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

031608

凡飛過必留下玄機-珍珠板飛機的飛行奧秘

學校名稱：連江縣立中正國民中學

作者：	指導老師：
國二 莊絜閔	王連發
國二 王格	鍾孟璋
國二 李國豪	
國二 陳怡芊	

關鍵詞：珍珠板　飛機　白努力定律

名稱　凡飛過必留下玄機－珍珠板飛機的飛行奧秘

內文

壹、　摘要

本實驗藉由製作珍珠板飛機，期望能夠多了解一些飛行的原理。在翻閱了一些文獻的資料之後，發現影響飛行的要素主要有「機翼形狀構造」、「發射仰角」、「重心的位置」等。我們分別對這三個因素做研究，並根據所得到的實驗結果做出其相對應的討論。最後我們找出了實驗中最適合於飛行的各種參數設定。

貳、　研究動機

飛行，自古以來就是人類的夢想，在各種飛行器陸續問世之後，更是縮短了地球上各地之間的距離。相信大家都曾經想要擁有一個多啦 A 夢的「竹蜻蜓」以遨遊天際，折疊出一架能飛得又高又遠的紙飛機更是大家都曾有過的夢想，我們希望藉由書本及網路上的資料能夠了解飛行的原理，並靠自己的雙手製作一架能飛得很遠的珍珠板飛機。

參、　研究目的

一、　資料搜尋－找出影響珍珠板飛機飛行的所有可能因素。
二、　探討機翼的有無對飛行的影響。
三、　探討機翼弧度的大小對飛行的影響，並找出最適合的機翼弧度。
四、　探討發射仰角的大小對飛行的影響，並找出最適合的發射仰角。
五、　探討飛機的重心位置對飛行的影響，並找出最適合的重心位置。
六、　討論該如何設計，才能製作出一架飛行良好的珍珠板飛機。

肆、　研究設備及器材

機身模型：珍珠板、噴膠、透明膠帶、雙面膠。
機翼模型：白紙、護貝膠膜、珍珠板、透明膠帶、雙面膠。
發射器：木塊、螺絲釘、釘槍、橡皮筋。
重心量測器：木塊、吸管、鐵絲、螺絲釘、噴膠、透明膠帶、粉彩紙。
簡易風洞：電子秤、珍珠板、透明膠帶、大頭針、強力風扇、電池、紗窗。

伍、　研究過程

我們知道飛機在飛行的狀態下所受到的力有重力、升力、推進力、以及阻力，如下圖 1。

推進力即是燃料所給的飛行動力，阻力是空氣阻力，重力即是飛機的重量，在本實驗中，我們暫時不討論這三種力對飛行的影響，實驗內容主要討論「上升力」對飛行所造成的影響。

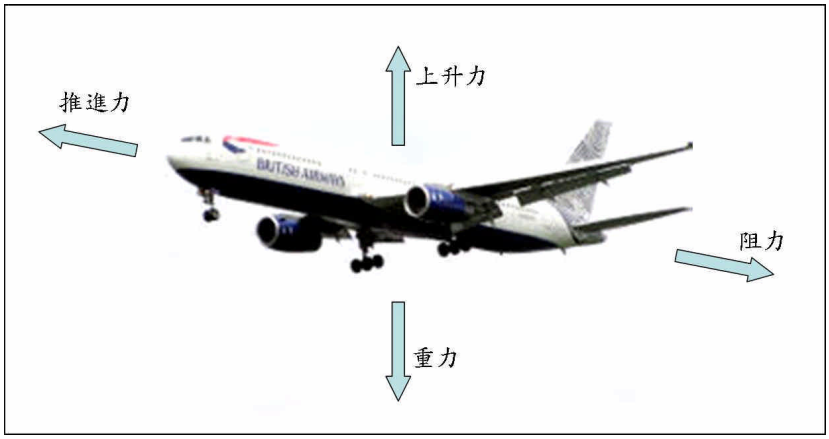


圖 1 飛機飛行時受力示意圖。

一、 根據文獻的說明，影響上升力的因素有：

（一）空氣浮力：由浮力的定義我們可以知道，流體對物體所產生的浮力，是由作用在物體向上及向下的壓力差所造成的，但珍珠板飛機的機翼很薄，造成的壓力差較小，因此我們暫時不考慮浮力所造成的影響。

（二）白努力原理（Bernoulli’ s Principle）：根據文獻記載，物體在不可壓縮且無黏滯性的的流體中，會遵守白努力定律，即 $P+\frac{1}{2}\rho v^2+\rho gy=$定值，其中 P 是流體的靜態壓力，$\frac{1}{2}\rho v^2$ 是流體動態壓力（ ρ 是流體的密度，g 是重力加速度，y 是高度， v 是流體速率）；簡單來說，流體的動態壓力與流速成反比。當我們考慮如圖 2 機翼的形狀，當空氣從 A 點流至 B 點時，會有路線 1 及路線 2 兩種狀況，其中因爲路線 1 有弧度，其路徑較路線 2 長，因此當 A 點出發的氣流要同時達到 B 點，走路線 1 的氣流流速必快於路線 2；根據白努力原理，路線 1 的氣流壓力將會較小，而路線 2 的氣流壓力較大，因此會造成一個向上的壓力差，造成一部份的上升力。

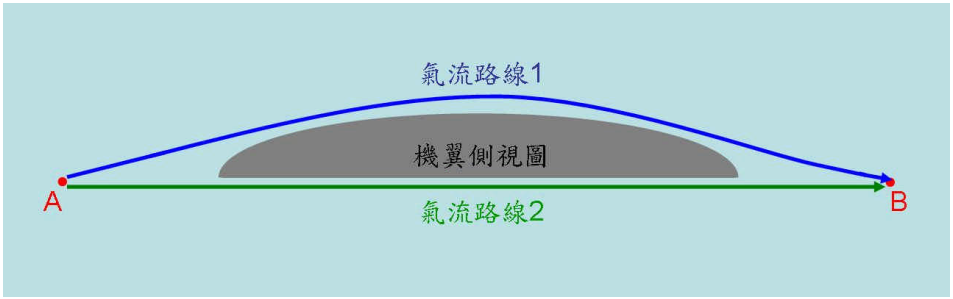


圖 2 飛行時機翼的剖面及氣流流向圖。

（三）牛頓第三運動定律（作用力與反作用力）：除了白努力原理對上升力有重大的影響之外，「飛行時機翼的仰角」也是一個重大的影響因素。由於飛行時，空氣會給機翼一個反作用力 F，其方向與飛行方向相反，如下圖 3，飛行時若機翼與水平面有個夾角 θ，我們可以由力的分解，將水平的反作用力 F 分解成平行於機翼的 $F_{平行}$，

與垂直於機翼的 $F_{垂直}$（也稱爲正向作用力）。此垂直於機翼的力就是升力 $F_{升力}$與阻力 $F_{阻力}$的主要來源。

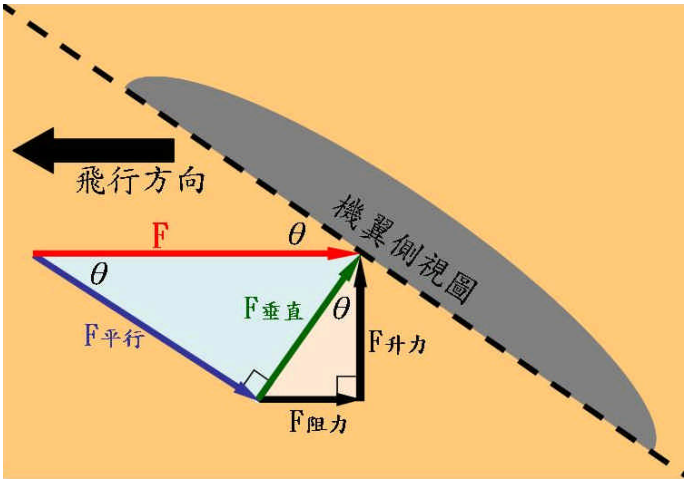


圖 3 飛行時機翼受力圖。

根據簡單的三角函數計算：

$F_{垂直} = F\sin\theta$ ，

$F_{升力} = F_{垂直}\cos\theta = F\sin\theta\cos\theta$ ，

$F_{阻力} = F_{垂直}\sin\theta = F\sin\theta\sin\theta$ ，

因此我們可以利用理論得出 $F_{升力} - \theta$ 的關係圖，以及 $F_{阻力} - \theta$ 的關係圖，如下圖 4。

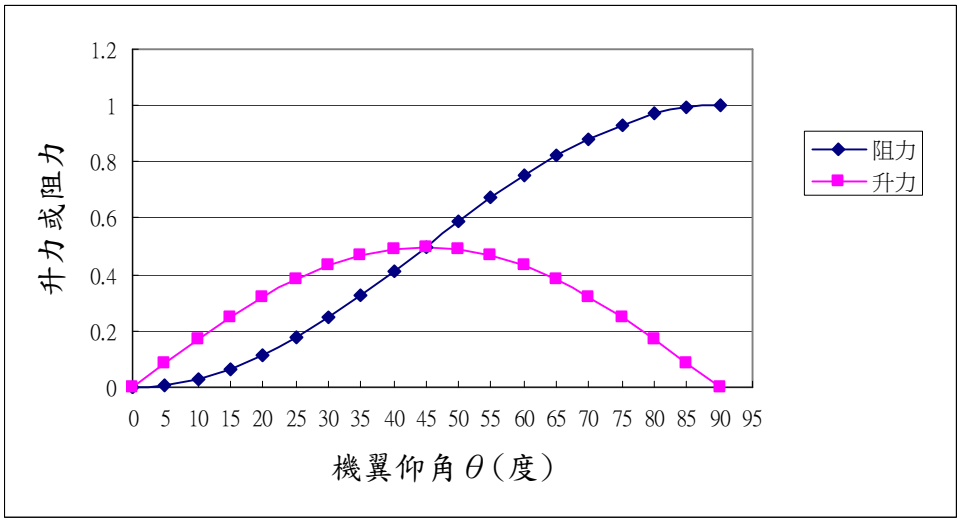


圖 4 機翼仰角與升力、阻力的關係圖。

由圖中我們可以看出當仰角越大時，理論上阻力也越大；升力在 45 度之前會隨著仰角的變大而變大，但過了 45 度之後，仰角越大，升力反而慢慢變小。由此可得，45 度的機翼仰角，將有最大的升力，但同時卻沒有最小的阻力（0 度才是）。因此，多大的 θ 角才是最適合飛行的角度，尚待實驗的驗證。

（四）重心的影響：根據參考資料，我們得知，重心的位置與飛行的軌跡息息相關，因

此也直接影響到飛行的距離。（1）假使重心偏向頭部，會造成飛行時機頭向下俯衝的情況；（2）假使重心偏向尾部，有可能會造成飛行時頭部翹起，仰角的瞬間變化過大，根據前一點理論，我們知道仰角過大時阻力也很大，因此在飛行一段時間之後就將墜落，也就是一般空難報導所常聽到的「失速」；（3）若重心落在機翼的位置，也就是大部份的升力作用的位置，則飛行的軌跡有可能在落下之後還會繼續有滑行的效果。如圖 5 所示。

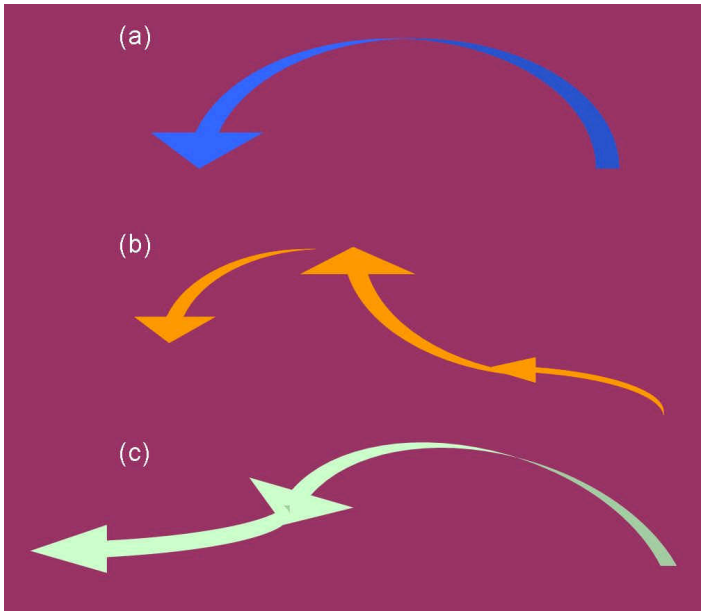


圖 5 重心對飛行軌跡的關係圖。
（a）重心在頭部。（b）重心在尾部。（c）重心在機翼。

二、 前置工作：

（一）設計飛行發射器：實驗中我們拿一些木板及橡皮筋、螺絲釘等，製作出一個簡易的發射器，原理是利用橡皮筋的彈力（虎克定律）而製作成的，如下圖 6 所示。利用對齊刻度的方式，設法保持每一次發射的力道均相同。另外，在發射器的前緣底下墊木塊，透過三角函數的計算，即可得到跑道傾斜的角度，如下圖 7 所示。貼上一張護貝過後的跑道紙，除了較爲美觀之外，也有讓斜面的摩擦力較小的功用。

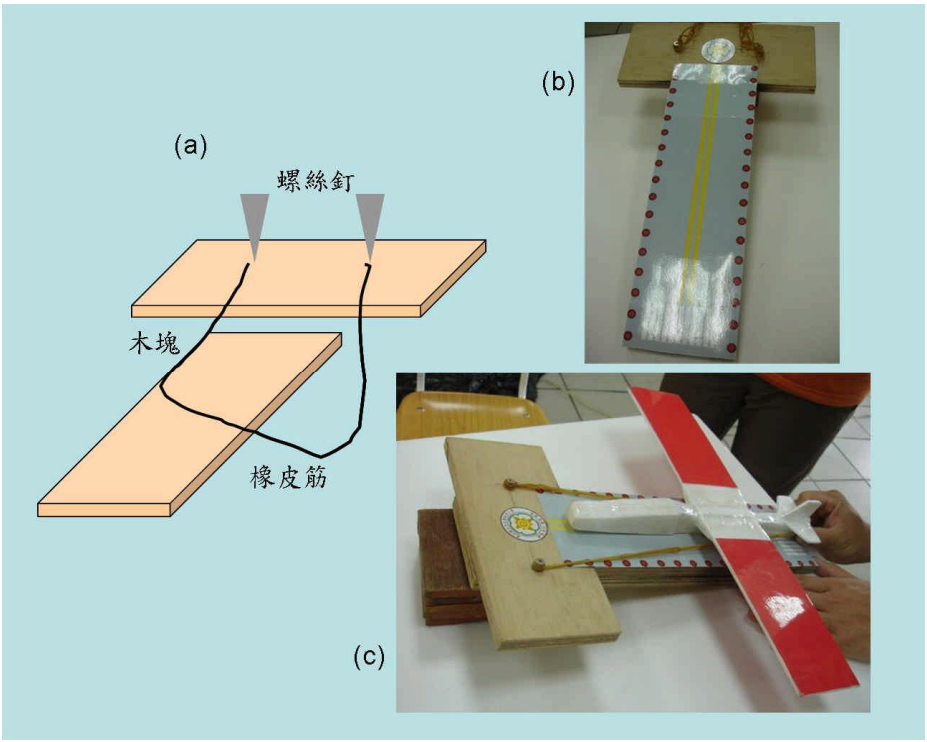


圖 6 飛行發射器裝置圖。
（a）裝置示意圖。（b）完成圖。（c）利用橡皮筋的彈力發射飛機。

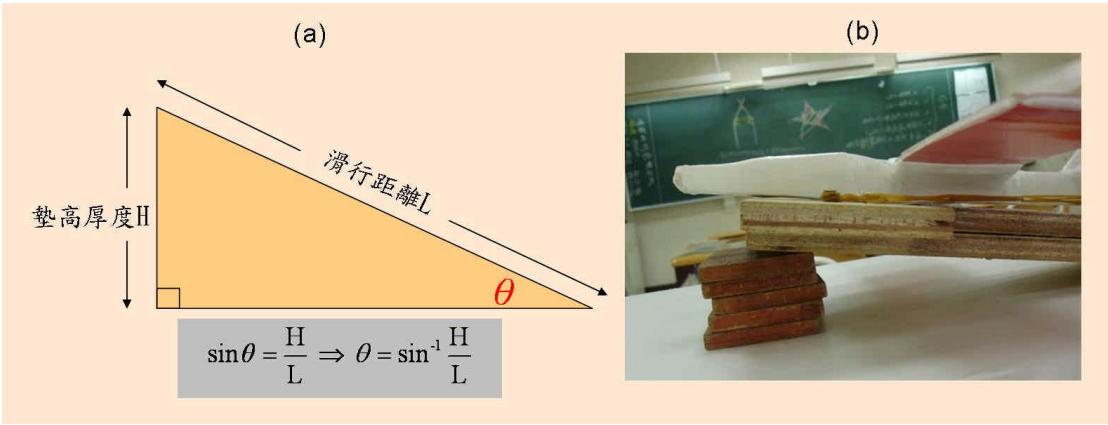


圖 7 計算發射仰角示意及實驗裝置圖。
（a）利用三角函數的定義可得出 θ 的大小。（b）實驗裝置圖。

（二）設計重心量測器：由於重心的位置（X）也是所要探討的變因之一，因此我們設法製作出一個能夠測量重心位置的儀器。假設飛機左右兩邊（兩翼連線）完全對稱，我們只要簡單測出另一個方向（頭尾連線）的重心即可知道整架飛機的重心位置。其實重心量測器就是一個簡易的天秤，在物體達到平衡時，支點的位置就可以看成是重心的位置，如下圖 8。

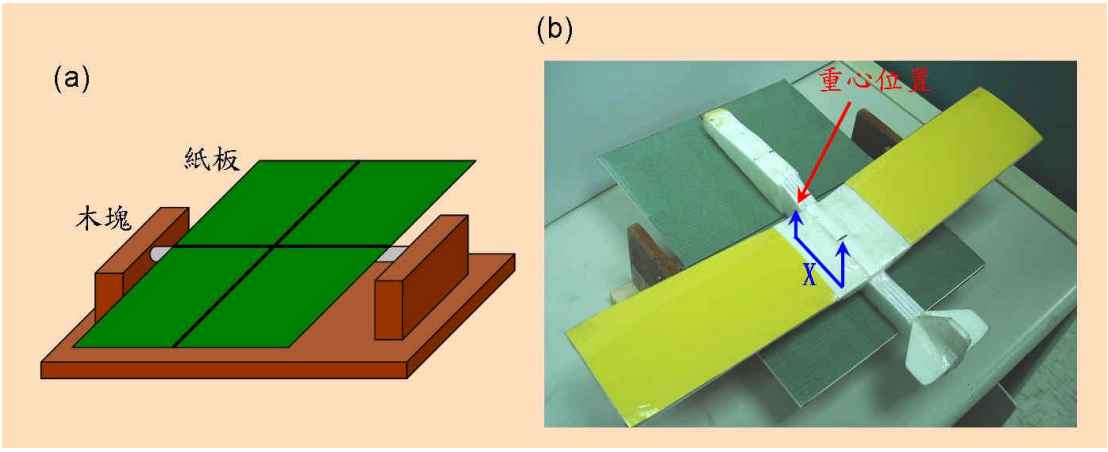


圖 8 重心量測器示意及實驗實物圖。
（a）示意圖。（b）實驗裝置圖，找出重心之後，即可找出 X 值。

（三）製作不同的機翼：對於彎曲弧度不同的機翼的討論，是我們此次討論的重點，製作方式是利用護貝過後的 A4 紙，固定在針珠板製作的機翼上，若我們需要弧度很大的機翼，就將較大片的 A 面機翼黏貼在 B 面上，使其自然彎曲成一個弧度，如下圖 9。利用這個方法的好處是，我們就可以定量說明機翼的弧度，即利用 A/B 的比值，值越大就代表弧度越大。在後面的實驗數據中，將直接利用 A/B 的比值代表機翼的造型，其中若 A/B 爲大於 1，表示機翼屬於上凸型；等於 1，表示機翼屬於平版型；若小於 1，即表示機翼造型屬於下凸型（若爲上凸型，設定珍珠板那面爲 B 面；若爲下凸型，則設定珍珠板爲 A 面）。

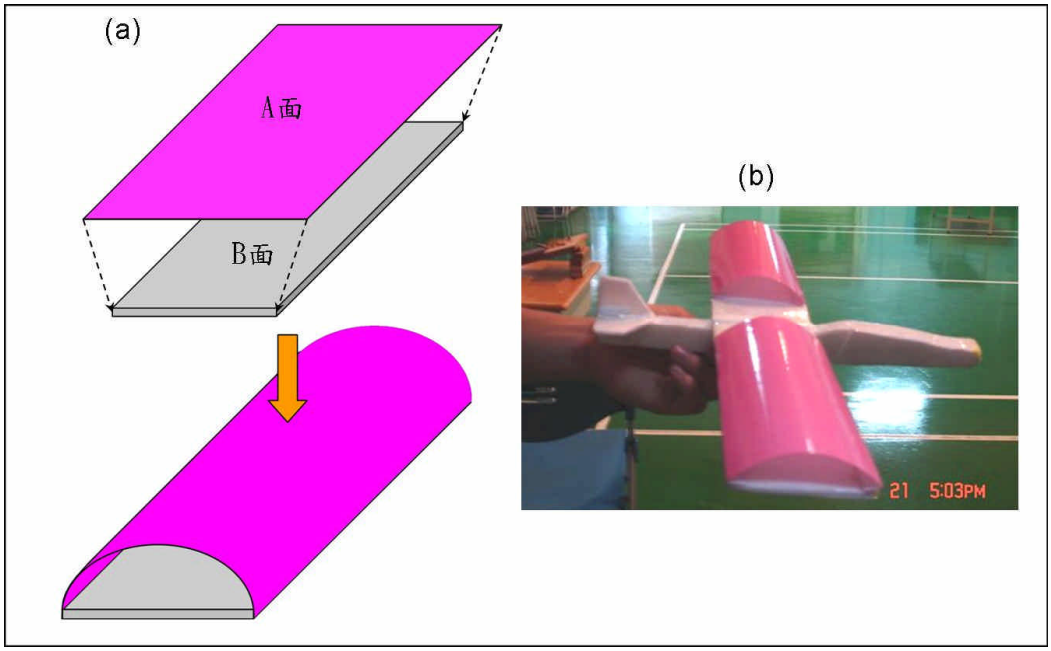


圖 9 有弧度的機翼示意及實驗實物圖。
（a）利用大小面積不相同的兩個面組合而成有弧度的機翼。（b）實驗實物圖。

（四）製作簡易風洞：風洞的實驗可以說是白努力原理及牛頓第三運動定律的雙重驗證，藉由風洞的實驗，我們更可以直接確認機翼的形狀及傾斜角度會直接影響到

上升力的值。將珍珠板圍成一個四周封閉、前後開口的通道，機翼樣品用大頭針固定在通道內部，風力來源是一個 12 公分乘 12 公分的風扇，中段夾著一張紗窗的網子以整流。實驗時以電子秤測量「整個系統」的「重量變化」，即可得知各種狀況的上升力大小。

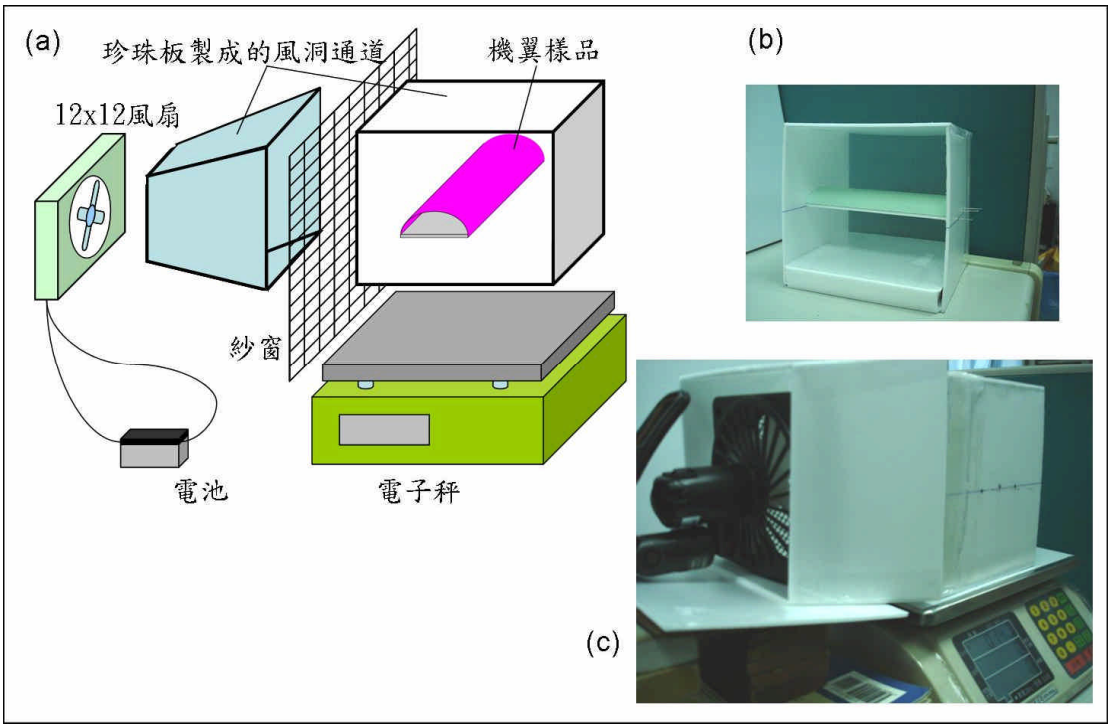


圖 10 風洞實驗示意及實物裝置圖。
（a）示意圖。（b）實物裝置圖（風洞及機翼樣品）。（c）實物裝置圖。

三、 確認機翼對飛行距離確實有重大的影響：

首先，我們對於機翼是否卻實能幫助飛行，先作一個簡單的實驗驗證：比較有機翼的飛機與無機翼的飛機其飛行距離是否有很大的差異。爲了控制變因，兩架飛機的差異除了機翼的有無之外，其他方面盡量做到完全相同（外觀、質量、重心位置等）。測量各種發射角度之下，兩種飛機的飛行距離。

四、 機翼形狀構造對飛行距離的影響：

此部份實驗又分爲兩個部份：

（一）風洞模擬實驗：使用風洞裝置，模擬各種不同的機翼形狀（不同 A/B 值）對上升力的影響，在我們的實驗中，我們測量風扇打開之前與之後的系統重量（包含最後一截風洞與機翼樣品）的差，將其差值定爲此條件下的上升力。

（二）實機發射實驗：爲了排除其他因素影響實驗結果，我們使用同一架飛機模型的機身，在加裝了各種不同的機翼形狀之後，分別測量其在不同發射仰角之下，飛機飛行的距離，並紀錄各種狀態之下的飛行軌跡，實際測量白努力定律對飛行所造成的影響，如下圖 11。

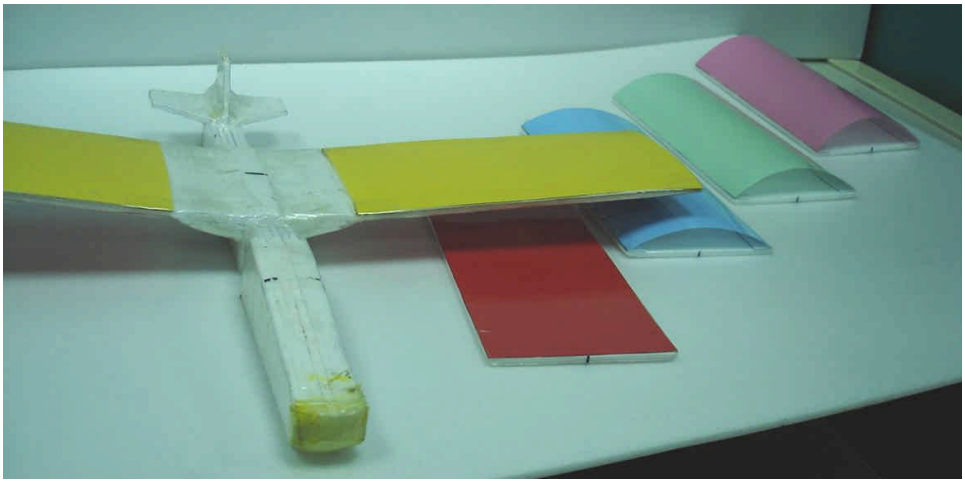


圖 11 飛機模型及不同弧度的機翼裝置圖。

五、 發射仰角對飛行距離的影響：

此部份的實驗也分成兩個部份：

（一）風洞模擬實驗：將平版型的機翼放入風洞的內部，測量在不同的傾斜角度之下，其上升力的大小，觀察結果是否與理論（圖 4）相符合。

（二）實機發射實驗：此部分的實驗，也就是仰角與飛行距離的關係，在上一個實驗其實已經包含在其中，我們取出射程最遠的一種樣品加以討論。

六、 重心的位置對飛行距離的影響：

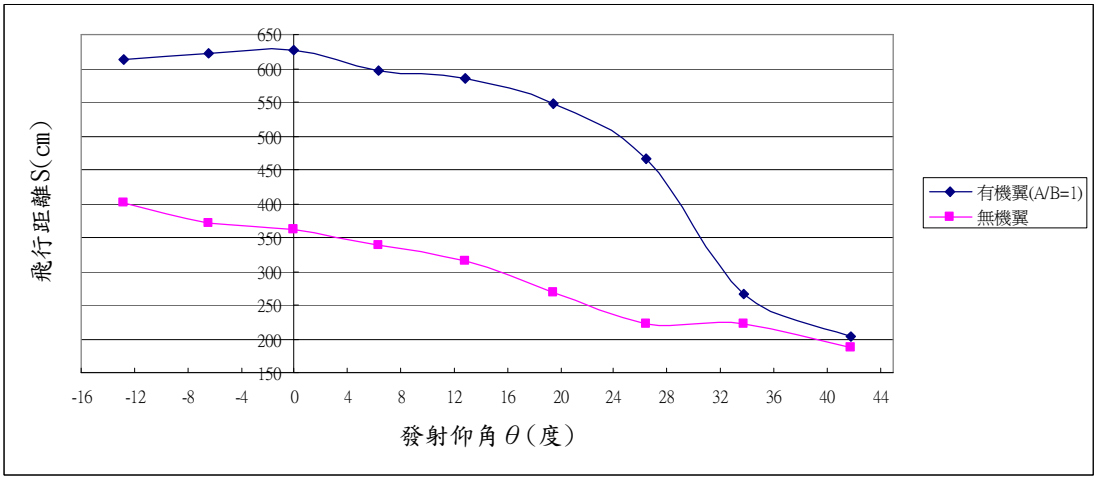
最後我們簡單探討重心對於飛行距離的影響，由理論可以知道飛機重心的位置對飛行軌跡將有重大的影響（圖 5），因此我們預期它也會對飛行距離有影響。利用重心量測器（圖 8）找到重心位置之後，取「重心與機翼中心連線的距離」當作重心的位置（以 X 表示）。改變重心的方式，以前後黏硬幣的距離來改變，硬幣越接近飛機的頭尾末端，重心偏移越多，因此整個飛機的總值量是不變的。

陸、 研究結果

一、 機翼的有無與飛行距離的關係：

有機翼			無機翼	
A/B=1				
仰角 θ (度)	飛行距離 (cm)		仰角 θ (度)	飛行距離 (cm)
-12.8	613		-12.8	402
-6.4	621		-6.4	371
0	627		0	362
6.4	596		6.4	337
12.8	585		12.8	316
19.5	548		19.5	268
26.4	467		26.4	222
33.4	267		33.4	221

41.8	203		41.8	188



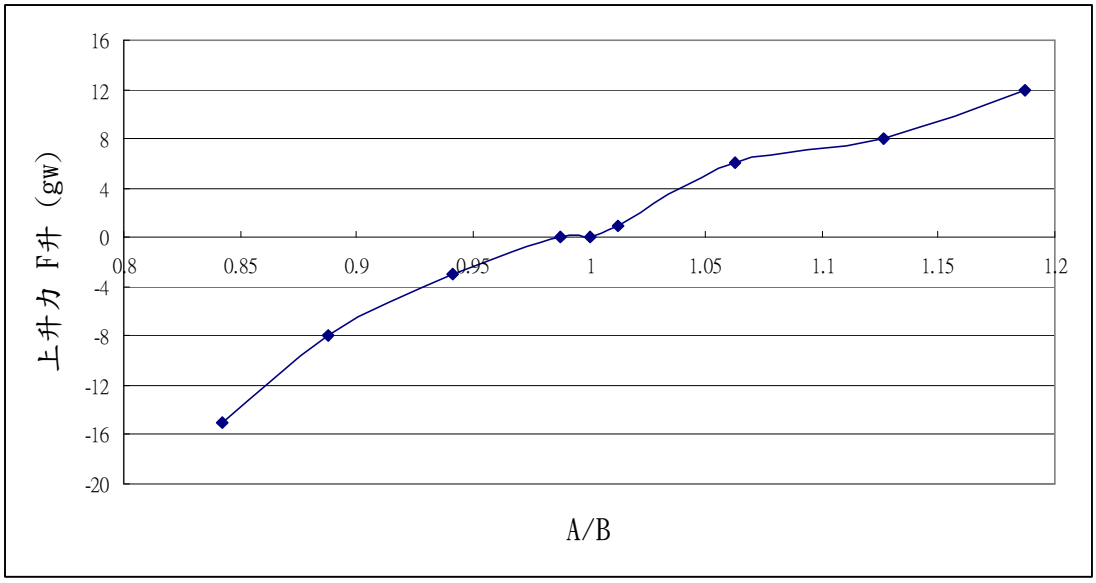
圖表 1 機翼的有無與飛行距離的關係。

由圖表 1 中可以觀察出來，有機翼的飛機在各種發射角度均比無機翼的飛機多飛了幾百公分的距離，確定有機翼確實對飛行距離有明顯的幫助。附件 1-1 與 1-2 是此實驗的原始數據。

二、 機翼形狀構造與飛行距離的關係：

（一）風洞實驗：

	A/B	上升力 F升 (gw)
上凸型	1.1875	12
	1.1268	8
	1.0625	6
	1.0125	1
平板型	1	0
下凸型	0.9877	0
	0.9412	-3
	0.8875	-8
	0.8421	-15

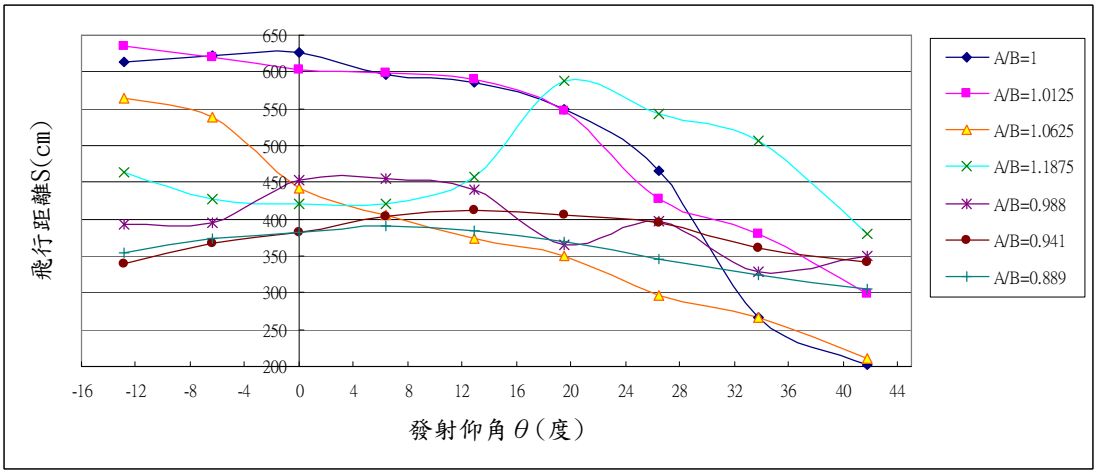


圖表 2 機翼形狀構造對上升力的影響（風洞實驗），其中包含平板（A/B=1）、上凸（A/B>1）與下凸（A/B<1）。

此實驗利用風洞裝置實際測量不同的機翼形狀造成的上升力變化，由圖中可以清楚見到上凸越明顯（A/B 值越大）的機翼，其將會造成越大的上升力；下凸越明顯（A/B 值越小）的機翼，反而會造成向下的力（負的上升力）。附件 2-0 是此實驗的原始數據。

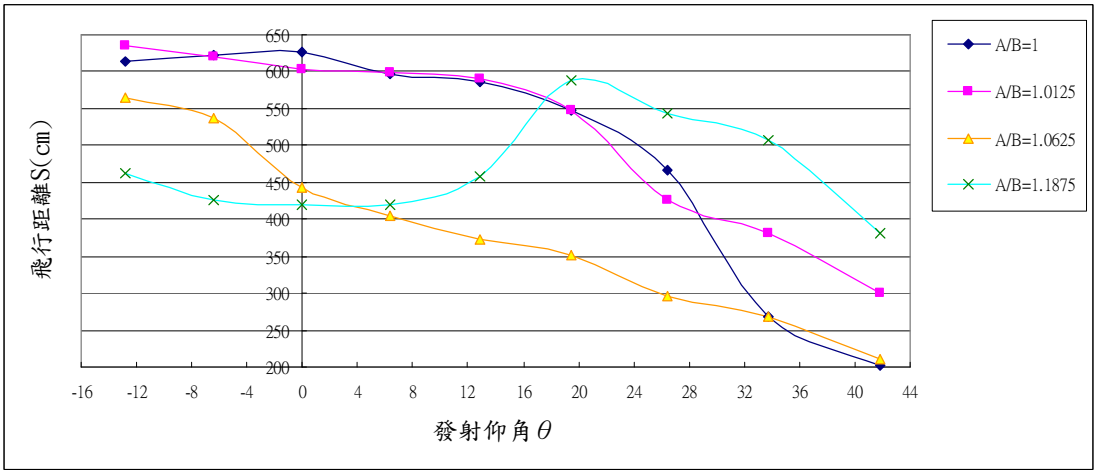
（二）實機發射實驗：

	A/B=1	A/B=1.0125	A/B=1.0625	A/B=1.1875	A/B=0.988	A/B=0.941	A/B=0.889
仰角 θ (度)	距離 (cm)	距離 (cm)	距離 (cm)	距離 (cm)	距離 (cm)	距離 (cm)	距離 (cm)
-12.8	613	635	565	463	392	340	354
-6.4	621	620	538	427	395	367	373
0	627	603	443	420	454	382	383
6.4	596	598	405	420	455	403	390
12.8	585	591	373	458	441	412	384
19.5	548	547	351	587	364	405	369
26.4	467	427	296	543	398	394	344
33.4	267	380	267	507	329	361	324
41.8	203	299	212	381	350	342	306



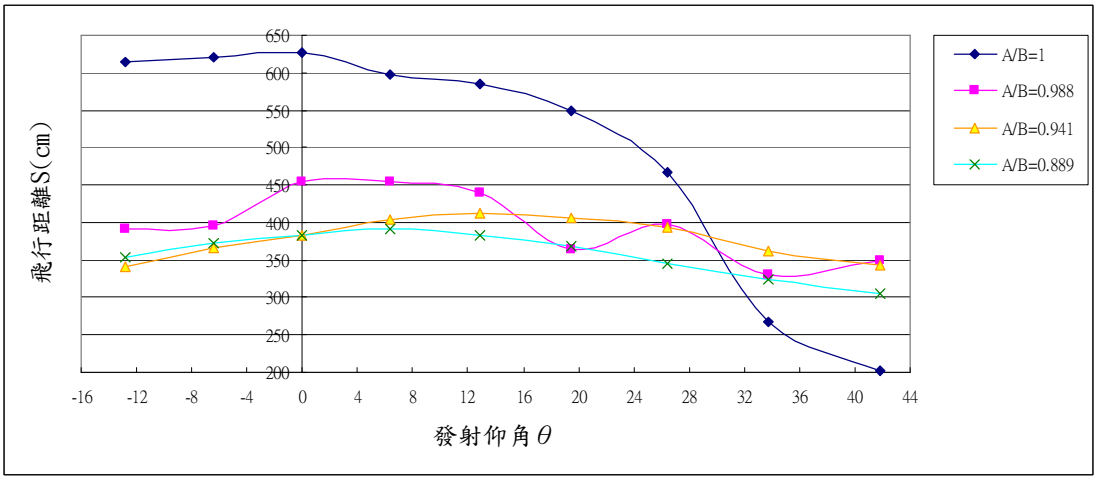
圖表 3 機翼的造型與飛行距離的關係，其中包含平板（A/B=1）、上凸（A/B>1）與下凸（A/B<1）。

由圖表 3 可以看出，下凸型（A/B<1）的機翼，其飛行距離明顯不及上凸型（A/B>1）及平板型（A/B=1）的機翼。另外飛行軌跡方面，上凸型的軌跡有機頭拉高的傾向，而下凸型的則有機頭慢慢降低的傾向。附件 2-1 至 2-7 是此實驗的原始數據。



圖表 4 機翼造型與飛行距離的關係，包含平板（A/B=1）與上凸（A/B>1）。

圖表 4 則是比較了平板型與上凸型機翼的飛行距離，在我們的實驗結果當中，擁有平板型機翼的飛機也能飛得相當遠（約 630cm），而若機翼有稍微上凸的（A/B=1.0125）構造，在接近 0 度或稍微向下 10 度的發射角度，則有機會飛行到接近 650cm 甚至更遠。在這組實驗數據裡面，我們也發現雖然 A/B 值越大，其受到的上升力越大，但飛行距離反而縮短了。而在最後一組上凸弧度最大的數據中（A/B=1.1875），大角度的範圍區間內發現了飛行距離變化不規則的情況。大部分的上凸型機翼的飛行路徑，在最後落地之前都是採用「滑行」的方式（失速墜毀的例外）。



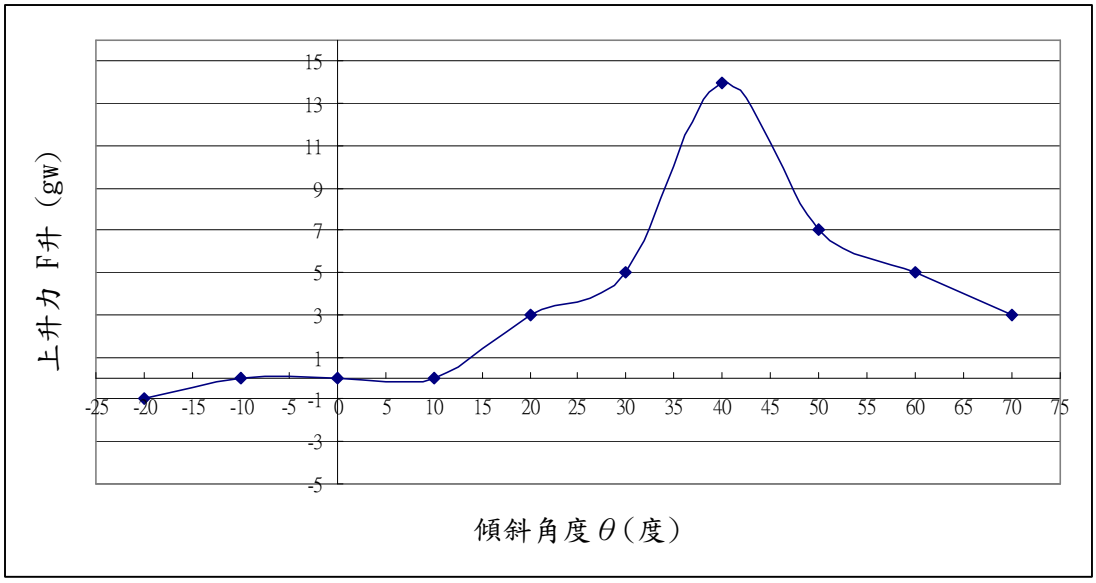
圖表 5 機翼造型與飛行距離的關係，包含平板（A/B=1）與下凸（A/B<1）。

圖表 5 比較了使用平板型與下凸型的機翼的飛行距離，下凸型的飛行距離明顯較近，但是相較於上凸型，飛行距離相對於發射仰角的變化速率較小。大部分下凸型的機翼，其飛機飛行的軌跡，在落地之前都是「頭部著地」，而沒有滑行或是失速墜毀的現象。

三、 發射仰角與飛行距離的關係：

（一）風洞實驗：

傾斜角 θ (度)	上升力 F 升 (gw)
-20	-1
-10	0
0	0
10	0
20	3
30	5
40	14
50	7
60	5
70	3

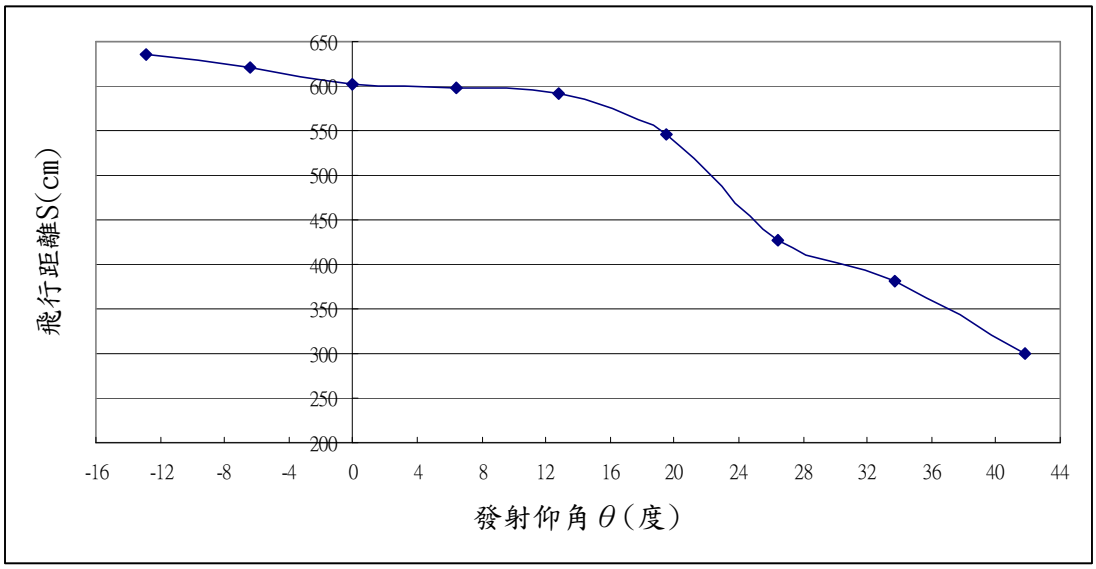


圖表 6 機翼形狀構造對上升力的影響（風洞實驗）（A/B=1）。

此實驗利用風洞裝置實際測量不同的傾斜角度造成的上升力變化，在此我們選用平版型的機翼來測試，由實驗結果中發現，傾斜角度大約在 40 度時，有最大的上升力，與理論（圖 4）的結果差異不大。而傾斜角度爲負值時，會造成向下的力（負的上升力）。附件 3-0 是此實驗的原始數據。

（二）實機發射實驗：

仰角 θ (度)	飛行距離 (cm)
-12.8	635
-6.4	620
0	603
6.4	598
12.8	591
19.5	547
26.4	427
33.4	380
41.8	299

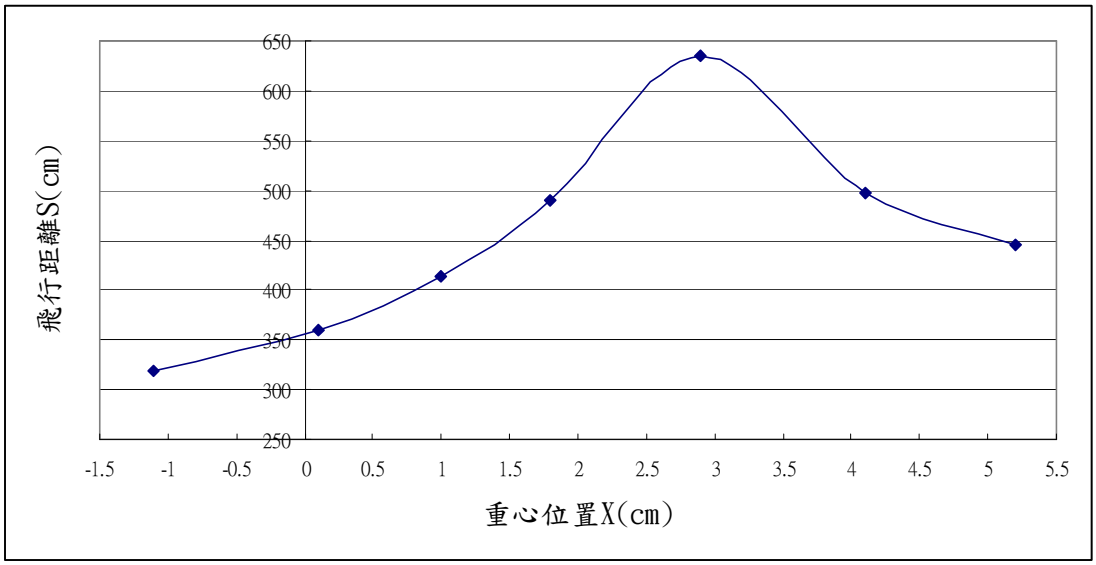


圖表 7 發射仰角與飛行距離的關係（A/B=1.0125）。

我們採用前一個實驗中，表現較爲良好的「稍微上凸型，A/B=1.0125」機翼的數據，發現飛行距離隨著仰角增大而縮短，而距離最遠的數據竟然是機頭朝下約 12 度的發射角度。由反作用力的理論（圖 3、圖 4）與風洞實驗，我們可以知道在 40 度附近時有最大的升力，但同時也有不小的阻力，相互抵銷的結果，在實驗中，上凸型的機翼最大射程幾乎都在小於 0 度的仰角時發生；而下凸型的機翼最大射程都發生在 5~10 度左右。附件 3-1 是此實驗的原始數據。

四、 重心的位置與飛行距離的關係：

重心位置 X (cm)	飛行距離 (cm)
-1.1	318
0.1	359
1	414
1.8	490
2.9	635
4.1	498
5.2	445



圖表 8 重心位置與飛行距離的關係（A/B=1.0125，θ=-12.8 度）

相同的，我們也採用之前表現較爲良好的機翼（A/B=1.0125）來做重心的位置與飛行距離的比較，由實驗結果圖表 8 可以觀察到，重心的位置並非恰好落在機翼中心上，才會飛行的最遠，而是在「機翼中心前方約 3 公分處」會有最好的效果。在飛行的軌跡方面，也的確如先前所述：重心過偏機頭，會以頭部撞擊的方式提前墜地；重心過偏機尾，飛機會快速爬升，最後機尾著地失速墜毀。附件 4-1 是此實驗的原始數據。

柒、 討論

一、 實驗中，爲了控制變因，都盡量使用同一架飛機來做實驗，以避免每架飛機的個別差異影響結果。譬如探討機翼形狀的實驗中，我們使用同一架飛機，每次只改變機翼上的紙板寬度，即可達到目的。

二、 由於氣流流速的不同，引起壓力差，進而產生作用力的白努力定律，在日常生活中隨處可見，例如各種球類的變化球就是一個例子。

三、 初次做實驗的時候，發現一個很奇特的現象：用很大的力道發射出去，飛機會亂飛；使用較小的力道發射，飛機較能順利滑翔。這個現象在機身多加了一些重量之後（多加了兩枚硬幣）獲得明顯改善，使用較大的力道也能平穩的滑翔，實驗結果也較爲準確。

四、 實驗中，白努力定律、飛行仰角、重心等因素都會影響飛行軌跡，進而影響飛行距離，我們的實驗雖然找到了一組我們認爲最佳的設定（A/B=1.0126，仰角=-12 度，重心在機翼中心前 3 公分處），但這組數值只適用於我們所設計的飛機外觀造型，其他如機翼形狀是三角形好，還是方形好；機翼位置該安裝在何處；機翼的大小等（所謂的 AR 值），還有很多其他文獻也有記載的相關研究，可能會對實驗結果有其他的影響，不過在此處只探討這三項因素，其他變因就暫時不予討論。

五、 實驗結果發現，上凸型機翼的表現並不如想像中比平板型機翼優秀，我們猜測是由於過大的機翼使上凸型機翼所受到的上升力相當強，迅速抬高機身的結果也很早就墜

落，這也可能是-12 度的發射角度竟然能夠飛得相當遠的原因之一：-12 度的發射角使得機頭在達到失速的角度之前已經滑翔得夠遠。

六、 在的實驗結果當中，大部分的數據是 0 度附近的發射角能達到最遠的距離，此種與理論及其他文獻結果（40 度左右）的差異我們推測是因爲我們的機翼做得過大，過大的表面積造成在同時有相當大的上升力與阻力，相當大的上升力並沒有好處，因此造成結果的不理想。

七、 另有文獻記載：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，因此推斷我們使用的飛機是屬於寬翼飛機的結果。

捌、 結論

雖然這次實驗的結果與理論有一些落差，但是我們仍得到很多寶貴的經驗，學習到了如何擬定題目、搜尋資料、計畫並實際完成整個實驗的流程，以及最後如何針對實驗的結果做解釋與討論。我們也學習到了不能從一個角度去觀察整件事情，必須多個面向去探討才有可能找出最佳的結論。另外，實驗的部分仍有很多需要克服的地方，例如：該如何讓發射器穩定的發射；飛機該如何製作才不易損壞；該如何準確的確認飛機的降落點；機翼的造形或大小是否有決定性的影響等，這些問題都是本次的實驗尚未達成的，也希望以後如果有機會，能夠繼續研究這個有趣而又與生活息息相關的題目。

玖、 參考資料

一、 鄧美貴（民 94）。國中自然與生活科技 2 下。康軒文教事業有限公司。

二、 鄧美貴（民 94）。國中自然與生活科技 3 上。康軒文教事業有限公司。

三、 張慧娟。學習如何做飛機。取自：http://www.efs.hlc.edu.tw/~class94/page-2/page-2-2.htm

四、 淡江大學航太系手擲機製作說明文件。

五、 卓志賢（民 94）。紙飛機工廠。聯經出版股份有限公司。

【評　語】　031608　凡飛過必留下玄機-珍珠板飛機的飛行奧秘

1. 考慮機翼形狀及飛行仰角等如何影響紙板飛機之飛行的題材並非新穎，本作品所涵蓋之變因相當有限，呈現之數據並無完整之分析及合理的解釋(如$a/b = 0.988$仰用~20^0時及~33^0飛行距離最短)，報告並不完整。
2. 本作品創意較不足，數據處理及解釋分析不完整，現場回答不流暢。