

風能量測設備使用經驗與評估

Experience and Evaluation of Wind Energy Measurement Instruments

李宜宸、蘇永明、呂威賢

Yi-Chen Li, Yung-Ming Su, Wei-Hsien Lu

近來風力發電的發展受到越來越多的關注，準確風能的觀測可以找出較佳的風力發電場址，因此風能觀測是一個非常重要的技術。近年來工業技術研究院在台灣地區架設了五座陸域風速塔與一座海域風速塔，並且擁有一套移動式的風速量測設備。筆者將介紹歷年來所採用之系統，並就使用經驗與優缺點進行說明。而藉由這些系統的使用經驗，說明對於設立於戶外環境之風能觀測塔，不建議採用 PC base 的資料紀錄系統，應改採單晶片的資料紀錄系統。同時可移動式之聲達可以同時量測不同高度之風速，然而其容易受到周邊環境干擾與發出尖銳刺耳之噪音，因此必須慎選量測時間與位置，方能得到正確合理之量測資料。

Wind power technology is gaining increasing concern recently, and the accurate wind energy assessment can help us select a better site. Therefore, it is no doubt that wind energy observation is a very important technology for site selection. Under this kind of condition, in recent years Industrial Technology Research Institute (ITRI) has established five onshore wind masts and one offshore wind observation station. In addition, ITRI has a portable wind measurement equipment. This article will describe the measurement experience and advantages/disadvantages of the historical measurement system in ITRI. From our measurement experience, the PC based data log is not suitable for the out door estimate system, and it suggests that single chip data log is convenient to the measurement system. On the other hand, the portable SODAR (Sound Detection and Ranging) profiler can measure wind speed at different altitude at the same time. But, SODAR will easily interfere with the surrounding environment. Besides, during the measurement, SODAR is very noisy. Therefore, the selection of the measurement period and position will be very significance because it is related to the accuracy of data.

一、前言

2006 年全球新設置風力發電容量為 15,197 MW，歐洲地區仍持續處於領先地位⁽¹⁾，就累計總裝置容量而言，以德國、美國與西班牙居於明顯的領導地位，而印度、丹麥、中國、義大利與英國則緊追在後。2007 年累計裝置總容量前五名的國

家分別為德國 (22.3 GW)、美國 (16.8 GW)、西班牙 (15.1 GW)、印度 (7.8 GW) 和中國 (5.9 GW)⁽²⁾。然而 2008 年國際風電市場有急遽的變化⁽³⁾，美國已經超越長期領先的德國成為總裝設容量最高的國家，中國也超越印度成為第四名，西班牙則維持第三名，印度仍為第五名。由以上資訊可以發現近年來世界風力產業蓬勃發展，該產業包含了風場與風

機兩大部分，其中風場的部分，中風能評估占了非常重要的地位。風能評估包含現場風速量測與數值模擬兩大部分，長期的現場風速觀測可以了解一個區域的風能特性，並可作為數值模擬比對校驗。

目前國內風速觀測佔大部分，是為了氣象監測而設置，觀測高度一般為 10 m，然而 10 m 高度之風速易受到地表粗糙度與周邊障礙物所影響，因此不適合用來推估該區域之風能狀況。風力發電機係由風通過風力機葉片掃掠區域帶動轉子旋轉發電，因此是為了應用風能而進行風速量測最好的方法，即為採用高的時間解析度，同時量測一整個風力機葉片掃掠區域之風速。然而此種量測方式的可行性不高，所以通常會使用在輪轂高度的位置量測來取代，然而通常量測的高度會較低，再藉由風速剖面理論外插到輪轂高度⁽⁴⁾。另一個方式是採用非接觸式的體積風速量測 (SODAR、LidAR、RASS 等)，此種方式與單點量測比較起來有一最大優勢，就是非接觸式的體積風速量測可以同時產生不同高度的資料 (探空汽球只能循序產生這樣的資料)，所以採用這樣的量測方式可以得到垂直於旋轉葉片的風截面。

由於風速觀測資料是風能評估的重要依據，然而建立長時間的風能觀測需要大量的人力與物力，方能確保量測資料的正確性與高可用率。工業技術研究院能源與環境研究所 (以下簡稱工研院能環所) 近幾年來在台灣地區陸續架設了多座陸域風速塔與一座海域風速塔⁽⁵⁻⁸⁾，並且擁有一套移動式的風速量測設備^(7, 8)。目前來說，以點量測的方式較為普遍，而工研院所具有之固定式測風設備皆為此類，為了能夠同時取得該點之風速剖面作為風能評估使用，因此在同一座風速塔不同高度的位置設立風速感測器；而工研院目前擁有之移動式的風速量測設備，即為非接觸式的體積風速量測設備。筆者在本文中將介紹近年來工研院所採用之量測設備 (包含現役與除役之觀測設備)，並且說明這些設備的量測過程與使用經驗。

二、固定式風速量測設備

工研院近年來所架設之固定式風速觀測設備有六座 (圖 1, 2)，其中一座為海域風速觀測塔，其餘

皆為陸域風速觀測塔，其設置地點分別為宜蘭利澤 (新舊兩座)、嘉義新塭、嘉義外傘頂 (海域)、高雄興達港與屏東枋山，所使用之觀測儀器包含風速計、風向計、溫度計與壓力計等，前述設備之資料擷取系統分為三種，分別為 PC base、NRG 測風系統 (套裝風能觀測系統) 與修改型套裝風能觀測系統三種。以下將介紹所採用之三種不同資料擷取系統分別進行風速觀測塔之儀器設備。

首先，針對 PC base 的部分進行說明。採用該擷取系統包含舊宜蘭利澤 (E121.844767, N24.647329)、嘉義新塭 (E120.183861, N23.331131)、嘉義外傘頂 (E120.04093, N23.445834) 與高雄新達港 (E120.208709, N22.837299) 四座陸海域風速觀測塔。目前僅剩下嘉義外傘頂海域風速觀測塔尚在運作，其餘因土地租約到期、颱風破壞等因素而拆除，不再進行觀測。風能觀測塔的電力系統係由太陽能光電板、鉛蓄電池與不斷電系統所構成，陸域觀測塔有三片 75 W 的太陽光電板與 6 顆 100 AH 的蓄電池 (12 V)；海域觀測塔有六片 75 W 的太陽光電板與 12 顆 100 AH 的蓄電池 (12 V)。無論陸域或海域觀測塔，在沒有陽光的情形下，約可持續提供超過一星期儀器量測與其他安全設備所需的電力需求。PC base 的紀錄器採用 Windows 作業系統，將量測資料以 5 Hz 的頻率紀錄在硬碟中，可以藉由 GSM 無線遠端控制及下載觀測資料 (非完整之原始資料) 作為現場狀況之初步判定。

本系統之陸域風能觀測站裝置四組三杯式風速計與風標示風向計，其配置之高度分別為 10 m、30 m、50 m、60 m；海域風能觀測塔於高度 10 m、30 m、50 m、60 m 分別架設三杯式風速計與風標示風向計，以觀測現場風速，其中 50 m 與 60 m 處另外加裝一組風車式風速風向計。無論陸域或海域每個風速觀測儀器皆以 5 Hz 取樣頻率進行量測，並以 5 Hz 的頻率紀錄於現場之資料蒐集器，本資料蒐集器是基於 Windows 作業系統的電腦環境，主要蒐集的資料包含各層高度之風速與風向、環境溫度、大氣壓力、機櫃溫度與電池電壓。目前所設之兩座風速觀測塔資料，因資料量非常龐大，所以測得之資訊皆儲存於量測地點之硬碟，因此須每月至風速塔現場以抽換硬碟的方式擷取前一個月之原始觀測資料。風速塔每月定期至現場維



圖 1. 近年來工研院設置之固定式風能觀測塔位置圖。

護，惡劣氣候（颱風）過後，亦會至現場進行不定期維護。所採用之儀器皆經過中央氣象局校驗，並附有校驗報告，主要儀器規格描述如下：

1. 三杯式風速計：量測範圍為 0.3–75 m/s，量測精度為 > 3% (0.3–50 m/s)、> 6% (50–75 m/s)，信號輸出為 0–5 VDC，電源供應為 12 VDC。
2. 風標式風向計：量測方式為電位計式，量測範圍為 0–360 度，量測精度為 0.25%，解析度為 0.25%，信號輸出為 0–5 VDC，電源供應為 12 VDC。
3. 風車式風速風向計：量測範圍為 0–90 m/s (風速)、0–360 度 (風向)，量測精度為 3% (風速)、2° (風向)，信號輸出為 0–5 VDC，電源供應為 12 VDC。

由於本系統需每月至現場保養並抽換硬碟，在保養與抽換硬碟期間需要關閉電腦，因此在這段期間的量測資料都不會被紀錄。此外，採用電腦系統

作為紀錄器耗電量較大，因此需要較大的太陽能光電板，且電腦易受周邊環境的影響，例如天氣太熱時，放置電腦的機箱溫度高，容易當機，多日天氣不佳則會造成電瓶電量不足，而迫使電腦關機。此外，因為測風塔設立於沿海或海上，電腦容易受鹽害而損壞，因此每月必須至現場檢查電腦與進行更換硬碟等作業。此系統最大的優點在於可以擷取 5 Hz 完整的紀錄資料，其缺點是系統穩定性不高，易導致資料可用率較低。

舊宜蘭利澤風能觀測站拆除後，選定新觀測點所採用的觀測系統為套裝風能觀測系統。宜蘭利澤新設風能觀測塔的經緯度座標為 (E121.84366, N24.666366)，其所採用之測風塔塔架高為 60 m，觀測塔之電力供應由一片太陽能版 (10 W) 與一顆蓄電池 (12 V, 2.2 AH) 所構成，本系統之電力需求遠低於 PC base 與本院所採用之修改型套裝風能觀測系統。此套裝風能觀測系統不需要 PC，且穩定



(a)

(b)



(c)



(d)

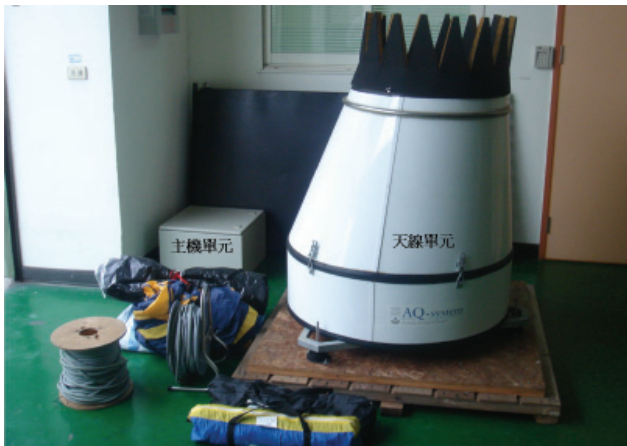
圖 2.

近年來工研院設置之固定式風能觀測塔現場照片。(a) 海域，(b) 陸域 (以嘉義新塭為例) PC Base 測風系統；(c) NRG 測風系統；(d) CR1000 測風系統。

性高，其量測以 0.5 Hz 進行取樣，每十分鐘平均一次，並儲存於紀錄器中的 MMC 卡，每日會透過 GPRS 傳送兩次紀錄資料至指定之電子郵件信箱。第一封郵件是當日開始數筆紀錄資料，第二封郵件傳送前日之整日紀錄資料，然而所傳送回來之資料僅為十分鐘平均資料，且該系統並無儲存原始量測資料之功能。目前本系統於高度 40 m、50 m 及 60 m 分別架設兩座風杯式風速計，而高度 50 m 和 60 m 分別架設一座風標式風向計。本套裝風能觀

測系統係經國際認證為國內外風能開發評估之主要依據，目前新設宜蘭利澤測風主要儀器規格描述如下：

- (1) 測風塔塔架：NRG TallTower。
- (2) 風速量測元件：NRG#40C Anemometer, Calibrated。
- (3) 風向量測元件：NRG#200P Win Direction Vane, 10K。
- (4) 溫度量測元件：NRG#110S Temperature Sensor



(a)



(b)

(c)

圖 3. 聲達。(a) 整體設備，(b) 主機單元與 (c) 天線單元。

with Eadiation Shield。

(5) 數據紀錄元件：Symphonie NRG Logger with MMC and accessories, 0.5 Hz。

(6) 數據傳送元件：GPRS傳輸設備。

宜蘭利澤新設風速塔在運轉過程幾乎不需要至現場下載量測數據 (除非有數據遺失才需要至現場下載數據)，這些量測數據皆會藉由 GPRS 傳送到指定之郵件信箱。其傳送回來之資料可藉由套裝風能觀測系統所提供之軟體進行分析處理，該軟體亦可以將接收之紀錄資料轉換為 ASCII 格式，以便於對數據進行進一步分析與提供其他繪圖軟體繪圖使用。

在設立屏東風能觀測塔時，考量前述套裝風能觀測系統無法紀錄與傳送原始資料，而採用 PC base 的方式有不穩定且耗電量大的缺點，因此改採非 PC base 的紀錄器且可以持續傳送原始風速資料的方案，因此修改前述套裝風能觀測系統，將原設計之紀錄器以其他單晶片紀錄器取代。屏東風能觀測塔的經緯度座標為 (E120.624085,

N22.332533)，其所採用之測風塔塔架形式與宜蘭新設風速塔相同，而電力系統的部分採用兩塊 75 W 的太陽光電板與兩顆 12 V/100 AH 的蓄電池提供觀測塔之電力需求，本系統的耗電量介於套裝風能觀測系統與 PC base 測風系統之間。目前此系統紀錄頻率配合量測儀器之取樣頻率以 0.5 Hz 進行原始資料紀錄 (該系統紀錄器的紀錄頻率最高為 100 Hz，然而目前架設的宜蘭儀器設備取樣頻率為 0.5 Hz，因此紀錄器為了搭配量測儀器的取樣頻率設定為 0.5 Hz)，紀錄之原始量測資料透過 3.5 G 無線網路傳送至近端主機。本系統在高度 10 m、30 m、50 m 及 60 m 處分別架設風杯式風速計，而高度 30 m 和 60 m 分別架設一座風標式風向計。該系統主要儀器規格與新設宜蘭利澤風速觀測塔相同，唯數據紀錄元件與數據傳送元件改為 CR 1000 與無線網路。該系統從設立量測後到目前為止皆無資料遺漏等事件發生 (約一年)，是目前工研院所設立之風能觀測塔中最高為穩定的系統。相對於套裝測風系統來說，透過此系統所取得之量測數據需要自行撰寫程式進行統計分析與繪圖。

三、移動式風速量測設備

圖 3 為工研院能環所擁有之移動式風能觀測設備聲達剖風儀 (mini-SODAR, AQ-500)，其原理係利用都普勒效應來量測大氣中不同高度之風速，由於該設備可以同時量測不同高層之風速資料，因此又稱為剖風儀。以下將針對聲達 (sound detection and ranging, SODAR) 進行較詳細的介紹。最佳風能的量測為具高時間解析度之風平面積分量測法。一般風能的量測都採用在輪轂高度點量測法量測風速，或在較低位置量測風速後，外插至輪轂位置推測風速的大小。而體積量測法可以同時取得不同高度的量測值，其中聲達可對空間中的環境風速進行體積量測，進而評估該處風能的表現。

聲達是利用聲波量測大氣中空氣的流速。圖 4 為聲達運作的方塊圖，圖中顯示聲達可分成兩大部分，分別為主機單元與天線單元 (圖 3)，其中天線單元負責聲波訊號的發射與接收，主機單元則負責訊號的處理。以下根據訊號的發射與接收來介紹聲

達的工作流程。圖 5 顯示聲達聲波波束發射的重要參數，這些重要參數大部分可利用軟體來設定與調整。除了圖 5 所示這些參數外，尚有傾角與波束半寬，此兩種參數與硬體設計有關，無法進行改變。而前述可藉由軟體改變的參數其特性如下所列：

- (1) 傳輸頻率上升，徑向風速解析度上升，取樣深度下降。
- (2) 傳輸能量越大越好。
- (3) 脈衝長度上升，能量回傳上升，傳輸頻率下降。
- (4) 上升時間會影響有效脈衝長度的大小。
- (5) 脈衝節距與量測的最大高度有直接關係。

訊號接收的硬體設備與參數特性之影響說明如下：

1. 訊號接收的硬體設備及其功能說明
 - (1) 麥克風接收回傳訊號。
 - (2) 低噪音放大器會增加訊號強度。
 - (3) 頻寬濾波器放大訊號後，過濾掉噪音。
 - (4) 斜坡增益器增強從高海拔回來的訊號。
 - (5) 混頻器保持較低的取樣率。
 - (6) 低通濾波器取得都普勒效應（限制可測風速）。
2. 訊號接收一天線單元對量測的影響
 - (1) 切換時間：揚聲器與麥克風的切換時間。
 - (2) 取樣時間：測量高度是由聲達測量散射回傳的訊息時間而決定。
 - (3) 可測高度範圍受制於高度解析度。
 - (4) 高度解析度上升，脈衝長度上升。
 - (5) 高度解析度上升，FFT 取樣數量上升，取樣

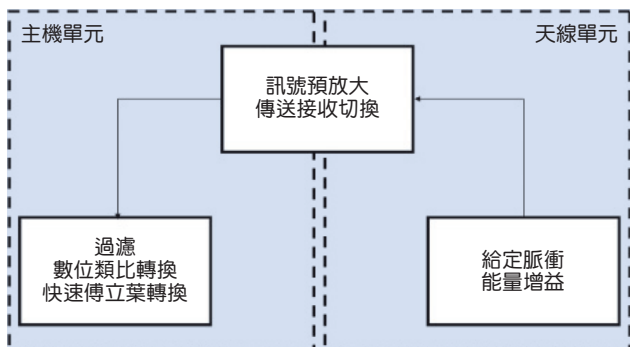


圖 4. 聲達運作方塊圖。

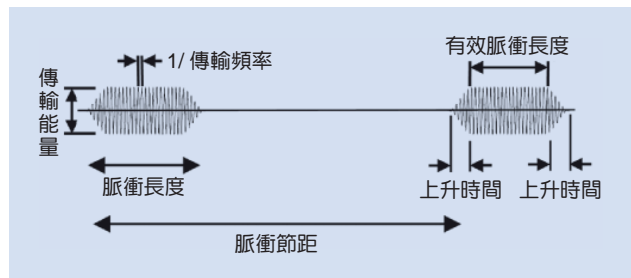


圖 5. 聲達聲波波束發射之重要參數。

- 率下降。
 3. 訊號接收－主機單元對量測結果的計算
 - (1) 快速傅立葉轉換：FFT 通常使用 64 或 128 個點峰值的計算、一致性的偵測與數據的拒絕。
 - (2) 風分量的計算與水平風向量的計算：已知天線的傾角，透過三角函數的關係計算出 U、V、W 三個方向的風速與水平風的風向。
- 聲達量測主要是藉由發射聲波，而聲波在大氣中碰到空氣中的介質，使得傳回來的聲波發生頻率的改變，藉以推測大氣中空氣流速，此流速即為風速。而上述之工作原理即是利用都卜勒效應來得知風速，以下將簡單地介紹都卜勒效應如何應用於風速的量測上。都卜勒效應波源和觀察者有相對運動時，觀察者接受到波的頻率與波源發出的頻率並不不同的現象。例如遠方急駛過來的警車警笛聲變得尖細（即頻率變高，波長變短），而離我們遠去的警車警笛聲變得低沉（即頻率變低，波長變長），就是都卜勒效應的現象。對於聲達量測而言（圖 6），觀察頻率是透過聲達量測得到的頻率，波速即為聲速，發射頻率是聲達發射的頻率，觀察者移動速度為零（麥克風接收位置是固定的），而波源的移動速度即為風速。

由於聲達是時間平均的資料，然而風速塔之風杯風速計是瞬時的量測結果，所以很難直接進行比較。而如果在良好的大氣狀況下，聲達量測結果與風速塔之風杯風速計量測結果比較可以表示為：

$$U_{\text{Sodar}} = \alpha U_{\text{cup}}$$

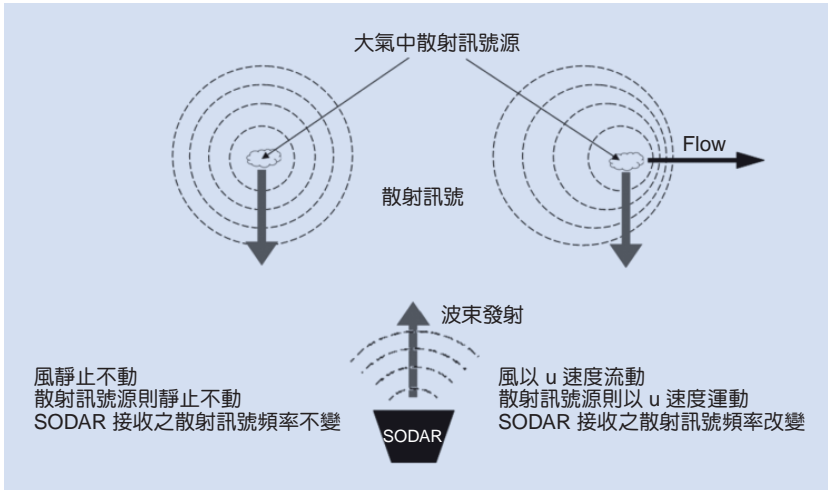


圖 6.
都卜勒效應於風能量測上的應用。

其中 α 的量級大約為 0.98–0.995，若考慮風速量測系統受陣風影響下的誤差，其差異大約為 0.97–0.995⁽⁹⁾。而風杯風速計量測值略高於聲達量測值的主要因素，為風杯風速計的機械設計使得局部垂直風速也會使風杯風速計旋轉，且旋轉中的風杯風速計也會因為慣性，使得風杯風速計對於大氣中風速的反應較慢。

由於聲達是接收回傳訊號頻率的改變來計算風速，因此障礙物會破壞回傳的訊號而影響量測的結果。對於聲達量測位置選擇的規範為：

1. 在開放的空間中必須離開建築物至少 100 m，若介於兩建物之間，可距一建物小於 10 m，但另一建物則需超過 100 m 以外。
2. 如果 100 m 內有產生干擾的建築物，須設法根據建築物情況調整天線的位置，以便從某種程度上將建物的反射區域降到最低。

目前本系統僅有兩個地點之實地量測經驗，分別於高雄興達港與林口火力發電廠，其量測結果分別與工研院設立於高雄興達港之風能觀測塔與台灣再生能源公司於林口火力發電廠之風能觀測塔進行比對。高雄興達港進行兩次量測時間分別在 2006 年 3 月與 8 月各 4 天，其中 3 月份量測期間天氣良好，但是飛行器出現的頻率較高，而 8 月份部分時間有降雨的情形，飛行器出現頻率低。3 月份之量測結果可用率達 80% 以上 (15–90 m)；8 月量測結果可用率更高達 90% 以上 (15–80 m)。由量測

結果顯示，高噪音會影響所有高程的資料可用率，而濕度大，則對於高層資料影響較明顯。兩次量測與風速塔量測風速回歸分析，其回歸曲線斜率皆接近於 1，表示整體量測結果頗佳。對於 3 月與 8 月量測結果與風速塔 30、50、60 米風速關係數分別為 0.6839、0.7963、0.8093 及 0.6575、0.7296、0.7835，第二次較低可能與當時天氣有關。在林口火力發電廠的量測期間亦有兩次，分別在 2007 年 11 月與 12 月，皆為 7 天，此兩次的量測結果皆不理想，經過討論後歸納其原因可能為：

1. 裝設地點：由於現場非常靠近海邊而後方道路高於海灘 (可以視為障礙物)，可以選用的位置皆無法合乎聲達量測位置選擇的規範。
2. 噪音問題：由於非常靠近海邊，海浪拍打岸邊發出很大的聲響，而兩次量測時間後方的道路皆在進行施工，因此量測結果受噪音的影響很大。

就兩次量測之經驗，顯示聲達容易受到周邊環境干擾而影響其量測結果，此外，量測期間發出尖銳刺耳之噪音也導致其量測地點受到限制。而市售之移動式測風設備除了聲達以外，尚有光達 (LiDAR)，該設備一樣是藉由都普勒效應來量測大氣中不同高度之風速，惟其發射與接收的為光波。可以確定的是該設備不會發出擾人的噪音，而其受周邊環境影響的大小為何，因筆者未有使用該設備之經驗，故無法提供具體之分析數據。

四、結論

就本文所論述之風能觀測系統，經過量測所得之經驗可以歸納如下：

1. PC base 的資料紀錄系統受到多重因素的影響，導致穩定性不高，對於設立於戶外環境之風能觀測塔來說，不是一個很好的選擇，因此不建議使用。
2. 套裝測風系統的紀錄器每日會回傳十分鐘之平均資料，並可透過其專有軟體進行資料分析與繪圖，對風能評估來說是一個穩定而且便利的選擇。此外，可以透過部分元件的替換來達到使用者的需求，例如更換紀錄器以紀錄原始資料，可以提供更詳細之資料，以便於進一步處理分析。
3. 聲達透過都普勒原理可以同時量測不同高度之風速，然而其容易受到周邊環境干擾與發出尖銳刺耳之噪音，因此必須慎選量測時間與位置，方能得到正確合理之量測資料。

參考文獻

1. A. Zervos and S. Sawyer, *Global Wind Energy 2006 Report*, Global Wind Energy Council, 6 (2007).
2. A. Zervos and S. Sawyer, *Global Wind Energy 2007 Report*, Global Wind Energy Council, 6 (2008).
3. A. Zervos and S. Sawyer, *Global Wind Energy 2008 Report*, Global Wind Energy Council, 8 (2009).
4. E. W. Peterson and J. P. Hennessey Jr., *J. Appl. Meteorology*, **17**, 390 (1978).
5. 江懷德, 顏文治, 顏志偉等, 風力示範推廣計畫九十四年度執行報告, 經濟部能源局 (2006).
6. 江懷德, 顏文治, 顏志偉等, 風力示範推廣計畫九十五年度執行報告, 經濟部能源局 (2007).
7. 曹芳海, 呂威賢, 陳美蘭等, 風力示範推廣計畫九十六年度執行報告, 經濟部能源局 (2008).
8. 顏文治, 呂威賢, 張文綺等, 風力發電開發環境建構計畫

九十七年度執行報告, 經濟部能源局 (2009).

9. I. Antoniou, H. E. Jørgensen, F. Ormel, S. Bradley, S. von Hünerbein, S. Emeis, and G. Warmbier, *On the Theory of SODAR Measurement Techniques*, Denmark: Risø National Laboratory.



李宜宸先生為國立清華大學動力機械工程博士，現任工業技術研究院能源與環境研究所研究員。

Yi-Chen Li received his Ph.D. in power mechanical engineering from National Tsing Hua University. He is currently a researcher at Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute.



蘇永明先生為明新科技大學電子工程學士，現任工業技術研究院副工程師。

Yung-Ming Su received his B.S. in electronic engineering from Minghsin University of Science and Technology. He is currently an associate engineer at Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute.



呂威賢先生為美國加州大學柏克萊分校海洋工程碩士，現任工業技術研究院能源與環境研究所工程師。

Wei-Hsien Lu received his M.S. in ocean engineering from University of California at Berkeley, USA. He is currently an engineer at Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute.