

出國報告（出國類別：實習）

赴歐洲學習離岸風電檢測技術

服務機關：台灣電力股份有限公司

姓名職稱：施順動慶 經理

陳俊宇 檢測專員

派赴國家：丹麥、德國

出國期間：106年5月15日至106年5月25日

報告日期：106年7月20日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：赴歐洲學習離岸風電檢測技術

頁數 27 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電例公司/陳德隆/02-2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

施順動慶/台灣電力公司/核能發電處/經理/02-23667066

陳俊宇/台灣電力公司/核能發電處/檢測專員/02-23667066

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：106/05/15~106/05/25

出國地區：丹麥、德國

報告日期：106/07/20

分類號/目

關鍵詞：離岸風電、非破壞檢測

內容摘要：

因應政府綠能政策，本公司正積極擴大再生能源之設置及發展離岸風電。惟因國內非破壞檢測領域的經驗於離岸風電產業仍屬萌芽階段，了解較少，因此亟需豐富經驗之專家可供詢問或指導。並希望藉由實際勘查國外非破壞檢測廠商於風電檢測技術之發展經驗，作為未來發展之

借鏡。爰此，遂研擬本次丹麥及德國非破壞檢測廠商及離岸風電製造商參訪討論，期了解非破壞檢測於離岸風電製造及營運階段之應用及作業概況。

本次參訪之主要業者如下：

- 一、Force Technology
- 二、Siemens Gamesa
- 三、GMA Group, Inc.(Mistras Group)

經由本次參訪行程，對於非破壞檢測於離岸風電的應用有進一步了解，並汲取相當豐富之資料與廠商經驗，對後續檢測業務推廣及落實產業自主有莫大助益。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網(<http://report.nat.gov.tw/reportwork>)

目 次

壹、目的及任務.....	1
貳、行程簡介.....	2
一、任務行程.....	2
二、FORCE Technology 研習排程.....	2
三、Siemens Gamesa 研習排程.....	3
四、GMA Group 研習排程.....	4
參、實習公司簡介.....	5
一、Force Technology.....	5
二、Siemens Gamesa.....	6
三、GMA Group, Inc.(Mistras Group).....	7
肆、實習內容概述.....	8
一、超音波檢測(UT).....	8
二、離岸風電葉片檢測(Blade Inspection).....	11
三、離岸風電塔架銲道檢測(Tower Welding Inspection).....	14
四、無人機應用於葉片(Blade)外觀檢測.....	18
五、離岸風電結構即時監控.....	19
六、聲發射檢測技術.....	24
伍、心得與建議.....	26

壹、 目的

行政院經濟部欲打造綠能低碳環境的國家能源政策，將陸續開發陸域與離岸風電，擬定"千架陸域及離岸風電機組"。其中陸域風電部分，由於陸域優良風場已趨飽和，將在 2020 年以前開發完成，最多可設置約 450 架風力機，約相當於 1,200MW 裝置容量。離岸風電部分，則規劃在 2030 年前完成 800 架離岸風電機組，約相當 4,000MW 裝置容量。亦即在 2030 年前，國內在陸域與離岸總共要設置超過 1,250 架風力機組。

近年來風電發展迅速，裝置容量逐年遞增，本公司配合政府推動再生能源計畫，積極辦理第一期離岸風電工程之新建，其中離岸風電非破壞檢測工作屬公司重大工程，也屬核能發電事業部對外技術服務工作。由於大型離岸風電機組長期在暴露在大自然環境下工作，機組運轉環境惡劣，很多早期結構失效很難被即時發現和維修，長時間運轉演變為嚴重故障，甚至導致重大事故，嚴重影響經濟效益。

考量離岸風電建置品質、擴大核能檢測技術應用層面、推展核能以外非破壞檢測技術應用及鑑於國內對於離岸風電非破壞檢測技術相關資訊及經驗缺乏。為建立檢測隊在離岸風電相關檢測技術，派員赴歐洲學習了解離岸風電維護相關檢測技術、檢測設備、規範及引進離岸風電檢測技術，並於國內扎根和產業自主。

根據離岸風電發展演變史，全球第一個離岸風電示範風場位於丹麥 Vindeby(1991 年設置 4.95MW 裝置容量)，其後丹麥就竭盡全力發展離岸風電，20 幾年所累積成果堪稱豐碩，不但帶動離岸風電產業鏈的蓬勃發展，亦創造大量就業機會，更成為離岸風電設備及技術輸出大國。

爰此，此次赴歐洲學習離岸風電非破壞檢測技術選定位於丹麥及德國之非破壞檢測公司。

貳、 任務行程暨會議排程

本案實習、開會期間含往返行程共 11 天，即自民國 106 年 5 月 15 日至同年 5 月 25 日止，其任務行程及三家參訪公司會議排程分列於如下說明。

一、任務行程

日期	地點	任 務
5/15	台北-荷蘭-丹麥	往程
5/16~5/17	Force Technology (丹麥哥本哈根)	Force 簡介與設備介紹、風電 NDT 應用、風機塔架葉片檢測。
5/18~5/19	Siemens Gamesa (丹麥 Brande)	風機製程檢測與 QC/QA、人員訓練與資格、風機觀摩、運轉與維護 NDT、線上監測技術
5/22~5/23	GMA Group (德國漢堡)	GMA 簡介、風電服務品質與安全、風機葉片檢查、狀態監測系統。
5/28	法蘭克福-台北	返程

二、FORCE Technology 研習排程

Day	Time	Subject	Presenter
May 16 th	09:00 – 10:00	FORCE Technology Wind Services	Soren Granskov
	10:00 – 11:30	Why Inspection? Corrosion Prevention, QA/QC on Steel Structure during manufacturing Phase.	Lisbeth Hilbert
	12:30 – 14:00	Structural Design and Verification	Rolf Hansson
	14:00 – 16:00	Structural Monitoring	Soren Granskov
May 17 th	08:00 – 09:00	Coating Protection of Wind Inspection	Peter Kronborg
	09:00 – 09:30	Drone Inspection	Rune Yding Brogaard
	09:30 – 10:00	In-service Steel Tower and Blade Inspection	Zlate Nesevski
	10:00 – 11:00	Live demonstration of Drone and In-service inspection	Rune + Zlate
	12:45 – 13:45	In-production Inspection of Tower welds	Ole Olsdal
	13:45 – 14:45	Presentation of in-production inspection equipment	Ole + Steen
	14:45 –	Closing Discussion	All

	15:30		
--	-------	--	--

三、Siemens Gamesa 研習排程

Day	Time	Subject	Presenter
May 18 th	09:00 – 09:15	Pick-up at reception	Tony
	09:15 – 09:30	Welcome & introduction round	Nielsen.lise
	09:30 – 10:30	Introduction to EHS in Sales and Execution phase	Gintare Kuodyte
	10:30 – 10:50	Quality assurance and quality control in manufacturing	Thomas Lund
	10:50 – 11:10	SQP quality requirements towards suppliers	Kay Kobbe
	11:15 – 11:35	Non-destructive testing requirements in manufacturing	Bjoern Pedersen
	11:35 – 11:55	Equipment for non-destructive testing	Bjoern Pedersen
	11:55 – 12:10	Training and qualification requirements for NDT personnel	Bjoern Pedersen
May 18 th	12:10 – 12:30	Questions & Answers	Bjoern Pedersen
	13:30 – 15:00	Guided Factory Tour in SWP production facility	Nielsen.lise
	15:00 – 15:30	Wrap-up – Day1 & Walk-through of program for Day 2	Nielsen.lise
May 19 th	09:00 – 09:15	Pick-up at reception	Tony
	09:15 – 09:30	Welcome	Nielsen.lise
	09:30 – 10:15	SWP Diagnostic Center	Ben Hughes
	10:15 – 10:45	Non-destructive testing requirements in operation and maintenance	Piet Egmuth
	10:45 – 11:15	Questions & Answers	Piet Egmuth
	11:15 – 11:45	Maintenance requirements and inspection items in Service	Piet Egmuth
	11:45 – 12:00	Questions & Answers	Piet Egmuth
	13:00 – 13:15	Wrap-up – Day2	Nielsen.lise

四、GMA Group 研習排程:

Day	Time	Subject	Presenter
May 22 nd	10:00 – 10:30	Self-Introduction of the participants	All
	10:30 – 10:45	Acceptance, changing or modification of the Agenda	All
	10:45 – 11:00	Short overview about the Mistras-GMA	Rudiger
	11:00 – 12:30	Monitoring a). Offshore monopoles b).Transition pieces c).Onshore towers d). Blade development and in service e).Introduction AE	Tim Bradshaw
	12:30 – 13:00	Question	All
	13:30 – 14:15	Inspection and repair a).Blade inspection and repair from rope, MEWP and Platform b).Tower Inspection	Nicola Mcglynn
	14:15 – 15:30	Current technology, NDT Rotor blade, Status of the development of automatic UT Scan systems	Wolfgang Hohn
	15:30 – 16:00	End of day one	All
May 23 nd	10:00 – 10:15	Arrival of participants	All
	10:15 – 11:45	Overview about the Portfolio	Rudiger
	11:45 – 13:45	Tour of the laboratories of the GMA	Bernd Zahab
	14:30 – 15:00	Questions, open Discussion further actions	All
	15:00 – 16:00	Advanced NDT	Manuel Lohr
	16:00 – 16:30	End of the meeting	All

參、實習公司簡介

一、 FORCE Technology

FORCE Technology 是一家國際技術諮詢服務公司，跨足領域包括能源、石油、天然氣、海運、製造業和基礎設施方面的諮詢和服務。其總部位於丹麥，全球有 1500 多名員工，在挪威、瑞典、美國、新加坡和中國均設有子公司(圖 1)。主要客戶有西門子(Siemens)、丹能(Dong Energy)、VESTAS、奇異(GE)、快桅(Maersk)、英國石油(BP)、殼牌(Shell)、中國石油及中國海洋石油。

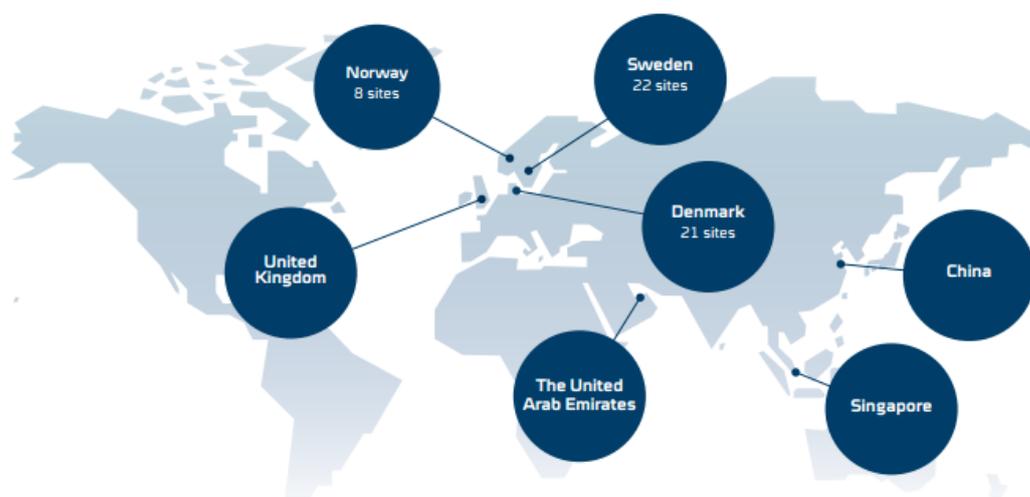


圖 1 FORCE Technology 全球分布位置

FORCE Technology 位於風電大國丹麥。自 1940 年以來，FORCE Technology 向所有製造和利用海上、電廠、壓力容器管道和鋼結構的行業提供了高品質的非破壞檢測服務，在製造、營運、停機和維護期間執行非破壞檢測技術。提供的 NDT 技術，如：目視檢測、射線照相檢測、超音波檢測、渦電流檢測、液滲檢測、磁粒檢測及各種洩漏檢測方法。由於早期就投入離岸風電這個領域，且是離岸風電機組設計、運行和維護服務的世界領先者。其服務包括離岸風電機整個生命週期的狀況評估、驗證、檢驗和測試，從設計開發到生產、安裝、設置、現場檢查和維護。

以下為該公司於離岸風電的專業項目：

- 超音波檢測設備(Ultrasonic inspection equipment)
- 腐蝕和材料檢查(Corrosion and materials examinations)
- 無人機應用於離岸風電機檢測(Drone inspection of wind turbines)

- 離岸風電機組基礎上混凝土的檢查(Inspection of concrete in wind turbine foundations)
- 離岸風電機塔架和基座的壽命評估(Lifetime assessment of wind turbine towers and foundations)
- 離岸風電機基礎監測(Monitoring of offshore wind turbine foundations)
- 離岸風電機組海底結構的非破壞檢測(NDT of subsea structures on wind turbines)
- 離岸風電機轉子葉片上的非破壞檢測(NDT on wind turbine rotor blades)
- 離岸風電機塔架上的非破壞檢測(NDT on wind turbine towers)
- 離岸風電機組非破壞檢測(NDT on wind turbines)

二、 Siemens Gamesa

Siemens Wind Power 為風機製造商，成立於 1980 年，該公司於 2011 年被分割成為 Siemens 的一個獨立部門，總部設在德國漢堡，但海上風電總部設置於丹麥布蘭德(Brande, Denmark)。

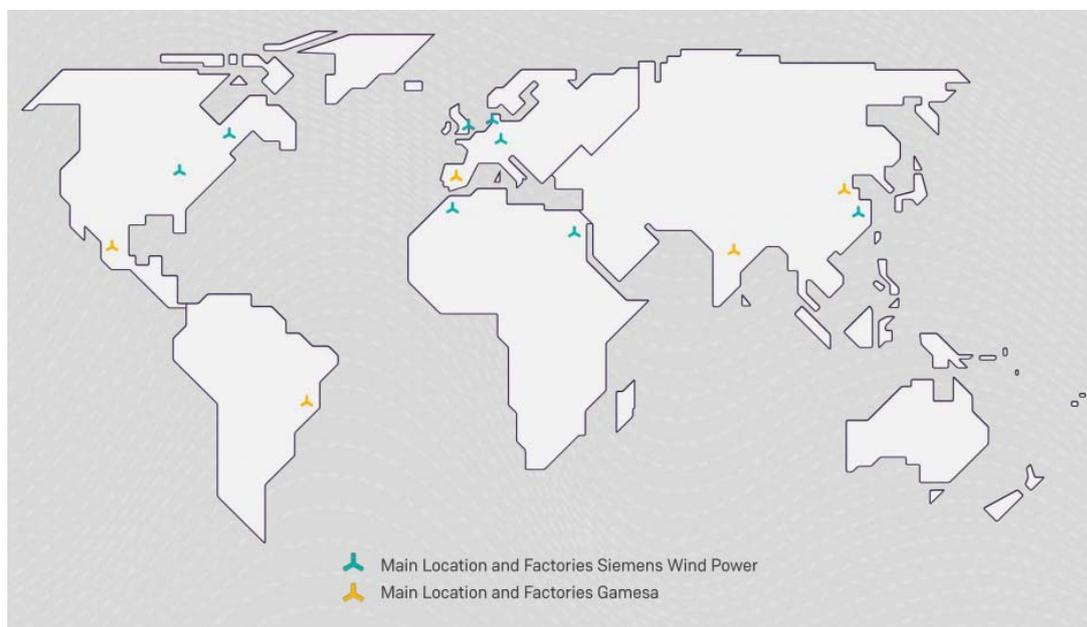


圖 2 Siemens Gamesa 全球分布位置

在 2011 年，Siemens Wind Power 於風機市場占有率為 6.3%，2014 時為世界第二大的風機製造商，2015 年時 Siemens Wind Power 在歐洲離岸風機市場占有率達

63%。因 Siemens Wind Power 希望能於新興市場中，如印度、墨西哥和巴西(圖 2)，建立營運領導地位。故於 2017 年 4 月，西門子與西班牙 Gamesa 公司正式合併，合併後成為全球新一代最大風機製造商，年度營業額達 11 億歐元。全球員工人數達 27,000，合計裝置容量為 75GW。

三、 GMA Group, Inc. (Mistras Group)

GMA Group, Inc.為 Mistras Group 一員，總部位於德國杜塞道夫。該公司為品質保證、非破壞檢測、破壞性材料測試及工程服務領域的領先廠商。GMA 擁有超過二十五年的經驗和 500 多名員工，在德國有 11 個技術單位和測試中心，並在荷蘭和西班牙設有辦事處。GMA Group 在航空、汽車、發電廠、石化行業、工業、離岸風電及交通運輸等領域為客戶提供服務。

GMA Group, Inc.主要客戶涵蓋有西門子(Siemens)、VESTAS、AREVA、Alstom、拜耳(BAYER)、福斯、BMW、英國石油(BP)和勞斯萊斯等。

為加強其在中歐及其他地區的業務，MISTRAS 和 GMA 合併後，共同擁有 1250 多名歐洲員工，成為德國唯一一家非破壞性和破壞性的先進服務、產品、系統和工程解決方案供應商(圖 3 Mistras Group 全球分布圖)。



圖 3 Mistras Group 全球分布圖

肆、實習內容概述

一、超音波檢測(UT)

超音波(UT)為非破壞檢測(NDT)技術中的其中一項，其它還包括渦電流檢測(ET)、磁粒檢測(MT)、射線檢測(RT)、液滲檢測(PT)及目視檢測(VT)。其中超音波(UT)檢測之精準度更加細膩，適合用於品質要求較高之檢測。

非破壞檢測((Non-Destructive Testing, NDT)：利用物理、機械方法或技術，在不破壞材料的情況下，檢測出材料是否產生缺陷、探測材料物理或機械性質的檢測技術。

超音波檢測(UT)：利用高頻振動的音波導入材料內部檢查材料表面或內部缺陷。

渦流檢測(ET)：利用電磁感應生成渦流之原理以達檢測目的，因此僅限於檢測導電材料。

射線檢測(RT)：利用高穿透力的 X 射線或 γ 在不傷害被檢物的本質狀況下檢測材料內部非平面型的缺陷，如氣孔、孔洞等。

磁粒檢測(MT)：利用材料中瑕疵所形成的磁漏磁場，吸引細小磁粒而形成顯示，常用於檢測鐵磁性材質的表面及近表面瑕疵。

目視檢測(VT)：利用眼睛的視覺能力，加上輔助工具、儀器等來進行直接或間接的偵查及檢視各種物件表面的瑕疵。

液滲檢測(PT)：針對非多孔性固體材料，利用液體毛細作用檢測開口至表面間斷的非破壞檢測方法。

離岸風電葉片製造生產為使用複合材料(Composite Material)由兩種或兩種以上不同材料結合而成，同時兼具其組成成份材料上之優點。其製作程式有手積層塗布及噴布法、自動化纖維置放法、模壓成形法、真空成形及吹袋成形法、預浸布積層成形法...等等，以需求之目的來決定製程方法。這些製作方法因為製作的過程中可能產生材質內部的缺陷包含夾層、氣泡、氣孔、缺膠、折皺...等。而這些缺陷若在生產階段或運轉前沒有檢測出來，則對於機組運轉品質有很大的潛在性危害。

利用超音波的特性，音波經由反射、折射、繞射，檢測被測物件厚度及內部缺

陷。經由音波速率與時間長計算得出距離來計算被檢物件厚度和缺陷位置，並由儀器顯示出物件厚度與其它相關資料。

無論是超音波或其它非破壞檢測方法，標準規塊(Block)是非常重要的檢測條件，此標準規塊做為儀器、設備校準使用，並做為未來檢測產品品質之標準與對照。一個標準規塊必須具備與實際之被檢測對象同材質、相同製程、相同的熱處理、相同密度...等。簡而言之，最好是由母材上取下之部份材料將之做為標準規塊，若沒有從母材上取下的規塊，則需要用與母材相同材質依同樣的製程與條件做出幾近相同的規塊。一般標準規塊除了做為材質品質檢測的對照標準之外，還需另一具備人工瑕疵的參考規塊來做為與實際被檢測物件上可能出現的瑕疵訊號做比照。人工瑕疵的型式是依據被檢物於製作程序與所處環境變化所受到影響可能產生的缺陷，也就是由應力集中或是不完美的製程所可能產生的缺陷。所以簡而言之，標準規塊是做為儀器校準用，具有人工缺陷的參考規塊是為儀器對缺陷靈敏度的設定用。因此在參考規塊的製作上應就該葉片實際製作過程中可能出現的瑕疵(缺陷)來做出這些人工瑕疵(缺陷)。圖 4 為複合材料標準規塊示意圖，編號為人工瑕疵位置。圖 5 為人工瑕疵規塊於超音波檢測的顯示。

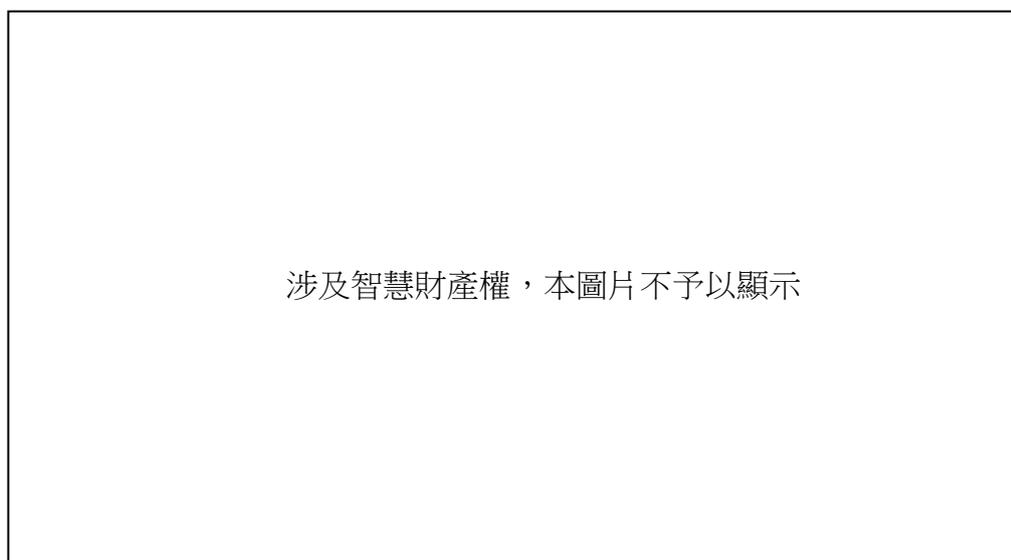


圖 4 複合材料標準規塊示意圖

涉及智慧財產權，本圖片不予以顯示

圖 5 人工瑕疵於超音波檢測的顯示

超音波應用以使用的方式有手動超音波檢測與自動超音波檢測。手動超音波檢測儀器的主要功能與優點為具有立即訊號判別的功能與在工作場所較不受環境限制影響。唯其缺點是無法對大型被檢物檢測收集的訊號做存儲之功能，且手動受人為因素影響較大容易影響訊號判別。而自動超音波檢測的優點，因其使用全自動檢測系統不會受到人為因素影響，且全自動的檢測方式對整個被檢測物件有清楚且完整的檢測記錄，可待日後對於檢測結果有所疑慮時可將收集的檢測資料取出再次加以分析。表 1 為手動超音波檢測與自動超音波檢測比較表。

	手動超音波檢測	自動超音波檢測
設備尺寸	小，可單人攜帶	較大。除儀器外，還須包括掃描器
探頭數量	受使用設備與操作員人數限制	依檢測範圍大小可增減探頭使用數量
訊號結果	受人為影響因素大，易影響訊號收集結果	自動系統掃描收集訊號，訊號清楚、不易間斷。
檢測區域	小，較不受工作現場環境限制影響	大，設備需不被周遭環境影響
資料儲存	手動式無法詳細記載訊號位置	可儲存大量數據且清楚記錄完整的檢測過程與檢測位置
檢測速度	受操作人員與訊號解析度影響	可使用多顆探頭，檢測範圍較大且快

表 1 手動超音波檢測與自動超音波檢測比較表

參照綜合表 1，自動超音波的應用時機主要有以下幾點：

1. 需完整與清楚記錄檢測區域位置，可資料儲存與待日後查驗。
2. 需使用多角度探頭(換能器)或其它檢測方法時。
3. 特殊工作環境，如高空或輻射作業環境等危險環境或不適人員作業區域。
4. 生產線產品自動化檢測，如鋼材成品自動化檢測等。

二、 離岸風電葉片檢測(Blade Inspection)

離岸風電機組主要組成：(1)葉片、(2)塔架、(3)變速齒輪箱及(4)發電機等，其中葉片及塔架佔了成本的一半以上，並且葉片之形狀對於風能的截取扮演重大的角色，其葉片之翼型及所使用之材料對離岸風電的效率有很大的影響，風力葉片主要使用的材料為 FRP 纖維複合材料，從最開始的聚酯樹脂與玻璃纖維的組合，隨著離岸風電機改變其開始轉向高瓦數也就是大型葉片，近期轉變為使用碳纖維及環氧樹脂等。

風力葉片的超音波非破壞檢測是結合多年經驗及多種超音波檢測技術的發展來應用在複合材料，如 GFRP、CFRP 等。其證實能有效且可以檢測到大量與多種的缺陷的檢出，諸如缺膠、乾纖維、氣孔、夾層、雜質、折皺、黏接面缺膠等，如圖 6。詳細的葉片缺陷說明請參照表 2。



圖 6 複合材料葉片缺陷(瑕疵)示意圖

缺陷名稱	缺陷描述	檢測內容
殼體損傷	殼體撞傷凹陷、殼體切傷、輕度發黑、纖維布分層（包括殼體蒙皮和夾芯材料的分層）	檢測殼體的損傷程度，為後續修補措施提供依據。
乾纖維	殼體在灌注過程中，由於包圍、動力不足等因素導致纖維未浸膠的情況。	乾纖維的位置、深度，尤其是夾層幹纖維的內層或外層，最終修補方案是採用補灌或打磨。
黏接面缺膠	殼體缺膠是指黏接面未全部黏上，局部有氣泡、空洞、小縫隙等。	前/後緣黏接面、大樑黏接面，尤其是大樑與梁帽黏接區域複雜結構區域等。
夾雜質	殼體夾雜是指在殼體結構層中夾有非設計性材料，對葉片性能造成一定的影響。	異物類型：脫模布、真空袋、隔離膜、剪刀、尼龍繩、紙條、膠帶紙等。
殼體發白	指由灌注時漏氣、包圍，固化時局部過熱等一些因素引起的殼體局部纖維含膠量偏低的現象。	一般發白都是表層發白，可以目測，但有時表層延伸到內部，需探測深度和程度。
纖維褶皺	纖維布在鋪層或者灌注過程中，由於一定原因導致最終固化後內部褶皺，從而使一定區域厚度過渡不均。	纖維褶皺的區域，距離內外表面的厚度，褶皺纖維的層數等。

表 2 複合材料葉片常見缺陷一覽表

AMS-46 全自動檢測掃描器

AMS-46 (如圖 7)是 Force Technology 所開發一套用於葉片 (Blade)製造階段檢測製造瑕疵(缺陷)的一套超音波檢測掃描器，與 P-Scan 資料收集與分析系統搭配使用。

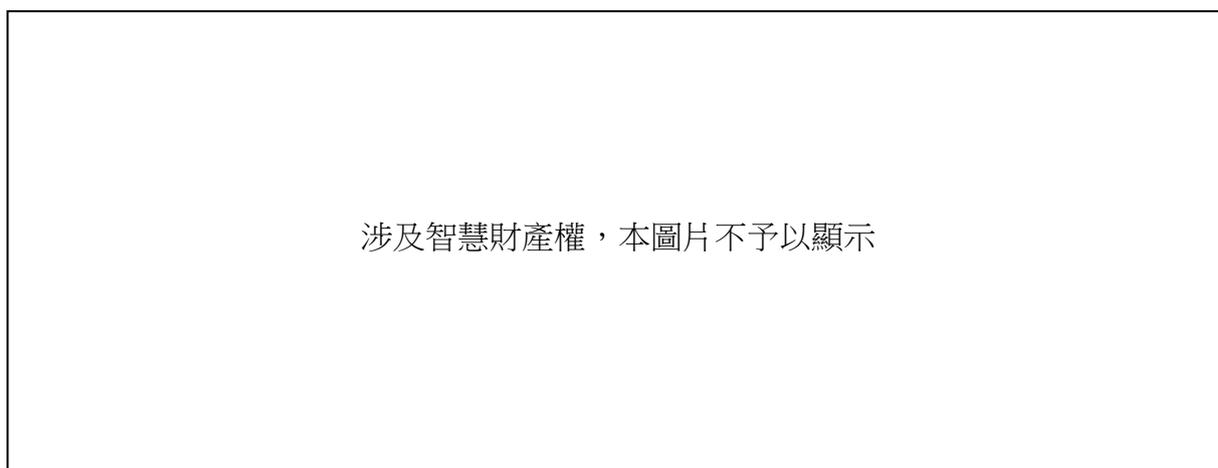


圖 7 AMS-46 & P-Scan 超音波全自動檢測系統

特點：

- 1.經由控制器與攝影鏡頭來控制整個掃描系統
- 2.快速、解析、有效率地映射出主樑夾板與接合線
- 3.自走式爬行掃描系統
- 4.可同時配置多超音波探頭進行檢測

應用範圍：

- 1.複合材質主樑處之乾膠區與分層顯示。
- 2.黏合處之膠合評估。
- 3.葉片水平檢測。
- 4.纖維波紋（皺紋和起伏）的評估。

應用範例：

掃瞄器(scanner)的 X 軸方向與 Y 軸方向之檢測速率(velocity)最大為 100mm/sec 及 250 mm/sec，換能器(transducer)之直徑為 ϕ 25 mm。測試時所需要的時間以被測試件以及所需的解析度為參數。掃描寬度 500mm、X 跨步(step)20mm，可得到良好的涵蓋範圍，且可以同時 2 個 Y 軸方向移動，。因此每移動 500mm 的範圍只需一秒。每公尺(1000mm) X 軸所需的跨步(step)數為 $1000 / 20 \text{ mm} = 50 \text{ steps}$ 。因此掃描一公尺(1000mm)的時間為： $50 \text{ X steps} \times 1 \text{ second} + 50 \text{ Y strokes} \times 1 \text{ second} = 100 \text{ seconds per 1 meter scanning}$ (每 1 公尺掃描時間為 100 秒)，含蓋整個測試的範圍。

以一半的解析度可以同樣得到一半的掃描時間= 50 seconds per 1 meter of scanning(每 1 公尺掃描時間為 50 秒)。

AMS-64 全自動檢測掃描器

上述檢測掃描器為製造階段風力葉片檢測使用，AMS-64 則是風力機組在營運運轉階段檢測使用，如圖 8。

涉及智慧財產權，本圖片不予以顯示

圖 8 AMS-64 全自動檢測掃描器

特點：

- 1.體積小，檢測運送時只需兩箱，大小為 950x690x480mm。
- 2.使用氣動吸盤附著於被檢測物上。
- 3.兩個可移動 Y 軸，涵蓋檢測範圍達 950mm。

三、 離岸風電塔架銲道檢測(Tower Welding Inspection)

離岸風電塔架的類型主要有桁架式(lattice tower)與管狀式(tubular tower)等。桁架式塔架造價低廉，缺點是維護不方便。管狀式塔架是用鋼板捲製銲接而成，外形為上小下大的圓錐管。管狀式塔架結構緊湊、安全可靠、維護方便、外形美觀，雖然造價較桁架式塔架高，但仍被廣泛採用。

風電管狀式塔架圓錐筒形銲接結構件為分段製造，每段高度在十幾公尺至三十幾公尺，每段節間採用連接法蘭連接，頂部安裝葉片、機艙、變速齒輪箱及發電機等。風電管狀塔架製造難點在於解決各段連接法蘭之間的平面度、平行度與銲接變形的問題。管塔式塔架的生產製造流程一般如下：數位切割機下料，厚板需要開銲接坡口。捲板機捲板成型後，點焊、定位、確認後進行內外縱向銲道的銲接。圓度檢查後，如有問題進行二次較圓。單段筒體銲接完成後，採用液壓組對滾輪架進行

組對點銲，接著銲接內外周向銲道、直線度等公差檢查、銲接法蘭。再進行銲道非破壞檢測和平面度檢查。最後於噴砂，噴漆處理、完成內件安裝和成品檢驗後，運輸至安裝現場。

由於銲道為塔架結構中最薄弱的部位，在銲接過程中對於銲道中不允許有裂紋(crack)、夾渣(slag)、氣孔(porosity)、填料不足(underfill)、不完全融合(incomplete fusion)、不完全滲透(incomplete penetration)及深度大於規範的銲蝕(undercut)等缺陷的存在，且銲接瑕疵和缺陷發生成因，基本上可分為技術性和操作性二類。1).**技術性**:指材料特性、銲材選用、接頭設計、程序條件等因素造成，包括裂紋，如冷裂紋和熱裂紋。2).**操作性**:指操作人員因操作技藝因素所造成，包括氣孔、夾渣及不完全滲透。

TOFD 繞射波飛行時間法

繞射波飛行時間法(TOFD)之檢測是以斜束縱波雙探頭，一發一收方式藉由瑕疵上下尖端產生繞射來擷取其繞射波傳送的時間差，經由 TOFD 電腦軟體計算出瑕疵的尺寸。探頭角度範圍從 45° 至 70°，而發射探頭在發射超音波訊號時會在物件表面產生表面波及物件底面會產生底面反射波，若在發射探頭與接收探頭之音波涵蓋範圍內有長形缺陷則會在缺陷兩端產生繞射波，如以 A-scan 信號顯示方式則會有上下尖端訊號產生。其最大優點適用於從外部精確檢測各種缺陷，由於訊號均經電腦處理及儲存，能方便未來準確的追蹤缺陷劣化的趨勢，圖 9 為 TOFD 訊號及掃描示意圖。

涉及智慧財產權，本圖片不予以顯示

圖 9 TOFD 訊號及掃描示意圖

PAUT 相位陣列超音波

PAUT 相位陣列探頭由一系列的個別晶體所構成，每一晶體可各自產生時間平移

且每一晶體皆有個別的連結線，利用時間平移使波產生干涉作用搭配楔形塊以達到不同角度的掃瞄範圍。利用其強大的運算系統可將多數 A-scan 處理成 2-D 的扇型模式掃瞄 Sectorial-scan(S-scan)方便檢測人員研判，圖 10 為 PAUT 訊號及掃描示意圖。

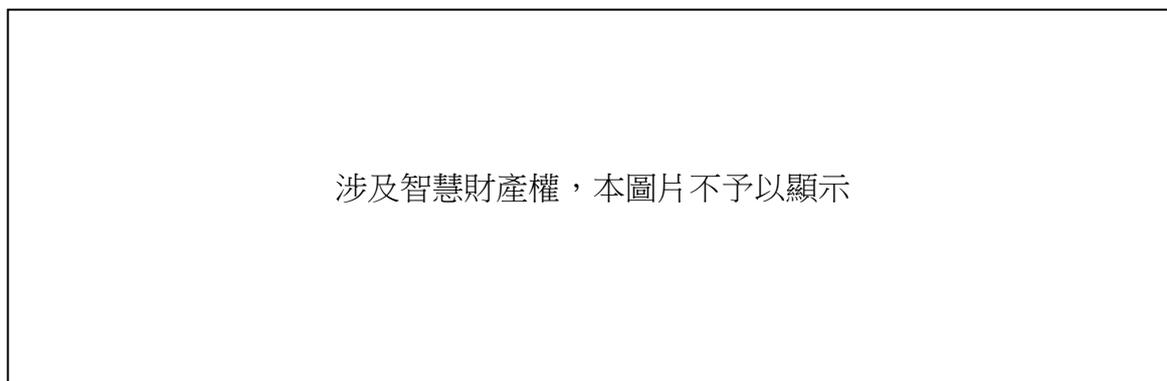


圖 10 PAUT 訊號及掃描示意圖

TOFD & PAUT

由於 TOFD 有著以下幾點特性(劣勢)，無法單獨使用來檢測碳鋼銲道。因此結合使用 PAUT 可用來快速且有效檢出碳鋼銲道內存在的瑕疵或缺陷，如圖 11。

1. TOFD 技術對材料特性敏感

TOFD 衍射信號微弱，增益較高，使銲道及母材中的晶粒雜訊放大，造成檢測信噪比較低，缺陷識別困難。目前 TOFD 技術僅用於碳鋼及其他細晶材料的檢測，鑄鋼及不銹鋼等粗晶材料不適用。

2. 檢測物件結構單一，目前僅適用於平板或者管對接銲道。

TOFD 技術要求一發一收的兩個探頭對稱佈置，故對不等厚銲道、填角銲道、T 型銲道及管節點銲道檢測時存在困難。檢測不等厚銲道時，定位及定量誤差增大；填角銲道及 T 型銲道等因探頭無法放置於同一平面，需要特殊的檢測工藝，且伴有諸多局限性，目前較少採用。

3. 單次掃描不能確定缺陷的準確位置、深度及高度。

TOFD 檢測和定位缺陷依賴於信號到達時間，按照三角幾何關係計算內部衍射信號與橫波的時間差，進行深度座標的線性化。理論上，缺陷回波位置位於以發射/接收兩個波束主軸的出射/接收點為焦點的橢圓之上。單次掃描時，通常假定缺陷位於焊縫中心線上，計算缺陷深度及高度值，因此對偏離焊縫中心線的缺陷會帶來誤差，偏離越遠，誤差越大。

4. 存在上下表面盲區

橫波具有一定的持續寬度，位於近表面的缺陷因渡越時間與橫波傳播時間接近，其衍射波將淹沒於橫波中，導致缺陷漏檢。該盲區稱為上表面盲區。檢測位於鐸道中心線兩側、靠近底面的缺陷時，衍射回波的渡越時間可能大於底面反射波的到達時間，從而使缺陷衍射回波淹沒於底面反射波之中，造成漏檢，該盲區稱為下表面盲區。對上表面盲區，應輔以其他檢測技術手段予以補充，如 PAUT、磁粉等。使用表面檢測手段時，應對表面檢測手段的有效檢測深度予以確認。TOFD 的下表面盲區相對較小，當檢測驗收等級較高時，應採用偏置非平行掃描予以補充。當檢測驗收等級較低時，可以忽略。

涉及智慧財產權，本圖片不予以顯示

圖 11 TOFD & PAUT 訊號及掃描示意圖

為了有效預防及檢出製造階段相關製造瑕疵或缺陷的存在，應用 TOFD & PAUT 於塔架鐸道檢測是生產製造過程中必須的環節，以確保塔架的生產品質。

AMS-41 全自動檢測掃描器

Force Technology AMS-41 掃描器(圖 12)是設計用於風電管塔式塔架或類似結構的超音波檢測設備，其特點如下所述。

涉及智慧財產權，本圖片不予以顯示

圖 12 AMS-41 掃描器

1.有效減少檢測時間、2.掃描器可由單一人員操作、3.掃描厚度從 8mm 至 70mm、4.掃描速度可達 35mm/sec、5. 支援對接法蘭銲道檢測、6.使用水為耦合劑、7. 適用於脈衝回波和 TOFD 檢測、8.掃描器上配有紅外線準直儀，可自動修正掃描偏位。

四、無人機應用於葉片(Blade)外觀檢測

製造期間的風力葉片檢測，可應用如前述使用超音波和一般目視檢測葉片缺陷或瑕疵。但營運中的風電機組由於所在位置一般不容易接近檢測且環境危險，因此使用較為先進的檢測方式來執行任務更為適當。

無人機檢測適用於陸上和海上的建築、離岸風電機組、煙囪、橋樑和其他難以到達的設施，但仍必須考慮到國家或地方法規的限制。

無人機的目視檢查是一種快速且具成本效益的檢查方法，證明具有高價值、確保更長的檢查周期、增加對結構條件的了解、檢查腐蝕和閃電等造成的損壞。無人機檢測可以接近不容易接近的結構和細節，可以提供立即行動、替代傳統耗時和昂貴的檢查方法，如使用繩索垂降、電梯和鷹架。

檢查風力風電機組受到風速環境條件的影響甚大，遠端控制功能可允許無人機檢查高風險區域，使檢查人員能夠遠離危險區域，同樣可獲得檢查位置的關鍵詳細圖像和影像，而不干擾過程，例如電塔及離岸風電葉片或塔架。由於低檢測成本、快速設置和高解析度支援顯示表面受損的情況，可使機組停機時間最小化並增加發電時間。

葉片前緣損壞(圖 13)會降低離岸風電機的發電效率，使用無人機檢查顯示葉片損壞，可確保即時進行維修。另外對機組避雷器的損壞可能導致進一步的損壞或關鍵部件的壽命降低(圖 14)，通過圖片或影像，可以及早發現問題並及時進行維修。

涉及智慧財產權，本圖片不予以顯示

圖 13 葉片前緣損壞

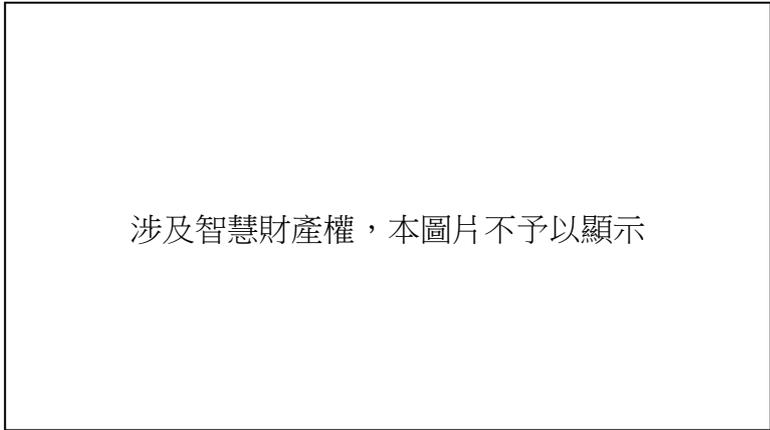


圖 14 避雷器損壞所造成的葉片瑕疵

五、 離岸風電結構即時監控

引用『以可靠性為中心的維修(Reliability-Centered Maintenance)』的預防性維護 (Preventive maintenance)，如圖 15，是當今海上工業中最常用的維護策略。

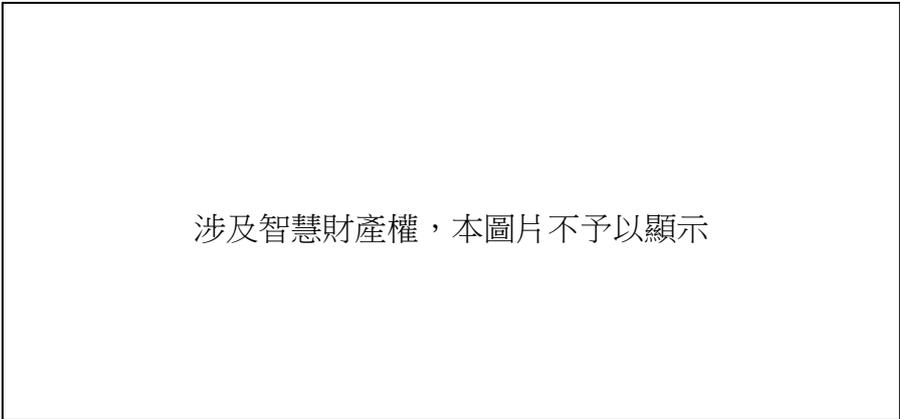


圖 15 以可靠性為中心的維修

當預防性維護運用在海上離岸風電機組時，理論上認知機組的使用壽命是可估計的，機組不會提前故障可等到達週期時間才進行大修，但在實際中並不總是如此的容易。隨著離岸風電機組中的部件隨機失效，對離岸風電機組基礎的早期失效的隱憂也逐漸浮出。因為當風電機組發生結構的腐蝕或疲勞進而造成失效時，其經濟損失是顯著的，且遠遠高於即時狀態監測系統的建置費用。

安裝即時監測系統來收集數據和評估，以監測離岸風電機組結構的變化，從而可以從具有成本效益的方式採取行動，以保持系統的可靠性。

下列為即時監測系統的特點：

- 狀態監測使用專用技術（關鍵區域）來監測運轉條件的變化:**多數的失效模式具有可測量的響應並且須要一段時間的成長。
- 狀態監測提供潛在故障的早期警告:**如果測量的參數被選擇和適當地測量和分析，

將獲得有價值的信息用於維護規劃目的，並且可以立即消除嚴重的變化。

- 狀態監控提供有關失效性質的訊息**:機器上的採樣速率和對維護歷史的訪問可能對所作出的最終決策的品質有影響。

- 狀態監控評估糾正措施**:收集的數據將對現有工程設計的任何設計校正或優化都有極大的好處。

離岸風電機組結構監測技術包括應變計、加速度計、線性差動變壓器、溶氧量、溫度、陰極保護、腐蝕監控、水位感測器、沖刷感測器、電位感測器，安裝位置如圖示 16 說明。



圖 16 離岸風電機組結構監測技術

▪應變計(Strain Gauge)

應變測量有幾個原因，例如：澄清設計負荷假設是否正確、計算連接段(transition piece)和基礎(foundation)的疲勞負荷、確定結構的特徵頻率等。

根據這些原因，應變計通常於設計階段就安裝在具有疲勞危險或高風險的結構位置處，如圖 17 所示。

▪加速度計(Accelerometer)

結構的動態模式通常可從應變計獲得。另外，通過加速度計也是可以監測基礎結構的振動水平、共振頻率和阻尼值，如圖 18 所示。

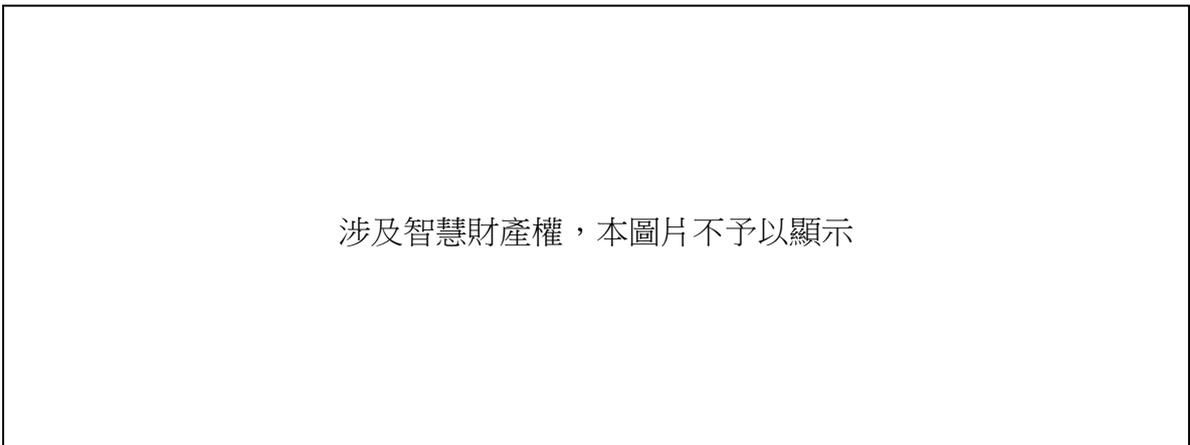


圖 17 應變計安裝示意圖

圖 18 加速度計安裝示意圖

▪線性差動變壓器(LVDT)

可以監測連接段和基礎之間的灌漿連接時吸收的負載所造成的相對位移。如連接段相對於基礎的垂直位移的測量、測量施加在止動器上的接觸力，如圖 19 所示。

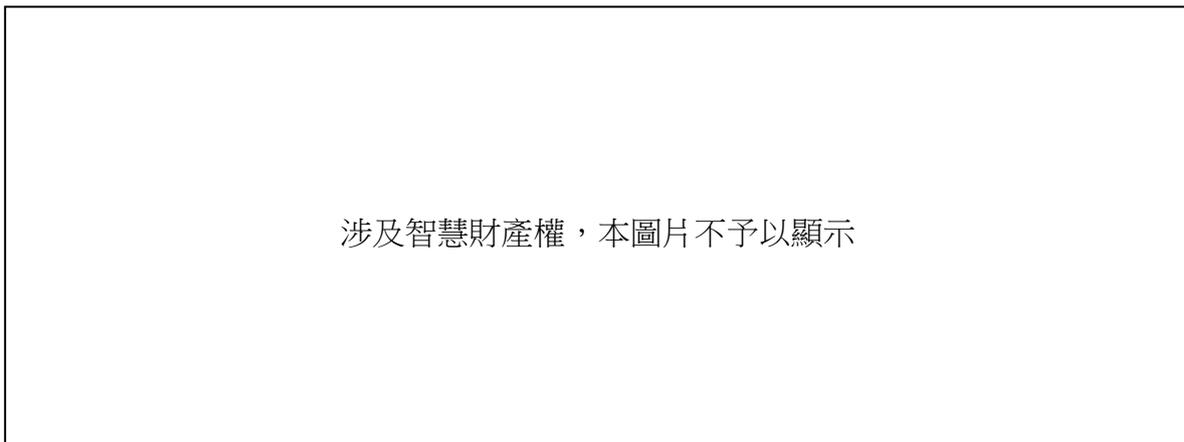


圖 19 線性差動變壓器(LVDT)

圖 20 溶氧量計

•溶氧量(Dissolved oxygen)

風機基礎的設計是為一封閉空間，與海水完全隔絕。然而，經驗表明，海水可以透過不同的方式進入基樁，例如: J 管墊圈。因此須使用專門設計的測量架進行檢查，以便對溶氧量和基礎內的其他關鍵環境參數進行監測，如圖 20 所示。

•陰極保護

因為對外部的區域和潮汐影響的不確定性，以及取決於位置的微生物學，沉積物組成和內部海水通風的影響，通常要求監測陰極保護 (CP)。CP 監測基於使用耐用參考電極或探針測量受保護鋼材的實際腐蝕速率的電位測量。結構和犧牲陽極之間運行的保護電流也被記錄，因為該參數提供了關於腐蝕條件以及陽極消耗的發展的有價值的信息，如圖 21。

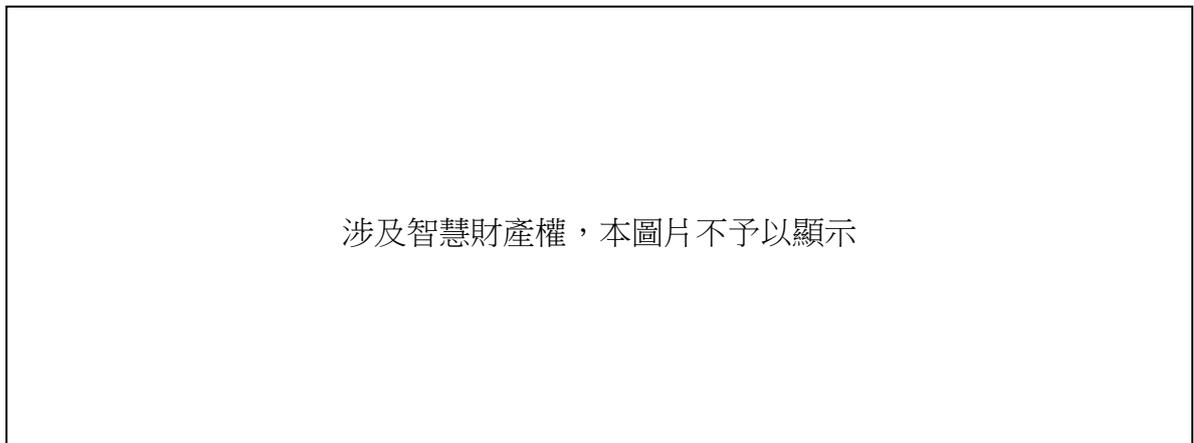


圖 21 陰極保護

圖 22 泥漿區腐蝕監測

•泥漿區腐蝕

基樁基礎內的泥漿線可代表高度局部腐蝕的風險，這是由於泥漿中的細菌活性和含氧介質和貧氧泥漿區之間的大量的直流元素組合。對於量測泥漿線中的腐蝕沒有直接的標準化方法，如圖 22 所示。

•沖刷和海底特性

海底水位 (沖刷) 的變化是即時測量的，並從傳感器的現場回傳。Scour 監測器可以獲取關於各種物理結構 (包括單樁) 的底部高程中隨時間的動態變化的重要數據，如圖 23 所示。

涉及智慧財產權，本圖片不予以顯示

圖 23 沖刷感測器

圖 24 ER 腐蝕速率測量

•ER 腐蝕速率測量

在單樁中的即時速率腐蝕測量是提供依靠氧氣的無保護結構消耗以及由陽極保護的結構（陰極保護 CP）。為此目的提供了基於電阻（ER）的經驗證的探針，其具有 0.006mm /年的分辨率。該技術在偏差條件（例如 CP 故障，酸化或過度的海水進入）的情況下提供預警。除了腐蝕速率，ER 探頭提供了來自參考元件的電阻測量的溫度的間接測量。如圖 24 所示。

•資料收集系統

資料收集系統設計用於安裝在氣密室上方，可以作為“獨立”系統提供。可以使用通過 WAN、LAN 或傳統 GSM 方式連接通信。也可以結合到風電場的 SCADA 系統。所有測量都作為原始數據存儲或傳輸。資料收即系統設計安裝在氣密室上方，如圖 25 所示。

涉及智慧財產權，本圖片不予以顯示

圖 25 資料收集系統

六、聲發射檢測技術

材料局部或結構在外力與內力的作用下產生變形或斷裂時，以彈性波的形式釋放出應變成能的現象。

聲發射檢測技術可對裂紋的發生和成長進行動態監測，進而能夠有效檢測出風機葉片、塔架鉚道或螺栓結構的品質狀態，評價缺陷的實際危害程度，可預防意外事故的發生。在檢測過程中，接收的信號是缺陷在應力作用下自發產生的，但在實際應用中，由於聲發射對環境因素十分敏感，因此對監測系統會造成干擾，影響檢測的準確性，所以很難對缺陷進行定量分析，但是能夠提供缺陷在應力作用下的動態資訊，對於壽命評估有一定的優勢，可對結構進行安全性評估。

該方法與超音波法相比，在檢測靜態結構方面沒有優勢；然而，由於使用該技術可以遠端監測，不需要接近被檢測物，因而比較適用於離岸風電營運階段葉片、塔架鉚道或螺栓的全天候即時監測。

並採用多感測器長距離佈置的方式，能夠接收到葉片在運行過程中所產生的聲發射信號，通過後處理，可以獲得損傷部位的動態資訊。採用該方法對葉片進行監測，主要是因為葉片在運行過程中，會受到外力作用，進而產生應力集中現象，缺陷處在外力作用下會自發的產生信號，這樣就能夠判斷出缺陷產生的位置。

特點如下：

1. 聲發射檢測技術對成長中的缺陷有極高的靈敏度，可以探測到微米級的裂紋。
2. 聲發射感應器是固定在被檢測物面陣列方式來檢測，不需要移動感應器。因此對被檢測物表面的加工品質要求不高。
3. 缺陷尺寸、位置及方位不影響聲發射檢測結果。
4. 受到材料的限制小。例如：沃斯田鐵系不鏽鋼的熱裂紋，用 RT 或 UT 檢測難度較高，使用聲發射技術有明顯優勢。

以下為聲發射監測技術實際用在離岸風電機組情況：

▪螺栓-聲發射監測

涉及智慧財產權，本圖片不予以顯示

▪塔架鉚道-聲發射監測

涉及智慧財產權，本圖片不予以顯示

伍、心得與建議

再生能源發電佔比將逐年增加，其中陸域風電已漸趨飽和，離岸風電建置目前正值開發期，未來不論在製造及營運階段檢測工作都需要投入較多的軟硬體來配合，本次實地接觸的三家廠商，他們的業務均遍及全世界風電產業，尤其在風電領域的檢測與監測累積多年經驗，從實務教學中我們獲益良多。

風電可用率是營運的重點，要提高可用率必須要有良好的運維措施及環境條件，因此從製造期針對結構做好檢測，管控制程品質，在營運階段透過監測系統搭配適用的檢測方法查驗(如表 3)，有效掌握風機狀況預防損壞，即可提升風機的可靠度(可用率)，讓風力發電源源不絕。

涉及智慧財產權，本圖片不予以顯示

◎：極佳 ○：佳 △：選做

表 3 非破壞檢測和即時監測於風電結構應用範圍

建議事項如下:

1. 建議引進 Force Technology 新開發之 AMS-41 全自動超音波掃描器，用於風機管狀塔架製造階段，可進行精準、有品質、高效率的檢出鐳道缺陷之用。
2. 離岸風電機組營運期間目視檢測，可採無人機取代傳統方式，配合精準 GPS 定位、軟體建置大修週期、儲存檢測資料等，是可進行之方向。
3. 投資聲發射及即時狀態監測系統，透過先進的狀態監測系統預知設備故障，並配合非破壞檢測系統提高維修時效。