

中華民國 第 49 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 物理科

080101

翼飛攻天

-線繫珍珠板飛機滯空平衡與攻角的升力作用之研究

學校名稱：基隆市安樂區建德國民小學

作者： 小六 陳柏堯 小六 林善政 小六 魏郁玓 小六 許媗	指導老師： 鄧詩展 黃翠柳
--	-----------------------------

關鍵詞：滯空平衡、攻角、升力

摘要

以遠哲科學趣味競賽中【升力大挑戰】的項目為基礎，以自製線繫珍珠板飛機滯空時的載重性能。雖是高中課程中的力學，仍激起我們挑戰研究飛行升力原理的意念。

透過風扇與導流板的調整與製作，獲得較為平行的風向。在測試一般市售珍珠板飛機之後無法取得明顯的滯空性與載重性，則改以概念的方式設計出基本比例的原型機。經測試獲得初步的滯空性與載重性。接著製作可縱向調整機翼的測試機，進行配重與重心修正後的測試。

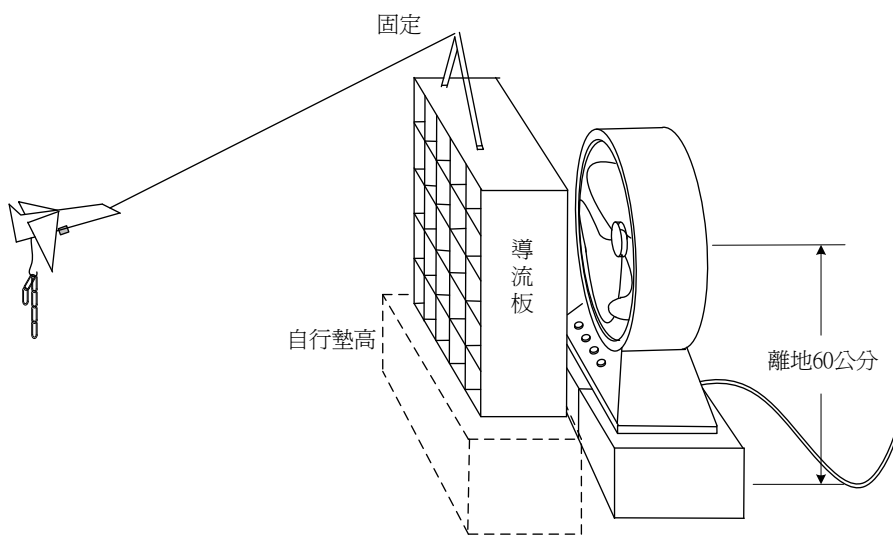
以自製機翼攻角升力測量儀研究最佳升力的攻角，進而以可調整機翼攻角的機型實測攻角的升力，相互對照中確定攻角對於升力的作用。最後珍珠板飛機穩定飛行的載重量由原本的 18 g 提升至 26g，也使得每次的飛行更具穩定性。

壹、研究動機

在科技發達的現代，搭乘飛機已成為人類普遍的交通方式。然而偌大的飛機為什麼能在天空遨翔，一直是我們想探究的謎。所以想透過製作小型飛機的研究過程，驗證並體會出飛機飛行的原理。

蒐集飛行資料時，從網路上搜尋到一份很有趣的競賽辦法。那是財團法人遠哲科學教育基金會在 2005 年舉辦的第十一屆遠哲科學趣味競賽，在校內初賽的實施手冊中由吳原旭老師設計的項目：**【遊龍戲鳳】**吸引了我們的注意。是以珍珠板製作成線控飛機進行滯空性、載重性、操控性與創意造型的競賽，雖然比賽是針對高中、高職、五專的學生來設計，牽涉的學理是高中課程的力學，遠超出我們在小學階段所學的範圍。但是似乎與想要嘗試的研究相符合。然而當中有三個活動：**【一、升力大挑戰】**：挑戰滯空時的載重性能、**【二、操控自如】**：挑戰滯空時的位移操控性、**【三、創意競賽】**：創意造型兼具飛行能力。在能力及時間的考量下，決定先以此競賽的**【升力大挑戰】**作為研究的內容，因為不以操控為目的，故改稱「**線繫飛機**」(圖 1)。

(圖 1) **【升力大挑戰】** 競賽辦法及裝置示意圖



【升力大挑戰】 競賽辦法

每隊在 30 分鐘內製作兩部「飛機」。一部飛機限一片 A4 珍珠板製作，並以大會提供之細線繫住飛機上一點(自行決定位置)，線的另一端固定於導流板上緣一定點，未開電扇時飛機自然下垂位置必須低於導流板下緣。飛機上可自行附加重物以調整重心，並以大會提供之迴紋針折成掛勾固定於飛機上以便於競賽中加掛重物(大會提供之迴紋針)，也可加上自備的配重。

風扇採用一般家庭用 80W 桌扇，取下前面風向板，中心墊高至離地 60cm。滯空必須 10 秒鐘以上才算成功，2 分 30 秒內最多可測試 4 次，並以載重物最多的三次計分。

貳、研究目的

競賽手冊訂定的研究目的為：「以簡易材料設計並製作線控飛機，使其能在電扇風力中滯空、載重、調整位置，藉以體會飛機飛行之部分原理並享受操控飛行之樂趣。」為了能具體說明我們的階段性研究目的，將其分項敘述如下：

一、模擬參賽前的測試

以達成競賽為目的，所以相關的器材、製作時間、材料等都要符合規定。

二、以單純的結構性為前提，便於實驗的探討及簡化製作。

基於實驗發展與製作的需要，透過單純的結構關係，有助於計算及釐清之間的作用性，也便於製作。

三、驗證飛行的部分原理並加以研究及製作

由於飛行原理是一門龐大的學問，對於基礎學習階段的我們是相當大的挑戰。所以將針對飛機基本滯空時平衡穩定及機翼攻角的升力作用加以驗證及研究，並做為提高升力及載重性的依據。

叁、研究器材

一、風力設備：80W 箱型電風扇、延長線

二、紀錄用具：筆、電腦、照相機、攝影三角架、計時器

三、裁製工具：美工刀、切割墊、量角器、裁圓器、尖嘴鉗、尺、油性筆

四、測試工具：迴紋針、細鐵絲、吸管、墊高用整理箱、鑷子、電子秤

五、導流板製作材料：塑膠瓦楞版、細紙條、膠帶

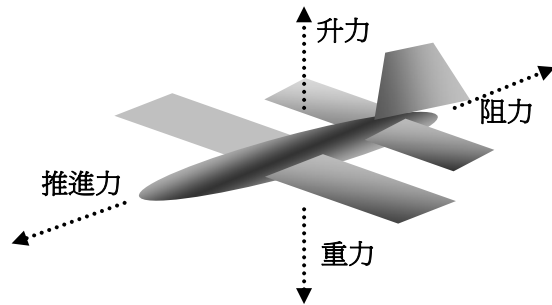
六、飛機製作用材料：珍珠板、細線、保利龍膠

七、其他：市售珍珠板飛機、鐵絲、大頭針、珠針、實驗支架、方格紙

肆、研究過程及方法

一、理論探討：

根據競賽手冊及蒐集的飛行資料，我們整理出飛行時作用於飛機的力量及原理。飛機能夠飛行在天空，是由於四種力量交互作用的結果（圖 2）：

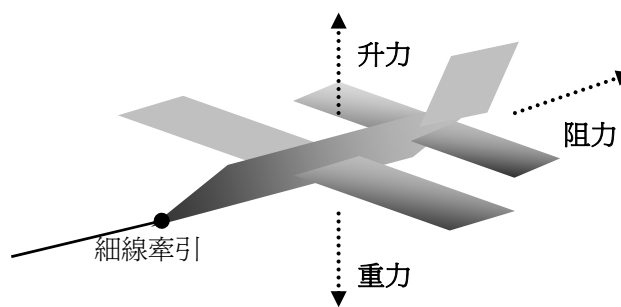


（圖 2）飛機飛行時主要的作用力

- （一）**引擎推進力**：有些飛機是利用螺旋槳，而噴射飛機則是利用引擎來產生推力。紙飛機就推力型態來說與滑翔機一樣是靠重力滑落、又藉此前進，都是不使用引擎而是利用自然力量飛翔的航空器。
- （二）**空氣的阻力**：空氣對機身的阻力及摩擦力。為了增進飛行效率，飛機在設計上應盡量接近流線型以減少不必要阻力的產生。但阻力也不全然都是負面的，像飛機要減速(升起機翼上的擾流板)、提供升力、穩定機身等。
- （三）**空氣的升力**：板狀的東西一遇到強風就會產生升力，飛舞在空中，小朋友最喜歡放的風箏，便是一個好例子。風箏如果和風向成直角，被風推動的軌跡只會往後移動，但若與風成一適當的角度，便會不斷地往上升。飛機的機翼與氣流保持某一傾斜角度時，會較水平時產生更大的升力。這種機翼的傾斜角度稱為攻角。
- （四）**飛機的重力**：就是飛機本身的全體重量，此重力對飛行的影響及能量的消耗均是負面的，因此飛機機身的設計都盡量採用較輕的材料。

飛機利用引擎的推進力產生向前移動的速度，速度使空氣透過機翼的形狀產生向上的升力並造成來自反方向的空氣阻力。當推進力大於阻力、升力大於飛機的重力，飛機就產生向前、向上的運動。

然而所要製作的線繫飛機與一般飛機運行的原理有所出入，主要的差異在於產生升力的來源不同及飛行的狀態不同：飛機利用引擎的推進力造成升力、線繫飛機運用風扇的風力產生升力。飛機向前飛行，線繫飛機則以滯留空中為目的(圖3)。



(圖3) 線繫飛機滯空時主要的作用力

所以製作飛機時必須要注意的下列作用力之間的關係：

- (一) **力平衡**：要使飛機維持靜止狀態，必須使在飛機上的所有作用力相互抵消，也就是合力必須為0。
- (二) **穩定平衡**：當飛機的平衡狀態被破壞時，若能自動產生恢復力(或力矩)，則飛機能回復原來平衡。若無恢復作用則飛機將持續偏離原來的狀態。
- (三) **斜面分力**：當氣流斜向衝擊在平面上時，將提供平面一正向力(垂直平面的作用力)。
- (四) **白努力原理**：流體通過物體表面時將使表面的壓力降低，且流速愈快壓力愈小。
- (五) **轉動平衡**：若要使飛機保持穩定不旋轉，必須使作用在飛機上的力矩相互抵消，也就是合力矩為0。

綜合上述各點，也就是說飛機要能在空中飛行，最重要的是要達到兩點：(一) 升力的產生、(二) 作用力之間維持平衡的穩定性；產生升力來克服重力的作用，飛機才能升空。飛機滯空時必須保持飛行時縱向、橫向及側向的各種作用力相互制衡達到平衡，飛機才能平穩的飛在天空。

由於研究製作的線繫飛機是依靠風扇產生的風力產生升力來滯空載重，而透過風扇的改造與導流板的製作，以產生單向的風源並減少其他作用力的影響更是飛行的關鍵，所以必須先進行此項製作的研究。

二、風扇的改造與導流板的製作與測試

透過在風扇前方網架黏貼細紙條的測試，可發現風向呈現旋轉放射狀(圖4)。這會影響風力的穩定性及風向的一致性，所以必須拆除前段轉動風向板。再以細紙條作風向測試，發現仍呈現放射狀(圖5)，於是有必要製作可導正為直向的導流板。

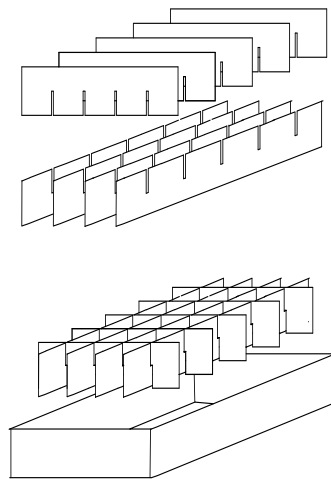
參考競賽手冊的範例進行導流板的製作(圖6)。基於經費與製作能力的考量，選用塑膠瓦楞板作為製作材料。以市售80W的風扇高度作為標準並依照手冊的圖例，按比例加以製作，成品為60cm×60cm×15cm的尺寸，長與寬各分成五格，總數為25個方格(圖7)。



(圖4) 電風扇風向測試



(圖5) 拆除風向板後的風向



(圖6) 手冊中導流板的作法



(圖7) 依範例製作的導流板

完成後貼以細紙條再測試，飄起角度顯示風力稍減、風向趨於平行，但仍是逆時旋轉（圖 8），可見修正風向平行的狀態仍不足。

於是以珍珠板製作更小的方格置入方格中，由於導流板中間的九格與風扇尺寸相近，所以將方格集中都集中到此區域。接著以細紙條測試風向與風力的情形時，發現風向變得更為統一，風力似乎也更為增強（圖 9）。

進一步嘗試在小方格中加入大型吸管，雖然風向更平穩，風力卻大幅減低，所以不採用此項改造。所以本導流板以中間九格的區域為導風範圍，於是飛機繫線的長度則以此為標準。

而其他來自於環境的氣流影響，除了要關閉門窗、阻絕來自門縫的風、防止因緊靠物體使風向偏轉及避免走動，好避除風扇以外的氣流干擾。



（圖 8）加上導流板後測試風向





（圖 9）測試加入細格後的導流板

三、測試市售珍珠板飛機

由於飛行相關原理之間的作用關係相當複雜，要從零開始進行製作使我們倍感艱難。經過討論之後決定先測試市售珍珠板飛機，如果具備滯空飛行性，則可以就其中各項元素進行改變與測試，以獲得最佳的升力作用。

蒐集來的市售珍珠板飛機有兩類，分別是**手擲型**與**彈射型**。都進行投擲及導流測試，以觀察飛行與載重的狀態（表 1）。

（表 1）手擲型與彈射型珍珠板飛機在飛行與載重測試的比較

		手擲型	彈射型
			
手擲飛行		向上仰飛	直向平飛
導流實驗	飛行性	快速擺動後隨即落下	直接落下
	載重性	無	無
綜合評估		<p>可能是向上仰飛的特性使得在導流實驗中產生向上的運動，可能有助於載重的提升，卻可能因此產生跳動感而頻頻飛離受風的範圍，導致失去平衡性。</p> <p>其形體的複雜性高，不易探討彼此間的作用關係。雖然穩固性可能會提升，但是也提高複製的難度，且面積超出規定的板面運用。</p>	<p>手擲飛行狀態屬於直向平飛。也許是因為彈射型必須承受彈射產生較強的作用力，而採用包覆塑膠膜的珍珠板，致使重量較重。如果改用一般的珍珠板，變輕後也許可以產生較大的升力。</p> <p>形體較前者簡單，面積運用較少，形體的複雜性高，不易探討彼此間的作用關係。</p>

綜合評估上述兩者的特性，都無法產生明顯的滯空狀態，由於構造形體的複雜提高了製作的難度，所以決定自行設計較單純的概念機型。如果能產生滯空飛行性，便可以就個別的構造加以測試，以釐清與飛行的作用性，並嘗試提升改造其特性。

四、自行設計概念式原型機及其測試

為了使飛機構造的變因較明確，以下是設計時的思考：

(一) 根據一般飛機的構造關係，區分成四大部分並以矩形為規格：

依概念區分出機身、主翼、水平尾翼、垂直尾翼，並以簡單的矩形及比例呈現，如此可以獲得明確比例的關係，也容易製作。

(二) 充分運用整張版面

以 7 cm×7 cm 的正方形，排成 3 排 4 列的長方形，其長寬是 21 cm×28 cm，正好接近 A4 尺寸的 21 cm×29.7 cm。(圖 10)。

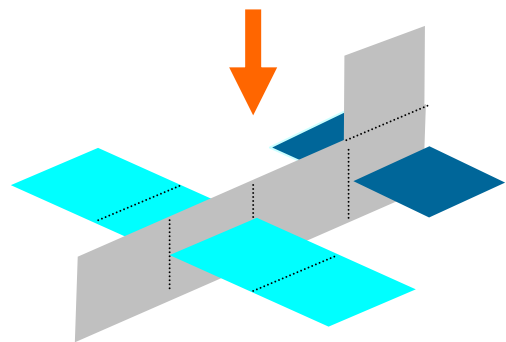
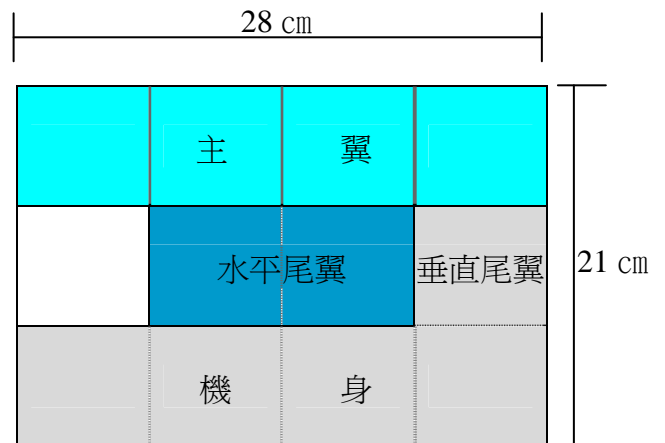
(三) 各部位都以垂直相互組合：

先由垂直關係測試，後續再視情形測試不同角度的組合。

以不同風速測試空機時，發現具有短暫滯空性，但產生劇烈搖晃轉動，容易飄飛出風力範圍而落下。增掛重量於機身中心點正下方時，在逐漸加重的測試過程中發現穩定性提高：前後波動、上下翻轉及左右搖擺的情形減少了(圖 11)。持續增掛幾乎都會在短暫滯空後朝面向風扇的左側直接墜落。

將垂掛點向前移動並加掛之前在最強風速下較穩定作用的 20 個迴紋針(約 7g)。越往前移時，機鼻向下、機身漸趨水平，但是升力也逐漸減少，變得容易直接落下；垂掛點越往後移時，機尾向下機身趨向垂直，但是升力也逐漸增加，變得容易急速上升後飛往左側，機身更加上揚後急速落下。可能是因為風扇逆時鐘的旋轉，所以在左側風向偏上，而右側則偏下所致。當升力較大時，便容易飛過風扇中軸線；遇到趨向上的風向時，致使升力不足失速墜落。在持續增加增重及移動垂掛點時發現，垂掛點只有在機翼附近時有機會增加至 50 個左右(約 18g)產生較穩定的飛行；是否因為重心造成前後機身傾斜度的改變則有待後續設計實驗加以釐清。

雖然並非每次都能穩定飛行，但已算是具有滯空性與載重性，便可結合部分理論進行各部位的分析測試，以釐清其作用性與升力的關係並加以改造提升。



(圖 10) 概念式機型的裁切與組合



(圖 11) 進行原型機的導流測試




五、原型機的測試與改造

從測試過程中發現珍珠板飛機的滯空性與載重性，似乎與平衡及迎風角度息息相關。故透過蒐集相關的飛行原理，思考實驗的方法與器材的設計。首先以實驗推測出飛機各部位的作用力，並針對與平衡及迎風角度的主要構造加廣測試的範圍，藉以運用於本研究。

【實驗一】：測試原型機各部位的作用




由於個別的部位無法形成其所在位置的作用，所以不易單獨測試。故先將兩相連的部位繫線後加以測試，除了可以應證作用性的交互情形，也可對不存在的部位作用性進行反證。將分別測試下列各相連部位組合的作用性（表 2）：

（表 2）測試兩個相連的部位組合的作用

	組合 1-1 機身+垂直尾翼	組合 1-2 機身+水平尾翼	組合 1-3 機翼+機身
			
作用描述	<ul style="list-style-type: none"> ● 無法平衡的飄飛，迅速墜落。 ● 機身翻轉，轉向左右不定。 ● 如果機身轉向水平時，會產生短暫飄飛現象。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 能呈現短暫平衡的飄飛現象。 ● 機身翻轉，轉向左右不定。 ● 機身上下波動。 ● 能呈現機身與風向平行，水平尾翼與風向垂直的飛行狀態。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 能呈現短暫平衡的飄飛現象。 ● 機身左右搖擺飄移。 ● 上下波動較組合（1-2）劇烈。 ● 能呈現機身與風向平行，主翼與風向垂直的飛行狀態。

基於初步測得原型機各部位作用的推論，接著採用去除的方式進行反證，以確認其作用性是否也消失，相對的也是驗證其餘三者間的作用。由於機身連貫前後機翼及垂直尾翼，所以無法去除機身分別進行測試。將分別測試下列部位的存在作用性（表 3）：

（表 3）測試三個相連的部位組合存在的作用

	組合 2-1 機身+垂直尾翼+水平尾翼	組合 2-2 機身+機翼+垂直尾翼	組合 3-3 機身+機翼+水平尾翼
			
作用描述	<ul style="list-style-type: none"> ● 能呈現短暫平衡的飄飛現象。 ● 機身搖擺偏轉。 ● 機身上下波動。 ● 能呈現機身、垂直尾翼與風向平行，水平尾翼與風向垂直的飛行狀態。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 能呈現短暫平衡的飄飛現象。 ● 機身搖擺，偏轉較組合（2-1）弱。 ● 機身上下波動劇烈。 ● 能呈現機身、垂直尾翼與風向平行，主翼與風向垂直的飛行狀態。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 平衡飄飛是測試中最佳者。 ● 翻轉較組合（2-1）（2-2）明顯。 ● 機身上下波動最少。 ● 能呈現機身與風向平行，主翼、水平尾翼與風向垂直的飛行狀態。

從（表3）描述中交互分析後可以歸結出本實驗中原型珍珠板飛機各部位的作用，分別敘述如下表（表4）。

（表4）原型珍珠板飛機各部位的作用推論

部位名稱	作用推論描述
主翼	與風向呈垂直的關係。當翼面傾斜時，便可以出現較穩定的飄飛現象，推測具有提供升力的作用。也可能因升力作用使機身產生上揚，受繫線的限制及飄離風力範圍失去升力而呈現波動。
機身	連接主翼、水平尾翼、垂直尾翼，可以使飛行時機翼與風向呈垂直。
水平尾翼	與風向呈垂直的關係。維持前後縱向的平衡，使機身飛行時減少上下的波動現象，推測具有提供升力的作用。
垂直尾翼	與風向呈垂直的關係。維持左右橫向的平衡，使機身飛行時減少左右的搖擺及翻轉現象。

上述實驗中推論出機翼與水平尾翼是升力主要的來源，所以其改造與測試是重點；而滯空時平衡的穩定調整必須先加以釐清，待飛機具有基本的滯空性才能進行升力作用的探討。

【實驗二】：重心的測定與平衡的測試與調整

由初次測試的操作中，思考調整機身傾斜狀態如同槓桿原理一般。當重心是支點時，若受到前後段不同作用力時則會產生縱向平衡的改變。若能先測量出重心，便可進行位置的調整、重物的垂掛點、配重的修正之後以減少前後段作用力的改變。

針對上述進行測定前的四點思考：

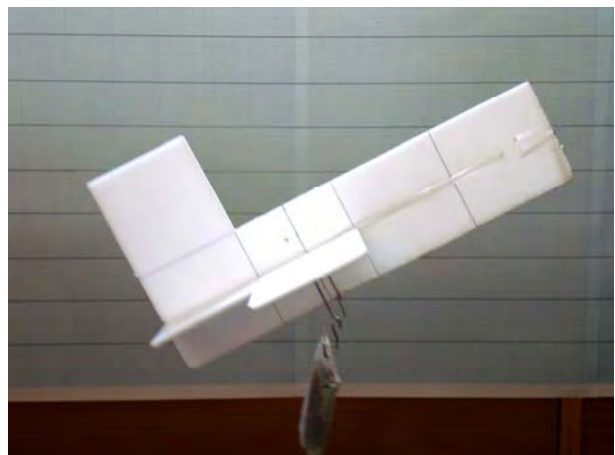
- 1、**重心的測定**：用鑷子輕夾機身加以觀察調整，重心可使前後左右皆呈現平衡。
- 2、**位置的調整**：機翼若是移往重心附近，升力產生時可減少對機身前後力矩的作用。
- 3、**重物垂掛點**：重物若垂掛在重心的位置，對機身前後力矩作用力較小。
- 4、**配重的修正**：目的是使機體下降至受風處，並作為重心的調整；但會減低升力。

測試後的機翼水平向後空機重心測定是落在機身前後中點偏後方及上方 1.5 cm 處。為了將重心調至機翼中心點，在盡可能不改變原有形狀及減少配重原則下，製作成可縱向調整機翼的測試機以測量重心的改變（圖 12）。

（表 5）重心調入機翼中心的測試

編號	移動位置說明	配重			最高載重 總重量	飛行狀態		
		掛勾重	機鼻處	總重		傾斜度	回復性	空機滯空性
1	移至最前（前移 7 cm）	1g	23g	24g	無	無法測量	無	受風時機身接近水平，隨即向前落下。
2	前移 3.5 cm	1g	18.5g	19.5g	無	無法測量	無	
3	原比例位置	1g	4g	5g	無	無法測量	不明顯	飄飛翻轉後隨即落下。
4	後移 3.5 cm	1g	1.5g	2.5g	20g	25°	有	易翻轉、上飄，滯空時間短暫。
5	後移 7 cm	1g	0.5g	1.5g	21g	30°	有	翻轉與上飄狀態變較前者，滯空時間普遍較前者長。
備註		<ul style="list-style-type: none"> ● 機身傾斜度是透過連續照相後測量所得。 ● 飛行與載重狀態，是測量 5 次以上能穩定的狀態作為記錄。 						

從（表 5）實驗中得知，測試中五種機翼的位置，以（編號 5）配置後的狀態最適合：配重最少、載重性最高、飛行狀態都有較優勢的表現，所以後續實驗中將以此比例關係的機型作為基礎再行測試。

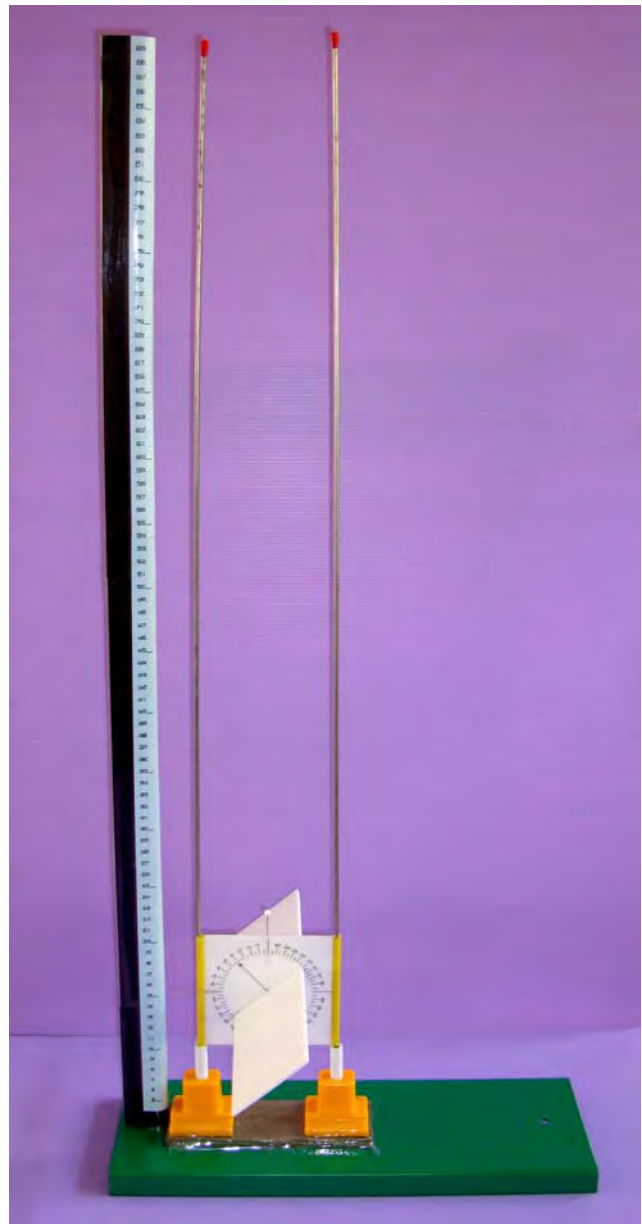


（圖 12）可縱向調整機翼的測試機

【實驗三】：機翼攻角升力作用的模擬測試

在原型機的測試中已發現機身傾斜度與升力似乎有關聯，且在(實驗二)也再度顯示，也呼應了資料中的敘述：「機翼的攻角是指機翼與機身中軸基準線間的夾角稱之為攻角，會影響升力，故攻角大則升力大，但有極限。」

所以必須針對機翼攻角所產生的升力作用進行測試。由於線繫飛行時並非完全靜止，要觀察相關高度、穩定機翼攻角並不容易，故模擬機翼飛行時的狀態設計成攻角升力測量儀(圖 13)，先以 5° 作為每次增加的角度，觀察飛行的迴紋針載重數及高度，希望測出最佳升力作用的攻角。



(圖 13) 模擬機翼攻角升力的測量儀

(表6) 機翼攻角升力作用的模擬測試

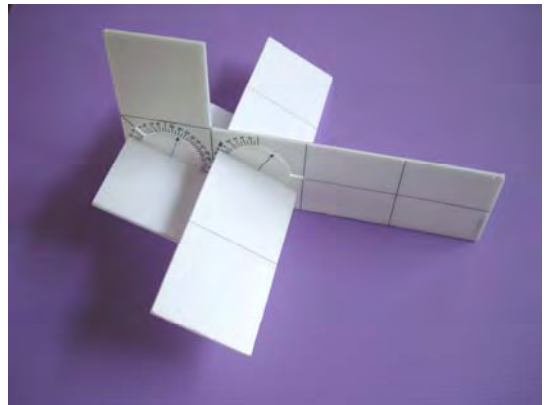
攻角	最高載重 (g)						註記
	測試一	測試二	測試三	測試四	測試五	有效值	
0°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	迅速落下，升力作用不明顯。
5°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	緩緩落下，升力作用不足。
10°	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	升力明顯、已能承載重量。
15°	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50	升力與載重性持續增加。
20°	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	
25°	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	
30°	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	
35°	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50	
40°	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50	
45°	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	升力作用達到最高範圍、載重性最高。
50°	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50	11.50	升力減低、載重性減少。
55°	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50	8.50	
60°	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	
65°	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	似乎產生橫向的作用力，空機時可固定高度，但增加重物便容易逐漸落下
70°	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	
75°	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	
80°	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	緩緩落下，升力作用不足。
85°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
90°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
95°~130	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	隨著角度的增加落下的速度也有所增加，似乎產生向下的作用力。
135°~175°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	隨著角度的增加落下的速度也有所減緩，向下的作用力逐漸減少。
備註	<ul style="list-style-type: none"> ● 風扇由扇葉旋轉產生出風力，所以風力範圍也呈現圓形，爲了獲得較高位置區域的受風範圍，故測試時儀器擺放於風扇的對稱軸線上，並配合規定計算繫線長度後獲得測試位置是在相距 60 cm 的位置。 ● 加掛重物時必須站在側面，手必須由後方進入以避免產生亂流、造成急速上升失速墜落。 ● 由於動力不是自機體產生，飛行高度受到風力範圍限制，只要能滯留產生高度便算是飛行狀態、故不列爲紀錄項目。而高度可能受到各種力量的影響無法完全停滯不動，而高度表僅作爲觀測滯空狀態及高度範圍的參考。 ● 爲了求取有效的數值，以進行五次測試最低重量爲載重的數值。 ● 爲了求得穩定的滯空性，滯空時間採取超出比賽規定標準 10 秒鐘以上的一分鐘，且必須在一定高度的上下範圍持續來回升降才算平衡、才能採計其載重數。 ● 每次加掛先將機翼提至最高處，等產生升力作用後再予以輕放，以符合實際競賽的方式。 ● 由於機翼前後端並無差異，所以超出 180°便從頭由 0°起算。 ● 由於製作的強度不足受正向風阻改變了支架的垂直性：以至於雖然數量在某些角度範圍呈現明顯改變時，雖然試著加以修正，但精確度仍不足，故不再加測每 1°的差別。 ● 由於使用迴紋針爲重物，重量約在 0.32g~0.38g 間，累計重量不易標準化。爲求數據的統一性，則以每次增重 0.5g 爲測試的標準。 ● 可能仍有未知的氣流會影響實驗的準確性，所以每次測試的結果會有些許誤差。 						

從(表6)測試得知機翼攻角與升力的關係，在 45°時載重量性最好，應具備最好的升力。以此爲分界：低於及超出 45°的升力也逐漸減少；0°~10°及 80°~90°的升力無法明顯載重。超出 90°以後會呈現向下的作用力。其作用力的大小，在本測試中無法測得，後續相關研究時再予設計測知。

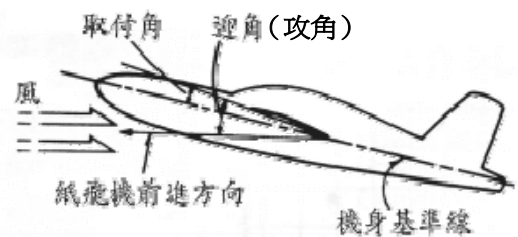
【實驗四】：機翼最佳攻角調整的測試

在最少增減原型機重量與形式的狀態下，製作成可調整機翼攻角的測試機來進行線繫飛行（圖 14）。在重心位置加掛重物予以測試，發現機身上仰的角度在增重過程的改變不大幾乎在 30° 上下、載重約 25g，比之前機型再予提升，推測是製作時的切削及配重減少的緣故。

如（圖 15）所示迎面吹來的風向與翼弦線所成的角稱為攻角（又稱迎角），原本只在飛機製作或製圖時方便起見才在機身畫出的基準線，它與翼弦線形成的角稱為取付角，取付角是固定於機身，而攻角會隨著飛行的姿勢而變化，所以二個角度通常不會相同。也就是說機身基準線的傾斜度加上取付角便是攻角。然而（表 6）實驗中的取付角等於攻角，以作用性而言則視為攻角。接著進行測試機翼攻角調整的實測，以確定最佳攻角的實際作用性（表 7）。



（圖 14）可調整機翼攻角的測試機

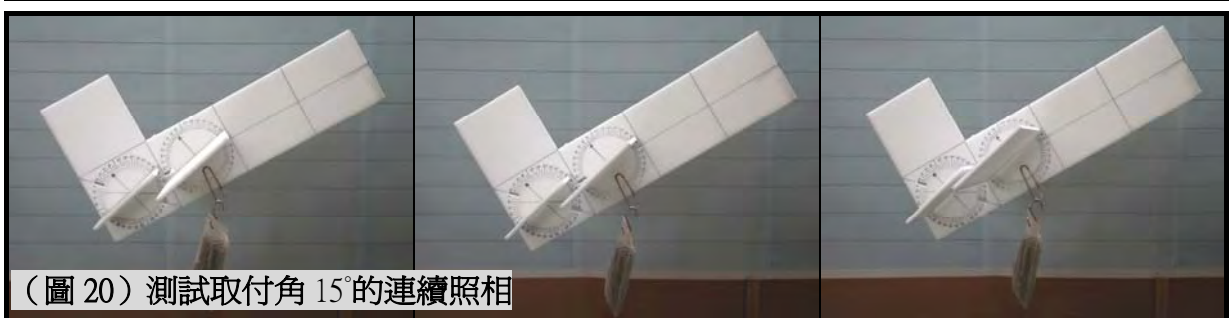


（圖 15）取付角與攻角的說明

（表 7）機翼攻角調整的實測

編號	取付角	攻角	最高載重時		註 記
			機身傾斜度	載重量	
1	-30°	無法測得	無法測得	無法測得	空機時迴轉飄移後落下，載重後左右飄移後落下。
2	-20°	11°	31°	15.00g	空機可飛行，具恢復力，容易左右搖擺落下。（圖 16）
3	-10°	22°	32°	23.50g	空機時可飛行，具恢復力。（圖 17）
4	0°	30°	30°	25.00g	空機時可飛行，具恢復力。（圖 18）
5	10°	41°	31°	25.50g	空機時可飛行，具恢復力。（圖 19）
6	15°	45°	30°	26.00g	空機時可飛行，具恢復力。（圖 20）
7	20°	48°	28°	19.00g	空機時容易擺動墜落。（圖 21）
8	30°	無法測得	無法測得	無法測得	空機時容易擺動墜落。載重後容易因擺動墜落無法測得仰角。
9	40°	無法測得	無法測得	無法測得	
備 註		<ul style="list-style-type: none"> ● 機身中軸與機翼的夾角平行時取付角為 0°，反向則為負度數。 ● 飛行時機身傾斜度都是動態的，所以測量是採用多張影像的數據。 ● 若載重量隨著仰角的增加而有所不同變化時，加測 5° 的數值。 ● 由於製作精確度仍不夠，故不再加測每 1° 的差別。 ● 沿用前項實驗每次增重以 0.5g 為標準。 ● 爲了求取有效的數值，以五架測試機分別進行五次測試出最低重量為載重的數值。 			

從（表 7）中可以發現測試機在攻角為 45° 左右時能獲得最好的載重性，與（表 6）實驗結果相符，同時也發現機身在測試範圍中機身傾斜度似乎都維持在 30° 上下，似乎受攻角改變的影響不大。



伍、研究結果

將概念的原型機，在調整機翼、配重與重心的位置後進行修正，達成較穩定飛行的狀態。藉著利用自製機翼攻角升力測量儀研究最大升力的攻角，並運用可調整機翼仰角的機型測試攻角升力實測中的改變，相互對照中確定攻角對於升力的作用。最後線繫珍珠板飛機穩定飛行的載重量由原本的 18 g 提升至 26g，也使得每次的飛行更具穩定性。

從上列實驗結果，歸納出有關本實驗條件中的線繫飛機製作及提高升力的要點：

- 一、正方形連結成概念的機型，比例為（機身：機翼：垂直尾翼：水平尾翼=4：4：1：2）
- 二、重心落於機翼翼幅中心，可減少受風後與增重時力矩的改變，能產生平衡的恢復力。
- 三、以結構的調整完成重心的配置，避免調整後所增加的配重對於升力作用相對的減少。
- 四、垂掛點位於重心下方，可以在重量增減時避免對於機翼翼面仰角產生影響。
- 五、配重與掛勾的重量宜控制在空機時能降至受風力的範圍，避免過重而抵銷升力作用。
- 六、機翼攻角控制在 45°時能獲得最大的升力作用，使載重性能更為提升。

陸、討論

- 一、導流板仍無法產生真正平行穩定的風，如果能以更堅固、更薄的材料且更長距離的導流修正過程製作成風洞，減低環境因素的影響，相信可獲得更好的實驗效果。
- 二、市售珍珠板飛機採樣太少，不足以作為驗證及對照。而自行設計的概念機能初具滯空性與載重性，有相當機率是出於的巧合。
- 三、以我們對於力學的認識及學習，短期內無法深入測量及計算作用力的大小。只好先著重現象的呈現，其則留待後續再予研究學習。
- 四、有關升力的作用在機翼的構造上有許多可以加以探究：如白努力原理、升降舵的攻角運用、機翼的形狀、長度、寬度等因素來調整升力，這留待後續加以研究。
- 五、實驗中只針對正向平行風源加以測試，但在真實飛行的飛行狀態，飛機必須承受來自不同方向的作用力影響：像是側向風、上升氣流、亂流……等，此留待後續加以研究。
- 六、本實驗為了模擬參賽所作的限制；比如比例、材質、尺寸、風力等，可在後續研究中加以排除，以求得更大的探討範圍。
- 七、綜合上述，本研究所得的數據現階段只適合作為線繫飛行時的參考，尚不能廣泛地運用到其他飛行狀態。

柒、結論

透過此實驗的設計與研究，初步揭起了飛行謎樣面紗的一角。過程中歷經思緒紊亂、不得其解的窘境，和在飛機載重升起那一刻的成就感，體會到研究飛行的樂趣，更領悟到飛行原理是一門複雜且深奧的學問。

我們只是嘗試探討了升力與攻角的基礎，使珍珠板飛機能具有較穩定的滯空性與載重性，便歷經近三個多月的持續摸索與測試。很難想像科學家們是如何成就一架具備動力、自由升降飛行、能乘載自身龐大的重量並搭載人員及物品的飛機，甚至是飛向地球以外天際的太空梭。除了向他們致上最大的敬意，更激起持續研究飛行奧秘的動力，後續將針對競賽辦法中的線控飛行項目加以研究，進而加廣相關學理的涉略，不斷持續這一股對於飛行研究的熱力。

捌、參考資料及其他

- 一、遠哲科學教育基金會，第十一屆遠哲科趣校內初賽實施手冊，<http://www.ytlee.org.tw>，2005。
- 二、林波斯，紙飛機的飛行原理製作技巧與競賽，國立羅東高中，<http://www.phy.ntnu.edu.tw>。
- 三、國家紙飛機全集製作組，紙飛機 DIY3，國家出版社，1997。
- 四、TONY.S 資訊工作室，國際比賽競技機設計入門。<http://home.so-net.net.tw/5448/r0.htm/tony.s>，2000。

【評語】 080101

- 1、 透過科學趣味競賽的設計主題挑戰飛行升力的最佳攻角，表現豐富趣味性。
- 2、 實驗裝置除整流外，若能增加風洞設計，則更能增加實驗數據的正確性與穩定度。