

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國小組 物理科

080105

【 滯空 UFO 】— 懸浮的紙蜻蜓

學校名稱：基隆市安樂區建德國民小學

作者： 小六 宋宸灝 小六 高紫綺 小六 張沛穎 小六 賴宣妘	指導老師： 鄧詩展
---	--------------

關鍵詞：重力、阻力、旋轉作用

摘要

在研究如何讓紙蜻蜓更慢速降落和造型關係的過程中，想到如果能讓紙蜻蜓在垂直風洞中像 UFO 滯空懸浮飛行一定很有趣！從原理推想如果能控制影響紙蜻蜓的各種變因，讓重力和降落時的作用力和向上的阻力相當，是不是可以飄浮在半空中了？

運用自製施放架統一施放標準，並慢速攝影紀錄。在相同面積和重量的製作下，測試 20 項造型變因，用所得的時間和圈數，推論阻力和旋轉作用的改變，再用 Tracker 軟體分析探討其速度與加速度的變化。

分析自製的垂直風洞，結合之前實驗的推論，發展出容易製作的懸浮紙蜻蜓。將相關數據帶入【阻力方程】後，推論出旋轉作用會有抵銷部分阻力的作用。這可以發展成看板或是玩具，再搭配跳躍閃爍的燈光，看上去就是十足的【滯空 UFO】！

壹、研究動機

研究紙蜻蜓慢速降落和造型關係的過程中，聯想到如果可以讓紙蜻蜓在垂直風洞中像 UFO 懸浮飛行一定很有趣！從原理推想如果能掌控有關紙蜻蜓重力、阻力、旋轉作用等的各種變因，讓向下的重力及旋轉作用和向上的阻力相當，是不是就可以懸浮在垂直風洞中？

貳、研究目的

一、蒐集相關資料，對紙蜻蜓造型與緩降及相關的現象，作更系統的探討。

參考歷年相關紙蜻蜓的科展作品與研究：

- 第 38 屆 國小組 物理科 臺北縣光華國民小學 【有趣的螺旋降落】
- 第 49 屆 國小組 物理科 臺東市卑南國民小學 【凌空而降的玩具】
- 第 56 屆 國小組 生活與應用科學科 臺東縣福原國民小學 【飛吧！紙蜻蜓】

主要都在探討不同造型、紙質、造型改變對於緩慢降落的作用。【有趣的螺旋降落】有提出配重的影響，【凌空而降的玩具】和【飛吧！紙蜻蜓】都有提出相同面積和重量的控制；但施放方式都不夠標準客觀，沒提到無風環境的處理；缺乏對於重心的改變、旋轉圈數、

偏轉及翻轉現象的觀察，造型的推演不夠系統，本研究都將增加探討。

二、發展成可懸浮的紙蜻蜓

為了讓紙蜻蜓在垂直風洞中像 UFO 懸浮飛行，就要掌控有關紙蜻蜓重力、阻力、旋轉作用等的各種變因，讓向下的重力及旋轉作用和向上的阻力相當。就必須運用歸納的造型因素，配合自製垂直風洞的特性分析，並帶入理論及計算，發展出可以懸浮在垂直風洞的紙蜻蜓。

參、研究設備及器材

一、 測量器材：捲尺、電子秤、水平儀、量角器、風速計

二、 記錄器材：電腦、iPad、粉筆、小黑板、板擦

三、 製作工具：鉛筆、直尺、刀片、電鑽、切割墊、螺絲起子

四、 製作材料：

(一) 施放架：棉線、鐵片、鋁條、砝碼、木板、頂天立地晾衣架、絹版印刷固定夾

(二) 紙蜻蜓：膠水、黏土膠、牛皮紙、影印紙、便條紙、螢光筆、鋁箔膠帶

(三) 高度表：膠帶、磁鐵、牛皮紙、麥克筆、書背膠帶

(四) 攝影架：繪圖桌支架、平板固定架

(五) 垂直風洞：抽風扇、吸管、鐵架、鐵網、書背膠、配線壓條、PVD 透明塑膠片

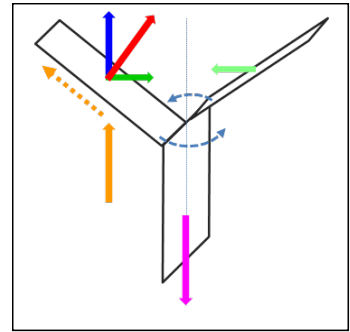
肆、研究過程

一、資料蒐集與分析

蒐集紙蜻蜓緩慢旋轉降落的原理，作為研究的參考。

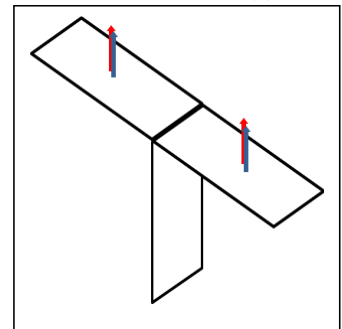
紙蜻蜓落下時，相對向上的空氣阻力給予翼面作用力。如果翼面為 Y 字型、而且交錯的。紅色箭頭代表空氣阻力，垂直於翼面，其分力為藍色箭頭和綠色箭頭。藍色箭頭的分力為垂直朝上，使紙蜻蜓下降變慢。而綠色箭頭的分力在左右兩邊翼面的方向是平行相對的，這使得紙蜻蜓以綠色點為中心產生旋轉。推論翼面為 45° 時，綠色箭頭的分力最大，旋轉作用會最快，旋轉越快的，有助於維持垂直的運動方向，也就是陀螺儀原理【如圖 1】。

【圖 1】紙蜻蜓的旋轉



如果翼面為水平、而且是相對時，紅色箭頭的作用力與藍色箭頭的作用重疊，雖然阻力作用會變大，就沒有綠色箭頭的分力了，因此無法旋轉【如圖 2】。主要的作用力是：重力、阻力、旋轉作用（陀螺儀原理）。如果能讓降落和向上的作用力相當，是不是就可以使紙蜻蜓懸浮在半空中？

【圖 2】無法產生旋轉



二、準備實驗、紀錄器材及場地

- (一) 將教室封閉成無風的環境，配合【風速計】來確認。
- (二) 運用【施放架】統一施放高度並維持施放高度及垂直的穩定，如【圖 3】。
- (三) 並用【慢速攝影平板】配合紙蜻蜓的立面單邊上色，方便紀錄計算圈數、時間，如【圖 4】。
- (四) 並排的【高度表】提供攝影記錄時的對照，如【圖 5】。
- (五)【垂直風洞】作為紙蜻蜓懸浮的器材，如【圖 6】。

【圖 3】施放架及穩定施放狀態



【圖 6】垂直風洞



【圖 4】平板及攝影架



【圖 5】高度表



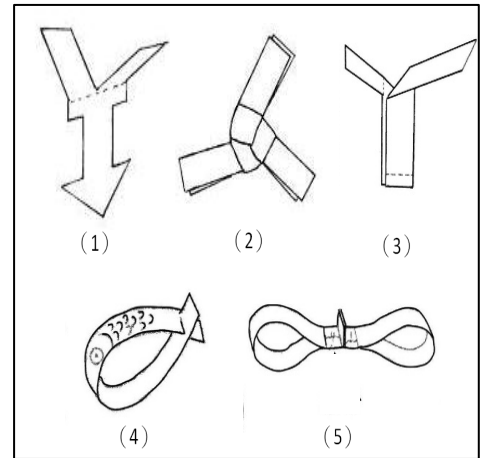
三、從基準型紙蜻蜓的改變造型實驗，找出使降落更慢的構造

【實驗一】選定實驗的基準型（對照組）

考慮到造型改變的實驗，是在相同的面積和重量條件下，來證明造型改變的影響，用【圖 7】中最簡單、翼面相對、最接近原理說明的（第 3 種）造型為基礎，再結合其他部分造型加以改變。

經過測試後，確定這種造型能夠降落旋轉，就作為實驗的（基準型），也就是對照組【如表 1】。

【圖 7】5 種造型的紙蜻蜓



【表 1】基準型的紙蜻蜓

	重量 (g)		面積 (cm ²)		
	主體	固定片	0.04	立面 (兩片疊合)	24 × 2
		鋁片	0.03 × 4		
	紙張	0.78			
	配重	0.36		翼面	48
	總重量	1.31		總面積	96
	測試結果	【見 2-2】			
	備註	<ul style="list-style-type: none"> 立面的上端加一片固定片，讓施放架可以夾放。下端用黏土膠來取代常用的迴紋針（約 0.36g），方便進行配重改變的實驗。紙張總面積定為 96 cm²，方便計算出許多同面積下的邊長組合。翼面和立面先用 1：1 的比例，單邊翼面長度和立面一樣長，兩側分別向前後傾斜 15°。 			

用自由落體來說：排除空氣阻力後，相同高度、不同重量的物體都會同時落地。在開始設計基準型的測試中，就發現相同重量、不同造型的落地時間不一樣，所以造型對於阻力的產生和重量對於阻力的抵銷，還有產生旋轉的作用，就是實驗設計的思考方向。

所以用資料整理出的三個作用力來推論和各部位造型的關聯：

- (一) 重力：重量（紙質、配重、翼面、立面）、重心位置
- (二) 阻力：翼面面積、旋轉面積、翼面俯仰角、翼面形狀、翼面折曲
- (三) 旋轉作用：翼面傾斜度、左右錯開的距離、翼面數量、立面造型、立面旋轉面積

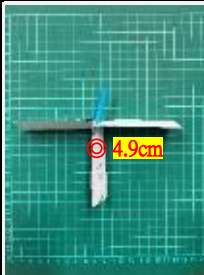



接著就把上面的推論在發展出後面的 19 項實驗：

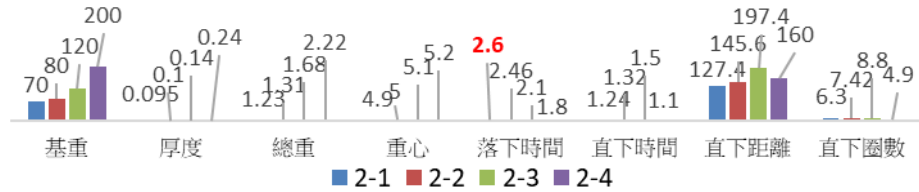
【實驗二】 不同的厚度（不同總重量）的紙張

用不同基重的影印紙做成相同的造型，來測試相同紙質、不同的厚度（不同總重量）的影響，從【表2】可知，較輕的（落下時間）大於較重的；較輕的（直下時間）小於較重的。推測是相同翼面條件產生的阻力，

隨著（旋轉作用）的加速而增加；阻力如果大過下降時的重力就會產生偏轉。

【表2】不同的厚度（不同總重量）的紙張

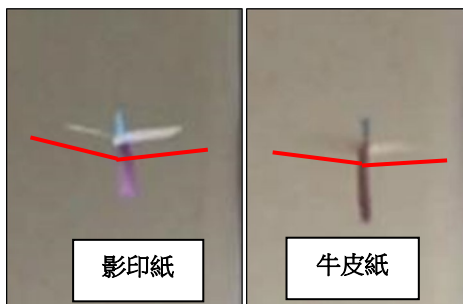
編號	2-1	2-2 (基準型)	2-3	2-4
基重 (gsm)	70	80	120	200
厚度 (mm)	0.095	0.10	0.14	0.24
總重 (g)	1.23	1.31	1.68	2.22
實物 ◎ 表示重心				
備註	<ul style="list-style-type: none"> 其餘詳見實驗數據統計。 (2-1) 的（落下時間）比（2-2）多，列入能夠緩慢降落的參考條件。 			





【實驗三】 相同基重、不同紙質的紙張

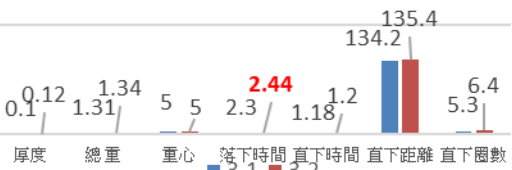
用相同基重、不同紙質(厚度)的紙做實驗。從【表】可知，(厚度)和(總重)、(落下時間)、(直下階段)是正比；牛皮紙較重，符合【實驗二】(直下階段)的變化，但是(落下時間)反而變多；推論和厚度產生的重量有關。定格影片後發現，牛皮紙翼面的抬升角度較小，能產生較大的阻力，落下時間就變長，如【圖8】，可能和紙質的韌性有關。

【圖8】影印紙和牛皮紙降落翼面角度



【表3】相同基重、不同紙質（厚度）

編號	3-1 (同2-2)	3-2
紙種	影印紙	牛皮紙
厚度 (mm)	0.1	0.12
總重 (g)	1.31	1.34
實物 ◎ 表示重心		
備註	<ul style="list-style-type: none"> 其餘詳見實驗數據統計。 (3-2) 的（落下時間）比基本型（3-1）多，列入能夠緩慢降落的參考條件。 (3-1) 和 (2-2) 是相同的，但是 (2-2) 的結果都比 (3-1) 多，推論是氣候造成的，之後的相同實驗要在類似的氣候條件做，才可以更準確。 	



【實驗四】 不同的總重量 (不同的配重)

從沒配重開始,接著重心位置逐漸增加配重,來觀察相同重心、不同重量的影響,從【表4】得知:重心偏高、重量越重的(直下階段)越短,越容易產生偏轉。

【表4】 不同的總重量 (不同的配重)

編號	4-1	4-2	4-3	4-4
配重 (g)	0	0.36	0.72	1.08
總重 (g)	0.95	1.31	1.66	2.02
實物				
備註	<ul style="list-style-type: none"> (4-1)的(落下時間)比(2-2)多,列入能夠緩慢降落的參考條件。 			

配重	總重	重心	落下時間	直下時間	直下距離	直下圈數
0	0.95	6.3	1.96	1.02	93.8	2.7
0.36	1.31	6.3	2.58	0.64	77.4	2.1
0.72	1.66	6.3	1.74	0.54	73.4	1.9
1.08	2.02	6.3	1.56	0.48	66	1.9

【實驗五】 不同配重的位置

改變(配重)的高度位置,讓(重心)有上下的不同,來證明(重心)高度和(直下階段)的影響,從【表5】得知,(配重)位置和(重心)位置是正比;和(落下時間)、(直下階段)是反比。(配重)降低時,(重心)降低,(直下階段)變多;(配重)較高時,(重心)偏高,(直下階段)較少。

【表5】 不同配重的位置



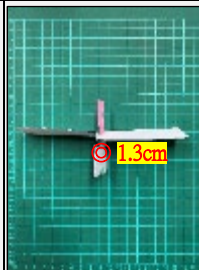
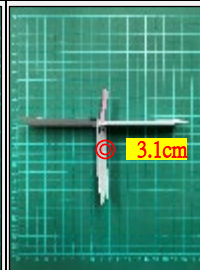
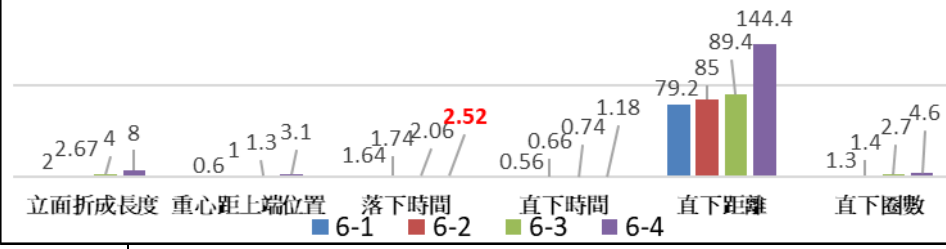
編號	5-1	5-2	5-3	5-4
配重位置 (和底端的距離)	6.3	4.3	2.3	0.3
重心位置 (和底端的距離)	6.3	5.9	5.4	4.9
實物				
備註	<ul style="list-style-type: none"> (5-4)的(落下時間)比(2-2)多,列入能夠緩慢降落的參考條件。 			

配重位置	重心位置	落下時間	直下時間	直下距離	直下圈數
6.3	6.3	1.96	0.64	77.4	2.1
4.3	5.9	2.22	0.9	105	3.8
2.3	5.4	2.24	0.92	106.4	4.2
0.3	4.9	2.56	1.28	144.6	6.3

【實驗六】相同面積的立面向上收折

把立面向上收折後固定，讓（重量）一樣，實驗（立面長度）的影響，從【表6】得知：長度、落下時間和直下階段都是正比；和重心的高度是反比。即（立面）由短到長，落下和直下的時間和距離都增加。

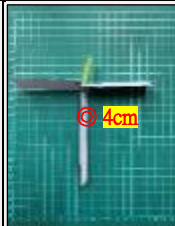


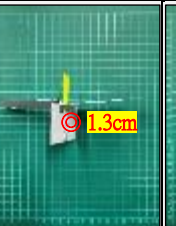
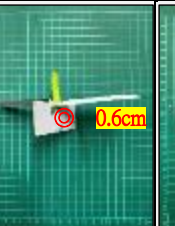
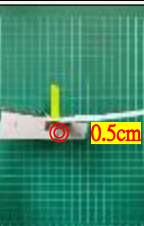
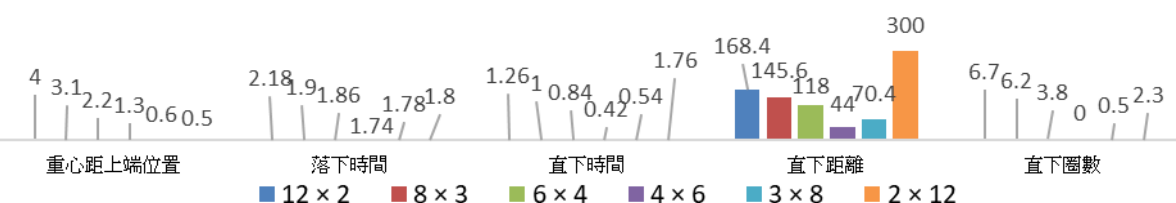
【表6】相同面積的立面向上收折

編號	6-1	6-2	6-3	6-4
立面折成長度	2	8/3 (=2.67)	4	8
重心距上端位置	0.6	1	1.3	3.1
實物 ◎表示重心				
				
備註	<ul style="list-style-type: none"> 因為立面的長度不同，改從上端計算，所以數字越大表示越低。 其餘詳見實驗數據統計。 (6-4)的(落下時間)比(2-2)多，列入能夠緩慢降落的參考條件。 			

【實驗七】不同長方形的立面

實驗立面相同的面積、不同長寬比例的長方形的影響。從【表7】得知：當立面的寬度越大、長度越小時，和（重心距上端的位置）是正比。(7-1)~(7-4)符合之前（重心）越高時，（落下時間）、（直下階段）會變少；但是(7-4)~(7-5)反而開始增加，可能是越寬的立面增加了旋轉時橫向的阻力，降低了（旋轉作用），甚至(7-3)~(7-5)還造成翻轉。(7-6)沒有偏轉墜落的情形，認為是立面的寬度和翼面一樣長，左右平衡了重心較高會有的偏轉情形，反而能完全落地。

【表7】不同長方形的立面


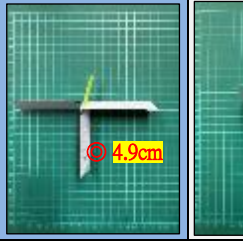
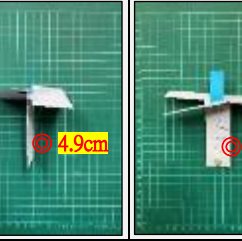

編號	7-1	7-2	7-3	7-4	7-5	7-6
立面長寬比	12 x 2	8 x 3	6 x 4	4 x 6	3 x 8	2 x 12
重心距上端位置	4	3.1	2.2	1.3	0.6	0.5
實物 ◎表示重心						
						
其他	會偏轉，落地前不會翻倒。	會偏轉，落地前不會翻倒。	落地前翻轉	落地前翻轉	落地前翻轉	會偏轉，落地前不會翻倒。
總圈數	15.6	15.9	不列入計算	不列入計算	不列入計算	2.3
備註	• 其餘詳見實驗數據統計。					

【實驗八】不同長方形的翼面

也把翼面製作出相同面積、不同長寬的組合，從【表 8】得知：(落下時間)是(12x2) > (8x3) > (2x12) > (4x6)，和翼面的旋轉半徑：(12 cm > 8.1 cm > 6.3 cm > 4.9 cm) 的大小順序一樣。

旋轉面積越大，阻力也較大；所以可能就是造成(12x2)落地前就翻轉，所以(直下階段)反而比(8x3)少。




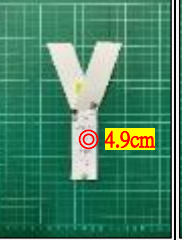

【表 8】不同長方形的翼面

編號	8-1	8-2 (同 7-2)	8-3	8-4																														
翼面長寬比	12 x 2	8 x 3	4 x 6	2 x 12																														
重心距底端位置	4.9	4.9	4.9	4.9																														
實物 ◎ 表示重心																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>(8-1) 12x2</th> <th>(8-2) 8x3</th> <th>(8-3) 4x6</th> <th>(8-4) 2x12</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>重心距底端位置</td> <td>4.9</td> <td>4.9</td> <td>4.9</td> <td>4.9</td> </tr> <tr> <td>落下時間</td> <td>2.48</td> <td>1.9</td> <td>1.66</td> <td>1.88</td> </tr> <tr> <td>直下時間</td> <td>0.78</td> <td>1</td> <td>0.66</td> <td>0.56</td> </tr> <tr> <td>直下距離</td> <td>100.6</td> <td>145.6</td> <td>90.4</td> <td>73.2</td> </tr> <tr> <td>直下圈數</td> <td>2.1</td> <td>6.2</td> <td>2</td> <td>0.5</td> </tr> </tbody> </table>					項目	(8-1) 12x2	(8-2) 8x3	(8-3) 4x6	(8-4) 2x12	重心距底端位置	4.9	4.9	4.9	4.9	落下時間	2.48	1.9	1.66	1.88	直下時間	0.78	1	0.66	0.56	直下距離	100.6	145.6	90.4	73.2	直下圈數	2.1	6.2	2	0.5
項目	(8-1) 12x2	(8-2) 8x3	(8-3) 4x6	(8-4) 2x12																														
重心距底端位置	4.9	4.9	4.9	4.9																														
落下時間	2.48	1.9	1.66	1.88																														
直下時間	0.78	1	0.66	0.56																														
直下距離	100.6	145.6	90.4	73.2																														
直下圈數	2.1	6.2	2	0.5																														
旋轉半徑	12	8.1	4.9	6.3																														
其他	落地前翻轉	會偏轉，落地前不會翻倒。	會偏轉，落地前不會翻倒。	會偏轉，落地前不會翻倒。																														
總圈數	不列入計算	15.9	13.3	8.2																														
備註	● (8-1) 的(落下時間)比(2-2)多，列入能夠緩慢降落的參考條件。其餘詳見實驗數據統計。																																	

【實驗九】不同梯形的翼面

用相同高度、不同梯形的翼面，實驗(左平斜)和(右平斜)的差異，從【表 9】得知：左斜或右斜的角度變少時，(直下階段)會增加。

【表 9】不同梯形的翼面

編號	9-1	9-2	9-3 (同 8-2、7-)	9-4	9-5																																										
翼面傾斜度(°)	左平斜 70°	左平斜 55°	0°	右平斜 55°	右平斜 70°																																										
重心距底端位置	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9																																										
實物 ◎ 表示重心																																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>(9-1) 左平斜70°</th> <th>(9-2) 左平斜55°</th> <th>(9-3) 0°</th> <th>(9-4) 右平斜55°</th> <th>(9-5) 右平斜70°</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>重心距底端位置</td> <td>4.9</td> <td>4.9</td> <td>4.9</td> <td>4.9</td> <td>4.9</td> </tr> <tr> <td>落下時間</td> <td>1.86</td> <td>1.88</td> <td>1.9</td> <td>2.42</td> <td>1.84</td> </tr> <tr> <td>直下時間</td> <td>0.7</td> <td>0.88</td> <td>1</td> <td>0.86</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>直下距離</td> <td>95</td> <td>111.4</td> <td>145.6</td> <td>110</td> <td>26</td> </tr> <tr> <td>直下圈數</td> <td>2.6</td> <td>3.8</td> <td>6.2</td> <td>2.3</td> <td>0.1</td> </tr> <tr> <td>旋轉半徑</td> <td>10.8</td> <td>9.1</td> <td>8</td> <td>9.1</td> <td>10.8</td> </tr> </tbody> </table>						項目	(9-1) 左平斜70°	(9-2) 左平斜55°	(9-3) 0°	(9-4) 右平斜55°	(9-5) 右平斜70°	重心距底端位置	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	落下時間	1.86	1.88	1.9	2.42	1.84	直下時間	0.7	0.88	1	0.86	0.3	直下距離	95	111.4	145.6	110	26	直下圈數	2.6	3.8	6.2	2.3	0.1	旋轉半徑	10.8	9.1	8	9.1	10.8
項目	(9-1) 左平斜70°	(9-2) 左平斜55°	(9-3) 0°	(9-4) 右平斜55°	(9-5) 右平斜70°																																										
重心距底端位置	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9																																										
落下時間	1.86	1.88	1.9	2.42	1.84																																										
直下時間	0.7	0.88	1	0.86	0.3																																										
直下距離	95	111.4	145.6	110	26																																										
直下圈數	2.6	3.8	6.2	2.3	0.1																																										
旋轉半徑	10.8	9.1	8	9.1	10.8																																										
旋轉半徑	10.8	9.1	8	9.1	10.8																																										
其他	落地前翻轉	落地前翻轉	會偏轉，落地前不會翻倒。	會偏轉，落地前不會翻倒。	落地前翻轉																																										
總圈數	不列入計算	不列入計算	15.9	14	不列入計算																																										
備註	● 其餘詳見實驗數據統計。																																														

【實驗十】不同傾斜角的翼面

改變翼面傾斜角為 40°，從【表 10】得知：0°除了（落下時間）比 60°多一些；其他傾斜角的（落下時間）和（直下時間）都和傾斜角的增加成反比。推論阻力和旋轉作用之間可能會互相抵消，在（30°）左右是（直下距離和圈數）的高峰點。

【表 10】不同傾斜角的翼面

編號	10-1	10-2	10-3	10-4	10-5
翼面傾斜角	60	45	30	15	0
重心距底端位置	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9
實物 ◎表示重心					
其他	會偏轉，落地前不會翻倒				落地前翻轉
備註	● 為了配合（翼面傾斜角 60°）展開時的最大角度是 100°，其他造型的翼面抬升角度也都是 40°。其餘詳見實驗數據統計。				

翼片傾斜度	重心距底端	落下時間	直下時間	直下距離	直下圈數	總圈數
60	5.9	1.1	1.12	210.6	8.9	8.9
45	5.9	1.68	1.24	212.6	8.2	11.7
30	5.9	2.12	1.26	208	9.7	15.1
15	5.9	1.22	1.4	36.6	8.3	16
0	5.9	1.1	0.3	0	0	0

【實驗十一】不同抬升角度的翼面

實驗傾斜角 15°、不同抬升角度的翼面，從【表 11】得知：除了（60°）之外，（抬升角度）和（重心）、（落下時間）、（直下階段）成正比，和（總圈數）除了（-20°~-60°）成反比；而（落下時間）、（直下階段）都是（40°）最多，只有（60°）的（直下距離）比（40°）少，可能是（60°）角度較小，阻力也最小

【表 11】不同抬升角度的翼面

編號	11-1	11-2 (同 10-4)	11-3	11-4 (同 9-3, 8-2, 7-2)	11-5	11-6	11-7
翼面抬升角度	+60	+40	+20	0	-20	-40	-60
重心距底端位置	6.1	5.9	5.6	4.9	4.5	4.2	3.9
實物 ◎表示重心							
其他	會偏轉，落地前不會翻倒				落地前翻轉	落地前翻轉	落地前翻轉
備註	● (11-2) 同 (10-4)，因為天氣潮濕因素，所以使用同一天實驗的新數據。其餘詳見實驗數據統計。						

翼面抬升角度	重心距底端	落下時間	直下時間	直下距離	直下圈數	總圈數
60	6.1	1.34	1.34	213	4.8	4.9
40	5.9	2.24	1.26	164	6.8	14.8
20	5.6	1.9	1.26	145.6	6.2	15.8
0	4.9	1.88	1.54	129.6	4.9	15.9
-20	4.5	1.56	1.094	24	2.9	0
-40	4.2	1.34	0.3	14	0.50	0
-60	3.9	1.54	0.16	0	0	0

【實驗十二】不同折起面積的翼面

實驗翼面折起面積的影響，從【表 12】推論是較大的旋轉作用能增加向下的阻力和落下時間。

【表 12】不同折起面積的翼面

編號	12-1	12-2	12-3	12-4
翼面折起比例	1/8	2/8	3/8	4/8
傾斜面積	3 × 2	6 × 2	9 × 2	12 × 2
重心距底端位置	4.9	4.9	4.9	4.9
實物				
其他	會偏轉，落地前不會翻倒			
備註	● 翼面是 0°，兩端部分面積折起的傾斜角是 15°。其餘詳見實驗數據統計。			

重心距底端位置	落下時間	直下時間	直下距離	直下圈數	總圈數
12-1 1/8 × 2	4.9	1.9	26	0	4.7
12-2 2/8 × 2	4.9	2.08	65	<0.5	7.3
12-3 3/8 × 2	4.9	1.76	102.2	0.5	3.4
12-4 4/8 × 2	4.9	0.28	45	0.1	9.7

【實驗十三】不同位置折起的翼面

翼面兩邊折起 15° 傾斜面，實驗相同面積在不同位置的影響，從【表 13】得知：如果用直下時間和直下距離來推論阻力的大小，
 (13-4) >
 (13-3) >

【表 13】不同位置折起的翼面

編號	13-1 (同 12-1)	13-2	13-3	13-4
翼面折起位置	1/4 前端	2/4 前端	3/4 末端	4/4 末端
傾斜面積	3 × 2	3 × 2	3 × 2	3 × 2
重心距底端位置	4.9	4.9	4.9	4.9
實物				
其他	會偏轉，落地前不會翻倒			
備註	● 翼面是 0°，兩端部分面積折起的傾斜角是 15°。其餘詳見實驗數據統計。			





重心距底端位置	落下時間	直下時間	直下距離	直下圈數	總圈數
13-1 (同 12-1) 1/4 前端 3 × 2	4.94	1.9	26	0	4.7
13-2 2/4 前端 3 × 2	94.9	1.74	39	0	2.6
13-3 3/4 末端 3 × 2	94.9	1.8	31	0	3.2
13-4 4/4 末端 3 × 2	94.9	0.28	40	0	4.1

(13-2)，這和水平翼面減掉傾斜面後的旋轉面積大小順序相同；但是 (13-1) 和推論的順序不合，旋轉面積最小、反而最慢落下；推論是越外側傾斜面的旋轉作用最大，和旋轉面積所增加的差距多，才讓 (13-1) 的阻力最大。這還需要其他實驗來證明。

【實驗十四】不同斜角折起面積的翼面

翼面外側折出 45°、向上傾斜 15° 的不同面積，從【表 14】得知：傾斜面積和落下時間、總圈數成正比、和直下時間、距離成反比；就是說減少水平翼面時阻力也減少，但是增加的折起面積、旋轉作用也增加，所以落下時間和總圈數就會增加。

【表 14】不同斜角折起面積的翼面




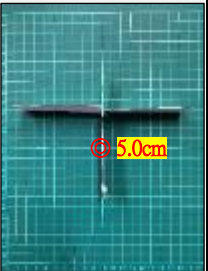
編號	14-1	14-2	14-3	14-4
翼面折起面積	4.5 × 2	7.5 × 2	10.5 × 2	13.5 × 2
重心距底端位置	5.0	5.1	5.1	5.2
實物 ◎表示重心				
其他	會偏轉，落地前不會翻倒	會偏轉，落地前不會翻倒	會偏轉，落地前不會翻倒	會偏轉，落地前不會翻倒
備註	●其餘詳見實驗數據統計。			

重心距底端位置	落下時間	直下時間	直下距離	直下圈數	總圈數
5.0	1.64	0.34	34	0	3.4
5.1	2.04	0.32	22	0	8.2
5.1	2.12	0.26	15	0	12.9
5.2	2.14	0.24	7	0	15.3

【實驗十五】不同縱向折上和折下面積的翼面

水平相對的翼面，兩邊折出不同縱向折上或折下傾斜 15° 的面積，從【表 15】分成推論：向下折的面積越大時，直下的時間和距離變少，總圈數和落下時間增加，阻力和旋轉作用增加。

【表 15】不同縱向折上和折下面積的翼面

編號	15-1	15-2	15-3	15-4 (同 12-4)
折向	折下	折上	折下	折上
面積	6 × 2	6 × 2	12 × 2	12 × 2
重心距底端位置	4.9	5.0	4.9	5.0
實物 ◎表示重心				
其他	逆時針螺旋	順時針	逆時針螺旋	順時針螺旋
備註	●其餘詳見實驗數據統計。			

重心距底端	落下時間	直下時間	直下距離	直下圈數	總圈數
4.9	1.86	0.3	24	0	2.9
5.0	1.9	0.26	25	0	5.3
4.9	2.38	0.2	15	0	11.7
5.0	2.2	0.4	45	0.1	9.7

向上折面積越大時，直下的時間和距離變多，總圈數和落下時間會增加，表示阻力會變小、但旋轉作用變大。

【實驗十六】橫向中間上下折曲的翼面

翼面橫向中間向下或向上折曲，從【表 16】得知：落下時間和總圈數增加，角度要減少。不同的是折下角度較大時，直下距離和時間會增加，但阻力變小；相反，折

【表 16】橫向中間上下折曲的翼面

編號	16-1	16-2	16-3	16-4
折向	折下 W	折下 W	折上 M	折上 M
折起的傾斜角是	15°	30°	15°	30°
重心距底端位置	4.9	4.5	5.0	5.5

實物 ◎表示重心				
	◎ 4.9 cm	◎ 4.5 cm	◎ 5.0 cm	◎ 5.5 cm

其他	逆時針	逆時針	逆時針	逆時針	逆時針
備註	其餘詳見實驗數據統計。				

重心距底端	落下時間	直下時間	直下距離	直下圈數	總圈數
4.9 4.5 5.5	1.96 1.52 2.16	0.24 0.42 0.64 0.28	21 55 89	0 0 1 0	7.6 3.9 13.9 12.9
■ 16-1 折下 W 15°	■ 16-2 折下 W 30°	■ 16-3 折上 15°	■ 16-4 折上 30°		

上的角度較大時，直下距離和時間會減少，有可能是阻力變大。

【實驗十七】翼面左右不同錯開的距離

觀察翼面左右錯開不同距離的影響。從【表 17】得知：左前移順時針轉，左前移越多，落下時間、直下距離和時間和總圈數越多；表示阻力減少、旋轉作用增加；右後移會逆時針轉，右後移越多，一樣也阻力減少、旋轉作用增加。旋轉作用會增加，應該是翼面左右相對的分力和立面旋轉時的中軸線的距離加大、力矩也變大的關係。

【表 17】翼面左右不同錯開的距離

編號	17-1	17-2	17-3	17-4	17-5
錯開距離	左前移 2	左前移 1	0	右後移 1	右後移 2
重心距底端位置	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5

實物 ◎表示重心					
	◎ 5.5 cm	◎ 5.5 cm	◎ 5.5 cm	◎ 5.5 cm	◎ 5.5 cm

重心距底端位置	落下時間	直下時間	直下距離	直下圈數	總圈數
5.5 5.5 5.5 5.5 5.5	2.88 2.28 2.28 1.68 2.58	0.42 0.36 0.4 0.32	42 27 50 30 32	0 0 0 0 0	15.7 7.2 0.9 8.3 12.3
■ 17-1 左前移 2	■ 17-2 左前移 1	■ 17-3 0	■ 17-4 右後移 1	■ 17-5 右後移 2	

備註	• (17-1) 和 (17-5) 的 (落下時間) 比 (2-2) 多，列入能夠緩慢降落的參考條件其餘詳見實驗數據統計。
----	---

【實驗十八】部分翼面重疊貼合，改變翼面的重心位置

把翼面長度中的 3cm 重疊貼合成 1cm，翼長變成 6cm 的長度，來改變翼面的重心位置，從【表 18 圖】後得知：隨著翼面的重心由內往外移，落下時間、直下距離和時間都增加，但最外側的總圈數反而最低；推論重心由內移到中間時的旋轉作用是增加的；越向外側移時，反而是減少的。可能是外側的重量會讓翼面下垂，減少了阻力和旋轉作用。

【表 18】部分翼面重疊貼合，改變翼面的重心位置

編號	18-1	18-2	18-3																												
重疊位置	最內側	中間	最外側																												
重心距底端位置	4.9	4.9	4.9																												
實物 ◎表示重心																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>18-1 最內側</th> <th>18-2 中間</th> <th>18-3 最外側</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>重心距底端</td> <td>4.9</td> <td>4.9</td> <td>4.9</td> </tr> <tr> <td>落下時間</td> <td>1.6</td> <td>1.64</td> <td>1.66</td> </tr> <tr> <td>直下時間</td> <td>0.36</td> <td>0.38</td> <td>0.64</td> </tr> <tr> <td>直下距離</td> <td>29.8</td> <td>40</td> <td>94</td> </tr> <tr> <td>直下圈數</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0.4</td> </tr> <tr> <td>總圈數</td> <td>4.9</td> <td>5.3</td> <td>3.9</td> </tr> </tbody> </table>				項目	18-1 最內側	18-2 中間	18-3 最外側	重心距底端	4.9	4.9	4.9	落下時間	1.6	1.64	1.66	直下時間	0.36	0.38	0.64	直下距離	29.8	40	94	直下圈數	0	0	0.4	總圈數	4.9	5.3	3.9
項目	18-1 最內側	18-2 中間	18-3 最外側																												
重心距底端	4.9	4.9	4.9																												
落下時間	1.6	1.64	1.66																												
直下時間	0.36	0.38	0.64																												
直下距離	29.8	40	94																												
直下圈數	0	0	0.4																												
總圈數	4.9	5.3	3.9																												
其他	會偏轉，落地前不會翻倒	會偏轉，落地前不會翻倒	會偏轉，落地前不會翻倒																												
備註	● 錯開距離用翼面中軸線左右之間的距離計算。																														

【實驗十九】不同立面造型 Z 形折曲，最後合併成細條

立面折曲、合併成細條，從【表 19】得知：立面折曲成(反Z)和(Z)的(落下時間、直下階段差距不多，總圈數是(反Z)>(Z)，推論是立面(反Z)是邊緣部分朝向空氣，產生的阻力較小，旋轉作用較大，所以落下時間、總圈數)較多；(Z)落下旋轉時直角朝向空氣阻力較大，旋轉作用較小，所以落下時間、總圈數較少。合併成細條的直下階段和總圈數都最少，可能是少了立面的阻力對於旋轉的平衡作用，落下時不平衡，所以落下時間、總圈數最少。

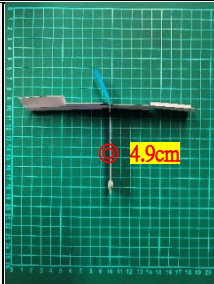


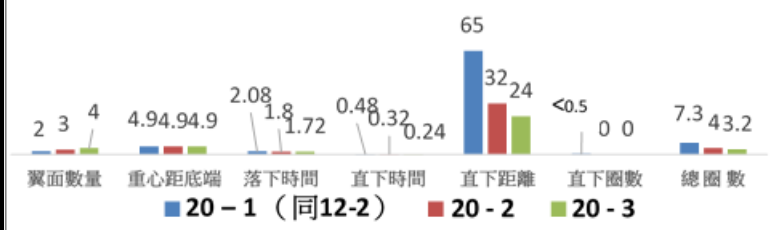
【表 19】不同立面造型 Z 形折曲，最後合併成細條

編號	19-1	19-2	19-3																												
立面造型	反Z	合併	Z																												
重心距底端位置	4.9	4.9	4.9																												
實物 ◎表示重心																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>19-1 反Z</th> <th>19-2 合併</th> <th>19-3 Z</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>重心距底端</td> <td>4.9</td> <td>4.9</td> <td>4.9</td> </tr> <tr> <td>落下時間</td> <td>1.86</td> <td>1.66</td> <td>1.82</td> </tr> <tr> <td>直下時間</td> <td>0.32</td> <td>0.24</td> <td>0.36</td> </tr> <tr> <td>直下距離</td> <td>39</td> <td>17</td> <td>38</td> </tr> <tr> <td>直下圈數</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>總圈數</td> <td>5.3</td> <td>2.9</td> <td>4</td> </tr> </tbody> </table>				項目	19-1 反Z	19-2 合併	19-3 Z	重心距底端	4.9	4.9	4.9	落下時間	1.86	1.66	1.82	直下時間	0.32	0.24	0.36	直下距離	39	17	38	直下圈數	0	0	0	總圈數	5.3	2.9	4
項目	19-1 反Z	19-2 合併	19-3 Z																												
重心距底端	4.9	4.9	4.9																												
落下時間	1.86	1.66	1.82																												
直下時間	0.32	0.24	0.36																												
直下距離	39	17	38																												
直下圈數	0	0	0																												
總圈數	5.3	2.9	4																												
其他	會偏轉，落地前不會翻倒	會偏轉，落地前不會翻倒	會偏轉，落地前不會翻倒																												
備註	● 三種都是逆時針旋轉。 ● 錯開距離用翼面中軸線左右之間的距離計算。																														

【實驗二十】不同數量的翼面

做出三種不同數量的翼面，有相同的總面積、傾斜的面積、角度和位置，從【表 20】得知：翼面數量的增加，和（落下時間）、（直下時間和距離）、（總圈數）成反比。推論是單一翼面的阻力和傾斜面會隨著翼面數量的增加而減少，雖然旋轉作用變小，但是因為翼面增加產生的平衡作用、使得落下時更接近垂直。

【表 20】不同數量的翼面

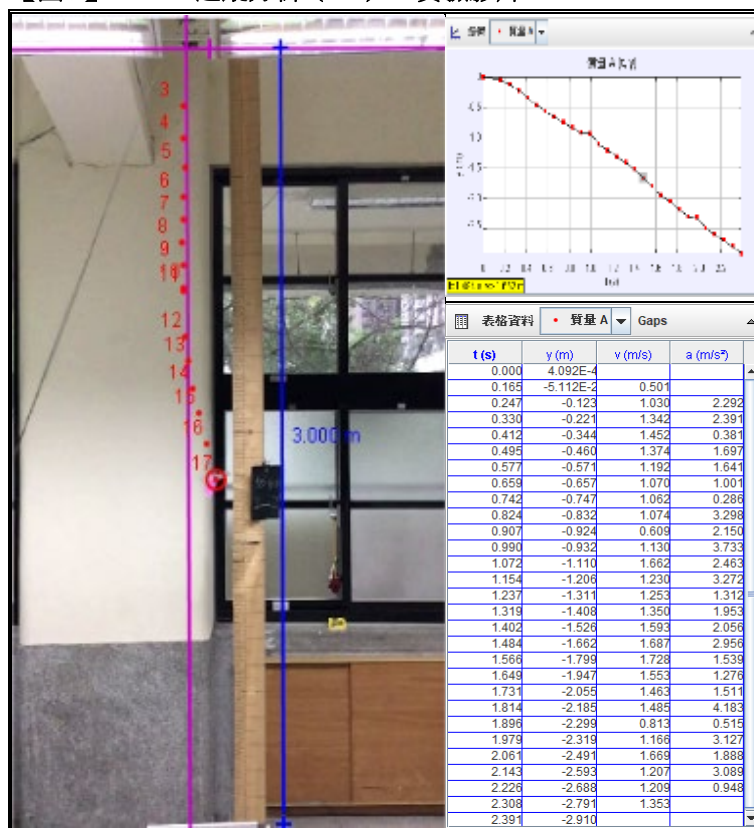
編號	20-1 (同 12-2)	20-2	20-3
翼面數量	2	3	4
重心距底端位置	4.9	4.9	4.9
實物			
			
其他	會偏轉，落地前不會翻倒	會偏轉，落地前不會翻倒	會偏轉，落地前不會翻倒

四、使用 Tracker 追蹤分析

接著用 Tracker 追蹤分析比(基準型)的落下時間多的造型，用接近平均值的為代表，觀察直下階段的時間、距離、速度、加速度。

從【表 21】發現，(基準型)的(初期最高加速度)、(最高速度)、(加速度)都比後者們多；(落下時間和距離)都比後者們少。表示後者們的加速度普遍小於(基準型)，也就是阻力普遍大於(基準型)。

【圖 9】Tracker 追蹤分析 (2-2) -1 實驗影片



表示基重較輕 (2-2)、紙質較韌 (3-2)、重量要輕 (4-1)、重心要低 (5-4、6-4)、增加阻力和旋轉作用 (8-1、17-1、17-5)，可增加落下時間，後續就用這些做法發展成新的紙蜻蜓。

【表 21】Tracker 分析落下時間多於基準型

造型	編號	(2-1) -2	(2-2) -1	(3-2) -1	(4-1) -4	(5-4) -2	(6-4) -1	(8-1) -5	(17-1) -1	(17-5) -3
	做法	基準型	基準型 基重 70gsm	牛皮紙	配重 0g	配重位置 0.3cm 重心 4.9cm	立面無收折 重心距上端 3.1cm	翼面 12*2	翼片向左錯開 2cm	翼片向右錯開 2cm
最快偏轉處	落下時間 (s)	0.417	0.742	0.842	0.417	1.017	0.917	1.500	1.700	1.750
	落下距離 (cm)	32.8	74.7	83.9	39.4	56.5	120.9	179.8	198.8	218.6
	初期最高加速度	5.215	2.391	4.102	3.122	7.960	4.169	3.627	0.565	1.857
	最高速度 (m/s)	1.506	1.062	1.090	1.321	1.686	0.987	1.068	1.063	0.197
	加速度 (m/s ²)	0.959	0.286	0.272	0.950	0.925	0.677	0.412	0.920	1.051
說明	用影格 10 標記追蹤的間距。 表示與 (基準型) 推論的大小關係不符。									

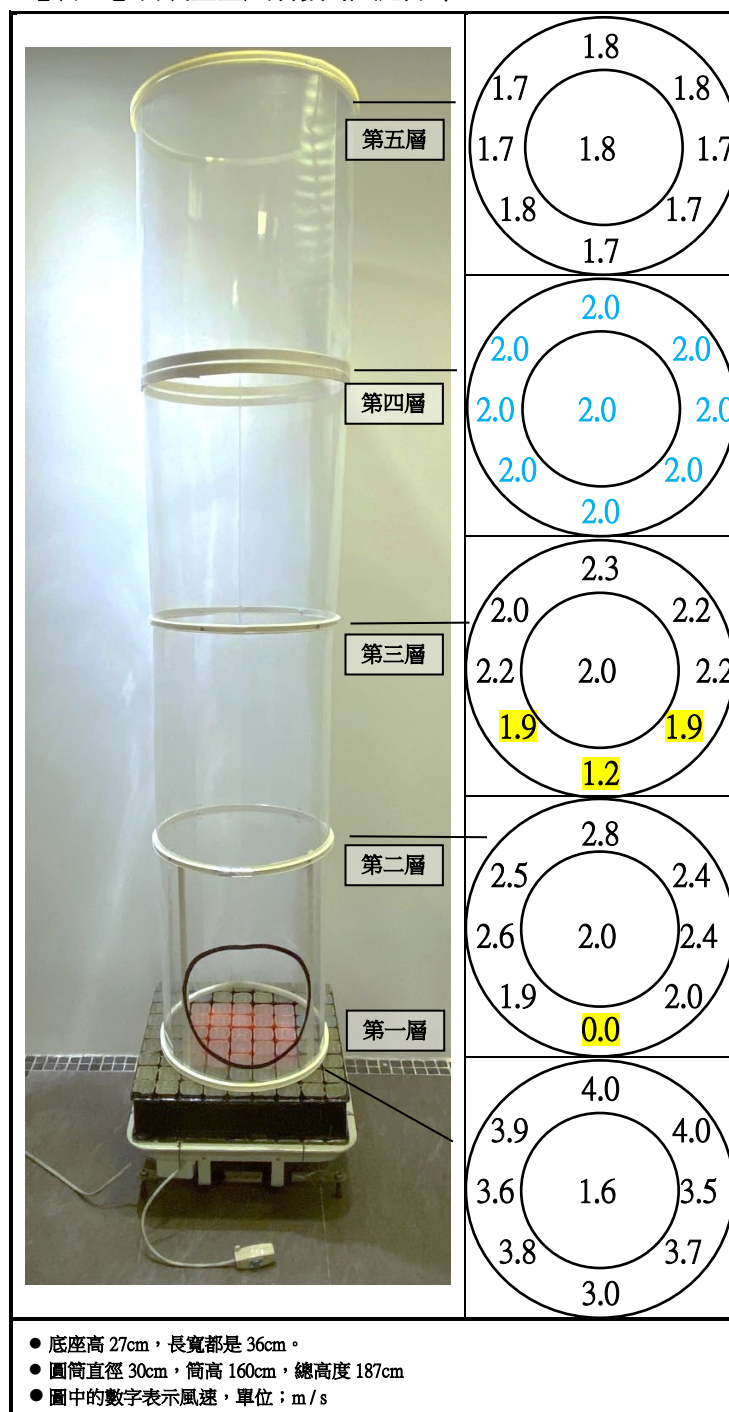
五、垂直風洞的製作與測試

測試自製垂直風洞時，發現

【表 22】中各點的風速不完全相同：各層中央位置大多是最弱，然後向上逐層變弱、也變接近。底層中央偏弱的原因可能是風扇中央並沒有推進扇葉的構造。還有下方的圓形取物口引入側面氣體，向上匯集使取物口上方的速度降低，甚至出現 0m/s 的速度，在第四層的速度最接近，第五層又開始不同。也試著將取物口封上，發現各層速度明顯降低，而且不好拿取，所以維持取物口的設計，**並用第四層為主要的實驗高度。**

本來想從施放架將紙蜻蜓降落到垂直風洞，再用 Tracker 紀錄觀察速度的改變，是不是會在下降和上升阻力的平衡點停止，產生懸浮的現象。發現之前製作的紙蜻蜓的紙質太軟、重量太輕、一降到筒中就馬上變型、偏轉、翻轉。因為是採用單速的抽風扇無法調降風速，所以就必須重新設計製作更大、更堅固的造型。

【表 22】自製垂直風洞機的風速分布



六、配合之前的實驗結果，設計新造型的紙蜻蜓

結合歸納的造型作用推論、配合垂直風洞的特性，

用以下的思考做出新造型，如【圖 10】、【表 23】：

- (一) 紙質：改用 200gsm 的紙，配合米字摺紙法和黏貼來增加造型的穩定度。
- (二) 翼面：互相對稱的四個翼面使前後左右更平衡。
- (三) 配重：增加造型下方的構造、降低重心，不增加額外的配重、減輕重量。
- (四) 立面：底部改成十字尖錐狀，斜面產生阻力作用，前後左右維持的平衡。

【圖 10】飄浮的狀態



【表 23】新造型紙蜻蜓的發展階段

編號	23 - 1	23 - 2	23 - 3	23 - 4	23 - 5
尺寸	正方形紙 (15 cm X 15 cm)			正方形紙 (21 cm X 21 cm)	
翼面面積	每片 7.5 cm ²	每片 11.5 cm ²	每片 15 cm ²	每片 23.625 cm ²	每片 28 cm ²
實物					
直徑cm	19			26.5	26
高度cm	6			7.5	7.5
重量 g	4.11			8.46	8.3
投影面積 cm ²	136.8	143.3	146.3	197.1	231.4
立面角度	直向 35°			44°	37°
	橫向 130°			126.8	121°
翼面傾斜角	15°	20°	25°	30°	10°
狀態	能飄浮，幾乎不轉動	能飄浮，偶爾轉動	能飄浮，慢速轉動	能飄浮，快速轉動	能飄浮，持續轉動
說明	<ul style="list-style-type: none"> ● (23-1)、(23-2)、(23-3) 造型是暫時性的。 ● (23-4) 的立面角度固定，但翼面角度維持性不久，會影響穩定性。 ● (23-4) 的立面和翼面的角度都固定。 ● 紙蜻蜓飄浮的高度是立面的中段，落在筒口的邊緣。推測是氣流離開筒子後會和外面的氣流互相影響而擾動，而筒中其他高度的風速分布又不夠均勻，容易偏移碰撞而掉落。 				

七、結合理論，帶入方程式

【阻力方程】是流體力學中計算一物體在流體中運動，所受到阻力的方程式：

$$F_d = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d A$$







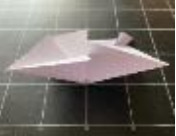


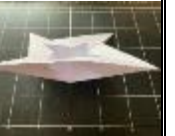
當阻力 $F_d =$ 重力 mg ，物體的靜力是零

$$則 \quad mg = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d A$$

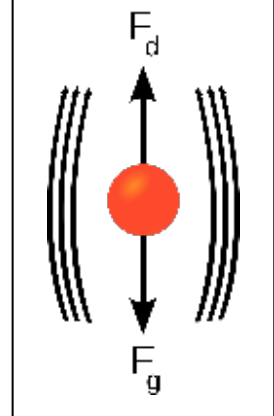
$$C_d \text{ 是未知數時，則 } C_d = \frac{2mg}{\rho v^2 A}$$

就把【表 23】的數據帶入程式，求出阻力係數，如【表 24】。

【表 24】用（阻力方程）來推算類似造型的數據

編號		23-1	23-2	23-3	23-4	23-5
實物						
						
m	物體重量 kg	0.00411	0.00411	0.00411	0.00846	0.0083
g	重力加速度 m/s ²	9.8				
v	流體相對物體的速度 m/s	2				
p	所處的流體密度 kg/m ³	1.225				
A	物體的投影面積 m ²	0.01368	0.01433	0.01463	0.01971	0.02314
C _d	阻力係數	1.20	1.147	1.12	1.72	1.43
F _d	向上的空氣阻力 kgw	0.040278			0.082908	0.08134

【圖 11】重力等於阻力



對照【圖 12】的係數阻力參考，阻力係數大多介於（立方體）和（短圓柱）之間，（23-4）更高達 1.72。而（23-4）都比其他造型係數高，為什麼還能飄浮？除了是重量較重，推論是旋轉的作用比其他造型高，將部分上升的阻力轉成旋轉力的關係。原本如果翼面傾斜角較小時，會一直飄走，代表阻力太大，把翼面上抬到 30°，轉速變得更快時，就能穩定飄浮。

【圖 12】阻力係數參考

Shape	Drag Coefficient
Sphere	0.47
Half-sphere	0.42
Cone	0.50
Cube	1.05
Angled Cube	0.80
Long Cylinder	0.82
Short Cylinder	1.15
Streamlined Body	0.04
Streamlined Half-body	0.09
Measured Drag Coefficients	

伍、研究結果

對照相關實驗的結果，歸納推論如下：

- 一、從【實驗二～四】推論：(重量)越輕的，(落下時間)越長；越重的會越短。(2-2)和(4-1)比(基準型)的(落下時間)多。
- 二、從【實驗三】推論：紙質越厚，可以幫助維持翼面的角度。(3-2)比(基準型)的(落下時間)多。
- 三、從【實驗四～六】推論：(配重)位置較低、(立面)較長，使(重心)越低時可以維持立面垂直。(4-1)、(5-4)和(6-4)比(基準型)的(落下時間)多。
- 四、從【實驗七】推論：(立面)越長越窄的，(落下時間)較長、(直下距離)也較長。
- 五、從【實驗八】推論：(翼面)越長、(旋轉面積)越大，(落下時間)越長。(8-1)比(基準型)的(落下時間)多。
- 六、從【實驗八～十】推論：傾斜面的高度較小，(落下時間)較長；高度較大較短。
- 七、從【實驗十】推論：翼面傾斜角度在(15°)左右的(落下時間)最長。
- 八、從【實驗十一】推論：翼面抬升角度(40°)的(落下時間)最長。
- 九、從【實驗十二】和【實驗十四】推論：折起面積較大，(旋轉作用)較大，(落下時間)增加。
- 十、從【實驗十三】推論：折起面積越在外側，(旋轉作用)越大，(落下時間)增加。
- 十一、從【實驗十五】推論：翼面縱向上下折的面積增加，(落下時間)、(總圈數)增加。
- 十二、從【實驗十六】推論：翼面橫向中間上下折曲變小，(落下時間)、(總圈數)增加。
- 十三、從【實驗十七】推論：翼面左右錯開距離加大，(落下時間)、(總圈數)增加。向左錯開順時針轉，向右會逆時針轉。(17-1)和(17-5)比(基準型)的(落下時間)多。
- 十四、從【實驗十八】推論：重心由內往外移，(落下時間)、(直下距離和時間)都增加；在翼面中間時的(旋轉作用)最多；向內外兩側移時，會減少。
- 十五、從【實驗十九】推論：立面造型以邊緣朝前轉的阻力小，(落下時間)、(總圈數)較多；細條狀的立面(落下時間)、(總圈數)最少。
- 十六、從【實驗二十】推論：翼面數量的增加，(落下時間)、(直下時間和距離)、(總圈數)變少。推論是阻力跟著變大、旋轉作用變小。
- 十七、用 Tracker 分析得知：比(基準型)慢降落的，阻力較大、加速度跟著變小。
- 十八、運用歸納的造型方法，能調整下降的重力和旋轉作用和上升阻力相近，讓紙蜻蜓能滯空飄浮在垂直風洞。

陸、討論

- 一、實驗中的(落下時間)最多時,(總圈數)也最多,代表(旋轉作用)最大;但是(7-2)、(9-3)、(11-2)、(18-3)的(落下時間)最多,(總圈數)卻不是最多,還需要進一步研究
- 二、(17-1)的(落下時間)最多,推論是因為翼面傾斜度定為 0° ,但是受到降落時的阻力而向上傾斜約 10° ,傾斜度較小且整個翼面都是阻力面積;左右相對的分力也較大能產生較強的旋轉作用。
- 三、本實驗是用相同重量下、不同造型變化,來觀察對於降落的影響。如果改變造型時所做改變不只一樣,會跟著改變的狀態會更多,所以之後要進行改造時,要同時考慮到更多條件的影響。
- 四、相同基重、不同紙質(厚度)的實驗,還需要再搜集更多紙種來確認。
- 五、有關天氣影響紙張韌性的問題,之後的實驗沒有記錄實驗當天的氣候條件;或是改成有防水性質的紙質,後續實驗要改進。
- 六、對於各種作用力如果能用進一步找出計算的方式,更直接得到數字來證明。
- 七、類似配重 0.36g 、翼面抬升角度 40° 和翼面傾斜角 15° ,還可以作更細微數量的實驗,也許能找到更理想的狀態。
- 八、垂直風洞中央風速較低的情形還要改進:如果能更均勻,也許就不會偏斜在筒口飄浮。
- 九、後續可以運用求得的阻力係數,試著照比例放大或縮小造型,探討作用力的改變。
- 十、還可以探討不同風速下,不同阻力係數的造型和不同旋轉作用構造的組合影響。

柒、結論

從實驗中推論出各部位對於（阻力）和（旋轉）的作用，及對於（落下時間）的關係；也做出比（基準型）的（落下時間）更久的造型。從中歸納出下列可以增加阻力和旋轉作用的造型原理，需要減少作用時就相反運用；並運用向下重力和向上阻力互相抵銷的推論，證明可以用此來發展出在風洞機中飄浮的造型。

一、阻力的增加：

- （一）用較輕的紙質，減少重量對阻力的降低；較韌的紙質可維持造型和阻力。
- （二）從最下方配重來降低重心，可維持直下狀態，配重就不用太多。
- （三）翼面縮短寬度、增加長度會增加旋轉面積，使阻力增加。
- （四）翼面加寬會增加阻力，但是增加的重量會抵消阻力。

二、旋轉力的增加：

- （一）翼面向下調降或傾斜面積減少。
- （二）翼面兩側傾斜面積越向外時。
- （三）翼面左右錯開距離較大時。
- （四）減少立面的寬度或面積，會降低對於翼面旋轉作用的抵銷。

三、結合歸納的造型作用推論、配合垂直風洞的特性，做出：

- （一）紙質：配合風力用較厚的紙張，配合摺紙和黏貼的作法增加造型的穩定度。
- （二）翼面：互相對稱的四個翼面使前後左右更平衡。
- （三）配重：增加造型下方的構造、好降低重心，不增加額外的配重、減輕重量。
- （四）立面：底部改成十字尖錐狀，斜面產生阻力作用，前後左右維持的平衡。

這樣的裝置可以發展成商場的看板或是玩具，如果下方再搭配跳躍閃爍的燈光，放在微暗的空間，看過去十足就像是【滯空的 UFO】，一定會很有趣！

捌、參考資料及其他

一、NTCU 科學遊戲 Lab：紙蜻蜓 - NTCU-科學遊戲實驗室 - 台中教育大學

scigame.ntcu.edu.tw/paper/paper-003.html

二、維基百科：陀螺儀，<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/陀螺儀>

三、維基百科：終端速度，<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/終端速度>

四、維基百科：空氣密度，<https://zh.wikipedia.org/wiki/空氣密度>

五、國立台灣師範大學物理系 (黃福坤) 物理教學示範實驗教室 物理問題討論區

終端速度與物體的大小尺度：<http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/phpBB/viewtopic.php?topic=8330>

空氣阻力：<http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/phpBB/viewtopic.php?topic=14404>

六、中華民國第 38 屆中小學科學展覽會/國小組 物理科/有趣的螺旋降落/臺北縣光華國民小學

七、中華民國第 49 屆中小學科學展覽會/國小組 物理科/凌空而降的玩具/臺東市卑南國民小學

八、中華民國第 56 屆中小學科學展覽會/國小組 生活與應用科學科/飛吧!紙蜻蜓/臺東縣福原國民小學

【評語】 080105

本作品研究紙蜻蜓慢速降落和造型關係，以及垂直風洞中懸浮。

實驗包括各種造型的紙蜻蜓，唯缺特色與一貫性。雖然前半段就紙蜻蜓操部作分做了一連串研究，但是與半段懸浮的探究並不連貫。後半段懸浮的部分顯得比較薄弱不足。

作品簡報



• 【物 理】 【國小組】

【滯空UFO】— 懸浮的紙蜻蜓

【研究問題】

一、參考歷年相關紙蜻蜓的科展作品與研究：

- 第38屆 國小組 物理科 臺北縣光華國民小學【有趣的螺旋降落】
- 第49屆 國小組 物理科 臺東市卑南國民小學【凌空而降的玩具】
- 第56屆 國小組 生活與應用科學科 臺東縣福原國民小學【飛吧！紙蜻蜓】

主要都在探討不同造型、紙質、造型改變對於緩慢降落的作用。**【有趣的螺旋降落】**有特別提出配重的影響，**【凌空而降的玩具】**和**【飛吧！紙蜻蜓】**都有提出相同面積和重量的控制；但施放方式都不夠標準客觀，沒提到無風環境的處理；缺乏對於重心的改變、旋轉圈數、偏轉及翻轉現象的觀察，造型的推演不夠系統，本研究都將增加探討。

二、發展成可懸浮的紙蜻蜓

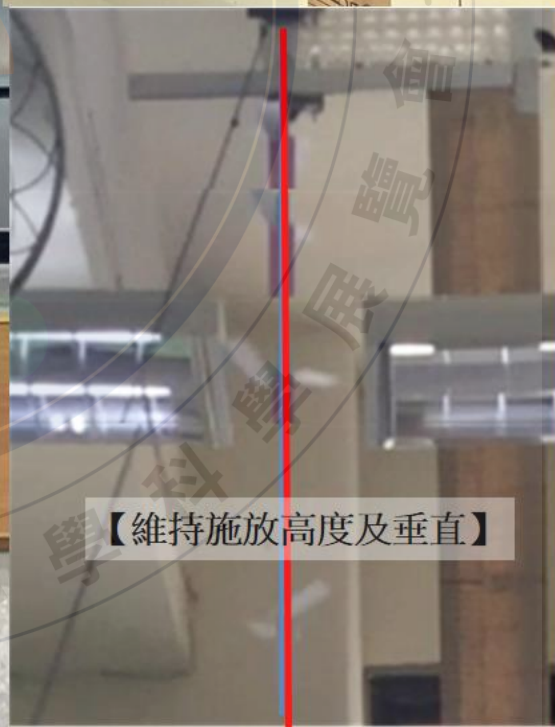
研究中聯想到如果可以讓紙蜻蜓在垂直風洞中像UFO懸浮飛行一定很有趣！推想如果能掌控有關紙蜻蜓重力、阻力、旋轉作用等的各種變因，讓向下的重力及旋轉作用和向上的阻力相當，是不是就可以懸浮在垂直風洞中？

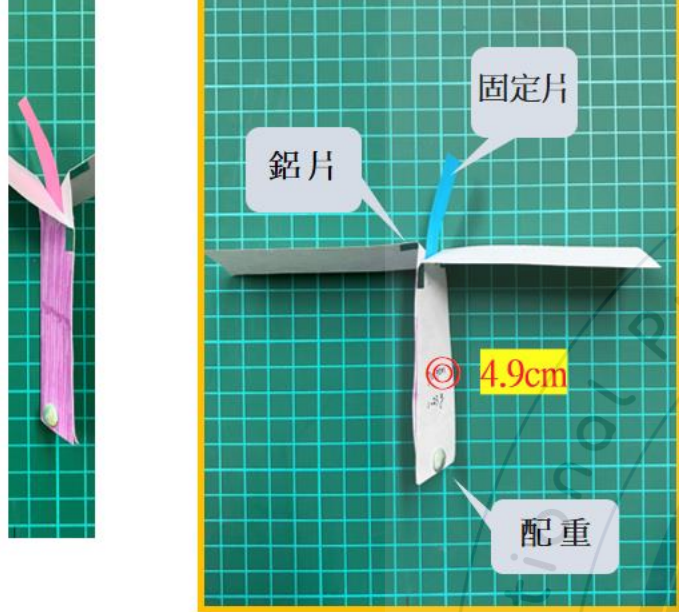
【研究方法】

一、造型變因的實驗

(一) 設備與環境

1. 將教室封閉成無風的環境，配合【風速計】來確認。
2. 運用【施放架】統一施放高度並維持施放高度及垂直的穩定。
3. 並用【慢速攝影平板】配合紙蜻蜓的立面單邊上色，方便紀錄計算圈數、時間。
4. 並排的【高度表】提供攝影記錄時的對照。
5. 【垂直風洞】作為紙蜻蜓懸浮的器材。





實驗	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
變因	基準型	不同的厚度	同基重 不同紙質	不同總重量	不同配重位置	立面 向上收折	不同 長方形 立面	不同 長方形 翼面	不同 梯形 翼面	不同 傾斜角 翼面
黃框是 基準型										
紅框是 比基準 型緩慢										

(二) 設計基準型的紙蜻蜓

1. 總面積**96 cm²**(3cm*24cm*4)的紙，方便算出不同長寬的組合。
2. (立面單邊上色) 可在慢速攝影中計算出圈數。
3. 頂端加上(固定片)，可夾在施放架上後施放。
4. 底端用(黏土膠)配重，
5. 用(鋁箔膠帶)強化翼面和力麵之間的角度，
6. 標示(重心)作為觀察，

增作重量改變

(三) 發展系統化紙蜻蜓

用（相同和重量）的原則下，在【20項造型面積變因】中，加上基準型，系統化演變出【78種造型】：

1. 對照組：基準型 (1項)

2. 實驗組：

(1) 重量：厚度、紙質、總重、重心 (4項)

(2) 立面：向上收折
不同長寬比
Z形折曲到細條 (3項)

(3) 翼面：不同長寬比

梯形
傾斜角
抬升角
折起面積
不同位置折起
斜角折起
縱向折起或折起
橫向中間上下折曲
左右錯開距離
翼面部分重疊
不同數量的翼面 (13項)

實驗	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
變因	不同抬升角度的翼面	不同折起面積的翼面	不同位置折起的翼面	不同斜角折起面積的翼面	縱向折上和折下面積的翼面	橫向中間上下折曲的翼面	翼面左右不同錯開的距離	部分翼面重疊貼合	立面造Z形折曲到細條	不同數量的翼面
										
										
										
黃框是基準型										
紅框是比基準型緩慢										
										
										

(四) 現象推論並選出更慢的造型

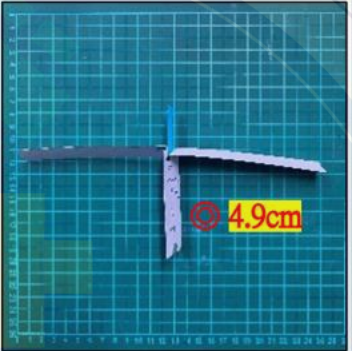

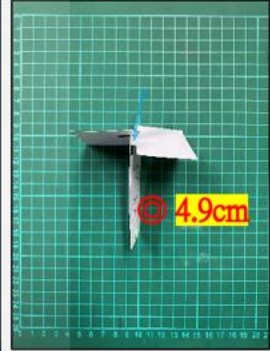


用【實驗八】舉例說明：每個數值都是採5次實驗的平均值，再作成圖表來推論：

【實驗八】不同長方形的翼面

翼面製作出相同面積、不同長寬的組合，從【表8】得知：（落下時間）是（ 12×2 ）>（ 8×3 ）>（ 2×12 ）>（ 4×6 ），和翼面的旋轉半徑：（ $12 \text{ cm} > 8.1 \text{ cm} > 6.3 \text{ cm} > 4.9 \text{ cm}$ ）的大小順序一樣。

旋轉面積越大，阻力也較大；所以可能就是造成（ 12×2 ）落地前就翻轉，所以（直下階段）反而比（ 8×3 ）少。

【表8】不同長方形的翼面

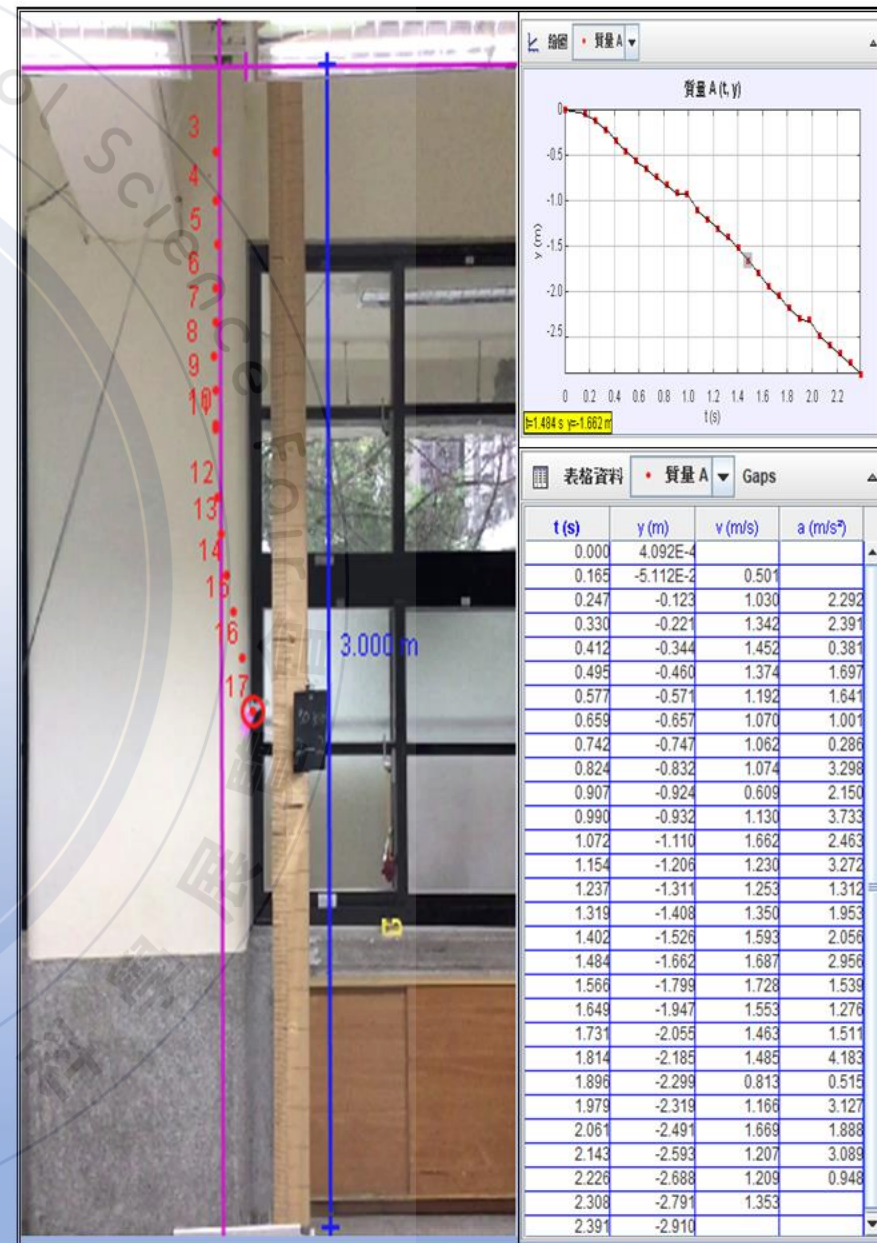
編號	8-1	8-2 (同7-2)	8-3	8-4
翼面長寬比	12×2	8×3	4×6	2×12
重心距底端位置	4.9	4.9	4.9	4.9
實物				
				
旋轉半徑	12	8.1	4.9	6.3
其他	落地前翻轉	會偏轉，落地前不會翻倒。	會偏轉，落地前不會翻倒。	會偏轉，落地前不會翻倒。
總圈數	不列入計算	15.9	13.3	8.2
備註	●（8-1）的（落下時間）比（2-2）多，列入能夠緩慢降落的參考條件。其餘詳見實驗數據統計。			

（8-1）的（落下時間）比（2-2）多，列入能夠緩慢降落的參考條件。

二、使用Tracker追蹤分析

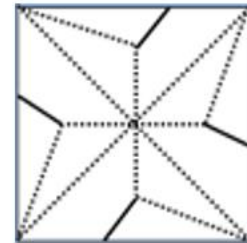
接著用Tracker追蹤分析比（基準型）落下時間多的8種造型，用5次中最接近平均值的為代表，觀察直下階段的時間、距離、速度、和加速度。發現（基準型）的（初期最高加速度）、（最高速度）、（加速度）都比後者多；（落下時間和距離）都比後者少。表示後者加速度普遍小於（基準型），也就是阻力普遍大於（基準型）。表示**基重較輕（2-2）、紙質較韌（3-2）、重量要輕（4-1）、重心要低（6-4）、增加阻力和旋轉作用（8-1、17-1、17-5）**，可增加落下時間，後續就用這些做法發展新的紙蜻蜓。

【圖9】Tracker 追蹤分析 (2-2) -1 實驗影片



【表21】Tracker分析落下時間多於基準型

造型	編號	(2-1) -2	(2-2) -1	(3-2) -1	(4-1) -4	(5-4) -2	(6-4) -1	(8-1) -5	(17-1) -1	(17-5) -3
	做法	基準型	基準型 基重70gsm	牛皮紙	配重0g	配重位置0.3cm 重心4.9cm	立面無收折 重心距上端 3.1cm	翼面12*2	翼片向左錯開 2cm	翼片向右錯開 2cm
最快偏轉處	落下時間 (s)	0.417	0.742	0.842	0.417	1.017	0.917	1.500	1.700	1.750
	落下距離 (cm)	32.8	74.7	83.9	39.4	56.5	120.9	179.8	198.8	218.6
	初期最高加速度	5.215	2.391	4.102	3.122	7.960	4.169	3.627	0.565	1.857
	最高速度 (m/s)	1.506	1.062	1.090	1.321	1.686	0.987	1.068	1.063	0.197
	加速度 (m/s ²)	0.959	0.286	0.272	0.950	0.925	0.677	0.412	0.920	1.051
說明	用影格10標記追蹤的間距。 ■ 表示與（基準型）推論的大小關係不符。									



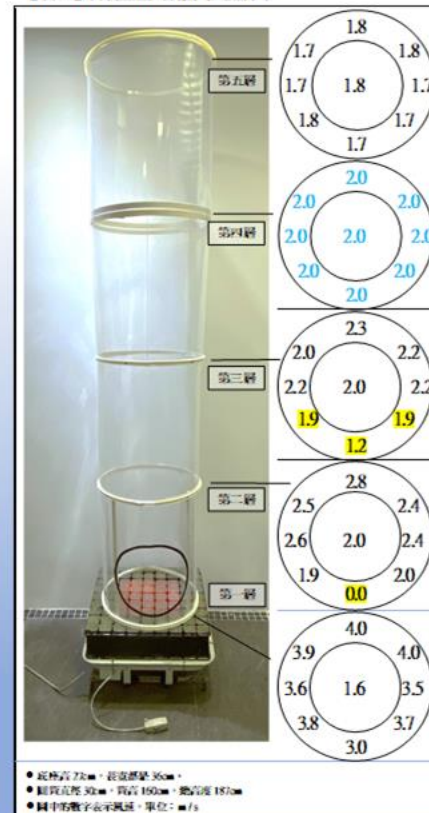
【研究結果】

- 結合歸納的造型作用推論、分析並配合【自製垂直風洞】的特性，做出新造型的紙蜻蜓。
- 把【表23】的數據帶入【阻力方程】，求出的阻力係數大多介於（立方體）和（短圓柱）之間

$F_d = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d A$ ，當阻力 $F_d =$ 重力 mg ，物體的靜力是零，則 $mg = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d A$ ， C_d 是未知數時，則 $C_d = \frac{2mg}{\rho v^2 A}$

- 運用歸納的造型方法，調整下降的重力和旋轉作用和上升阻力相近，就能讓紙蜻蜓能滯空飄浮在垂直風洞。

【表 22】自製垂直風洞機之風速分布



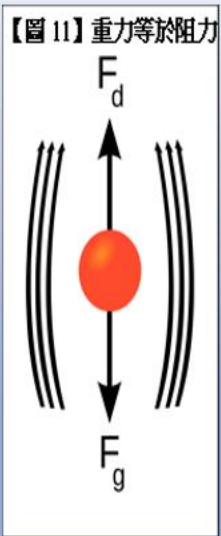
● 紙筒高 72cm，紙筒直徑 36cm。
 ● 風筒直徑 50cm，風筒 160cm，總高度 187cm。
 ● 圓中的數字表示風速，單位：m/s。

【表 23】新造型紙蜻蜓的發展階段

編號	23-1	23-2	23-3	23-4	23-5
尺寸	正方形紙 (15cm x 15cm)		正方形紙 (21cm x 21cm)		
翼面面積	每片 7.5cm ²	每片 11.5cm ²	每片 15cm ²	每片 23.625cm ²	每片 28cm ²
實物					
直徑	19		26.5	26	
高度	6		7.5	7.5	
重量	4.11		8.46	8.3	
投影面積	136.8	143.3	146.3	197.1	231.4
立角					
真角	35°		44°	37°	
橫角		130°		126.8°	121°
傾斜角度	15°	20°	25°	30°	10°
說明	能飄浮，幾乎不轉動	能飄浮，偶爾轉動	能飄浮，慢速轉動	能飄浮，快速轉動	能飄浮，持續轉動

【表 24】用（阻力方程）來推算類似造型的數據

編號	23-1	23-2	23-3	23-4	23-5
實物					
m	0.00411	0.00411	0.00411	0.00846	0.0083
g	9.8				
v	2				
p	1.225				
A	0.01368	0.01433	0.01463	0.01971	0.02314
C _d	1.20	1.147	1.12	1.72	1.43
F _d		0.040278		0.082908	0.08134



【圖 12】阻力係數參考

Shape	Drag Coefficient
Sphere	0.47
Half-sphere	0.42
Cone	0.50
Cube	1.05
Angled Cube	0.80
Long Cylinder	0.82
Short Cylinder	1.15
Streamlined Body	0.04
Streamlined Half-body	0.09
Measured Drag Coefficients	

【圖 11】重力等於阻力

【結果解釋】

- 一 從【實驗二~四】推論：（重量）越輕的，（落下時間）越長。（2-2）
- 二 從【實驗三】推論：紙質較厚，可以幫助維持翼面的角度。（3-2）
- 三 從【實驗四~六】推論：（配重）位置較低、（立面）較長，使（重心）越低時可以維持立面垂直。（4-1）、（5-4）、（6-4）
- 四 從【實驗八】推論：（翼面）越長、（旋轉面積）越大，（落下時間）越長。（8-1）
- 五 從【實驗十七】推論：翼面左右錯開距離加大，（落下時間）、（總圈數）增加。向左錯開會順時針轉，向右會逆時針轉。（17-1）、（17-5）
- 六 用Tracker分析得知：比（基準型）慢降落的，阻力較大、加速度跟著較小。【表12】
- 七 運用歸納的造型方法，調整下降的重力和旋轉作用和上升阻力相近，就能讓紙蜻蜓能滯空飄浮在垂直風洞。



(2-2)



(3-2)



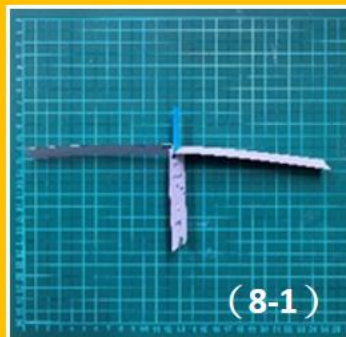
(4-1)



(5-4)



(6-4)



(8-1)



(17-1)



(17-5)

【討論】

- 一、實驗中的（落下時間）最多時，（總圈數）也較多，代表（旋轉作用）最大；但是（7-2）、（9-3）、（11-2）、（18-3）的（落下時間）最多，（總圈數）卻不是最多，還要再研究。
- 二、相同基重、不同紙質（厚度）的實驗，還需要再搜集更多紙種來確認。
- 三、有關天氣影響紙張韌性的問題，雖然採用天氣晴朗、整組實驗接連的條件進行，之後的實驗沒有記錄實驗當天的氣候條件；或是改成有防水性質的紙質，後續實驗要改進。
- 四、對於各種作用力如果能用進一步找出計算的方式，更直接得到數字來證明。
- 五、類似配重0.36g、翼面抬升角度 40° 和翼面傾斜角 15° ，還可以作更細微數量的實驗，也許能找到更理想的狀態。
- 六、垂直風洞中央風速較低的情形還要改進：如果能更均勻，也許就不會偏斜在筒口飄浮。
- 七、後續可以運用求得的阻力係數，試著照比例放大或縮小造型，探討作用力的改變。
- 八、後續再探討不同風速下，不同阻力係數的造型和不同旋轉作用構造的組合影響。



【結論】

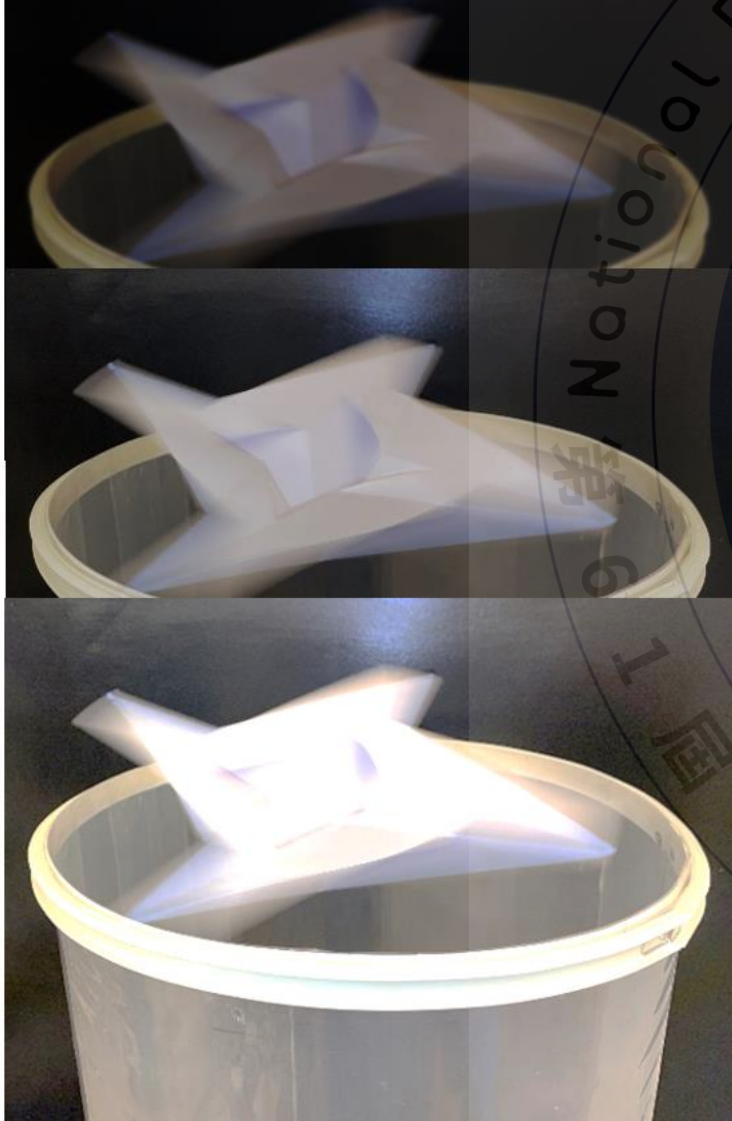
實驗推論出各部位對於（阻力）和（旋轉）的作用，及（落下時間）的關係；也做出比（基準型）的（落下時間）更久的造型。從中歸納出可以增加阻力和旋轉作用的造型原理，需要減少作用時就相反運用；

基重較輕、紙質較韌、重量要輕、重心要低、增加阻力和旋轉作用。

並運用向下重力和向上阻力互相抵銷的推論，證明可以用此來發展出在風洞機中飄浮的造型。

- （一）紙質：用較厚的紙，配合摺紙和黏貼的作法增加造型的穩定度。
- （二）翼面：互相對稱的四個翼面使前後左右更平衡。
- （三）配重：增加下方的構造、降低重心，不作額外配重、減輕重量。
- （四）立面：底部用十字尖錐狀，斜面產生阻力，前後左右維持的平衡。

這樣的裝置可以發展成商場的看板或是玩具，如果下方再搭配跳躍閃爍的燈光，放在微暗的空間，看過去十足就像是【滯空的UFO】，一定會很有趣！



【參考資料】



- 一、NTCU科學遊戲Lab：紙蜻蜓 - 台中教育大學 scigame.ntcu.edu.tw/paper/paper-003.html
- 二、國立台灣師範大學物理系 (黃福坤) 物理教學示範實驗教室 物理問題討論區
終端速度與物體的大小尺度：<http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/phpBB/viewtopic.php?topic=8330>
空氣阻力：<http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/phpBB/viewtopic.php?topic=14404>
- 三、中華民國第38屆中小學科學展覽會/國小組 物理科/有趣的螺旋降落/臺北縣光華國民小學
- 四、中華民國第49屆中小學科學展覽會/國小組 物理科/凌空而降的玩具/臺東市卑南國民小學
- 五、中華民國第56屆中小學科學展覽會/國小組 生活與應用科學科/飛吧!紙蜻蜓/臺東縣福原國民小學