

中華民國第 56 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 物理科

第二名

030106

風火輪流轉~天燈浮力、阻力及側風力之研究

學校名稱：高雄市立陽明國民中學

作者： 國二 嚴培勻 國二 張鈞翔 國二 張哲維	指導老師： 柯瑞龍 柯翠菱
---	-----------------------------

關鍵詞：天燈、浮力、阻力

摘要

我們利用木板及壓克力板，製作浮力、阻力及側風力測量裝置，並利用粗細的吸管進行氣流的整流。將鐵絲用點焊機焊接後，製作天燈的模型外框，並在外部包覆宣紙製成耐用的天燈模型。我們利用此測試模組測試了方形、長型及梯形天燈，並發現天燈內部的浮力和其體積成正比關係，而阻力及側風力都會隨著風速的升高而變大。長形天燈比方形天燈有較好的浮力效果，但側風力及阻力仍然很大。梯形天燈具有更好的浮力效果，且阻力和側風力皆較方形天燈小，加上上蓋後，不僅浮力效果變好，也降低了垂直阻力及上側風力。在天燈周圍裝上擾流翼後，發現天燈會因熱氣溢出的關係而推動擾流翼產生自旋效果。最後綜合研究，利用 Excel 發展出天燈飛行軌跡的分析模型。

壹、動機

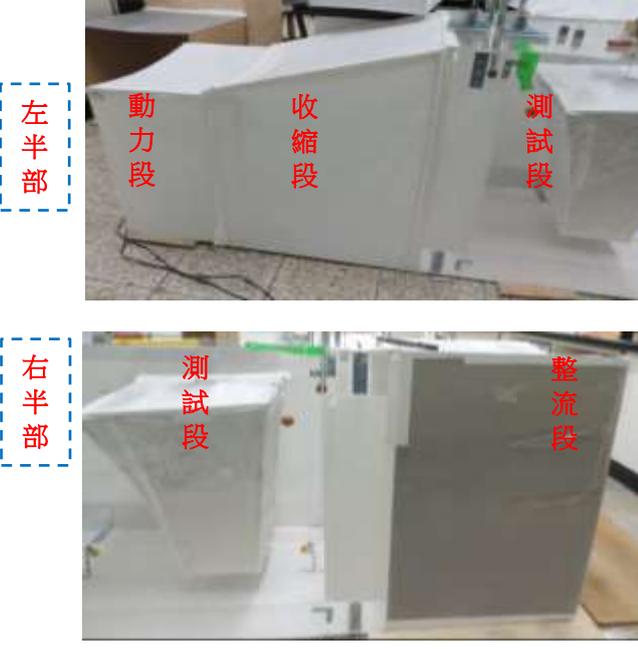
天燈祈福一直是一個很重要的活動，雖然最近一直在提倡環保，以及消防安全，但是仍有許多的人在全力保護這老祖宗留下的東西，因此也出現了許多類似的研究，希望可以製作更好的天燈。自從小時候和家人一起到平溪放過天燈後，一直就對天燈有著濃厚的興趣，希望這次可以藉由科展的研究，了解天燈的作用原理及運行方式，進而從中找出天燈的潛在危險及找出應對方法，並找出天燈飛行的安全機制，讓這樣子的活動可以一直延續下去。

貳、目的

- 一、測試市售天燈的浮力。
- 二、設計天燈的測量裝置。
- 三、測試方形天燈的浮力、阻力及側風力。
- 四、測試長形天燈的浮力、阻力及側風力。
- 五、測試梯形天燈(一)的浮力、阻力及側風力。
- 六、測試梯形天燈(一)的浮力、阻力及側風力。
- 七、旋轉天燈的測試。
- 八、測試上蓋對天燈的影響。
- 九、天燈飛行模型之建立。

參、器材

電子秤	工業用風扇	自製調速器	風速計
			

自製風洞(一)	自製風洞(二)：測量側風力
	

全高約 2.22 公尺，可測量浮力、阻力及旋轉力。	全長約為 3 公尺，高 1 公尺，可測量不同風速下的側風作用力大小。
---------------------------	------------------------------------

自製天燈模型(材料：宣紙、鐵絲)

方形	長型
	
梯形 1	梯形 2
	

肆、原理及相關名詞

一、**浮力原理**：一般指物體在流體（包括液體和氣體）中，各表面受流體壓力的合力。其公式為： $B = \rho Vg$ （ B ：浮力； ρ ：流體密度； V ：體積； g ：重力加速度），但天燈為一個中空的物體，且內部的氣體密度較小，因此可以利用加熱前後氣體的重量差所造成的

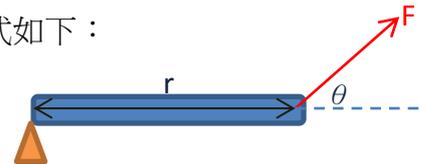
浮力來計算。其推導公式如下：

$$B = W_{\text{前}} - W_{\text{後}} = \rho_1 Vg - \rho_2 Vg = (\rho_1 - \rho_2)Vg = \Delta\rho Vg$$

其中 ρ_1 又等於外面的空氣密度，所以浮力大小就等於內外的密度差與體積之乘積。

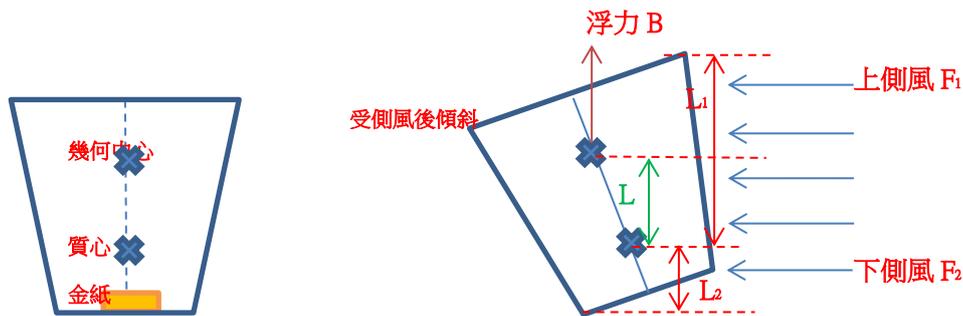
二、**力矩**：外力促使物體繞著**轉動軸**或**支點**轉動的趨向，稱為**力矩**（torque），也就是扭轉的力。力矩能夠使物體改變其**旋轉運動**。推擠或拖拉涉及到作用力，而扭轉則涉及到力矩。如圖右，力矩 τ 等於徑向向量 r 與作用力 F 的外積。其公式如下：

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F} \quad , \quad \text{其大小為 } |\vec{\tau}| = rF \sin \theta$$



三、**側風力矩分析**：

天燈正常向上飛行，因下方有框架及燃燒的油紙，所以整體的質心會落在天燈下半部，大約 1/3~1/4 高度處，並未與天燈之幾何中心重合(如圖)。



天燈受側風後繞質心產生傾斜，此時天燈的浮力(假設集中在幾何中心)，與質心下半部的側風力會形成一個反向的力矩抵抗上側風的力矩而達到一個平衡，其平衡關係為：

$$B \times L \sin \theta + F_2 \times L_2 = F_1 \times L_1 \quad \Rightarrow \sin \theta = \frac{F_1 L_1 - F_2 L_2}{BL}$$

其中 θ 即為天燈轉動的角度，若要降低 θ 之大小，則要使浮力增加，或是提升下側風 F_2 的大小，即可減少天燈晃動的角度，增加天燈的安全性。

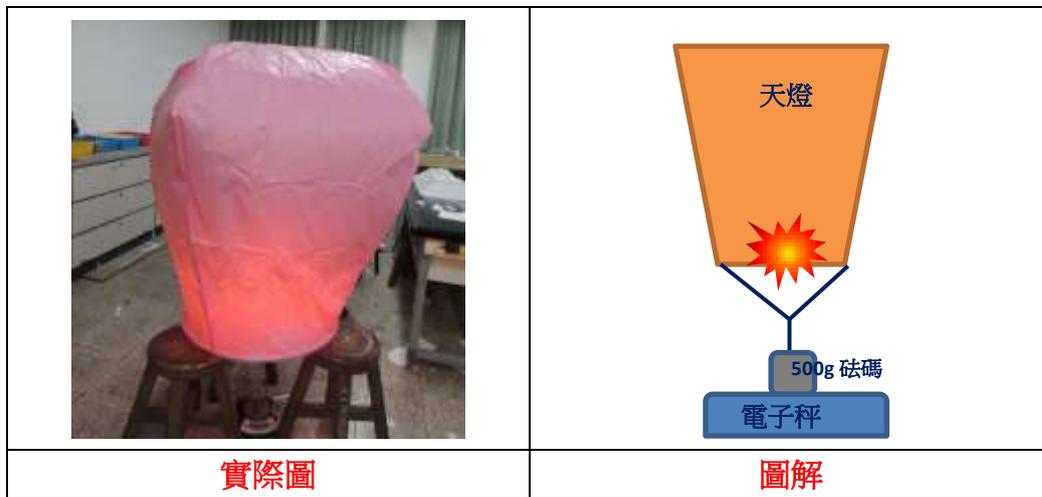
伍、研究過程、結果及討論

研究一、如何測試天燈的浮力

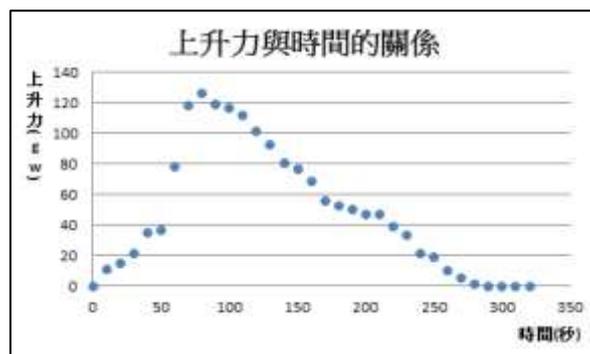
探討 1、過去天燈的測量方式為何

(一)目的：利用過去的方式測量天燈的浮力

- (二)步驟：1. 將買來的天燈裝上油紙，接著在底部拉線並用砝碼固定在電子秤上。
2. 請同學將天燈撐開，並點燃下方的 12 張油紙，使天燈產生浮力(如下圖)。
3. 將電子秤的力量變化紀錄(10 秒一次)下來，即可得到升力值。



- (三)結果：1. 上升力與時間之關係



- (四)討論：1. 使用以上的方法雖然可以求得上升力的變化，並找到最佳升力，但事後討論後，我們發現了一些問題。
2. 此方法僅能測量天燈的上升力變化，即為天燈對電子秤的拉力，但拉力不等於天燈的浮力。主要原因是天燈在燃燒時，油紙大約有 50gw 左右的重量，燃燒的過程重量會一直減輕，這會使得電子秤讀數減小。
3. 另外天燈必須要在浮力大於本身的重量時才會上升，才會產生所謂的上升力，在天燈上升前的力量就只能用 0gw 表示，當後半段浮力小於重量時也是用 0gw 表示，這些都無法精確地將浮力變化求出來。
4. 為了改良測量的缺點，我們開始了以下的研究。

研究二、如何製作天燈的測量裝置

探討 1、如何製作浮力與阻力的測試裝置

(一)目的：製作浮力與阻力的測試裝置

(二)步驟：1. 先畫好設計圖後，再向廠商訂購木材。

2. 測試裝置主要分為整流段、測試段及動力段。



<p>測試段：利用螺絲釘及釘子將木板固定。</p>	<p>整流段：利用塑膠瓦楞板及粗、細吸管製成。</p>	<p>動力段：使用工業電扇，以吸入的方式製作氣流。</p>

3. 測試段分析如下：

<p>實物</p>	<p>分析圖</p>

分析：(1)點火時，天燈獲得浮力向上，電子秤就可以顯現出浮力的讀數。

(2)裝上壓克力板使正面密封(如圖)，並打開動力段風扇，即可從電子秤得到阻力的讀數。

(3)利用照相機的腳架製成伸縮架，可配合天燈高度上下調整火焰位置。



(三)結果：浮力、阻力測量裝置如下圖



- (四)討論：
1. 當天燈點火後，油紙會因為燃燒而逐漸減輕重量，透過此測量裝置可以直接測到天燈的「浮力」，而不是升空後的拉力，也不會因油紙重量減輕而造成測量誤差，這是過去的作品所辦不到的。
 2. 利用天燈的浮力，可以計算內部氣體的密度大小，了解天燈浮力效果。
 3. 利用動力段排風所造成的吸力及整流段的整流效果，可造成向下的穩定氣流，模擬天燈向上飛行時所受到的阻力。

探討 2、如何製作側風力的測試裝置

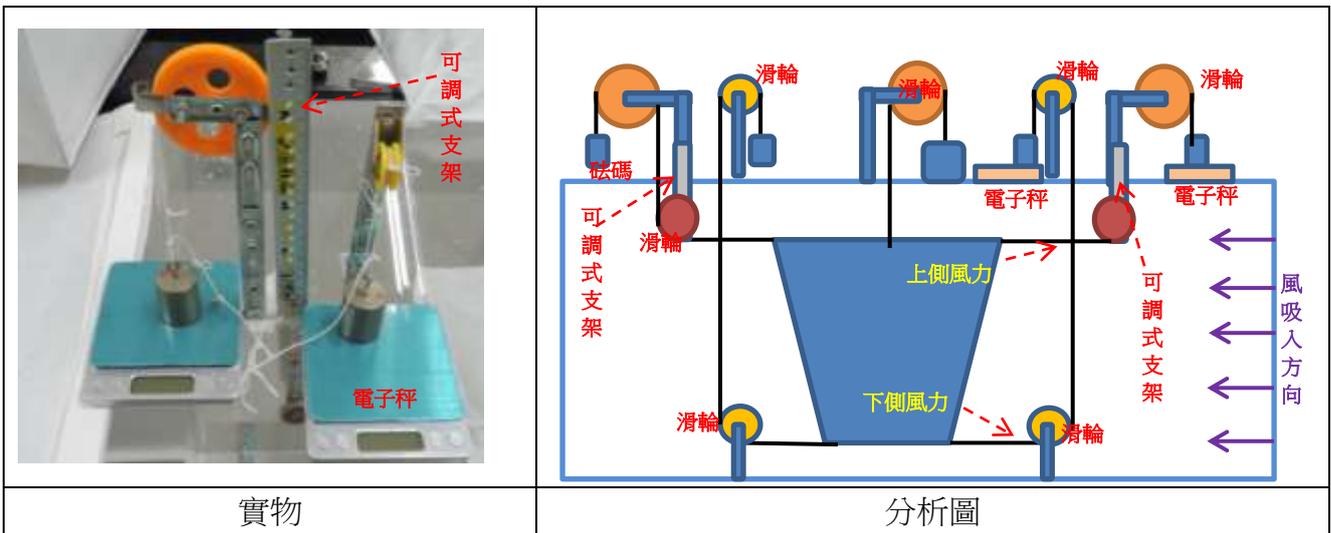
(一)目的：製作側風力的測試裝置

(二)步驟：1. 先畫好設計圖後，再向廠商訂購壓克力。

2. 測試裝置主要分為整流段、測試段及動力段。

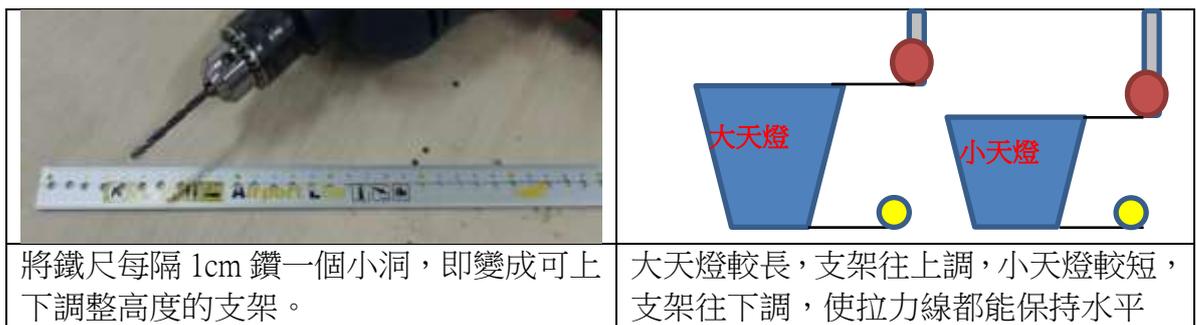


3. 測試段分析如下：

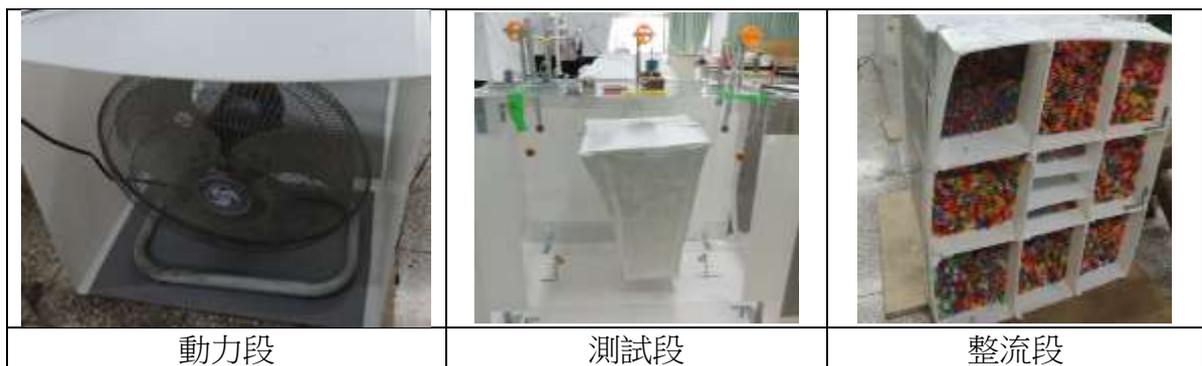


分析：(1)打開右側動力段風扇向右吹，產生向右邊的氣流，模擬側風的效果。當側風吹過來時，會對天燈產生風阻力，再讀取右上角的電子秤讀數，可分別求得上下的側風阻力，藉此分析力矩的大小。

(2)可調式支架說明



(三)結果：1. 側風阻力測量裝置如下圖



(四)討論：1. 透過可調式支架可讓天燈在測試段中保持水平。

2.利用此測試裝置可以模擬出天燈在受到側風之後的受力情形，並進一步利用上下拉力的分析求出轉動的力矩，這也是在過去天燈的作品中沒有做到的部分。

探討 3、氣流的測試

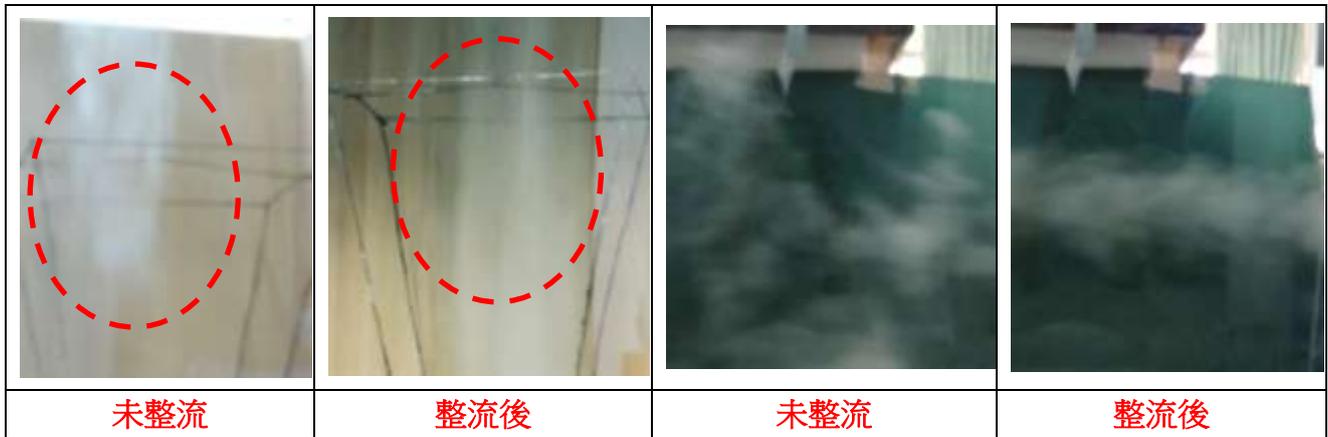
(一)目的：測試整流段對氣流的整流效果。

- (二)步驟：1. 將乾燥的二氧化錳和雙氧水混合，利用其產生的大量煙霧進行氣流測試。
2. 分別比較整流前後的氣流變化。

(三)結果：

垂直氣流測試

水平氣流測試

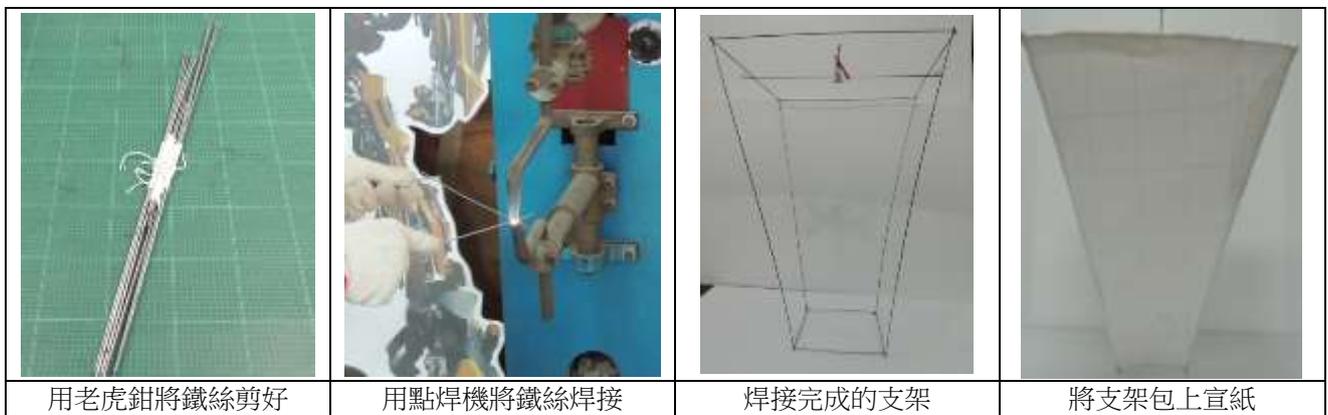


- (四)討論：1. 未整流之前，氣流呈現混亂的現象。
2. 透過整流段的作用，就可以得到比較平穩的氣流。

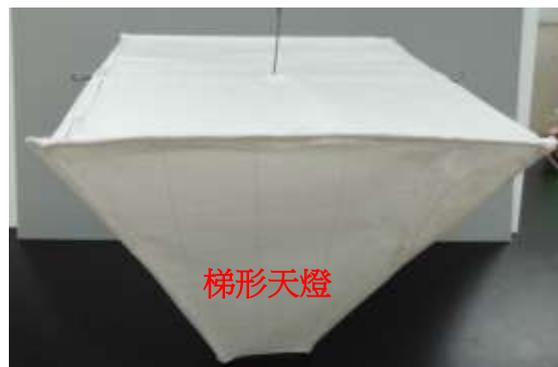
探討 4、如何製作天燈的測試模型

(一)目的：製作堅固的天燈測試模型

(二)步驟：如下圖



(三)結果：1.完成的成品如下



(四)討論：1. 利用工藝教室的點焊機將鐵絲焊接，再將外面用宣紙包覆，就可以完成天燈的測試模型。此方法可以做出各種形狀及比例的天燈，也方便我們做理論的探討及變因的控制。

2. 因為外框是鐵絲做的，所以如果在實驗的過程中不小心將天燈焚毀，外框是不會損壞的(如圖)。接著只要將外框焦黑的宣紙刮除，再重新貼上新的宣紙就可以再完成一個規格和原本相同的天燈，方便我們日後反覆的測試。



探討 5、天燈架子對數據的影響

(一)目的：測試天燈空架子對測試數據的影響

(二)步驟：1. 將天燈的支架架在測試裝置上(如圖)。

2. 打開抽風扇，紀錄天燈架子對阻力的影響。
3. 在支架下方點火，測試天燈架子對浮力的影響。
4. 將天燈架子架在側風測試裝置上，測試架子對側風力的影響。



(三)結果：1. 數據(阻力的影響)

風速(m/s)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
阻力(gw)	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02
上側風力(gw)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02
下側風力(gw)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02

2. 數據(升力的影響)

油紙數量(張)	0	1	2	3	4	5
浮力(gw)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01

(四)討論：1. 由測試中發現，天燈的架子只會對數據產生些微的影響，而且製作完成的天燈，已經將大部分的支架包覆在內。所以在測試時，可以忽略架子造成的影響。

探討 6、天燈油紙的製作

(一)目的：找尋適合作天燈測試的油紙燃料比例

(二)步驟：1. 測量金紙的質量，並控制質量在 1.20 克。

2. 分別製作(煤油：沙拉油)比例為 A(10：0)、B(9：1)、C(8：2)、D(7：3)、E(6：4)、F(5：5)、G(4：6)、H(3：7)、I(2：8)、J(1：9)及 K(0：10)之燃料。

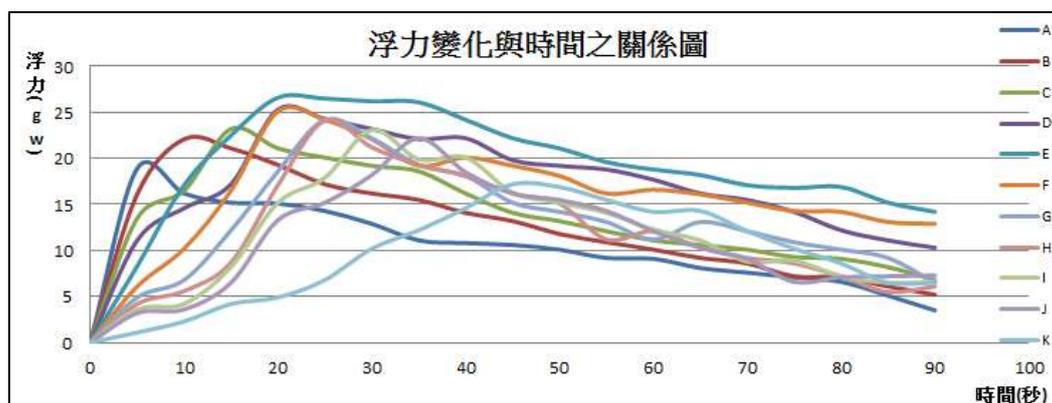
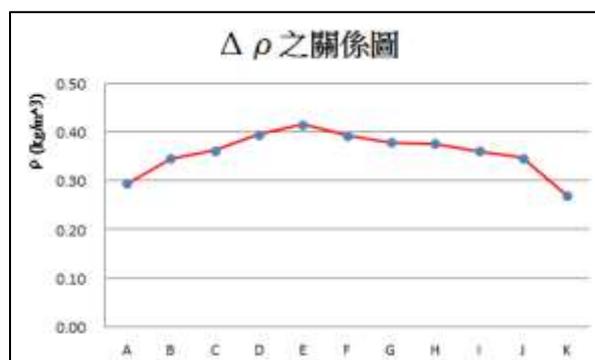
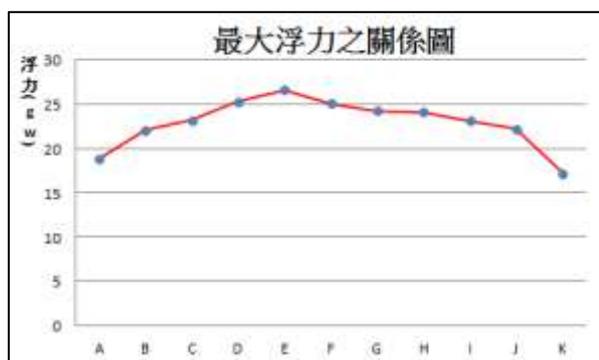
- 分別將金紙浸泡到不同比例之燃料，並控制其總質量為(3.60±0.05)g。
- 使用不同比例的金紙，對方形天燈(40cm x 40cm x 40cm)進行浮力的測試。
- 將電子秤的力量變化(浮力)紀錄(5 秒一次)下來，並作圖分析。

(三)結果：1. 數據(最大浮力)

$\Delta \rho$ ：表示內外空氣密度差

比例	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
最大浮力(gw)	18.9	22.1	23.2	25.3	26.6	25.1	24.2	24.1	23.1	22.2	17.2
$\Delta \rho$ (kg/m ³)	0.295	0.345	0.363	0.395	0.416	0.392	0.378	0.377	0.361	0.347	0.269

2. 圖形



(四)討論：1. 由上面的數據可知，比例 E(6：4)具有較好的浮力效果，且續航力較佳。

2. 由圖形分析，當煤油比例多時，最大浮力出現的時間較早，但是續航力較差。當沙拉油比例較多時，最大浮力出現的時間較晚，但續航力較好，但因為火不夠大，所以造成的最大浮力也較差。

3. $\Delta \rho$ 可利用加熱前後氣體的重量差所造成的浮力來計算。其推導公式如下：

$$B = W_{前} - W_{後} = \rho_1 Vg - \rho_2 Vg = (\rho_1 - \rho_2) Vg$$

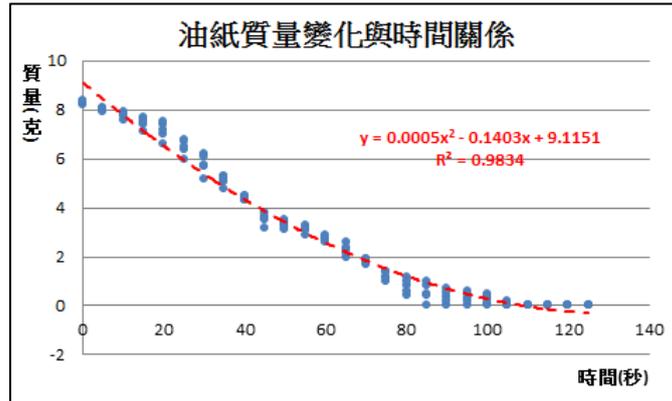
，透過 $\Delta \rho$ 的計算，可用來判別浮力效果， $\Delta \rho$ 越大時表示單位體積所造成的浮力效果越好。

探討 7、天燈油紙的燃燒

(一)目的：找出油紙燃燒時的質量變化關係

- (二)步驟：
1. 將油紙對折後放置在測試架上。
 2. 將油紙點燃，並記錄其質量變化情形並記錄下來並作圖分析。
 3. 反覆進行步驟 2，並將結果作圖分析。

(三)結果：1. 質量變化關係圖



(四)討論：1. 透過 Excel 作圖分析，可大致找出燃燒時間與質量的關係。了解此關係將有助於日後作為天燈飛行模型之計算參考。

垂直拉力線連接電子秤測試浮力。

研究三、方形天燈的測試

探討 1、方形天燈的浮力關係

(一)目的：測試不同大小的方形天燈的浮力。

- (二)步驟：
1. 將方形天燈模型 A1 架在測試架上(如圖)。
 2. 使用比例 E(6：4)的油紙作為熱源，並將熱源放在伸縮架上，點火後測試浮力。
 3. 分別改成 A2、A3、A4 及 A5 天燈，並重複步驟 1~2。



左右拉力線連接法碼平衡。

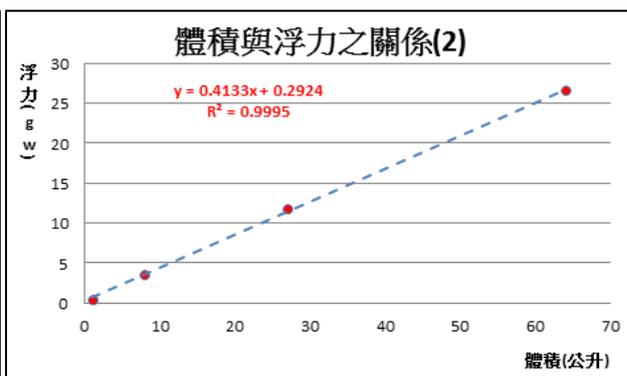
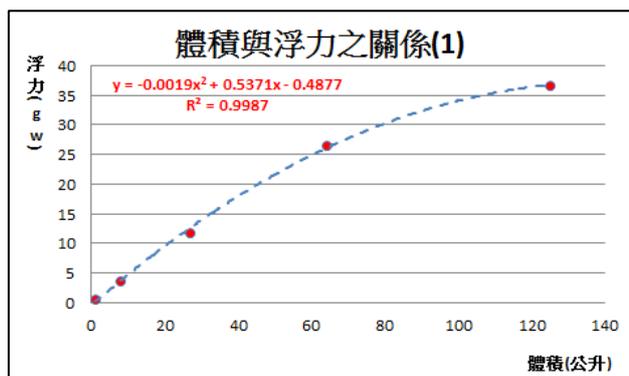
(三)結果：1. 天燈格式

天燈編號	A1	A2	A3	A4	A5
邊長(cm)	10x10x10	20x20x20	30x30x30	40x40x40	50x50x50

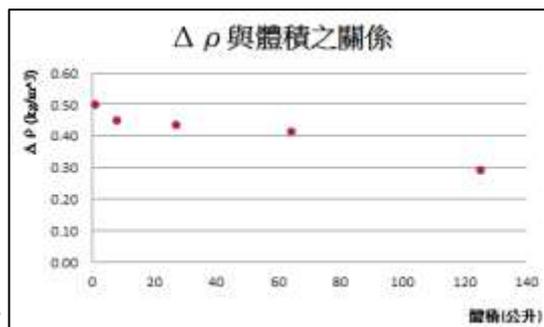
2. 數據(最大浮力)

天燈編號	A1	A2	A3	A4	A5
最大浮力(gw)	0.5	3.6	11.8	26.6	36.6
$\Delta \rho$ (kg/m ³)	0.500	0.450	0.437	0.416	0.293

3.關係圖



(四)討論：1. 由上圖中發現，浮力的大小會隨著體積的大小而變大，但兩者不是正比。但若捨去 A5 的數據再重新作圖則發現，浮力與體積幾乎呈現正比的關係。



2. 由以上的結果再比較 $\Delta \rho$ 之關係可發現，A1~A4 有著大約相同的 $\Delta \rho$ ，顯示此天燈的內部氣體已經獲得充分地加熱，所以浮力已經達到最大值，而 A5 因為體積大油紙小的關係，並未真正達到浮力的最大值。
3. 綜合以上結果可知，不同大小的天燈要使用不同大小的油紙，才可達到此天燈的最佳浮力。若天燈達到最佳浮力，則浮力大小會和體積大小呈現正比的關係。
4. 由以上的機制不儘可以推算出同一種形狀的天燈在不同大小下的浮力大小，亦可以檢驗此天燈配合的油紙尺寸或數量是否已達到最佳的效果，避免因過度增加油紙造成火焰過大使天燈焚毀。
5. 為了測試方便，我們使用 A4 尺寸為基準再做變化，以檢驗不同形狀的天燈在浮力上的關係。

探討 2、方形天燈的垂直阻力關係

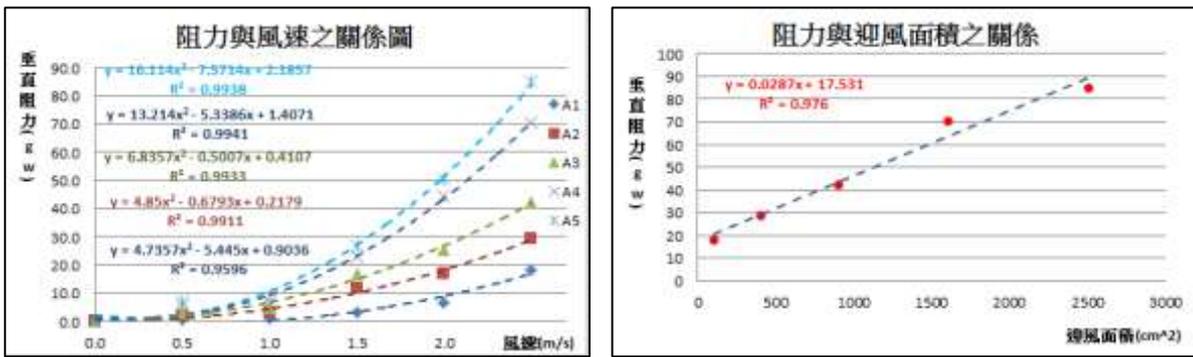
(一)目的：測試不同大小的方形天燈的垂直阻力。

(二)步驟：1. 將方形天燈模型 A1 架在測試架上，並將壓克力板及整流段裝上。

2. 利用自製調速器，改變風速為 0.5m/s、1.0 m/s、1.5 m/s、2.0 m/s 及 2.5 m/s，並將阻力大小記錄下來。

3. 分別改成 A2、A3、A4 及 A5 天燈，並重複步驟 1~2。

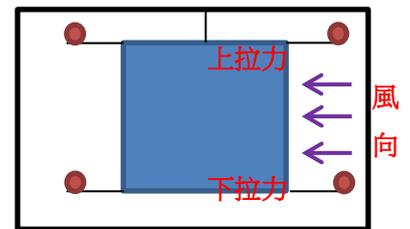
(三)結果：1. 圖形(阻力與風速關係)



- (四)討論：1. 由以上結果我們發現，垂直阻力的大小會隨著下沉風速的增強而增加，表示天燈上升速率越快時，阻力也越大。
2. 綜合浮力之數據，就可以求出天燈上升時的最大速率關係。
3. 將天燈的迎風面積和最大阻力一起作圖後發現，阻力之大小也隨著迎風面的增加而增加。

探討 3、方形天燈的側風力關係

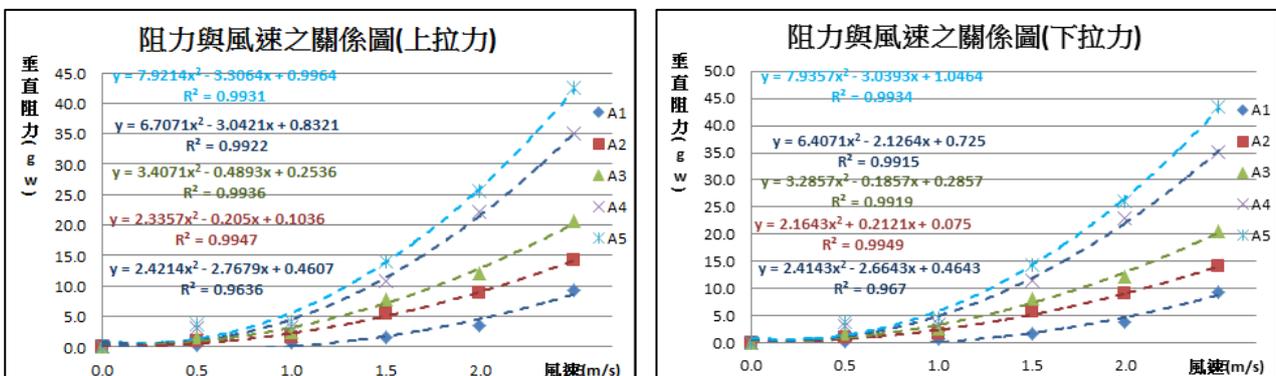
(一)目的：測試不同大小的方形天燈的側風力。



(二)步驟：1. 將方形天燈模型 A1 架在側風測試架上，並調整拉力線至水平(如圖)。

2. 利用自製調速器，改變風速為 0.5m/s、1.0 m/s、1.5 m/s、2.0 m/s 及 2.5 m/s，並將上、下側風力大小記錄下來。
3. 分別改成 A2、A3、A4 及 A5 天燈，並重複步驟 1~2。

(三)結果：1. 圖形



(四)討論：1. 由以上結果我們發現，側風力的大小會隨著風速的增強而增加。

2. 另外我們也意外地發現，上下拉力並不如預期地相等，而有下拉力大於上拉力之現象出現，其原因可能是因為天燈的上面為平整面，氣流較容易通過，天燈

的下面為了讓熱氣進入，沒有宣紙包覆，較容易產生亂流而造成較大的阻力。

研究四、長形天燈的測試

探討 1、長形天燈的浮力關係

(一)目的：測試不同大小的方形天燈的浮力。

(二)步驟：1. 將長形天燈模型 L1 架在測試架上。

2. 使用比例 E(6：4)的油紙作為熱源，並將熱源放在伸縮架上，點火後測試浮力。

3. 分別改成 L2、L3 及 L4 天燈，並重複步驟 1~2。

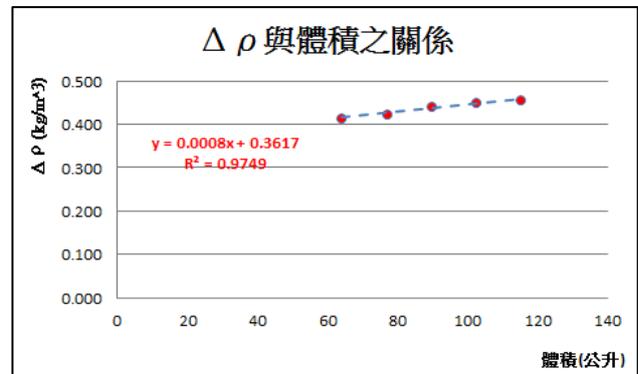
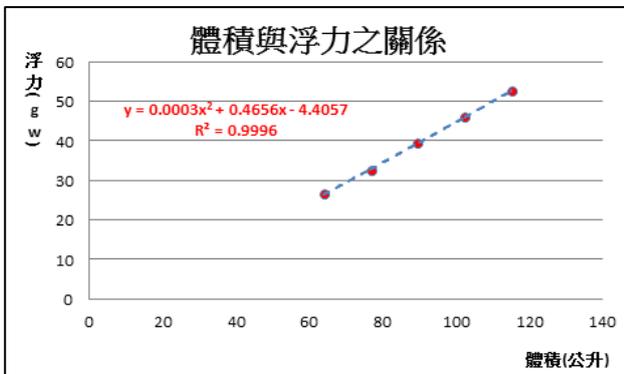
(三)結果：1. 天燈格式

天燈編號	A4	L1	L2	L3	L4
邊長(cm)	40x40x40	40x40x48	40x40x56	40x40x64	40x40x72

2. 數據(最大浮力)

天燈編號	A4	L1	L2	L3	L4
最大浮力(gw)	26.6	32.6	39.5	46.2	52.6
$\Delta \rho$ (kg/m ³)	0.416	0.424	0.441	0.451	0.457

3.關係圖

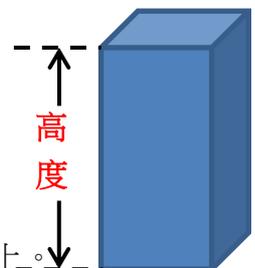


(四)討論：1. 由圖形中發現，浮力的大小隨著天燈的長度增加而變大， $\Delta \rho$ 也漸漸提升，顯示長形的天燈較容易留住熱空氣。

探討 2、長形天燈的垂直阻力關係

(一)目的：測試不同大小的方形天燈的垂直阻力。

(二)步驟：1. 將長形天燈模型 L1 架在測試架上，並將壓克力板及整流段裝上。



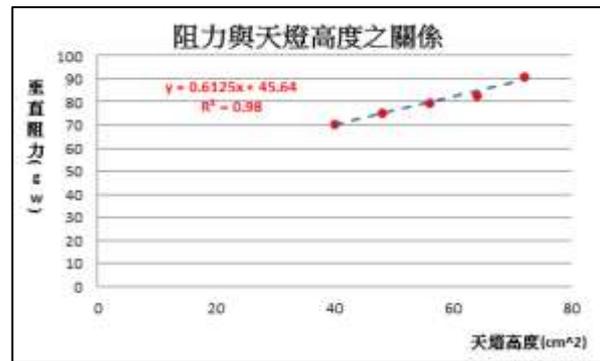
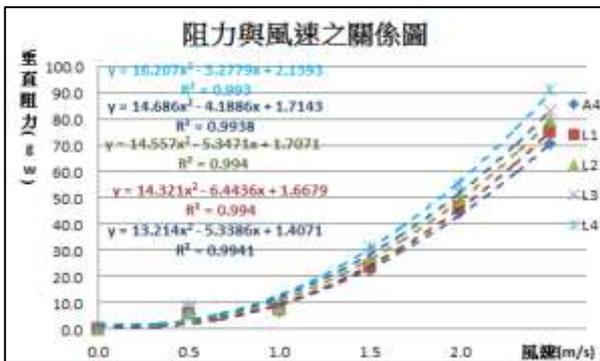
2. 利用自製調速器，改變風速為 0.5m/s、1.0 m/s、1.5 m/s、2.0 m/s 及 2.5 m/s，並將阻力大小記錄下來。

3. 分別改成 L2、L3 及 L4 天燈，並重複步驟 1~2。

(三)結果：1. 數據(阻力與風速關係)

風速(m/s) \ 編號	A4	L1	L2	L3	L4
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.5	5.7	6.1	6.9	7.7	8.6
1.0	6.8	7.2	8.2	9.1	9.9
1.5	22.7	23.5	26.3	28.5	31.3
2.0	44.3	46.6	49.3	52.3	55.2
2.5	70.6	75.2	79.6	83.2	91.1

2. 圖形



(四)討論：1. 由上面的關係圖可知，垂直阻力大小隨著風速度的增加而變大。

2. 同一風速下，高越長的天燈，受到的阻力也越大。

探討 3、長形天燈的側風力關係

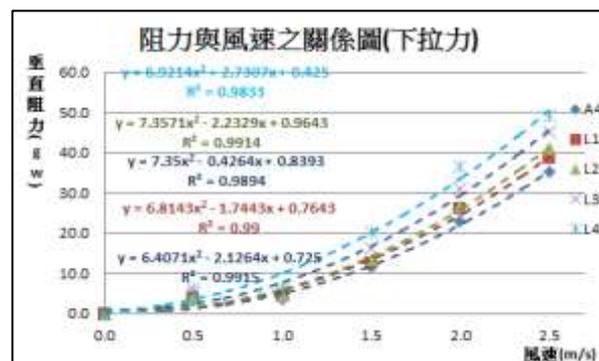
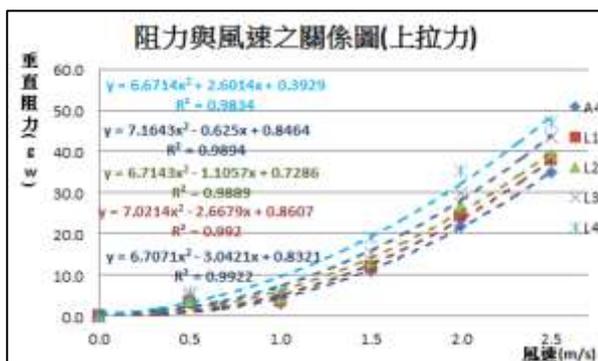
(一)目的：測試不同大小的方形天燈的側風力。

(二)步驟：1. 將長形天燈模型 L1 架在側風測試架上，並調整拉力線至水平。

2. 利用自製調速器，改變風速為 0.5m/s、1.0 m/s、1.5 m/s、2.0 m/s 及 2.5 m/s，並將上、下側風力大小記錄下來。

3. 分別改成 L2、L3 及 L4 天燈，並重複步驟 1~2。

(三)結果：1. 風速與上下阻力之關係圖



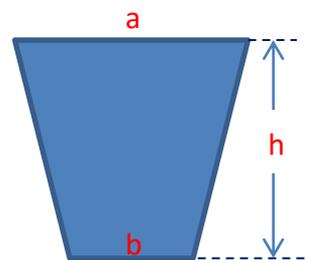
- (四)討論：1. 由以上結果我們發現，側風力的大小會隨著風速的增強而增加。
2. 而長形天燈也出現了下方側風力大於上方側風力的趨勢。

研究五、梯形天燈的測試(一)

探討 1、梯形天燈的浮力關係

(一)目的：測試不同下底之梯形天燈的浮力。

(二)步驟：1. 將梯形天燈模型 T1 架在測試架上。



2. 使用比例 E(6：4)的油紙作為熱源，並將熱源放在伸縮架上，點火後測試浮力。
3. 分別改成 T2、T3、T4、T5、T6 及 T7 天燈，並重複步驟 1~2。

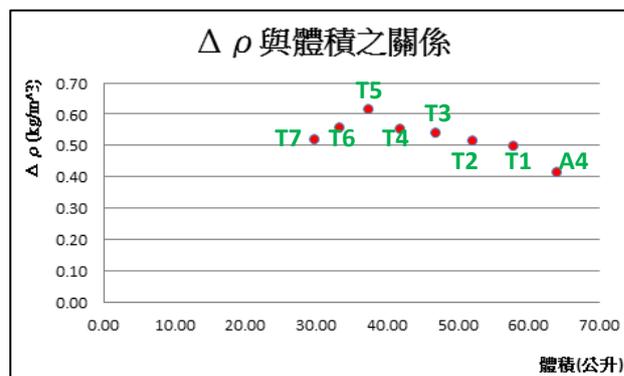
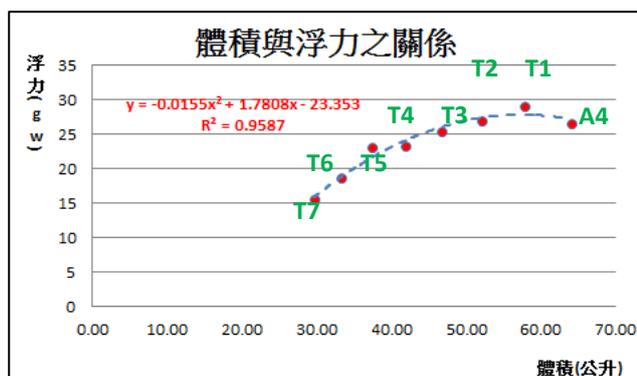
(三)結果：1. 天燈格式

天燈編號	A4	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
上底 a(cm)	40	40	40	40	40	40	40	40
下底 b(cm)	40	36	32	28	24	20	16	12
高 h(cm)	40	40	40	40	40	40	40	40

2. 數據(最大浮力)

天燈編號	A4	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
最大浮力(gw)	26.6	29.1	26.9	25.3	23.2	23.1	18.6	15.5
$\Delta \rho$ (kg/m ³)	0.42	0.50	0.52	0.54	0.55	0.62	0.56	0.52

3. 關係圖



- (四)討論：1. 由結果可知，形狀的改變會影響浮力。當開口 b 逐漸縮小時，浮力值會先變大然後變小，主要原因是體積變小的關係
2. $\Delta \rho$ 也受開口大小影響，當開口變小時， $\Delta \rho$ 也逐漸變大，在 T5 比例時效果最好，但開口更小時，因為熱源較不易充分燃燒，因此間接影響到 $\Delta \rho$ 之大小。

探討 2、梯形天燈的垂直阻力關係

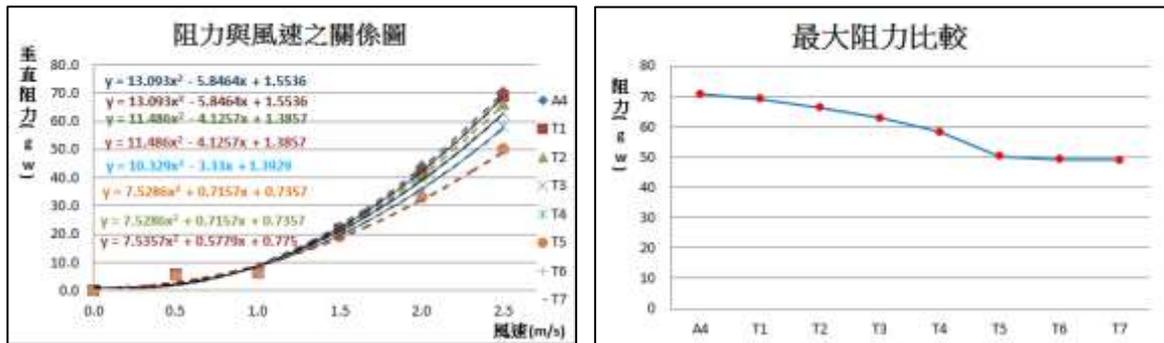
(一)目的：測試不同下底之梯形天燈的垂直阻力。

(二)步驟：1. 將梯形天燈模型 T1 架在測試架上，並將壓克力板及整流段裝上。

2. 利用自製調速器，改變風速為 0.5m/s、1.0 m/s、1.5 m/s、2.0 m/s 及 2.5 m/s，並將阻力大小記錄下來。

3. 分別改成 T2、T3、T4、T5、T6 及 T7 天燈，並重複步驟 1~2。

(三)結果：1. 圖形(阻力與風速關係)



(四)討論：1. 由結果可知，阻力隨著風速的增大而變大。

2. 當開口逐漸縮小時，最大阻力也跟著變小。

探討 3、梯形天燈的側風力關係

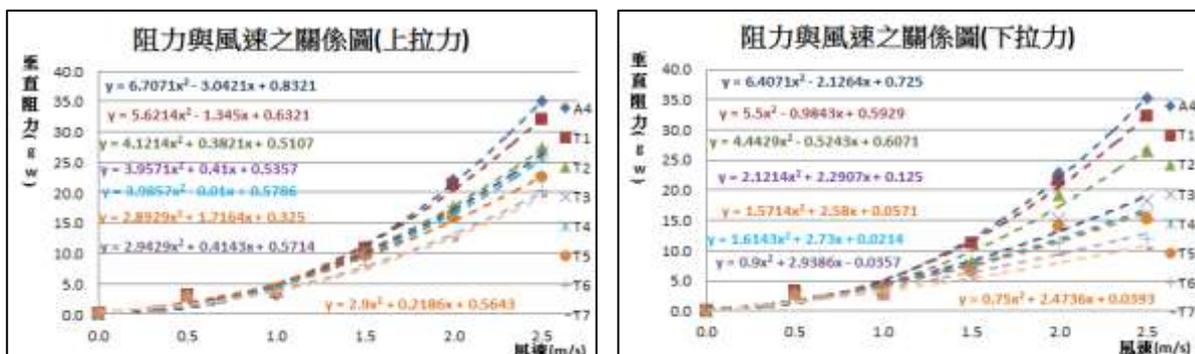
(一)目的：測試不同下底之梯形天燈的側風力。

(二)步驟：1. 將長形天燈模型 T1 架在側風測試架上，並調整拉力線至水平。

2. 利用自製調速器，改變風速為 0.5m/s、1.0 m/s、1.5 m/s、2.0 m/s 及 2.5 m/s，並將上、下側風力大小記錄下來。

3. 分別改成 T2、T3、T4、T5、T6 及 T7 天燈，並重複步驟 1~2。

(三)結果：1. 風速與上下阻力之關係圖



(四)討論：1. 由結果可知，上下的側風力都隨著風速的增大而變大。當開口逐漸縮小時，除

側風阻力變小外，下側風力也因為迎風面積變小而開始迅速地降低。

研究六、梯形天燈的測試(二)

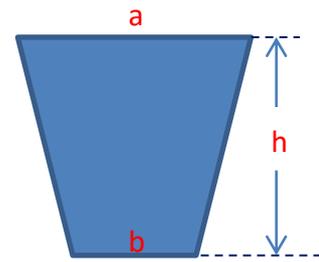
探討 1、梯形天燈的浮力關係

(一)目的：測試不同高之梯形天燈的浮力。

(二)步驟：1. 將梯形天燈模型 T51 架在測試架上。

2. 使用比例 E(6：4)的油紙作為熱源，並將熱源放在伸縮架上，點火後測試浮力。

3. 分別改成 T52、T53、T54、T55、T56 及 T57 天燈，並重複步驟 1~2。



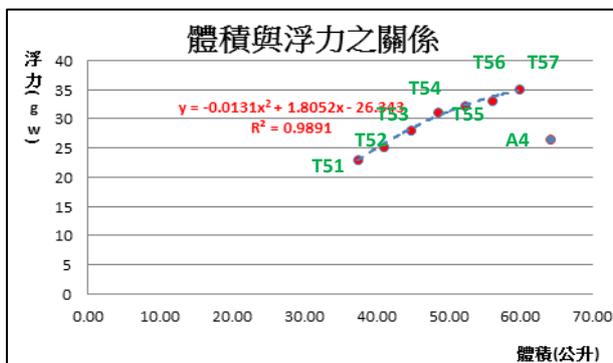
(三)結果：1. 天燈格式

天燈編號	A4	T51	T52	T53	T54	T55	T56	T57
上底 a(cm)	40	40	40	40	40	40	40	40
下底 b(cm)	40	20	20	20	20	20	20	20
高 h(cm)	40	40	44	48	52	56	60	64

2. 數據(最大浮力)

天燈編號	A4	T51	T52	T53	T54	T55	T56	T57
最大浮力(gw)	26.6	23.1	25.2	28.2	31.2	32.3	33.2	35.1
$\Delta \rho$ (kg/m ³)	0.42	0.62	0.61	0.63	0.64	0.62	0.59	0.59

3. 關係圖



(四)討論：1. 由結果可知，梯形天燈的浮力隨著體積變大而上升，且明顯優於方形天燈。

2. $\Delta \rho$ 也隨著高度的變化而改變，其中效果最好的是 T54 型的梯型天燈。

探討 2、梯形天燈的垂直阻力關係

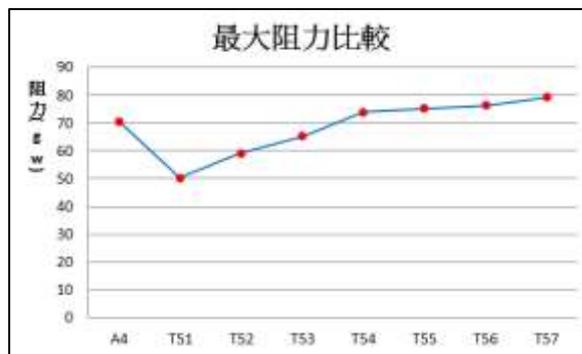
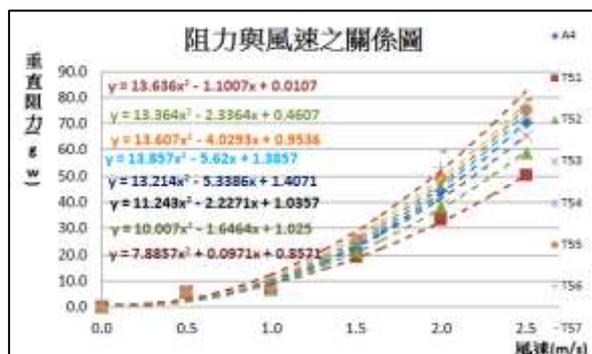
(一)目的：測試不同高之梯形天燈的垂直阻力。

(二)步驟：1. 將梯形天燈模型 T51 架在測試架上，並將壓克力板及整流段裝上。

2. 利用自製調速器，改變風速為 0.5m/s~2.5 m/s，並將阻力大小記錄下來。

3. 分別改成 T52、T53、T54、T55、T56 及 T57 天燈，並重複步驟 1~2。

(三)結果：1. 圖形(阻力與風速關係)



(四)討論：1. 由結果可知，阻力隨著風速的增大而變大。

2. 當天燈的高變大時，阻力也跟著上升。

探討 3、梯形天燈的側風力關係

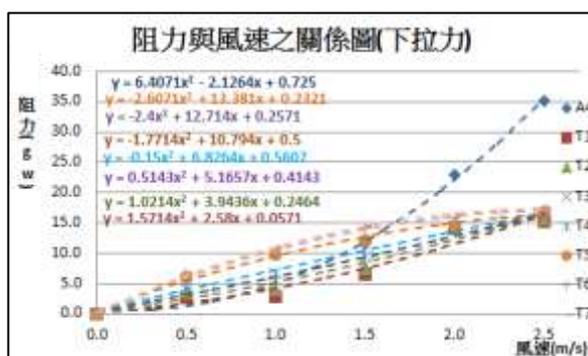
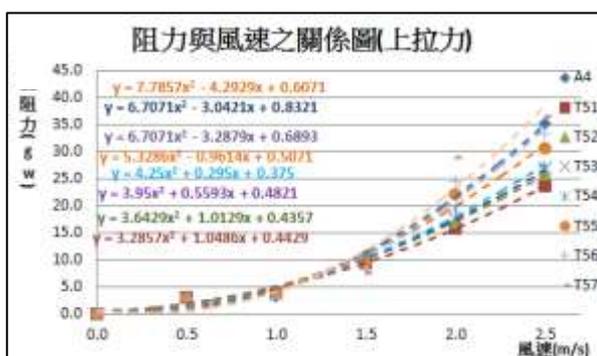
(一)目的：測試不同高之梯形天燈的側風力。

(二)步驟：1. 將長形天燈模型 T51 架在側風測試架上，並調整拉力線至水平。

2. 利用自製調速器，改變風速為 0.5m/s~2.5 m/s，並將上、下側風力大小記錄下來。

3. 分別改成 T52、T53、T54、T55、T56 及 T57 天燈，並重複步驟 1~2。

(三)結果：1. 風速與上下阻力之關係圖



(四)討論：1. 由結果可知，上下的側風力都隨著風速的增大而變大。

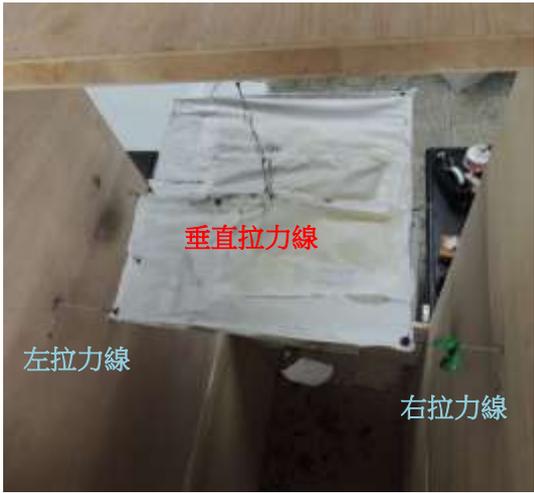
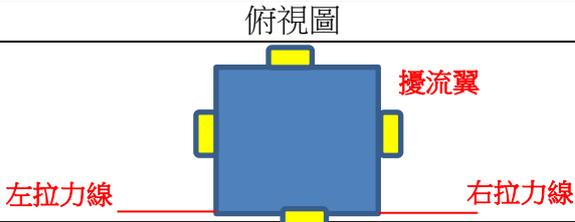
2. 小開口的天燈在下方的側風力則明顯地都比方形天燈小。

研究七、旋轉天燈的測試

探討 1、裝設擾流翼後對天燈的影響

(一)目的：測試擾流翼對天燈轉動的影響

- (二)步驟：1. 將梯形天燈模型 T54 架在測試架上(架設方式圖如下)。
2. 使用 12cm x 6cm 的紙片製成擾流翼，並和摺疊尺組合再裝在天燈上面。
3. 使用比例 E(6：4)的油紙作為熱源，點火後測試浮力及轉動力矩。
4. 利用自製調速器固定風速為 2.5 m/s，並將阻力大小記錄下來。
5. 將天燈裝在側風測試裝置，固定風速為 2.5 m/s，並將側風力大小記錄下來。

特殊架設法	正視圖
	
	<p>俯視圖</p> 
垂直拉力線連接電子秤測試浮力。	右拉力線連接電子秤，測試轉動力量。

(三)結果：1. 數據(浮力與轉動力矩) 力臂長度：30cm

天燈編號	T54(正常)	T54(擾流翼)
最大浮力(gw)	31.2	31.9
$\Delta \rho$ (kg/m ³)	0.64	0.66
拉力(gw)	0.0	9.8
轉動力矩(gw-cm)	0.0	196.0

2. 數據(阻力與上下拉力)：風速 2.5cm

天燈編號	T54(正常)	T54(擾流翼)
垂直阻力(gw)	73.9	75.8
側風力(gw)	上	27.5
側風力(gw)	下	17.2

- (四)討論：1. 使用擾流翼後可以產生轉動力矩，理論上可以達到轉動的效果。
2. 擾流翼會使浮力值提升，造成 $\Delta \rho$ 之推算值上升，但 $\Delta \rho$ 之推算值上升應不是內部空氣的 ρ 再變小所造成的影響。仔細觀察天燈的周圍發現，熱氣累積一定的量後會從開口溢出而向上流動，此氣流除了推動擾流翼產生轉動力矩外，還回造成些微的上升力，使浮力的整體大小上升，造成 $\Delta \rho$ 之推算值上升。
3. 另外擾流翼也會增加些微的垂直阻力及上下拉力。

探討 2、不同角度的擾流翼對天燈的影響

(一)目的：測試擾流翼角度對天燈轉動的影響

(二)步驟：1. 將梯形天燈模型 T54 架在測試架上。

2. 使用 12cm x 6cm 的紙片製成擾流翼，並和摺疊尺組合，並固定其角度為 0° (和鉛直線的夾角)並點燃油紙測試測試浮力及轉動力矩。

3. 改變角度為 5°、10°、15°、20°、25° 及 30°，並重複步驟 1~2。

4. 將天燈裝在側風測試裝置，固定風速為 2.5 m/s，並將側風力大小記錄下來。

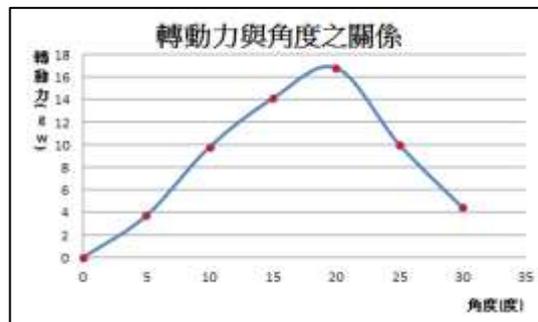
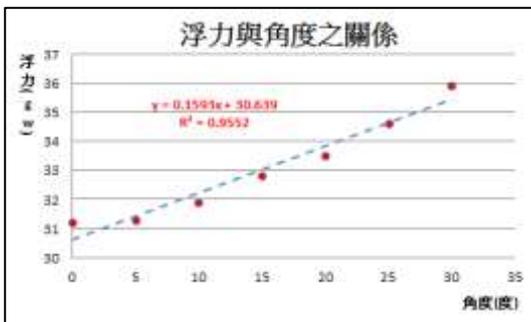
5. 改變角度為 5°、10°、15°、20°、25° 及 30°，並重複步驟 4。

(三)結果：1. 數據：浮力與轉動力矩

轉動力臂：30cm

擾流翼角度(度)	0	5	10	15	20	25	30
最大浮力(gw)	31.2	31.3	31.9	32.8	33.5	34.6	35.9
$\Delta \rho$ (kg/m ³)	0.64	0.64	0.66	0.68	0.69	0.71	0.74
拉力(gw)	0.0	3.7	9.8	14.1	16.8	10.0	4.4
轉動力矩(gw-cm)	0	74	196	282	336	200	88

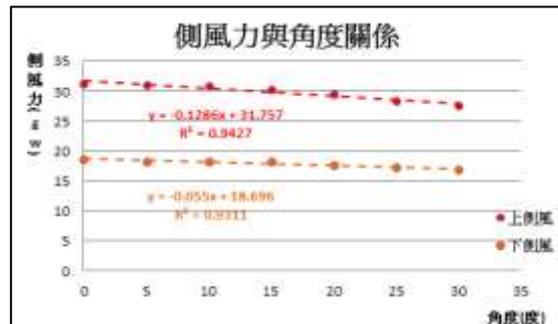
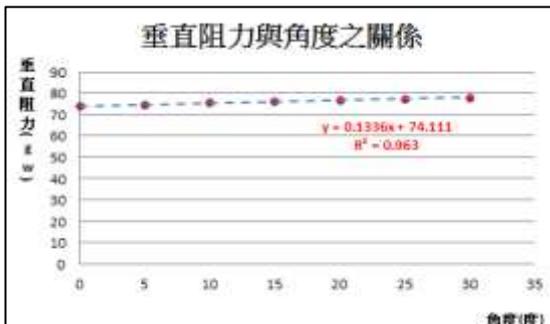
圖形：浮力與轉動力



2. 數據：垂直阻力與側風力

擾流翼角度(度)	0	5	10	15	20	25	30	
垂直阻力(gw)	73.9	74.5	75.8	76.5	76.9	77.3	77.9	
側風力(gw)	上	31.3	31.1	30.8	30.2	29.5	28.3	27.6
側風力(gw)	下	18.6	18.3	18.2	18.2	17.6	17.3	16.9

圖形：垂直阻力與側風力

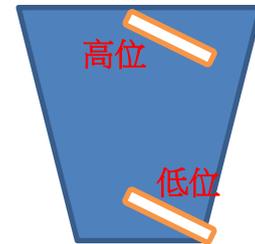


- (四)討論：1. 由圖形可知，浮力的大小隨著擾流翼角度的增加而上升，顯示擾流翼越接近水平時，對於浮力的提升效果越大。
2. 轉動力的大小一開始也隨著角度的上升而變大，大約在 20 度時達到最大值。
3. 垂直阻力會隨著角度的增加而變大，而側向力則是隨著角度的增加而變小。

探討 3、擾流翼位置對天燈的影響

(一)目的：測試擾流翼位置對天燈轉動的影響

(二)步驟：1. 將梯形天燈模型 T54 架在測試架上。



2. 使用 12cm x 6cm 的紙片製成擾流翼，並和摺疊尺組合，固定其角度為 0°，並將其置於天燈的低位。點燃油紙後測試浮力及轉動力矩。
3. 改變角度為 5°、10°、15°、20°、25° 及 30°，並重複步驟 1~2。
4. 將天燈裝在側風測試裝置，固定風速為 2.5 m/s，並將側風力大小記錄下來。
5. 改變擾流翼角度為 5°、10°、15°、20°、25° 及 30°，並重複步驟 4。
6. 將擾流翼的位置改到高位，並重複步驟 3~5。

(三)結果：1. 數據：浮力與轉動力矩(低位)

轉動力臂：30cm

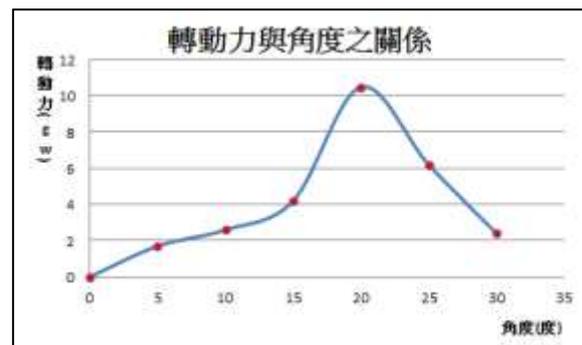
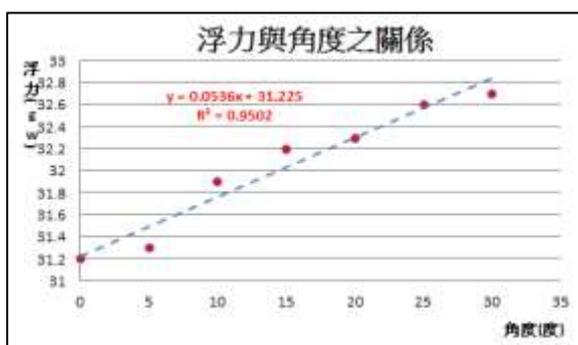
擾流翼角度(度)	0	5	10	15	20	25	30
最大浮力(gw)	31.2	31.3	31.9	32.2	32.3	32.6	32.7
$\Delta \rho$ (kg/m ³)	0.64	0.64	0.66	0.66	0.67	0.67	0.67
拉力(gw)	0.0	1.7	2.6	4.2	10.5	6.2	2.4
轉動力矩(gw-cm)	0	51	78	126	315	186	72

數據：浮力與轉動力矩(高位)

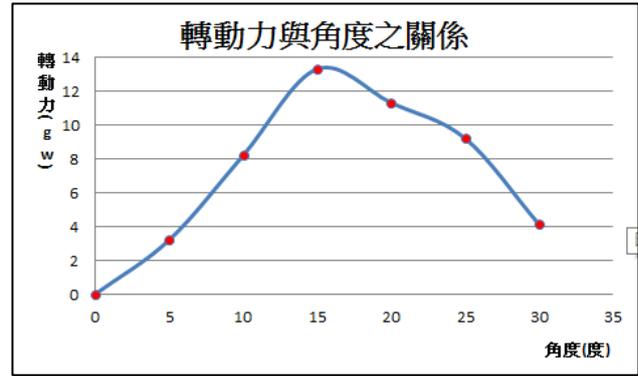
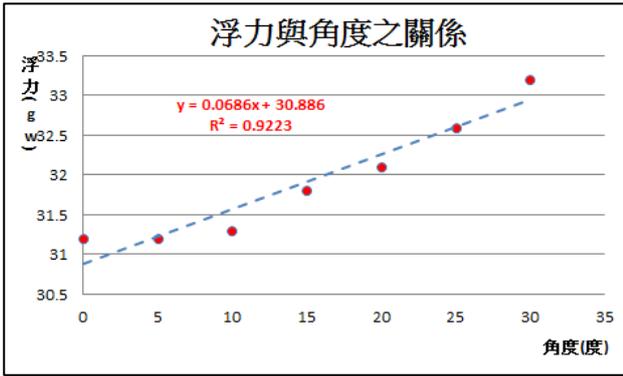
轉動力臂：30cm

擾流翼角度(度)	0	5	10	15	20	25	30
最大浮力(gw)	31.2	31.2	31.3	31.8	32.1	32.6	33.2
$\Delta \rho$ (kg/m ³)	0.64	0.64	0.64	0.66	0.66	0.67	0.68
拉力(gw)	0.0	3.2	8.2	13.3	11.3	9.2	4.1
轉動力矩(gw-cm)	0	96	246	399	339	276	123

圖形：浮力與轉動力(低位)



圖形：浮力與轉動力(高位)



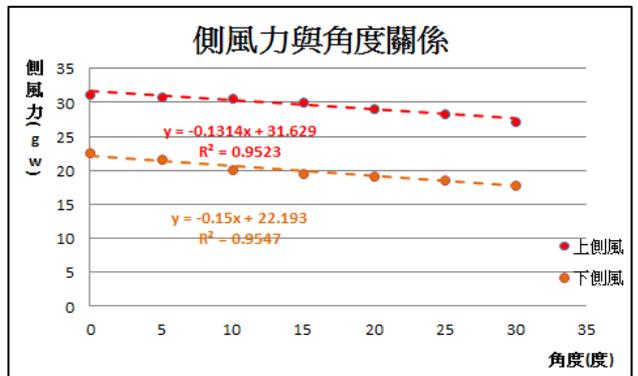
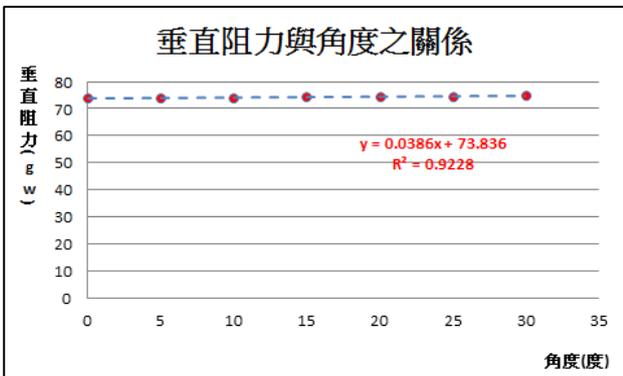
2. 數據：垂直阻力與側風力(低位)

擾流翼角度(度)	0	5	10	15	20	25	30
垂直阻力(gw)	73.9	74.1	74.2	74.3	74.5	74.7	75.2
側風力(gw) 上	31.3	30.8	30.6	30.1	29.2	28.3	27.3
側風力(gw) 下	22.6	21.6	20.2	19.5	19.1	18.7	17.9

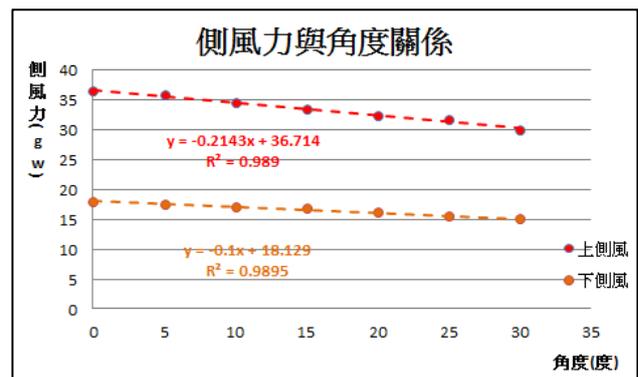
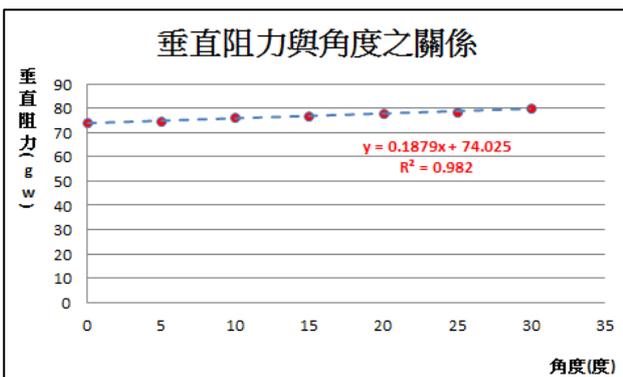
數據：垂直阻力與側風力(高位)

擾流翼角度(度)	0	5	10	15	20	25	30
垂直阻力(gw)	73.9	74.9	76.2	76.9	77.9	78.2	79.9
側風力(gw) 上	36.5	35.8	34.5	33.6	32.5	31.7	29.9
側風力(gw) 下	18.1	17.5	17.2	16.8	16.2	15.5	15.1

圖形：垂直阻力與側風力(低位)



圖形：垂直阻力與側風力(高位)



- (四)討論：1. 結果顯示擾流翼裝在中位有比較好的浮力效果。
2. 擾流翼裝在高位、中位(探討 1)及低位，對於垂直阻力都有一定的影響，且都會隨著角度的上升而變大。
3. 擾流翼裝在低位時雖然對於轉動力比不上中位和高位，主要的原因是力臂較小所致，但我們也意外的發現，當角度為 0 度時，對於下方側風力有很大的提升，這樣有助於側風來時力矩的平衡。



研究八、增加上蓋對天燈的影響

探討 1、不同上蓋對天燈的浮力影響

(一)目的：測試不同上蓋對天燈的浮力影響

(二)步驟：1. 將 T54 天燈裝上上蓋(S0)，並固定在測試架上。

2. 使用比例 E(6：4)的油紙作為熱源，並將熱源放在伸縮架上，點火後測試浮力。

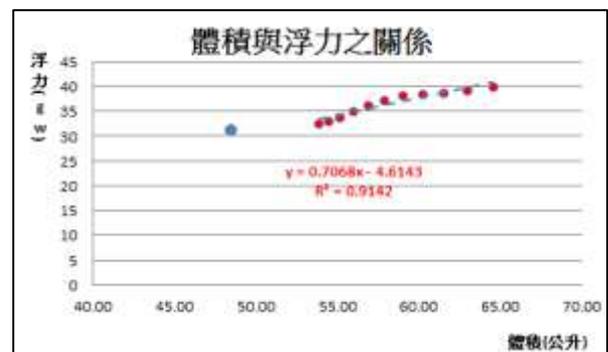
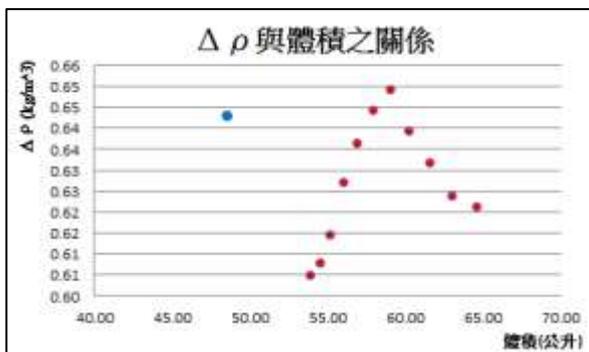
3. 分別改成 S1、S2、…、S9、及 S10 天燈，並重複步驟 1~2。

(三)結果：1. 上蓋格式

天燈編號	T54	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
上底 a(cm)	X	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
下底 b(cm)	X	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
高 h(cm)	X	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

2. 數據(最大浮力)

天燈編號	T54	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
最大浮力(gw)	31.2	32.6	33.1	33.9	35.1	36.2	37.3	38.3	38.5	38.9	39.3	40.1
$\Delta \rho$ (kg/m ³)	0.64	0.61	0.61	0.61	0.63	0.64	0.64	0.65	0.64	0.63	0.62	0.62



(四)討論：1. 由圖可知，加上上蓋後浮力有上升的趨勢，主要是體積增加的原因。

2. 浮力效果以 S6 天燈最好，顯示上部稍微內縮的形狀，有助於 $\Delta \rho$ 之提升。

探討 2、不同上蓋對天燈的阻力影響

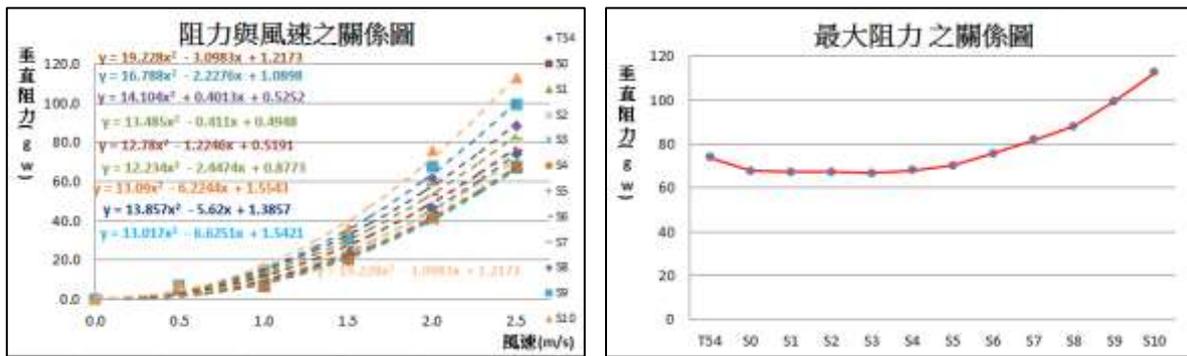
(一)目的：測試不同上蓋對天燈的阻力影響

(二)步驟：1. 將 T54 天燈裝上上蓋(S0)，並固定在測試架上。

2. 利用自製調速器，改變風速為 0.5m/s~2.5 m/s，並將垂直阻力大小記錄下來。

3. 分別改成 S1、S2、…、S9、及 S10 天燈，並重複步驟 1~2。

(三)結果：1. 圖形



(四)討論：1. 由圖可知，阻力大小會隨著風速增加而提升。

2. 上端面積較小之上蓋可以減少垂直阻力之影響，提高上升速率。

探討 3、不同上蓋對天燈的側風力影響

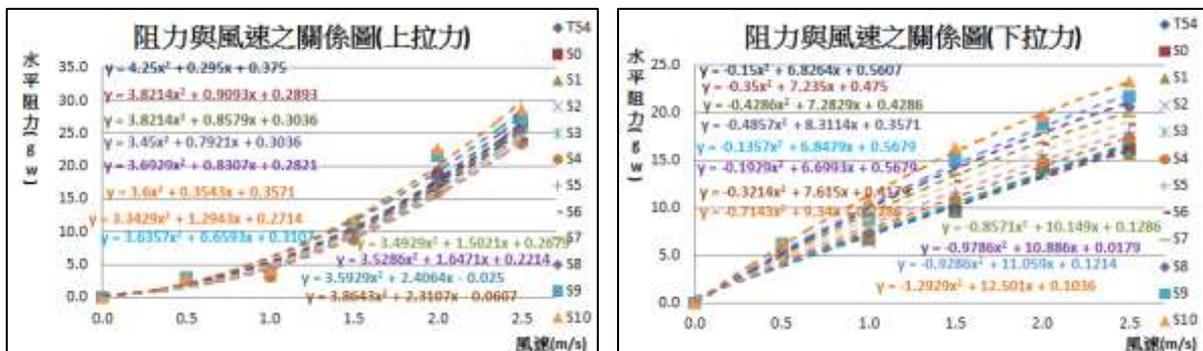
(一)目的：測試不同上蓋對天燈的側風力影響

(二)步驟：1. 將 T54 天燈裝上上蓋(S0)，並固定在測試架上。

2. 利用自製調速器，改變風速為 0.5m/s~2.5 m/s，並將側風力大小記錄下來。

3. 分別改成 S1、S2、…、S9、及 S10 天燈，並重複步驟 1~2。

(三)結果：1. 圖形：



(四)討論：1. 由圖可知，側風力大小會隨著風速增加而提升。

2. 上端面積較小之上蓋可以減少上側風力之影響，減少天燈晃動角度。

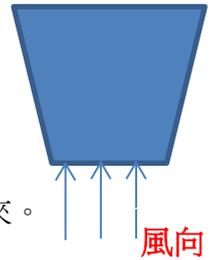
研究九、天燈飛行模型的建立及安全評估(以自製天燈為例)

探討 1、天燈落地的阻力關係

(一)目的：測試天燈落地時地的阻力影響

(二)步驟：1. 將 T54 天燈裝上上蓋(S6)，並固定在測試架上。

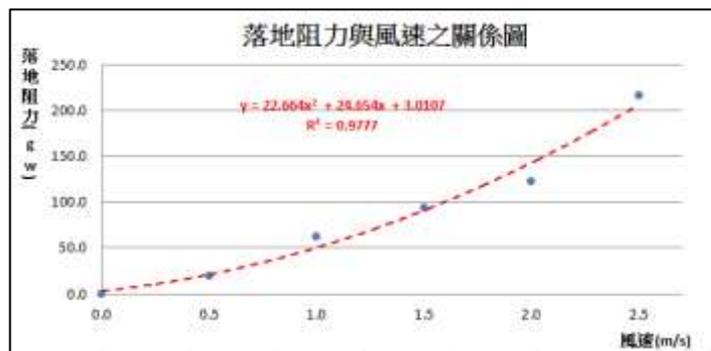
2. 利用自製調速器，改變風速為 0.5m/s~2.5 m/s，並將上吹阻力記錄下來。



(三)結果：1. 數據：

風速(m/s)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
阻力(gw)	0.0	63.1	89.8	112.6	123.5	157.9

2. 關係圖



3. 終端速率分析

終端速率(m/s)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
天燈重量(gw)	3.0	5.7	8.8	12.4	16.5	21.0	26.0	31.4	43.6	50.3	57.6	65.2

(四)討論：1. 由數據發現，天燈在落地的時候，阻力非常的大，也顯示若天燈的形狀沒有變化，很快就會達到下降之終端速率。

2. 透過落地阻力之方程式可推斷出不同天燈質量在落地時的終端速率。

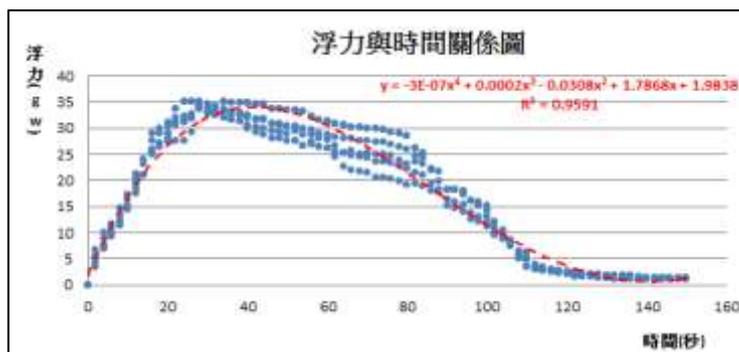
探討 2、天燈浮力變化的關係

(一)目的：測試天燈浮力變化與時間的關係

(二)步驟：1. 將 T54 天燈裝上上蓋(S6)，並固定在測試架上。

2. 將油紙放在伸縮架上，點火後測試浮力隨時間變化之關係。

(三)結果：1. 關係圖：



(四)討論：1. 其方程式為 $B = -3 \times 10^{-7} \times t^4 + 0.0002t^3 - 0.0308t^2 + 1.7868t + 1.9838$

2. 由上圖可知，天燈在一開始的時候浮力增加很快，但後來持平，接著緩慢減少。



探討 3、天燈飛行模型的建立(以自製天燈為例)

(一)目的：建立天燈飛行的模擬圖

(二)步驟：1. 將相關數據及方程式輸入 Excel(如下圖)。

2. 利用 Excel 計算天燈的飛行關係並作圖。

輸入相關方程式

各項數據分析

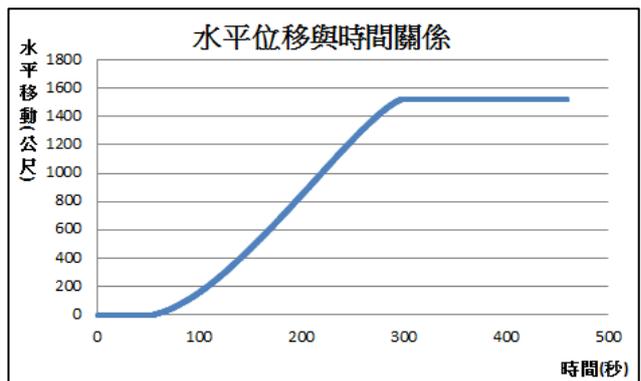
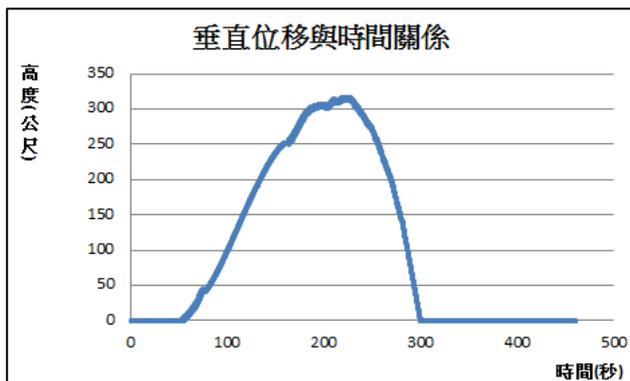
	時間(秒)	浮力	油紙	總質量	合力	上升力	上升速率	阻力	加速度	垂直位移
地面風速	2	0	0.00	39.00	-39.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
油紙質量	9	0.2	8.97	38.97	-31.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
天燈質量	30	0.4	8.07	38.94	-30.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.6	8.18	12.26	38.92	-30.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.8	8.28	12.42	38.89	-30.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1	8.39	12.58	38.86	-30.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.2	8.49	12.74	38.83	-30.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.4	8.59	12.89	38.80	-30.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.6	8.70	13.05	38.78	-30.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.8	8.80	13.21	38.75	-29.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	8.91	13.36	38.72	-29.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2.2	9.01	13.52	38.69	-29.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2.4	9.11	13.67	38.67	-29.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

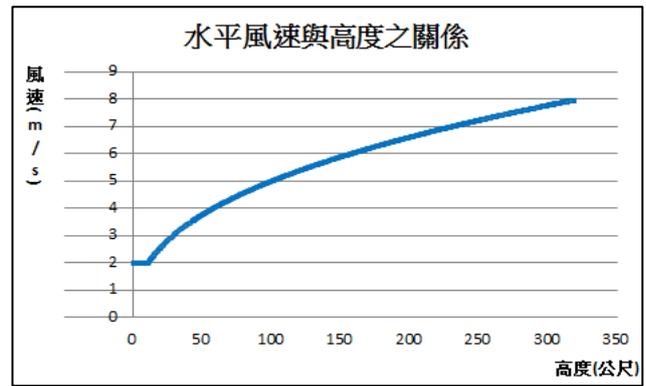
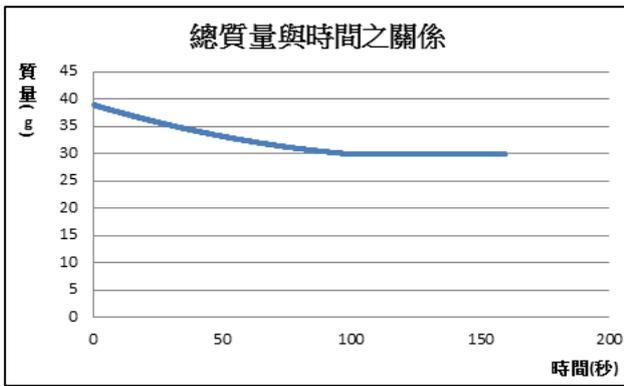
輸入相關數據

(三)結果：1. 天燈飛行模型相關方程式

浮力大小變化	$B = 4 \times 10^{-6} \times t^3 - 0.0031t^2 + 0.5311t + 7.8578$ (B：浮力；t：時間)
油紙質量變化	$m = 0.0005t^2 - 0.1403t + C$ (m：質量；C：初始質量)
風速與高度關係	$V_h = V_{10}(h/10)^n$ (V_h ：高空風速； V_{10} ：地面風速；h：高度；n：環境係數)
垂直阻力關係	上升阻力： $F_D = 12.78V^2 - 1.2246V + 0.5191$ (F：阻力；V：垂直速率) 落地阻力： $F_D = 22.664V^2 + 24.654V + 3.0107$
上側風力關係	$F_1 = 3.3429v^2 + 1.2943v + 0.2741$ (F_1 ：上部側風力；v：側風風速)
上側風力關係	$F_2 = -0.7142v^2 + 9.34v + 0.2286$ (F_2 ：下部側風力)

2. 天燈飛行模擬圖形





- (四)討論：1. 利用此天燈飛行模擬器，可以在天燈飛行之前，輸入相關資料後，就可以預測其飛行的高度及落點，有利於天燈之回收及消防安全分析。
2. 代入 G. Hellman 經多年收集的風力數據所得到的方程式，就可以求得地面風速與高度之關係，分析側風所造成的水平位移及上、下側風力的差異。藉此可以進行天燈在飛行時晃動角度的預測，評估其是否會因此而自燃。

陸、結論

- 一、利用傳統的方式測量天燈，僅能得到天燈的上升力，並無法求得浮力、阻力及側風力等相關數據。
- 二、為了求得更多的數據，我們使用了木板及壓克力板自行組裝了浮力、垂直阻力及側風力的測試裝置，整流段的部分使用了瓦楞板及粗細吸管，以工業用電扇做為動力段，並用電子秤來測量天燈受力的情形。
- 三、為了打造更堅固耐用的天燈模型，我們使用了鐵絲做為框架，並用生科教室的點焊機將連接處焊起來，外層包上宣紙後，就是一個堅固耐用的天燈模型。
- 四、在方形天燈的測試中，我們透過測試裝置得到浮力值，並利用浮力公式求得內外的密度差 $\Delta \rho$ ，透過此數據檢驗天燈內部的浮力效果，從中也意外發現，方形天燈只要搭配合適尺寸的熱源，都可以達到差不多的 $\Delta \rho$ ，其浮力大小則會和體積大小成正比關係。
- 五、方形天燈的垂直阻力會隨著風速及迎風面積變大而增加。側風力也有類似的趨勢，其中我們也意外發現，方形天燈的下半部側風力比上半部側風力大一些，可能是因為天燈的下半部沒有天燈包覆，所以易產生亂流而造成較大的側風力。
- 六、在長型天燈的測試中，我們發現越長的天燈 $\Delta \rho$ 越大，其造成的浮力效果越好，顯示熱氣在內部比較不容易逸出。而在阻力及側風力部分，也是隨著風速和迎風面積而增加。

- 七、在梯形天燈(一)的測試中，我們使用了上底和高相同，但下底逐漸變小的天燈，結果發現，浮力大小隨著下底逐漸縮小，而有先上升後下降的趨勢，但 $\Delta \rho$ 卻逐漸上升。主要原因為下底縮小後，體積也變小，但開口縮小有利於熱氣的保留所以浮力會變小，但 $\Delta \rho$ 卻會上升。
- 八、垂直阻力方面，也有隨著開口縮小而變小的趨勢。而側向力總和隨著開口縮小而逐漸變小，主要是迎風面積變小及形狀改變之關係，但我們也發現，側向力因為下底縮小的關係，而逐漸呈現上大下小的趨勢，
- 九、在梯形天燈(二)的測試中，我們使用了上底 40cm，下底 20cm 的天燈，並改變其高來進行測試，結果發現高度為 52cm 的天燈，在相同的燃料下有比較好的浮力效果。而垂直阻力及側風力的則是隨著天燈變高而增大。
- 十、在旋轉天燈的測試中，我們使用了 T54 的梯型模型，並用水平的兩條線拉住天燈上底的兩個角進行旋轉力測試。
- 十一、我們對 T54 裝上擾流翼進行測試，結果發現擾流翼可使天燈得到旋轉力，並且會提升部分升力。主要原因是內部的熱氣逸出後會往上流動推動擾流翼，所以會形成旋轉力及增加部分升力。
- 十二、接著我們分別改變擾流翼的黏貼位置為天燈的低、中、高位，結果發現擾流翼貼在中位，角度為 20 度時有最大的旋轉力，但超過 20 度時，旋轉力則開始下降，就好像機在超過失速攻角後，升力也會大幅下降一般。而浮力則是會隨著擾流翼角度增加而上升。
- 十三、分析浮力增加的大小與擾流翼重量的關係後發現，浮力增加的大小遠不及擾流翼所需的重量，這樣反而不利於天燈的升空。但若將擾流翼貼在低位，且當其與鉛垂線為 0 度角，卻可增加下側風力的大小，這有助於天燈受側風力時的平衡。
- 十四、我們將天燈裝上上蓋後再進行分析，發現裝上上蓋之後的天燈浮力有明顯上升的效果，且垂直阻力及上側風力都有明顯降低的效果，這樣的形狀可使上下側風力更加平衡。
- 十五、最後則是利用現有的研究數據發展出天燈的飛行模型，藉此預測天燈的飛行高度及落點位置，及受到側風的影響，使天燈在升空之前就可以有一個安全的評估機制，大大降低施放天燈的風險，這可說是前所未有的突破。

柒、未來展望

本次的研究利用自製的測試裝置，成功地取得各種天燈的相關數據，並將數據加以整合，發展出天燈飛行模擬器，若能將更多的天燈數據納入此模擬器，一定可以就天燈飛行安全作科學之分析，降低天燈活動所造成的危險及汙染。

捌、參考資料

- 一、康軒文教事業(2015)。自然與生活科技第四冊。第六章 力。台北：康軒文教事業。
- 二、康軒文教事業(2015)。自然與生活科技第五冊。第三章 功與能。台北：康軒文教事業。
- 三、林浚傑等。中華民國第 43 屆中小學科學展覽作品輯「願望之翼-天燈飛行之探討」。
- 四、陳識任等。中華民國第 53 屆中小學科學展覽作品輯「天燈密碼」。
- 五、林源堂(2000)。陀螺天燈轉速控制之探討。物理雙月刊。(22 卷 1 期)。2000 年 2 月。
- 六、周鑑恆(2013)。走馬天燈。物理雙月刊。(35 卷 2 期)。2013 年 4 月。
- 七、葉泰和。台灣風場風能評估方法分析。新能源施工處。

【評語】 030106

完整的小型科學研究計劃，從實驗裝置設計、數據量測、模擬偵測，都具備了。作品呈現技巧也相當不錯。若能到天燈施放實地進行實驗，與所偵測的結果相互印證就更加完美。太空火箭的研發過程也就是如此了。這是一個令人印象深刻的科展作品。