

出國報告（出國類別：實習）

赴加拿大卡爾加利大學實習出國報告

服務機關：核能研究所

姓名職稱：蘇煒年 副工程師

派赴國家：加拿大

出國期間：103年12月5日~103年12月20日

報告日期：103年12月20日

摘要

位於加拿大艾伯塔省之卡爾加利大學(University of Calgary)，是加拿大排名前七的研究性大學之一。本次實習研究於 University of Calgary 機械及製造系 (Mechanical and Manufacturing) 的 Wind Tunnel Research Cluster 執行，由 Enmax/Schulich Professor David Wood 從旁指導。Prof. Wood 現為 University of Calgary 再生能源工程的主任教授，專長於小型風力機研葉片最佳化設計、風場分析、負載計算、發電機與控制系統開發等。本次國外公差在 University of Calgary 期間，針對小型風力機風洞實驗，以及屋頂紊流特性模擬等進行研究。藉由實際參與實驗設置，瞭解在實驗設計上需有完善之計畫，各種感應器需事先校正，此外，由實驗結果可明顯看出，小型風力機慣性非常小，起動瞬間加速相當快，因此低轉速區間可獲得之有效量測點不多；而在屋頂紊流特性模擬上，Prof. Wood 分享研究成果，並且建議 CFD 模擬上可能簡化之設定，實習期間則以 2 維流場分析進行測試，由結果可看出，建築物屋頂氣流除了水平方向之外，垂直方向之流速亦比平地高出許多，而流速變化除了受到建築物高度影響之外，同時也受到鄰近之建築物所影響，依據風機距離屋緣之距離，塔架高度必須適當調整以獲取較佳之風資源。本次實習研究之成果，對於 104 年將進行之垂直軸風力機縮尺模型風洞實驗，以及 IEA Task 27 垂直軸風力機屋頂紊流影響研究等有相當之助益。

目 次

摘 要.....	I
一、目的.....	1
二、過程.....	2
三、心得.....	20
四、建議事項.....	21

附 圖 目 錄

圖 1、UNIVERSITY OF CALGARY	2
圖 2、開放式小型風洞.....	3
圖 3、密閉式小型風洞.....	3
圖 4、WATER TUNNEL.....	4
圖 5、開放式小型風洞示意圖.....	4
圖 6、開放式風洞風扇 50 MHz 風速分佈圖.....	5
圖 7、多葉片測試用小型風力機示意圖.....	6
圖 8、葉片外形示意圖.....	6
圖 9、MPB 示意圖.....	7
圖 10、MPB 內部構造示意圖.....	7
圖 11、MPB 校正曲線.....	8
圖 12、ATI FORCE & MOMENT TRANSDUCER	9
圖 13、ATI FORCE & MOMENT TRANSDUCER 介面架構示意圖.....	10
圖 14、小型風力機風洞測試.....	10
圖 15、六葉片小型風力機於風速 7 M/s 測試結果.....	11
圖 16、2 維建築物 CFD 網格	12
圖 17、2 維建築物流速分佈圖.....	13
圖 18、入口與屋頂前後緣流速隨高度之分佈.....	13
圖 19、單一 4 葉片風輪網格示意圖.....	14
圖 20、單一 4 葉片風輪 10 M/s 風速功率輸出曲線.....	14
圖 21、單一 4 葉片風輪結合建物網格示意圖.....	15
圖 22、單一 4 葉片風輪結合建物在 10 M/s 風速功率輸出曲線.....	16
圖 23、單一 4 葉片風輪結合建物於 75 RPM 條件下流速分佈圖.....	16
圖 24、簡化之單一 4 葉片風輪結合建物網格示意圖.....	17
圖 25、屋頂前緣 TURBULENT KINETIC ENERGY 隨高度之分佈.....	18
圖 26、屋頂前緣 TURBULENT DISSIPATION RATE 隨高度之分佈.....	18
圖 27、簡化之單一 4 葉片風輪結合建物功率輸出曲線.....	19

圖 28、簡化之單一 4 葉片風輪結合建物於 75 RPM 條件下流速分佈圖.....	19
圖 29、修正後之風洞縮尺模型示意圖	22

一、目的

小型垂直軸風力機常見結合建築物結構，或直接裝設於建築物屋頂，具備市場獨特應用性，台灣廠商如新高能源科技股份有限公司之小型垂直軸風力機產品，現今不論在市場佔有率，亦或是技術上皆領先國際。核能研究所(本所)自 2009 年投入小型垂直軸風力機之研發，2010 年完成 400 W 垂直軸風力機之開發，2011 年完成小型垂直軸風力機簡易負載計算模式之開發，並且積極參與兩岸垂直軸風力機共通標準開發，以及執行 IEA Wind Task 27 相關之工作，分別於 2012 年協助完成台灣 CNS 小型垂直軸風力機設計標準，以及 2013 年協助新高能源科技股份有限公司 DS-3000 產品通過日本驗證。

IEA Wind Task 27 是國際能源總署(IEA)於執行風能系統研究發展合作協定下所形成的一個國際合作工作小組，目前整合各國團隊進行技術討論與研究的重要方向係著重在小風機微觀選址、高紊流模型與參數、高紊流風機效能及其分級、高紊流風機性能試驗方法等。城市紊流為目前小型風力機研發重點之一，但各研究單位目前僅止於靜態建築物流場分析與量測，本所可將風力機氣動力動態模型結合建築物流場，進行城市紊流對於小型風力機性能與安全性之探討，進而提升小型風力機於城市應用之安全性；此外，自 2014 年起，本所結合新高能源科技股份有限公司先期參與，共同開發 5 kW 垂直軸商用風機，預定於今年(2015 年)進行縮尺模型風洞實驗，因此，有必要針對 CFD 模擬技術提升，以及風洞實驗設置進行先期作業。

位於加拿大艾伯塔省之卡爾加利大學(University of Calgary)(圖 1)，是加拿大排名前七的研究性大學之一，致力於法律、家庭、能源、環境、工程、軟件、人文科學等領域的專業研究，並有著卓著的成果。本次實習研究於 University of Calgary 機械及製造系(Mechanical and Manufacturing)的 Wind Tunnel Research Cluster 執行，由 Enmax/Schulich Professor David Wood 從旁指導。Prof. Wood 現為 University of Calgary 再生能源工程的主任教授，專長於小型風力機研葉片最佳化設計、風場分析、負載計算、發電機與控制系統開發等。

本次國外公差在 University of Calgary 期間，針對小型風力機風洞實驗，以及屋頂紊流特性模擬等進行研究。藉由實際參與實驗設置，瞭解各種風洞實驗感應器之特性與使用方式，以及小型風力機風洞實驗應注意之事項；而在屋頂紊流特性模擬上，Prof. Wood 分享研究成果，並且建議 CFD 模擬上可能簡化之設定，實習期間則以 2 維流場分析進行測試，增進流場模擬分析之技巧。本次實習研究之成果，對於 104 年將進行之垂直軸

風力機縮尺模型風洞實驗，以及 IEA Task 27 垂直軸風力機屋頂紊流影響研究等有相當之助益。



圖 1、University of Calgary

二、過程

本次實習研究選擇位於加拿大艾伯塔省的 University of Calgary 進行研究。此行於 103 年 12 月 5 日出發，並於 103 年 12 月 20 日返國，為期共 16 天。研究其間由該校機械及製造系之 Enmax/Schulich Professor David Wood 從旁指導，並且由 Prof. Wood 安排博士後研究生 Dr. Mazharul Islam 與 Dr. Michael Sherry 協助。Dr. Islam 於一年多前加入 Prof. Wood 之實驗室，專長於垂直軸風力機氣動力分析，而 Dr. Sherry 則於 2014 年加入 Prof. Wood 之實驗室，專長於風洞實驗相關之研究，因此，在實習期間除了由 Prof. Wood 分享過去實驗室之研究成果外，很多垂直軸風機模擬及風洞實驗相關之問題更有 Dr. Islam 與 Dr. Sherry 熱心解答。

(一) 小型風力機風洞實驗

本次實習期間之風洞實驗於機械及製造系的 Wind Tunnel Research Cluster 進行，該實驗室共計有一個開放式風洞、一個密閉式風洞、以及一個 Water Tunnel。風洞實驗設置由 Dr. Sherry 協助，藉由開放式風洞進行小型風力機葉片實度影響試驗，由於仍有其他研究生需使用風洞進行論文研究，因此僅能進行六葉片設定之部分測試。



圖 2、開放式小型風洞



圖 3、密閉式小型風洞

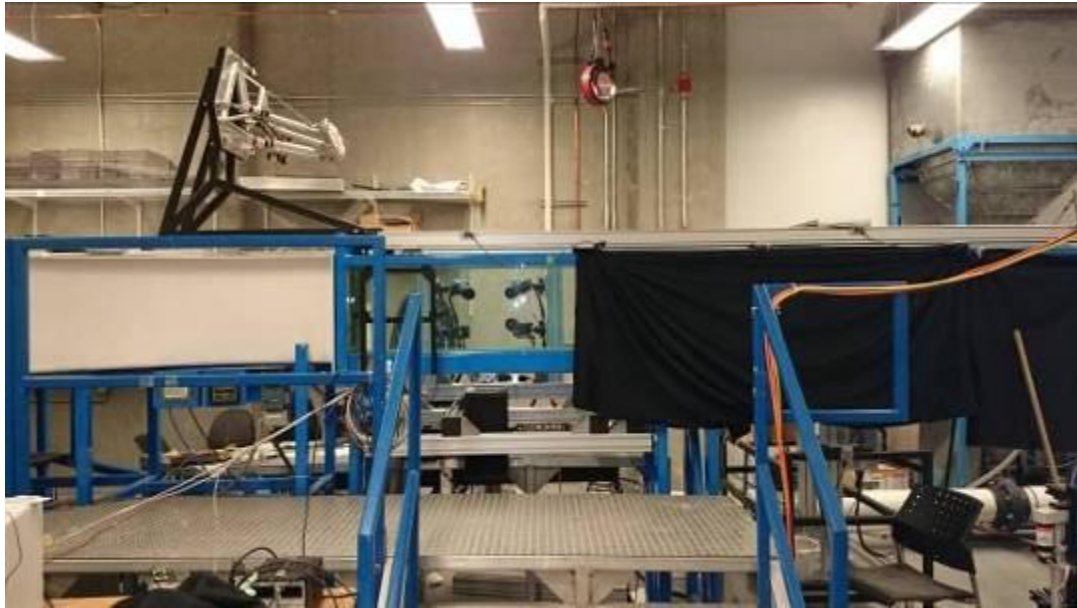


圖 4、Water Tunnel

開放式風洞由風扇、擴散區、穩流區、以及加速區所組成如圖 5所示，不含風扇部分總長 7.6 m，開口測試有效面積約 1 m^2 ，最高風速可達 20.5 m/s 。利用皮托管流量計(Pitot tube)，架設於平面點陣移動機構，可進行測試區風速校正，以及風洞紊流特性量測，由於時間關係，Dr. Sherry 僅解釋如何進行校正，並且提供最近一次校正之風速分佈圖(圖 6)，該開放式風洞紊流強度約為 0.8%。

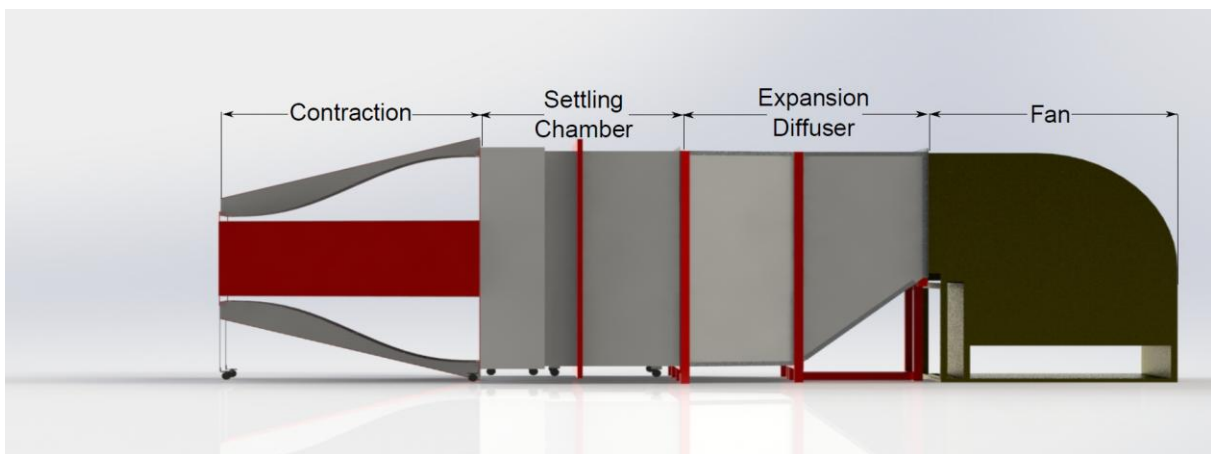


圖 5、開放式小型風洞示意圖

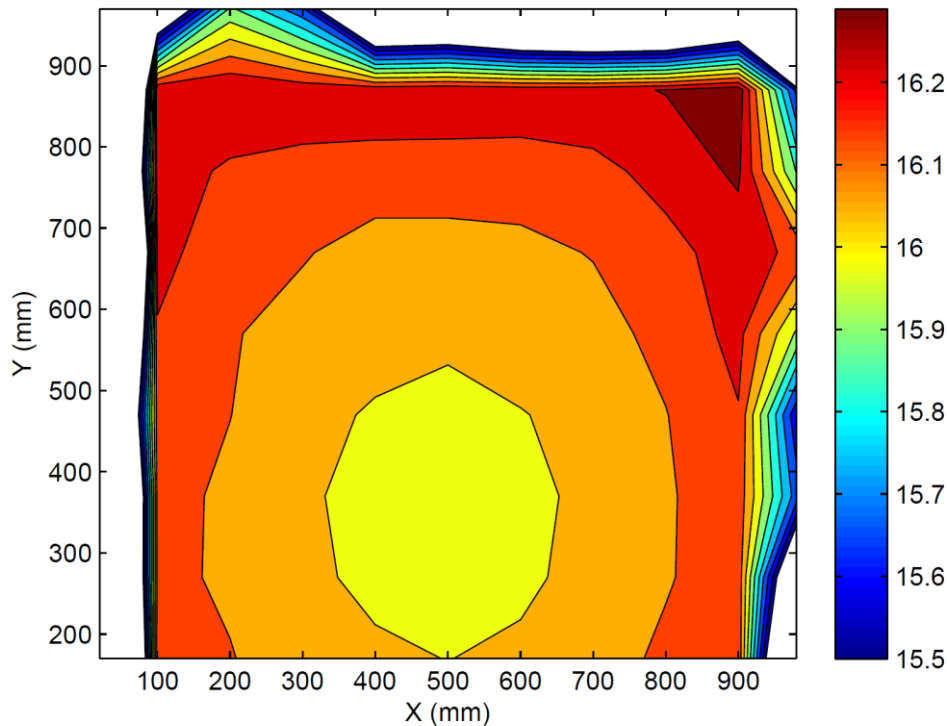


圖 6、開放式風洞風扇 50 MHz 風速分佈圖

測試用小型風力機如圖 7 所示，最多可裝置 24 片葉片，設計上採為碳纖簡易圓弧型(圖 8)，有別於傳統上結合發電機整機測試，Prof. Wood 採用磁粉式剎車器 (Magnetic Particle Brake, MPB) 取代發電機如圖 9 所示。MPB 利用磁粉填加於內部溝槽如圖 10 所示，當無電流通過時，磁粉於溝槽中自由流動，一旦施加電流，則產生磁場鎖住轉動主軸而產生反扭力。MPB 在價格上不僅低於傳統式發電機，更具備量測上之優勢，藉由輸入電流之調整(圖 11)，可精確設定施加之扭力值，此數值即為葉片氣動扭力，若是採用發電機，則必需搭配相關之負載設備，經由量測發電機輸出功率與轉速，換算成發電機扭力，然而此數值並非葉片氣動扭力，還必須考慮機械能轉換為電能之損失，再推估葉片氣動扭力。由於風洞實驗之目的為風力機氣動力特性之探討與驗證，並非為了發電目的，Prof. Wood 強烈建議使用 MPB 取代發電機進行風洞實驗。

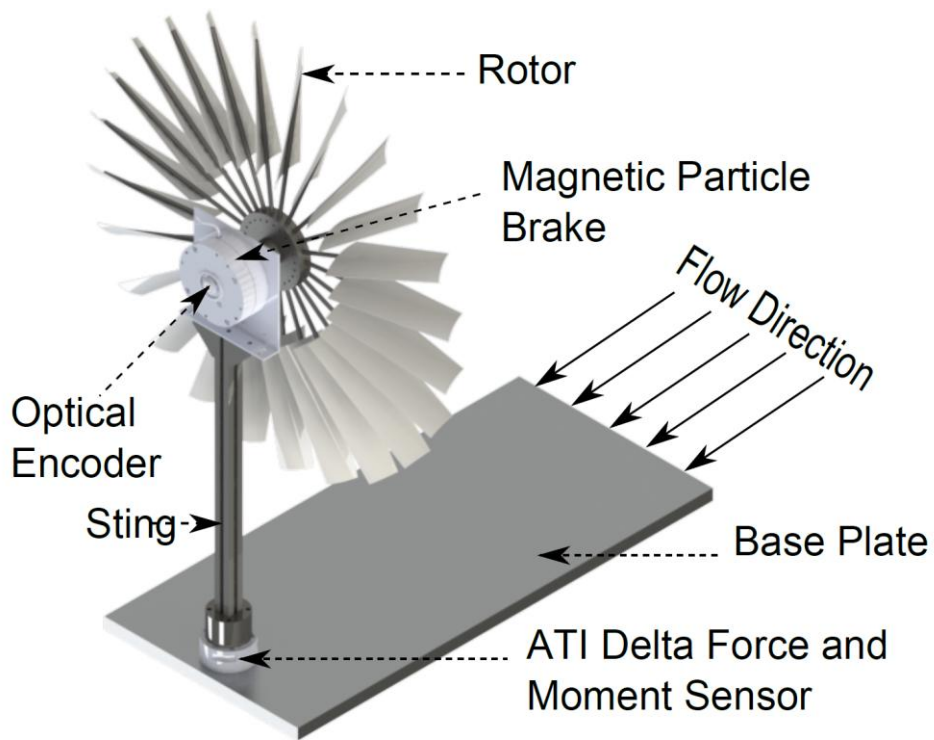


圖 7、多葉片測試用小型風力機示意圖

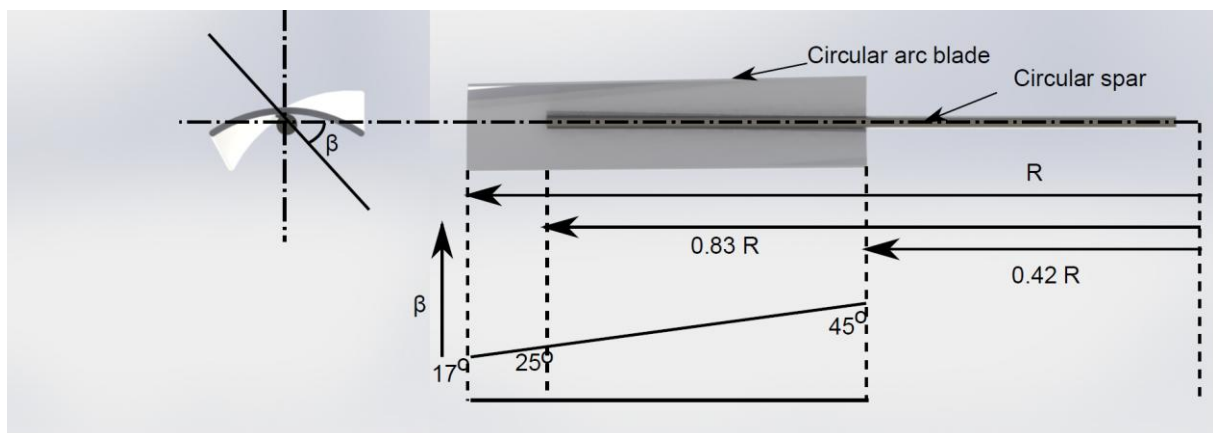


圖 8、葉片外形示意圖



圖 9、MPB 示意圖

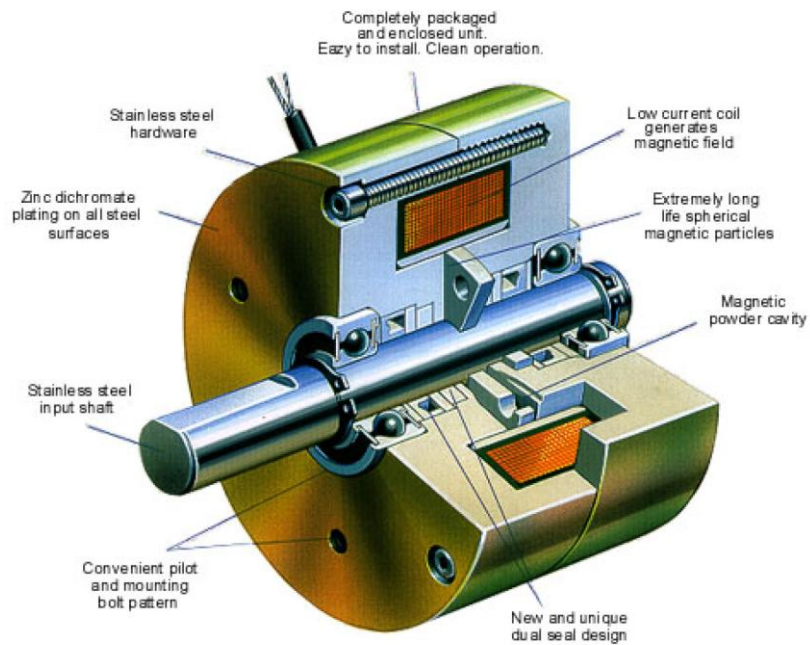


圖 10、MPB 內部構造示意圖

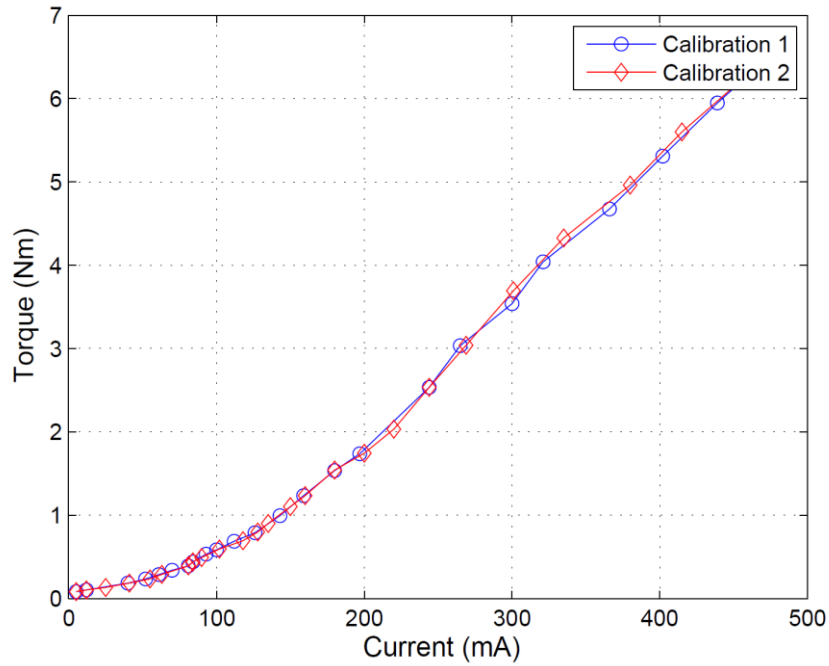


圖 11、MPB 校正曲線

此外，除了 MPB 之外，Prof. Wood 亦應用 ATI Force & Moment Transducer 如圖 12 所示，可同時量測 x-y-z 三方向之力量，以及 x-y-z 三方向之力矩，將能精確獲得風力機軸向推力(Thrust)、側向推力(Side force)、以及 Yawing & Bending moment 等資訊，雖然價格較高，但數值精準，且具備自我校正功能，反之，若是自行黏貼應變規於相關位置，不僅需事先進行力量與應變曲線之校正，風洞實驗時亦容易受到雜訊干擾，再加上一片單軸向應變規僅能測量單一方向應變值，多向負載則需採用多組應變規，此時多組訊號線將增加風洞實驗設置上之難度。



圖 12、ATI Force & Moment Transducer

測試數據擷取採用美商國家儀器之設備，其中轉速編碼器應用 NI-DAQ USB-6162 進行訊號擷取，轉子 1 圈計有 360 個突波，位置解析度為 1 度，取樣頻率設定為 10 Hz，因此，轉速有效讀數約為 0.5 RPM；風速訊號則以 NI myDAQ 擷取，MPB 則以電源供應器提供電流，藉由校正表換算扭力值，而 ATI Force & Moment Transducer 訊號擷取則使用附屬之控制卡如圖 13 所示。圖 14 顯示風洞實驗情形，由於風洞使用時間有限，僅完成風速 7 m/s 幾個轉速點測試，Dr. Sherry 提供前次研究生完整測試之數據供參考(圖 15)，並且藉由測試結果指出小型風力機慣性非常小，起動瞬間加速相當快，因此低轉速區間可獲得之有效量測點不多(TSR 0.5~1 區間)，中高轉速區域則可獲得較多之有效量測數據(TSR > 1)，此外，由於測試方式採用開放式風洞，不需要將風速依據阻塞率進行修正(Blockage Ratio)，若是在密閉式風洞測試，由於風機兩側屏蔽效應，會造成流速加快，功率與負載測試值會增加，因此必須將風速加以修正，亦或是測試值加以修正，如此才能與實際運轉情形比對，以上兩點為相當寶貴之經驗回饋。

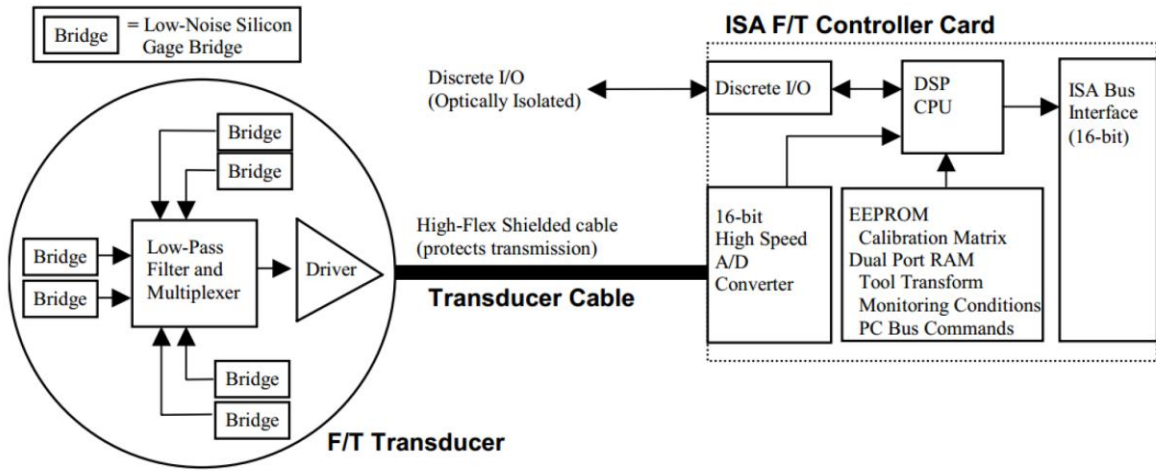


圖 13、ATI Force & Moment Transducer 介面架構示意圖



圖 14、小型風力機風洞測試

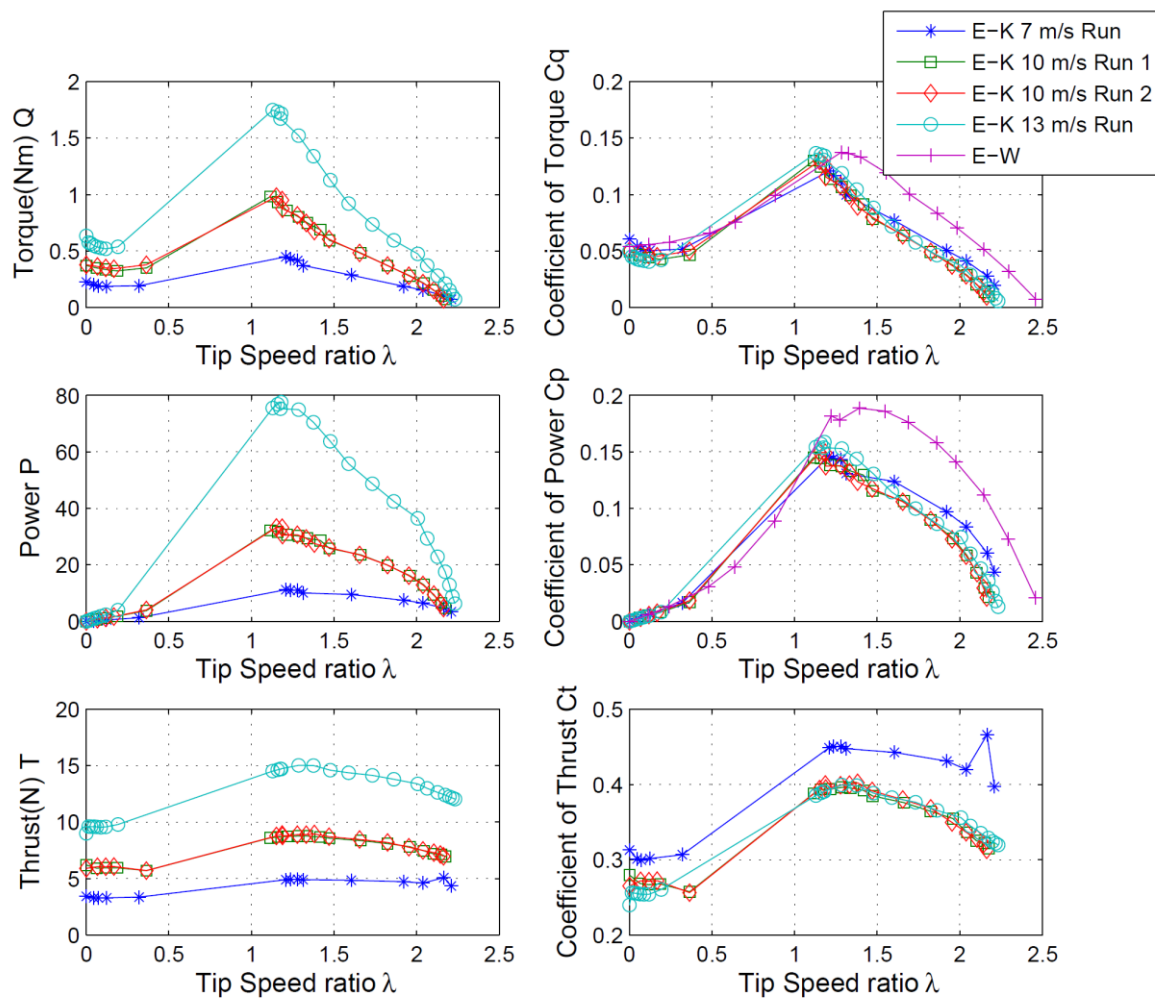


圖 15、六葉片小型風力機於風速 7 m/s 測試結果

(二) 屋頂紊流特性模擬

IEA Wind Task 27 目前積極整合各國團隊進行小風機微觀選址、高紊流模型與參數、高紊流風機效能及其分級、高紊流風機性能試驗方法等，因此，城市紊流為目前小型風力機研發重點之一，但各研究單位目前僅止於靜態建築物流場分析與量測，而本所自 2012 年起已陸續建置完成 H-Type、Darrieus 型式、Savonius 型式、以及 Darrieus & Savonius Hybrid 型式之 3 維 CFD 分析模型，並且藉由合作廠商提供之測試數據，以及各種參考文獻完成初步驗證，因此，若能將風力機氣動力動態模型結合建築物流場，將能深入探討城市紊流對於小型風力機性能與安全性影響評估，提升小型風力機

於城市應用之安全性。然而單一風機 CFD 流場約需 600 萬以上之網格，若再加上建築物，不僅流場考慮範圍需加大，建築物周邊亦需較細密之網格邊界層，整體模型之網格數預估會超過 1 千萬，因此，經過與 Prof. Wood 之討論，Prof. Wood 建議嘗試先計算單一建築物(無風力機)流場分析，然後將屋頂前緣之流場條件當作單一風力機之入口條件，如此並不需要增加整體流場之網格數。

首先以 2 維模型進行測試，圖 16 顯示 2 維建築物 CFD 網格，建物高度約 6 m，入口流速為 10 m/s 均勻氣流，經過網格靈敏度測試，網格數約為 11 萬時可達到數值收斂。圖 17 顯示流速分佈，流體於接近建築物前方時流速逐漸降低，並且於建築物前緣上方形成一加速區域，然而在加速區域與屋頂間形成一低速紊流區，若風力機高度在此低速紊流區域間將無法有效利用風資源。如圖 18 所示，屋頂前緣高度低於 10 m 之風速小於入口自由流風速，而在屋頂後緣處，高度低於 10 m 處更處於渦旋尾流區，流速甚至是負的(反向)，此處之高度必須達到 11 m 才能回復至 10 m/s。由於建築物高度為 6 m，因此，依據風機距離屋前緣之距離，塔架高度若為 4 m 至 5 m 以上可擷取較佳之風資源。

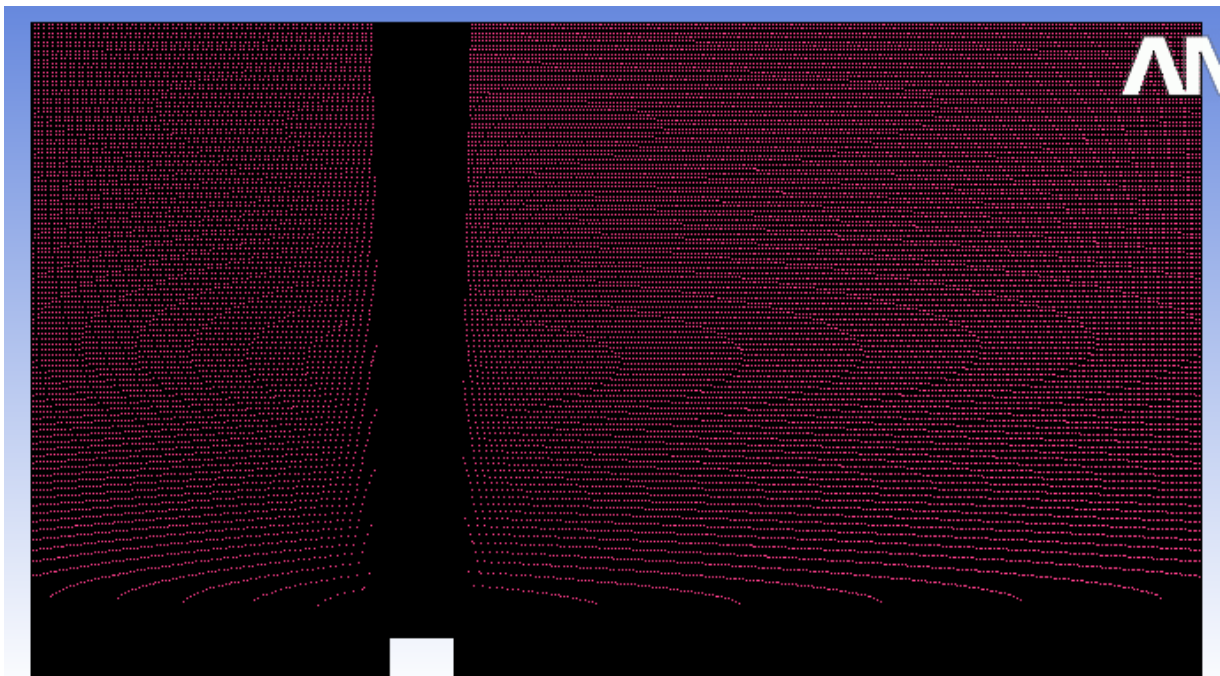


圖 16、2 維建築物 CFD 網格

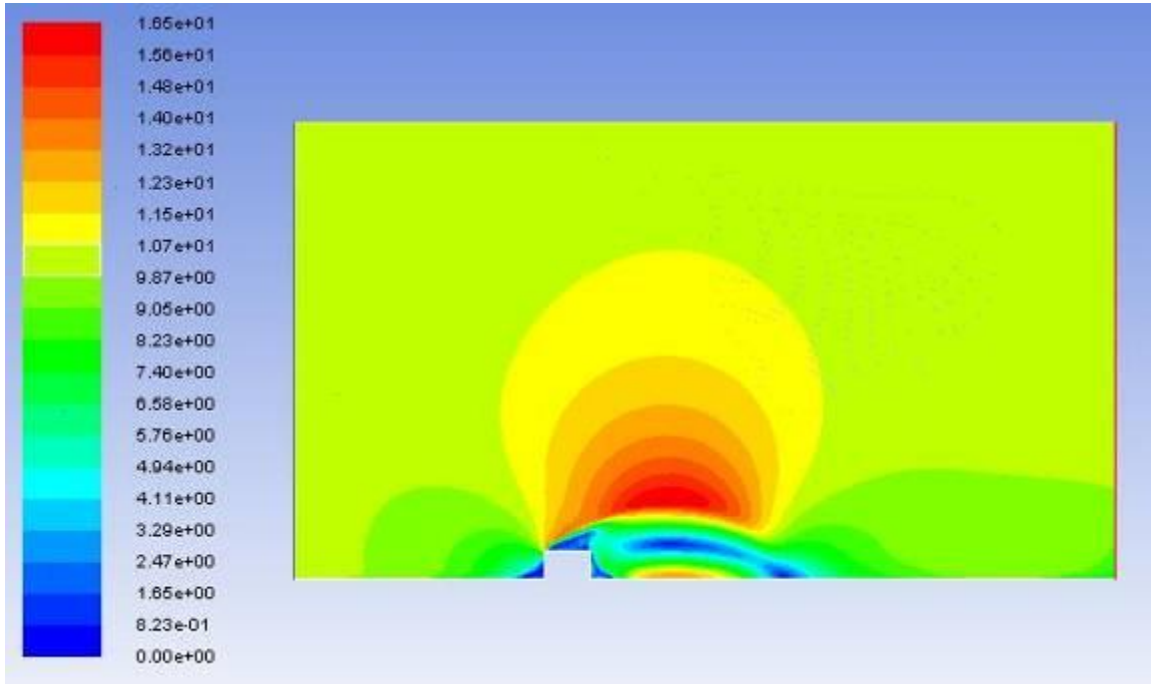


圖 17、2 維建築物流速分佈圖

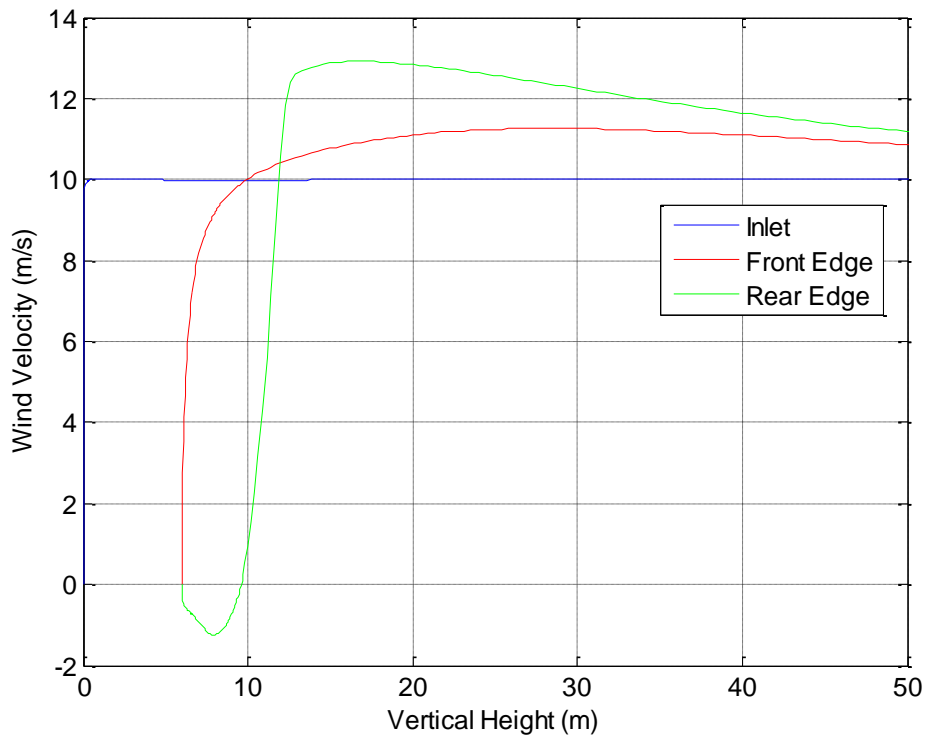


圖 18、入口與屋頂前後緣流速隨高度之分佈

圖 19顯示隨意繪製之 4 葉片風輪網格設置，網格數約 6 萬可達到數值收斂，入口流速設定為 10 m/s，採用 $k-\omega$ 紊流計算模式，分別運算 65 RPM、75 RPM、以及 85 RPM 之功率性能曲線如圖 20所示。由圖中可看出此阻力式風輪屬於低轉速機具，在 10 m/s 風速下，最高功率輸出點低於 65 RPM。

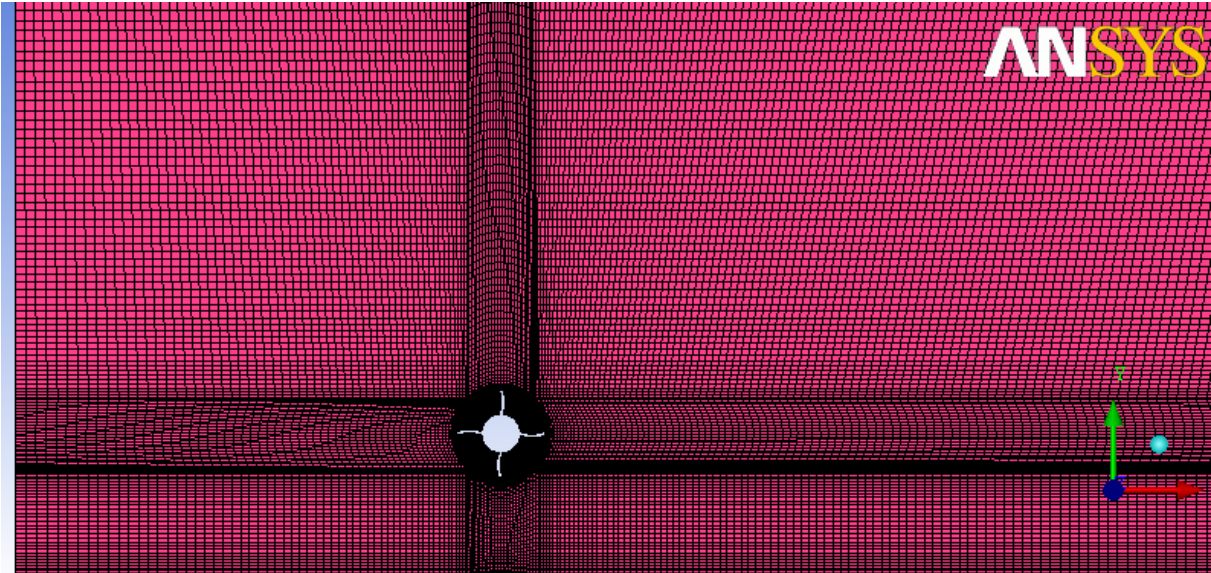


圖 19、單一 4 葉片風輪網格示意圖

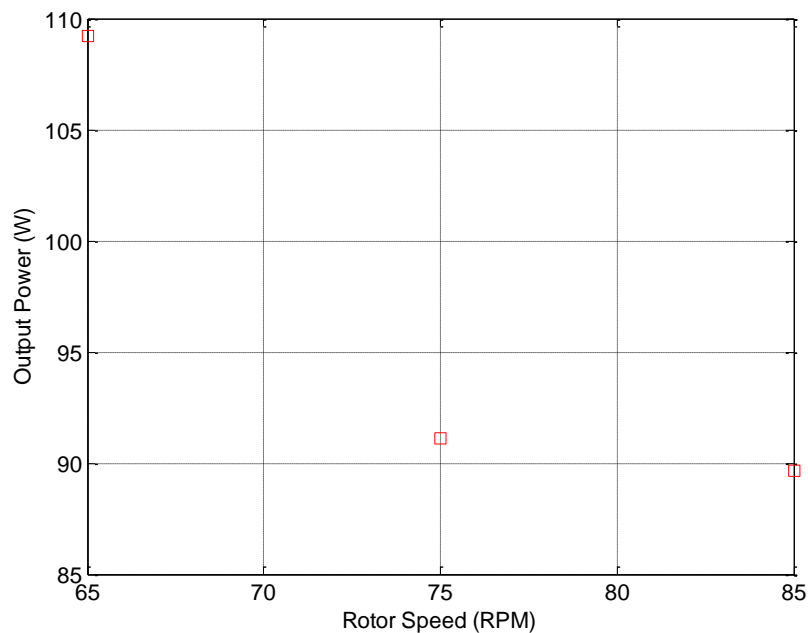


圖 20、單一 4 葉片風輪 10 m/s 風速功率輸出曲線

圖 21顯示單一 4 葉片風輪結合建物網格設置，網格數約 18 萬可達到數值收斂，入口流速設定為 10 m/s，採用 $k-\omega$ 紊流計算模式，分別運算 65 RPM、75 RPM、以及 85 RPM 之功率性能曲線如圖 22所示。在 10 m/s 風速下，最高功率輸出點發生於 75 RPM，約為 127.2 W，相較於同樣塔高之風機架設於地面之輸出功率(圖 20)，整體輸出功率高約 30%。由於屋頂前緣產生之流體加速現象，該風輪塔高約 4 m，所感受之風速介於 10 m/s 至 11 m/s 之間，功率與風速成 3 次方成長，若以風速 11 m/s 計算，約為 10 m/s 風速之 1.1 倍，因此，輸出功率約為 1.33 倍，圖 22之計算結果在合理範圍內。圖 23為單一 4 葉片風輪結合建物於 75 RPM 條件下之流速分佈，風輪與建物屋頂之間呈現一條加速區域，而風輪後方則呈現嚴重之渦旋尾流。

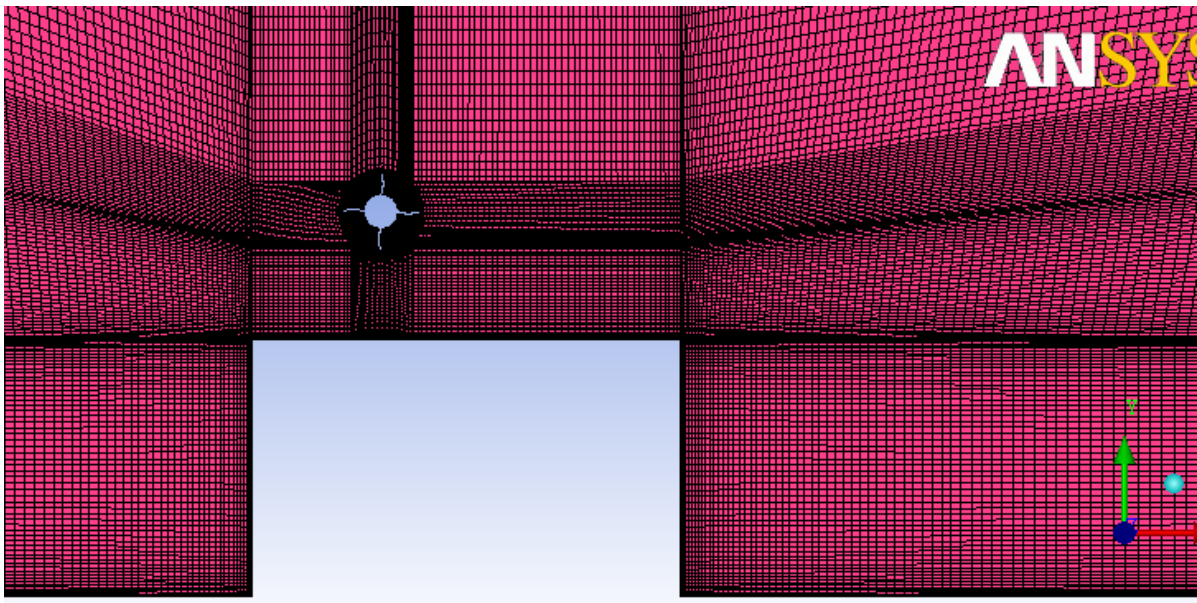


圖 21、單一 4 葉片風輪結合建物網格示意圖

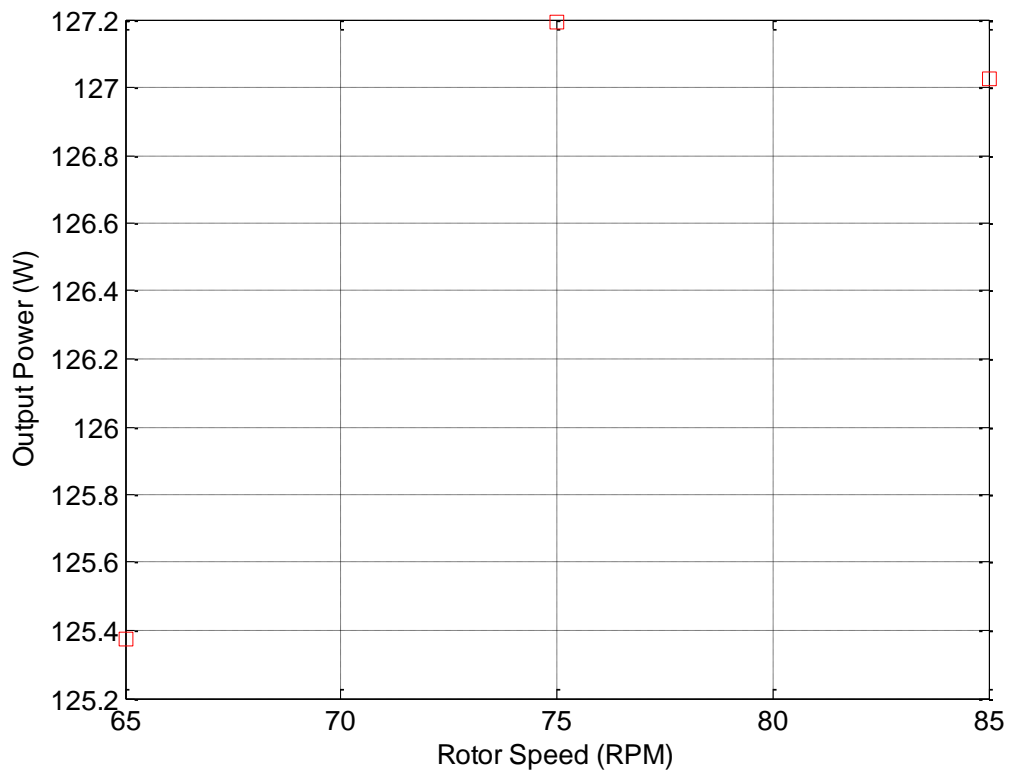


圖 22、單一 4 葉片風輪結合建物在 10 m/s 風速功率輸出曲線

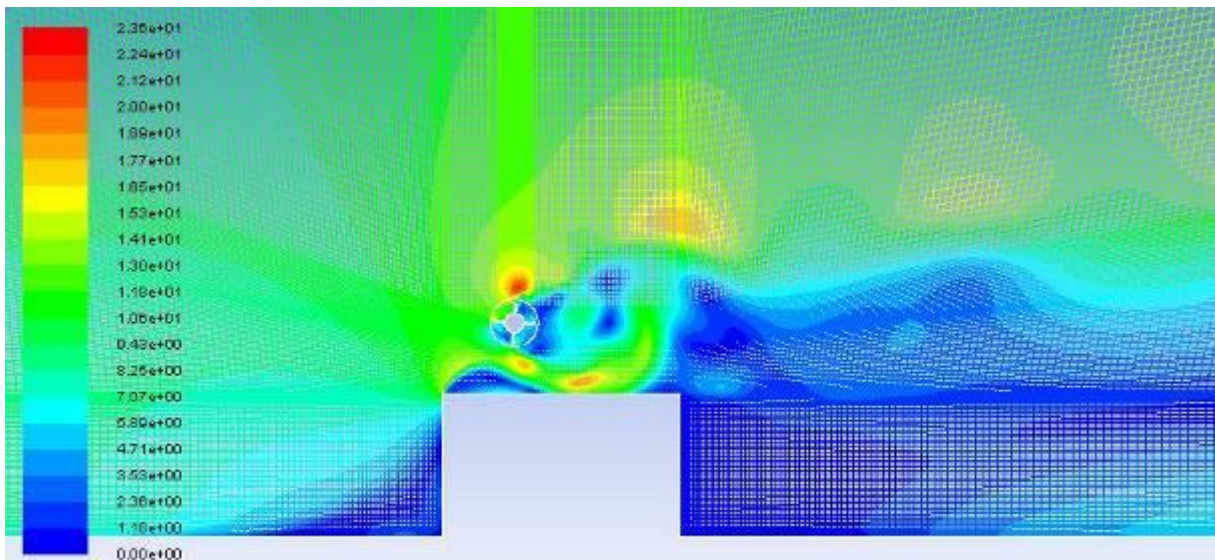


圖 23、單一 4 葉片風輪結合建物於 75 RPM 條件下流速分佈圖

圖 24顯示簡化之單一 4 葉片風輪結合建物網格設置，網格數約 9 萬可達到數值收斂，相當於完整風輪結合建物分析模型之網格數的一半，將建物前緣之流場結果(流速(圖 18)、Turbulent kinetic energy(圖 25)、以及 dissipation rate(圖 26))當作入口輸入邊界條件，採用 $k-\omega$ 紊流計算模式，分別運算 65 RPM、75 RPM、以及 85 RPM 之功率性能曲線如圖 27所示，最高功率輸出點發生於 85 RPM 之後，此為較不合理之現象，相較於完整分析模型之輸出功率(圖 22)，75 RPM 條件下，兩者有相當一致之輸出功率；此外，比較兩者之流速分佈(圖 23與圖 28)，仍有些許差異，由其是在風輪後方之窩流現象差異較大。

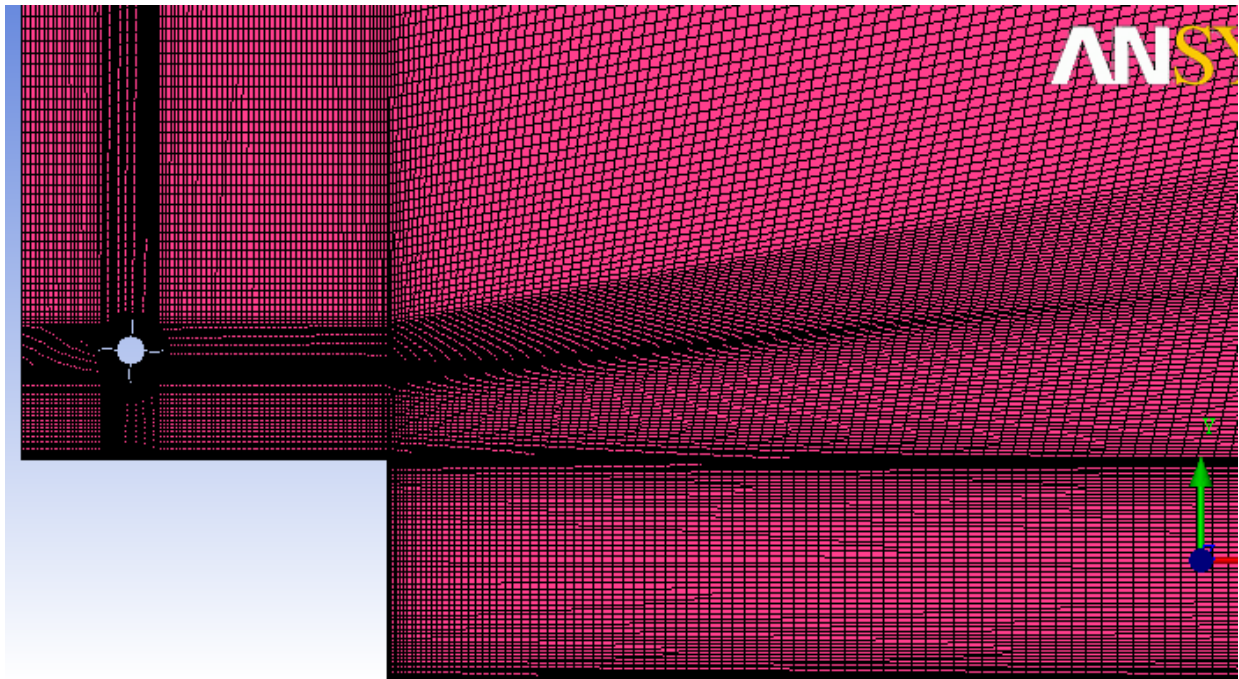


圖 24、簡化之單一 4 葉片風輪結合建物網格示意圖

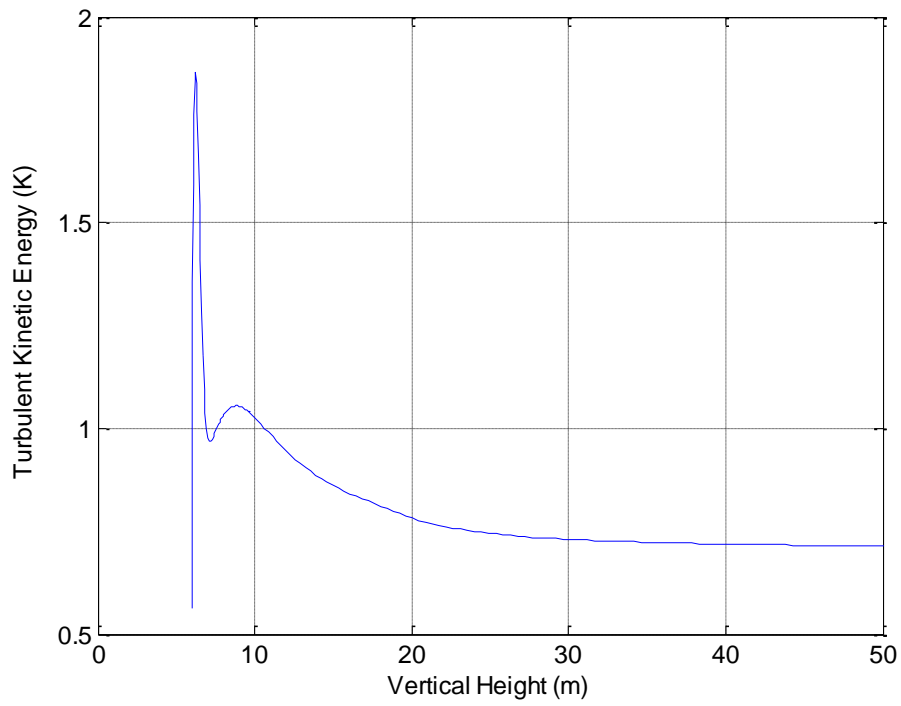


圖 25、屋頂前緣 Turbulent Kinetic Energy 隨高度之分佈

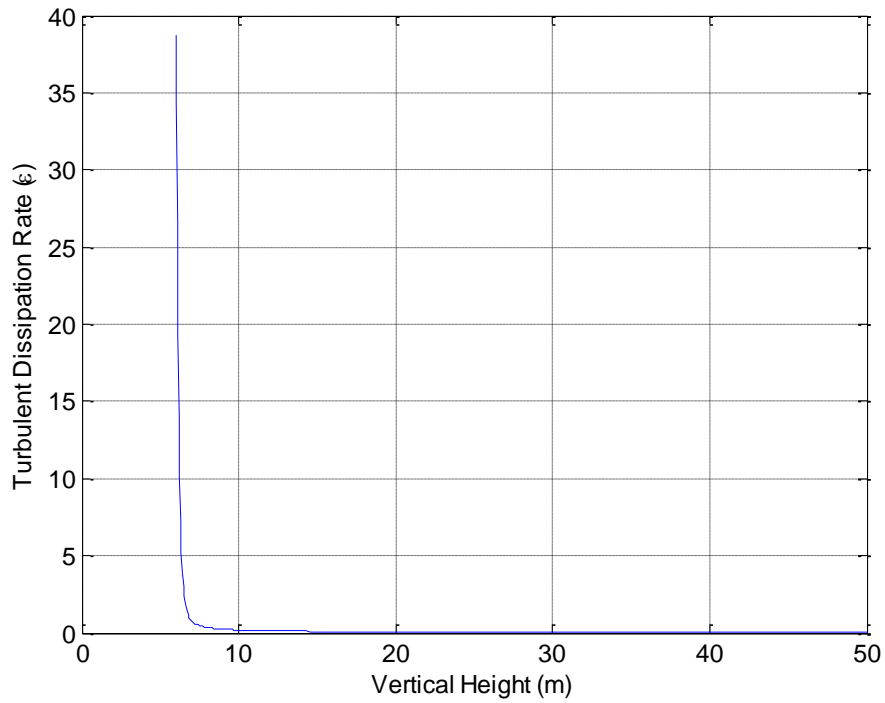


圖 26、屋頂前緣 Turbulent Dissipation Rate 隨高度之分佈

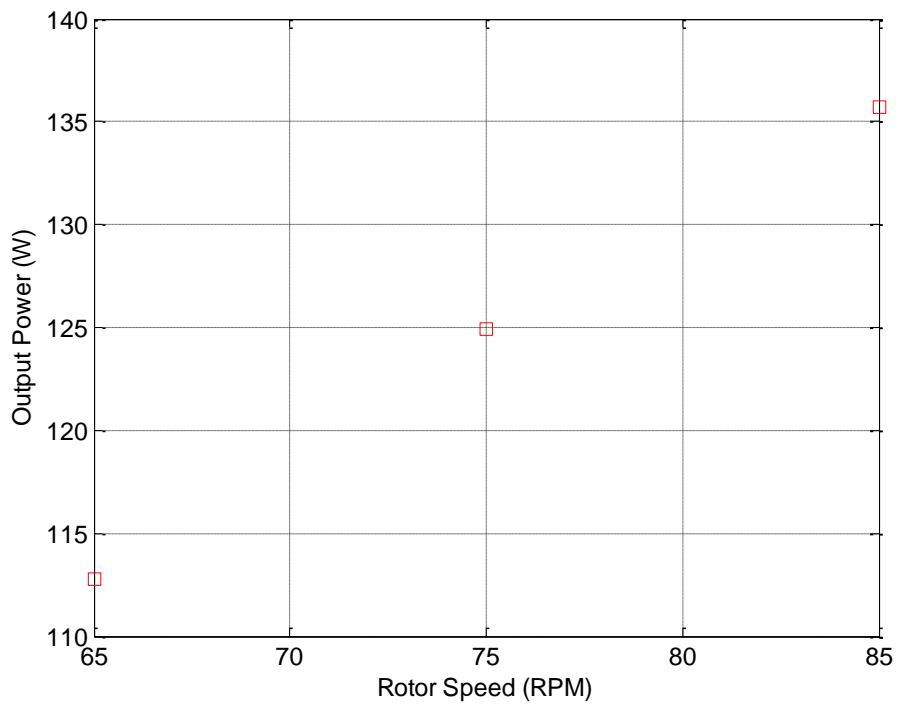


圖 27、簡化之單一 4 葉片風輪結合建物功率輸出曲線

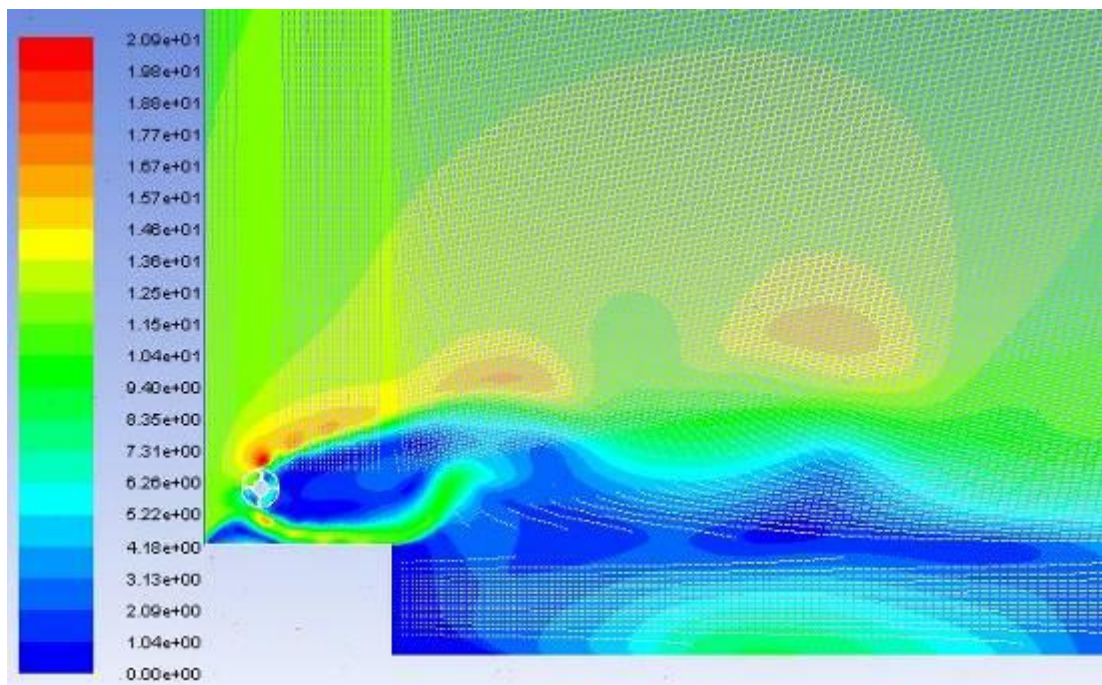


圖 28、簡化之單一 4 葉片風輪結合建物於 75 RPM 條件下流速分佈圖

由於實習期間僅能應用攜帶之雙核心筆記型電腦進行運算，並無法於兩星期內完成所有分析，返國後陸續完成案例比對分析，並將結果與 Prof. Wood 透過電子郵件討論。Prof. Wood 認為高轉速模型網格仍不夠周延，同時可以嘗試使用較小之時間步階，或許能有所改善。整體而言，簡化之分析模型僅需花費完整模型之一半時間即可完成一個案例分析，若是以中低轉速區間而言，簡化模型仍具代表性，對於風力機結合建物之分析而言，除了考慮塔架高度之外，亦需考慮距離屋前緣之位置，分析案例數量將會相當龐大，若能應用簡化模型應可有效獲得大致之趨勢分佈。

三、心得

本所自 2009 年投入小型垂直軸風力機之研發，2010 年完成 400 W 垂直軸風力機之開發，2011 年完成小型垂直軸風力機簡易負載計算模式之開發，並且積極參與兩岸垂直軸風力機共通標準開發，以及執行 IEA Wind Task 27 相關之工作。本人於各項工作中，主要負責氣動力分析，過程中對於垂直軸風力機之特性已有相當程度之瞭解。藉由此次 Prof. Wood 的指導，以及 Dr. Islam 與 Dr. Sherry 的協助，實際參與風洞實驗，對本人獲益良多，大致上可彙整如下：

1. 風洞實驗在實驗設計上需有完善之計畫，無論是感應器之選用與架設方式，亦或是量測案例之訂定，皆必須於事前完成規劃，並且確認訊號之正確性，尤其是風洞使用時間有限，若於實驗過程中發生錯誤，亦或是實驗數據明顯不合理時，將必須重新安排風洞使用時間，如此不僅浪費時間，更有可能影響計畫執行之進度。
2. 藉由風洞實驗可明顯看出，小型風力機慣性非常小，起動瞬間加速相當快，因此低轉速區間可獲得之有效量測點不多(TSR 0.5~1 區間)，中高轉速區域則可獲得較多之有效量測數據(TSR > 1)。
3. 若風洞實驗採用開放式風洞，則不需要將風速依據阻塞率進行修正，若是在密閉式風洞測試，由於風機兩側屏蔽效應，會造成流速加快，功率與負載測試值會增加，因此必須將風速加以修正，亦或是測試值加以修正，如此才能與實際運轉情形比對。

4. 氣流因建物牆壁而流速減緩，於屋頂前緣上方則產生加速現象，若風力機架設高度不足，則有可能位處於低速紊流區，並無法有效利用風資源；然而若風力機架設靠近屋頂後緣處，架設高度不足則處於渦旋尾流區，因此，依據風機距離屋前後緣之距離，塔架高度必須適當調整以獲取較佳之風資源。
5. 建築物屋頂氣流除了水平方向之外，垂直方向之流速亦比平地高出許多，而流速變化除了受到建築物高度影響之外，同時也受到鄰近之建築物所影響；此外，風向隨季節變化而有所改變，例如冬天吹東北季風時，定義為屋前緣之裝設位置，在夏天西南風時，則成為屋後緣，因此，於建築物屋頂架設風機時必須詳加考慮。

本次實習期間，藉由實際參與實驗設置，瞭解各種風洞實驗感應器之特性與使用方式，以及小型風力機風洞實驗應注意之事項；而在屋頂紊流特性模擬上，Prof. Wood 分享研究成果，並且建議 CFD 模擬上可能簡化之設定，實習期間則以 2 維流場分析進行測試，增進流場模擬分析之技巧。本次實習研究之成果，對於 104 年將進行之垂直軸風力機縮尺模型風洞實驗，以及 IEA Task 27 垂直軸風力機屋頂紊流影響研究等有相當之助益。

四、建議事項

(一)、由於風洞實驗之目的為風力機氣動力特性之探討與驗證，並非為了發電目的，建議使用磁粉式剎車器(Magnetic Particle Brake, MPB)取代發電機進行風洞實驗。藉由輸入電流之調整，可精確設定施加之扭力值，此數值即為葉片氣動扭力，若是採用發電機，則必需搭配相關之負載設備，經由量測發電機輸出功率與轉速，換算成發電機扭力，然而此數值並非葉片氣動扭力，還必須考慮機械能轉換為電能之損失，再推估葉片氣動扭力。

返國後，經與同仁及長官討論，並且進行規格與價格查詢，決定將原風洞縮尺模型稍加修正(圖 29)，原發電機位置由 MPB 取代，並且於測試架與轉子接合點間加裝 Force & Moment transducer。

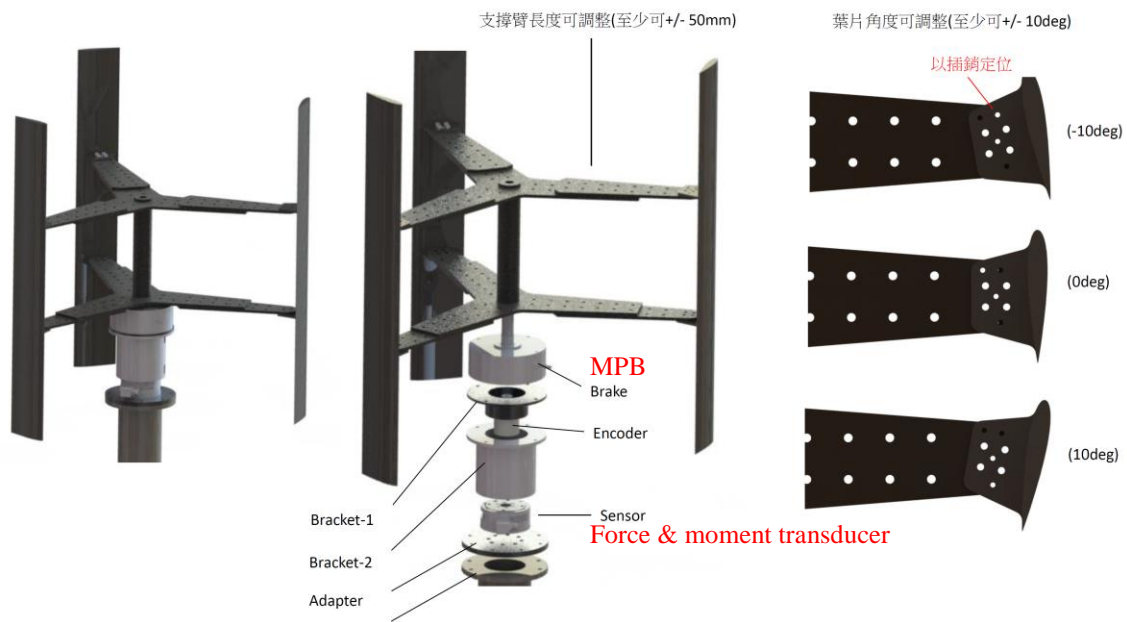


圖 29、修正後之風洞縮尺模型示意圖

- (二)、風洞實驗在實驗設計上需有完善之計畫，無論是感應器之選用與架設方式，亦或是量測案例之訂定，皆必須於事前完成規劃，並且確認訊號之正確性，尤其是風洞使用時間有限，若於實驗過程中發生錯誤，亦或是實驗數據明顯不合理時，將必須重新安排風洞使用時間，如此不僅浪費時間，更有可能影響計畫執行之進度。
- (三)、一般風機 CFD 流場約需 600 萬以上之網格，若再加上建築物，不僅流場考慮範圍需加大，建築物周邊亦需較細密之網格邊界層，整體模型之網格數預估會超過 1 千萬。建議使用屋頂前緣之流場條件當作原本風力機分析模型之入口條件，如此則不需要增加整體流場之網格數，然而邊界條件設定上仍需多加驗證，以確保結果之準確性。