

彰化縣 113 學年度國民中小學學生獨立研究作品甄選

作品說明書

作品編號：

國小組

數學類

組別：

自然、科技類

國中組

人文社會類

作品名稱：「磁」起彼落

壹、研究訓練階段

一、近二年學校獨立研究課程之規劃

(一)、本校獨立研究課程目標：

1. 早自修時間及周六早上時段，培訓科目為數學、英文自然科學、創意語文。
2. 輔導室統籌規劃結合熱心且具備相關指導經驗的教師組成各科教學團隊。
3. 學生依照自己興趣選擇數理或語文兩大領域，教師引導學生從課本延伸，找尋研究題材，進行主題探究。
4. 在硬體方面提供生物、理化、地科實驗研究器材、電腦設備的使用及資訊編輯軟體。
5. 提供歷年彰化縣獨立研究之成果資料供學生參閱。

(二)、本校獨立研究課程目標：

1. 提供學生適性學習，發揮潛能。
2. 培養學生探索的精神和思維之能力。
3. 培養學生解決問題、研究問題的能力。
4. 培養學習科學態度和科學道德，掌握科學研究的方法。
5. 培養學生社會責任感和互助合作的精神。

二、學校如何提供該生獨立研究訓練

(一)、資優資源班的學生：藉由獨立研究課程來訓練學生的研究能力，及情意課程來培養學生的表達與溝通能力。

(二)、非資優資源班的學生：將有興趣的學生，引導適當的指導老師，指導老師利用課餘時間，團體討論尋求研究的主題及分工來進行研究課程，並指導學生撰寫研究內容與格式，學校會提供場地與相關的設備。

結語：學校希望藉由這個過程讓學生了解生活中的問題，透過創意的想法、科學的方法、嚴謹的過程來將問題解決，或者改善生活。

貳、獨立研究階段

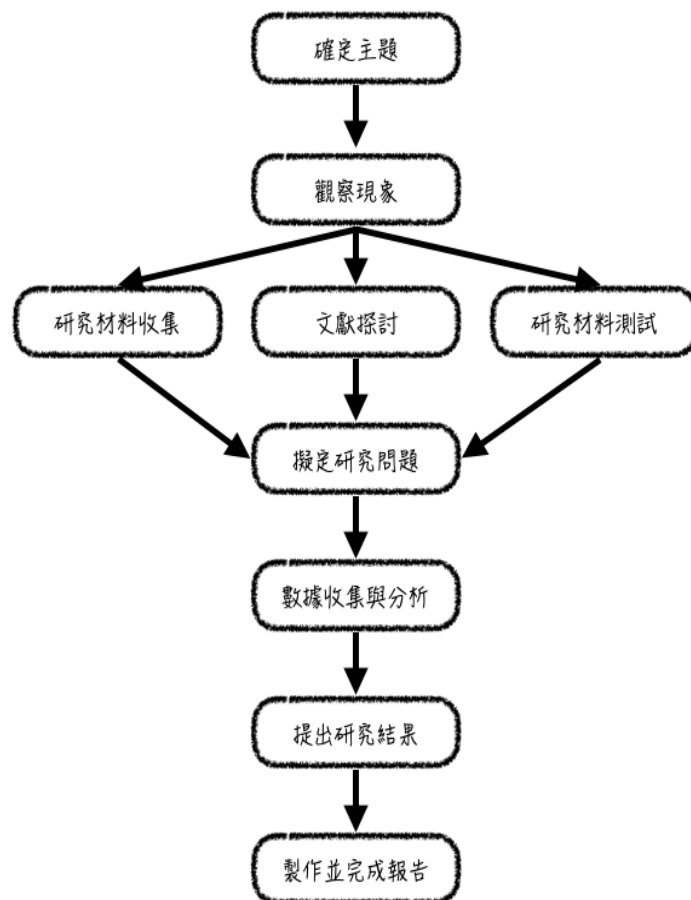
一、研究動機

會想要做這個主題是由於之前在書上有看到電與磁相關的東西，因為覺得很有趣，所以就上網查了一些相關資料。在這些資料當中，我深受電磁砲的吸引，只需要使用線圈跟電就能夠以強大的力道發射子彈，在經過各種改良過後，甚至能夠變成強大的武器。因為電磁砲與其他各種武器不同的特點，使我好奇其中的原理，於是便與同學一起請老師帶領我們探索其中的奧妙！

二、擬定正式計畫、研究問題及工作進度表

(一)、擬定正式計畫

圖 2-1-1 正式計畫流程圖



(二)、研究問題

1. 探討子彈發射位置對發射距離的影響
2. 探討電容電量對發射距離的影響
3. 探討電容電量與子彈最佳放置位置的關係

(三)、工作進度表

表 2-3-1 工作進度表

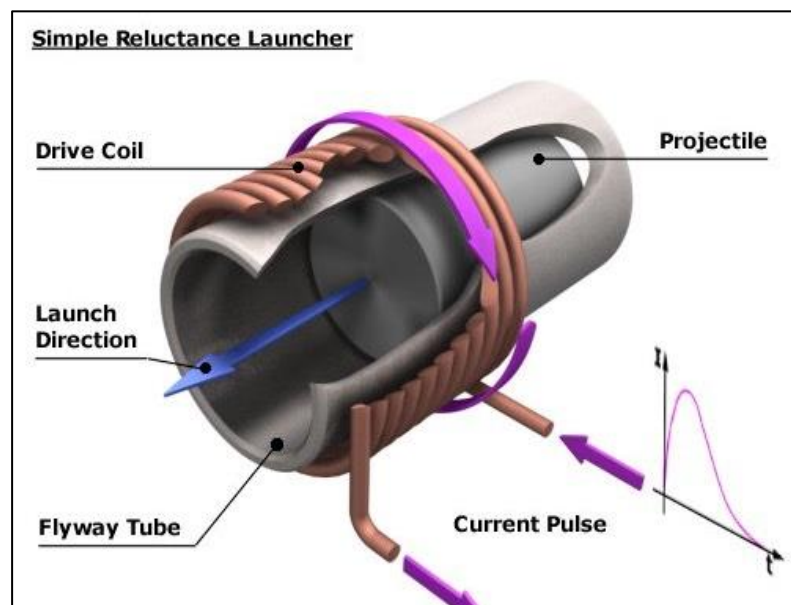
時間 / 工作	7/ 2 ~ 8	7/ 9 ~ 15	7/ 16 ~ 22	7/ 23 ~ 29	8/ 1 ~ 5	8/ 6 ~ 12	8/ 13 ~ 19	8/ 27 ~ 31	9/ 3 ~ 9	9/ 10 ~ 16	9/ 17 ~ 23	9/ 24 ~ 30	10/ 1 ~ 7	10/ 8 ~ 14
擬定研究主題														
資料收集／彙整相關文獻														
前置工作準備／實驗試做														
正式實驗														
數據分析														
結果與討論														
撰寫報告														

三、彙整文獻

(一) 電磁砲線圈的發射原理

電磁砲線圈的發射原理如圖 3-1 所示。在此實驗中，電磁砲線圈利用電流磁效應，當電流通過漆包線繞成的線圈進而產生磁場，吸引磁性物質製成的子彈。文獻指出，當穩定供應線圈電流時子彈會射不出去，其原因為線圈產生的磁力會將射出去的子彈吸回。為了避免子彈被吸回所以我們使用電容，希望透過電容快速放電的特性，讓子彈在經過磁力的加速後，電容就已經完全放電，以此減少子彈射出後磁力對子彈造成減速的效果。

圖 3-1 電磁砲線圈的發射原理



取自 ResearchGate

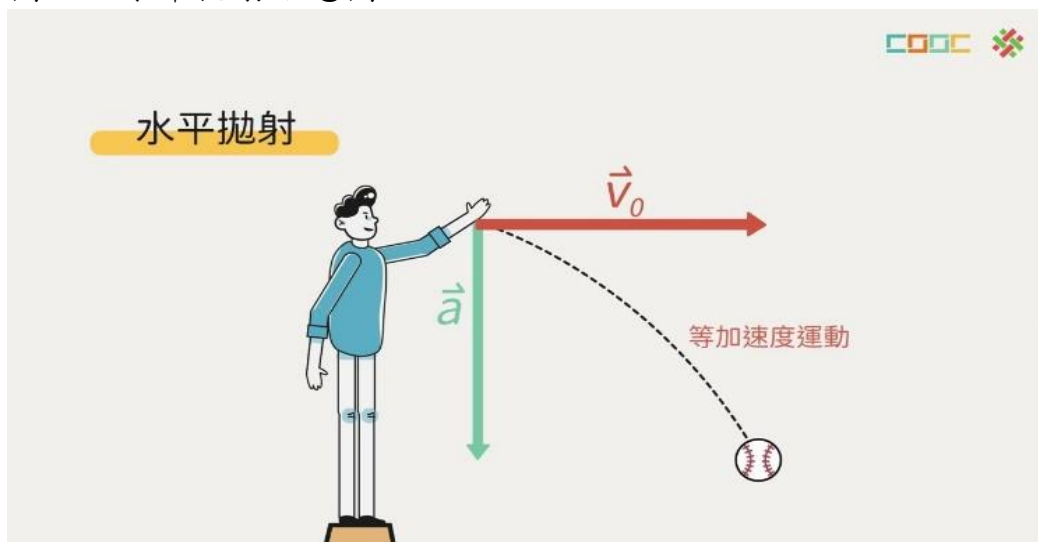
(二) 電容器

電容器就是可以儲存電荷、電能的原件，而電容器儲存電能的能力，就是我們所看到電容的大小。最簡單的電容器是由兩片分開一段距離的金屬板所構成，藉由兩片金屬板間異性電荷相吸的特性來儲存電能（蔡坤憲，2018，引自物理雙月刊）。

(三)水平拋射

水平拋射是指在不計空氣阻力時，一物體水平方向初速度不為 0，只受到重力加速度 $g(\approx 9.8\text{m/s}^2)$ 的影響作等加速度運動。此運動可視為水平方向的等速度運動以及垂直方向的自由落體運動之合運動，所以水平拋射同時具有兩分運動的特性。因此我們可以利用自由落體公式 $h=1/2gt^2$ 代入垂直高度 $h=1.00(\text{m})$ 算出時間 $t\approx 0.45(\text{s})$ 。在我們的實驗裝置設計中，我們固定垂直高度，因此子彈從射出到落地所需時間皆相同，使水平距離則與子彈射出時的初速成正比關係。在我們的實驗中利用水平距離來當作子彈受到螺線管磁力作用的大小。

圖 3-2 水平拋射示意圖



取自台北酷課雲

(四)歷屆科展相關文獻

序號	名稱	作者	年份	結論
1	電磁砲!真的還假的?	潘楷彥 曾祥智 侯正浩	民國 106年	<ol style="list-style-type: none"> 1. 鐵棒發射速度與電壓有正相關。 2. 發射速度與線圈密度有正相關。 3. 鐵棒發射速度與線圈長度有正相關。 4. 鐵棒發射速度與電容個數有正相關。
2	電磁砲	葉達謙	民國 99年	<ol style="list-style-type: none"> 1. 電壓越高時，子彈位置越往後，速度越快 2. 電容量與電壓的關係:在低電容量，和適當電壓下，速度更快。
3	無聲動力 一線發射 砲的與應 分析	郭彥助 鄧雅文 李靖元	民國 100年	<ol style="list-style-type: none"> 1. 探討電容容量與發射物速度:固定電壓下，電容量在一定範圍內，發射物有最高速表現。 2. 電壓與發射物速度的關係:電容量較小 ($390\mu\text{F} \sim 1800\mu\text{F}$)，發射速率與電壓成正相關。電容量$3300\mu\text{F}$以上，發射物的發射初速會下降。 3. 發射物的發射位置與速度的關係:相同電壓下，質心愈接近線圈開口，發射初速愈快；而相同發射位置，電壓愈高，發射初速愈快。 4. 發射物質量與速度的關係:發射物的質量越小，發射初速愈大；發射物的質量越大，發射初速愈小。
4	「磁」母 手中線一 探電容 放電時 常數對 磁砲發 射的影 響	陳韶寧 楊國睿 林品喬 莊承諺 莊凡毅	民國 109年	<ol style="list-style-type: none"> 1. 螺線圈匝數越多、線徑越大則發射速度快；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降。 2. 電容量越大則放電時間常數τ越大。 3. 發射威力與子彈質心位置之關係: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。

(五)彙整

過去的研究發現，子彈在經過螺線管時其受力情形如下。透過圖 3-3 可以說明，子彈在螺線管中，前段為加速，尾段為減速，而中間則不受力。對應電容的放電時間如圖 3-4 所示，當子彈經過螺線管前端的加速區域後，電容剛好完全放電，這時子彈飛行的距離最遠。而電容的放電時間與電容的大小有關，因此，子彈飛行的距離會與電容的大小和子彈放置的位置有關。

圖 3-3 子彈受力與距離情形

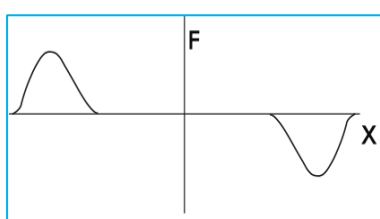
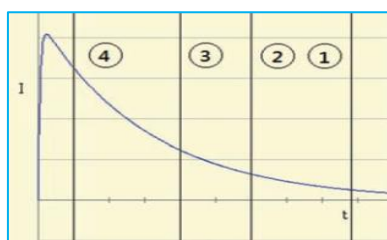


圖 3-4 對應電容的放電時間



取自中華民國 50 屆中小學科學展覽—高中組物理科 電磁跑

總結過去和電磁炮有關的科展如表 3-1 所示，我們發現電壓和電容的大小和子彈的初速度呈正相關，而電壓和電容彼此之間有交互作用，也就是說在固定電壓的情況下，並非電容越大子彈初速越快；相反的，在固定電容的情況下，也並非電壓越大子彈初速就會越快。過去研究也指出，固定電壓與電容的狀況下，不同的放置位置也會影響子彈的初速，然而，卻沒有研究探討電容的大小與子彈放置位置之間的關係，因此本組進行以下實驗：

1. 探討不同位置對子彈水平飛行距離的影響
2. 探討電容電量對發射距離的影響
3. 探討電容電量與子彈最佳發射位置的關係

四、資料分析

(一) 實驗工具及裝置



圖 4-1 三角尺



圖 4-2 電容



圖 4-3 鐵釘



圖 4-4 壓克力板(用來標示子彈落點)



圖 4-5 用電動螺絲起子纏繞線圈



圖 4-6 固定線圈長度



圖 4-7 紀錄裝置



圖 4-8 發射裝置

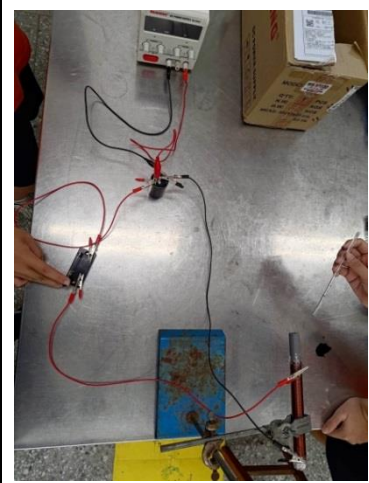


圖 4-9 電路接法



圖 4-10 固定螺線管高度

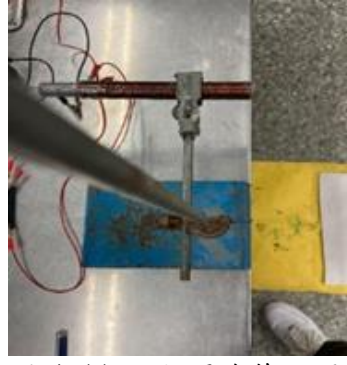


圖 4-11 固定螺線管位置



圖 4-12 找螺線管口垂直到地
面的點，該點為基準點



圖 4-13 測量的基準點與桌
面切齊

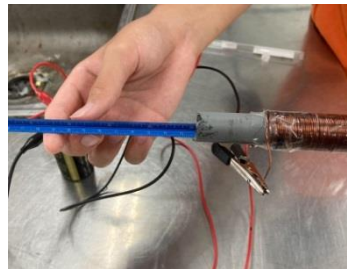


圖 4-14 固定子彈位置



圖 4-15 測量子彈飛行距離

(二)探討不同位置對子彈水平飛行距離的影響

- 控制變因：固定電容與電壓
- 操縱變因：子彈放置位置
- 應變變因：不同位置對子彈水平飛行距離

1. 實驗步驟

- (1)將 $22000\ \mu\text{F}$ 的電容利用電源供應器充電到電壓 60V 。
- (2)將沾上墨汁的鐵釘放入線圈中，並利用三角尺上的刻度調整鐵釘在線圈內放置的位置。
- (3)關閉電源供應器後，開通電容和線圈迴路開關，使線圈通電，並讓鐵釘射到白色塑膠板上，留下墨汁的痕跡。
- (4)利用捲尺測量鐵釘發射的水平距離。
- (5)重複以上的步驟五遍，測量鐵釘發射的水平距離並取其平均值。
- (6)改變子彈位置，重複上述 1~5 的步驟。子彈位置分別為 -1 、 0 、 1 、 2 、 3 (由線圈尾端開口開始，往線圈外一公分計為 1 ，往線圈內一公分計為 -1)。
- (7)測量完後用 excel 分析測出來的數據，以子彈放置的位置為 x 軸，飛行水平距離 y 軸，並繪製成圖表，探討子彈放置位置與子彈水平飛行距離之間的關係。

2. 實驗結果

(1) 固定 22000 μF 的電容，不同位置對子彈水平飛行距離的結果

鐵釘質量	1.28g		電容	22000 μF	
子彈位置	-1	0	1	2	3
1	70.85cm	128.01cm	190.91cm	213.23cm	74.87cm
2	70.98cm	125.76cm	189.76cm	214.64cm	73.20cm
3	72.66cm	131.60cm	192.45cm	214.78cm	63.01cm
4	72.34cm	122.78cm	190.78cm	209.78cm	67.50cm
5	70.65cm	123.56cm	193.12cm	217.50cm	78.80cm
平均	71.50cm	126.34cm	191.40cm	213.99cm	71.48cm

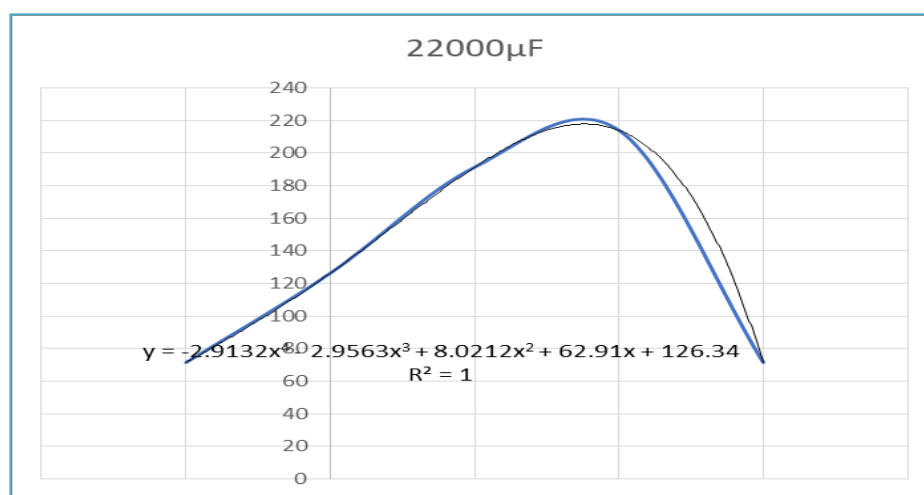


圖 4-16 固定 22000 μF 的電容，探討不同位置對子彈水平飛行距離的影響分析：

從表 4-1 可以看出 22000 μF 的電容固定電壓下，子彈在螺線管外兩公分的位置發射距離最遠，為 213.99cm。進一步將子彈放置位置和發射距離繪製出關係圖，如圖 4-16。透過關係圖能看出子彈放置位置介於螺線管外 1 到 2 公分之間能射出最遠距離，分析關係圖後我們找出在線圈外 1.75 公分的位置，能射出最遠的距離約 221.00 公分。

(三)探討電容電量與水平飛行最遠距離時子彈所放置位置的關係

- 控制變因：固定電壓
- 操縱變因：不同的電容
- 應變變因：水平飛行最遠距離時子彈所放置的位置

1. 實驗步驟：

- (1)將要測試的電容利用電源供應器充電到電壓 60V。
- (2)將沾上墨汁的鐵釘放入線圈中，並利用三角尺上的刻度調整鐵釘在線圈內放置的位置。
- (3)關閉電源供應器後，開通電容和線圈迴路開關，使線圈通電，並讓鐵釘射到白色塑膠板上，留下墨汁的痕跡。
- (4)利用捲尺測量鐵釘發射的水平距離。
- (5)重複以上的步驟四遍，測量鐵釘發射的水平距離並取其平均值。
- (6)改變子彈位置，重複上述 1~5 的步驟。子彈位置分別為 -1、0、1、2、3(由線圈尾端開口開始，往線圈外一公分計為 1，往線圈內一公分計為-1)。
- (7)改變 4 種不同電容量，重複上述 1~6 的步驟。電容大小分別為 $15000\ \mu\text{F}$ 、 $10000\ \mu\text{F}$ 、 $6800\ \mu\text{F}$ 、 $3300\ \mu\text{F}$ 四種。
- (8)測量完後用 excel 分析測出來的數據，以電容量為 x 軸，飛行水平的最遠距離為 y 軸，並繪製成圖表，探討電容量與子彈水平飛行距離之間的關係。
- (9)用 excel 分析測出來的數據，以電容量為 x 軸，子彈放置最佳位置為 y 軸，並繪製成圖表，探討電容量與子彈放置最佳位置之間的關係。

2. 固定 15000 μF 的電容，不同位置對子彈水平飛行距離的結果

從表 4-2 可以看出 15000 μF 的電容固定電壓下，子彈在螺線管外兩公分的位置發射距離最遠，為 179.48cm。進一步將子彈放置位置和發射距離繪製出關係圖，如圖 4-17。透過關係能看出子彈放置位置介於螺線管外 1 到 2 公分之間能射出最遠距離，分析關係圖後我們找出在線圈外 1.64 公分的位置，能射出最遠的距離約 193.00 公分。

表 4-2 固定 15000 μF 的電容，不同位置對子彈水平飛行距離					
鐵釘質量	1.28g		電容	15000 μF	
子彈位置	-1	0	1	2	3
1	49.60cm	100.20cm	176.23cm	180.88cm	0.00cm
2	49.70cm	98.43cm	171.10cm	179.23cm	0.00cm
3	47.72cm	99.23cm	178.64cm	174.53cm	0.00cm
4	47.00cm	103.00cm	175.43cm	181.53cm	0.00cm
5	45.78cm	108.34cm	181.53cm	181.23cm	0.00cm
平均	47.96cm	101.84cm	176.59cm	179.48cm	0.00cm

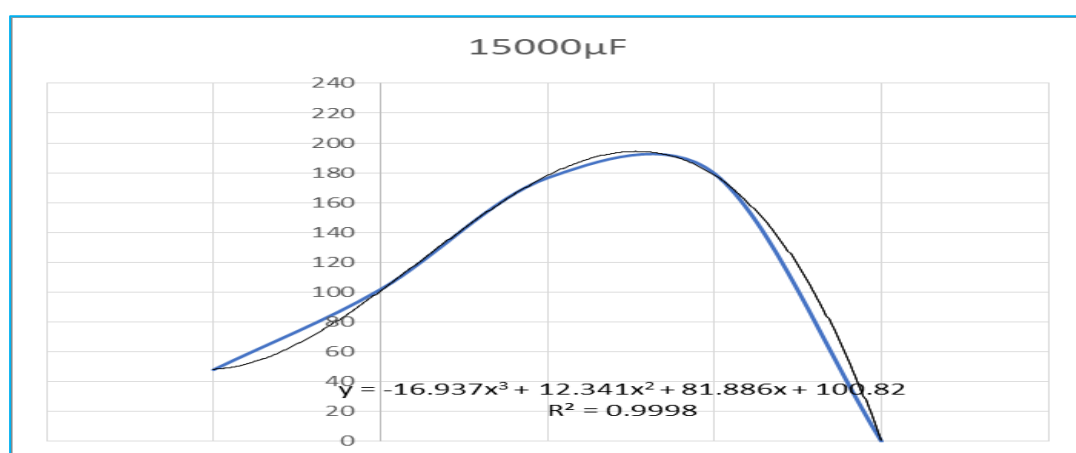


圖 4-17 固定 15000 μF 的電容，不同位置對子彈水平飛行距離的影響

3. 固定 10000 μF 的電容，不同位置對子彈水平飛行距離的結果

從表 4-3 可以看出 10000 μF 的電容固定電壓下，子彈在螺線管外一公分的位置發射距離最遠，為 155.54cm。進一步將子彈放置位置和發射距離繪製出關係圖，如圖 4-18。透過關係圖能看出子彈放置位置介於螺線管外 1 到 2 公分之間能射出最遠距離，分析關係圖後我們找出在線圈外 1.35 公分的位置，能射出最遠的距離約 160.00 公分。

表 4-3 固定 10000 μF 的電容，不同位置對子彈水平飛行距離					
鐵釘質量	1.28g		電容	10000 μF	
子彈位置	-1	0	1	2	3
1	32.78cm	90.81cm	151.07cm	139.14cm	0.00cm
2	38.43cm	98.57cm	158.48cm	138.99cm	0.00cm
3	36.24cm	96.20cm	154.57cm	137.61cm	0.00cm
4	36.98cm	94.00cm	157.13cm	138.52cm	0.00cm
5	32.92cm	97.33cm	156.44cm	133.59cm	0.00cm
平均	35.47cm	95.38cm	155.54cm	137.57cm	0.00cm

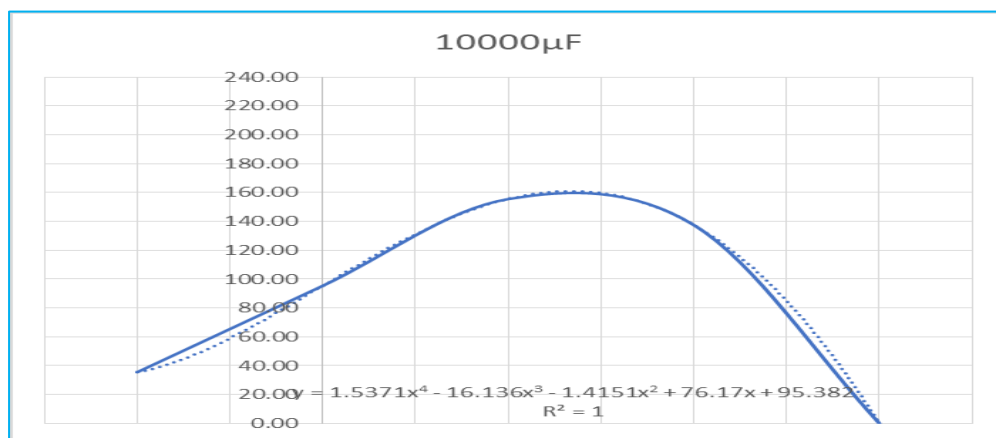


圖 4-18 固定 10000 μF 的電容，不同位置對子彈水平飛行距離的影響

4. 固定 6800 μF 的電容，不同位置對子彈水平飛行距離的結果

從表 4-4 可以看出 6800 μF 的電容固定電壓下，子彈在螺線管外一公分的位置發射距離最遠，為 131.22cm。進一步將子彈放置位置和發射距離繪製出關係圖，如圖 4-19。透過關係圖能看出子彈放置位置介於螺線管外 1 到 2 公分之間能射出最遠距離，分析關係圖後我們找出在線圈外 1.26 公分的位置，能射出最遠的距離約 134.50 公分。

表 4-4 固定 6800 μF 的電容，不同位置對子彈水平飛行距離					
鐵釘質量	1.28g		電容	6800 μF	
子彈位置	-1	0	1	2	3
1	0.00cm	65.76cm	131.00cm	109.13cm	0.00cm
2	0.00cm	66.87cm	133.68cm	114.63cm	0.00cm
3	0.00cm	65.50cm	129.31cm	109.01cm	0.00cm
4	0.00cm	62.91cm	131.35cm	108.42cm	0.00cm
5	0.00cm	62.85cm	130.78cm	111.78cm	0.00cm
平均	0.00cm	64.78cm	131.22cm	110.59cm	0.00cm

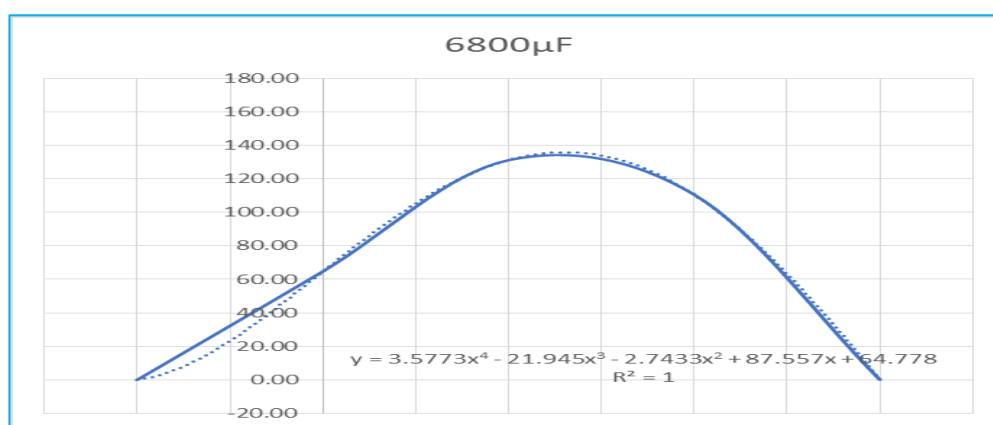


圖 4-19 固定 6800 μF 的電容，不同位置對子彈水平飛行距離的影響

5. 3300 μF 的電容固定電壓下，不同位置對子彈水平飛行距離的結果

從表 4-5 可以看出 3300 μF 的電容固定電壓下，子彈在螺線管外一公分的位置發射距離最遠，為 70.57cm。進一步將子彈放置位置和發射距離繪製出關係圖，如圖 4-20。透過關係圖能看出子彈放置位置介於螺線管外 1 到 2 公分之間能射出最遠距離，分析關係圖後我們找出在線圈外 1.03 公分的位置，能射出最遠的距離約 70.70 公分。

表 4-5 固定 3300 μF 的電容，不同位置對子彈水平飛行距離					
鐵釘質量	1.28g		電容	3300 μF	
子彈位置	-1	0	1	2	3
1	0.00cm	29.90cm	71.49cm	32.63cm	0.00cm
2	0.00cm	31.43cm	70.87cm	43.23cm	0.00cm
3	0.00cm	29.78cm	70.00cm	40.50cm	0.00cm
4	0.00cm	32.05cm	69.00cm	42.00cm	0.00cm
5	0.00cm	32.50cm	71.50cm	40.01cm	0.00cm
平均	0.00cm	31.13cm	70.57cm	39.67cm	0.00cm

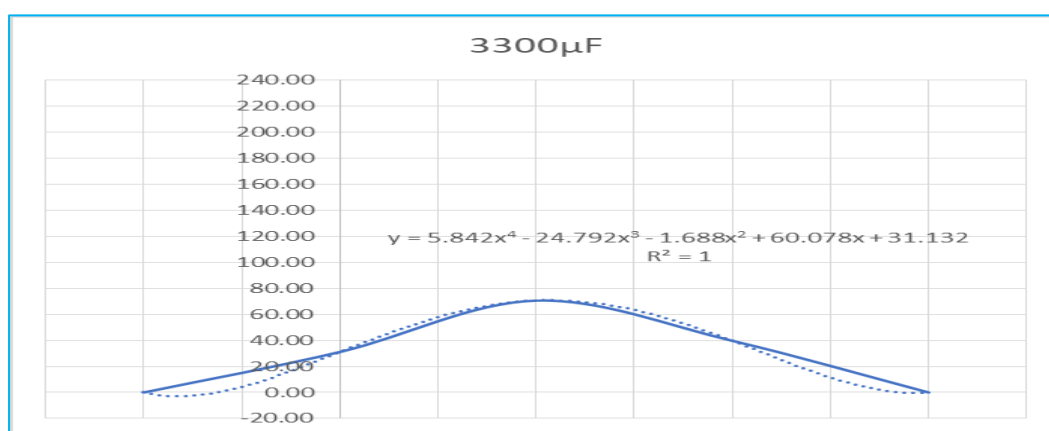


圖 4-20 固定 3300 μF 的電容，不同位置對子彈水平飛行距離的影響

綜合以上分析我們發現在達到最遠發射距離的情況下，電容與子彈位置成正相關，如下圖 4-21；電容與其能達到的最遠發射距離成正相關，如下圖 4-22。

表 4-6 子彈在不同電容下的最佳子彈位置與最遠發射距離					
鐵釘質量	1.28g				
電容	3300 μ F	6800 μ F	10000 μ F	15000 μ F	22000 μ F
發射位置	1.03	1.26	1.35	1.64	1.75
最遠距離	70.70cm	134.50cm	160.00cm	193.00cm	221.00cm

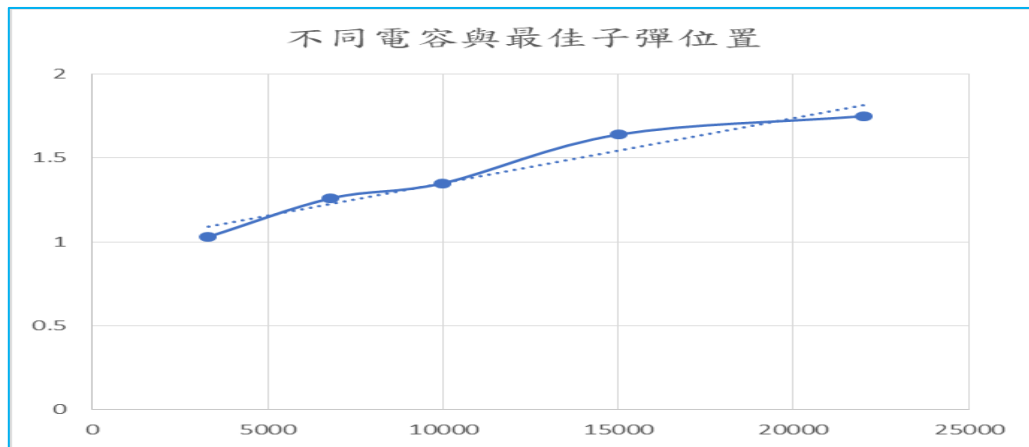


圖 4-21 子彈在不同電容下的最佳子彈位置

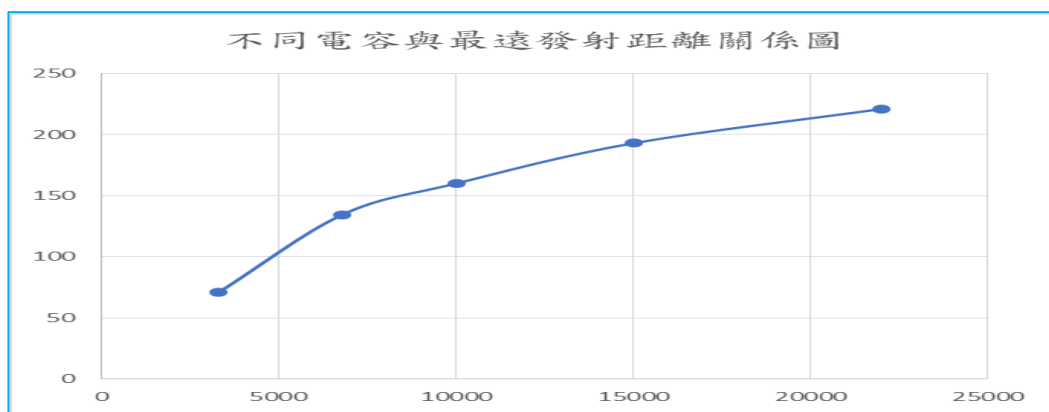


圖 4-22 子彈在不同電容下的最遠發射距離

五、研究結果與討論

1. 在本研究中，固定電壓在 60V，不管電容大小，子彈能射出最

遠距離時子彈放置位置皆在螺線管外 1 到 2 公分之間，且隨著電容越來越大，最佳子彈放置位置就越遠離發射端螺線管口。然而，我們的實驗結果與郭彥助等（2011）的科展結果有些許出入，在他們的實驗中，最佳的發射位置為螺線管口處。經過討論後，我們認為實驗結果的差異在於，使用電容大小和子彈質量大小的不同，在郭彥助等（2011）的實驗中所使用的電容大小為 $1680\ \mu\text{F}$ ，子彈質量為 9.8g 。就電容大小的部分，與我們實驗結果所得到相同，因其電容較小，因此越接近發射端螺線管口。就發射子彈質量的部分，建議未來實驗可以探討質量對子彈放置位置的影響。

2. 郭彥助 等（2011）的實驗探討電容大小和發射距離的關係，指出：「電容量 $3300\ \mu\text{F}$ 以上，發射物的發射初速會下降」，但我們認為這可能與發射的位置有關係，在經過實驗後發現，當在進行不同電容與發射距離的比較時，若能將子彈都放置於最佳發射位置的話，隨著電容值越大，子彈能發射的越遠。在畫出圖形後，發現電容值和最遠發射距離之間的關係卻非線性。在和老師討論後，我們發現電容釋放的能量正比於電容值，而這個能量會轉換成動能，因此電容值的大小應和速度的平方成線性關係。重新做圖後如圖 5-1，的確得到相對線性的結果。

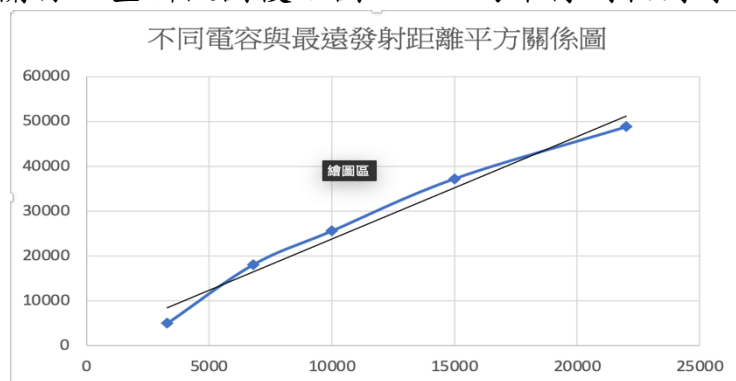


圖 5-1 不同電容與最遠發射距離平方關係圖

六、評鑑與檢討

(一)、對擬定正式計畫及研究問題的新發現

最一開始我們其實是想製作磁浮列車，原以為不會很難，沒想到卻處處碰壁。後來因為列車的動力、平衡以及巨大開銷等難以突破的問題讓我們不得不作廢，但也讓我們認識到電流磁效應的神奇現象，於是將目光轉移到電磁砲上。

在製作電磁砲的過程中我們首先遇到如何繞線圈的問題，原本是用手繞，但是手繞的線圈不只密度難以掌控和花時間，品質也難以保證，在經過幾次的討論後，我們決定用電鑽和水管繞線圈！不僅省時，線圈的密度也能夠維持得差不多！然而之後又出現各種問題，例如：子彈無法順利射出、器具品質不佳、不易判斷子彈的落點等，我們才發現做研究並沒有我們想的這麼單純，而是需要在發現問題後不斷重複「提出假說」→「設計實驗」→「驗證假說」等繁瑣的過程，每一個地方都要謹慎的操作。

經過一番努力我們終於完成了這篇報告，其中團隊合作和老師的教導都是成功的必要條件！雖然花費了大量的時間和精力，但是我很慶幸自己在國中就有這種經驗，除了對「電與磁」有更深層的認識，也希望在未來如果遇到類似的問題能夠快速且有效率地解決。

(二)、研究困難與勇於突破

1. 時間常常難以配合：

由於大家都常有各種比賽和訓練，常有成員需要請假，因此，我們把大家都在的時間用來做實驗，並盡量多利用零碎時間，此外也使用通訊軟體討論。

2. 纏繞線圈的方法：

最一開始是親手慢慢繞，不過，這種方法不僅沒效率，而且也會使得螺線管的線圈疏密不一。後來，我們改成先將螺線管內部的水管固定在電動螺絲起子

上，使水管能和電動螺絲起子一起旋轉。接著，銅線的一端先固定在水管上，之後，讓電動螺絲起子旋轉，以固定速率慢慢拉著銅線移動，線圈就完成了。

3. 線圈通電時間的控制：

在將子彈發射的過程中，若是放電時間太長，子彈就會被吸回線圈裡，即使只有一瞬間，線圈也會對子彈施予一個和速度方向相反的力，使子彈速度變慢！為了使子彈的速度達到最快，我們一開始決定讓同學在一瞬間快速的通電並斷電，但是這衍生了新的問題，每次的通電時間都不一樣，並且也不能確定間隔夠短。於是在搜尋完資料後，我們最後決定採用電容。電容的優點和特性就是瞬間放電，並且電壓也十分的符合我們研究的需求。瞬間放電使得我們能夠避免子彈被吸回來，並且時間間隔的差異也比手動操作小多了！

4. 如何測量距離：

把子彈射出去之後，接著就是要測量發射的距離，但是，要怎麼量、怎麼測是個問題。我們在考慮了各項因素及手邊的材料之後，決定要先將子彈先沾上墨汁，發射後再記錄子彈落在紙上的位置。但是，那張紙用了一陣子之後就變得很黑，而且無法重複利用，因此，我們決定要改成使用白色塑膠板，這樣一來，子彈發射並測量完距離後，就可以擦掉，恢復成乾淨的狀態，方便我們再測量其他數據。

七、參考資料

- (一)、中華民國第 57 屆中小學科學展覽會-高中組物理科-
電磁砲！真的還假的？
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/57/pdf/051812.pdf>
- (二)、中華民國第 50 屆中小學科學展覽會-高中組物理科-
電磁砲
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/50/pdf/040111.pdf>
- (三)、中華民國第 51 屆中小學科學展覽會-國中組物理科-
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>
- (四)、中華民國第 60 屆中小學科學展覽會-國小組物理科-
「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>
- (五)、康軒自然 3 下 電磁 52 頁-81 頁 安培
- (六)、臺北酷課雲
https://www.youtube.com/watch?v=r_525GzaEyk
- (七)、ResearchGate
<https://www.researchgate.net/>
- (八)、百聞不如一見的平行板電容器：虛擬與實境的搭配
<https://pb.ps-taiwan.org/modules/news/article.php?storyid=251>