

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 物理科

團隊合作獎

030105

你可以再瞄準一點—旋轉火箭

學校名稱：臺中市立四育國民中學

作者： 國二 蔡承達 國二 蔡承霖 國二 陳侑志	指導老師： 周志偉 黃淳敏
---	-----------------------------

關鍵詞：牛頓第三運動定律、轉動、流體力學

摘要：

我們把尾翼黏成有偏折角度，想試試火箭會怎麼飛行。結果火箭如同我們預期一邊旋轉一邊飛行，但距離卻沒有變近。於是我們先做出**最佳發射角度 43°**。然後我們以 43° 跟不同的打氣磅數作實驗發現：1.尾翼偏折角度在 10°~15° 會是旋轉最穩定且飛行距離最遠的角度。2.我們利用 Tracker 軟體來分析空氣火箭的飛行軌跡、及速度、加速度。3.我們再利用自製儀器測量空氣火箭在不同磅數時衝力有多大。4.我們利用電動打氣機與風速計測量空氣火箭在不同磅數時噴出空氣的時間與風速為多少。5.最後我們自製風洞、模擬空氣火箭在空氣中的旋轉狀態，利用超慢速錄影看見空氣是如何通過旋轉火箭，最後發現旋轉火箭就跟槍管膛線是一樣的功用。

壹、研究動機：

上學期老師帶我們去參加臺中市科學創意競賽(空氣火箭比賽)，我們獲得全臺中市第二名，這也讓我們打開對空氣火箭的興趣。而且因為我們以前是羽球隊的，也在去年拿下全臺中市運動會男子雙打第四名。我們在打羽球的時候，發現羽球飛行時總是會一直旋轉，所以我們就一直在想如果能讓空氣火箭也一直旋轉呢？(因為當時在空氣火箭比賽時，所有的隊伍都是把尾翼黏的又對稱、又直、又平順.....但也因此，有很多隊伍的火箭都是因為飛出跑道外而被取消資格，不然其實距離都是夠遠的。)這樣會跟羽球一樣飛的又高又遠嗎？或是根本就只會一直旋轉而飛不遠呢？還是會因為旋轉而讓空氣火箭轉彎呢？各式各樣的想法充斥在我們的腦海中，於是我們就跑去找老師討論。老師就說：不然我們就一起來當成科展來做做看吧，你們敢挑戰嗎？雖然我們一開始有點猶豫跟害怕，但最後還是鼓起勇氣的跟老師說：好，我們要做。於是我們就開始做這個『旋轉空氣火箭的研究了！』

貳、研究目的：

- 一、做出正常空氣火箭的最佳發射角度(尾翼三角形)。
- 二、做出正常空氣火箭的最佳發射角度(尾翼梯形)。
- 三、做出打氣磅數與距離的公式(尾翼三角形)
- 四、做出打氣磅數與距離的公式(尾翼梯形)
- 五、做出旋轉空氣火箭在不同尾翼偏折角度下的飛行距離(尾翼三角形)。
- 六、做出旋轉空氣火箭在不同尾翼偏折角度下的飛行距離(尾翼梯形)。
- 七、做出旋轉空氣火箭(非光滑表面)在不同尾翼偏折角度下的飛行距離(尾翼三角形)。
- 八、做出旋轉空氣火箭(非光滑表面)在不同尾翼偏折角度下的飛行距離(尾翼梯形)。
- 九、比較正常火箭以及旋轉火箭的穩定度以及落地分布圖。

十、利用 Tracker 軟體分析旋轉空氣火箭的軌跡、速度、加速度(由此可驗證是否與後面實驗一致)。

















十一、我們利用自製器材並用超慢速錄影，測量出空氣火箭的衝力。

十二、我們利用學校的電動打氣機測量出空氣火箭在各磅數時噴出氣體的時間以及利用風速計測量風速。

十三、利用風扇、乾冰跟煙霧與自製機械模擬旋轉火箭與空氣的碰撞情形。

十四、利用風扇與乾冰跟煙霧與自製機械模擬旋轉火箭(非光滑表面)與空氣的碰撞情形。

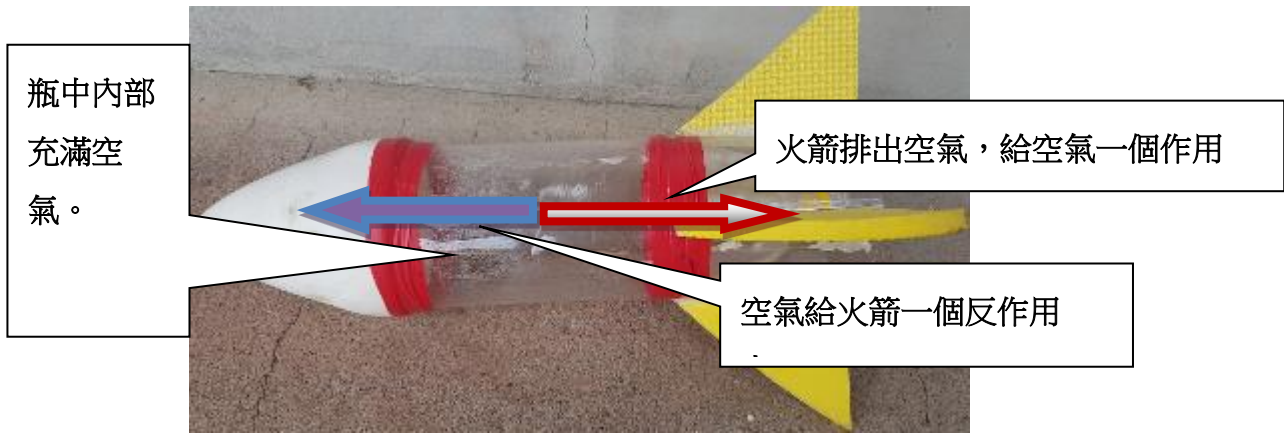
參、研究設備以及器材：

			
風速計可測溫度 °C 與風速 m/s	滾輪尺(最小單位 0.1m)	打氣筒附有壓力計 (我們用 psi 單位)	空氣火箭發射器
			
電動打氣機(單位： PSI)	瓶身光滑的空氣火箭	瓶身不光滑的空氣火 箭	用來做尾翼的 EVA 地 墊
			
空氣火箭的彈頭	電子磅秤可調整準 要測量的準度。	自製觀測空氣火箭撞 風容器	自製空氣火箭旋轉機 器
			
筆電	電風扇	iPad(支援超慢速錄影 480FPS)	乾冰

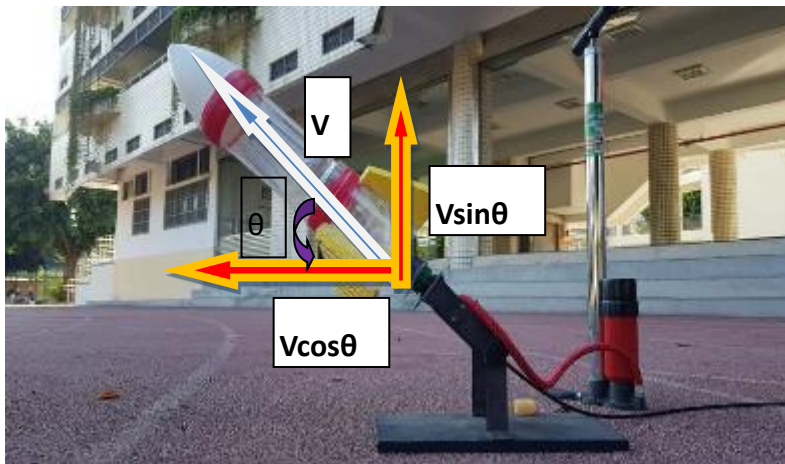
肆、研究過程或方法：

先備知識：

(壹)、牛頓第三運動定律：作用力與反作用力定律



(貳)、斜向拋射運動：



我們可以用 $V\cos\theta t =$ 飛行的水平距離
來求出空氣火箭的平均速率為多少。

(參)、白努力方程式原理：

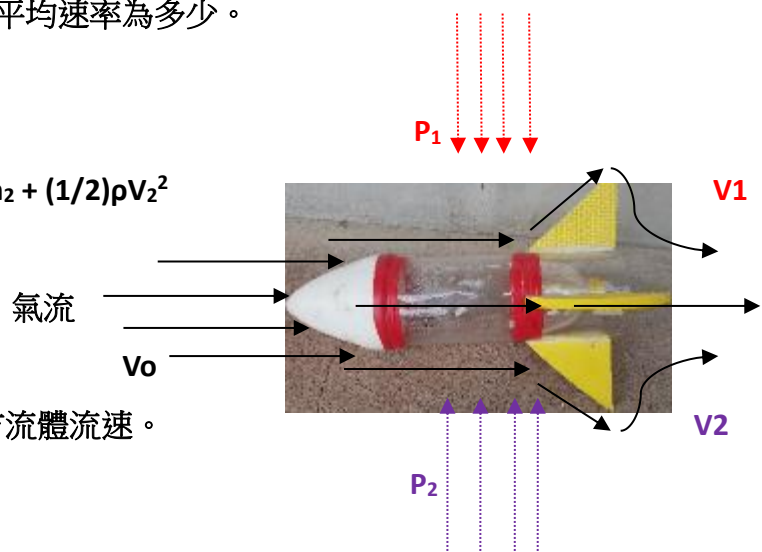
$$P_1 + \rho gh_1 + (1/2)\rho V_1^2 = P_2 + \rho gh_2 + (1/2)\rho V_2^2$$

P_1 ：上方壓力， P_2 ：下方壓力

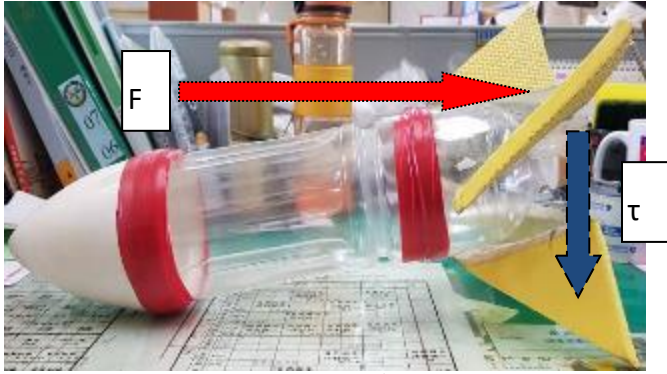
h_2-h_1 =空氣火箭高度差。

ρ ：流體密度

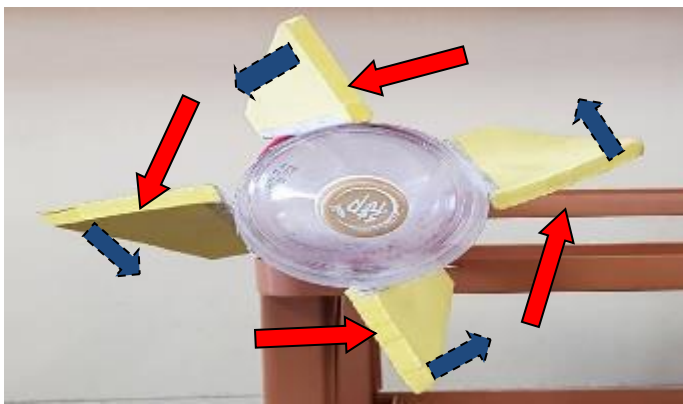
V_1 ：上方流體流速、 V_2 ：下方流體流速。



(肆)、力矩與轉動： $\tau = F \times r$ (此為外積，因為兩者皆為向量。)



風給尾翼一個力，這個力會造成此尾翼向下方轉動的力矩；我們換個角度來看。



從這個角度看更清楚可以發現風的阻力撞擊在尾翼上反而讓空氣火箭開始旋轉，而且不但沒有不穩定反而更穩定。

(伍)、子彈的飛行與膛線：

子彈的飛行就是以一直旋轉劃開前方空氣，而達到讓飛行更穩定以及更遠的目的，而槍管膛線的製作就是以此為目的。膛線（英語：Rifling，又譯作來福線，[來福槍](#)即來自此名字）是現代炮管及槍管的管膛內壁上被鍛刻加工出的呈螺旋狀分布的凹凸槽，可使子彈在發射時沿著膛線作縱軸旋轉，產生[陀螺儀](#)效應穩定彈道，因而能更精確的射向目標。



(陸)、如何測量距離：最後因為火箭落地時會彈跳，所以我們就全部改到沙坑量測。



先利用捲尺拉一條直線，再利用滾輪尺測距離，若兩者不相同再取平均值。

一、找出最佳的發射角度：風速：1.60m/s，氣溫：28.70°C

控制變因：尾翼三角形(邊長 8cm、10cm、12cm)、尾翼四片、打氣磅數 50psi、寶

特瓶身：光滑面，重量：__117.00__g。(以下每個數據皆為做 20 次的平均值)

發射角度	30°	40°	45°	50°	55°	60°	43°
距離(m)	20.00	20.45	20.89	20.15	19.50	18.8	22.05

由上面的表格可以知道，在發射角度 **43°** 的情況下，可以射出的距離最遠。

二、找出最佳的發射角度：風速：1.70m/s，氣溫：27.90°C

控制變因：尾翼梯形(上底 2cm、6cm、10cm)、尾翼四片、打氣磅數 50psi、寶特

瓶身：光滑面，重量：__117.00__g。(以下每個數據皆為做 20 次的平均值)

發射角度	30°	40°	45°	50°	55°	60°	43°
距離(m)	20.10	20.52	20.88	20.45	20.50	19.8	22.15

由上面的表格可以知道，在發射角度 **43°** 的情況下，可以射出的距離最遠。

三、做出打氣磅數與距離的公式(尾翼為三角形)：風速：1.80m/s，氣溫：28.40°C

控制變因：尾翼三角形(邊長 8cm、10cm、12cm)、尾翼四片、發射角度：43°、寶

特瓶身：光滑面，重量：__117.00__g。(以下每個數據皆為做 20 次的平均值)

打氣磅數 psi	10	20	30	40	50	60	70	80	90
距離(m)	2.85	7.03	9.15	18.56	22.05	26.33	33.17	37.46	44.45

註：打氣打到 **90psi** 以上寶特瓶會爆開，故就不在繼續往上加壓力了，以免危險。

四、做出打氣磅數與距離的公式(尾翼為三角形)：風速：1.80m/s，氣溫：28.00°C

控制變因：尾翼梯形(上底 2cm、6cm、10cm)、尾翼四片、發射角度：43°、

寶特瓶身：光滑面，重量：__117.00__g。(以下每個數據皆為做 20 次的平均值)

打氣磅數 psi	10	20	30	40	50	60	70	80	90
距離(m)	3.00	7.48	11.20	19.75	21.15	26.10	31.48	35.20	42.20

五、討論旋轉火箭在不同偏折角度下的距離(也有與正常火箭的比較)：風速：1.60m/s，氣

溫：28.50°C 控制變因：尾翼三角形(邊長 8cm、10cm、12cm)、尾翼四片、發射角度：43°、

寶特瓶身：光滑面，重量：__117.00__g。(以下每個數據皆為做 20 次的平均值)

打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
10	距離(m)	3.25	3.00	3.78	3.95	3.15
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
20	距離(m)	7.88	7.55	8.56	8.98	7.70
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
30	距離(m)	11.85	11.60	12.37	13.54	11.66
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
40	距離(m)	19.90	19.90	22.05	24.05	19.85
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
50	距離(m)	22.05	23.20	24.95	27.89	23.45
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
60	距離(m)	27.20	27.00	27.95	28.90	26.15
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
70	距離(m)	32.58	33.22	36.85	39.90	33.15
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
80	距離(m)	37.65	37.58	39.87	43.77	37.55
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
90	距離(m)	45.10	44.61	47.82	50.93	44.55

六、討論旋轉火箭在不同偏折角度下的距離(也有與正常火箭的比較)：風速：1.8m/s，氣溫：

27.90°C 控制變因：尾翼梯形(上底 2cm、6cm、10cm)、尾翼四片、發射角度：43°、寶特瓶

身：光滑面，重量：__117.00__g。(以下每個數據皆為做 20 次的平均值)

打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
10	距離(m)	3.34	3.10	4.96	5.85	3.10
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
20	距離(m)	7.90	7.54	9.89	11.58	7.71
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
30	距離(m)	12.25	11.60	13.87	15.77	11.56
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
40	距離(m)	19.98	19.36	22.95	25.90	19.80
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
50	距離(m)	22.15	21.60	24.00	26.84	21.75
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
60	距離(m)	23.50	23.05	24.98	28.05	23.10
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
70	距離(m)	32.00	31.58	35.02	37.00	31.60
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
80	距離(m)	37.85	35.50	39.64	44.10	35.45
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
90	距離(m)	44.75	42.90	46.40	49.20	42.88

七、討論旋轉火箭(非光滑面)在不同偏折角度下的距離(也有與正常火箭的比較)：風速：

1.70m/s，氣溫：28.50°C 控制變因：尾翼三角形(邊長 8cm、10cm、12cm)、尾翼四片、發射

角度：43°、寶特瓶身：非光滑面，重量：__139.10__g。(以下每個數據皆為做 20 次的平均值)

打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
10	距離(m)	3.10	2.90	3.54	3.18	2.83
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
20	距離(m)	7.85	7.54	10.54	9.08	7.38
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
30	距離(m)	11.00	9.60	12.63	11.10	9.50
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20

40	距離(m)	20.50	18.85	21.40	20.00	18.45
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
50	距離(m)	24.00	22.30	25.45	23.35	22.10
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
60	距離(m)	28.50	26.58	29.95	27.98	26.35
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
70	距離(m)	35.65	33.23	36.50	35.40	33.10
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
80	距離(m)	39.85	37.53	41.00	39.50	37.30
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
90	距離(m)	47.80	44.60	49.95	47.88	44.46

八、討論旋轉火箭(非光滑面)在不同偏折角度下的距離(也有與正常火箭的比較)：風速：

1.80m/s，氣溫：**28.00°C** 控制變因：尾翼梯形(上底 2cm、6cm、10cm)、尾翼四片、發射角

度：**43°**、寶特瓶身：非光滑面，重量：139.10g。(以下每個數據皆為做 **20** 次的平均值)

打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
10	距離(m)	3.50	3.05	4.87	4.25	3.00
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
20	距離(m)	8.10	7.56	9.75	8.30	7.40
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
30	距離(m)	12.40	11.56	14.70	13.50	11.50
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
40	距離(m)	21.35	19.99	24.88	23.20	19.65
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
50	距離(m)	22.88	21.35	25.99	24.65	21.05
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
60	距離(m)	28.65	26.33	32.43	29.78	25.55
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
70	距離(m)	33.66	31.98	35.50	33.80	31.60
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20

80	距離(m)	37.55	35.98	39.60	37.56	35.80
打氣磅數 psi	尾翼偏折角度	0	5	10	15	20
90	距離(m)	43.40	42.34	46.45	44.60	42.25

九、比較正常火箭以及旋轉火箭的穩定度以及落地分布圖：

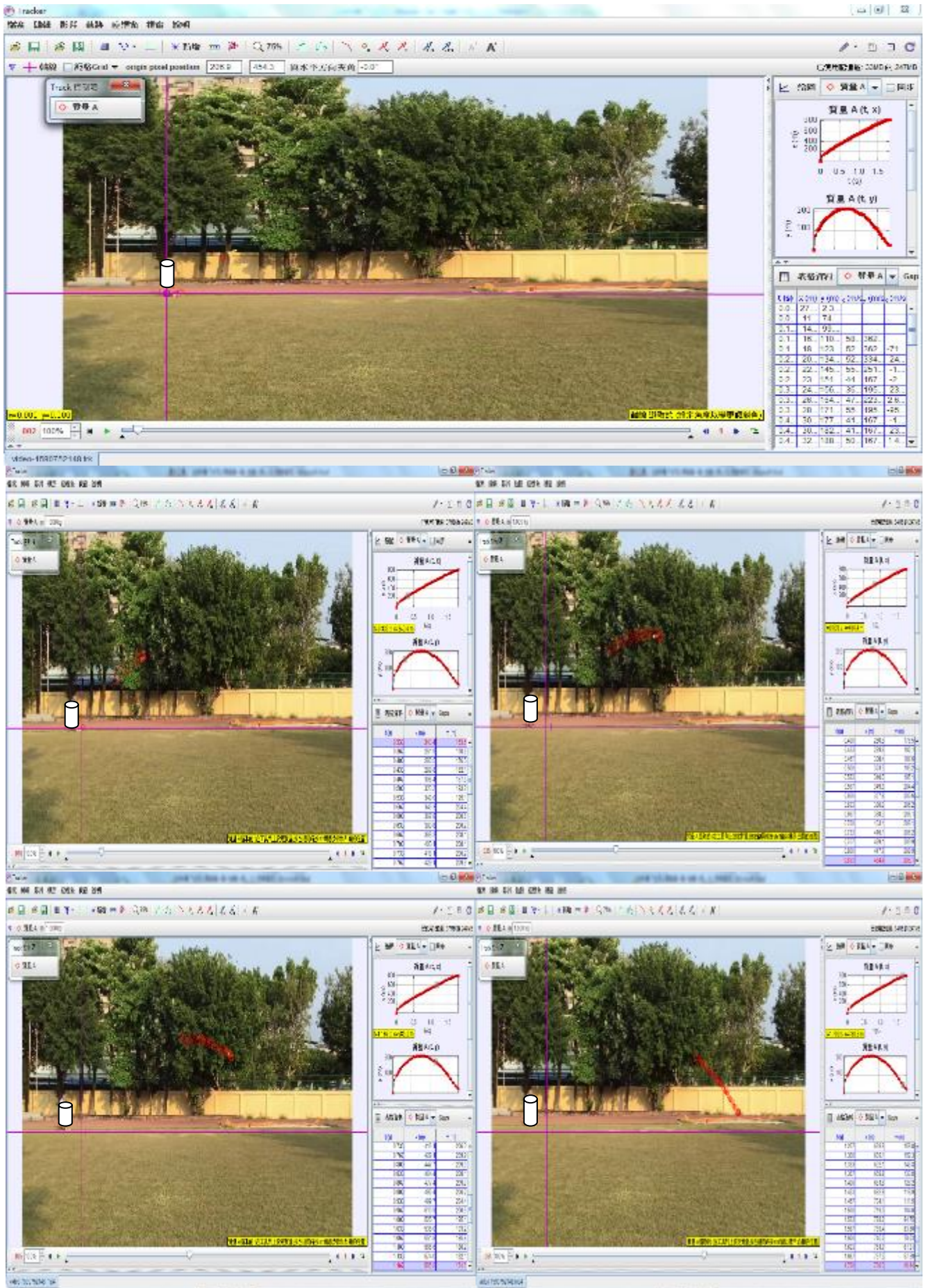


利用沙坑看落地的『形狀』以及分布的地點。



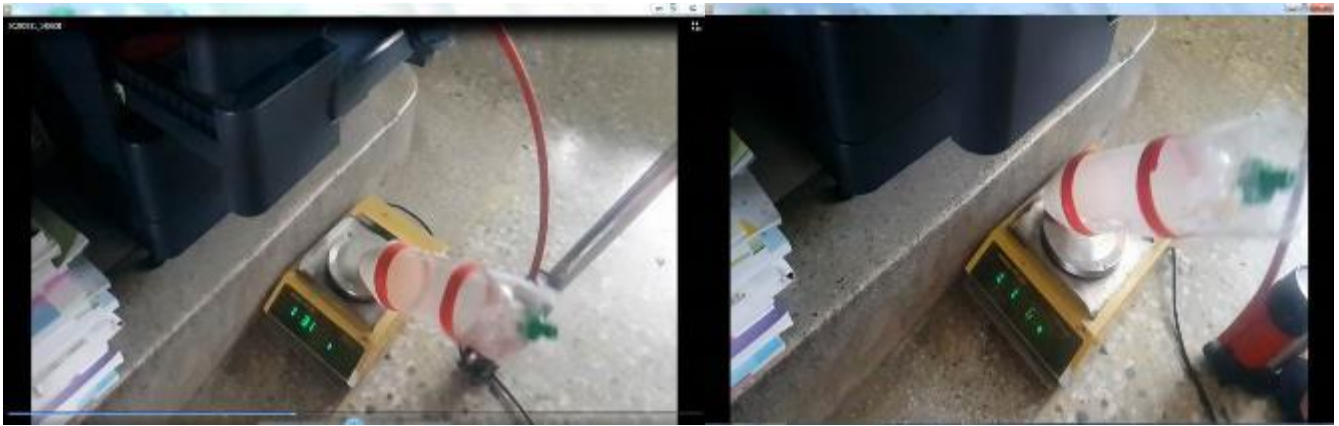
正常的空氣火箭常常因為飛行不穩定導致飛出沙坑外。

十、利用 Tracker 軟體分析旋轉空氣火箭的軌跡、速度、加速度(由此可驗證是否與後面實驗一致)



十一、我們利用自製器材並用超慢速錄影，測量出空氣火箭的衝力：





以上為直放式測空氣火箭衝力(一樣是做 20 次取平均值)。

十二、我們利用學校的電動打氣機測量出空氣火箭在各磅數時噴出氣體的時間以及利用風速計測量風速：



十三、利用電風扇製造風阻，分別利用煙霧跟乾冰造成的白煙來觀察：



(一)旋轉火箭(光滑面)、尾翼三角形、尾翼偏折角度 15 度：



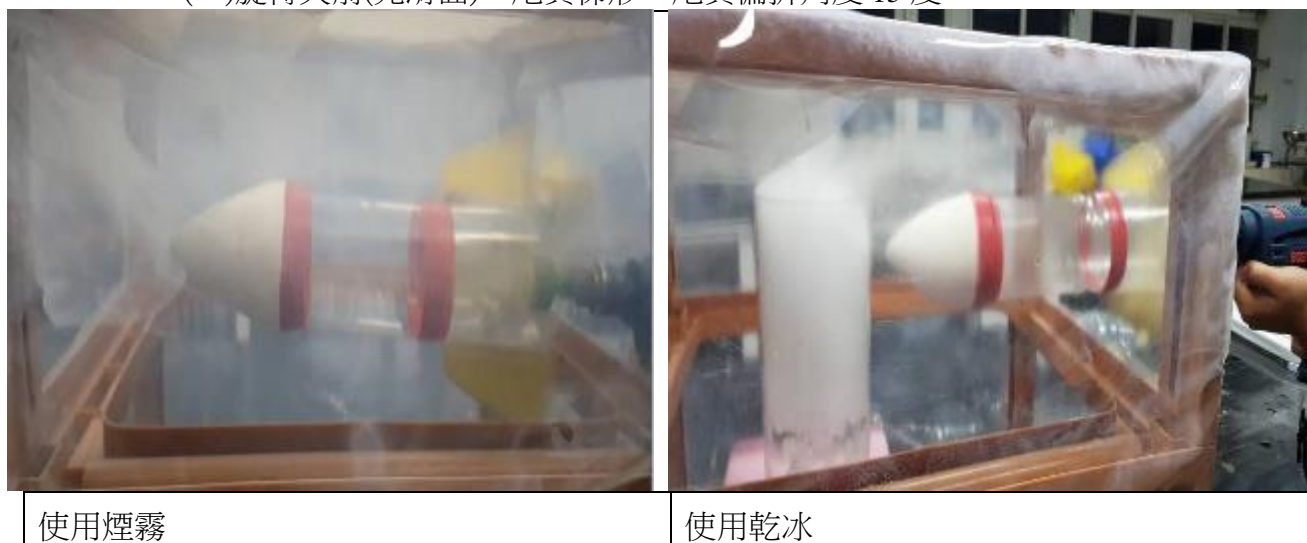
旋轉時皆可以看到彈頭前面會有空氣稀薄區近乎沒有煙霧跟白煙，而煙霧跟白煙會非常順的由中間以非常快的速率通過然後被排出到尾翼正後面區域。

我們可以看下面的影片：

使用煙霧 <https://www.youtube.com/watch?v=rvY1Mf0RY9c>

使用乾冰 <https://www.youtube.com/watch?v=CH4qizFCEJE>

(二)旋轉火箭(光滑面)、尾翼梯形、尾翼偏折角度 15 度：



梯形旋轉時會比較晃動有可能是要讓梯形完全對稱是比較困難的，而煙霧跟白煙仍然會非常順的由中間以非常快的速率通過然後被排出到尾翼正後面區域。

我們可以看下面的影片：

使用煙霧 <https://www.youtube.com/watch?v=x-XHNbtdjPA>

使用乾冰 <https://www.youtube.com/watch?v=8Vpt0lav5ig>

十四、利用風扇與乾冰跟煙霧與自製機械模擬旋轉火箭(非光滑表面)與空氣的碰撞情形：

(一)旋轉火箭(非光滑面)、尾翼三角形、尾翼偏折角度 10 度：



旋轉時皆可以看到彈頭前面會有空氣稀薄區近乎沒有煙霧跟白煙，而煙霧跟白煙會非常順的由中間以非常快的速率通過然後被排出到尾翼正後面區域。

我們可以看下面的影片：

使用煙霧 <https://www.youtube.com/watch?v=8atmL1BveWE>

使用乾冰 <https://www.youtube.com/watch?v=kjUXeRu7mI8>

(二)旋轉火箭(非光滑面)、尾翼梯形、尾翼偏折角度 10 度：



旋轉時皆可以看到彈頭前面會有空氣稀薄區近乎沒有煙霧跟白煙，而煙霧跟白煙會非常順的由中間以非常快的速率通過然後被排出到尾翼正後面區域。

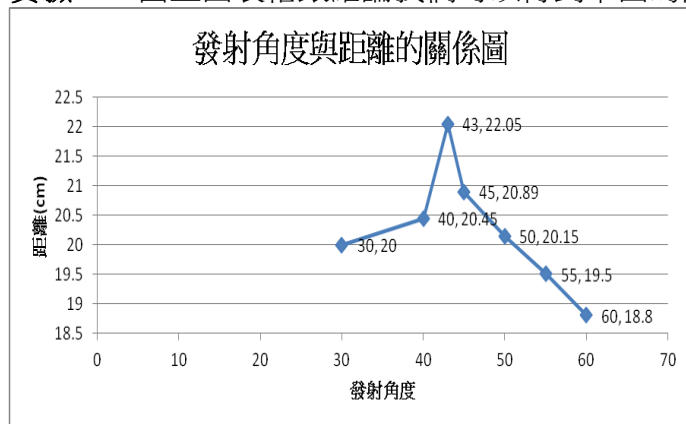
我們可以看下面的影片：

使用煙霧 <https://www.youtube.com/watch?v=8atmL1BveWE&feature=youtu.be>

使用乾冰 https://www.youtube.com/watch?v=kB_BCI4OF-o

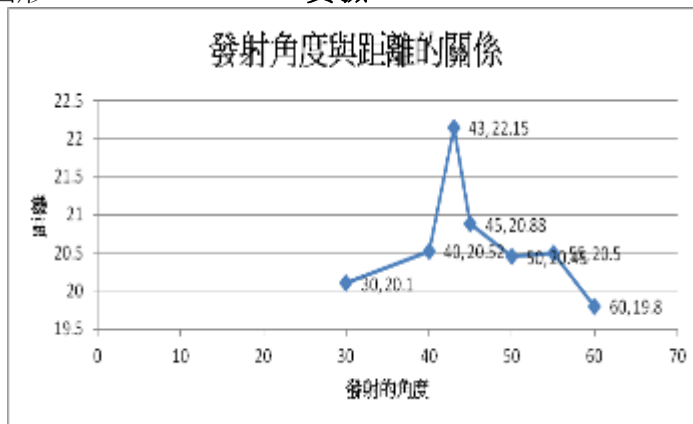
伍、研究結果

實驗一、由上面表格跟結論我們可以得到下面的圖形：



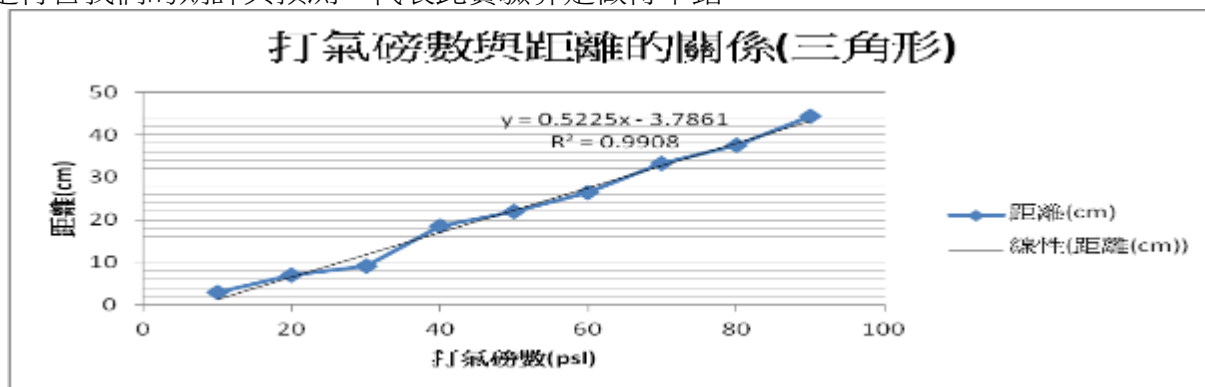
由上面的圖形我們可以知道在 43° 時空氣火箭飛行最遠，並非一般認為的 45° 。

實驗二

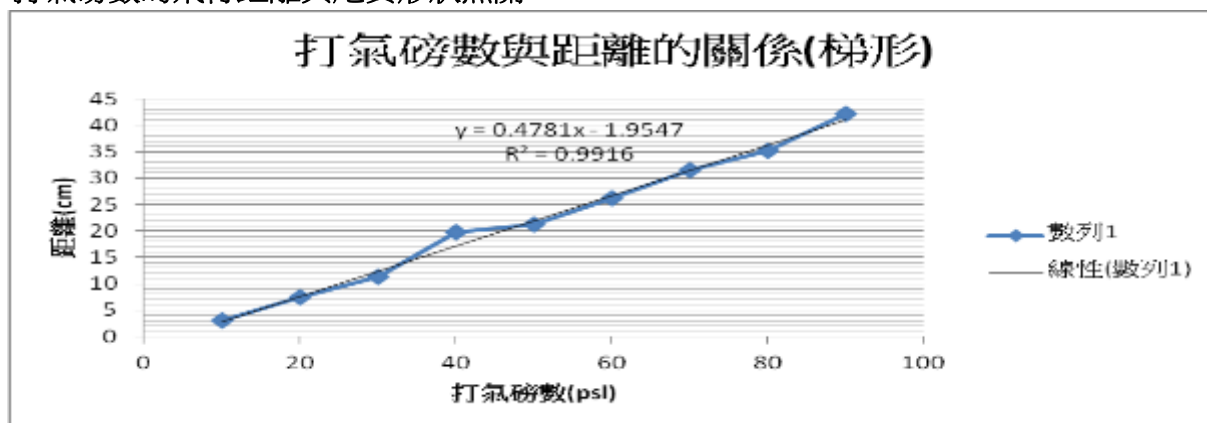


由上面的圖形我們可以知道在 43° 時空氣火箭飛行最遠，跟尾翼為三角形一樣，證明在尾翼沒有偏折的情況下，發射角度跟尾翼形狀無關。

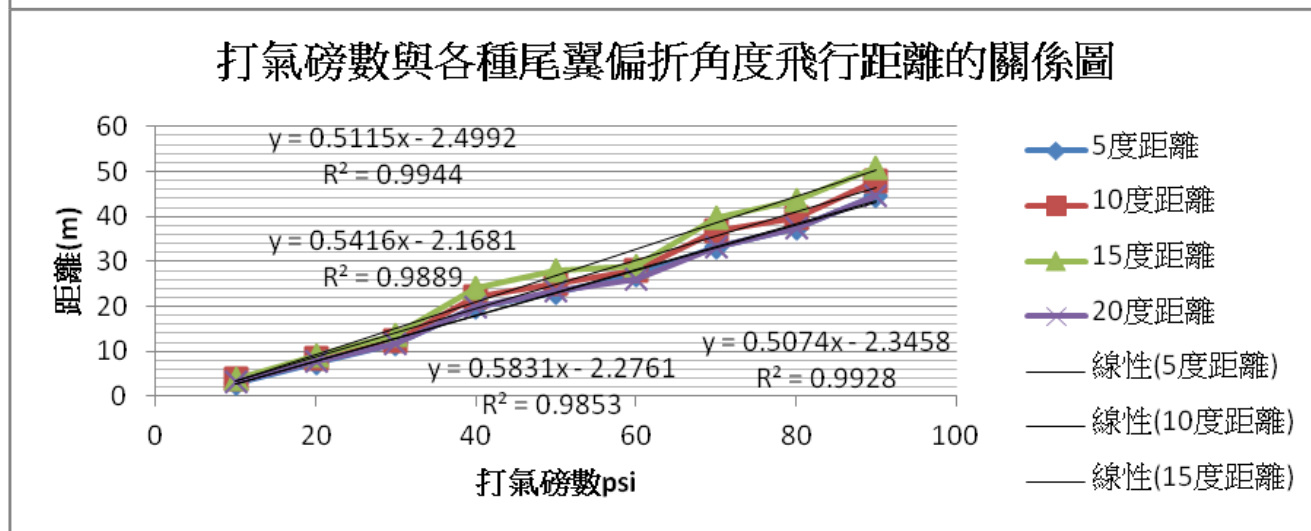
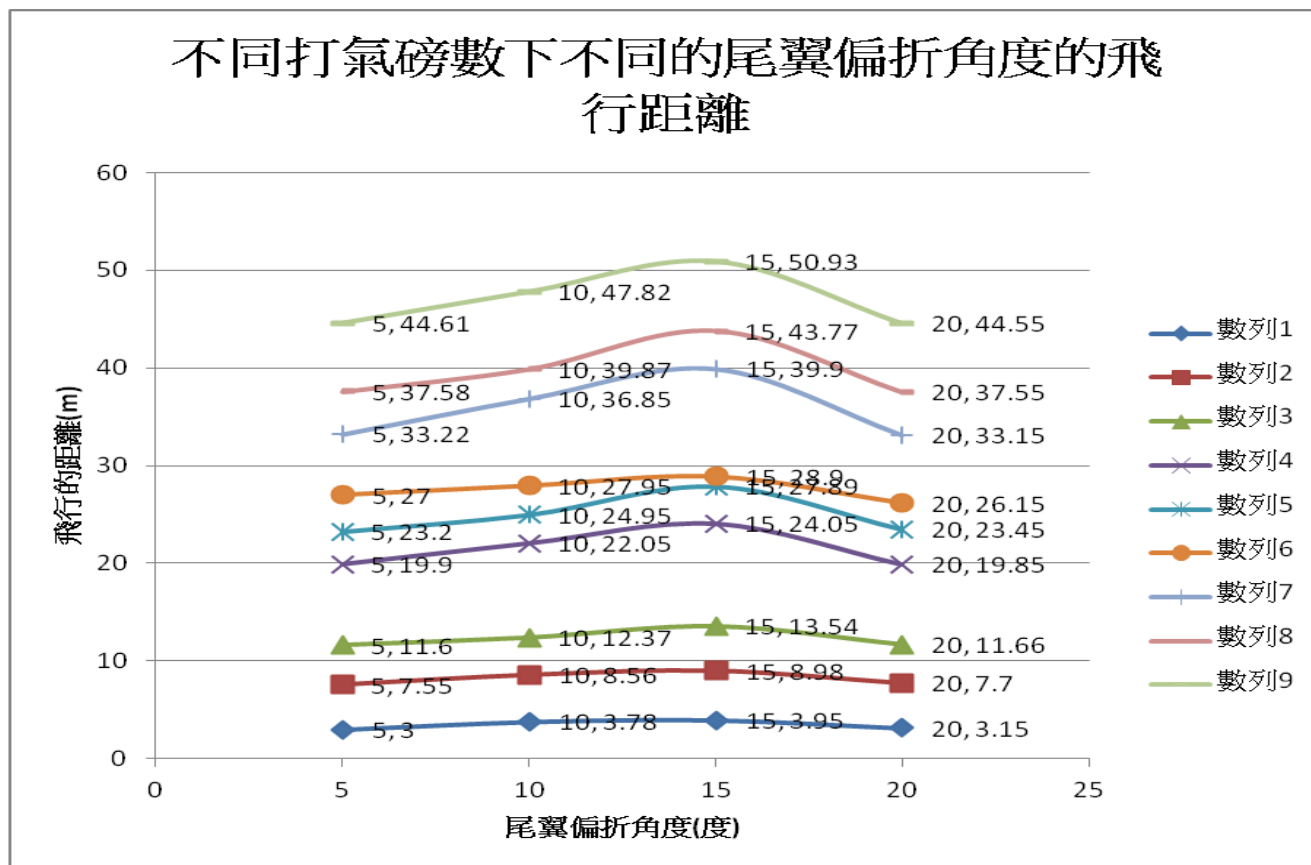
三、由上面的打氣磅數與距離關係的表格，我們可以得到這個圖形。從這個圖形中，我們幾乎可以看出來打氣磅數跟距離幾乎呈現出一個非常正相關的圖形。而做完線性迴歸後 R^2 值更是符合我們的期許與預測，代表此實驗算是做得不錯。



四、由上面的打氣磅數與距離關係的表格，我們可以得到這個圖形。從這個圖形中，我們幾乎可以看出來打氣磅數跟距離幾乎跟三角形的尾翼一樣，所以代表在尾翼沒有偏折的情況下打氣磅數的飛行距離與尾翼形狀無關。

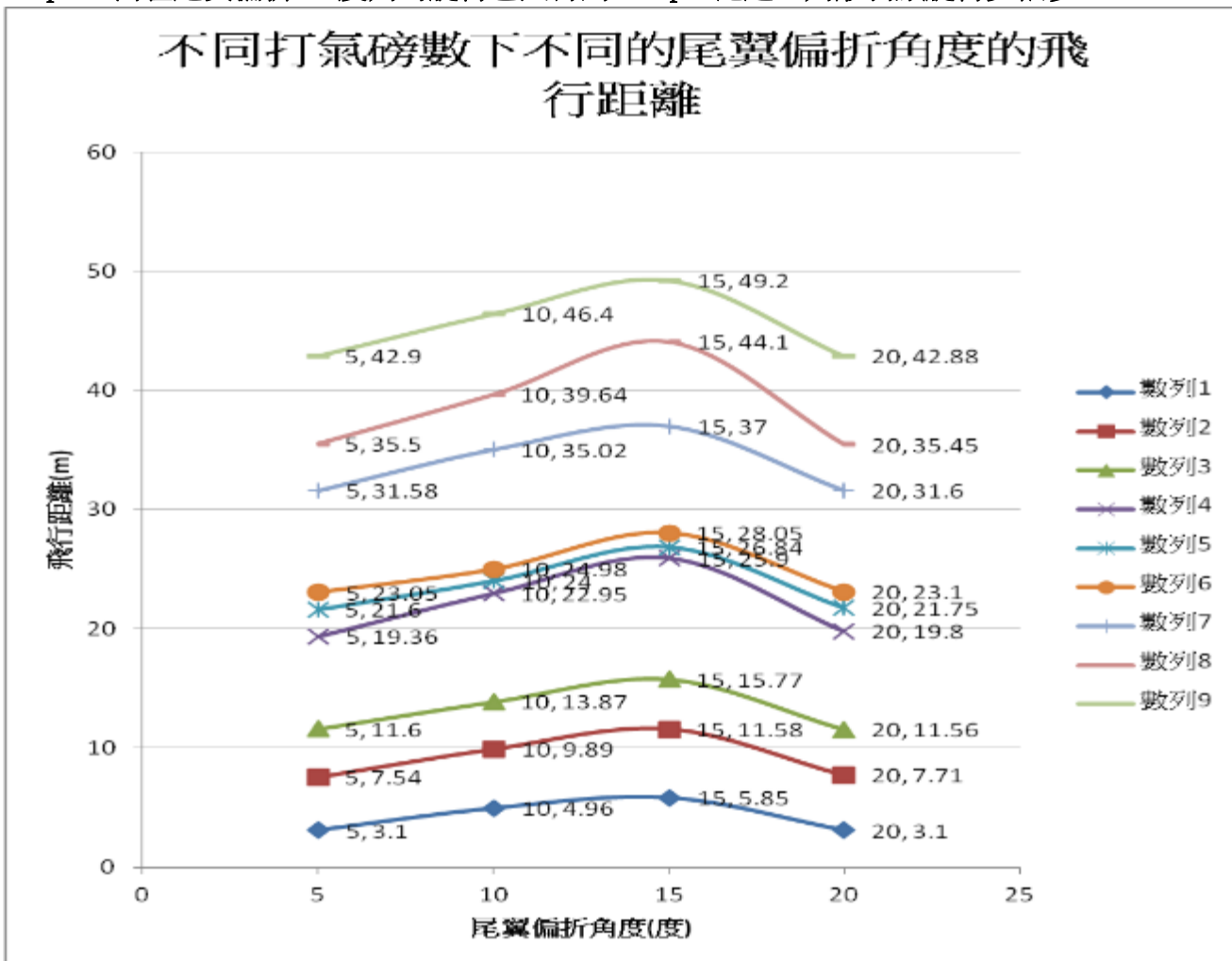


五、在實驗中我們可以很清楚看出，在尾翼為三角形、寶特瓶身是光滑的情況下：尾翼偏折 15 度時飛行的距離最遠。但透過 EXCEL 的作圖，我們可以發現應該是在偏折 10°~15° 之間時會距離最遠。而且再透過攝影的時候我們也可以看到尾翼偏折角度越大旋轉情形越明顯、轉速也越快。而從慢動作攝影影片來觀察記算可以算出，尾翼偏折 15 度角的旋轉達到 120rpm，而在尾翼偏折 20 度角的旋轉更達到 180rpm，但距離就飛不遠了。

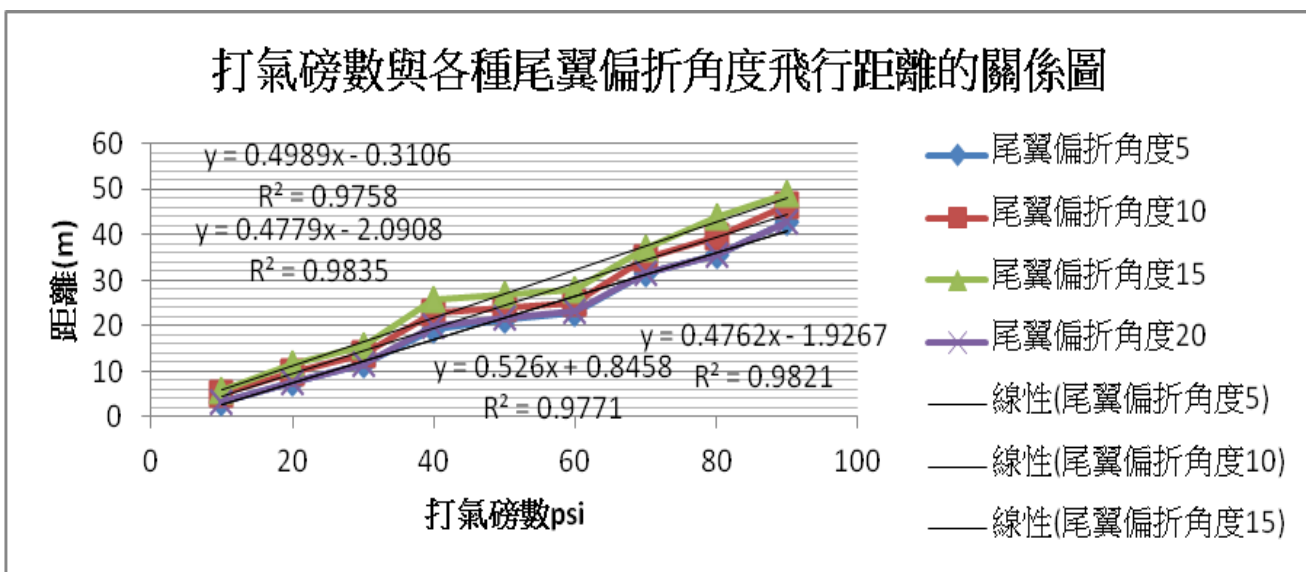


從上圖中我們可以看出，打氣磅數越大雖然飛行距離越遠，但風阻也會隨之越大，這樣也會導致每個偏折角度的飛行距離不同。但是我們從圖中發現 10~30psi 幾乎都差異不大，但從 40psi 開始就差異很大了，但唯一特別的是在 60psi 時幾乎又都差不多，是一個很特別的現象。

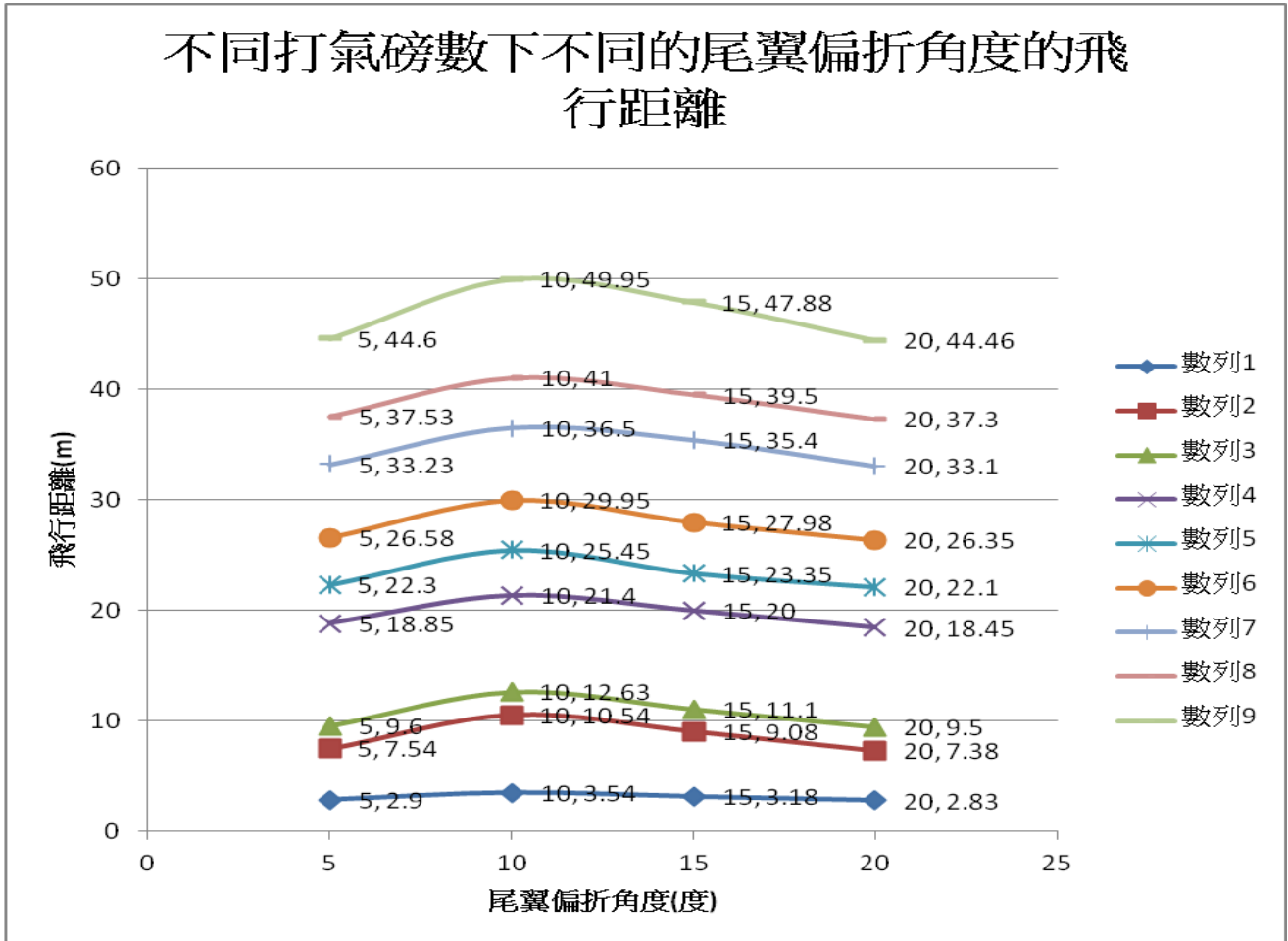
六、從圖中我們可以很清楚看出，在尾翼為梯形、寶特瓶身是光滑的情況下：實驗跟三角形是一樣的，都是在尾翼偏折 15 度時飛行的距離最遠，而真正的最大值，應該是落在 10°~15° 之間。但透過攝影的時候我們卻發現梯形的旋轉角速度比三角形還要小尾翼偏折 15 度角的旋轉只有 90rpm，而在尾翼偏折 20 度角的旋轉也只有到 120rpm 比起三角形明顯旋轉少很多。



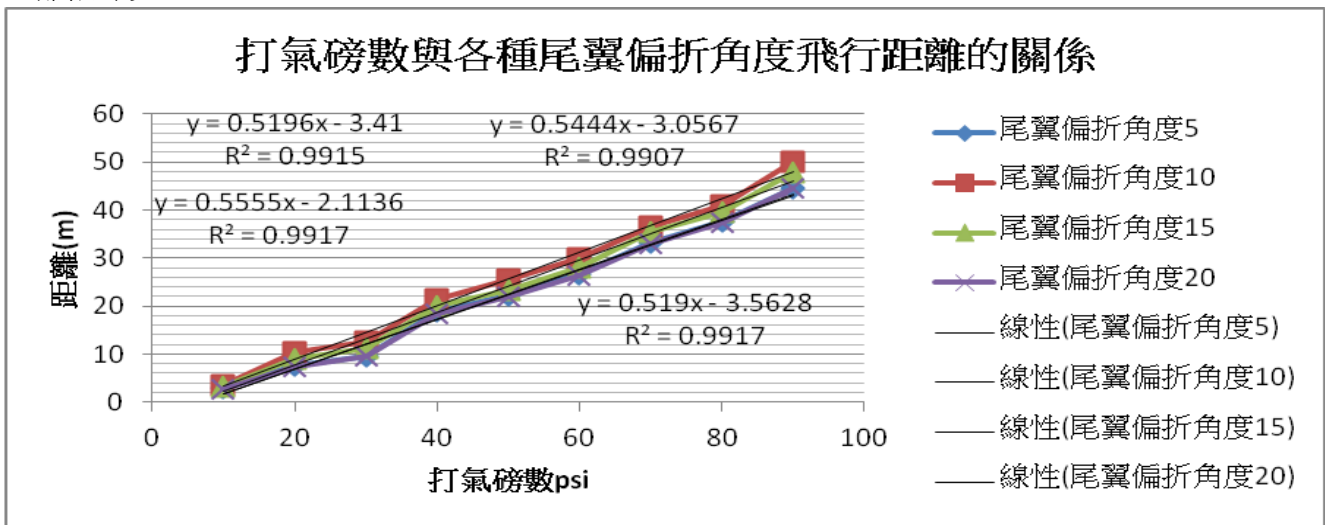
不太一樣這也是跟三角形很不同的地方。



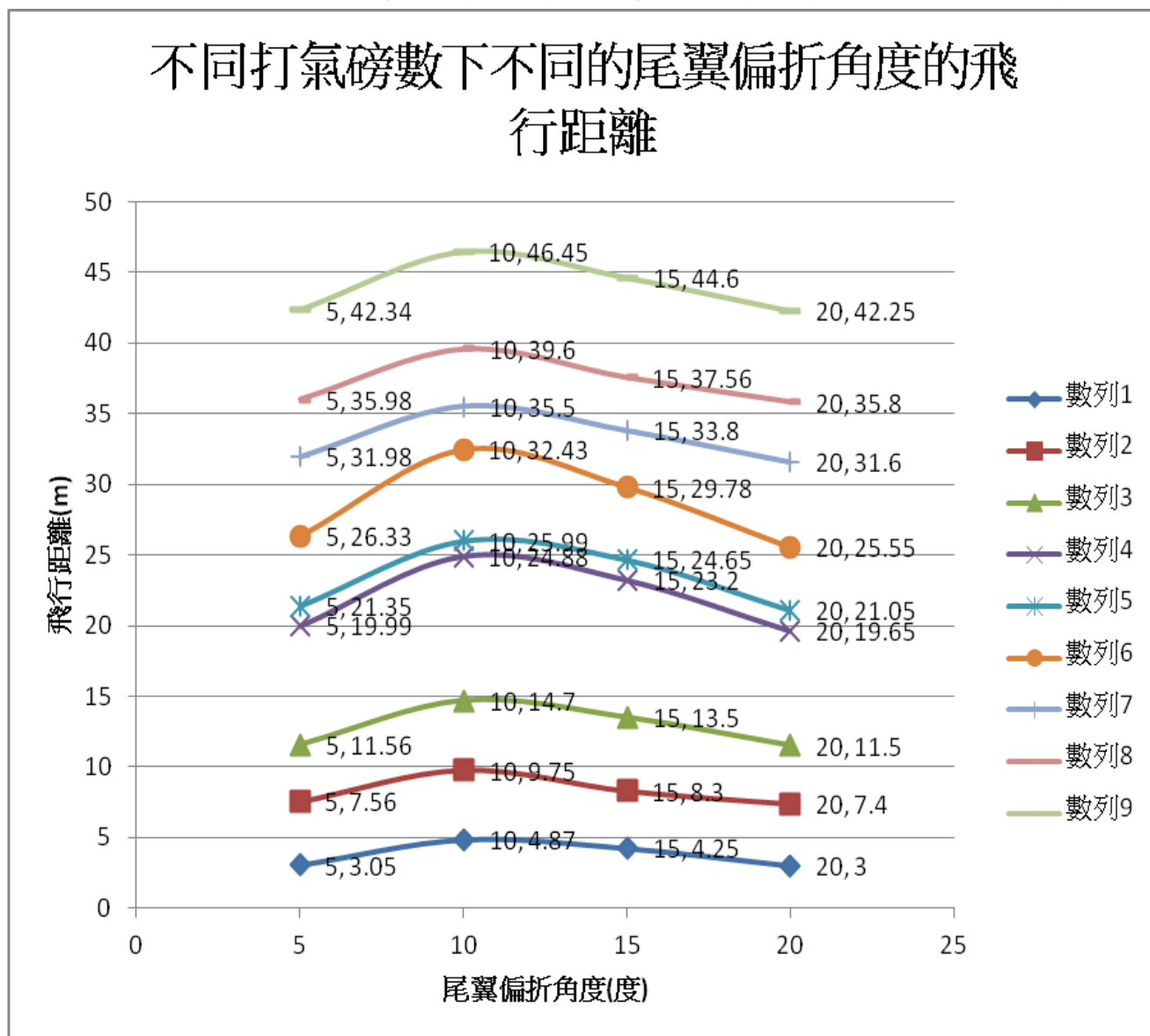
七、非光滑瓶身、尾翼為三角的實驗中，我們可以很清楚看出，實驗雖然做出尾翼偏折 10 度時飛行的距離最遠。但透過 EXCEL 作圖可知道真正的最大值，應該是落在 10°~15°之間。而且再透過攝影的時候我們也可以看到尾翼偏折角度越大旋轉情形越明顯、轉速也越快。而從慢動作攝影的影片來觀察發現非光滑瓶身的旋轉稍為比光滑瓶身快一點，推論應該為瓶身的凹凸痕跡所致。



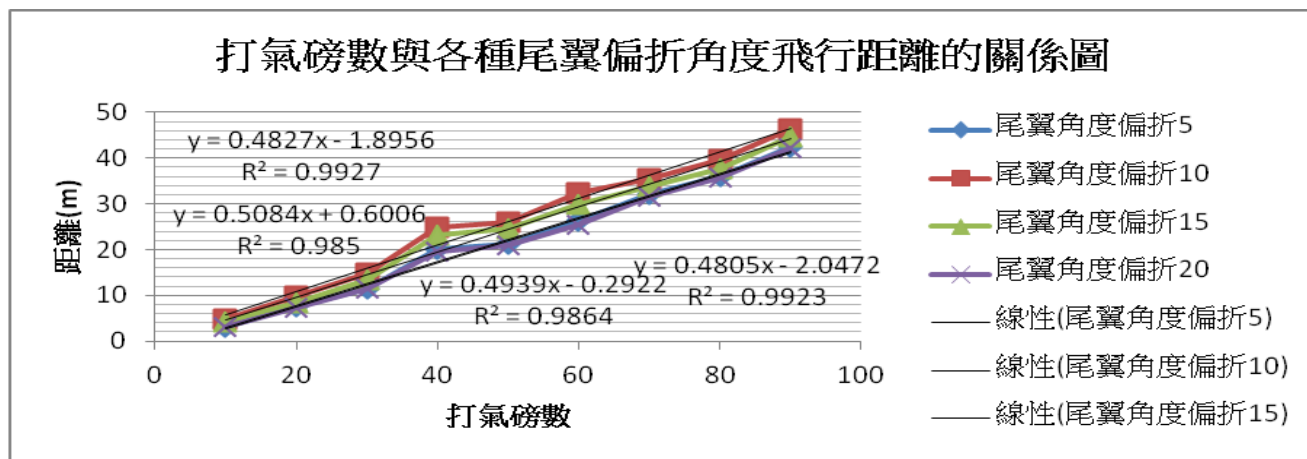
如下圖可以看到非光滑瓶身，尾翼為三角形，做出來的結果反而更像斜直線，線性迴歸的結果也都很漂亮。



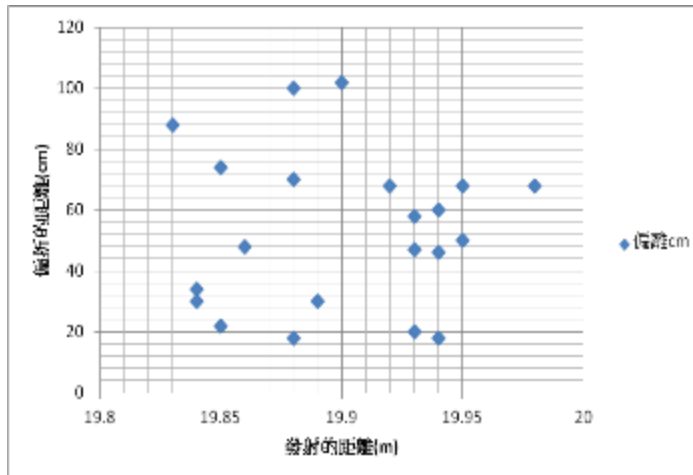
八、尾翼梯形的非光滑瓶身也跟之前的實驗很像，由表格中我們可以得到最遠的距離為尾翼偏折 10 度，但由 EXCEL 作圖出來的結果，我們猜測最遠的飛行距離應該在 10°~15° 度之間。



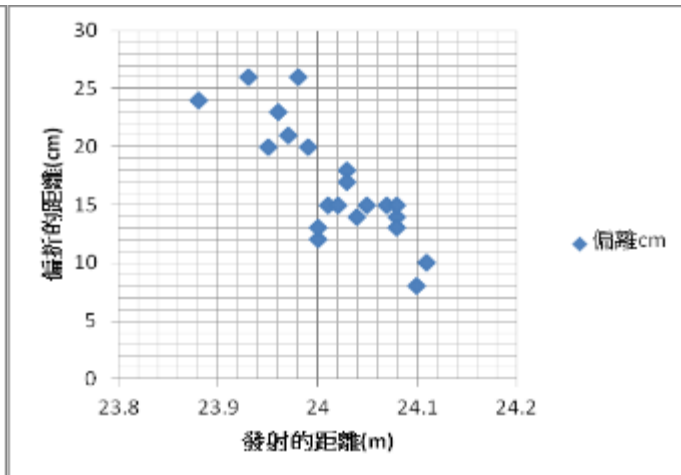
來的結果也發現竟然在距離最遠的 10 度跟 15 度線性迴歸後都不漂亮，反而是 5 度跟 20 度比較來得出色。



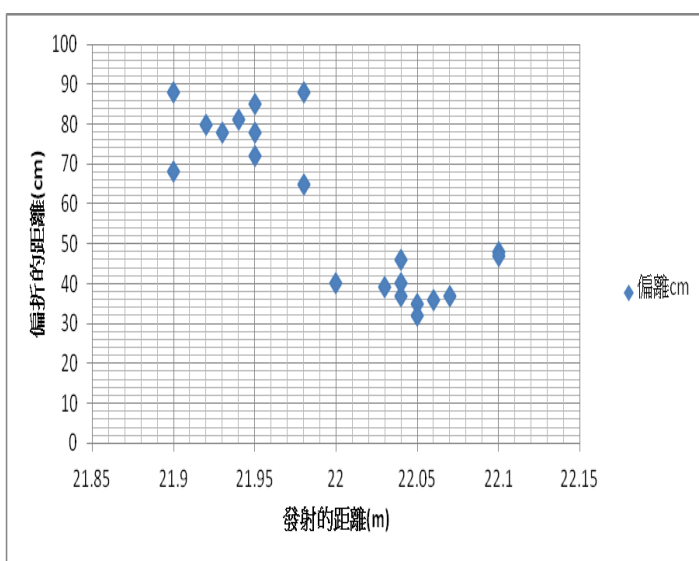
九、打氣磅數 40PSI 時正常火箭的落地分布圖



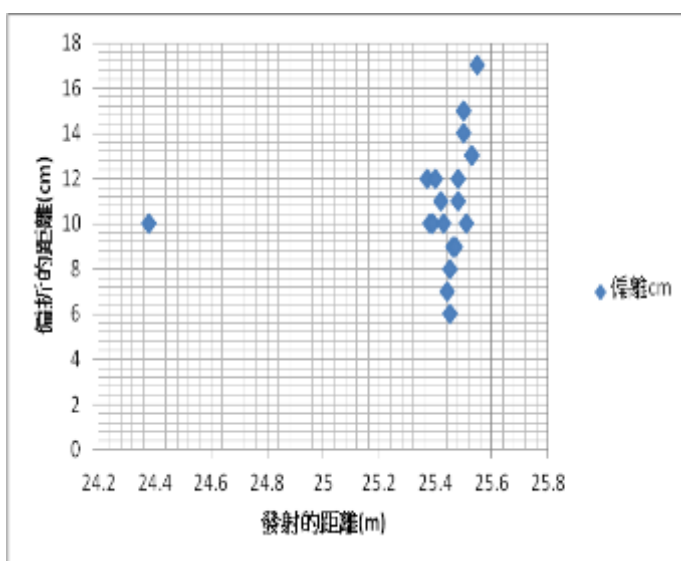
打氣磅數 40PSI 時旋轉火箭的落地分布圖



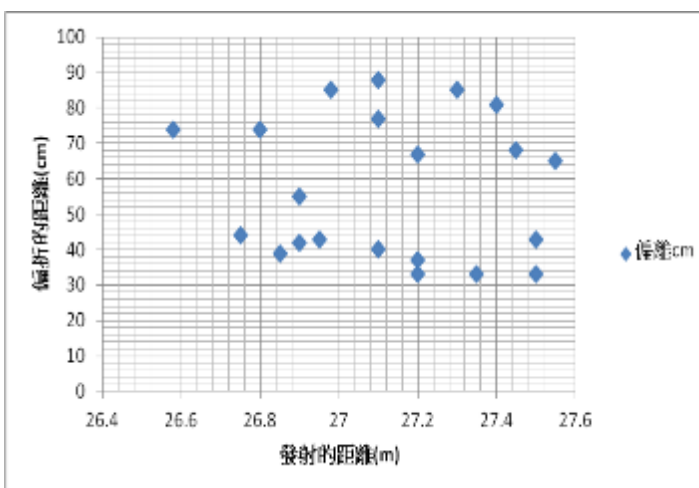
打氣磅數 50PSI 時正常火箭的落地分布圖



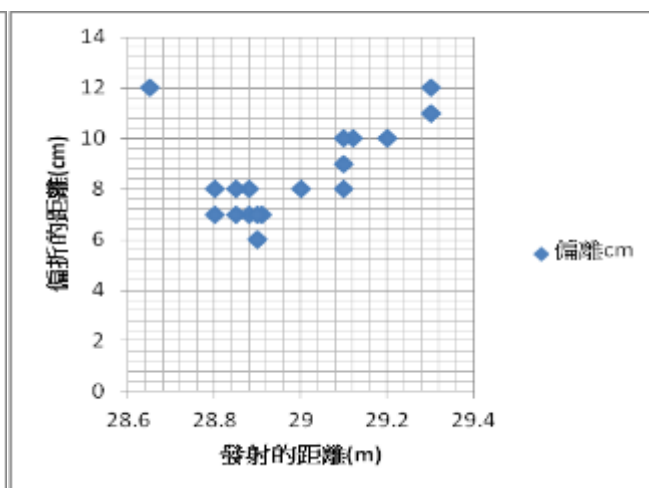
打氣磅數 50PSI 時旋轉火箭的落地分布圖



打氣磅數 60PSI 時正常火箭的落地分布圖



打氣磅數 60PSI 時旋轉火箭的落地分布圖



由上面的分布圖我們可以知道，旋轉火箭在空中飛行軌跡確實比正常火箭穩定，落地的地方也跟發射的地方比較成一直線。

十、利用 Tracker 軟體分析旋轉火箭的水平加速度=0 時，為空氣火箭內部氣體噴完的時候：

t (s)	x (m)	y (m)	a_x (m/s ²)
1.033	248.5	134.9	1.030E3
1.067	261.8	140.3	-1.202E3
1.100	276.5	144.3	-1.546E3
1.133	287.2	149.6	-858.7
1.167	296.5	144.3	687.0
1.200	308.6	144.3	-343.5
1.233	320.6	144.3	-1.546E3
1.267	328.6	144.3	-1.374E3
1.300	336.6	144.3	858.7
1.333	343.3	145.6	343.5
1.367	355.3	142.9	0.000
1.400	362.0	142.9	-343.5
1.433	371.4	141.6	1.717E3
1.467	380.7	137.6	-1.202E3

t (s)	x (m)	y (m)	a_x (m/s ²)
1.133	217.7	130.9	-1.030E3
1.167	233.8	138.9	-1.889E3
1.200	248.5	145.6	-1.030E3
1.233	263.2	152.3	-1.030E3
1.267	275.2	159.0	1.030E3
1.300	287.2	160.3	2.576E3
1.333	305.9	165.6	687.0
1.367	324.6	172.3	-1.202E3
1.400	339.3	172.3	-858.7
1.433	355.3	179.0	-515.2
1.467	370.0	179.0	-858.7
1.500	383.4	179.0	-343.5
1.533	396.7	181.7	687.0
1.567	410.1	180.3	0.000

t (s)	x (m)	y (m)	v_x (m/s)	v_y (m/s)	a_x (m/s ²)
1.367	668.8	133.8	445.9	-278.7	-955.4
1.400	681.8	128.2	362.3	-222.9	-1.672...
1.433	692.9	118.9	334.4	-250.8	477.7
1.467	704.1	111.5	390.1	-222.9	0.000
1.500	719.0	104.0	362.3	-250.8	-716.6
1.533	728.2	94.75	306.5	-306.5	-2.150...
1.567	739.4	83.60	250.8	-250.8	1.194E3
1.600	745.0	78.03	334.4	-334.4	0.000
1.633	761.7	61.31	334.4	-306.5	477.7
1.667	767.3	57.59	278.7	-222.9	-955.4
1.700	780.3	46.44	334.4	-306.5	1.433E3
1.733	789.6	37.16	334.4	-278.7	-2.866...
1.767	802.6	27.87	195.1	-195.1	
1.800	802.6	24.15			

t (s)	x (m)	y (m)	a_x (m/s ²)
1.367	352.7	146.9	1.030E3
1.400	364.7	148.3	-1.202E3
1.433	372.7	142.9	171.7
1.467	379.4	142.9	1.202E3
1.500	392.7	138.9	171.7
1.533	402.1	138.9	-1.717E3
1.567	411.4	133.6	687.0
1.600	418.1	128.2	515.2
1.633	431.5	125.6	1.030E3
1.667	439.5	121.6	-343.5
1.700	452.8	113.5	515.2
1.733	462.2	109.5	0.000
1.767	474.2	102.9	1.030E3
1.800	486.2	100.2	-171.7

由此軟體可以分析每個時間的垂直、水平距離；垂直、水平速度；以及水平加速度。

因為垂直加速度一直是重力加速度，所以就不予討論。

由上圖可以知道：在什麼時間寶特瓶內的氣體噴完。(因為軟體是利用兩次微分所以未必準確)

打氣磅數 PSI	30	40	50	60
秒數(秒)	1.367	1.567	1.600	1.733

十一、我們利用自製器材並用超慢速錄影，測量出空氣火箭的衝力：

(一)、光滑寶特瓶：(已經扣除火箭本身重量：110.00g)

打氣磅數 PSI	10	20	30	40	50	60	70	80	90
最大衝力 kgw	31.41	32.43	36.65	40.88	55.64	72.35	88.69	96.24	102.12

<https://www.youtube.com/watch?v=u0Z1Am3NY70>(使用超慢速錄影)

(二)、非光滑寶特瓶：(已經扣除火箭本身重量：132.40g)

打氣磅數 PSI	10	20	30	40	50	60	70	80	90
最大衝力 kgw	47.10	55.21	63.98	73.81	85.20	92.53	122.38	126.74	133.92

<https://www.youtube.com/watch?v=7cK5G5lrE-c>(使用超慢速錄影)

十二、我們利用學校的電動打氣機測量出空氣火箭在各磅數時噴出氣體的時間以及利用風速計測量風速。



打氣磅數 PSI	10	20	30	40	50	60	70	80	90
噴氣時間(秒)	1.00	1.21	1.36	1.58	1.64	1.75	1.89	2.07	2.22
最大風速(m/s)	1.20	2.22	3.44	4.72	5.58	6.65	7.98	9.01	10.08

陸、討論

一、有時候一發射出去，空氣火箭就會不如預期地，以一個很水平的角度平飛的飛出去。我們運氣好大概個十幾次才會遇到這樣的情況、運氣不好幾次就會遇到一次，有時候還會一直遇到。而且也並不是只有風大的時候才會發生，有時候沒什麼風的時候也會發生。後來我們找老師討論了以後，覺得應該剛好是因為發射時遇到了沉降的氣流，這股氣流讓原本應該飛上去的空氣火箭被往下壓了，這也常常是直升機跟飛機莫名失事的主因。

我們可以看實際發射影片：<https://www.youtube.com/watch?v=KxX09Dh8eFQ>



一發射出去角度就是往下掉，呈現幾乎水平的狀態。

二、原本認為尾翼應該是越直越好，這樣會造成的風阻就會越小，也會讓空氣火箭飛的比較穩定比較遠。但經過這次實驗之後，發現其實讓尾翼是直的就必須做的非常精準、對稱，才有機會讓空氣火箭不受影響的飛行。不然其實是很容易偏掉的就像棒球中的『蝴蝶球』一樣，反而這次我們做的旋轉火箭就像棒球中的『子彈球』一樣，飛行軌跡很穩定、距離也幾乎差不多，反而更好瞄準要射擊的目標。

阻力（又稱**後曳力**或**流體阻力**）是物體在**流體**中相對**運動**所產生與運動方向相反的**力**。對於一個在流體中移動的物體，阻力為周圍流體對物體施力，在移動方向的反方向上分量的總和。而施力和移動方向垂直的分量一般則視為**升力**。因此阻力和物體移動方向恰好相反，像飛機前進時會產生**推力**來克服阻力的影響。

高速時阻力： $F_D = (1/2) \rho v^2 C_d A$ ，

F_D ：為空氣阻力、 ρ ：為流體密度、 v 為流體相對物體的速度、

C_d ：為空氣阻力系數、 A ：為受風面積。

由上面的公式我們可以算出，空氣火箭在飛行中每一個不同的階段所受到的空氣阻力。



以下有影片測試：<https://www.youtube.com/watch?v=rcCXisgfEZw&feature=youtu.be>

<https://www.youtube.com/watch?v=wCBMsG1Ydgc&feature=youtu.be>

三、我們也曾經使用過壓克力塑膠片來製作尾翼，但是發現效果比 EVA 材質的更不好控制，也需要用更多的電氣膠帶固定也會增加整體火箭的重量。更麻煩的是會讓重心不好控制在正中間，所以我們後來就放棄用塑膠片當尾翼當對照組的實驗。



尾翼水平組



尾翼偏折組

四、我們發現寶特瓶放太久了，有可能因此而變質、或是根本裝每一種飲料的寶特瓶都有可能有些許的不同，才會導致做出來的實驗結果跟預期中完全不符合。

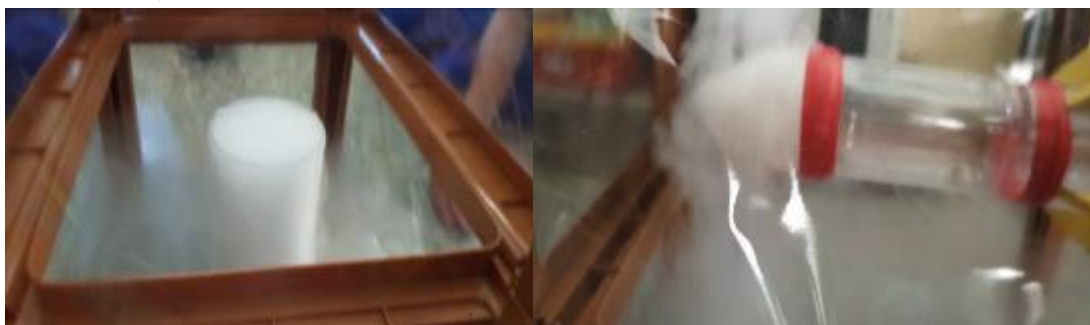


之前的(放了大概一年)

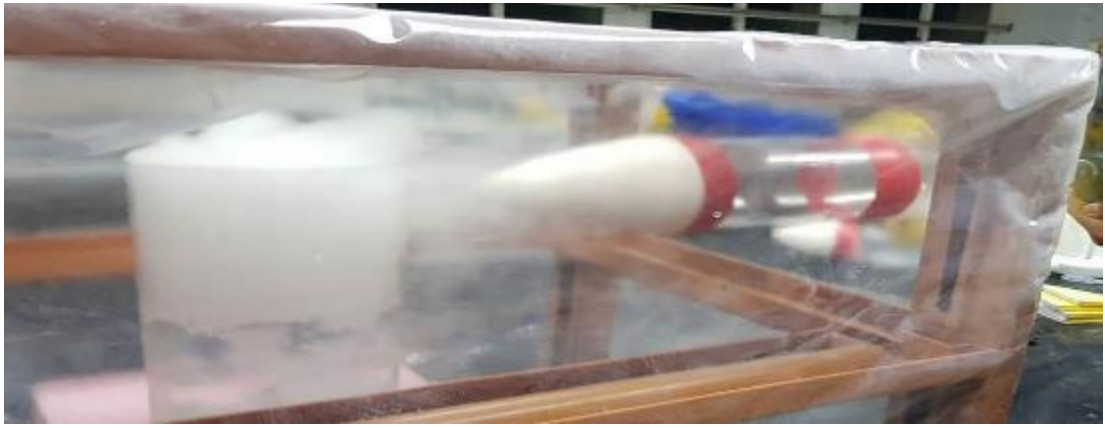


後來用的(新買的)

五、原本我們用線香來製造白煙，並以自製觀測器來觀察空氣火箭跟旋轉火箭跟空氣接觸的情況。但是效果不是很好，幾乎完全看不到，所以我們後來就用乾冰加熱水來製造白煙(小水滴)，用來觀測並且錄影記錄，效果就好很多。



六、承第五點，畢竟乾冰的白煙是小水滴，我們怕會不是很準確。所以還是利用了燃燒鎂帶來製造白煙，這樣就可以製造大量的白煙，而且效果比線香好非常的多。最後我們就以燃燒鎂帶所製造的白煙跟乾冰加熱水所製造的白煙(小水滴)一起來互相對照觀察比較，結果就好很多。(可看影片：<https://www.youtube.com/watch?v=u81cLSM5mR8>)



七、我們在做實驗的時候，發現到火箭落地時會彈跳離開，造成我們判斷落地點的困難。於是後來我們選擇了跳遠的跑道與沙坑當成我們的發射的地方，這樣可以讓我們更精準的判斷空氣火箭落地的地點。更驚訝的是，空氣火箭落地後並不會定住，而是會再往前滑行，造成其形狀如同長方形一樣。

八、在做空氣火箭衝力時候的實驗，一開始我們用水平的方向但發現這樣電子秤會失準；於是乎我們就改成了垂直方向的測量，本來沒有扣除掉火箭本身的重量，後來有把火箭本身的重量扣除掉。

九、在做空氣火箭噴氣時，一直找不到適合的打氣裝置，後來終於找到學校專門打各式球類的電動打氣機。並且在我們的改裝下換了一個頭，讓它可以測量到我們要的10~90PSI的範圍。而一抽開就要馬上讓瓶內的風可以吹向風速計，那個距離我們發現其實是有影響的。所以我們只能在可以做到的範圍內，讓風速計跟噴嘴盡量接近，以減少實驗誤差。

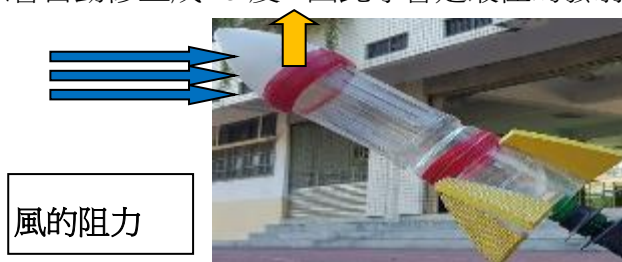
十、用 Tracker 軟體做出的影片分析空氣火箭的軌跡結果，確實如同我們影片中所看到的，幾乎就是以 43 度角發射，最後以 45 度角落下。整體軌跡也都呈現出一個完美的拋物線，而此軟體更可以協助分析更多的物理量。是一個非常棒的軟體，我們很推薦大家使用。



柒、結論

一、我們做出了最佳的發射角度並非大家公認的 45 度而是 **43 度**，我們一起探究了原因，應該是整個空氣火箭的重心幾乎偏在後半部。而且當發射時，空氣火箭跟空氣的撞擊會讓空氣火箭向上偏一些角度所以會自動修正成 45 度，因此才會是最佳的發射角度。(可看我們的慢動作錄影影片)

因為一開始發射時，火箭都是被反作用力推著出去，所以也會先受到風的阻力。因而導致彈頭會向上偏一點點。如右圖所示：



二、我們做出了打氣磅數跟距離的兩個公式，在尾翼不偏折的情況下：

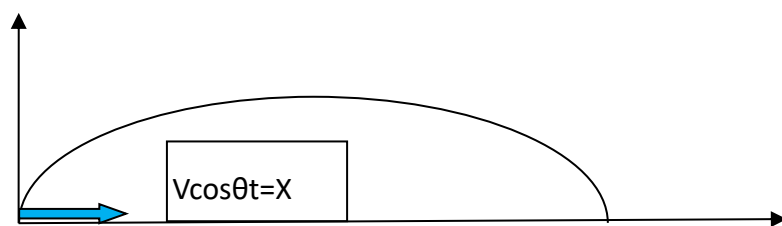
(一)尾翼為三角形： $Y = 0.5225X - 3.7861$

(二)尾翼為梯形： $Y = 0.4781X - 1.9547$

(三)旋轉火箭尾翼為三角形： $Y = 0.5831X - 2.2761$

(四)旋轉火箭尾翼為三角形： $Y = 0.526X + 0.8458$

三、我們也可利用斜向拋射運動原理，來計算空氣火箭的平均速率，如下圖所示：



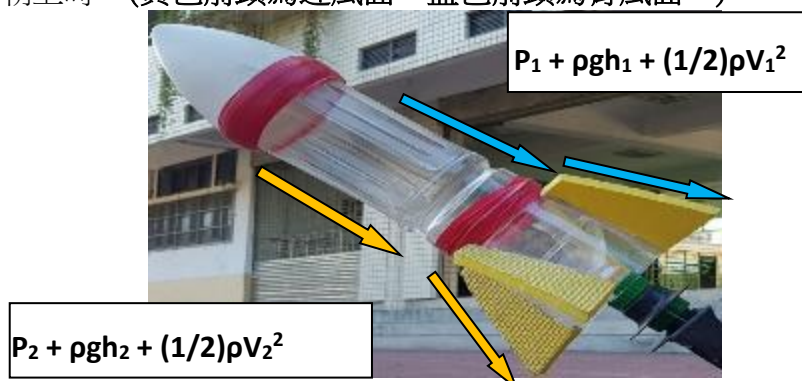
舉個例子：以發射角度 45° ，時間=1.5 秒，距離=30.00m，將其代入公式

$V\cos 45^\circ \cdot 1.5 = 30.00 \rightarrow V \approx (30/1.414) \approx 21.2$ (平均速率)，因為一開始速率會比較快，後來因為瓶中空氣噴完、壓力變小，速率也會變小。

(註：後來利用 Tracker 軟體就可以不用這樣看影片計算，只要利用軟體的建立軌跡，就可以輕鬆幫你算出任何的速度)

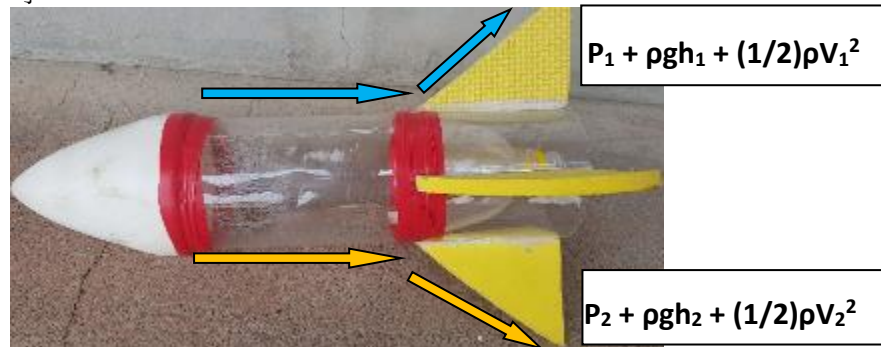
四、空氣火箭在飛行中的三個狀態：

(一)彈頭朝上時：(黃色箭頭為迎風面，藍色箭頭為背風面。)



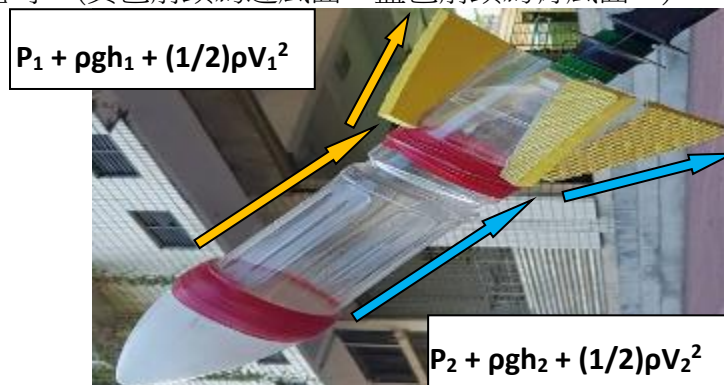
由圖可知 $P_1 - P_2 = \rho g(h_2 - h_1) + (1/2) \rho (V_2^2 - V_1^2) = \rho g \Delta h + (1/2) \rho (V_2 - V_1)(V_2 + V_1)$ = 負值，所以空氣火箭在第一階段可以持續上升。(透過超慢速錄影我們發現氣流不會是『渦流』)

(二)彈頭水平時：



由圖可知， $P_1 - P_2 = \rho g(h_2 - h_1) + (1/2) \rho (V_2^2 - V_1^2) \approx (1/2) \rho (V_2 - V_1)(V_2 + V_1)$ ，將 $(1/2)(V_2 + V_1)$ 令為 V ，則公式變為 $P_1 - P_2 = \rho V \Delta V$ ，故此時就類似旋轉的羽毛球或棒球飛行一樣。

(三)彈頭下落時：(黃色箭頭為迎風面，藍色箭頭為背風面。)



由圖可知， $P_1 - P_2 = \rho g(h_2 - h_1) + (1/2) \rho (V_2^2 - V_1^2) = \rho g \Delta h + (1/2) \rho (V_2 - V_1)(V_2 + V_1)$ = 正值，所以空氣火箭在此時因往的下壓力+重力 > 往的上壓力所以會往下墜落。

五、光滑面的寶特瓶是按起來比較軟的寶特瓶、非光滑面的寶特瓶是按起來比較硬的寶特瓶。這裡我們可以知道光滑面的寶特瓶可承受的壓力比較小、但彈性比較好；而非光滑面的寶特瓶可承受的壓力比較大、但彈性比較差。但是發射起來的距離，在相同發射角度、相同尾翼形狀、相同尾翼偏折角度、相同打氣磅數非光滑面的寶特瓶會比較遠一點。



光滑面寶特瓶 60psi 最遠為 28.90m



非光滑面寶特瓶 60psi 最遠為 32.43m

六、空氣火箭衝力的是隨著時間慢慢增大到最大值後，再慢慢遞減，而我們由此去計算出空氣火箭應該有的 Cd 值。而我們算出的 Cd 值=0.50 跟圓形的標準值=0.47 差別不大。

註：透過衝力與作用時間以及影片分析速度進行計算得知。

七、我們利用了電動打氣機、風速計並加上了記時。成功找出了，空氣火箭在空氣中真正排出氣體的時間，也就是加速的時間。我們甚至可以得知氣體排出的速率有多快。

八、由空氣模擬實驗我們可以發現，旋轉火箭可以真的劃開前面的空氣，讓前面的氣流不好阻礙旋轉火箭。而且劃開空氣之後，會讓空氣比較稀薄，也就是可以降低空氣阻力讓旋轉火箭能夠更好維持穩定的方向性以及距離。

(我們可以看影片：

<https://www.youtube.com/watch?v=tqET86YsMYg> (旋轉火箭排開上方氣流)

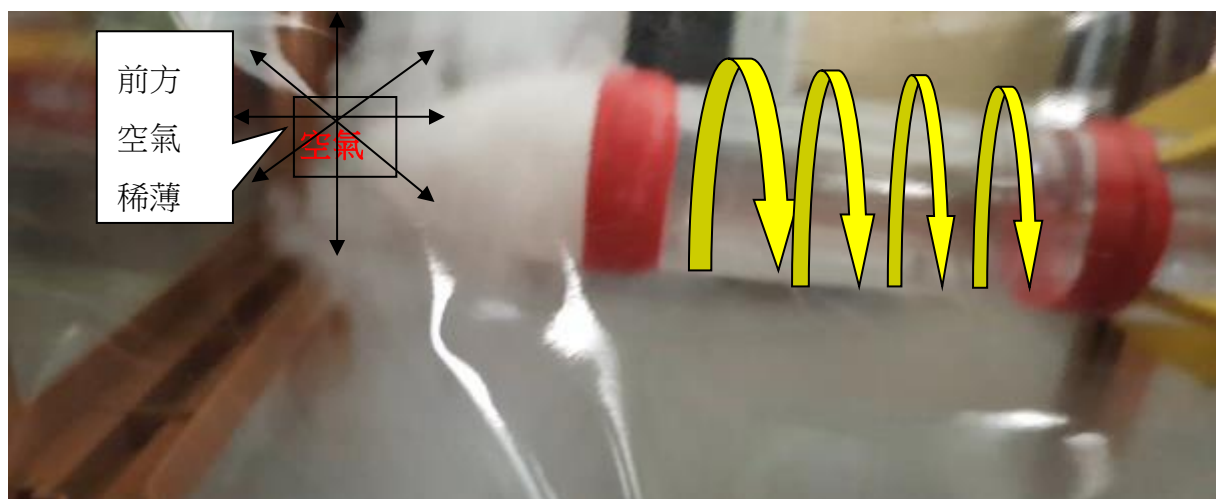


<https://www.youtube.com/watch?v=LtsAfHuhQZE> (旋轉火箭排開下方氣流)



<https://www.youtube.com/watch?v=Nph-iRG0dgs>

https://www.youtube.com/watch?v=6dbuV_ohMCw&feature=youtu.be



九、我們在旋轉火箭上做了三個部分：

(一)讓乾冰造成的白煙通過旋轉火箭的頭部看看會造成什麼現象？結果發現果然如同預測的一樣會將空氣不僅劃開、更可以說是排開，讓附近空氣幾乎稀薄。這樣確實可以讓旋轉火箭增加穩定性以及更遠的距離。

<https://www.youtube.com/watch?v=l4uZS4RFjnI>



注意氣體已經被排到外面去了！

(二)讓乾冰造成的白煙通過旋轉火箭的中段部分看看會造成什麼現象？結果發現也是一樣可以將空氣排開，讓旋轉火箭中段上面附近的空氣幾乎稀薄。這樣確實可以讓旋轉火箭增加穩定性以及更遠的距離。也就更像子彈發射時會一直旋轉，更穩定更有威力。

我們先看影片：<https://www.youtube.com/watch?v=rifprsg8KOo>



(三)這次的實驗最重要的主角就是尾翼，如果尾翼沒有偏折角度，空氣不會撞擊尾翼面積就不會產生力矩、也就不會產生旋轉、更不會有類似膛線、陀螺儀的裝置.....。而既然提到力矩，在此也就不用提到角動量以及轉動動能。

因為 $L=r \times p$ (此 \times 為數學的外積，因為 r 跟 p 都是向量)→因為是系統中剛體的總角動量：所以 $L=\sum m r^2 \omega$ ，其中令 $\sum m r^2=I$ ，可以推出 $L=I\omega$ 。

轉動動能： $K=(1/2) \sum m_i v_i^2=(1/2) \sum m_i (r_i^2 \omega^2)=(1/2) \sum (m_i r_i^2) \omega^2=(1/2) I \omega^2$

最後我們得到一個結論：偏折角度不能太大，因為這樣除了空氣阻力比較大以外，也會把能量都變成了轉動動能，前進的動能就變得比較少一些。

但尾翼的排開氣體功能真的超強，也製造了非常多的旋轉，讓轉速很快很穩定，彈道也就更準確。

我們來看影片：<https://www.youtube.com/watch?v=0ohRhHPryhA>



十、最後證實了旋轉火箭在穩定性以及準確性上面都跟子彈以及槍管的膛線很像，也運用到了陀螺儀跟角動量原理，讓我們著實增長不少知識。本來以為把尾翼黏偏會讓火箭的阻力變大然後射程就會變得不遠，結果沒想到非但沒有這樣反而還更穩定，也更讓我們知道原來跟這麼多的物理原理有關。

十一、未來的展望：

- (一)、做出讓空氣火箭能夠更穩定飛行而且不受風力影響的結果。
- (二)、找出可以讓空氣火箭飛行最遠距離的尾翼偏折最佳角度。
- (三)、設計出可以更便利的電動或更省力的打氣機以及發射器、因為這次實驗我們足足打氣超過『五千次』，真的非常累人，尤其超過 60PSI 以後，要再打氣進去真的很考驗體力、耐力、意志力。
- (四)、利用自製的觀察器材研究氣流與空氣火箭互相撞擊的情形，讓所有人都能上 Youtube 觀看我們的實驗影片結果。
- (五)、可用於『飛彈』發射出去時萬一偏離軌道，需要修正時，改變尾翼方向可以讓飛彈再回到正常的發射軌道。
- (六)、推廣 Tracker 這個免費的好用物理軟體，可以利用影片教大家如何使用，並且讓大家輕鬆上手以及輕鬆參與我們的實驗。下面有我們的影片：

<https://www.youtube.com/watch?v=L-EWTiGk3Qk>

<https://www.youtube.com/watch?v=IVV8m9nxoPI>

捌、參考資料及其他

- (一)南一文教事業(2019)。自然與生活科技第五冊。第二章力與運動。臺北：南一文教事業。
- (二)南一文教事業(2019)。高中物質科學物理上。第二章平面運動。臺北：南一文教事業。
- (三)南一文教事業(2018)。高中物質科學物理下。第九章 轉動。臺北：南一文教事業。
- (四)南一文教事業(2018)。高中物質科學物理下。第十章流體的性質。臺北：南一文教事業。
- (五)維基百科。膛線。<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E8%86%9B%E7%B7%9A>
- (六)維基百科。陀螺儀。<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E9%99%80%E8%9E%BA%E5%84%80>
- (七)維基百科。阻力。<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E9%98%BB%E5%8A%9B>

【評語】 030105

火箭飛行是一個有趣且有挑戰性的課題，涵蓋了力學與流體力學。參與學生深入研究了火箭飛行的動力學，引入的飛行體自旋的觀念，進行了詳盡的探索。雖然物理概念相對淺易，但具有相當的實際應用參考。是一項很成功的團隊合作成果。實驗參數考慮完整，能妥善使用器材並該改進實驗的進行。研究精神相當值得鼓勵！建議可朝尾翼的偏折角度上做更深入的討論，也許可以得到更多有價值的發現！

摘要

大家印象中空氣火箭或是水火箭的尾翼都應該要黏得對稱、方正、愈順、愈平滑.....愈好，這樣風阻才會愈小，這樣的火箭飛行方向才會穩定、距離才會夠遠。而這次我們突發奇想，把尾翼黏成有偏折角度的，試試看火箭會怎麼飛行。結果火箭果然照著我們預期的一邊旋轉一邊飛行，但是距離卻沒有因為旋轉而導致變近。於是我們馬上展開研究，最後我們先做出了最佳發射角度43°可以得到最遠的距離。然後我們再以此發射角度跟不同的打氣磅數去做實驗發現：1. 尾翼偏折角度在10°~15°會是旋轉最穩定而且飛行距離最遠的角度。2. 我們又利用Tracker軟體來分析空氣火箭飛行的軌跡圖，並利用軟體可得知其速度以及加速度。3. 我們再利用自製器材測量空氣火箭在不同磅數時的衝力有多大。4. 我們在利用學校的電動打氣機與風速計測量空氣火箭在不同磅數時噴出空氣的時間與風速為多少。5. 最後我們利用電風扇、自製容器、煙霧、乾冰、自製旋轉槍，模擬空氣火箭在空氣中旋轉的狀態，以及在飛行中空氣是如何通過空氣火箭的，用到超慢速錄影讓整體能夠更清楚看見，並用到轉動、流體力學來解釋.....，最後發現其實旋轉火箭就跟槍管的膛線是一樣的功用。

壹、研究動機

上學期老師帶我們去參加臺中市科學創意競賽(空氣火箭比賽)，我們獲得了全臺中市第二名，這也讓我們打開了對空氣火箭的興趣。又因為我們以前是羽球隊的，也在去年拿下全臺中市雙打第四名。我們打羽球的時候，發現羽球飛行時總是會一直旋轉，所以我們就在想如果能讓空氣火箭也一直旋轉呢？這樣會跟羽球一樣飛的又高又遠嗎？或是根本就只會一直旋轉而飛不遠呢？還是會因為旋轉而讓空氣火箭轉彎呢？各式各樣的想法充斥在我們的腦海中，於是我們就跑去老師討論。老師就說：不然我們就一起來當成科展來做做看吧，你們敢挑戰嗎？雖然我們一開始有點猶豫跟害怕，但最後還是鼓起勇氣的跟老師說：好，我們要做。於是我們就開始做這個「旋轉空氣火箭的研究了！」

貳、研究目的

- 一、做出正常空氣火箭的最佳發射角度(尾翼三角形)。
- 二、做出正常空氣火箭的最佳發射角度(尾翼梯形)。
- 三、做出打氣磅數與距離的公式(尾翼三角形)。
- 四、做出打氣磅數與距離的公式(尾翼梯形)。
- 五、做出旋轉空氣火箭在不同尾翼偏折角度下的飛行距離(尾翼三角形)。
- 六、做出旋轉空氣火箭在不同尾翼偏折角度下的飛行距離(尾翼梯形)。
- 七、做出旋轉空氣火箭(非光滑表面)在不同尾翼偏折角度下的飛行距離(尾翼三角形)。
- 八、做出旋轉空氣火箭(非光滑表面)在不同尾翼偏折角度下的飛行距離(尾翼梯形)。
- 九、比較正常火箭以及旋轉火箭的穩定度以及落地分布圖。
- 十、利用Tracker軟體分析旋轉空氣火箭的軌跡、速度、加速度(由此可驗證是否與後面實驗一致)。
- 十一、我們利用自製器材並用超慢速錄影，測量出空氣火箭的衝力。
- 十二、我們利用學校的電動打氣機測量出空氣火箭在各磅數時噴出氣體的時間以及利用風速計測量風速。
- 十三、利用風扇、乾冰跟煙霧與自製機械模擬旋轉火箭與空氣的碰撞情形。
- 十四、利用風扇與乾冰跟煙霧與自製機械模擬旋轉火箭(非光滑表面)與空氣的碰撞情形。

參、研究設備與器材



風速計可測溫度°C與風速m/s

滾輪尺(最小單位0.1m)

打氣筒附有壓力計(我們用psi單位)

手機(支援超慢速錄影480FPS)

iPad

瓶身光滑的空氣火箭

瓶身不光滑的空氣火箭

精密的電子磅秤

電動打氣機單位PSI

自製觀測空氣火箭撞風容器

自製空氣火箭旋轉機器

筆電

肆、實驗先備知識

- 一、牛頓第三運動定律：作用力與反作用力定律
- 二、斜向拋射運動
- 三、力矩與轉動： $\tau = F \times r$ (此為外積，因為兩者皆為向量。)
- 四、子彈的飛行與膛線。
- 五、如何測量距離：利用捲尺滾輪尺。

肆、研究過程及方法

研究(一) 找出最佳的發射角度：(所有數據都是做20次的平均值)

控制變因：尾翼三角形(邊長8cm、10cm、12cm)、尾翼四片、打氣磅數60psi、寶特瓶身：光滑面，重量：___117.00___g。

研究(二) 找出最佳的發射角度：

控制變因：尾翼梯形(上底2cm、6cm、10cm)、尾翼四片、打氣磅數60psi、寶特瓶身：光滑面，重量：___117.00___g。

研究一數據	發射角度	30°	40°	45°	50°	55°	60°	43°
	距離(m)	20.00	20.45	20.89	20.15	19.50	18.8	22.05
研究二數據	發射角度	30°	40°	45°	50°	55°	60°	43°
	距離(m)	20.10	20.52	20.88	20.45	20.50	19.8	22.15

由上面的兩個表格可以知道，在發射角度43°的情況下，可以射出的距離最遠。

研究(三) 做出打氣磅數與距離的公式(尾翼為三角形)：風速：1.80m/s，氣溫：28.40°C，控制變因：尾翼三角形(邊長8cm、10cm、12cm)、尾翼四片、發射角度：43°、寶特瓶身：光滑面，重量：___117.00___g。

研究(四) 做出打氣磅數與距離的公式(尾翼為三角形)：風速：1.80m/s，氣溫：28.00°C，控制變因：尾翼梯形(上底2cm、6cm、10cm)、尾翼四片、發射角度：43°、寶特瓶身：光滑面，重量：___117.00___g。

研究三數據	打氣磅數PSI	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	距離(m)	2.85	7.03	9.15	18.56	22.05	26.33	33.17	37.46	44.45
研究四數據	打氣磅數PSI	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	距離(m)	3.00	7.84	11.20	19.75	21.15	26.10	31.84	35.20	42.20

研究(五) 討論旋轉火箭在不同偏折角度下的距離(也有與正常火箭的比較)：風速：1.60m/s，氣溫：28.50°C控制變因：尾翼三角形(邊長8cm、10cm、12cm)、尾翼四片、發射角度：43°、寶特瓶身：光滑面，重量：___117.00___g。

研究(六) 討論旋轉火箭在不同偏折角度下的距離(也有與正常火箭的比較)：風速：1.8m/s，氣溫：27.90°C控制變因：尾翼梯形(上底2cm、6cm、10cm)、尾翼四片、發射角度：43°、寶特瓶身：光滑面，重量：___117.00___g。

研究(七) 討論旋轉火箭(非光滑面)在不同偏折角度下的距離(也有與正常火箭的比較)：風速：1.70m/s，氣溫：28.50°C控制變因：尾翼三角形(邊長8cm、10cm、12cm)、尾翼四片、發射角度：43°、寶特瓶身：非光滑面，重量：___139.10___g。

研究(八) 討論旋轉火箭(非光滑面)在不同偏折角度下的距離(也有與正常火箭的比較)：風速：1.80m/s，氣溫：28.00°C控制變因：尾翼梯形(上底2cm、6cm、10cm)、尾翼四片、發射角度：43°、寶特瓶身：非光滑面，重量：___139.10___g。

研究數據五、六、七、八

尾翼偏折角度	打氣磅數PSI	10	20	30	40	50
0/5/10/15/20	五六七八	3.25/3.00/3.78/3.95/3.15 3.34/3.10/4.96/5.85/3.10 3.10/2.90/3.54/3.18/2.83 3.50/3.05/4.87/4.25/3.00	7.88/7.55/8.56/8.98/7.70 7.90/7.54/9.89/11.58/7.71 7.85/7.54/10.54/9.08/7.38 8.10/7.56/9.75/8.30/7.40	11.85/11.60/12.37/13.54/11.66 12.25/11.60/13.87/15.77/11.56 11.00/9.60/12.63/11.10/9.50 12.40/11.56/14.70/13.50/11.50	19.90/19.90/22.05/24.05/19.85 19.98/19.36/22.95/25.90/19.80 20.50/18.85/21.40/20.00/18.45 21.35/19.99/24.88/23.20/19.20	22.05/23.20/24.95/27.89/23.45 22.15/21.60/24.00/26.84/21.75 24.00/22.30/25.45/23.35/22.10 22.88/21.35/25.99/24.65/21.05
尾翼偏折角度	打氣磅數PSI	60	70	80	90	
0/5/10/15/20	五六七八	27.20/27.00/27.95/28.90/26.15 23.50/23.05/24.98/28.05/23.10 28.50/26.58/29.95/27.98/26.35 28.65/26.33/32.43/29.78/25.55	32.58/33.22/36.85/39.90/33.15 32.00/31.58/35.02/37.00/31.60 35.65/33.23/36.50/35.40/33.10 33.66/31.98/35.50/33.80/31.60	37.65/37.58/39.87/43.77/37.55 37.85/35.50/39.64/44.10/35.45 39.85/37.53/41.00/39.50/37.30 37.55/35.98/39.60/37.56/35.80	45.10/44.61/47.82/50.93/44.55 44.75/42.90/46.40/49.20/42.88 47.80/44.60/49.95/47.78/44.46 43.40/42.34/46.45/44.60/42.25	

註：打氣打到90psi以上寶特瓶會爆開，故就不在繼續往上加壓力了，以免危險。

研究(九) 比較正常火箭以及旋轉火箭的穩定度以及落地分布圖：

研究(十) 利用Tracker軟體分析旋轉空氣火箭的軌跡、速度、加速度(由此可驗證是否與後面實驗一致)

研究(十一) 我們利用自製器材並用超慢速錄影，測量出空氣火箭的衝力：

研究(十二) 我們利用學校的電動打氣機測量出空氣火箭在各磅數時噴出氣體的時間以及利用風速計測量風速：

實驗九



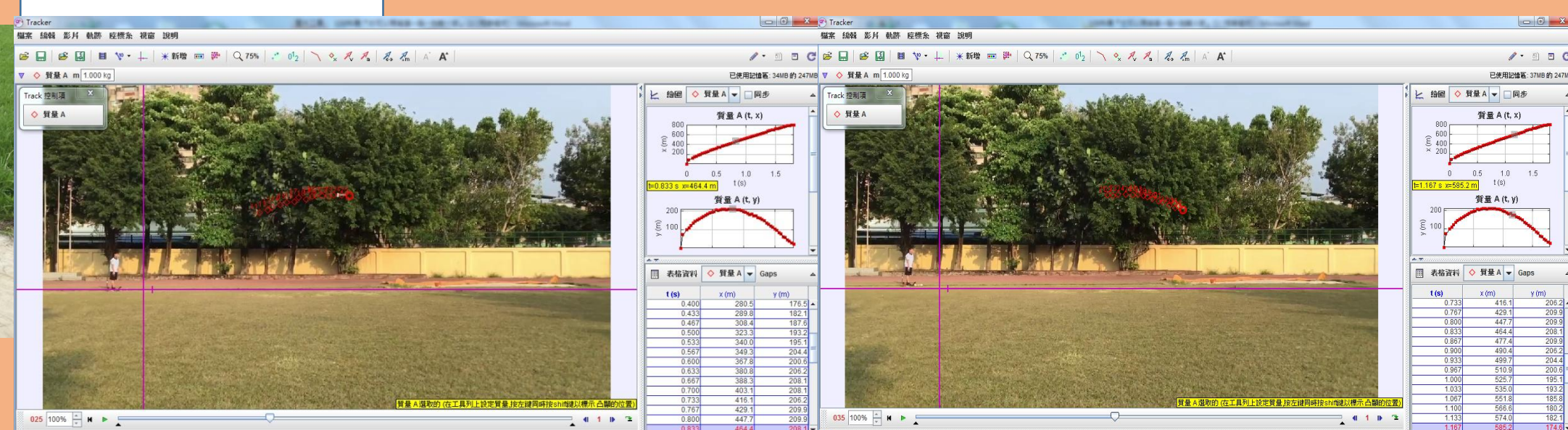
利用沙坑觀測落地分布與形狀

圖形為一長方形

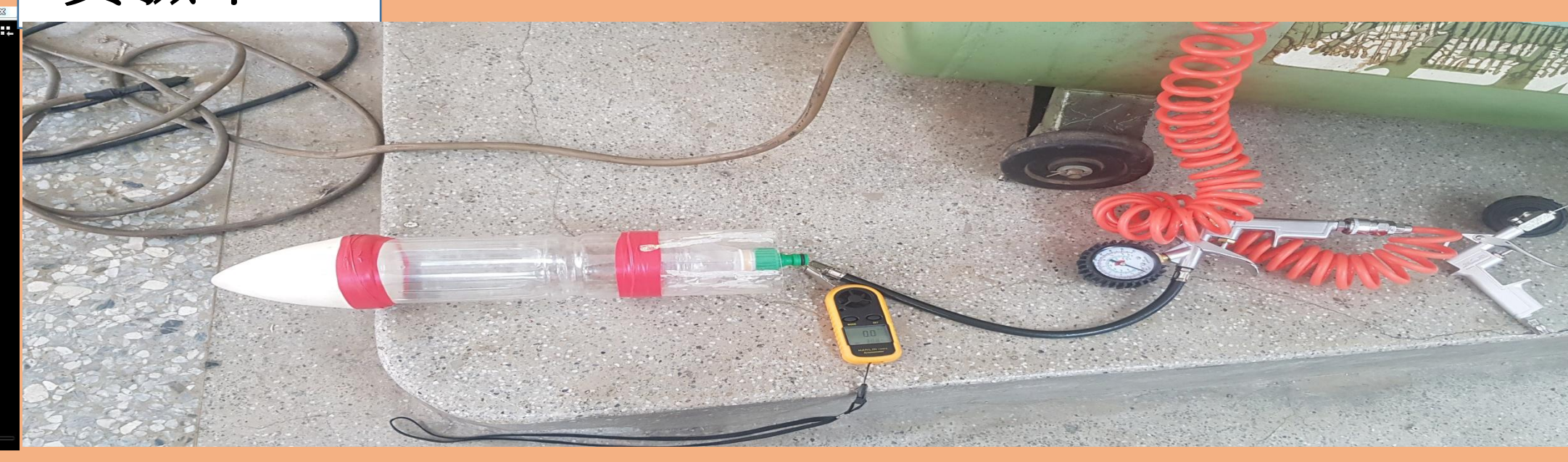


正常火箭常常偏離軌道

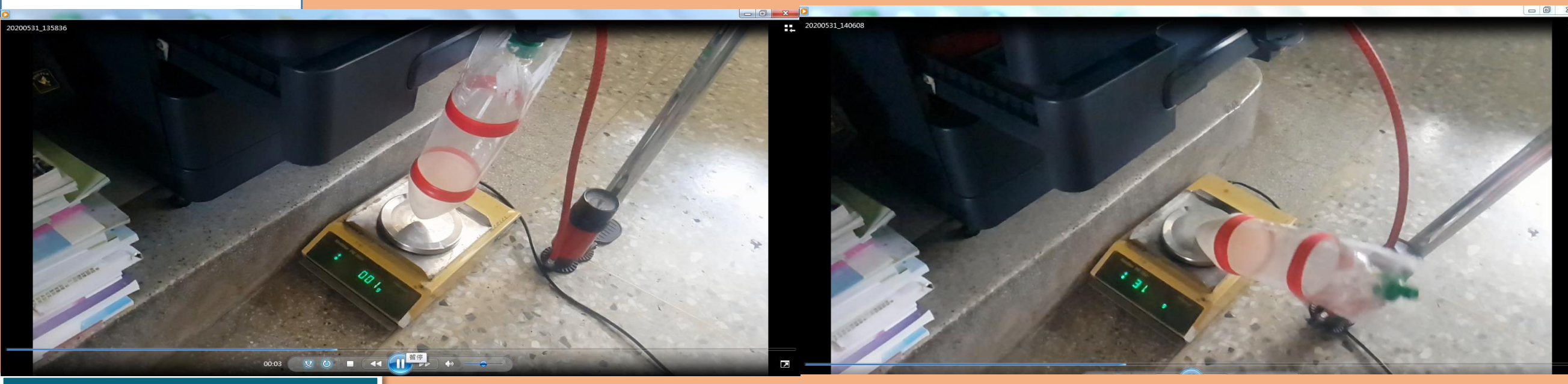
實驗十



實驗十二



實驗十一



研究(十三) 利用電風扇製造風阻，分別利用線香跟鎂帶製造的煙霧以及乾冰造成的白煙來模擬旋轉火箭(光滑表面)與空氣的碰撞情形：

研究(十四) 用風扇與乾冰跟煙霧與自製機械模擬旋轉火箭(非光滑表面)與空氣的碰撞情形：



研究十三圖形與內容：

尾翼三角形

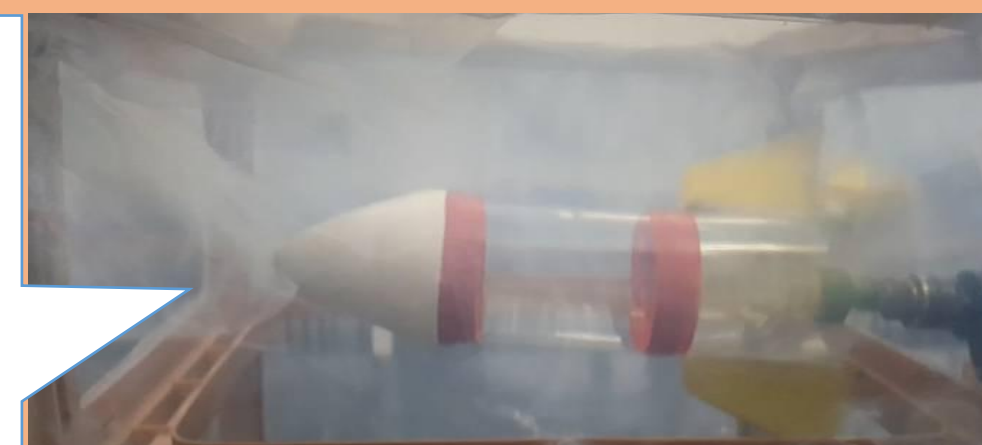


使用煙霧



使用乾冰

尾翼梯形



使用煙霧



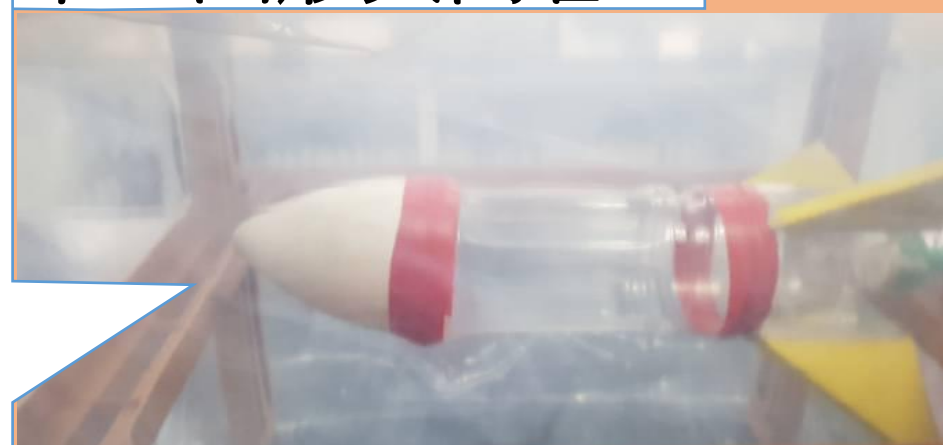
使用乾冰

(一)旋轉火箭(光滑面)、尾翼三角形、尾翼偏折角度15度；尾翼梯形、尾翼偏折角度10度：

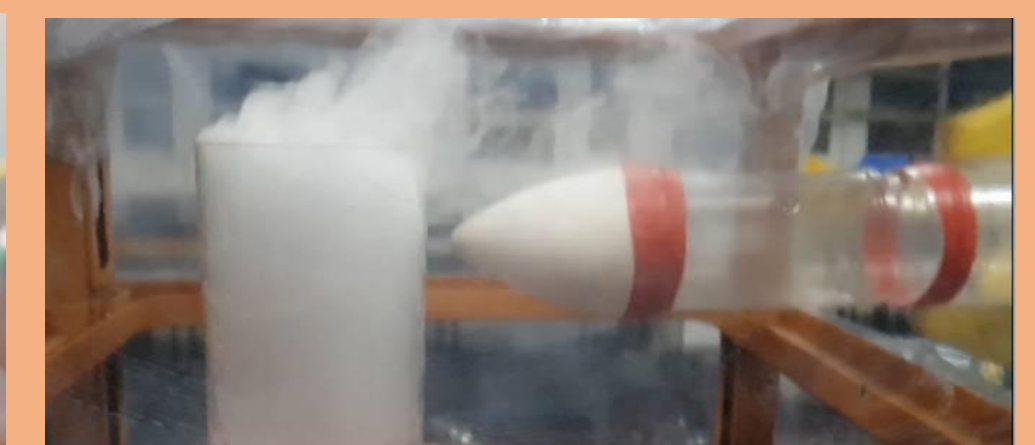
旋轉時皆可以看到彈頭前面會有空氣稀薄區近乎沒有煙霧跟白煙，而煙霧跟白煙會非常順的由中間以非常快的速率通過然後被排出到尾翼正後面區域。我們可以看下面的影片：使用煙霧<https://www.youtube.com/watch?v=rvY1Mf0RY9c>使用乾冰<https://www.youtube.com/watch?v=CH4qizFCEJE>

研究十四圖形與內容：

尾翼三角形



使用煙霧



使用乾冰

尾翼梯形



使用煙霧



使用乾冰

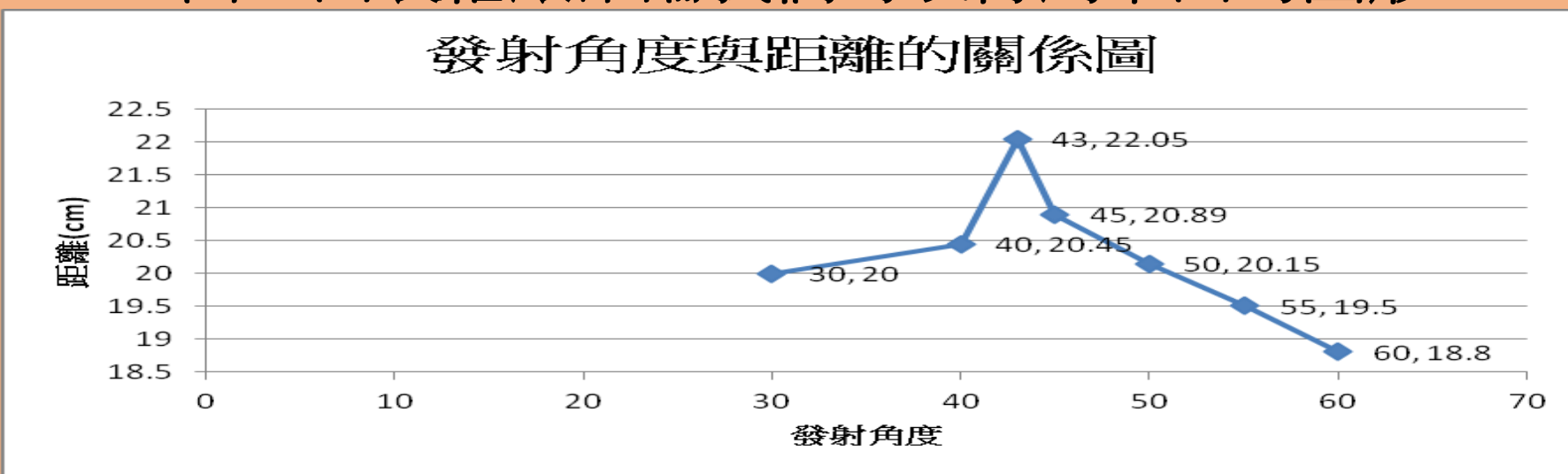
(二)旋轉火箭(非光滑面)、尾翼三角形、尾翼偏折角度15度；尾翼梯形、尾翼偏折角度10度：

梯形旋轉時會比較晃動有可能是要讓梯形完全對稱是比較困難的，而煙霧跟白煙仍然會非常順的由中間以非常快的速率通過然後被排出到尾翼正後面區域。我們可以看下面的影片：使用煙霧<https://www.youtube.com/watch?v=x-XHNbtdjPA>使用乾冰<https://www.youtube.com/watch?v=8Vpt0lav5ig>

伍、研究結果

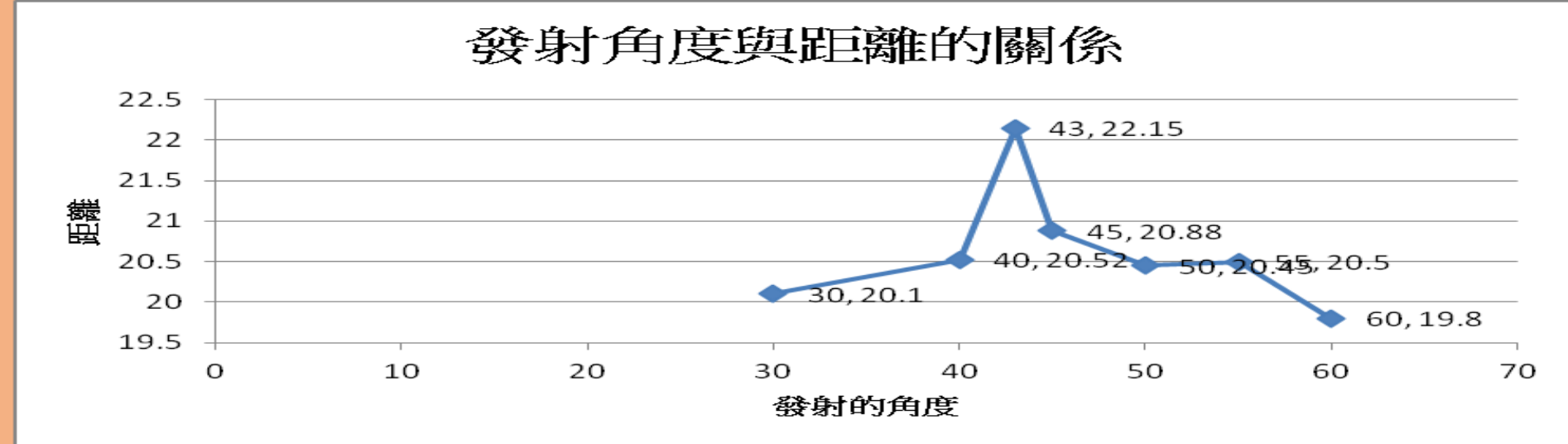
結果(一)

由上面表格跟結論我們可以得到下面的圖形：



結果(二)

由上面表格跟結論我們可以得到下面的圖形：

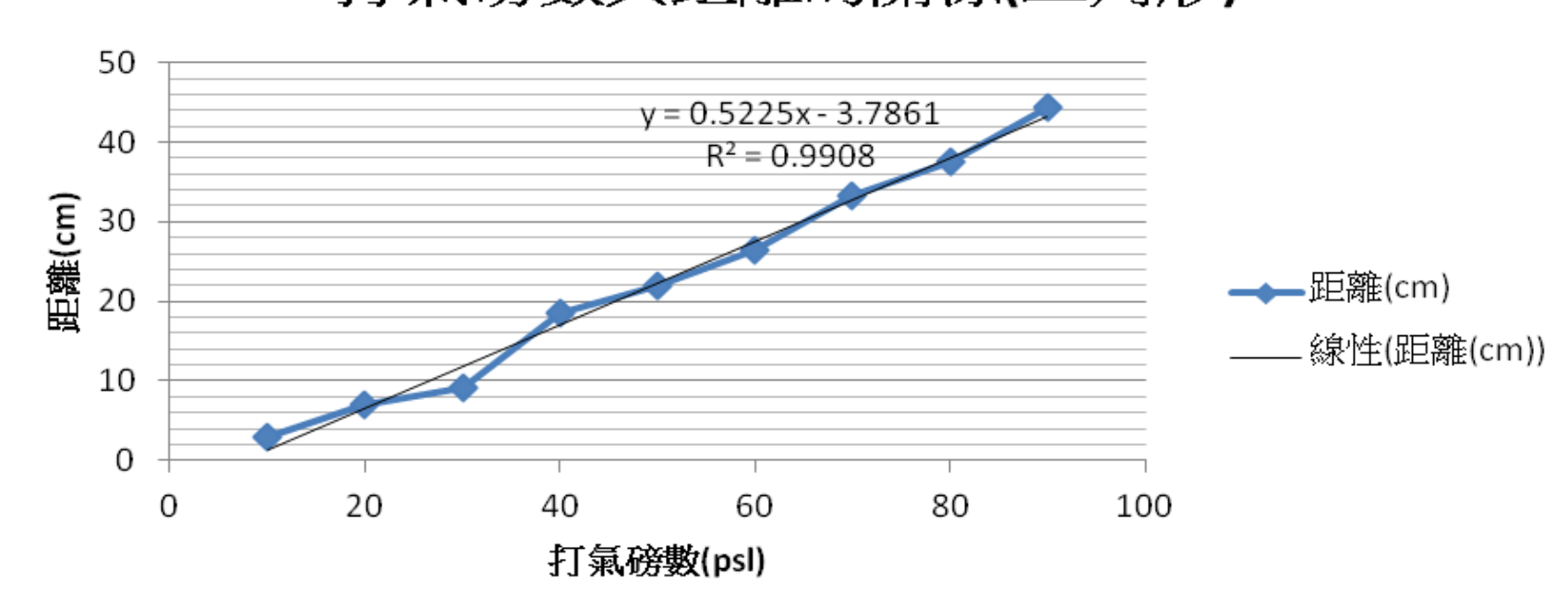


由左邊的圖形我們可以知道在43°時空氣火箭飛行最遠，跟尾翼為三角形一樣，證明在尾翼沒有偏折的情況下，發射角度跟尾翼形狀無關。

由上面的圖形我們可以知道在43°時空氣火箭飛行最遠，並非一般認為的45°。

結果(三)

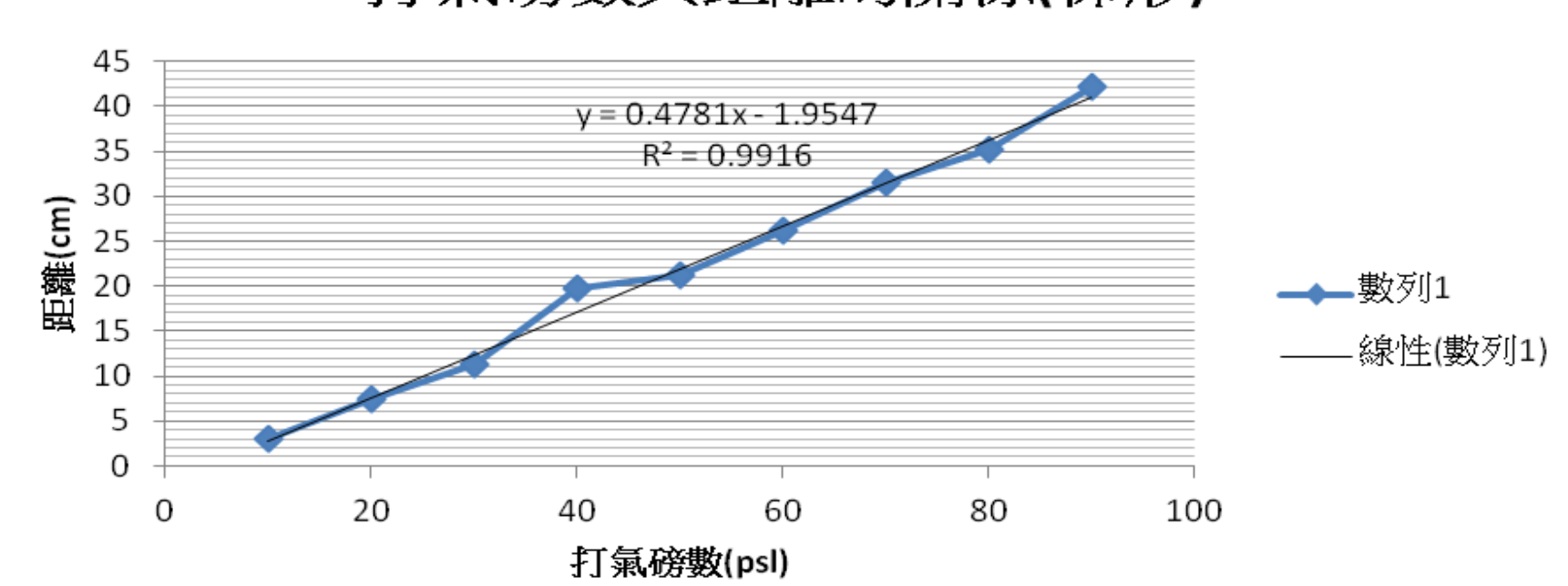
打氣磅數與距離的關係(三角形)



由上面的打氣磅數與距離關係的表格，我們可以得到這個圖形。從這個圖形中，我們幾乎可以看出來打氣磅數跟距離幾乎呈現出一個非常正相關的圖形。而做完線性迴歸後R²值更是符合我們的期許與預測，代表此實驗算是做得不錯。

結果(四)

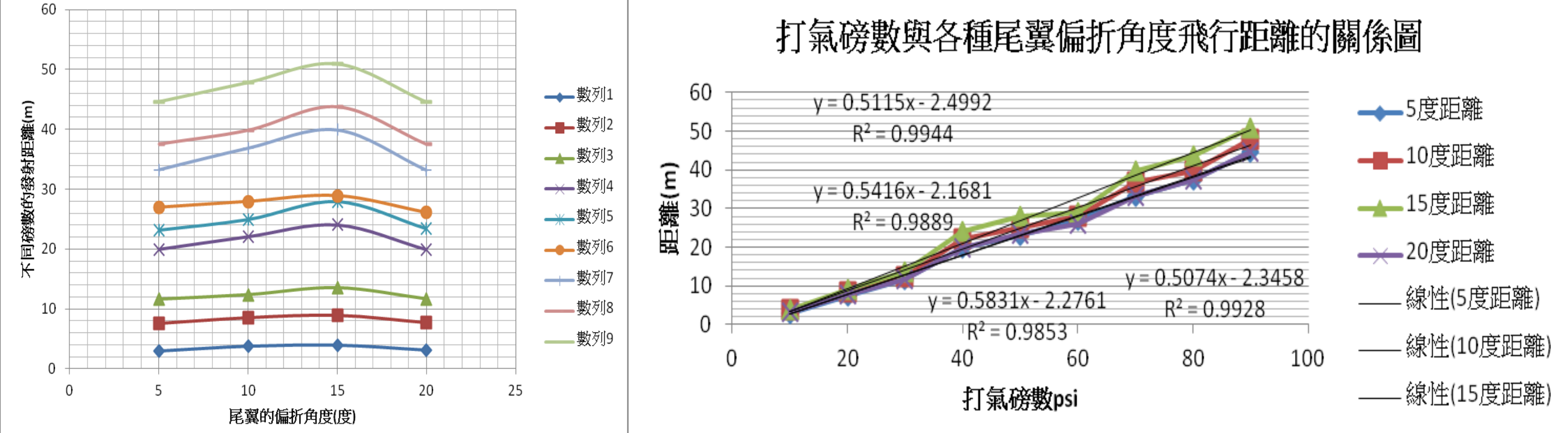
打氣磅數與距離的關係(梯形)



由上面的打氣磅數與距離關係的表格，我們可以得到這個圖形。從這個圖形中，我們幾乎可以看出來打氣磅數跟距離幾乎呈現出一個非常正相關的圖形。而做完線性迴歸後R²值更是符合我們的期許與預測，代表此實驗算是做得不錯。

結果(五)

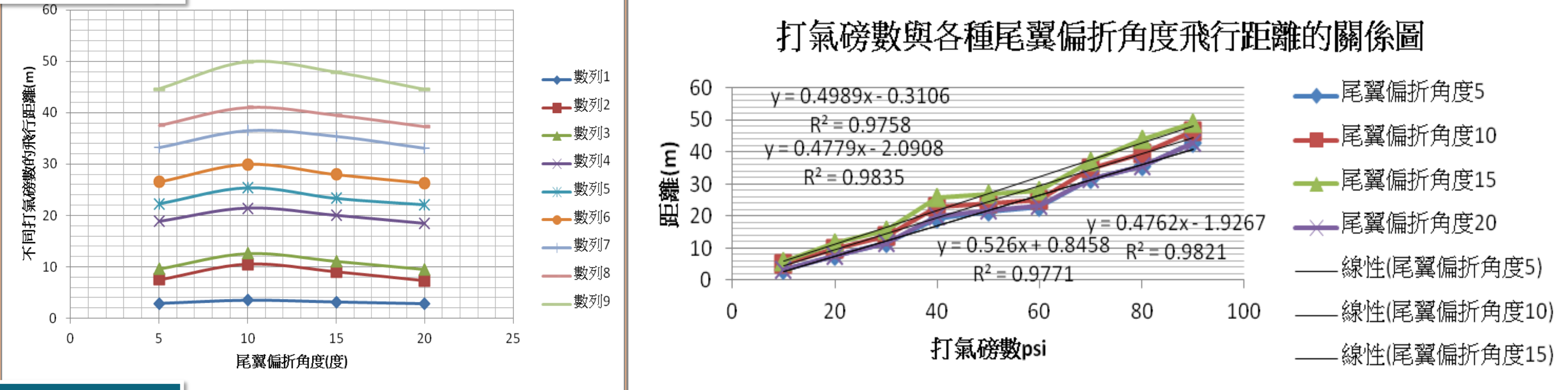
打氣磅數與各種尾翼偏折角度飛行距離的關係圖



結果五：實驗中我們可以很清楚看出，在尾翼為三角形、寶特瓶身是光滑的情況下：尾翼偏折15度時飛行的距離最遠。但透過EXCEL的作圖，我們可以發現應該是在偏折10°~15°之間時會距離最遠。而且再透過攝影的時候我們也可以看到尾翼偏折角度越大旋轉情形越明顯、轉速也越快。而從慢動作攝影影片來觀察記算可以算出，尾翼偏折15度角的旋轉達到120rpm，而在尾翼偏折20度角的旋轉更達到180rpm，但距離就飛不遠了。

結果(六)

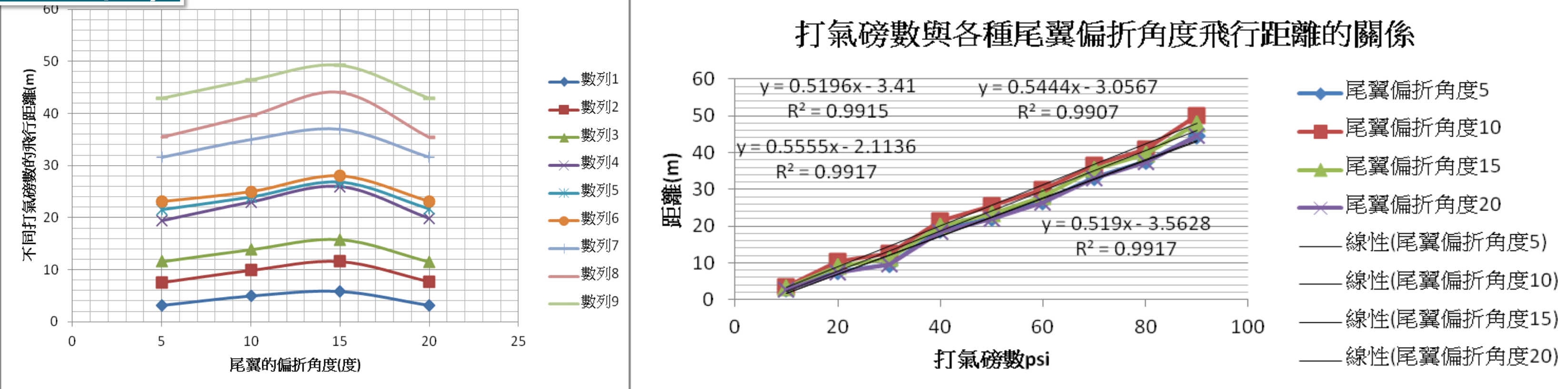
打氣磅數與各種尾翼偏折角度飛行距離的關係圖



結果六：圖中我們可以很清楚看出，在尾翼為梯形、寶特瓶身是光滑的情況下：實驗跟三角形是一樣的，都是在尾翼偏折15度時飛行的距離最遠，而真正的最大值，應該是落在10°~15°之間。但透過攝影的時候我們卻發現梯形的旋轉角速度比三角形還要小尾翼偏折15度角的旋轉只有90rpm，而在尾翼偏折20度角的旋轉也只有到120rpm比起三角形明顯旋轉少很多。

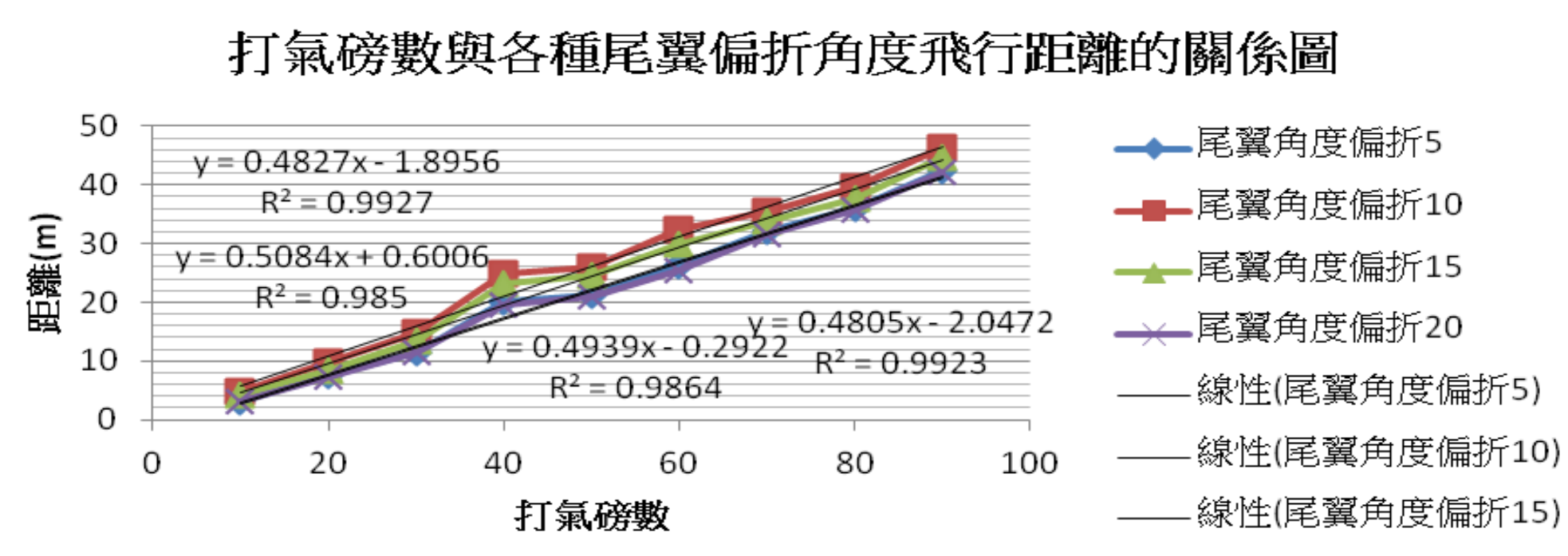
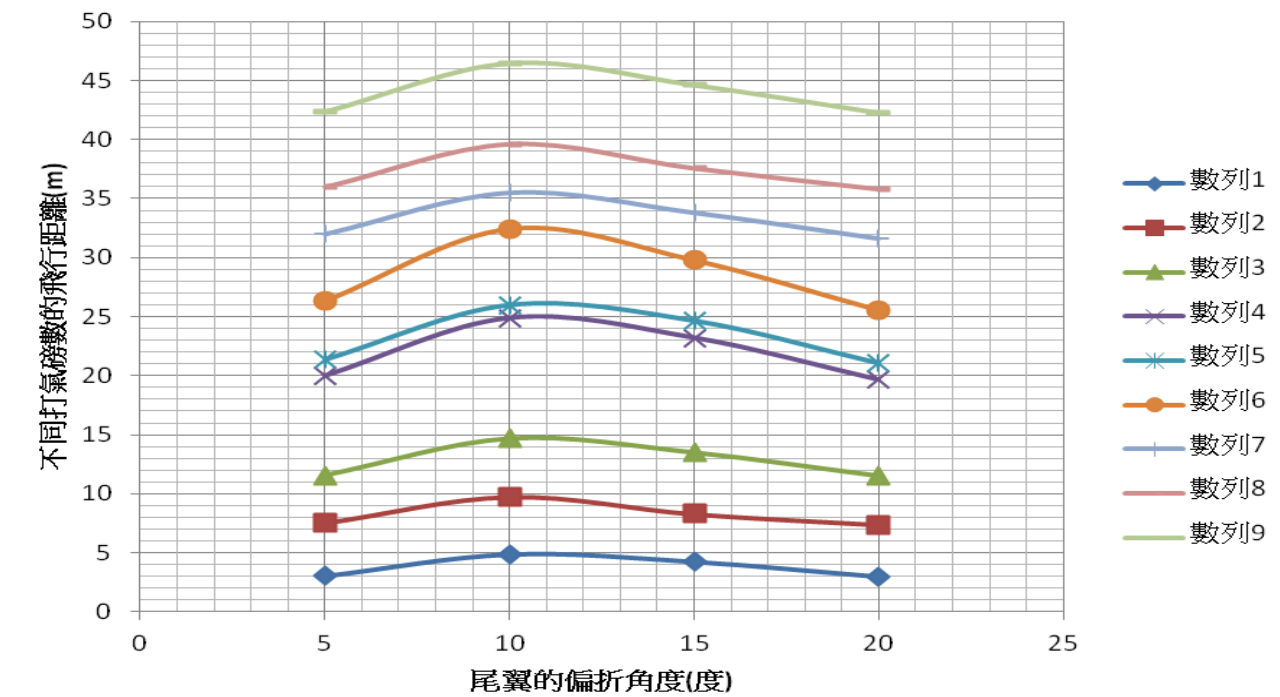
結果(七)

打氣磅數與各種尾翼偏折角度飛行距離的關係



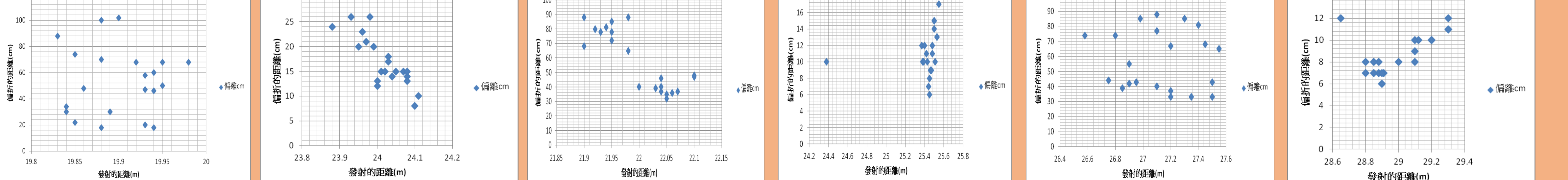
結果七：非光滑瓶身、尾翼為三角的實驗中，我們可以很清楚看出，實驗雖然做出尾翼偏折10度時飛行的距離最遠。但透過EXCEL作圖可知道真正的最大值，應該是落在10°~15°之間。而且再透過攝影的時候我們也可以看到尾翼偏折角度越大旋轉情形越明顯、轉速也越快。而從慢動作攝影的影片來觀察發現非光滑瓶身的旋轉稍為比光滑瓶身快一點，推論應該為瓶身的凹凸痕跡所致。

結果(八)



尾翼梯形的非光滑瓶身也跟之前的實驗很像，由表格中我們可以得到最遠的距離為尾翼偏折10度，但由EXCEL作圖出來的結果，我們猜測最遠的飛行距離應該在10°~15°度之間。

結果(九) 打氣磅數40、50、60PSI時正常火箭跟旋轉火箭的落地分布圖



由上面的分布圖我們可以知道，旋轉火箭在空中飛行軌跡確實比正常火箭穩定，落地的地方也跟發射的地方比較成一直線。

結果(十) 利用Tracker軟體分析旋轉空氣火箭的水平加速度=0時，為空氣火箭內部氣體噴完的時候：

t (s)	x (m)	y (m)	a _x (m/s ²)
1.033	248.5	134.9	1.030E3
1.067	261.8	140.3	-1.202E3
1.100	276.5	144.3	-1.546E3
1.133	287.2	149.6	-858.7
1.167	296.5	144.3	687.0
1.200	308.6	144.3	-343.5
1.233	320.6	144.3	-1.546E3
1.267	328.6	144.3	-1.374E3
1.300	336.6	144.3	858.7
1.333	343.3	145.6	343.5
1.367	355.3	142.9	0.000
1.400	362.0	142.9	-343.5
1.433	371.4	141.6	1.717E3
1.467	380.7	137.6	-1.202E3

由此軟體可以分析每個時間的垂直、水平距離；垂直、水平速度；以及水平加速度。因為垂直加速度一直是重力加速度，所以就不予討論。由上圖可以知道：在什麼時候寶特瓶內的氣體噴完。

結果(十一) 我們利用自製器材並用超慢速錄影，測量出空氣火箭的衝力：

<https://www.youtube.com/watch?v=u0Z1Am3NY70>(使用超慢速錄影)

<https://www.youtube.com/watch?v=7cK5G5lrE-c>(使用超慢速錄影)



結果(十二) 我們利用學校的電動打氣機測量出空氣火箭在各磅數時噴出氣體的時間以及利用風速計測量風速

陸、討論

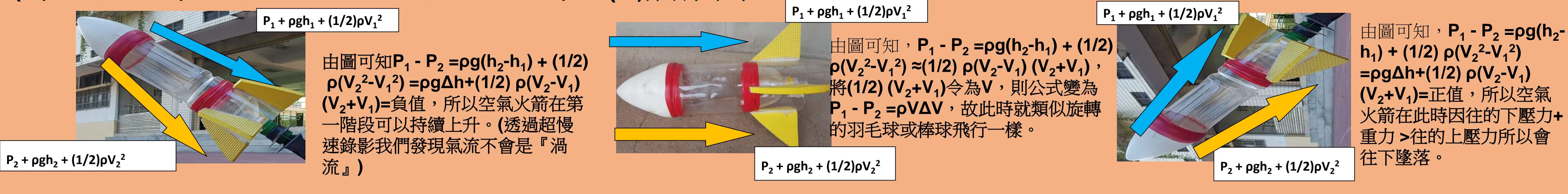
- 一、有時候一發射出去，空氣火箭就會不如預期地，以一個很水平的角度平飛的飛出去。我們運氣好大概個十幾次才會遇到這樣的情況、運氣不好幾次就會遇到一次，有時候還會一直遇到。而且也並不是只有風大的時候才會發生，有時候沒什麼風的時候也會發生。後來我們找老師討論了以後，覺得應該剛好是因為發射時遇到了沉降的氣流，這股氣流讓原本應該飛上去的空氣火箭被往下壓了，這也常常是直升機跟飛機莫名失事的主因。我們可以看實際發射影片：<https://www.youtube.com/watch?v=KxX09Dh8eFQ>
- 二、原本認為尾翼應該是越直越好，這樣會造成的風阻就會越小，也會讓空氣火箭飛的比較穩定比較遠。但經過這次實驗之後，發現其實讓尾翼是直的就必須做的非常精準、對稱，才有機會讓空氣火箭不受影響的飛行。不然其實是很容易偏掉的就像棒球中的『蝴蝶球』一樣，反而這次我們做的旋轉火箭就像棒球中的『子彈球』一樣，飛行軌跡很穩定、距離也幾乎差不多，反而更好瞄準要射擊的目標。
- 三、我們也曾經使用過壓克力塑膠片來製作尾翼，但是發現效果比EVA材質的更不好控制，也需要用更多的電氣膠帶固定也會增加整體火箭的重量。更麻煩的是會讓重心不好控制在正中間，所以我們後來就放棄用塑膠片當尾翼當對照組的實驗。
- 四、我們最後以燃燒線香、燃燒鎂帶所製造的白煙以及乾冰加熱水所製造的白煙(小水滴)一起來互相對照觀察比較，結果就好很多。(可看影片：<https://www.youtube.com/watch?v=u81cLSM5mR8>)
- 五、我們在做實驗的時候，發現到火箭落地時會彈跳離開，造成我們判斷落地點的困難。於是後來我們選擇了跳遠的跑道與沙坑當成我們的發射的地方，這樣可以讓我們更精準的判斷空氣火箭落地的地點。更驚訝的是，空氣火箭落地後並不會定住，而是會再往前滑行，造成其形狀如同長方形一樣。
- 六、在做空氣火箭衝力時候的實驗，一開始我們用水平的方向但發現這樣電子秤會失準；於是乎我們就改成了垂直方向的測量，本來沒有扣除掉火箭本身的重量，後來有把火箭本身的重量扣除掉。
- 七、用Tracker軟體做出的影片分析空氣火箭的軌跡結果，確實如同我們影片中所看到的，幾乎就是以43度角發射，最後以45度角落下。整體軌跡也都呈現出一個完美的拋物線，而此軟體更可以協助分析更多的物理量。是一個非常棒的軟體，我們很推薦大家使用。
[https://www.physlets.org/tracker/\(Tracker軟體網站\)](https://www.physlets.org/tracker/(Tracker軟體網站))

柒、結論

- 一、我們做出了最佳的發射角度並非大家公認的45度而是43度，我們一起探究了原因，應該是整個空氣火箭的重心幾乎偏在後半部。而且當發射時，空氣火箭跟空氣的撞擊會讓空氣火箭向上偏一些角度所以會自動修正成45度，因此才會是最佳的發射角度。(可看我們的慢動作錄影影片)因為一開始發射時，火箭都是被反作用力推著出去，所以也會先風的阻力受到風的阻力。因而導致彈頭會向上偏一點點。如下圖所示：
- 二、我們做出了打氣磅數跟距離的兩個公式，在尾翼不偏折的情況下：**(X帶入磅數，Y即可得到距離。)**
 (一)尾翼為三角形： $Y = 0.5225X - 3.7861$ (二)尾翼為梯形： $Y = 0.4781X - 1.9547$
 (三)旋轉火箭尾翼為三角形： $Y = 0.5831X - 2.2761$ (四)旋轉火箭尾翼為三角形： $Y = 0.526X + 0.8458$



- 三、我們也可利用斜向拋射運動原理，來計算空氣火箭的平均速率，如右圖所示： $V \cos \theta t = X$ 、舉個例子：以發射角度45°，時間=1.5秒，距離=30.00m，將其代入公式 $V \cos 45^\circ 1.5 = 30.00 \rightarrow V \approx (40/1.414) \approx 28.3$ (平均速率)，因為一開始速率會比較快，後來因為瓶中空氣噴完、壓力變小，速率也會變小。
- 四、空氣火箭在飛行中的三個狀態：
 (一)彈頭朝上時：(黃色箭頭為迎風面，藍色箭頭為背風面。)
 (二)彈頭水平時：
 (三)彈頭下落時：



- 五、由空氣模擬實驗我們可以發現，旋轉火箭可以真的劃開前面的空氣，讓前面的氣流不好阻礙旋轉火箭。而且劃開空氣之後，會讓空氣比較稀薄，也就是可以降低空氣阻力讓旋轉火箭能夠更好維持穩定的方向性以及距離。
- 六、我們在旋轉火箭上做了三個部分：
 (一)讓乾冰造成的白煙通過旋轉火箭的頭部看看會造成什麼現象？結果發現果然如同預測的一樣會將空氣不僅劃開、更可以說是排開，讓附近空氣幾乎稀薄。這樣確實可以讓旋轉火箭增加穩定性以及更遠的距離。
 (二)讓乾冰造成的白煙通過旋轉火箭的中段部分看看會造成什麼現象？結果發現也是一樣可以將空氣排開，讓旋轉火箭中段上面附近的空氣幾乎稀薄。這樣確實可以讓旋轉火箭增加穩定性以及更遠的距離。也就更像子彈發射時會一直旋轉，更穩定更有力。
 (三)這次的實驗最重要的主角就是尾翼，如果尾翼沒有偏折角度，空氣不會撞擊尾翼面積就不會產生力矩、也就不會產生旋轉。而既然提到力矩，在此也就不得不提到角動量以及轉動動能。因為 $L = r \times p$ 、總角動量：所以 $L = \sum m_i r_i^2 \omega$ ，其中令 $\sum m_i r_i^2 = I$ ，可以推出 $L = I \omega$ 。轉動動能： $K = (1/2) \sum m_i v_i^2 = (1/2) \sum m_i (r_i \omega)^2 = (1/2) \sum (m_i r_i^2) \omega^2 = (1/2) I \omega^2$ 最後我們得到一個結論：偏折角度不能太大，因為這樣除了空氣阻力比較大以外，也會把能量都變成了轉動動能，前進的動能就變得比較少一些。但尾翼的排開氣體功能真的超強，也製造了非常多的旋轉，讓轉速很快很穩定，彈道也就更準確。
- 七、所有的影片都可以上：https://www.youtube.com/channel/UCGYO1TkdPvcHuXeN2Ge9TQg?view_as=subscriber這裡觀看。

捌、參考資料及其他

(一)南一文教事業(2019)。自然與生活科技第五冊。第二章 力與運動。臺北：南一文教事業。
 (二)南一文教事業(2019)。高中物質科學物理上。第二章 平面運動。臺北：南一文教事業。
 (三)南一文教事業(2018)。高中物質科學物理下。第九章 轉動。臺北：南一文教事業。
 (四)南一文教事業(2018)。高中物質科學物理下。第十章 流體的性質。臺北：南一文教事業。
 (五)維基百科。腔線。<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E8%86%9B%E7%B7%9A>
 (六)維基百科。陀螺儀。<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E9%99%80%E8%9E%BA%E5%84%80>
 (七)維基百科。阻力。<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E9%98%BB%E5%8A%9B>

貢獻以及展望

- (一)、做出讓空氣火箭能夠更穩定飛行而且不受風力影響的結果。
- (二)、找出可以讓空氣火箭飛行最遠距離的尾翼偏折最佳角度。
- (三)、設計出可以更便利的電動或更省力的打氣機以及發射器、因為這次實驗我們足足打氣超過『五千次』，真的非常累人，尤其超過60PSI以後，要再打氣進去真的很考驗體力、耐力、意志力。
- (四)、利用自製的觀察器材研究氣流與空氣火箭互相撞擊的情形，讓所有人都能上Youtube觀看我們的實驗影片結果。
- (五)、可用於『飛彈』發射出去時萬一偏離軌道，需要修正時，改變尾翼方向可以讓飛彈再回到正常的發射軌道。
- (六)、推廣Tracker這個免費的好用物理軟體，可以利用影片教大家如何使用，並且讓大家輕鬆上手以及輕鬆參與我們的們實驗。下面有我們的影片：
<https://www.youtube.com/watch?v=L-EWTiGk3Qk> <https://www.youtube.com/watch?v=IVV/8m0nxcPi>