

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

高中組 工程學(一)科

第一名

052313

雙層式水平軸風力渦輪機葉片下洗氣流之探究

學校名稱：臺北市立麗山高級中學

作者：  高二 馬灝  高二 洪容	指導老師：  吳明德  許永昇
-------------------------------	-----------------------------

關鍵詞：雙層葉片風力渦輪機 (Dual-rotor Wind Turbine)、下洗氣流 (DownwashFlow)、貝茲定律 (Betz' Law)

# 得獎感言

## 「瘋」力發電-夢想、努力、成就-全國科展的巔「風」時刻

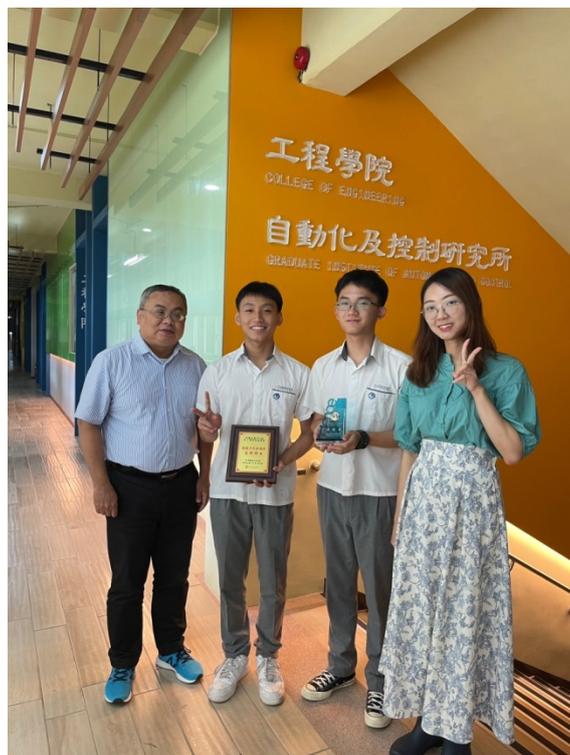
回顧全國科學展工程科中獲得第一名的旅程，喜悅和激動自然不在話下，同時也很欣慰過去的努力有了收穫，更重要的是想表達對一路上幫助過我們的人致上感謝之情。

首先最重要的是感謝父母無條件的支持及鼓勵，沒有他們的幫忙，我們斷然不會有今天的這番成果；以及指導老師吳明德、許永昇老師一路上細心的指導及帶領；同時特別感謝臺灣科技大學工程學院的陳明志院長、黃欣萍教授、范瀨元學姐、蔡昇恩及FandiD. Suprianto學長，感謝他們不遺餘力得提供諮詢、技術資源的指導及協助；臺灣師範大學的張玉山教授提供諮詢及建議。沒有他們的指導和鼓勵，我們不可能獲得這份殊榮。

展覽中最難以忘懷的是與來自全國各地的優秀對手及評審教授展示研究項目的機會，展覽現場除了緊張之餘，更是充滿了好奇與熱情，並在評審的提問及同儕的交流下，更加的點燃了我們對於未來繼續探索研究的熱情。

我們常常自稱自己在研究「『瘋』力發電」，從高一迄今已經做了相關的研究一年半，過程中的失敗、挫折到堅持，如果不是「瘋子」，怎麼撐得下去呢？回首望去，有幾個晚上睡在實驗室地板、有幾個晚上配著泡麵徹夜盯著實驗數據、又有幾個晚上靠冷水澡沖刷心中的挫敗？但正如卡內基所說的：「成功不是偶然的，它是努力的結晶，是智慧的勝利，是堅持的果實。」，感謝自己當初的瘋狂，造就了現在豐碩的成績。

總而言之，在全國科展工程科中獲得第一名對我們是一次變革性的經歷，它給予的喜悅和為我們打開的機會只是旅程的開始，更對未來的展望充滿遐想，我們迫不及待地想看到心中對科學和工程的熱情將引領我們走向何方。



與臺灣科技大學指導教授合影  
最左為工程學院陳明志院長、最右為材料科學與工程系黃欣萍教授。



與臺灣師範大學指導教授合影  
科技應用與人力資源發展學系張玉山教授。



與指導老師合影  
臺北市科展吳明德老師

# 作品名稱

雙層式水平軸風力渦輪機葉片下洗氣流之探究

Investigation of Downwash Flow Below the Blades of a Double-layer Horizontal Axis Wind Turbine

## 摘要

本研究設計雙層葉片風力渦輪機，並使第二層葉片吸收第一層剩餘風能，提升發電效率。由於渦輪機葉片運動模式複雜，因此將實驗分成兩部分，首先去除渦輪機旋轉的因素，測量前後機翼改變攻角、間距及方位角情況下的升力，經實驗分析下洗氣流效益最佳處，為攻角於 12 度、間距 1.5 倍弦長、方位角-15 度處；第二部分實驗測試雙層葉片渦輪機發電效率，當兩層葉片間距為 1/4 螺距（90 度）時，兩層葉片應於夾角 90 度有最大效率，但減去下洗氣流方位角-15 度，夾角 75 度對應效率最佳，經風洞實驗得相同結果。經效益分析，兩層葉片渦輪機效率提升四葉葉片的三成，一層葉片佔渦輪機總成本 10-20%之間，可見本設計具備提升效率及降低成本的特性，未來具有高度前瞻性。

# 壹、前言

## 一、研究動機

再生能源是近年來相當重要的發展領域，其中風能發電具有相當高的發展潛力，目前風能發電的發展趨於成熟且進步平緩，無突破性進展。現行風能領域發展大多著重於離岸式風機，增加發電機大小及葉片長，而本研究著眼於利用流經發電機葉片殘餘的風，在葉片後架設第二層葉片接收剩餘的風能，進一步提升發電效率。

同時，與有些發電機設計由前連接至後的長型葉片相比，本研究所設計的是前後葉尖未相連的雙層葉片，優勢在於結構較簡單，便於維修且成本較低（單層損毀時僅需維修單層，免於前後層一同更換）。

流經前方物體所產生氣流對後方物體產生效益的例子在日常生活中有以下兩點。野雁飛行時會呈現V字形隊伍，氣流流經帶頭的野雁可使後方野雁提升飛行時的升力以提高飛行效率，使其飛行時較省力，適合長途飛行；另一個例子則是自行車隊中的破風手，破風手會使風繞開後方隊友，並藉此減少阻力，使後方自行車手更輕鬆。



圖 1 前後相連的雙層葉片風機[1]



圖 3 野雁 V 字飛行[2]



圖 2 自行車犧牲戰法流場示意圖[3]

本研究最終目的為分析雙層葉片式水平軸風力渦輪機（Double-layer Blade Wind Turbine）前後流場（Flow Field）變化，搭配下洗氣流位置，使其通過第一層葉片之風能不致散失或造成干擾，而由第二層葉片吸收並提高升力，設計能最大化發電效率及最有效吸收、利用風能之發電裝置。

除了風能發電層面以外，本研究未來亦希望推導至螺旋槳（Propeller）運用，進一步探究是否能減少翼端渦流（Wingtip Vortices）的負面影響，同時減少噪音。



圖 4 無人機照片[4]

葉片設計前翼低於後翼

## 二、文獻回顧

近年風能發電著重於研究螺距並延伸至葉片本體，例如添加擾流裝置、仿生科技等[5][6][7]。黃祉穎、吳品儀與賴柔安於 2013 年發表的研究中曾設計多款垂直軸及水平軸之雙軸風能發電機，並測試兩軸發電機所產生的發電效率為一般狀態之倍率[8]；Johnson 等十人於 2020 年發表的研究自適轉子搭配轉軸對發電效率的影響，並特別加以分析葉片周圍流場狀況[9]；另外亦有相關研究針對類似本研究探討之雙層葉片做回顧及延伸探討，特別是發展史的分析（OPRINA G., CHIHAI A R.A., EL-LEATHEY L.A., NICOLAIE S. & BAĂBUȚANU C.A., 2016）[10]；而 Csaba Heteyi, Ferenc Szlivka 於 2021 年發表的曾針對此雙軸兩層式葉片與其於發電機型做對比，並完整的分析其優劣[11]。

本研究進行前分別參看了之前歷屆科展及相關研究的成果[5][8][12][13][14][15]，發現歷年來有關風力發電的科展較專注於葉片或螺距（pitch）方面的研究，其中「第 19 屆旺宏科學獎-被動可變螺距」以可變螺距達成最大化發電效應[16]，及以不同電阻搭配產生高功風能最大功率追蹤系統[17]，亦有相關科展在發電機葉片上穿孔，探討抽吸效應（Suction Effect）的影響[13]，而對本研究較相關之科展文獻探討單軸雙轉子之風（水）力發電裝置[6]，與本研究最相關的下洗氣流（Downwash Flow or Downwash, 又稱下洗流）探究包含，介紹下洗氣流對升力的影響及產生的尖端渦流現象觀察[18]，以及下洗氣流的流場及升力關係之分析[19]。

根據先前所作的研究《風能發電-探討風罩與仿生科技結合對發電效率的影響》[7]，當中提到，倘若於葉片上添加擾流線，能有效的減少葉片後方產生亂流的機會，使葉片升力提升、阻力減少，該結果亦能推廣使用於本研究。

動機所提及野雁的 V 字隊形及自行車隊破風手的例子，其實都是運用了下洗氣流的例子。所謂的下洗氣流是指當風通過機翼（或類伯努利原理可產生升力之物體）時，在其後下方將產生一個明顯穩定、強勁的氣流，此氣流能使後方物體升力提升。

類似此現象之效應目前廣泛運用於飛機領域的機翼設計中。

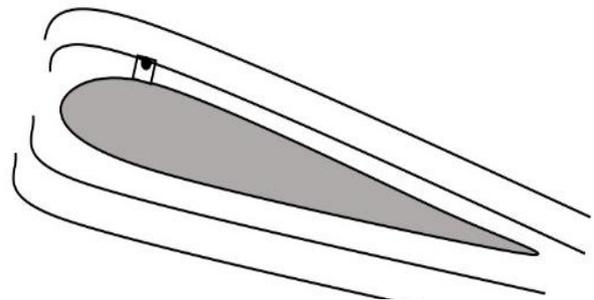


圖 5 葉片擾流裝置示意圖[7]  
葉片前架設擾流裝置（擾流線）



圖 6 下洗氣流 Downwash 示意圖[20]  
機翼後方向後向下的氣流

「跳蚤飛機 (Flying Flea)」，是一種雙層機翼飛機 (Biplane)，也是世界上第一款運用下洗流的飛機，如同其字面上的意象，此飛機特點在於體積小、操作簡單，最大的優點在於其雙層葉片設計前後的形式，且可調動攻角，能在飛行過程中最有效的運用下洗氣流，使飛行較省力及省能源，不過此飛機在接下來卻不斷傳出事故，進而導致多國明令禁止該飛機的製造及使用。



圖 7 跳蚤飛機下洗流示意圖[21]

前翼角度調整使下洗流增強，後翼升力增大

Barnaby Wainfan 於 2017 年曾提出有關跳蚤飛機的事故原因，經過該研究分析，跳蚤飛機事故原因出在飛機起落調動前翼攻角時，若下洗流的控制未調整適當，將可能造成位於後方的機翼升力急遽增加迫使飛機低頭，進而導致飛機不穩定甚至墜毀，該研究也提出可以透過機翼的設計來改善此類問題，不過棘手之處在於，跳蚤飛機製作簡單、便宜，普羅大眾皆可以製造，但若是未受訓練的駕駛員仍然有發生事故的危險性[21][22]。

在近代，學界科學家已經解決了上述問題，並實際運用在航空飛行的機翼上，這個設計被稱為「鴨翼 canard」，特別是在英國、法國等歐洲國家戰鬥機的設計上。如：幻象戰機 (法)、颶風戰鬥機 (英)、雷式戰鬥機 (瑞典)、JAS 39 獅鷲戰鬥機 (瑞典)、颶風戰鬥機 (法)、蘇愷-30MKI 戰鬥機 (俄)、殲-20 (中) 等。



圖 8 鴨翼佈局戰機 (左：幻象戰機[23] / 右：JAS 39 獅鷲戰鬥機[24])

由上述可明顯發現在適當設計或配置下雙翼面耦合的效益，同時也越來越廣泛的被運用，特別是在飛機的機翼效率設計上，但是，**風能發電的領域卻鮮少相關的應用產出**，本研究及期望設計雙層葉片的發電機，並搭配下洗流的效益分析，使發電效率提升。

### 三、延伸研究之必要性（研究新穎性）

正如動機所提及，現行風力發電機絕大多數設計單層葉片，原因在於人們認為風通過渦輪機後，風場將會極其不穩定，並且風速較弱，但是本研究認為，由於下洗流的存在，在適當的設計或配置的狀態下，下洗流是能夠被後側的第二層葉片有效的利用。

根據貝茲定律（Betz' Law），風通過渦輪機後，理論上最高的風能轉換率為 59%（一般離岸風電機約 20-30%），若假設今日有理想環境及風機，已轉換效率 25%假設推估，則第一層葉片吸收 25%的風能後，後方殘餘的 75%風能可以被第二層葉片再吸收 25%（ $75\% \times 25\% = 18.75\%$ ），較原單層發電機發電效率提升高達 75%。

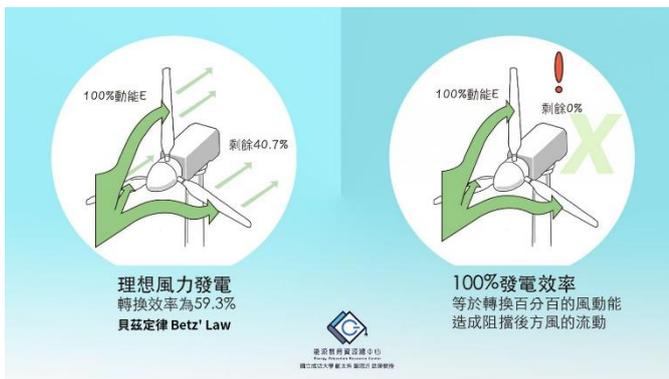


圖 9 貝茲定律示意圖[25]

風能發電最大能源轉換率為 59%，第二層能再利用剩餘的風能。

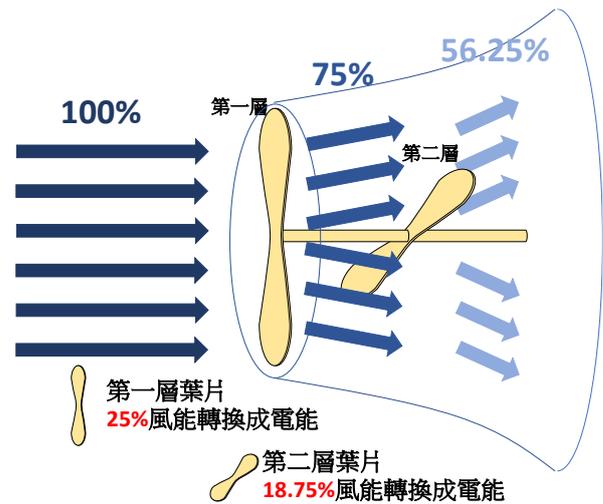


圖 11 貝茲定律示意圖

本研究設計雙層葉片渦輪機

而針對「雙層葉片的發電機」，本研究的新穎性在於過去研究設計主要為「同軸雙轉子或異軸風力渦輪機」(Dual-rotor wind turbine) [9][10][11][26]，意即該研究兩層渦輪機的葉片轉向不同，並期望藉以提高發電效率；本研究裝置為「同軸單轉子」的渦輪機，兩層葉片轉向相同，且機構較簡單，即具有成本低及方便維修的特性，依照本研究之實驗設計，前後葉片開始旋轉後，應透過螺距及下洗流相互影響並提升轉速，進而影響發電效率，並期望藉下洗流提升發電效率。

與本研究最為相似的設計是「環形葉片風力發電機 (Loop Wind Power Generator)」[1]，此作品亦為設計兩層葉片，並使用氣流於發電機葉片的實例，但是其將前後層的葉片相連，其特性在於透過減少翼端渦流的影響，使其在低風速下亦能發電，相對於本研究而言，本研究之設計機構簡單，同時有較低的成本及較便於維修。綜合上述，本研究作品具有明顯的新穎性。

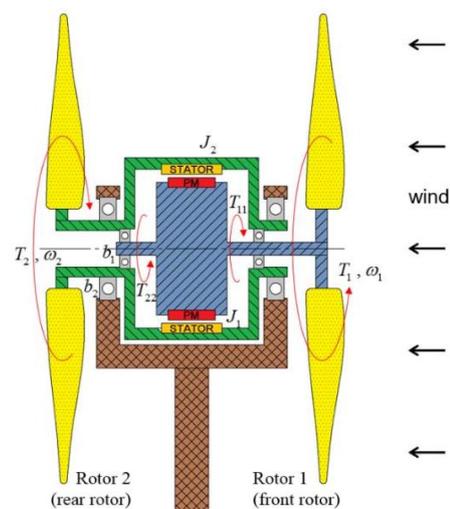


圖 10 反轉式雙層風力發電機[26]

兩葉片分別接上發電機轉子與定子，旋轉方向相反，運用的機構與本研究不同。

#### 四、研究目的

由於通過風力渦輪機的風包含前進及旋轉的要素，運動模式複雜，因此本研究預計先將旋轉的成分去除，利用機翼放入風洞中測量氣流流經機翼後的風向，藉此歸納下洗流的方位；而後才會加入轉動雙層葉片渦輪機的發電機，實測第二層葉片如何配置能達成最高效能的發電效率；最後結合上述兩部分實驗結果統整分析，並於討論中論證下洗氣流運用於發電機中的可行性。

綜上所述，本研究可大致分為 3 個部分：

- (一) 改變兩層機翼之相對位置及攻角，歸納出下洗氣流位置及其對後翼之影響。
- (二) 將雙層渦輪機裝置透過風洞測試，改變前後葉片夾角測試，並驗證效果，嘗試提升發電效率。
- (三) 綜整前述結果，將雙層葉片之渦輪機進行效益及性價比的分析。

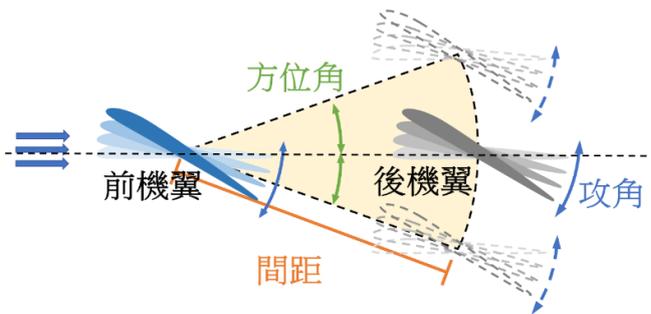


圖 12 改變兩層機翼之相對位置及攻角示意圖

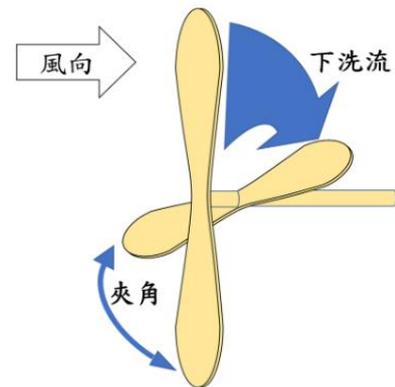


圖 13 改變兩層葉片夾角並結合下洗流示意圖

#### 五、研究價值

本實驗應用流體力學的相關理論，期望達成最佳化的發電效率，進而延伸應用及探討，其研究重要性在於：

- (一) 運用伯努利原理 (Bernoulli's principle) 及文丘里 (文氏) 效應 (Venturi effect) 與空氣動力學結合於葉片，研究並分析空氣流經機翼的特性[6]。
- (二) 葉片設計結合邊界層 (Boundary Layers) 之效應[11]，搭配下洗氣流之效益，嘗試達成渦輪葉片最佳化。
- (三) 分析下洗氣流 (Downwash) 位置及運用其提升升力，並結合風能發電推廣運用，同時運用發電機葉片螺距 (Pitch) 及週速比 (Tip Speed Ratio, T.S.R.) 的理論計算結合，嘗試提升渦輪葉片效率。

綜合前述，本研究之重要性特別在於設計增設一層葉片的風力渦輪機，嘗試提升現行葉片效率以及成本上的經濟效益及前瞻性。

## 貳、研究設備及器材

### 一、第一部份實驗：前後機翼升力實驗

將後機翼、檯座、電子秤組合並將後機翼懸空架設於風洞內，將畫有極座標測試點位的木板架設於風洞內，將前機翼架設於待測極座標點位上並以黏土固定。

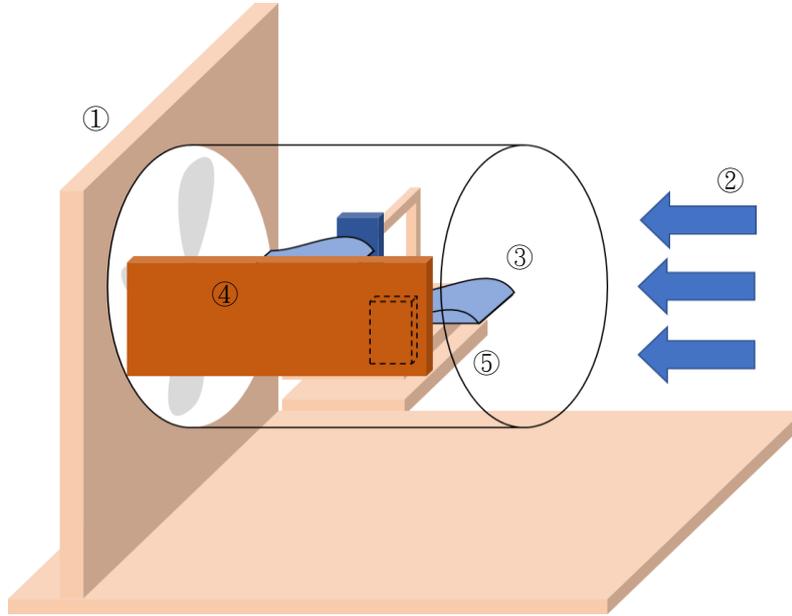


圖 14 升力測試裝置示意圖

①風源（吸風）②風向 ③機翼 ④測試點位版 ⑤電子秤

由於本實驗操縱變因包含相對距離( $d$ 、 $1.5d$ )、方位角，因此採用極座標來繪製測試點位；操縱變因包含葉片攻角，因此葉片及支架中間使用強力磁鐵連接，方便更改角度同時具有穩定性。

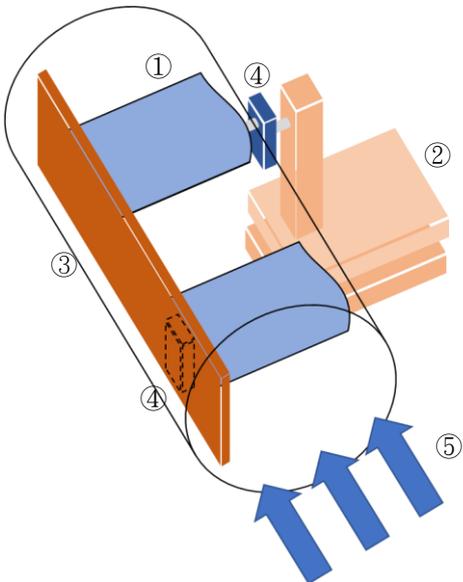


圖 15 風洞實驗裝置配置示意圖

①機翼 ②電子秤 ③ 測試點位板  
④伺服馬達 ⑤風向



圖 16 升力測試實際裝置圖

①風源（吸風）②風向 ③機翼 ④測試點位版 ⑤電子秤

## 二、第二部份實驗：雙層葉片渦輪機效率實驗

將葉片架設於風洞內，連接發電機、電路及檯座，並透過檯座使渦輪機葉片懸於風洞正中央，固定葉片間距，改變前後夾角並做測試。由於設計雙層渦輪機葉片，因此本裝置透過軸連接器連接螺絲延長發電機軸，並透過螺帽控制間距及改變角度。

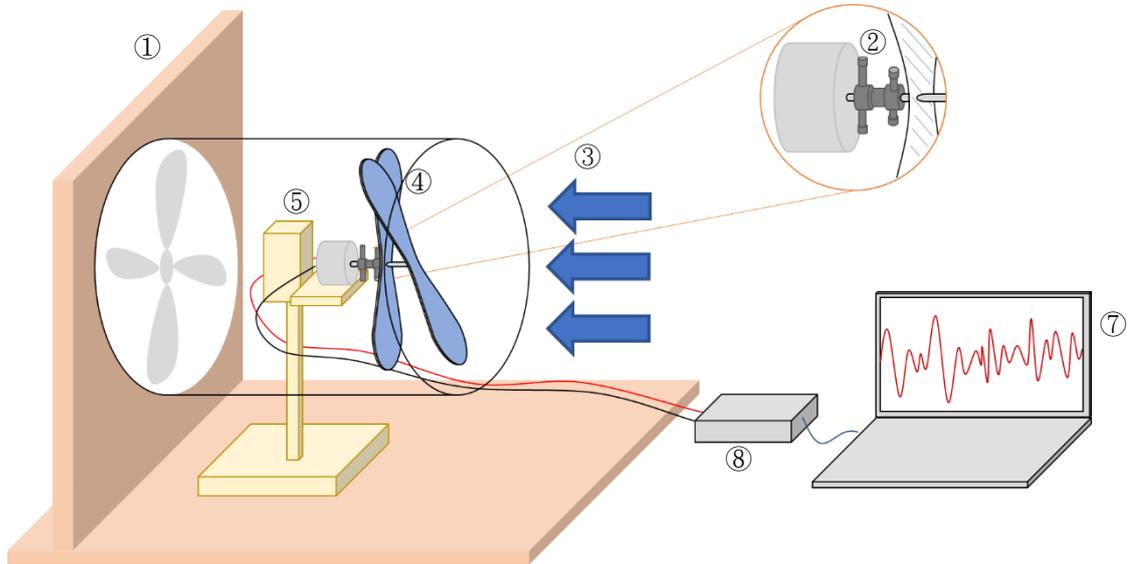


圖 17 雙層葉片測試裝置示意圖

①風源（吸風）②軸連接器 ③風向 ④葉片 ⑤檯座 ⑥發電機 ⑦電腦 ⑧Vernier Go Direct Energy

發電機電路部分則使用 Vernier Go Direct Energy 的電路測量，此儀器透過內建之伏特計、安培計及負載系統（電阻）直接測量發電效率並輸出，除能減少電路連接之困難及接觸不良外，亦可減輕低負載（電阻）狀態下產生的誤差，同時不同的狀態或型態的發電機對應到最佳發電效率搭配的電阻值將不同，此電路亦可直接精準調動電阻值。

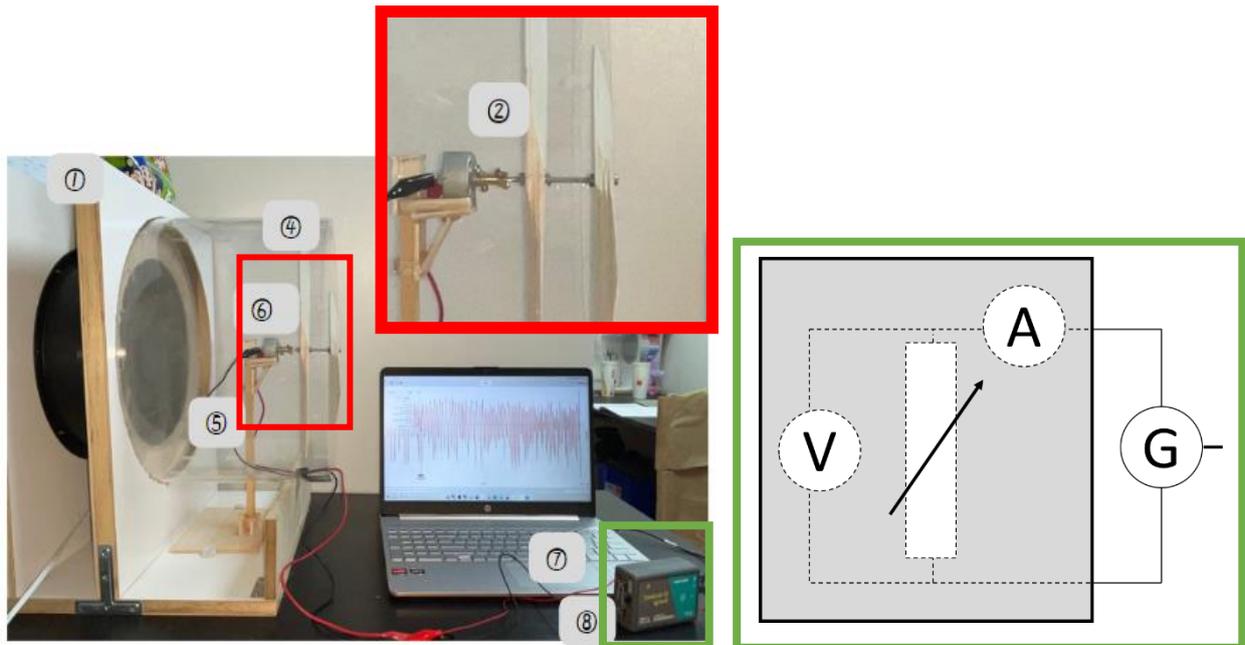


圖 18 雙層葉片測試裝置圖

①風源（吸風）②軸連接器 ③風向 ④葉片 ⑤檯座 ⑥發電機 ⑦電腦

⑧Vernier Go Direct Energy（右下綠框，內含安培及伏特計，並聯可變電阻作電路之負載）

## 參、研究過程及方法

本研究大致可分為兩個部份進行，第一部份將發電機複雜的旋轉運動成分去除，實驗測量後翼升力，首先設計機翼型態之葉片，並分別調控前後翼的攻角及間距、方位角等可調控因素，最後進行下洗流的位置及影響分析；第二部份為雙層葉片風力發電機的實驗，以螺距計算並固定前後葉片間距，而後調整夾角並進行測試，結合第一部份的初步結果分析數據。最終結合兩部分的數據及結果進行分析並作成結論。

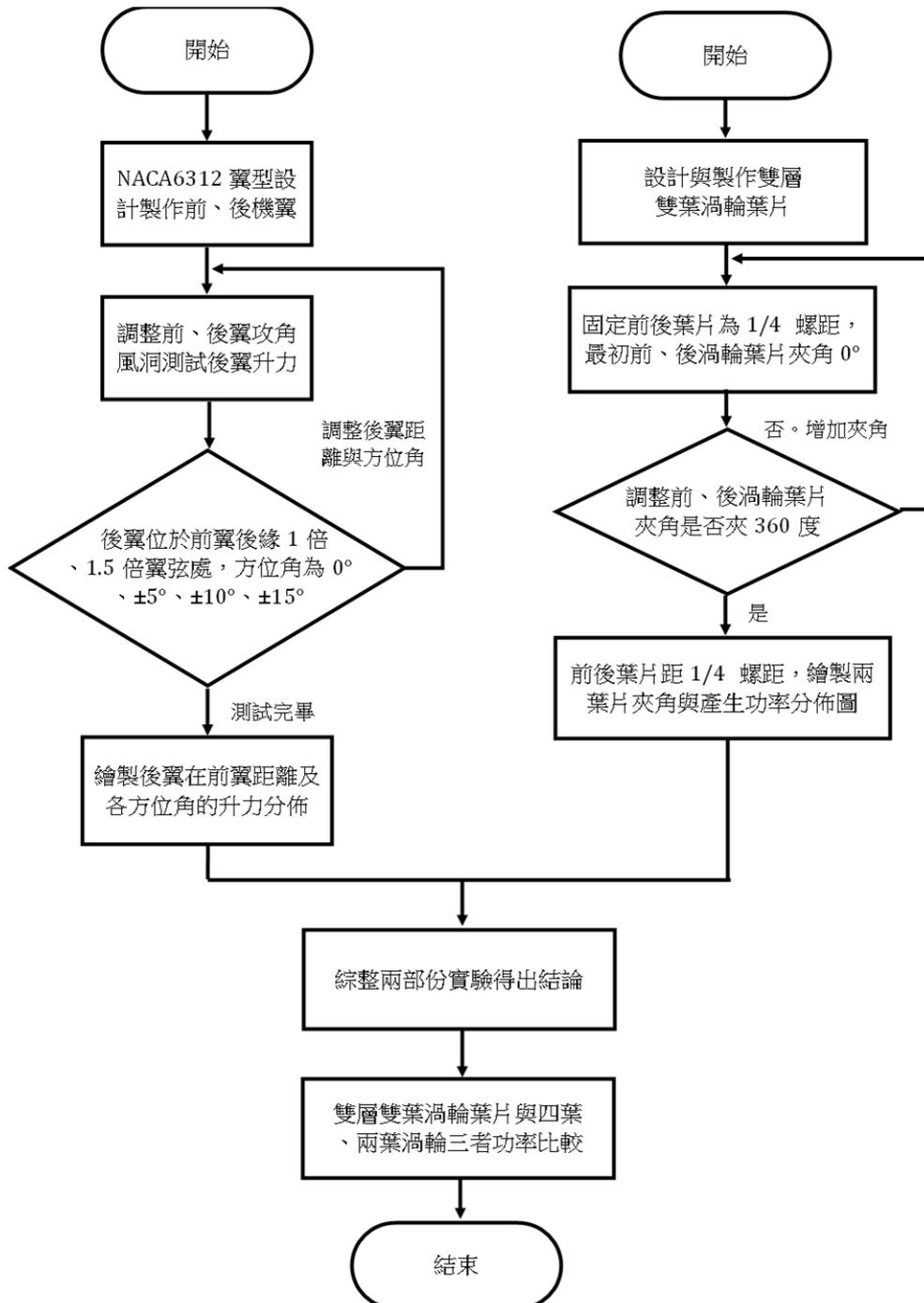


圖 19 實驗流程圖

# 一、第一部份實驗：前後機翼升力實驗

## (一) 相關原理

### 1. 伯努利原理 (Bernoulli's Principle)

當流體流速增加時，會造成流體的壓力或是重力位能減少。以飛機機翼為例，當空氣從機翼正面撞擊葉片時，空氣會流過機翼頂面及底面，而流過頂面的風速高於底面因而產生壓力差，使機翼整體產生升力。

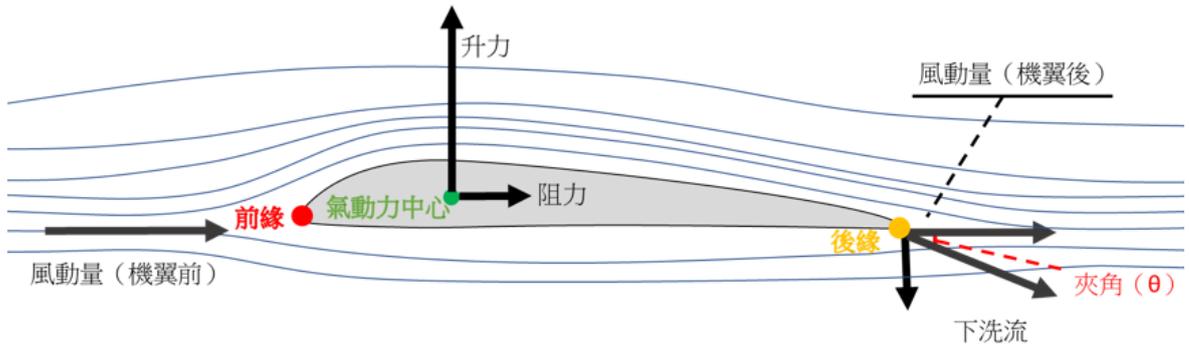


圖 20 白努力定律示意圖

上方氣流流速較快，壓力較小，升力即提升。

當風動量流經機翼後，後方動量會減少，轉變成升力，流經機翼後剩餘的風動量將形成下洗氣流。

對於本研究而言，伯努利原理使得風流經機翼頂面時風速大於底面，因此因此當機翼具有一攻角 (angle of attack, 機翼與風向的夾角) 時，理論上機翼後方出現一個強勁且穩定的氣流範圍，此氣流就稱為下洗氣流。

### 2. 下洗氣流 (Downwash)

推廣上述原理，機翼後方將產生下洗氣流 (下洗流)，理論上於此氣流範圍內再架設機翼將增加其升力。

對本研究而言，機翼不同攻角會對應到不同的下洗氣流範圍，若將後機翼架設於下洗氣流範圍內，則可提升其升力，對應到發電機時理論上即可提高發電效率。

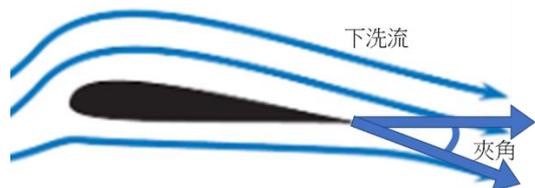
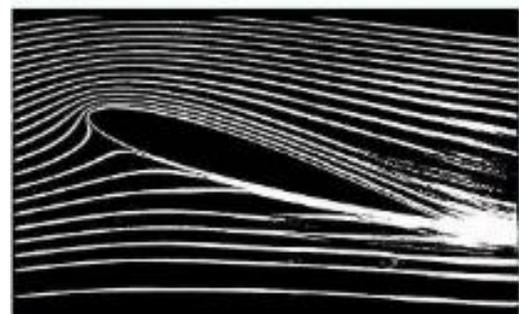


圖 21 下洗流範圍及流向示意圖[27]

### 3. 葉片（機翼）升阻力（Lift, Drag of Wind Turbine Blades）

當真實風吹向風能發電機的葉片時，風能將轉換成動能帶動葉片轉動，並產生旋轉風，兩者產生的力垂直，形成合成風帶動整體發電機轉動。

轉動的力量可分為升力（Lift）及阻力（Drag），升力計算公式  $L = \frac{1}{2} C_L \rho A v^2$ ，

阻力計算公式  $D = \frac{1}{2} C_D \rho A v^2$ ，並且可分別以分力的形式分析，而下圖升力的垂直分量（在旋轉方向）可計成  $L \cos \theta$ ，阻力垂直分量可計成  $D \sin \theta$ 。

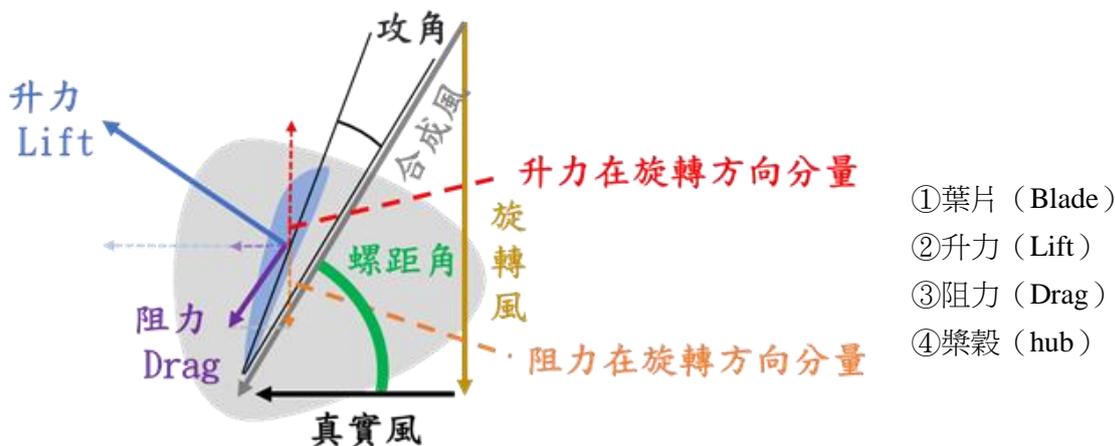


圖 22 風能發電葉片升阻分力分析圖

升力分量即阻力分量相減即為葉片的作用力 ( $F = L \cos \theta - D \sin \theta$ )，以此力驅動渦輪機葉片旋轉，其中升力 (L) 越大，阻力 (D) 越小會使升阻比 (L/D) 越高，即代表葉片運轉狀態越佳，由右圖可知，攻角 5~10 度間有最大升阻比，因此本研究前後機翼實驗定訂攻角測試範圍於 0 至 30 度之間。

對於本研究而言，前翼產生的下洗流將使後翼升力增加。理論上葉片攻角從 0 度起，攻角增加越多升力將越高，然約至 15 度起，阻力亦將大幅提升，亦即升力與阻力的比值（升阻比，越大表示越省力或越有效率）約於攻角 10 度時有最大值，能產生最高的效益。[22]

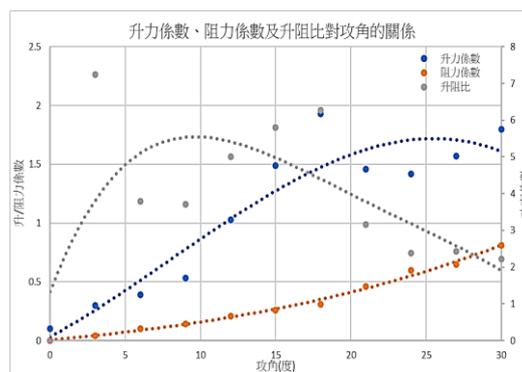


圖 23 升力、阻力、升阻比與攻角關係分析[7]  
攻角 5-10 度有最大升阻比

## (二) 研究方法

### 1. 機翼型態設計及製作

機翼運用於第一部分實驗，主要測試下洗流的範圍，為使機翼與第二部分的葉片誤差不致過高，本機翼期望設計盡量相似於風能發電機，因此預計使用 NACA6312 之翼型製作機翼。

NACA6312 表示此翼型中弧線最大彎度佔翼弦的 6%、此最高點位於距前緣 30%、而最大厚度佔弦長之 12%。一般風力渦輪機葉片最高點位於距前緣 30% 處，符合此翼型。

製作方式採用巴爾沙木（飛機木）製作骨架，並使用卡典西德包覆，使機翼重量不致過重且結構穩固，便於在流場內測試。

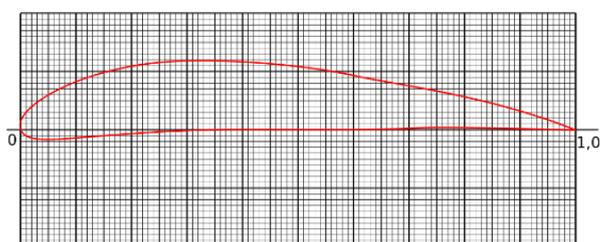


圖 24 NACA6312 翼型剖面圖[28]/ 機翼製作照片  
材質為巴爾沙木，外包卡典西德

### 2. 測試後翼升力（改變攻角、間距及方位角）

本實驗利用 Arduino 電子秤進行升力測量，當機翼重量變輕時，即可測得升力數值。實驗測試點位利用極座標標示，分別對應前後葉片之方位角 ( $\theta$ ) 及間距 ( $r$ )，主要期望驗證前翼產生之下洗氣流對後翼的影響、有效影響的範圍及最有效率運用其效益的位置。

實驗點位分別訂定為：間距  $d/1.5d$  ( $d=10\text{cm}$ ) 及方位角  $10^\circ/5^\circ/0^\circ/-5^\circ/-10^\circ/-15^\circ$ （以前翼為基準，即角度為負值時前翼在上、後翼在下）。機翼攻角使用 Arduino 控制，除能提高測試效率外，也能使數據更加準確。

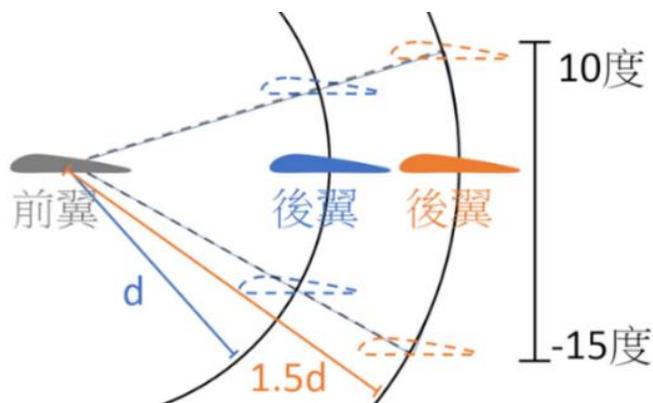


圖 25 測試點位示意圖

## 二、第二部份實驗：雙層葉片渦輪機效率實驗

### (一) 相關原理

#### 1. 螺距 (Pitch)

螺距為風能發電機葉片轉動一周風向前進的距離。

對於本研究而言，螺距為風能發電機葉片轉一周風前進的距離，運用此數據可求得雙層葉片在何種夾角及間距時將對應到最佳發電效率，同時也可以利用此理論解釋為何下洗流能運用於發電機葉片。

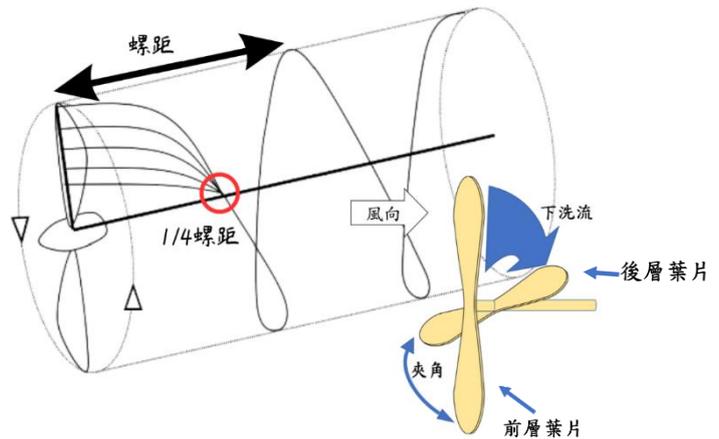


圖 26 螺距示意圖

1/4 螺距即為風轉 90 度的距離，右下圖表示螺距運用於葉片的型態

#### 2. 下洗流螺距結合於渦輪機的運用

風通過渦輪機葉片後將順著螺距旋轉前進，如圖所示，當雙層葉片的間距固定於 1/4 螺距時，氣流對應到的位置為 90 度之處，但考慮下洗流將會對此螺距偏轉角度產生變化。

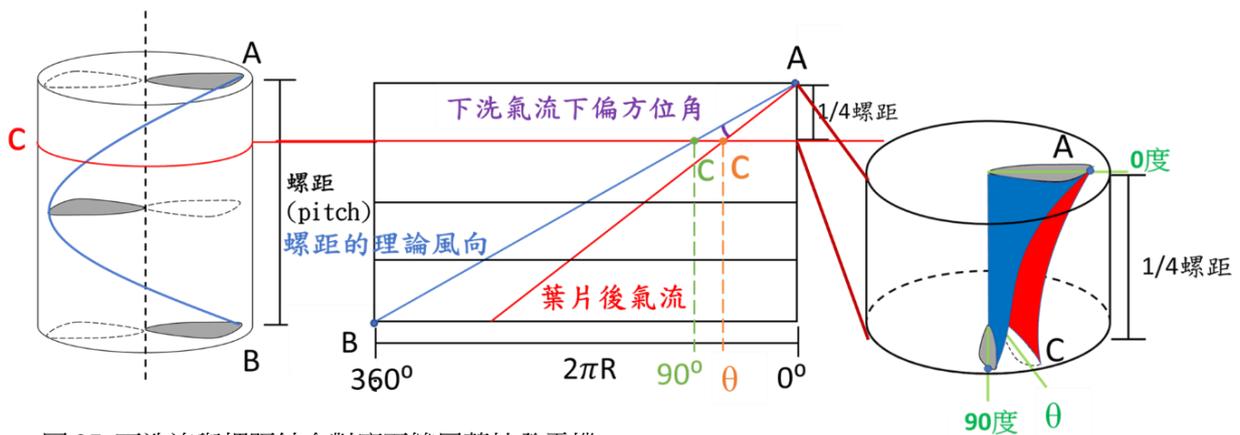


圖 27 下洗流與螺距結合對應至雙層葉片發電機

C 點為 1/4 螺距，即 90 度之處，搭配下洗流後夾角將變小，此夾角即為本研究探究重點。

## (二) 研究方法

### 1. 風力渦輪機葉片製作及螺距理論值計算

透過螺距計算葉片各位置角度及風速、週速比、轉速等數據。如下圖所示，將螺距之實際前進立體示意圖展開，將形成一由圓周長 ( $2\pi r$ ) 及螺距 ( $pitch$ ) 組成兩股的三角形，並將兩股同除  $2\pi$  即可將其中一股化成半徑 ( $r$ )。

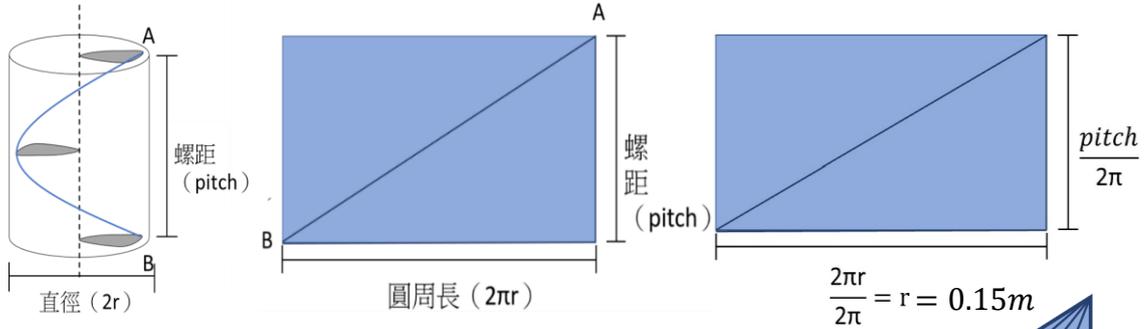


圖 29 螺距理論示意圖

如右圖所示，其中一股為半徑時，即可對應至葉片並計算各位置角度。而後設定理論值即可計算葉片各位置之角度。

本實驗訂定螺距 ( $pitch$ ) 為 0.20 m/轉、半徑為 0.15m，因此尖端攻角可以公式計算：

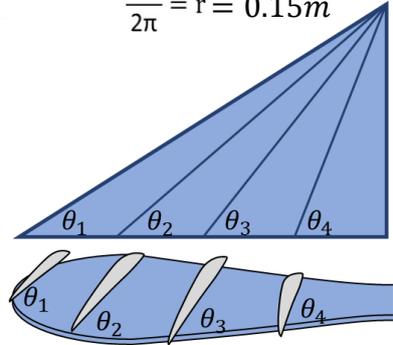


圖 28 螺距-葉片彎角示意圖

$$\tan\theta_{tip(1)} = \frac{pitch}{2r}, \tan\theta_{tip(1)} = \frac{0.2}{2 \times 0.15} \cong 0.2124, \theta_{tip(1)} \cong 12^\circ$$

而後將半徑  $r$  代入 0.1、0.05m 計算，即可得出各點所需攻角。

$$\tan\theta_2 = \frac{0.2}{2 \times 0.10} \cong 0.3184, \theta_2 \cong 17^\circ, \tan\theta_3 = \frac{0.2}{2 \times 0.05} \cong 0.6369, \theta_3 \cong 32^\circ \dots$$

螺距也可以推導至週速比 (T.S.R) 的關係  $\frac{V_{tip}}{V_{wind}}$ ，如右圖簡化。

$$\frac{pitch}{2\pi r}, \frac{0.2002}{2 \times 3.14159 \times 0.15} = 4.71$$

且本實驗風速 ( $V_{wind}$ ) 為 3 m/s，可推知葉片旋轉風為 14.13 m/s。

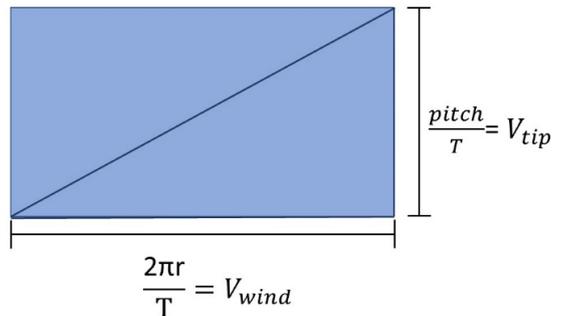


圖 30 螺距-週速比示意圖

而轉速的部分則由風源提供風速為 3 m/s 的風代入計算，

$$V_{wind} = pitch \times \omega, \quad \omega = \frac{3}{0.2002} \cong 14.99 \text{ 轉/s}$$

即葉片每秒約轉 15 圈。此數據可校正葉片狀態使用。

計算完成後，使用四片 0.3mm 之巴爾莎木（飛機木）交叉相疊，形成固定螺距，後削、磨製成葉片形狀，以此步驟製作兩片。



圖 31 葉片製作照片

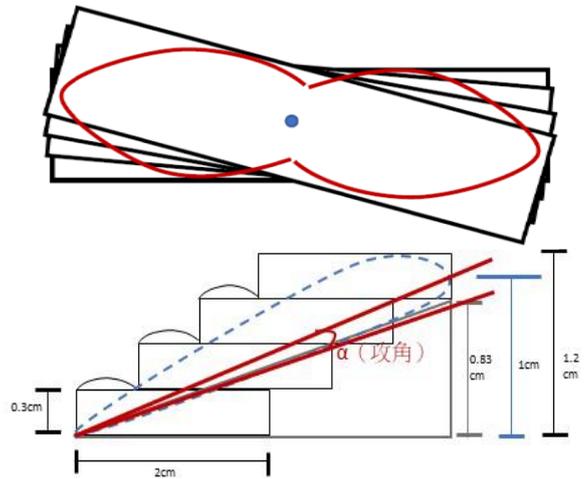


圖 32 葉片製作示意圖（俯視/側視）

## 2. 測試風力發電機搭配葉片的發電效率 （固定間距、改變夾角）

根據前述算式，本實驗葉片螺距為  $0.20 \text{ m/轉}$ ，葉片旋轉一周風約前進  $20\text{cm}$ ，因此可理論上將葉片間距固定於  $\frac{pitch}{4}$  ( $5\text{cm}$ ) 時，當兩葉片夾角為  $90^\circ$  時，通過前方葉片的氣流將剛好旋轉  $\frac{1}{4}$  圈，並被第二層葉片接收。

但由於有下洗流的現象產生，理應最適角度將有些許變化，本實驗將結合前述測試後翼升力實驗結果一併分析。

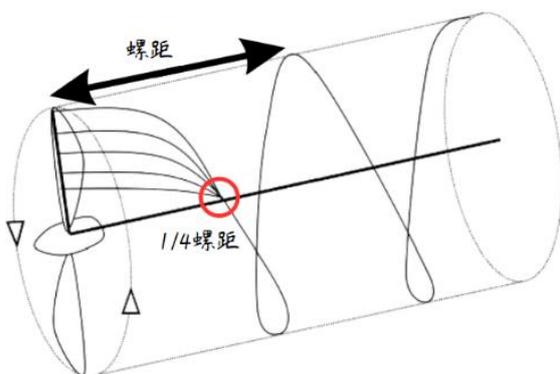


圖 33 風路徑示意圖

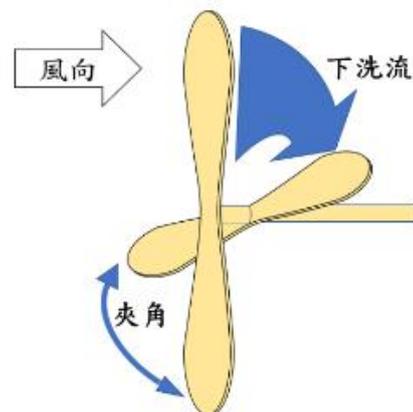


圖 34 改變兩層葉片夾角並結合下洗流示意圖

## 肆、研究結果

研究結果如同研究目的所述，分三個部份呈現，第一部份圖表展示不同狀況下後翼的升力，並輔以僅一片機翼狀況下的升力做對照組；第二部分呈現雙層葉片的發電機在不同夾角的狀態下，其發電效率提升狀況；最後將上述數據輔以單層葉片兩葉及四葉之發電效率做效益比較。

### 一、前後機翼升力實驗結果

#### (一) 第一次實驗

(測量後翼位於前翼後方 1 倍及 1.5 倍翼弦處，方位角 10 至-15 度間)

以下以前後機翼夾角與升力的關係圖表呈現結果，其中「(攻角 x/y)」中，x 表示前翼攻角，y 表示後翼攻角，即(前翼攻角/後翼攻角)。下圖表中 **d** 為機翼翼弦長 (10cm)，表示兩機翼前後距離，為使其無因次化以利觀察比例，全數皆表示成幾倍翼弦長 (d) 的形式。

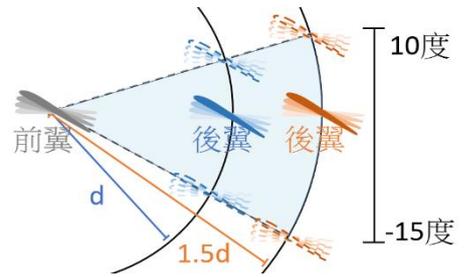


圖 35 第一次實驗點位示意圖

下表中升力為正時，表示產生正向升力，葉片向上抬舉，反之亦然。升力為零時，表示該夾角、攻角狀態下，前後機翼互相接觸，無法測得升力。本實驗以單翼之升力做對照組比較。

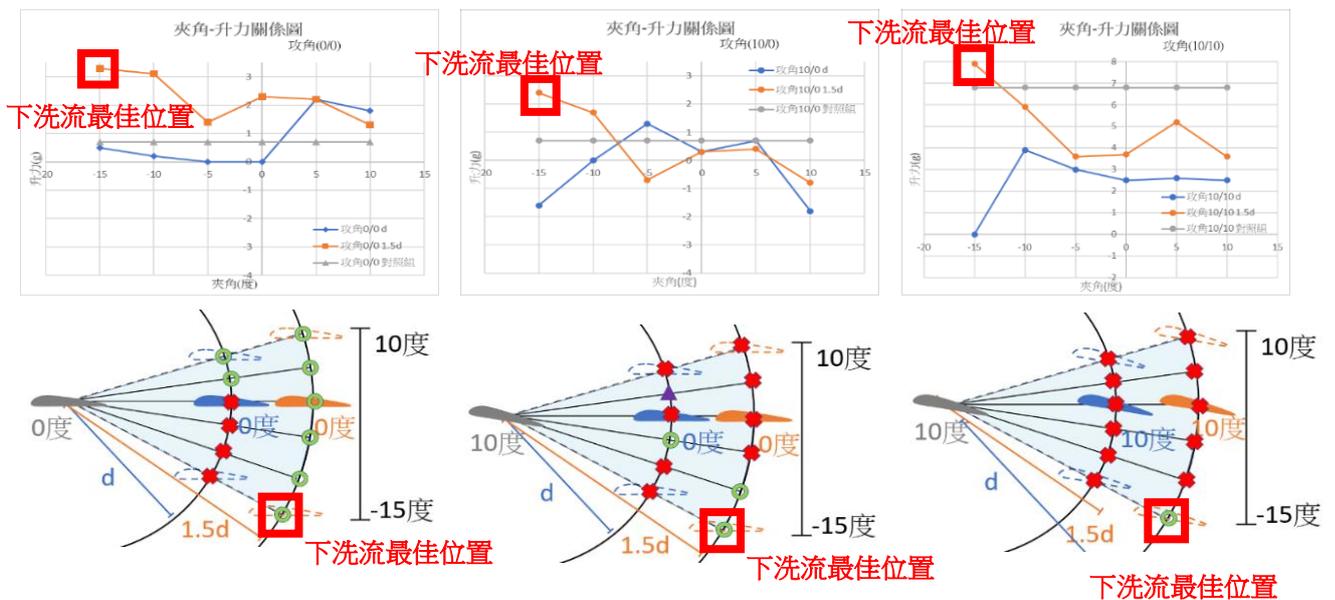


圖 36 方位角升力關係圖分析分別為攻角 0°/0°、10°/0° 及 10°/10°

後翼在距前翼 1.5 倍翼弦處及方位角在-15 度下有最佳升力

1. 由實驗總計共 16 組圖所對應的配置中，分別為攻角  $0^{\circ}/0^{\circ}$ 、 $10^{\circ}/0^{\circ}$ 及  $10^{\circ}/10^{\circ}$ 且間距  $1.5d$  時升力提升較多，因此挑選此 3 組圖分析（圖 36），此些配置下洗流影響比例最為顯著，可進一步推論攻角較小時下洗流較明顯，將以小攻角作為下一階段實驗主要對象。
2. 雖然較高攻角狀態下有部份數據呈現升力較大，然根據葉片攻角對升阻力的關係可知，攻角高於約 15 度時，雖升力不斷提升，阻力卻亦將大幅度提升，又無法明顯觀測得下洗流影響，因此判斷較不適用於下一階段實驗。
3. 由上述數據可知，後翼位置為於前翼方位角-15 度處（後翼為於前翼後下方），下洗流可最明顯的提升後翼升力，目前推測此數據將影響雙層葉片渦輪機之螺距理論。

（二） 第二次（聚焦）實驗（後翼位於前翼後 1.5 倍翼弦處，方位角-10 至-20 度間）

經由第一次實驗可明顯觀察在小攻角狀態下後翼升力在方位角-15 度時有最明顯的升力提升，同時現行多數風力渦輪機葉片的尖端攻角都落在  $8\sim 12$  度之間，因此第二次（聚焦）實驗將方位角聚焦於-10 度~-20 度做測試，並且每 5 度測試一次，攻角聚焦在  $0\sim 12$  度之間測試，每 4 度測一次。

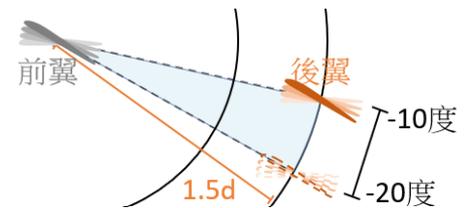


圖 37 第二次（聚焦）實驗點位示意圖

實驗設備搭配 Arduino 重量感測模組，可在短時間內紀錄多筆數據進行平均以提高數據精確度，及使用 Arduino 伺服馬達，使其可自動且精準調整攻角。

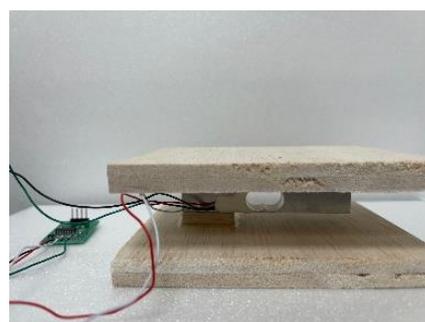


圖 38 Arduino 模組  
伺服馬達及重量傳感器

以下四組圖表以後翼作為分類依據分別為後翼攻角 0 度、4 度、8 度、12 度時，前翼不同攻角時的升力變化，每一組圖表的上圖為機翼配置示意圖，下圖為升力變化雷達圖。

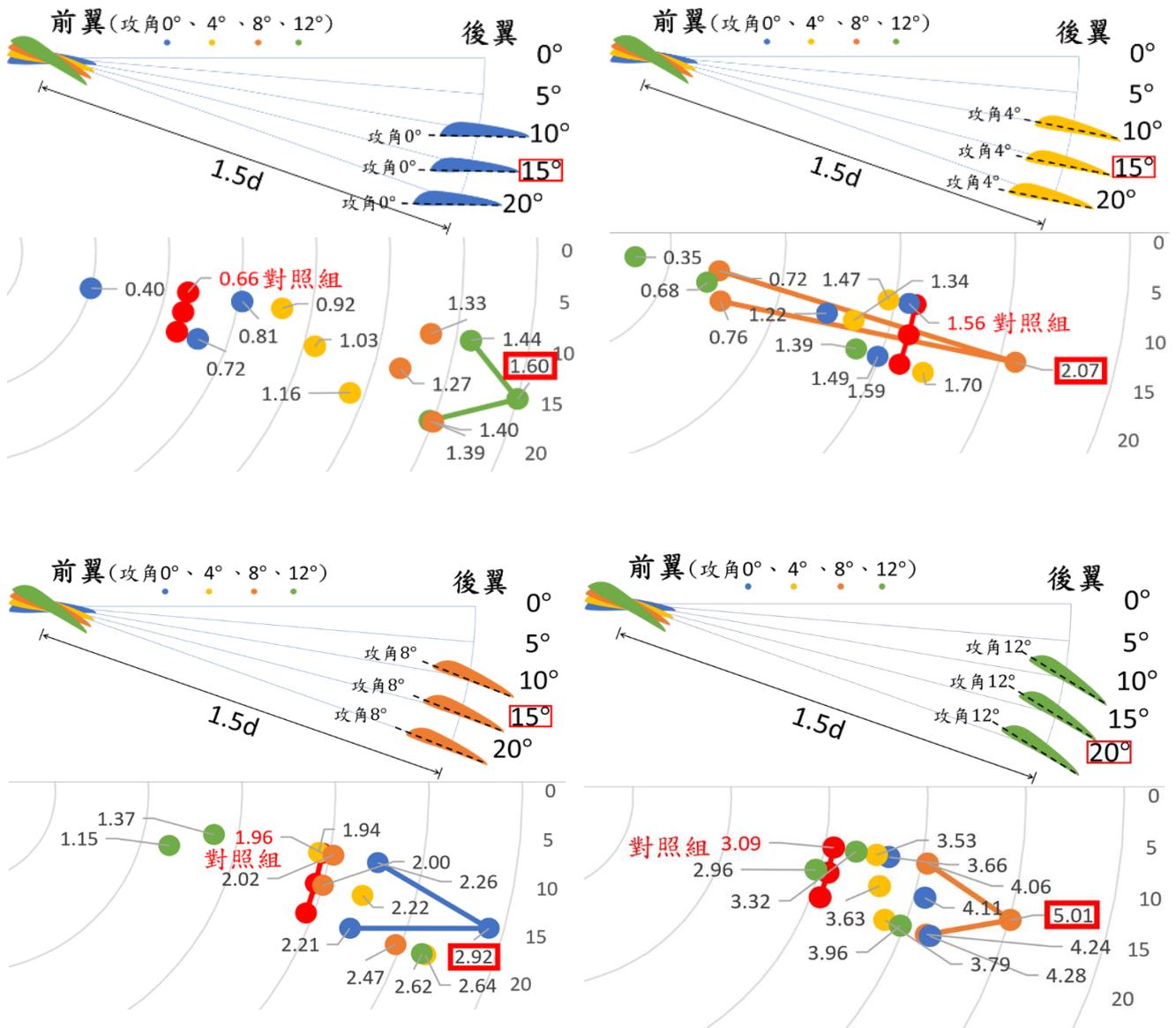


圖 39 第二次（聚焦）實驗點位示意圖實驗配置圖及升力變化雷達圖  
紅色點位一律為對照組，其餘藍、黃、橘、綠依序為攻角 0°、4°、8°、12°

將實驗得出的四組圖表進行疊圖後可得到下圖，藍色虛線的斜直線代表對照組數據，表示將前翼移除，僅測量後翼在不同攻角狀態下的升力變化。

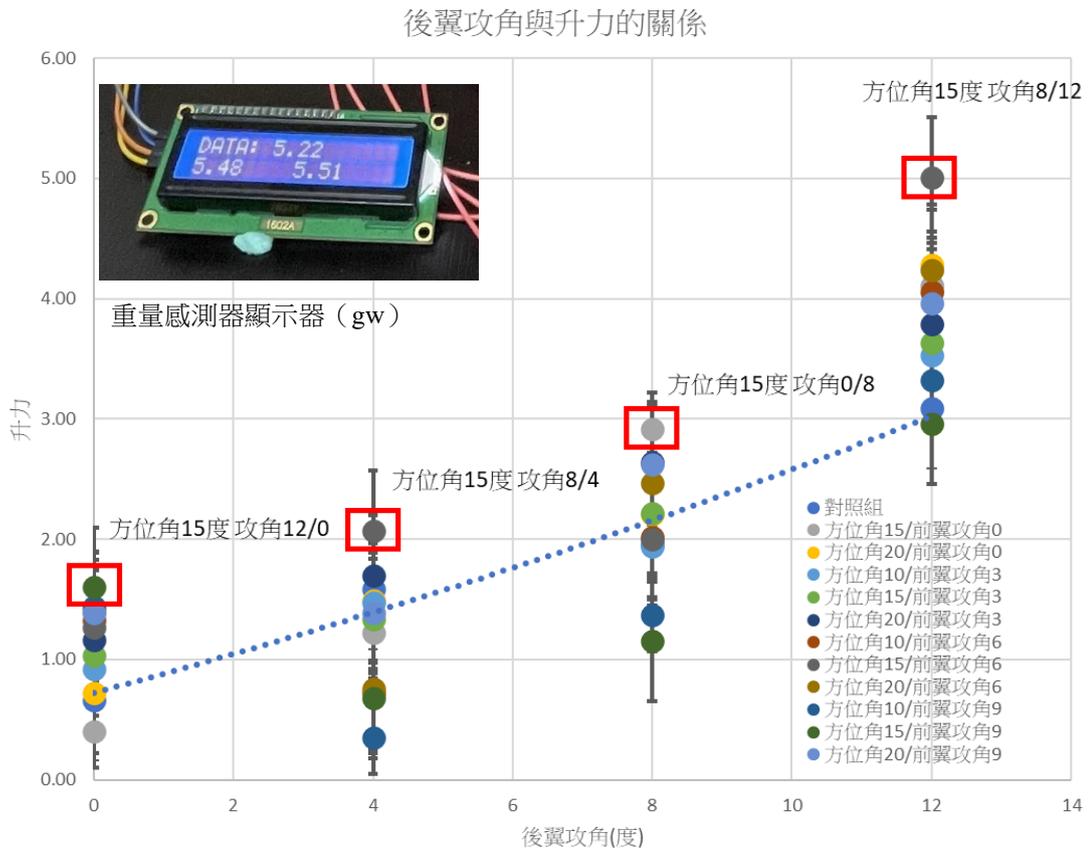


圖 40 第二次（聚焦）實驗升力變化疊圖

觀察圖表可發現大多數點位在增加前翼的配置後升力數據都明顯高於對應攻角之對照組升力，且無論何種後翼攻角狀態下，位於方位角-15 度的點位都有最明顯的升力提升，同時隨著後翼攻角的提升，升力變化程度也隨之提升，在攻角 12 度時達成最大升力。

### （三） 機翼煙流實驗

固定機翼攻角 12 度，使煙流清楚且排列整齊的流經機翼四周，可用肉眼清楚觀察到下洗氣流位於機翼後下方 15 度位置，符合上述實驗結果。

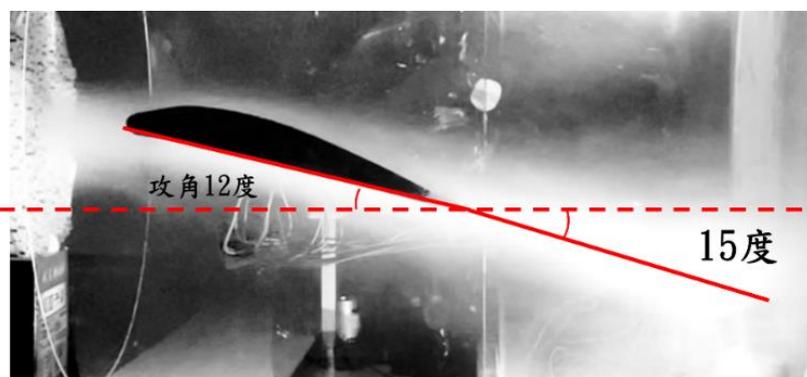


圖 41 機翼煙流實驗影像

下洗流角度為後下方 15 度。

## 二、雙層葉片渦輪機效率實驗結果

下圖以前後葉片夾角與發電效率的關係圖表呈現結果，以前後葉片重疊作為夾角零度，固定後葉片，以順時針調整前葉片並每 15 度進行一次測量，測量至前後葉片夾角 180 度止。

本實驗著重探究夾角及發電效率的關係，因此將兩葉片間距設為定值 1/4 螺距，並使用葉片長 15 公分、尖端攻角 12 度之葉片進行測量（前後機翼升力實驗結果）。

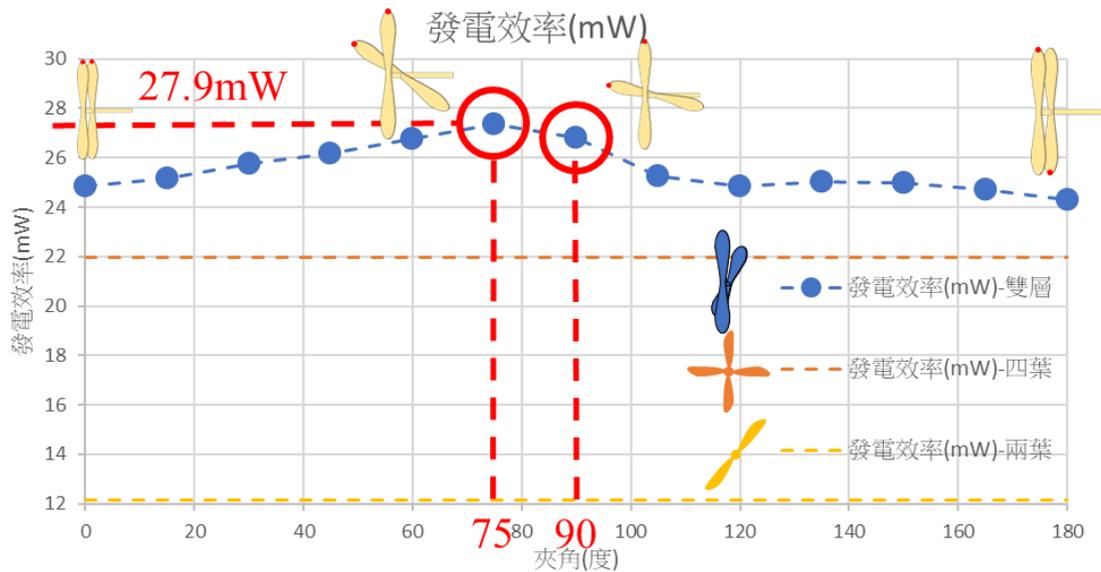


圖 42 發電機葉片種類與發電效率關係圖

由上圖可知，四片葉片的發電機其發電效率並非兩片的兩倍，但若將兩層葉片搭配發電機，卻可將發電效率大幅度的提升。

由於將前後葉片間距設為 1/4 螺距（5.0 公分），因此理論上當兩葉片夾角 90 度時會有最高發電效率。

根據圖表顯示，當兩片葉片夾角 75 度時有最高發電效率 27.9mw，與理論夾角 90 度會有最高發電效率不符，但若將第一部份實驗的結果納入討論，則理想最高發電效率之對應葉片夾角（90 度）需減去下洗流範圍（15 度），因此發電效率最高值落在葉片夾角 75 度，符合實驗推論。

### 三、比較兩層葉片之風力渦輪機與兩片、四片風力渦輪機的發電效率及其效益

下圖以渦輪機葉片種類與發電效率的關係圖表呈現結果，令四片渦輪機為(標準 100%)。

將兩層葉片風力渦輪機最高發電數值(夾角 75 度)與兩片、四片風力渦輪機發電數值比較並分析其原因。

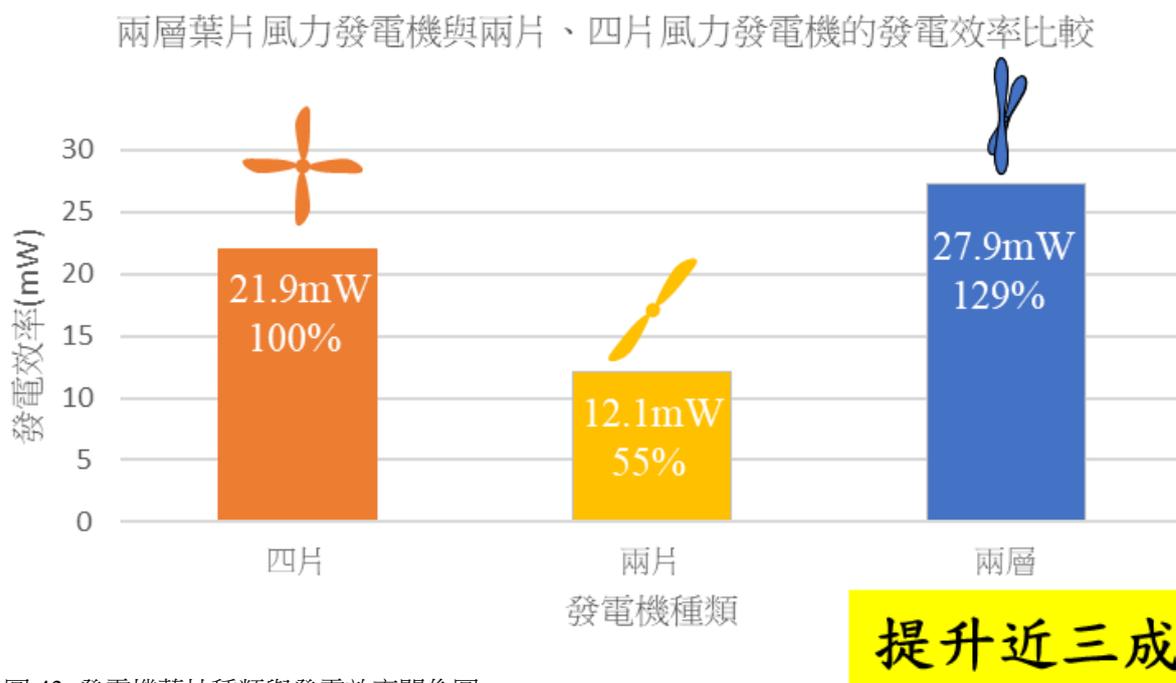


圖 43 發電機葉片種類與發電效率關係圖

由上圖可知，四片葉片的發電機其發電效率並非兩片的兩倍，但若將兩層葉片搭配發電機，卻可將發電效率大幅度的提升。

經實驗得知當兩層葉片風力發電機前後葉片夾角 75 度時有最高發電效率 27.352mw，以此數據與兩片、四片風力發電機發電效率比較後可發現，兩層葉片風力發電機發電效率比四片風力發電機高出三成，其原因為後葉片位於下洗流範圍內，可使用到下洗氣流使後葉片升力大幅提升，以提高發電機發電效率。

## 伍、討論

### 一、針對實驗過程改進

(一) 目前實驗配置上，不論第一、二部份實驗，皆有取樣點過於零散的問題，在未來實驗除了使取樣點更密集外，也應注意峰值的真實性，在目前測得的峰值附近聚焦測試更多點位，確保峰值確實落在數值的最大處。

(二) 承上述，由於研究取樣點過於零散，或許造成線在第一、二部份可相對應的結果有誤差，即現測試 75 度

為發電效率最佳處，然當增加取樣點後或許會有變化，進而導致下洗流對應至發電效率峰值是有誤差。(原因分析參見本項第三點針對研究假設修正之第三點)

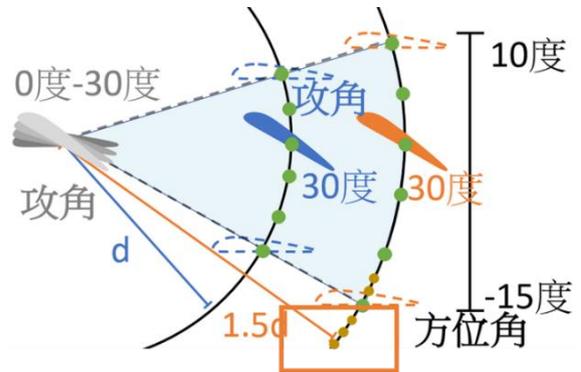


圖 44 實驗修正改進示意圖

橘框-推廣至更高夾角/黃點-峰值處距焦點位

### 二、針對實驗結果論證

(一) 後翼升力實驗中，前翼攻角較小較容易觀察到下洗氣流之影響，其主因應為阻力較小之緣故，阻力較小相對升力之變化就較顯著；前翼攻角較大時，葉片邊緣由於邊界層的效應，將會產生極厚的氣流於葉片邊緣黏滯，並在後緣產生混亂且極強的紊流，除影響自身運行外，亦將影響後方物體、葉片的運作，在實務運用上有難以突破之困難點，固本研究僅針對小攻角測試，並可發現小攻角狀態下洗流約在方位角-15 度處。

(二) 雙層葉片發電機發電效率實驗中，根據螺距計算理論上風前進之軌跡，並將葉片夾角調整完成後，將發現該夾角並未對應至發電效率的峰值，其原因正是前述大量提及的「下洗氣流」，依據後翼升力實驗中得知下洗流方位角-15 度，雙層葉片發電機發電效率實驗中理論最大值夾角為 90 度，然實際測試後對應夾角為 75 度，恰巧符合下洗流位置 ( $90^{\circ}-15^{\circ}=75^{\circ}$ )。

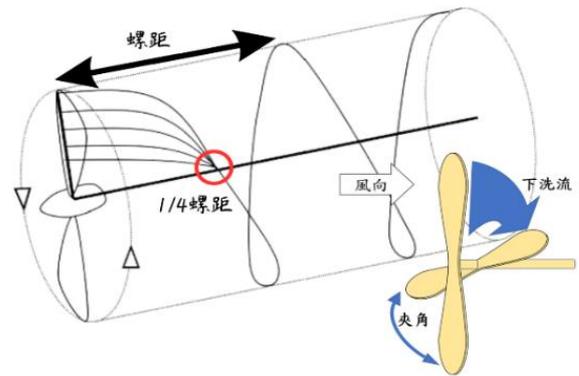


圖 45 風路徑示意圖

(三) 承上述，雙層發電機葉片在不同的間距下，都會有一個理論最大值對應之夾角，若將該夾角減去下洗流最強勁之夾角，所得角度即為發電效率峰值對應之夾角，即螺距角-下洗方位角=真實發電效率極值夾角。

### 三、針對研究假設修正

本項主要討論本研究設計時忽略的變因及未考慮完全之處，同時也可以對應至未來本研究需進一步實作及論證的方向，大致為透過相關物理量說明研究者認為本研究結果其實有未臻完善之處，並進一步說明相關修正方案。

- (一) 飛機機翼相對於風而言是靜止的物體，但是發電機葉片不斷地轉動，會使葉片相對於風不斷地在變動，可能造成風被壓縮，進而影響後方流向。

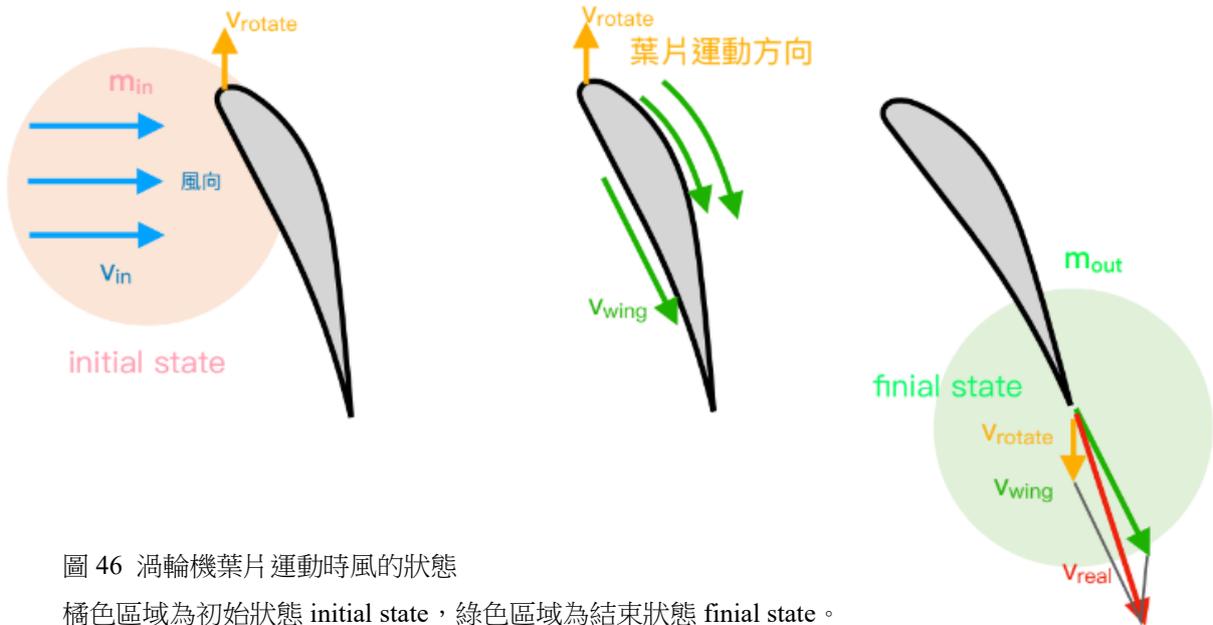


圖 46 渦輪機葉片運動時風的狀態

橘色區域為初始狀態 initial state，綠色區域為結束狀態 final state。

代號可對應下公式。

由上圖可知，貼翼面的風越 ( $v_{wing}$ ) 大或旋轉風 ( $v_{rotate}$ ) 越小，將造成所得真實風 ( $v_{real}$ ) 下偏角度越大，而此即為本實驗前述所說，由於發電機的運動狀態，將使葉片後的氣流並不吻合機翼下洗流，預期透過以下公式修正葉片後的風向。

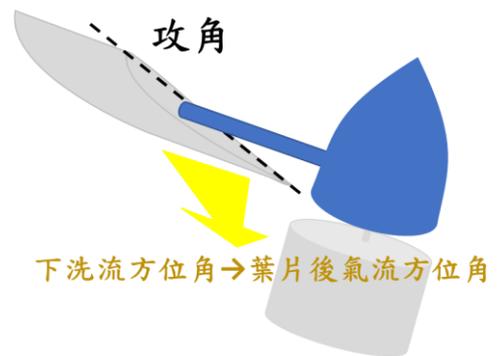


圖 47 渦輪機葉片後風向示意圖

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{initial\ state = final\ state} \\ (m_{air/in} \cdot v_{air/in}) + 0 = (m_{air/out} \cdot v_{air/out} \cdot \cos\theta) \\ 0 = (m_{blade} \cdot v_{blade}) + (m_{out}^{air} \cdot v_{out}^{air} \cdot \sin\theta) \\ \rho_{in} \cdot A_{in} \cdot v_{air/in} = \rho_{out} \cdot A_{out} \cdot v_{air/out} \cdot \cos\theta \end{array} \right.$$

(二) 由上述可知，機翼下洗流並不一定能直接對應至葉片的向後偏轉之氣流，意即當增加前兩部份實驗的取樣點密集程度時，兩部分實驗數據在對應上將可能有誤差，必須透過進一步試算才能將下洗氣流修正為真實發電機葉片後的偏轉氣流，。

前頁共三條方程式，內含三項未知數，透過解方程式將能得知  $\theta$ ，修正下洗流方位角為葉片後偏轉氣流方位角。上述三條方程式僅為初步想法，恐仍有誤差因素需討論，未來應加入此項推論未來應加入「尾流 Wake」及「誘導阻力 Induced Drag」分析，進一步確立相關推論流程。

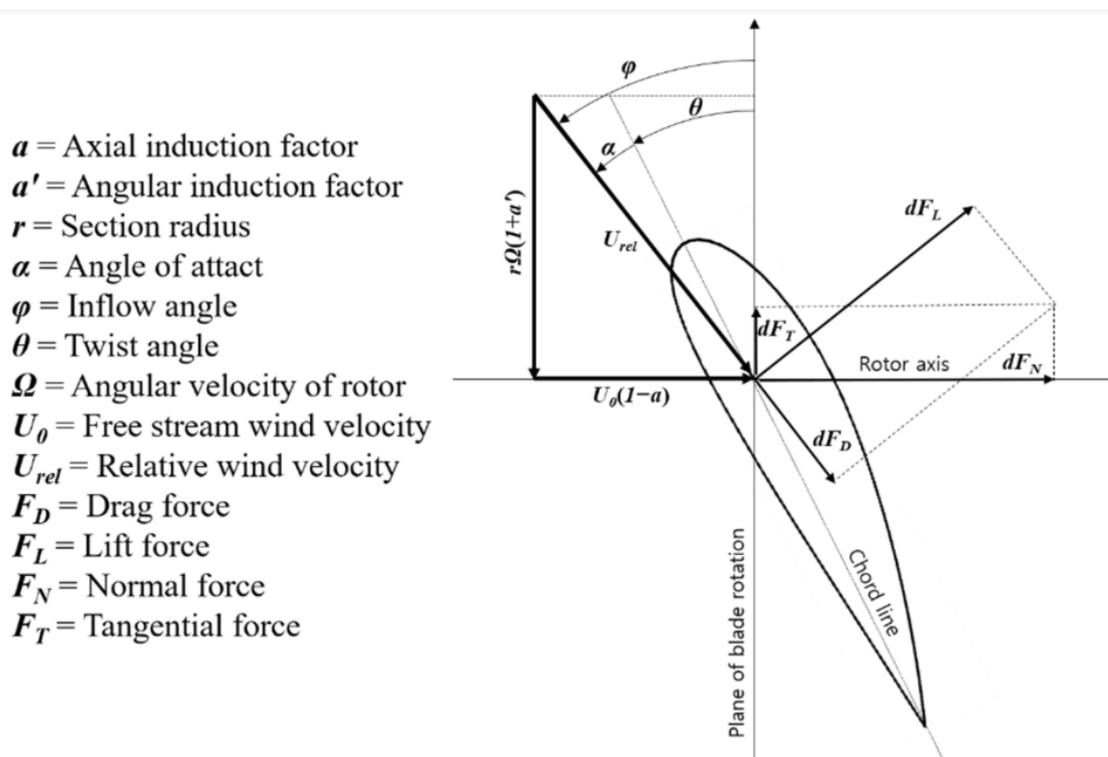


圖 48 葉片升阻力於流場中的影響因素[29]

真實風 ( $U_0$ ) 或旋轉風 ( $r\Omega$ ) 都需考慮修正項 ( $a$ 、 $a'$ ) 的因子。

雖此處推論下洗流或許不能完全運用於葉片上，但不可否認其仍能產生效益於效率上，僅推論仍能透過進一步實驗及分析更大程度的提升效率。

#### 四、針對未來研究方向

綜合上述，本研究仍有許多未臻成熟之處，需進一步的延伸並討論，以下總結。

- (一) 新增實驗取樣點，尋找實驗真實峰值，進一步對照兩部份實驗能否對應。
- (二) 透過相關物理量及公式將下洗流修正至真實渦輪機葉片後偏轉氣流方位角，並進一步分析其效益。
- (三) 增加一層葉片將提升發電效率（目前實驗實測約提升約 30%），若對應研究新穎性所述，每層葉片接收 25% 的風能，理論上在增設一片葉片將再提升發電效率，但增設葉片的同時也會造成發電機的負擔及製作困難，本研究未來也預計不斷增加葉片層數，觀察在增設置第幾層葉片時，效率將產生負回饋。

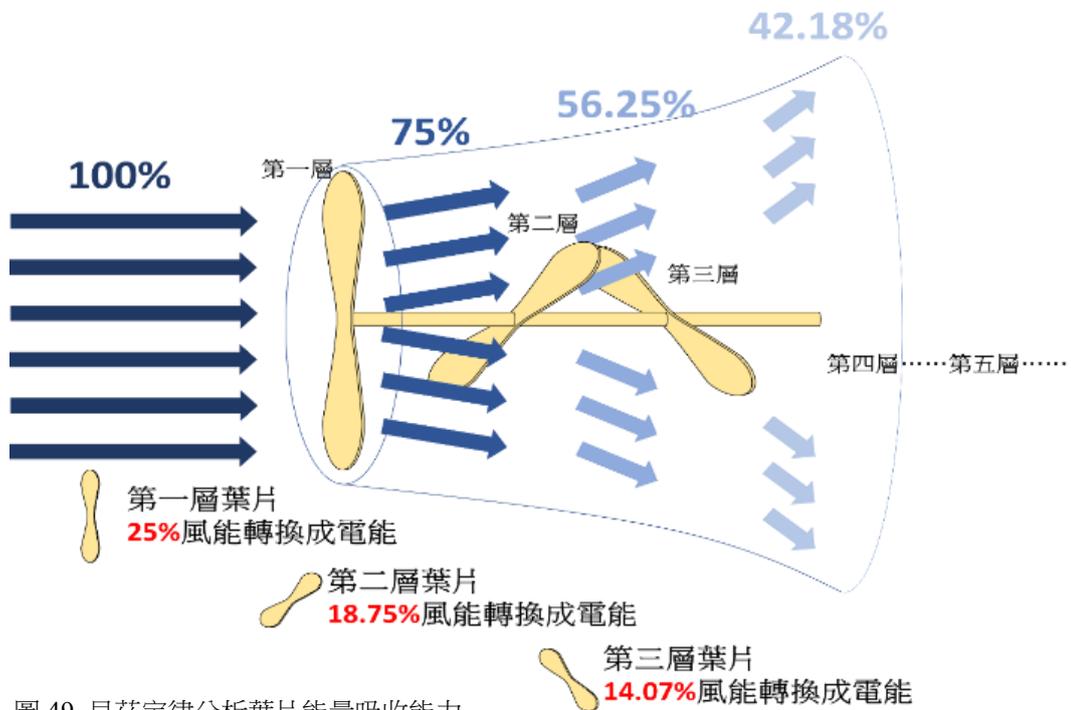


圖 49 貝茲定律分析葉片能量吸收能力

假設每一層葉片能吸收 25% 的風能，單層 25%，雙層即 25%+18.75%，以此類推。

每增加一層葉片都能增加其葉片吸收風能的效率，但同時將產生阻力。

(四) 如下圖所示，風通過渦輪機葉片後風將會旋轉並且擴散，因此本研究將來預計延伸實驗至減少第一層葉片大小，進一步的提升效率及降低成本。

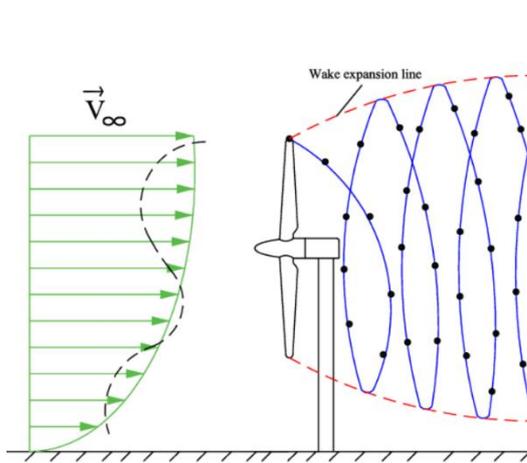


圖 51 風力渦輪機後方風場示意圖 [30]

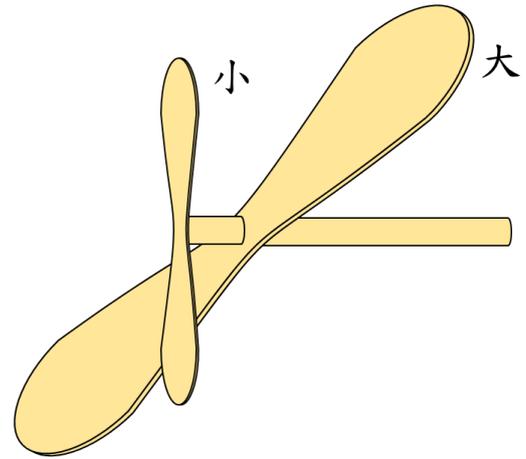


圖 50 前葉片設計較小示意圖

風流經風力渦輪機後呈螺旋線前進，且有擴散的趨勢。風通過後將旋轉擴散至第二層葉片。

(五) 由下圖可知，不同型態、葉片數的渦輪機及不同的週速比( Tip Speed Ratio[ T.S.R ] )將對應至不同的功率係數 ( Power coefficient )，由實驗可推知雙層風力渦輪機的功率係數為 0.074；四葉為 0.063；兩葉為 0.037，功率係數將對應到發電功率，未來實驗應推廣至各種風速及其對應之週速比，進一步論證發電功率及功率係數的優劣。

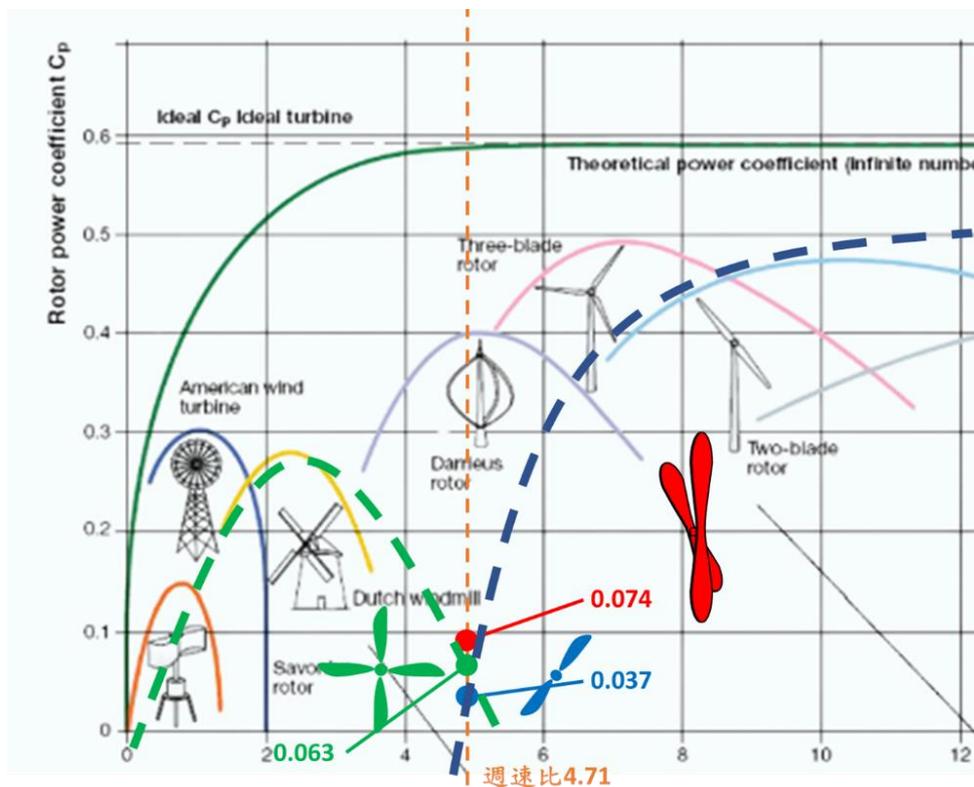


圖 52 功率係數、週速比與葉片形式數量關係圖 [31]

本研究於週速比 4.71 作測試 (棕色垂直虛線)。

綠色虛線為單層 4 葉發電機、藍色虛線為單層 2 葉發電機、本研究設計為紅色點位。

## 陸、結論

### 一、結論

(一) 測試雙層葉片渦輪機前，先進行「前後機翼升力實驗」。發現後翼位於前翼 1.5 倍翼弦位置相較於 1.0 倍翼弦處能獲得更多升力。且後翼位於前翼-15 度方位角處，能由前翼的下洗流效應使升力大幅增加。此現象再由「風洞實驗的煙流實驗」予以證實。

(二) 螺距為旋轉一週所前進的距離。第一層葉片產生的尾流，遇到相距 1/4 螺距處的第二層葉片，應與旋轉 1/4 週，也就是 90 度。但依「前後機翼升力實驗」結果運用在此「雙層葉片渦輪機效率實驗」，效率最大值為理論夾角 90 度減去下洗流夾角 15 度，對應至兩層葉片應為夾角 75 度，實驗也證實兩層葉片在夾角 75 度時有最大功率輸出。

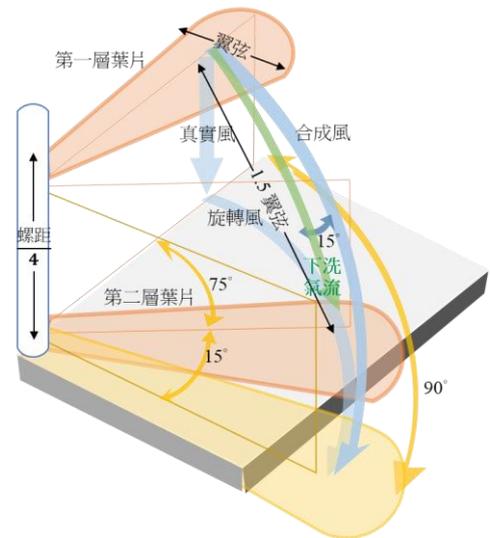


圖 53 發電效率峰值夾角示意圖

(三) 分別比較半徑相等的：「單層兩葉渦輪機」、「單層四葉渦輪機」以及「雙層兩葉渦輪機」三者風力渦輪機數據樣本。如果將「雙層兩葉渦輪機」調整至最佳的狀態，其發電效率較「四葉渦輪機」高出近三

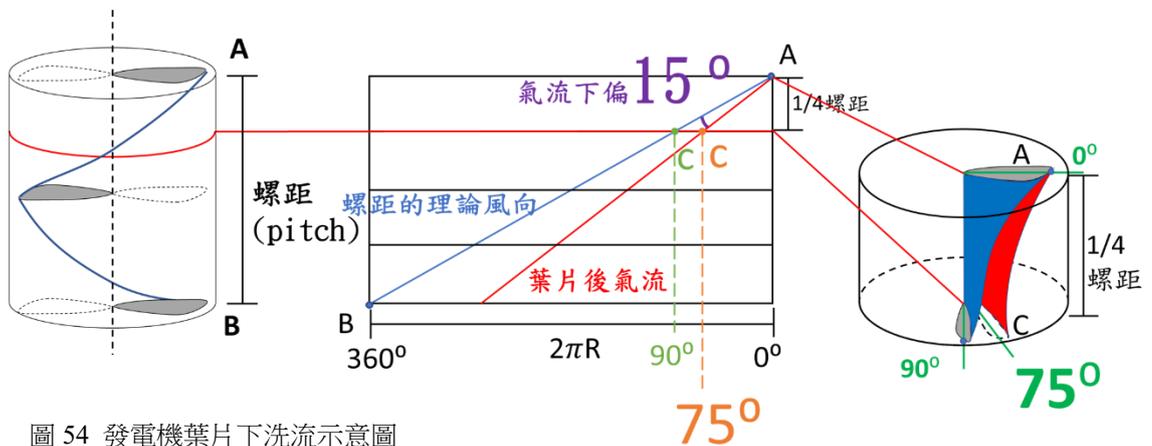


圖 54 發電機葉片下洗流示意圖

成功率。

### 二、效益分析

本研究設計之雙層葉片發電機能提升約 30% 之發電效率，同時一層葉片的成本佔整體發電機成本約 10%-20% 間，雖本研究預期在延伸實驗上能更大程度的提升效能，然針對現有數據分析即可發現本設計明顯在發電效率及減少成本的交際效益是極高的，具有良好的發展可能及前瞻性。

### 三、應用及創建性

- (一) 翼端渦流是一種在機翼或葉片尖端產生的紊流，將使成航空器的不穩定及削弱翼面的升力，而下洗流運用於飛機上時，能有效的減少翼端渦流的負面效益，現在也有相關研究顯示無人機葉片運用下洗流將可以降低噪音，本研究未來也可針對這幾點進行分析論證。

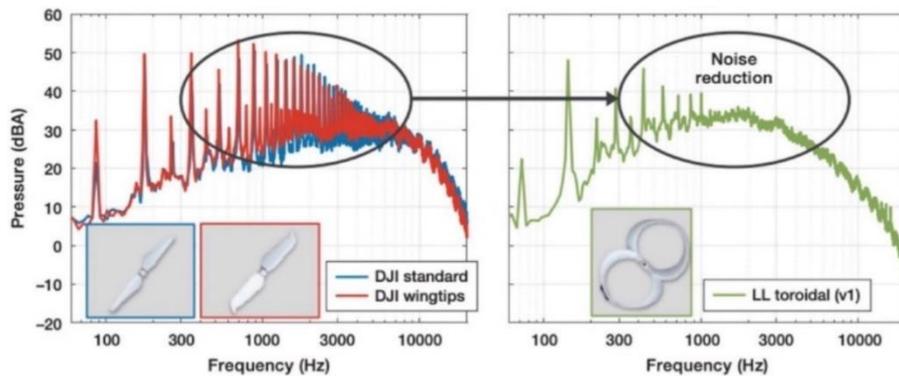


圖 55 葉片形狀對降噪能力的影響[32]

- (二) 如同動機所述，本研究之設計與現行類似設計相比，具有成本較低及好維修的特性，如圖所示，本研究相對於環形葉片發電機而言，在葉片設計上相對簡單，而且若今日葉片受損，環形葉片需要整組葉片進行汰換，然本研究設計可以針對單層做檢修或汰換，大幅提升維修之便利性及成本。

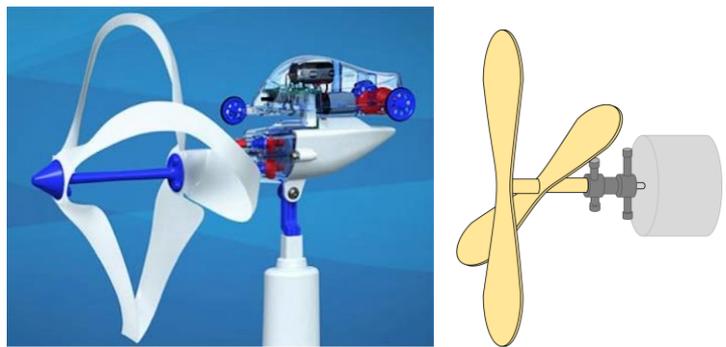


圖 56 設計比較（環形風機[1] / 本研究設計）  
前後葉片相連將使葉片損壞時須整組修復，本研究設計可使維修更加方便。

- (三) 部份飛機會在機翼前緣架設前緣襟翼，該襟翼會將流場擾動，藉此提升主翼的升力，該現象與本研究具有異曲同工之妙，未來探討兩者是否能結合是本研究重要的方向。

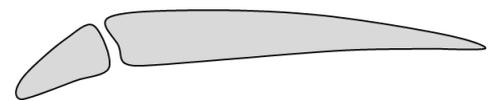


圖 57 前緣襟翼示意圖

- (四) 下洗流是否能完全運用於葉片中有待商榷，未來亦將透過延伸實驗做分析及論證，但是依現行數據而言，本研究利用下洗流仍能提升發電效率（預期延伸實驗將更大幅度的提升效益，參照討論第三點）
- (五) 下洗流在航空飛行領域中是相當成熟的效應，但運用於發電機中是相對新穎的議題，本實驗規劃未來將更精準的測量並取得結論，但僅透過現行的結果，就可以發現下洗氣流造成的效益絕對不容忽視，綜合上述，本研究在未來的發展及創建性都有極大的空間及可能性。

## 柒、參考文獻資料

1. Tamiya(2020)。Loop Wing wind power generator。Japan trend shop。  
<https://reurl.cc/XEeOyR>。
2. 作者未知(2014)。飛行變省力\_英專家解候鳥 V 形飛行之謎。東網新聞。  
<https://reurl.cc/8jyraR>。
3. Gabe(2016)。Giải đáp khoa học cho "chiến thuật hy sinh" trong môn đua xe đạp!科學解答騎行“犧牲戰術”。SOHA NEWS Vietnam。  
<https://reurl.cc/Eo2qOn>。
4. 作者未知(2023)。Toroidal Propeller。r&d 100 awards。Massachusetts Institute of Technology Lincoln Laboratory。  
<https://reurl.cc/65aVZZ>。
5. 李亮澄 邱政揚(2020)。風力發電最大功率探討。中華民國第 60 屆中小學科學展覽會工程學科(一)高中組特優。北市某高級中學。
6. Kun Chen,Wei-wei Yao,Jian-hui Wei,Rui-biao Gao,Yi-xiao Li (2021)。Bionic coupling design and aerodynamic analysis of horizontal axis wind turbine blades-水平軸風力機葉片仿生耦合設計與氣動分析。
7. 本研究者 李芷萱(2022)。風能發電-論風罩與仿生科技結合對發電效應的影響。臺北市 111 年度中等學校學生科學研究獎助研究作品說明書。
8. 黃祉穎 吳品儀 賴柔安(2013)。流體動能利用系統—Stanley Generator 製作及模組化應用。中華民國第 53 屆中小學科學展覽會國中組生活與應用科學科 佳作。基隆市立建德國民中學。
9. Nick Johnson, Pietro Bortolotti, Katherine Dykes, Garrett Barter, Patrick Moriarty, Scott Carron, Fabian Wendt, Paul Veers, Josh Paquette, Chris Kelly, Brandon Ennis(2020)。Investigation of Innovative Rotor Concepts for the Big Adaptive Rotor Project-大型自適創新轉子之概念研究。研究專案。National Renewable Energy Laboratory and Sandia National Laboratories。
10. OPRINA G., CHIHAIA R.A., EL-LEATHEY L.A., NICOLAIE S., BĂBUȚANU C.A.(2016)。A REVIEW ON COUNTER-ROTATING WIND TURBINES DEVELOPMENT-對轉風力渦輪機的回顧發展。VOINA A.National Institute for R&D in Electrical Engineering ICPE-CA。
11. Csaba Heteyei, Ferenc Szlivka(2021)。COUNTER-ROTATING DUAL ROTOR WIND TURBINE LAYOUT OPTIMISATION-反向雙轉子風力渦輪機配置優化。Óbuda University。
12. 黃詩云 吳佳芸 王俞傑 洪宜婷(2018)。風馳電生。中華民國第 58 屆中小學科學展覽會生活與應用科學科(一)國小組第三名。屏東縣鹽埔鄉振興國民小學。
13. 劉昕恬 廖苑婷(2014)。運用抽吸效應(suction effect)減阻之研究。中華民國第 54 屆中小學科學展覽會物理 科高中組最佳團隊合作獎。北市某高級中學。
14. 陳吟珍 張育豪 黃兆宇 陳芳琦 呂鎧均(2014)。神「風」特攻隊-扇葉與風力發電。中華民國第 54 屆中小學科學展覽會國小組 生活與應用科學科 入選。澎湖縣馬公市中正國民小學。

15. 亭儒 林玟葳 黃翊(2017)。風力罩得住酷旋發電機。中華民國第 57 屆中小學科學展覽會生活與應用科學 科(一) 國中組第一名。臺北市立龍門國民中學。
16. 邱政揚(2020)。被動式可調螺距風力渦輪葉片。第 9 屆旺宏科學獎銀牌。北市某高級中學。
17. 陳良瑞 吳佳軒 吳文欽(2010)。高功風能最大功率追蹤系統。碩士論文。國立澎湖科技大學電機工程系。
18. Lester Gilbert(2022)。Downwash-下洗氣流。教育網路科普網站。
19. Nancy Hall(2022)。Downwash Effects on Lift.-升力的下洗氣流效應。National Aeronautics and Space Administration(NASA)。
20. 未知(2018)。Upwash。WIKIMEDIA COMMONS。 <https://reurl.cc/p6gDd4>。
21. AVID C. EYRE(2019)。MIGNET HM-14 POU DU CIEL-跳蚤飛機。Aeropedia。
22. Barnaby Wainfan(2018)。Wind Tunnel,Flying Flea, part 3.-風洞，飛行跳蚤第三章。Kitplanes。
23. 未知。JAS 39 獅鷲獸戰鬥機。維基百科。 <https://reurl.cc/51rgvq>。
24. 未知(2019)。幻象戰機 可 6 分鐘迎敵。自由時報。 <https://reurl.cc/3xaDkM>。
25. 未知(2021)。貝茲定律(Betz' Law)--風力發電機的效率極限。能源教育資源總中心。國立成功大學。 <https://reurl.cc/qLgDap>。
26. E. Erturk ,S. Sivrioglu , FC Bolat(2018)。Analysis Model of a Small Scale Counter-Rotating Dual Rotor Wind Turbine with Double Rotational Generator Armature。Semantic scholar。
27. Krishna Kumar Subramanian(2018)。The lines are produced by injecting smoke into the tunnel。Quora。
28. ILA-boy(2008)。NACA 6312.svg。Wikimedia Commons。
29. Kyoungboo Yang(2020)。Geometry Design Optimization of a Wind Turbine Blade Considering Effects on Aerodynamic Performance by Linearization。MDPI。
30. H. Abedi(2016)。Development of Vortex Filament Method for Wind Power Aerodynamics。Semantic scholar。
31. Vatsalkumar Arvindbhai Manavar(2021)。Design Optimization of Savonius Wind Turbine using CFD Simulations。Uppsala Universitetit。
32. Loz Blain(2023)。Toroidal propellers:A noise-killing game changer in air and water。

## 【評語】 052313

1. 由文獻回顧可看出作者對風機及飛行器的空氣動力學有深入瞭解，並依據這些原理設計一雙層葉片風力渦輪機，並使第二層葉片吸收第一層剩餘風能，提升發電效率，作品具創新性。
2. 對於研究目的及研究價值說明清楚，研究具實用性及價值性。
3. 該研究有系統地進行文獻回顧，對設計之作品有進行詳細流體力學實驗，進行各項性能驗證，證明效率有明顯提升。
4. 對於未來進一步提升及改進亦有很好的規劃。

# 作品海報

# 雙層式水平軸風力渦輪機葉片 下洗氣流之探究

Investigation of Downwash Flow Below the Blades of  
Double-layer Horizontal Axis Wind Turbine



# 前言 Introduction

## 雙層葉片渦輪機：

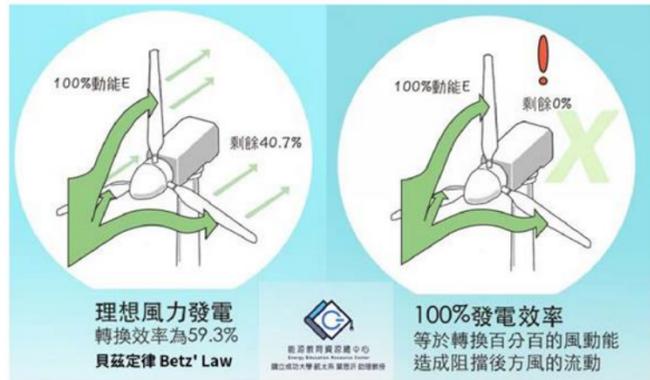


圖1 貝茲定律(極限)[1]

風能發電最大能源轉換率為59%，第二層能再利用剩餘的風能。

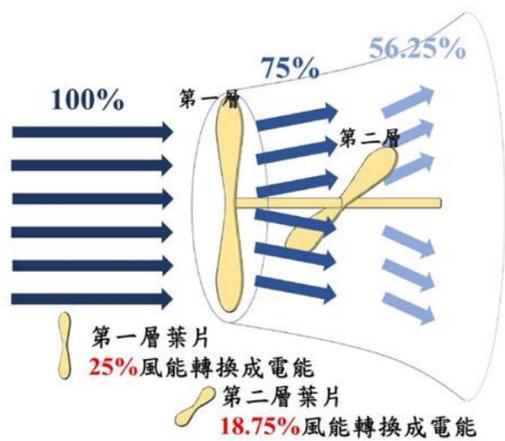


圖2 實驗設計示意圖

本研究設計雙層葉片渦輪機吸收通過前葉片的能量，提升效能。

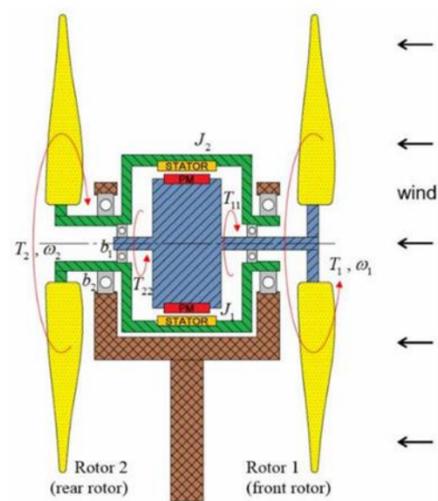


圖3 類本研究設計[2]

異軸反轉式風力渦輪機

## 下洗流 (downwash)

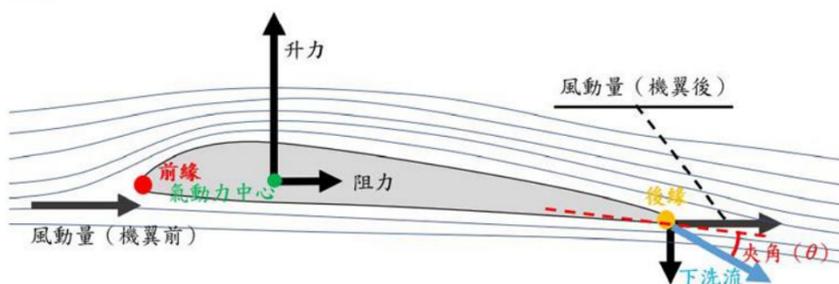


圖4 下洗流示意圖

後方亂流中明顯強勁且整齊向後、向下的氣流。



圖5 下洗流實例[3][4]

大雁飛行、跳蚤飛機等，因前翼尾流對後翼的氣動效果影響。



## 目的 Purposes

1. 運用計算及分析法討論風流經渦輪機後流場分布情形，試找出葉片後偏轉氣流(下洗氣流-尾流)。
2. 改變兩層葉片夾角，搭配尾流位置分析並驗證最佳化發電效率夾角。
3. 綜整結果，比較兩層葉片之渦輪機與單層兩、四片渦輪機的效率孰優孰劣。

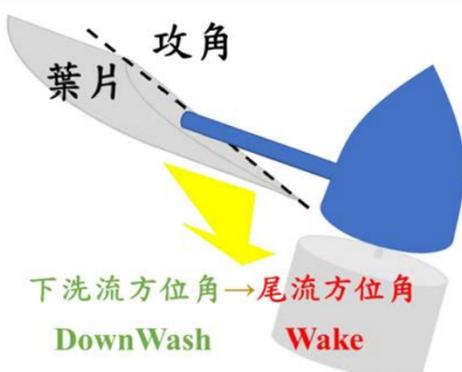


圖6 氣流修正示意圖

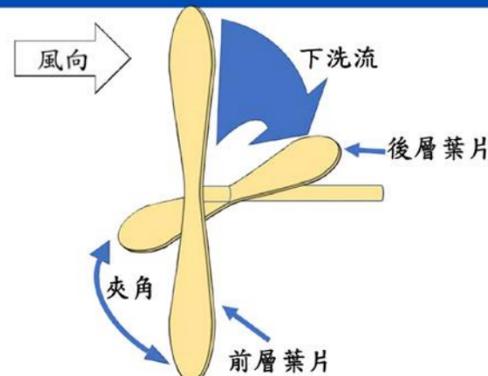


圖7 雙層葉片渦輪機實驗示意圖

## 研究方法 Research Methodology

### 螺旋槳 & 渦輪機

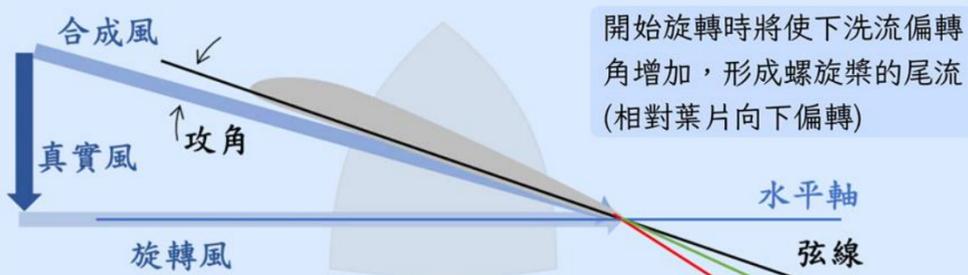


圖8 螺旋槳(propeller)葉片受風力圖分析

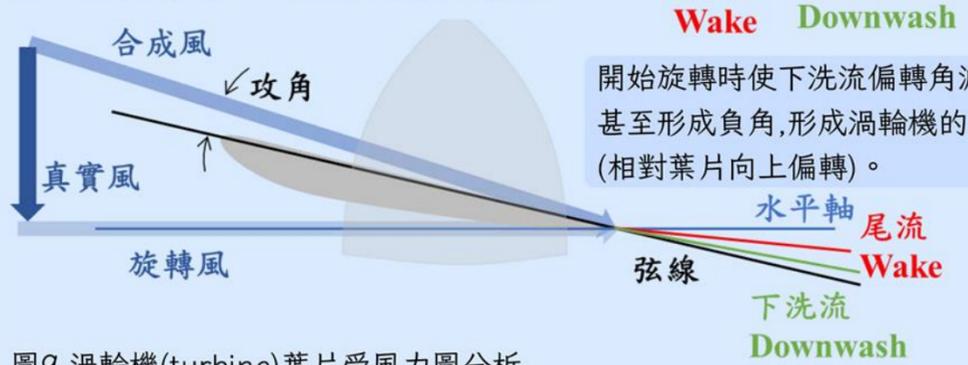


圖9 渦輪機(turbine)葉片受風力圖分析

### 旋轉速度公式

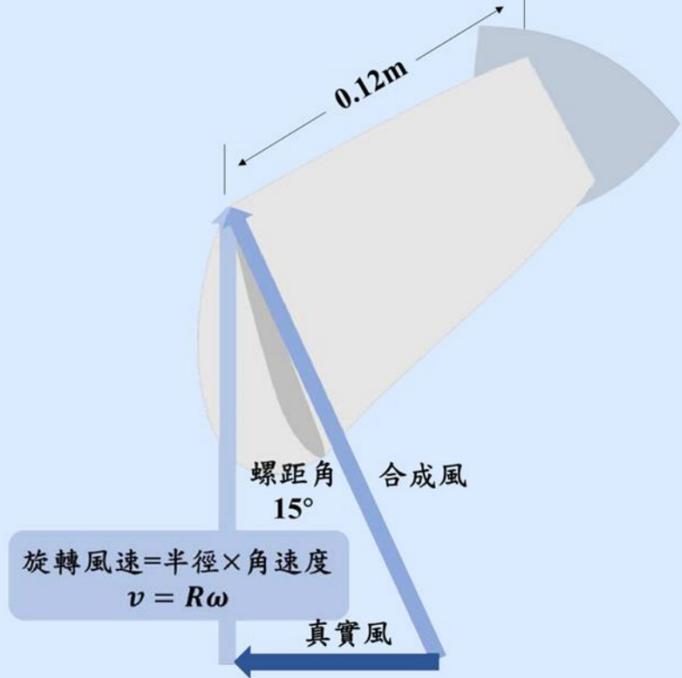


圖10 轉速公式示意圖

- ①風源(吸風)
- ②葉片(前/後)
- ③噴煙器
- ④整流段
- ⑤電子秤

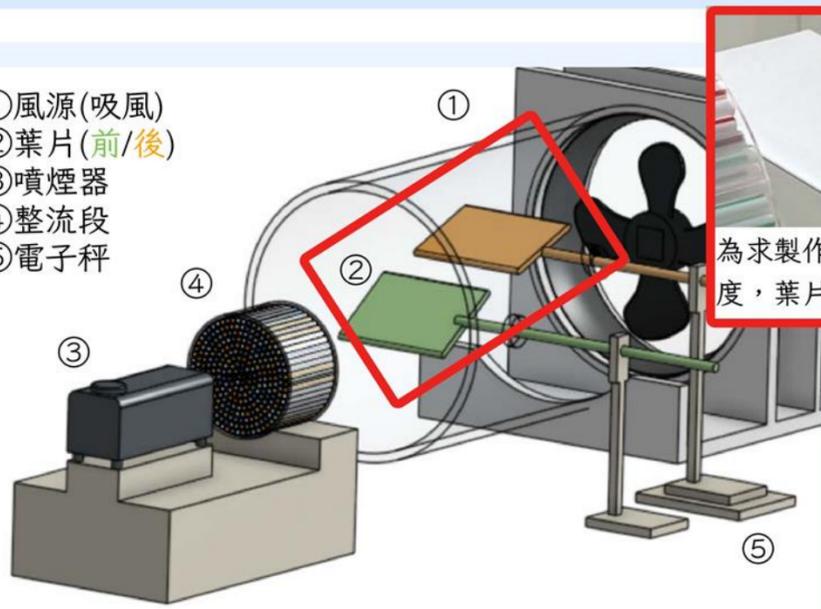


圖11 「實驗1-葉片偏轉氣流實驗」裝置示意圖

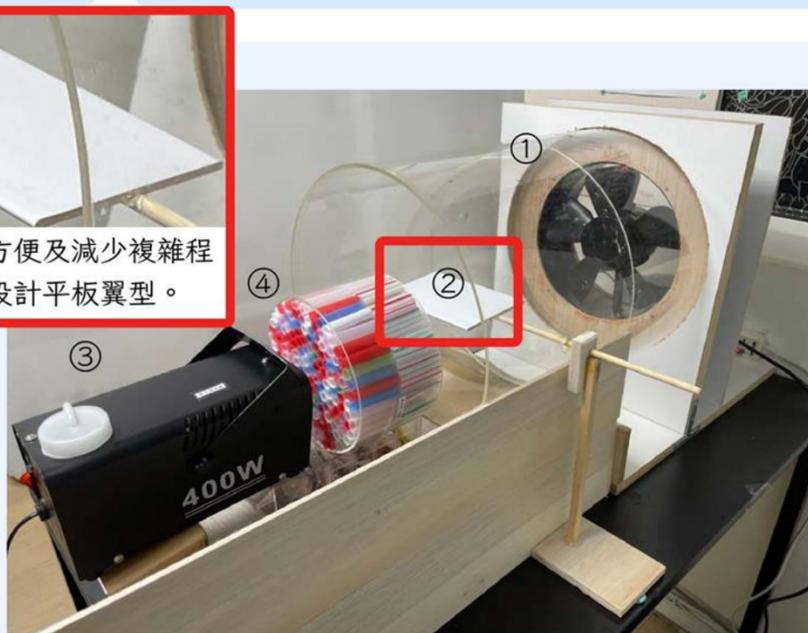
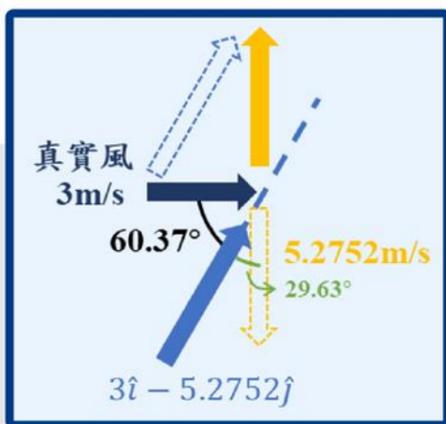
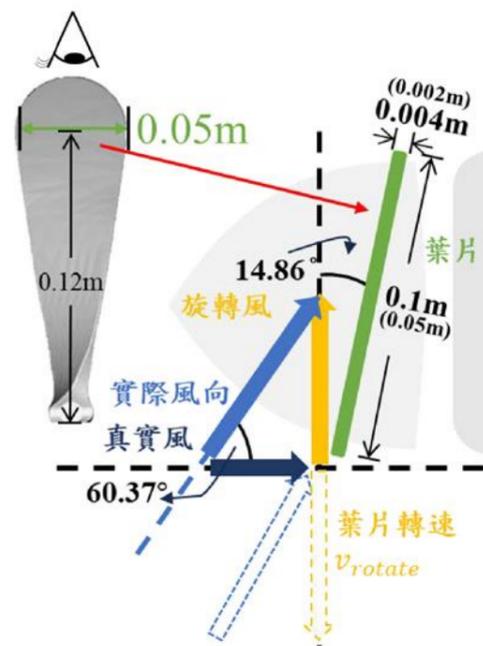


圖12 「實驗1-葉片偏轉氣流實驗」裝置實際照片

為求製作方便及減少複雜程度，葉片設計平板翼型。

## 實驗1-葉片偏轉氣流實驗



旋轉風速公式  $v_{rotate} = r\omega$   
 $r$  為渦輪機半徑，葉片截面設計渦輪葉片半徑0.12m處；  
 $\omega$  為渦輪機轉速，經計算與實驗約420rpm(每秒7轉)，  
 $v_{rotate} = 0.12 \times 7 \times 2\pi \approx 5.2752$   
 真實風速為 3m/s  
 葉片轉動時受風向量為  
 $3.00\hat{i} - 5.2752\hat{j}$   
 最終氣流應與水平軸夾60.37度角吹入，  
 才符合葉片轉動狀態。

圖13 葉片轉速計算及角度分析  
 由於渦輪機旋轉，將造成風並非由水平向射入渦輪機，需要經過計算修正。  
 (左圖及上圖)

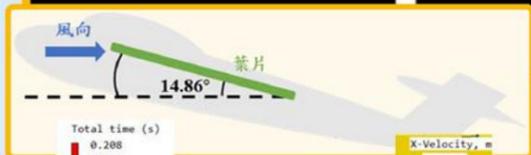
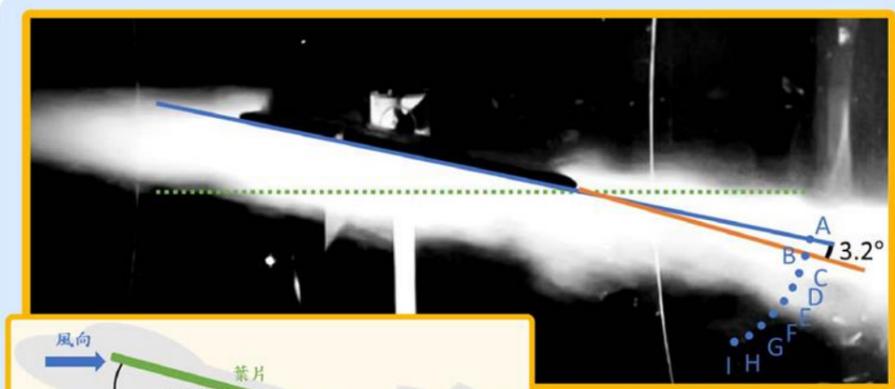
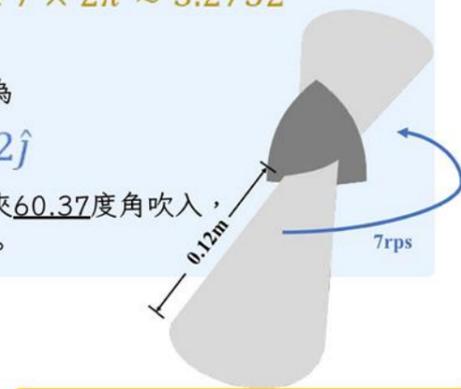


圖14 葉片煙流實驗結果  
 經實驗得知氣流偏角約為3.2度

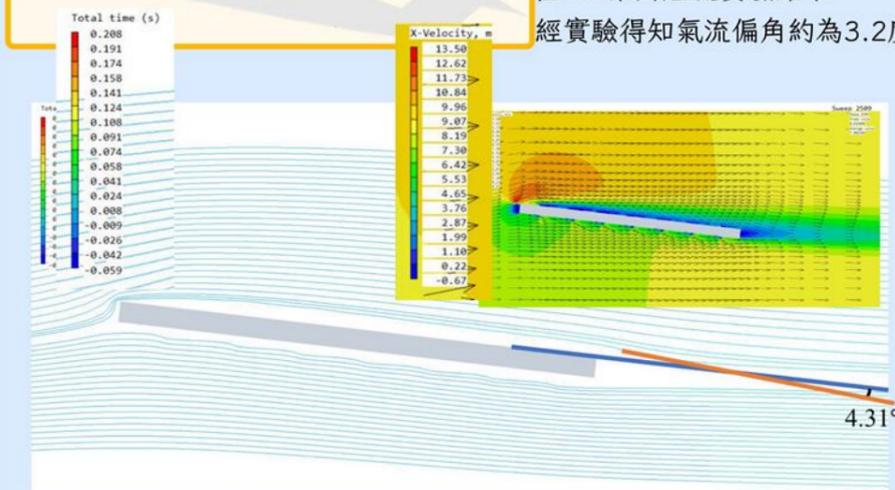


圖15 有限元素分析法結果(CFD) 氣流約偏轉4.31度。

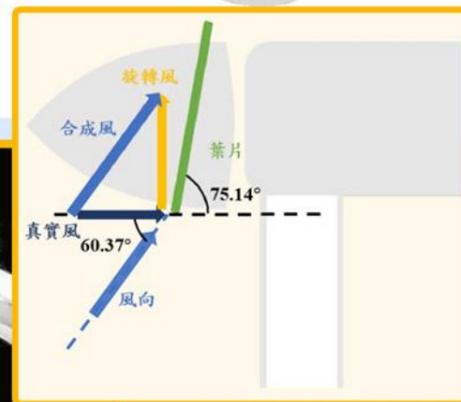
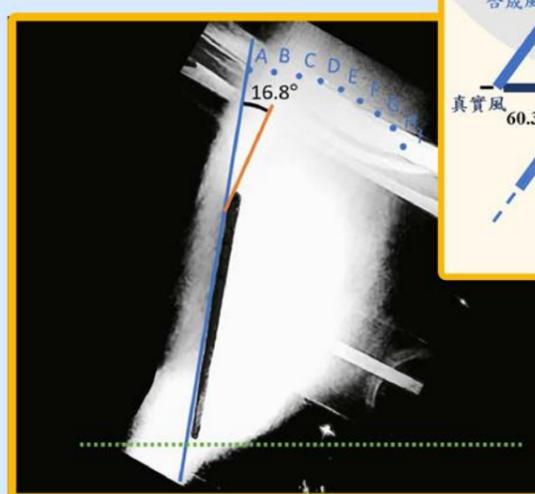


圖17 葉片煙流實驗結果  
 氣流約偏轉16.8度。

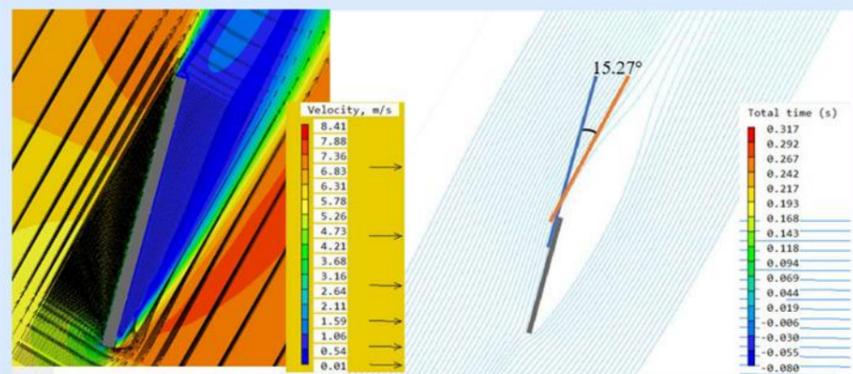


圖18 有限元素分析法結果(CFD) 氣流約偏轉15.27度。

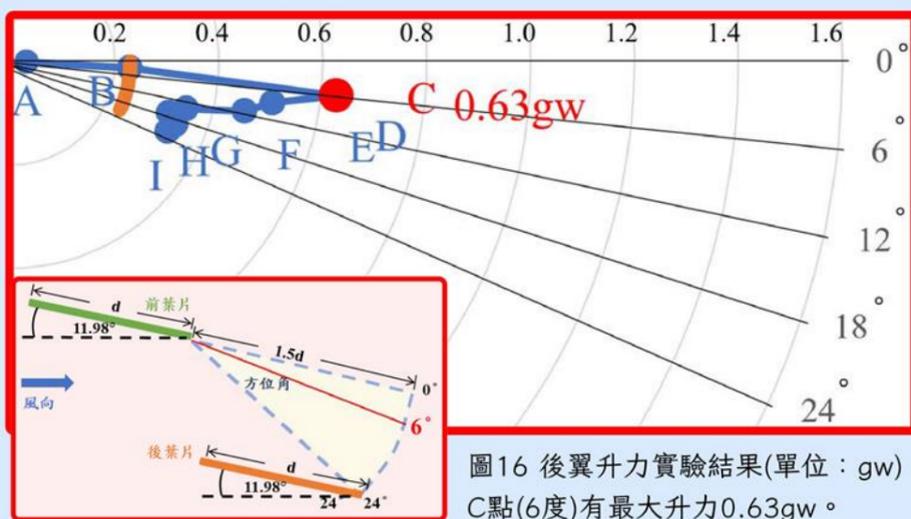


圖16 後翼升力實驗結果(單位: gw)  
 C點(6度)有最大升力0.63gw。

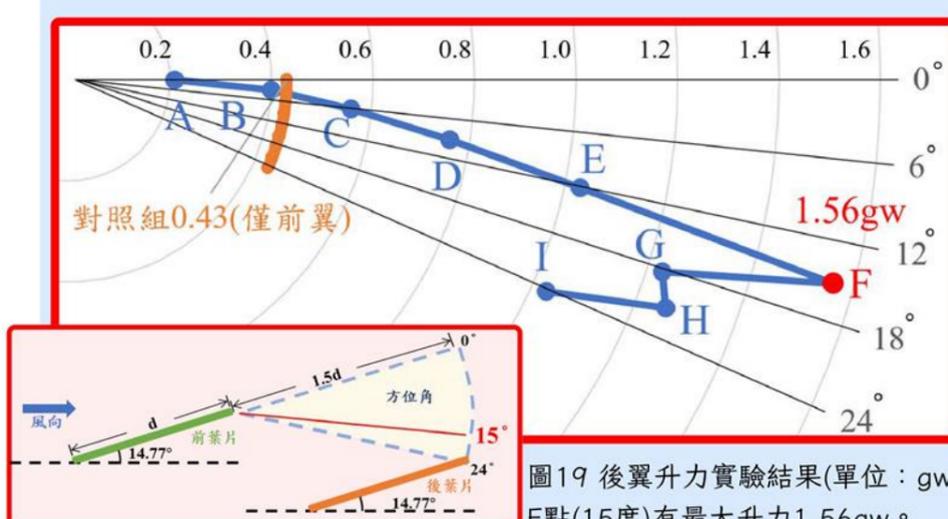
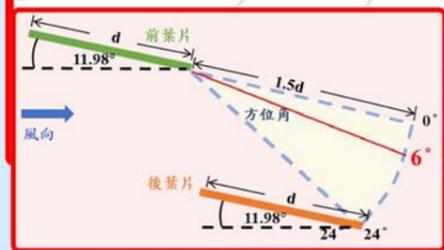


圖19 後翼升力實驗結果(單位: gw)  
 F點(15度)有最大升力1.56gw。

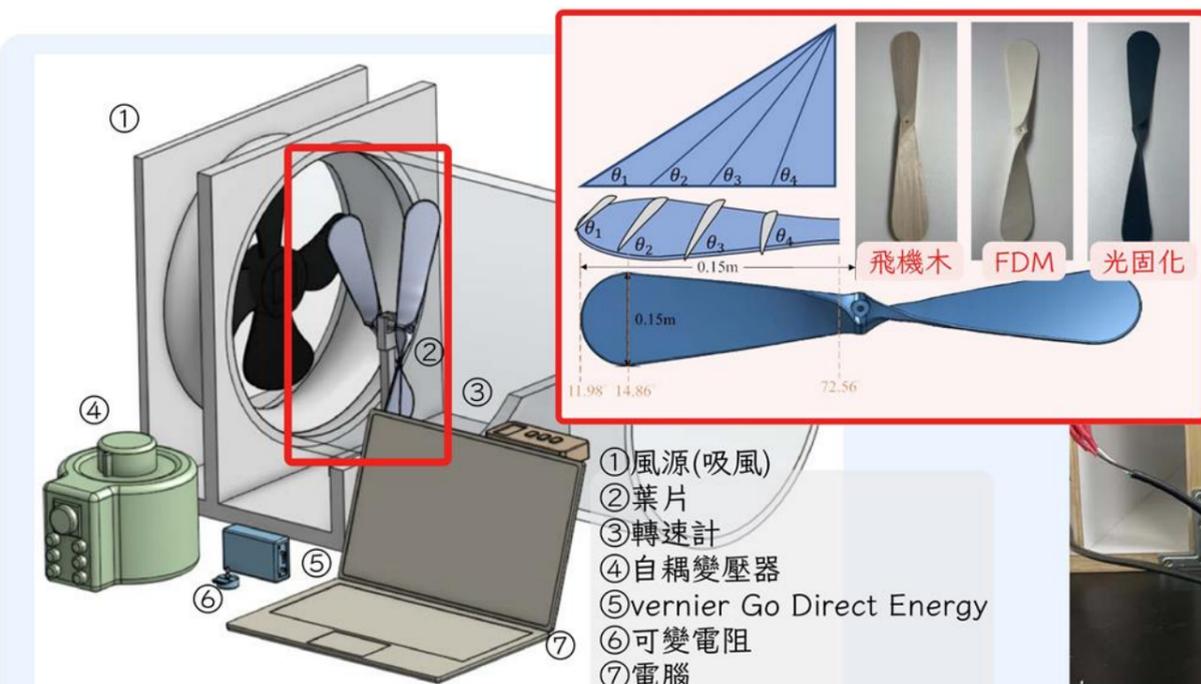
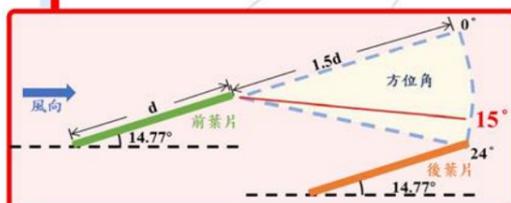


圖20 「實驗2-雙層葉片渦輪機效率實驗」裝置示意圖

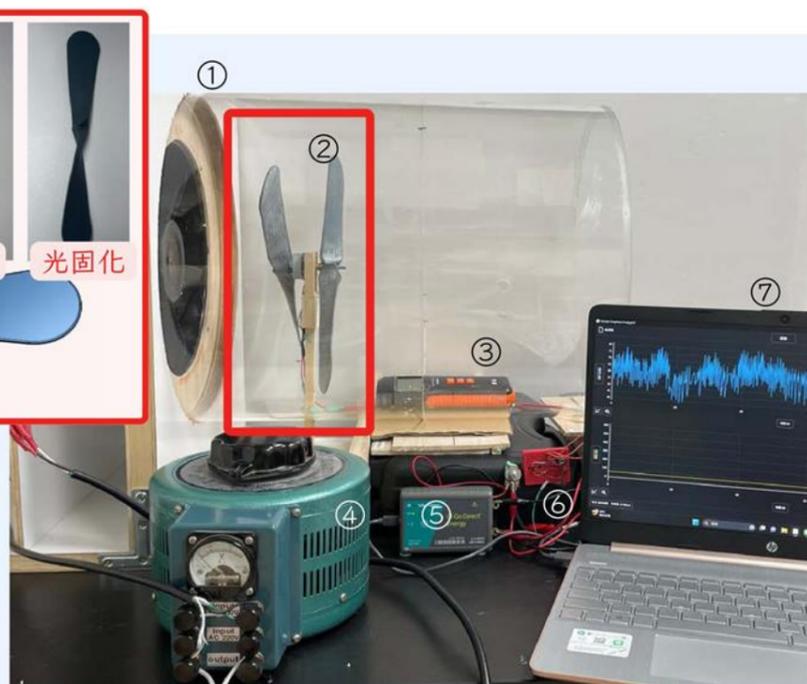


圖21 「實驗2-雙層葉片渦輪機效率實驗」裝置實際照片

# 實驗2-雙層葉片渦輪機效率實驗

間距5cm(1/4pitch)

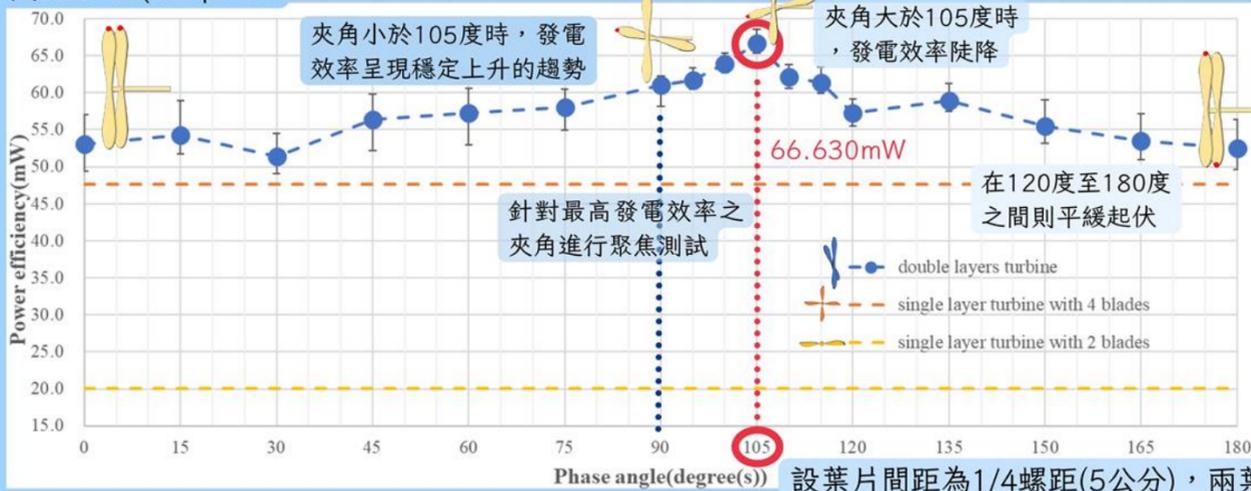


圖22 尾流相位夾角-效率關係圖(1/4pitch-5cm)

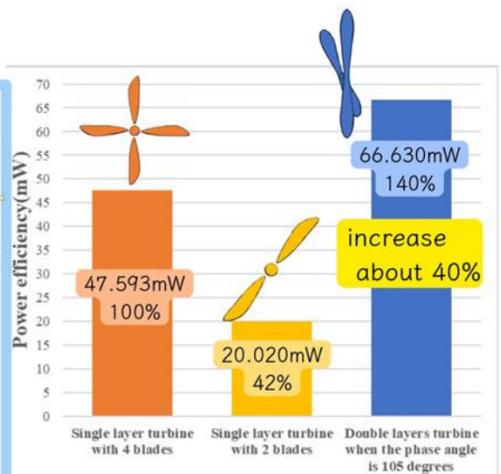


圖23 效率比較(單/雙層)

設葉片間距為1/4螺距(5公分)，兩葉片重疊時為初始狀態(0°)，每15°設一測試點至180°為止。夾角105度時有最大功率66.630mW。

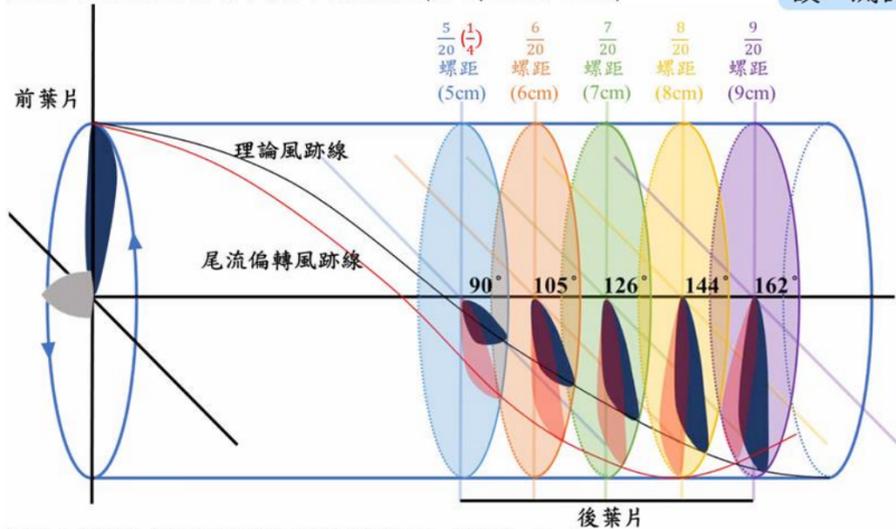


圖24 螺距-尾流偏轉示意圖(5/20~9/20pitch)

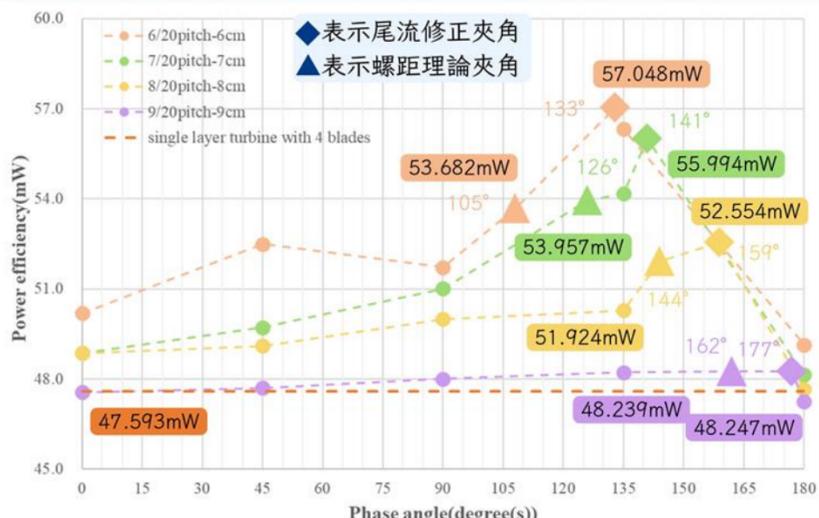


圖25 尾流相位夾角-效率關係圖(6/20~9/20pitch, 6~9cm)

## 討論 Discussion

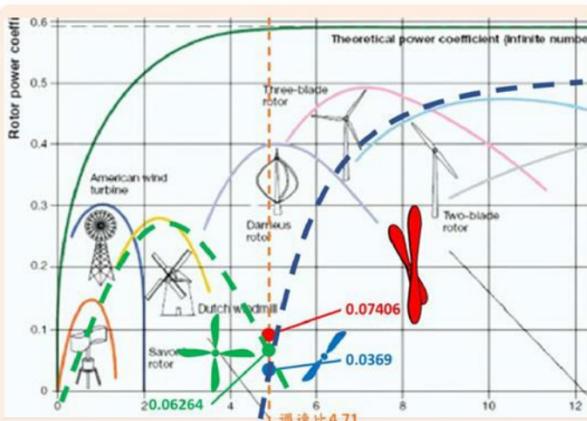


圖26 功率係數、週速比關係圖[5]

如圖26 未來延伸：  
測試至各種風速及對應週速比，  
論證本設計發電功率及功率係數的優劣。

如圖27 未來延伸：  
風通過渦輪機將旋轉並擴散，延伸實驗至  
減少第一層葉片大小，嘗試提升效率及降  
低成本。

通式應用：  
預計增加取樣密集程度，利用彈性碰撞討  
論，形成渦輪機的通用公式。

如圖28 定性分析：  
• 尾流將在葉片後形成旋轉風軌跡。  
• 風流經前層葉片提供後層葉片下緣衝  
擊力，並產生升力提升運轉效率。  
• 未來能設計剖面翼型(NACA)及調整  
後層葉片攻角。

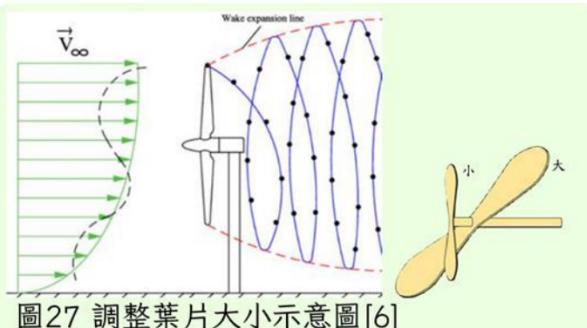


圖27 調整葉片大小示意圖[6]

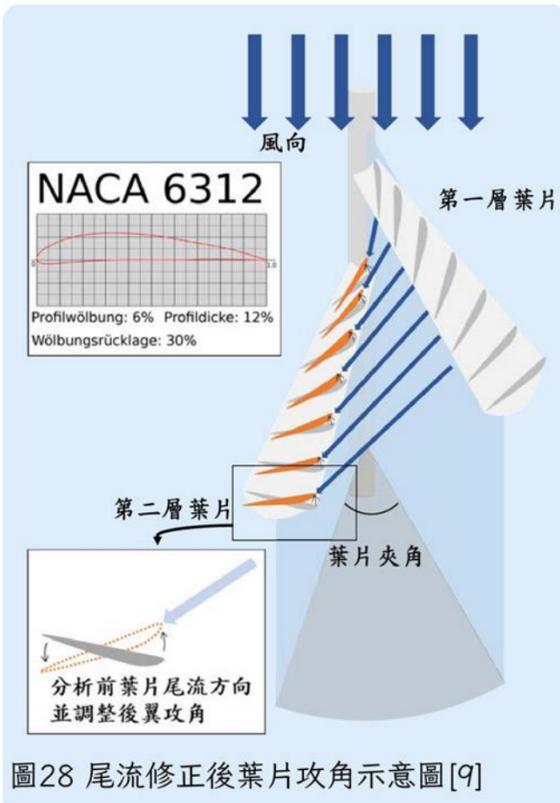


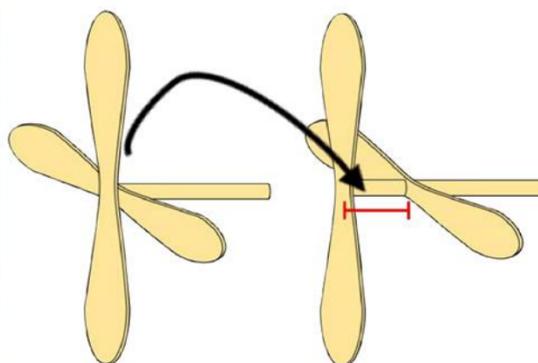
圖28 尾流修正後葉片攻角示意圖[9]

## 結論 Conclusion

- 尾流偏轉相位角約15°，由此角度推廣成葉片後氣流軌跡線(由原螺距理論軌跡修正)。
- 雙層葉片渦輪機於1/4螺距，理論相位角90°有效率峰值，然因尾流影響，峰值相位角修正為105°，即增加尾流偏轉角(與螺旋槳相反)。
- 若後葉片配置在尾流軌跡線上將能提升效率，但將有極限(本研究1/2螺距為極限)。
- 雙層葉片渦輪機僅需增加少量成本，但可提升四葉發電機效率約四成。
- 若進一步改變實驗控制參數(如翼型、後葉片攻角等)，將有望再大幅提升發電效率。



圖29 最佳模型配置  
雙層葉片夾105度，間距1/4螺距



耗費少量成本，可提升40%發電效率  
圖30 葉片效益分析  
以葉片數量而言，僅需將軸延長。  
以葉片層數而言，單層葉片約佔整體  
發電機成本的15~20%。

★雙層葉片之風能發電機透過調整夾角、間距等狀態，搭配尾流運用將顯著的提升發電效率。

## 參考文獻 References

1. 未知(2021)。貝茲定律(Betz' Law)--風力發電機的效率極限。能源教育資源總中心。國立成功大學。<https://reurl.cc/aLgDap>。
2. E. Erturk, S. Sivrioglu, FC Bolat(2018)。Analysis Model of a Small Scale Counter-Rotating Dual Rotor Wind Turbine with Double Rotational Generator Armature。Semantic scholar。
3. 作者未知(2014)。飛行變省力\_英專家解候鳥 V 形飛行之謎。東網新聞。<https://reurl.cc/8jyraR>。
4. Barnaby Wainfan(2018)。Wind Tunnel, Flying Flea, part 3.-風洞，飛行跳蚤第三章。Kitplanes。
5. Vatsalkumar Arvindbhai Manavar(2021)。Design Optimization of Savonius Wind Turbine using CFD Simulations。Uppsala Universitet。
6. H. Abedi(2016)。Development of Vortex Filament Method for Wind Power Aerodynamics。Semantic scholar。