

2023 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 100033

參展科別 工程學

作品名稱 一路順風—多向式無扇葉風力發電

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 無扇葉風力發電、渦激振動、田口法

作者簡介



郭耀嶸：

我是郭耀嶸，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，正好聽到了郭耀嶸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，便與郭耀嶸展開了這次研究，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

本研究主要針對多種參數對「無扇葉風力發電機」的影響進行研究，並且提出一個新的發電機構設置 UBA (Universal Bladeless Aerogenerator)，其利用萬向接頭作為支點、擷取各方向的風能轉換為電能。研究中共提出了兩種不同的 UBA 機構設置，分別為磁力線垂直於地面的 VUBA (Vertical Universal Bladeless Aerogenerator) 與磁力線平行於地面的 HUBA (Horizontal Universal Bladeless Aerogenerator)，針對上述兩種 UBA，本研究運用田口方法 (Taguchi Methods) 進行測試，並得出了較佳的參數水準組合，藉以提升 UBA 之發電效率。

本研究透過六組獨立變項實驗，得出直徑較大的阻流體在風速較大的情形下發電效率較佳、負重與發電效率呈負相關等，各參數對 UBA 發電效率之影響。根據實驗結果，本研究針對影響輸出功率之各參數進行了因次分析，並從結果得知，UBA 輸出功率與雷諾數和斯特勞哈爾數有關，藉此進一步提出自然頻率與最適風速之關係式，可用於求得不同結構之 UBA 產出最高功率之特定風速。

Abstract

In this study, we studied the influence of the various parameters on the "bladeless aerogenerator" and proposed a new generator setup Universal Bladeless Aerogenerator, UBA.

UBA uses a ball joint head as a fulcrum to capture wind energy from all directions and transform it into electricity. Two different types of UBAs are proposed in the study. The VUBA (Vertical Universal Bladeless Aerogenerator) with magnetic lines perpendicular to the ground and HUBA (Horizontal Universal Bladeless Aerogenerator) with magnetic lines parallel to the ground. For the above two types of UBA, the Taguchi Method was used to test and find the best combination of parameter levels to improve the efficiency of UBA.

In this study, six sets of independent variable experiments were conducted to determine the effect of each variable on the power generation efficiency of the UBA, such as, at higher wind speeds larger sectional area of the bluff body is more suitable, and the negative correlation between weight and generation efficiency, etc. A dimensional analysis of the parameters that affect the output power was carried out. According to the results, it was found that the output power of the UBA is related to the Reynolds number and the Strouhal number, leading to a new formula for the relationship between natural frequency and optimum wind speed, allowing a specific wind speed to be found for the highest power produced in different structures of the UBA.

壹、緒論

一、研究背景與動機

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。

離開新竹市區沿著台 61 線南下過崎頂一帶，印入眼簾的不再是綿延起伏的丘陵，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，也是台灣所使用的再生能源之一。但由於傳統渦輪式風力發電機體積龐大，需於空曠的大型空間進行設置，台灣在沿海以外的內陸地區鮮少可以看見它們的身影。因此本研究希望設計出一種體積小且不受風向限制的風力發電方式，讓風力發電機能夠普及於都市與丘陵等非沿海地區。

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

目前多數與無扇葉風力發電相關的研究，多是針對單一風向進行設計，而我們希望藉由萬向接頭的設計，製作多向無扇葉風力發電機，使其可以適應都市中相對不穩定的風向。

二、研究目的

如上所述，本研究希望能開發一架多向式無風扇風力發電（Universal Bladeless Aerogenerator ,UBA），為達到此目的，我們須先達成以下六點：

- (1) 藉由用渦激振動，促使阻流體帶動桅杆產生振動。
- (2) 找出可能會對渦激振動產生影響的因子。
- (3) 透過實驗得出各因子與渦激振動、桅杆振動之關係。
- (4) 運用田口方法設計實驗，得出對最佳化之參數組合。
- (5) 經由變異數分析得出各控制因子對系統的貢獻度，執行確認性實驗。
- (6) 找出各參數對發電機組輸出功率之關係。

三、報告架構

本報告共分為七章，第一章為緒論，概述此研究的實驗背景與動機、研究目的、報告架構及文獻探討。第二章為實驗裝置介紹，會對實驗裝置與無風扇風力之發電原理進行介紹，並提出兩種 UBA 之發電裝置設計。第三章為研究原理，介紹了本研究中運用到的實驗原理。第四章為田口方法，簡單地對田口品質工程進行了介紹。第五章為研究方法，闡述了本研究將田口方法運用於無風扇風力發電，在透過獨立變項實驗得出對渦激振動產生影響的因素後，選定實驗參數、規劃並針對兩種不同的裝置設計進行實驗，透過結果分析獲得最佳參數水準組合，最後進行確認性實驗。第六章為討論，針對獨立變項實驗與田口法得出之實驗結果進行進一步的理論分析與討論。第七章為結論，為本研究之總結，針對實驗結果進行討論，提出未來可能的研究方向與建議。

四、文獻探討

(一) 各式風力發電比較

本文引用 Vortex Bladeless 公司於 2018 年刊登於其官網的文章[1]，來說明水平軸風力發電機 (HAWT)、垂直軸風力發電機 (VAWT) 與無扇葉風力發電機 (Vortex) 之間的差異。該文章主要從以下三個方面進行比較：

1. 輸出功率

該公司取用小型水平軸風力發電、小型垂直軸風力發電與無扇葉風力發電，比較在不同風速下各式風力發電輸出功率，無扇葉風力發電之輸出功率大約為水平軸發電機的 25~48%，如表 1.1 所示。

2. 啟動風速

該公司的無扇葉風力發電之啟動風速約為 3.0 m/s，而垂直軸風力發電與水平軸風力發電之啟動風速則分別為 4.0 m/s 與 4.5 m/s，如表 1.2 所示。

3. 風能轉換效率

各式風力發電之風能轉換效率受到風速影響而改變，無扇葉風力發電之風能轉換效率明顯高於水平軸與垂直軸風力發電，如圖 1.1 所示。

表 1.1 不同風速下各式風力發電之輸出功率[1]

Wind speed (m/s)	Small HAWT	Small VAWT	Vortex Bladeless
3	0 W	0 W	3 W
6	72 W	44 W	35 W
7	104 W	66 W	60 W
8	135 W	86 W	80 W
9	160 W	105 W	93 W
Nominal speed	400 W	200 W	100 W

表 1.2 各式風力發電之啟動風速[1]

	Small HAWT	Small VAWT	Vortex Bladeless
Start speed (m/s)	4 m/s	4.5 m/s	3 m/s

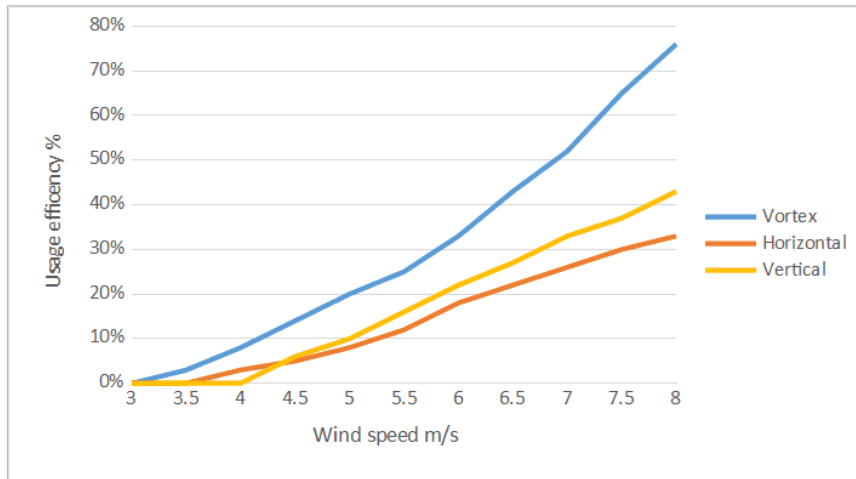


圖 1.1 各式風力發電於不同風速下之風能轉換效率[1]

表 1.3 各式風力發電之綜合比較表[1~3]

發電機種類			
	水平軸風力發電	垂直軸風力發電	無扇葉風力發電
發電功率	高	中(水平軸之 50 ~ 61%)	低(水平軸之 25 ~ 48%)
噪音	約 102 dB A	約 69 dB A	N/A
空間限制	限制高 (需設於大型空曠空間)	限制低 (可設於都會區、山區等)	限制低 (可設於都會區、山區等)
葉片成本	葉片體積龐大，成本較高	葉片設計複雜，成本較高	葉片結構簡單，成本較低
風向限制	需隨風向改變葉片朝向	不受限於風向	不受限於風向

(二) 本研究與 Vortex Bladeless 公司之差異

Vortex Bladeless 公司的無扇葉風力發電機將桅杆支點設置於發電機基座，並將發電裝置固定於阻流體內部，利用渦流對阻流體產生之共振運動，將風能轉換為機械能，再透過電磁感應將此機械能轉換為電能輸出，如圖 1.2 所示。

本研究設計之無扇葉風力發電機 (Universal Bladeless Aerogenerator, UBA) 將桅杆支點設置於裝置中央，並將發電裝置設置於發電機基座，藉此增加受力臂長度，達到提高桅杆振幅、增加感應線圈所接收到的磁通量變化的目的，如圖 1.3 所示。

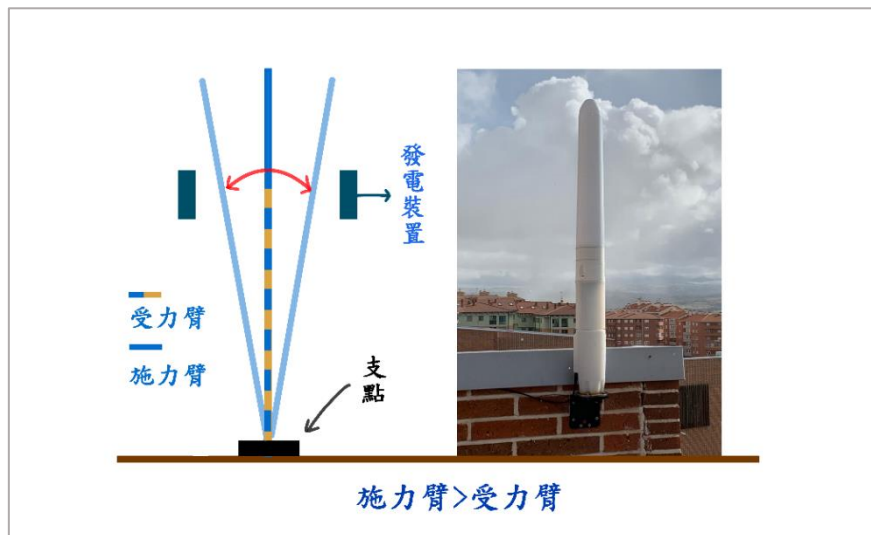


圖 1.2 Vortex Bladeless 公司的無扇葉風力發電裝置

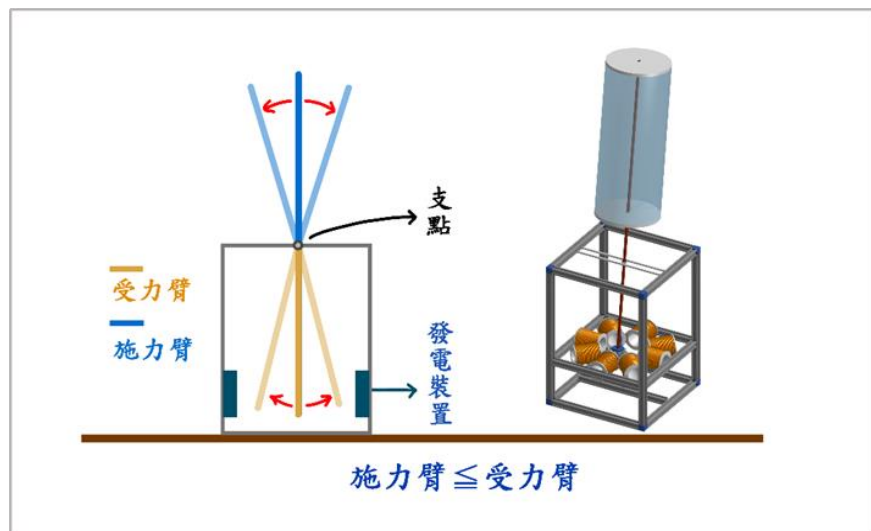


圖 1.3 本研究設計的無扇葉風力發電裝置 (UBA)

貳、實驗裝置介紹

一、量測儀器與軟體簡介

下表 2.1 為本研究所使用之量測儀器與軟體，本研究主要針對 UBA 產出之感應電動勢與電流進行量測，以下為本研究之量測與軟體簡介：

(一) 感應電動勢、電流與風速



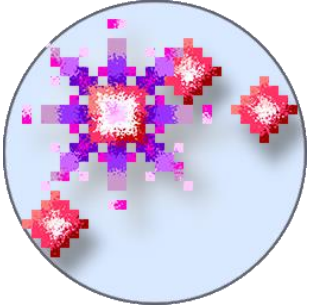



本實驗採用 Vernier 公司所生產的實驗分析採集器 LabQuest 2 進行數據的整理，並用其配合的電能感應器、電壓差異感應器和風速計去採集相關的實驗數據，最後再用搭配的分析軟體 Logger Pro 進行數據的分析，功能包括有把時域資料轉換成 FFT、把資料進行疊加等。

電能感應器能同時感應輸出的電流和電壓，並有著可以在電路上外加電阻的功能，適合小型風機和太陽能板進行電能、電功率的量測；電壓差異感應器能測量低電壓的直流、交流電路，並且可以使用多個感應器串聯及並聯電路；風速計採用渦輪式，能測量的風速區間在 0.5~30m/s。風速計後面有一個標準鎖孔，利用內附的桿子能固定在風洞中，或是在風扇前進行風渦流實驗。

(二) 桅杆振動運動狀態

本研究除了電的分析外，還有需要對 UBA 進行動量分析，因此會需要使用到動量分析軟體 Tracker，Tracker 能對匯入的影像進行質點位移的分析，進而推導出速度與加速度等資料。

表 2.1 量測儀器與軟體表

		
<p>LabQuest 2</p>	<p>Logger pro (分析軟體)</p>	<p>Tracker (分析軟體)</p>
		
<p>Energy Sensor</p>	<p>Anemometer</p>	<p>Differential Voltage Probe</p>

二、實驗設備及器材

本研究許多研究設備皆為組員手工製作，包含有風洞、風機主體、發電裝置等構造，以下將依據不同作用的設備進行簡略的介紹。

(一) 風洞測試裝置

本研究採用大型塑膠桶做為抽風機與測試段的銜接，原因為我們認為桶子的圓柱型可以較為適切的貼合測試段與抽風機，並且塑膠的平滑表面也可減少摩擦，確保風場穩定、降低風能的浪費，風洞裝置如下圖 2.1 所示。實驗中所使用的抽風機型號為 PX-400 手提式抽風機，最高風速可到達 30m/s，本研究所取用的風速區間為 4.55~12.8m/s。實驗中為了觀察渦激振動的現象，此研究採用透明壓克力圓桶做為測試段，直徑為 26cm，如下表 2.2 所示。

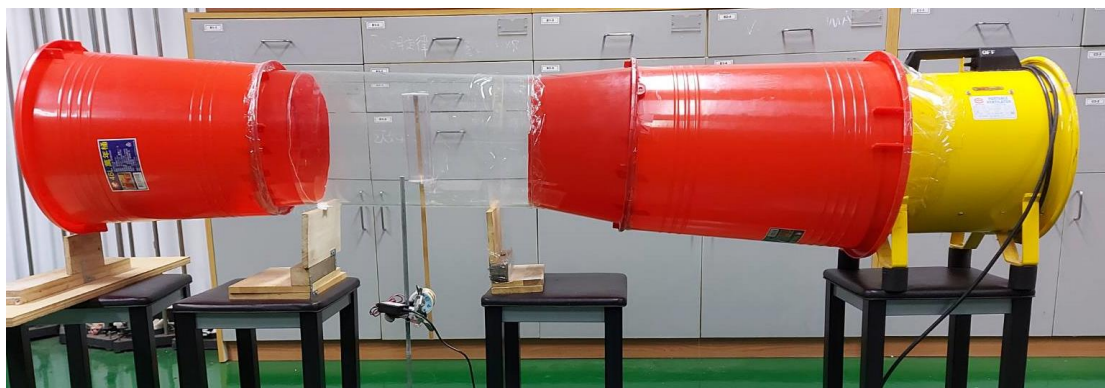



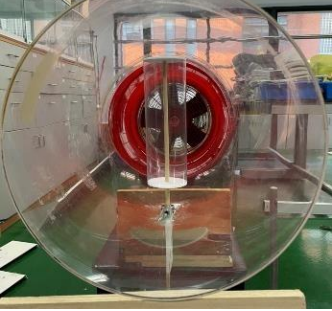


圖 2.1 風洞裝置

表 2.2 風洞器材表

	
<p>大型塑膠桶</p>	<p>整流段</p>
	
<p>PX-400 手提式抽風機</p>	<p>壓克力管</p>

(二) 多向式無扇葉風力發電機 (UBA) 簡介

1. UBA 之風機構造

本研究的風機可分為兩部分：阻流體和桅杆。首先，由透明塑膠片所組成的圓柱阻流體，是做為引發渦激振動的器材來使用，使用易於塑型且輕的塑膠片作為材料，並為了風機的多向性，設計成圓柱形以迎合各向風源。桅杆則為木頭製，使用重量較輕且韌性較佳的木條作為本實驗的風機主幹，如下圖 2.2 及 2.3 所示。

除了上述兩個風機主構造，還有設置於桅杆中心作為機構支點的部分，早期實驗用縫衣針作為支點，僅能接收雙向的風向；近期實驗為了使風機能接收各方向風能，設計了萬向接頭作為替代，第一代萬向接頭為 3D 列印，但有摩擦力的問題，如下圖 2.3 所示。第二代採用市面上販售的魚眼軸承，金屬材質的接頭配合潤滑油以解決摩擦力的問題，如下圖表 2.3 所示。

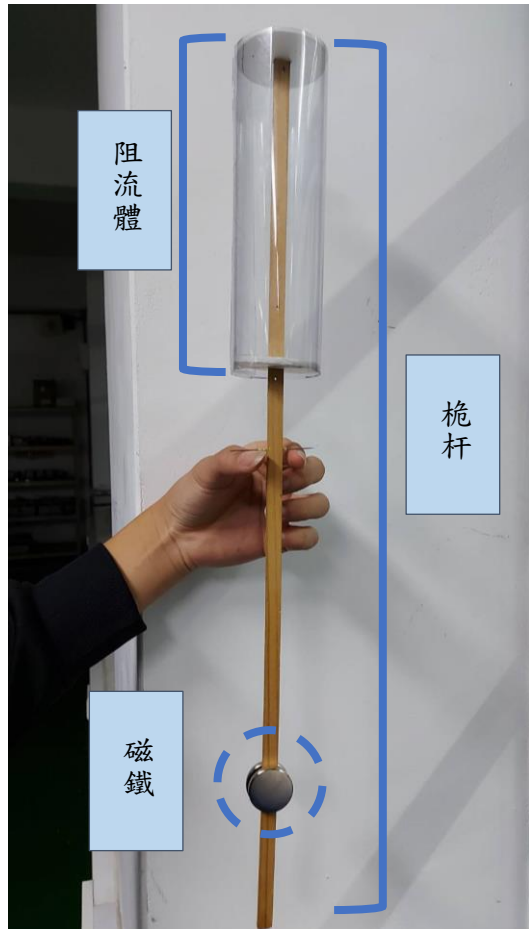


圖 2.2 雙向式桅杆

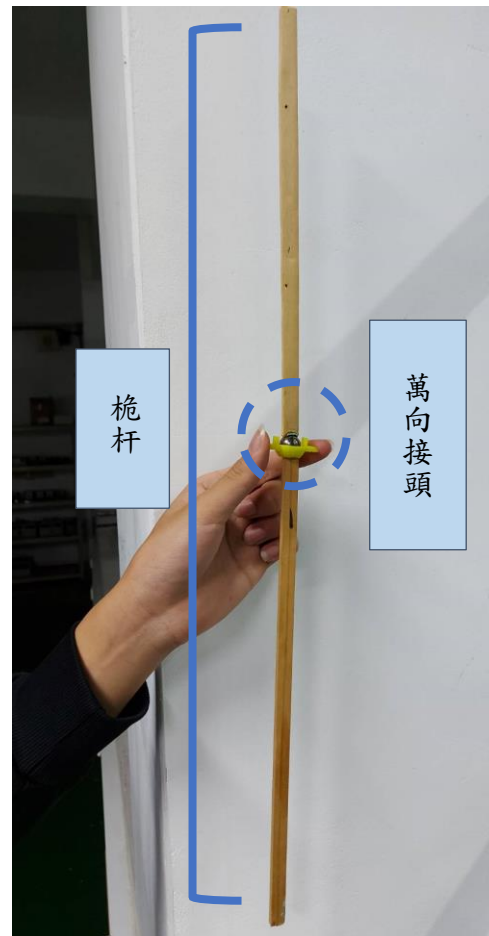


圖 2.3 多向式桅杆

表 2.3 第一代與第二代萬向接頭

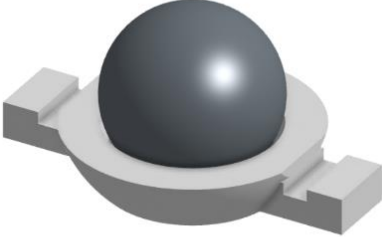


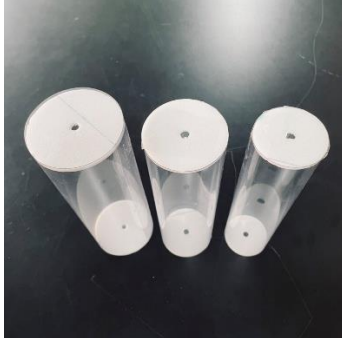

萬向接頭	
第一代	第二代
	
PLA 塑膠材質	不鏽鋼材質

表 2.4 風機器材表

		
木質桅杆	不同直徑的阻流體	魚眼軸承(萬向接頭)

2. UBA 之發電裝置

由於本研究的無風扇風力發電機是藉由渦激振動來發電，不同於傳統的渦輪發電機組，是藉由 3D 列印的底座將磁鐵裝置在桅杆最下方，並與桅杆下的線圈產生電磁感應。

本研究使用的磁鐵為圓形燒結鈹鐵硼磁鐵，單顆約 2000 高斯、重量為 18 公克重。線圈採用直徑 1.2、0.9、0.6、0.37 mm 的線圈，其規格如下表 2.5 所示。

表 2.5 線圈規格表

直徑 (mm)	直徑 (mm ²)	重量 (gw)	總長 (m)	內圈直徑 (mm)	匝數 (匝)	電阻 (Ω)
0.37	0.11	517.20	582.00	3.50	5290.93	92.01
0.60	0.28	502.00	201.67	3.50	1835.00	12.24
0.90	0.64	511.30	89.87	3.50	818.00	2.38
1.20	1.13	515.40	51.31	3.50	467.00	0.77

針對 UBA 之發電機裝置設計，本研究提出了兩種方案：(1) 磁力線方向垂直於地面的 Vertical Universal Bladeless Aerogenerator (VUBA)。(2) 磁力線方向平行於地面的 Horizontal Universal Bladeless Aerogenerator (HUBA)。

本實驗原先是使用 HUBA 作為發電裝置，如圖 2.4，配合渦激振動所帶來的雙向振動，與左右的線圈產生電磁感應，但是此種方法在萬向接頭加入 UBA 後，便產生了發電效率不彰的情形，這是因為無法保證磁鐵的位置能不能與線圈產生最大的磁通量，因此我們便設計出 VUBA，如圖 2.5，此種方法能保證在因應多方向風源時仍能與線圈保持固定的距離方便陣列式發電機的架設，如圖 2.6 所示。在本研究中我們分別針對這兩種方案進行了直交表實驗。

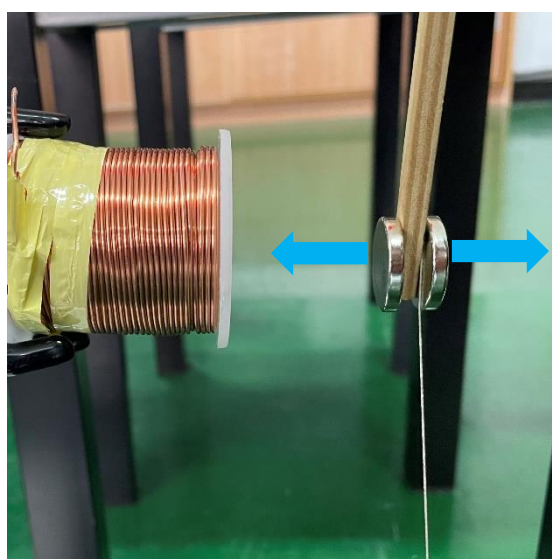


圖 2.4 HUBA 之機構設計，磁鐵與線圈間距離不定（箭頭表桅杆運動方向）

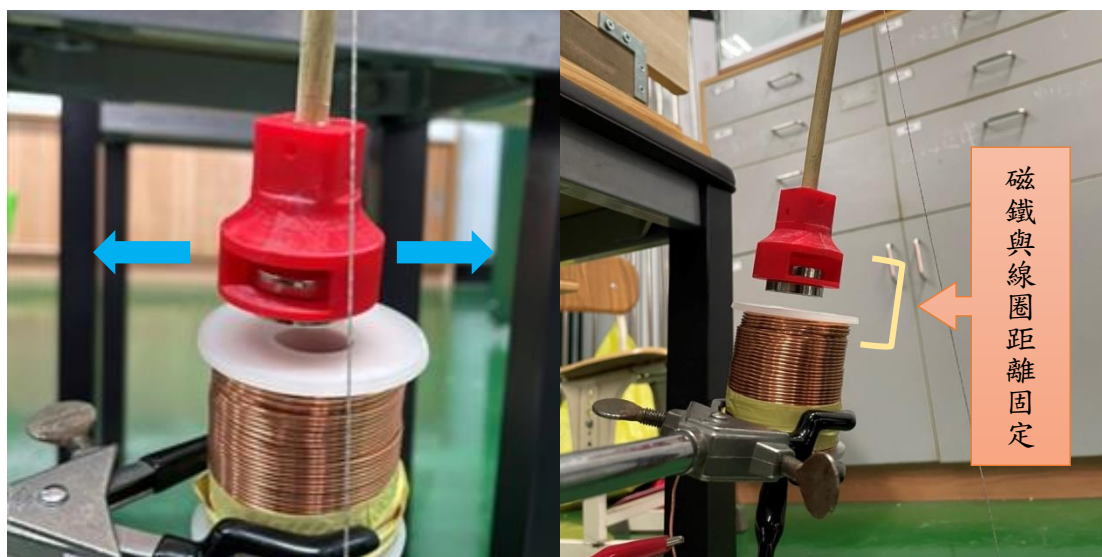


圖 2.5 VUBA 之機構設計，磁鐵與線圈距離固定（箭頭表桅杆運動方向）

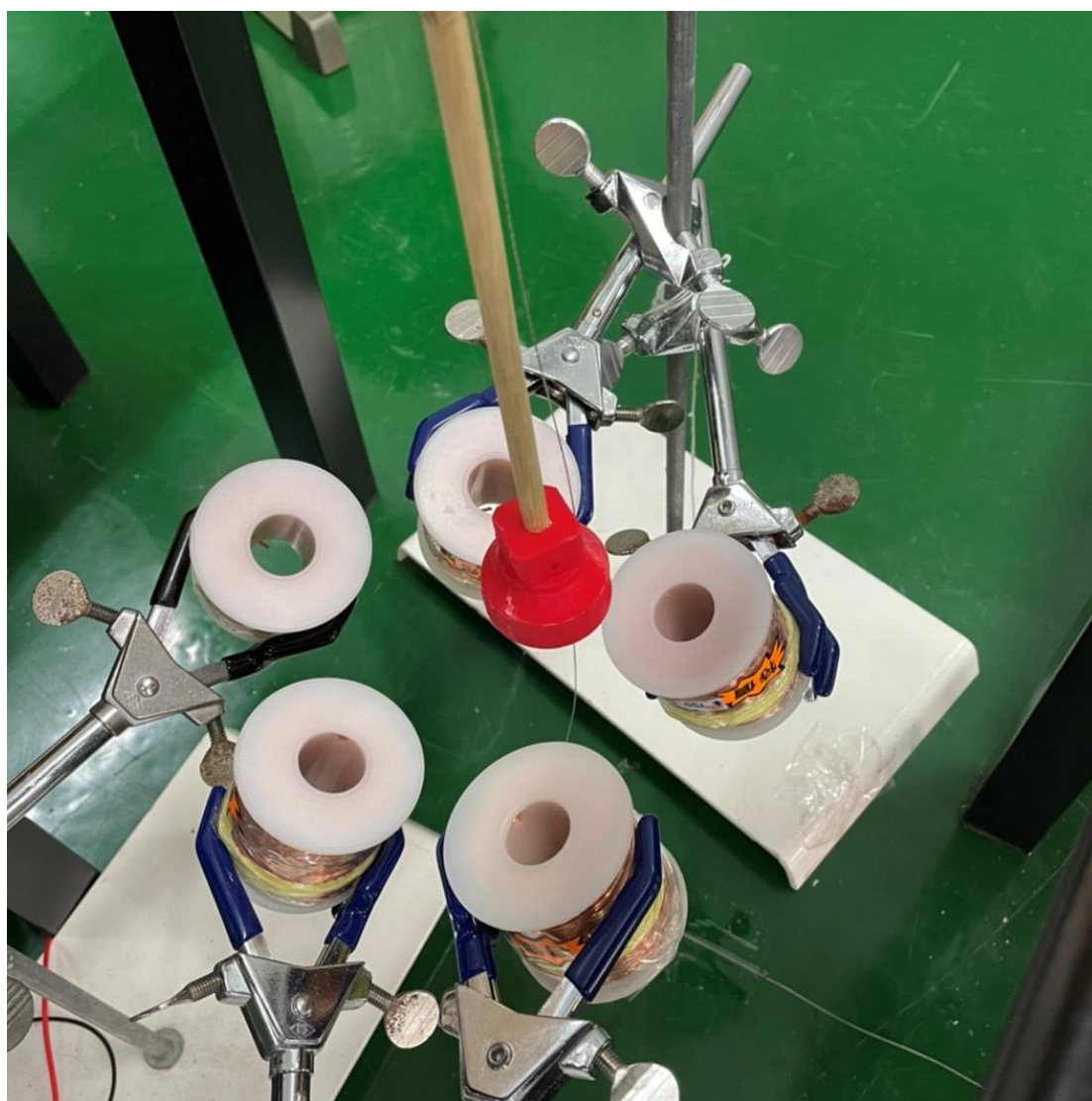


圖 2.6 陣列式發電裝置 (VUBA)

3. UBA 之發電原理

UBA 不同於渦輪式風力發電機直接透過葉片來將風能轉換成機械能，再轉換成電能。UBA 是透過流體力學裡一個稱作渦激振動的現象來將風能轉換為機械能，如圖 2.5 所示：渦激振動會使阻流體左右(垂直於風向)產生升力，進而讓阻流體左右晃動，並帶動桅杆與裝設在桅杆下方的磁鐵與線圈產生電磁感應，如圖 2.7 所示。

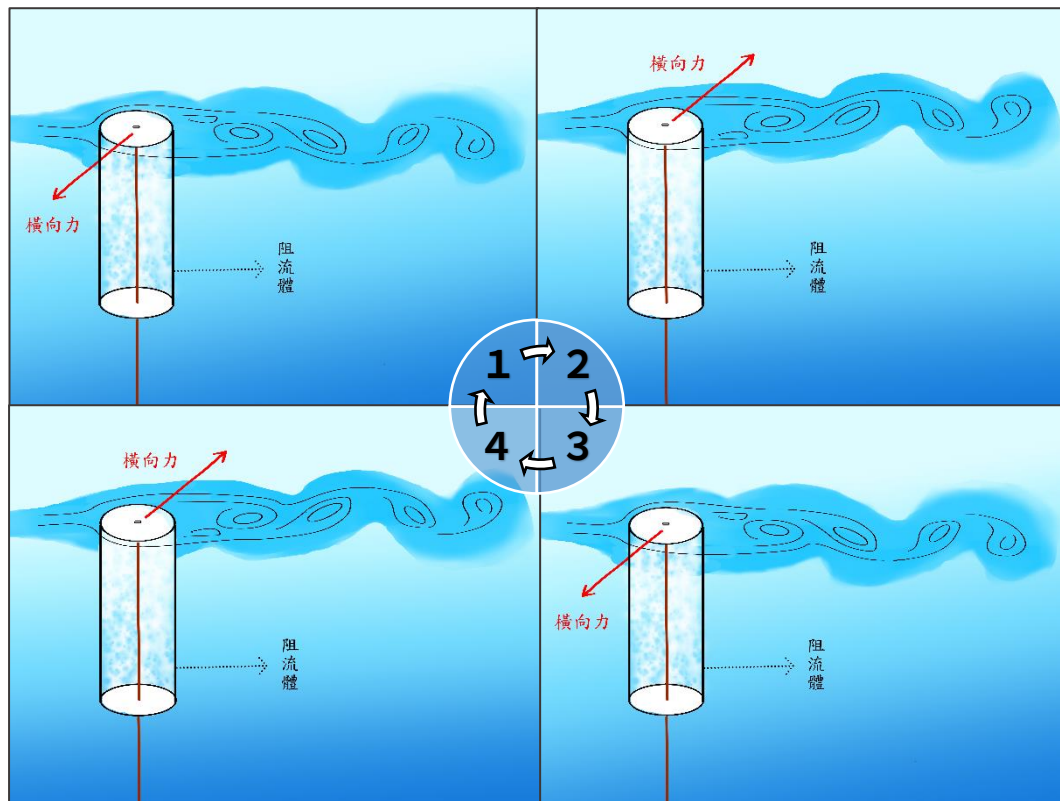


圖 2.7 渦激帶動阻流體產生垂直於風向的振動

桅杆帶動磁鐵振動，磁鐵對感應線圈產生磁通量變化，利用法拉第感磁感應原理，將磁鐵橫向振動的機械能轉換成電能輸出。

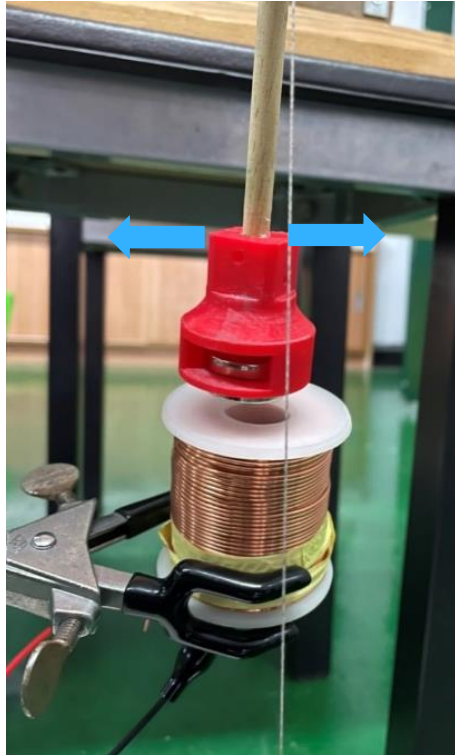


圖 2.8 桅杆帶動磁鐵振動，將機械能轉換為電能（箭頭表桅杆運動方向）



圖 2.6 UBA 之能量轉換示意圖

4. UBA 之優點

UBA 與傳統渦輪式風力發電機的最大不同之處為構造，UBA 如其名，並沒有風扇的構造，因此比起水平軸的渦輪式風機有體積小、架設限制低、啟動風速較低等優勢；而跟直立式風機則是具有成本低廉的優勢，由於直立式風機需要較多精密機械，因此價格一直無法壓低，也造成它無法普及於大眾，但 UBA 的整體構造都較於簡單，比較適合大量生產，以降低生產成本。

參、研究原理

一、 渦激振動 (Vortex-Induced Vibration)

渦激振動(VIV)是一種風(流體)致振動現象。具體定義為一非線性物體在恆定流速的流體中，流體在物體兩側交替產生脫離結構物表面的漩渦，所產生一具有週期性的震盪。在流場中是否能產生渦激振動主要由雷諾數(Reynolds Number)來決定，如圖 3.2 所示。通常在雷諾數在 40 至 300000 會有渦激振動產生。若渦激振動的頻率與結構物的自然振動頻率相近，並產生共振現象，便會產生顯著的振動，甚至使大橋倒塌。



圖 3.1 1940 年美國塔科馬海峽吊橋(Tacoma Narrows Bridge)風毀事件

二、 雷諾數 (Reynolds Number)

雷諾數為無因次量，其所代表流體慣性力與黏滯力的比值。雷諾數較小時，黏滯力對流場的影響大於慣性力，流場中流速的擾動會因黏滯力而衰減，流體流動穩定，為層流；反之，若雷諾數較大時，慣性力對流場的影響大於黏滯力，流體流動較不穩定，流速的微小變化容易發展、增強，形成紊亂、不規則的紊流流場。雷諾數在管內流場的公式如下：

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu}$$

Re：雷諾數 V：流體速度(m/s) D：特徵長度(m) ν ：流體運動黏度(m^2/s)

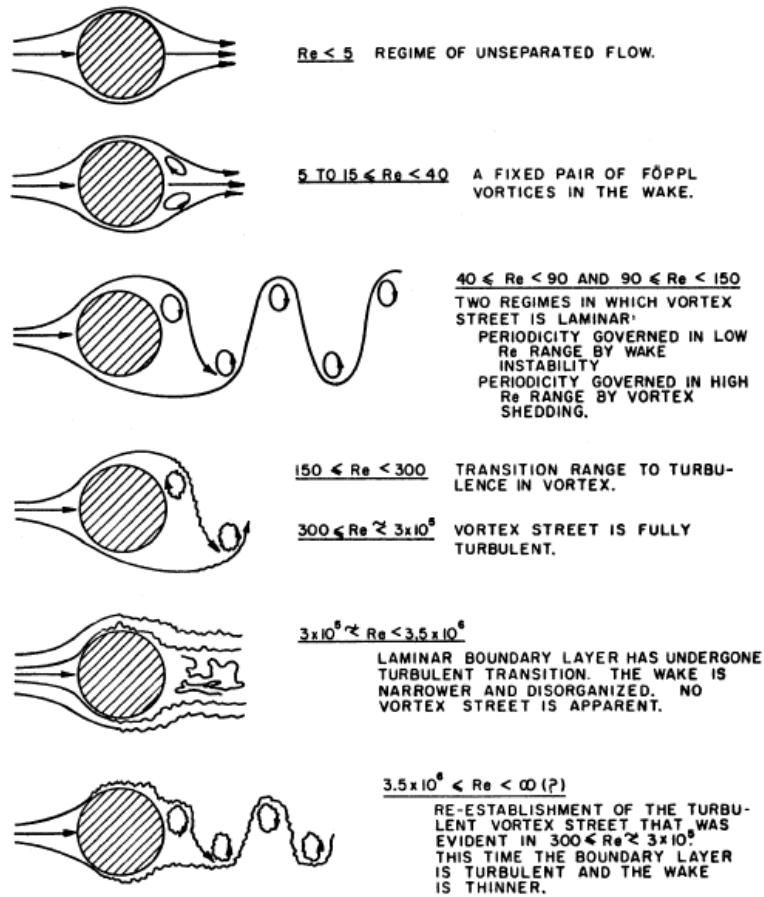


圖 3.2 不同雷諾數(Re)所對應之渦流狀態[2]

三、斯特勞哈爾數 (Strouhal Number)

斯特勞哈爾數是流體力學中用來描述周期性非定常流動的一個無因次數，可用於計算渦旋脫離的頻率，渦激振動頻率可用斯特勞哈爾數(Strouhal Number)、流體速度與特徵長度來計算，在本研究中用於討論渦激振動之頻率與最適風速之關係，其公式如下：

$$f = \frac{St \cdot D}{V}$$

f：頻率(Hz) D：特徵長度(m) V：流體速度(m/s)

St：斯特勞哈爾數（當雷諾數介於 300~300000 之間時常為一定值：0.2）

當雷諾數在一區間內，斯特勞哈爾數可視為定值 0.2，如圖 3.3 所示。

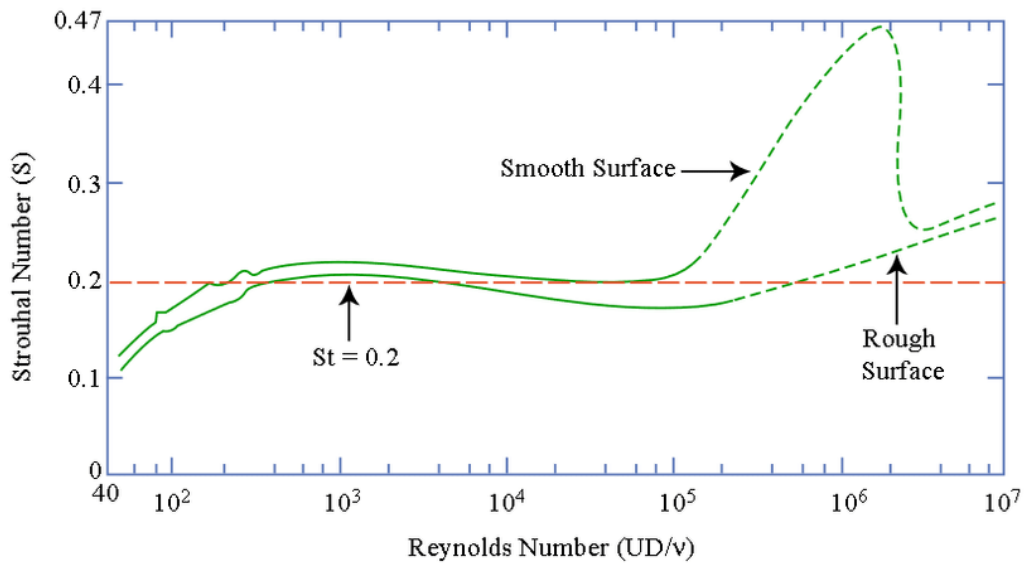


圖 3.3 不同雷諾數(Re)所對應之斯特勞哈爾數(St)

Data from Lienhard (1966) and Achenbach and Henecke (1981). $St \sim 0.21 (1-21/Re)$ for $40 < Re < 200$, from Roshko (1955)

四、法拉第電磁感應定律 (Faraday's Law of Electromagnetic Induction)

電磁感應定律是電磁學的一條基本定律，也是變壓器、電感元件及多種馬達、發電機、螺線管的根本運作原理。定律指出任何封閉電路中感應電動勢大小，等於穿過這一電路磁通量的變化率。此定律預測磁場如何與電路交互作用以產生電動勢，而這種現象稱為電磁感應。可以藉由以下公式得出感應電動勢。

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt}$$

ε : 感應電動勢(V) ϕ_B : 磁通量(Wb) t : 時間(s)

肆、田口方法

一、田口品質工程

田口方法 (Taguchi Method)，一套由田口玄一博士開發倡導的工程方法，以統計學的方法進行實驗與生產過程的控管，是一種透過實驗進行參數最佳化設計的方法，目前已被廣泛應用於各種工程領域。

田口方法利用直交表來進行參數配置，藉此達到精簡實驗次數、降低成本的目的；透過找出降低製程與品質變異的原因，進而將各式變異極小化、穩定品質，得出最佳參數組合，提高生產力。本研究參考陽明交通大學管理學院的一篇碩士論文[4]，採用之田口方法參數設計流程如圖 4.1 所示。

(一) 影響產品品質的參數種類

產品的品質會受到參數改變的影響進而呈現不同的結果，這些參數可分為信號因子(M)、控制因子(Z)和雜訊因子(X)三類，參數關係圖如下圖 4.2 所示，各參數敘述如下：

1. 控制因子 (Control factor)：該參數水準可由設計人員掌握且決定，經由對此參數水準的調整與控制，有效地降低產品質特性的變異。
2. 信號因子 (Signal factor)：該參數被用於表達想要的回應，可由設計人員自行調整。
3. 雜訊因子 (Noise factor)：該參數又稱不可控制因子，為設計人員無法控制的參數，其水準隨著環境變，因此無法確知某一特定情況下的雜訊因子值。

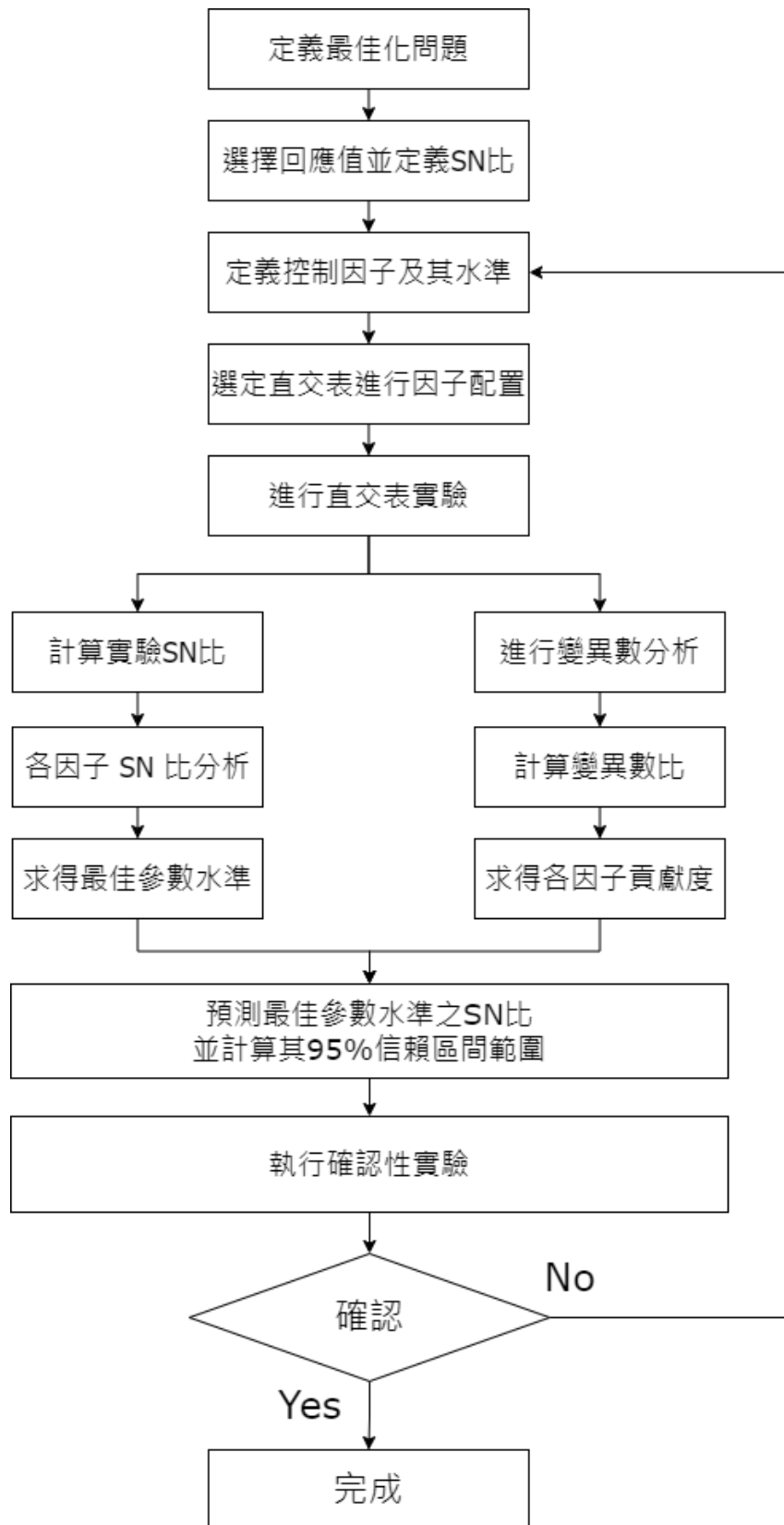


圖 4.1 參數設計流程圖

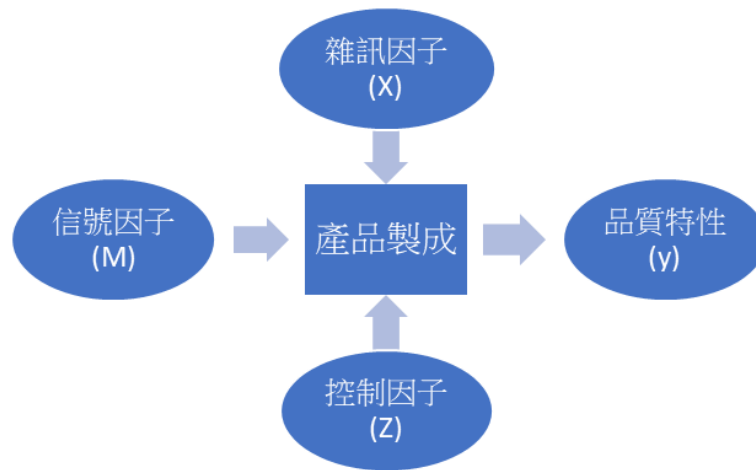


圖 4.2 參數關係圖

(二) 標準直交表

直交表常被用於實驗計畫中以簡化實驗，以較少的實驗次數或取有用的統計資訊。標準直交表以 $L_a(b^c)$ 來命名，其中 a 代表該直交表共需執行 a 組實驗、可容納最多 b 個水準的因子共 c 個，以本研究採用的 $L_9(3^4)$ 直交表為例，它可以容納 4 個 3 水準的控制因子，共需執行 9 組實驗，如下表 4.1 所示。

表 4.1 L_9 直交表

EXP	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

二、訊號雜音 (S/N) 比

田口方法中所定義好的品質主要可分為兩點：1.品質特性的平均值與目標直一致。2.品質特性的變異越小越好。而 S/N 比同時反應品質特性的平均值與變異，在田口方法中常作為該批產品的品質指標，習慣以 η 表示單位為 dB。S/N 比的計算方式依據品質特性可分為望大、望小、望目三種，若 S/N 比越大表示變意越小，以下為各種品質特性之計算方式與敘述：

(1) 望大特性 (larger-the-better)

當品質特性 y 越大，品質愈佳，目標值為無限大。

$$\eta_{LTB} = -10\log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum\frac{1}{y_i^2}\right)$$

(2) 望小特性 (smaller-the-better)

當品質特性 y 越小，品質愈佳，目標值為零

$$\eta_{SLB} = -10\log_{10}\left(\frac{\sum y_i^2}{n}\right)$$

(3) 望目特性 (nominal-the-better)

當品質特性 y 越接近目標值，品質愈佳。

$$\eta_{NTB} = -10\log_{10}\left(\frac{\sum \bar{Y}^2}{S^2}\right)$$

三、變異分析

變異數分析 (Analysis of Variance, ANOVA) 主要用於篩選實驗因子對實驗的結果影響是否顯著，並利用 F 檢定法得出各實驗參數之貢獻度。

變異分析如下表 4.2 所示，其中總變異平方和(S_T)，變數 j 之平方和(SS_j)，誤差平方和(S_e)，自由度 (Degree of freedom, DOF) 為某一實驗因子的水準數減 1，變數 j 之變異數(V_j)，誤差之變異數(V_e)，平均變異和平方(CF)，變數 j 之變異比(F_j)，變數 j 之貢獻度(p_j)，誤差的貢獻度(p_e)。m 代表直交表樣本組合數，w 為實驗因子的個數和，n 表示某一實驗因子各水準之樣本個數。

$$CF = \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^m \eta_i \right)^2$$

$$S_T = \sum_{i=1}^m (\eta_i)^2 - CF$$

$$SS_j = \frac{1}{r_A} \left(\sum_{i=1}^a (P_i)^2 - CF \right) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{m/n} \left(\sum_{i=1}^n \eta_{ik} \right)^2 - CF$$

$$S_e = S_T - \sum_{j=1}^w SS_j$$

$$V_j = \frac{SS_j}{f_j}$$

$$V_e = \frac{S_e}{f_e}$$

$$F_j = \frac{V_j}{V_e}$$

$$\rho_j = \frac{S_j - f_j V_e}{S_T} \times 100\%$$

$$\rho_e = \frac{S_e + (f_T - F_e) V_e}{S_T} \times 100\%$$

表 4.2 變異分析表

Factor	S (變動)	DOF (自由度)	V (變異)	F (變異比)	p (貢獻度)
A	SS_j	f_j	V_j	F_j	p_j
B					
C					
D					
Error	S_e	f_e	V_e	-	p_e
Total	S_T	f_T	-		100%

伍、研究方法

一、研究架構與流程步驟

在設計、執行直交表實驗前，本研究欲先了解對渦激振動產生影響的因素為何，以進行合理且有效的實驗參數設計。本研究之實驗流程如圖下圖 5.1，相關進行步驟如下所述，主要分為以下四階段進行研究：

(一) 獨立變項試驗

根據現有原理與文獻，歸納出可能會對渦激振動、桅杆振動造成影響的因子，如風速、阻流體形狀、桅杆掛重等。接著分別針對這些因子設計並進行獨立變項實驗，求得各項因子對渦激振動的影響與關係。

(二) 田口方法

利用在第一階段得出的結果，決定回應值與品質特性，辨認控制因子及其水準，選擇合適的直交表進行因子配置。執行直交表實驗、收集數據，接著繪製各因子水之 S/N 比效果圖，獲得最佳參數水準，進行確認性實驗。

(三) 變異分析

將直交表實驗中得到的數據進行變異分析 (ANOVA)，計算各因子之貢獻度，並將貢獻度最低的控制因子併入誤差項。本研究採用 95%信賴區間計算確認性實驗之期望 S/N 比範圍，將其用於判定確認性實驗結果是否成功。

(四) 因次分析

基於經驗與實驗結果，本研究從實驗中選取了多個參數之物理量進行因次分析，並藉由白金漢 π 定理 (Buckingham π Theorem) 從現有數個因子中找出數組無因次常數，以表示各參數之關係，並與理論進行對照。本研究中共選取了以下 6 個參數作為變量以進行因次分析，而各參數分別由 3 個基本量 (長度 L、時間 T、質量 M) 所組成，則可由 $6-3=3$ 得知本研究中應存在 3 個無因次 π ，本研究將其以 π_1 、 π_2 、 π_3 表示。

參數	符號	因次
1. 風速	V	L/T
2. 渦激振動頻率	f	$1/T$
3. 特徵長度	D	L
4. 功率	P	$P = \frac{W}{T} = ML^2/T^3$
5. 空氣動力黏度	μ	$\frac{M}{TL}$
6. 掛物重量	M	M

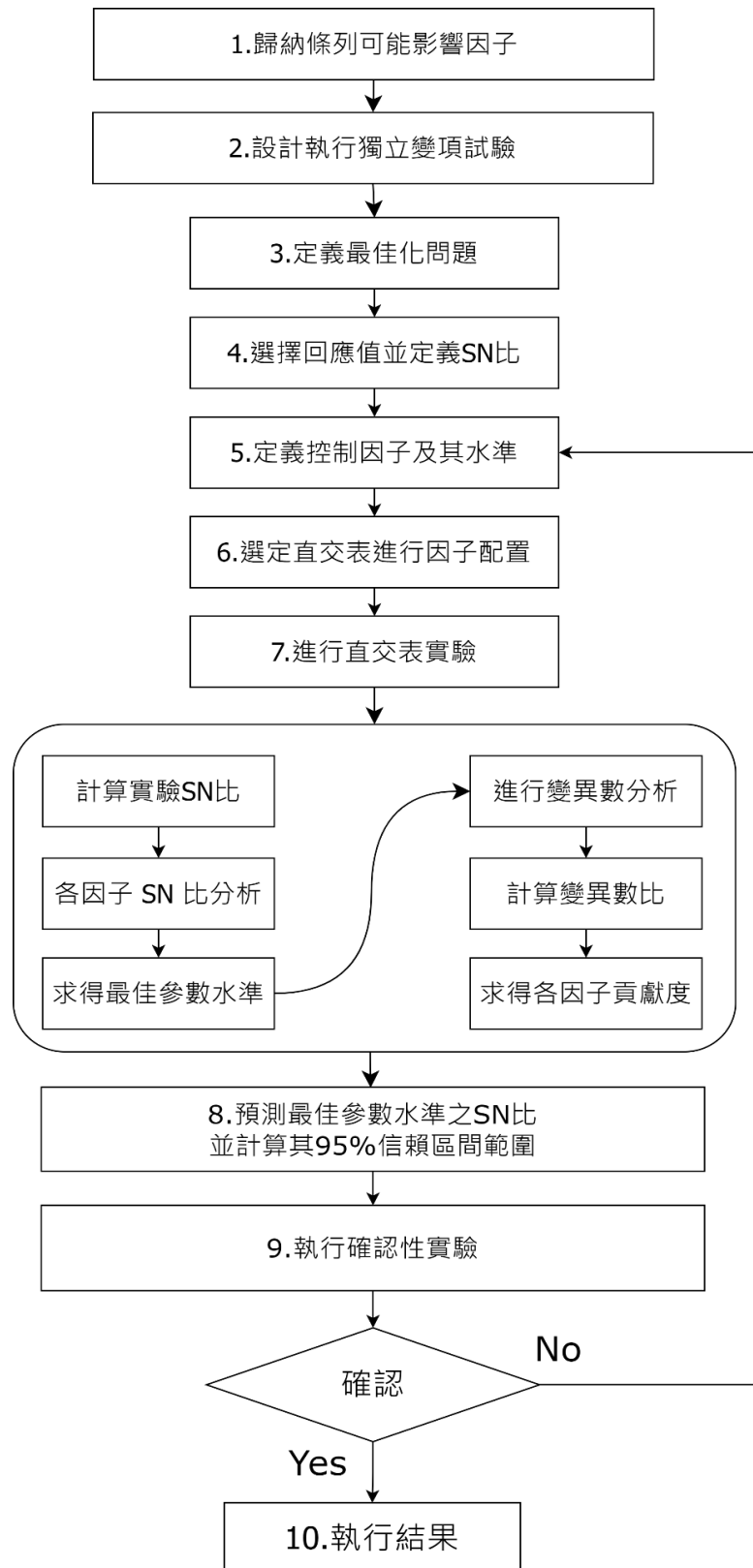


圖 5.1 實驗流程圖

- 步驟一：歸納條列可能影響因子：本步驟透過文獻探討與原理蒐集，了解了無扇葉風力發電的發電原理，接著條列出可能會對渦激振動、桅杆振動產生影響的因子，如風速、阻流體直徑、桅杆長度、掛物重量等。
- 步驟二：設計執行獨立變項實驗：此階段針對於步驟一條列出的各項因子，各別設計獨立變項實驗，並透過實驗結果得出各因子與渦激振動之關係。
- 步驟三：定義系統最佳化問題：此階段包含定義本研究目標、設計並架設風洞裝置、設計 UBA 之發電裝置等。
- 步驟四：選擇回應值並定義 S/N 比：本階段確立了直交表實驗中的品質特性與回應值，決定 S/N 比之計算方法。
- 步驟五：定義控制因子及其水準：本階段根據步驟二得出之實驗結果，將會對渦激振動產生影響的因子設為控制因子，並決定其水準。
- 步驟六：選定直交表進行配置：根據控制因子之個數與水準，選擇合適的直交表，並將各水準之控制因子配置於直交表中。
- 步驟七：進行直交表實驗：進行實驗、收集數據，重複進行每組實驗，以確保實驗結果之現性，並盡可能的排出外在雜訊干擾，得出最佳參數水準組合。
- 步驟八：預測確認性實驗之 S/N 比範圍：本階段將各組實驗得出的數據，根據望大特性公式計算出各參數水準之 S/N 比，繪製各因子水準的 S/N 比效果圖。進行變異分析 (ANOVA)，得出各參數之貢獻度，並計算確認性實驗之期望 S/N 比範圍。
- 步驟九：執行確認性實驗：利用步驟七中得出之最佳參數水準進行多次實驗，確認結果之 S/N 比是否皆落在，步驟八計算出之確認性實驗之期望 S/N 比範圍。若在範圍內，則表示確認性實驗成功。若結果不在範圍內，則回到步驟五重新定義控制因子及其水準。

二、實驗規劃

(一) 獨立變項實驗

UBA 的構想為以一種流體力學的現象卡門渦街的應用，本研究希望找出在怎樣的條件下能使 UBA 發揮出最佳的效能，因此條列出了多項可能對渦激振動、桅杆振動產生影響的因子，各別利用 HUBA 在後傾角為零時，進行單變項實驗，以下是本研究進行的實驗，獨立變項實驗流程如圖 5.2 所示：

- (1) 在固定風速下，阻流體直徑對功率、頻率關係。
- (2) 在固定風速下，掛物重量與功率、頻率關係。
- (3) 固定阻流體直徑，風速與電壓、頻率關係。
- (4) 不同阻流體直徑所對應的最適風速區間。

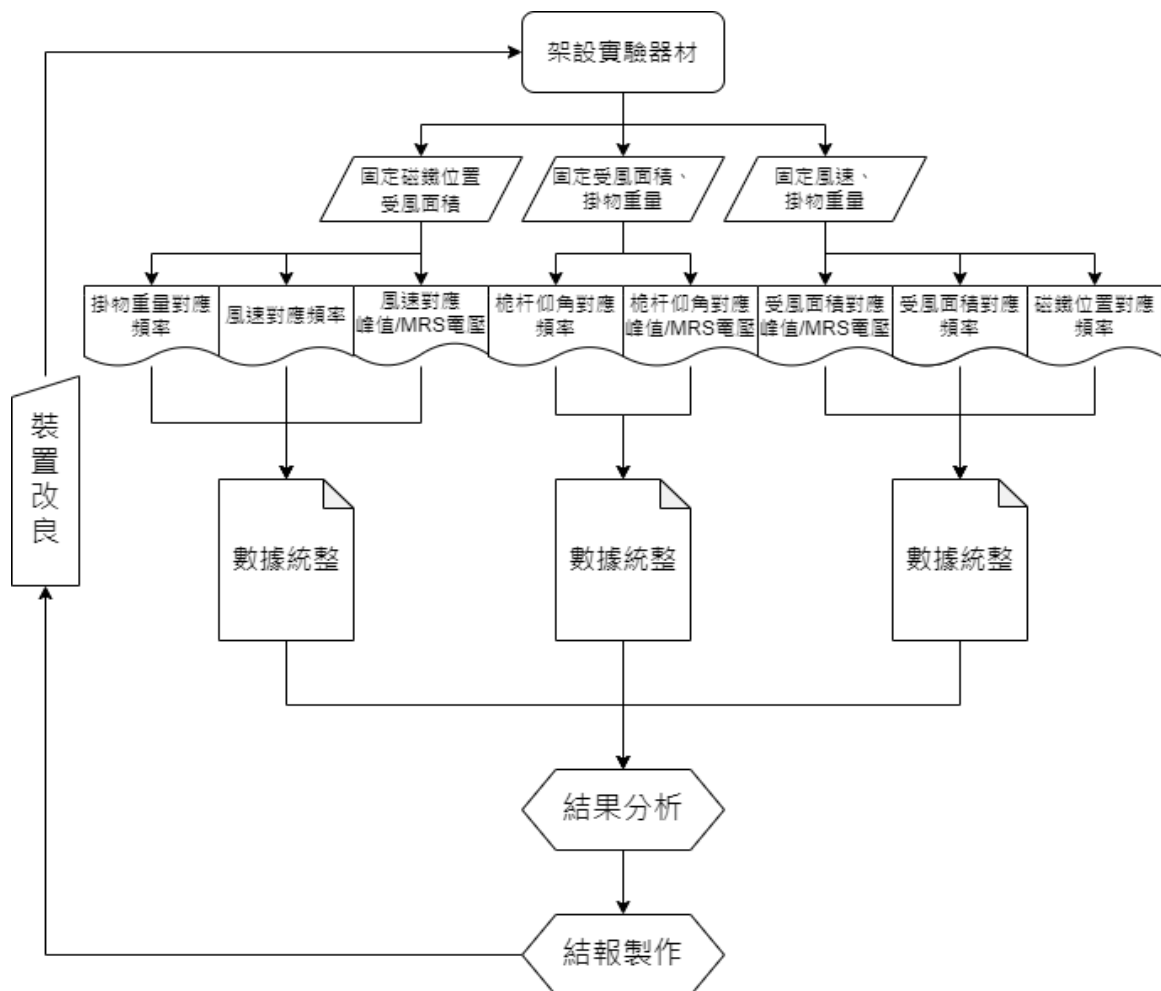


圖 5.2 獨立變項實驗之流程

(二) 獨立變項實驗結果

1. 阻流體直徑與頻率關係

我們分別測量 30 秒內不同直徑所產生的時域電壓、電流信號，並將此時域資料以快速傅立葉轉換 (FFT) 為頻域資料。此實驗中採用四種不同直徑之阻流體在 7.1 m/s 的風速下進行實驗，下圖 5.3、5.4、5.5 分別為直徑 7cm、8cm、9cm 之阻流體所對應之頻域資料。根據此實驗結果結果可知：直徑 7cm、8cm、9cm 之阻流體渦激振動頻率大約會落在 17~21 Hz 之間，而阻流體直徑愈大其所對應到的渦激振動頻率也會愈低。

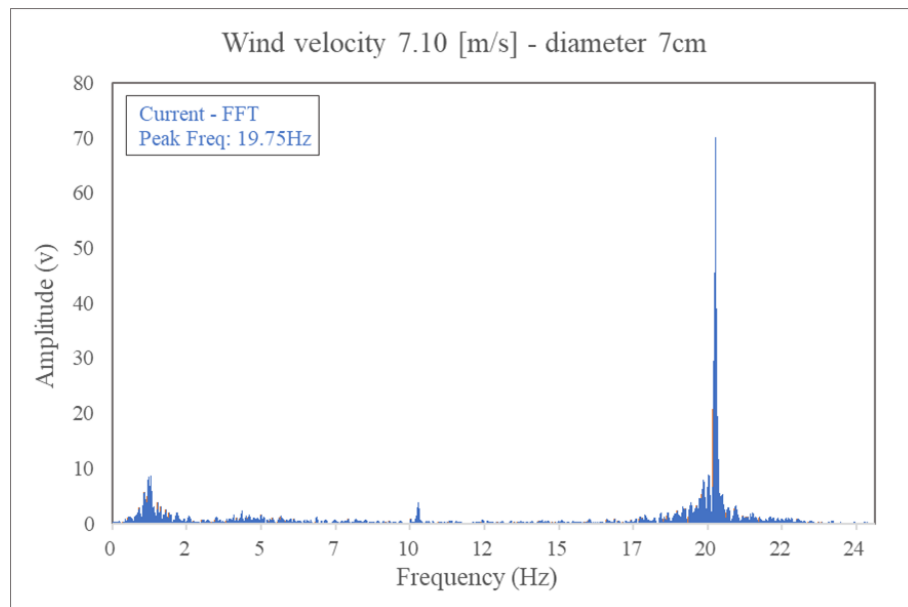


圖 5.3 直徑 7cm 之阻流體渦激振動頻率大約 19.75Hz

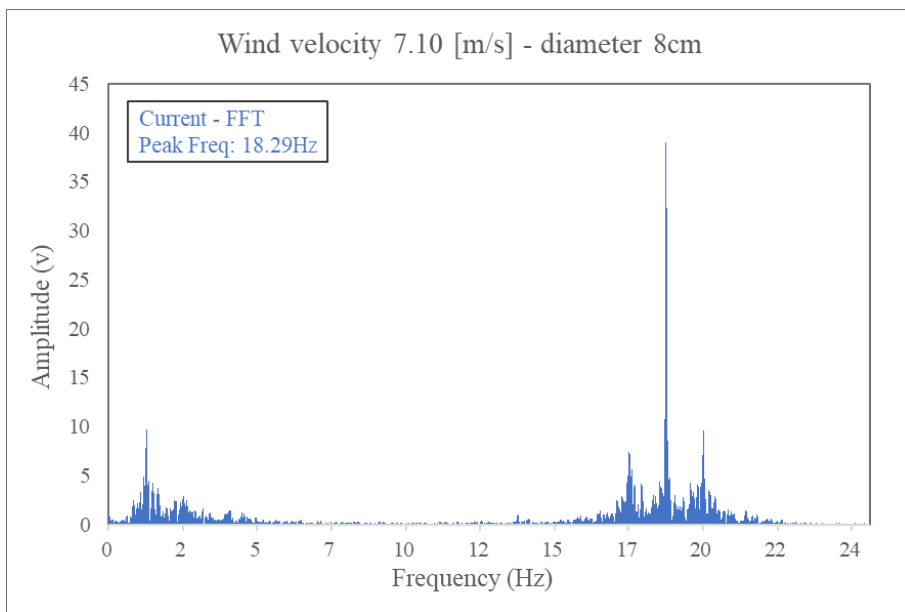


圖 5.4 直徑 8cm 之阻流體渦激振動頻率大約 18.29Hz

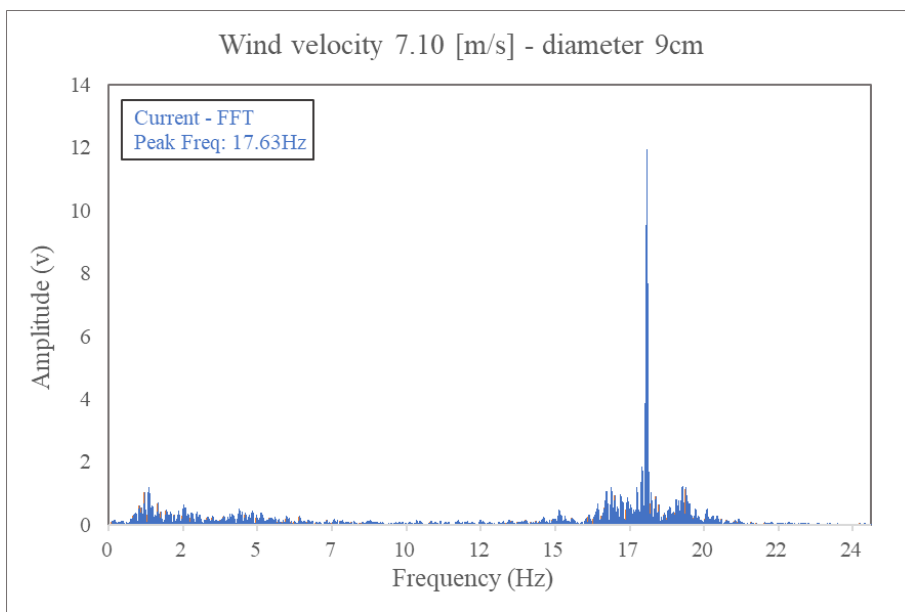


圖 5.5 直徑 9cm 之阻流體渦激振動振動頻率大約 17.63Hz

2. 掛物重量與頻率關係

此實驗固定風速，測量 30 秒內不同掛物重量下的時域電壓、電流信號，並將此時域資料以快速傅立葉轉換（FFT）為頻域資料。下圖 5.6、5.7、5.8 分別為掛物 50、100、150 克重時，所對應的桅杆振動頻率，根據實驗結果：掛物重量對渦激振頻率之影響並不顯著，如圖 5.9 所示。

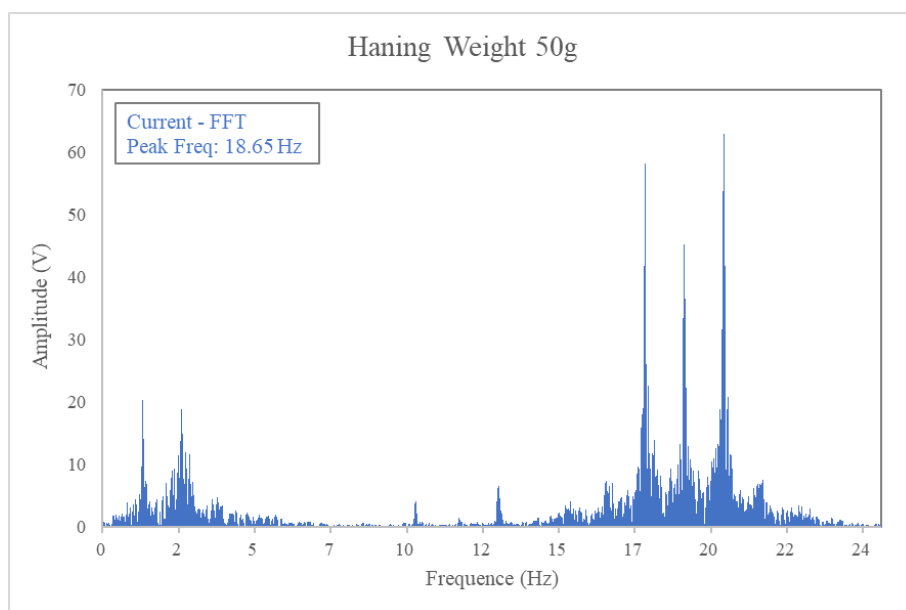


圖 5.6 掛物重 50 克時頻率大約為 18.65 Hz

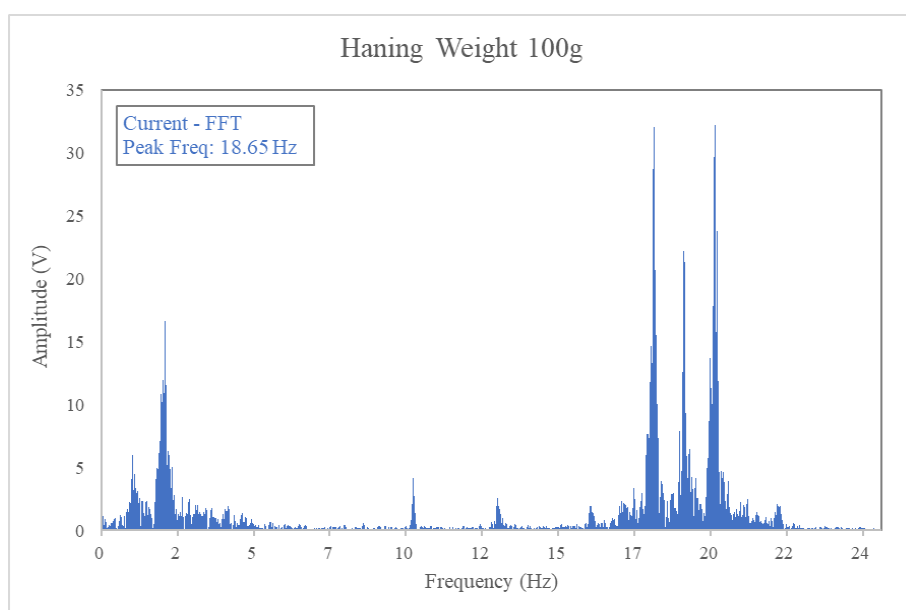


圖 5.7 掛物重 100 克時頻率大約為 18.65 Hz

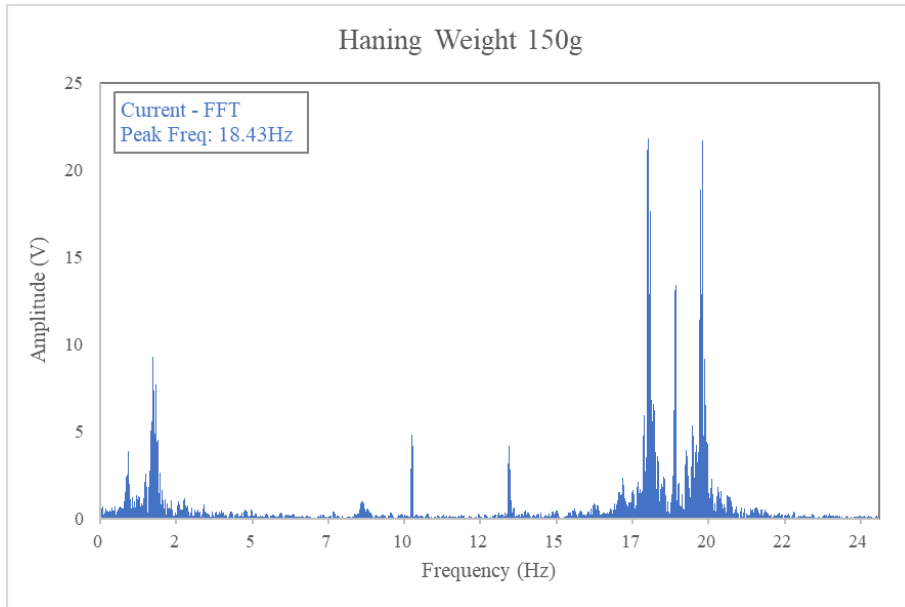


圖 5.8 掛物重 150 克時頻率大約為 18.43 Hz

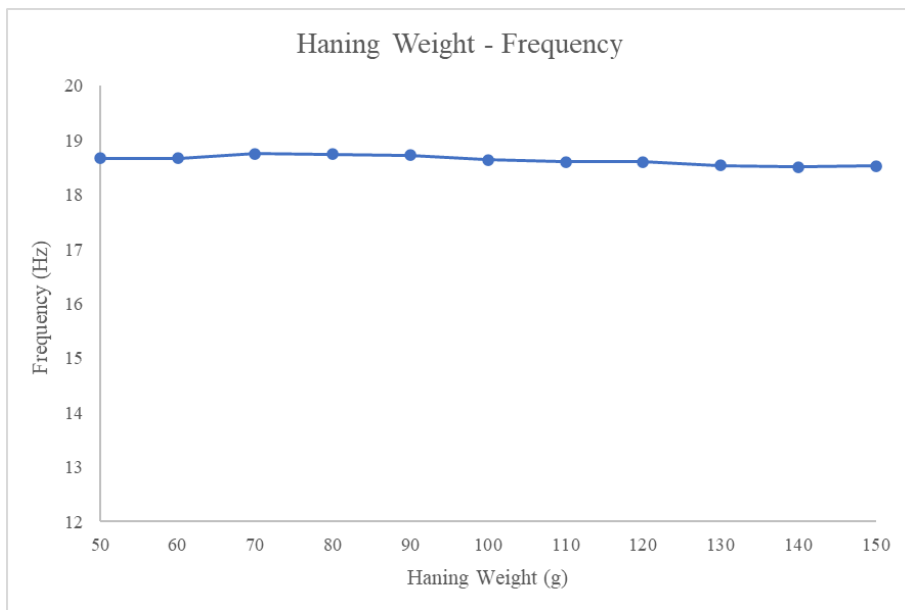


圖 5.9 相同風速下掛物重量對渦激振動頻率無顯著影響

3. 風速與功率、頻率關係

此實驗固定阻流體直徑，測量 30 秒內不同風速下的時域電壓、電流信號，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。根據此實驗可得出以下四項結果：

(1) 不同尺寸之流體皆對應一特定風速，在此風速下能產出最高電壓，本研究中將此一可產出最大功率的特定風速稱之為該阻流體的「最適風速」，如圖 5.10、5.11 所示。

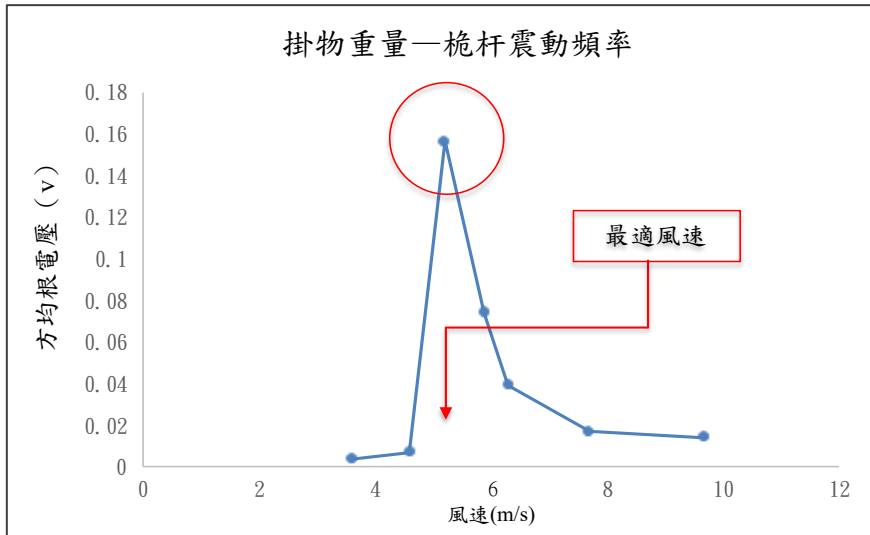


圖 5.10 風速對應方均根電壓

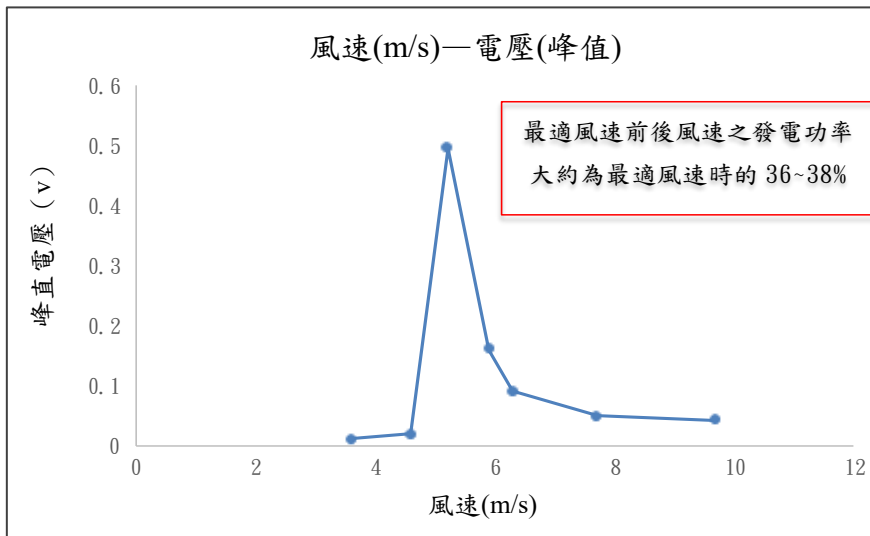


圖 5.11 風速對應峰值電壓

(2) 本研究將上述產出最高峰值與方均根電壓的風速定義為「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，下圖 5.12、5.13、5.14 為不同直徑所對應的最適風速區間。

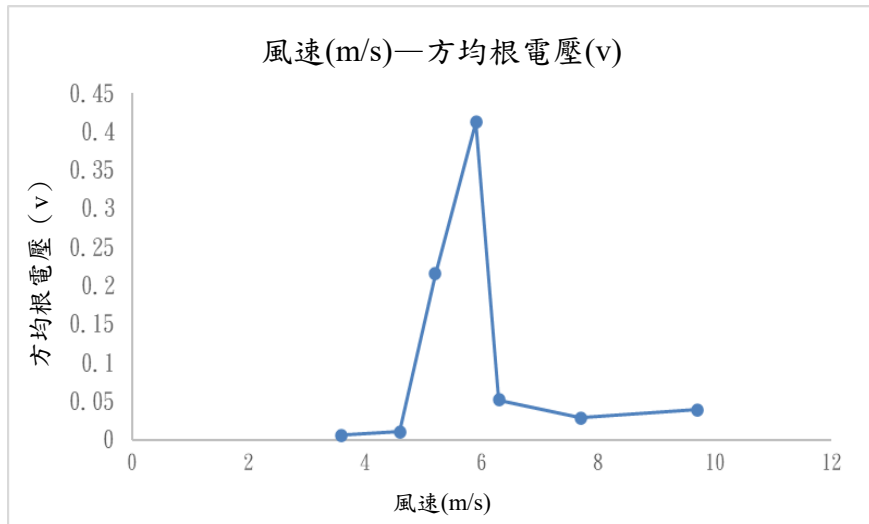


圖 5.12 直徑 6.5cm 時最適風速區間大約位於 5.9m/s 上下

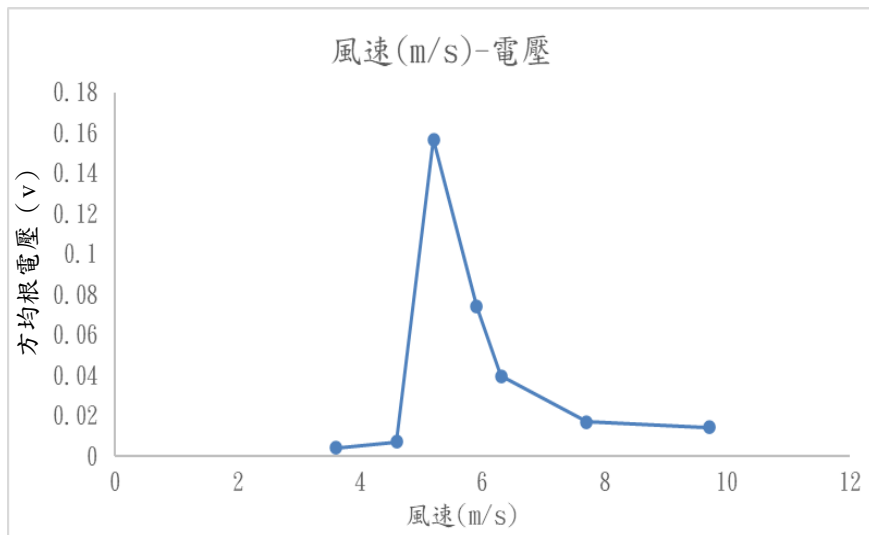


圖 5.13 直徑 6.0cm 時最適風速區間大約位於 5.55m/s 上下

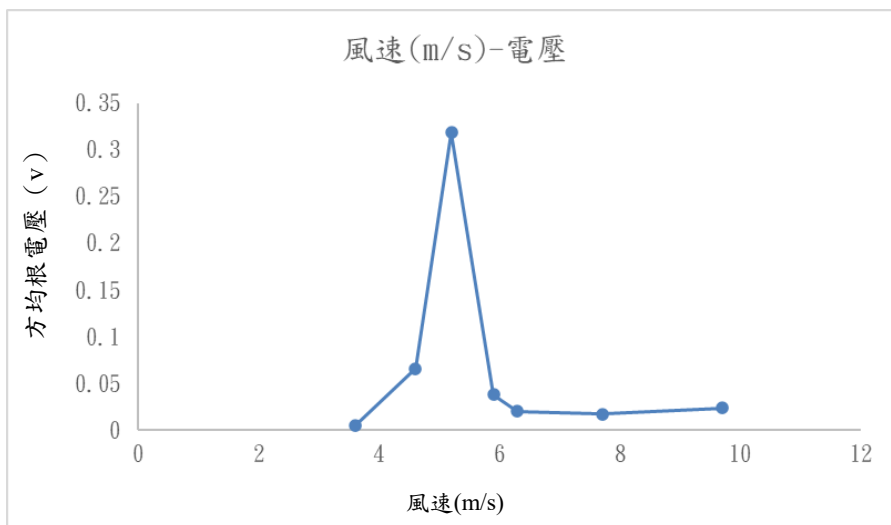


圖 5.14 直徑 5.2cm 時最適風速區間大約位於 5.2m/s 上下

(3) 振動物的主要頻率會在風速 4.6~7.7m/s 之間較為明顯。

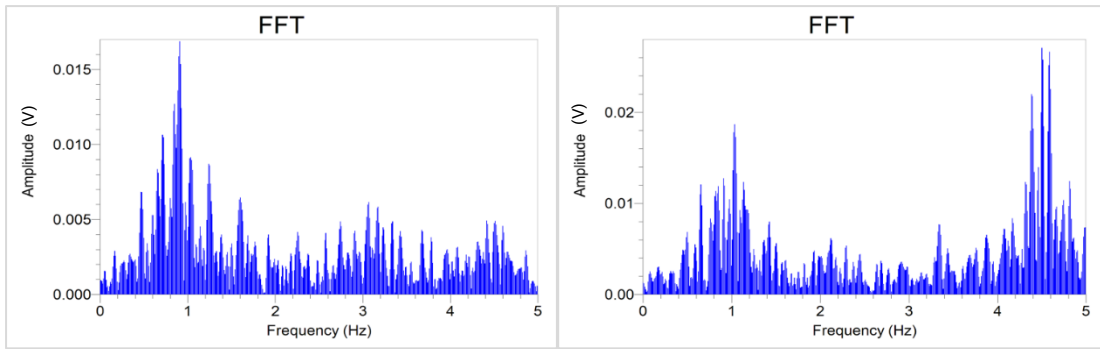


圖 5.15 風速 3.6m/s 時無明顯副頻出現 圖 5.16 風速 4.6m/s 時副頻開始出現

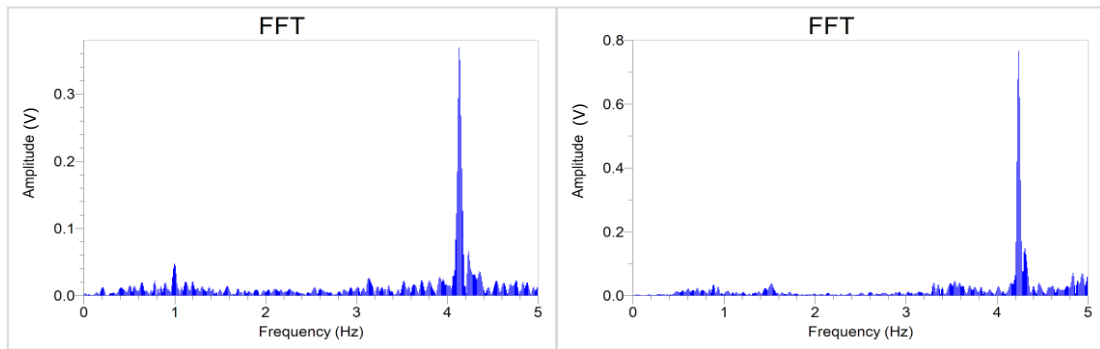


圖 5.17 風速 5.2m/s 時副頻約為 4.12Hz 圖 5.18 風速 5.9m/s 時副頻約為 4.21Hz

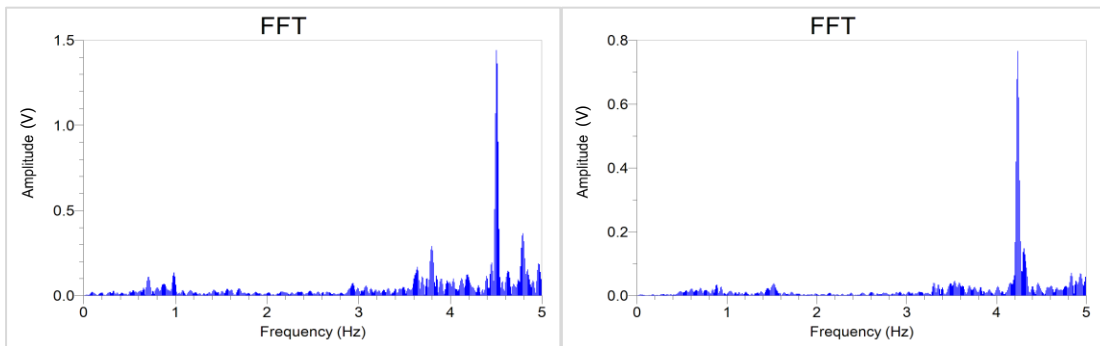


圖 5.19 風速 6.3m/s 時副頻約為 4.5Hz 圖 5.20 風速 7.7m/s 時副頻約為 4.22Hz

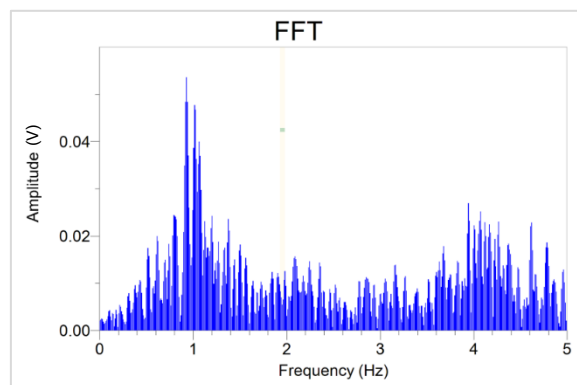


圖 5.21 風速 9.7m/s 時副頻不顯著

(4) 最適風速區間前，風速二次方與峰值及方均根電壓成正相關，結果如下圖 5.22、5.23 所示。

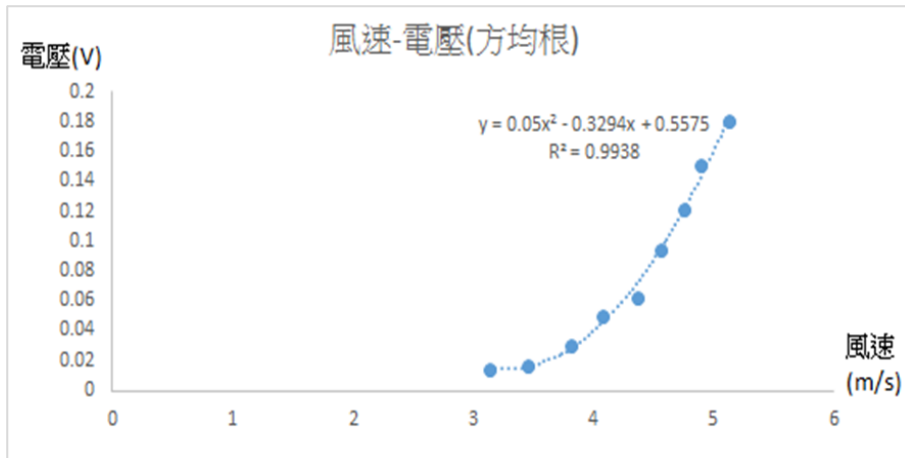


圖 5.22 風速平方與方均根電壓成正相關

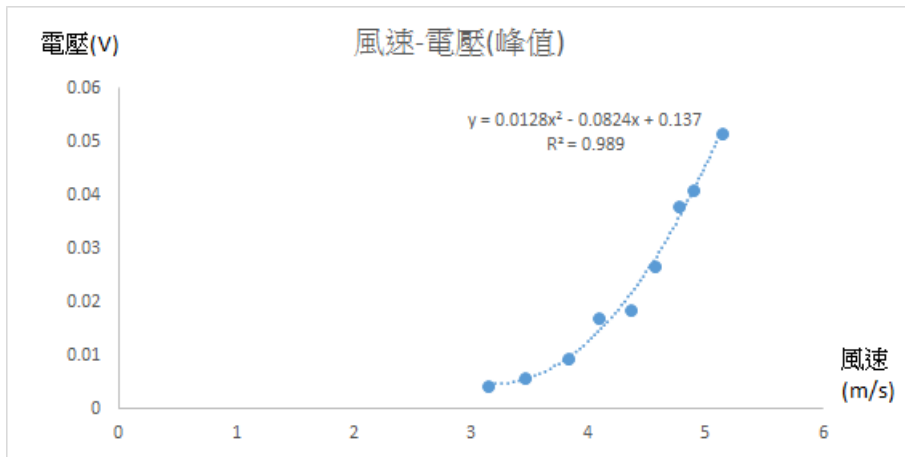


圖 5.23 風速平方與峰值電壓成正相關

(三) 定義系統目標/回應值/控制因子/S/N 比

1. 決定系統目標與回應值

根據上述多組獨立變項實驗結果，本研究將此系統的佳定義為：

- (1) 桅杆振動頻率越高越佳
- (2) 感應電動勢之方均根值越大越佳
- (3) 電流之方均根值越大越佳

綜合上述三點，本研究決定將功率設為直交表實驗中之回應值，適用望大品質特性計算 S/N 比。

2. 決定控制因子及其水準

根據獨立變項實驗結果，本研究歸納出重要的控制因子並設定其水準，如圖 5.24、表 5.1 所示。

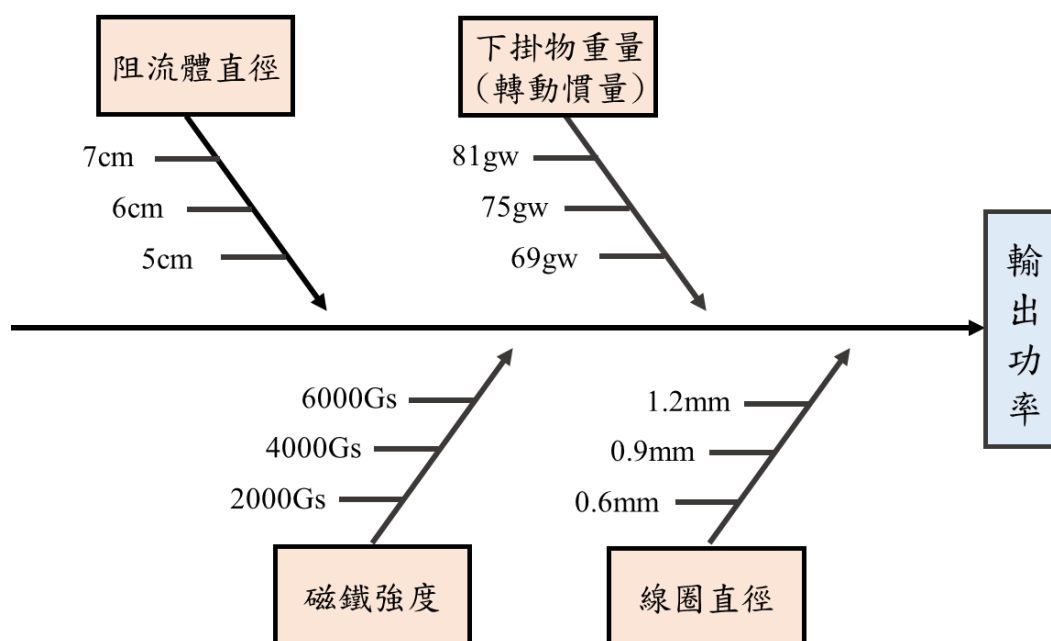


圖 5.24 影響輸出功率因素之魚骨圖

表 5.1 控制因子水準表

Factor	description	Level	Level 1	Level 2	Level 3
A	Bluff body diameter (Volume)	3	5cm	6cm	7cm
B	Hanging Weight	3	69g	75g	81g
C	Magnetic intensity	3	2000Gs	4000Gs	6000Gs
D	Coil diameter	3	0.6mm	0.9mm	1.2mm

(四) 選定直交表進行因子配置

本研究共有四個三水準控制因子，其自由度為： $4 \times (3-1) = 8$ ，因此採用實驗次數最少且剛好可以容納四個三水準因子的 $L_9(3^4)$ 直交表，表 5.2 為 $L_9(3^4)$ 直交表和控制因子配置。為了方便調整控制因子本研利用 Excel 製作了直交表實驗之參數配置檢索表，如表 5.3 所示。

表 5.2 $L_9(3^4)$ 直交表與控制因子水準配置

EXP	A	B	C	D	y	average	stdev	S/N
1	1	1	1	1				
2	1	2	2	2				
3	1	3	3	3				
4	2	1	2	3				
5	2	2	3	1				
6	2	3	1	2				
7	3	1	3	2				
8	3	2	1	3				
9	3	3	2	1				

表 5.3 實驗參數配置檢索工具

參數配置檢索	參數	阻流體直徑	轉動慣量(桅杆負重)	磁鐵強度	線圈直徑	補重
實驗編號	參數水準	3	2	1	3	25gw
8	參數值	7cm	75gw	2000Gs	1.2mm	
	請於“實驗編號”下方欄位輸入欲直行實驗編號 輸入後即會顯示該組實驗之參數水準配置			磁鐵+磁鐵座		
				50gw		

三、執行直交表實驗

為確保實驗結果之在現性，本研究將每組實驗風速控制於 6.1 公尺每秒，每組實驗進行五次，量測自桅杆開始出現振動起 30 秒內之感應電動勢與電流，每秒紀錄 50 筆數據，並在每次實驗結束後將風速歸零後重新啟動，共得出 90 筆實驗數據，表 5.4、5.5 為直交表實驗數據。

表 5.4 實驗量測值 (VUBA)

EXP.	A	B	C	D	1	2	3	4	5	average	stdev	S/N
1	1	1	1	1	0.09369	0.08362	0.08307	0.07828	0.08180	0.08409	0.00575	-19.09992
2	1	2	2	2	0.10976	0.09242	0.07057	0.08907	0.11436	0.09524	0.01754	-17.42809
3	1	3	3	3	0.10619	0.10170	0.08323	0.08032	0.11504	0.09730	0.01500	-17.17557
4	2	1	2	3	0.21410	0.21388	0.19775	0.22140	0.20949	0.21132	0.00871	-11.24187
5	2	2	3	1	0.13028	0.11062	0.12776	0.13828	0.13165	0.12772	0.01032	-15.98513
6	2	3	1	2	0.07557	0.07870	0.06928	0.08504	0.07268	0.07625	0.00602	-20.21931
7	3	1	3	2	0.35416	0.32336	0.30897	0.30499	0.31268	0.32083	0.01985	-7.47460
8	3	2	1	3	0.37501	0.36713	0.33033	0.33398	0.32676	0.34664	0.02262	-6.83343
9	3	3	2	1	0.12540	0.10435	0.11708	0.09204	0.08894	0.10556	0.01571	-17.51068

表 5.5 實驗量測值 (HUBA)

EXP	A	B	C	D	1	2	3	4	5	average	stdev	S/N
1	1	1	1	1	0.00055	0.00045	0.00137	0.00060	0.00380	0.00135	0.00141	-62.22457
2	1	2	2	2	0.00057	0.00191	0.00071	0.00019	0.00181	0.00104	0.00077	-58.63329
3	1	3	3	3	0.02961	0.02040	0.03764	0.03046	0.03622	0.03087	0.00682	-29.35145
4	2	1	2	3	0.02397	0.01839	0.01453	0.02071	0.01602	0.01873	0.00376	-32.35058
5	2	2	3	1	0.00449	0.00440	0.00528	0.00472	0.00459	0.00470	0.00035	-44.73761
6	2	3	1	2	0.00380	0.00557	0.00529	0.00719	0.00475	0.00532	0.00124	-44.65223
7	3	1	3	2	0.30216	0.21083	0.24995	0.25895	0.25290	0.25496	0.03248	-9.93122
8	3	2	1	3	0.03022	0.02108	0.02500	0.02589	0.02529	0.02550	0.00325	-29.91977
9	3	3	2	1	0.00056	0.00155	0.00179	0.00152	0.00278	0.00164	0.00080	-58.77459

四、資料分析

首先，計算每組實驗之平均值及標準差，利用望大品質特性計算實驗 S/N 比，如表 5.4、5.5 所示。

接著，計算各控制因子水準之 S/N 比，得出各控制因子水準之 S/N 比如表 5.6、5.7 所示。為方便判讀各控制因子之 S/N 比，以得出最佳參數水準組合，本研究繪製如圖 5.25、5.26 之各控制因子之 S/N 比效果圖。

表 5.6 各控制因子水準之 S/N 比 (VUBA)

Level	A	B	C	D
1	-17.901	-12.605	-15.384	-17.531
2	-15.815	-13.415	-15.393	-15.040
3	-10.606	-18.301	-13.545	-11.750

表 5.7 各控制因子水準之 S/N 比 (HUBA)

Level	A	B	C	D
1	-50.07	-34.835	-45.599	-55.245
2	-40.58	-44.430	-49.919	-37.738
3	-32.875	-44.259	-28.007	-30.540

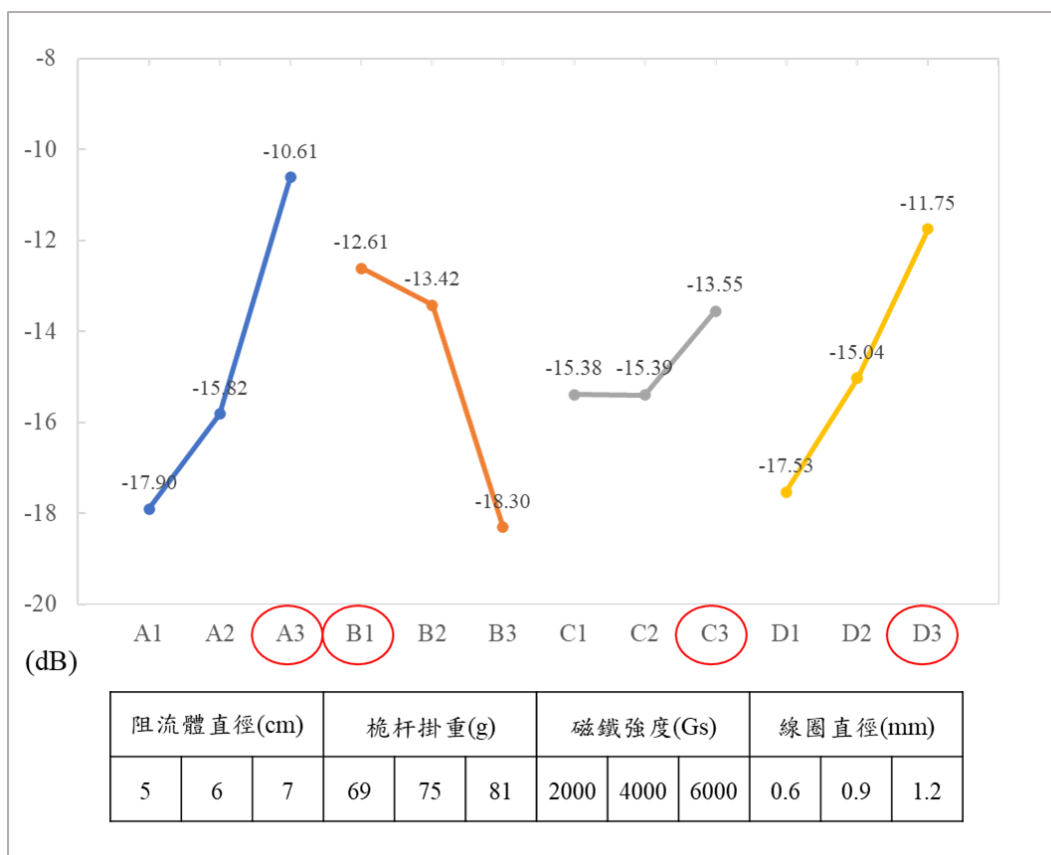


圖 5.25 各控制因子水準之 S/N 比效果圖 (VUBA)

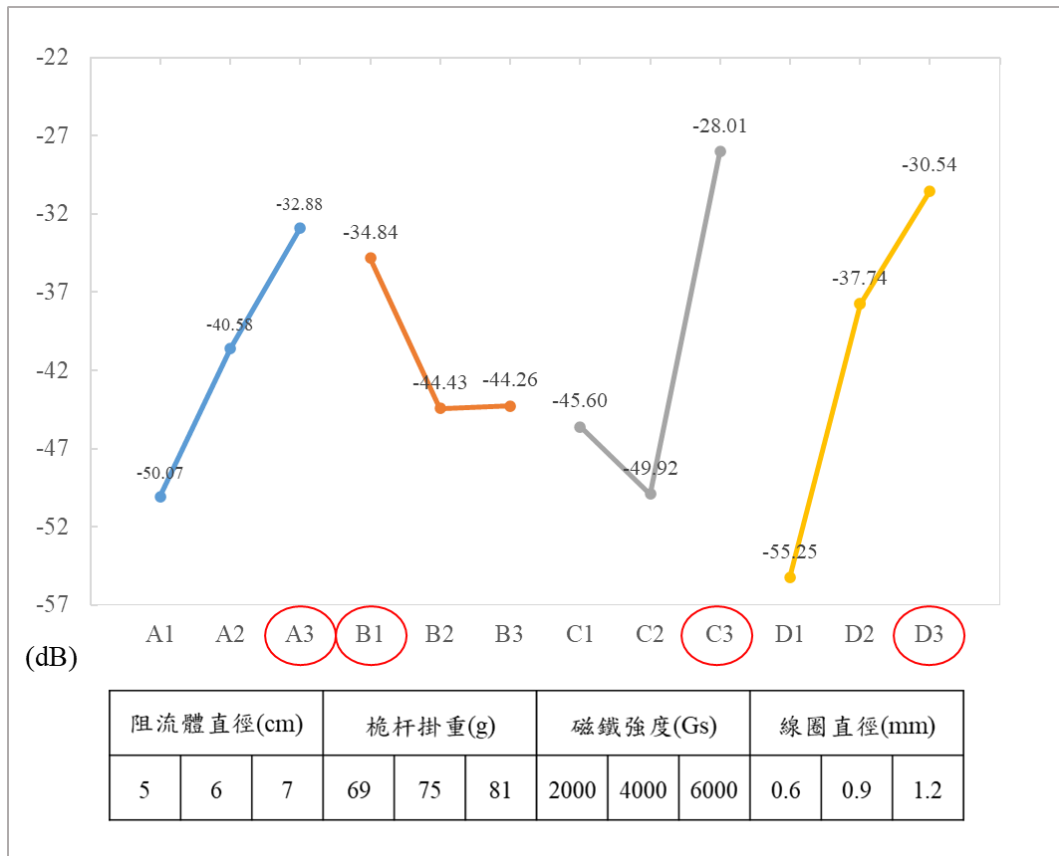


圖 5.26 各控制因子水準之 S/N 比效果圖 (HUBA)

根據 S/N 比的定義，S/N 比應越大越好，故於圖 5.25、5.26 中圈出各控制因子中 S/N 比最大之水準，該參數水準組合即為建議最佳參數水準組合。根據實驗結果中可知，無論是 VUBA 還是 HUBA，得出之建議最佳參數水準組合皆為 $A_3B_1C_3D_3$ ，故將採用此組合進行確認性實驗，確認性實驗之參數組合如表 5.8 所示。

表 5.8 確認性實驗之參數組合

確認性實驗之參數組合			
A3	B1	C3	D3
阻流體直徑 7cm	桅杆掛重 69gw	磁鐵強度 6000 Gs	線圈直徑 1.2mm

為了解各參數對輸出功率之影響程度，找出影響品質之重要因子，本研究利用變異分析（ANOVA）計算出各控制因子之貢獻度，本研究將對貢獻度最小之控制因子 C 併入誤差項，繪製出變異分析表，結果如下表 5.9、5.10 所示。

表 5.9 變異分析結果（VUBA）

Factor	SS 平方和	DOF 自由度	V 均方和	F 變異數比	P 貢獻度
A	141.171	2	70.585	12.449	42.576%
B	94.968	2	47.484	8.375	28.642%
(C)	11.332	2	5.666	0.999	3.418%
D	84.100	2	42.050	7.416	25.364%
Error	11.340	2	5.670	1.000	
Total	331.571	8			100%

表 5.10 變異分析結果（HUBA）

Factor	SS 平方和	DOF 自由度	V 均方和	F 變異數比	P 貢獻度
A	741.788	2	370.894	2.460	18.522%
(B)	301.500	2	150.750	1.000	7.528%
C	1,347.196	2	673.598	4.468	33.639%
D	1,614.393	2	807.197	5.354	40.311%
Error	301.504	2	150.752	1.000	
Total	4,004.877	8			100%

五、確認性實驗

進行確認性實驗之前，本研究先利用公式計算出確認性實驗之期望 S/N 比範圍，若確認性實驗之 S/N 比皆落於該範圍內，則表示實驗成功，反之若確認性實驗之 S/N 比落於該範圍外，則表示實驗失敗，應該重新選擇控制因子及水準，確認性實驗之期望 S/N 比範圍之計算公式如下：

期望 S/N 比範圍 = SN ± CI

$$SN = A_3 + B_1 + C_3 + D_3 + (n-1)\bar{\eta}$$

$$CI = X \pm 1.96 \times \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right)$$

確認性實驗結果與期望 S/N 比範圍如下表 5.11、5.12 所示，兩項確認性實驗皆為成功。

表 5.11 確認性實驗結果 (VUBA)

確認性實驗結果							
1	2	3	4	5	average	stdev	S/N (dB)
0.472	0.457	0.434	0.416	0.434	0.442	0.021	-4.750
S/N比之95%信賴區間							
-10.099 ~ 1.730 (dB)							
預期SN比				確認性實驗SN比			
-4.184				-4.750			

表 5.12 確認性實驗結果 (HUBA)

確認性實驗結果							
1	2	3	4	5	average	stdev	S/N (dB)
0.349	0.314	0.268	0.311	0.228	0.294	0.046	-8.772
S/N比之95%信賴區間							
-55.561 ~ 50.095 (dB)							
預期SN比				確認性實驗SN比			
-2.732				-8.772			

六、直交表實驗結果

本研究根據獨立變項實驗結果，設計控制因子及其水準，利用田口方法以最精簡的實驗次數進行實驗，最佳化 HUBA 與 VUBA 的輸出功率，並利用變異分析得出各控制因子之貢獻度，如表 5.9、5.10 所示。

本研究經過有系統的實驗步驟得出了 VUBA 與 HUBA 的最佳參數水準組合，最佳參數水準組合如表 4.8 所示。接著本研究通過確認性實驗，經由多次實驗證明了實驗結果的再現性。根據上述確認性實驗結果可知 VUBA 相較於 HUBA 擁有更大的輸出功率，如表 5.11、5.12 所示，換句話說，VUBA 擁有更大的機械能轉換效率。另外如表 5.11 所示，HUBA 確認實驗之 S/N 比 95% 信賴區間極廣，也就是說 HUBA 之變異數極大，品質較差。因此本研究改用 VUBA 之設計，使得輸出功率大幅提升 50.5%。

陸、討論

一、因次分析

根據獨立變項實驗結果可知，影響發電功率 P 的因素應包括：(1) 風速 V 、(2) 自然頻率 f 、(3) 阻流體半徑 d 、(4) 流體黏滯係數 μ 、(5) 風質量 m 等物理量，其 SI 制單位與因次如下表所示。其中 M 為質量、L 為長度、T 為時間

表 6.1、發電功率影響因子 SI 制單位及因次

	發電功率 P	風速 V	特徵長度 D	流體質量 m	自然頻率 f	流體黏滯係數 μ
SI 制 單位	$(\text{kg}\cdot\text{m}^2)/\text{s}^3$	m/s	m	kg	1/s	kg/(m·s)
因次	ML^2T^{-3}	LT^{-1}	L	M	T^{-1}	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$

因前述 6 個物理量共由 3 個基本因次 (M、L、T) 組成，故依據白金漢 π 定理，此方程式可由 $6-3=3$ 個獨立的無因次量 (令作 π_1 、 π_2 、 π_3) 描述。本研究設因次組成較簡單的 V 、 D 、 m 作為基本單位，則 π_1 、 π_2 、 π_3 分別對應至 f 、 P 、 μ 。表示如下：

$$\pi_1 = f \cdot V^x D^y m^z \Rightarrow \pi_1 = f \cdot [M]^z [L]^{x+y} [T]^{-1-x}$$

$$\pi_2 = P \cdot V^x D^y m^z \Rightarrow \pi_2 = P \cdot [M]^{1+z} [L]^{x+y+2} [T]^{-3-x}$$

$$\pi_3 = \mu \cdot V^x D^y m^z \Rightarrow \pi_3 = \mu \cdot [M]^{1+z} [L]^{x+y-1} [T]^{-1-x}$$

依無因次量之定義，各基本因次之次方應為 0，故得到 π_1 、 π_2 、 π_3 ：

$$\pi_1 = f \cdot V^{-1} D^{-1} = \frac{f}{VD}$$

$$\pi_2 = P \cdot V^{-3} D^1 m^{-1}$$

$$\pi_3 = \mu \cdot V^{-1} D^2 m^{-1}$$

其中， π_1 即為特勞哈爾數 (Strouhal Number)， π_2 為一功率因數，而 π_3 即雷諾數 (Reynolds Number) 之倒數，其中 ρ 表空氣密度，如下式：

$$\pi_3 = \frac{\mu \cdot D^2}{V \cdot m} = \frac{\mu}{V} \left(\frac{D^2}{m} \right) = \frac{\mu}{V} \left(\frac{1}{\rho D} \right) = \frac{\mu}{\rho V D} = \frac{1}{\text{Re}}$$

二、雷諾數 (Re) 與斯特勞哈爾數 (St) 之關係

根據前人對斯特勞哈爾數 (Strouhal Number, St) 與雷諾數 (Reynolds Number, Re) 之研究可知，當 $3 \times 10^3 \leq \text{Re} \leq 10^5$ 時斯特勞哈爾數會大約會落於位於 0.2，如圖 3.3 所示。然而這與本研究之實驗結果並不相符，本研究之結果如圖 6.1 所示。我們推論這是與 St 公式中所定義之頻率 f 有關，St 公式中的 f 是表示渦流曳放的頻率，但是實驗中所得出的頻率為渦激振動的頻率。渦激振動只會在渦流曳放頻率與結構自然振動頻率產生共振時出現，因此渦激振動頻率會相近於結構自然頻率。上述說明可知實驗結果計算出的 St' 並非為理論值 St，

因此報告中將用 St' 來替代。由圖 6.1 可知在不同尺寸的阻流體下， St' 與 Re 皆呈現反比關係，即 St' 與 $1/Re$ 成正比關係，如圖 6.2 所示。

St' 公式如下，其中 f_n 為渦激振動頻率，其值與阻流體之結構自然頻率相近，在結構相同時可視為一定值，故 St' 與風速呈反比關係。

$$St' = \frac{f_n \cdot D}{V}$$

f_n ：渦激振動頻率 (Hz) D ：特徵長度 (m) V ：風速 (m/s)

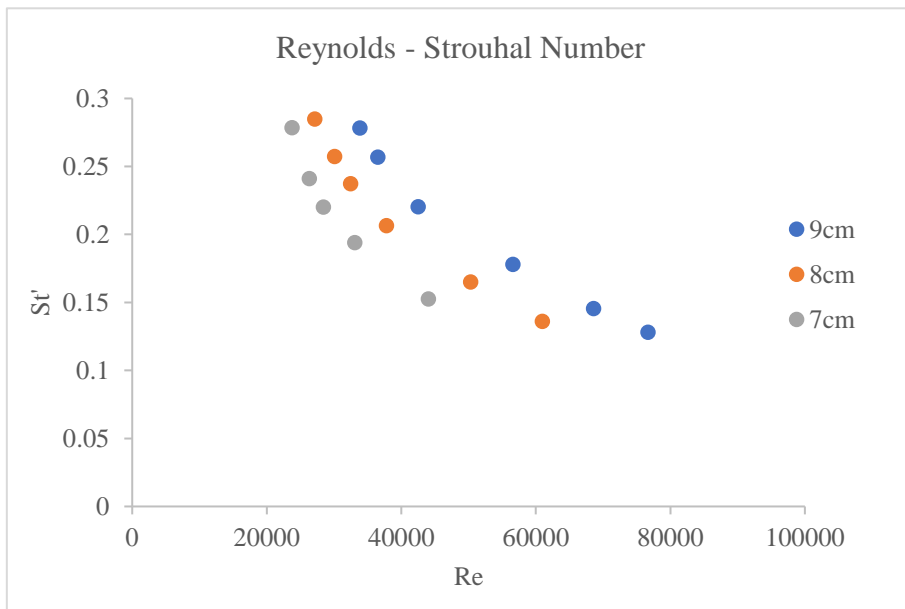


圖 6.1 不同尺寸阻流體下 Re 與 St' 之關係

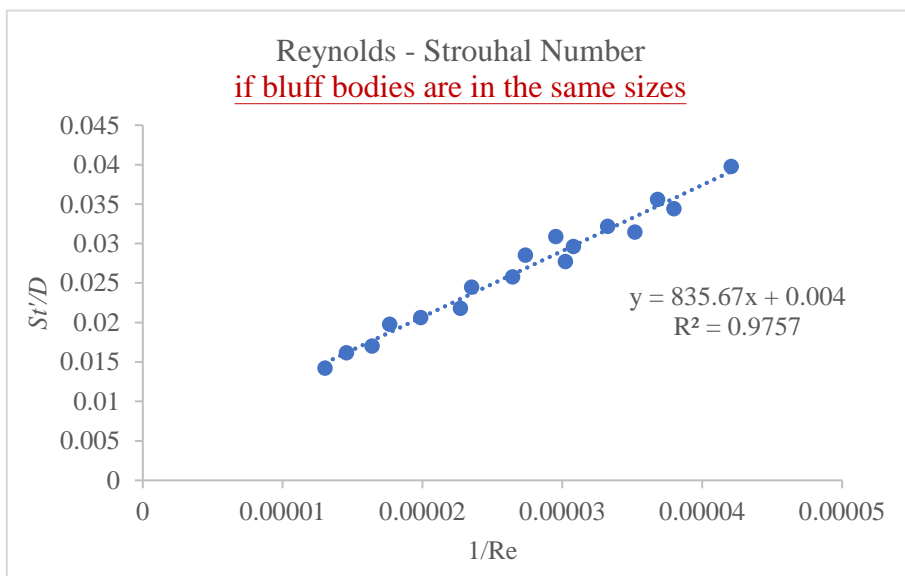


圖 6.2 St'/D 與 $1/Re$ 成正比關係

三、 π_2 (功率因數) 與 St' 之關係

π_2 為關係實驗輸出功率的無因次量。圖 6.3 為三種尺寸的阻流體所計算的 π_2 對應 St' ，可以看出在 St' 越靠近理論值 0.2 時，功率因數越大，也代表輸出功率越大。此結果可以從上面渦激振動的定義來解釋，當 St' 越靠近理論值 St 時，代表渦流曳放頻率與結構自然頻率越接近，因此共振的強度也越大，渦激振動顯著，輸出功率也越高。

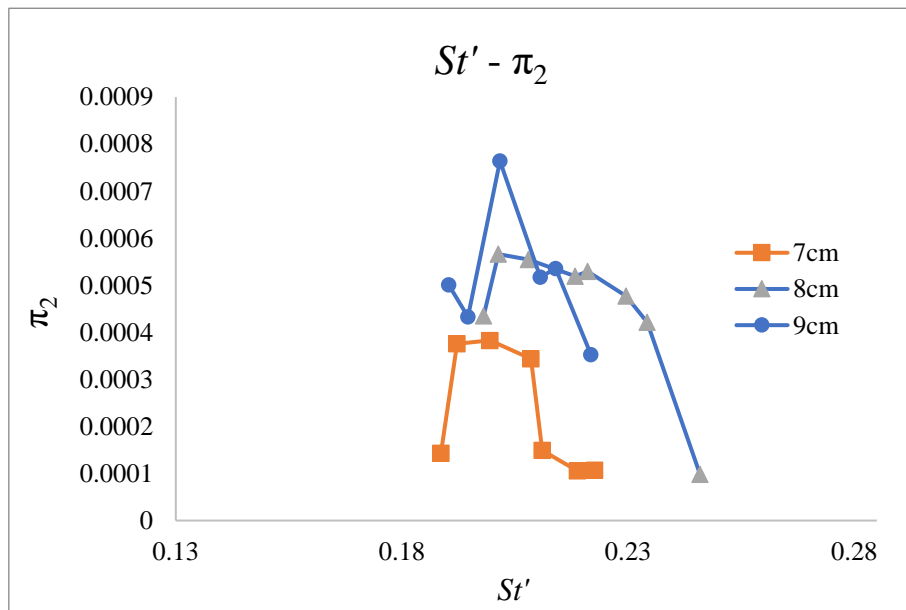


圖 6.3 不同尺寸阻流體下 π_2 與 St' 關係

四、雷諾數 (Re) 與 π_2 (功率因數)

由圖 6.4 可知不同阻流體皆有一特定雷諾數可產出其最佳的功率輸出，而在實驗中僅有風速會影響雷諾數的數值，因此也可以理解為不同尺寸的阻流體皆存在一特定風速能產出最高的功率輸出，而若阻流體皆在其最適風速，則阻流體尺寸越大，功率輸出越高。每個風速皆有其對應的最佳阻流體尺寸，若一尺寸阻流體在其最適風速下，則它會是所有尺寸中發電效率最好者。

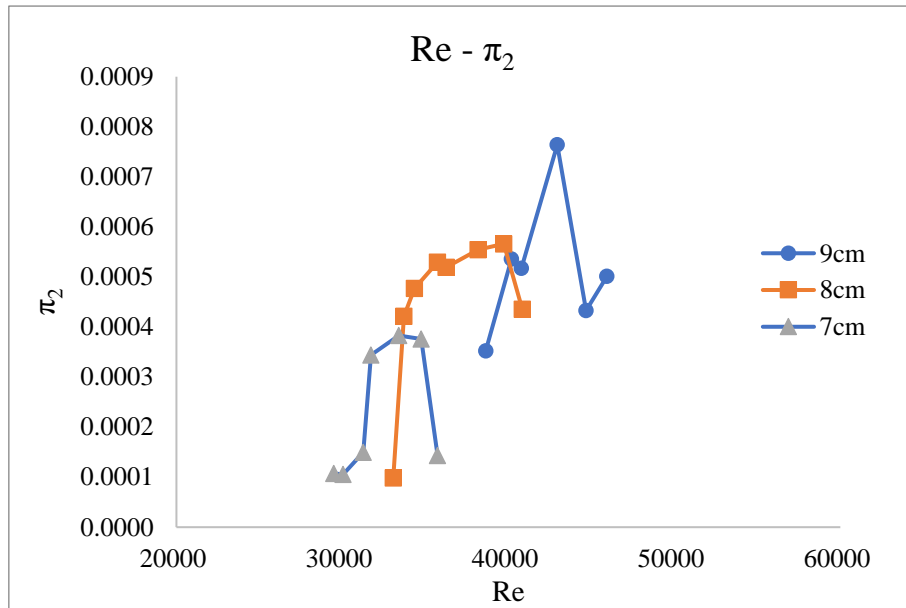


圖 6.3 不同阻流體下 π_2 與 Re 之關係

柒、結論

一、獨立變項實驗

本研究透過獨立變項實驗得出各因子對渦激振動之影響，可歸納出以下三點結論：

- (1) 直徑不同之阻流體皆對應一特定風速，在此風速下能產出最高輸出功率。
本研究將上述產出最高峰值與方均根電壓的風速定義為「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。
- (2) 最適風速區間前，風速二次方與峰值及方均根電壓成正相關。
- (3) 根據實驗算出的 St' 越接近理論 St 時，渦激振動會越顯著，同時也代表功率輸出會越高。

二、田口方法

- (1) 本研究提出之 VUBA 設計，成功提升了 UBA 的輸出功率。相較於原本 HUBA 之設計，VUBA 的輸出功率大幅提升了約 50.5%。
- (2) 本研究透過直交表實驗結果得出 VUBA 與 HUBA 之最佳參數水準組合皆為：阻流體直徑 7 公分、桅杆負重 69 公克重、磁鐵強度 6000 高斯、線圈直徑 1.2 毫米。
- (3) VUBA 與 HUBA 確認性實驗結果之 S/N 比皆落於 95%信賴區間之內，實驗成功。透過 ANOVA 分析，本研究得出各控制因子對發電效率之貢獻度與經驗關係。
- (4) 本研究原先採用 HUBA 設計，其確認性實驗 S/N 比 95%信賴區間極廣，表示其變異極大，品質較差。因此本研究改採用輸出功率高、品質變異較小之 VUBA 設計。

三、最適風速

臺灣是個海島型國家，一年四季皆有季風吹拂，沿岸也有海風可利用，但是臺灣風力發電的發電量仍只占臺灣綠能發電的一小部分，原因不外乎為風機的造價和維修過於昂貴，而且過於大型的機台也難以普及於都市地區。

此研究所設計的無扇葉型風機模型不管是成本亦或是佔地皆遠小於傳統渦輪風機，並且根據實驗，只要透過計算 St' 與 St 便可得知各種風速下所適用的祖流體尺寸，使功率輸出最佳化。

UBA 擁有體積小、易於架設、架設空間限制小等特點，因此雖然當前尺寸之 UBA 輸出功率不如現存渦輪式風力發電，UBA 仍相當適合被用於地形較為複雜的區域，如都市或丘陵等。而目前本研究將無扇葉風機定義在供應家用的小型風力發電機台，或是配合儲電設備，在臺灣較為缺電的尖峰時期，做為後備電力來使用。

四、未來研究方向與建議

依據現今所得出的實驗結果，可以了解複數參數對無風扇風力發電機的影響，因此本研究將以此為基礎提出幾點未來可能研究方向與建議：

(1) 尋找更多參數與發電機的關係

本研究已經針對過阻流體直徑、風速、機構轉動慣量、綁線位置等參數進行探討，但仍有其他參數，如桅杆材質、阻流體表面材質變更、阻流體形狀變化等，可以進一步研究。

(2) 加強學理分析，討論參數間交互作用

本研究受風洞大小限制，目前之實驗裝置較預估商用機要小上約3~5倍，因此實驗所得出之最佳參數組合，是否能直接在商用機上等比放大，還有待商確。目前本研究已開始擬定相關實驗，針對各參數間的交互作用及學理分析進行設計，希望藉此得出未來放大化之學理依據。目前根據因次分析結果可知當 St' 越靠近理論值 0.2，功率因數越大，也代表輸出功率越大。因此從上述 St' 之公式可知，將來在設計 UBA 時若能得知不同尺寸阻流體之結構自然頻率，就能藉由下式計算得該尺寸阻流體之最適風速：

$$V = \frac{f_n \cdot D}{0.2}$$

V ：最適風速 (m/s) f_n ：自然頻率 (Hz) D ：特徵長度 (m)

(3) 尋求各參數與電功率之間的最佳方程式

本實驗運用田口分析法，把先前所測驗對於電功率有影響的參數進行分析，並找出哪一個參數對於電功率的影響最為巨大，並找出其他參數的相關性與影響比例，但目前尚缺一個方程式能把各參數統合，並找出其最佳曲線。

參考文獻

- [1] “Cost-Effectiveness & Feasibility Analysis For Bladeless Turbines” Luis Perez Maroto.2018:<https://vortexbladeless.com/cost-effectiveness-analysis-bladeless/#comments>.
- [2] Chen, S. S. (1985). *Flow-induced vibration of circular cylindrical structures* (No. ANL-85-51). Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States).
- [3] Jianu, O., Rosen, M. A., & Naterer, G. (2012). Noise pollution prevention in windturbines: Status and recent advances. *Sustainability*, 4(6), 1104-1117.
- [4] Möllerström, E., Ottermo, F., Hylander, J., & Bernhoff, H. (2015). Noise emissionof a 200 kW vertical axis wind turbine. *Energies*, 9(1), 19.
- [5] 林雲德, 蘇朝墩, & 洪瑞雲. (2007). 應用田口方法改善接觸式三次元測量儀量測品質 (Doctoral dissertation).
- [6] Viré, A., Derksen, A., Folkersma, M., & Sarwar, K. (2020). Two-dimensional numerical simulations of vortex-induced vibrations for a cylinder in conditionsrepresentative of wind turbine towers. *Wind Energy Science*, 5(2), 793-806.
- [7] Lee, Y. J., Qi, Y., Zhou, G., & Lua, K. B. (2019). Vortex-induced vibration wind energy harvesting by piezoelectric MEMS device in formation. *Scientific reports*, 9(1), 1-11.
- [8] 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)。
- [9] Vortex bladeless (2020) Vortex bladeless biography & current stage: <https://vortexbladeless.com/story-vortex-bladeless-tech-startup>

【評語】 100033

本研究針對多種參數對「無扇葉風力發電機」的影響進行研究，並提出一個新的發電機構設置 UBA (Universal Bladeless Aerogenerator)，利用萬向接頭作為支點、擷取各方向的風能轉換為電能。想法來自一西班牙公司 Vortex Bladeless Ltd(https://en.wikipedia.org/wiki/Vortex_Bladeless)。

本作品創意點來自可變的受風圓柱大小，但此點須更佳的表達與呈現。