

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 生活與應用科學科(一)

第三名

032805

新型態風能共振發電機組開發與設計

學校名稱： 新北市立土城國民中學

作者：	指導老師：
國二 余承昀	謝昇達
國二 黃翊恩	郭玉辰
國一 黃振軒	

關鍵詞： 風能共振、電磁感應、發電機設計

新型態風能共振發電機組設計與開發

摘要

我們在生活中有許多共振現象，如：盪鞦韆越盪越高、樓梯旁的欄杆因為風而晃動得越來越快，發出震動的聲響，基於能源轉換，進而開發一款風能共振發電機組。研究分三大部分，首先研究發電機與馬達的科學原理與構造，其二以工程設計軟體 RHINO 進行 3D 建模，並導入流體力學的渦漩觀察，能在風場中提升發電效率；其三探究機械結構與風能共振的影響因子，阻風筒、支柱高度、擺盪時的支點比例，達系統效能最佳化。綜上所述，本研究為設計一款提升單位面積發電產能之風力發電機組，透過專題式方法將國中及高中的科學知識進行垂直整合，從而實現創新的綠能科技產品，兼具工程設計及設計藝術學養，具有培育發展綠色能源基礎人才。

壹、 前言

一、現況調查

(一) 風力發電的發展

近幾年來再生能源已被全世界各國廣泛使用與推廣，大致可分為幾類：太陽能、風能、水利能、海洋能、生質能、地熱能，根據經濟部能源署 114 年 1 月統計，再生能源中風力發電占 55.6%（圖 1），老師帶我們了解這些知識後，對於風力發電特別有興趣，像是早些時候廣泛應用於農業灌溉的風車，機械轉動轉換為電能使用，稱之為風力發電機。相比其它發電方式，如火力發電、核能發電，是一種較為有益於環境的發電方式，風的能量豐富、隨處可見，它是依靠風力來發電，由於風是一種免費的產品，生產者無需承擔燃料成本，且運行和維護比其他發電技術低。



圖 1. 再生能源占比（經濟部能源署）。

(二) 風能、生態、漁業相互之間的影響

為了達成非核家園和能源轉型的目標，我國政府在海上興建風力發電機組，這項提案卻爭議不斷，例如位在彰化的環團擔心生態被破壞，白海豚恐怕滅亡；還有漁民質疑，業者刨整海床鋪設海底纜線，造成魚群大量死亡，衝擊他們的生計，像是雲林外海，要設置 80 座風力發電機，當漁場變成風電場，漁民該如何生活？能源公司正和漁民展開協調，但因為雙方難有共識，頻頻發生海上衝突！（華視新聞雜誌，2020）

(三) 風力發電與地理位置的影響

台灣海峽因位置介於國內中央山脈與中國福建武夷山之間，為兩個山脈中間的一個氣流通道，受「狹管效應」影響（圖 2），容易產生風勢強勁的東北季風，而彰化地區外海處在東北季風經過的狹道尾端，更容易匯入集流最大風能。



圖 2. 狹管效應（華視新聞雜誌，2020）。

因此台灣電力公司於 105 年在彰化芳苑外海（王功地區）設置多部風力發電機組（下圖 3），推動離（下圖 4）、沿岸風力發電，並計畫於彰化、雲林、嘉義等西部沿海區域陸續推廣設置風力發電計畫，但是彰化、雲林、嘉義等西部沿海地區是台灣主要水產養殖生產區之一，養殖面積達 4891 公頃，風力發電所產生的「噪音」、「震動」、「電磁波」等，有可能會影響養殖生物之生長，因此需評估在風力發電機長期運作情形下，其對養殖生物所造成的影響。



圖 3. 彰化王功地區風力發電機組。
(華視新聞雜誌，2020)



圖 4. 離岸風力發電。（華視新聞雜誌，2020）

二、風力發電機使用環境與類型

(一) 風力發電機的使用環境

風力發電機主要是藉由風力所產生的空氣流動轉動扇葉以取得風的動能並轉換成可用的電力能量或機械能量。葉片風扇轉子受風吹動而旋轉，是來自於升力及阻力等氣動力的作用使葉片產生轉動扭力。由於風是一種免費的產品，生產者無需承擔燃料成本，風力發電的運行和維護比其他發電技術低（康志堅，2018）。依據目前的風力發電機技術，大約是每秒 3 公尺的微風程度便可以開始發電，並產生風速在每秒 13 至 15 公尺的疾風程度的輸出力道時，發電效益最佳。

(二) 風力發電機的類型

風力發電可分為中小型風力發電與大型風力發電，750kW 以下為中小型風力發電，750kW 以上則為大型風力發電。中小型風力發電約佔 0.5% 全球市場，大型風力發電則約佔全球 99.5%。一部典型的風力發電機大致上的構造，包含葉片、輪、齒輪箱、發電機、塔架、基座、控制系統、電纜線等，大致上分為水平軸式與垂直軸式（圖 5）。

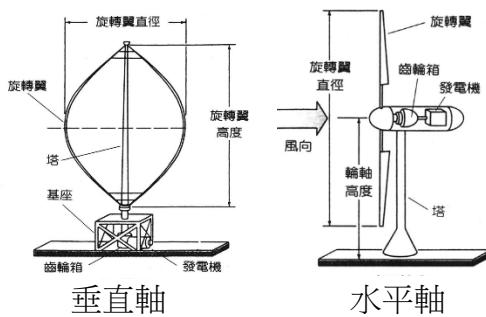


圖 5. 風力發電機的構造。（康志堅，2018）

三、研究動機

我們居住的台灣，常常在新聞上看到缺電的問題，甚至停電，影響我們的生活，就連我們的學校籃球場也裝設了太陽能板來發電。根據淨零排放的十二項關鍵策略，風力與太陽能發電是台灣再生能源的核心支柱。推動這些再生能源的應用，不僅有效降低溫室氣體排放，提升台灣於國際能源轉型中之形象與能見度，所以我們經歷數月探討現況之後，對風力發電特別有興趣，經由我們小組一起和老師討論之後，想要更深入的了解，於是開啟了我們的研究之路，並發現下面四個問題想去解決：

(一) 架設風力發電機占地大小問題

占地廣是風力發電機頗受爭議的部分，因此開發一座綠能電廠，往往需要龐大的土地，對於我國台灣土地面積有限的國家來說，不管是前面提及水平軸或是垂直軸式的發電機都較不友善，例如台灣離岸發電影響漁民的捕撈作業、沿岸地區影響人類的居住。

(二) 風力發電機對生態環境的危害

我們發現不管沿岸或是離岸都會對生態環境造成衝擊，大部分的風力發電廠都建立在岸邊，或是在離岸數公里的淺水區海床（約 5~30 公尺深）。但是這些海域也同時是魚類攝食及產卵的主要場所，提供許多海洋生物的卵及幼體生存的棲地，因此具有高度的生態重要性（科學月刊）。另外，鳥類是最直接受風力發電影響的生物類群之一，許多國外研究均指出，陸域風力發電機的設置會對當地鳥類生態造成危害，譬如利用棲息地、繁殖地與覓食地之間產生干擾，而隨著風力發電逐漸由陸地邁向海洋，相較陸域風機，離岸風機對於多數鳥類衝擊應較小，但對於海鳥及遷徙路徑經過該地的候鳥，卻可能產生影響（科學月刊）。

(三) 風力發電機的噪音、震動對人類居住生活及養殖的影響

風力發電所產生的「噪音」、「震動」、「電磁波」等，有可能會影響養殖生物之生長，就像上面提及彰化王功地區垂直軸式的發電機組造成的震動影響養殖類，而噪音、電磁波對人們生活也具有非常大的影響。

(四) 能安裝於都會市區，且美化市容

風力發電作為重要的再生能源之一，不僅能提供穩定的能源供應，如果其設計與安裝也可以與城市景觀結合，成為公共藝術的一部分，對於都會區的美化與形象能創造城市特色、提升公民環保意識，並能使文化創意與科技的結合。

四、研究目的

根據目前市面上的風力發電機缺點，進行了資料蒐集與探討，作為本綠能專題設計開發的主要目的，有以下三點：

- (一) 電磁感應的探究。
- (二) 解決我國風力發電遇到的問題，並具有創意。

1. 能利於使用於都會區。
2. 能降低環境噪音的產生。
3. 實現模組化，使得減少生產與維修成本。
4. 能減少風力發電機對生態環境的破壞。
5. 能減少占地面積，提升單位面積發電量。
6. 能夠美化市容，融入公共藝術。

- (三) 創新開發一個創能的發電機，並產品化。

五、研究限制

因時間、成本與技術的關係，以下三點為本專題的研究限制：

- (一) 使用 7mm 的碳纖棒，一根 100cm 長為 350 元。
- (二) 研究後期，購買網路上繞好的八極線圈做為定子，為一 80x5mm 的圓片，畢竟機器纏繞的線圈，較為整齊精密，但也因此我們只能設計外觀為 8cm 的圓柱體。

貳、 研究設備/工具與材料

一、設備/工具（下表 1 本研究拍攝）

表 1.

			
電烙鐵- 製作參考資料的震動發電燈籠，鋸接電路板時使用。	熱熔槍- 實驗探究時，固定結構膠合用。	CNC- 利用 3D 軟體繪製轉子，送至 CNC 工廠加工。	光固化 3D 列印- 製作本產品設計的內部與外觀的機構結構。



雷射切割機-
製作震動燈籠及本產品原型。



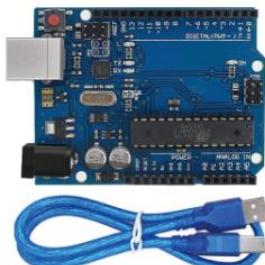
磁顯片-
檢測鐵片磁化情況分布及磁極變化。



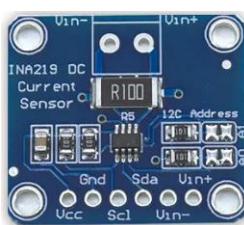
驗磁筆-
量測磁鐵 N 極與 S 磁極。



紅外線轉速計-
測量轉子與定子實驗旋轉轉速與電壓變化狀況。



Arduino 控制版-
連接 INA219 感測器與發電機，運算處理功率數值。



INA219 感測器-
測量電流和電壓。



三用電錶-
量測電壓電流。



示波器-
觀測電壓動態波形的電子測量儀器。



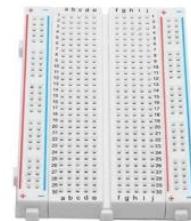
凡士林-
線圈定子脫模用。



環氧樹脂-
線圈定子部件製作。



鼓風機-
風速測試。



麵包板-
測量功率接線用。

二、使用材料（下表 2 本研究拍攝）

表 2.



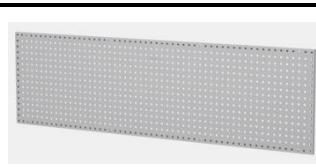
強力磁鐵-
(15 直徑*4 厚度) -
本研究產品的轉子。



漆包線-
製作本研究產品發電機
纏繞的定子。



**白光/藍光 LED
(3.0-3.2V) -**



PVC 洞洞板-
電路設計佈線用。



培林-
使用於軸承，發電機組轉動時，能減少摩擦時的能量損耗。



墊片-
螺絲防鬆、減震、避免傷害發電機組功能。



充電電池-3.6V/40mAh-
震動燈籠儲電裝置。



碳纖棒 (Carbon) -
此次發電機產品支柱。

型號 MB10F 橋式整流器 4.95*4.1*1.6(mm) 震動燈籠電路交流轉直流。	熱縮套管- 遇熱會收縮，焊接電線絕緣用。	2P 紅黑電線

參、 研究方法與過程

本章共分為三節，包含：第一節為研究架構；第二節為研究工具；第三節為研究過程。

一、研究方法及架構

首先在確立製作風機主題後，探討風機的現況問題，依次確認本研究解決問題的目標、蒐集市面上相關產品資料，接著探討本專題設計製作的相關科學原理，如電磁感應與發電機構造，並進行文獻回顧，設計出發電機的原型後，進行原型的測試與分析，如阻風筒造型與長度、碳纖棒支柱高度、發電機位置及阻風套管，目的在於能夠達到最佳化的成果，最後根據研究發現，提出結論與建議。本研究實施流程（圖 6）：



圖 6. 研究實施流程圖。（本研究繪製）

本專題設計製作的過程中，主要分為以下五階段實驗：

第一階段：發電機轉子結構設計。

第二階段：測試有無阻風套管。

第三階段：測試阻風筒高度與功率關係。

第四階段：測試阻風尖筒、圓筒與功率關係。

第五階段：測試不同葉片數量與功率關係。

二、研究工具

(一) 工程設計 3D 軟體 RHINO：

通常使用於產品設計、建築設計與室內設計，我們用來設計整體結構與機構，除了計算尺寸、模擬、預測、分析外，最後進行 3D 列印。

(二) 設計繪圖 2D 軟體 Illustrator：

用來繪製平面線稿圖，除了能進行尺寸計算，並且用來雷射切割做模型測試。

(三) 流體力學模擬：

用來觀察流體流動現象與分析，使用 Autodesk Flow Design 教育版，可設定不同風速、方向及觀察時間的變化。

三、研究過程

(一) 研究背景

研究最初，我們發現生活中有許多共振現象，例如：盪鞦韆越盪越高、樓梯旁的欄杆因為風而晃動得越來越快，發出震動的聲響，於是開始對共振現象的科學原理進行探討，來作為能源轉換研究的發想起點。經過文獻資料的收集，找到中華民國第 48 屆中小學科展-生活與應用科學科，編號 080814 所做的震動電磁發電研究，我們做出（圖 7）的能量轉換探究實作，將動能轉換為電能，只要手提著燈籠頂部鉤環，在走路晃動時便能使 LED 燈發光，製作方式是利用頂部鉤環與線圈內的磁鐵，以橡皮筋的連接，當磁鐵振動頻率越頻繁時，線圈能產生電動勢並感應電流，使 LED 燈發光。我們團隊花費近一年的時間進行產品設計開發與探究，此風能共振發電機是將風能轉換為電能的再生能源系統，其中花了一個多月的時間，才明白產生的是交流電的特性，之後在電路中（圖 8）安裝了整流器與充電電池，使得最後輸出直流電，並且能夠隨時儲存電能。

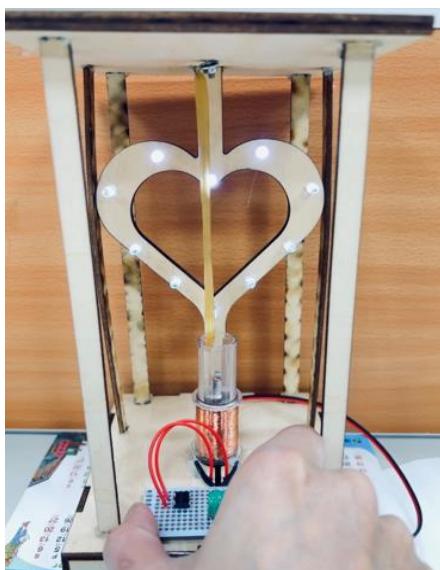


圖 7. 震動電磁燈籠實驗。（本研究成果）

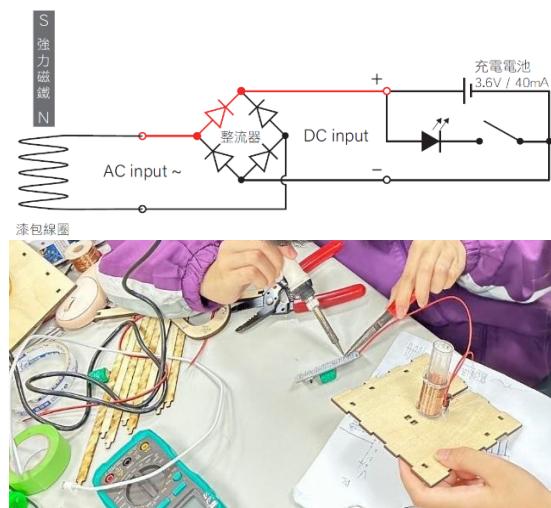


圖 8. 震動電磁燈籠電路圖與電路鉗接。

電壓的數據，比原先的參考資料更好，原因是纏繞的線圈匝數更整齊，且磁場更靠近線圈進行震動，在發電機內，磁鐵與線圈的距離，稱之為氣隙，一般距離 0.5mm 左右。

(本研究成果)

在資料的蒐集、概念的發想過程中，找到郭耀嶸、洪熙陽（2023）使用一根稱為桅杆的圓木棒支柱，支柱底部連接磁鐵，當木棒擺動時，磁鐵會靠近附近的線圈，產生電壓（如圖 9、10），探討他們的研究報告後，電壓的實驗數據不超過 0.05V，連 LED 都無法發光，我們決定在此作突破口，探討如何使它產品化的可能。

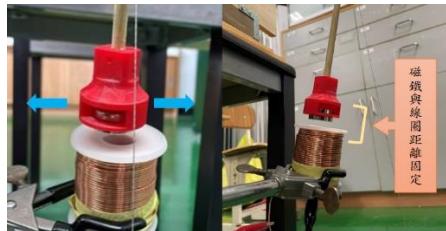


圖 9. 取自郭耀嶸、洪熙陽（2023）。

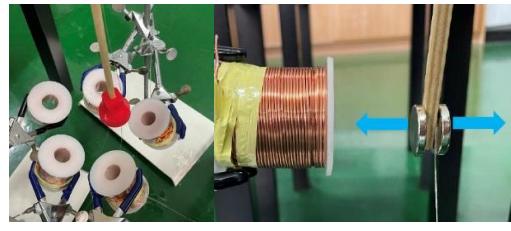


圖 10. 取自郭耀嶸、洪熙陽（2023）。

他們的研究對我們的啟發有二，一從風能轉換機械能再轉換成電能，二為風吹過物體時的流體變化，但他們電壓上不來的主因，是因為電磁感應的科學原理及科技技術需要再改良，主要缺點有三：一、磁場無法完全切割到線圈，二、磁鐵產生的磁場距離線圈過遠，在發電機機構中稱之為氣隙，也就是磁鐵與線圈的距離，通常距離在 0.3-0.5mm，三、木棒支柱的材質延展性不佳及重量過重，影響擺動的頻率速度；後經查證它們是研究西班牙的一個新創公司 Vortex Bladeless 的柱體無葉片風機（圖 11），雖然我們無法查到發電機內部構造的設計方法，但這些資料能夠引領我們前行。



圖 11. Vortex bladeless，取自 Vortex bladeless 公司

(二) 發電機研究與探討

我們經過資料蒐集，驗證電磁感應及發電機原理探究實作，找出具體可行的方案（圖 12、圖 13），利用 0.38mm 的漆包線，纏繞在 4cm 西卡紙的圓柱上，分別有 200/400/800/1500 圈

的線圈匝數。



圖 12. 200/400/800/1500 圈的線圈匝數，
內置兩片強力磁鐵。（本研究成果）



圖 13. 轉速計與三用電錶量測。
（本研究成果）。

再使用手持電鑽轉動固定在筷子上的磁鐵，並用轉速計測量記錄，發現 1500 圈的線圈在 300rpm 轉速時，三用電表量測的電壓高達 2.4V 的交流電，也證實了楞次定律，輸出交流電（圖 14）。

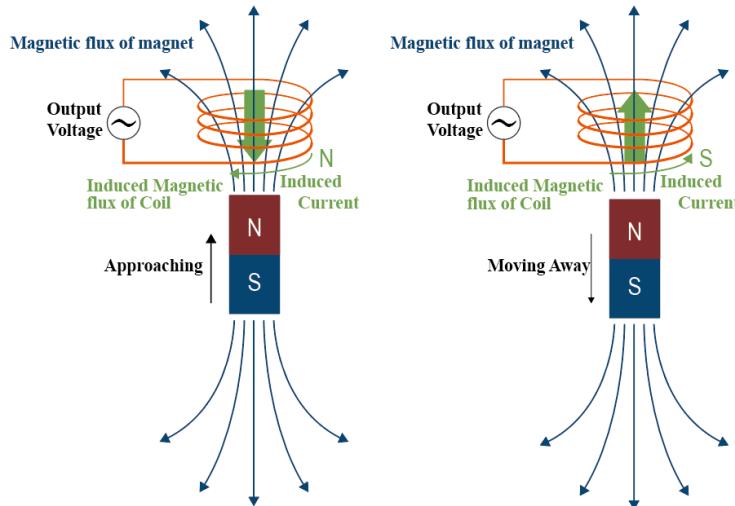


圖 14. 交流電的輸出（本研究繪製）

接著鋸接整流器成直流電輸出，是 3.5V，查詢資料交流電轉直流電要乘上 $\sqrt{2}$ ，數據上也對應的上。發電機目前分為徑向（垂直）和軸向兩種製作方式（圖 15、圖 16）Birdbrain(2022)徑向磁通（垂直）設計技術生產成熟、軸向磁通（水平）這種設計，使其具有高功率和較薄的結構，常用於風力發電機、電動車和輕量化應用，效率較高。

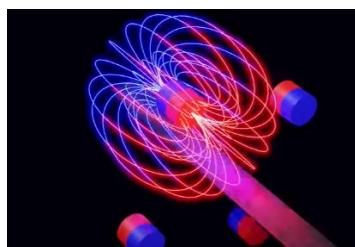


圖 15. 軸向磁通（水平）設計，效率較高。
（Birdbrain, 2022）

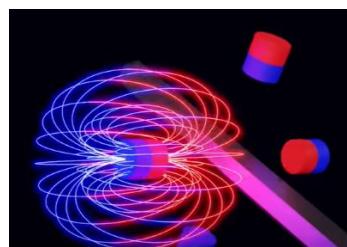


圖 16. 徑向磁通（垂直）設計，技術生產成熟。
（Birdbrain, 2022）

而因為只需上下兩層磁鐵轉動，使磁場變化，就能讓中間線圈層感應電壓輸出，莊國志、陽毅平（2002）將上下兩層鐵片裝上磁鐵，使鐵片磁化，就是使用這種軸向設計方式（圖 17），探討磁化的分布，紅色是磁通量最大的地方，也就是安裝磁鐵的位置。

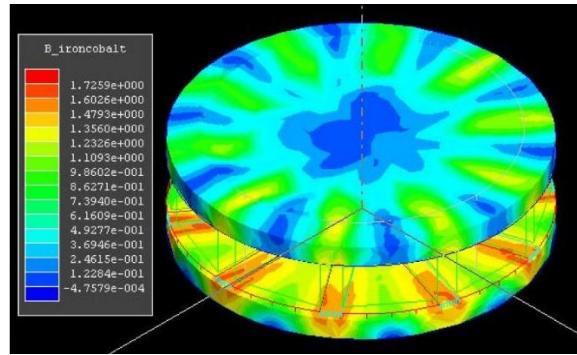


圖 17. 鐵片磁化分布。（莊國志、陽毅平，2002）。

值得一提的是，我們期間也測試了陶瓷壓電片材料（圖 18），於網路蝦皮賣場購買的壓電材料（60*30*0.2mm），經由快速按壓陶瓷部位時，經三用電錶測量，會產生約 2-3V 電壓 0.01A 的電流，兩片共 1400 元，單價過高、電流量過少，且需輔以更多機構進行晃動按壓，會使機構設計產生更多的變因，因此本設計暫不考慮使用，但這個材料的科學實驗，未來還是有龐大的發展潛力，可運用於一般的按壓設計產品。

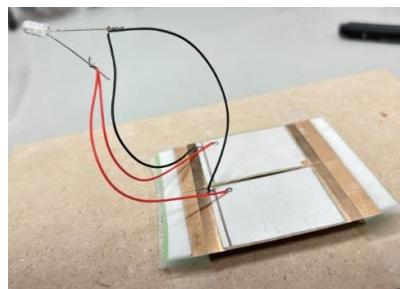


圖 18. 陶瓷壓電材料-在被快速的壓縮時，會讓裡面的電荷重新分布，從而產生電壓。（本研究成果）

（三）發電機機構與結構設計

我們根據上述資料統整，繪製了一些設計草圖（圖 19），並使用 3D 工程設計軟體 RHINO 先繪製出圓柱體直徑 80mm、高度 710mm 的概念圖（圖 20）。如何在使支柱搖擺時，讓轉子（磁場）自行轉動切割線圈（定子），這個問題讓我們花了很多的時間，想了很多的辦法都不盡理想，到這邊基本上就快停止了此次的研究。

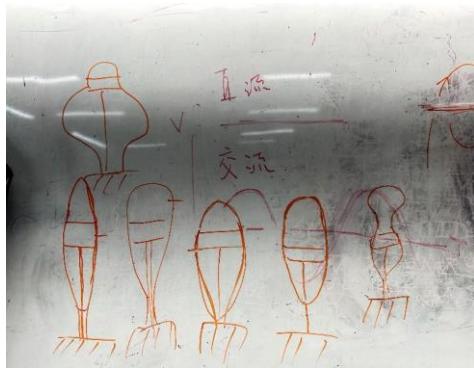


圖 19. 草圖繪製探討。
(本研究繪製)



圖 20. 概念 3D 圖 RHINO 軟體繪製。
(本研究繪製)

研究期間，我們在網路上購買了四、五款組裝好的各種軸向、徑向的玩具馬達及發電機，進行拆解研究，其中一組是單相交流發電機，能夠在低轉速就發電。

1. 發電機轉子設計與製作

如果將原本的定子換成轉子，並且加上配重塊設計（圖 21），也就是上下兩層磁鐵構成的磁場。當發電機的水平角度變化，配重塊會跟著傾斜而旋轉，產生離心力，進而使定子的線圈感應出電流，這個機構的突發奇想，令我們受到很大的鼓舞，能夠繼續地推進這個研究。

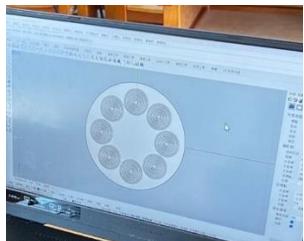


圖 21. 設計探究轉子與定子機構。
(本研究成果)

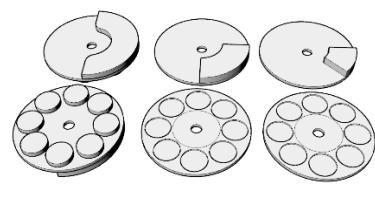
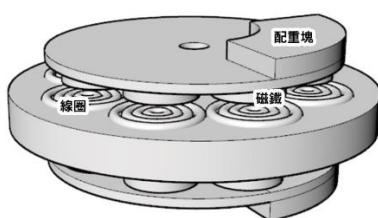


圖 22. 配重塊設計-1/2 圓 (左) 、
1/4 圓 (中) 、1/6 圓 (右)。
(本研究成果)

將轉子配重塊的設計（圖 22），分別設計了四種款式， $1/2$ 圓、 $1/4$ 圓、 $1/6$ 圓、 $1/8$ 圓作發電測試，尺寸為直徑 80mm ，厚度 2mm ，配重塊高度 4mm ，送 CNC 工廠做出，再利用砂紙和噴漆罐，進行鐵片砂磨及防鏽噴漆保護（圖 23），流程是先上一層底漆，再上透明保護漆，徹底隔絕鐵片與空氣的接觸，之後購買 M3 螺絲組、培林軸承等進行組裝測試（圖 24、25、26）。



圖 23. 轉子防鏽保護製作。
(本研究成果)



圖 24. 組裝。
(本研究成果)



圖 25. 組裝。
(本研究成果)

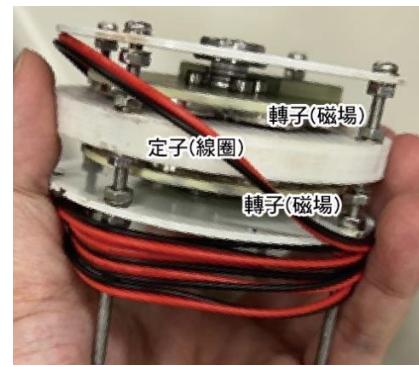


圖 26. 搖晃電壓測試。
(本研究成果)

2. 發電機定子設計與製作

先 3D 列印定子模具，將 0.38mm 線圈纏繞於上（圖 27），做出八個長度 18mm 厚度 8mm 的圓形線圈，並將它們串連鉗接起來，置放於定子模具內（下圖 28），塗上凡士林方便之後脫模，再倒入環氧樹脂（圖 29），完成後（圖 30）量測八個串連的線圈電阻為 24Ω 。

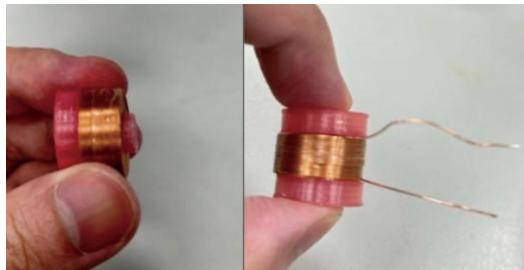


圖 27. 線圈模具。（本研究成果）



圖 28. 定子模具。（本研究成果）



圖 29. 定子製作。（本研究成果）



圖 30. 定子。（本研究成果）

接下來將四種不同型態的配重塊，接在具延展性的 100cm 碳纖棒支柱上進行搖晃電壓測試（下圖 31），結果發現 1/2 圓配重塊的發電機電壓值最高，因為碳纖棒回彈時，其它型態的轉子來不及旋轉到另一邊，變成不太會動。

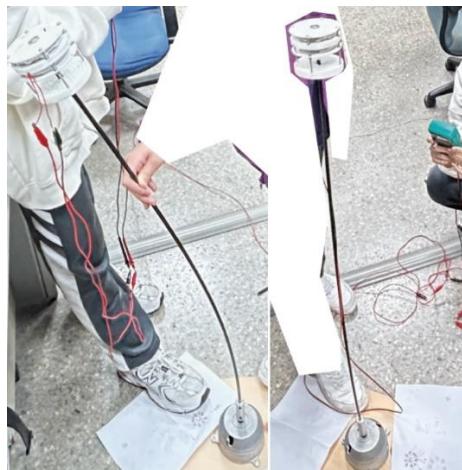


圖 31. 搖晃電壓測試。（本研究成果）



圖 32. 將發電機鎖上 3D 列印的機殼，安裝至碳纖棒上。（本研究成果）

(四) 發電機最佳化測試過程

1. 第一階段：發電機原型測試

實驗後，發電機的構造決定使用 1/2 圓的轉子（磁鐵），將它安裝在 3D 列印的機箱上，並接上 7mm 的碳纖棒支柱（圖 32），而支柱底部連接廢棄的抽油煙機馬達當底座，它本身轉軸能自轉，裝上我們設計的軸承（圖 33），鎖上螺絲固定碳纖棒，就能使碳纖棒也能自轉，最後包上西卡紙成圓筒狀（圖 34），並製作不同高度的圓筒（圖 35、圖 36），使用鼓風機、風速計及電錶測量電壓，而風速在 10m/s 時，電壓輸出為 2ACV~3.3ACV，這基本上就是我們風力發電機的原型了。



圖 33. 支柱底部連接
軸承固定
(本研究成果)



圖 34. 圓筒製作
(本研究成果)



圖 35. 發電機原型柱
狀高度測試。
(本研究成果)



圖 36. 發電機原型柱
子高度測試。
(本研究成果)

接下來針對製作的原型使用示波器觀測電壓波形（圖 37）及功率計算，頻率為 12-26Hz，發電機短路電流為 20-30mA，將最高 3.3ACV 乘上 30mA，因此，我們發電機原型的交流發電功率為 99mW。



圖 37. 示波器電壓波形觀測。（本研究成果）

2. 第二階段：測試有無阻風套管

研究期間大部分是花在電磁感應現象原理、發電機構造研究、3D 建模（轉子、定子、軸承、阻風筒造型）、直流電與交流電的不同，接下來就是測試最佳柱狀高度發電量，而圓柱體本身就是個阻風器，它與風的作用力關係，使得整體能夠擺動，因此，後續又再柱上加裝阻風套管測試，用以增加阻風效果，測試時，阻風套管以水果包裝材料替代（圖 38、圖 39）。



圖 38. 增加阻風套管測試。 圖 39. 阻風套管（水果保護包裝套）。
（本研究成果）



但使用鼓風機測試時，增加的阻風套管結構，擺盪效果並沒有更好，原因是減少了圓柱體後方形成的低壓區，而低壓區的流體也因壓力差的關係，產生漩渦（渦流），漩渦會回到圓柱體，推動柱子往回推並且振動，（圖 40）是利用 Autodesk Follow Design 進行流體力學現象的觀察與分析。經過資料查證高爾夫球上 300-500 個凹洞的核心技術設計，就是為了防止在球的後方形成渦旋，讓球飛得更遠更穩，另外棒球上紅色的縫線，也因投手投出縫線的角度不同，而產生變化球，如蝴蝶球。

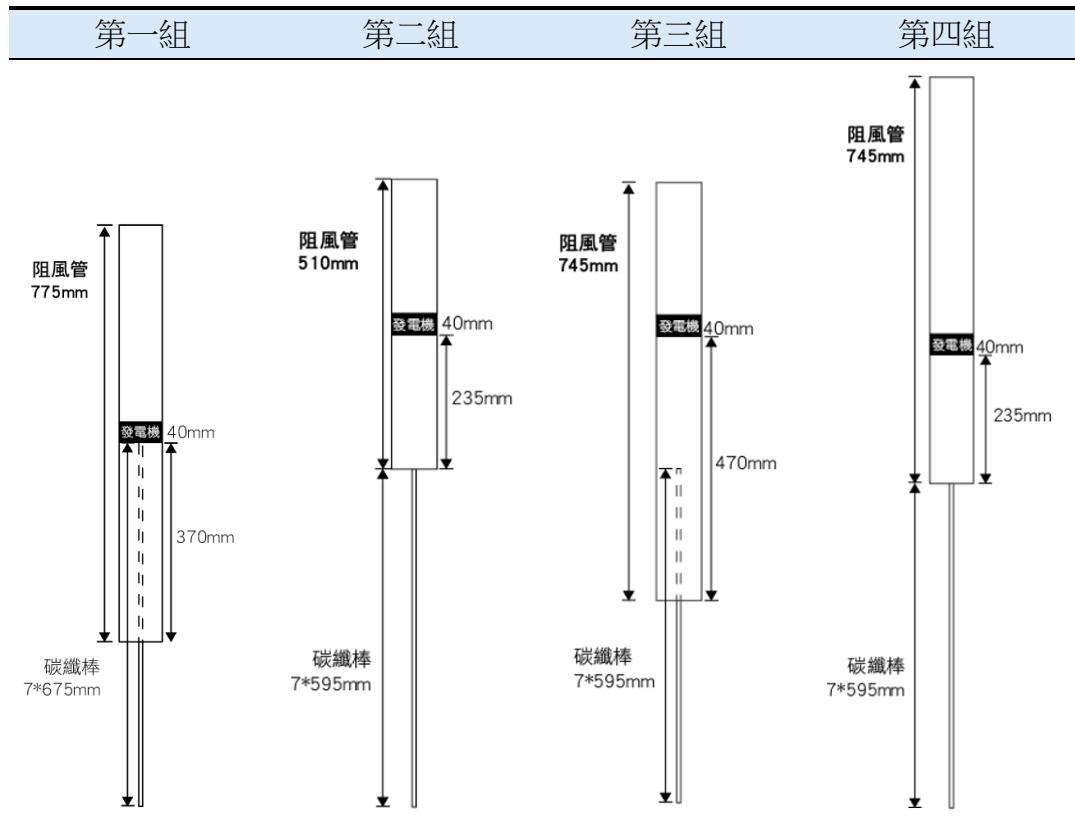


圖 40. 本研究流體力學模擬，使用 Autodesk flow design 教育版。

3. 第三階段：測試阻風筒高度與電壓變化的關係

在確定使用 1/2 圓的轉子和不使用阻風套管的結構後，我們測試了數十種不同阻風筒高度、發電機支點重心位置，下面四組是較為穩定且理想的數值（表 3）。

表 3. 測試阻風筒高度與電壓變化的關係（本研究由作者自行繪製）



4. 第四階段：測試阻風尖筒、圓筒與功率關係

我們使用西卡紙當作阻風筒，確定出發電機的理想高度後，進行 3D 建模、流體力學模擬並 3D 列印出成品。在流體力學模擬的現象觀察中，渦流接觸振動風筒的面積，圓筒略勝尖筒一點。因此使用圓筒狀（圖 41）、尖筒狀（圖 42）這兩種造型來測試發電量。



圖 41. 圓筒
(本研究成果)
圖 42. 尖筒
(本研究成果)

這個階段確定了圓筒造型（圖 43）的發電效果較好，本次 3D 列印黃綠色 2.5mm 厚度的重量較重（圖 44），因此發電量並不理想，於是決定重新 3D 建模 1.3mm 厚度的風筒（下圖 45），另外在內壁增加格狀條紋，藉以增加結構強度，最後將重量記錄下來。

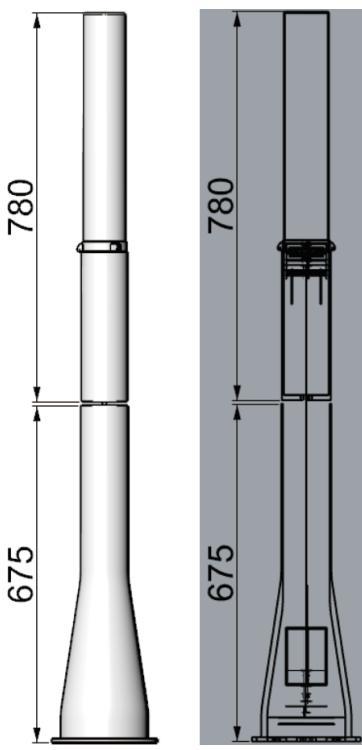


圖 43. 圓筒造型-
(本研究 3D 建模 1:1 繪製)

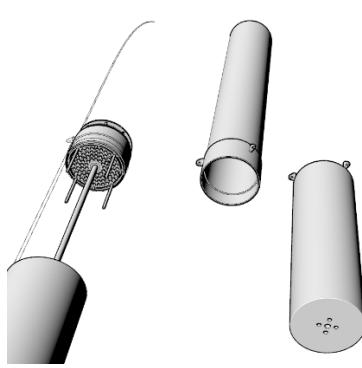


圖 44. 2.5mm 厚度風筒
(本研究 3D 建模 1:1 繪製)

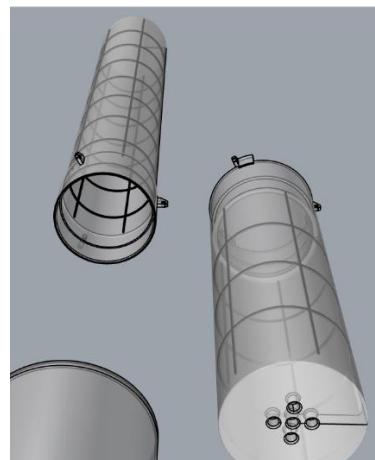


圖 45. 1.3mm 厚度
內壁帶格狀結構的風筒
(本研究 3D 建模 1:1 繪製)

經過重量測試 532g 白色阻風筒的 1.3mm 厚度，重量較原本輕了 69%，在經過鼓風機測試後，1.3mm 厚度的阻風筒發電量較高（表 4）。

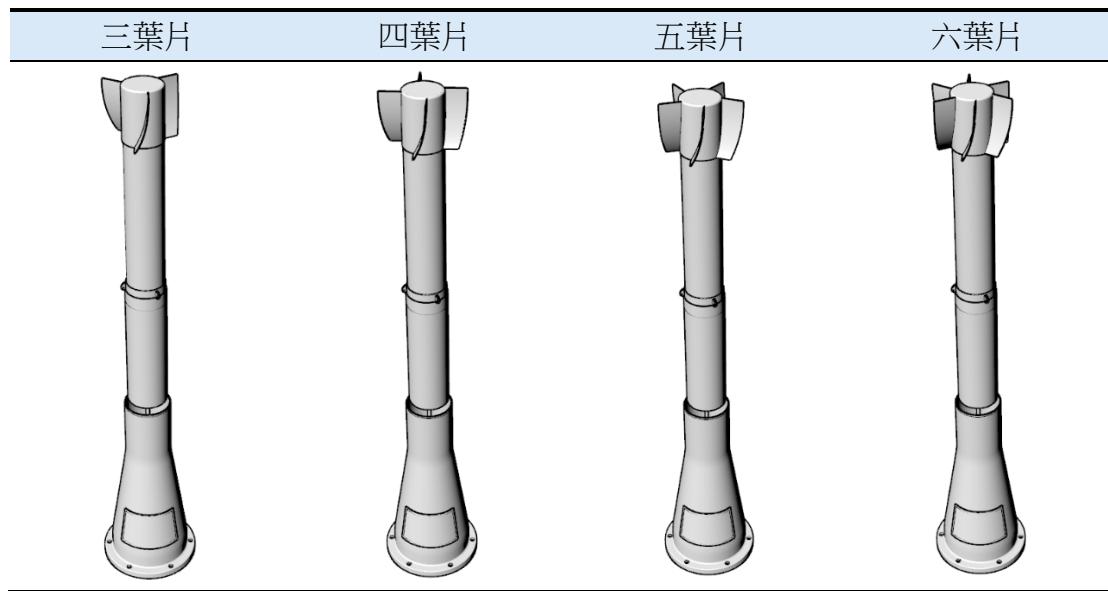
表 4. 阻風筒 1.3mm 與 2.5mm 重量比較 (本圖片由作者親自拍攝)

	2.5mm 厚度阻風筒	1.3mm 厚度阻風筒	發電機
上段 阻風筒			
重量	268g	240g	
發電機 機箱			
重量	64g	62g	
下段 阻風筒			
重量	440g	230g	
總重量	772g	532g	470g

5. 第五階段：測試不同葉片數量與功率關係

上階段確定了圓筒狀造型發電量最佳，底座與碳纖棒連接處有設計自轉功能的軸承，在轉子（磁鐵）旋轉時，使定子也跟著旋轉，能增加發電量，所以增加了不同數量的葉片測試（表 5），分析是否能夠增加發電量，最後結果顯示五葉片的交流電電壓值最高，再來為六葉片、四葉片、三葉片，原因是葉片重量和葉片本身阻風效果的搭配上，能夠更容易產生自轉效果。

表 5. 不同數量的葉片測試（本研究由作者自行繪製）



(五) 智慧控制監測系統研究

我們研究如何使用智慧控制系統，來監測我們發電機實時電壓、電流與功率的變化，這個系統是使用 Arduino 開發板和 INA219 感測器連接發電機，把量測到的數值傳送到電腦，再用一個叫 PLX-DAQ 的小工具，會一直讀取從 Arduino 傳來的資料（圖 46），會把資料直接寫進 Excel 對應的電壓、電流與功率表格裡，自動把資料分類、加上時間，這樣就可以馬上看到每筆資料的變化，這樣做的好處是可以即時在 Excel 上看到量測資料，還可以自動記錄下來，方便做後續的分析或畫成圖表，讓資料更清楚地呈現出來（圖 47）。

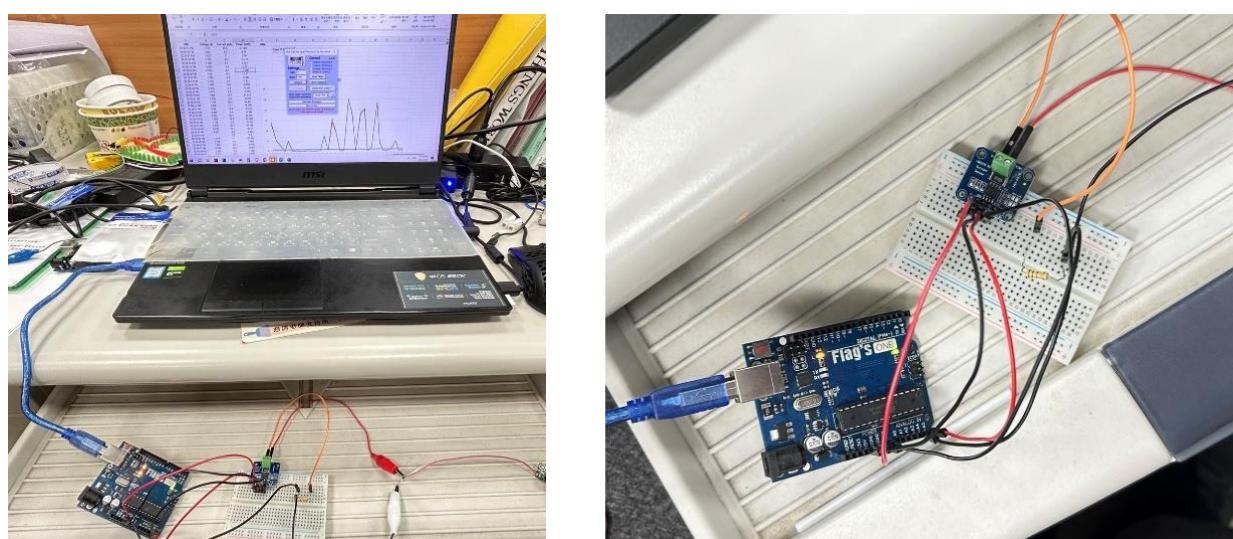


圖 46. Arduino 與 INA219 感應器。（本研究成果）

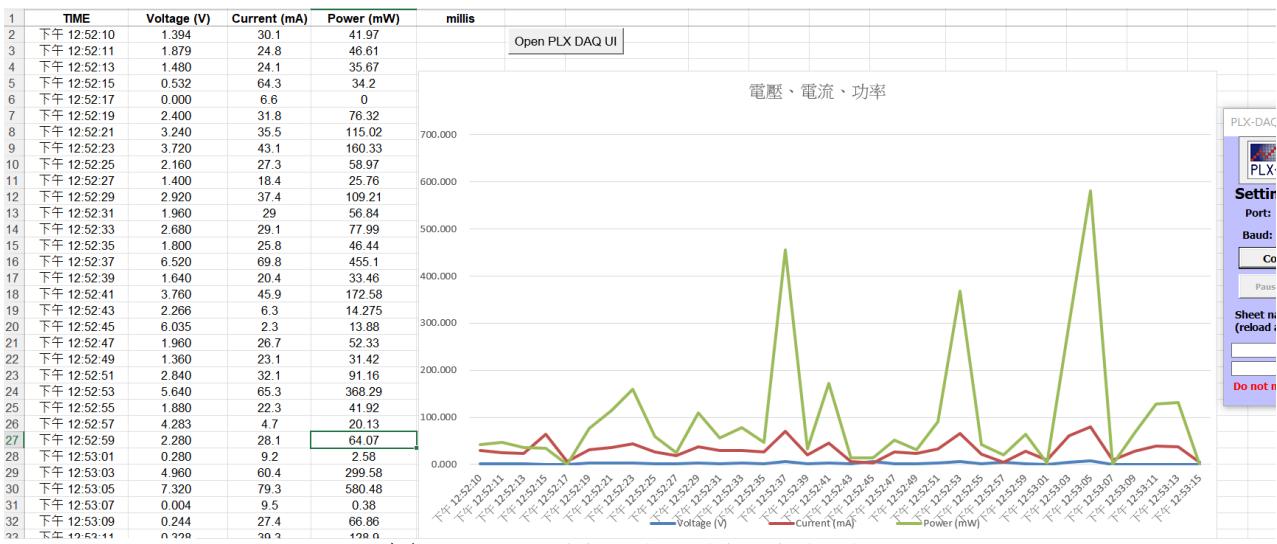


圖 47. EXCEL 資料圖表。（本研究成果）

我們研究的 Arduino 開發版的程式碼如下：

```

#include <Wire.h> // 引入 I2C 通訊函式庫 (用於和 INA219 溝通)
#include <Adafruit_INA219.h> // 引入 Adafruit 提供的 INA219 模組函式庫

Adafruit_INA219 ina219; // 宣告一個 INA219 感測器的物件 (名稱為 ina219)

void setup ()
{
  Serial.begin (9600); // 啟動序列通訊 (設定 baud rate 為 9600)，用來與 PLX-DAQ 或電腦傳資料

  if ( !ina219.begin () ) // 嘗試啟動 INA219 模組
  {
    Serial.println ("找不到 INA219 感測器，請檢查接線"); // 若感測器未回應，顯示錯誤訊息
    while ( 1 ); // 無限迴圈，讓程式停止執行 (避免繼續往下跑)
  }

  // === PLX-DAQ 表頭初始化設定 ===
  Serial.println ("CLEARDATA"); // 告訴 PLX-DAQ 清除舊資料 (從 Excel 表格清空)
  Serial.println ("LABEL,TIME,Voltage (V),Current (mA),Power (mW)"); // 設定 Excel 欄位名稱：時間、電壓、電流、功率
}

void loop ()
{
  float busVoltage = ina219.getBusVoltage_V (); // 讀取電壓 (單位：Volt，測量 Bus 上的電壓)
  float current_mA = ina219.getCurrent_mA (); // 讀取電流 (單位：mA，經由 shunt 電阻計算)
  float power_mW = busVoltage * current_mA; // 自行計算功率 (瓦特 = 電壓 × 電流)，單位為 mW

  // === 傳送資料給 PLX-DAQ / Excel ===
  Serial.print ("DATA,TIME,"); // 插入 PLX-DAQ 所需格式，TIME 會自動對應 Excel 系統時間
  Serial.print (busVoltage, 3); // 輸出電壓值，顯示到小數點後 3 位
  Serial.print (",");
  Serial.print (current_mA, 3); // 輸出電流值，顯示到小數點後 3 位
  Serial.print (",");
  Serial.println (power_mW, 3); // 輸出功率值，顯示到小數點後 3 位
  delay (2000); // 暫停 1 秒鐘 (每秒記錄一次資料)
}
  
```

肆、研究結果

一、實驗一：轉子配重塊設計測試

表 6、圖 48 為四種轉子設計的電壓值的測試，分別用手拉支柱約 40 度角度（圖 31），再放手，使其回彈搖晃，各測試十次電壓值，可以發現 1/2 圓的轉子設計，電壓較高。

表 6. 轉子配重塊設計測試

測試項目	1/8 圓轉子	1/6 圓轉子	1/4 圓轉子	1/2 圓轉子
平均電壓	8.8mV	13.1mV	31.4mV	53.7mV
平均電流	2.44mA	4.66mA	14.44mA	18.44mA
平均功率	2.15mW	6.10mW	45.34mW	99.00mW

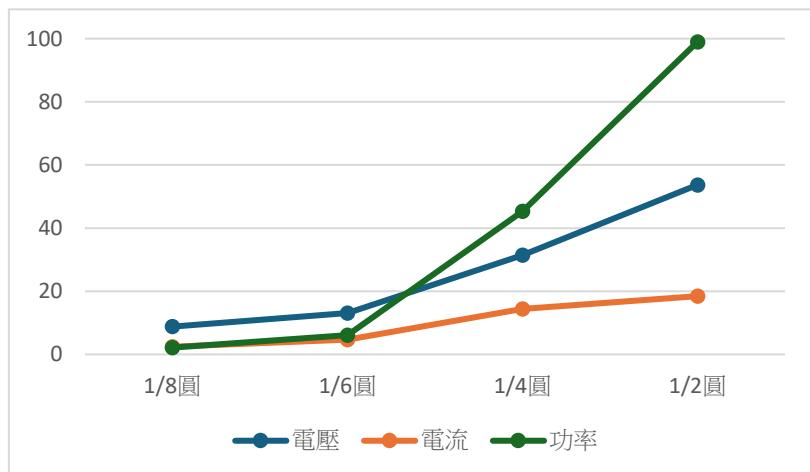


圖 48. 轉子配重塊設計測試（本研究成果）

二、實驗二：測試阻風筒高度與功率關係

表 7、圖 49 是測試數十種高度，抓出四種電壓值相近的高度做電壓測試，可以得出第一組的電壓值較高，因此就以這個高度作為 3D 建模及列印。

表 7. 阻風筒高度與功率關係

測試項目	第一組	第二組	第三組	第四組
平均電壓	53.4mV	31.1mV	36.3mV	54.2mV
平均電流	28.12mA	15.32mA	20.41mA	26.36mA
平均功率	150.16mW	47.65mW	74.90mW	142.87mW

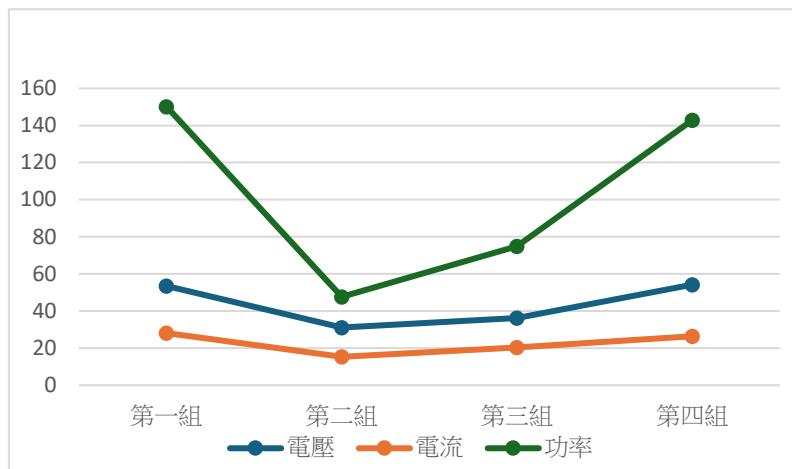


圖 49. 不同高度阻風筒測試。（本研究成果）

實驗數據顯示第一組在支柱高度 675mm、阻風筒高度 775mm 的組合下，平均發電量最高，最高可達 7.14V(AC)。

三、實驗三：測試阻風筒尖筒與圓筒功率關係

表 8、圖 50 為尖筒與圓筒兩種造型的電壓值數據，圓筒較尖筒高，最高可達 5.45V(AC)。

表 8. 阻風筒尖筒與圓筒功率關係

測試項目	尖筒	圓筒
平均電壓	47.2mV	54.5mV
平均電流	23.87mA	28.36mA
平均功率	112.66mW	154.61mW

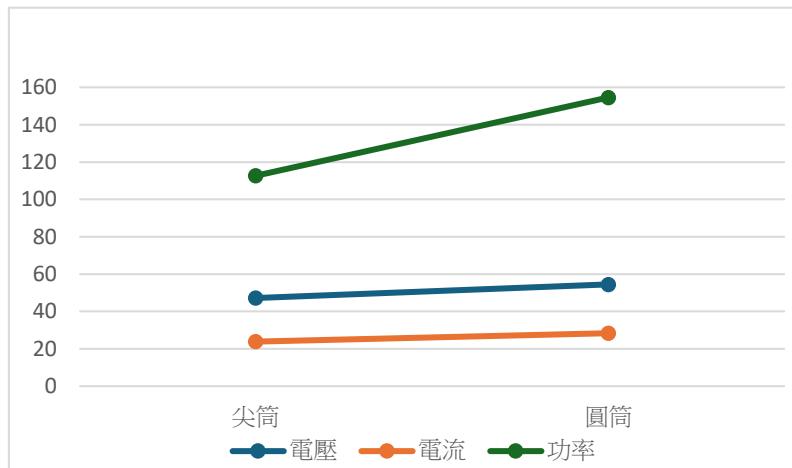


圖 50. 阻風筒尖筒與圓筒造型功率測試。（本研究成果）

四、實驗四：測試不同葉片數量與功率關係

下表 9、圖 51 是圓筒阻風筒的基礎上，增加不同葉片數量的測試，可以得出五葉片的電壓值最高，主要是在重量和阻風效果上，使整體更能夠自轉。

表 9. 不同葉片數量與功率關係

測試 次數	三葉片	四葉片	五葉片	六葉片
電壓	45.6mV	68.9 mV	108.1mV	67.7mV
電流	30.03mA	29.34mA	40.00mA	30.51mA
功率	136.93mW	178.68mW	432.40mW	206.55mW

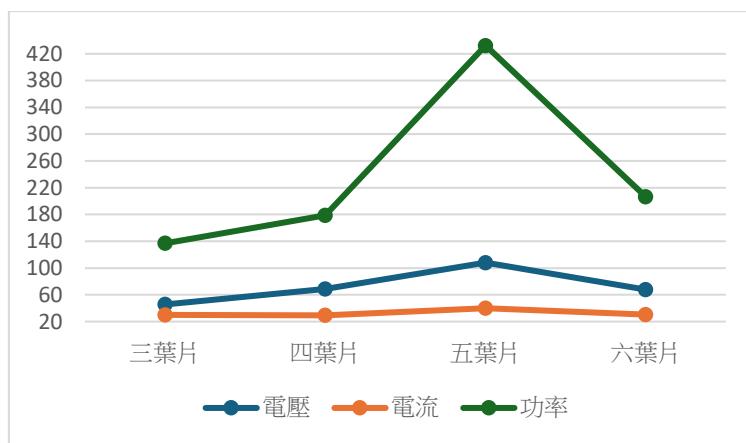


圖 51. 不同葉片數量的電壓測試。（本研究成果）

我們經過最佳化的設計後，重新計算發電機的功率，實驗四可以得知在五葉片電壓最高值為 10.81ACV，三用電錶量測定子線圈短路電流為 40mA，套用如下電功率公式，最後計算出功率為 432mW。

$$\text{電功率公式 } P = IV \rightarrow 10.81V \times 40mA = 432mW$$

伍、 討論

一、產品化的過程

在進行本專題產品設計時，查詢到模組化(Modularization)是一種設計概念，是將一個系統拆分成獨立的模組，並且可以獨立開發、測試、維護和替換。而我們在設計期間一直修正、測試與分析，浪費了很多時間，因此將各個組件拆分獨立物件時，能夠更省時、省力與節省成本。

二、關於單相交流電與三相交流電

在製作發電機時，遇到的難題就是交流電大多分為單相與三相交流電，到底要用哪種，會牽涉到我們定子線圈與轉子磁極相互配合的設計，單相會有兩條火線出來，三相則有三條火線；單相交流電適用於家庭與小功率設備，功率輸出較波動，電壓為 110V 或 220V。三相交流電適用於工業與大功率設備，功率穩定且輸送效率高，電壓為 380V 以上。最後經過資料統整，我們產品化後，輸出的電流量低，因此使用單相交流電的方式製作，優缺點以下列表 9 整理：

表 9. 單相交流電與三相交流電差異性比較

單相交流電	三相交流電
電壓波形為單一正弦波，電壓週期性變化，每週期兩次通過零點，導致功率輸出有波動。	三條火線的電壓波形互相相差 120° 相位角，提供穩定的功率輸出
成本較低，但在負載較大或需要穩定電壓的情況下，會不夠穩定，因為只有一條電流線，電流的波動較明顯。	因為三相波形平衡，功率更穩定，適合驅動大功率設備。
因功率輸出有波動，需求低的設備，但容易受電壓降影響，供電距離有限。	具備較高的功率傳輸效率，相較於單相交流電，能夠減少損耗。

三、3D 軟體的使用

我們在分配工作時，3D 軟體的學習佔了很大一部分，其中一人完全沒時間處理其他的研究，因此，有效規劃三人分工，能促進整體研究的速度。

陸、 結論與建議

一、結論

(一) 涡流共振與圓柱體

在這次專題研究中，透過 3D 建模、流體力學分析與實驗驗證，證明無葉片的共振風力發電技術的市場可行性，能有效減少占地面積。此圓柱狀結構可有效產生渦流共振，再使內藏的發電機，產生電能，避免傳統風機因葉片旋轉對生態、噪音與視覺影響的問題。

實驗過程中，在阻風筒外加上阻風套管的效果不理想，大大出乎我們意料之外，因此開展了流體力學的模擬研究，主因是加上之後，會影響流體經過圓柱體後方時，減少產生的低壓，無法在柱後產生亂流，形成反彈的推力。

(二) 本專題開發設計的六款風機產品，最佳化結果

下表 10 是此次專題風機的產品設計最佳化後，功率由高至低排列，依序為：五葉片圓柱體→六葉片圓柱體→四葉片圓柱體→圓柱體→三葉片圓柱體→尖圓柱體。而 7.27V 的交流電通過整流器轉成直流電後，可達 12V 的直流電壓，交流電功率約為 432mW，利用麵包版測試 LED 亮燈數，可達 300 顆（圖 52）。

表 10. 最佳化結果 (本圖片由作者親自拍攝)

五葉片 圓柱體	六葉片 圓柱體	四葉片 圓柱體	圓柱體	三葉片 圓柱體	尖 圓柱體
					
432.40mW	206.55mW	178.68mW	154.61mW	136.93mW	112.66mW

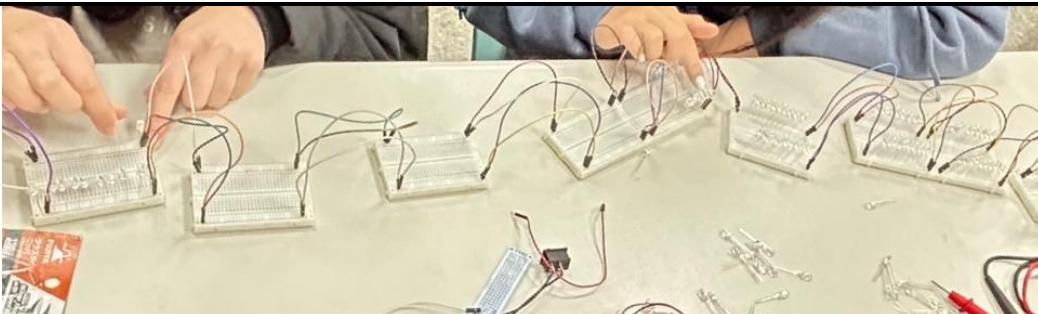


圖 52. LED 發光測試 (本研究成果)

使用鼓風機測試我們最終成品，風速約在 12m/s 的效果最好，能有效使圓柱體往返運動及旋轉，也就是公轉與自轉的搭配組合（圖 53、圖 54）。



圖 53. 最終成品 (本研究成果)

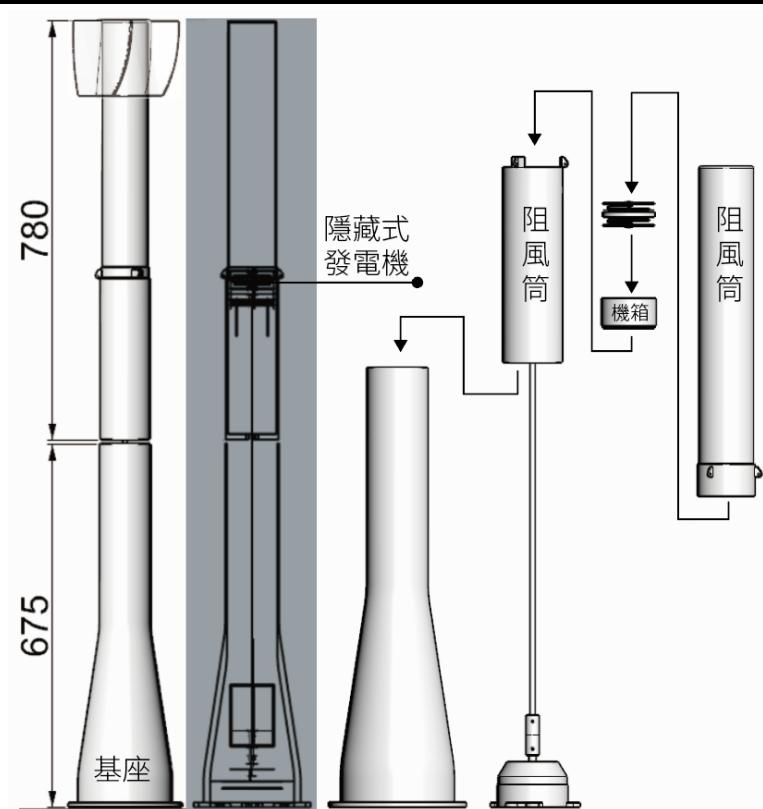


圖 54. 最終成品 (本研究成果)

(三) 發電機組規格

下表 11 為我們專題最佳化的成果，依照風速我們發電量在 1-10.81V，啟動風速為 5m/s，並隨著受風時間，擺盪速度會越來越快，最高輸出功率為 432mW，而使用示波器顯示，頻率在 12-32Hz，並不是我們目前一般常用的 50-60Hz，之後可以經過濾波整流及儲能方式，按照使用需求輸出電能。

表 11. 發電機組規格 (本研究由作者自行繪製)



項目	數據
裝置發電量	1~10.81V
最高輸出功率	432mW
頻率	12-32Hz
風機高度	1455mm
風機直徑	80mm
啟動風速	5m/s
最佳風速	12m/s
受風面積	1097cm ²
葉片數量	5 葉

二、建議

(一) 發電機與馬達構造

1. 工廠技術觀摩

我們在一開始買了一些馬達與發電機玩具進行拆解，並透過網路與書籍的研究，佔去了很大一部分的時間還不甚了解，後來找到位於士林的明昇電機實業有限公司去參訪，觀摩工程師在現場如何操作機器製作發電機，從中了解科技技術的核心，建議後續想研發的同學，必須現場探究，能夠更明白裡面的原理，避免紙上談兵。

2. 發電機功率

未來可測試不同線圈匝數、尺寸、磁鐵數量排列方式等多極排列、提高磁通穿越線圈的效率，或設計多層定子線圈，提高更高功率的輸出，使發電量的實驗結果更加理想。

(二) 實驗過程與實驗的改進

1. 穩定有效風場的設置

目前我們使用鼓風機，如果能夠設計一個大型ㄇ字型的有效風場控制，對實驗會有更佳準確的結果，並減少實驗的次數。

2. 支柱支點高度的設置，與風能共振關係

本次專題重量最重的為發電機，也就是發電機的位置，會在整個風筒設計上形成槓桿原理，由於目前只使用了 7mm 的碳纖棒，未來可以增加碳纖棒粗細度的實驗。

3. 阻風筒的造型

目前我們專題使用大型光固化 3D 列印，廠商列印的一整組為 8000 元，原本在風筒外觀的設計上，要再測試一款表面有螺旋紋的溝槽圓筒造型設計，但因經費問題就此作罷。

柒、 未來展望

一、 關於實驗及最佳化的改善

(一) 目前定子為圓形線圈，若能改成使用楔形線圈，增加線圈滿槽率能提升效能。

(二) 在阻風筒與基座間加上磁浮和彈簧設計，來提升阻風筒共振效果。

(三) 目前我們只嘗試了高度、重心支點及材質的影響因子，以後可以進一步加入碳纖棒長度、直徑大小涉及力學的回彈係數等因素，或是測試其它種形狀的阻風筒的可能性，如在圓柱體表面上增加螺旋線圈溝槽，來測試更好的效能。

(四) 探索更多新材料，如輕量化與高強度材料，增加耐用性、效率與發電穩定度。

二、 發展與應用

(一) 進一步深化此小型風機功率，能夠推廣至都市的高樓建築與社區、偏鄉或離島等偏遠地區自給自足。

(二) 設計儲能設備，提高發電效果並保持穩定性。與建築設計結合，成為智慧建築的一部份，提高建築物的能源自主性。

(三) 搭配太陽能與儲能系統，形成混合型電網，提供穩定電力。希望未來台灣能夠真正普及朝向創能、節能與儲能的公民議題涵養，讓台灣離淨零排放更進一步。

捌、 參考文獻

1. Narbel, P. A., Hansen, J. P., & Lien, J. R.(2014). Energy technologies and economics. Springer.
2. 政策內容。（2024/10/16）。國家發展委員會，2024/10/16 取自 https://www.ndc.gov.tw/Content_List.aspx?n=733396F648BE2845
3. 郭耀嶸、洪熙陽（2023）。一路順風-多向式無扇葉風力發電。第 63 屆中小學科學展覽會。
4. 郭耀嶸、洪熙陽（2022）。風驅電極-陣列式無扇葉風力發電機。第 62 屆中小學科學展覽會。
5. 華視新聞 CH52(2020, Aug/07)。EP2234 離岸風電衝突再起[Video]。取自 https://www.youtube.com/watch?v=VkJX9shRsxKo&ab_channel=%E8%8F%AF%E8%A6%96%E6%96%B0%E8%81%9ECH52
6. 科學月刊（2019）。離岸風機噪音對於魚類可能的影響。取自 <https://www.scimonth.com.tw/archives/2443>
7. 康志堅（2018）。我國風力發電產業發展現狀與未來展望。經濟部國際貿易局推動綠色貿易專案辦公室台灣綠色產業報告，p1-14。
8. 林芷韻（2017）。電磁線圈與磁鐵的愛恨情仇。第 57 屆中小學科學展覽會。
9. 陳昱安、丁倍敏、林湘嶺與王鉉淯（2010）。來不來電～發電機製作與研究。第 50 屆中小學科學展覽會。
10. 林楨暉、劉安妮、陳佳琳、林俞婷、張洪愷與溫佳蓁（2010）。「瘋」力發電～風力發電研究。第 50 屆中小學科學展覽會。
11. 周子萱（2008）。拯救地球的電磁燈籠-震動電磁發電研究。第 48 屆中小學科學展覽會。

12. 林家湄、林翌蓁、陳麒安、施芳妤、葉宇翔與羅晨光（2008）。閃電二號-水平感應發電機之研究與應用。第 48 屆中小學科學展覽會。
13. 莊國志、陽毅平（2002）。擺盪式發電機系統之設計與分析。國立台灣大學-機械工程研究所。
14. Birdbrain. (2022, Apr/19). *An Axial Flux BLDC Motor Build*. YouTube. [Video].
<https://www.youtube.com/watch?v=sUzuLbmdb64>

【評語】032805

1. 此作品以無葉片共振與渦流原理建構風能系統，跳脫傳統風力發電框架。工程實作深度高，從概念設計、CAD 建模、CNC 製作、3D 列印、焊接、感測器串接到 EXCEL 數據視覺化皆有實作。
2. 所考慮的控制變因良好，逐一測試阻風筒形狀、葉片數、配重塊形狀等變因，有邏輯地驗證設計改良。設計兼具美觀與功能，考量都會區美化、市容共融與模組化維修，具有應用的潛力。
3. 數據統計資料提供平均電壓與功率佐證設計改良成果，若能補充標準差、誤差分析或統計圖更具說服力。
4. 關於風能轉換效率分析略缺，若補充風能輸入與輸出功率比值將更完整。

作品海報

新嘉坡華語學院

啟迪未來的華語

新型態風能共振 發電機組開發與設計

摘要

生活中有許多共振現象，因此我們透過電磁感應和能源轉換原理進行探究，設計出一款占地面積小的新型態風能共振發電機組。

研究分三大部分：

- (一) 研究發電機與馬達的科學原理與構造。
- (二) 利用工程設計軟體RHINO進行3D建模，導入流體力學的渦漩共振觀察。
- (三) 探究風機機械結構與風能共振的影響因子，阻風筒、支柱高度、擺盪的支點比例，達系統效能最佳化。

研究實施流程圖



研究目的

(一) 電磁感應的探究。

(二) 解決我國風力發電遇到的問題。

1. 能夠利於使用於都會區。
2. 能降低環境噪音的產生。
3. 實現模組化，使得減少生產與維修成本。
4. 減少風力發電機對生態環境的破壞。
5. 減少占地面積，提升單位面積發電量。
6. 能夠美化市容，融入公共藝術。

(三) 創新開發一個創能的發電機，並產品化。

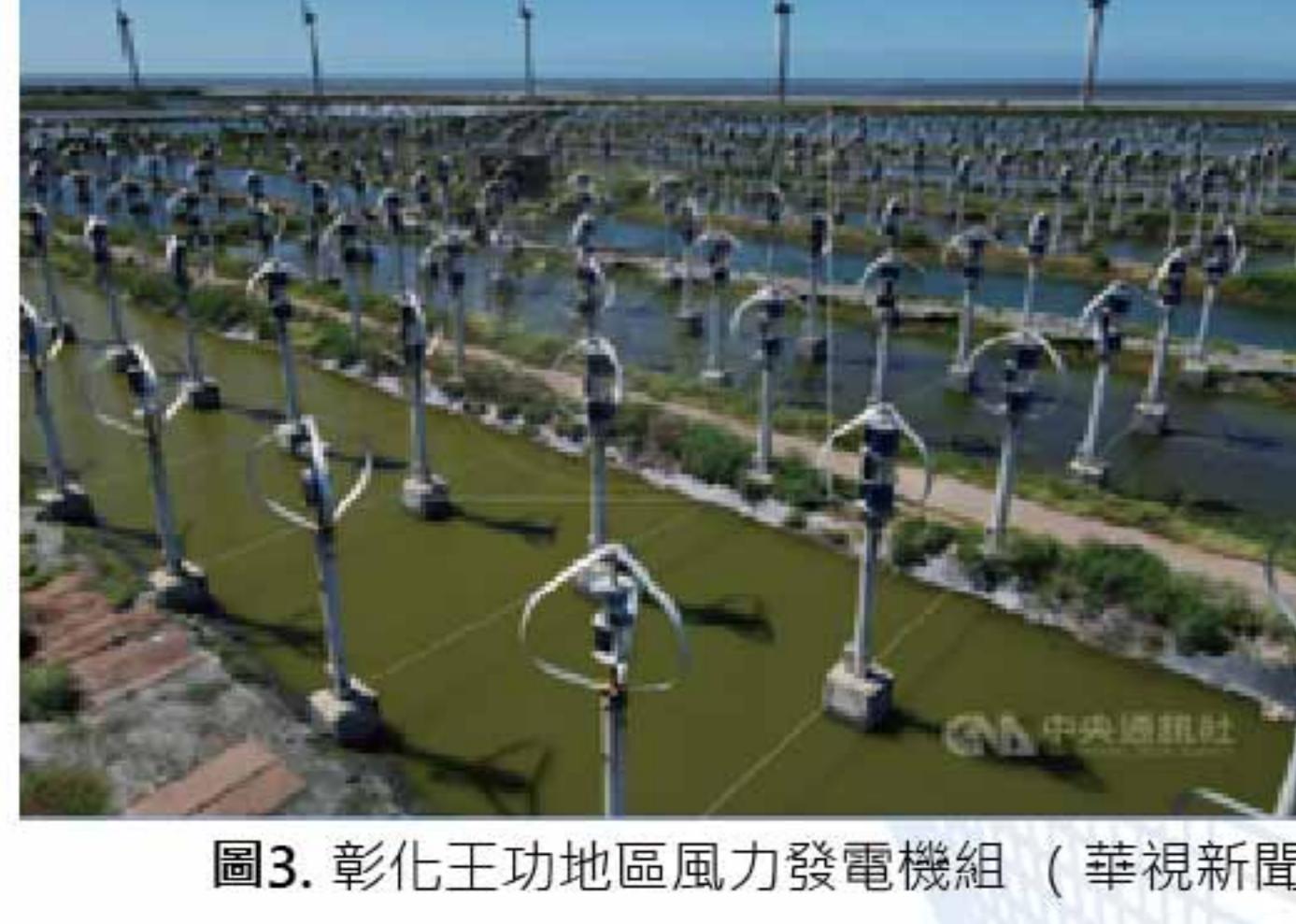


圖3. 彰化王功地區風力發電機組 (華視新聞雜誌, 2020)



圖4. 離岸風力發電 (華視新聞雜誌, 2020)



研究限制

因時間、成本與技術的關係，以下三點為本專題的研究限制：

- (一) 使用7mm的碳纖棒，一根100cm長為350元。
- (二) 購買網路上機器繞好的線圈做為定子(80x5mm的圓片)。

研究背景

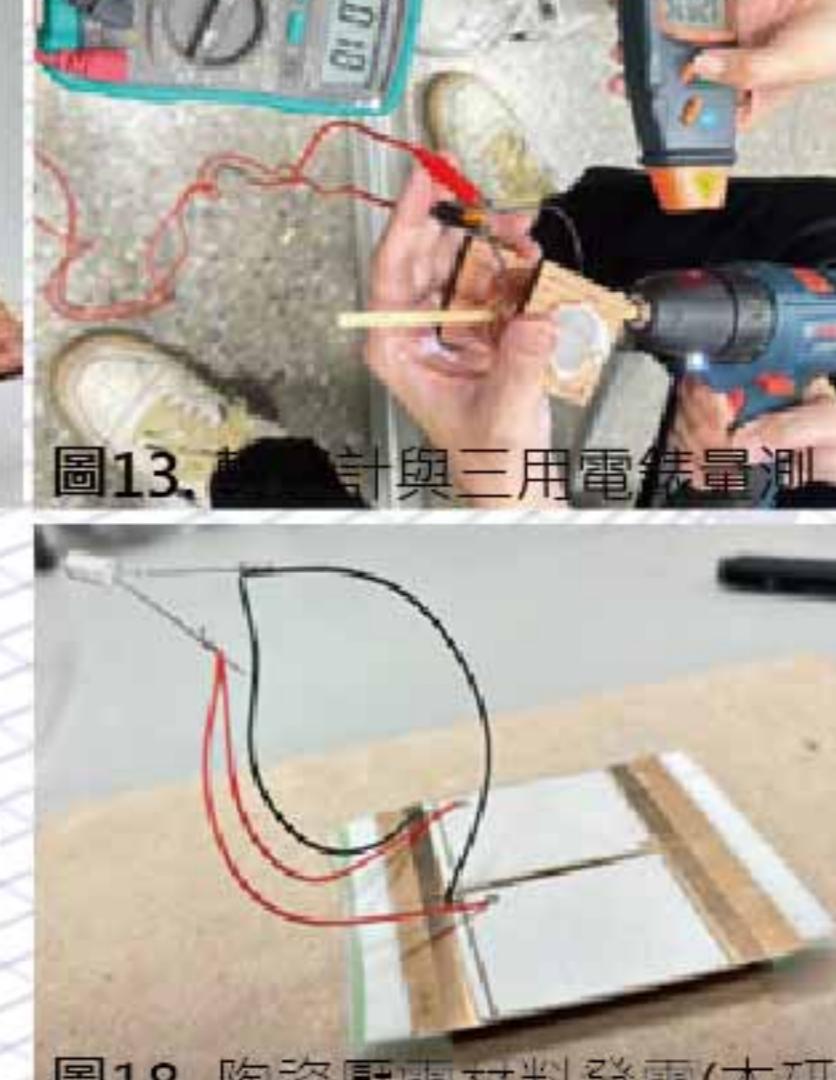
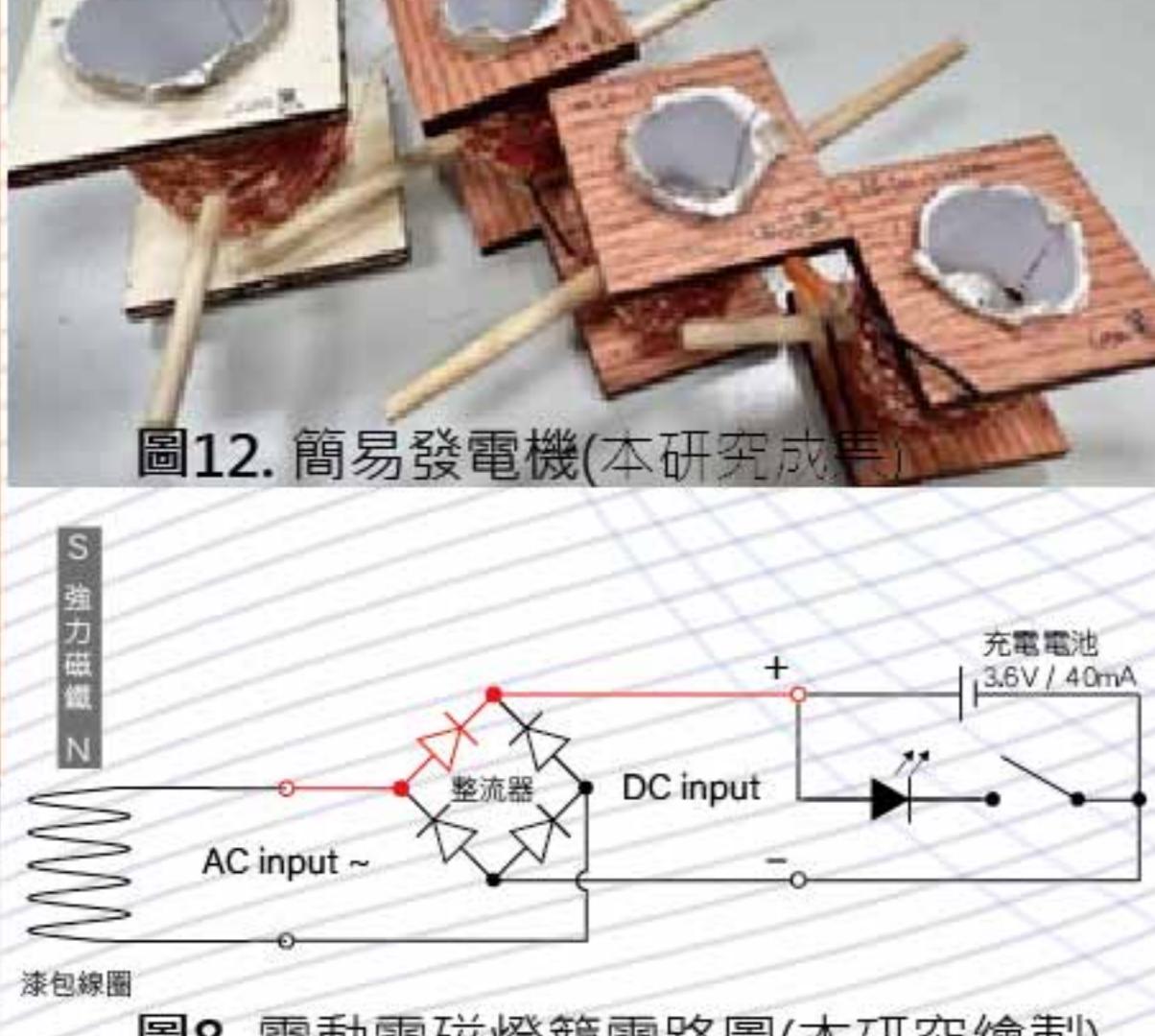
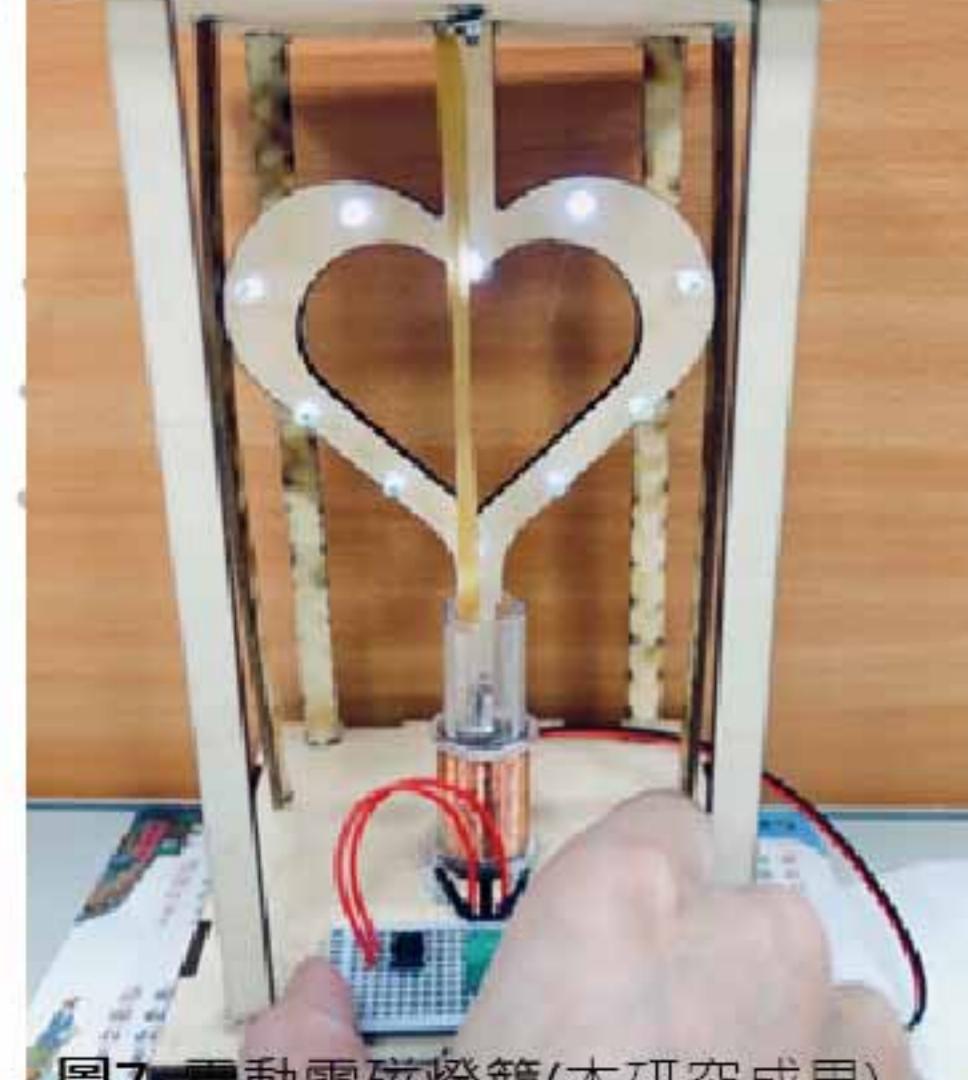


圖12. 簡易發電機(本研究成果)

圖13. 計算與三用電錶量測。

圖8. 震動電磁燈籠電路圖(本研究繪製)

圖18. 陶瓷壓電材料發電(本研究成果)

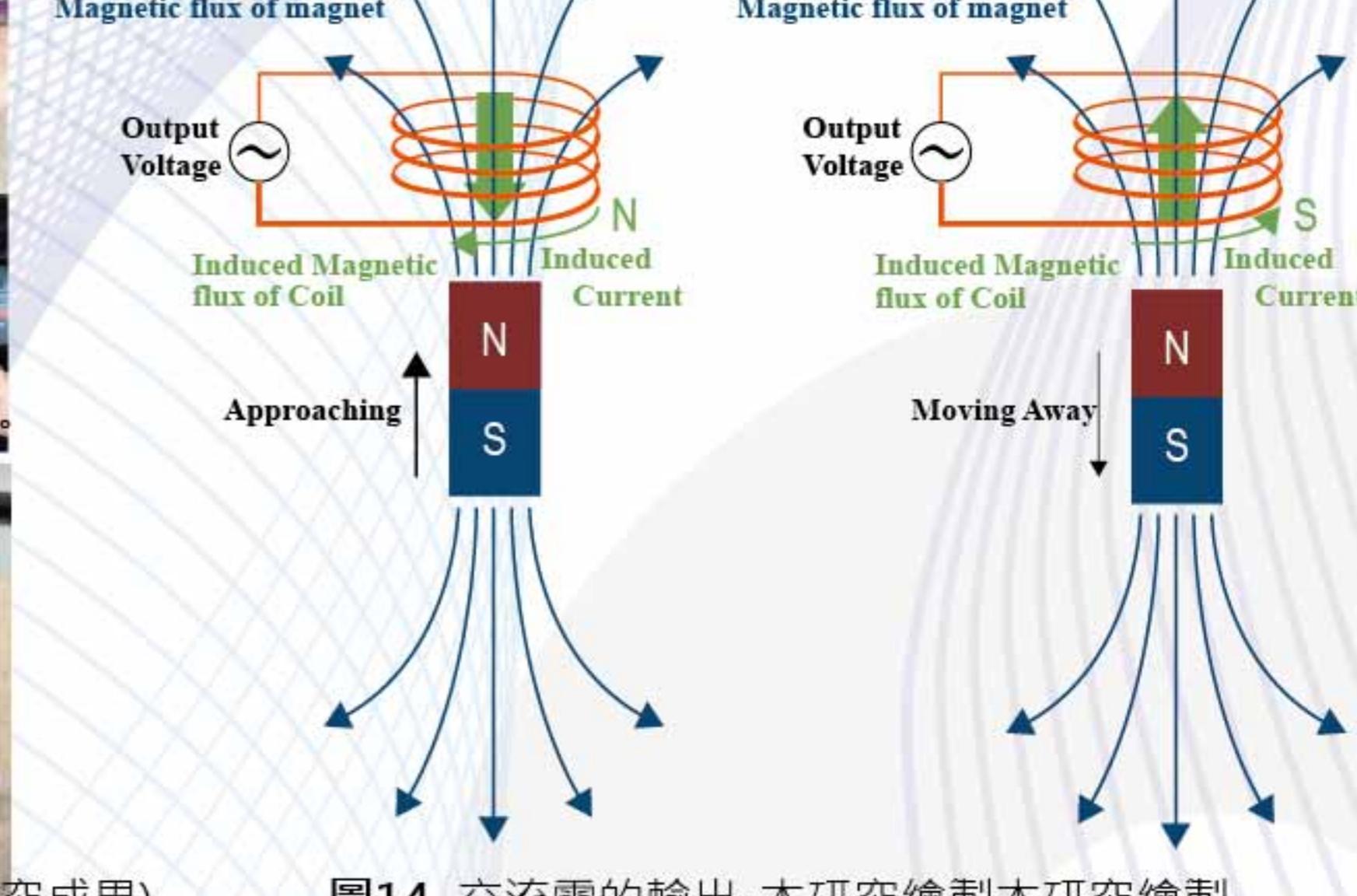


圖14. 交流電的輸出-本研究繪製

Wind Energy Vortex Resonance 風能渦旋共振



圖40. 本研究流體力學模擬，使用Autodesk Flow Design教育版。

結論

- 一、渦流共振與圓柱體
- 二、達預期開發的風機產品，共六款與最佳化結果
7.27V的交流電通過整流器轉成直流電後，可達12V的直流電壓，功率為432mW。

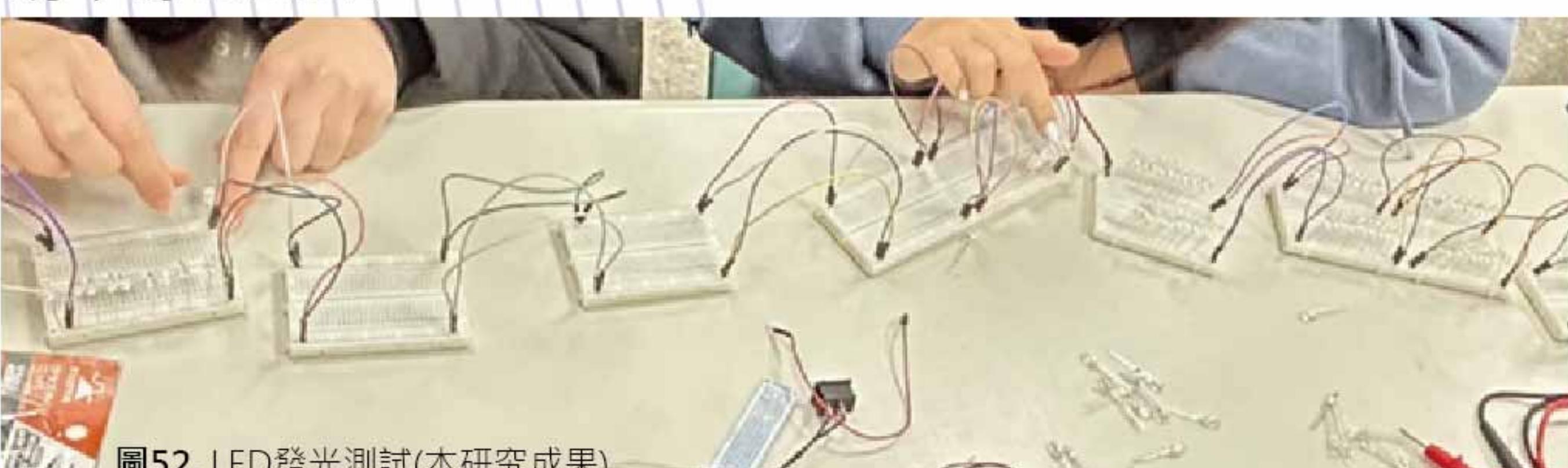


圖52. LED發光測試(本研究成果)

三、最佳化成果

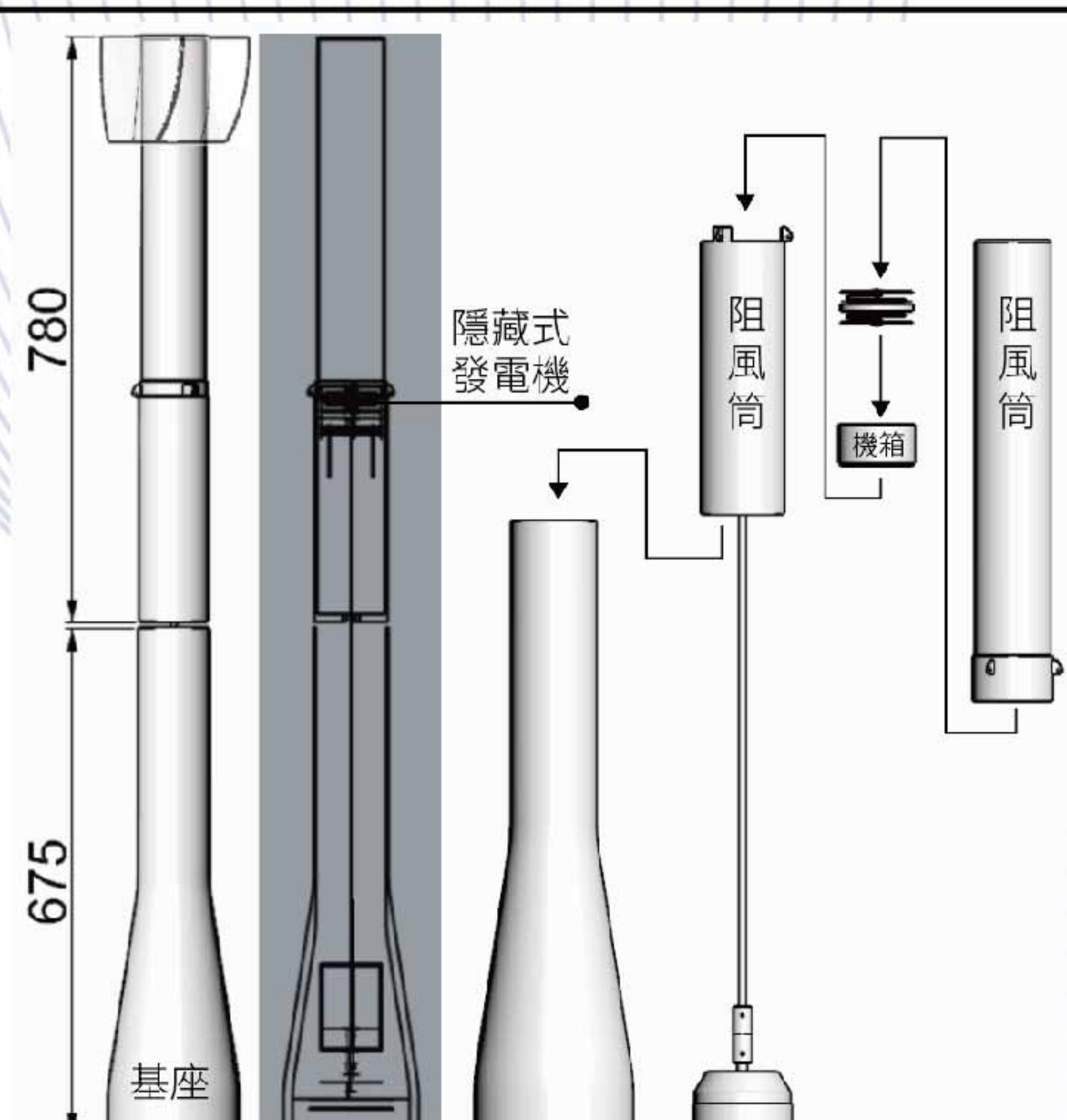
風速約在12m/s輸出功率最好，能有效使柱體往返運動共振及旋轉。

五葉片圓柱體→六葉片圓柱體→四葉片圓柱體
→圓柱體→三葉片圓柱體→尖圓柱體。



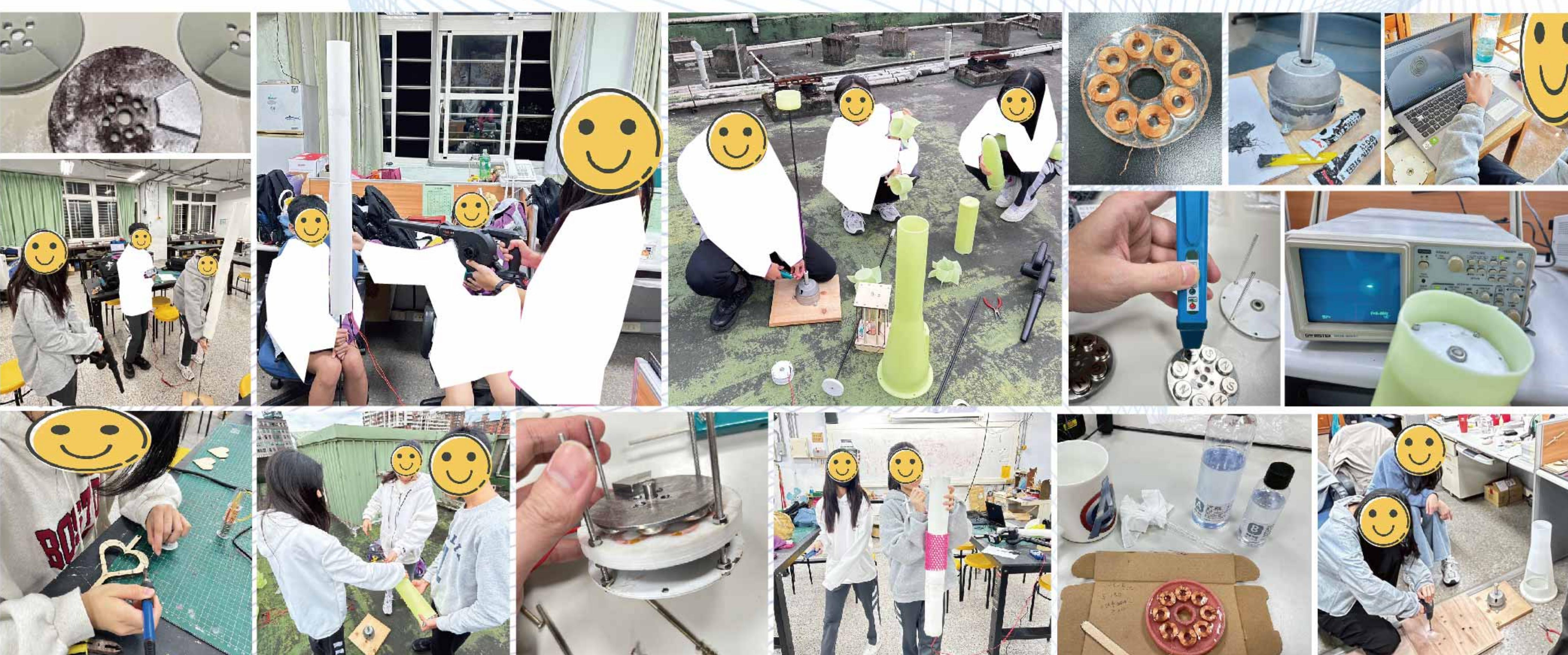
圖53/54. 最終成品(本研究成果)

四、發電機組規格表



項目	數據
裝置發電量	1~10.81V
最高輸出功率	432mW
頻率	12-32Hz
風機高度	1455mm
風機直徑	80mm
啟動風速	5m/s
最佳風速	12m/s
受風面積	1097cm ²
葉片數量	5 葉

我們的開發設計過程 (本研究成果)



建議

一、發電機與馬達構造

(一) 工廠技術觀摩

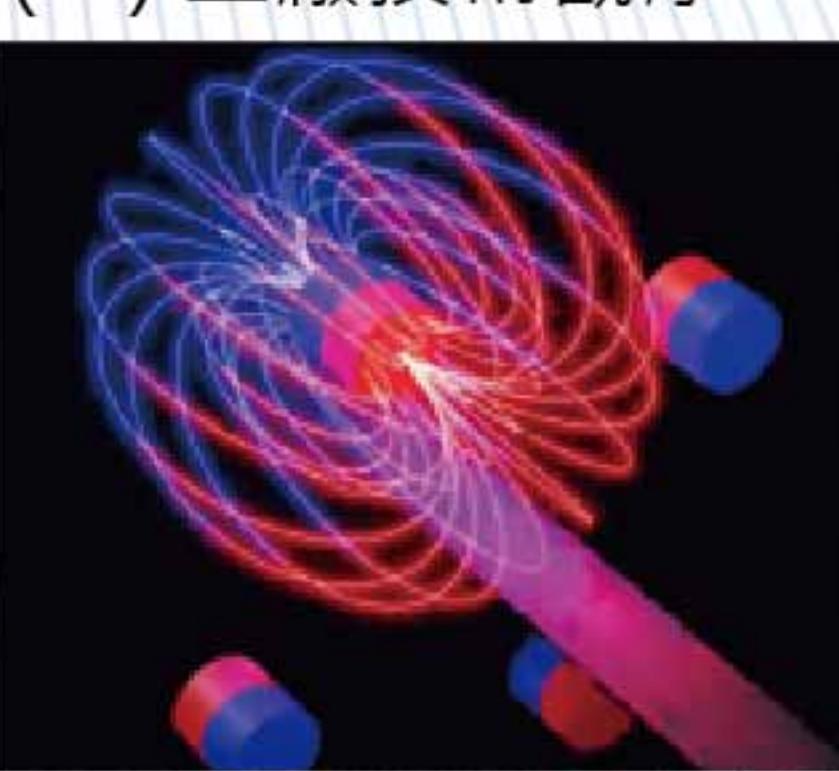


圖15. 軸向磁通(水平)設計，效率較高。Birdbrain(2022).

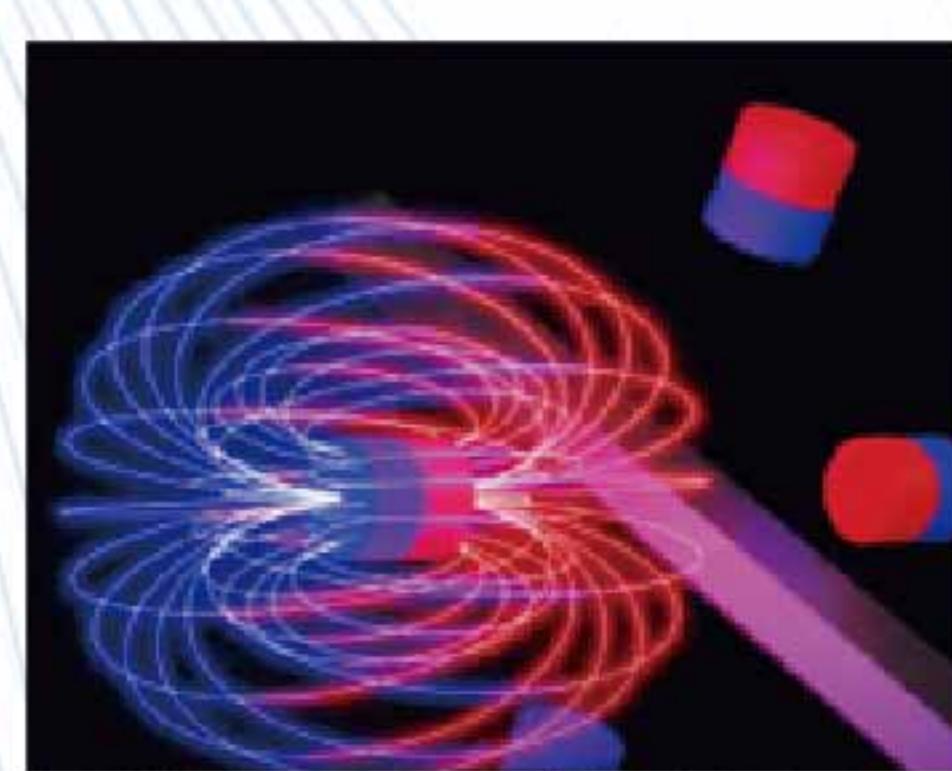


圖16. 徑向磁通(垂直)設計，技術生產成熟。Birdbrain(2022).

(二) 發電機功率

二、實驗過程與實驗的改進

(一) 穩定有效風場設置

(二) 支柱支點高度設置，與風能共振關係

(三) 阻風管的造型，如螺旋溝槽

未來展望

一、關於實驗及最佳化的改善

(一) 提升功率，增加線圈數，使用梯形線圈

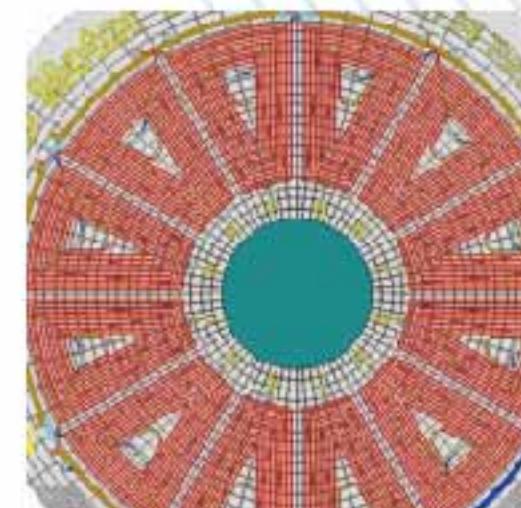


圖25. (本研究成果)

(二) 加上磁浮彈簧設計，增加共振次數

(三) 測試更多影響因子的數據，達最佳化

(四) 探索更多新材料

二、發展與應用

(一) 推廣至高樓建築與社區、偏鄉或離島等偏遠地區自給自足。

(二) 設計儲能設備，結合智慧電網。

(三) 太陽能與儲能系統，形成混合型電網，普及創能、節能與儲能的公民議題涵養。

本專題設計製作的過程中，主要分為以下五階段實驗：

第一階段：發電機原型設計。

第二階段：測試有無阻風套管。

第三階段：測試阻風筒高度與功率關係。

第四階段：測試阻風尖筒、圓筒與功率關係。

第五階段：測試不同葉片數量與功率關係。



第一階段/實驗一： 發電機轉子結構設計

表6.

測試項目	1/8 圓轉子	1/6 圓轉子	1/4 圓轉子	1/2 圓轉子
平均電壓	8.8mV	13.1mV	31.4mV	53.7mV
平均電流	2.44mA	4.66mA	14.44mA	18.44mA
平均功率	2.15mW	6.10mW	45.34mW	99.00mW

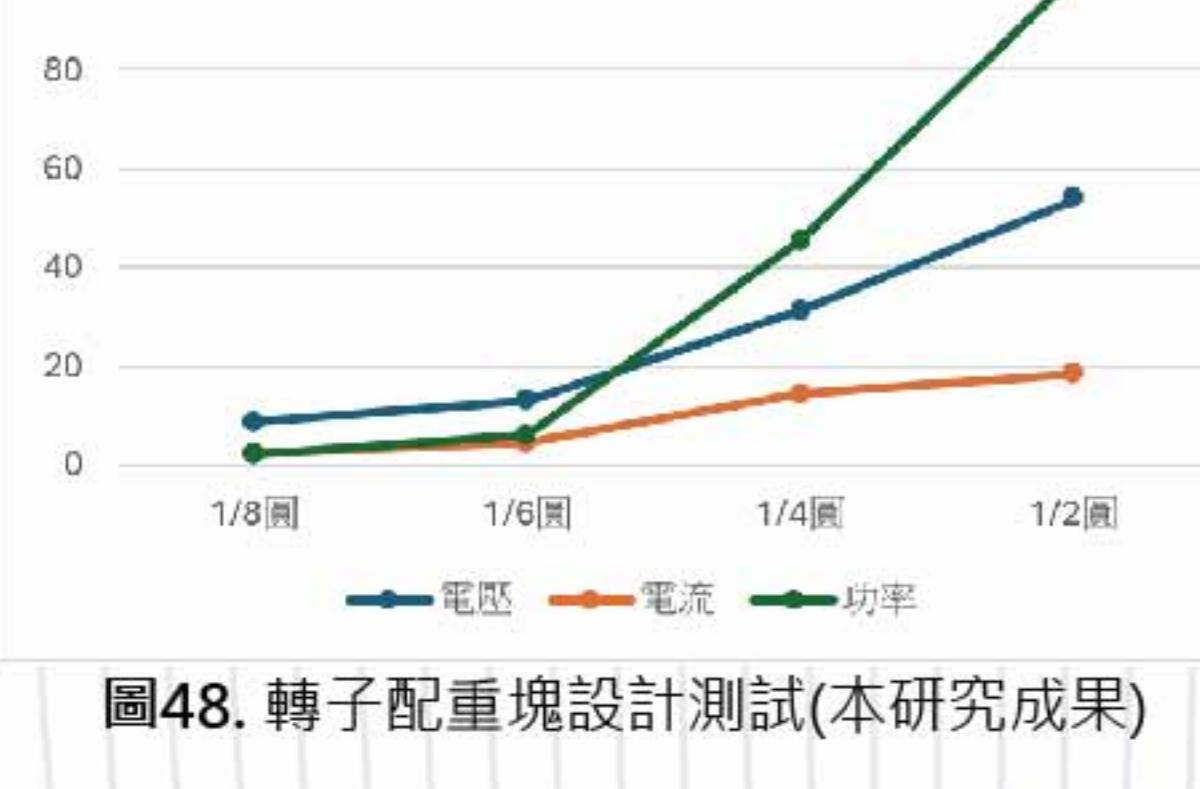


圖48. 轉子配重塊設計測試(本研究成果)

第四階段/實驗三： 測試阻風尖筒、圓筒與功率關係

表8.

測試項目	尖筒	圓筒
平均電壓	47.2mV	54.5mV
平均電流	23.87mA	28.36mA
平均功率	112.66mW	154.61mW

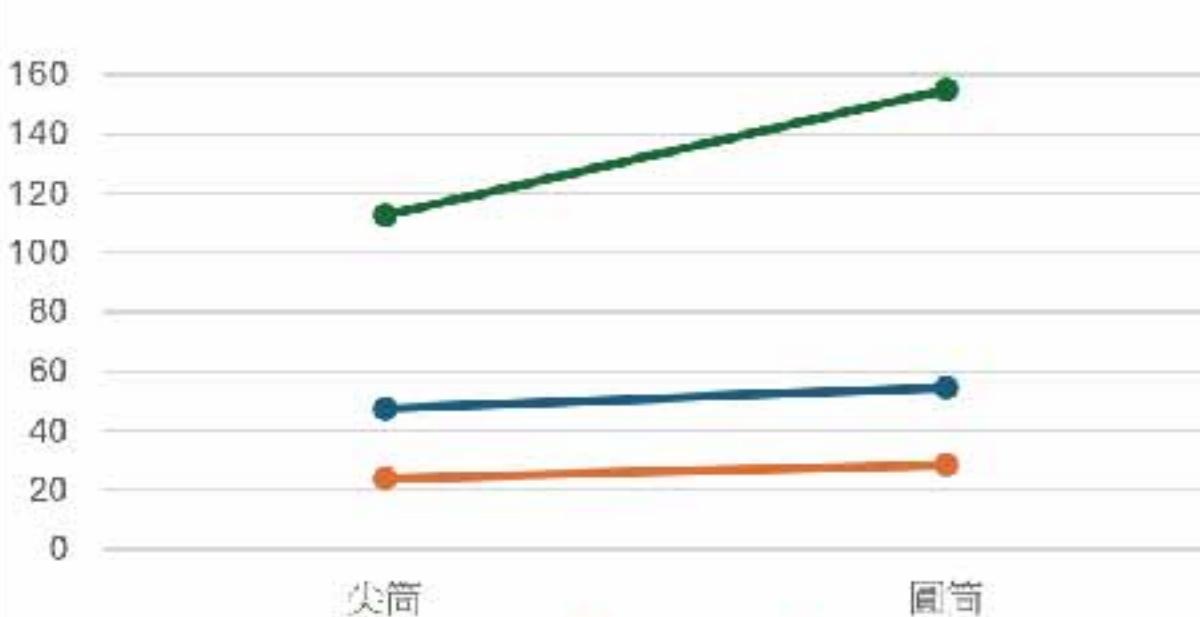


圖50. 阻風筒尖筒、圓筒功率測試(本研究成果)

第二階段： 測試有無阻風套管



圖38. 增加阻風套管測試
(本研究成果)

第三階段/實驗二： 測試阻風筒高度與功率關係

表7.

測試項目	第一組	第二組	第三組	第四組
平均電壓	53.4mV	31.1mV	36.3mV	54.2mV
平均電流	28.12mA	15.32mA	20.41mA	26.36mA
平均功率	150.16mW	47.65mW	74.90mW	142.87mW

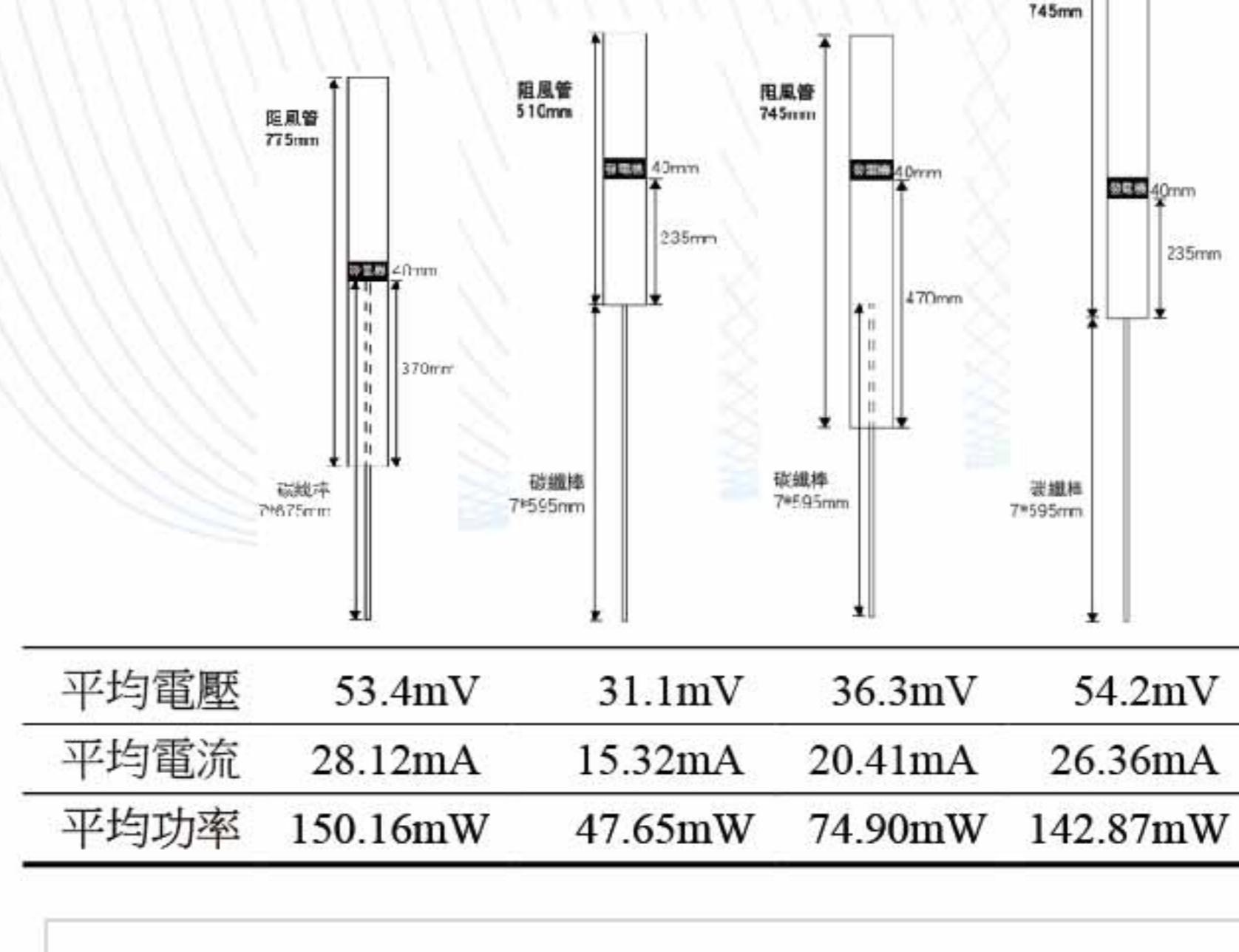


圖49. 不同高度阻風筒測試(本研究成果)

第五階段/實驗四： 測試不同葉片數量與功率關係

表9.

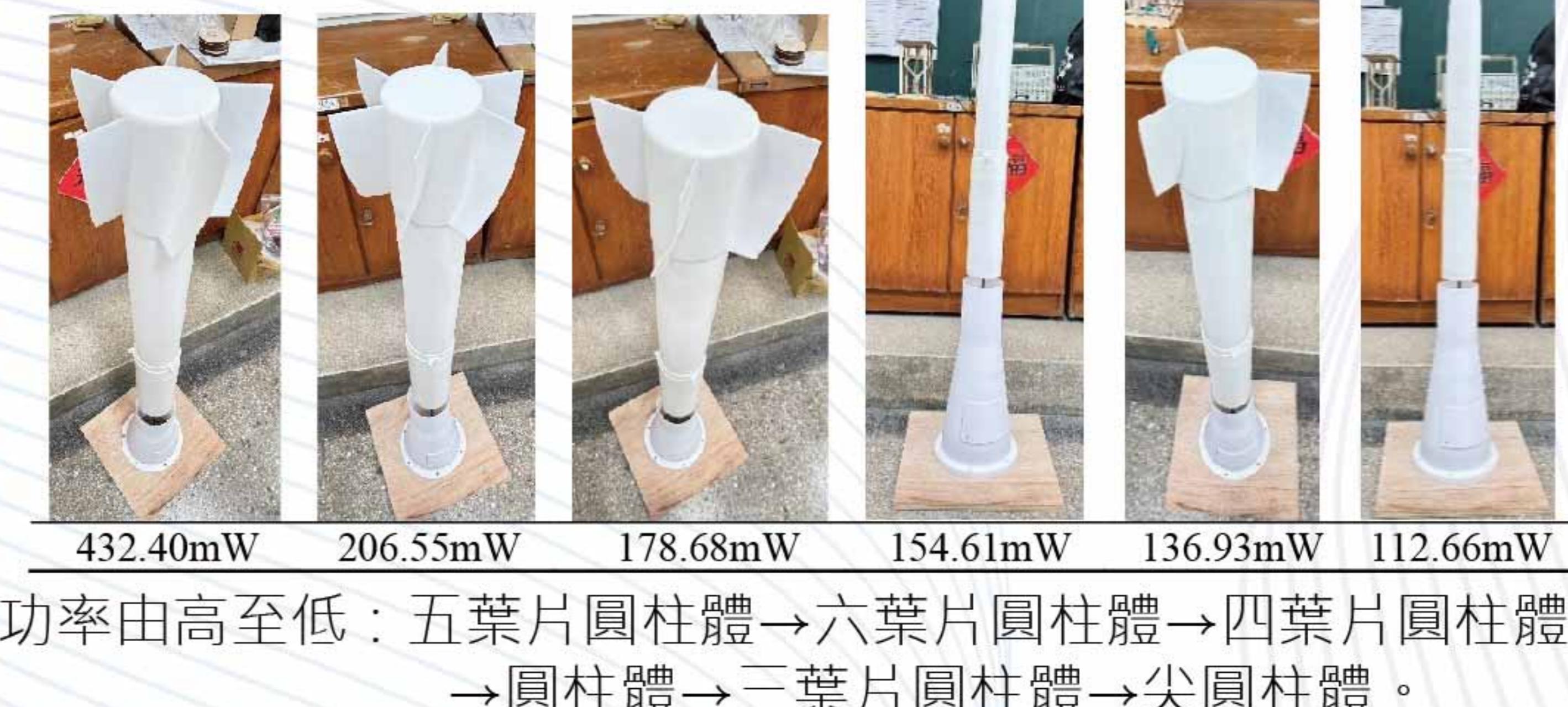
測試次數	三葉片	四葉片	五葉片	六葉片
平均電壓	45.6mV	68.9mV	108.1mV	67.7mV
平均電流	30.03mA	29.34mA	40.00mA	30.51mA
平均功率	136.93mW	178.68mW	432.40mW	206.55mW



圖51. 不同葉片數量的功率測試(本研究成果)

表10. 不同葉片數量的功率

五葉片 圓柱體	六葉片 圓柱體	四葉片 圓柱體	圓柱體	三葉片 圓柱體	尖圓柱體
------------	------------	------------	-----	------------	------



功率由高至低：五葉片圓柱體→六葉片圓柱體→四葉片圓柱體
→圓柱體→三葉片圓柱體→尖圓柱體。

智慧控制監測系統研究

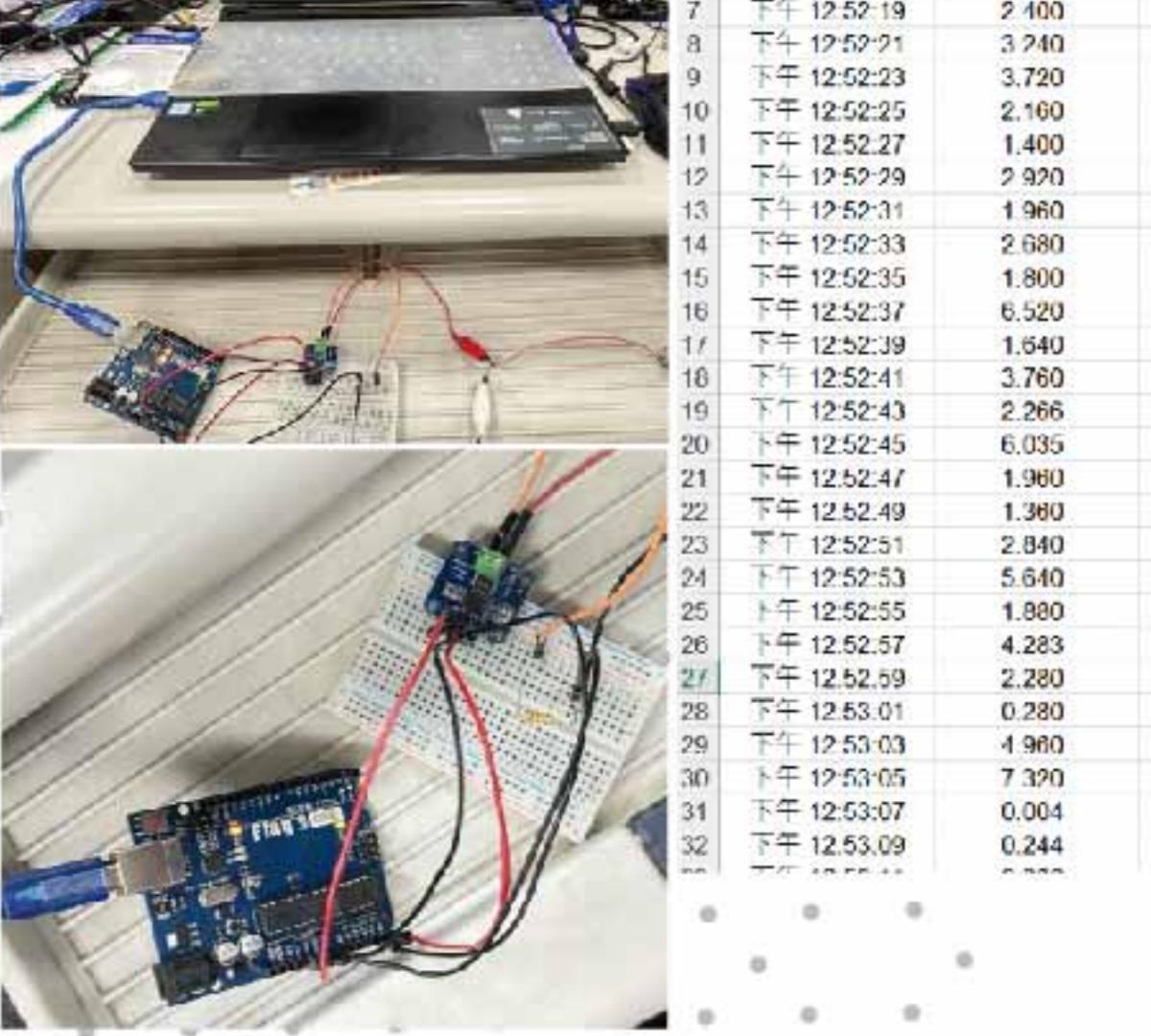


圖46. Arduino與INA219感應器(本研究成果)

電壓、電流、功率

圖47. EXCEL資料圖表(本研究成果)

Arduino開發板程式碼(本研究成果)

```
#include <Wire.h> // 引入 I2C 通訊函式庫 (用於和 INA219 溝通)
#include <Adafruit_INA219.h> // 引入 Adafruit 提供的 INA219 機組函式庫
Adafruit_INA219 ina219; // 壓告一個 INA219 感測器的物件 (名稱為 ina219)

void setup()
{
  Serial.begin(9600); // 啟動序列通訊 (設定 baud rate 為 9600) · 用來與 PLX-DAQ 或電腦傳資料
  if (!ina219.begin()) // 試著啟動 INA219 機組
  {
    Serial.println("找不到 INA219 感測器，請檢查接線!"); // 若感測器未回應，顯示錯誤訊息
    while (1); // 無限迴圈，讓程式停止執行 (避免繼續往下跑)
  }

  // == PLX-DAQ 機組初始化設定 ==
  Serial.println("CLEARDATA"); // 告訴 PLX-DAQ 清除資料 (從 Excel 表格清空)
  Serial.println("LABELTIME Voltage Current Power (mW)"); // 設定 Excel 檔位名稱：時間、電壓、電流、功率
}

void loop()
{
  float busVoltage = ina219.getBusVoltage_V(); // 讀取電壓 (單位：Volt · 測量 Bus 上的電壓)
  float current_mA = ina219.getCurrent_mA(); // 讀取電流 (單位：mA · 經由 shunt 電阻計算)
  float power_mW = busVoltage * current_mA; // 自行計算功率 (瓦特 = 電壓 × 電流) · 單位為 mW

  // == 傳送資料給 PLX-DAQ / Excel ==
  Serial.print("DATA,TIME,"); // 輸入 PLX-DAQ 所需格式 · TIME 會自動對應 Excel 系統時間
  Serial.print(busVoltage); // 輸出電壓值 · 顯示到小數點後 3 位
  Serial.print(",");
  Serial.print(current_mA); // 輸出電流值 · 顯示到小數點後 3 位
  Serial.print(",");
  Serial.print(power_mW); // 輸出功率值 · 顯示到小數點後 3 位
  delay(2000); // 暫停 1 秒鐘 (每秒記錄一次資料)
}
```