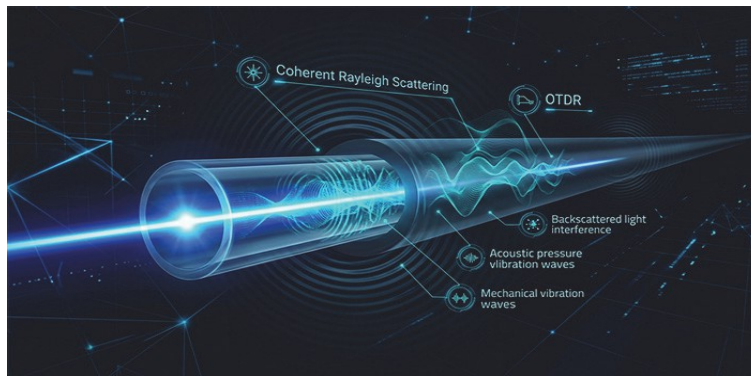


分散式光纖振動(DAS)系統技術與應用

分散式光纖振動感測技術 (Distributed Acoustic Sensing, DAS) 的核心是「將既有的通信光纖轉化為綿延數十公里的高靈敏度麥克風陣列」，原理基於相干瑞利散射 (Coherent Rayleigh Scattering) 與光時域反射技術 (OTDR)。當雷射脈衝注入光纖時，光纖內部的密度不均勻性，會導致微弱的光子向後散射。一旦光纖周圍發生機械振動、聲波震盪或外力侵入，光纖本體的幾何尺寸與折射率會發生瞬間的微米級的形變。這種形變會直接改變後向瑞利散射光的相位，導致干涉訊號發生變化。由此透過高速解調技術，精準分析反射光訊號的到達時間 (Time of Flight)，系統便能以公尺級的空間解析度，即時定位並還原出數十公里跨度上任何微小的振動頻率與強度，實現全時、全線的動態監測。



國家級關鍵基礎設施與邊界安防——在機場、軍事基地、邊防線以及高規設防的懲教單位等場所，傳統的視訊監控與電子圍籬常受限於視線死角、天候（大霧、暴雨、地震等）以及後續維護成本。

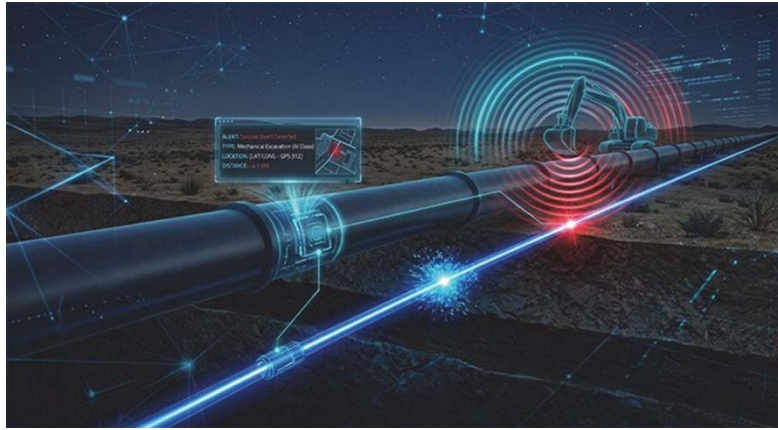
- 隱蔽佈署與周界防護：DAS系統通常將光纖直接埋設於圍籬下方、圍牆內部或地下土壤中。由於光纖本身不通電、不發熱且不發射任何電磁波，入侵者完全無法透過探測設備得知其存在。
- 精準行為辨識 (AI賦能)：當人員走動、攀爬圍籬、挖掘地道或車輛逼近時，土壤或結構傳導至光纖的振動頻率截然不同。智慧型技術加持的DAS系統整合了深度學習算法（如 CNN 與 LSTM），能精確過濾風吹草動、小動物走動等環境雜訊，實現極低的誤報率 (FAR)，並精確分類出「攀爬」、「挖掘」或「剪切」等惡意行為，提供警衛安保人員幾公尺內的精確定位。



長距離能源管道（油氣與水務）安全監測——長達數百甚至數千公里的輸油、輸氣與長途輸水管線，橫跨荒漠、山區或無人區，隨時會面臨著第三方惡意打孔偷盜、機械非法施工挖掘、以及自然災害（土石流、地滑）引發的結構破壞風險。

- 施工早期預警：當重型機械（如挖掘機、鑽孔機）在管線周邊數百公尺內進行作業時，其產生的強烈低頻振動會率先被 DAS 捕捉。系統能在機械真正破壞管線前發出預警，讓監控中心有充足的時間派遣巡檢人員前往制止。
- 洩漏次聲波捕捉：當管線發生高壓氣體或液體洩漏時，微小裂縫產生的噴射湍流會引發高頻的突發性聲波（Acoustic Emission）。DAS 能夠全天候不間斷地捕捉此類洩漏特徵波，結合分佈式溫度感測（DTS）技術進行多模態感測融合，從而實現公尺級的洩漏點定位與快速關斷，防止環境災難的擴大。

軌道交通與地下隧道智慧運維——隨著高鐵運營速度提升與城市捷運（地鐵）路網的密集化，軌道與隧道的結構健康與行車調度面臨著極高壓力的挑戰。可利用沿著軌道佈設的既有通信光纖，或備用的光纖，DAS 能將整條鐵路變成一個巨大的智能監控網。



- 列車追蹤與速度感測：列車行駛時對軌道產生的巨大動態負載，會在 DAS 訊號中形成一個非常清晰且隨時間移動的「振動能量脊」。透過時頻分析，系統可以精確計算出列車的即時位置、行駛速度、加速度以及列車長度。這可作為傳統計軸器與軌道電路的冗餘備援，提升擁塞區間的調度彈性。
- 軌道缺陷與車輪踏面擦傷診斷：當列車車輪出現不圓順或踏面擦傷（Flat Spot）時，每次車輪旋轉都會對軌道產生一次週期性的猛烈衝擊。DAS 系統在特定路段捕捉到該異常衝擊特徵後，能自動關聯該車次，提醒運維單位進行列車入庫檢修，避免軌道疲勞損壞。同時，對於隧道內的第三方非法侵入、塌方落石，DAS 也能做到秒級的即時反應。



地球物理勘探與地震學研究——在傳統的地震學與石油天然氣地質勘探中，需要佈署成千上萬個昂貴且笨重的傳統檢波器（Geophones），其佈署難度高、維護不易且空間採樣密度有限。

- 新型井下地震勘探（VSP）：將特製的耐高溫光纖電纜下入油氣井中，利用 DAS 技術可以實現高

密度、全井深的垂直地震剖面（Vertical Seismic Profiling）測量。這為地層結構成像、儲層動態監測提供了極高空間解析度的第一手資料。



- 城市黑暗光纖（Dark Fiber）再利用：科學家們開始利用都市地下已經鋪設但尚未使用的「黑暗光纖」，連接 DAS 採集儀來監測都市周邊的微震、活斷層活動，甚至是交通流量引發的城市背景雜訊。這種將基礎設施「變廢為寶」的作法，為彈性城市與地震早期預警系統（EEW）開闢了全新的研究路徑。

感測智慧化的發展前景與技術交融——展望未來，分散式光纖振動（DAS）系統將朝著更長監測距離、更高空間解析度以及多模態整合的方向加速演進。隨著「邊緣運算晶片」與「大語言/大視覺模型」在工業領域的落地，未來的 DAS 將不再只是單純的振動記錄儀，而是演變為具備自我學習能力的物理邊緣 AI 節點。

此外，DAS 與 DTS（分散式溫度感測）、DSS（分散式應變感測）的「三合一」一體化解調技術，將使一條光纖具備觸覺、痛覺與溫覺。這項技術將深入融入智慧城市的神經網路中，成為全三維數位孿生（Digital Twin）不可或缺的地基底座，全面賦能下一代智慧工業與安全社會。