



環境部環境管理署
113 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

即時電(磁)法之風控加油站滲漏
監測技術建置與發展

期末報告（定稿）

主辦單位： 環境部環境管理署
專案執行單位：國立陽明交通大學／防災與水環境研究中心
專案主持人：林志平 教授
專案執行期間：113 年 12 月 1 日起至
114 年 11 月 30 日止

中華民國 114 年 12 月 印製



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書

☐申請計畫書

☐期中報告

☐修正計畫書

☒成果報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	113 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 其他		主持人：林志平 NO：R13
計畫名稱	即時電(磁)法之風控加油站滲漏監測技術建置與發展		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 1. 一站式平台之內容與說明過於簡略，建議補充。 2. TDR 與 ERT 具互補性，但在報告中或一站式平台僅分別列出，或可再就技術關聯性進行平台應用規劃。(例如：透過 ERT 回傳數值發現區域異常，再由 TDR 驗證是否井內浮油)。 3. 建議未來平台可自動標記 TDR 波形異常（例如 NCC 值升高）與 ERT 電阻率異常，並在地圖上集中呈現異常位置，以利早期因應。 4. 建議補充平台相較傳統監測方法之改善效果。		1. 謝謝委員指教，已補充至 4.3 節。 2. 謝謝委員指教，目前完成平台整合數據呈現，未來會往委員方向進行研究，透過機器學習進行異常標註與數據整合解釋。 3. 謝謝委員指教，本計畫主要是台灣第一次建置數據回傳自動處理平台，未來會導入更多數據與功能擴充。 4.平台與傳統監測方法是相同的，主要差別是平台監測是不需要人在現場，將監測設備放置場址，透過 5G/4G 模組將數據傳輸至平台資料庫，再透過平台自動成圖系統進行數據反演。未來位加入機器學習達到真正自動監測、預警的功能。	
委員二 1. 計畫執行團隊運用 TDR 量測技與時變地電阻調查技術等,完成 real-time 地電阻監測系統(TDR 與 TimeLapse ERT 成果可成果視化平台)。 2. 利用南投廢棄加油站現地,建置 ERT 回傳系統與 TDR 監測主機及 TDR 感測器放置於監測井中,並佈設 ERT 測線於加油站地下水下游,可以達成即時監測汽油是否滲漏於水體與土壤中。		謝謝委員肯定	
委員三 1. 本計畫目標達成度大致可符合預期。 2. 本計畫及過往研究成果，已建立 TDR 滲漏監測系統標準流程與分析方法，並持續對於這些方法進行精進以提高資料分析的穩定性以及靈敏度，有關		1. 謝謝委員肯定 2. 謝謝委員指教，於前期 TDR 儲槽管線污染滲漏監測的分析方法中使用包含雜訊波形差異的三個標準差作為閾值，使用 HHT-EDM 降低雜訊影響之後，可使閾值降低以提高偵測靈敏度。	



穩定性以及靈敏度之精進成果可否簡要量化說明。 3. 對於開發自動計算反演逆推模組，接收數據後便能自動成圖，確實較傳統 ERT 量測需人工處理，大幅節省時間及提高工作效率。 4. 倘依據現有成果及本計畫已建置之場址而言，可否提出對本場址地下水風險管理之預警或決策，供作本案成果範例參考。	3. 謝謝委員肯定 4. 謝謝委員指教，目前建置場址正在監測中，本技術主要是洩漏預警，只要出現洩漏訊號，便會根據洩漏位置進行預警開挖，以降低滲漏液進入土染的風險。
委員四 1. 技術發展目標明確，含 TDR/ERT 量測原理、設備參數、資料處理（NCC、HHT-EMD）、WebGIS/GeoBIM 平台與資料流說明完整；流程具體可操作。 2. 符合風險導向整治、智慧監測之政策趨勢，可降低整治成本、縮短通報反應時間並強化民眾信任度。 3. 建議可再強化呈現 TDR/ERT 監測系統的穩定度與耐久性測試成果，包括(1)長期監測數據一致性、(2)環境變化(溫度、濕度、季節)影響評估、(3)設備防爆安全措施等。 4. 建議可再說明技術未來應用於不同場址的推廣計畫，包括(1)加油站場址特性評估、(2)工業園區邊界監測應用、(3)溶解態污染物監測推廣方向。 5. 建議可再具體說明申請中之新型專利(編號、申請日期、技術創新重點)，包括 TDR 浮油偵測的自動化分析方法或 Geo-BIM 平台之創新功能，並強化說明與石化公司、加油站經營業者之技術移轉洽談進展。	1. 謝謝委員肯定 2. 謝謝委員肯定 3. 謝謝委員指教，目前 TDR 與 ERT 監測系統在其他計畫已完成超過一年以上的測試，數據在沒有事件發生前再現性佳數據一致，未來會增加防爆安全措施。 4. 謝謝委員的指教，未來會根據研究成果應用於相關監測場址。 5. 謝謝委員指教，目前正在與環境顧問公司進行技轉與新型專利的申請。
委員五 1. 本計畫建置一套即時監測遠端自動化電性監控系統，監測結果與污染擴散潛勢的預估，是否已完成驗證? 2. 是否比對遠端監測結果與實測值之間的關係?	1. 謝謝委員指教，自動化監測與預估正在驗證中。 2. 遠端結果與實測值的結果是完全吻合。



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書 ☐申請計畫書 ☒期中報告
☐修正計畫書 ☐成果報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	113 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 其他		主持人：林志平 NO：R13
計畫名稱	即時電(磁)法之風控加油站滲漏監測技術建置與發展		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 1. 原審查意見已說明 2. 本計畫已經參與國外研討會發表論文 1 篇，已有初步成果 3. 報告書中已說明執行現況與研究流程&方法 4. 報告書中說明："...本計畫擬發展 TDR 技術在停滯場址儲槽滲漏監測的應用，發展出適用於土壤與地下水污染防治的滲漏監測技術..."(浮油即時監測系統與時變地電阻監測系統)，建議期末報告中能提出更具體的說明 5. 期末報告建議說明：適用情境與適合的場址特性		1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員肯定。 3. 謝謝委員肯定。 4. 本研究發展的浮油即時監測系統將 TDR 監測儀器放入地下水井中直接偵測浮油層，並使用時變地電阻監測系統觀察井外的電學性質變化以獲得間接連續資訊，對於污染場址有更進一步的評估。 5. 謝謝委員建議，期末報告會針對這方面進行補充。	
委員二 1. p13 滲漏污染物蓄積有助於 TDR(或其他方法)檢測之特性，或可做為未來地下管槽襯墊料施工規範之建議。 2. p21 選擇噪聲三倍標準差作為滲漏判斷閾值，敏感度較低，建議可透過過去資料，嘗試不同噪聲倍率，檢視相應之型一型二錯誤。 3. p23 之頻率域全波型分析與先前方法之應用比較，或可補充。 4. p34 前文說明為南投昱佑加油站，此處又說明為陸昌化工，應釐清前次與本次之計畫內容與相關性，避免混淆。		1. 謝謝委員建議，未來可根據所需監測標的進行施工建議。 2. 謝謝委員建議，本團隊將嘗試不同資料處理方法用以降低噪聲影響並提高敏感度。 3. 謝謝委員建議，期末報告會根據不同方法進行比較。 4. 謝謝委員指教，本計畫的主要場址在南投昱佑加油站，但 TDR 儲槽管線污染滲漏方法精進使用的資料是源自於目前還在監測的陸昌化工場址，期末報告中會將關於此部分的章節獨立撰寫，避免混淆。	



委員三 1、後續 TDR 滲漏、浮油監測技術是否應用於本計畫模場? 2、請說明本計畫 ERT real-time 監測系統設置位置及目的性，是否考量(雨)季節性影響? 3、請簡要分析 ERT real-time 監測系統與傳統採樣監測之成本效益差異?	1. TDR 滲漏監測技術將繼續再陸昌化工模場中應用並藉由回傳資料改善資料分析方法，而 TDR 浮油監測技術將應用於本計畫南投昱佑加油站模場中應用。 2. 本計畫目前位置會布設在下游側監測地下水電阻率變化，並且因為雨水影響地層電阻率不會超過 1 公尺，所以不會造成季節性影響。 3. Timelapse ERT 反而比傳統調查成本較低，只要布設一次，便可以得到不同時間的電阻率變化，人不需要到現場，唯一差異是 Timelapse ERT 設備略貴於傳統 ERT。
委員四 1.執行團隊利用 TDR 訊號波形，進行對齊與擷取，建立新的頻率波形分析方法，增加量測上的精度與穩定度。 2.執行團隊完成建置電磁波時域反射（TDR）浮油污染滲漏標準分析方法與時變地電阻（ERT）監測技術方法測試，並利用網路執行線上數據監測，符合期中報告進度。	謝謝委員肯定。
委員五 1. 本研究目前已建立 TDR 污染滲漏監測系統標準作業流程與分析方法及初步建置 ERT real-time 監測系統等工作。 2. 計畫摘要宜增列說明目前的研究成果與後續工作重點? 3. 少部分參考文獻未於本文中被引用；另參考文獻章節之文獻排列方式和格式不一致? 4. 後續宜強化呈現所建構系統之穩定度和耐久性等測試成果? 5. 宜量化目前工作進度完成率，並說明與研究計畫書所擬工作進度甘特圖之進度差異? 6. 期末報告宜呈現所開發技術之成本效益分析? 7. 期末報告宜說明本研究成果的實場應用性和限制及後續具體可行的精進或優化的研究方向?	1. 謝謝委員肯定 2. 謝謝委員指教，期末報告中會進行補充。 3. 謝謝委員提醒，期末報告中會進行修正。 4. 謝謝委員指教，於現地監測週期中將測試監測系統的穩定度及耐久性。 5. 謝謝委員指教，目前工作進度按照甘特圖進行。 6. 謝謝委員建議，期末報告中會對這方面進行補充。 7. 謝謝委員建議，期末報告中將對於適用性和限制性進行討論。



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書 ☐申請計畫書 ☐期中報告

☒修正計畫書 ☐成果報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	113 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 其他	主持人：林志平 NO：R13	
計畫名稱	即時電(磁)法之風控加油站滲漏監測技術建置與發展		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 1. 加油站內外有不同的地質型態，汙染時有擴散至站外情況，此系統平台是否也可以涵蓋？ 2. 設備的防爆措施		1. 謝謝委員指教。平台皆可涵蓋，且支援多項設備訊號。 2. 設備防爆措施，會在設備箱中進行改善與合規。	
委員二 1. 本計畫可歸屬於延續性計畫。與前期計畫比對，本計畫增加 ERT 即時監測系統與浮油監測系統，並建立可視化平台 2. 本計畫將現場數據即時傳遞至雲端，建立可視化展示平台，就污染場址而言，”即時”的意義與必要性		1. 謝謝委員肯定 2. 就污染場址而言，即時並非很重要的因素，但是針對監測場址而言，即時就非常重要因為關聯至預防、減災等時效性。	
委員三 無		謝謝委員肯定	
委員四 1. 建議詳細說明場址選擇的依據與代表性，特別是模場南投加油站汙染範圍內的地質條件與污染物分布特徵 2. 本計畫於 112 年已提出之 TDR 浮油監測技術具有經濟效益，建議亦可於今年度計畫中具體的成本效益數據 3. 本法在加油站設置之限制條件為何？未來操作維護難易程度如何？		1. 謝謝委員指教，針對場址選擇的依據有二；一為停滯應加速場址進行風險評估，並無科學性監測手段，而且目前國內私人場址進行模場監測的業主意願低。所以本次場址的選擇主要是進場條件佳、具汙染潛力且為停滯場址。 2. 謝謝委員指教會增加在期中報告中。 3. 限制條件設備需安裝在地下水位以下，未來操作維護 SOP 會在期中報告中補充之。	
委員五 前期延續，符合場址需求		謝謝委員的肯定	
委員六 1. 本計畫內文多處提及「行政院環境部」，惟環境部已升格為「環境部」，故請重新檢視及修正		1. 謝謝委員的指教，以檢視並修正至本文中。 2. 未來會提供建議名單與應用可行性列	



2. 建議可於報告書中說明國內潛力汙染場址並探討實場應用可行性。	表
委員七 1. 本計畫書加入可視性介面及數位孿生，具進步性 2. 國內浮油場址逐漸減少，建議思考技術未來之應用性，是否考量溶解態汙染物？	1. 謝謝委員的肯定 2. 目前研究成果已涵蓋溶解態汙染物，未來會應用於工業區下游邊界
委員八 1. 即時電(磁)法之監測頻率或時距?是線上即時監控? 2. 場址監測最小面積?地質狀況限制?	1. 謝謝委員的指教，目前頻率會以小時為主，也會根據事件調整時距。 2. 無相關面積與地質狀態限制。
委員九 1. 人事費:本計畫非模場型計畫，請補充說明需聘任專任人員之原因，或聘任兼任人員 2. 耗材費:請詳實填寫單位及數量，另消耗性器材中涉及軟硬體使用，請以租賃或分年度攤提，並補充說明租賃單價與使用月數 3. 請依補助上限調整各項經費，並修正於申請計畫書修正稿	1. 謝謝委員的指教。本計畫應申請模場計畫，因文書往來問題，所以調整成非模場計畫。本計畫主要工作都在加油站模場中，所以需要專任人員進行現地調查；監測與維護工作，所以需編列相關人事費用，不足部分由主持人自行吸收。 2. 根據委員指教已修正與補充至本文中 3. 已修正置計畫書修正稿中。



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☒構想書 ☐申請計畫書 ☐期中報告

☐修正計畫書 ☐成果報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	113 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 其他	主持人：林志平	NO：R13
計畫名稱	即時電(磁)法之風控加油站滲漏監測技術建置與發展		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 1. 針對(三)預期目標及可能之成果，提及「可完善與快速 TDR 滲漏量測模式與 ERT 平台反算方法」建議補充如何完善反算方法及其具體效益。		謝謝委員指教，此反算方法惟一可視化方式，透過平台自動運算，將每日收集資料即時可視化的過程，為本計畫賣點之一。	
委員二 1. 建議說明本計畫與過去執行計畫之進步性，以及後續技轉之可行性。		謝謝委員指教，已補充至計劃書中。	
委員三 1. P1-3，有關二、本期申請補助經費，建議應補充相關經費細項，以利瞭解本計畫經費運用之合理性。 2. 本研究強調監測系統的數據即時回傳與風險管理的重要性，建議進一步針對數據處理後的應對方案進行描述，如於發現異常或數據顯示潛在危險時，應如何快速反應和決策，以確保即時監測技術能夠真正風險管控。 3. 本研究提出未來應可進入真實環境執行現地測試與實證，建議未來導入應詳細規劃不同地區或環境的測試方案。		謝謝委員指教 1. 計劃書中以補充相關費用細項。 2. 本計畫為國內少有的調查數據監測平台建置，目前突破即時數據的呈現與可視化過程，提供管理單位參考，下一階段期望增加汙染預警模型，提供預警值的建立，以達即時監測技術能夠真正風險管控。 3. 謝謝委員建議，未來希望增加不同場景監測數據，真正達到一張圖可視化平台。	



委員四 1. 建議應針對本研究所提技術與前期計畫以及目前現有技術之差異以及如何突破實場應用面臨問題進行說明。 2. 建議應說明前期計畫後續推廣之成果。	1. 謝謝委員指教，已補充至計畫書中 2. 前期計畫成果，主要在地下儲槽與管線。目前會在某石化公司之管線與地下儲槽進行長期監測，提供即時監測數據，只要有洩漏訊號，會立刻進行開挖驗證。加油站部分透過署內媒合已有業主接觸了解。
委員五 1. 本案持續精進前期專案浮油厚度發展技術成果，並型化監測 PROBE，並結合 ERT 監測系統，整合至即時監測平台，有利於停滯場址與工業園區邊界監測提供新的技術與數據整合。本案核心技術雖於國外已有發展但尚未在國內進行試驗，研究團隊規劃於本專案自行發展，期能通過實驗室研究之技術測試及試驗，提升國內有關技術之成熟度。	1. 謝謝委員肯定與指教
委員六 1. 請說明擬開發系統(1)測試/適用停滯場址之理由 (2)如何用於工業園區邊界監測提供新的發整與數據整合。	1.運用於停滯場址的目的是先以單一場址的多源異構數據進行融合。原因是場址較小、成本較低，且無相關監測系統。選擇加油站的原因是接近受體，風險管控價值高。 2. 工業邊界監測平台是本研究下一階段的方向，監測井水位、雨量、汙染訊息、地球物理方法等數據融合可視化。
委員七 1. 符合主題。	謝謝委員肯定與指教
委員八 1. 本計畫的主要目標是：""...現地感應元件優化、縮小化與平台優化節省建置費用..."" 2. 本計畫預計延續 112 年計畫成果，建置一套 加油站即時監測系統：含針對監測井建置 TDR 浮油監測系統，加油站下游側建置即時地電阻影像監測系統。 3. 本計畫與之前的計畫類似。	謝謝委員肯定與指教 前期計畫有兩個模場，主要完成地下儲槽與管線監測系統，本期計畫增加 ERT 即時監測系統與優化浮油監測系統。並建立 Geo_BIM 可視化平台，將現場數據即時傳遞至雲端，建立可視化展示平台，提供管理單位即時監測數據。



113 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗申請計畫書

一、專案基本資料表

申請編號：(由本署填寫)

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質		專案技術編碼	LAB - R - I - OI - P
專案類別(單選)	☐ 先導型 ☒ 研究型 ☐ 模場型		研究主題	☐ 整治 ☒ 調查 ☐ 政策類或其他
申請機構系所	國立陽明交通大學防災與水環境研究中心			
機構地址	新竹市東區大學路 1001 號			
專案主持人	林志平	職等/職稱	特聘教授兼工學院院長	
協同主持人	劉興昌	職等/職稱	副研究員	
協同主持人	董天行	職等/職稱	經理	
專案名稱	中文	即時電(磁)法之風控加油站滲漏監測技術建置與發展		
	英文	Development and Implementation of Real-Time Electromagnetic-Based Risk-Control Technology for Gas Stations Leakage Monitoring		
	關鍵字	加油站監測平台、時域反射法、時變電阻率法		
執行期程	自民國 113 年 11 月 1 日起至民國 114 年 11 月 30 日止			
專案主持人	姓名：林志平	E-mail：cplin.ce@nycu.edu.tw	專線：03-5131574 手機：0922-747-731	
專/兼任人員	姓名：陳軍韜	E-mail：ctcmm001@gmail.com	專線：03-5712121 手機：0910-143-186	
經費分析總表 (僅模場試驗專案需填寫兩年度金額)	專案預估總經費		第一年申請經費	第二年申請經費
	1.	人事費用	420,000	
	2.	設備使用含維護費	0	
	3.	耗材與主要費用	284,000	
	4.	其它研究相關費用	10,000	
	5.	行政管理費	126,000	
	6.	自籌款	0	
	申請補助經費(1~5 項)		840,000	
計畫總經費(1~6 項)		840,000		
		編列說明		
		(1~5 項相加之 50%為限)		
		(與計畫實驗相關)		
		(與計畫主體相關)		
		(含差旅與租賃費用)		
		(1~5 項相加之 15%為限)		
		(申請單位自行籌備款項)		
		總金額：840,000		
		總金額：840,000		

說明：

1. 本署以部份補助為原則，得指定不補助項目，不補助項目應為自籌款項，應自行核銷不得申請。
2. 非實驗性質之專案，若第一項費用編列金額超出比率，須於申請公文內向本署說明，俾利審查。
3. 補助專案經費編列自申請起經專案核准後，經費編列中各項費用單價與需求只可減少與下修。

專案主持人：  (簽名或蓋章) 日期：114.1.14

附件 7-1

校長 林奇宏



土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

113 年度專案成果績效自評表

二、成果績效自評表：「計畫總預估數」應與計畫審查核定值相符，請執行單位依實際達成之量化成果填寫於欄位中。

(一) 學術面

項目 \ 目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	成果 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱)
A 學術產 出及活 動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文	0	0	0		
		(2)研討會論文	0	0	0		
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	0	0	0		
		(2)國際研討會 論文發表	1	1	1		
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告	0	0	0		
		(2)研究報告	1	0	0		
	4.專著 (本數)		0	0	0		
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會	0	0	0		
		(2)成果發表會	0	0	0		
		(3)論壇	0	0	0		
	6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術	0	0	0		
		(2)技術平台	1	0	1		
	7.技術獎項(項數)		0	0	0		
B 人才 培育	8.研發人員 (人數)	(1)碩士	1	0	1		
		(2)博士	1	0	1		
	9.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	0	0	0		
		(2)跨機構團隊	1	0	1		
		(3)形成研究中 心	0	0	0		
		(4)形成實驗室	0	0	0		
10.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

(二) 產業面

項目 \ 目標達成程度				申請 預估數	期中 達成數	成果 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因或專利、技術轉移相關詳細資料)
A 智慧財產權	1.專利 (件數)	已核准	發明	0	0	0		
			新型/設計	0	0	0		
			合計	0	0	0		
		申請中	發明	0	0	0		
			新型/設計	1	0	0		
			合計	1	0	0		
B 研發技術轉移	2.先期技術 成果移轉	件數		0	0	0		
		授權金(仟元)		0	0	0		
		衍 生 利 益 金 (仟元)		0	0	0		
	3.技術移轉 (專利)	件數		0	0	0		
		授權金(仟元)		0	0	0		
		衍生利益金 (仟元)		0	0	0		
	4.技術移轉 (應用技術)	件數		0	0	0		
		授權金(仟元)		0	0	0		
		衍 生 利 益 金 (仟元)		0	0	0		
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)		0	0	0		
		(2)品種/系 (件數)		0	0	0		
	C 產學研合作	6.促成合作 研究	件數		0	0	0	
金額(仟元)			0	0	0			
7.促成投資		件數		0	0	0		
		投資金額 (仟元)		0	0	0		
8.促成取得 業界科專		件數		0	0	0		
		業界投資金額 (仟元)		0	0	0		
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)						



(三) 政策面

目標達成程度			申請預 估數	期中 達成數	成果 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因 或其他詳細資料)
項目		次數	0	0	0		
		收入(仟元)	0	0	0		
A 服務 便民	1.技術服務	次數	0	0	0		
		收入(仟元)	0	0	0		
	2.諮詢服務	次數	0	0	0		
		收入(仟元)	0	0	0		
B 政策 推動	3.協助政府推動 (件數)	(1)政策	0	0	0		
		(2)法規	0	0	0		
C 技術 效益	4.整治技術提升(%)		0	0	0		
	5.整治成本降低(%)		0	0	0		
	6.提升能源效率(%)		0	0	0		
7.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

三、請依前述學術面、產業面、政策面等預期量化成果，具體敘明研究成果對本署政策推動之助益。(200 字為限)

學術面(如國內外研討會、期刊投稿件數、或人才培育碩博士生說明)
1.投稿期刊 0 篇、參與國際研討會發表論文 1 篇。 2.培育 1 名碩士生、1 名博士生。
產業面(如合作研發產業、申請專利、洽談技術移轉廠商件數說明)
本計畫擬發展 TDR 技術在停滯場址儲槽滲漏監測的應用，發展出適用於土壤與地下水污滲漏監測技術，並發展出停滯場址監測平台。預期於本計畫執行結束後，應可進入真實現地測試與實證，並推動業界的技術移轉與實質申請至少一項新型發明專利。
政策面(如整治費用降低、特定污染物整治效益提升、或提供政府作為監測/管制標準、污場址管理等政策及法規研訂之參考)
本計畫目的是進入真實環境執行現地測試與實證，提供政府作為智慧監測/管制、污染場址管理等政策及法規研訂之參考。停滯場址與風險評估場址目前並無監測平台，本研究欲建置一監測平台，納入本團隊研究成果浮油即時監測系統與時變地電阻監測系統，提供停滯場址與風控場址時時監測數據，豐富管理單位汙染場址管理數據，隨時監測是否汙染有外移與趨向嚴重之現象，本研究先以停滯加油站為例進行建置與研究。



十、主要研究人力 請依照「專案主持人」、「協同主持人」、「專任人員」及「兼任人員」等類別之順序分別 填寫

類別	姓名	服務機構/系所	職稱	在本研究專案內擔任之具體工作性質、項目及範圍	*每月平均投入工作日數比率(%)
專案主持人	林志平	國立陽明交通大學 /土木工程系兼環境工程研究所	特聘教授兼工學院院長	擬定研究方法、工作協調及成果整合、解決核心問題	20%
協同主持人	董天行	霖昌工程有限公司	技術經理	擬定研究方法、進行現地量測作業與分析	20%
協同主持人	劉興昌	國立陽明交通大學 /防災與水環境研究中心	副研究員	擬定模場工作、進行分析方法探討、撰寫研究成果報告	50%
專任人員	陳軍韜	國立陽明交通大學 /防災與水環境研究中心	副工程師	模場試驗之執行、資料分析、撰寫研究報告	100%
兼任人員	詹昊叡	國立陽明交通大學 /土木工程系	博士研究生	模場試驗之執行、資料分析、撰寫研究報告	90%

註：表格不敷使用時，請自行增列。



中文摘要

風險評估是國際間先進國家用來作為土壤污染土地再利用之政策工具，遭受污染的土地可以依據當地的現況及未來土地利用的規劃等條件，利用風險為基準的評估架構，找出可行的方案及整治的目標。如何替土地資源的使用尋找出路，如何為污染的土壤及地下水設計規劃整治的目標等，政策的推動方向是朝建立完善的健康風險評估機制，利用風險評估作為平台，將未來的不確定性，以土地使用的效益和使用後對人體健康的風險結合起來綜合考量。在風險評估指引中，將風險評估的執行劃分成三個層次，三個層次由簡單到複雜，各層次評估的過程中分別針對場址內與場址外，使用假設的暴露參數和採用現地的採樣資料，利用模式模擬之污染物濃度資料和現地採樣分析之濃度資料等，根據風險評估指引中建議之十種的暴露途徑，評估受體的暴露劑量。如何科學性評估與得到真實現地數據，變成說服民眾與 NGO 很重要的根據。所以本計畫預計延續計畫成果，建置一套加油站即時監測系統：含針對監測井建置 TDR 浮油監測系統，加油站下游側建置即時地電阻影像監測系統。透過單點即時監測井浮油數據與即時電性地層數據，即時回傳至監控中心，本計畫會建置一套簡易風控加油站 GeoBIM(Geo-Building Information Model)平台，即時提供數據給相關人員，提供最新現地採集成果。發展地下污染風控監測的 GeoBIM 平台符合數位轉型與數位孿生(Digital Twin)的趨勢，未來還可以結合模擬分析的結果進行情境模擬與綜合評估。



英文摘要

Risk assessment is a policy tool used by advanced countries worldwide for the redevelopment of contaminated land. Polluted sites can, based on local conditions and future land-use plans, employ a risk-based assessment framework to determine viable solutions and remediation targets. Key policy directions aim to establish a robust health risk assessment system that uses risk assessment as a platform to comprehensively evaluate the benefits of land use against potential health risks after usage, accounting for future uncertainties. Within the risk assessment guidelines, the execution of risk assessments is divided into three levels, ranging from simple to complex. Each level assesses both on-site and off-site conditions, utilizing hypothetical exposure parameters and on-site sampling data. This involves using models to simulate pollutant concentrations and analyzing concentration data from on-site sampling according to the ten exposure pathways suggested in the guidelines to assess the exposure levels of receptors.

Scientific assessments and accurate field data are essential for gaining public trust and convincing NGOs. Therefore, this project aims to build on previous outcomes by establishing a real-time monitoring system for gas stations. This includes a TDR floating oil monitoring system for monitoring wells and a real-time electrical resistivity imaging system on the downstream side of gas stations. Through single-point, real-time data collection from monitoring wells and real-time geoelectrical data, the data will be instantly transmitted to a monitoring center. The project will also create a simplified GeoBIM (Geo-Building Information Model) platform for gas stations, providing real-time data to relevant personnel and displaying the latest field-collected results. The development of this GeoBIM platform for monitoring underground pollution risk management aligns with trends in digital transformation and digital twins, and it has potential to integrate simulation results for scenario modeling and comprehensive assessments in the future.



目錄

目錄	1
第一章 研究動機與目的	3
第二章 計畫背景探討	9
2.1 前期相關研究成果與延伸應用	9
2.1.1 電磁導波時域反射法(TDR)監測技術之前瞻性	9
2.1.2 TDR 儲槽管線之污染滲漏監測	11
2.1.3 TDR 監測井浮油監測技術	16
2.2 試驗場址相關背景說明	17
第三章 研究方法與過程	21
3.1 TDR 儲槽管線之污染滲漏監測方法技術說明與欲突破發展	21
3.2 TDR 測漏管浮油自動偵測與量測方法技術說明與欲突破發展	23
3.3 時變地電阻調查技術監測場址邊界方法與建置	25
3.4 建置以一張圖可視化平台呈現停滯場址與風控場址之5G 智慧監測數據	30
第四章 結果與討論	33



4.1 TDR 儲槽管線污染滲漏分析方法之精進	33
4.1.1 環境建置	33
4.1.2 現場監測數據	34
4.1.3 分析方法	37
4.2 TDR 監測井浮油監測技術分析方法之精進	39
4.2.1 室內物理實驗	39
4.2.2 室內試驗成果	42
第五章 初步結論與後續工作說明	59
參考文獻	65



第一章 研究動機與目的

閒置的污染土地本不應存在的，它們若不是已經整治完成了，就應該是正在整治之中，或根本就尚未被發現。若土地持續以污染之狀態存在，必有其原因，例如場址經適當之控制，已可免於「危害國民健康與生活環境」(例如污染濃度超過管制標準而僅以控制方法維持不危害國民健康，但不做積極整治之控制場址)，或因「地質條件、污染物特性或污染整治技術等因素，無法整治」(此為國內理論上可以存在，但至今未有任何個案成立)，或因整治者財力狀況致無法進行整治(例如桃園 RCA 舊廠場址)，或因污染責任未釐清，無任何單位或個人願出面整治(例如台南中石化安順廠)，或應該整治土地者已不存在，而又無任何單位出面處理(例如新莊正泰化工舊場址)。污染土地持續存在下，除了仍然可能對於國民健康與生活環境有危害之外，場址本身閒置不能利用，成為藏污納垢的溫床；週邊社區的經濟活動也會受到影響，導至商業衰退，土地價值下降，居民遷走。如果從對國家開發的層面影響來探討，開發用土地的需求如果不變，勢必需要尋求其他的土地，甚至將原來未開發的處女地，提供開發之用。如果污染土地仍被容忍持續存在，它的危害性恐怕也已經無急迫性了，如果透過科學方法建置一監測平台提供主管機關對於污染土地時時監測，應該是一個促進社區發展，同時減輕原始土地開發壓力，讓環保與經濟發展雙贏的局面。

風險評估是國際間先進國家用來作為土壤污染土地再利用之政策工具，遭受污染的土地可以依據當地的現況及未來土地利用的規劃等條件，利用風險為基準的評估架構，找出可行的方案及整治的目標。國內有關管理及整治土壤及地下水污染的法律，主要是根據民國 89 年 2 月 2 日通過之「土壤及地下水污染整治法」(以下簡稱土污法)。在該法下，對於土地及



地下水的污染，訂定防治、調查評估、管制、整治復育措施及財務、責任、罰則等訂定了執行的程序。土污法規定，各地方主管機關應定期檢測轄區土壤及地下水品質狀況，若超過管制標準者，應採取必要的措施，追查污染責任。在查明污染來源明確的條件下，所在地主管機關應公告為土壤、地下水污染控制場址。又，控制場址經初步評估後，有危害國民健康及生活環境之虞時，則所在地主管機關應報請中央主管機關審核後公告為土壤、地下水污染整治場址。

目前全國經行政院環保署公告列為控制場址者有 752 個場址，而被列為整治場址者則有 22 個；其中有八個縣市被公告列為控制場址或整治場址之土地面積超過 45,000 平方公尺以上，這些縣市包括桃園縣、苗栗縣、彰化縣、台南縣、台南市、高雄縣、高雄市和屏東縣等（行政院環保署，2009）。對於土地資源本來就非常有限，人口密集程度又為全世界排名數一數二的台灣而言，這麼多土地的使用因為土壤及地下水污染的問題而受到限制及管制，在經濟學上確實是一種缺乏效率的資源配置。因此，如何替土地資源的使用尋找出路，如何為污染的土壤及地下水設計規劃整治的目標等，政策的推動方向是朝建立完善的健康風險評估機制，利用風險評估作為平台，將未來的不確定性，以土地使用的效益和使用後對人體健康的風險結合起來綜合考量。因此，若未查明污染行為人則需協商土地使用人、管理人或所有人等土地關係人執行污染改善，但若土地關係人無意執行污染改善則恐淪為停滯場址(泛指查無污染行為人之場址且無污染改善作為之場址)，本團隊執行模場南投昱佑加油站便是類似狀況，目前屬於停滯狀態，未來有機會透過風險管理與評估的方式進行控制。行政院環保署(環境部組改前)於民國 95 年完成「土壤及地下水污染場址健康風險評估評析方法及撰寫指引」(以下簡稱風險評估指引)的編撰，國內應用健康風



險評估的方法到土壤及地下水污染場址的管理正式進入了實踐的階段。在風險評估指引中，將風險評估的執行劃分成三個層次，三個層次由簡單到複雜，各層次評估的過程中分別針對場址內與場址外，使用假設的暴露參數和採用現地的採樣資料，利用模式模擬之污染物濃度資料和現地採樣分析之濃度資料等，根據風險評估指引中建議之十種的暴露途徑，評估受體的暴露劑量。如何科學性評估與得到真實現地數據，變成說服民眾與 NGO 很重要的根據。所以本計畫預計延續 112 年計畫成果，建置一套加油站即時監測系統:含針對監測井建置 TDR 浮油監測系統，加油站下游側建置即時地電阻影像監測系統。透過單點即時監測井浮油數據與即時電性地層數據，即時回傳至監控中心，本計畫會建置一套簡易風控加油站 GeoBIM(Geo-Building Information Model)平台，即時提供數據給相關人員，提供最新現地採集成果。如圖 1 所示。發展地下污染風控監測的 GeoBIM 平台符合數位轉型與數位孿生(Digital Twin)的趨勢，未來還可以結合模擬分析的結果進行情境模擬與綜合評估。

國內並無依針對調查與控制場址數據監測平台，本計畫根據前年研究成果與本團隊獨立發展地電阻影像即時監測系統數據，嘗試透過 5G 大數據 GeoBim 平台建置昱佑加油站風控數據平台。

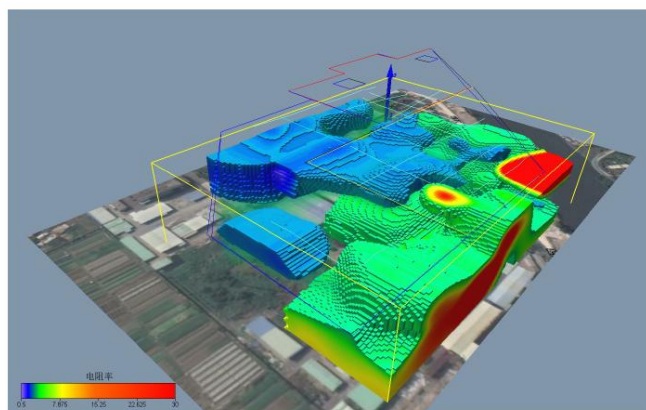


圖 1 電法及監測系統平台展示成果



在受污染場地的風險管理中，地球物理監測是重要的工具，能夠幫助識別和追蹤污染物的分布與變化情況，並提供有關環境狀況的即時數據。透過地球物理技術，管理人員可以更準確地評估污染場地的潛在風險並制定有效的修復措施。以下是關於地球物理監測在污染場地風險管理中的應用方法與其重要性：

1. 風險管理的基本步驟

- 污染源調查：確定污染源、污染物類型、分布及遷移路徑。
- 風險評估：分析污染物對環境和人體健康的潛在威脅。
- 數據收集與監測：使用地球物理技術進行現場監測，並持續更新數據。
- 整治措施與成效評估：根據監測數據制定修復計畫，並評估其有效性。

2. 地球物理監測在風險管理中的應用

- 污染物遷移監測：監測地下水中污染物的擴散路徑和範圍，以便及時採取控制措施，防止污染擴散。
- 修復成效追蹤：監測修復措施的效果，確保修復進程順利，並調整策略。
- 風險預測與預警：根據監測數據預測污染物的未來遷移趨勢，提供早期預警，並採取適當的緩解措施。
- 成本效益分析：透過監測數據，精確定位污染範圍，避免不必要的挖掘或處理作業，節省修復成本。



觀測、探測與監測空間資訊整合：

GeoBIM 是指 Geotechnical/Geological Modelling 和 Building Information Modeling 兩大領域之概念結合，目的是為了在大地工程領域中導入 BIM 資訊化的特性，應用於模式化地表下、地表面及表面上建築工程的相互關係。GeoBIM 的概念開始應用在一些基礎工程專案(Svensson and Friberg, 2017)，例如歐洲散裂中子源計劃(European Spallation Source, ESS)，瑞典高速鐵路計劃(Swedish East Link Project)等，相較於傳統建築工程導入的 BIM，GeoBIM 的優勢在於(1)整合基礎工程必要的地層資訊、(2)提供相對大範圍的建築基地空間資訊、(3)異質資訊來源整合於單一分析平台。

Digital Twin(數位孿生)(Fuller et al., 2020)是在資訊化平台建構實體世界的雙胞胎，可發展及應用於智慧城市之決策分析。在 Digital Twin 的發展趨勢下，GeoBIM 扮演著提供地下地質模型的重要角色，補足傳統 BIM 地下資訊不足的問題，因此國際開放地理空間協會(Open Geospatial Consortium)成立 GeoScience Domain Working Group，GeoBIM 的主要發展趨勢是探討 BIM Infra-Model 及 Geotechnical Model 的互操作性(Interoperability) (GeoScienceDWG, 2020)。

在 GeoBIM 現行的發展中，鑽孔(Borehole)與土層模式(Geotechnical Model)的資訊標準化是主要的發展重點，例如：擴充 buildingSmart 的 ifcproxy 連結鑿孔的幾何外觀及屬性資訊。Tegtmeier et al. (2014)從 GIS 的角度出發，以 CityGML 為主體進行擴充，提出 3D-GEM(3D Geotechnical Extension Model)結合 CityGML 及 GeoSciML 進行基礎工程的資訊整合，以 CityGML 對基礎工程所需要的屬性(語義)進行整合，然而 BIM 資訊未導入所提出的 3D-GEM。Zhang et al., (2016)則是從作業程序的



角度出發，以 BIM 為主體建置地質調查作業程序，在 BIM 導入地質調查資料庫，然而工程主體是著重在水利發電工程。

本計畫探討的主體是停滯場址加油站，且著重於加油站的觀測、探測與監測，這類的加油站量測資料，在現行的 GeoBIM 發展中較少被討論，因此本計畫的研究重點是在於整合量測資料在 GeoBIM 平台中，以達到停滯場址風控管理與現地調查資訊整合之目的。



第二章 計畫背景探討

2.1 前期相關研究成果與延伸應用

2.1.1 電磁導波時域反射法(TDR)監測技術之前瞻性

時域反射儀(time-domain reflectometry, TDR)一般由步階脈衝電壓產生器(step generator)、訊號採樣器(sampler)與示波器(oscilloscope)組成，TDR之基本原理類似於傳輸線雷達，由步階脈衝電壓產生器發射一電磁脈衝進入同軸電纜(coaxial cable)及感測導波器(sensing waveguide)，並由示波器記錄由於感測導波器內阻抗不連續所造成之反射，如圖 2 所示。電磁波之傳輸系統包括延長線(同軸纜線)與感測導波器，導波器可視為同軸纜線之延伸，同時做為訊號傳輸與感測元件，導波器之設計主要在將所需監測之環境變化轉換為感測導波器之傳輸阻抗變化，如此可藉由反射訊號得知環境變化參數。

計畫團隊過去二十年在TDR量測技術有深入的研究與應用發展，除了TDR量測技術的基礎學理發展(Lin et al., 2007, 2015; Lin and Tang, 2007)，基於TDR技術成功發展了許多應用於土木、水利與環境的感應導波器與監測方法。林志平等(2020)利用原為延長線之同軸纜線，將其當成一整段連續型感測器進行全分布式感應監測，可應用於地滑、水位與沖淤之高時空解析度監測。此類全分布式TDR監測技術，藉由傳輸線的幾何斷面變化，或藉由特殊之傳輸線設置將電磁波向外引導以感應外部材料之介電度變化，在全段傳輸線主要觀測因前述二種原因造成的反射訊號。全分布式TDR感應於地滑監測應用示意圖如圖 3(a)所示，將同軸纜線埋設於有滑動現象的岩土邊坡中作為地體變形感測器，當地層相對錯動而改變同軸纜線幾何形狀時，TDR儀器所發出之步階脈衝將在同軸



纜線變形處發生訊號反射尖峰 (reflection spike)，並透過走時分析技術來定位阻抗不連續的位置，即滑動面深度。Wang et al. (2019) 基於此法研發了沖刷監測纜，其應用情景如圖 3 (b) 所示，透過特殊鋼鍵股與PVC絕緣材結合為一創新沖刷監測纜，利用絕緣鋼鍵股與非絕緣鋼鍵股形成導波器的兩極，再以TDR儀器定時量測其波形，辨識土水界面變化來推估沖刷深度。

計畫團隊前期112年計畫『儲槽管線污染滲漏與加油站測漏管智慧監測技術』，其中提出之TDR浮油監測技術透過一系列室內實驗與研發，並經過模場試驗驗證TDR監測技術於監測井浮油監測之可行性及其便利性。此類應用相較於其他既有監測技術而言，具高時空解析度且空間連續分佈之優勢，亦易於自動化量測與分析，為一高經濟效益之監測技術。

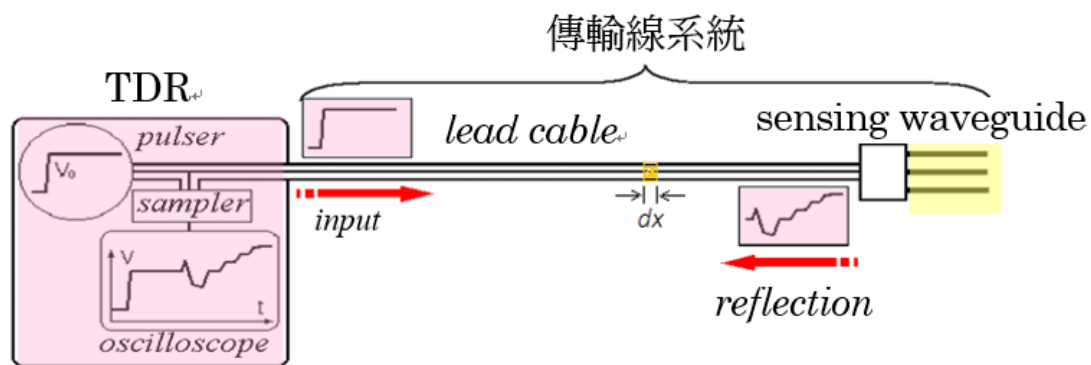
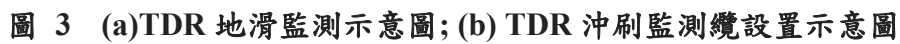


圖 2 TDR 量測設備的組成與量測架構



計畫團隊於前期計畫中蒐集了近年來基於電磁波時域反射法 (TDR) 的新型滲漏監測方法 (Aghda et al., 2018; Cataldo et al., 2014, 2015, 2017; Woo et al., 2018)，TDR 技術的適用性已獲得實驗室與一系列現地測試實驗之驗證。根據 Cataldo et al. (2015) 的報告，此類技術已經被歐洲最大的水操作公司 Acquedotto Pugliese S.p.A. 實際安裝於 10 km 的地下供水管線上。TDR 滲漏監測技術的基本原理主要是利用漏水造成感應纜線對應位置電學性質的改變 (主要是介電度，dielectric constant)，造成傳輸線在漏水處因電學阻抗改變而產生反射訊號，如同沿著感應纜線的漏水雷達，其原理示意圖如圖 4 所示。目前 TDR 滲漏監測技術的發展目的主要在於供水管線的滲漏監測，水有最高的介電度 80，因此在漏水處造成土壤的濕潤與整體介電度的明顯改變。然而，工業液體如油品或其他非水相液體，其介電度甚低，工業廢水的電學性質也比較複雜，因此前期計畫進一步探討 TDR 滲漏監測技術是否可適用在不同的監測環境。

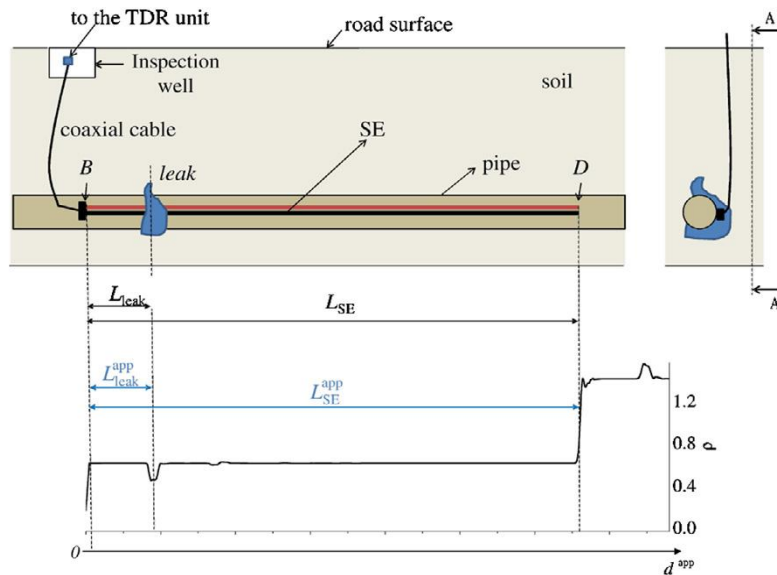


圖 4 TDR 管線滲漏監測原理與其對應之量測波形示意，因滲漏造成左側一下凹的反射訊號，其中 L_{leak} 為滲漏位置距離， L_{SE} 為感應纜線的總長；下圖橫坐標為時間，亦可換算為視傳輸距離 L_{app}
(取自 Cataldo et al., 2014)

計畫團隊於 110 年『電磁波時域反射法之儲槽管線滲漏監測技術評估與發展』前期計畫中，應用 TDR 技術於儲槽與管線之污染滲漏監測中，探討了感應纜線型態、介質差異(水 vs. 有機污染物)、環境變化、量測距離限制等，冀以優化 TDR 污染滲漏監測方法並驗證其實務可行性。

前期計畫中探討感應纜線型態時，傳輸線依其兩極導體的配置可以有不同的形態，例如同軸纜線、平行雙導體、平行三導體等，感應纜線的型態不同，其量測敏感度與受環境電磁雜訊的影響不同。當導波器之導體直徑與間距越大，絕緣材厚度越小，感應纜線監測品質愈佳，監測效果亦佳，其中以附有吊線之 P3-500 纜線為最佳之感應纜線。

至於目標洩漏物之介電性質差異，前期計畫探討 TDR 儲槽管線滲漏監測對於水和汽油二類洩漏物質的敏感度。因水具較高介電度(80)，



在漏水處造成土壤環境的濕潤與整體介電度的明顯改變。然對於有機污染物（如汽油），其介電度甚低（約略 2-3），當其滲漏發生時與周圍土壤環境介電度相近，利用附有吊線之 P3-500 纜線作為感測纜線，在搭配優化 TDR 污染滲漏監測方法，仍能有效監測汽油類污染物滲漏之發生。

前期計畫亦針對現地回填環境差異探討該系統之敏感度，埋設地下之感應纜線可能受到受到回填土體之孔隙率不同，而形成監測滲漏效果之差異。油品一般具特殊介面，當滲入七厘石環境中，部分沿孔隙滲漏，部分會殘留於七厘石表面較長時間，如同手觸碰到油品時清除不易，當殘留於七厘石之汽油量較細砂環境中之殘留量多時，導致在七厘石環境中監測汽油滲漏效果較佳，如圖 5 所示。由此可見，因滲漏物可蓄積或滯留於孔隙中，在相同滲漏量下，孔隙率大之土壤環境，可讓感應纜線測得較多滲漏物，能更有效監測滲漏之發生。

在評估該系統量測距離限制時，前期計畫藉由數值模擬，輔以室內試驗標定纜線阻抗參數，在有限空間中嘗試評估現地實際狀況。圖 6 為細砂環境中汽油滲漏監測之數值模擬結果，當距離 100 公尺時，利用數值模擬尚能分析滲漏位置，但在實際情況下，波形可能會受電磁波雜訊影響，因此當反射係數差值($\Delta\rho$)變化太小，即無法有效判斷滲漏實際位置，又因感應元件會隨距離增加造成空間解析度與感應強度降低，前期計畫根據此數值模擬結果，建議用以監測汽油滲漏之距離限制約略為 50 公尺，實際數字仍需以現地狀況為準。

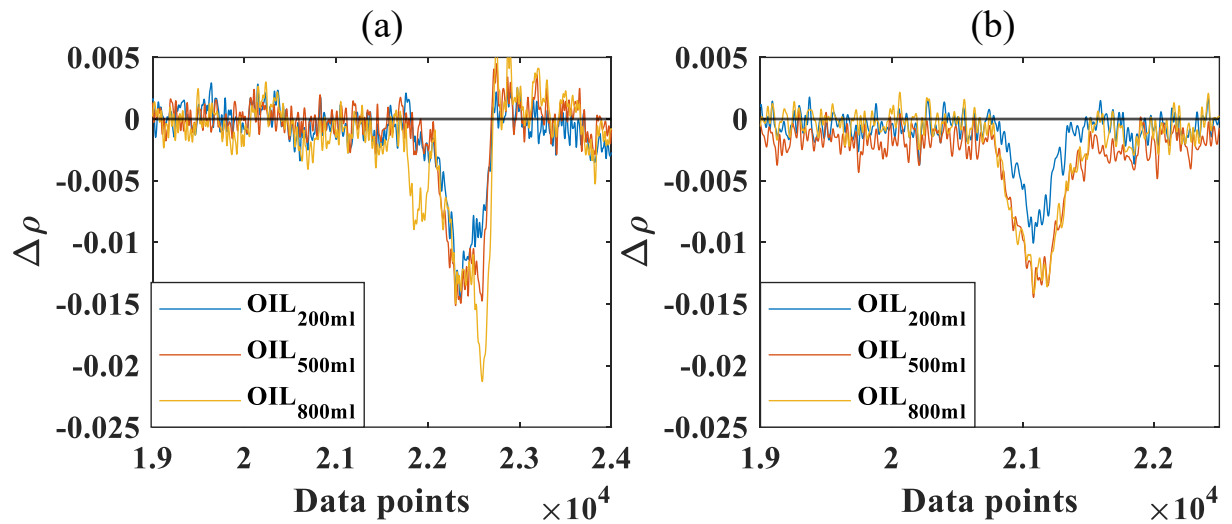


圖 5 附有吊線之 P3-500 纜線不同環境中汽油滲漏波形差異分析

(a) 七厘石環境；(b) 細砂環境

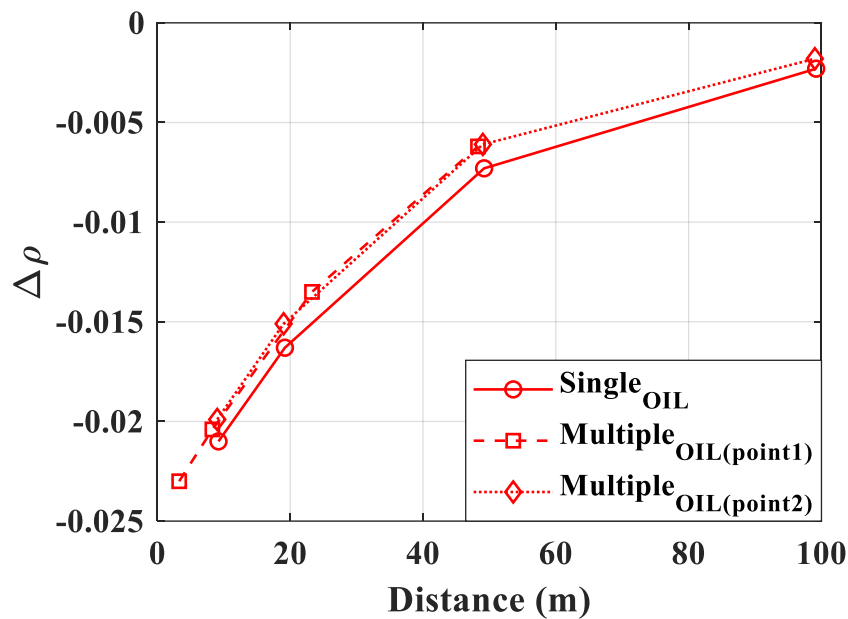


圖 6 模擬汽油在細砂中單點與多點滲漏比較

綜合以上說明，前期計畫驗證 TDR 技術應用於儲槽與管線之污染滲漏監測之可行性，透過一系列室內實驗評估既有儀器與感應元件的適用性與限制，針對適用現地監測之最佳配置與影響因子，可歸納成以下幾點：



1. TDR 波傳模擬初步以室內實驗標定纜線參數，模擬更長距離之滲漏情景，發現附有吊線之 P3-500 纜線對於自來水和汽油滲漏監測距離，初步發現分別為 100 米以上和 50 米以內。
2. TDR 訊號分析中，差異分析法 (Difference analysis method) 可有效監測汽油滲漏發生之位置，而走時分析法 (Travel time analysis method) 可評估感應元件之靈敏度。
3. 室內試驗探討感應元件靈敏度與纜線阻抗影響時，因靈敏度與纜線阻抗有關，亦受感應元件品質影響，當導波器之電極直徑越大，絕緣材厚度越小，導波器間距越大，感應元件品質越好，則監測效果越佳，其中最佳之感應元件為附有吊線之 P3-500 纜線。
4. 在含水率約 10 %之環境下，汽油滲漏監測效果相較於無含水率環境時不易監測，因水的介電度大影響甚鉅，當現地受雨水影響而造成土壤含水率變化下，TDR 滲漏監測技術面臨之不確定性仍待評估。
5. 當回填之土壤孔隙越大，滲漏監測效果越佳。因滲漏物可蓄積停留於孔隙中，較多滲漏物使得大幅影響背景有效介電性質，感應纜線更容易測得其變化。
6. 多點滲漏監測可行性評估中，發現當滲漏點距離監測位置越遠，其效果將遞減，訊號強度與空間解析度隨距離增加而降低。其中若自來水導電度高，則滲漏點受距離之影響較大，然汽油相對不導電，滲漏位置距離之遠近對其影響不大。



2.1.3 TDR 監測井浮油監測技術

計畫團隊於前期計畫中蒐集了基於電磁波時域反射法(TDR)的分層液體監測方法(Harney & Nemerich, 1983; Cataldo et al., 2007, 2014; Piuze et al., 2009)，上述技術皆用於儲油槽中油水分層厚度偵測，此技術的適用性已獲得實驗室試驗驗證並取得公分級的精度。TDR 浮油監測技術將使用於儲油槽中偵測厚油層厚度的技術向偵測地下水滲漏浮油之薄油層精進，此技術之原理為利用感測器感應到具有不同介電性質的介質(空氣、浮油和地下水)，造成電學阻抗改變而產生反射訊號，如圖 7 所示，若當於浮油層較薄時，TDR 波型變化較不明顯且難以判斷空氣-油介面。

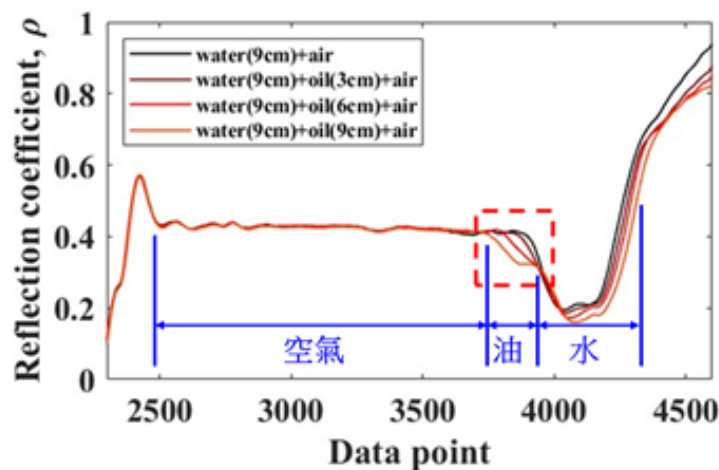


圖 7 TDR 浮油監測量測波型圖

計畫團隊於 112 年『儲槽管線污染滲漏與加油站測漏管智慧監測技術』前期計畫中提出浮油層監測策略，於浮油層較厚的情境下使用電磁波於不同介質中傳播的時間差異進行時間域定量化分析，此分析可以偵測到大於 5 mm 的浮油層厚度並計算層厚度，如圖 8 所示，為提高浮油層偵測之靈敏度，浮油層厚度小於 5 mm 時，使用正規化互相關(Normalized Cross-Correlation, NCC)分析方法，量化監測資料與無浮油層情況下之波形差異，如圖 9 所示，在正規化互相關數值超過由其他無浮



油層量測值所訂定出的門檻值後，則判斷為浮油層存在，透過以上監測策略以達到前期預警及定量量測的效果。

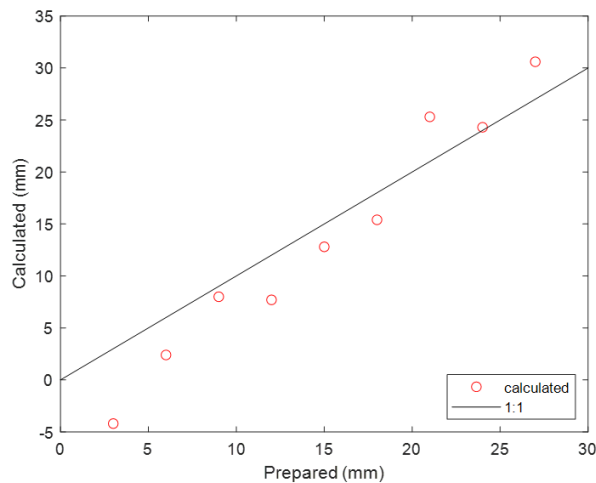


圖 8 時間域定量化分析成果

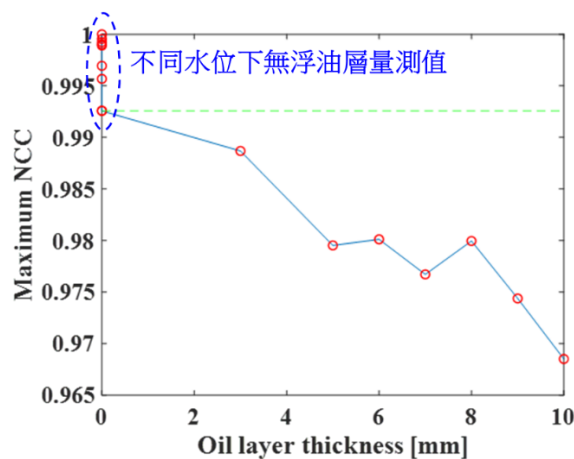


圖 9 正規化互相關與浮油層厚度關係圖

2.2 試驗場址相關背景說明

試驗場址為南投加油站，污染情況為土壤中 TPH（總石油碳氫化合物）62700 mg/kg，超標六十二．七倍，地下水苯也超標二十七．六倍。推測場址可能出現油槽龜裂、泵島區管線漏油的情況。相關位置如圖 10 與圖 11 所示。

本場址於民國 101 年 11 月 29 日公告列管後至今未有執行污染改善



作業，雖然歷年區域周邊民井未發現有相關污染項目，但由 108 年度場址監測井及簡易井檢測結果確認場址內地下水仍具有污染潛勢；簡易井監測結果顯示可能局限於場址內未有擴散至區外疑慮。監測井監測結果顯示原污染物苯已降低至管制標準以下；但總石油碳氫化合物上升至管制標準之上情形，監測結果目前無明顯洩漏汙染事件造成。



圖 10 模場位置圖

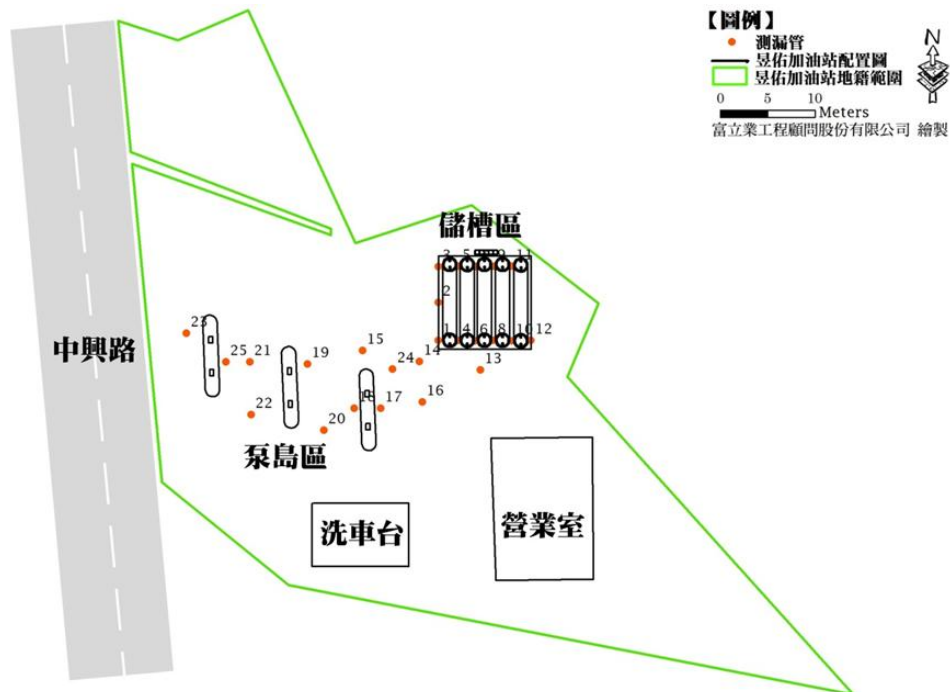


圖 11 加油站平面配置圖

場址雖無改善作業執行，但環保局積極要求地主進行應變必要措施；針對污染物阻絕進行相關工作；在 109 年 6 月地主已抽除油槽內之殘油，阻絕避免油槽內之殘油可能持續洩漏情形。為瞭解油槽抽除後對於地下水污染是否有影響故規劃針對場址既有一口標準監測井及兩口簡易井進行地下水採樣檢測作業，地下水檢測項目為一般項目、BTEX、MTBE 及總石油碳氫化合物等項目。另場址已多年無執行土壤採樣檢測，為了解目前場址土壤污染範圍規劃於油槽區執行 2 點次；泵島及管線區執行 3 點次共計 5 點次，採樣深度每點次 5 公尺；每點次以 0.5 公尺為區段執行 PID 及 FID 篩測；篩選測值較高區段送實驗室分析土壤中揮發性有機物(VOCs)及總石油碳氫化合物。

監測井及簡易井檢測結果公告污染物總石油化合物及苯雖有檢出但均低於污染管制標準以下，另由監測井定期巡查結果，過去監測井抽取



貝勒管中約有 1~2 cm 浮油情形，在 109 年巡查期間以貝勒管拉取井中水樣雖仍有些許油味但浮油情形以降低許多。由檢測結果顯示場址地下水污染情形可能侷限於場址內未擴散至區外。本計畫會在油槽區監測井與加油站下游周界裝設本團隊自主研發之智慧型電磁波監測測漏系統。如圖 12 所示，目前某監測井有浮油的狀態。

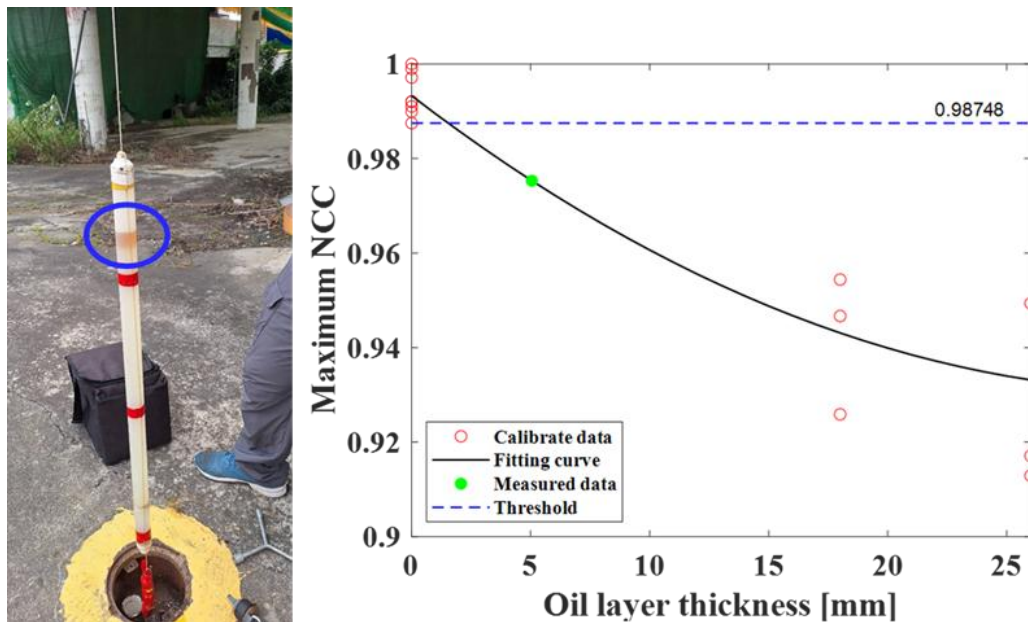


圖 12 監測井浮油狀態



第三章 研究方法與過程

3.1 TDR 儲槽管線之污染滲漏監測方法技術說明與欲突破發展

在 TDR 儲槽管線之污染滲漏監測中，分析方法為將資料使用正規化及低通濾波器等預處理方法後，將處理後的資料進行差異分析以觀察監測波型與無滲漏波形之不同處，並利用雜訊的三倍標準差做為判斷滲漏事件發生的閾值，但使用三倍標準差可能使靈敏度降低，造成發現滲漏的時間受到延遲。

Hilbert-Huang Transform (HHT)提供了一種基於經驗模態分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)的訊號分解方法，首先取得局部極值之包絡線，再將原始訊號減去上下包絡線之平均值，重複迭代多次之後即可將訊號分解為多個本質模態函數(Intrinsic Mode Function, IMF)，透過 IMF 可以瞭解時間域的震盪和頻率特性，並且與傅立葉轉換以及小波轉換相比，HHT 不假設訊號為線性或穩態，為完全在時間域內運作的時頻分析方法，因此適合分析非穩態之自然訊號，其分析方法說明如下：

1. 確定資料中的區域最大值並使用這些值進行三次樣條插值建立上包絡線
2. 同樣使用區域最小值建立下包絡線
3. 建立上包絡線和下包絡線的平均值曲線，將原始資料減去平均值曲線，如圖 13 所示
4. 重複步驟 1~3 直到符合 IMF 的兩個條件：
 - 資料中區域極值和與零交叉的數量相等或相差一個
 - 資料中的區域最大值數量需要和區域最小值數量相等
5. 分析出所有 IMF 並得到僅具有平滑趨勢的殘餘函數



於訊號分析時可使用具有較少雜訊的 IMF 以重建有價值的 TDR 訊號，以期望代替設置閾值的方法提早發生滲漏的時間。

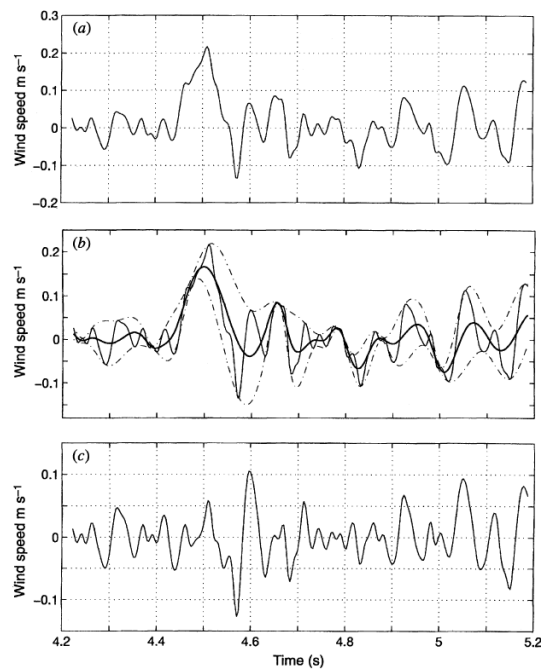


圖 13 HHT-EDM 方法分析範例 (Huang et al., 1998)



3.2 TDR 測漏管浮油自動偵測與量測方法技術說明與欲突破發展

TDR 浮油監測目前使用之時間域定量分析及正規化互相關分析方法雖然可以進行量測及前期預警，但其分析可能受到雜訊的影響進而導致可信度受限，且不容易自動化。因此除正規化互相關分析之預警方法外，為了突破性提升浮油偵測的精度與進行自動化的定量分析，本團隊亦提出使用頻率域全波形分析方法以持續精進。

頻率域全波形分析方法為一創新方法，將量測資料推展至頻率域進行分析，藉由頻率間隔等於總時間長度倒數的關係，利用將時間域資料進行零值填充拓展總時間長度以增加頻率域解析度及量測的可信度；並利用計畫團隊前期發展之 TDR 量測介電頻譜技術(Ngui and Lin, 2022)，如圖 14 所示，透過增加一阻抗不匹配段與創新的 Reflection-Decoupled 分析以排除量測儀器之輸入訊號影響，且於實際量測之前只須使用已知材料進行單次校正，並且在更換儀器後亦不需重新校正，這些優勢大幅提升感測器設計的靈活性及實際量測的便利性。

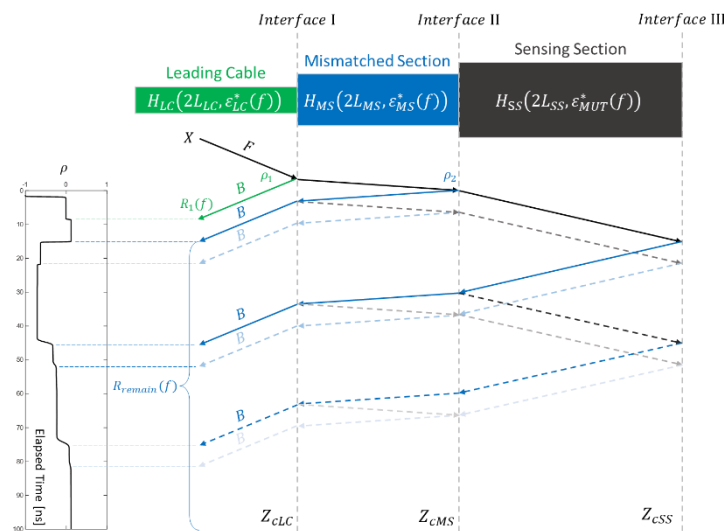


圖 14 TDR 介電頻譜量測技術示意圖



在浮油量測的情境下量測材料為已知(空氣、油和水)，透過改寫理論公式，並輸入已知材料的介電頻譜則可以量測各層材料的厚度，期望藉由此創新且具含學理之頻率域全波形分析方法，提高浮油層量測精度及可靠性。



3.3 時變地電阻調查技術監測場址邊界方法與建置

場址整治之最終期望乃是將污染物完全移除，還予人民安全健康的生活環境，然不同類型污染場址於整治上所面臨的困難度不盡相同，一般而言，未擴及地下水之淺層土壤污染場址處理較為明確有效，特別是污染物危害程度較低，及污染物分布已有效掌握的場址，例如部分非法廢棄物掩埋場址，或小規模單一油品洩漏事件，若有效將污染土處理或替換，即能完善解決污染問題；但當污染擴及地下水層時，整治難度將大幅提高，因污染在地下水中的移動是較難以掌握的，尤其當地層具異質異向性高，或深層地下水污染，這類型場址在整治過程中就會面臨許多盲點與困境，尤其是無法確定整治藥劑是否能廣布至預期範圍，若注入之整治藥劑無法成功與污染物混合產生作用，則場址整治將難以達到具體效果，甚至流於消極的「pumping forever」處理態度。地球物理探勘技術於此也同樣能有所貢獻與協助，藉由整治前、中、後的調查，依訊號評估污染物是否移除，整治藥劑流向，污染是仍有擴散之疑慮。以單純土壤污染場址而言，整治多以置換、混合或清運方式進行，地表材料會翻動改變，地球物理設備無法固定於現場定期監測，然可以採取分階段調查評估，在相近的位置或測線於整治前、後進行探測，並以整治前的訊號成果為背景值，比對前後差異，甚可使用 time-lapse 資料差值的資料處理方法分析電性差異百分率(在線調查技術)，藉此評估土方清除體積是否符合設計，同時研判是否有遺漏未處理之疑似污染潛勢區。如同前述，以團隊合作、分工連結，必能完成有效之調查結果，掌握整治成效，具體提升整治成果與價值。因應未來政策走向及發展，大型或大範圍地下水污染場址可能採取風險評估與長期地下水管理方式，此時地下水監測將扮演重要角色，然地下水分析時間較長，且採樣時間間隔



必須適當控制，間隔太短耗費金錢，間隔太長失去監測的意義，而監測井地下水分析畢竟為「點」的調查，兩監測井間的現況缺乏直接或間接的評估，此時地球物理探勘技術或可藉由定期的地表及井內調查提供間接之證據，提出預警建議採樣時機。而地球物理遠端控制調查技術已是國際地物界與儀器商發展的趨勢，有許多純熟有效的文獻提出，本團隊近年來持續致力此項研究，並鑽研提升自動化資料處理之品質，將於本計畫中配合調查或整治執行項目中，依各項條件領先評估遠端自動化電性監控系統之可行性，並研析本土化設計應用之適當時機與方式，而此技術之發展甚可達到接近「real-time」的成果展現，或能使長期地下水風險管理得到更多資訊以利提出預警與做出決策。

因為本次監測的場址為加油站，所以利用電法於加油站污染調查如下說明：環境地球物理方法是根據天然或人為建立的地球物理場對地下或不可視物質內部物性分佈特徵進行觀測，根據異常變化來推斷地下介質的物性改變。LNAPLs 進入含水層以後一般不能與水混合，而是以液相、氣相的形態賦存在土壤、地下水中。由於水相對是良導體，且含水多孔介質在電性上表現為低阻，一般情況下新鮮的油品等有機污染物導電性遠不及水，故油品類在介質孔隙內替代一部分水後，其整個地電特性也就發生了變化，相對於低阻背景，通常會出現高阻異常。但如果場址廢棄多年，由於 LNAPLs 屬於易揮發、易被生物分解的污染物，即容易被自然環境風化的化合物，根據實場經驗：油品的導電率會隨著風化程度與時間明顯上升（或電阻率降低），因此歷經數十年的場址，幾乎是看不到相對高電阻的油品，但無論油品是否被風化，其在地下介質中與周圍的圍岩都形成明顯的電性差別。利用這一特性，地電阻影像剖面法(ERT) 在探測其分佈範圍及深度展現出一定優勢。因而形成調查此



類污染分佈可採用地球物理方法探測的前提。根據經驗比較飽和土壤中之電阻率分佈，可發現地質材料愈細粒之材質其電阻率愈低(導電性佳)，而 NAPL 之電阻率一般多超過 1,000 Ohm-Meters，比礫石、砂質、砂土或黏土之電阻率高出許多，容易與地層區別開來。現場施測可在同一測線安排不同電極排列(如二極法、四極法、梯度法…等)與解析方法交叉佐證，以同時獲取地質與污染最佳擬合剖面與具說服力之證據。Schneider and Greenhouse (1992) 於砂質含水層(砂之孔隙率約 0.4)中觀察到 ERT 法之電阻率隨 NAPL 飽和度增加而迅速增加。

本計畫於停滯場址建立一套電阻率動態監測系統，建置一套大數據資料庫，每天進行量測，最初訊號成果為背景值，比對前後差異，使用 time-lapse 資料差值的資料處理方法分析電性差異百分率(線上調查技術)，藉此評估地層電阻率變化，同時分析是否有遺漏未處理之疑似異常區。此探勘技術密集 time-lapse 探測成果之差異分析，能呈現類 4D 的動態影像成果，且由於電極位置不動，在過程中的持續調查，將能藉由材料的電性變化，評析水位面與異常區變化。而地球物理遠端控制調查技術已是國際地物界與儀器商發展的趨勢，有許多純熟有效的文獻提出，本團隊近年來持續致力此項研究，並鑽研提升自動化資料處理之品質，將於本計畫建置一套即時監測遠端自動化電性監控系統，並研析本土化設計應用之適當時機與方式，而此技術將來可以發展甚可達到接近「real-time」即時成果展現，或能使長期地下水風險管理得到更多資訊以利提出預警與做出決策(時間序列成果如圖 15 所示)。本計畫規劃時變電阻率探測採用以天為取樣單位，資料為現場連續存取並透過 5G 網路傳輸技術透過雲端介面進行接收，如圖 16 所示。

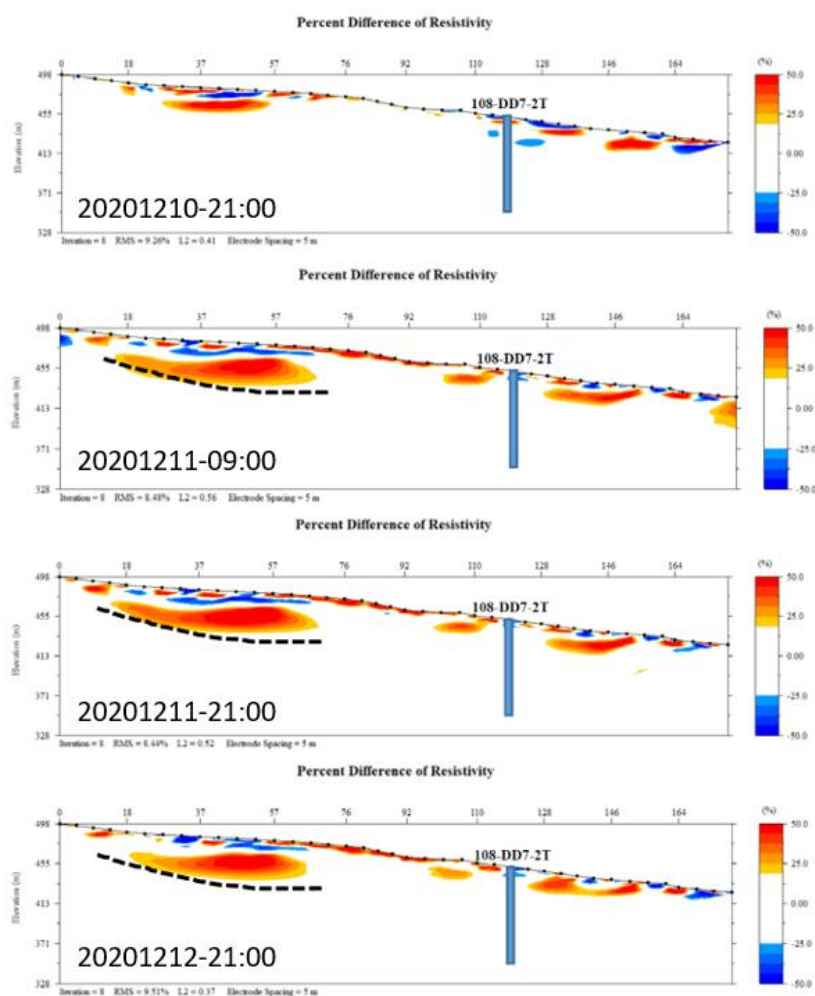
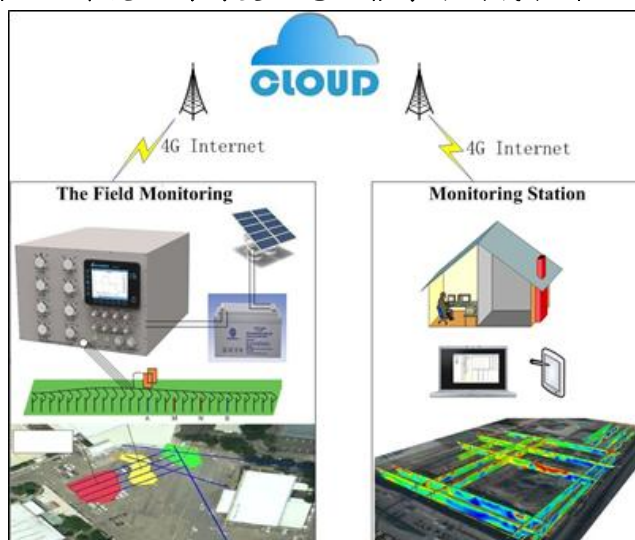


圖 15 某掩埋場時變地電阻影像探測成果圖



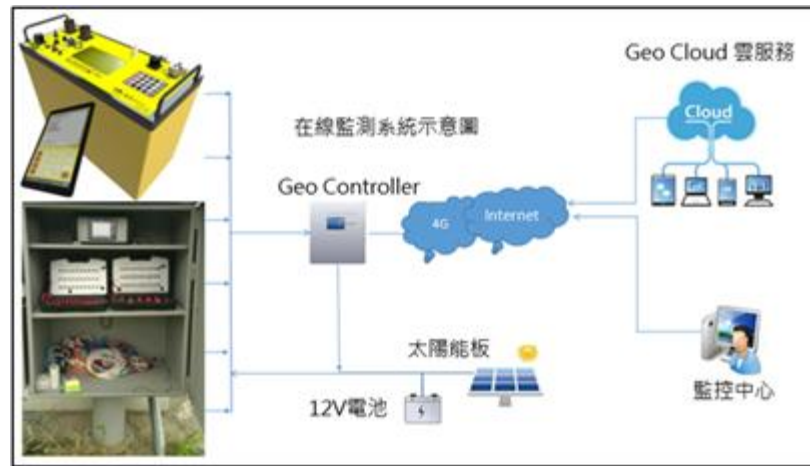


圖 16 時序地電阻監測系統示意圖



3.4 建置以一張圖可視化平台呈現停滯場址與風控場址之 5G 智慧監測數據

本專案期望建立一個可視化場地地球物理訊息監測平台，通過“一張綜合地圖”或“一站式服務”建立一個場地污染空間資訊管理系統平臺，開發統一的 WebGIS 人機交互操作圖形介面，實現場地污染空間資訊系統化集成和協同管理、直觀快速圖形視覺化和多手段綜合分析應用。

本專案通過一張綜合場地污染空間資訊的網路地圖介面，初步建立一個即時數據可視化平台，未來再往集合場地土壤污染、地下水污染環境大資料、高精度三維資料插值方法應用為一體，針對海量土壤污染環境資料的採集、管理、快速視覺化、關聯分析、資料分享及示範應用的數位化、視覺化、智慧化的污染空間資訊管理系統。

場地污染相關資料量龐大，資料標準不統一，資料類型和格式複雜。在資料處理時，一方面可以充分利用國際上行業常用的標準化資料格式標準，如 rd3、csv 等，開發針對標準化資料格式介面；另一方面對本地常用的“非標準”資料介面進行開發，從而使所有資料來源無需進行統一化的資料轉換，直接無縫輸入。資料介面相容規則、三角網格、混合網格、離散點等常見資料結構，從而實現多源頭、不同結構資料的融合與解析。資料類型包括場地採樣監測資料、非侵入式探測資料、周邊監測站監測資料等等。如圖 17 所示：

場地污染空間資訊管理平臺的開發採用 Browser/Server 架構下包含四層體系結構的設計模式：包括使用者介面層、業務邏輯層、資料資源層和資料接入層。平臺基於 WINDOWS SERVER2012 及以上版本，使用開來源資料庫 POSTGRESQL 為核心資料庫，前臺服務使用 H5/JS，後臺使用 MS VISUAL STUDIO 2010 及以上版本開發。



圖 17 污染場地數據可視化成果平台

使用者介面層是直接面向使用者統一的、介面友好的門戶系統，平臺為使用者提供基於 WebGIS 人機友好交互操作的 HTML5/JavaScript 圖形介面，使用者介面層與業務邏輯層分離，業務邏輯代碼獨立，使得各系統模組具備很強的獨立性，確保系統運行的靈活性和系統後期的可擴展性

在以往過去經驗，BIM 往往都是在地表面上建模，時常忽略了地理與地下數據的資訊，沒有關注到地下隱藏的風險，當前 BIM 中缺少的大地資訊源於需從雜亂的大地調查報告中提取和轉化數據困難，相對耗時且容易出現解釋錯誤之情形。而 Geo-BIM 的引入解決了地下條件所帶來的風險和不確定性，這些地下條件常常是工程項目中最大的挑戰之一。Geo-BIM 平台彙整通過將地理和地下數據和 BIM 模型，使數據被轉換為資訊，建成立包含地下資訊和地面上結構的建築資訊模型的三維管理平台，使得使用者可以實時確認數據，從而有效減少不確定性，降低風險。透過 Geo-BIM 的應用，這種數據整合不僅為使用者提供了更豐富的



資訊，還有助於改進大地數據處理和工作流程，可以更準確地評估地下條件對建築結構的影響，並能更好地預測可能出現的問題和掌握工程項目中複雜的地下狀況，從而在早期階段進行風險評估和規劃，且提高項目的可靠性和持續性。隨著技術的不斷進步和對 Geo-BIM 的持續研究，在未來，Geo-BIM 將在工程領域中發揮更大的作用，為使用者提供更全面、準確和可靠的數據和資訊，從而推動整個行業邁向更高的水準。

Geo-BIM 數據管理將傳統的勘測和設計過程愈趨數位化，從現場的鑽孔、航拍和地球物理方法探測資料數據等，將這些數據轉換為資訊進行數據管理，並彙整至 Geo-BIM 平台，整個過程實現了數據的即時、精確和數位化收集。且透過數據標準化，確保數據的準確性和一致性，並令數據可隨時更新，保持數據庫的即時性，同時有著 Geo-BIM 的數據共用和協作功能促進了管理團隊的合作和溝通，進一步提高了管理的效率品質，從數據中提取有用資訊，通過可視化將數據以直觀的方式呈現，轉化為易於閱讀的圖資和三維模型，有助於更好地理解資訊，幫助管理者做決策計劃，可知 Geo-BIM 數據管理的實現，推動整個工程領域的數位轉型。Svensson (2016)將整理成 Geo-BIM 數據庫五個組成要素，分別為相關資訊輸入、框架輸入、數據視圖、模型的數據視圖和數據管理(如圖 18)。

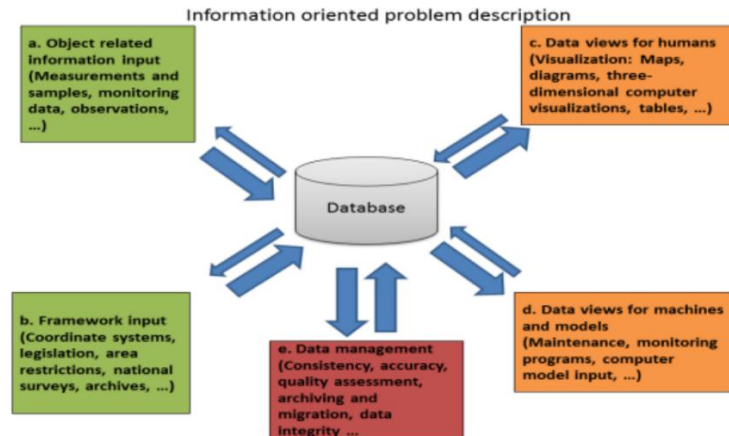


圖 18 Geo-BIM 數據庫的要素 (Svensson, 2016)

第四章 結果與討論

4.1 TDR 儲槽管線污染滲漏分析方法之精進

本研究藉由前期計畫之監測資料，精進其資料分析方法，並實際應用於試驗場址中。茲說明如下：

4.1.1 環境建置

利用室內試驗找出監測不同管道及滲漏物時所使用的環境建置。

(一) 環境建置

當量測水相液體滲漏，應採用保水效果佳的細砂作為細顆粒回填材；

當量測油相液體滲漏，應採用比表面積小的七厘石作為粗顆粒回填材。

1. 明管線

可將感應元件以吊掛的方式固定在明管下方如圖 19，使明管線內的液體滲漏時，液體能順著管壁流至管線下方接觸到感應元件，使感應元件可以偵測到滲漏發生；感應元件與管線中間也可以放置海綿、布...等吸水材料，作為類似回填材的效用，以增加滲漏量以及滲漏液體停留時間範圍，進而提高準確度。

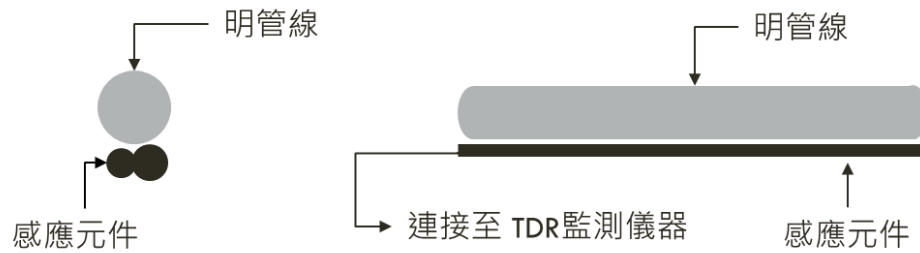


圖 19 PVC 明管線安裝感應元件示意圖

2. 地下管線

監測圓形管線時，可將纜線置於管線下方，但須注意管線可能造成的滲流範圍，在對管線的尺寸進行評估之後決定感應元件擺放的深度，使管線的任何地方發生滲漏時都能被感應元件接收到，並於感應元件與管線中間根據所需進行監測的液體填入適當之回填材。

監測矩形管線時，可在矩形渠道下方挖掘一個 U 型溝槽並且填上回填材如圖 20，將感應元件放置於 U 型溝槽底部，利用液體的優勢路徑引導滲漏液體匯集至感應元件周圍；若無法利用優勢路徑引導滲漏液體則需考慮感應元件擺放在管道下的深度、數量以及間距，以涵蓋管道滲漏可能的滲流範圍。

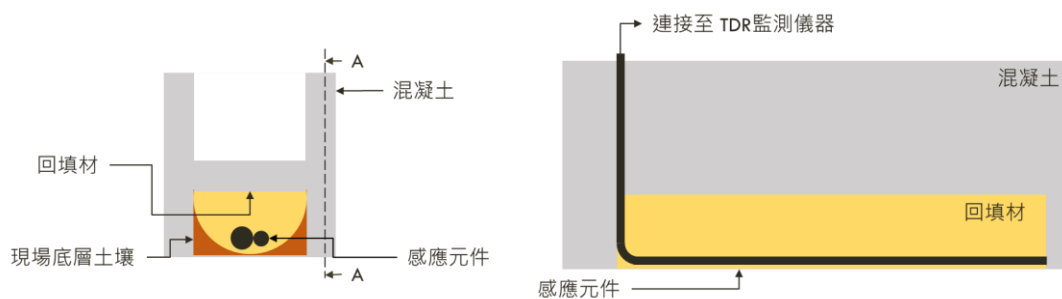


圖 20 地下管線安裝感應纜線示意圖(以現地混凝土水溝滲漏監測設置為例)

4.1.2 現場監測數據

前期計畫之模場試驗目前仍在持續進行自動化監測，監測場址為陸昌



化工，所以本團隊優先進行監測元件安裝，並規劃導入滲漏情境以完整描繪出本智慧型監測系統之完整監測模式。目前已完成監測系統的安裝，圖 21 為現場滲漏監測之模場位置。並將截至目前為止的監測成果呈現於

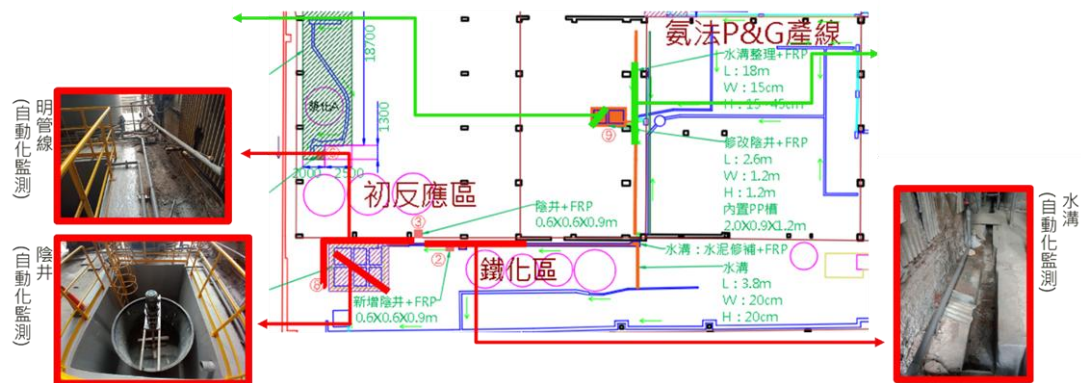


圖 21 現場滲漏監測之模場位置

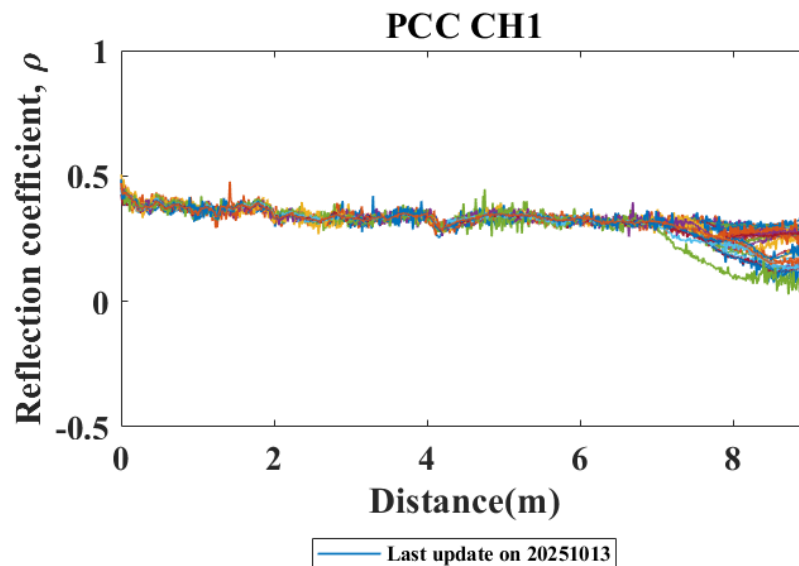


圖 22 自動化監測-明管線(CH1)

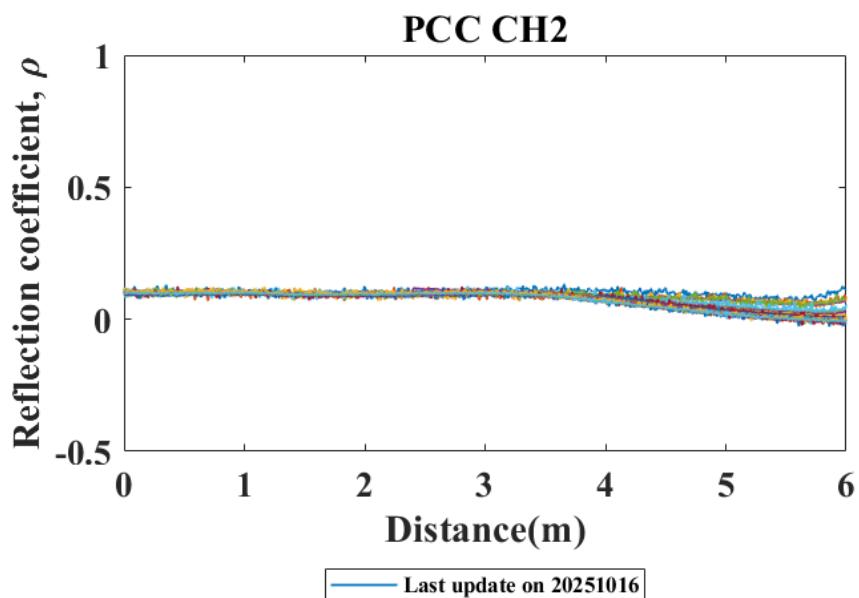


圖 23 自動化監測-陰井(CH2)

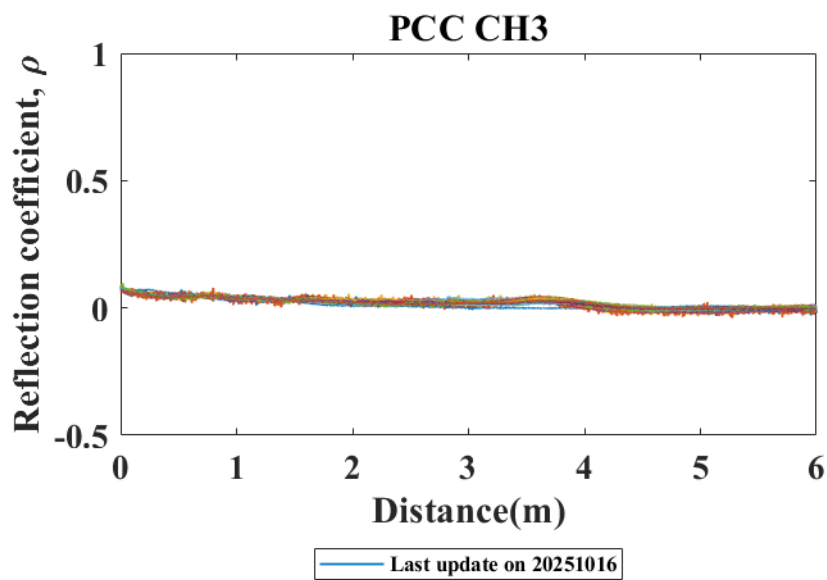


圖 24 自動化監測-水溝(CH3)



4.1.3 分析方法

前期計畫中，本團隊利用差異分析法和三倍標準差滲漏準則應用於實際場址中以偵測滲漏發生及定位，但使用此方法需要進行訊號預處理降低資料中的雜訊，使用三倍標準差作為判斷滲漏發生的依據，為進一步增加訊號處理的穩定性，本團隊提出使用 Hilbert-Huang Transform (HHT) 中 Empirical Mode Decomposition (EMD) 方法進行分析，透過使用適當的本質模態函數(Intrinsic Mode Function, IMF)擷取滲漏訊號的特徵，以下使用在滲漏監測系統進行安裝時於現地試驗之資料進行測試；首先對於原始波型進行平移使資料起始點對齊，再將回填材環境下之資料當作原始波形，並使用不同滲漏量之波形與原始波形相減，得出反射係數差值($\Delta\rho$)，如圖 25 所示，後續使用 HHT-EMD 方法分解 IMFs，如圖 26 到圖 28 所示，由圖中可以觀察到各 IMFs 所分解出原始訊號的特徵訊號，在這些特徵訊號當中 IMF6 和 IMF7 中具有明顯的滲漏訊號。

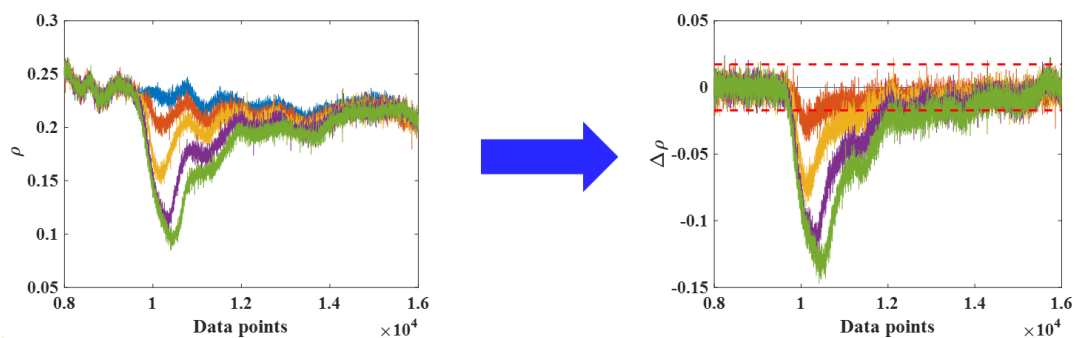


圖 25 計算反射係數差值

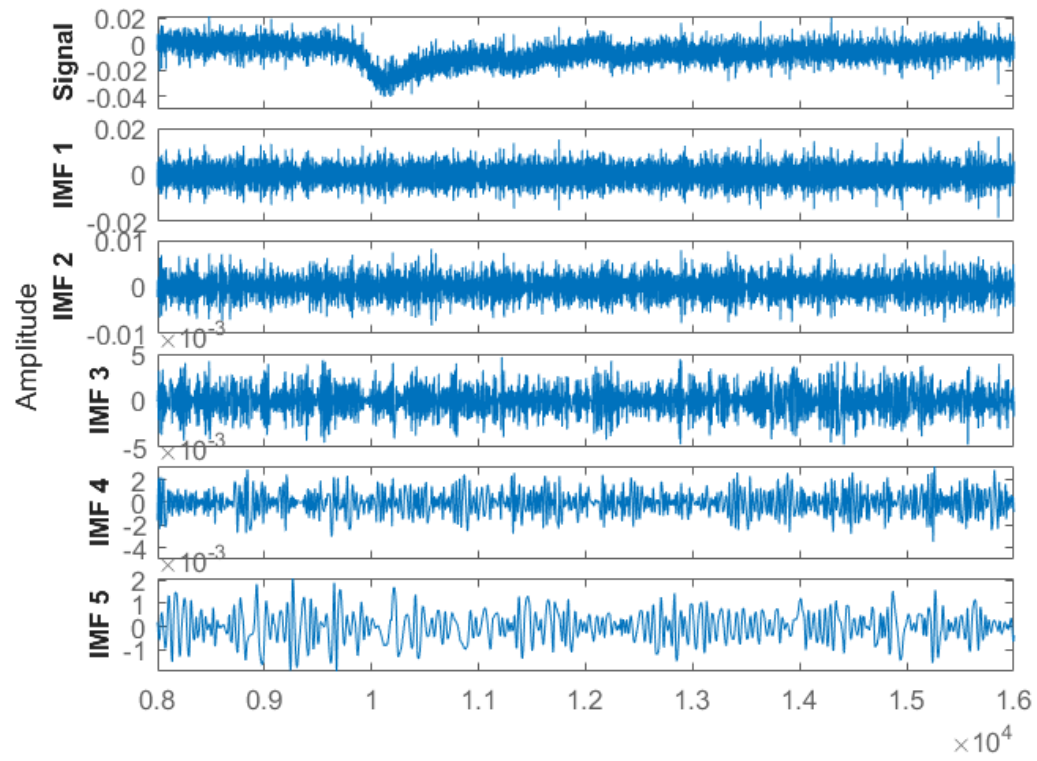


圖 26 本質模態函數一

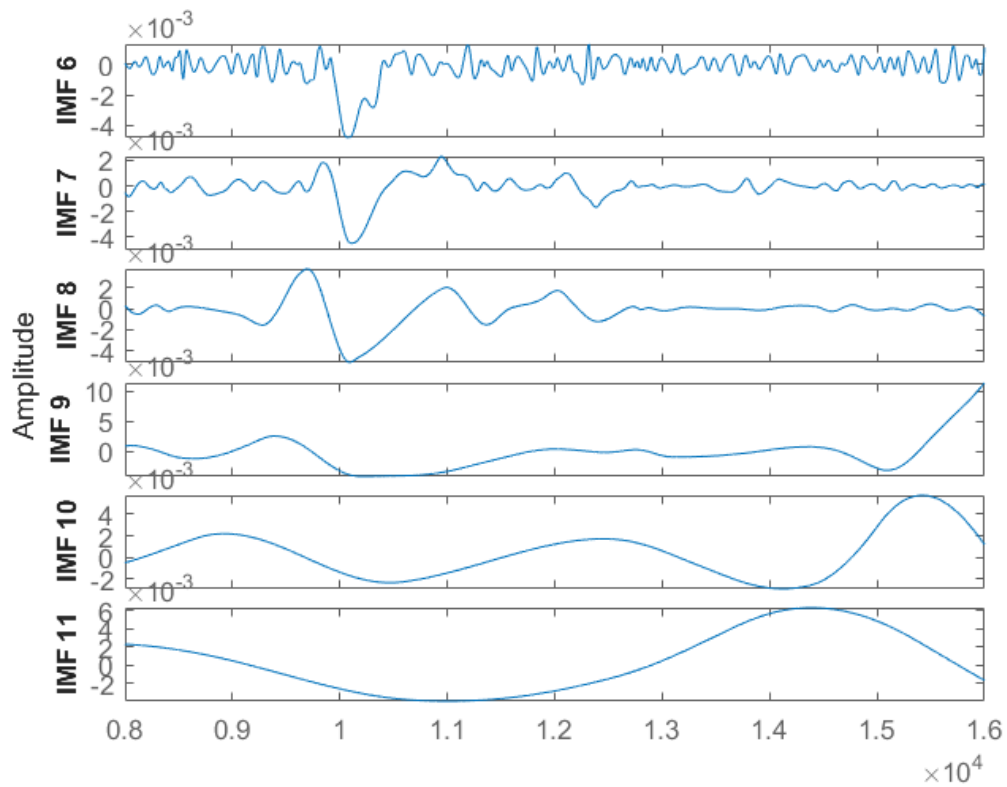


圖 27 本質模態函數二

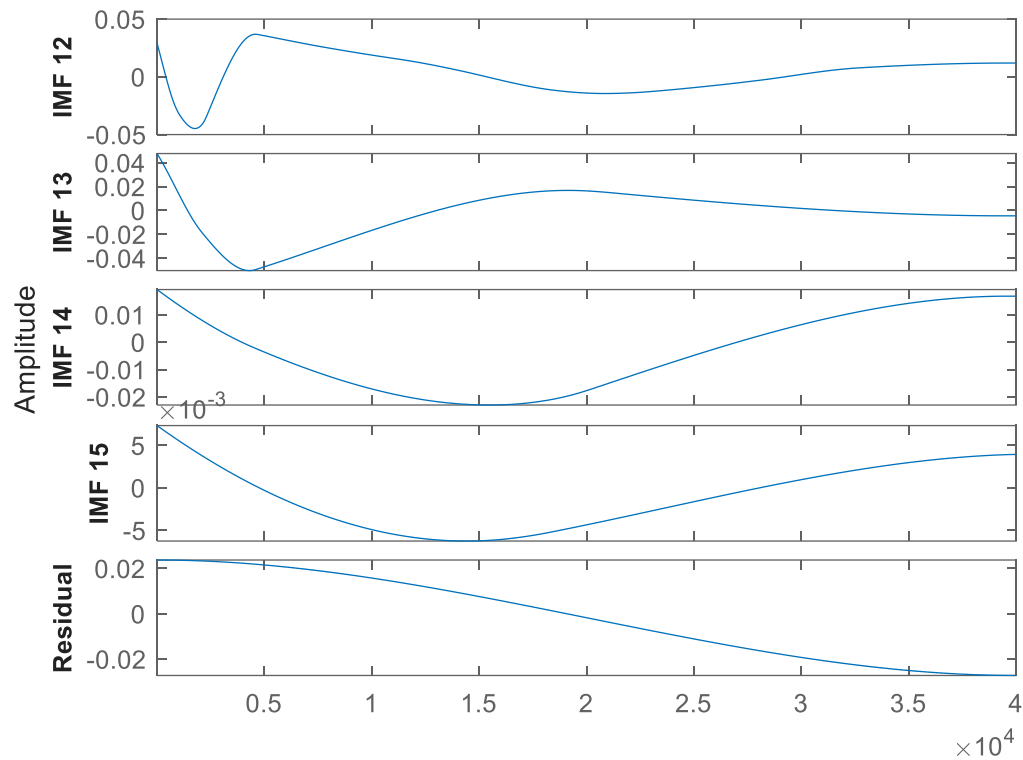


圖 28 本質模態函數三

4.2 TDR 監測井浮油監測技術分析方法之精進

本研究利用數值方法及室內物理實驗模擬現地情形，精進 TDR 監測浮油技術之精度及靈敏度。

4.2.1 室內物理實驗

室內物理實驗以直立玻璃圓筒模擬現地測漏井與油品滲漏情形，實驗中使用之儀器、滲漏物與其他配置項目，茲說明如下：



Constant Water-Column

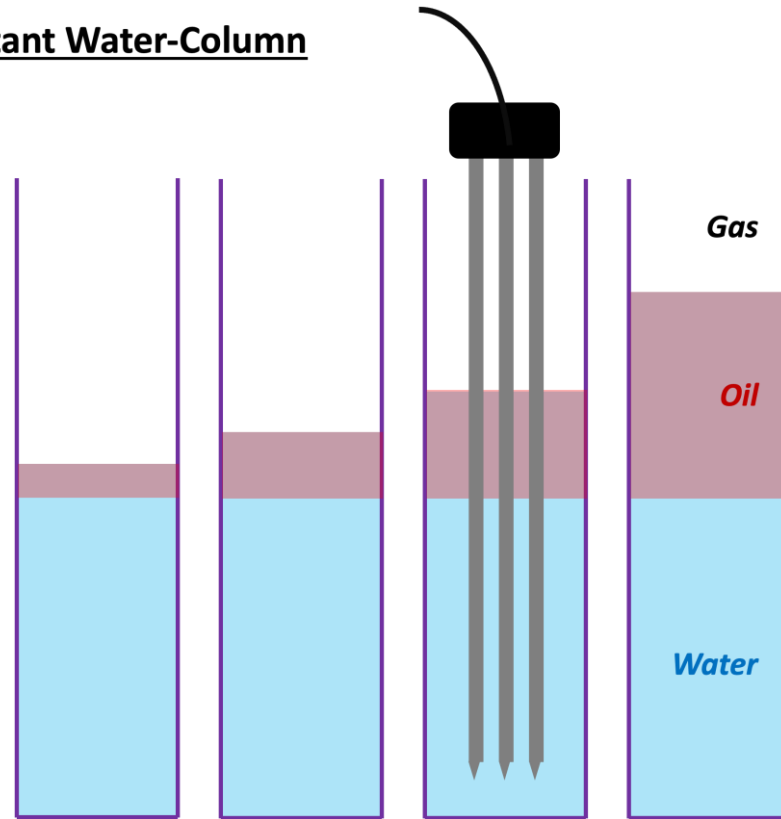


圖 29 TDR 浮油監測之室內試驗方式示意圖

實驗儀器包含 TDR3000、玻璃直立圓筒以及感應元件，以下逐一介紹：

1. TDR3000

TDR3000 為德國 SYMPULS 公司製造，其可以產生一階脈衝進入纜線，若搭配多工器，則可以同時量測多個頻道 TDR 感測器，若是搭配資料擷取器，則能夠具有可程式化及自動化量測的功效，詳細規格，如表 1，可用於量測土壤體積含水量、土壤體積電導率與岩石變形監測等。本研究將 TDR3000 連接現有的資料擷取器(筆記型電腦)，並透過本研究團隊自行研發撰寫的程式進行資料擷取與分析。

表 1 TDR3000 規格



垂直系統(Vertical System)	
輸入(Input)	50 Ω ,SMA-Connector
上升時間(Rise Time)(10-90%)	80 ps
帶寬(Bandwidth)(3dB)	5 GHz
線路阻抗範圍(Range of Line Impedance)	0 to 1000 Ω
解析度(Resolution)	0.01%
顯示解析度(Display Resolution)	40 dots/div, 400 dots/screen
水平系統(Horizontal System)	
時間解析度(Time Resolution)	1 ps
顯示解析度(Display Resolution)	50 dots/div, 500 dots/screen
距離尺度(Distance Scale) (/div)	1 cm, 2 cm, 5 cm ... 100 m
內部測量 TDR 脈衝發生器(Internal Pulse Generator for TDR-Measurement)	
脈衝形狀(Pulse Shape)	Rectangular 24.4 kHz, app. 0.5V into 50 Ω
上升時間(Rise Time)	< 80 ps
雜項(Miscellaneous)	
電源供應(Power Supply)	4.5V ... 5.5V / 0.5A Powered over USB-port
尺寸(Dimensions)	Aluminum Case, W x H x D = 115mm x 55mm x 175mm

2. 玻璃直立圓筒

玻璃直立圓筒為模擬現地監測井內含浮油狀況，圓筒內部高度及直徑分別為 50cm 和 10cm，如圖 30。實驗可針對不同浮油厚度做分段增加浮油變化進行評估。

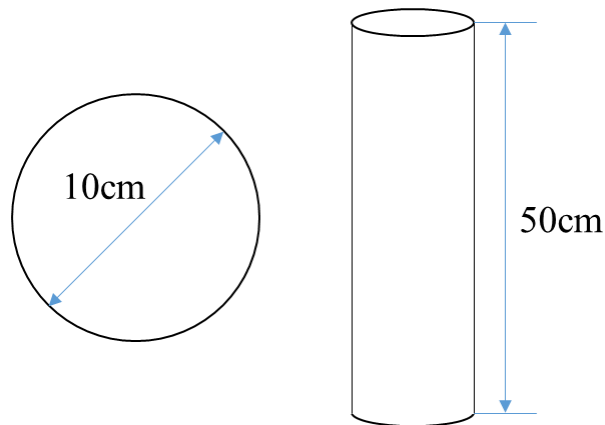


圖 30 玻璃直立圓筒尺寸示意圖

3. 感應元件

為收錄高品質且不受外部干擾的量測訊號，本團隊設計一堅固且適用於現場環境之同軸感測器，如圖 31 所示，將電磁波感應範圍限縮在感測器當中，並在感測器上留有允許液體流經之孔洞，使地下水及浮油層能順利地被感測器偵測，以排除可能接收到的外部干擾，降低量測可能發生誤判的機率。



圖 31 同軸感測器

4.2.2 室內試驗成果

本研究在室內試驗中利用自來水模擬地下水位面，再利用與模場滲漏油品電學性質相近的市售沙拉油模擬儲槽滲漏物；首先將自來水填入圓筒當中，接著將沙拉油也倒入圓筒，使其形成浮油層，最後將感應元件以直立的方式放置於圓筒內，使其穿過浮油層；以定量增加浮油厚度模擬現地因持續滲漏造成浮油累積。



本團隊於前期計畫中使用局部正規化互相關(Normalized Cross-Correlation, NCC)評估有無浮油層之間的訊號波形差異，並藉以避免由於水會變化造成的訊號平移並降低訊號雜訊以及訊號衰減的影響，其計算方法如下：

$$NCC[k] = \frac{\sum_x f[x] g[x - k]}{\sqrt{\sum_x f[x]^2 \cdot \sum_x g[x - k]^2}}$$

上式中 $NCC[k]$ 為正規化互相關數值、 $f[x]$, $g[x]$ 為基準訊號及量測訊號、 k 為座標偏移量。由於局部 NCC 方法僅作為薄層的浮油偵測以提供早期預警，本團隊透過進一步的限縮分析範圍，減少雜訊對於演算法的影響並提高分析的穩定性。由於感測器在接觸到空氣段當中接觸到不同介質之前應呈現相同趨勢的波型，而除了空氣段中也包含雜訊之外，也會使 NCC 數值對於油層偵測的靈敏度降低，因此在擷取波型訊號之前先將空氣段進行對齊，並藉由閾值盡可能將空氣段的訊號去除，如圖 32 所示，使減少空氣段對於 NCC 計算的影響，並放大有無存在浮油層波形之間差異，降低浮油層偵測方法產生誤判的機會。

圖 32 (b) 中顯示擷取波形的閾值設定，由於浮油層僅會出現於地下水層上方，因此閾值的下界可以設定在地下水層的界面以去除後續訊號的雜訊，在範例中將上下界分別設定為 -0.02 及 -0.35，此閾值會隨著感測器規格不同而需要進行調整。利用 NCC 方法進行分析後，如圖 33 所示，由於走時延遲是因為不同地下水層高度差異所造成，在此僅關注 NCC 數值的最大值以評估波形最相似處的變化，藉以消除地下水層高度差異的影響；藉由評估不同水層高度的 NCC 最大值數值，並以其最小值做為判斷浮油層是否存在的閾值，其結果如圖 34 所示，結果顯示 NCC 最大值可以有效辨別浮油層是否存在，浮油層存在的 NCC 最大值與閾值



之間尚具有一段冗餘以確保受到雜訊的影響後不會產生誤判，增加此分析方法的穩定性。

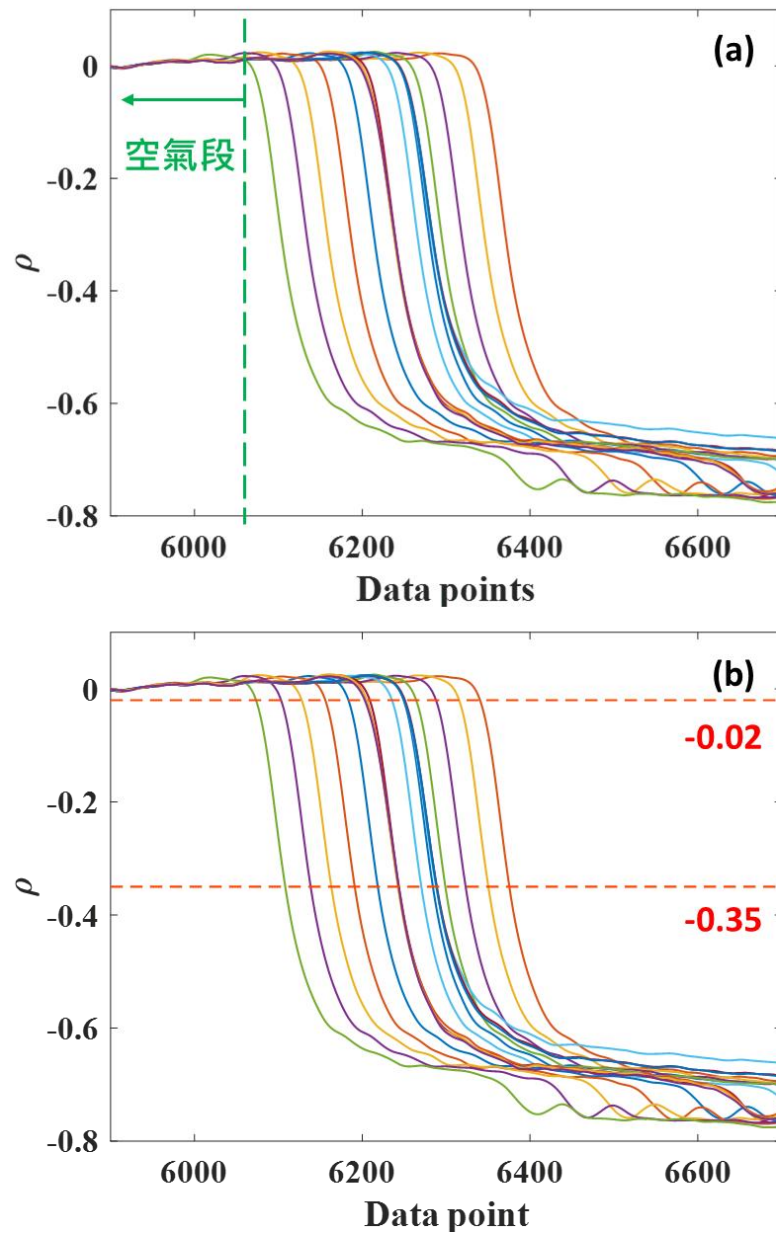


圖 32 NCC 分析波形擷取範例 (a)空氣段波形對齊 (b)擷取波形資料
閾值設定

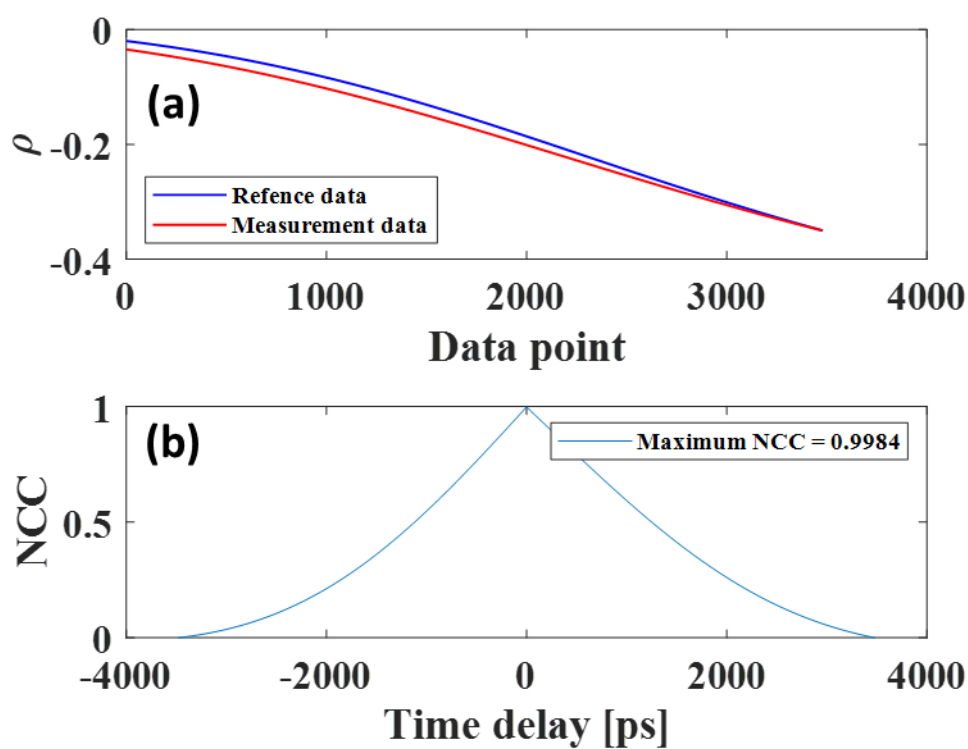


圖 33 NCC 分析範例 (a)擷取後波形，藍線為無浮油層參考波形，紅線為 5 mm 浮油層量測波形 (b)NCC 計算值

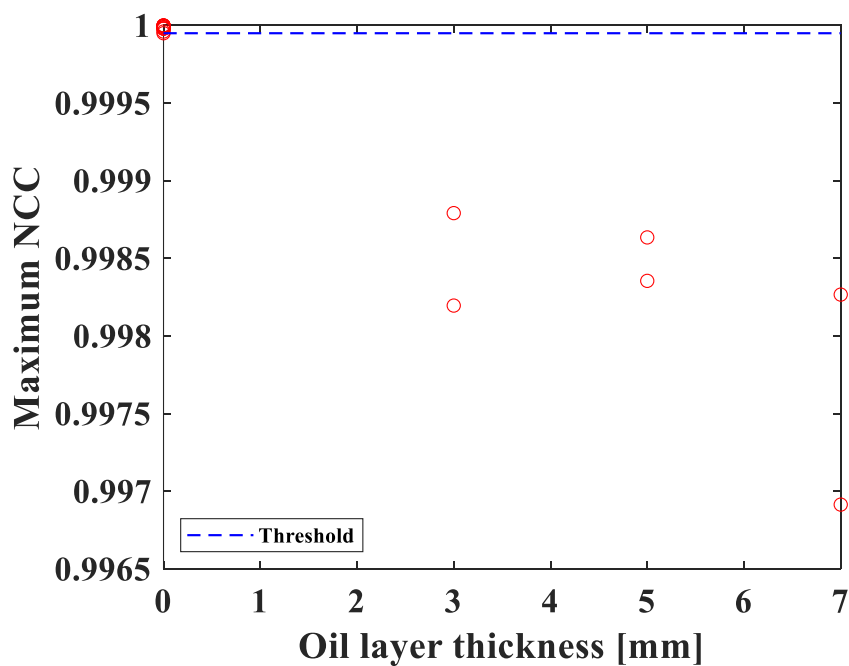


圖 34 NCC 最大值分析結果



時間域分析中，訊號容易受到雜訊影響並且須對部分訊號波形進行對齊及擷取，這些步驟為訊號分析增加不確定性，本團隊於前期計畫中提出一創新之頻率域全波形分析方法，將資料推展至頻率域進行分析，此方法透過將感測器中增加一阻抗不匹配段及創新的 Reflection-Decoupled 分析以排除量測儀器之輸入訊號影響，如圖 14 所示，並透過已知材料校正系統參數，增加量測的精度及穩定性，關於此方法說明如下：

TDR 系統的基本模式為一維 TEM 模式，並可以利用射線追蹤圖定義 TDR 訊號的波傳播，其中傳播函數

$$H(L, \varepsilon^*(f))$$

可以用來表示電磁波沿傳輸線傳播過程中的衰減和相位變化， L 代表傳輸距離、 $\varepsilon^*(f)$ 為傳輸線中介質之複介電常數、 f 為頻率，當輸入訊號進入傳輸線系統並沿著同軸電纜(Leading Cable, LC) 傳播至介面一(Interface I)時，部分入射波被第一次反射(R_1)

$$R_1 = X \cdot F \cdot \rho_1 \cdot B$$

X 為儀器輸入訊號之函數、 F 和 B 分別為訊號在 LC 中向前和向後傳播的函數，而 ρ_1 為介面一處的反射係數並可由下式計算得出

$$\rho_1 = \frac{Z_{CMS} - Z_{CLC}}{Z_{CMS} + Z_{CLC}}$$

其中 Z_{CLC} , Z_{CMS} 分別為 LC 和阻抗不匹配段(Mismatched Section, MS)中之特性阻抗。剩餘未被反射的訊號經由介面一後傳播並進入 MS，當傳播至 MS 和感測段(Sensing Section, SS)之間的介面二(Interface II)時會引起第二次的反射，而 ρ_2 為介面二處的反射係數，其中包含來自感測器的所有影響，透過 TDR 綜合波傳播模型(Lin and Tang, 2007)可以將其等效為單一阻抗以減少分析的複雜性並推導出



$$\rho_2 = \frac{Z_{cSS} \cdot \coth(\gamma_{SS} L_{SS}) - Z_{cMS}}{Z_{cSS} \cdot \coth(\gamma_{SS} L_{SS}) + Z_{cMS}}$$

$$Z_{cSS} = \frac{Z_{pSS}}{\sqrt{\epsilon^*}}, \quad \gamma_{SS} = \frac{j2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon^*}$$

其中 Z_{cSS} , Z_{pSS} 為 SS 中的特性阻抗及幾何阻抗、 L_{SS} 為 SS 之長度、 γ_{SS} 為的傳播常數、 c 為真空中的光速、 $j = \sqrt{-1}$ 。前兩次主要的反射之後進一步分析在 MS 內的多重反射，透過射線追蹤和級數收斂推導第一次反射之後的反射($R_{remaining}$)

$$R_{remaining} = XFB[H_{MS}(1 - \rho_1^2)(\rho^2)] \frac{1}{1 + \rho_1 \rho_2 H_{MS}}$$

其中 H_{MS} 為 MS 中的傳播函數，並與第一次反射(R_1)取比值得到 RDR 值

$$RDR = \frac{R_{remaining}}{R_1} = \frac{\rho_2 H_{MS}(1 - \rho_1^2)}{\rho_1(1 + \rho_1 \rho_2 H_{MS})}$$

藉由此 RDR 值可以將與儀器輸入相關的 X 、 F 、 B 函數抵銷，並使用 TDR 綜合波傳模型(Lin and Tang, 2007)之理論值最佳化擬合實際量測波形，以描繪出單一介質的介電頻譜；而在此方法中 Z_{cLC} , H_{MS} , Z_{cMS} , L_{SS} , Z_{pSS} 為系統參數，於實際量測之前只須使用已知材料進行單次校正，並且在更換儀器後亦不需重新校正，這些優勢大幅提升感測器設計的靈活性及實際量測的便利性。

在浮油量測的情境下量測材料為已知(空氣、油和水)，如圖 35 所示，藉由輸入已知材料的介電頻譜則可以量測各層材料的厚度，同樣使用 TDR 綜合波傳模型(Lin and Tang, 2007)推導 ρ_2 如下：



$$\rho_2 = \frac{Z_{pSS} \cdot \frac{ow + \tanh(\gamma_A L_A)}{1 + ow \cdot \tanh(\gamma_A L_A)} - Z_{cMS}}{Z_{pSS} \cdot \frac{ow + \tanh(\gamma_A L_A)}{1 + ow \cdot \tanh(\gamma_A L_A)} + Z_{cMS}}$$

$$ow = \frac{1 + \sqrt{\epsilon_W^*} / \sqrt{\epsilon_O^*} \cdot \tanh(\gamma_O L_O) \cdot \tanh(\gamma_W L_W)}{\sqrt{\epsilon_W^*} \cdot \tanh(\gamma_W L_W) + \sqrt{\epsilon_O^*} \cdot \tanh(\gamma_O L_O)}$$

$\epsilon_W^*, \epsilon_O^*, \gamma_A, \gamma_W, \gamma_O$ 為已知空氣、油、水之介電頻譜及傳播常數， L_A, L_O, L_W 分別為空氣、油、水之層厚度。

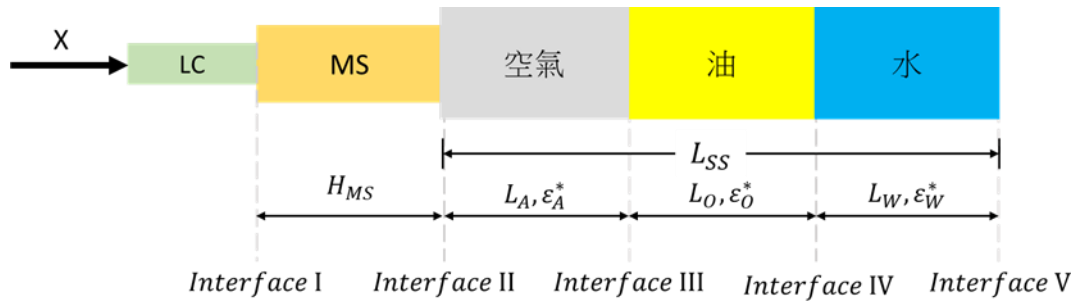


圖 35 浮油量測參數示意圖

TDR 浮油量測中，空氣層的厚度會隨著地下水位層的常時變動而變化，但可以預期的是空氣層一定存在量測當中，因此本團隊提出簡化配置的架構，此配置將空氣層代替原本人工放置於感測器中的不匹配段，如圖 36 所示，並重新推導理論公式，以進一步降低感測器製作所需要的門檻並減少所需校正的系統參數，其理論推導說明如下：

簡化配置的理论公式主要變化在於介面一和介面二中的反射係數 ρ_1 和 ρ_2 不同以及不匹配段的傳播函數(H_{MS})被空氣段的傳播函數(H_A)所取代，由於去除了人工不匹配段，介面一處的反射係數可由下式得出

$$\rho_1 = \frac{Z_{cA} - Z_{cLC}}{Z_{cA} + Z_{cLC}}$$

其中 Z_{cLC} ， Z_{cA} 分別為 LC 和空氣段中之特性阻抗。以及介面二處的反射



係數可以由下式計算得出

$$\rho_2 = \frac{ow - 1}{ow + 1}$$

$$ow = \frac{1 + \sqrt{\epsilon_W^*}/\sqrt{\epsilon_O^*} \cdot \tanh(\gamma_O L_O) \cdot \tanh(\gamma_W L_W)}{\sqrt{\epsilon_W^*} \cdot \tanh(\gamma_W L_W) + \sqrt{\epsilon_O^*} \cdot \tanh(\gamma_O L_O)}$$

$\epsilon_W^*, \epsilon_O^*, \gamma_A, \gamma_W, \gamma_O$ 為已知空氣、油、水之介電頻譜及傳播常數， L_A, L_O, L_W 分別為空氣、油、水之層厚度。經過簡化之後的系統參數包含

$Z_{CLC}, H_A, L_{SS}, Z_{pSS}$ 並需使用兩種不同的已知水層厚度進行校正。

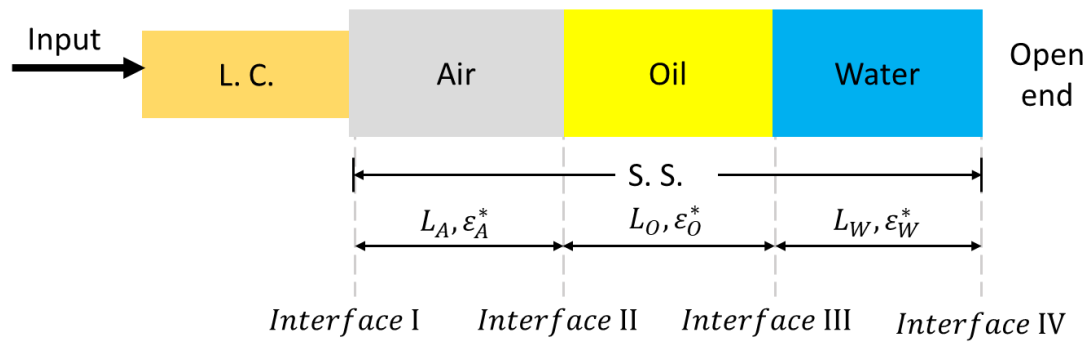


圖 36 浮油量測簡化配置參數示意圖

為更好的研究此方法的適用性，首先使用 TDR 綜合波傳模型 (Lin and Tang, 2007) 生成模擬資料，在理想條件下對於分析方法進行測試。如圖 37 所示，理想條件下的感測器系統可以明確地辨別出第一次反射 (R_1) 及後續剩餘的反射 ($R_{remaining}$)，透過快速傅立葉轉換將時間域波形轉換到頻率域後，得到模擬量測之波形的頻譜並取其比值得到 RDR 值，後續即可利用前述說明的理論模型對於量測波形的 RDR 頻譜進行擬合。

在進行量測之前，需要先對於系統參數進行校正，在校正中需要使用兩筆已知水層厚度且沒有浮油層的數據進行擬合，需要進行校正的參數



包含 $Z_r, L_{SS}, L_{W1}, L_{W2}$ ，其中 L_{W1}, L_{W2} 為已知的兩個水層厚度、 $Z_r = \frac{Z_{pSS}}{Z_{cLC}}$ 藉由比值以減少需要進行反算的未知參數，提高反算結果的穩定性。模擬量測波形中設定的各項系統參數值為 $Z_r = 1.3, L_{SS} = 0.5 \text{ m}, L_{W1} = 0.15 \text{ m}, L_{W2} = 0.17 \text{ m}$ ，在使用最佳化演算法對於 TDR 量測有效範圍內之頻譜 (1 MHz ~ 1 GHz) 進行擬合後之系統參數分別為 $Z_r = 1.3001, L_{SS} = 0.5000 \text{ m}, L_{W1} = 0.1500 \text{ m}, L_{W2} = 0.1699 \text{ m}$ ，擬合後之頻譜如圖 38 所示，在模擬資料的理想狀態下量測數據和理論模型的系統參數及 RDR 頻譜都得到很好的擬合。

在量測階段，於理論模型中輸入校正過後的系統參數以透過最佳化演算法反算未知層厚度的量測波形，由於在反算中使用的是區域最佳化演算法，在反算之前需要輸入一個合理的初始猜測值，因此使用時域分析方法 (Chung et al., 2013) 給出概略水層厚度量測值並將浮油層厚度設定為零，以上述參數作為初始猜測值進行 RDR 頻譜之擬合，結果如圖 39 所示，此方法可以量測大於 3 mm 的浮油層厚度，但到較厚浮油層厚度時，反算結果會因為時域分析方法輸入的水層厚度初始猜測值受到厚浮油層干擾，使區域最佳化演算法找尋到其他不合理的區域最小值；為解決厚浮油層量測不準確並提高薄浮油層量測靈敏度，本團隊分析量測浮油層厚度之靈敏度，如圖 40 所示，各浮油層厚度之頻譜值減去無浮油層之頻譜，由圖可知浮油層厚度變化於越高頻率段處越明顯，因此可以使用較低頻率段先進行反算獲得較為準確的水層厚度，爾後將其反算結果作為較高頻率段的初始猜測值以獲得更靈敏的浮油層厚度量測，此兩階段的反算方法可以有效的提高量測的穩定性，如圖 41 所示，第一階段以 1 MHz ~ 600 MHz 作為較低頻率段進行反算，第二階段以 801 MHz ~ 1



GHz 作為較高頻段進行反算，此方法成功的將量測靈敏度由 3 mm 推進為 1 mm。

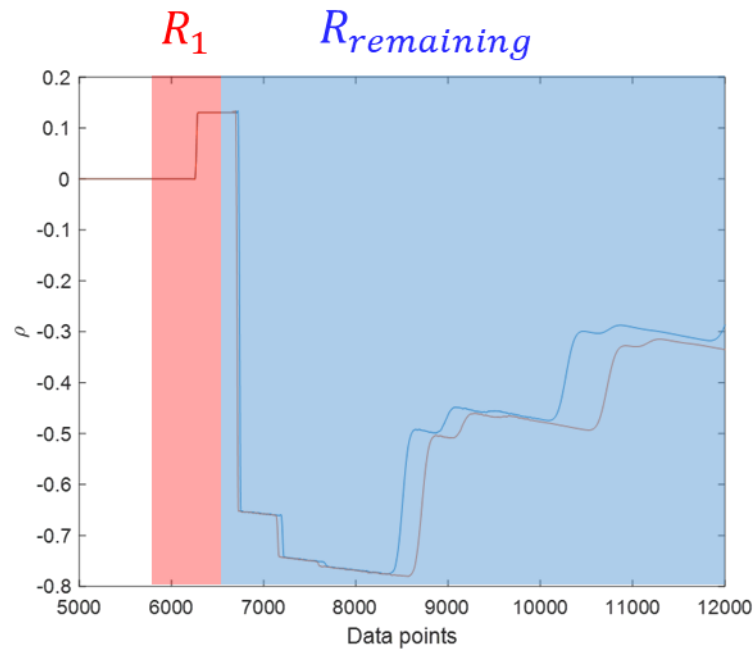


圖 37 模擬資料 TDR 時域波型圖，藍線為水層厚度 0.15 m 的時域波形，橘線為水層厚度 0.17 m 的時域波形

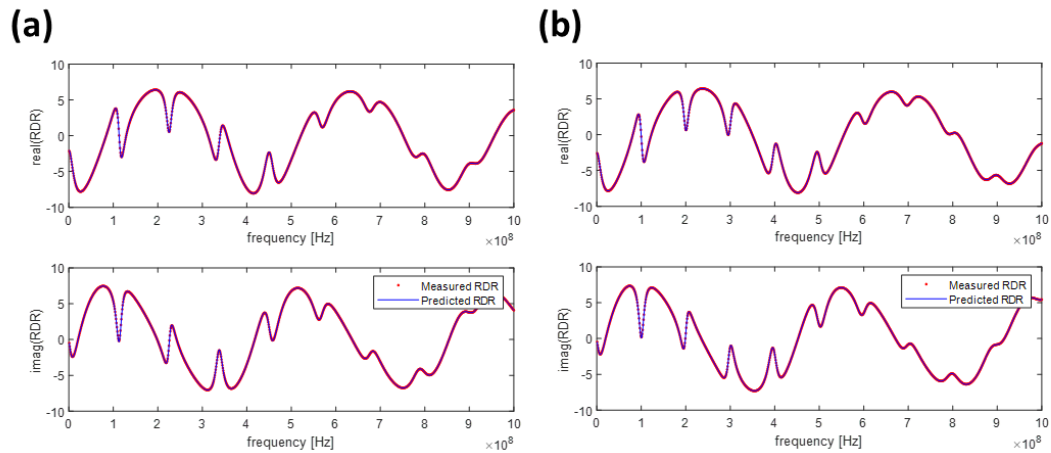


圖 38 系統參數校正之 RDR 值頻譜圖，紅色點為模擬量測波形之 RDR 頻譜，藍色實線為經過校正擬合後之理論模型 RDR 頻譜 (a) 水層厚度 0.15 m (b) 水層厚度 0.17 m

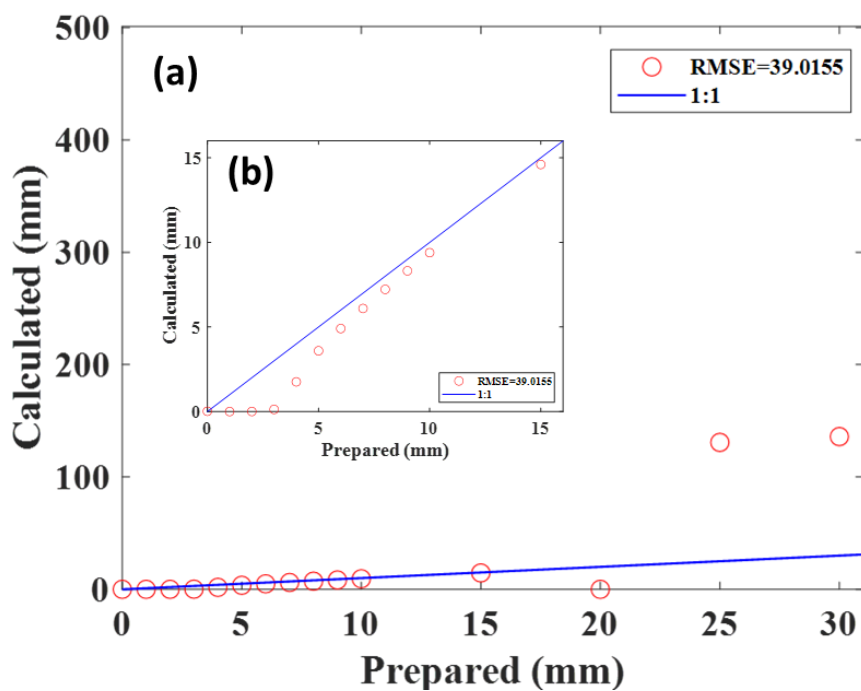


圖 39 模擬量測波形浮油層厚度反算結果圖，紅色圓圈為反算結果，藍色實線為正確值直線 (a) 0 ~ 30 mm 浮油層厚度 (b) 縮小範圍到 0 ~ 15 mm 浮油層厚度

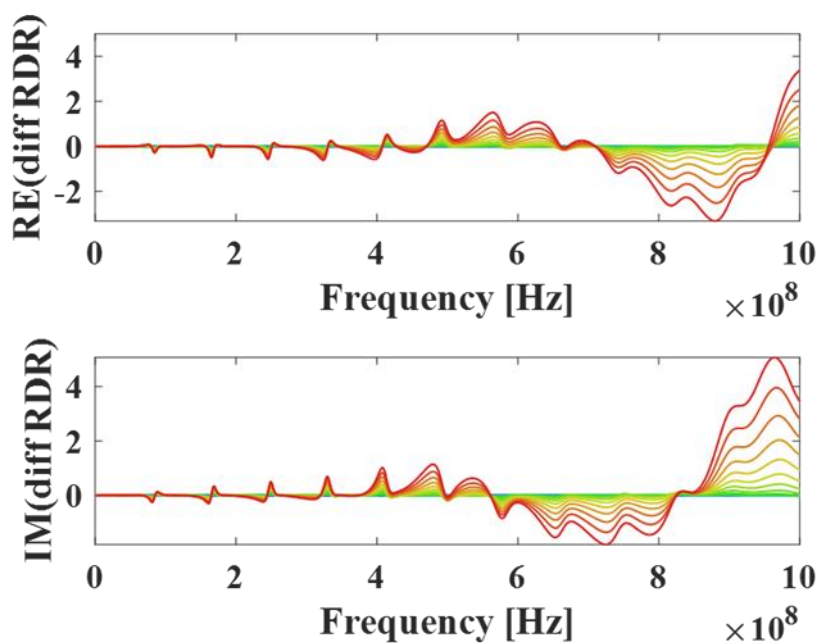


圖 40 浮油層厚度之 RDR 頻譜差異圖，以零浮油層厚度為基準值

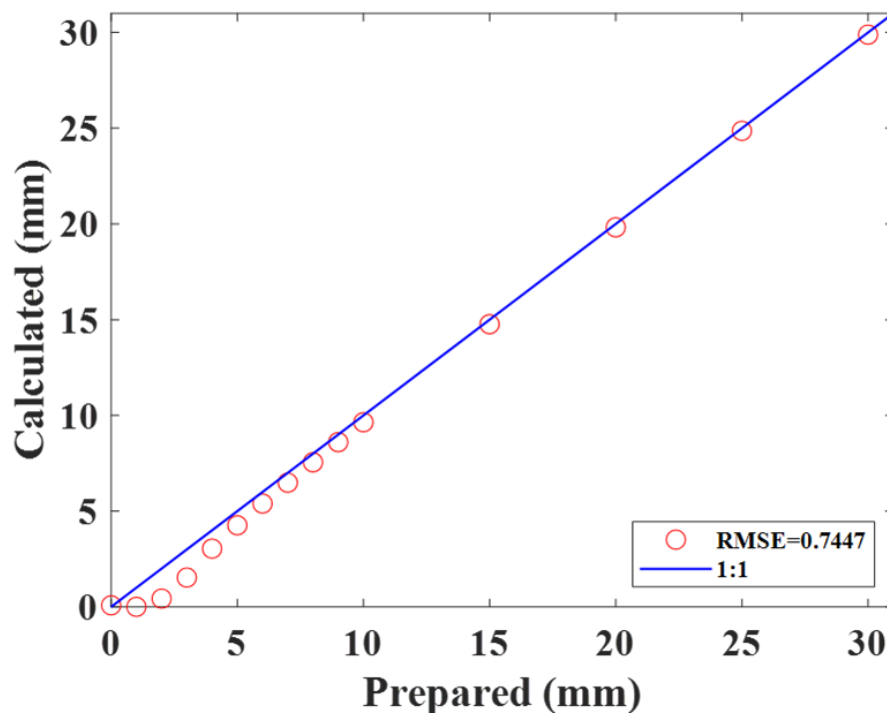


圖 41 兩階段反算模擬量測浮油層厚度結果，紅色圓圈為反算結果，藍色實線為正確值直線

在實際量測當中，達到藉由對感測器的精密加工到達近似於上述模擬中的理想狀態相當困難，需要耗費大量時間及成本進行多次調整及改進。為使 TDR 量測方法所使用感測器的製作門檻更加簡易，本團隊將感測器內可能產生誤差的部分納入量測系統的理论當中，並透過適當的假設及射線追蹤分析方法推導其理論模型，如圖 42 所示，此理論模型較先前的模型中多考慮前導纜線 (LC) 與感測器 (SS) 之間的連接器所造成不匹配 (connector mismatch, CMS)，以及感測器中使結構穩定的間隔器 (spacer)，間隔器的影響可以藉由 TDR 綜合波傳模型 (Lin and Tang, 2007) 進行分析，但 CMS 的部分則需要重新推導 RDR 分析方法的理論框架，以射線分析法重新推導理論公式，推導公式簡易說明如下：

1. 由 LC 段進行傳播並遭遇到 LC 和 CMS 之間的界面時所產生的



第一個反射波 (R_1)，如圖 43 所示。

2. 由 LC 段傳播經過 LC 和 CMS 之間的界面透射到 CMS 段內的所有多重反射 (R_{CMS})，如圖 44 所示。
3. 由 CMS 段所有多重反射經過 CMS 和 MS 之間的界面透射到 MS 段內的所有多重反射 (R_{MS})，如圖 45 所示。
4. 由 MS 段的所有多重反射傳播到 CMS 和 LC 之間的界面反射之後的所有多重反射 (R_{remain})，如圖 46 所示。

經上述推導及整理之後，理論公式展開如下：

$$RDR = \frac{R_{MS} + R_{remain}}{R_1 + R_{CMS}}$$

，其中

$$\begin{aligned} R_1 &= \rho_1 \\ R_{CMS} &= (1 - \rho_1^2) \frac{H_{CMS}\rho_2}{1 + \rho_1\rho_2 H_{CMS}} \\ R_{MS} &= R_{CMS} \frac{1 - \rho_2^2}{\rho_2} \frac{H_{MS}\rho_3}{1 + \rho_2\rho_3 H_{MS}} \\ R_{remain} &= R_{MS}(R_{CMS} + R_{MS}) \frac{-\rho_1}{1 - \rho_1^2} \frac{1}{1 + \frac{\rho_1}{1 - \rho_1^2} (R_{CMS} + R_{MS})} \end{aligned}$$

，在浮油層厚度的量測當中 $\rho_1 = \frac{Z_{r1}-1}{Z_{r1}+1}$, $\rho_2 = \frac{1-Z_{r2}}{1+Z_{r2}}$, $\rho_3 = \frac{OW-1}{OW+1}$ 分別為 LC 和

CMS 界面、CMS 和 MS 界面、MS 和 SS 界面的反射係數， H_{CMS} , H_{MS} 分

別為 CMS 段、MS 段的傳播函數，且

$$\begin{aligned} OW &= \frac{1}{\sqrt{\epsilon_o^*}} \cdot \frac{W/\sqrt{\epsilon_w^*} + \tanh(\gamma_o L_o)/\sqrt{\epsilon_o^*}}{1/\sqrt{\epsilon_w^*} + (W \cdot \tanh(\gamma_o L_o))/\sqrt{\epsilon_o^*}} \\ W &= \frac{\coth(\gamma_{w'} L_{w'})/\sqrt{\epsilon_{w'}^*} + \tanh(\gamma_w L_w)/\sqrt{\epsilon_w^*}}{1/\sqrt{\epsilon_{w'}^*} + \coth(\gamma_{w'} L_{w'}) \cdot \tanh(\gamma_w L_w)/\sqrt{\epsilon_w^*}} \end{aligned}$$



，其需要校正的系統參數包括 $Z_{r1} = \frac{Z_{cCMS}}{Z_{cLC}}$, $Z_{r2} = \frac{Z_{cCMS}}{Z_{pSS}}$, L_{CMS} , L_{SS} , $L_{W'}$, L_W ,

當中 L_{CMS} , Z_{cCMS} 為 CMS 段的長度以及特徵阻抗， $L_{W'}$, $\epsilon_{W'}^*$, $\gamma_{W'}$ 為間隔器段的長度、介電頻譜和傳播常數。

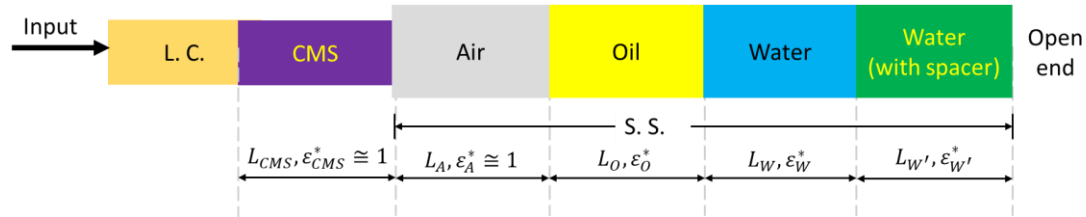


圖 42 考慮連接器所造成的不匹配段以及感測器中的間隔器

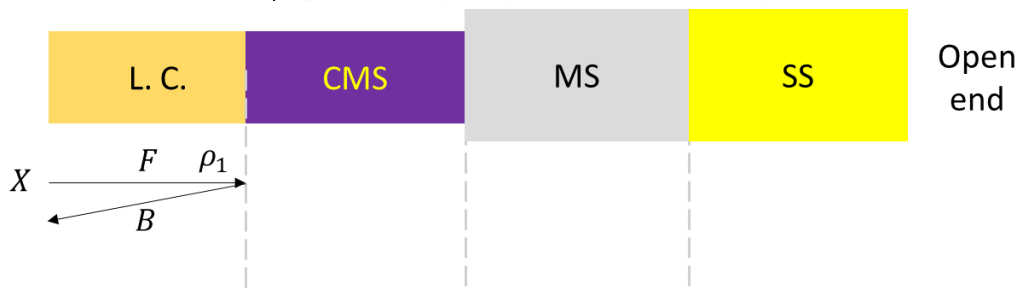


圖 43 第一反射波（黑色路徑）

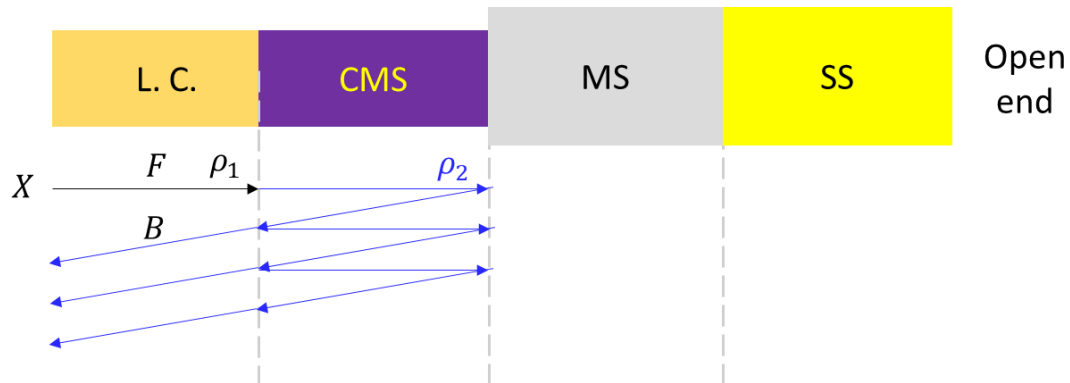


圖 44 由 LC 段透射到 CMS 段內所產生的多重反射波（藍色路徑）

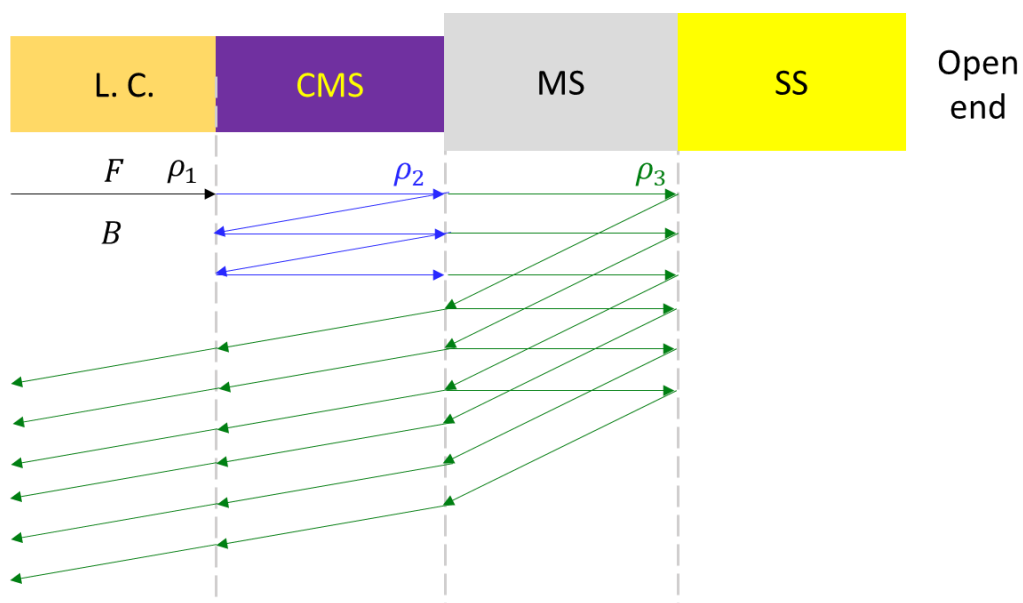


圖 45 所有由 CMS 段透射到 MS 段內所產生的多重反射波（綠色路徑）

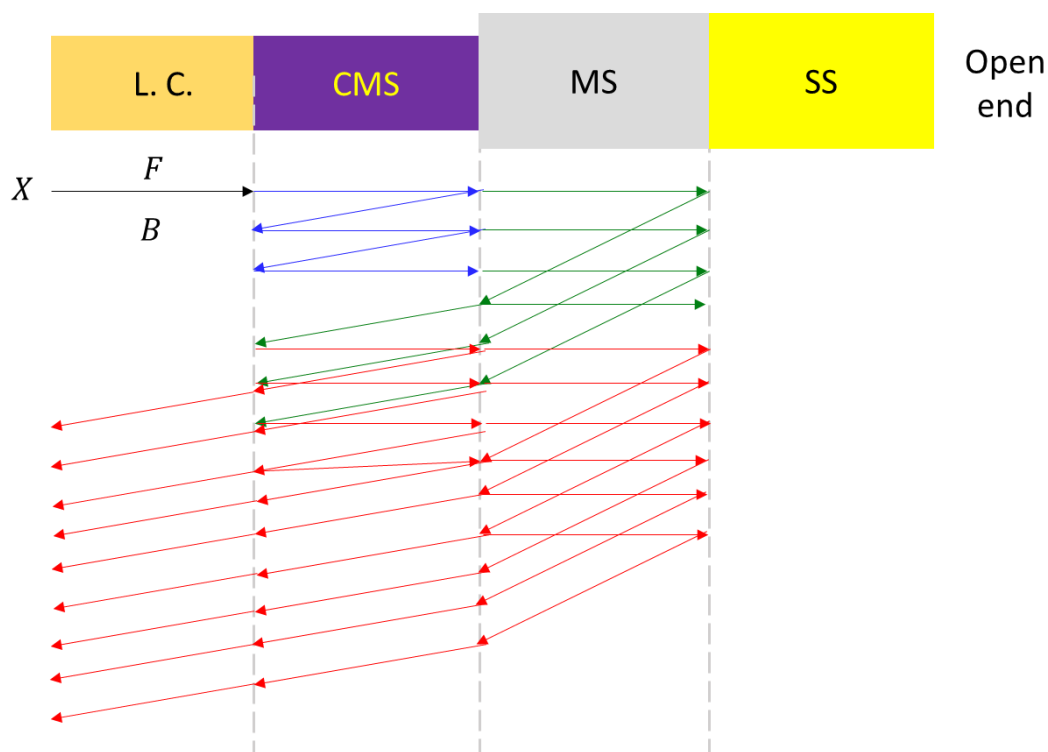


圖 46 所有由 MS 段反射到 CMS 和 LC 界面之後所有的反射波（紅色路徑）

在新的 RDR 理論架構之下，同樣使用模擬量測資料研究此方法的適



用性，模擬波形如圖 47 所示，於 MS 段之前加入一個 CMS 段並且同樣使用兩筆已知水層厚度的數據進行系統參數校正，校正後所擬合的 RDR 頻譜如所示，其顯示理論模型和模擬量測值相當好的擬合，在反算未知的模擬量測值時同樣使用二階段反算方法，浮油層厚度的反算結果如所示，反算的量測靈敏度與理想狀態下的分析結果相似，顯示此方法的適用性。

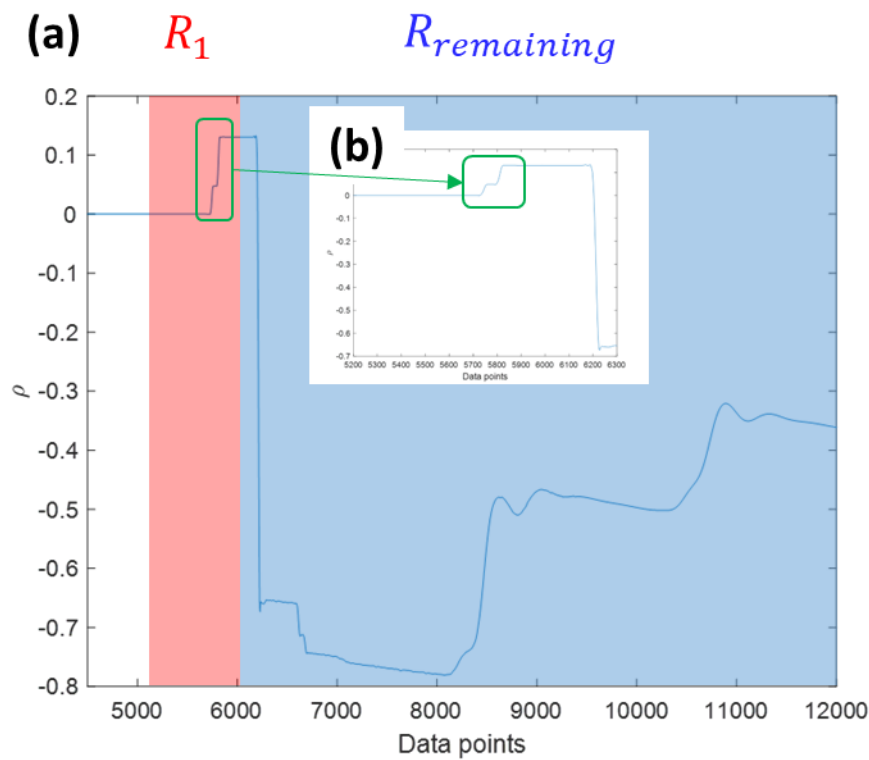


圖 47 加入 CMS 段 (綠色方框圈起處) 後之模擬量測波形 (a) 量測波形 (b) 局部放大波形

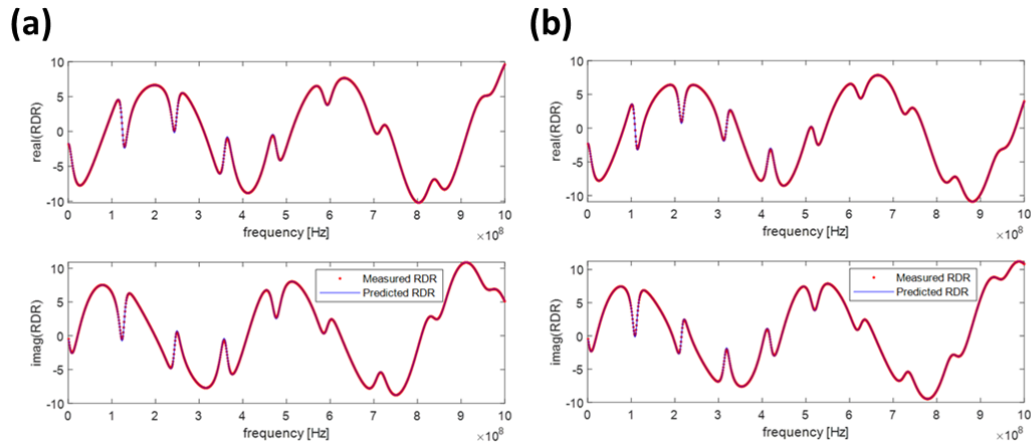


圖 48 加入 CMS 段後理論模型之系統參數校正的 RDR 值頻譜圖，紅色點為模擬量測波形之 RDR 頻譜，藍色實線為經過校正擬合後之理論模型 RDR 頻譜 (a) 水層厚度 0.15 m (b) 水層厚度 0.17 m

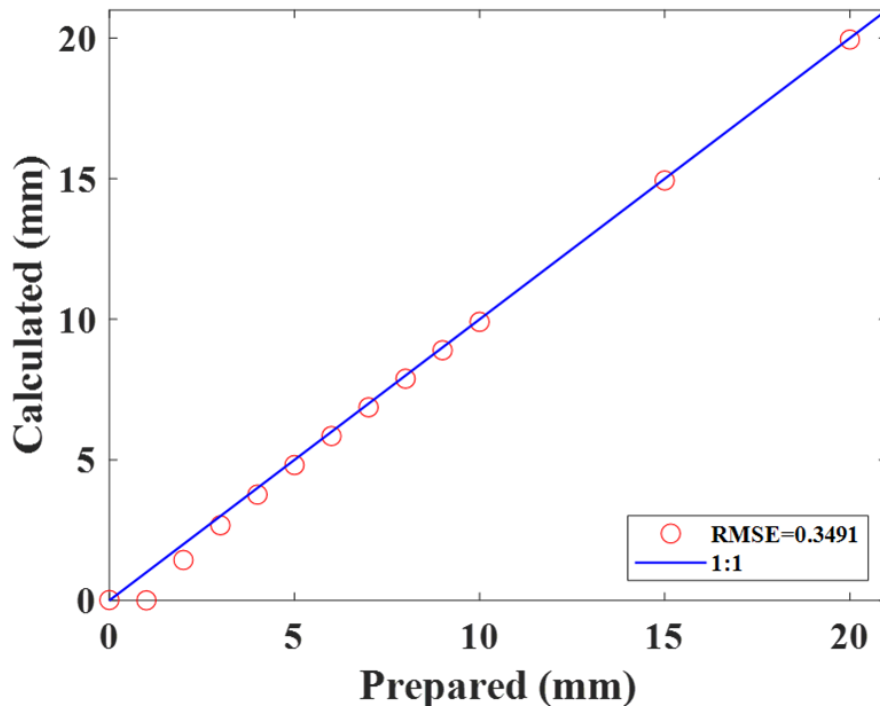


圖 49 加入 CMS 段後理論模型之兩階段反算模擬量測浮油層厚度結果，紅色圓圈為反算結果，藍色實線為正確值直線

上述 TDR 頻率域分析方法皆使用模擬資料探討其可行性，在實際應用中仍需注意量測系統以及感測器的配置是否符合理論模型中的假設。



4.3 一張圖可視化平台呈現場址之智慧監測數據

本專案期望建立一個可視化場地地球物理訊息監測平台，通過“一張綜合地圖”或“一站式服務”建立一個場地污染空間資訊管理系統平臺，開發統一的 WebGIS 人機交互操作圖形介面，實現場地污染空間資訊系統化和管理，並直觀快速圖形視覺可綜合分析應用。

本平台為場地污染環境數位化與空間資訊管理系統 DEMO 版，其架構如下：雲端一站式平台的建置架構（Platform Architecture）本平台的建置核心在於解決「多來源不同資料」的整合管理，並採用混合雲策略來平衡資料的公開透明與機密安全。系統核心架構：採用標準的三層式架構：WebGIS（前端地圖展示）+ Web Service（服務層）+ PostgreSQL/PostGIS（後端空間資料庫）。時空資料引擎：規劃導入特別引擎（PaaS 層），這是專門處理時空資料（Spatio-temporal data）的核心組件，能與 PostgreSQL 資料庫整合，實現對大量地理資訊的高效存儲、查詢與運算。現地資訊採集與傳輸（On-site Data Collection & Transmission）系統強調從多個維度獲取現場數據，並利用現代通訊技術進行即時彙整。即時傳輸技術：利用 5G 的高頻寬、低延遲特性，負責傳輸現地環境監測設備的數據，確保資料能即時回傳至雲端伺服器。不同資料整合：系統能接入原始監測數據與反演處理後的數據，並結合影像與現地數據進行座標轉換，實現多來源資料的整合分析。

重點功能為電法探勘與地層可視化(Electrical Method & Visualization): 電阻率剖面呈現 (Inverted Resistivity Section)彩虹圖視覺化，平台能將地下的電阻率數值以色彩分級呈現（例如：暖色系代表高電阻、冷色系代表低電阻）。透過電性差異，協助判讀地下是否存在污染團 (Plume)、含水層或地質異常區。反演結果展示：系統直接支



援展示經反演計算後的電阻率剖面圖，讓使用者能清楚看到不同深度（Elevation/Depth）的電性變化。

目前第一步先建立一個即時數據可視化平台，示範應用的數位化、視覺化、智慧化的加油站空間資訊系統。場地污染相關資料標準不統一，在資料處理時非常不易，本平台利用國際上行業常用的標準化資料格式標準，以 csv 與 dat 等格式，開發本計畫資料格式介面。本計畫資料類型主要有兩種：一場地 TDR 監測資料與 ERT 非侵入式探測資料等。監測大屏如圖 50 所示：

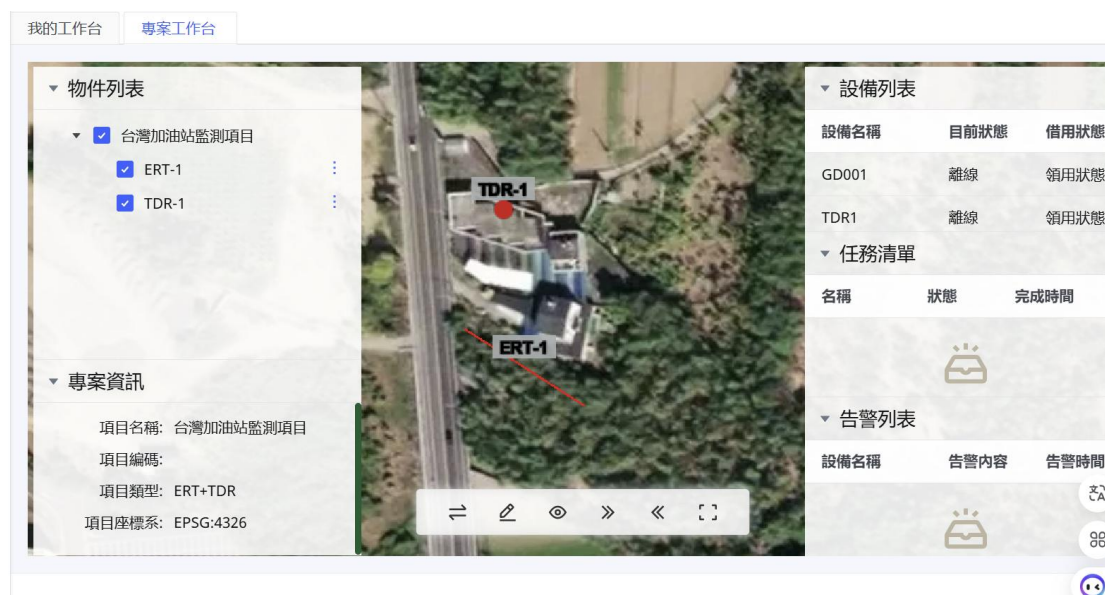


圖 50 南投某廢棄加油站監測平台

本監測平台大屏總共分為三個部分：第一部分為主頁訊息(如圖 50 所示)包含左邊分頁顯示監測方法、座標系統等相關監測目標訊息；中間分頁為監測位置底圖(目前使用 google Earth API)與監測方法位置；右邊分頁為監測設備現場訊息回傳資訊與設備狀態。第二部分點選主頁 TDR 位置，則可呈現 TDR 實時回傳浮油局部正規化互相關(NCC)數據(如圖 51 所示)。第三部分為點選主頁 ERT 位置，即可呈現 ERT 反演逆推後成果(如圖 52



所示)，也可以透過下拉式選單選取不同時間成果，這個是本平台最新亮點，平台自行開發自動計算反演逆推模組，現場主機收集完資料後，透過 4G 網路回傳數據，平台便可自動成圖，提供使用者能夠實時監測現地狀態，不用透過數據下載，再使用商用軟體進行反演逆推得到最終地電阻影像成果圖。如果想要進一步人工干預處理，便可以點選右上角數據詳情進行人工處理與描繪異常體位置。如圖 53 與圖 54 所示。圖 55-57 為現地廢棄加油站 TDR 與 ERT 設備建置照片。透過廢棄泵島加油站建置 ERT 回傳系統與太陽能供電設備，如圖 55 所示、圖 56 為將 TDR 監測主機亦建置在泵島加油站中，並放置 TDR 感測器於監測井或者是測漏管中。圖 57 為 ERT 測線位置，放置此處的原因有二：一為此區域為加油站地下水流向之下游；二為此處較為隱蔽不易被人發現。



圖 51 TDR 浮油實時監測 NCC 數值成果圖

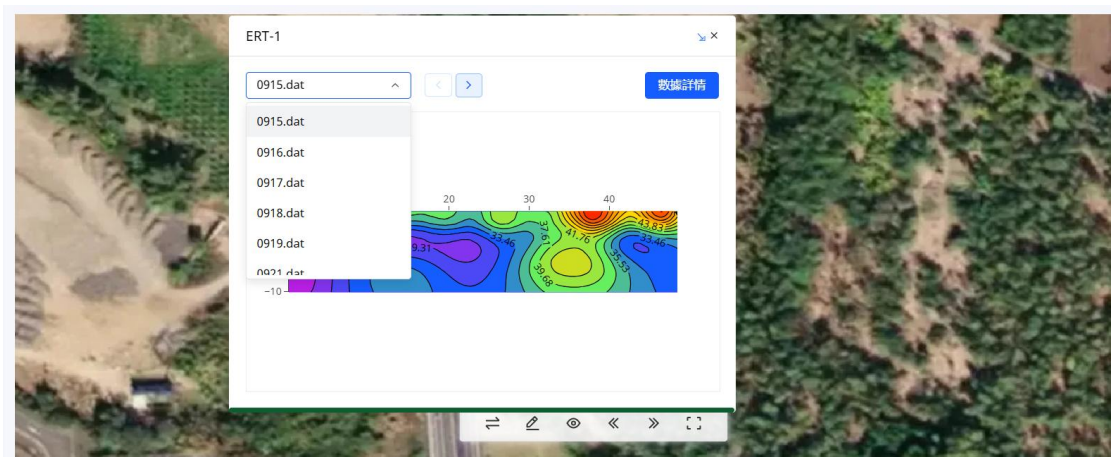


圖 52 ERT 監測成果圖

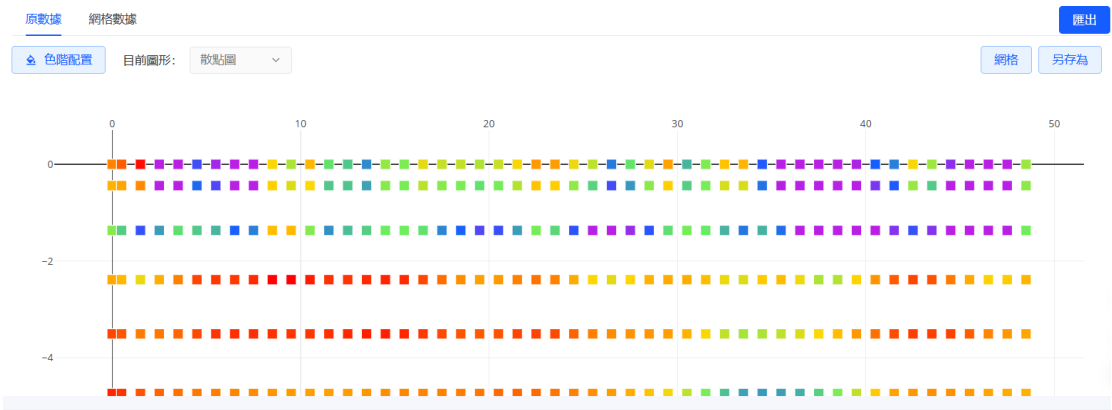


圖 53 ERT 監測數據分析成果圖

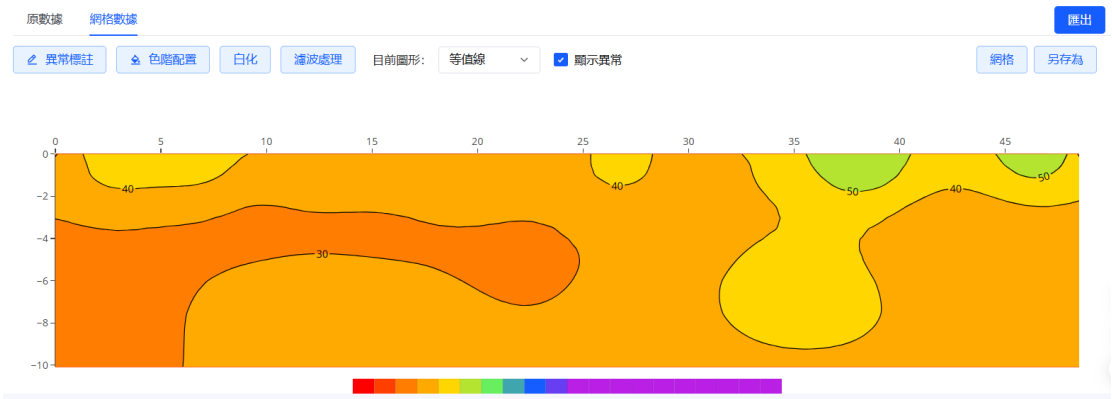


圖 54 ERT 監測數據人工處理介面圖



圖 55 TDR 回傳系統與太陽能供電設備



圖 56 建置 TDR 監測系統與 TDR 監測感測器



圖 57 ERT 監測位置(紅色線為測線位置)



第五章 結論與工作成果說明

本研究的目的是在發展浮油厚度 TDR 技術與即時 ERT 在停滯場址監測的應用，透過精進監測技術並發展穩定運作的自動化系統，配合標準化的資料整合，發展出適用於土壤與地下水污染防治的滲漏監測技術與實時數據監測平台。

本研究目前已完成工作成果說明如下：

[1] TDR 汙染滲漏標準建置與分析方法之精進：

本研究基於過去對於 TDR 量測技術的學理基礎以及模場試驗，已建立 TDR 滲漏監測系統標準流程與分析方法，並在本年度持續對於這些方法進行精進，以進一步提高資料分析的穩定性以及靈敏度，並使用模擬量測資料檢測分析方法之適用性及合理性。

[2] 建置時變地電阻調查技術監測場址邊界方法：

本研究基於時變地電阻的學理基礎以及前期試驗，進一步提升自動化資料處理之品質，建置一套即時監測遠端自動化電性監控系統，並利用適當的設計應用之適當時機與方式，對地下水風險管理提供更多資訊以利提出預警與做出決策。

[3] 建置可視化平台呈現場址之智慧監測數據：

本計畫成功建置了一個場地污染空間資訊管理系統平台（監測大屏），旨在通過「一張綜合底圖」提供即時數據。此平台的關鍵成果包括：

- 平台架構與功能：



- 開發了統一的 WebGIS 人機交互操作圖形介面。
- 平台主頁整合了三大功能區塊。
- **核心數據整合：**
 - 此平台成功整合了兩種類型的關鍵監測數據：場地 TDR 監測資料與 ERT 非侵入式探測資料。
 - **TDR 數據可視化：**點選 TDR 設備可顯示浮油監測 NCC 數據。
 - **ERT 數據可視化：**點選 ERT 設備可呈現地電阻影像反演逆推成果。
- **關鍵技術突破（自動化反演）：**
 - 本平台的一大亮點是開發了**自動計算反演逆推模組**。
 - 平台接收數據後便能**自動成圖**，讓使用者無需下載原始數據、也無需使用商用軟體進行反演，即可時時監測現地狀態。
 - 平台亦提供「數據詳情」選項，允許使用者在必要時進行人工干預處理與異常描繪。
- **現地場址建置（南投廢棄加油站）：**
 - 監測系統已成功部署於南投某廢棄加油站。
 - 利用廢棄的泵島加油亭建置 ERT 回傳系統與 TDR 監測主機。
 - TDR 感測器已放置於監測井（或測漏管）中。
 - ERT 測線佈設於加油站地下水流向的下游。

本計畫期末報告按照計畫書規劃，完成工作項目，建置現場即時監測系統與實時數據可視化監測平台，並評估實時可視化平台的成效。



九、研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）

年月 工作項目	12 months												備註
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
發展 TDR/ERT 最佳化平台算法	[Progress Bar]												
建置 TDR 監測井/測漏管浮油偵測			[Progress Bar]										
建置 ERT real-time 監測系統			[Progress Bar]										
發展一張圖可視化監測平台						[Progress Bar]							
數據即時上傳					[Progress Bar]								
工作進度估計百分比	5%	10%	20%	25%	30%	50%	55%	70%	80%	90%	95%	100%	
(累 積 數)													
預定查核點	期中		1. 建置 TDR /ERT 污染滲漏之標準建置與分析方法										
	成果		2. 建置現場 TDR/ERT 浮油自動偵測與即時監測系統 完成 real-time 地電阻監測系統(TDR 與 TimeLapse ERT 成果可視化平台)										
說明：													
1、工作項目請視專案性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。													
2、「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：(1)工作天數，(2)經費之分配，(3)工作量之比重，(4)擬達成目標之具體數字。													
3、「預定查核點」，請在條形圖上標明※符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。													
4、以 12 個月作規劃，其中期中報告書初稿提送要件需達計畫執行進度 50%以上，成果報告書初稿需於計畫結束前 1 個月提送。													



參考文獻

1. 國立交通大學防災與水環境研究中心 (2021),『電磁波時域反射法之儲槽管線滲漏監測技術評估與發展』, 行政院環境保護署委託計畫。
2. 林志平、魏殷哲、王凱、林婉婷、吳采容、鐘志忠(2020)。地工電磁波導監測技術之新近發展, 地工技術, 166, 7-16。
3. Lin, C.-P., Chung, C.-C., and Tang, S.-H. (2007). Accurate Time Domain Reflectometry Measurement of Electrical Conductivity Accounting for Cable Resistance and Recording Time. *Soil Science Society of America Journal*, 71(4), 1278.
4. Lin, C.-P., and Tang, S.-H. (2007). Comprehensive wave propagation model to improve TDR interpretations for geotechnical applications. *Geotechnical Testing Journal*, 30(2), 90–97.
5. Lin, C.-P., Tang, S.-H., Lin, C.-H., and Chung, C.-C. (2015). An improved modeling of TDR signal propagation for measuring complex dielectric permittivity. *Journal of Earth Science*, 26(6), 827–834.
6. Wang, K., Lin, C.-P., and Chung, C.-C. (2019). A bundled time domain reflectometry-based sensing cable for monitoring of bridge scour. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(5), e2345.
7. Aghda, S. F., GanjaliPour, K., and Nabiollahi, K. (2018). Assessing the accuracy of TDR-based water leak detection system. *Results in Physics*, 8, 939–948.
8. Cataldo, A., De Benedetto, E., Cannazza, G., Giaquinto, N., Savino, M., and Adamo, F. (2014). Leak detection through microwave reflectometry: From laboratory to practical implementation. *Measurement*, 47, 963–970.



9. Cataldo, A., De Benedetto, E., Cannazza, G., Masciullo, A., Giaquinto, N., D'Aucelli, G., Costantino, N., De Leo, A., and Miraglia, M. (2015). Large-scale implementation of a new TDR-based system for the monitoring of pipe leaks. *XXI IMEKO World Congress 'Measurement in Research and Industry*, 1174–1177.
10. Cataldo, A., De Benedetto, E., Cannazza, G., Masciullo, A., Giaquinto, N., D'Aucelli, G. M., Costantino, N., De Leo, A., and Miraglia, M. (2017). Recent advances in the TDR-based leak detection system for pipeline inspection. *Measurement*, 98, 347–354.
11. Woo, S., Kim, T., Lee, J., Oh, H., Youn, B. D., and Kwon, D. (2018). TDR-based Multiple Leak Detection System using an S-parameter Transmission Line Model for Long-Distance Pipelines. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 9(3).
12. Chung, C.-C., Lin, C.-P., Wu, I.-L., Chen, P.-H., and Tsay, T.-K. (2013). New TDR waveguides and data reduction method for monitoring of stream and drainage stage. *Journal of Hydrology*, 505, 346–351.
13. O'Connor, K. M. (2001). *Use of TDR to Monitor Changes in Ground Water Level and Crude Oil Thickness*. TDR 2001 Symposium.
14. Cataldo, A., Tarricone, L., Attivissimo, F., & Trotta, A. (2007). A TDR method for real-time monitoring of liquids. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 56(5), 1616-1625.
15. Lin, C. P., Wang, K., Chung, C. C., & Weng, Y. W. (2017). New types of time domain reflectometry sensing waveguides for bridge scour monitoring. *Smart Materials and Structures*, 26(7), 075014.



16. Lin, C. P. (1999). *Time domain reflectometry for soil properties* (Doctoral dissertation, Purdue University).
17. Ngui, Y. J., & Lin, C. P. (2022). Self-referencing TDR dielectric spectroscopy using reflection-decoupled analysis with a mismatched section. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, 1-15
18. Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen, N.-C., Tung, C. C., & Liu, H. H. (1998). The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary Time Series Analysis. *Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454(1971), 903–995.