

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高級中等學校組 工程學(一)科

第三名

052314

被動式可調螺距風力渦輪葉片功率分析

學校名稱：臺北市立麗山高級中學

作者： 高二 李亮澄 高二 邱政揚	指導老師： 吳明德
-------------------------	--------------

關鍵詞：可調式螺距 Adjustable pitch、
風力發電機 Wind turbine、
週速比 Tip speed ratio

摘要

本研究實驗有兩項重點，第一項利用可變電阻改變通過發電機的電流，利用其斥力調控發電機與渦輪葉片轉速，以達到最佳功率輸出。

第二項重點為開發創新被動式可變螺距葉片。此可變螺距裝置無需使用伺服機控制螺距，完全使用空氣動力被動調控葉片螺距角，當剛啟動時螺距角設定在 45 度，使得低風速下仍極易開始旋轉葉片，在高轉速下此被動式迅速調降螺距的葉片，其螺距角幾乎與旋轉面夾零度。經實驗證實，被動式可調螺距的葉片功率至少為 15 度固定螺距的 135%，特別是在低風速下仍可以輕易啟動，其功率更是固定螺距的 180%，除了能達到極好發電功率。針對風速弱或者風速不穩定的環境下，被動式可變螺距是極佳選擇，特別是中小型的風力發電機。

壹、研究動機

在臺北市科展本研究團隊調控電阻(負載)，分析對風力發電機輸出電功率的影響，當負載電阻小通過發電機電流大，根據冷次定律大電流使發電機的斥力增大，導致轉速降低產生電壓降低，反之電阻大時通過電流小，產生的電壓較大。所以在每個風速下，皆有一個最佳電阻可以使發電機達到最佳功率。

當時發現風力渦輪葉片在螺距角大時可在小風速下輕易啟動，但在啟動後所發的功率卻比螺距角小的渦輪葉片時來的小，主因是螺距角小時轉速較快，功率自然而然也較高。所以本研究將兩種螺距角的特性結合，也就發展可調螺距渦輪葉片，但本研究設計的可調螺距葉片，並非是利用複雜的伺服馬達調控，而是藉由自然風與旋轉風產生的合成風，以空氣動力被動調整葉片的螺距。此被動式可調螺距葉片，在啟動時採大螺距角能低風速輕易啟動，轉動後再利用旋轉風來調控降低螺距角，使發電機能達到最大功率。

然而在歷屆科展中對於風力發電的葉片部分，只針對葉片數量及材質的實驗(參考一、二)幾乎沒有探討到螺距這部分，更沒有研究關於可變螺距渦輪葉片。本研究創新的被動式可變螺距渦輪葉片，能夠自適應不同週速比被動調整螺距角度，以期達成最佳功率的輸出。

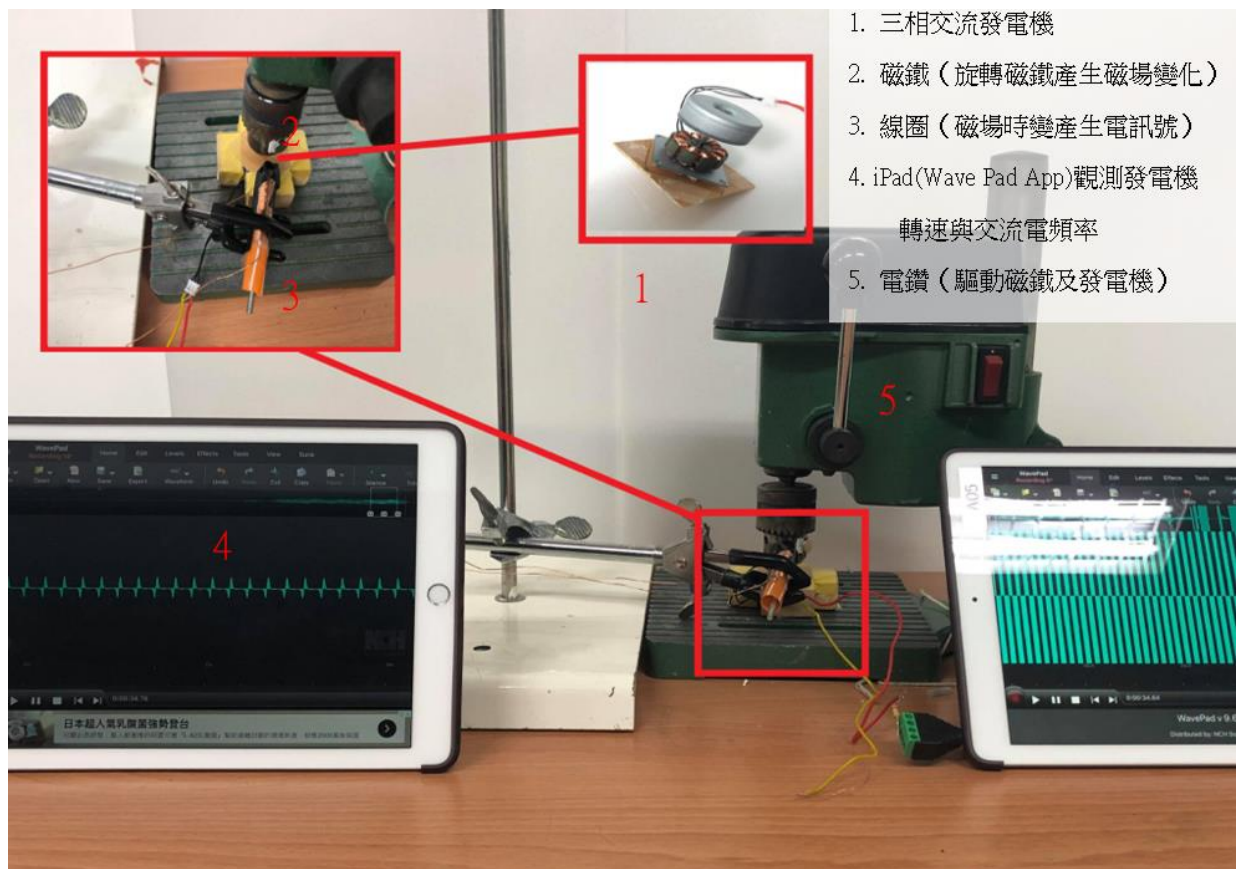
貳、研究目的

- 一、固定螺距角渦輪葉片驅動發電機改變其負載電阻，量測各風速下的功率及轉速。
- 二、不同風速下改變螺距角測量轉速。
- 三、比較各風速下最佳負載電阻與固定負載電阻發電機功率。
- 四、測量可變螺距與固定螺距葉片的啟動風速與功率達穩定值的時間。
- 五、在多種風速下測量可變螺距與固定螺距葉片的功率。
- 六、在相同風速下改變周速比量測功率與功率係數值(C_p)。

參、研究設備與器材

一、測量發電機的轉速與交流電訊號的頻率比

本實驗採用的三相交流發電機具有多極線圈，其產生的交流電為轉速的整數倍（轉動一圈有多個磁極通過線圈），本實驗為測量發電機的轉速，藉由產生的交流電頻率是真實發電機轉速的幾倍關係，即能迅速求得發電機轉速。

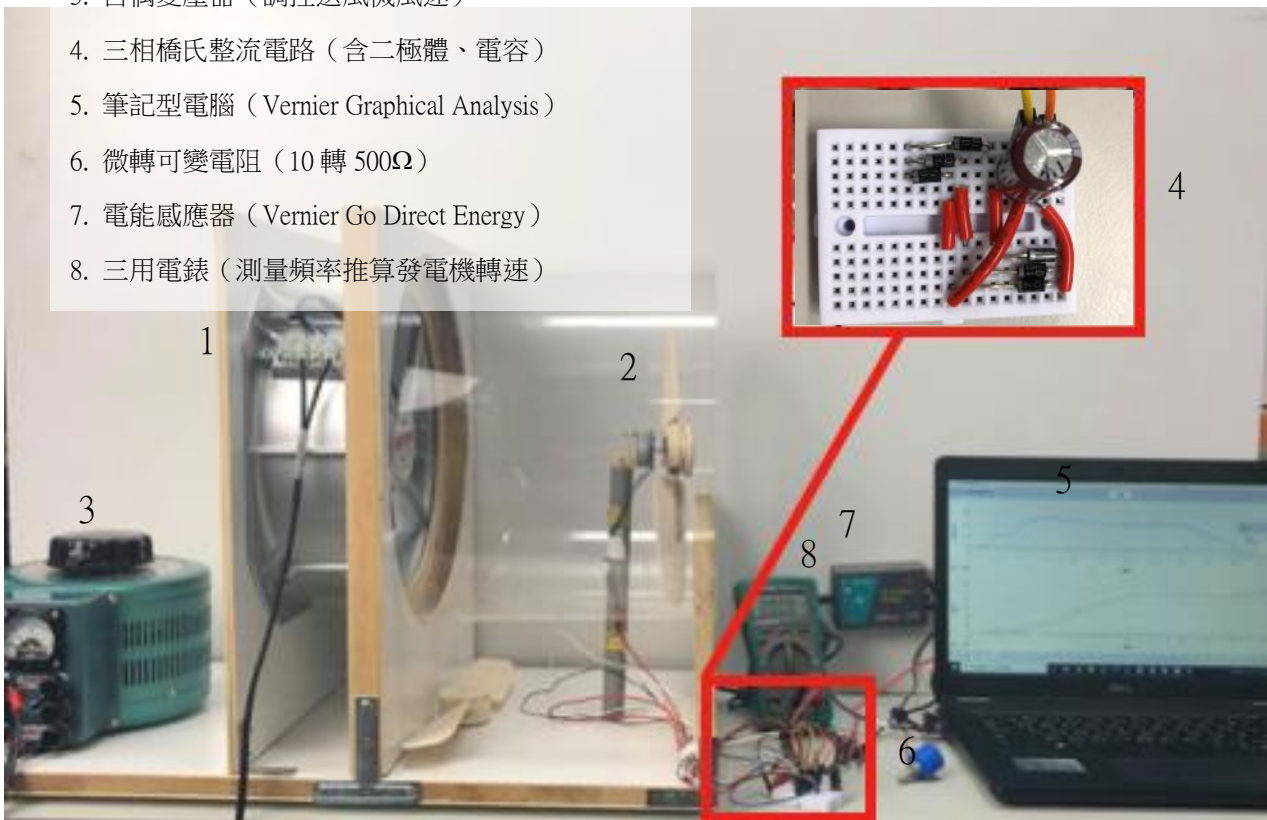


圖一 利用電鑽帶動發電機轉動並利用磁鐵與線圈的電磁感應產生訊號，利用兩組平板的 Wave Pad App 顯示波形，分別比較發電機交流電訊號週期，以及其發電機的轉速。

二、測量可變螺距葉片與固定螺距的功率比較

為瞭解自製被動式可變螺距葉片與固定 15 度螺距角葉片性能有何不同，本實驗利用數位量測儀器 Vernier Go Direct Energy，即時採樣並比較自製被動式可變螺距葉片與固定 15 度螺距角葉片驅動發電機產生的電功率。藉由分析各時間的發電功率，觀察各渦輪葉片的啟動所需的最低風速、啟動至最大功率所需經歷時間，和兩種螺距在不同週速比下的功率的比較。

1. 自製風洞
2. 自製渦輪葉片
3. 自偶變壓器（調控送風機風速）
4. 三相橋氏整流電路（含二極體、電容）
5. 筆記型電腦（Vernier Graphical Analysis）
6. 微轉可變電阻（10 轉 500 Ω ）
7. 電能感應器（Vernier Go Direct Energy）
8. 三用電錶（測量頻率推算發電機轉速）

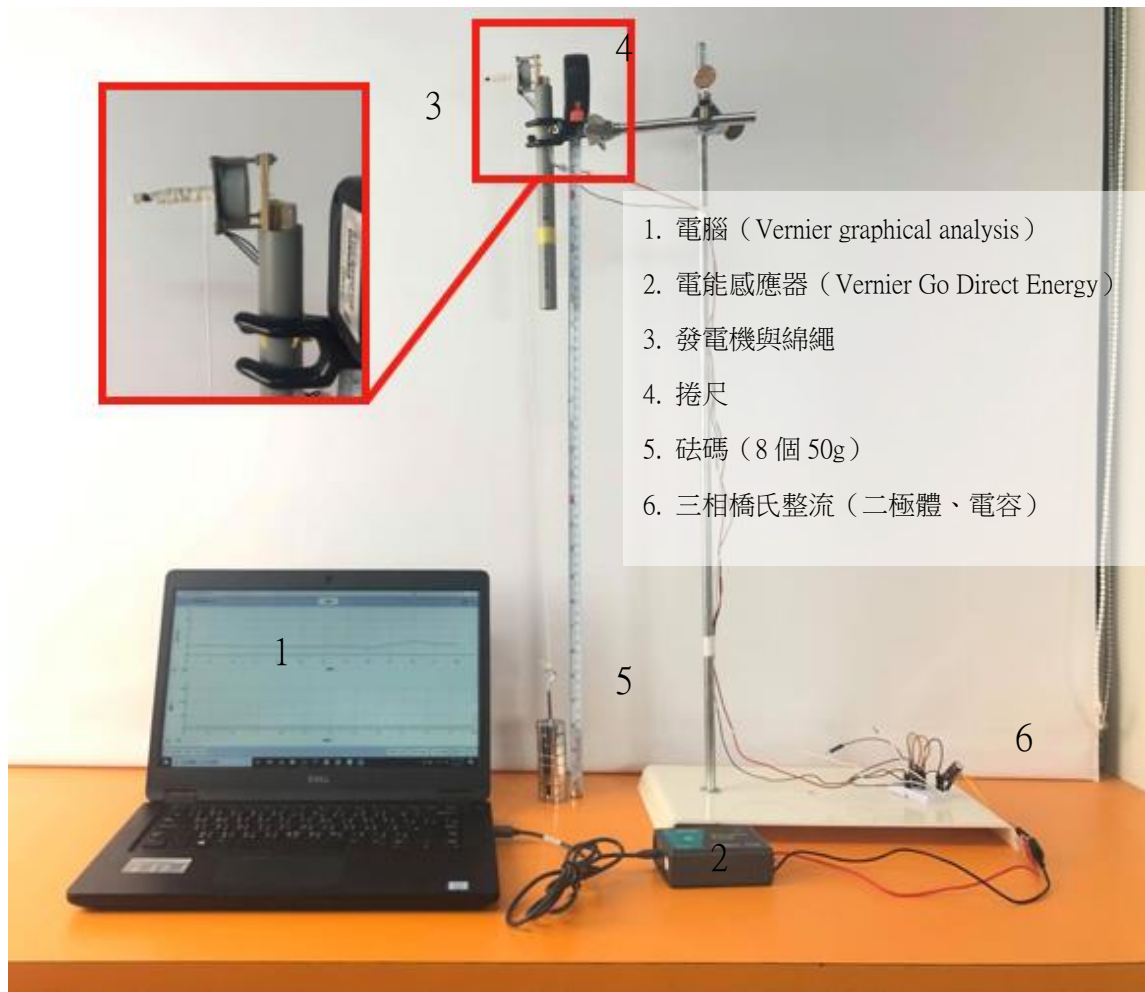


圖二 測量可變螺距葉片與固定螺距的功率比較，放大圖為發電機的轉速儀器裝置圖。

三、測量發電機效率

風能流經過渦輪葉片驅動發電機，接著發電機產生的交流電訊號經由整流電路，才輸出至量測設備，所以要計算渦輪葉片的功率係數，須先了解發電機的發電效率。

總發電功率 = 渦輪葉片功率係數 × 發電機與整流電路效率。換言之，真正的渦輪葉片效率要推算的葉片功率係數 $C_P = \text{發電機產生的功率} / \text{發電機與整流電路效率}$ 。所以為得出功率係數 C_P ，本實驗需先測量發電機產生的功率以及發電機與整流電路的轉換效率。



圖三 利用砝碼從高處落下所釋放的重力位能，轉成電能，並計算發電機與整流電路的轉換效率。利用總發電功率/發電機轉換效率，求得風力渦輪機葉片實際功率係數

肆、研究過程或方法

一、研究原理

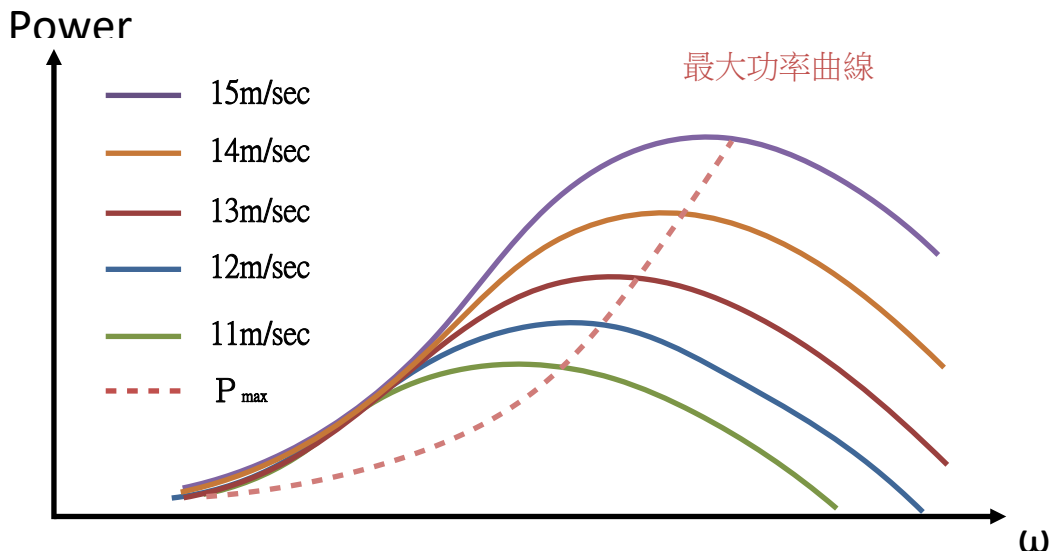
(一) 貝茲定律(Betz' Law)

$$P = 1/2 C_p \rho A V_w^3, \quad \rho \text{ 空氣密度、} A \text{ 渦輪旋轉面積、} V_w \text{ 風速、} C_p \text{ 功率係數}$$

上式可知風力發電機由風擷取功率 P 與功率係數 C_p 成正比關係。為達到最好風能擷取效率，必須使風力發電機操作於最大功率係數 $C_{p \max}$ 。由於功率係數為週速比(Tip Speed ratio) λ 函數。 $\lambda = \text{葉尖速度/風速} = \omega R/v$ 。

葉尖速度 V 可以計算為 $R \times \omega$ ， ω 為轉子角速度(弧度/秒為單位)， R 是轉子半徑(以米為單位)。

藉改變轉速 ω 控制風力發電機操作於最大風能係數 $C_{p \max}$ ，以達到最好風能擷取效率。圖四為各個風速時，風力發電機於不同轉速時所擷取之風能曲線圖。由圖中可知，在任意一風速下皆存在一轉速，使得風力發電機操作在最大功率點。藉由控制轉速使其工作在最大功率曲線上，即可使風力發電機於各風速時皆位於最大功率點上工作。



圖四 不同轉速時發電機所截取之風能曲線圖

(二) 法拉第電磁感應與冷次定律

法拉第電磁感應：

$$\varepsilon = -N(d\Phi_B/dt) = NBA\omega \sin \omega t$$
， N 線圈圈數； Φ_B 通過線圈的磁通量，單位為韋伯。

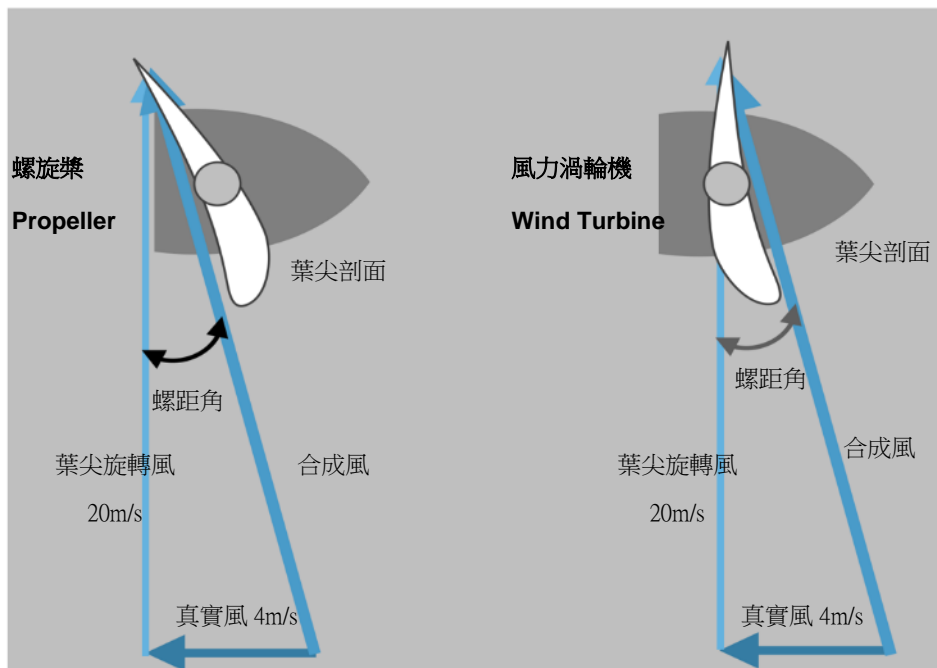
應電壓 ε 與角速度 ω 成正比，即發電機轉速越快，能產生更高的電壓。

冷次定律：由於磁通量的改變而在封閉線圈內產生的應電動勢(或應電流)，會抵抗原有磁通量的變化。

(三) 風力渦輪機(Wind turbine)與螺旋槳(Propeller)

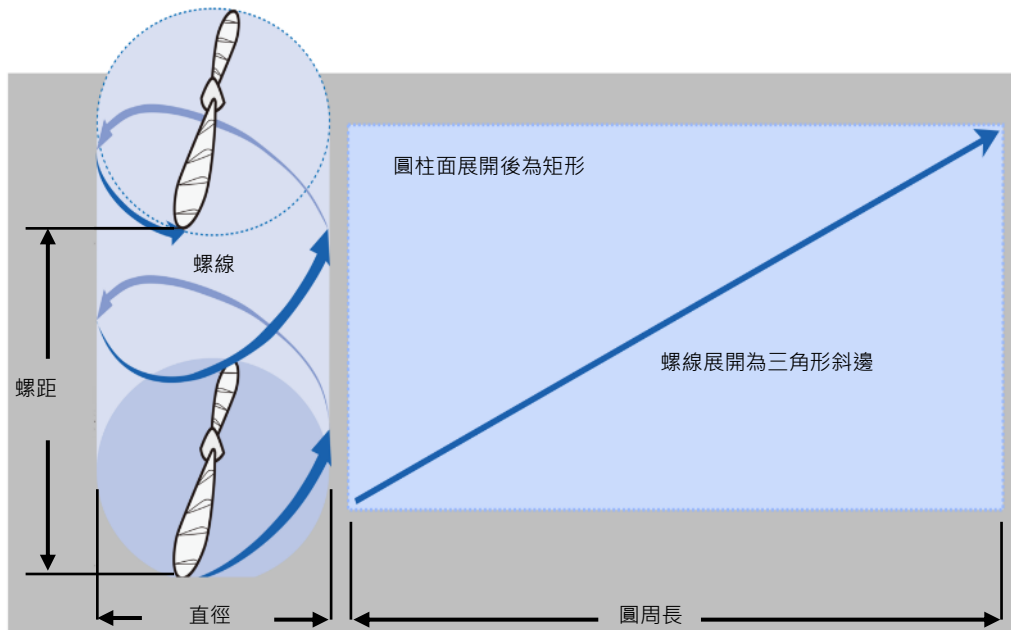
由下圖可發現外觀上，渦輪機葉片迎風面是凹面，而螺旋槳則是凸面。兩者在功能上並不相同，引擎驅動使螺旋槳旋轉會推動空氣或水，就像電風扇、飛機或船的螺旋槳。反之當風吹動渦輪機，則能使渦輪葉片旋轉帶動輪軸等機構或者發電機等，例如是風力發電機、風車或者是水力發電的渦輪機。

而螺距角 Pitch angle 的正切值等於槳葉尖旋轉風速/真實風速，也等於旋翼圓周長/螺距，也等於週速比。



圖五 螺旋槳與風力渦輪機示意圖

螺旋槳可說是斜面的變形，同時進行旋轉與前進。所以可以利用紙斜面捲成圓筒說明螺旋，斜面即為螺旋槳旋轉的軌跡線，而圓筒的高度即為螺距。為說明螺旋槳不同半徑處的角度，用不同半徑的紙斜面捲成圓筒。



圖六 螺旋槳的直徑與螺距展開示意圖

週速比(Tip Speed Ratio)

風力渦輪機有個重要的參數，稱為週速比(Tip Speed Ratio)，定義是葉片尖端的旋轉速率與真實風速的比值。在剛開始啟動，葉尖旋轉速率極低所以週速比小。轉速提高後葉尖速率大也就是週速比大。

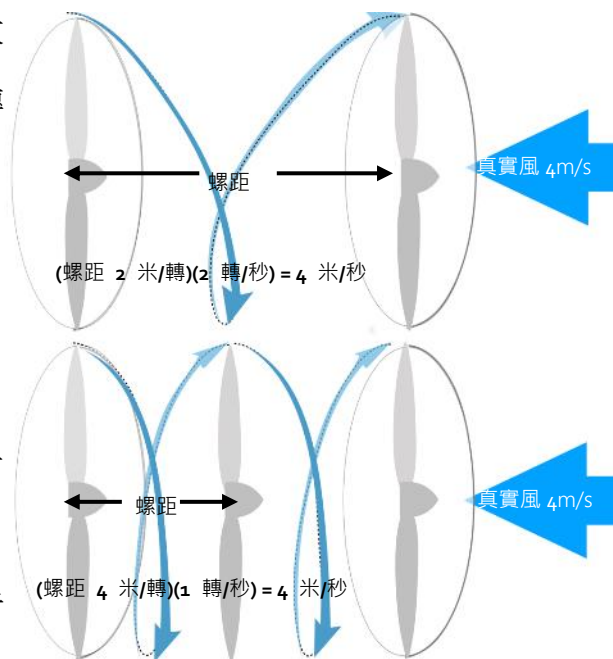
週速比 = 葉尖速率 / 真實風速

= (圓周長 / 週期) / (螺距 / 週期)

= (圓周率 × 直徑) / 螺距

相同風速與轉子(Rotor)直徑下，若希望有較大的週速比，轉子需要轉速提高，所以將此渦輪葉片螺距調整小一點。或者可得：

真實風速(米/秒) = 螺距(米/轉) × 轉速(轉/秒)



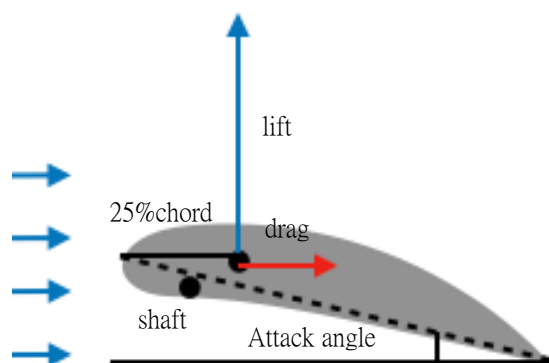
圖七 螺距與轉速關係示意圖

(四) 翼型的氣動力中心

翼型表面的力：翼型在流場中所受的力是作用在上下翼面的分佈力的合力，定義與前方氣流相垂直的升力(Lift)，與前方氣流方向平行的阻力(Drag)，合成的氣動力。

俯仰力矩：由流體動力學沿翼面分佈的壓力合成氣動力與力矩，這個力矩命名為俯仰力矩。

此空氣動力作用到一個特殊點叫做氣動中心(Aerodynamic of Center)，空氣動力中心位於翼型大約 25%~30%弦長。



圖八 葉片受力圖

(五) 轉軸與氣動力中心相對位置 (三種平衡)

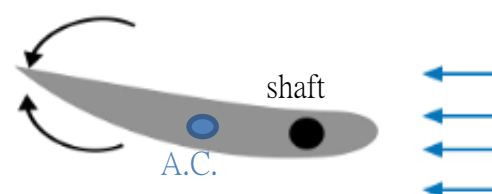
因本實驗裝置需設計可變螺距的葉片，需先決定葉片的氣動力中心與轉軸的相對位置葉片的剖面是翼型的形狀，其氣動力中心位於翼弦具前緣的百分之 25%~30%的弦長。若轉軸定於前緣與氣動力之間為穩定平衡，其狀態類似國旗的飄動或不倒翁。



圖九 穩定平衡

穩定平衡 (圖九) 指處於平衡狀態的物體在受到外力的微小擾動而偏離平衡位置時，若物體能自動恢復到原先的狀態，這樣的平衡叫做穩定平衡。

若轉軸定於氣動力中心，則為隨遇平衡(圖十一)，例如手持物體重心。指處於平衡狀態的物體在受到外力的微小擾動而偏離平衡位置時，若物體在新的位置也能平衡，這樣的平衡叫做隨遇平衡。



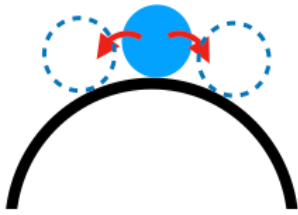
圖十 轉軸在前氣動力中心在後，葉片達到穩定平衡

若轉軸定於氣動力之後，例如用手頂著筆尖維持平衡不倒，則為不穩定平衡。

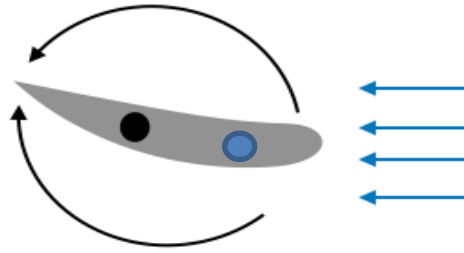


圖十一 隨遇平衡

不穩定平衡（圖十二）指處於平衡狀態的物體在受到外力的微小擾動而偏離平衡位置時，若物體不能自動恢復到原先的狀態，這樣的平衡叫做不穩定平衡。



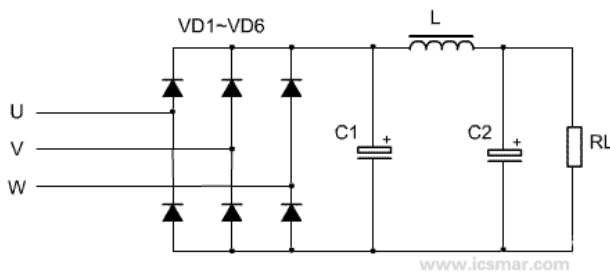
圖十二 不穩定平衡



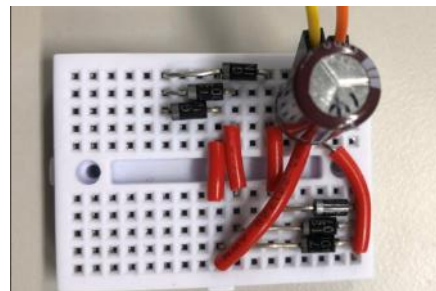
圖十三 轉軸在後氣動力中心在前，葉片成不穩定平衡

（六）三相橋氏整流

三相交流電是三線輸入相位差各 120 度的正弦函數交流訊號，可使用六個二極體。即三對的二極體進行三相橋式整流，並加上電容以達到較佳的直流電。不過，每一對不是同樣會被用在全波單相整流電路的雙二極體，而是將對處於系列（陽極陰極）。通常，市面雙二極體有四個接頭，所以使用者可以將它們配置為單相拆分供應使用供半一座橋或三相。



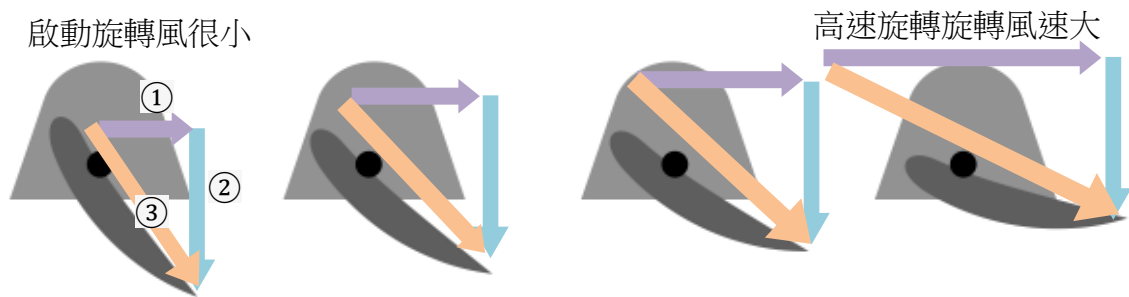
圖十四 三相橋氏整流電路圖示意圖



圖十五 實際三相橋氏整流電路

二、可變螺距葉片設計

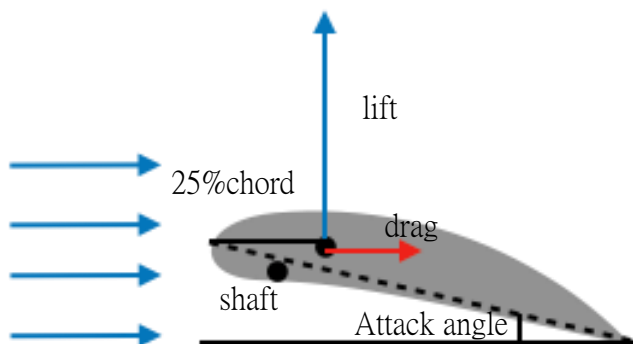
(一) 可變螺距葉片隨著轉速提高螺距角變小



圖十六 可變螺距葉片隨著轉速提高螺距角變小(葉片剖面側視圖)

① 旋轉風 (隨轉速提高風速增加) ② 真實風 (假設真實風不變) ③ 合成風

因為空氣動力中心為翼剖面的四分之一長處，所以將轉軸放在約七分之長度左右，使升力可以產生一個正力矩，會將轉軸擺在偏下的位子是為了讓阻力也產生一個逆力矩與正力矩可以達成平衡，與風向標的原理一樣。



圖十七 葉片受力圖分析



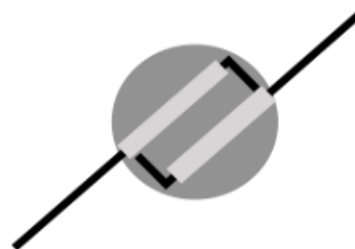
圖十八 風向標

(二) 被動可變螺距葉片槳轂設計

利用鋼絲及滾珠軸承使被動可變螺距葉片能夠自由轉動，在末端將鋼絲凹成 90 度來限定轉動的角度範圍，並以鋼絲長度與高度控制。啟動旋轉時希望葉片螺距角成 45 度，因為葉片能有較大的升力，轉動後葉片便會氣動力被動調控葉尖與旋轉面呈零度左右，使攻角約為 7-8 度以得到最大功率。



圖十九 被動可變螺距槳轂設計側視圖

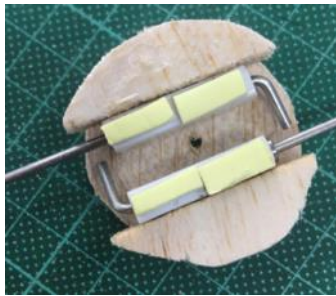


圖二十 被動可變螺距槳轂設計俯視圖

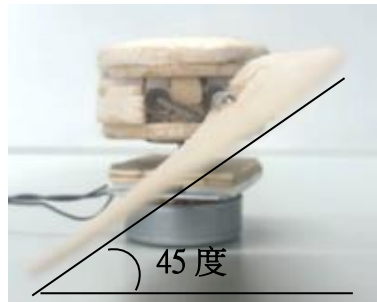
(三) 被動可變螺距葉片與槳轂製作過程



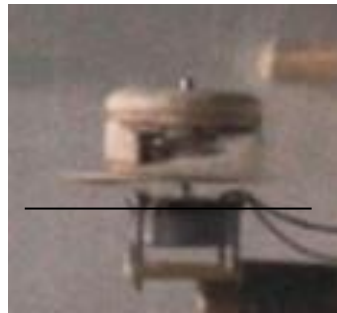
圖二十一 被動可變螺距槳轂側視圖



圖二十二 被動可變螺距槳轂俯視圖



圖二十三被動式可變螺距啟動 45 度



圖二十四 轉動時螺距角近乎於 0 度

葉片製作



圖二十五 葉片烤製模具



圖二十六 利用棉繩將葉片固定



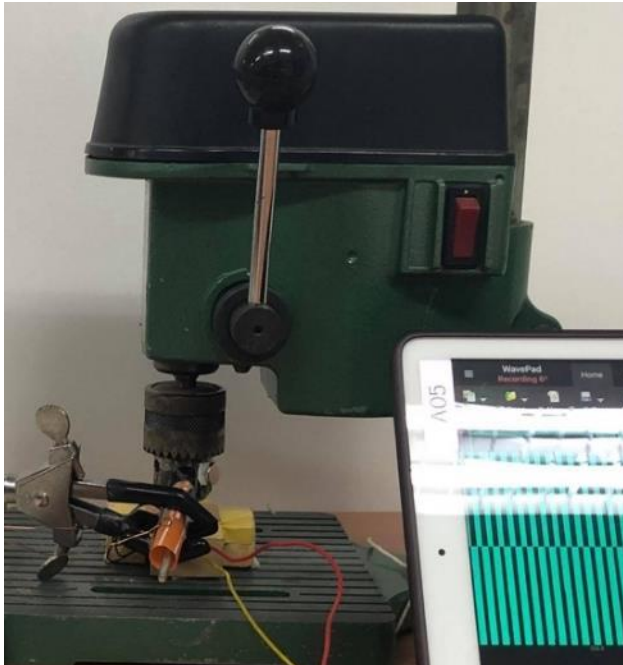
圖二十七 將葉片放置烤箱烘烤十分鐘



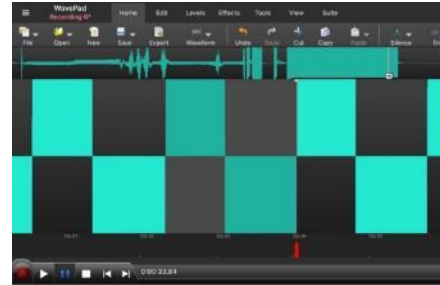
圖二十八 利用砂紙將葉片磨成翼剖面形狀

三、利用電鑽帶動三相交流發電機並分析交流電頻率與三相交流發電機轉速

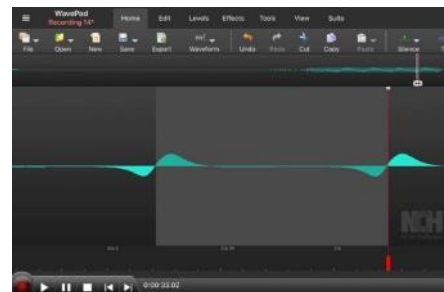
利用電鑽帶動發電機轉動並利用磁鐵與線圈的電磁感應產生訊號，利用兩組平板的 Wave Pad App 顯示波形，分別計算發電機交流電訊號週期，以及其發電機的轉速。



圖二十九 電鑽驅動發電機與輸出波形裝置圖

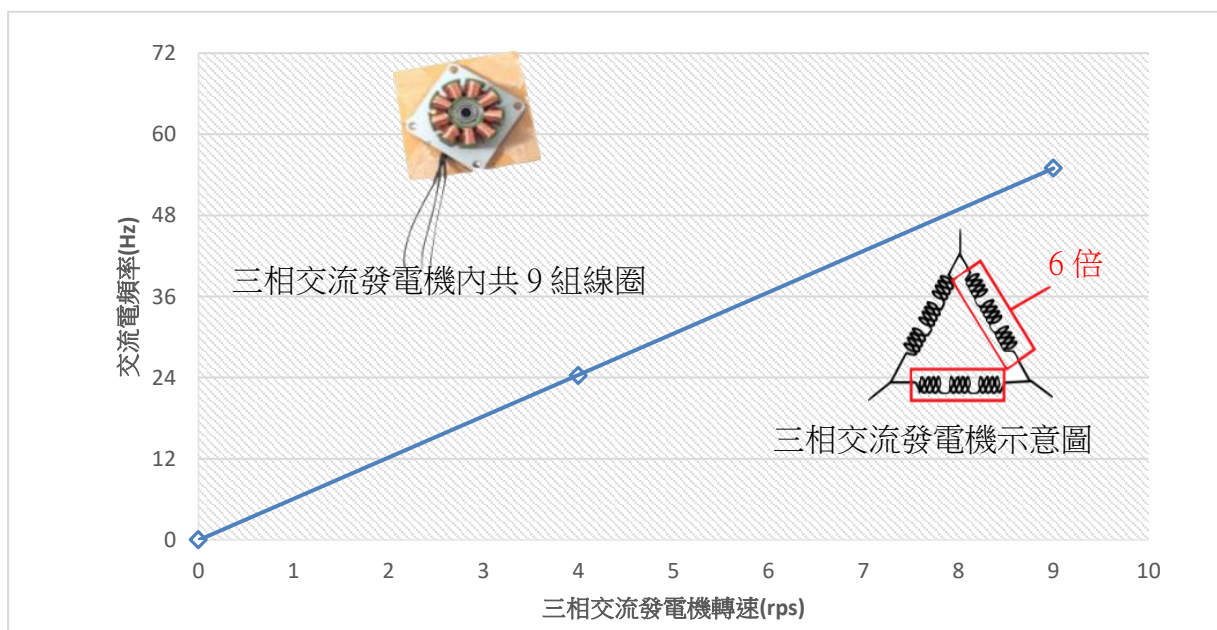


圖三十 三相交流發電機訊號



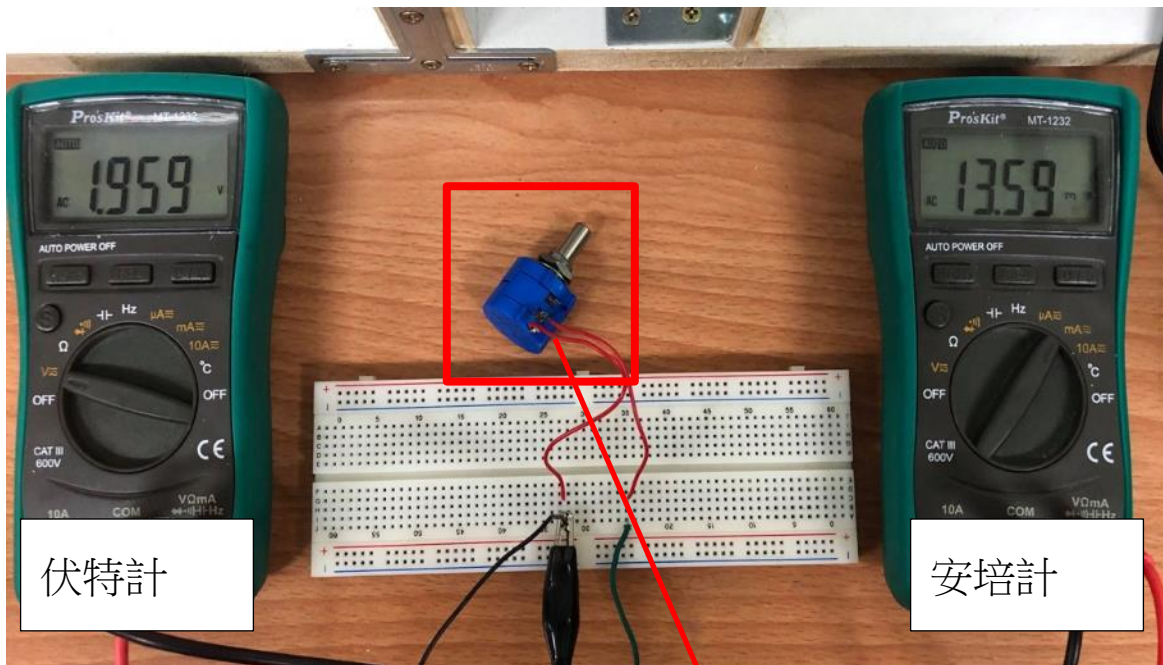
圖三十一 線圈訊號代表轉速

經計算後發現其週期為 0.018 頻率為 55 轉/s 經計算後發現其發電機轉速週期為 0.11 頻率 9.1 轉/s，可知三相交流發電機內外轉速比為 6 倍



圖三十二 三相交流發電機轉速與交流電頻率關係圖

四、利用精密可變電阻調控週速比，使發電機達到最佳功率，可以外接電能感測器，並利用電腦軟體(Vernier graphical analysis)觀察功率隨時間變化。或是以伏特計與安培計直接測量發電機輸出的電功率。

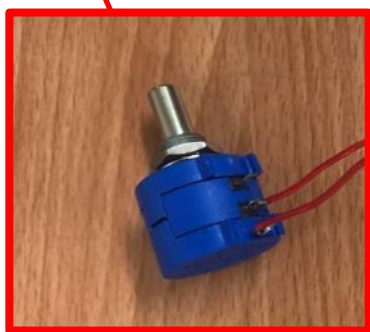


伏特計

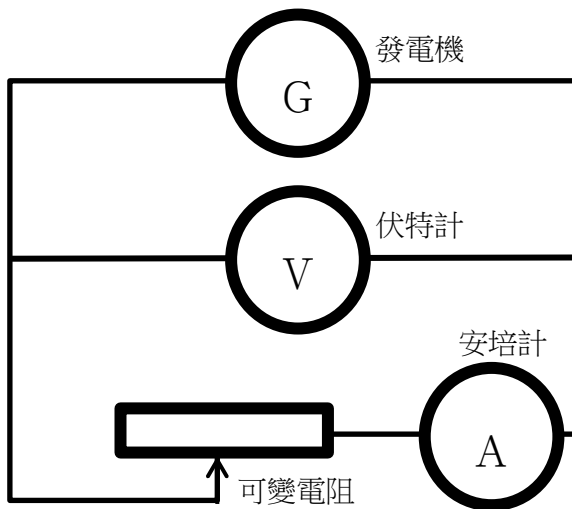
安培計



頻率



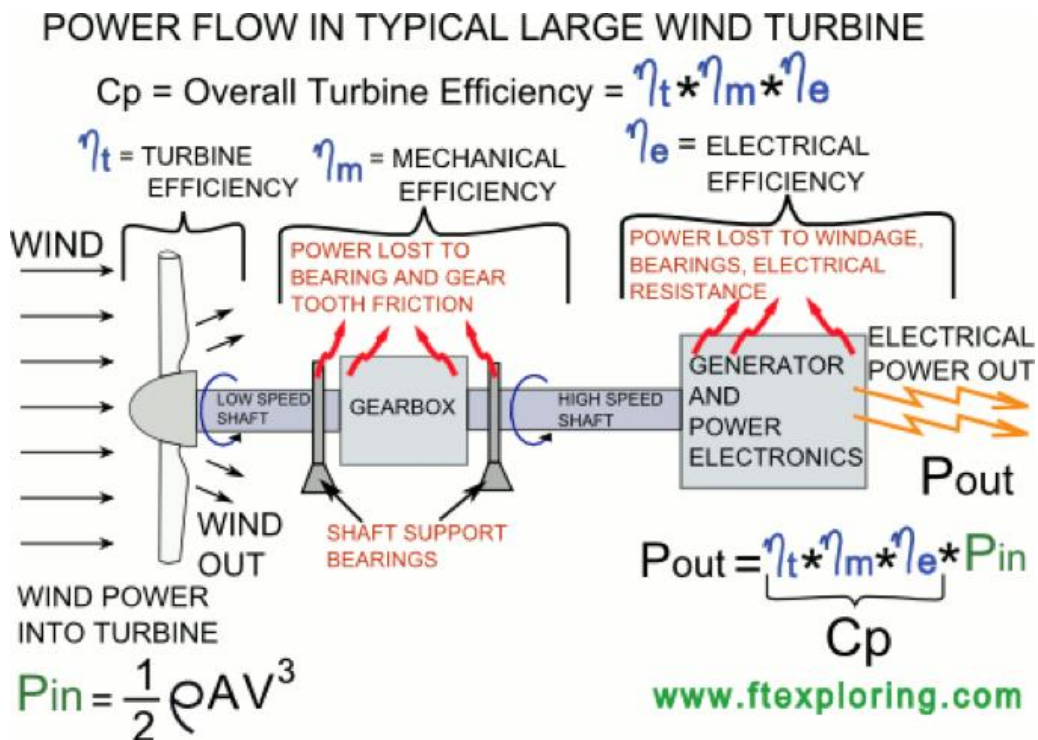
利用精密可變電阻調控所需電阻(10轉 500Ω)



圖三十四 發電機外接負載電阻及功率測量示意圖

圖三十三實際電路圖

五、計算渦輪葉片發電效率



圖三十五 總功率係數 C_p 是渦輪葉片功率係數 \times 齒輪箱效率 \times 發電機效率，算出的 C_p 要再除以發電機效率才是我們渦輪葉片的實際效率（不考慮齒輪箱效率）

以下為我們實際計算的轉換效率:

400 克砵碼降低 93 公分損失重力位能： $mgh=0.40 \times 9.8 \times 0.93=3.65(\text{J})$

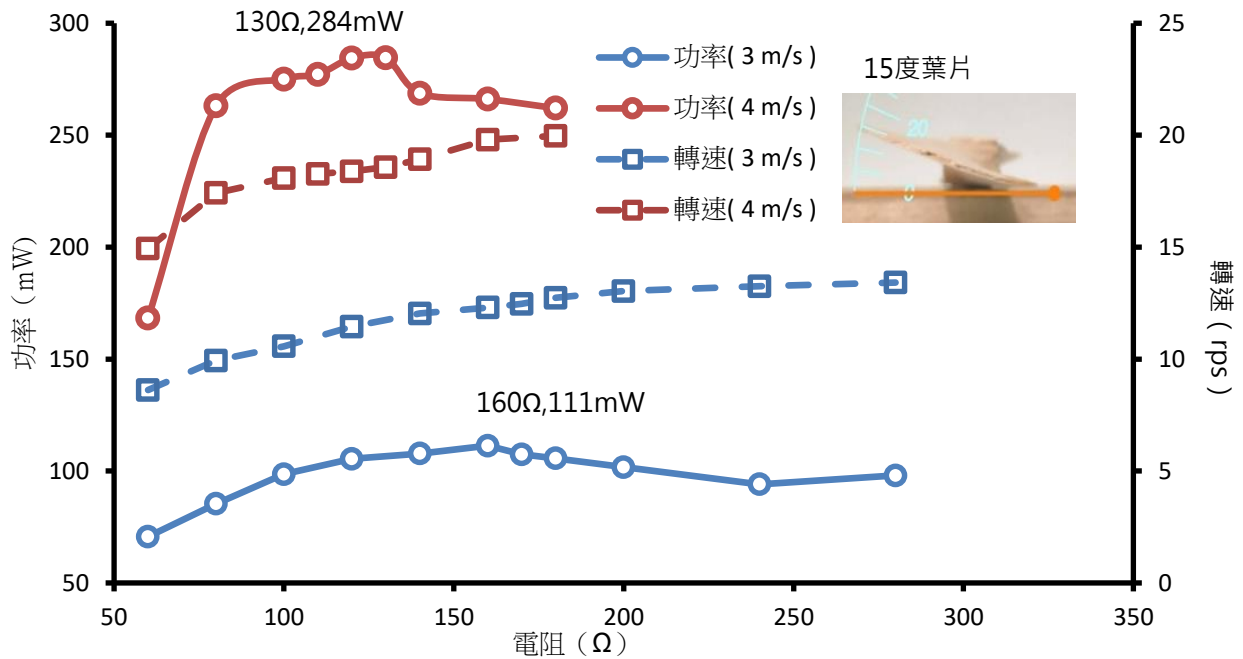
0.061 安培電流經 30 歐姆電阻，歷時 3.4 秒，電路損耗： $I^2 R_{xt} = (0.061)^2 \times 30 \times 3.4=0.38(\text{J})$

發電機產生電能： $W_{xt}=0.467(\text{J})$

發電機轉換效率: $(I^2 R_{xt}) + (W_{xt}) / mgh = 0.232$ (由於動能極小，所以不討論)

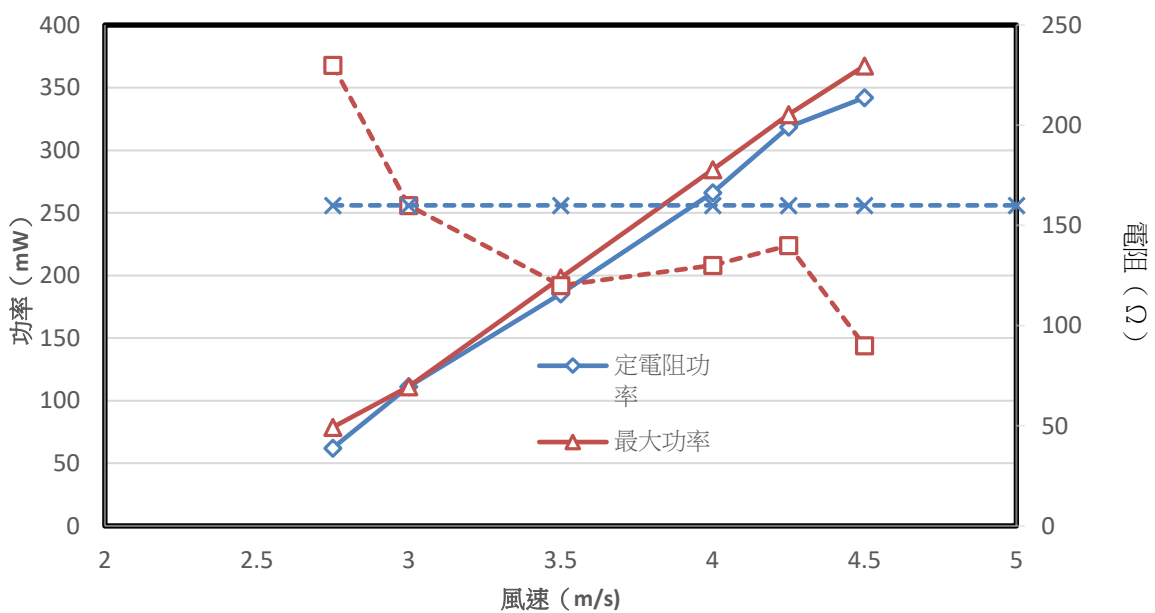
由此可知發電機的轉換效率為 23.2%，因此我們利用發電機所測量的發電量功率需再乘以 4.3 倍(23.2%倒數)才是葉片的真正功率係數。

伍、研究結果



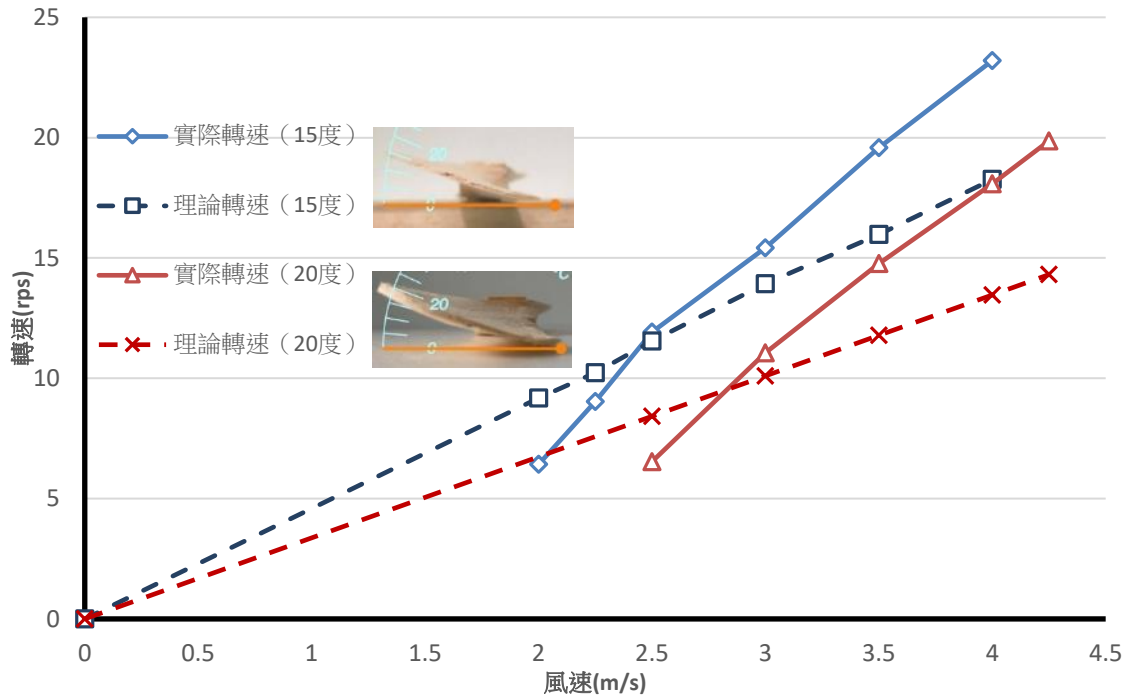
圖三十六 15 度、20 度螺距角下改變風速實際轉速與理論轉速關係圖

在風速 3m/s 時的最佳電阻值為 130Ω，風速 4m/s 時的最佳電阻值為 160Ω，由此可知，每個風速下皆有一個適當的電阻對應的最大功率，而風速越大會使葉片轉速提升，所以功率也會提高。轉速剛開始雖隨電阻提高有上升的趨勢，然而到後來即便調高電阻，降低負載，轉速卻逐漸穩定不再上升。



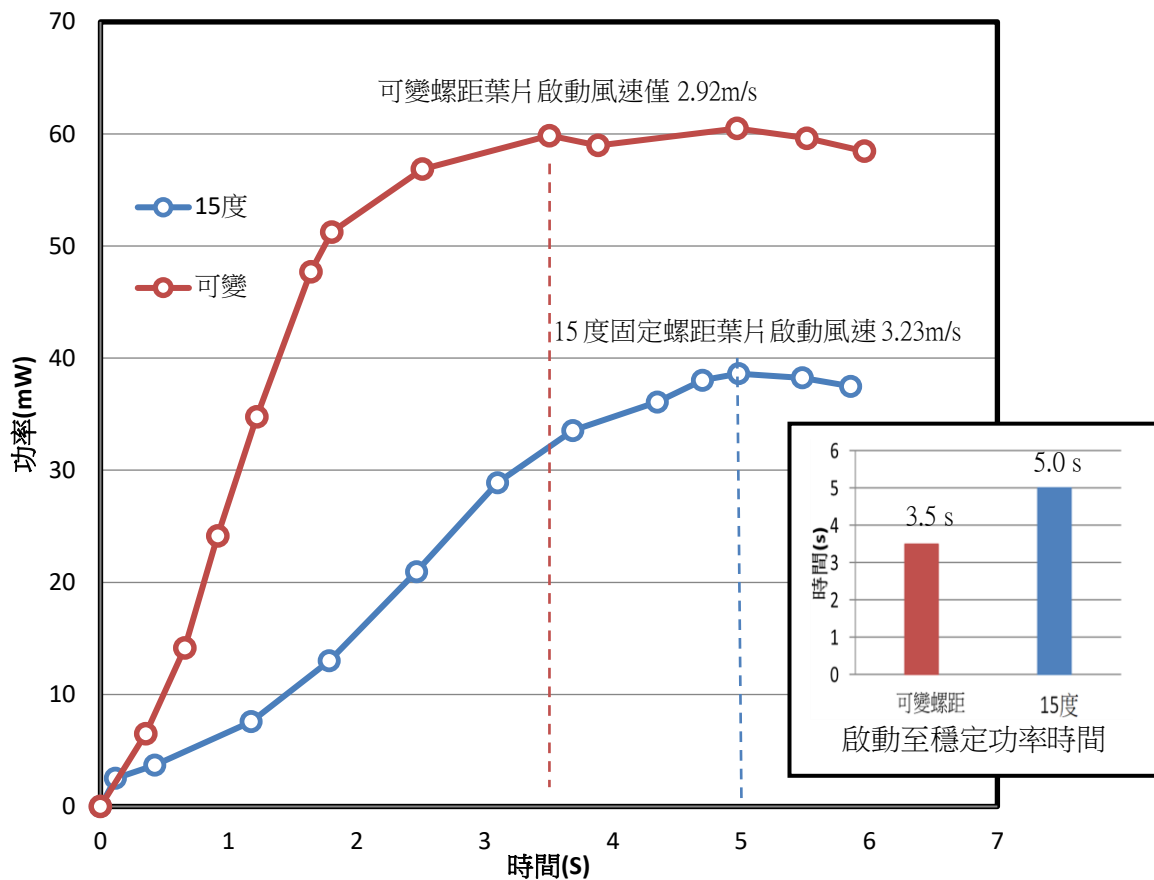
圖三十七 為各風速下最佳電阻值與固定電阻值所測得的功率比較

可以發現在不同風速下改變電阻成最佳電阻的功率皆大於固定電阻的功率。由上圖可以看到在風速小時的最佳電阻值較大因風速小時較不易轉動所以負載要小。



圖三十八 螺距為 15、20 度時風速與轉速的關係

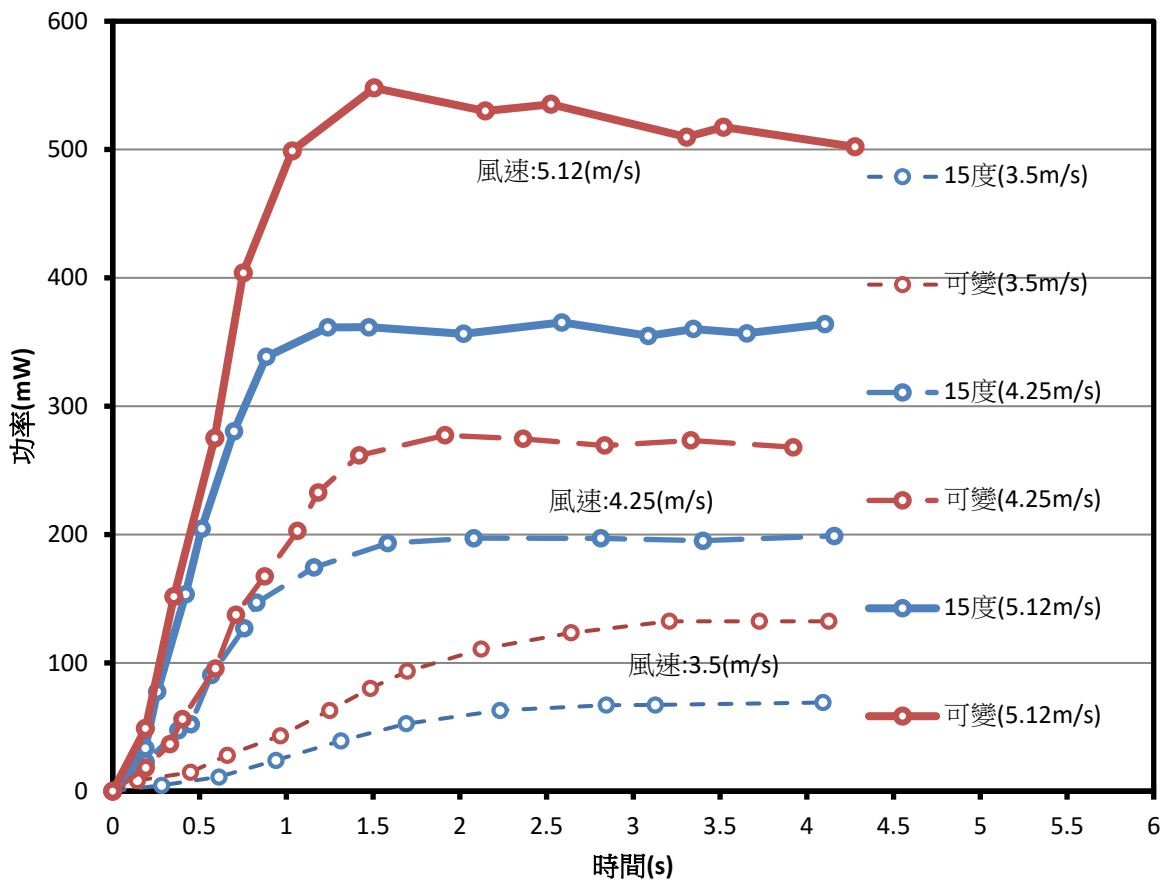
紅色實線為螺距角為 20 度的實際轉速，虛線為理論值，藍色實線為螺距角為 15 度的實際測量值，虛線為理論值。根據 $V_{wind} = \omega \times Pitch$ 計算理論值，又因風速相同，螺距角小時轉速較大，螺距角大時轉速較小，因此 15 度螺距角的轉速會較快，而 20 度的轉速則會較慢。由上圖表可以發現實際值與理論值有些微誤差，這是因為實際上葉片在轉動時，風向與螺距角並非完全相同，誤差值稱為攻角，風速越高時偏離理論值較多。



圖三十九 可變螺距與固定螺距(15度)啟動功率變化

由圖三十九可以發現可變螺距在 2.92m/s 時即可啟動，固定 15 度螺距葉片則需 3.23m/s 較高的風速才能啟動。而可變螺距啟動達穩定功率的時間僅需 3.5 秒，相對的，15 度固定螺距葉片需 5.0 秒 較長的時間才能達到穩動功率輸出。因此可知不但較啟動，達平衡的時間也較快。

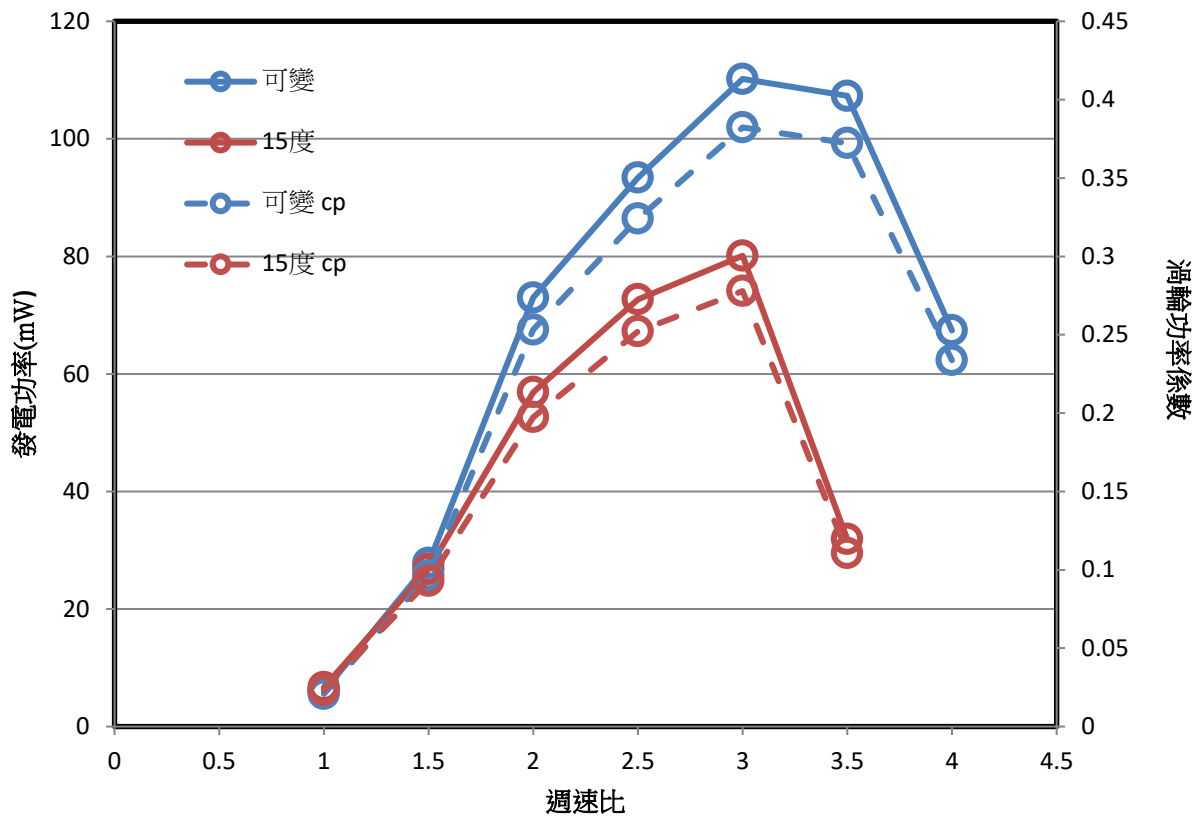
圖三十九說明被動可變螺距葉片，極適合較低風速即可啟動發電，所以適合低風速地區發電。並且因為能在短時間內達到穩定輸出功率，說明也適合裝置在風速變化快速的地區，能提供穩定且較高的電能輸出。



圖四十 三個風速下可變螺距與固定螺距(15 度)的功率比較

由圖四十由上到下的風速分別為 5.12m/s、4.25m/s、3.50m/s，紅色為可變螺距的功率，而藍色為 15 度固定螺距的功率，圖中可以發現各風速下可變螺距的功率皆大於 15 度固定螺距的功率。在風速 3.50m/s 下，可變螺距的功率為 15 度固定螺距的 188%。在風速 4.25m/s 下，可變螺距的功率為 15 度固定螺距的 135%。在風速 5.12m/s 下，可變螺距的功率為 15 度固定螺距的 150%。

因此被動式可變螺距在低風速下與高風速下的功率皆大幅高於固定螺距，特別是在低風速下，被動式可變螺距葉片更具有特別優勢。



圖四十一 為風速 3.5 (m/s)時可變螺距與固定螺距(15 度)的葉片在不同周速比下的發電功率與渦輪功率係數比較。

在圖四十一可以發現，同風速下的兩種葉片皆在周速比為 3 左右時最大。然而被動式可變螺距葉片可量測的周速比範圍為 1 到 4，而 15 度固定螺距的周速比範圍僅為 1 到 3.5，不論在功率或功率係數的值，可變螺距的葉片輸出的功率皆較大，可運作的周速比範圍也較為寬廣。

在貝茲定律中，理論葉片能輸出的最佳功率係數 C_p 值為 59%。而本研究中，受限實驗風動直徑，較小尺寸的模型風力渦輪葉片，不容易獲得較高的功率係數。實驗中得到被動式可變螺距葉片的最佳 C_p 值為 0.38，而 15 度固定螺距葉片的最佳 C_p 值為 0.27，已經是十分優異的成績了。

啟動時與轉動時合成風的夾角探討：

因為風力渦輪機轉速為本研究的發電機輸出交流電的頻率 1/6，得到葉尖螺距角設計如下。

$$\tan \theta = \frac{\text{風速(m/s)}}{\text{螺距(m)} \times \text{交流電頻率(Hz)} \times \frac{1}{6}}$$

15 度固定螺距葉片，由下列三種風速與實驗渦輪葉片轉速計算得到夾角如下。

風速為 3.50m/s 時的夾角：

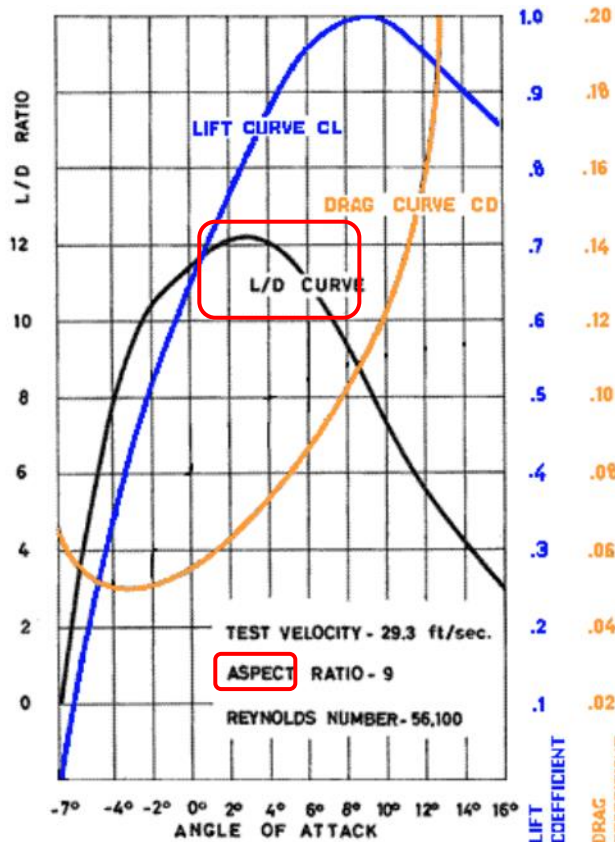
$$\tan \theta = \frac{3.5}{2 \times \pi \times 0.13 \times 74.3 \times \frac{1}{6}} = \tan 19.1$$

風速為 4.25m/s 時的夾角：

$$\tan \theta = \frac{4.25}{2 \times \pi \times 0.13 \times 98.5 \times \frac{1}{6}} = \tan 17.6$$

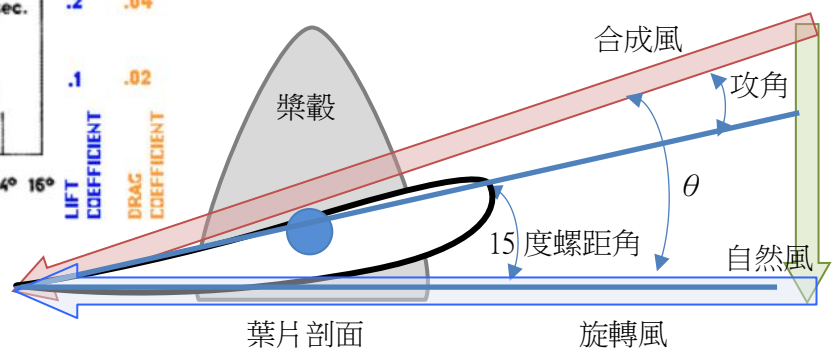
風速為 5.12m/s 時的夾角：

$$\tan \theta = \frac{5.12}{2 \times \pi \times 0.13 \times 125.4 \times \frac{1}{6}} = \tan 16.7$$



左圖為 RAF 32 翼型的升力、阻力與升阻比與攻角關係圖，其中黑色曲條為升阻比，在攻角為 2~4 度左右有最大值。

由上面計算得到 θ 分別為 19.1 度、17.6 度及 16.7 度，扣除 15 度螺距角之後，得到攻角分別為：4.1 度、2.6 度與 1.6 度，約為最大升阻比的攻角範圍，產生最大升力，最小阻力，有利於葉片驅動發電機。

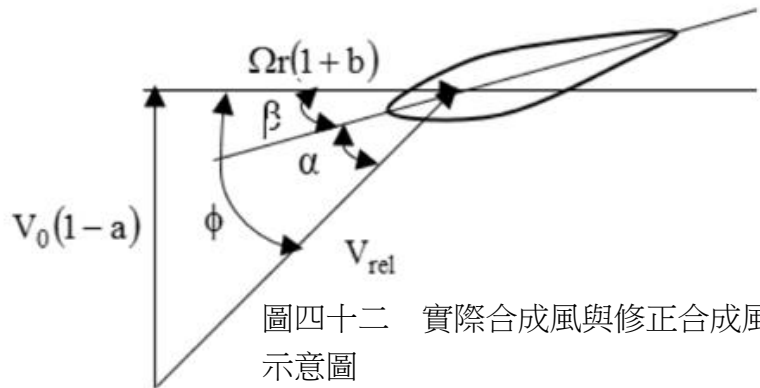


陸、討論

一、可變螺距轉動時螺距角接近 0 度，但合成風的角度卻為 10 幾度，導致攻角不為理想的最佳攻角 7 到 8 度，是因為轉動時所產生的渦流(wake)的影響。造成合成風的角度不是我們所計算出的值，要經過修正，所以實際的合成風角度會比原來的來得小。

以下為修正公式：a、b 分別為修正的角度。

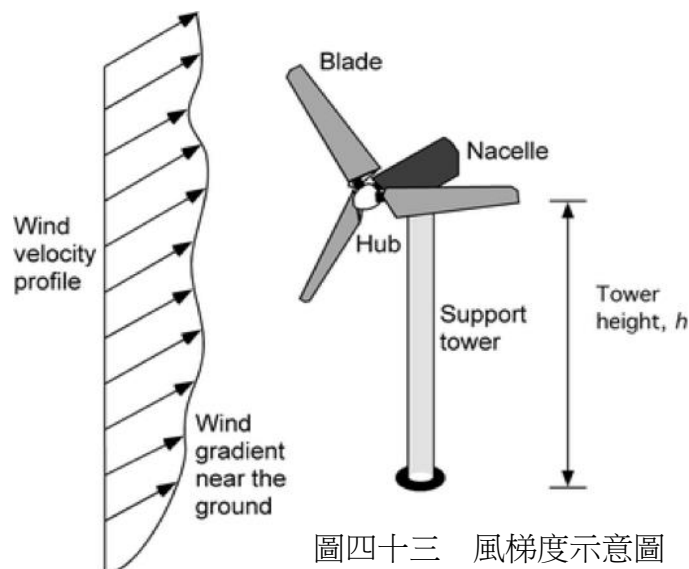
$$\tan\phi = \frac{V_0(1-a)}{\Omega r(1+b)}$$



二、目前大型風力發電機的螺距調整與本實驗所製作的被動式可變螺距比較。

大型風力發電機是利用發電機上的風速計偵測風速，並利用程式計算出理想螺距，再利用伺服馬達與齒輪調控葉片螺距。但因旋轉面的直徑很大，會因為風梯度(wind gradient)的影響，導致葉片從上方轉至下方時的風速不一樣，但偵測器卻無法測得，造成功率下降與噪音。

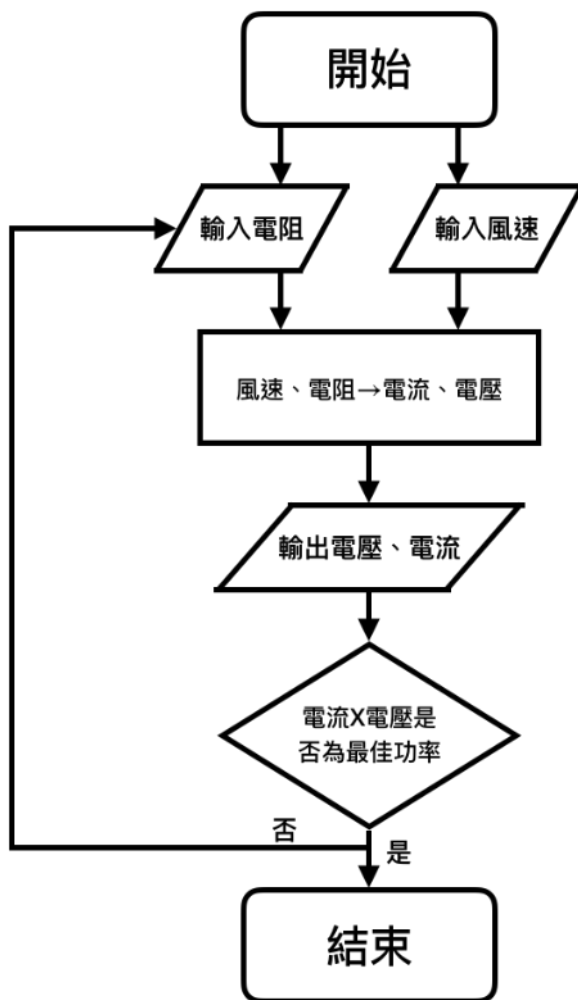
本實驗所製作的被動式可變螺距可隨著風速的大小，被動調控螺距角，可減少不必要的躁音與功率的下降。



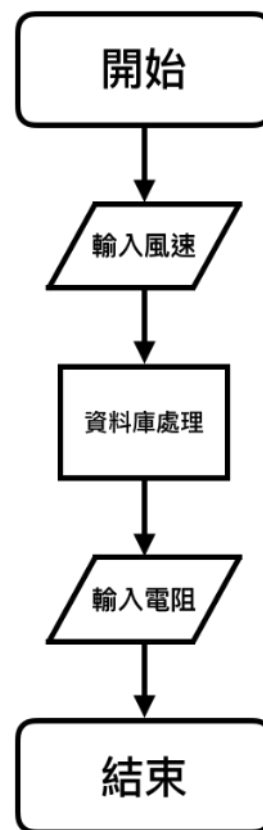
三、未來展望

由於我們目前的題目是最大功率探討，我們之後會往最大功率追蹤的方向繼續做，我們將會取在不同風速下的最佳電阻值以及其對應的功率，有這些數據之後，我們在這些數據中找尋關聯性，然後再彙整成一個數據庫輸入在 Arduino 的板子上，在外接數位電位模組自動更改電阻。

以下為兩種程式運作的方法(流程 1、流程 2)，我們最終選擇流程 2 因為風速的變化實在太大，必須在最快的方式計算，這樣就可以完成不須手動，而是自動追蹤，並且最有效率。



流程 1：試誤法



流程 2：資料庫

柒、結論

- 一、調整至適當的電阻有最大功率。當電阻變大時，電流變小，轉速提升，電壓也提升，功率隨之增加，但持續增加電阻，轉速無法持續提升，反而造成電流減少，功率降低。
- 二、在實驗範圍內風速增加時功率並沒有隨著風速成三次方增加，各風速下調控至最佳功率的電阻其輸出功率皆大於固定電阻的輸出功率。
- 三、根據風速(米/秒)= 螺距(米/轉) \times 轉速(轉/秒)與實驗結果，風速較大或螺距較小，轉速會較大。
- 四、固定螺距的啟動風速需 3.23m/s，可變螺距的啟動風速僅需 2.92m/s，從啟動到最大功率固定螺距需 5.0s，可變螺距僅需 3.5s，說明可變螺距適合快速變動及低風速的風場。
- 五、可變螺距的功率都大於固定螺距，特別在低風速與高風速的功率大幅大於固定螺距，風速 3.50m/s 為 188%倍，風速 4.25m/s 為 135%倍，風速 5.12m/s 為 150%倍。
- 六、總功率係數=發電機轉換效率 \times 葉片功率係數，由貝茲定律理論最佳功率係數為 0.59，本實驗得到，當周速比為 3 時而可變螺距葉片的最佳 C_p 值為 0.38，定螺距葉片的最佳 C_p 值僅為 0.27，此外可變螺距可運作的周速比範圍較固定螺距大，也就是在不同轉速下皆有很大的發電效率。

捌、參考資料與其他

- 一、黃詩云 吳佳芸 王俞傑 洪宜婷 (2018).風馳電生·屏東縣鹽埔鄉振興國民小學
- 二、陳吟珍 張育豪 黃兆宇 陳芳琦 呂鎧均 (2014)·神「風」特攻隊-扇葉與風力發電實驗.
澎湖縣馬公市中正國民小學
- 三、陳亭儒 林玟葳 黃翊(2017)·風力罩得住酷旋發電機.臺北市立龍門國民中學·中華民國
第 57 屆中小學科學展覽會
- 四、詹富翔 蘇映佳 (2018)·升力式扇葉發電裝置的設計及探討·新北市立安溪國民中學
- 五、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
- 六、姚珩等 (2009) 選修物理·高三翰林課本 9-2
- 七、Glenn Research Center·(2014)·Aerodynamic Center-ac·NASA
- 八、N.C.K. Pawsey·(2002)·DEVELOPMENT AND EVALUATION OF PASSIVE
VARIABLE-PITCH VERTICAL AXIS WIND TURBINES School of Mechanical and
Manufacturing Engineering·The University of New South Wales.
- 九、Yaşar Demirel·(2002)·Nonequilibrium Thermodynamics·Science Direct
- 十、Jui-Fang Tsai, Hsien-Kuo Chang, Jin-Cheng Liou, and Lian-Sheng Ho·(2016)·Onshore and
Offshore Wind Speed Distribution at the Western Waters in Taiwan·International Journal of
Environment Science and Development

【評語】 052314

1. 本研究有兩項重點，第一項利用可變電阻改變通過發電機的電流以調控發電機渦輪葉片轉速，以達到最佳功率輸出。第二項重點為利用空氣動力開發創新被動式可變螺距葉片。研究具創新性、實用性、和探索性。
2. 研究架構完整，對於過去科展的相關研究有進行了解，創新想法及相關學理說明清楚，針對現有變數現有環境的分析也尚稱嚴謹，分析方法也相當適切。
3. 目前實驗環境和測試項目是理想情況，建議依據台灣風場狀況，導入變風向和變風量的測試，以進一步確認可變螺距和可變電阻的效用。
4. 系統放大至真實尺寸後，或許會引入工程上新問題和議題，建議一併評估。

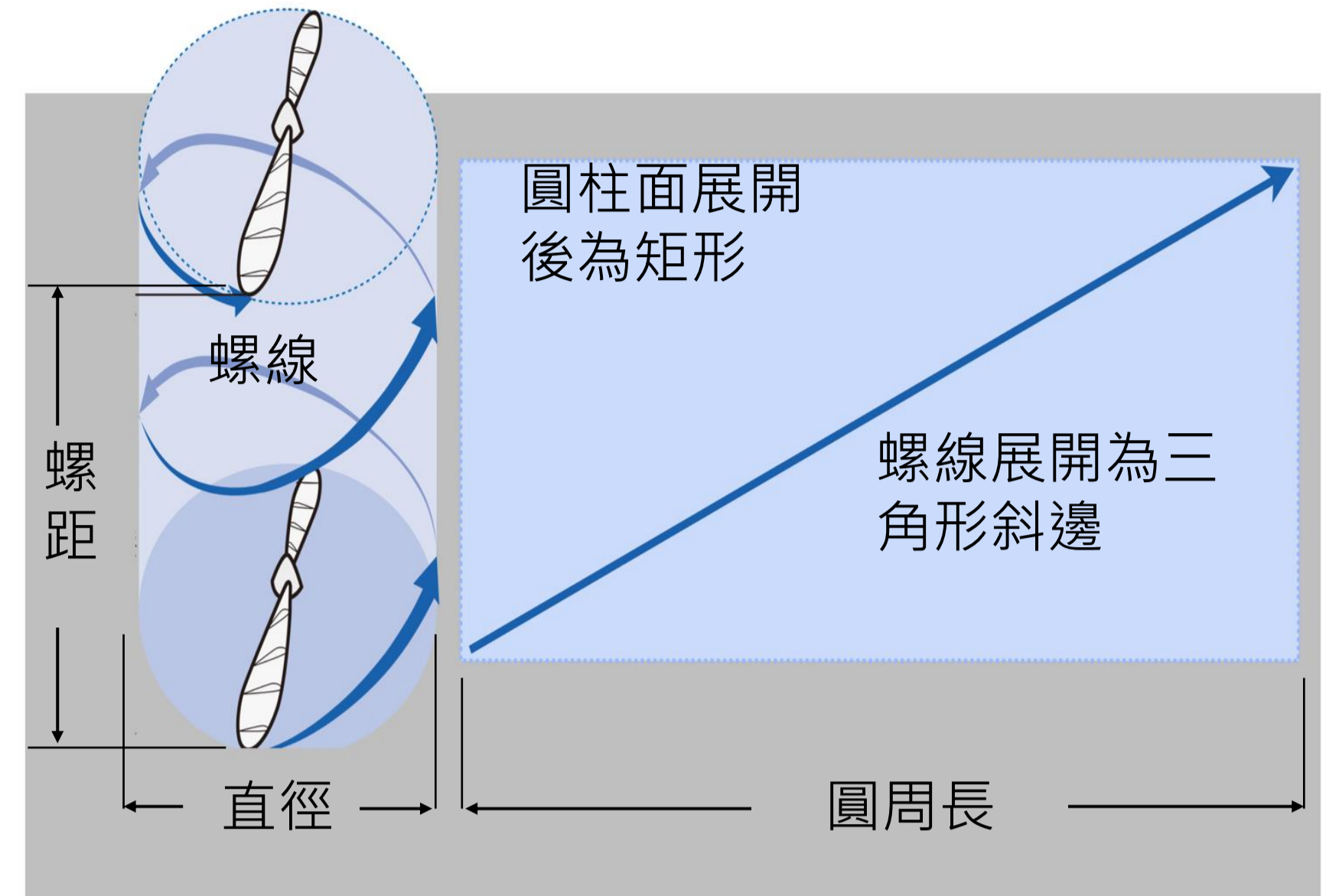
研究動機

在地方科展本研究調控電阻(負載)，分析對風力發電機輸出電功率的影響，得知在各風速下，皆有最佳電阻可使發電機達最佳功率。當時發現風力渦輪葉片在螺距角大時可在小風速下輕易啟動，但啟動後的功率卻比螺距角小的渦輪葉片時來的小，主因是螺距角小時轉速快，功率自然而然也較高。所以本研究將兩種螺距角的特性結合，也就發展可調螺距渦輪葉片，但本研究設計可調螺距葉片，並非採複雜伺服馬達調控，而是藉自然風與旋轉風產生合成風，以空氣動力被動調整葉片螺距。

此被動式可調螺距葉片，啟動時為大螺距角能低風速啟動，轉動後再藉氣流調控降低螺距角，使發電機能達到最大功率。然而在歷屆科展中對於風力發電的葉片部分，只針對葉片數量及材質的實驗，幾乎沒有探討到螺距這部分，更沒有研究關於可變螺距渦輪葉片。本研究創新的被動式可變螺距渦輪葉片，能夠自適應不同週速比被動調整螺距角度，以期達成最佳功率的輸出。

研究目的

- 固定螺距葉片驅動發電機改變負載電阻，量測各風速下的功率及轉速。
- 在多種風速下測量可變螺距與固定螺距葉片的功率。
- 測量可變螺距與固定螺距葉片的啟動風速、功率及達穩定值的時間。
- 在相同風速下改變週速比量測功率與功率係數值 C_p 。

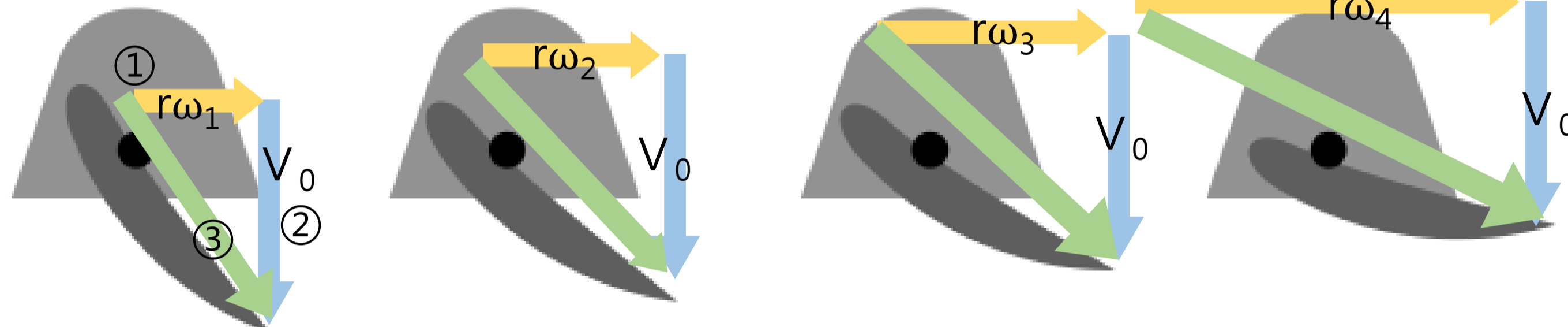


圖一 螺距示意圖

葉片設計

(一) 可變螺距葉片隨著轉速提高螺距角變小

啟動時旋轉風小



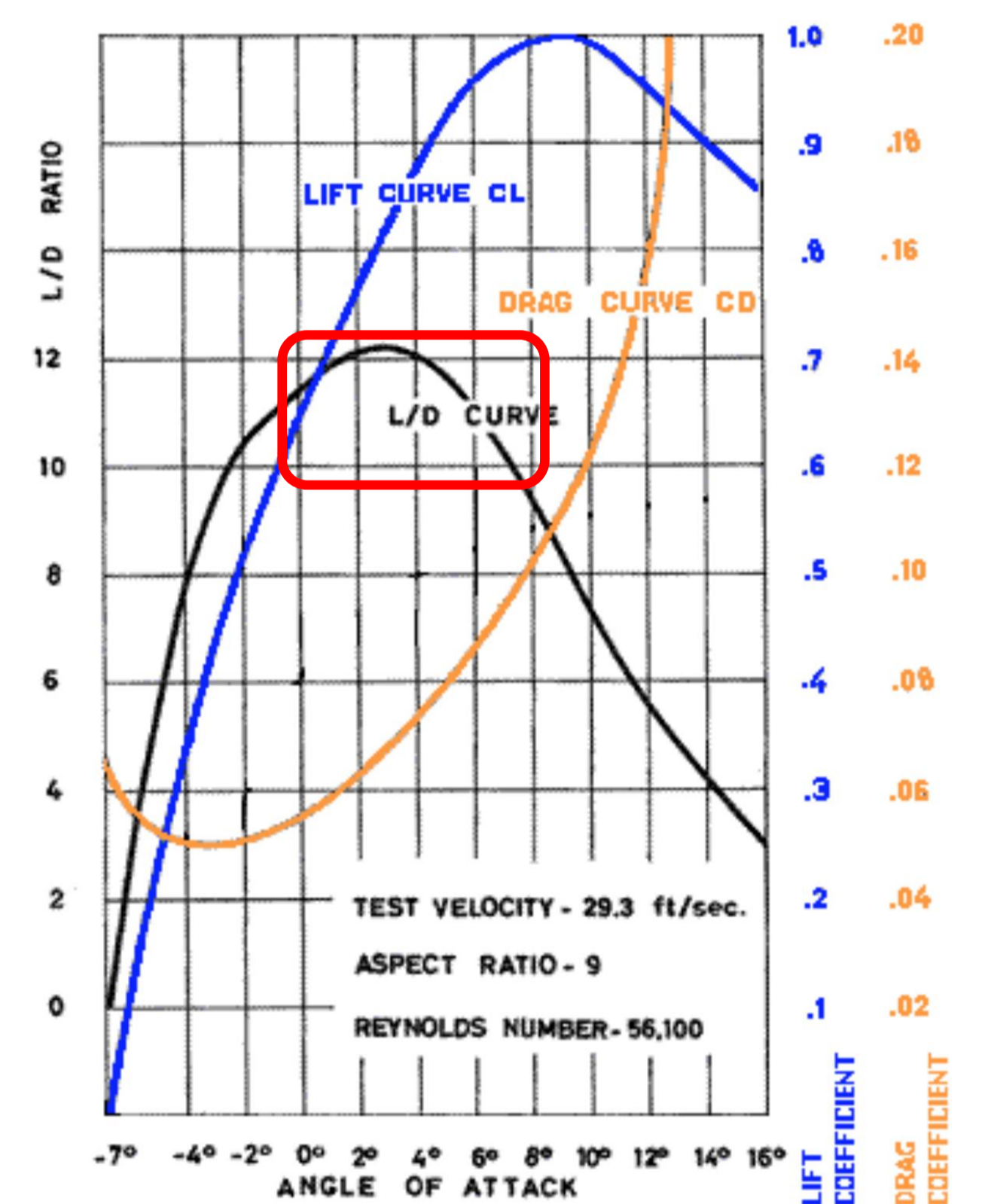
圖二 可變螺距葉片隨著轉速提高螺距角變小(葉片剖面側視圖)

① 旋轉風 $V=r\omega$ (隨轉速提高風速增加) ② 真實風 V_0 (假設真實風不變) ③ 合成風

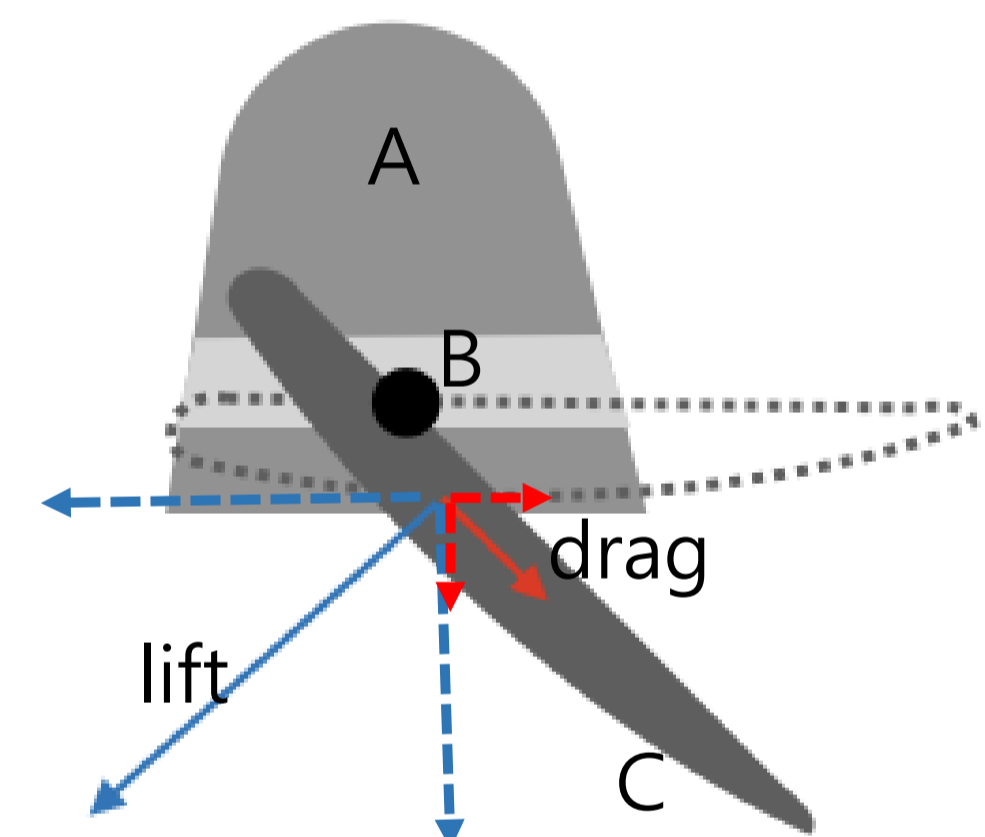
因為空氣動力中心為距前緣的四分之一長度，所以將轉軸放在距前緣約五分之一長度左右，使升力可以產生一個正力矩，會將轉軸擺在偏下的位子是為了讓阻力也產生一個逆力矩與正力矩可以達成平衡。被動可變螺距葉片的原理與風向標的原理一樣。

(二) 被動可變螺距葉片槳轂設計

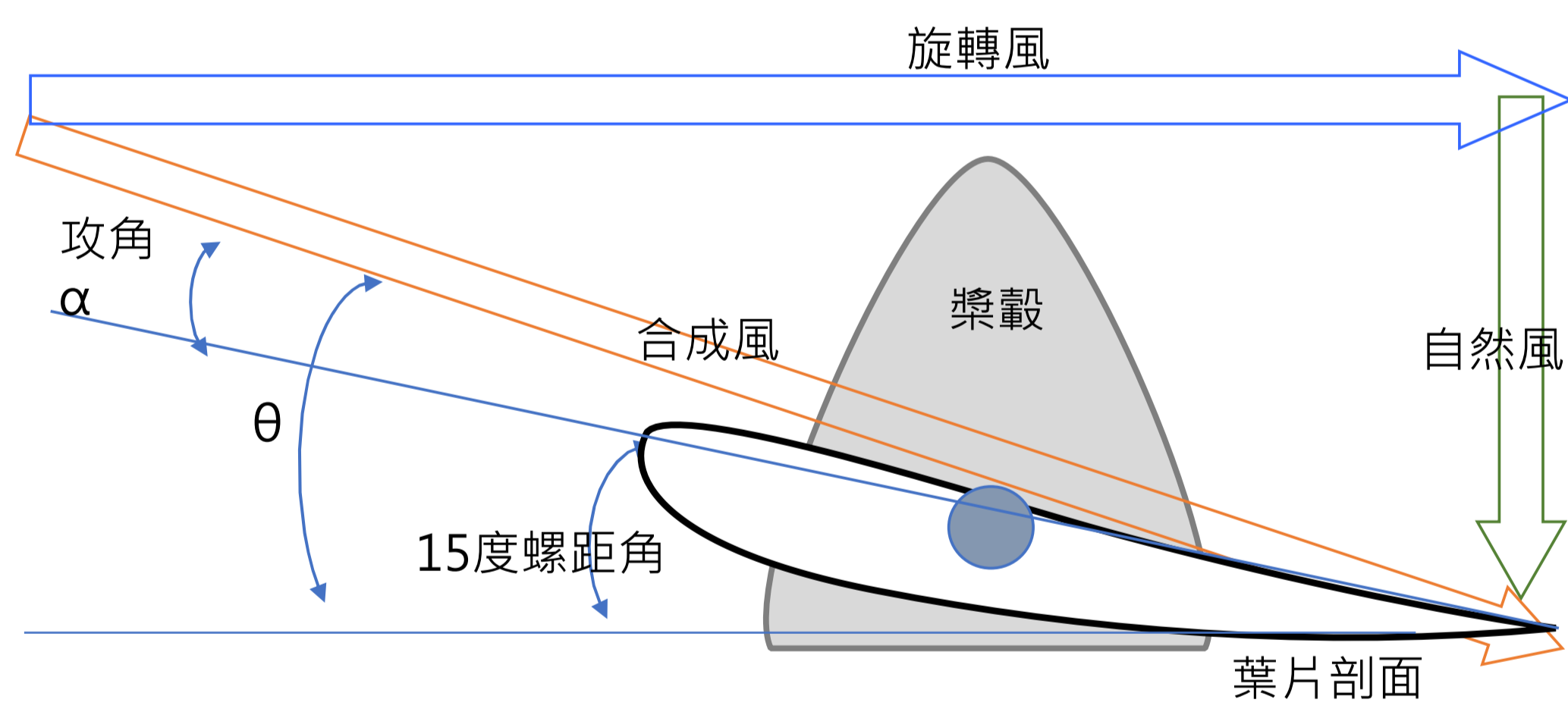
利用鋼絲及滾珠軸承使被動可變螺距葉片能夠自由轉動，在末端將鋼絲凹成90度來限定轉動的角度範圍，並以鋼絲長度與高度控制。啟動旋轉時希望葉片螺距角成45度，因為葉片能有較大的升力，轉動後葉片便會氣動力被動調控葉尖與旋轉面呈零度左右，使攻角約為0~8度以得到最大功率。



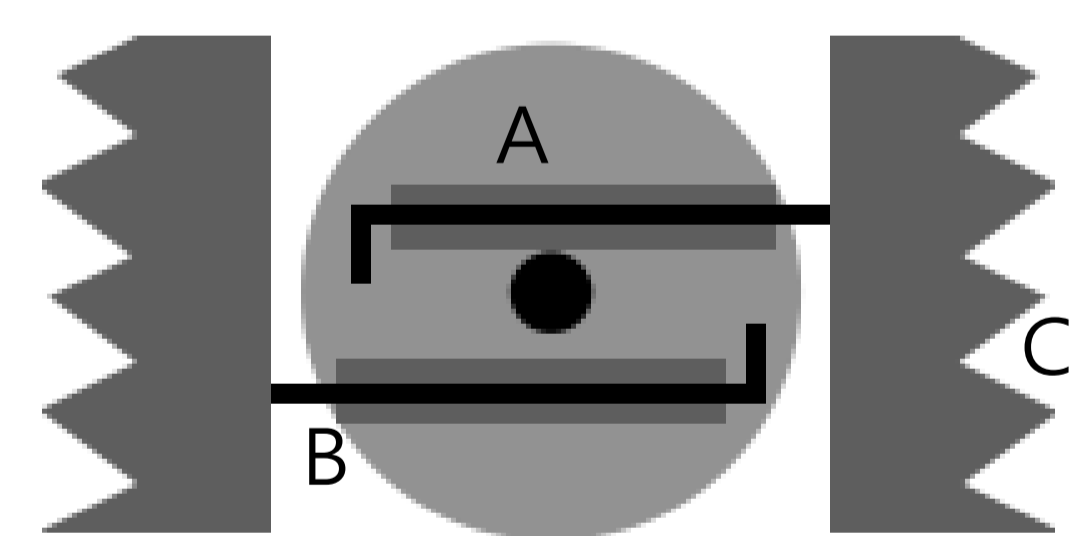
圖三 升阻比圖



圖四 被動可變螺距槳轂設計側視圖



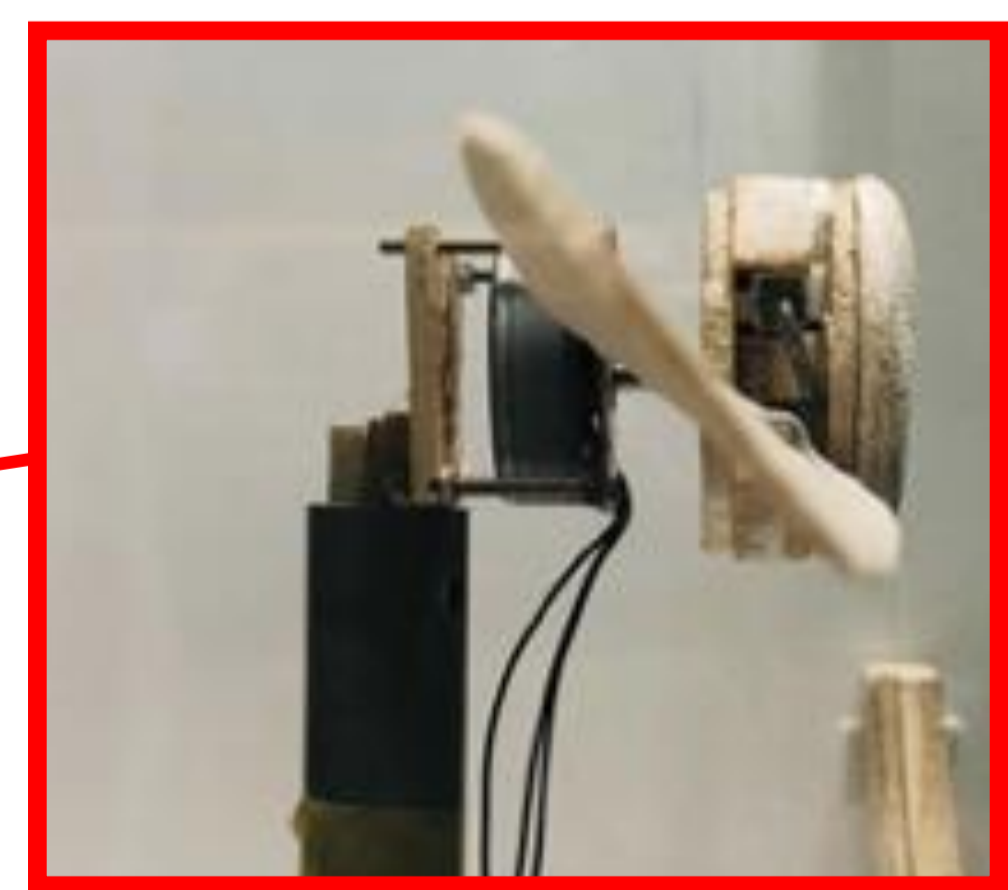
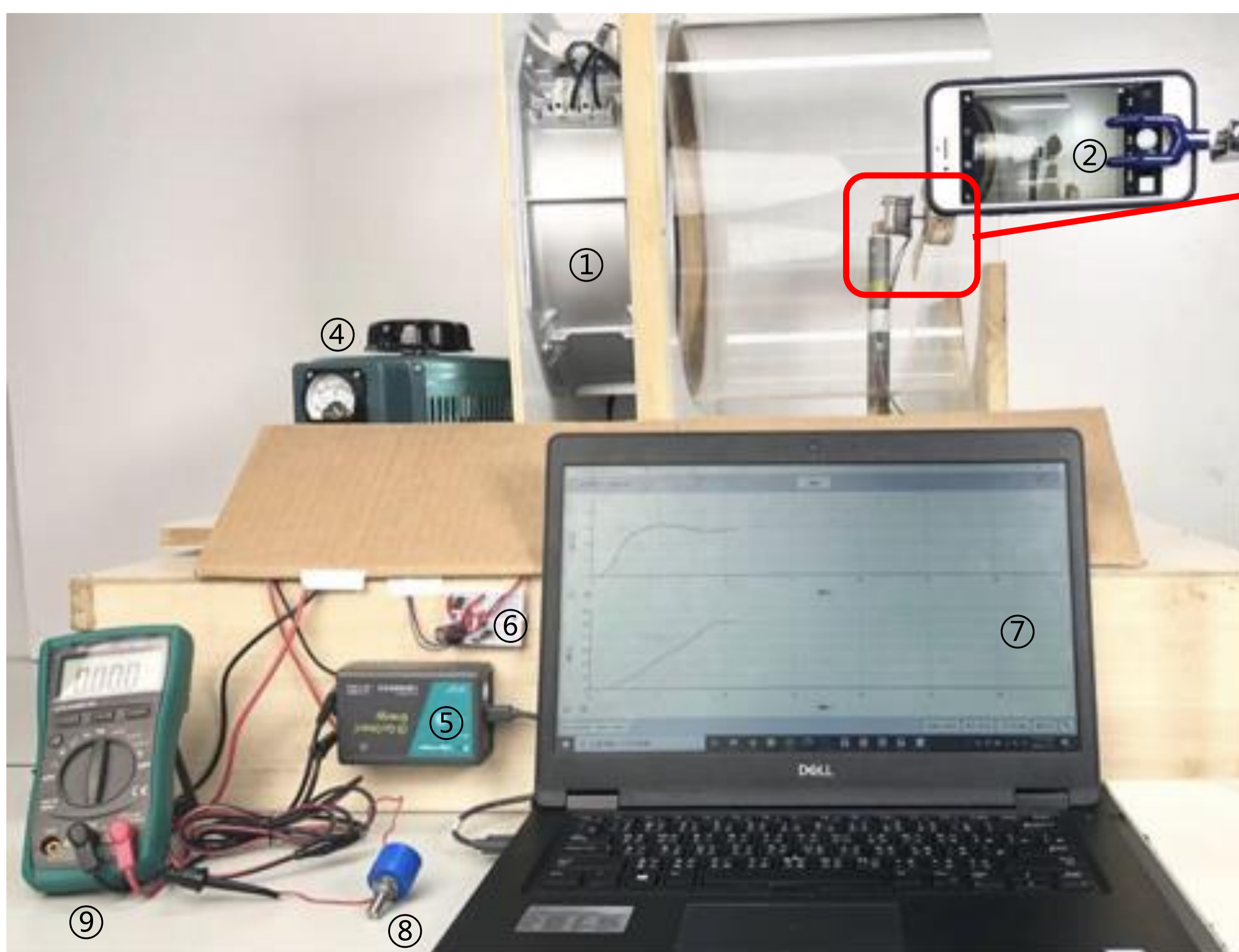
圖五 葉片受力圖



圖六 被動可變螺距槳轂設計俯視圖

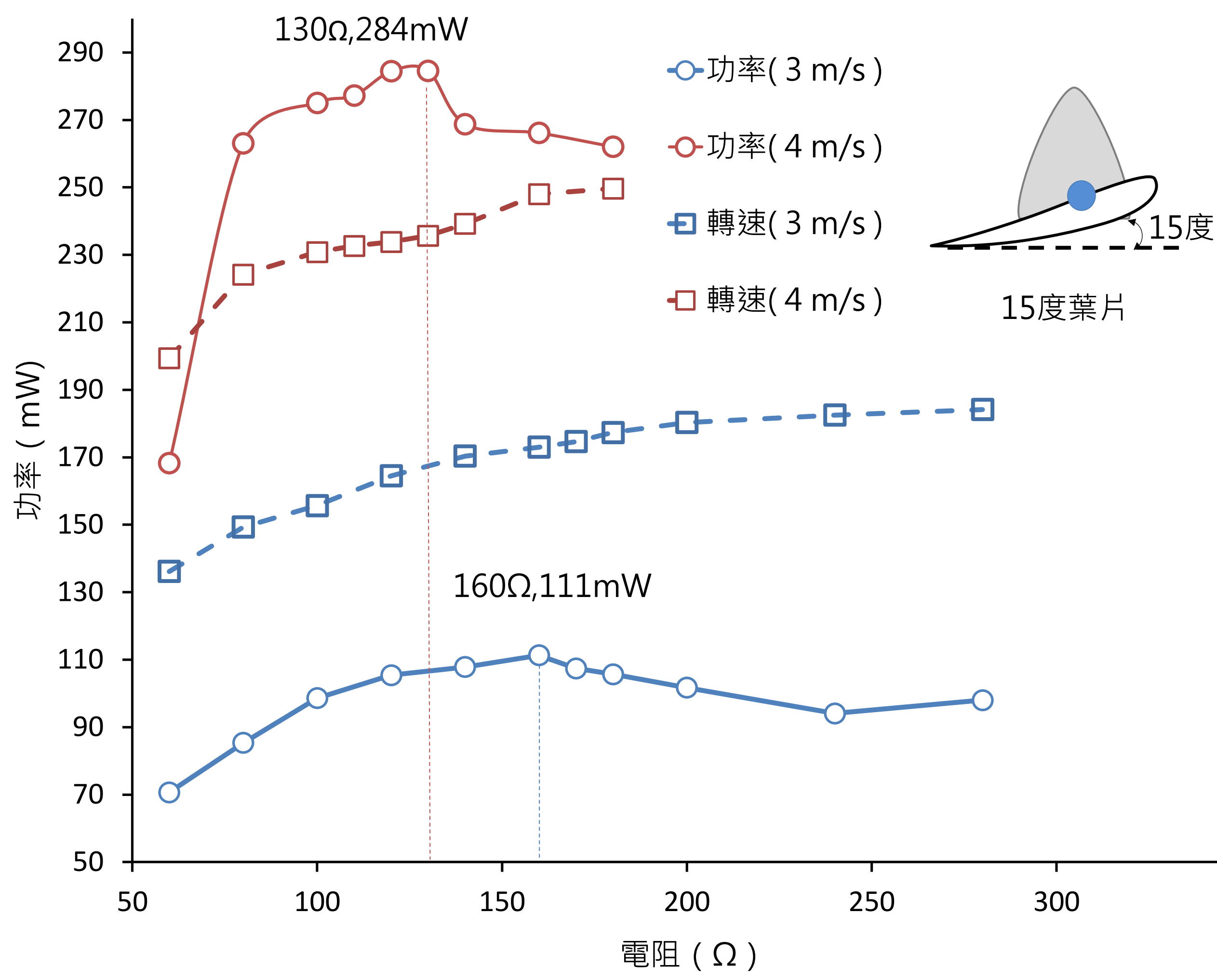
A 槳轂(hub) B 轉軸(shaft) C 葉片(blade)

實驗裝置圖



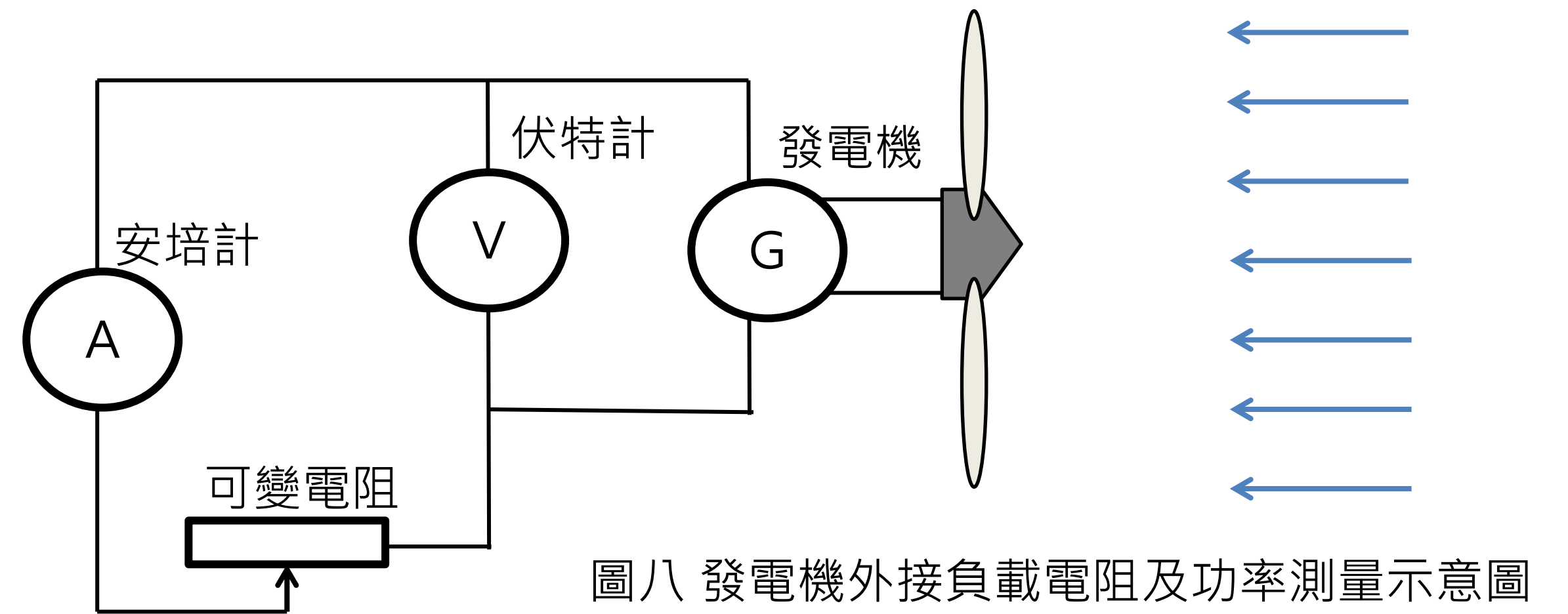
- ① 自製風洞
- ② 手機 (利用Stroboscope的閃頻攝影)
- ③ 自製渦輪葉片
- ④ 自偶變壓器 (調控送風機風速)
- ⑤ 電能感應器 (Vernier Go Direct Energy)
- ⑥ 三相橋氏整流電路 (含二極體、電容)
- ⑦ 筆記型電腦 (Vernier Graphical Analysis)
- ⑧ 微轉可變電阻 (10轉500Ω)
- ⑨ 三用電錶 (測量頻率推算發電機轉速)

研究結果

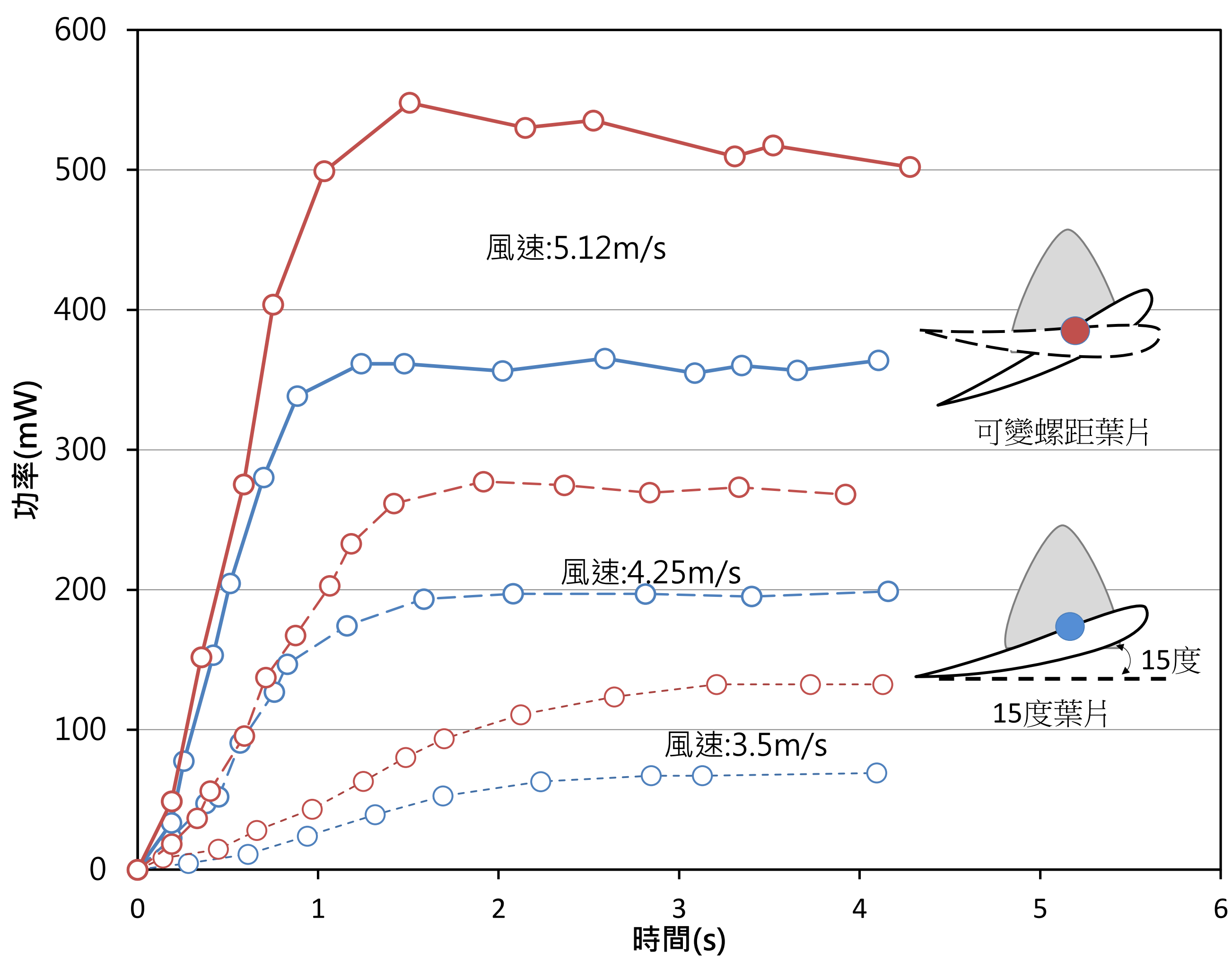


圖七 風速3m/s與風速4m/s下螺距角為15度時的功率與轉速

- 每個風速下皆有一個適當的電阻對應的最大功率，在風速3m/s時的最佳電阻值為130Ω，風速4m/s時的最佳電阻值為160Ω。
- 轉速到最後成長會逐漸趨緩，增加電阻，降低負載，而轉速卻沒提升。
- 歐姆定律： $V=IR$ $R \propto 1/I$
- 載流線圈力矩： $\tau=r \times F=N[r(ILB)]=(V/R)NBA$ $\tau \propto I$
- $\tau_{total}=\tau_{wind}-\tau_{generator}$ τ_{total} 與轉速成正向關係
- 法拉第電磁感應： $\varepsilon=-NAB\omega \sin(\omega t)$ $V \propto \omega$
- 由上式推導： $P=V^2/R=IV=I(NAB\omega \sin \omega t)$
- 電阻變大時， I 變小， ω 提升， V 也提升，功率隨之增加

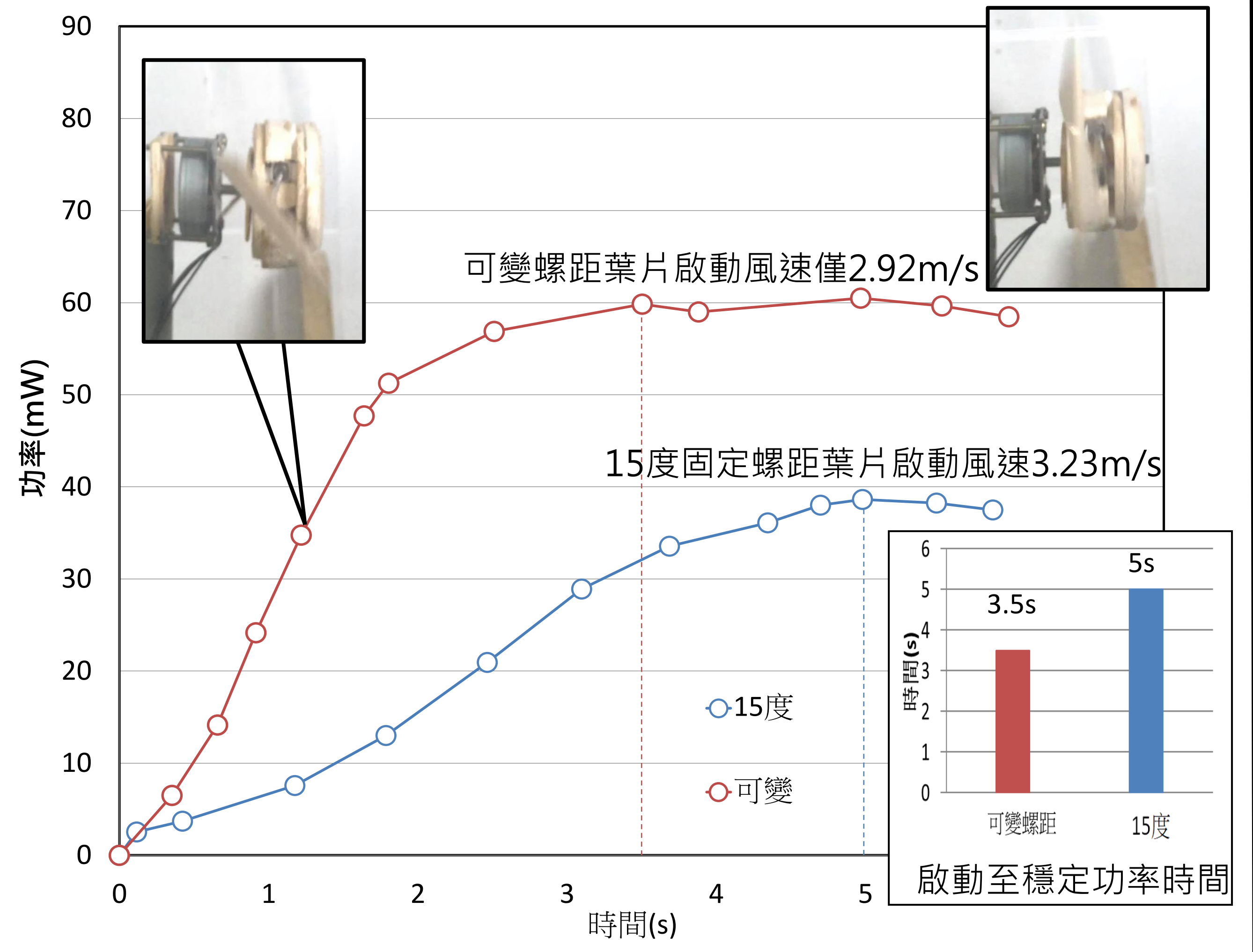


圖八 發電機外接負載電阻及功率測量示意圖



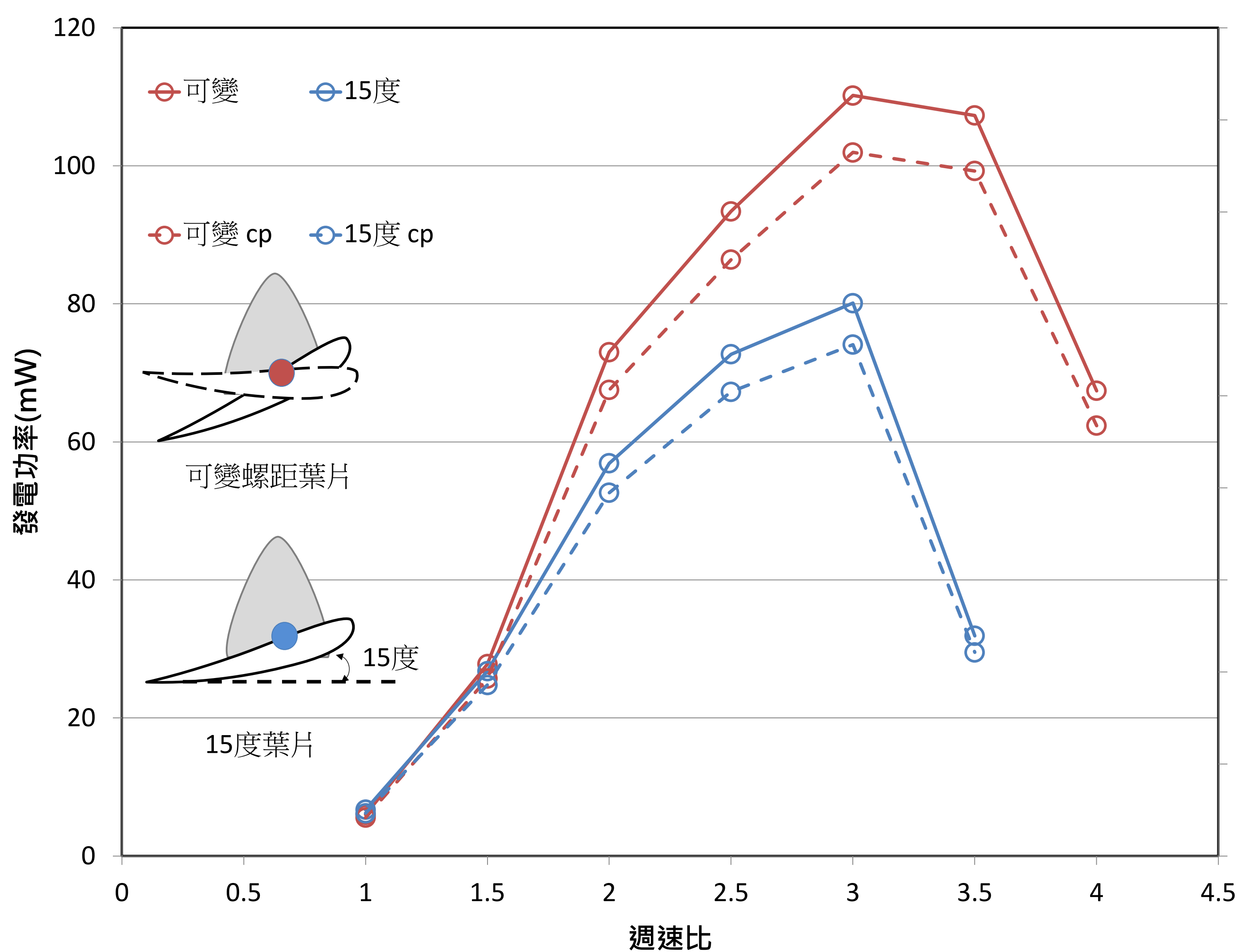
圖九 三個風速下可變螺距與固定螺距(15度)的功率比較

- 圖中可以發現各風速下可變螺距的功率皆大於15度固定螺距的功率。
- 在風速3.50m/s下，可變螺距的功率為15度固定螺距的**188%**。在風速4.25m/s下，可變螺距的功率為15度固定螺距的**135%**。在風速5.12m/s下，可變螺距的功率為15度固定螺距的**150%**。
- 被動式可變螺距在低風速下與高風速下的功率皆大幅高於固定螺距，特別是在低風速下，被動式可變螺距葉片更具有特別優勢。

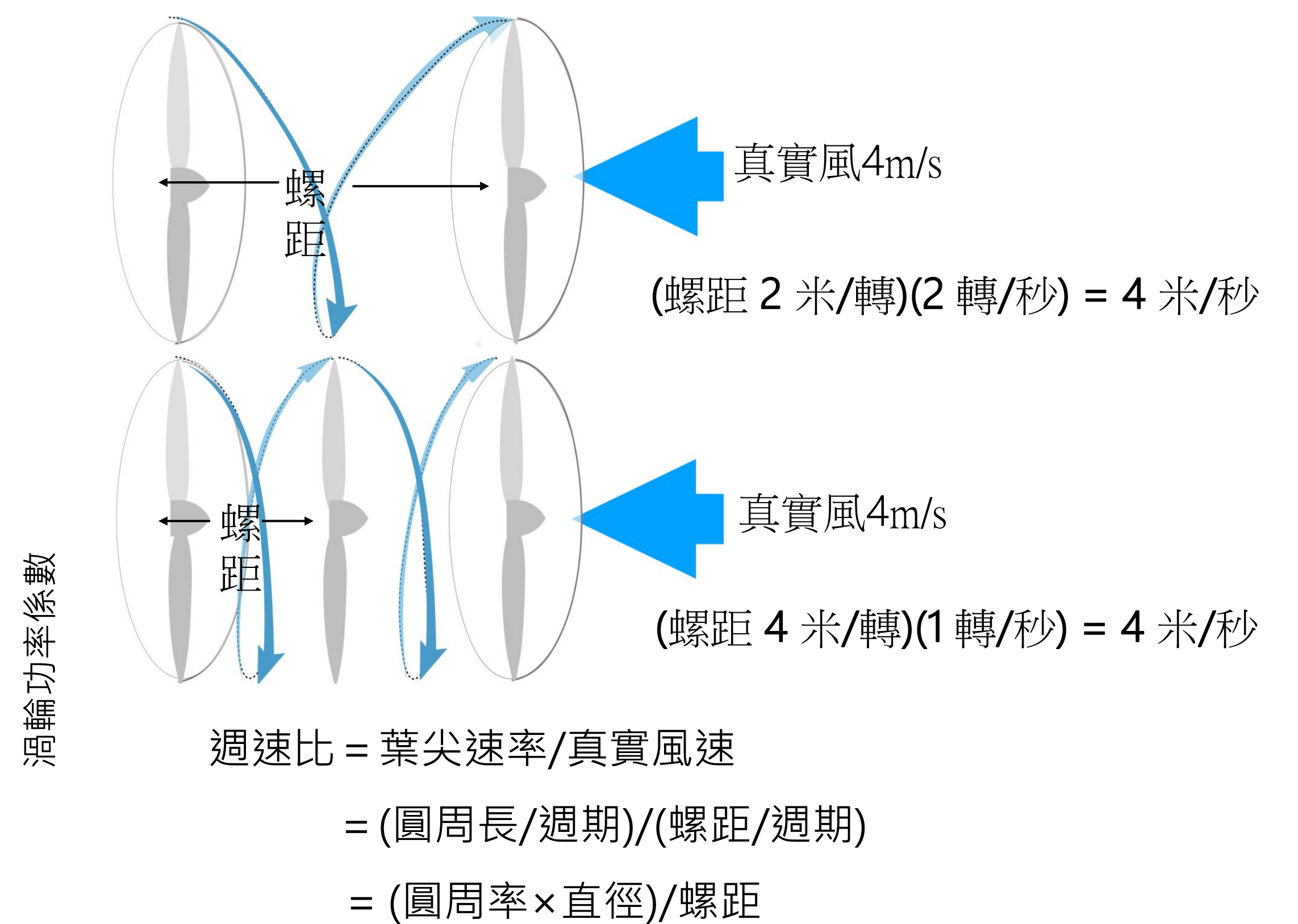


圖十 可變螺距與固定螺距(15度)啟動功率變化

- 由圖三十九可以發現可變螺距在2.92m/s時即可啟動，固定15度螺距葉片則需3.23m/s較高的風速才能啟動。
- 可變螺距啟動達穩定功率的時間僅需3.5秒，相對的，15度固定螺距葉片需5.0秒較長的時間才能達到穩定功率輸出。因此可知不但較啟動，達平衡的時間也較快。



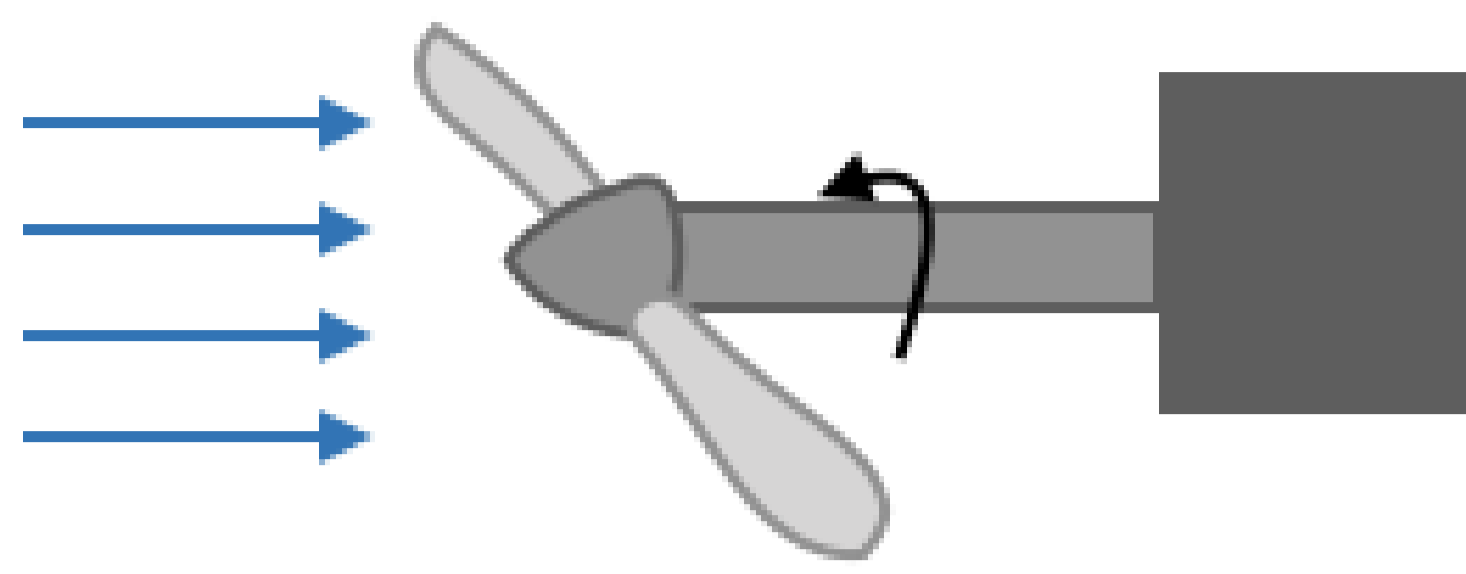
圖十一 為風速3.5 m/s時可變螺距與固定螺距(15度)的葉片在不同周速比下的發電功率與渦輪功率係數比較。



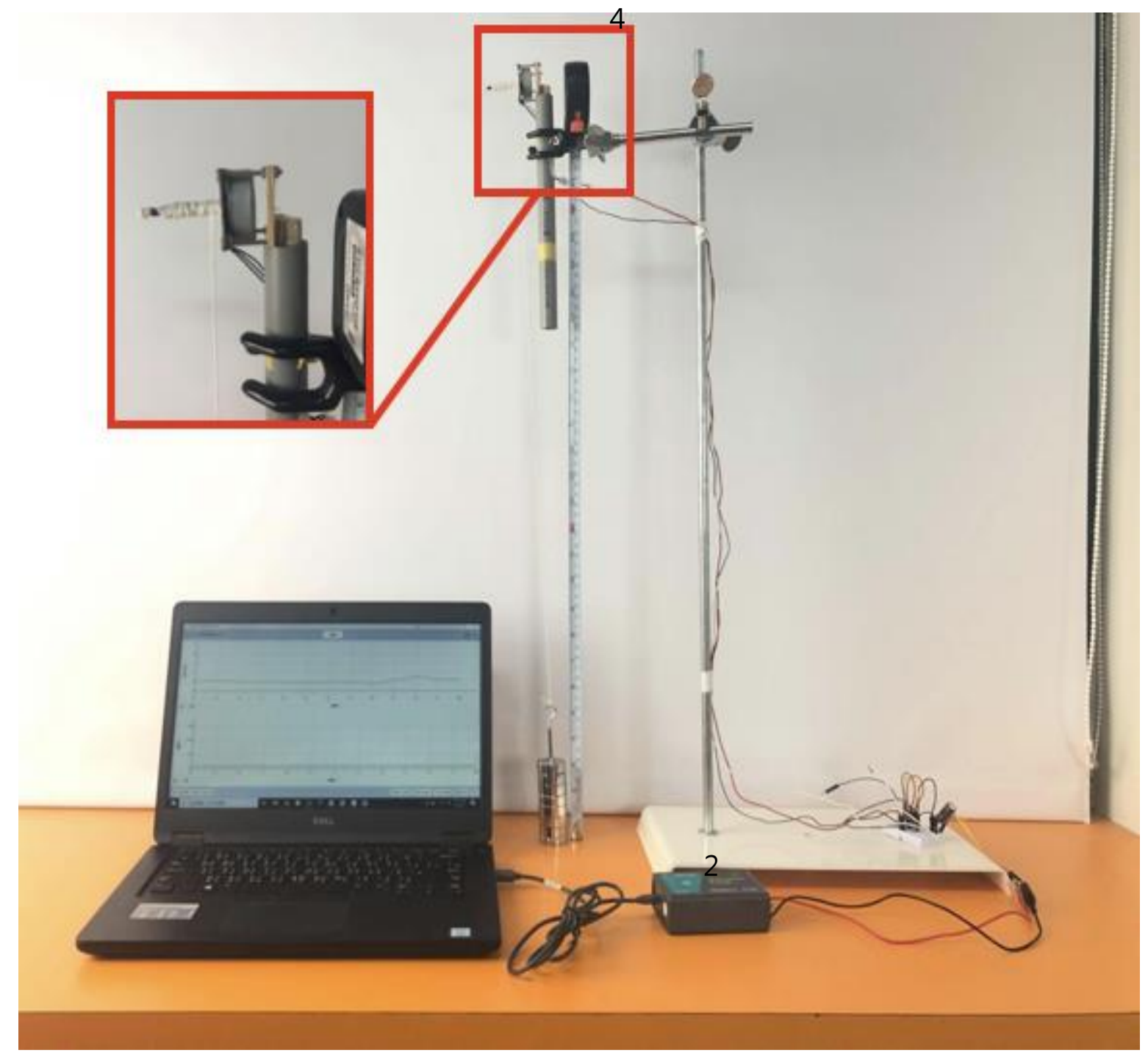
- 同風速下的兩種葉片皆在周速比為3左右時最大。
- 被動式可變螺距葉片可量測的周速比範圍為1到4，而15度固定螺距的周速比範圍僅為1到3.5。
- 在貝茲定律中，理論葉片能輸出的最佳功率係數 C_p 值為59%。實驗中得到被動式可變螺距葉片的最佳 C_p 值為0.38，而15度固定螺距葉片的最佳 C_p 值為0.27。

討論

- 由此可知發電機的轉換效率為23.2%，因此我們利用發電機所測量的發電量功率需再乘以4.3倍(23.2%倒數)才是葉片的真正功率係數。

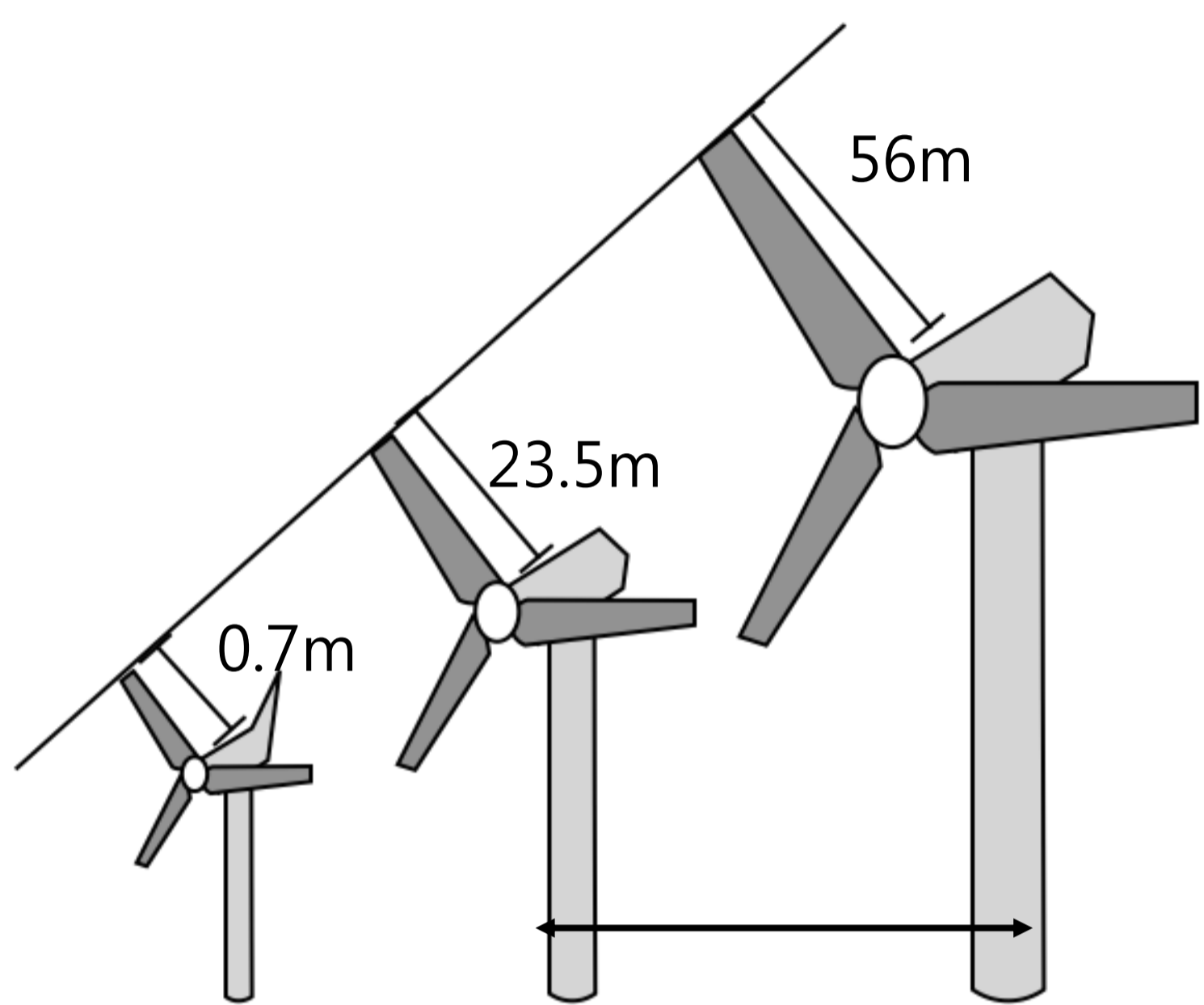


$$\text{總功率係數 } C_p = \text{渦輪葉片功率係數} \times \text{齒輪箱效率} \times \text{發電機效率}$$

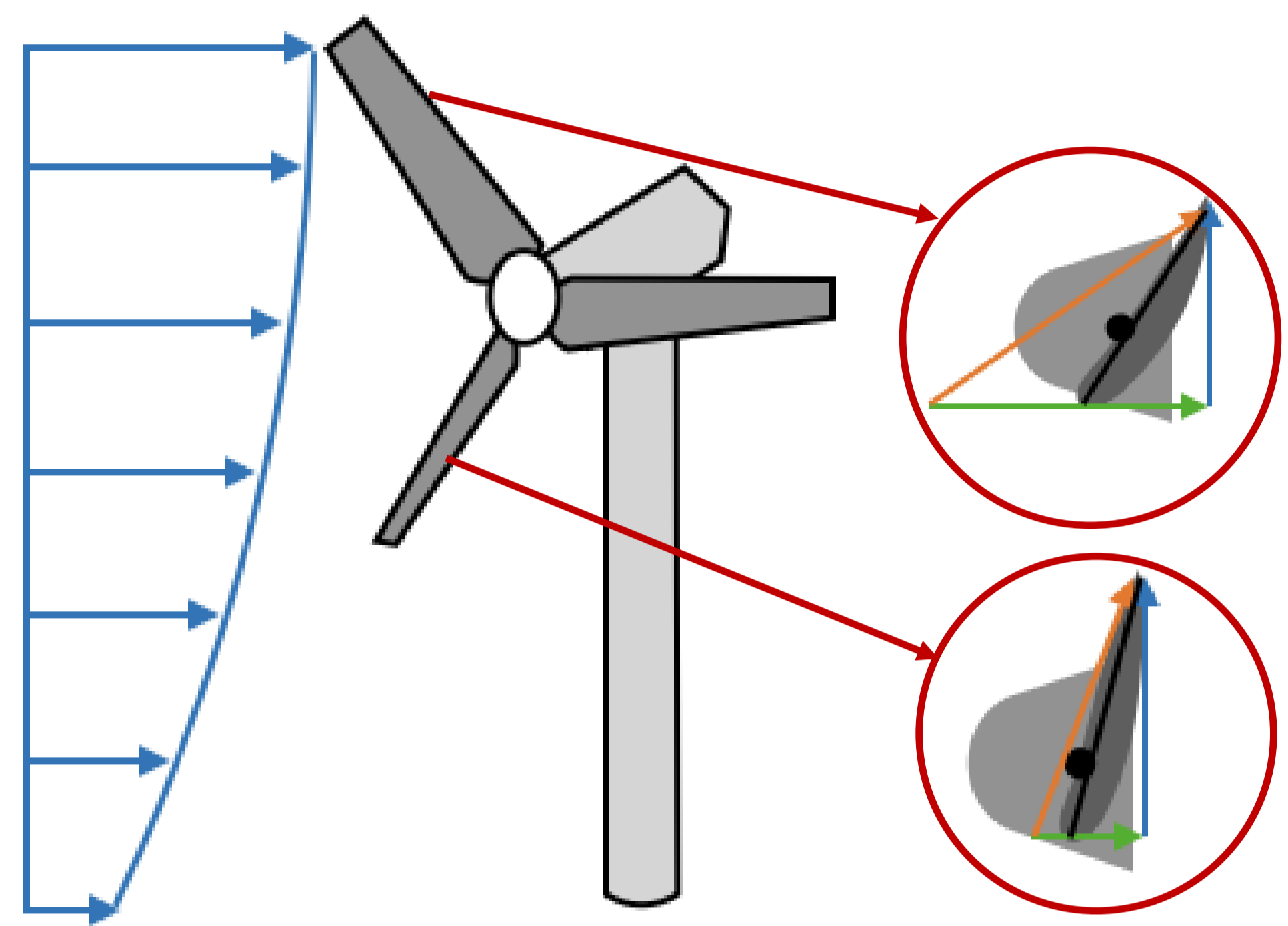


圖十二 測量發電機效率圖

- 目前大型風力發電機是利用發電機上的風速計偵測風速，並利用程式計算出理想螺距，再利用伺服馬達與齒輪調控葉片螺距。但因旋轉面的直徑很大，會因為風梯度(wind gradient)的影響，導致葉片從上方轉至下方時的風速不一樣，但偵測器卻無法測得，造成功率下降與噪音。本實驗所製作的被動式可變螺距可隨著風速的大小，被動調控螺距角，可減少不必要的躁音與功率的下降。因為利用風速計偵測風速再利用伺服馬達主動調整螺距的成本很高，所以僅在中大型發電機才有此可變螺距系統，現今的小型風力發電機僅有最大功率追蹤系統而已。然而，如果使用的是被動式可調螺距，不但可以降低成本，也可以減少機械故障的機會



圖十三 大中小型風力發電機



圖十四 風梯度示意圖

- 可變螺距轉動時螺距角接近0度，但合成風的角度卻為10幾度，導致攻角不為理想的最佳攻角7到8度，是因為轉動時所產生的渦流(wake)的影響。造成合成風的角度不是我們所計算出的值，要經過修正，所以實際的合成風角度會比原來的來得小。

可變螺距葉片啟動後，由下列三種風速與實驗渦輪葉片轉速計算得到夾角如下。

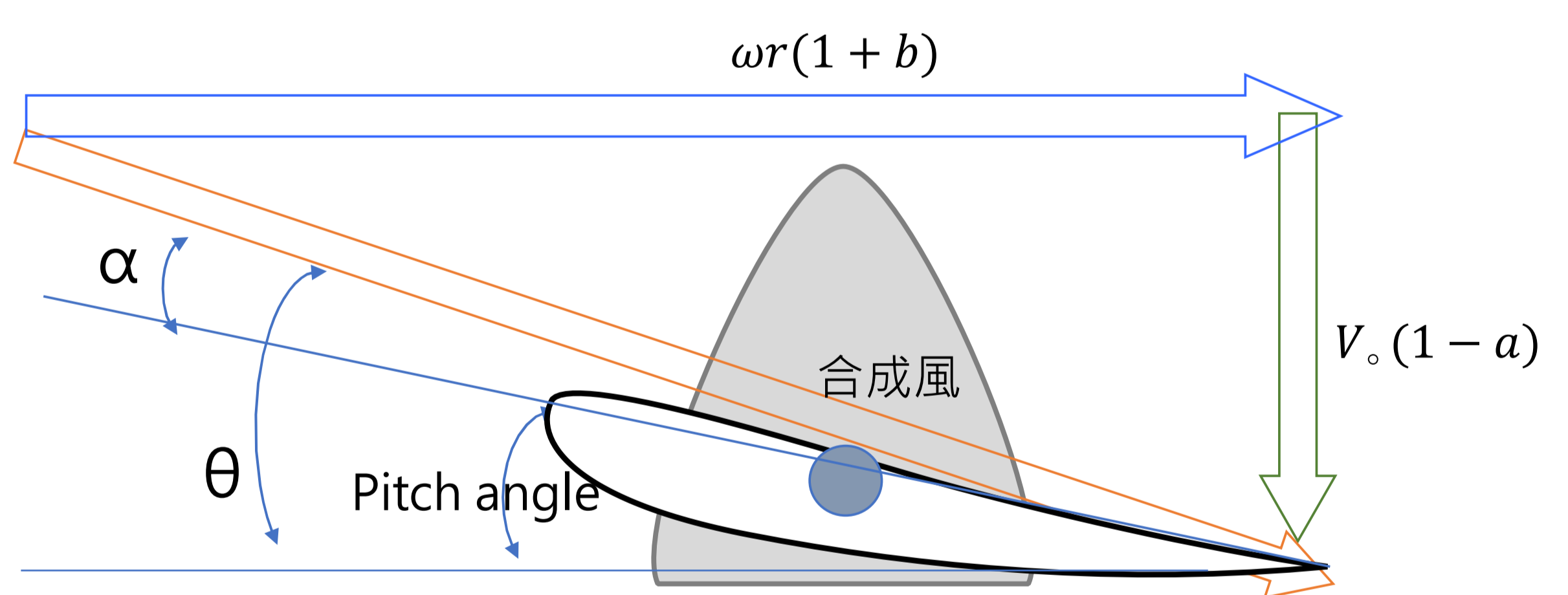
$$\tan \theta = \frac{3.5}{2 \times \pi \times 0.13 \times 74.3 \times \frac{1}{6}} = \tan 19.1$$

$$\tan \theta = \frac{4.25}{2 \times \pi \times 0.13 \times 98.5 \times \frac{1}{6}} = \tan 17.6$$

$$\tan \theta = \frac{5.12}{2 \times \pi \times 0.13 \times 125.4 \times \frac{1}{6}} = \tan 16.7$$

$$\tan \theta = \frac{V_o (1-a)}{\omega r (1+b)}$$

以上為修正公式：a、b分別為修正的角度。



圖十五 葉片受力圖

結論

- 調整至適當的電阻有最大功率。當電阻變大時，電流變小，轉速提升，電壓也提升，功率隨之增加，但持續增加電阻，轉速無法持續提升，反而造成電流減少，功率降低。
- 可變螺距的功率都大於固定螺距，特別在低風速與高風速的功率大幅大於固定螺距，風速3.50m/s為188%倍，風速4.25m/s為135%倍，風速5.12m/s為150%倍。
- 固定螺距的啟動風速需3.23m/s，可變螺距的啟動風速僅需2.92m/s，從啟動到最大功率固定螺距需5.0s，可變螺距僅需3.5s，說明可變螺距適合快速變動及低風速的風場。
- 總功率係數 = 發電機轉換效率 × 葉片功率係數，由貝茲定律理論最佳功率係數為0.59，本實驗得到，當周速比為3時而可變螺距葉片的最佳 C_p 值為0.38，定螺距葉片的最佳 C_p 值僅為0.27，此外可變螺距可運作的周速比範圍較固定螺距大，也就是在不同轉速下皆有很大的發電效率。

參考資料

- Glenn Research Center · (2014) · Aerodynamic Center-ac · NASA
- N.C.K. Pawsey · (2002) · DEVELOPMENT AND EVALUATION OF PASSIVE VARIABLE-PITCH VERTICAL AXIS WIND TURBINES School of Mechanical and Manufacturing Engineering · The University of New South Wales.
- Yaşar Demirel · (2002) · [Nonequilibrium Thermodynamics](#) · Science Direct
- Jui-Fang Tsai, Hsien-Kuo Chang, Jin-Cheng Liou, and Lian-Sheng Ho · (2016) · Onshore and Offshore Wind Speed Distribution at the Western Waters in Taiwan · International Journal of Environment Science and Development