中華民國第 57 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高級中等學校組　物理與天文學科

051812

電磁砲！真的還假的？

學校名稱：新北市立永平高級中學

作者：	指導老師：
高二 潘楷彥 高二 曾祥智 高二 侯正浩	黃春盛

關鍵詞：電磁炮、電流磁效應、電磁鐵

摘要

本研究在探討電磁炮射出的鐵棒初速，研究其與電容數量、電壓大小、漆包線線圈長度、線圈密度之關係。利用電容瞬間放電之特性，漆包線在極短時間內流經電量，使線圈電流達極大。當電流通過線圈時，根據電流磁效應會產生磁場形成電磁鐵枝效果，將鐵棒吸引並射出。量測上以軟體 tracker 及光電閘兩種不同方法測得時間數據，分析得鐵棒射出初速。

最後得知發射速度因為漆包線線徑安全電流上限影響，有很大的限制。因此討論線圈線徑將可能因達到電流上限無法順利發射。發射速度大致上與電壓大小、線圈密度、電容數量有正相關。改變電容數量與電壓最顯著，改變線圈密度將有可能因纏繞半徑太大而有終端速度產生。

壹、研究動機

有一次在閱讀科學雜誌時，看到美國海軍使用電磁炮作為未來的武器，突然一個念頭想到:是不是可以把電磁炮縮小，改良以線圈射出，並製成一把電磁槍，而剛好這學期開始有專題課，便一心投入研究當中，並尋找與我志同道合的朋友，一開始的前兩個月經歷了許多失敗，使我們有了想要半途而廢的想法，但在老師孜孜不倦鼓勵下，我們終於發現了其中的關鍵。

貳、研究目的

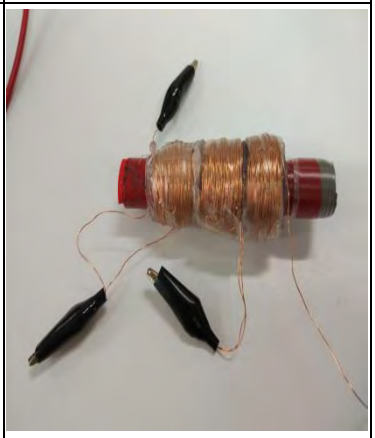
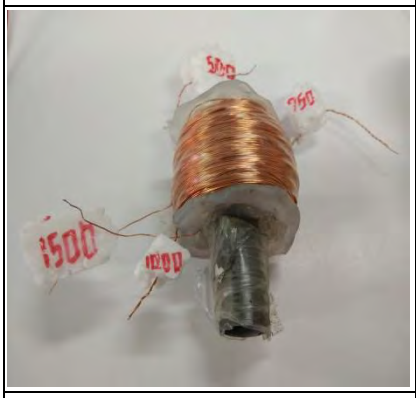
1. 研究如何順利發射鐵棒
2. 研究鐵棒發射速度與電壓之關係
3. 研究鐵棒發射速度與線圈密度之關係
4. 研究鐵棒發射速度與線圈長度之關係
5. 研究鐵棒發射速度與電容個數之關係

參、研究原理

本實驗中，電磁炮是利用電磁力原理來加速彈丸的發射系統；利用電流磁效應，使電流通過由漆包線捲成的線圈產生磁場，並使鐵棒磁化，使其前端產生和線圈後端相反的磁極，進而就被吸入，為了避免鐵棒前端碰到線圈前端相斥，所以必須在鐵棒接近線圈末端前斷電，使線圈失去磁性，如此一來鐵棒就能依原先的動能靠著慣性飛出了。實驗中控制不同的電壓、線圈匝數、通電時間、鐵棒與線圈的距離來找到最完美的射程範圍。

圖1、　螺線管與鐵棒受力關係

肆、實驗器材

(一) 電容*3 450V、4700uF	(二) 直流電源供應器(1) 輸出電流 0~3 安培 輸出電壓 0~50 伏特	(三) 直流電源供應器(2) 輸出電壓:AC6.3 伏特 DC100 伏特、 DC200 伏特
		
(四) 待射物:鐵棒 重:16(g)、直徑:0.5(cm) 長:10.387(cm)	(五)三用電表	(六)線圈(1) 200/cm 2cm 4cm 6cm
		
(七)線圈(2) 2cm 250/cm375/cm500/cm750/cm	(八)發射台 高:47.2(cm)	(九)Arduino 電路板

伍、實驗過程與紀錄

一、研究一：討論鐵棒在線圈中的加速時間

在發射過程中，若持續通電是無法將鐵棒射出，因為線圈兩端磁力堆會將鐵棒吸引回顯圈中，無法順利發射。這也是研究初時便選用電容放電之原因，除了有瞬間大電流，亦能擁有通電時間較短之效果。但是當螺線管長度增加後，通電時間便會超出鐵棒通過之時間，使鐵棒再射出另一端後有了反向的磁力，產生不必要之阻力，影響鐵棒發射速度，甚至將鐵棒拉回線圈中無法發射。

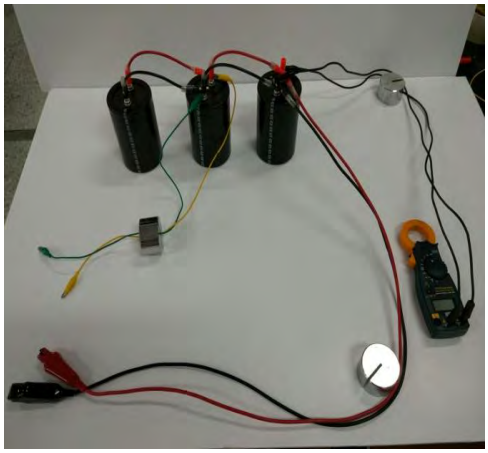


圖2、　裝置示意圖

為了解決這樣的問題，我們認為如果可以控制發射時間，使鐵棒恰好達到另一端時便斷電，則可以完全避免鐵棒射出後被另一端磁場所造成磁力拉回線圈中，造成發射速度變慢甚至拉回線圈中之現象。但運動中的鐵棒是受到變力作用，礙於器材量測不方便，我們僅量測發射初時的最大拉力，假定為等加速運動通過線圈長度之過程，求得時間，再以 Arduino 連接繼電器控制線圈通電時間。

(一) 實驗步驟：

(1) 利用彈簧秤連接鐵棒，並校正歸零。

(2) 將電容充電至所需電壓(20V、30V、40V、50V、100V、200V)後即斷開外接電源。

(3) 開通電容與線圈迴路開關，使線圈通電，可見鐵棒立即被吸引。

(4) 讀取開通迴路開關瞬間所量測得彈簧秤最大讀數。

(5) 重復以上步驟，不同電壓與不同螺線管各量測 20 組取其平均拉力並記錄。

表1、相同密度不同長度線圈、各電壓之拉力

	200 匝/cm 長度 2cm	200 匝/cm 長度 4cm
充電電壓	拉力(N)	拉力(N)
20V	46.7	X
30V	110	156.7
40V	140	240
50V	190	328.3
100V	536.7	X
200V	816.7	X

表2、相同長度不同密度線圈、各電壓之拉力

	250 匝/cm， 長度 2cm	375 匝/cm， 長度 4cm	500 匝/cm， 長度 4cm	750 匝/cm， 長度 6cm
充電電壓	拉力(N)	拉力(N)	拉力(N)	拉力(N)
20V	76.7	X	X	X
30V	216.7	123.3	X	X
40V	316.7	246.7	116.7	123.3
50V	403.3	316.7	313.3	253.3
100V	543.3	540	540	580
200V	836.7	X	X	X

二、研究二：不同操縱變因下對發射速度的影響

(一)實驗 2-1 研究不同電壓下對發射速度之關係

(1) 實驗步驟:

1.以直流電源供應器對電容器充電，使電容器充電達實驗所需之電壓 100 伏特。

2.切斷直流電源供應器，再打開線圈與電容迴路開關，使電流流經漆包線線圈。

3.鐵棒將隨即射出後，並錄影紀錄其運動過程

4.將影片利用 Tracker 標記鐵棒的運動軌跡，記錄平面座標 x-y 關係。

(2) 實驗結果:

表3、 單位密度 200 圈/cm、長度 2cm，電容充電 100V 的實驗數據(單位:公分)

次數	1		2		3		4		5	
座標位置	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
	-0.04	0.01	-0.01	0.01	-0.07	0.09	0.00	0.00	0.00	0.08
	12.56	-1.80	16.72	-3.91	20.37	-3.23	18.28	-2.91	16.89	-3.64
	26.69	-5.02	34.44	-9.90	37.32	-10.29	37.89	-8.04	32.49	-8.57
	39.88	-9.18	51.16	-16.90	53.45	-16.54	57.51	-14.70	49.22	-15.76
	52.84	-14.28	68.24	-26.35	72.21	-26.42	77.89	-21.37	66.52	-24.81
	67.81	-20.82	87.41	-37.25	X	X	97.64	-30.60	84.38	-35.40

表4、 單位密度 200 圈/cm、長度 2cm，電容充電 200V 的實驗數據(單位:公分

次數	1		2		3		4		5	
座標位置	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
	0.00	-0.06	0.03	0.00	0.00	-0.11	0.07	0.00	-2.40	0.13
	23.45	-2.32	21.85	-3.81	17.56	-2.72	23.52	-1.08	16.33	-0.41
	44.27	-6.29	43.24	-8.65	34.47	-6.71	46.18	-3.66	38.65	-2.50
	65.09	-11.54	64.69	-14.49	52.49	-11.97	68.01	-6.73	60.81	-6.51
	86.06	-17.10	85.58	-21.34	69.23	-17.71	91.52	-11.71	84.89	-10.23
	106.88	-25.05	106.50	-29.41	87.89	-25.36	113.62	-17.46	105.70	-16.36

(二)實驗 2-2：研究固定線圈密度不同線圈長度對發射速度之關係

(1)實驗步驟

1. 同實驗 2-1 的步驟，但更換相同單位密度、不同長度的線圈，對電容充電電壓至 100 伏特。測量 200 匝/cm 長 4cm、200 匝/cm 長 6 公分。錄影並以 tracker 紀錄、繪圖。
2. 改將電容充電至 200 伏特，重複上述步驟，紀錄之。

(2)實驗結果:

表5、在單位密度 200 匝/cm、長度 4cm，電容充電 100V 的實驗數據(單位:cm)

次數	1		2		3		4		5	
座標位置	0.14	0.05	-0.11	0.01	-0.11	0.01	-0.12	0.02	0.04	0.05
	13.73	-3.17	13.47	-1.17	13.47	-1.17	13.34	-2.61	13.56	-2.24
	26.77	-7.61	27.83	-3.62	27.83	-3.62	27.58	-6.62	28.22	-5.12
	41.49	-13.38	42.19	-7.18	42.19	-7.18	40.62	-11.13	42.48	-10.14
	54.15	-20.47	56.55	-11.86	56.55	-11.86	54.56	-17.55	56.14	-15.67
	79.86	-35.92	71.58	-17.98	71.58	-17.98	68.30	-24.77	69.69	-22.19
	X	X	85.05	-25.00	85.05	-25.00	82.83	-33.44	84.46	-30.83

表6、在單位密度 200 匝/cm、長度 4cm，電容充電 200V 的實驗數據(單位:cm)

次數	1		2		3		4		5	
座標位置	-0.05	-0.11	-0.06	-0.09	1.17	1.16	-0.43	-2.72	-0.06	-0.10
	14.43	-2.61	13.12	-3.12	14.35	-1.87	14.05	-5.14	16.03	-2.63
	30.21	-6.09	31.23	-7.11	32.71	-5.86	29.22	-8.51	31.31	-6.23
	44.49	-10.68	45.32	-10.98	46.80	-8.57	43.50	-13.10	44.51	-10.53
	59.52	-16.52	60.12	-18.50	61.60	-16.09	58.53	-18.74	59.64	-16.21
	74.89	-23.82	74.77	-25.40	77.31	-22.53	73.46	-26.04	76.00	-24.30
	90.91	-32.33	91.21	-35.20	93.75	-32.33	88.80	-34.55	89.81	-33.54

表7、在單位密度 200 圈/cm、長度 6cm，電容充電 100V 的實驗數據(單位:cm)

次數	1		2		3		4		5	
座標位置	-0.03	0.14	0.00	0.00	0.17	0.04	-0.05	-0.08	-0.06	0.13
	16.07	-1.89	17.72	-1.32	16.64	-0.79	15.09	-1.82	17.44	-1.88
	31.69	-4.62	37.29	-4.04	33.23	-2.74	30.11	-4.77	37.03	-4.83
	48.43	-8.44	55.36	-7.54	50.63	-5.92	44.95	-8.98	55.96	-9.38
	63.43	-13.87	73.26	-12.72	67.45	-10.28	59.63	-14.15	74.71	-14.42
	78.42	-19.92	93.00	-18.95	83.96	-15.73	73.10	-20.79	92.54	-21.14
	95.17	-27.64	110.72	-26.14	101.88	-22.43	86.14	-28.32	111.59	-28.80

表8、在單位密度 200 匝/cm、長度 6cm，電容充電 200V 的實驗數據(單位:cm)

次數	1		2		3		4		5	
座標位置	-0.04	-0.05	-0.03	0.07	-0.22	0.11	-2.87	-1.12	-0.07	0.07
	17.58	-3.34	23.39	-1.15	18.34	-1.43	15.69	-2.66	22.20	-0.97
	33.29	-7.19	50.72	-3.99	36.79	-3.29	33.81	-4.52	49.31	-4.30
	47.61	-14.70	71.40	-10.77	56.11	-6.92	53.13	-8.78	73.38	-8.39
	63.78	-20.24	99.05	-14.12	73.25	-12.19	70.14	-14.05	96.48	-13.46
	77.07	-28.88			89.50	-17.24	86.39	-19.10	120.80	-20.73

(三)實驗 2-3 研究固定線圈長度不同線圈密度對發射速度之關係

(1)實驗步驟

1. 同實驗 2-1 的步驟，但更換相同長度、不同單位密度的線圈，對電容充電電壓至 100 伏特。量測 250 匝/cm 長 2cm、375 匝/cm 長 2cm、500 匝/cm 長 2cm、750 匝/cm 長 2cm 之線圈。錄影並以 tracker 紀錄、繪圖。
2. 改將電容充電至 200 伏特，重複上述步驟，紀錄之。

(2)實驗結果

表9、 在單位密度 250 匝/cm、長度 2cm，電容充電 100V 的實驗數據(單位:cm)

次數	1		2		3		4		5	
座標位置	0.11	0.11	0.68	0.41	0.02	0.00	-0.07	-0.01	0.00	0.07
	13.31	-1.68	15.54	-2.04	13.84	-2.58	14.13	-2.20	13.97	-1.49
	26.00	-4.68	31.12	-6.24	27.84	-6.46	27.49	-5.56	29.66	-5.16
	39.82	-8.96	46.63	-12.65	41.90	-11.58	41.10	-9.59	45.51	-10.16
	53.19	-14.15	62.51	-18.16	56.07	-17.53	54.46	-15.05	60.90	-15.62
	66.18	-20.68	77.55	-27.21	70.61	-25.49	67.44	-21.69	76.51	-22.94
	79.54	-28.64	93.55	-36.14	85.45	-33.63	82.34	-29.32	92.50	-31.23

表10、 在單位密度 375 匝/cm、長度 2cm，電容充電 100V 的實驗數據(單位:cm)

次數	1		2		3		4		5	
座標位置	0.02	-0.02	-0.24	0.20	0.01	0.03	0.08	-0.07	0.00	0.00
	14.35	-2.17	16.92	-2.74	16.61	-2.33	16.09	-2.50	16.02	-2.97
	29.28	-5.71	35.22	-7.55	32.82	-5.60	32.33	-6.08	32.04	-7.12
	44.50	-10.44	53.71	-13.14	49.02	-10.34	48.11	-10.52	48.24	-12.16
	60.02	-16.21	70.84	-19.62	66.30	-16.41	64.94	-16.55	63.54	-18.21
	75.17	-23.38	88.69	-27.77	82.51	-22.94	81.78	-23.84	80.63	-25.67

表11、 在單位密度 500 匝/cm、長度 2cm，電容充電 100V 的實驗數據(單位:cm)

次數	1		2		3		4		5	
座標位置	0.08	-0.07	-0.01	-0.01	-0.02	0.04	-0.02	-0.03	0.06	-0.06
	16.09	-2.50	15.32	-3.51	15.01	-2.37	14.34	-2.18	13.56	-3.14
	32.33	-6.08	30.21	-7.65	30.36	-5.57	28.36	-5.33	27.19	-7.58
	48.11	-10.52	45.46	-13.24	45.55	-10.03	42.85	-9.82	40.63	-12.97
	64.94	-16.55	60.31	-19.86	61.30	-16.07	56.94	-15.26	53.96	-19.61
	81.78	-23.84	76.44	-27.76	76.91	-22.85	71.90	-22.44	67.64	-27.60

表12、 在單位密度 750 匝/cm、長度 2cm，電容充電 100V 的實驗數據(單位:cm)

次數	1		2		3		4		5	
座標位置	-0.05	0.02	-0.04	0.07	0.07	0.00	-0.06	0.09	-0.01	-0.01
	16.36	-3.50	15.22	-3.35	16.15	-3.17	15.33	-3.61	13.88	-1.63
	32.25	-8.09	30.47	-7.85	32.24	-7.05	31.23	-8.65	27.10	-4.37
	48.66	-13.60	45.73	-13.35	49.04	-12.38	46.96	-14.88	40.76	-8.36
	65.13	-20.39	61.65	-20.86	66.23	-19.14	62.77	-22.36	54.57	-13.30
	82.35	-28.95	77.65	-29.00	83.60	-26.71	78.80	-30.97	68.68	-19.88

三、研究三：以較大的線徑規格 16AWG 重複進行研究二之實驗

(一) 實驗 3-1：以 16AWG 漆包線，研究不同電壓下對發射速度之關係

(1) 實驗步驟

1.以直流電源供應器對電容器充電，使電容器充電達實驗所需之各個不同之電壓(40 伏特、50 伏特、60 伏特、70 伏特、80 伏特、90 伏特、100 伏特、195 伏特)。

2.切斷直流電源供應器，再打開線圈與電容迴路開關，使電流流經漆包線線圈。

3.鐵棒將隨即射出後，以光電閘紀錄鐵棒飛出通過光電閘時間。

(2) 實驗結果

表13、 改變電壓為操作變因，由光電閘測得鐵棒通過時間 (單位：秒)

電壓(伏特)	40	50	60	70	80	90	100	195
時間(秒)	0.0566	0.0416	0.0232	0.0185	0.0173	0.0154	0.0146	0.0069

(二) 實驗 3-2：研究鐵棒發射速度與線圈密度之關係

(1) 實驗步驟：

1.取纏繞 80 圈之漆包線線圈圍發射線圈。以直流電源供應器對電容器充電，使電容器充電達電壓 100 伏特。

2.切斷直流電源供應器，再打開線圈與電容迴路開關，使電流流經漆包線線圈。

3.鐵棒將隨即射出後，以光電閘紀錄鐵棒飛出通過光電閘時間。

4.取不同圈數，改變線圈為 100 圈、120 圈、140 圈、160 圈、180 圈、200 圈之漆包線線圈，重複步驟 1~3，紀錄之。

5.嘗試不同電壓做比較，改變電壓為 120 伏特與 140 伏特，重複步驟 1~4。

(2) 實驗結果

表14、 以圈數為操作變因測量鐵棒通過光電閘時間 (單位：秒)

	80 圈	100 圈	120 圈	140 圈	160 圈	180 圈	200 圈
100V	0.0177	0.0148	0.0132	0.0122	0.0107	0.0105	0.0097
120V	0.0147	0.0125	0.0105	0.0103	0.0092	0.0090	0.0086
140V	0.0130	0.0104	0.0092	0.0090	0.0081	0.0081	0.0075

(三) 實驗 3-3：研究鐵棒發射速度與線圈長度之關係

(1) 實驗步驟:

1.多取一個漆包線與原漆包線平行線圈中央軸串聯，以達到不改變線圈密度、改變線圈長度之目的。

2.以直流電源供應器對電容器充電，使電容器充電達電壓 100 伏特。

3.切斷直流電源供應器，再打開線圈與電容迴路開關，使電流流經漆包線線圈。

4.鐵棒將隨即射出後，以光電閘紀錄鐵棒飛出通過光電閘時間。

5.再以不同電壓，改變電壓為 200 伏特，重複步驟 1~4，紀錄之。

(2) 實驗結果

表15、 以線圈長度為操作變因測量鐵棒通過光電閘時間 (單位：秒)

電壓	一綑漆包線	兩捆漆包線
100 伏特	0.0146	0.0132
200 伏特	0.0069	0.0063

(四) 實驗 3-4：研究鐵棒發射速度與電容個數之關係

(1) 實驗步驟:

1.將一顆電容接上開關與漆包線線圈迴路。

2.以直流電源供應器對電容器充電，使電容器充電達電壓 100 伏特。

3.切斷直流電源供應器，再打開線圈與電容迴路開關，使電流流經漆包線線圈。

4.鐵棒將隨即射出後，以光電閘紀錄鐵棒飛出通過光電閘時間。

5.並聯兩顆及三顆電容，使電容可儲存電荷量增加，重複實驗步驟 1~4。

6.再以不同電壓，改變電壓為 40 至 200 伏特，速度太慢、無法發射則忽略，重複步驟 1~5。

(2) 實驗結果

表16、 以電容數量為操作變因測量鐵棒通過光電閘時間 (單位：秒)

電壓	一顆電容	兩顆電容	三顆電容
40 伏特	X	X	0.0565
50 伏特	X	0.0497	0.0416
60 伏特	X	0.0342	0.0232
70 伏特	X	0.0261	0.0185
80 伏特	X	0.0225	0.0173
90 伏特	0.0429	0.0197	0.0158
100 伏特	0.0358	0.0170	0.0146
120 伏特	0.028	0.0219	X
140 伏特	0.0215	X	X
160 伏特	0.0185	X	X
180 伏特	0.0165	X	X
195 伏特	0.0151	0.0096	0.0069

陸、研究分析與討論

一、 由於鐵棒出線圈後磁力為阻力，造成反向加速度，使得鐵棒射出管口速度並非最大值，因此需要控制線圈通電時間，使鐵棒在射出管口瞬間立即斷電，以最大速度慣性飛出。假設鐵棒在線圈內運動時，先忽略其他阻力僅考慮一開始瞬間最大磁力。且過程中雖為變力，但為器材量測方便，僅以最大磁力計算，其鐵棒通過線圈時間應大於以最大磁力所求得之時間。因此鐵棒加速過程並無阻力，可以穩定發射。根據等加速度公式

$$X = V_0 t + \frac{1}{2} a t^2 = 0 + \frac{1}{2}\frac{F}{m} t^2 \quad , \quad \therefore t = \sqrt{\frac{2mX}{F}}$$

已知鐵棒質量 0.016 公斤，取各線圈長度為 X 與量測所得彈簧力 F 帶入上式，即可得到通電時間。

表17、 相同密度，不同長度通電之時間

	200 匝/cm，長度 2cm		200 匝/cm，長度 4cm	
充電電壓	拉力(N)	時間(s)	拉力(N)	時間(s)
20V	46.7	0.037	X	X
30V	110	0.025	156.7	0.020
40V	140	0.021	240	0.016
50V	190	0.019	328.3	0.014
100V	536.7	0.011	X	X
200V	816.7	0.009	X	X

表18、 不同密度，相同長度通電之時間

	250 匝/cm 長度 2cm	375 匝/cm 長度 4cm	500 匝/cm 長度 4cm	750 匝/cm 長度 6cm
充電電壓	時間(s)	時間(s)	時間(s)	時間(s)
20V	0.029	X	X	X
30V	0.017	0.023	X	X
40V	0.014	0.016	0.024	0.023
50V	0.013	0.014	0.014	0.016
100V	0.011	0.011	0.011	0.011
200V	0.009	X	X	X

二、為方便控制通電時間，利用 Arduino 控制版與繼電器做控制開關。便可精準的設定不同線圈之通電時間，順利量測鐵棒發射後的速度最大值。

將 Arduino 接通電源，將數位接腳 8 孔(黑線)與 GND 孔(白線)接上繼電器線圈(接在繼電器右上與右下，無正負之分)。

繼電器右端綠線與左上端綠線經鱷魚夾串聯連接上發射螺線管線圈迴路中。

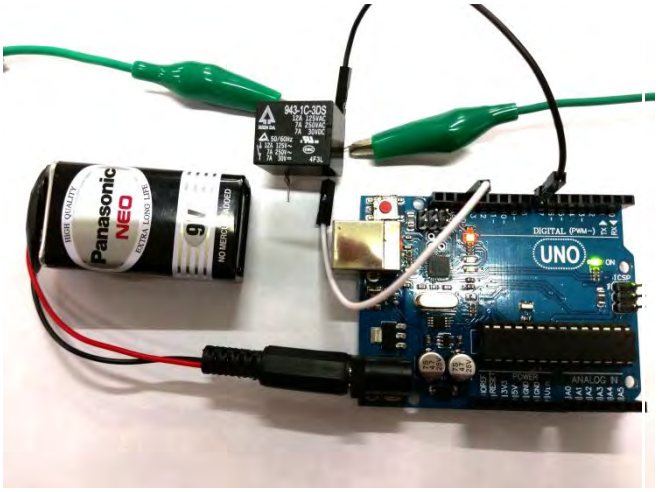


圖3、 Arduino 電路板

利用免費軟體 Arduino IDE 開發環境 1.6.9 版，寫入程式至 Arduino 控制版晶片中。

程式第 11 行：

設定繼電器(Relay)為數位接腳 8

程式第 12 行：

數位接腳 8 為高電位輸出(通電)

程式第 14 行：

控制高電位輸出時間，單位毫秒

程式第 16 行：

數位接腳 8 為低電位輸出(斷電)

程式第 17 行：

結束程式

FlagsBlockSketch

```
1  // Flag's Block 產生的草稿碼
2
3  int Relay;
4
5  // setup() 會先被執行且只會執行一次
6  void setup() {
7  }
8
9  // loop() 裡面的程式會不斷重複執行
10 void loop() {
11   Relay = 8;
12   pinMode(Relay, OUTPUT);
13   digitalWrite(Relay, HIGH);
14   delay(37);
15   pinMode(Relay, OUTPUT);
16   digitalWrite(Relay, LOW);
17   while(true);
18
19 }
```

圖2、 Arduino 程式碼

三、根據研究二所錄製影片，以 tracker 分析所得位置數據，求得各操控變因與發射速度之關係。

(一) 由實驗 2-1 與實驗 2-2，討論改變電壓大小與改變線圈長度之關係如下：

表19、 不同電壓、線圈長度與速度關係

電壓(V)	20	30	40	50	100	200
200/cm 2cm 平均速度(m/s)	153	208	259	330	513	627
200/cm 4cm 平均速度(m/s)	X	110	185	235	433	453
200/cm 6cm 平均速度(m/s)	X	217	282	353	505	600

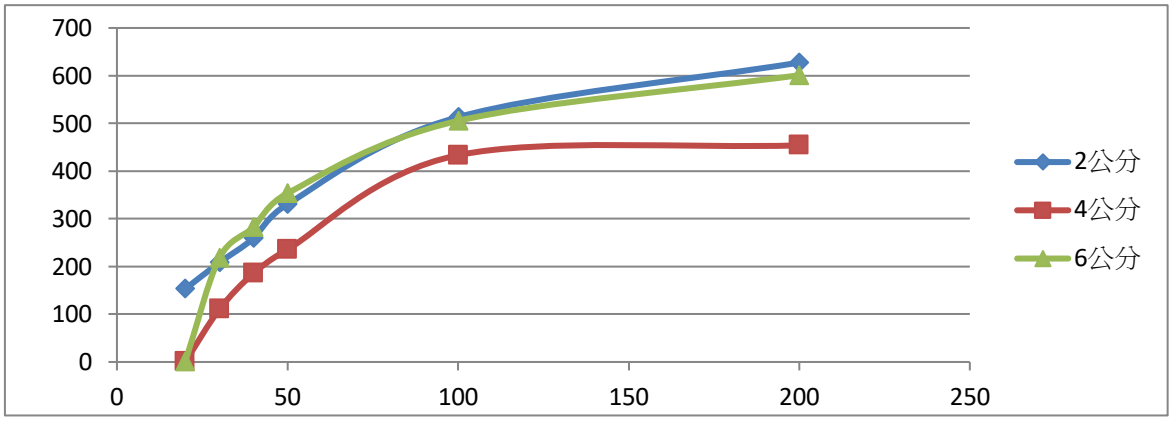


圖4、 不同線圈長度之電壓與速度關係

(二) 由實驗 2-3 可分析固定線圈長度 2 公分但不同線圈密度之電壓與速度關係。

表20、 固定線圈長度但不同線圈密度之電壓與速度關係

充電電壓 100V	200 匝/cm	250 匝/cm	500 匝/cm	750 匝/cm
平均速度(m/s)	513	432	449	469

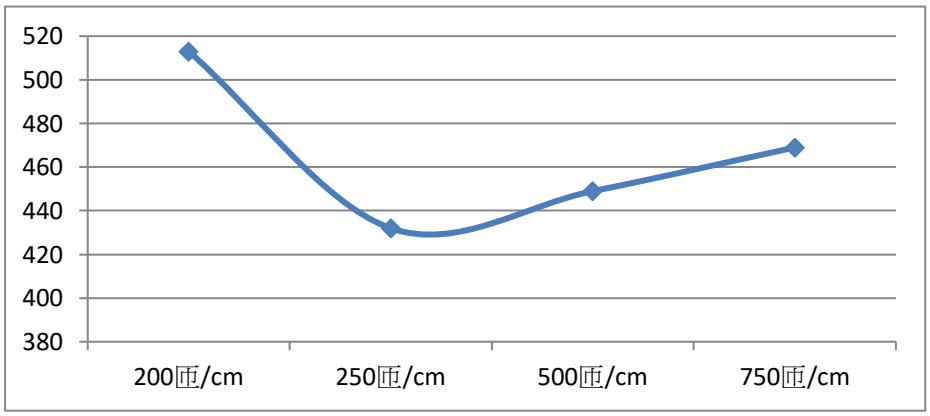


圖5、 改變線圈密度與發射速度之關係圖

(三) 本來將繼續研究改變不同電容數量(450V、4700μF)或不同漆包線線圈線徑(原實驗等等不同操作變因。但量測中發現了很重要的問題－電容並未完全放電完畢！因為以 Arduino 控制了通電時間，從研究一可知其時間約在百分一秒間，在如此短的時間，並無法讓電容完全放電完畢，這也是所得數據並不如預期最主要原因。經討論後，得知不同線徑之漆包線有不一樣的電流上限。當漆包線線徑越大時，可流經之電流上限會增大，亦即能在更短時間內通過電容中所儲存之所有電量。

安全電流：

絕緣體材質 Insulation Materials		LDPE Neoprene PU HDPE	PP HDPE	PVC XLPVC NYLON	KYNAR XLPE TPR	Kapton Teflon Silicone
絕緣體最大適用溫度 (銅之溫度)		80℃	90℃	105℃	125℃	200℃
線徑	30 AWG	2	3	3	3	4
	28 AWG	3	4	4	5	6
	26 AWG	4	5	5	6	7
	24 AWG	6	7	7	8	10
	22 AWG	8	9	10	11	13
	20 AWG	10	12	13	14	17
	18 AWG	15	17	18	20	24
	16 AWG	19	22	24	26	32
	14 AWG	27	30	33	40	45
	12 AWG	36	40	45	50	55
	10 AWG	47	55	58	70	75
	8 AWG	65	70	75	90	100
	6 AWG	95	100	105	125	135
	4 AWG	125	135	145	170	180
	2 AWG	170	180	200	225	240

圖6、 各規格漆包線之安全電流

擷取自 http://www.tskdenko.com.tw/appendix/technicaldata.pdf

由此，我們可以得知，實驗用的漆包線為 24AWG 之規格，就算是最好的絕緣

材料也只能達到 10 安培之大小。

(四) 為了可以更準確的量測實驗，我們決定至電子商場以能購得之最大線徑，重新開始著手實驗。便以 16AWG 重新量測各操作變因對發射速度之影響。

四、在研究三改以就粗線徑之漆包線線圈實驗初期，我們嘗試過 20AWG、18AWG，雖可以發射，且速度較之前塊非常多，但利用測量結果發現鐵棒通過光電閘之時間很不穩定。我們認為這又有可能是漆包線線圈安全電流上限較低，無法讓鐵棒通過瞬間立即完全釋放電容之電量，造成觀察與紀錄上有很大的誤差。於是我們索性以能方便購入的漆包線最大線徑 16AWG，來修正研究二因為電流上限，造成誤差過大不足之處。

(一) 由實驗 3-1 電壓與時間關係紀錄中，從已知的鐵棒長度 10 公分，可求得鐵棒通過光電閘之速度。

表21、 由實驗 3-1 分析電壓與速度關係

電壓(伏特 v)	40	50	60	70	80	90	100	195
速度*(m/s)*	1.77	2.40	4.30	5.41	5.78	6.50	6.85	14.43

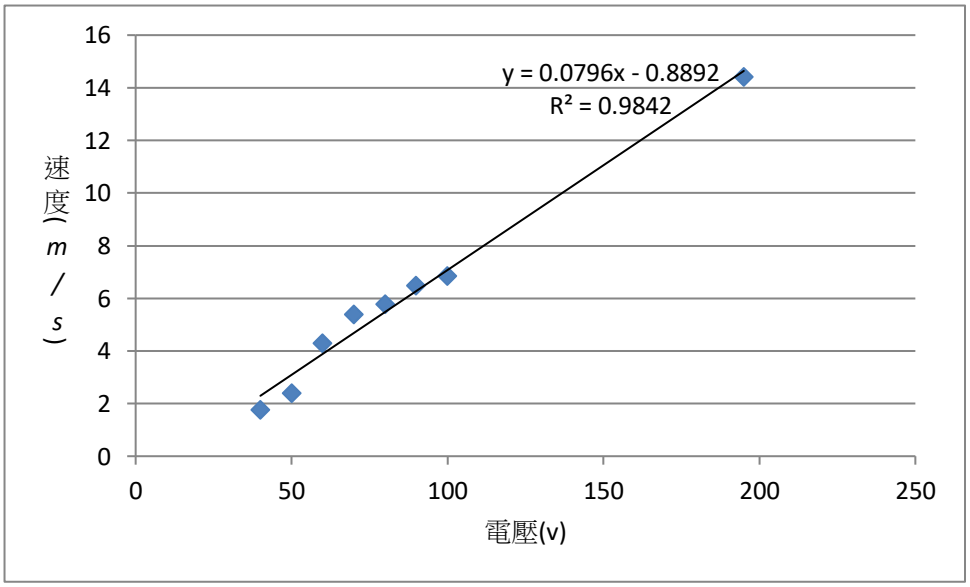


圖7、 實驗 3-1 分析電壓與速度關係圖

雖然礙於一開始器材沒有 100 至 200 伏特之電壓可以對電容充電。由速度與電壓關係圖還是可以清楚看出，鐵棒發射初速與電壓大致上成正比關係。

(二) 由實驗 3-2 中，雖然不知道買來的漆包線線圈纏繞了多少圈，於是我們假設每捆漆包線線圈纏繞圈數為 N，再每次繞出互纏上 10 圈反覆實驗，最後得知原漆包線線圈圈數為 110 圈。為討論方便以下取 80 圈、100 圈、120 圈、140 圈、160 圈、180 圈、200 圈，作為此時驗操作變因。

(1) 電容充電至 100 伏特時，線圈圈數與速度關係。

表22、 電容 100V，漆包線圈數與鐵棒發射速度關係

	80 圈	100 圈	120 圈	140 圈	160 圈	180 圈	200 圈
速度(*m/s*)	5.6497	6.7568	7.5758	8.1967	9.3458	9.5238	10.3093

(2) 電容充電至 120 伏特時，線圈圈數與速度關係。

表23、 電容 120V，漆包線圈數與鐵棒發射速度關係

	80 圈	100 圈	120 圈	140 圈	160 圈	180 圈	200 圈
速度(*m/s*)	6.8027	8.0000	9.5238	9.7087	10.8696	11.1111	11.6279

(3) 電容充電至 140 伏特時，線圈圈數與速度關係。

表24、 電容 140V，漆包線圈數與鐵棒發射速度關係

	80 圈	100 圈	120 圈	140 圈	160 圈	180 圈	200 圈
速度(*m/s*)	7.6923	9.6154	10.8696	11.1111	12.3457	12.3457	13.3333

(4) 將表 22、表 23、表 24 繪成折線圖。

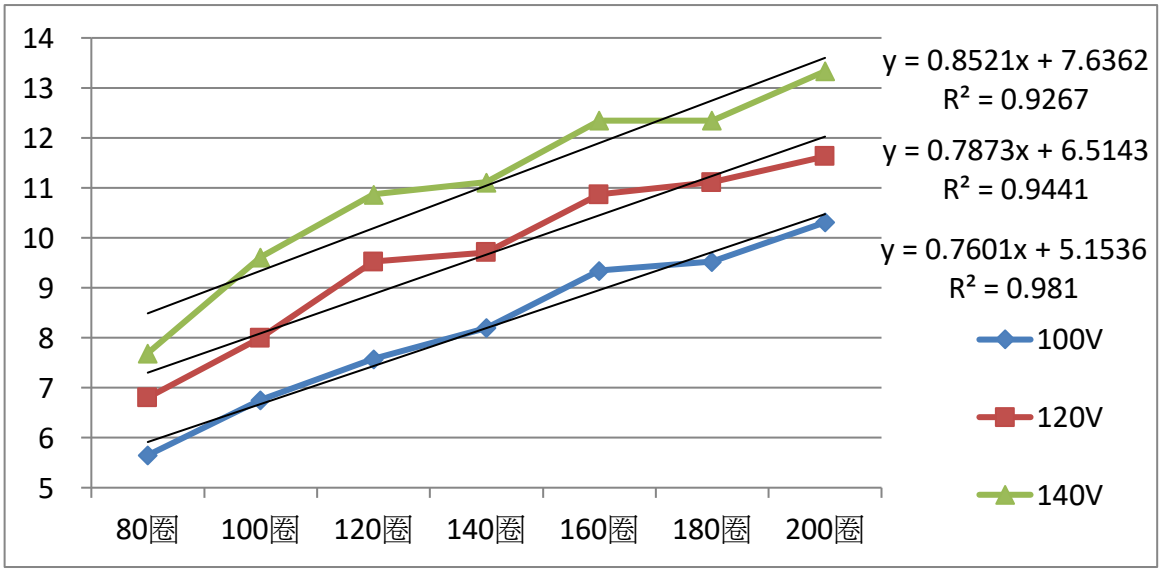


圖8、 漆包線線圈圈數與鐵棒發射初速關係圖

(5) 從圖五可以發現圈數與鐵棒發射初速也呈正相關，當圈數越多時，鐵棒發射速度愈快。另外，我們也比較了電容充電至 120 伏特與 140 伏特的情形。乍看之下，各趨勢線接近平行，雖然斜率有些許差異，但可看出電壓較大者，斜率較大。可以了解相同線圈密度時，電壓直接影響了發射速度，如實驗 3-1 討論相同。

(6) 在深入討論後，若以二次多項式來討論圖 6 之函數圖，應會更貼合區線。因為線圈愈繞其半徑愈大，所造成之磁場對鐵棒影響愈小，因此當繞多圈後，發射速度應該會趨於平緩。

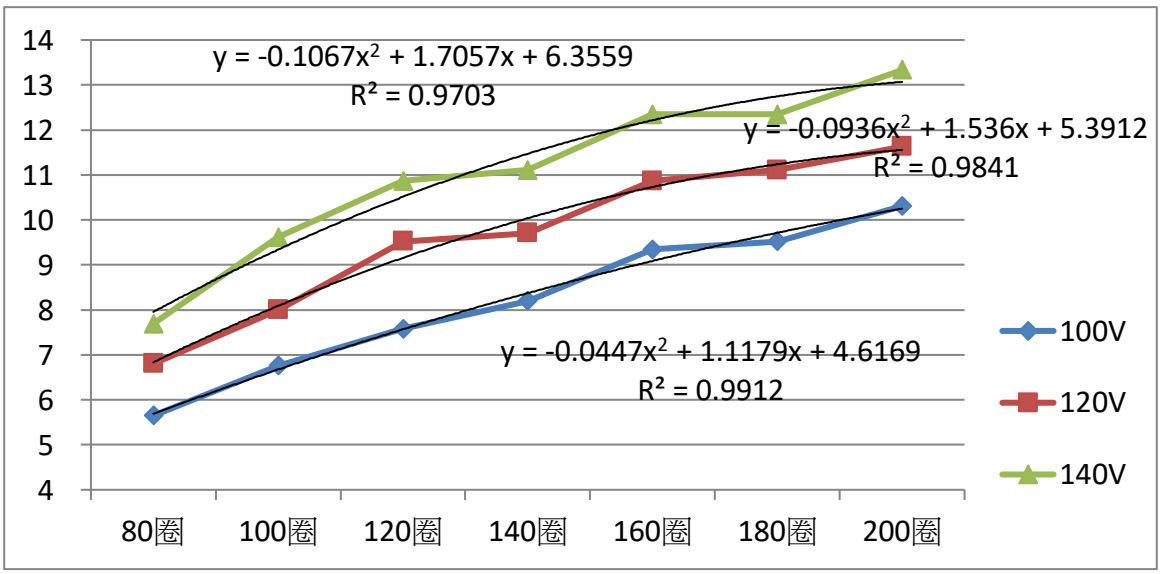


圖9、 以二次多項式為趨勢線做圖 6 之比較

(三) 實驗 3-3 中以相同之漆包線，將平行軸串聯，以固定線圈單位密度而改變線圈長度。在本實驗中，我們總共準備了三個漆包線線圈，打算討論一個、兩個及三個漆包線線圈為操縱變因下，研究發射速度之關係。但串聯第三個漆包線時，鐵棒常常無法穩定發射。因此紀錄上，僅記錄了一個及兩個漆包線線圈之數據。

(1) 分析實驗 3-3 之數據，可以得到發射速度。

表25、 以漆包線線圈長度為操作變因，討論與速度之關係 (單位：*m/s*)

電壓	一綑漆包線	兩捆漆包線
100 伏特	6.85	7.58
200 伏特	14.49	15.87

(2) 將表 25 繪成線圈數量與速度關係圖

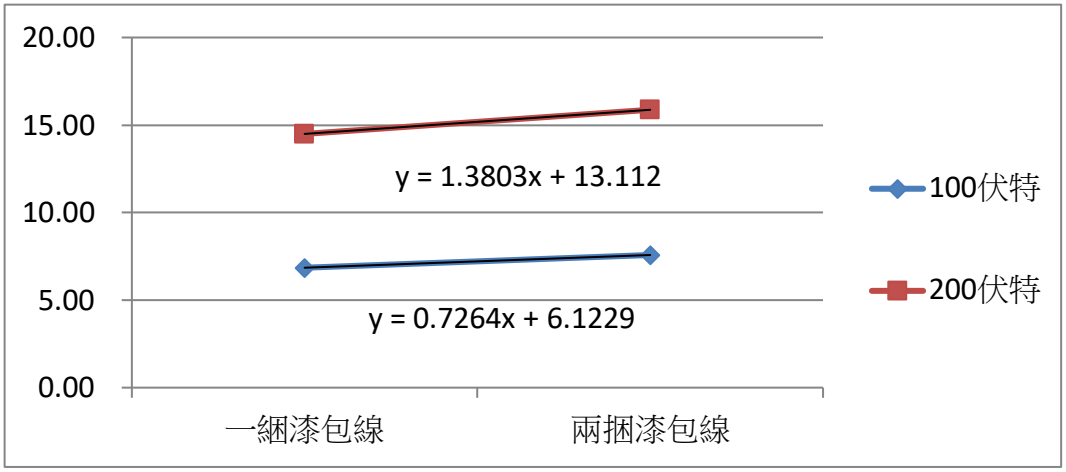


圖10、　漆包線線圈數量與發射速度之關係 (單位：*m/s*)

(3) 在線圈數量數據上雖有些許不足，但還是可以由實驗 3-3 得知鐵棒發射速度與線圈長度正相關。本來在實驗之前，如實驗 3-1 與實驗 3-2，都可如我們預期一般，發射速度隨著電壓與線圈密度增加，均可以有正相關地表現。但根據螺線管磁場公式：

$B = \mu_0 \cdot n \cdot i$，

(μ_0為真空磁導率、n為螺線管單位匝數、i為螺線管流經電流)

實驗 3-3 當線圈長度增加時，電阻應該會加倍，導致電流減半，進而影響線圈所產生生之磁場。較小的磁場對鐵棒所造成之磁力應該有減弱之可能，因為在討論之時，我們認為發射速度有可能會隨著漆包線線圈長度增加而變慢，但事實上，卻依然有速度提升的事實。

(4) 為了確定實驗無誤，我們多加了一組將電容充電至 200 伏特來做為比較。實驗後發現依舊有速度的提升。在繪出漆包線線圈數量與鐵棒發射速度關係圖後，比較其斜率與截距，大約都與電壓成正比關係。

(5) 在線圈數量增加後所得到的分析結果，令我們相當興奮，可惜在規劃好實驗步驟後，為節省成本，線圈都已經拆開繞成各種不同線圈密度，以至於無法嘗試其他電壓來比較各斜率與截距之關係。

(四) 為了較好的實驗品質，我們所使用的電容為工業用450V、4700μF電解電容，但成本考量由二手購入僅購得三顆，所以在實驗 3-3 僅討論三種不同電容數量。

(1) 由實驗 3-3 中，一樣利用光電閘所測得時間可計算出鐵棒發射速度。

表26、 電容數量與發射數度之關係 (單位：*m/s*)

電壓	一顆電容	兩顆電容	三顆電容
40 伏特	X	X	1.77
50 伏特	X	2.01	2.40
60 伏特	X	2.92	4.31
70 伏特	X	3.83	5.41
80 伏特	X	4.44	5.78
90 伏特	2.33	5.08	6.33
100 伏特	2.79	5.88	6.85
120 伏特	3.57	4.57	X
140 伏特	4.65	X	X
160 伏特	5.41	X	X
180 伏特	6.06	X	X
195 伏特	6.62	10.42	14.49

(2) 在實驗進行實，我們本只想討論 100 伏特與 200 伏特(實際上電源供應器所量測電壓為 195 伏特)。一來礙於時間關係，也想試試看有沒有其他變化，所以多量測了數組數據，如表 26 中。打 X 的部分為沒有量測。

(3) 從表 26 中，取 90 伏特、100 伏特、195 伏特來比較線圈數量與發射速度之關係。重新製表並繪成線圈數量與發射速度關係圖。

表27、 整理表 26，取三個電容皆有之數據 (單位：*m/s*)

電壓	一顆電容	兩顆電容	三顆電容
90 伏特	2.33	5.08	6.33
100 伏特	2.79	5.88	6.85
195 伏特	6.62	10.42	14.49

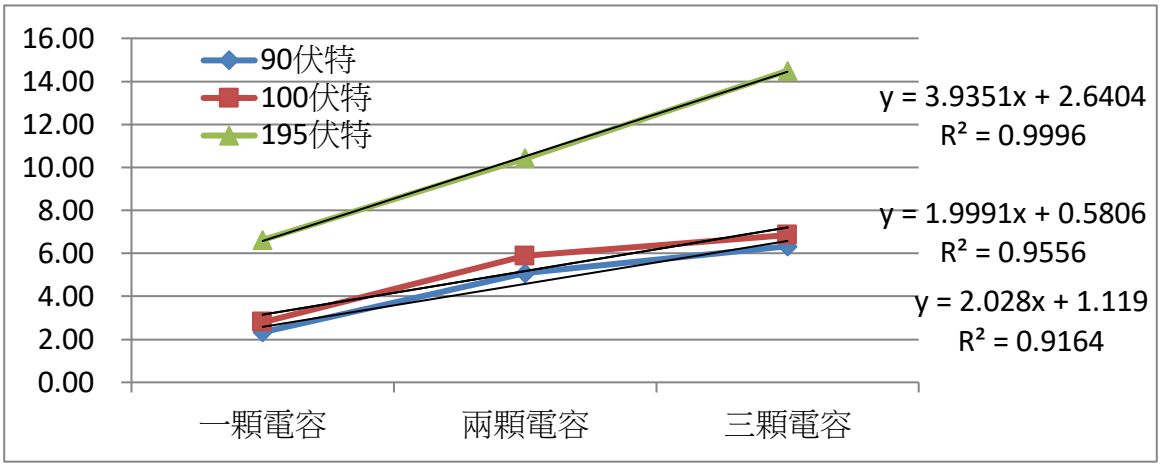


圖11、 實驗 3-3 電容數量與發射速度關係圖

(4) 當電容並聯後，電容容量變大，相同的開路電壓下可儲存更多電量，因此可在短時間內在漆包線線圈內流經更多電量，亦即有更大之電流。可以看到 90 伏特與 100 伏特折線圖很接近且 100 伏特速度較快，可見實驗有一定的可信度。而 195 伏特電壓比另兩個電壓值大一倍也使的斜率也是大約多了一倍。

五、在研究過程中，我們知道電容能量為$\mathrm{E}=\frac{1}{2}CV^2$，發射後鐵棒動能為$\mathrm{K}=\frac{1}{2}mv^2$。根據已知的鐵棒質量 0.016 公斤，取較好量測的三顆電容並聯再連接漆包線線圈迴路討論能量關係。其中三顆電容並聯總電容值為$14100\mu\mathrm{F}$，由實驗數據取其電壓與速度關係討論之。

表28、 電容能量與鐵棒動能關係表

電壓(V)	速度(*m/s*)	電容能量(J)	鐵棒動能(J)	百分比%
40	1.77	11.28	0.03	0.22
50	2.40	17.63	0.05	0.26
60	4.30	25.38	0.15	0.58
70	5.41	34.55	0.23	0.68
80	5.78	45.12	0.27	0.59
90	6.50	57.11	0.34	0.59
100	6.85	70.50	0.38	0.53
195	14.43	268.08	1.67	0.62

從關係表中，其實將電容能量釋放後轉換成鐵棒動能的效益居然連 1%都不到，其餘的能量大多消耗在漆包線上之熱能。在實驗研究初期，未使用無熔絲開關當連接迴路用之開關時，我們曾以導線直接觸碰來當作通電開關之動作。但產生之電弧非常嚇人，常常令我們實驗做的膽戰心驚！產生電弧的同時也發現漆包線常常被炸斷或是過熱瞬間融掉，可見導線上熱能的消耗佔了很大之比例，甚至反覆實驗過後，漆包線線圈也會感受到些許的溫度。

柒、結論

一、根據以上的研究，我們發現了電磁砲的槍口初速與不同變因的關係如下。

(一) 發射速度因為漆包線線徑安全電流上限影響，有很大的限制。當漆包線線徑太小時，即使再高的電壓、再密的線圈、再多的電容等，都無法大幅提升發射速度，甚至可能會將實驗中的鐵棒拉回。只能盡可能地使用線徑較大的漆包線，才能讓發射速度可以有效提升。

(二) 發射速度大致上與電壓大小、線圈密度、電容數量有正相關。至於線圈長度在數據不足情況下無法做出相當結論。

(1) 由各圖中分析斜率可得電容數量影響最鉅，成本也最高，但在經濟許可之下應可無限制擴充，是提升發射速度最有效的辦法。

(2) 接著是電壓影響亦很顯著，但一般市電僅能提供 110 伏特，在考量實驗安全情況下較難有數百倍甚至數千倍之增長。實驗初期曾經購入升壓器升壓至電容電壓上限 450 伏特，卻礙於能量守恆，高電壓低電流之影響供電電流過小，以升壓板對電容充電電壓至 100 伏特以上便無法有效充電，電壓上升速率非常緩慢。

(3) 線圈密度受到圍繞半徑之影響，所繞圈數達一定上限後，提升發射速度效益便不太明顯。

二、未來願景

(一) 研究一開始便希望能以 3D 印表機印出槍管、槍身，製作一把電磁手槍，未來這也將是我們最後的目標之一。

(二) 因為線圈有安全電流上限，因此在未來電磁砲普及化製作上，玩具類型的漆包線線徑可以有效且方便控制，不至於造成過快的發射速度使人受傷。

(三) 在能量比例討論上，由電容能量轉換至鐵棒發射動能連 1%都無法達到，是否有更好的發射方式可以有更高地能源轉換效益。

捌、參考資料

一、Mehdi (2013,January 24) How to Make a Coil Gun 。2017 年 3 月 30 日，取自 http://www.electroboom.com/?p=101

二、instructables (2016, Aug 14) Make Your Own Coilgun 。2017 年 3 月 30 日，取自 http://www.instructables.com/id/Make-Your-Own-Coilgun/

三、吳玉書、師明睿（譯）（2010）費曼物理學講義。台北：天下文化。

四、維基百科。2017 年 3 月 30 日，取自 https://en.wikipedia.org/wiki/Coilgun

五、周青彬（2009）。高中物理應是對策選修物理總整理。高雄：晟景數位文化

【評語】051812

本件作品取材自新聞題材美國海軍發展磁衝砲，進行有系統的探討。以電容放電進行實驗，但是後面的能量分析與實際數據紀錄不完整。學理討論亦嫌不足。

作品海報

摘要

本研究在探討電磁炮射出的鐵棒初速，研究其與電容數量、電壓大小、漆包線線圈長度、線圈密度之關係。利用電容瞬間放電之特性，可使漆包線在極短時間內流經電量，使線圈電流達極大。當電流通過線圈時，根據電流磁效應會產生磁場形成電磁鐵之效果，將鐵棒吸引並射出。量測上以軟體tracker及光電閘兩種不同方法測得時間數據，分析得鐵棒射出初速。

最後得知發射速度因為漆包線線徑安全電流上限影響，有很大的限制。因此討論線圈線徑將可能因達到電流上限無法順利發射。發射速度大致上與電壓大小、線圈密度、電容數量有正相關。改變電容數量與電壓最顯著，改變線圈密度將有可能因纏繞半徑太大而有終端速度產生。

壹、研究動機

有一次在閱讀科學雜誌時，看到美國海軍使用電磁炮作為未來的武器，突然一個念頭想到:是不是可以把電磁炮縮小，改良以線圈射出，並製成一把電磁槍，而剛好這學期開始有專題課，便一心投入研究當中，並尋找與我志同道合的朋友，一開始的前兩個月經歷了許多失敗，使我們有了想要半途而廢的想法，但在老師孜孜不倦鼓勵下，我們終於發現了其中的關鍵。

貳、研究目的

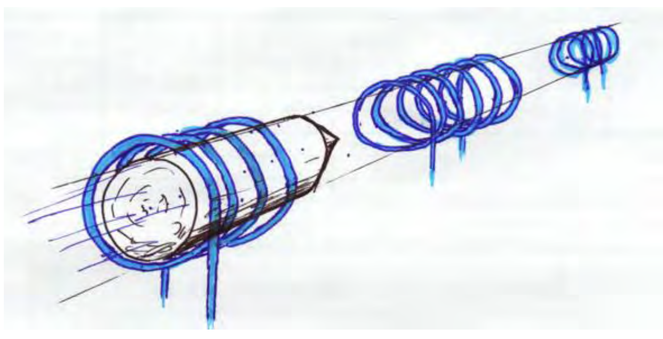
1.研究如何順利發射鐵棒

2.研究鐵棒發射速度與電壓之關係

3.研究鐵棒發射速度與線圈密度之關係

4.研究鐵棒發射速度與線圈長度之關係

5.研究鐵棒發射速度與電容個數之關係



研究如何順利發射鐵棒

↓

研究鐵棒發射速度與電壓之關係

↓

研究鐵棒發射速度與線圈密度之關係

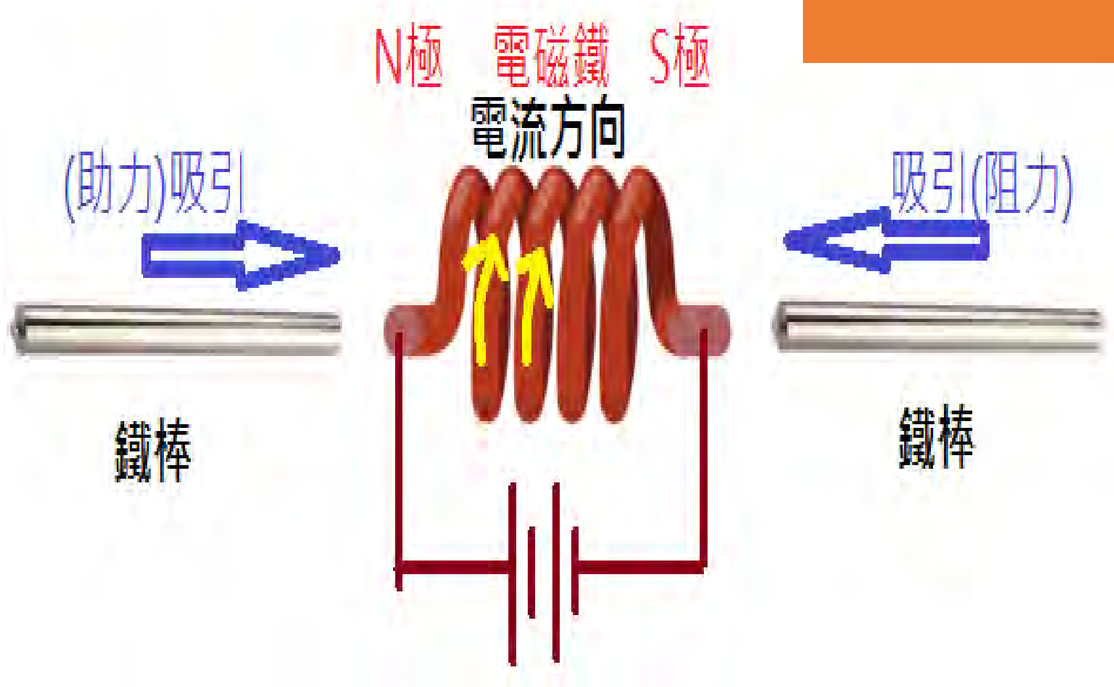
↓

研究鐵棒發射速度與線圈長度之關係

↓

研究鐵棒發射速度與電容個數之關係

參、研究原理



本實驗中，電磁炮是利用電磁力原理來加速彈丸的發射系統；利用電流磁效應，使電流通過由漆包線捲成的線圈產生磁場，並使鐵棒磁化，使其前端產生和線圈後端相反的磁極，進而就被吸入，為了避免鐵棒前端碰到線圈前端相斥，所以必須在鐵棒接近線圈末端前斷電，使線圈失去磁性，如此一來鐵棒就能依原先的動能靠著慣性飛出了。實驗中控制不同的電壓、線圈匝數、通電時間、鐵棒與線圈的距離來找到最完美的射程範圍。

肆、實驗器材

1.電容，450V、4700uF

2.直流電源供應器

3.線圈(一)，200匝/cm，直徑0.4mm

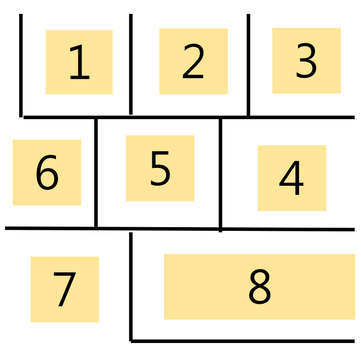
4. Arduino電路板

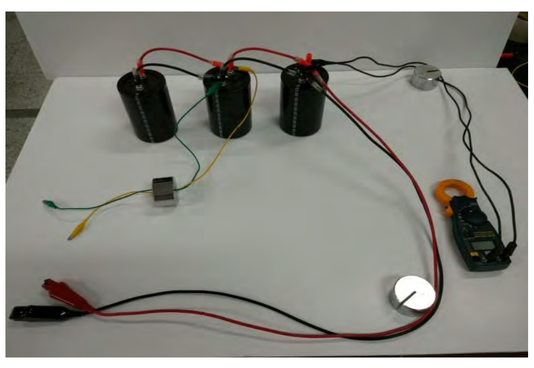
5.線圈(二)，250匝/cm、375匝/cm、500匝/cm、750匝/cm， 直徑0.4mm

6.三用電表

7.線圈(三)，200匝/cm，直徑1.6mm

8.鐵棒





伍、實驗過程與紀錄、研究分析與討論

研究一：討論鐵棒在線圈中的加速時間

在發射過程中，若持續通電是無法將鐵棒射出，因為線圈兩端磁力均會將鐵棒吸引回線圈中，無法順利發射。

為了解決這樣的問題，我們認為如果可以控制發射時 間，使鐵棒恰好達到另一 端時便斷電，則可以完全避免鐵棒射出後被另一端磁場所 造成磁力拉回線圈中， 造成發射速度變慢甚至拉回線圈中之現象。

我們僅量測發射初時的最大拉力，假定為等加速運動通過線圈長度之過程，求得時間，再以Arduino連接繼電器控制線圈通電時間。

實驗步驟：

(1) 利用彈簧秤連接鐵棒，並校正歸零。
(2) 將電容充電至所需電壓(20V、30V、40V、50V、100V、200V)後即斷開外接電源。
(3) 開通電容與線圈迴路開關，使線圈通電，可見鐵棒立即被吸引。
(4) 讀取開通迴路開關瞬間所量測得彈簧秤最大讀數。
(5) 重復以上步驟，不同電壓與不同螺線管各量測20組取其平均拉力並記錄。

討論一：討論鐵棒在線圈中的加速時間

由於鐵棒出線圈後磁力為阻力，造成反向加速度，使得鐵棒射出管口速度並非最大值，因此需要控制線圈通電時間，使鐵棒在射出管口瞬間立即斷電，以最大速度慣性飛出。假設鐵棒在線圈內運動時，先忽略其他阻力僅考慮一開始瞬間最大磁力。且過程中雖為變力，但為器材量測方便，僅以最大磁力計算，其鐵棒通過線圈時間應大於以最大磁力所求得之時間。因此鐵棒加速過程並無阻力，可以穩定發射。

根據等加速度公式

$$X = V_0 t + \frac{1}{2}at^2 = 0 + \frac{1}{2}\frac{F}{m}t^2 \text{ ， } \therefore t = \sqrt{\frac{2mX}{F}}$$

已知鐵棒質量0.016公斤，取各線圈長度為X與量測所得彈簧力F帶入上式，即可得到通電時間。

	200匝/cm，長度2cm		200匝/cm，長度4cm	
充電電壓	拉力(N)	時間(s)	拉力(N)	時間(s)
20V	46.7	0.037	X	X
30V	110	0.025	156.7	0.020
40V	140	0.021	240	0.016
50V	190	0.019	328.3	0.014
100V	536.7	0.011	X	X
200V	816.7	0.009	X	X

	250匝/cm 長度2cm	375匝/cm 長度4cm	500匝/cm 長度4cm	750匝/cm 長度6cm
充電電壓	時間(s)	時間(s)	時間(s)	時間(s)
20V	0.029	X	X	X
30V	0.017	0.023	X	X
40V	0.014	0.016	0.024	0.023
50V	0.013	0.014	0.014	0.016
100V	0.011	0.011	0.011	0.011
200V	0.009	X	X	X

研究二：不同操縱變因下對發射速度的影響

實驗2-1研究不同電壓下對發射速度之關係

實驗步驟:

(1)以直流電源供應器對電容器充電，使電容器充電達實驗所需之電壓100伏特。
(2)切斷直流電源供應器，再打開線圈與電容迴路開關，使電流流經漆包線線圈。
(3)鐵棒將隨即射出後，並錄影紀錄其運動過程
(4)將影片利用Tracker標記鐵棒的運動軌跡，記錄平面座標x-y關係。

次數	1		2		3		4		5	
座標位置	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
	0.00	-0.06	0.03	0.00	0.00	-0.11	0.07	0.00	-2.40	0.13
	23.45	-2.32	21.85	-3.81	17.56	-2.72	23.52	-1.08	16.33	-0.41
	44.27	-6.29	43.24	-8.65	34.47	-6.71	46.18	-3.66	38.65	-2.50
	65.09	-11.54	64.69	-14.49	52.49	-11.97	68.01	-6.73	60.81	-6.51
	86.06	-17.10	85.58	-21.34	69.23	-17.71	91.52	-11.71	84.89	-10.23
	106.88	-25.05	106.50	-29.41	87.89	-25.36	113.62	-17.46	105.70	-16.36

單位密度200圈/cm、長度2cm，電容充電200V的實驗數據(單位:公分)

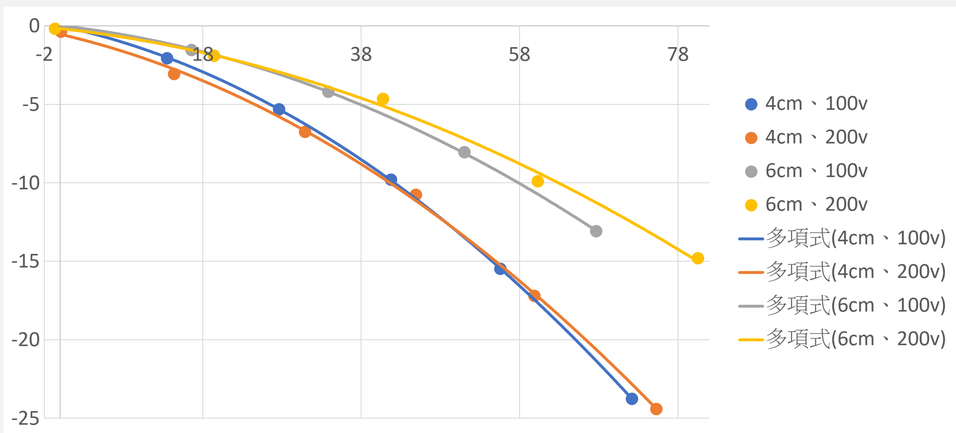
次數	1		2		3		4		5	
座標位置	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
	-0.04	0.01	-0.01	0.01	-0.07	0.09	0.00	0.00	0.00	0.08
	12.56	-1.80	16.72	-3.91	20.37	-3.23	18.28	-2.91	16.89	-3.64
	26.69	-5.02	34.44	-9.90	37.32	-10.29	37.89	-8.04	32.49	-8.57
	39.88	-9.18	51.16	-16.90	53.45	-16.54	57.51	-14.70	49.22	-15.76
	52.84	-14.28	68.24	-26.35	72.21	-26.42	77.89	-21.37	66.52	-24.81
	67.81	-20.82	87.41	-37.25	X	X	97.64	-30.60	84.38	-35.40

單位密度200圈/cm、長度2cm，電容充電100V的實驗數據(單位:公分)

實驗2-2：研究固定線圈密度不同線圈長度對發射速度之關係

實驗步驟:

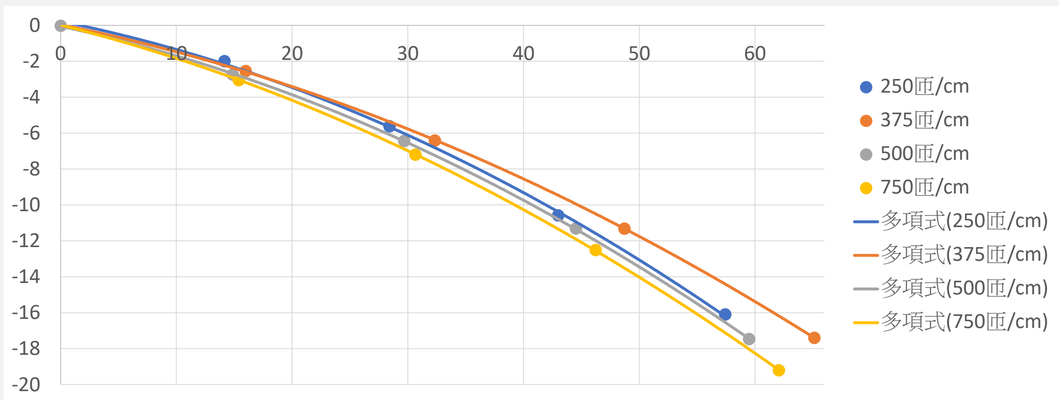
(1) 同實驗2-1的步驟，但更換相同單位密度、不同長度的線圈，對電容 充電 電壓至100伏特。測量200匝/cm長4cm、200匝/cm長6公分。錄影 並以tracker紀錄、繪圖。
(2) 改將電容充電至200伏特，重複上述步驟，紀錄之。



實驗2-3研究固定線圈長度不同線圈密度對發射速度之關係

實驗步驟:

(1) 同實驗2-1的步驟，但更換相同長度、不同單位密度的線圈，對電容充電電壓至100伏特。量測250匝/cm長2cm、375匝/cm長2cm、500匝/cm長2cm、750匝/cm長2cm之線圈。錄影並以tracker紀錄、繪圖。
(2) 改將電容充電至200伏特，重複上述步驟，紀錄之。



討論二：不同操縱變因下對發射速度的影響

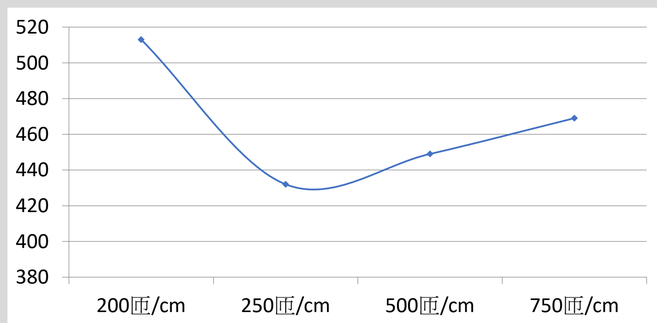
1.根據研究二所錄製影片，以tracker分析所得位置數據，求得各操控變因與發射速度之關係。
2.由實驗2-3可分析固定線圈長度2公分但不同線圈密度之電壓與速度關係。

(一)由實驗2-1與實驗2-2，討論改變電壓大小與改變線圈長度之關係如下：

電壓(V)	20	30	40	50	100	200
200/cm 2cm 平均速度 (m/s)	153	208	259	330	513	627
200/cm 4cm 平均速度 (m/s)	X	110	185	235	433	453
200/cm 6cm 平均速度 (m/s)	X	217	282	353	505	600

不同電壓、線圈長度與速度關係

(二)由實驗2-3可分析固定線圈長度2公分但不同線圈密度之電壓與速度關係。



固定線圈長度但不同線圈密度之電壓與速度關係

本來將繼續研究改變不同電容數量(450V、4700μF)或不同漆包線線圈線徑(原實驗等等不同操作變因。但量測中發現了很重要的問題–電容並未完全放電完畢！因為以Arduino控制了通電時間，從研究一可知其時間約在百分一秒間，在如此短的時間，並無法讓電容完全放電完畢，這也是所得數據並不如預期最主要原因。經討論後，得知不同線徑之漆包線有不一樣的電流上限。當漆包線線徑越大時，可流經之電流上限會增大，亦即能在更短時間內通過電容中所儲存之所有電量。

由此，我們可以得知，實驗用的漆包線為24AWG之規格，就算是最好的絕緣材料也只能達到10安培之大小。

為了可以更準確的量測實驗，我們決定至電子商場以能購得之最大線徑，重新開始著手實驗。便以16AWG重新量測各操作變因對發射速度之影響。

安全電流：

絕緣體材質 Insulation Materials		LDPE Neoprene PU HDPE	PP HDPE	PVC XLPVC NYLON	KYNAR XLPE TPR	Kapton Teflon Silicone
絕緣體最大適用溫度 (銅之溫度)		80℃	90℃	105℃	125℃	200℃
線徑	30 AWG	2	3	3	3	4
	28 AWG	3	4	4	5	6
	26 AWG	4	5	5	6	7
	24 AWG	6	7	7	8	10
	22 AWG	8	9	10	11	13
	20 AWG	10	12	13	14	17
	18 AWG	15	17	18	20	24
	16 AWG	19	22	24	26	32
	14 AWG	27	30	33	40	45
	12 AWG	36	40	45	50	55
	10 AWG	47	55	58	70	75
	8 AWG	65	70	75	90	100
	6 AWG	95	100	105	125	135
	4 AWG	125	135	145	170	180
	2 AWG	170	180	200	225	240

研究三：以較大的線徑規格16AWG重複進行研究二之實驗

實驗3-1：以16AWG漆包線，研究不同電壓下對發射速度之關係

實驗步驟:

(1)以直流電源供應器對電容器充電，使電容器充電達實驗所需之各個不同之電壓(40伏特、50伏特、60伏特、70伏特、80伏特、90伏特、100伏特、195伏特)。
(2)切斷直流電源供應器，再打開線圈與電容迴路開關，使電流流經漆包線線圈。
(3)鐵棒將隨即射出後，以光電閘紀錄鐵棒飛出通過光電閘時間。

電壓(伏特)	40	50	60	70	80	90	100	195
時間(秒)	0.0566	0.0416	0.0232	0.0185	0.0173	0.0154	0.0146	0.0069

實驗3-2：研究鐵棒發射速度與線圈密度之關係

實驗步驟：

(1)取纏繞80圈之漆包線線圈圍發射線圈。以直流電源供應器對電容器充電，使電容器充電達電壓100伏特。
(2)切斷直流電源供應器，再打開線圈與電容迴路開關，使電流流經漆包線線圈。
(3)鐵棒將隨即射出後，以光電閘紀錄鐵棒飛出通過光電閘時間。
(4)取不同圈數，改變線圈為100圈、120圈、140圈、160圈、180圈、200圈之漆包線線圈，重複步驟1~3，紀錄之。
(5)嘗試不同電壓做比較，改變電壓為120伏特與140伏特，重複步驟1~4。

	80圈	100圈	120圈	140圈	160圈	180圈	200圈
100V	0.017	0.0148	0.0132	0.0122	0.0107	0.0105	0.0097
120V	0.014	0.0125	0.0105	0.0103	0.0092	0.0090	0.0086
140V	0.0130	0.0104	0.0092	0.0090	0.0081	0.0081	0.0075

實驗3-3：研究鐵棒發射速度與線圈長度之關係

實驗步驟:

(1)多取一個漆包線與原漆包線平行線圈中央軸串聯，以達到不改變線圈密度、改變線圈長度之目的。
(2)以直流電源供應器對電容器充電，使電容器充電達電壓100伏特。
(3)切斷直流電源供應器，再打開線圈與電容迴路開關，使電流流經漆包線線圈。
(4)鐵棒將隨即射出後，以光電閘紀錄鐵棒飛出通過光電閘時間。
(5)再以不同電壓，改變電壓為200伏特，重複步驟1~4，紀錄之。

電壓	一綑漆包線	兩捆漆包線
100伏特	0.0146	0.0132
200伏特	0.0069	0.0063

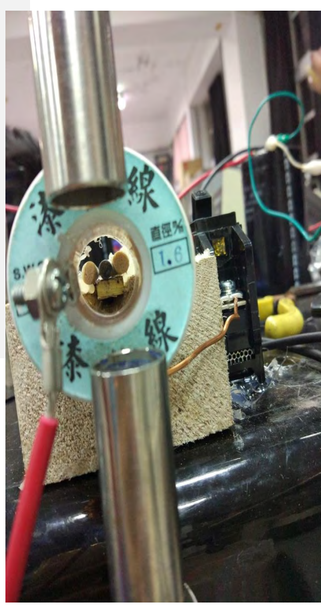
電壓	一顆電容	兩顆電容	三顆電容
40伏特	X	X	0.0565
50伏特	X	0.0497	0.0416
60伏特	X	0.0342	0.0232
70伏特	X	0.0261	0.0185
80伏特	X	0.0225	0.0173
90伏特	0.0429	0.0197	0.0158
100伏特	0.0358	0.0170	0.0146
120伏特	0.028	0.0219	X
140伏特	0.0215	X	X
160伏特	0.0185	X	X
180伏特	0.0165	X	X
195伏特	0.0151	0.0096	0.0069

以電容數量為操作變因測量鐵棒通過光電閘時間 (單位：秒)

實驗3-4：研究鐵棒發射速度與電容個數之關係

實驗步驟:

(1)將一顆電容接上開關與漆包線線圈迴路。
(2)以直流電源供應器對電容器充電，使電容器充電達電壓100伏特。
(3)切斷直流電源供應器，再打開線圈與電容迴路開關，使電流流經漆包線線圈。
(4)鐵棒將隨即射出後，以光電閘紀錄鐵棒飛出通過光電閘時間。
(5)並聯兩顆及三顆電容，使電容可儲存電荷量增加，重複實驗步驟1~4。
(6)再以不同電壓，改變電壓為40至200伏特，速度太慢、無法發射則忽略，重複步驟1~5。



討論三：以較大的線徑規格16AWG重複進行研究二之實驗

在研究三改以就粗線徑之漆包線線圈實驗初期，我們嘗試過20AWG、18AWG，雖可以發射，且速度較之前塊非常多，但利用測量結果發現鐵棒通過光電閘之時間很不穩定。我們認為這又有可能是漆包線線圈安全電流上限較低，無法讓鐵棒通過瞬間立即完全釋放電容之電量，造成觀察與紀錄上有很大的誤差。於是我們索性以能方便購入的漆包線最大線徑16AWG，來修正研究二因為電流上限，造成誤差過大不足之處。

(二)、由實驗3-2中取80圈、100圈、120圈、140圈、160圈、180圈、200圈，作為此實驗操作變因。

	80圈	100圈	120圈	140圈	160圈	180圈	200圈
速度(m/s)	5.6497	6.7568	7.5758	8.1967	9.3458	9.5238	10.3093

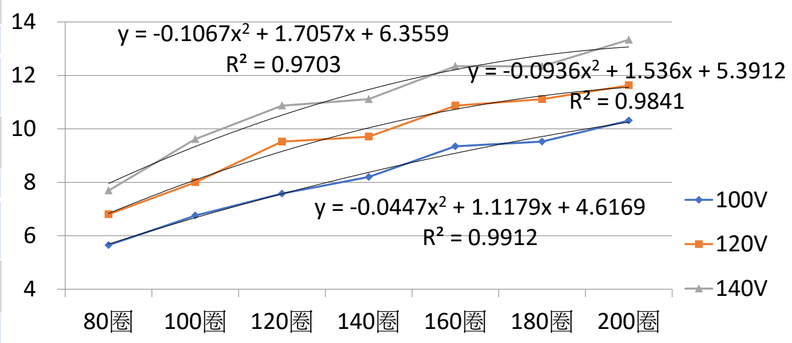
(1)電容100V，漆包線圈數與鐵棒發射速度關係

	80圈	100圈	120圈	140圈	160圈	180圈	200圈
速度(m/s)	6.8027	8.0000	9.5238	9.7087	10.8696	11.1111	11.6279

(2)電容120V，漆包線圈數與鐵棒發射速度關係

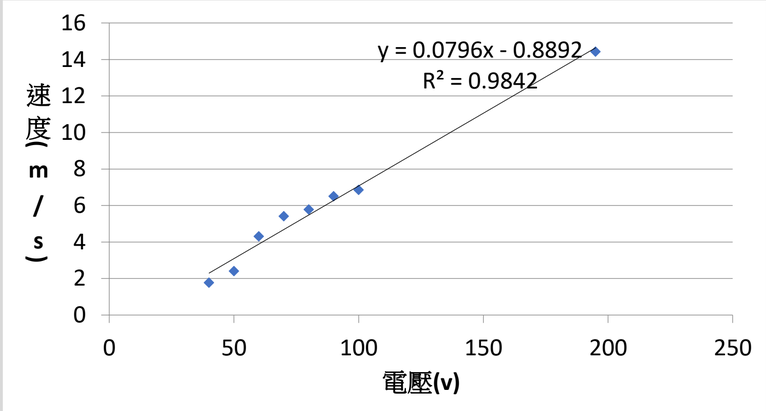
	80圈	100圈	120圈	140圈	160圈	180圈	200圈
速度(m/s)	7.6923	9.6154	10.8696	11.1111	12.3457	12.3457	13.3333

(3)電容140V，漆包線圈數與鐵棒發射速度關係

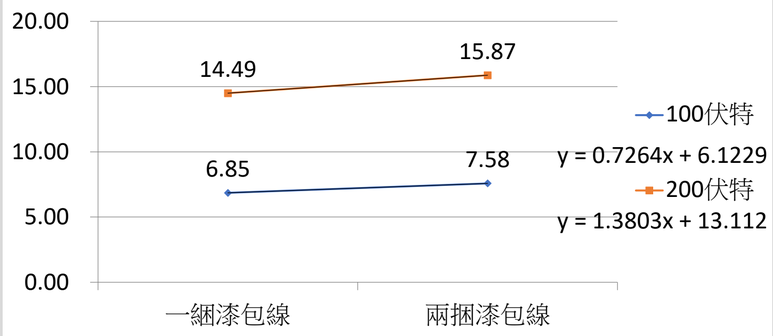


(一)、由實驗3-1電壓與時間關係紀錄中，從已知的鐵棒長度10公分，可求得鐵棒通過光電閘之速度。

雖然礙於一開始器材沒有100至200伏特之電壓可以對電容充電。由速度與電壓關係圖還是可以清楚看出，鐵棒發射初速與電壓大致上成正比關係。



(三)、實驗3-3中以相同之漆包線，將平行軸串聯，以固定線圈單位密度而改變線圈長度。記錄了一個及兩個漆包線線圈之數據。



在線圈數量數據上雖有些許不足，但還是可以由實驗3-3得知鐵棒發射速度與線圈長度正相關。本來在實驗之前，如實驗3-1與實驗3-2，都可如我們預期一般，發射速度隨著電壓與線圈密度增加，均可以有正相關地表現。

但根據螺線管磁場公式：

$$B = \mu_0 \cdot n \cdot i，$$

(μ_0為真空磁導率、n為螺線管單位匝數、i為螺線管流經電流)

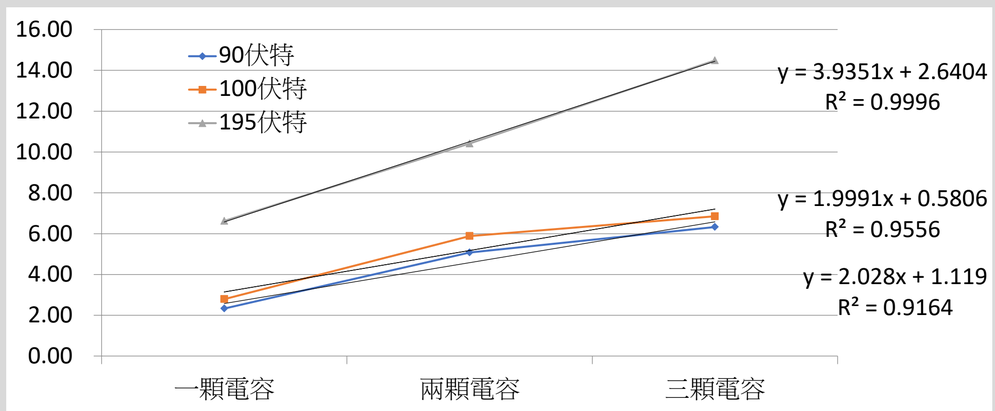
實驗3-3當線圈長度增加時，電阻應該會加倍，導致電流減半，進而影響線圈所產生生之磁場。較小的磁場對鐵棒所造成之磁力應該有減弱之可能，因為在討論之時，我們認為發射速度有可能會隨著漆包線線圈長度增加而變慢，但事實上，卻依然有速度提升的事實。

(4) 為了確定實驗無誤，我們多加了一組將電容充電至200伏特來做為比較。實驗後發現依舊有速度的提升。在繪出漆包線線圈數量與鐵棒發射速度關係圖後，比較其斜率與截距，大約都與電壓成正比關係。

(5) 在線圈數量增加後所得到的分析結果，令我們相當興奮，可惜在規劃好實驗步驟後，為節省成本，線圈都已經拆開繞成各種不同線圈密度，以至於無法嘗試其他電壓來比較各斜率與截距之關係。

(四)由實驗3-4中，一樣利用光電閘所測得時間可計算出鐵棒發射速度。

從右表中，取90伏特、100伏特、195伏特來比較線圈數量與發射速度之關係。重新製表並繪成線圈數量與發射速度關係圖。



當電容並聯後，電容容量變大，相同的開路電壓下可儲存更多電量，因此可在短時間內在漆包線線圈內流經更多電量，亦即有更大之電流。可以看到90伏特與100伏特折線圖很接近且100伏特速度較快，可見實驗有一定的可信度。而195伏特電壓比另兩個電壓值大一倍也使的斜率也是大約多了一倍。

電壓	一顆電容	兩顆電容	三顆電容
40伏特	X	X	1.77
50伏特	X	2.01	2.40
60伏特	X	2.92	4.31
70伏特	X	3.83	5.41
80伏特	X	4.44	5.78
90伏特	2.33	5.08	6.33
100伏特	2.79	5.88	6.85
120伏特	3.57	4.57	X
140伏特	4.65	X	X
160伏特	5.41	X	X
180伏特	6.06	X	X
195伏特	6.62	10.42	14.49

電容數量與發射數度之關係 (單位：m/s)

(五)、在研究過程中，我們知道電容能量為$E = \frac{1}{2}CV^2$，發射後鐵棒動能為$K = \frac{1}{2}mv^2$。根據已知的鐵棒質量0.016公斤，取較好量測的三顆電容並聯再連接漆包線線圈迴路討論能量關係。其中三顆電容並聯總電容值為14100μF，由實驗數據取其電壓與速度關係討論之。

電壓(V)	速度(m/s)	電容能量(J)	鐵棒動能(J)	百分比(%)
40	1.77	11.28	0.03	0.22
50	2.40	17.63	0.05	0.26
60	4.30	25.38	0.15	0.58
70	5.41	34.55	0.23	0.68
80	5.78	45.12	0.27	0.59
90	6.50	57.11	0.34	0.59
100	6.85	70.50	0.38	0.53
195	14.43	268.08	1.67	0.62

陸、結論

一、根據以上的研究，我們發現了電磁砲的槍口初速與不同變因的關係如下。

(一)發射速度因為漆包線線徑安全電流上限影響，有很大的限制。當漆包線線徑太小時，即使再高的電壓、再密的線圈、再多的電容等，都無法大幅提升發射速度，甚至可能會將實驗中的鐵棒拉回。只能盡可能地使用線徑較大的漆包線，才能讓發射速度可以有效提升。

(二)發射速度大致上與電壓大小、線圈密度、電容數量有正相關。至於線圈長度在數據不足情況下無法做出相當結論。

(1)由各圖中分析斜率可得電容數量影響最鉅，成本也最高，但在經濟許可之下若可無限制擴充，是提升發射速度最有效的辦法。

(2)接著是電壓影響亦很顯著，但一般市電僅能提供110伏特，在考量實驗安全情況下較難有數百倍甚至數千倍之增長。實驗初期曾經購入升壓器升壓至電容電壓上限450伏特，卻礙於能量守恆，高電壓低電流之影響供電電流過小，以升壓板對電容充電電壓至100伏特以上便無法有效充電，電壓上升速率非常緩慢。

(3)線圈密度受到圍繞半徑之影響，所繞圈數達一定上限後，提升發射速度效益便不太明顯。

二、未來願景

(一)研究一開始便希望能以3D印表機印出槍管、槍身，製作一把電磁手槍， 未來這也將是我們最後的目標之一。

(二)因為線圈有安全電流上限，因此在未來電磁砲普及化製作上，玩具類型的漆包線線徑可以有效且方便控制，不至於造成過快的發射速度使人受傷。

(三)在能量比例討論上，由電容能量轉換至鐵棒發射動能連1%都無法達到， 是否有更好的發射方式可以有更高地能源轉換效益。