



國立臺灣大學工學院工程科學及海洋工程研究所

碩士論文

Department of Engineering Science and Ocean Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

離岸風機塗層特性變化之監測技術開發

The Development of Corrosion Monitoring Technology
for Coating Characteristics of Offshore Wind Turbines

蔡宗翰

Zong-Han Cai

指導教授：李岳聯 博士

Advisor：Yueh-Lien Lee, Ph.D.

中華民國 112 年 7 月

July, 2023

口試審定書



致謝



感謝李岳聯教授、褚喻仁博士這幾年來的教導，讓這篇論文可以具有良好的成果，期望能提供給日後做相關研究的人員不一樣的研究方向，對於塗層監測系統能有更完善的檢測方式，在研究過程中也要感謝陳昭宏教授提供實驗上的想法以及電路設計上的協助。

感謝實驗室同仁這幾年來提供的幫忙，分享彼此遇到的困境或是碰到有趣的事情，討論如何改善或是修正錯誤的地方，透過與同仁們討論可以加速實驗的進展，並對於如何將實驗成果呈現出來有相當的幫助。

摘要



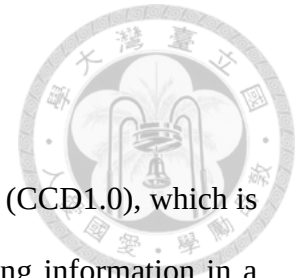
台灣位於亞熱帶區域，再加上四面環海，高溫高濕所引起的腐蝕破壞將是台灣海上的離岸風機長時間正常運作所需克服的挑戰。因此需要透過腐蝕檢測及監測的方式掌握其腐蝕狀態，以此對設施進行提前預警和壽命評估，並確保這些工程可以持續運作及檢修人員的安全。

本論文於前半部份將針對離岸風機建設於台灣如此嚴苛的腐蝕環境下面臨的困境以及常應用於工業上檢測腐蝕情況的技術進行介紹，並且回顧了本團隊先前對於防腐蝕塗層是否還具有保護力所開發之塗層監測系統，包含了 CID、CID 2.0 及 CID 3.0，CID 驗證了運用分壓公式得以計算塗層阻抗值的初步概念，CID 2.0 透過 FPGA 等硬體整合將前述之概念進行微型化，CID 3.0 則在 CID 2.0 的基礎上對電路及訊號處理作改良，提升塗層阻抗量測之準確性。有鑑於過往做單點頻率阻抗量測時會有誤判的情形發生，本論文的主要目的為藉由擷取一段頻率範圍獲得更多塗層性質相關資訊，以此來提升判斷塗層保護性是否完好之準確性。

實驗結果顯示，透過 CCD 1.0 量測不同頻率電壓訊號反饋電流之比值，不僅能降低因外在因素干擾(塗層在施工時的厚薄度差異、塗層狀態處於腐蝕初期等)造成誤判塗層對於底材之保護力，還能判斷出良好塗層及受破壞塗層之優劣，呈現出當具良好保護能力之塗層(特性相似於電容)在腐蝕環境中持續劣化以致於保護能力下降(即塗層之電化學阻抗特性逐漸趨向電阻)之特性。

關鍵字：防蝕塗層監測、電化學交流阻抗量測、電流比值、塗層性質

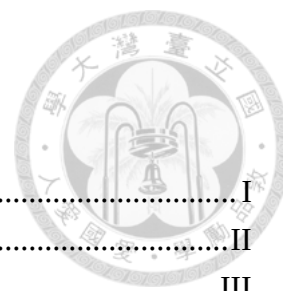
Abstract



In this study, we propose the coating characteristic detector 1.0 (CCD1.0), which is an improved version of our previously developed CID. By acquiring information in a range of frequency to realize more information about the coating properties and improving the accuracy of the durability of protective organic coatings. Among many methods of measuring frequency interval, we replaced the sinusoidal-wave with square-wave signal injection and used the current responses at several different frequencies to measure the current ratio. Compared with the previous CID which the impedance modulus was evaluated at a single frequency, CCD1.0 successfully reduced the misjudgment of the protective coating health and indicated the coating characteristics which tend to be capacitance or resistance with an appropriate frequency interval.

Keywords: Coating degradation, Corrosion monitor, Coating characteristic, Current ratio, Electrochemical impedance spectroscopy

目錄



口試委員會審定書	I
致謝	II
摘要	III
Abstract.....	IV
目錄	V
圖目錄	VII
表目錄	IX
1. 第一章 序論	1
1.1 研究動機	1
1.2 研究背景	2
1.2.1 離岸風機結構	2
1.2.2 腐蝕對於離岸風機之影響	3
2. 第二章 文獻回顧	7
2.1 腐蝕的防治技術	7
2.1.1 電化學防蝕法	7
2.1.2 表面處理防蝕法[17]	9
2.2 腐蝕的檢測與評估方法	11
2.2.1 渦電流檢測法(Eddy Current Testing, ECT)[30-33]	11
2.2.2 超聲波檢測法(Ultrasonic Technique, UT)[35-37]	12
2.2.3 紅外線熱成像法(Infrared thermography)[38-41]	12
2.2.4 電阻法(Electrical Resistance, ER)[42]	13
2.2.5 開路電位法(Open-Circuit Potential, OCP)	13
2.2.6 線性極化阻抗量測(Linear Polarization Resistance, LPR)	14
2.2.7 交流阻抗頻譜法(Electrochemical impedance spectroscopy, EIS)[44-51]	15
2.3 塗層健康監測儀 (Coating Health Monitor, CHM)[52, 53]	16
2.4 塗層阻抗監測儀 (Coating Impedance Detector, CID)	21

2.4.1	第一代塗層阻抗監測儀 (CID) [54, 55].....	21
2.4.2	第二代塗層阻抗監測儀 (CID 2.0)[55, 56].....	26
2.4.3	第三代塗層阻抗監測儀 (CID 3.0)[11].....	33
3.	第三章 實驗方法與流程	41
3.1	實驗器材介紹	41
3.1.1	恆電位儀(Potentiostat).....	41
3.1.2	塗層特性監測儀 (Coating Characteristic Detector, CCD 1.0)....	43
3.2	實驗設計	47
3.2.1	電流波形與塗層抗蝕能力變化	48
3.2.2	工程指標建立	49
3.2.3	CCD 1.0 準確性量測(Accuracy)	53
3.2.4	CCD 1.0 靈敏度量測(Sensitivity)	54
3.2.5	CCD 1.0 精確度量測(Precision)	54
4.	第四章 實驗成果與討論	55
4.1.1	電流波形與塗層抗蝕能力變化量測結果	56
4.1.2	高阻抗塗層系統量測結果比較	58
4.1.3	受破壞之塗層系統量測結果比較	61
4.1.4	受破壞之塗層系統量測結果之靈敏度與精確性比較	64
5.	第五章 結論	66
6.	第六章 未來工作	67
	參考文獻	68

圖目錄



圖 1-1 離岸風機結構示意圖	3
圖 1-2 離岸風機不同環境之腐蝕速率[15]	5
圖 1-3 處於飛沫帶之海上結構腐蝕情況[16]	6
圖 2-1 犧牲陽極法示意圖	8
圖 2-2 外加電流法示意圖	8
圖 2-3 渦電流檢測法示意圖[34]	12
圖 2-4 CHM 外觀圖[54]	16
圖 2-5 CHM 內部電路配置[54]	17
圖 2-6 CHM 遠端傳輸接收器[54]	17
圖 2-7 恆電位儀對 PU 塗漆試片量測結果圖[54]	18
圖 2-8 CHM 與恆電位儀對鍍鋅鋼板量測結果圖[54]	19
圖 2-9 CHM 與恆電位儀對 PU 塗層量測結果圖[54]	19
圖 2-10 CHM 與恆電位儀對離岸風機塗層量測結果圖[54]	20
圖 2-11 CID 電路板外觀及連接外部儀器之配置圖	22
圖 2-12 分壓電路設置圖	22
圖 2-13 CID 實驗架設全貌	23
圖 2-14 CID 添加 OP 進行電路改良之設計圖	24
圖 2-15 CID 與恆電位儀對標準電阻量測結果	25
圖 2-16 聚氨酯塗層厚度 105 μm 之式樣 Bode Plot	26
圖 2-17 Altera DE0-Nano FPGA 之功能配置	27
圖 2-18 結合 PCB 與 FPGA 之 CID 2.0 整體外觀	28
圖 2-19 CID 2.0 整體架設全貌	29
圖 2-20 CID 2.0 與恆電位儀對標準電阻量測結果	30
圖 2-21 環氧樹脂塗層厚度 100 μm 之式樣 Bode Plot	31
圖 2-22 環氧樹脂塗層厚度 220 μm 之式樣 Bode Plot	32
圖 2-23 CID 2.0 對高阻抗環氧樹脂塗層試樣量測	32
圖 2-24 CID 2.0 對高阻抗塗層試樣進行十次量測	33
圖 2-25 CID 3.0 改良電路方塊圖	35
圖 2-26 三種高阻抗塗層系統量測結果比較(a) 75 μm 厚之環氧樹脂塗層試樣； (b) 450 μm 厚之環氧樹脂塗層試樣；(c) 550 μm 厚之環氧樹脂塗層試樣 ..	38
圖 2-27 60 小時連續監測結果比較	39
圖 3-1 Ref 600 恆電位儀外觀	42
圖 3-2 二極式實驗架設圖	42
圖 3-3 正弦波訊號對三種塗層情形於 Bode plot 實驗結果	44
圖 3-4 方波訊號對三種塗層情形於 Bode plot 實驗結果	45
圖 3-5 CCD 1.0 電路板外觀及連接配置圖	47

圖 3-6	CCD 1.0 電路設置圖.....	47
圖 3-7	良好塗層於 Bode plot 呈現結果.....	50
圖 3-8	良好塗層電流波型之傅立葉轉換結果.....	50
圖 3-9	受腐蝕破壞之塗層於 Bode plot 實驗結果.....	51
圖 3-10	受腐蝕破壞塗層之電流波型傅立葉轉換結果.....	51
圖 4-1	模擬電容電流實驗結果.....	57
圖 4-2	示波器量測電容實驗結果.....	57
圖 4-3	良好塗層試樣於 Bode plot 實驗結果.....	58
圖 4-4	受腐蝕破壞之塗層試樣(3)於 Bode plot 實驗結果.....	61
圖 4-5	受腐蝕破壞之塗層試樣(4)於 Bode plot 實驗結果.....	61
圖 4-6	受腐蝕破壞之塗層試樣(4)於 Bode plot 實驗結果.....	64

表目錄

表 1-1 新版腐蝕等級及其對應環境影響效應因子[14].....	4
表 2-1 CHM 與恆電位儀對鍍鋅銅板量測結果比較表[54].....	19
表 2-2 CHM 與恆電位儀對 PU 塗層量測結果比較表[54].....	20
表 2-3 CHM 與恆電位儀對離岸風機塗層量測結果比較表[54].....	21
表 2-4 CHM 空量測數據表[54].....	21
表 2-5 標準電阻之 CID 與恆電位儀量測數據.....	25
表 2-6 標準電阻之 CID 2.0 與恆電位儀量測數據.....	30
表 2-7 CID 3.0 與三用電錶量測標準電阻實驗數據（未使用 OSR）.....	36
表 2-8 CID 3.0 與三用電錶量測標準電阻實驗數據（使用 OSR）.....	36
表 2-9 60 小時連續監測結果數據比較表.....	39
表 3-1 正弦波訊號對三種塗層保護性之判定結果.....	44
表 3-2 方波訊號對三種塗層保護性之判定結果.....	45
表 3-3 $Z_{10(t_0)}$ 模擬數值結果.....	53
表 4-1 良好塗層於單點阻抗量測結果.....	59
表 4-2 CCD 1.0 量測良好塗層試樣結果.....	60
表 4-3 受腐蝕破壞之塗層於單點阻抗量測結果.....	62
表 4-4 CCD 1.0 量測受腐蝕破壞之塗層試樣結果.....	63
表 4-5 CCD 1.0 針對小範圍頻率量測結果.....	65
表 4-6 CCD 1.0 針對大範圍頻率量測結果.....	65

第一章 序論



1.1 研究動機

隨著環保意識的提升及能源危機的議題日漸受到重視，綠色能源的迫切使用便成為不可或缺的一環，其中風能更是佔有一席之地，且在全世界快速發展。風力發電的部分包含陸域風力發電及海域風力發電，其中陸域風力發電相較於離岸風力發電容易因障礙物阻擋造成風源不穩定，以平均風速的觀點來看也較離岸風力低，且須遠離民宅才能避免噪音所造成的影響。對此，開發商們開始將風力發電轉往離岸發展，期望能以此獲得更高的發電量。

由於離岸風機常建設於較深的海域，且為避免對船隻航行的安全性上造成危害經常會將設置地點遠離航道，此種保護措施將導致離岸風機受到腐蝕影響而產生非預期之破壞時，相較於陸域風機將難以透過人工檢視的方式快速得知，而腐蝕情況的發生可能會造成離岸風機無法正常運作或是對於檢修人員的安全性產生危害[1]。一般情況下會預期離岸風機能夠服役 20-25 年，因此其造價高昂，其中運作及維護的成本高達總成本的 25%-30%[2]。為了避免因腐蝕的發生造成離岸風機無法正常運作或使檢測人員受到危害，現今有許多減緩腐蝕過程快速發生的方式，對於水下構件的防護上將利用陰極保護法 [3-5]，包含犧牲陽極法及外加電流法，對於水面上方的構件及處於水面上方及下方之間的轉階段構件將利用高規格防蝕塗層對於金屬底材進行保護，透過以上方法減緩腐蝕對於離岸風機造成的危害。

防蝕塗層被視為一種最具有經濟效益的防蝕方法，其優點在於成本低、施作簡易且能夠提供金屬底材基礎防護[6, 7]。然而，防蝕塗層可能因外力撞擊造成破壞，例如檢測船隻靠近塔架時的碰撞造成塗層剝落；也可能因長時間的海水侵蝕造成腐蝕溶液滲透，以上原因都將容易對於防蝕塗層的保護性能產生危害[8,

9]，因此開發塗層健康監測儀檢測塗層保護力變相當重要，讓修護人員得以在塗層受腐蝕影響產生劣化之初期快速決定維修方式。

電化學交流阻抗頻譜(Electrochemical impedance spectroscopy, EIS)作為一項非破壞性檢測的技術，經常被應用於量測防蝕塗層對於底材是否還具有保護力。EIS 的優點在於能提供測試者完整的塗層資訊，但 EIS 易受外部環境干擾，使得 EIS 的使用上需要搭配許多輔助儀器，較適合於實驗室內做使用，且因其檢測頻率範圍廣使得檢測相當耗時，以上缺點限制 EIS 用於離岸風機現地檢測的適用性 [10]。

為了克服 EIS 難以實際應用於實地量測的問題，本團隊透過電壓分壓的概念開發出塗層健康檢測裝置，以此量測未知塗層之塗層阻抗值，結果顯示以單點頻率進行阻抗量測下可獲得準確的塗層阻抗值[11-13]，但僅透過單點阻抗量測方式只能得知保護塗層在特定頻率下的阻抗值大小，無法呈現出其他與腐蝕行為相關之塗層資訊。因此本研究透過擷取一段頻率範圍區段內的資訊來提升判斷塗層優劣之準確性，降低誤判情況的發生，對離岸風機塗層健康狀態的檢測提供了更好的工具。

1.2 研究背景

1.2.1 離岸風機結構

離岸風機根據功能不同在結構上大致可分為以下幾部分，包含基樁(Foundation)、轉接段(Transition piece)、塔架(Tower)及發電機艙(Nacelle)，如圖 1-1 所示。基樁的功能類似地基，會放入海床當中用來支撐整架風機，避免風機因為外在因素(如:強風、大浪)跟著晃動而造成損壞；轉接段主要是用來將基樁與上方部件進行連接，也作為維護人員前往風機維修的工作平台；塔架主要用來支撐海平面上的構件，包含頂部的發電機艙與風機葉片；發電機艙主要用來保護發電機及齒輪變速箱等物件，避免因日曬雨淋而造成損壞。

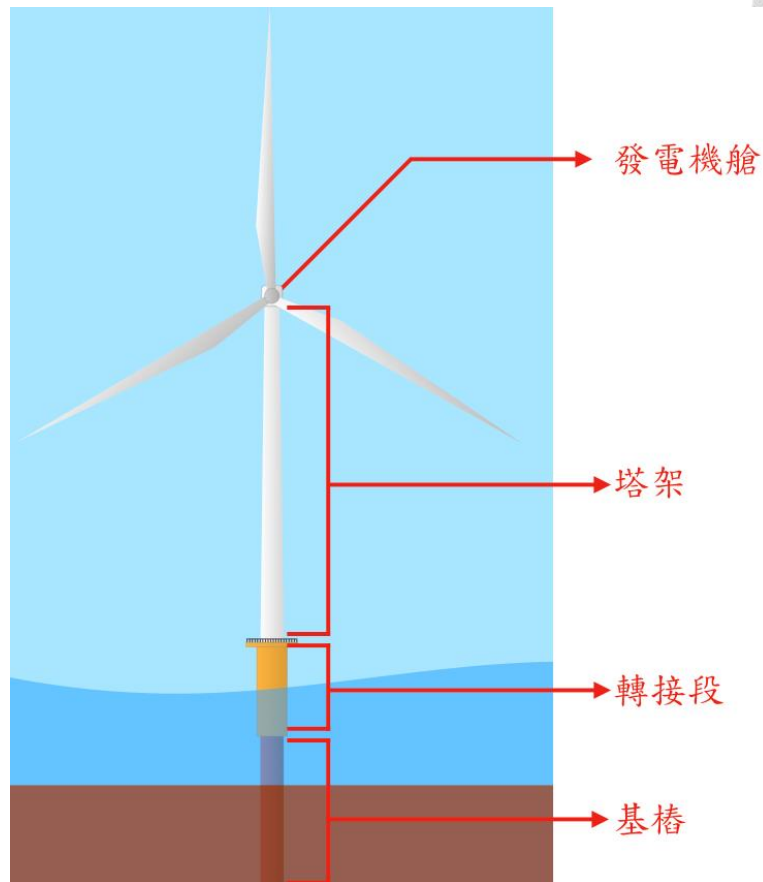


圖 1-1 離岸風機結構示意圖

1.2.2 腐蝕對於離岸風機之影響

在全球最佳前 18 個具開發潛能的離岸風場中台灣佔了 16 個，非常適合發展離岸風電。但台灣的氣候與歐洲截然不同，像是颱風帶來的強勁風勢或是強大的浪朝對於離岸風機的結構安全上產生相當大的威脅，且台灣因為高溫高濕高鹽份的環境容易加劇腐蝕進行，根據表 1-1 所示之腐蝕環境分類，海洋環境分類等級為 C5I 或 C5M 等級[14]，也就是金屬結構物在此環境底下將受到嚴重的腐蝕，由於離岸風機需要長期處於如此嚴苛的環境中，為了確保離岸風機能在預期使用年限內正常使用，因此離岸風機的結構及保護措施將受到更嚴格的規範，而如何盡量避免因為腐蝕的發生造成離岸風機無法正常運作成為離岸風機設計的一大重點，其中如何得知塗層優劣情況為本團隊所關注的部分。



表 1-1 新版腐蝕等級及其對應環境影響效應因子[14]

腐蝕度 類別	單位面積上品質的損失（第一年曝露後）				典型環境（僅作參考）
	低碳鋼		鋅		
	重量損失 g/m ²	厚度損失 μm	重量損失 g/m ²	厚度損失 μm	
C1 (很低)	≤10	≤1.3	≤0.7	≤0.1	加熱的建築物內部，空氣潔淨，如辦公室、商店、學校和賓館等
C2 (低)	10～200	1.3～25	0.7～5	0.1～0.7	大氣污染較低，大部分是鄉村地帶
C3 (中)	200～400	25～50	5～15	0.7～2.1	城市和工業大氣，中等的二氧化硫污染，低鹽度沿海區域
C4 (高)	400～650	50～80	15～30	2.1-4.2	高鹽度的工業區和沿海區域
C5I 很高(工業)	650～1500	80～200	30～60	4.2-8.4	高鹽度和惡劣大氣的工業區域
C5M 很高(海洋)	650～1500	80～200	30～60	4.2－8.4	高鹽度的沿海和離岸地帶

離岸風機結構根據腐蝕情況不同，大致可區分成以下幾個區域：海洋大氣帶、飛沫帶、潮汐帶、海中帶、海泥帶，如圖 1-2 所示[15]。由於海洋大氣帶未與海水直接接觸，其主要受到的危險因子為大氣中附著的高鹽度粒子，對於結構形成的破壞力相對較低，可以透過給予高規格防蝕塗層(具有足夠抗蝕能力之塗層)，便可有效達到保護效果；飛沫帶受到的腐蝕因子最多，包含受到海浪拍打，使得表面經常濕潤，流動的空氣使得氧氣充足，再加上陽光照射，因此在頻繁乾溼交替循環的嚴苛環境下，導致飛沫帶的腐蝕情況往往是最嚴峻的(如圖 1-3 所示)，因此飛沫區也成為我們監測塗層健康狀態最看重的區域；潮汐帶主要受到海水反覆漲退潮作用，易在海面上下方形成氧濃差電池，加速腐蝕的發生[15]；海中帶長期位於水面下方，影響腐蝕速率的因素包含海水溫度、含氧量等，而淺海區相較於深海區因為溫度較高，含氧量也高，因此腐蝕速率相對較快；海泥帶為溫度、含氧量最低的區域，其造成腐蝕的主要因素為生物附著與硫酸鹽還原菌，因此海泥帶也為腐蝕速率較慢之區域，破壞性相較其他區域低。

一般而言，長時間處於海水面下方的結構(如:基樁)，會使用外加電流法及犧牲陽極法來保護；位於海面上的結構(塔架及機艙)，因所處環境較乾燥，會使用

高規格防蝕塗層來保護，機艙內部為了避免電子部件受到腐蝕影響而無法正常運作，會配置空調及除濕設備，以此來控制機艙內部的環境條件(溫度、濕度及鹽度)；轉接段位於兩者之間，此區域會同時受到海浪拍打及陽光照射，在高度乾溼循環的情況下，腐蝕情況會特別嚴重，因此在轉接段通常會採用多重防護達成防蝕目的，包含高性能防蝕塗層及犧牲陽極法等方式。

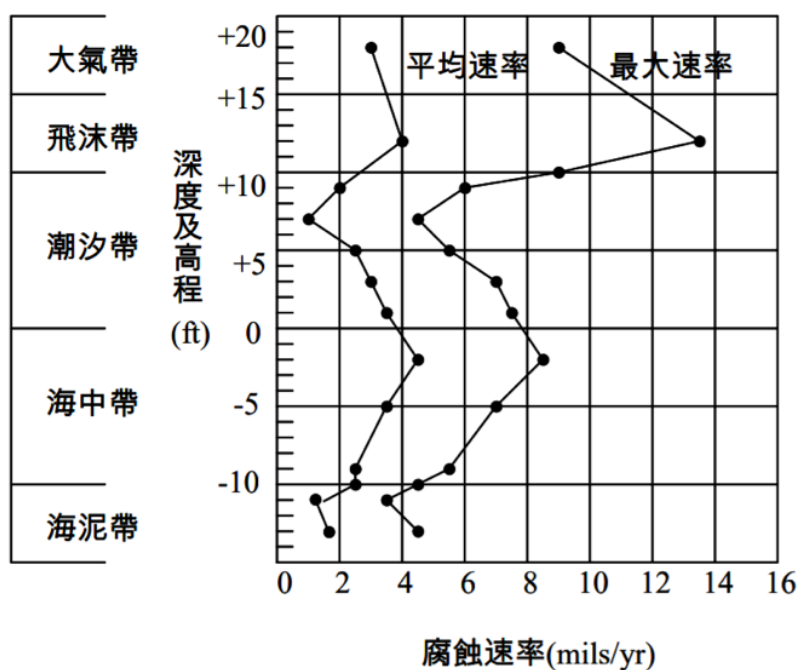


圖 1-2 離岸風機不同環境之腐蝕速率[15]



圖 1-3 處於飛沫帶之海上結構腐蝕情況[16]



第二章 文獻回顧

2.1 腐蝕的防治技術

腐蝕的發生為一種無法避免的自然現象，尤其在海洋工程領域更為嚴重，其種類包含均勻腐蝕、應力腐蝕、加凡尼腐蝕、孔蝕等，一旦發生腐蝕的情況便容易對結構造成損壞，對於整體構件或人員安全性方面造成隱憂，因此現今發展出許多防蝕方法(包含電化學防蝕及材料表面防蝕法)及腐蝕檢測(包含物理檢測及電化學檢測)技術，以下將對於兩者分別作說明：

2.1.1 電化學防蝕法

此方法又稱為陰極保護法，由於不同金屬之間電位差不同而形成類似電化學電池的形式，期望能透過縮小陽極與陰極電位差，以此來達到防蝕效果。其中陰極保護法主要是將活性較欲受保護之底材大的金屬或合金置於陽極，陰極區放置欲受保護之金屬底材端，如此一來，陰極區的金屬便不容易受到腐蝕行為。常見的陰極保護法主要有兩種：犧牲陽極法(Sacrificial anode)與外加電流法(Imposed current)[3-5]。

犧牲陽極法(Sacrificial anode)

犧牲陽極法的原理為使活性大於受保護底材之金屬透過電性連接後自身成為陽極，讓欲受保護之底材呈現相對陰極，並於腐蝕環境中將兩金屬透過物理接觸或以導線連接，此時電子透過腐蝕環境從陽極區流向陰極區，陽極端之金屬優先溶解，成為犧牲陽極，進而讓相對陰極之金屬受到保護。圖 2-1 為犧牲陽極法示意圖，透過連接低還原電位金屬作為犧牲陽極，使欲保護之金屬受到陰極保護而不被腐蝕環境侵蝕破壞。

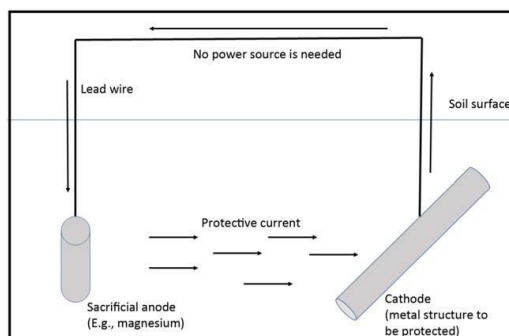


圖 2-1 犧牲陽極法示意圖

外加電流法(Impressed current)

外加電流法原理與犧牲陽極法相似，主要都是透過改變環境或是金屬狀態，使欲受保護之金屬底材形成相對陰極區，其不同之處在於外加電流法會額外利用直流電源供應器提供電流於相對陽極端之金屬，並經由腐蝕環境流回欲受保護之金屬端，以此達成防蝕目的，如圖 2-2 所示。

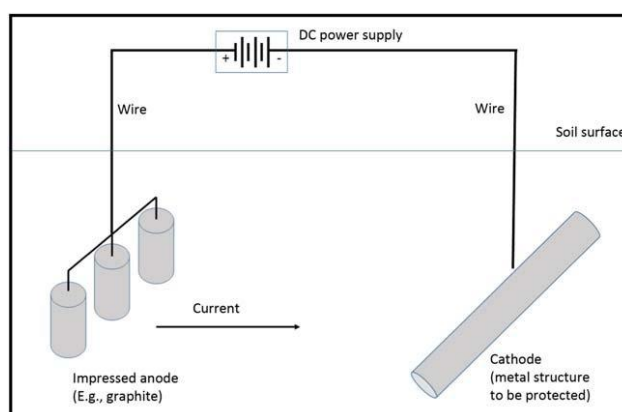


圖 2-2 外加電流法示意圖

一般而言，當將金屬材料應用於腐蝕環境中，且難以即時得知腐蝕情況是否發生時，例如離岸風機、反應槽內部等，經常會選擇陰極保護法來做防蝕。對於離岸風機而言，開發商將建置多塊合金於構件上作為犧牲陽極，外加電流法因為存在電流大小分布不均的情況，因此在實際應用上外加電流法相較於犧牲陽極法會比較少被使用，但兩者皆為能有效達成防蝕之方法。



2.1.2 表面處理防蝕法[17]

此方法主要是利用塗層披覆於金屬底材上，以此做為初步的保護層來隔絕腐蝕因子，此方法施作簡易且能提供給金屬底材基礎的防蝕效果，因此被廣泛應用於工業上。以下將對塗層種類及應用方式分別進行介紹：

➤ 金屬塗層

金屬塗層主要是將各式金屬披覆於欲受保護之底材，包含銅、鋁、銀等材料，以此達到防腐蝕、耐磨耗、抗高溫等功能。根據不同種類之披覆塗層方法又可分為以下幾種：

- (1) 熱噴塗層(Thermal Spray)[18, 19]：熱噴塗技術是將噴塗材料經過熱源加熱至溶化或半融化狀態後，通過高速狀態噴射出霧化粒子，並以層狀結構堆積於經預處理過後的金屬表面上。
- (2) 熱浸鍍塗層(Hot Dip)[20, 21]：熱浸鍍是將欲受保護之材料浸入內部含有熔融態金屬之浴槽內，使鍍件獲得一層金屬保護層的防蝕方法。此方式的優點包括：鍍層耐腐蝕性強、厚度及表面形態可控制等。
- (3) 電沉積塗層(Electroplating)[22, 23]：又稱為電鍍，為一種電解過程，施作方式為陽極放置鍍層金屬的金屬片，陰極放置被鍍金屬，浸泡於同一電解液中，此電解液通常為含有欲鍍金屬之陽離子溶液。輸入電流後，電解液中的金屬陽離子會流向陰極並接收電子，還原成金屬附著於被鍍金屬上。
- (4) 化學沉積塗層[24]：又稱化學鍍，其技術原理為加入強還原劑於含有金屬離子的溶液中，根據氧化還原反應原理，金屬離子將還原成金屬，並沉積在受保護之金屬材料表面。與電沉積塗層法相比，此方法操作時不需輸入電流，且能獲得較高的鍍層均勻性。

- (5) 氣相沉積塗層[25]：包括物理氣相沉積(Physical vapor deposition, PVD)與化學氣相沉積(chemical vapor deposition, CVD)，兩者皆作用於高溫真空環境下。物理氣相沉積為透過高溫環境將鍍層材料汽化成原子、分子或是離子態，使汽化後之鍍層材料沉積於欲受保護之材料上；化學氣相沉積將透過混合氣體與金屬材料之間的相互作用，並形成金屬或化合物的塗層於欲受保護之材料表面。

➤ 非金屬塗層

非金屬塗層依照種類不同可分為有機塗層及無機塗層。有機塗層內部含有高分子聚合物、顏料、溶劑等[26, 27]，透過不同方式塗佈於金屬材料上，使其成為有機塗層，其優點在於具有相當優異的抗蝕性，並廣泛應用於日常生活及工業應用中，像是常見的各式油漆，離岸風機常用的環氧樹脂塗層等；無機塗層通常指的是由矽酸鹽材料或礦物材料組成的塗層，其塗布方式可通過不同溫度條件進行，或以濕式塗佈方式(常溫環境)塗佈於金屬表面上[28]。

塗層的使用旨在避免腐蝕因子與金屬底材過多接觸，進而達到保護金屬材料的效果。然而對於任何塗層而言皆難以提供永久性的防護，因為塗層可能會受到外力撞擊造成剝落，或腐蝕溶液滲透並與底材接觸，縮短其壽命期限。因此需要有定時檢測的儀器來提供塗層即時狀態，給予維護人員是否需要前往修護的依據，以下將介紹目前常應用於工業上檢測塗層或結構物是否因腐蝕的發生而造成損壞之方式。



2.2 腐蝕的檢測與評估方法

腐蝕監測的目的在於透過不同類型的監測方式來掌握結構物受腐蝕的狀態，可以對設施進行提前預警和壽命評估，保證裝備及人員的安全。由於離岸風力發電機中的結構與零組件必須長時間在高溫高濕及高鹽度的海洋環境中使用，因此可預期一段時間後就會面臨到材料腐蝕劣化的問題，為了提供檢測人員對於結構安全性的評估，現今有許多不同類型的腐蝕監測方式來掌握結構物腐蝕狀態[29]。腐蝕檢測的方法包含物理檢測、電化學檢測等方式，物理檢測包含直接觀察、量測材料質量損失、電磁感應、超聲波檢測等方式；電化學檢測包含線性極化阻抗量測、交流阻抗頻譜法等。以下將對於腐蝕檢測的方法進行簡單介紹：

2.2.1 渦電流檢測法(Eddy Current Testing, ECT)[30-33]

渦電流檢測法原理為透過將載有交流電之激發線圈(Driver coil)接近金屬物體，使得金屬導體引發交變磁場，材料會感應產生旋渦狀電流，稱為渦電流，如圖 2-3 所示。當試樣受到破壞時，渦流的分布和流動路徑會發生變化，而試樣上的缺陷會改變材料的電導率和磁導率，導致渦流會在缺陷附近產生不規則變化，這些渦流會另外感應出一個交變磁場，檢測人員可以透過感測器檢測磁場之變化，確認試樣是否存在缺陷。

渦電流檢測法優點包括：能夠檢測微小尺寸的破裂與瑕疵、線圈探頭可不需接觸到被測物、適用於形狀不規則之被測物等。但此方法的缺點在於檢測時會因為集膚效應的影響，也就是磁場強度隨著缺陷深度越深而降低，使得靈敏度降低，也會因為試樣表面清潔程度的不同影響到檢測結果。

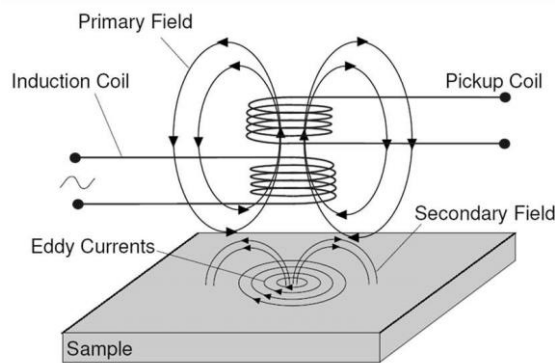


圖 2-3 渦電流檢測法示意圖[34]

2.2.2 超聲波檢測法(Ultrasonic Technique, UT)[35-37]

超聲波檢測法為透過探頭髮射出超聲波，超聲波在試樣的傳播中或多或少產生衰減，當波碰觸到缺陷時會產生反射或透射，並以此為依據進行分析，探測構件內部缺陷的大小、位置等物理性能的一種方法。此方法的優點在於能用來檢測厚度大的物件，像是油管、天然氣管厚度，更進一步研究用來量測離岸風機構建厚度，且當設備在運作時也能在外部進行量測，檢測結果也能快速得知。然而，其缺點在於當量測材料不同時通常都需要先進行校準，且當材料只有受到微小的破壞或是損失時，量測的靈敏度會降低。

2.2.3 紅外線熱成像法(Infrared thermography)[38-41]

在工業環境中，幾乎所有設施在發生故障前會產生溫度變化，例如電器設備若是發生故障導致電路中的電流異常，會使得電子零件(電阻、電容等)過熱，而紅外線熱成像法主要是透過儀器或設備檢測物體發出的紅外線能量，並將其轉換為溫度，進而顯示溫度分佈圖像的方法，透過量測到的溫度變化判斷設備是否需要進行修復，這使得紅外熱像儀成為一種非常有價值的檢測工具，且具有多種應用。

紅外線熱成像法優點在於可以輕鬆測量移動物體或是具有危險性的物體溫度，且當物體溫度發生劇烈變化或是短時間內發生的不同現象也可測量到。值得注意的是，此方法在量測過程中可能會受到附近物體反射的影響，降低其量測準確性。



2.2.4 電阻法(Electrical Resistance, ER)[42]

由於金屬受到腐蝕後，其橫截面會發生變化，電阻法為利用量測截面積的變化得出金屬腐蝕速度。當腐蝕環境改變時，可以透過不同種類的探頭(ER Probe)進行量測，並根據所需靈敏度改變探頭厚薄度，以此來準確地反映出設備運行階段的腐蝕速率及其變化。

電阻法優點在於可應用在不同種類的腐蝕環境中，進行連續的現場偵測。此方法的缺點在於較不適合應用於監測孔蝕或應力腐蝕等局部腐蝕情況，因為截面積的改變量不大，比較適合用於均勻腐蝕的量測。此外，若是有導電性沉積物附著在探頭表面時，將影響其量測靈敏度。

2.2.5 開路電位法(Open-Circuit Potential, OCP)

OCP 是用來量測在穩定及自然狀況的環境下無外加電流相通之工作電極和參考電極之間的電位差。此方法是基於金屬或合金的開路電位與腐蝕狀態之間的關係，具有活性-鈍化的金屬或合金系統可以通過測量和監測開路電位來確定金屬或合金系統的腐蝕狀態。通過測量開路電位可獲得材料的平衡電位，當材料處於平衡電位時，顯示材料處於一種相對穩定的狀態，而腐蝕情況發生時，材料的電位可能偏離平衡電位。透過測量開路電位，可以了解材料是否處於平衡狀態，並進一步研究腐蝕行為及其相關機制。開路電位法缺點在於無法得知系統的腐蝕速率。其優點在於可在不改變金屬表面狀態或干擾待測系統條件的情況下以此獲得電位信息，從而判斷金屬或合金的當前狀態。



2.2.6 線性極化阻抗量測(Linear Polarization Resistance, LPR)

此方法簡稱為線性極化法，主要是利用量測腐蝕過程中表面極化電阻的變化來決定腐蝕速率，其優點在於可以直接實時測量腐蝕速率。

極化的定義為當電極上有電流流過時，若單位時間內陽極反應無法即時補足被移走的電子，或是陰極反應無法即時消耗輸送來的電子，將導致累積過多的電荷於電極表面使得電極電位偏離平衡電位。其中電位偏移量稱為過電位(Overpotential)或者極化電位 ΔE 。極化曲線在當極化電位 ΔE 很小的情況下(通常介於 50mV 左右)將呈現線性關係，其斜率則稱為極化電阻 R_p 。透過 Wagner 和 Traud 所提出之混合電位理論得以推導出腐蝕速率方程式如下：

$$\frac{\Delta E}{\Delta I} = R_p = \frac{b_a b_c}{2.3(b_a + b_c)} \times \frac{1}{i_{corr}} \quad 2-1 \text{ 式}$$

此為 Stern-Geary 方程式[43]，其中 b_a 代表陽極塔弗(Tafel)斜率($b_a = 2.3RT/\beta_n F$)； b_c 代表陰極塔弗斜率，通常為了進行快速計算會假設 b_a 與 b_c 為 0.1 V。對此，Stern-Geary 方程式可簡化為：

$$i_{corr} = 0.022 \times \frac{1}{R_p} \quad 2-2 \text{ 式}$$

金屬的腐蝕速率 (i_{corr}) 與極化阻抗 (R_p) 透過 2-2 式可得兩者之間呈反比關係，因此透過比較 R_p 的方式便能判定在不同腐蝕環境的條件下個別金屬之抗蝕能力。通常以線性極化法進行量測時，施加在待測樣本上的極化程度僅在 ± 20 mV 範圍內，電極表面不至於因此偏離穩定狀態，此外，線性極化法的量測時間也相對較短。因此，在現場實地監測時使用線性極化法對於維護人員而言具有相當優勢。

然而，利用線性極化法量測時需要仰賴具有導電性的電解質中才能進行，且無法對於局部腐蝕提供足夠的資訊，較適合應用於量測均勻腐蝕的速率。



2.2.7 交流阻抗頻譜法(Electrochemical impedance spectroscopy, EIS)[44-51]

EIS 是最常被應用於量測塗層是否對於底材具有保護力的一種非破壞性檢測方式，其原理為在不同量測頻率下施加微小振幅電位的正弦波於工作電極，透過於不同頻率下所得電流響應加以計算後，便可得知不同頻率下的阻抗及相位資訊。將交流阻抗頻譜法搭配微結構分析便可進行等效電路模擬，以此獲得材料在腐蝕過程中之極化電阻、電雙層電容等重要的腐蝕動力學參數，對於得知塗層與金屬底材之間的腐蝕反應訊息有一定幫助。因為 EIS 量測頻率寬廣，且相較於其他電化學方法可獲得更多電極界面資訊，因此交流阻抗頻譜法經常被應用於量測保護塗層性能的研究中。然而，EIS 量測所需儀器成本高昂且易受外界環境干擾，也因其量測頻率範圍寬，使得量測耗時長，限制應用於現場量測的可行性，目前較適合於實驗室進行研究。由於在離岸風機常見的防蝕對策中，保護塗層的應用為一種具有經濟效益的方式，能給予材料基礎的防護，也就是說塗層的健康程度關係著金屬結構件的使用壽命，但當塗層受到外力破壞或是受到嚴重腐蝕，導致離岸風力發電機結構受損，目前還無法即時得知是否需做更換。對此，本研究團隊致力於開發檢測塗層健康狀態之裝置，期望開發出基於交流阻抗頻譜法的方式下能提供檢測人員一種快速且兼顧品質的方式來得知塗層健康程度。

2.3 塗層健康監測儀 (Coating Health Monitor, CHM)[52, 53]

G. D. Davis 於 2010 年提出之電化學塗層健康監測儀，主要用來檢測軍隊地面車輛底盤之烤漆是否完整。由於車輛底盤可能因長期處於腐蝕環境中，烤漆受到腐蝕因子滲透或是受外力破壞而無法提供永久保護，需要依靠外部設備監測車輛底盤的烤漆是否還具有保護力，能在嚴重損毀前達到警示作用，以利人員進行維修補強。CHM 大小為 8cm*8cm*4cm，如圖 2-4 所示，其內部含有電路系統、電池座、電池，如圖 2-5 所示。量測數據將以遠端方式傳送至電腦做後續處理，如圖 2-6 所示，透過計算得知特定頻率下的阻抗值。CHM 與傳統恆電位儀相比，具有輕巧、架設簡便、量測快等優點，且具備遠端傳輸之功能，可在 500 英尺遠的距離下以筆記型電腦讀取並顯示每個感測器區域的塗層情況。儘管 CHM 擁有許多優點，但受限於其量測區間而難以應用於現有離岸風機塗層量測，後續將對其進行介紹。



圖 2-4 CHM 外觀圖[54]

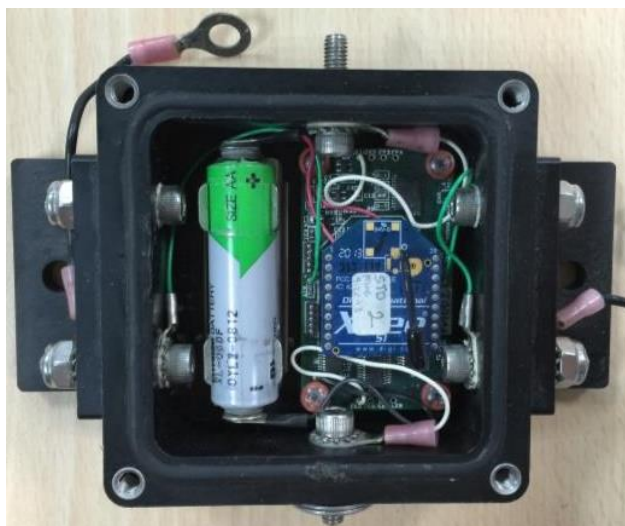


圖 2-5 CHM 內部電路配置[54]



圖 2-6 CHM 遠端傳輸接收器[54]

- **CHM 量測原理**

於實驗室中進行 EIS 實驗時，通常選擇較大的頻率區段進行量測($10^{-2} \sim 10^5 \text{Hz}$)以得知不同時間尺度之電化學反應，但在進行塗層的交流阻抗量測時，高頻區域($10^3 \sim 10^5 \text{Hz}$)表示的阻抗值含有參考電極和工作電極之間的水溶液阻抗以及恆電位儀量測時的寄生電容，因此塗層系統在相同環境下發生劣化時，高頻區段的阻抗變化並不明顯，而中低頻區域是由擴散主導，變化較明顯，得以透過中低頻($10^{-2} \sim 10^1 \text{Hz}$)量測結果判斷此塗層系統是偏向容抗主導還是電阻主導，以此作為塗層劣化判斷依據。根據圖 2-7 恆電位儀對 PU 塗層塗佈於鍍鋅鋼板之試片於腐蝕環境中浸泡三週後所量測之交流阻抗圖，可得低頻區段的交流阻抗值變化較高頻區段明顯，因此 CHM 主要針對 0.2Hz、0.5Hz 及 0.9Hz 的頻率點進行量測，大幅縮減量測時程，

由原本的恆電位儀需要 1 小時 縮短至 CHM 量測只需 3~5 分鐘便可獲得量測結果。

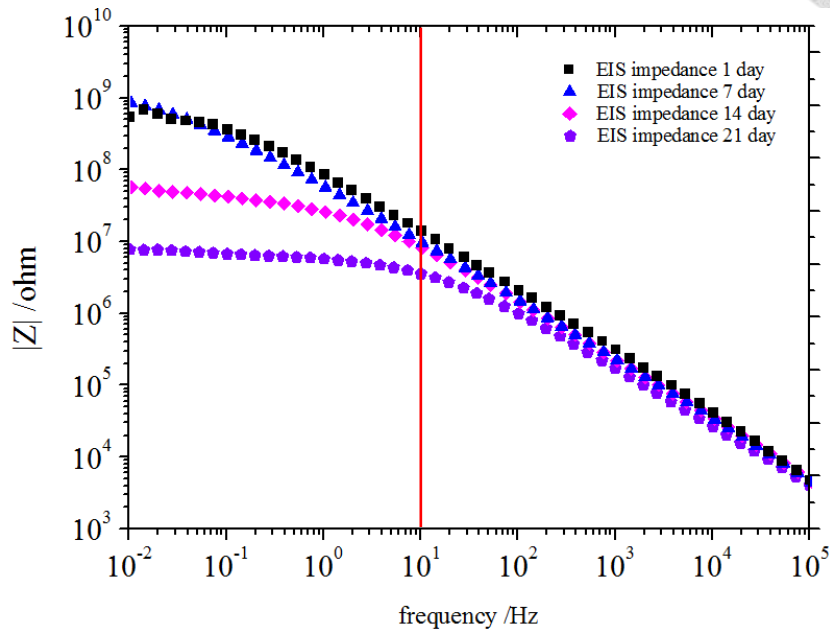


圖 2-7 恆電位儀對 PU 塗漆試片量測結果圖[54]

- 塗層健康監測儀(CHM)性能驗證[54]

為確認 CHM 在量測上的準確性以及是否與恆電位儀的量測結果相符，李忠縈的研究《離岸風機防蝕塗層性質監測技術之開發及應用》分別以 CHM 及恆電位儀對低阻抗之鍍鋅鋼板、PU 塗層以及高規格防蝕塗層進行檢測，並對量測結果進行比較。

圖 2-8 及圖 2-9 分別展示了 CHM 與恆電位儀對商用鍍鋅鋼板及 PU 塗層試片進行量測的結果。藍色曲線為恆電位儀所量測之交流阻抗大小；粉色曲線為恆電位儀所量測之相位，而紅色圓點代表 CHM 以三個不同頻率點(0.2、0.5、0.9Hz)對商用鍍鋅鋼板的阻抗量測結果。量測鍍鋅鋼板所得值如表 2-1 所列；量測 PU 塗層所得值如表 2-2 所列。根據量測結果可得 CHM 在量測鍍鋅鋼板與 PU 塗層之結果與恆電位儀量測結果具有高度一致性。

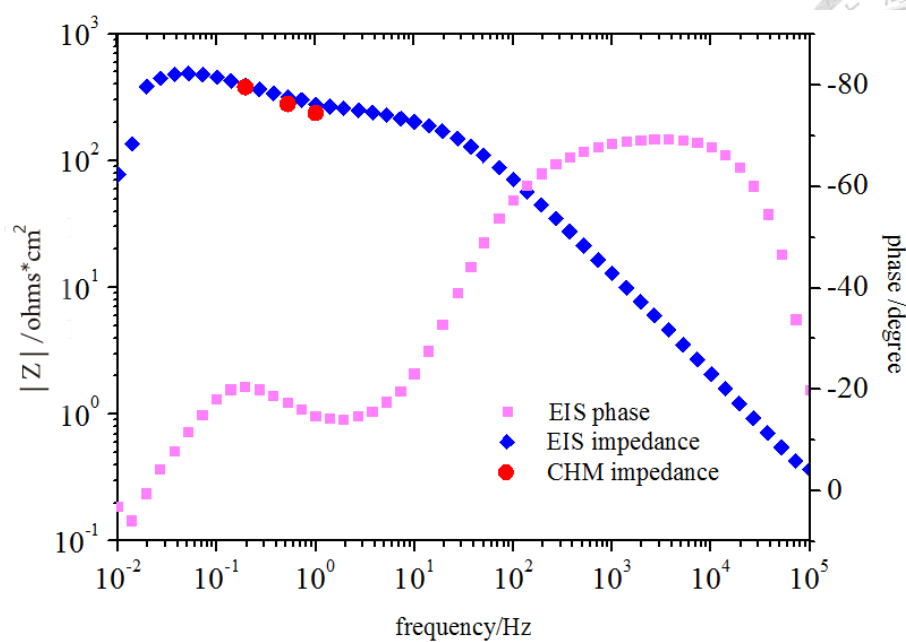


圖 2-8 CHM 與恆電位儀對鍍鋅鋼板量測結果圖[54]

表 2-1 CHM 與恆電位儀對鍍鋅鋼板量測結果比較表[54]

單位：ohm*cm ²	0.2 Hz	0.5 Hz	0.9 Hz
恆電位儀	394	317	276
CHM	380	280	238

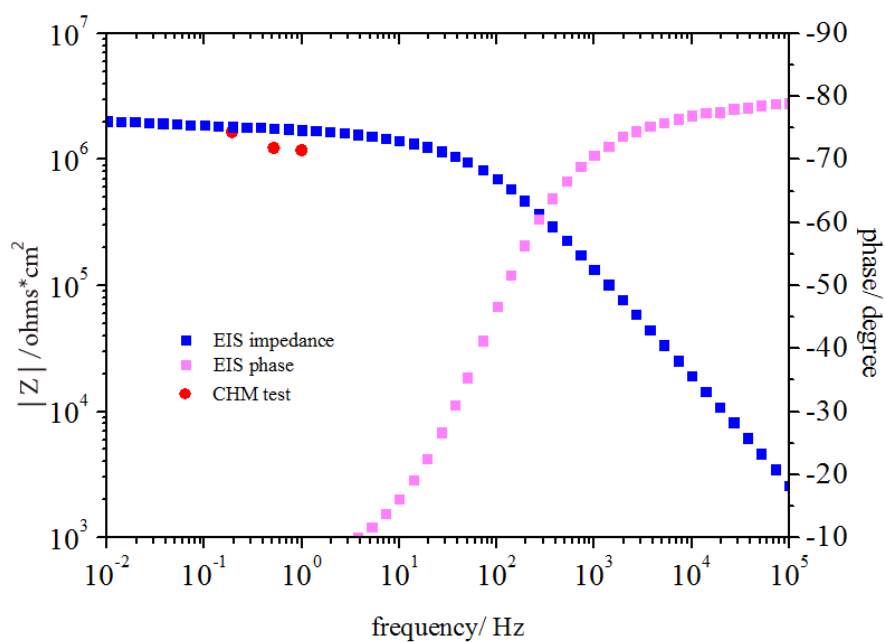


圖 2-9 CHM 與恆電位儀對 PU 塗層量測結果圖[54]

表 2-2 CHM 與恆電位儀對 PU 塗層量測結果比較表[54]

單位：ohm*cm ²	0.2 Hz	0.5 Hz	0.9 Hz
恆電位儀	1.82*10 ⁶	1.77*10 ⁶	1.71*10 ⁶
CHM	1.6*10 ⁶	1.2*10 ⁶	1.15*10 ⁶

圖 2-10 為 CHM 與恆電位儀分別對高阻抗防蝕塗層量測結果，根據圖及表 2-3 可得高抗蝕塗層在 0.2、0.5、0.9Hz 的頻率下所得之塗層阻抗值約 10^9 ohm*cm²，但 CHM 量測所得結果皆顯示出 $5*10^8$ ohm*cm² 之數據，由此推測 CHM 量測極限只能顯示最高 $5*10^8$ ohm*cm² 之值，或是代表 CHM 是在進行空量測，並未實際測得塗層阻抗值，對此進行了空量測實驗，也就是在量測時不架設式樣，結果如表 2-4 所示，在量測頻率點下之阻抗值皆為 $5*10^8$ ohm*cm²。根據此量測結果可得 CHM 為了能以簡易的方式對塗層進行量測，從而對整體電路進行大幅度簡化，導致其量測上受到限制，使得在量測高阻抗之離岸風機防蝕塗層結果與恆電位儀的數據不相符，而現今使用於離岸風機的商用塗層阻抗值一般高於 10^9 ohm*cm²，因此需要建立一套能夠滿足量測高規格防蝕塗層的監測系統。

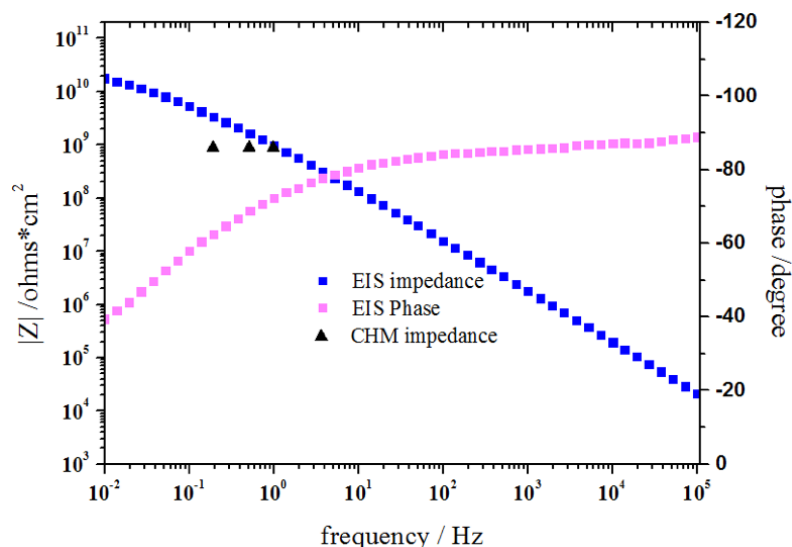


圖 2-10 CHM 與恆電位儀對離岸風機塗層量測結果圖[54]

表 2-3 CHM 與恆電位儀對離岸風機塗層量測結果比較表[54]

單位：ohm*cm ²	0.2 Hz	0.5 Hz	0.9 Hz
恆電位儀	3.4*10 ⁹	1.6*10 ⁹	0.97*10 ⁹
CHM	5*10 ⁸	5*10 ⁸	5*10 ⁸

表 2-4 CHM 空量測數據表[54]

單位：ohm*cm ²	0.2 Hz	0.5 Hz	0.9 Hz
CHM 空量測	5*10 ⁸	5*10 ⁸	5*10 ⁸

2.4 塗層阻抗監測儀 (Coating Impedance Detector, CID)

因為 CHM 難以應用於高防護性之商用塗層阻抗量測上，對此本團隊著手開始進行塗層阻抗監測儀(Coating Impedance Detector, CID)之研發，以此作為對高阻抗塗層進行量測之工具。CID 將透過電路板上之電子元件，包含參考電阻(Reference Resistance)、運算放大器(Operational Amplifier)等進行電路規劃，並將其作為量測塗層阻抗值之工具。本團隊於先前已研發出三個版本的 CID，分別為 CID1.0、CID2.0 及 CID 3.0，以下將針對以上版本個別介紹：

2.4.1 第一代塗層阻抗監測儀 (CID) [54, 55]

第一代塗層阻抗監測儀之電路板外觀如圖 2-11 所示，將以一塊微小印刷電路板(Printed Circuit Board, PCB)(面積大小 4*4cm²、厚度為 1mm)為中心透過 SMA 接頭連接所有需要的外部儀器，包含示波器、訊號產生器、電源供應器等，整體實驗架設全貌如圖 2-13 所示。

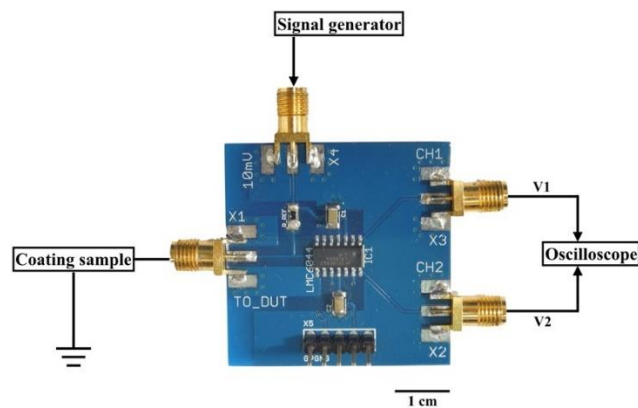


圖 2-11 CID 電路板外觀及連接外部儀器之配置圖

CID 之電路設置如圖 2-12 所示，輸入端將透過訊號產生器輸入一 500 mHz、10 mV_{pp} 之正弦波於此等效電路。將未知的待測塗層看成一個等效阻抗 Z_c ，藉此與電路板上的已知參考電阻($Z_{ref}=10^8$ ohm)形成串聯，接著通過示波器擷取分壓前後兩端之 V1、V2 訊號，並將所得波形訊號利用 Matlab 進行傅立葉轉換後可得 V1、V2 值，且 Z_{ref} 為已知，便可根據電壓分配定則 2-1 式得知待測物之阻抗(Z_c)值。

$$V2 = V1 \times \frac{Z_c}{Z_{ref} + Z_c} \quad 2-1 \text{ 式}$$

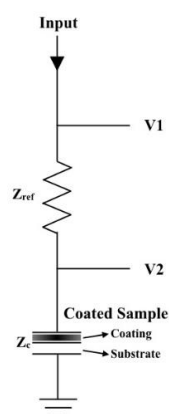


圖 2-12 分壓電路設置圖

$$Z_c = Z_{ref} \times \frac{V2}{V1 - V2} \quad 2-2 \text{ 式}$$

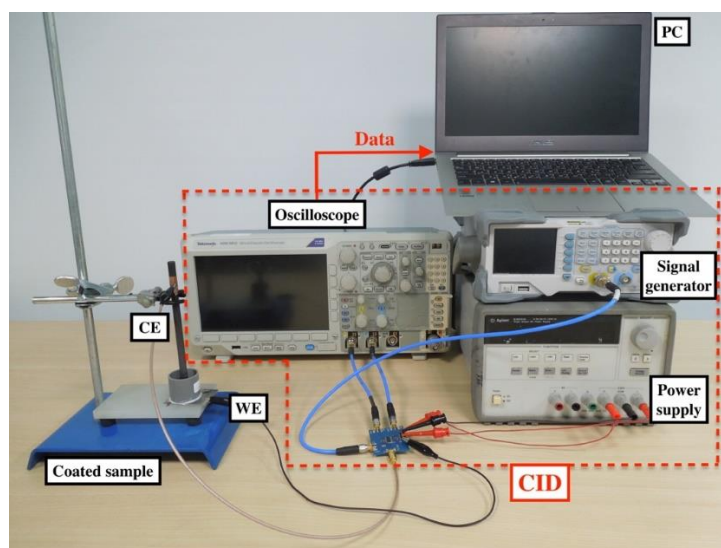


圖 2-13 CID 實驗架設全貌

由於 CID 的開發是用來對高阻抗之待測物(阻抗值大於 $10^9\Omega$)進行量測，若是直接將訊號送入示波器(阻抗值 $1M\Omega$)，由於輸入端為微小振幅電壓，經過阻抗分壓後可能會造成訊號衰減而失真甚至造成示波器無法測到所需訊號。為了解決以上情況，將以添加 OP 的方式對其電路進行改良，改良方式為使 V1 及 V2 的訊號先經過單位增益緩衝器(Unity-Gain Buffer)，其增益值為 1，回授量為 100%。透過理想 OP 的特性(輸入阻抗無限大、輸出阻抗為 0)，使接收到的微小訊號不發生失真，讓後端電路能以準確的原始訊號進行計算。圖 2-14 顯示通過添加 OP 對電路進行改良。

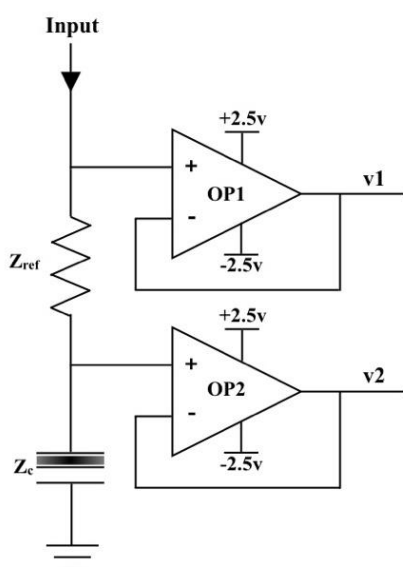


圖 2-14 CID 添加 OP 進行電路改良之設計圖

恆電位儀在進行 EIS 量測時，其量測頻率範圍為 10^{-2} - 10^5 Hz，且每個頻率數量級會取七個測量點，因此量測一組試樣需耗時 30-40 分鐘。由於高頻區域不會隨著塗層受腐蝕而有明顯變化，而低頻區的變化較明顯，因此會選擇以 Bode Plot 中低頻區域做為判斷塗層性能的重要依據。參考前述美國市售 CHM 所使用之特徵頻率量測點[53]，第一代 CID 將選擇以特徵頻率 0.5 Hz 進行單點阻抗量測，其優點在於每次的量測時間僅需五分鐘便可快速獲得當前塗層於腐蝕環境下之狀態。

CID 測試結果

為了證明 CID1.0 量測的準確性，因此利用 CID 與恆電位儀分別對標準電阻進行量測，圖 2-15 中曲線部分及實心點部份分別代表恆電位儀及 CID 對標準電阻進行量測所得結果，其中 CID 的量測方式為快速重複量測五次後取平均作為其量測結果。根據表 2-5 之完整量測數據結果可得，當選用 10^8 ohm 作為 CID 之已知參考電阻，並以恆電位儀於 0.5Hz 下的阻抗值當作參考理論值，對於 CID 量測待測電阻 $10^6 \sim 10^9$ ohm 結果均與恆電位儀量測值位於相同數量級以內，但以誤差的觀點來看時 $[(\text{實驗值}-\text{理論值})/\text{理論值}]$ ，CID 在準確性上僅對於量測 10^6 ohm 及 10^8 ohm 的標準電阻有比較好的成果，其餘部分仍有進步空間。

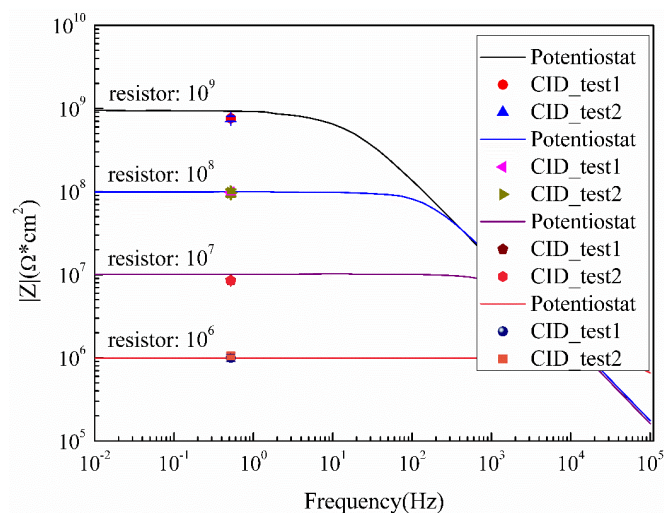


圖 2-15 CID 與恆電位儀對標準電阻量測結果

表 2-5 標準電阻之 CID 與恆電位儀量測數據

Sample (ohm*cm²)	10 ⁶ 電阻	10 ⁷ 電阻	10 ⁸ 電阻	10 ⁹ 電阻
恆電位儀 $ Z _{0.5\text{Hz}}$	9.92×10 ⁵	9.90×10 ⁶	9.91×10 ⁷	9.98×10 ⁸
CID 平均值	9.99×10 ⁵	8.51×10 ⁶	9.78×10 ⁷	7.62×10 ⁸
CID 標準差	1.00×10 ⁵	4.34×10 ⁴	6.90×10 ⁶	2.99×10 ⁷
誤差(%)	0.71	14	1.25	23

為了確認 CID 量測實際塗層時能否與恆電位儀獲得相似結果，圖 2-16 顯示分別用恆電位儀及 CID 對一厚度為 105 μm 之聚氨酯塗層進行量測所得結果，其中恆電位儀與 CID 在 $|Z|_{0.5\text{Hz}}$ 下個別結果為 7.89×10⁸ ohm*cm² 與 9.06×10⁸ ohm*cm²，誤差值 15%。根據上述結果，當試樣之阻抗值在 10⁷ ohm*cm² 和 10⁹ ohm*cm² 之間時，雖然 CID 在量測結果上與恆電位儀結果存在誤差，但結果仍呈現高度正相關，顯

示在量測塗層阻抗值介於 $10^8 \text{ ohm}\cdot\text{cm}^2$ 上下一個數量級時，CID 在量測上依然有相當的辨識度。

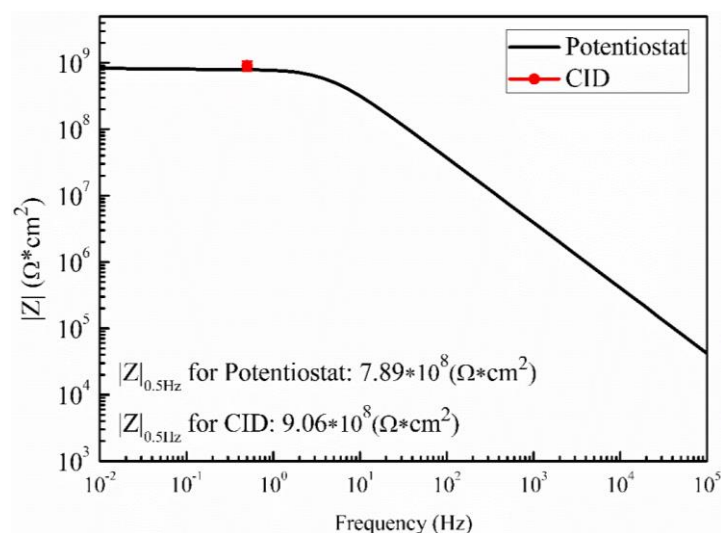


圖 2-16 聚氨酯塗層厚度 $105\mu\text{m}$ 之式樣 Bode Plot

經過上述單點阻抗量測結果顯示，CID 雖然在透過分壓概念計算未知塗層阻抗的準確性上有待加強上，但其結果還是具有一定的辨識度。由於 CID 在運作上主要是將一塊 PCB 版連接許多外部儀器，包含電源供應器、訊號產生器、示波器等，以上設備不僅體積龐大且價格昂貴，難以應用於實際現場量測，因此下一代 CID 便需要考量如何以輕便且低成本的方式進行塗層阻抗量測，以利於應用在離岸風機實地量測。

2.4.2 第二代塗層阻抗監測儀 (CID 2.0)[55, 56]

為了使 CID 能夠普遍應用於離岸風機上，根據第一代 CID 的設計概念對其進行微型化。在眾多微型化工具中，我們選擇 Altera DE0-Nano FPGA(Field Programmable Gate Array, FPGA)成為 CID2.0 的開發工具。FPGA 是一種現場可程式邏輯閘陣列微控制器，可以透過編寫硬體描述語言自動生成邏輯電路，以硬體的方式實現電路設計，相較於全定製電路（如特殊應用積體電路-ASIC），FPGA

擁有可重複編程的優點，使其在開發階段具有更高的自由度，並可根據期望目標自行搭配外接電路。

FPGA 優點在於尺寸小、重量輕且可重複編程，不需要過多額外的硬體設備。因此非常適合應用於自動控制裝置和攜帶型電子器材。以攜帶型電子產品來說，電源的提供相當重要，對此 DE0-Nano 提供了 2 種供電模式：一種是透過 USB mini-AB 接口；另一種是透過 2 針的外接電源接頭。

在供電方面，FPGA 將通過 Mini-USB 接口與電腦連接，取代傳統的電源供應器；訊號方面將以內部提供之 50 MHz 石英震盪器（XTAL）進行除頻來輸出欲使用之特定頻率波形，代替傳統的訊號產生器。隨後通過類比數位轉換器（ADC）將類比訊號轉換為數位訊號，可以快速將數據傳送至電腦進行後續處理，取代原本示波器的使用。基於 FPGA 功能性上的多樣性，有助於減少原始複雜機台使用及因為大量的走線而造成的雜訊。

圖 2-17 顯示了 FPGA 的功能配置，而圖 2-18 則展示了結合 PCB 與 FPGA 之 CID 2.0 整體外觀。

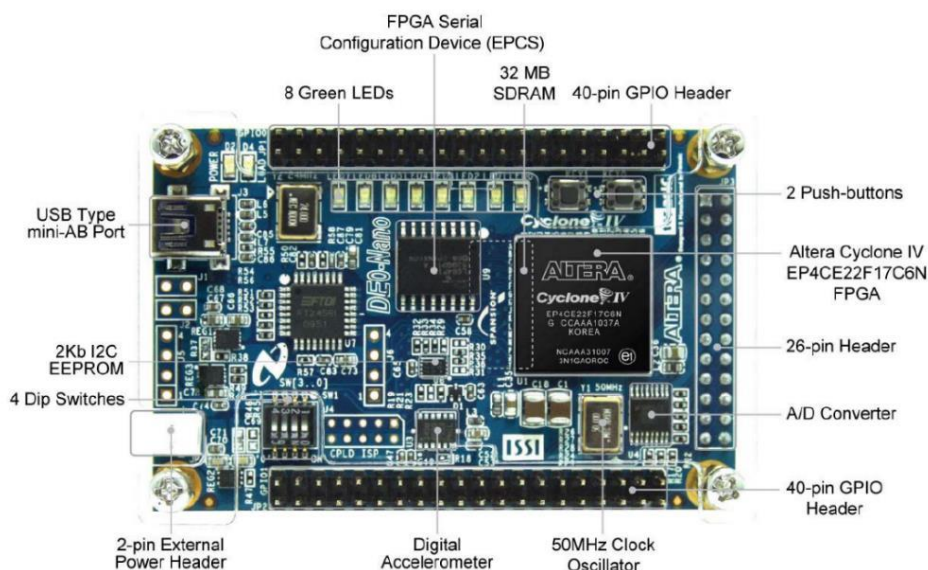


圖 2-17 Altera DE0-Nano FPGA 之功能配置

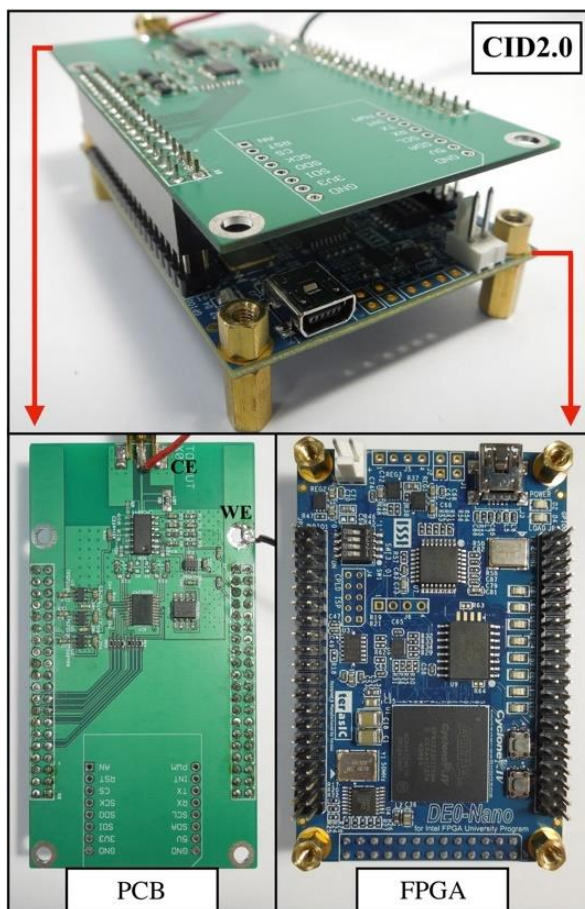


圖 2-18 結合 PCB 與 FPGA 之 CID 2.0 整體外觀

訊號輸出處理方式將透過在一個過採樣(Oversampling)的系統上添加一個相當於 N 階巴特沃斯高通濾波器(N-th Order Butterworth High-Pass Filter)的回授路徑，以達到量化雜訊並實現雜訊重造的效果，這種處理方式稱為積分-微分調變(Sigma-Delta Modulation, SDM)。透過這種概念得以將雜訊推至高頻區段，從而減少了低頻段的雜訊，有助於產生乾淨的 1 Hz 弦波。

CID 2.0 成功利用 FPGA 將原本繁雜的機台微型化，其整體架設如圖 2-19 所示，且 FPGA 作為業界廣泛使用之開發工具，使得 CID 2.0 在成本上得以較 CHM 低廉。

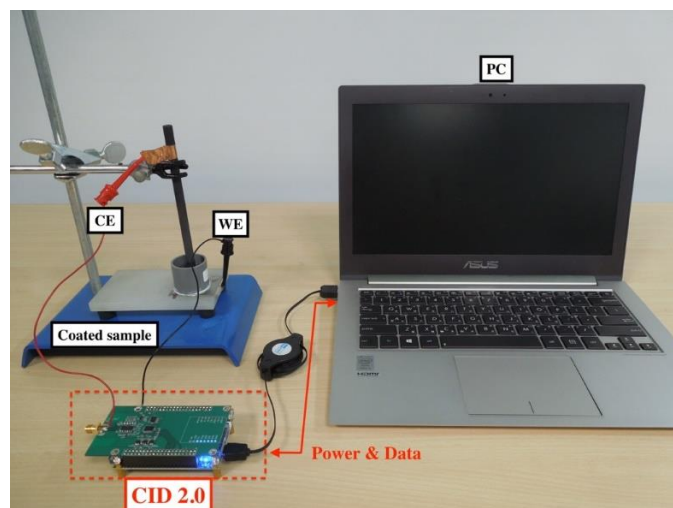


圖 2-19 CID 2.0 整體架設全貌

CID 2.0 測試結果

圖 2-20 以實線與實心點分別代表恆電位儀與 CID2.0 進行量測所得結果。在一般情況下阻抗值不隨頻率變化而改變，但現實情況下會因為寄生電容的原因使得量測結果受到影響。其中寄生電容是指恆電位儀在量測待測物時，兩導線之間的跨壓訊號，且存在於電路各處，其阻抗值可視為 $Z_c = \frac{1}{j\omega c} = \frac{1}{j2\pi f c}$ 。從圖中可以觀察到，當恆電位儀的交流訊號頻率越高時，寄生電容的阻抗值越小，而當寄生電容的阻抗值與待測物達到相同數量級時，恆電位儀所量測到的阻抗值會下降。此外，隨著式樣阻抗值增加， Z_c 在較低頻率時越容易與待測式樣達到相同數量級。

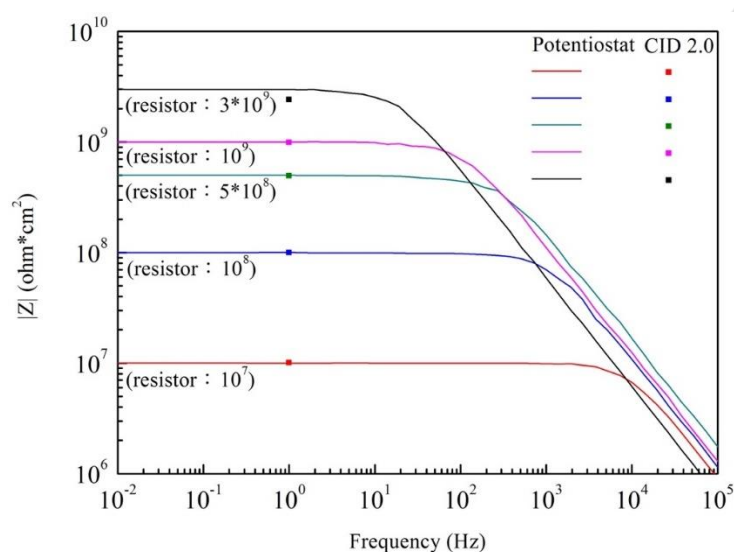


圖 2-20 CID 2.0 與恆電位儀對標準電阻量測結果

根據表 2-6 的結果可得 CID 2.0 系統在選用參考電阻(Z_{ref})值為 10^7ohm 情況下，透過硬體設施優化之演算法，得以將低輸出訊號雜訊，相較於第一代 CID 的結果可得知 CID 2.0 的量測在誤差上有大幅進步，而其中 $3 \times 10^9 \text{ohm} \cdot \text{cm}^2$ 的待測電阻因為是由三個 $10^9 \text{ohm} \cdot \text{cm}^2$ 標準電阻串聯而成，可能會因為訊號迴路不夠連續或是待測式樣之阻抗高於參考電阻兩個數量級時，藉由 2-1 式可知， V_1 與 V_2 值將過於接近，以致於量測結果容易在過程中受到儀器本身或外在環境干擾而造成誤差，使 CID 2.0 在量測誤差及數據標準差方面皆較為上升。

表 2-6 標準電阻之 CID 2.0 與恆電位儀量測數據

Sample (ohm*cm ²)	10 ⁷ 電阻	10 ⁸ 電阻	5×10 ⁸ 電阻	10 ⁹ 電阻	3×10 ⁹ 電阻
恆電位儀 $ Z _{1\text{Hz}}$	1.08×10^7	9.98×10^7	4.99×10^8	9.17×10^8	2.98×10^9
CID 2.0 平均值	1.09×10^7	1.00×10^8	4.95×10^8	9.86×10^8	2.42×10^9
CID 2.0 標準差	2.43×10^4	4.41×10^5	1.38×10^7	9.11×10^7	1.49×10^8
誤差(%)	0.9	0.2	0.8	7.5	18.5

為了確認 CID 2.0 是否能在實際量測塗層阻抗上獲得準確阻抗值，以下將針對不同厚度之塗層進行檢測。第一組試樣如圖 2-21，使用塗層材料為環氧樹脂且阻抗值約為 $5 \times 10^8 \text{ ohm} \cdot \text{cm}^2$ 的試樣進行量測，圖中黑色實線代表恆電位儀對塗層進行交流阻抗量測所得結果，阻抗值 $|Z|_{1\text{Hz}}$ 為 $5.09 \times 10^8 \text{ ohm} \cdot \text{cm}^2$ ，紅色實心點代表 CID 2.0 量測結果，阻抗值 $|Z|_{1\text{Hz}}$ 為 $4.89 \times 10^8 \text{ ohm} \cdot \text{cm}^2$ ，量測標準差為 $7.44 \times 10^6 \text{ ohm} \cdot \text{cm}^2$ ，顯示 CID 2.0 在量測上的穩定性；另一組試樣量測所得結果如圖 2-22 所示，使用塗層材料為環氧樹脂且阻抗值約為 $10^9 \text{ ohm} \cdot \text{cm}^2$ 附近的試樣進行量測，圖中黑色實線代表恆電位儀對塗層進行交流阻抗量測結果，阻抗值 $|Z|_{1\text{Hz}}$ 為 $9.30 \times 10^8 \text{ ohm} \cdot \text{cm}^2$ ，紅色實心點代表 CID 2.0 量測結果，阻抗值 $|Z|_{1\text{Hz}}$ 為 $9.25 \times 10^8 \text{ ohm} \cdot \text{cm}^2$ ，量測標準差為 $4.85 \times 10^7 \text{ ohm} \cdot \text{cm}^2$ 。根據以上兩組式樣之量測成果顯示出 CID 2.0 得以在量測塗層組抗值介於 $10^8 \sim 10^9 \text{ ohm} \cdot \text{cm}^2$ 之間時，能以相當高的穩定性及準確性輸出量測結果，代表著 CID 2.0 能夠透過測量單點頻率 ($|Z|_{1\text{Hz}}$) 的阻抗來及早判定 防蝕塗層對於底材是否還具有保護力，有助於提升現場實際應用之可行性。

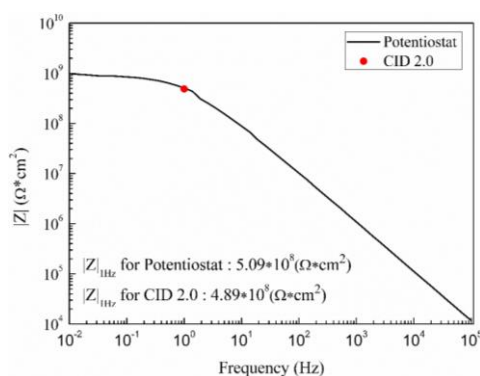


圖 2-21 環氧樹脂塗層厚度 100 μm 之式樣 Bode Plot

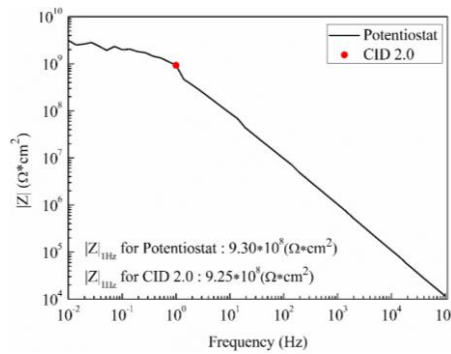


圖 2-22 環氧樹脂塗層厚度 220 μ m 之式樣 Bode Plot

為了確保離岸風機在長時間運轉的情況下能降低腐蝕造成的危害，防蝕塗層的阻抗值通常會在 10^9 ohm*cm^2 以上，因此將測量一組高阻抗塗層，結果如圖 2-23 所示，其中黑色實線代表恆電位儀對塗層進行量測所得結果，單點頻率阻抗值 ($|Z|_{1\text{Hz}}$) 為 $7.93*10^9 \text{ ohm*cm}^2$ ；紅色實心點為 CID 2.0 量測結果，單點頻率阻抗值 ($|Z|_{1\text{Hz}}$) 為 $8.32*10^9 \text{ ohm*cm}^2$ ，由此組結果可發現在量測標準差上已達到同一數量級，其值為 $3.40*10^9 \text{ ohm*cm}^2$ 。

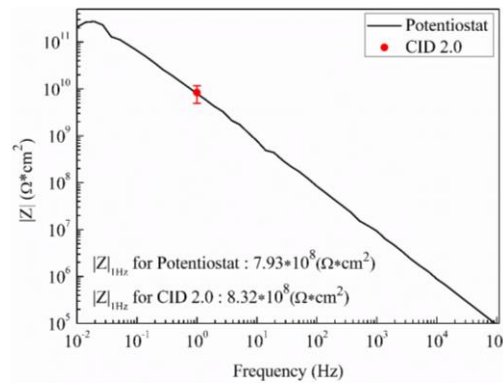


圖 2-23 CID 2.0 對高阻抗環氧樹脂塗層試樣量測

此外，如圖 2-24 所示，CID 2.0 在量測運用於離岸風機上之高阻抗防蝕塗層 (阻抗值達 $10^8 \text{ ohm*cm}^2 \sim 10^{10} \text{ ohm*cm}^2$) 時會因為其量測極限使得量測結果離散程度增加且誤差上升。儘管在結果上 CID 2.0 進行十次量測後所得量測結果平均值與恆電位儀量測高規格防蝕塗層結果相近，但對於量測高規格防蝕塗層的穩定性上仍有進步空間，因此 CID 3.0 將針對 CID 2.0 進行改良。

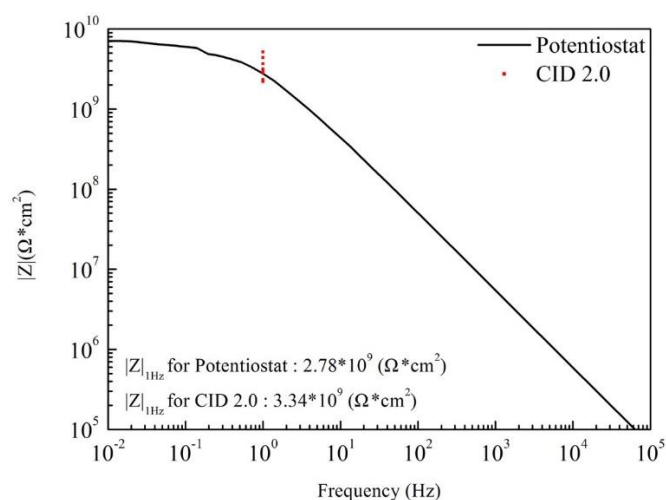


圖 2-24 CID 2.0 對高阻抗塗層試樣進行十次量測

2.4.3 第三代塗層阻抗監測儀 (CID 3.0)[11]

為了使 CID2.0 能夠近一步提升量測的範圍，將以此為基礎上進行改良，提出的改良版稱為 CID 3.0，將針對 CID2.0 類比電路的部分做改良，並對波形做信號處理讓整體系統的雜訊降低。

CID 3.0 信號雜訊處理

根據 Friis formula

$$F_{total} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}} \quad 2-3 \text{ 式}$$

F_{total} 代表整個系統雜訊指數， F_n 代表第 n 級的雜訊指數， G_n 代表第 n 級的增益。

由公式可以看出，當系統整體的增益維持一樣時，第一級的增益越大能夠讓系統的雜訊越小，因此相對於 CID2.0 使用單一增益放大器，CID 3.0 在接訊號的採用有增益的放大器讓系統的雜訊變小。



為了進一步讓雜訊降低，對 ADC 取得的信號在電腦做後處理。使用 Oversampling ratio 的技巧把白雜訊在信號的頻率降低，OSR 和 SNR 的關係如 2-4 式及 2-5 式所示

$$OSR = \frac{f_{sampling}}{2 \times f_{signal}} \quad 2-4 \text{ 式}$$

$$SNR(dB) = 1.76dB + 6.02N + 10\log(OSR) \quad 2-5 \text{ 式}$$

其中 $f_{sampling}$ 代表 ADC 的取樣頻率， f_{signal} 為量測訊號的頻率。根據 2-5 式中 SNR 跟 OSR 的關係式可以得知採用 oversampling ratio 方法，有助於提升 SNR 進而增加量測準確性。

CID 3.0 類比電路改良

CID 3.0 電路方塊如圖 2-25，相比於 CID2.0 使用兩顆運算放大器作為單一增益放大器，CID 3.0 使用一個運算放大器接成非反放大器（non-inverting amplifier）的形式，後端訊號接收部分與 CID2.0 相同，使用 24-bits ADC 和 FPGA 來接收量測訊號。圖中 Z_{dut} 代表待測物的阻抗， R_{ref} 代表使用的參考電阻阻值。CID 3.0 之非反放大器增益如 2-6 式

$$G = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad 2-6 \text{ 式}$$

根據基爾霍夫電路定律非反放大器的輸出電壓如 2-7 式，其中 $V1(\omega)$ 和 $Vs(\omega)$ 代表 $v1(t)$ 和 $vs(t)$ 的傅立葉轉換。

$$V1(\omega) = \frac{Z_{dut}}{Z_{dut} + R_{ref}} \times G \times Vs(\omega) \quad 2-7 \text{ 式}$$

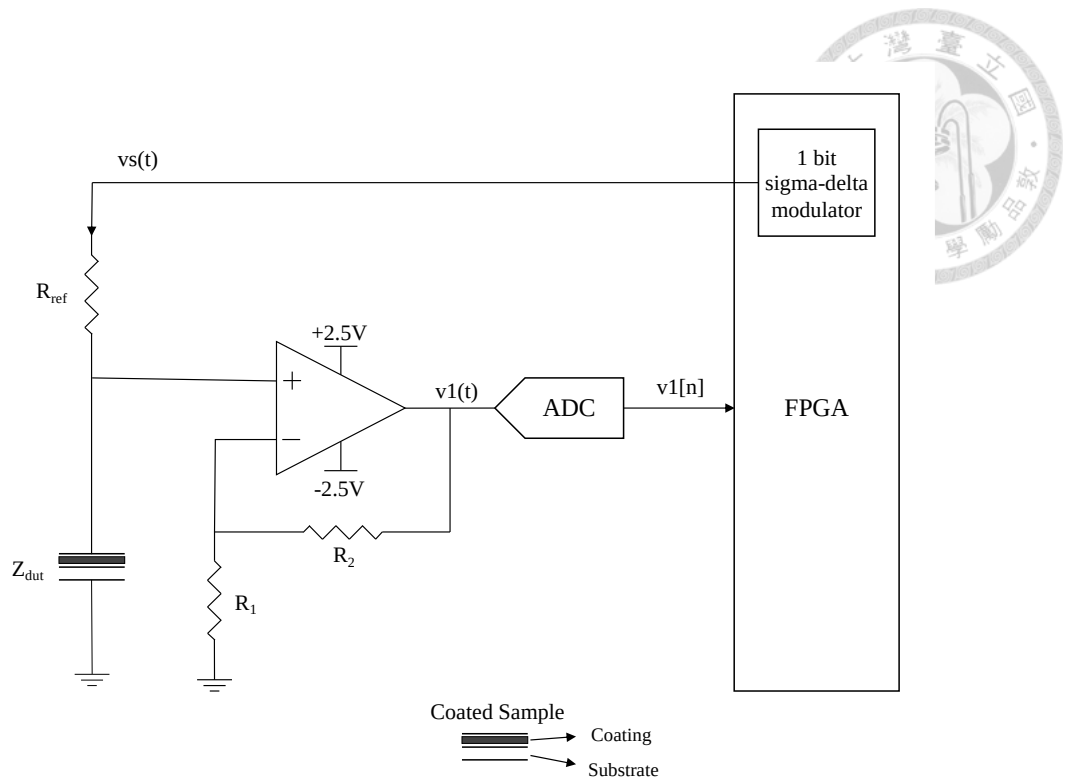


圖 2-25 CID 3.0 改良電路方塊圖

當 2-7 式之 $Z_{dut} \rightarrow \infty$ 時可得 2-8 式

$$V1(\omega)|_{Z_{dut} \rightarrow \infty} = G \times Vs(\omega) \quad 2-8 \text{ 式}$$

$V1(\omega)$ 代表量測到的訊號，其值為放大器增益(G)乘上 FPGA 打出的訊號。

實驗上將電路開路達到阻抗無窮大時可以獲得 $V1(\omega)|_{Z_{dut} \rightarrow \infty}$ ，將此結果帶回 2-8 式可得 2-9 式

$$V1(\omega) = \frac{Z_{dut}}{Z_{dut} + R_{ref}} \times V1(\omega)|_{Z_{dut} \rightarrow \infty} \quad 2-9 \text{ 式}$$

其中 R_{ref} 為已知值，將量測所得之 $V1(\omega)|_{Z_{dut} \rightarrow \infty}$ 及 $V1(\omega)$ 值帶入 2-9 式便可獲得式樣阻抗值(Z_{dut})。透過 2-9 式求得式樣阻抗之優點在於我們並不需要得知放大器的增益，因此 $R1$ 和 $R2$ 的值並不需要知道，這表示不需要用到成本較高的高精準的電阻。



在 CID 3.0 的實驗中，量測訊號採用 0.5Hz 的弦波，ADC 的取樣頻率為 1024Hz，R1 和 R2 值選用讓訊號放大後震幅接近 ADC 能接受的輸入電壓範圍，藉此降低量化雜訊的影響。

CID 3.0 標準電阻量測結果比較

CID 3.0 量測標準電阻之方法為將不同阻抗值大小之電阻分別量測 10 次訊號後做平均，每次量測的訊號時間長 4 秒。實驗數據如表 2-7 及表 2-8 所示，以三用電錶量測標準電阻所得阻抗作為基準與 CID 3.0 的結果做比較。透過實驗數據表可以觀察到 CID 3.0 在量測 10k Ω ~10G Ω 範圍內之阻值誤差皆在 5% 以內，且相較於 CID 2.0 在量測 3*10⁹ Ω 時有 18% 誤差，CID 3.0 量測標準電阻 9*10⁹ Ω 仍在 1% 誤差以內，當採用 OSR 技巧做後處理時誤差將會更小。

表 2-7 CID 3.0 與三用電錶量測標準電阻實驗數據（未使用 OSR）

標準電阻(Ω)	10k	100k	1M	10M	100M	1G	10G
三用電錶	10.01k	99.7k	0.99M	9.87M	101.2M	1.075G	9.1G
CID 3.0	9.69k	94.65k	0.994M	9.92M	101.25M	1.069G	9.17G
標準差	1.83k	1.49k	7.56k	42.3k	0.12M	5.99M	0.24G
誤差(%)	3.16	4.96	0.36	0.46	0.05	0.50	0.84

表 2-8 CID 3.0 與三用電錶量測標準電阻實驗數據（使用 OSR）

標準電阻(Ω)	10k	100k	1M	10M	100M	1G	10G
三用電錶	10.01k	99.7k	0.99M	9.87M	101.2M	1.075G	9.1G
CID 3.0	9.78k	99.4k	0.992M	9.91M	101.18M	1.072G	9.07G
標準差	3.3k	1.15k	12.4k	47.6k	0.23M	4.75M	0.43G
誤差(%)	2.30	0.29	0.19	0.45	0.02	0.28	0.35

CID 3.0 高阻抗塗層系統量測結果比較

CID 3.0 量測實際塗層之方法為將測試面積皆為 7 cm^2 而厚度不同之式樣分別量測 5 次訊號後做平均，每次量測的訊號時間長 4 秒，結果如圖 2-26 所示，綠色實心點為 CID 3.0 量測結果，黑色實線為恆電位儀量測結果。第一組試樣底材為低碳鋼，上層塗層為環氧樹脂(epoxy resin)，厚度為 $75\mu\text{m}$ ，恆電位儀量測阻抗值結果 $|Z|_{0.5\text{Hz}}$ 為 $3.03 \times 10^8\text{ ohm}$ ，CID 3.0 量測阻抗值結果為 $3.64 \times 10^8\text{ ohm}$ ，量測標準差 $5.57 \times 10^6\text{ ohm}$ ；第二組試樣底材為鋁合金，上層塗層為環氧樹脂，厚度 $450\mu\text{m}$ ，恆電位儀量測阻抗值結果 $|Z|_{0.5\text{Hz}}$ 為 $0.98 \times 10^9\text{ ohm}$ ，CID 3.0 量測阻抗值結果為 $1.11 \times 10^9\text{ ohm}$ ，量測標準差 $1.69 \times 10^7\text{ ohm}$ ；第三組試樣底材為鋁合金，上層塗層為環氧樹脂，厚度達到 $550\mu\text{m}$ ，恆電位儀量測阻抗值結果 $|Z|_{0.5\text{Hz}}$ 為 $1.37 \times 10^{10}\text{ ohm}$ ，CID 3.0 量測阻抗值結果為 $1.35 \times 10^{10}\text{ ohm}$ ，量測標準差 $2.02 \times 10^9\text{ ohm}$ 。

根據量測結果得知 CID 3.0 在量測阻抗範圍介於 $10^8 \sim 10^{10}\Omega$ 之實際塗層與恆電位儀量測結果接近一致，對比 CID 2.0 在量測 $3 \times 10^9\Omega$ 時有 18% 誤差，CID 3.0 量測標準電阻 $9 \times 10^9\Omega$ 仍在 1% 誤差以內，且量測實際塗層阻抗到 $10^{10}\Omega$ 結果與恆電位儀結果一致，表示 CID 3.0 具有比 CID 2.0 更佳的量測範圍。透過以上實驗證實 CID 3.0 不論是在量測標準電阻或是實際塗層都有相當高的準確性，顯示出 CID 3.0 在經過電路改良及雜訊處理後擁有比 CID 2.0 更佳的量測性能。

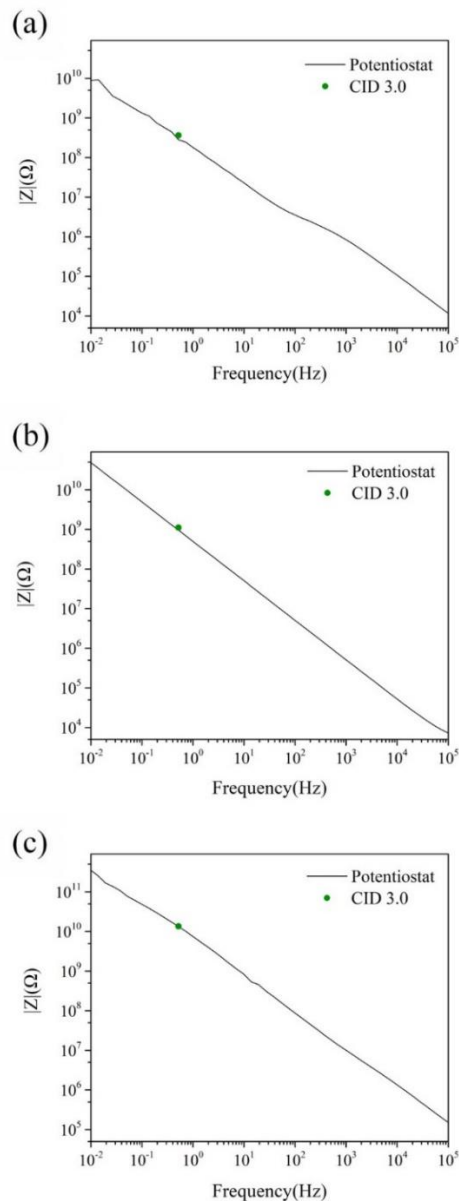


圖 2-26 三種高阻抗塗層系統量測結果比較(a) 75 μm 厚之環氧樹脂塗層試樣；
(b) 450 μm 厚之環氧樹脂塗層試樣；(c) 550 μm 厚之環氧樹脂塗層試樣

CID 3.0 長時間連續監測結果比較

CID 3.0 長時間連續監測實驗方式為將塗層試樣放置在腐蝕環境中 36 小時後，利用美工刀對塗層試樣導入一個人工刮痕，並連續監測其阻抗值變化值至 60 小時。圖 2-27 及表 2-9 為最後之量測結果。由圖 2-27 中可以發現，在人工缺陷尚未建立的前 36 小時，不論是恆電位儀及 CID 3.0 之量測數據皆呈現固定且相似的數值，代表目前塗層處於一個穩定狀態。然而當位於第 48 小時人工缺陷導入後，

我們可以發現不論是恆電位儀及 CID 3.0 之量測數據皆呈現一個可量測到的下降趨勢，且下降的幅度隨著時間的增加而增加，代表目前塗層處於一個劣化過程中，而 CID 3.0 在即時的數據量測上也可偵測到此阻抗值下降的情形，顯示 CID 3.0 具有即時監控塗層劣化的能力。

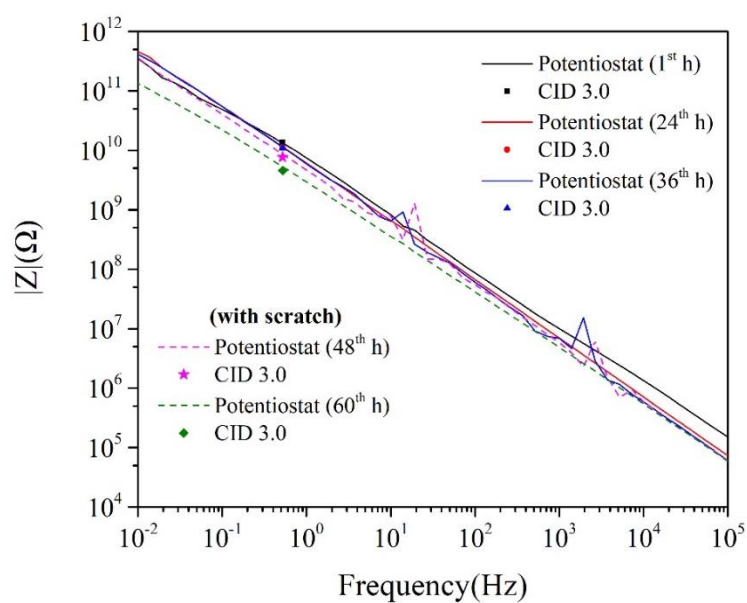


圖 2-27 60 小時連續監測結果比較

表 2-9 60 小時連續監測結果數據比較表

Sample (Ω)	Potentiostat	CID 3.0
1 h	1.33×10^{10}	1.35×10^{10}
24 h	1.14×10^{10}	1.12×10^{10}
36 h	1.13×10^{10}	1.09×10^{10}
48 h (with scratch)	8.55×10^9	7.74×10^9
60 h (with scratch)	5.31×10^9	4.56×10^9

透過以上實驗證實 CID 3.0 不論是在量測標準電阻或是實際塗層都有相當高的準確性，且具備長時間連續監測的能力，顯示出 CID 3.0 在經過電路改良及雜訊處理後擁有比 CID 2.0 更佳的量測性能。



雖然 CID 的開發已能針對單點頻率進行準確的阻抗量測，但僅透過單點阻抗量測方式，只能得知保護塗層在特定頻率下的阻抗值大小，無法呈現出其他與腐蝕行為相關之塗層資訊，且塗層在固定頻率下之阻抗值會受到多種因素所影響造成誤判的情況，例如塗層阻抗值因為塗層種類、施工時造成的厚度差異、以及在腐蝕環境中發生之非均勻腐蝕等，以單點阻抗量測時會產生誤判的情況。若將完好塗層誤判為失效塗層，會產生不必要之運營維修成本；而若將失效塗層誤判為良好塗層，則可能導致工程上之意外及經濟上之損失。因此本研究預計透過擷取頻率範圍區段內的資訊來提升判斷塗層優劣之準確性，其方法將利用電化學阻抗交流頻譜法(Electrochemical Impedance spectroscopy, EIS)的波德圖(Bode plot)以此獲得一段頻率範圍區段之資訊(相位值、阻抗值)。

第三章 實驗方法與流程



3.1 實驗器材介紹

3.1.1 恆電位儀(Potentiostat)

本論文將以美國 Gamry 公司所生產的 Ref 600 恆電位儀作為實驗儀器。該儀器大小為 27cm*10cm*18cm，重量 3 公斤，其外觀如圖 3-1 所示。Ref 600 為一種高性能的研究級電化學測試系統，特點包含快速掃描和低電流等，常被應用於材料電化學性質、塗層狀態和腐蝕情況等研究領域，且能進行多種電化學測試。本研究利用恆電位儀對塗層系統進行電化學交流阻抗量測，頻率量測範圍為 10^{-2} - 10^5 Hz。通常在測量過程中，恆電位儀會施加微小振幅(10 mV)的正弦波於塗層系統上，並根據電流響應所獲得個別頻率下之塗層阻抗值作為判定塗層於腐蝕環境下之抗蝕能力依據。

恆電位儀的實驗架設通常包括三個電極，即與底材連接之工作電極(Working Electrode)、用來導通電化學迴路的碳棒作為輔助電極(Counter Electrode)、作為參考電極(Reference Electrode)之飽和甘汞電極，這種架設被稱為三級式架設。在對塗層系統做交流阻抗量測時，也可以使用二極式架設，僅包括工作電極和作為輔助電極的碳棒，如圖 3-2 所示。在準備進行交流阻抗量測實驗前，會先於待測塗層表面黏上水管，然後將腐蝕溶液(3.5wt% NaCl 水溶液)倒入水管中，使其浸泡 24 小時，待塗層表面達到平衡狀態後開始進行量測。



圖 3-1 Ref 600 恆電位儀外觀

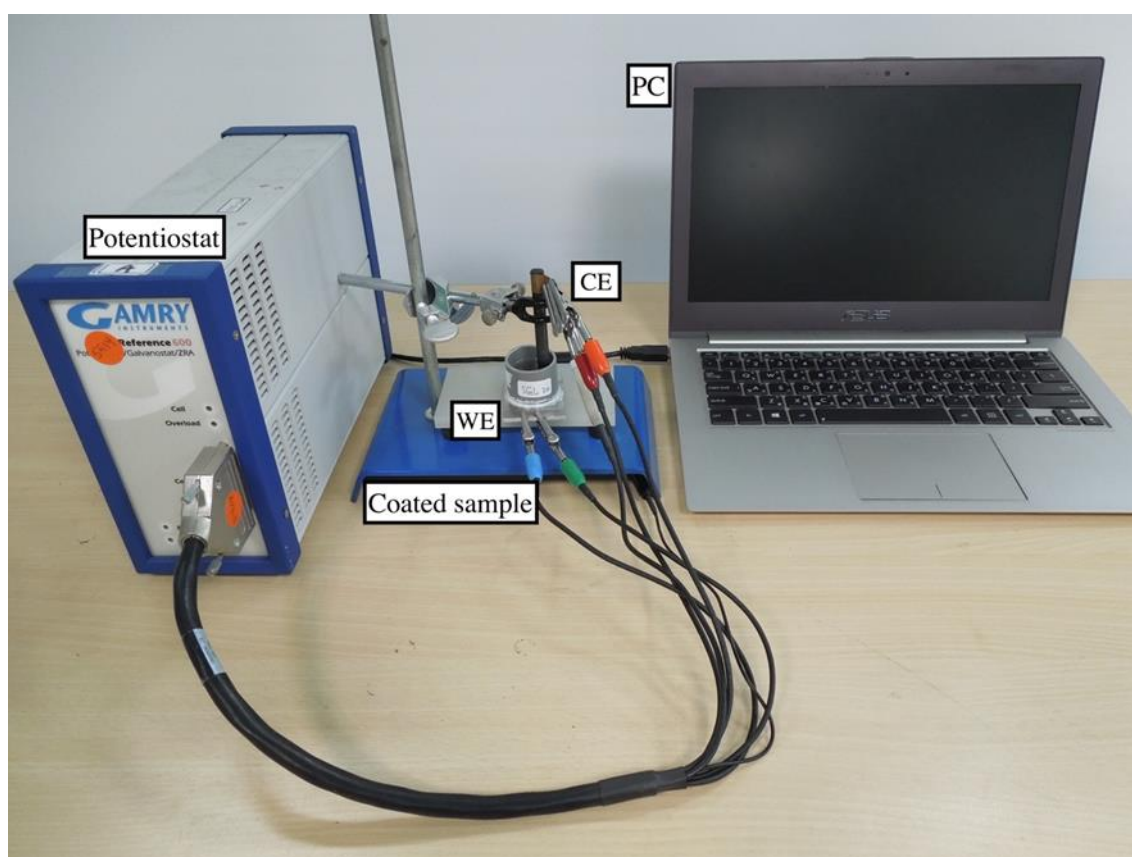


圖 3-2 二極式實驗架設圖

3.1.2 塗層特性監測儀 (Coating Characteristic Detector, CCD 1.0)

CCD 1.0 將採用與 CID 1.0 相同研究設備及架設，主要是以一塊微小印刷電路板(Printed Circuit Board, PCB)為中心透過 SMA 接頭連接所有需要的外部儀器，包含示波器、訊號產生器等，電源方面將通過外接 Pin 角的方式與電源供應器連接，以此來提供電路板所需工作電壓。相較於先前開發之 CID 利用單點阻抗量測值來判定塗層優劣，本研究著重在風機塔架上防蝕塗層老化行為檢測方法，實驗上將透過擷取塗層在一段頻率區間的變化來獲取塗層劣化行為資訊，提升檢測塗層保護性之準確性，因此以塗層特性監測儀(Coating Characteristic Detector, CCD)作為監測儀的名稱。

CCD 1.0 之設計概念在於透過擷取塗層在一段頻率區間的變化來獲取塗層劣化行為資訊，相較於先前的 CID 設計主要針對單一頻率進行量測，除了無法得知其他與腐蝕行為相關之塗層資訊，且可能會因此造成誤判的情況，例如有三種式樣之塗層在 Bode plot 上皆以良好塗層的形式呈現(斜直線)，但阻抗值因表面情形、厚度不同使得單點量測之阻抗值有差異，導致序號 3 式樣之量測結果因為低於判定標準(1G)而被判定失效，如圖 3-3 及表 3-1 所示。換言之，單點量測無法準確反映出塗層狀態，因此 CCD 1.0 將針對不同頻率所反饋之電流比值來提升判斷塗層好壞的準確性，且在頻率區段內的眾多資訊中將選擇 Bode plot 的斜率變化作分析，因為在 Bode plot 中，若是在容抗主導的頻率區段，阻抗隨頻率會呈現一條「斜直線」，表現出類似電容或是常相位元件的行為(具良好保護能力之塗層)；而在電阻主導的頻率區段，阻抗隨頻率為定值，則會呈現出「平台區」，即類似電阻之行為(塗層劣化以致於保護能力下降)，以此判定塗層對於底材是否還具有保護力。CCD 1.0 優勢在於利用獲取一段頻率區段內的資訊將有效降低因單點頻率阻抗量測所造成之誤判，前述因塗層均勻性不同被判定失效之塗層可透過 CCD 1.0 的量測認定保護塗層還具有效力(序號 3 試樣)，如圖 3-4 及表 3-2 所示，預計透過此方法能有效提升判定防蝕塗層優劣之準確性。

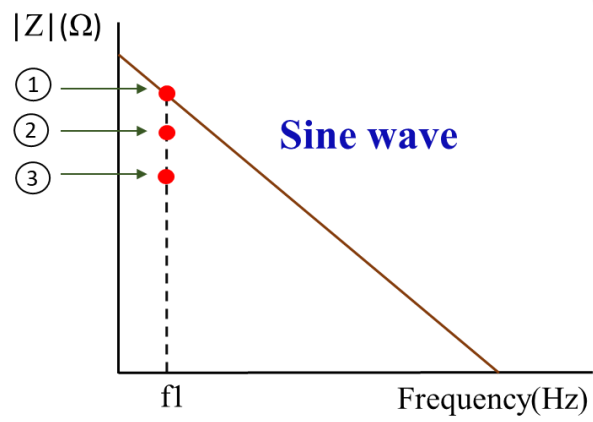


圖 3-3 正弦波訊號對三種塗層情形於 Bode plot 實驗結果

表 3-1 正弦波訊號對三種塗層保護性之判定結果

序號	塗層情形	測量值	判定
1	厚/平滑	10G	失效
2	中	1G	失效
3	薄/粗糙	0.1G	失效

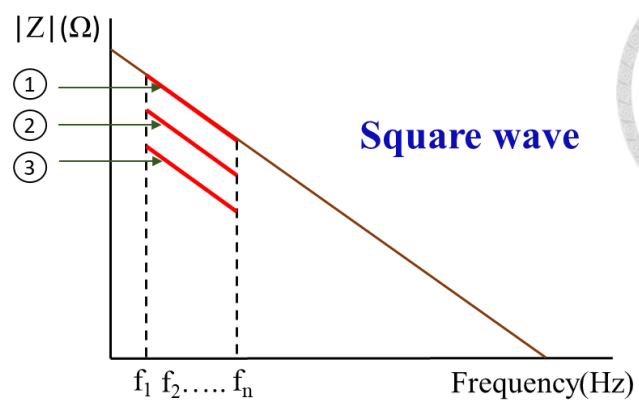


圖 3-4 方波訊號對三種塗層情形於 Bode plot 實驗結果

表 3-2 方波訊號對三種塗層保護性之判定結果

序號	塗層情形	判定
1	厚/平滑	有效
2	中	有效
3	薄/粗糙	有效



CCD 1.0 之目的在於獲取塗層在一段頻率區間之資訊，其中訊號產生器至少要輸出兩個不同頻率之參考交流電壓訊號，而每個參考交流電壓訊號皆為正弦波，隨後透過接收參考交流電壓訊號經過塗層後產生的回饋電流訊號量測電流比值。本研究將在符合以上條件下之眾多波形中選擇以方波作為輸入波形，因為方波包含幾項特點：

1. 方波是由基礎頻率的多個基數倍頻率正弦波組合而成，能夠透過打入特定頻率的方波得到一頻段範圍的資訊(例如阻抗或相角之變化)。
2. 電壓振幅將隨著頻率增加而有規律的縮小($\frac{1}{1}, \frac{1}{3}, \frac{1}{5}, \dots, \frac{1}{2n-1}, \dots$)，且振幅衰減量不至於造成量測上之信噪比過差而獲得錯誤資訊。

在許多工程應用中會運用方波的特點作為量測工具[57-59]，藉此我們將透過方波作為量測塗層性質之方式，並以此改善先前 CID 在單點阻抗量測上的限制。



3.2 實驗設計

CCD 1.0 將以 CID 1.0 之研究設備進行實驗，如圖 3-5 所示，透過訊號產生器 (Signal generator) 打入方波，從內部電路設置圖，如圖 3-6 所示，將輸入之訊號 (方波) 通過已知參考電阻(R_{ref})，並利用示波器接收 V1、V2 訊號，最後將結果透過 USB 傳入電腦做分析。因塗層監測為一種非破壞檢測方法，為避免輸入電壓訊號過大使得塗層遭受破壞，本研究所使用電壓訊號之振幅範圍為 5-20mV，而較佳的範圍為 10-20mV。

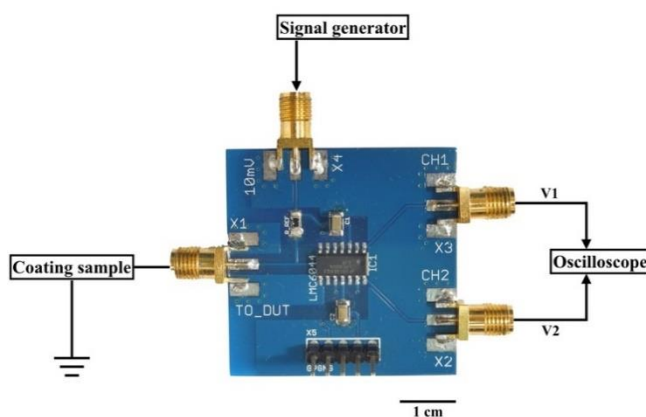


圖 3-5 CCD 1.0 電路板外觀及連接配置圖

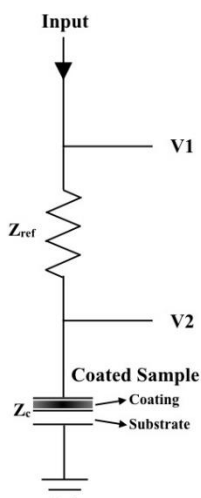


圖 3-6 CCD 1.0 電路設置圖



3.2.1 電流波形與塗層抗蝕能力變化

由於阻抗是電壓與電流的比值，不具有波形，具有波形的為電流，因此目標會放在利用量測電流波形之變化來解讀塗層試樣之性質變化。

根據圖 3-6 的電路設計，可得 3-1 式及 3-2 式：

$$V1 = I \times (R_{ref} + R_c) \quad 3-1 \text{ 式}$$

$$V2 = V1 - I \times R_{ref} \quad 3-2 \text{ 式}$$

將 3-1 式及 3-2 式改寫，可得 3-3 式及 3-4 式：

$$I = \frac{V1}{R_{ref} + R_c} \quad 3-3 \text{ 式}$$

$$I = \frac{V1 - V2}{R_{ref}} \quad 3-4 \text{ 式}$$

根據串聯電路上的節點電流相等，可知透過 3-3 式及 3-4 式所得電流波型理論上會具有相同趨勢。為了驗證兩式所得波型是否如預期所想，將利用 3-4 式做為實驗公式；利用 3-3 式做為模擬公式。若在實驗結果能與模擬結果相符，將能證明出電流變化會隨塗層抗蝕能力變化。



3.2.2 工程指標建立

本研究預計建立出一個判定塗層防蝕能力之指標，作為實際工程檢測塗層效力之工具應用於工程檢測上，其方法為透過將 3-3 式拆解成不同頻率下對應的電壓值($v_{1,n}$)及試樣阻抗值($R_{c,n}$)，也就是利用方波為許多不同頻率組合而成之特性獲得得隨頻率不同而改變之電流值(A_n)， A_n 表示式如 3-6 式：

$$A_n = \frac{v_{1,n}}{R_{ref} + R_{c,n}} \quad 3-6 \text{ 式}$$

預計訂立出之指標依據稱為 $Z_n(t)$ ，其表示式如 3-7 式所示，將以此作為判斷塗層對於底材是否還具有保護力之依據

$$Z_n(t) = \frac{A_n(t)}{A_1(t)} \quad 3-7 \text{ 式}$$

為了在工程應用上有較顯著之標的，建立出 n 值的選擇標準如下：

$$\text{Max value of the } [Z_n(t_o) - Z_n(t_c)]$$

其中 $Z_{n(t_o)}$ 為塗層具有良好保護性時對應之 Z 值， $Z_{n(t_c)}$ 為塗層受到嚴重破壞時對應之 Z 值，並以兩者之間差值最大者作為 n 值的選擇。

當塗層具有良好保護性時的 Bode plot 如圖 3-7 所示，其對應之電流波型作傅立葉轉換，可得在基於基頻(f_1)下不同頻率(f_1 、 f_2 、 f_3 ...、 f_n ...)將對應到個別的電流值(A_1 、 A_2 、 A_3 ...、 A_n ...)，如圖 3-8 所示；當塗層受到嚴重腐蝕破壞後的 Bode plot 如圖 3-9 所示，將其對應之電流波型作傅立葉轉換，可得在基於基頻(f_1)下不同頻率(f_1 、 f_2 、 f_3 ...、 f_n ...)將對應到個別的電流值(A_1' 、 A_2' 、 A_3' ... A_n' ...)，如圖 3-10 所示。

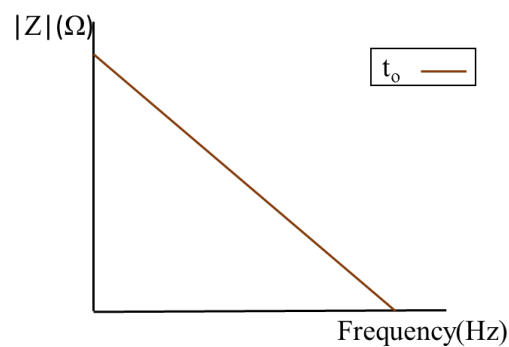


圖 3-7 良好塗層於 Bode plot 呈現結果

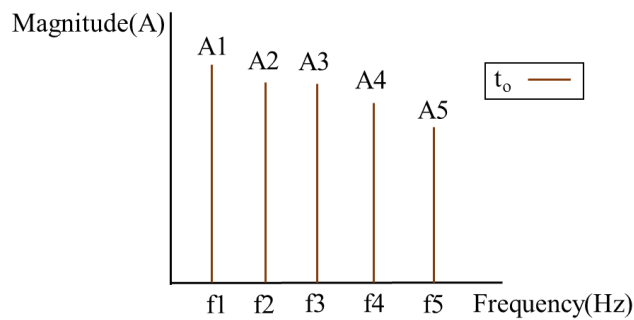


圖 3-8 良好塗層電流波型之傅立葉轉換結果

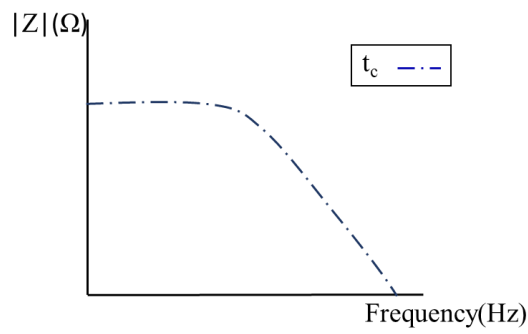


圖 3-9 受腐蝕破壞之塗層於 Bode plot 實驗結果

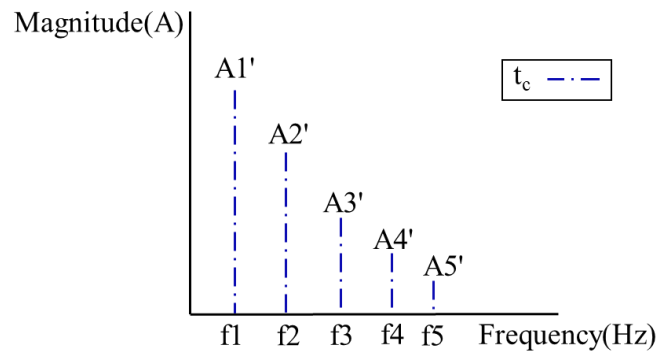


圖 3-10 受腐蝕破壞塗層之電流波型傅立葉轉換結果

根據方波特性得知電壓的振幅將隨著頻率的增加而有規律的縮小，第 n 個頻率的振幅將縮小為基頻電壓振幅的 $(\frac{1}{2n-1})$ 倍，將此結果及改寫後的 3-6 式帶入 3-7 式可得 3-8 式：

$$Z_n = \frac{A_n}{A_1} = \frac{1}{2n-1} \frac{R_{ref} + R_1}{R_{ref} + R_n} \quad 3-8 \text{ 式}$$



根據 3-8 式假設 $n=10$ 為所得差距最大點，當塗層情況良好時，Bode plot 呈現出斜直線($R \propto \frac{1}{\omega}$)，則

$$Z_{10(t0)} = \frac{A_{10}}{A_1} = \frac{1}{19} \frac{R_{ref} + R_1}{R_{ref} + R_{10}} = \frac{1}{19} \frac{R_{ref} + 19R_{10}}{R_{ref} + R_{10}} \quad 3-9 \text{ 式}$$

若 $Z_{10(t0)}$ 中滿足 $R_{ref} \ll R_{10}$ ， R_{ref} 將忽略不計，則

$$Z_{10(t0)} = \frac{19}{19}$$

當塗層受到嚴重破壞時，Bode plot 呈現出平台區($R_1 = R_{10}$)，則

$$Z_{10(tc)} = \frac{A_{10}}{A_1} = \frac{1}{19} \frac{R_{ref} + R_1}{R_{ref} + R_{10}} = \frac{1}{19}$$

根據上述，當在 $n=10$ 時塗層從情況良好到受到嚴重腐蝕破壞後，其比值將從

原來的 $Z_{10(t0)} = \frac{19}{19}$ 變為 $Z_{10(tc)} = \frac{1}{19}$ 。換言之，透過得知兩不同頻率下的電流值後做

比值，便可斷出目前所量測之塗層試樣是偏向容抗主導的頻率區段或是偏向電阻主導的頻率區段，以此種方法量測將有效降低單一阻抗量測造成誤判的可能性，提供檢修人員更精確地更換依據。



3.2.3 CCD 1.0 準確性量測(Accuracy)

此部分實驗利用恆電位儀量測當塗層抗蝕能力變化時與模擬之比值是否能對應，以及模擬數值與實際量測所得是否一致，若確實顯示出 EIS 結果與實際塗層變化相對應，便可確認塗層因腐蝕造成抗蝕能力改變時將可透過 CCD 1.0 獲得準確資訊。其中模擬數值的方式將以 $R_n = k \times R_{ref}$ 帶入 3-8 式，假設當以 $n=10$ 作為選擇點，將 $R_{10} = k \times R_{ref}$ 帶入 3-9 式中可得模擬之比值 $Z_{10(t_0)}$ ，結果如表 3-3 所示。

表 3-3 $Z_{10(t_0)}$ 模擬數值結果

$R_{10} = k \times R_{ref}$	$R_{ref} + R_1$	$R_{ref} + R_{10}$	$Z_{10(t_0)}$ 模擬值
$k = 1$	20	2	0.5263
$k = 2$	39	3	0.6842
$k = 3$	58	4	0.7631
$k = 4$	77	5	0.8105
$k = 5$	96	6	0.8421
$k = 6$	115	7	0.8647
$k = 7$	134	8	0.8816
$k = 8$	153	9	0.8947
$k = 9$	172	10	0.9053
$k = 10$	191	11	0.9139
$k = 11$	210	12	0.9211
$k = 12$	229	13	0.9271
$k = 13$	248	14	0.9323
$k = 14$	267	15	0.9368



3.2.4 CCD 1.0 靈敏度量測(Sensitivity)

雖然在低頻率訊號量測下，塗層劣化的情況比較容易顯現，但單次監測的時間較長。由於塗層監控必須考量監控效率和檢測靈敏度，因此本研究將針對當塗層劣化時，透過 CCD 1.0 評估在不同頻率範圍下，即當 f_1 和 f_n 改變時，是否能根據所選之適當頻率範圍而有足夠靈敏度判斷塗層優劣。其中 f_1 的範圍介於 0.05-5 Hz，較佳範圍是介於 0.1-2 Hz，而頻率比值(f_n/f_1)較佳的範圍為 5~30。

3.2.5 CCD 1.0 精確度量測(Precision)

此部分實驗將針對當塗層劣化時，透過 CCD 1.0 量測塗層所得結果評估當參考訊號頻率比值(f_n/f_1)越大時，對於所測得數據之誤差值影響，並決定在能有良好的數據品質下的監測頻率範圍。

第四章 實驗成果與討論



於實驗室中進行 EIS 實驗，通常選擇較大的頻率區段進行量測(10^{-2} ~ 10^5 Hz)，用來得知不同時間尺度之電化學反應，如高頻區域(10^3 ~ 10^5 Hz)表示的是在參考電極和工作電極之間的水溶液阻抗，因此塗層系統在相同環境下發生劣化時，高頻區段的阻抗變化並不明顯，而中低頻區域是由擴散主導，變化較明顯，得以透過中低頻(10^{-2} ~ 10^1 Hz)量測結果判斷此塗層系統是偏向容抗主導還是電阻主導，因此本研究將以中低頻作為主要研究範圍。

由於目前商用之塗層監測器採用監測之頻率大多為 0.1~1 Hz，因此本研究將在避免破壞塗層情況下輸入頻率 0.1Hz、振幅 20mV 於塗層系統，其中判斷塗層是否仍具備足夠防蝕能力之阻抗值標準將依所監測的目標而定，通常設定在 $100\text{ M}\Omega \sim 1\text{ G}\Omega$ 左右[60-62]。

實驗結果的呈現將先証實電流波型與塗層特性是否能相互對應，以此確認後續電流比值應用的可行性，其驗證方式將基於恆電位儀量測塗層系統之方法，恆電位儀量測之方式為輸入具有微小振幅之正弦波於待測試樣並接收反饋電流訊號，以此來計算各頻率點下的阻抗及相位，因此我們透過給予不同頻率下各自的振幅及相位來模擬方波輸入待測試樣後之結果，並確認實際利用示波器量測到的波型結果是否與模擬結果相符。隨後將根據利用電流比值建立的工程指標(Z_n)作為判斷塗層優劣之依據，並決定較適合用來量測塗層系統的頻率範圍。



4.1.1 電流波形與塗層抗蝕能力變化量測結果

為了確認電流波型與塗層抗蝕能力之間的關係，我們將透過 3-3 式及 3-4 式做驗證。我們利用 3-4 式($I = \frac{V1-V2}{R_{ref}}$)做為實驗公式，實驗方法為將方波透過訊號產生器打入 CCD 1.0 後，透過示波器將 V1、V2 所得波型做相減，以此結果波型作為實驗波型；利用 3-3 式($I = \frac{V1}{R_{ref}+R_c}$)做為模擬公式，其模擬方法將利用方波本身具備的特性—由許多不同頻率的正弦波組合而成，透過將不同頻率的正弦波拆解，給予個別頻率特定電壓振幅(V_i)及相位(ϕ_f)，以此可得模擬公式 4-1 式：

$$I_i = |I_i| \times \sin(2\pi ft + \phi_f) = \left| \frac{V_i}{R_i} \right| \times \sin(2\pi ft + \phi_f) \quad 4-1 \text{ 式}$$

由於在 Bode plot 中當塗層對於底材具有良好保護能力時塗層特性表現出類似電容或是常相位元件的行為，因此我們將 $\arctan(R + \frac{\cos(\theta)}{WC}, \frac{\sin(\theta)}{WC})$ 帶入 4-1 式中的 ϕ_f ，其中電阻因為不具有相位差，所以只存在於實部項。根據模擬量測一顆電容值 1200pF 的電容($\theta=90^\circ$)結果，如圖 4-1，實際利用示波器量測結果如圖 4-2，比較圖 4-1 及圖 4-2 可發現模擬公式雖然因為帶入的正弦波頻率項式為有限項，使得結果呈現上帶有毛刺，不如實際以訊號產生器產生之方波所得結果如此平滑，但以兩者之波型趨勢來看，以準確性而言還是為可被接受之範圍，意謂著根據電流波形對應塗層抗蝕能力之結果證明出電流變化會隨塗層抗蝕能力變化而改變。

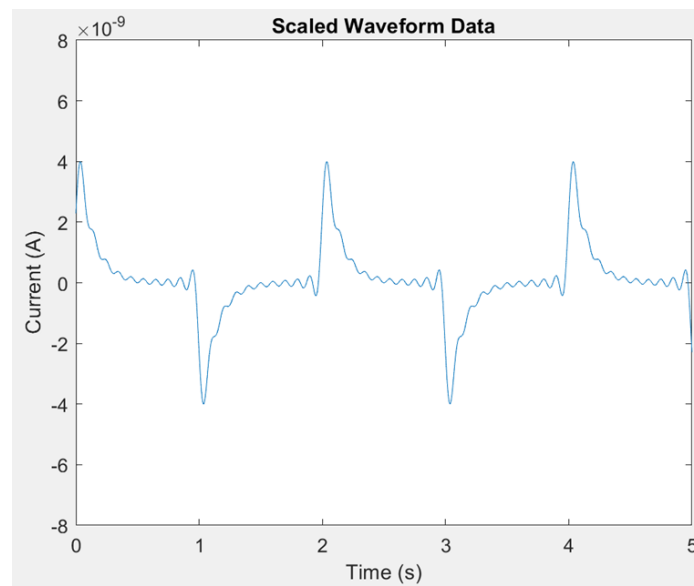


圖 4-1 模擬電容電流實驗結果

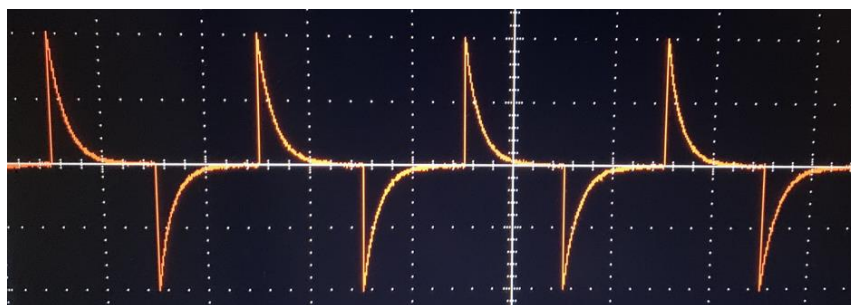


圖 4-2 示波器量測電容實驗結果



4.1.2 高阻抗塗層系統量測結果比較

為了確認塗層在具有優良保護性時能透過特性量測的方式避免被誤判成失效塗層，因此分別將測試塗層 Sample (1)及 Sample (2)以恆電位儀量測波德阻抗值作為參考標準，並透過 CCD 1.0 量測所得斜率值判定塗層優劣。

Sample (1)式樣之底材為鋁合金，塗層為液體塗層(Epoxy)；Sample (2)式樣之底材為鋁合金，塗層為粉體塗層(含色料之高純度還氧樹脂)。根據 EIS 結果，如圖 4-3 所示，圖中黑色線為 Sample (1)量測結果，藍色線為 Sample (2)量測結果，兩式樣於 Bode plot 之結果上皆呈現出斜直線，顯示塗層行為皆偏向容抗主導，意謂著兩測試塗層對於底材皆具有良好保護力。

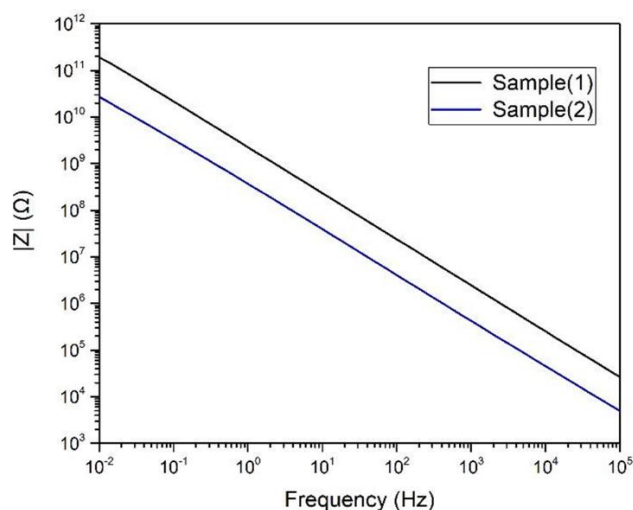


圖 4-3 良好塗層試樣於 Bode plot 實驗結果

若以先前僅針對單一頻率(0.5Hz)阻抗值做為判斷塗層保護性依據，並將更換塗層標準訂為(1GΩ)時，根據表 4-1 結果所示，可以觀察到以下情況：Sample (1) 之單點塗層阻抗值 $|Z|_{0.5\text{Hz}}$ 為 4.29 GΩ，其阻抗值高於判定標準，因此塗層依然會被認定為具有保護底材之能力；Sample (2)之單點塗層阻抗值 $|Z|_{0.5\text{Hz}}$ 為 0.69 GΩ，由於阻抗值低於判定標準，因此塗層會被認定為失去保護底材之能力，顯示單一頻率阻抗量測可能會受到塗層種類或是均勻性等因素而造成誤判。

由於塗層可能在不同頻率下具有不同的阻抗特性，僅選擇單一頻率阻抗量測值作為判定塗層優劣之依據可能無法全面評估塗層的保護效果。因此，在評估塗層保護性時，除了單一頻率外，或許能使用其他評估方法來綜合考慮塗層的性能。

表 4-1 良好塗層於單點阻抗量測結果

試樣	$ Z _{0.5\text{Hz}}(\Omega)$	塗層狀態
Sample (1)	4.29 G	優良
Sample (2)	0.69 G	失效

當以 CCD 1.0 對 Sample (1)及 Sample (2)式樣進行量測時，結果如表 4-2 所示，可得當選擇基頻為($f_1=0.1\text{Hz}$)，參考電阻 $R_{\text{ref}}=10^7\Omega$ ， $n=14$ ($f_{14}=2.7\text{Hz}$)的情況下時，Sample (1)之 $Z_{14(to)}$ 實際量測值($\frac{A_{14}}{A_1}$)為 0.98，透過 3-9 式代入 $n=14$ 所獲得模擬值為 0.99，顯示出塗層具有保護底材之能力；Sample (2)之 $Z_{14(to)}$ 實際量測值($\frac{A_{14}}{A_1}$)為 0.95，透過 3-9 式代入 $n=14$ 所獲得模擬值為 0.95，顯示出塗層依然具有保護底材之能力。相較於先前 CID 單點阻抗量測方式，CCD 1.0 透過量測塗層特性可以降低因塗層種類或是均勻性等影響而造成誤判之情況。

進一步研究塗層的阻抗特性，相較於單一頻率量測有可能造成誤判的情況，將有助於提升塗層保護性能的可靠性和準確性，並確保底材在長期使用中獲得有效的保護。

表 4-2 CCD 1.0 量測良好塗層試樣結果

試樣	選定頻率值	$Z_{14(to)}$	$Z_{14(to)}$ 模擬值	塗層狀態
Sample (1)	$f_1=0.1\text{Hz}$ 、 $f_{14}=2.7\text{Hz}$	0.98	0.99	優良
Sample (2)	$f_1=0.1\text{Hz}$ 、 $f_{14}=2.7\text{Hz}$	0.95	0.95	優良



4.1.3 受破壞之塗層系統量測結果比較

為了確認塗層在遭受腐蝕破壞而失去保護力時能透過特性量測的方式避免被誤判成有效塗層，因此分別將測試塗層 Sample (3)及 Sample (4)以恆電位儀量測波德阻抗值作為參考標準，並透過 CCD 1.0 量測所得斜率值判定塗層優劣。

Sample (3)及 Sample (4)試樣之底材皆為鋁合金，塗層皆為液體塗層(Epoxy)。根據 EIS 所得結果，如圖 4-4、圖 4-5 所示，兩塗層皆於中低頻區皆出現平台區，顯示塗層特性偏向阻抗主導，意謂著兩測試塗層對於底材皆失去保護力。

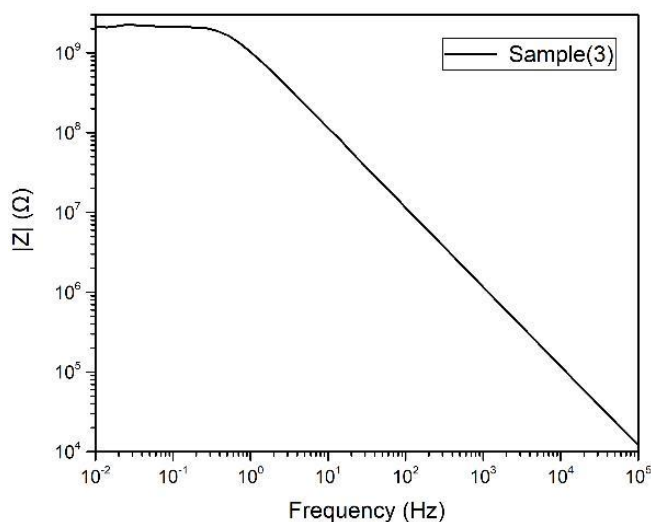


圖 4-4 受腐蝕破壞之塗層試樣(3)於 Bode plot 實驗結果

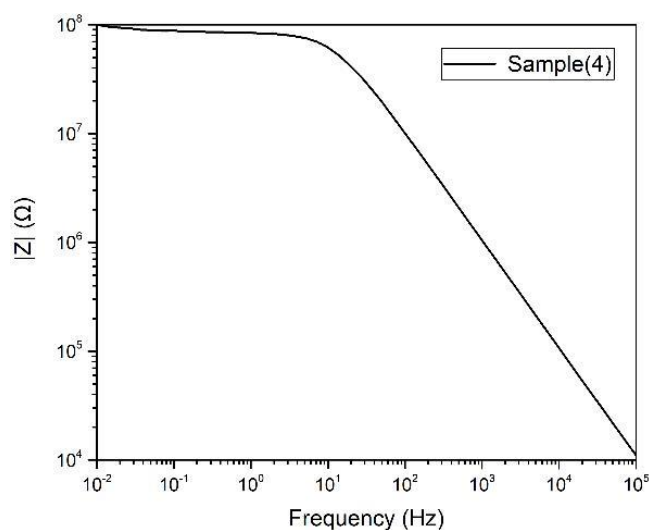


圖 4-5 受腐蝕破壞之塗層試樣(4)於 Bode plot 實驗結果

若以先前針對單一頻率(0.5Hz)阻抗值做為判斷塗層保護性依據，並將更換塗層標準訂為(1GΩ)時，其結果如表 4-3 所示，Sample (4)之單點塗層阻抗值 $|Z|_{0.5\text{Hz}}$ 為 0.085 GΩ，其阻抗值低於判定標準，因此塗層依然會被認定為失去保護底材之能力；但 Sample (3)之單點塗層阻抗值 $|Z|_{0.5\text{Hz}}$ 為 1.7 GΩ，因為阻抗值高於判定標準，因此塗層會被認定為具有保護底材之能力，顯示單一頻率阻抗量測可能會因為塗層處於腐蝕初期狀態等因素而造成誤判。

以上結果顯示單一頻率下的阻抗量測可能無法全面評估塗層的保護效果。塗層的阻抗特性可能會因為多種因素而產生變化，包括腐蝕程度、塗層材料的特性等。因此，在評估塗層保護性時，或許能使用更綜合的評估方法，例如與其他頻率下的阻抗值相結合，以更加確認塗層目前的性能。

表 4-3 受腐蝕破壞之塗層於單點阻抗量測結果

試樣	$ Z _{0.5\text{Hz}}(\Omega)$	塗層狀態
Sample (3)	1.7 G	優良
Sample (4)	0.085 G	失效

當以 CCD 1.0 對 Sample (3)及 Sample (4)之受破壞塗層式樣進行量測時，結果如表 4-4 所示，可得當選擇基頻為($f_1=0.1\text{Hz}$)，參考電阻 $R_{\text{ref}}=10^7\Omega$ ， $n=14$ ($f_{14}=2.7\text{Hz}$)的情況下時，Sample (3)之 $Z_{14(tc)}$ 實際量測值為 0.05，Sample (2)之 $Z_{14(tc)}$ 實際量測值為 0.036，兩者結果皆表示塗層已失去保護性，相較於先前 CID 單點阻抗量測方式，CCD 1.0 透過量測塗層特性可以降低因塗層處於腐蝕初期狀態等影響而造成誤判之情況。

表 4-4 CCD 1.0 量測受腐蝕破壞之塗層試樣結果

試樣	選定頻率值	$Z_{14(tc)}$	塗層狀態
Sample (3)	$f_1=0.1\text{Hz}$ 、 $f_{14}=2.7\text{Hz}$	0.05	失效
Sample (4)	$f_1=0.1\text{Hz}$ 、 $f_{14}=2.7\text{Hz}$	0.036	失效



4.1.4 受破壞之塗層系統量測結果之靈敏度與精確性比較

此部分將以 Sample (4)作為量測試樣，並以不同基頻及不同頻率區段進行量測，結果如表 4-5、表 4-6。根據判定結果顯示，CCD 1.0 之靈敏度會因為塗層情形於選定之頻率區段不同而變化，隨著所選基頻(f_1)越高時可能會因為塗層在此頻率區段還沒完全破壞導致難以判定，而透過選定適當頻率區段(0.1~2 Hz)進行量測將能準確判定出塗層優劣。

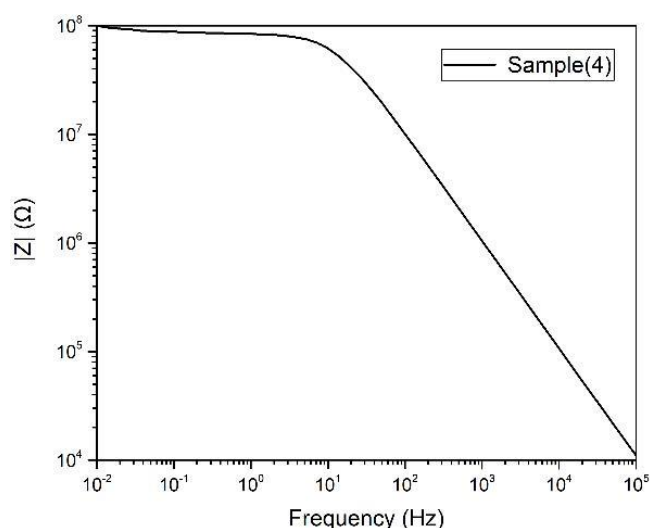


圖 4-6 受腐蝕破壞之塗層試樣(4)於 Bode plot 實驗結果

根據理論值與量測值之間誤差比較，CCD 1.0 之精確度可能會因為當頻率範圍取樣越大時，訊號振幅變小使得信噪比變差，使得在準確度上雖然會呈現出塗層目前處於不良狀態，但精確度上還是有差異。因此為兼顧測得數據品質與監測頻率範圍，本研究選擇之 f_1 的範圍介於 0.05-5 Hz，較佳範圍是介於 0.1-2 Hz，而頻率比值(f_n/f_1)較佳區間為 5~30，在此區間之外，雖可採用相同方法進行量測，但所測得數據會具有較大之誤差。

表 4-5 CCD 1.0 針對小範圍頻率量測結果

f_1 (基頻)	f_n	量測值	判定結果	理論值
0.05	0.25	0.24	失效	0.2
0.1	0.5	0.2	失效	0.2
2	10	0.22	失效	0.2
5	25	0.47	較難判定	0.2

表 4-6 CCD 1.0 針對大範圍頻率量測結果

f_1 (基頻)	f_n	量測值	判定結果	理論值
0.05	1.25	0.049	失效	0.04
0.1	2.7	0.036	失效	0.037
2	50	0.052	失效	0.04
5	125	0.16	失效	0.04

第五章 結論



本研究之主要目標是以擷取一段頻率範圍內之資訊來判定塗層優劣，相較於先前的 CID 只針對單點頻率進行量測容易因塗層厚度差異、非均勻腐蝕等外在因素之干擾造成誤判，CCD 1.0 優勢在於可呈現某頻率區段內的阻抗趨勢，準確反應出塗層當下是否仍具備完好之障蔽保護能力。更確切的說，CCD 1.0 可避免塗層依然具有良好保護能力下僅因其厚度較薄而遭誤判失效，藉此可降低非必要之維修成本。反之，CCD 1.0 可避免塗層在遭受非均勻腐蝕(如孔蝕)破壞下僅因其狀態處於腐蝕初期阻抗值尚未大幅衰退而遭誤判良好，藉此可防止後續非可預期之快速腐蝕破壞導致工程上之意外及經濟上之損失。

本研究在眾多塗層資訊中選擇以斜率作為判斷依據，並以方波輸入，透過此種量測方式，建立出新的指標依據，除了得知塗層在單一頻率之阻抗值大小之外，更可了解目前塗層系統之行為偏向容抗主導或是電阻主導，即可據此判斷塗層是否還具有保護底材之能力，並為了解塗層系統於腐蝕環境中劣化之形式與過程等進一步分析提供更全面之資訊。

第六章 未來工作



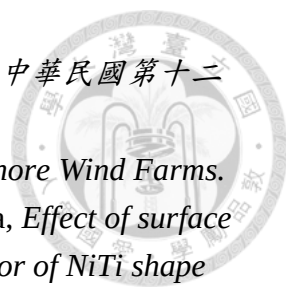
本論文之研究結果顯示，透過擷取一段頻率區間作為判斷塗層優劣之依據較先前 CID 所使用之單點阻抗量測判定方法擁有更佳的準確性，而本研究在眾多含有至少兩個不同頻率之參考交流電壓訊號下選擇方波作為輸入波型，但不排除其餘波型使用之可行性，例如針對特定塗層以固定頻率之兩正弦波輸入、以三角波做為輸入等，且在 EIS 的結果上包含波德阻抗圖及波德相位圖，意謂著此方式可以提供的不只有阻抗資訊，但不論是先前開發之 CID 或是本論文之研究皆只使用到阻抗的部分作為判定塗層優劣之依據，未來可以將通過相位的觀點來判定塗層優劣的方式成為研究目標。

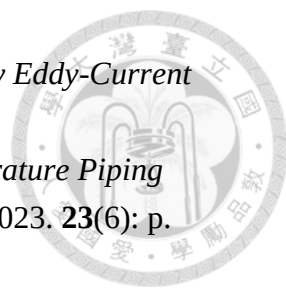
由於 CCD 1.0 還是以 CID 1.0 之研究工具作為基礎，需要用到許多外部儀器，包含訊號產生器、示波器、電源供應器等，皆不利於實際應用於現場量測，因此如何將 CCD 1.0 的概念應用於微型化的工具上也成為未來的研究目標。

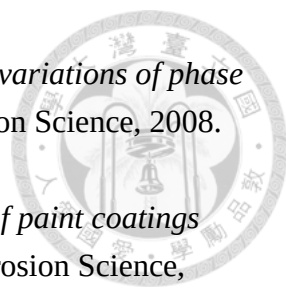
參考文獻



1. Hevia-Koch, P. and H.K. Jacobsen, *Comparing offshore and onshore wind development considering acceptance costs*. Energy Policy, 2019. **125**: p. 9-19.
2. Kou, L., et al., *Review on monitoring, operation and maintenance of smart offshore wind farms*. Sensors, 2022. **22**(8): p. 2822.
3. Deshpande, P., et al., *Impressed current cathodic protection (ICCP) of mild steel in association with zinc based paint coating*. Materials Today: Proceedings, 2022. **50**: p. 1660-1665.
4. Erdogan, C. and G. Swain, *Conceptual sacrificial anode cathodic protection design for offshore wind monopiles*. Ocean Engineering, 2021. **235**: p. 109339.
5. Gundogdu, S. and O. Sahin, *EMI effects of cathodic protection on electromagnetic flowmeters*. Sensors, 2007. **7**(1): p. 75-83.
6. Caldon, E.B., D.O. Wipf, and D.W. Smith Jr, *Characterization of a tetrafunctional epoxy-amine coating for corrosion protection of mild steel*. Progress in Organic Coatings, 2021. **151**: p. 106045.
7. Qin, C.C., A.T. Mulroney, and M.C. Gupta, *Anti-icing epoxy resin surface modified by spray coating of PTFE Teflon particles for wind turbine blades*. Materials Today Communications, 2020. **22**: p. 100770.
8. Yuan, X., et al., *EIS study of effective capacitance and water uptake behaviors of silicone-epoxy hybrid coatings on mild steel*. Progress in Organic Coatings, 2015. **86**: p. 41-48.
9. Slot, H., et al., *Leading edge erosion of coated wind turbine blades: Review of coating life models*. Renewable energy, 2015. **80**: p. 837-848.
10. Magar, H.S., R.Y. Hassan, and A. Mulchandani, *Electrochemical impedance spectroscopy (EIS): Principles, construction, and biosensing applications*. Sensors, 2021. **21**(19): p. 6578.
11. Liao, H.-C., et al., *Degradation Observations of Protective Coatings: An Improved Version of Coating Impedance Detector*. IEEE Access, 2022. **10**: p. 18074-18080.
12. Lee, Y.-L., et al., *Field-programmable gate array-based coating impedance detector for rapid evaluation of early degradation of protective coatings*. IEEE Access, 2019. **7**: p. 20472-20478.
13. Kuo, Y.-T., C.-Y. Lee, and Y.-L. Lee, *Compact coating impedance detector for fast evaluation of coating degradation*. Measurement, 2018. **124**: p. 303-308.
14. 吳興練, *離岸風機塔架塗裝系統耐蝕性評估*. Journal of Chinese Corrosion Engineering, 2016. **30**(1): p. 24-37.

- 
15. 林維明、饒正, 港灣碼頭鋼板樁結構物腐蝕調查研究, in 中華民國第十二屆海洋工程研討會論文集. 1990.
 16. Pawsey, C., *The Importance of Corrosion Protection on Offshore Wind Farms*.
 17. B. Thierry, M.T., C. Trepanier, O. Savadogo, and L. H. Yahia, *Effect of surface treatment and sterilization processes on the corrosion behavior of NiTi shape memory alloy*. Journal of biomedical materials research, 2000. **51**: p. 685-693.
 18. Berger, L.-M., *Application of hardmetals as thermal spray coatings*. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2015. **49**: p. 350-364.
 19. Ang, A.S.M. and C.C. Berndt, *A review of testing methods for thermal spray coatings*. International Materials Reviews, 2014. **59**(4): p. 179-223.
 20. Hernández-Betancur, J.D., H.F. Hernández, and L.M. Ocampo-Carmona, *A holistic framework for assessing hot-dip galvanizing process sustainability*. Journal of cleaner Production, 2019. **206**: p. 755-766.
 21. Shibli, S., B. Meena, and R. Remya, *A review on recent approaches in the field of hot dip zinc galvanizing process*. Surface and Coatings Technology, 2015. **262**: p. 210-215.
 22. Zhou, Y., et al., *3D confined zinc plating/stripping with high discharge depth and excellent high-rate reversibility*. Journal of Materials Chemistry A, 2020. **8**(23): p. 11719-11727.
 23. Kavitha, B., et al., *Role of organic additives on zinc plating*. Surface and Coatings Technology, 2006. **201**(6): p. 3438-3442.
 24. Hajdu, G.O.M.a.J.B., *Electroless plating: fundamentals and applications*. 1990.
 25. Carlsson, J.-O. and P.M. Martin, *Chemical vapor deposition*, in *Handbook of Deposition Technologies for films and coatings*. 2010, Elsevier. p. 314-363.
 26. Z. W. Wicks Jr, F.N.J., S. P. Pappas, and D. A. Wicks, *Organic coatings: science and technology*. 2007.
 27. Grundmeier, G., W. Schmidt, and M. Stratmann, *Corrosion protection by organic coatings: electrochemical mechanism and novel methods of investigation*. Electrochimica Acta, 2000. **45**(15-16): p. 2515-2533.
 28. P. M. Ajayan, L.S.S., and P. V. Braun, *Nanocomposite science and technology*. 2006.
 29. Price, S.J. and R.B. Figueira, *Corrosion protection systems and fatigue corrosion in offshore wind structures: current status and future perspectives*. Coatings, 2017. **7**(2): p. 25.
 30. Xie, S., et al., *A hybrid nondestructive testing method of pulsed eddy current testing and electromagnetic acoustic transducer techniques based on wavelet analysis*. NDT & E International, 2023: p. 102900.

- 
31. Marschnig, S., et al., *Assessing Head Check Crack Growth by Eddy-Current Testing*. Infrastructures, 2023. **8**(5): p. 89.
 32. Santos, D., et al., *Non-Destructive Inspection of High Temperature Piping Combining Ultrasound and Eddy Current Testing*. Sensors, 2023. **23**(6): p. 3348.
 33. Grosso, M., et al., *Eddy current and inspection of coatings for storage tanks*. Journal of Materials Research and Technology, 2018. **7**(3): p. 356-360.
 34. Hwang, B., et al. *Eddy current imaging for electrical characterization of silicon solar cells and TCO layers*. in *Smart Materials and Nondestructive Evaluation for Energy Systems 2015*. 2015. SPIE.
 35. Behravan, A., M.M. deJong, and A.S. Brand, *Laboratory study on non-destructive evaluation of polyethylene liquid storage tanks by thermographic and ultrasonic methods*. CivilEng, 2021. **2**(4): p. 823-851.
 36. Liu, H., et al., *High-frequency ultrasonic methods for determining corrosion layer thickness of hollow metallic components*. Ultrasonics, 2018. **89**: p. 166-172.
 37. Arumaikani, T., S. Sasmal, and T. Kundu, *Detection of initiation of corrosion induced damage in concrete structures using nonlinear ultrasonic techniques*. The Journal of the Acoustical Society of America, 2022. **151**(2): p. 1341-1352.
 38. Kulkarni, N.N., et al., *Deep learning augmented infrared thermography for unmanned aerial vehicles structural health monitoring of roadways*. Automation in Construction, 2023. **148**: p. 104784.
 39. Shi, L., et al., *On-line detection of porosity change of high temperature blade coating for gas turbine*. Infrared Physics & Technology, 2020. **110**: p. 103415.
 40. Doshvarpassand, S., C. Wu, and X. Wang, *An overview of corrosion defect characterization using active infrared thermography*. Infrared physics & technology, 2019. **96**: p. 366-389.
 41. Yang, R., et al., *Through coating imaging and nondestructive visualization evaluation of early marine corrosion using electromagnetic induction thermography*. Ocean Engineering, 2018. **147**: p. 277-288.
 42. Piro, N.S., A.S. Mohammed, and S.M. Hamad, *Electrical resistivity measurement, piezoresistivity behavior and compressive strength of concrete: A comprehensive review*. Materials Today Communications, 2023: p. 106573.
 43. M. Stern, a.A.L.G., *Electrochemical polarization i. A theoretical analysis of the shape of polarization curves*. Journal of the electrochemical society 1957. **104**: p. 56-63.
 44. Touzain, S., *Some comments on the use of the EIS phase angle to evaluate organic coating degradation*. Electrochimica acta, 2010. **55**(21): p. 6190-6194.

- 
45. Zuo, Y., et al., *The evaluation of coating performance by the variations of phase angles in middle and high frequency domains of EIS*. Corrosion Science, 2008. **50**(12): p. 3322-3328.
46. Mahdavian, M. and M. Attar, *Another approach in analysis of paint coatings with EIS measurement: phase angle at high frequencies*. Corrosion Science, 2006. **48**(12): p. 4152-4157.
47. Shanaghi, A., A.R. Souri, and P.K. Chu, *EIS and noise study of zirconia-alumina-benzotriazole nano-composite coating applied on Al2024 by the sol-gel method*. Journal of Alloys and Compounds, 2020. **816**: p. 152662.
48. Martinez, S., I. Šoić, and V. Špada, *Unified equivalent circuit of dielectric permittivity and porous coating formalisms for EIS probing of thick industrial grade coatings*. Progress in Organic Coatings, 2021. **153**: p. 106155.
49. Ciucci, F., *Modeling electrochemical impedance spectroscopy*. Current Opinion in Electrochemistry, 2019. **13**: p. 132-139.
50. Feliu Jr, S., *Electrochemical impedance spectroscopy for the measurement of the corrosion rate of magnesium alloys: Brief review and challenges*. Metals, 2020. **10**(6): p. 775.
51. Ribeiro, D. and J. Abrantes, *Application of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) to monitor the corrosion of reinforced concrete: A new approach*. Construction and Building Materials, 2016. **111**: p. 98-104.
52. G. D. Davis, R.A.R., and S. Raghu, *Coating Health Monitoring System for Army Ground Vehicles*. Corrosion, 2007. **7230**: p. 11-28.
53. P. D. Ryan Dunn, G.D., *Monitoring Coating Degradation with a Wireless, Battery-Powered Coating Health Monitor (CHM)*. 2010: p. 12-20.
54. 李忠紫, 離岸風機防蝕塗層性質監測技術之開發及應用. 臺灣大學工程科學及海洋工程學研究所學位論文, 2016(2016 年): p. 1-108.
55. 郭昱彤, 以 FPGA 為基礎開發離岸風機之塗層腐蝕監測器. 臺灣大學工程科學及海洋工程學研究所學位論文, 2018: p. 1-71.
56. 陳泓勳, 離岸風機塗層健康監測技術之改良研究. 臺灣大學工程科學及海洋工程學研究所學位論文, 2020.
57. Svatos, J. *Metal discrimination using time domain processed SINC signal*. in *2016 15th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC)*. 2016. IEEE.
58. Xu, P. and Z. Zhu, *Novel square-wave signal injection method using zero-sequence voltage for sensorless control of PMSM drives*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016. **63**(12): p. 7444-7454.
59. Svatoš, J., J. Vedral, and P. Nováček. *Metal object detection and discrimination using Sinc signal*. in *2012 13th Biennial Baltic Electronics Conference*. 2012. IEEE.

- 
60. Margarit-Mattos, I., *EIS and organic coatings performance: Revisiting some key points*. *Electrochimica Acta*, 2020. **354**: p. 136725.
61. Potvin, E., L. Brossard, and G. Larochelle, *Corrosion protective performances of commercial low-VOC epoxy/urethane coatings on hot-rolled 1010 mild steel*. *Progress in organic coatings*, 1997. **31**(4): p. 363-373.
62. Sharer, Z. and J. Sykes, *Insights into protection mechanisms of organic coatings from thermal testing with EIS*. *Progress in Organic Coatings*, 2012. **74**(2): p. 405-409.