

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 物理科

030117

「翅」大招風-摺翅風力發電研究

學校名稱：桃園市立桃園國民中學

| | |
|---|-----------------------------|
| 作者： 國三 陳翊宇 國三 江旻臻 國三 黃鼎晉 | 指導老師： 陳鼎元 莊馥毓 |
|---|-----------------------------|

關鍵詞：昆蟲翅膀摺疊、風力發電

摘要

本研究起始於**參觀風力發電機後的突發異想**，想要藉由仿生學的靈感設計出可以因應颱風損害的**摺翅風力發電機**，進而找出理想的**摺翅風力發電機原型**。實驗選定了瓢蟲和隱翅蟲兩種昆蟲翅膀進行模擬，利用可摺疊的昆蟲翅膀作為扇葉，配上不同砝碼，探討了不同風速、不同尺寸、開、闔翅膀對轉動及發電效率有何影響，研究詳細記錄了摺翅風扇的表現並探討各項變因對轉動效應的影響，最後討論出理想的摺翅風力發電扇葉。本研究認為**摺翅風力發電機是相當可行的做法**，希望未來能實際應用於風機發電，並推廣仿生學在科學科技的妙用。



壹、 研究動機

七年級下學期校外教學時我們去參觀了風力發電機，並且進到發電機內部，講師更是詳細講解風力發電機的構造跟原理，從那次參觀之後我們就對風力發電這樣的綠能科技倍感興趣，更想要進一步去了解風力發電更多知識，研讀相關文獻才知道原來風力發電的扇片設計是利用仿生學，以鯨魚的鰭肢為原型來設計，以減少紊流阻力。而台灣每到颱風時節，風力發電機都面臨著損壞的風險，這就讓我們有了一些想法，那為何不試著做做看可以摺疊的風力發電機呢？基於摺疊需求，我們也試著結合仿生學，讓風扇扇葉模擬昆蟲翅膀的摺疊，來防止扇葉因風災損毀，但是其成效又會是如何呢？我們又會從中發現什麼意料之外的事呢？就因為有了這些疑問，開啟了我們一連串的實驗。

貳、 研究目的

- 一、風速對摺翅扇葉轉動及發電效率有何影響
- 二、摺翅尺寸大小對扇葉轉動及發電效率有何影響
- 三、開、闔翅膀對轉動及發電效率有何影響
- 四、翅膀種類對扇葉轉動有何影響
- 五、找出理想的摺翅風力發電機原型

參、 理論探討

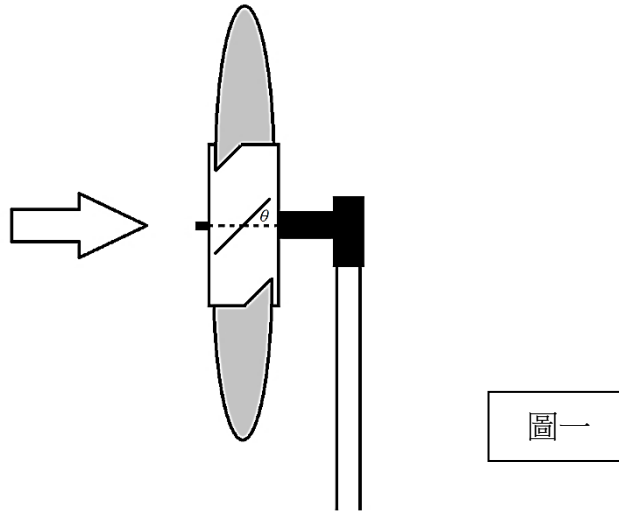
一、扇葉轉動的物理原理推導

當風扇葉片受風力作用時，會產生一力矩(τ)，推動風扇開始轉動，轉動初期會有一角加速度 α ，當經過一段時間 t 後，系統因為風的阻力及發電機齒輪組的摩擦力而達到平衡，此時風扇之角動量為 L ，風扇會以約略固定的角速度 ω 作旋轉。我們可以用以下的公式來描述其運動行為：

$$\text{角速度: } \omega = \frac{d\theta}{dt}, \text{ 角加速度: } \alpha = \frac{d\omega}{dt}, \text{ 轉動慣量: } I = \sum m_i r_i^2$$

$$\text{角動量: } L = I\omega, \text{ 力矩: } \tau = I\alpha = Fr, \text{ 。}$$

1. 當風力越大，產生的力矩 τ 越大，初始時產生的角加速度 α 越大。但是初始產生的角加速度 α 越大不代表之後轉動平衡時的角速度 ω 越大，必須看角加速度 α 作用的時間而定。
2. 角速度 ω 越大，風扇轉動的速度越快，理論上發電量亦越大，但實際情形需考慮發電機組內部的阻力。
3. 以角動量公式來看， $L = I\omega$ ，當 L 相同時， I 越小，則 ω 越大。故當葉片越輕，或者越靠近中心時(扇葉收闔)，其轉動慣量 I 會越小，表示轉動速率加快。
4. 在分析扇葉受風轉動的情形時，先以不會變形的平板葉片來分析，且暫時不考慮流體力學中紊流的影響，下圖為風扇迎風，其中扇葉與風向夾角 θ 的示意圖，當 θ 為 0° 時表示扇葉不受風， θ 為 90° 時表示扇葉全部面積與風向垂直，均能有效受風。



圖一

5. 將模型簡化如上圖一所示，面積 A ，質量為 m 。僅計算一個葉片，假設葉片承受一均勻分佈風壓 p ，總風力 $F=p \times A$ 。有效正向力 $F_{\theta}= p \sin\theta \times A = F \sin\theta$ ，由以此角度旋轉之力矩

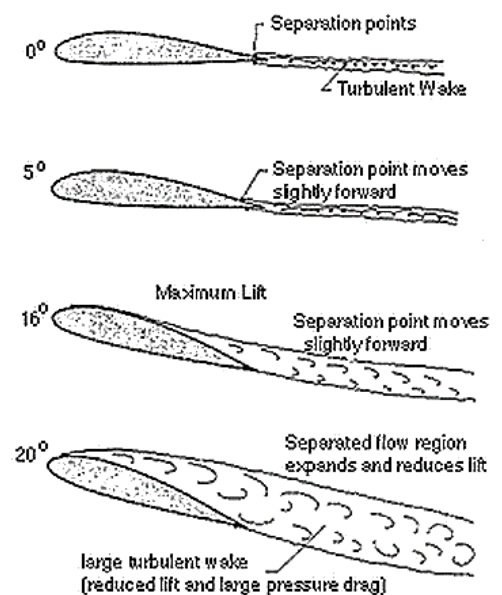
$$\tau_{\theta} = \int p \sin\theta \Delta A dr$$

其中 r 為每一個力作用的微小面積 ΔA 到轉軸支點的距離，須再轉換為有效力矩 τ_z ， $\tau_z = \tau_{\theta} \times \cos\theta$ ，故 $\tau_z = \cos\theta \int p \sin\theta \Delta A dr$ 。

6. 但風扇葉片轉動時會有風阻，風阻會降低轉動速率，故需要考慮風阻產生之力矩 τ' ， $\tau' \propto \kappa A \cos\theta r^3 \omega^2$ ， κ 為流體黏滯常數。
7. 此外因為風力施加在轉軸上的正向力，也會產生摩擦力，連帶產生些微降低轉動的力矩 $\tau_k = \mu_k (p \sin\theta A) \times (\pi r'^2)$ ，其中 r' 為轉軸的微小半徑。
8. 經由理論的探討，當無發電阻力時，達轉動平衡時 $\tau_z = \tau' + \tau_k$ 。若考慮發電時所額外增加的阻力將更為複雜，就需加入由電磁阻力所造成的力矩。

二、紊流的影響

- 紊流是流體的一種流動狀態。當流速很小時，流體分層流動，互不混合，稱為層流；逐漸增加流速，流體的流線開始出現波浪狀的擺動；當流速增加到很大時，流線不再清楚可辨，流場中有許多小漩渦，稱為亂流或紊流。
- 紊流使得風扇的轉動更加複雜，除了考慮流體的黏滯性之外，因為扇葉與風向夾角所導致的紊流也會降低風扇的轉動，如圖二。
- 除了風扇轉動產生的亂流，自然環境的亂流也會影響風扇轉動，因此在大型亂流場域或颱風時，風力發電機會停止發電並剎車以免傷害機件。



圖二

三、從風車到風力發電機

1. 風力發電機採用空氣動力學原理，是利用風力帶動葉片旋轉，就像飛機的機翼一樣，再透過將旋轉的速度提升，來促使發電機發電。對於所有風力發電機，風能與風速立方成正比。風能是移動的空氣的動能。質量為 m 且速度為 v 的動能為

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m v^2$$

空氣質量 m 可以根據以下公式從空氣密度 ρ 和空氣量 V 中確定

$$m = \rho V$$

$$E_{kin, wind} = \frac{1}{2} V \rho v^2$$

功率是能量除以時間。我們考慮一個小的時間 Δt ，其中，所述空氣行進的距離為 $v \Delta t$ 流過。我們將該距離乘以風力發電機的風扇面積 A ，得出的體積為

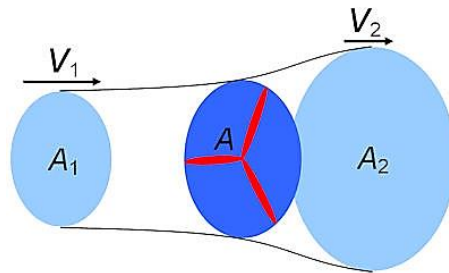
$$\Delta V = A v \Delta t$$

在短時間內驅動風力發電機。則風力為

$$P_{wind} = \frac{E_{kin, wind}}{\Delta t} = \frac{\Delta V \rho v^2}{2 \Delta t} = \frac{\rho A v^3}{2}$$

風力隨風速的立方增加。換句話說：將風速提高一倍將獲得八倍的風力。因此，選擇“有風”位置對於風力發電機非常重要。

有效可用風力小於上式所示。由於沒有空氣跟隨，風力發電機後面的風速不能為零。因此，只能提取一部分動能。



圖三

如圖三，風力發電機之前的風速大於之後的風速，因為質量流必須是連續的，所以風力發電機之後的面積 A_2 大於 之前的面積 A_1 。有效功率是兩風力之間的差：

$$P_{eff} = P_1 - P_2 = \frac{\Delta V \rho}{2 \Delta t} (v_1^2 - v_2^2) = \frac{\rho A}{4} (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2)$$

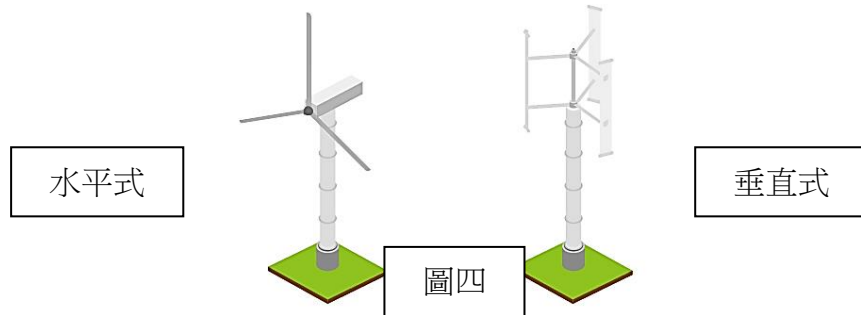
如果兩個速度之差為零，則我們沒有淨效率。如果差異太大，則表示氣流通過風扇時遭遇太多阻礙。我們以功率係數 C_P 代表從風中可提取用來發電的比例。

$$C_P = \frac{P_{eff}}{P_{wind}} = \frac{(v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2)}{2 v_1^3} = \frac{(1 + x) (1 - x^2)}{2}$$

為了找到給出 C_P 最大值的 x 值，我們對 x 取導數並將其設置為零。當 $x = 1/3$ 時，可得到最大值。因此理想最大功率係數為

$$C_P = \frac{P_{eff}}{P_{wind}} = \frac{16}{27} \approx 59\%$$

2. 大型風力發電機通常採用"水平軸"型式，如圖四，它由風葉輪、變速箱(加速齒輪箱)、發電機、偏移裝置、控制系統、塔架等部件所組成。風葉輪的作用是将風能轉換為機械能，它是由氣體流動性能良好的葉片裝在輪軸上所組成，低速轉動的風葉輪通過傳動系統經由加速齒輪箱來增速，將動力傳導給發電機。上述這些組件都安裝在機艙內，整個機艙由高大的塔架支撐，由於風向會經常改變，為了有效地利用風能，必須要有自動迎風的裝置，根據風向感測儀測得的風向信號，保持正確對向迎風面。我們想設計的摺翅風扇主要用來防範風災的損害，因大型風力發電機受風損較為顯著，因此我們將摺翅概念用在水平式風力發電機上。



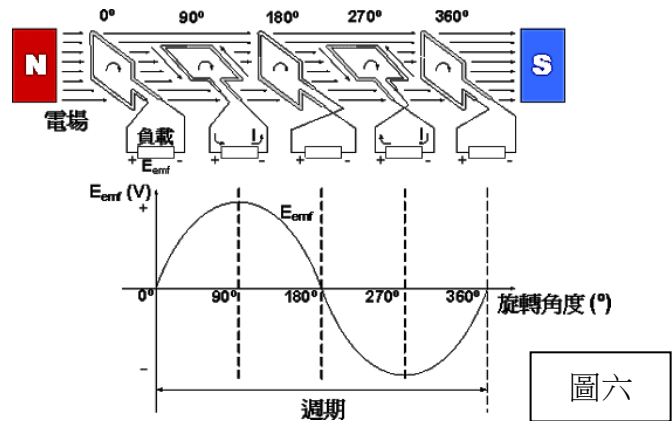
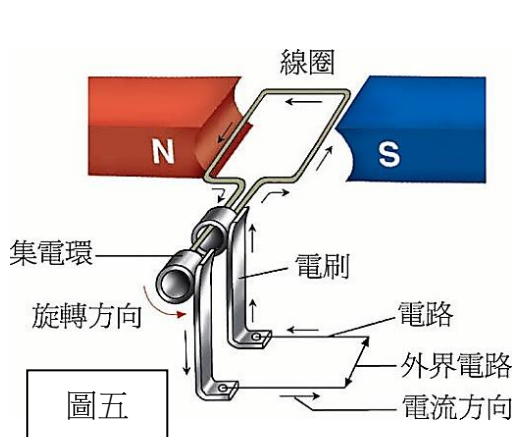
3. 發電機原理

發電機是將動能轉變為電能的裝置

(1) 構造：

- a. 場磁鐵：產生磁場的磁鐵。
- b. 電樞：置於磁鐵中間，能自由轉動的多匝線圈。
- c. 集電環：連接線圈的兩個金屬環。
- d. 電刷：與集電環微微接觸，當感應電流產生，此電流可經電刷導出。

(2) 原理：以動力使線圈在磁鐵的兩極間快速轉動時，通過線圈的磁場大小就不斷的隨時間改變，此時線圈就有感應電流產生。理論上感應的線圈數愈多，轉動的速度越快則產生的電能越多，如圖五、圖六。



4. 電磁阻尼指的是當導體在磁場中運動時，感應電流會使導體受到安培力，安培力的方向總是阻礙導體的運動的這種現象。電磁阻尼現象源於電磁感應原理，巨觀現象即為當閉合導體與磁極發生相對運動時，兩者之間會產生電磁阻力，阻礙相對運動。這一現象也可以用楞次定律解釋之。

四、國內相關科展研究成果

關於風力發電的相關研究以及科展可以說是琳瑯滿目，從地方區賽到全國賽均有許多師生投注了相當多的心力，試圖建構更好的風力發電原型，以此拓展綠能科技達到善待地球的目的。我們細細爬文扣除掉垂直式風力發電機的相關研究，也找到幾篇與我們實驗相關性較高的科展報告作為實驗設計參考。

1. 中華民國第 58 屆中小學科學展覽會，國小組物理科，洞動扇葉最來電：主要探討風力發電機扇葉上打洞鏤空是否可提高發電量。發現扇葉數量為三片，扇葉形狀為橢圓形，裝置角度為 80° 或 100° ，打 3 或 2 個洞，立體樣式為由小到大，洞平均分配打在扇葉上，洞排列方式可以利用右斜向左、左斜向右，且串聯可提高發電效益。

我們的發現：葉片的數量、角度、形狀對轉動影響明顯。

2. 中華民國第 54 屆中小學科學展覽會，國小組生活與應用科學科，神「風」特攻隊－扇葉與風力發電：實驗結果發現長度以扇葉 10cm 的效率最好、扇葉數量以 4 片扇葉的風扇效率最好、面風角度的扇葉以角度 20° 的效率最好、承軸厚度以 1.2cm 的承軸效率最好、材質以木片的效率最好。

我們的發現：葉片的數量、角度、形狀對轉動影響明顯。

3. 中華民國第 48 屆中小學科學展覽會，國中組生活與應用科學科，風力發電之葉片設計及其應用：藉由轉動的原理，估算出葉片的迎風角度在 0° 至 45° 之間會有最佳的轉動效果，經由實驗的測試發現葉片迎風角度在 20° 左右，可以得到最佳的轉動效果；也由轉動的原理，在相同的風力下，轉動慣量(由葉片質量及葉片距轉軸距離所決定)愈小轉動會越快。

我們的發現：葉片的迎風角度在 0° 至 45° 之間會有最佳的轉動效果。

4. 中華民國第 46 屆中小學科學展覽會，國小組物理科，風馳電掣：直流電動機內部線圈的匝數越多，電動機轉動後所發出的電壓越大；但是，相對地也必須有比較大的風能，才能使其轉動。葉片數目、尺寸大小和葉片迎風的角度對風扇能否轉動有很大影響，值得繼續探討研究。

我們的發現：可藉由調整電動機內部線路改變輸出電壓。

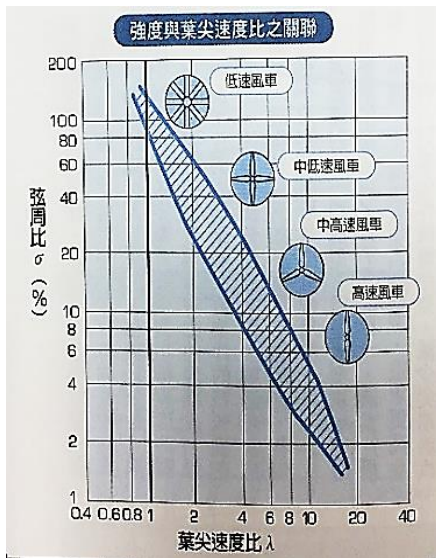
5. 臺北市第 44 屆中小學科學展覽會，國小組物理科，風從哪裡來扇葉的秘密：本研究發現裝在馬達上的風扇風力不論是用吹力或吸力都會隨著面積和增加而增加趨勢。結論所有因素，最佳組合為 2 片扇葉、吹力角度 140° 梯形扇葉、吸力角度 50° 的三角形扇葉。

我們的發現：葉片面積愈大越能增加增加轉動。

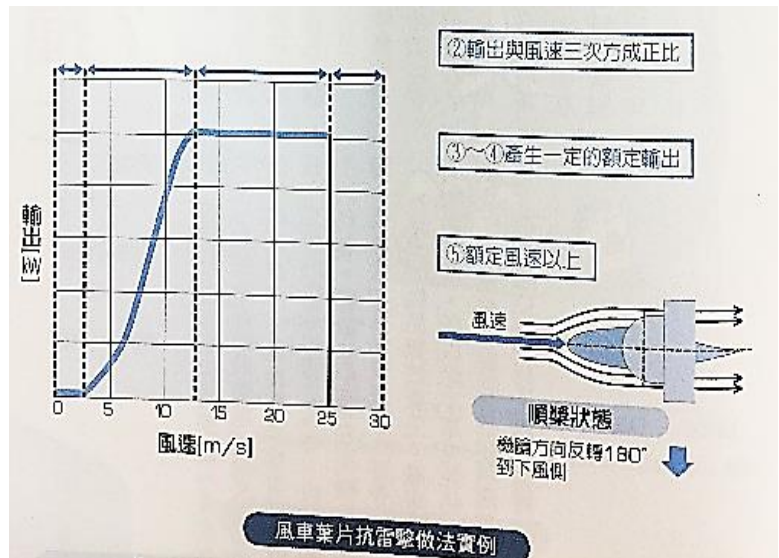
綜觀歷屆的研究成果，發現大多數都著重在風扇扇葉的數量、形狀、角度之設計，實驗目的也以高發電產能為取向，很可惜的是這些模擬實驗的扇葉迎風角度、扇葉數量並無法推廣到真實的風力發電，另外大多數的風力發電機也多採取固定式的裝置，也就是架設好之後只有啟動運轉或停止關閉兩種選擇，沒有因應環境變形的設計，而本研究主要目標為引入仿生學，利用摺翅造成的面積差異來降低風災損耗，並且也考量發電產能的效率，希望得到摺疊型式風力發電的可行性和良好原型，與先前各科展的研究方向均不同。

五、風力發電專書的研究成果

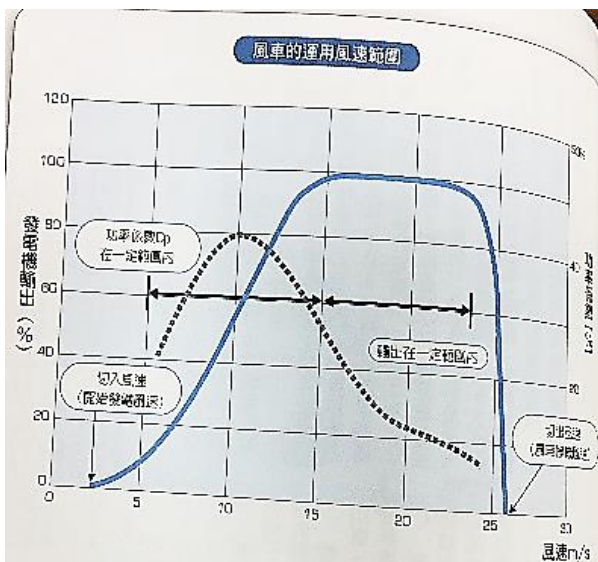
查訪坊間關於風力發電的專書，有一本世茂出版社出版，牛山泉著，李漢庭譯的專書，書中對於現行的風力發電均有實務性的介紹，我們從中發現許多有趣的資訊，除了比對目前台灣所採用的風力發電機以外，我們也思考摺翅扇葉在現行水平式風力發電機的使用效能以及設計構想會不會和當前的實務經驗背道而馳，進而構思我們的實驗設計。



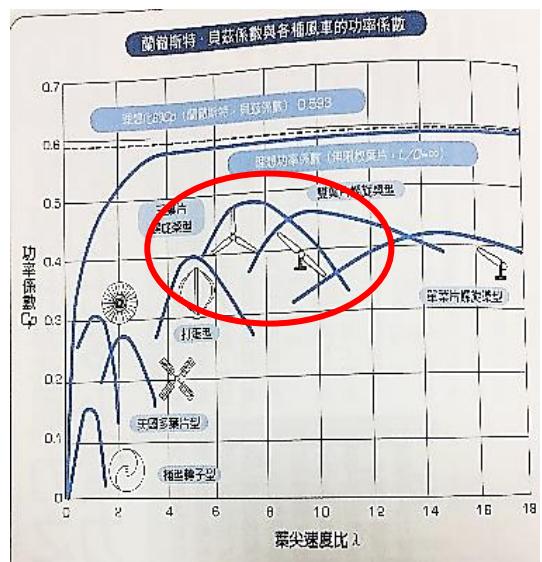
圖七



圖八



圖九



圖十

從這本專書的介紹中，我們的發現：

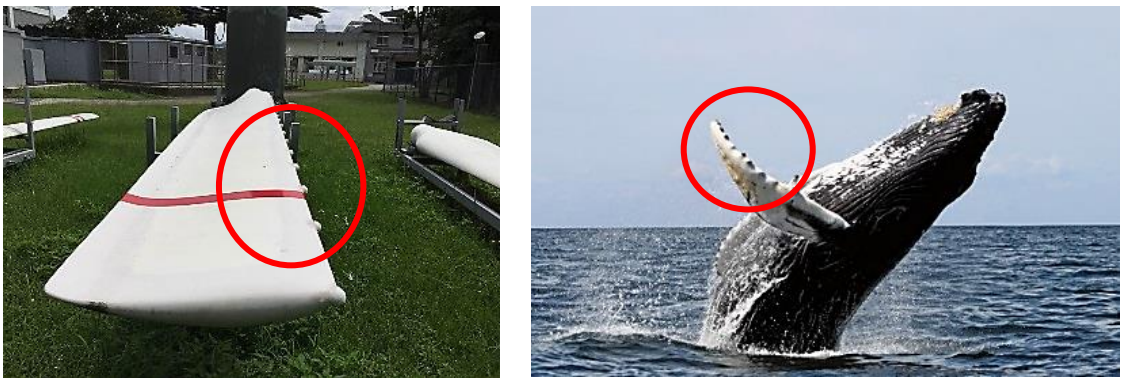
1. 從經濟性與性能的觀點來看，大量細長葉片高速旋轉，是理想的型態；但是從強度與噪音限制來看，就會碰到葉片數量下限(三片)與轉速上限的問題。(圖七)

2. 風能與風速三次方成正比，與風扇面積成正比，風車後方的氣流並非完全靜止，因此目前實務上最高性能的風車效率也不過 53% 左右。(圖八)
3. 無論是大型風車或小型風車，沒有風當然不會轉，但除非有特別加寬葉片之類的加工，否則在 2m/s 以下也不會轉，換言之啟動風速都約在 2m/s。(圖九)
4. 台灣線型採用的三葉風力發電機適用於葉尖週速比 λ 6~10，葉尖週速比 λ 是用來表述風電機特性的一個十分重要的參數。它是風扇葉片尖端線速度與風速之比。(圖十)

六、仿生學

仿生學是透過了解生物的結構和功能原理，來研製新的機械和新技术，或解決機械技術的難題。生物通過自然選擇在地球悠久的歷史中演化出了適應性強的結構和材料。仿生技術就是以生物解決方案啟發的新技术。人類自從工業革命之後，開始製造許多人為的產品及機械，但是其實自然界中有許多值得借鏡的好方法，仿生學並非只是單純的複製自然生物的特徵，而是將其優點應用結合在所需的科技新領域。除此之外，仿生科技具有成本低、效能高、廢棄物或毒素的產出少的優勢。

傳統的空气動力學理論認為，具有筆直尖銳邊緣的扇葉效率最高。但科學家意外發現座頭鯨鰭肢的一側有很多小隆起，此小隆起形狀應用到風車扇葉的設計上，如圖十一，結果令人驚訝風力發電機在加裝了有隆起的扇葉之後，有效降低紊流，效率增加了 20%。



圖十一

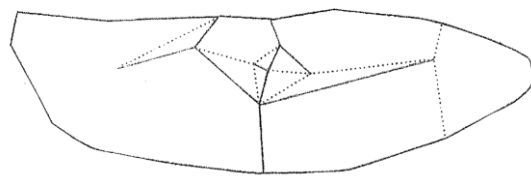
另一個仿生學的例子是日本高速列車新幹線 500 系列的流線型設計，啟發此設計的仿生來源是根據翠鳥的鳥喙在俯衝水面掠食的空气動力學模型，並以此進行建模，如圖十二。



圖十二

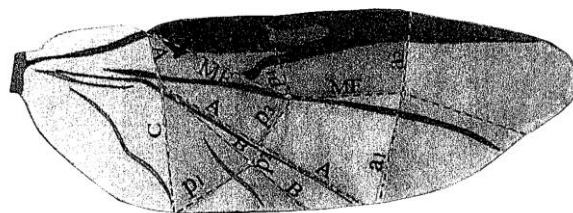
本實驗為了製作可摺疊的風扇，也希望利用仿生學，向自然界的生物取經，在諸多討論與比較之後，我們選定了瓢蟲以及隱翅蟲兩種均為鞘翅目的昆蟲摺疊翅膀。使用昆蟲翅膀的另一個理由是昆蟲翅膀多為薄膜狀，因此可以藉由平面厚紙的剪裁即可模擬，若是選用鳥類或蝙蝠的羽翼，恐怕須考量其立體結構在流體力學上的作用，礙於設備及技術，因此一開始我們就鎖定從昆蟲摺疊翅膀中做選擇。

1. 瓢蟲有兩層翅膀，外層是有斑點、硬殼，具有保護作用的鞘翅，內層是飛行用的軟膜翅膀，由於平時外層鞘翅都是緊閉狀態，看不到內層翅膀變換動作的過程，因此瓢蟲能迅速開合內層翅膀(只需要 0.1 秒)，並在飛行中保持翅膀的力量和硬度。日本一群研究人員發現相較於其他昆蟲，瓢蟲的翅膀具有相對優異的靈活性和力量的平衡。研究人員並認為，這項發現可以被應用於輕量化折疊傘，參看圖十三。



圖十三

2. 隱翅蟲是一種在全球廣泛分布的小型昆蟲，因翅膀不可見而得名。日本研究人員弄清楚了隱翅蟲的「隱翅」機制，有望在此基礎上開發出新型人造衛星上的摺疊太陽能電池板以及雨傘。隱翅蟲後翅摺疊後的面積只相當於展開時的五分之一，展開只需要 0.1 秒，摺疊也僅需要 1 秒。研究指出隱翅蟲一瞬間張開和收縮後翅的方法以及身體的結構都是非常獨特的。後翅摺疊後不僅面積小，而且能夠在一瞬間展開，摺疊後也不會失去韌性和強度，參看圖十四。



圖十四

這兩種昆蟲翅膀都兼具了可以快速收摺，翅膀反覆摺疊仍可維持堅固強韌的優點，而且這兩種翅膀也已被日本研究單位評估適合進一步應用到摺疊雨傘、太陽能板等領域，因此我們認為也相當適合作為風力發電的摺翅扇葉的設計原型。

肆、 研究工具



工業用風扇



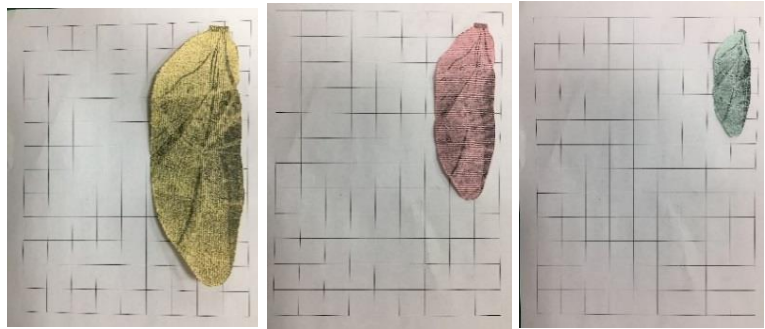
碼錶



風速計



轉速計



各尺寸模擬昆蟲翅膀(大、中、小)



砝碼 5g、10g、20g



膠帶



1mm 鋁線



捲尺



風扇基座



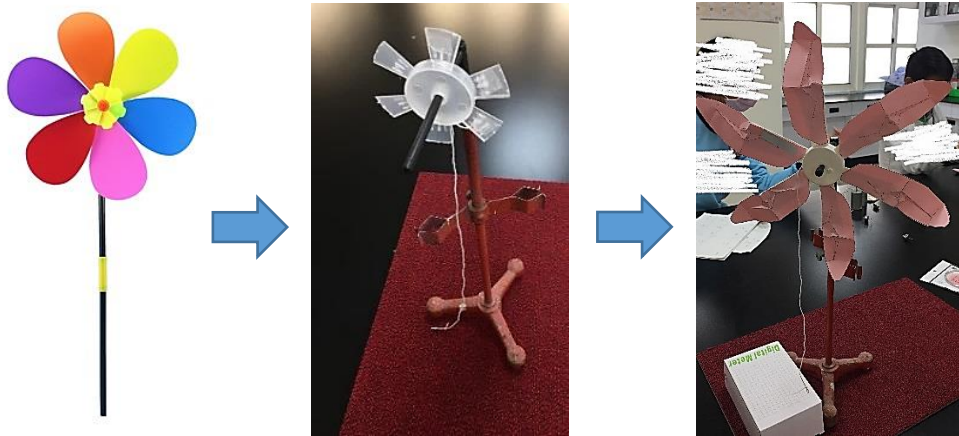
電子秤

伍、 研究過程與方法

一、風力發電模擬裝置

1. 實驗裝置

- (1) 風扇的原型使用市售的六葉風車，並將其原本的扇葉摘除，僅留下骨架，並接於一個穩定的鐵製底座，以此作為水平軸式風力發電機的風扇轉子部分，最後在扇葉的地方接上我們所仿製的昆蟲翅膀，如圖十五。



圖十五

- (2) 為了測量轉動的快慢，我們使用轉速計，使用時必須在扇葉某處先貼上的反光貼紙，藉由偵測反光的頻率來測得轉動快慢，單位為 rpm，代表每分鐘轉了幾圈。偵測圖示，如圖十六。



圖十六

2. 在選擇摺翅風扇材質時，我們嘗試了多種紙材，一般的影印用紙雖輕薄，但是強度不夠，受風時變形程度太大。另外堅固的厚紙板雖然耐受度高，但是凹折不易，無法良好摺疊，最後我們使用稍厚且質輕的粉彩紙製作昆蟲摺翅的扇葉，並且可以依照該種昆蟲摺翅時的山線與谷線確實凹折摺疊，為了強化受風，我們使用質輕的鋁線在扇葉背後加裝一條輔助支架，如圖十七，這樣風扇的扇葉就可以順利模擬昆蟲的開展翅膀(圖十八)和閉闔翅膀了(圖十九)。



圖十七



圖十八

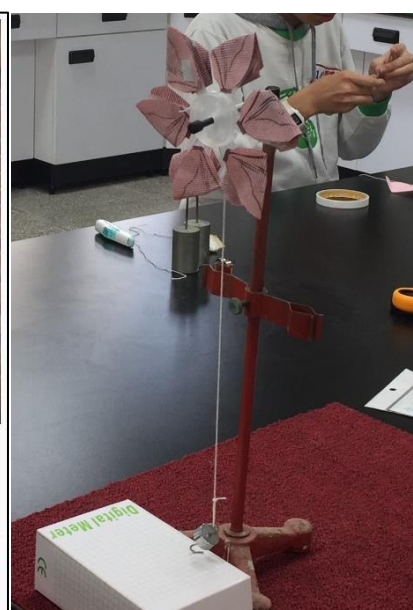


圖十九

3. 另外我們從《原來如此》CCTV 科教 2017 年發布的科學實驗影片(圖二十)中得知風扇的轉速越快不見得發電量就高，參考先前的科展研究作品，在測量發電量時大多直接使用電錶進行量測，但是我們認為這樣無法探討轉子旋轉的電磁阻尼帶來的影響，而且不夠直觀。為了更直截了當看出發電量(能量)的多寡，我們利用國中三年級在力學單元所教到的功與能量的觀念，直接讓風扇轉軸綁上質輕的棉線，棉線另一端接上砝碼，如圖二十一，當風扇轉動時，就會將砝碼拉升，如同舊時代水井打水的轆轤裝置，從能量的觀點來看，當較重的砝碼拉升一定高度時，可獲得較多的重力位能，也就代表風力的能量轉換成砝碼的重力位能，因此發電量越大就能將越重的砝碼拉升，發電量大小與未接上砝碼的空轉速是否有關係，將可由研究數據上得知並討論。



圖二十



圖二十一







除此之外，為了計算發電的功率，我們使用碼錶測量砝碼上升所需時間，藉此求得平均功率，觀察砝碼上升時的模式，前面一小段為加速上升，後面則維持大略等速上升的模式，因此我們上升過程中後段作為計時起迄點，此段高度為 35 公分，以砝碼記錄拉抬所耗時間，並且與轉速計比對看看數據是否合理。



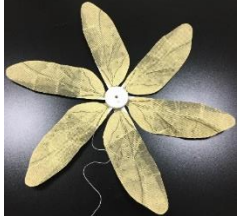



二、各項變因的篩選與控制

1. 先前許多科展研究已經探討過扇葉數量、扇葉角度的影響，因此本研究想專注在開展翅膀與閉闔翅膀間的差異與此仿生構想的可行性評估，所以翅膀數量固定為 6 片，扇葉角度也都沿用原風車設計角度。
2. 為了瞭解開闔翅在不同風速下的表現，因此我們將風速變因定為三個等級：2m/s、3m/s、4m/s。除此之外，我們還特別測量了「最低啟動風速」。我們將最低啟動風速定義為讓風扇由靜止狀態開始轉動的風速。藉由比較各風速下的表現，以及最低啟動風速來探討各型風力發電機的性能和差異。
3. 由前述理論探討中提及的公式可知風力 P_{wind} 與風力發電機的風扇截面成正比。

$$P_{wind} = \frac{E_{kin, wind}}{\Delta t} = \frac{\Delta V \rho v^2}{2 \Delta t} = \frac{\rho A v^3}{2}$$

因為開闔翅之間風扇截面也會跟著改變，為了進一步瞭解風扇截面的影響，因此我們製作了三個尺寸的風扇(開翅時翼展)：大 20.5cm、中 13.6、小 8.5cm。但是由於不同種類的昆蟲摺疊翅膀的方式不同，導致摺疊後的翼展將不一樣，連帶能攫取的風截面將不同，我們也會在後續討論哪一種昆蟲的摺疊比例較適合應用於摺翅風力發電，因此翅膀狀態的變因有兩項：開展翅膀和閉闔翅膀，而昆蟲種類有兩種：瓢蟲和隱翅蟲，如下表所示(圖片大小縮放以中心轉軸為相同尺寸進行調整)。

| 瓢蟲尺寸 | 小 | 中 | 大 |
|------|--|--|---|
| 開展 |  單葉長 8.5cm |  單葉長 13.6cm |  單葉長 20.5cm |
| 閉闔 |  單葉長 4.6cm |  單葉長 7.3cm |  單葉長 11.1cm |

| 隱翅蟲尺寸 | 小 | 中 | 大 |
|-------|--|--|---|
| 開展 |  單葉長 8.5cm |  單葉長 13.7cm |  單葉長 20.4cm |
| 閉闔 |  單葉長 3.0cm |  單葉長 4.9cm |  單葉長 7.1cm |

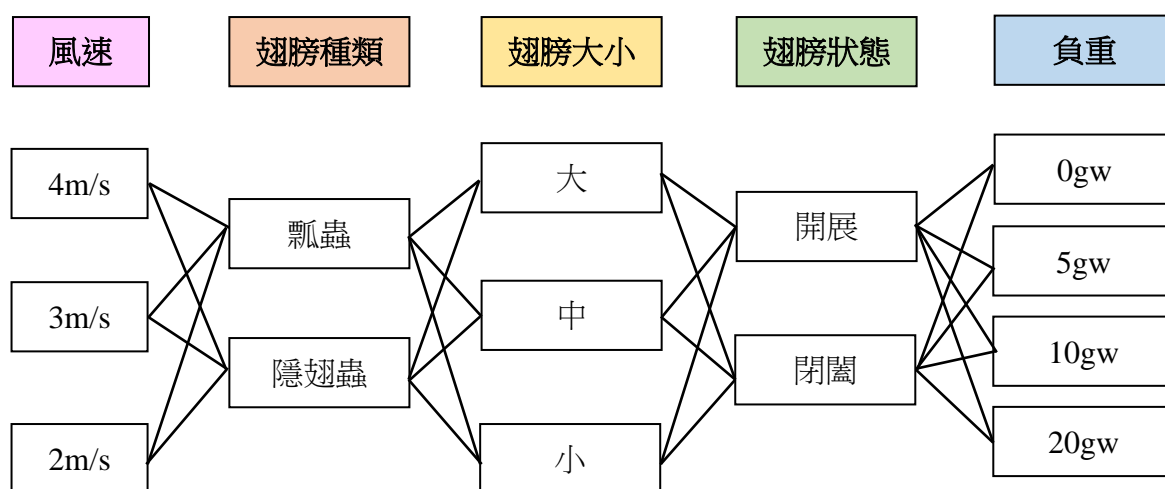
由於所需的昆蟲摺翅數量很多，加上有可能因為實驗耗損，所以實驗初期花費了許多的時間在製作昆蟲摺翅的扇葉(如圖二十二)。但是在製作過程中，也讓我們更加瞭解昆蟲摺翅的機制，參考《洪崴。2017。昆蟲飛行特性與翅翼結構分析探討》的報告中所介紹昆蟲翅膀的膜翅結構，更讓我們相信將其運用在風力發電的扇葉是可行而且具有低成本高耐受度的優點。



圖二十二

4. 我們利用風扇轉動時拉抬砝碼來得知風力的大小，在此我們選用了三種不同質量的砝碼，加上沒有掛上砝碼的空轉狀態，因此負重變因可細分為四個程度：0gw、5gw、10gw 以及 20gw。

下圖(圖二十三)為本次實驗各變因的一覽圖，共計 144 組，每一組實驗至少重覆 5 次，我們將記錄轉速、拉抬砝碼所需的時間，並求取平均，也仔細觀察風扇運轉的狀況，希望藉由交叉比對可以得知各變因的影響。

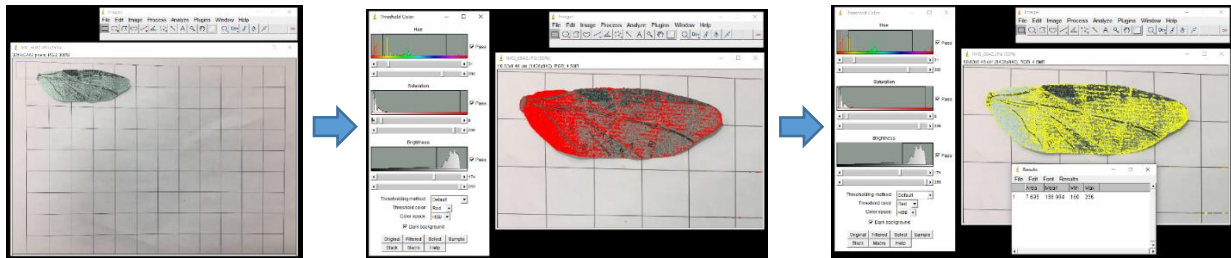


圖二十三


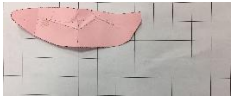
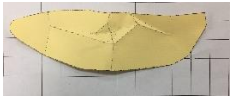



三、翅膀面積估算






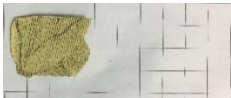
為了探討翅膀面積對於風扇轉動的影響，所以我們使用 **imageJ** 來測量各個翅膀的面積，因為翅膀是不規則圖案，透過 **imageJ** 的比例以及像素計算可以快速得出翅膀的面積。操作使用流程大致如下：

1. 先將待測面積翅膀放在方格紙上拍照。
2. 以 **imageJ** 打開照片圖檔，並輸入方格紙的方格尺寸。
3. 利用顏色差異來區隔待測物邊界，調整到能涵蓋翅膀的最佳面積數值。
4. 計算出此翅膀的面積，並獲得數值。



依照此方法，我們陸續測得各尺寸翅膀的開展面積以及閉闔面積，彙整如下：

| 瓢蟲尺寸 | 小 | 中 | 大 |
|------|--|---|---|
| 開展 |  單葉面積 15.84cm ² |  單葉面積 44.31cm ² |  單葉面積 103.35cm ² |
| 閉闔 |  單葉面積 8.41cm ² |  單葉面積 21.27cm ² |  單葉面積 47.87cm ² |

| 隱翅蟲尺寸 | 小 | 中 | 大 |
|-------|--|---|---|
| 開展 |  單葉面積 18.79cm ² |  單葉面積 52.11cm ² |  單葉面積 121.71cm ² |
| 閉闔 |  單葉面積 4.84cm ² |  單葉面積 13.78cm ² |  單葉面積 34.23cm ² |

陸、 研究結果與討論

一、實驗結果與數據概覽

| 瓢蟲 size小 | 開展 | 長度 | 8.5 | cm | | 閉闔 | 長度 | 4.6 | cm | |
|-------------|----|--------|-----------------|---------|------|----|-------|-----------------|---------|--------|
| | 面積 | 15.84 | cm ² | | | 面積 | 8.41 | cm ² | | |
| | 負重 | 最低起動 | 風速 | 平均轉速 | 拉抬耗時 | 負重 | 最低起動 | 風速 | 平均轉速 | 拉抬耗時 |
| | 0 | 0.70 | | | | 0 | 0.80 | | | |
| | 0 | | 2 | 2443.33 | 0.43 | 0 | | 2 | 2882.67 | 0.36 |
| | 0 | | 3 | 5050.83 | 0.21 | 0 | | 3 | 5050.83 | 0.21 |
| | 0 | | 4 | 4896.17 | 0.21 | 0 | | 4 | 5002.43 | 0.21 |
| | 5 | 1.50 | | | | 5 | 4.40 | | | |
| | 5 | | 2 | 117.35 | 8.95 | 5 | | 2 | × | × |
| | 5 | | 3 | 458.52 | 2.29 | 5 | | 3 | × | × |
| | 5 | | 4 | 857.14 | 1.23 | 5 | | 4 | × | × |
| | 10 | 2.90 | | | | 10 | × | | | |
| | 10 | | 2 | × | × | 10 | | 2 | × | × |
| | 10 | | 3 | 122.43 | 8.58 | 10 | | 3 | × | × |
| | 10 | | 4 | 458.52 | 2.29 | 10 | | 4 | × | × |
| | 20 | × | | | | 20 | × | | | |
| | 20 | | 2 | × | × | 20 | | 2 | × | × |
| | 20 | | 3 | × | × | 20 | | 3 | × | × |
| | 20 | | 4 | × | × | 20 | | 4 | × | × |
| 瓢蟲 size中 | 開展 | 長度 | 13.6 | cm | | 閉闔 | 長度 | 7.3 | cm | |
| | 面積 | 44.31 | cm ² | | | 面積 | 21.27 | cm ² | | |
| | 負重 | 最低起動 | 風速 | 平均轉速 | 拉抬耗時 | 負重 | 最低起動 | 風速 | 平均轉速 | 拉抬耗時 |
| | 0 | 0.20 | | | | 0 | 1.20 | | | |
| | 0 | | 2 | 756.00 | 1.39 | 0 | | 2 | 1920.60 | 0.55 |
| | 0 | | 3 | 1235.00 | 0.85 | 0 | | 3 | 2582.00 | 0.41 |
| | 0 | | 4 | 1531.00 | 0.69 | 0 | | 4 | 2918.60 | 0.36 |
| | 5 | 1.60 | | | | 5 | 1.90 | | | |
| | 5 | | 2 | 416.67 | 2.52 | 5 | | 2 | 113.92 | 9.22 |
| | 5 | | 3 | 737.72 | 1.42 | 5 | | 3 | 248.23 | 4.23 |
| | 5 | | 4 | 636.36 | 1.65 | 5 | | 4 | 216.94 | 4.84 |
| | 10 | 1.70 | | | | 10 | × | | | |
| | 10 | | 2 | 235.27 | 4.46 | 10 | | 2 | × | × |
| | 10 | | 3 | 572.83 | 1.83 | 10 | | 3 | × | × |
| | 10 | | 4 | 419.58 | 2.50 | 10 | | 4 | × | × |
| | 20 | 1.90 | | | | 20 | × | | | |
| | 20 | | 2 | 134.74 | 7.79 | 20 | | 2 | × | × |
| | 20 | | 3 | 421.18 | 2.49 | 20 | | 3 | × | × |
| | 20 | | 4 | 361.69 | 2.90 | 20 | | 4 | × | × |
| 瓢蟲 size大 | 開展 | 長度 | 20.5 | cm | | 閉闔 | 長度 | 11.1 | cm | |
| | 面積 | 103.35 | cm ² | | | 面積 | 47.87 | cm ² | | |
| | 負重 | 最低起動 | 風速 | 平均轉速 | 拉抬耗時 | 負重 | 最低起動 | 風速 | 平均轉速 | 拉抬耗時 |
| | 0 | 0.50 | | | | 0 | 1.10 | | | |
| | 0 | | 2 | 1724.67 | 0.61 | 0 | | 2 | 569.29 | 1.84 |
| | 0 | | 3 | 1977.33 | 0.53 | 0 | | 3 | 810.83 | 1.29 |
| | 0 | | 4 | 2402.17 | 0.44 | 0 | | 4 | 1187.83 | 0.88 |
| | 5 | 0.80 | | | | 5 | 1.60 | | | |
| | 5 | | 2 | 350.35 | 3.00 | 5 | | 2 | 41.68 | 25.19 |
| | 5 | | 3 | 395.73 | 2.65 | 5 | | 3 | 107.88 | 9.73 |
| | 5 | | 4 | 301.44 | 3.48 | 5 | | 4 | 199.37 | 5.27 |
| | 10 | 1.00 | | | | 10 | 1.80 | | | |
| | 10 | | 2 | 365.01 | 2.88 | 10 | | 2 | 6.93 | 151.50 |
| | 10 | | 3 | 353.93 | 2.97 | 10 | | 3 | 69.77 | 15.05 |
| | 10 | | 4 | 339.44 | 3.09 | 10 | | 4 | 181.24 | 5.79 |
| | 20 | 1.40 | | | | 20 | 3.40 | | | |
| | 20 | | 2 | 355.13 | 2.96 | 20 | | 2 | × | × |
| | 20 | | 3 | 328.13 | 3.20 | 20 | | 3 | × | × |
| | 20 | | 4 | 350.00 | 3.00 | 20 | | 4 | 92.81 | 11.31 |

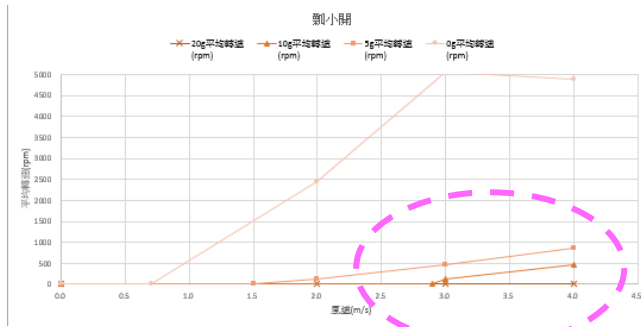
單位 gw m/s m/s rpm s 單位 gw m/s m/s rpm s

| 隱翅蟲 size小 | 開展 | 長度 | 8.5 | cm | | 閉闔 | 長度 | 3 | cm | | |
|--------------|----|------|--------|-----------------|------|----|------|-------|-----------------|-------|------|
| | | 面積 | 18.79 | cm ² | | | 面積 | 4.84 | cm ² | | |
| | 負重 | 最低起動 | 風速 | 平均轉速 | 拉抬耗時 | | 負重 | 最低起動 | 風速 | 平均轉速 | 拉抬耗時 |
| | 0 | 0.08 | | | | 0 | 1.90 | | | | |
| | 0 | | 2 | 1841.20 | 0.57 | 0 | | 2 | 582.00 | 1.80 | |
| | 0 | | 3 | 3336.66 | 0.31 | 0 | | 3 | 1907.60 | 0.55 | |
| | 0 | | 4 | 5029.40 | 0.21 | 0 | | 4 | 1624.60 | 0.65 | |
| | 5 | 1.40 | | | | 5 | 5.40 | | | | |
| | 5 | | 2 | 259.90 | 4.04 | 5 | | 2 | × | × | |
| | 5 | | 3 | 628.74 | 1.67 | 5 | | 3 | × | × | |
| | 5 | | 4 | 870.21 | 1.21 | 5 | | 4 | × | × | |
| | 10 | 2.40 | | | | 10 | × | | | | |
| | 10 | | 2 | × | × | 10 | | 2 | × | × | |
| | 10 | | 3 | 425.69 | 2.47 | 10 | | 3 | × | × | |
| | 10 | | 4 | 588.24 | 1.79 | 10 | | 4 | × | × | |
| | 20 | 3.20 | | | | 20 | × | | | | |
| | 20 | | 2 | × | × | 20 | | 2 | × | × | |
| | 20 | | 3 | × | × | 20 | | 3 | × | × | |
| | 20 | | 4 | 170.29 | 6.17 | 20 | | 4 | × | × | |
| 隱翅蟲 size中 | 開展 | 長度 | 13.7 | cm | | 閉闔 | 長度 | 4.9 | cm | | |
| | | 面積 | 52.11 | cm ² | | | 面積 | 13.78 | cm ² | | |
| | 負重 | 最低起動 | 風速 | 平均轉速 | 拉抬耗時 | | 負重 | 最低起動 | 風速 | 平均轉速 | 拉抬耗時 |
| | 0 | 0.60 | | | | 0 | 1.30 | | | | |
| | 0 | | 2 | 627.00 | 1.67 | 0 | | 2 | 1183.00 | 0.89 | |
| | 0 | | 3 | 985.00 | 1.07 | 0 | | 3 | 1666.25 | 0.63 | |
| | 0 | | 4 | 1081.00 | 0.97 | 0 | | 4 | 1893.00 | 0.55 | |
| | 5 | 0.80 | | | | 5 | 2.70 | | | | |
| | 5 | | 2 | 320.12 | 3.28 | 5 | | 2 | × | × | |
| | 5 | | 3 | 444.92 | 2.36 | 5 | | 3 | 142.66 | 7.36 | |
| | 5 | | 4 | 490.65 | 2.14 | 5 | | 4 | 257.35 | 4.08 | |
| | 10 | 1.00 | | | | 10 | × | | | | |
| | 10 | | 2 | 248.23 | 4.23 | 10 | | 2 | × | × | |
| | 10 | | 3 | 399.24 | 2.63 | 10 | | 3 | × | × | |
| | 10 | | 4 | 530.30 | 1.98 | 10 | | 4 | × | × | |
| | 20 | 1.80 | | | | 20 | × | | | | |
| | 20 | | 2 | 268.54 | 3.91 | 20 | | 2 | × | × | |
| | 20 | | 3 | 318.18 | 3.30 | 20 | | 3 | × | × | |
| | 20 | | 4 | 486.11 | 2.16 | 20 | | 4 | × | × | |
| 隱翅蟲 size大 | 開展 | 長度 | 20.4 | cm | | 閉闔 | 長度 | 7.1 | cm | | |
| | | 面積 | 121.71 | cm ² | | | 面積 | 34.23 | cm ² | | |
| | 負重 | 最低起動 | 風速 | 平均轉速 | 拉抬耗時 | | 負重 | 最低起動 | 風速 | 平均轉速 | 拉抬耗時 |
| | 0 | 0.01 | | | | 0 | 1.20 | | | | |
| | 0 | | 2 | 938.40 | 1.12 | 0 | | 2 | 475.00 | 2.21 | |
| | 0 | | 3 | 1385.33 | 0.76 | 0 | | 3 | 726.17 | 1.45 | |
| | 0 | | 4 | 1824.80 | 0.58 | 0 | | 4 | 1264.33 | 0.83 | |
| | 5 | 0.10 | | | | 5 | 2.80 | | | | |
| | 5 | | 2 | 296.61 | 3.54 | 5 | | 2 | × | × | |
| | 5 | | 3 | 378.51 | 2.77 | 5 | | 3 | 40.25 | 26.09 | |
| | 5 | | 4 | 493.75 | 2.13 | 5 | | 4 | 54.35 | 19.32 | |
| | 10 | 1.10 | | | | 10 | 4.40 | | | | |
| | 10 | | 2 | 296.61 | 3.54 | 10 | | 2 | × | × | |
| | 10 | | 3 | 386.03 | 2.72 | 10 | | 3 | × | × | |
| | 10 | | 4 | 475.11 | 2.21 | 10 | | 4 | × | × | |
| | 20 | 1.30 | | | | 20 | × | | | | |
| | 20 | | 2 | 248.05 | 4.23 | 20 | | 2 | × | × | |
| | 20 | | 3 | 361.69 | 2.90 | 20 | | 3 | × | × | |
| | 20 | | 4 | 406.50 | 2.58 | 20 | | 4 | × | × | |

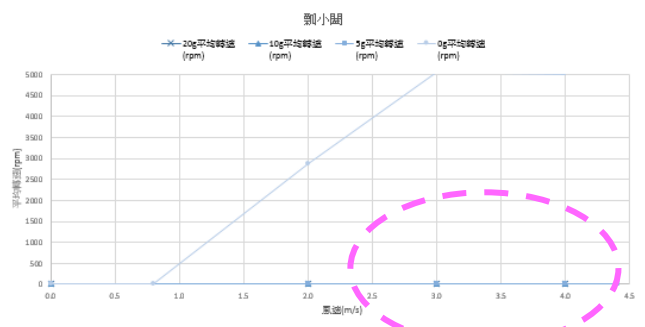
單位 gw m/s m/s rpm s 單位 gw m/s m/s rpm s

二、風速-轉速討論

當討論風力發電扇葉的轉動情形時，首要討論的必定是在不同的風速下的轉動快慢情形，以圖二十四為例，圖片標題為「瓢小開」代表瓢蟲小尺寸翅膀展開時的數據作圖，以風速(單位 m/s)為橫軸對轉速(單位 rpm)作圖，圖中有深淺不一的四條線，由淺而深分別代表負重 0、5、10、20gw 時的轉動表現，從圖中可以看到各線段並非從原點出發，因為風車存在基本的摩擦阻力，因此我們根據最低啟動風速標出線段的起始點。同樣的方式我們將瓢蟲小尺寸翅膀閉闔時的數據作圖得到圖二十五，標題定為「瓢小闔」。

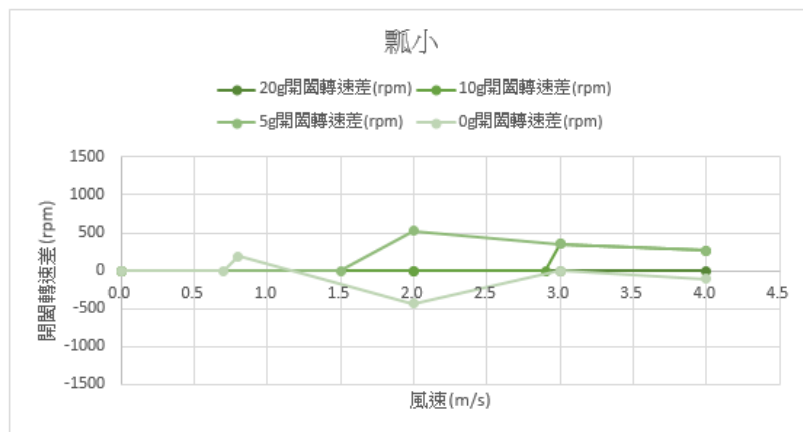


圖二十四



圖二十五

從圖二十四及圖二十五兩相比較，可發現沒有負重時展開翅膀跟閉闔翅膀的表現差不多，值得注意的是當風速大於 3m/s 時，0gw 負重開展翅膀的風扇轉速反而下降了。而當我們用砝碼負重模擬電磁阻力時，會看到只有開展翅膀的風扇可以持續轉動，而閉闔翅膀的風扇均無法轉動拉抬砝碼，此現象代表開展翅膀的風扇可以轉換較多的能量，似乎與風扇的攔截面積有關。



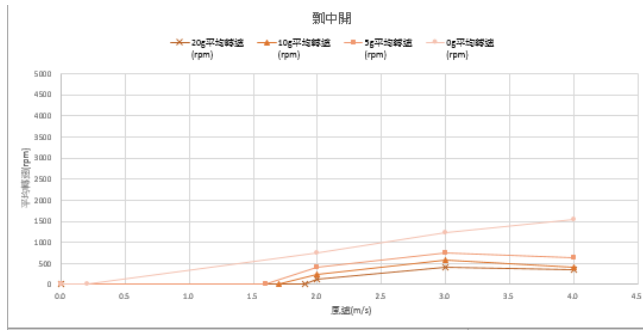
圖二十六

我們進一步將瓢蟲小尺寸翅膀時的風速與開闔轉速差作圖，得到圖二十六。

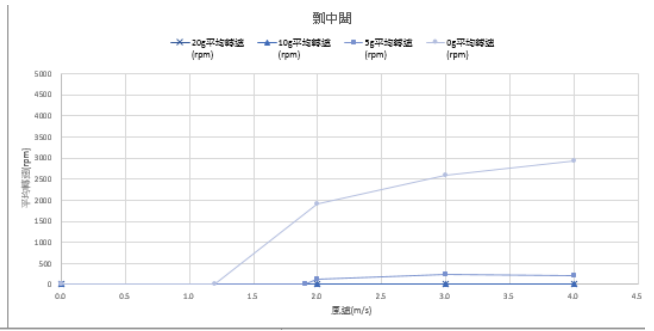
開闔轉速差 = 展開翅膀的轉速 - 閉闔翅膀的轉速

兩相抵扣之後，若為負值代表閉闔翅膀時的轉速較快。由圖二十六可以發現風速對於此尺寸的瓢蟲翅膀影響無明顯的趨勢。

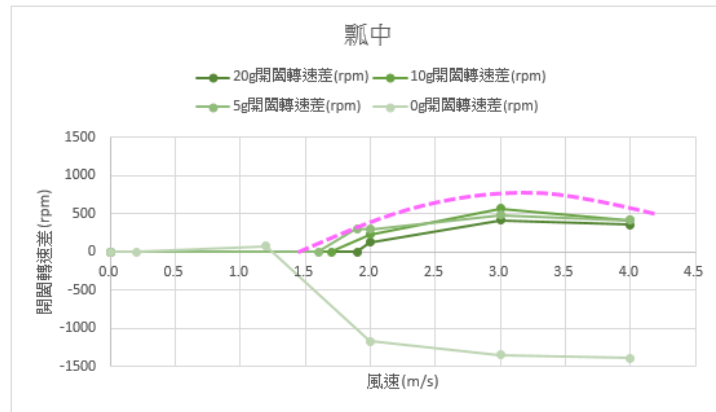
我們以同樣的方法將各個尺寸的昆蟲翅膀都處理了一遍，在中尺寸的瓢蟲翅膀中，我們發現 0gw 負重時閉闔翅膀會轉得比較快，但是一旦增加負重阻力之後，明顯轉速較慢，也可以說負重之後閉闔翅膀的風扇拉不太起來。



圖二十七



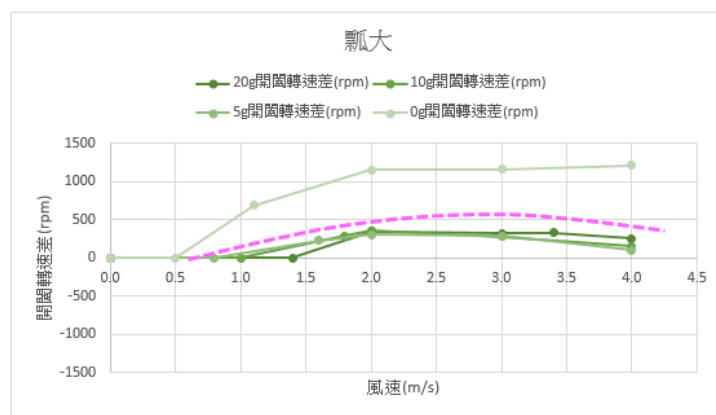
圖二十八



圖二十九

而在開闔轉速差的作圖中，我們發現負重後開闔翅膀轉速差獲得良好的一致性，而且約在風速 3m/s 時轉速差差距最大，大概達到 500rpm，之後隨著風速增強反而差距變小。也可解讀為此尺寸的瓢蟲翅膀風扇在遭遇不同電磁阻力時的表現比較穩定。同時從圖二十九也可以看出 0gw 負重的轉速快慢為閉闔翅膀時較快，而在負重之後轉速反而是展開翅膀較快，所以在未考量電磁阻力下的風扇轉速不能直接代表發電量。

我們進一步將大尺寸的瓢蟲翅膀也作同樣的分析，從圖三十發現在負重之後轉速差也獲得良好的一致性，而且大尺寸的風扇在啟動風速的表現在 0.5~1.5m/s 之間，相較於中尺寸的瓢蟲翅膀 1.5~2.0m/s 更優。除此之外，0gw 負重時大尺寸的瓢蟲翅膀閉闔時的轉速較慢，能夠契合我們想要尋找預防風損的摺翅風力發電風扇之需求，也就是說當翅膀收摺時風吹時的轉速較展開翅膀慢，若在颱風來時收摺翅膀，能避免風扇因劇烈轉動而損害軸承等零件，我們覺得可以先預選為適合作為摺翅風力發電原型的候選翅膀。

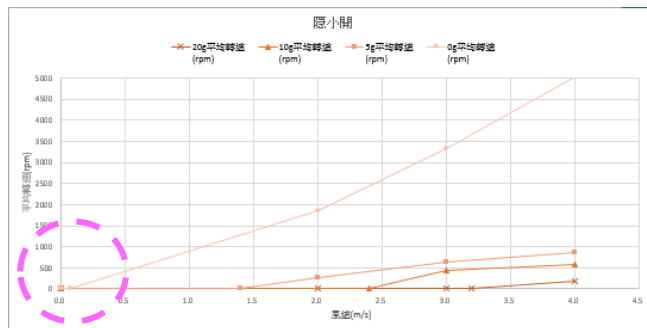


圖三十

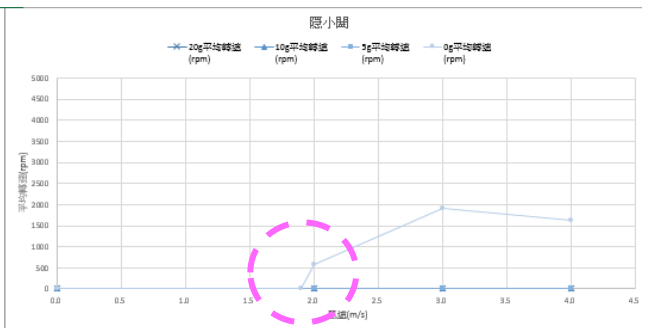
從瓢蟲各尺寸在不同風速的轉動表現，我們歸納出以下幾點心得：

1. 開闔翅膀在不同尺寸的翅膀表現不一，有時閉闔後轉更快，有時閉闔後轉更慢。
2. 以負重模擬電磁阻力後的表現趨於一致，均為展開翅膀轉較快，而且開闔轉速差在不同風速下的表現曲線雷同。
3. 大尺寸的翅膀啟動風速不見得比較大，需考量整體阻力造成的效應。
4. 現階段考量，大尺寸的瓢蟲翅膀將是比較適合作為摺翅風力發電原型的候選。

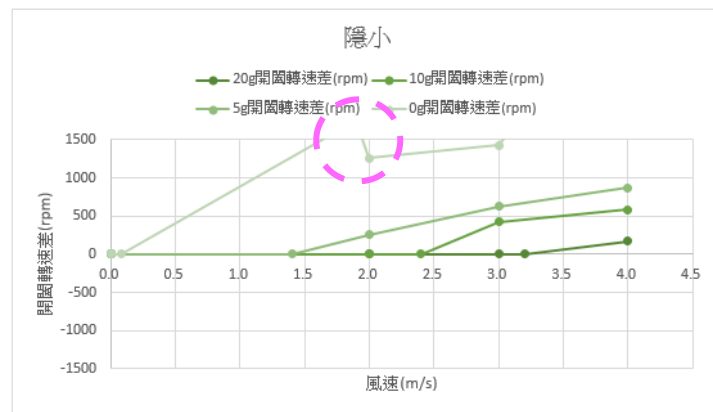
接著分析以隱翅蟲翅膀作為風扇扇葉的轉動情形，同樣的，我們將展開翅膀和閉闔翅膀分開作圖(圖三十一、三十二)，然後再將兩者轉速相減得到開闔轉速差，如圖三十三。比較特別的地方是隱翅蟲展開翅膀的風扇非常靈敏，啟動風速非常小即可引發轉動，但是一旦收摺之後，啟動風速就要逼近 2m/s，而且面對風速增強，閉闔翅膀的轉速也不會一直提高，很快就下降了，也可以說一旦翅膀閉闔轉動效應將會大打折扣，非常適合用於降低風損。



圖三十一



圖三十二

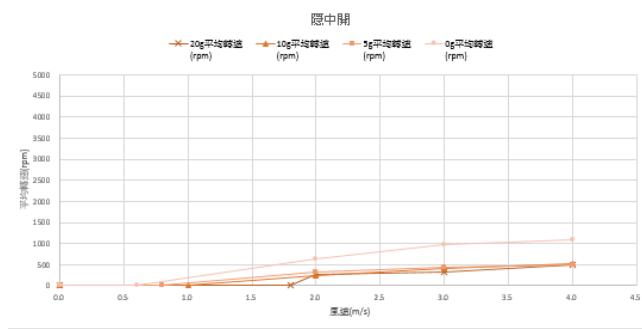


圖三十三

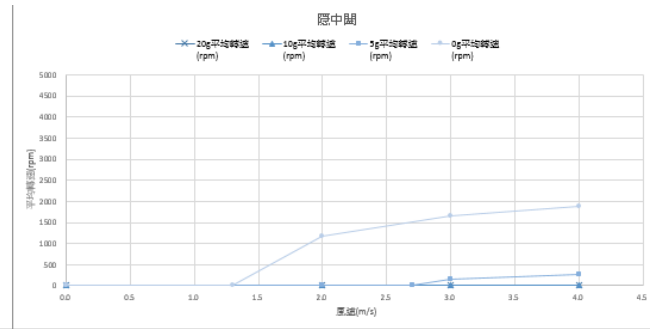
在圖三十三中 0g 的開闔轉速差出現一個明顯轉折，這是由於閉闔翅膀的扇葉開始啟動所造成的不連續。除此之外，開闔的轉速差均會隨著風速漸強而增加。另外隱翅蟲在小翅膀的開闔轉速差一致性不佳，各線段分歧明顯，這個情形在小型的瓢蟲翅膀也有出現(圖二十六)，我們推測原因應該是小型翅膀易受干擾，因本身轉動慣量較小、質量也較小，因此外在阻力、摩擦力的影響效應就會比較明顯，因此圖中各線段分離。

我們繼續與中尺寸的隱翅蟲翅膀相比較討論之，當隱翅蟲翅膀變成中尺寸之後，整體的轉動效應都變差了，不僅在展開翅膀時最低啟動風速沒有優勢，而且在負重之後的轉速也沒有明顯優勢，目前看起來是表現不佳的一組。而且轉速在閉闔翅膀之後變得更

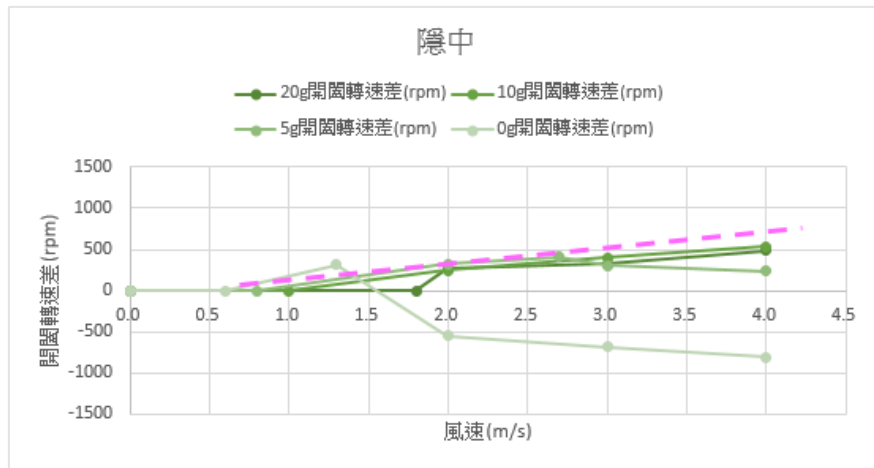
快，更無法應用在防範風損的情形。唯一的優點應是負重後的表現一致性比較好，跟小尺寸的翅膀相比，顯得比較統一。



圖三十四

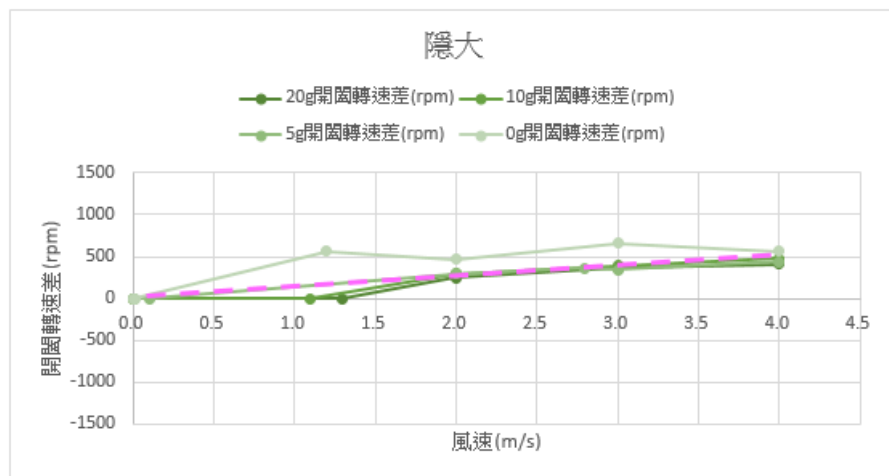


圖三十五



圖三十六

最後看到的是隱翅蟲在大尺寸翅膀的表現，在 0g 負重時隱翅蟲翅膀靈敏的優點回來了，啟動風速低代表著受風靈敏，而且閉闔翅膀之後轉動較慢能夠用於防範風損，除此之外，負重後的表現均具有一致性，能適用於不同風速。從圖三十七可看出在風速 1.0~1.5m/s 就可以有明顯的開闔轉速差了，唯一的缺點應該是轉速差一直無法拉高，頂多就到 500rpm。



圖三十七

從隱翅蟲在各種風速下的轉動表現，我們能歸納出以下幾個要點：

1. 中大尺寸隱翅蟲翅膀在負重後表現比較穩定，小尺寸的隱翅蟲翅膀開闔轉速差受風速影響多。
2. 隱翅蟲 0gw 負重時的開展翅膀啟動風速低，受風靈敏。
3. 現階段的數據來看，大尺寸的隱翅蟲比瓢蟲有更多優點，例如受風靈敏、轉速差直逼 500rpm 等，更適合用於摺翅風力發電機的扇葉。

關於瓢蟲及隱翅蟲在中尺寸翅膀均表現出閉闔後轉速更快的情形，一開始有組員提出角動量守恆的理論來解釋之，也就是當翅膀收摺後轉動慣量明顯變小了，因此轉速就會加快，我們也在搜尋資料時看到有些科展報告以此解釋小風扇轉速較快的現象。

$$L = I_1 \omega_1 = I_2 \omega_2$$

但仔細思考以及尋求答案之後，我們知道角動量守恆的條件必須是系統所受合力矩為零時才成立，而摺翅轉換的過程變因太多太複雜了，不可能維持合力矩為零的狀態，參考前段理論探討：

$$\tau_z = \tau' + \tau_k$$

首先因摺翅受風面積的改變必定影響轉動的力矩以及摩擦力的力矩，再來因摺翅後導致扇葉厚度增加，也增加了風阻，多重因素影響之下，難以維持合力矩為零。

再來若角動量守恆此解釋為真，那應該在各個尺寸的翅膀風扇均能觀查到此情形，但實驗顯示有時閉闔翅膀後轉更快，有時卻會轉更慢，而且此情形只有在中尺寸的昆蟲翅膀風扇中見到，因此可見無法單純以角動量守恆來解釋摺翅後轉速變快的現象，我們推論其原因應該是各力矩綜合的結果，要變快或變慢應該主要是由翅膀面積來決定，至於是否有最大值或最小值，則待更進一步的實驗來驗證了。

三、風速-功率討論

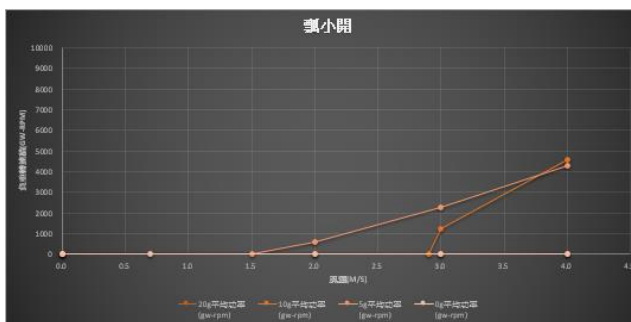
我們從先前的文獻以及理論探討得知空轉(0gw 負重時)轉的快的風扇，不見得發電時就可以有比較多的產能，所以我們藉由掛上砝碼很直觀的看到風扇將風能轉換成物體的位能，並且也可以操縱改變砝碼的重量，來模擬發電時電磁阻力的差異。我們好奇同一個風扇在相同風速下發電的功率都會保持固定不變嗎？會不會隨著電磁阻力而有所變化呢？利用轉速計算功率的算式如下：

$$\text{功率 } P = \frac{mg\Delta h}{\Delta t}, \Delta t = \frac{\Delta h}{v} = \frac{\Delta h}{r\omega}$$

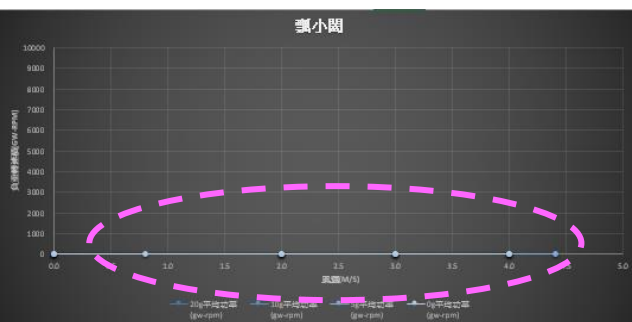
$$\text{功率 } P = mgr\omega \propto W\omega$$

(m:砝碼質量，g:重力加速度，r:轉軸半徑， ω :角速度，W:砝碼重量)

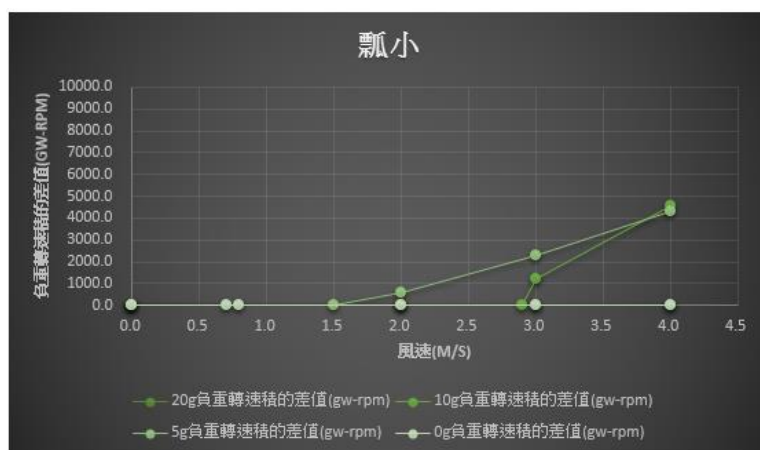
由上式可以得知，若取負重和轉速相乘，所得的乘積可正比於功率。下頁圖三十八、圖三十九為瓢蟲小尺寸翅膀的風速(單位 m/s)對負重轉速積(單位 gw-rpm)作圖之結果，可以很清楚的發現當瓢蟲小尺寸翅膀閉闔時均不會作功。因此也可以推論，當風力發電機在毫無電磁阻力的狀態下，若轉得快並不表示開機發電就能產出較多的電能，在模擬風力發電機的運作效率時，均應考量電磁阻力的影響。



圖三十八



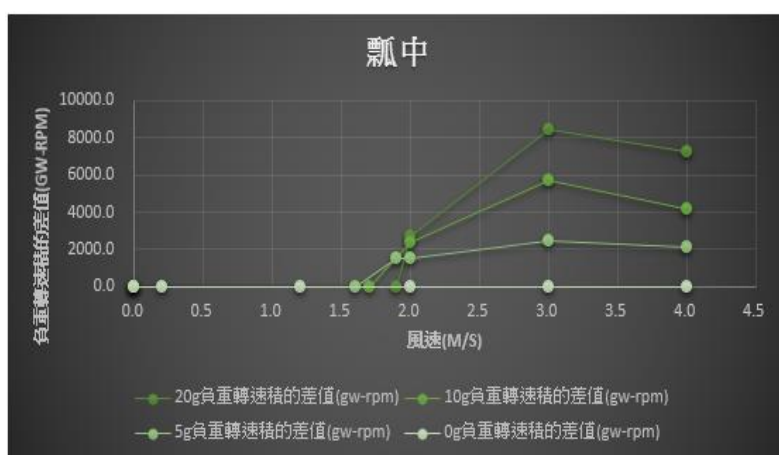
圖三十九



圖四十

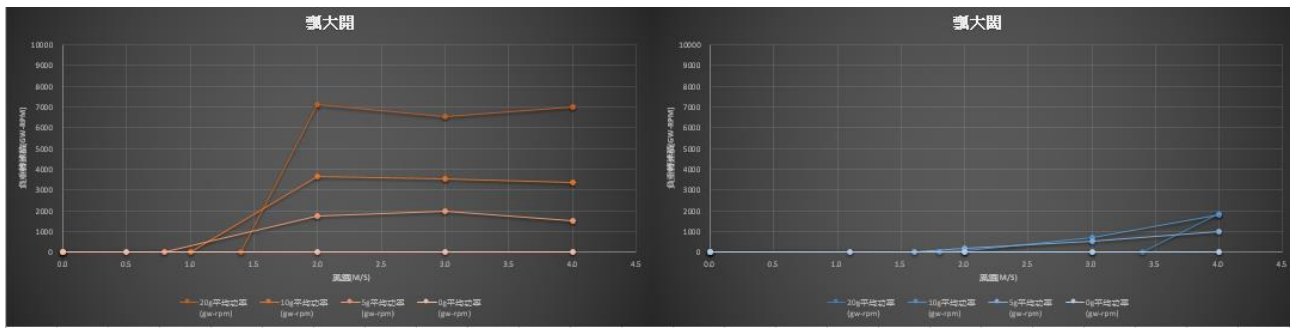
將兩者功率相抵扣可得到風速對功率差的圖，如圖四十，由此圖也可約略看出負重越重在風速大於 3.8m/s 之後的功率表現更優於負重小的情形。

但由於瓢蟲小尺寸翅膀不是理想中的摺翅風力發電風扇原型，我們陸續將各尺寸的翅膀風扇作圖，我們可以看到閉闔翅膀之後的功率都非常低，而展開翅膀的表現則發現有趣的現象：**相同風速下負重越大，產出功率越大**。大約在風速 3m/s 可達到最大值，之後略為降低，而且在風速 1.5m/s 以下幾乎沒有作功產出。



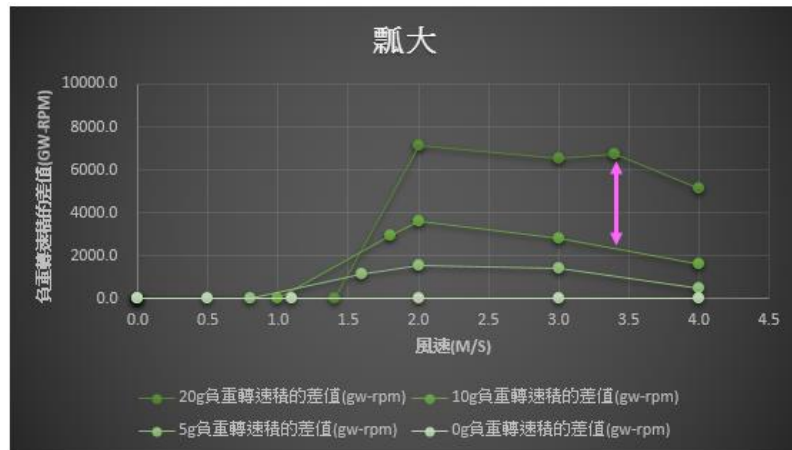
圖四十一

我們猜想這樣的負重越重，作功功率會越多的情形也會發生在大尺寸翅膀的情況嗎？將大尺寸的數據作圖後，果然也有同樣的情形，而且在比較功率差值時，更可以發現隨著風速增強，高負重的功率差值表現明顯優於低負重的狀態。



圖四十二

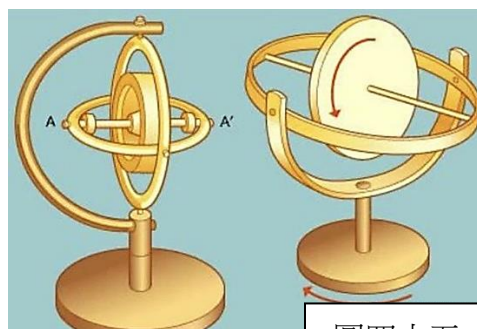
圖四十三



圖四十四

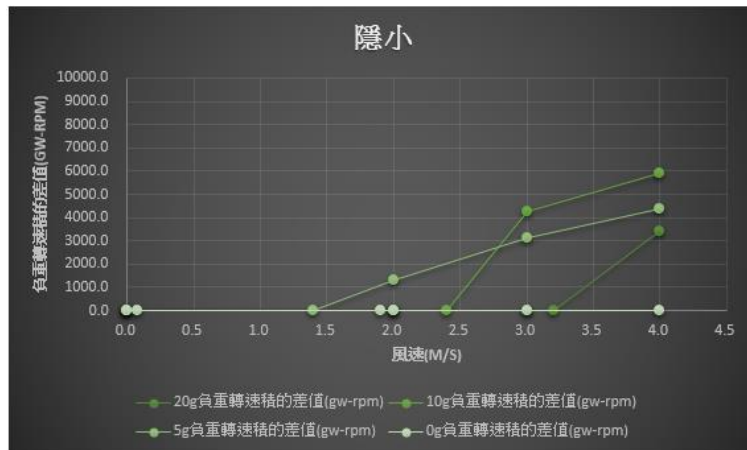
我們思考為什麼會有這種情形？依照常理推論，一台風力發電機在相同風速下的功率應該是固定不變的呀！因為截取風能的裝置相同，所以我們原先預期可以藉由作圖驗證不同負重均可達到相似的功率表現，可是為什麼會隨著阻力變化而有這樣的趨勢呢？在真實的風力發電機組內部，的確也可以藉由控制齒輪組來調整發電機電樞的轉速，那也就會造成不同電磁阻力，言下之意，難道表示調高電磁阻力可以獲得更佳的轉換效率嗎？我們查閱相關資料並仔細討論後得出幾點解釋：

1. 轉動越頻繁，耗費在轉動的摩擦損耗就會越多，應該盡可能降低轉動速度，以低轉速高電壓輸出為佳。
2. 電磁阻力所形成的抵抗力矩，可視為增加風扇的等效轉動慣量。等效轉動慣量越大，在轉動後產生的角動量也較大，類似陀螺儀(圖四十二)的原理能避免風機產生震動、搖晃等，非用於發電的能量流失。
3. 以砝碼負重越重有助於穩固風扇基座，避免風能轉換成振動的動能，所以高負重的狀態，能有較佳的功率表現。

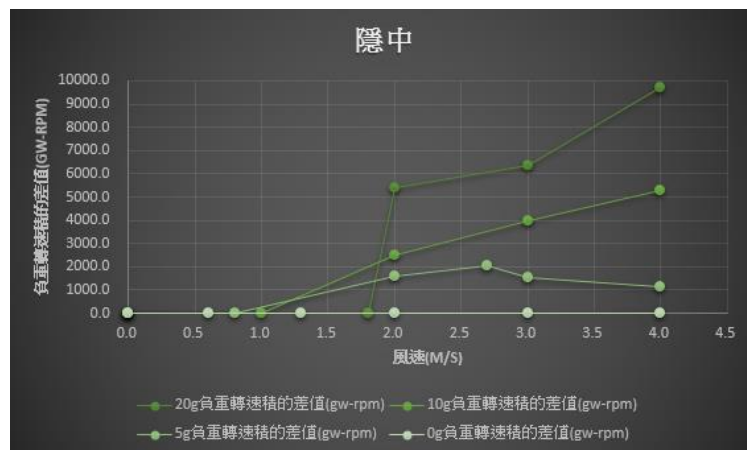


圖四十五

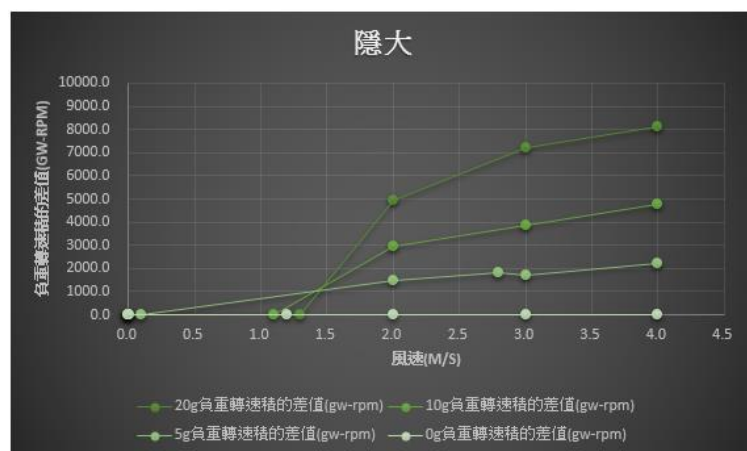
分析完瓢蟲翅膀的功率表現，當然也要來看看隱翅蟲是不是也是有這樣的情形，用以驗證高負重高功率的解釋，從以下連續三組圖(圖四十六~圖四十八)，都可以看出此現象，除了隱翅蟲小尺寸的翅膀略微分歧之外，當翅膀的尺寸變為中大尺寸後，都可以看到負重越大功率表現越好的情形。另外值得一提的是隱翅蟲在中尺寸翅膀的功率差值高達 10000gw-rpm，而且尚未達最大值，可看出開闢之間的差距甚大，另外大尺寸的翅膀表現也不惶多讓，到達 8000gw-rpm，相較於瓢蟲的表現都較多，最後考量摺疊翅膀時，希望能有較低轉速，我們現階段評估大尺寸的隱翅蟲翅膀更適合做為摺翅風力發電的風扇原型。



圖四十六

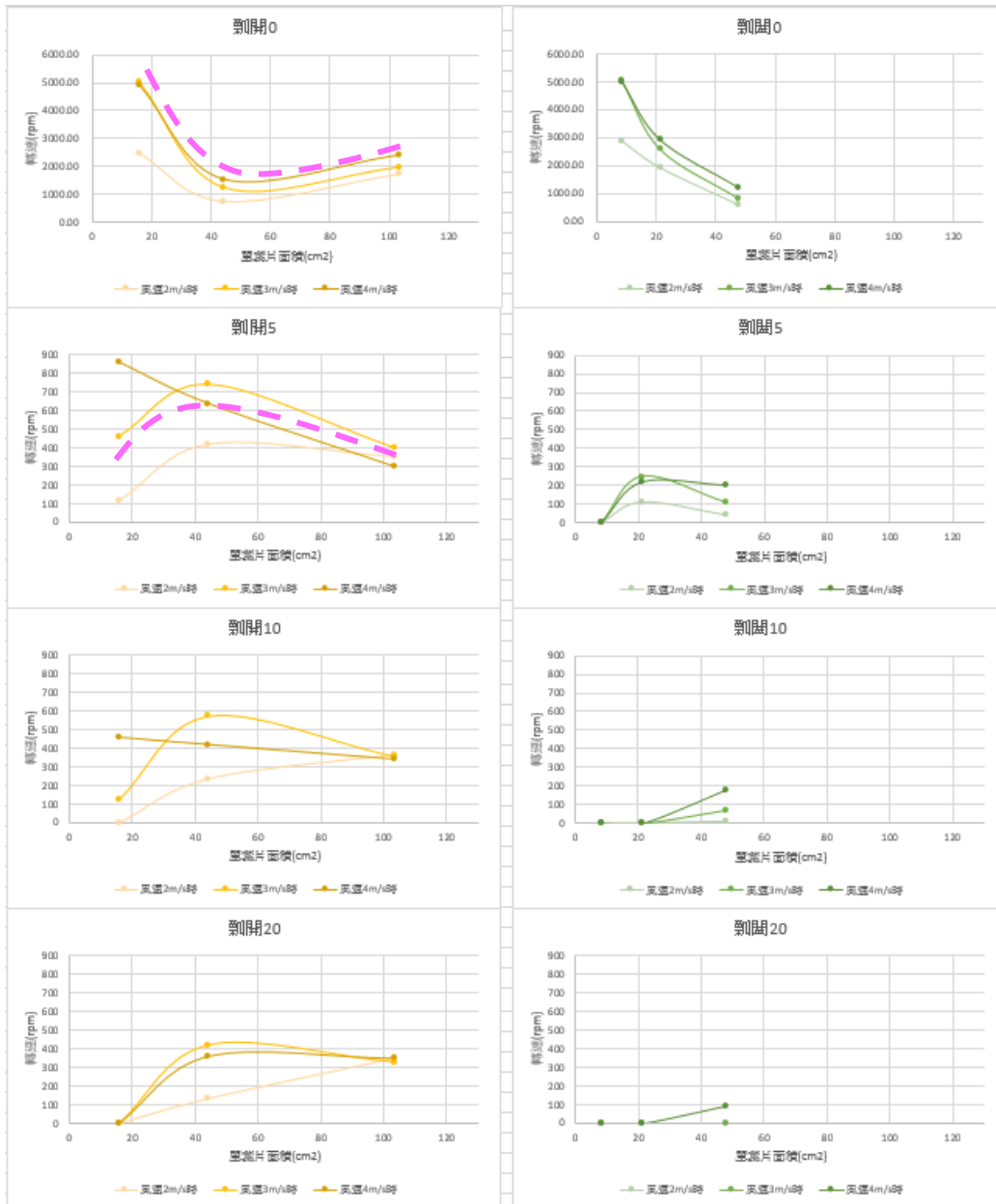


圖四十七



圖四十八

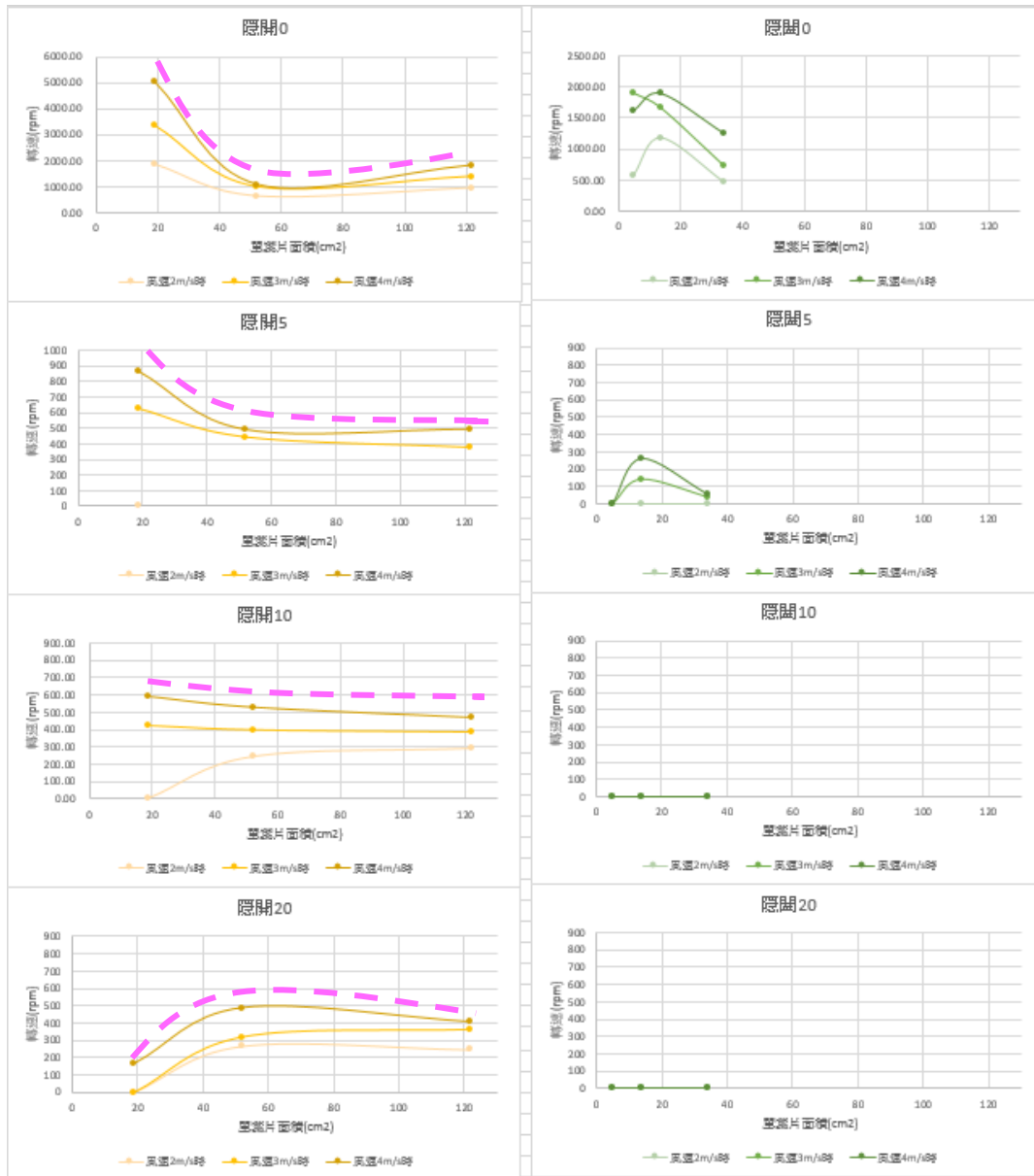
四、面積-轉速討論



圖四十九

扇葉面積既是風推動風扇轉動的重要幫手，卻也是轉動時造成風阻的殺手，因此我們想要看看面積對於風扇轉動有何影響？上圖橫軸均為單一扇葉面積大小(單位 cm^2)，縱軸均為轉速快慢(單位 rpm)，標題所示數字代表負重，由瓢蟲的翅膀表現，我們發現當翅膀面積小的時候變異性很大，也不穩定，未負重時圖形成線 U 形，負重之後轉為 \cap 形，且在不同風速下的表現欠缺一致性，只能隱約看出一點趨勢。當將瓢蟲翅膀摺疊後，大致上也是呈現類似的表現：未負重時，面積越小轉越快；負重之後，面積越小轉越慢。

觀察到這樣的變化，我們迫不急待地將隱翅蟲的數據也作圖來看看，下頁所示圖五十即為隱翅蟲的翅膀面積對轉速所作的圖。我們發現未負重時圖形也是呈現 U 形，但是負重之後是漸漸轉為 \cap 形，依照負重量的增加，我們可以看出其轉變的過程。除此之外，當隱翅蟲翅膀摺疊後，則一律顯現出 \cap 形。還有，中大尺寸之後的翅膀表現趨於穩定，不再因面積而有劇烈變動，我們從圖可看出隨著面積增大，圖形趨於水平。



圖五十

翅膀在摺疊之後若轉速下降代表推動的力矩比不上阻抗的力矩。若在未負重時就顯現此跡象，那麼負重之後當然就更難以拉抬轉速，隱翅蟲翅膀的構形就屬於這一類。在未負重時就顯現出∩形，在負重之後轉速幾乎都被打趴在地，此現象或可作為其他種昆蟲翅膀是否適合做為摺翅風扇的參考指標。

綜合以上幾個發現，我們得出以下論述：

1. 隱翅蟲翅膀在小尺寸面積時受風表現與負重有很大的關聯，調整適當的負重，甚至可以讓風扇轉動維持在一定的轉速。
2. 隱翅蟲在中大翅膀的表現比較穩定，轉速趨於一致，較不易受面積大小影響，也較不易受負重影響。
3. 隱翅蟲翅膀摺疊後不利於轉動，此不單純只是面積的影響，跟其翅膀形狀有更大的關聯。
4. 隱翅蟲翅膀在負重 10gw 的狀態下可維持最佳的穩定度，風速、面積改變也不會造成劇烈影響。

五、週速比-功率係數討論

最後我們要討論葉尖週速比 λ 和功率係數 C_p 的關係，葉尖週速比 λ 是評估風力發電機性能很重要的一個參數。

$$\text{葉尖週速比 } \lambda = \frac{\text{翼尖速率}}{\text{真實風速}}$$

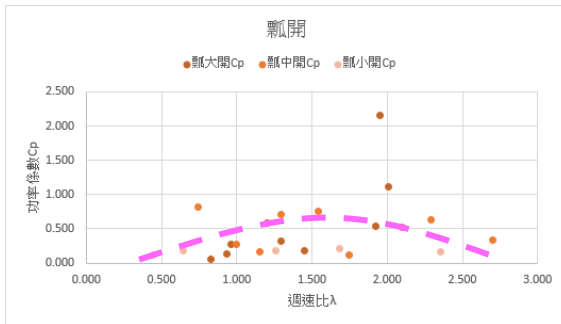
$$\text{功率係數 } C_p = \frac{\text{有效功率 } P_{eff}}{\text{風功率 } P_{wind}} = \frac{mg\Delta h}{\frac{1}{2}\rho sv^3}$$

(ρ :空氣密度, s :風扇截取面積, v :風速)

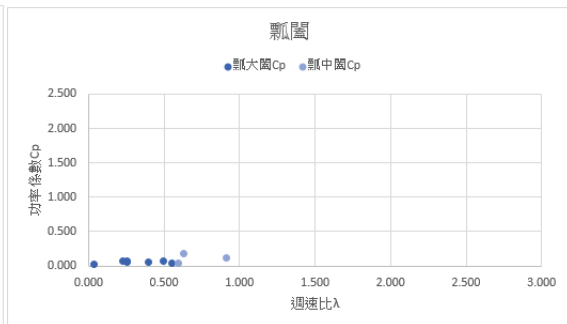
根據德國科學家貝茲(Albert Betz)提出的風力機致動盤理論，為了獲得最大的風能利用係數(功率係數 C_p)，可對風扇的外形加以設計，此理論中提到若設計葉尖週速比 λ 小的風扇，那麼葉片的軸向推力負荷就會增大，這就需要通過增加鋪層來增加葉片的剛度，保證葉片不會因為軸向推力的增大而與塔架發生碰撞。另一方面，增大葉片面積，也會增加鋪層材料，這兩方面都將導致葉片成本的增加，同時也導致整個風力機負重增大，需要增加整座塔架、輪轂等部件的強度才能滿足負荷增大的要求，進而增加整體成本。所以，為減少葉片和整機的負荷成本，葉尖週速比 λ 不能太小。

由此我們可以了解葉尖週速比 λ 太大太小都不恰當，不同的風機有其最適合的葉尖週速比 λ 範圍，在此範圍內可獲得最佳的功率係數 C_p ，也就是能有最好的截取風能表現。

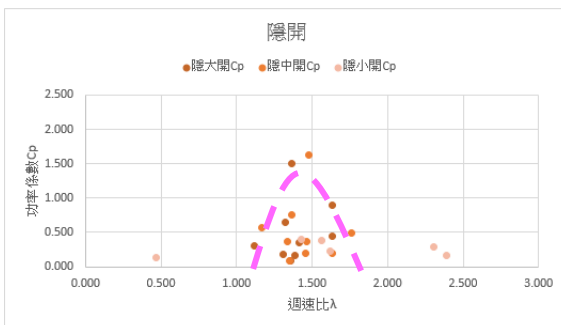
我們仿造先前理論探討中圖十的資料，以葉尖週速比 λ 為橫軸，功率係數 $C_p(\%)$ 為縱軸作圖。為了探討簡便，將空氣密度使用 $25^\circ\text{C} - 1\text{atm}$ 的乾空氣密度 $1.185(\text{kg}/\text{m}^3)$ 。所得的圖如下頁所示，以圖五十一為例，圖片標題「瓢開」代表瓢蟲開展翅膀所得數據作的圖，不同尺寸的翅膀則以深淺不一的散佈圖顯示。



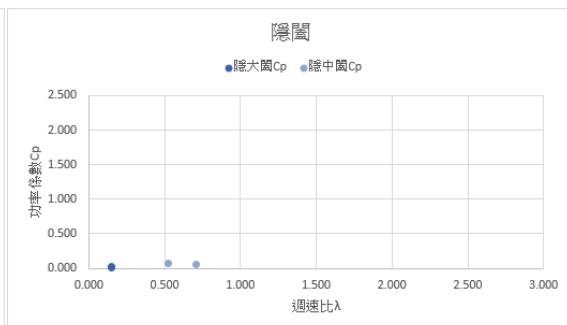
圖五十一



圖五十二



圖五十三



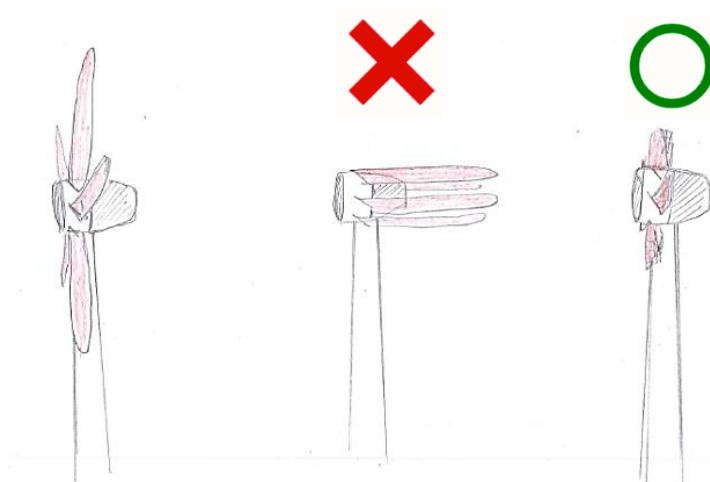
圖五十四

在這一組圖中，我們發現以瓢蟲翅膀為原型製作的風扇，其葉尖週速比 λ 適用範圍較為廣泛，但截取的風能普遍較低，收摺之後還能有一絲絲截取風能的功能；相較之下，以隱翅蟲翅膀為原型的設計所適用的葉尖週速比 λ 較窄較集中，而截取的風能似乎稍微優於瓢蟲的性能，而當翅膀收摺之後，幾乎不再有截取風能的功能了。

六、綜合討論

在發想摺翅風力發電機的過程中，有同學提到既然要收摺翅膀，為何不直截了當直接往後摺，這樣子就不會有受風面，風機也不會轉動了啊！我們仔細端詳之後發現此法乍聽之下好像可行，其實存在以下困難：

1. 將扇葉直接往後摺，所耗費的能量會較大。
2. 收摺過程需小心扇葉不要和塔柱碰撞受損。
3. 收摺後的質心位置大幅改變將造成傾倒危險。
4. 收摺後若有側向陣風，仍會有受風面。



圖五十五

基於以上幾點討論，我們認為利用仿生學來製作的昆蟲摺翅風力發電，是大有發展前途的，由於其生物結構的特殊性收展快速，收摺後不會造成質心位置過多變動，都有助於風力發電塔的建造。

另外從先前轉速、功率、面積、週速比等多項變因的分析，我們也可看到藉由調整內部阻力以及翅膀尺寸，可以在收摺翅膀後減低轉速，應用於防範風災，而開展翅膀時還能保持良好的發電功率，雖然此模擬實驗還不夠細緻，但是其測試結果數據都可看出此概念具有可行性。

綜合比較瓢蟲與隱翅蟲兩種昆蟲的翅膀特性，我們一致認為**隱翅蟲在大尺寸翅膀比例下適合作為摺翅風力發電風扇的原型**，另外需搭配較高的電磁阻力(高負重)，如此一來，可獲得低轉速高功率的表現，不但減少轉動磨損消耗，而且有較佳的能量轉換率。當翅膀閉闔時整體面積縮小至原先的四分之一，而且轉動效應大打折扣，不利於轉動，非常適合運用在颱風來襲時停機防損，即使風速很強，稍加一點阻力即可停住風扇，最後其葉尖週速比 λ 與功率係數 C_p 顯示出穩定集中的表現，減少風力發電供電總是大起大落、不穩定的弊病。

柒、 結論

- 一、當風速越快時，推動扇葉的力量越大，基本上轉動速率都會變快，但當轉速到達某一臨界值之後，即使風速再增強，轉速也無法再提升了，將會呈現一固定值。若討論風速與發電功率的關係，則會有類似的情形，隨著轉速達到臨界值，發電功率也達到最大值，即使風速再加強也無法進一步提升發電功率了。
- 二、尺寸大小最直接的影響就是受風面積以及截取風能的圓半徑。當未負重時，也就是未有電磁阻力時，尺寸越小轉越快；增加電磁阻力之後，尺寸越小反而轉越慢。換言之，空轉快不代表發電量較多。根據我們的實驗選擇大尺寸的翅膀風扇有助於發電產能，但是大尺寸的扇葉最低啟動風速也較大，需要較強的風才能啟動。
- 三、開闔翅膀因改變受風面積也改變轉動慣量，不但影響轉動也會影響發電的功率，至於閉闔翅膀之後轉速要變快還是變慢，不能引用角動量守恆來解釋之，必須綜合考量其風阻面積等改變所造成的力矩變化，而我們的目標是尋求閉闔翅膀後不利於轉動的翅膀模型，經過實驗大尺寸的隱翅蟲及大尺寸的瓢蟲翅膀均能有符合期待的表現。
- 四、從開闔翅膀之間所造成的功率差，將可看出最佳風速，在最佳風速時，開闔翅膀的功率差會達最大值。另外選用較強電磁阻力的發電狀態也可以獲得較佳的開闔翅膀功率差。
- 五、這次的實驗我們精挑細選了兩種昆蟲翅膀來測試，其中隱翅蟲的翅膀表現較為出色，我們猜測是摺疊後的面積比較小，瓢蟲的摺翅面積比 0.463，而隱翅蟲的摺翅面積比為 0.281，因此隱翅蟲開闔翅膀的差異較為顯著，各方面的表現都較瓢蟲明顯。
- 六、理想的摺翅風力發電風扇原型為大尺寸的隱翅蟲，搭配較高的電磁阻力(高負重)，如此一來，可獲得低轉速高功率的表現，不但可減少轉動磨損，而且有較佳的功率係數 C_p 表現。當隱翅蟲翅膀閉闔後不利於轉動，適合運用在颱風來襲時停機防損，即使風速很強，稍加一點阻力即可停住風扇，另外其葉尖週速比與功率係數穩定集中，減少風力發電供電不穩定的弊病。
- 七、將摺翅仿生學運用在風力發電機的設計上，經過本實驗多方測試討論與評估，是相當環保而且可行的做法，值得相關部門持續研發。

捌、 應用與未來展望

我們認為綠能發電將會是未來世界產能的主流，雖然目前對於風力發電的研究已經多如牛毛，但每年都有新的想法、新的創意不斷更新現有的技術，我們希望可以在這個領域盡一份心力，對待我們的地球也能更友善。未來展望如下：

1. 希望能夠拓展仿生摺翅的概念，並且嘗試利用鳥類或蝙蝠的摺疊翅膀，但是此模擬需要運用到 3D 列印技術，才能做出有厚度的翅膀，雖然在摺疊時也會有更多需要克服的難題，但我們相信立體的翅膀，對於空氣流體力學的效應應該會有更佳表現。
2. 根據資料顯示大型風機多採水平軸式的扇葉設計，主要截取強大風場的能量；若是混亂的小風場則建議採用垂直軸式的風機，我們好奇仿生摺翅的概念是否也能運用在垂直軸式的風機呢？在小又混亂的風場中，又該怎麼自動調整摺翅呢？也許克服此點之後，就可以在家家戶戶屋頂上製做出可廣泛使用的產品了。

玖、 參考資料

- 國民中學自然與生活科技課本，第五冊，康軒版，108 學年。
- 圖解風力發電入門。牛山泉著，李漢庭譯。2010。世茂出版社出版社。
- 中華民國第 58 屆中小學科學展覽會，國小組物理科，洞動扇葉最來電。
- 中華民國第 58 屆中小學科學展覽會，國中組生活與應用科學(二)科，風「升」電起一升力式扇葉發電裝置的設計及探討。
- 中華民國第 57 屆中小學科學展覽會，國中組生活與應用科學科，風力罩得住酷旋發電機。
- 中華民國第 54 屆中小學科學展覽會，高中組物理科，運用抽吸效應(suction effect)減阻之研究。
- 中華民國第 54 屆中小學科學展覽會，國小組生活與應用科學科，神「風」特攻隊－扇葉與風力發電。
- 中華民國第 50 屆中小學科學展覽會，國小組物理科，追風築電。
- 中華民國第 48 屆中小學科學展覽會，國中組生活與應用科學科，風力發電之葉片設計及其應用。
- 中華民國第 46 屆中小學科學展覽會，國小組物理科，風馳電掣。
- 臺北市第 44 屆中小學科學展覽會，國小組物理科，風從哪裡來扇葉的秘密。
- 2020 全國科學探究競賽-這樣教我就懂，高中（職）組，葉尖小翼風力發電之空氣動力學研究。
- 昆蟲飛行特性與翅翼結構分析探討。洪崑。台北市立成功高中。2012。
- 0.1 秒就能開合翅膀！ 日本解開了瓢蟲的秘密
<https://pets.ettoday.net/news/931186#ixzz6g0zI48Od>
- 日本宣布首次弄清隱翅蟲「隱翅」的巧妙機制 <https://kknews.cc/science/alollog.html>
- 《原來如此》20171208 | CCTV 科教 <https://www.youtube.com/watch?v=pmIxKp5sGWM>
- 【生活裡的科學】2018/01/19 - 風力發電潛力無限 <https://www-youtube-com/watch?v=HjOmbRaZOgU>
- 瓢蟲 <https://zh-wikipedia-org/wiki/%E7%93%A2%E8%9F%B2>
- 瓢蟲翅膀 https://www-luow-com/dc_tw/101270121
- 隱翅蟲科 <https://zh-wikipedia-org/wiki/%E9%9A%B1%E7%BF%85%E8%9F%B2%E7%A7%91>
- 大自然與科技發明 https://www-greenpower-org-hk/html5/chi/an_125-shtml
- 力矩- 維基百科 <https://zh-wikipedia-org/wiki/%E5%8A%9B%E7%9F%A9>
- 風力發電機轉得很慢還能發電？ <https://kknews-cc/zh-tw/news/6zqnxol.html>
- 仿生學 <http://www-biomimicrytaiwan-org/what-is-biomimicry/>
- 風速與風從哪裡來 https://www-twtpo-org-tw/knowledge_show.aspx
- 台灣風力發電
<https://zh-wikipedia-org/wiki/%E5%8F%B0%E7%81%A3%E9%A2%A8%E5%8A%9B%E7%99%BC%E9%9B%BB>

【評語】 030117

本作品以仿生學的概念，模擬瓢蟲與隱翅蟲的翅膀來測試折疊葉片，並利用砝碼所受的重力，模擬電磁阻力。良好的呈現了風機的許多細節。完整的實驗設計與分析值得讚賞。

作品簡報

第61屆全國中小學科學展覽

「翅」大招風

-摺翅風力發電研究-



國中組 物理科
報告編號：030117
日期：2021/7/1

摘要

本研究想要藉由**仿生學**的靈感設計出可以因應颱風損害的摺翅風力發電機，進而找出理想的摺翅風力發電機原型。實驗選定了**瓢蟲**和**隱翅蟲**兩種昆蟲翅膀進行模擬，利用可摺疊的昆蟲翅膀作為扇葉，探討各項變因對轉動效應的影響本研究認為摺翅風力發電機**是相當可行的做法**，希望未來能實際應用於風機發電。

動機

作品說明書
p1

- 1.我們曾經在校外教學時參觀過風力發電機，引發研究興趣。
- 2.想解決台灣每到颱風時節，風力發電機面臨著損壞的風險。

目的

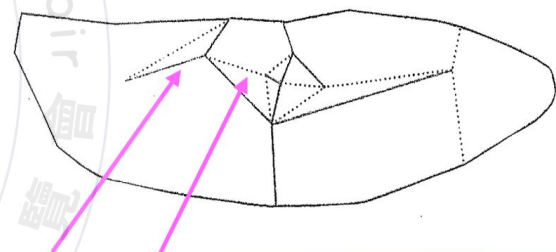
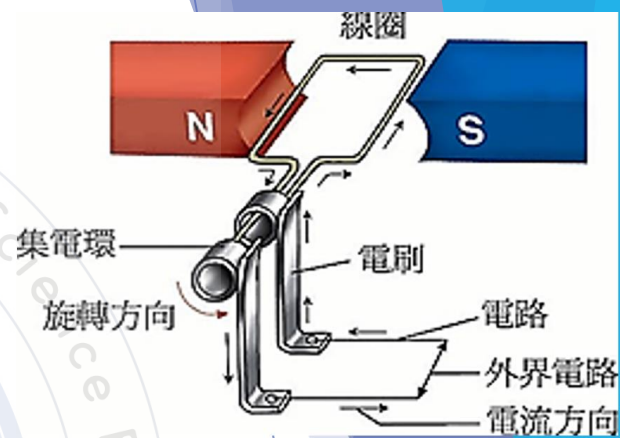
作品說明書
p1

1. **風速**對摺翅扇葉轉動及發電效率有何影響
- 2.摺翅**尺寸大小**對扇葉轉動及發電效率有何影響
- 3.**開、闔翅膀**對轉動及發電效率有何影響
- 4.**翅膀種類**對扇葉轉動有何影響
- 5.找出**理想**的摺翅風力發電機**原型**

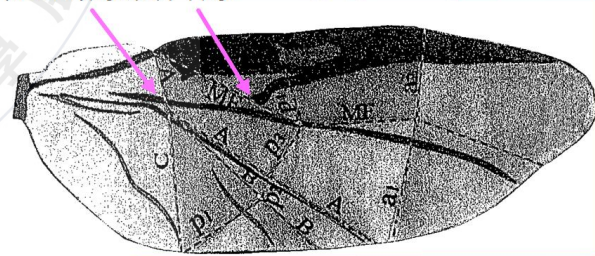
文獻探討

作品說明書
p4.p7.p8

發電機運用「**電磁感應**」原理將動力所作的功轉換成電能的裝置。**電磁阻尼**現象源於電磁感應原理，巨觀現象即為當閉合導體與磁極發生相對運動時，兩者之間會產生電磁阻力。



摺疊山線及谷線



仿生學是透過了解生物的結構和功能原理，來研製新的機械和新技术，或解決機械技術的難題。本實驗選定了**瓢蟲**以及**隱翅蟲**兩種均為鞘翅目的昆蟲摺疊翅膀作為摺翅風力發電機的扇葉。

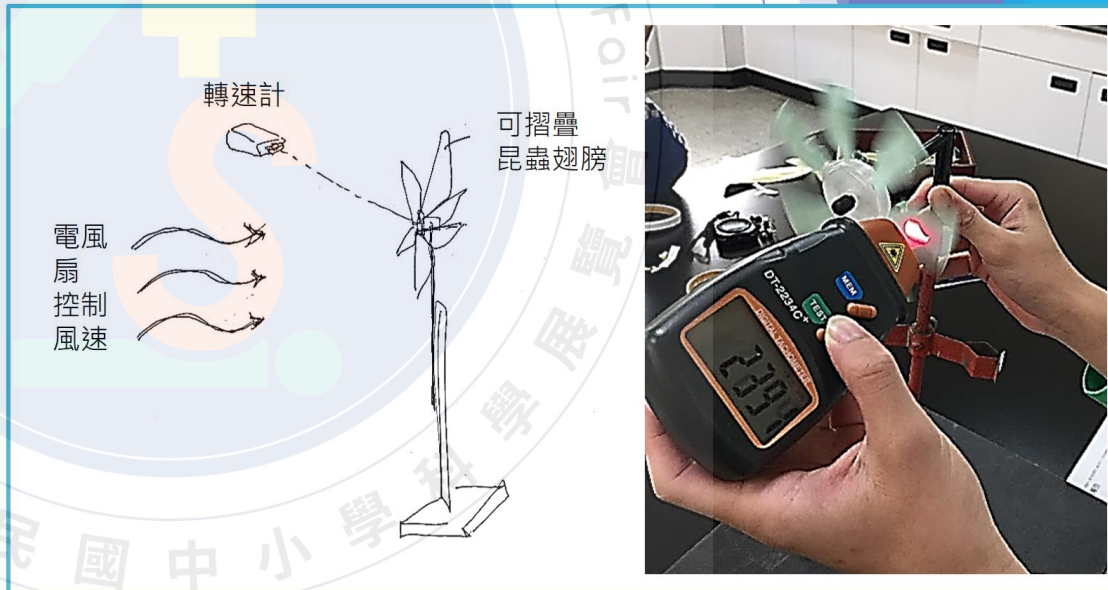
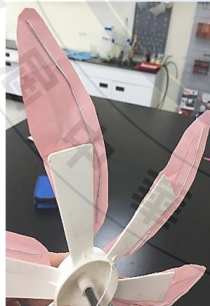
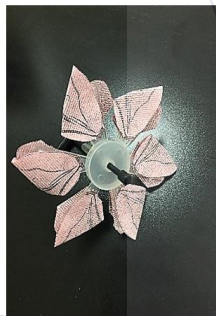
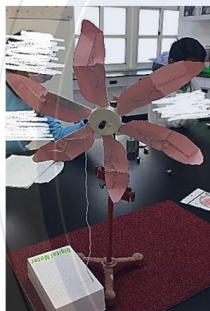
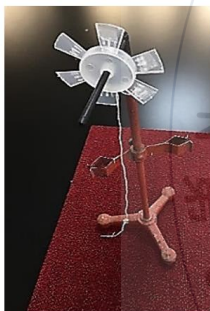
工具

作品說明書
p9

工業用風扇、碼錶、風速計、轉速計、紙昆蟲翅膀、透明膠帶、捲尺、砝碼、風車基座、鋁線

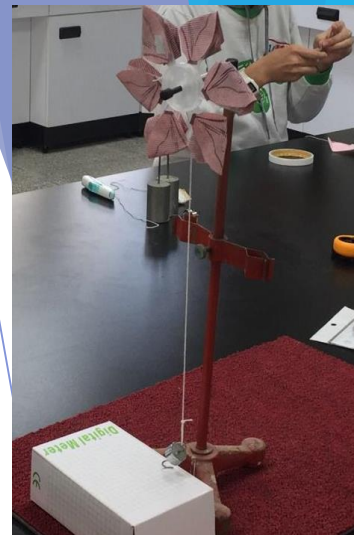
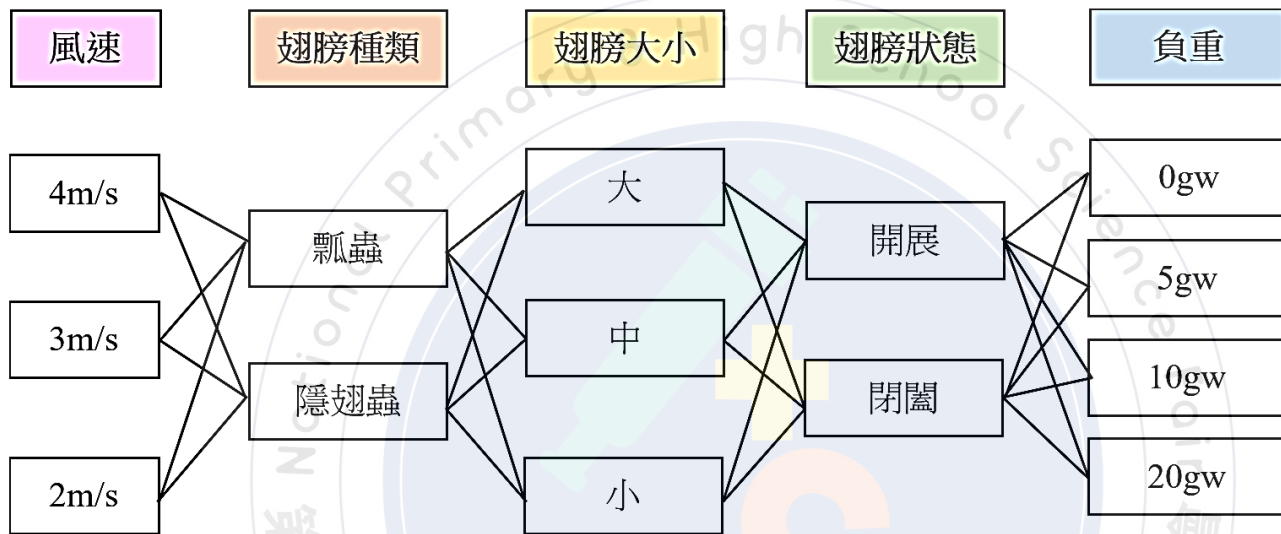
歷程及方法

作品說明書
p10.p11



歷程 及 方法

作品說明書
p13.p14



1. 為了更直截了當看出發電量(能量)的多寡，我們利用國中三年級在力學單元所教到的功與能量的觀念，直接讓風扇轉軸綁上砝碼，當風扇轉動時，就會將砝碼拉升，**砝碼重量模擬發電時的電磁阻尼，發電量越大就能將越重的砝碼拉升。**
2. 我們使用**ImageJ**來測量各個不規則翅膀的面積。

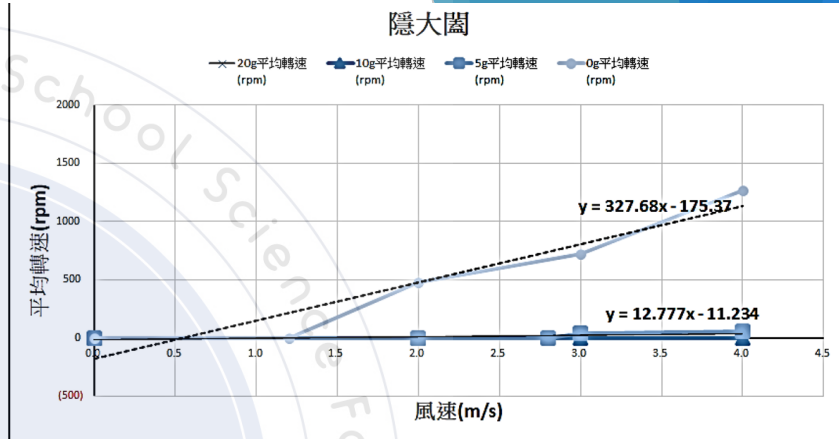
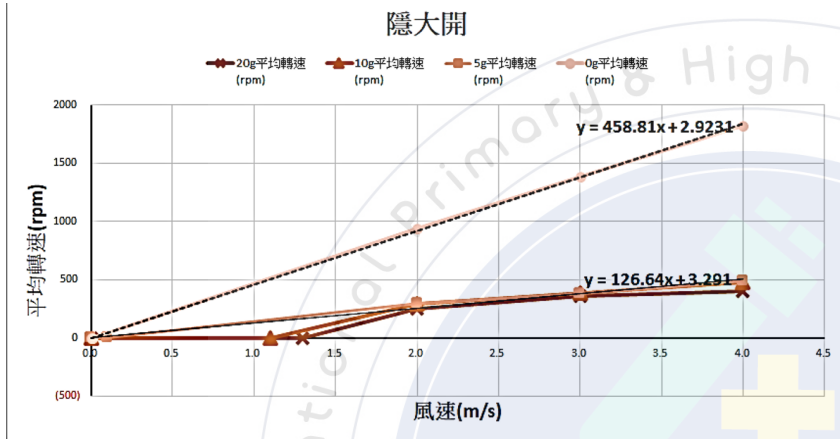
實驗結果節錄

作品說明書
p15.p16

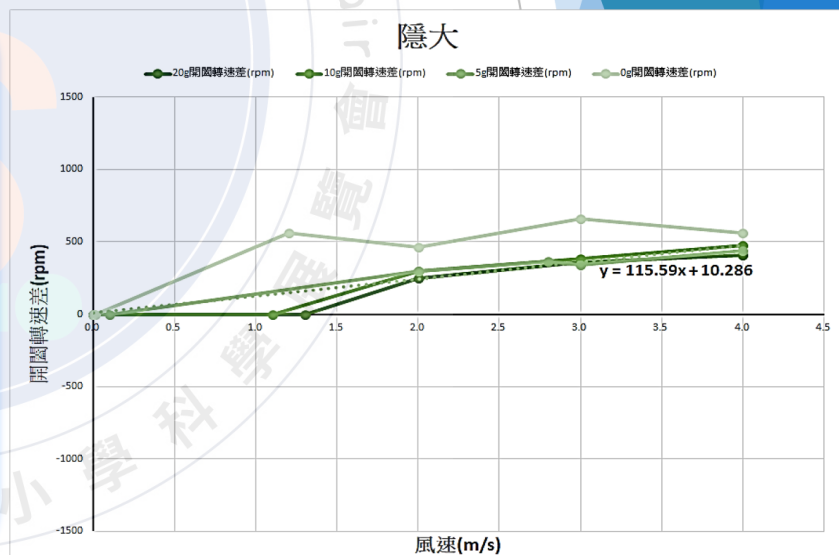
| 瓢蟲 size大 | 開展 | 長度 面積 | 20.5 103.35 | cm cm ² | | | | | | 閉闔 | 長度 面積 | 11.1 47.87 | cm cm ² | | | | | |
|-------------|----|----------|----------------|-----------------------|------|----|------|----|---------|--------|----------|---------------|-----------------------|--|--|--|--|--|
| | 負重 | 最低起動 | 風速 | 平均轉速 | 拉抬耗時 | 負重 | 最低起動 | 風速 | 平均轉速 | 拉抬耗時 | | | | | | | | |
| | 0 | 0.50 | | | | 0 | 1.10 | | | | | | | | | | | |
| | 0 | | 2 | 1724.67 | 0.61 | 0 | | 2 | 569.29 | 1.84 | | | | | | | | |
| | 0 | | 3 | 1977.33 | 0.53 | 0 | | 3 | 810.83 | 1.29 | | | | | | | | |
| | 0 | | 4 | 2402.17 | 0.44 | 0 | | 4 | 1187.83 | 0.88 | | | | | | | | |
| | 5 | 0.80 | | | | 5 | 1.60 | | | | | | | | | | | |
| | 5 | | 2 | 350.35 | 3.00 | 5 | | 2 | 41.68 | 25.19 | | | | | | | | |
| | 5 | | 3 | 395.73 | 2.65 | 5 | | 3 | 107.88 | 9.73 | | | | | | | | |
| | 5 | | 4 | 301.44 | 3.48 | 5 | | 4 | 199.37 | 5.27 | | | | | | | | |
| | 10 | 1.00 | | | | 10 | 1.80 | | | | | | | | | | | |
| | 10 | | 2 | 365.01 | 2.88 | 10 | | 2 | 6.93 | 151.50 | | | | | | | | |
| | 10 | | 3 | 353.93 | 2.97 | 10 | | 3 | 69.77 | 15.05 | | | | | | | | |
| | 10 | | 4 | 339.44 | 3.09 | 10 | | 4 | 181.24 | 5.79 | | | | | | | | |
| | 20 | 1.40 | | | | 20 | 3.40 | | | | | | | | | | | |
| | 20 | | 2 | 355.13 | 2.96 | 20 | | 2 | × | × | | | | | | | | |
| | 20 | | 3 | 328.13 | 3.20 | 20 | | 3 | × | × | | | | | | | | |
| | 20 | | 4 | 350.00 | 3.00 | 20 | | 4 | 92.81 | 11.31 | | | | | | | | |

結果討論

作品說明書
p19.p20.p21

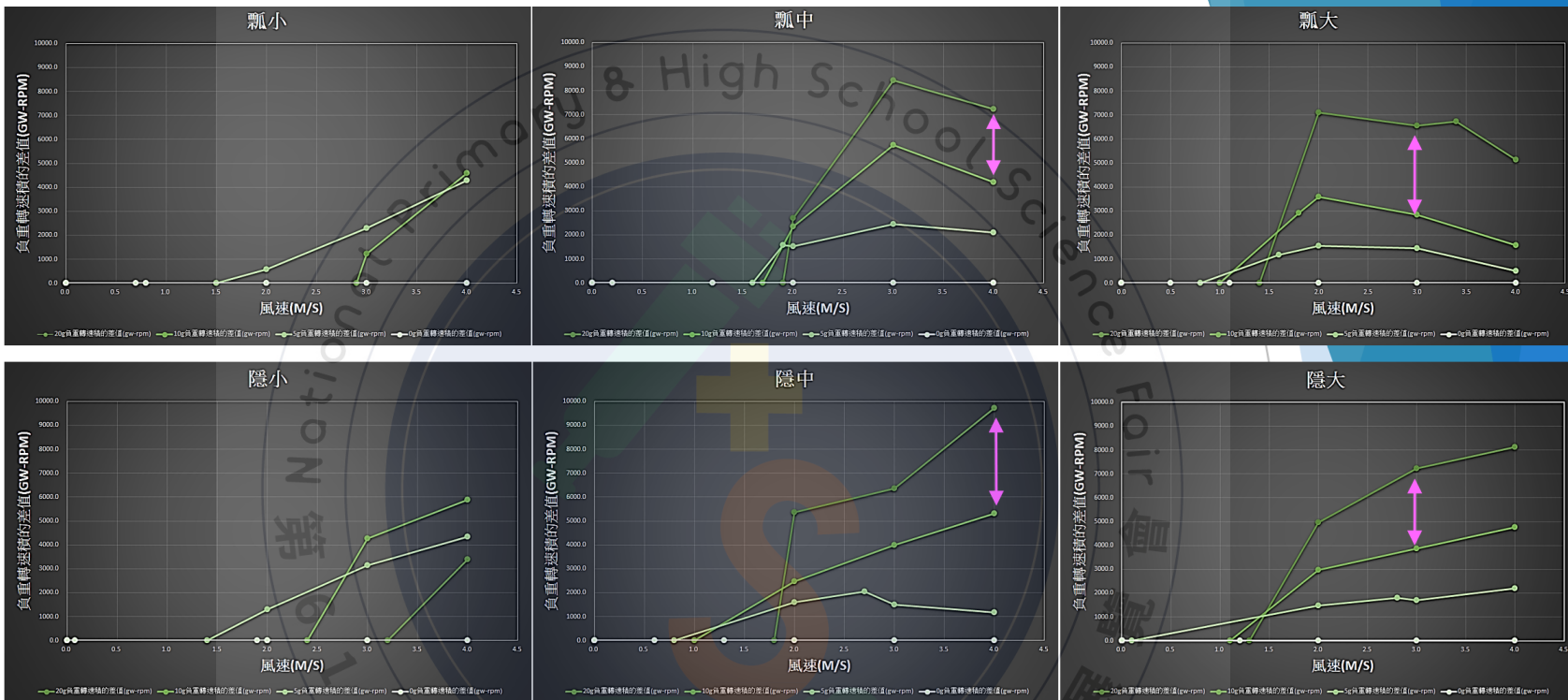


1. 中大尺寸隱翅蟲翅膀在負重後表現比較穩定，小尺寸受風速影響多。
2. **隱翅蟲開展翅膀啟動風速低**(低於1.5m/s)，**受風靈敏**，線性回歸斜率較閉闔時高131.1。
3. 現階段的數據來看，**大尺寸的隱翅蟲比瓢蟲有更多優點**，平均轉速差直逼 500rpm，更適合用於摺翅風力發電機的扇葉。



結果討論

作品說明書
p23.p24

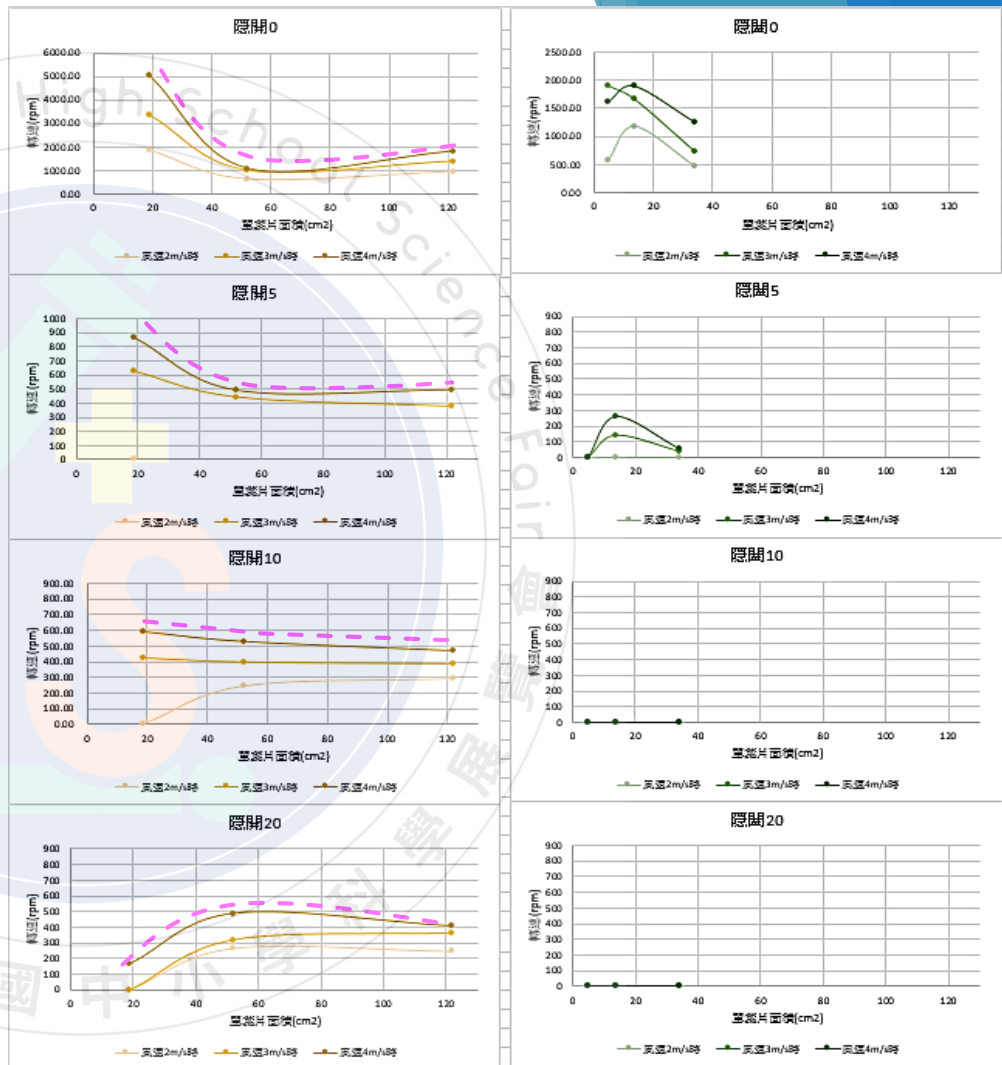


1. 轉動越頻繁，耗費在轉動的摩擦損耗就會越多，**以低轉速高電壓輸出為佳**。
2. 電磁阻力所形成的抵抗力矩，可視為增加風扇的等效轉動慣量。等效轉動慣量越大能**避免風機產生震動**、搖晃等，非用於發電的能量流失。
3. 以砝碼負重越重有助於穩固風扇基座，避免風能轉換成振動的動能，所以**高負重的狀態**，能有較佳的功率表現，差距可高達4000(gw-rpm)。

結果討論

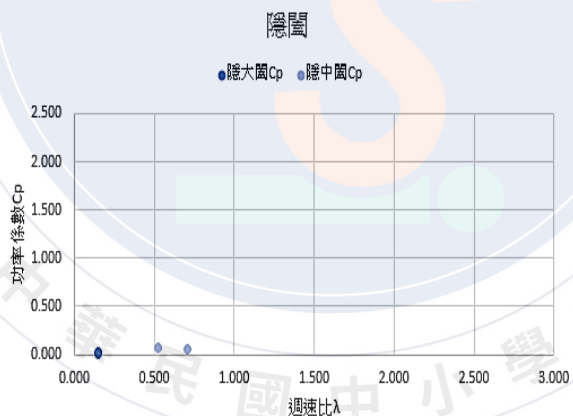
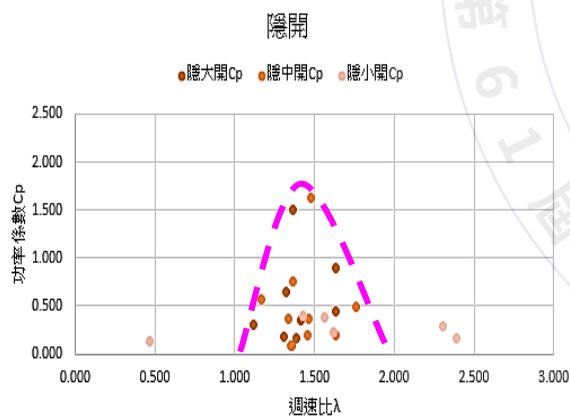
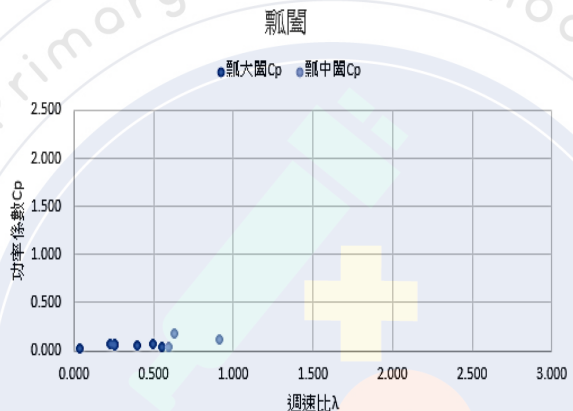
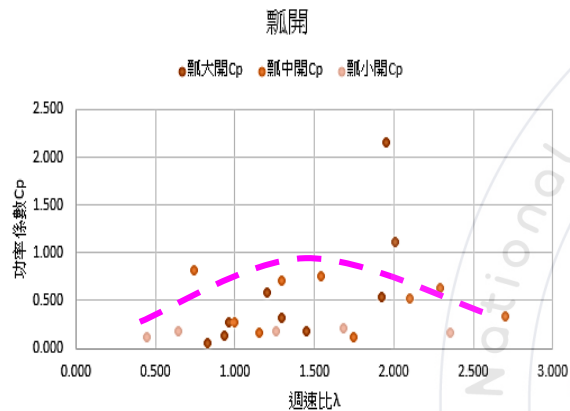
作品說明書
p25.p26

1. 隱翅蟲翅膀在小尺寸面積時受風表現與負重有很大的關聯，調整適當的負重，甚至可以讓風扇轉動維持在一定的轉速。
2. 隱翅蟲在中大翅膀的表現比較穩定，轉速趨於一致，較不易受面積大小影響，也較不易受負重影響。
3. **隱翅蟲翅膀摺疊後不利於轉動**，此不單純只是面積的影響，跟其翅膀形狀有更大的關聯。
4. 隱翅蟲翅膀在負重 10gw 的狀態下可維持**最佳的穩定度**，**風速、面積改變也不會造成劇烈影響**。



結果討論

作品說明書
p27.p28



$$\text{葉尖週速比 } \lambda = \frac{\text{翼尖速率}}{\text{真實風速}}$$

$$\text{功率係數 } C_P = \frac{\text{有效功率 } P_{eff}}{\text{風功率 } P_{wind}} = \frac{\frac{mg\Delta h}{\Delta t}}{\frac{1}{2}\rho sv^3}$$

(ρ :空氣密度, s :風扇截取面積, v :風速)

1. 以瓢蟲翅膀為原型製作的風扇，其葉尖週速比 λ 適用範圍較為廣泛，但截取的風能普遍較低，收摺之後還能有一絲絲截取風能的功能。
2. 以隱翅蟲翅膀為原型的設計所適用的葉尖週速比 λ 較窄較集中，而**截取的風能似乎稍微優於瓢蟲的性能**，而當翅膀收摺之後，幾乎不再有截取風能的功能了。

結論

作品說明書
p29

1. 這次的實驗中**隱翅蟲的翅膀表現較為出色**，我們猜測是摺疊後的面積比較小，瓢蟲的摺翅面積比**0.463**，而隱翅蟲的摺翅面積比為**0.281**，造成隱翅蟲翅膀收摺之後，幾乎不再有截取風能的功能，可避免風損。隱翅蟲開闔翅膀的差異較為顯著，各方面的表現都較瓢蟲明顯。
2. 從開闔翅膀之間所造成的功率差，將可看出最佳風速，在最佳風速時，開闔翅膀的功率差會達最大值。**選用較強電磁阻力的發電狀態也可以獲得較佳的開闔翅膀功率差**，本實驗中可**達4000(gw-rpm)**。
3. 理想的摺翅風力發電風扇原型為大尺寸的隱翅蟲，**搭配較高的電磁阻力(高負重)**，如此一來，可獲得低轉速高功率的表現，不但可減少轉動磨損，而且**有較佳的功率係數 C_p 表現(1.5%)**。當隱翅蟲翅膀閉闔後不利於轉動，適合運用在颱風來襲時停機防損，即使風速很強，稍加一點阻力即可停住風扇，另外其**葉尖週速比與功率係數穩定集中，減少風力發電供電不穩定的弊病**。
4. 當轉速**到達某一臨界值**之後，即使風速再增強，轉速也無法再提升了，風速與發電功率的關係，也會有類似的情形。

結論

作品說明書
p29

5. 當未負重時，也就是未有電磁阻力時，尺寸越小轉越快；增加電磁阻力之後，尺寸越小反而轉越慢。換言之，**空轉速快不代表發電量較多**。
6. 開闔翅膀因改變受風面積也改變轉動慣量，不但影響轉動也會影響發電的功率，閉闔翅膀之後**轉速要變快還是變慢，不能引用角動量守恆來解釋之**，必須綜合考量其風阻面積等改變所造成的力矩變化。
7. 將**摺翅仿生學運用在風力發電機**的設計上，經過本實驗多方測試討論與評估，**是相當環保而且可行的做法**，值得相關部門持續研發。

未來展望

作品說明書
p29

1. 希望能夠拓展仿生摺翅的概念，並且嘗試利用鳥類或蝙蝠的摺疊翅膀，並運用3D列印技術，**模擬有厚度的翅膀**扇葉。
2. 將仿生摺翅的概念運用在垂直軸式的風機，並製作出家家戶戶屋頂上製做出可廣泛**用於家庭發電**的產品。

參考資料

- 圖解風力發電入門。牛山泉著，李漢庭譯。2010。世茂出版社出版社。
- 日本宣布首次弄清隱翅蟲「隱翅」的巧妙機制 <https://kknews.cc/science/alollog.html>
- 台灣風力發電 維基百科網頁