

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 生活與應用科學(一)科

082811

呼風「換」電～探討不同設計的垂直式風力發電
機葉片對生成電壓之影響

學校名稱：高雄市左營區勝利國民小學

作者：	指導老師：
小六 陳昀勤	林芸芝
小六 陳以華	陳利玲
小六 陳加育	
小五 王玟宣	
小五 黃映晴	

關鍵詞：風力發電、垂直軸、葉片

摘要

現今的臺灣，因燃煤發電所產生的空汙問題日益嚴重，而在氣候變遷與追求永續發展的趨勢中，綠色能源的應用勢必成為我們未來發展的重點。臺灣因得天獨厚的地理位置與季風的盛行，非常適合發展風力發電；因此，我們借用古人的智慧，以垂直軸風車為基礎，融合現今的創意，利用 3D 繪圖列印技術，設計出「固定式葉片」風力發電機模型，並進行一連串生成電壓的施測，研究結果顯示：垂直軸風力發電機的最佳葉片設計為「厚紙板材質」、「芭蕉扇形」、「數量 3 扇」、「角度 0 度」、「中型面積」、「與軸心距離 4 公分」。

壹、研究動機

在六年級自然課程「電磁作用」這個單元中，我們學到了馬達和發電機的原理，發電機的應用讓我們有深入研究的興趣，再加上臺灣現今的電力來源以火力發電為主，大量的燃煤造成空汙問題日益嚴重，因此經過討論後，我們決定以風力發電為研究主題，希望能找出生成電壓最高的風力發電機設計，為環境保護貢獻一份心力。

風力發電機的種類主要可分為垂直軸及水平軸兩種，各有其優缺點，但考慮到想將此科展研究結果與學校現有的太陽能路燈結合在一起的問題，我們決定選擇較不受風向、風速及地形限制的垂直軸風力發電機為研究主體。

貳、研究目的

一、風力與發電的文獻探討。

（一）古代各國風車的應用。

（二）垂直軸、水平軸風力發電的比較。

（三）風力發電機的工作原理與使用方式。

二、設計垂直軸風力發電機模型。

（一）設計「活動式葉片」、「固定式葉片」、「無中柱」風力發電機模型。

（二）測試不同設計之模型對生成電壓之影響。

三、探討不同的葉片設計對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響。

- (一) 葉片「材質」對生成電壓之影響。
- (二) 葉片「形狀」對生成電壓之影響。
- (三) 葉片「數量」對生成電壓之影響。
- (四) 葉片「面積」對生成電壓之影響。
- (五) 葉片「角度」對生成電壓之影響。
- (六) 葉片「與軸心距離」對生成電壓之影響。
- (七) 「改良版」葉片對生成電壓之影響。

四、設計校園風光互補路燈系統。

參、研究設備及器材

			
AutodeSkFuSion 3603D 繪圖軟體	Cura3D 切片軟體	Infinity X1 3D 列印機	測試用發電機
			
測試用電風扇	三用電表	不同材質葉片	模型修整工具
			
Rexon 力山 M20-25 空壓機	電壓測量機	HANLIN-FGM816 風速計	結合校園太陽能發電 為風光互補路燈系統

圖 1 實驗器材

肆、文獻探討

一、古代各國風車的應用

不論中國或西方國家，很早之前就有應用風車的紀錄，顯示人類早已發現風能的重要並加以利用，而在空汙問題日益嚴重的現今，利用風能來發電已是全球發展的重點，古人的智慧值得我們借鏡，所以我們將古代風車的應用情形整理如下表 1，希望能從中得到設計風力發電機的啟發。

表 1 古代風車的應用

國家 項目	東方中國	西方歐洲
起源 紀錄	中國早在 1700 年前就有使用風車的紀錄	歐洲始見於紀錄的風車為西元 1180 年出現在法國諾曼第
類型	為了適應季風氣候與起伏多變的地形，中國古代採取了 <u>垂直軸式的風車</u> 和帆船式的風帆。垂直的軸心可以接受四面八方的風，不用特別考慮風向，重心也較為穩定。擁有自動調節功能的風帆則安裝於軸架周圍的柱桿上，利用繩索的鬆緊和帆的偏裝，巧妙地借用了中國式船帆的結構與操控方式。	西歐國家位處於地球西風帶，一年四季盛行西風，同時瀕臨大西洋，海陸風長年不息，加上地勢較為平坦，因此使用 <u>水平軸式風車</u> 。
用途	東漢的墓式磚畫清楚展示古人利用風車來利用提水灌溉、排水冶鹽，是所有風力發電機的先驅。	習慣將風車與各類建築物結合應用，用來磨麥、排水和鋸木，以精簡人力獸力。在蒸汽機興起之前，是歐洲各國重要動力來源之一。
圖片		
資料來源	《天工開物》、中國經濟史論壇、中國農史與環境史研究	

二、垂直軸、水平軸風力發電的比較

目前市面上較常見的風力發電機可以分為水平軸式與垂直軸式兩大類，茲將其設計方式與優缺點整理如下表 2：

表 2 垂直軸與水平軸風力發電機的比較

種類 項目	垂直軸風力發電機（簡稱 VAWT）	水平軸風力發電機（簡稱 HAWT）
設計方式	1.風力發電機之轉動軸與風向成垂直 2.陀螺式旋轉，不隨風向改變軸心	1.風力發電機之轉動軸與風向平行 2.需有尾翼以隨風向變化而轉動風車
優點	不受地形風影響、風能利用率高、 啟動風速低、噪音小	設計具多樣性、起動性能佳、振動較 小、運轉效率高
缺點	轉速相對較慢、無法在風速過高的情 況下停機，易導致發電機的承軸在強 風時轉速過快而損毀	噪音大、對地形風敏感、無法克服不 定風向問題、裝置成本及維修費用高 、易受地形、地物之影響
適用場所	都會區、郊區、沿海區、山區皆適用	空曠無遮蔽物之大型空間

本校位於高雄市左營區與鼓山區交界處，依據經濟部能源局風力資訊整合平台地理資訊系統顯示，左營區平均風速大致落在 4~4.5 (m/s) 之間 (如圖 2)，以蒲福氏風級換算為 3 級風的微風等級，而從中央氣象局觀測資料中可發現左營區的最大陣風可達 25 (m/s)，屬於 10 級狂風等級。

風向角度會受地形影響並隨季節變換而改變，本校位置處於高雄市都會區，附近建築物林立，若考慮將自行設計之風光互補路燈系統裝設在學校校園或教室頂樓，想必是一大考驗；因此我們決定選擇採用較不受風向、風速及地形限制的垂直軸風力發電機為研究主體。

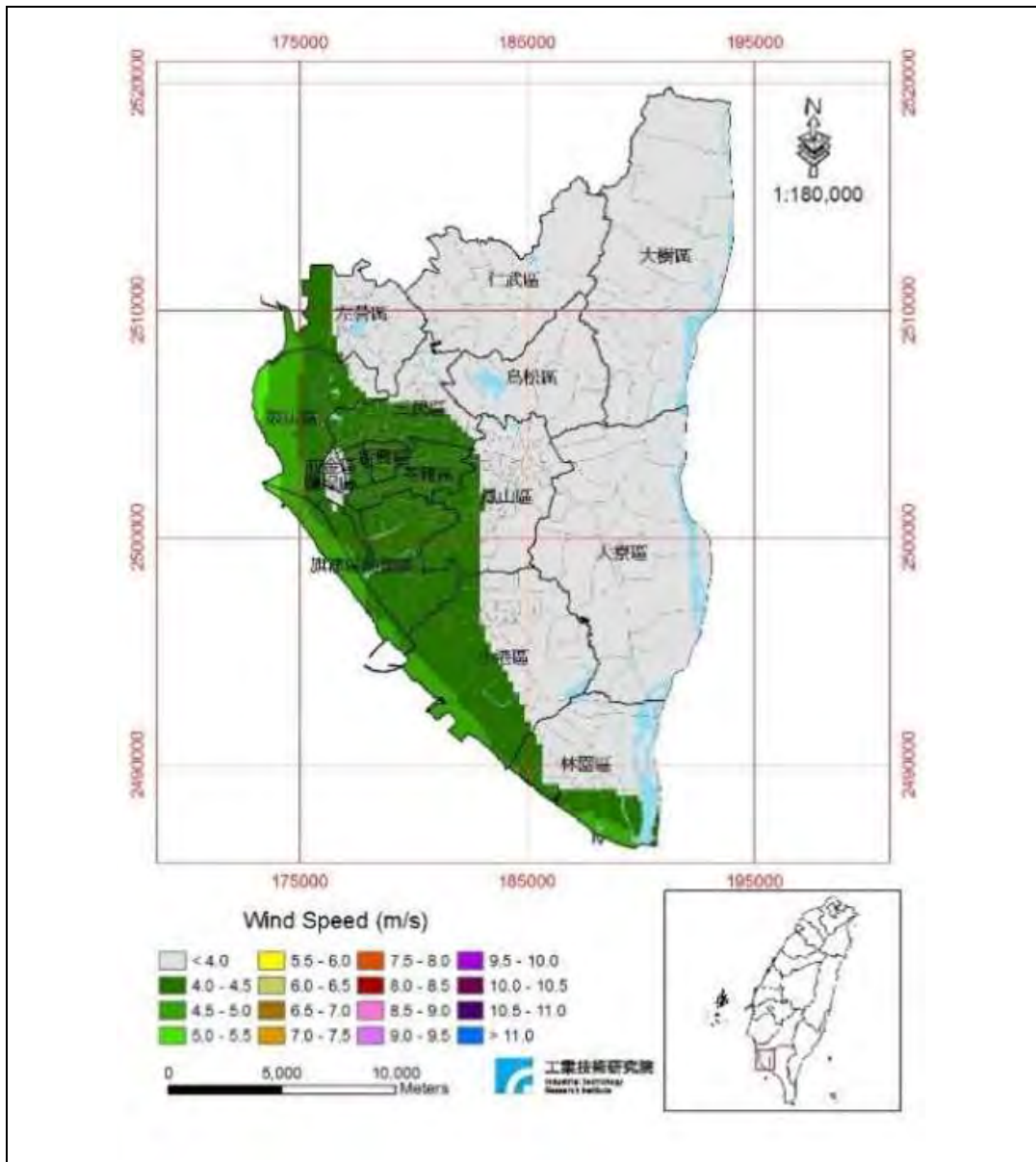


圖 2 高雄市左營區風速資料 (資料來源：經濟部能源局)

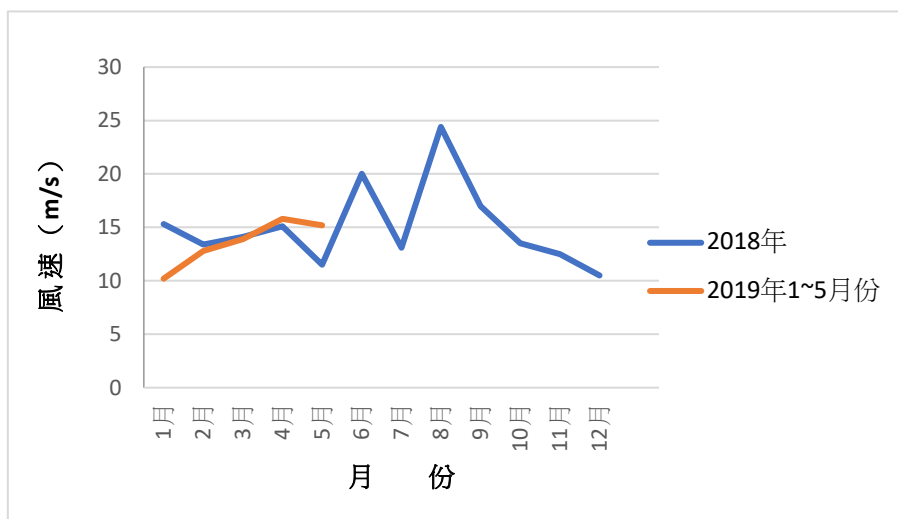


圖 3 2018~2019 年高雄市左營區最大陣風 (m/s) (資料來源：中央氣象局)

三、風力發電機的工作原理與使用方式

茲將風力發電機的工作原理與最常見的使用方式資料整理如下表 3：

表 3 風力發電機工作原理與最常見的使用方式

工 作 原 理	使用方式
<ul style="list-style-type: none">• 利用風力帶動風車葉片旋轉，再透過增速機將旋轉的速度提升，來促使發電機發電。• 無法將風能全部轉換成電能，效率約在 20%~40%之間。• 風力發電機的高度會影響效率，葉片愈長，受風面積愈大，所能擷取的風能就愈多。• 風力發電機的輸出電能約與葉輪直徑平方和風速三次方成正比。	<p>目前最常見的使用方式大概分為三種：</p> <ul style="list-style-type: none">• 與電力網直接併聯發電系統：目前風力發電約 90%以上都是與電網併聯方式使用。• 與柴油機或太陽光電混合發電系統。• 獨立系統。 <p>（與柴油機或太陽光電混合發電系統、獨立系統一般使用於偏遠地區或電力網無法到達的地方）</p>

本研究最後所設計的風光互補路燈系統，就是上述與太陽光電的混合應用，利用太陽能電池方陣、風力發電機將發出的電能存儲到蓄電池組中，當使用者需要用電時，逆變器將蓄電池組中儲存的電力，通過輸電線路送到使用者負載處，是風力發電機和太陽電池方陣兩種發電設備共同發電。夜間和陰雨天無陽光時由風能發電，晴天則由太陽能發電，在既有風又有太陽的情況下兩者同時發揮作用，實現了全天候的發電功能，更為經濟、科學、實用。

伍、研究過程、結果與討論

一、研究過程

(一) 研究流程

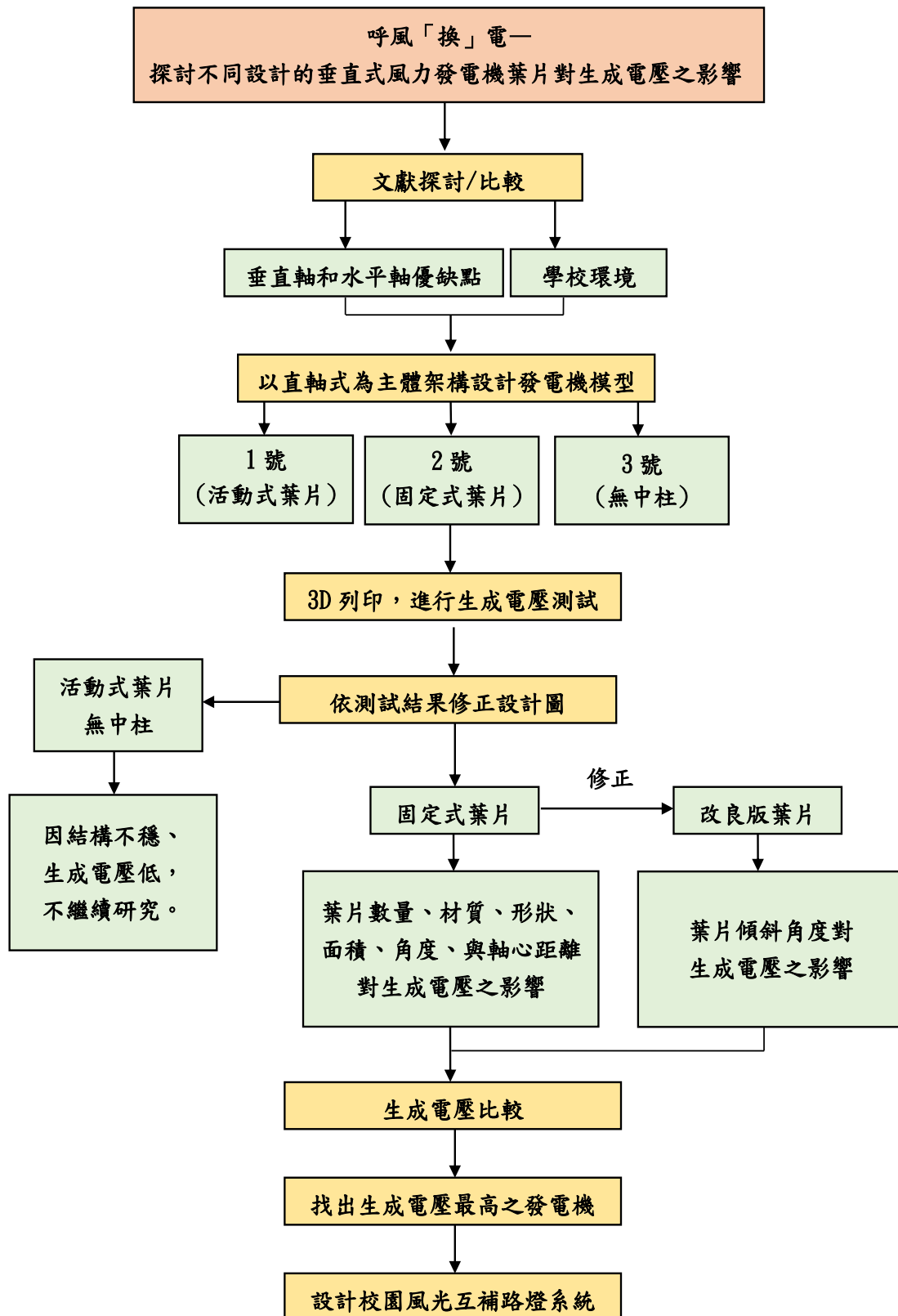


圖 4 不同設計之垂直軸風力發電機葉片對生成電壓之影響實驗流程圖

(二) 實驗進行照片

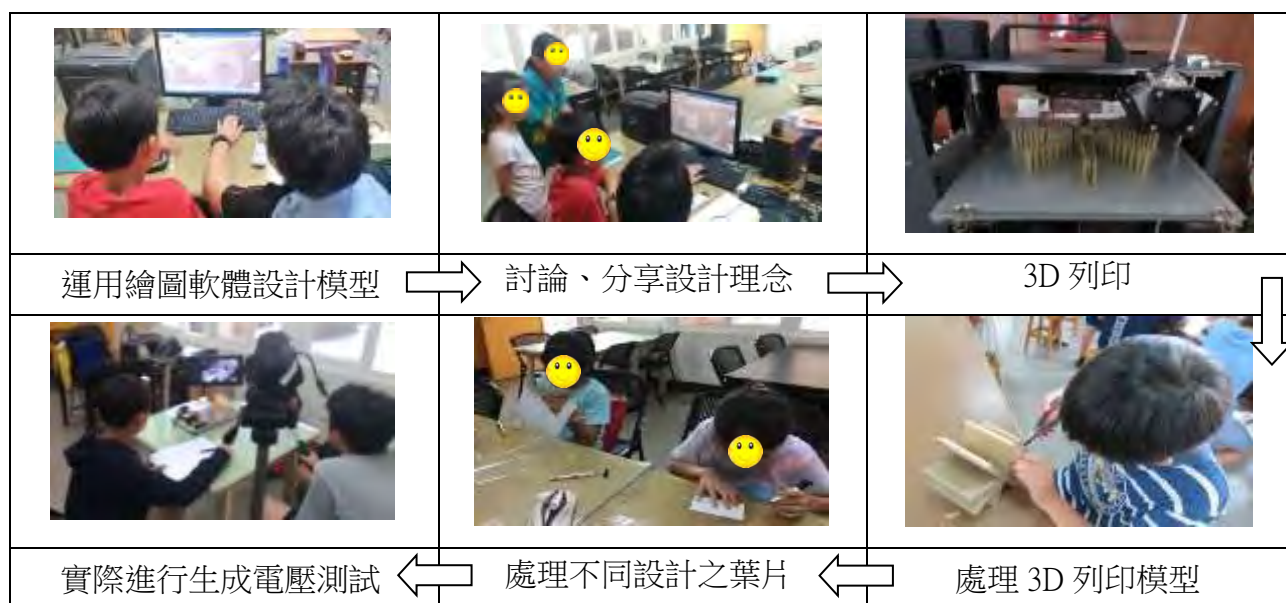


圖 5 實驗操作圖

二、設計垂直軸風力發電機模型

實驗一：不同設計之垂直軸風力發電機葉片對生成電壓之影響

(一)分組設計：以垂直軸風力發電機為基礎，使用 Autodesk Fusion 360 3D 繪圖軟體、Cura3D 切片軟體和 Infinity X1 3D 印表機，分別設計出不同操作變因的風力發電機模型（如表 4）。



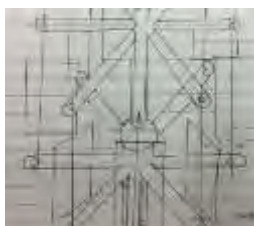


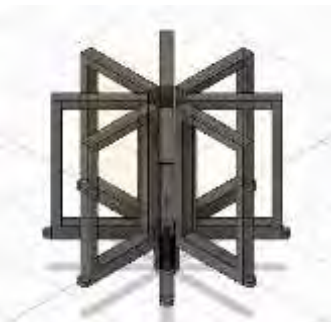





表 4 不同操作變因之垂直軸風力發電機模型設計

項目 作品	設計說明	3D 列印 花費時間
1 號 (活動式扇葉)	<ol style="list-style-type: none"> 1.結構分為二個部分，整體尺寸 18 cm×18 cm×14.5cm。 2.主體是由中間的中柱連接上方、下方的八角支架，中柱空心以減輕重量。上方、下方的八角支架末端預留小孔，無扇葉設計。 3.扇葉的骨架是 8 隻長 13 cm 的棍子，在長棍上用塑膠袋做成 11cm×7cm 之長方形扇葉，再插入八角支架末端預留之小孔中。 4.扇葉可隨風力 360° 隨意轉動。 	約 27.5 小時
2 號 (固定式扇葉)	<ol style="list-style-type: none"> 1.模型結構一體成型，整體尺寸 18 cm×18 cm×14.5cm。 2.扇葉為 11cm×7cm 之長方形，與底部八角支架相連，不可拆卸，僅需將塑膠袋貼上即完成扇葉。 3.為減輕模型重量，捨去整根中柱。 	約 24 小時

作品	項目	設計說明	3D 列印 花費時間
3 號 (無中柱)		1.結構分為三個部分，整體尺寸 18 cm×18 cm×14.5cm。 2.第一個部分是上方的八角支架，支架末端預留小洞。 3.第二個部分是下方的八角支架，中間有一段長約 2 公分的圓柱，用來增加重量並維持平衡，支架末端有小洞。 4.第三個部分是 11cm×7cm 之長方形葉片支架 8 片，中間有一根桿子，可插入上、下八角支架小洞中固定葉片。	約 15 小時

(二) 模型設計圖：

表 5 不同操作變因之垂直軸風力發電機模型設計圖

編號 圖片	1 號作品 (活動式扇葉)	2 號作品 (固定式扇葉)	3 號作品 (無中柱)
手畫 草圖			
3D 繪圖	 		 
成品			

(三) 測試過程說明：

- 1.風力發電機模型分為「活動式葉片」、「固定式葉片」、「無中柱」三種。
- 2.葉片條件為：數量「8 扇」、形狀「11cm×7cm 之長方形」，材質「塑膠袋」。
- 3.使用 2HP 空壓機與電壓測量機、三用電錶加以測量，施測時間為 30 秒。
- 4.空壓機風口與模型距離固定為 30 cm。
- 5.在施測時間 30 秒內，記錄生成之最高電壓與最低電壓，測量三次，記錄並進行平均。

(四) 實驗照片：

表 6 不同操作變因之垂直軸風力發電機模型

		
1 號作品	2 號作品	3 號作品

(五) 實驗測量結果：

表 7 不同設計之垂直軸風力發電機模型對生成電壓影響測試結果

編號 次數	1 號作品			2 號作品			3 號作品		
	最高 電壓	最低 電壓	平均 電壓	最高 電壓	最低 電壓	平均 電壓	最高 電壓	最低 電壓	平均 電壓
三用電錶	3.72	0.58	2.15	8.79	4.56	6.68	4.31	1.36	2.84
電壓測量機	3.81	0.65	2.23	8.73	4.65	6.69	4.39	1.35	2.87
平均	3.77	0.62	2.20	8.76	4.61	6.69	4.35	1.36	2.86

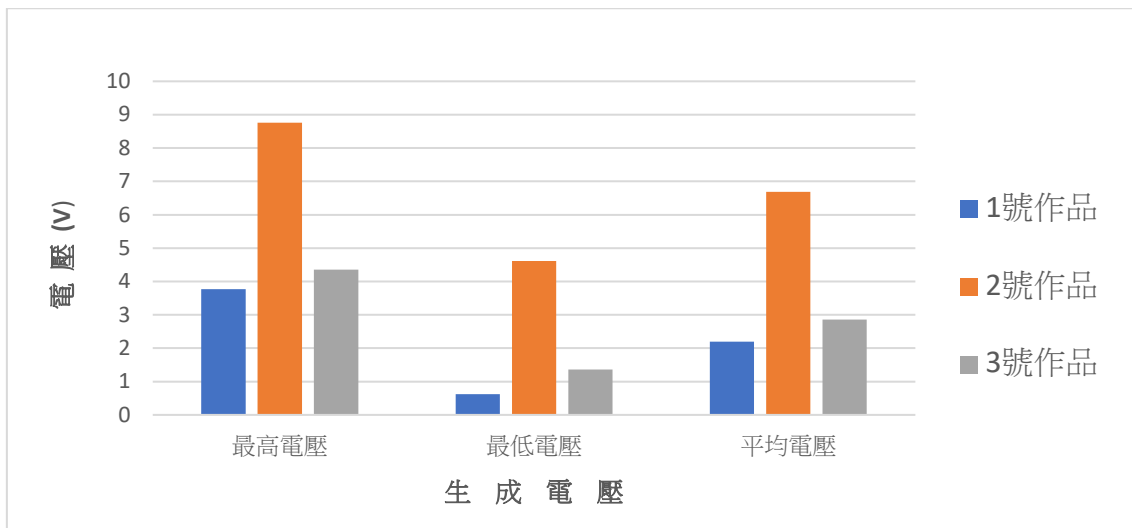


圖 6 不同設計之垂直軸風力發電機模型之生成電壓

(六) 實驗發現與討論：由上圖 6 中可以發現

- 1、1 號作品在旋轉時扇葉擺盪幅度大，扇葉會隨著風向而成圓形擺動，雖然在生成平均電壓方面表現最差，只有 2.2V，但整體運轉時穩定度不錯。在 3D 列印方面，因為模型整體均須開支撐，除了耗費最多材料外，也最耗時。
- 2、2 號作品在旋轉時重心平穩，不會左右搖晃，且轉速很快，因此不論在最高電壓、最低電壓方面都表現最佳，平均為 6.69V。在 3D 列印方面，模型整體均須開支撐，但因沒有中柱設計，所以列印上較 1 號作品省時、省材料。
- 3、3 號作品則因為沒有中柱設計，模型中間的支撐力量不足，且整體結構重心不穩，運轉時會劇烈搖晃，雖然生成平均電壓為 2.86V，排名第二，但因劇烈搖晃易對發電機轉軸造成損壞，不適合用來施測。在 3D 列印方面，不須開支撐，所以列印時間最短，也最省材料。
- 4、3 件不同設計之垂直軸風力發電機模型中，只有 2 號作品在電壓測試時沒有明顯的缺點，所以最後決定選擇此模型進行 3D 繪圖細部修正，做為定案之發電機模型，並搭配葉片的「材質」、「形狀」、「數量」、「面積」、「角度」、「與軸心距離」等不同變因，繼續深入研究。
- 5、3 件作品分別用三用電錶與電壓測量機進行生成電壓測試，結果發現二種不同測量工具施測結果相同，且數據差異很小，為求方便性，後續相關施測均只以電壓測量機施

測。

三、探討不同葉片設計對「固定式葉片」風力發電機生成電壓之影響





實驗二：不同「材質」的葉片對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

(一) 測試說明：

- 1.葉片為與底座相連一體成型固定式 6 扇，形狀為 11cm×7cm 之長方形。
- 2.採用「塑膠袋」、「厚紙板」、「和紙」、「廣告旗幟」四種材料作為葉片材質。
- 3.使用 2HP 空壓機與電壓測量機加以測量，施測時間為 30 秒。
- 4.空壓機風口與模型距離固定為 30cm。
- 5.在施測時間 30 秒內，記錄生成之最高電壓與最低電壓，測量三次進行平均。

(二) 實驗照片：

表 8 不同葉片材質的風力發電機模型

材質 形狀	塑膠袋	厚紙板	和紙	廣告旗幟
長 方 形				

(三) 實驗測量結果：

表 9 不同葉片材質對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響實驗結果

葉片形狀	葉片材質	生成電壓		
		最高電壓(V)	最低電壓(V)	平均電壓(V)
長方形	塑膠袋	9.06	4.09	6.58
	厚紙板	9.64	4.71	7.18
	和紙	9.32	4.08	6.70
	廣告旗幟	9.18	4.03	6.61

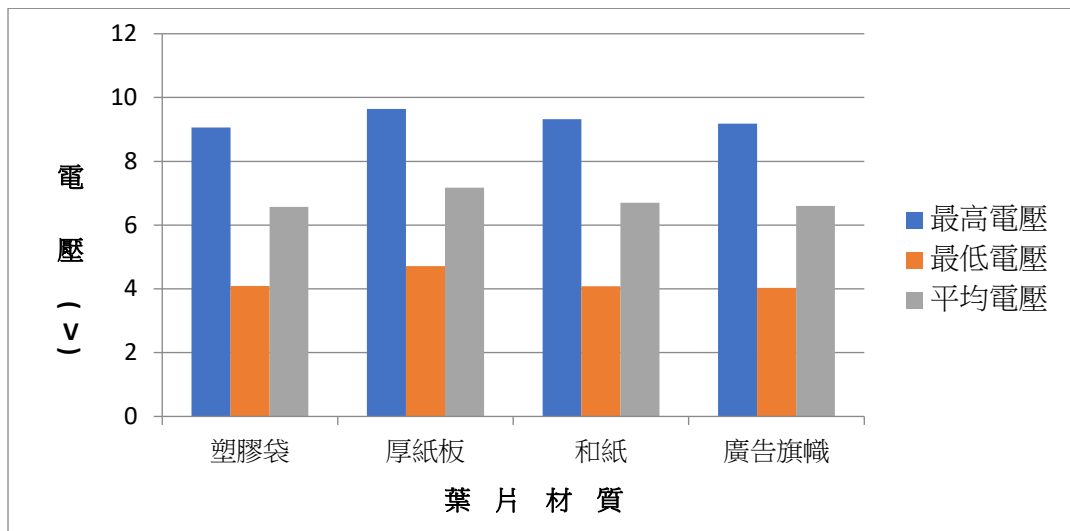


圖 7 不同的葉片材質對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

(四) 實驗發現與討論：

- 1.由上圖 7 中可以看出，所有材質中以厚紙板的生成平均電壓表現最佳，為 7.18V，其餘三種材質的生成平均電壓約在 6.5V 左右，差距不大。
- 2.若要考慮葉片材質因素時，採用固定式葉片風力發電機，最佳設計為「厚紙板材質」。





實驗三：不同「形狀」的葉片對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

(一) 測試說明：

- 1.葉片為與底座相連一體成型固定式 6 扇，材質為厚紙板。
- 2.採用「長方形」、「帆船形」、「曲線 S 形」、「芭蕉扇形」四種扇葉形狀。
- 3.使用 2HP 空壓機與電壓測量機加以測量，施測時間為 30 秒。
- 4.空壓機風口與模型距離固定為 30cm。
- 5.在施測時間 30 秒內，記錄生成之最高電壓與最低電壓，測量三次進行平均。

(二) 實驗照片：

表 10 不同葉片形狀的風力發電機模型

形狀 材質	長方形	帆船形	曲線 S 形	芭蕉扇形
厚紙板				

(三) 實驗測量結果：

表 11 不同形狀的葉片對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響實驗結果

葉片材質	葉片形狀	生成電壓		
		最高電壓(V)	最低電壓(V)	平均電壓(V)
厚紙板	長方形	9.64	4.71	7.18
	帆船形	11.44	8.47	9.96
	曲線 S 形	11.50	9.35	10.43
	芭蕉扇形	12.47	9.39	10.93

備註:除了帆船形外，其餘三種形狀在施測時，風速較快的情形下，會有些許搖晃。

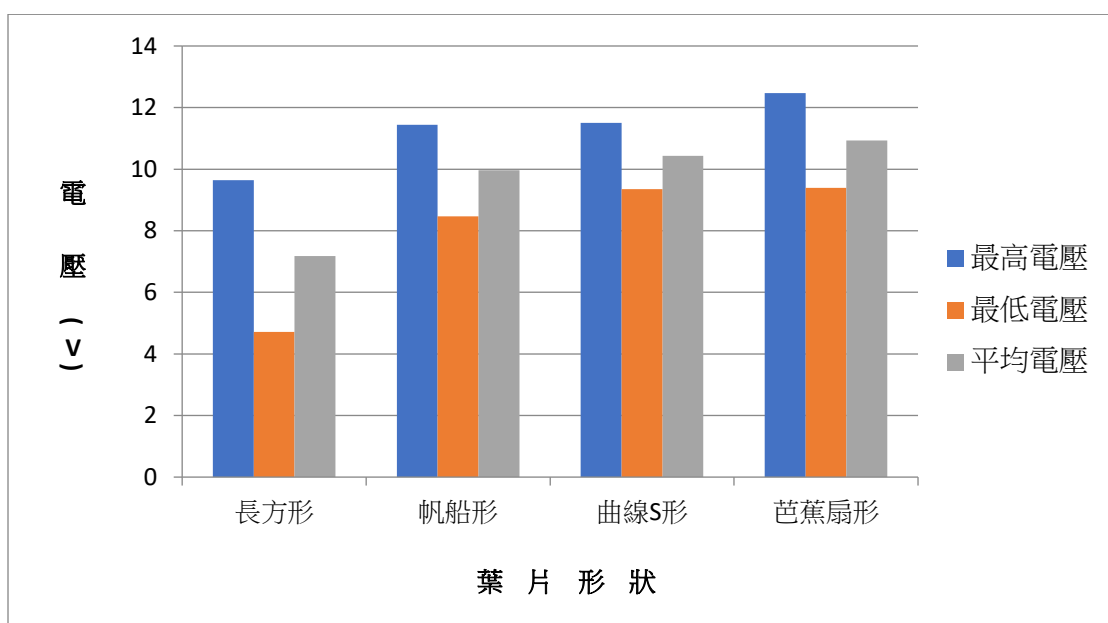


圖 8 不同的葉片形狀對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

(四) 實驗發現與討論：

- 1.由上圖 8 中可以看出，四種葉片形狀中，在生成平均電壓方面表現最佳的是芭蕉扇形的 10.93V，比表現最差的長方形 7.18V，高出約 4V。
- 2.考慮葉片形狀因素時，採用固定式葉片風力發電機，最佳設計為「芭蕉扇形」。

實驗四：不同葉片「數量」對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

(一) 測試說明：

- 1.葉片為與底座相連一體成型固定式，形狀為芭蕉扇形，材質為厚紙板。
- 2.葉片數量為「2 扇、3 扇、4 扇、5 扇、6 扇」五種。
- 3.使用 2HP 空壓機與電壓測量機加以測量，施測時間為 30 秒。
- 4.空壓機風口與模型距離固定為 30cm。
- 5.在施測時間 30 秒內，記錄生成之最高電壓與最低電壓，測量三次進行平均。

(二) 實驗照片：

表 12 不同葉片數量的固定式葉片風力發電機模型



(三) 實驗測量結果：

表 13 不同葉片數量對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響實驗結果

葉片數量	生成電壓		
	最高電壓(V)	最低電壓(V)	平均電壓(V)
2 扇	9.35	2.70	6.03
3 扇	12.65	9.71	11.18
4 扇	12.20	9.43	10.82
5 扇	12.41	7.75	10.08
6 扇	12.47	9.39	10.93

備註：2 扇葉片的模型在施測時運轉較不順暢，風速高時運轉尚平順，但當風速降低時，會有突然卡住推不動的感覺，所以生成最低電壓數值下降得很快。

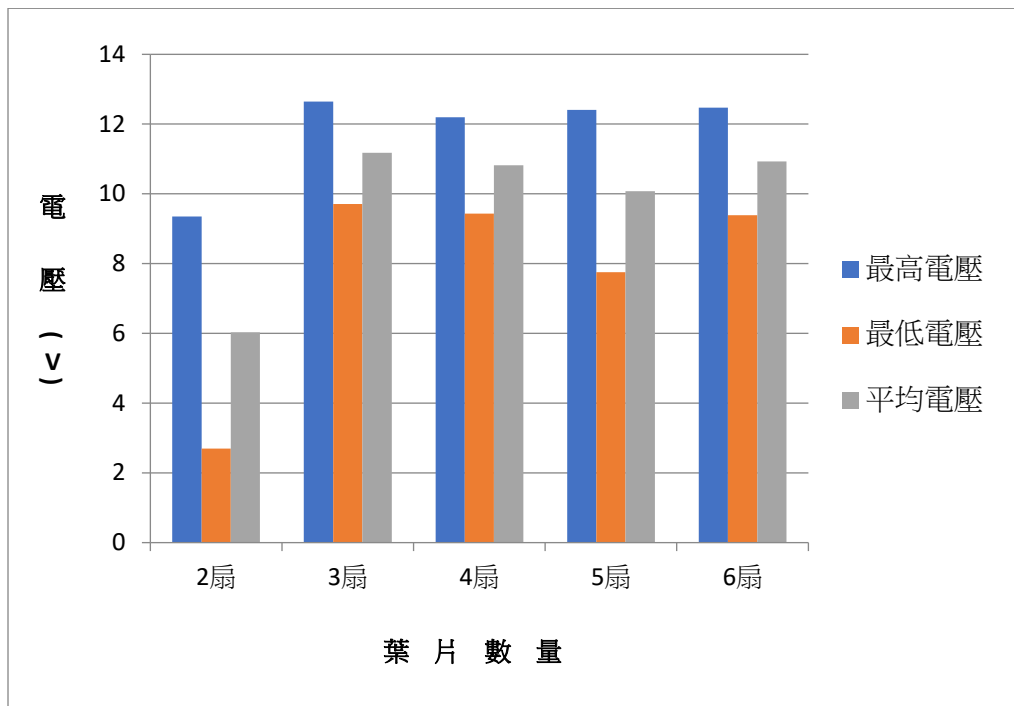


圖 9 不同的葉片數量對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

(四) 實驗發現與討論：

- 1.由上圖 9 中可以發現，葉片數量 3 扇的模型生成平均電壓表現最好，為 11V 以上。其次依序為葉片數量 6 扇、4 扇，5 扇，在 10.08~10.93V 之間，三者差距不大。表現最差的是葉片數量 2 扇的模型，生成平均電壓為 6.03V，且在施測時運轉較不順暢。
- 2.考慮葉片的數量因素時，採用固定式葉片風力發電機，最佳設計為「葉片數量 3 扇」。




實驗五：不同葉片「面積」對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

(一) 測試說明：

- 1.葉片為與底座相連一體成型固定式，形狀為芭蕉扇形，材質為厚紙板，數量 3 扇。
- 2.葉片面積分為「大型、中型、小型」三種。
- 3.使用 2HP 空壓機與電壓測量機加以測量，施測時間為 30 秒。
- 4.空壓機風口與模型距離固定為 30cm。
- 5.在施測時間 30 秒內，記錄生成之最高電壓與最低電壓，測量三次進行平均。

(二) 實驗照片：

表 14 不同葉片面積的風力發電機模型

大型葉片 將中型葉片放大 40% 面積為 78 cm ²	中型葉片 當作標準尺寸葉片 面積為 38cm ²	小型葉片 將中型葉片縮小 40% 面積為 17 cm ²
		

(三) 實驗測量結果：

表 15 不同葉片面積對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響實驗結果

葉片面積	生成電壓		
	最高電壓(V)	最低電壓(V)	平均電壓(V)
大型(140%)	9.52	2.57	6.05
中型(100%)	12.65	9.71	11.18
小型(60%)	5.04	0.57	2.81

備註：小型葉片由於面積太小，且施測距離為 30 公分，實驗時發現空壓機送風口擺放於相同位置，但是葉片難以有效接受風力，導致發電機運轉時較不順暢。

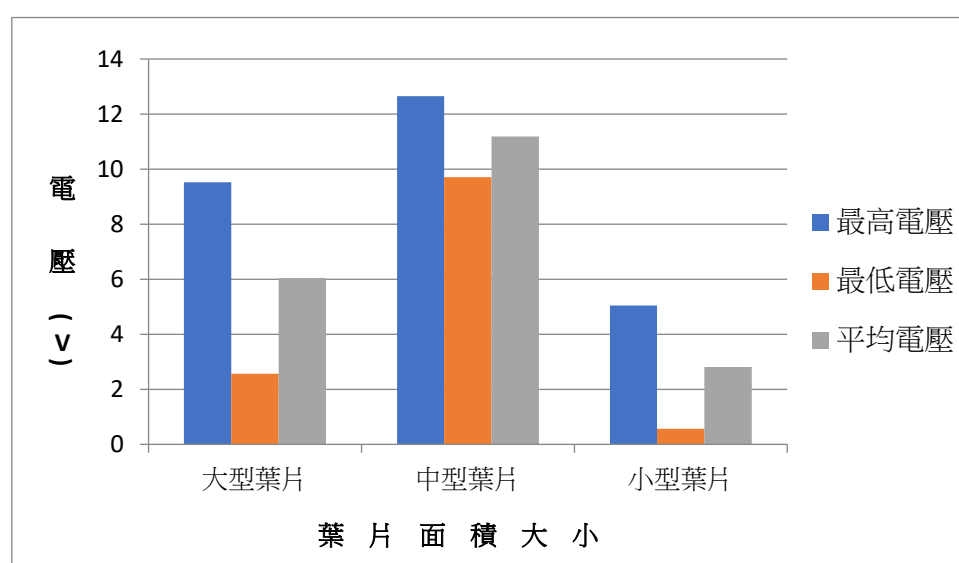


圖 10 不同的葉片面積對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

(四) 實驗發現與討論：

- 1.由上圖 10 中可以發現，中型葉片的生成平均電壓表現最佳，為 11.18V；其次為大型葉片的 6.05V；表現最差的是小型葉片，為 2.81V。
- 2.考慮葉片的面積因素時，採用固定式葉片風力發電機，最佳設計為使用「中型葉片」。





實驗六：不同葉片「角度」對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

(一) 測試說明：

- 1.葉片為與底座相連一體成型固定式，形狀為芭蕉扇形，材質為厚紙板，數量 3 扇，使用中型葉片。
- 2.葉片與支架的夾角分為「0 度、30 度、60 度、90 度」四種。
- 3.使用 2HP 空壓機與電壓測量機加以測量，施測時間 30 秒。
- 4.空壓機風口與模型距離固定為 30cm。
- 5.在施測時間 30 秒內，記錄生成之最高電壓與最低電壓，測量三次進行平均。

(二) 實驗照片：

表 16 不同葉片角度的風力發電機模型

夾角 0 度	夾角 30 度
	
夾角 60 度	夾角 90 度
	

(三) 實驗測量結果：

表 17 不同葉片角度對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響實驗結果

葉片角度	生成電壓		
	最高電壓(V)	最低電壓(V)	平均電壓(V)
0 度	12.65	9.71	11.18
30 度	9.50	1.21	5.36
60 度	0.98	0.19	0.59
90 度	0.82	0.14	0.48

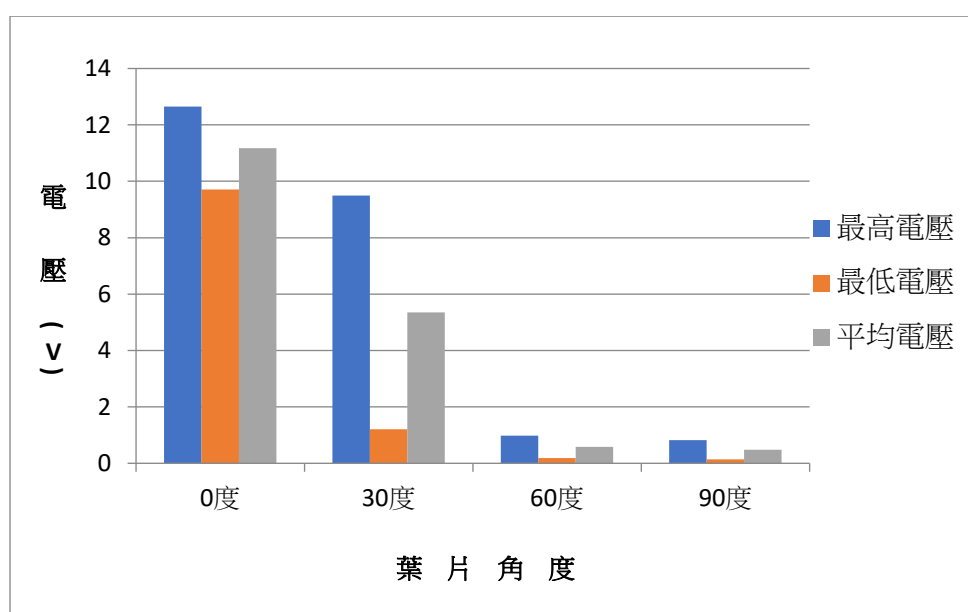


圖 11 不同的葉片角度對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

(四) 實驗發現與討論：

- 1.由上圖 11 中可以發現，葉片角度為 0 度的模型在生成平均電壓方面表現最佳，為 11.18V；其次為葉片角度 30 度的模型，平均電壓 5.36V。葉片角度的增加會使葉片變得無法有效接受風力，導致發電機轉速降低，生成平均電壓也就快速地由 11.18V 一直降到 0.48V。
- 2.葉片的角度增加至 60 度以上時，發電機模型幾乎無法轉動，生成電壓均在 1V 以下。
- 3.考慮葉片的角度因素時，採用固定式葉片風力發電機，最佳設計為使用「角度 0 度」的葉片。

實驗七：「與軸心不同距離」的葉片對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

(一) 測試說明：

- 1.葉片為與底座相連一體成型固定式，形狀為芭蕉扇形，材質為厚紙板，數量 3 扇，使用中型葉片，葉片角度為 0 度。
- 2.葉片中心與軸心間的距離分為「3 公分、4 公分、5 公分、6 公分」四種。
- 3.使用 2HP 空壓機與電壓測量機加以測量，施測時間為 30 秒。
- 4.空壓機風口與模型距離固定為 30cm。
- 5.在施測時間 30 秒內，記錄生成之最高電壓與最低電壓，測量三次進行平均。

(二) 實驗照片：

表 18 葉片中心與軸心不同距離的風力發電機模型



(三) 實驗測量結果：

表 19 葉片中心與軸心不同距離對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響實驗結果

葉片中心與 軸心距離	生成電壓		
	最高電壓(V)	最低電壓(V)	平均電壓(V)
3 公分	9.70	2.26	5.98
4 公分	12.65	9.71	11.18
5 公分	9.59	4.06	6.83
6 公分	9.45	1.59	5.52

備註：葉片中心與軸心距離 3 公分的發電機在運轉時會出現搖晃的情形。

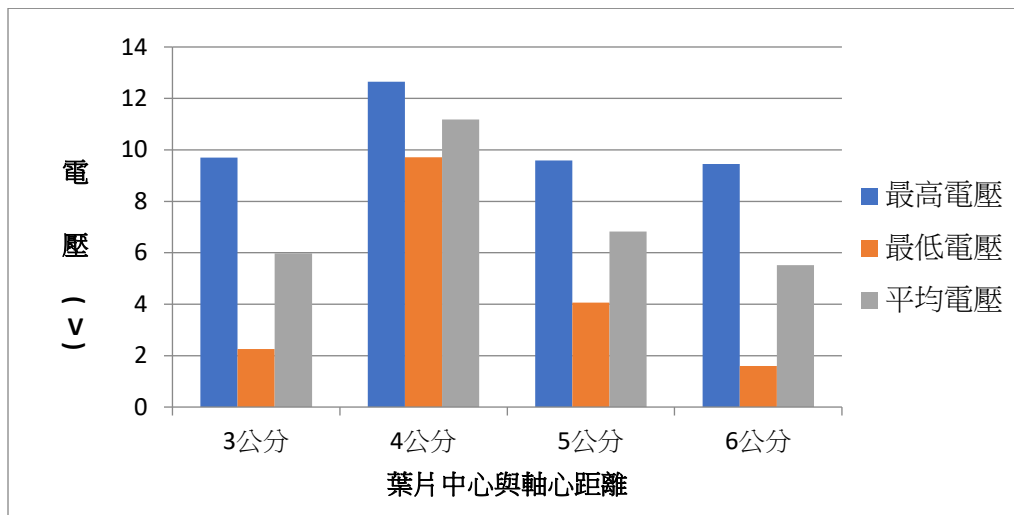


圖 12 不同的葉片中心與軸心距離對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

(四) 實驗發現與討論：

- 1.由上圖 12 中可以發現，在生成平均電壓方面表現最佳的是葉片中心距離軸心 4 公分的葉片，為 11.18V，其次依序為與軸心距離 5 公分、3 公分、6 公分的葉片，三者平均電壓差距不大。
- 2.在最低電壓方面，表現最差的是葉片中心距離軸心 6 公分的葉片，只有 1.59V，顯示葉片中心與軸心之間距離過大，葉片將無法有效受風，導致生成電壓降低。
- 3.葉片中心與軸心距離 3 公分的發電機在運轉時會出現搖晃的情形，原因可能是葉片相互之間十分緊密，沒有空隙，風無法穿透，因此風環繞推動時會造成整個模型搖晃。
- 4.若要考慮葉片中心與軸心不同距離的因素時，採用固定式葉片風力發電機，最佳設計為「葉片中心距離軸心 4 公分」。

實驗八：「改良版葉片」對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

(一) 測試說明：

- 1.為修正風速強時固定式葉片中心旋轉輕微搖晃問題，我們挑出曲線 S 形、芭蕉扇形二種模型來設計改良版，將葉片傾斜，讓軸心中間部分空間加大，讓風能流動其中，希望能使模型轉速更快，重心也更穩固。
- 2.«芭蕉扇形»和«曲線 S 形»模型，利用改變«葉片傾斜角度»的方法改善，使扇

葉傾斜 10 度。

3.使用 2HP 空壓機與電壓測量機加以測量，施測時間為 30 秒。

4.空壓機風口與模型距離固定為 30cm。

5.在施測時間 30 秒內，記錄生成之最高電壓與最低電壓，測量三次進行平均。

(二) 實驗照片：

表 20 改良版固定式葉片風力發電機模型

模型種類	芭蕉扇形葉片模型	曲線 S 形葉片模型
改善方法	改變葉片傾斜角度	改變葉片傾斜角度
3D 繪圖		
模型照片		
葉片說明	數量 3 片、中型葉片 傾斜 10 度、厚紙板材質	數量 3 片、長寬 11cm×7cm 傾斜 10 度、厚紙板材質

(三) 實驗測量結果：

表 21 改良版固定式葉片風力發電機生成電壓之影響實驗結果

葉片形狀	葉片材質	生成電壓		
		最高電壓(V)	最低電壓(V)	平均電壓(V)
曲線 S 形	厚紙板	11.50	9.35	10.43
曲線 S 形改良版	厚紙板	13.49	9.43	11.46
芭蕉扇形	厚紙板	12.47	9.39	10.93
芭蕉扇形改良版	厚紙板	13.11	9.32	11.22

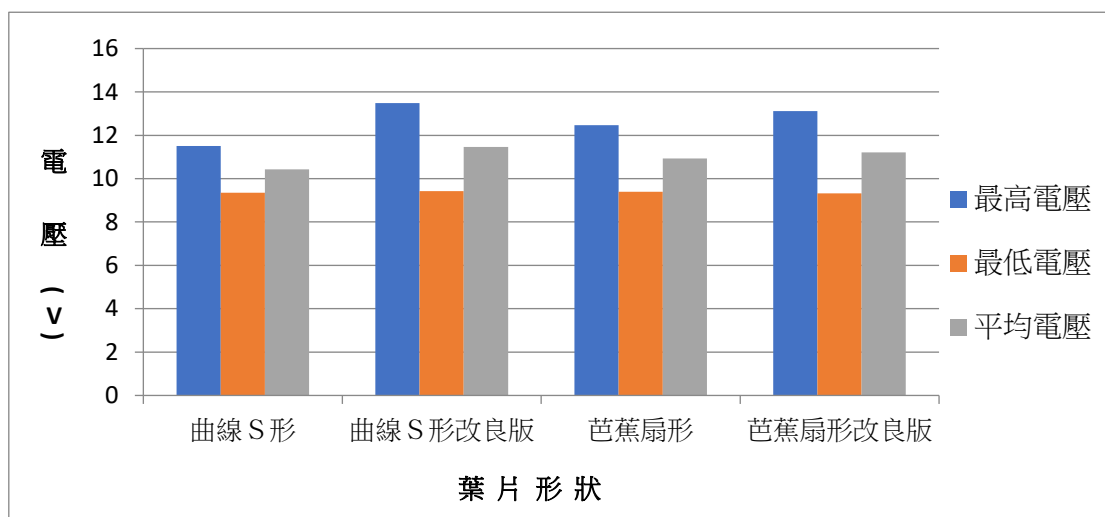


圖 13 改良版固定式葉片對風力發電機生成電壓之影響實驗結果

(四) 實驗發現與討論：

- 1.由上圖 13 中可以發現，曲線 S 形改良版風力發電機的生成平均電壓增加 1V 左右，芭蕉扇形則變動不大，二者平均電壓皆達 11V 以上。
- 2.挑選改良版葉片生成平均電壓最高之曲線 S 形改良版做為本校風光互補路燈系統之風力發電機模型設計。

五、設計校園風光互補路燈系統

整體而言，全球風力發電發展的趨勢仍以大型風力發電機為主，小型風力發電機因其發電效能較差，不適合大規模開發而屬於小眾產品，不過小型風力發電機的應用範圍更廣，可滿足偏遠地區、家庭用電、交通號誌、路燈、通訊設備等用電需求，因此在近年來逐漸受到重視。

雖然小型風力發電機的發電效能遠不及大型風力發電機，但因其設置成本較低，且可設置於低風速的環境中，因此成為無電力設施或電力設施不完善的偏遠地區的供電來源。在美國、英國、日本等先進國家，則將小型風力發電機應用於低碳城市上，與建築物結合，成為輔助電力的供應來源。有鑑於此，我們也希望能將本次科展研究出的風力發電機模型應用於校園中，以達到減碳及實施能源教育的雙重功能。

本校於 94 年度期間即已利用永續校園經費施作 3 組蝴蝶造型的太陽能夜間照明路燈，我們計劃將此次科展所設計出生成平均電壓最高的的風力發電機模型與太陽能路燈

做結合，建構成為校園風光互補路燈系統。

對校園而言，風光互補路燈系統是推動能源教育最實際的應用，不僅可節省電費、有助於減少二氧化碳的排放，更兼具地景藝術觀賞功能，所以，本校已爭取經費與高雄地區的國立大學合作，計畫將本研究所設計之風光互補路燈系統實際於校園中施作，期望能發展成為本校特色。

(一) 本校校園內原有之蝴蝶造型的太陽能夜間照明路燈(如圖 14)



圖 14 本校校園內原有之蝴蝶造型的太陽能夜間照明路燈

(二) 自行設計之校園風光互補路燈系統說明(如圖 15)：

- 1.風力發電機葉片造型為曲線S形改良版，葉片數量3扇。
- 2.將曲線S形改良版風力發電機設置於之蝴蝶造型太陽能夜間照明路燈最上方。
- 3.夜間照明路燈的太陽能板原設置於蝴蝶正上方，會挪至風力發電機下方增加的橫桿上，以免被遮擋，數量為1片。
- 4.原蝴蝶造型及路燈維持不變。

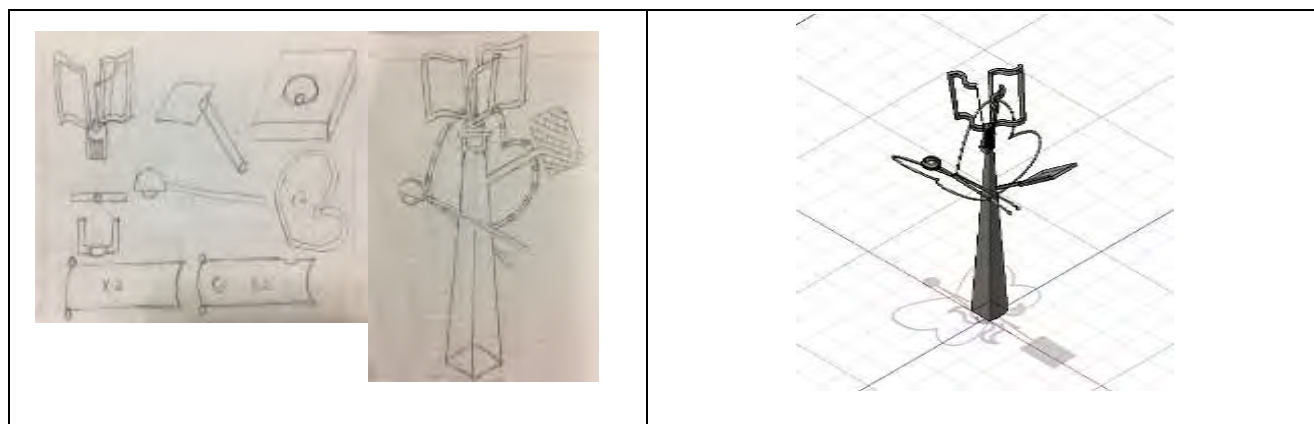


圖 15 校園風光互補路燈系統手繪圖及 3D 設計圖


(三) 實驗照片：

表 22 校園風光互補路燈系統模型製作

		
<p>使用之電路材料</p>	<p>組裝過程</p>	<p>風光互補路燈系統模型</p>

(四) 校園垂直軸風光互補型路燈規劃設計與效益預估

表 23 校園垂直軸風光互補型路燈系統規格說明

規 格	風光互補型路燈示意
<p>垂直軸風力發電機：400W</p> <p>太陽能光電板：多晶矽 120WP*1 片</p> <p>燈源：24W LED(色溫：5500~6000k)</p> <p>電源種類：直流低壓供電</p> <p>供電型態：蓄電池儲存轉換獨立供電系統</p> <p>蓄電池組；深循環電池，容量 DC12V，150AH</p> <p>備載電力：約 5 個陰雨日設計</p> <p>路燈使用時間：具光控和定時控點滅模式（8~12hrs/日）</p> <p>控制核心：風光互補型 MPPT 控制器</p> <p>燈桿高度：5.7M</p>	

由上表 23 中可看出，我們設計的校園風光互補路燈系統預計使用額定功率為 400W 的垂直軸風力發電機，以經濟部能源局風力資訊整合平台模擬之左營區平均風速約 4m/s 估算，對照其發電輸出曲線（如圖 16）可知，風力發電機實際輸出功率約達 25W，若可用率為 90%(發生故障與例行維修)，保守估計年發電量計算如下，大約是 197.1kWh(度)。

$$\text{風力發電機年發電量} = 0.025(\text{kW}) \times 365(\text{天}) \times 24(\text{小時}) \times 90\% \approx 197.1 \text{ kWh}$$

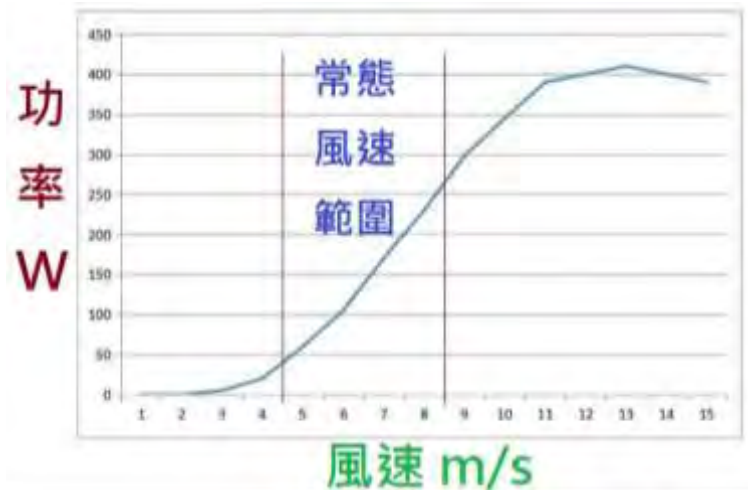


圖 16 400W 垂直軸風力發電機發電曲線

至於太陽能部分，預計使用多晶矽太陽能板，單片額定功率為 120W，共 1 片。假設其實際發電轉換率為 80%，依據中央氣象局統計之高雄地區年平均日照時數為 2212.2 小時，估計年發電量計算如下，大約是 212.4kWh(度)。

$$\text{太陽能板年發電量} = 0.12(\text{kW}) \times 80\% \times 2212.2(\text{小時}) \doteq 212.4\text{kWh}$$

如上風能和太陽能估算出之年發電量，若依據台電公司 108 年上半年公告電價費率以每度平均電價 2.6253 (元/度) 計算，可估算出設置每座風光互補路燈每年可節省之電費金額。此外，依據經濟部能源局最新公布之 106 年度電力排放係數，我國平均每發一度電之二氧化碳排放量為 0.554 公斤 CO₂e。綜上所述，本校設計之風光互補路燈系統之實際效益預估整理如下表：

表 24 本校風光互補路燈系統預期效益

項目 數量	太陽能		風力		總發電量 (kWh)	合計 年節省(元)	合計年減少 碳排放量(kg)
	年發電量 (kWh)	節省電費 (元)	年發電量 (kWh)	節省電費 (元)			
1 座 風光互補	212.4	557.6	197.1	517.4	409.5	1,075	226.9
3 座 風光互補	637.2	1,672.8	591.3	1,552.2	1,228.5	3,225	680.6

陸、研究結果

本研究以「固定式葉片」垂直軸風力發電機模型為研究主軸，選擇葉片的「材質」、「形狀」、「數量」、「面積」、「角度」、「與軸心距離」為操作變因，進行一連串生成電壓的施測，茲將研究結果整理如下：

一、三種不同設計的垂直軸風力發電機對生成電壓之影響

- (一) 活動式葉片設計在旋轉時扇葉擺盪幅度大，扇葉會隨著風向而成圓形擺動，雖然在生成平均電壓方面表現最差，但整體運轉時穩定度不錯。
- (二) 固定式葉片設計在旋轉時重心平穩，不會左右搖晃，且轉速很快，因此不論在最高電壓或最低電壓方面，均表現最佳。
- (三) 沒有中柱的設計，會使發電機模型中間的支撐力量不足，且整體結構重心不穩，運轉時會劇烈搖晃，易對發電機轉軸造成損壞，不適合用來施測。
- (四) 三件不同設計之垂直軸風力發電機模型中，只有固定式葉片設計的模型在電壓測試時沒有明顯的缺點，所以最後決定選擇此模型進行 3D 繪圖細部修正，做為定案之發電機模型，並搭配葉片的「材質」、「形狀」、「數量」、「面積」、「角度」、「與軸心距離」等不同變因，繼續深入研究。

二、不同「材質」的葉片對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

- (一) 所有材質中以厚紙板的生成平均電壓表現最佳，其餘三種材質的生成平均電壓差距不大。
- (二) 考慮葉片材質因素時，採用固定式葉片風力發電機，最佳設計為「厚紙板材質」。

三、不同「形狀」的葉片對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

- (一) 四種葉片形狀中，在生成平均電壓方面表現最佳的是芭蕉扇形，比表現最差的長方形高出約 4V。
- (二) 考慮葉片形狀因素時，採用固定式葉片風力發電機，最佳設計為「芭蕉扇形」。

四、不同「數量」的葉片對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

- (一) 葉片數量 3 扇的模型生成平均電壓表現最好，為 11V 以上。其次依序為葉片數量 6 扇、4 扇，5 扇，在 10.08~10.93V 之間，三者差距不大。表現最差的是葉片數量 2

扇的模型，生成平均電壓只有 6.03V，且在施測時運轉明顯不順暢。

(二) 考慮葉片數量因素時，採用固定式葉片風力發電機，最佳設計為「葉片數量 3 扇」。

五、不同「面積」的葉片對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

(一) 模型中以中型葉片的生成平均電壓表現最佳，其次為大型葉片，表現最差的是小型葉片。

(二) 綜上所述，若要考慮葉片的面積因素時，採用固定式葉片風力發電機，最佳設計為使用「中型葉片」。

六、不同「角度」的葉片對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

(一) 葉片角度為 0 度的模型，在生成平均電壓方面表現最佳，其次為葉片角度 30 度的模型，且生成電壓會隨著葉片角度的增加而快速降低。

(二) 綜上所述，若要考慮葉片的角度因素時，採用固定式葉片風力發電機，最佳設計為使用「角度 0 度」的葉片。

七、「與軸心不同距離」的葉片對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

(一) 在生成平均電壓方面表現最佳的是葉片中心距離軸心 4 公分的葉片，其次依序為與軸心距離 5 公分、3 公分、6 公分的葉片，三者平均電壓差距不大。

(二) 在最低電壓方面，表現最差的是葉片中心距離軸心 6 公分的葉片，顯示葉片中心與軸心之間距離過大，葉片將無法有效受風，導致生成電壓降低。

(三) 綜上所述，若要考慮葉片中心與軸心不同距離的因素時，採用固定式葉片風力發電機，最佳設計為使用「葉片中心距離軸心 4 公分」的葉片設計。

八、「改良版」葉片對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

(一) 曲線 S 形改良版風力發電機的生成平均電壓增加 1V 左右，芭蕉扇形則變動不大，二者平均電壓皆達 11V 以上。

(二) 挑選改良版葉片中生成平均電壓最高之曲線 S 形改良版做為風光互補路燈系統之風力發電機模型設計。

九、在校園中施作風光互補路燈系統是可行的，具有經濟與環境雙重效益，應多加推廣。

柒、未來研究與建議

現今全球風力發展目前仍以大型風力機為主，但小型垂直式風力機因安裝簡便、成本低廉，可設置於低風速的環境中，因此許多先進國家如美國、英國、日本及韓國等，將小型垂直式風力機與建築結合，透過小型垂直式風力機使其成為輔助電力供應來源；而在無電力設施或電力設施不完善的偏遠地區，也可透過成本低安裝容易的小垂直式型風力機來作為小規模供電。

台灣擁有良好風場，也有機械、電子等製造基礎，在技術足以支援的情況下，應大力推動小型垂直軸風力發電機廣泛的運用，進駐機構大樓、學校、社區與家庭的屋頂，除了落實環境教育、綠能發電之外，更是順應未來趨勢之最佳選擇。

捌、參考資料

- 1.風生電起--探討風能的有效應用國中組。物理科。中華民國第四十五屆中小學科學展覽會
取自 <http://www.ntsec.gov.tw/activity/race-1/45/high/0316/031611.pdf>
- 2.牛山泉、關和市（民 100）。垂直軸風車。台北市：台大出版中心。
- 3.關於小型垂直軸風力發電機，取自：http://www.hi-vawt.com.tw/tw/tw_about_vaswt.html
- 4.經濟部能源局。<https://www.moeaboe.gov.tw>

【評語】 082811

1. 以綠能為研究方向，呼應時事議題，規劃設計垂直式風力發電系統，並使用 3D 列印製作所需物件，來進行相關實驗。設計固定式葉片風力發電機模型，擬透過發電結合校園太陽能發電系統，實際應用在校園中，設計出風光互補的路燈。
2. 討論葉片角度設計、葉片材質、葉片形狀、葉片數量等可以控制參數對於生成電壓的影響。眾多參數，如能透過有系統的實驗設計方法，會節省實驗時間以及更有條理。
3. 使用空壓機為風源，與模型距離固定為 30cm，如何產生穩定且均衡的風力，應加以說明。

摘要

現今的臺灣，因燃煤發電所產生的空汙問題日益嚴重，而在氣候變遷與追求永續發展的趨勢中，綠色能源的應用勢必成為我們未來發展的重點。臺灣因得天獨厚的地理位置與季風的盛行，非常適合發展風力發電；因此，我們借用古人的智慧，以垂直軸風車為基礎，融合現今的創意，利用3D繪圖列印技術，設計出「固定式葉片」風力發電機模型，並進行一連串生成電壓的施測，研究結果顯示：垂直軸風力發電機的最佳葉片設計為「厚紙板材質」、「芭蕉扇形」、「數量3扇」、「中型面積」、「距離軸心4公分」、「夾角0度」、「攻角75度」。以此為依據，我們進一步結合校園中現有之太陽能路燈，設計出屬於自己學校的風光互補路燈系統。

壹、研究動機

在六年級自然課程「電磁作用」這個單元中，我們學到了馬達和發電機的原理，發電機的應用讓我們有深入研究的興趣，再加上臺灣的電力來源以火力發電為主，大量的燃煤造成空汙問題日益嚴重，因此經過討論後，我們決定以風力發電為研究主題，希望能找出發電效能最佳的風力發電機葉片設計，為環境保護貢獻一份心力。

風力發電機的種類主要可分為垂直軸及水平軸兩種，各有其優缺點，但考慮到想將此科展研究結果與學校現有的太陽能路燈結合在一起的問題，我們決定選擇較不受風向、風速及地形限制的垂直軸風力發電機為研究主體。

貳、研究目的

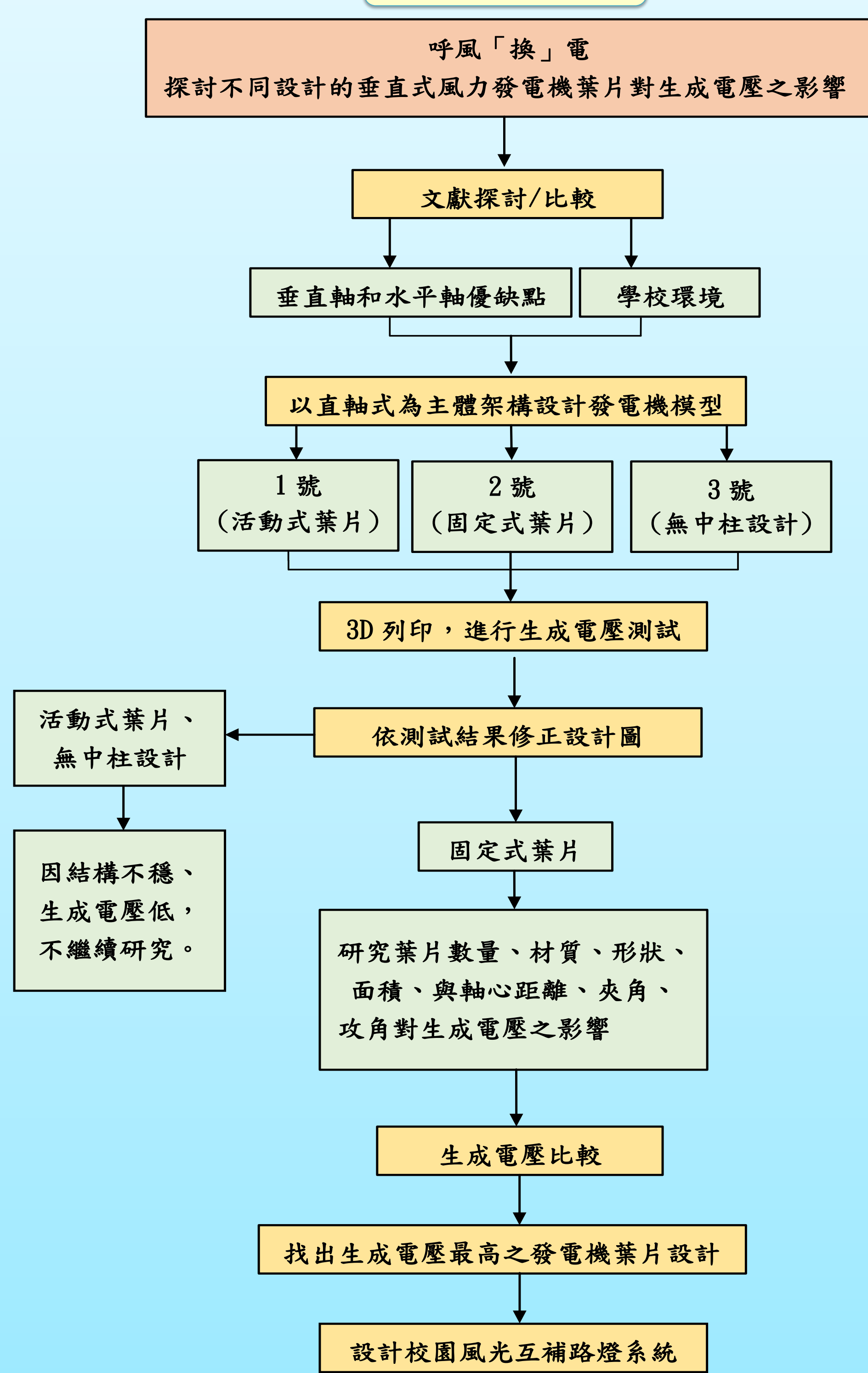
- 一、風力與發電的文獻探討。
- 二、設計垂直軸風力發電機模型。
- 三、探討不同的葉片「材質」「形狀」「數量」「面積」「與軸心距離」「夾角」「攻角」

對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響。

- 四、設計校園風光互補路燈系統。

肆、研究過程

實驗架構



參、研究設備



實驗進行圖片



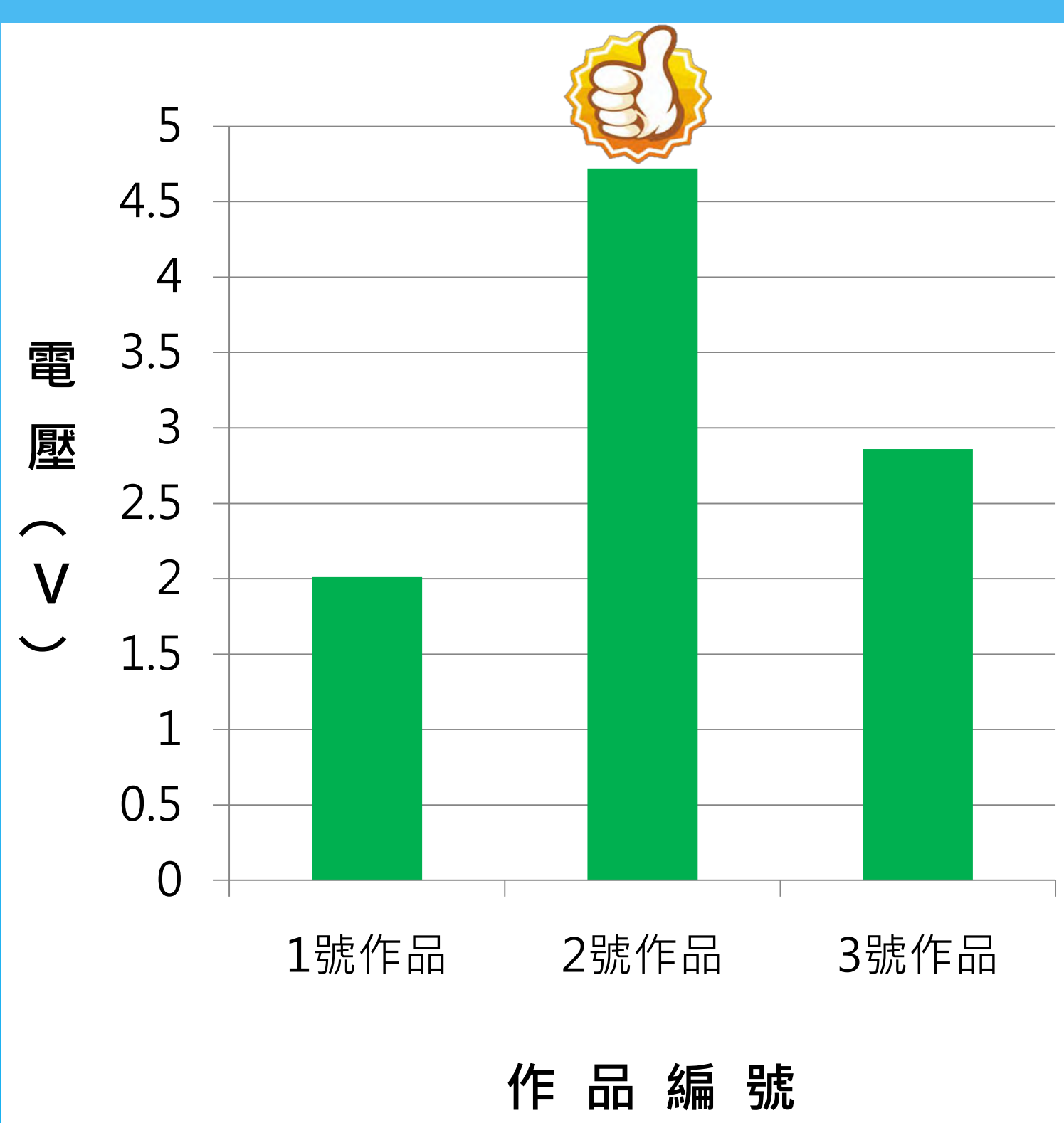
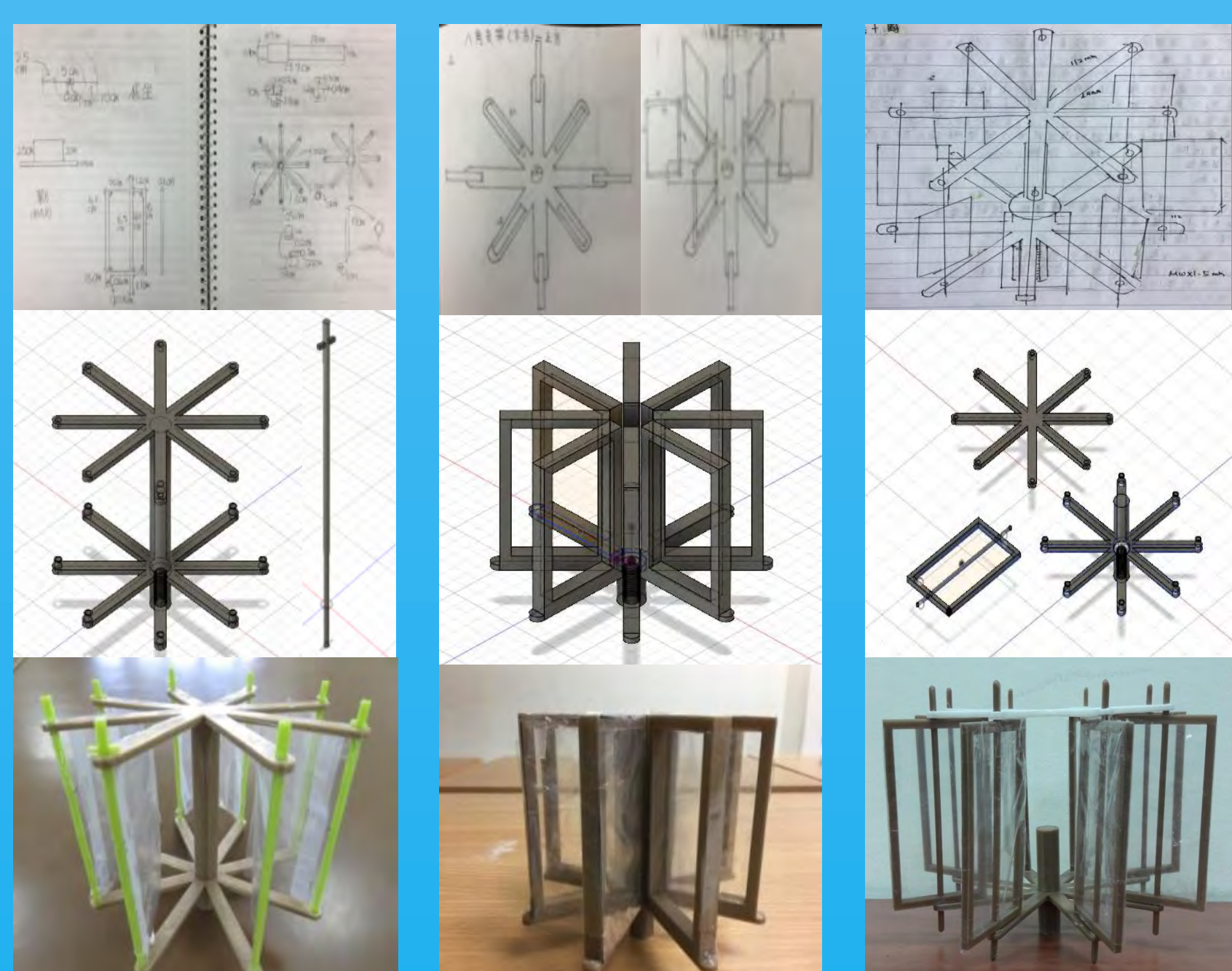
施測方法

使用2HP空壓機當做風源，風速維持4m/s，距離30公分，施測30秒，用電壓測量機測試生成電壓，每5秒記錄一次，計算平均值。

伍、研究結果討論

實驗一：不同設計之垂直軸風力發電機模型對生成電壓之影響

●葉片條件：數量8扇、長方形、塑膠袋材質



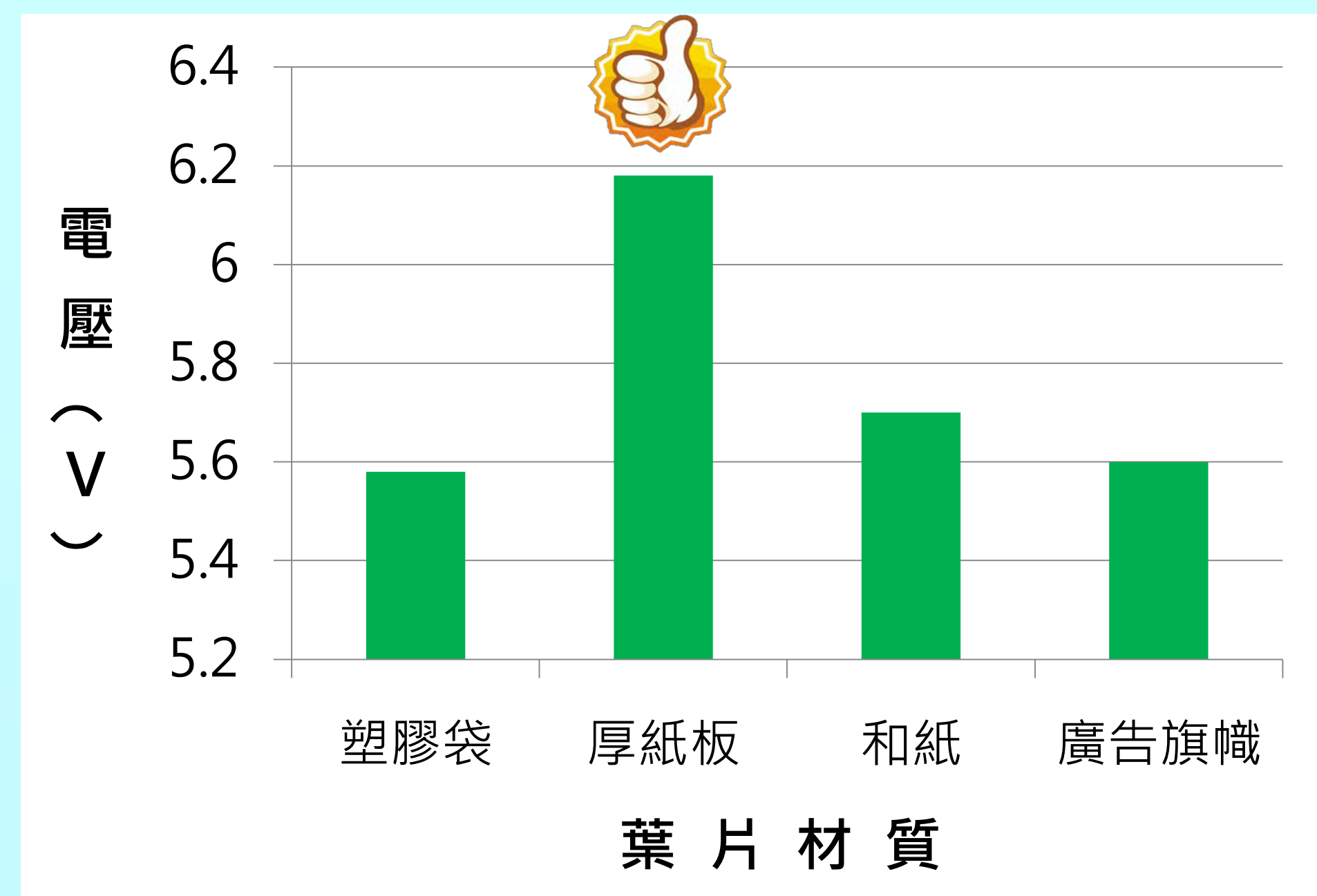
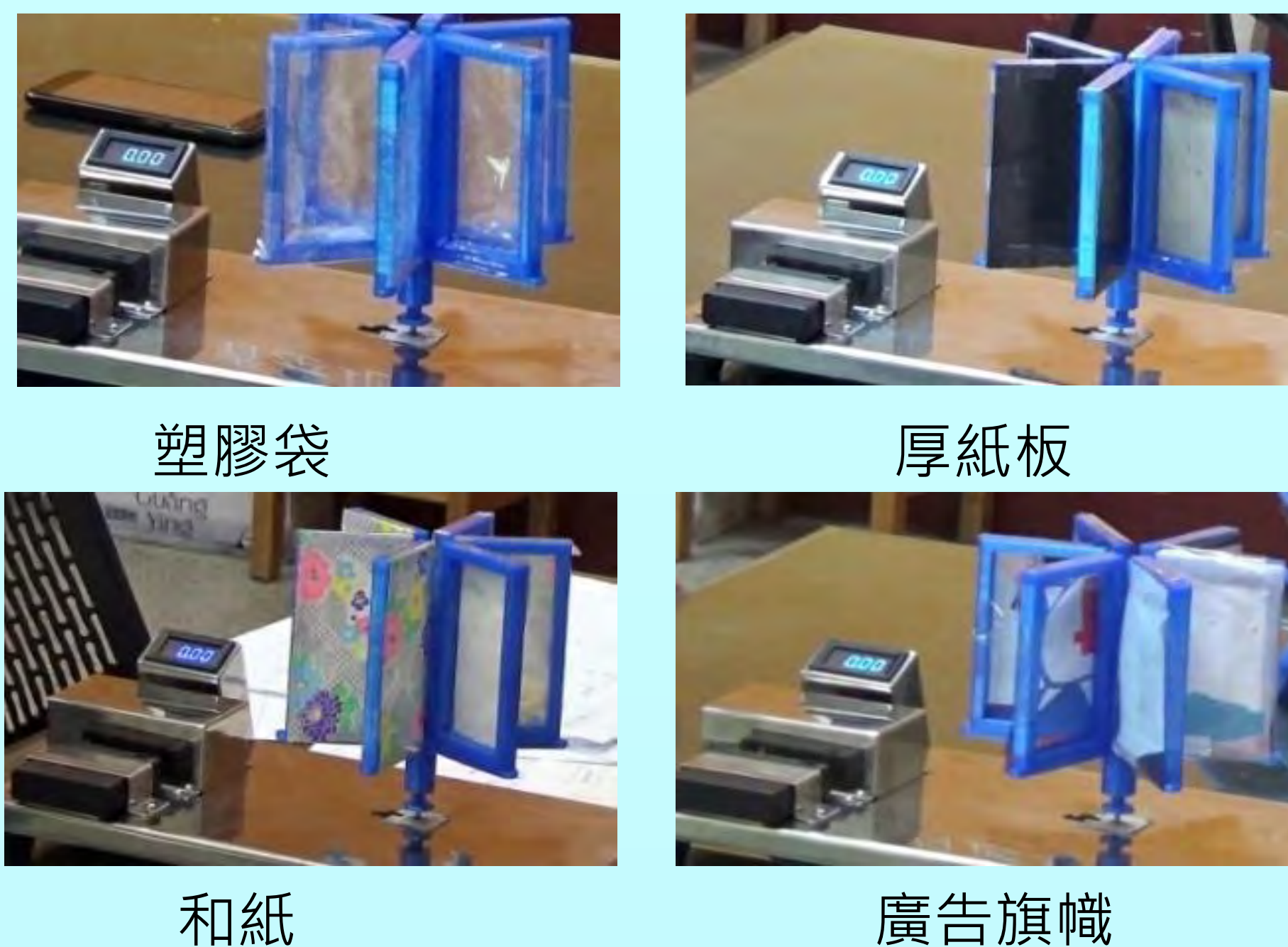
實驗結果

- 1號作品：旋轉時穩定度佳
生成電壓最差
列印最耗時耗材
- 2號作品：旋轉重心平穩
生成電壓最佳
列印表現居中
- 3號作品：旋轉時劇烈搖晃
生成電壓居中
列印最省時省材

實驗二、不同「材質」的葉片對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

•葉片條件：6扇、長方形

•葉片材質：「塑膠袋、厚紙板、和紙、廣告旗幟」



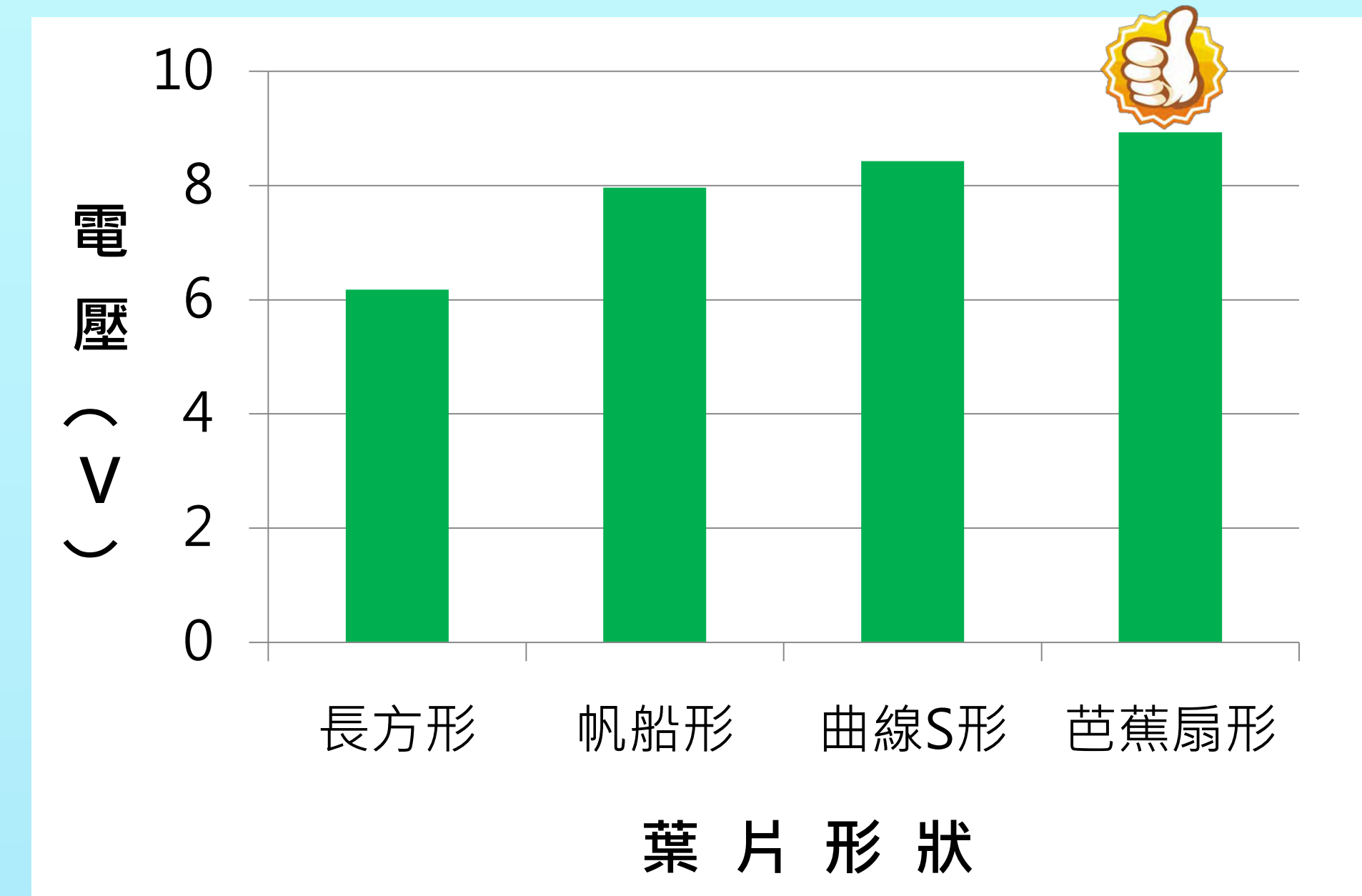
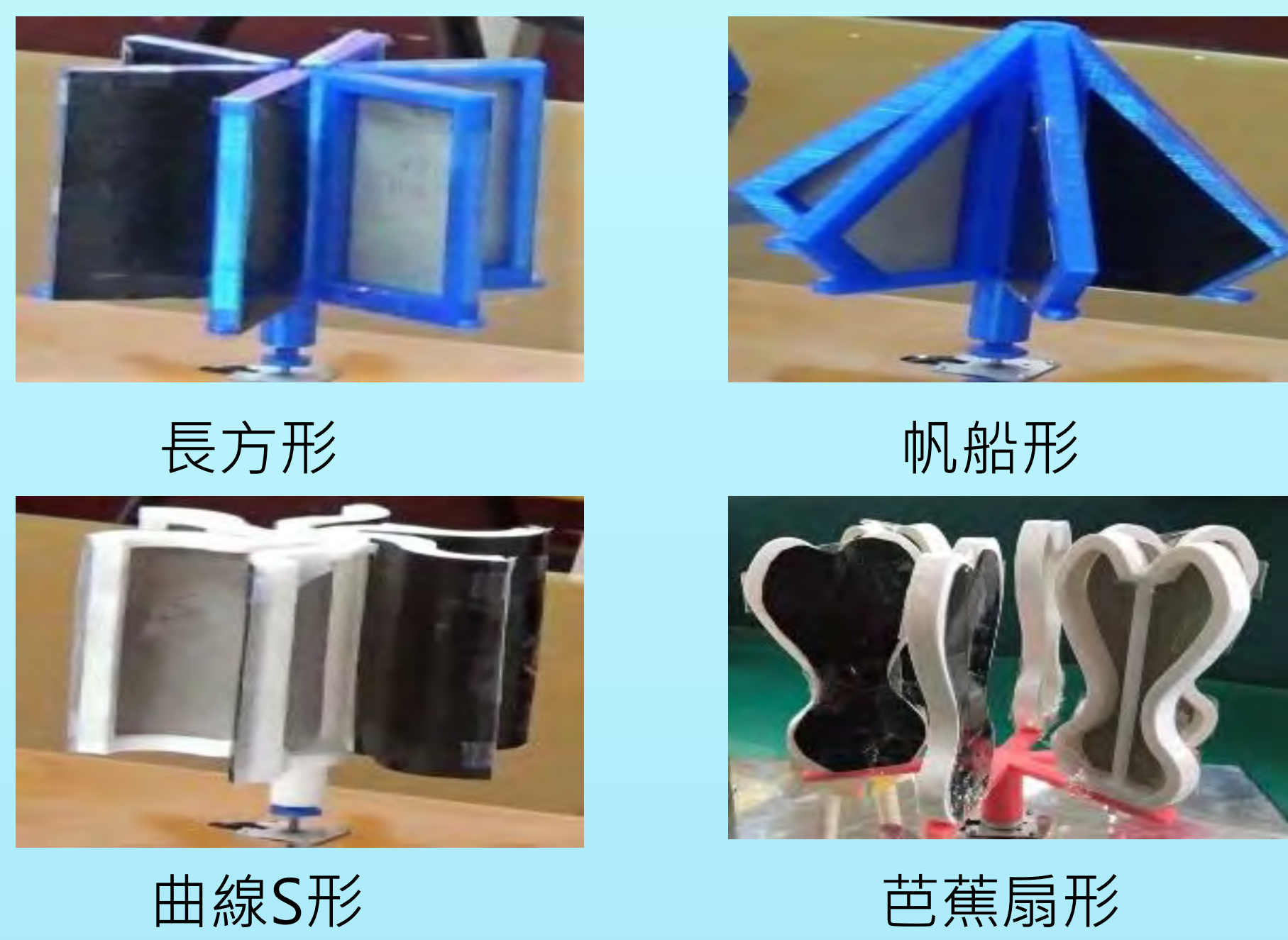
實驗結果

考慮葉片「**材質**」因素，最佳設計為「**厚紙板**」。

實驗三、不同「形狀」的葉片對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

•葉片條件：6扇、厚紙板

•葉片形狀：「長方形、帆船形、曲線S形、芭蕉扇形」



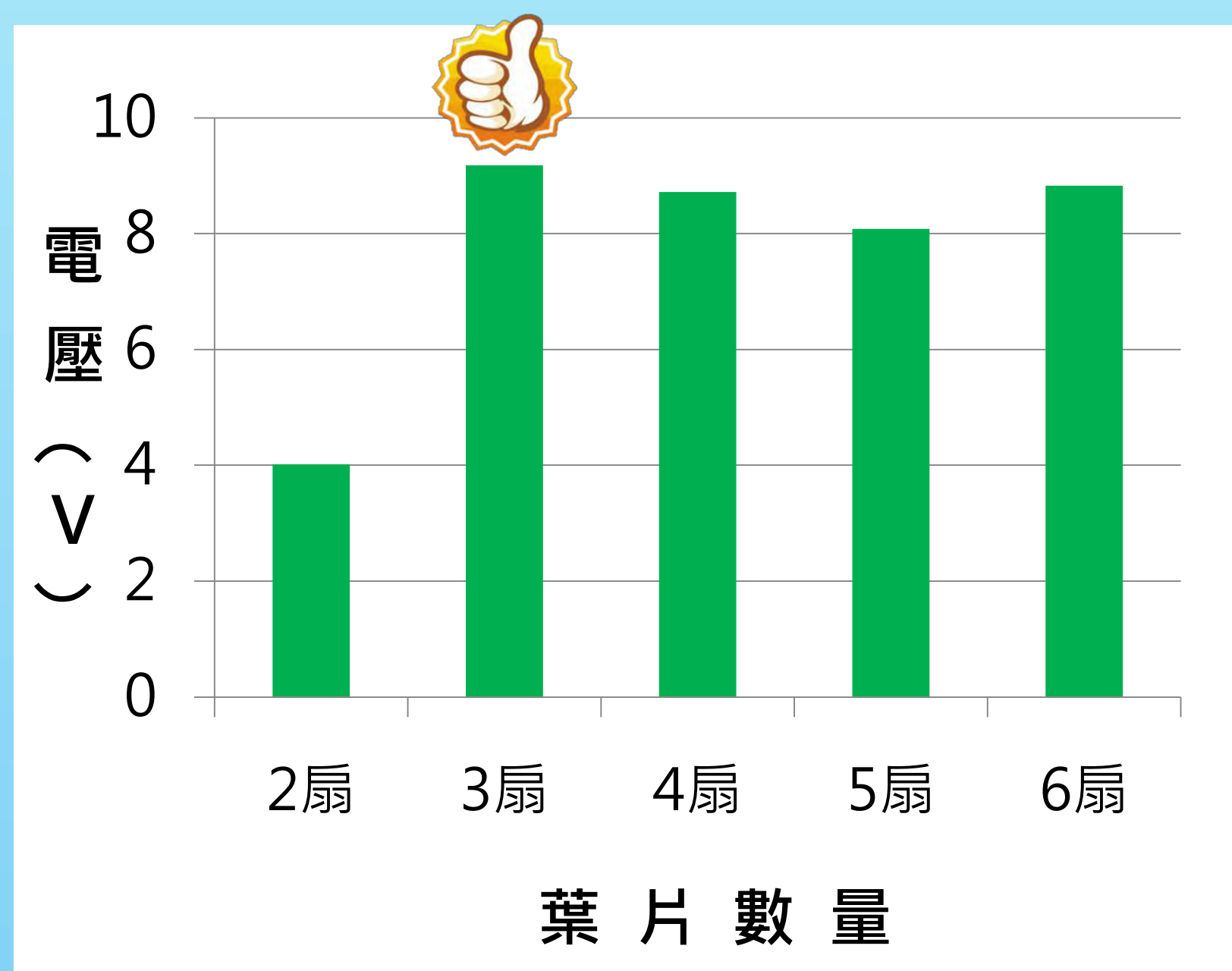
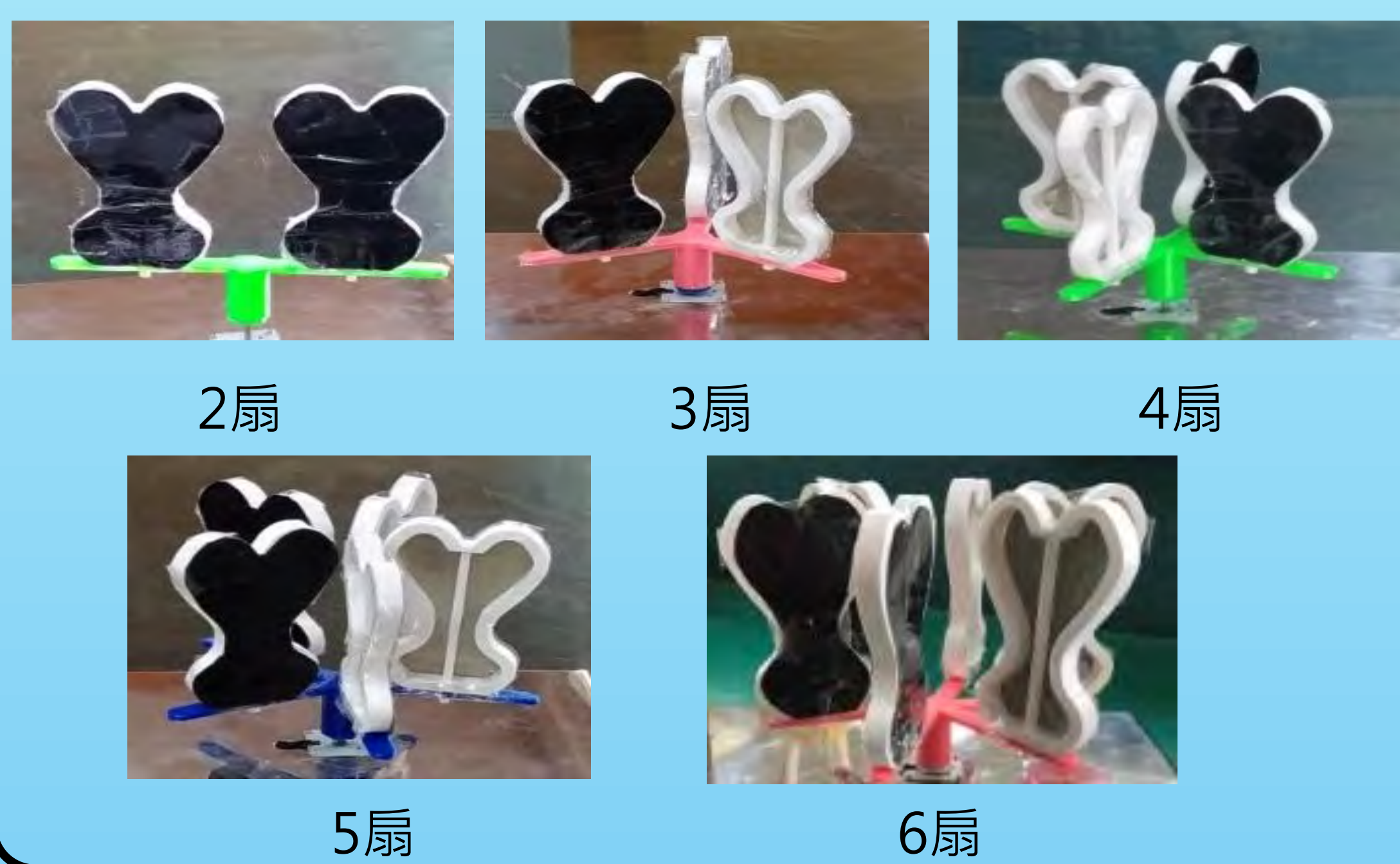
實驗結果

考慮葉片「**形狀**」因素，最佳設計為「**芭蕉扇形**」。

實驗四、不同「數量」的葉片對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

•葉片條件：厚紙板、芭蕉扇形

•葉片數量：「2扇、3扇、4扇、5扇、6扇」



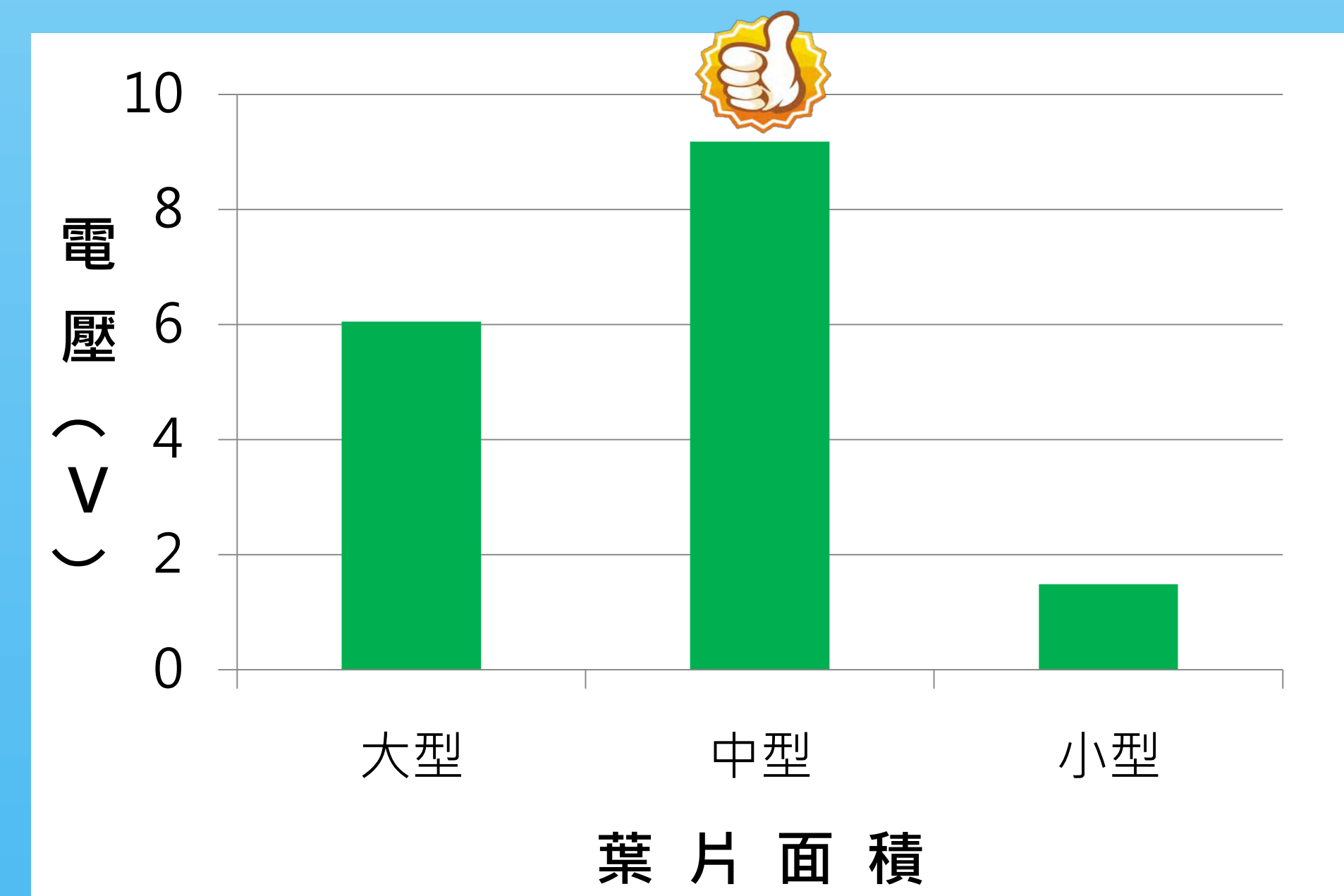
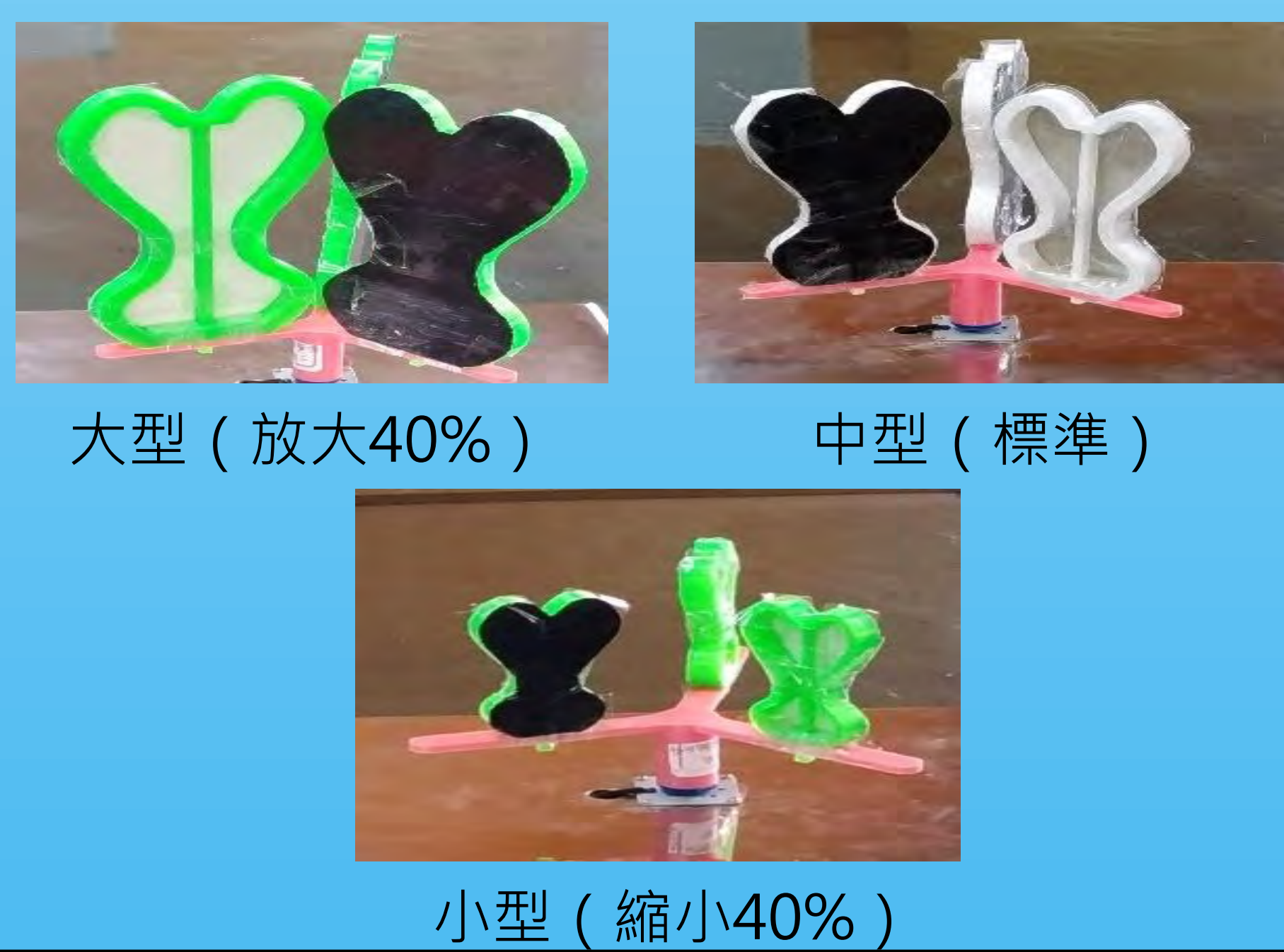
實驗結果

考慮葉片「**數量**」因素，最佳設計為「**3扇**」。

實驗五、不同「面積」的葉片對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

•葉片條件：厚紙板、芭蕉扇形、3扇

•葉片面積分為「大型、中型、小型」



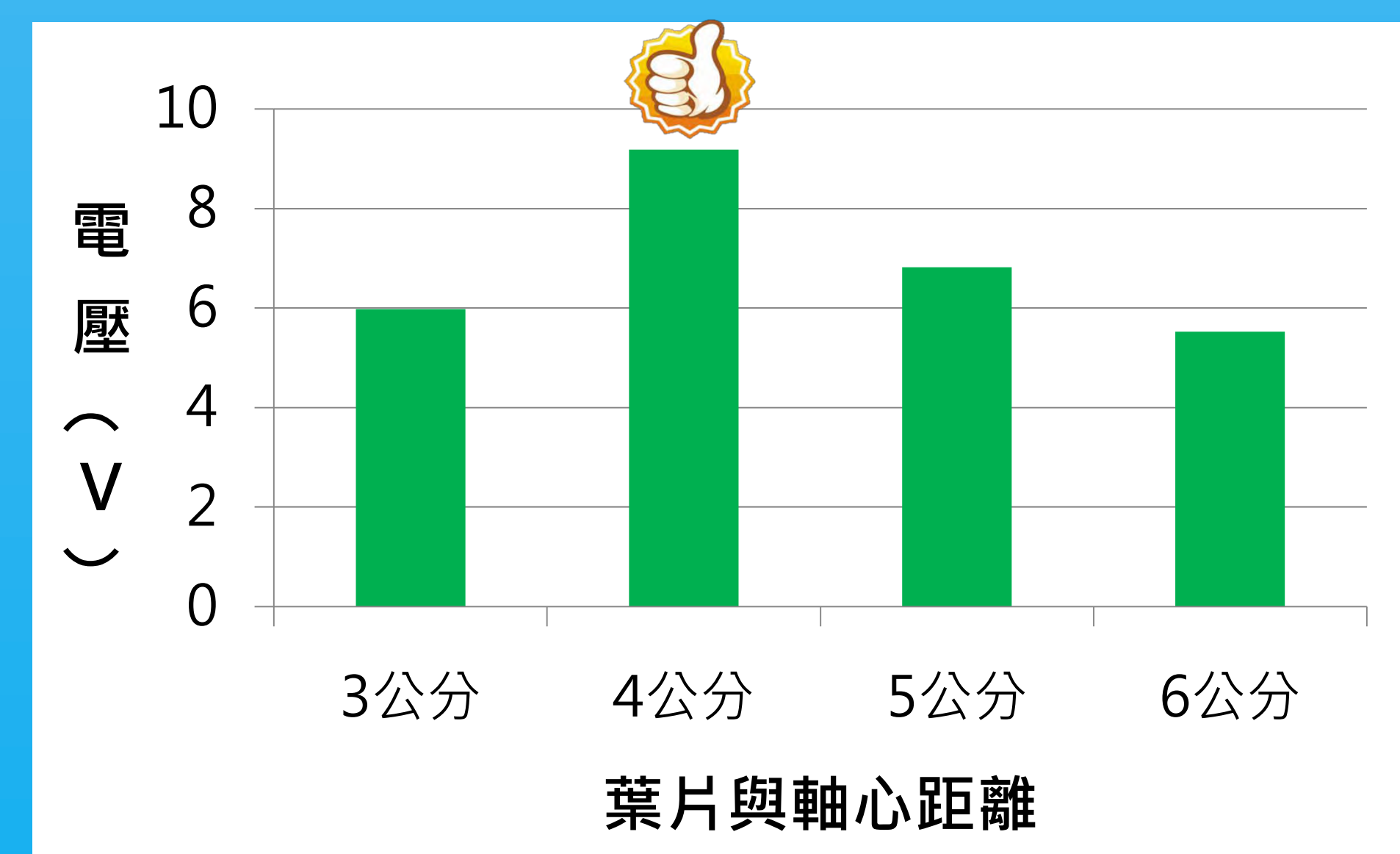
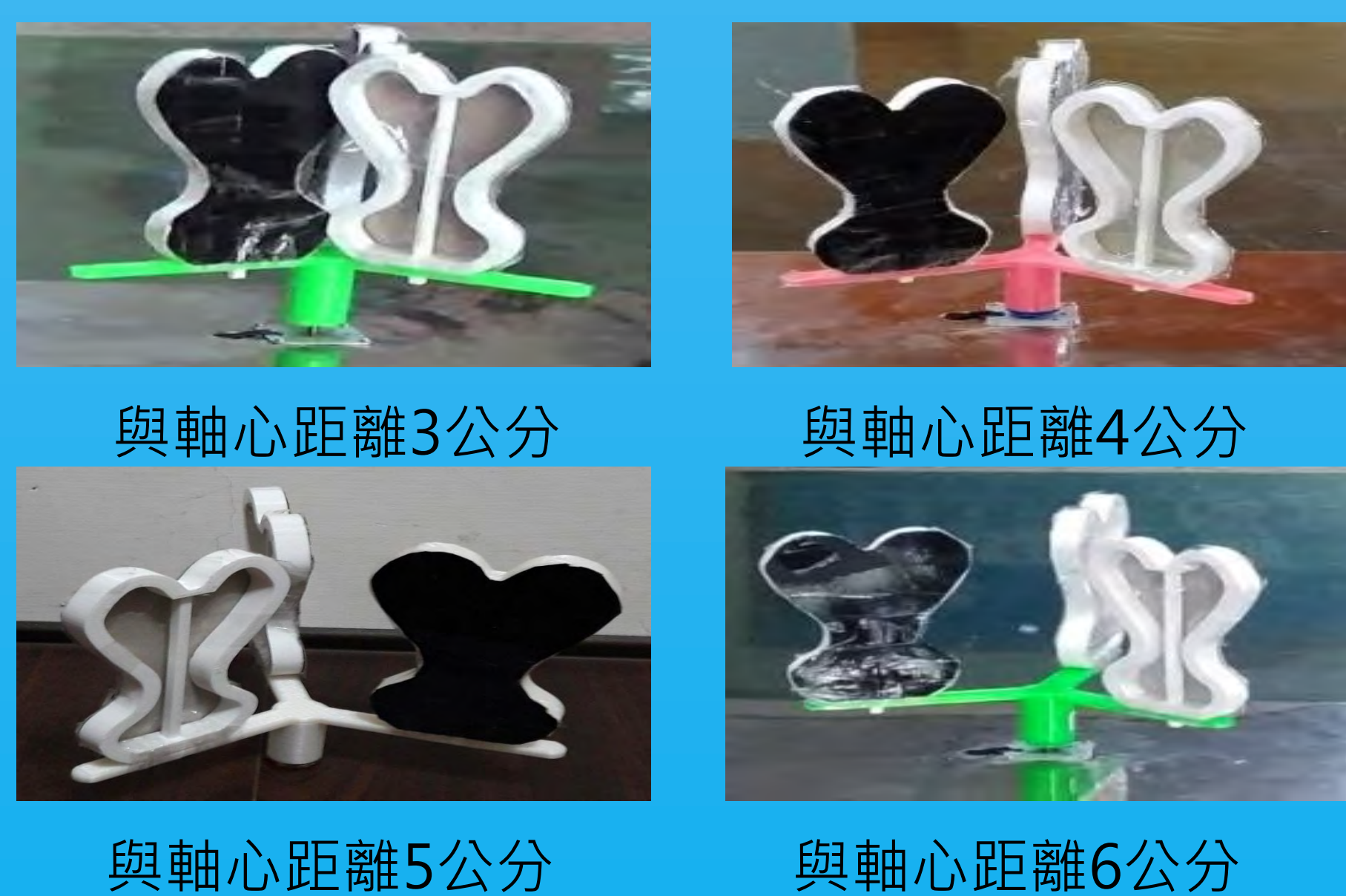
實驗結果

考慮葉片「**面積**」因素，最佳設計為「**中型葉片**」。

實驗六、「與軸心不同距離」的葉片對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

•葉片條件：厚紙板、芭蕉扇形、3扇、中型葉片

•葉片中心與軸心間的距離分為「3公分、4公分、5公分、6公分」

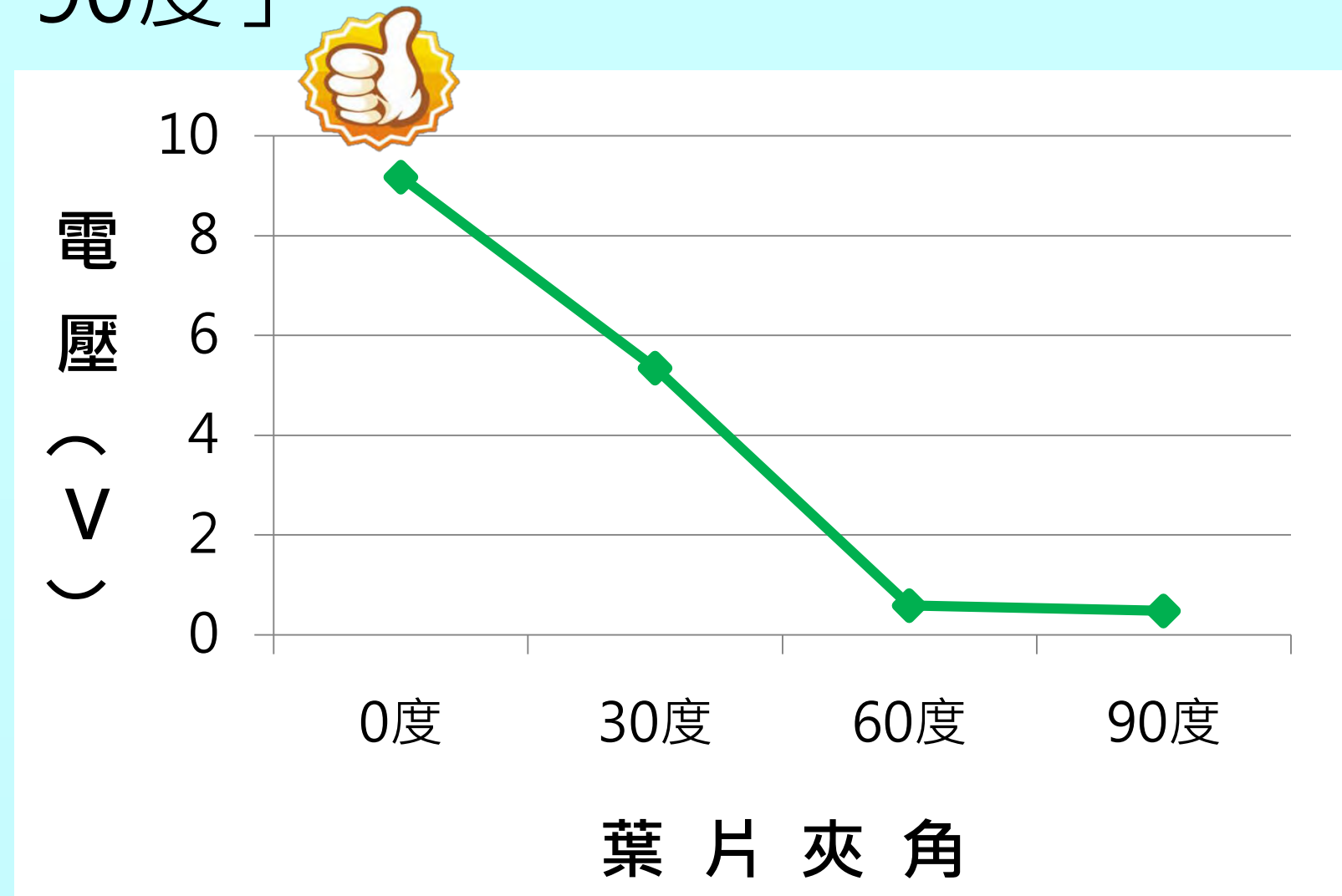
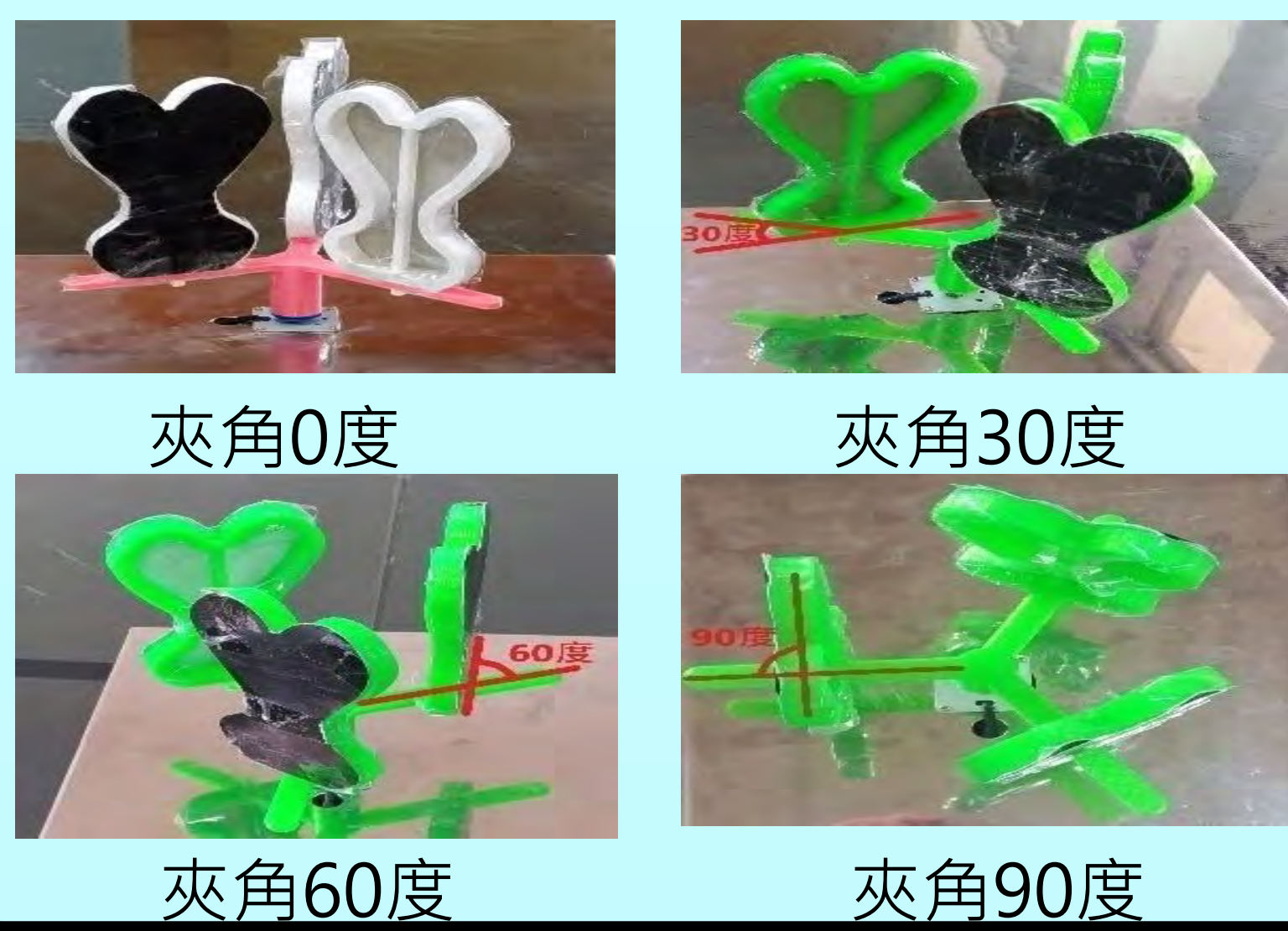


實驗結果

1. 「**距離軸心4公分**」表現最佳。
2. 葉片與軸心距離過大，會導致生成電壓降低。

實驗七、不同「夾角」的葉片對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

- 葉片條件：厚紙板、芭蕉扇形、3扇、中型葉片、距離軸心4公分
- 夾角分為「0度、30度、60度、90度」

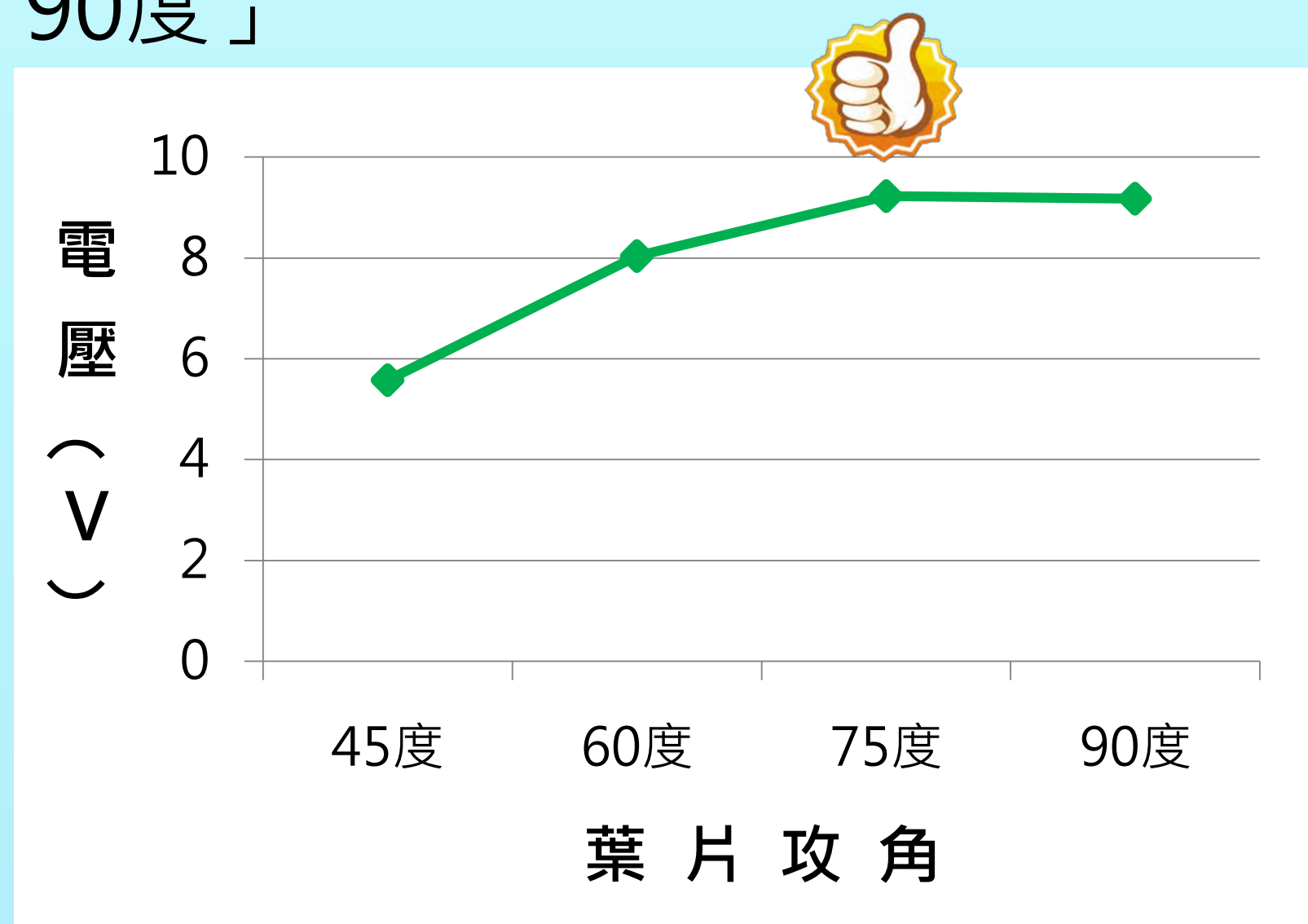


實驗結果

- 1.葉片夾角增加，會使葉片生成電壓降低。
- 2.考慮葉片「夾角」因素，最佳設計為「夾角0度」

實驗八、不同「攻角」的葉片對固定式葉片風力發電機生成電壓之影響

- 葉片條件：厚紙板、芭蕉扇形、3扇、中型葉片、距離軸心4公分、夾角0度
- 攻角分為「45度、60度、75度、90度」



實驗結果

- 1.葉片攻角 < 75度，會使葉片生成電壓降低。
- 2.考慮葉片「攻角」因素，最佳設計「攻角75度」

實驗九、設計校園風光互補路燈系統

本校於94年度期間即已利用經費施作3組蝴蝶造型太陽能夜間照明路燈，我們計劃將此次科展所設計出生成電壓最高的風力發電機模型與太陽能路燈做結合，建構成為校園風光互補路燈系統，期望此一設計能成為本校特色。

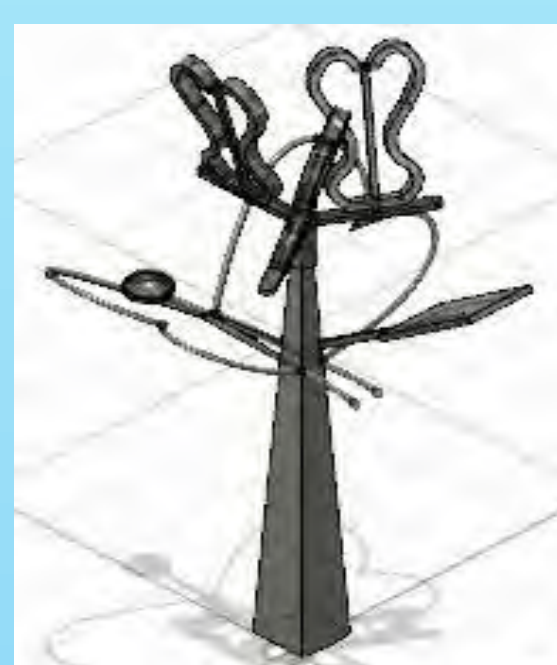
一、實驗過程圖片



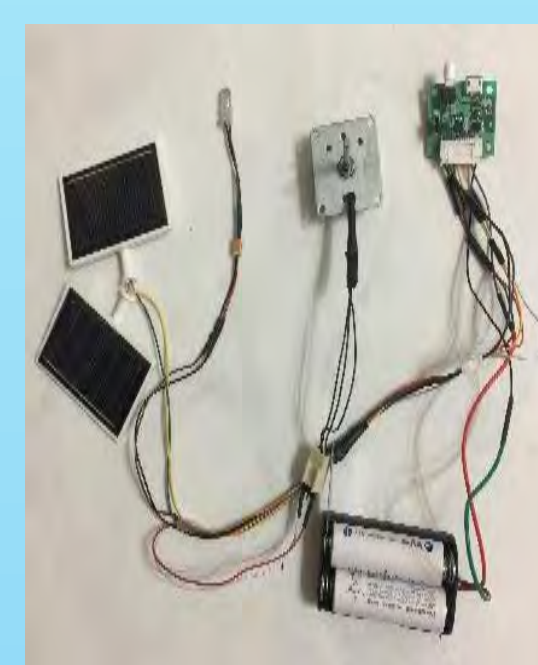
原有路燈(白天)



原有路燈(夜晚)



3D設計圖



使用電路材料

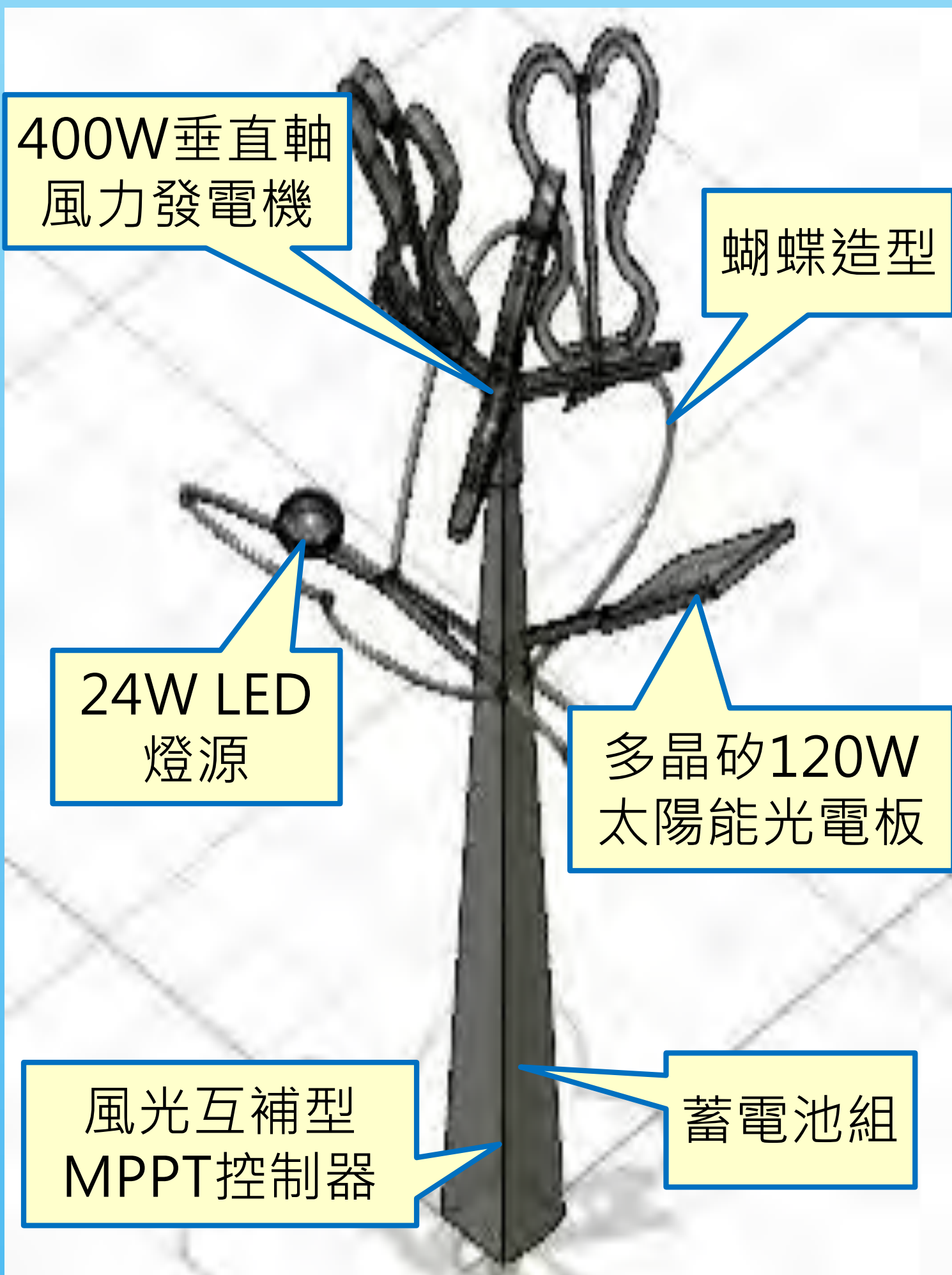


組裝過程



風光互補路燈模型

二、風光互補路燈系統說明



三、效益預估

風力發電年發電量 = $0.025(\text{kW}) \times 365(\text{天}) \times 24(\text{小時}) \times 90\%(\text{可用率}) = 197.1 \text{ kWh}$
(對照風力發電機發電曲線計算)

太陽能板年發電量 = $0.12(\text{kW}) \times 80\%(\text{發電轉換率}) \times 2212.2(\text{小時}) = 212.4 \text{ kWh}$

每年節省電費 = $(197.1 + 212.4)(\text{kWh}) \times 2.6253(\text{元/度}) = 1075 \text{ 元}$

每年減少排碳量 = $(197.1 + 212.4)(\text{kWh}) \times 0.554(\text{公斤CO}_2\text{e}) = 226.9 \text{ kg}$

本校風光互補路燈系統預期效益

項目	太陽能		風力		總發電量(kWh)	合計年節省(元)	合計年減少碳排量kg
	年發電量(kWh)	節省電費(元)	年發電量(kWh)	節省電費(元)			
1座風光互補	212.4	557.6	197.1	517.4	409.5	1,075	226.9
3座風光互補	637.2	1,672.8	591.3	1,552.2	1,228.5	3,225	680.6

備註：1.台電公司108年上半年公告電價費率為每度平均2.6253 (元/度)
 2.經濟部能源局最新公布之106年度電力排放係數，我國平均每發一度電之二氧化碳排放量為0.554公斤CO₂e

陸、研究結論

- 一、「固定式葉片」設計之模型最適合進行生成電壓測試。
- 二、考慮葉片材質因素時，最佳設計為「厚紙板材質」。
- 三、考慮葉片形狀因素時，最佳設計為「芭蕉扇形」。
- 四、考慮葉片數量因素時，最佳設計為「數量3扇」。
- 五、考慮葉片面積因素時，最佳設計為使用「中型葉片」。
- 六、考慮葉片與軸心距離因素，最佳設計為「距離4公分」。
- 七、考慮葉片夾角因素時，最佳設計為「夾角0度」。
- 八、考慮葉片攻角因素時，最佳設計為「攻角75度」。
- 九、在校園施作風光互補路燈系統是可行的，應多加推廣。

柒、研究建議

現今全球風力發展目前仍以大型風力機為主，但小型垂直式風力機因安裝簡便、成本低廉、可設置於低風速的環境中，因此深具發展潛力。臺灣擁有良好風場，也有機械、電子等製造基礎，在技術足以支援的情況下，應大力推動小型垂直軸風力發電機廣泛的運用，使之進駐機構大樓、學校、社區與家庭的屋頂，除了落實環境教育、綠能發電之外，更是順應未來趨勢之最佳選擇。

捌、參考資料

- 1.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國小組。生活與應用科學科。中華民國第五十四屆中小學科學展覽會取自 <http://www.ntsec.gov.tw/activity/race1/45/high/0316/031611.pdf>
- 2.牛山泉、關和市(民100)。垂直軸風車。台北市：台大出版中心。
- 3.關於小型垂直軸風力發電機，取自：http://www.hi-vawt.com.tw/tw/tw_about_vaswt.html