

廢(污)水處理類

數位科技「大人物」於智慧水處理之運用

羅英維*、張王冠**、梁德明***

摘 要

水及污水處理特性之一為進流污染物成分複雜，且變異性高，而對於出流水的水質要求又相當得高，成為操作上的一大挑戰。典型的水處理以學理及人員經驗為基礎，但實際的狀況，卻往往複雜而多變。物聯網與人工智慧技術的提升與普及，透過 on-line sensor 所收集的水質數據、操作參數以及實驗室水質數據、透過大數據的分析，以及智能化軟體的演算，將最佳操作參數回傳至控制設備進行 real-time control，使得牽涉複雜參數的水處理問題得到解決。工研院材化所在生物處理、混凝沉澱、薄膜過濾等程序導入智慧物聯網 AIoT 技術，在自來水淨化、生活污水處理、科學園區廢水處理、工業廢水處理及水回收等均有實際案例，奠定台灣水處理產業的數位化轉型的基礎。本文以智慧物聯網中的 3 個主要構成元素－【大】數據、【人】工智慧及【物】聯網，淺談智慧水處理的運用實務。

【關鍵字】大數據、人工智慧、物聯網

* 工研院材化所水科技組
** 工研院材化所水科技組
*** 工研院材化所水科技組

技術經理
副組長
組長

一、前言

由於生產技術的提升，人們以【工業 4.0】形容現代的工業特色。大體而言，【工業 1.0】是指人們利用蒸汽動力取代勞力與獸力，機械的投入大幅提高原本人力難以完成的工作；【工業 2.0】時代，電力的運用更是快速提升產品的製作速率，加速了產業的蓬勃發展；而電腦的運用，更使工業進入到自動化的數位【工業 3.0】時代。近年來由於物聯網 (IoT, Internet of Things) 技術的崛起，將工業帶入另一個新的【工業 4.0】領域，透過物聯網技術，利用感測器連結萬物，人與機械之間、機械與機械之間可以相互溝通，使製造方式提升為客製化、智慧化，並以服務客戶為核心，產生少量多樣的市場特色。

相對於【工業 4.0】，美國柏克萊大學大衛·賽德拉克教授 (Sedlak, 2014) 於 2014 年也提出了【Water 4.0】的概念。【Water 1.0】是指運用傳統簡易的水處理技術，形成小區域的供水及廢污水排水系統；【Water 2.0】則是指機械力的運用，形成大範圍的自來水及污水下水道系統，以及中型的淨水及污水處理廠。自動化的運用，是【Water 3.0】的特色，大幅降低人力的投入、並提升處理水質的穩定度。【Water 4.0】的特色與【工業 4.0】相仿，是水處理進程的重要里程碑，IoT 技術仍是其中的特色，透過傳感器的感知及數據的傳輸及數據可視化的呈現，大幅拉近人們與水之間的關係。此外，數據所形成大數據 (BD, Big Data)，更隱藏著可供進一步探索及運用的豐富資源。為了窺探海量數據中可能隱藏的有用資訊，各種數據科學的工具相應產生，加上人工智慧 (AI, Artificial Intelligence) 技術的發展，利用類似人類感知、記憶、學習、調適、反應等機制，可將大數據進一步轉化為可供利用的訊號或資訊。因此，【Water 4.0】的特色，可以說是數位【大】(大數據)【人】(人工智慧)【物】(物聯網)的運用。

【Water 4.0】或稱為「Digital Water」，在我國一般以「智慧水務」一詞行之，它的範圍涵蓋面廣闊，包含了環境水質、水資源管理、自來水系統、廢污水處理、再生水、工業製程用水、海水淡化、輔助用水以及都市排水等，如圖 1。本文將重點放在水處理系統相關領域。由於技術層次的考量，先介紹【物】(物聯網)，而後【大】(大數據)，進而談及【人】(人工智慧)，並輔以案例說明。



(圖片來源：經濟日報 110 年 4 月 22 日水資源專輯)

圖 1 智慧水務領域

二、【物】- 物聯網 Internet of Things

2.1 智慧水務 IoT 系統架構

物聯網以無線或有線的網際網路對儀器及設備進行固定位址的連結，以形成互相聯通的網路，具有網路互聯、通訊識別以及智慧功能。物聯網的組成可分為 3 大部分：感知層、網路層與應用層。感知層是由可以感測訊號的裝置組成，水處理中常用的感測器包括 pH、溶氧、懸浮固體、氧化還原電位、流量、水位、溫度、數位電表等，可以即時得知物件所在位置的水質或操作狀況。網路層包含無線或有線的網際網路與雲端技術，透過可靠的網路傳輸功能，使每一個裝置或設備都具有各自可辨識的 IP 位址，網路層的通訊協定必須相容，才能提供安全而穩定的網路環境。當我們將物與物聯結起來，並將數據加以適當的處理產生輸出訊號後，就可以進行不同領域的應用(羅英維, 2018)。水處理過程中，最直接的是抽水機及鼓風機的變頻設施、加藥機控制閥

等，對水質的變異做出反應。此外，透過數據顯示板 dashboard，使用者可以在任何時間、地點取得相關資訊，甚至連結雲端服務平台，利用物聯網大量資訊處理與其他的物件協同運作的需求，建構一個開放式的水務服務平台 (張哲銘等，2020)。圖 2 為典型智慧水處理設施 IoT 的架構示意圖。



(圖片來源：智慧水處理技術平台)

圖 2 智慧水處理 IoT 架構示意圖

2.2 水質傳感器

水質傳感器 (water quality sensor) 是智慧水務最基礎、也是相當重要的一個環節。它能在第一時間感測水質的變化，作為後續運用的基準。唯有獲得正確有效的數據，才能順利進到智慧物聯網的運作之中。錯誤或不準確的數據，不但限制智慧水務的功能，甚至會因為系統誤操作造成難以收拾的後果。常用的水質感測器包括：酸鹼度 (pH)、溫度 (Temp)、溶氧 (DO)、導電度 (EC)、氧化還原電位 (ORP)、濁度 (Turb)、懸浮固體 (SS)、污泥濃度 (MLSS)、化學需氧量 (COD)、氨氮 (NH₃-N)、硝酸鹽氮 (NO₃-N) 及餘氯等。依其偵測的原理，可分為化學分析式、電極式、光學式及電化學伏安法。不同的方式，獲得水質數據的時間長短不同，精確度也不同；一般而言，化

學分析式所需的時間較長，準確度也相對較高。然而在講求即時性的智慧水務而言，數據取得的頻率不宜過長。在大數據的需求下，獲得數據的成本，形成另一個重要的考量。如何能夠縮短水質分析的時間、以低設置成本及操作成本取得相對準確的數據，時常是業者決定採行智慧水務的關鍵因素。電極式及光學式感應器，可以說是在這些因素折衷下，較為可以接受的監測方式。然而，在不同水質環境下，使用該類型 sensor，應考量各種干擾因素所造成數據失準的問題。

水質傳感器裝設的位置是否具有代表性，也是重要考量。安裝的深度應與池面及池底保持一段距離，同時考量水流的狀況，避開短流與死角，也應該與池壁維持一段距離，建議至少隔 1 公尺以上為宜。此外，也需要考慮反應槽的流況，完全混合 (completely mixed) 反應槽及柱狀流 (plug flow) 反應槽，sensor 安裝地點的考量也不同，完全混合槽理論上各點的濃度一致，而柱狀流反應槽污染物濃度則隨距離而削減。

在污水處理廠常見到的安裝方式為感應端以塑膠延伸管延伸至適當的水下量測位置，但由於每次需要進行清潔保養或校正時，需要將長約 2~3 公尺的 sensor 延伸桿拉出池槽，之後再安裝回去，相當費工，因此大幅減低操作人員日常維護清理的意願，導致 sensor 無法持久運作，很快便閒置無用，操作人員仍然以手持 sensor 至現場量測，再以手抄紀錄，線上自動監測形同虛設。使用單位可以考慮設置離槽監測裝置，將各種 sensor 安裝於量測槽中取代原本置於池中的方式，各槽待測水樣以沉水式抽水泵輪流抽送至量測槽中量測，並妥於數據庫中標示各槽採樣泵啟動的時間以與測值相對應。離槽監測設施需考量設置的地方及高度，方便操作同仁執行保養清潔及校正，以有效延長 sensor 壽命，並維持數據的可用度。離槽監測設施的另一個好處是多槽可共用 1 組 sensor，大幅減少 sensor 的數量、投資金額及維護成本。

線上水質傳感器使用的場所，一般屬較為惡劣的環境，特別使用在廢污水處理，sensor 很容易受到污染物結垢、堵塞，或微生物滋長而影響數據品質。使用單位可以考慮帶有自清設施的產品，可以有效維持 sensor 的清潔程度，減少人員清洗保養頻率、維持數據準確度，並延長 sensor 壽命。常用的自清方式有：氣洗、水洗、刮板、清潔刷、超音波、光學殺菌以及奈米鍍膜等，視使用環境及 sensor 污染狀況而選擇。

2.3 其他水處理傳感器

除了前述水質的部分以外，想要達成水處理過程中的智慧化，對於「量」的時效掌握，也是相當重要的部分，其中包含了：液體流量計、氣體流量計、污泥流量計等，以及液位計、泥位計。流量計的原理及方法有許多種，需考慮量測流體的性質。流量計安裝的位置至關重要，一般為了避免紊流的干擾，會要求在流量計前後至少有 5 倍及 3 倍管徑的直管段，同時避免設置在管線的高點，以避免有非滿管的現象產生。

液位的量測有超音波、雷達波、浮球式、電極式、壓力式、氣泡式等。最近以來，由於汽車主動安全系統的普遍，雷達測距儀大量使用，使得雷達波液位計的價格也顯得親民，其精準度及穩定度又比超音波高，是可以選擇的量測方式。

2.4 控制端設備

為了達到智慧控制，能夠接受智能化演算輸出，並即時做出反應的設備，不可或缺。水處理過程中，不外乎調整進流水水量、水質、曝氣量、加藥量或反應槽流速、溫度等操作條件。

1. 變頻器 -- 要達到上述目的，需要找出相對應的機械及設備，如欲調整處理水或污泥流量，最常使用的就是抽水機，然而真正能改變抽水機送量的，是電力系統中可接受頻率調整的變頻器，透過變頻器調整電動馬達轉速，進而達到改變流量的目的。除了液體的控制，風量的控制舉足輕重，生物處理過程中曝氣能耗往往是總耗電量佔比最重的一個部分，曝氣量由鼓風機供應，一般均透過改變變頻器的頻率，達到風量調整的目的。變頻器為水處理智慧控制中不可或缺的元件，技術成熟度高，各種大小馬力的電動機都可以找到相對應的變頻器。絕大多數的變頻器都接受數位化自動控制，同時具有可將該設備相關用電資訊如電壓、電流、功率等，數位化輸出的功能。
2. 控制閥及驅動器 -- 控制閥的功能主要有 3：開及關閉管線、調整流量及轉變流體方向。當閥件連接電動驅動器，就能達到自動控制的目的。智能化操作，要求的不只是 ON/OFF 全開全閉的操作，它還需要達到能準確控制流量大小的目的，因此就得憑藉能進行比例控制的電動驅動器。閥的種類繁多，在配管中使用量相當大，常用的有閘閥、蝶閥、球閥、球型閥、逆止閥、栓塞閥及隔膜閥，視其用途及輸送流體而選用。在水

量及曝氣量的控制中，偶爾也會用調整閥門開度大小的方式來代替變頻器，使用時應留意管線系統所增加的壓力及設備的能耗效率範圍的變化。

3. 可調式加藥機 -- 另一個常常會被使用到的控制單元為加藥機。水處理過程中，酸鹼度的調整、混凝劑、助凝劑、消毒劑、氧化劑，以及補充碳源等，均依靠加藥機將藥品輸送至反應槽中。若欲進一步進行加藥量的精準控制，則需要將加藥機提升至具有可接受自動控制調整加藥量的功能。一般較小流量的加藥機，可以選用電磁式定量加藥機，這類加藥機多半具有數位流量計的功能，免去加裝流量計的困擾；而較大流量的加藥機，以馬達驅動，仍需加設變頻器及流量計以進行智慧控制。

三、【大】- 大數據 Big Data

大數據為傳統的統計工具所無法處理的巨量數據，它除了在數量上多到需要運用電腦及演算法輔助處理，更包括了數個項目之間錯綜複雜的關聯性分析及探索。以污水處理廠單一個生物處理槽為例，如果它收集了 DO、pH、溫度、MLSS、ORP、COD、氨氮共 7 項數據，以每分鐘 1 筆數據的頻率收集，1 天有 10,080 筆原始數據，一個月就高達 30 多萬筆，如果再加上數據處理過程所增生的項目，所形成的數據量相當可觀。欲從其中發掘各個數據間的相關性，並從中獲得有價值可供利用的訊息，大數據分析技術的運用，顯得十分重要。

目前國內外絕大多數的污水處理廠已進入到相當程度的自動化控制，SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) 系統能高效率處理數據的收集與傳輸，然而卻缺乏紀錄的功能，擷取到的數據短暫顯示後未予以貯存，沒有機會保留下來，更遑論從中發掘有用的寶貴資訊。智慧水務的基礎建設中，除了上述的傳感器，資料庫的佈署也是不可或缺的。完整的資料庫是大數據的前提，是後續智慧化運用的要角。

3.1 數據來源與種類

3.1.1 On-line 數據

使萬物相連的 IoT 技術特色之一，就是傳感器能源源不絕的將所偵測的環境變化以數位的方式傳輸出去，因此形成智慧水務大數據中最基本的數據來源。On-line sensor 數據頻率視該 sensor 類別的反應快慢而定，化學分析式因為牽涉多重程序及反

應時間，每筆數據間隔時間相對較長，而電極式或光學式的反應時間短，數據頻率甚至可以到小於每 1 秒 1 筆。水處理的反應一般相對較慢，尚無需要精確到每秒 1 筆數據，通常考慮的數據頻率為分鐘值、10 分鐘值或小時值，在資料庫中可以輕易的由原始數據產生各種不同頻率的數據。

3.1.2 實驗室分析數據

水質項目中，有許多尚未有市售的 on-line sensor，或是價格昂貴使得使用者在經濟的考慮下卻步不前，有些則是安裝的場所不適宜，必須透過人工採樣分析。因此，實驗室的水質分析成果，也是大數據的一個重要來源(如圖 3)，許多影響性高的數據，往往由實驗室分析提供，若忽略了這些項目，對後續的智慧化提升，實屬可惜。實驗室對於水質的分析頻率，有些為每天 1 次、有的每週 1 次、更有每月或每季 1 次的。為了將這些資料整併於資料庫中，以便讓大數據內容更加豐富，有必要對實驗室成果進行數位化的處理，進一步將一般常用 excel 的內容轉換並貯存於資料庫中，再依後續演算法對數據頻率及格式的需求，進行數據處理，讓實驗室數據與 on-line sensor 數據頻率能夠一致。人工智慧演算法往往對於輸入層數據的格式有嚴格要求，只要稍有不對，都可能造成模型故障停擺，或產生不合理的輸出值。這些異常都可能造成智慧控制上的失靈甚至操作上的災難。數據前處理，實為大數據中不容小覷的步驟。

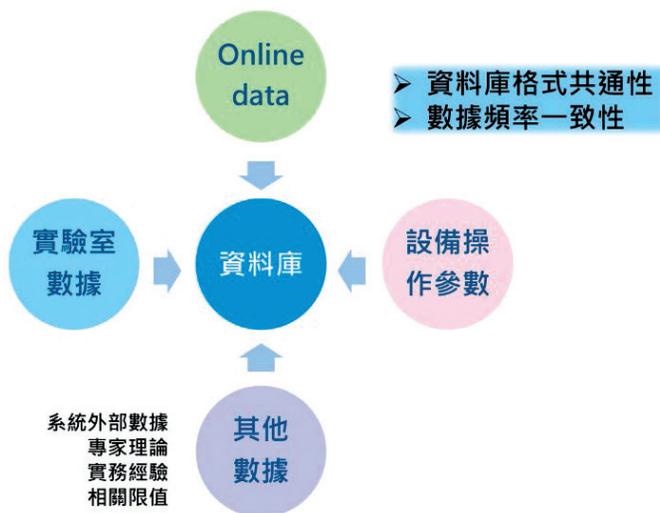


圖 3 智慧水務數據來源

3.2 數據處理

水質感測器所偵測的水質項目，濃度通常相對較低，單位在 mg/L 範圍，透過電流及電壓的微小變化，放大轉換後得知該指標物濃度，而同一水體中所包含的其他物質相當複雜，濃度可能是受測目標的數倍、甚至數十倍，因此經常干擾無所不在。此外，水處理場所動力線迴路因其他大型設備啟停產生的突波、電壓不穩、電磁波干擾，甚至雷擊，都是造成數據明顯變動的原因。在數據進入使用之前，有必要進行相當程度的處理。一般需要進行數據前處理的樣態包括：超過量測上下限值的的不合理值、在合理範圍但與其它測值存在明顯差異的離群值、數據驟升或驟降、不規則上下浮動的噪音現象、數據遺失等等。修正的方式有：剔除、延續前值、內外差、移動平均，以及透過 AI 進行遺漏數據的修補等（如圖 4）。經過多重步驟的數據清整，可得到可以進入後續演算的最終修正值，提高模型的準確度。

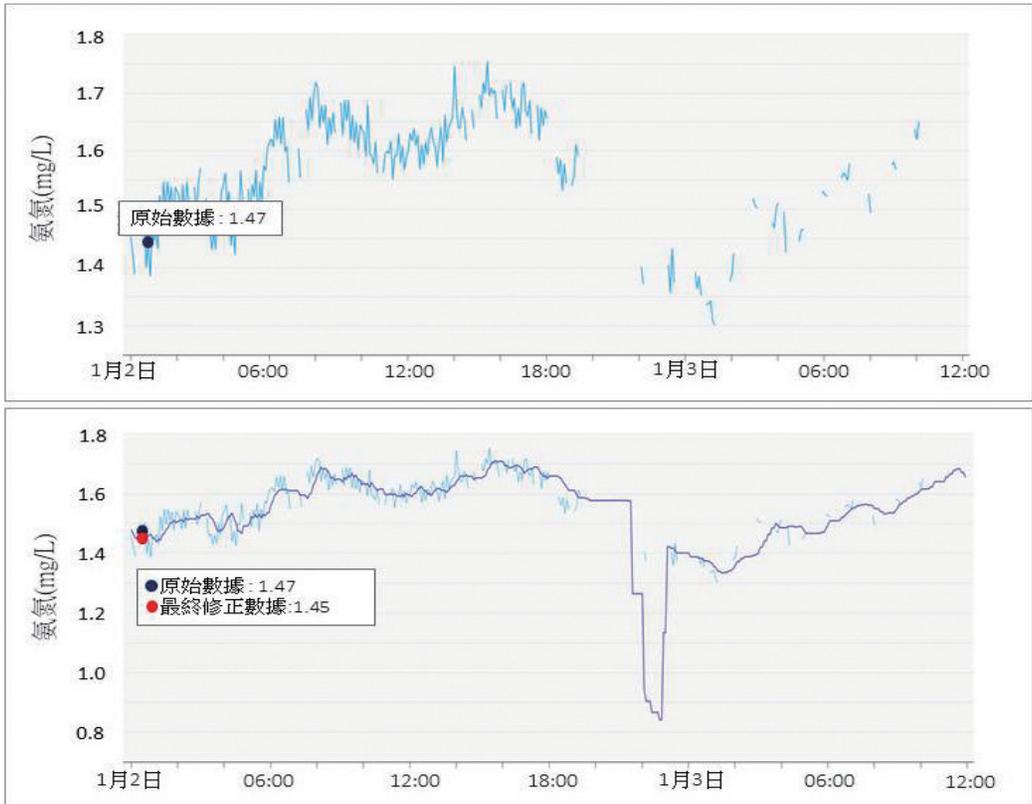


圖 4 原始數據及處理後數據 (左)；數據遺漏 AI 補遺成果 (右)

3.3 數據分級呈現

數據透過數位儀表板的可視化呈現，可以讓原本的數值以多樣態的風貌呈現，讓資訊更容易在短時間被吸收。適度合理的將資訊呈現，才能達到訊息傳遞的效果，過多的資訊往往造成資訊傳遞的反效果，收受資訊的一方因為大量未整理的資訊，需花更多的時間去分辨、理解、吸收，最終可能因海量數據所造成的不便而放棄接觸相關的訊息。在智慧水務的數據分級中，我們主張應該將適當的數據給不同的使用者，讓使用者真正獲得大數據所帶來的方便。

針對工程師，需要較全面的訊息，而且常要考慮到時間序列的相關問題，因此將各個水質及設備操作狀態以時間的趨勢圖方式呈現，不只可以掌握現在的狀態，對以前的狀態也能一目了然。為水處理工程師所設計的工程數位儀錶板 (Engineering Dashboard) 的功能還包括了歷史數據查詢與多重水質項目比對等。

由於行動裝置、智慧型手機功能日益強大、攜帶輕巧方便，集眾多功能於一機，越來越多的現場操作人員偏好於利用手機進行操作。因此可以將操作者使用介面 (Operation User Interface) 以智慧手機為載體進行設計。詳細的數據資料對現場操作人員而言並無需求，而可輸入的對話視窗則相對重要。操作者使用介面的畫面宜力求清晰簡單，字體不宜太小，以免形成輸入操作條件時的困擾。

對於管理階層所設計的智慧管理儀錶板 (Management Dashboard)，所需的資訊屬於綜合績效方面，如進流水質、放流水質、處理水量、耗電量、用水量、藥品用量、污泥清運量、碳排量等，也可進一步以與職安及營運資訊管理系統 (Management Information System) 等重要績效指標相互整合。大眾關心的環保議題，則另行設計網頁，將一般民眾所關心的數據及資訊，即時向社會大眾揭露。

四、【人】- 人工智慧 Artificial Intelligence

4.1 機器學習 (Machine Learning)

安德烈亞斯·卡普蘭和麥可·海恩萊因 (Kaplan & Michael, 2018) 將人工智慧定義為「系統正確解釋外部資料，從這些資料中學習，並利用這些知識透過靈活適應達成特定目標和任務的能力」。人工智慧是計算機科學的進階發展，它能感知環境的變化，並採取適當的行動，以提高其成功的機會。此外，人工智慧的特色之一是能夠從過去的經驗中學習，並透過在訓練的機制不斷更新演進，做出合理的決策，並快速回應。

人工智慧依其功能區分，可大致可分為專家系統、啟發式問題解決、語言與影像處理；其基本的原理可大致分為回歸及分類 2 大類，透過機器學習演算法，以訓練資料為基礎而得到的結果，隨著訓練資料的擴充而更真實地與現實吻合。常用的機器學習演算法包括多參數回歸 (Multiple Regression Analysis)、邏輯回歸 (Logistic Regression)、貝氏機率分類 (Bayesian Classifier)、支援向量法 (Support Vector Machine)、類神經網路 (Neural Network)、K-Means、隨機森林 (Random Forest)、決策樹 (Decision Tree) 等等 (秋庭伸也等, 2021)。不同的演算法適用於不同的數據屬性及使用目的，水處理智能化過程中需要處理大量的時間序列數據來進行預測，有時也會運用到影像辨識技術來模擬操作人員的感官經驗。進行智能化提升時，可以先行透過試算來篩選合適的演算法，再進一步進行軟體開發。Google TensorFlow、Microsoft Azure Machine Learning 以及市場上 AutoML (auto machine learning) 商用套件，在協助演算法的選型上提供了很大的方便。

4.2 監督式、非監督式與強化學習

依訓練資料、產出判別的過程與結果不同，機器學習大致上可以分為 3 類：監督式學習 (Supervised Learning)、非監督式學習 (Unsupervised Learning) 與增強式學習 (Reinforcement Learning)。

監督式學習 (Supervised learning) 是藉由演算法從標籤化 (labeled) 的數據中分析後做出的學習方式，主要的功能為預測與分類。由於標記過的資料有學習目標可做參考，在學習的過程透過對比誤差，可以修到更精準的結果，讓監督式學習有準確率高的優點。在水處理智慧化的運用中，由於數據的類別有限，可以正確掌握並定義，監督式學習法非常適用於該領域，為主要的機器學習方式。

非監督式學習 (Unsupervised learning) 相對於監督式學習，輸入的數據未加以標註，模型由數據特徵中自行判別分析，其主要的功能包括；分群、關聯及降維。在智慧控制的運用上，一般會將數據妥予定義進行監督式學習，可避免非監督式學習因特徵數據量比例的差異或數據品質不佳，而造成輸出結果的偏差。

強化式學習 (Reinforcement Learning) 是監督式與非監督式學習以外的一種有效機器學習方式，為智慧水處理可以選擇的方法。它的特徵是不需給機器任何的標籤化的資料，讓機器直接從互動中去學習，同時也無需對非最佳解的輸出進行糾正。機器透過正向及反向回饋，從中自我學習，做出有效達成目標的行動，可經由這個訓練過程獲取最大利益的目標。

4.3 理論模型與數學模型

智慧水務發展過程中，數據的探勘及數據科學的運用，常常在水處理工程師或學者心中引起一些疑慮。在專業養成訓練的過程中，一向相當重視公認確定的理論，任何的工程設計或現場的操作，都需要有充分的學理依據，並與實際狀況融合後形成實務經驗。而數據科學所得到的結論，其演算過程卻與學理沒有直接關係，很難讓習慣於學理的人士能全盤接受。兩者各有優缺，學理模型有其邏輯，可以加以解釋，只要依循該規則，可以反覆獲得一致的合理結果，使用者均能產生高度的認同。然而學理模型是對許多的現象加以綜合歸納，產生精要的成果，過程中無可避免對許多的因子進行簡化甚至去化。當學理依據的模型運用到實廠，常常折損了它的準確度。數據科學的缺點在於無法一一對相關的參數之間的關聯性做出合理的解釋，因此常常讓使用者不敢放心運用。然而在實廠線上所收集到的即時數據，掌控細微的變化，加上可獲得學理公式以外的多元參數作為輸入特徵，往往能夠呈現更符合現況的資訊，經過 AI

的模型演算，所獲得的準確度經常高於學理模型。若能進一步結合學理與數據科學兩者的特色，形成相融合的混合模型 (Hybrid Model) (Keskitalo & Leiviska, 2015)，在智慧水務的進程上，會是相當的助力。

五、案例介紹

5.1 水質預測與早期預警系統

工研院水科技組智慧水務團隊，曾接受委託進行某石化廠廢水處理出流水預測及預警工作。該廠廢水量約為 10,000 CMD，廢水 COD 濃度約 8,000 mg/L。廢水主要成分為對苯二甲酸、對甲基苯甲酸、苯甲酸、甲酸及其他環狀有機物。主要處理流程包括上流式厭氧污泥床 (Upflow Anaerobic Sludge Bed, UASB) 反應槽、一階好氧槽、一階沉澱池、二階好氧槽、二階沉澱槽，之後經砂濾後放流或回收。放流之處理水須符合該產業類別之放流水標準：COD 需小於 100mg/L，SS 小於 30mg/L。廢水經過 UASB 厭氧處理後，可 COD 以去除 70~80%，達到可以進入一好氧處理的進流水質。而一階好氧的出水，必須符合二階好氧處理進流水設計值，COD 不大於 600 mg/L。由於製程排放廢水水質及水量相當不穩定，雖經過調節槽減緩水質變動，UASB 進流水仍存在一定程度的變異。工研院團隊導入 AIoT (AI+IoT) 相關技術，對 UASB 出流水之 COD、SS、揮發性有機酸及碳酸鹽鹼度進行 16 小時的預測，以利操作人員在系統可能發生異常前，能有足夠的時間提早應變。除了 UASB 外，團隊也對一階及二階好氧生物處理放流水進行 COD 及 SS 的 16 小時預測。

運用在 AI 預測模型的輸入參數包含了來自各反應槽的線上偵測儀器，如：pH、進流流量、迴流流量、溫度、溶氧等，以及實驗室分析的成果，包括：COD、出流 SS、揮發性有機酸、碳酸鹽鹼度、生物反應槽 MLSS、氨氮、硝酸鹽氮及食微比 (F/M) 等。該企業有嚴格的實驗室品管，並推動 LIMS (Laboratory Information Management System)，實驗室的數據有相當嚴格的品管系統，樣品的採樣、分析頻率、分析過程、數據的分析等，都相當有制度，可以獲得高品質的數據，符合至連網運用。該廠預測軟體所採用的演算法為 SVR (支持向量回歸法)，預測模型的準確度相當高，與實測值

比較，平均 R^2 達到 0.96。每一項測值均以數位儀表板顯示，並與廠方操作人員討論設定限值，如圖 5 所示。

當預測值碰觸限值時，系統便會發出預警，操作人員可以從該資訊系統中查詢異常原因分析及應變策略，從中獲得避免水質惡化的預防性處理方法建議。該水質 AI 預測系統，提供了早期預警的功能，有效降低異常排放的風險，並大幅減輕現場人員面對出流水超標的壓力。

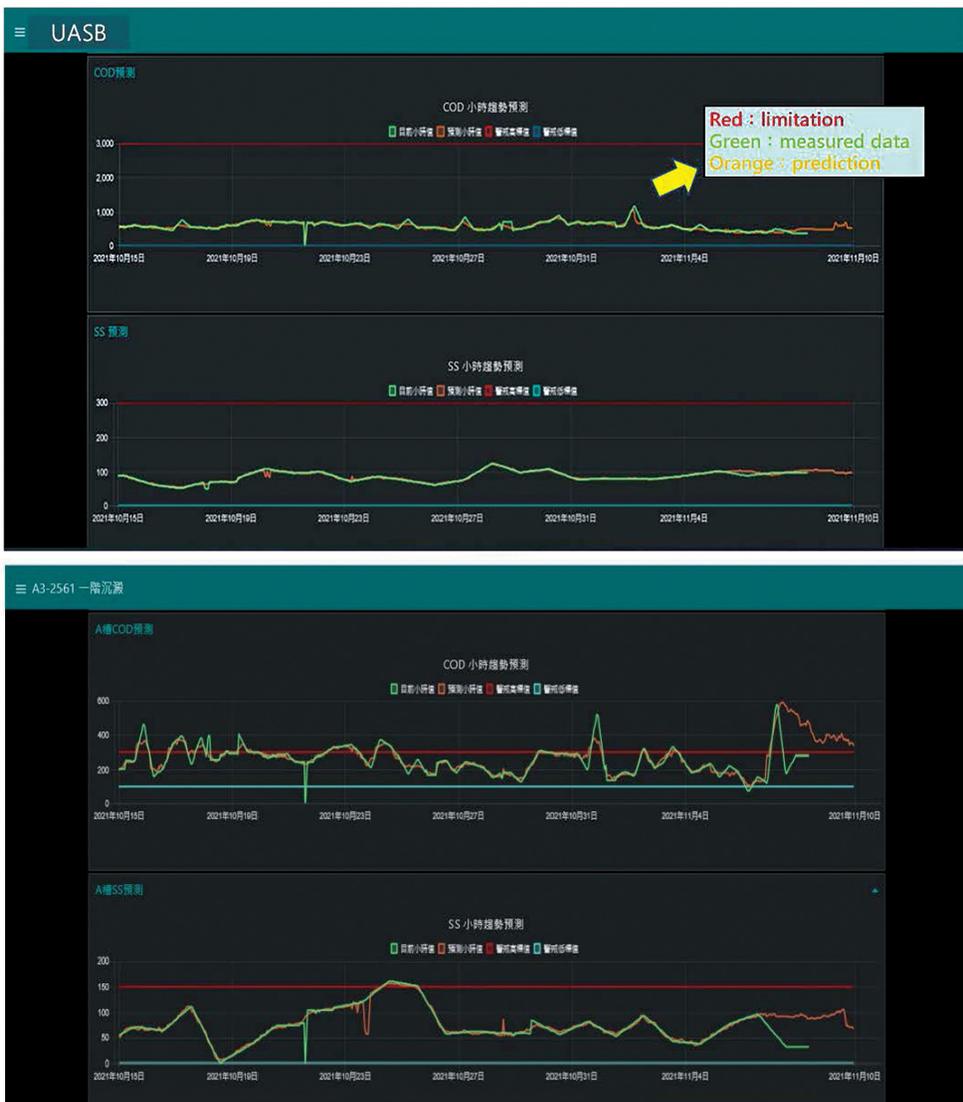


圖 5 石化廢水處理水質預測案例

5.2 生物除氮系統智慧控制

水處理過程中，生物處理屬於較為複雜、具有操作難度的單元，能夠達到除氮功能的生物處理單元，更為複雜。為了達成水質淨化的目的，除氮程序通常透過以下項目來達成：曝氣量控制、污泥迴流控制、硝化液迴流控制、廢棄污泥控制、碳源控制。

某工業廢水之污水處理廠進行生物處理智能化提升，該廠處理量共 55,000 CMD，進流水質變異大，COD 平均約為 110mg/L (80~160mg/L)、氨氮平均約為 25mg/L (15~35mg/L)，放流水 COD 七日平均不高於 80mg/L，氨氮低於 30mg/L，考量減輕環境負擔及提升日後水資源再利用價值，該生物處理採用 AO 除氮系統，碳源不足時以甲醇補充。其放流水 COD 可在 40mg/L 以下、氨氮小於 1mg/L。智能化提升的項目及概念介紹如下 (參閱圖 6)，並非所有的控制方法均使用 AI 演算，有些方式透過進階邏輯程式可以達成的，因考慮 AI 開發成本高，以進階邏輯控制方式進行。

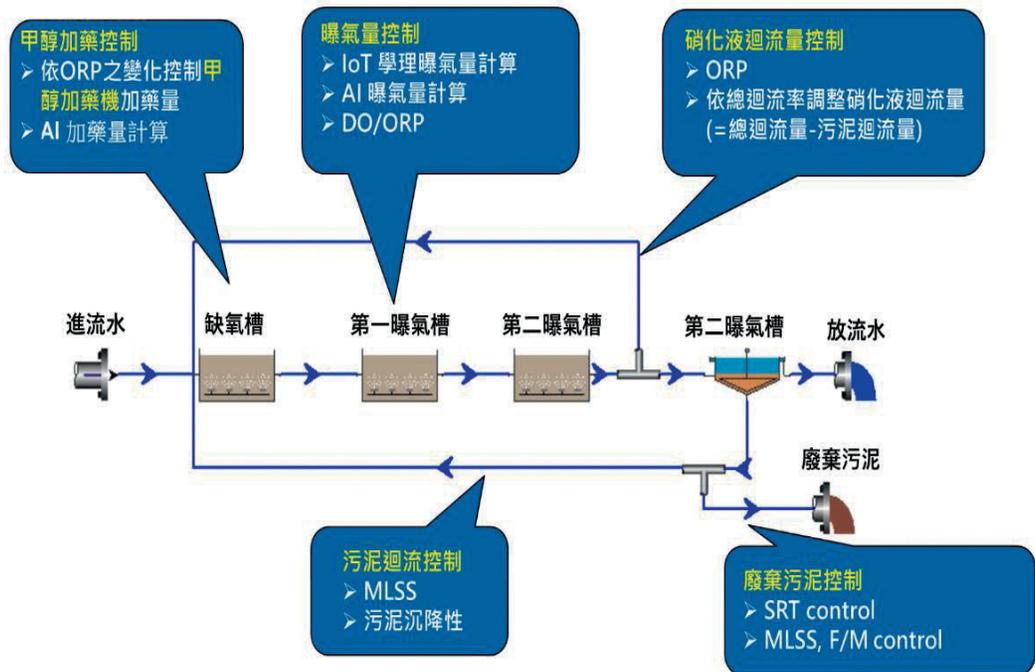


圖 6 生物處理 AO 系統智能化概念示意圖

1. 曝氣量控制

- A. 氧化還原電位：一般好氧生物處理曝氣量以 DO 為依據，控制鼓風機的運轉，改變曝氣量，使 DO 維持在所設定的區間內。另一個控制曝氣量的方式，利用不同生物代謝所需要的氧化還原電位不同，作為控制的原理 (Chiavola, et al., 2017)，例如：好氧自營性硝化作用，所需的氧化還原電位高於好氧異營去除 COD 所需的氧化還原電位。利用兩者間的區別，可以得知硝化作用是否正在發生，以做為減少或增加曝氣量的依據，達到即時控制 (real-time control) 的目的。
- B. 學理公式：第二種控制曝氣量的方式為學理公式，透過 on-line sensor 收集水質水量資訊，如：流量、COD、氨氮、MLSS、DO、溫度等，傳輸至依照學理所推導的曝氣量公式中，即時依水質水量的變化算出實際所需曝氣量。
- C. AI 演算：第三種方式，是運用數據科學，將從該生物處理系統長期所收集的進出流相關數據，以及各操作參數，透過 AI 模型進行演算，輸出最適曝氣量作為操作的依據。

2. 污泥迴流控制

生物反應槽中的 MLSS，靠污泥迴流來維持，迴流污泥流量不足，將會造成污泥累積在終沉池，造成生物反應槽內 MLSS 偏低，以及放流水 SS 過高。然而迴流流量若過大，則造成能源浪費。一般迴流污泥量可操作在 25%~100% 進流處理水量，延長曝氣法迴流率可以更高。從另一個角度看，迴流污泥濃度直接影響污泥的沉降性，它與污泥沉降指數 SVI 之間有一個概略的相關性。如果希望 SVI 維持在 120mg/L 以下，以獲得好的出水水質，則迴流污泥濃度大約需控制在 8,000 mg/L 左右，以此據以調整迴流污泥的流量。

3. 硝化液迴流控制

- A. 總迴流量推算：如果處理效果良好，好氧槽達到完全硝化，而在缺氧槽能達到完全脫硝，總迴流 (包括硝化液迴流 + 污泥迴流) 可以視為用來稀釋進流的總氮。因此可以從希望達到的放流水質目標，反推總迴流量，再扣除污泥迴流量既是硝化液迴流量。
- B. ORP 控制：缺氧脫硝作用，也有它適合的 ORP 範圍，因迴流的硝化液中富含硝酸鹽及溶氧，ORP 較高。如果迴流量過大，將造成缺氧槽的 ORP 過高，反而阻礙了

脫硝作用。利用 ORP 來控制硝化液迴流，確保缺氧槽能充分發揮功能，讓硝酸鹽得以被還原。

4. 廢棄污泥控制

- A. MLSS 控制模式：生物反應槽 MLSS 的高低與 F/M (食微比) 有關，智慧控制系統設計時預先參考該廠水質特性，列舉不同的 MLSS 操作範圍及建議值，供操作人員勾選，若欲操作的 MLSS 不在表列範圍，可由人工填入。廢棄污泥泵的啟停及排泥時間長短，依據 MLSS 濃度變化的趨勢而定，MLSS 升高，則增加排泥量，反之則減少排泥量。
- B. SRT (平均污泥齡) 控制模式：不同的生物處理方式，依靠不同的微生物族群主司其事，欲讓該菌群成為優勢菌種，可以透過控制有利的生長環境來達成，控制生物系統的 SRT 為當中常用的方式。智慧控制系統預先列舉合宜的 SRT 範圍及建議值，供操作人員勾選，若欲操作的 SRT 不在表列範圍，可由人工填入。透過學理公式計算得出廢棄污泥量，藉以控制廢棄污泥泵的作動。

5. 碳源控制

若廢水組成中碳源不足，無法滿足脫硝的需求，就需要藉著補充碳源來達成。由於生物處理系統微生物相複雜，碳源未必都是被脫硝菌運用在脫硝作用上，使得碳源的控制存在相當程度的不確定性，難以掌握。該廠透過以下 2 種模式，可進行甲醇加藥量的智慧控制。

- A. ORP 控制：與前述以氧化還原電位控制曝氣量類似，利用脫硝作用生化代謝的 ORP 特性，作為調控甲醇加藥機流量大小的依據。
- B. AI 演算：甲醇添加，一般以 C/N 做為參考，尚無精確的學理公式可供運用。然而將長期所收集的相關數據及操作參數，透過 AI 模型進行演算，可以輸出最適的脫硝單元加藥量。

六、結論

智慧水務的特色以水處理為核心，融合物聯網、大數據及人工智慧等相關技術。是一個跨領域整合的運用，結合了水處理、資通訊及自動控制相關領域，將傳統的水務領域推向一個新的世代，也相對帶來了新的衝擊。水處理專業人員，不論是工程師、現場操作人員或營運管理者，都面臨來自不同領域的挑戰，需要以開放的態度去面對，接受並學習新的技藝。

資安問題在網路世代，是人人必須面對的問題。智慧水務大量使用網路傳輸，無論是有線或無線，都存在被駭客入侵或攻擊的弱點。估且不論數據遭竊可能造成的營業祕密外洩，以自來水為例，若資訊系統遭駭客入侵，修改其中的操作參數，可能造成供水安全上極大的威脅；污水處理廠操作參數遭竄改，也可能造成放流水不合格，危及環境品質。智慧水務伴隨發生的資安問題，需要一併列入考量。建議以內網方式進行為優先考慮，盡量減少與外界接觸的機會，嚴設防火牆、使用人員權限、密碼等措施，力行資安檢查，以降低被駭成功的機率。

有關投資效益，是智慧水務參與者常問的問題。由於投入的傳感器、物聯網相關傳訊設施、大數據庫佈署、人工智慧軟體開發、設備提升等等，所費不貲，如果單純從量化的成本投資效益看，它的節能、節藥及省工回收年限往往超過預期甚久。然而，若從另一個質化效益來看，它可以穩定放流水質、降低異常風險、精簡人事、科學化管理，提高企業形象，其價值往往大過投資成本。智慧水務在產業智慧製造、城市智慧化等的推波助瀾之下，勢將成為一股不可逆的趨勢。

參考文獻

- Sedlak, D (2014), *Water 4.0: The Past, Present, and Future of the World's Most Vital Resource*, Yale University Press, London.
- 羅英維 (2018), 智能化水處理應用趨勢及案例, 工業材料雜誌 380 期, p.97-103. [2018-08-05].
- 張哲銘、黃廷涵、黃智、羅英維 (2020), 水資源與水處理產業智能化應用, 工業材料雜誌 401 期, P.108-116. [2020-05-05].
- Kaplan, A. and Haenlein, M (2019), Siri, Siri in my Hand, who's the Fairest in the Land? On the Interpretations, Illustrations and Implications of Artificial Intelligence, *Business Horizons*, 62(1), 15-25.
- 秋庭伸也、衫山阿聖、寺田學 (2021), 零基礎入門的機器學習圖鑑, 采實文化。
- Keskitalo, J. and Leiviskä, K. (2015), *Artificial neural network ensembles in hybrid modelling of an activated sludge plant*, Springer International Publishing, *Advances in Intelligent Systems and Computing* 322.
- Chiavola, A., Romano, R., Bongiolami, S. and Giulioli, S. (2017), Optimization of Energy Consumption in the Biological Reactor of a Wastewater Treatment Plant by Means of Oxy Fuzzy and ORP Control. *Water Air Soil Pollut* 228 (article #277).

