

國立臺灣大學工學院工程科學及海洋工程學系

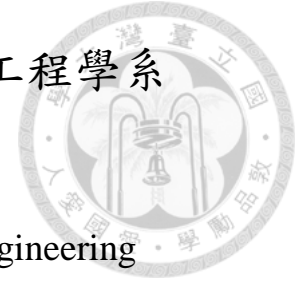
博士論文

Department of Engineering Science and Ocean Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Doctoral Dissertation



台灣地區颱風風況對風機氣動力負荷影響之研究

Study of Aerodynamic Loads Acting on Wind Turbines  
under the Typhoon Conditions in Taiwan

楊淳宇

Chun-Yu Yang

指導教授：郭真祥 博士

Advisor: Jen-Shiang Kouh, Ph.D.

中華民國 105 年 7 月

July, 2016



## 致謝

感謝親愛的家人，一直以來的默默陪伴、支持與關愛，

感謝敬愛的指導教授 郭真祥老師這一路來對學生的關心、照顧與教導，

感謝親愛的學長 趙修武教授 在最後攻關時的協助與鼓勵，

感謝尊敬的口試委員 李雅榮老師、蔡進發老師、陳建宏老師與蔡國忠老師給予的指教與建議，

感謝曾經提攜學弟的前輩 彥均學長、鴻斌學長、振緯學長、育禎學長，振哲學長，

感謝一路相互支持鼓勵的戰友 宗岳 秉天，

感謝可愛的學弟與學妹 可掬、岳祥、張雲、旻玫、顏敏、子靖、仲凱、育吟、柏延、佺蓁、引棋、育璋、子豪、維佐、郁雯、柏文、云珊、正彬、映臻、彥呈、惠婷、薇頤、育杰、維淵、佳燕、佑勳、少廷、源佑、裕仁、建憶與文祥，

讓敝人的求學路程充滿歡樂，

感謝各位，使本文得以完成且更為完善。

總之要感謝的人太多，只能在此對所有曾陪伴與協助敝人的好心人們致上最誠摯的謝意，謝謝。



## 摘要

台灣極具有風能開發之潛力，但也同時面臨颱風所造成風機倒塌的問題，這些風機不乏國際知名風機大廠的產品，且經過國際風機認證，但仍無法存活於嚴苛的颱風風況條件，故風機認證依據之規範(IEC61400-1)內容是否充分考量了颱風風況須要進一步研究。風機設計規範 IEC61400-1 的設計案例中未包含颱風狀況下的風機工作環境，雖然 DLC6 與 DLC7 的設計工況設定為停機，外部風況條件為極端風況，可對應風機於颱風期間的高風速，但此兩種設計負荷案例的風況條件未包含颱風期間風速瞬間變化的陣風情況。有鑑於此，本文將對台灣在颱風期間的風況進行分析，提出符合台灣颱風期間之極端風速與陣風模型，並以此作為風速條件進行風機數值模擬，以了解風機在颱風期間所受之氣動力負荷特性，以供風機設計、採購與補強時參考。

藉由比較氣象學上對於颱風風況之定義以及國際風機設計規範 IEC61400-1 中對於類似颱風之風況定義與數學模型，設定風機需要考量之颱風風況參數，並依此對颱風期間的彰工測風塔風速量測資料進行統計整理，以評估台灣颱風期間可能面臨之極端風速與陣風，結果顯示台灣彰工地區颱風期間可能面臨之 1 分鐘平均風速為 36m/s，陣風因子為 1.26、期間最大風速為 64.85m/s。接著以商業軟體 ANSYS FLUENT 求解 RANS 方程與 SST  $k-\omega$  紊流模型以模擬 NREL 5MW 風機在颱風期間極端風速與陣風下之流場。陣風期間風機氣動力負荷極值並非發生於風速最大時，且較極端風速為定值情況下之風機氣動力負荷為大，其中阻力為 1.50 倍、縱搖力矩為 1.30 倍、轉子力矩為 1.40 倍而塔頂結構物的平擺力矩則為 1.35 倍。

由模擬結果可知以極端風速評估風機氣動力負荷會低估風機於颱風期間可能面臨的極端氣動力負荷。因此本文建議常有颱風侵襲的區域在進行風機設計或負

荷評估時，除了原先的設計負荷案例 DLC6 與 DLC7 外，最好再增加設計工況為停機，外部風況條件為陣風之案例設定。



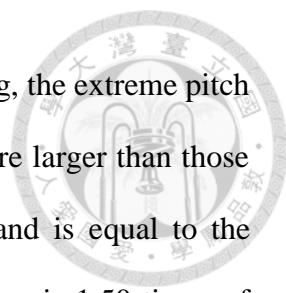
關鍵字：颱風、極端風速、陣風、計算流體力學

## Abstract



In Taiwan, the wind turbine that has been certificated by the international certification organization, such as GL, was still collapsed during typhoon. So, it is necessary to discuss if the design requirements of wind turbine described in IEC61400-1 satisfied the environment of typhoon. There is no design load case defined for the conditions of wind turbine during typhoon in IEC61400-1, the guideline for design requirements of wind turbine. Although the standstill situation and wind condition of DLC6 and DLC7 are corresponding to the wind turbine with extreme wind speed during typhoon, but the gust during typhoon is not included. For these reasons, the recorded wind data during typhoon is analyzed to propose the extreme wind speed and gust model that corresponding to the wind condition during typhoon in Taiwan. Then, the characteristics of aerodynamic load acting on the wind turbine are studied by the numerical simulation of the flow field around the wind turbine with the proposed wind conditions mentioned above to be the reference for design, purchase and reinforcement of wind turbine in this article.

According to the statistical analysis of the data that recorded by Chang-Kung anemometer during typhoon, the 1 minute average wind speed is 36m/s, the maximum 3 seconds average wind speed is 45.36m/s, the gust factor is 1.26 and the maximum instantaneous wind speed is 64.85m/s. And then the flow field around the NREL 5MW wind turbine with extreme wind speed and gust mentioned above are simulated by solving the RANS equations and SST  $k-\omega$  turbulence model. The simulating results of the gust case show that the drag and pitch moment of the wind turbine are not the extreme values while the wind speed being the maximum during typhoon. Moreover,



the simulating results of the gust case also show that the extreme drag, the extreme pitch moment, the extreme rotor moment and the extreme yaw moment are larger than those of the extreme wind speed case that the wind speed is constant and is equal to the maximum wind speed during gust. The extreme drag of the gust case is 1.50 times of the extreme wind speed case, the extreme rotor moment of the gust case is 1.40 times of the extreme wind speed case and the extreme yaw moment of the gust case is 1.35 times of the extreme wind speed case.

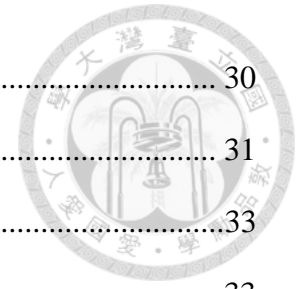
According to the simulating results, the extreme aerodynamic loads acting on the wind turbine will be under estimated if the wind condition is the fixed extreme wind speed that is corresponding to the wind condition of DLC6 and DLC7. Therefore, the gust should be considered as one of the wind condition for the design load case with standstill situation.

Keywords: Typhoon, Extreme Wind Speed, Gust and CFD

# 目錄



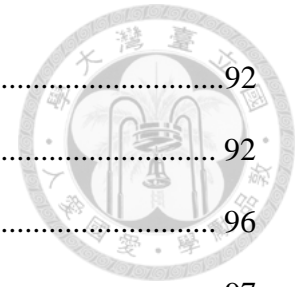
致謝 .....	i
摘要 .....	ii
Abstract.....	iv
目錄 .....	vi
表目錄 .....	ix
圖目錄 .....	xi
符號表 .....	xiv
第一章 緒論 .....	1
1-1 研究背景與動機 .....	1
1-3 研究目的與方法 .....	8
1-4 論文架構 .....	10
第二章 颱風風況 .....	12
2-1 風況參數與數學模型 .....	12
2-1-1 氣象學上之颱風風況參數 .....	12
2-1-2 風機規範 IEC61400-1 .....	13
2-1-3 颱風風況參數與數學模型 .....	18
2-2 颱風資料整理分析 .....	21
2-2-1 資料內容簡述 .....	21
2-2-2 紊流強度 .....	24
2-2-3 陣風因子 .....	26
2-3 台灣地區颱風風況 .....	28
2-3-1 陣風因子與極端風速 .....	28



2-3-2 紊流強度 .....	30
2-3-3 幕次律風剖線 .....	31
第三章 數值模擬模型 .....	33
3-1 目標風機簡介 .....	33
3-1-1 風機幾何外形 .....	33
3-1-2 運轉條件與風機流場性質 .....	38
3-2 數值方法 .....	41
3-2-1 統御方程式 .....	41
3-2-2 紊流模型 .....	42
3-2-3 數值離散方法與求解流程 .....	43
3-3 數值模擬模型 .....	45
3-3-1 計算空間 .....	45
3-3-2 邊界條件 .....	47
3-3-3 網格分佈與獨立性測試 .....	48
第四章 模擬結果與討論 .....	56
4-1 模擬案例與風機氣動力負荷定義 .....	56
4-1-1 模擬案例 .....	56
4-1-2 風機氣動力負荷定義 .....	60
4-2 極端風速模擬結果與分析 .....	61
4-2-1 作用於風機之力 .....	61
4-2-2 作用於風機對原點之力矩 .....	70
4-2-3 葉片轉子轉子力矩與變槳力矩 .....	74
4-3 陣風模擬結果與分析 .....	77
4-3-1 陣風案例模擬結果 .....	77
4-3-2 陣風案例模擬結果分析 .....	84



第五章 結論 .....	92
5-1 結論與建議 .....	92
5-2 未來研究方向 .....	96
參考文獻 .....	97
附錄 A 颱風風速資料統計 .....	103
附錄 B 風機葉片攻角分佈 .....	109
附錄 C 風機流場分佈圖 .....	112





## 表目錄

表 2.1 中央氣象局颱風等級定義.....	13
表 2.2 IEC61400-1 風機設計等級.....	15
表 2.3 IEC61400-1 設計負荷案例.....	15
表 2.4 風速紀錄資料期間內之颱風列表.....	22
表 2.5 彰工測風塔颱風期間風速最大值與平均值.....	23
表 3.1 NREL 5MW 離岸風機主要幾何特徵.....	34
表 3.2 NREL 5MW 離岸風機葉片幾何特徵.....	36
表 3.3 NREL 5MW 離岸風機運作條件.....	38
表 3.4 台灣彰工地區颱風期間風速.....	40
表 3.5 1 標準大氣壓, 溫度 20°C 情況下空氣性質.....	40
表 3.6 數值模擬模型計算空間尺寸參數.....	45
表 3.7 數值模型之流場邊界條件.....	48
表 3.8 不同網格密度之網格數量.....	49
表 3.9 網格獨立性測試計算條件.....	49
表 3.10 網格獨立性測試結果.....	53
表 4.1 颱風風況之模擬案例.....	57
表 4.2 台灣颱風風況參數( $z = 70\text{m}$ ).....	58
表 4.3 陣風模型於不同高度之特徵風速.....	59
表 4.4 風機極端風況模擬結果-受力.....	62
表 4.5 風機受力中的黏滯項分量與壓力項分量.....	69
表 4.6 風機極端風況模擬結果-力矩.....	71
表 4.7 風機極端風況模擬結果-葉片.....	74

表 4.8 風機陣風期間氣動力負荷最大值-受力.....	77
表 4.9 風機陣風期間氣動力負荷最大值-對原點力矩.....	80
表 4.10 風機陣風期間氣動力負荷最大值-轉子力矩與變槳力矩.....	80
表 4.11 風機在陣風與極端風速條件下之最大氣動力負荷.....	91
表 A.1 紊流強度常態分佈卡方檢定結果.....	106
表 A.2 陣風因子常態分佈卡方檢定結果.....	108



## 圖目錄

圖 1.1 全球風機裝置容量示意圖.....	2
圖 1.2 風機裝置容量預測圖.....	2
圖 1.3 台灣颱風風況設定流程圖.....	9
圖 1.4 數值模擬研究流程圖.....	9
圖 2.1 不同風切指數之冪次律風剖線示意圖.....	17
圖 2.2 正常紊流模型示意圖.....	17
圖 2.3 1 分鐘平均風速與 10 分鐘平均風速關係圖.....	23
圖 2.4 紊流強度統計結果示意圖.....	25
圖 2.5 陣風因子統計結果示意圖.....	27
圖 2.6 陣風因子求解示意圖.....	29
圖 2.7 陣風模型示意圖.....	29
圖 2.8 颱風期間陣風最大風速-彰工測風塔與 IEC61400-1 比較圖.....	30
圖 2.9 彰工測風塔颱風期間紊流強度與 IEC61400-1 設計紊流強度比較圖.....	31
圖 2.10 颱風期間冪次律風剖線模型示意圖.....	32
圖 3.1 NREL 5MW 離岸風機幾何外形示意圖.....	34
圖 3.2 NREL 5MW 離岸風機支撐結構幾何外形示意圖.....	35
圖 3.3 NREL 5MW 離岸風機葉片幾何外形示意圖.....	37
圖 3.4 風機葉片節距角與方位角示意圖.....	39
圖 3.5 NREL 5MW 離岸風機葉片雷諾數分佈示意圖.....	40
圖 3.6 SIMPLE 法計算流程示意圖.....	44
圖 3.7 數值模擬模型計算空間示意圖.....	46
圖 3.8 數值模擬模型邊界條件示意圖.....	46

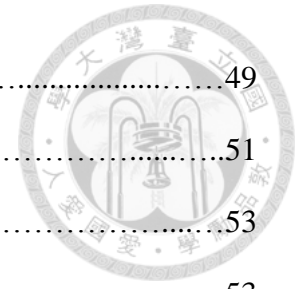


圖 3.9 風機表面網格分佈示意圖.....	49
圖 3.10 數值計算模型網格分佈示意圖.....	51
圖 3.11 縱搖力矩與網格數量關係圖.....	53
圖 3.12 離散誤差與無因次網格大小關係圖.....	53
圖 3.13 目標風機額定運轉條件下葉片雷諾數分佈示意圖.....	54
圖 3.14 目標風機額定運轉數值模擬模型示意圖.....	55
圖 3.15 目標風機額定運轉數值模擬計算結果示意圖.....	55
圖 4.1 數值模擬計算流程示意圖.....	57
圖 4.2 陣風風況示意圖(模擬案例 B).....	59
圖 4.3 極端風況示意圖(模擬案例 A).....	59
圖 4.4 風機氣動力負荷定義示意圖.....	60
圖 4.5 風機極端風況模擬結果-阻力.....	63
圖 4.6 極端風況下風機周圍壓力分佈( $z=75\text{m}$ ).....	63
圖 4.7 不同葉片轉子方位角之阻力差異說明示意圖.....	64
圖 4.8 風機極端風況模擬結果-橫向力.....	66
圖 4.9 單一葉片不同方位角橫向力圖.....	66
圖 4.10 軸傾角對葉片攻角影響示意圖.....	67
圖 4.11 單一葉片於不同方位角受力示意圖.....	67
圖 4.12 風機極端風況模擬結果-升力.....	68
圖 4.13 單一葉片於不同方位角升力示意圖.....	68
圖 4.14 風機阻力、橫向力與升力比較示意圖.....	69
圖 4.15 風機極端風況模擬結果-縱搖力矩.....	72
圖 4.16 風機極端風況模擬結果-橫搖力矩.....	72
圖 4.17 風機極端風況模擬結果-平擺力矩.....	73
圖 4.18 風機極端風況模擬結果-轉子力矩.....	75

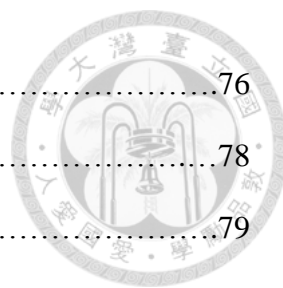


圖 4.19 風機極端風況模擬結果-變槳力矩.....	76
圖 4.20 風機陣風風況模擬結果-阻力.....	78
圖 4.21 風機陣風風況模擬結果-橫向力.....	79
圖 4.22 風機陣風風況模擬結果-升力.....	79
圖 4.23 風機陣風風況模擬結果-縱搖力矩.....	81
圖 4.24 風機陣風風況模擬結果-橫搖力矩.....	82
圖 4.25 風機陣風風況模擬結果-平擺力矩.....	82
圖 4.26 風機陣風風況模擬結果-轉子力矩.....	83
圖 4.27 風機陣風風況模擬結果-變槳力矩.....	83
圖 4.28 陣風期間風速加速度與時間關係圖.....	85
圖 4.29 風速、加速度與風機氣動力正規化之結果比較.....	88
圖 4.30 動量理論流場示意圖.....	89
圖 A.1 資料統計流程示意圖.....	103
圖 A.2 原始紊流強度分佈示意圖.....	104
圖 A.3 過濾後紊流強度分佈示意圖.....	104
圖 A.4 陣風因子分佈示意圖.....	107
圖 A.5 過濾後陣風因子分佈示意圖.....	107
圖 B.1 風速與風機葉片關係示意圖.....	110
圖 B.2 A-A 截面風速與風機葉片關係示意圖.....	110
圖 B.3 葉片攻角變化與方位角關係示意圖.....	111
圖 C.1 極端風速下風機 $z = 70\text{m}$ 處壓力分佈示意圖.....	113
圖 C.2 陣風條件下風機表面與 $y-z$ 平面在 $x = 0\text{m}$ 處壓力分佈示意圖.....	117



## 符號表

符號	單位	說明
$z$	[m]	高度
$z_{ref}$	[m]	參考高度
$D$	[m]	葉片轉子直徑
$D_{hub}$	[m]	輪轂轉子直徑
$H_{hub}$	[m]	輪轂高度
$r$	[m]	葉片轉子半徑位置
$R$	[m]	葉變轉子半徑
$t$	[s]	時間
$\tau$	[s]	瞬間風速取樣時間
$T$	[s]	陣風持續時間
$V$	[m/s]	風速
$V_0$	[m/s]	時間為 0 時之風速
$V_{max}$	[m/s]	最大瞬間風速
$V_{ref}$	[m/s]	IEC61400-1 風機設計等級之參考風速
$\bar{V}_3$	[m/s]	3 秒鐘平均風速
$\bar{V}_{60}$	[m/s]	1 分鐘平均風速
$\bar{V}_{600}$	[m/s]	10 分鐘平均風速
$u_i$	[m/s]	流體於 $i$ 方向之速度分量
$p$	[pa]	壓力
$I$	[-]	紊流強度
$I_{ref}$	[-]	IEC61400-1 風機設計等級之參考紊流強度
$P_{rated}$	[W]	風機額定功率
$F_x$	[N]	阻力
$F_y$	[N]	橫向力
$F_z$	[N]	升力
$Q_x$	[N·m]	橫搖力矩
$Q_y$	[N·m]	縱搖力矩
$Q_z$	[N·m]	平擺力矩
$Q_A$	[N·m]	轉子力矩
$Q_{pi}$	[N·m]	葉片 $i$ 之變槳力矩
$GF$	[-]	陣風因子
$\alpha$	[-]	風切因子

$\sigma$	[m/s]	風速標準差
$\theta_p$	[°]	節距角
$\theta_t$	[°]	軸傾角
$\theta_a$	[°]	方位角
$\phi$	[-]	任意物理量
$\Omega$	[rpm]	風機葉片轉子轉速







# 第一章 緒論

## 1-1 研究背景與動機

自工業革命以來，人類對於石化燃料的使用量逐漸增加，因而排放之二氧化碳亦隨之上升[1]，雖然對此是否為造成地球暖化現象之主因目前各界尚無定論，但美國國家海洋暨大氣總署(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)於夏威夷之觀測站對大氣中二氧化碳含量的量測紀錄資料[2]顯示，自 1958 年以來大氣中二氧化碳氣體含量為上升的趨勢，而人類因使用石化燃料產生之二氧化碳氣體以及地表平均溫度也都呈現上升之趨勢。故許多國家的政府於 1997 年通過京都議定書以約束各自國家對於溫室氣體之排放，力圖使地表平均溫度減緩上升甚至恢復工業革命前之水準。為了能夠接續京都議定書，在 2015 年於巴黎舉行之聯合國氣候大會中，聯合國氣候變化框架公約(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)195 個締約國一致通過巴黎協定[3]，承諾控制溫室效應氣體的排放，以確保於 2100 年前全球平均氣溫的升幅能夠控制在工業化前水平 2°C 升幅之內，並朝不超過 1.5°C 的目標努力。為此，世界各國勢必會更加重視潔淨且可再生能源的使用與開發，而風能即為其中一個重要的選項。

1970~1990 年間的幾次石油危機促成近代風力發電的發展，而環保意識的抬頭則更進一步促進風能之推廣。依據全球風能組織公布的報告[4]指出，2015 年年度全球裝機總容量達 63.5GW，市場年度成長率達 17.2%，且截至該年年底為止，全球累積裝機總容量更達 432.9GW(參考圖 1.1)，而世界風能協會[5]推測到 2020 年時，全球裝機容量將達到 792.1GW(參考圖 1.2)。

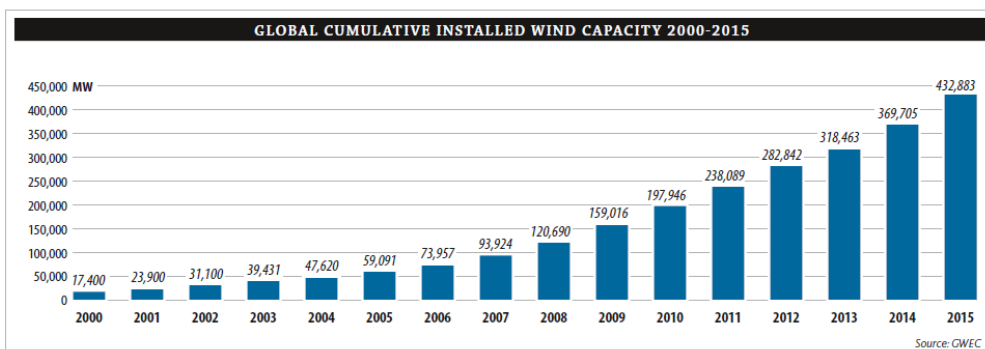
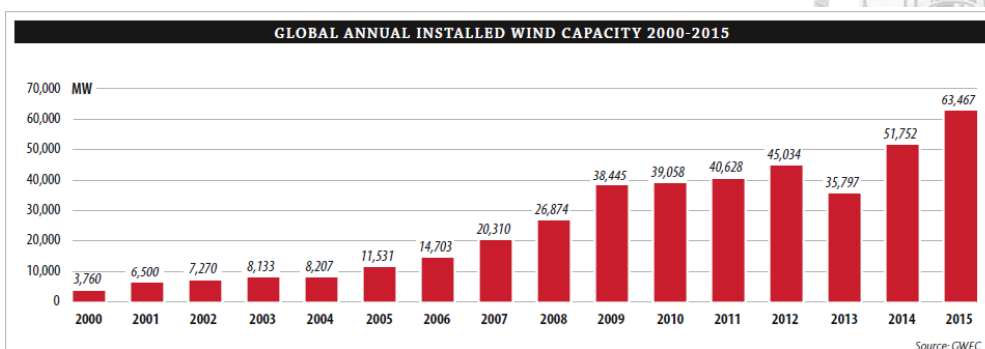
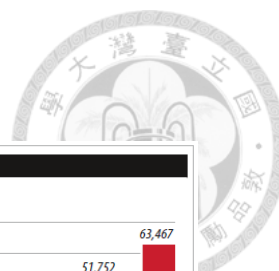


圖 1.1 全球風機裝置容量示意圖[4]

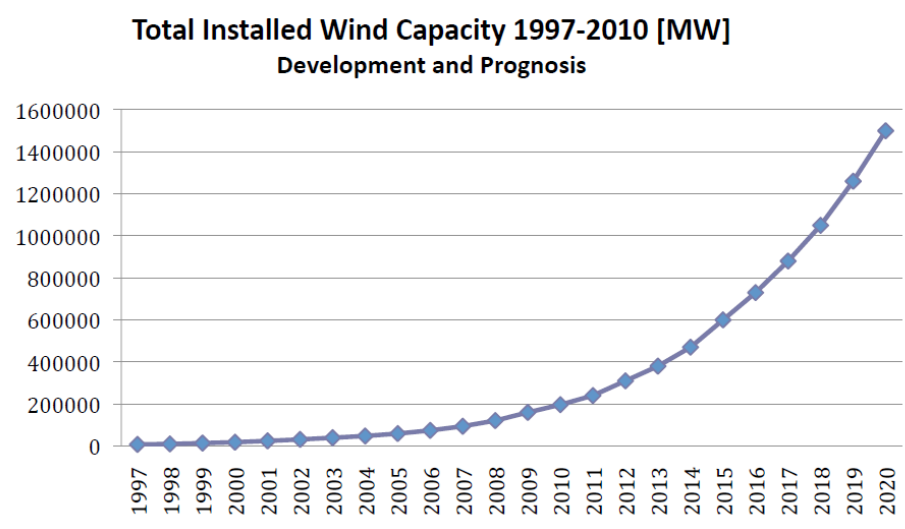



圖 1.2 風機裝置容量預測圖[5]



台灣的風力發電發展起始於 1990 年，該年年底於澎湖七美設立兩部 100kW 之風機[6]，進行並聯運轉試驗為風力發電的商用運轉做準備，接著於 2000 年在澎湖中屯興建風力發電廠，於 2001 年開始商轉，之後陸續於澎湖新增風機組和風力發電廠，至 2008 年澎湖風力發電廠發電容量已達 9.9MW，相當於澎湖尖山火力發電機組發電容量的 24%。至於台灣本島則在 2002 年完成風力發電第一期計畫之規劃，於 2003 年開始進行風機之設置，至 2015 年年底為止，陸域已運轉之風機發電容量已達 649MW[7]。為進一步發展風力發電，尤其離岸風電，行政院更於 2012 核定千架海陸風機計畫，由工研院成立千架海陸風機計畫推動辦公室以配合政府施政，並於同年公告實施風力發電離岸示範系統獎勵辦法[8]，預期於 2020 年完成離岸風場之設置與商轉，預計總發電容量將超過 350MW。


台灣由於地形與地理位置關係，每年夏秋兩季常有颱風侵襲。依據中央氣象局颱風資料庫(<http://rdc11.cwb.gov.tw/TDB/>)的資料顯示，自 1958 年到 2015 年期間發布警報之颱風達 390 個，其中輕度颱風有 112 個，中度颱風有 161 個，強烈颱風則有 117 個，平均每年侵襲台灣之颱風多達 6~7 個。因此，雖然台灣地區擁有良好的風場，尤其台灣海峽區域平均風速可達 12m/s (<http://www.4coffshore.com/windfarms/windspeeds.aspx>)，為世界排名前 10 的風場，極具有開發離岸風能之潛力，但也同時面臨颱風所帶來之極端風況與其對風機可能造成損害等問題。如 2008 年薔密颱風便造成台中風機倒塌以及最近(2015 年 8 月)的蘇迪勒颱風同樣也造成許多風機損壞或倒塌。這些倒塌的風機不乏國際知名風機大廠之產品，且經過國際風機認證，但仍無法存活於嚴苛的颱風風況條件，故風機認證依據之規範(IEC61400-1)內容是否充分考量了颱風風況，為台灣以及所有面臨颱風威脅地區發展風能時必須要了解並加以深入研究之重要課題。



## 1-2 文獻回顧


颱風是東亞地區經常面臨的嚴苛氣候情況，台灣尤其嚴峻，每年會有 6~7 個颱風侵襲，而隨著風機在東亞地區的發展，颱風造成風機損壞的問題也將隨之頻頻發生，故不少機構或學者對颱風造成風機損壞因素進行研究。

風機所受之負荷與風況息息相關，了解颱風期間風機可能面臨的風況對風機的負荷分析相當重要，相關風況條件可藉由統計學方法整理分析實際量測資料、以環境風洞進行縮尺模型試驗或者以計算流體力學方法模擬計算特定風場的流場等方法取得。Clausen(2006)等[9]由現有氣象站之颱風量測資料，以颱風中心壓力以及距離颱風中心距離方式推算風速，以甘氏分佈(Gumbel distribution)評估菲律賓地區 50 年回歸周期之極端風速分佈，該區域東北方之 50 年極端風速最大，大於 65m/s 以上。Cao(2009)等[10]以 9 個螺旋槳式風速計與 7 個三維超聲波測風儀在離地 15m 量測 2003 年 Maemi 颱風期間之風速資料並進行統計分析，以 10 分鐘平均風速為基礎，統計紊流強度與陣風因子等參數，並指出該颱風期間陣風因子平均達 1.6。方新發(2009)等[11]以風況分析軟體 WAsP Engineering 對 1995~2007 年蘭嶼氣象站的量測資料進行統計分析，以甘氏分佈估算極端風速的分佈狀況，發現在高度 67 公尺時，極端風速可能超過 100m/s。Estelito(2010)等[12]統計颱風地區與非颱風地區 50 年回歸週期極端風速的機率分佈，並配合 ISO(International Organization for Standardization)建議之挫曲(Buckling)模型，以 Generalized Extreme Value(GEV)機率分佈模型進行風險評估，並依此提出菲律賓地區 50 年回歸週期極端風速分佈，結果顯示 50 年回歸週期極端風速會大於 70m/s。Liu(2011)等[13]以架設於南海 100m 高氣象塔上的三維超聲波測風儀量測黑格比(Hagupit)颱風的風速情況，並將量測資料與 IEC61400-1 規範相比，結果發現由實測資料統計所得之極端操作陣風的風速升幅較 IEC61400-1 規範的設計上限值高，此外依據 IEC61400-1 提供之模型以風速標準差計算所得之風速升幅較從直接量測所得之風速升幅為大，並且風速愈高偏差愈大。林博雄(2011)等[14]以架設在嘉義東石鄉海埔新生地之超



聲波測風儀，在離地 15m 量測 2009 年莫拉克(Morakot)颱風的風速，並對量測資料進行統計分析颱風期間之 10 分鐘平均風速、極端風速、紊流強度、陣風因子，結果顯示 10 分鐘平均風速最大為 9.67m/s、極端風速最大為 59.6m/s、紊流強度最大可達 0.81、陣風因子超過 10，且建議陣風持續時間可修正到 5~7 秒，並指出降水會造成超聲波測風儀量測失效頻率增加，影響量測資料品質。

由於大型風機尺寸相當大，因此常以數值計算方法計算風機之氣動力負荷以節省成本，葉片動量元素理論與計算流體力學方法為目前常用以評估風機氣動力負荷特性的數值方法。葉片動量元素理論係結合動量理論與葉片元素理論對風機葉片之氣動力性能進行計算，該方法能夠快速評估風機葉片氣動力性能，因此諸如 FAST、Bladed、FLEX5、ADAMS 與 HAWX2 等需要快速評估風機氣動力負荷以進行氣彈力分析之軟體皆採用葉片動量元素理論以評估風機氣動力負荷，但該方法在使用時需要事先準備許多二維翼型氣動力性能(如升力係數、阻力係數等)資料，且無法得到風機表面壓力分佈等較為詳細的資訊。陳裕仁(2008)[15]便利用此方法計算時間短的特性，蒐集許多二維翼型氣動力性能資料，建立能夠快速評估風機氣動力性能之網路平臺。劉童斌(2009)等[16]使用 FAST 計算評估平均風速為 20m/s 與 74.7m/s 下 1.5MW 風機氣動力負荷，並結合採用有限元素法之商用軟體 ANSYS 模擬計算塔柱之位移與應力，並對在風速 20m/s 情況下之塔柱外形進行最佳化，最佳化之結果較原先設計之總體積縮減約三分之二。謝坤儒(2010)等[17]使用 Bladed 計算風機氣動力負荷，並作為外部負載以有限元素法進行風機塔柱之結構分析，以探討不同塔頂質量對塔柱規格之影響，結果顯示當塔頂重量減少 50%，塔柱管壁厚度可減少約 22%。蔡國忠(2010)等[18]同樣使用 Bladed 計算風機葉片的氣動力負荷，再以有限元素軟體 ANSYS 進行風機在運轉下時之結構分析，結果顯示應力與應變最大值發生在三支葉片的各個集中負載位置。賴偉銘(2010)[19]結合葉片動量元素理論與有限元素法的樑模型來計算風機葉片受力負載以及流體與結構之間的耦合關係，並以此探討葉片纖維積層角度對風機氣動力效能之影響，結



果顯示耦合造成葉片之扭轉量相當小。詹裕禎(2011)[20]採用葉片動量元素理論求取葉片各翼斷面之入流攻角，再以 Xfoil 進行翼斷面二維流場分析求得葉片翼斷面之壓力分佈，並作為 ABAQUS 有限元素分析軟體建立之風機結構分析模型的外部負荷以進行結構分析，並依據結構分析所得葉片變形結果重覆上述氣動力與結構分析，建立氣動力與結構間相互影響之流固耦合迭代程序以進行風機氣彈力分析。

計算流體力學方法藉由求解離散化後之守恆方程式以取得流場資訊，進而求得風機的氣動力負荷，該方法求解時間較長，但能獲得較為詳細的流場資訊，且隨著電腦運算能力的增長，計算時間可大幅縮短，故不少學者以此方法進行風機流場研究。Benjanirant(2003)[21]以 CFD 方法求解三維暫態 Navier-Stokes equations，模擬計算 NREL Phase VI 風機在風速為 7m/s 與 25m/s 下運轉之流場，並比較不同紊流模型(Spalart-Allmaras model 與 k- $\epsilon$  model)對模擬之影響，結果顯示 k- $\epsilon$  model 與實驗結果較為接近。Mandas(2006)等[22]以 CFD 方法求解穩態 RANS equations 與 k- $\omega$  model 模擬計算 Nordtank 41/500 風機在不同風速運轉條件下之流場，探討風機尾流流場。模擬計算採用之網格為六面體網格，網格數達 150 萬，結果與葉片動量元素理論方法計算結果相當吻合。Tachos(2009)等[23]以 CFD 方法求解穩態 RANS equations 與 Spalart-Allmaras model 模擬計算 NREL Phase II 風機在風速為 7.2m/s 運轉條件下之流場。模擬計算採用之網格為六面體網格，網格數達 330 萬，結果與實驗結果相當吻合，顯示 CFD 方法能夠有效的評估風機之流場。

為了進一步探討颱風造成風機損壞之原因，Ishihara(2005)等[24]對 2003 年 9 月 Maemi 颱風期間的風機倒塌的因素進行研究，其研究方法係藉由實際風速紀錄資料、風洞實驗以及計算流體力學取得風場風速資料，再依此設定極端風速以評估作用於風機之氣動力負荷，再以之為外部負荷進行結構分析，結果顯示塔柱的出入口為塔柱結構最薄弱處，很可能造成預期外的挫曲破壞或倒塌。Uchida(2011)等[25]使用類似 Ishihara 之方法對 2009 年 10 月 Melor 颱風造成風機損壞的因素進

行研究。該研究以計算流體力學方法求得之葉片表面壓力分佈作為後續結構分析之輸入條件以更為接近實際情況，模擬計算的結果顯示應力集中的位置與風機實際破壞的位置相同。

前人對於颱風風況對風機之影響研究大致可區分為颱風風況之研究、定義極端風速或風機所受之負荷等方面，但這些研究多數將重點放在颱風的極端風速，在提及陣風風況時也僅注重陣風的最大風速，甚少考量風機停機下的氣動力負荷隨陣風風速變化之暫態反應，故本文將研究重心放在颱風期間之陣風風況以及作用於風機的氣動力負荷隨時間變化的情況。



### 1-3 研究目的與方法

風機設計規範 IEC61400-1[26]藉由設計負荷案例(Design Load Cases，簡稱 DLC)設定風機在不同設計工況下可能之外部環境條件，並要求設計者必須要依據這些案例對風機進行負荷分析以確保風機的安全性。在這些設計案例中並未針對颱風狀況下的風機工作環境進行定義，唯 DLC6 與 DLC7 的設計工況設定為停機，外部風況條件為極端風況，可對應風機於颱風期間的高風速情形，但此兩種設計負荷案例的風況條件未包含颱風期間風速瞬間變化的陣風(Gust)情況。有鑑於此，本文將對台灣在颱風期間的風況進行研究，提出符合台灣颱風期間之極端風速與陣風模型，並以此作為風速條件進行風機之數值模擬，以了解風機在颱風期間所受之氣動力負荷特性，以供風機設計、採購與補強時參考。

為了達到上述的研究目標，首要工作便是瞭解氣象上用以描述颱風風況之方式與參數定義，因為風速資料多依照這些參數的定義方式進行記錄。同時為了能夠將這些風速紀錄應用於風機的研究上，對國際風機設計規範 IEC61400-1 中有關風況參數的定義與描述各種風況的數學模型也必須加以了解，與氣象學上相對應之參數互相比較，再依照風機研究之需求設定描述颱風風況之參數與數學模型等。接著收集相關風速紀錄資料，依照設定之參數對相關資料加以整理分析，並利用統計學方法評估台灣颱風期間可能面臨之極端風況。藉由台灣颱風風況評估之結果以及國際風機設計規範 IEC61400-1 設計負荷案例，設定可對應風機於台灣颱風風況環境條件之模擬案例，進行數值模擬計算。

由於國內開始離岸風場之建設，故以 NREL 5MW 風機為目標風機，該風機設計用來作為不同國家或機構研究不同離岸風場的海上基礎之風機，以方便進行研究成果之交流。此外，本文以計算流體力學方法進行數值模擬研究，藉由建立相應幾何模型之計算網格，配合適當的邊界條件，用商業套裝軟體 ANSYS FLUENT



為工具求解離散之守恆方程式。並藉由網格獨立性測試確認所建立之數值計算模型能有效的進行模擬。相關的研究流程如圖 1.3 與圖 1.4 所示。

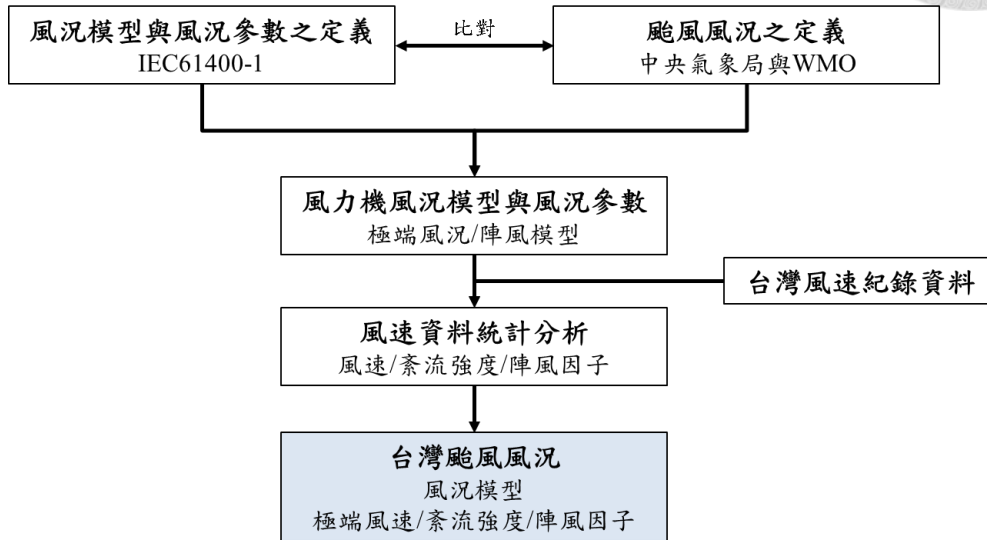


圖 1.3 台灣颱風風況設定流程圖

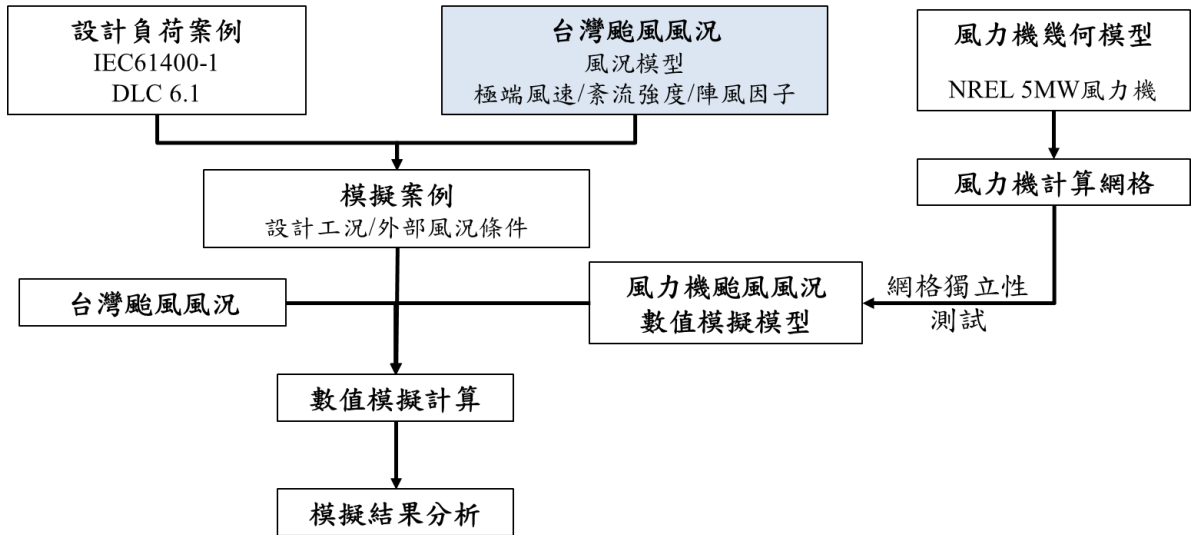


圖 1.4 數值模擬研究流程圖



## 1-4 論文架構

為了瞭解通過國際認證之風機在台灣颱風期間為何仍發生故障或倒塌的原因，探討台灣地區颱風風況以及風況對風機氣動力負荷之影響。在文中首先依據相關規範以及氣象學對於描述颱風風況參數的定義，對台灣地區颱風風速紀錄資料進行統計分析，以獲得台灣颱風期間可能面臨之極端風況。接著以 NREL 5MW 風機為目標建立模擬風機於停機工況，極端風速條件下的數值計算模型，最後以所建立之數值模型依據可能面臨之極端風況，進行目標風機於停機工況下在極端風速與陣風條件下的數值模擬，以了解風機在颱風情況下的氣動力負荷特性，並依此建議颱風地區必須考慮之設計負荷案例。

本文架構如下

第一章 緒論：對於發展風機的必要性以及國內、外在風能開發的歷史進程與未來前景。此外對本文的研究動機進行簡單說明，並回顧探討颱風對風機氣動力負荷影響的相關研究，最後說明研究目的與方法。

第二章 颱風風況：參考國內、外對於颱風風況之定義以及國際風機設計規範 IEC61400-1 中對於類似颱風風況之定義與數學模型，設定風機需要考量之颱風風況參數，並依此對颱風期間的風速量測資料進行統計整理，以評估台灣颱風期間可能面臨之極端風況。

第三章 數值計算模型：計算流體力學方法能有效、經濟的對各種流場進行計算模擬，因此本文將建立能夠進行風機於停機工況，颱風風況下之數值計算模型，並藉網格獨立性測試以確認數值模型的可信度。

第四章 數值模擬結果：藉由台灣颱風期間可能面臨之風況，並參考 IEC61400-1 的設計負荷案例建立模擬案例，進行穩態極端風速與暫態陣風的數值模擬計算。最後對於計算之結果加以討論分析，以了解台灣颱風期間風機可能面臨之負荷與必須考量之風況。

第五章 結論與建議：對於研究成果進行總結，包含台灣地區的颱風風況、數值計算結果以及風機在台灣颱風風況下的氣動力負荷特性等，並提出台灣颱風期間可能面臨的極限風況與評估風機負荷時，在 IEC61400-1 建議的案例外仍需考量之設計負荷案例。





## 第二章 颱風風況

要了解風機在台灣區域颱風期間所受之氣動力負荷特性，必須要先對台灣颱風期間之風況特性進行了解。故本章依據氣象上對於颱風風況的相關定義以及參考國際風機規範中有關極端風況的定義與風速模型等，設定擬探討之颱風風況參數，並以此對台灣颱風期間之量測資料進行統計分析，以進一步了解台灣颱風期間的風況特性，同時利用此分析結果，作為後續數值模擬之邊界條件。

### 2-1 風況參數與數學模型

本節探討氣象學與國際風機設計規範 IEC61400-1 中有關颱風風況之參數定義與數學模型，以了解其中之差異與設定擬探討之參數。

#### 2-1-1 氣象學上之颱風風況參數

每當颱風來臨時，都可以在氣象報告上聽到諸如最大風速、陣風與颱風強度等名詞，這些名詞為氣象上用以描述颱風風況之參數，以下即為台灣在氣象上對於颱風風況的相關名詞定義與描述。

**平均風速：**依據中央氣象局地面氣象測報作業規範[27]之定義，平均風速為在一定時間內風速之平均值。中央氣象局氣象觀測所稱平均風速係指觀測前 10 分鐘之平均，也通稱為風速。

**瞬間風速：**依據中央氣象局氣候資料作業規範[28]之定義，在某一短暫時間(約 20 秒)內之風速稱為瞬間風速，其中最大者稱瞬間極大風速。

**陣風：**依據中央氣象局地面氣象測報作業規範[29]之定義，10 分鐘平均風速和同時出現之最大瞬間風速之差大於 5m/s 時，稱為有陣風現象，風速差在 5m/s 到 10m/s 者為小陣風，大於 10m/s 者為大陣風。對於陣風的大小亦可由陣風因子 (Gust Factor) 進行更為詳細的描述，依據世界氣象組織 (World Meteorological



Organization, WMO)之定義[30]，陣風因子為同時間內最大風速和平均風速之比值，詳細定義如 2.1 式所示，其中 $V_{T_0}$ 為參考週期(Reference Period,  $T_0$ )內平均風速， $V_{\tau,T_0}$ 表示為同時段( $T_0$ )內 $\tau$ 秒鐘平均風速之最大值， $GF_{\tau,T_0}$ 即為陣風因子。

$$GF_{\tau,T_0} = \frac{V_{\tau,T_0}}{V_{T_0}} \quad (2.1)$$

颱風強度：在中央氣象局氣象預報作業規範中將颱風依其中心最大風速之大小區分為三個等級，如表 2.1 所示，當風速在 17.2m/s 到 32.6m/s 之間者為輕颱，風速在 32.7m/s 到 50.9m/s 之間者為中颱，而當風速達到 51.0m/s 以上者則為強颱。

表 2.1 中央氣象局颱風等級定義

颱風等級	中心最大風速		相當蒲福風級 (級)
	公尺每秒 m/s	海里每時(kts)	
輕度颱風	17.2~32.6	34~63	8~11
中度颱風	32.7~50.9	64~99	12~15
強烈颱風	51.0 以上	100 以上	16 以上

### 2-1-2 風機規範 IEC61400-1

國際風機設計規範 IEC61400-1 為目前多數風機認證的依據，該規範以參考風速( $V_{ref}$ )與參考紊流強度( $I_{ref}$ )作為定義風機設計等級(如表 2.2 所示)之參數，其中參考風速為風機輪轂高度之 10 分鐘平均風速，而參考紊流強度則為平均風速為 15m/s 時之紊流強度。於此之外，依據風機會面臨之狀況以及可能遭遇之問題加以定義與描述，提出設計者在設計風機時必須考量且進行負荷分析的設計負荷案例(Design Load Cases, DLC)。設計負荷案例依據風機運作狀況區分為發電(Power Production)、發電且故障(Power Production plus Occurrence of Fault)、啟動(Star Up)、正常關機(Normal Shut Down)、緊急關機(Emergency Shut Down)、停機(Parked)、停機且故障(Parked and Fault Conditions)和運輸、組裝、維護及修理(Transport,

Assembly, Maintenance and Repair)等 8 種設計工況(參考表 2.3)，並定義每個設計工況之風力、電力或其他外部條件。在諸多設計負荷案例中，設計負荷案例 DLC6 與 DLC7 的設計工況為停機與風機在颱風期間之工況相同，而外部風力條件為極端風速，亦可對應颱風期間的部分風況。





表 2.2 IEC61400-1 風機設計等級

Class		I	II	III
$V_{ref}$ (m/s)		50.0	42.5	37.5
$V_{e50}$ (m/s)		70.0	59.5	52.5
$I_{ref}$	A	0.16		
	B	0.14		
	C	0.12		

表 2.3 IEC61400-1 設計負荷案例

設計工況	DLC	外部條件	
		風況	其他
1. 發電	1.1	NTM	
	1.2	NTM	
	1.3	ETM	
	1.4	ECD	
	1.5	EWS	
2. 發電且故障	2.1	NTM	控制系統故障或電力網路損失
	2.2	NTM	保護系統或預留內部電力故障
	2.3	EOG	外部或內部電力故障
	2.4	NTM	控制、保護或電力系統故障
3. 啟動	3.1	NWP	
	3.2	EOG	
	3.3	EDC	
4. 正常關機	4.1	NTM	
	4.2	EOG	
5. 緊急關機	5.1	NTM	
6. 停機	6.1	EWM 50 年回歸期	
	6.2	EWM 50 年回歸期	電力網路連接損失
	6.3	EWM 1 年回歸期	轉向錯位
	6.4	NTM	
7. 停機且故障	7.1	EWM 1 年回歸期	
8. 運輸、組裝、 維護及修理	8.1	NTM	
	8.2	EWM 1 年回歸期	

NTM:normal trubulence model ETM:extreme trubulence model EDC:extreme wind direction change

ECD:extreme coherent gust with direction change EWS:extreme wind shear

NWP:normal wind profile model EWM:extreme wind speed model



案例 DLC6 與 DLC7 中所定義之風力條件以及相關風況參數描述如下。

極端風速(Extreme Wind Speed,  $V_{eN}$ )：3 秒內平均最高風速，規範中依據重現週期分別為 50 年與 1 年而有  $V_{e50}$  與  $V_{e1}$  等 2 種。

紊流強度(Turbulence Intensity,  $I$ )：風速標準差與 10 分鐘平均風速之比值，如下式所示。

$$I = \frac{\sigma}{\bar{V}_{600}} \quad (2.2)$$

其中  $\sigma$  為風速標準差， $\bar{V}_{600}$  為 10 分鐘平均風速。

冪次律風剖線(Power Law Wind Profile)：用以描述風速因為地面摩擦力而沿垂直高度變化之數學模型。

$$V(z) = V(z_{ref}) \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (2.3)$$

其中為  $V$  風速， $z$  為離地高度， $z_{ref}$  為參考高度， $\alpha$  為風切指數，圖 2.1 為不同風切指數之風速沿垂直高度變化分佈圖。

極端風速模型(Extreme Wind Model, EWM)：藉由參考風速與冪次律風剖線描述極端風速之數學模型，如下式所示。

$$V_{e50}(z) = 1.4V_{ref} \left( \frac{z}{z_{hub}} \right)^\alpha \quad (2.4)$$

$$V_{e1}(z) = 0.8V_{e50}(z) \quad (2.5)$$

其中  $z_{hub}$  為輪轂高度。

正常紊流模型(Normal Turbulence Model, NTM)：藉由參考紊流強度描述不同風速下之縱向風速標準差，再藉此計算該風速下之紊流強度，相關數學模型如下式所示，而圖 2.2 則為不同風機等級之正常紊流模型示意圖。

$$\sigma_1 = I_{ref}(0.75V_{hub} + 5.6) \quad (2.6)$$



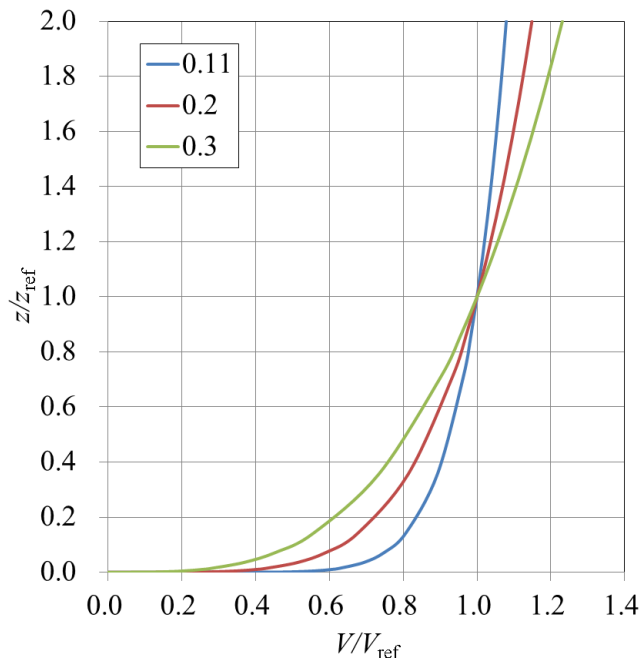
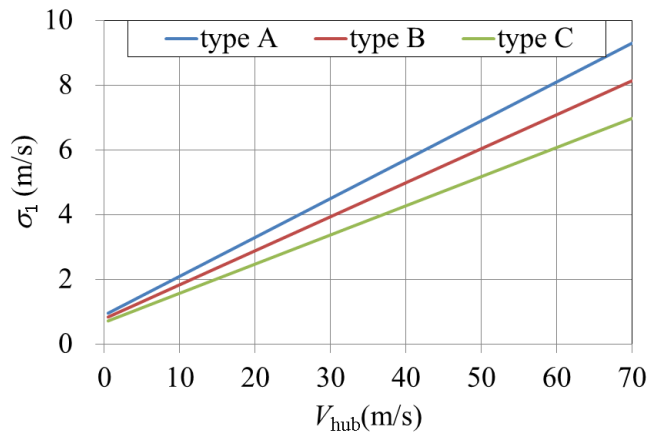
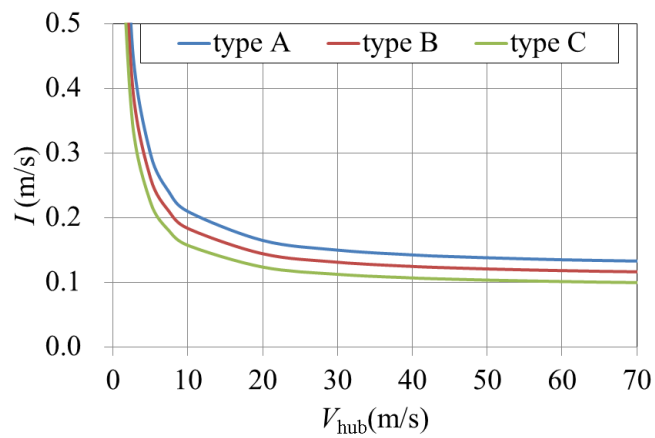


圖 2.1 不同風切指數之幂次律風剖線示意圖



(a) 縱向風速標準差示意圖



(b) 紊流強度示意圖

圖 2.2 正常紊流模型示意圖[26]

由上述之風況參數與數學模型可以發現，設計工況為停機之設計負荷案例 DLC6 與 DLC7 所定義之外部風力條件並未考量風速隨時間變化之情形，故此兩種設計負荷案例僅能對應風機在颱風環境下遭遇強風侵襲之情況，無法描述風機在颱風期間面臨風速於短時間內變化之情況。但在設計工況為運轉(DLC2)、啟動(DLC3)與正常關機(DLC4)等三種設計負荷案例中，則將風速於短時間內之變化列為外部風力條件之一，並以下述之極端運轉陣風模型加以描述。

極端運轉陣風(Extreme Operating Gust, EOG)：應用於風機運轉發電時，用以描述風速於短時間內變化之情形，數學模型如下式所示。

$$V(t) = \begin{cases} V_0 - 0.37V_{gust} \sin\left(\frac{3\pi t}{T}\right) \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)\right], & 0 \leq t < T \\ V_0, & t \geq T \end{cases} \quad (2.7)$$

$$V_{gust} = \text{Min} \left\{ 1.35(V_{eN} - V_{hub}); 3.3 \left( \frac{\sigma_1}{1 + 0.1(D/A_1)} \right) \right\} \quad (2.8)$$

其中 $V(t)$ 為時間 $t$ 時的風速、 $V_0$ 為 $t = 0$ 時之風速、 $V_{gust}$ 為陣風強度、 $V_{hub}$ 為風機輪轂高度之風速、 $T$ 為陣風持續時間、 $D$ 為風機葉片轉子直徑、 $A_1$ 為紊流尺度參數。

### 2-1-3 颱風風況參數與數學模型

有關颱風的風況，風機設計規範 IEC61400-1 中並未特別針對此種狀況進行描述或定義，雖然可以找到對應於氣象上於颱風風況描述之參數，但對於這些參數之定義或多或少有些許差異，無法直接套用，例如：對於颱風瞬間風速之描述，我國氣象局之定義為 20 秒平均值，而 IEC61400-1 中與之相應的極端風速則為 3 秒平均值；陣風方面，世界氣象組織採用最大風速與平均風速之比值表示陣風變化情況，而 IEC61400-1 則是以陣風強度表示風速變化大小。因為上述原因，本文參考氣象上與風機設計規範之風況參數定義與數學模型，並考量颱風實際情況，對颱風風況參數與數學模型提出合理之定義或進行適當之修改。

首先在極端風速(瞬間風速)部分，採用風機設計規範建議之三秒平均風速值，而非國內氣象上所使用之 20 秒平均或 10 分鐘平均，以免低估風機可能受到之風

速大小，以至於在進行負荷分析時低估風機所受之氣動力負荷，因而導致設計上的不足。

在描述颱風期間風速於短時間內變化之情形則參考 IEC61400-1 規範中所提之極端運轉陣風模型，但由於該模型在規範中應用於設計工況為運轉狀況下，且描述風速變化大小之參數亦非氣象上所定義之陣風因子，因此將極端運轉陣風模型修改為以陣風因子描述風速變化大小之形式，修改方式如下。

首先將 2.7 式改寫如下式所示

$$V(t) = \begin{cases} V_0[1 - Kg(t)], & 0 \leq t < T \\ V_0, & t \geq T \end{cases} \quad (2.9)$$

其中  $K$  與陣風風速變化大小有關， $g(t)$  則與陣風變化快慢有關，可表示如下式所示。

$$g(t) = \sin \frac{3\pi}{T} t \left( 1 - \cos \frac{2\pi}{T} t \right) \quad (2.10)$$

因此陣風持續時間 ( $T$ ) 內之平均風速、 $\tau$  內平均最大風速以及參考周期內平均風速可分別表示如下 2.11~2.13 式所示。

$$\bar{V}_T = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt = V_0 \left( 1 + \frac{8}{15\pi} K \right) \quad (2.11)$$

$$\bar{V}_\tau = \frac{1}{\tau} \int_{\frac{T-\tau}{2}}^{\frac{T+\tau}{2}} V(t) dt = V_0 \left( 1 - K \frac{G(\tau)}{\tau} \right) \quad (2.12)$$

$$\bar{V}_{T_0} = \frac{V_0(T_0 - T) + \bar{V}_T T}{T_0} = V_0 \left( 1 + K \frac{8}{15\pi} \frac{T}{T_0} \right) \quad (2.13)$$

其中  $G(\tau)$  定義如下所示

$$G(\tau) \equiv \int_{\frac{T-\tau}{2}}^{\frac{T+\tau}{2}} g(t) dt = -\frac{T}{\pi} \left( \sin \frac{\pi \tau}{2T} + \frac{2}{3} \sin \frac{3\pi \tau}{2T} + \frac{1}{5} \sin \frac{5\pi \tau}{2T} \right) \quad (2.14)$$

由此可將陣風因子表示如下

$$GF_{\tau, T_0} \equiv \frac{\bar{V}_\tau}{\bar{V}_{T_0}} = \frac{\left( 1 - K \frac{G(\tau)}{\tau} \right)}{\left( 1 + K \frac{8}{15\pi} \frac{T}{T_0} \right)} \quad (2.15)$$

將 2.15 式加以整理可得



$$K = -\frac{GF_{\tau, T_0} - 1}{\frac{G(\tau)}{\tau} + \frac{8}{15\pi} \frac{T}{T_0} GF_{\tau, T_0}} \quad (2.16)$$

將之代回 2.9 式即可得到以陣風因子表示之陣風模型，如下式所示。

$$V(t) = \begin{cases} V_0 \left[ 1 + \frac{GF_{\tau, T_0} - 1}{\frac{G(\tau)}{\tau} + \frac{8}{15\pi} \frac{T}{T_0} GF_{\tau, T_0}} \sin \frac{3\pi}{T} t \left( 1 - \cos \frac{2\pi}{T} t \right) \right], & 0 \leq t < T \\ V_0, & t \geq T \end{cases} \quad (2.17)$$

於此之外，為了能夠描述颱風短時間內的風速變化，本文從世界氣象組織所建議之 5 種(60、120、180、600 與 3600 秒等)參考週期中選用參考週期為 60 秒之平均風速計算陣風因子，即採用之陣風因子為 3 秒平均最大風速與 1 分鐘平均風速之比值( $GF_{3,60}$ )，由此可進一步將陣風模型表示如下。

$$V(t) = \begin{cases} V_0 \left[ 1 + \frac{GF_{3,60} - 1}{\frac{G(3)}{3} + \frac{8}{15\pi} \frac{T}{60} GF_{3,60}} \sin \frac{3\pi}{T} t \left( 1 - \cos \frac{2\pi}{T} t \right) \right], & 0 \leq t < T \\ V_0, & t \geq T \end{cases} \quad (2.18)$$

$$K = -\frac{GF_{3,60} - 1}{\frac{G(3)}{3} + \frac{8}{15\pi} \frac{T}{60} GF_{3,60}} \quad (2.19)$$

$$G(3) \equiv \int_{\frac{T-3}{2}}^{\frac{T+3}{2}} g(t) dt = -\frac{T}{\pi} \left( \sin \frac{3\pi}{2T} + \frac{2}{3} \sin \frac{9\pi}{2T} + \frac{1}{5} \sin \frac{15\pi}{2T} \right) \quad (2.20)$$



## 2-2 颱風資料整理分析

### 2-2-1 資料內容簡述

本文用以分析台灣地區颱風風況的資料為彰工地區測風塔的量測資料，該測風塔於距離地面高度 10、30、50 與 70 公尺處設有風速計，風速計量測頻率為每秒 10 次。所獲得的資料內容包含 10 分鐘平均風速、10 分鐘平均風向、1 分鐘平均風速、1 分鐘平均風向、3 秒鐘平均最大風速、3 秒鐘平均最大風向與紊流強度、10 分鐘風速標準差、日照量、溫度與相對濕度...等等，資料內容為每分鐘記錄一筆，時間自 2007 年 8 月至 2014 年 10 月，共計 85 個月，期間經歷中央氣象局發布警報之颱風共計 42 個(詳見表 2.4)。考量風機設計規範 IEC61400-1 在描述風況參數時多以輪轂高度之值為依據，而目前市面上之大型商用風機輪轂高度多在 70 公尺左右，故本文採用彰工測風塔 70 公尺處之風速紀錄資料進行整理分析。

為了瞭解颱風期間之風況，必須要先排除沒有颱風侵襲台灣期間的資料。為此，必須先行說明颱風侵襲台灣期間的時間範圍如何界定，本文以中央氣象局發布陸上颱風警報期間作為定義颱風侵襲台灣的時間，並以此作為過濾風速紀錄資料之依據。當排除非颱風期間的資料後，進一步排除資料中非數值之或小於零等不合理的資料，經由上述過濾之後的資料，才能進行颱風期間風況資料的分析。對風速紀錄資料進行紊流強度或陣風因子等相關參數的計算或整理前，先對該資料進行概略性的了解。



表 2.4 風速紀錄資料時間內之颱風列表

No.	颱風名稱	時間	強度	No.	颱風名稱	時間	強度
1	帕布 PABUK	2007.08	輕	2	梧提 WUTIP	2007.08	輕
3	聖帕 SEPAT	2007.08	強	4	韋帕 WIPHA	2007.09	中
5	柯羅莎 KROSA	2007.09	強	6	米塔 MITAG	2007.11	中
7	卡玫基 KALMAEGI	2008.07	中	8	鳳凰 FUNG-WONG	2008.07	中
9	如麗 NURI	2008.08	中	10	辛樂克 SINLAKU	2008.09	強
11	哈格比 HAGUPIT	2008.09	中	12	薔蜜 JANGMI	2008.09	強
13	蓮花 LINFA	2009.06	輕	14	莫拉菲 MOLAVE	2009.07	輕
15	莫拉克 MORAKOT	2009.08	中	16	芭瑪 PARMA	2009.10	中
17	萊羅克 LIONROCK	2010.08	輕	18	南修 NAMTHEUN	2010.08	輕
19	莫蘭蒂 MERANTI	2010.09	輕	20	凡那比 FANAPI	2010.09	中
21	梅姬 MEGI	2010.10	中	22	艾利 AERE	2011.05	輕
23	桑達 SONGDA	2011.05	強	24	米雷 MEARI	2011.08	輕
25	梅花 MUIFA	2011.08	中	26	南瑪都 NANMADOL	2011.08	強
27	泰利 TALIM	2012.06	輕	28	杜蘇芮 DOKSURI	2012.06	輕
29	蘇拉 SAOLA	2012.07	中	30	海葵 HAIKUI	2012.08	中
31	啟德 KAI-TAK	2012.08	輕	32	天秤 TEMBIN	2012.08	中
33	杰拉華 JELAWAT	2012.09	強	34	蘇力 SOULIK	2013.07	強
35	西馬隆 CIMARON	2013.07	輕	36	潭美 TRAMI	2013.08	輕
37	康芮 KONG-REY	2013.08	輕	38	天兔 USAGI	2013.09	強
39	菲特 FITOW	2013.10	中	40	哈吉貝 HAGIBIS	2014.06	輕
41	麥德姆 MATMO	2014.07	中	42	鳳凰 FUNG-WONG	2014.09	輕

在颱風侵襲台灣的時間內，該風速紀錄資料的 3 秒鐘平均最大風速、1 分鐘平均風速與 10 分鐘平均風速分別為 45.57、39.34 與 36.38m/s，而平均值則分別為 14.91、12.00 與 12.00m/s，如表 2.5 所示。為了瞭解台灣颱風期間 1 分鐘平均風速與 10 分鐘平均風速兩者之間的關係，將風速紀錄資料中 1 分鐘平均風速與 10 分鐘平均風速資料繪製如圖 2.3 所示，圖中顯示 1 分鐘平均風速與 10 分鐘平均風速兩者呈現一線性關係，以最小平方方法進行線性回歸分析之結果如 2.21 式所示：

$$\bar{V}_{60} = 0.9998\bar{V}_{600} \quad (2.21)$$

表 2.5 彰工測風塔颱風期間風速最大值與平均值

風況參數	最大值	平均值
3 秒鐘平均最大風速(m/s)	45.57	14.91
1 分鐘平均風速(m/s)	39.34	12.00
10 分鐘平均風速(m/s)	36.38	12.00

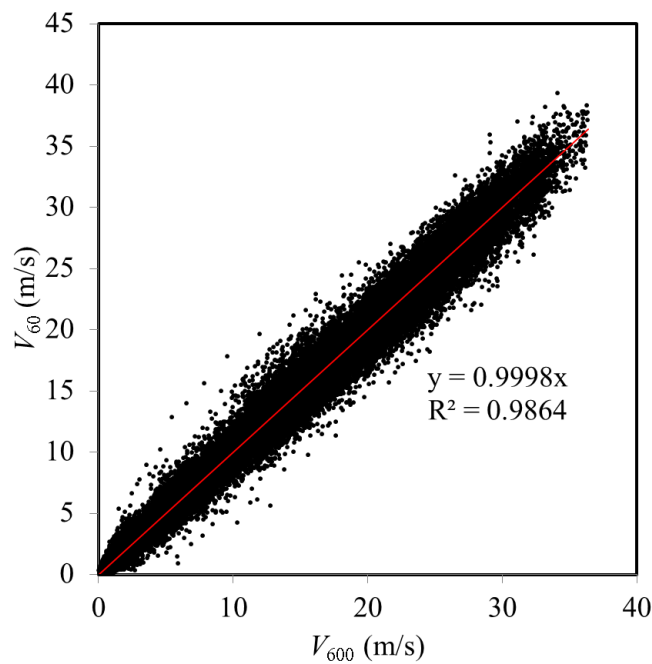


圖 2.3 1 分鐘平均風速與 10 分鐘平均風速關係圖



## 2-2-2 紊流強度

風機設計規範 IEC61400-1 中在計算特定風速之紊流強度時，採用 90 百分位數之縱向風速標準差進行計算，因此本文在假設縱向風速標準差為常態分佈的條件下，將所蒐集之風速紀錄資料依 10 分鐘平均風速以 1m/s 之組距對資料進行分組，隨後以盒形圖判定法(box-whisker plot)對每個組距的資料進行過濾，即紊流強度超出第 3 四分位數 3 倍四分位距與小於第 1 四分位數 3 倍四分位距之資料將被移除。接著求出每組資料的縱向風速標準差之平均值與標準差，以此推算每組風速標準差之常態分佈，並取 90 百分位數之結果計算該組距之紊流強度(詳細統計過程參考附錄 A)，結果如圖 2.4 所示。圖中明顯可以看出採用 90 百分位數(即累積機率為 90%)之風速標準差計算所得之紊流強度較颱風期間紀錄之紊流強度小，因此本文改採較大之累積機率進行計算，結果發現累積機率需達 0.9999999 時，不同風速組距計算所得之紊流強度才會皆稍大於颱風期間紀錄之結果，以此進行曲線擬合之結果如圖 2.4 與下式所示(擬合結果之判定係數為 0.98)，以描述颱風期間不同風速可能發生紊流強度的最大值。

$$I(\bar{V}_{600}) = 1.0231\bar{V}_{600}^{-0.5715} \quad (2.22)$$



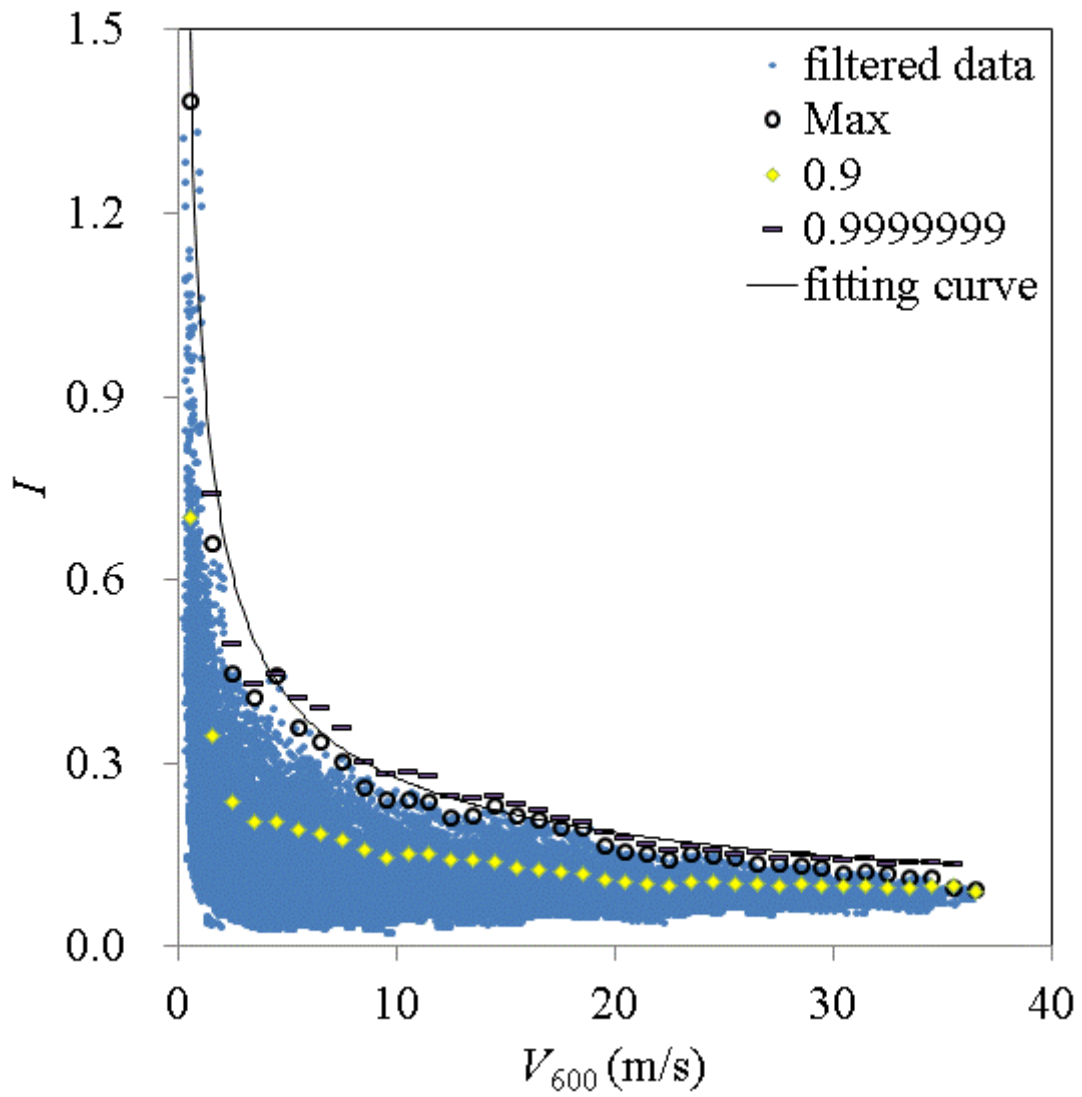


圖 2.4 紊流強度統計結果示意圖



### 2-2-3 陣風因子

首先依據中央氣象局判定陣風之定義，即瞬間最大風速與 10 分鐘平均風速差異大於 5m/s 以上為有陣風，對紀錄資料中 3 秒平均最大風速與 10 分鐘平均風速風速差異小於 5m/s 之資料刪除，接著依據陣風因子之定義計算該參數，計算之結果如圖 2.5 所示。為了能夠得到描述陣風因子與平均風速之關係，同樣在假設陣風因子為常態分佈的條件下(參考附錄 A)，將資料依 1 分鐘平均風速為 1m/s 之組距對資料進行分組，隨後同樣以盒形圖判定法(box-whisker plot)對資料進行過濾，之後求出每組資料的陣風因子之平均值與標準差，以此推算每組風速標準差之常態分佈。同樣採用不同大小之累積機率進行計算，結果發現當累積機率達 0.99999 時，不同風速組距計算所得之陣風因子皆稍大於颱風期間紀錄之結果。由於 3 秒平均最大風速不小於 1 分鐘平均風速，故陣風因子不小於 1，因此以參數  $GF - 1$  進行曲線擬合，擬合之結果如圖 2.5 與下式所示(擬合結果之判定係數為 0.96)，以描述颱風期間的陣風因子在不同平均風速下可能發生之最大值。

$$GF = 1 + 8.4177\bar{V}_{60}^{-0.9702} \quad (2.23)$$

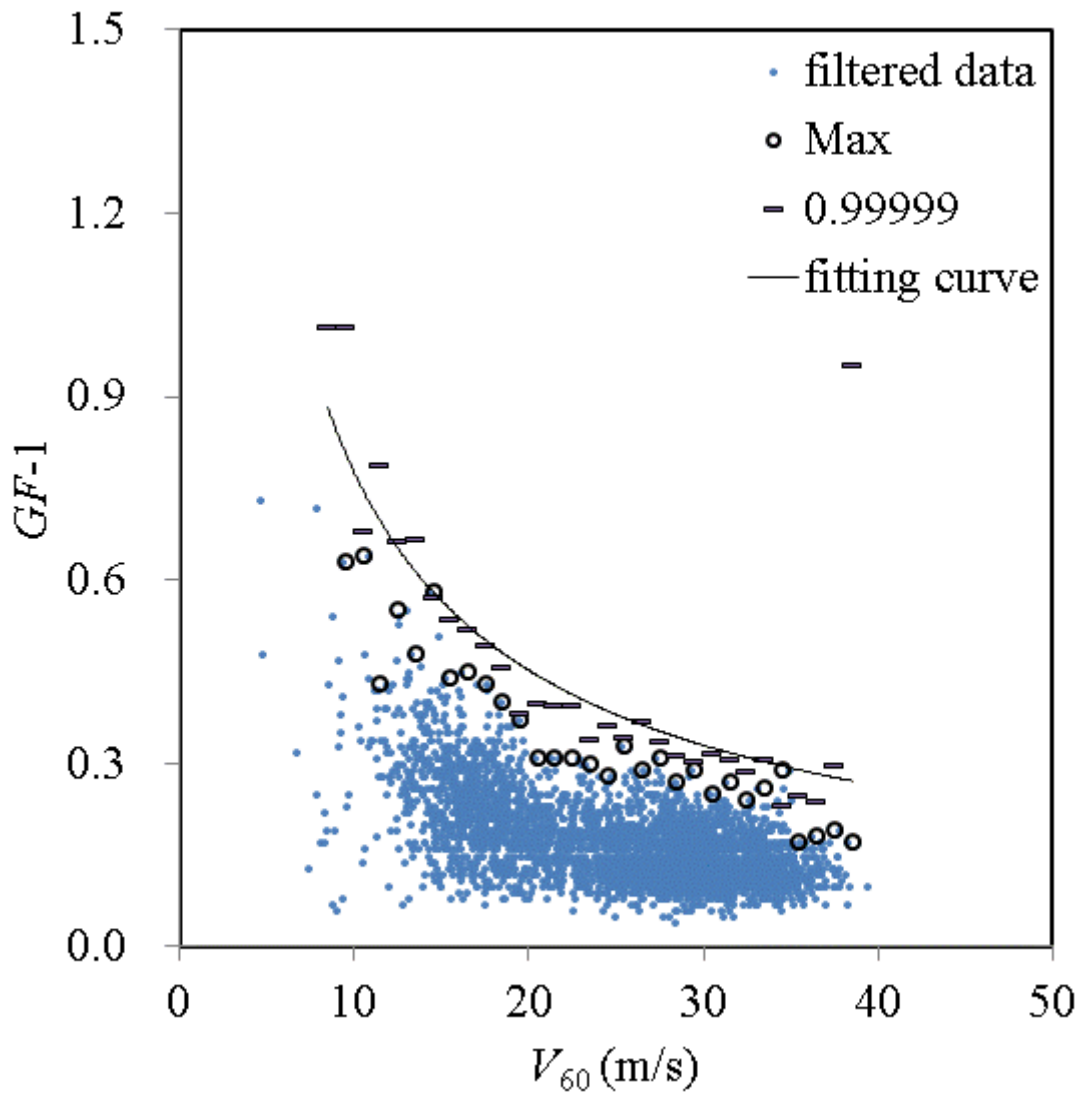


圖 2.5 陣風因子統計結果示意圖



## 2-3 台灣地區颱風風況

為了瞭解台灣颱風期間，颱風風況對風機氣動力負荷之影響，必須先定義台灣颱風期間可能遭受之風況條件。颱風風況的主要特徵為強風與短時間內劇烈的風速變化，前者與極端風速有關，而後者則與陣風以及紊流強度有關，故本節依 2-2 節中對於彰工測風塔颱風期間風速紀錄資料的統計結果，對紊流強度、極端風速與陣風因子提出可能遭遇之極值，並做為評估風機氣動力負荷之外部條件。

### 2-3-1 陣風因子與極端風速

依據 2-1-3 節所描述之陣風模型，需要 3 秒鐘平均最大風速、1 分鐘平均風速與陣風持續時間才能完整描述颱風期間陣風隨時間變化之情況。3 秒鐘平均最大風速由彰工測風塔在颱風期間風速資料的統計結果取得，為 45.57m/s；1 分鐘平均風速則可藉由 2-2-3 節 2.23 式所描述之陣風因子最大值與 1 分鐘平均風速關係以及陣風因子之定義，配合以 3 秒鐘平均最大風速迭代求解下式而得(參考圖 2.6)。

$$\frac{\bar{V}_{3,max}}{\bar{V}_{60}} = 1 + 8.4177\bar{V}_{60}^{-0.9702} \quad (2.24)$$

依此求得之 1 分鐘平均風速為 36m/s 時，對應之 3 秒鐘平均最大風速為 45.36m/s，與統計結果之 45.57 相對誤差小於 0.5%，相應之陣風因子為 1.26。至於陣風持續時間，本文參考林[14]等人基於莫拉克颱風期間於嘉義東石鄉以三維超聲波測風儀量測紀錄資料的統計結果(建議為 5~7 秒)設定為 6 秒。依據上述之參數值與 2.11~2.13 式，陣風模型可以 2.24 式表示，風速隨時間變化之函數則如圖 2.7 所示。

$$V(t, z) = \begin{cases} V_0(z) \left[ 1 + \frac{GF - 1}{\frac{G(3)}{3} + \frac{8}{15\pi} \frac{T}{60} GF} \sin \frac{3\pi}{T} t \left( 1 - \cos \frac{2\pi}{T} t \right) \right], & 0 \leq t < T \\ V_0, & t \geq T \end{cases} \quad (2.24)$$

若與 IEC61400-1 原始規範之結果相比，可發現彰工測風塔所得颱風陣風期間的最大風速較大，如圖 2.8 所示。

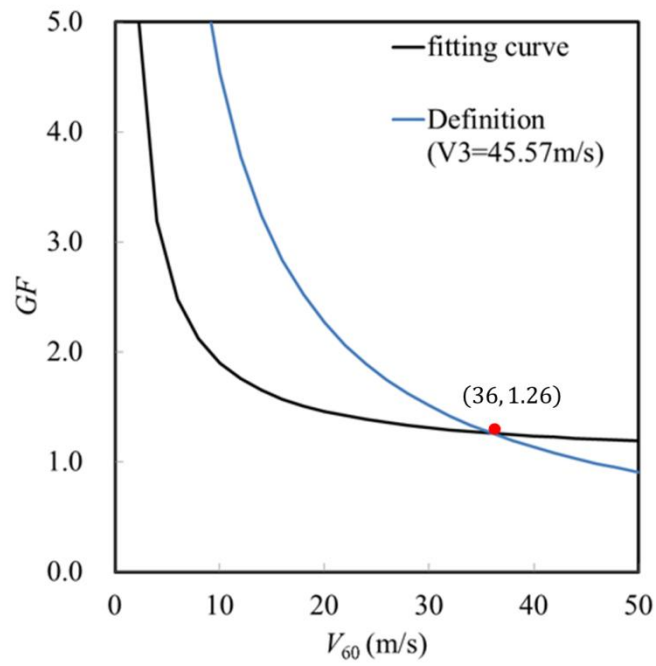


圖 2.6 陣風因子求解示意圖

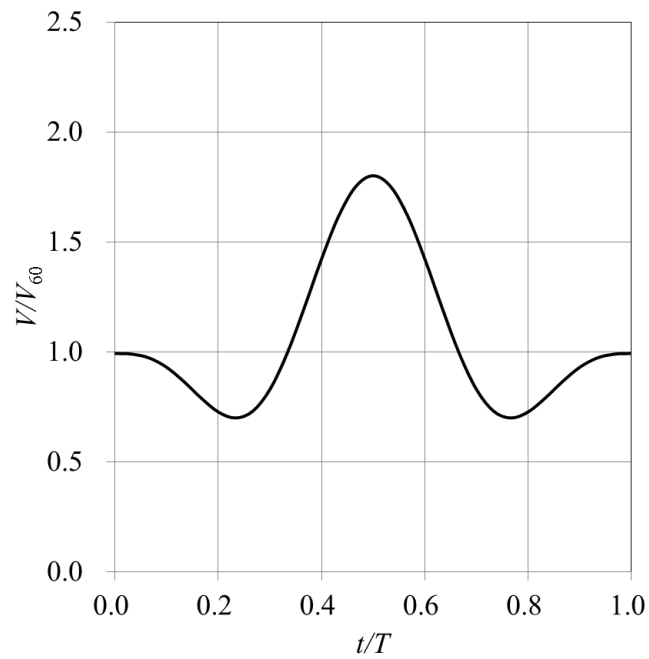


圖 2.7 陣風模型示意圖

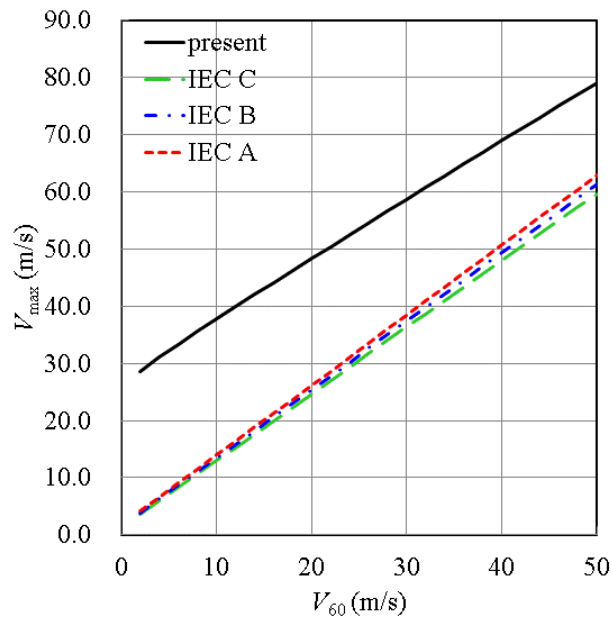


圖 2.8 颱風期間為陣風最大風速-彰工測風塔與 IEC61400-1 比較

### 2-3-2 紊流強度

彰工測風塔風速紀錄資料中的紊流強度為 10 分鐘平均風速計算之結果以符合風機設計規範中之定義，但可藉由 2.21 式進行 1 分鐘平均風速與 10 分鐘平均風速之換算，進而得到相應之紊流強度。以 1 分鐘平均風速為 36m/s 為例，換算成 10 分鐘平均風速為 35.99m/s，故對應之紊流強度為 0.13。若與 IEC61400-1 三種設計紊流強度相比，可發現彰工測風塔所得颱風期間之紊流強度在低風速時較規範為大，在高風速時則較小，如圖 2.9 所示。

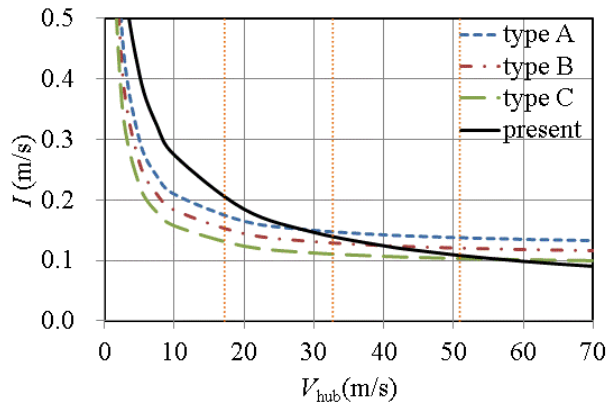


圖 2.9 彰工測風塔颱風期間紊流強度與 IEC61400-1 設計紊流強度比較

### 2-3-3 冪次律風剖線

風機設計規範 IEC61400-1 在極端風況下之冪次律風剖線模型之風切指數定義為 0.11。而陳[31]、詹[32]、蒲[33]、簡[34]與張[35]等人藉由台灣板橋、花蓮、綠島、屏東與馬公等五個地點地高所釋放空氣球之風速資料探討台灣風切指數之特性，在不考慮颱風等特殊情況下，除馬公機場由於周圍地勢較平坦，風切指數較低外其它地點的風切指數多在 0.2 以上，尤其板橋因為台北盆地之關係，風切指數多在 0.3 以上。在颱風期間，各個地點因為颱風路徑、強度等等因素，風切指數範圍可從 0.25 到 0.4 左右，其中馬公機場由於地形平坦，條件與風力發電場相似，且依據蘇迪勒颱風台電風機組受損事故調查報告[36]中對測風塔颱風期間不同高度之風速，計算統計風切指數之平均為 0.3，故本文颱風期間之冪次律風剖線模型之風切指數採用 0.3，風速沿垂直高度之變化如圖 2.10 與 2.24 式所示。

$$V(z) = V(70) \left( \frac{z}{70} \right)^{0.3} \quad (2.24)$$

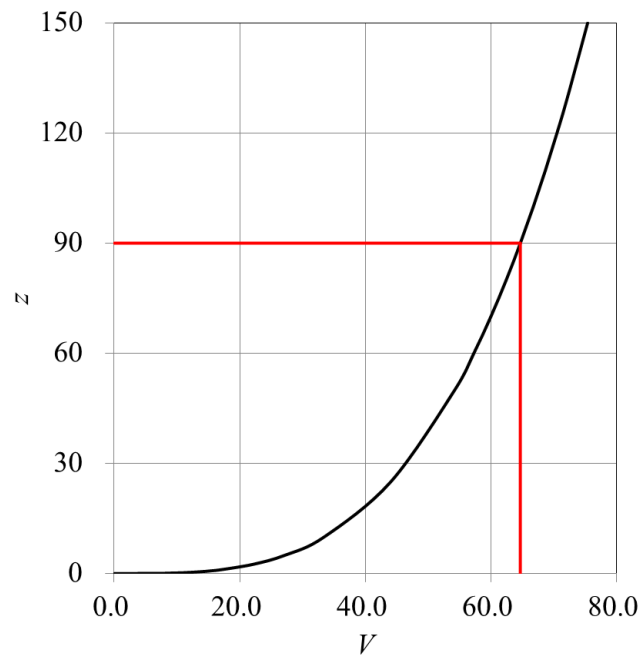


圖 2.10 颱風期間幕次律風剖線模型示意圖



## 第三章 數值模擬模型



由於電腦計算能力日益強大，且數值計算模擬發展相當進步，使得數值模擬方法為現今探討各種現象與問題的常見方式，故本文採用數值方法模擬計算風機在颱風風況下之流場，探討風機在颱風風況下的氣動力負荷特性。

### 3-1 目標風機簡介

美國國家再生能源實驗室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)所發表之 5MW 離岸風機的相關報告[37]中提供該風機的各種詳細資訊，包含幾何外形、各主要部件的機械性值(質量、重心、材料性質等)、主要電力與控制裝置之規格等等，並做為不同單位研究離岸風電水下基礎的統一風機，以利相互交流，再加上台灣離岸風場開發剛開始萌芽，故本文採用該離岸風機為目標風機。

#### 3-1-1 風機幾何外形

風機主要可區分為塔座、機艙、輪轂、葉片、發電機、傳動與控制系統等七部分，而前四部分為構成風機的幾何外形，對氣動力特性影響甚大，其中葉片與輪轂合稱為葉片轉子；葉片、輪轂與機艙則合稱為塔頂結構。NREL 5MW 風機幾何外形如圖 3.1 所示，主要幾何特徵如表 3.1 所示，葉片轉子直徑為 126m，輪轂高度為 90m，軸傾角(即葉片轉子轉軸與地平面之夾角)為  $5^\circ$ 。風機之塔柱、機艙、輪轂與葉片等幾何外形特徵說明於下。



表 3.1 NREL 5MW 離岸風機主要幾何特徵[37]

葉片數量	3
轉子直徑( $D$ )	126m
輪轂高度( $H_{hub}$ )	90m
輪轂直徑( $D_{hub}$ )	3m
軸傾角( $\theta_t$ )	5°
節距角( $\theta_p$ )	運轉：0°~23.5°
	停機：90°

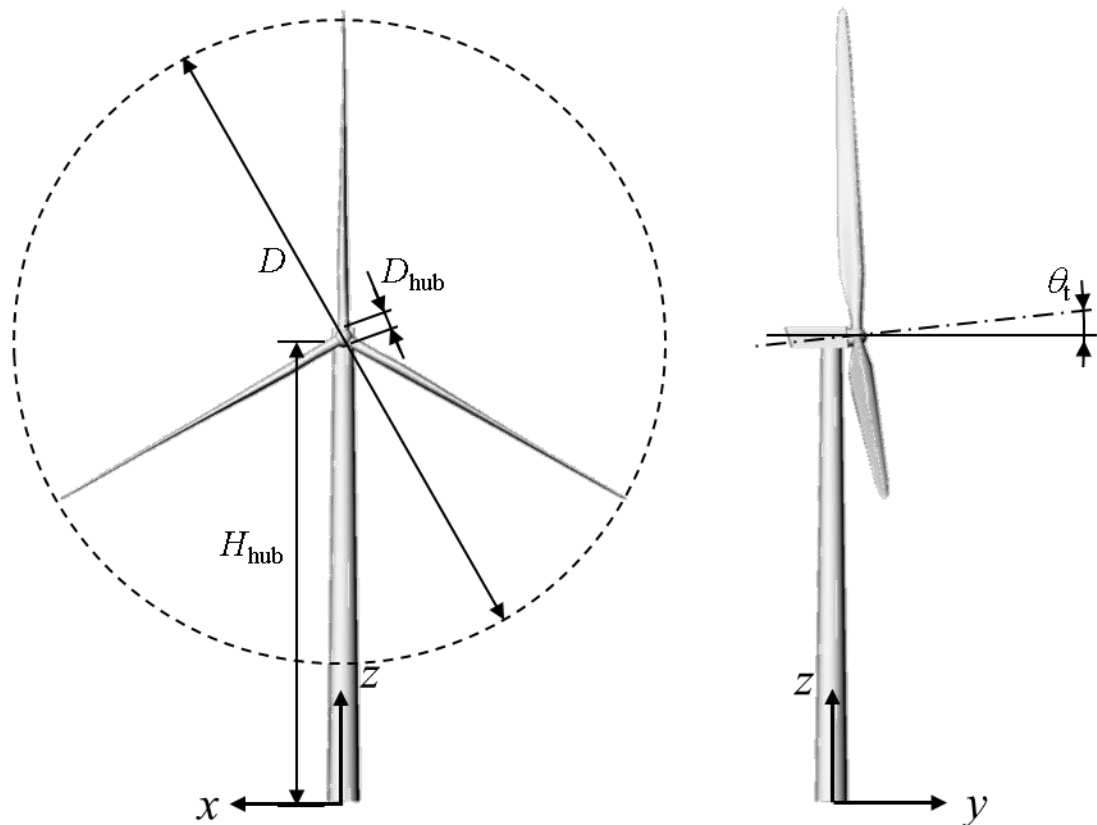


圖 3.1 NREL 5MW 離岸風機幾何外形示意圖[37]

- 1 塔柱：NREL 5MW 風機之塔柱為圓錐形管柱。基部的直徑為 6 公尺，管壁厚度為 0.027 公尺，頂部的直徑為 3.87 公尺，管壁厚度為 0.019 公尺，塔柱垂直高度為 87.6 公尺，設計之質心位置在塔柱中心離地面 38.234 公尺處。
- 2 機艙與輪轂：在 NREL 所公布之報告中，僅提供與風機之輪轂直徑、輪轂以及機艙與塔柱頂端中心的相對位置，並未詳述實際之幾何外形。林宇[38]同樣以該風機進行其研究，而其所建立之機艙幾何除了符合上述設計參數外，其外形與該風機在設計時所參考之 RE Power 5MW 與 DOWEC 6MW[39]等風機機艙相似，故本文採用相同之幾何模型。一般將風機的塔柱、機艙與輪轂等主要部件合稱為風機的支撐結構，NREL 5MW 風機的支撐結構，外形如圖 3.2 所示。

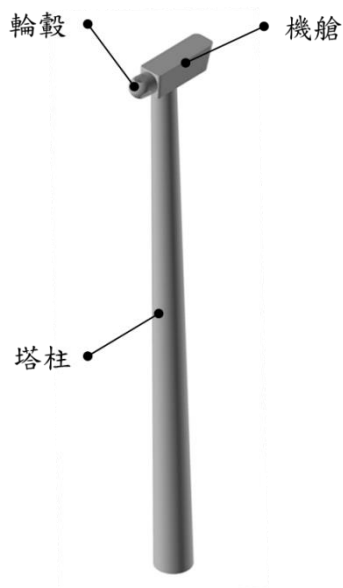
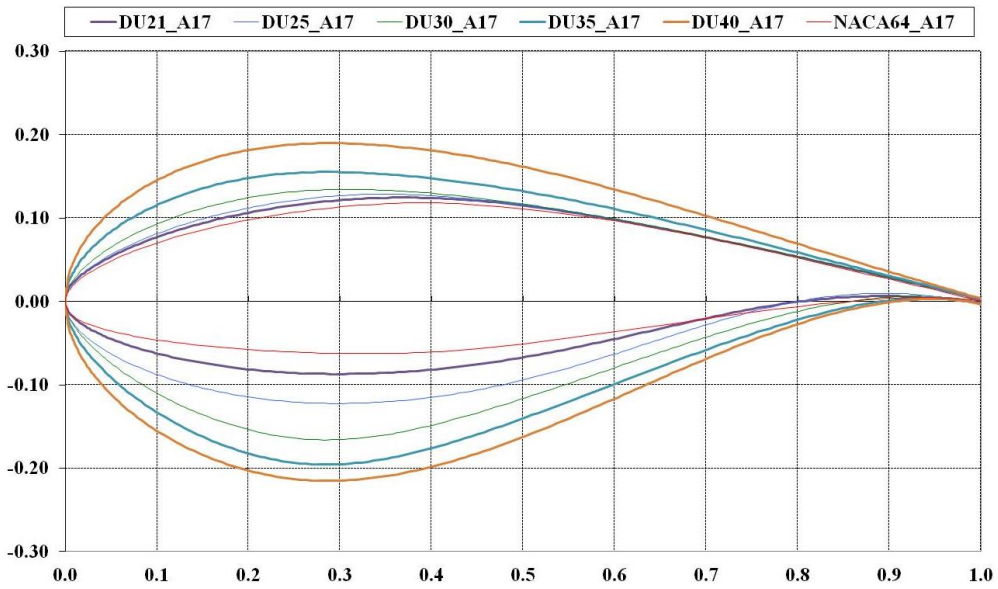


圖 3.2 NREL 5MW 離岸風機支撐結構幾何外形

- 3 葉片：葉片為風機能夠將風能轉換成機械能傳遞至發電機使之產生電能的主要部件。NREL 5MW 風機有 3 支葉片，葉片全長 61.25 公尺，最大弦長約為 4.7 公尺，平均弦長約為 3.4 公尺，根部為圓柱形，葉片截面由 6 種翼型組成，詳細參數如表 3.2 所示(其中安裝角定義為不同半徑位置之翼型首尾連線與葉片尖端翼型首尾連線之間的夾角)，葉片幾何外形如圖 3.3 所示。

表 3.2 NREL 5MW 離岸風機葉片幾何特徵[37]

編號	距轉軸距離(m)	安裝角(°)	弦長(m)	翼型
1	2.8667	13.308	3.542	Cylinder
2	5.6000	13.308	3.854	Cylinder
3	8.3333	13.308	4.167	Cylinder
4	11.7500	13.308	4.557	DU40_A17
5	15.8500	11.480	4.652	DU35_A17
6	19.9500	10.162	4.458	DU35_A17
7	24.0500	9.011	4.249	DU30_A17
8	28.1500	7.795	4.007	DU25_A17
9	32.2500	6.544	3.748	DU25_A17
10	36.3500	5.361	3.502	DU21_A17
11	40.2500	4.188	3.256	DU21_A17
12	44.5500	3.125	3.010	NACA64_A17
13	48.6500	2.319	2.764	NACA64_A17
14	52.7500	1.526	2.518	NACA64_A17
15	56.1667	0.863	2.313	NACA64_A17
16	58.9000	0.370	2.086	NACA64_A17
17	61.6333	0.106	1.419	NACA64_A17



(a) 葉片剖面翼型示意圖[37]



(b) 葉片幾何示意圖

圖 3.3 NREL 5MW 離岸風機葉片幾何外形示意圖



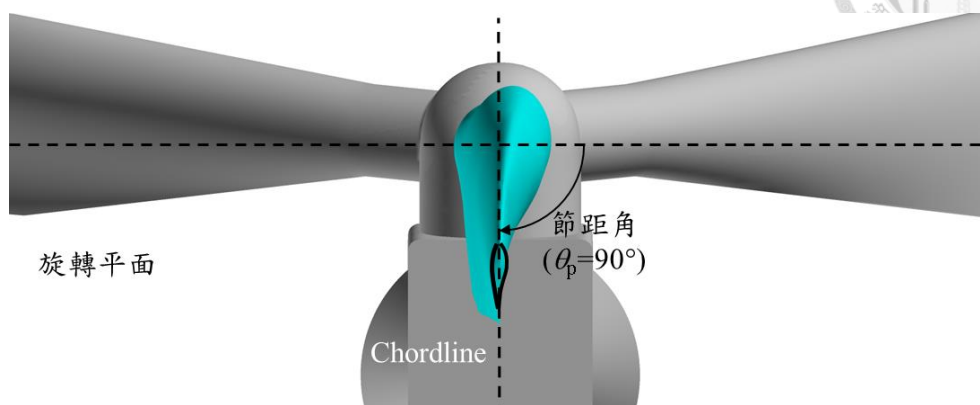
### 3-1-2 運轉條件與風機流場性質

NREL 5MW 風機的運作情況如表 3.3 所示，切入、切出風速分別為 3m/s 與 25m/s、額定風速為 11.4m/s、額定轉速為 12.1rpm，設計之額定功率則為 5MW。該風機在風速大於切出風速(25m/s)時，風機將調整其葉片節距角(參考圖 3.4)至 90°，同時停止葉片轉子之轉動，以減少風機承受來自於空氣之負荷，而此時的運作情況為風機的停機工況。為方便後續說明，將葉片轉子停止位置以參數方位角 (Azimuthal Angle,  $\theta_a$ ) 進行描述，以葉片尖端指向上方之位置(12 點鐘方向)為基準，並定義葉片沿順時鐘方向與基準位置之間的夾角定義為方位角，如圖 3.4 所示。

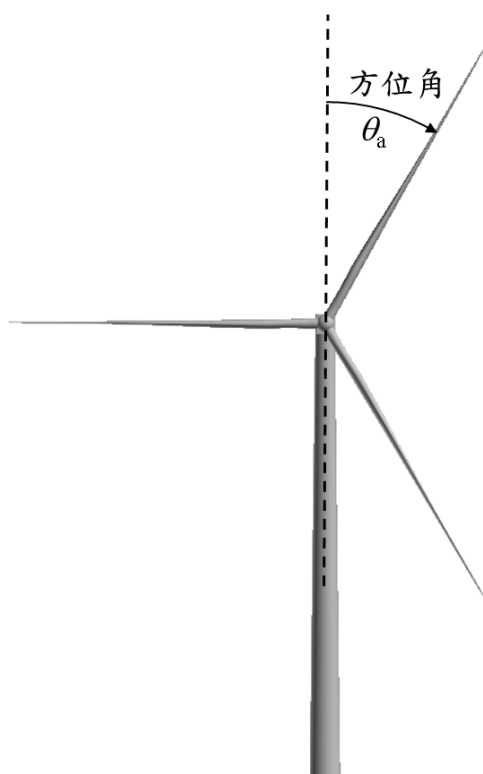
表 3.3 NREL 5MW 離岸風機運作條件[37]

額定功率( $P_{\text{rated}}$ )	5 MW
切入風速( $V_{\text{cut-in}}$ )	3 m/s
切出風速( $V_{\text{cut-out}}$ )	25 m/s
額定風速( $V_{\text{rated}}$ )	11.4 m/s
額定轉速( $\Omega_{\text{rated}}$ )	12.1 rpm

依據目標風機之幾何參數與運轉條件，配合台灣颱風期間的風速資訊(參考表 3.4)，在 1 標準大氣壓，溫度 20°C 情況下(空氣相關性質參考表 3.5)，以風機葉片弦長為特徵長度，在忽略軸傾角的情況下，馬赫數約為 0.2 左右，而雷諾數範圍在  $3 \times 10^6$  到  $2.5 \times 10^7$ (參考圖 3.5)之間，故目標風機在颱風風況下之流場為不可壓縮之紊流流場。



(a) 葉片節距角示意圖



(b) 葉片方位角示意圖

圖 3.4 風機葉片節距角與方位角示意圖



表 3.4 台灣彰工地區颱風期間風速(以冪次律風剖線模型計算輪轂高度之風速)

離地高度 (m)	70	輪轂高度(90)
3 秒平均最大風速 (m/s)	45.36	48.91
最大風速 (m/s)	64.85	69.83

表 3.5 1 標準大氣壓，溫度 20°C 情況下空氣性質

密度 ( $\rho$ )	1.225 kg/m <sup>3</sup>
黏滯係數 ( $\mu$ )	1.7894 × 10 <sup>-5</sup> N·s/m <sup>2</sup>
氣體常數 ( $R$ )	287 J/kg·k
$k (c_p/c_v)$	1.4
聲速 ( $V_s$ )	343.2 m/s

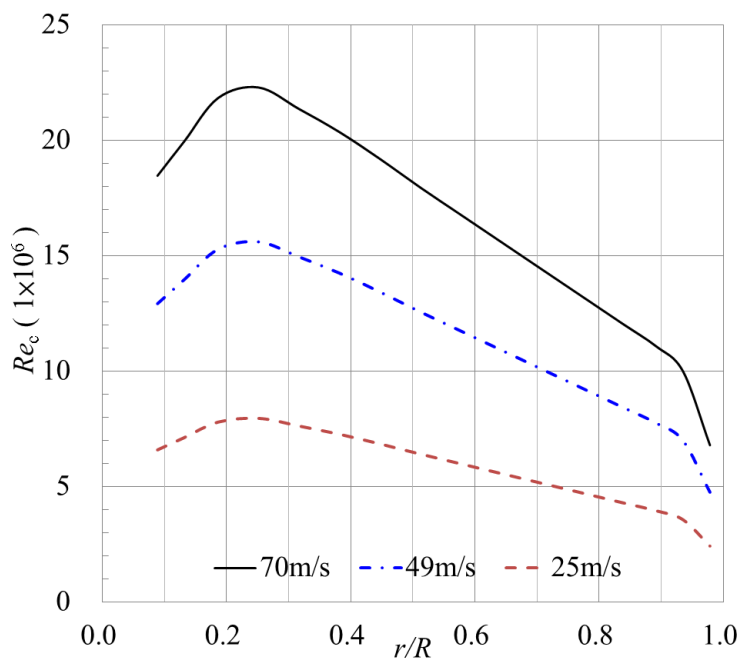


圖 3.5 NREL 5MW 離岸風機葉片雷諾數分佈示意圖





## 3-2 數值方法

本文採用商業套裝 CFD 軟體 ANSYS FLUENT 為工具進行數值模擬，該軟體採用有限體積法離散相關控制方程式，並提供多種迭代求解方法。此外，為了能夠正確的使用該工具進行有效之數值模擬，對於所使用之數值模擬方法進行了解實屬必要。

### 3-2-1 統御方程式

依據 3-1-3 節對目標風機在颱風風況下流場馬赫數與雷諾數的計算結果，以及假設溫度變化可忽略的情況下，流場為等溫不可壓縮之紊流流場，而相應之質量守恆與動量守恆方程式如下所示：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + a_i \quad (3.2)$$

其中  $\rho$  為流場密度， $t$  為時間，下標  $i=1, 2$  及  $3$  分別代表三個座標軸  $x, y$  及  $z$ ， $u_i$  為流場速度  $\mathbf{u}$  在座標  $i$  方向上之速度分量、 $p$  為流場壓力、 $\mu$  為黏滯係數、 $a_i$  為物體力 (body force) 造成之加速度在  $i$  方向之分量，若只考慮重力，則  $a_1 = a_2 = 0, a_3 = g, g$  即為重力加速度。若將流場物理量以時間平均值加上擾動量之方式 (即  $u_i = \bar{u}_i + u'$ ， $p = \bar{p} + p'$ ) 表示以描述紊流之現象，並以此代回守恆方程式所得之結果即為雷諾平均納維爾-史托克斯方程式 (Reynolds Average Navier-Stokes Equation, RANS) 如下所示。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial (\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} + a_i \quad (3.4)$$

其中  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  為雷諾應力 (Reynolds Stress)，需要藉由紊流模型以進行求解。



### 3-2-2 紊流模型

許多研究(如 Pape[40]、Duque[41]、Tongchitpakdee[42]與李[43]等)應用剪應力傳輸  $k$ - $\omega$  紊流模型(Shear-Stress Transport, SST)預測風機的效能，與實驗的結果比較也有很好的一致性，故本文使用 SST  $k$ - $\omega$  紊流模型。

3.4 式中的雷諾應力項常藉由 Boussinesq hypothesis[44]描述與平均速度梯度之關係，如下式所示。

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (3.5)$$

其中  $\mu_t$  為黏流黏度(Turbulent Viscosity)， $\delta_{ij}$  為 Kronecker delta，當  $i = j$  時，其值為 1、 $i \neq j$  時，其值為 0。

在 SST  $k$ - $\omega$  紊流模型中，藉由求解模型中紊流動能  $k$ (Turbulent Kinetic Energy) 以及特定消散率  $\omega$ (Specific Dissipation Rate)以計算黏流黏度  $\mu_t$ ，其方程式如下[45]：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \omega) = \quad (3.7)$$

$$\frac{\gamma}{v_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

$$\mu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega; \Omega F_2)} \quad (3.8)$$

其中  $\Omega$  為渦度的絕對值， $\Omega = \frac{\partial u}{\partial y}$ ，而常數  $a_1 = 0.31$ 。混合函數  $F_2$  為壁面距離  $y$  之函數，如下所示：

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (3.9)$$

$$\arg_2 = \max\left(2 \frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y}; \frac{500 \nu}{y^2 \omega}\right) \quad (3.10)$$

3.7 式等號右邊最後一項為正交擴散項，其為將  $k$ - $\varepsilon$  模型轉換為  $k$ - $\omega$  模型時所產生之項，函數  $F_1$  結合了考量邊界層區域的  $k$ - $\omega$  方程之係數以及考量自由剪切層和



自由流區域的  $k$ - $\varepsilon$  方程之係數，函數  $F_1$  在無滑移壁面上的值為 1，在邊界層裡趨近於 1，在邊界層邊緣則為 0，如下所示：

$$F_1 = \tanh(\text{arg}_1^4) \quad (3.11)$$

$$\text{arg}_1 = \min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}; \frac{500\nu}{y^2\omega}\right); \frac{4\rho\sigma_{\omega 2}k}{CD_{k\omega}y^2}\right] \quad (3.12)$$

$$CD_{k\omega} = \max\left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20}\right) \quad (3.13)$$

SST  $k$ - $\omega$  模型中的各項常數如下所示：

$$\beta^* = 0.09, k = 0.41, \sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{\omega 1} = 0.5, \beta_1 = 0.075, \gamma_1 = 0.553, \sigma_{k2} = 1.0, \\ \sigma_{\omega 2} = 0.856, \beta_2 = 0.0828, \gamma_2 = 0.440。$$

### 3-2-3 數值離散方法與求解流程

有限體積法[39]藉由將流場分割為一系列微小控制體積(一般為所建立之網格)，以每個控制體積之幾何中心為代表(節點)，通過將統御方程式對每一個微小控制體積進行積分以得到離散方程組。為方便說明，將統御方程式表示如下：

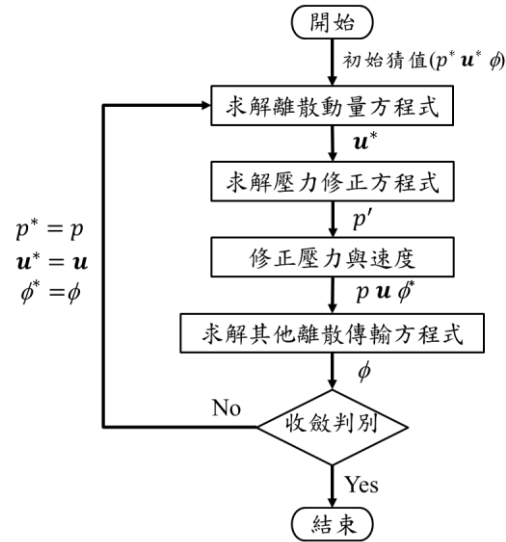
$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint_A \rho \phi \vec{u} \cdot d\vec{A} = \oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (3.14)$$

其中  $\phi$  為流場物理量， $\Gamma_\phi$  為該物理量之擴散係數而  $S_\phi$  則為該物理量之源項，將 3.14 式套用在微小控制體積則可以得到離散之統御方程式，如下所示：

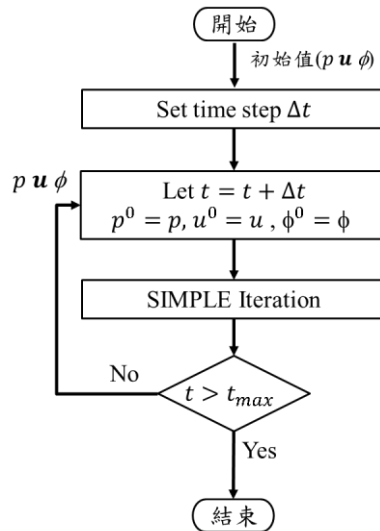
$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} \Delta V + \sum_f \rho \phi \vec{u}_f \cdot \hat{n}_f \Delta A_f = \sum_f \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot \hat{n}_f \Delta A_f + S_\phi \Delta V \quad (3.14)$$

其中  $\Delta V$  為微小控制體積之體積， $\vec{u}_f$ 、 $\hat{n}_f$ 、 $\Delta A_f$  分別為微小控制體積邊界  $f$  面上之速度、單位法向量與面積。由於有限體積法將各微小控制體積之流場物理量紀錄在節點上，因此需要額外之離散方法對流場物理量在空間或時間進行離散才能建立相關聯立方程組，本文採用二階上風法進行離散。最後以迭代方法對所建立之聯立方程組進行求解，ANSYS FLUENT 提供多種求解方法供選擇，SIMPLE 法即為其中之一，亦為本文所選用以迭代求解之方法。

SIMPLE 法(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)為 Patankar 與 Spalding[46]於 1972 年提出，為半隱式解法。該方法係先利用給定之壓力場求解離散形式之動量方程式以得到速度場，再將之代入離散之連續方程從而得到修正方程以求解壓力修正值，再以修正後之壓力場求得新的速度場，重複反覆此流程直到獲得收斂之解，詳細的求解流程如圖 3.6 所示。



(a) SIMPLE 迭代解流程示意圖



(b) 暫態之迭代求解流程示意圖

圖 3.6 SIMPLE 法計算流程圖[46]



### 3-3 數值模擬模型

本節對所使用之數值模擬模型進行說明，包含計算空間、邊界條件設定以及網格分佈與獨立性測試之結果。

#### 3-3-1 計算空間

參考李[43]對計算空間大小對風機數值模擬計算影響之結果，本文計算空間之大小如圖 3.7 與表 3.6 所示，流場原點設為風機塔柱底部中心點，上游邊界(abcd)距離流場原點之距離稱為入流距離，尺寸為 2 倍轉子直徑、下游邊界(ghef)距離流場原點之距離稱為出口距離，尺寸為 6 倍轉子直徑、兩側邊界(aehd、bcgf)的距離稱為空間寬度，尺寸為 3 倍轉子直徑、底部(cdhg)與上邊界(abfe)的距離距離稱為空間高度，尺寸為 3 倍轉子直徑。此外將計算空間分為兩個區域，分別為 Region I 與 Region II。Region II 為以風機塔柱底部中心，直徑為葉片轉子 1.27 倍轉子直徑，高為 1.31 倍轉子直徑之圓柱體空間，而 Region I 則為除 Region II 以外之所有空間。

表 3.6 數值模擬模型計算空間尺寸參數(以轉子直徑  $D$  為基準)

$L_h$	$3D$
$L_w$	$3D$
$L_1$	$2D$
$L_2$	$6D$
$D_{II}$	$1.27D$
$H_{II}$	$1.31D$

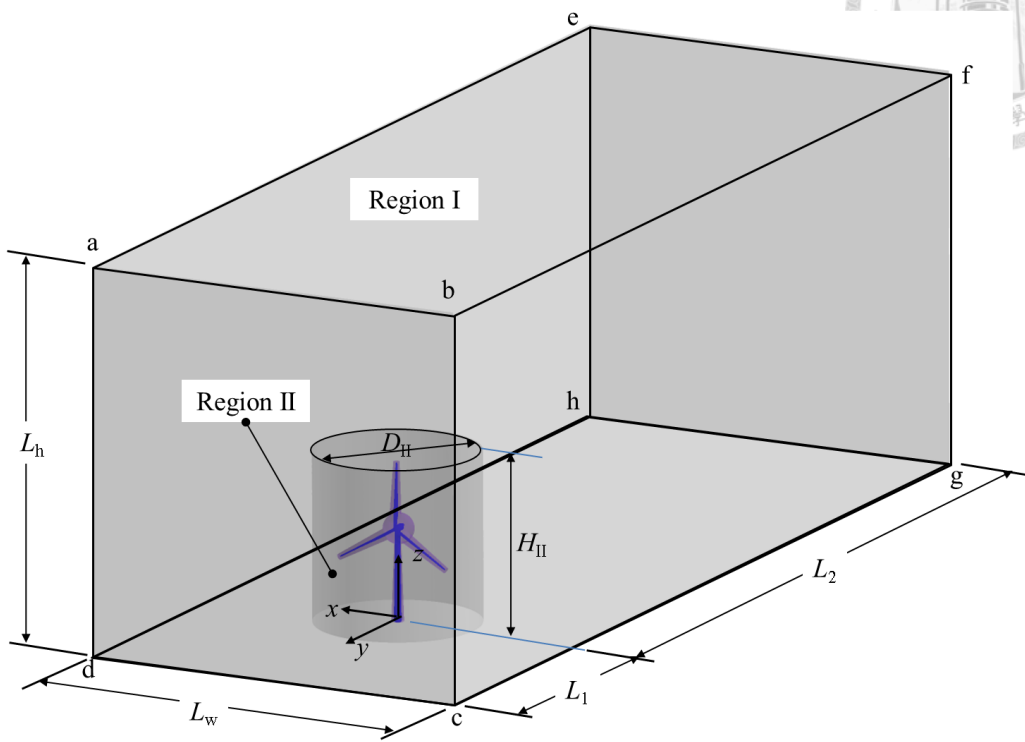
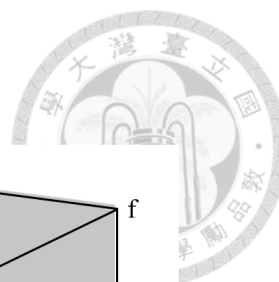


圖 3.7 數值模擬模型計算空間示意圖

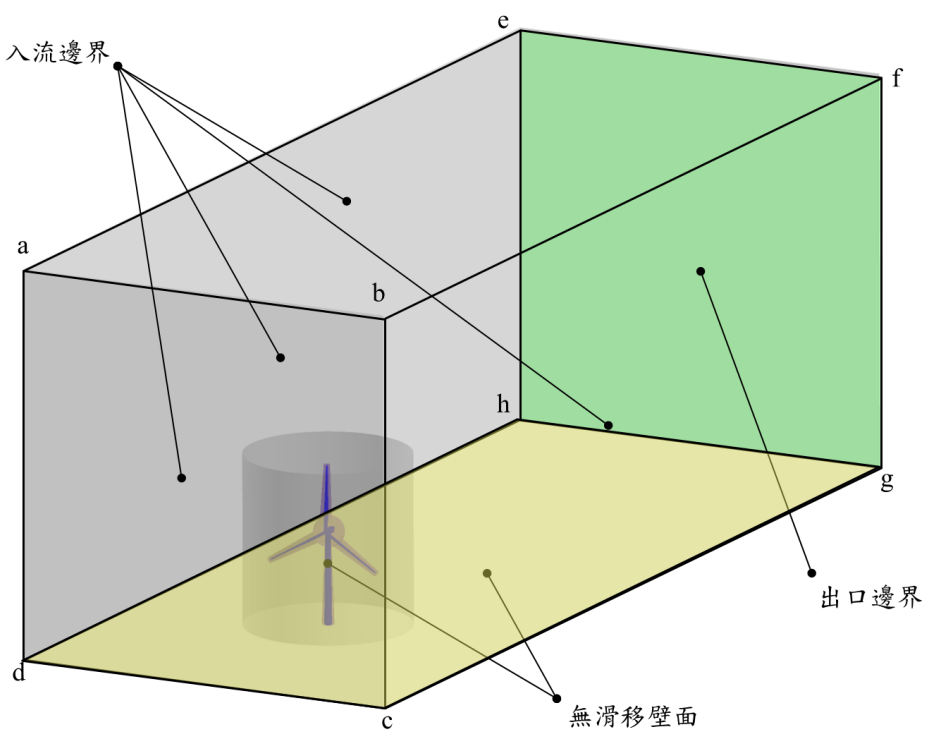


圖 3.8 數值模擬模型邊界條件示意圖



### 3-3-2 邊界條件

數值模擬計算主要目的在於研究現實之問題，因此相關條件都必須要符合實際的狀況。颱風期間風機為減少風機之受力面積，葉片節距角為  $90^\circ$ ，風機輪轂面對風向，因此在不考量風向變化的情況下，數值模型的前方的邊界平面設定為入流邊界，兩側與上方之邊界則因為距離風機足夠遠，流場受到風機之影響可以忽略，同樣設定為入流邊界，而後方的邊界平面設定為出口邊界，地面以及風機本身由於空氣無法穿透，故為無滑移壁面，相關邊界條件位置如圖 3.8 所示。

- 1 入流邊界: 依據 2-3 節對颱風期間風況分析整理結果給定這些邊界之風速。

給定之風速可分為為穩態風速與陣風風速兩種，分別描述於下。

穩態風速：給定之風速不隨時間改變，同時藉由冪次律風剖線描述因地面摩擦力而造成風速沿高度變化之風切現象，如下式所示：

$$V(z) = V(70) \left( \frac{z}{70} \right)^{0.3} \quad (3.15)$$

其中  $V(70)$  為 35.75m/s 與 64.85m/s。

陣風風速：由於颱風期間風速在短時間內有明顯變化之現象，依據對颱風期間風況之分析結果，風速變化如下式所示：

$$V(t, z) = \begin{cases} V_0(z) \left[ 1 + 0.407 \sin \frac{\pi}{2} t \left( 1 - \cos \frac{\pi}{3} t \right) \right], & 0 \leq t < T \\ 35.75, & t \geq T \end{cases} \quad (3.16)$$

$$V_0(z) = 35.75 \left( \frac{z}{70} \right)^{0.3} \quad (3.17)$$

其中  $T = 6s$ 。

- 2 出口邊界: 邊界上之流場物理量沿邊界平面法向之梯度(參考表 3.7)為 0，代表該處之流場為完全發展(Fully Developed)。



- 3 無滑動壁面：邊界上流體之相對速度為 0，用以描述黏流流場壁面之無滑動(No Slip)條件，本文之風機與地面為靜止(相對於地球)，故該邊界上之速度為 0。

表 3.7 數值模型之流場邊界條件

邊界名稱	邊界類型	流場邊界條件	
abcd、abfe aehd、bcgf	入流邊界(Velocity Inlet)	速度	3.15~3.17 式
		紊流強度	0.13
ghef	出口邊界(Outlet)	$\frac{\partial \vec{u}}{\partial \hat{n}} = 0$	
cdhg 風機表面	無滑移壁面(Wall)	$\vec{u} = \vec{u}_{wall} = 0$	

### 3-3-3 網格分佈與獨立性測試

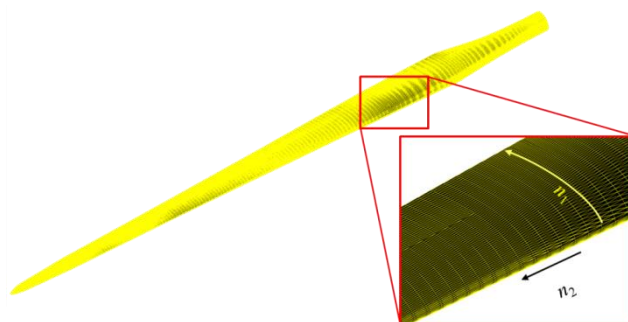
計算空間的網格數愈多，品質愈好，計算的結果也就愈準確，但愈多網格表示愈耗費計算資源。為確立在有限資源下能以足夠的網格數進行模擬，本文設定葉片沿著徑向(spanwise)與流線方向(streamwise)的網格數(如圖 3.9 與表 3.8)，依此產生 5 套不同網格(網格形式為四面體網格，總網格數量介於 5 百萬至 3 千萬之間，參考圖 3.10 與表 3.8)，這 5 套網格皆在風機表面設定第一層網格厚度為 0.00008m，比值 1.3 之比例向外產生 12 層之邊界層網格(如圖 3.10 所示)以捕捉流體在邊界層之變化。藉由對這些網格進行相同邊界條件之數值模擬計算，在殘值小於 $10^{-3}$ 條件下，取得不同網格數下風機所受之縱搖力矩，計算之相關條件如表 3.9 所示，考量風切現象，入流風速採用 3.15 式之風剖線模型，離地高度 70 公尺之風速為 60m/s，空間離散採用二階上風法(Second-Order Scheme)，風機之葉片轉子方位角( $\theta_a$ )為 $0^\circ$ 。



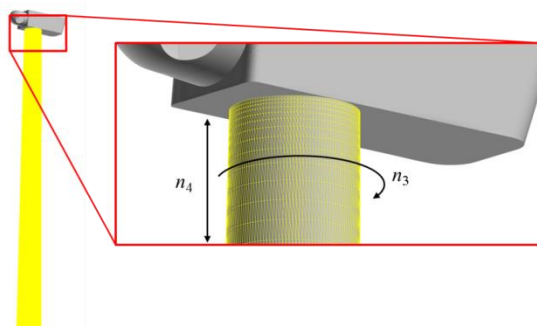


表 3.8 不同網格密度之網格數量

總網格數(million)		5.3	8.4	13.5	19.2	26.1
葉片	$n_1$	30	38	48	60	76
	$n_2$	75	94	119	150	189
塔柱	$n_3$	40	50	63	80	101
	$n_4$	90	113	143	180	227



(a) 葉片表面之網格分佈

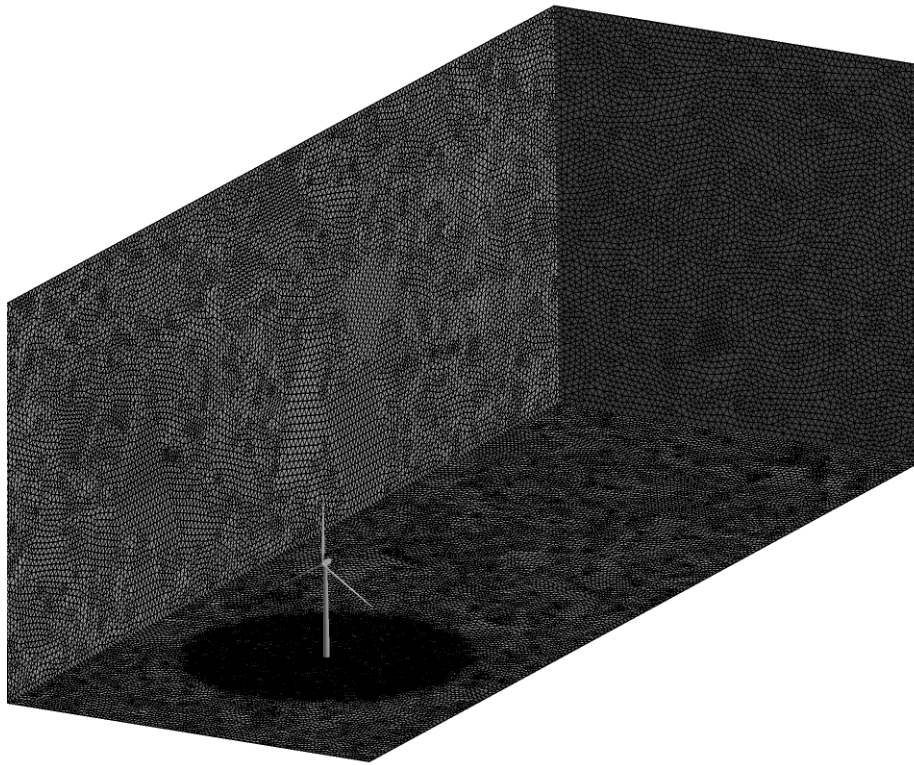


(b) 塔柱表面之網格分佈

圖 3.9 風機表面網格分佈示意圖

表 3.9 網格獨立性測試計算條件

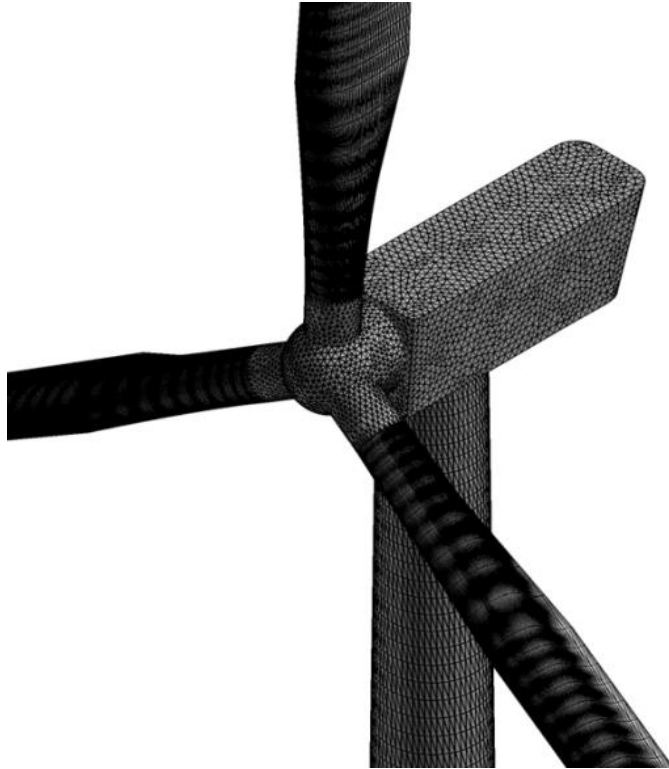
葉片轉子方位角( $\theta_a$ )	$0^\circ$
入流風速	$V(z) = 60(z/70)^{0.3}$
紊流模型	SST $k-\omega$
數值求解方法	SIMPLE 法
空間離散法	二階上風法



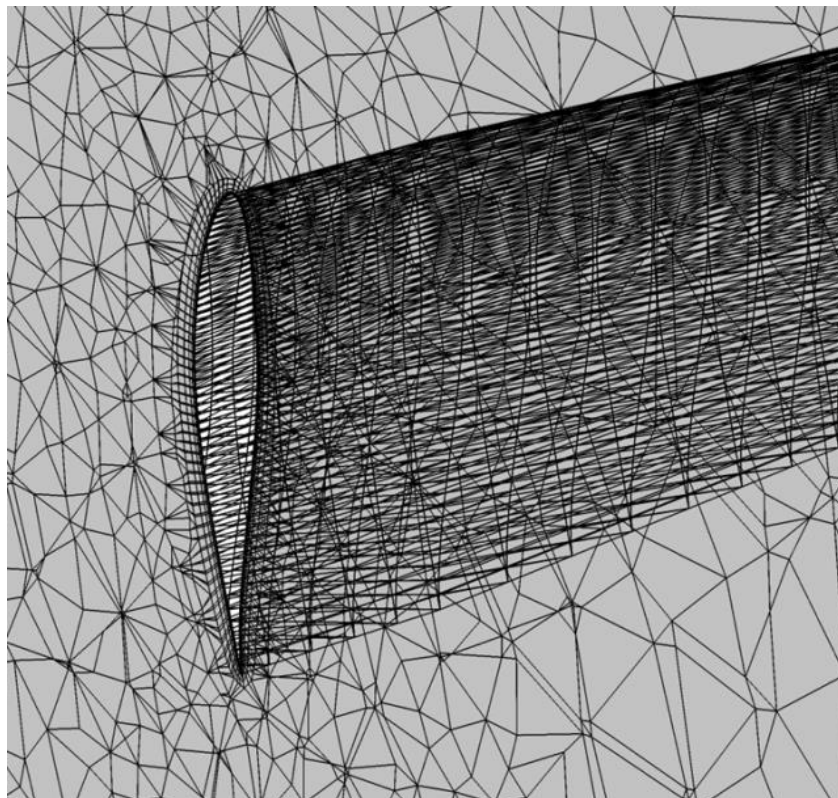
(a) 計算域邊界網格分佈示意圖



(b) 計算 Region2 網格示意圖



(c) 風機表面網格



(d) 葉片邊界層網格

圖 3.10 數值計算模型網格分佈示意圖

待取得模擬計算結果後，以 Richardson's extrapolation 方式[47]推估網格數趨近於無限大時之縱搖力矩以及計算數值相對離散誤差，詳細流程如下：

(1) 選用網格數最多的兩個計算結果(網格數由多至少分別為  $N_n$ 、 $N_{n-1}$ )，依下式計算特定物理量在網格數趨近於無限大時之近似值( $\phi_\infty$ ，參考圖 3.11)。

$$\phi_\infty = \phi_n + \frac{\phi_n - \phi_{n-1}}{\left(\sqrt[3]{N_n/N_{n-1}}\right)^2 - 1} \quad (3.18)$$

(2) 依下式計算各個網格數之無因次網格大小  $dx$ 。

$$dx = \sqrt[3]{\frac{1}{N}} \quad (3.19)$$

(3) 依下式計算不同網格數模型所得特定物理量的相對離散誤差( $E$ )。

$$E = \left| \frac{\phi_\infty - \phi_n}{\phi_\infty} \right| \quad (3.19)$$

(4) 將相對離散誤差與無因次網格大小繪製如圖 3.12 所示，坐標軸採用對數座標，並觀察網格數第三多與第二多之間的斜率是否已接近所使用數值近似方法的離散誤差曲線斜率(二階法：當網格縮小一半，離散誤差變為四分之一；一階法：當網格縮小一半，離散誤差變為二分之一)。若是，則表示  $\phi_\infty$  為符合所採用近似方法的網格獨立解。

圖 3.11 與表 3.10 為縱搖力矩與網格數的關係，縱搖力矩隨著網格數增加產生單調性的收斂，表示所使用之網格已達到的足夠密度得以進行適當的離散誤差計算。圖 3.12 表示離散誤差與無因次網格大小的關係，離散誤差隨著無因次網格減小產生單調性的收斂，而且曲線在密網格端(即直左側)斜率近乎平行與理想二階方法離散誤差曲線斜率，表示計算結果符合使用方法的預期精度，說明所使用網格數目與劃分的適切性以及該有限網格所造成的誤差大小。基於網格獨立性測試之結果，本文後續之模擬將採用網格數為 13.4 百萬之網格(離散誤差小於 2%)作為後續之數值模擬計算。該套網格在 Region I 空間內的網格數量約為 7.2 百萬，Region II 空間內的網格數量約為 6.2 百萬。

表 3.10 網格獨立性測試結果

網格數(百萬)	$dx$ ( $10^{-3}$ )	縱搖力矩(MN·m)	相對離散誤差(%)
5.4	5.7	27.35	11.7
8.4	4.9	25.38	3.2
13.4	4.2	24.95	1.8
19.2	3.7	24.85	1.4
27.2	3.3	24.78	1.1

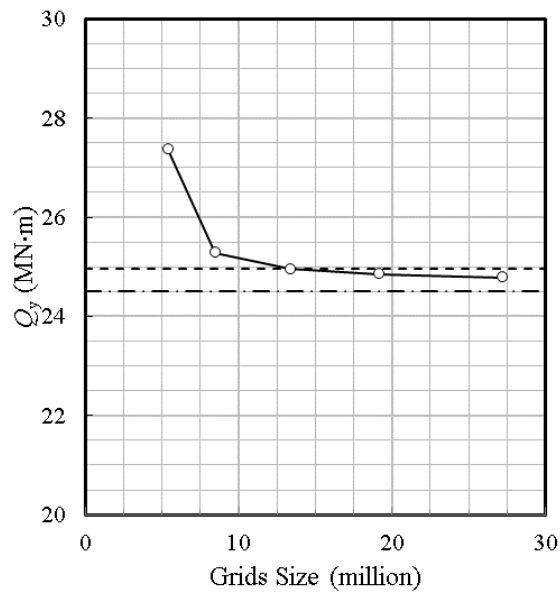


圖 3.11 縱搖力矩與網格數量關係圖

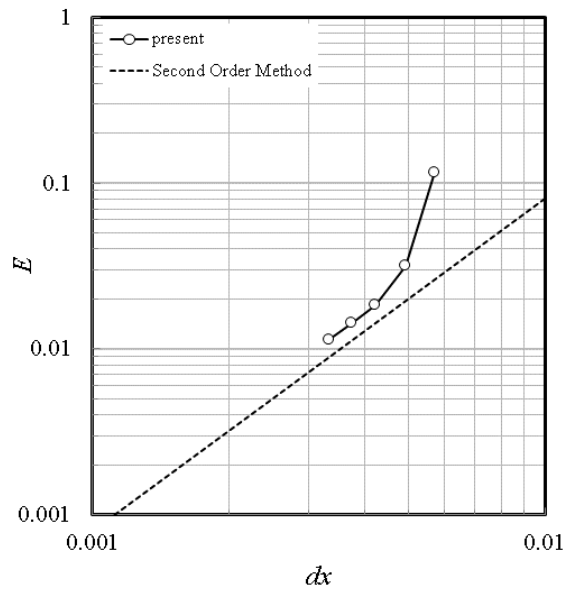


圖 3.12 離散誤差與無因次網格大小關係圖

為了進一步確認所建立之模擬模型的計算結果準確性，進行目標風機在額定風速(11.4m/s)、額定轉速(12.1rpm)條件下之數值模擬。在額定風速、轉速條件下，目標風機葉片節距角為 $0^\circ$ ，雷諾數在 $3 \times 10^6$ 到 $1.2 \times 10^7$ 之間，如圖 3.13 所示，此外 NREL 公布在均勻入流，額定風速、轉速條件下的轉子力距為 4.18 MN·m。所建立之模型如圖 3.14 所示，將圖中圓盤區域設為滑動網格(Sliding Mesh)以模擬葉片之旋轉，網格分佈採用先前設定之方式生成，總網格數約為 9.5 百萬，模擬結果如圖 3.15 所示，當時間超過 40s 後計算結果趨於穩定，故取旋轉第 11 圈之結果計算轉子力矩平均值，結果為 4.09MN·m，較 NREL 公布之 4.18 MN·m 稍低約 2.1%，顯示本研究所建立之數值模擬模型能有效的模擬風機之流場，具有一定的可信度。

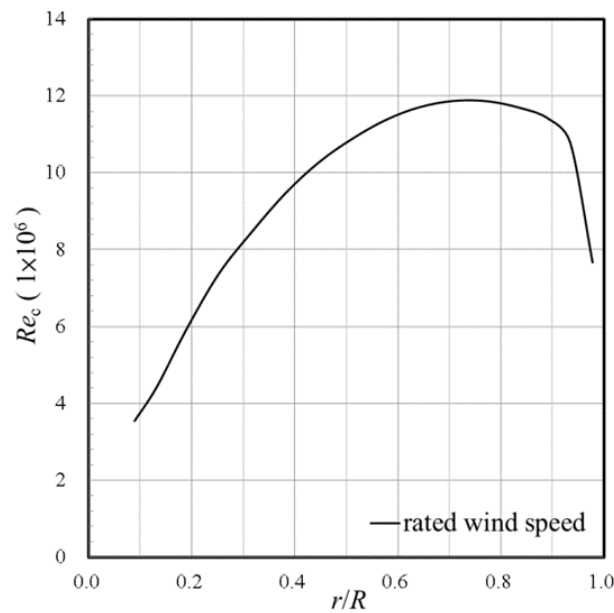
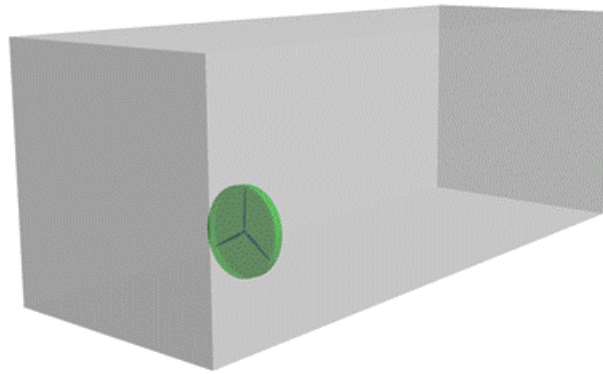
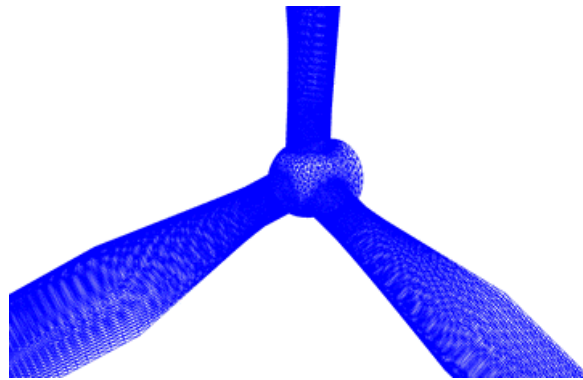


圖 3.13 目標風機額定運轉條件下葉片雷諾數分佈示意圖



(a) 計算模型示意圖



(b) 網格示意圖

圖 3.14 目標風機額定運轉數值模擬模型示意圖

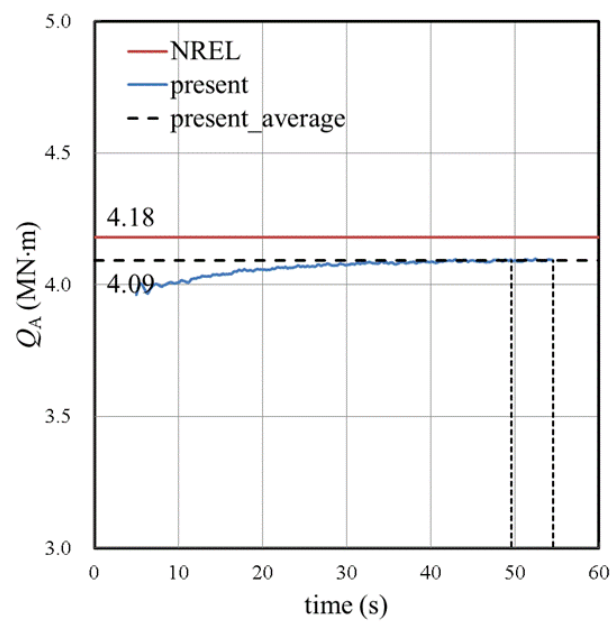


圖 3.15 目標風機額定運轉數值模擬計算結果示意圖

## 第四章 模擬結果與討論



基於對台灣颱風期間風況整理分析之成果，以類似國際風機規範 IEC61400-1 設計負荷案例方式，設定台灣颱風期間風機可能面臨之負荷案例，並藉由所建立之數值模擬模型進行模擬計算，相關模擬計算結果將於本章中說明與討論。

### 4-1 模擬案例與風機氣動力負荷定義

為了能夠有效的研究台灣地區颱風風況對風機氣動力負荷影響的關鍵特性，藉由第二章與第三章中對台灣彰工地區颱風風況與風況模型的研究成果設定模擬計算的案例，諸如設計工況、風速條件等，除此之外，為了方便後續模擬與討論分析，對作用於風機的各项氣動力負荷進行定義與說明。

#### 4-1-1 模擬案例

國際風機設計規範 IEC61400-1 設計負荷案例 6.1(DLC 6.1，參考表 2.2)中，要求風機在設計工況為停機的條件下進行風機在極端風速下之負荷分析，這些條件與一般風機基於安全性考量在颱風期間處於停機，以度過颱風期間強風吹襲的情況相符合，故本文參考設計負荷案例 6.1 之定義，設定穩態之極端風速模擬案例。另外，在 IEC61400-1 設計負荷案例(DLC6~DLC7)中並未考量陣風風況，但颱風期間的風速紀錄資料顯示，颱風期間會有風速在短時間內出現高低劇烈變化之陣風現象，故而在穩態極端風速模擬案例外，將額外設定暫態陣風模擬案例，對目標風機進行陣風條件下之暫態數值模擬計算，以模擬風機在颱風陣風下之氣動力負荷情況。模擬案例的風況條件，將依據 2-3 節中提出之颱風風況模型進行設定，如表 4.1 所示。





表 4.1 颱風風況之模擬案例

案例	設計工況	風況條件	數值模擬條件
A	停機	極端風速	穩態
B	停機	陣風	暫態

依據所設計之模擬風況，需要對進行極端風況下穩態之數值模擬計算以及陣風條件下之暫態模擬計算。在進行暫態計算時，為了能夠獲得計算過程較好的收斂結果，時間步進設定為 $1 \times 10^{-3}$ s，因此為了節省進行數值計算所需要的時間，陣風之模擬案例先進行風速條件為陣風初始風速的穩態數值模擬，並將計算之結果作為初始條件進行陣風條件的暫態數值模擬計算，流程如圖 4.1 所示。

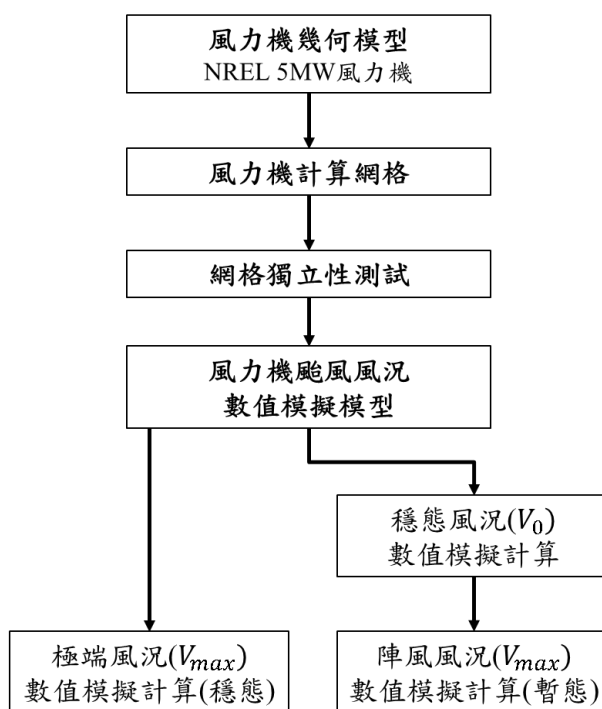


圖 4.1 數值模擬計算流程示意圖

風機設計規範 IEC61400-1 對極端風速之定義為特定重現週期(1 年或 50 年)之最大 3 秒鐘平均風速，根據 2-2 節對颱風資料統計結果為 45.57m/s。以此為基礎並依照 2-1 節之流程與 2-3 節建議相關參數(表 4.2 所示)，建立案例 B 之陣風模型。結果如 4.1 式與圖 4.2 所示，陣風因子為 1.26，詳細參數如表 4.3 所示。在距離地面 70 公尺處之初始速度為 35.75m/s(與 1 分鐘平均風速之相對誤差小於 0.7%)，最大風速(即  $t = 3$  秒時之風速)為 64.85m/s、1 秒鐘平均風速為 61.41m/s、陣風持續時間內之平均風速為 38.22m/s。該陣風的 3 秒鐘平均最大風速( $z = 70\text{m}$ )為 45.36m/s，最大風速( $z = 70\text{m}$ )為 64.85m/s(參考表 4.3)，較 3 秒鐘平均最大風速高出近 20m/s，故本文以為以 3 秒鐘平均最大風速做為風機極端風況負荷分析的風況條件無法真正描述風機可能遭受之極限負荷，故以陣風最大風速(64.85m/s、 $z = 70\text{m}$ )為風速條件，並以 2-3 節中所建議之冪次律風剖線模型作為案例 A 中的極端風況，結果如圖 4.3 與 4.2 式所示。

$$V(t, z) = \begin{cases} V_0 \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^{0.3} \left[ 1 + \frac{GF - 1}{\frac{G(3)}{3} + \frac{8}{15\pi} \frac{T}{60} GF} \sin \frac{3\pi}{T} t \left( 1 - \cos \frac{2\pi}{T} t \right) \right], & 0 \leq t < T \\ V_0, & t \geq T \end{cases} \quad (4.1)$$

$$V(z) = V_{max} \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^{0.3} \quad (4.2)$$

表 4.2 台灣颱風風況參數( $z = 70\text{m}$ )

風切指數	陣風持續時間	3 秒平均最大風速	1 分鐘平均風速
0.3	6 s	45.36 m/s	36 m/s

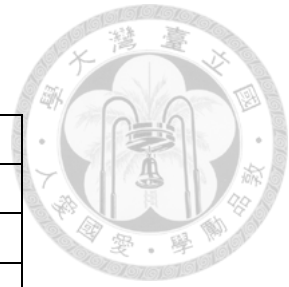


表 4.3 陣風模型於不同高度之特徵風速

$z$ (m)	70(風速計高度)	90(輪轂高度)
$\bar{V}_{60}$ (m/s)	36.00	38.82
$\bar{V}_3$ (m/s)	45.36	48.91
$\bar{V}_1$ (m/s)	61.41	66.22
$V_{max}$ (m/s)	64.85	69.93
$V_0$ (m/s)	35.75	38.55

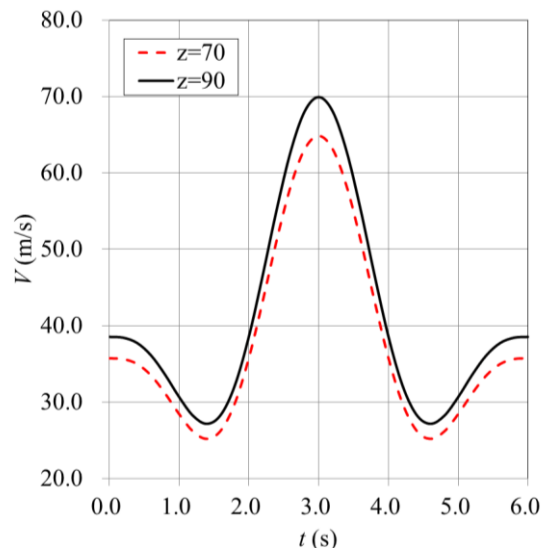


圖 4.2 陣風風況示意圖(模擬案例 B)

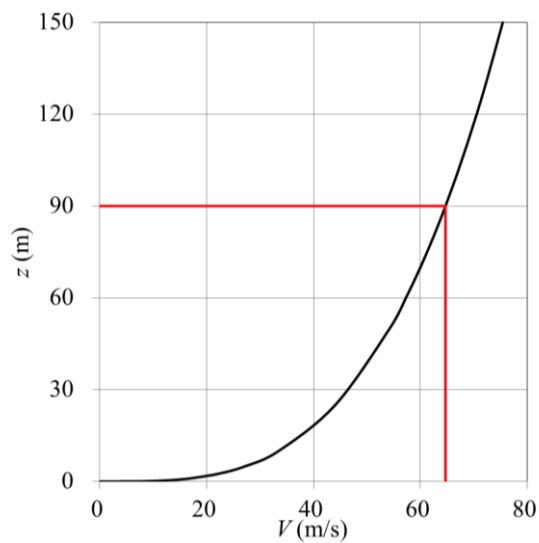


圖 4.3 極端風況示意圖(模擬案例 A)



### 4-1-2 風機氣動力負荷定義

為方便後續的討論，在此對風機的座標定義以及作用於風機的一種力量定義進行說明。以風機塔柱底部圓心為原點，依右手定則定義座標系統如圖 4.4 所示。作用在風機上沿 y 方向之力，稱為橫向力，以  $F_y$  表示、作用在風機上沿 x 方向之力，稱為阻力，以  $F_x$  表示、作用在風機上沿 z 方向之力，稱為升力，以  $F_z$  表示； $Q_y$  為通過原點對 y 軸方向力矩，稱為縱搖力矩、 $Q_x$  為通過原點對 x 軸之力矩，稱為橫搖力矩、 $Q_z$  為通過原點對 z 軸之力矩，稱為平擺力矩； $Q_A$  則為葉片轉子對轉軸(rotor axis)之力矩，稱為轉子力矩； $Q_{pi}$  為  $i$  葉片相對於節距角旋轉軸之力矩，稱為變槳力矩，詳細參考圖 4.4。

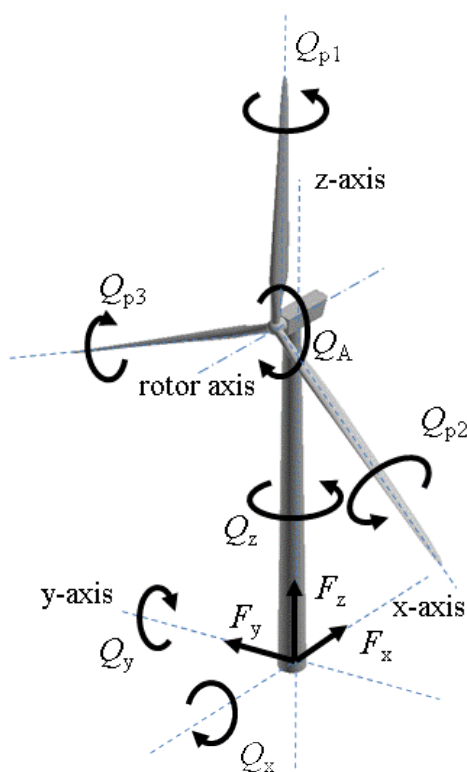


圖 4.4 風機氣動力負荷定義示意圖



## 4-2 極端風速模擬結果與分析

將 NREL 5MW 風機於極端風速下計算模擬所得之各項負荷如表 4.4~4.7 所示，詳細情形依風機所受負荷類型分項說明如下。

### 4-2-1 作用於風機之力

風機受力的模擬結果如表 4.4 所示，分阻力、橫向力與升力等討論於下。

1. 阻力( $F_x$ )：風機各部件的阻力以塔柱所佔比例最大，約為風機阻力的 60%。圖 4.5 為風機阻力與不同葉片轉子方位角之關係圖(其中 WT 表示風機整體、Tower 表示塔柱、Top 表示風機塔頂結構、Rotor 表示葉片轉子)，顯示不同葉片轉子方位角下風機的阻力變化不大(風機阻力平均值約為 457.5kN，標準差為 5.9kN)。若進一步觀察，可以發現當葉片轉子方位角愈靠近 60°時，塔柱的阻力增加而風機頂部(葉片、輪轂與機艙)的阻力則減少。這是因為當葉片轉子方位角愈近為 60°時，2 號葉片與塔柱之間距離越靠近(葉片轉子方位角為 60°時，葉片位於塔柱正前方)，兩者之間流場相互影響程度愈大。以葉片轉子方位角為 60°時之情況為例，氣流在流經該葉片之後又直接流經塔柱，故葉片與塔柱之間流場的相互影響最為明顯(參考附錄 C，圖 C.1)。葉片轉子方位角在 0°時，塔柱在  $z = 45\text{m}$  截面處的壓力分佈如圖 4.6 所示，圖 4.7(a)中紅色與藍色面積差即為該處阻力之大小。進一步比較葉片轉子方位角在 0°與 60°情況下，塔柱在  $z = 45\text{m}$  截面處的壓力分佈，如圖 4.7(b)所示。圖中紅色之面積表示葉片轉子方位角為 60°時阻力較葉片轉子方位角為 0°時為增加，而藍色則為減少，從圖中可以看出增加的部分較減少為多，因此當葉片轉子方位角在 60°時，塔柱的阻力較其它葉片轉子方位角時稍大。



表 4.4 風機極端風況模擬結果-受力

負荷類型 力(kN)	風機部件	方位角(°)			
		0	30	60	90
$F_y$	葉片 1	82.4	162.4	121.3	-6.8
	葉片 2	-118.1	-203.3	32.0	4.7
	葉片 3	35.1	6.8	-44.4	-13.6
	葉片轉子	-1.2	-36.9	109.2	-14.1
	塔頂	2.2	-37.8	109.5	-16.7
	塔柱	24.1	-55.8	-11.8	-40.3
	風機	26.3	-93.6	97.7	-57.0
$F_x$	葉片 1	55.2	65.2	76.3	79.1
	葉片 2	67.5	57.7	11.4	36.1
	葉片 3	41.3	41.9	47.8	51.2
	葉片轉子	177.5	175.7	146.6	177.3
	塔頂	180.6	178.6	148.2	181.1
	塔柱	271.0	280.3	306.0	284.3
	風機	451.6	458.9	454.2	465.5
$F_z$	葉片 1	3.4	98.3	220.3	239.4
	葉片 2	189.5	107.1	-3.0	-7.5
	葉片 3	45.9	112.0	89.1	137.2
	葉片轉子	244.3	321.8	314.5	248.6
	塔頂	229.4	314.8	305.9	239.9
	塔柱	4.2	7.6	8.7	8.8
	風機	233.6	322.4	314.6	248.7

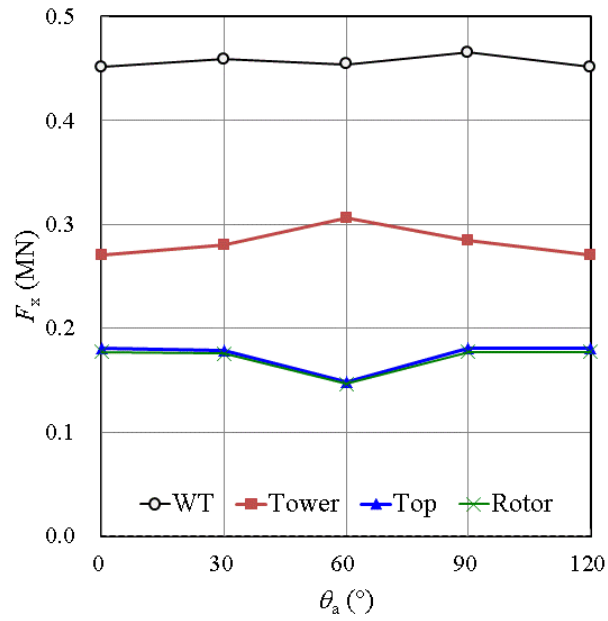


圖 4.5 風機極端風況模擬結果-阻力

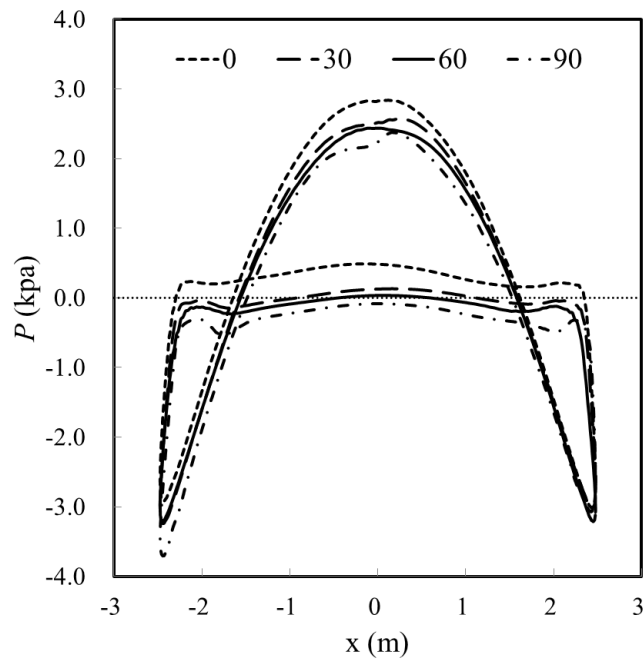
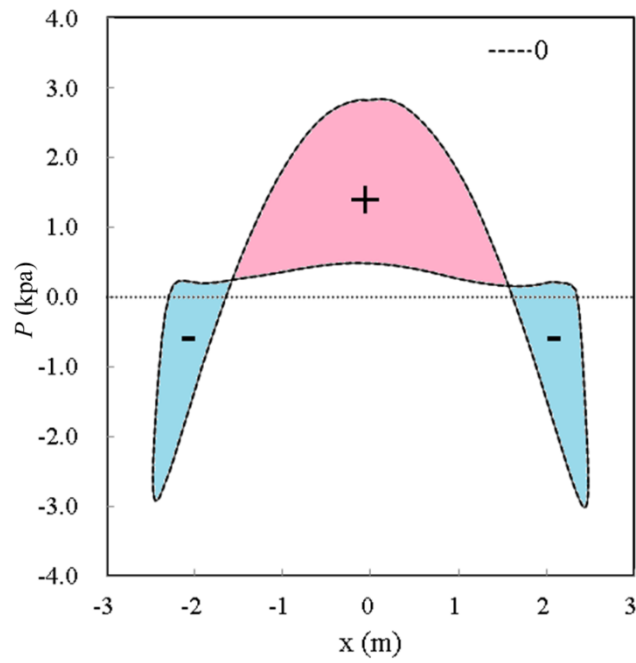
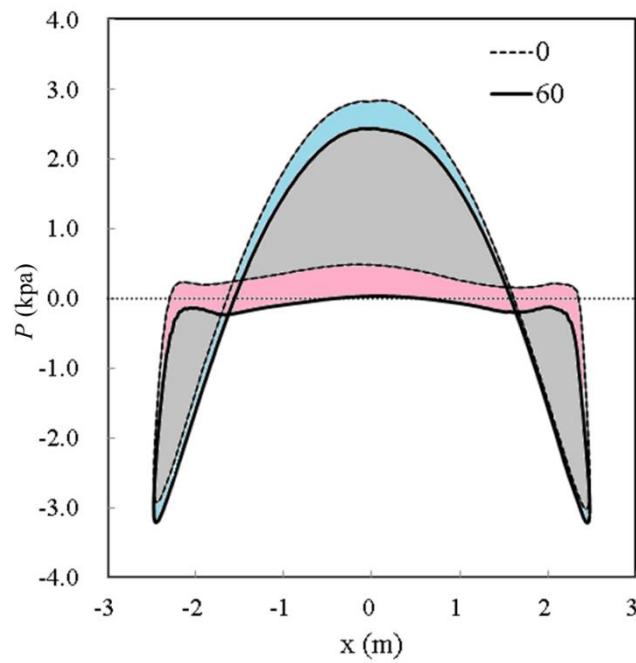


圖 4.6 極端風況下風機塔柱壓力分佈( $z=45\text{m}$ )



(a) 塔柱表面壓力分佈對風機阻力影響示意圖



(b) 不同方位角塔柱表面壓力對風機阻力影響示意圖

圖 4.7 不同葉片轉子方位角之阻力差異說明示意圖



2. 橫向力( $F_y$ )：風機橫向力與葉片轉子方位角關係如圖 4.8 所示，模擬結果顯示橫向力對葉片轉子方位角相當敏感。在葉片轉子部分，由於葉片轉子的橫向力為三支葉片共同影響之結果，因此觀察葉片在不同方位角的橫向力分佈情形，如圖 4.9 所示。另外由於軸傾角的關係，對葉片攻角產生影響(參考附錄 B)，結果如圖 4.10 所示，以葉片  $r/R=0.71$  的位置為例，由於該處之翼型升力為 0 之攻角約為 $-4^\circ$ (圖中虛線)，以方位角約  $180^\circ$ 時為分界，方位角小於  $180^\circ$ 時，攻角小於 $-4^\circ$ 、升力為負；方位角大於  $180^\circ$ 時，攻角大於 $-4^\circ$ 時升力為正，因此造成方位角在  $0^\circ\sim 90^\circ$ 時葉片橫向力為正、方位角在  $90^\circ\sim 180^\circ$ 時葉片橫向力為負、方位角在  $180^\circ\sim 270^\circ$ 時葉片橫向力為正、方位角在  $270^\circ\sim 360^\circ$ 時葉片橫向力為負(參考圖 4.11)。但由於其他半徑位置之葉片之安裝角較大，因此使得該處葉片升力為正之方位角範圍減少，因此使得葉片在方位角  $180^\circ\sim 360^\circ$ 之間的橫向力較方位角  $0^\circ\sim 180^\circ$ 時為小。
3. 升力( $F_z$ )：風機各部件的升力以葉片轉子所佔比例最大，為風機升力的 95% 以上，且所受之垂向力皆為正值(如圖 4.12 所示)，若探討葉片於不同方位角所受之升力可發現其外形如駱駝之雙峰(如圖 4.13 所示)，主要與影響葉片橫向力表現的原因相同，皆是因為軸傾角造成葉片攻角的變化，使得葉片升力在不同方位角表現有所不同，而葉片升力在  $z$  軸之分量與升力有關。同樣以葉片  $r/R=0.71$  的位置為例，方位角在  $0^\circ\sim 180^\circ$ 時葉片升力為負，造成升力為正、方位角在  $180^\circ\sim 360^\circ$ 時葉片升力為正、造成升力為正，但同樣因為其他半徑位置之葉片升力為正之方位角範圍較小，因此使得在方位角  $180^\circ\sim 360^\circ$ 之間不同半徑位置之升力會相互抵消，造成葉片的升力減小，而使得升力大小較葉片在方位角  $0^\circ\sim 180^\circ$ 時為小。

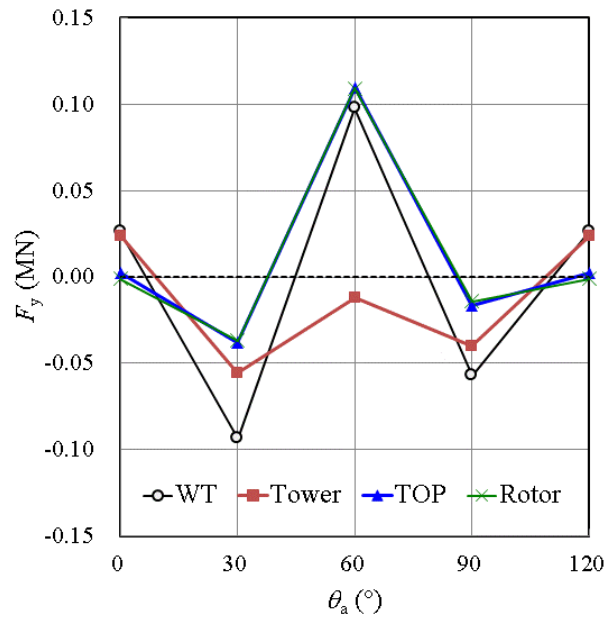


圖 4.8 風機極端風況模擬結果-橫向力

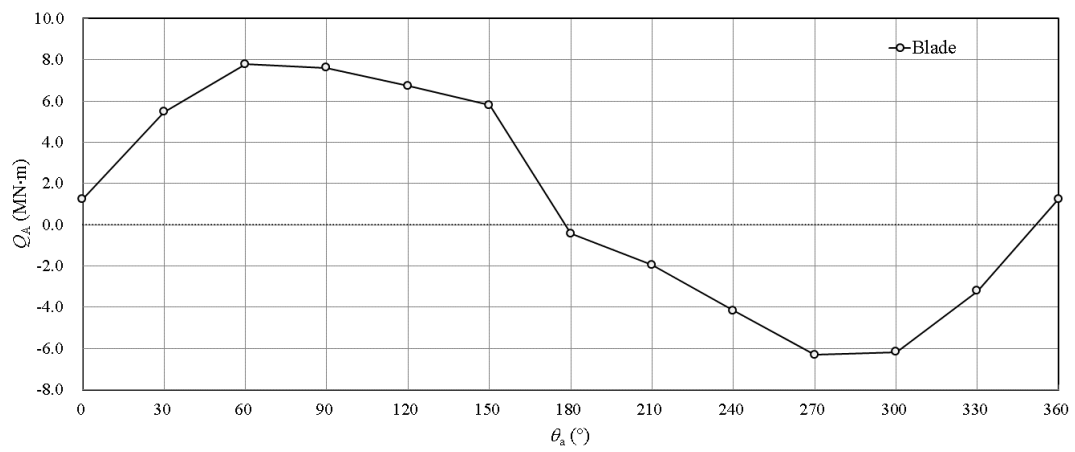


圖 4.9 單一葉片不同方位角橫向力圖

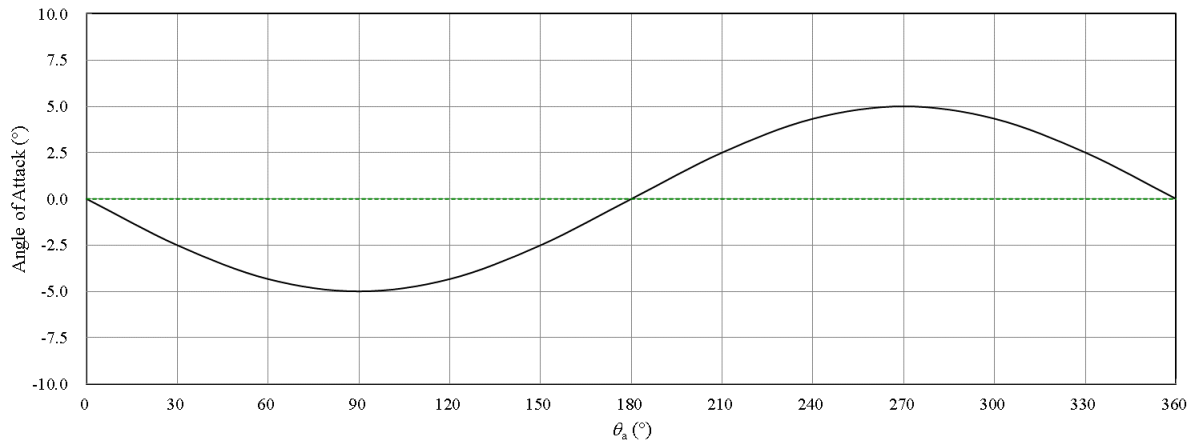


圖 4.10 軸傾角對葉片攻角影響示意圖

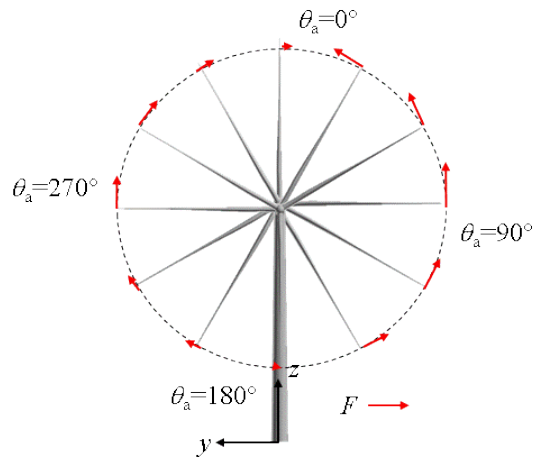


圖 4.11 單一葉片於不同方位角受力示意圖

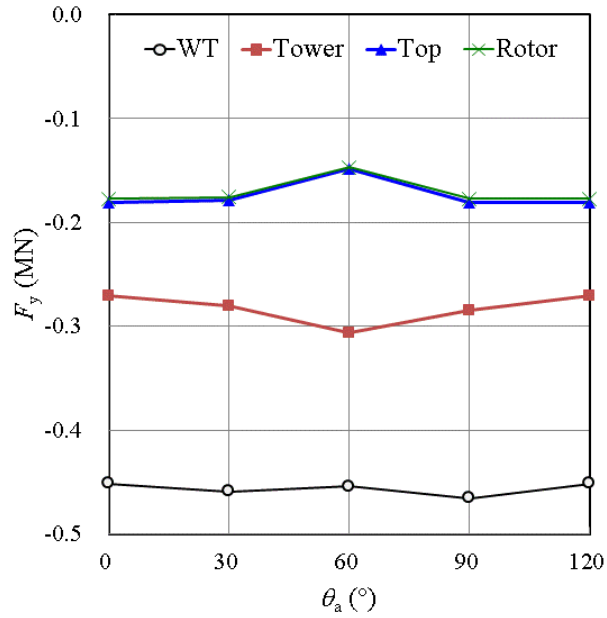


圖 4.12 風機極端風況模擬結果-升力

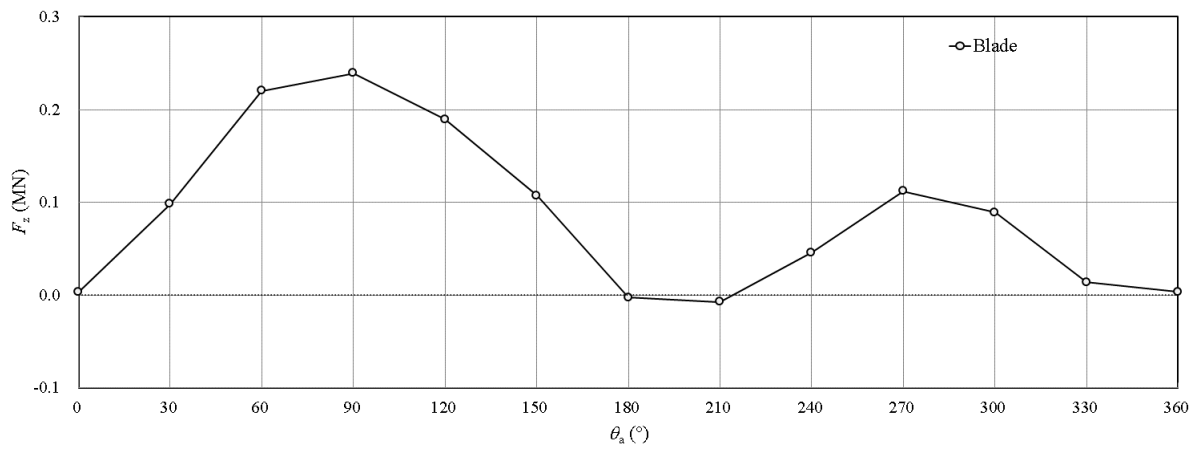


圖 4.13 單一葉片於不同方位角升力示意圖

比較風機在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向所受之橫向力、阻力與升力(參考圖 4.14)，可以發現風機受力分量大小以阻力為最大，且較不受葉片轉子位置影響，而橫向力與升力則因為主要受葉片轉子影響，因此在不同方位角之表現變化較大。表 4.5 為壓力項與壁面剪應力項在風機受力中之影響，剪應力項在橫向力與升力所占比重不到 1%，在阻力所占比中則不到 3.6%，顯示剪應力項對風機受力之影響甚微。

#### 4.5 風機受力中的黏滯項分量與壓力項分量

方位角		0°		30°		60°		90°	
負荷		kN	%	kN	%	kN	%	kN	%
$F_y$	總和	15.73	100	-82.83	100	94.11	100	-57.81	100
	壓力	15.72	99.95	-82.67	99.81	94.09	99.97	-57.96	101.66
	剪應力	0.007	0.05	-0.16	0.19	0.03	0.03	0.15	-0.27
$F_x$	總和	453.90	100	458.87	100	454.48	100	465.54	100
	壓力	437.94	96.48	443.21	96.59	439.28	96.66	449.74	96.60
	剪應力	15.66	3.52	15.66	3.41	15.19	3.34	15.81	3.40
$F_z$	總和	233.58	100	322.09	100	314.31	100	248.66	100
	壓力	235.51	99.97	322.05	99.00	314.28	99.99	248.64	99.99
	剪應力	0.07	0.03	0.04	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01

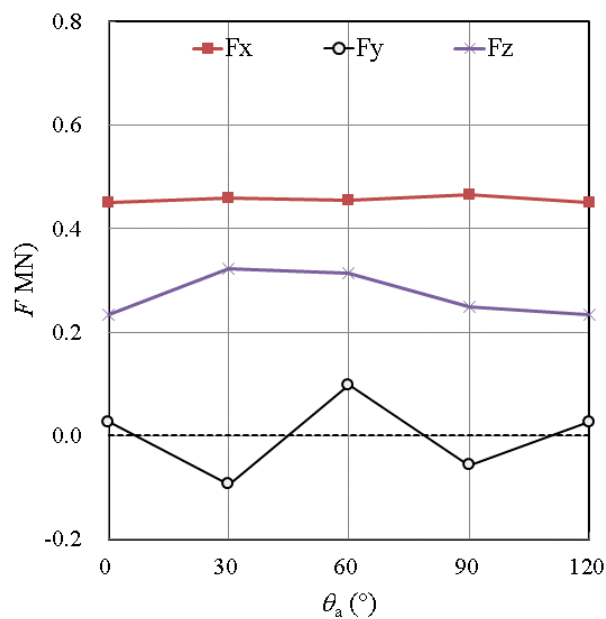


圖 4.14 風機阻力、橫向力與升力比較示意圖



#### 4-2-2 作用於風機對原點之力矩

表 4.6 為風機縱搖力矩、橫搖力矩與平擺力矩之結果，詳細結果討論於下。

1. 縱搖力矩( $Q_y$ )：圖 4.15 為風機在不同葉片轉子方位角下之縱搖力矩分佈，圖中顯示不同葉片轉子方位角下風機的縱搖力矩變化不大(風機縱搖力矩平均值約為 32.3MN·m，標準差為 0.3MN·m)。若與阻力之結果(圖 4.5)相比可以發現兩者表相相當一致，主要是因為風機為一細長型結構，使得對應於阻力之力臂遠較對應於平擺力矩之力臂為大，使得縱搖力矩與阻力有類似之表現。同時也因為力臂較長的因素，讓葉片轉子所造成之力矩被放大，使得葉片轉子造成之縱搖力矩稍大於塔柱所造成之縱搖力矩。
2. 橫搖力矩( $Q_x$ )：風機橫搖力矩在不同葉片轉子方位角下之表現如圖 4.16 所示。與橫向力(參考圖 4.8)相比可以發現，橫搖力矩與橫向力對於不同葉片轉子方位角的變化趨勢相似，但是在葉片轉子所受之橫搖力矩方向與橫向力方向在方位角  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $90^\circ$  時，葉片轉子橫搖力矩之方向與橫向力結果所造成之力矩方向相反。主要是因為風機升力同樣會影響橫搖力矩，尤其在颱風期間風機處於停機工況，整組風機可視為一整體，葉片升力以及相對應的力臂可以對橫搖力矩產生一定的影響。以方位角  $0^\circ$  之情形為例，轉子對應之橫向力小於 0，對應之橫搖力矩亦應大於 0。但對應於方位角  $120^\circ$  與  $240^\circ$  之葉片(葉片 2、葉片 3)升力(189.5、49.5kN、)皆大於 0，所造成之橫搖力矩方向則相反，但由於兩者位置對於  $z$  軸為對稱，表示力臂大小相似，故葉片升力造成之橫搖力矩總和大於 0，這也使得最後之葉片轉子橫搖力矩大於 0。
3. 平擺力矩( $Q_z$ )：圖 4.17 為風機平擺力矩在不同葉片轉子方位角下之表現，從中可看出風機頂部結構物為造成平擺力矩的主因，而塔柱幾乎不造成平擺力矩。當葉片轉子方位角  $30^\circ$  時，風機的水平擺力矩有最大值(1.3MNm)、 $0^\circ$  時風機的水平擺力矩為最小，接近於零。



表 4.6 風機極端風況模擬結果-力矩

負荷類型 力矩(MN·m)	風機部件	方位角(°)			
		0	30	60	90
$Q_y$	葉片 1	6.0	7.4	8.9	8.8
	葉片 2	7.1	5.3	8.4	2.8
	葉片 3	3.8	4.5	5.0	5.3
	葉片轉子	18.1	18.2	15.8	17.8
	塔頂	18.5	18.6	16.0	18.3
	塔柱	13.8	13.9	15.9	14.2
	風機	32.3	32.5	31.9	32.5
$Q_x$	葉片 1	-8.6	-19.9	-18.5	-6.9
	葉片 2	3.9	12.3	-2.4	1.5
	葉片 3	1.0	5.7	10.1	4.4
	葉片轉子	-3.7	-1.6	-10.8	-1.2
	塔頂	-4.0	-1.5	-10.9	-0.9
	塔柱	-1.0	5.2	1.8	4.0
	風機	-5.0	3.7	-9.1	3.1
$Q_z$	葉片 1	-0.6	-0.2	0.6	1.6
	葉片 2	2.0	2.3	-0.1	-0.4
	葉片 3	-0.9	-0.7	-0.6	-0.6
	葉片轉子	0.6	1.3	-0.09	0.5
	塔頂	0.6	1.3	-0.06	0.6
	塔柱	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	風機	0.6	1.3	-0.06	0.6

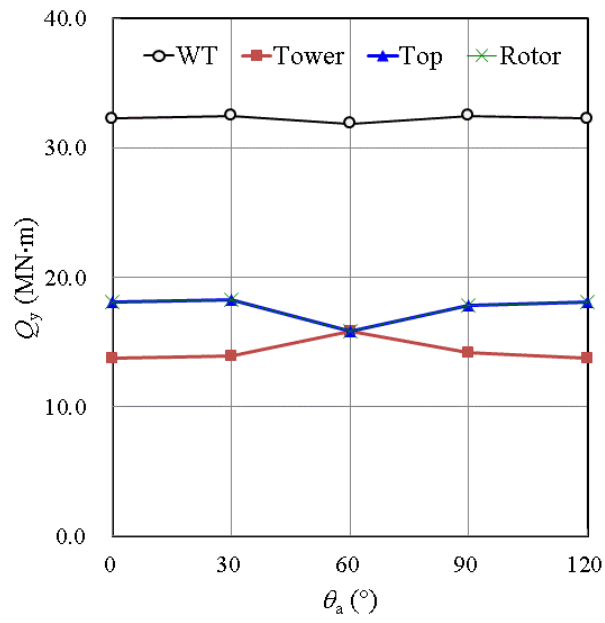


圖 4.15 風機極端風況模擬結果-縱搖力矩

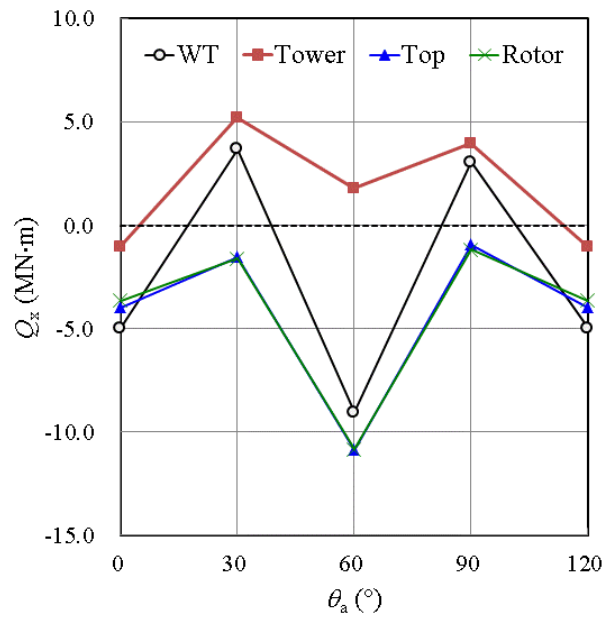


圖 4.16 風機極端風況模擬結果-橫搖力矩



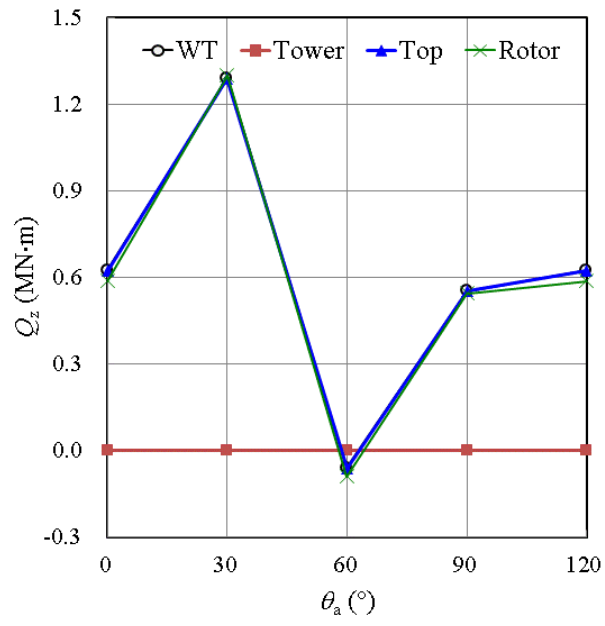


圖 4.17 風機極端風況模擬結果-平擺力矩



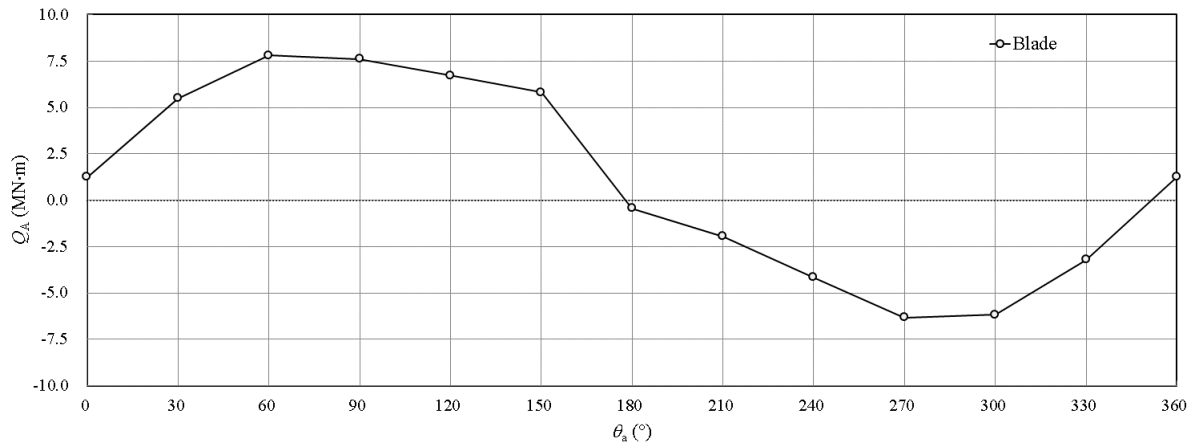
### 4-2-3 葉片轉子轉子力矩與變槳力矩

風機之葉片轉子在正常發電時會不斷轉動，而葉片之節距角會依風速變化而進行調整，但在颱風期間，風機為停機工況，即葉片轉子轉速為 0，且葉片節距角為 90°以減少風機的受力面積，降低風機於颱風期間可能承受之負荷，以安全度過颱風侵襲期間。因此固定葉片轉子與葉片煞車裝置之規格是否能承受風機所受之氣動力負荷影響風機能否安然度過颱風之侵襲，表 4.7 為計算模擬之結果。

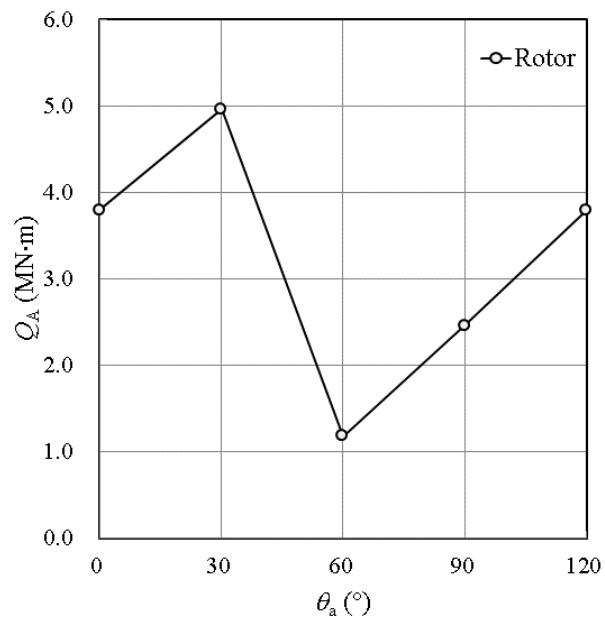
- 轉子力矩( $Q_A$ )：圖 4.18 為葉片在不同葉片轉子方位角下之轉子力矩，當葉片轉子方位角為 60°時，葉片轉子對轉軸產生之轉子力矩為最小(1.1MN·m)，葉片轉子方位角為 30°時，轉子力矩為最大(5.0MN·m)。若觀察單一葉片在不同方位角造成之轉子力矩(如圖 4.18(a)所示)，可以發現單一葉片在方位角 0°~180°造成之轉子力矩為逆時鐘方向，方位角 180°~360°為順時鐘方向，外形類似一個餘弦波，主要原因如 4-2-1 節所提及，由於目標風機設計之軸傾角為 5°，產生葉片之攻角在不同方位角時有所差異，當方位角在 0°~180°時葉片升力為負( $r/R=0.71$  為例)，方位角在 180°~360°時葉片升力為正，因而造成此現象。

表 4.7 風機極端風況模擬結果-葉片( $Q_{pi}$ 為  $i$  葉片之變槳力矩)

負荷類型 力矩(MN·m)	風機部件	方位角(°)			
		0	30	60	90
$Q_A$	葉片 1	1.2	5.5	7.8	7.6
	葉片 2	6.7	5.8	-0.4	-2.0
	葉片 3	-4.2	-6.3	-6.2	-3.2
	葉片轉子	3.8	5.0	1.2	2.5
$Q_{pi}$	葉片 1	-0.20	-0.23	-0.23	-0.21
	葉片 2	-0.17	-0.17	-0.10	-0.12
	葉片 3	-0.13	-0.12	-0.13	-0.17



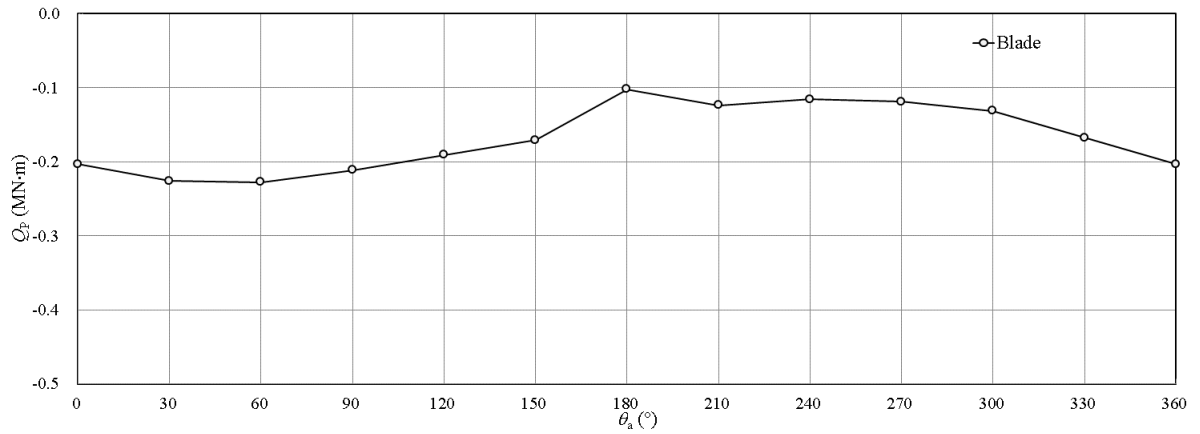
(a) 單一葉片



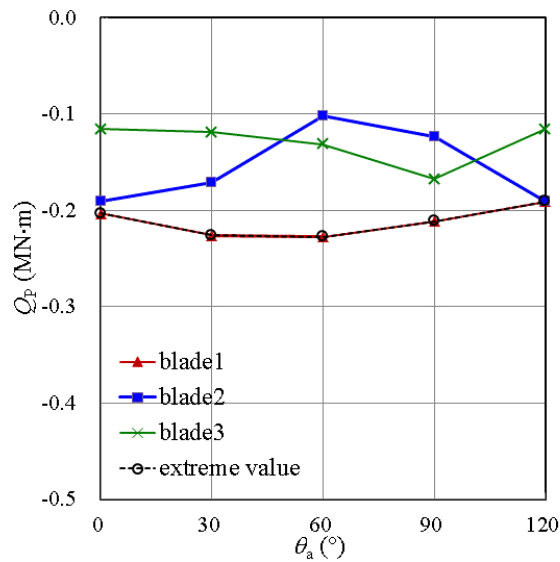
(b) 葉片轉子

圖 4.18 風機極端風況模擬結果-轉子力矩

2. 變槳力矩( $Q_{pi}$ )：變槳力矩與方位角之關係則如圖 4.19 所示，當葉片方位角為  $60^\circ$  時有極值( $0.23 \text{ MN}\cdot\text{m}$ )，方位角為  $180^\circ$  時有最小值( $0.10 \text{ MN}\cdot\text{m}$ )。若以葉片轉子中之變槳力矩最大之葉片為代表，對不同葉片轉子方位角時之葉片變槳力矩進行整理，結果如圖 4.19(b)所示，當葉片轉子方位角為  $0^\circ$  時，葉片面臨之最大變槳力矩最小，葉片轉子方位角為  $60^\circ$  時，葉片面臨之最大變槳力矩最大。



(a) 單一葉片



(b) 葉片轉子

圖 4.19 風機極端風況模擬結果-變槳力矩



### 4-3 陣風模擬結果與分析

為了瞭解台灣颱風陣風情況對風機氣動力負荷的影響，依據模擬案例 B 設定之條件進行風機在停機(轉子葉片方位角為  $0^\circ$ )工況，風況為陣風條件下之數值模擬。相關計算模擬結果將於本節中說明並進行整理分析。

#### 4-3-1 陣風案例模擬結果

當風機所受之氣動力負荷超出其所能承受之範圍時，風機便會因此而損壞甚至倒塌，故而風機在颱風期間可能承受之最大氣動力負荷為影響風機是否能安全度過颱風的重要因素。為此，對目標風機於陣風條件下之計算模擬結果進行整理，以取得風機在陣風期間各項氣動力負荷最大值，如表 4.8~表 4.10 所示。

表 4.8 風機陣風期間氣動力負荷極值-受力

負荷類型		風機	塔柱	頂部結構	葉片轉子
$F_y$	$t = 3s$	-58.62	-31.32	-27.30	-24.49
	最大值(kN)	-61.30	-41.74	-33.20	-24.40
	$t_{max}(s)$	2.85	2.88	2.85	3.16
$F_x$	$t = 3s$	610.10	400.34	209.76	220.99
	最大值(kN)	677.82	458.50	223.04	235.25
	$t_{max}(s)$	2.74	2.70	2.74	2.86
$F_z$	$t = 3s$	218.92	-13.61	232.53	266.27
	最大值(kN)	230.84	-20.32	236.23	267.61
	$t_{max}(s)$	3.16	2.85	3.16	3.04

陣風期間風機之阻力如圖 4.20 所示，風機各部分阻力隨時間變化情況相當一致。葉片轉子阻力極值為 235.23kN，發生在  $t = 2.86$  秒時、塔頂裝置阻力極值為 223.1kN，同樣發生在  $t = 2.86$  秒時、而風機整體阻力極值為 677.8kN，發生在  $t = 2.74$  秒時。橫向力表現如圖 4.21 所示，葉片轉子橫向力極值為 29.4kN，發生在  $t = 3.16$  秒時、塔頂裝置橫向力極值為 33.2kN，發生在  $t = 2.7$  秒時，而風機整體橫向力極值則為 61.3kN，發生在  $t = 2.85$  秒時，雖然風機各部分極值發生時間差異稍大，但隨時間變化趨勢大體相似。風機升力的表現則如圖 4.22 所示，葉片轉子升力極值為 267.6kN，發生在  $t = 3.04$  秒時、塔頂裝置升力極值為 236.3k，發生在  $t = 3.06$  秒時、而風機整體升力極值為 230.9kN，發生在  $t = 2.74$  秒時。由於風速方向與地面平行，故升力主要受到葉片轉子之影響，塔柱對其貢獻不大。

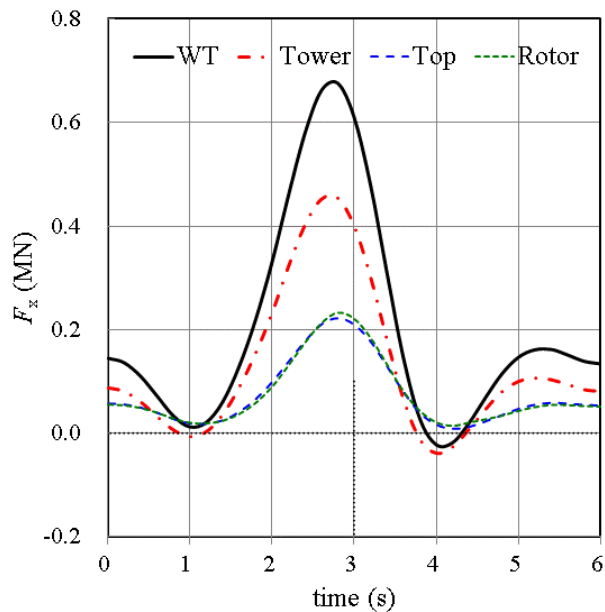


圖 4.20 風機陣風風況模擬結果-阻力

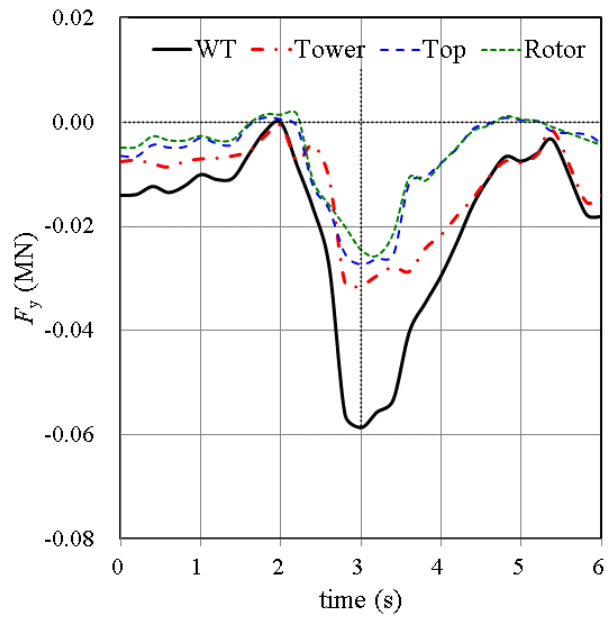


圖 4.21 風機陣風風況模擬結果-橫向力

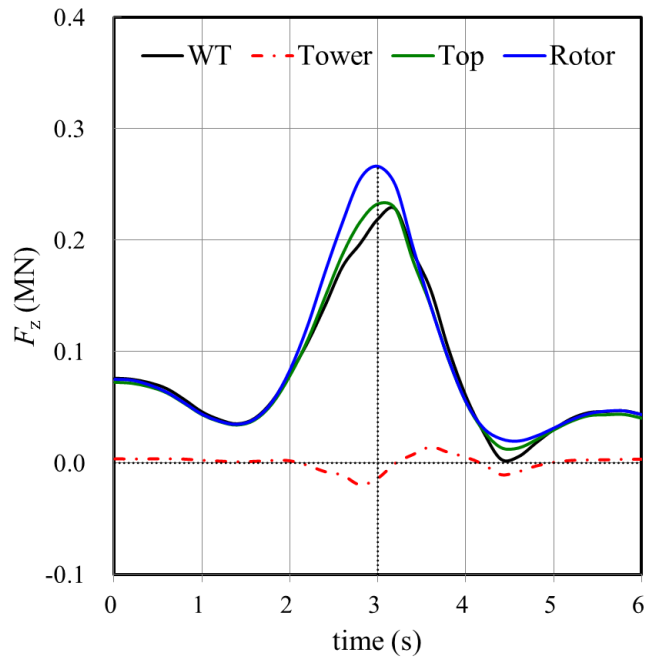


圖 4.22 風機陣風風況模擬結果-升力

從過往台灣風機於颱風期間倒塌的相關報告 [36] 與相關影片 (<https://www.youtube.com/watch?v=CqEccgR0q-o>) 顯示，風機葉片轉子、葉片或偏航等系統的制動器在風機倒塌或損壞前便已故障或損壞，因此颱風期間除了影響風機倒塌與否的對原點力矩外，風機葉片轉子的轉子力矩、葉片的變槳力矩以及風機塔頂的平擺力矩等可能造成上述設備故障或損壞之負荷，同樣是影響風機能否在颱風中存活的關鍵負荷。表 4.9 為目標風機陣風計算模擬結果中，風機整體對原點之力矩、風機葉片轉子的轉子力矩、葉片的變槳力矩以及風機塔頂結構物的平擺力矩。

表 4.9 風機陣風期間氣動力負荷最大值-對原點力矩

風機部件	風機			塔頂結構
	$Q_y$ (MN·m)	$Q_x$ (MN·m)	$Q_z$ (MN·m)	$Q_z$ (MN·m)
$t = 3s$	39.16	0.76	0.80	0.80
最大值(kN)	42.04	-1.78	0.84	0.84
$t_{max}(s)$	2.80	2.28	3.16	3.16

表 4.10 風機陣風期間氣動力負荷最大值-轉子力矩與變槳力矩

風機部件	葉片轉子	葉片		
	$Q_A$ (MN·m)	$Q_{p1}$ (MN·m)	$Q_{p2}$ (MN·m)	$Q_{p3}$ (MN·m)
$t = 3s$	5.11	-0.19	-0.19	-0.16
最大值(kN)	5.31	-0.19	-0.19	-0.16
$t_{max}(s)$	2.87	3.01	3.00	2.93



陣風期間風機之縱搖力矩如圖 4.23 所示，風機各部分的縱搖力矩隨時間變化情況相當一致，而風機整體縱搖力矩極值為  $42.0\text{MN}\cdot\text{m}$ ，發生在  $t = 2.80$  秒時。橫搖力矩表現如圖 4.24 所示，風機整體極值則為  $1.8\text{MN}\cdot\text{m}$ ，發生在  $t = 2.275$  秒時。風機平擺力矩的表現則如圖 4.25 所示，由於塔頂結構物為造成風機平擺力矩的主因，故與風機整體平擺力矩幾乎相同。風機塔頂之平擺力矩極值為  $0.8\text{MN}\cdot\text{m}$ ，發生在  $t = 3.16$  秒時，代表偏航系統制動器必須克服之力矩極值。

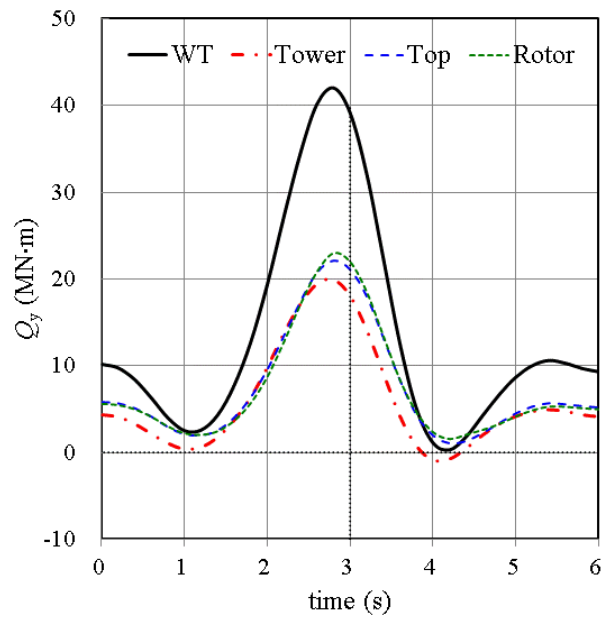


圖 4.23 風機陣風風況模擬結果-縱搖力矩

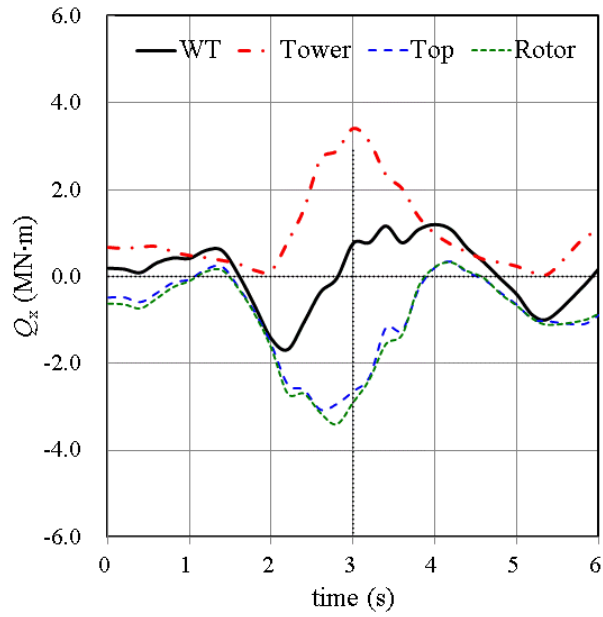


圖 4.24 風機陣風風況模擬結果-橫搖力矩

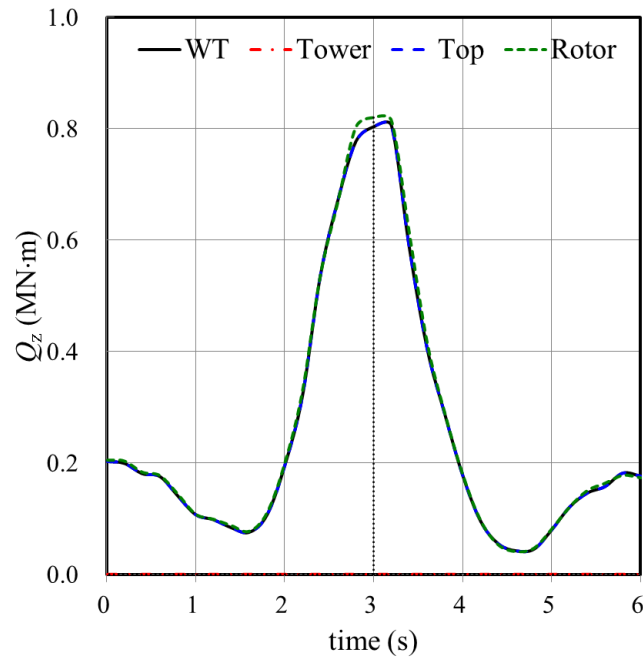


圖 4.25 風機陣風風況模擬結果-平擺力矩

陣風計算模擬結果中，葉片轉子的轉子力矩與葉片的變槳力矩如圖 4.26 與圖 4.27 所示。兩者隨時間的變化幾乎是以  $t = 3$  秒為對稱軸之對稱圖形，與陣風風速變化相似。葉片轉子轉子力矩極值為  $5.3 \text{ MN}\cdot\text{m}$ ，發生在  $t = 3.00$  秒時。風機三葉片之變槳力矩分極值分別為： $0.19 \text{ MN}\cdot\text{m}$  (葉片 1,  $t = 3.01$ )、 $0.19 \text{ MN}\cdot\text{m}$  (葉片 2,  $t = 3.00$ ) 與  $0.16 \text{ MN}\cdot\text{m}$  (葉片 3,  $t = 2.97$ )。

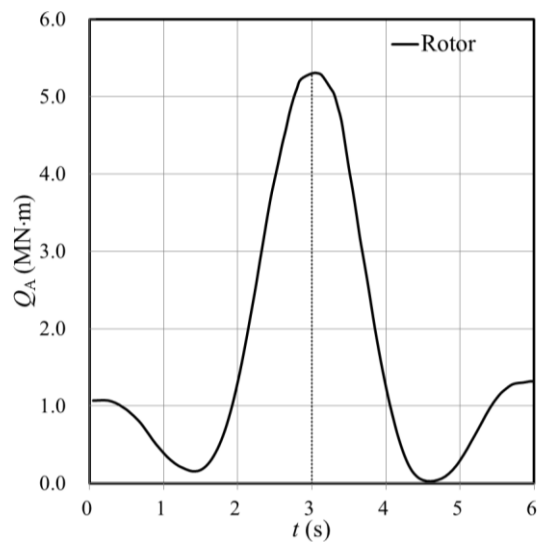


圖 4.26 風機陣風風況模擬結果-轉子力矩

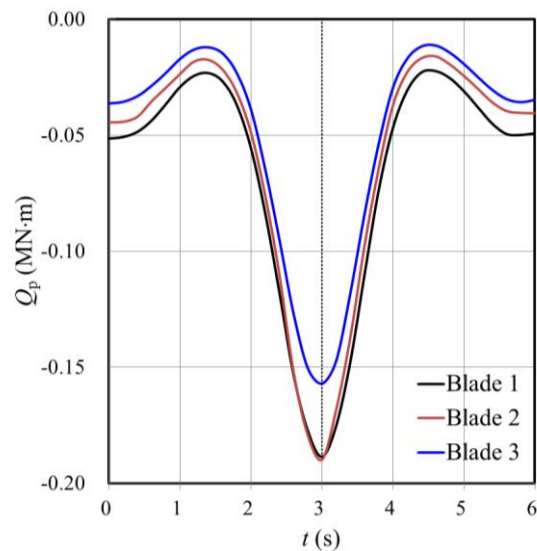


圖 4.27 風機陣風風況模擬結果-變槳力矩



### 4-3-2 陣風案例模擬結果分析

風機所受之氣動力負荷與風速有關，因此在探討此風機在陣風下的氣動力負荷表現之前，對於所使用之陣風模型做進一步的了解。在陣風計算模擬案例中所使用之陣風模型如圖 4.2 所示，為一以時間中點形成左右對稱之數學模型。依風速的增加或減少可將陣風風速變化分為四個階段， $0 \leq t \leq 1.4$  期間風速下降，為第一階段、 $1.4 \leq t \leq 3.0$  期間風速上升至最大值，為第二階段、 $3.0 \leq t \leq 4.6$  期間為第三階段，期間風速再次下降、而  $4.6 \leq t \leq 6.0$  期間為第四階段，風速再度上升至初始之速度。若將風速對時間微分，即可得知陣風期間的風速加速度，結果如圖 4.28 與下式所示：

$$\frac{dV}{dt} = V_0 K \frac{dg(t)}{dt} = V_0 K \left[ \frac{\pi}{2T} \left( \cos \frac{\pi}{T} t - 6 \cos \frac{3\pi}{T} t + 5 \cos \frac{5\pi}{T} t \right) \right] \quad (4.1)$$

在第一階段與第三階段期間，風速與加速度方向相反；相反的，在第二階段與第四階段期間，風速與加速度方向相同，加速度極值發生在  $t = 2.27$  秒與  $t = 3.73$  s 時，大小約為  $43.35 \text{m/s}^2$  與  $-43.35 \text{m/s}^2$  (以  $z = 90 \text{m}$  計算)。

工程上常以阻力係數或扭力係數評估物體所受之力量或力矩大小，依據系數定義可知，兩者皆與速度平方成正比，若以此對風機陣風期間之氣動力負荷進行評估，可預期極值會發生在風速最大時(陣風持續時間的一半時， $t = 3 \text{s}$ )。但明顯除了轉子力矩、變槳力矩外與升力外，風機氣動力負荷極值並非發生在風速最大時。為了方便比較風機氣動力負荷與陣風風速變化之間的關係，本文對風機氣動力負荷與風速進行正規化，其中正規化方法如下式所示：

$$\phi_N = \frac{\phi(t)}{|\phi|_{max}} \quad (4.2)$$

其中  $\phi$  為擬正規化之物理量、 $|\phi|_{max}$  為該物理量取絕對值後的最大值、 $\phi_N$  為該物理量正規化後之值。將氣動力負荷、陣風風速與加速度等參數正規化後之結果繪製



於同一圖中(如圖 4.29 所示),從正規化後之圖形中可以發現氣動力負荷與陣風風速變化趨有所顯不同,尤其是與風向平行之分量(即阻力與縱搖力矩)。

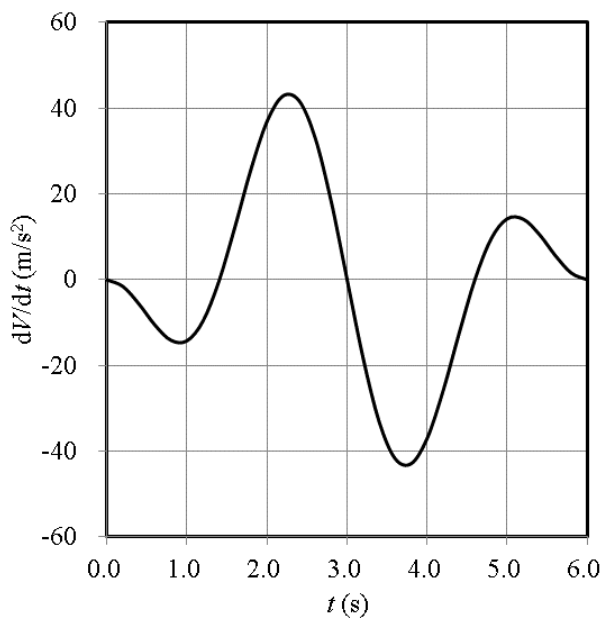
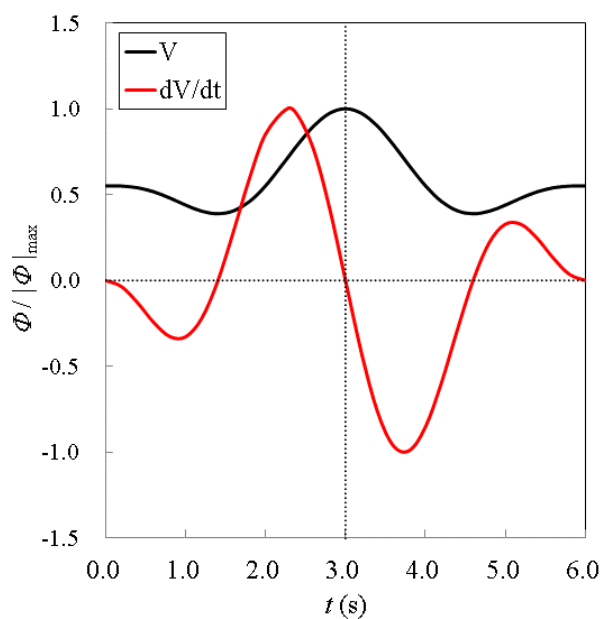
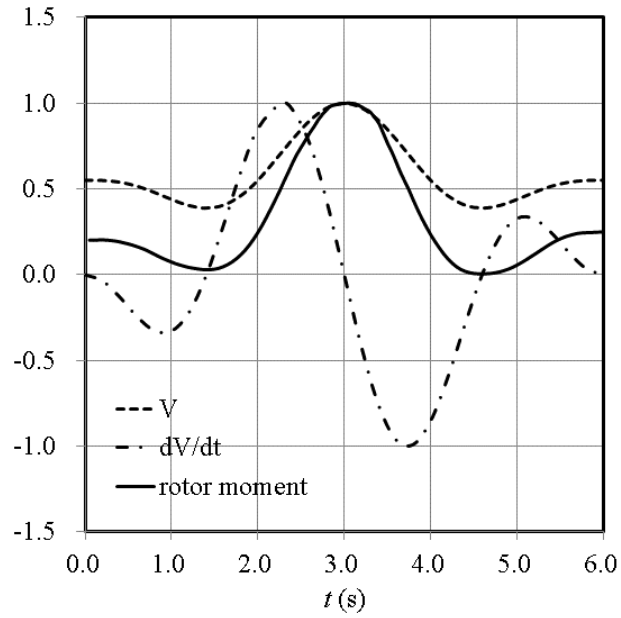


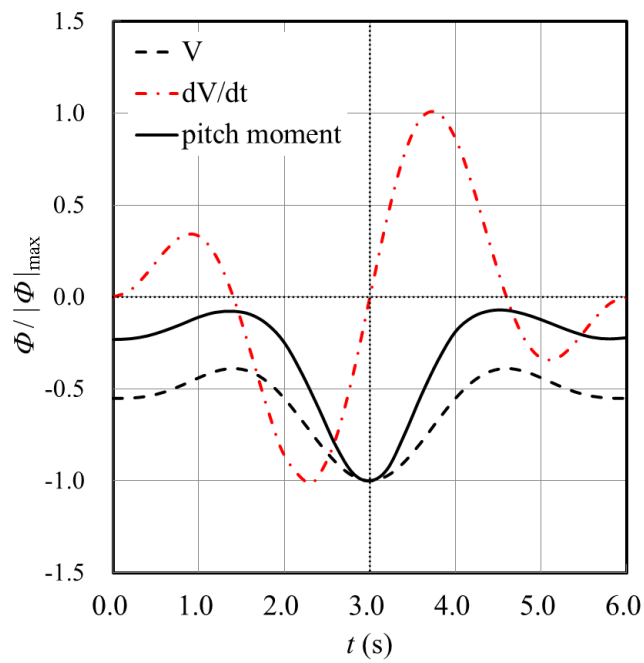
圖 4.28 陣風期間加速度與時間關係圖



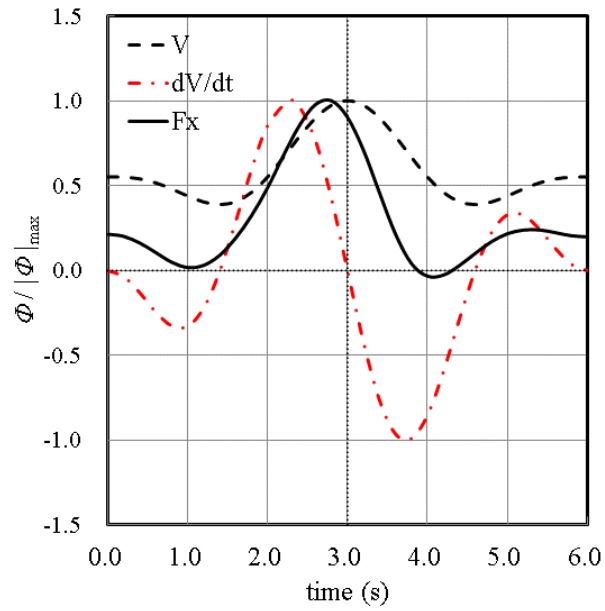
(a) 風速、加速度



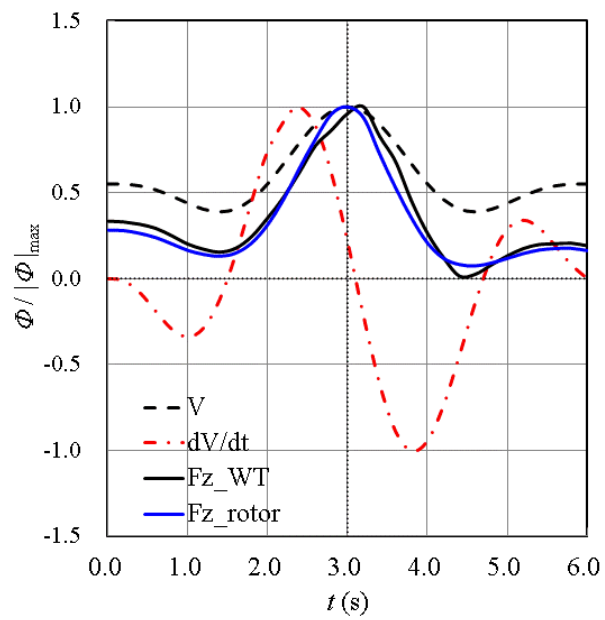
(b) 轉子力矩



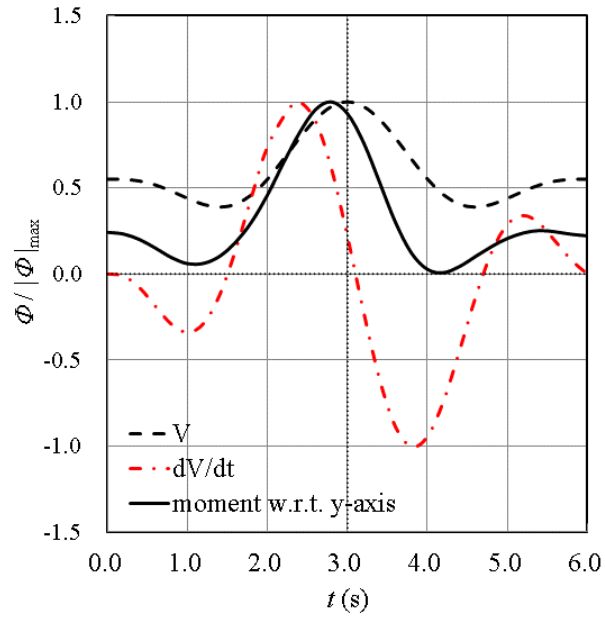
(c) 變槳力矩



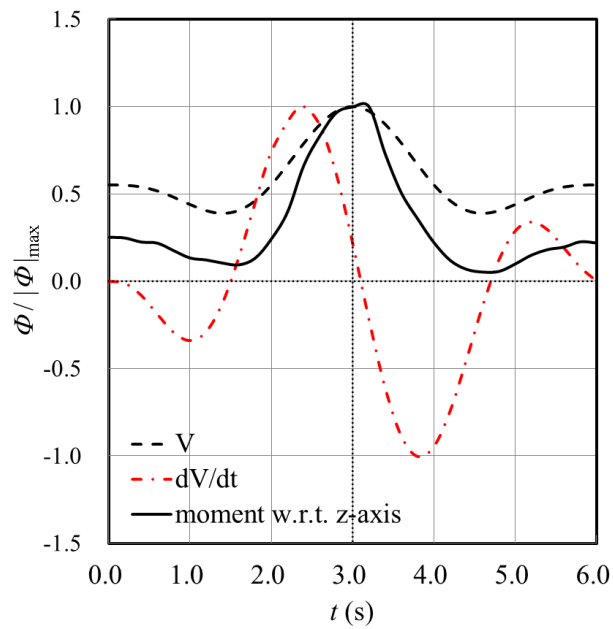
(d) 阻力



(e) 升力



(f) 縱搖力矩



(g) 平擺力矩

#### 4.29 風速、加速度與風機氣動力正規化之結果比較





風機氣動力負荷與風向平行之分量(如阻力與縱搖力矩)變化跟風速加速度之變化趨勢相近，但有向右偏移之情況。由於風機之流場較為複雜，加上依據表 4.5 顯示風機的受力中剪應力項所占比例不到 3.6%，即風機負荷的主要受壓力影響為主。

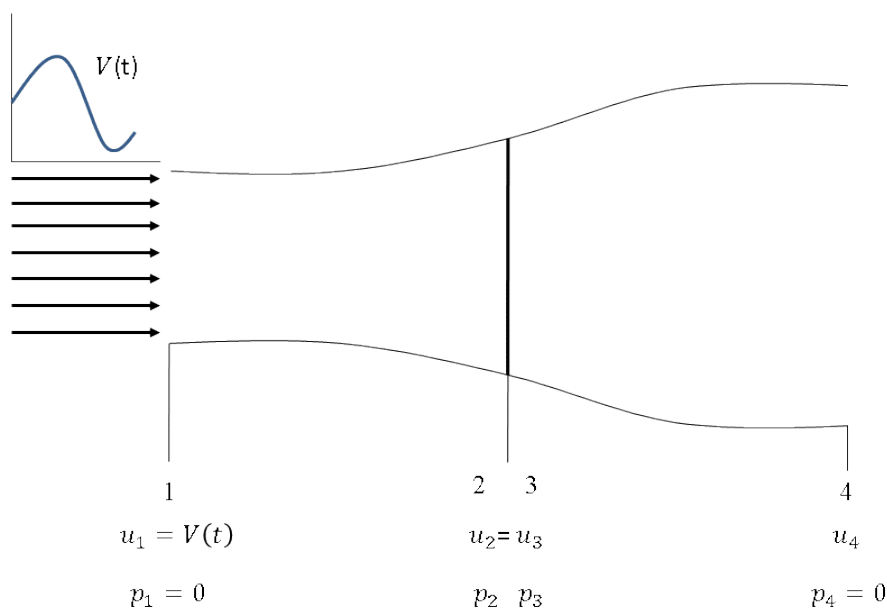


圖 4.30 動量理論流場示意圖[48]

故考慮風機在設計常用以評估氣動力負荷的葉片動量元素理論中動量理論的部分[48]，如圖 4.31 所示，位置 1 為入口、位置 2 與位置 3 分別為風機前、後方，位置 4 為流場出口。以暫態之伯努力方程描述位置 1 到位置 2 以及位置 3 到位置 4 的流場，如下式所示：

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho V^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho u_2^2 + \rho \int_1^2 \frac{\partial u}{\partial t} ds \quad (4.3)$$

$$p_3 + \frac{1}{2}\rho u_3^2 = p_4 + \frac{1}{2}\rho u_4^2 + \rho \int_3^4 \frac{\partial u}{\partial t} ds \quad (4.4)$$

將兩式相加，整理後即可得風機前後之壓力差，如下式所示：



$$\Delta p = p_2 - p_3 = p_1 - p_4 + \frac{1}{2}\rho(u_1^2 - u_4^2) + \frac{1}{2}\rho(u_3^2 - u_2^2) - \rho \left[ \int_1^2 \frac{\partial u}{\partial t} ds + \int_3^4 \frac{\partial u}{\partial t} ds \right] \quad (4.5)$$

若以風機向前運動之方式模擬風機受風之情況，則可假設上下游無限遠處壓力相同，並假設風機轉子相當薄，流體在風機轉子前後之速度相同，故風機前後之壓差可表示如下：

$$\Delta p = p_2 - p_3 = \frac{1}{2}\rho(u_1^2 - u_4^2) - \rho \left[ \int_1^2 \frac{\partial u}{\partial t} ds + \int_3^4 \frac{\partial u}{\partial t} ds \right] \quad (4.12)$$

由上式可以了解風機的受力變化會同時受到速度平方與加速度之影響。

若比較陣風條件下風機承受的最大氣動力負荷與極端風速下風機所受之氣動力負荷，結果如表 4.11 所示。風機在陣風條件下之橫搖力矩較在極端風速下為小，但其中兩者在整個風機中所佔比例較小，並非造成風機倒塌的主要負荷；變槳力矩與升力在兩種風況條件下表現差異不大；風機塔頂結構物之平擺力矩以及葉片轉子之轉子力矩為影響風機是否能保持停機工況的重要負荷，而風機的縱搖力矩則是造成風機倒塌的主要負荷，在陣風條件下，作用在風機的這三種負荷皆比在極端風速條件下為大，約 1.3~1.4 倍。因此在評估可能作用在風機上的最大負荷時，只考慮極端風速(EWM)很可能低估風機所受之氣動力負荷，有需要增加設計工況為停機、外部風況條件為陣風的設計負荷案例以評估於風機在颱風期間可能受到的最大氣動力負荷。



表 4.11 風機在陣風與極端風速條件下之最大氣動力負荷

氣動力負荷 (Loads)	陣風 (Gust)	極端風速 (Extreme Wind)	$\frac{ \phi_{gust} }{ \phi_{extreme\ wind} }$
橫向力( $F_x$ ,kN) 整機	61.30	26.30	2.33
阻力( $F_y$ ,kN) 整機	677.82	451.64	1.50
升力( $F_z$ ,kN) 整機	230.84	233.63	0.99
縱搖力矩( $Q_x$ ,MN·m) 整機	42.04	32.27	1.30
橫搖力矩( $Q_y$ , MN·m) 整機	1.78	4.97	0.36
平擺力矩( $Q_z$ , MN·m) 塔頂結構物	0.84	0.62	1.35
轉子力矩( $Q_a$ , MN·m) 葉片轉子	5.31	3.80	1.40
變槳力矩( $Q_p$ , MN·m) 葉片	0.19	0.20	0.95

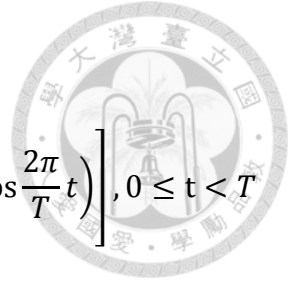
## 第五章 結論



### 5-1 結論與建議

台灣擁有良好的風場，有利於發展風力發電，但颱風期間風機倒塌的消息時有所聞，而這些風機多為國際大廠而且通過風機認證機構認證之風機，為何仍無法通過颱風之考驗？因此台灣發展風能的重要課題之一便是探討風機在颱風期間倒塌之因素，以及了解風機認證參考之依據—國際風機設計規範 IEC61400-1 中對於颱風情況設計要求的不足之處，並提出補充的建議，以便未來購買或設計風機時參考，尤其是目前正在進行的離岸示範風場，能夠依此提出更為嚴謹且適當之風機規格。為了上述之目的，本文蒐集整理台灣彰工地區颱風風況資訊，並藉此提出適合台灣彰工地區的風況參數，再由數值模擬方法對目標風機針對台灣彰工地區極端風速與陣風風況進行計算模擬，最後對模擬之結果加以整理分析，以了解風機在台灣彰工地區颱風風況下可能之氣動力負荷特性。相關研究成果與結論分項說明於下：

- 一、對於氣象學上(中央氣象局與 WMO)用以描述颱風風況之名詞定義加以了解與釐清，並且與風機設計規範 IEC61400-1 中相關的風速定義加以比對，以了解兩者之間的差異，避免不恰當的將風速量測記錄資料使用於描述風機規範中之風況。兩者對於陣風大小的描述上，有相當的差異。氣象上以陣風因子描述，而 IEC61400-1 則以紊流強度與極端風速表示。由於氣象因子更能真實反應台灣颱風期間之陣風情況，因此將 IEC61400-1 中描述陣風之數學模型依陣風因子的定義加以修改，結果如下：



$$V(t, z) = \begin{cases} V_0 \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^{0.3} \left[ 1 + \frac{GF - 1}{\frac{G(3)}{3} + \frac{8}{15\pi} \frac{T}{60} GF} \sin \frac{3\pi}{T} t \left( 1 - \cos \frac{2\pi}{T} t \right) \right], & 0 \leq t < T \\ V_0, & t \geq T \end{cases}$$

二、由於氣象觀測站的風速計所在之高度相較於一般大型風機用以描述風速的輪轂高度而言太低，而彰工測風塔的風速計高度達 70m，且該測風塔安裝在海岸邊，所在位置處於台灣幾處優良之風場範圍內，可以代表台灣彰工地區之風速。本文以統計方式整理該測風塔自 2007 年到 2014 年期間的颱風風速資料，對台灣地區颱風期間可能之最大紊流強度與最大陣風因子等參數提出以下之公式，以便評估不同風速下之紊流強度與陣風因子。

$$\text{紊流強度：} I(\bar{V}_{600}) = 1.0231 \bar{V}_{600}^{-0.5715}$$

$$\text{陣風因子：} GF = 1 + 8.4177 \bar{V}_{60}^{-0.9702}$$

三、由修正之陣風模型與彰工測風塔於颱風期間風速資料以及陣風因子評估公式，提出台灣颱風期間可能面臨之陣風情形：1 分鐘平均風速為 36m/s，陣風因子為 1.26、期間最大風速為 64.85m/s，1 秒鐘平均最大風速為 61.41m/s。2015 年蘇迪勒颱風期間該測風塔紀錄之 1 秒鐘平均最大風速值為 59.4m/s，表示依據建議之數值模型(長期性)計算所得之 1 秒鐘平均風速較在特定期間(偶發性)量到的值約大 4% 左右。

四、考量台灣離岸風場開發之需求，採用了專為不同離岸風電基礎平台研究設計之 NREL 5MW 離岸風機為目標風機，以商業 CFD 軟體 ANSYS FLUENT 建立數值模擬模型，藉由網格獨立性測試以確認所建立之數值模

擬模型的適用性，最後採網格數為 13.5 百萬之網格(離散誤差小於 2%)進行台灣颱風情況下風機氣動力負荷的評估數值與分析。

五、 IEC61400-1 規範中並未要求風機在颱風期間停機工況下，進行描述風速於短時間內變化的陣風條件之負荷分析，因此本文除了依照 DLC6.1 之要求進行數值模擬計算外，參考規範之設計負荷案例，增加設計工況為停機，外部風況條件為陣風風況之案例設定，並配合本文提出之陣風風況進行數值模擬計算。結果顯示在陣風期間風機阻力極值為 677.82kN、發生在時間約 2.74s；橫向力極值為 61.30kN、發生在時間約 2.85s；升力極值為 230.84kN、發生在時間約 3.16s；轉子力矩極值為 5.31NM·m、發生在時間約 2.88s；轉子力矩極值為 5.31NM·m、發生在時間約 2.88s；變槳力矩極值為 0.19NM·m、發生在時間約 3.00s；縱搖力矩極值為 42.04NM·m、發生在時間約 2.80s；塔頂結構平擺力矩極值為 0.84NM·m、發生在時間約 3.11s。

六、 陣風風況下之數值模擬結果顯示：風機的阻力與縱搖力矩的極值並非發生於風速最大的時候。以設計風機時常用於評估氣動力負荷的葉片動量元素理論中動量理論，配合暫態之 Bernoulli Equation 評估流場流經葉片上下游之壓力差隨時間變化之情形，藉以從側面了解此現象。結果顯示壓力差之變化同時受到風速平方以及風速加速度之影響。

七、 對於國際風機設計規範中之風況模型以及與設計負荷案例並未特別針對颱風之情況規範有關之風況與設計負荷案例，唯其中定義之極端風速與設計負荷案例設定 DLC6 與 DLC7 能夠對應部分台灣颱風期間風機可能面臨之情況。這兩個設計負荷案例設定的設計工況皆為停機，外部風況條件為極端風況。但依據陣風條件之數值模擬計算結果之氣動力負荷極值較在相同最大風速條件下，風機所受之氣動力負荷為大，其中阻力為 1.50

倍、縱搖力矩為 1.30 倍、轉子力矩為 1.40 倍而塔頂結構物的平擺力矩則為 1.35 倍。

- 八、 建議在常有颱風侵襲的區域在進行風機設計或負荷分析時，除了原先的設計負荷案例 DLC6 與 DLC7 外，最好再增加設計工況為停機，外部風況條件為陣風之案例設定。



## 5-2 未來研究方向

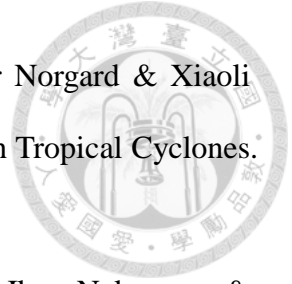
本文對台灣彰工測風塔之風速紀錄資料加以統計分析，以此提出評估台灣颱風期間可能遭遇之紊流以及陣風因子等參數的極值，並依此進行不同風速條件下風機的數值模擬，藉此提出風機設計規範在設計時需要進行負荷分析之風況條件，該風況主要是針對描述風速之強弱，而風向變化方面則由於風速資料所包含之風向變化資訊匱乏且相關規範描述之風向變化模型無法完全描述資料中風向變化的情況，有待未來進一步的研究，以了解颱風期間風向變化對風機所產生更為不穩定負荷之影響。




## 參考文獻




- [1] Thomas F. Stocker, Dahe Qin & Gian-Kasper Plattner (2014). Technical Summary, *IPCC*.  
Website:  
[http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5wg1/WG1AR5\\_TS\\_FINAL.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5wg1/WG1AR5_TS_FINAL.pdf).
- [2] NOAA (2016). Full Manua Loa CO<sub>2</sub> record., NOAA., *ESRL* Website:  
<http://esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/full.html>.
- [3] United Nations (2015). Paris Agreement, United Nations, *UNFCCC* Website:  
[http://unfccc.int/paris\\_agreement/items/9485.php](http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php).
- [4] GWEC & Guiyong Yu. (2015). Global Wind Report 2015.*GWEC*.  
Website:  
[http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report\\_April-2016\\_22\\_04.pdf](http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-2016_22_04.pdf)<http://www.wwindea.org/wwea-bulletin-special-issue-2015/>
- [5] Stefan Gsanger, Martina Bachvarova, Shane Mulligan, Guiyong Yu & Tristan Evans (2016). World Wind Energy Report 2014. *WWEA*.  
Website: <http://www.wwindea.org/wwea-bulletin-special-issue-2015/>
- [6] 余勝雄(2007)，我國風力發電現況及展望，永續產業發展，第 35 期，16-21 頁。  
取自 <http://www.ema.org.tw/monthlymgz/pdf/35/16-21.pdf>
- [7] 工業技術研究院，陸域風力推動現況，取自  
[http://www.twtpo.org.tw/onshore\\_list.aspx?category\\_id=139](http://www.twtpo.org.tw/onshore_list.aspx?category_id=139)
- [8] 行政院 (2012)，風力發電離岸系統示範獎勵辦法，取自  
<http://gaz.ncl.edu.tw/detail.jsp?sysid=E1514498>



- [9] Niels-Erik Clausen, Soren Ott, Niels-Jacob Tarp-Johnsen, Rer Norgard & Xiaoli Guo Larsen. (2006.02). Design of Wind Turbine in an Area with Tropical Cyclones. *Europen Wind Energy Conference*, Athen.
- [10] Shuyang Cao, Yukio Tamura, Naoshi Kikuchi, Mamoru Saito, Ikuo Nakayama & Yutaka Matsuzaki. (2009). Wind Characteristic of a Strong Typhoon. *Journal of Wind Engineering and Instrustrial Aerodynamic*, 97, 11-21.
- [11] 方新發(2009)，極端風速研究初步，*台灣風能學術研討會*，台北市。
- [12] Lessandro Estelito O. Garcino & Takeshi Koike. (2010). Newreference Wind Speed for Wind Turbine in Typhoon-Prone Areas in the Philippines. *Journal of Structural Engineering*, 136, 463-467.
- [13] Dong-hai Liu, Li-li Song, Guo-ping Li, Peng Qin, Wen-chao Chen & Hao-hui Huang. (2011). Characteristics of the offshore extreme wind load parameters for wind turbines during strong typhoon Hagupit. *Journal of Tropical Meteorology*, 17, 399-408.
- [14] 林博雄、杜佳穎(2011)，侵颱期間台灣西部濱海之強陣風特性分析\_以莫拉克颱風為例，*台灣風能學術研討會*，台南市。
- [15] 陳裕仁(2009)，*風力發電葉片效能評估之網路平臺建置*(碩士論文)，國立台灣大學，台北市。
- [16] 劉童斌、陳坤男、許佳舜 & 陳品揚(2009)，風力機塔架之外形最佳化設計，*台灣風能學術研討會*，台北市。
- [17] 謝坤儒、曾瑞堂 & 張永源(2010)，風力機之塔架負載分析，*台灣風能學術研討會*，澎湖。
- [18] 蔡國忠、李韋學、張永源 & 曾瑞堂(2010)，風力機之塔架負載分析，*台灣風能學術研討會*，澎湖。

- 
- [19] 賴偉銘(2010)，*風力發電機葉片負載計算及彈性耦合葉片之研究*(博士論文)，國立台灣大學，台北市。
- [20] 詹育禎(2010)，*風力發電機葉片之流固耦合分析與模流製程探討*(博士論文)，國立台灣大學，台北市。
- [21] Sarun Benjanirat, L.N. Sankar & Guanpeng Xu. (2003.01). Evaluation of Turbulence Model for the Prediction of Wind Turbine Aerodynamics, *Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 41th*, Reno, Nevada.
- [22] Natalino Mandas, Francesco Cambuli & Carlo Enrico Carcangiu. (2006.02). Numerical Prediction of Horizontal Axis Wind Turbine Flow. *Euopen Wind Energy Conference*, Athen.
- [23] N.S. Tachos, A.E. Filios, D.P. Margaris & J.K. Kaldellis. (2009). A Computational Aerodynamics Simulation of the NREL Phase II Rotor, *The Open Mechanical Engineering Journal*, 3, 9-16.
- [24] Takeshi Ishihara, Atsushi Yamaguchi, Keiji Takahara, Takehiro Mearu, & Shinich Matsuura. (2005.09). An Analysis of Damaged Wind Turbines by Typhoon Maemi in 2003. *APCWE-VI*(1413-1427). Seoul, Korea.
- [25] Takanori Uchida, Takashi Maruyama, Hirohiko Ishikawa, Masaru Zako & Akira Deguchi. (2011). Investigation of Cause of Wind Turbine Blade Damage at Shiratakiyama Wind Farm in Japan, *A Computer Simulation Based Approach. Reports of Research Institute for Applied Mechanics No.141*(13-25), Kyushu University..
- [26] I.E.C. (2005) *International Standard:Wind Turbines-Part1:Design Requirements*. International Electrotechnical Commission. Switzerland.
- [27] 交通部中央氣象局(2004)，*地面氣象測報作業規範*，交通部中央氣象局，台北市。

- 
- [28] 交通部中央氣象局(1998)，*氣象預報作業規範*，交通部中央氣象局，台北市。
- [29] 交通部中央氣象局資料處理科(1985)，*地面氣象測報作業規範*，交通部中央氣象局，台北市。
- [30] B.A. Harper, J.D. Kepert & J.D. Ginger. (2010). *Guidences for Converting between Various Wind Averaging Periods in Tropical Cyclone Condition*. World Meteorological Organization. Switzerland.
- [31] 陳志岳(2006)，*台灣地區風速剖面參數之探討*(碩士論文)，國立台灣海洋大學，基隆。
- [32] 詹富傑(2008)，*台灣地區風速剖面參數之探討*(碩士論文)，國立台灣海洋大學，基隆。
- [33] 蒲姿榕(2008)，*台灣地區颱風之風速剖面參數探討*(碩士論文)，國立台灣海洋大學，基隆。
- [34] 簡慶文(2010)，*風敏結構之設計與可靠度分析研究*(博士論文)，國立台灣海洋大學，基隆。
- [35] 張家晟(2012)，*臺灣地區高樓層設計風速剖面之探討*(碩士論文)，國立台灣海洋大學，基隆。
- [36] 台灣電力公司(2015)，*蘇迪勒颱風台電風力發電機組受損事故調查報告*，台灣電力公司。
- [37] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial & G. Scott. (2009). *Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development*. NREL/TP-500038060. National Renewable Energy Laboratory.
- [38] 林宇(2014)，*水平軸離岸風機雙向流固耦合氣動力特性分析*(碩士論文)，國立台灣科技大學，台北市。
- [39] H.J. Kooijman, C. Lindenburg, D. Winkelaar & E.L. van der Hooft. (2003). *DOWEC 6MW Pre-Design: Aero-elastic Modeling of the DOWEC 6MW*



- pre-Design in PHATAS. *DOWEC Dutch Offshore Wind Energy Converter 1997-2003 Public Reports*, DOWEC 10046\_009, Netherlands: Energy Research Center of the Netherlands.
- [40] A. Pape & J. Lecanu. (2004) 3D Navier–Stokes computations of a stall-regulated wind turbine. *Wind Energy*, 7(4), 309–324.
- [41] E. Duque, M. Burklund & W. Johnson. (2003) Navier-Stokes and comprehensive analysis performance predictions of the NREL phase VI experiment. *Journal of Solar Energy Engineering*, 125, 457.
- [42] C. Tongchitpakdee, S. Benjanirat & L. Sankar. (2005) Numerical simulation of the aerodynamics of horizontal axis wind turbines under yawed flow conditions. *Journal of solar energy engineering*, 127, 464.
- [43] 李文傑(2011)，*運轉狀態下風力發電機之氣動力負荷數值研究*(碩士論文)，國立台灣科技大學，台北市。
- [44] J.O. Hinze. (1975) *Turbulence*. New York, McGraw-Hill.
- [45] F. R. Mentor(1994) Two-Equation Eddy Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA J.* 32, 1299 -1310.
- [46] S.V. Patankar & D.B. Spalding. (1972). A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in three-Dimensional Parabolic Flows, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15, 1787-1806.
- [47] L.F. Richardson. (1911). The Approximate Arithmetical Solution by Finite Difference of Physical Problems Involving Differential Equations, with an Application to the Stresses in a Masonry Dam. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, 210, 307-357.
- [48] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins & Ervin Bossanyi (2001). *Wind Energy Handbook* (42-46). England, John Wiley & Sons, Ltd.

[49] Herbert A. Sturges (1926). The Choices of a Class Interval, *Journal of the American Statistical Association*, 21(153), 65-66.





## 附錄 A 颱風風速資料統計

為了瞭解台灣颱風期間紊流強度與陣風因子可能的最大值，對彰工測風塔之風速紀錄資料進行統計分析。首先以中央氣象局發布陸上颱風警報間期作為過濾器對風速紀錄資料進行過濾，取得颱風期間的風速資料，接著移除資料中數值小於 0 以及亂碼(Nan)等無效的資料，而經由上述兩次過濾後之資料便是可以用來進行颱風期間統計分析各項風況參數之颱風風速資料，最後分別依據紊流強度與陣風因子之定義對颱風風速資料進行進一步的統計分析，整個流程如圖 A.1 所示。

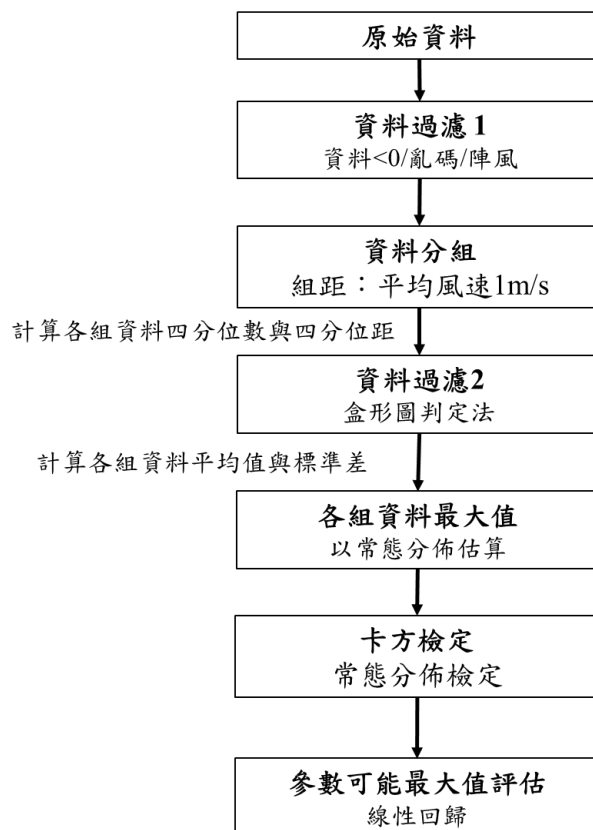


圖 A.1 資料統計流程示意圖

風機設計規範 IEC61400-1 中紊流強度定義為 10 分鐘內風速縱向標準差與該期間內 10 分鐘平均風速之比值，故將 10 分鐘平均風速與相對應之紊流強度繪製如圖 A.2 所示，從中可以觀察到有些資料的紊流強度極大，因此需要對資料進行過濾以排除這些極值過大的資料。本文採用盒形圖判定法(box-whisker plot)對資料中的離群值(outlier)進行過濾，步驟如下所述：

- 步驟 1. 將颱風風速資料依照 10 分鐘平均風速大小進行排序，再以 10 分鐘平均風速 1m/s 為組距對風速資料進行分組；
- 步驟 2. 計算每組資料紊流強度之四分位數與四分位距(第 3 四分位數與第 1 四分位數之差)；
- 步驟 3. 將每組資料中，紊流強度超過第 3 四分位數達 3 倍四分位距與小於第 1 四分位數達 3 倍四分位距之資料移除。

依上述步驟對颱風風速資料中紊流強度進行過濾所得之結果如圖 A.3 所示。將離群值從資料中移除後，在各分組資料紊流強度為常態分佈的假設下，計算每組資料紊流強度的平均值與標準差，並依此計算各組資料在常態機率分佈下不同累積機率下的紊流強度。當累積機率達到 0.9999999 時，各組資料計算之紊流強度才會都稍大於紀錄資料，可作為評估颱風期間可能發生最大紊流強度之依據。

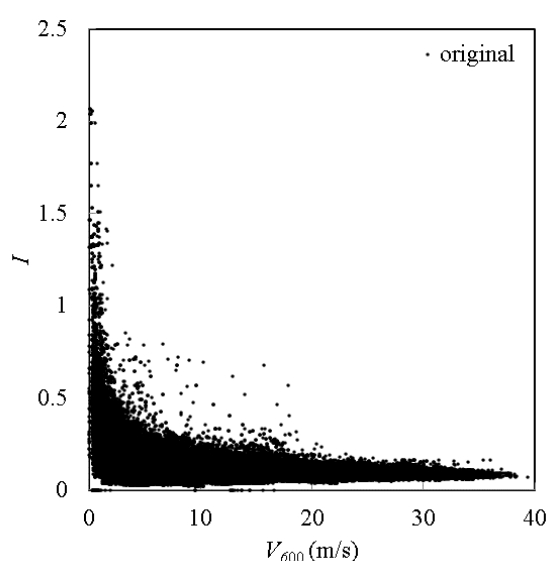


圖 A.2 原始紊流強度分佈示意圖

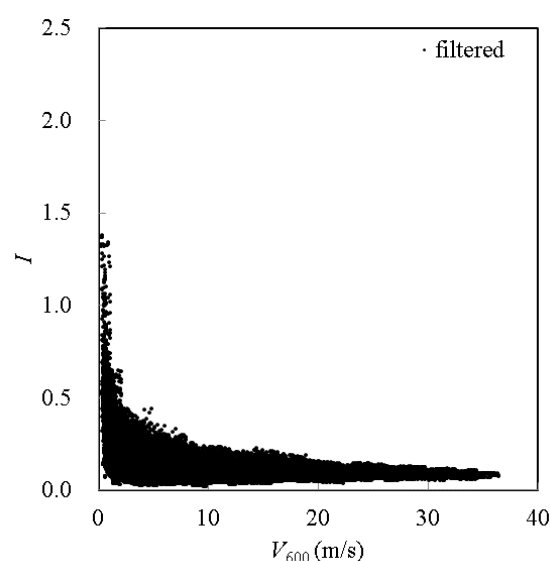


圖 A.3 過濾後紊流強度分佈示意圖



在以此結果評估颱風期間紊流強度前，必須對各組資料紊流強度分佈是否符合常態分佈之假設進行檢定。在統計學上，卡方檢定常用來檢定資料是否符合常態分佈，該方法藉由比較資料的檢定值與判定值以判別資料是否符合常態分佈，當檢定值大於判定值時，則拒絕資料為常態分佈之假設。本文同樣以此進行檢定，過程如下所述：

步驟 1. 依據 Sturges 之建議[49]，將第  $i$  組資料(依風速分組)依下式分為  $k_i$  組(依紊流強度)。

$$k_i = 1 + 3.3 \log_{10} n_i \quad (\text{A.1})$$

步驟 2. 在顯著水準為 0.05 下，計算每組資料之卡方分配臨界值：

$\chi_{0.05}^2(k - m - 1)$ ，由於無法得知所有颱風的資訊，因此母體(所有颱風)的平均值與標準差為未知，故  $m = 2$ 。

步驟 3. 依下式計算第  $i$  組資料的檢定值

$$\chi_{0,i}^2 = \sum_{j=1}^{k_i} \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}} \quad (\text{A.2})$$

其中  $O_{ij}$  為第  $i$  組資料中，第  $j$  組資料觀察到的次數， $E_{ij}$  為第  $i$  組資料中，第  $j$  組資料的期望次數，計算方法如下式所示

$$E_{ij} = n_i P(I_{L,ij} < I < I_{R,ij}) \quad (\text{A.3})$$

其中  $P(I_{L,ij} < I < I_{R,ij})$  為依據第  $i$  組風速之紊流強度平均值與標準差計算在常態分配下第  $j$  組紊流強度可能發生的機率。

步驟 4. 比較第  $i$  組之檢定值是否大於判定值，若比較結果為肯定，則拒絕該組資料之紊流強度為常態分佈之假設。

依據上述之步驟計算颱風風速資料之紊流強度檢定值與判定值結果如表 A.1 所示，10 分鐘平均風速為 0~1m/s 與 36~37m/s 此兩組資料的紊流強度無法以常態分佈方式描述，故將此兩組資料移除，最後對此進行線性迴歸分析，評估颱風期間可能發生最大紊流強度，結果如下式所示：

$$I(\bar{V}_{600}) = 1.0231 \bar{V}_{600}^{-0.5715} \quad (\text{A.4})$$



表 A.1 紊流強度常態分佈卡方檢定結果

No.	風速 (m/s)	檢定值	判定值	常態分佈	No.	風速 (m/s)	檢定值	判定值	常態分佈
1	0~1	1973.5	1702.4	否定	20	19~20	751.2	2382.0	接受
2	1~2	2665.6	5091.4	接受	21	20~21	1183.7	2698.3	接受
3	2~3	4440.0	6539.5	接受	22	21~22	719.7	2197.5	接受
4	3~4	2869.6	7896.1	接受	23	22~23	318.6	2129.8	接受
5	4~5	2832.8	6711.0	接受	24	23~24	454.1	2151.3	接受
6	5~6	818.5	4824.0	接受	25	24~25	1838.9	2010.7	接受
7	6~7	352.2	3128.5	接受	26	25~26	801.8	1659.2	接受
8	7~8	512.1	2739.2	接受	27	26~27	120.2	1243.4	接受
9	8~9	487.2	2730.0	接受	28	27~28	289.9	1372.6	接受
10	9~10	345.9	2668.6	接受	29	28~29	1000.8	1170.0	接受
11	10~11	414.3	2399.4	接受	30	29~30	363.7	883.6	接受
12	11~12	250.4	2284.6	接受	31	30~31	97.7	451.9	接受
13	12~13	214.3	2281.5	接受	32	31~32	98.1	500.5	接受
14	13~14	190.4	2712.6	接受	33	32~33	82.6	460.3	接受
15	14~15	413.6	3282.7	接受	34	33~34	17.9	243.7	接受
16	15~16	657.6	3619.4	接受	35	34~35	18.0	107.5	接受
17	16~17	2188.5	3402.1	接受	36	35~36	45.3	48.6	接受
18	17~18	979.0	3073.4	接受	37	36~37	29.2	27.6	否定
19	18~19	1048.1	2617.4	接受					

在陣風因子方面，由於風速資料未直接提供陣風因子此參數，必須依據定義計算，即 3 秒鐘平均最大風速與 1 分鐘平均風速之比值(如圖 A.4 所示)，此外，還需要對資料中 10 分鐘平均風速與 3 秒鐘平均最大風速間差異不足 5m/s 的資料加以排除以符合中央氣象局對陣風之定義，即當 10 分鐘平均風速與該時間內的最大瞬間風速之間差異大於 5m/s 以上時表示有陣風發生，結果如圖 A.5 所示。經由上述操作即可得到颱風期間之陣風因子資料，隨後以評估颱風期間紊流強度可能最大值之方法對陣風因子之資料進行統計(包含卡方檢定，如表 A.2 所示)，評估颱風期間可能之最大陣風因子，結果如下式所示：

$$GF = 1 + 8.4177\bar{V}_{60}^{-0.9702} \quad (A.5)$$

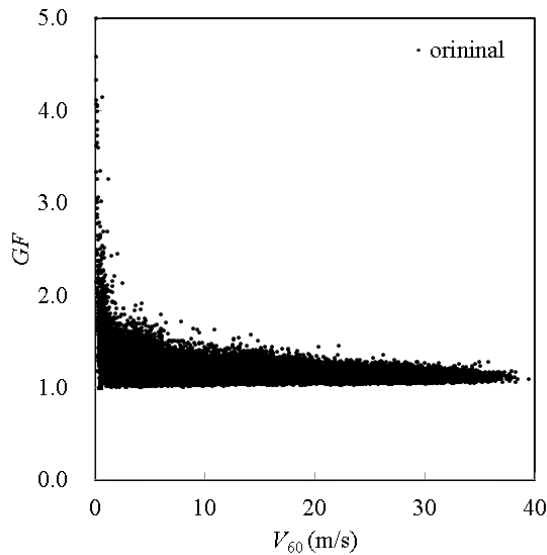


圖 A.4 陣風因子分佈示意圖

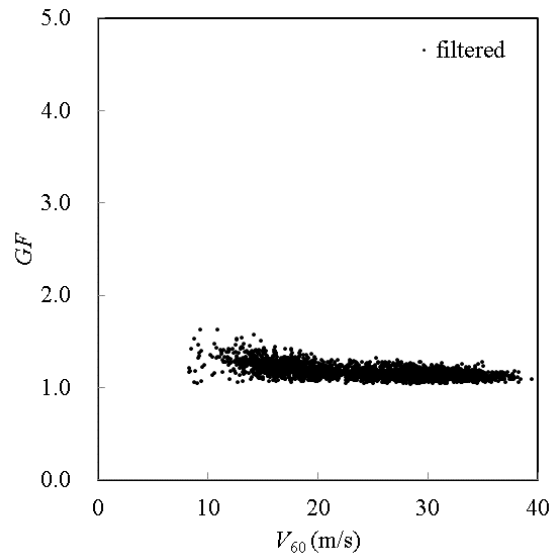


圖 A.5 過濾後陣風因子分佈示意圖



表 A.2 陣風因子常態分佈卡方檢定結果(\*表示資料數不足 3 筆)

No.	風速 (m/s)	檢定值	判定值	常態分佈	No.	風速 (m/s)	檢定值	判定值	常態分佈
1	4~5	N/A	N/A	否定*	19	22~23	2.1	96.2	接受
2	5~6	N/A	N/A	否定*	20	23~24	3.9	117.6	接受
3	6~7	N/A	N/A	否定*	21	24~25	8.4	176.3	接受
4	7~8	5.1	3.8	否定	22	25~26	5.3	168.6	接受
5	8~9	2.8	11.1	接受	23	26~27	43.6	203.6	接受
6	9~10	1.0	12.6	接受	24	27~28	12.4	221.0	接受
7	10~11	1.4	12.6	接受	25	28~29	11.7	287.9	接受
8	11~12	4.2	31.4	接受	26	29~30	21.7	261.0	接受
9	12~13	3.5	46.2	接受	27	30~31	10.9	266.4	接受
10	13~14	1.5	80.2	接受	28	31~32	17.0	200.3	接受
11	14~15	11.2	113.1	接受	29	32~33	3.8	174.1	接受
12	15~16	6.9	141.0	接受	30	33~34	8.5	170.8	接受
13	16~17	7.1	167.5	接受	31	34~35	16.7	127.7	接受
14	17~18	14.5	173.0	接受	32	35~36	6.0	65.2	接受
15	18~19	13.4	171.9	接受	33	36~37	10.3	45.0	接受
16	19~20	3.1	135.5	接受	34	37~38	3.1	22.4	接受
17	20~21	6.5	117.6	接受	35	38~39	1.9	3.8	接受
18	21~22	4.7	116.5	接受	36	39~40	N/A	N/A	否定*



## 附錄 B 風機葉片攻角分佈

多數大型風機為了避免葉片因為變形撞擊到塔柱，多會設計葉片轉子轉軸與地面之間有軸傾角，本文採用之 NREL 5MW 風機同樣設計有  $5^\circ$  的軸傾角。由於軸傾角的關係，使得葉片轉子的旋轉平面與風速之間不再是  $90^\circ$ ，故而使得風機葉片與風速之間產生了額外的攻角變化，而攻角為影響葉片氣動力性能的重要參數，因此依下述方法進行計算，以了解目標風機因為軸傾角所造成之攻角變化。

圖 B.1 為風速與風機葉片關係示意圖，由於軸傾角之關係，使得風速在葉片轉子旋轉平面上之分量為  $V \sin \theta_t$  以及垂直該平面之速度分量  $V \cos \theta_t$ 。圖 B.2 為從葉片尖端往輪轂方向看 A-A 截面時風速與風機葉片關係示意圖，當葉片位置在方位角  $\theta_a$  時，風速於旋轉平面上之分量可分為與垂直於葉片之分量  $V \sin \theta_t \sin \theta_a$  與平行葉片徑向之分量  $V \sin \theta_t \cos \theta_a$ ，而藉由垂直於葉片之速度分量與垂直與旋轉平面之速度分量，即可得到風機因為軸傾角而造成葉片攻角之變化(如式 B.1 所示)，結果如圖 B.3 所示，在方位角在  $0^\circ \sim 180^\circ$  時，造成攻角減少，而當方位角  $180^\circ \sim 360^\circ$  時，造成攻角增加。

$$\Delta\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \theta_t \sin \theta_a}{\cos \theta_t} \right) \quad (\text{B.1})$$

將因為軸傾角而造成的攻角變化加上 NREL 5MW 風機的葉片在不同截面所設計的安裝角度後，即可得到葉片在不同方位角之攻角關係，如圖 B.4 所示，其中虛線為 NREL 報告中所提供翼型升力為 0 時之攻角。

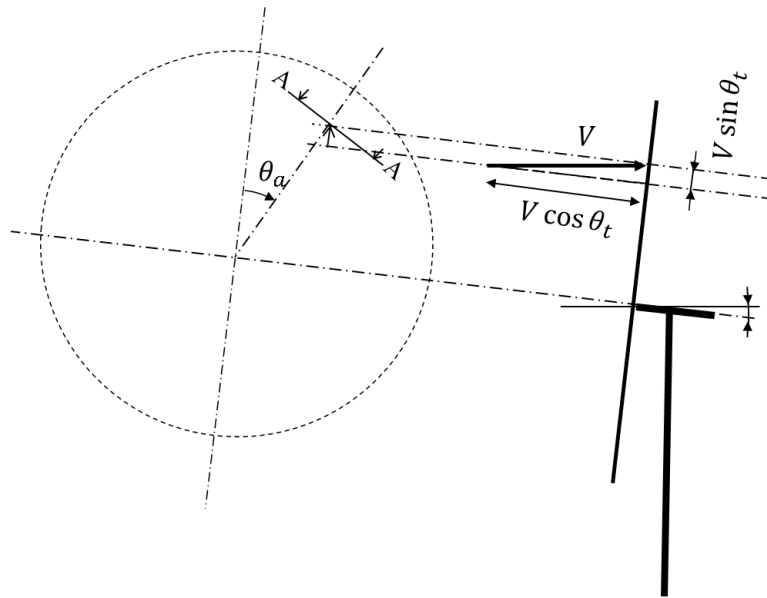


圖 B.1 風速與風機葉片關係示意圖

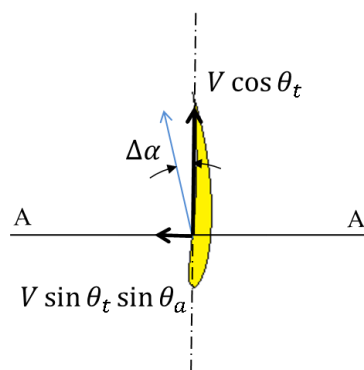
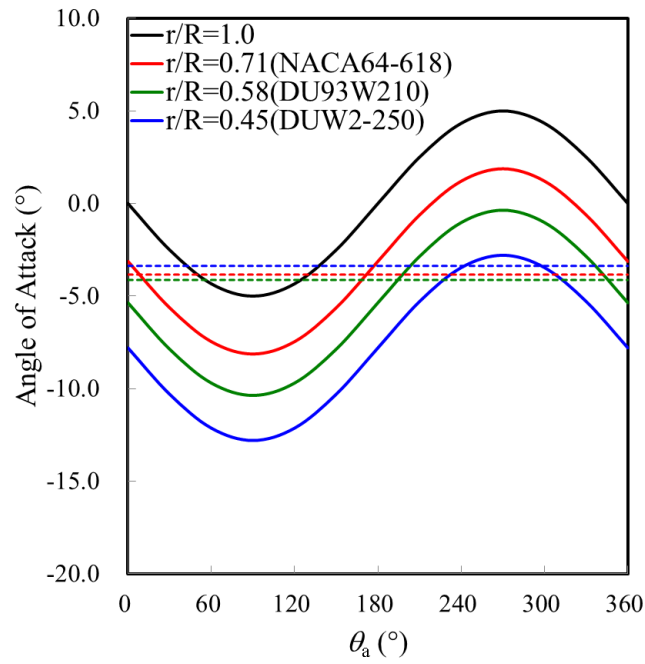
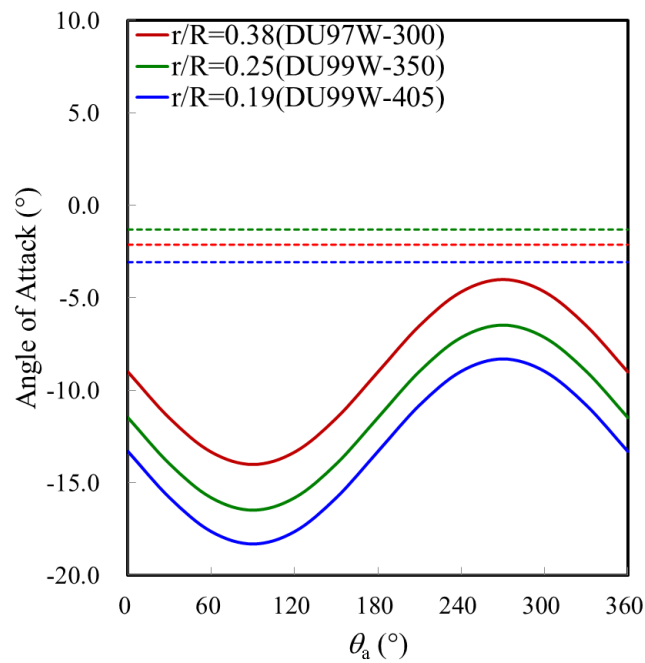


圖 B.2 A-A 截面風速與風機葉片關係示意圖



(a)  $r/R=0.1, 0.71, 0.58$  與  $0.45$  處葉片攻角與方位角關係示意圖



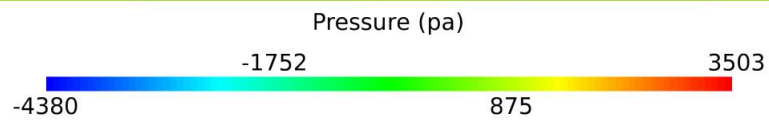
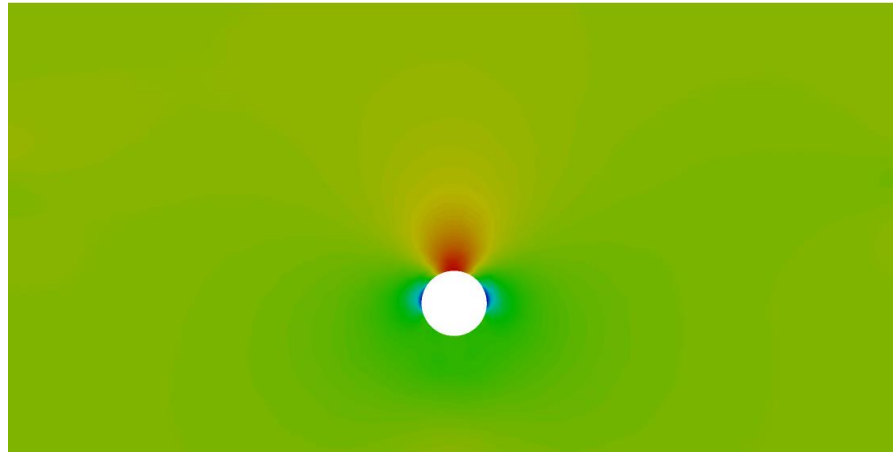
(b)  $r/R=0.38, 0.25$  與  $0.19$  處葉片攻角與方位角關係示意圖

圖 B.4 葉片攻角與方位角關係示意圖

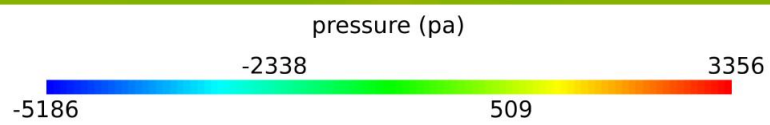
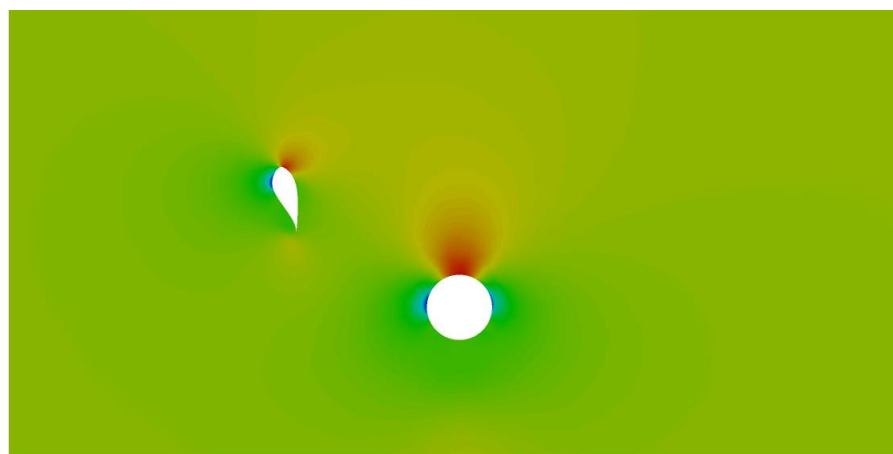


## 附錄 C 風機流場分佈圖

模擬案例 A(極端風速)

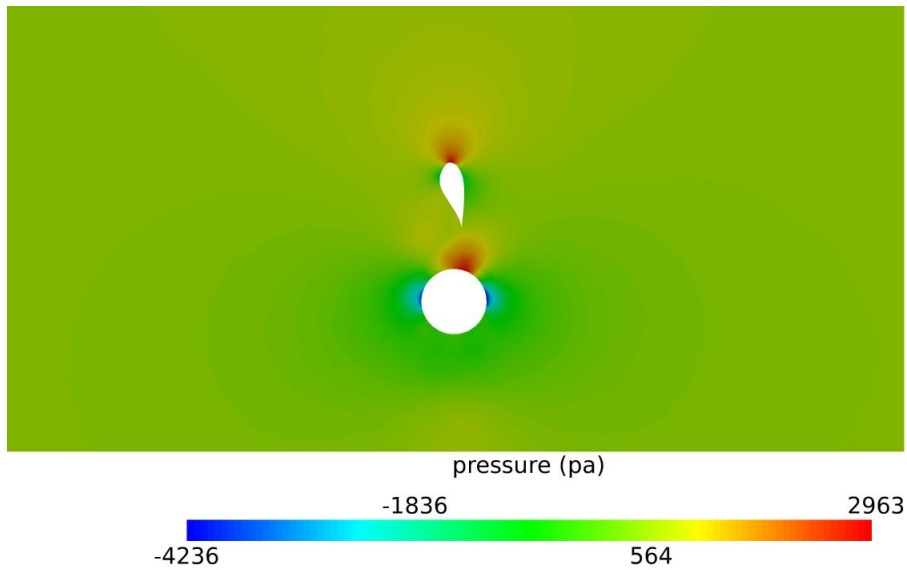


(a)  $\theta_a = 0^\circ$

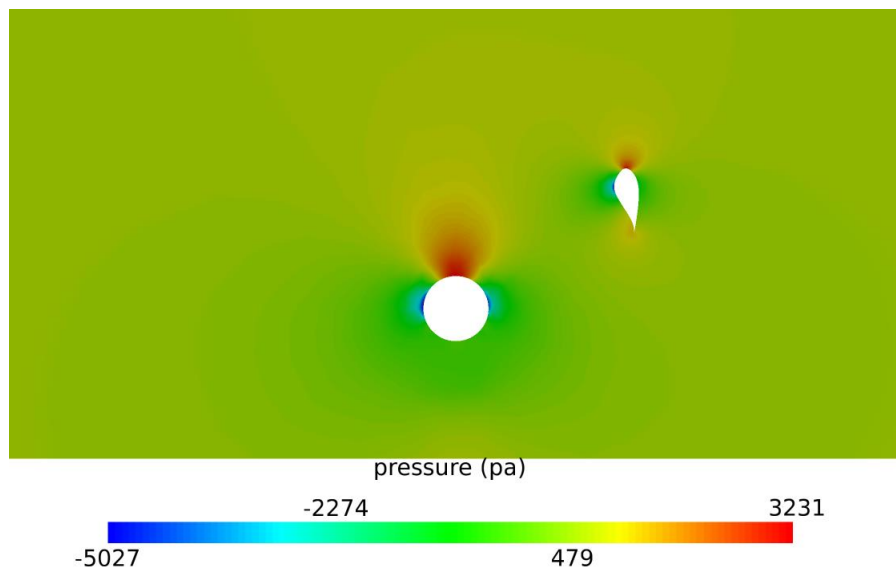


(b)  $\theta_a = 30^\circ$





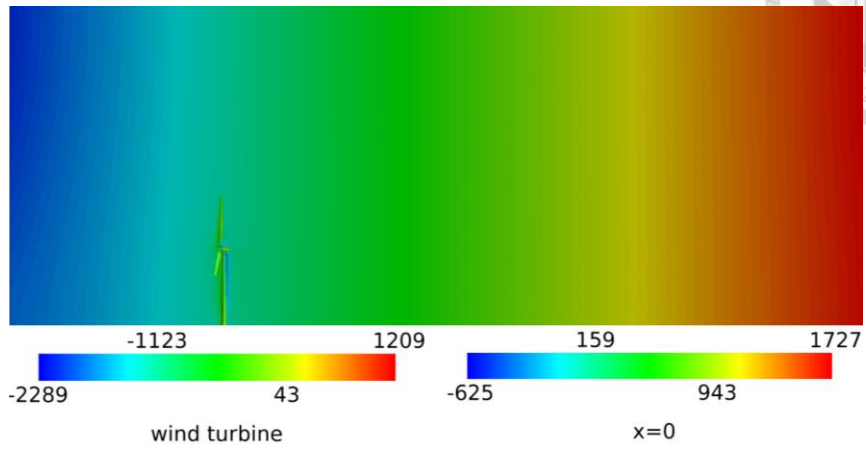
(c)  $\theta_a = 60^\circ$



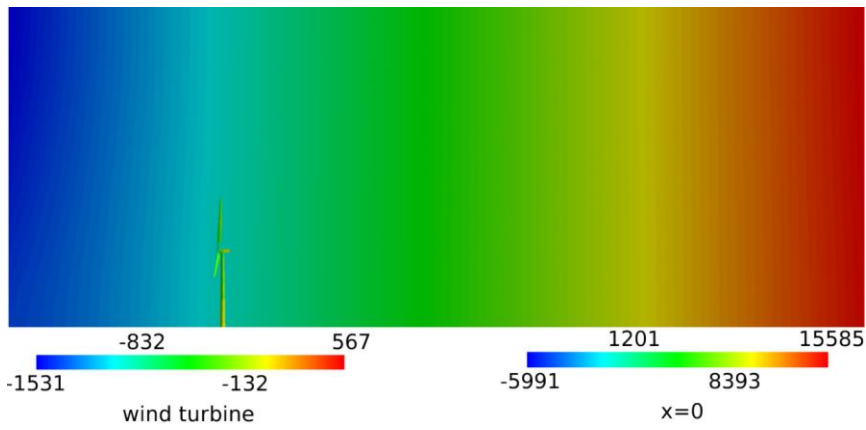
(d)  $\theta_a = 90^\circ$

圖 C.1 極端風速下風機 $z = 70\text{m}$ 處壓力分佈示意圖

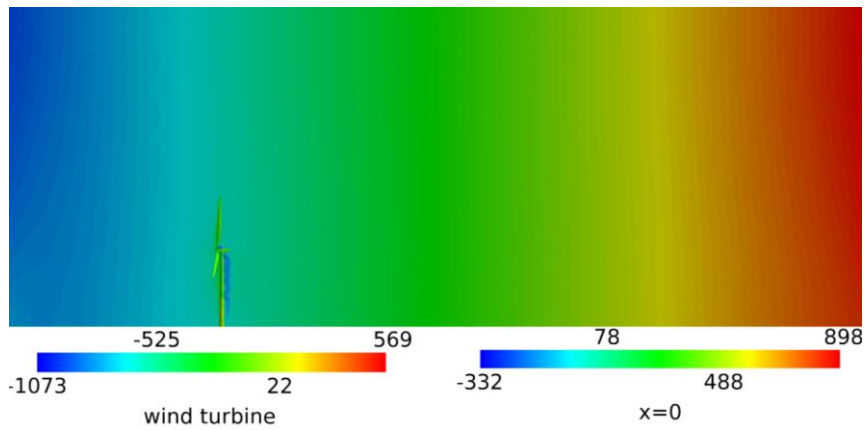
# 模擬案例 B(陣風)



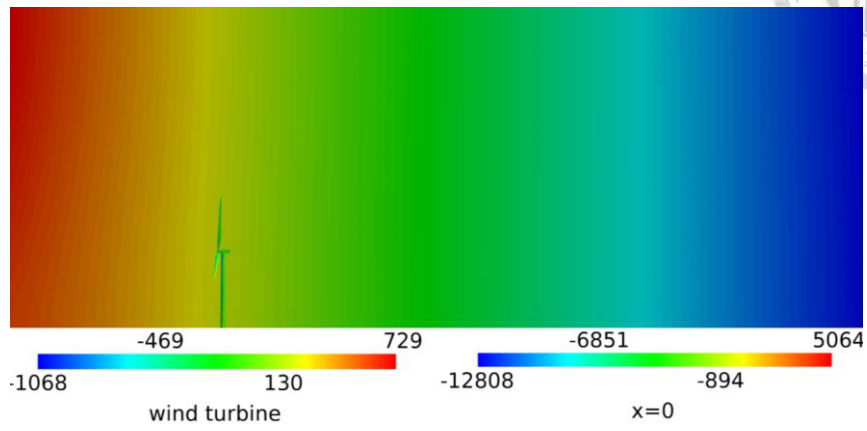
(a)  $t = 0.2s$



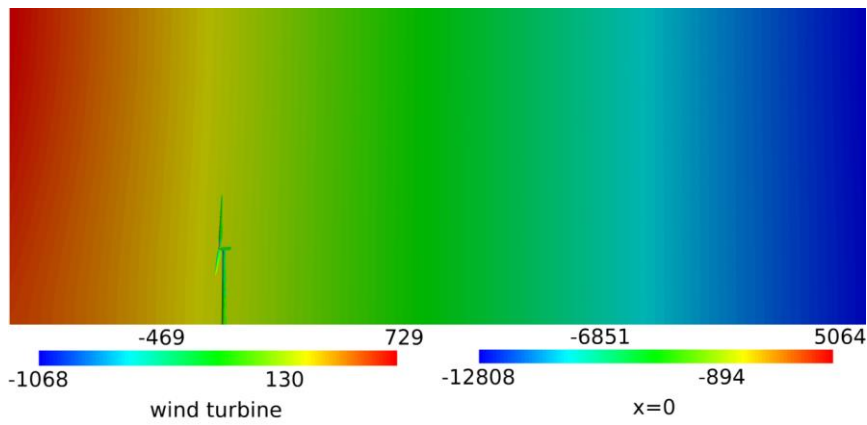
(b)  $t = 1.0s$



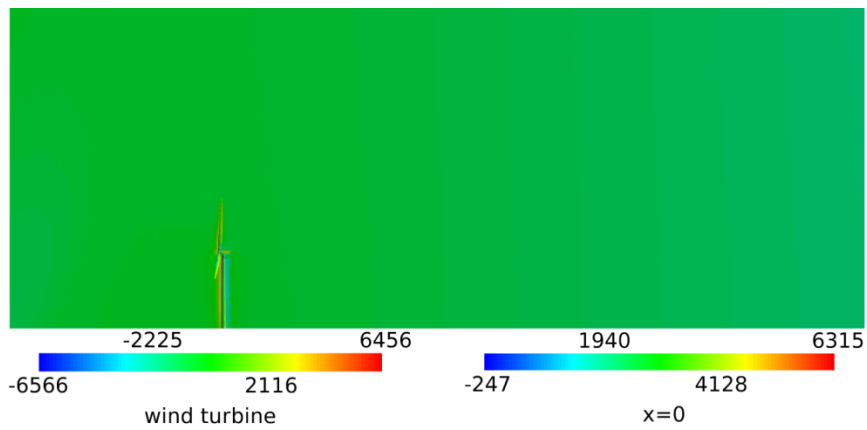
(c)  $t = 1.4s$



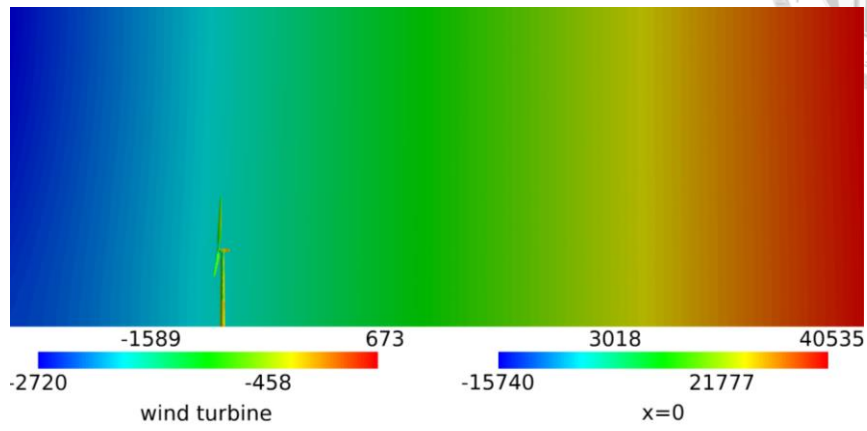
(d)  $t = 1.6s$



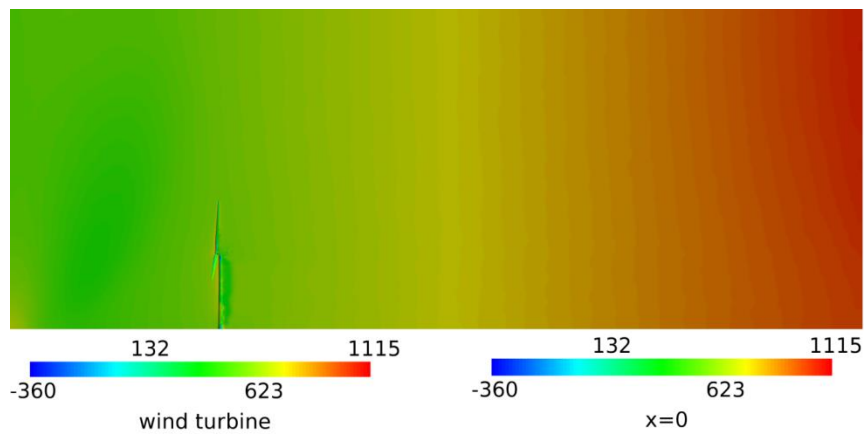
(e)  $t = 2.0s$



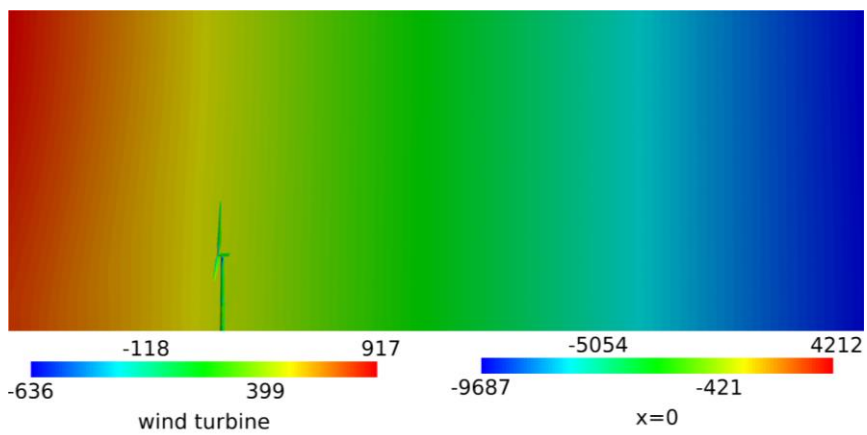
(f)  $t = 3.0s$



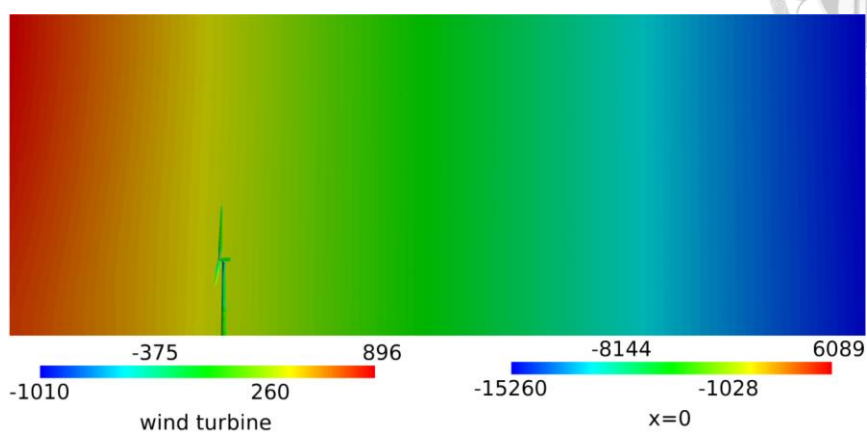
(g)  $t = 4.0\text{s}$



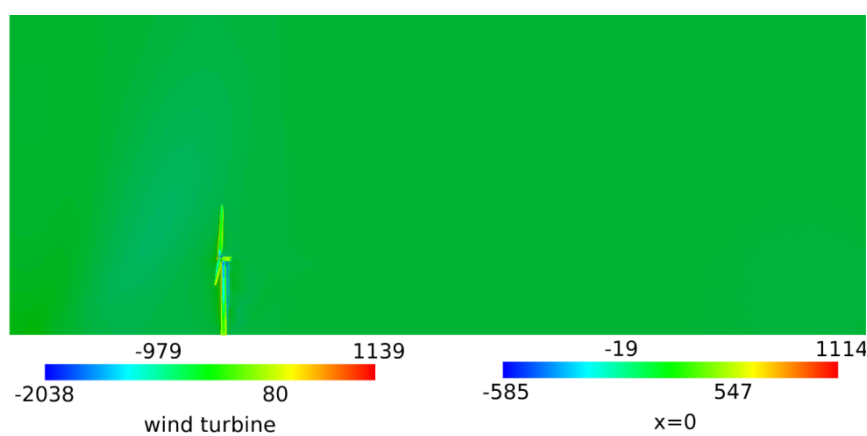
(h)  $t = 4.6\text{s}$



(i)  $t = 4.8\text{s}$



(j)  $t = 5.0s$



(k)  $t = 6.0s$

圖 C.2 陣風條件下風機表面與  $y-z$  平面在  $x = 0m$  處壓力分佈示意圖(單位：Pa)