

國立交通大學

工學院精密與自動化工程學程

碩士論文

葉片可調式賽渥紐氏風力發電機葉輪機構
之改良與模擬

The improvement and simulation of a variable Savonius
wind turbine

研究生：張至翔
指導教授：鄭璧瑩 博士

中華民國九十九年八月

葉片可調式賽渥紐氏風力發電機葉輪機構
之改良與模擬

The improvement and simulation of a variable
Savonius wind turbine

研究生：張至翔 Student : Chih-Hsiang Chang
指導教授：鄭璧瑩 Advisor : Pi-Ying Cheng



A Thesis

Submitted to Degree Program of Automation and Precision Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Science
in
Automation and Precision Engineering
August 2010
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 九十九 年 八 月

葉片可調式賽渥紐氏風力發電機葉輪機構之改良與模擬

學生：張至翔

指導教授：鄭璧瑩 博士

國立交通大學工學院精密與自動化工程學程

摘 要

本文係針對賽渥紐氏(Savonius)風力發電機之葉輪調整及控制機構進行改良設計與模擬，藉由電腦模擬掌握葉輪機構之動態行為，使風車設計者預知葉輪之運動狀態，並找出風車於高速時可改善扭矩值週期性變化之參數。

研究初期利用 UG NX 建構出一個具動態調整葉輪受風面積之(Savonius)型式風車模型，並將風車模型轉入 MSC.ADAMS 軟體中進行機械系統動態模擬分析。其動態模擬時欲輸入葉片位移量與風速之關係數值，則藉由製作等尺寸之葉片可調整受風面積之風車實體模型，於風洞之中進行實驗與數值量測取得。後續則藉由風洞實驗及動態模擬所產出之數據，規畫應用於結合有(Savonius)及達拉斯(Darrieus)之混合型風力機上，建立(Savonius)風車葉片開度、靜態扭矩及轉速之關係，透過 MSC.ADAMS 對改良型之(Savonius)葉片位移調整機構進行動態模擬，並模擬葉片位移控制機構能於轉速上升時，使葉片逐漸位移至受風面積較小之位置，以降低葉片對系統產生之週期性扭矩、風力擾動及對傳動系統造成之週期性震動及噪音等問題，以提高新型組合式風力發電機之運轉效率。

關鍵字：賽渥紐式風力機、動態模擬、風洞試驗、量測技術。

The improvement and simulation of a variable Savonius wind turbine

Student : Chih-Hsiang Chang

Advisor : Pi-Ying Cheng

Degree program of Automation and Precision Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to build a variable Savonius wind turbine model and perform the motion simulation and design. In motion simulation part, we used UG NX to model a Savonius wind turbin with variable blade and exported this model into ADAMS. And ADAMS can generate a graphics output file which may be to view an animation of the motion simulation. The analysis results compared with wind tunnel experiment, and ADAMS are obtained good agreements in this case.

The experimental method was developed to measures the reaction torque and rpm varying with angle of rotation. It is useful for the construction of the methodology of designing and analysis mode for wind turbine blades.

Keywords: Savonius wind turbin, Dynamic simulation , Wind tunnel test, Measurement technique.

誌 謝

首先感謝恩師 鄭璧瑩博士在學生求學過程中所給予的悉心指導與建議，使學生在就讀研究所期間獲益匪淺。恩師治學嚴謹，認真的研究精神更為學生的最佳典範，特此卷首，致上最由衷的敬意與謝意。

同時承蒙論文口試委員 金大仁教授、傅武雄教授於文中提供諸多寶貴意見，使本論文更臻完善。並感謝伴我一同學習的實驗室學弟：長懋、首余、昱登等人在論文研究期間之協助，幫助我累積許多知識與研究上的啟發。此外，特別感謝工作上的長官及同事：祖詮、志龍、求奮、冠旭、志偉等人對我的指導與鼓勵，銘感在心。

最後獻上此論文感謝我最敬愛的父親大人 張新華先生、母親大人 顏美金女士，感謝他們多年來的養育之恩與栽培，及岳父母 陳世建先生、陳李英嬌女士的支持與鼓勵，更感謝愛妻 澄如一路上的付出與扶持，愛兒 蒼榮的鼓勵，加上姊姊 張育倫的關懷，有了您們使我感到莫大之幸福。最後再一次向恩師 鄭璧瑩教授致上最深之謝意。

目 錄

摘要	.....	i
ABSTRACT	.....	ii
誌謝	.....	iii
目錄	.....	iv
表目錄	.....	vi
圖目錄	.....	vii
一、	緒論.....	1
1.1	研究背景.....	1
1.2	研究動機與目的.....	2
1.3	風車之類型.....	5
1.4	國內風車之發展與應用.....	11
1.5	文獻回顧.....	16
1.6	研究方法與流程.....	21
二、	風車基礎理論.....	23
2.1	風力發電原理.....	23
2.2	性能特性係數.....	23
2.2.1	性能方程式.....	23
2.2.2	頂端速度比.....	25
2.2.3	固相比.....	26
2.2.4	葉片上作用力方程式.....	28
2.2.5	動能及扭矩係數.....	29
2.3	Savonius 型風力機幾何參數之關係.....	30
2.4	機械系統之運動模擬理論.....	34
三、	實驗設備與模型製作.....	35
3.1	風洞設備.....	35
3.2	量測設備.....	38
3.3	訊號擷取設備.....	40
3.4	實驗模型製作.....	41
3.4.1	風車模型設計與製作.....	41
3.4.2	模型組裝.....	54
四、	實驗方法與結果討論.....	56
4.1	實驗方法.....	56
4.2	實驗流程.....	57
4.3	實驗數據量測與結果.....	61
五、	電腦模型建立與動態運動模擬.....	64
5.1	風車模型建立.....	64
5.2	葉片位移控制機構.....	66

5.3	ADAMS 軟體簡介.....	69
5.4	建構基本零件模型與材質參數.....	72
5.5	拘束接頭與作用力之設定.....	74
5.6	動態模擬結果.....	77
六、	結論與後續展望.....	81
6.1	結論.....	81
6.2	後續展望.....	83
參考文獻	.....	84



表目錄

表 1	風力發電機之分類表.....	8
表 2	Savonius 葉輪主要幾何參數.....	31
表 3	模型葉片幾何參數	41
表 4	實驗附屬材料項目及規格表	50
表 5	風向與葉片角度關係表	57
表 6	材質參數設定表	73



圖目錄

圖 1	世界各地 10m 高度的風級圖	3
圖 2	台灣地區 50 m 高之平均基本風速圖	4
圖 3	水平軸式風力發電機	9
圖 4	垂直軸式風力發電機	10
圖 5	水平軸小型風力發電機	12
圖 6	高樓上方流場示意圖	13
圖 7	混和雙葉片風車	15
圖 8	Darrieus 混和 Savonius 型之功率比較	18
圖 9	研究流程圖	22
圖 10	各種風車之端速比與轉子效率關係圖	24
圖 11	頂端速度比與固相比之關係圖	27
圖 12	Savonius 型式葉片幾何參數定義圖	30
圖 13	雙層式 Savonius 型風力渦輪	32
圖 14	Savonius 風力機層數與啟動扭矩之關係	33
圖 15	風洞實驗設備(a~b)	37
圖 16	風速量測計	38
圖 17	非接觸感應式扭力計	39
圖 18	扭力與轉速顯示系統	40
圖 19	葉片位移示意圖	42
圖 20	Savonius assy. 零件設計圖(a~g)	44
圖 21	實驗風車之 3D 組立模型及作動示圖(a~e)	52
圖 22	實驗風車組裝過程	55
圖 23	實驗風車完成品	55
圖 24	風車量測角度示意圖	56
圖 25	實驗風車完成品與扭力感測器配置	58
圖 26	本實驗風力機於風洞中之實驗情形	60

圖 27	葉片重疊量之靜態力矩與角度比較.....	62
圖 28	不同葉片重疊量之轉速與時間比較值.....	63
圖 29	改良型混合式風力機機構配置示意圖.....	65
圖 30	低速時葉片向外展開之示意圖.....	67
圖 31	高速時葉片向內收合之示意圖.....	67
圖 32	改良型 Savonius 風力機葉片增加離心配重示意圖.....	68
圖 33	簡化後之 UG NX 風車模型圖.....	73
圖 34	葉片固定型式之運動模型.....	75
圖 35	葉片活動型式之運動模型.....	76
圖 36	葉片質量中心之位移量與時間關係.....	78
圖 37	葉片固定型式之葉片位移與時間關係.....	78
圖 38	葉片活動型式之葉片位移與時間關係.....	80



一、緒論

1.1 研究背景

由於環保意識的抬頭，不得不開發再生能源。在全球因應氣候變遷與保護環境的呼聲中，再生能源因為具有潔淨、低溫室氣體排放及自產能源的特性，愈來愈多的國家將再生能源列為未來能源政策考慮重點之一，因此我國的能源政策，也逐步思考如何發展再生能源，使得無污染的風力發電受到重視。

但是因為早年風力發電廠運轉結果不如預期，政府認為風力發電存有環境條件限制、供應不穩定及成本仍偏高之問題，因此認為風能僅能作為輔助性能源。不過隨著近年來國際技術進步及國外推動風力發電的經驗顯示，風力發電成本已經降低至接近傳統能源的發電成本，因此要求政府大幅發展風力發電的呼聲也越來越高。

風力發電機由兩大部分組成，其一為風力機，其二為發電機，前者主要將風能轉換成機械能，後者主要將機械能轉換成電能，而風力機分成許多型式，如依葉片轉軸於空間中的方向分類，可分為水平式風力機與垂直式風力機兩種，如依風推動葉片的方式分類，可分成阻力型風力機與升力型風力機，而垂直軸風力機中阻力型的代表為Savonius型，升力型的代表為Darrieus型。

1.2 研究動機與目的

全世界可利用的風能相當充沛，以目前水平軸風力機而言，當平均風速到達5 m/s 至6 m/s 即可啟動運轉進行發電，如圖1所示，為全世界高度10m的風級圖，風速5m/s以上涵蓋的區域相當廣泛，全台灣的年平均風速於5 m/s 至6 m/s 以上的區域，其所涵蓋面積至少兩千平方公里以上，預估發電潛能至少500 MW 以上，如圖2所示，為台灣地區50 m高之平均基本風速(m/s)圖，但在都市區建立一般大型水平軸風力發電場並不容易，比較適合建造小型垂直軸風力機，雖然在30m以上的高樓上方風能皆相當良好，但流場受到各建築物高低起伏與大樓複雜的位置影響，將使大樓上方之流場產生嚴重的紊流並影響風力機之穩定性，致使對風力機造成充電系統電壓閃爍及機械結構之疲勞與震動等問題〔1〕。

根據Sandia National Laboratories對垂直軸風力機的研究報告〔2〕，主要研究領域可分為四大區域，分別為系統工程、疲勞與可靠度、結構動力與空氣動力，本研究主要關注於結構動力特性上，並透過自行設計製作之可變葉片受風面積之改良型Savonius垂直軸式風車實驗模型，於小型風洞中進行靜態扭矩及轉速等實驗數據量測，以建立本模型之風速、轉速、葉片受風面積改變量之相對關係，以提供電腦動態模擬時之輸入參數，後續針對葉片控制機構進行動態特性之模擬確認，並由葉片之控制機構型式及動態模擬結果提供風車設計時之參考，而本研究係期望可達到兼具有良

好之低風速啟動性及降低風車於高轉速時，對系統產生之週期性扭矩、疲勞與震動以及高速時的擾動與風阻效應，以達到提高新型組合式風力發電機之運轉效率，及縮短風車設計時間及降低驗證次數與成本之目的。

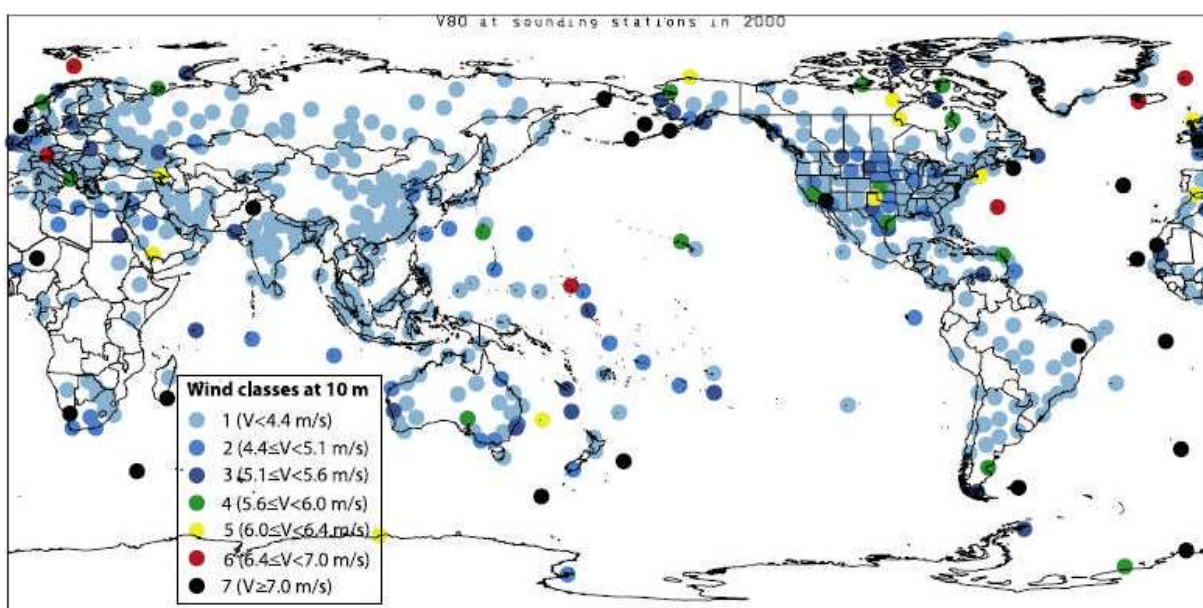


圖 1 世界各地 10m 高度的風級圖 [1]

50m wind speed(96-00 avg)

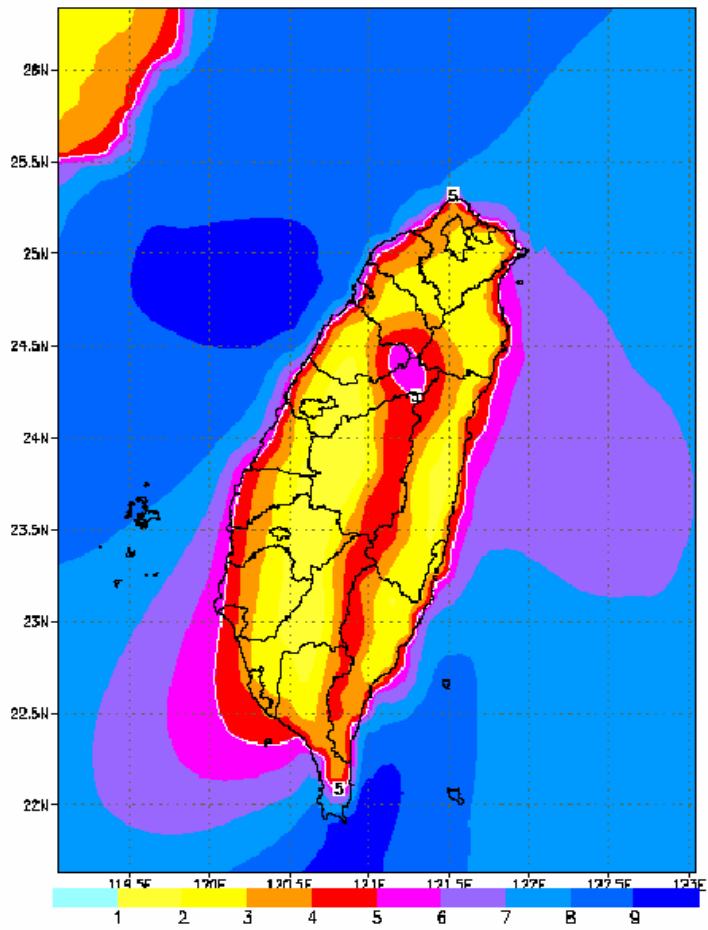


圖 2 台灣地區 50m 高之平均基本風速圖(m/s) [1]

1.3 風車類型

目前風力機可分為許多類型如表1所示，大致上主要分為兩種，其中一種為水平軸式風力渦輪機Horizontal axis wind turbine (HAWT)，另一種則為垂直軸式風力渦輪機Vertical axis wind turbine (VAWT)，每一類型各有其特性。如圖3所示為水平軸式風力機，包含升力型與阻力型，而升力型風力機，具高轉速，與阻力型相比擁有較高之輸出功率，若依轉子葉片相對於風向的位置分類，可分為上風式(upwind)、下風式(downwind)兩種。上風式風車一般運用在風穩定之場合，但在風向不穩定處，由於風向的變動，轉子葉片會立即改變方向，容易造成運轉的不穩定。下風式風車，其轉子葉片會隨著風向的改變而被動的改向，適合運用在風向不穩定之場合，構造雖是簡單，但效率較低且容易產生振動及噪音等問題。

水平軸風力機必需藉由尾舵或是帶有馬達之轉向控制來調整風機葉片與風向位置，而風向改變與擾流將會造成水平軸風力機運轉效能有所下降，因此水平軸風力機最好設置在空曠地區，空氣流動穩定且沒有障礙物的地方。

如圖4所示為垂直軸式風力機，垂直軸風力機是為了設置在都市中所發展出來的類型，其軸對稱的外形使風力機可以吸收各方向(omni-direction)的風能，使其不必使用偏向(yaw)機構系統。風力機運作時，尖端速度比的範圍較水平軸風力機低，此項特性使垂直軸產生的噪音較小。風力機效率

受紊流強度的影響較低，使垂直軸更適合裝設於高紊流強度建築風場之下。發電機、變速箱、煞車系統及各主要的系統零件裝設於地面，亦於維修並降低成本。而在低紊流強度的流場中，垂直軸風力機不具有自行啟動 (self-start) 的能力，除非強迫提高尖端速度比，各風速取決於不同的特定尖端速度比。在風力機不轉動的情況，只有於特定的風向，氣動扭力才能克服磨擦扭力，使風力機啟動，但當風速不夠快時，將會再次於某特定的角度停下，此時的風力機只會於特定的陣風模式下才可自行啟動。

接著在下面舉出幾個常見風車，並簡要說明其特性〔3〕

(1)螺旋槳型風車(Propeller-type)，如single bladed、double bladed、three-bladed。

螺旋槳型風車是目前使用最多機種，葉片數量主要設計成單片、雙片、三片和四片，葉片為飛機翼形(airfoil)剖面形狀，為了增加轉動動力並減少空氣動力學的損失，常將葉片根部設有承受高扭力與變形的能力。缺點是螺旋槳葉片迎風攻角需有方位控制裝備的配合，才能達到設計時預估的效能。

(2)多葉式風車(multi-bladed type)，如U.S farm windmill、multi-bladed、Bicycle Multi-bladed。

在早期使用的目的是牧場的揚水車，葉片數至少都有四片以上，此種風車主要優點是具有很低啟動風速，另外因為葉片受風面積很大，因此

能產生大的旋轉扭力，雖早期並非用來風力發電，但是以現今的風力發電趨勢來看，低的啟動風速以目前來說是一個趨勢。

(3)賽渥紐氏(Savonius-type)和Multi-bladed Savonius，Savonius-type之風車命名是為了紀念一芬蘭發明者而取。設計之初，是以兩片半圓筒型葉片構成，構造簡單成本也低，但是能量轉換效率甚低，使用者不多，不過後人經過研究之後，還是有延伸出許多種型態的Savonius型風車。

(4)達流斯型風車(Darrieus-type)，又區分有 Φ -Darrieus 和

Δ -Darrieus。達流斯型風車(Darrieus-type)命名同樣是為紀念發明者而取，原創者是一法國人在1931年所發明，此種風車葉片數以2~3片最多，轉動時像跳繩旋動，轉動時葉片承受彎曲應力非常小，整體構造簡單而成本低，但最大缺點是啟動性能較差，只適合放在風場大的地方。

表 1 風力發電機之分類表

分類依據	描述	分類名稱
旋轉軸結構	主軸與地面相對方向	水平軸式 (Horizontal-axis type) 垂直軸式 (Vertical-axis type)
發電機種類	發電機類型	同步機 (Synchronous generator) 感應機 (Asynchronous generator)
轉子葉片位置	轉子相對於風向位置	上風式(Up wind) 下風式(Down wind)
轉子葉片受力情形	轉子葉片工作原理	升力型(Lift) 阻力型(Drag)

資料來源：Walker, 1997

Horizontal axis turbines

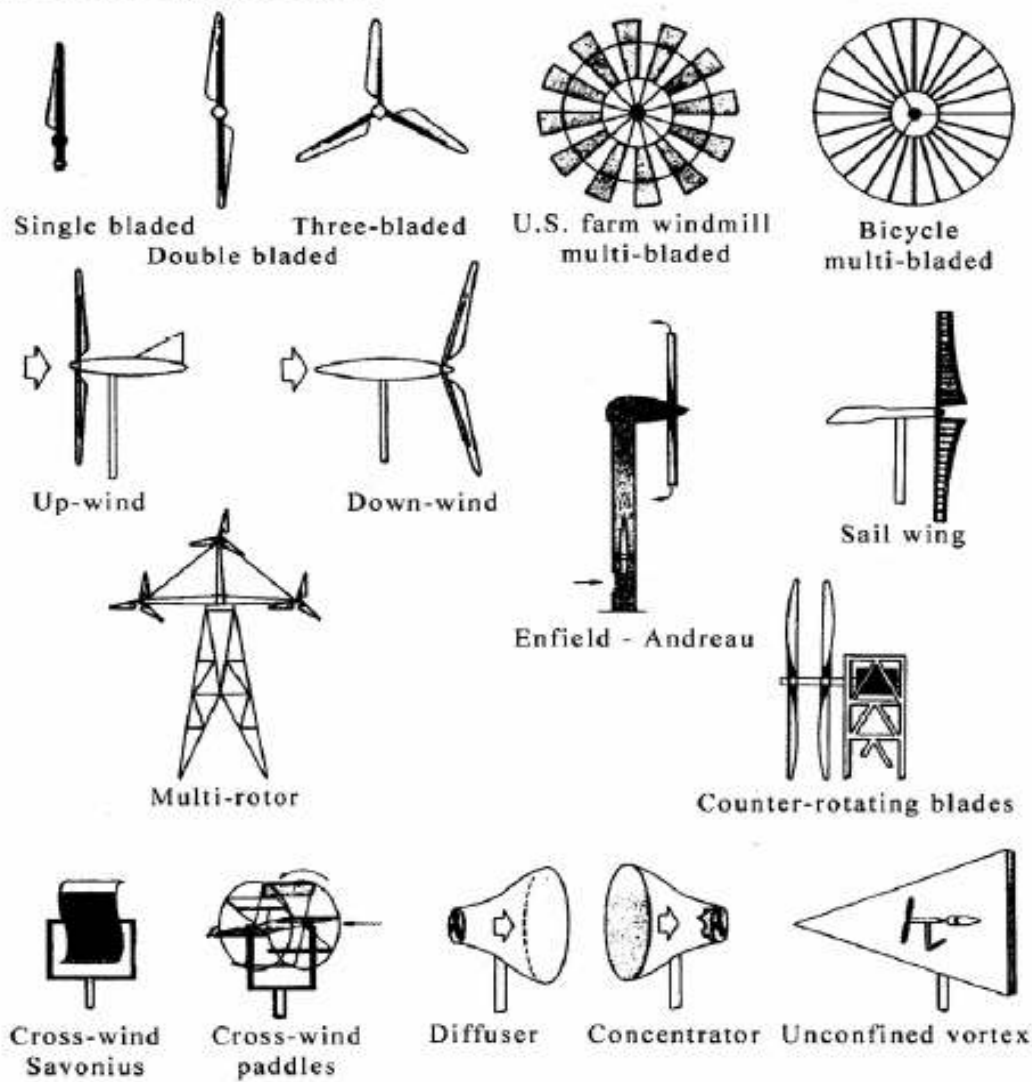


圖 3 水平軸式風力發電機〔4〕

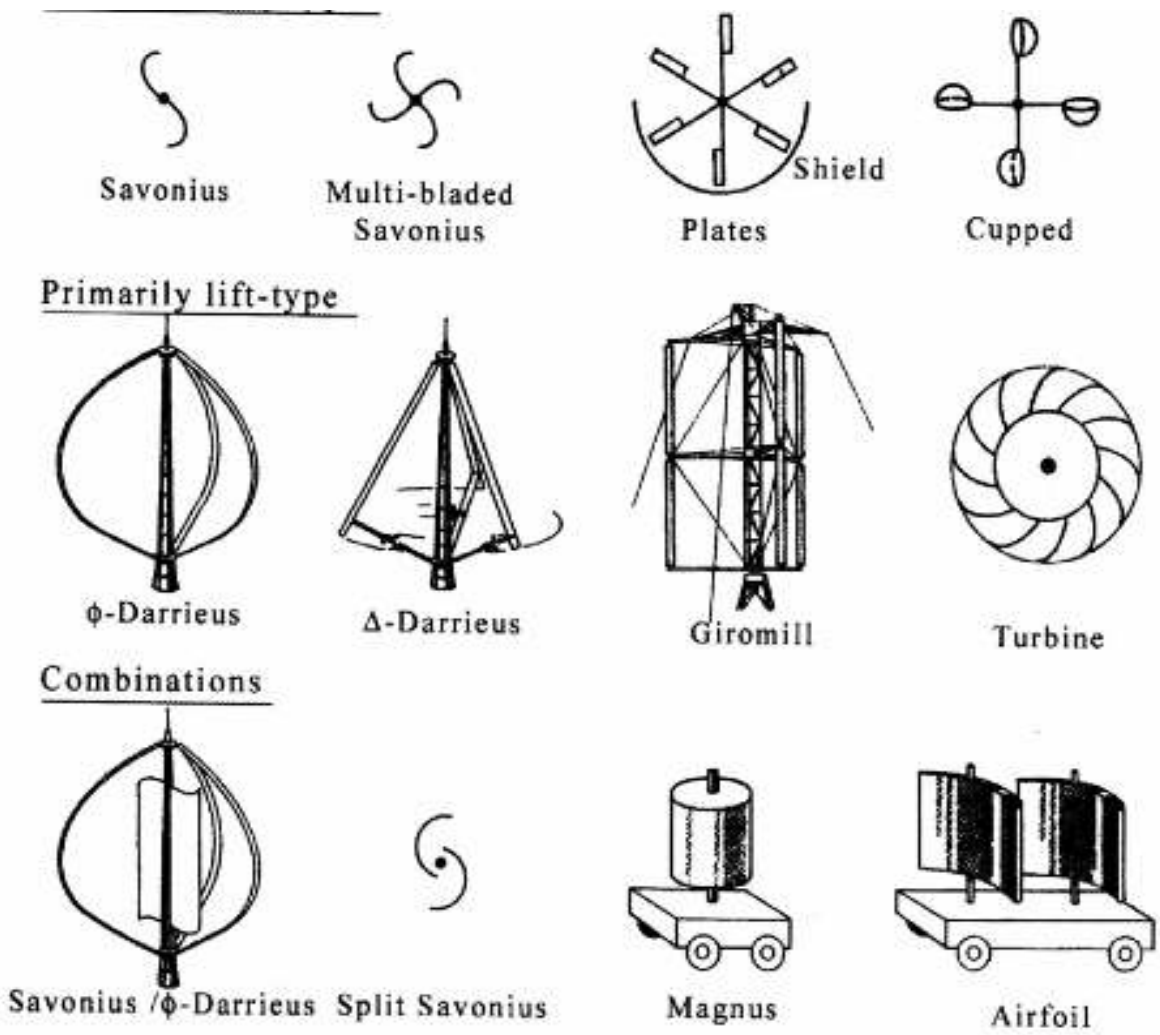


圖 4 垂直軸式風力發電機〔4〕

1.4 國內風車之發展與應用

由於台灣屬於太平洋上的一個小島，為海島型地區，土地狹小，東邊陸地多半都為山地，西半部則多為平原，但是西半部平原皆開發成都市，然而一般大型風力場需要龐大的陸地以及良好風能，才能進行架設大型風力機，在台灣地緣狹小並無廣大土地，若要架設大型風力場於陸地上必然有土地問題，因此提出離岸式風力場，但離岸式風力場為架設在海上，風力機所發出之電力，需要有長途海底纜線從離岸式風力場將電力傳送至本島上，其電力損失與市電並聯以及發電量之關係仍須改進。

根據貝茲定律，最理想的風力渦輪機在風中所能擷取的最大的風能為59%，而水平軸式風力機風能的轉換效率於40%以上，因此在目前大型風力場上進行發電之風力機多為水平軸式，由於高樓上的風能相當優渥，因此為了有效利用大樓風能，將水平軸風力渦輪機與大樓結合的情況下，噪音部份將會是為考量重點，由於水平軸風力機為高速旋轉，會產生相當大的風切以及震動噪音，但在一台2MW 發電量的大型水平軸風力渦輪機上，其產生最大噪音可以達到100dB，葉片部份產生的噪音亦有90dB，須避開都市才可裝設，故以建造小型風力機之方式進行發電，將發出之電力供給大樓使用，方能自給自足又能減少資源的浪費，但其紊流之流場將嚴重影響風力發電機，若能從紊流風場之中獲取能量，將能增加風力機的使用率[5]。

如圖5所示為傳統水平軸小型風力發電機，圖6為高樓上方之流場示意圖，若建築物高度為 H ，風吹過建築物後方約 $20H$ 之距離及高度高達 $2H$ 之範圍內，皆為紊流區域，因受地形紊流及噪音影響，小型水平軸小型風力發電機無法符合小型風電運用市場〔6〕。

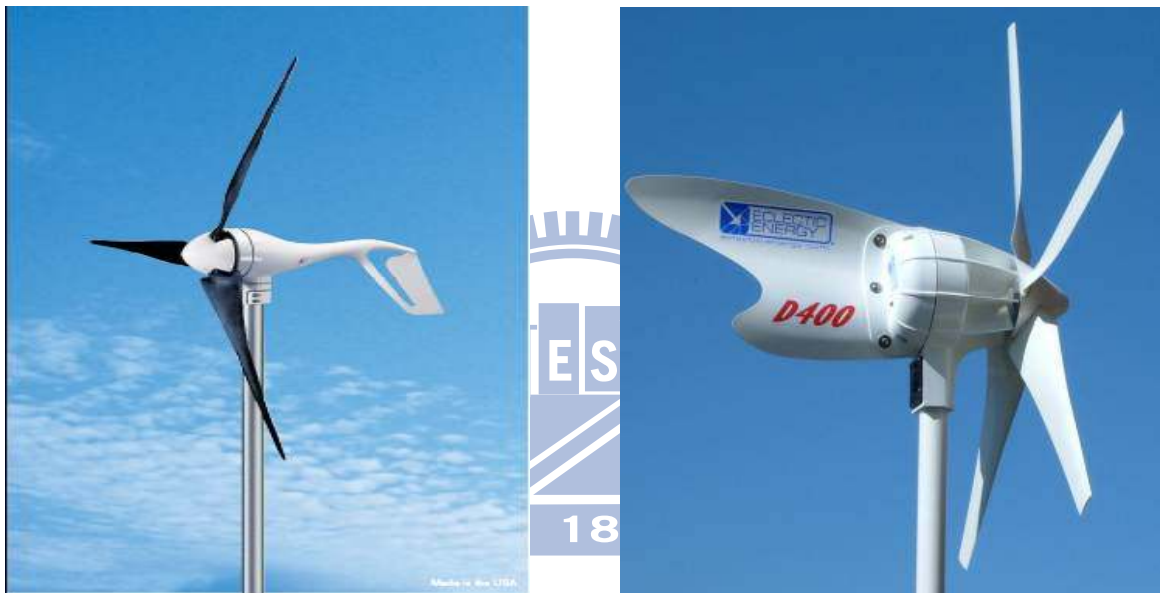


圖 5 水平軸小型風力發電機

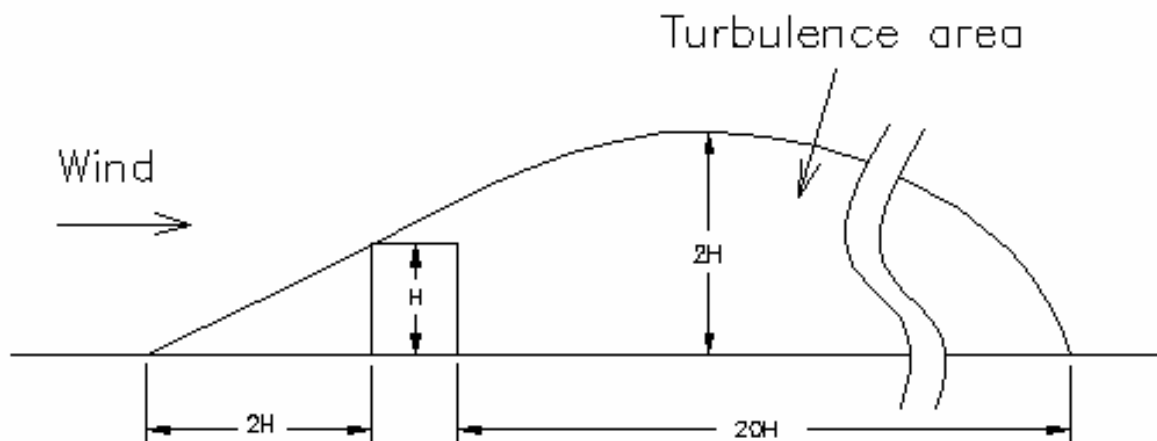


圖 6 高樓上方流場示意圖〔6〕

為克服上述小型水平軸式風力機於都會使用之限制所發展出的小型垂直軸式風力機，相較於水平軸式風力機則具有不受地形風影響及噪音低之優勢，但若單為Savonius型式之風力機雖低風速之啟動性良好，但高風速時之效率卻不若Darrieus型式之風力機為佳，其原因於後續第二章節中之部分會再說明。

因考量上述垂直式風機之特性，為使垂直軸式風力機能同時兼具有較佳之啟動性及高風速時運轉效率，新高公司將雙層 Savonius 型風力機與 Darrieus 型風力機相互結合，如圖 7 所示，當低風速情形下，Darrieus 風力機尚無法產生足夠升力克服葉片整體阻力時，可以藉由 Savonius 風力機低風速易啟動的性質，帶動 Darrieus 風力機克服最大靜磨擦力啟動，而當整體風力機產生足夠的升力時候，則開始換由 Darrieus 風力機一起帶動

Savonius 型風力機，而 Savonius 型風力機於高速時幾乎形成失效狀態，由於 Savonius 型風力機為阻力型風力機，故當混合型風力機高速轉動時，Savonius 依然會有阻力存在，其阻力會降低整體之功率係數，後續文獻回顧中會有細部之說明。





圖7 混合型雙葉片風車

1.5 文獻回顧

早期對於垂直軸式風力發電機之研究，大致可分為實驗討論與數值模擬分析，實驗量測主要針對基礎的葉片空氣動力研究，與風力機功率特性的測試，藉由實驗得出各種形狀風力機的效能特性，或透過流場可視化觀察流場現象。近年來因流場分析軟體(CFD)、個人電腦硬體發展成熟，文獻多將「分析模擬」與「性能實測」進行比較與討論。另參考其他相關文獻如下。

S. Mertens [7] 指出在大能量的紊流的流場內，垂直軸會更適合於一般水平軸風力渦輪機。因為水平軸風力渦輪機必須正對著風才能形成最大效率，一般水平軸風力渦輪機皆會擁有追風功能，但在亂流時因為風的變化，造成風力渦輪機無時無刻追風，造成無法發電或效率降低，且因葉片高速旋轉，當風向急劇變化時，會造成葉片或主軸扭斷，葉片的斷裂對周圍或風力渦輪機本身造成的傷害極大，反觀垂直軸，360 度全向性的風都可接受，在紊流之流場中以垂直軸風力渦輪機較為優勢，全向性的風即可轉動發電。

Jean-Luc Menet, Nachida Bourabaa [8] 針對Savonius風力機進行流場、支撐架幾何外型分析，也研究預知的雷諾數，以定義最佳之幾何結構；並建議實驗採用上下兩層、兩葉片、兩端板，葉片高度為直徑之兩倍，主要重疊率為0.15~0.3之間，次要重疊率為零，而兩層之構造雖使扭矩輸出較為平順，但是因為重量增加會導致產生之最高扭矩值降低。

Kawamura, Hayashi, Miyashita [9] 建議以Domain Decomposition Method進行Savonius之Torque Coefficient比較，結果顯示沒有導風片之模型於 $TSR^1=0.25$ 時之Torque Coefficient於Attack angle 30度時有最大值，Attack angle 150度時有最小值。

S. V. Pasupulati 等人 [10] 探討風渦輪機葉片長度的改變對功率擷取之影響，葉片長度的增加會使低風速下可獲得較多之功率，且效率會增加。文中的機組為120kW，可變葉片長度為7.5~12m，控制方面則是安裝一台3馬力永磁直流馬達去控制葉片長度，可變葉片長度的改變在高風速期間可縮短葉片而防止葉片損壞。

¹ $TSR(\text{Tip speed ratio 簡稱 } TSR) = \Omega R / U$

(Ω : 葉片頂端之角速度, R : 葉片旋轉面半徑, U : 風速)

Kyozuka [11] 於 2008 年，曾比較單一 Darrieus 型風力機，與同時結合了 Savonius 型與 Darrieus 型風力機之混和型風力機之功率曲線，如圖 8 所示，於增加了 Savonius 型風力機雖可提升起動性，但因 Savonius 型為阻力型風力機，故當風力機於高速轉動時，依然有阻力存在，致使混和性風力機之整體功率係數仍比單一 Darrieus 型風力機為低。

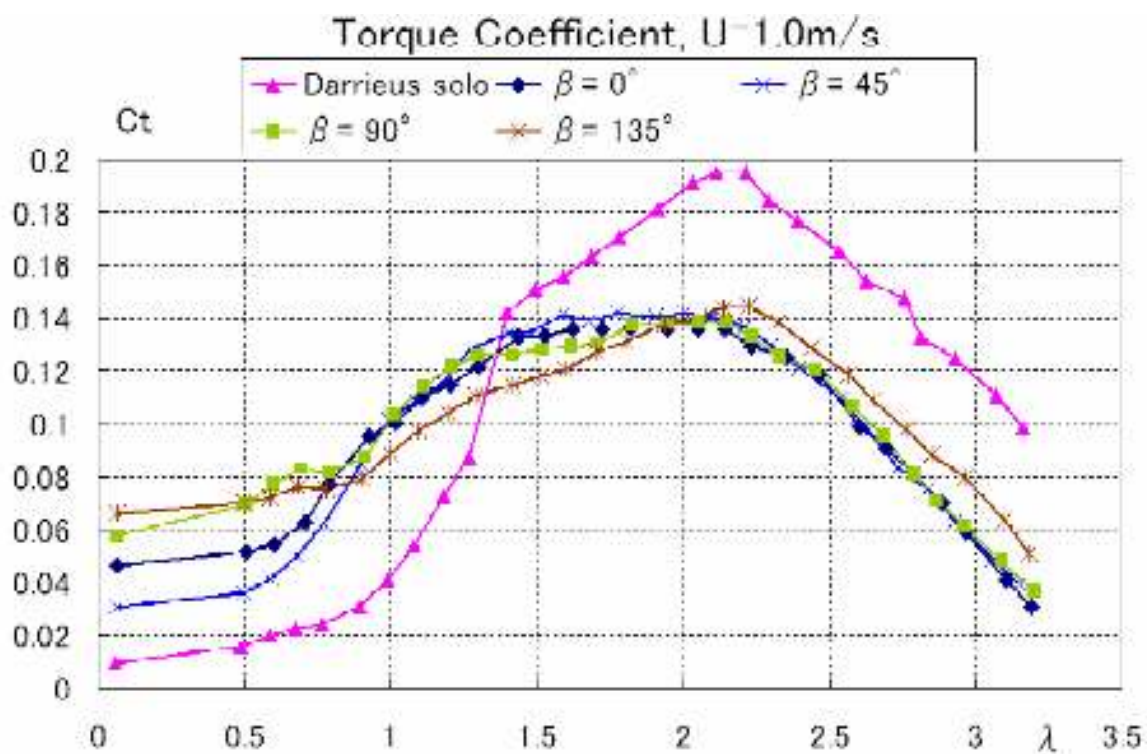


圖 8 單一 Darrieus 型與 Darrieus 混和 Savonius 型之功率比較 [10]

Z. Lin 等人 [12] 利用可調的旋角控制及整流器控制去符合風渦輪機運轉區域，主要針對定功率產生區域去設計控制器，根據機械動態的特性，旋角控制則是利用非線性控制理論去做設計。

周辰穎 [13] 利用風洞產生出紊流流場，對水平軸風力渦輪機進行干擾，其研究發現水平軸風力渦輪機在紊流流場中，無法將所得到的風能完全輸出為電能。因此水平軸風力渦輪機必須在無干擾的定向流的風場中，才能達到效率最高點。

R. Sakamoto 等人 [14] 探討風渦輪之葉片旋角控制來限制其功率的輸出，文中所採用的控制方法為自動調節調整器 (self-tuning regulator, STR)，所採用的控制器則是比例-微分控制器 (PD Controller)，也利用最小變動控制法來做旋角控制，並藉由最小變動控制量 (MVC) 來決定控制輸入的量，目的則是為了減少穩態誤差；且它僅在額定風速區域控制輸出的實功率。

桂人傑 [15] 指出實際上運用風能轉動風力發電機葉片，帶動發電機發電之能量轉換過程相當複雜，過程中能量需消耗帶動風力機之運轉，理論上最高轉換效率約為 59%，實際上大多數的葉片轉換風能效率約介於 30~50% 之間，經過機電設備轉換成電力能後的總輸出效率則約介於 20%~45%。為避免過高的風速損壞發電機，大多於風速達 20~25m/s 範圍內停機，一般採用旋角節制 (pitch regulation) 或失速節制 (stall control)

方式來調節葉片之氣動性能及葉輪之輸出，當風速超過滿載風速時，可利用旋角控制(Pitch Control)系統改變葉片受風角度，降低葉片受風力量，以限制轉子速度及功率輸出，避免造成過載情形發生，而目前主流之風機為解決定速風機無法在較強大的陣風出現時做出即時反應，電力輸出呈現較大擾動，必需靠較強的電網加以吸收及必需仰賴較粗壯的機構來吸收所產生之高機械應力問題，而可調速變速風機之可變速特性使得風機在額定風速下能更有效的擷取風能，並減少風力擾動對傳動系統造成之衝擊性轉矩。

目前國內外研究風力發電的相關文獻很多，而且在風力發電系統的穩定度與葉片控制情形，如水平軸風力機之葉片角度或長度變化控制等，更是近年來重要的研究工作，而有關於利用可調速變速風機來保護系統及提升效率的研究也變得越來越重要，特別是適用於都市地形之垂直軸式風力機，而本研究之風洞實驗數值部分則與Kawamura, Hayashi, Miyashita [9]之實驗數據進行比對。

1.6 研究方法與流程

本研究初期先評估欲進行實驗之Savonius風車尺寸與風洞實驗設備之關係。設計風車時係參考文獻中之規格，並利用CAD軟體繪製一直徑73mm，高度80mm，具可調整葉片受風面積功能之Savonius風力機設計圖，並依圖製作出實體模型後，再於風洞設備之中進行實驗。實驗過程中主要目的係建立該尺寸模型之葉片於調整受風面積時，相對於葉片轉軸上不同迎風角度所產生力矩變化值、轉速等關係。並將實驗量測之數據與Jean-Luc Menet、Kawamura之參考文獻相互比對，發現與實驗之靜態扭矩量測值與相對角度皆具有相同之趨勢。再利用實測數值提供電腦動態模擬軟體中進行模擬與分析，並研究本風力機葉片控制機構於動態下之行為。

圖9所示為本論文研究流程，初期係依參考文獻中Savonius風力機之規格建立葉片位移量可變化之模型，葉片重疊量依實際尺寸先行定義有4組規格，接著需要由實驗建立本模型風速對應轉速、扭矩之關係，後續則調整模型之葉片重疊量並進行實驗，再以電腦輔助模擬葉片之動態行為，並與實驗部分進行比對。

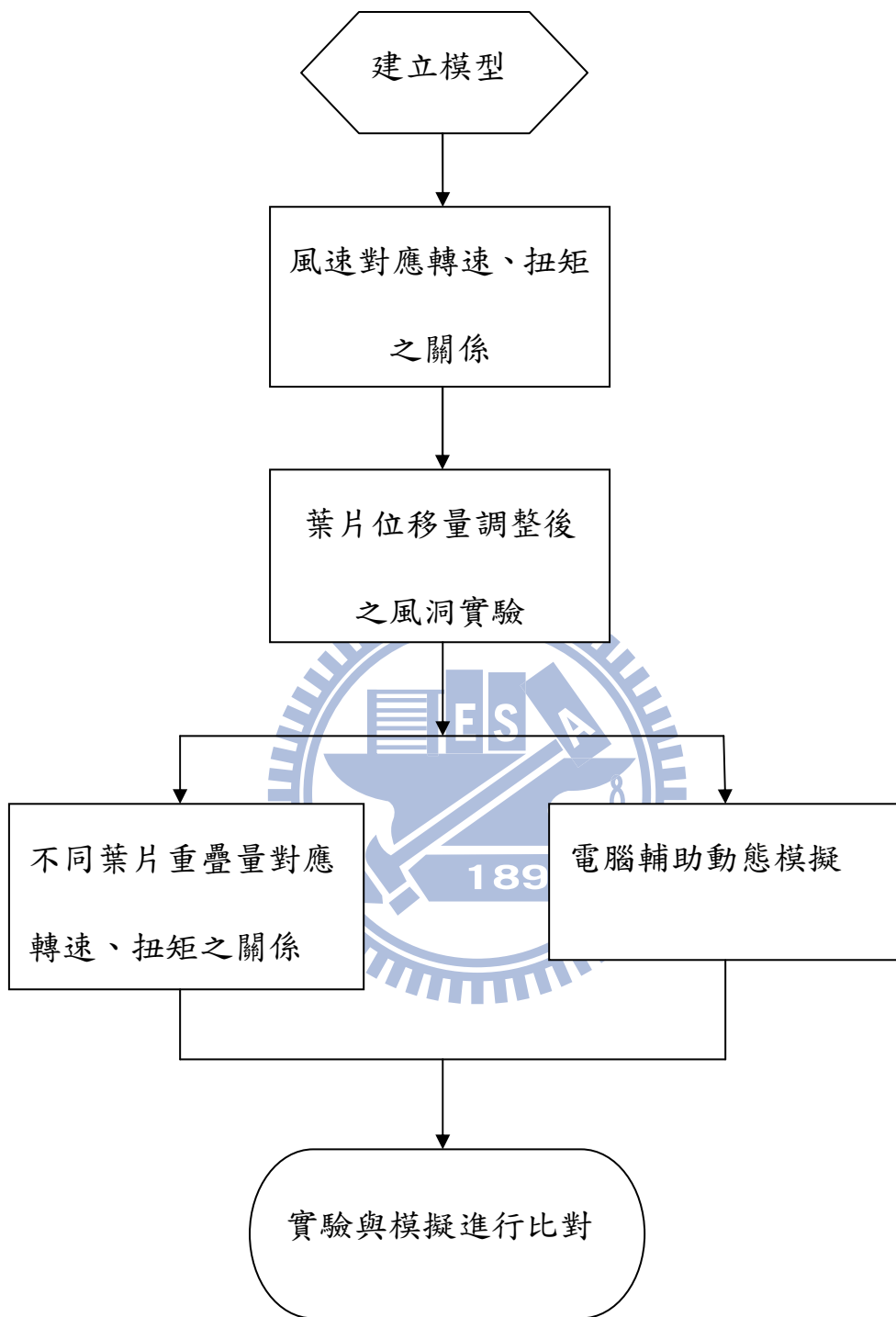


圖 9 研究流程圖

二、基礎理論

2.1 風力發電原理

風力發電其實是藉空氣的流動來推動風力渦輪機的葉片而生電。一般風力發電機的機艙皆安裝了葉輪、變速箱、發電機等。當風流過葉片時，葉輪因此轉動，帶動變速箱加速，最後將動力傳送給發電機。因此，風力系統簡單來說，是一個將流體能量轉換成機械能，再將機械能轉換成電能的系統，如果要細分出它的子系統，可說是相當龐大的系統。

2.2 風力性能特性係數

2.2.1 風車性能方程式 [3]

由風力機發電原理可知，風以速度 U 流向葉片，密度為 ρ ，葉片之旋轉受風面積 A ，風力機之功率轉換係數操作點 C_p ，我們將風力機所擷取之風能以下(1)式表示，以係數表示無單位：

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho AU^3} \quad \text{單位為：} \quad \frac{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3}}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \text{m}^2 \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3} \quad (1)$$

上式顯示出葉片所擷取風能正比於 C_p 的值，當風力機 C_p 值愈高表示風力機擷取越多風能，然而 C_p 受限於空氣動力學的限制。

根據貝茲定律 (Betz' s Law)：理想的風力機能將原來進入葉片的風速減為三分之一，而最大可擷取的風能為原來進入葉片風能的 $16/27$ 。圖10為各風力渦輪機轉換效率圖，理想風車之輸出係數 C_p 最大值為0.593，實際風車運轉時高性能螺旋槳形風車約為0.45，阻力型Savonius風車約為0.20。

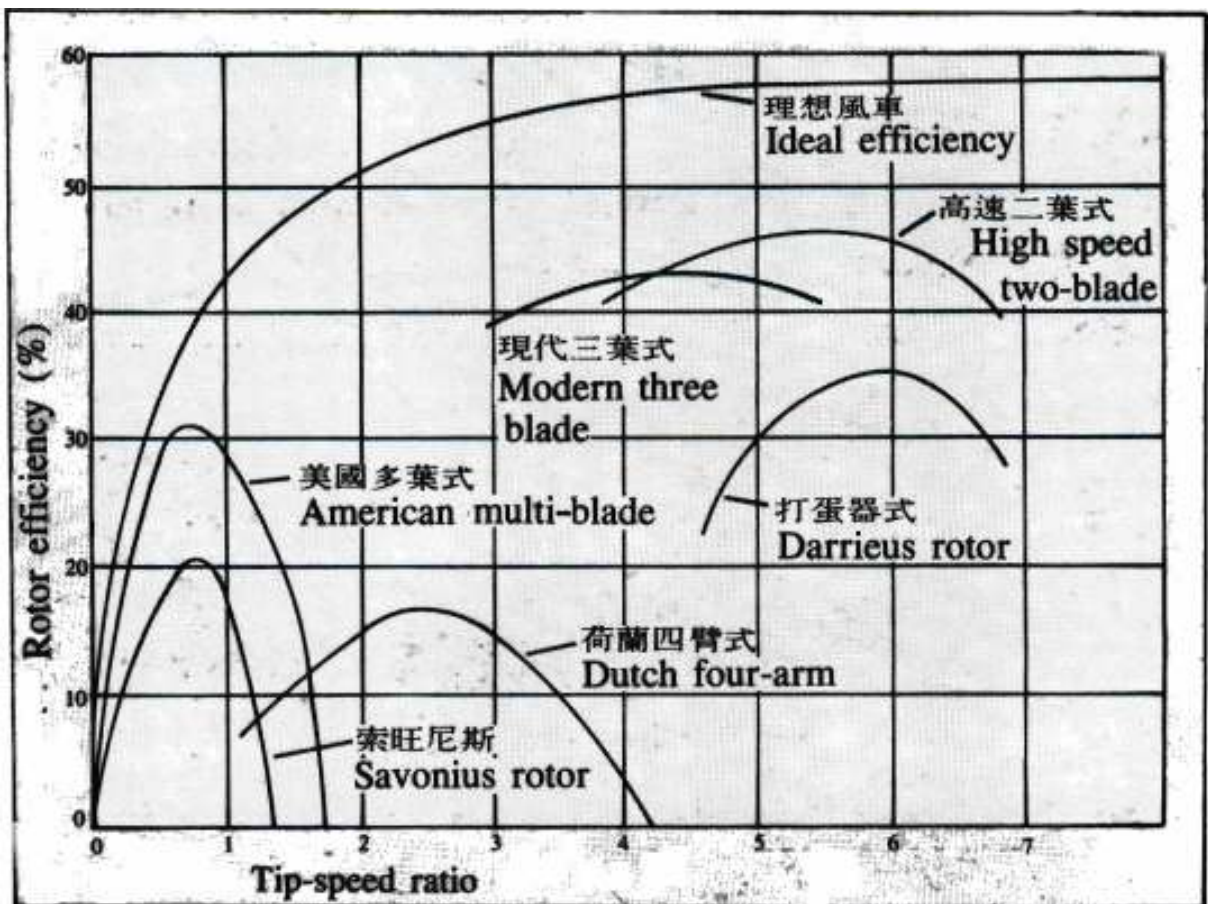


圖10 各種風車之頂端速比(λ)與轉子效率(C_p)關係圖 [15]

2.2.2 風車頂端速度比〔3〕

表示風車性能的另一值為頂端速度比(Tip speed ratio 簡稱TSR) λ ，以風車葉片翼端速度與風速之比定義，表示為(2)式。

$$\lambda = \frac{\omega R}{U} \quad (2)$$

其中 ω : 是葉片頂端之角速度[rad/s]

R : 是葉片旋轉面半徑[m]

U : 風速[m/s]

如此可知一個理想的風車，想要有高轉子效率(C_p)，必須要有高頂端速比(λ)；而螺旋槳型風車(Propeller-type)和達流斯型風車(Darrieus-type)的風車轉子效率係數大，適合發電的高轉速、低轉矩；賽渥紐氏型(Savonius-type)和多葉式風車(multi-bladed type)為風車轉子效率係數小、低轉速、高轉矩適於揚水。

2.2.3 風車固相比 [3]

另一表示風車性能的重要特性係數為固相比(solidity ratio) S_r ，定義為葉片實質面積大小對整個葉片旋轉面積之比，表示為(3)式。

$$S_r = \frac{BRc}{\pi R^2} \quad (3)$$

其中 B : 是葉片數

c : 是葉片平均寬度[m]

R : 是葉片旋轉面半徑[m]

圖11所示為 λ 與 S_r 之關係圖，我們可明確看出，當 S_r 增加時， λ 則減小。因此，當要有一個較高之 C_p 時， λ 勢必增加，則 S_r 必須減小，亦即葉片面積要小。

由上面所述可以瞭解到，葉片固相比 S_r 影響頂端速度 λ ，而頂端速度 λ 又影響 C_p ，故要設計一風力機時，必須分別計算出 S_r 、 λ 與 C_p 之間的關係方能精確求出風力機的輸出風能。

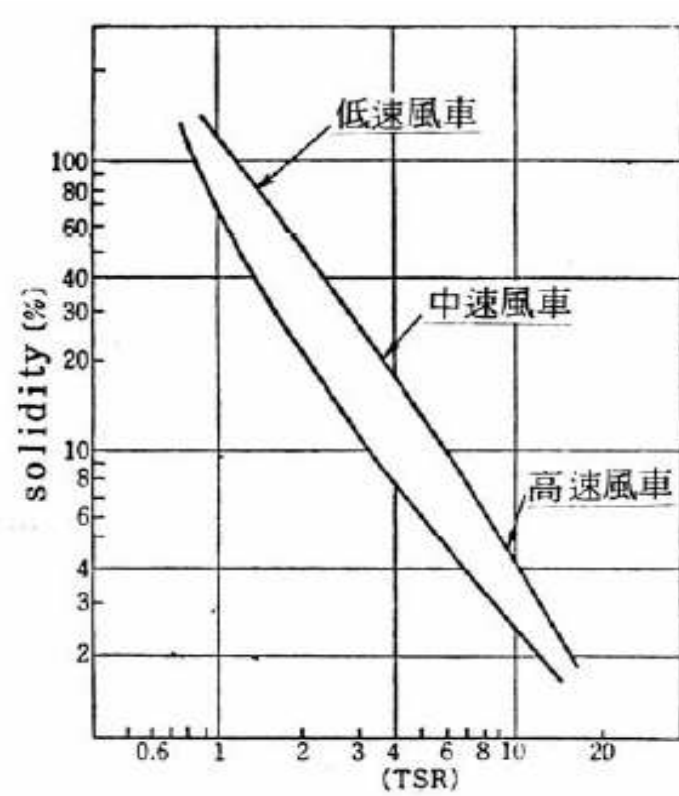


圖11 頂端速度比TSR(λ)與固相比solidity(S_r)之關係圖〔3〕



2.2.4 Savonius 葉片上作用力方程式 [3]

Savonius轉子其作用在葉片上的力 F_D ，如式(4)所示

$$F_D = \frac{1}{2} \rho (v - v_b)^2 A_v C_D \quad (4)$$

其中， ρ 為空氣密度， v 為進入葉片之風速， v_b 為葉片之轉速， A_v 為葉片之面積， C_D 為葉片之阻力係數。一般而言， C_D 約介於0~1之間，如果葉片靜止不動且風向垂直於葉片時，則葉片具有最大之 F_D 。當 F_D 乘上葉片轉速可得作用於葉片之功率，如式(5)所示：

$$P_D = \frac{1}{2} \rho (v - v_b)^2 v_b C_D A_v \quad (5)$$

由上式可知， v 愈大時，葉片擷取風能成一拋物線上升或下降。當葉片速度為風速的三分之一時，則葉片擷取到最大之風能。若 A_v 減少時作用在葉片上之力 F_D 隨之下降。

2.2.5 Savonius動能及扭矩係數 [3]

Savonius型式風力機作用於轉軸上之動能計算，如式(6)所示：

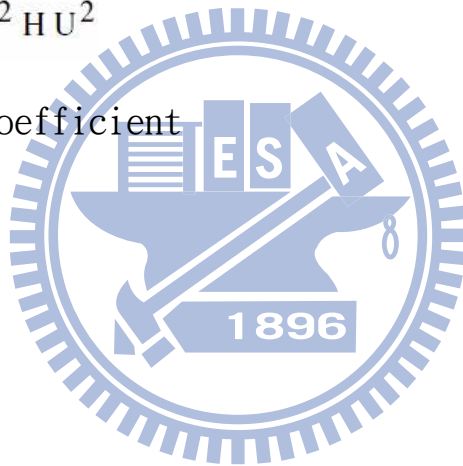
$$P = C_p \rho R H U^3 \quad (6)$$

其中H：葉片的高度，U：風速

Savonius型式風力機作用於轉軸上之扭矩，如式(7)所示：

$$M = C_m \rho R^2 H U^2 \quad (7)$$

其中 C_m ：為Torque coefficient



2.3 Savonius型風力機幾何參數之關係

一般Savonius型式之葉片相關之幾何參數經驗值之定義如圖12所示

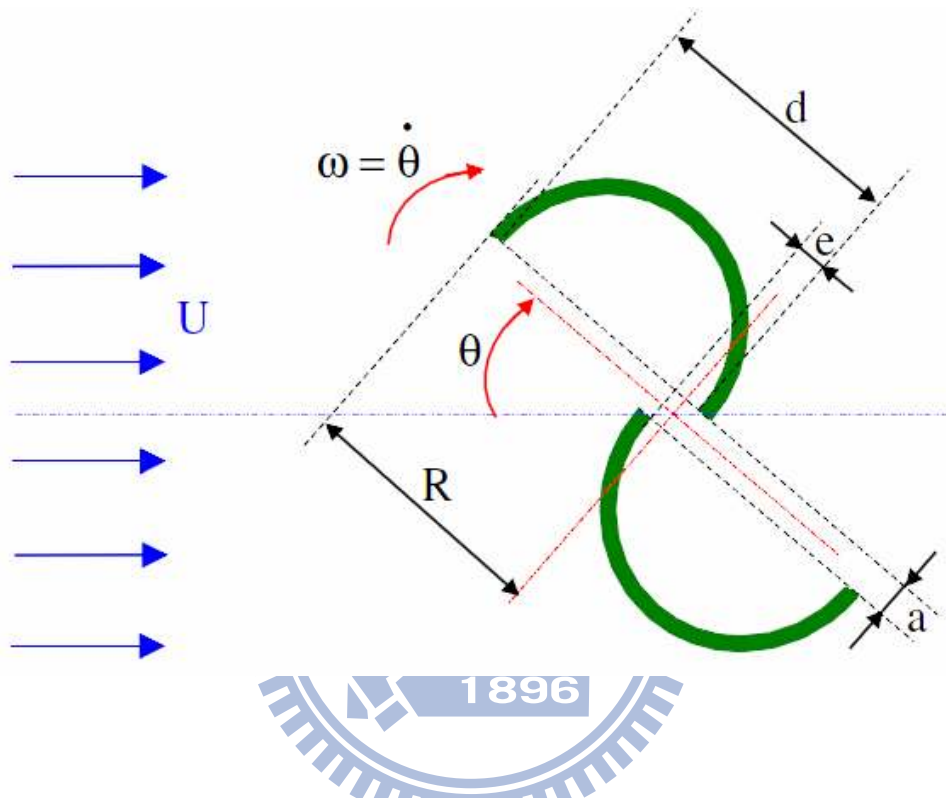


圖12 Savonius型式葉片幾何參數定義圖 [16]

另表2 為圖12所示之Savonius風力機之主要幾何參數建議值，Number of steps為上下2層之設定，End-plates radius是指葉片上下端圓盤之半徑與葉片組之半徑比為1.1倍，但本文探討之改良型Savonius風力機因葉片為位移可變型式，故並不適用。

表 2 Savonius 葉輪主要幾何參數值 [16]

Number of steps	Number of paddles	End-plates radius R_f	Height of the rotor H	Primary overlap e	Secondary overlap a
$2 \rightarrow \infty$	≥ 2	1.1 R	4 R	$0.15 d \rightarrow 0.3 d$	0

其中實驗結果指出使用如圖 13 所示之兩層式 Savonius 風車，並以兩層角度相差 90 度之方式搭配，如圖 14 所示為使用單一層 Savonius 型風力機、及兩層相差 90 度堆疊後產生之扭矩關係比較表，由圖中顯式 step1 + step2 兩層相差 90 度堆疊後，雖然扭矩值之變化量有降低約 1/2，但因整體慣量增加，會使產生之扭矩值比單一 step1 或 step2 之扭矩值降低而影響風能效率。

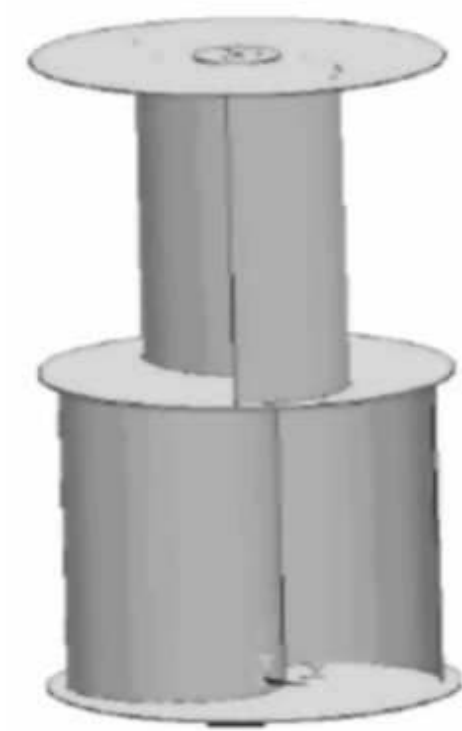


圖 13 雙層式 Savonius 型風力機〔15〕



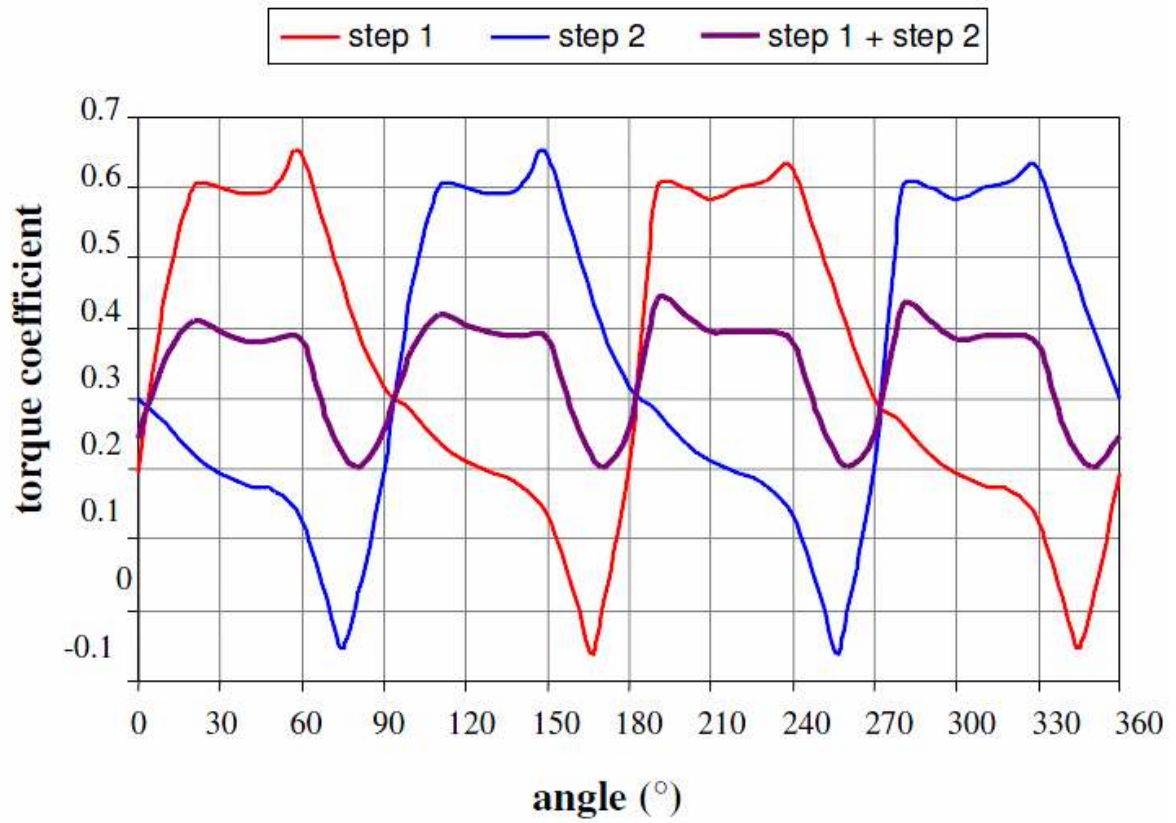


圖14 Savonius風力機層數與啟動扭矩之關係圖〔16〕



2.4 機械系統之運動模擬理論

本研究係利用MSC. ADAMS軟體進行風力機之運動模擬分析，以下分別說明運動模擬時所運用的理論基礎。首先為機動學，電腦輔助運動模擬軟體的系統模型主要是由物體零件、拘束單元、以及外界負荷三者構成 [17]，運用機動學的觀念即可建立一個完整的機械系統，建構此類機械系統中，最重要的就是定義系統自由度(Degree of freedom ,DOF)。

一般在定義系統的自由度可運用如下之Gruebler方程式(8)：

$$M = D(N - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i \quad (8)$$

其次為剛體動力學，在動力學的理論中，常用到的系統運動方程式(equations of motion)構成法則有二：


- a. 力平衡原理：如剛體之D' Alembert原理
- b. 能量平衡原理：如剛體之Lagrange方程式

最終為數值分析，系統運動之模擬必須應用數值方法，才能進行前述方程式之求解。數值分析方法的選用主要是選擇適當的積分器(integrator)及求解公式，至於選用何種積分器則須依據系統之運動聯立方程式是否為剛性方程式(stiff equation)而定。上述各種運動分析理論均是在使用電腦輔助運動模擬軟體時，能確保模擬成果之精度與品質所必須使用的。

三、實驗設備與模型製作

本研究進行實驗之目的，主要針對改良型Savonius型風力機於不同葉片開度時，所產生之靜態力矩及轉速進行實驗數值之量測，建立不同葉片位置對扭矩值及轉速之關係，並與動態模擬後之行為進行比對。實驗之設備及模型部分僅針對改良型Savonius型風力機之部分進行，並未進行適合高風速時之Darrieus型風力機之相關實驗，而有關結合有Savonius型風力機與Darrieus型風力機之混合型風力機相關功率特性，可參考先前圖8所示及參考文獻〔11〕說明。

3.1 風洞設備



風洞是進行空氣動力學實驗的一種主要設備，幾乎絕大多數的空氣動力學實驗都在各種類型的風洞中進行。風洞的原理是使用動力裝置在一個專門設計的管道內驅動一股可控氣流，使其流過安置在實驗段的靜止模型，模擬實物在靜止空氣中的運動。測量作用在模型上的空氣動力，也可觀測模型表面及周圍的流動現象。風洞實驗的主要優點是易於控制氣流狀態和模形狀態之實驗條件，而流動參數可各自獨立變化，且一般不受大氣環境變化的影響。

1981年，美國Sandia國家實驗室為了解風洞可靠度，將一直徑2公尺的Darrieus風力發電機分別測試於低速風洞及自然風場的環境下，比較自然風場數據與風洞測試結果是否相符，風洞內所量測之最大功率係數為0.32，自然風場所得之最大功率係數為0.34，其餘的測試點皆相當的接近，證實風洞及風場的測試資料具有高度吻合性，代表利用風洞來測試風力發電機性能之準確度與可靠度是很高的〔2〕。

本研究之風洞實驗感謝三陽公司熱情提供場地及器材，如圖15(a~b)所示，其風洞總體大小長*寬*高約為2.5m*0.7m*0.7m，產生最高風速約10m/s，主要藉此設備提供趨近於自然風場之測試環境。



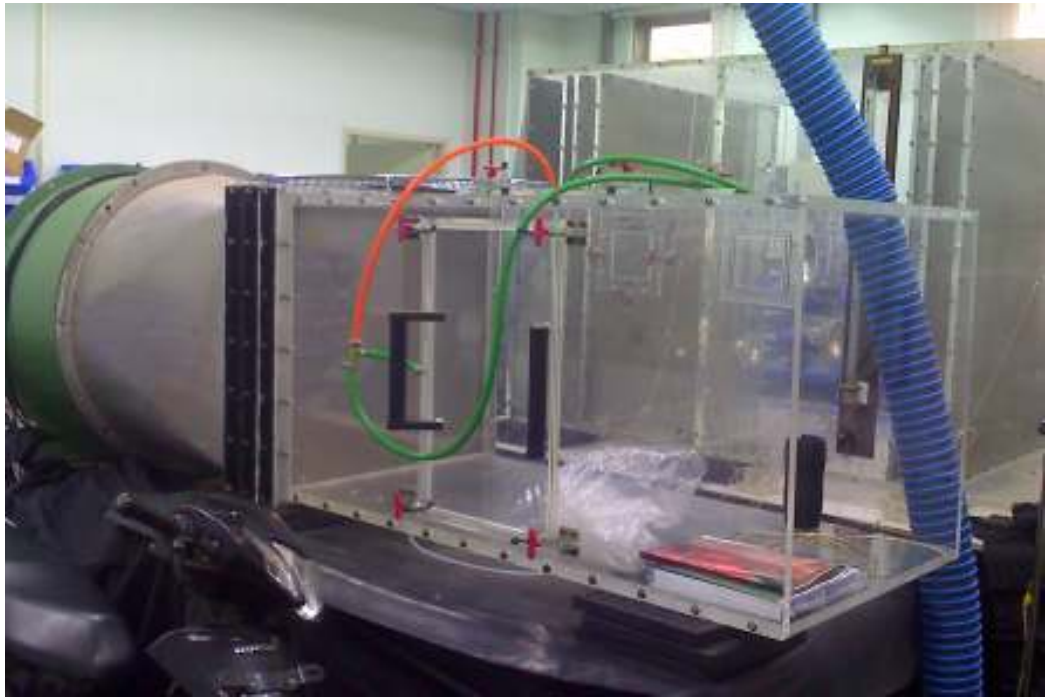


圖15(a) 風洞實驗設備



圖15(b) 風洞實驗設備

3.2 量測設備

(1). 風速量測計：

本實驗採用如圖16所示之TSI Air velocity transducer進行風速之量測，內建數值轉換器計，可進行平均風速0~50m/s之量測，並將Air velocity transducer之輸出電壓值經轉換後產出平均風速值。



圖16 風速量測計

(2). 扭力感測器：

本實驗採用如圖17所示，Honeywell公司生產之1720型式非接觸感應式扭力計，所需供應電壓為12V，測試範圍為5 N·m，並有0.25%之精度，其感測器兩端各伸出一連接軸，量測扭矩時須將一側連接軸固定，另一側扭轉時會有訊號輸出至訊號擷取設備，量測轉速時則將扭力感測器一側轉軸透過連軸器固定於旋轉物件上，另一側之轉軸不需固定即可量測，其內建有電壓放大器，並能同時偵測轉軸之轉速及扭矩。



圖17 非接觸感應式扭力計

3.3 訊號擷取設備：

本研究採用之扭力與轉速顯示系統，所需供應電壓110V交流電，可直接透過訊號傳輸線與扭力感測器進行連接，並於面板顯示扭矩值，單位為 $N \cdot m$ ，轉速單位為rpm，如圖18所示。



圖18 扭力與轉速顯示系統

3.4 實驗模型製作

3.4.1 風車模型設計與製作

因本實驗擬進行Savonius風車葉片重疊量與靜態扭矩相關之實驗，故模型製作初期先使用電腦輔助繪圖軟體AUTOCAD進行機構設計，如表3所示為實驗模型尺寸與參考圖12文獻之模型葉片幾何參數，而本研究實驗模型之葉片重疊量，分別可預設固定於12mm、26mm、40mm、54mm之四組位置，如圖19所示為葉片位移示意圖。

表3 模型葉片幾何參數

NO.	項目	說明	模型尺寸	文獻尺寸	備註
1	d	葉片之直徑	71mm	150mm	兩片葉片直徑與高度相同
2	h	葉片之高度	80mm	240mm	
3	e	葉片主要重疊量	12/26/40 /54mm	24mm	
4	D	上下端板直徑	略	略	因葉片位移量為變化值，故無此設計。
5	a	葉片次要重疊量	0	0	

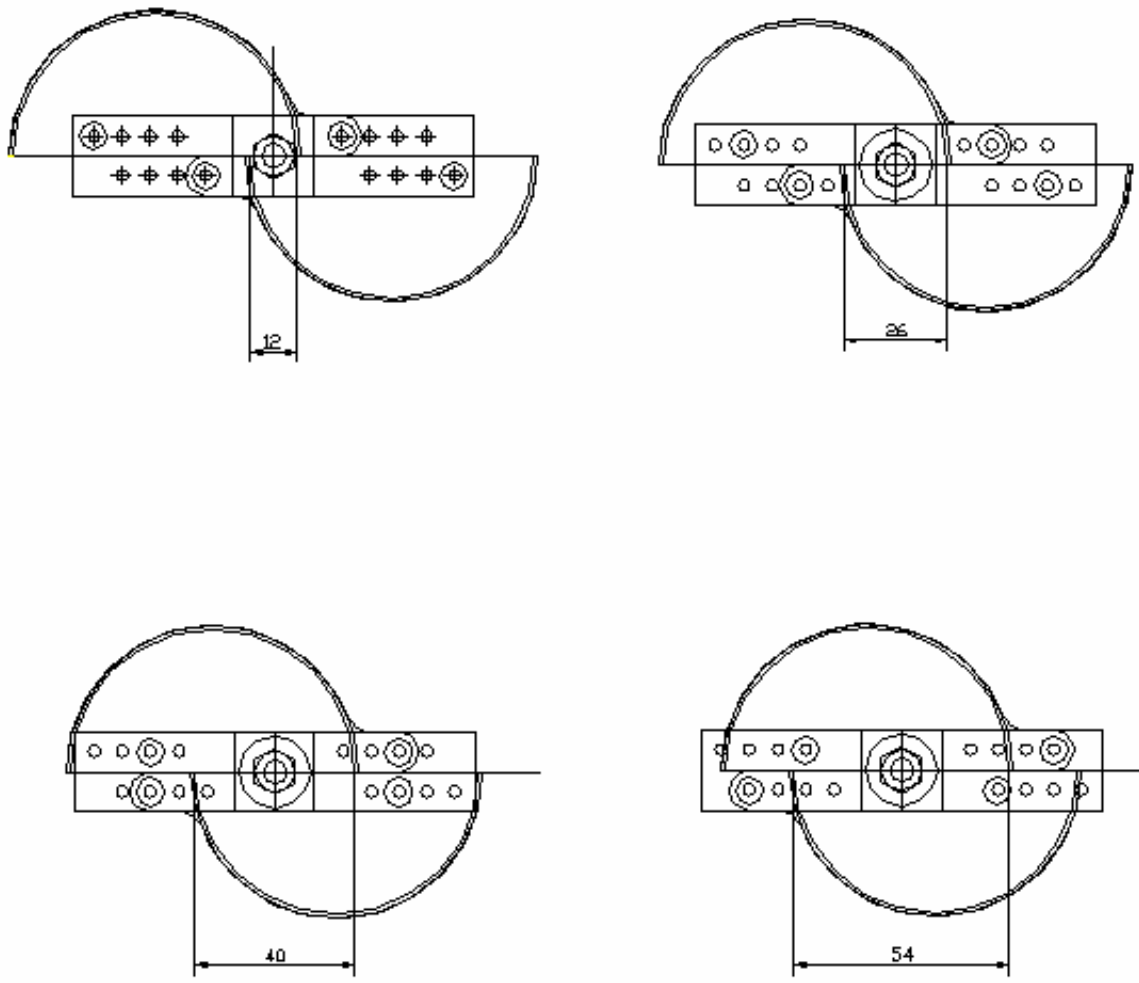


圖 19 葉片位移示意圖

進行實驗設計與加工過程中需同時評估時間、成本與品質，例如實驗模型之主體結構多數由壓克力板切割後組合而成，圖20(a~f)所示為細部設計圖，因雷射切割之定位精度很高，可達0.02mm，雷射光點僅0.01mm，可將plate a~d較小之零件，規畫緊湊排列，各零件間距不需預留過大，如此可減少廢料及節省換工程所需之時間，另Base plate上方則可先行設計預留有調整葉片時工具作業之空間，之後再將.DWG的圖檔匯入系內實驗室之雷射切割機中進行壓克力板切割。



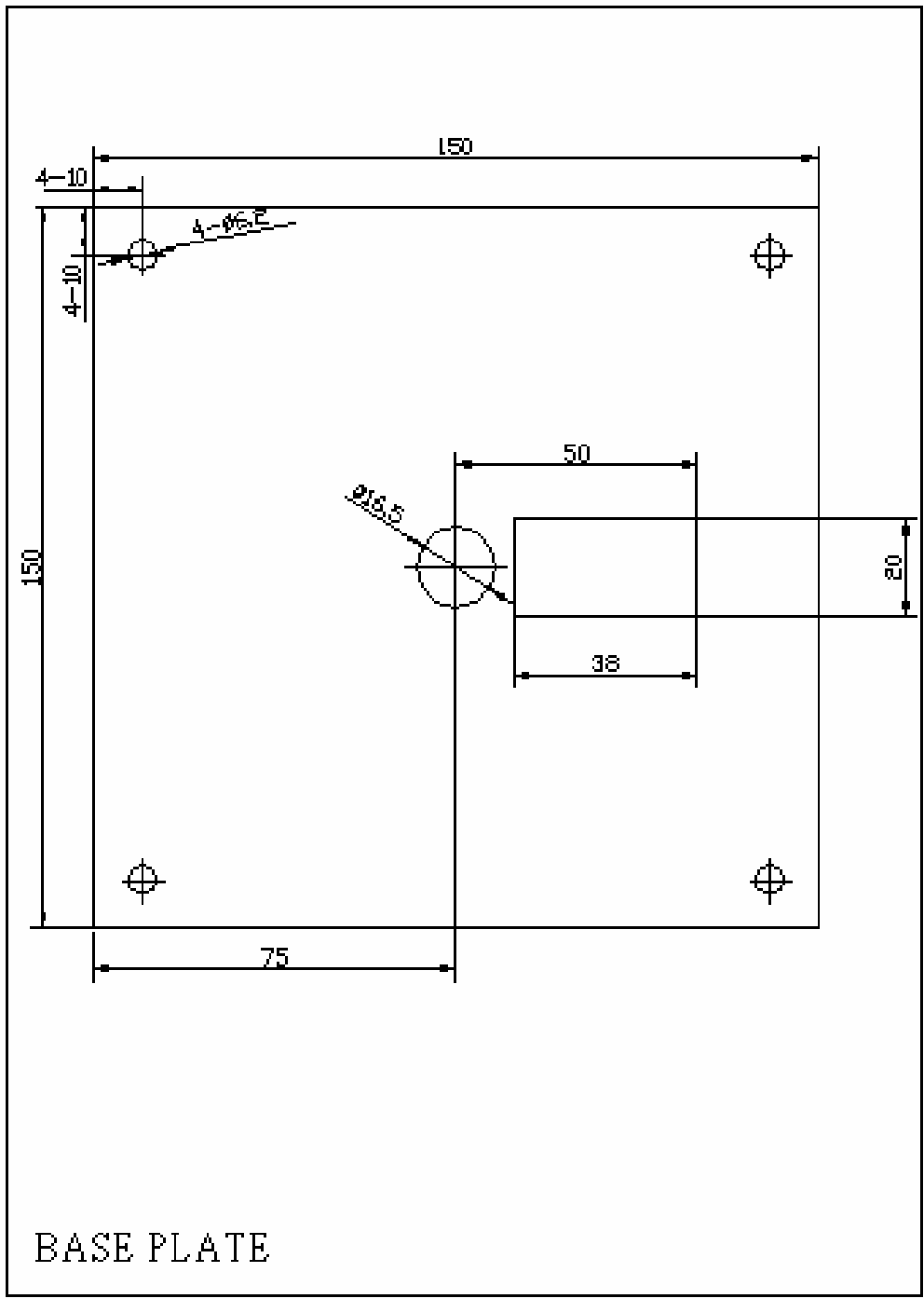


圖20(a) Base plate設計圖

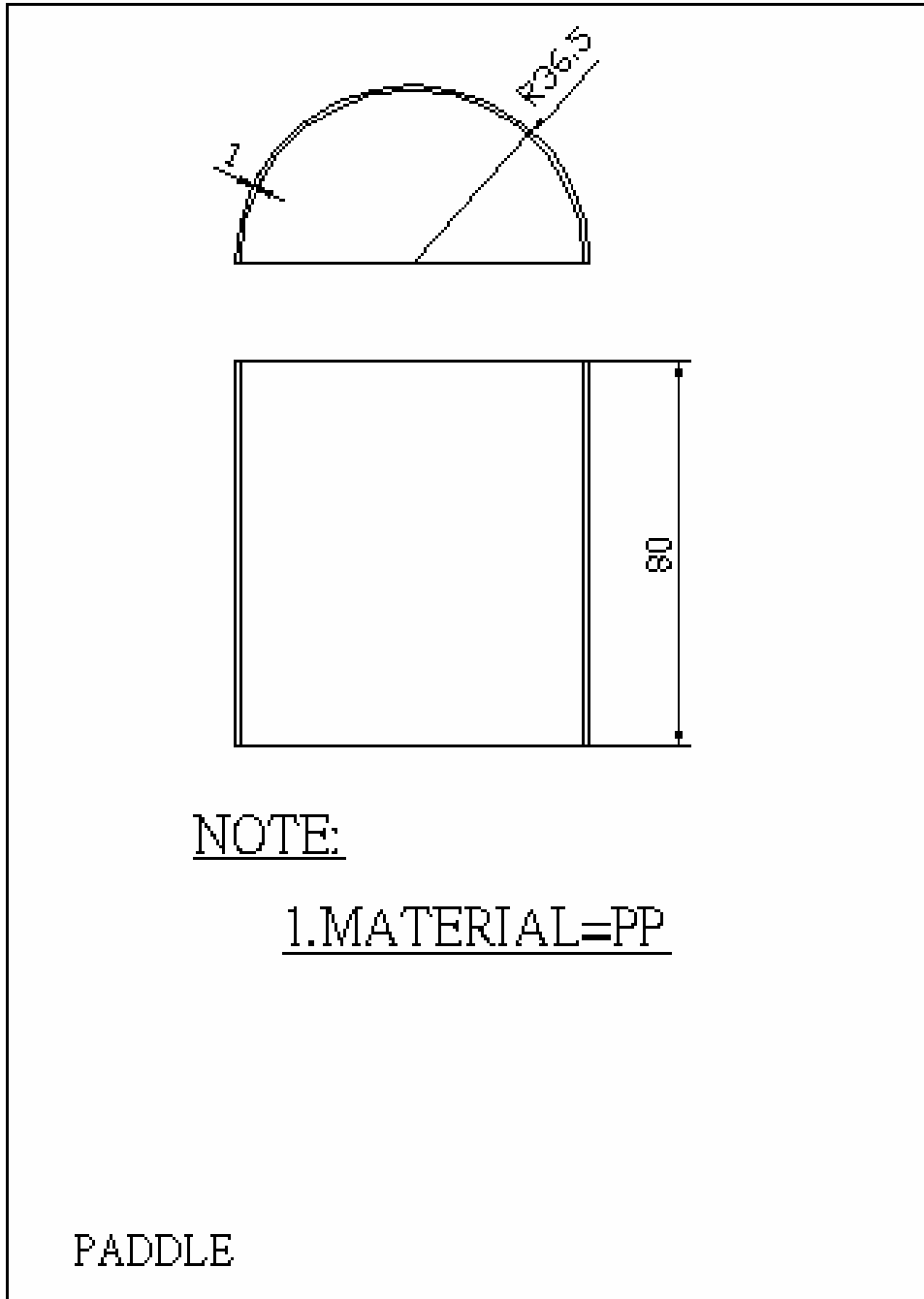
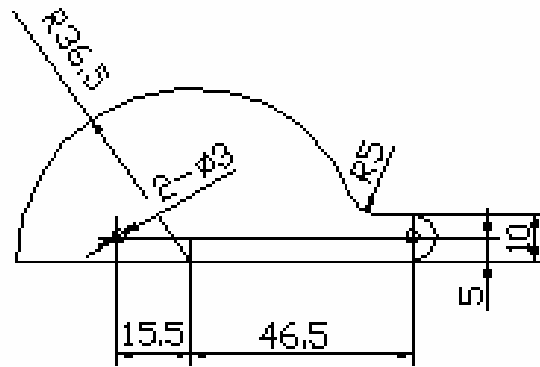


圖20(b) Paddle設計圖

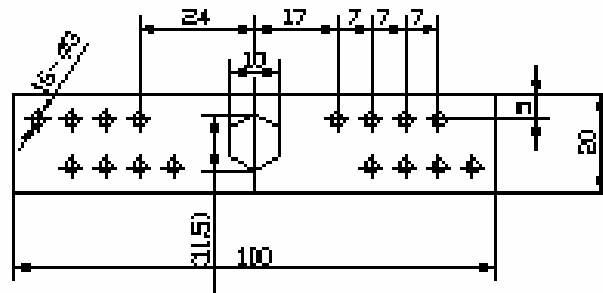


NOTE:

1.MATERIAL=ACRYLIC,t=2

PLATE A

圖20(c) Plate a設計圖

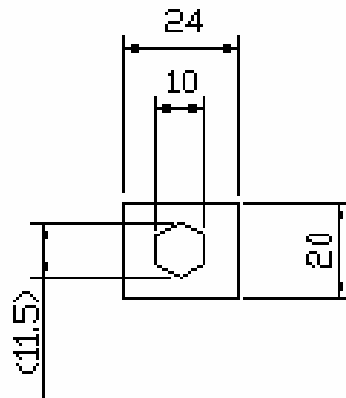


NOTE:

1.MATERIAL=ACRYLIC,t=2

PLATE B

圖20(d) Plate b設計圖



NOTE:

1.MATERIAL=ACRYLIC,t=2

PLATE C

圖20(e) Plate c設計圖

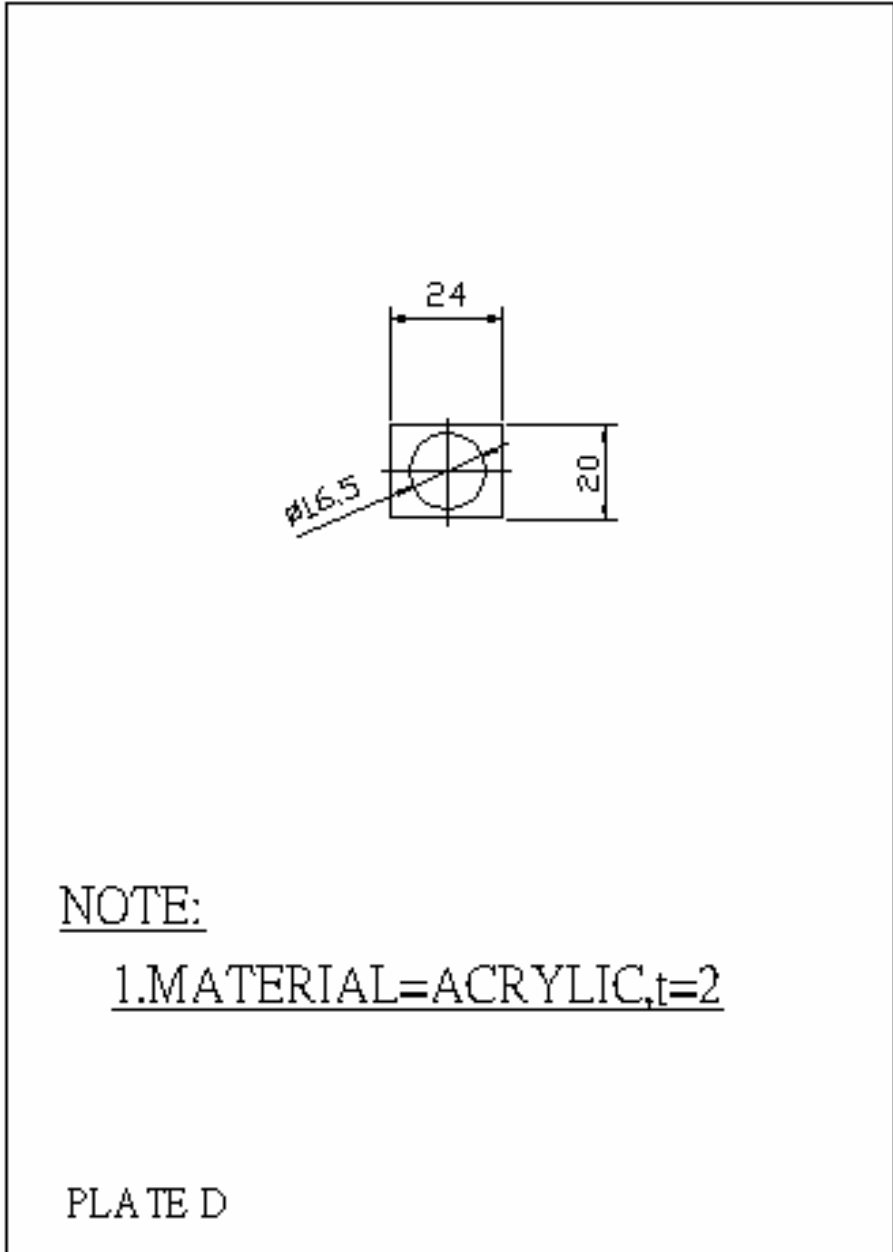


圖20(f) Plate d設計圖

另於完成主要雷射切割之壓克力零件後，尚須搭配附屬零件，如螺桿、螺帽等零件以將Savonius風車組立，如表4為實驗過程所需之附屬零件項目及規格表，最後再完成圖20(g)之零件組立圖並依圖施工，圖21(a~e)所示為使用UG NX所建立之3D機構模型組立及葉片位移示意圖。

表4 實驗附屬材料項目及規格表

NO.	項目	規格	數量	備註
1	螺桿	M6*1.0*100	1	旋轉主軸
2	螺絲/螺帽/墊片	M6*1.0/M3*0.5	30	
3	軸承	6*17*5	2	內含黃油潤滑
4	連接頭	30*35/6*1.0	1	連接扭力感測計

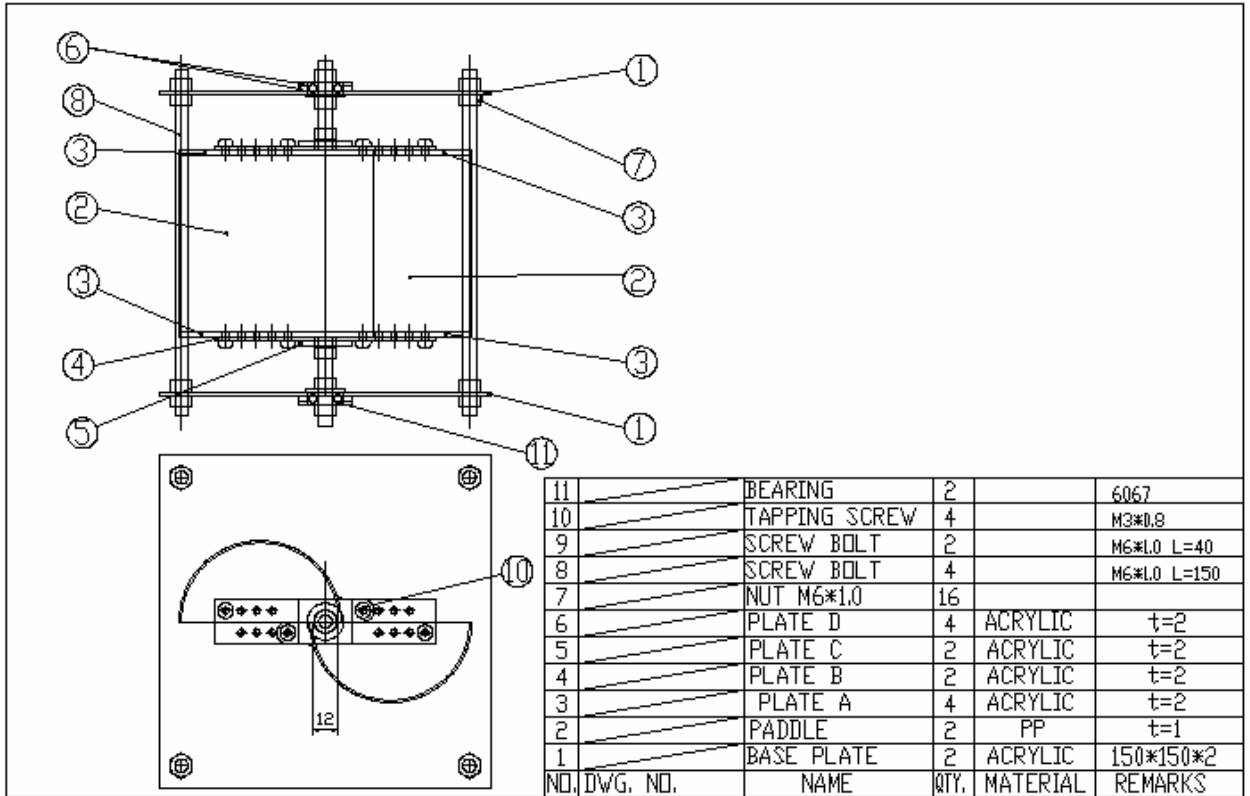


圖20(g) Savonius rotor assy. 組立圖



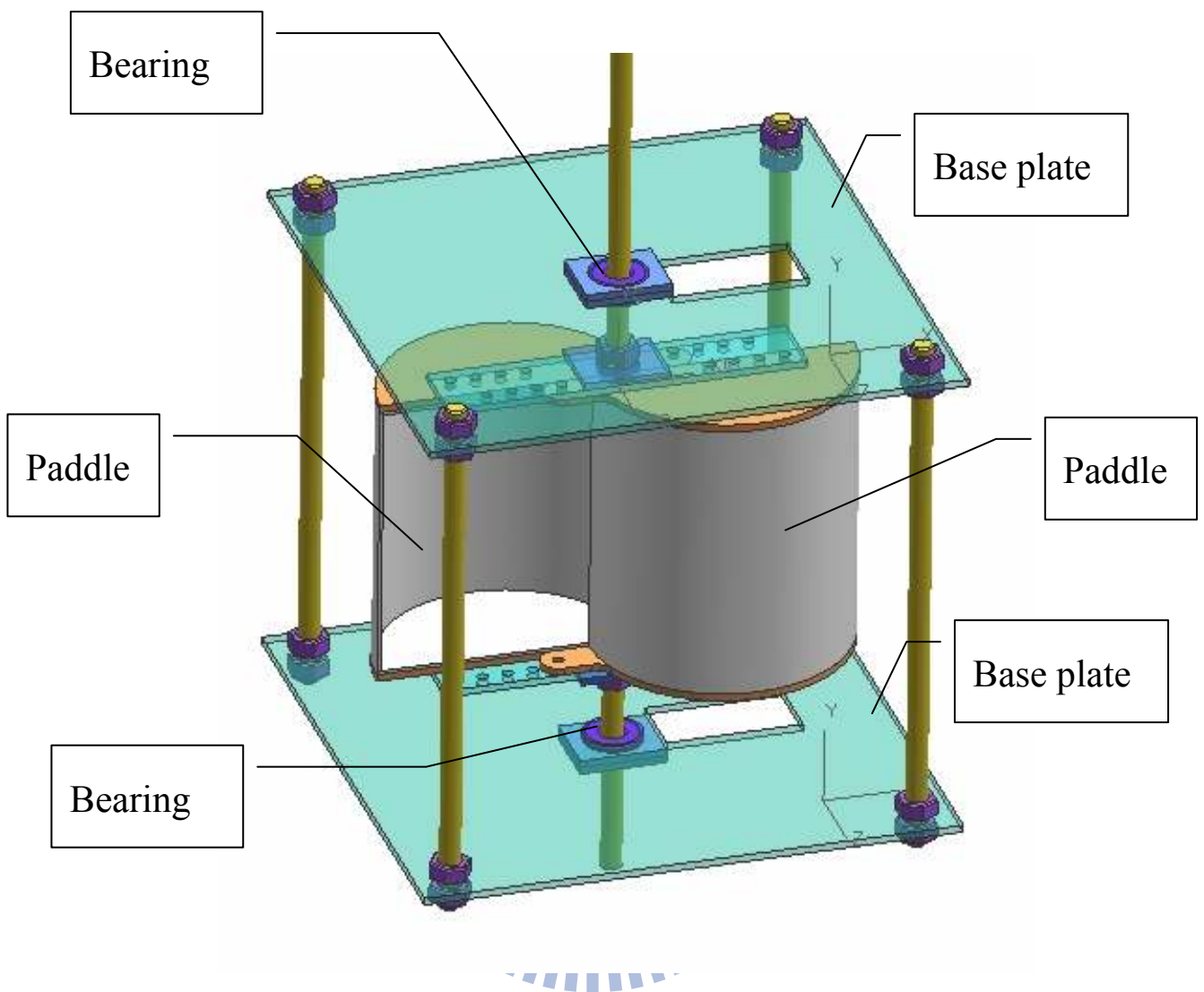


圖21(a) 實驗風車之3D機構組立模型圖

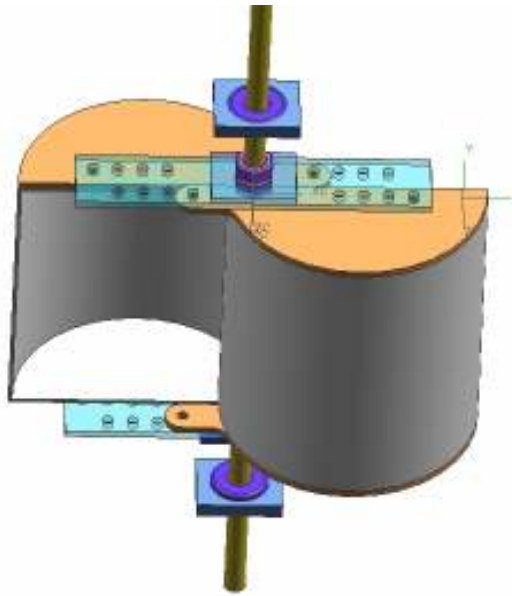


圖21(b) 葉片重疊量為12mm圖示

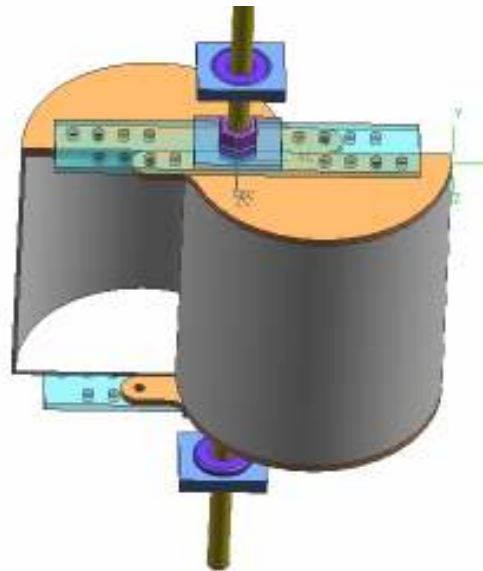


圖21(c) 葉片重疊量為26mm圖示

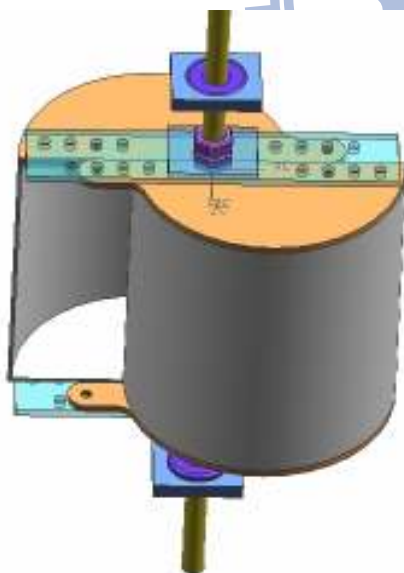
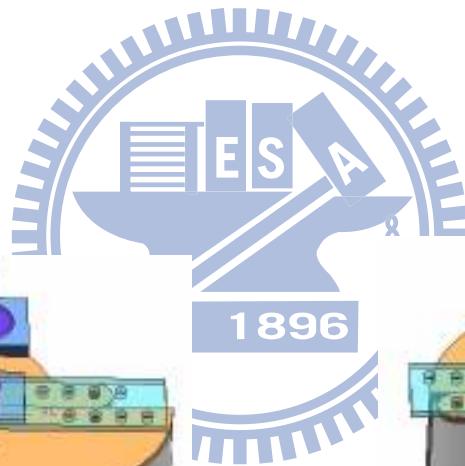


圖21(d) 葉片重疊量為40mm圖示

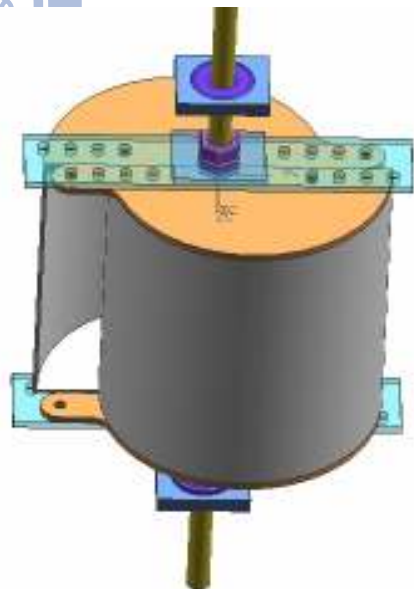


圖21(e) 葉片重疊量為54mm圖示

3.4.2 風車模型組裝

後續則將雷射切割後之壓克力板及附屬零件進行組裝，如圖22所示為組裝過程及圖23為風車完成品，組裝時由葉片及旋轉軸開始，若轉軸採上下兩段之型式，須注意轉軸與葉片之垂直度以維持轉軸之同心度，亦可將轉軸貫穿葉片組，雖轉軸會影響兩葉片間之流場，但轉軸貫穿葉片組之型式可使葉片組旋轉時更為順暢，其葉片間距設定為4段可調式設計，每一段位移量設定7mm，因葉片上下之Base plate預留有工具調整孔，故進行葉片位移調整時不需拆卸Base plate。

後續組裝補強風車結構之螺桿時，則須注意維持上下Base plate之平行，以避免因螺桿鎖付力不均，使Base plate因扭曲而造成軸承受力歪斜而磨擦力變大之情形，軸承則外環輕壓配於Base plate上方，若風車葉片組結構於運轉中無發生偏擺或過大之震動，則可以拆除上下端之Base plate及螺桿等構件以減少摩擦損失。



連接頭

圖22 實驗風車組裝過程

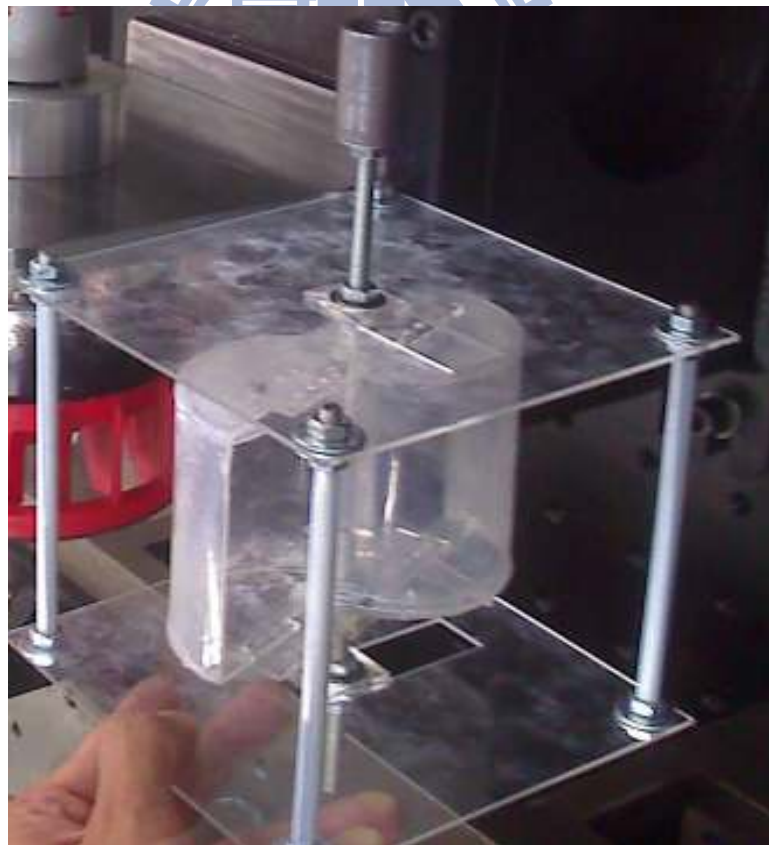


圖23 實驗風車完成品

四、實驗方法與結果討論

4.1 實驗方法

風力機產生之扭力值量測一般分為兩種，分別為Reaction torque和Rotary torque。Reaction torque的量測是以擬靜態(Quasi-static)的方法來近似各旋轉角度扭力輸出，分析不同旋轉角度位置的扭力表現，量測角度的定義如圖24所示，先將風車X方向與風向垂直，再順時針旋轉 θ 角度後進行實驗，風速則於風洞中設定於10m/s。

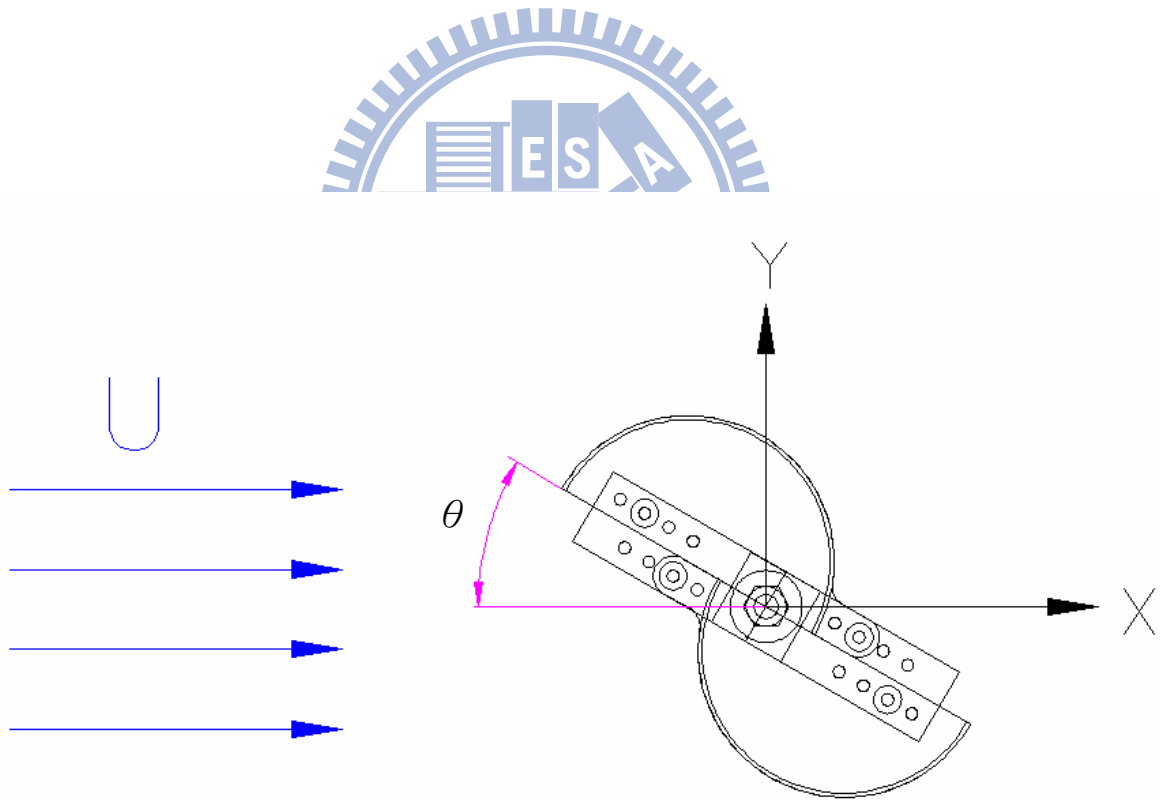






圖24 風車量測角度示意圖

4.2 實驗流程

量測Reaction torque時，風力機為固定不動，表5所示為本實驗之風向與葉片角度關係表，分別將葉片固定於0度、30度、60度、90度、120度、150度及180度位置，量測各角度的Reaction torque表現，而葉片重疊量共有12mm、26mm、40mm、54mm 共4組規格皆需要個別進行，量測前將葉片轉至欲量測之角度後即將連接扭力感測器之下端鎖付固定住，即可進行Reaction torque量測，也可以利用步進馬達進行量測角度之控制。

表5 風向與葉片角度關係表

葉片角度	0	30	60	90	120	150	180
風向							

開始進行實驗時，先將風車透過連軸器後鎖付於扭力感測器之一端，如圖25所示為實驗風車完成品與扭力感測器配置，連軸器可吸收動力傳遞過程中之震動與衝擊以保護扭力感測器。



圖25 實驗風車完成品與扭力感測器配置

於實驗中，葉片重疊量共需進行四組之變更，葉片角度之定位，係於 Base plate 上方之角度以刻畫記號，並將葉片組與刻畫記號對齊，本實驗設定每組葉片重疊量需分別進行角度為30度、60度、90度、120度、150度及180度之實驗量測，角度定位後再將扭力計下方之軸部與基座鎖緊固定。後續將風洞之風速設定為10m/s，並量測每組重疊量各個角度之下之 Reaction torque；欲量測風車轉速時，須將扭力計下方之軸部與基座鎖緊處釋放，使風車由靜止狀態開始加速旋轉，並可搭配碼錶分別記錄扭力與轉速顯示系統之四組葉片重疊量之顯示數值。圖26為本實驗風力機於風洞中之實驗情形。



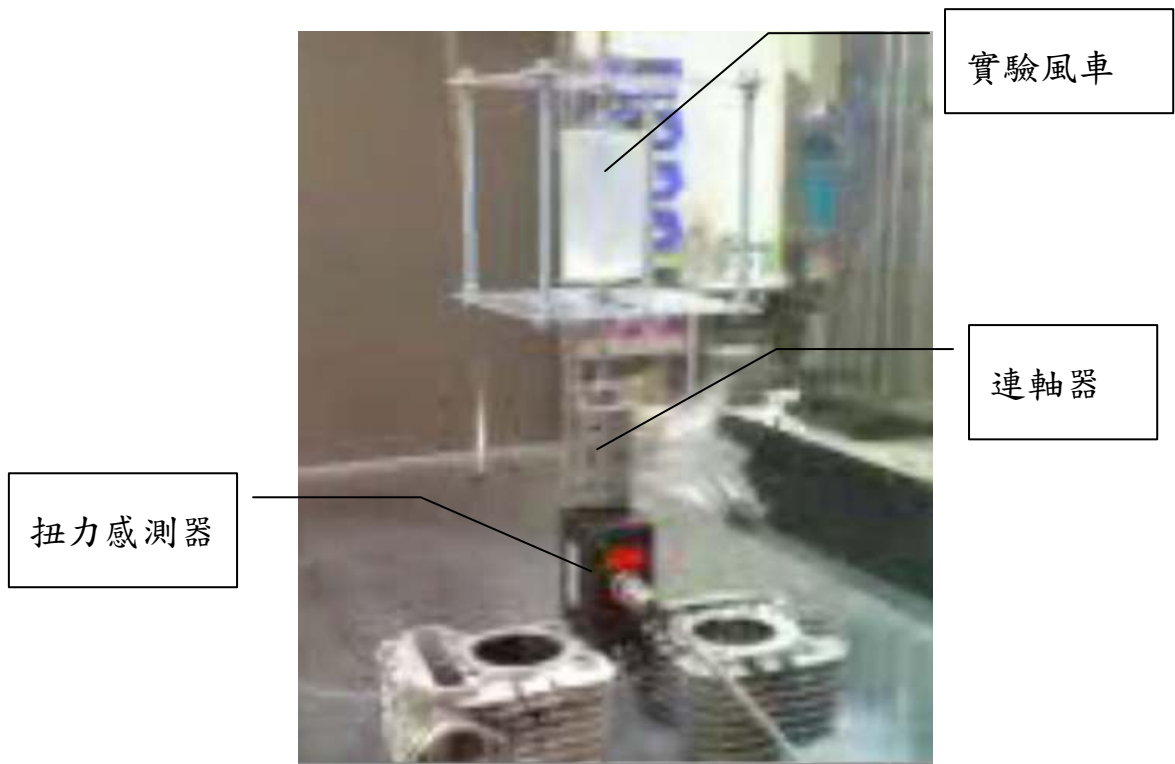


圖26 本實驗風力機於風洞中之實驗情形



4.3 實驗數據量測與結果

實驗之結果由圖27所示，為參考文獻〔14〕及本文實驗之四組不同葉片重疊量之實驗靜態力矩與葉片角之比較數據，其四組不同葉片重疊量之最大扭矩值皆產生在葉片角度在30度時，最小扭矩值則出現在葉片角度150度時，以上因實驗時角度係以每30度為一量測間隔，故實際最大或最小值可能出現些許變化，但是對趨勢影響變化不大，結果顯示葉片重疊量增加時產生之扭力變化量會有減少之趨勢，參考文獻之數值於最大時約有0.18N·m之扭力值，明顯高出本文實驗之水準，其原因為其風車尺寸約大於本模型2.1倍，風速係以14m/s進行實驗導致，但扭矩變化值相對應葉片角度之趨勢與本實驗模型之趨勢具高相似性。

轉速量測時，則利用碼錶記錄每間隔5秒時扭力與轉速顯示系統上之轉速值，實驗中發現增加葉片之重疊量，即葉片逐漸收合時，風車轉速亦會隨之下降，由圖28所示為四組不同葉片重疊量之轉速與時間比較值，轉速顯示會於測試開始後約20~25sec之後趨於穩定。

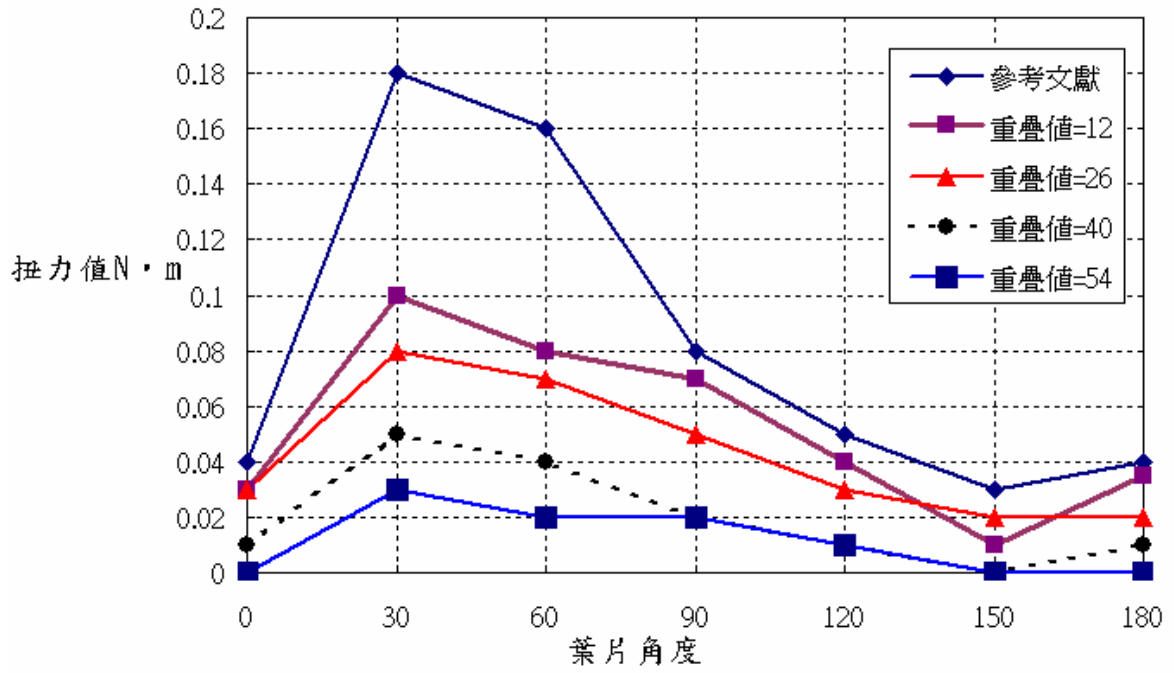


圖27 葉片重疊量之靜態力矩與角度比較圖



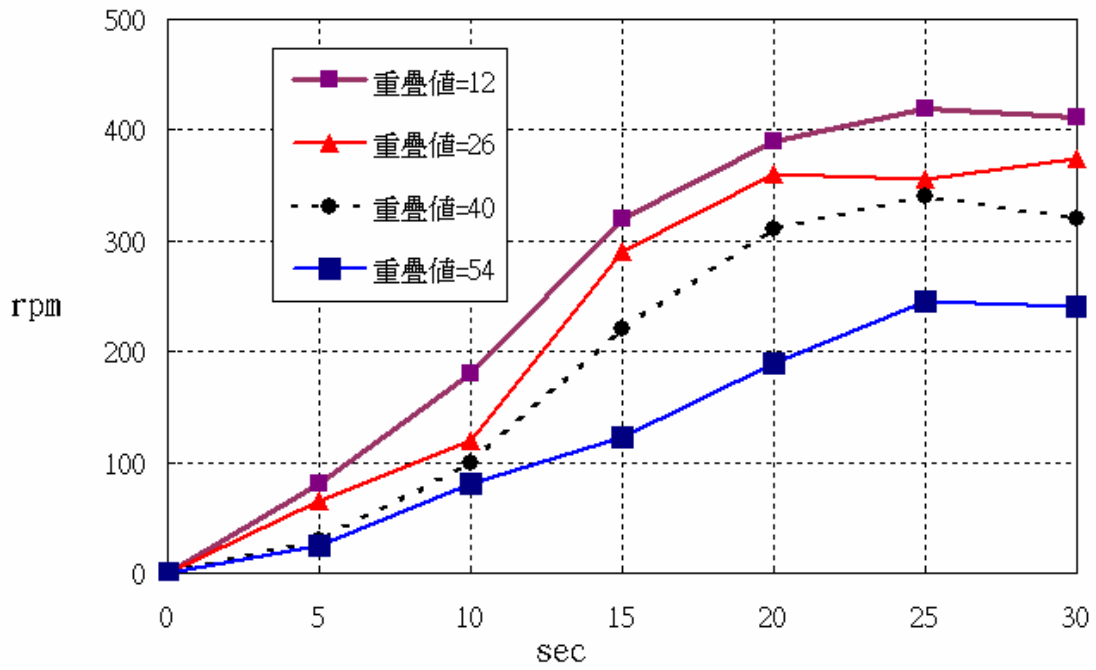


圖28 葉片重疊量之時間與轉速比較



五、電腦模型建立與動態運動模擬

5.1 風車模型建立

本論文使用之模型係使用 UG NX(Unigraphics NeXt Generation)來建構一個具動態調整葉片受風面積功能之風車機構模型，模型的建立使得設計者可以在電腦上看到自己設計的成品，並且可以從不同的視角來觀察這個設計成品，若是對某些特定區域的設計有所懷疑時，更可透過軟體所提供的旋轉、平移、放大、縮小、間隙檢討等功能，達到仔細觀察設計成品的目的，因此實體模型的建立，使得設計者可以更用心的觀察到自己設計的產品的優缺點。圖 29 所示為使用 UG NX 建立之改良型混合式風力機機構配置示意圖，其中央部分為本論文研究之改良型單層葉片間距可變之 Savonius 風車，外側則搭配為 Darrieus 型高速風車。

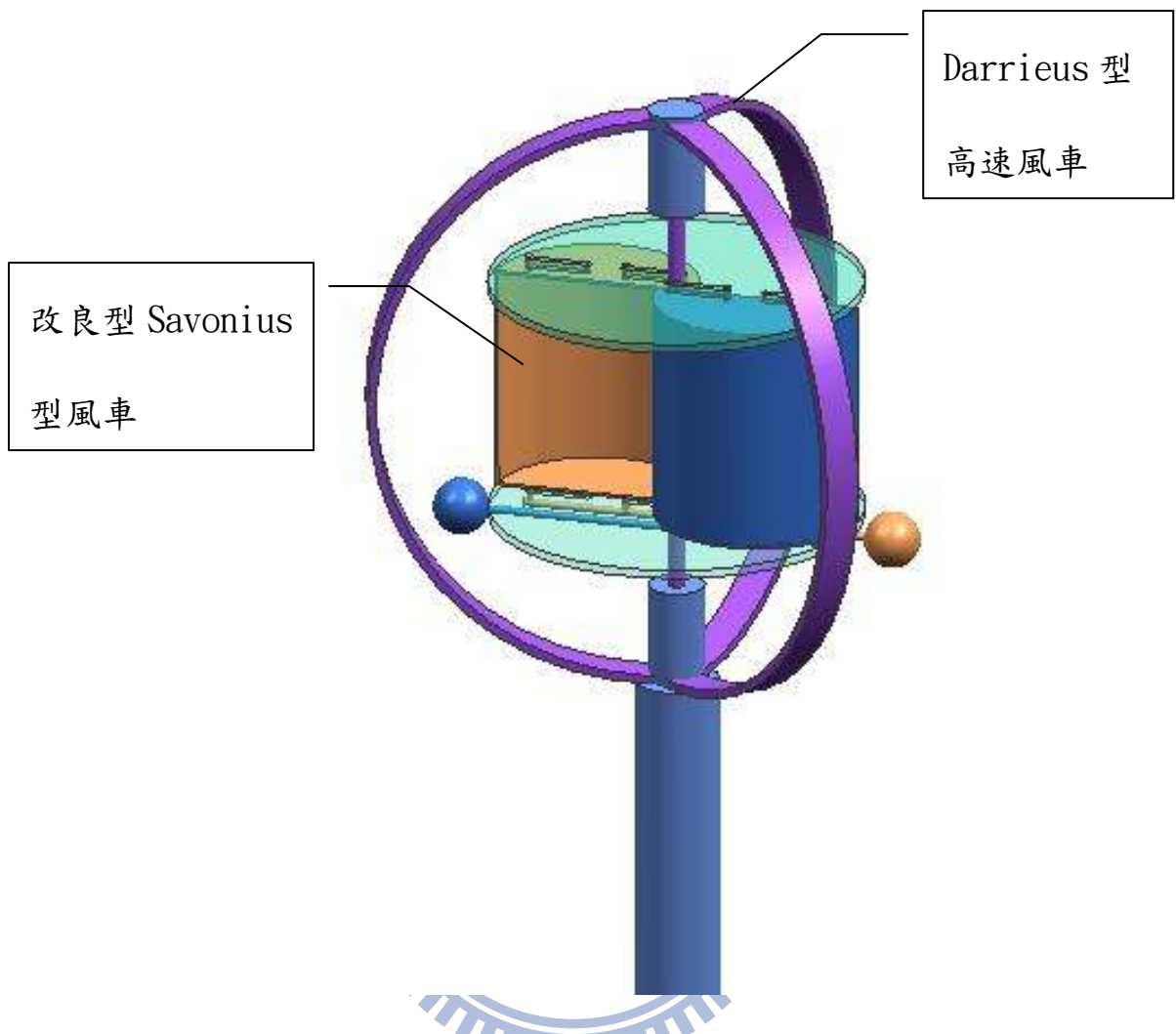


圖29 改良型混合式風力機機構配置示意圖

5.2 葉片位移控制機構

為使傳統之 Savonius 風車具備低風速易於啟動及高風速時又能將兩葉片向內收合之機能，分別於葉片上下端之圓盤設計有長孔缺槽，葉片上下端部則設計有可於長孔缺槽內部滑動之圓柱，如圖 30 所示為葉片向外展開之示意圖，圖 31 所示為葉片向內收合之示意圖。再於兩葉片間配置有葉片位移控制機構，使葉片能透過控制機構進行動態調整，而本文所使用之控制機構型式為於 Savonius 風車之兩葉片上各配置有一組離心配重及壓縮彈簧，透過兩者搭配使葉片於低速時能受壓縮彈簧之作用力而維持向外展開，當風力機於低風速之環境下欲啟動時，可利用改良型 Savonius 風車帶動混合型風車，使其克服最大靜磨擦力開始轉動，而當轉動之轉速達到可由 Darrieus 風車運轉之轉速後，Savonius 風車能藉由旋轉時配重之離心力與彈簧力之綜合作用使葉片逐漸收合，並減少受風面積，使 Savonius 風車於高風速時之阻力下降以減少對 Darrieus 風車之影響，以提升效率。如圖 32 所示為於改良型 Savonius 風力機葉片下方增加離心配重之示意圖。

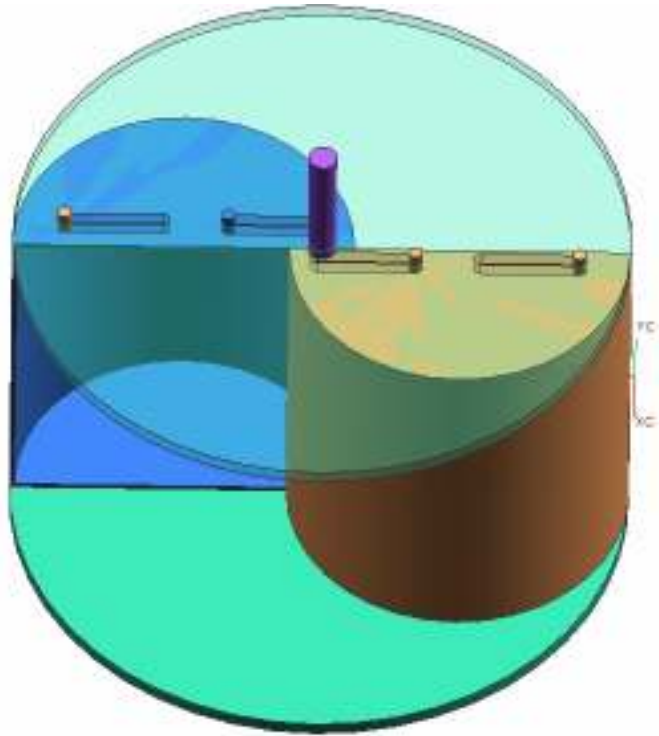


圖 30 低速時葉片向外展開之示意圖

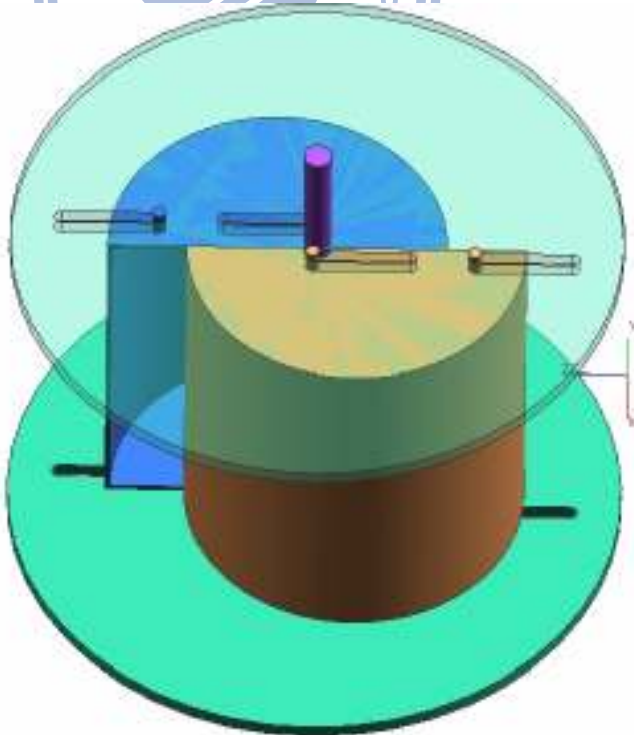


圖 31 高速時葉片向內收合之示意圖

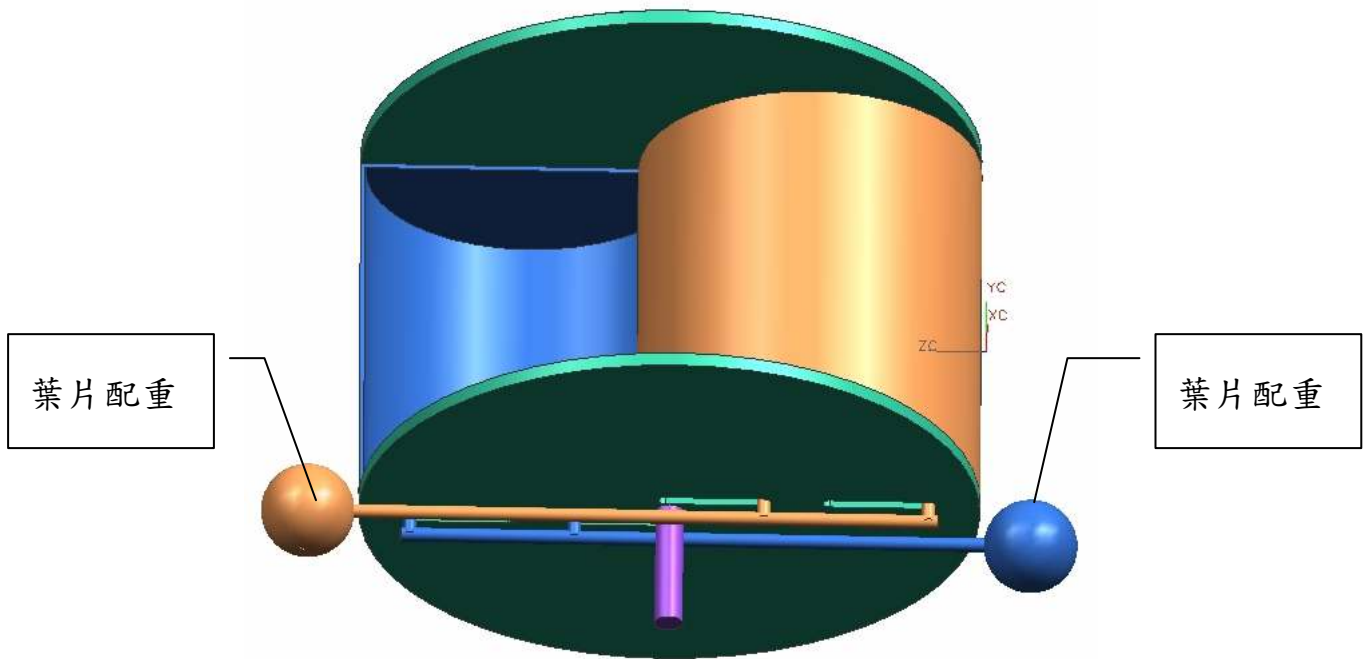


圖32 改良型Savonius風力機葉片增加離心配重之示意圖



5.3 ADAMS軟體簡介

在所有的 CAE(computer aided engineering)軟體中，ADAMS 是屬於運動模擬分析軟體的一種，其名係來自於” Automatic Dynamic Analysis of Mechanical System” (機械系統動態模擬分析)英文名稱各取第一個字的縮寫，常應用於多體系統分析(Multibody System Analysis，簡記為 MSA)，可作為模擬機械系統(人造衛星、噴射客機、汽車、怪手或軌道車輛等)之大型或小型運動，而這些運動系統係由施於系統上之作用力來產生的。

ADAMS 為一機構分析和合成之工程軟體，其功能具備完整之機構分析項目，包含的運動反應如位移、角位移、速度、加速度、角加速度…等，並可計算機構之動能、角動能、勢能…等。除了分析功能外，此軟體還具有機構合成和機構最佳化的功能 [3]。以下我們分別簡介本文中所使用的 ADAMS 軟體所包含的應用模組與其應用領域及其可執行之作業平台。

模組一(ADAMS/View)：

ADAMS/View係ADAMS軟體之圖形前置和後續處理器，可提供一套工具用以顯視資料處理結果，諸如：動畫、X-Y 圖、數值型式之輸出以及有關結果集合之數學運算等等。在分析執行ADAMS 軟體後，即可利用ADAMS/View來檢視所有的輸出。

模組二(A/Solver)：

A/Solver 為機構分析時之求解核心器，包含運動、(準)靜定、動力學之線性及非線性分析。ADAMS 軟體定義了(1)零件的慣性特徵(2)零件間之關聯性(3)系統之驅使運動和作用力，以指定模擬的機械系統模型。模型尚可包含額外的一階微分方程式和代數方程式，這些方程式與系統間相互耦合或相互獨立。每一ADAMS/Solver 模擬均開始於檢測輸入資料，以驗證機械系統的敘述是否具完整、正確以及一致性。整個驗證過程相當嚴謹，只要檢測出可能出現在輸入資料內的錯誤，便會產生有助於使用者快速找出錯誤所在的錯誤訊息。唯有在輸入資料通過ADAMS 之標準檢測後，ADAMS/Solver 才會將輸入資料轉換成相應之微分和代數方程式(DAE)，以進行機械系統的模擬。在每一個輸出時，ADAMS/Solver 會紀錄目前系統之狀態，因此，整段資料便紀錄在輸出檔案內，整個輸出內容為下述項目的組合：(1)位移 (2) 速度 (3) 加速度 (4) 反作用力(5) 作用力(6)使用者

定義之變數 (7) 使用者定義之導出結果。

模組三(A/Postprocessor):

後置處理器，執行分析後數據的整合，及動畫與分析圖表的資料整理於單一視窗中。這裡所探討的機械系統，係由多個剛體及撓體零件所組成，通常，這些零件間以各種不同接頭及約束力來連接，而由作用力與反作用力關係驅動零件間之相互運動。ADAMS 軟體利用Euler-Lagrange公式推導機械系統之運動方程式，因此，動力方程式由代數和二階微分方程式組成，必須利用複雜數值方法求解。而本文係以ADAMS 2005版之ADAMS/View圖形前置和後續處理器進行分析。



5.4 建構基本零件模型與材質參數

本論文先利用UG NX(Unigraphics NeXt Generation)建立如圖33所示之改良型Savonius風力機簡化模型，其主要目的為可減少匯入ADAMS後分析之時間，其模型主要個零件有三，分別上下圓盤、半圓形葉片及配重，其上圓盤及下圓盤可控制葉片運動方向及位移量，葉片配重因後續之動態模擬時之變數中並不考慮配重位置對流場產生之影響，故配重模型可簡化置於葉片中央之位置，實際規劃設計之配重則可單獨配置，或與外側之Darrieus高速型風車結合，即利用Darrieus高速型風車於運轉時產生之離心力，於特定時機透過連桿拉動中央之Savonius葉片，再利用Darrieus高速受離心力影響外移時，一併將Savonius葉片位移向內收合，反之於風速降低時，Savonius風車之彈簧會將其葉片向外推開，以增加迎風面積。葉片之幾何尺寸及重疊率設定係參考本文先前表3之模型葉片幾何參數表。

在ADAMS環境下一般依照各種不同開啟檔案的需要，共有建立新檔案、開啟已建立的bin檔案及開啟其他格式檔案等三種方式〔17〕，本文係將UG NX檔案的格式存為Parasolid格式再於MSC. ADAMS 匯入模型後，並確認使用單位須同UG NX之設定，選擇” Settings\units\MMKS” ，接下來則是設定座標軸系統與重力場之設定及基本的材質參數，才能進行後續的運動模擬。表6為本研究中各零件的材質參數設定表。

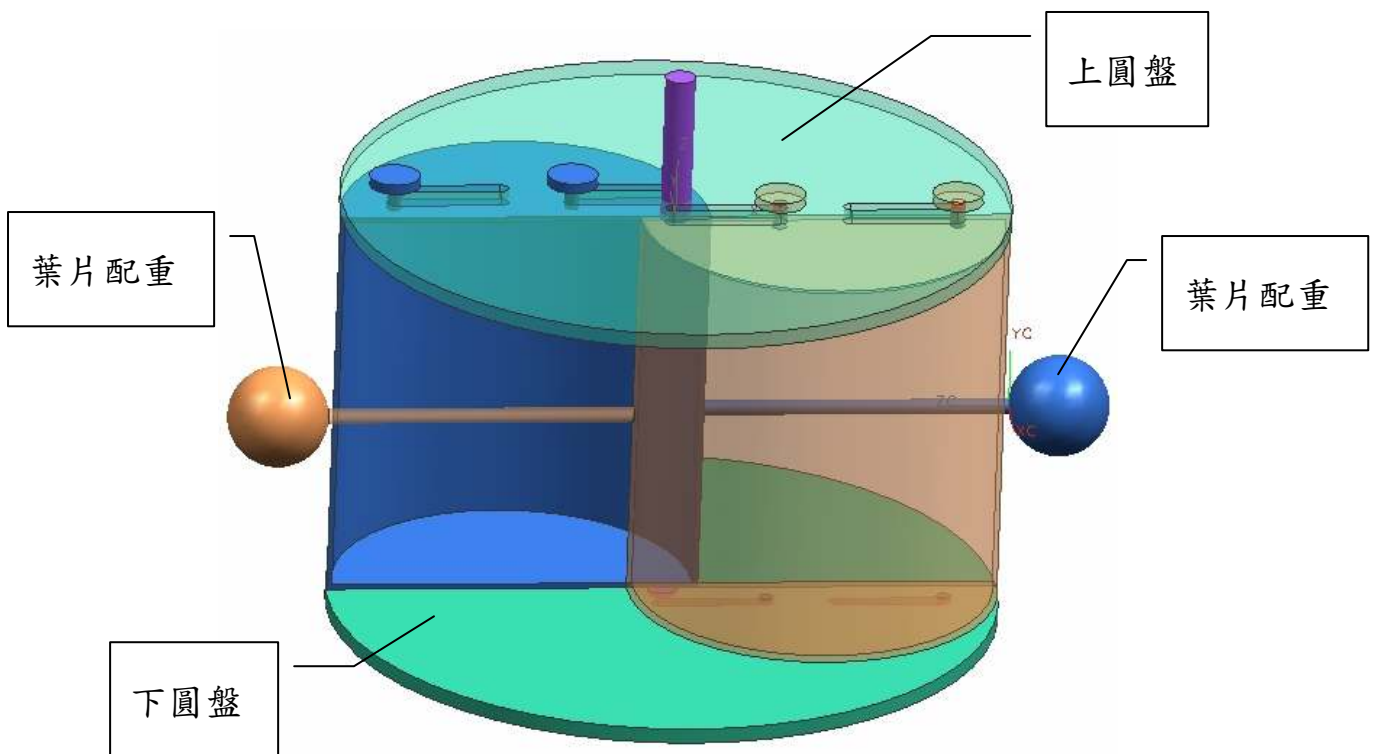


圖33 簡化後之UG NX風車模型圖



表6 材質參數設定表

	Density(kg/mm ³)	Mass(kg)
上下圓板	1.2	0.030
葉片配重區	2.74	32
葉片	1.2	0.087

5.5 拘束接頭與作用力之設定

於葉片零件材質參數設定完成之後，接著就需建立葉片以及葉片上下圓板之間所具有的固定接頭(Fixed joint)、運動(Motion)與作用力(Force)等關係。本研究模型會有兩組運動模型，分別為習知之葉片固定型式及改良型具動態調整葉片重疊量之型式。

如圖 34 所示，係為 Savonius 葉片固定型式匯入 ADAMS 的運動模型，其中葉片之重疊量設定為 12mm，其中使用到的接頭與作用力分別如下：

- a. Joint Fixed，將兩葉片及上下圓板固定在一起。
- b. Joint Revolute，設定風車系統繞轉軸中心旋轉。
- c. Applied Force，設定作用在轉軸上之扭矩，輸入參考本文先前圖 27 中數值，即 Savonius 葉片重疊量為 12mm，並於葉片相對風向之角度為 30 度時之實驗量測值為 $0.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

另如圖 35 所示為簡化模型之 Savonius 型風車匯入 ADAMS 的運動模型，兩葉片上下端部設計有定位圓柱，並可透過控制機構於上下圓板內之滑槽中移動，並於兩葉片之間設定一彈簧，而系統於靜止至動態旋轉過程中存在有許多如離心力、靜磨擦力、動磨擦力及彈簧力等線性或非線性之作用力，後續皆可透過 ADAMS 並與先前圖 27 之轉速實驗量測數據進行設定及比對，以觀察葉片之動態行為。

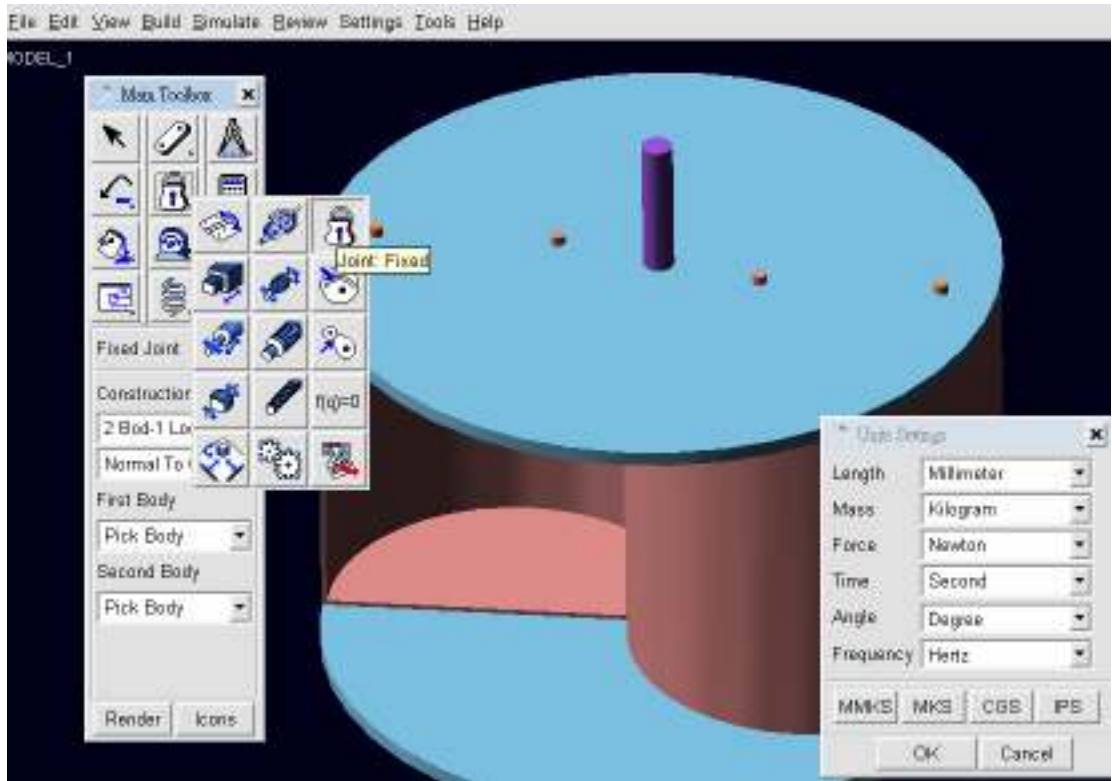


圖 34 葉片固定型式的風車運動模型



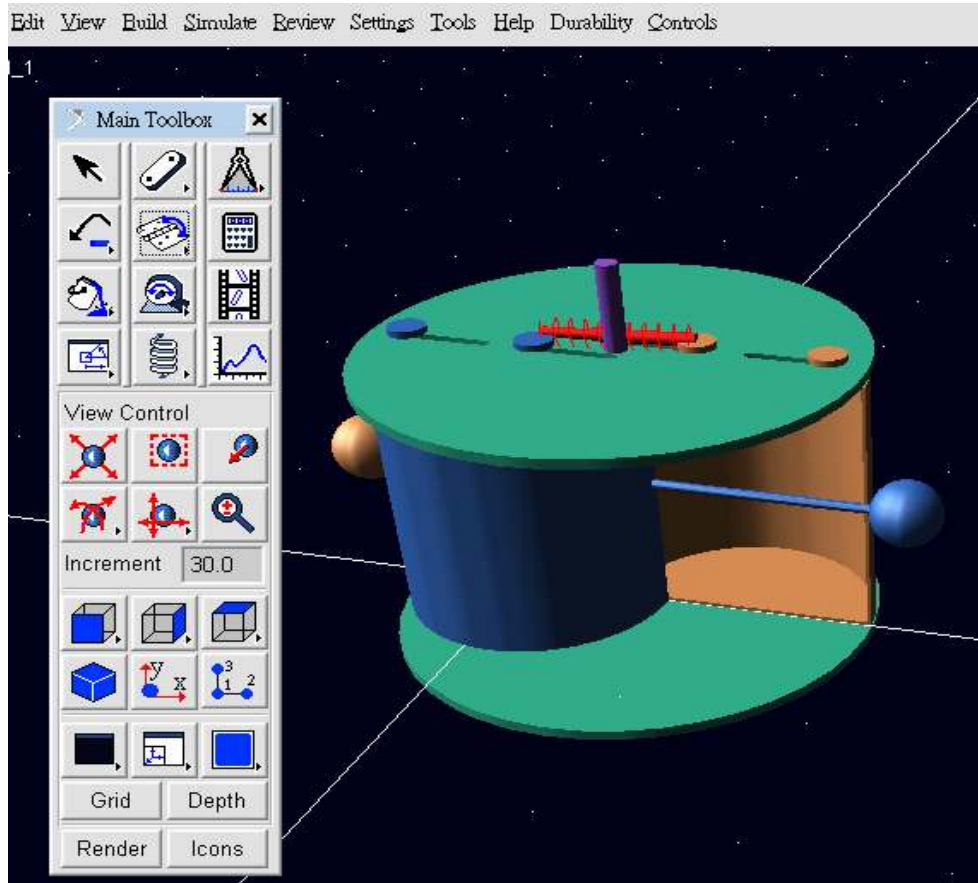


圖 35 葉片具備動態調整重疊量之風車運動模型



5.6 動態模擬結果

以本文模擬之改良型Savonius風車，葉片由靜止時完全向外伸展之狀態，其葉片重疊量與實驗量測時所設定之12mm相同，實驗發現風力機作用在轉軸上之扭矩會於0.1與0.01N·m之間周期性變化，由圖36所示為使用ADAMS模擬當Savonius風車繞者以座標Z軸為旋轉中心旋轉時，其中一葉片之質量中心位置，在座標X軸上之投影距離與時間關係，觀察上述葉片質量中心之運動曲線，並顯示時間於20秒期間之週期變化。

如圖 37 所示，為針對將風車葉片固定之型式，模擬單一葉片質心於座標 X 軸上之投影距離與時間之關係圖，模擬時係觀察將其中一葉片之質心以座標軸 Z 軸為轉軸中心旋轉，並顯示該葉片質心於座標軸 X 方向之位移量變化，其葉片質心相對座標中心之值，會顯示於 X 軸向上由正值至負值週期性變化，因初其葉片設定為固定不隨扭矩變化而產生位移，所以葉片質心會呈現規律之正至負值週期性變化。

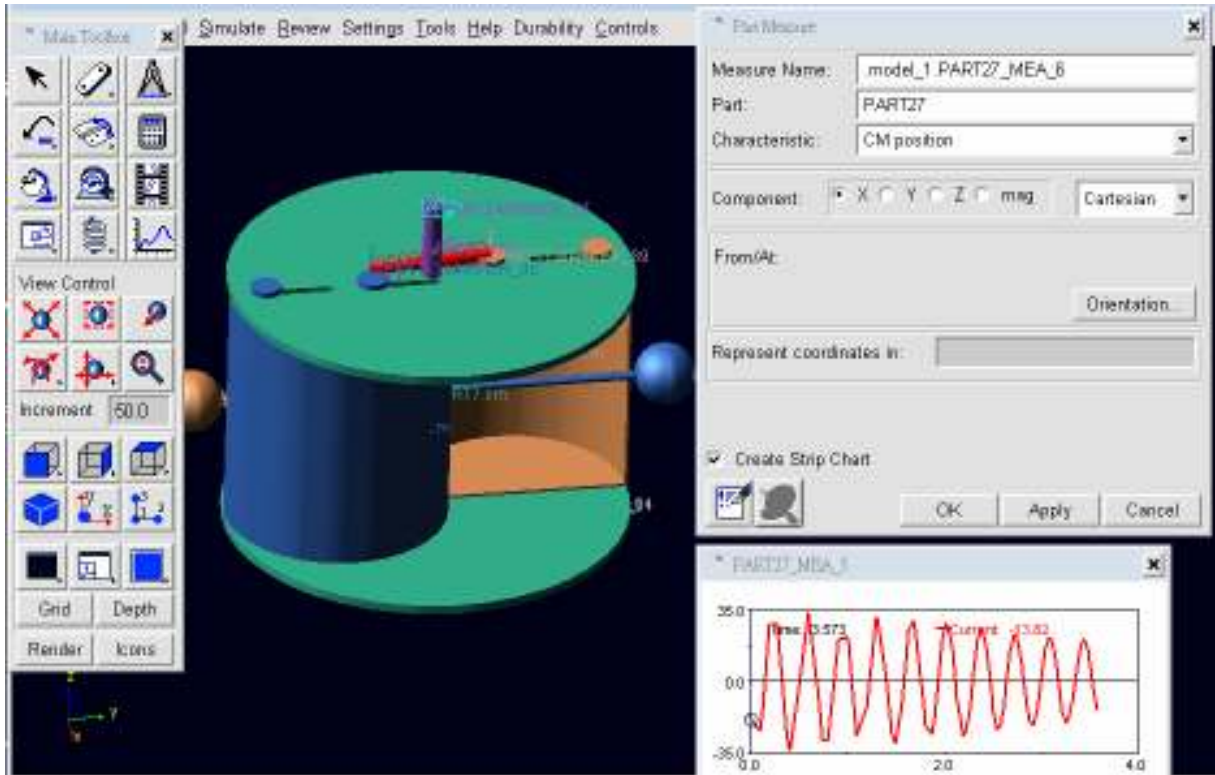


圖36 葉片質心於座標X軸上之投影距離與時間關係圖

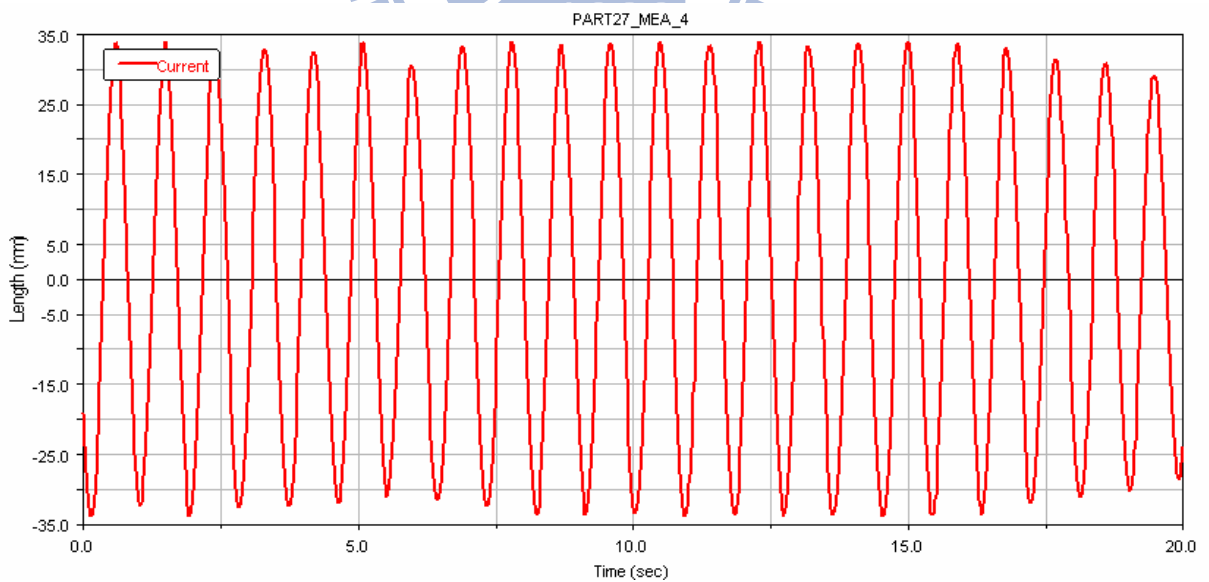


圖37 葉片質心於座標X軸上之投影距離與時間關係圖

後續則模擬改良型 Savonius 風車，若此時模擬風速持續提升至 10m/s 以上，輸入作用於風力機轉軸上扭矩維持 0.1 N·m 時，因風力機系統設定為先前圖 29 所示之混合型風力機系統，即高速時可透過外部 Darrieus 風車帶動運轉，故設定 Savonius 風車之轉速可隨之提升，而內部之 Savonius 風車葉片亦會隨轉速上升而逐漸收合，如圖 38 所示為模擬改良型 Savonius 風車活動式葉片動態位移量與時間之關係圖，模擬時亦設定將其中一葉片之質心以座標軸 Z 軸為轉軸中心旋轉，模擬值顯示葉片於約 7 秒之後上方配重受離心力之影響，逐漸向外甩開，並克服彈簧力及磨擦力使葉片開始收合，即顯示於 X 軸向量之最大位移量由約 32mm 內移至約 20mm 之位置，其間約 16 秒時可完全收合，模擬顯示改良型 Savonius 風車葉片係具有動態調整葉片受風面積之機能。而由 UG NX 模型轉入 ADAMS 時，可將模型系統加以簡化，由其是設定接觸或滑動的區域，可縮短 ADAMS 模擬運算時間，以本研究為例，約可縮短 40% 之時間。

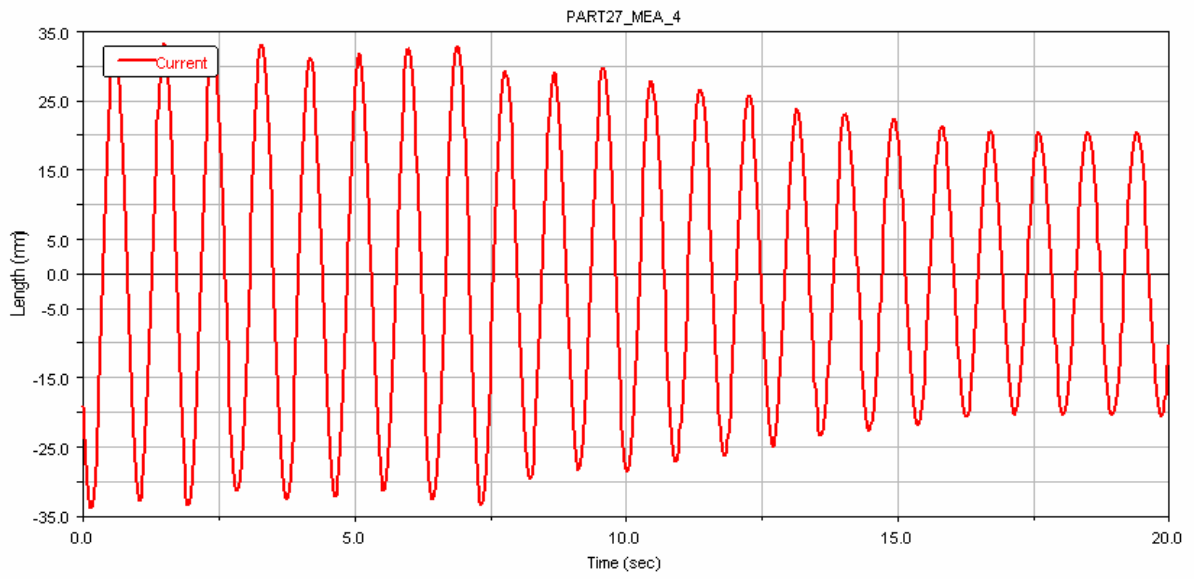
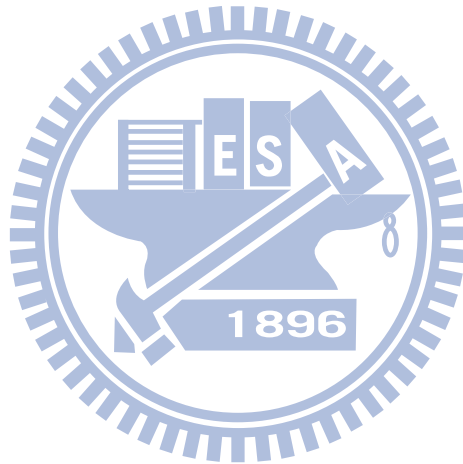


圖38 葉片活動型式之葉片位移與時間關係



六、結論與後續展望

6.1 結論

本研究利用 UG NX 來建構一個新設計之改良型 Savonius 風車，並適用於結合 Darrieus 型風車之混合型風力機，再將其建構完成的改良型 Savonius 風車模型在 MSC. ADAMS 軟體中執行運動模擬，使設計者可預知並確認其運動狀態，進而改善其設計。

而透過風洞實驗及電腦模擬方法，可預知將啟動性良好之 Savonius 風車與適於高轉速運作之 Darrieus 風力機互相組合，在高風速時，改良型 Savonius 風車可自動縮小受風葉片之面積，並減少高速時扭矩變化所產生之擾動與風阻之效應，以維持 Darrieus 風車之高風速時性能，提高新型組合式風機之效益，即使其達到兼具有良好之低風速啟動性及高風速時運轉效率之目的，並可降低 Savonius 風車於高轉速時對系統產生之週期性扭矩、疲勞與震動。

製作葉片可調整受風面積之 Savonius 風車實體模型，於風洞實驗中進行實驗與數值量測，實驗結果可顯示葉片重疊量改變時對風車扭矩及轉速造成之影響，並可提供動態模擬時須輸入之參數值，以提昇動態模擬之準確性。綜合前面幾個章節，歸納成下面幾點結論：

1. 為使混合型風力機達到兼具有良好之低風速啟動性及高風速時運轉效率之目的，將改良型 Savonius 風車搭配動態位移調整機構，藉由動態模擬

顯示，Savonius 風車可於高轉速時自動縮小受風葉片之面積，減少高速時對系統的擾動與對 Darrieus 風車之風阻效應，並能提供風車設計者對於風車轉速控制型式選用、降低扭矩變化量、改善震動與噪音研究時之參考。

2. 電腦模擬分析時之前，配合實體尺寸模型先行進行風洞實驗所量測之扭矩值及轉速，可提供 ADAMS 動態模擬時所需之輸入值，並有助提高模擬之準確性。
3. 提供一種 Savonius 風車葉片位移之控制方法，係可將 Savonius 風車葉片直接連接至外側之 Darrieus 型或 Giromill 型高速風車，即利用高速風車於運轉時之離心力同時拉動中央之 Savonius 風車，使其葉片位移量產生變化。
4. MSC.ADAMS 分析數值顯示本改良之 Savonius 風車機構，於風速提升至 10m/s 以上時，約 7 秒後改良型之 Savonius 風車葉片開始收合，約 16 秒時完全收合，對應實驗量測之結果可降低扭矩變化值約 75%，降低迎風面積約 50%。

6.2 後續展望

本研究規畫之後續展望如下：

1. 葉片可隨轉速自動調整之控制機構可進行細部設計及實驗確認機能。
2. 以 CFD(Computational fluid dynamics)補充流場及壓力紛風場對葉片造成作用力矩之影響。
3. 可針對 Savonius 葉片之模型，於 UG NX 進行參數化設計，不需反覆重新建立或修改模型，以縮短時間。
4. 針對 Savonius 風車葉片位移控制方法可進行細部設計、模擬與實驗，係可將 Savonius 風車葉片直接連接至外側之 Darrieus 型或 Giromill 型高速風車，即利用高速風車於運轉時之離心力同時拉動中央之 Savonius 風車，使其葉片位移量產生變化。

參考文獻

- [1]. 藍偉庭，風力發電市場與技術發展概觀，2007-11-09。
- [2]. 謝承翰，「垂直軸風力機扭力與功率的檢測與模擬」，國立成功大學航空太空工程學系，碩士論文，民國 98 年。
- [3]. 徐彬堯，「風車葉片運動模擬與動態分析」，國立成功大學航空太空工程學系，碩士論文，民國 94 年。
- [4]. J.F. Manwell, J.G. McGowan and A.L. Rogers, “Wind energy explained :theory, design and application”, Chichester ;Wiley,c2002.New York
- [5]. 李欣哲 / 呂威賢，我國風力發電之二氧化碳減量效益評估，經濟部能源會委託，工研院能資所與中央大學物理所合作研究成果。
- [5]. 鄭璧瑩，楊修和，「家用洗窗裝置之創新設計」，中華明國專利，Jul. 2006
- [6]. 新高能源科技有限公司，垂直軸風力發電市場之分析與現況簡介
- [7]. Sander Mertens, 「Wind energy in urban areas : Concentrator effects for wind turbines close to buildings 」,Refocus, Volume 3, Issue 2,Pages 22-24,2002.
- [8]. J.-L. Menet , 「 Adouble-step Savonius rotor for local production of electricity 」 , Renewable Energy ,1843–1862,2004.

- [9] . Kawamura, Hayashi, Miyashita, 「 Application of the Domain Decomposition Method to the Flow around the Savonius Rotor 」 , 12th International Conference on Domain Decomposition Methods, 2001.
- [10] . S. V. Pasupulati, J. Wallace, and M. Dawson, 「 Variable length blades wind turbine 」 IEEE Power Engineering Society General Meeting, vol.3, Jun. 12-16, 2005, pp. 2097-2100.
- [11] . Yusaku KYOZUKA , 「 An experimental study on the Darrieus-Savonius turbine for the tidal current power generation 」 , journal of fluid science and technology , 2008.
- [12] . Z. Lin and G. Qingding, “Adjustable-pitch and variable-speed control of wind turbines using nonlinear algorithm,” in Proc. 2003 ICEMS International Conf., Electrical Machines and Systems, pp. 270-273.
- [13] . 周辰穎，「陣風效應對風力發電之影響」，國立中央大學土木工程系研究所碩士論文，94年。
- [14] . R. Sakamoto and T. Senjyu, “Output power leveling of wind turbine generator by pitch angle control using adaptive control method,” in Proc. 2004 International Conf., Power System Technology, vol. 1, Nov. 2004, pp. 834-839.
- [15] . 桂人傑，「變速風機之控制系統，精密製造與新興能源技術專輯」，機械工業，2006.

〔16〕. Jean-Luc Menet , Nachida Bourabaa , 「 Increase in the Savonius rotors efficiency via a parametric investigation 」 。

〔17〕. 傅增棣，「電腦輔助工程設計ADAMS基礎應用手冊」，高立圖書有限公司，民93。

