

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 物理科

佳作

030118

風起「渦」湧～卡門渦街現象與風力發電

學校名稱： 新北市立板橋國民中學

作者： 國一 葉宥岑 國一 黃禹瑄 國一 洪若軒	指導老師： 胡文達
---	------------------

關鍵詞： 卡門渦街、無扇葉風力發電、共振現象

風起「渦」湧~卡門渦街現象與風力發電

摘要

本研究在風洞中觀察到卡門渦街造成振動阻體共振的現象，了解到振動阻體口徑、風速大小影響卡門渦街頻率，而振動阻體的自然頻率與渦街頻率在特定條件下發生共振，也觀察到前後擺放兩個振動阻體，振動阻體因卡門渦街，有交錯擺動的現象。我們利用可產生最大振幅，口徑 16 cm 的彈簧阻體來製作發電裝置，在風速 3 m/s、彈簧長 16.5 cm 下，可得到最佳功率為 5.3 ± 0.11 mW。將前後擺放兩個振動阻體串聯，在風速 3 m/s、彈簧長 19.7 cm 下，可得到最佳功率為 12.5 ± 0.5 mW。未來期望多加以改進並實際運用到生活中。

壹、前言

一、研究動機；

這幾年，台灣致力於風力發電的建設，逐漸提升綠能占比。傳統的風力發電機用地大、噪音大、對生態影響也較嚴重。近年來研發出的無扇葉風力發電機，雖然單支發電效率較低，但可廣設於任何地方，既沒有噪音紛擾且較不會影響生態，維修也較不頻繁，相信經過不斷改良，未來無扇葉風力發電於綠能產業將佔有一席之地，我們也因此往這方面研究。

二、研究目的

- (一)在風洞中觀察玻璃纖維桿阻體因卡門渦街引起的共振現象。
- (二)探究不同玻璃纖維桿阻體的口徑對共振現象的影響。
- (三)探究不同風速對玻璃纖維桿阻體共振現象的影響。
- (四)探究利用彈簧製作的阻體因卡門渦街引起的共振現象。
- (五)探究不同彈簧長度對彈簧阻體振現象的影響。
- (六)探討利用共振現象用來發電的可行性。

三、文獻探討

(一)依據維基百科[1]：

卡門渦街，即卡門渦、卡門渦流（Kármán vortex street、von Kármán vortex street）是

一個空氣動力學術語，指流體中安置的阻流體，在特定條件下會出現不穩定的邊界層分離，阻流體下游的兩側，會產生兩道非對稱地排列的旋渦，其中一側的旋渦循時針方向轉動，另一旋渦則反方向旋轉，這兩排旋渦相互交錯排列，各個旋渦和對面兩個旋渦的中間點對齊，如街道兩邊的街燈一般，故名渦街。該現象由匈牙利裔美國空氣動力學家西奧多·馮·卡門最先從理論上闡明而得名。河水流過障礙物時，經常可見卡門渦街，馮·卡門曾在義大利北部博洛尼亞的一所教堂裡，目睹一幅聖克里斯多福背負耶穌化身的兒童，赤足渡河的油畫，畫家畫出聖克里斯多福的腳跟在河水中造成兩排交錯的旋渦，這是馮卡門關於卡門渦街論述的最早的記錄。

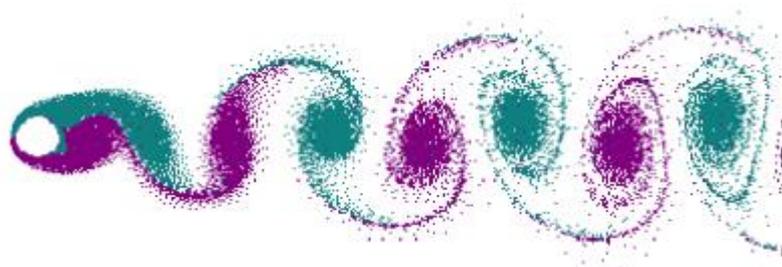


圖 1：卡門渦街示意圖(本圖源自維基百科)[1]

- 卡門渦街頻率 $f=StV/d$ 其中：

f =卡門渦街頻率、 St =斯特勞哈爾數 (~ 0.2)、 V =流體速度、 d =阻流體迎面寬度

(二)依據第 56 屆中小學高中組科展作品：追風逐電-無扇葉型風力發電機[2]

- 1.實驗利用卡門渦街，使中柱振動帶動磁鐵而發電，和有扇葉風力發電機相比，有噪音小，體積小，製作成本和方法容易等優點。
- 2.為增加發電量，須讓振動物有更大的振幅及頻率，需利用「共振」的現象加強振幅，振動裝置運用中柱的彈性來產生擺動，藉由改變各種變因尋求最大的發電效益。
- 3.實驗中，找出了感應電動勢會正比於振幅的 1.5 次方、頻率的 2 次方。且發現以截面距為 9 cm、自然振動頻率為 2.1 Hz，放置於軟風(0.4~1.1 m/s)下，會有較佳之發電效能。

(三)依新北市 111 學年度中小學科學展覽會作品「探討卡門渦街現象及渦激振動」[3]：

- 1.利用 arduino 開發版搭配超音波傳感器來測量振動體的振動頻率及振幅，希望看到

當渦街頻率與彈性體振動自然頻率相當時所發生的共振現象。

2.發現在不同風速及不同振動體直徑，非在理論渦街頻率下，某些振動體頻率的確發生類似共振現象使得振動幅度之大令人驚訝。

(四)由上列參考資料(二)、(三)提供了我們研究的大概輪廓：

- 1.架設能提供較大穩定風速的風洞。
- 2.振動體截面愈小、風速愈大渦街頻率愈大，若要在較小風速下與渦街產生共振，振動體截面必須放大，因此要選用較大的圓柱體當振動體。
- 3.利用玻璃纖維支撐圓柱當作振動體，玻璃纖維的彈性係數不能太小，否則無法產生與渦街頻率相當的振動頻率。
- 4.找出不同風速下造成最大振幅的條件。
- 5.利用強力磁鐵改變通過線圈的磁場來發電，其中感應電壓會正比於振幅的 1.5 次方、頻率的 2 次方，所以大振幅及大頻率會有較佳的發電效率。

(五)傅立葉轉換 (Transformation de Fourier)：

依據維基百科：傅立葉轉換（法語：Transformation de Fourier，英語：Fourier transform，縮寫：FT）是一種線性轉換，通常定義為一種積分轉換[4]。

常被應用於濾波、混頻、等化器等[5]。在本研究中被用於頻率與相對振幅的探討與比較。

貳、研究設備及器材

一、風洞

角鋼約 20 公尺、紙板、透明壓克力板、35 公分 PVC 管約 600 條、電風扇、風速計、熱熔膠、矽利康、電壓調節器

二、玻璃纖維桿阻體、彈簧阻體

塑膠圓筒、玻璃纖維桿、木板、木塊、arduino UNO 開發板、超音波測距模組、麵包版、開關、LED 燈、電阻、電線、雷切機、彈簧(19.7 cm、16.5 cm、13.3 cm)

三、發電裝置

線圈、電壓電流計、三用電表、3D 列印機印製線圈框、鈦磁鐵、碼表、電阻

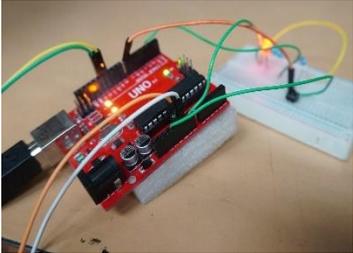
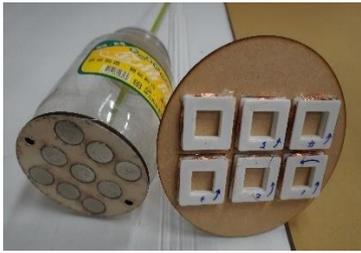
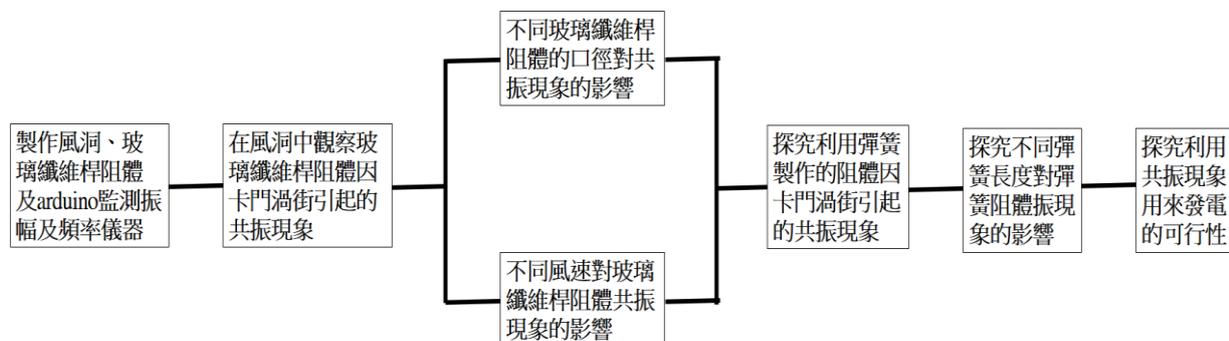
		
震動阻體	底座及支撐架	雷射切割機
		
玻璃纖維桿	風扇陣列	電壓電流計、三用電表
		
arduino 開發板及麵包板	風速器	強力磁鐵及線圈

圖 2：各類研究器材(照片由第 1 作者拍攝)

參、研究過程或方法

一、實驗架構



二、製作研究裝置

(一)製作風洞

- 1.參考歷屆科展、有製作風洞作品，設計風洞[5-8]。
- 2.組裝風洞骨架:用角鋼做出風洞的主體輪廓。
- 2.用厚紙板密封風洞，透明壓克力板裝置在觀察區側面。
- 3.裁切長 35 公分、直徑約 2 公分的 PVC 管約 600 根，整齊排列並黏牢於出風口前方處作為整流區。
- 4.將 4 個邊長約 50 公分的正方形框電風扇用木框固定後置入送風的喇叭開口
- 5.結構示意圖如圖 3：

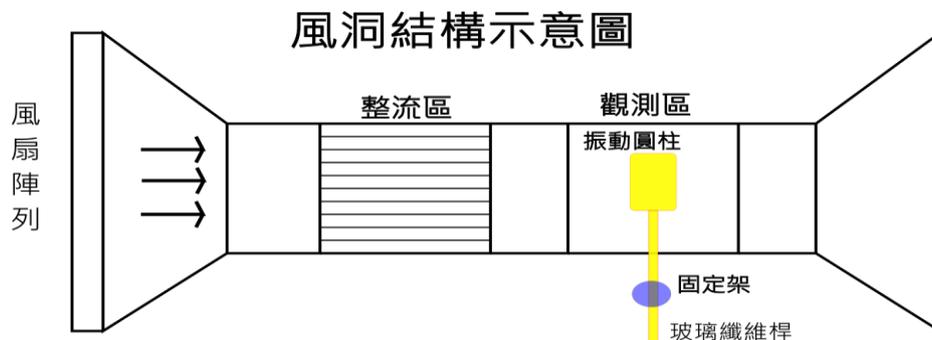
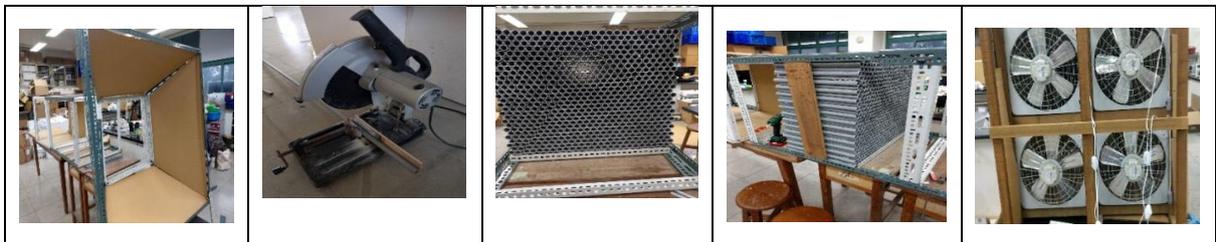


圖 3：風洞結構示意圖(照片、圖由第 1 作者拍攝、製圖)

(二)製作玻璃纖維桿阻體

- 1.利用雷射切割機切割塑膠圓桶開口內徑大小的密集板，中間切割穿入玻璃纖維桿的圓洞。
- 2.塑膠圓桶底部利用鑽床鑽出玻璃纖維桿口徑的洞。將上步驟之圓板固定在圓桶上再插入玻璃纖維桿到底部穿過圓洞，再用熱溶膠固定桿子。
- 3.在觀察箱下方厚紙板中間處切一長方形的洞，振動主體穿出至

風洞底部並固定於底座。

4.用木頭製做能調整高度變化的架子以便放置底座。

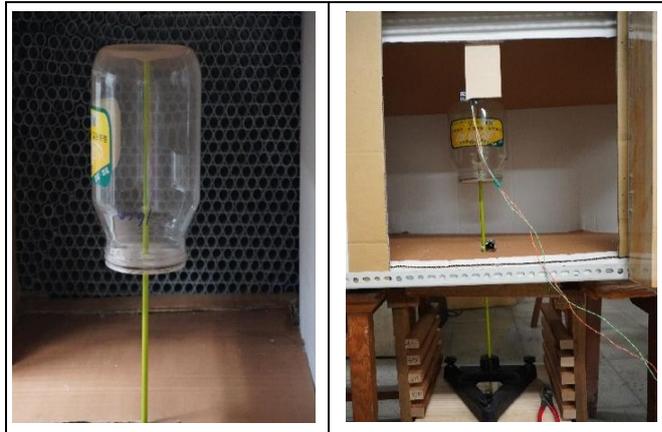


圖 4：振動阻體安裝示意圖 (a)玻璃纖維桿在風洞 (b)木頭製架子與底座架設位置桿(照片由第 1 作者拍攝)

(三)利用 arduino UNO 開發板製作監測振幅及頻率儀器

1.監測振幅及頻率的 arduino 程式碼如附錄 1

2.電路圖如下：

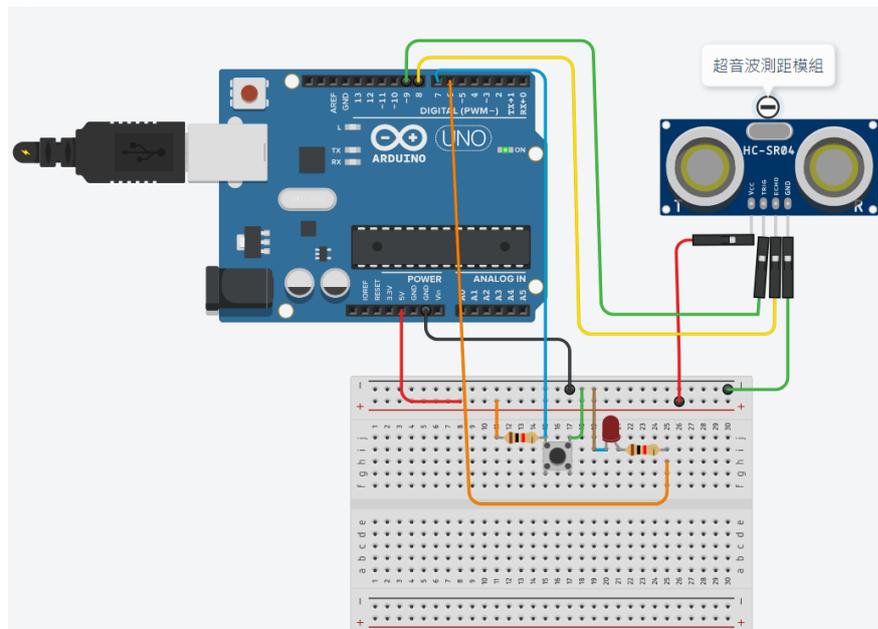


圖 5：監測振幅及頻率裝置電路圖(本圖由指導老師製圖)

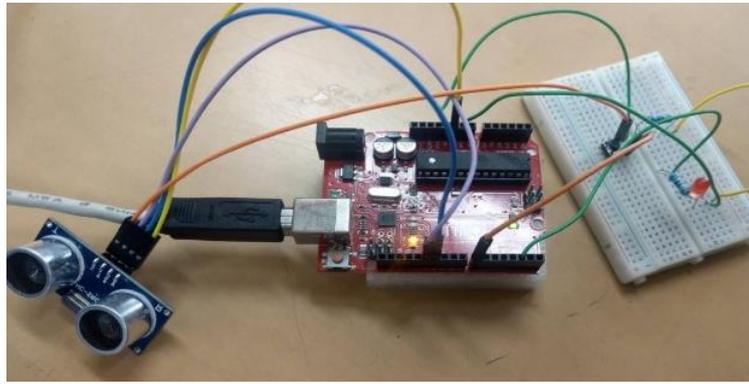


圖 6：監測振幅及頻率裝置電路組裝圖(照片由第 1 作者拍攝)

(四)風洞完成品

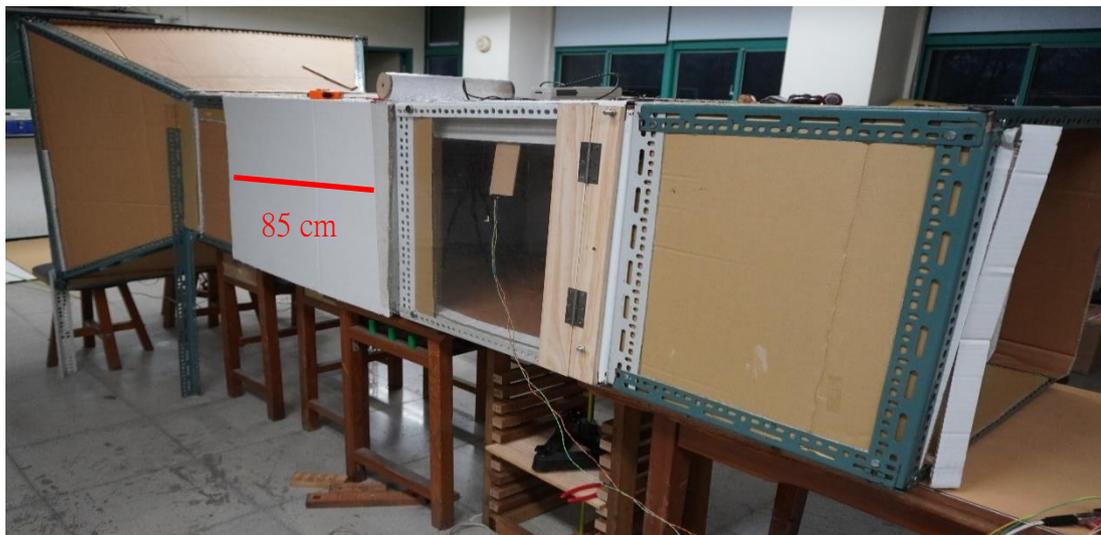


圖 7：風洞及振動阻體實際組裝圖(照片由第 1 作者拍攝)

三、在風洞中觀察卡門渦街造成玻璃纖維桿阻體共振的現象

(一)實驗組裝如圖 8，振動阻體於風洞中裝置圖

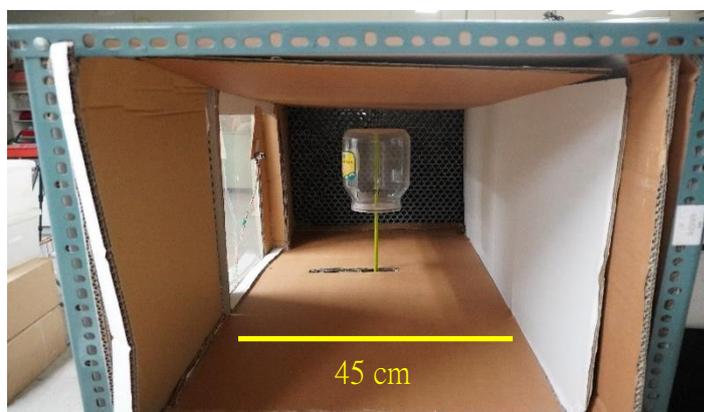


圖 8：振動阻體於風洞中裝置圖(照片由第 1 作者拍攝)

依據文獻探討我們認為口徑大一些的圓柱體在小風速下較能觀察到卡門窩街與振動阻體產生共振的現象，共振發生時應能看到劇烈的振幅。因此我們選擇約口徑約 16 cm 的塑膠圓桶做為振動阻體。我們使用的玻璃纖維桿有 7.5 mm、8.5 mm、9.5 mm 三種口徑。

(二)利用 arduino UNO 開發板加上超音波測距模組組成監測振幅及頻率的裝置

- 1.將超音波測距模組貼在觀測區門上，UNO 開發板連接到筆電 USB，開啟 serial 監視視窗。
- 2.啟動風扇一段時間，振動阻體穩定振動後，按下按鈕即可開始記錄振動體來回擺動的距離，每 0.02 秒紀錄一次，每秒可取得 50 個數據共紀錄 30 秒。
- 3.將 serial 監視視窗的資料複製到 excel 軟體，求出波峰、波谷的平均後相減除以 2 得到振幅。
- 4.利用 excel 內建資料分析-傅立葉轉換將振動資料判讀出頻率。
- 5.利用可上下移動之固定架調整玻璃纖維桿長度相當於改變振動阻體的擺長，由 85、80、75、70、65、60、55、50、45、40 cm 每次遞減 5 cm，測量振幅及頻率。

四、探究不同玻璃纖維桿阻體的口徑對共振現象的影響



圖 9：各種口徑的振動阻體(照片由第 1 作者拍攝)

(一)固定風速 3.7 m/s，改變振動阻體口徑分別為 15、16、17.7、22.1 cm。

(二)利用可上下移動之固定架調整玻璃纖維桿長度相當於改變振動阻體的擺長，由 85、

80、75、70、65、60、55、50、45、40 cm 每次遞減 5 cm，測量振幅及頻率。

五、探究不同風速對玻璃纖維桿阻體共振現象的影響

(一)取用口徑 16 cm 振動阻體，利用數位電壓調節器，來改變電壓，使風速改變，風速分別為 3.7、2.4、1.1 m/s。

(二)利用可上下移動之固定架調整玻璃纖維桿長度相當於改變振動阻體的擺長，由 85、80、75、70、65、60、55、50、45、40 cm 每次遞減 5 cm，測量振幅及頻率。

六、探究利用彈簧製作的阻體因卡門渦街引起的共振現象

(一)為了考量之後要用來發電，希望可以有更大振幅，所以嘗試將玻璃纖維桿改成彈簧，搭配有最好振幅的 16 cm 阻體，整個振動阻體如圖 10，改變不同風速：3.7、3、2.7、2.4、1 m/s，利用 Tracker 軟體，測量振幅時跟頻率。



圖 10：彈簧振動阻體圖
(照片由第 1 作者拍攝)

(二)因為彈簧阻體架設簡單，將相同兩個彈簧阻體前後擺放，彈簧阻體擺放圖如圖 11，在風洞下觀察振動情況，並利用 Tracker 軟體，測量振幅時跟頻率。



圖 11：彈簧振動阻體擺放圖
(照片由第 1 作者拍攝)

七、探究不同彈簧高度對彈簧阻體振現象的影響

將彈簧剪短，彈簧長度為 19.7、16.5、13.3 cm，三種彈簧阻體圖如圖 12，在風洞下觀察振動情況，並利用 Tracker 軟體，測量振幅時跟頻率。



圖 12：不同彈簧長度阻體圖
(照片由第 1 作者拍攝)

八、探討利用共振現象用來發電的可行性

(一)由參考資料[2] [9-10]得知利用強力磁鐵在線圈中產生磁場變化即可產生電壓，而且產生電壓大小與振幅與頻率有關，我們利用可產生最大振幅的阻體來製作發電裝置。

(二)一開始我們設計強力磁鐵固定在圓筒底部(倒過來即上方了)，線圈另外架設風洞頂端，結構組裝圖如圖 13：



圖 13：最初設計(a)強力磁鐵與線圈設計 (b)強力磁鐵與線圈架設圖(照片由第 1 作者拍攝)

(三)上步驟組合方式雖可得到較佳的磁場變化，但考慮實際架設一般空地上必須額外架設線圈於振動阻體上方並不方便，而且風向是變動的必須考慮進去，因此我們變更設計，將強力磁鐵固定在阻體下方，線圈固定在底座上如下圖 14：



圖 14：改良版設計(a)強力磁鐵與線圈設計 (b)強力磁鐵與線圈組裝(照片由第 1 作者拍攝)

(四)改成上步驟組合方式後，發現強力磁鐵盤黏在阻體上，讓重量加重，導致振幅過小，再加上磁場變化差，所以整體發電效率極差，也嘗試過不同風速、桿長、玻璃纖維管，都無法得到較佳的振幅與發電效率，我們又更改設計，使用口徑為 16 公分的阻體，下端用 PVC 管黏接口徑 25 mm、厚度 5 mm 的強力磁鐵，左右兩側各三片，線圈線徑 0.29 mm、600 匝，固定於 PVC 管兩側，2 個線圈串聯再接到電壓檢測計讀取數值，裝置如圖 15。

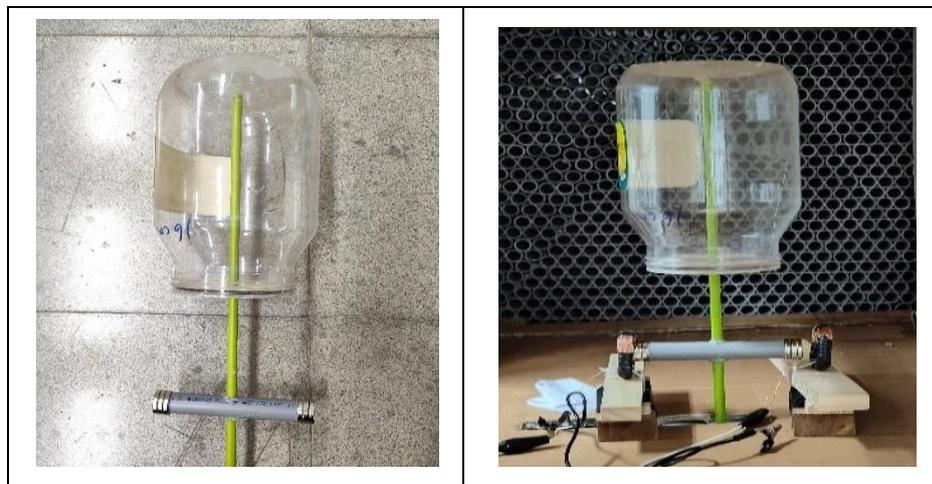


圖 15：玻璃纖維桿阻體最終版設計(a)玻璃纖維桿阻體與強力磁鐵(b)發電裝置在風洞中組裝圖 (照片由第 1 作者拍攝)

(五)在不同風速下，改變桿長找到最大發電量，紀錄 5 秒內測得電壓。

(六)接上電阻，想同時偵測電流與電阻來計算功率，但卻發現線圈也會產生磁場，導致整個玻璃纖維桿阻體無法正常振動，無法偵測電流，只好放棄此設計。

(七)將彈簧阻體加發電裝置，考量到之前玻璃纖維桿阻體的情況，這次將線圈設計在中央，中間架線徑為 0.29 mm、900 匝的線圈，線圈的左右兩側架厚度 5 mm 的強力磁鐵各三片，接 240 Ω 電阻，利用電壓檢測計與三用電表讀取數值，紀錄 5 秒內測得電壓與電流，並計算功率，且利用 Tracker 軟體，測量振幅時跟頻率，裝置如圖 16。



圖 16：彈簧振動阻體加發電裝置圖
(照片由第 1 作者拍攝)

(八)將剪短的彈簧阻體：16.5 cm、13.3 cm 加發電裝置，線圈設計在中央，中間架線徑為 0.29 mm、900 匝的線圈，線圈的左右兩側架厚度 5 mm 的強力磁鐵各三片，接 240 Ω 電阻，利用電壓檢測計與三用電表讀取數值，紀錄 5 秒內測得電壓與電流，並計算功率，且利用 Tracker 軟體，測量振幅時跟頻率。

(九)將兩個 19.7 cm 彈簧阻體串聯或並聯，利用電壓檢測計與三用電表讀取數值，紀錄 5 秒內測得電壓與電流，並計算功率。

肆、研究結果

一、在風洞中觀察玻璃纖維桿阻體因卡門渦街引起的共振現象：

固定風速 3.7 m/s、振動阻體口徑 16 cm，利用超音波測距儀每 0.02 秒紀錄振動阻體距離觀測窗的距離，其中前 100 個數據呈現如圖 17：

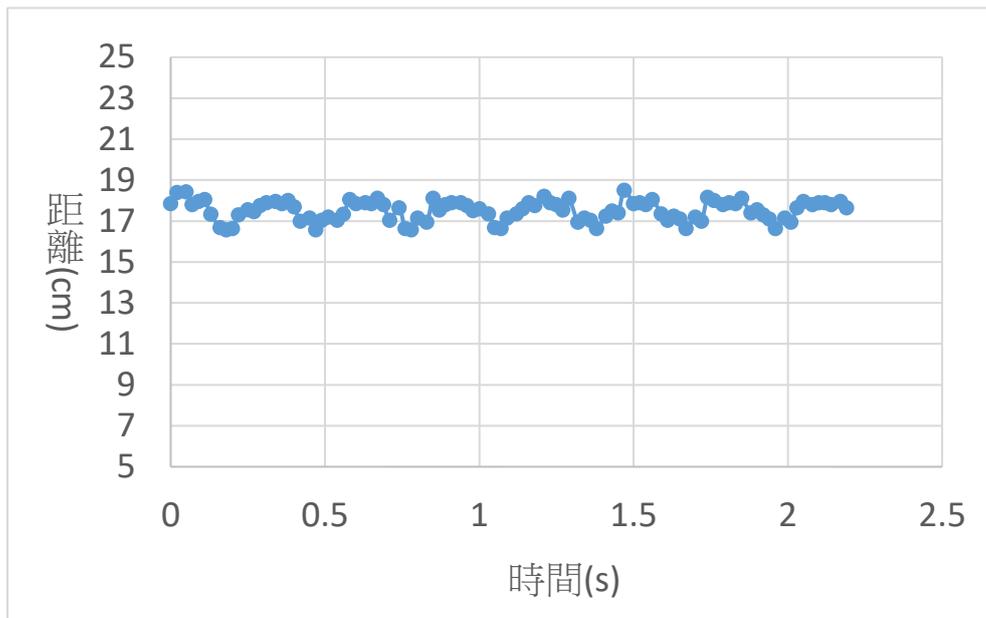


圖 17：桿長 35 cm 時間振幅波形圖

每 0.02 秒紀錄振動阻體距離觀測窗的距離，連續紀錄 30 秒，其中前 1024 個距離資料經傅立葉轉換呈現如圖 18，左邊的峰值即是振動阻體的振動頻率。

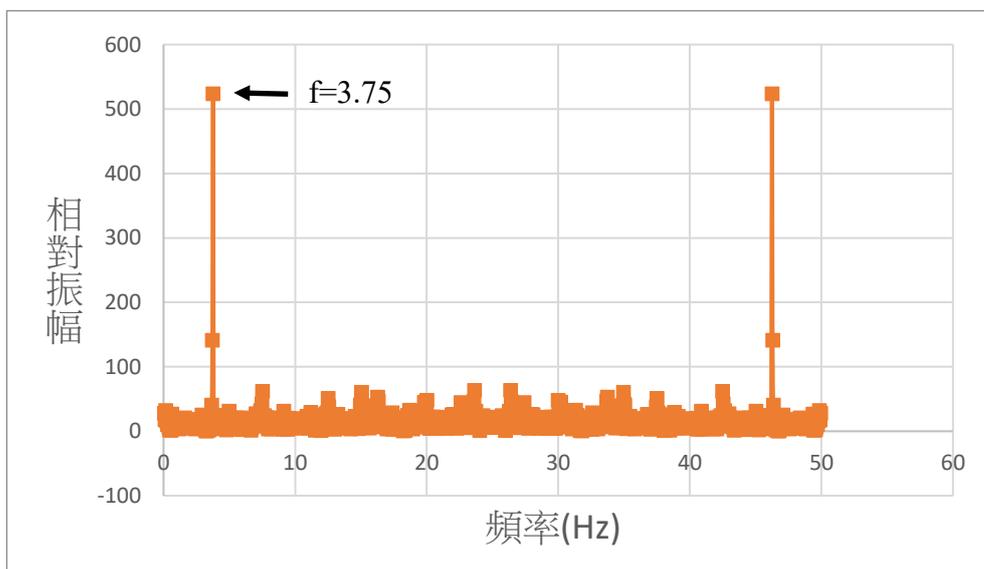


圖 18：桿長 35 cm 傅立葉分析頻譜圖

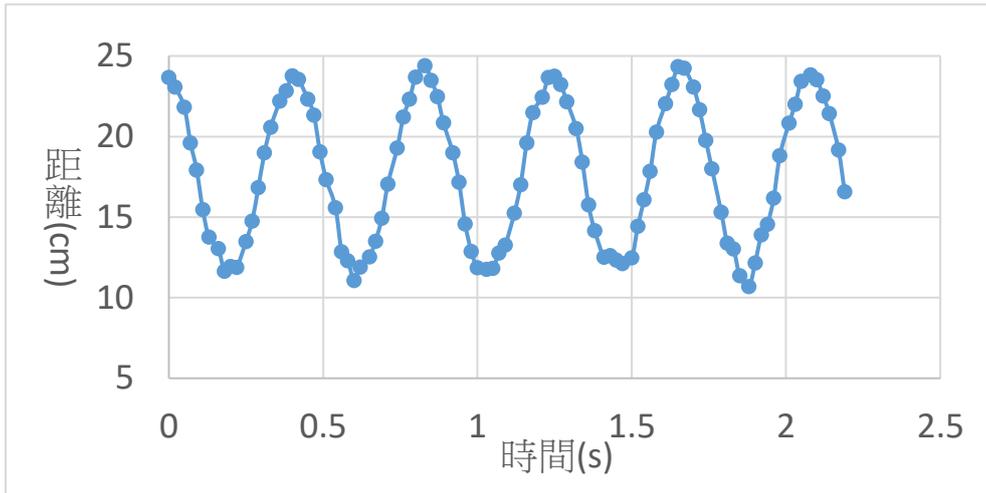


圖 19：桿長 40 cm 時間振幅波形

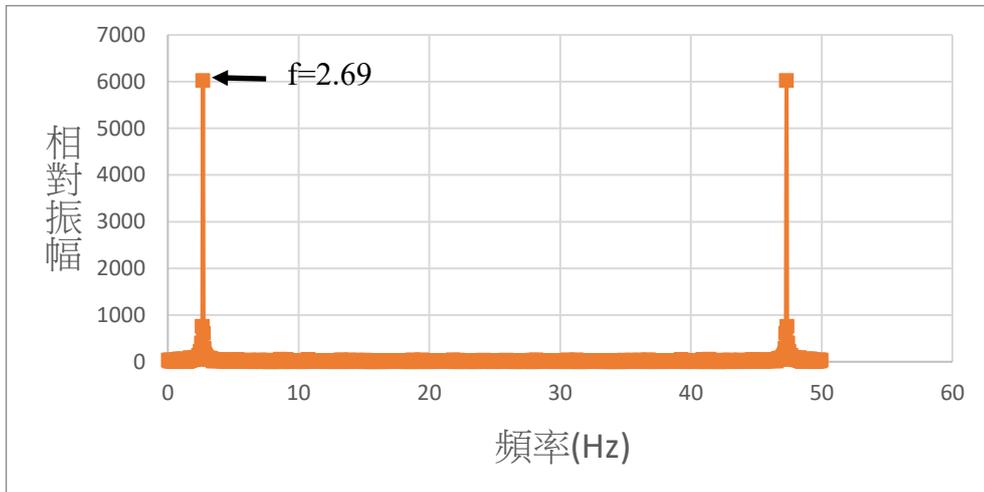


圖 20：桿長 40 cm 傅立葉分析頻

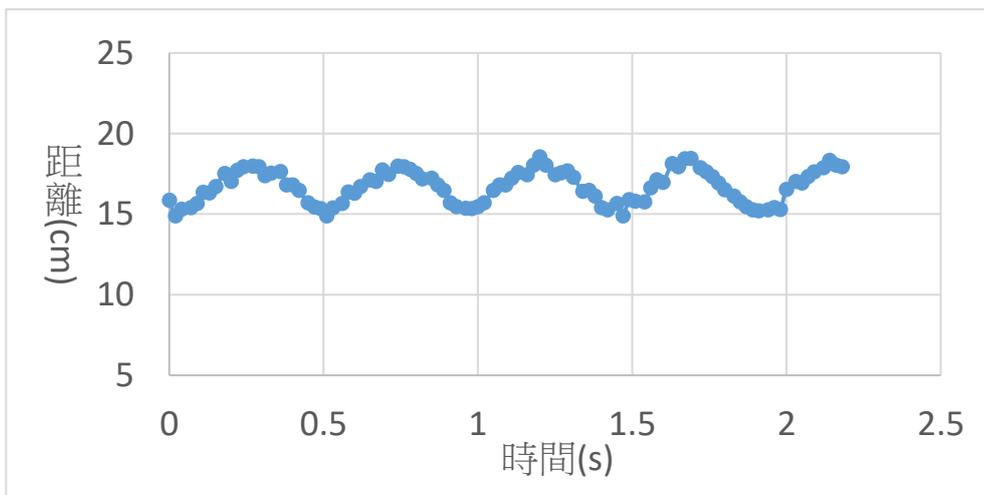


圖 21：桿長 45 cm 時間振幅波形

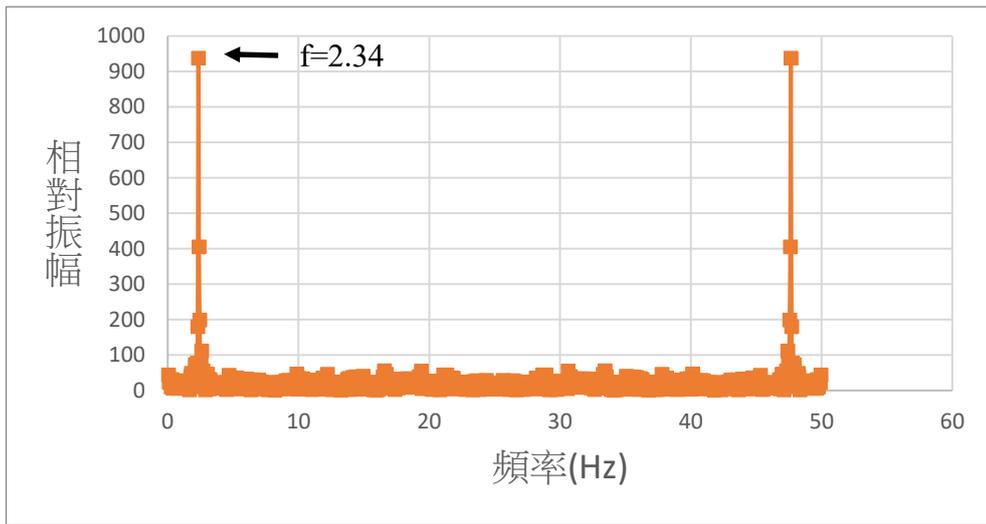


圖 22：桿長 45 cm 傅立葉分析頻

表 1：固定風速 3.7 m/s、玻璃纖維阻體口徑 16 cm，桿長、振幅、頻率關係

桿長 (cm)	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
振幅 (cm)	0.19	0.29	0.44	4.99	0.38	0.26	0.18	0.26	0.26	0.26	0.24	0.26
頻率 (Hz)	振動 太小	振動 太小	3.76	2.69	2.34	2.02	振動 太小	1.54	1.39	1.25	1.09	0.96

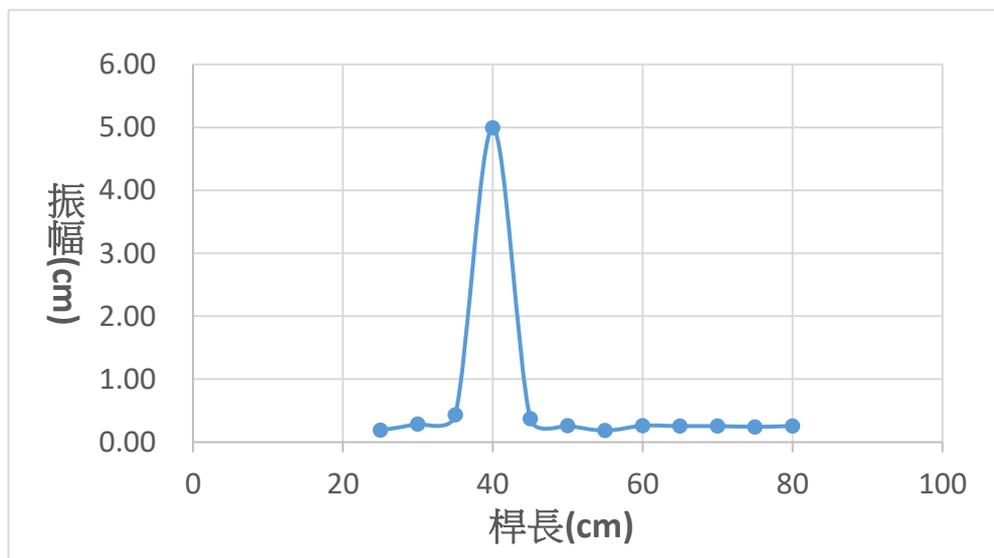


圖 23：振動阻體桿長與振幅關係

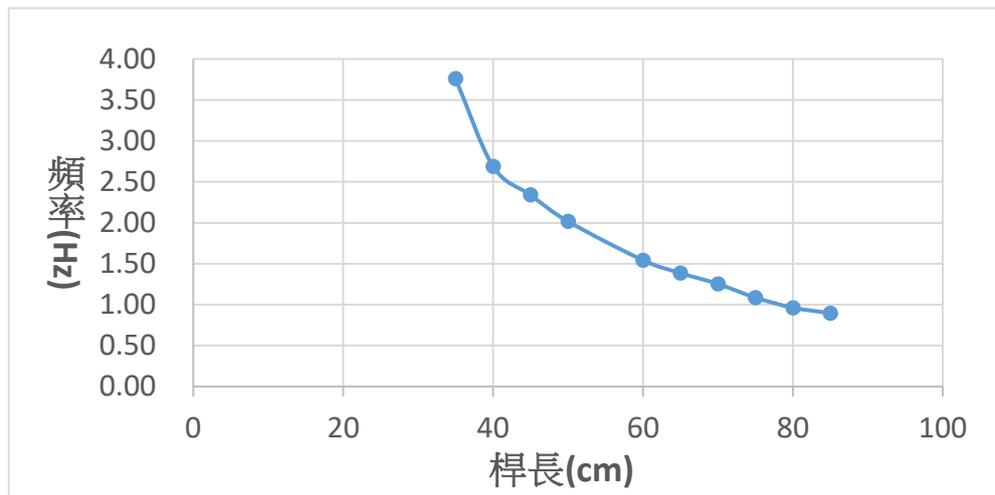


圖 24：振動阻體桿長與頻率關係

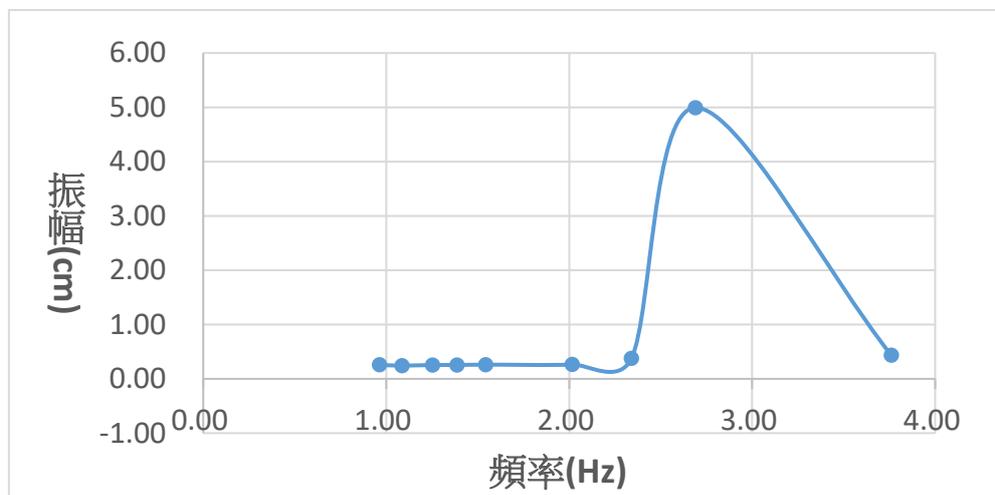


圖 25：振動頻率與振幅關係圖

●說明與推論：

(一)由圖 17 到圖 22 比較了桿長 35、40、45 cm 的振動波形與頻譜圖，可發現桿長 40 cm 時振幅大而穩定，頻譜圖非常乾淨，僅含一種頻率。而相對的桿長 35、45 cm 其振幅小而凌亂，其頻譜圖也包含了許多不穩定的擾動。

(二)由圖 23 振動阻體桿長與振幅關係圖可發現只有在桿長 40 cm 時振幅特別大，這時候觀察到振動阻體的振動規律且大幅度而穩定，推論應該是發生共振。

(三)由圖 24 振動阻體桿長與頻率關係圖可發現桿長愈長振動頻率愈小，似

乎有成反比的趨勢。

(四)由圖 25 振動阻體頻率與振幅關係圖顯示只有在振動頻率 2.69 Hz(桿長 40 cm 時)時振幅特別大。意味著某振動體的自然頻率與卡門渦街頻率產生了共振現象。

二、探究不同玻璃纖維桿阻體的口徑對共振現象的影響

固定風速 3.7 m/s，改變振動阻體口徑分別為 15、16、17.7、22.1 cm，依前項實驗方法分析了每一種口徑振動阻體在各種桿長之下其振幅與頻率的分布如下：

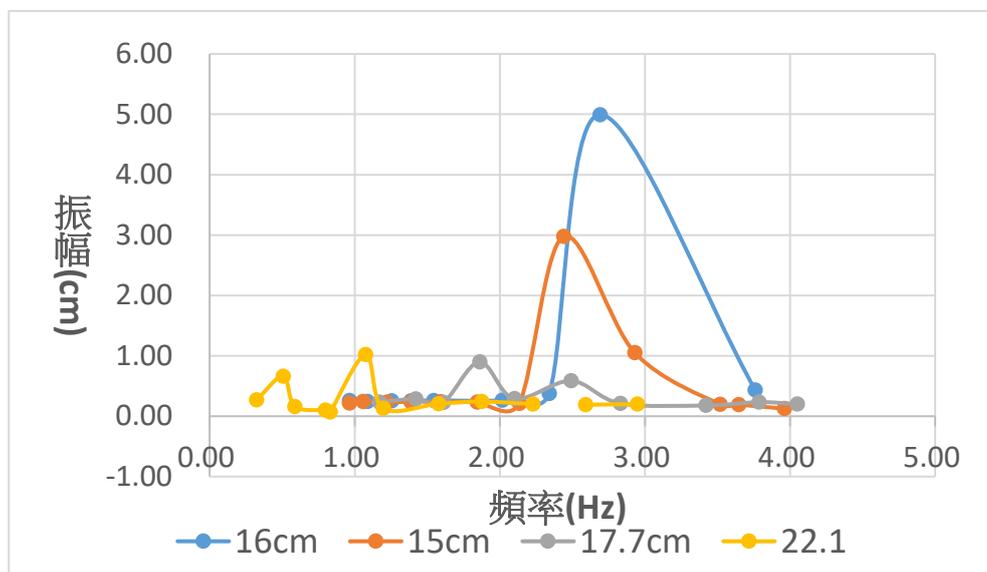


圖 26：不同玻璃纖維桿阻體口徑對頻率與振幅關係圖

●說明與推論：

(一)圖 26 顯示不同口徑的阻體產生最大振幅的頻率都不相同，而且有口徑愈大頻率愈小的趨勢，有近似卡門渦街頻率與阻體口徑成反比的現象。但是因各阻體重量不同、長度不同及形狀也不盡相同，故難以逕下定論。

(二)圖 26 也顯示阻體口徑較大的 17.7 及 22.1 cm 雖然受風面積大，相對的阻力也大，故振幅沒有口徑小的來得好。

三、探究不同風速對玻璃纖維桿阻體共振現象的影響

振動阻體口徑 15 cm，改變不同的風速分別為 1.1、2.4、3.7 m/s 依第一項實驗方法分析了每一種風速振動阻體在各種桿長之下其振幅與頻率分布如下：

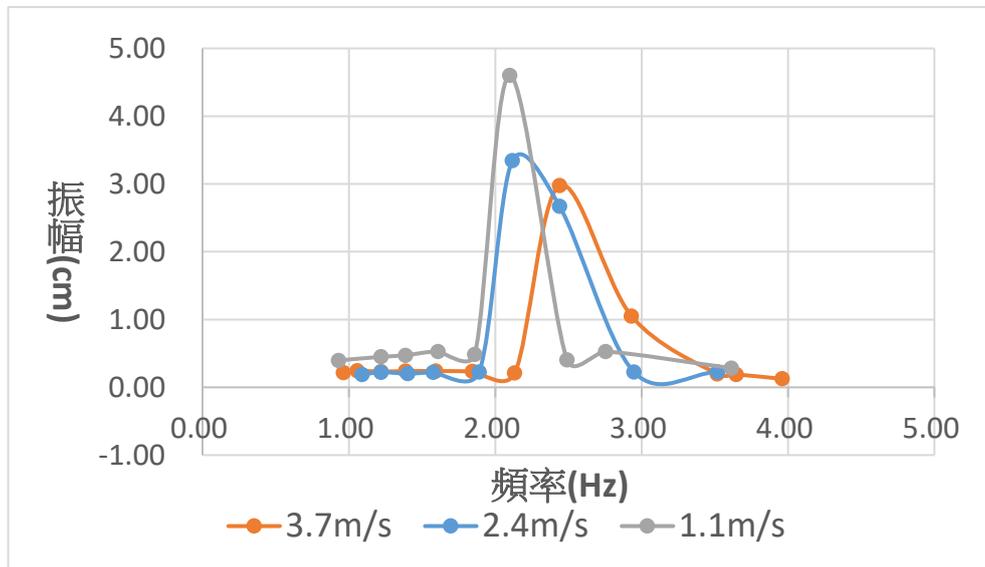


圖 27：不同風速下，玻璃纖維桿阻體振動頻率與振幅關

●說明與推論：

- (一)圖 27 顯示風速愈小振動阻體達最大振幅的頻率愈小。
- (二)圖 27 更顯示風速小不必然振幅就小，更可顯現共振的效應多可觀。

四、探究利用彈簧製作的阻體因卡門渦街引起的共振現象

利用彈簧製作振動阻體，改變不同風速：3.7、3、2.7、2.4、1 m/s，使用 Tracker 軟體，測量振幅時跟頻率，結果如下表 2：

表 2：不同風速下，彈簧阻體的振幅、頻率關係

風速 (m/s)	3.7	3	2.7	2.4	1
振幅 (cm)	9.3	9.48	7.85	4.79	振動太小
頻率 (Hz)	2.49	2.51	2.48	2.52	振動太小

●說明與推論：

(一)為了考量發電需要更大的振幅，所以嘗試將玻璃纖維桿改成彈簧，搭配有最好振幅的 16 cm 阻體，在風速 3 m/s 下，彈簧阻體可得到最大振幅 9.48 cm，比玻璃纖維桿的最大 4.99 cm 來的大很多，頻率則是比玻璃纖維桿阻體 (2.69 Hz)測到的小。

(二)除了在風速 1 m/s 振幅過小外，風速在 3.7、3、2.7、2.4m/s 下，所測到的彈簧阻體頻率都很相近，可以發現阻體振動頻率與風速幾乎無關，也意味著阻體依其自然頻率振動，風力只是助長它振動而已並不改變其振動頻率。

五、觀察兩個彈簧振動阻體前後擺放振動情況

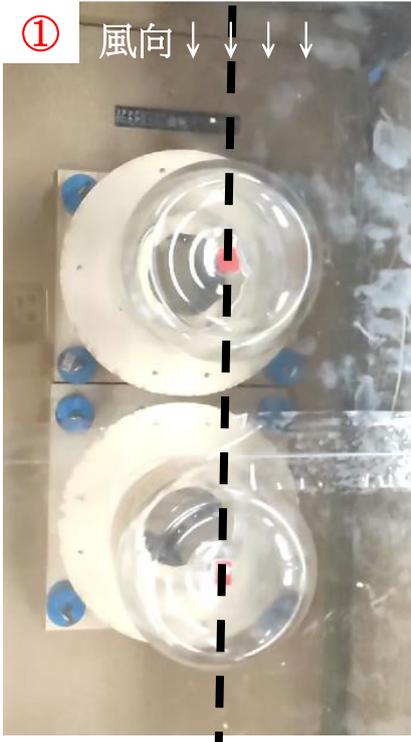
在風速3 m/s 下，兩個彈簧振動阻體前後擺放振幅與頻率如表3、振動情況如下圖28。

表 3：前後擺放彈簧振動阻體的振幅、頻率關係

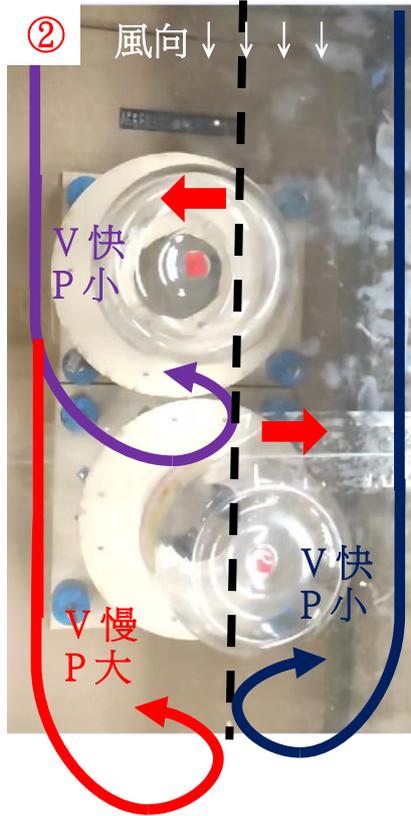
兩個彈簧阻體相距離 10 cm		
	前彈簧振動阻體	後彈簧振動阻體
振幅(cm)	9.4	9.48
頻率(Hz)	2.49	2.51
兩個彈簧阻體相距離15 cm		
	前彈簧振動阻體	後彈簧振動阻體
振幅(cm)	5.8	1.8
頻率(Hz)	2.51	2.53

V=風速、P=壓力

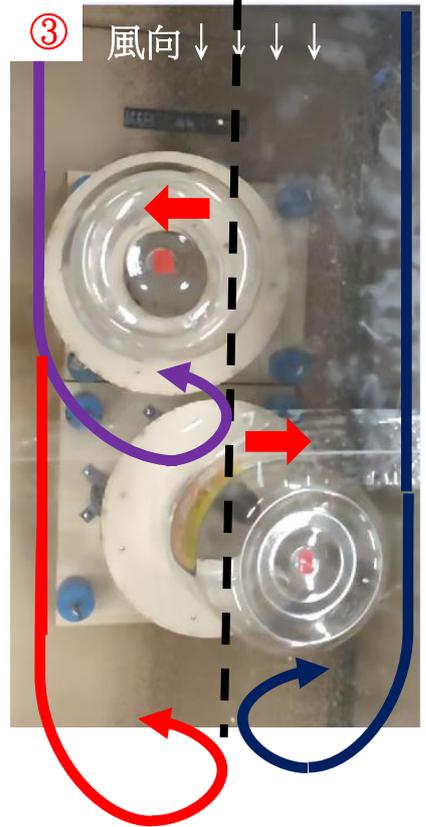
① 風向 ↓ ↓ ↓ ↓



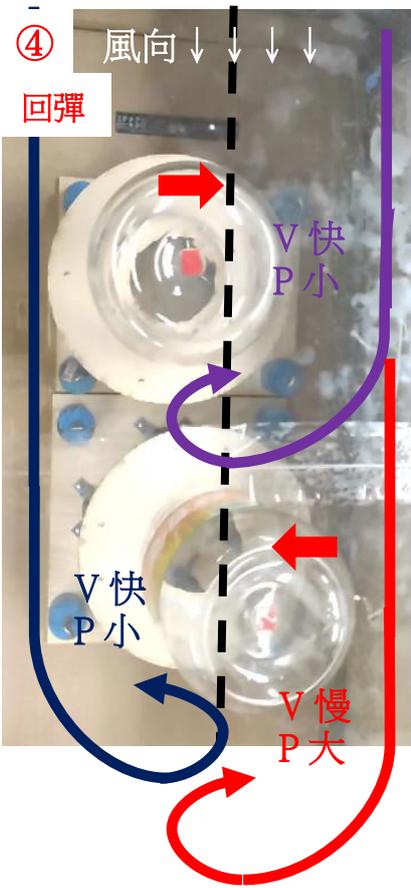
② 風向 ↓ ↓ ↓ ↓



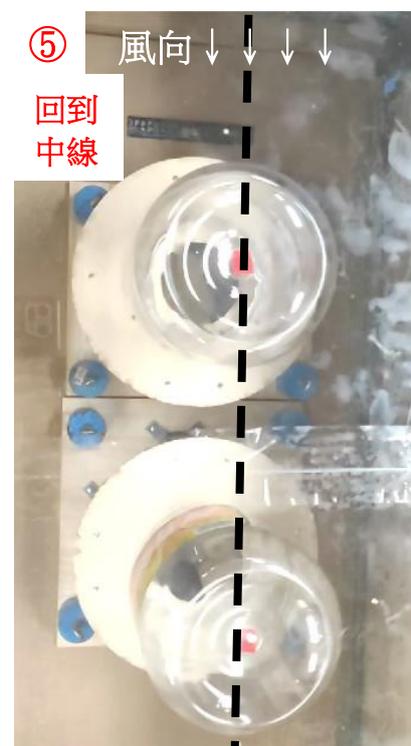
③ 風向 ↓ ↓ ↓ ↓



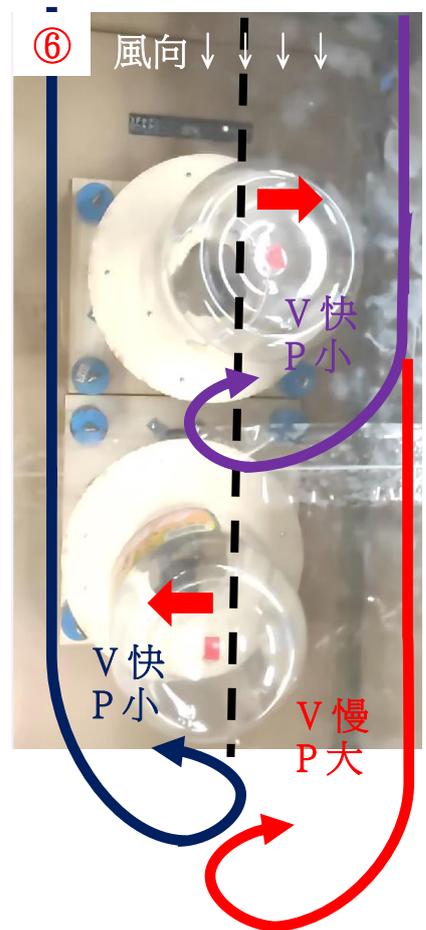
④ 風向 ↓ ↓ ↓ ↓



⑤ 風向 ↓ ↓ ↓ ↓



⑥ 風向 ↓ ↓ ↓ ↓



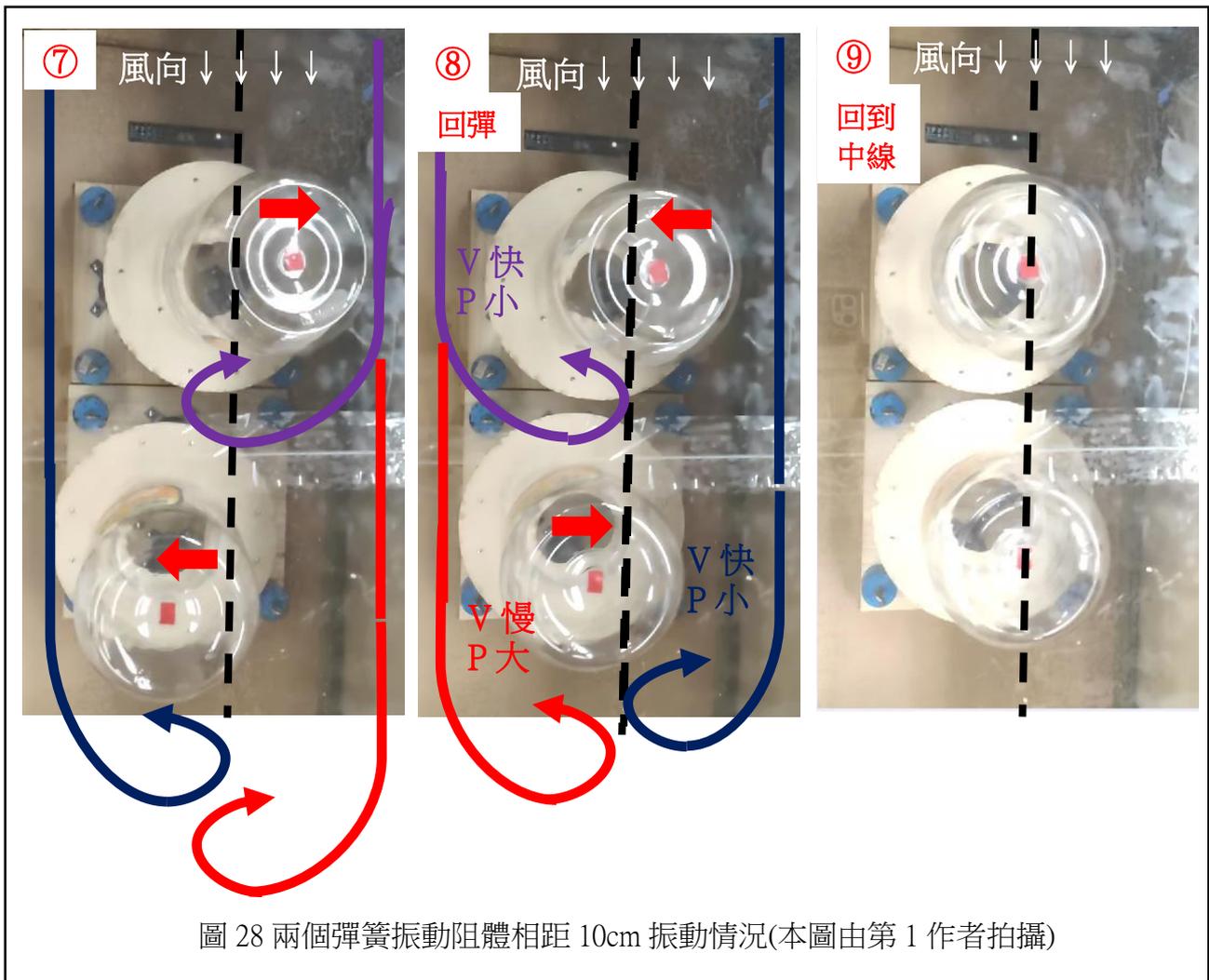


圖 28 兩個彈簧振動阻體相距 10cm 振動情況(本圖由第 1 作者拍攝)

●說明與推論：

- (一)從表 3 可觀察到前後兩個彈簧阻體相距離為 10 cm 時，兩個彈簧阻體振幅跟頻率都相近，但兩個彈簧阻體相距離為 15 cm 時，振幅不一樣，但頻率為相近，推測兩個阻體相距的距離，會影響到渦街氣流的流動。
- (二)從圖 28 可觀察到，在兩個彈簧阻體相距離為 10 cm 時，前後兩個彈簧阻體的振動並非單純左右振動，而是接近扁平橢圓形來振動，也觀察到兩個彈簧阻體進行相反方向交錯擺動，符合卡門渦街現象:阻流體下游的兩側，會產生兩道非對稱地排列的旋渦，其中一側的旋渦循時針方向轉動，另一旋渦則反方向旋轉，這兩排旋渦相互交錯排列。在兩個彈簧阻體相距離為 15 cm 時，兩個彈簧阻體則無進行相反方向交叉振動。

六、探究不同彈簧長度對彈簧阻體振現象的影響

在風洞下，三種彈簧長度:19.7、16.5、13.3 cm，改變不同風速：3.7、3、2.7、2.4、1 m/s，使用 Tracker 軟體，測量振幅時跟頻率，結果如下表4：

表 4：三種彈簧長度，彈簧振動阻體的振幅、頻率

彈簧 長度	風速 (m/s)	3.7	3	2.7	2.4	1
	19.7 cm	振幅(cm)	9.3	9.48	7.85	4.79
頻率(Hz)		2.49	2.51	2.48	2.52	-
16.5 cm	振幅(cm)	5.35	2.68	-	-	-
	頻率(Hz)	3.94	3.9	-	-	-
13.3 cm	振幅(cm)	-	-	-	-	-
	頻率(Hz)	-	-	-	-	-

-：(振動太小)

●說明與推論：

(一)彈簧長度 13.3 cm 因振動太小，無法比較。比較彈簧 19.7、16.5 cm，

在風速 3.7、3 m/s 下，當長度變短後，振幅變小、頻率變大。

(二)從彈簧 16.5 cm 的結果，推測因為自然頻率大，如果要有更大的振幅，就需要有更強的風。

(三)依照彈簧 19.7、16.5 cm 的比較結果，推測彈簧長度 13.3 cm 的自然頻率會更大，但因為我們的風速最高只到 3.7m/s，所以無法造成有效的振動。

七、探討利用共振現象用來發電的可行性

(一)在不同風速下，紀錄三種彈簧阻體 5 秒內測得平均電壓與電流，並計算出功率，且利用 Tracker 軟體，測量振幅時跟頻率，三種彈簧長度，不同風速下的功率如下圖 29~31、振幅、頻率關係如表 5。

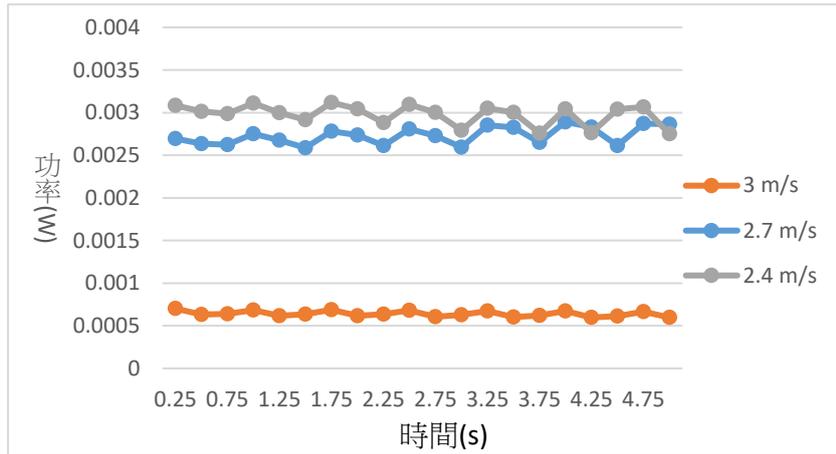


圖 29 彈簧 19.7 cm、不同風速下的功率

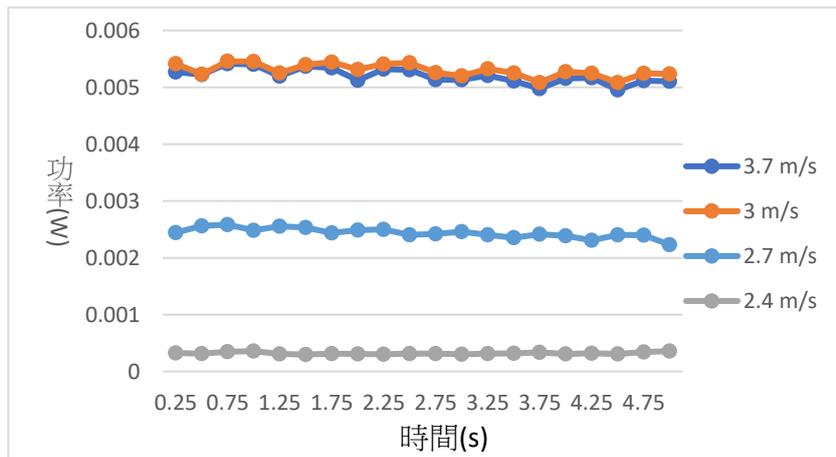


圖 30 彈簧 16.5 cm、不同風速下的功率

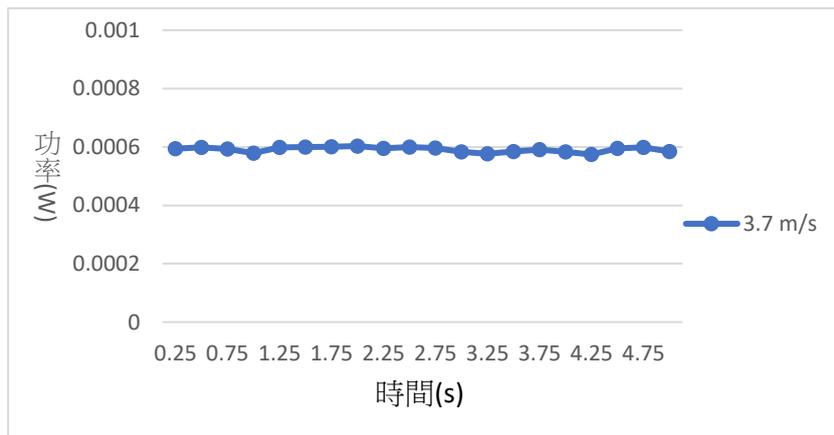


圖 31 彈簧 13.3 cm、不同風速下的功率

表 5：三種彈簧長度，彈簧振動阻體+發電裝置的振幅、頻率關係

彈簧長度 19.7 cm	風速 (m/s)	3.7	3	2.7	2.4	1
	振幅(cm)	-	4.65	8.57	9.47	-
	頻率(Hz)	-	2.004	1.9941	1.988	-
彈簧長度 16.5 cm	振幅(cm)	10.67	11.075	8.075	1.79	-
	頻率(Hz)	2.6525	2.6244	2.6932	2.7041	-
彈簧長度 13.3 cm	振幅(cm)	4.118	-	-	-	-
	頻率(Hz)	3.3444	-	-	-	-

-：(振動太小)

●說明與推論：

- 1.比較彈簧19.7、16.5、13.3cm 發電數據，最佳功率是在彈簧16.5 cm、風速 3 m/s 下，功率為 5.3 ± 0.11 mW。
- 2.在彈簧19.7、16.5 cm 發電數據中，兩組頻率都比未加發電裝置的頻率小，推測是因為發電裝置的重量，降低了彈簧阻體的自然頻率。
3. 在彈簧 13.3 cm 發電數據中，原來未加裝發電裝置，因為振動太小，無法測到數據，加裝發電裝置後，可測到其自然頻率，比 19.7、16.5 cm 都來的大，與先前推測結果相似，但要得到更好的振幅，就可能需要更大的風。

(二)將觀察到兩個交錯擺動 19.7 cm 彈簧阻體，串聯跟並聯，紀錄彈簧阻體 5 秒內測得電壓與電流，並計算出功率，如下圖 32~33。

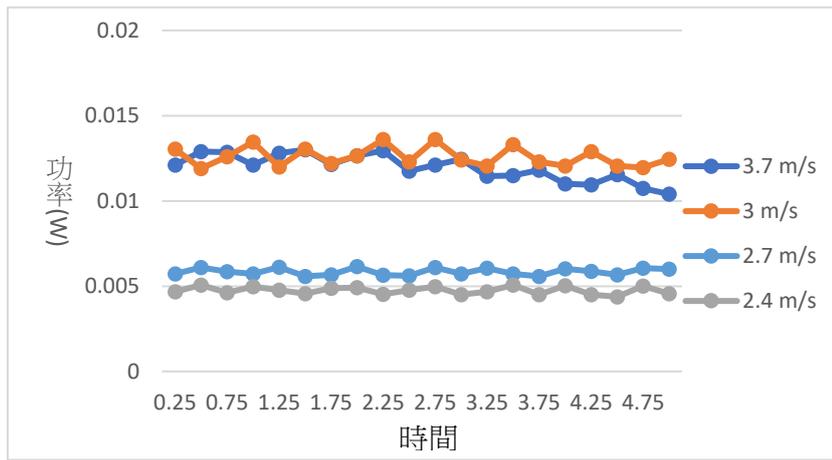


圖 32 兩個彈簧長 19.7 cm 彈簧阻體串聯、不同風速下的功率

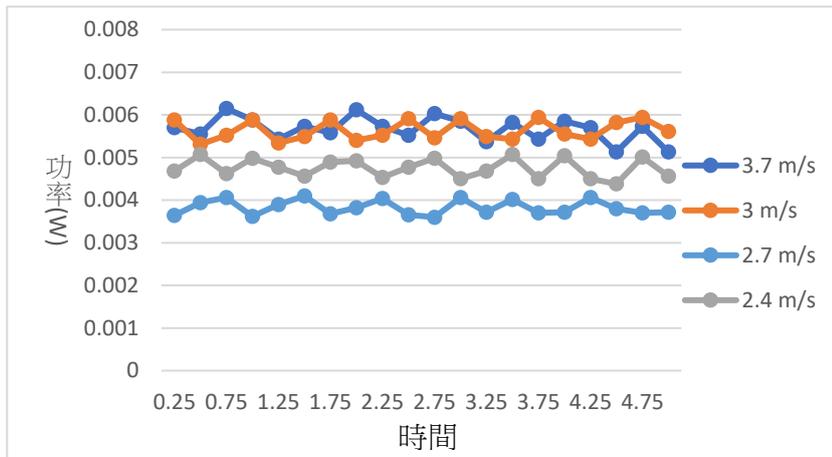


圖 33 兩個彈簧長 19.7 cm 彈簧阻體並聯、不同風速下的功率

●說明與推論：

- 1.比較彈簧 19.7 cm 阻體串聯與併聯發電數據，最佳功率是在風速 3 m/s 下利用串聯，功率為 12.5 ± 0.5 mW。
- 2.比較彈簧 19.7cm 兩個彈簧阻體跟一個彈簧阻體的發電數據，一個最佳功率是在風速 2.4m/s 下，功率為 2.9 ± 0.12 mW，而兩個彈簧阻體串聯，功率增加約 4.3 倍，交流電的串聯並聯本來就比直流電相對複雜，但得到發電結果相對不錯。
- 3.彈簧 19.7 cm 彈簧阻體一個最佳功率是在風速 2.4 m/s 下，跟兩個彈簧阻體最佳功率在風速 3 m/s 不同，但跟之前沒加裝發電裝置，觀察到交錯擺動的風速相同，推測是因為兩個彈簧阻體產生渦街現象，會相

互影響所導致。

伍、討論

一、本實驗使用了兩種不同的方式製作阻體，玻璃纖維桿和彈簧，當初考量如果要有較好的發電量，需要有比較大的振幅，實驗中玻璃纖維桿最大振幅為 4.99 cm，實驗中彈簧最大振幅為 9.48 cm，玻璃纖維桿因發電裝置設計問題，無法偵測電流計算功率，但也偵測了空載電壓，可得到 0.719 ± 0.27 V，彈簧則是可得到 1.766 ± 0.037 V，所以越大振幅，發電越好。

二、在實驗目的(二)探究不同玻璃纖維桿阻體的口徑對共振現象的影響，各口徑的圓桶在風速 3.7m/s 下，理論渦街頻率(參考資料(一) $f=StV/d$)與實測得最大振幅之頻率比較如下表 6：

表 6 相同風速下，不同圓桶直徑，實測得最大振幅之頻率

圓桶直徑(cm)	風速(m/s)	理論渦街頻率(Hz)	實測得最大振幅之頻率(Hz)
15 (玻璃纖維桿)	3.7	4.93	2.44
16 (玻璃纖維桿)	3.7	4.63	2.69
16 (彈簧阻體)	3.7	4.63	2.49
17.7	3.7	4.18	1.86
22.1	3.7	3.35	1.08

口徑 15、16cm 的數據顯示最大振幅時振幅相當大且穩定，其振動頻率頻譜圖也顯示相當單純，故判斷應達到共振狀態，所以是渦街頻率理論公式需考慮其他條件，還是其他因素需進一步探討，值得進一步研究。

三、探究不同風速對玻璃纖維桿阻體共振現象的影響，我們也將不同風速下各桿長的振動頻率作成關係圖如圖 34，圖中是三種不同風速下，在各種桿長下一一測得振動頻率，可以發現阻體振動頻率與風速幾乎無關。在由彈簧製作的阻體，也有相似的關係，阻體振動

頻率與風速幾乎無關，也意味著阻體依其自然頻率振動，風力只是助長它振動而已並不改變其振動頻率。

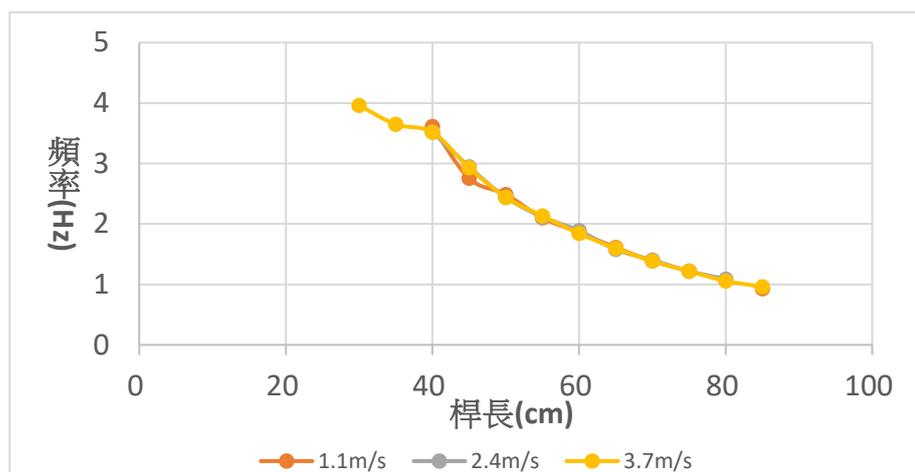


圖 34 不同風速下，玻璃纖維桿阻體桿長與頻率關係圖

四、實驗目的(五)探討利用共振現象用來發電的可行性探究中，利用彈簧阻體加上發電裝置，最後採用左右各三個強力磁鐵。雖然磁鐵越多，可得到越大的發電電壓，實測單邊使用八個強力磁鐵，可得到平均 2V 以上的發電電壓，但接了電阻後，發現線圈會產生磁場導致八個磁鐵振幅變的小很多，最後採用左右各三個強力磁鐵，雖然電壓沒有八個好，但可同時測到電壓跟電流，換算功率後各三顆也比其他顆數的磁鐵都來的好。如果想要達到更好的功率，可能需要思考更適合的發電機制。

五、本研究都在風洞內進行實驗，如果未來要實體化，需要考慮在一般環境中，風向、風速是會改變的。風向部分，目前市面上已有風向儀可支援樹梅派或 Arduino，可搭配旋轉底座來朝向迎風面。風速部分，可能要先計算當地平均風速，選擇適合彈簧長度，或利用重量，改變適合振動頻率，來搭配適合的風速。

陸、結論

一、本研究利用玻璃纖維桿及彈簧製作阻體，在風洞中觀察到卡門渦街造成振動阻體共振的現象，而阻體振動頻率與風速幾乎無關，也意味著阻體依其自然頻率振動，風力只是助長它振動而已並不改變其振動頻率。也觀察到前後擺放兩個振動阻體，振動阻體因卡門渦街，有交錯擺動的現象。

二、我們利用可產生最大振幅，口徑 16 cm 的彈簧阻體來製作發電裝置，在風速 3 m/s、彈

簧長 16.5 cm 下，可得到最佳功率為 5.3 ± 0.11 mW。將前後擺放兩個振動阻體串聯，在風速 3 m/s、彈簧長 19.7 cm 下，可得到最佳功率為 12.5 ± 0.5 mW

三、利用振動阻體應用於風力發電，目前發電功率雖然不大，但結構簡單成本低，所以仍值得進一步研究提升效率。

柒、參考資料

一、維基百科。卡門渦街。

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%8D%A1%E9%97%A8%E6%B6%A1%E8%A1%97>

二、劉邦彥，追風逐電-無扇葉型風力發電機，第 56 屆中小學科學展覽會作品說明書。

三、黃奕安，探討卡門渦街現象及渦激振動，新北市 111 學年度中小學科學展覽會作品說明書。

四、維基百科。傅立葉轉換。

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%82%85%E9%87%8C%E5%8F%B6%E5%8F%98%E6%8D%A2>

五、郭耀嶸，追風逐電-無扇葉型風力發電機，2022年臺灣國際科學展覽會。

六、陳子安，花飛蝶舞－探討蝴蝶拍翅渦流與升力之關係，第50屆中小學科學展覽會作品說明書。

七、蔡旻岑，流動「生」力－平面溝紋對氣流升力及渦流形成探討，第58屆中小學科學展覽會作品說明書。

八、劉詠豐，不離不棄的保麗龍箱-模擬高速行駛下小貨車後斗空氣流動的變化及應用，第61屆中小學科學展覽會作品說明書。

九、邱姿穎，秤秤有磁，第48屆中小學科學展覽會作品說明書。

十、邱子宸，週期性變化磁場對複合磁體磁浮特性的影響，第61屆中小學科學展覽會作品說明書。

附錄

1、監測振幅及頻率的arduino程式碼

```
#define TRIGPIN 9
#define ECHOPIN 8
//發送脈衝
float ping()
{
    digitalWrite(TRIGPIN, LOW);
    delayMicroseconds(5);
    digitalWrite(TRIGPIN, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(TRIGPIN, LOW);
    return (float)pulseIn(ECHOPIN, HIGH)/29/2;
}
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    pinMode(TRIGPIN, OUTPUT);
    pinMode(ECHOPIN, INPUT);
}
void loop() {
    float cm;
    float ttt;
    float starttime;
    digitalWrite(6, LOW);
    if(digitalRead(7)==LOW){
        starttime = millis();
        ttt=(millis()-starttime)/1000;
        digitalWrite(6, HIGH);
        while(ttt<=10){
            ttt=(millis()-starttime)/1000;
            cm = ping();
            Serial.print(ttt);
            Serial.print(", ");
            Serial.println(cm);
            delay(20);
        }
        digitalWrite(6, LOW);
    }
    delay(20);
}
```

【評語】 030118

本作品是研究卡門渦街現象並希望利用阻體振動發電。學生在教室裡裝設出一個很大型的風洞，且可以產生到 3.7m/s 的氣流，令人印象深刻。建議可以利用線香等方法，進一步觀察內部氣流流動的狀況。學生改變各種參數，討論振動頻率、振幅、發電功率等，建議也在相同的條件下，使用體積大小與阻體相近的風扇發電，比較兩者的功率大小，並建議找出目前實驗裝置發電功率偏低的原因，並提出改良方向。

作品簡報

風起「渦」湧～

卡門渦街現象與風力發電

摘要

本研究在風洞中觀察到卡門渦街造成振動阻體共振的現象，了解到振動阻體口徑、風速大小影響卡門渦街頻率，而振動阻體的自然頻率與渦街頻率在特定條件下發生共振，也觀察到前後擺放兩個振動阻體，振動阻體因卡門渦街，有交錯擺動的現象。我們利用可產生最大振幅，口徑16 cm的彈簧阻體來製作發電裝置，在風速3 m/s、彈簧長16.5 cm下，可得到最佳功率為 5.3 ± 0.11 mW。將前後擺放兩個振動阻體會相互影響，將其串聯，在風速3 m/s、彈簧長19.7 cm下，可得到最佳功率為 12.5 ± 0.5 mW。未來期望多加以改進並實際運用到生活中。

壹、前言

一、研究動機

這幾年，台灣致力於風力發電的建設，逐漸提升綠能占比。傳統的風力發電機用地大、噪音大、對生態影響也較嚴重。近年來研發出的無扇葉風力發電機，雖然單支發電效率較低，但可廣設於任何地方，既沒有噪音紛擾且較不會影響生態，維修也較不頻繁，相信經過不斷改良，未來無扇葉風力發電於綠能產業將佔有一席之地，我們也因此往這方面研究。

二、研究目的

- (一)在風洞中觀察玻璃纖維桿阻體因卡門渦街引起的共振現象。
- (二)探究不同口徑的玻璃纖維桿阻體對共振現象的影響。
- (三)探究不同風速對玻璃纖維桿阻體共振現象的影響。
- (四)探究利用彈簧製作的阻體因卡門渦街引起的共振現象。
- (五)探究不同彈簧長度對彈簧阻體振現象的影響。
- (六)探討利用共振現象用來發電的可行性。

三、文獻探討

卡門渦街，即卡門渦、卡門渦流是一個空氣動力學術語，指流體中安置的阻流體，在特定條件下會出現不穩定的邊界層分離，阻流體下游的兩側，會產生兩道非對稱地排列的旋渦，其中一側的旋渦循時針方向轉動，另一旋渦則反方向旋轉，這兩排旋渦相互交錯排列，各個旋渦和對面兩個旋渦的中間點對齊，如街道兩邊的街燈一般，故名渦街。

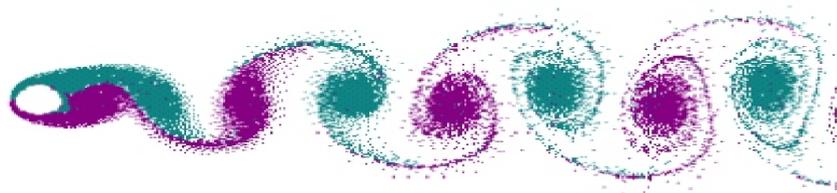


圖1：卡門渦街示意圖(本圖源自維基百科)

$$f = StV/d$$

其中：f=卡門渦街頻率、St=斯特勞哈爾數 (~0.2)

其中：f=卡門渦街頻率、St=斯特勞哈爾數 (~0.2)

貳、研究設備及器材

一、製作風洞

角鋼約20公尺、紙板、透明壓克力板、35公分PVC管約600條、電風扇、風速計、熱熔膠、矽利康、電壓調節器。

二、製作振動阻體

塑膠圓筒、玻璃纖維桿、木板、木塊、Arduino UNO開發板、超音波測距模組、麵包版、開關、LED燈、電阻、電線、雷切機、彈簧(19.7 cm、16.5 cm、13.3 cm)。

三、利用Arduino UNO開發板製作監測振幅及頻率儀器

線圈、電壓電流計、三用電表、3D列印機印製線圈框、釹磁鐵、碼表、電阻。

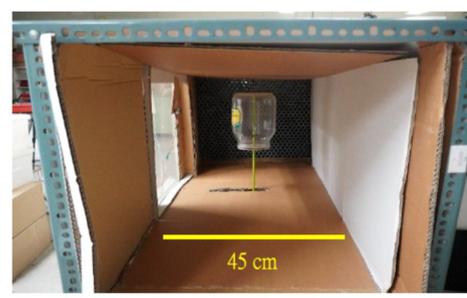
參、研究過程與方法

一、實驗架構



二、製作研究裝置

(一)製作風洞、(二)製作振動阻體、(三)利用Arduino UNO開發板製作監測振幅及頻率儀器、(四)風洞完成品



圖二 風洞及振動阻體實際組裝圖(照片由第1作者拍攝)

肆、研究結果

一、在風洞中觀察玻璃纖維桿阻體因卡門渦街引起的共振現象

固定風速3.7 m/s、振動阻體口徑16 cm，利用超音波測距儀每0.02秒紀錄振動阻體距離觀測窗的距離。

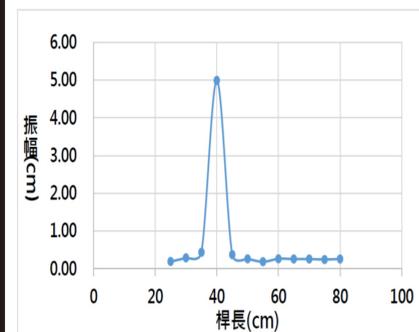


圖3：振動阻體桿長與振幅關係圖

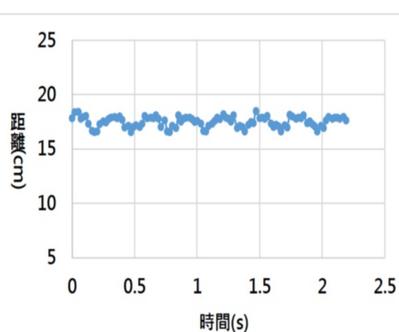


圖4：桿長35 cm時間振幅波形圖

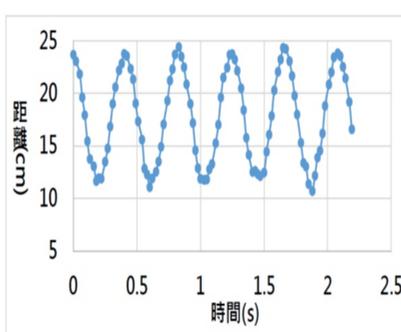


圖5：桿長40 cm時間振幅波形圖

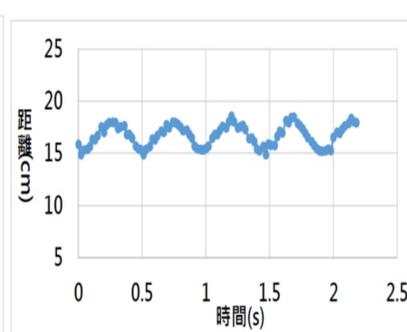


圖6：桿長45 cm時間振幅波形圖

每0.02秒紀錄振動阻體距離觀測窗的距離，連續紀錄30秒，其中前1024個距離資料經傅立葉轉換呈現如圖7~9，左邊的峰值即是振動阻體的振動頻率。

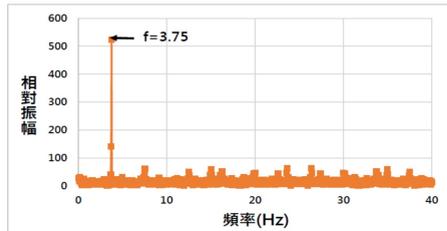


圖7：桿長35 cm傅立葉分析頻譜圖

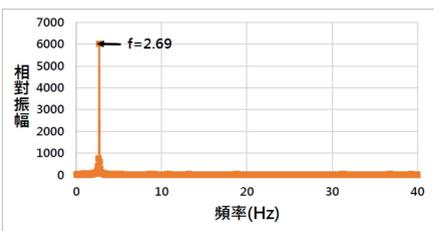


圖8：桿長40 cm傅立葉分析頻譜圖

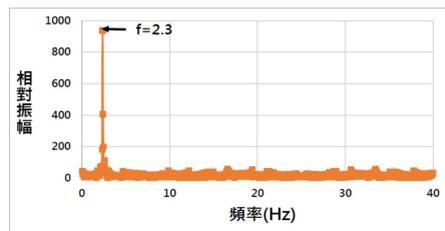


圖9：桿長45 cm傅立葉分析頻譜圖

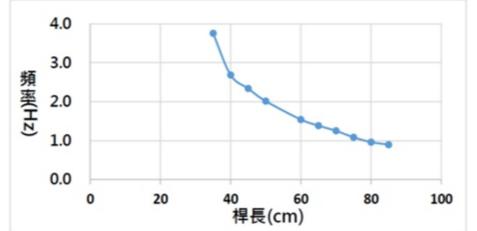


圖10：振動阻體桿長與頻率關係圖

●說明與推論：(一)桿長40 cm時振幅大而穩定，頻譜圖非常乾淨，僅含一種頻率。(二)可發現桿長愈長振動頻率愈小，似乎有成反比的趨勢。

二、探究不同口徑的玻璃纖維桿阻體對共振現象的影響

固定風速3.7 m/s，改變不同振動阻體口徑，依前項實驗方法分析了每一種口徑振動阻體在各種桿長之下其振幅與頻率的分布如圖11

●說明與推論：

不同口徑的阻體產生最大振幅的頻率都不相同，而且有口徑愈大頻率愈小的趨勢，有近似卡門渦街頻率與阻體口徑成反比的現象。

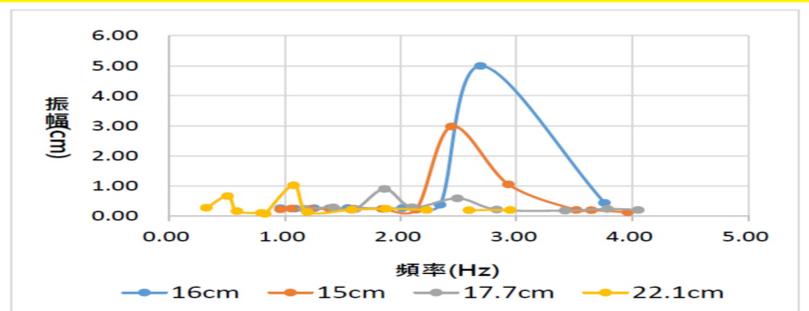


圖11：不同玻璃纖維桿阻體口徑對頻率與振幅關係圖

三、探究不同風速對玻璃纖維桿阻體共振現象的影響

振動阻體口徑15 cm，改變不同的風速依第一項實驗方法分析了每一種風速振動阻體在各種桿長之下其振幅與頻率的分布如圖12：

●說明與推論：

圖12顯示風速愈小振動阻體達最大振幅的頻率愈小。

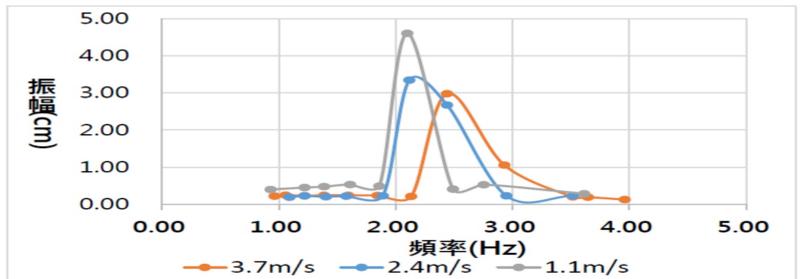


圖12：不同風速下，玻璃纖維桿阻體振動頻率與振幅關係圖

四、探究利用彈簧製作的阻體因卡門渦街引起的共振現象

利用彈簧製作振動阻體，改變不同風速，使用Tracker軟體，測量振幅時跟頻率，結果如下表1：

表1：不同風速下，彈簧阻體的振幅、頻率關係

風速(m/s)	3.7	3	2.7	2.4	1
振幅(cm)	9.3	9.48	7.85	4.79	振動太小
頻率(Hz)	2.49	2.51	2.48	2.52	振動太小

●說明與推論：

(一)為了考量發電需要更大的振幅，所以嘗試將玻璃纖維桿改成彈簧，搭配有最好振幅的16 cm阻體，在風速3 m/s下，彈簧阻體可得到最大振幅9.48 cm，比玻璃纖維桿的最大4.99 cm來的大很多。

(二)在不同風速下，所測到的彈簧阻體頻率都很相近，可以發現阻體振動頻率與風速幾乎無關，意味著阻體依其自然頻率振動，風力只是助長它振動而已並不改變其振動頻率。

五、觀察兩個彈簧振動阻體前後擺放振動情況

在風速3 m/s下，兩個彈簧振動阻體前後擺放振幅與頻率如表2、振動情況如下圖13。

V=風速、P=壓力

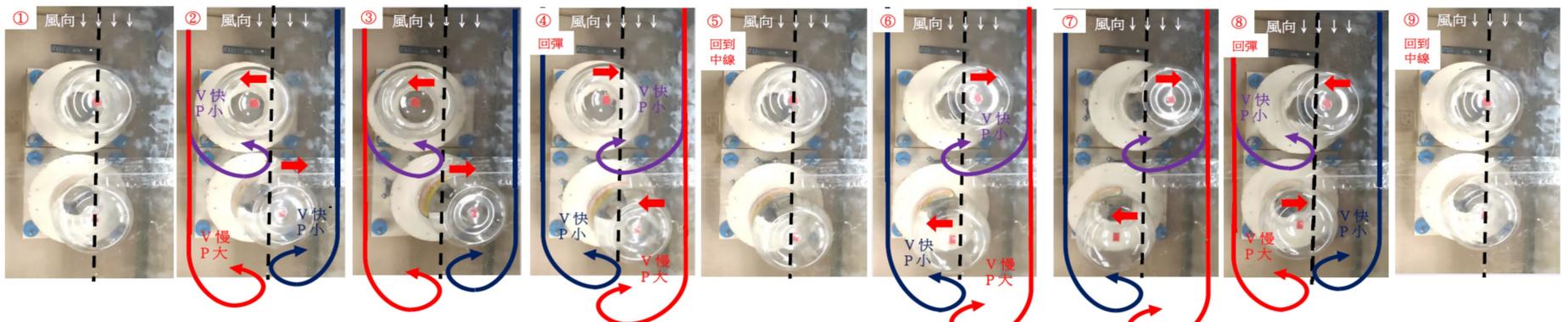


圖13：兩個彈簧振動阻體相距10cm振動情況(本圖由第1作者拍攝)

表2：前後擺放彈簧振動阻體的振幅、頻率關係

兩個彈簧阻體相距10 cm			兩個彈簧阻體相距15 cm		
	前彈簧振動阻體	後彈簧震動阻體		前彈簧震動阻體	後彈簧震動阻體
振幅(cm)	9.4	9.48	振幅(cm)	5.8	1.8
頻率(Hz)	2.49	2.51	頻率(Hz)	2.51	2.53

●說明與推論：

從圖13可觀察到，在兩個彈簧阻體相距為10 cm時，觀察到兩個彈簧阻體進行相反方向交錯擺動。在兩個彈簧阻體相距為15 cm時，兩個彈簧阻體則無進行相反方向交錯振動。推測兩個阻體相距的距離，會影響到渦街氣流的流動。

六、探究不同彈簧長度對彈簧阻體振現象的影響

在風洞下，三種彈簧長度:19.7、16.5、13.3 cm，改變不同風速：3.7、3、2.7、2.4、1 m/s，使用Tracker軟體，測量振幅時跟頻率，結果如表3：

●說明與推論：

(一)比較彈簧19.7、16.5 cm，在相同風速下，當彈簧長度變短，頻率變大。
(二)比較彈簧19.7、16.5 cm的結果，推測彈簧長度13.3 cm的自然頻率會更大，但因為我們的風速最高只到3.7m/s，所以無法造成有效的振動。

表3：三種彈簧長度，彈簧振動阻體的振幅、頻率

	風速(m/s)	3.7	3	2.7	2.4	1
彈簧長度 19.7 cm	振幅(cm)	9.3	9.48	7.85	4.79	-
	頻率(Hz)	2.49	2.51	2.48	2.52	-
彈簧長度 16.5 cm	振幅(cm)	5.35	2.68	-	-	-
	頻率(Hz)	3.94	3.9	-	-	-
彈簧長度 13.3 cm	振幅(cm)	-	-	-	-	-
	頻率(Hz)	-	-	-	-	-

-:振動太小

七、探討利用共振現象用來發電的可行性

(一)將玻璃纖維桿加上發電裝置，再接上電阻，想同時偵測電流與電阻來計算功率，電路圖如圖14，但卻發現在兩側的線圈也會產生磁場，導致整個玻璃纖維桿阻體無法正常振動，無法偵測電流，只好放棄此設計。

(二)將彈簧阻體加發電裝置，考量到之前玻璃纖維桿阻體的情況，這次將線圈設計在中央，中間架線徑為0.29 mm、900匝的線圈，線圈的左右兩側架厚度5 mm的強力磁鐵各三片，接上電阻，發電裝置如圖15。

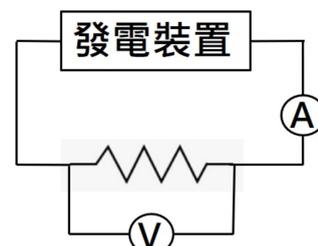


圖14：發電裝置電路圖

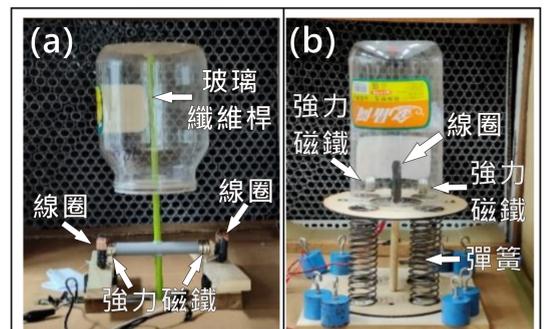


圖15：(a)玻璃纖維桿阻體與發電裝置 (b)彈簧阻體與發電裝置 (照片由第1作者拍攝)

利用電壓檢測計與三用電表讀取數值，紀錄5秒內測得電壓與電流，並計算功率，且利用Tracker軟體，測量振幅時跟頻率，三種彈簧長度，不同風速下的功率如圖16~17、振幅、頻率關係如表4。

表4：三種彈簧長度，彈簧振動阻體+發電裝置的振幅、頻率、功率關係

	風速(m/s)	3.7	3	2.7	2.4	1
彈簧長度 19.7 cm	振幅(cm)	-	4.65	8.57	9.47	-
	頻率(Hz)	-	2.004	1.994	1.988	-
	功率(mW)	-	0.64±0.03	2.73±0.1	2.97±0.12	-
彈簧長度 16.5 cm	振幅(cm)	10.67	11.075	8.075	1.79	-
	頻率(Hz)	2.6525	2.6244	2.6932	2.7041	-
	功率(mW)	4.85±0.17	5.3±0.11	2.43±0.08	0.32±0.01	-
彈簧長度 13.3 cm	振幅(cm)	4.118	-	-	-	-
	頻率(Hz)	3.3444	-	-	-	-
	功率(mW)	0.59±0.01	-	-	-	-

-:振動太小

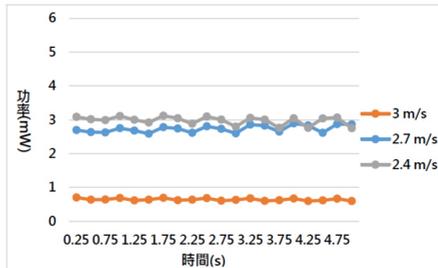


圖16 彈簧19.7 cm、不同風速下的功率

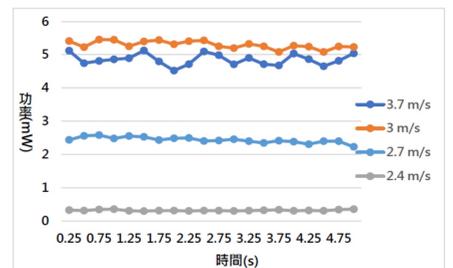


圖17 彈簧16.5 cm、不同風速下的功率

●說明與推論：

- 1.比較彈簧發電數據，最佳功率是在彈簧16.5 cm、風速3 m/s下，功率為5.3±0.11 mW。
- 2.在彈簧19.7、16.5 cm發電數據中，兩組頻率都比未加發電裝置的頻率小，推測是因為發電裝置的重量，降低了彈簧阻體的自然頻率。

(三)將觀察到兩個交錯擺動19.7 cm彈簧阻體，紀錄前、後彈簧阻體5秒內測得電壓與電流，並計算出功率，如表5。

表5 彈簧長19.7 cm，兩個前、後阻體，不同風速下的功率

風速(m/s)	3.7	3	2.7	2.4	1
前阻體 功率(mW)	5.02±0.22	5.51±0.24	2.84±0.09	2.51±0.13	振動太小
後阻體 功率(mW)	5.04±0.2	5.52±0.2	2.80±0.09	2.58±0.1	振動太小

●說明與推論：

- 1.比較彈簧19.7 cm，兩個前、後阻體，不同風速下發電數據，在風速3 m/s可得最佳功率。
- 2.與之前單個阻體比較，兩個阻體最佳功率比單個阻體好，另外單個阻體在風速3.7 m/s無法有效振動，在兩個阻體卻有不錯的振幅，推測是兩個阻體能互相交互影響。

(四)將觀察到兩個交錯擺動19.7 cm彈簧阻體，串聯跟並聯，記錄彈簧阻體5秒內測得電壓與電流，並計算出功率，電路圖如圖18~19、功率如表6。

表6 彈簧長19.7 cm，兩個前、後阻體串聯、並聯，不同風速下的功率

風速(m/s)	3.7	3	2.7	2.4	1
串聯 功率(mW)	11.27±0.71	12.59±0.57	5.85±0.2	4.75±0.22	振動太小
並聯 功率(mW)	5.67±0.28	5.63±0.22	3.82±0.17	4.11±0.12	振動太小

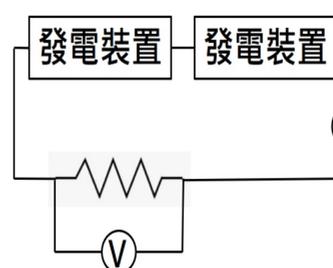


圖18 兩個彈簧阻體串聯電路圖

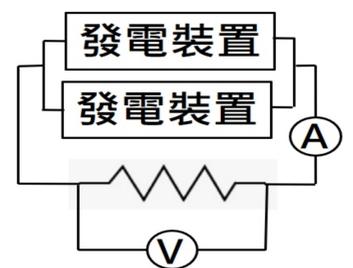


圖19 兩個彈簧阻體並聯電路圖

●說明與推論：

- 1.比較彈簧19.7 cm阻體串聯與並聯發電數據，最佳功率是在風速3 m/s下利用串聯，功率為12.5±0.57 mW。
- 2.比較彈簧19.7 cm兩個彈簧阻體跟一個彈簧阻體的發電數據，一個最佳功率為2.9±0.12 mW，而兩個彈簧阻體串聯，功率增加約4.3倍，交流電的串聯並聯本來就比直流電相對複雜，但得到發電結果相對不錯。

伍、討論

一、本實驗使用了玻璃纖維桿和彈簧製作阻體，考量要有較好的發電量，需要有比較大的振幅，實驗中玻璃纖維桿最大振幅為4.99 cm，彈簧最大振幅為9.48 cm，玻璃纖維桿因發電裝置設計問題，無法偵測電流計算功率，但也偵測了空載電壓，可得到0.719±0.27 V，彈簧則是可得到1.766±0.037 V，所以**振幅越大，功率越好**。

二、各口徑的圓桶在風速3.7 m/s下，理論渦街頻率

$f = StV/d$ 與實測得最大振幅之頻率比較如表7：

口徑15、16 cm的數據顯示當最大振幅時，振幅相當大且穩定，振動頻率頻譜圖也相當單純，故判斷應達共振，所以**渦街頻率理論公式是否需考慮其他條件，還是有其他因素需進一步探討**，值得進一步研究。

三、我們將不同風速下各桿長的振動頻率作成關係圖如圖20，圖中是三種不同風速下，在各種桿長下一測得振動頻率，可以發現阻體振動頻率與風速幾乎無關。在由彈簧製作的阻體，也有相似的關係，如圖21，不管風速如何，**阻體振動頻率與風速幾乎無關**，意味著**阻體依其自然頻率振動**，風力只是助長它振動而已並不改變其振動頻率。

表7 相同風速下，不同圓桶直徑，實測得最大振幅之頻率

圓桶直徑(cm)	風速(m/s)	理論渦街 頻率(Hz)	實測得最大振 幅之頻率(Hz)
15(玻璃纖維桿)	3.7	4.93	2.44
16(玻璃纖維桿)	3.7	4.63	2.69
16(彈簧阻體)	3.7	4.63	2.49
17.7	3.7	4.18	1.86
22.1	3.7	3.35	1.08

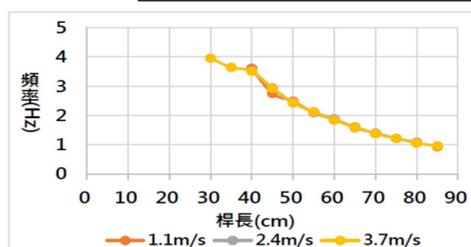


圖20 不同風速下，玻璃纖維桿阻體桿長與頻率關係圖

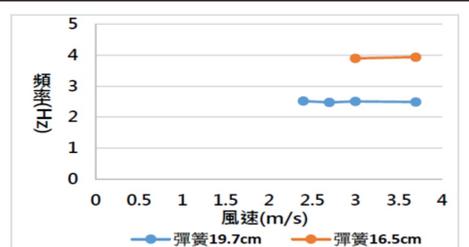


圖21 不同彈簧長度下，風速與頻率關係圖

四、我們利用彈簧阻體加上發電裝置，最後採用左右各三個強力磁鐵。雖然**磁鐵越多，可得到越大的發電電壓**，實測單邊使用八個強力磁鐵，可得到平均2V以上的發電電壓，但**接了電阻測電流，發現線圈會產生磁場**，導致八個磁鐵振幅變的小很多，最後採用左右各三個強力磁鐵，雖然電壓沒有八個好，但可同時測到電壓跟電流，換算功率後各三顆也比其他顆數的磁鐵都來的好。如果想要達到更好的功率，可能需要思考更適合的發電機制。

五、本研究都在風洞內進行實驗，如果未來要實體化，需要考慮在一般環境中，風向、風速是會改變的。風向部分，目前市面上已有風向儀可支援樹梅派或Arduino，可搭配旋轉底座來朝向迎風面。風速部分，可能要先計算當地平均風速，選擇適合彈簧長度，或利用重量，改變適合振動頻率，來搭配適合的風速。

陸、結論

一、本研究利用玻璃纖維桿及彈簧製作阻體，在風洞中觀察到卡門渦街造成振動阻體共振的現象，而阻體振動頻率與風速幾乎無關，也意味著**阻體依其自然頻率振動**，風力只是助長它振動而已並不改變其振動頻率。也觀察到**前後擺放兩個振動阻體，振動阻體因卡門渦街，有交錯擺動的現象**。

二、我們利用可產生最大振幅，口徑16 cm的彈簧阻體來製作發電裝置，在風速3 m/s、彈簧長16.5 cm下，可得到**最佳功率為5.3±0.11 mW**。將前後擺放兩個振動阻體會相互影響，將其串聯，在風速3 m/s、彈簧長19.7 cm下，可得到**最佳功率為12.5±0.5 mW**。

三、利用振動阻體應用於風力發電，目前發電功率雖然不大，但結構簡單、成本低，所以仍值得進一步研究提升效率。