

中華民國第 55 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高中組 生活與應用科學科

040801

風神有『雙』—『二倍風』

學校名稱：桃園市私立新興高級中學

作者： 高二 黃承閔 高二 黃文亮 高二 黃御宸	指導老師： 劉亞浚
---	------------------

關鍵詞：電風扇、扇葉形狀、效能化

摘要

本實驗主要目的為改變風扇扇葉形狀以達輸出風動能功率為原扇葉 2 倍以上。參考前人實驗方法並求得扇葉於某一特定轉速範圍可使電能消耗於電流熱效應之比例達最小，主題一成功驗證此最佳轉速範圍正確性。

主題二共設計 28 種不同形狀的扇葉，發現在最佳轉速範圍內可量得『不對稱扇葉』較『對稱扇葉』輸出風力佳，且等比例縮放月形扇葉後，得一特定面積使其『於最佳轉速範圍內微調即可達到最佳風力』，此法求得之扇葉即為兼顧最佳形狀及面積之扇葉，且實驗上量得輸出風動能功率約原扇葉 2.1 倍。

由於風扇輸出之風力為亂流狀態，故於主題三設計風罩使自行設計之最佳扇葉較裝置原風罩時風力更集中，因而增大風力吹拂範圍。

壹、實驗動機

高一某堂實驗課時曾聽老師說過以前曾帶過一組學生研究電風扇馬達的轉速，當達到特定轉速範圍的時候馬達消耗在電流熱效應的比例即會達到最小比例，而且更有趣的是市售電風扇扇葉運轉時的轉速也一如學長所測得的轉速範圍。

我們便討論，若能設計出一款不同的扇葉且同樣控制轉速於此最佳轉速範圍內時，是否能夠讓電能轉換成風力的效能更高？於是在好奇心的驅使下，便展開此次的科展之旅。

貳、研究目的

主題一：驗證『最佳轉速範圍內使熱效應佔電能比例最低』之實驗再現性。

主題二：討論扇葉在不同面積、圓心角、形狀下對於風力輸出功率與能源效益比之影響。

主題三：討論自製扇葉與原扇葉在加裝自製風罩與原風罩後的風力所及範圍比較。

參、研究器材與設備

一、研究器材與設備

名稱	數量	名稱	數量
自製風罩	1 個	千斤頂	1 台
電風扇	2 臺	六角板手	2 支
自製風扇轉頭	1 個	螺絲起子	1 把
自製扇葉（每組四片）	28 組	扳手	1 把
自耦變壓器	1 臺	剪刀、美工刀	各 1 把
三用電表	2 臺	電鑽	1 臺
風速計	1 臺	光電計時器	1 臺
螺絲	數個	鱷魚夾	數條

表 3-1 研究設備器材表

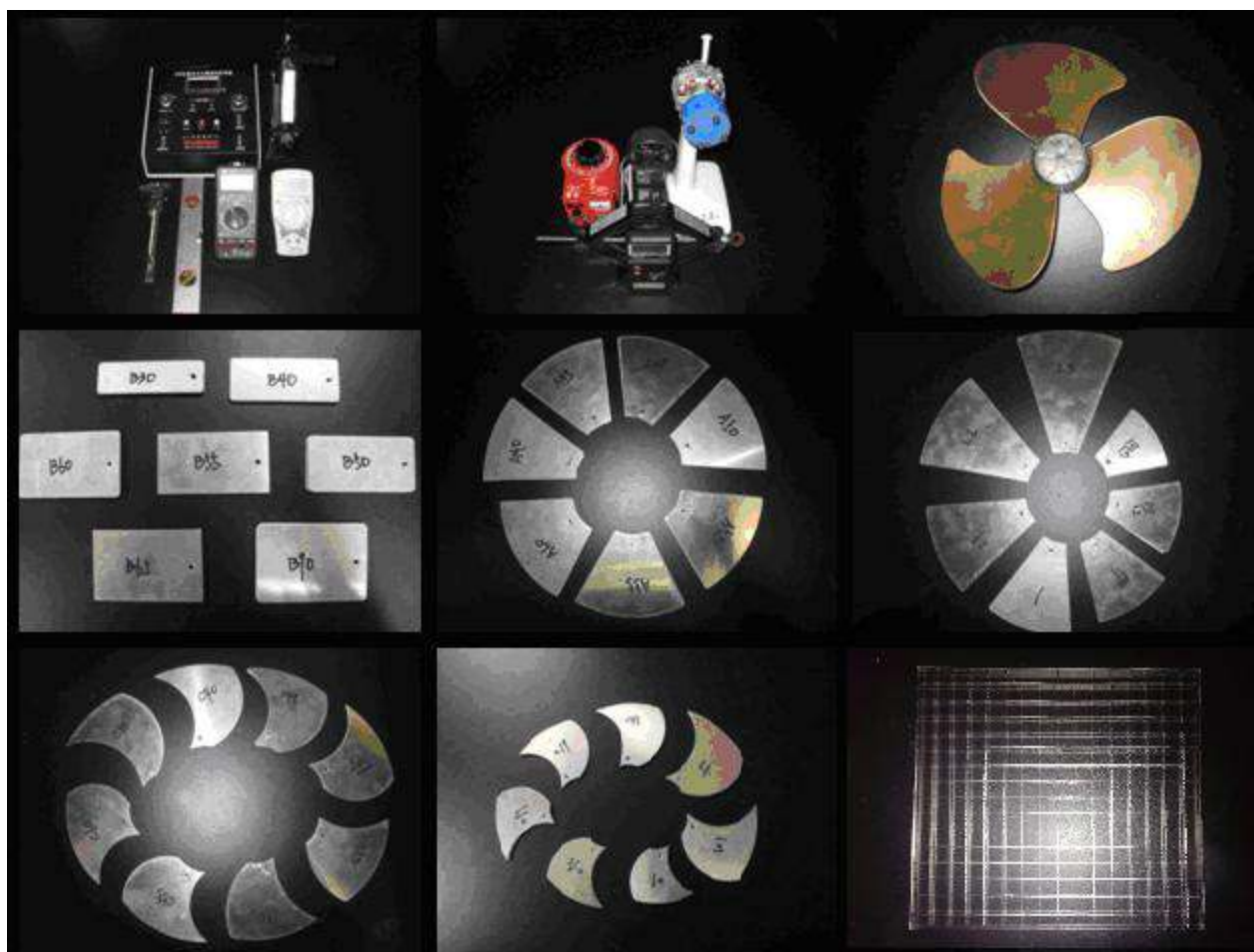


圖 3-1 研究設備器材

二、實驗測量方法說明

(一) 測量轉速：

目的：以 0° 偏轉角之塑膠薄片進行實驗，找出最佳轉速範圍。並檢驗扇葉在某一特定偏轉角下，是否符合最佳轉速範圍。

方法：如圖 3-2-1、3-2-2 所示。圖 3-2-1 中，採用偏轉角為 0° 的塑膠薄片(使得風阻可忽略不計)，以變壓器改變電壓，再利用光電計時器找出該電壓下四極馬達的轉速值。而自製扇葉亦需利用光電計時器檢驗是否達到最佳轉速值。



圖 3-2-1 塑膠薄片測量示意圖



圖 3-2-2 自製扇葉測量示意圖

原因：若扇葉偏轉角改變，扇葉所受風阻亦會隨之改變，故可藉由調整扇葉偏轉角改變扇葉轉速，以達最佳轉速。

(二) 測量風扇向前輸出風動能之功率及出風張角

目的：運用自製的扇葉，探討其在不同的圓心角、形狀及面積等變因對風力輸出與能源使用效益比的影響。

方法：如圖 3-2-3 所示，藉調整偏轉角使轉子在 110V 達到主題(一)所求出的最佳轉速，並在風扇轉子中心點前方 10cm 處，平行電風扇前緣黏貼一段膠帶，在此膠帶上每 2.4cm 為單位取 11 個點，而後再分別以每兩點為一單位標示為 A、B、C、D、E。利用風速計於 A、B、C、D、E 測量其風力，每點取 20 次數據計算平均值，再以公式計算該扇葉風動能。

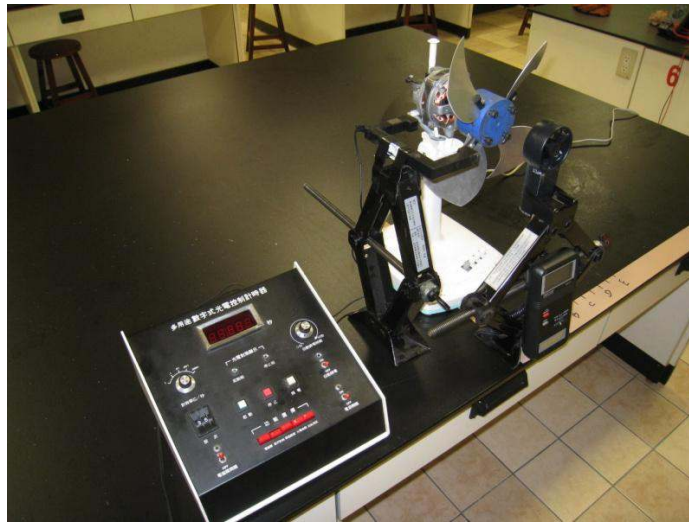


圖 3-2-3 風動能測量裝置示意圖

(三) 測量出風張角

目的：設計出一風罩使自製扇葉之出風張角與原扇葉相同。

方法：利用前述中測量向前輸出風動能所標示的刻度，調整風速計位置，使風速計之扇葉於某一特定位置上，恰能產生些微晃動，則該位置即為該組自製扇葉風力輸出範圍的極值。再利用反正切函數($\text{ATAN}\theta$)將此值轉換為該自製扇葉出風張角。實驗裝置圖如下圖 3-3-1 所示

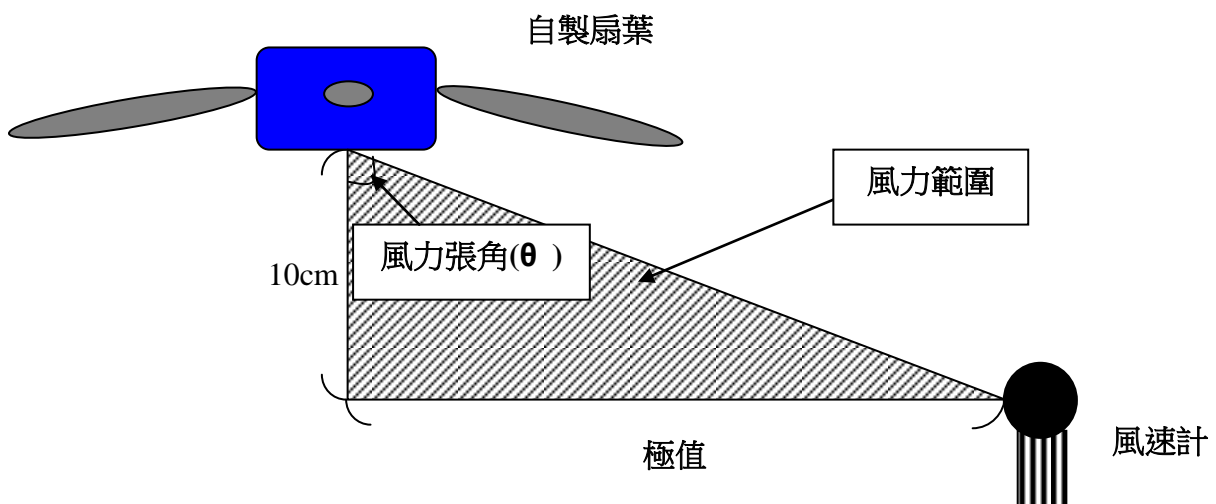


圖 3-3-1 出風張角測量裝置示意圖

肆、研究過程或方法

一、研究方法

(一) 主題一研究方法

參見參考文獻【一】，可得知實驗採用的四極馬達轉速上限為 30 轉/秒，而電源輸入電能後有部分比例能量消耗於電流熱效應，其中可分為轉子處渦電流之熱消耗及線圈處之熱消耗。文獻中提及四極馬達風扇具有最佳轉速範圍，可使熱消耗占電源輸入電能比例為最小，主題一實驗目的為呈現前人實驗之『再現性』。

(二) 主題二研究方法

本實驗設計 28 組扇葉，改變扇葉偏轉角，扇葉轉速便會隨之改變 (偏轉角設定示意圖見圖 4-1-1 及圖 4-1-2)。且每組扇葉均會因扇葉形狀及面積的不同，令每組扇葉會有不同偏轉角可使扇葉轉速符合最佳轉速範圍。因上述差異而造成向前輸出風動能功率有所不同，故主題二有兩個主要的課題分別為：

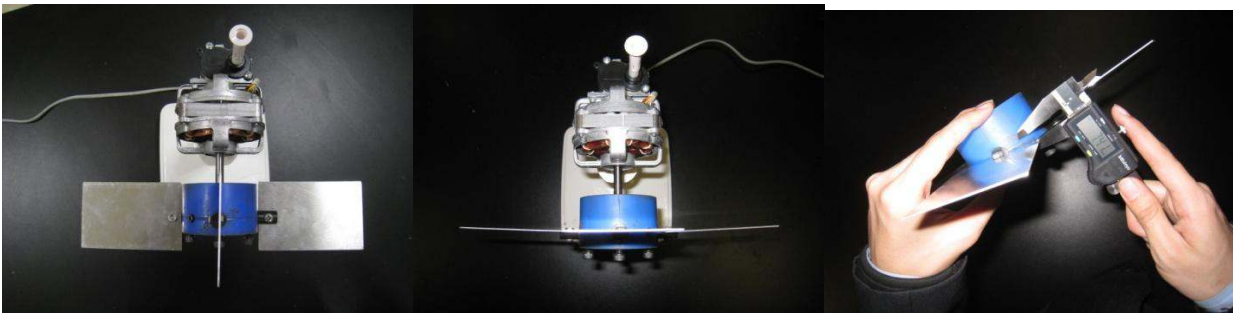


圖 4-1-1 扇葉偏轉角 90° 示意圖

圖 4-1-2 扇葉偏轉角 0° 示意圖

圖 4-1-3 偏轉角調整示意圖

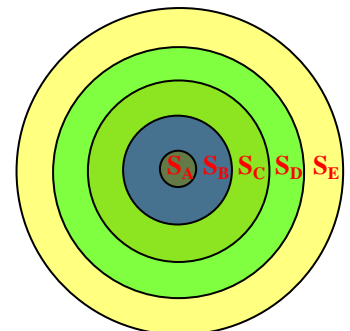
1. 設計測量輸出風力系統

風速計距離扇葉旋轉中心為 10 cm (見圖 4-1-4 所示)，將風力範圍分成 A、B、C、D、E 五個定點，每區域相隔 4.8 cm (如圖 4-1-5 所示)。

若擺設在 B 點之風速計測得風速為 v_B ，如右下圖所示藍色區域面積為 S_B ，因風力輸出為對稱圖形故每秒吹過此區域之空氣質量 $\frac{\Delta m}{\Delta t} = \rho v_B S_B$ ，則 S_B 面積內輸出向前風動能之功率

$$P_B = \frac{1}{2} \frac{\Delta m v_B^2}{\Delta t} = \frac{1}{2} \rho v_B^3 S_B$$

注： ρ 為空氣密度，其值為 1.293 kg/m^3



同理，若某次測量於五個定點測得風速計之讀數分別為 v_A 、 v_B 、 v_C 、 v_D 、 v_E

則此次扇葉輸出向前風動能總功率可以下式表示：

$$P_E = P_A + P_B + P_C + P_D + P_E = \frac{1}{2} \rho (v_A^3 S_A + v_B^3 S_B + v_C^3 S_C + v_D^3 S_D + v_E^3 S_E) \cdots \cdots (\text{式 4-1})$$

實驗中：

$$S_A = 18.10\text{cm}^2、S_B = 144.76\text{cm}^2、S_C = 289.53\text{cm}^2、S_D = 434.29\text{cm}^2、S_E = 579.06\text{cm}^2$$

故欲求得扇葉向前輸出風動能功率只需量得A、B、C、D、E五點風速計讀數，然後帶入(式 4-1)，即可求得此風扇所造成的氣體向前輸出風動能之功率(P_E)。

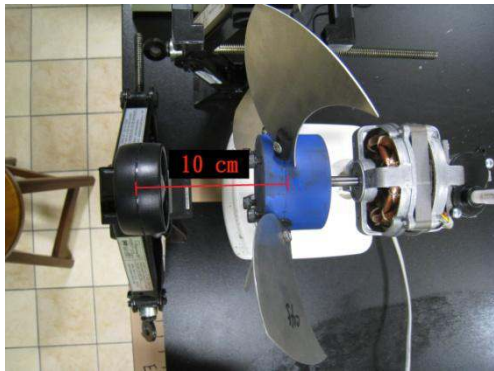


圖 4-1-4 風動能測量裝置俯視圖

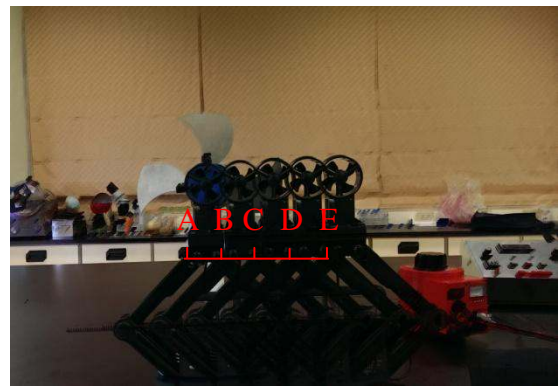
















圖 4-1-5 風動能測量裝置正視圖

2. 設計不同形狀及面積之扇葉

(1) 面積不同形狀相同：

扇葉種類及實體圖(圖例中直尺皆為 15 cm)	扇 1.1 : 	扇 1.2 : 	扇 1.3 : 	扇 40 : 	扇 0.91 : 
說明(內徑皆為 3.7cm)	面積：72.3cm ² 外徑：15.0cm	面積：86.0cm ² 外徑：16.3cm	面積：101.0cm ² 外徑：17.7 cm	面積：59.7cm ² 外徑：13.6cm	面積：49.4cm ² 外徑：12.4cm
扇葉種類及實體圖(圖例中直尺皆為 15 cm)	扇 0.83 : 	扇 0.77 : 	月 1.1 : 	月 1.05 : 	月 45 : 
說明(內徑皆為 3.7cm)	面積：41.5cm ² 外徑：11.4 cm	面積：35.3cm ² 外徑：10.5cm	面積：72.5cm ² 外徑：12.15cm 側徑：13.2cm	面積：66.1cm ² 外徑：13.55cm 側徑：12.6cm	面積：59.9cm ² 外徑：12.85cm 側徑：9.15cm
扇葉種類及實體圖(圖例中直尺皆為 15 cm)	月 0.99 : 	月 0.97 : 	月 0.95 : 	月 0.91 : 	
說明(內徑皆為 3.7cm)	面積：58.7cm ² 外徑：12.52cm 側徑：11.7cm	面積：56.4cm ² 外徑：12.25cm 側徑：11.5cm	面積：54.1cm ² 外徑：11.7cm 側徑：10.98cm	面積：49.6cm ² 外徑：10.3cm 側徑：10.06cm	

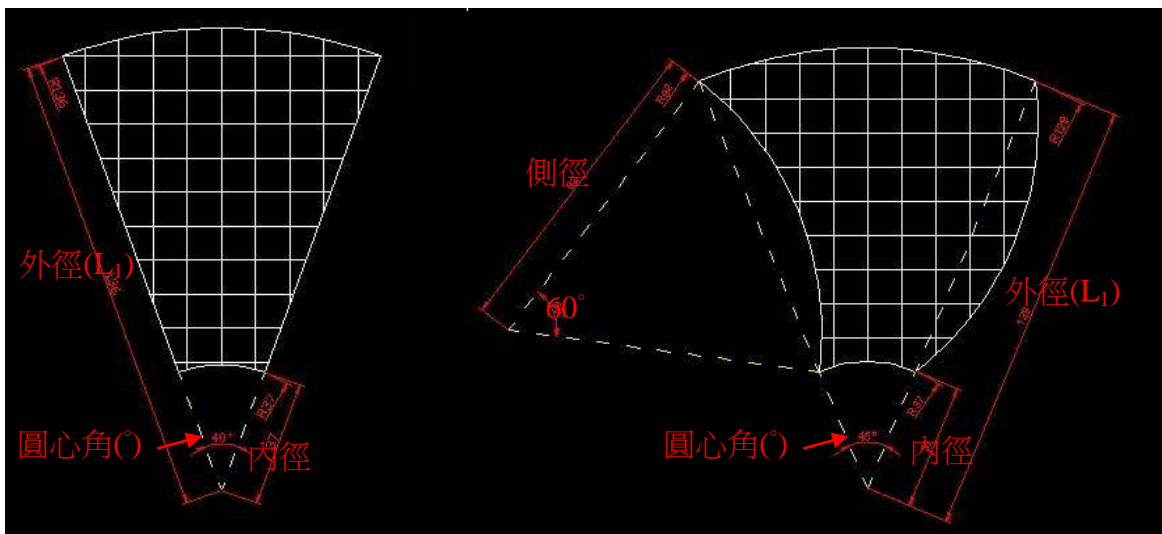
(2) 面積相同形狀不同：

扇葉種類及實體圖(圖例中直尺皆為 15 cm)	扇 35： 	扇 40： 	扇 45： 	扇 48： 	扇 50： 
說明(內徑皆為 3.7cm)	面積：60.0cm ² 外徑：14.5cm	面積：59.7cm ² 外徑：13.6cm	面積：59.9cm ² 外徑：12.9cm	面積：59.7cm ² 外徑：12.5cm	面積：60.0cm ² 外徑：12.3cm
扇葉種類及實體圖(圖例中直尺皆為 15 cm)	扇 53： 	扇 55： 	扇 60： 	月 35： 	月 40： 
說明(內徑皆為 3.7cm)	面積：60.2cm ² 外徑：12.0cm	面積：60.2cm ² 外徑：11.8cm	面積：59.6cm ² 外徑：11.3cm	面積：60.0cm ² 外徑：14.5cm 側徑：10.8cm	面積：59.7cm ² 外徑：13.6cm 側徑：9.9cm
扇葉種類及實體圖(圖例中直尺皆為 15 cm)	月 45： 	月 48： 	月 50： 	月 53： 	月 55： 
說明(內徑皆為 3.7cm)	面積：59.9cm ² 外徑：12.9cm 側徑：9.2cm	面積：59.7cm ² 外徑：12.5cm 側徑：8.8cm	面積：60.0cm ² 外徑：12.3cm 側徑：8.6cm	面積：60.2cm ² 外徑：12.0cm 側徑：8.3cm	面積：60.2cm ² 外徑：11.8cm 側徑：8.1cm
扇葉種類及實體圖(圖例中直尺皆為 15 cm)	月 60： 				
說明(內徑皆為 3.7cm)	面積：59.6cm ² 外徑：11.3cm 側徑：7.6cm				

(3) 實驗中不同形狀扇葉設定之說明：

扇形面積相同， θ 不同	扇 35、扇 40、扇 45、扇 48、扇 50、扇 53、扇 55、扇 60。	說明：面積均為 60cm^2 ，扇 35 即 θ 為 35° 。
扇形 θ 相同，面積不同	扇 1.3、扇 1.2、扇 1.1、扇 40、扇 0.91、扇 0.83、扇 0.77	說明：圓心角均 40° ，扇 1.1 邊長為扇 40 的 1.1 倍。
月形面積相同， θ 不同	月 35、月 40、月 45、月 48、月 50、月 53、月 55、月 60。	說明：面積均為 60cm^2 ，月 35 即 θ 為 35° 。
月形 θ 相同，面積不同	月 1.1、月 1.05、月 45、月 0.99、月 0.97、月 0.95、月 0.91	說明：圓心角均 45° ，月 1.1 即邊長為月 45 的 1.1 倍。
面積相同的扇形、月形	共三組：(扇 1.1；月 1.1)、(扇 40；月 45)、(扇 0.91；月 0.91)	

下圖為本實驗中扇形及月形兩種扇葉的差異，特徵長度： L_1 ，為扇形之半徑(即圖中之外徑)，設計等比例放大面積扇葉時，此特徵長度亦等比例改變。



扇形、月形扇葉說明圖

(三) 主題三研究方法

測量向前輸出風動能的實驗中，可同時測量出風張角。測量裝置如圖 3-3-1 所示。

由於本實驗採用之自製扇葉葉面無內旋，故其吹出之風力流線為無秩序的亂流。為解決此情況，主題三設計一款帶有整流器概念之自製風罩，以期自製風扇風力吹拂範圍較市售扇葉寬廣。

二、實驗流程圖

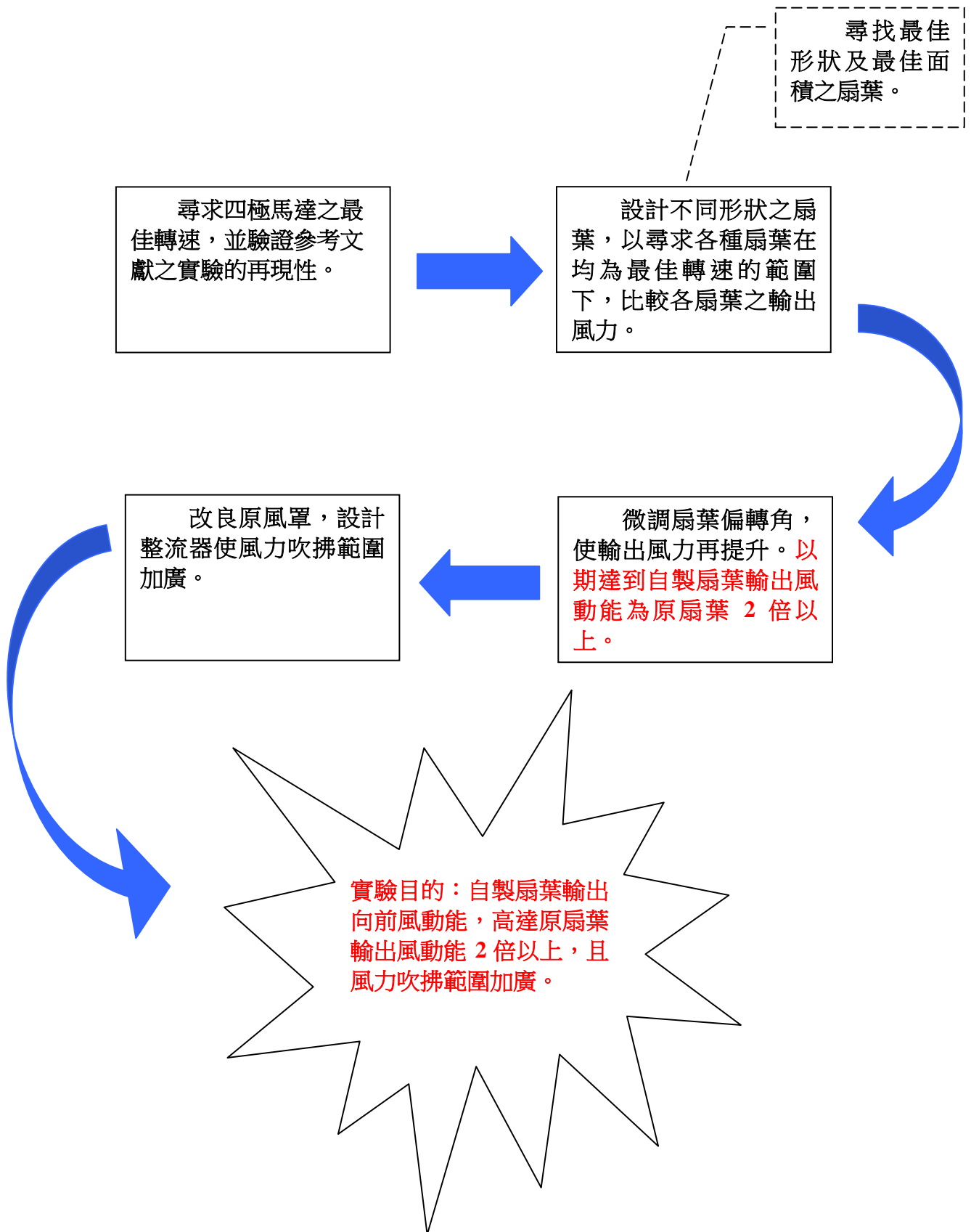


圖 4-4-1 實驗流程圖

伍、研究結果

主題一：驗證『最佳轉速範圍內使熱效應佔電能比例最低』之實驗再現性。

實驗 1-1：探討轉子與馬達線圈間互感的現象。

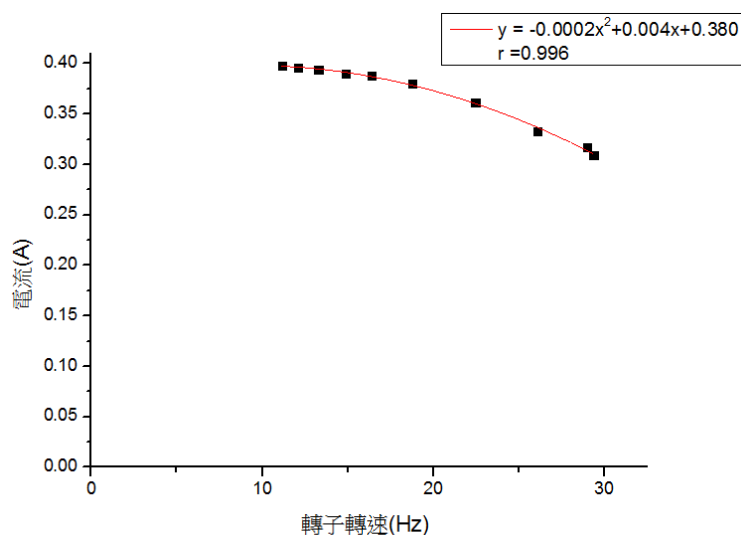
實驗目的：研究電流對扇葉轉速的關係。

控制變因：偏轉角

操作變因：交流電電壓

應變變因：電流、轉速

實驗結果圖形：



轉速(Hz)	電流(A)
29.37	0.309
29.01	0.317
26.10	0.333
22.45	0.361
18.78	0.380
16.40	0.388
14.86	0.390
13.28	0.394
12.07	0.396
11.15	0.398

圖 5-1-1 電流對轉子轉速示意圖

實驗結果分析：

由圖中可以發現轉子轉速越快則線圈的電流越小，原因見討論一。

實驗 1-2：降低電流熱效應之能量消耗。

實驗目的：利用參考文獻【一】之研究方法求得本實驗四極馬達之最佳轉速。

控制變因：扇葉偏轉角(操作方法如圖 4-1-1~4-1-3)

操作變因：交流電電壓

應變變因：電流、轉子轉速

實驗結果圖形：

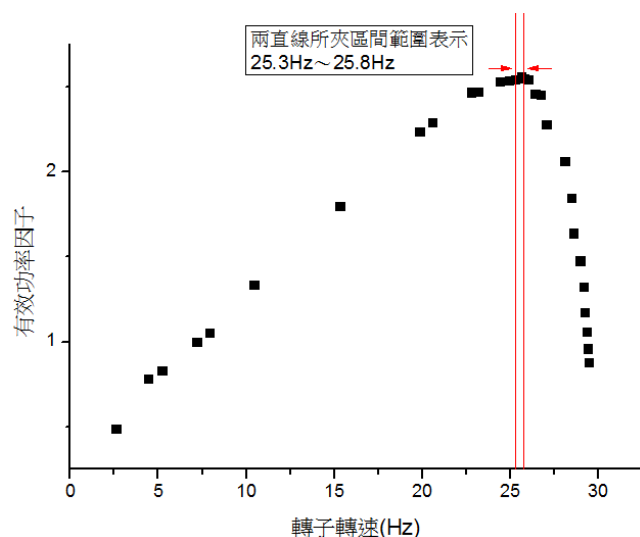


圖 5-1-2 有效功率因子(f/iV)對轉子轉速(f)關係圖

實驗結果分析：

圖中Y軸為有效輸出能量占原本電源輸入電能之比例，此一值可稱為有效功率因子，最高點處約發生在風扇轉速為 25.3Hz~25.8Hz之間，此一結果代表轉子轉速在此區間有最小比例的能量浪費在電流熱效應，此一結果與參考文獻之結果相符，呈現實驗之再現性。(原理詳見討論一)

因測量電流及電壓的工具之準確位數分別為小數點後第三位與小數點後第一位，測量轉速的光電計時器可準確至小數點後第四位。綜上所述，測量工具誤差值小於 0.5%，故在圖形中忽略誤差棒分析。

主題二：討論扇葉在不同面積、圓心角、形狀下對於風力輸出功率與能源效益比之影響。(注：可參考『P7~P8』扇葉實體圖或『P9』中扇葉形狀簡介表。)

實驗程序：

1. 每一種扇葉皆調整扇葉偏轉角，直到轉速符合主題一之最佳轉速範圍。
2. 測量每組扇葉在最佳轉速範圍內，向前輸出風動能之功率。
3. 比較不同形狀相同面積之扇葉，在最佳轉速下，向前輸出風動能功率的大小。
4. 比較不同面積相同形狀之扇葉，在最佳轉速下，向前輸出風動能功率的大小。
5. 同系列扇葉中選得向前輸出風動能最佳者，進行『微調』工作使向前輸出風動能再提升。

(注：微調之意義見討論四)

實驗目的：經實驗測得『原扇葉』向前輸出風動能功率為『3.18(W)』，主題二之目的為設計最佳形狀扇葉以期向前輸出風動能功率達到『6.36(W)』以上。

實驗 2-1：比較『不同圓心角扇葉』未進行微調前，最佳轉速範圍內向前輸出風動能功率。

實驗目的：改變扇葉偏轉角使轉速落在 25.3Hz~25.8Hz區間，測量並比較『等面積之各種不同圓心角之扇葉』所能輸出最佳向前風動能功率。

控制變因：輸入交流電電壓、各組扇葉之扇葉面積(面積控制於 59.6cm²~60.2cm²，詳細參見『P7』自製扇葉簡介表)、扇葉偏轉角

操作變因：『扇形扇葉』與『月形扇葉』之圓心角、扇葉轉速

應變變因：向前輸出風動能功率

實驗結果圖形：

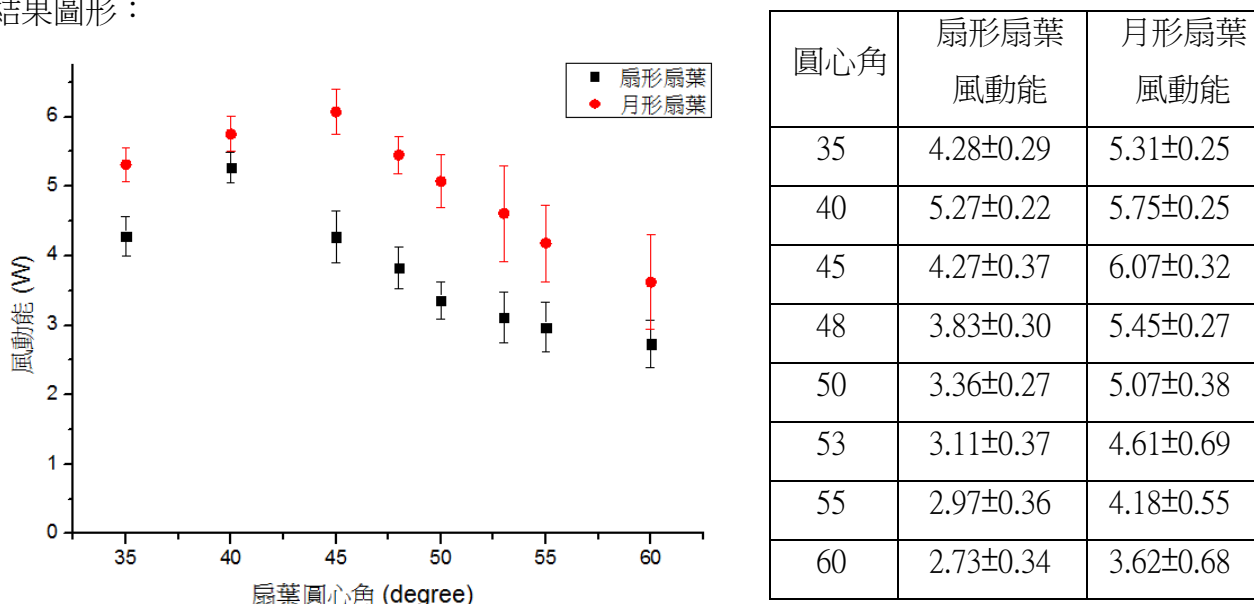


圖 5-2-1 等面積之扇形及月形扇葉各圓心角輸出風動能比較圖(未微調前)

實驗結果分析：

在未微調前，等面積之扇形及月形扇葉各圓心角向前輸出風動能功率關係圖如圖 5-2-1，可以發現等面積不等圓心角之『扇形扇葉』在轉速為最佳轉速區間內，圓心角為 40°時風動能輸出功率可比其他圓心角之『扇形扇葉』強，且測得向前風動能功率最大值範圍為 5.05(W)~5.49(W)。

此外，觀察圖 5-2-1 可見，當相同面積不同圓心角之『月形扇葉』的轉速處於最佳轉速範圍內時，發現圓心角為 45°時向前輸出風動能之功率可比其他圓心角的『月形扇葉』強，最大值範圍為 5.75(W)~6.39(W)。

此外觀察圖 5-2-1 可以發現，『形狀不對稱之月形扇葉』於各圓心角風力輸出皆會大於『形狀對稱之扇形扇葉』，可見不對稱的扇葉設計之風力輸出效能優於對稱的扇葉設計。(形狀對向前輸出風動能之影響詳見討論三)

實驗 2-2：比較『相同圓心角不同面積之扇葉』尚未進行微調前，在最佳轉速範圍內向前輸出風動能功率。

實驗目的：改變扇葉之偏轉角使轉速落在 25.3Hz~25.8Hz 區間，測量並比較『各組等圓心角不等面積之扇葉』所能輸出最佳向前風動能功率。

控制變因：扇葉圓心角(扇形扇葉之圓心角固定為 40°；月形扇葉之圓心角固定為 45°)、扇葉偏轉角

操作變因：扇葉面積、扇葉轉速

應變變因：向前輸出風動能功率

實驗結果圖形：

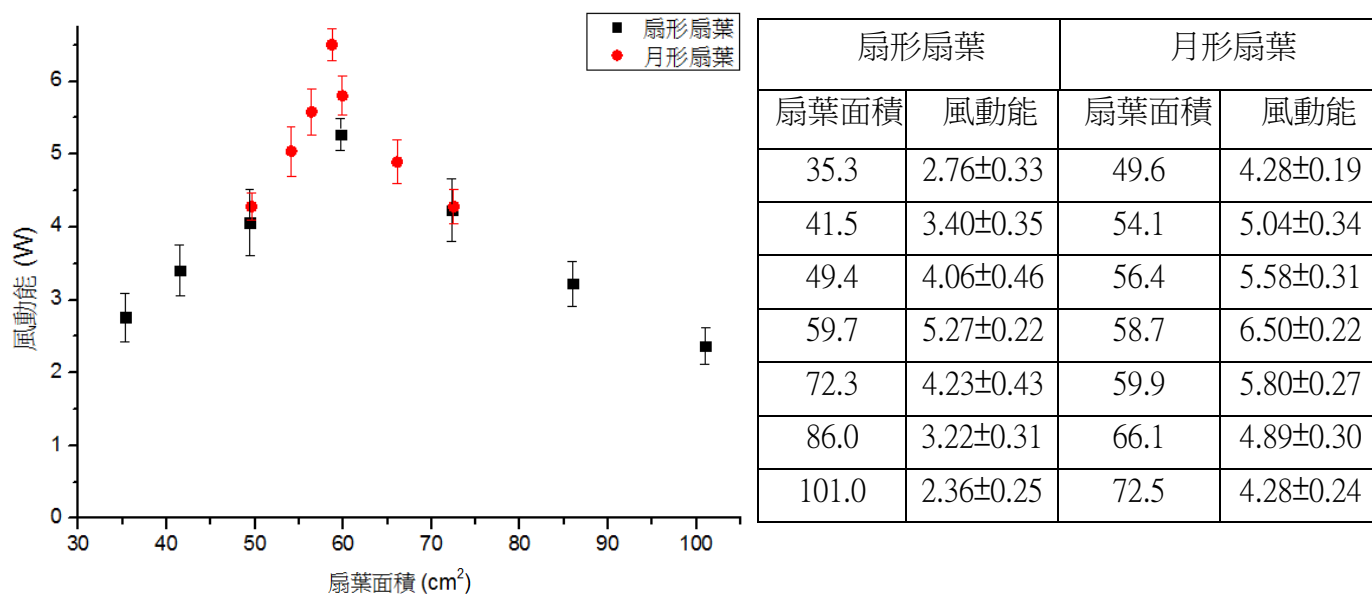


圖 5-2-2 最佳圓心角之扇形、月形扇葉經等比例縮放面積對向前輸出風動能比較圖(未微調前)

實驗結果分析：

以相同圓心角不同面積之扇葉不經微調進行實驗，測得數據可繪製如圖 5-2-2。

圖 5-2-2 中可發現，即使經等比例縮放，扇 40 依舊是等比例縮放之扇形系列扇葉中的最佳扇葉，其最大值範圍為 5.05(W)~5.49(W)。

而月形扇葉則不然，月 45 經等比例縮放後，當特徵長度為月 45 之 0.99 倍時之扇葉(即月 0.99)較其他面積比例的『月形扇葉』強，其最大值範圍為 6.28(W)~6.72(W)，此一結果與『扇形扇葉』不同。

此外，觀察圖 5-2-2 可發現：在任何扇葉面積比例下，月形扇葉的向前輸出風動能功率皆明顯大於扇形扇葉。此結果亦與圖 5-2-1 所得結果相符。(詳見討論三)

實驗 2-3：同系列扇葉中選取輸出風動能最佳者，進行『微調』工作使輸出風動能再提升。

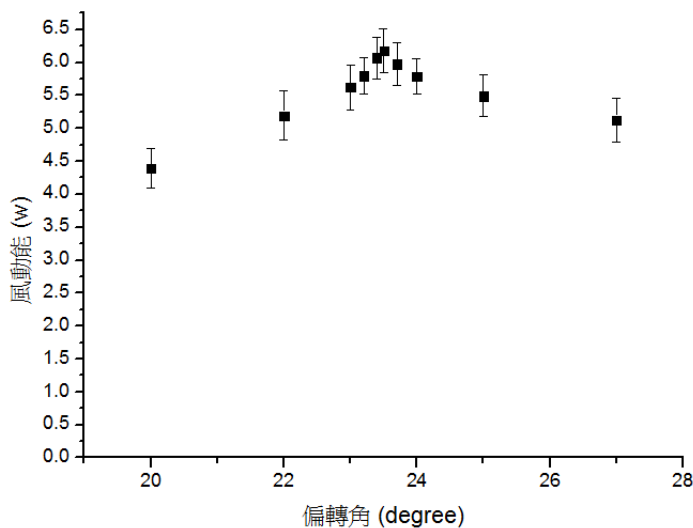
實驗目的：微調扇葉偏轉角，探討扇形扇葉微調後向前輸出風動能之變化。

控制變因：扇葉圓心角

操作變因：扇葉偏轉角、扇葉面積

應變變因：風動能、扇葉轉速

實驗 2-3-1 結果圖形：(採用扇葉：月 45)



偏轉角	風動能
20	4.39±0.30
22	5.19±0.37
22.9	5.62±0.35
23.1	5.80±0.27
23.3	6.07±0.32
23.5	6.17±0.33
23.7	5.97±0.33
24	5.78±0.27
25	5.49±0.32
27	5.12±0.33

圖 5-2-4 月 45 微調前後向前輸出風動能比較圖

實驗 2-3-1 結果分析：

由圖 5-2-4 中可以發現，月 45 的扇葉偏轉角稍經調整 0.2°後，風動能至少會產生 5%的變化量。於是便可作出一假設：若對各組扇葉之扇葉偏轉角進行『微調』這個實驗程序後，皆會有機會提高其風力輸出。故實驗 2-3 便聚焦在：對不同扇葉進行『微調』作業後，對向前輸出風動能之影響。

此外，由圖中亦可發現，當月 45 之偏轉角度為 23.5°時，會達向前輸出風動能功率之最佳值，故便可藉此最佳扇葉偏轉角預測並設計出一組最佳面積之月形扇葉，且此一扇葉設計為依照月 45 之扇葉形狀等比例縮放而成。(詳見討論四)

實驗 2-3-2 結果圖形（採用系列為：扇形扇葉等比例縮放面積）：

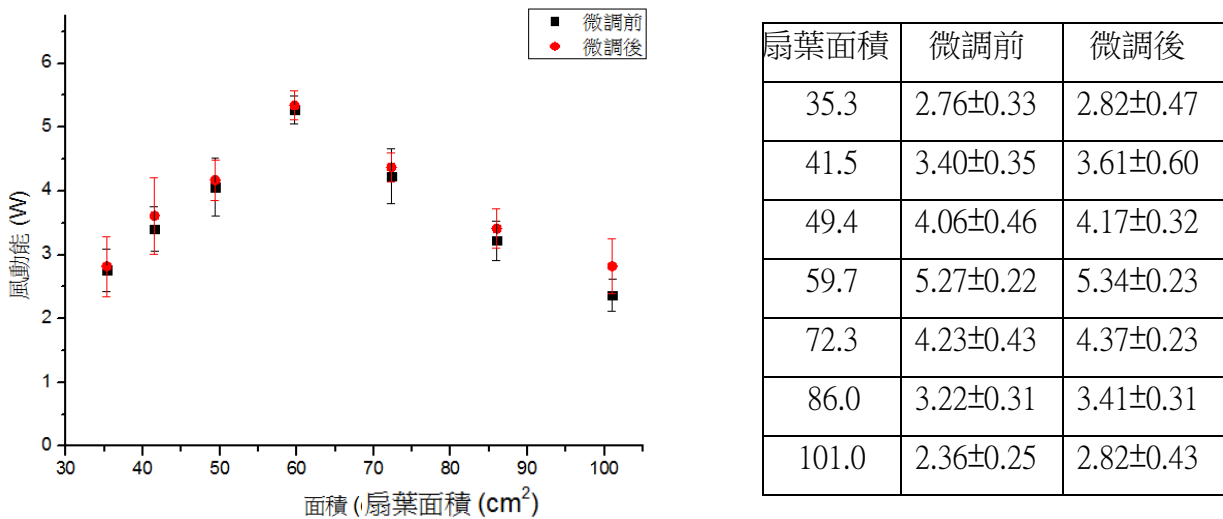


圖 5-2-5 扇葉面積比例微調前後向前輸出風動能比較圖

實驗 2-3-2 結果分析：

由圖 5-2-5 中可以發現，扇形扇葉經微調後有所提升，而扇 40 於微調後仍為此系列扇葉中向前輸出風動能功率最佳者，該組扇葉向前輸出風動能最佳值範圍更增加至 5.11(W)~5.57(W)，此結果所得向前輸出風動能功率便是所有扇形扇葉中最佳者。

實驗 2-3-3 結果圖形（採用系列為：月形扇葉等比例縮放面積）：

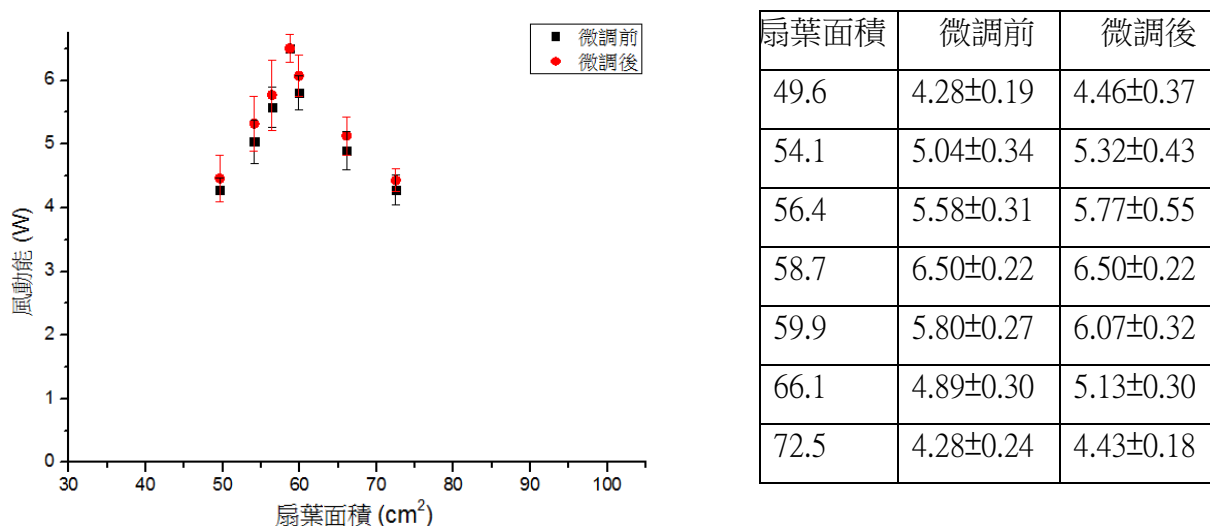


圖 5-2-6 月形扇葉面積比例微調前後向前輸出風動能比較圖

	月 0.91	月 0.95	月 0.97	月 0.99	月 45	月 1.05	月 1.1
微調前轉速	25.74★	25.64★	25.68★	25.70★	25.57★	25.65★	25.51★
微調後轉速	25.94	26.34	26.53	25.70★	25.43★	23.01	20.85

(注：轉速後含『★』標示者，表示其轉速位於最佳轉速範圍)

實驗 2-3-3 結果分析：

相同方法測量等圓心角不同面積之『月形扇葉』可得圖 5-2-6，發現『月形扇葉』之面積比例經微調後也有明顯的上升，但最高點月 0.99 之向前輸出風動能功率經微調後仍不改變。

實驗 2-3-4 結果圖形（扇 40 單獨微調）：

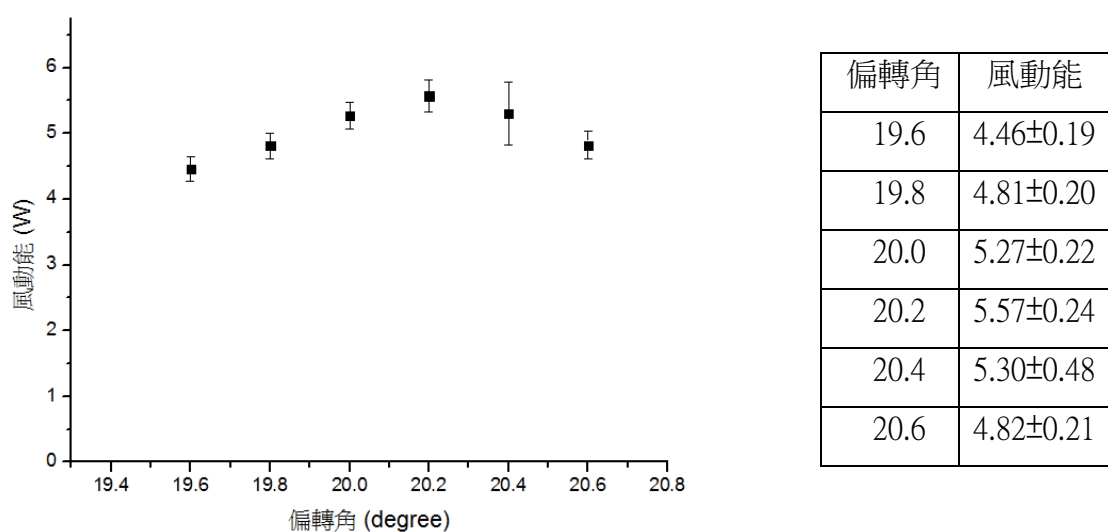


圖 5-2-7 扇 40 單獨微調各偏轉角比較圖

實驗結果分析：

由圖 5-2-7 中，可以發現扇 40 微調後，在扇葉偏轉角為 20.2°時，有最大值範圍 5.33(W)~5.81(W)。

實驗 2-3-5 結果圖形（月 0.99 單獨微調）：

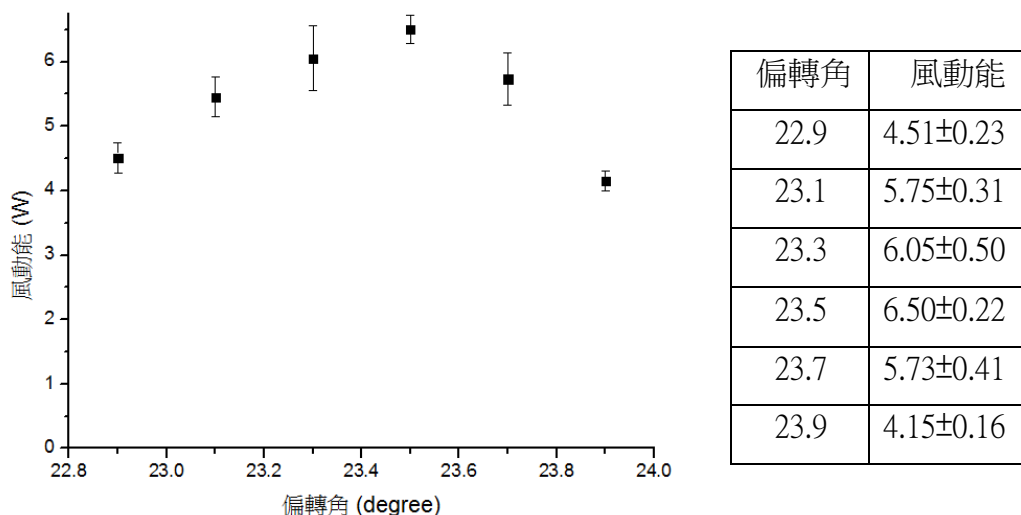


圖 5-2-8 月 0.99 單獨微調各偏轉角比較圖

實驗 2-3-5 結果分析：

由圖 5-2-8 中，可以觀察到月 0.99 在微調後，向前輸出風動能功率之最大值仍然是當該扇葉轉速處於最佳轉速範圍內時。顯示月 0.99 能以最低電流熱消耗產生最佳向前輸出風動能功率。

實驗 2-3-4 與實驗 2-3-5 統合分析：

比較扇形扇葉測量出之最佳扇葉『扇 40』與月形扇葉測量所得之最佳扇葉『月 0.99』，發現扇形系列扇葉之最佳向前輸出風動能功率仍較月形系列扇葉所得之數值低，故『月 0.99』即為主題二中所求得之最佳扇葉形狀設計。

實驗 2-3 總結：

	向前輸出風動能 (瓦)	電能轉換效益比 ($\frac{\text{向前輸出風動能}}{\text{電源電能輸入}}$)	是否符合最佳轉速
原扇葉	3.05~3.31	1.19~1.29	是
月 0.99	6.28~6.72	2.47~2.63	是

表 5-3-1 原扇葉與月 0.99 各面向比較表

由表 5-3-1 中，歸納出以下結論：

1. 自製扇葉之向前輸出風動能為原扇葉之 2.06 倍
2. 自製扇葉之電能轉換效益比 2.05 倍
3. 自製扇葉與原扇葉之轉速皆位於最佳轉速範圍內，故兩者之電流熱效應占總電能輸入比例均為最小值
4. 月 0.99 成功達成主題二目的之所求——『二倍風動能輸出功率』

主題三：討論自製扇葉與原扇葉在加裝自製風罩與原風罩後的風力所及範圍比較

主題三承接主題二實驗結果進行。

雖主題二實驗結果所得『最佳扇葉』之向前輸出風動能功率已達原扇葉兩倍以上，但最佳扇葉的出風張角與原扇葉相比卻顯得過於擴散，而無法集中。故主題三便旨在設計一風罩來收束氣流，以利有效益更高的風力運用。

(一) 自製風罩設計概念：

自製扇葉因無葉面內旋，故拍擊氣體團後，氣體團會沿扇葉外緣滑出，風力便因此而向外逸散；反之，原扇葉因葉面內旋故風力會向扇葉中心集中。為求有效收束逸散的氣體團，故主題三採用整流器的概念設計風罩。(整流器對輸出風力影響參見討論五)

(二) 自製風罩與原風罩比較

1. 比較自製風罩與原風罩比較之目的有二：

- (1) 因觀察到原風罩亦採用網格狀設計，與自製風罩有相同之處，故比較自製風罩對風力輸出影響程度能否高於原風罩
- (2) 為比較『完全根據實驗而設計出的自製扇葉配合自製風罩』與『市售的原扇葉配合原風罩』兩者之優劣，於是進行自製風罩與原風罩之比較

2. 自製扇葉與原扇葉加裝自製風罩與原風罩出風張角比較：

扇葉型號 風罩設置與否	原扇葉	自製扇葉(月 0.99)
加裝原風罩之出風張角	51.6°	57.3°
加裝自製風罩後出風張角	28.2°	28.2°

表 5-3-1 自製風罩加裝前後出風張角比較表

3. 自製風罩與原風罩對風力所及範圍影響比較：

原扇葉與自製扇葉裝設原風罩及自製風罩後吹拂風力面積比較圖如下圖 5-3-1 所示：

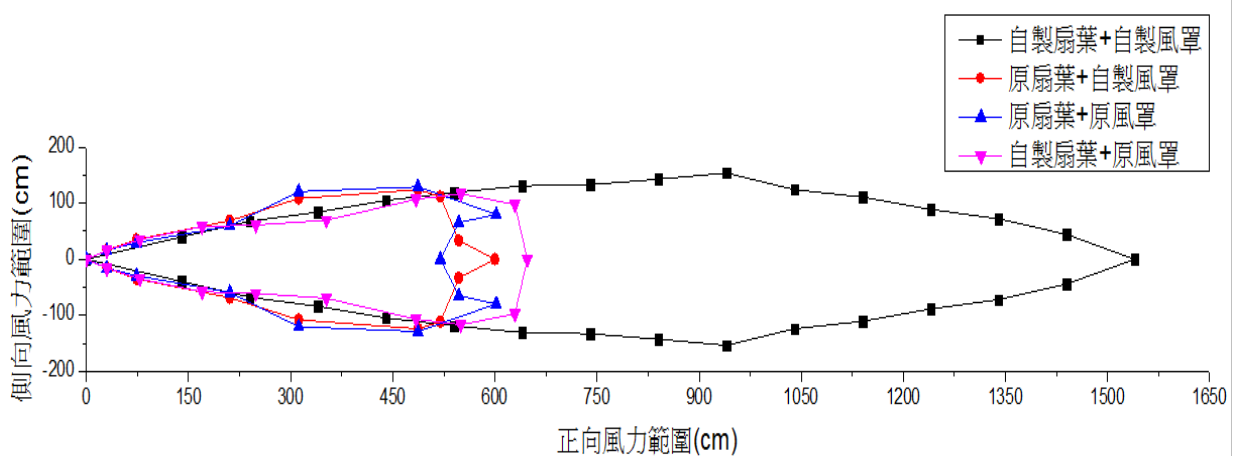


圖 5-3-1 原扇葉與自製扇葉裝設原風罩及自製風罩風力面積比較圖

風罩設置與否	扇葉型號	原扇葉	自製扇葉(月 0.99)
	加裝原風罩風力吹拂範圍		9.09 m ²
加裝自製風罩風力吹拂範圍		8.92 m ²	28.50 m ²

表 5-3-2 原扇葉與自製扇葉裝設原風罩及自製風罩風力面積比較表

實驗結果分析：

由表 5-3-1 可見，自製風罩能有效收束氣流，使得自製扇葉與原扇葉之出風張角縮至相同範圍。可見自製風罩之風力收束效果極佳。

由圖 5-3-2 可見，自製扇葉風力裝設自製風罩之吹拂範圍明顯大於原扇葉裝設原風罩之吹拂範圍。吹拂面積經計算，可得表 5-3-2。

比較後可發現風力所及範圍面積由大至小依序為：自製扇葉加自製風罩、原扇葉加原風罩、自製扇葉加原風罩、原扇葉加自製風罩。

由前述比較可發現：自製扇葉最適與自製風罩搭配，而原扇葉則最適與原風罩組合。由以上兩種最佳組合來比較，更可以發現自製扇葉配合自製風罩之風力吹拂範圍明顯大於市售電扇。

陸、討論

討論一：四極馬達在運轉的過程中，最佳轉速的意義為何？

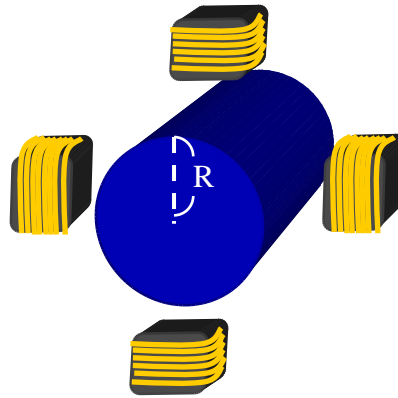


圖 6-1-1 四極馬達示意圖

主題一之操作方式，是為探討如何藉由改變轉子轉速，使得電流熱效應占電源輸入電能之比例達到最小化，在此簡略說明其實驗原理。

四極馬達示意圖如圖 6-1-1 所示，此種馬達四個極點皆為串接且相鄰極點在每一瞬間必產生反向磁力。當輸入交流電 60Hz 時，轉子表面會有渦電流產生，且此渦電流形成之磁極必符合法拉第定律，以致與其中一磁極相吸、與另一相鄰磁極相斥。由於相位的關係，轉子上某一瞬間形成的渦電流必最快在 $\frac{1}{120}$ 秒內轉 $\frac{1}{4}$ 圈，故四極馬達之極速為 30 轉/秒，若已達極速的情況下再向上增加電壓，其電能只會轉換成渦電流及線圈的電流熱效應，並不會增加轉子之轉動能而提高轉速。

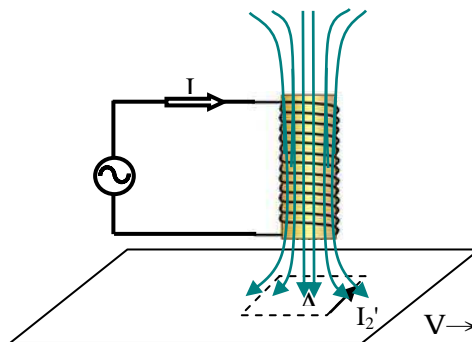


圖 6-1-2 渦電流與線圈互感示意圖

線圈和渦電流互感示意圖如上圖 6-1-2 所示，假想轉子某一極小平面以 v 之速度向右前進，則單位時間掃過磁區之面積周圍會產生渦電流並與線圈產生互感的效應，實驗 1-1 的研究結果顯示在輸入相同 110V 之交流電的情況，由圖 5-1-1 可發現：

1. 逐漸減小扇葉偏轉角，則轉速漸漸變大。
2. 轉速變大，測得線圈電流卻漸漸變小

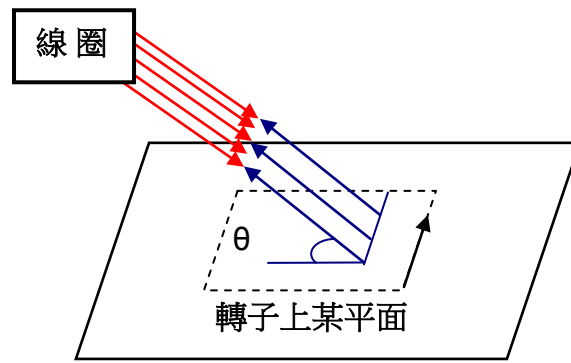


圖 6-1-3 線圈和渦電流互感方向改變示意圖

此現象成因為線圈和渦電流互感方向漸漸轉至垂直轉子表面方向，其示意圖如圖 6-1-3 所示，轉速越快則 θ 越接近 90° ，故轉速越快則互感作用越強即渦電流變強，再根據能量守恆，渦電流熱效應變大則線圈熱效應必然變小，得一結果：『轉速越快線圈電流勢必減小』，故實驗 1-1 結果符合實驗再現性。

根據實驗 1-1 的結果可以推知下列兩點：

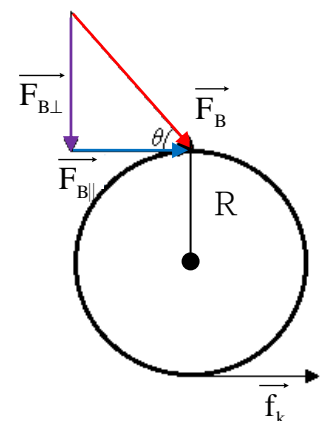
1. 轉速越快則整體線圈和渦電流互感方向越接近垂直方向，故轉子達到理想極速 30 轉/秒時磁力作用的方向為完全垂直於表面，並無增速之情況，但因磁力變化方向為垂直表面，所以此時有利渦電流增強。
2. 轉速越慢互感方向漸往水平偏移，故渦電流效應減小，但實驗 1-1 之結果顯示此時線圈電流會變大。

由上述兩點可以推知轉速越快則渦電流之熱效應越大，轉速越慢則線圈之熱效應越大，故必存在一最佳轉速可使得線圈熱效應及渦電流熱效應占總電源輸入電能之比例最小。

實驗 1-2 採用方式為取下扇葉，使得電能輸出必轉換成三種能量形式，分別為：

1. 轉子處之渦電流熱效應。
2. 線圈之電流熱效應。
3. 磁力切線力對轉子做正功。

若磁力切線力對轉子做正功達到最大，亦代表熱效應占輸入電能為最小，而轉子與軸承間之摩擦，造成動摩擦力所做負功與平均磁力切線力對轉子所做之正功抵消，使得轉子維持等速率轉動。故當『動摩擦力』等於『磁力水平分量』，此四極馬達之有效電能百分比(η)可以用下式 6-1-1 表示：



$$\eta = \frac{P_{B||}}{P_{in}} = \frac{f_k(2\pi R)}{iV} \propto \frac{f}{iV} \dots\dots\dots \text{式 6-1-1}$$

公式名詞解釋：

F_B = 四極馬達所產生的磁力、 $F_{B||}$ = 磁力的水平分量、 $F_{B\perp}$ = 磁力的垂直分量、 f_k = 動摩擦力、 f = 轉子轉速、 $P_{B||}$ = 磁力做正功、 P_{in} = 總輸入電流做功、 R = 轉子半徑

由式 6-1-1 可知，四極馬達之有效電能百分比和 $\frac{\text{轉子轉速}}{\text{電源總輸入電能}}$ 之值成正比。

實驗 1-2 測量最佳轉速的原理為上式中取有效功率因子 ($\frac{f}{iV}$) 對轉速 (f) 之關係圖，此一實驗結果如圖 5-1-2 所示，可以發現當轉速處於 25.3Hz~25.8Hz 之間會使得電流熱效應占輸入電能比例最小，此一結果與參考文獻【一】之結果相符，呈現實驗之再現性。

討論二：討論扇葉偏轉角對轉速及有效輸出風力之影響

扇葉偏轉角越大則受到較大之空氣阻力，如下圖 6-2-1 所示。故在輸入相同能量的情況下，扇葉偏轉角越大則轉速越慢，而從扇葉對空氣分子作用力之方向分析如下：

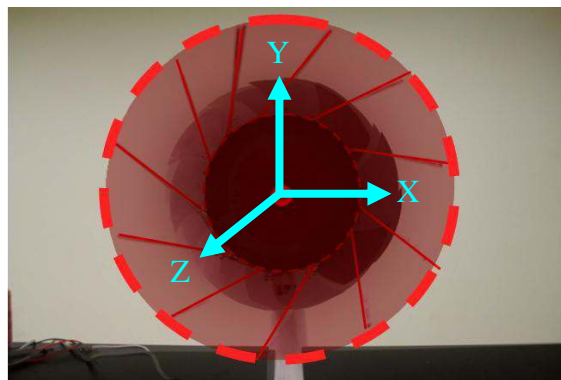


圖 6-2-1 扇葉拍打氣體團之正向力作圖

1. 扇葉對氣體團作用力的方向為一向外擴散圓錐狀，而半圓錐角($\frac{\theta}{2}$)即為扇葉偏轉角。
2. 此作用力為三維空間向量，如果扇葉偏轉角越大則圖中Y方向之作用力比例越大，然Y方向之分力對氣體團作功為壓縮氣體團，並不會形成有效風力輸出。

下表分析扇葉偏轉角取捨問題，可以推知偏轉角調大或是調小對有效輸出風動能各有利弊。

	作用氣體量	有效力做功之比例	總結
扇葉偏轉角大	作用較多氣體	較少	作用氣體量較多但有效力做功比例差
扇葉偏轉角小	作用較少氣體	較多	有效力做功比例大但作用氣體量較少

表 6-2-1 偏轉角調整利弊分析

討論三：扇葉形狀之對稱性與否對輸出風力的影響

從參考文獻【二】中扇葉對氣體分子之模擬軌跡分析而言，扇葉表面作用氣體團之力為正向力，若以力學分析氣體團在扇葉上方之軌跡並以不動座標($X' - Y'$ 座標)描述氣體團的路徑可以下式表示之：

$$X' = R_0 \cos(\omega t - \varphi) + \Delta r \cos(\omega t - \varphi)$$

$$Y' = \frac{R_0 \sin(\omega t - \varphi)}{\cos \theta} + \Delta r \sin(\omega t - \varphi)$$

符號意義：

R_0 ：座標點與轉軸之距離、 ω ：角速度、 θ ：扇葉偏轉角、 Δr ：地面上觀察水平方向之偏移量、 φ ：氣體團進入扇葉表面至與 X' 軸接觸所轉動之相位角。

由此一公式可以模擬出扇葉在各種偏轉角的情況下，氣體團由進入到離開扇葉期間於表面滑動之軌跡，以偏轉角度為 20° 、扇葉轉速為 20 轉/秒為例，圖 6-3-1 中顯示本實驗中扇形($\overline{ab} \rightarrow \overline{bc} \rightarrow \overline{cd} \rightarrow \overline{da}$)及月形($\overline{ab} \rightarrow \overline{bc} \rightarrow \overline{cd} \rightarrow \overline{da}$)兩種扇葉，滑過扇形扇葉之氣體團軌跡線為 $e_1 \rightarrow e'_1$ ；氣體團滑過月形扇葉之軌跡線為 $e_2 \rightarrow e'_2$ ，將兩條路徑之 X' 軸分析其加速度和時間的關係圖可以表式為圖 6-3-2 及圖 6-3-3，因圖形中和時間軸所為的面積為氣體團進入扇葉後沿軌跡線離開扇葉期間之『速度變化』，可以發現：

1. 氣體團在扇形扇葉表面受到正向力作用後於 X' 軸方向之速度變化比較小，而氣體團於月形扇葉上之速度變化量比較大。
2. 扇形扇葉為對稱形狀，故在氣體團在扇葉上方過程中受到正向力於 X' 軸之投影分力亦接近對稱(由公式可推知正向力方向由右偏 28° 變化左偏 31°)，導致 X' 軸之投影速度變化較小。
3. 承 2. 可推知月形扇葉因形狀為不對稱，故正向力在 X' 方向之分力亦為不對稱(由公式可推知正向力方向由右偏 15° 變化左偏 41°)，使得做功轉換成風動能之比例較高。

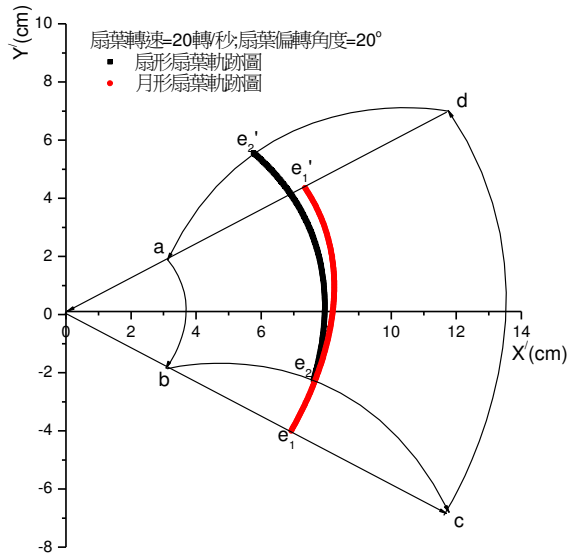


圖 6-3-1 模擬氣體團分別在扇形扇葉及月形扇葉進出表面期間之軌跡圖

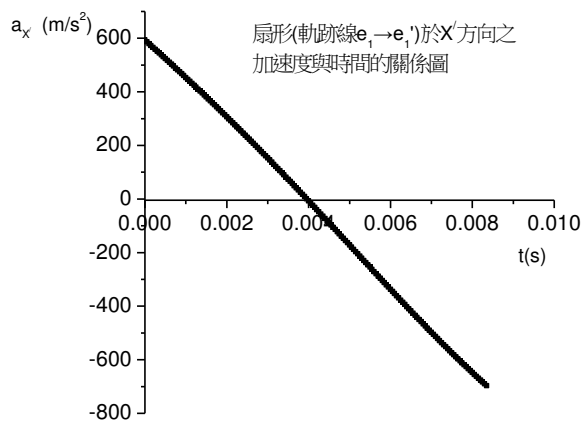


圖 6-3-2 模擬氣體團在扇形扇葉表面期間於X'軸方向之加速度與時間關係圖

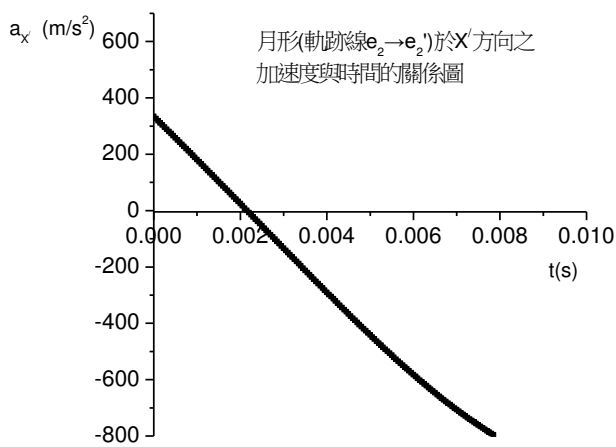


圖 6-3-3 模擬氣體團在扇形扇葉表面期間於X'軸方向之加速度與時間關係圖

討論四：『微調』之意義與說明

一、原因：

見表 6-2-1 便可知：增減扇葉偏轉角度各有利弊得失。故如何在得失間抉擇出最佳角度，使向前輸出風動能功率得以進一步提升，即為『微調』的主旨所在。

此外，由於主題一中所測量出之最佳轉速為一極小範圍(如圖 5-1-2 所示，此範圍落在 25.3Hz~25.8Hz 之間)。故亦可藉由『微調』之概念預測、並設計出一款扇葉『於最佳轉速範圍內進行微調即可達到最佳風動能』的扇葉。

二、偏轉角控制極限：

實驗中，偏轉角調整的方法為：運用正切函數求出調整邊應調整之長度(即扇葉邊緣與轉子旋轉面的垂直距離，如圖 6-4-1 所示)後。再利用游標尺將調整邊調至該距離，利用該距離將扇葉調整至欲求角度。

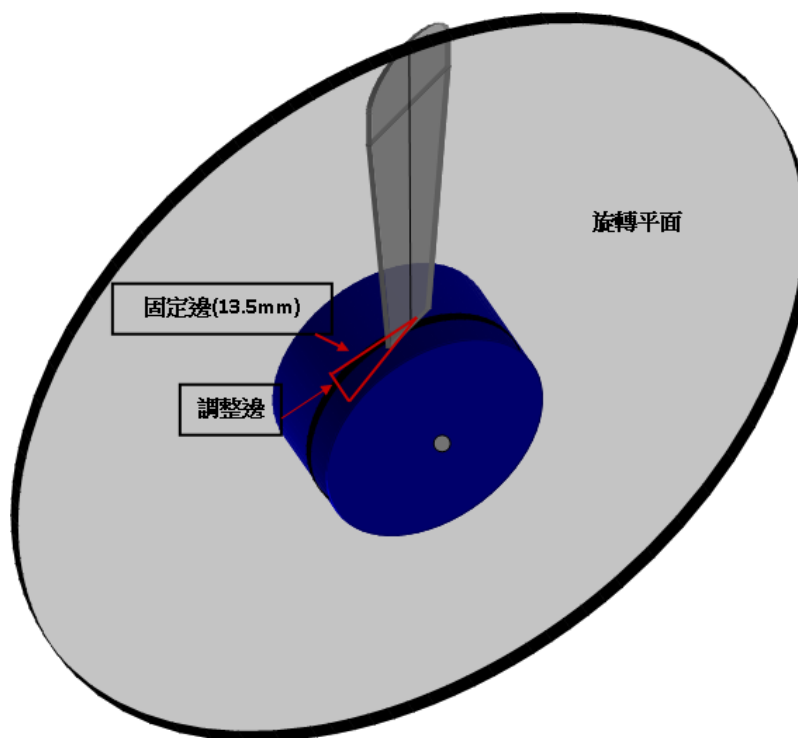


圖 6-4-1 扇葉偏轉角調整示意圖

θ (扇葉偏轉角)	$\tan\theta$	Y (偏轉角對邊長，為固定邊)	X (調整邊， $X=Y\tan\theta$)
23.3°	0.43067	13.5mm	5.8140mm
23.4°	0.43274	13.5mm	5.8420mm
23.5°	0.43481	13.5mm	5.8700mm
23.6°	0.43689	13.5mm	5.8980mm
23.7°	0.43897	13.5mm	5.9261mm

表 6-4-1 運用正切函數求得調整長度之範例

由表中可見，倘若偏轉角僅相差 0.1° 時，其偏轉角之對邊長度差只有 $0.02\text{mm} \sim 0.03\text{mm}$ 。有鑑於如此微小長度差距已無法用肉眼分辨，故決定將實驗中之偏轉角控制極限設為 0.2° 。

三、 藉最佳偏轉角設計『於最佳轉速範圍內微調即可達最佳風能』的扇葉：

(一) 扇葉面積縮放設計原理：

相同轉速下，外圍受風面積較小之扇葉，需調大偏轉角以增加其受風面積來降低其轉速；反之，外圍受風面積較大者，則需調小偏轉角以增速。

(二) 圖 6-4-2 及圖 6-4-3 為月 35 與月 45 於各偏轉角下的向前輸出風動能功率比較圖。如圖所示，當兩種不同型號的扇葉經微調後的向前輸出風動能功率為最佳值時：

1. 月 35 微調後的向前輸出風動能之功率於最大值時，轉子轉速已低於最佳轉速範圍。
2. 月 45 經微調後的向前輸出風動能之功率於最大值時，轉子轉速仍符合最佳轉速範圍。

故便可將月 35 視為『非最佳扇葉』，而月 45 則視為『最佳扇葉』。

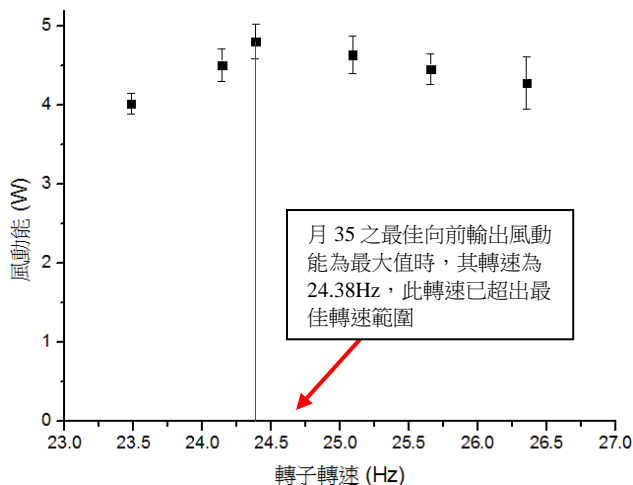


圖 6-4-2 『非』最佳扇葉轉速示意圖

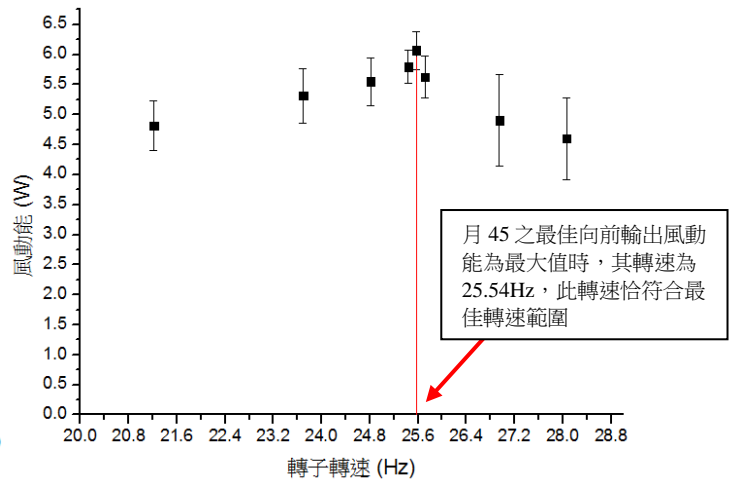


圖 6-4-3 最佳扇葉轉速示意圖

3. 由前段敘述中可歸納出以下結論：

此實驗過程提供一方法，即『扇葉在幾何形狀相同之情況，如何找出最佳扇葉面積』，方法如下：

若某扇葉之最佳向前輸出風動能於微調後，其扇葉轉速會較最佳轉速範圍低，則該圓心角之扇葉必存在一等比例縮小扇葉，於最佳轉速範圍內微調即可達到最佳向前輸出風動能功率。經等比例縮小後的扇葉便為該扇葉圓心角之最佳面積，且此縮小扇葉之向前輸出風動能功率亦會較調整前扇葉高。

討論五：整流器對風力輸出的影響

一、設計目的：

圖 6-2-1 為自製扇葉拍打氣體團的正向力作圖，由圖中可以看到自製扇葉所吹出來的風呈現向外擴散的圓錐狀，導致輸出的風力流線相互抵觸，以致於形成亂流。故利用整流器概念設計一風罩，以解決上述問題。

二、整流器之概念：

亂流發生機率提高原因有二：

1. 流速過快
2. 氣體團截面積增加

故整流器採網格狀設計（如圖 6-5-1），為的就是利用整流器的網眼切割大型氣體團，以防止氣體團截面積過大令亂流現象發生機率提高。此外，網眼垂直旋轉平面的能整理氣流流動方向，使得氣體團能以層流的形式輸出，可減少風力流線因相互抵觸而產生無謂風動能損失的問題。（詳見參考文獻【二】）

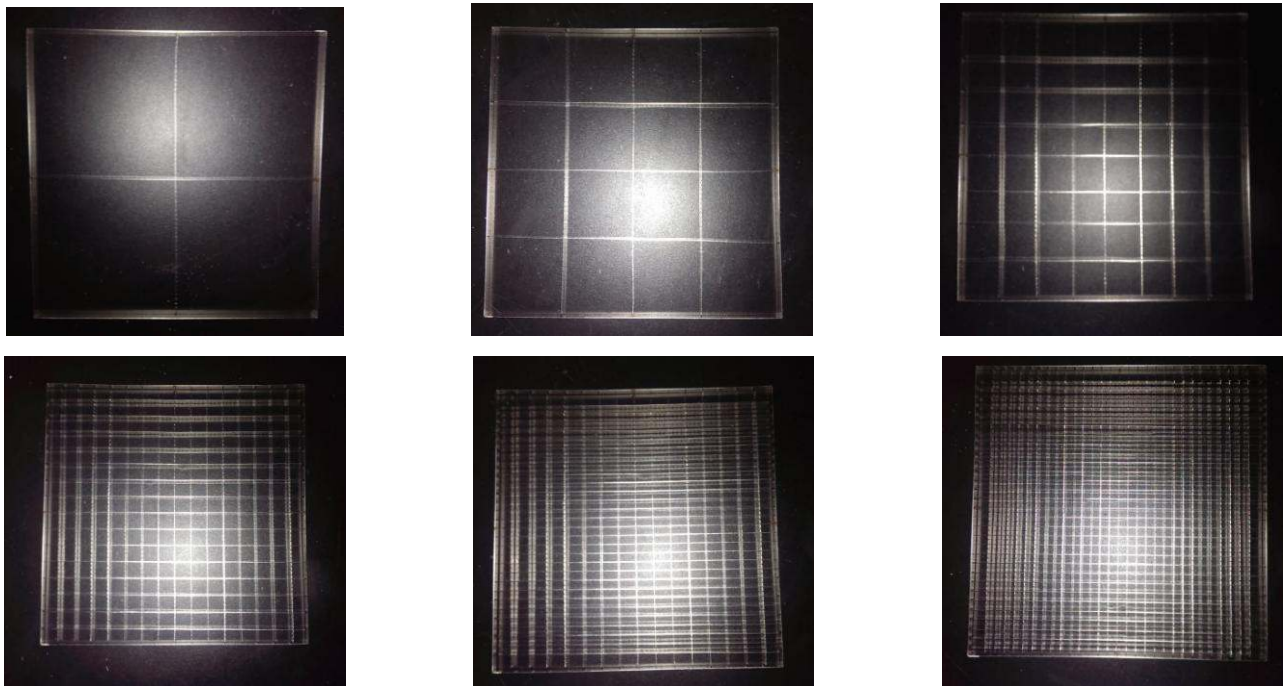


圖 6-5-1 具整流器概念之自製風罩

三、整流器網格數對風力之影響：

（一）說明：

整流器是藉著讓風力在網眼內不斷反射來修正風力流線方向。然而在修正風力流線，將輸出風力轉換為層流的過程中，扇葉拍擊氣體團所提供的向前輸出風動能亦會因不斷反射而有所消耗。網格數對風力相關影響之分析，詳見表 6-5-1。

	整流效果	網眼內損耗風動能	總結
網格數多	強	高	雖然整流效果強，但因網眼過多導致風動能過度耗損，使得風力範圍無法達到預期
網格數少	弱	低	雖然輸出風動能強，但因整流效果不佳導致風力流線相互抵觸，使得風力範圍無法達到預期

表 6-5-1 網格數對風力輸出影響分析

(二) 實驗結果圖形：

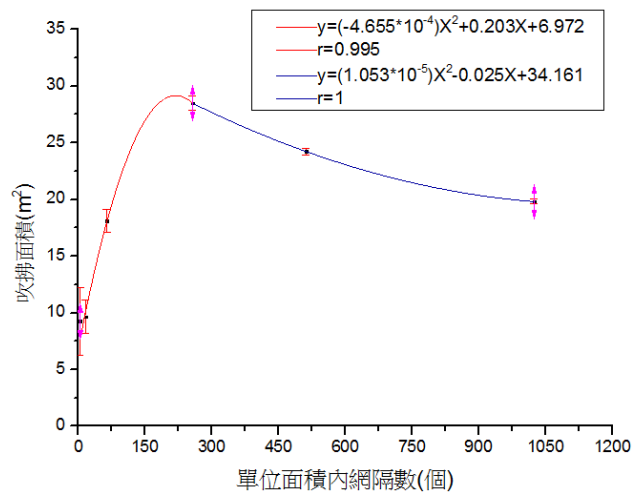


圖 6-5-2 網格數對吹拂範圍關係圖

(三) 實驗結果分析：

由圖 6-5-2 可以發現，當面積為 961 平方公分的風罩內存在 256 格網眼的設置下，會有最大的風力吹拂範圍 28.5 m²。於主題三中所採用的自製風罩便是依此所得之『最佳風罩』。

四、綜合主題三之實驗結果與討論五可歸納出下列三點：

- 1.原扇葉裝置兩種不同風罩之風力吹拂範圍幾近相同，乃是因原扇葉葉面內旋，已達到初步整流的效果，故其吹出之氣體團產生亂流機率較低，則整流器的功效便較不明顯。
- 2.自製扇葉在配合自製風罩下的吹拂範圍相對於配合原風罩有明顯增加，顯示整流器的功效對於亂流產生機率高自製扇葉極為顯著。
- 3.圖 5-3-1 可見『自製扇葉裝設自製風罩』之吹拂範圍增為『原扇葉配合原風罩』的 3.1 倍。顯示經本實驗設計出的風扇與市售電扇比較，不僅風力較強，風力範圍亦有大幅提升。

柒、結論

- 一、於主題一測得轉子轉速控制在 25.3Hz~25.8Hz 內時，電流熱效應占電能總輸出的比例最小。此結果符合參考文獻【一】之結論，呈現實驗之再現性。
- 二、主題二中，分別以扇形扇葉、月形扇葉進行改變扇葉圓心角與改變扇葉面積的比較後，得知當月形扇葉之扇葉圓心角為 45° 、面積為 58.7 cm^2 、偏轉角為 23.5° 時，轉速會位於最佳轉速範圍內，且其向前輸出風動能之功率高達原扇葉的 2.1 倍。
- 三、比較月形扇葉與扇型扇葉的向前輸出風動能，發現在當兩種不同形狀之扇葉在等面積與等圓心角的條件下，月形扇葉的向前輸出風動能必定會大於扇形扇葉，此一結果符合討論三中以數學模型所建立出的理論。
- 四、實驗中發現當扇葉偏轉角稍經調整 0.2 度，向前輸出風動能之功率至少會產生 5% 的變化量，故若只是以 0.1 度為單位調整扇葉偏轉角，是極難求得本研究之最終結果。故『微調』的程序占本研究中極大的份量，是非常重要的實驗步驟。
- 五、自製風罩配合自製扇葉時能有效的收束氣流，使正向風力吹拂範圍得以進一步提升。配合自製風罩之自製扇葉的風力吹拂範圍為市售扇葉的 3.14 倍。

捌、未來展望

本次實驗因器材之限制，故無法使轉頭達到輕量化，本次轉頭加風扇之總重量為原風扇之 4.46 倍，若能輕量化後定能降低因轉子動摩擦產生之熱消耗，故未來希望能使轉頭輕量化，以期向前輸出風動能功率能達到 2.1 倍以上，風力吹拂範圍能達到 3.14 倍以上。

玖、參考文獻

- 一、蕭閔駿、黃宣輔、吳承樺(2013)。中華民國第五十三屆全國中小學科展作品：『讓變頻現形吧！—四極馬達實驗看變頻意義』。
- 二、林建忠、阮曉東、陳邦國、王建平、周潔、任安祿(1991)。高等院校力學教材—流體力學(457 頁)。北京市：清華大學
- 三、David Halliday、Rober Resnick、Jearl Walker(2011)。Fundamentals of Physics Extended 9/E(14-1~34 頁、19-1~19-36 頁)。新北市：全華。
- 四、變頻器原理、基本知識(2011-05-07 17:37:46)。” 自動化在線” 取自：
<http://www.autooo.net/utf8-classid36-id19019.html>
- 五、傅昭銘、陳義裕（民 100）。基礎物理[二 B]上、下冊（上冊：48 ~54 頁、109~146 頁；下冊：7~ 39 頁、81~ 138 頁）。臺南市：南一。

【評語】 040801

本作品有系統地探討風扇葉片角度與轉速的關係，亦實現動手做的精神。若能更完整的考慮實質功率消耗與風力的產生，及阻抗匹配等效應，當使本作品更為完善。