

國立勤益科技大學  
工業工程與管理系碩士班

碩士論文

基因演算法在風能函數參數之估算



指導教授：李鴻濤 教授

研究生：張孟婷

學 號：49915027

中華民國一〇一年六月

基因演算法在風能函數參數之估算

**Application of Genetic Algorithms in Estimating the  
Wind Energy Function Parameters**

研究生：張孟婷

指導教授：李鴻濤



A Thesis

Submitted to

Institute of Industrial Engineering and Management  
National Chin-Yi University of Technology  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
Master of Engineering

June 2012

Taiping, Taichung, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇一年六月

國立勤益科技大學  
工業工程與管理系碩士班

論文口試委員會審定書

本校工業工程與管理系 碩士班 張孟婷 君

所提論文基因演算法在風能函數參數之估算

合於碩士資格水準，業經本委員會評審認可。

口試委員：

李鴻濤

曾清枝

楊乃奇

指導教授：

李鴻濤

系(所)主任：

許水清

中華民國 一〇一 年 六 月

# 基因演算法在風能函數參數之估算

學生：張孟婷

指導教授：李鴻濤 教授

國立勤益科技大學工業工程與管理系碩士班

## 摘要

風力發電為全球綠色能源的主要研究對象之一。為使風力發電發展更廣，對於風力發電機是否正常運作將是一項重要的指標。本研究運用風力機產生之數據分析其績效，而風速為影響風能之關鍵因素，因此透過風速和風能建構出功率曲線（Power Curve）與邏輯特曲線（Logit Curve）之關係，運用參數分析中最小平方法（LSD）計算出邏輯特函數之參數最佳組合，其方法利用基因演算法（GA），並採用實數編碼，藉由不同交配機制與突變範圍經過實驗測試出較有效率之方法。最後，針對台灣各地風力發電機計算出最佳參數組合，以便日後監測風力機之異常狀況，可即早進行維修，避免更大之損壞成本及維修成本。

**關鍵字：**風力發電機、風能、再生能源、最小平方法、基因演算法。

# **Application of Genetic Algorithms in Estimating the Wind Energy Function Parameters**

Student : Meng-Ting Chang

Advisor : Dr. Hong-Tau Lee

**Department of Industrial Engineering and Management  
National Chin-Yi University of Technology**

## **Abstract**

One of the major studying issues of green energy is wind power. How much of the wind power could be generated was based on the operation condition of wind turbine. Theoretically, a certain amount of power should be generated by a wind turbine given a specific speed of wind. Hence, if the amount of wind energy that generated by a wind turbine less than its theoretical value, special attention should be paid on the specific wind turbine because that its operation condition may encounter some problems.

Since the theoretical function of wind power is “s” type curve, the logit function was applied to illustrate the power generated by wind turbine. Owing to the fact that there are four parameters in a logit function and their values are associated with each specific wind turbine, the determination for their values is becoming complicate. The least square method was applied to measure the fitness of the parameters’ value. A genetic algorithm was proposed in this research for solving the evaluated function. The best parameters’ value was involved into the logit function for monitoring the operation condition of the wind turbine. Finally, the data of a wind turbine that located at west Taiwan was applied to verify the effectiveness of the proposed approach.

**Key word** : Wind turbine, wind energy, renewable energy, least squares method, genetic algorithm

## 致謝

時光飛逝，歲月如梭，研究所生涯兩年轉眼間過去，首先要感謝指導教授李鴻濤教授，於研究期間的栽培與耐心指導，讓我不僅增進許多專業知識，更學習到生活中應對的智慧，以及在教授生日當天作計畫書之口試，由衷的感謝教授的指導。口試期間，承蒙楊旭豪教授與曾清枝教授特別撥冗時間審閱論文，並提供寶貴的建議與指導，且於颱風天特地前來替我作論文口試，使本論文可以順利完成，在此致上最深的謝意。

兩年的研究生涯中，謝謝朝夕相處 M608、M607、M606 研究室同學的鼓勵、幫助與同樂，讓我在研究所期間多采多姿，還有 Vita 總是替我分憂解勞，在我徬徨時給予最多的聲援。

最後，感謝我最愛的父母，讓我 18 年的學生生涯在無憂無慮的環境中學習，並支持我選擇自己想走的方向，給予我無限的包容與體諒，以及咩咩總是給我溫暖的擁抱，還有廷豪在生活上無微不至的關心與照顧，謝謝所有我摯愛的人，這篇論文的成果希望與你們一起分享。

張孟婷 謹誌於  
國立勤益科技大學 工業工程與管理系 碩士班  
中華民國一〇一年六月

# 目錄

摘要 .....	i
Abstract .....	ii
致謝 .....	iii
目錄 .....	iv
表目錄 .....	vi
圖目錄 .....	vii
一、緒論 .....	1
1.1 研究背景與動機 .....	1
1.2 研究問題與目的 .....	2
1.3 研究架構與流程 .....	3
二、文獻探討 .....	5
2.1 再生能源 .....	5
2.2 風能 .....	9
2.3 風力發電機 .....	10
2.3.1 風力機之種類 .....	10
2.3.2 風力機基本結構 .....	13
2.4 風速與風能之關係 .....	15
2.4.1 Logit 迴歸模型 .....	20
2.4.2 最小平方法 .....	23
三、研究方法 .....	25
3.1 基因演算法 (Genetic Algorithms, GA) .....	25
3.2 基因演算法運作流程 .....	26
3.3 運用基因演算法估算參數 .....	29
3.3.1 問題描述 .....	29
3.3.2 基因演算法估算參數之流程 .....	29

四、結果分析與比較.....	35
4.1 案例分析.....	35
4.2 比較結果.....	36
4.3 實例驗證.....	41
五、結論.....	44
參考文獻.....	45
附錄.....	48



## 表目錄

表 1	我國及國際再生能源定義 .....	5
表 2	累計至 2011.9.30 裝置容量 .....	7
表 3	台灣再生能源發電之中長期發展目標 .....	8
表 4	全球風力發展現況 .....	9
表 5	實驗交配機制與突變範圍之代碼表 .....	36
表 6	實驗結果之平均代數比較表 .....	37
表 7	實驗結果之平均目標函數值 (S) 比較表 .....	37
表 8	實驗結果之最佳目標函數值 (S) 比較表 .....	38
表 9	彰濱風場之風機最佳參數組合 .....	48
表 10	鹿港風場之風機最佳參數組合 .....	48
表 11	王功風場之風機最佳參數組合 .....	49
表 12	實驗結果之平均代數比較表 (終止條件設為 2000) .....	49
表 13	實驗結果之平均目標函數值 (S) 比較表 (終止條件設為 2000) .....	50
表 14	實驗結果之最佳目標函數值 (S) 比較表 (終止條件設為 1000) .....	50

## 圖目錄

圖 1	流程圖	4
圖 2	水平軸式風力機與垂直軸式風力機	11
圖 3	水平軸式翼式風力機	12
圖 4	垂直軸式風力發電機	13
圖 5	水平軸式風力機之基本結構	14
圖 6	不同風速下風力機輸出功率曲線	18
圖 7	風力發電圖	19
圖 8	邏輯曲線圖	22
圖 9	基因演算法之流程圖	28
圖 10	基因演算法之流程圖	30
圖 11	風力機功率曲線圖	40
圖 12	驗證步驟流程圖	41
圖 13	彰濱第 18 號風機 Logit curve	42
圖 14	彰濱第 18 號風機檢測圖	43

# 一、緒論

## 1.1 研究背景與動機

針對氣候逐漸暖化、能源危機之因素，以及社會更趨向於重視地球環保之議題，更於日本發生 311 地震導致福島核災事件，衝擊各國降低對於核能發電的政策，紛紛尋找其替代能源。替代能源中包含風力、水力、太陽能及潮汐能，其中，風力發電技術之應用不但已趨成熟及具有商業化之發展前景更為解決世界能源問題之重要措施之一。

（朱佳仁，2006；陳維新，2008）風能屬於一種存在於地球上永久性的資源，這個特性可供應長期且穩定的能源。且風能少了燃料的風險與燃料價格的風險，並能緩解全球氣候暖化，因為風能不會產生碳排放，這些都與化石能源不相同。讓環境避免汙染，更讓氣候受到保護，免去地球的生命質量受不良影響。

根據邱錦松、翁榮羨（1988）研究指出，台灣沿岸、山區及離島皆適合發展風力發電。台灣海峽季節氣流造就台灣西部地區良好的風場地點，（呂威賢，2004）年平均風速每秒達 5 至 6 公尺以上，及具開發潛力，加上政府獎勵，於八十九年發佈實施「風力發電示範系統設置補助辦法」及工研院能資所配合執行「風力示範推廣計畫」，目前台灣風力發電已完工 24 座風場與 273 台風力發電機，為增加風力發電機之效率，必須加強對風力發電機之控管以降低維修成本。

風能是藉由風力發電機所產生，為了能更有效運用風能，對於風力發電機是否正常運作將是一項重要的指標。由於風力發電機維修成本高，期望能透過監控方式來評估風力發電機之績效。因此本研究將探討透過觀測風能數據計算出邏輯特曲線，便於日後監測風力機是否有發生異常狀況，將導出之邏輯特曲線作為日後檢測風力發電機之依據。

(Kingsland , 1995 ; Kusiak et al , 2008 ; Thapar et al , 2011 ; Gill et al , 2012)多位學者皆提出參數分析法中最小平方法進行擬合數據，可得出良好的結果，因此本研究透過參數分析法中的最小平方法來估算四個參數，並根據 Kusiak et al(2008)提出求解邏輯特函數中向量參數非常困難且複雜，針對該問題本研究將透過基因演算法(Genetic Algorithms, GA)來搜尋四維空間中向量參數的最佳估計值，其過程中採用實數編碼來搜尋四個參數之最佳值，相較於二進位編碼直接採用實數編碼較有效率且搜尋範圍較廣，最後透過此方法來探討風力發電用於台灣地區，計算出相關參數組合，以便檢測風力發電之績效，進而除去風機異常之狀態。

## 1.2 研究問題與目的

本研究主要透過估算參數建構出風力機之邏輯特曲線 (Logit Curve)，以便日後觀察風力機之狀況，在估算參數過程中因求解邏輯特函數中四個參數值非常繁雜，因此採用基因演算法求取最佳參數組合，為了求解更有效率，本研究利用不同交配機制與突變範圍期望能得最有效率之方法，並將最佳參數組合帶入邏輯特函數中，若邏輯特曲線與功率曲線越為吻合即所得參數越接近最佳值，因此可求出台灣風力機之最佳參數組合，以利日後評估風力機是否有異常狀態並即時進行維修。

## 1.3 研究架構與流程

本研究之架構與流程圖如下頁圖 1 所示，分為第一章緒論、第二章文獻探討、第三章研究方法、第四章結果分析與比較、第五章結論，其各章節簡述如下：

### 第一章、緒論

敘述本研究背景、動機、問題與目的及架構流程。

### 第二章、文獻探討

整理本研究相關文獻，包括再生能源、風力發電、邏輯特函數、最小平方法。

### 第三章、研究方法

介紹本研究採用之基因演算法，並對該方法流程與運用之各種交配機制與突變範圍詳加說明。

### 第四章、結果分析與比較

將實驗結果作比較並對採用之機制進行分析，選出最佳之交配機制與突變機制，透過選出機制進行驗證，並利用最佳機制計算出其他風力機之最佳參數組合。

### 第五章、結論

針對問題與目的所採用之研究方法與實驗所得之結果提出結論。

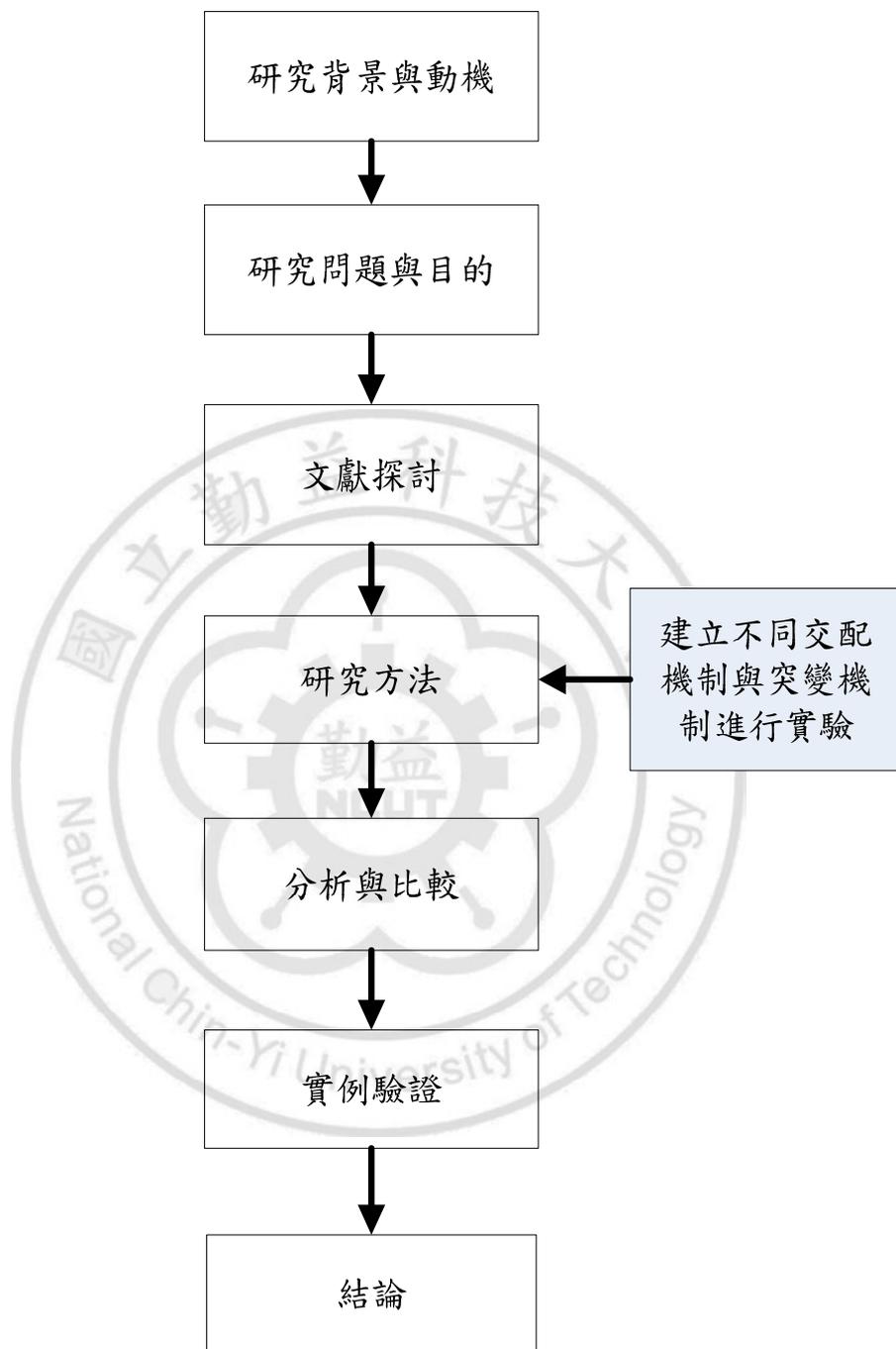


圖 1 流程圖

## 二、文獻探討

### 2.1 再生能源

再生能源係指可永續使用、不會消耗殆盡且不會產生污染之能源。(陳維新, 2009) 再生能源分為三種, 即太陽能(solar energy)、地熱能(geothermal energy)與潮汐能(tidal energy), 皆由自然界中的資源轉化成能源且在短時間內即可再生。Twidell & Weir(1986)定義再生能源為: 於自然環境裡源源不絕的來源中所獲得的能源。依據張鼎煥、呂威賢(2004)對各國再生能源之範圍(如表 1)整理如下:

表 1 我國及國際再生能源定義

國家組織	再生能源之定義
中華民國 再生能源發展條例 (草案)	太陽能、生質能、地熱能、海洋能、風力、非抽蓄式水力。
聯合國環境規畫署 (UNEP)	太陽能、地熱能、潮汐能、風力、波浪能、生質能、水力及海洋溫差。
國際能源總署 (IEA)	可燃性再生能源、廢棄物(生質能)、水力、地熱能、太陽能、風力及海洋能(含潮汐能與波浪能)。
歐盟 (EU)	風力、太陽能、地熱能、波浪能、潮汐能、水力、生質能、垃圾掩埋場與污水處理廠之沼氣及生質燃氣。
德國 再生能源優先法	水力、風力、太陽能、地熱能、垃圾掩埋場沼氣、污水處理場沼氣、礦坑沼氣及生質燃氣。
美國	太陽能、風力、地熱能及生質能, 小於 30 MW 的水力及都市固體廢棄物(DOE)。

表 1 我國及國際再生能源定義（續一）

國家組織	再生能源之定義
英國 可再生能源義務法	風電、波浪發電、水電、潮汐發電、光伏發電（每月發電量至少達到 0.5MWh）、地熱發電、沼氣發電和生物質發電。
日本 利用新能源法	太陽能、風力、中小型水力、生質能、地熱能。
澳洲 再生能源（電能） 法	水力、風力、太陽能、蔗渣汽電共生、黑液、林木廢棄物、能源作物、作物廢棄物、食品和農作物潮濕廢棄物、垃圾掩埋場沼氣、都市固體廢棄物燃燒、污水沼氣、地熱-地下蓄水層、潮汐、光電及其獨立系統、風力及其混合再生獨立系統、太陽能熱水、混燒、波浪、海洋、燃料電池、熱乾岩。

資料來源：張鼎煥與呂威賢（2004）

再生能源中主要的來源還是源自於太陽，如太陽光(sunlight)、水力、風、海洋溫差、洋流、生質能，上述皆包含於太陽能所產生的能源中。以風為例，太陽的熱會帶動起風，接著藉由風力機(wind turbines)加以擷取，進而成為我們所使用的重要能源。

再生能源皆有永續性之特點，就能源的觀點來看，永續係指擷取能源時並不因為持續使用而大幅減少、因使用不當大幅對環境造成傷害或汙染物以及使用不當對健康和社會公平正義造成嚴重且永久性之危害，由於再生能源非消耗品且擁有永續之特性，因此大部分的再生能源，如太陽能、風、水力、潮汐(tidal)、地熱，皆為零成本且可以幫助降低能源價格的不穩定性。

## 2.1.1 再生能源發展現況

使用再生能源的好處眾所皆知，再生能源有助於減緩氣候變化、支持著長期的世界經濟目標，（吳文騰，2011）而台灣目前超過 99.23%之能源皆仰賴國外進口供給，且 91.3%中為化石燃料，台灣自然資源有限，故提升能源安全，並發展自主能源、分散來源為現今重要之目標。依據經濟部能源局之統計，至 2011 年 9 月底止，台灣已完工再生能源發電設施之裝置容量累計為 3364.405 百萬瓦（MW）（如表 2），其中：

- 估計年發電量約 90 億度電，一年二氧化碳約可減量 550 萬噸，約可供應 166 萬戶之用電量。
- 風力發電已完工 24 個風場 273 台風機，總裝置容量為 529.25 百萬瓦（MW），而當中以商轉 268 台風機，容量為 517.8 百萬瓦（MW）。

表 2 累計至 2011.9.30 裝置容量

項目	風力發電	水力發電	生質能	廢棄物	太陽光電	合計
裝置容量 (MW)	529.25	1979.5	148.755	649.7	57.2	3364.405
發電度數 (千度)	1,270,200	2,101,437	818,153	4,742,810	71,500	9,004,100

資料來源：經濟部能源局

根據經濟部能源局(2007)年行政院「產業科技策略會議」(SRB)所提出之資料表示(如表 3)，在未來再生能源發展的目標方面，預估將於 2015 年，再生能源之總發電量可達 4972 百萬瓦(MW)，占總發電容量的 11.2%；而至 2025

年預估再生能源之總電量將提高至 8450 百萬瓦 (MW)，占總發電容量的 15% (如表 3)。其中，再生能源發電的發展目標中，預計將風力發電總容量從 2009 年的 439 百萬瓦 (MW) 到 2015 年提升至 1480 百萬瓦 (MW)，於 2011 年 9 月經濟部更設定在 2020 年增加 450 支陸上風機，總容量達 1,200MW 外，也計劃 2030 年前在彰化、雲林及嘉義等外海海域，安裝 600 支離岸風力機，總裝置容量可逾 3,000MW，台灣總容量將達 4,200MW，發電量相當於 3 座核電一廠，顯示出台灣正積極推動再生能源之發展，特別是風力發電的發展上。

表 3 台灣再生能源發電之中長期發展目標

發展時程	2009		2015		2025	
	發電容量 (MW)	配比 (%)	發電容量 (MW)	配比 (%)	發電容量 (MW)	配比 (%)
推廣目標						
水力發電	1939	4.93	2261	5.1	2500	4.4
風力發電	436	1.11	1480	3.4	3000	5.3
太陽光發電	6.8	0.02	320	0.7	1000	1.8
生質能發電	814.5	2.07	850	1.9	1400	2.5
地熱能發電	—	—	10	0.0	150	0.3
燃料電池	—	—	50	0.1	200	0.4
海洋能發電	—	—	1	0.0	200	0.4
合計	3196	8.13	4972	11.2	8450	14.9

資料來源：國家政策研究基金會

## 2.2 風能

地球的自轉及地球上各緯度所接受太陽輻射強度不均，造成各地氣候變化不同、產生高低氣壓，形成空氣對流運動。空氣沿著水平方向循環就形成風，而空氣的流動具有速度，亦即具有動能，此動能即稱為風能。當動能由各種方式轉換成乾淨的能源（電能），不但方便使用且不會造成空氣汙染，又可稱為綠色電力。

在未來石化能源的日趨耗竭，風能擁有取之不盡且乾淨環保的特性，是重要能源來源之必然考量。（劉萬琨等，2009）世界風能的總量為  $2 \times 10^{13}$  W，約為世界總能源消耗的 3 倍。如果 1% 的風能被使用，即可減少 3% 世界的能源消耗；利用風能發電，將可產生世界總電量的 8% 至 9%。美國風能協會指出一台 750 千瓦風力機每年可發 200 萬度的電，大約可減少 1500 噸二氧化碳之排放量，也相當於大約 204 甲的樹林每年所吸收二氧化碳的貢獻量。

表 4 全球風力發展現況

排名	國家	總裝置容量 (MW)	成長率 (%)	新增裝置容量 (MW)
1	美國	35,159	39.3	9,922
2	中國	26,010	113.0	13,800
3	德國	25,777	7.9	1,880
4	西班牙	19,149	14.7	2,460
5	印度	10,925	14.0	1,338
6	義大利	4,850	29.8	1,114
7	法國	4,521	32.8	1,117
8	英國	4,092	28.1	897
9	葡萄牙	3,535	23.5	673

表 5 全球風力發展現況 (續一)

排名	國家	總裝置容量 (MW)	成長率 (%)	新增裝置容量 (MW)
10	丹麥	3,497	10.6	334
13	日本	2,056	9.4	176
24	台灣	436	21.8	78
28	韓國	364.4	31.1	86.4

資料來源：World Wind Energy Association, 2010

現今，再生能源中風力發電之成長迅速，根據世界風能協會資料顯示至 2009 年止全球風機總裝置已達 159,213 百萬瓦 (MW)，而 2009 年新增裝置容量為 38,312 百萬瓦 (MW)，比 2008 年成長 31.7%，自 2001 年以來成長最快速的一年，(如表 4) 全球風力發電發展顯示，前十名國家總計為 137,515 百萬瓦 (MW)，占全球總裝置容量 86.3%。我國排名第 24，總裝置容量為 436 百萬瓦 (MW)，在亞洲年成長率僅次於中國，根據資料可看出不只台灣對於風力發展現況及未來目標都相當重視，對於世界各地也迅速發展風力發電之技術與規模。

## 2.3 風力發電機

### 2.3.1 風力機之種類

根據早期歷史記載，風能的利用在數千年前已用於推動船隻在海上航行，而風能取得主要透過風車，因此進而也用於汲水、灌溉及磨坊等。風力機的樣式和種類眾多，基本上分為兩種類型：水平軸式風力機和垂直軸式風力機 (如圖 2)，主要依據主軸與水平面之相對位置而言，即轉動主軸呈水平方向稱為水平

軸型，又被稱為「螺旋槳」型；反之，轉動主軸呈垂直方向稱為垂直軸型，又被稱為「打蛋器」型。前者較為常見，全球市場上幾乎所有發電廠皆屬於此類型。

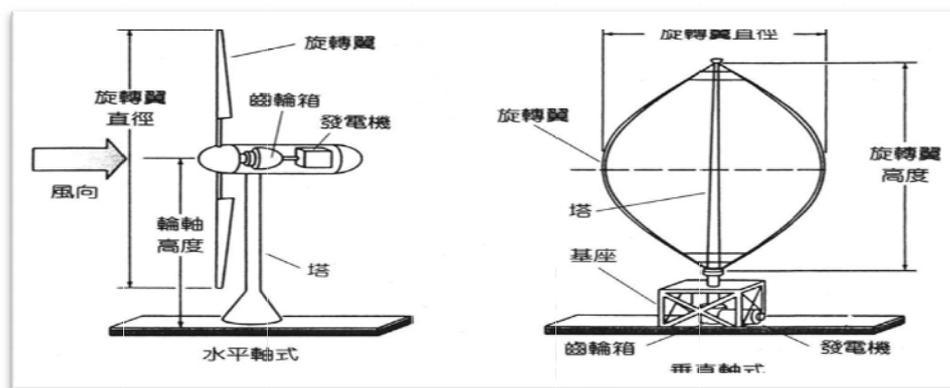


圖 2 水平軸式風力機與垂直軸式風力機

資料來源：普通物理醫學系 WIKI

水平軸式風力機依葉片數量分為多葉片與少葉片式，較常見的為雙葉片、三葉片、四葉片型式。依葉輪相對於風向的位置可分為順風式(或上風式)及逆風式(下風式)。另外，還有擴散式和集中型式。垂直軸式風力機依葉片數量分為「S」型單葉片式、「S」型多葉片式。另外，還有 Darrieus 透平、太陽能風力透平(Turbine)、偏導器式等。

### 1. 水平軸式風力機

水平軸式風力機是利用葉輪圍繞著水平軸旋轉，在運作時，葉輪的旋轉平面與風向垂直。視風力機用途來決定風力機葉片數量的多寡，一般大型風力發電機葉片數取 1~4 片(多為雙片或三片)通常利用於風力發電，而小型、微型風力發電機葉片數取 12~24 片一般用於提水，葉片數多寡與風力機的高速特性數  $\lambda$  曲線相關。

多葉式風力機而言，因葉片數量多，因此葉片成本較高，並於低速運轉時，有較高的風能利用係數和較大的轉矩，因此稱為低速風力機。此風力機啟動力矩大，啟動風速低，因此適合用於涉水。依不同構造型式可歸類為下列三種（圖 3）：



圖 3 水平軸式翼式風力機

資料來源：葉世宗（2008）

多葉式採低轉速運轉，所以振動及噪音較小。反之，雙葉式採高轉速運轉，所以振動與噪音較大。因此目前普遍使用三葉片式，此類型綜合雙葉式及多葉式之優點。

## 2. 垂直軸式風力機

垂直軸式風力機（如圖 4）是利用風輪圍繞著一個垂直軸旋轉，其主要特點在於任何風向皆可發電，因此當風向改變時，葉片無需隨之改變，省去偏航裝置，不存在扭纜與解纜的問題。由於不需調整葉片裝置，使得結構設計更加簡化。垂直軸式風力機更有另一項優點是增速箱與發電機可安裝於地面上，使安裝、運行、維修更加簡便，但此類型發電機效率較低，且由於傳送軸重量的問題，將垂直軸的齒輪箱放於地面為不可行的，更有一項缺點，當機翼的表面與旋

轉軸接近，與旋轉軸越近的機翼部分速度越慢，降低了空氣動力的效能。這些缺點使得於商業主流設計中逐漸減少大型風力機的垂直軸設計。

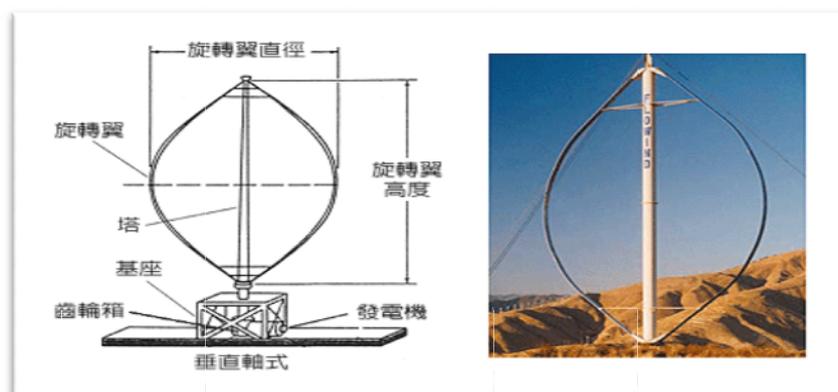


圖 4 垂直軸式風力發電機

資料來源：節能減碳教育網

### 2.3.2 風力機基本結構

風力機是將流動空氣的動能轉換為轉動機械能的裝置。由於風力機設計形式眾多，而水平軸式風力機為市場上之設計主流，其結構（如圖 5）包含葉片、輪轂、機艙、齒輪箱、發電機、塔架、偏轉裝置和控制系統等元件。風力機係由許多不同元件組合而成，以下將詳細說明各元件之功能。（羅際航，2006）

- 葉片轉子（rotor blade）或葉輪：葉輪包括一個輪轂（hub）與三片空氣翼（hydrofoils）的輕質葉片，葉片受氣動作用後，繞軸水平旋轉，將風能轉換成轉動的軸能（shaft energy），風速越高，轉動越快，因此葉片的長度、寬度、尺寸等將會影響風機的效能。
- 機艙（nacelle）：保護風力機之部分機電系統以及傳動發電機構。
- 齒輪箱（gearbox）：當機械能轉換成電能時，需透過增速齒輪箱提高轉速，使發電機運作。

- 發電機 (generator)：使機械能轉換成電能並將電能輸出之元件。
- 塔架 (tower)：用以支撐葉輪、機艙的重量，且使風力機的迴轉中心有一定之高度及靜態時之穩定性，塔架內包含電纜、照明設備及維護爬梯以便進入維修機艙。
- 轉向系統 (yaw system)：當風速計與風向計測量過風速及風向後，透過控制系統控制轉向馬達與轉向軸承，不需人力監控，葉片轉子即轉向迎風面。
- 控制系統 (control system)：為確保風機安全運轉，所設計之安全控制，包含阻止風力機超過轉速之調速控制以及迎風轉向之風向控制。
- 風速計和風向計 (anemometers and wind-vane)：用於測量風速與風向，大型風力機的風速計與風向計位於機艙外。由於風力機的效能、安全與風向及風速有絕對之關係，因此其精度必須準確。

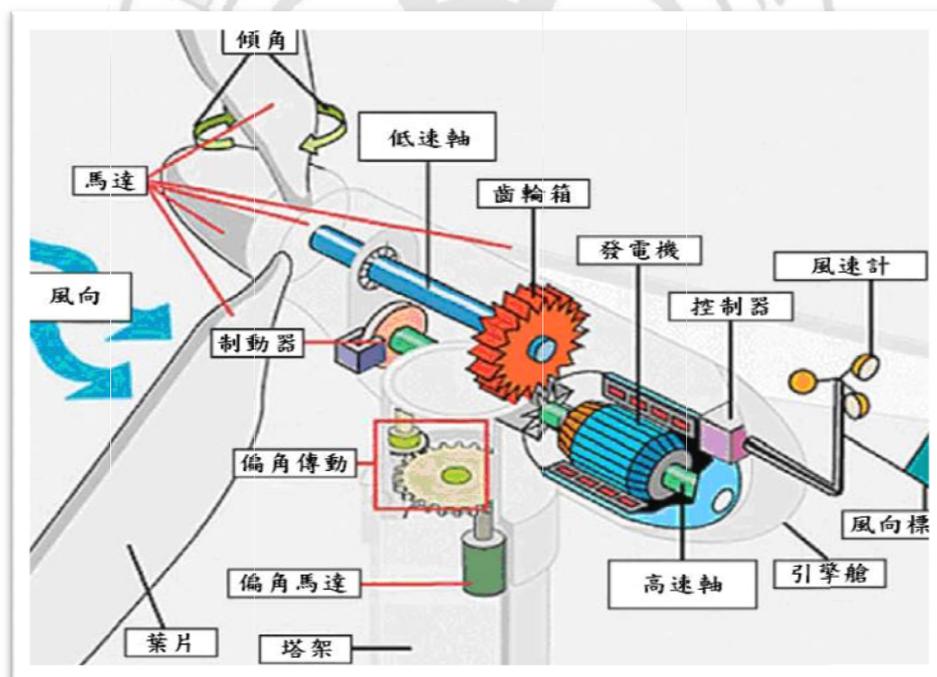


圖 5 水平軸式風力機之基本結構

資料來源：普通物理醫學系 WIKI

## 2.4 風速與風能之關係

風力發電機是利用空氣動能經由葉片帶動機械而產生電能之設備，在產生電力的過程中，若效率佳將產生更多的電力並得到更好的效益，若效率不佳即可對葉片或齒輪箱等設備作優化或改善，進而提高風力發電機發電之效率。

Carta & Mentado(2007)說明基於空氣動力學原理空氣流動產生風，其中蘊藏著動能依循質量守恆定律，而動能轉換公式 (2.1) 如下：

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} mV^2 \\ &= \frac{1}{2} (\rho AV)V^2 \\ &= \frac{\rho AV^3}{2} \end{aligned} \quad (2.1)$$

其中：

$\rho$  為空氣密度( $\text{kg/m}^3$ )，

$V$  為流動速度，

$A$  為單位時間內通過某一截面之氣流能量。

Anderson & Bose(1983)提出從相同地點來看，空氣密度值為常數，當面積為固定數值時，風速成為決定風能大小之主要因素，而不同之風速將會產生不同大小之風能，由四個因素之函數來描述風的變化定義基本風速( $V_{WB}$ )、強風風速( $V_{WG}$ )、斜坡風速( $V_{WR}$ )、擾動風速( $V_{WN}$ )四個因素與總風速 $V_W$ 之關係，依不同種類之風速函數了解影響風力機發電之原因，由下列 (2.2) 式表示：

$$V_W = f(V_{WB}, V_{WG}, V_{WR}, V_{WN}) \quad (2.2)$$

(a) 基本風速( $V_{WB}$ )可由下列方程式 (2.3) 表示：

$$V_{WB} = K_B \quad (2.3)$$

其中， $K_B$ 為基本風速之常數。

(b) 強風風速( $V_{WG}$ )組成因素可由下列方程式 (2.4) 表示：

$$V_{WG} = \begin{cases} 0 & t < T_{sg} \\ V_{cos} & T_{sg} < t < T_{sg} + T_G \\ 0 & t > T_{sg} + T_G \end{cases} \quad (2.4)$$

式中

$$V_{cos} = (MAXG/2)\{1 - \cos 2\pi [(t/T_G) - (T_{sg}/T_G)]\} \quad (2.5)$$

其中，

$T_G$ 為陣風週期時間(s)

$T_{sg}$ 為陣風開始時間(s)

$MAXG$ 為陣風峰值(m/s)

(c) 斜坡風速( $V_{WR}$ )組成因素可由下列方程式 (2.6) 表示：

$$V_{WR} = \begin{cases} 0 & t < T_{sr} \\ V_{ramp} & T_{sr} < t < T_{er} \\ 0 & t > T_{er} \end{cases} \quad (2.6)$$

式中

$$V_{ramp} = MAXR[1 - (t - T_{er})/(T_{sr} - T_{er})] \quad (2.7)$$

其中，

$MAXR$ 為斜坡風峰值(m/s)

$T_{sr}$ 為斜坡風開始時間(s)

$T_{er}$ 為斜坡風結束時間(s)

(d) 擾動風速( $V_{WN}$ )組成因素可由下列方程式 (2.8) 表示：

$$V_{WN} = 2 \sum_{i=1}^N [S_V(\omega_i) \Delta\omega]^{1/2} \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (2.8)$$

式中

$$\omega_i = (i - 1/2) \Delta\omega \quad (2.9)$$

$$S_V(\omega_i) = \frac{2K_N F^2 |\omega_i|}{\pi^2 [1 + (F\omega_i/\mu\pi)^2]^{4/3}} \quad (2.10)$$

其中，

$\phi_i$  為  $0 \sim 2\pi$  間隨機分佈值，

$K_N$  為表面阻力係數，

$F$  為擾動規模(m)，

$\mu$  為平均風速(m/s)

Zamani et al. (2007) 說明空氣流動產生風推動風力機之葉片，使葉片旋轉，由傳動系統將機械功率傳至發電機發電。因此，依據空氣動力學原理，葉片經由風帶動機械能再轉換成電能，其風速轉換為風能由下 (2.11) 式表示：

$$P = 0.5 \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) V^3 \quad (2.11)$$

其中：

$P$  為風力機之功率，

$R$  為轉子葉片半徑(m)，

$C_p(\lambda, \beta)$  為功率係數，

$V$  為風速(m/s)

在風機輪轂高度的空氣密度  $\rho$  在長時間下通常保持不變，因此，影響風能最大的運作參數為功率係數  $C_p(\lambda, \beta)$  及風速  $V$ ，其功率係數表示風力發電機獲取風

能之效率，藉由控制系統將功率係數進行最佳化。而實際上，利用風力發電機運作需要擁有足夠的風能來克服機械組件的阻力及摩擦力。而風力機最理想的輸出功率，則需要經由風力機所設定之風速運作，此設定的風速即稱作設計風速。

沈鈺玲（2011）說明由（2.11）式中得出，當風速越大時，所得風能也越多，充足的風速與穩定的環境可提高風力發電機之效益與使用年限，依各廠牌的風力機在不同風速下產生之功率，如下圖 6：

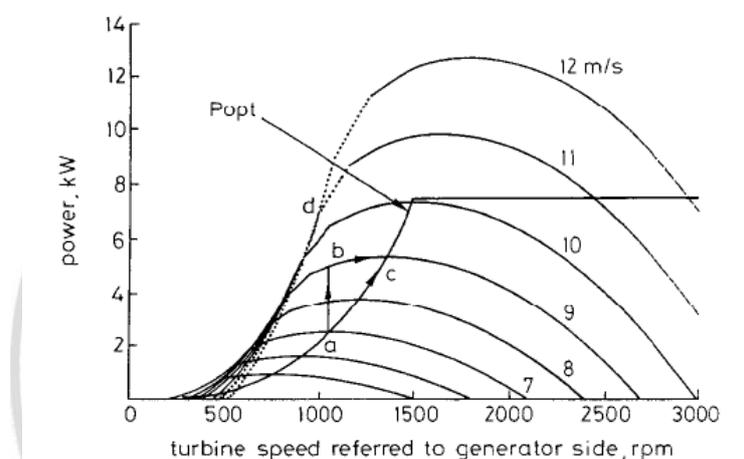


圖 6 不同風速下風力機輸出功率曲線

資料來源：Pena et al. (1996)

林宜緯（2009）風速與風力機發電量之關係，如圖 7：

- 風力機開始運作並作工時的風速稱作啟動風速或切入風速（cut-in velocity）約介於 2.5~4 m/s。
- 當風速達至某一風速或高於某一風速時，風機的速限裝置將會限制風輪轉速固定不變，讓風力機之風力穩定，且電力輸出穩定在額定容量左右，即以發電量輸出電力固定，稱作此風速為額定風速（rated velocity），約介於 12~15 m/s。

- 風速若再增強，達至某一程度時，為避免過高之風速破壞發電機，於是必須停止風力機之運作，此風速稱作停機風速或截止風速（cut-off velocity），風速約達 20~25 m/s 之內停機。

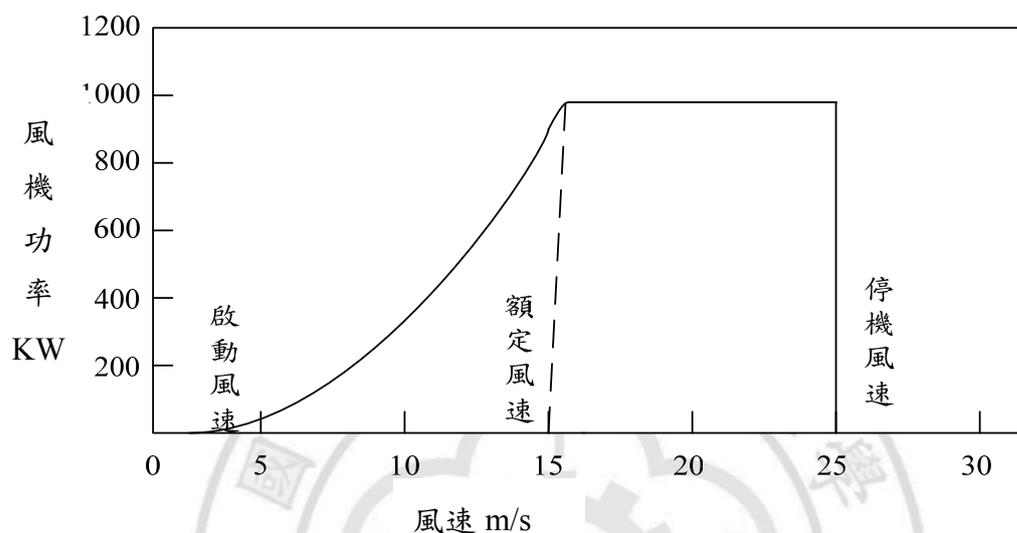


圖 7 風力發電圖

朱佳仁 (2006) 由 Betz (1927) 所提出的理論中說明，因空氣的黏滯阻力、風車轉軸之摩擦阻力等因素，其風力機並無法利用全部的風能，氣動透過葉片轉換之極限效率為 59.3%。而多數葉片轉換效率約在 30%至 45%間，經過機電轉換後，風力機所輸出效率則在 20%至 40%間。

Kusiak et al. (2008) 提出風力發電機在某一風速下能產生固定的風能，但風力發電機之功率曲線並不是一個理想的邏輯特曲線，實際上，風速與風能之資料數據點若落在邏輯特曲線以外之區域代表電力耗損，亦表示風力發電機發生異常狀態，如：風力機性能降低，反之，若風速與風能之資料數據點落於邏輯特曲線上或功率曲線與邏輯特曲線越吻合表示風力機狀態佳，由於此邏輯特曲線模型可以反應出風力機正常狀態，因此本研究將採用此模型檢測風力機是否為異常狀態之根據。

Chang et al. (2011) 說明在風電場上風速是影響風能最重要的特性。而風速本身又是一個隨機變量 (random variable)，透過加強對風速的科學分析，使用統計之方法來研究各地區不同條件下風速的變化，提出最小平方法估算風速機率分佈參數在長期觀測數據中所得結果較佳。

Kusiak et al. (2008) 由產生之電能是否合理來觀察風力發電機之情況，透過風力發電機的功率曲線圖 (Power Curve) 來評估發電之績效，因而進一步觀察風力發電機之情況。並提出參數分析中最小平方法與非參數分析之最鄰近演算法有較高的準確度。

由於本研究透過監測風力機數據找出最佳參數組合，以便日後檢測風力機運作情況，本研究將採用參數分析中之最小平方法加以研究探討風力發電機透過觀測的風速與風能數據，期望能得出最佳參數值，來評估風力機之狀態。

#### 2.4.1 Logit 迴歸模型

線性迴歸分析是一套用來表示兩個或兩個以上變數間關係的統計工具，當 $\chi_i$ 每增加一單位事件發生的機率就相對增加一個固定的量 (Kmenta, 1986; Long, 1997; 王濟川、郭志剛, 2003) 其方程式如 (2.12) 式：

$$y_i = \alpha + \beta\chi_i + \varepsilon_i \quad (2.12)$$

而許多情況下，線性迴歸會受到限制，在二元變數作為因變數的模型中自變數與事件發生機率間可能存在著非線性關係。對於此不適宜性可使用非線性函數來分析二元因變數，藉由在值域 (0, 1) 之間有著 S 形狀的曲線，當 $\chi_i$ 趨近於負無窮大時， $E(y_i)$ 趨近於 0，當 $\chi_i$ 趨近於正無窮大時， $E(y_i)$ 趨近於 1。此 S 型曲線與隨機變數的累積分佈曲線相似，於二元因變數中曾使用多種分佈函數分析，logit

分佈為最常使用之函數 (Cox, 1970; 王濟川、郭志剛, 2003)。因此將簡述 logit 函數用於二元因變數。

在 (1) 公式  $y_i$  為實際觀察的反應變數,  $y_i = 1$  表示事件發生,  $y_i = 0$  表示事件未發生, 且反應變數  $y_i$  與自變數  $\chi_i$  之間存在線性關係, 且在 (1) 公式中誤差項  $\varepsilon_i$  有 logit 分佈或標準常態分佈, 取得累積分佈函數 (cumulative distribution function, CDF) 可得到公式(2.13):

$$\begin{aligned}
 P(y_i = 1|\chi_i) &= P[(\alpha + \beta\chi_i + \varepsilon_i) > 0] \\
 &= P[\varepsilon_i > (-\alpha - \beta\chi_i)] \\
 &= P[\varepsilon_i \leq (\alpha + \beta\chi_i)] \\
 &= F(\alpha + \beta\chi_i)
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

假設  $\varepsilon_i$  為 logit 分佈, 其標準 logit 分佈的平均值為 0, 變異數等於  $\pi^2/3 \approx 3.29$  (王濟川、郭志剛, 2003), 因此得出一個較簡單的公式 (2.14):

$$P(y_i = 1|\chi_i) = P[\varepsilon_i \leq (\alpha + \beta\chi_i)] = \frac{1}{1+e^{-\varepsilon_i}} \tag{2.14}$$

此函數為 logit 函數, 呈現 S 型分佈, 如圖 8, 無論  $\varepsilon_i$  為任意值, logit 函數均介於 0 至 1 之間。假使  $\varepsilon_i = -\infty$  開始向右移動, 當  $\varepsilon_i$  增加時, logit 函數先緩慢增加, 接著迅速增加, 之後增加的速度又開始逐漸緩慢, 直到  $\varepsilon_i$  趨近於  $+\infty$  時, 函數值趨近於 1 呈現 S 型曲線, 此與風力機功率曲線相似, 一般商業運轉之風力機啟動風速為 3m/s 至 5m/s 之間, 隨風速增加風力機功率也隨之增加, 而到達額定風速與截止風速之間時, 風力機之功率將不再增加, 呈現 S 型曲線。但風力機功率曲線並非介於 0 至 1 之間, 因此必須將 logit 函數擴大再轉換成風力機之 logit 函數。

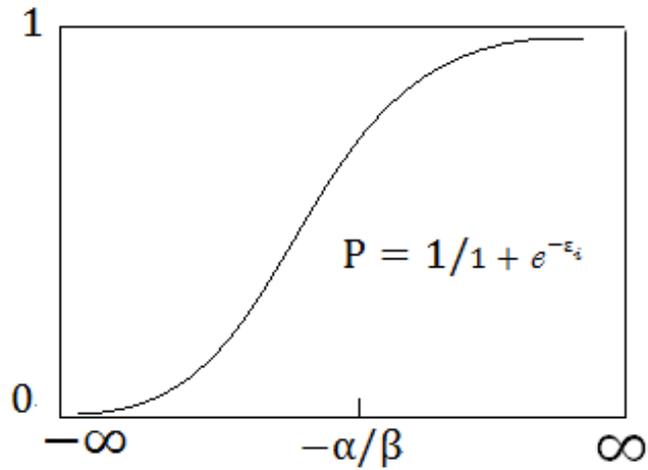


圖 8 邏輯曲線圖

因此將 logit 函數轉成 logit 迴歸模型，當  $\epsilon_i$  為  $(\alpha + \beta\chi_i)$  時的累積分佈函數。其  $\chi_i$  為自變數， $\alpha$  為迴歸截距， $\beta$  為迴歸係數，因此得出下列 logit 迴歸模型 (2.15) 式：

$$P_i = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha + \beta\chi_i)}} = \frac{e^{\alpha + \beta\chi_i}}{1 + e^{\alpha + \beta\chi_i}} \quad (2.15)$$

而當有 K 個自變數時，可擴展為下列公式 (2.16) (王濟川、郭志剛，2003)：

$$P_i = \frac{e^{\alpha + \sum_{k=1}^k \beta_k \chi_{ki}}}{1 + e^{\alpha + \sum_{k=1}^k \beta_k \chi_{ki}}} \quad (2.16)$$

Kusiak et al.(2008)提出以標準 logit 函數擴大至與風能功率曲線相符就可用來做為觀察風力機之判斷標準，因此將 logit 函數轉換成下列風力機之 logit 函數，其公式 (2.17) 為：

$$y = f(x, \theta) = a \frac{1 + m e^{-x/\tau}}{1 + n e^{-x/\tau}} \quad (2.17)$$

## 2.4.2 最小平方法

本研究旨在透過風速與風能之關係來評估風力發電機之績效，因此在求解過程中採用參數分析中廣受使用的最小平方法 (least squares) 之觀念，以計算出參數之最佳組合，許多學者曾經透過此種觀念來求出最佳解如下：

Kingsland(1995)、Kusiak et al(2008)採用邏輯特曲線與功率曲線擬合觀念，藉由最小平方法計算兩點間之距離，可方便來描述風力機觀測值與計算值之間的誤差，並避免將誤差反應變大或複雜。Kusiak et al(2008)提出運用參數分析法中最小平方法比最大概似估計法對風力機功率曲線績效分析所得結果較有高度準確度。

Thapar et al.(2011)說明最佳風速之場址、輪轂高度與風力機功率為影響風力機最主要因素，透過風力發電機功率曲線建模來最佳化系統設計，測試三台市售風力機模擬風力機實際功率，採用最小平方法和三次板條插值法之曲線擬合，結果顯示該模型運用最小平方法較能與實際功率曲線吻合。

Gill et al.(2012)採用最小平方法預測長期風能，以便測試風力機之功率性能，透過不完整的功率曲線與預測曲線間最小誤差進行分析，並利用完整曲線與預測曲線證明此方法具有效性，不僅可節省收集數據時間，且可帶來良好的經濟效應。

多位學者提出最小平方法對於擬合數據資料提供良好的方法，因此本研究將針對最小平方法利用歷史數據來檢測風力發電機之狀態，本節將介紹最小平方法及相關參數。

Casella & Berger(1990)、Kusiak et al(2008)利用函數的參數模型數量表示一個基因，基於歷史資料分析 (如圖 3)，功率曲線將會趨近於帶入四個參數之邏輯特函數 (Logit function) 曲線，因此本研究將透過風力機之功率曲線與邏輯特函數藉由基因演算法來探索近似解。藉由文獻中所提之邏輯特函數來表示某風速下

轉換成電能的風力發電情形。其中， $x$  為風速、 $y$  為產生之功率、 $\theta = (a, m, n, \tau)$  為決定邏輯特函數之參數，公式 (2.18) 如下：

$$y = f(x, \theta) = a \frac{1+m e^{-x/\tau}}{1+n e^{-x/\tau}} \quad (2.18)$$

假設一組資料包含  $N$  組數據  $[y(i), x(i)]$ ， $i = 1, \dots, N$  為風電場在正常條件下運行時，功率曲線的  $N$  組資料，利用最小平方法對  $N$  組數據估計向量參數  $\theta = (a, m, n, \tau)$ ，必須使此 (2.19) 式成本函數為最小。

$$S_{(x,y)} = \sum_{i=1}^N \left[ a \frac{1+m e^{-x(i)/\tau}}{1+n e^{-x(i)/\tau}} - y(i) \right]^2 \quad (2.19)$$

其中，估計的向量參數  $\hat{\theta}$  計算於下式 (2.20) 中：

$$\hat{\theta} = \arg \min_{a,m,n,\tau} S_{(x,y)}(x(1), y(1), \dots, x(N), y(N) | a, m, n, \tau) \quad (2.20)$$

### 三、研究方法

基因演算法 (Genetic Algorithm, GA) 於 1975 年由 Holland 提出，其中核心的精神為達爾文的演化論所提出「物競天擇、適者生存、不適者淘汰」的物種競爭原則，利用此原則作為尋求最佳解的方式，在天擇物種時，能夠選擇適應環境的母代 (顏勝茂，2005)，藉由交換彼此的基因，期望能繁衍出更優秀之下一代，且隨著環境的改變逐漸調適，使子代基因排列後更優於母代基因排列，經過重複迭代將繁衍出適應性更佳之子代。

基因演算法的主要目的在於透過自然生物中的演化過程，來建立一套自然演化機制之人工系統，此方法已廣泛被應用於尋求最佳化之問題，運算方法為將問題的基本解轉化成基因的方式呈現，利用亂數選擇方式來產生多組可行解，定義其適因性函數 (fitness function)，此函數作為物種生存與否之依據，適應性高即被保留其基因於交配池 (mating pool) 中，並透過複製 (reproduction)、交配 (crossover) 及突變 (mutation) 等過程之運算來產生下一代的解。在演化過程中，適應性較高者擁有較大之機會來繁衍下一代，而適應性較差者將被淘汰，經過數代不斷的演化後，即可產生近似最佳解，或即為最佳解。

#### 3.1 基因演算法 (Genetic Algorithms, GA)

(謝吉泉，2009) 基因演算法中常用的有兩種編碼方式：第一種為二進位基因演算法 (Binary Genetic Algorithms, Binary GAs)，其採用二進位方式編碼來表示其參數；第二種為實數型基因演算法 (Real-Coded Genetic Algorithms, RCGA)，即直接採用實數型態來表示其參數。二進位基因演算法雖能找出所求之最佳解，但在程式中有許多繁複的編碼與解碼之動作，反而顯得更加耗時。當參數過多時，需要透過大量或長串的字元來表示，程式執行的速度將會嚴重減

緩；或是編碼字串長度不足時，最佳解之準確度越低，將只找出粗略的最佳值，無法得出精確的最佳值，對於需要搜尋較多參數的系統，想同時兼顧搜尋速度與精確度的情況下，實數型基因演算法是合適的選擇來免去編碼與解碼之繁複的運算，並提高系統的準確性。

基因演算法開始時透過電腦隨機產生搜尋空間 (Search Space) 中的一群設計參數組合，稱作群體 (Population)。此設計參數組合為一個體 (Individual)，對於二進位基因演算法來說，此設計參數組合需用二進位方式編碼，稱為染色體 (Chromosome)，而每個位元稱作基因 (Gene)。實數型基因演算法的設計參數組合不需編碼，即可視其為染色體，並將設計參數視為基因。而二進位基因演算法與實數型基因演算法過程大致相符，但在複製、交配及突變的方法不太相同，但本質上是相同的。

## 3.2 基因演算法運作流程

(施順榮, 2008) 在基因演算法的過程中，必須先產生母代，再經由複製、交配、突變的過程，其運作的流程如圖 9 所示，並敘述如下：

### 步驟一：初始化群體 (Initial Population)

設定產生之世代數 (Number of Generations)、群體數 (Population Size)、限制條件、設計參數個數、參數上下限。

### 步驟二：適應性函數評估

利用適應性函數評估世代中的所有個體，在其演化環境中的適應程度，針對不同環境而特別定義適應性函數，於實際之應用中，適應性函數可定義每個個體之優劣，而適應性函數即最佳化方法所稱之目標函數 (Objective Function)。

### 步驟三：選擇機制 (Selection)

基因演化過程中，透過交配與突變會繁衍子代來替代原來的母代，但交配與突變所繁衍的子代不一定優於母代，因此必須保存優良的基因，以防止交配與突變過後基因變差。而為避免產生較差的基因，在基因送入交配池中，必須先將優良之基因複製，接著再送入交配池中，經過交配與突變後，將子代與母代作比較，優良之基因留下，較差之基因捨棄，此方式可防止流失最佳之基因。

### 步驟四：交配 (Crossover)

交配旨在希望繁衍出越來越好的新世代，因此將適應性高的個體，其基因透過交配的方式期望產生適應性更佳的個體。實數型基因演算法常使用的交配方法為：算術式交配法 (Arithmetical Crossover)、模擬二進位交配法 (Simulated Binary Crossover, SBX) 等。

### 步驟五：突變 (Mutation)

突變旨在防止尋求最佳解的過程中落入局部最佳解，可用以保持物種的多樣性 (Diversity)，並拓展現有個體以外之基因庫。藉由從局部最佳解跳出，來尋求全域最佳解。實數型基因演算法常使用的突變方法為：均勻突變 (Uniform Mutation)、非均勻突變 (Non-Uniform Mutation) 等。

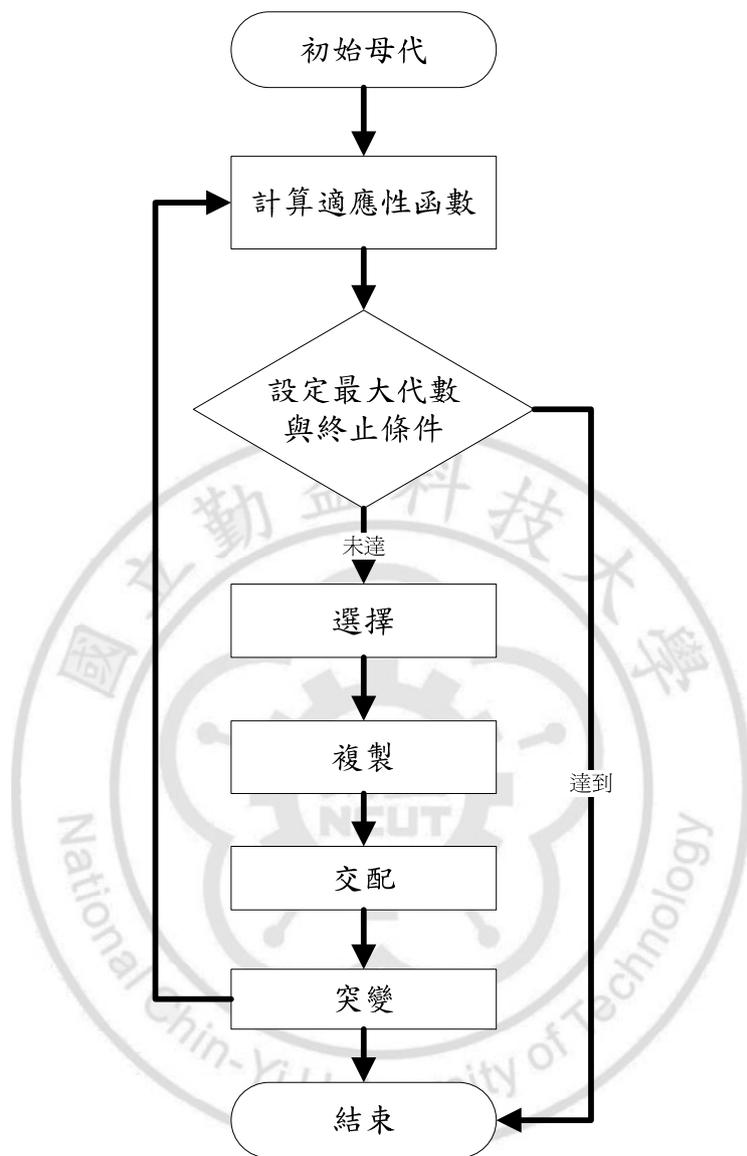


圖 9 基因演算法之流程圖

### 3.3 運用基因演算法估算參數

本研究藉由邏輯特函數 (Logit function) 轉換成電能的風力發電情形，利用基因演算法找出邏輯特函數之參數，針對此公式設計不同的交配機制與突變範圍期望能有效率搜尋最佳解。此章節將對本研究採用之方法詳加說明。

#### 3.3.1 問題描述

在探討風力機檢測情況下，主要透過風能與風速之關係來評估風力機發電情形，由文獻中學者提出可利用邏輯特曲線衡量風力機發電之情況，在過程中必須先估算出邏輯特函數之四個參數值，對每台風力機計算出其相關之參數組合，由於計算向量參數極為複雜，因此透過基因演算法搜尋每台風力機之最佳參數組合，以使用其相關參數組合來檢測風力發電機。

#### 3.3.2 基因演算法估算參數之流程

本研究利用基因演算法求解風能函數之最佳參數組合，因此將對本研究採用基因演算法之步驟做詳細的敘述。

應用基因演算法求解最佳化問題時，需先將探討之問題轉換成適應性函數 (Fitness Function)，接著以隨機方式產生初始族群，反覆透過複製 (Reproduction)、交配 (Crossover) 與突變 (Mutation) 來模擬自然界演化過程產生新物種。本研究求解最佳參數組合問題之基因演算法流程圖如下圖 10 所示：

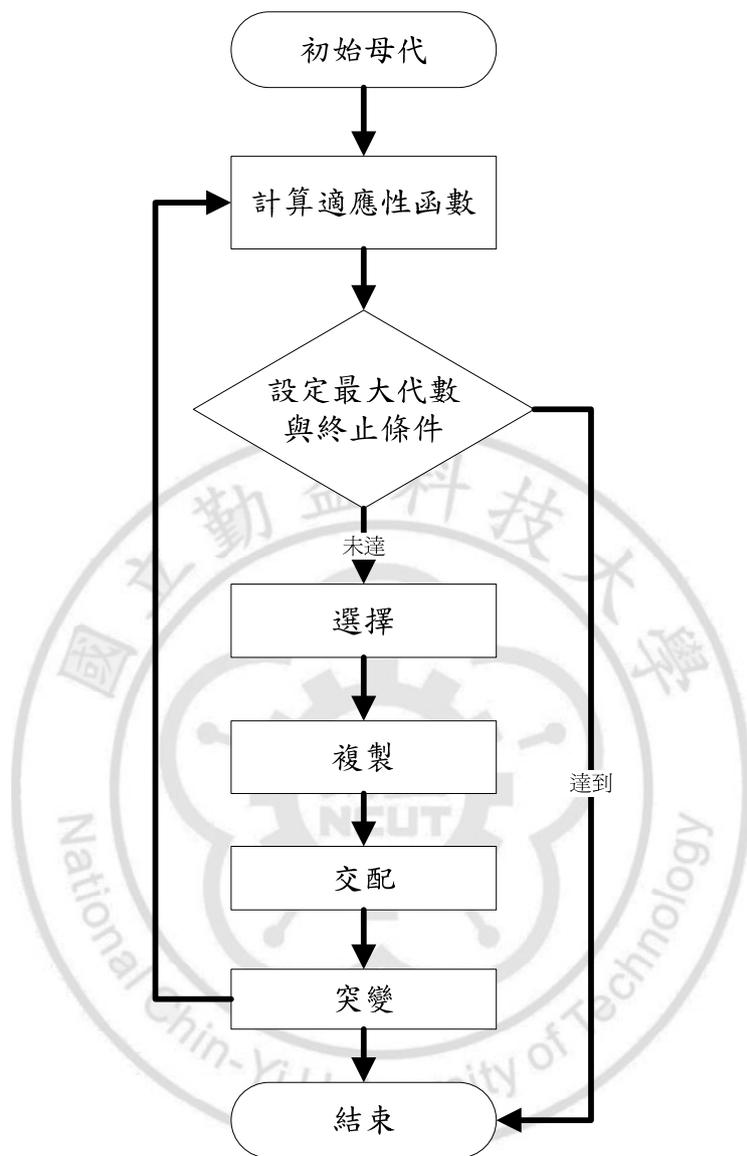


圖 10 基因演算法之流程圖

### 步驟一：初始母代 (Initial Population)

初始母代主要目的為決定個體數量及產生的方式，數量的多寡對執行效率有很大的影響，假使母代數量多執行效率將會變慢，但將更有機會得到理想的結果，反之，個體數量越少執行之時間將會減少，但也更有可能得出不佳的結果，依照其不同問題決定母代之數量。由於本研究需估算 $a, m, n, \tau$ 四個參數，因此採隨機方式產生；透過文獻中得出之參數值，本研究將設定參數範圍為 0~1000；避免執行時間太長影響效率，因此設定母代群體為 100 組。

### 步驟二：適應性函數 (Fitness Function)

適應性函數是決定染色體優劣的標準，本研究適應性函數採用風能與風速關係之函數，期望求出邏輯特曲線與功率曲線差距最小之值，因此適應性函數利用最小平方法之公式作為基因演算法之判斷標準，其公式 (3.1) 如下：

$$S_{(x,y)} = \sum_{i=1}^N \left[ a \frac{1+m e^{-x(i)/\tau}}{1+n e^{-x(i)/\tau}} - y(i) \right]^2 \quad (3.1)$$

$$\widehat{\theta} = \arg \min_{a,m,n,\tau} S_{(x,y)}(x(1), y(1), \dots, x(N), y(N) | a, m, n, \tau)$$

S：適應性函數值，其值越小所得參數較佳。

x：觀測之風速。

y：觀測某一風速下產生之功率。

$\theta = (a, m, n, \tau)$ ：決定邏輯特函數值之參數。

### 步驟三：複製/選擇 (Reproduction/ Selection)

透過計算適應性函數值後，運用精英政策將染色體依照適應值由小到大排出，選出前段 (62.5%) 適應值較佳的染色體保留為下一代，如此可將精英法則保留之染色體作為下一代之染色體。

### 步驟四：交配 (Crossover)

本研究採用兩種交配機制進行比較其方法、步驟如下：

方法一、對於所選出之 j、k 基因要進行交配，產生子代個體 p 之步驟如下：

Step1：將保留之適應性函數較佳的基因隨機產生兩個 0~100 之亂數值，假設得出 j、k 基因，進行交配。

Step2：對所選出 j 與 k 之基因進行交配，平均染色體 j 與染色體 k，所得出之下一代為母代中各一半之基因，其交配公式 (3.2) 如下：

$$a_p, m_p, n_p, \tau_p = \frac{a_j+a_k}{2}, \frac{m_j+m_k}{2}, \frac{n_j+n_k}{2}, \frac{\tau_j+\tau_k}{2} \quad (3.2)$$

方法二、針對目標函數值設計，將選出之 j、k 基因進行交配，產生子代個體 p 之步驟如下：

Step1：將保留之適應性函數較佳的基因隨機產生兩個 0~100 之亂數值，假設得出 j、k 基因，進行交配。

Step2：針對目標函數值設計，目標函數值越小產生之基因越優秀，將所選出 j 與 k 之基因，透過目標函數值設定之比例進行交配，假使 j 代目標函數 > k 代目標函數，將產生之染色體 p 偏向較優秀之染色體 k，反之，假使 j 代目標函數 < k 代目標函數，將產生之染色體 p 偏向較優秀之染色體 j，此交配機制可將產生之基因偏向較優秀之基因。其公式如下 (3.3) (3.4)：

假設  $S_j > S_k$

$$\begin{aligned}
 a_p &= \frac{S_j}{S_j+S_k} \times a_k + \frac{S_k}{S_j+S_k} \times a_j , \\
 m_p &= \frac{S_j}{S_j+S_k} \times m_k + \frac{S_k}{S_j+S_k} \times m_j , \\
 n_p &= \frac{S_j}{S_j+S_k} \times n_k + \frac{S_k}{S_j+S_k} \times n_j , \\
 \tau_p &= \frac{S_j}{S_j+S_k} \times \tau_k + \frac{S_k}{S_j+S_k} \times \tau_j
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

假設  $S_j < S_k$

$$\begin{aligned}
 a_p &= \frac{S_j}{S_j+S_k} \times a_j + \frac{S_k}{S_j+S_k} \times a_k , \\
 m_p &= \frac{S_j}{S_j+S_k} \times m_j + \frac{S_k}{S_j+S_k} \times m_k , \\
 n_p &= \frac{S_j}{S_j+S_k} \times n_j + \frac{S_k}{S_j+S_k} \times n_k , \\
 \tau_p &= \frac{S_j}{S_j+S_k} \times \tau_j + \frac{S_k}{S_j+S_k} \times \tau_k
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

#### 步驟五：突變 (Mutation)

在演化過程中，生物為了生存會產生突變以適應環境，突變的目的是在避免落入局部最佳解，透過增加母體中的變化，避免太早收斂的缺失進而找尋新的搜尋空間，本研究突變機制方式如下，對於個體  $j$  要進行突變，則突變完的子代個體  $p$  為 (3.5) 式所示：

$$\begin{aligned}
 a_p &= a_j + N(0, \sigma^P) \\
 m_p &= m_j + N(0, \sigma^P) \\
 n_p &= n_j + N(0, \sigma^P) \\
 \tau_p &= \tau_j + N(0, \sigma^P)
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

其中， $\sigma^P$ 為設定範圍之亂數，為了能更有效率得出最佳解，本研究採用試誤法測試 $\sigma^P$ 範圍，透過實驗將 $\sigma^P$ 設定為六種範圍分別介於 0-350，0-250，0-150，0-100，0-50，0-25 之間的亂數。

#### 步驟六：判斷是否符合終止條件

設定終止條件目的在停止基因演算法的演化循環，因此必須設定停止條件。本研究設定兩個停止條件：一、當演化世代數到達最大演化世代數時即停止演化；二、當子代之平均絕對離差值（Mean Absolute Deviation, MAD）與母代之平均絕對離差值差距 $<1$ ，且持續未進化時（設定為 2000 代），則停止繼續演化。



## 四、結果分析與比較

本研究主要目的是透過風力機功率曲線來檢測風力機是否有異常之狀況，由於計算向量參數過程相當繁雜，因此藉由所設計之基因演算法來建構出檢測台灣地區風電廠風力機之數據與曲線。透過不同的交配機制與突變範圍得出之結果進行相關分析。

本研究之基因演算法流程是用 Visual Basic 2005 程式語言撰寫，測試設備使用 Intel(R) Core(TM) i3 CPU 2.93GHz，4GB 記憶體之個人電腦。本研究採用台灣三個地區風電廠之資料，分別為鹿港的 21 台風力機、王功 10 台風力機、彰濱 24 台風力機，其資料皆為 2011 年四月份每十分鐘記錄一次之風力發電之相關數據，利用上述資料進行相關分析。

### 4.1 案例分析

本研究將對台灣風電廠風力機求出邏輯特函數中之最佳參數組合，日後檢測風力機將參數套入邏輯特函數中與觀測值比對，即可得知風力機發電之情況，本研究蒐集正常運作之風力機的觀測數據，運用基因演算法求出最佳參數組合，由於不同的交配機制與突變範圍會影響演算法收斂速度與求解品質，為了增加求解效率與得出良好的結果，本研究利用彰濱 2011 年 4 月 20 日至 2011 年 4 月 27 日每十分鐘觀察之風力機數據對兩種交配機制與六種突變範圍做測試，表 5 為本研究測試各種機制之方法，並加上代碼便於說明。

表 6 實驗交配機制與突變範圍之代碼表

代碼 突變範圍	交配 機制	平均分配	按目標函數 (S) 分配
0~25		A1	A2
0~50		B1	B2
0~100		C1	C2
0~150		D1	D2
0~250		E1	E2
0~350		F1	F2

## 4.2 比較結果

經過實驗測試本節將結果以表格方式呈現，並透過結果找出最佳參數組合與效率較佳之機制套用於邏輯特函數中，得出之功率曲線與邏輯特曲線比對是否吻合，以確認基因演算法搜尋最佳之參數組合結果是否有效。

本研究採用兩種交配機制與六種突變範圍進行比較，且為了比較結果更顯著，將終止條件設定為嚴謹與寬鬆兩種（分別為 2000 次與 1000 次），不顯著結果列於附錄，顯著結果列於下方以便說明，包括表 6 實驗結果之平均代數比較表、表 7 實驗結果之平均目標函數值 (S) 比較表、表 8 實驗結果之最佳目標函數值 (S) 比較表進行分析與說明：

表 7 實驗結果之平均代數比較表

平均 代數 突變範圍	交配 機制	平均分配	按目標函數 (S) 分配
		1	2
0~25	A	8116.3 代	7402.5 代
0~50	B	6028.6 代	6369.4 代
0~100	C	5346.6 代	4852.9 代
0~150	D	3649.2 代	3054.1 代
0~250	E	4099.9 代	3935.2 代
0~350	F	2591.1 代	2476.3 代

表 8 實驗結果之平均目標函數值 (S) 比較表

平均 S 值 突變範圍	交配 機制	平均分配	按目標函數 (S) 分配
		1	2
0~25	A	41,370,080.21	10,637,066.88
0~50	B	2,226,282.49	2,138,900.64
0~100	C	2,391,977.29	1,962,123.64
0~150	D	2,423,160.10	2,330,003.80
0~250	E	8,663,674.46	14,328,357.81
0~350	F	3,708,129.57	3,283,551.80

對於兩種交配機制結果下，在嚴謹之終止條件中平均代數與平均目標值比較顯示，並無明顯差異；於寬鬆之終止條件中平均代數與平均目標值顯示出，按目標函數分配的結果明顯比平均分配結果佳，且收斂速度快。在六種突變範圍比較結果顯示，範圍越廣，即 A 至 F 所收斂速度越快，但結果並非最佳平均目標函數值，透過寬鬆終止條件得出，其最佳平均目標函數結果於 0~100 之突變範圍，證明此範圍內之突變範圍搜尋能力較佳。

表 9 實驗結果之最佳目標函數值 (S) 比較表

最佳 S 值 突變範圍	交配 機制	平均分配	按目標函數 (S) 分配
		1	2
0~25	A	最佳代數=10000 $a=2155.77$ $m=-2.91$ $n=245.93$ $\tau=1.6$ $S=3,820,144.18$	最佳代數=10000 $a=2168.92$ $m=3.21$ $n=395.47$ $\tau=1.49$ $S=3,427,721.30$
0~50	B	最佳代數=9414 $a=2338.4$ $m=0.95$ $n=466.28$ $\tau=1.47$ $S=1,289,965.71$	最佳代數=8130 $a=2318.05$ $m=-0.04$ $n=310.65$ $\tau=1.58$ $S=1,339,735.18$

表 10 實驗結果之最佳目標函數值 (S) 比較表 (續一)

最佳 S 值 突變範圍	交配 機制	平均分配	按目標函數 (S) 分配
		1	2
0~100	C	最佳代數=8647 $a=2330.74$ $m=0.6$ $n=452.51$ $\tau=1.48$ $S=1,284,854.79$	最佳代數=8240 $a=2434.21$ $m=-2.36$ $n=268.86$ $\tau=1.66$ $S=1,125,946.77$
0~150	D	最佳代數=3460 $a=239.97$ $m=3.17$ $n=723.88$ $\tau=1.36$ $S=1,798,679.25$	最佳代數=5214 $a=2333.44$ $m=6.56$ $n=691.68$ $\tau=1.39$ $S=1,738,978.04$
0~250	E	最佳代數=5512 $a=2308.86$ $m=-1.04$ $n=446.96$ $\tau=1.46$ $S=1,424,166.56$	最佳代數=6789 $a=2379.22$ $m=-2.77$ $n=229.88$ $\tau=1.69$ $S=1,159,192.05$
0~350	F	最佳代數=3402 $a=2240.34$ $m=10.86$ $n=1098.36$ $\tau=1.27$ $S=2,528,606.75$	最佳代數=2774 代 $a=2301.14$ $m=6.77$ $n=895.7$ $\tau=1.32$ $S=2,047,155.26$

從表 8 中顯示出，兩種交配機制比較下，由於所設終止條件過於嚴謹，導致結果較不顯著；於六種突變範圍比較下 B、C、D、E 搜尋結果較佳，且於 C 範圍內運算出最佳目標函數值，其最佳函數值結果為 C2，顯示該方法運算出最佳參數組合，搜尋參數能力較佳且有效率，其為目標函數分配比例之交配機制與介於 0~100 之突變範圍，結果計算出最小平均絕對離差值 (MAD) 為 18.21，並將最佳之參數組合套入邏輯特函數中，得出之邏輯特曲線與功率曲線呈現於下圖 11：

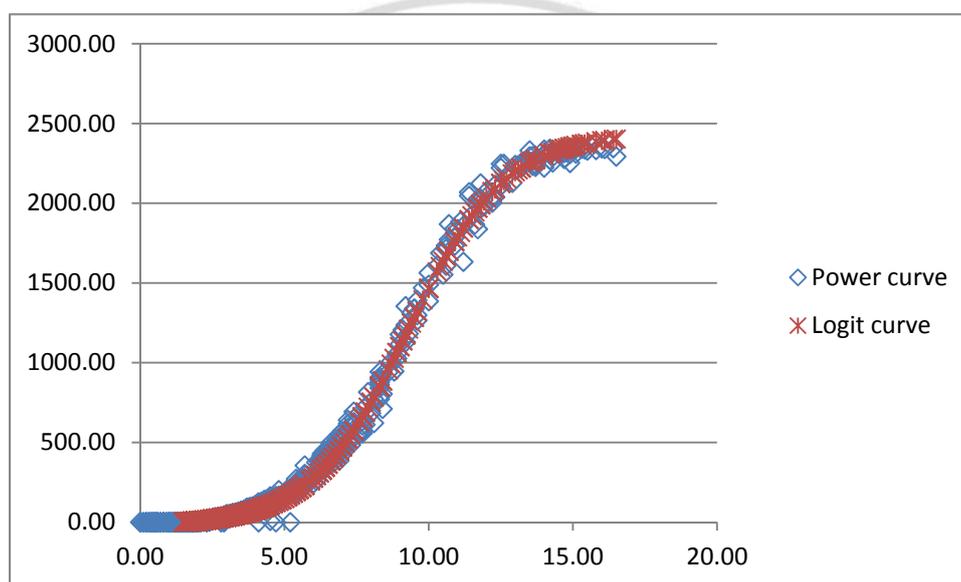


圖 11 風力機功率曲線圖

此資料為彰濱 2011 年 4 月 20 日 19 時至 2011 年 4 月 27 日 17 時，每十分鐘記錄一次之每秒平均風速與產生的風能資料，採用基因演算法設定終止條件代數為 10000 代，交配機制為按目標函數比例分配，突變範圍為 0~100 之間，測試 10 次之結果，約於 6158.5 代收斂，此資料為第 1 次測試在 5512 代即收斂結果為  $(a, m, n, \tau) = (2434.21, -2.36, 268.86, 1.66)$ ，其所得之 S 值為 1,125,946.77，將資

料帶入風力機功率曲線呈現於上圖，顯示由功率曲線與邏輯特曲線相符，可運用此方法對風力機計算出相關之參數組合，用以檢測風力機日後發電之情況。

### 4.3 實例驗證

本研究為了增加基因演算法之演化效率，利用不同之交配機制與突變範圍進行實驗，其最佳參數所採用之方法是否具可行性，針對此問題於本節進行相關驗證說明。

本研究將隨機選出彰濱第 18 號風機之資料數據進行驗證，該筆資料為 2011 年 4 月 24 日 10 時 30 分至 2011 年 4 月 27 日 17 時 00 分每十分鐘所得之平均風速與平均風能之數據，共 472 筆，其驗證方法步驟流程於圖 12，並於下方詳細說明：



圖 12 驗證步驟流程圖

步驟一：本研究將透過 2011 年 4 月 24 日 10 時 30 分至 2011 年 4 月 26 日 2 時之資料作為第一筆數據，驗證 2011 年 4 月 26 日 2 時 10 分至 2011 年 4 月 27 日 17 時 00 分之資料作為第二筆數據，將觀察風能與風速之數據分為兩筆。

步驟二：運用基因演算法估算第一筆數據之參數，其得出最佳參數組合為  $(a, m, n, \tau) = (2186.64, 7.89, 539.62, 1.41)$ 。

步驟三：將最佳參數組合套用於邏輯特公式 (4.1) 中，得出邏輯特曲線，如圖 13。

$$y = f(x, \theta) = a \frac{1 + m e^{-x/\tau}}{1 + n e^{-x/\tau}} \quad (4.1)$$

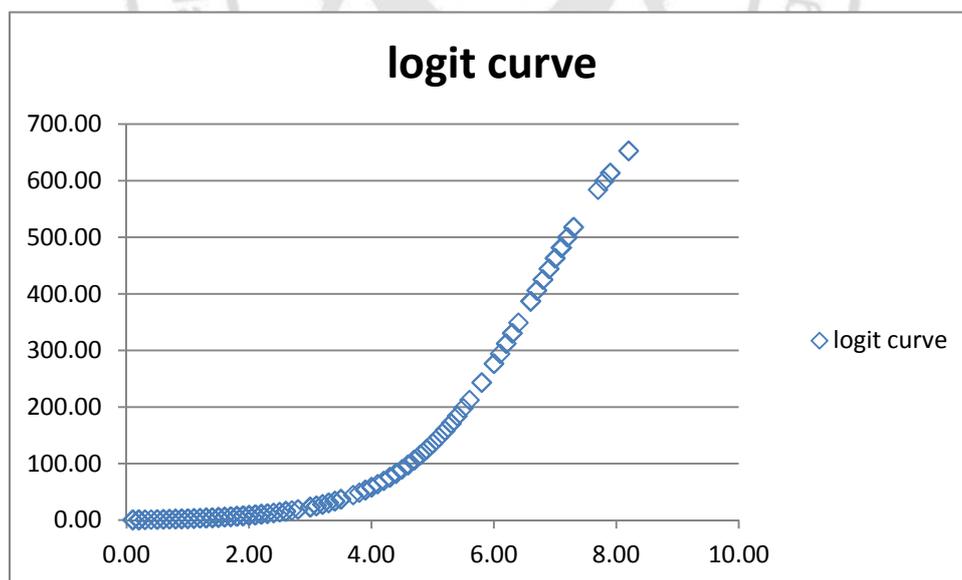


圖 13 彰濱第 18 號風機 Logit curve

步驟四：以邏輯特曲線作為基準，檢測第二筆數據是否觀察之風速與風能數值皆落於邏輯特曲線上？如圖 14 所示。

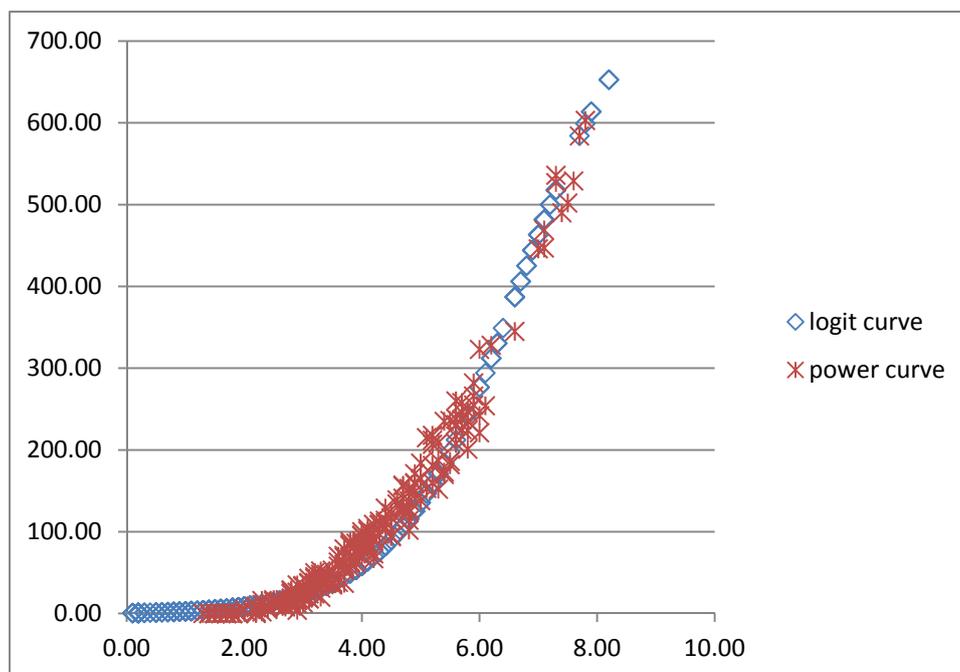


圖 14 彰濱第 18 號風機檢測圖

步驟五：一台正常運作之風力發電機其觀測點會落於邏輯特曲線上，若觀測點落於邏輯特曲線外表示風力機發生異常情況，此驗證採用正常運作之風力機，因此觀測點皆落於邏輯特曲線上。

透過本研究實驗結果比較出最佳交配機制與突變範圍，運用於實際檢測風能數據上，顯示可得出相當不錯之最佳解 ( $MAD=11.49$ )，用於正常運作之風機計算出之邏輯特曲線與功率曲線相符，證明其可行性，且運算結果為最佳參數組合，因此採用此方法運算其他風力機之最佳參數組合，其結果參考附錄。

## 五、結論

本研究運用基因演算法對台灣風力機估算風能參數，為了更有效率搜尋風能函數中之參數組合，將採用不同的交配機制與突變範圍加以比較，得出結果之方法將可作為日後估算風能參數方法之依據，便於日後檢測風力發電機。

由交配機制之分析結果發現，於嚴謹終止條件中，兩種機制在平均代數與平均目標函數值項下比較時，較無明顯差異，但於寬鬆終止條件中，按目標函數分配之交配機制其所得參數組合較佳收斂速度較快；而在突變範圍之分析結果顯示，範圍越廣越快收斂，但並非最佳目標函數值，其最佳參數組合採用突變範圍為 0~100，因此往後再進行估算參數時，可將參數設定為上述之交配機制與突變範圍，以提升搜尋參數之效率。針對實驗與實證後歸納出以下結論：

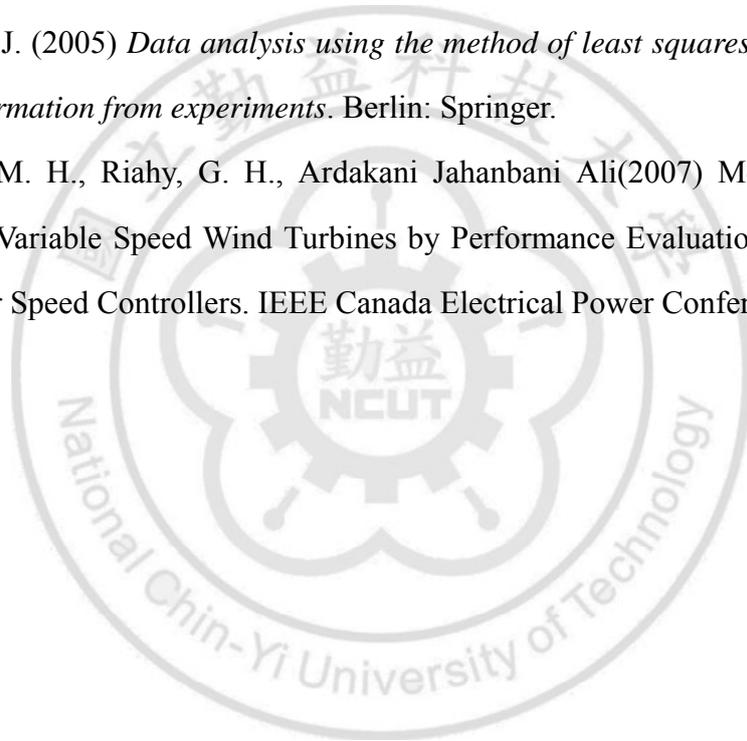
1. 本研究運用基因演算法針對風能與風速之特性，設計出不同交配機制與突變範圍的演算法，實驗結果顯示以目標函數分配交配比例且突變之標準差範圍設定於 0~100 之間，對參數之搜尋能力較有效率，且得出最佳參數組合。
2. 為了驗證本研究所設計之演算法，利用鹿港第 16 號風機進行模擬，結果顯示在正常運作的風力機情況下，其觀測數據落於邏輯特曲線上，證明基因演算法運用於檢測風力機具可行性。
3. 透過本研究所設計之基因演算法，套用台灣風力機觀測數據顯示出，由於每台風機特性不同所觀察之風速與風能數據具有差異，因此得出之最佳參數組合皆不相同。

## 參考文獻

1. 王濟川、郭志剛（2003）著，Logistic 迴歸模型-方法及應用，台北：五南，初版。
2. 朱佳仁（2006）著，風工程概論，台北：成陽，初版。
3. 吳怡萱（2008）編著，再生能源概論，台北：五南，初版。
4. 呂威賢（2004），風的故事-從風車到風力機，科學發展期刊，384，6-13。
5. 沈鈺玲（2011），氣候變化對再生能源產氫影響之研究，碩士論文，國立高雄應用科技大學。
6. 林宜緯（2009），圓錐裝置對風力機流場的影響，碩士論文，國立清華大學。
7. 邱錦松、翁榮羨等（1988年8月），風能應用研究-76年度計畫期末報告，能源研究發展基金研究報告，768M1
8. 施順榮（2008），整合基因演算法與熱流分析軟體進行散熱模組最佳化，碩士論文，國立成功大學。
9. 翁榮羨，呂威賢（2001），風力發電技術與應用展望，電工通訊期刊，90卷，2，12-21。
10. 張鼎煥，呂威賢（2004），我國再生能源法規制度探討，永續產業發展雙月刊，22，32-43。
11. 陳維新（2008）著，能源概論，台北：高立。
12. 劉萬琨，張志英，李銀風，越萍（2009）編著，風能與風力發電技術，台北：五南，初版。
13. 謝吉泉（2009），使用實數型基因演算法於數位 IIR 濾波器之最佳化設計，碩士論文，樹德科技大學。
14. 顏勝茂（2005），利用遺傳基因演算法建構演化數分析，碩士論文，中華大學。

15. 羅際航 (2006) , 具不同翼型葉片的水平式風力機之數值模擬, 碩士論文, 國立台灣科技大學。
16. 經濟部能源局 <http://www.moeaboe.gov.tw/>(2012/6/20)
17. Anderson P.M., Bose A., (1983) Stability simulation of wind turbine systems. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, vol.102, No.12.
18. Carta J.A., Mentado D., (2007) A continuous bivariate model for wind power density and wind turbine energy output estimations. *Energy Conversion and Management*. 48.420-432.
19. Casella, G., Berger, R., (1990) *Statistical inference*. 2<sup>nd</sup> ed. Pacific Grove, CA: Brooks/Cole.
20. Chang Xu, Yan Yan, Deyou Liu, Yuan Zheng, Chengqi Li (2011) Study of different anemometer time intervals influence on wind speed probabilistic distribution parameters. *IEEE International Conference on Electrical and Control Engineering*, pp.1744-1747.
21. Cox, D.R. (1970) *The Analysis of Binary Data*. London: Methuen.
22. John, A.R. (1994) *Mathematical statistics and data analysis*. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Duxbury Press.
23. Kmenta, Jan. (1986) *Elements of Econometrics*. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Macmillan Publishing Company.
24. Kusiak, A., Zheng, H., Song, Z. (2009). On-line monitoring of power curves, *Renewable Energy*, 34, 1487-1493.
25. Kingsland, S.E. (1995) *Modeling nature*. 2<sup>nd</sup> ed. Chicago, IL; The University of Chicago Press.
26. Long, J. Scott. (1997) *Regression Models for Categorical and Limited Dependent Variables*. Thousand Oaks, California: Sage Publications.

27. Luis, M. (2006) Dynamic models of wind farms with fixed speed wind turbines, *Renewable Energy*, 31, 1203-1230.
28. Pena, R., Clare J. C., Asher G. M.(1996) Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation. IEE Proceedings Electric Power Applications, 143. 231-241.
29. Thapar, V., Agnihotri, G., Sethi K. V.(2011) Critical analysis of methods for mathematical modeling of wind turbines. *Renewable Energy*, 36, 3166-3177.
30. Wolberg, J. (2005) *Data analysis using the method of least squares: extracting the most information from experiments*. Berlin: Springer.
31. Zamani, M. H., Riahy, G. H., Ardakani Jahanbani Ali(2007) Modifying power curve of Variable Speed Wind Turbines by Performance Evaluation of Pitch angle and Rotor Speed Controllers. IEEE Canada Electrical Power Conference, 347-352.



## 附錄

表 11 彰濱風場之風機最佳參數組合

NO.1	NO.2	NO.3	NO.4	NO.5
代數=6758	代數=7436	代數=5959	代數=5600	代數=3457
$a=2334.42$	$a=1022.71$	$a=1127.21$	$a=1050.89$	$a=2336.54$
$m=2.95$	$m=4.27$	$m=7.45$	$m=8.4$	$m=9.75$
$n=612.4$	$n=1124.61$	$n=825.91$	$n=643.2$	$n=858.25$
$\tau=1.41$	$\tau=0.98$	$\tau=1.07$	$\tau=1.05$	$\tau=1.36$
$S=1544423.22$	$S=859173.54$	$S=410107.9$	$S=233602.47$	$S=1801387.51$

表 12 鹿港風場之風機最佳參數組合

NO.2	NO.3	NO.4	NO.5	NO.6
代數=9608	代數=7194	代數=3729	代數=6824	代數=8276
$a=2426.79$	$a=713.66$	$a=793.08$	$a=916.06$	$a=955.02$
$m=-1.62$	$m=21.54$	$m=4.91$	$m=8.33$	$m=21.11$
$n=248.35$	$n=820.62$	$n=478$	$n=617.61$	$n=949.11$
$\tau=1.68$	$\tau=0.94$	$\tau=1$	$\tau=1.09$	$\tau=0.97$
$S=682255.59$	$S=112842$	$S=64329.55$	$S=88954.87$	$S=97580.04$

表 13 王功風場之風機最佳參數組合

NO.1	NO.2	NO.3	NO.4	NO.5
代數=4657	代數=6377	代數=9499	代數=6707	代數=10000
$a=2368.44$	$a=1011.11$	$a=996.47$	$a=923.39$	$a=1275.9$
$m=8.59$	$m=9.61$	$m=16.4$	$m=25.79$	$m=30.34$
$n=721.51$	$n=593.31$	$n=718.45$	$n=850.02$	$n=928.13$
$\tau=1.49$	$\tau=1.15$	$\tau=1.08$	$\tau=1.13$	$\tau=1.19$
$S=2056574.13$	$S=111426.73$	$S=71793.09$	$S=129826.33$	$S=160797.59$

表 14 實驗結果之平均代數比較表 (終止條件設為 2000)

平均 代數 突變範圍	交配 機制	平均分配	按目標函數 (S) 分配
		1	2
0~25	A	9703.8 代	9729.9 代
0~50	B	7870.1 代	7262.2 代
0~100	C	8647.0 代	7489.7 代
0~150	D	5131.6 代	5573.6 代
0~250	E	6158.5 代	5823.0 代
0~350	F	4213.0 代	4336.4 代

表 15 實驗結果之平均目標函數值 (S) 比較表 (終止條件設為 2000)

平均 S 值 突變範圍	交配 機制	平均分配		按目標函數 (S) 分配	
		1	2	1	2
0~25	A	8,280,435.71	8,851,570.00		
0~50	B	1,930,659.09	2,031,862.78		
0~100	C	1,966,415.88	1,788,534.13		
0~150	D	2,401,452.59	2,347,302.82		
0~250	E	5,507,088.27	3,761,612.88		
0~350	F	3,025,556.10	3,043,340.51		

表 16 實驗結果之最佳目標函數值 (S) 比較表 (終止條件設為 1000)

最佳 S 值 突變範圍	交配 機制	平均分配		按目標函數 (S) 分配	
		1	2	1	2
0~25	A	最佳代數=10000 $a=2102.45$ $m=-0.97$ $n=472.74$ $\tau=1.4$ $S=4,220,480.43$	最佳代數=7843 $a=2063.37$ $m=6.19$ $n=530.74$ $\tau=1.41$ $S=6,038,516.63$		
0~50	B	最佳代數=6305 $a=2293.96$ $m=2.87$ $n=556.5$ $\tau=1.42$ $S=1,580,935.92$	最佳代數=9650 $a=2307.56$ $m=1.94$ $n=530.34$ $\tau=1.43$ $S=1,478,487.49$		

表 16 實驗結果之最佳目標函數值 (S) 比較表 (終止條件設為 1000) (續一)

最佳 S 值 突變範圍	交配 機制	平均分配	按目標函數 (S) 分配
		1	2
0~100	C	最佳代數=4556 $a=2270.17$ $m=1.34$ $n=522.34$ $\tau=1.48$ $S=1,810,615$	最佳代數=5662 $a=2347.96$ $m=0.22$ $n=333.52$ $\tau=1.57$ $S=1,146,916.20$
0~150	D	最佳代數=4418 $a=2292.53$ $m=6.58$ $n=683.7$ $\tau=1.37$ $S=1,839,308.37$	最佳代數=2804 $a=2325.65$ $m=3.54$ $n=592.46$ $\tau=1.41$ $S=1,551,347.07$
0~250	E	最佳代數=3510 $a=2272.58$ $m=-1.91$ $n=333.49$ $\tau=1.54$ $S=1,569,910.58$	最佳代數=4523 $a=2268.62$ $m=-1.18$ $n=406.72$ $\tau=1.52$ $S=2,808,961.56$
0~350	F	最佳代數=3203 $a=2290.53$ $m=5.18$ $n=1072.03$ $\tau=1.27$ $S=2,532,370.74$	最佳代數=2173 $a=2187.55$ $m=8.77$ $n=924.4$ $\tau=1.29$ $S=2,842,414.44$