

2022 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 100009

參展科別 工程學

作品名稱 風驅電「極」- 陣列式無扇葉風力發電機

得獎獎項

就讀學校 臺北市立麗山高級中學

指導教師 金佳龍、盛寶徵

作者姓名 郭耀嶸、洪熙陽

關鍵詞 風力發電機 wind driven generator、
康達效應 Coanda effect、
渦激振動 vortex-induced vibration

作者簡介



郭耀燦：

我是郭耀燦，從國中開始對科學實驗產生強烈的興趣，並在高一下學期開始與洪熙陽進行無風扇風力發電的研究，希望能設計出一架能被廣泛運用的風力發電機！下課往實驗室跑已成為每天的例行公事，再一次次的實驗中學會了不少實驗與合作的技巧，在一路上也受到了許多老師與同學的幫助，十分感謝。

洪熙陽：

我是洪熙陽，目前就讀麗山高中二年級，我從以前就對能源議題感興趣，正好聽到了郭耀燦報告的無風扇風力發電，可以架設在外海風場，也可架設在高樓大廈，我對此十分好奇，便與郭耀燦展開了這次研究，雖然剛開始我們的知識尚且不足，但幸好有專題老師的幫助，我們才能走到現在，感謝老師的教導和一路上有幫助我們的同學！

摘要

「無扇葉風力發電」是一種新型的能量擷取研究，透過渦流引起的震動將風能轉換成電能。傳統渦輪式風力發電利用風推動扇葉旋轉發電，受限於風向、成本、噪音及體積等問題無法在內陸得到普遍。先前已有外國公司發表初步的機構設計與發想概念，但目前仍只能針對單一風向進行發電。本研究提出新型機構設計，有效的運用了多方向風源，降低了風能的浪費。為了瞭解渦激振動與各項變因之間的關係，我們設計了多項實驗，藉由影像分析軟體 Tracker，得出不同風速下桅杆晃動振幅與頻率之關係，並利用實驗分析採集器 LabQuest 2，精確的得出單位時間內的平均流速與電壓變化，獲得流速與電壓頻率特性。

根據實驗結果，隨著風速的增長，電機產生的峰值電壓會有 2 次方的增長，且桅杆晃動頻率與風速和支點位置並無直接關係。

Abstract

Traditional horizontal-axis wind turbine (HAWT) generates electricity by using the wind to push the fan blades. However, it cannot be widespread due to the limitation of cost, noise and size.

Vortex bladeless is the new research of energy-harvesting technology intending to transform wind energy to electricity. To prove vortex harvesting, which is a better solution in our experiment. We design our electric generator by using enamel insulated wire, magnet. Then generating the data from Imaging analysis "Tracker."

In our experiments, we intend to find out the relations between different velocity. Such as the frequency of simple pendulum and amplitude of the center post. Furthermore, we measure the data of the change between average flowing velocity and voltage in specific unit time by experiment data acquisition unit, LabQuest mini and gain the characteristics of flowing velocity and voltage frequency.

According to the results of experiments, when the wind velocity is getting higher, the peak voltage of the power plant will be increased squared. Besides, it is found the frequency of simple pendulum with no relationship between wind velocity or fulcrum.

壹、前言

一、研究動機

隨著科技不斷的演進，人類用電的需求也跟著與日俱增，能源枯竭成了人類必須面對的重要問題；而就在再生能源的技術逐漸成熟之餘，許多再生能源造成的外部成本也跟著浮上了檯面，如何妥善地利用再生能源是現今重要的課題。我們希望藉由無風扇風力發電補強台灣的風電產業。

離開新竹市區沿著台 61 線南下過崎頂一帶，印入眼簾的不再是延綿起伏的丘陵，而是碧藍如黛的大海，沿著海岸線向前看去，可以看見一部部巨大的渦輪風力發電機，也是是台灣所使用的再生能源之一，但是幾天前在電視上看見了沿岸居民反對傳統風力發電的消息，理由是擔心機組電磁波、噪音影響環境及健康。因此。我們希望利用康達效應產生的不穩定邊界分離層帶動桅杆震動，藉此產生電能並改善上述傳統風力發電所造成負面效果。

臺灣的地理環位置，造就了臺灣優質的風場資源，但目前礙於體積、裝置成本與風向問題，並未得到最有效的利用，我們希望藉由這項研究，更有效的善用臺灣的風力資源。

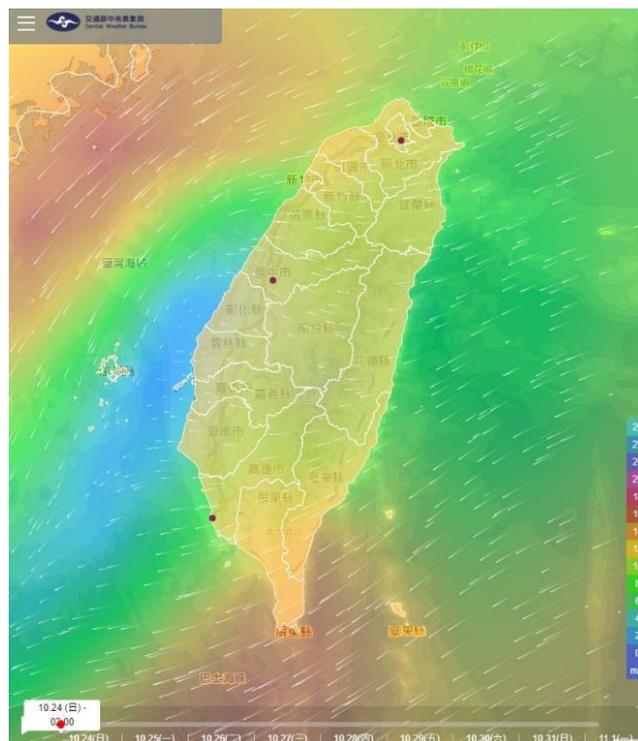


圖 1 臺灣擁有豐富的風力資源（圖片來源：交通部中央氣象局）

二、研究目的及研究問題

如上所述，本研究希望能開發一架陣列式無風扇風力發電，並優化其效能。為達到此目的，我們須先達成以下五點：

- (一) 藉由用康達效應，促使阻流體帶動桅杆產生震動。
- (二) 架設發電機構進行發電效率的量測。
- (三) 藉由改變桅杆支點位置以及下掛物重量，尋求最佳的發電效率。
- (四) 改變桅杆仰角進行實驗，得出桅杆仰角對震動情形的影響。
- (五) 研發陣列式無扇葉風力發電機。

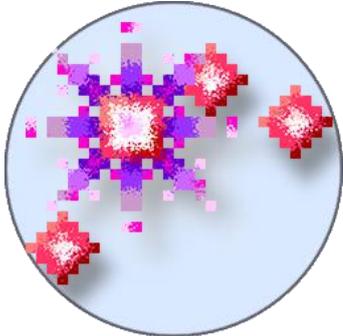
三、文獻探討

近年隨著全球環保意識的高漲，綠色能源的議題也開始受到了高度的關注。來自挪威的 Vortex Bladeless 公司在 2015 年發表了無扇葉風力發電的初步設計，他們以渦激振動的現象做為發電機的動力來源，在近期也被列為能源產業 10 大令人振奮的新創之一。

在 56 屆中小學科展環境科學科中花蓮高中的作品「追風逐電 - 無風扇風力發電機」，同樣運用了渦機振動的現象做為理論基礎，對無風扇風力發電進行研究，但是他們的桅杆支點是設計在整個發電機構的頂端，這樣的設計會導致施力臂小於受力臂，影響風能的轉換效率。並且相對於支點位於最頂端，要在現實中架設將支點設置於中央的風力發電機機組，所需的架設風險與技術都要來的低上許多，而為了證實我們的推論，我們固定了風速及磁鐵位置，測量施力臂與受力臂長度關係不同時的即時電壓數據，並進行快速傅立葉轉換 (FFT)，以求得支點位置對發電效率的影響。

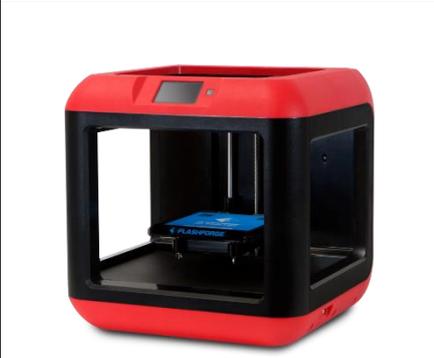
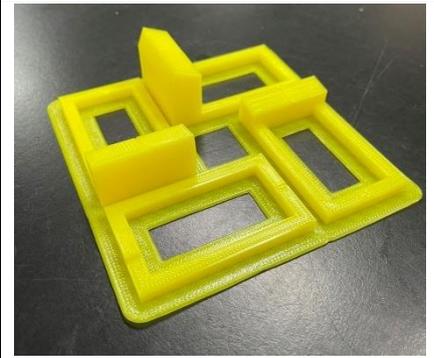
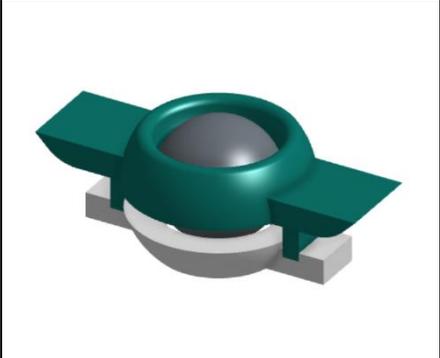
貳、研究設備及器材

一、實驗測量儀器及軟體

		
LabQuest Mini	Logger pro(分析軟體)	Tracker(分析軟體)
		
Anemometer	High Current Sensor	Differential Voltage Probe

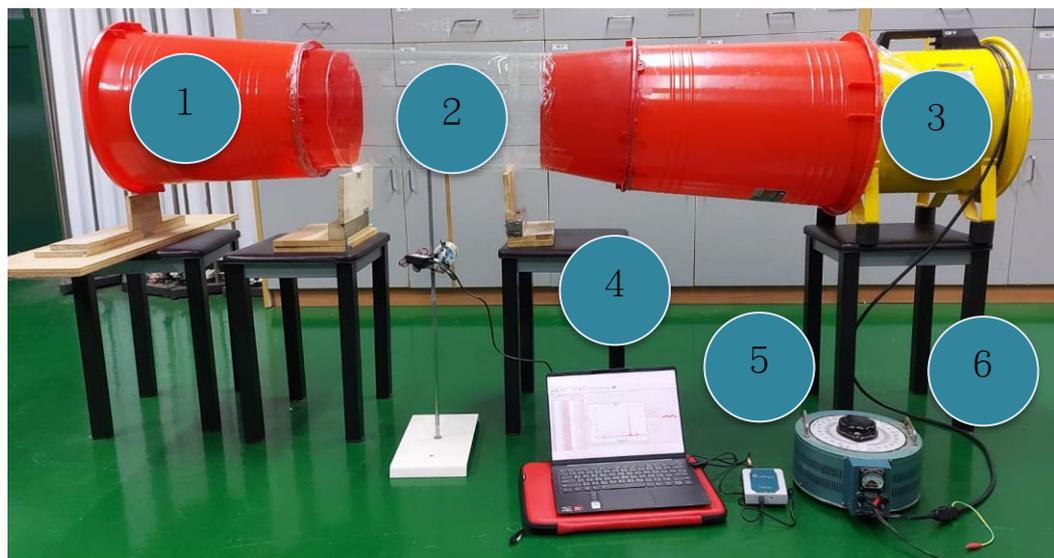
二、實驗設備及器材

		
大型塑膠桶	壓克力圓桶及整流段	抽風機

		
<p>粗吸管</p>	<p>木棒</p>	<p>不同大小的阻流體</p>
		
<p>漆包線</p>	<p>圓形燒結釵鐵硼磁鐵</p>	<p>自耦變壓器</p>
		
<p>鋼珠</p>	<p>砂帶機</p>	<p>三叉鐵夾</p>
		
<p>Flashforge Finder 3D Printer</p>	<p>不同角度的桅桿支架</p>	<p>自製萬向接頭</p>

三、實驗裝置

(一) 風洞



- 1. 整流段
- 2. 測試段
- 3. 抽風機
- 4. 筆電
- 5. LabQuest mini
- 6. 自耦變壓器

(二) 桅杆與阻流體

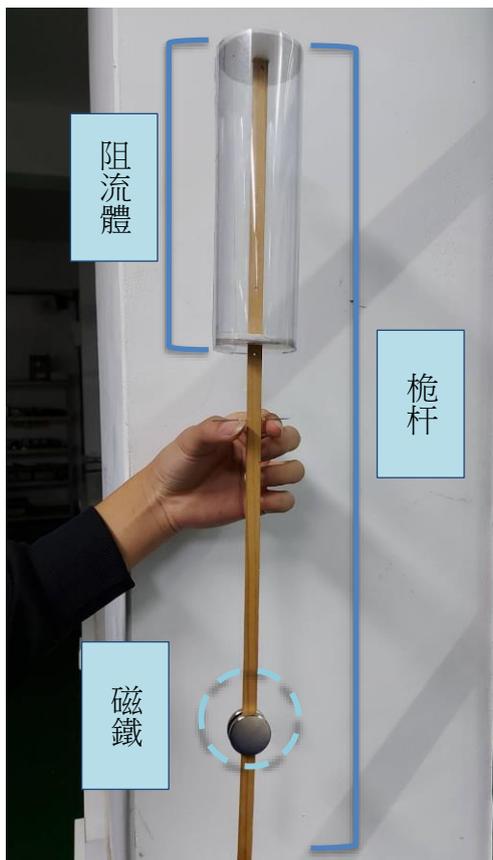


圖 2-1 雙向式桅杆

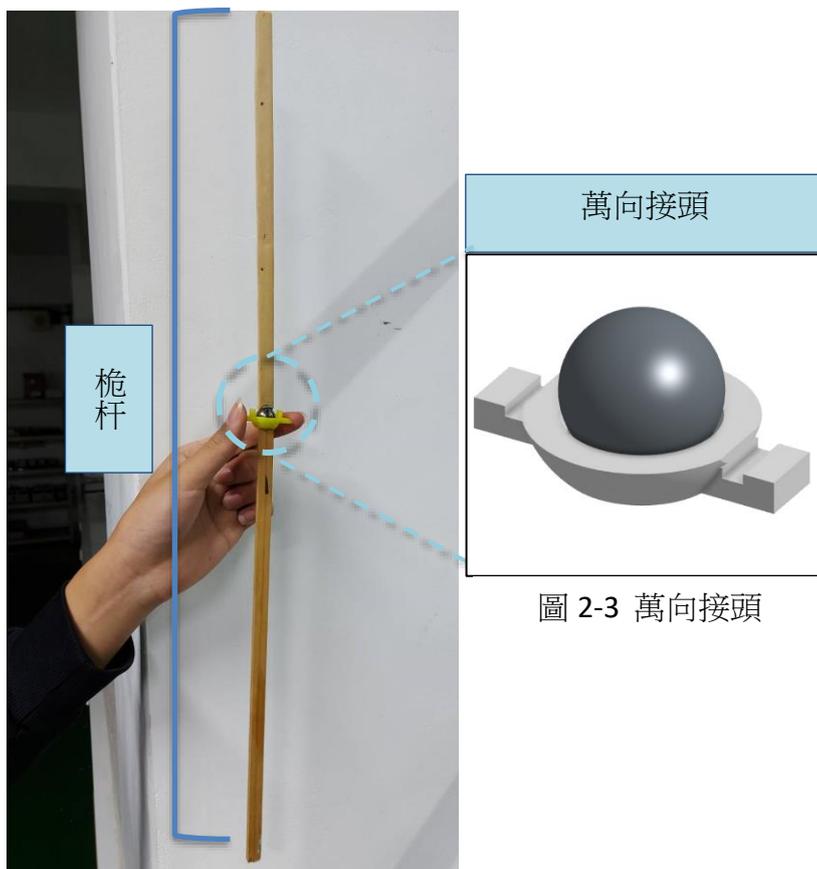


圖 2-3 萬向接頭

圖 2-2 多向式桅杆

參、研究方法與過程

一、 實驗原理探討

(一) 康達效應 (Coandă effect)

又稱附壁作用。流體偏離原流動方向，改而沿著凸出物體表面流動之傾向，由於流體流動方向改變，使得周圍產生壓力較低的區域，此稱為康達效應。這是本實驗桅杆的震動原理，由此效應所生的壓力差使桅杆晃動。

(二) 雷諾數 (Re)

在管內流場中，流體之流動常受到各種力量影響，如壓力、重力、黏滯力、彈性力、表面張力等，其中與流體關係最大者當屬黏滯力，即由真實流體所具有之黏性而產生之力，而雷諾數即為慣性力與黏滯力比值。我們計算雷諾數來推估目前流場內的狀態，層流或湍流，還有卡門渦街的穩定性。

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu}$$

Re:雷諾數 ρ :流體之密度

V:管路中流體的平均速度(m/s) D:特徵長度

$\nu = \mu / \rho$ =流體的運動黏度(m²/s) μ :流體之黏滯係數

(三) 渦激振動 (vortex-induced vibration)

渦激振動是圓柱體在流體所產生的現象，由於流體具有黏性，圓柱體周圍的動在與圓柱體表面接觸時會減速，形成邊界層。

然而，有時該層會因為過度彎曲而與主體分離，接著渦流便形成，改變表面的壓力分佈，當渦流不是圍繞柱體對稱形成時，不同的升力在圓柱的每一側產生，導致橫向於流動方向的運動。在非常低的雷諾數下，所得流動的流線完全對稱，然而，隨著雷諾數增加，流動變得不對稱，並出現卡門渦街。

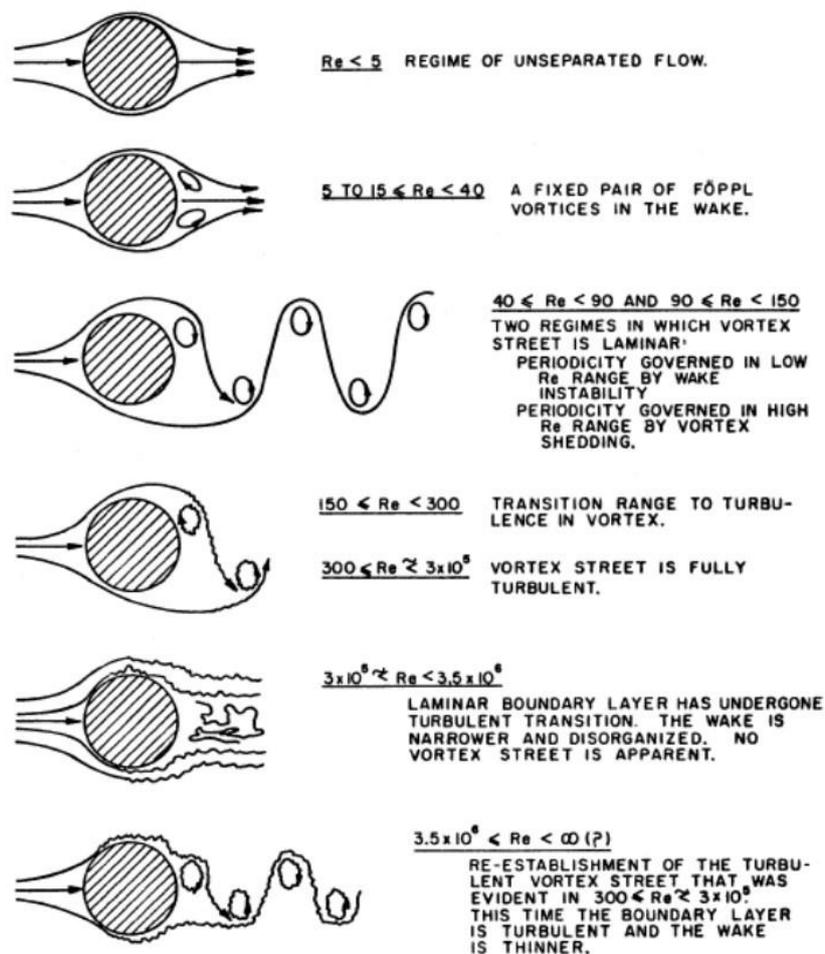


圖 3-1 Vortex shedding pattern for different Reynolds number

(圖片來源：https://www.researchgate.net/figure/Vortex-shedding-pattern-for-different-Reynolds-number-6_fig2_328873691)

(四) 卡門渦街 (Kármán vortex street)

指在流體中設置的圓柱體下游兩側，在雷諾數 >47 時因不穩定的邊界分離層，產生兩道非對稱排列的旋渦，並且相互交錯排列之現象。本實驗利用此現象來確定康達效應的成效，只有在穩定的卡門渦街下，晃動才會比較穩定。

$$F = Sr \times v / d$$

f:卡門渦街頻率(Hz)

v:風速(m/s)

d:迎風物體之截面距(m)

Sr:斯特勞哈爾數(自然情況下大約為 0.2)

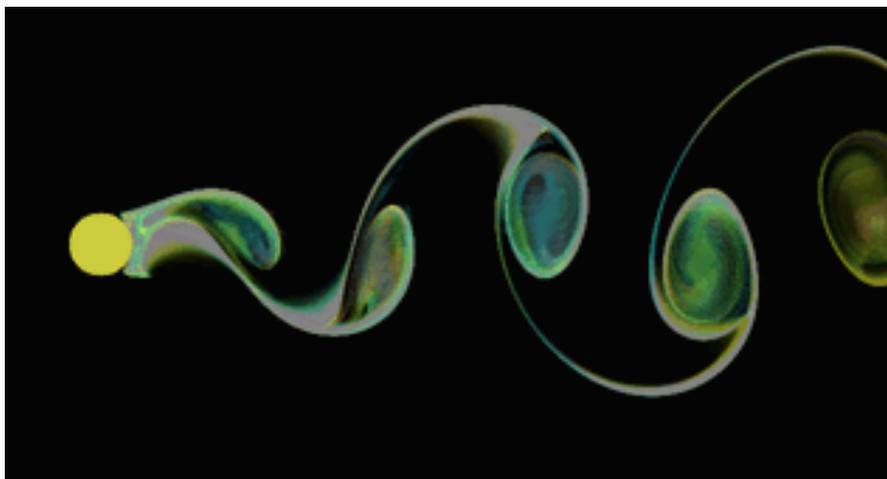


圖 3-2 卡門渦街 (圖源：<http://blog.sciencenet.cn/blog-739225-889268.html>)

(五) 傅立葉轉換 (Transformation de Fourier)

一種線性積分轉換。用於將時域訊號轉換，並以頻域的形式表示，能讓我們從頻域的觀點，更進一步地去了解訊號的內涵。常被應用於濾波、混頻、等化器等等。在本研究中被用於電壓變化頻率的探討與比較。

二、 研究改良

(一) 風洞改良

我們最初風洞中所使用的是 GF-B280H-80 散熱風扇，但在實驗的過程中我們發現其提供可調變的最大風速不足，所以改使用 PX-400 手提式抽風機作為風源，由於 PX-400 抽風機與壓克力管管徑大小不一，為了解決兩者的接合問題，我們利用大型塑膠桶製作接合段。

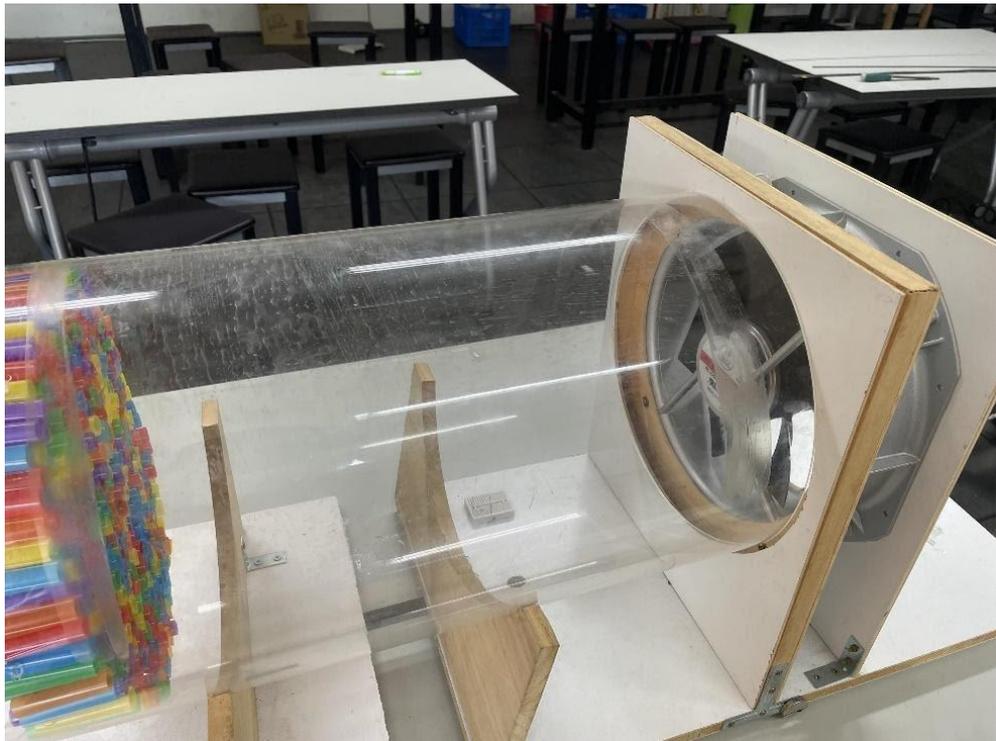


圖 3-3 第一代風洞裝置

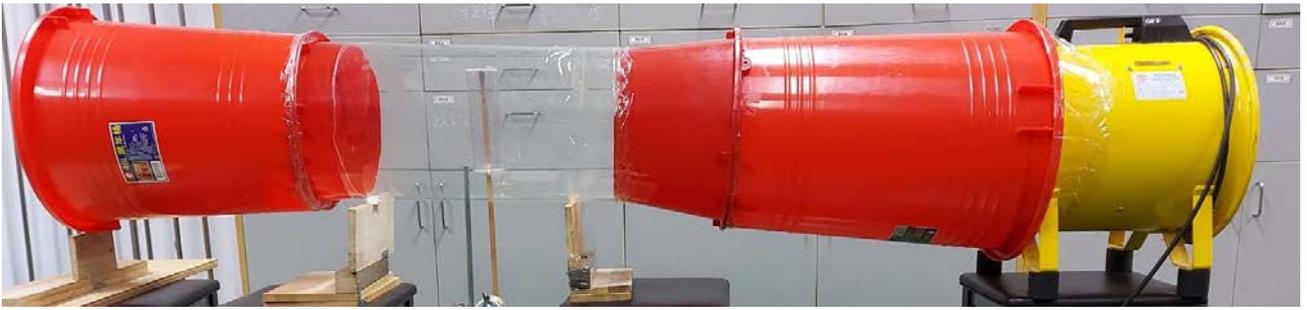


圖 3--4 目前風洞裝置

(二) 阻流體改良

接下來是我們阻流體的變化，初始版本的阻流體是利用細的塑膠條去固定外層阻流體，這樣的設計會造成桅杆重心偏移，故改用圓形保麗龍片固定阻流體。



圖 3-5 初代阻流體



圖 3-6 目前阻流體

(三) 測量方式改良

最初我們測量電壓的方式，是利用音源線的正負兩端接上線圈，並利用音訊編輯軟體，然而這種測量方式僅能觀察應電壓波型，無法準確地得知當下電壓大小，所以我們改用 LabQuest 2 和其搭配的感測器進行數據採集。

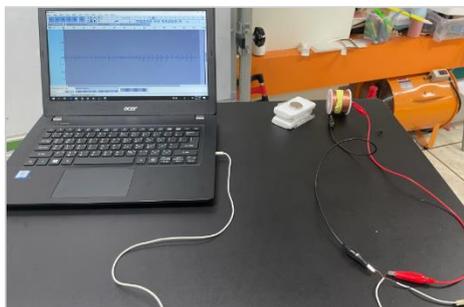


圖 3-7 音源線測量電壓信號

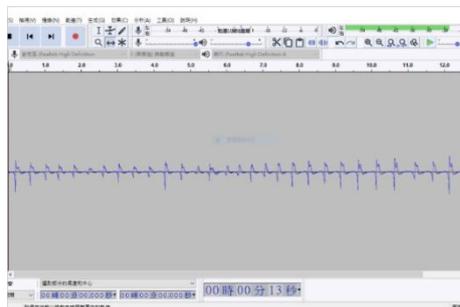


圖 3-8 線圈電壓信號測量

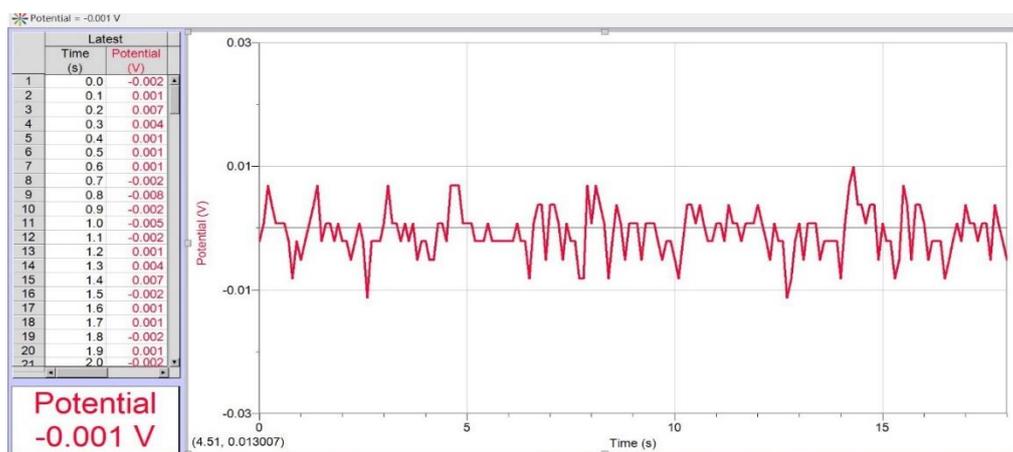


圖 3-9 LabQuest 2 電壓量測畫面

(四) Tracker 影像分析

我們運用 Tracker 來對桅杆的振動頻率進行分析。

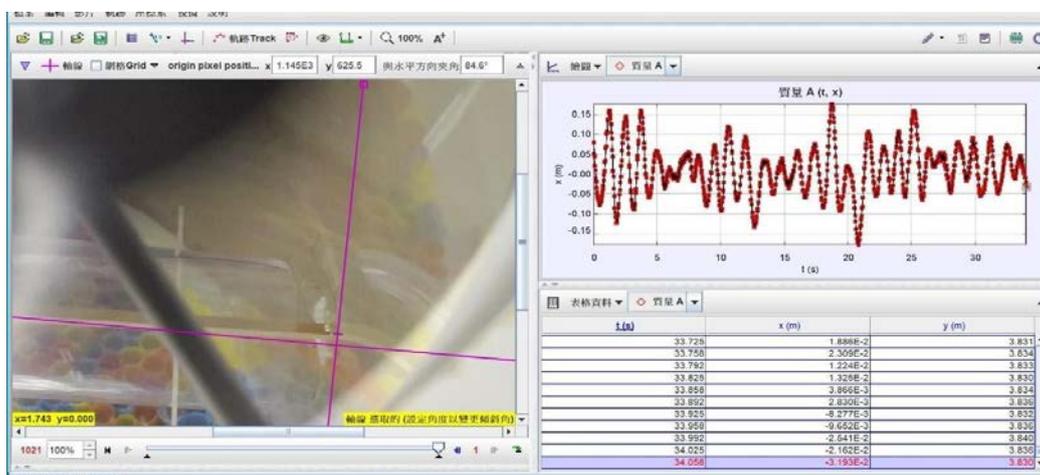


圖 3-10 Tracker 分析畫面

三、 實驗設計

無風扇風力電的構想為以一種流體力學的現象卡門渦街的應用，而我們希望在我們的研究中，找到在怎樣的條件下能使無風扇風力發電發揮出最佳的效能，以下是我們進行的研究：

- (一) 在固定風速下，阻流體截面積對電壓、頻率關係。
- (二) 在固定風速下，桅杆支點位置與電壓、頻率關係。
- (三) 在固定風速下，磁鐵位置與電壓、頻率關係。
- (四) 在固定風速下，掛物重量與電壓、頻率關係。
- (五) 固定阻流體截面積，風速與電壓、頻率關係。
- (六) 在固定風速下，桅杆仰角與電壓、頻率關係。
- (七) 不同阻流體截面積所對應的最適風速區間。

四、 實驗步驟

(一) 阻流體截面積不同時，峰值與方均根電壓的量測

- 1. 架設器材
- 2. 利用自耦變壓器改變電壓以調整管內風速
- 3. 透過感測器及 LabQuest 2 收集數據
- 4. 利用 Excel 進行數據的統整與分析

(二) 阻流體截面積不同時，電壓變化頻率的測量

- 1. 架設器材
- 2. 利用自耦變壓器改變電壓以調整管內風速
- 3. 將線圈的正負極接上實驗分析採集器 LabQuest mini
- 4. 透過程式 Logger pro 得出即時電壓數據
- 5. 進行傅立葉轉換
- 6. 更換阻流體重復上述步驟

(三) 桅杆震動頻率測量

1. 架設器材
2. 利用自耦變壓器改變電壓以調整管內風速
3. 拍攝不同風速下阻流體的擺盪情形
4. 將影片匯入 Tracker 進行數據分析

(四) 施力臂與受力臂長度關係（支點位置）不同時，發電效率的比較

1. 架設器材
2. 利用自耦變壓器改變電壓以調整管內風速
3. 將線圈的正負極接上實驗分析採集器 LabQuest mini
4. 透過程式 Logger pro 得出即時電壓數據
5. 進行傅立葉轉換
6. 更換桅杆支點位置重複上述步驟

(五) 不同磁鐵位置下，峰值與方均根電壓的量測

1. 架設器材
2. 利用自耦變壓器改變電壓以調整管內風速
3. 將線圈的正負極接上實驗分析採集器 LabQuest mini
4. 透過程式 Logger pro 得出即時電壓數據
5. 進行傅立葉轉換
6. 更換磁鐵位置或掛物重量重複上述步驟

(六) 不同掛物重量下，峰值與方均根電壓的量測

1. 架設器材
2. 利用自耦變壓器改變電壓以調整管內風速
3. 將線圈的正負極接上實驗分析採集器 LabQuest mini
4. 透過程式 Logger pro 得出即時電壓數據
5. 進行傅立葉轉換
6. 更換掛物重量重複上述步驟

(七) 不同風速下，電壓變化頻率測量

1. 架設器材
2. 利用自耦變壓器改變電壓以調整管內風速
3. 將線圈的正負極接上實驗分析採集器 LabQuest 2
4. 透過程式 Logger pro 得出即時電壓數據
5. 進行傅立葉轉換

(八) 不同桅杆仰角下的電壓變化頻率測量

1. 架設器材
2. 利用自耦變壓器改變電壓以調整管內風速
3. 將線圈的正負極接上實驗分析採集器 LabQuest 2
4. 透過程式 Logger pro 得出即時電壓數據
5. 進行傅立葉轉換

五、 實驗流程圖

在確認好實驗主題和設計後，我們製作出本研究的實驗流程圖（如圖十五）

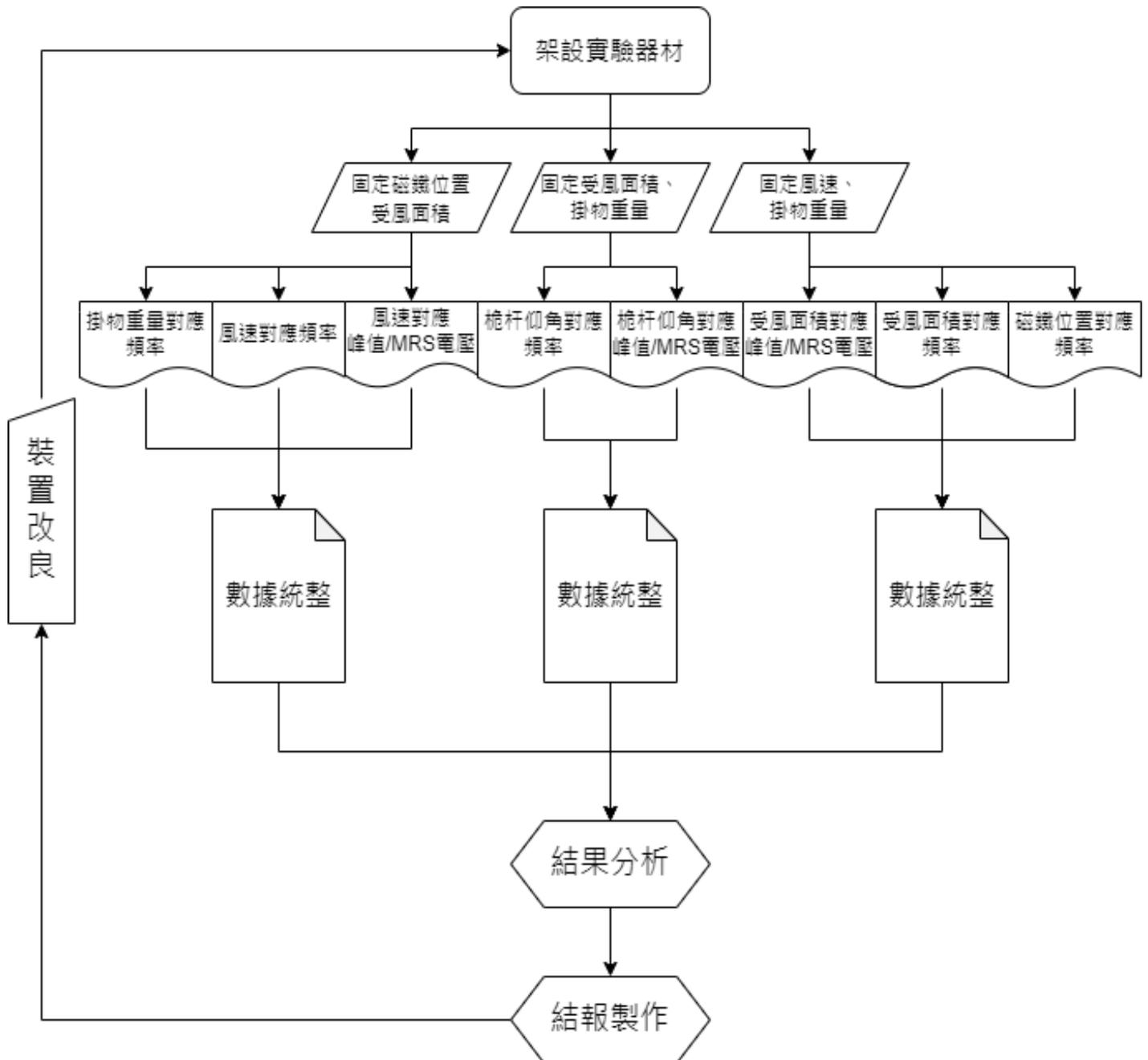


圖 3-11 研究流程圖

肆、研究結果與討論

一、阻流體截面積對電壓、頻率關係

我們分別測量不同截面積所產生的時域電壓信號，並將此時域資料以快速傅立葉轉換（FFT）為頻域資料。以下是我們得到的結果：

（一）截面積愈大，桅桿震動頻率愈高

以下分別為三種不同截面積在 5.2 m/s 的風速下所對應的頻域資料，可知愈大的截面積所對應到的桅桿震動頻率也會愈高，而桅杆振動大約會落在 4~5 Hz 之間。

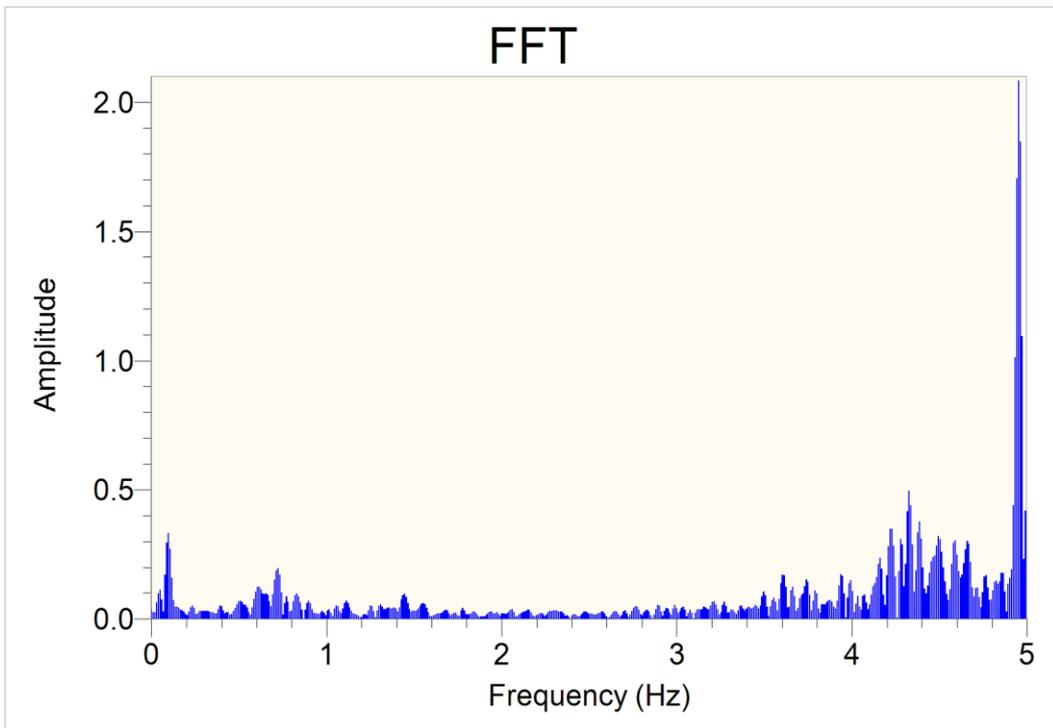


圖 4-1 截面積 136.2cm²之阻流體桅杆振動頻率大約 5Hz

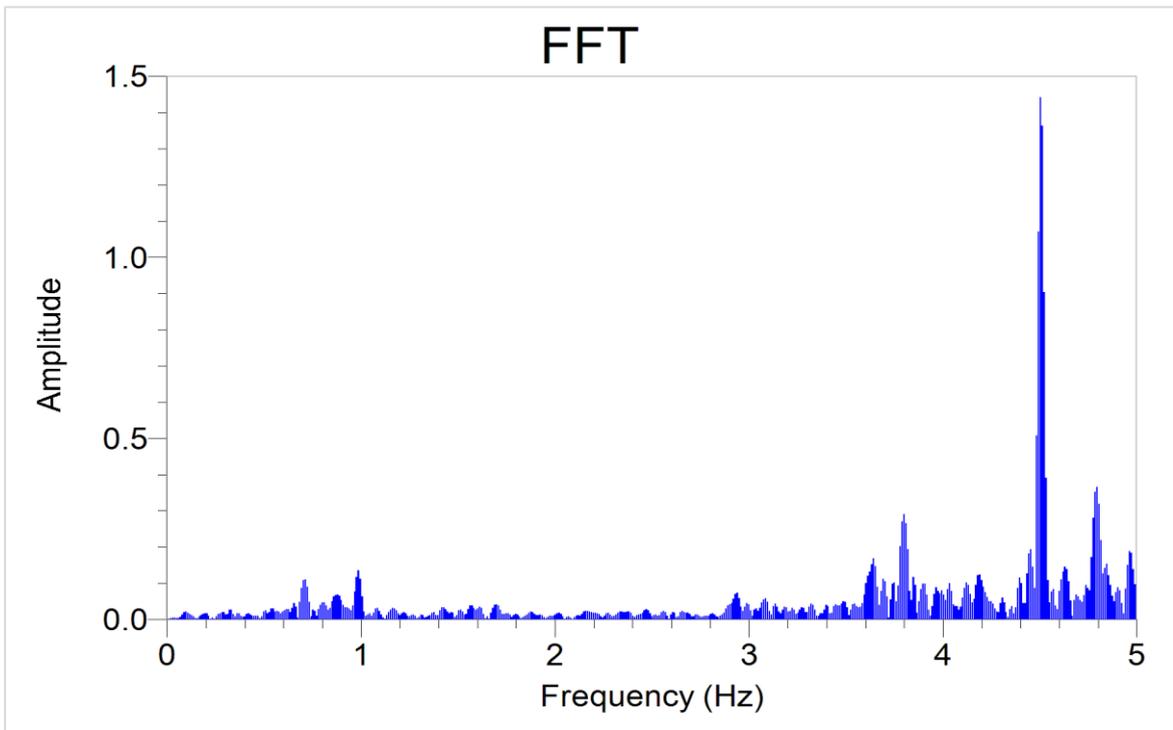


圖 4-2 截面積 124.6cm^2 之阻流體桅杆振動頻率大約 4.5Hz

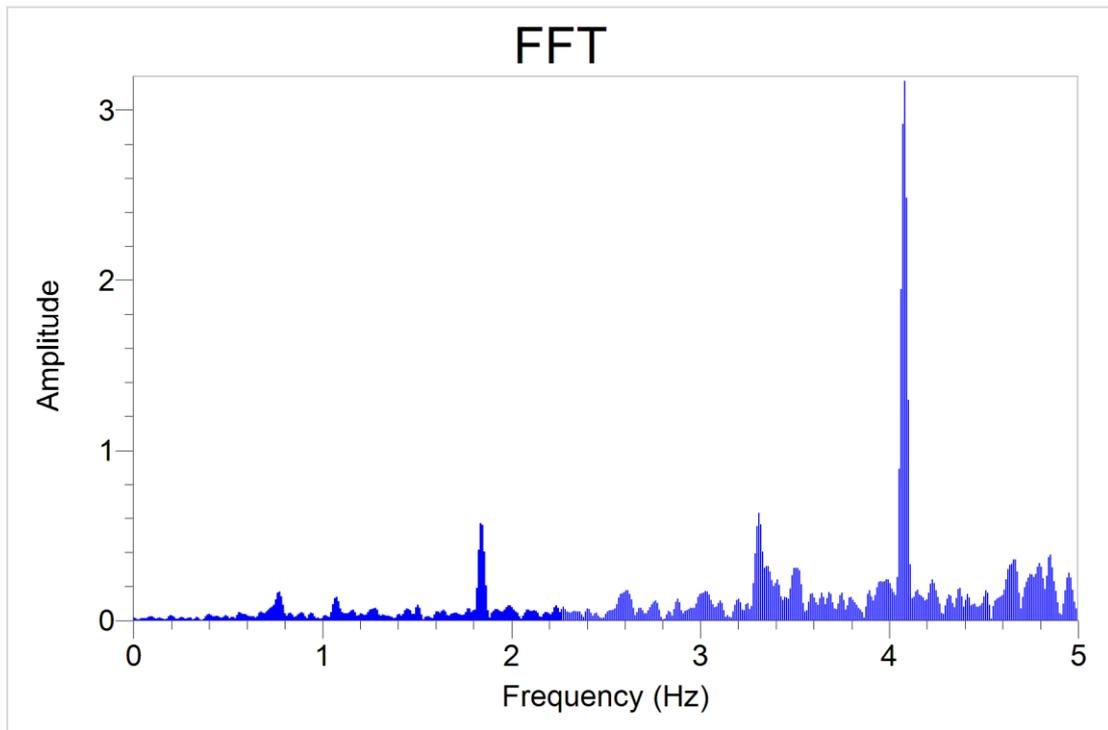


圖 4-3 截面積 111cm^2 之阻流體桅杆振動頻率大約 4.1Hz

(二) 當截面積小於 92.4 平方公分時，主要頻率不顯著，如下圖

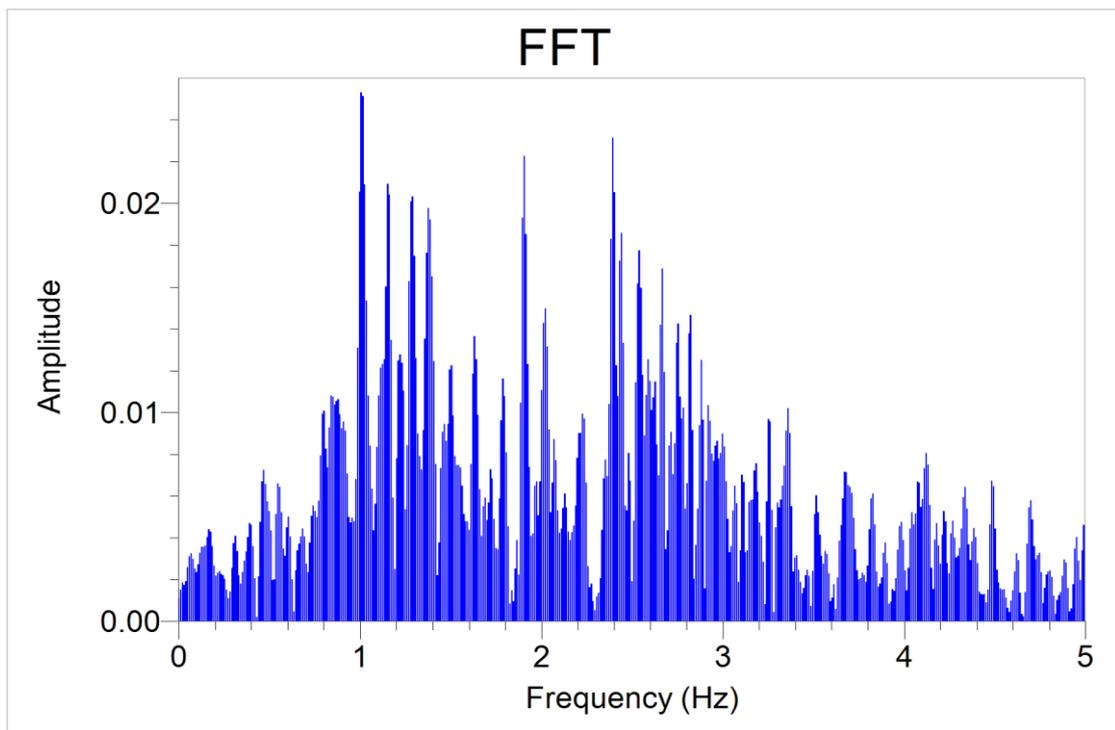


圖 4-4 截面積 92.4cm² 之阻流體主要頻率不明顯

二、 桅杆支點位置與電壓、頻率關係

固定風速及磁鐵位置，測量施力臂與受力臂長度關係不同時的時域電壓訊號，並將此時域資料以快速傅立葉轉換（FFT）為頻域資料。

根據實驗結果得，施力臂與受力臂的長短關係並不影響桅杆的晃動頻率，但當施力臂小於受力臂時，桅杆的振幅會比兩者相等時要來的大，也就是說當施力臂小於受力臂時可以得到更好的發電效率。

(一) 施力臂 < 受力臂

根據下圖 施力臂小於受力臂時，電壓變化頻率主要在 2Hz 及 23Hz 特別明顯，且最大震幅大約在 0.0025 左右。

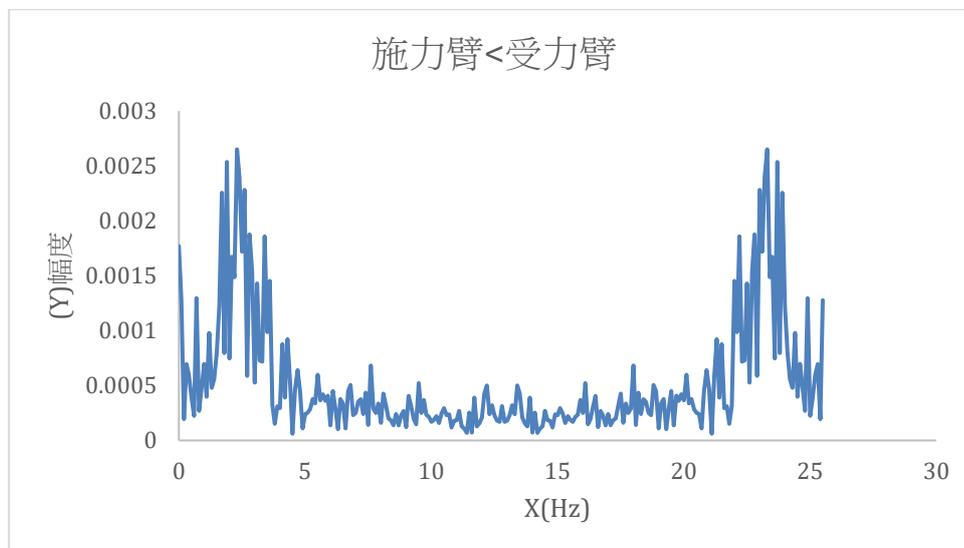


圖 4-5 施力臂 < 受力臂時之頻率

(二) 施力臂 = 受力臂

根據下圖 5 施力臂小於受力臂時，電壓變化頻率主要在 2Hz 及 23Hz 特別明顯，且最大震幅大約在 0.002 左右。

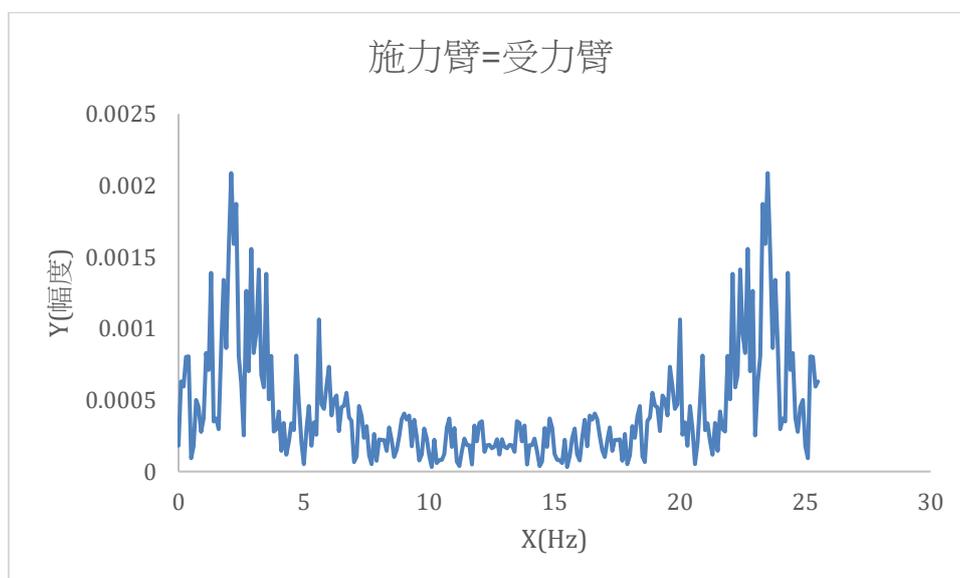


圖 4-6 施力臂 = 受力臂時之頻率

三、 磁鐵位置與電壓、頻率關係

固定風速，測量不同磁鐵位置下的時域電壓信號，並將此時域資料以快速傅立葉轉換（FFT）為頻域資料；利用 Excel 計算峰值與方均根電壓。

（一）相同風速下，磁鐵設置於支點下 21 公分時，可產出最高峰值與方均根電壓

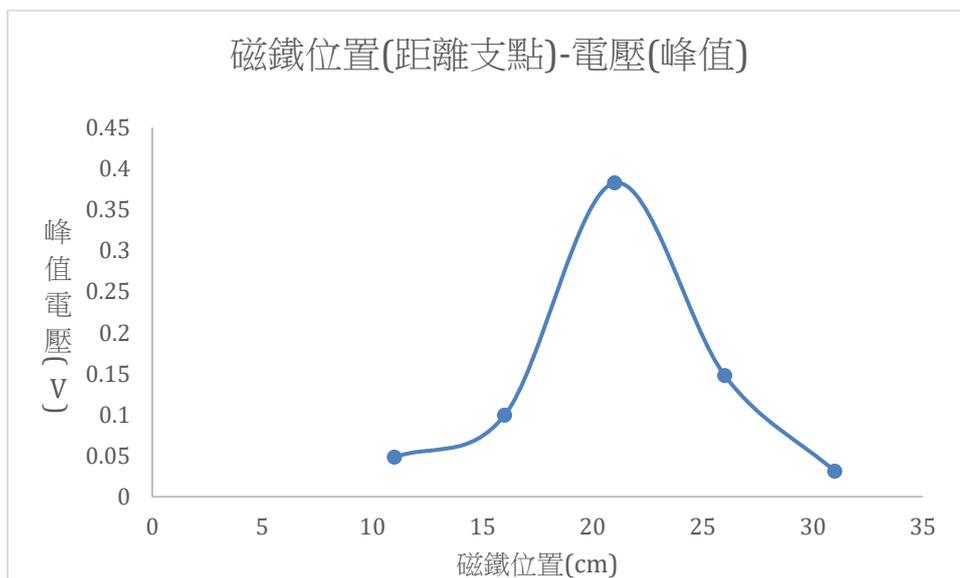


圖 4-7 磁鐵位置對應峰值電壓

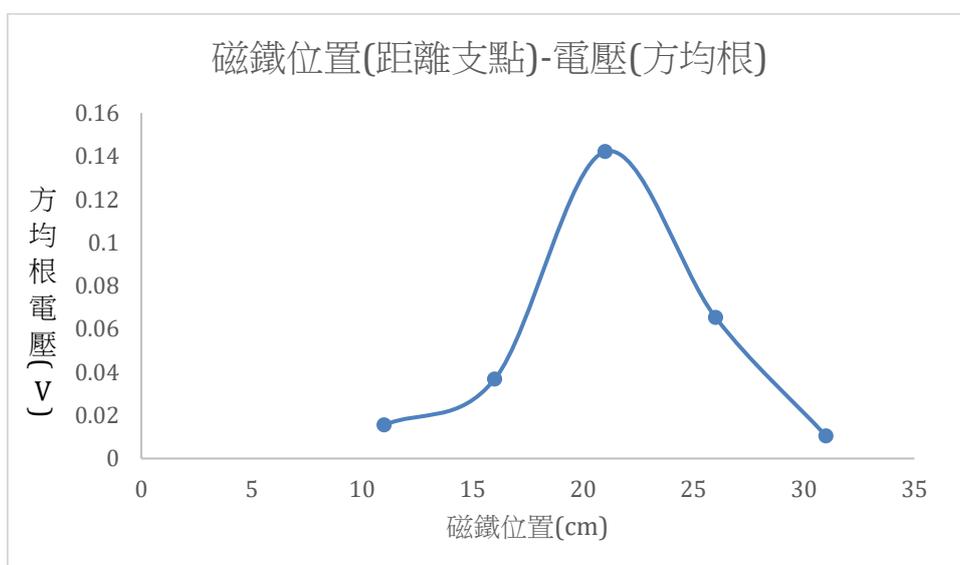


圖 4-8 磁鐵位置對應方均根電壓

(二) 磁鐵位置距支點愈遠，桅桿震動頻率愈高

以下分別為磁鐵距支點位置 16、21、26 公分處時，所得出的桅桿振動頻率

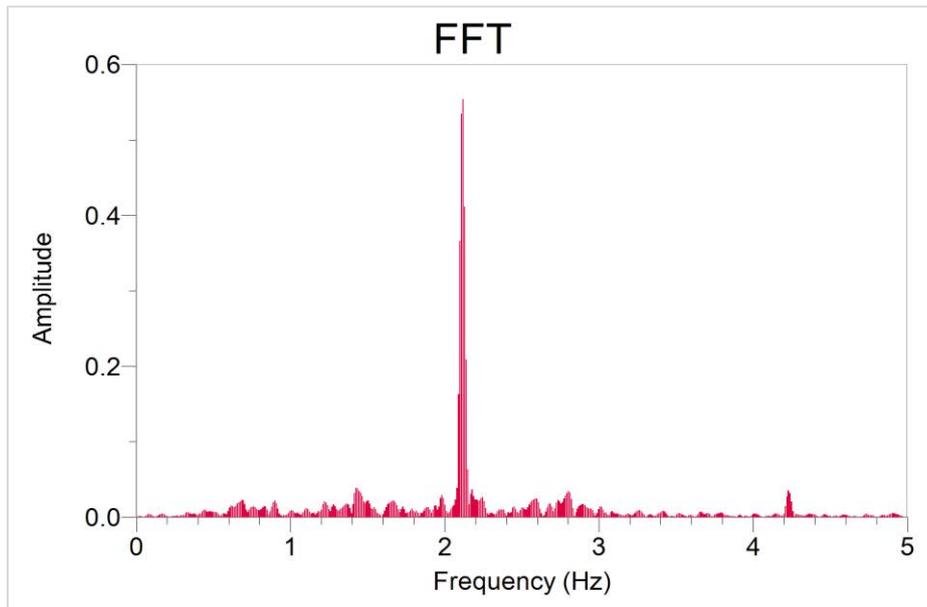


圖 4-9 磁鐵位於支點下 16 公分時頻率大約為 2.13Hz

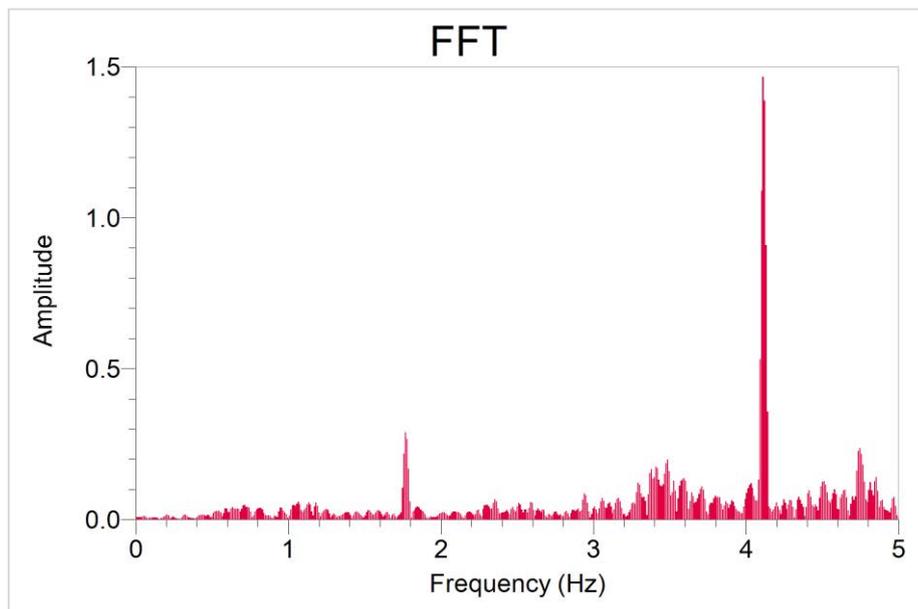


圖 4-10 磁鐵位於支點下 21 公分時頻率大約為 4.1Hz

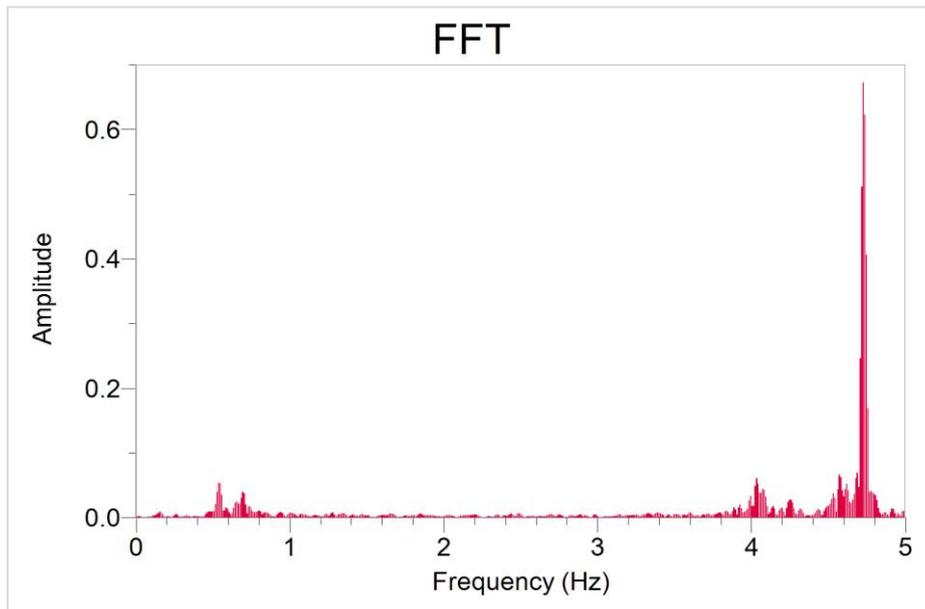


圖 4-11 磁鐵位於支點下 26 公分時頻率大約為 4.78Hz

四、 掛物重量與頻率關係

固定風速，測量不同掛物重量下的時域電壓信號，並將此時域資料以快速傅立葉轉換（FFT）為頻域資料。根據實驗結果，掛物重量愈重，桅桿震動頻率愈低，以下分別為掛物增加 11.9、19.2、24.5 克時，所得出的桅杆振動頻率

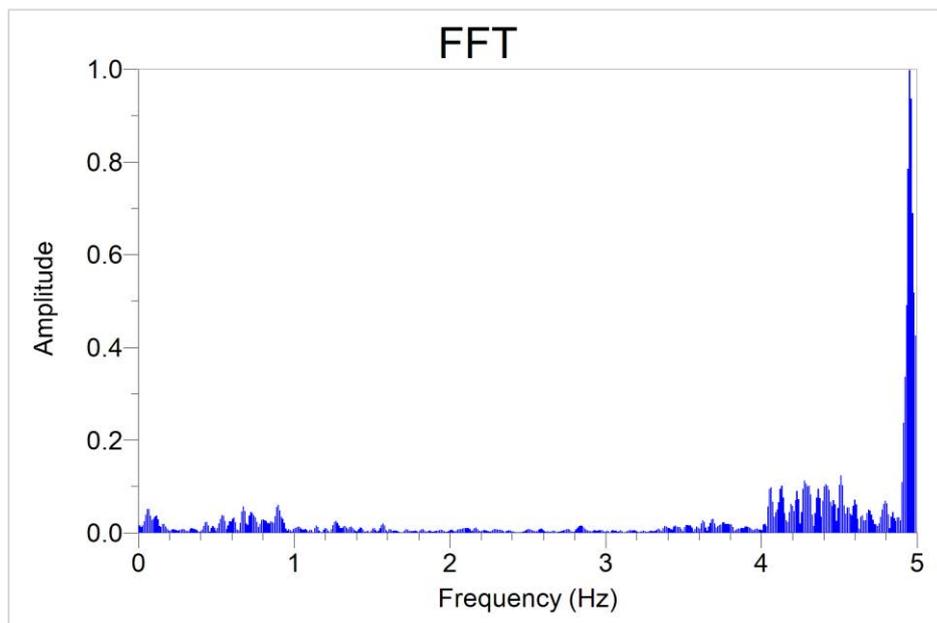


圖 4-12 掛物增重 11.9 克時頻率大約為 5Hz

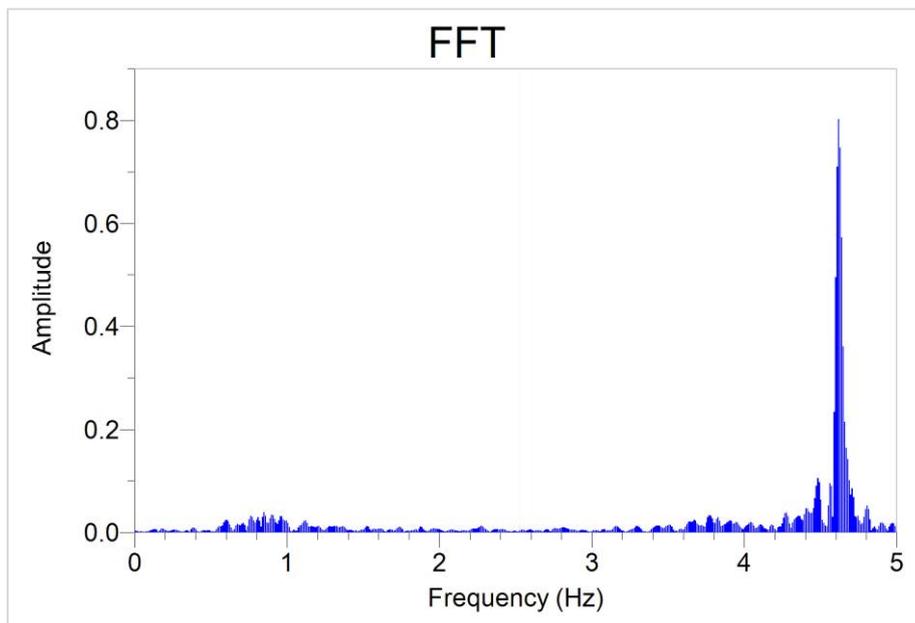


圖 4-13 掛物增重 19.2 克時頻率大約為 4.6Hz

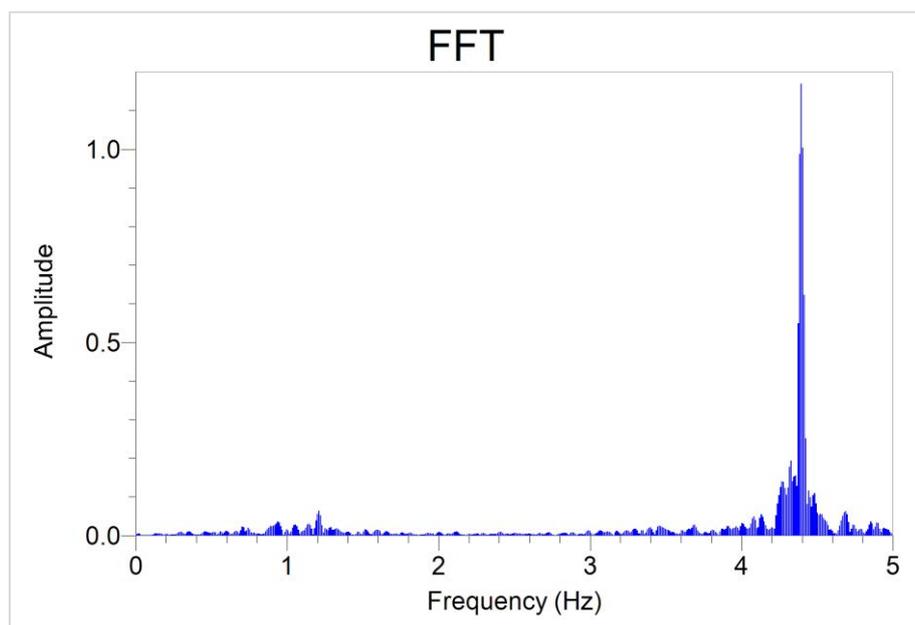


圖 4-14 掛物增重 24.5 克時頻率大約為 4.4Hz

五、 風速與電壓、頻率關係

固定截面積，測量不同風速下的時域電壓信號，並將此時域資料以快速傅立葉轉換（FFT）為頻域資料；利用 Excel 計算峰值與方均根電壓。

（一）相同截面積下，風速在 5.5m/s 時，可產出最高峰值與方均根電壓

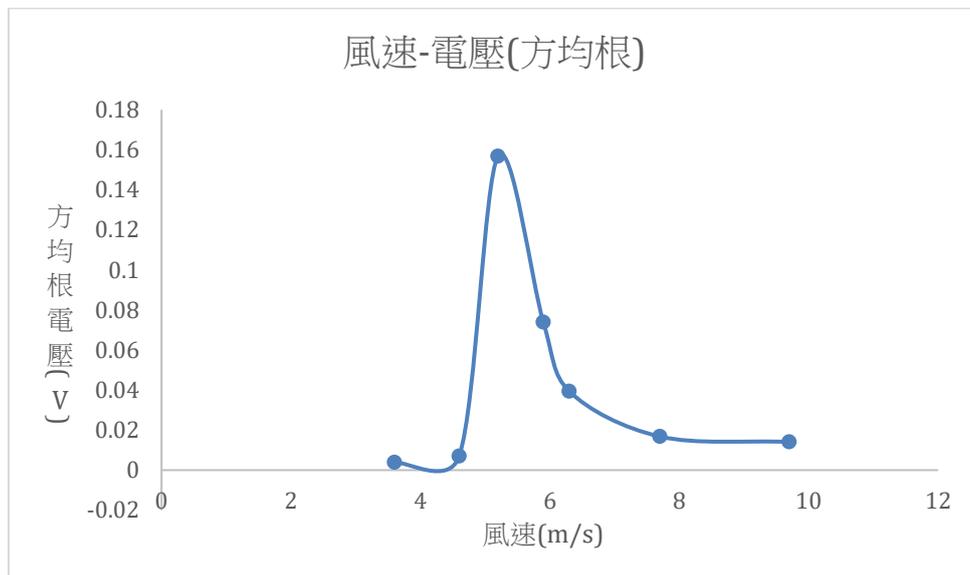


圖 4-15 風速對應方均根電壓

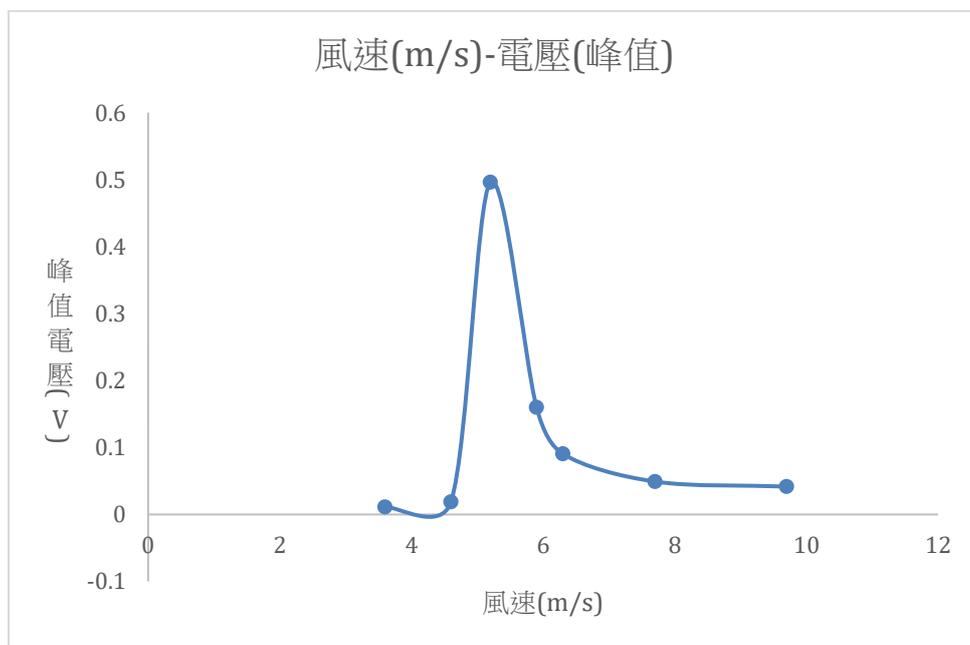


圖 4-16 風速對應峰值電壓

(二) 截面積愈大，最適風速區間愈大

我們將上述會產出最高峰值與方均根電壓的風速稱為「最適風速區間」，在此風速區間內發電機組的風能轉換效率會達到最高，以下是不同截面積所對應的最適風速區間

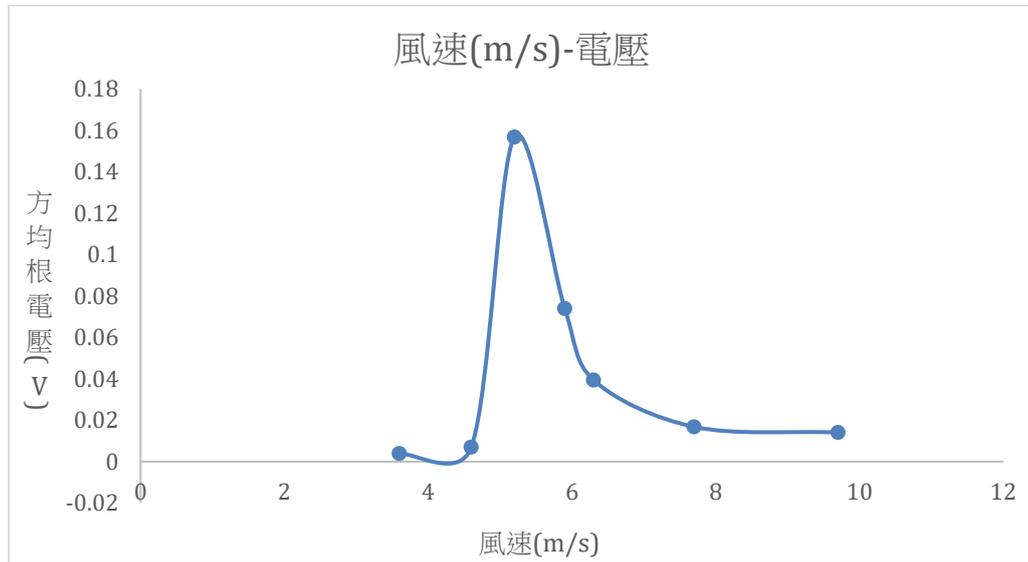


圖 4-17 截面積 136.2cm²時最適風速區間大約位於 5.9m/s 上下

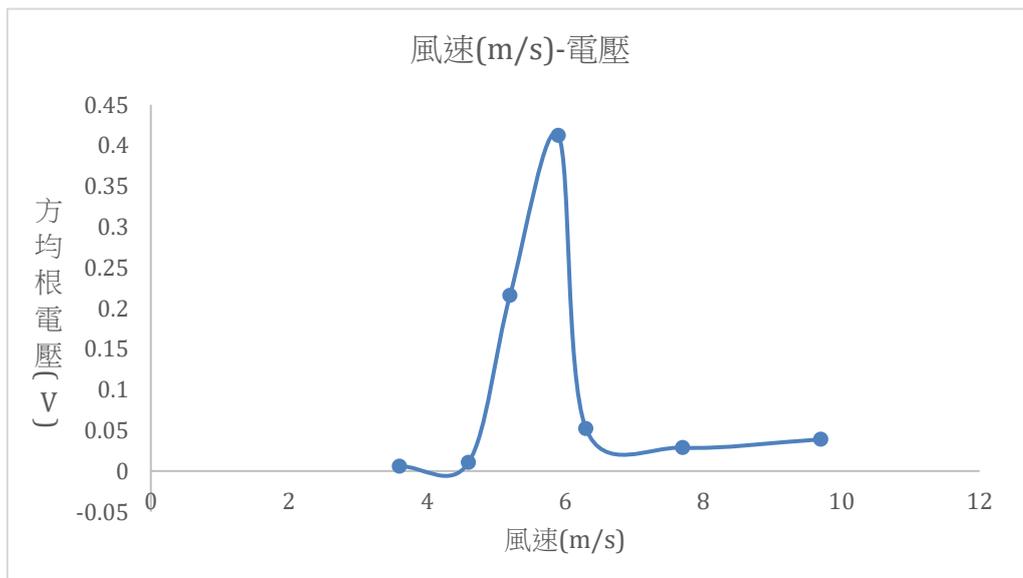


圖 4-18 截面積 124.6cm²時最適風速區間大約位於 5.5m/s 上下

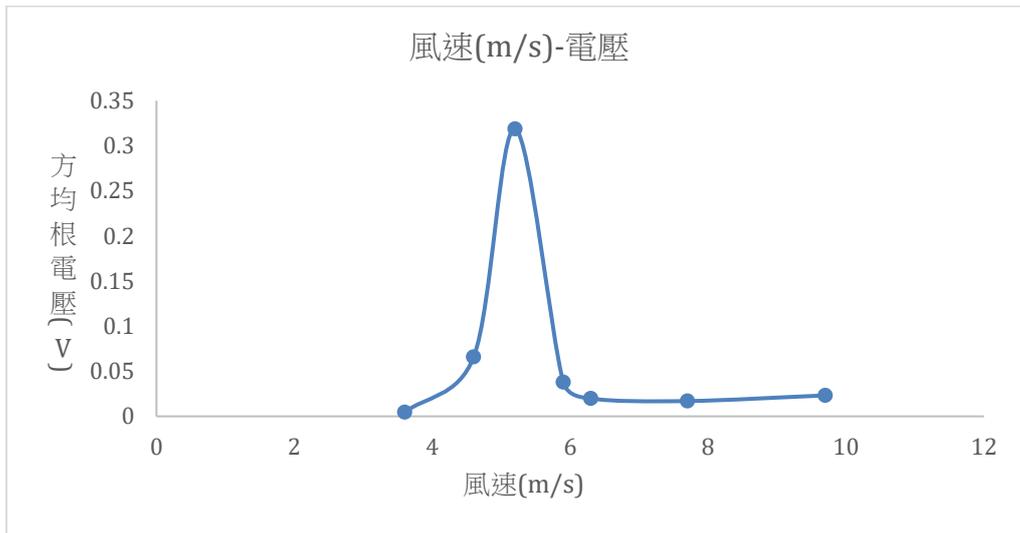


圖 4-19 截面積 111cm²時最適風速區間大約位於 5.2m/s 上下

(三) 振動物的主要頻率會在風速 4.6~7.7m/s 之間較為明顯

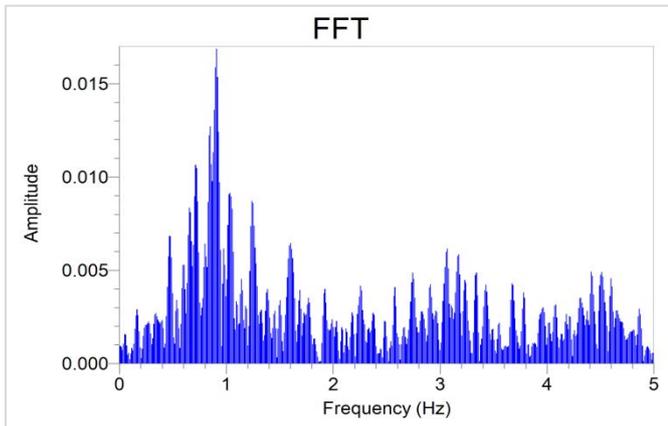


圖 4-20 風速 3.6m/s 時無明顯副頻出現

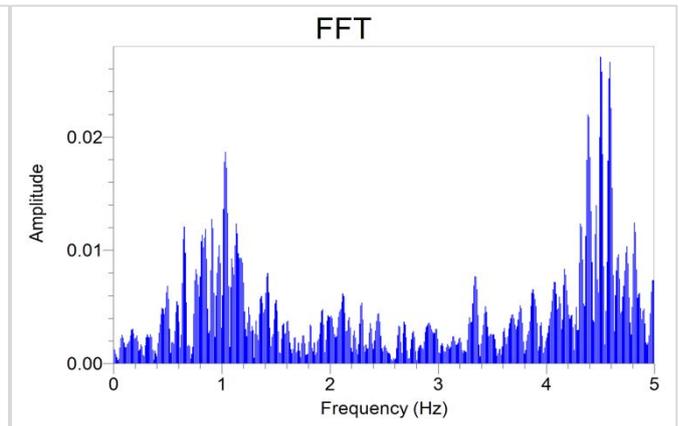


圖 4-21 風速 4.6m/s 時副頻開始出現

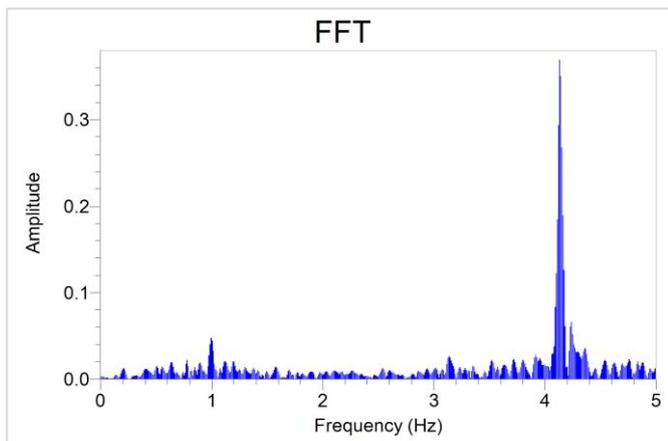


圖 4-22 風速 5.2m/s 時副頻約為 4.12Hz

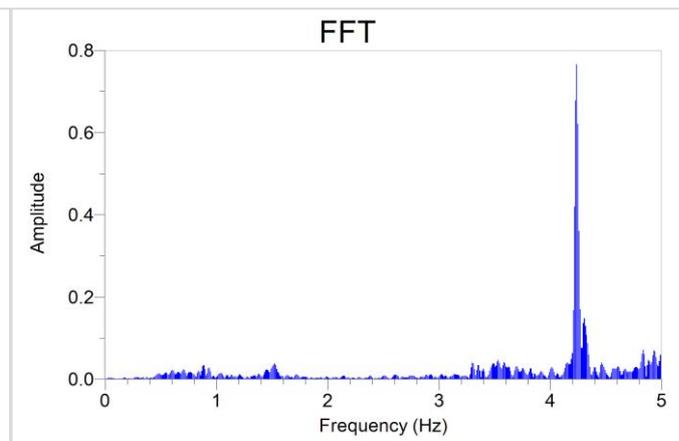


圖 4-23 風速 5.9m/s 時副頻約為 4.21Hz

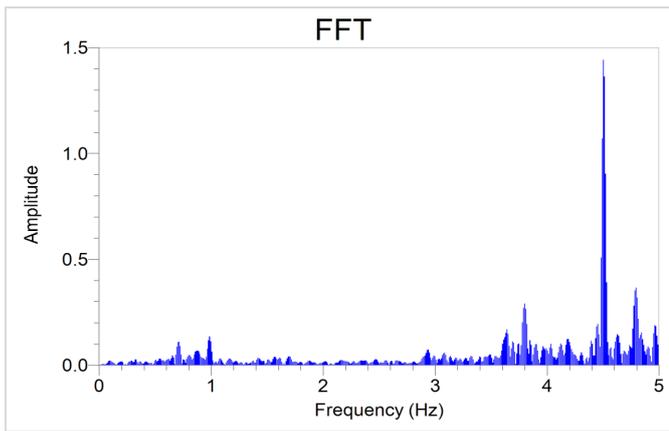


圖 4-24 風速 6.3m/s 時副頻約為 4.5Hz

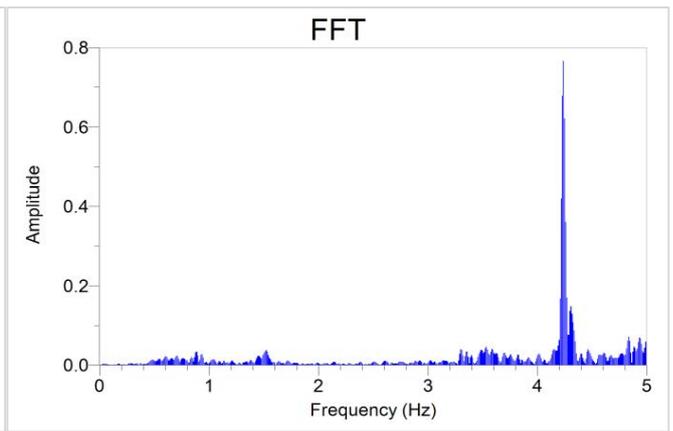


圖 4-25 風速 7.7m/s 時副頻約為 4.22Hz

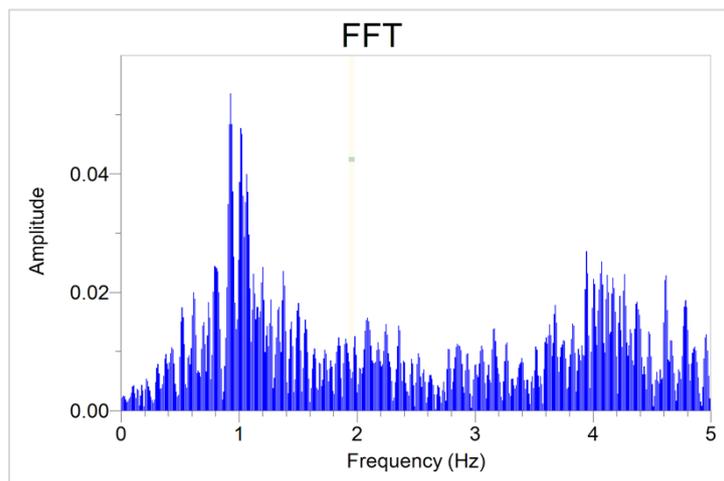


圖 4-26 風速 9.7m/s 時副頻不顯著

(四) 最適風速區間前，風速二次方與峰值及方均根電壓成正比

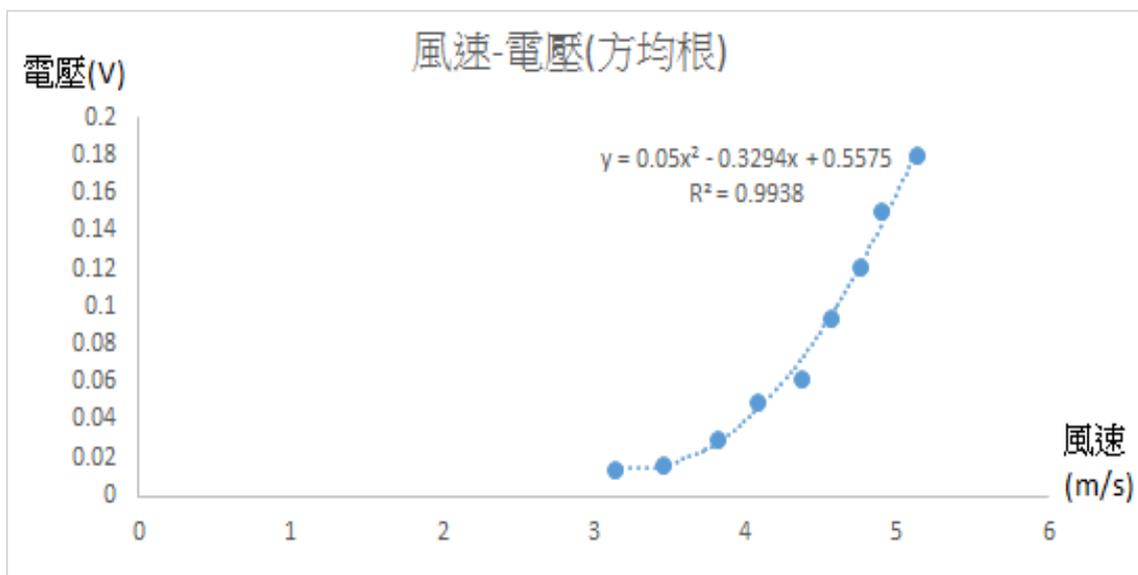


圖 4-27 風速平方與方均根電壓成正比

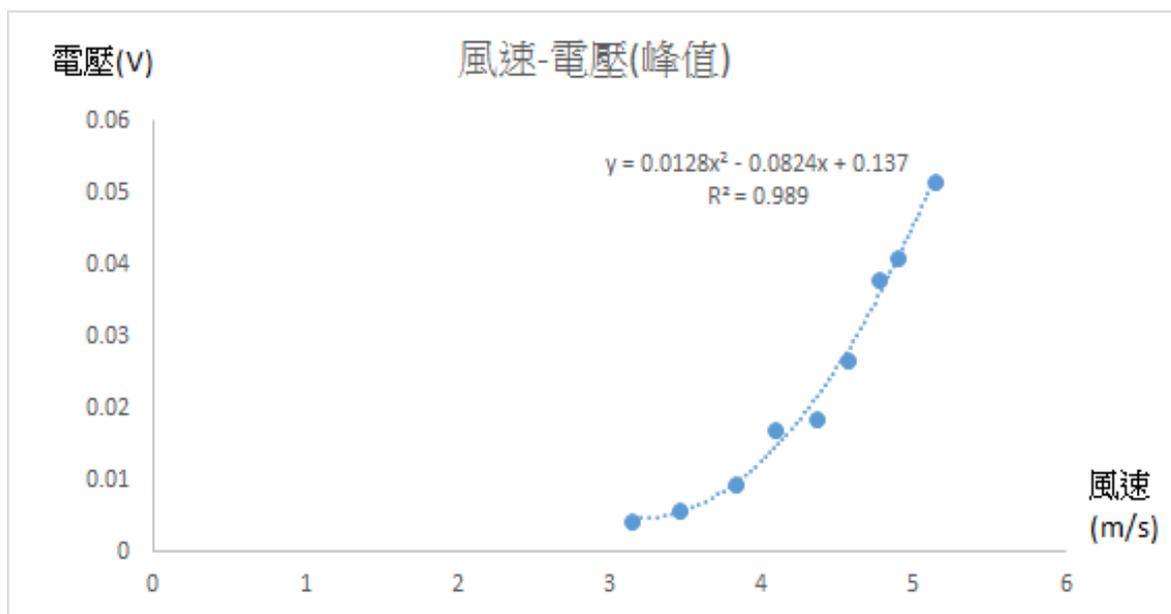


圖 4-28 風速平方與峰值電壓成正比

六、 桅杆仰角與電壓、頻率關係

固定截面積、風速，測量不同下的時域電壓信號，並將此時域資料以快速傅立葉轉換（FFT）為頻域資料。根據實驗結果，桅杆仰角愈大，渦激震動愈不顯著，桅杆小於 15 度，渦激震動顯著。

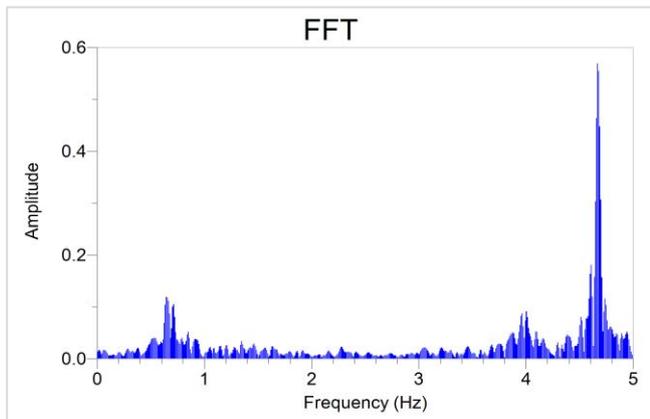


圖 4-29 桅杆仰角 7.5 度時副頻明顯

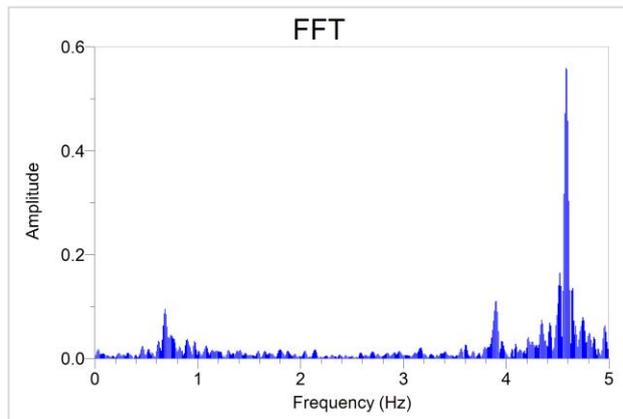


圖 4-30 桅杆仰角 15 度時副頻明顯

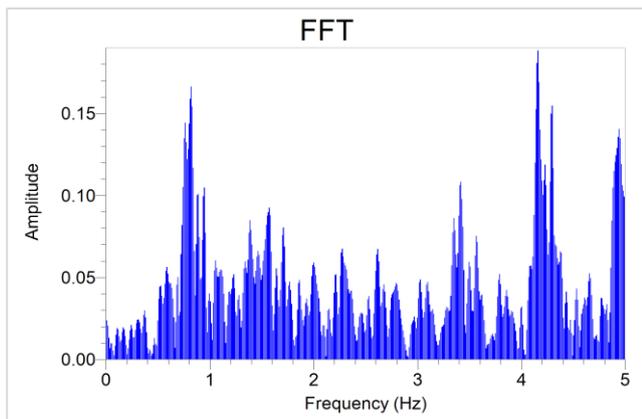


圖 4-31 桅杆仰角 22.5 度時副頻不顯著

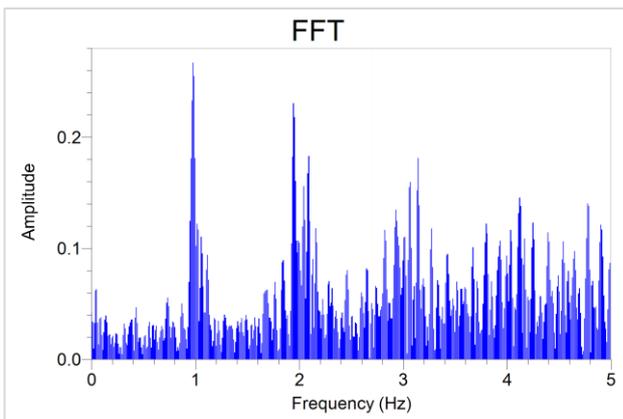


圖 4-32 桅杆仰角 30 度時副頻不顯著

伍、討論

一、 發現

(一) 基頻與副頻

在我們進行頻域數據採集時發現主要會出現兩個頻率，為了進一步瞭解這兩個頻率，我們拍攝了桅杆運動的情形，匯入 Tracker 進行分析，並與頻域資料進行對比，發現副頻（5Hz）為渦激振動所引起的，其大小會受阻流體大小、磁鐵位置、掛物重量等結構上的改變影響；而目前造成基頻（1Hz）的原因目前還不清楚，推測是桅杆本身的自然頻率，故將設基實驗，改變桅杆材質，並觀察基頻的改變。

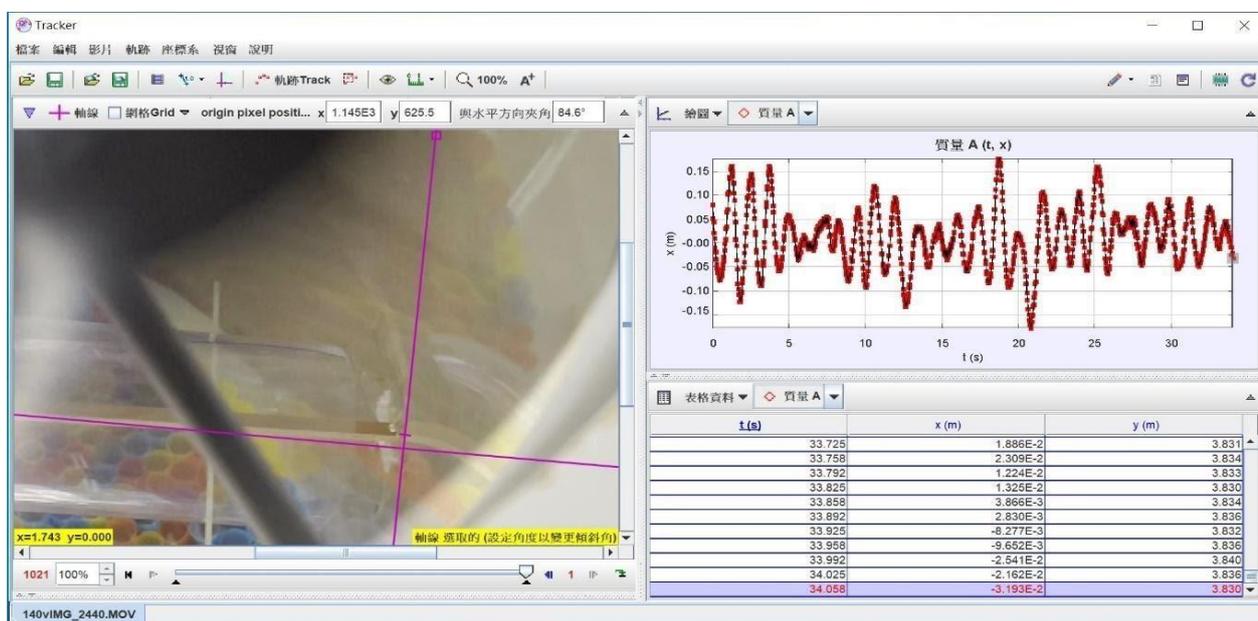


圖 5-1 錄製桅杆振動情形，匯入 Tracker 進行運動軌跡分析

(二) 震幅與電壓

在蒐機關於渦激振動的資料時，一篇在 2019 的研究同樣也是研究渦激振動的報告書中看見其風速對震幅的關係與我們結果中風速與電壓的關係相似，故將繼續進行實驗，確認兩者間的關係。

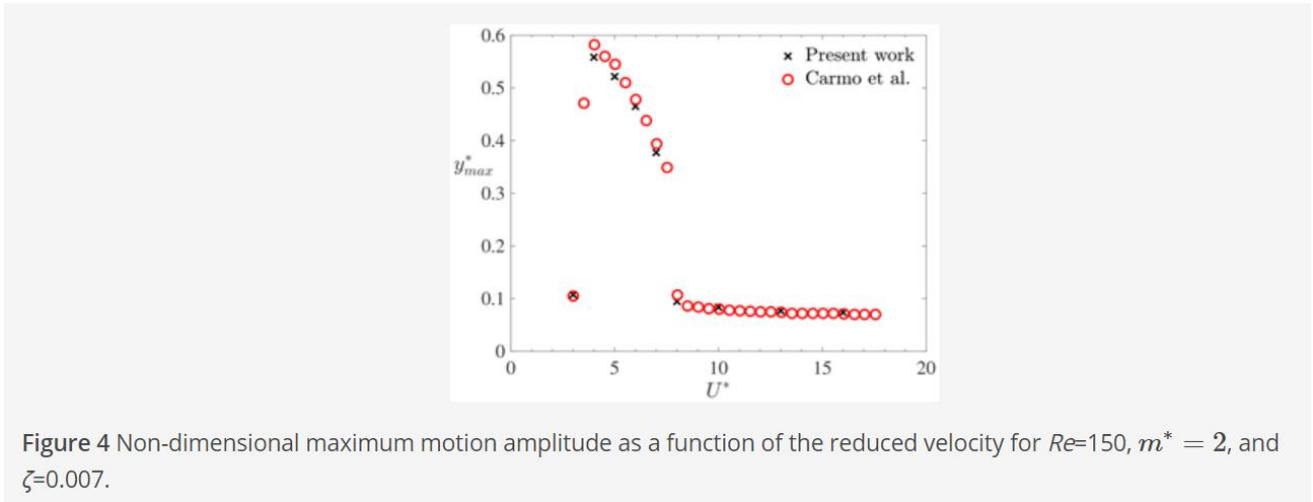


圖 5-2 風速對振幅的關係

(圖源：<https://wes.copernicus.org/articles/5/793/2020/>)

(三) 萬向接頭設計

目前已利用 3D 列印機打印出我們設計的萬向接頭，在測試的過程中發現了幾項問題還需要被改良，其中包含鋼珠與桅桿的結合穩定性的加強、目前的鋼珠仍無法動的非常滑順等，將持續進行改良。

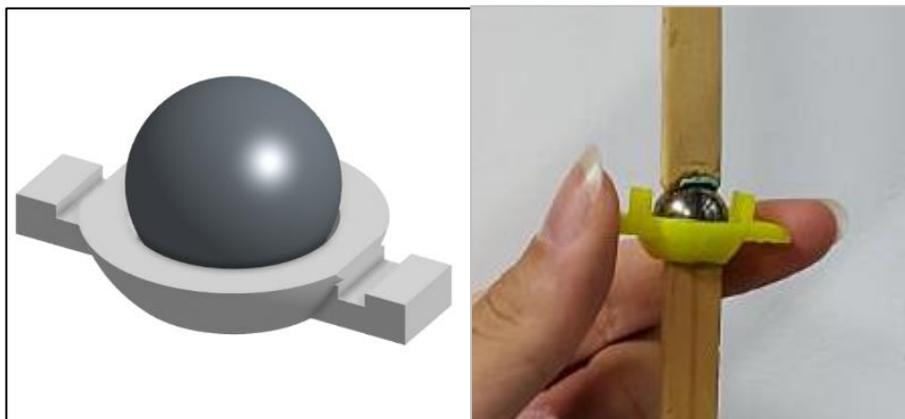


圖 5-3 目前的萬向接頭設計

陸、研究結論與展望

一、 研究結論

- (一) 我們預計的原型發電機大小約為目前實驗裝置等比放大 3 至 5 倍，根據我們吻合雷諾數的結果，原型發電機應該能在風速 6.04 至 26.65 m/s 下正常運作，相當於蒲福氏風級 4 至 10 級，而台灣沿海頻均風速大約在 12m/s 上下，正好介於這個區間。
- (二) 阻流體面積愈大，其所對應的風最適風速區間愈大。
- (三) 同樣風速下，桅杆施力臂小於受力臂時，會有較佳的發電效率。
- (四) 發現電壓(方均根和峰值)在風速小於 5m/s 時，皆會與風速平方成正比。
- (五) 磁鐵位置距支點愈遠頻率愈高。
- (六) 磁鐵位於支點下 21 公分時，可產出最高的峰值與方均根電壓。
- (七) 掛物重量愈重，桅杆振動頻率愈低。
- (八) 風速對桅杆振動頻率無直接影響。
- (九) 副頻在風速 4.6 至 7.7m/s 時較為明顯。
- (七) 桅杆仰角愈大，渦激振動愈不顯著。
- (八) 桅杆仰角小於 15 度時副頻明顯。

二、 未來展望

- (一) 嘗試藉由改變桅杆自然頻率，影響電壓變化頻率。
- (二) 測量更多種阻流體形狀與電壓變化頻率的數據，試求兩者關係。
- (三) 製作陣列式發電機構，進行發電效率的分析。
- (四) 根據當下風速，調變阻流體截面積，以達到更加的發電效率。
- (五) 在自然流場中進行測試，進行機構設計上的調整。

- (六) 改變阻流體受風面材質，觀察變壓、頻率變化。
- (七) 優化無扇葉風力發電機的效能。
- (八) 藉由發電電壓特性，反推當時的風向與風速。

柒、參考文獻

- 一、劉旭光（譯）（2017）。基礎流體力學（原作者：Yunus A. Cengel, John M. Cimbala）。東華出版社。(原著出版年：2017)。
- 二、劉邦彥、黃子嘉、林義傑(2016)。追風逐電-無扇葉型風力發電機。花蓮高中：第56屆中小學科學展覽會 環境科學科 052606
- 三、Vortex bladeless（2020）。VORTEX BLADELESS BIOGRAPHY & CURRENT STAGE
<https://vortexbladeless.com/story-vortex-bladeless-tech-startup/>
- 四、Scientific American（2020）。Solar and Wind Power Could Ignite a Hydrogen Energy Comeback
https://idp.scientificamerican.com/authorize/?response_type=cookie&client_id=sciam&redirect_uri=https%3A%2F%2Fwww.scientificamerican.com%2Farticle%2Fsolar-and-wind-power-could-ignite-a-hydrogen-energy-comeback%2F
- 五、ResearchGate（2018）。Vortex shedding pattern for different Reynolds number
https://www.researchgate.net/figure/Vortex-shedding-pattern-for-different-Reynolds-number-6_fig2_328873691
- 六、Two-dimensional numerical simulations of vortex-induced vibrations for a cylinder in conditions representative of wind turbine towers. Axelle Viré, Adriaan Derksen, Mikko Folkersma & Kumayl Sarwar（2019）。
- 七、Solar and Wind Power Could Ignite a Hydrogen Energy Comeback. Peter Fairley ,<https://www.scientificamerican.com/article/solar-and-wind-power-could-ignite-a-hydrogen-energy-comeback/>（2020）

【評語】 100009

1. 本研究以無扇葉風力發電機為目標，以影像分析軟體 Tracker 得出不同風速下中心柱晃動振幅，輸出電壓與頻率之關係。值得鼓勵。
2. 針對不同變因的影響原理與效益,應作進一步探討與分析.例如：組流體的截面積隨風速而變大,會得到效率提昇,建議對於組流體如何隨風速調整,應做進一步說明.
3. 目前以電壓作為目標參數,建議應對於產生的電能如何計算,依據學理進行分析
4. 對於陣列的參數,例如周期等,與所產生的電能之關係,建議應該依據學理進行分析或是規劃實驗進行分析.
5. 建議思考此結構產生之電能頻率較低,對於電力系統需求的影響.
6. 雖是測試原型，建議討論在實際使用場景下的運作效能。例如一天中風速的變動,各種方向來風的影響等.