

出國報告（出國類別：開會）

赴馬來西亞參加管線技術研討會 Pipeline Technology Conference

服務機關：天然氣事業部海管室

姓名職稱：葉宸璋 一般工程師

吳振文 領班

派赴國家/地區：馬來西亞/吉隆坡

出國期間：114.11.10至114.11.14

報告日期：114.12.01

摘要

本次公務出國參加「Pipeline Technology Conference」研討會，交流先進管線檢測技術、缺陷評估方案及施工工法。會議探討高解析度管線檢測技術，特別是電磁聲學傳感器在裂紋偵測的應用，以及機器學習模型針對海管懸空之判讀，提升數據分析之效率與準確性。針對不同地質條件之非開挖工法，如液化地層、鬆散砂土或沿海敏感區域等高風險環境，除了水平定向鑽掘外，可採用微隧道工法作為更安全穩定的替代方案，以避免孔壁失穩及泥漿外溢風險。在缺陷評估方面，探討了從傳統凹陷深度評估轉為基於幾何應變的凹痕形狀分析，以降低檢修成本，減少非必要支出。本次研討會所獲資訊，有助於本公司未來強化海底管線之完整性管理，並提升整體管線營運安全。

目次

摘要	1
目次	2
一、 目的	3
二、 行程	3
三、 過程	4
1. 管線內部檢測課程	4
2. 微隧道工法及水平定向鑽掘	8
3. 管線凹陷評估	11
4. EMAT 裂紋檢測技術.....	14
5. 機器學習應用於海底管線之懸空評估	15
四、 具體成效	18
1. 管線內部檢測課程	18
2. 微隧道工法及水平定向鑽掘	19
3. 管線凹陷評估	19
4. EMAT 裂紋檢測技術.....	19
5. 機器學習應用於海底管線之懸空評估	20
五、 心得及建議	20
1. 心得.....	20
2. 建議.....	21

一、目的

本公司天然氣海管肩負輸送進口天然氣至北部各大電廠及工業用戶使用之重任，為天然氣輸送之生命線，其海管檢測及維護技術與日俱進，為培訓天然氣海管維護人員之專業職能，確有必要派員赴國外汲取國際專業海管公司新型維護技術、新型儀器設備、維護工法及緊急維護新知，以增進海管維護管理技術。

目前台灣天然氣能源需求逐漸上升，為確保在管線維修期間仍能維持穩定供氣，本公司未來擬規劃興建數條天然氣海管，確有必要瞭解智慧型 IP 檢測及相關新興技術，以完善檢測維護工法之策略擇定。

二、行程

本次公務出國行程表如表 1：

表 1 行程表

日期	工作紀要
11/10	啟程及抵達
11/11	管線內部檢測課程(In-Line Inspection of Pipelines,ILI)
11/12	微隧道工法及水平定向鑽掘(Microtunnelling methods and HDD for pipeline crossings and landfalls) 管線凹陷評估(Value Your Pipeline Dents)
11/13	EMAT 裂紋檢測技術(EMAT Technology for heavy wall pipelines) 機器學習應用於海底管線之懸空評估(Application of Machine Learning for Subsea Pipeline Freespan Assessment)
11/14	返程抵台

三、過程

1. 管線內部檢測課程

透過管線內部檢測課程了解內部檢測發展史、管線缺陷及型態、非破壞檢測技術原理及工具規格標準、檢測執行的操作流程、管線完整性管理及缺陷評估。

1). 管線完整性管理及缺陷評估

管線完整性管理的目的係為確保海底管線系統在整個服役期間的完整性，DNV 公司已訂定相關標準，DNV-ST-F101定義了海底管線系統在概念開發、設計、建造、運營和除役等各階段的最低要求，以確保管線的完整性，並預先避免可能影響管線安全的挑戰，DNV-RP-F116提供了海底管線完整性評估和管理的執行依據，詳細闡述相關作法以符合前述海上標準 DNV-ST-F101，管線完整性管理的核心要素分為公司政策、人員組織、報告及通報、操作控制和程序、變更管理、應變計畫、稽核和審查及資訊管理(如圖 1)。



圖 1 管線完整性管理程序循環

管線內部檢測的核心目的是蒐集管線數據，以便進行缺陷評估，確保管線的機械完整性，並為後續的決策提供依據。

管線完整性三角(Integrity-Triangle) 缺陷評估涉及三個關鍵因素(如圖 2)：

- (1). **缺陷幾何形狀(Defect Geometry)**：缺陷 (如金屬損失/腐蝕/凹陷) 的維度或形態包括長度、寬度和深度，缺陷屬材料中的不完善之處(imperfection)會造成應力集中使管線受影響；裂紋屬線性缺陷，有長度和深度，但無寬度。

- (2). **材料特性(Material Properties)**：對於金屬損失，需了解降伏強度和極限拉伸強度；對於裂紋，則需了解韌性或斷裂韌性。
- (3). **負載>Loading**：管線承受內部或外部負載，這些負載會在管壁中引發機械應力，主要的應力來源包括內部壓力、溫度、地理災害引起的彎曲應力以及鋲接殘餘應力。

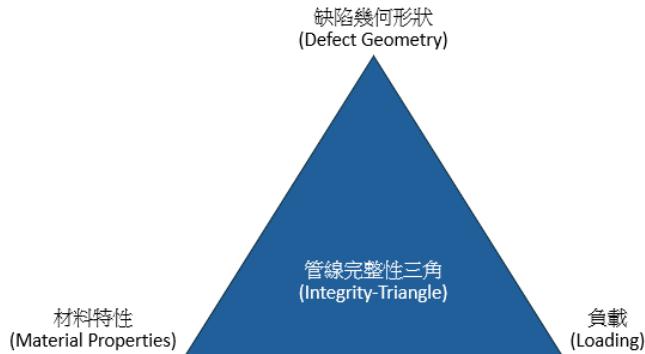


圖 2 管線完整性三角

缺陷會減少管壁的橫截面積，即使管線外部負載不變，局部應力也會增加，產生切口應力或應力峰值，缺陷評估係為計算這些局部應力，並將其與材料降伏強度或極限拉伸強度進行比較，如果應力超過降伏強度，材料將發生塑性變形造成永久變形，而如果超過極限拉伸強度，材料將會斷裂。

管線完整性的危害已被 ASME 和 API 等規範定義，包括外部腐蝕、內部腐蝕、選擇性鋲縫腐蝕、應力腐蝕裂紋、製造瑕疵、機械損傷（第三方干擾）、不當操作、氣候和外部力量（如地理災害），以及初始無害之異常因壓力循環疲勞形成有害缺陷。

2). 管線內部檢測設備及技術原理

管線內部檢測設備整體結構與驅動通常由多個不同功能之設備組成，這些設備透過萬向接頭連接，以提高工具在彎管中的靈活性，設備的移動是通過管線內介質（流體或氣體）在密封盤前後產生的壓力差驅動，而非破壞性檢測技術是管線內部檢測設備的基礎，不同的非破壞性檢測技術各有優勢和劣勢，因此選擇正確的設備技術取決於缺陷的形態，以下列舉幾種檢測方式：

(1). 磁通漏檢測(Magnetic Flux Leakage, MFL)

MFL 設備主要用於檢測金屬損失，MFL 設備通過強磁鐵使管壁達到磁飽和狀態，當缺陷存在時，磁力線會從管壁洩漏出來（磁漏），再由傳感器

測量這些信號，傳統 MFL 設備通常沿管線的軸向磁化，信號強度在缺陷與磁場線呈直角時最強，對於與磁場線平行的缺陷（如窄軸向延伸腐蝕，Narrow axially extended corrosion, NEC），MFL 信號會較弱，可使用橫向磁場設備通過在圓周方向磁化管壁來解決 NEC 問題，MFL 設備的最小檢測深度通常是壁厚(T)的10% (0.1T)，腐蝕長度準確度取決於數據採樣頻率，而結合軸向 MFL 與圓周 MFL 等不同技術之數據，可藉由交叉比對與數據整合分析提升缺陷長度的整體量測準度。

(2). 超音波檢測(Ultrasonic Testing,UT)

UT 是第二廣泛使用的非破壞性檢測技術，常被視為一種「直接測量」方法，UT 透過發射音波束並測量反射回來的時間，來計算距離和壁厚，縱波用於壁厚測量，橫波及剪切波用於尋找裂紋，一般 UT 依賴壓電探頭(Piezoelectric Transducer)產生音波，但在氣體環境中，大多數信號會被反射無法進入材料，因此需要液體介質才能工作。UT 是檢測裂紋的最佳方法，為了避免音波束與裂紋面平行而導致反射訊號不足，音波發射器通常需要傾斜45度。

(3). 電磁聲學傳感器(Electro-Magnetic Acoustic Transducer,EMAT)

EMAT 屬另一種產生超音波的方式，利用電磁感應在材料表面產生超音波，無需液體介質，因此適用於氣體管線的裂紋檢測，EMAT 還可用於尋找塗層分層。

(4). 超音波共振技術(Acoustic Resonance Technology, ART)

ART 是一種特殊形式的超音波，主要可在氣體管線中（至少50bar 操作壓力以上）測量壁厚，但此技術針對管線缺陷檢測並不適用。

(5). 潟電流(Eddy Current,EC)

EC 技術主要作為輔助技術使用，由交流電通過螺旋線圈產生磁場，在金屬表面產生感應渦電流，缺陷會改變渦電流產生的二次磁場，進而測量到缺陷，渦電流具有局限性，只能檢測內部表面的缺陷狀況，無法看到管線外部的缺陷。爰此，它常用於區分內徑(ID)或外徑(OD)缺陷，或用於檢測厚壁管線的內部缺陷。

(6). 其他專業技術設備

管線內部檢測設備的發展已不限於腐蝕缺陷檢測，亦含蓋其他檢測方

式確認管線不同特徵，以下列舉相關檢測設備及功能：

- A. 管線測徑設備(Caliper tools)可檢測幾何異常及凹陷和真圓度。
- B. 定位及測繪設備(Mapping tools)可使用慣性測量單元測量管線的中心線，識別管線位移量。
- C. 材料強度檢測設備(Material Grading tools)可基於渦電流技術，用於確認管線材料特性如極限拉伸強度和降伏強度，此設備特別適用於舊管線。
- D. 軸向應變測量設備(Axial Strain measurement)可基於渦電流技術，量測管線是否被拉伸或壓縮。
- E. 陰極保護檢測設備(Cathodic Protection,CP)可測量沿管線長度的電位值，評估管線陰極保護是否足夠。
- F. 變徑檢測設備(Multi-diameter tools)，如檢測之管線有多個直徑變化可使用變徑檢測設備，其設備變化在於傳感器載體和密封盤的設計，使其能夠開合以維持全周向覆蓋。

3).管線內部檢測操作

- (1). 管線清潔(Pipeline Cleaning):清潔是為獲得良好數據品質的先決條件，管線中的雜質及沉積物會導致設備數據回傳損失或儀器偏差以致測量距離錯誤及缺陷尺寸之誤判，管線清潔是一個循序漸進的過程，通常會使用不同工具之清管器，如帶有不同硬度的密封盤及導向盤、刷子及磁鐵，以清出之雜質及沉積物，廠商依據檢測設備所需要之清潔程度及前述雜質與沉積物之總量來判定是否進行下一階段之檢測。
- (2). 檢測前調查：廠商在檢測前會先蒐集管線與清管頭相關基本資料，以確定管線是否可通行檢測設備，如清管頭發射器及接收器尺寸、管線最小曲率半徑和操作條件（流速、壓力、溫度）。
- (3). 管線定位工具使用里程計輪測量距離，其誤差約為0.3%，為了提高定位精度，需要在管線上方地面設置標記，該系統與工具通信並記錄時間，作為距離校準的參考點。
- (4). 通行檢測設備後於現場確認檢測數據之完整性及數據量是否足夠，並進行初步判定，後續依蒐集之資料統整及進行篩選資料並計算缺陷之

修復因子(Estimated Repair Factor,ERF)判定缺陷之嚴重度，如有過往資料可進行比對，以便計算缺陷成長率、後續管線使用壽命及最大允許操作壓力。

4).某些管線因設計限制，如缺乏發射及接收器、極端的操作條件或彎曲限制，而無法使用一般形式檢測設備，可使用其他設備替代，如小管徑、短距離或無法活線作業之管線可使用繫繩工具以電纜操作，其優勢在於可將檢測設備停止於指定區域進行檢測，或可使用機器人設備，其優勢在於可自行遙控及驅動。

2. 微隧道工法及水平定向鑽掘

在跨越河川、交通要道或敏感沿海地區的地下管線工程中，需採用安全且高效的非開挖施工技術。水平定向鑽掘工法(Horizontal Directional Drilling, HDD)因其施工成熟、工期短且性價比高，長期以來被視為最普及的穿越方法，特別適用於長距離與大口徑管線的鋪設。然而，HDD 在高滲透性或不穩定地層中易發生孔壁失穩與泥漿外溢等風險；為因應這些限制，微隧道工法近年持續發展並逐漸被採用。此類工法採用微隧道鑽掘機(Microtunnel Boring Machine, MTBM)進行開挖，在鑽孔的過程提供持續的支撐，可有效避免地層沉陷與孔壁失穩，特別適用於需嚴格控制沉降、鄰近道路與鐵路等高風險區域的工程。

1). 水平定向鑽掘工法 (Horizontal Directional Drilling, HDD)

HDD 施工流程分為導向鑽掘、擴孔與拉管三階段。首先，鑽機沿預定路線進行導向鑽掘，接著以擴孔器逐步將孔徑加大，最後將預製管線由出口端拉回完成安裝。整個過程中，鑽掘液(drilling fluid)提供孔壁支撐、排渣及降溫功能，以確保鑽掘與擴孔順利進行。

HDD 的優勢為施工時間短、對地表環境干擾小、性價比高、曲線鑽掘路徑，並可達到5公里以上的長距離穿越。然而，HDD 對地層穩定性依賴較高，尤其在高滲透性或鬆散礫石層中，孔壁容易失穩並增加泥漿外溢(frac-out)風險，使其適用性受限。



圖 3 HDD 工法建議應用之土壤類型範圍

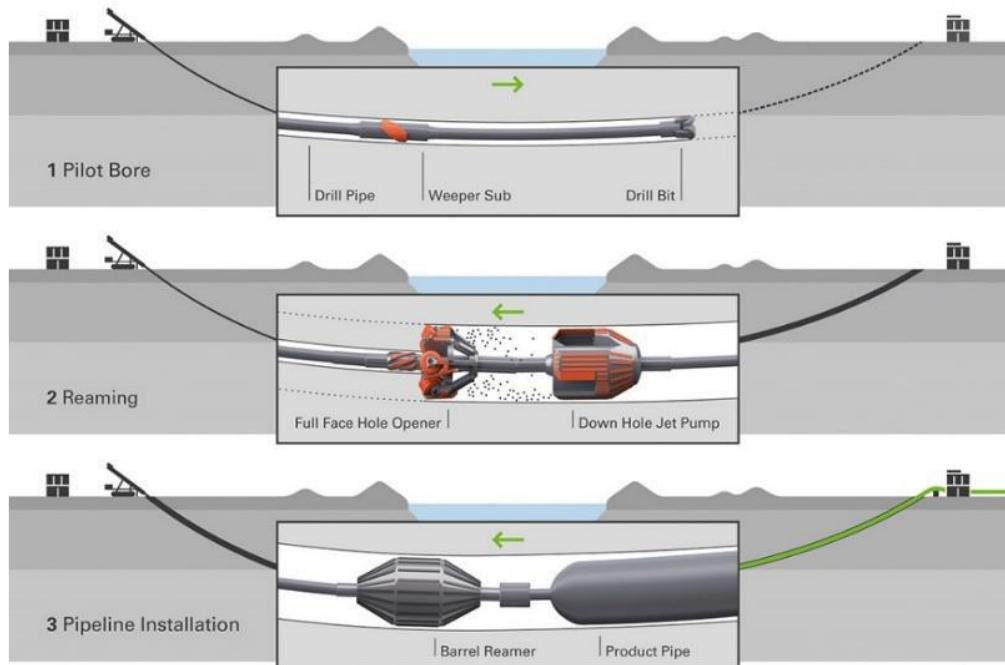


圖 4 HDD 工法之鑽掘流程(導向鑽掘、擴孔與拉管)

2). 微隧道工法(Microtunnelling Methods)

微隧道工法之核心概念是使用具泥漿循環系統的微隧道鑽掘機（MTBM）在地層內形成穩定的孔洞，同步維持面部支撐與孔壁穩定，以降低施工期間的地層沉陷風險。依施工方式與管線安裝方式的不同，常見微隧道工法可分為以下三類：

(1). Pipe Jacking

Pipe Jacking 頂管工法運用鋼筋混凝土管或鋼管作為頂進管節，由起點豎井內的液壓頂進架推動管節與 MTBM 穿越地層。MTBM 在前方負責鑽掘工作並使用泥漿系統運送土渣，同時提供穩定的面部支撐，使管線在推進過程中可有效避免地層鬆動與地表沉陷。此工法因其可適應多種地質條件，包括黏土、粉土、砂土、礫石甚至硬岩，已被廣

泛用於道路、鐵路、建築物下方的穿越工程，尤其適合沉陷控制要求極高的都市環境。



圖 5 Pipe Jacking 設施

(2). Direct Pipe

Direct Pipe 結合微隧道與推管技術，為單步驟施工方式，其特色在於能夠在鑽掘過程同步完成開挖與鋼管的安裝。施工時，前方的 MTBM 持續進行鑽掘工作，後方之管道推進器推動鋼管支撐孔洞，使鋼管能夠隨推進進入地下，並於目標點回收 MTBM。由於施工過程全程具備連續面部支撐，此工法在河川穿越、上岸段或地層不穩定區域中具備優勢，能大幅降低孔壁失穩與泥漿外溢等風險。Direct Pipe 之應用直徑通常為24吋至48吋，目前在全球已有超過250件工程中成功案例，並包含許多海上風電輸電管道與海岸上岸點工程。



圖 6 Direct Pipe 之作業原理

(3). E-Power Pipe

E-Power Pipe 為針對小直徑與長距離管線需求所開發的兩階段微隧道工法，其特色在於能以小型 MTBM 執行精準的先導頂進，再利用臨時鋼製頂管提供孔壁支撐，最後將管線回拉至起點完成安裝。第一階段中，MTBM 推進至目標端並形成完整孔洞；第二階段則在回收

MTBM 後，將管線接續於臨時頂管後方並同步回拉。此工法具有施工區域面積小、環境影響低、精度高等特性，適用於10至28吋的小直徑電纜保護管、燃氣管、氫氣管與供熱管等。由於其能安全穿越低覆土、鬆散或高滲透性地層，可作為 HDD 因地質條件受限而無法施作時的替代方案，目前最長施工距離可達2公里。

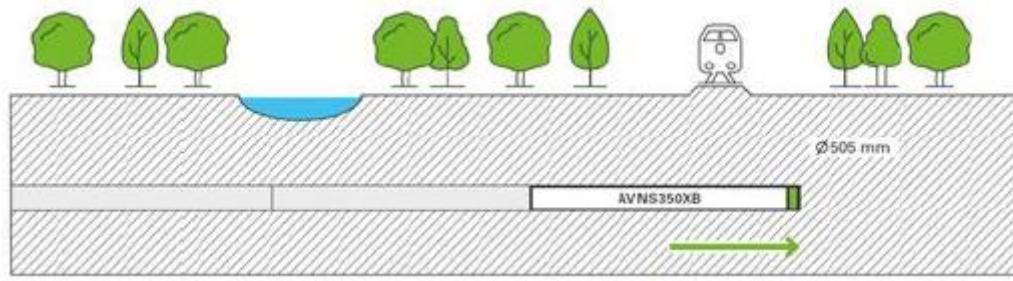


圖 7 E-Power 施工步驟第一階段：使用臨時鋼製頂管進行導引鑽孔

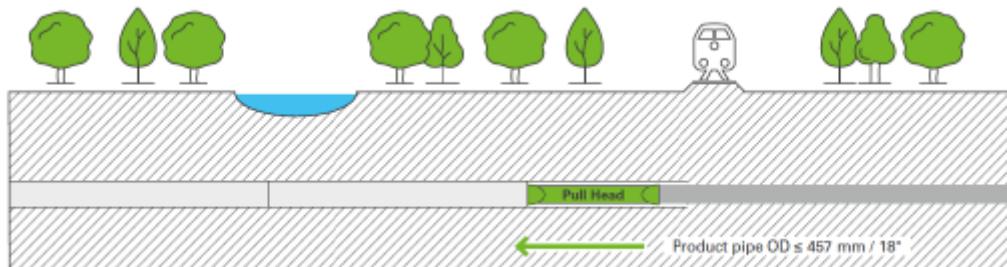


圖 8 E-Power 施工步驟第二階段：回拉臨時鋼製頂管並同步拉入管線

3. 管線凹陷評估

在管線的製造、運輸、施工或營運過程中，凹陷（Dents）是常見的幾何損傷。雖然大多數的凹陷屬於良性，但部分凹陷可能因形成時的裂紋導致立即失效，或在長期營運中因循環負載導致疲勞失效。早期評估凹陷主要依賴簡單的「深度」標準，然而，由於實際案例的凹陷通常由岩石或挖掘機鏟斗(海底管線為拖網、錨擊)造成，形狀複雜且不規則，單純的深度數據無法準確反映其風險。為了避免遺漏潛在風險，舊有的深度評估方法必須設定得非常保守，這導致營運商經常花費高昂的成本與時間，去開挖和修復實際上並無安全疑慮的凹陷。

1). 凹陷的成因與分類

(1). 非受限凹陷(Unrestrained Dents)

非受阻型凹陷多因外力撞擊管線後異物離開管壁而形成，如第三方挖掘機碰撞、製造瑕疵或搬運過程撞擊等。此類凹陷會在首次建壓時產生 *re-rounding*（再圓化），使凹陷深度減少，但同步產生額外塑性

應變。隨後的操作壓力循環會使凹陷反覆彎曲，導致應力集中，疲勞壽命隨之降低。

(2). 受限凹陷(Restrained Dents)

受阻型凹陷則是因管線鋪設時受硬物擠壓（如岩石、木塊等）而形成，硬物持續限制凹陷變形。雖然受阻型凹陷可能更深，但由於管線與物體持續保持接觸，阻礙了管線的再圓化，這類凹陷通常比非受限凹陷更深，但因外物的束縛減少了壓力循環下的彎曲幅度，其疲勞壽命反而較長。然而，此類凹陷更可能伴隨外部包覆及塗層破壞，引發局部腐蝕問題，仍需密切監控。

2). 凹陷的失效機制

凹陷失效模式主要包含超出材料極限的應變所導致洩漏或破裂的立即失效、靜態壓力下的延遲失效，以及長期操作壓力循環造成的疲勞失效。此外，凹陷若位於鋸道附近，鋸道中的微小缺陷可能在凹陷集中應力下出現裂縫，使鋸道相關凹陷的失效風險更高。

3). ILI 的凹陷檢測

1970年代 TDW 公司開發的 Kaliper 工具主要用於檢查管徑，其解析度為 5%OD，僅能提供有限的幾何資訊。近年來，多通道及高解析度的變形檢測工具(DEF)能精確測量管壁形狀，其解析度可高達 0.5~1%OD。



圖 9 Kaliper 原始線上檢測工具(左)高解析度變形檢測工具(右)

4). 凹陷評估方法

(1). ILI-based 方法

ILI-based 方法利用 ILI 測量的形狀數據，經過平滑處理去除雜訊

後，計算軸向和圓周方向的曲率來推算彎曲應變，其不需材料性質，可快速、自動化地評估大量凹陷，並以 ASME B31.8 的應變限值判定是否需要修復，是目前最常用的方法，但無法計算凹陷在再圓化過程產生的塑性應變（因測量的是再圓化後的形狀），為保守之評估方案。

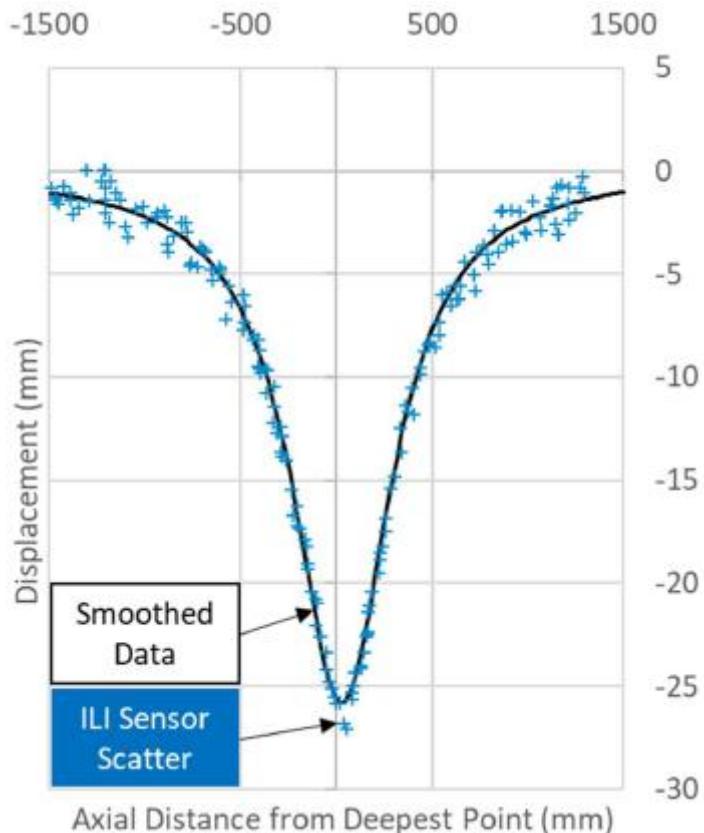


圖 10 經平滑處理後的 ILI 資料

(2). Indenter-based 方法

Indenter-based 方法使用有限元素分析(FEA)模擬凹陷形成過程。通過調整虛擬壓頭(Indenter)的形狀和尺寸，直到模擬出的最終形狀與 ILI 測量形狀相符。相對於 ILI-based 方法更準確，能包含再圓化效應的應變，被 API RP 1183 列為 Level 3 評估方法；但需取得管線材料資訊、建模，且無法自動化，多用於高風險凹陷之深入分析。

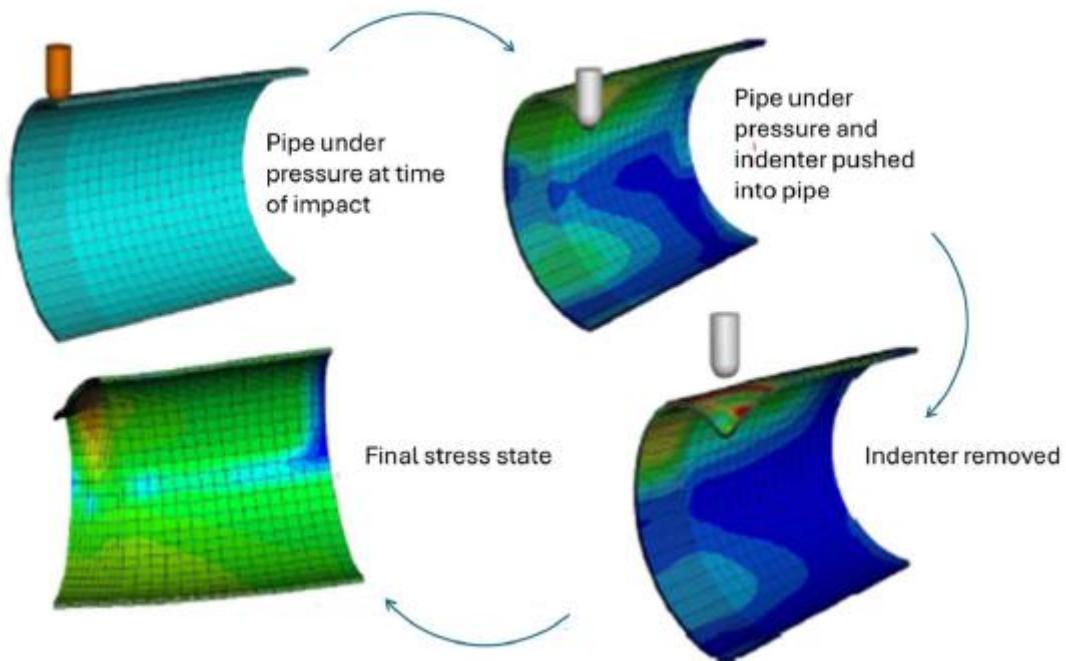


圖 11 有限元素法模擬凹陷之形成及壓頭形狀

5). 凹陷疲勞壽命評估方法

透過 FEA 計算凹陷處的循環應力，並利用 ILI 測量的凹陷形狀建立線性彈性有限元素模型，再施加壓力範圍以取得壓力與應力的關係，並結合雨流法(Rainflow analysis)和 Miner 線性累加損傷法則來評估。

凹陷評估不應僅依其深度，而是應全面考量形狀、局部應變、應力分布、鋸道品質及刮傷等複合因素。採用高解析度 ILI 與標準化的先進評估方法，不僅可提升管線完整性管理的準確性，也能避免不必要的挖掘與維修成本，使營運者能真正「重視並善用凹陷資訊」，做出更合理、可靠且經濟的完整性決策。

4. EMAT 裂紋檢測技術

電磁聲學傳感器 (Electro-Magnetic Acoustic Transducer,EMAT) 是一種非接觸式超音波檢測技術，可在無需液體媒介的情況下，於金屬材料內部產生並接收超音波訊號，因此非常適用於天然氣等氣體管線的內部檢測作業。

EMAT 的作用原理包括**勞倫茲力 (Lorentz force)** 及**磁致伸縮效應 (Magnetostriction)**，透過上述兩種物理機制，EMAT 能直接在鋼材內部激發水平剪切波，並沿管壁圓周方向傳播。當震波遇到裂紋、未鋸透、未熔合、銳邊腐蝕等平面類缺陷時，會產生反射或散射波，由接收端感測並經訊號分析後重

建缺陷影像。

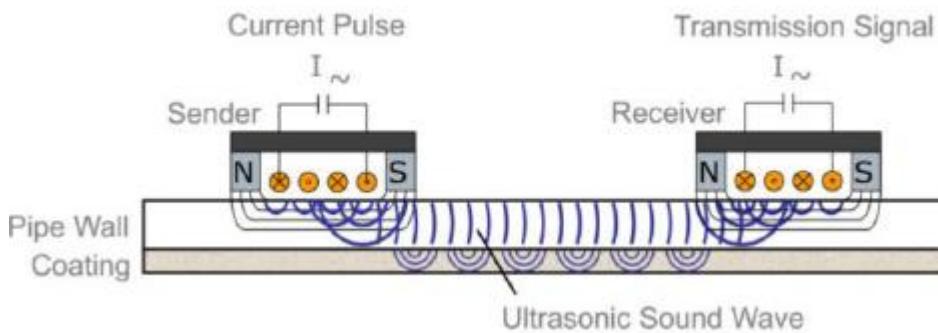


圖 12 EMAT 原理

EMAT 的檢測效能取決於傳感器至管壁距離、能量輸出及周向解析度。目前檢測能力最高約至48吋管徑、壁厚上限16.4 mm。



圖 13 EMAT 檢測器(48 吋)

5. 機器學習應用於海底管線之懸空評估

傳統海底管線懸空評估需考慮超過250項設計、環境及操作參數，流程複雜且依賴大量假設，容易導致不確定性與主觀性。機器學習提供一種以核心資料為基礎的快速方法，只需輸入少量高影響力特徵（如懸空長度、懸空高度、管徑）即可進行判別，可用於加速評估與後續自動化檢測（如 ROV 視覺系統）。

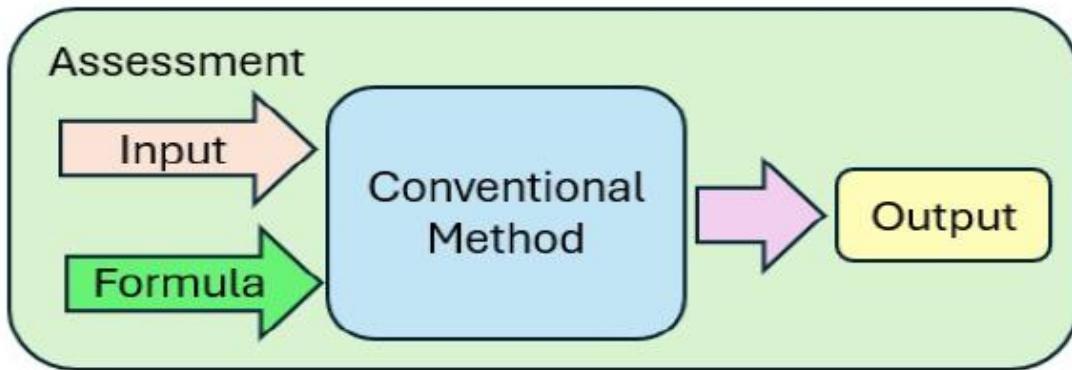


圖 14 傳統海管懸空評估流程

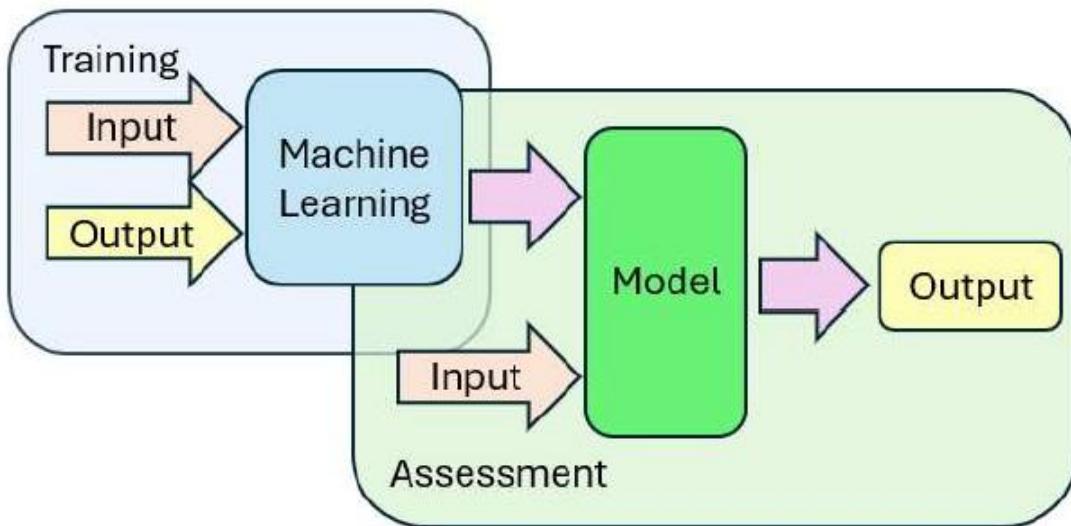


圖 15 機器學習模型海管懸空評估流程

1). 方法概述

採用監督式二元分類模型，輸入值為懸空相關參數，輸出為合格/不合格之評估結果。蒐集傳統方法之歷史資料作為標記資料，再透過多種機器學習演算法（Logistic Regression、Decision Tree、Random Forest、Gradient Boosting、SVM、KNN、Naive Bayes、Neural Network、LDA）訓練模型。

2). 核心特徵及數據處理

專注於3個可視化的核心特徵(懸空長度、懸空高度及管線外徑)，並將特徵標準化來消除偏差，確保所有特徵對模型有同等的影響力。另因數據量有限，透過 Bootstrapping 模擬數據變異性並提高模型的泛化能力，對於數據量較少的資料，此方法較為有利。

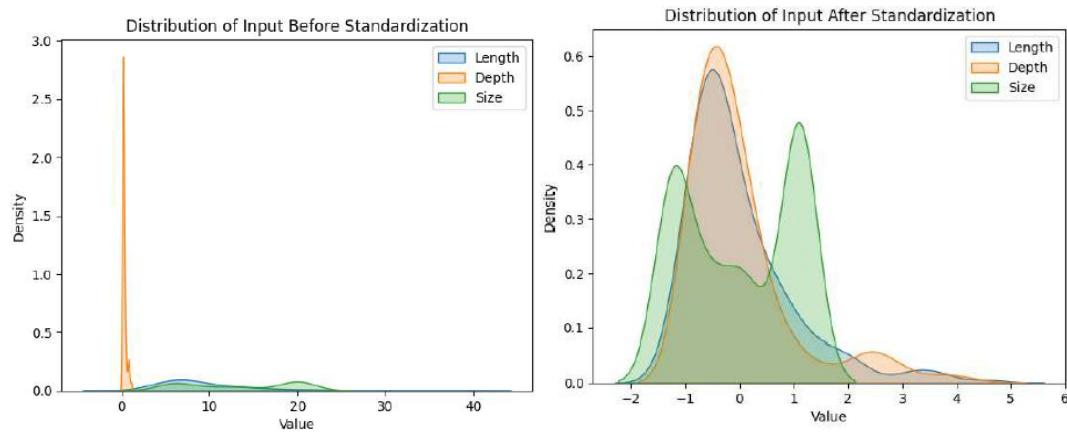


圖 16 特徵標準化前後之影響力比重差異

3). 模型評估與指標

建立54種不同模型情境（含資料處理方式、訓練/測試比例、分類算法），並以10,000次隨機重複訓練方式評估所有模型的統計穩定性，以確保模型結果不會受單次資料切分或隨機初始條件影響，使評估更可信、更具工程適用性。並以混淆矩陣匯總預測分類與實際分類的結果，包括真陰性(TN)、假陰性(FN)、假陽性(FP)和真陽性 (TP)。

		Actual Condition		
		FALSE	TRUE	
Predicted Condition	FALSE	TN	FN	Predicted Negative
	TRUE	FP	TP	Predicted Positive
		Actual Negative	Actual Positive	

圖 17 海管懸空評估之混淆矩陣

混淆矩陣中的四種類別定義如下：

真陰性 (TN) 表示實際為可接受，模型預測亦為可接受；

假陰性 (FN) 表示實際為不可接受，但模型誤判為可接受，可能會導致管線失效；

假陽性 (FP) 表示實際為可接受，但模型誤判為不可接受；

真陽性 (TP) 表示實際為不可接受，且模型預判亦為不可接受。

模型分數計算原則如下說明：

$$ModelScore(\text{模型分數}) = Accuracy(\text{準確率}) \times Recall(\text{召回率})$$
$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$
$$Recall = 1 - FNR = \frac{TP}{TP + FN}$$

4). 結論

Decision Tree、Gradient Boosting、Random Forest 為整體表現最佳的三大演算法，其評估結果與傳統 DNV-F105 規範的評估比對達 98.17% 一致性。另 Decision Tree 速度最快且模型最小，其模型大小比 Random Forest 小 120 倍，比 Gradient Boosting 小 40 倍，並且在訓練速度上快了 50~200 倍以上，模型分數高達 0.9920。

四、具體成效

1. 管線內部檢測課程

以本公司天然氣既有海管為例，目前定期執行 IP 檢測工作，並依每次檢測結果，調整下一次檢測頻率，以確保海管操作安全，有關海管陰極防蝕保護部份係以加裝手鍍式犧牲陽極塊(鋁鋅合金)進行保護海管，其永安通霄海管設計年限為 60 年，台中通霄大潭海管設計年限為 50 年，本公司每年均以水下遙控載具(加載陰極防蝕測試系統)進行陽極塊電位測試，每 5 至 10 年以 IP 檢測工作檢視全線海管腐蝕狀況，經本次研習後得知管線內部檢測設備亦有能檢測管線陰極防蝕電位之設備，相關說明如下：

- 1). 陰極保護電流繪圖(Cathodic Protection Current Mapping,CPCM) 可直接從管線內部精確定位、識別、測量並輸出所有 CP 電流源，以及 CP 漏洩、干擾和間隙，無需依賴其他管線外檢測技術，CPCM 技術採用專門設計的檢測設備，量測管內陰極保護電流流動所造成的管材電壓降，電壓降被轉換為電流值，並繪製成與管線長度的關係圖，由此產生的數據有助於更佳的定義、定位和量化管線內的陰極保護問題，甚至可以幫助釐清腐蝕發生的原因。
- 2). CPCM 檢測流程所需時間較傳統檢測方法要少，並且能夠 100% 接觸到整個管線。CPCM 的數據輸出包括 CP 電流（流量和方向）的圖表和繪圖，以及電

流密度、套管和管道特徵（如塗層、鋸接和彎曲）的報告。

- 3). CPCM 資料集還可以與其他內部檢測設備識別出的腐蝕情況疊加，從而全面了解管線狀況，其主要優點如下：
 - (1). 根據實際電流密度定義塗層品質。
 - (2). 定位並量化短路及鋸接點。
 - (3). 判定不受電流影響的區域。
 - (4). 辨識感應交流電區域。
 - (5). 有助於確定腐蝕發生的原因。
- 4). CPCM 系統從管線內部繪製管道陰極保護的健康狀況圖，評估電流密度和線路電流，識別整流器和連接點，CPCM 數據與腐蝕檢測數據相結合，經數據分析，可間接解釋腐蝕發生的原因。

2. 微隧道工法及水平定向鑽掘

本公司在「台中至通霄海管新舊管汰換工程」中採用 HDD 工法，透過精準的導向鑽掘順利穿越台中港南北堤，避免對港區航道、海堤結構及營運活動造成干擾，確保施工期間影響降至最低。未來「永安至通霄第二條海管」上岸段，因上岸點附近地層具液化潛勢，且屬沿海生態敏感區域，若採傳統開挖或 HDD 工法可能導致孔壁失穩、泥漿外溢及沉陷風險。因此採用 Pipe Jacking 微隧道工法，以鋼筋混凝土空心管推進方式建立受支撐之微隧道，再將鋼管由隧道內拉入定位。

3. 管線凹陷評估

海底管線相較於陸上管線具有更高的不確定性，包括海流作用、外力干擾、海床地形變化、拖網錨擊及海流沖刷造成的局部懸空等，均可能導致管線發生凹陷或與其他瑕疵共同作用。若僅以傳統深度法判斷海底凹陷風險，往往會因缺乏完整形狀資訊而過度保守，導致不必要的水下開挖與補修。高解析度 ILI 量測與有限元素評估方法可直接計算凹陷的完整幾何形狀，量化應變分布與疲勞壽命，使海管凹陷的風險定量化，降低判讀的不確定性。

4. EMAT 裂紋檢測技術

目前 EMAT 的最高檢測能力限制為48吋管徑、16.4mm 壁厚，本公司36吋海

底天然氣管線之最高壁厚為 25.4 mm，尚無法應用；惟其在裂紋、鋸接未熔合與應力腐蝕裂紋等平面缺陷的偵測能力優越，待其技術門檻達到本公司管線壁厚條件後，可依需求洽廠商進行可行性評估，以提升裂紋類缺陷的完整性管理能力。

5. 機器學習應用於海底管線之懸空評估

機器學習模型可作為快速、即時、低成本的懸空初判工具，能將傳統需耗時數天的人工評估與複雜計算，轉化為數秒鐘的自動化判讀，若此技術成熟，未來將可應用於海管外部檢測資料之初步判讀，大幅提升本公司對海管懸空風險的應變效率與整體完整性管理能力。

五、心得及建議

1. 心得

本次管線內部檢測研習講師為 ROSEN 資深工程師，從講師教學內容中得知相當多的檢測技術及原理，與之前所認知的 IP 檢測相差甚多，本公司天然氣海管係輸送天然氣，天然氣管線通常使用 MFL 設備檢測管線腐蝕狀況，現今亦有能使用不同原理之方式檢測管線之裂紋、強度、塗層、凹陷、厚度及陰極保護電流等設備，講師提到現今技術已越來越進步，廠商能依雇主之需求進而研發更新管線設備，透過檢測設備之進步，管線資料數據蒐集越完整，管線完整性將更為完善，未來本公司如有需求可考慮使用相關檢測技術蒐集管線資料，以便進行管線缺陷評估，確保機械完整性及資產安全，並為後續的決策提供依據。

在工程施工方面，不同地區之地層、環境條件及法規要求皆不同，因此非開挖工法的選擇不應侷限於水平定向鑽掘（HDD）。在液化地層、鬆散砂土、沿海敏感區域或高風險地質中，微隧道工法為相對安全穩定的替代方案。在管線設計階段應依據地質調查、風險評估與環境條件，選擇最合適的非開挖方式，以提升工程安全性與可行性。

以往對凹陷（Dents）的評估多以凹陷深度百分比作為主要判定依據，無法全面反映凹陷的真實風險，尤其是海底管線檢修成本極高，需要更精確的評估技術。高解析度 ILI 搭配有限元素分析可重建凹陷形成與再圓化過程，能更準

確計算局部應變與疲勞壽命，避免過度保守的判斷造成不必要的水下開挖與補修，以降低檢修成本，減少非必要支出。

傳統 DNV-F105懸空分析需人工處理大量設計及環境參數，流程複雜且耗時，人工判定易受主觀影響。隨著 AI 工具的崛起，讓管線懸空的評估工作只需部分核心特徵即可進行準確判別，其結果與 DNV 傳統方法有98%以上一致性，若未來能與外部檢測資料整合，將有機會成為快速判讀與完整性管理的有效工具。

2. 建議

- 1). 本公司既有海底天然氣管線過去一般使用磁通漏技術(MFL)執行 IP 檢測，主要用於腐蝕缺陷之偵測。隨著 ILI 檢測技術的發展，廠商已可依不同檢測需求，提供裂紋、凹陷、管壁厚度及陰極保護電流等多項檢測功能，未來可視管線狀況及檢測目的，評估採用不同類型之檢測設備，以提升檢測效能與完整性。
- 2). 在採用非開挖工法進行管線鋪設前，建議先完成充分且完整的地質鑽探與可行性評估，並依據施工距離、地層條件及相關法規，選擇最合適之施工工法，以確保工程安全及順利。
- 3). 有關 EMAT 裂紋檢測，本公司現有天然氣海底管線最大壁厚為25.4mm，且部分管線內部存在鐵粉沉積情形，對新型檢測技術可能造成限制。未來待 EMAT 檢測技術成熟，可洽廠商評估檢測可行性及預計成效。
- 4). 本公司海底管線部分區段行經港區，雖面臨船舶下錨之潛在風險，但目前高風險區段管線為掩埋狀態，並搭配 AIS 船舶監控系統管理。在凹陷(Dents)評估方面，歷次 ILI 線上檢測結果顯示，目前管線並無高風險之凹陷缺陷。為因應未來可能之檢測需求，建議可先行瞭解高解析度幾何量測技術，並搭配有限元素分析(FEA)進行更精確的應變與風險評估，以提升判讀準確性，避免因過度保守而產生不必要的維修或開挖成本。
- 5). 機器學習應用於海底管線懸空評估方面目前雖已展現快速、低成本且具高準確度的優勢，但仍存在假陰性(False Negative)誤判的不可接受風險。考量本公司海底天然氣管線屬關鍵基礎設施，其安全標準必須採取最嚴謹的策略。因此，在技術尚未完全成熟前，建議仍以人工執行傳統 DNV-F105懸空評估

為主，並持續蒐集相關參數資料，以利未來在模型成熟後能迅速導入，提升管線完整性管理之效率。

參考文獻

1. Beller, M. (2025). In-Line Inspection of Pipelines. Proceedings of the 2025 Pipeline Technology Conference.
2. Herrenknecht, S. (2025). Microtunnelling methods and HDD for pipeline crossings and landfalls. Proceedings of the 2025 Pipeline Technology Conference.
3. Kirkwood, M., Lockey, A., & Turner, S. (2025). Value your dents. Proceedings of the 2025 Pipeline Technology Conference Asia.
4. Hoeving, M., Yoxal, J., & Voss, J. (2025). EMAT technology for heavy wall pipelines. Proceedings of the 2025 Pipeline Technology Conference.
5. Kovač, B., & Singh, R. (2025). Machine learning applications for freespan prediction and offshore pipeline integrity. Proceedings of the 2025 Pipeline Technology Conference.