

中華民國第 54 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 生活與應用科學科

第三名

080817

御風少年～探討水平軸風車與垂直軸風車對發電效能的影響

學校名稱：高雄市三民區東光國民小學

作者： 小六 林儀恩 小六 王宜琳 小五 盧彥璋	指導老師： 楊宜倫 陳為志
-----------------------------------	---------------------

關鍵詞：風力、發電、綠色能源

御風少年

~探討水平軸風車與垂直軸風車對發電效能的影響

摘要

本研究主要在探討水平軸與垂直軸發電機的影響因素，與發電效能、啟動風速、風向範圍的比較，藉此找出較佳的發電模式，提出相關建議做風力發電設置的參考。經過一連串研究，我們瞭解以水平風車來說，葉片角度 15 度、翼樑角度 0 度、較短的翼樑(也要考量馬達啟動扭矩)、翼樑 2~3 軸、螺旋槳升力型的扇葉發電效果最好。而以垂直軸發電機來說，打蛋型發電效能佳，但啟動風速高，需要加裝桶型葉片來降低啟動風速，葉片寬窄比例以 10.5cm*13cm 發電效能較佳。比較起來螺旋槳型的水平軸風車，發電效能優於垂直軸的打蛋型，如果以大馬達來啟動，發電效能會明顯提高，此時要考量葉片扭力問題。最後我們做出發電 31V 兼具升力與阻力效果的水平軸葉片，讓 10 顆 3V LED 發出亮光！

壹、研究動機

「御風男孩」一書中，十四歲的馬拉威失學小男孩坎寬巴用想像力與創造力，造了一座風車，帶來的電力不僅照亮自己的未來，而且富足了家鄉。而我們在自然課中也學過風向與風力的測量，了解到台灣是一個高度依賴進口能源的國家，隨著地球暖化和石油危機帶來的隱憂，尋求適當的綠色能源有其必要性。尤其最近核四停建議題又鬧得沸沸揚揚，我們在媒體上得知台灣有兩位民眾分別在自家環境興建小型風力發電設備，成效頗佳。在好奇心驅使下，我們親身探訪，了解兩位先生所建設的風力發電設備與其效能，發現他們推崇的設備觀點不同，一位是使用水平軸風力發電機，另一位是使用垂直軸風力發電。究竟，這兩種風力發電模式有何優缺點？我們有沒有辦法找出一種發電效能較佳的風力發電方式？想藉著這次研究來一一探索。



貳、研究目的

- 一、了解風力發電的基本原理。
- 二、透過實驗了解水平軸與垂直軸風力發電的影響因素。
- 三、比較水平軸風力發電和垂直軸風力發電的優缺點。
- 四、運用創意設計發電效能較佳的風力發電機形式。
- 五、提出設置風力發電的具體建議。

參、實驗設備與器材

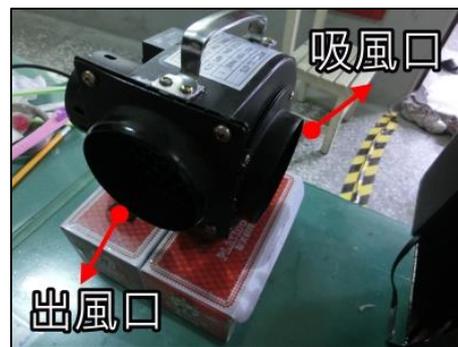
一、測量電壓與轉速的實驗：

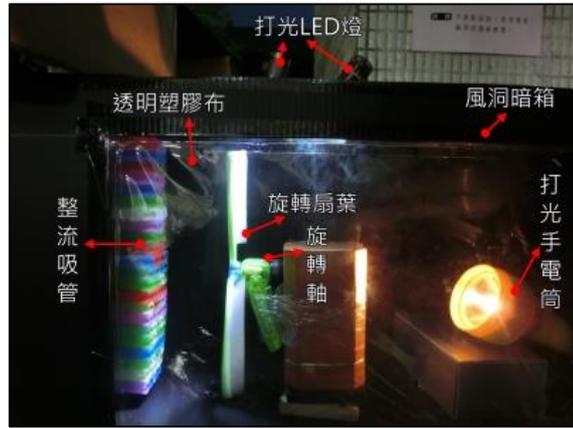
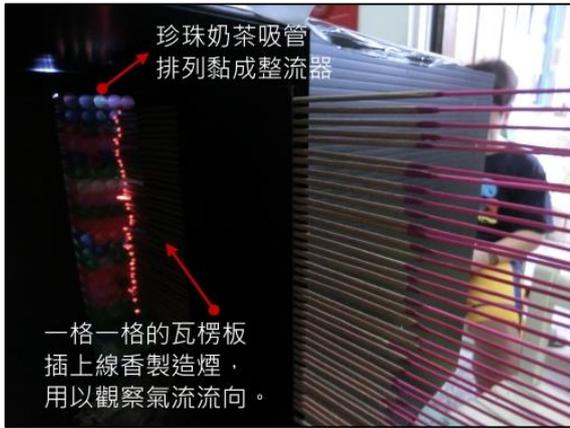


二、馬達比較：

<h3>長軸馬達</h3>  <p>最大電壓值：18VAC 無電刷 輸出直流電時需要整流線路</p>	<h3>直流3V電刷馬達</h3>  <p>磁鐵 線圈 電刷 最大電壓值：3VDC 不需要整流線路</p> 	 <p>使用長軸馬達的風車</p> 
--	---	---

三、觀察氣流的實驗





四、測量啟動風速的實驗



五、測量尾翼靈敏度的實驗



六、測量啟動角度的實驗



七、葉片扭力的實驗



八、其他：剪刀、卡紙、護貝膠膜、護貝機、吸管、量角器、熱熔槍、尺、美工刀、3D 列印機、電腦軟體、碼表

肆、研究過程與結果



一、從實地採訪中了解水平軸發電機與垂直軸發電機實際應用的情形。

※採訪對象：嘉義布袋新岑的李先生與苗栗嘉新里的賴先生

※結果比較：

對象	嘉義布袋新岑的李先生	苗栗嘉新里的賴先生
發電設備	以水平軸發電機為主	以垂直軸發電機為主，配合太陽能發電。
周邊環境	布袋漁塭附近，周圍空曠風力強。	居家巷子，一側是空地，另一邊有房子。風力不強，但風場尚佳。
發電效能	三台每月最高可發電 1000 度	三年省十萬的電費

❖ 嘉義李先生的發電設備：



❖ 苗栗賴先生的發電設備：



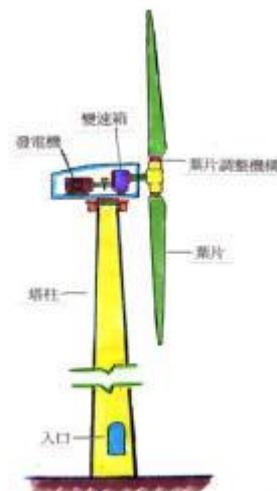
- ❖ 心得：從兩次探訪中我們深深了解，原來製造綠色能源不是遙遠的夢想，它不需有太多花費，兩位先生都告訴我們，**一支小型風力發電機大約只要五萬元左右即可設置**，這樣的話每個家庭幾乎都可以投資。至於設置的地點，無論是風場強勁的沿海地帶，或是住家頂樓都適合，因此，這對能源缺乏的台灣人民而言，是一個值得深思仿效的做法。
- ❖ 疑問：兩位先生推崇的風力發電設備不同，李先生以水平軸發電機為主，賴先生則以垂直軸發電機為主。究竟，**哪一種風力發電機的發電效能比較好？哪些因素會影響風力發電的效能？**我們想進一步深入探究。

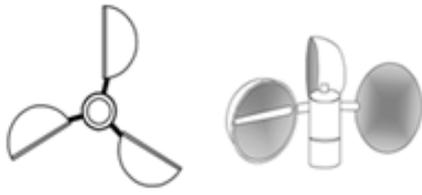
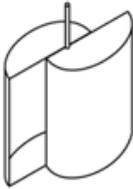
二、蒐集資料認識水平軸與垂直軸發電機：

(一) 風力發電的基本原理

風力發電機組由兩大部分組成，**風力機(將風能轉換為機械能)及發電機(將機械能轉換為電能)**，它還有包括葉片轉子、煞車系統、低高速轉軸、齒輪箱、控制箱、發電機、迎風馬達、感測器系統，電力箱等組件。風力機無法將全部的風能轉為機械能，根據學者的研究，葉片氣動轉換之極限效率為59.3%。而大多數葉片的轉換效率約在30~45%之間，經由機電轉換後，風力機的輸出效率約在20~40%之間。

一般而言，風車轉動的原理是因風車的斜面葉片受到風的作用力，產生一股反抗的力量，力量作用而造成風車的轉動，就是作用力與反作用力的原理。風力發電機組的葉片種類，依照傳動軸與水平面的相對位置可分為水平式與垂直式：

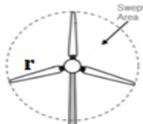
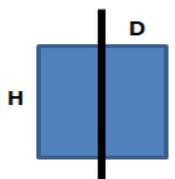
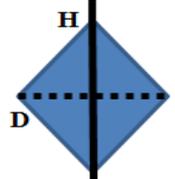


水 平 軸 風 車	葉片型	葉片傳動軸 平行於 水平面	垂 直 軸 風 車	葉片型	葉片傳動軸 垂直於 水平面
	荷蘭型			風杯型	
	螺旋槳型			桶型	
	多翼型			旋翼型	

	帆型			打蛋型	
	優點	<ol style="list-style-type: none"> 1. 風車塔高度較高，輪殼高度增高，因此可得到較快的風速。 2. 迎風角固定時，空氣動力負荷固定。 3. 有開發利用的歷史。 自動啟動性大。 		優點	<ol style="list-style-type: none"> 1. 轉子為非定向性，不需要橫搖結構。 2. 不用承受旋轉性負荷。 3. 不受風切影響。 4. 傳動設備置於地面，容易進行安全檢查。 5. 構造單純不需改變螺距結構。
	缺點	<ol style="list-style-type: none"> 1. 必須具有使轉子面正對風向的橫搖控制。 2. 方向控制時，因承受旋轉性負荷而震動。 3. 必須具備高價並容易發生故障的橫搖結構。 4. 葉片形狀複雜導致量產加工困難。 5. 可變螺距結構使構造複雜化。 6. 高塔使葉片前端與傳動設備所產生噪音容易傳播。 		缺點	<ol style="list-style-type: none"> 1. 轉子高度低，因此可用風速也較低。 2. 對應空氣動力效率最高點周數比低，需要加速裝置。 3. 為了架設由風車塔支撐的支撐電纜，必須增加設置面積。 4. 打蛋型風車的自動啟動性差。 5. 開發及利用的歷史尚淺，實績少。

(二)風車轉動掃過面積的計算

根據學者的研究，風車轉動所掃過面積大小與發電效能有關，其計算方式分為三類：

		A: 風車掃過面積	
水平軸風車	種類		
	荷蘭型		圓形 $A = \pi r^2$
	螺旋槳型		
	多翼型		
帆型			
垂直軸風車	種類		
	划槳翼型		矩形 $A = H * D$
	桶型		
	旋翼型		
打蛋型		近似菱形 $A = 1/2 H * D$	

三、觀察各地風力發電設備：

風車形式		
地點	旗山河岸	正修科大與高苑科大
類型	水平軸多翼型	垂直軸打蛋型兼桶型
風車形式		
地點	旗津風車公園	新光碼頭
類型	水平軸螺旋槳型	水平軸螺旋槳型

研究一：找出最佳的實驗環境

(一)實作風洞：

方法：製作風洞並實測風場環境。



1.根據設計圖進行木板剪裁和安裝。

2. 風洞兩側採用透明防水布方便觀察，並標註風力發電機測試點 A~I。

3.風洞完成品

(二) 風場量測比較

方法：將風速計架在電風扇前，量測有無風洞時，不同位置與不同強弱風力下的風速(風場概況)， 每個位置做三次求取平均值。

1. 無風洞時 (※說明：因為電風扇中間有圓蓋，因此接近中央高 30cm 部分風力會受影響。)

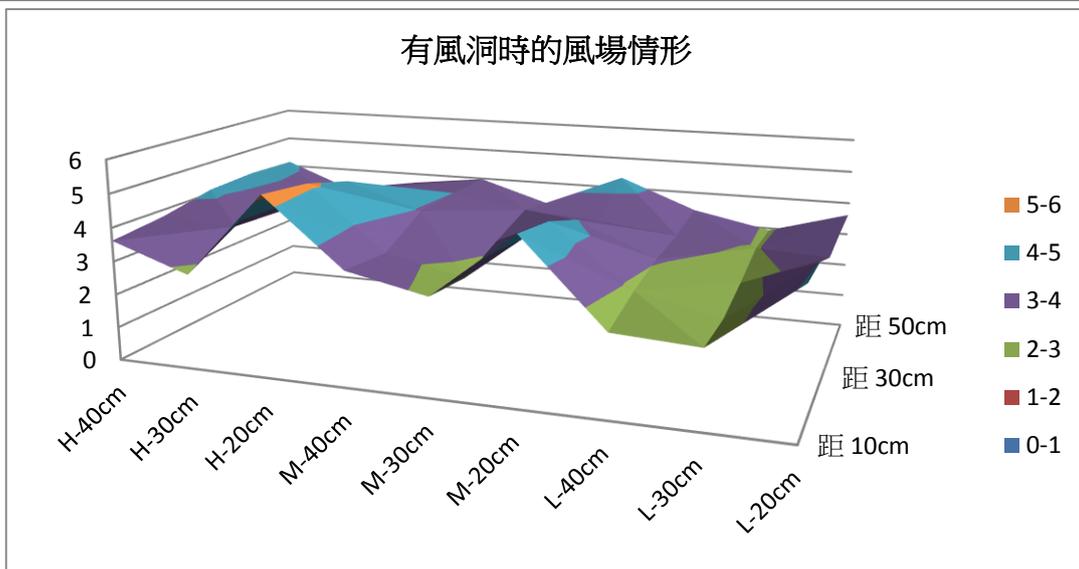
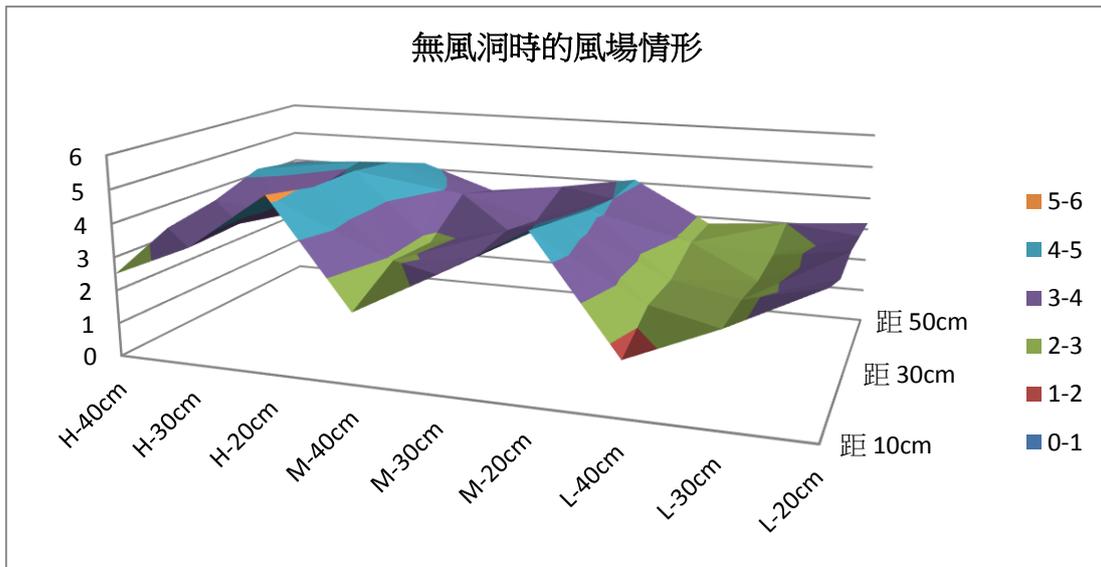
風力		風力 1(弱)					風力 2(中)					風力 3(強)				
距離		10	20	30	40	50	10	20	30	40	50	10	20	30	40	50
風速	高 40cm	1.6	2.3	2.3	2.8	2.8	2.1	2.9	2.8	3.8	3.4	2.5	3.28	3.6	4.16	3.94
	高 30cm	2.7	2.7	2.5	2.6	3	3.4	3.2	3.4	3.1	3.7	3.5	3.6	3.3	3.8	4.1
	高 20cm	4	3.5	3.6	3.4	3.2	4.8	4.5	4.2	4	4.1	5.2	4.9	4.9	4.7	4.2

風速單位：m/s

2. 有風洞時

風力		風力 1(弱)					風力 2(中)					風力 3(強)				
距離		10	20	30	40	50	10	20	30	40	50	10	20	30	40	50
風速	2.4	2.8	3.06	3.16	3.42	3.38	3.24	3.94	4	3.98	3.62	3.8	4.12	4.2	4.14	3.94
	2.26	2.24	2.56	2.96	2.94	2.88	2.72	3.2	3.62	3.26	2.82	3.66	3.56	3.74	3.26	4.1
	4.16	4.04	3.52	3.6	3.62	4.8	4.56	4.04	3.44	4.34	5.32	5.14	4.72	4.00	3.7	4.2

風速單位：m/s

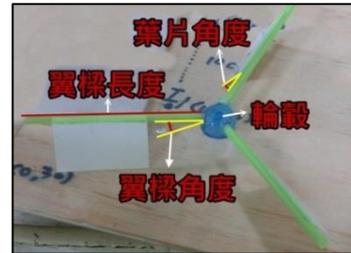


發現：風洞環境內部風場較穩定，最大風速較無風洞略大一點。因此以下實驗在風洞中進行。

研究二：了解水平軸風力發電機的影響因素

實驗說明：

- ❖ 名詞解釋：以下的實驗，均以右圖的名詞來解釋。
- ❖ 環境說明：以直徑為 40cm 的風扇，在風洞中進行實驗。



方法：

- (一)在風洞中擺放 3V 小馬達，裝上各式水平軸葉片，以 5m/s 的風速轉動葉片，測量電壓值。(做 10 次，去頭去尾取最接近的五次求平均。)
- (二)依序改變葉片角度、翼樑角度、沒有尾樑時的葉片距輪殼位置、有尾樑時的葉片距輪殼位置、葉片大小、葉片比例、葉片形狀、不同比例的倒三角形葉片、不同軸數的翼樑、阻力型風車與升力型風車等變因，重複實驗步驟做記錄。
- (三)知其然還要知其所以然。將各式扇葉放在自製風洞暗箱中旋轉，一端以鼓風機吸風，另一端燃燒線香將煙霧從整流吸管中流出，觀察記錄氣流流動的情形，以映證推論實驗結果。

結果：

觀察一：沒有扇葉旋轉時氣流流動的情形

發現：從煙霧飄散的結果得知，在沒有扇葉旋轉的情況下，因為另一端有鼓風機的吸風裝置，氣流是直線前進的。



實驗(一)：探討葉片角度對發電效能的影響

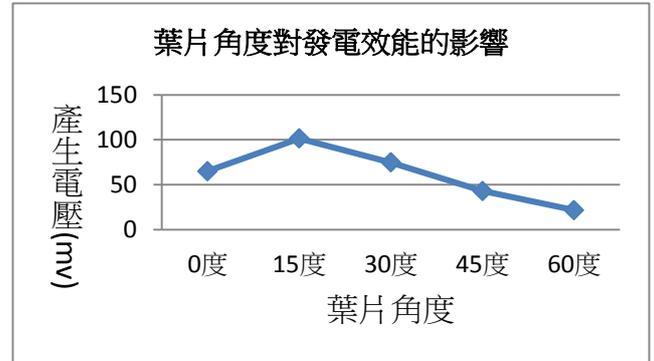
控制變因：風車形式(荷蘭型風車)、翼樑角度(0 度)、翼樑長度(12cm)、葉片大小(2*10 平方公分)、風速(5m/s)、葉片距輪殼位置、3V 馬達

葉片角度	0 度	15 度	30 度	45 度	60 度
葉片					
氣流流向					

觀察	大部分的氣流都被打回去了。	能夠通過較多的氣流，氣流通過葉片之後迅速地往上，且有渦流產生。	氣流通過葉片之後往上飄，有較多的氣流流失，渦流不清楚。	更多的氣流直接通過葉片，無渦流。	風車受風面積小，速度變慢，氣流幾乎直接通過葉片，無渦流。
平均電壓	64.992 mV	101.516 mV	74.868 mV	43.052 mV	21.590 mV

發現：

- (1)葉片角度 0 度時，風迎面而來，與葉片呈垂直角度，風阻力最大，氣流大多被打回去了，因此旋轉效果不好。
- (2)葉片角度 15 度時，有足夠的氣流推向前產生旋轉，葉片的角度最適中。
- (3)葉片角度太大時，很多氣流直接通過，受風面積相對變小，因此葉片旋轉效果變差，發電效能自然也差。

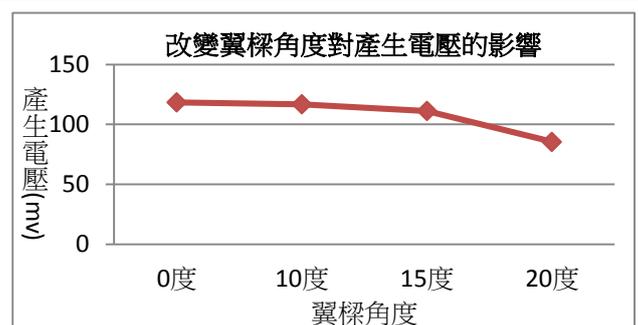


實驗(二)：探討翼樑角度對發電效能的影響

控制變因：風車形式(荷蘭型風車)、葉片角度(15 度)、翼樑長度 (12cm)、葉片大小(2*10 平方公分)、風速(5m/s)、葉片距輪軸位置、3V 馬達

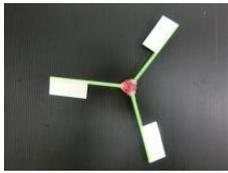
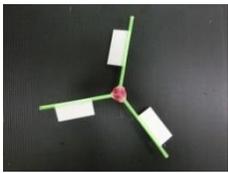
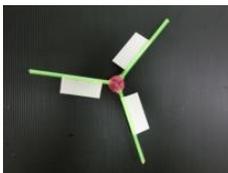
翼樑角度	0 度	10 度	15 度	20 度
葉片				
氣流流向				
觀察	氣流通過葉片之後迅速地往上，且葉片後上方有渦流。	葉片掃到的氣流較少，有渦流。	一些氣流流失掉了，有渦流。	受風面積最小，最多的氣流流失掉。
平均電壓	118.338 mV	116.784 mV	111.164 mV	85.498 mV

發現：當翼樑角度是 0 度時，受風面積最大，作用的氣流多且快，因此發電效能最大。



實驗(三)：探討同翼樑長度時，葉片距輪軸位置對發電效能的影響。

控制變因：風車形式(荷蘭型風車)、葉片角度(15度)、翼樑長度(12cm)、翼樑角度(0度)、翼樑三根、葉片大小(2.5*6 平方公分)、風速(5m/s)、3V 馬達

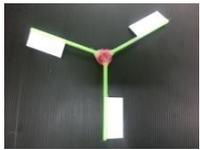
與輪軸距離	6cm	3.5cm	1cm
葉片			
氣流流向			
觀察	氣流集中在尾端有葉片的地方穿過，通過葉片後氣流往上升。	氣流從集中在有中間有葉片的部位，翼樑尾端有明顯的擾流形成。	氣流集中在有葉片的部位，翼樑尾端有擾流形成。
平均電壓	103.252 mV	68.62 mV	27.8582 mV

發現：當翼樑長度相同，雖然掃過面積一樣，但氣流作用在葉片的位置不同，結果就會不同。

葉片在後端的旋轉快速會產生升力，葉片在前端的，尾樑會形成擾流，因此旋轉效果差，發電效能自然也較差。

實驗(四)：探討不同翼樑長度時，葉片距輪軸位置對發電效能的影響。

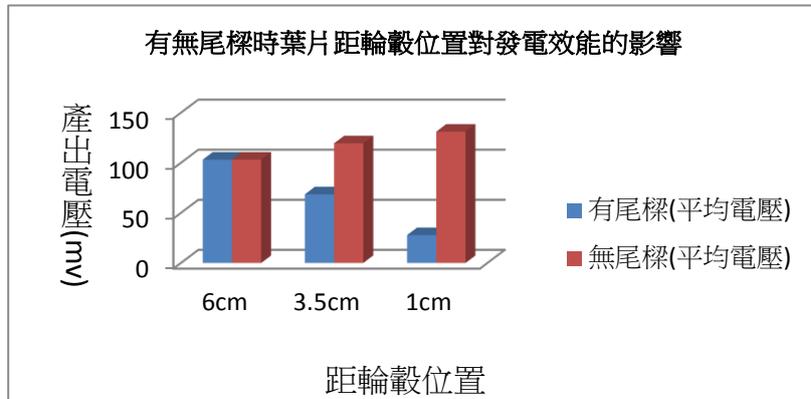
控制變因：風車形式(荷蘭型風車)、葉片角度(15度)、翼樑角度(0度)、翼樑三根、葉片大小(2.5*6 平方公分)、風速(6m/s)、3V 馬達

與輪軸距離	6cm	3.5cm	1cm
葉片			
氣流流向			
觀察	部分氣流從葉片中間穿過，葉片上方有渦流。	氣流較多一點，在通過中間翼樑的地方較亂。	翼樑較短，氣流流速很快，葉片快速旋轉。
平均電壓	103.252 mV	119.516 mV	131.186 mV

發現：當葉片大小一樣，翼樑較短的旋轉速度較快，氣流流速快又集中，發電效能較好。

討論：從前面的實驗我們得知，當葉片大小相同，翼樑越短的扇葉，雖然掃過面積較小，但相對的旋轉半徑較小，旋轉速度較快，產出電壓也較強。而有尾樑時，葉片大小一樣，距離輪轂位置也一樣，但尾樑會形成擾流，旋轉會變慢，發電效能也會受影響。

思考：這樣的結果意味著越小型的風車發電效能越好嗎？經過討論的結果，我們認為不是這樣的，因為我們目前所用的電風扇風的範圍較小，如果在戶外，吹來的風範圍很大，太小型的風車會浪費很多風的資源，發電效能一定也會受到影響。

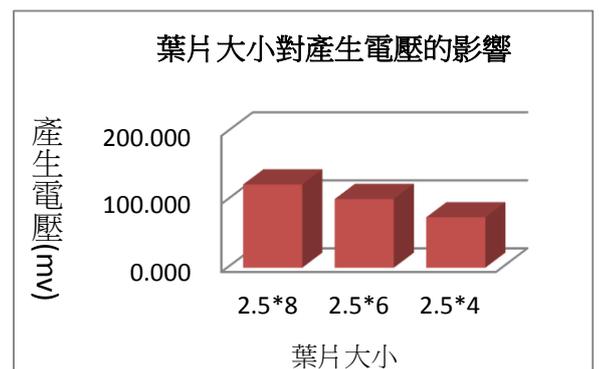


實驗(五)：探討葉片大小對發電效能的影響。

控制變因：風車形式(荷蘭型風車)、葉片角度(15度)、翼樑長度(12cm)、翼樑角度(0度)、翼樑三根、風速(5m/s)、3V馬達

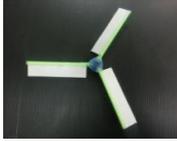
葉片大小	2.5*8(12.15g)	2.5*6(10.41g)	2.5*4(8.3g)
葉片			
氣流流向			
觀察	作用的氣流最多，葉片尾端有渦流。	一些氣流從中間流失掉，氣流通過葉片之後迅速上升，葉片尾端有渦流。	氣流通過葉片之後迅速的上升，葉片尾端有渦流，但作用的氣流較少。
平均電壓	122.490 mV	101.082 mV	74.194 mV

發現：儘管越大的葉片重量越重，但在足夠的風力下，一旦開始旋轉，也就是克服靜摩擦力後，重量其實對旋轉的效果並不大，此時葉片越大受風面積越大，作用的氣流越多，產生的電壓也越強。

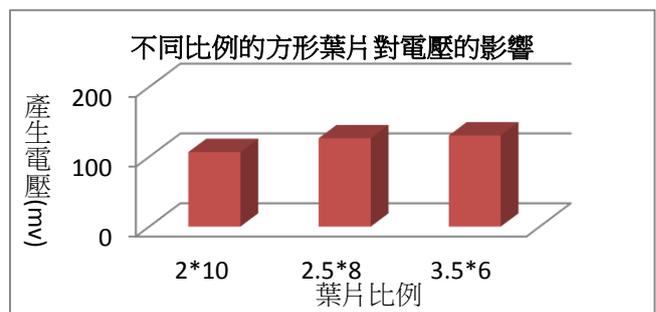


實驗(六)：探討葉片面積相同時，葉片比例不同對發電效能的影響。

控制變因：風車形式(荷蘭型風車)、葉片角度(15度)、翼樑長度(12cm)、翼樑角度(0度)、翼樑根數(3根)、風速(5m/s)、翼樑三根、葉片面積(每片接近20平方公分，共三片)、方形葉片、3V馬達

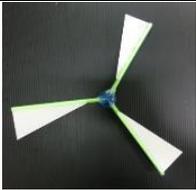
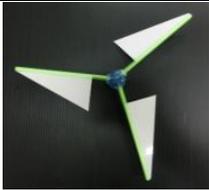
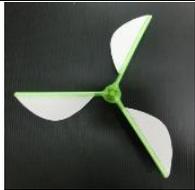
葉片比例	2*10	2.5*8	3.5*6
葉片			
氣流流向			
觀察	氣流平順的流過去，通過葉片之後拖很長才上升。	氣流通過葉片之後更快速的上升，葉片後端有一點渦流。	尾端的氣流流速更快，一樣迅速往上升。
平均電壓	106.696 mV	126.518 mV	130.49 mV

發現：3.5*6的葉片比例較接近正方形，翼樑後端的作用力較大，旋轉產生的力矩較大，氣流流速較快，產生電壓也較強。



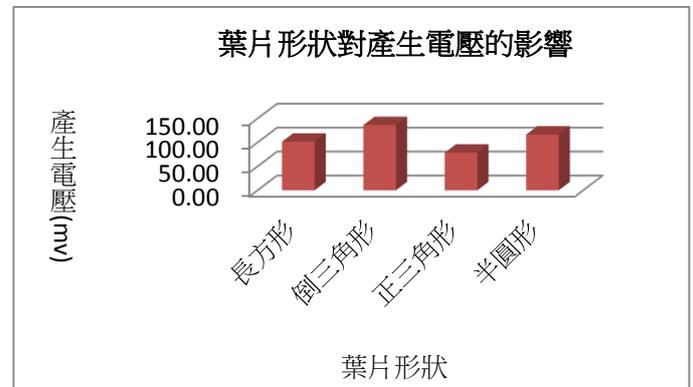
實驗(七)：探討葉片形狀對發電效能的影響。

控制變因：風車形式(荷蘭型風車)、葉片角度(15度)、翼樑長度(12cm)、翼樑角度(0度)、翼樑根數(3根)、風速(5m/s)、葉片面積(每片接近20平方公分，共三片)、3V馬達

葉片形狀	長方形	倒三角形	正三角形	半圓形
葉片				
氣流流向				

觀 察	氣流通過葉片之後迅速地往上，且均勻通過。	氣流集中在尾端部位，通過葉片之後急速往上。	氣流較多在靠近輪轂的位置，氣流通過後一樣迅速往上升。	葉片中間的氣流較集中，外側的氣流較散。
平均電壓	101.520 mV	136.260 mV	78.774 mV	116.488 mV

發現：四種不同的形狀來說，倒三角形最外圍的面積最寬，產生的力矩也最大，因此旋轉效果最好，產生的氣流集中在後端，電壓也最強。長方形前後平均，氣流均勻分散通過，產生的力矩沒有倒三角形好。正三角形則外圍的面積最小，產生的力矩最小，氣流集中在中間，發電電壓也最小。



疑問：雖然倒三角形產生的力矩大，但經過詢問結果發現，實際上大風車要考量葉片的堅固性，高速風車很少使用三角型葉片。

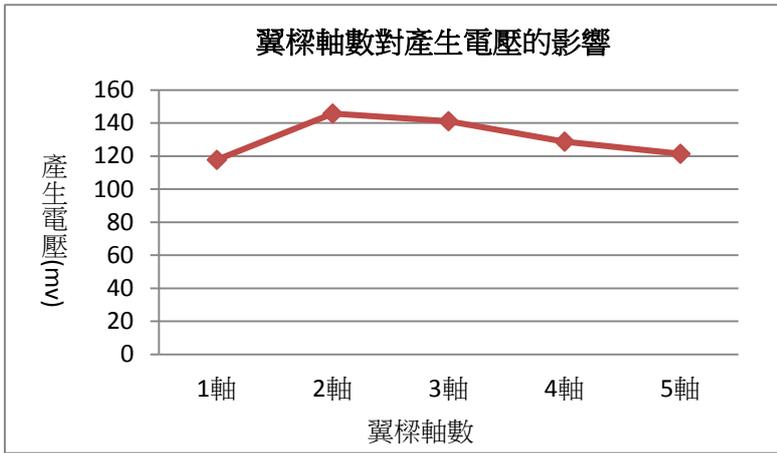
實驗(八)：探討不同軸數的翼樑對發電效能的影響。

控制變因：風車形式(荷蘭型風車)、葉片角度(15度)、翼樑長度(12cm)、翼樑角度(0度)、風速(5m/s)、葉片面積(每片接近 20 平方公分，每軸 1 片)、葉片形狀、葉片距輪轂位置、3V 馬達

葉片軸數	1 軸	2 軸	3 軸	4 軸	5 軸
葉 片					
氣流流向					
觀 察	很多氣流直接通過，沒有被葉片捕捉到。	氣流迅速通過，通過葉片後氣流會上揚。	氣流快速通過，葉片尾端有渦流。	氣流快速通過，葉片尾端有渦流。	氣流快速通過，葉片後面有渦流。
平均電壓	117.622 mV	145.630 mV	141.050 mV	128.622 mV	121.356 mV

推論：

- (1)翼樑軸數對產生電壓的影響依序為：2 軸 > 3 軸 > 4 軸 > 5 軸 > 1 軸
- (2)翼樑 1 軸時，風車嚴重晃動噪音很大。2 軸的風車發電效能雖然最好，但感覺也比較容易晃動。
- (3) 1 軸的風車最不平衡，捕捉到的氣流較少，發電效果最差。2 軸的風車重量最輕，旋轉效果最好，氣流流速快，發電效果也最佳。3 軸的風車與 2 軸的差不多，發電效能也不錯，僅次於 2 軸一點點，但較平衡，旋轉起來穩定許多。4、5 軸風車重量較重，發電效能就差了一點。



思考：難怪我們看到的風車，大多是以 3 軸居多，應該是為了兼顧旋轉速度與穩定性吧！

實驗(九)：探討阻力型風車與升力型風車對發電效能的影響。

❖ 名詞解釋：

- (1) **阻力型風車**：阻力型風車利用作用於風向垂直面上的力，稱為阻力。
- (2) **升力型風車**：對於翼型等物體擋住氣流的流動，不僅會產生氣流方向的阻力，也會有與氣流方向產生垂直的升力。



升力型風車葉片為機翼狀，一為平面，一為隆起曲面。依據伯努力定律，曲面流速快壓力小、而平面流速慢壓力大，因而產生升力。

控制變因：葉片角度(15度)、翼樑長度(12cm)、翼樑角度(0度)、風速(5m/s)、葉片面積(每片接近20平方公分，共三片)，翼樑根數(3根)、3V馬達

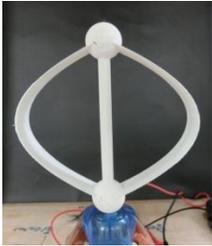
葉片形式	螺旋槳形(升力型)	倒三角形(阻力型)	長方形(阻力型)
葉片			
氣流流向			
觀察	氣流通過葉片之後有明顯的上升氣流，上揚角度約 45°。	氣流通過葉片之後，尾端氣流略為上揚，上揚角度約 10°。	氣流通過葉片之後，尾端氣流上揚角度較小，大約為 5°。
平均電壓	199.422 mV	141.050 mV	118.338 mV

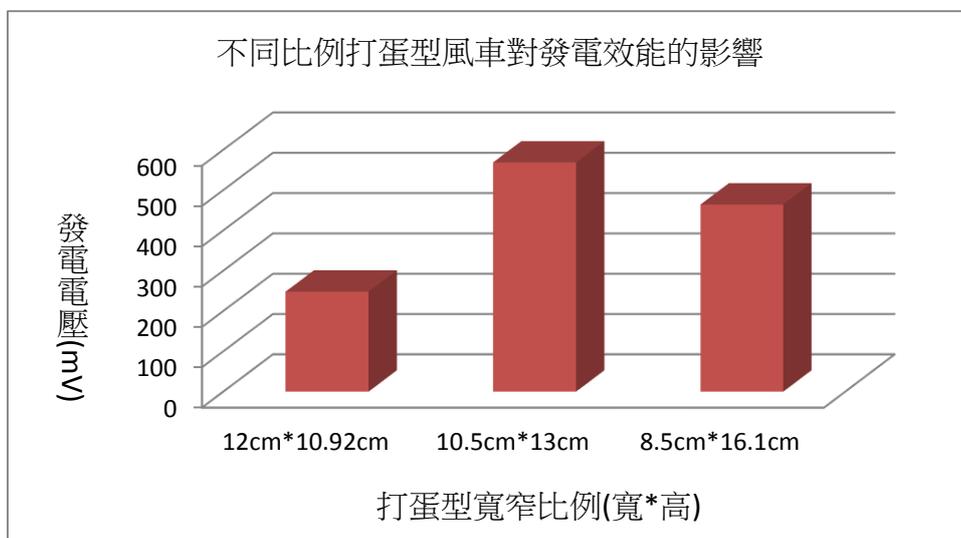
發現：葉片形式對電壓的影響依序為：螺旋槳形(升力型) > 倒三角形(阻力型) > 長方形(阻力型)。升力型的風車，運用翼型葉片的伯努力原理，將氣流阻力轉化為與氣流方向垂直的升力，進一步加速螺旋槳型風車葉片的旋轉，使得發電效能提升。

研究二：探討垂直軸風車對發電效能的影響

實驗(一)：探討不同寬窄比例的打蛋型風車的發電效果。

控制變因：風速(10m/s)、掃過葉片面積(大約 136.5 平方公分)、打蛋型風車型式、3V 馬達

比例	12cm*10.92cm	10.5cm*13cm	8.5cm*16.1cm
葉片形狀			
平均	247.98 mV	568.666 mV	464.316mV

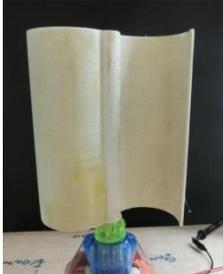


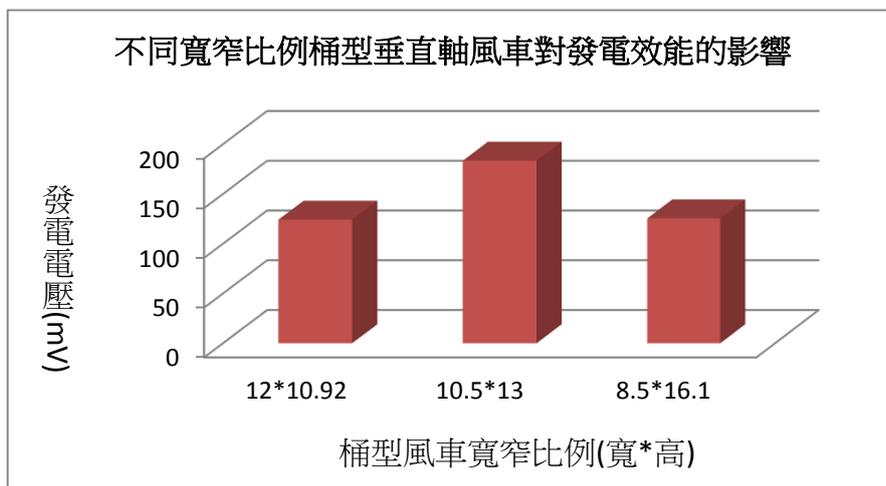
發現：不同比例的打蛋型風車對發電效能的影響，依序為：10.5*13cm>8.5*16.1cm >12*10.92cm

推論：在風速 10m/s 下三種比例的打蛋型風車都能啟動發電機並旋轉，但寬窄比例較適中的 10.5cm*13cm 打蛋型風車，葉片扭力夠大，旋轉半徑也不會太大，旋轉最快，發電效果最好。

實驗(二)：探討不同寬窄比例的桶型風車的發電效果。

控制變因：風速(10m/s)、掃過葉片面積(大約 136.5 平方公分)、桶型風車、3V 馬達

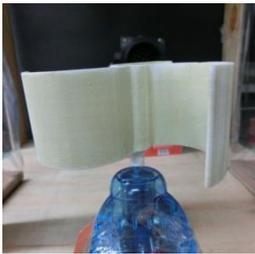
比例	12cm*10.92cm	10.5cm*13cm	8.5cm*16.1cm
葉片形狀			
平均	124.108mV	183.406mV	125.437mV

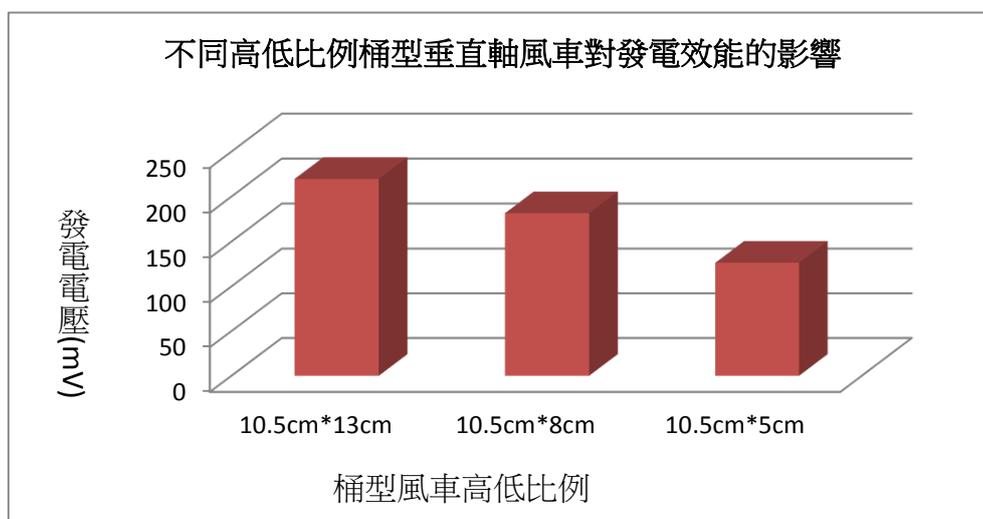


發現：不同寬窄比例的桶型風車對發電效能的影響，依序為：10.5*13cm > 8.5*16.1cm > 12*10.92cm
 推論：在風速 10m/s 下三種比例的桶型風車都能啟動發電機並旋轉，但寬窄比例較適中的 10.5cm*13cm 桶型風車，葉片扭力夠大，旋轉半徑也不會太大，旋轉最快，發電效果最好。

實驗(三)：探討不同高低比例的桶型風車的發電效果。

控制變因：風速(10m/s)、桶型 3 葉風車、3V 馬達

比例	10.5cm*13cm	10.5cm*8cm	10.5cm*5cm
葉片形狀			
平均	219.582mV	181.46mV	126.404mV

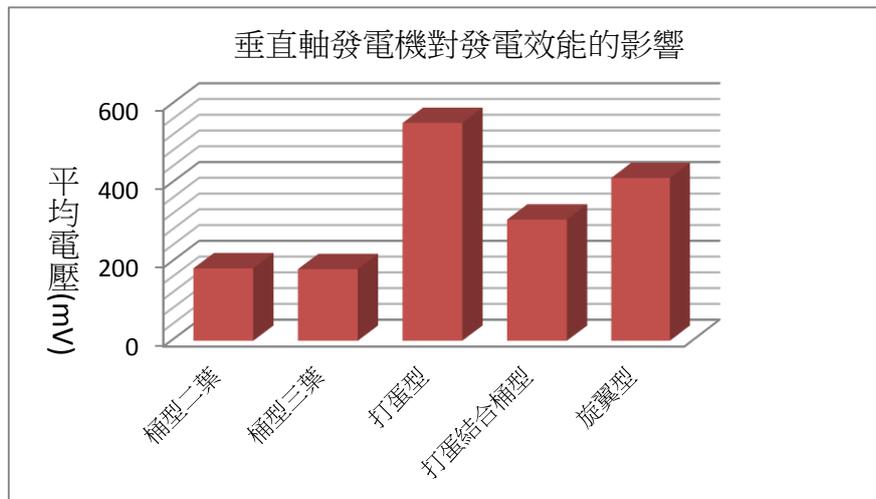


發現：不同高低比例的桶型風車對發電效能的影響，依序為：10.5*13 cm > 10.5*8cm > 10.5*5cm
 推論：在風速 10m/s 下三種比例的桶型風車都能啟動發電機並旋轉，但 10.5*13 cm 的桶型風車掃過面積較大，發電效果最好。

實驗(四)：探討常見垂直軸風力發電機的發電效果。

控制變因：風速(10m/s)、掃過面積(大約 136.5 平方公分)、垂直軸風車、3V 馬達

垂直軸型	桶型二葉	桶型三葉	打蛋型	打蛋結合桶型	旋翼型
葉片形狀					
氣流流向					
發現	明顯看到有些氣流會被打回去。屬於 阻力型 的垂直軸風車。	靠近葉片的地方，有些氣流會被打回去。屬於 阻力型 的垂直軸風車。	上下氣流會被吸入扇葉中，下方有明顯的上升氣流。屬於 升力型 的垂直軸風車。	上下氣流一樣會被吸入扇葉中，中間接近桶型葉片部分則部分被打回。	有明顯的上升氣流，屬於 升力型 的垂直軸風車。
電壓	183.406 mV	181.46 mV	568.666mV	318.562 mV	413.8 mV



發現：不同型式的垂直軸風力發電機對產生電壓的影響，依序為：打蛋型>旋翼型>打蛋結合桶型>二葉桶型>三葉桶型。

推論：從氣流流向看來，**打蛋型與旋翼型屬於升力型垂直軸風車**，因此旋轉速度較快，發電效能較好。而桶型葉片會有氣流打回去，屬於**阻力型風車**，旋轉較慢一些，發電效能也受影響。

討論：打蛋型風車雖然旋轉較快，但迎風面積較小，較難啟動，若結合桶型葉片，應該可以加快啟動的風速。

研究三：水平軸發電機與垂直軸發電機的比較

實驗(一)：探討水平軸發電機與垂直軸發電機的發電效果。

控制變因：掃過葉片面積(大約 136.5 平方公分)、升力型葉片(效果最好的垂直軸與水平軸代表)、風速 10m/s、3V 馬達

不同軸型	打蛋型(垂直軸)	螺旋槳型(水平軸)
葉片形狀		
氣流流向		
發現	上下氣流會被吸入扇葉中，下方有明顯的上升氣流。屬於升力型的垂直軸風車。	上下氣流會被吸進葉片中，氣流快速通過葉片後有明顯的上升。(升力型)
平均	515.234 mV	684.567mV

發現：在相同的掃過面積下，同樣都是升力型葉片的螺旋槳型與打蛋型風車，發電效果仍舊以水平軸的螺旋槳型最佳。

實驗(二)：探討水平軸風力車與垂直軸風力車的啟動風速。

操作變因：不同的風速

控制變因：旋轉環境、風力來源

方法：在一端放置鼓風機，啟動後在另一端放置不同型式風車，自遠而近慢慢移動，觀察風車開始啟動時的位置，並以風速計測量當時的風速。做 3 次求平均。

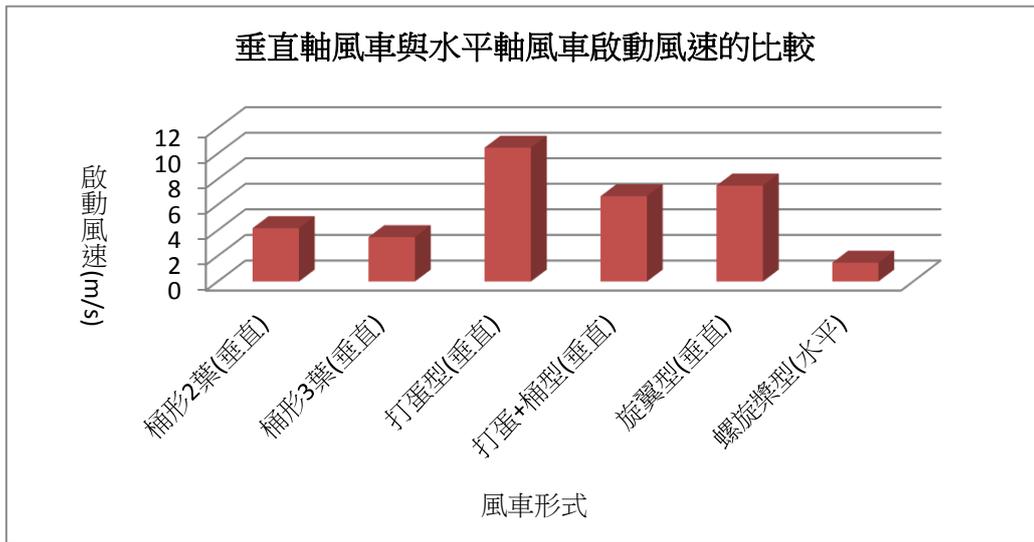
風車形式	桶型二葉	桶型三葉	打蛋型	打蛋結合桶型	旋翼型	螺旋槳型
啟動風速	4.17m/s	3.47 m/s	10.02 m/s	7.37 m/s	7.50 m/s	1.47 m/s

水平軸風車在很遠的地方風速很小就可以轉動。



垂直軸風車啟動風速大，在比較近的地方才能轉動。





發現：螺旋槳型的水平軸風車，啟動風速是最小的，而打蛋型風車最不容易啟動，若加上桶型扇葉，可以降低啟動風速。

推論：水平軸的風車受風面積較大，因此啟動風速較小。相反的以單一風向而言，垂直軸風車受風面積較小，因此需要比較大的風力才能啟動。

實驗(三)：探討水平軸風力車與垂直軸風力車的風向範圍。

操作變因：不同的風向

控制變因：旋轉環境、風力來源、最小啟動風速

方法：將各式風車置於風扇前面，以最小啟動風速從垂直方向開始慢慢轉，直到風車開始轉動為止，測量當時的角度。

結果：

形狀	倒三角形	螺旋槳型	長方形
轉動範圍	<p>旋轉範圍共345度</p> <p>5度不轉動</p> <p>10度不轉動</p>	<p>旋轉範圍共300度</p> <p>40度不轉動</p> <p>20度不轉動</p>	<p>旋轉範圍共325度</p> <p>5度不轉動</p> <p>30度不轉動</p>
形狀	桶型二葉	打蛋型	旋翼型
轉動範圍	<p>旋轉範圍共360度</p>	<p>旋轉範圍共360度</p>	<p>旋轉範圍共360度</p>

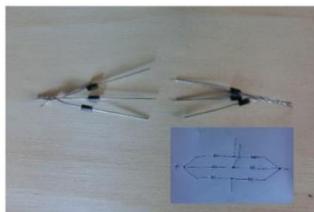
- 發現：1.使垂直軸風車轉動的風向角度比較大，幾乎 360 度都能轉動。而水平軸風車則有部分的
角度無法使風車轉動。
- 2.以水平軸風車來說，其轉動風向範圍的大小依序為：倒三角形>長方形(荷蘭型)>螺旋槳
型(升力型)。

- 討論：1.基於以上的實驗，我們知道一般垂直軸風力發電機啟動風速較大、但轉動風向角度範圍
也大，風場不固定的地方比較適用；而水平軸風力發電機啟動風速很小，但轉動風向角
度範圍比較有限制。因此，通常水平軸風力發電機需要加裝追風裝置，才能讓風力發電
機充分運用風能而轉動。
- 2.雖然經過實驗驗證，水平軸風車的旋轉範圍可以超越 180 度，但在實際情況下，以大部
份水平軸風車來說，後面來風會因為塔身或輪殼產生亂流，效率會受影響。另外，阻力
型風車因後面來風，而產生逆旋轉，甚至產生逆向電壓，若在缺乏整流線路下，有可能
從發電轉變成將電池組儲存電能耗盡。

※ 說明：根據我們的實驗，比較起來升力型的水平軸螺旋槳型風車發電效果最好，但觀察一般
水平軸的風車，發現葉片的設計不盡相同，尾翼的形式也有很多種變化。究竟哪一種
設計發電效能最好？我們在李先生指導下，透過簡單的材料，實作一款放大版的水平
軸發電機，並改變葉片形式、尾翼形狀、尾翼長短等變因，進一步探討。

研究四：實作稍大型水平軸發電機，並進一步探討。

※過程與方法：



依照電路製作整流器



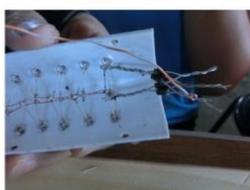
將速立康瓶子清空



取下來的蓋子
裝上LED



將整流器接上LED



接上連接馬達的電線



測試LED是否發亮



木板底座插上支撐桿



裝上速立康
外殼並固定



將塑膠頭鎖上
寶特瓶蓋



套上瓶身
當旋轉頭



CD片固定在木條上，並繫在瓶身尾端。



塑膠瓶剪成扇葉



修剪扇葉形狀



以吹風機與濕毛巾固定形狀



裝上機身即大功告成

實驗(一)：常見的升力型扇葉形狀，究竟哪一種發電效果比較好？

方法：觀察常見的扇葉形狀共五種，將不同葉片各為 15 度裝上大型水平軸風車，使用 18V 馬達發電，以 5m/s 風速旋轉，測量電壓，每種都做 10 次，去頭去尾取接近的五次求平均。

結果：

葉片 形狀				
平均電壓	9.7574	8.7626	10.0916	8.9758

單位：V

發現：1.  形狀的葉片，發電效能明顯比其他的好。
2. 使用 18V 的馬達發電效能明顯提升。

推論：扇葉直線的一面因為稍微扭轉傾斜，使具有升力的效果，不對稱的扇葉，反而可以使旋轉更快速。

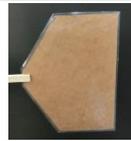
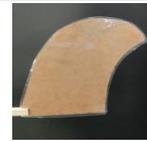
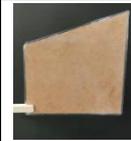


在風洞中以 5m/s 的風速吹動大型風車扇葉，測量電壓。

實驗(二)：尾翼形狀如何影響追風效果？

方法：將裝有不同尾翼的大型風車置於 14 吋電風扇前，固定 90° 以 2m/s 的風速直吹，觀察記錄尾翼與電風扇成一直線的時間，每種形狀做 10 次，去頭尾取最接近的 5 次求平均。

結果：

尾翼 形狀					
平均時間	8.58	4.084	5.856	4.068	4.88

單位：秒

發現：除了  三角形的形狀明顯靈敏度較差外，其餘效果皆不錯，其中又以  屬於流線型的尾翼追風效果最好，在最短的時間形成一直線狀態。



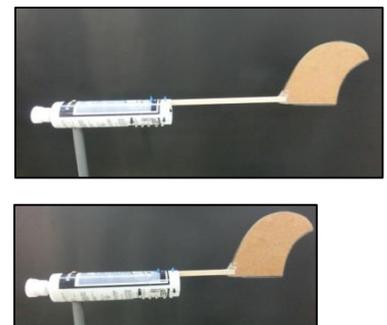
實驗(三)：尾翼長度如何影響追風效果？

方法：依照前面的方法，改變尾翼長度進行實驗。

結果：

尾翼 長度	32cm	21.5cm	9cm
平均時間	9.836	4.068	14.252

單位：秒



發現：尾翼長度要適中，太長或太短追風效果都會受影響。

本實驗機身長約 21.5cm，當尾翼長也是 21.5cm 時，較能達成平衡，追風效果較佳。

實驗(四)：尾翼面積如何影響追風效果？

方法：依照前面的方法，改變尾翼面積進行實驗。

結果：

尾翼長度	大	中	小
平均時間	8.62	4.068	13.862

單位：秒

發現：尾翼面積要適中，太大太重較不靈敏，太小太輕雖然可以迅速擺動，但容易轉過頭，等轉成順風方向時，需要花費更多的時間。



※ 說明：實驗至此，我們找出發電效果最佳的條件為：

風車型式	最佳條件
水平軸	葉片 15°、翼樑 0°、較短的翼樑、較大的葉片、2~3 軸、升力型螺旋槳型葉片、尾翼成流線形、長度與機身等長、面積適中
垂直軸	升力型葉片(打蛋型，但打蛋型加桶型較容易啟動)、寬窄、長度比例為 10.5cm*13cm。

運用實驗結果，我們想發揮創意，設計兼具升力與阻力效果的垂直軸與水平軸扇葉，改變不同馬達，看看能不能有更佳的發電效果。



研究四：自創效果更佳的風力發電機

實驗(一)：自創的發電機哪一種效果最好？

型態	恩恩一號(水平軸)	恩恩一號(垂直軸)	恩恩二號(水平軸)	恩恩二號(垂直軸)
葉片形狀				
氣流流向				
觀察	中間的凹洞有吸風的情形，且葉片上端有漩渦。	氣流被吸進中間凹洞，葉片右上端有和葉片平行的漩渦	氣流會被吸過去，在葉片尾端會有上升氣流。	葉片上端變成排風，而下端變成吸風。
啟動風速	2.8m/s	4.567m/s	1.2m/s	6.1m/s
10m/s 的電壓 (3V 馬達)	150.24mV	103.698mV	352.254mV	93.061mV
5m/s 的電壓 (18V 馬達)	馬達啟動扭矩太大 無法啟動	馬達啟動扭矩太大 無法啟動	15.2728V	馬達啟動扭矩太大 無法啟動
10m/s 的電壓 (18V 馬達)	5.648 V	3.448 V	19.741V	馬達啟動扭矩太大 無法啟動

型態	恩恩三號 (水平軸)	恩恩三號 (垂直軸)	琳琳號 (水平軸)	螺旋槳型(水平軸)
葉片 形狀				
氣流 流向				
觀察	中間會吸風，且氣流流動快速。	氣流會從四面八方吸進中間的凹洞，且會在葉扇旁造成渦流。	煙霧流動極為快速，上下氣流會被吸進扇葉之中。	上下氣流會被吸進葉片中，氣流快速通過葉片後有明顯的上升。
啟動風速	3.8m/s	7.5m/s	1.77 m/s	1.47 m/s
10m/s 電壓 (3V 馬達)	407.836 mV	140.46 mV	615.268 mV	684.567mV
5m/s 電壓 (18V 馬達)	馬達啟動扭矩太大 無法啟動	馬達啟動扭矩太大 無法啟動	10.86 V	馬達啟動扭矩太大 無法啟動
10m/s 電壓 (18V 馬達)	18.6762 V	馬達啟動扭矩太大 無法啟動	30.859 V	13.59V

- 發現：
- 1.恩恩二號與琳琳號發電效果最佳，尤其是琳琳號，在風速 10m/s 使用 3V 與 18V 馬達，發電效果都最好，最高可產生 31V 的電壓。
 - 2.部分風車無法使 18V 馬達的發電機轉動。
 - 3.水平軸風車啟動風速較低，尤其是恩恩 2 號，1.2m/s 即可轉動。

- 推論：
- 1.水平軸扇葉有凹面的，可以捕捉更多的風能，且具有升力與阻力效果，產生電壓最大，且啟動風速較低。
 - 2.馬達越大啟動扭矩越大，太小型的風車不容易啟動。



疑問：明明我們使用的是 18V 的馬達，卻有好幾個風車測到 18V 以上電壓，甚至到達 31V？經過我們查資料結果顯示，這類長軸馬達是永磁三相無電刷馬達，本身內部除了線圈和永久磁鐵做的定子外，並沒有任何保護或穩壓設計，所以將來要來接到一般電器時，需要透過「穩壓線路」將輸出電壓控制在 5V or 12V。

討論：從上面的實驗中我們發現，發電效果最好的琳琳號在風速 5m/s 時的發電效果比恩恩二號差，但在風速 10m/s 時，發電效果竟然遠遠優於恩恩二號，為什麼會有這樣的結果？我們認為跟葉片扭力有很大的關係，於是接著進行以下實驗：

實驗(二)：不同葉片的風車，其扭力大小如何？

方法：將葉片綁上縫衣線，並從輕到重逐漸吊上砝碼，在風速 5m/s 的電風扇前轉動，觀察記錄葉片不再旋轉時，所吊的砝碼重量。

結果：

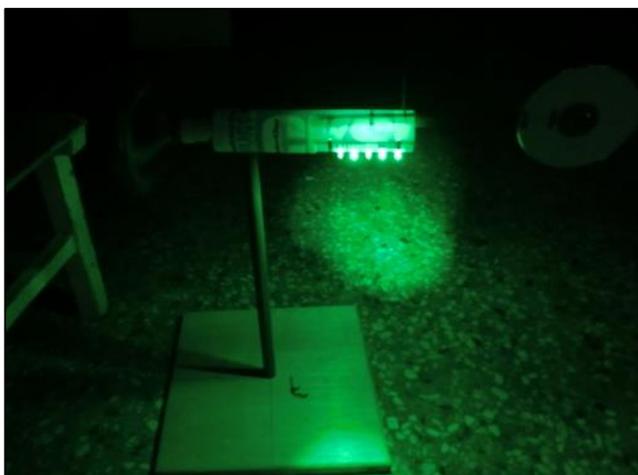
	恩恩二號	琳琳號
風車型式		
可吊砝碼重量	9g	4g
啟動風速	1.2m/s	1.77m/s
風速 5m/s 時 3V 馬達電壓	221.474mV	263.034 mV
風速 10m/s 時 3V 馬達電壓	352.254mV	615.268 mV
風速 5m/s 時 18V 馬達電壓	15.273V	10.860V
風速 10m/s 時 18V 電壓	19.741 V	30.859V



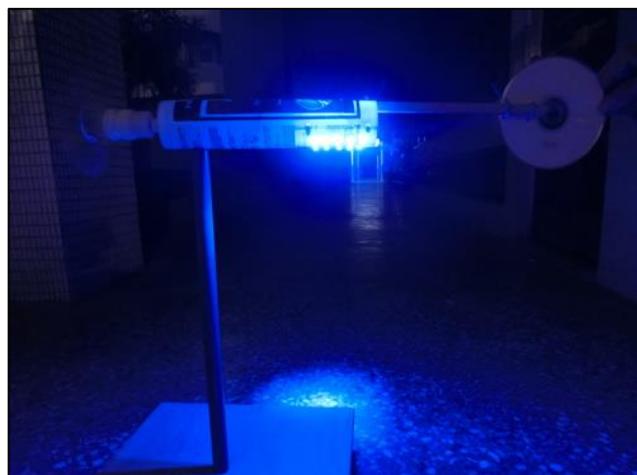
- 發現：
- 琳琳號可承受的砝碼重量比恩恩二號少很多，也就是扭力比較小。
 - 恩恩二號扭力較大，啟動風速較小；琳琳號扭力較小，啟動風速較大。
 - 使用 18V 大馬達時，恩恩二號在風速 5m/s 時發電效果比琳琳號大。

- 推論：
- 扭力大的風車，容易啟動，但風阻相對較高，因此在高風速時轉速無法有效提升，最大發電效果較差。
 - 裝上越大的馬達，必須要克服更大的反電動勢、靜摩擦力和動摩擦力，因此所需的啟動扭矩越大。所以小馬達適用的高速風車葉片，裝在大馬達時，有可能因為扭力不足，而無法有效驅動。除非風力夠強，才能展現高速風車葉片的效果。

※研究成果：最後，我們把恩恩二號與琳琳號裝在風車上，驅動 18V 馬達，都可以使 10 顆 3V 並聯的 LED 產生明亮的燈光。



恩恩二號



琳琳號

※ **綜合討論**：根據以上的研究結果，我們歸納出如何選擇適當風力發電機的原則：

1. 風力發電機的設置，要針對不同風場大小，來決定額定風速範圍和發電效能的目標。
2. 根據發電效能目標，進一步選定所需的發電機功率，風車葉片型式和風車尺寸。
3. 選擇扭力足以推動發電機而轉速最快的風車，使發電效能最佳化。
4. 水平軸適合沿海等空曠風場穩定的地方，垂直軸適合都會區等風場易變化的區域。

伍、討論

- 一、製作風車要儘量掌握重量與角度的一致，才能準確得到結果。
- 二、由於電壓的測量不是很穩定的數值，會在一定的範圍內跳來跳去。因此，實驗的方式是觀察三用電表的數值，穩定後記錄十次結果，再去頭去尾選擇較接近較佳的五次做平均。
- 三、水平軸風車與垂直軸風車，我們都採取正對的角度進行實驗，每次位置都要一樣，才能控制風速。
- 四、一開始我們以手做風車做實驗，但到了垂直軸風車的實驗，為了準確控制變因，我們以3D印表機印出各式風車。

陸、結論

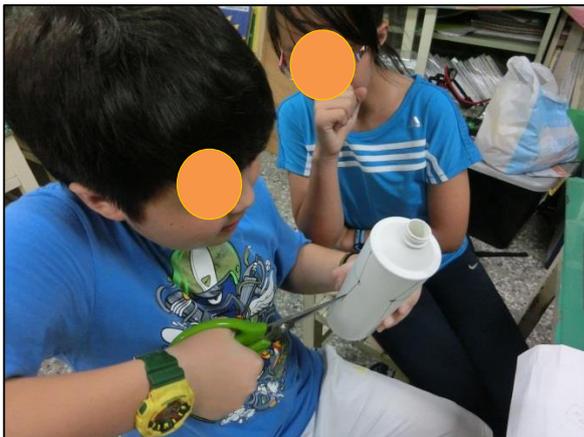
- 一、我們找出發電效果最佳的條件為：
水平軸風車：葉片 15°、翼樑 0°、較短的翼樑、較大的葉片(要配合馬達大小)、2~3 軸、升力型螺旋槳型葉片、尾翼成流線形、長度與機身等長、面積適中。
垂直軸風車：升力型葉片(打蛋型，但打蛋型加桶型較容易啟動)、寬窄、長度比例為 10.5cm*13cm。
- 二、水平軸風力發電機啟動風速小，但轉動風向角度範圍較小；垂直軸風力發電機啟動風速較大、轉動風向角度也大。因此水平軸發電機適合在沿海等空曠風場穩定的地方，垂直軸適合都會區等風場易變化的區域。
- 三、扭力大的風車，容易啟動，但風阻相對較高，因此在高風速時轉速無法有效提升，最大發電效果較差。
- 四、越大的馬達啟動扭矩越大。小馬達適用的高速風車葉片在大馬達時，有可能因為扭力不足，而無法有效驅動。
- 五、流線型的尾翼追風效果較好，尾翼長度要使風車平衡，面積也不宜過大或太小。
- 六、我們設計的自創型風車，兼顧了升力與阻力的作用，因此小風力即可啟動，使用 18V 馬達，發電效果可達 31V。

柒、研究與展望

嘉義李先生告訴我們，台灣是個適合發展風力發電的地方，可惜目前使用率不高，原因是多數人都以大型風力發電來思考，忽略小型風力發電的效能。經過這次研究，才了解原來小型發電機不管是水平軸或垂直軸，只要使用得當，都有適合設置的地方。目前，我們找出最好的小型發電機產生電壓是 31V，希望未來能繼續努力，運用創意提升發電效能，成為一個小小風力發電專家！

捌、參考資料

- 一、牛山泉(民 88 年) 風車工學入門 國立澎湖科技大學出版
- 二、牛山泉(民 88 年) 基礎風力能源 國立澎湖科技大學出版
- 三、牛山泉(民 100 年) 垂直軸風車 關和市 台大出版中心
- 四、牛山泉(民 99 年) 圖解風力發電入門 新北市 世茂出版
- 五、牛山泉、三野政洋(民 89 年) 小型風車手冊 台北市台大出版中心
- 六、光能節源科技有限公司：<http://goo.gl/sJCUvy>



【評語】 080817

1. 作品的主題與節能議題結合，作品符合科學的方法，值得鼓勵。
2. 宜對於過去相似之作品進行探討與比較並思考如何進行改善或差異化，並應比較類似的條件所得到的實驗結果之異同。
3. 部分實驗條件與結果和現有產品相同，應該進一步分析或加以延伸研究是否有更有利的條件結果。