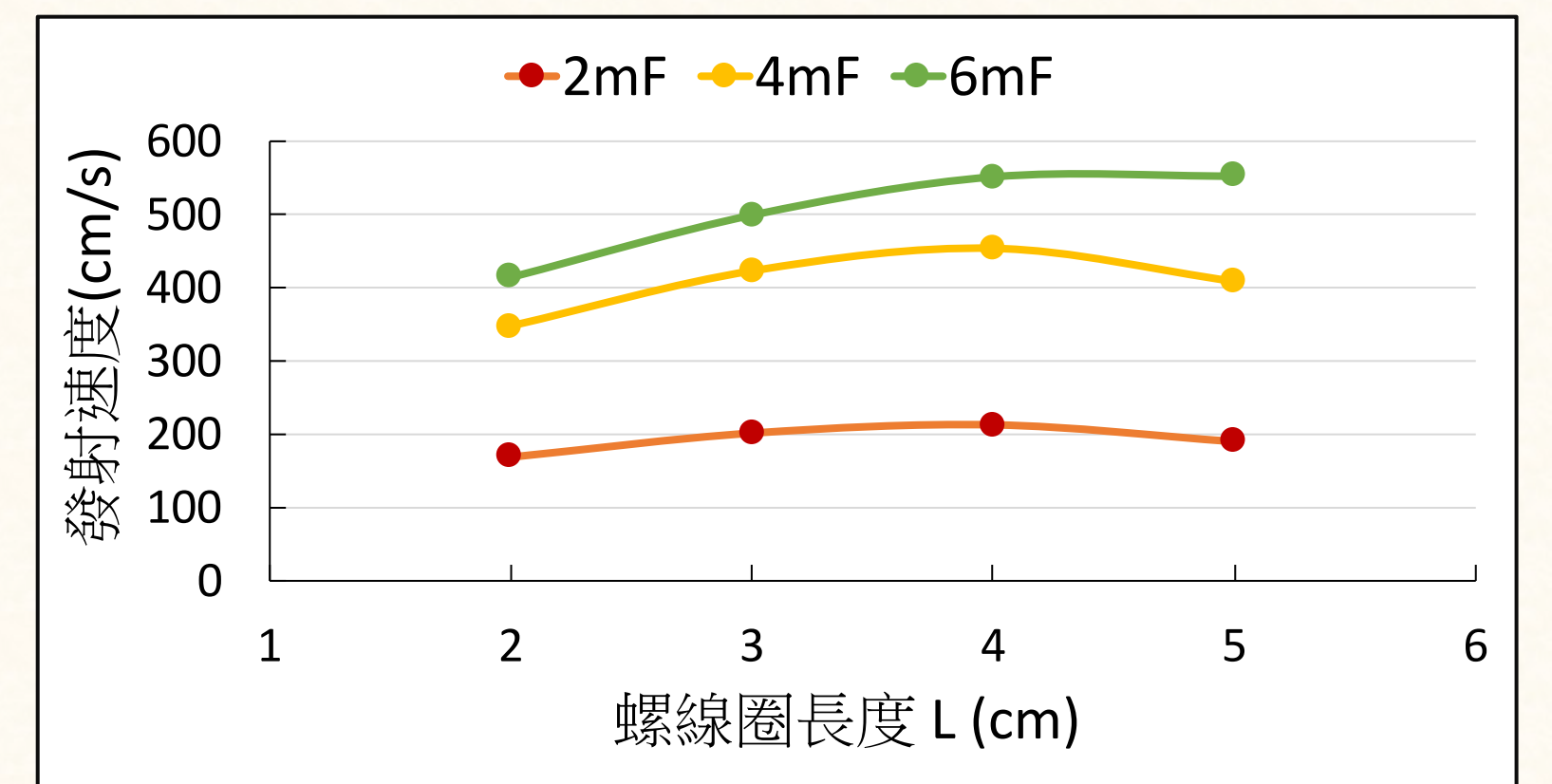


圖3-4：發射速度與螺線圈長度L關係圖

- 從圖3-2和圖3-3的結果顯示**提升匝數、螺線圈線徑**都會提高發射速度，因為螺線圈產生的**磁場 $B = \mu_0 nI$** 正比於匝數與電流，因此提升匝數、螺線圈線徑都能提高發射速度。
- 從圖3-4發現螺線圈長度增加時，2~6 mF的發射速度都是上升到一個最高值之後開始下降，這與**增加線圈長度會提高電阻**有關，另外增加線圈長度會**增加子彈的加速區**，在這兩因素同時作用下，造成發射速度先上升而後下降。

(三) 發射速度與電容量之關係實驗

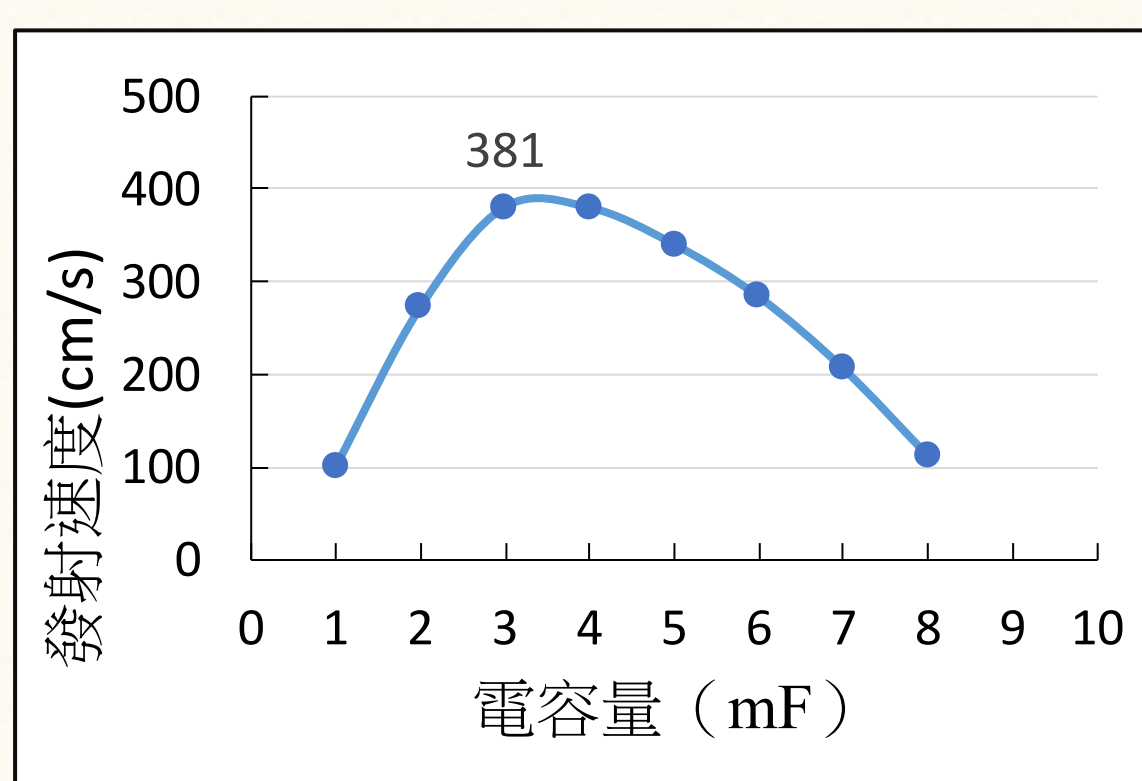


圖3-5：發射速度與電容量之關係圖（充電電壓固定40V）

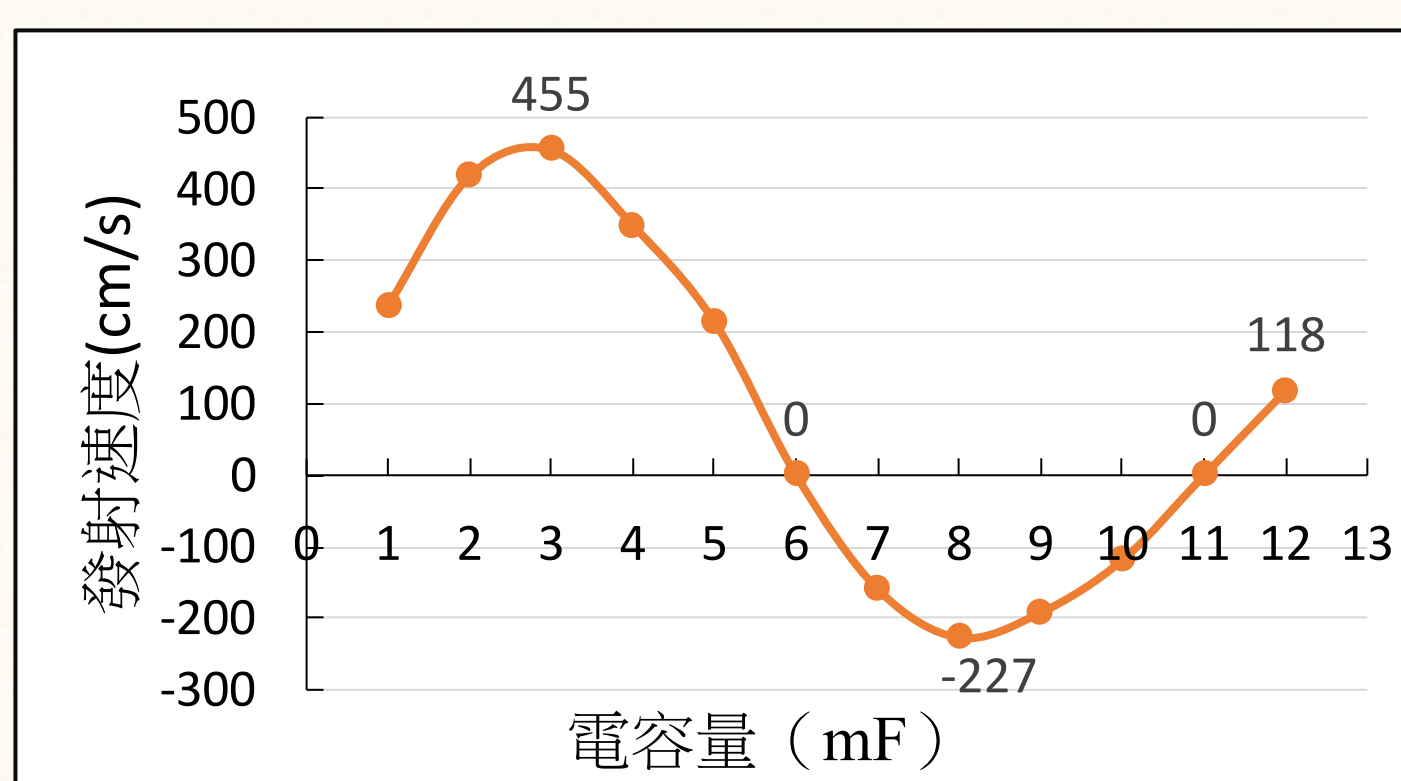


圖3-6：發射速度與電容量之關係圖（充電電壓固定60V）

- 固定充電電壓40V在電容量增加時速度變化會先上升再下降(圖3-5)，這與子彈的質心通過線圈中心所需的時間有關。電容儲存的電量 $q=CV$ ，正比於電容值。

- 固定充電電壓60V的實驗中(圖3-6)，速度會隨著電容大小而震盪，就我們所知，這是**以往的科展研究中從未被發現的**。
- 我們將所量測到的震盪粗略分為5個區來討論，如圖3-7。

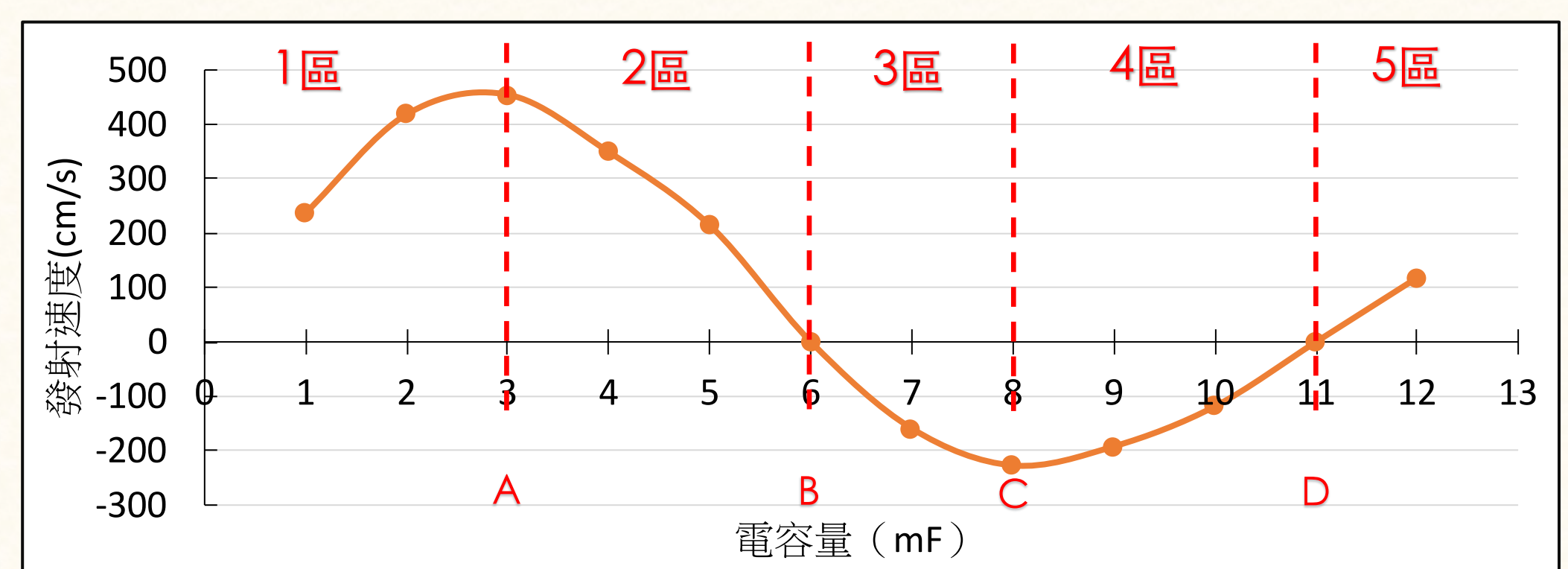


圖3-7：發射速度與電容量之分析(充電電壓60V)

- 我們設計實驗測量固定電壓60V時不同電容量的**放電時間常數**、也測量在虛線A前後(1~4 mF)子彈質心發射到螺線圈中心的時間。

(四) 電容放電時間常數 τ 之量測

1.不同充電電壓之放電時間常數 τ 之量測：

表1：不同充電電壓之放電時間常數量測數據

電壓 (V)	最高電壓V時刻	最高電壓 V_{xe}^{-1} 時刻	時間 (ms)
20	26.2	28.4	2.2
40	25.2	27.2	2
60	-9.7	-7.7	2

- 充電電壓並不會影響放電時間常數 τ

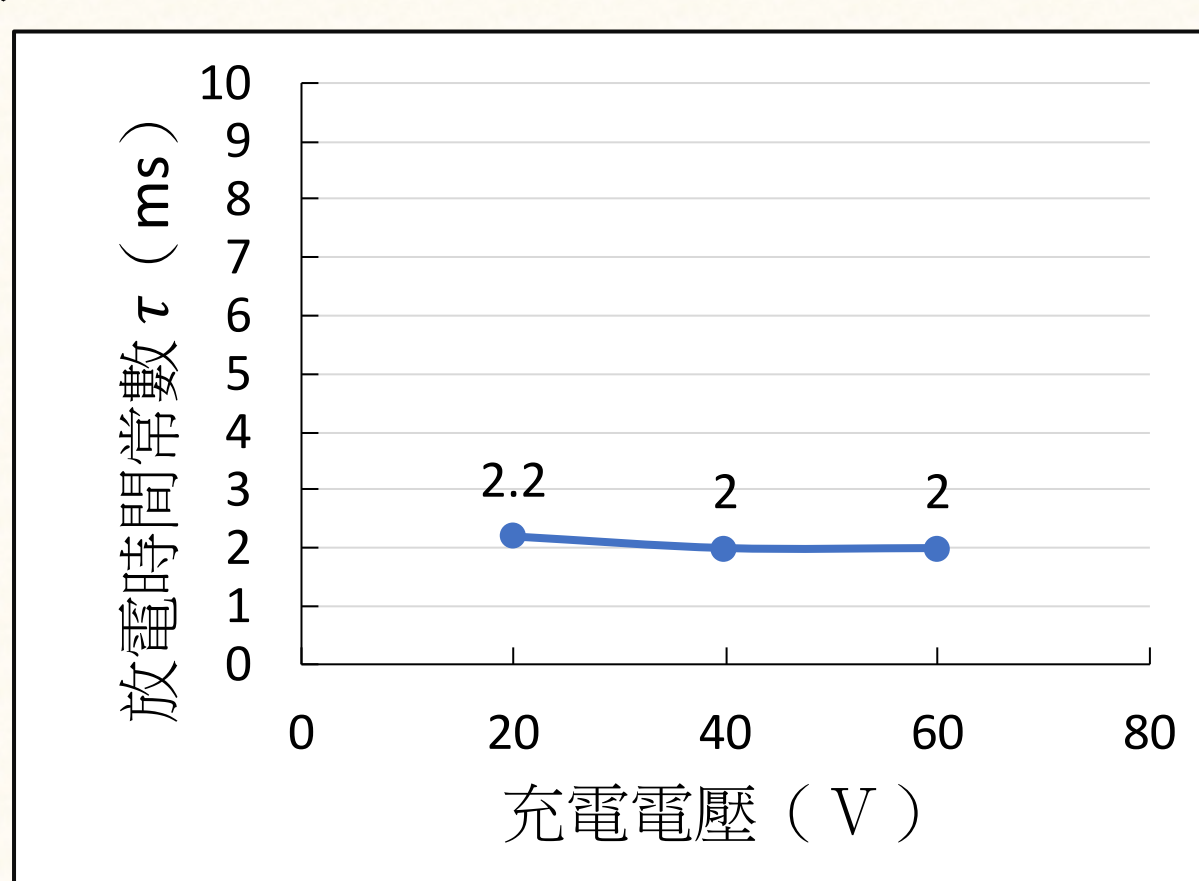


圖3-8：放電時間常數 τ 與充電電壓關係圖

2.不同電容量之放電時間常數 τ 之量測：

表2：不同電容量之放電時間常數量測數據

電容 (mF)	最高電壓V時刻	最高電壓 V_{xe}^{-1} 時刻	時間 (ms)
1	-15.1	-13.8	1.3
2	18.7	20.7	2.0
3	18.5	21.7	3.2
4	-1.3	2.4	3.7
5	-16.9	-12.2	4.7
6	-5.8	-0.3	5.5
7	-0.1	6.6	6.7
8	-15.8	-8.3	7.5
9	-10.9	-2.6	8.3
10	-14.3	-4.7	9.6
11	-17.9	-6.9	11
12	-19.6	-8.2	11.4

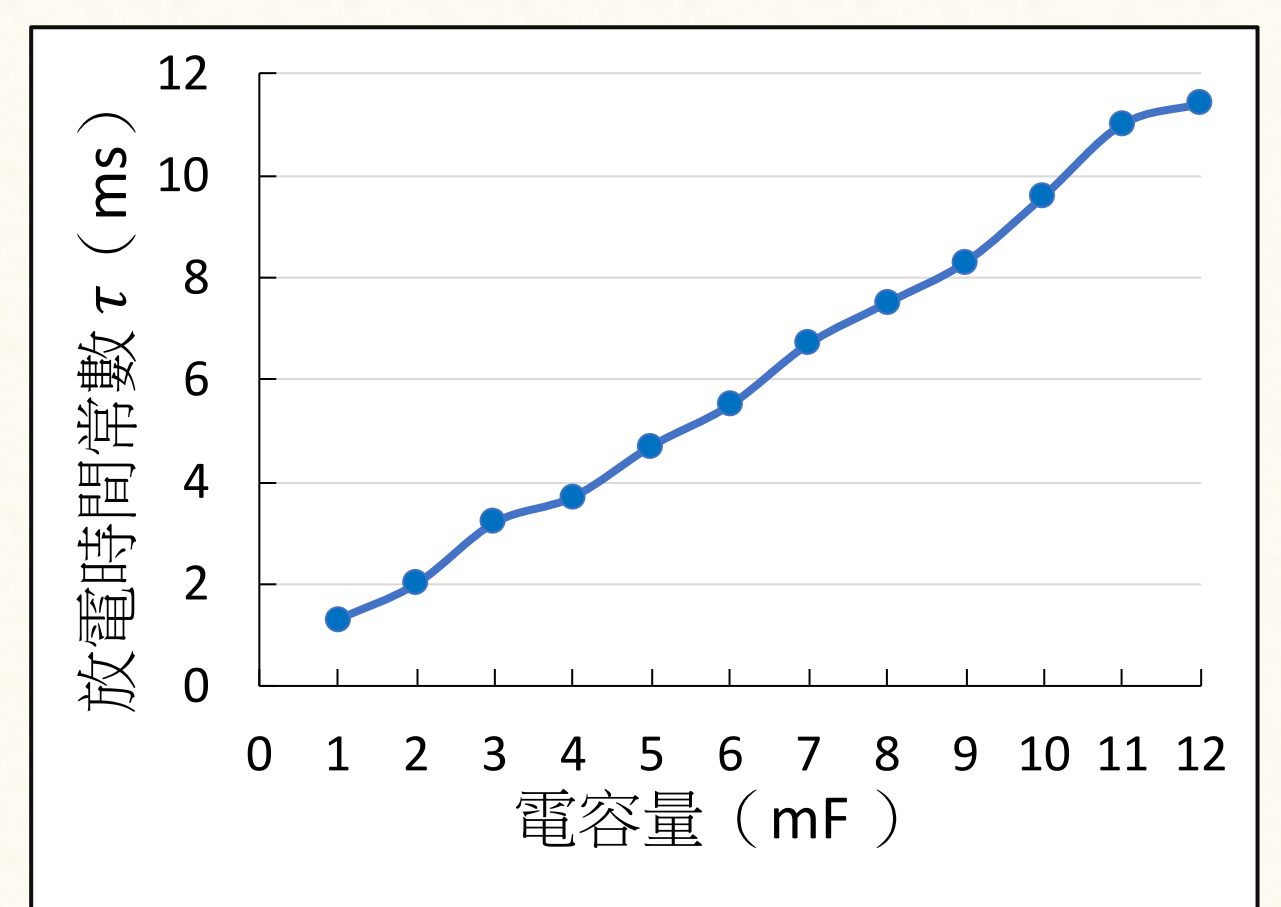


圖3-9：放電時間常數 τ 電容量關係圖

- 電容量大則放電時間常數 τ 大

(五) 子彈質心到線圈中心所需之時間與電容量之關係實驗

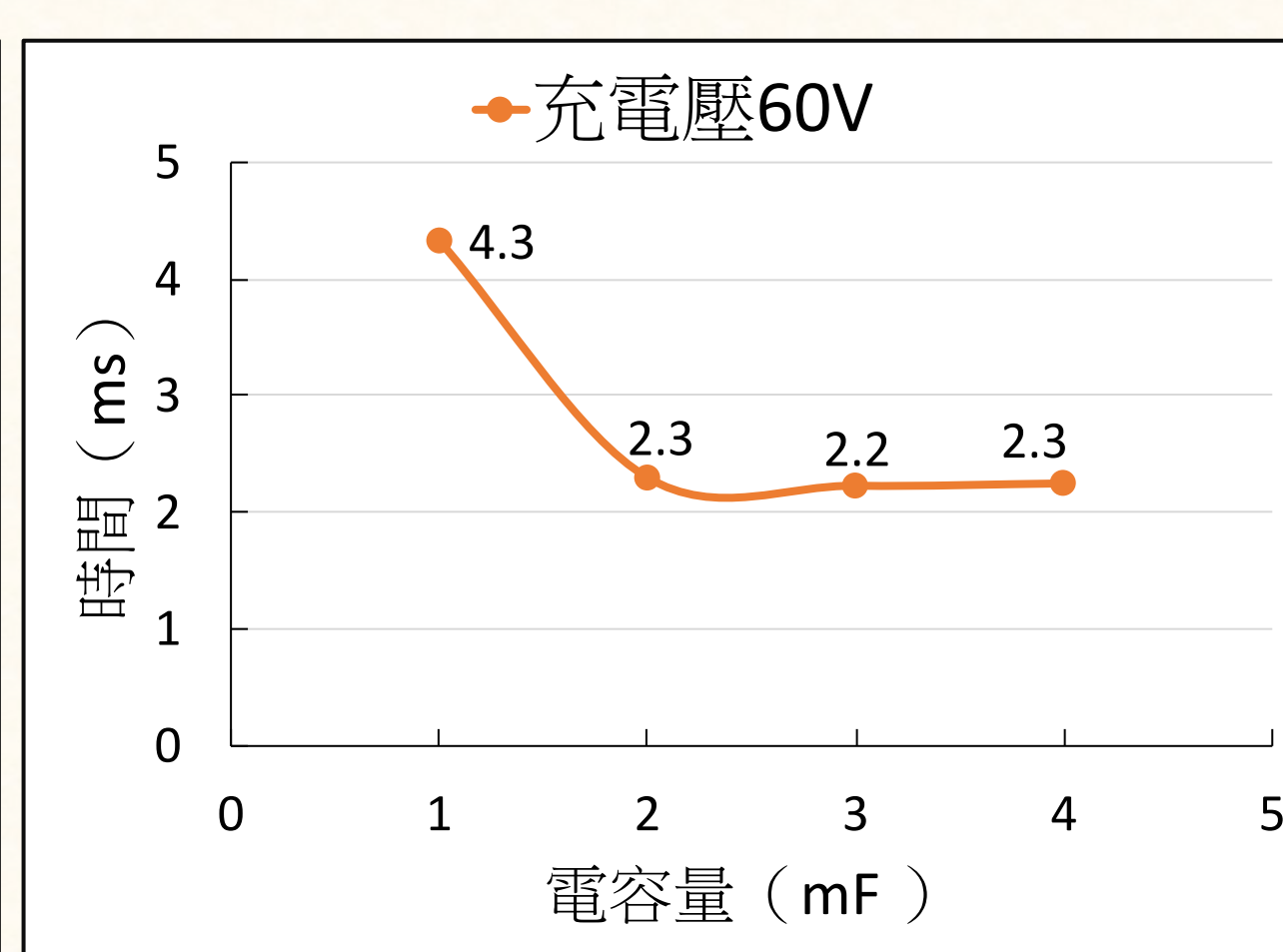
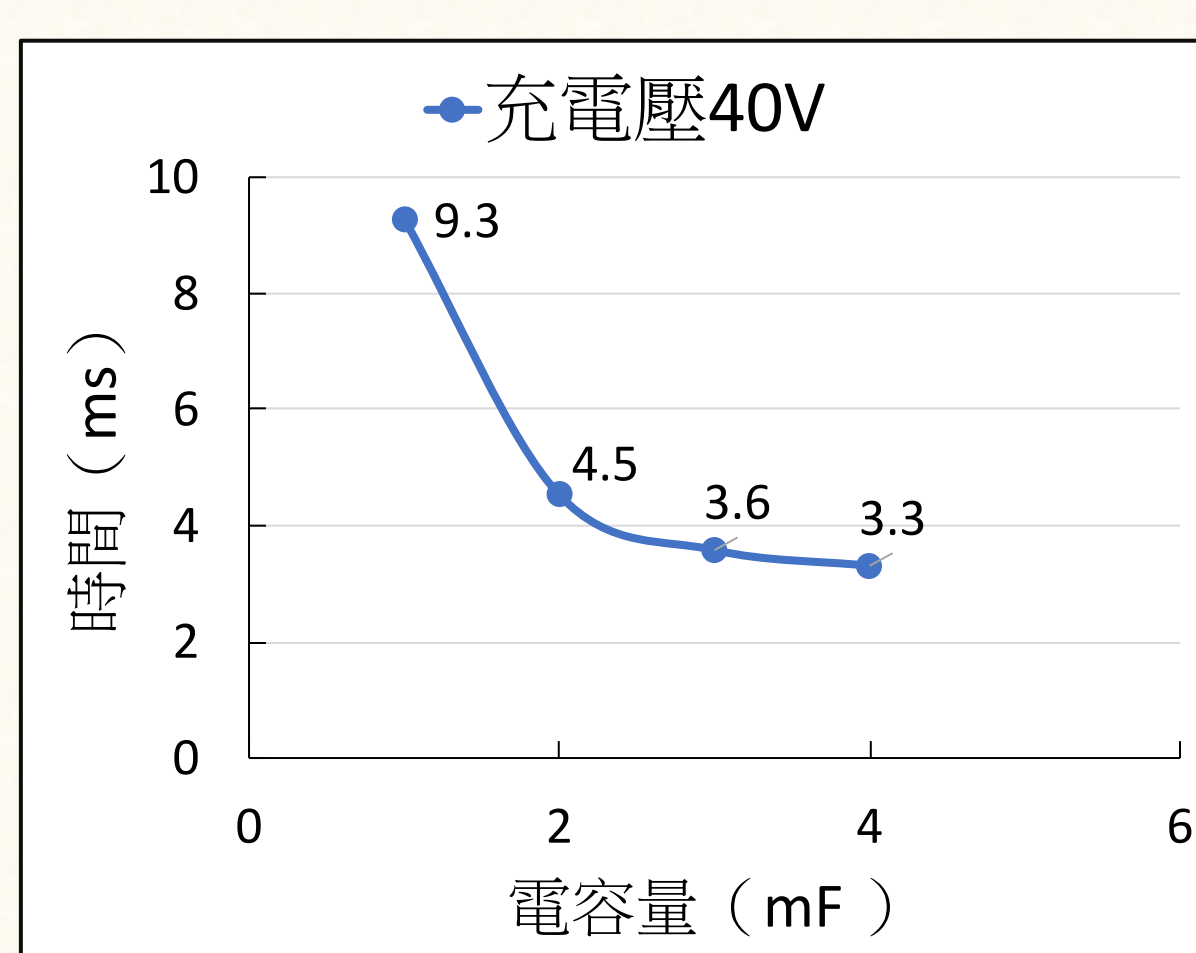


圖3-10：子彈質心到線圈中心所需之時間。充電電壓分別為(左)40V與(右)60V

- 充電電壓越大，子彈質心到線圈中心所需時間越短，表示子彈越快通過線圈的加速區。

- 固定充電電壓時，電容量增加時子彈加速的情形會漸漸趨緩。
- 將圖3-9和圖3-10(右)整理成下圖3-11，進行分析。

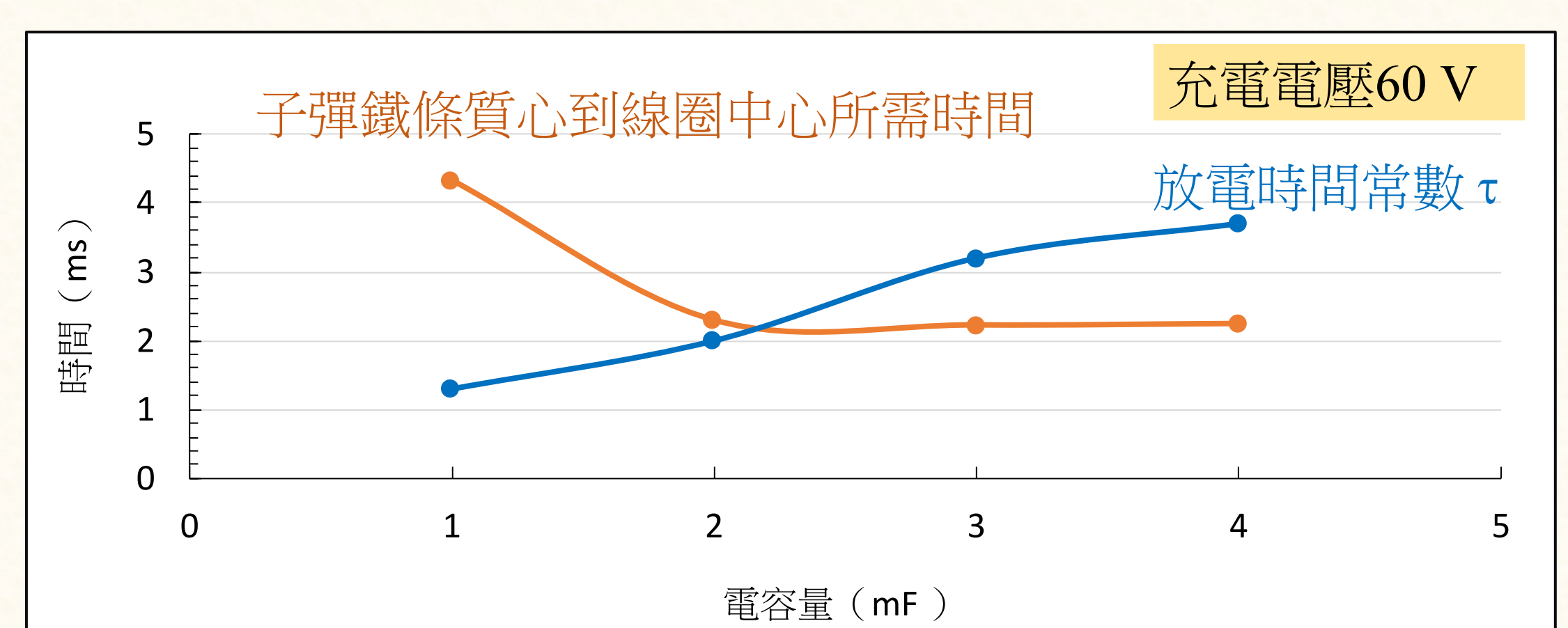


圖3-11：「放電時間常數 τ 」與「子彈鐵條質心到線圈中心所需時間」比較圖

- 當電容量約在2~3 mF時，子彈質心發射到中心的時間開始小於時間常數 τ ，子彈會開始受到**減速區**之阻力作用。

◆ 我們推論圖3-7中的分界線 A ~ D 分別表示**電容放電完畢時，子彈質心位置**恰好在某些**特定點**附近，我們將這些特定點相對於螺線圈的位置繪製成圖3-12。

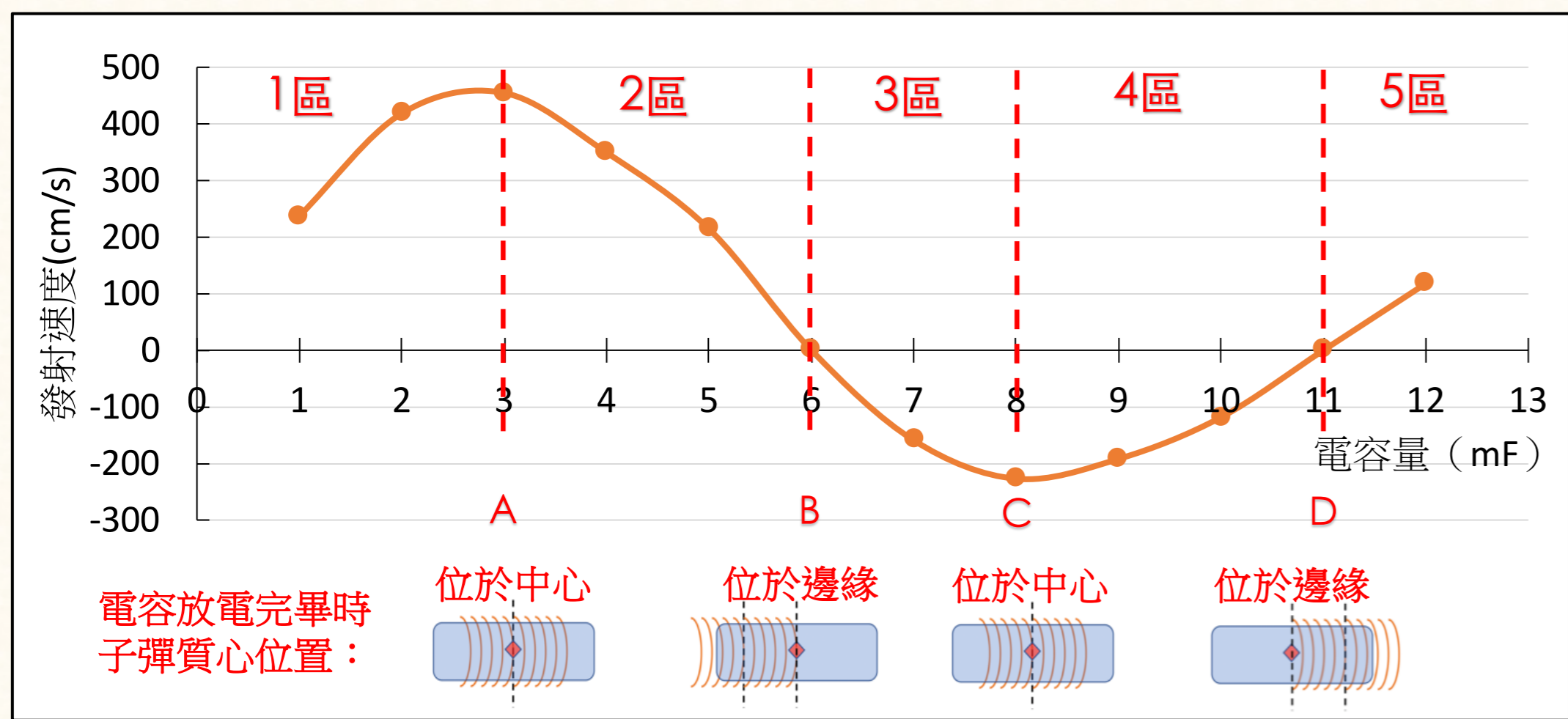


圖3-12：子彈質心位置分界線說明圖

- 界線A：電容放電完畢時，子彈的質心恰好位於於螺線圈的中心附近。
- 界線B：當子彈質心進入正向減速區減速至零時，質心恰好位於螺線圈的邊緣附近，電容放電完畢。
- 界線C：有最大的負向速度，這表示電容放電完畢時，子彈的質心恰好位於螺線圈的中心附近。
- 界線D：當子彈質心進入負向減速區減速至零時，質心恰好位於螺線圈的邊緣附近，電容放電完畢。

◆ 將圖3-6與圖3-9交叉分析，繪製如圖3-13所示。

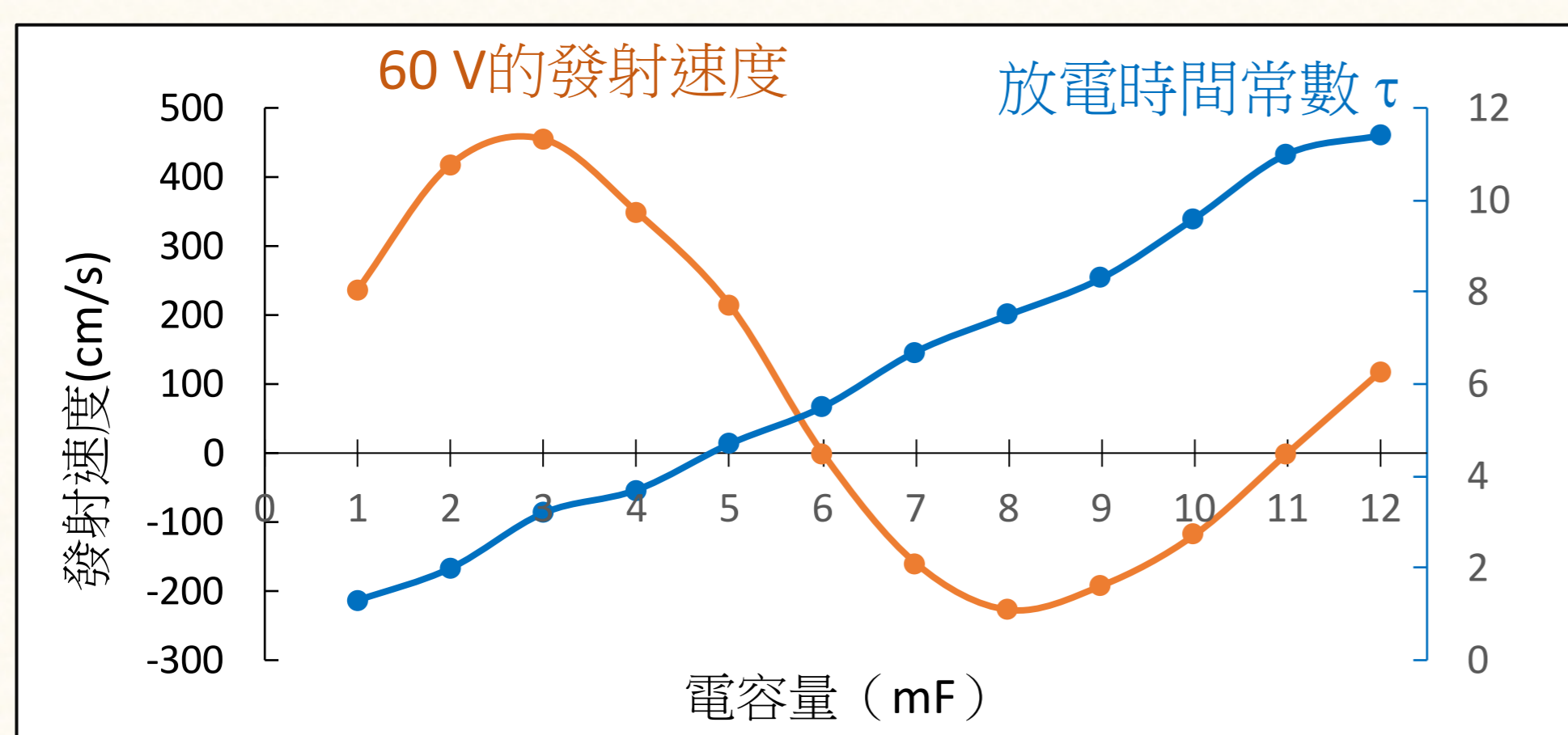


圖3-13：電容量與發射速度關係、放電時間常數τ分析圖

- 固定電壓時，增加電容量，電容的放電時間常數會越大，導致螺線圈產生磁力的時間變久，造成子彈在線圈內產生震盪的情形。
- 若是電容量持續增加，子彈震盪的次數會增加。
- 想要得到最佳的發射效果，需要考慮到**放電時間常數剛好等於子彈質心發射至線圈中心的時間**，這樣就可以避免子彈進入減速區時還有磁力作用造成減速。

(六) 發射威力與質心位置之關係實驗

➢ 測量方法①

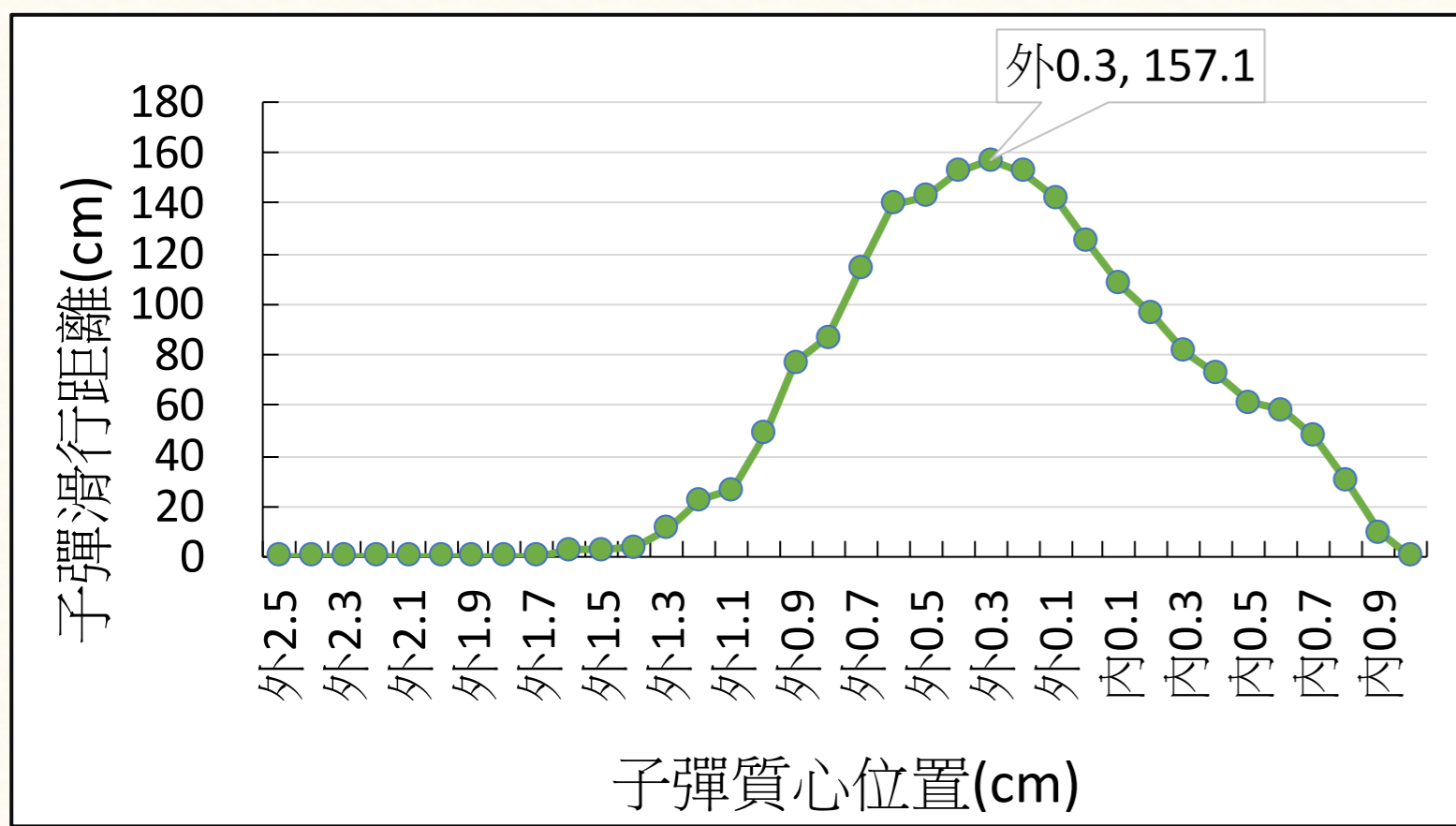


圖3-14：發射距離與子彈質心位置關係圖

➢ 測量方法②

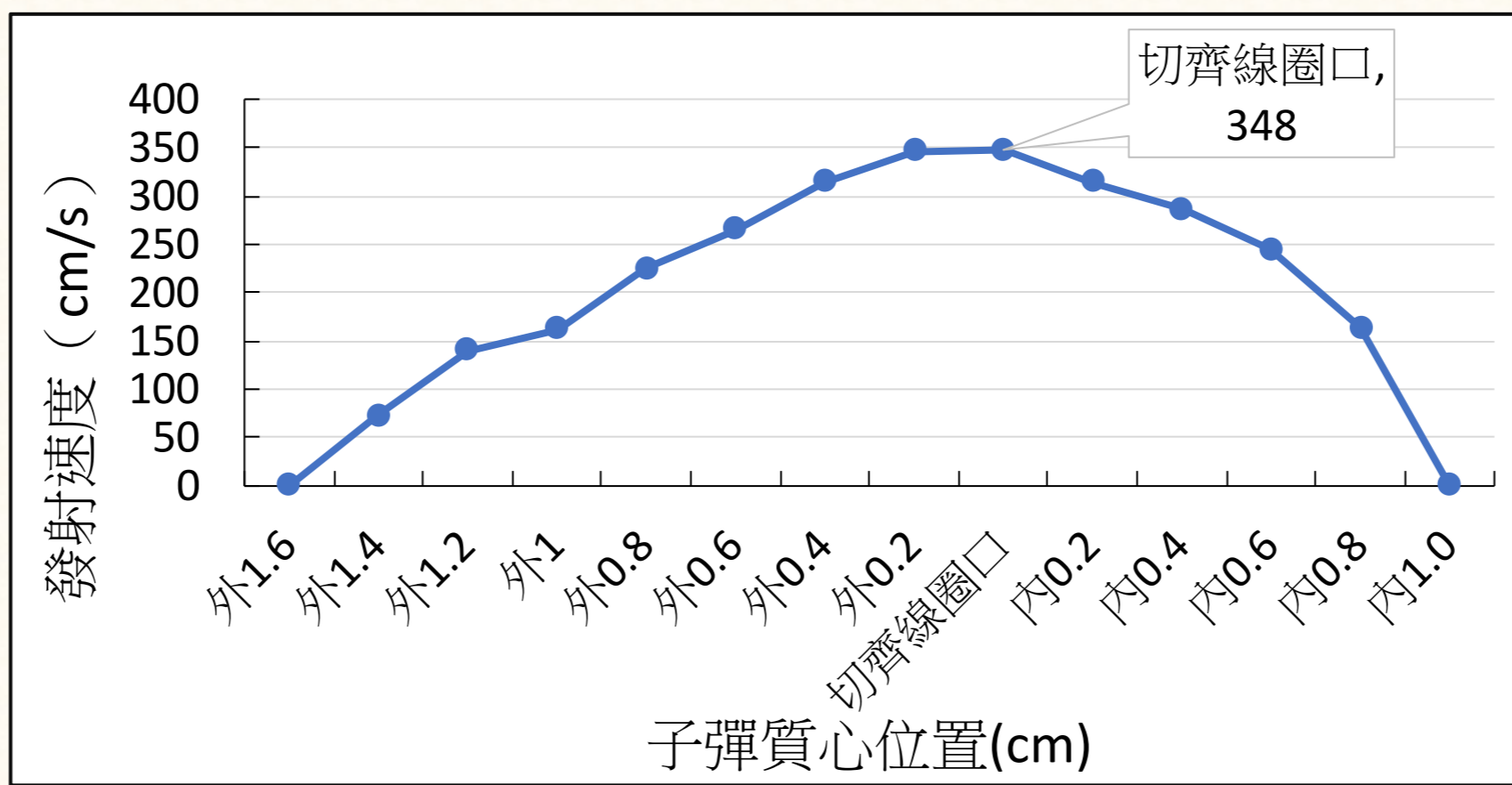


圖3-15：發射速度與子彈質心位置關係圖

➢ 從圖3-14、圖3-15中，兩種測量方式，都顯示出當子彈質心在線圈口外到切齊線圈口這之間有最大的威力，越遠離線圈口附近的地方，威力就下降。

➢ 螺線圈內之磁力作用

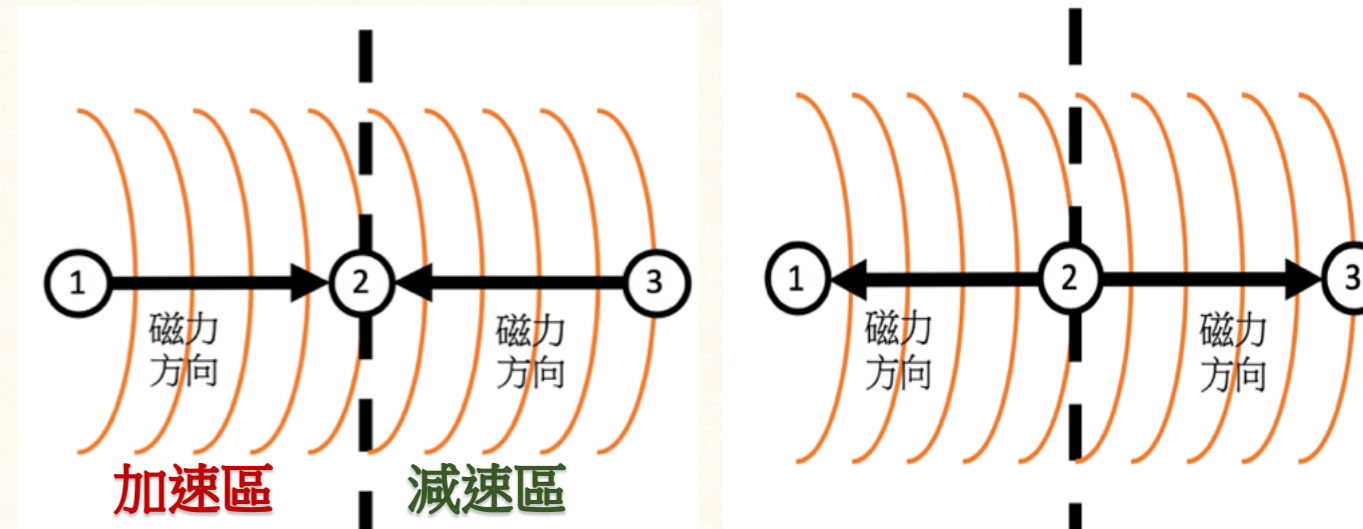


圖3-16：質心在①和③所受磁力；質心在②所受磁力

測量方法①的量測誤差比較大，因為子彈滑行距離變長，會提高軌道摩擦力的影響。測量方法②利用光電閘測量子彈脫離螺線圈時的發射速度，其他外力的影響比較少，誤差也較小。

➢ 了解到「子彈質心位置到線圈口的時間」與「放電時間常數」兩者之間的關聯性這個重要關鍵點之後，我們思考除了電容量、電壓兩個變因之外，是否還有其他方式可以讓子彈發射的更快？於是我們透過將質心往後移的方式，成功提升了子彈的發射速度(如圖3-17)，但如果往後移動太多，則會因為距離線圈太遠，磁力太弱無法拉動子彈前進。

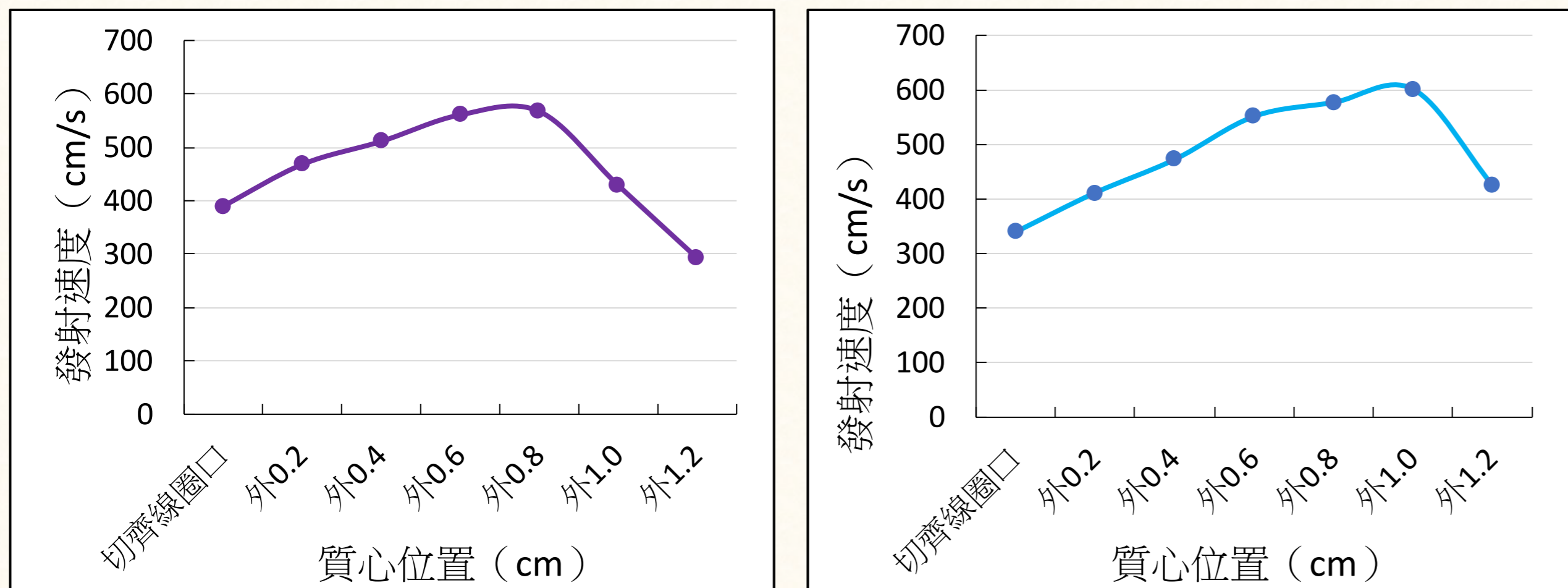


圖3-17：發射速度與質心位置關係圖。電容分別固定為(左)3 mF 與(右)4 mF。

綜合以上(一)~(六)的實驗分析與討論，我們認為**想要得到最大的威力，在相同條件下，我們要使放電時間常數τ剛好能讓子彈從出發點移動到線圈中心t**，在這樣的配置下，子彈可以獲得最多的加速作用而達到最高速。

結論

- 1.子彈質心位置越靠近螺線圈兩端，獲得磁吸引力越大且方向相反。
- 2.相同條件時，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.相同條件時，電容量在一定範圍內，發射速度有極值。若再提高電壓充電，不僅發射速度會下降，繼續增加電容還會有子彈反向射出、折返兩次後射出的情形發生，亦即發射速度會隨著電容大小而振盪。就我們所知，這是以往的科展研究中從沒被發現過的現象，經過我們設計實驗仔細測量與分析，我們認為這與**電容放電的時間常數τ**有關。
- 4.電容量越大則放電時間常數τ越大。
- 5.要得到最大發射速率，必須考量裝置的**磁力作用時間**和**子彈質心相對應位置**之關係。

延伸應用：

➢ 本研究之結論，可以提供六年級自然課電磁鐵單元的延伸活動：

1. 配合課本的實驗變因（電壓、線圈匝數等）來製作不同的線圈砲，驗證課本的實驗結果。
2. 透過製作線圈砲的過程，讓同學思考怎麼樣才能做出威力最強的線圈砲，當作比賽。

➢ 可以參考研究結果製作出**雙向發射**的線圈砲。