

中華民國第四十七屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 理化科

031616

談紙神功-紙飛機的滑翔研究

學校名稱：台中縣立后綜中學(附設國中)

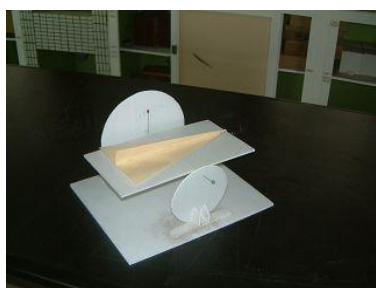
作者： 國二 蕭舜鴻 國二 吳冠賢 國二 林坤霈	指導老師： 王富民 胡雅雯
-----------------------------------	---------------------

關鍵詞：紙飛機 重心 反作用力

談紙神功-紙飛機的滑翔研究

壹、摘要：

- 一、風洞資料搜集及理論探討。
- 二、簡易風洞設計製作。
- 三、利用簡易風洞測試各式機翼模型在風洞中各種攻角受力狀況。
- 四、風洞實驗發現：各式機翼在攻角 50 度有最大升力、同一攻角各式機翼升力大小無明顯差異。判斷攻角影響大於機翼形式。
- 五、紙飛機機翼上下並無明顯長度差、飛行特技表演倒飛，用白努力原理似乎無法解釋？
- 六、從機翼風洞實驗觀察分析我們判斷：空氣反作用力是提供紙飛機滑翔所需升力的主要力量。
- 七、空氣動力理論分析，影響紙飛機滑翔的可能因素還有：重心位置、初速仰角、機翼面積。
- 八、製作紙飛機發射器、重心測量器，來測試重心位置、初速仰角、紙飛機材料（單位面積重量）、機翼面積大小對紙飛機飛行的影響。



貳、研究動機：

自古以來，飛翔是人們共同的夢想。在讀國小時，玩紙飛機是很普通的遊戲活動，有些紙飛機可以飛的又高又遠，有些卻是飛不起來。小時後的疑惑一直存在著。

因此，想藉由這個主題來仔細研究，如何讓紙飛機飛得更遠，變因是什麼，這就是我們所要研究的，於是我們進行了以下實驗。

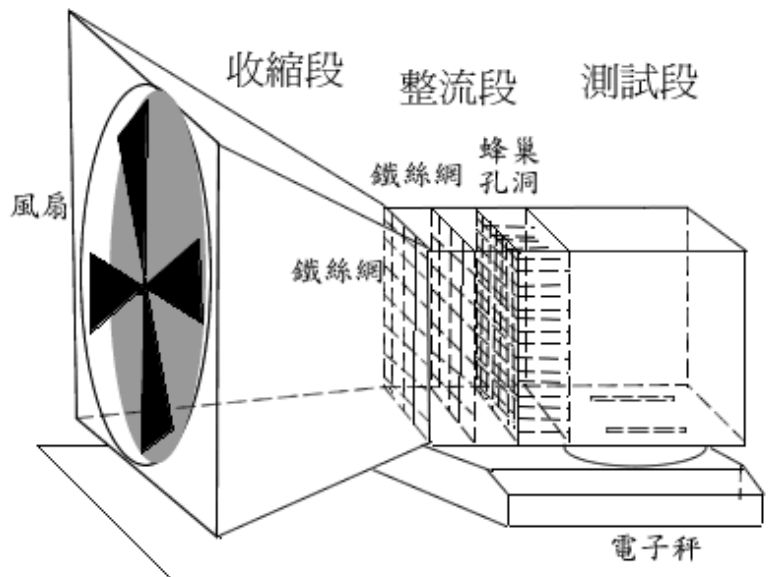
參、研究目的：

- 一、探討如何製作簡易風洞。
- 二、利用簡易風洞進行測試，了解機翼升力的主要來源。
- 三、探討重心位置與紙飛機滑翔的關係。
- 四、探討初速仰角與紙飛機滑翔的關係。
- 五、探討紙飛機材質（單位面積的重量）對飛機滑翔的影響。
- 六、探討機翼面積與紙飛機滑翔的關係。
- 七、設計一架可以滑翔很遠的紙飛機。

肆、研究設備及器材：

- 一、簡易風洞：

動力段



冷氣封口用塑膠版

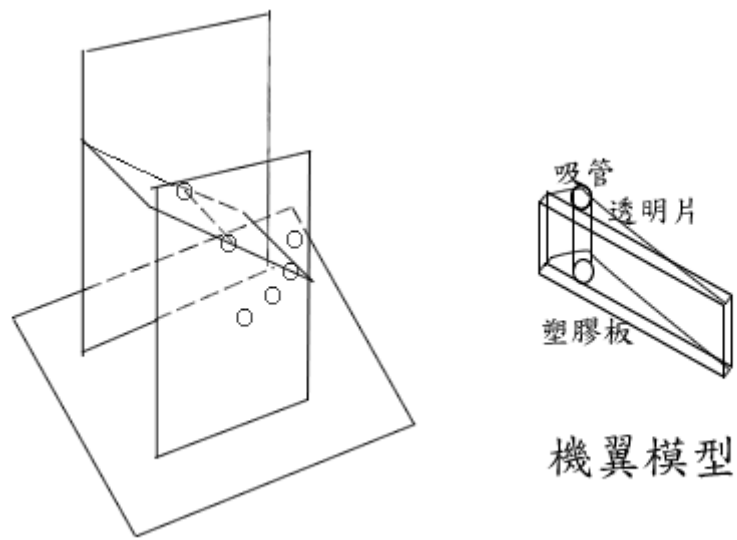


調速開關



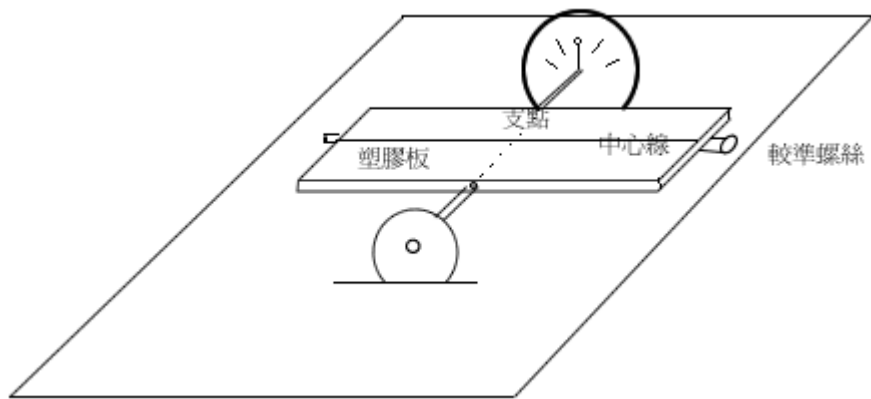
圖一、簡易風洞示。

二、機翼模型



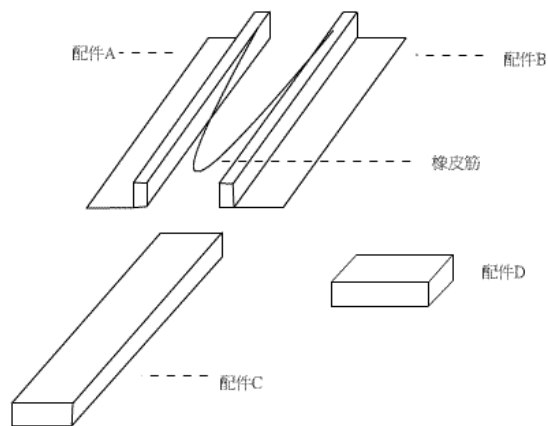
圖二、機翼模型。

三、重心測量器：



圖三、重心測量器。

四、紙飛機發射器：



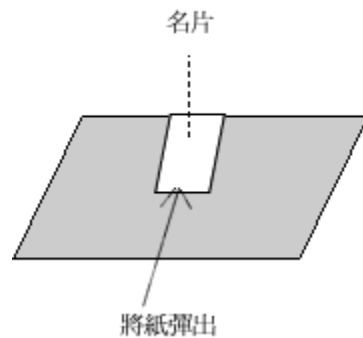
圖四、紙飛機發射器設計圖。

五、三角翼紙飛機。

伍、研究方法：

一、名片紙飛行測試

- (一) 名片紙平放於一平板上，短邊與板前緣切齊，板面與地面水平，沿板面將紙彈出（如圖五），觀察其飛行狀況，並記錄於表一。



圖五、名片紙飛行測試示意圖。

- (二) 重複步驟（一）但於紙張前緣中央夾 1 小鐵夾。
(三) 重複步驟（一）（二）但改變平板角度為上揚及下俯。

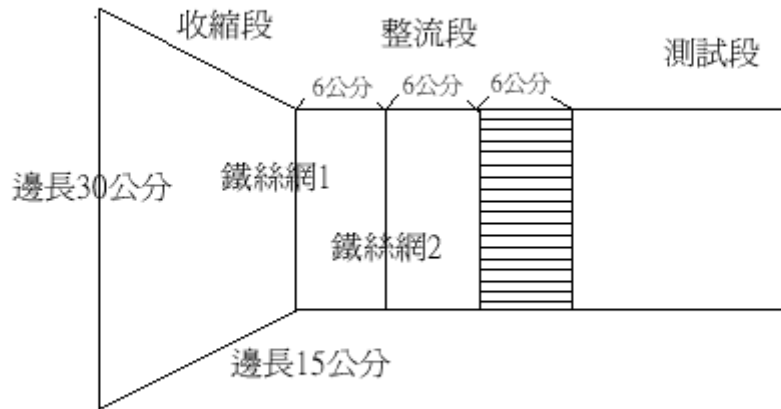
二、簡易風洞設計製作

（一）風洞理論分析

一般風洞包含動力段、收縮段、整流段、測試段。

- 1、動力段：可利用送氣或吸氣的方式產生氣流，動力段應考慮減震設計減少震動對實驗的影響。
- 2、收縮段：根據連續方程式(Equation of continuity)，流體在截面積不同的導管中流動時，在截面積較小的通道處，流速較快（ $A_1V_1 = A_2V_2$ ；A 代表截面積、V 代表流速）。通常收縮段兩端面積差最好 4：1 以上會有較佳效果。
- 3、整流段：整流段的設計包含整流網及蜂巢孔洞，整流網的距離與蜂巢孔洞深度及孔洞大小需與風速配合才能產生穩定的氣流。
- 4、測試段：進行實驗操作的區段，需考慮實驗操作及觀察的方便性。

（二）簡易風洞製作



圖六、風洞設計簡圖

- 1、氣流穩定度測試：將兩條 15 公分尼龍繩固定於大頭針圓頭端，利用鐵刷將尼龍繩刷成細毛狀。將大頭針水平插在蜂巢正中央，啟動風洞，觀察風洞測試段不同強度氣流的狀態，改變大頭針位置測試上、下、左、右氣流狀態。



- 2、避震設計：當動力段風扇運轉時，會產生震動，影響電子天平穩定，增加測量困難度。於動力段及整流段下部增加保麗龍板及折疊毛巾布，達到減振效果，實際測試發現效果不錯。

三、機翼在風洞中升力測試

- (一) 將機翼模型底座，穿過風洞模型測試段底部平行溝槽。
- (二) 機翼模型以砝碼壓住底座，因是測量重量差，所以砝碼重量並不影響測量結果，但可增加秤盤穩定性，減少測量誤差。
- (三) 如圖二將機翼模型固定於模型底座，利用量角器從機翼與水平面夾角零度開始，每隔 10 度於一側固定板做一記號，並用圖釘刺穿，欲改變機翼角度時，只要將機翼調整對準該角度之小洞，再以圖釘固定機翼。
- (四) 機翼模型共有三種：
 - 平板型：機翼上下無長度差，將塑膠板裁切成長 12*10 公分製成。
 - 翼型：機翼上側較長。裁切口徑 1 公分吸管 12 公分黏於距塑膠板一端 1 公分處與長邊平行，再用透明片包覆 (12*25 公分) (如圖二)。
 - 倒翼型：機翼下側較長，將翼型機翼顛倒放置即可。
- (五) 升力測量方法：將機翼模型按照步驟 (一)、(二)、(三) 置於升力測量器測

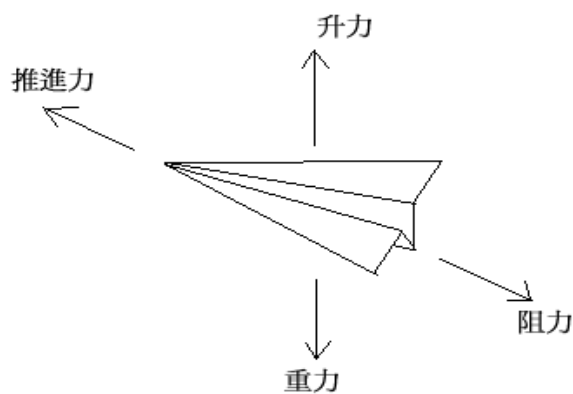
試段的電子秤盤上，記錄測得重量，再將風洞風扇啓動，記錄電子秤的讀數，減少的重量即為升力。

(六) 利用以上方法測量各式機翼在不同風力各種攻角產生的升力，記錄於表二、四、六。



四、從力學與空氣動力學的角度進行紙飛機受力情形的理論分析：

(一) 影響紙飛機的力量主要有推進力、阻力、升力、重力。



圖七、紙飛機滑翔過程受力狀況。

(二) 影響升力的因素：

1、空氣浮力：

影響不大暫不考慮。

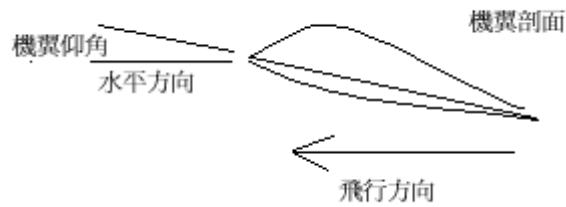
2、白努力原理：

當飛機飛行時，機翼與空氣產生相對速度，使上下的流體動態壓力不同產生壓力差，若向上壓力較大飛機就向上爬升。

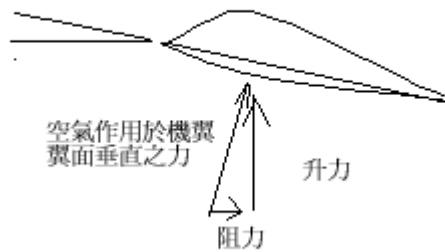


圖八、飛機飛行時機翼剖面圖。

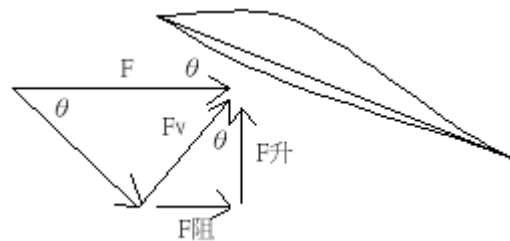
3、牛頓第三運動定律（作用力與反作用力定律）：



圖九、一般機翼與水平面有一仰角。



圖十、飛機飛行時空氣作用於機翼之力圖。



圖十一、升力與阻力分析圖。

假設因飛機飛行，空氣會產生一平行於飛行方向的反作用力 F 於機翼，參考圖十一做力的分析：

$$F_v = F \cdot \sin\theta \quad (F_v : \text{垂直機翼的分力})$$

$$F_{\text{升}} = F_v \cdot \cos\theta = F \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta = 1/2 \cdot F \cdot \sin 2\theta \quad (F_{\text{升}} : \text{升力})$$

$$F_{\text{阻}} = F_v \cdot \sin\theta = F \cdot \sin\theta \cdot \sin\theta = F \cdot \sin^2\theta \quad (F_{\text{阻}} : \text{阻力})$$

由以上分析當 $\theta = 45^\circ$ 可產生最大的升力， $\theta = 90^\circ$ 時會產生最大的阻力。

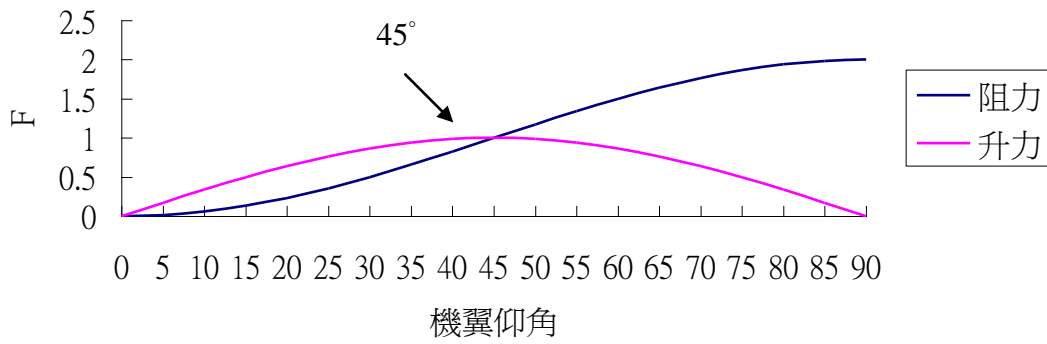
$$F_{\text{升}} = F_{\text{阻}}$$

$$F \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta = F \cdot \sin^2\theta$$

$$\tan\theta = 1$$

$$\theta = 45^\circ$$

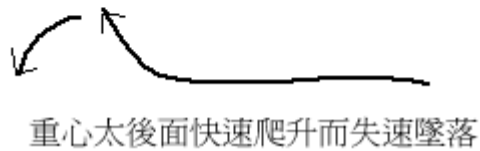
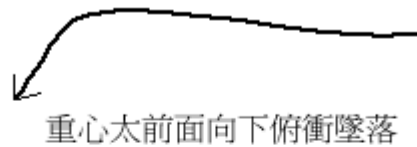
將升力與阻力對機翼仰角做關係圖如圖十二。



圖十二、機翼仰角與升力、阻力之關係圖。

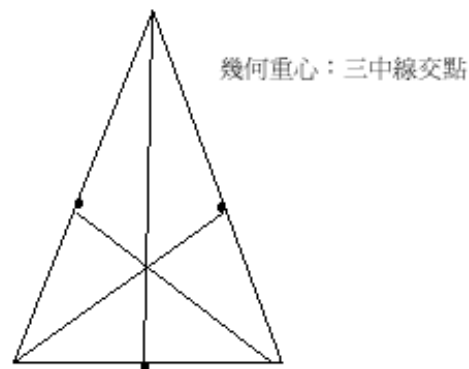
4、重心的影響：

- (1) 重心位置太前面：如圖十三上圖軌跡。
- (2) 重心位置太後面：軌跡圖如圖十三下圖。



圖十三、重心位置對飛行的影響。

- (3) 升力主要是靠空氣給機翼反作用力的向上分力，假設這些力量是均勻分佈在機翼表面，那升力合力應該作用在飛機機翼幾何重心位置，以三角形機翼為例，如圖十四。



圖十四、三角形幾何重心。

5、機翼面積的影響：

- (1) 機翼面積增大，空氣給機翼的反作用力會變大，升力及阻力皆變大。

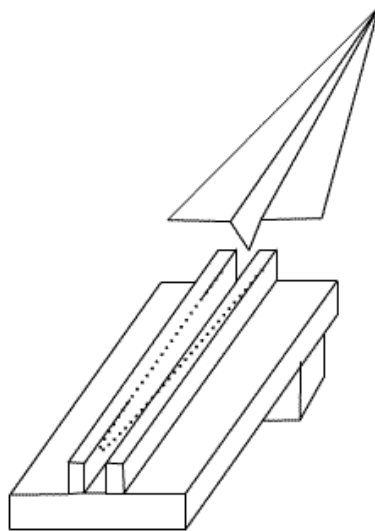
- (2) 當機翼仰角小於 45 度，空氣對機翼的力量影響升力較大，仰角大於 45 度時影響阻力較大。(如圖十二)
- (3) 紙飛機材質，單位面積重量越小，此時面積增大，升力變大但重量增加最少。但相對的因質量變小慣性變小向前的動力較易受阻力影響而變小。
- (4) 因此面積同時影響影響升力與阻力。

五、重心位置與紙飛機滑翔關係之研究

(一) 選擇最基本三角翼飛機作為研究對象，有幾項好處：

- 1、折疊手續簡單，避免不必要誤差。
- 2、三角翼飛機容易用圖解法繪出幾何重心。
- 3、同一種折法，紙飛機各項變因的控制較容易。

(二) 利用發射器很容易就可以做到力道的控制變因。同一架飛機之質量固定慣性也可被固定。



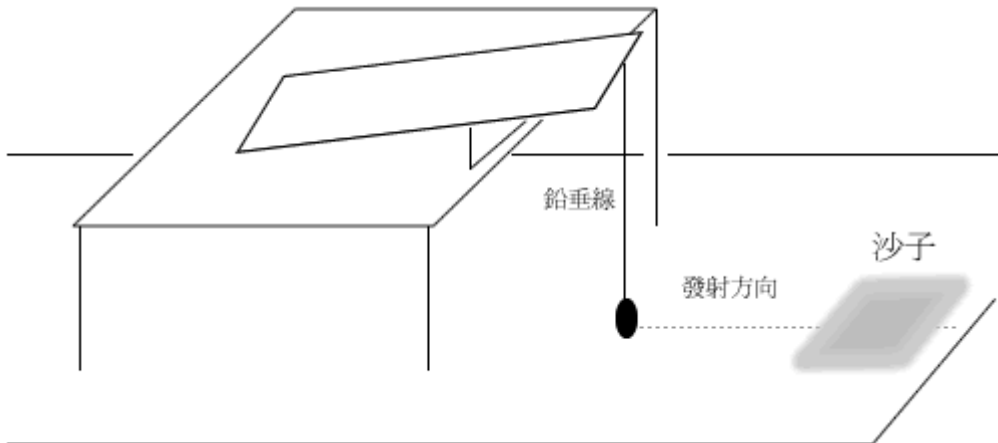
圖十五、紙飛機發射器。

(三) 重心測量器是利用支點在中間的第二類槓桿原理設計而成，測量器未放任何東西時保持水平，指針歸零（可調整較準螺絲）。當紙飛機置於塑膠板上，中心線必須對準塑膠板中心線，並前後調整至指針歸零，此時紙飛機重心通過測量器支點，便可測出紙飛機重心位置。



- (四) 在紙飛機尾部夾二支迴紋針。
- (五) 利用重心測量器測出紙飛機之重心，並標出重心位置，測量重心與機頭距離。
- (六) 將發射器橡皮筋以彈簧秤拉至一定強度，於軌道邊緣做一記號，並記錄彈簧秤測得之力量大小。

- (七) 用 5 塊木塊將紙飛機發射器墊高，將橡皮筋拉至記號處，紙飛機置於發射器對準記號，放開橡皮筋，紙飛機受力而射出，試射一次，於飛機落點前後一段區域灑上沙子，飛機落地時會有印記，幫助判斷落點，如圖十六。



圖十六、紙飛機發射器操作之示意圖

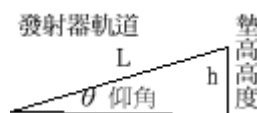


- (八) 將捲尺從發射器發射點（鉛垂線輔助標示）沿發射方向拉長，固定於地面做距離測量。若有偏向或機身翻轉該數據不算，調整機翼重測。
- (九) 重複發射五次，測量飛行距離，並記錄於表八。
- (十) 將迴紋針每次往機頭方向前移 2 公分，重複步驟（三）到（九），每次操作前利用彈簧秤做橡皮筋彈力校準。
- (十一) 利用幾何原理，畫出紙飛機機翼的幾何重心位置（三中垂線的交點）。
- (十二) 測量幾何重心距紙飛機機頭的距離。

六、初速仰角與紙飛機滑翔關係之研究

- (一) 利用發射器前緣加墊木塊的方式改變發射初速的仰角（射角），墊高後需調整發射器位置，使發射器前緣與墊高前切齊（可於發射器前緣固定一鉛垂線輔助對齊，如步驟六之圖十六），避免發射點變動產生的誤差。
- (二) 初速仰角可利用三角關係計算而得（如圖十七）。

$$\theta = \text{sine}^{-1}(h/L)$$



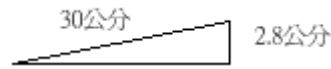
圖十七、發射初速仰角計算。

- (三) 將發射器水平置於桌面，前緣不加木塊，此時射角是零度；將橡皮筋拉至記

號處，並把紙飛機置於軌道，機尾對準記號，利用橡皮筋彈力將紙飛機發射，測量紙飛機飛行的距離，將數據記錄於表十，重複操作 5 次。

(四) 用彈簧秤較準橡皮筋拉力。(一個仰角測完後較準一次)

(五) 將發射器前緣(距尾部 30 公分處)以一次增加 2 片木塊墊高(約 2.8 公分，仰角大約提高 5.4 度)，其餘操作如步驟(三)、(四)。



$$\theta = \sin^{-1} 2.8/30 \approx 5.4^\circ$$

(六) 計算步驟(五)各種狀況之射角，並記錄於表十。

(七) 折疊一無翼紙飛機，重複步驟(三)到(六)，將資料紀錄於表十，做為對照組。

七、紙飛機材質(單位面積的重量)對飛機滑翔的影響

(一) 將表五各種紙材，裁切 10 公分邊長的正方形，並測量該正方形重量，並將結果記錄於表五。

(二) 計算出各種材料單位面積重量。

(三) 利用各種材料製作成同樣形式、大小的紙飛機，利用迴紋針調整紙飛機之重心至幾何重心前，置於發射器試射，測出最佳重心位置。

(四) 發射器墊高 5 片木塊，各架飛機測量飛行距離 5 次，記錄於表十二。

八、機翼面積與紙飛機滑翔的關係

(一) 利用 A4 的影印紙折出一架較步驟六，機翼面積大的紙飛機。

(二) 重複步驟六，並記錄於表十三。

陸、研究結果：

一、名片紙飛行測試

射出角度 前緣增重	水平	有仰角	有俯角
無小鐵夾	上揚飄落	上揚飄落	飛出掉落
有小鐵夾	飛出掉落	飛出掉落	飛出掉落

表一、名片紙飛行狀況。

二、機翼在風洞中的升力測試

(一) 氣流強度：強

1、平板型機翼

攻角 (度)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
無氣流時重量 (克重)	134.2	134.0	134.1	134.1	134.1	134.2	134.3	134.3	134.4
有氣流時重量 (克重)	134.3	130.4	128.7	126.9	125.6	124.8	125.3	127.6	131.2
升力 (克重)	-0.1	3.6	5.4	7.2	8.5	9.4	9.0	6.7	3.2

2、翼型機翼

攻角 (度)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
無氣流時重量 (克重)	141.3	141.3	141.3	141.3	141.2	141.1	141.1	141	141
有氣流時重量 (克重)	140	137.7	125.2	133.9	132.3	131.4	132.2	134.2	138.2
升力 (克重)	1.3	3.6	6.1	7.4	8.9	9.7	8.9	6.8	2.8

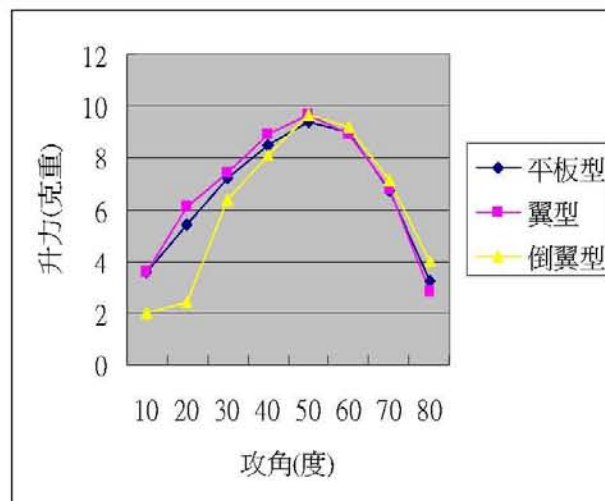
3、倒翼型機翼

攻角角 (度)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
無氣流時重量 (克重)	141.1	141.2	141.3	141.3	141.2	141.2	141.2	141.3	141.2
有氣流時重量 (克重)	142.9	139.2	138.9	134.9	133.1	131.5	132	134.2	137.2
升力 (克重)	-1.8	2.0	2.4	6.4	8.1	9.7	9.2	7.1	4.0

表二、各型機翼在強氣流中各種攻角升力測量。

類型 攻角(度)	平板型升力 (克重)	翼型升力 (克重)	倒翼型升力 (克重)
0	-0.1	1.3	-1.8
10	3.6	3.6	2.0
20	5.4	6.1	2.4
30	7.2	7.4	6.4
40	8.5	8.9	8.1
50	9.4	9.7	9.7
60	9.0	8.9	9.2
70	6.7	6.8	7.1
80	3.2	2.8	4.0

表三、強氣流中各型機翼風洞測試升力比較表。



圖表一、強氣流中各型機翼風洞測試升力比較。

(二) 氣流強度：中

1、平板型機翼

攻角 (度)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
無氣流時重量 (克重)	134.2	134.1	134.2	134.2	134.0	134.2	134.1	134.1	134.1
有氣流時重量 (克重)	135	131.2	129.8	128.5	128.0	126.2	126.9	128.6	131.5
升力 (克重)	-0.8	2.9	4.4	5.7	6.0	8.0	7.2	5.5	2.6

2、翼型機翼

攻角 (度)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
無氣流時重量 (克重)	141.3	141.2	141.2	141.2	141.2	141.2	141.3	141.2	141.3
有氣流時重量 (克重)	140.3	138.5	137.2	136.0	135.0	133.7	134.5	137.7	138.6
升力 (克重)	1.0	2.7	4	5.2	6.2	7.5	6.8	3.5	2.7

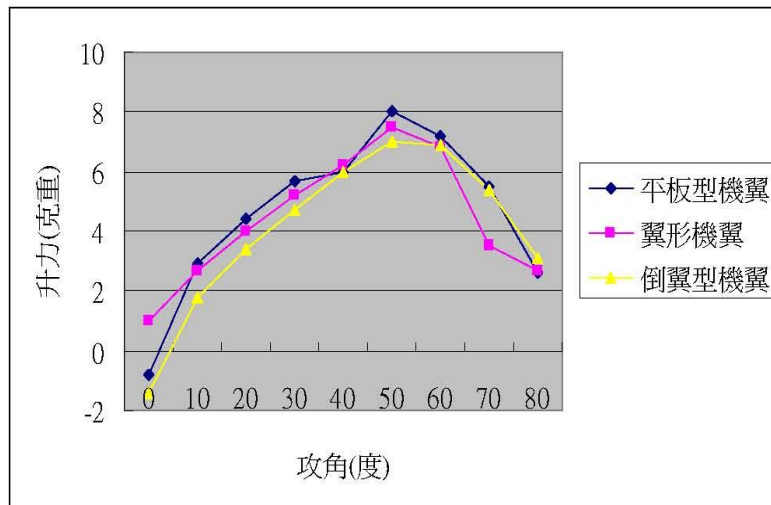
3、倒翼型機翼

攻角 (度)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
無氣流時重量 (克重)	141.3	141.2	141.2	141.2	141.2	141.2	141.2	141.2	141.2
有氣流時重量 (克重)	142.7	139.4	137.8	136.5	135.2	134.2	134.3	135.8	138.1
升力 (克重)	-1.4	1.8	3.4	4.7	6.0	7.0	6.9	5.4	3.1

表四、各型機翼在中氣流中各種攻角升力測量。

類型 攻角(度)	平板型升力 (克重)	翼型升力 (克重)	倒翼型升力 (克重)
0	-0.8	1.0	-1.4
10	2.9	2.7	1.8
20	4.4	4.0	3.4
30	5.7	5.2	4.7
40	6.0	6.2	6.0
50	8.0	7.5	7.0
60	7.2	6.8	6.9
70	5.5	3.5	5.4
80	2.6	2.7	3.1

表五、中氣流中各型機翼風洞測試升力比較表。



圖表二、中氣流中各型機翼風洞測試升力比較。

(三) 氣流強度：弱

1、平板行機翼

攻角 (度)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
無氣流時重量 (克重)	134.2	134.1	134.2	134.2	134.0	134.2	134.1	134.1	134.1
有氣流時重量 (克重)	134.4	133.3	132.7	132.6	132.3	132.2	134.3	132.6	133.3
升力 (克重)	-0.2	0.8	1.5	1.6	1.7	2.0	6.9	1.5	0.8

2、翼型機翼

攻角 (度)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
無氣流時重量 (克重)	141.3	141.2	141.2	141.2	141.2	141.2	141.3	141.2	141.3
有氣流時重量 (克重)	140.8	140.5	140.2	140.1	140.0	139.6	139.8	140.1	140.6
升力 (克重)	0.5	0.7	1.0	1.1	1.2	1.6	1.5	1.1	0.7

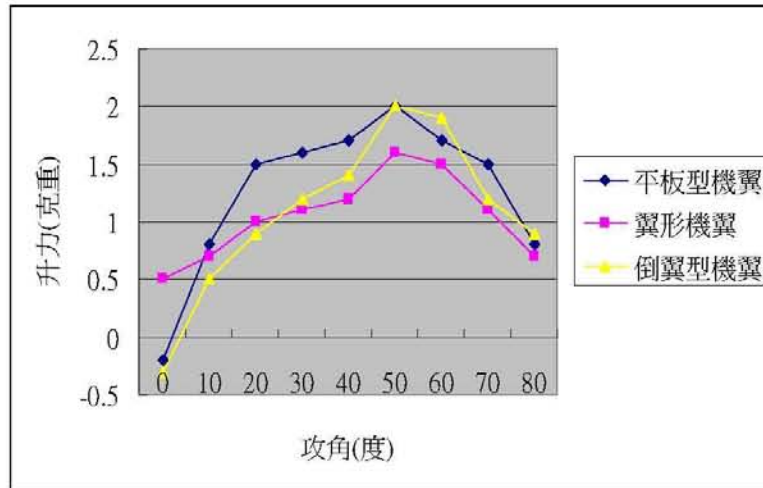
3、倒翼型機翼

仰角 (度)	0	10	20	30	40	50	60	70	80
無氣流時重量 (克重)	141.3	141.2	141.2	141.2	141.2	141.2	141.2	141.2	141.2
有氣流時重量 (克重)	141.6	140.7	140.3	140.0	139.8	139.2	139.3	140	140.3
升力 (克重)	-0.3	0.5	0.9	1.2	1.4	2.0	1.9	1.2	0.9

表六、各型機翼在弱氣流中各種攻角升力測量。

類型 角度(度)	平板型升 力 (克重)	翼型升力 (克重)	倒翼型升 力 (克重)
0	-0.2	0.5	-0.3
10	0.8	0.7	0.5
20	1.5	1.0	0.9
30	1.6	1.1	1.2
40	1.7	1.2	1.4
50	2.0	1.6	2.0
60	1.7	1.5	1.9
70	1.5	1.1	1.2
80	0.8	0.7	0.9

表七、弱氣流中各型機翼風洞測試升力比較表。



圖表三、弱氣流中各型機翼風洞測試升力比較。

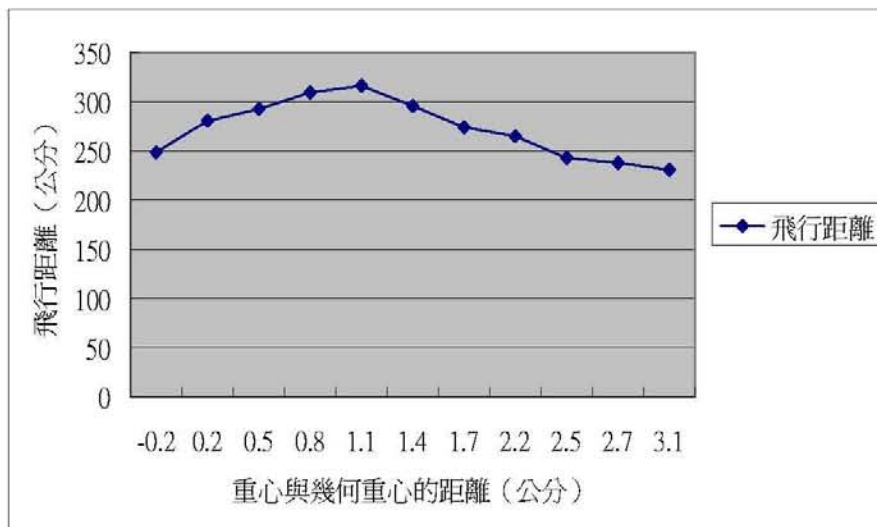
三、重心位置與紙飛機滑翔關係之研究

橡皮筋拉力=450 克重 射角：13.54 度 機翼幾何重心與機頭的距離=16.3 公分							
迴紋針距 機尾距離 (公分)	重心距機 頭距離 (公分)	飛行距離 (公分)					
		第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
0	16.5	229.5	245	273	245	255	248.3
2	16.1	277	230	295	283	282	280.6
4	15.9	312	279	277	299	300	292.6
6	15.6	308	310	311	299	312	309.6
8	15.3	310	317	320	321	311	316.0
10	15.0	299	297	270	307	291	295.6
12	14.7	267	275	291	267	280	274.0
14	14.2	256	274	277	264	255	264.6
16	13.9	243	240	244	241	249	242.6
18	13.7	239	239	230	237	237	237.6
20	13.3	220	230	231	240	231	230.6

表八、重心位置對飛機滑翔的影響。

重心距機頭距離 (公分)	重心與幾何重心的距離 (公分)	飛行距離 (公分)
16.5	-0.2	248.3
16.1	0.2	280.6
15.9	0.5	292.6
15.6	0.8	309.6
15.3	1.1	316.0
15.0	1.4	295.6
14.7	1.7	274.0
14.2	2.2	264.6
13.9	2.5	242.6
13.7	2.7	237.6
13.3	3.1	230.6

表九、重心位置對紙飛機滑翔的影響分析。



圖表四、重心位置對紙飛機滑翔的影響分析。

四、初速仰角與紙飛機滑翔關係之研究

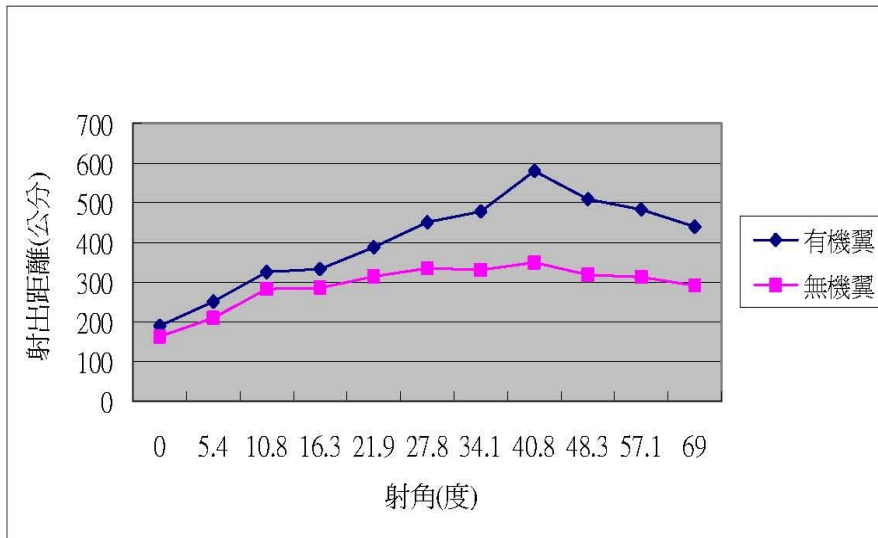
機翼狀況：有機翼		橡皮筋拉力：450 克重					
墊高保麗龍數 (片)	射角 (度)	飛行距離 (公分)					
		第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
0 塊	0	191	191	187	194.8	187	189.6
2 塊	5.4	234.9	246	257	253	253	250.6
4 塊	10.8	334.3	325.4	358.1	317.4	358	325.7
6 塊	16.3	343	334.4	323	341	326.9	332.8
8 塊	21.9	416	382.1	388.3	393.9	355.9	388.1
10 塊	27.8	489	481.5	413	460	411	451.5
12 塊	34.1	452	420	513	520	470	478.3
14 塊	40.8	579	640	645	522.3	686	580.4
16 塊	48.3	557.1	464.5	535.4	528.0	545.0	509.3
18 塊	57.1	531.2	576.3	457.5	461.0	456.2	483.2
20 塊	69.0	467.4	424.2	448.7	445.5	384.3	439.5

機翼狀況：無機翼		橡皮筋拉力：450 克重					
墊高保麗龍數 (片)	射角 (度)	射出距離 (公分)					
		第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
0 塊	0	192	163.6	166.5	157	159.2	163.1
2 塊	5.4	284.7	243.8	210	210	210	210
4 塊	10.8	193.5	274.3	293.0	279.5	309.4	282.3
6 塊	16.3	294.3	269.2	292.1	297.4	250	285.2
8 塊	21.9	310.5	310	321.4	261.3	344.8	314.0
10 塊	27.8	346.2	355.6	316.2	343.8	206.2	335.4
12 塊	34.1	320	350.5	291.0	322.2	353.3	330.9
14 塊	40.8	356.1	322.3	375.2	307.2	370.2	349.5
16 塊	48.3	314.1	374.0	302.2	334.0	307.8	318.6
18 塊	57.1	291.0	311.0	320.2	307.5	340.0	312.9
20 塊	69.0	337.0	290.1	292.5	292.3	249	291.6

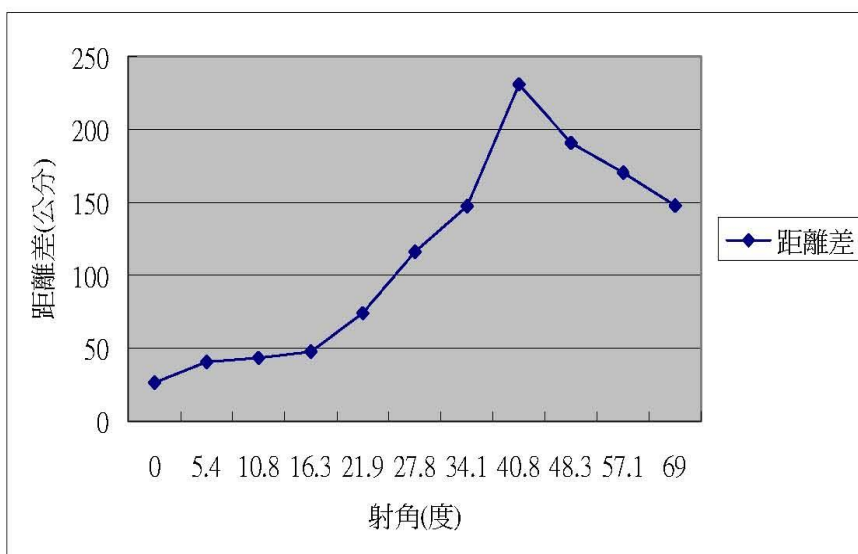
表十、初速仰角對紙飛機的影響。

射角 (度)	有機翼飛行距離 (公分)	無機翼射出距離 (公分)	距離差 (公分)
0	189.6	163.1	26.5
5.4	250.6	210	40.6
10.8	325.7	282.3	43.4
16.3	332.8	285.2	47.6
21.9	388.1	314.0	74.1
27.8	451.5	335.4	116.1
34.1	478.3	330.9	147.4
40.8	580.4	349.5	230.9
48.3	509.3	318.6	190.7
57.1	483.2	312.9	170.3
69.0	439.5	291.6	147.9

表十一、機翼各種射角對紙飛機滑翔產生的影響。



圖表五、機翼有無對飛行距離影響表較。

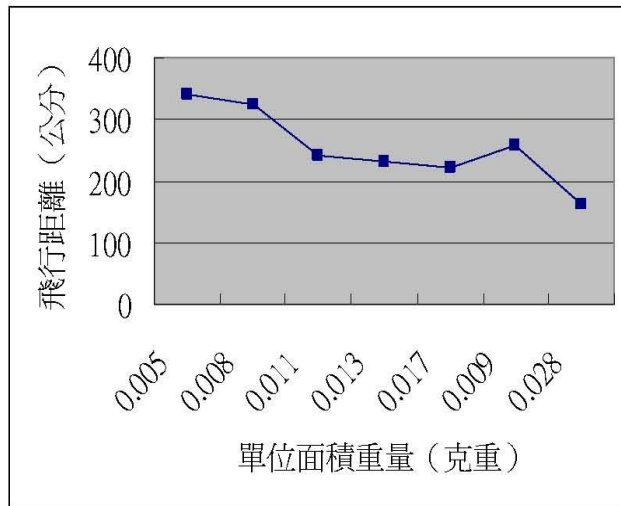


圖表六、機翼仰角對飛行距離的影響。

五、機翼材質對紙飛機飛行的影響

	油印紙	影印紙	海報紙	封面紙	雲彩紙	珍珠板	西卡紙	
重量 (克)	0.5	0.8	1.1	1.3	1.7	0.9	2.8	
單位面積重量 (克/平方公分)	0.005	0.008	0.011	0.013	0.017	0.009	0.028	
飛行距離 (公分)	1	340.5	319.5	221.0	235.2	221.0	260.0	160.0
	2	360.0	326.4	234.8	205.0	210.0	240.0	162.0
	3	344.0	331.6	246.1	241.2	220.0	255.0	150.0
	4	336.5	308.0	241.0	246.0	226.0	254.0	164.0
	5	273	329.3	255.0	216.0	221.0	210.0	171.0
	平均	340.2	325.0	240.6	230.8	220.7	256.3	162.0

表十二、不同材質紙飛機之探討。



圖表七、不同材質紙飛機飛行距離分析。

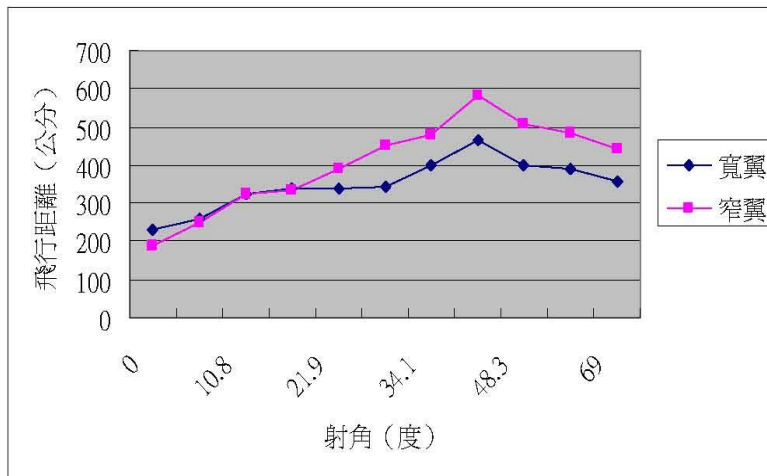
六、機翼面積與紙飛機滑翔的關係

機翼狀況：寬翼飛機		橡皮筋拉力：450 克重					
墊高保麗龍數 (片)	射角 (度)	飛行距離 (公分)					
		第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
0 塊	0	232	234	226	226	231	229.6
2 塊	5.4	249	360	258	256	258	257.3
4 塊	10.8	320	366.3	290	338	320	326
6 塊	16.3	315	333	343	345	350	340.3
8 塊	21.9	322	330	373.3	334	355	339.6
10 塊	27.8	342	306	340	354	344	342
12 塊	34.1	341	396	425	403	403.5	400.8
14 塊	40.8	456	462	483	465	472	466.3
16 塊	48.3	388	448	410	358	396	398
18 塊	57.1	373	464	350	410.2	386.7	389.9
20 塊	69.0	385	399	340	342	350	359

表十三、寬翼飛機之飛行探討。

射角 (度)	飛行距離 (公分)	
	寬翼	窄翼
0	229.6	189.6
5.4	257.3	250.6
10.8	326	325.7
16.3	340.3	332.8
21.9	339.6	388.1
27.8	342	451.5
34.1	400.8	478.3
40.8	466.3	580.4
48.3	398	509.3
57.1	389.9	483.2
69	359	439.5

表十四、寬翼窄翼飛機飛行狀況之比較。



圖表八、寬翼窄翼飛機飛行狀況之比較。

柒、討論：

一、名片紙飛行測試

- (一) 水平及仰角射出皆有前端上揚現象，表示前端有一向上之力矩使其上揚，因此判斷射出後升力在重心之前產生一個力矩。俯角射出飛出掉落，表示重心在升力之前產生前端向下力矩。
- (二) 若名片前端上揚，阻力會變大，名片便失速掉落。
- (三) 名片前端加小鐵夾後，重心前移，升力不足以讓前端產生太大的力矩，因此有飛行的感覺，但不遠即掉落，類似拋射運動。
- (四) 判斷名片紙只要重心調整得宜，雖不能飛遠，亦有短距離飛行的感覺。

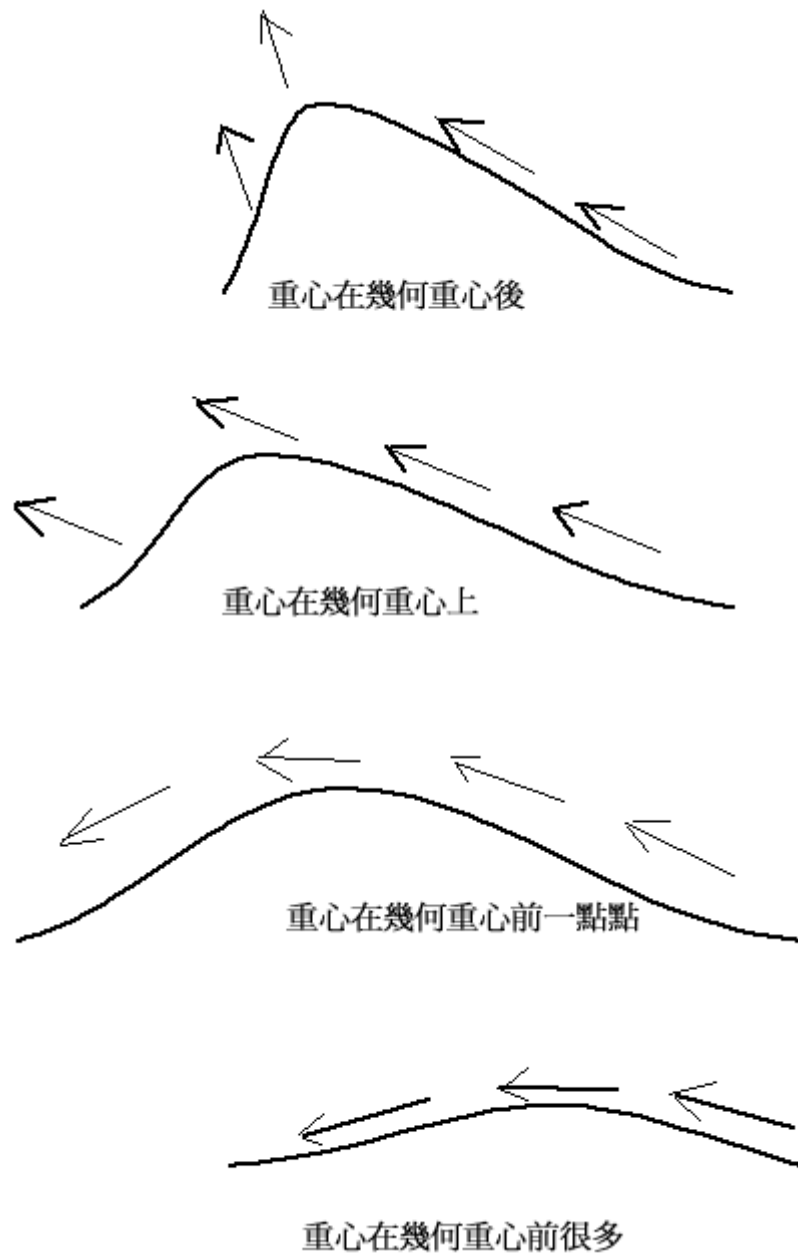
二、利用簡易風洞進行測試，了解機翼升力主要來源

- (一) 由理論分析影響升力的主要因素有二：白努力原理、牛頓第三運動定律（作用力與反作用力定律）。
- (二) 風洞氣流穩定測試，本次實驗所用風洞在強、中、弱三種氣流中，風洞的各個位置，尼龍繩振動上下幅度很小，判斷這次製作的風洞，氣流相當穩定。
- (三) 由表三、表五、表七數據可發現，同一攻角各式機翼升力大小無明顯差異，因此可以看出白努力原理對機翼會造成影響，但影響效果並不十分顯著（與此次其它升力數據比較）。
- (四) 按照白努力原理，在各種角度升力大小應該是翼形最大，倒翼形最小，但本次實驗發現並非如此，在低風速高攻角的情況尤其明顯。
- (五) 觀察圖表一、二、三，在各種強度氣流中，不管是那一型機翼皆在 50 度有較大的升力，與由空氣反作用力的幾何分析 45 度會有最大升力的理論相近，因此可推測空氣的反作用力應是提供飛機升力的主要因素。
- (六) 此次風洞的設計為盡量避免氣流造成電子秤不穩定而產生誤差，加入了三項設計：1、利用塑膠板將電子秤隔絕於風洞外，但於底部挖兩個溝槽讓機翼模型可與電子秤接觸並自由升降來測量機翼模型的重量。2、利用砝碼增加機翼模型的重量，增加機翼模型的穩定性，因升力測量是測氣流有無前後重量差，所以不影響測量結果。3、利用保麗龍及毛巾布來減少動力段振動所產生的影響。

三、重心位置與紙飛機滑翔的關係

- (一) 紙飛機重心測量時，紙飛機的中心線要對準重心測量平衡板的中心線。
- (二) 此次測量，如何準確定位飛機的落點，是我們必須解決的問題，我們採用以下幾個方式配合，期能盡量減少誤差：1、於地面灑上一層沙子，幫忙定位。2、每次由二位同學觀察落點，減少人為誤差。3、測量五次距離但去掉最遠與最近取平均值。
- (三) 觀察表九及圖表四發現，隨著重心前移，飛行距離增加，到達幾何重心前 1.1 公分時飛行距離最遠，但隨著重心再往前移飛行距離又變短。
- (四) 與名片紙的測試做對照，重心太後面，升力造成向上的力矩，爬升太快阻力增加而失速墜落，重心太前面，會產生向下力矩而提前墜落。
- (五) 重力作用在重心可由重心測量器測量其作用點，升力的作用點我們是用理論分析，假設升力是平均作用於機翼上，那升力的作用點應是在機翼幾何重心的地方。

(六) 圖十八為重心位置對飛行影響的示意圖。



圖十七、重心位置對飛行的影響。

四、初速仰角與紙飛機滑翔的關係

- (一) 為精簡發射器的設計，本項研究不採用量角器的設計，而採用墊高發射器的方式來改變發射角度，再利用幾何關係算出發射仰角，不僅簡化發射器的設計，也方便操作。
- (二) 因發射器角度的改變，會改變發射位置，於發射器前端設計一鉛垂線來定位發射位置。
- (三) 此次實驗發現，紙飛機在 40.8 度時有最遠的飛行距離，與理論值 45 度非常接近，但指導老師告訴我們，拋射運動理論上射角 45 度就可產生最遠的拋射距離，因此我們又設計了無翼飛機（利用紙飛機同一張紙，僅折疊機身不折疊機翼），來對照比較。
- (四) 我們發現無翼飛機射出後成拋物線落下，不像紙飛機有飛行的感覺。

- (五) 無翼飛機也是在 40.8 度拋射最遠，但在各種角度皆不如紙飛機的飛行距離。
- (六) 觀察表五及圖表六發現用有翼飛機飛行距離減去無翼飛機的拋射距離，兩者的差在 40.8 度最大。假設這個差值是因機翼造成，這與風洞實驗及理論分析，機翼升力受空氣反作用力的影響符合，進一步證明空氣的反作用力是讓紙飛機上升的主要因素。
- (七) 若不考慮空氣阻力，理論上應該在 45 度有最遠的飛行距離，若考慮空氣阻力，因仰角越大空氣阻力越大，因此若考慮空氣阻力飛行最遠的仰角應小於 45 度，本次實驗數據 40.8 度與理論相符（參考研究方法四圖十二）。

五、機翼面積對紙飛機飛行的影響

- (一) 觀察不同紙飛機的飛行，發現機翼面積小飛行速度快但速度變慢時不穩定；機翼面積大飛行速度慢但較穩定。機翼面積的大小應該對紙飛機的飛行有相當的影響。
- (二) 紙飛機面積增大時，雖然升力可以提升，但重量和阻力也會增加，因此我們利用不同的材質製作紙飛機，並測量它的飛行狀況，來瞭解材質單位面積重量與升力的關係。
- (三) 比較寬翼及窄翼飛機來瞭解機翼面積對升力與阻力的影響。
- (四) 為比較各材質的最佳狀況，且利用 2 支迴紋針調整重心位置，使重心在幾何重心前一點點，且先行試射最佳狀況再正式測量五次求平均值。
- (五) 由表十二及圖表七發現，單位面積重量越輕的材質，飛行的距離比較遠。
- (六) 材質雖較輕較好但也不能過輕，因太輕慣性太小，往前的動力易被阻力抵銷反而飛不遠，若不加迴紋針反而是 A4 影印紙較好。
- (七) 觀察表十四及圖表八發現，射角在 21.9 度以前，寬翼飛機飛得比較遠，21.9 度以後窄翼飛機飛得比較遠。這與理論分析吻合，因小角度時阻力影響較小，機翼面積大升力較大所以飛行較遠；角度大時，阻力影響較大，機翼面積大阻力大飛行的距離反而近了。

六、其他

從一些資料發現，紙飛機的設計尚有尾翼、垂直尾翼、副翼、氣溝等設計，這些設計主要目的是增加飛機的穩定性，本次研究主要針對影響飛機飛行的主要因素作探討，為使研究單純化並未加入以上所提的設計，這些設計可另外設計實驗來研究他們的功用。

捌、結論：

- 一、機翼的風洞測試 50 度有最大的升力、機翼仰角研究的結果在 40.8 度有最遠的飛行距離，這與反作用力的分析結果 45 度有最大的升力相當接近，我們推斷紙飛機的飛行，升力主要是靠空氣給機翼的反作用力。
- 二、從翼型、平板型、倒翼型機翼的風洞測試發現：翼型的升力比另外兩型大約大出些許的升力，證明白努力原理所產生的升力亦對飛機有些許的影響，但紙飛機的機翼並非翼型所以應無明顯的影響。
- 三、重心位置對紙飛機的飛行有很重要的影響，重心太前面會俯衝而快速降落，重心太後面會因爬升太快阻力增加而墜落。
- 四、此次重心的影響實驗發現，測試的紙飛機重心在幾何重心（三角形機翼幾何重心為

三角形三中線交點)前 1.1 公分飛行最遠，我們判斷紙飛機重心最佳位置應在機翼幾何重心之前一點點(大約 1 公分前後)，隨著紙飛機的飛行機頭會緩緩下降阻力隨著減少，最好升力不足時剛好降至水平，如此紙飛機飛行的狀況最接近實際飛機的升降情況。

- 五、紙飛機的材質越輕越好，但不能太輕因太輕慣性太小，往前的動力易被阻力抵銷而飛不遠。
- 六、利用迴紋針調整重心的情況，這次選的材質中油印紙製作的飛機可以行最遠，其次是影印紙及海報紙。若不用迴紋針調整重心以 A4 影印紙最好。
- 七、在射角較小時寬翼飛機有較佳的飛行距離，射角較大時窄翼飛機有較佳的飛行距離，本次研究的飛機大約以 21.9 度為界線。
- 八、我們利用實驗的結果採用油印紙、影印紙和海報紙折疊幾架寬翼型飛機，並利用貼紙調整紙飛機重心至最佳位置(幾何重心前約 1 公分前後)，都有不錯的表現。

玖、參考資料：

- 一、卓志賢(民 94)。台北市：紙飛機工廠。聯經出版股份有限公司。
- 二、鄧美貴(民 93)。國中自然與生活科技 2 上。台北縣：康軒文教事業股份有限公司。
- 三、鄧美貴(民 93)。國中自然與生活科技 3 上。台北縣：康軒文教事業股份有限公司。
- 四、褚德三(民 93)。物質科學物理篇。台北縣：龍騰文化事業股份有限公司。
- 五、大美百科全書(民 81)。台北市：光復書局編輯部。30-1,120-122。
- 六、風洞體驗(2004)。高雄：國立科學工藝博物館。民國 96 年 4 月，取自：
http://www.nstm.gov.tw/education/07_05_1.asp?menu=5&teach_tool_sn=4
- 七、風洞基本特性。蕭葆義等。民國 96 年 4 月，取自：<http://wt.hre.ntou.edu.tw/003/003-01.htm>
- 八、["Design Rules for Small Low-Speed Wind Tunnels"](#) by R.D. Mehta and P. Bradshaw, Aero. Journal (Royal Aeronautical Society), Vol. 73, p. 443 (1979)
- 九、How To Build Your Own Wind Tunnel
<http://ldaps.arc.nasa.gov/Curriculum/tunnel.html>
- 十、The Wind Tunnel Connection
<http://www.worthey.net/windtunnels>

【評語】 031616 談紙神功-紙飛機的滑翔研究

優：表達能力很好，對自己的作品有自信。

缺：1.實驗方法沒有創意。

2.建議原始數據放在附錄，內文盡量用圖代替表呈現實驗結果。

3.建議用照片表達實驗過程或設計，使作品更有參考價值。