



# 統包工程的數位雙生如何打造出智慧石化—從建廠到營運的全生命週期數據整合與加值應用

中鼎工程股份有限公司智慧創新部物聯平台組研發工程師 / 胡慶鴻

關鍵字：數位雙生 (Digital Twin)、統包工程 (EPC)、智慧石化 (Smart Petrochemical)、工程移交 (Handover)、設施維護管理 (O&M)、雲端運算 (Cloud Computing)、電腦化維修管理系統 (CMMS)

## 摘要

在全球工業 4.0 與智慧製造的浪潮下，石化產業面臨著提升營運效率、確保工安零事故以及落實永續發展的嚴峻挑戰。傳統建廠專案在統包工程 (Engineering, Procurement, and Construction, EPC) 與營運維護 (Operation and Maintenance, O&M) 階段之間，普遍存在資訊斷層與移交效率低落的問題。本文旨在深入探討由 EPC 統包商主導的「數位雙生 (Digital Twin)」技術，如何顛覆傳統的工程移交模式。透過建構無縫整合 1D 屬性、2D 圖紙與 3D 模型的雲端圖書館，並結合智慧檢索、多維度視覺化、互動式經驗傳承以及與電腦化維修管理系統 (CMMS) 的深度串接，數位雙生不僅實現了實體與虛擬工廠

的同步移交，更為石化廠的智慧化操作與預測性維修奠定了堅實的基礎。

## 一、前言：石化產業的數位轉型挑戰與契機

石化工業作為國家基礎建設與經濟發展的基石，其廠區往往具備占地廣大、製程複雜、高溫高壓及危險物質密集的特性。一個大型石化建廠專案，從概念設計、細部設計、設備採購到現場施工，動輒牽涉數十萬個零組件、數萬張工程圖紙以及龐大的規格數據。

長期以來，當工程進入尾聲，準備交接給業主營運團隊時，面臨最大的痛點即是「工



程移交 (Handover)」。傳統的移交方式不僅耗費大量人力整理，且資料多為缺乏關聯性的靜態檔案。當工廠正式啟動營運 (O&M) 後，現場工程師若需查閱某個特定幫浦或安全閥的維修手冊，往往需要在浩瀚的檔案海中反覆檢索，這不僅降低了維修效率，更在緊急工安事件發生時，可能因資訊落後而延誤了最佳處置時機。

為了解決此一長久以來的產業痛點，中鼎集團 (CTCI) 等國際級統包商，開始推動從 EPC 階段即啟動的數位轉型，推出了「CTCI Digital Twin」數位雙生解決方案。此舉宣告了工程移交從「檔案交付」正式邁入「數據資產交付」的新紀元，為打造智慧石化廠提供了最強而有力的核心引擎。

## 二、從實體到虛擬：工程移交的典範轉移

探討智慧石化的基礎，必須先檢視工程資料移交模式的演進。

### 1. 傳統移交模式的侷限性

在過去的工程實務中，統包商多以 DVD 光碟或硬碟作為載體，提供給業主獨立的電子檔案。這些檔案包含了使用 Intergraph Smart 3D 建立的幾何模型、AutoCAD 產出的 .dwg 圖檔、Excel 編製的設備清單與管線表，以及 PDF 格式的操作維修手冊 (IOM)。這種模式最大的缺陷在於「資料孤島 (Information Silos)」。3D 模型與 2D 圖紙、1D 屬性之間缺乏系統性的數位連結，業主必須額外花費數月甚至數年的時間，引進昂貴

的軟體並重新建立資料關聯，才能勉強應付日常的維修查詢。

### 2. 現代雲端數位雙生的崛起

現今的移交模式，則是以雲端服務 (Cloud Service) 為核心，提供交互關聯的智慧化資料。以 CTCI Digital Twin 為例，其建構於 Azure 等穩定雲端架構之上，致力於為客戶建立最新、最完整的「數位工程資料圖書館」。這套系統的核心價值在於「無縫接軌 EPC 資訊，快速展開穩定 O&M」。透過提供 3D 視覺化的多維度資料關聯雲端服務，統包商在將實體石化廠鑰匙交給業主的同時，也同步移交了一座一模一樣的「虛擬數位工廠」。

## 三、數位雙生的核心架構與技術解析

要達到「虛實整合，同時移交」的目標，數位雙生系統必須具備深厚的技術底蘊與架構設計。CTCI Digital Twin 的核心技術特色可歸納為以下幾個維度：

### 1. 1D、2D 與 3D 的深度關聯 (Data Interconnectivity)

建廠資料的本質可以解構為三個維度：

- (1) 1D 屬性 (Attributes)：包含設備規格、管線材質、操作溫度、壓力等數據。
- (2) 2D 圖文件 (Documents)：涵蓋管道與儀表圖 (P&ID)、管線等角圖 (ISO Drawing)、單線圖及操作維修手冊。



(3) 3D 模型 (Models)：反映現場真實空間配置的幾何模型。

系統透過 Tag 作為唯一識別碼，將這三個維度的資料進行關聯。當使用者查詢特定 Tag 時，系統能瞬間展開與該設備相關的所有屬性與圖文資料。

## 2. 雲端原生架構與免安裝特性

有別於傳統工程軟體需要高規格硬體與繁瑣的安裝設定，CTCI 打造的雲端服務標榜「免安裝、免設定，瀏覽器直覺操作」。使用者僅需透過簡單直覺的入口網頁登入，即可上網即用。這大幅降低了業主在 IT 基礎設施上的期初投資與後續維護成本。

## 3. 嚴謹的角色權限管理 (Role-Based Access Control)

石化廠的機密資料關乎企業核心競爭力與廠區安全。平台內建了完善的角色權限管理機制，針對總部高階主管、控制室操作員、現場巡檢人員、在家工作者，甚至外部客戶與承包商，賦予不同的資料存取與檢視權限。這確保了在推動資訊透明化的同時，依然能嚴守資安防線 (圖 1)。

## 四、賦能智慧石化的五大關鍵訂閱模組

為了滿足不同營運情境的需求，數位雙生系統架構了五大核心模組，提供靈活的訂閱服務 (圖 2)。



圖 1 CTCI Digital Twin 架構與角色權限管理



圖 2 Digital Twin 各模組

### 1. Tag Search：像 Google 般的直覺式智慧查詢

傳統系統查詢設備往往需要精確輸入長串的設備編號。Tag Search 模組打破了此一限制，提供支援全文檢索、類別篩選及自定義語言的強大搜尋引擎。其具備的「關鍵字搜尋、推斷使用者意圖、自動補齊、容許

錯別字」功能，讓現場工程師即使在緊急狀況下僅依稀記得部分關鍵字（例如輸入 P-304A），系統也能保留搜尋歷史紀錄，並快速提供包含 3D 預覽的搜尋結果。搜尋結果類別清晰，甚至可直接在搜尋欄進行檔案下載或無縫跳轉至 3D 空間（圖 3）。

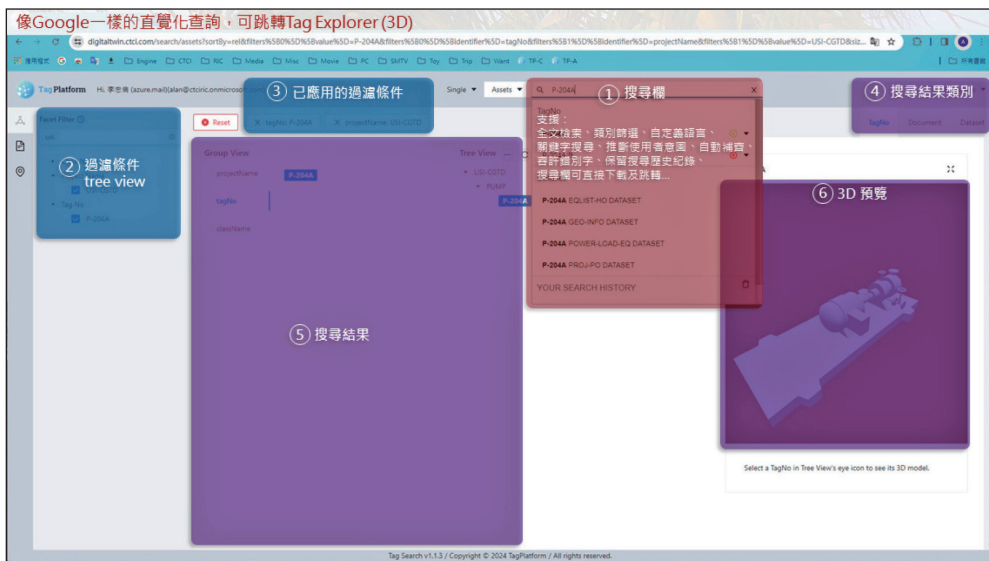


圖 3 Tag Search 使用介面



## 2. Tag Explorer：1/2/3D 多維度空間閱覽

此模組是整個數位雙生平台的視覺互動中樞。提供完整的 3D 瀏覽操作功能，包含切割面、量測空間距離等進階工具。在 Tag Explorer 中，畫面被巧妙地分割配置：

- 左側（3D Tree / Tag Tree）：顯示工廠的層級結構與設備位號。
- 左側下方（1D 資料與 2D 關聯關係）：條列出設備的儀表索引、規格書、管線圖等文件清單。
- 中央（3D 瀏覽視窗）：呈現高擬真的 3D 模型。

右側（圖文件瀏覽視窗）：可直接開啟並檢視 PDF 或 CAD 檔案。這種「連動設計」讓工程師在點選 3D 模型中的某個控制閥（如 PSV-03302A）時，相關的 P&ID 圖紙會立刻

在右側彈出並標示出相應位置，徹底消弭了空間配置與邏輯圖紙之間的隔閡（圖 4）。

## 3. Tag Note：多維互動筆記與經驗傳承

石化產業目前面臨嚴重的工程師老化與人才斷層危機。Tag Note 提供了一個革命性的「雲端互動式操作指引」平台。有經驗的資深工程師或操作員，可以將 3D 視角、圖文件網址及 Data 進行剪貼，並連結至筆記中。新進人員在閱讀這些富含實務經驗的筆記時，只要點擊文中的設備標籤（Tag），系統便會自動帶領其飛航至 3D 模型中的正確位置，實現所見即所得的情境式學習（圖 5）。

## 4. Tag Map：知識圖譜整合關聯報表

工廠內部的管線與信號網絡錯綜複雜。Tag Map 利用知識圖譜（Knowledge Graph）



圖 4 Tag Explorer 使用介面



圖 5 Tag Note 使用介面

技術，揭示資產之間是如何互相連接的，並整合專案的業務規則 (Business Rules)。這有助於生成高度客製化的整合關聯報表，幫助管理者快速釐清系統邊界與影響範圍。

介入了石化廠的操作 (Operation) 與維修 (Maintenance) 核心業務。

### 5. Data Exchange：維護資料虛實一致

確保資料的正確性與版本控制是 O&M 的基礎。此模組允許使用者在授權許可下交換資料，並匯出任何版本的資料。這保證了實體工廠進行設計變更 (MOC) 時，虛擬模型也能同步更新，維護長期的虛實一致性。

### 1. Web API 與異質系統資料整合

數位雙生平台並非孤立運作。CTCI Digital Twin 的所有功能皆對應開發了 Web API (應用程式開發介面)。這意味著業主現有的操作系統，如製造執行系統 (MES)、營運維護系統 (O&M System) 以及資料整合平台 (匯聚工廠 IT/OT 資料的 CIP)，皆可以透過 API 直接指揮數位雙生系統。這打破了系統間的藩籬，讓 3D 模型成為匯聚與展示各類營運數據的最佳載體 (圖 6)。

## 五、操作與維修 (O&M) 階段的深度加值應用

數位雙生若僅停留在「看圖」階段，其價值將大打折扣。CTCI Digital Twin 透過開放的 API 架構與視覺化技術，深度

### 2. CMMS 自動跳轉與雙向驅動

電腦化維護管理系統 (CMMS) 是石化廠排程保養與故障維修的大腦。目前，

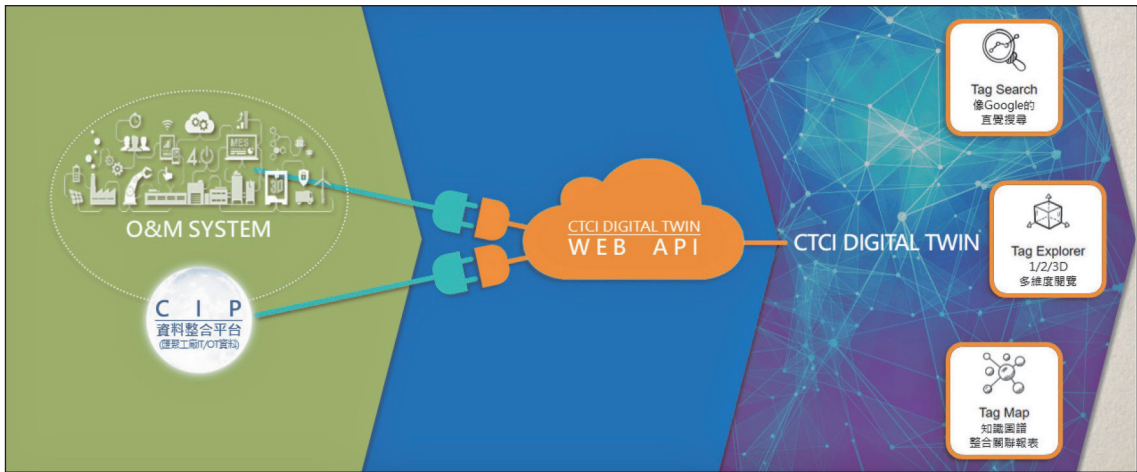


圖 6 CTCI Digital Twin Web API

數位雙生已具備與 CMMS 雙向連結的客製化能力。在實際應用場景中，當現場發生設備故障（例如：電力供應異常導致低壓配電盤故障），CMMS 系統生成維修工單（工令編號：20090526MM03，設備名稱：直接空氣加熱器進氣導管 #1）後，維

修人員可直接點擊連結。Digital Twin 會透過 API 驅動，畫面自動跳轉至該設備（如 0609-P001A）的 3D 空間位置。維修人員在出發前，即可於電腦前確認周邊環境、安全動線以及需準備的工具，大幅縮減現場勘查時間（圖 7）。

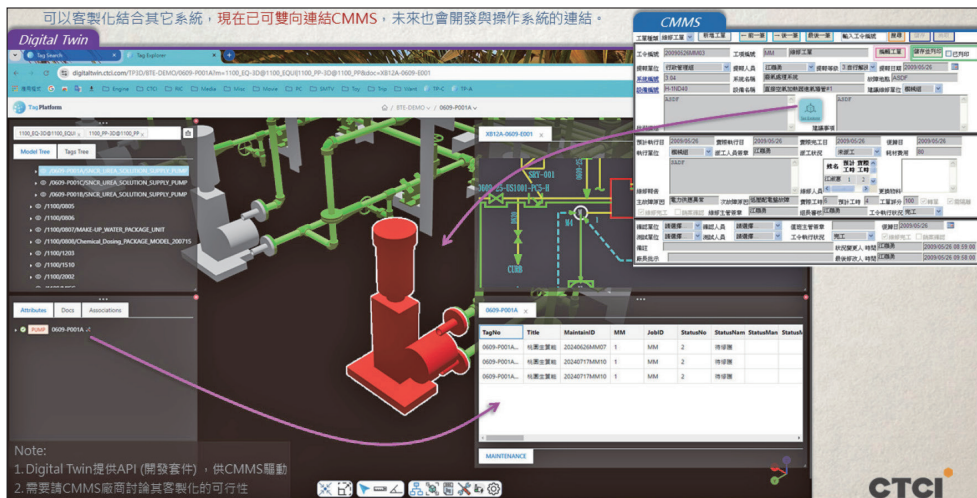


圖 7 CTCI Digital Twin 與 CMMS 雙向連結



### 3. 3D 檢修狀態顯示與視覺化工安管理

石化廠的維修往往伴隨著高風險，特別是涉及到管線切斷隔離與掛牌上鎖（Lockout/Tagout, LOTO）作業。系統針對此開發了「3D 檢修狀態顯示」功能。透過數位化及視覺化的查詢介面，管理人員可在現場重點區域設置的電腦上，快速掌握全廠的檢修狀態與空間關係。在 3D 模型上，系統利用顏色區塊直觀呈現不同的管制狀態（圖 8）：

- 紫色區塊：顯示設備處於「已開工單」狀態。
- 黃色區塊：警示該區域「禁止操作」。
- 橘色／紅色區塊：嚴格標示「禁止操作、禁止送電」的隔離區域。

此外，系統還能區分空間屬性，以「實心」代表開放空間，以「半透明」代表高風險的侷限空間。配合電氣／設備狀況切斷隔離一覽表，這種將靜態表單轉化為 3D 動態

視覺的管理方式，極大地提升了歲修或日常檢修的安全層級。

### 4. 圖文件打包與快速調閱

在執行維修任務時，完整的參考手冊是不可或缺的。系統的 Tag Note 筆記不僅可以記錄文字，還能指揮系統進行 3D 規劃工具調用、關聯報表產出以及「圖文件打包下載」。使用者只要貼上圖文件的網址，就可以一鍵下載所需的資料，例如往復式壓縮機（Reciprocating Compressor）的操作維修手冊（IOM）。確保維修人員取得的永遠是最新修訂版（如 Rev.1, Feb. 07, 2020）的正確技術文件。

## 六、統包商（EPC）主導 vs. 純軟體商主導之優勢分析

市場上推廣數位雙生概念的供應商眾多，但由 CTCI 這類具備實體建廠經驗的統

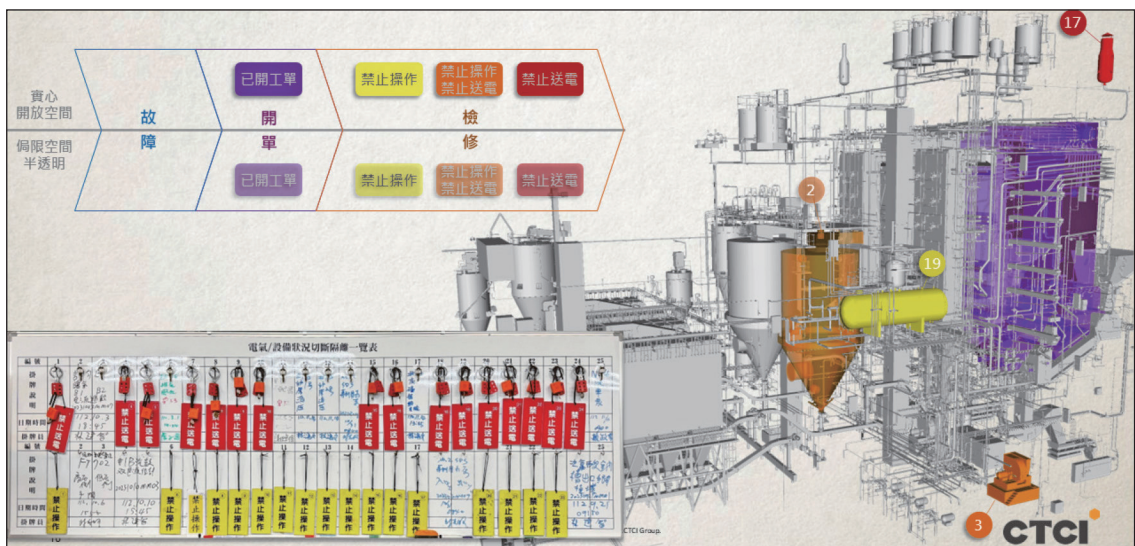


圖 8 CTCI Digital Twin 3D 檢修狀態顯示



包商所主導的數位轉型，相較於純商用軟體公司，存在著本質上的競爭優勢：

### 1. 深厚的產業知識與一條龍服務

純軟體公司往往缺乏石化工程的產業知識 (Domain Knowledge)。這導致在建置過程中，業主的實務需求、統包商的 EPC 資料格式以及軟體的程式設定，三方難以有效整合。相對地，CTCI 了解業主的痛點與需求，能大幅節省雙方的溝通成本。其憑藉自身的工程底蘊，以一條龍服務整合所有軟硬體介面，確保系統真正符合現場操作邏輯。

### 2. 開箱即用與導入時程差異

一般商用軟體的導入曠日廢時，往往需要半年（6 個月以上）的時間來架設維運資料 Server、應用 Server，並進行繁雜的安裝、設定與客製化訓練，客戶才能勉強上線使用。CTCI Digital Twin 則強調「無縫接軌，立即享受」。實體工廠與數位工廠同時移交，平台採純雲端服務架構，免安裝設定。直覺化的瀏覽器操作介面，使用者只需約 3 小時即可學會，極大化地降低了學習曲線與企業導入門檻。

### 3. 數位資料品質的溯源管理

資料的正確性是數位雙生的命脈。軟體主導的專案，往往是為了節省工時，在 IFC（發行供施工用）階段或移交後，才開始向各承包商收集資料並進行額外加工轉換。這種事後補救的方式極易產生錯漏。而統包商主導的優勢在於「數位品質，從頭開始」。CTCI 透過 Tag Platform 在工程設計初期即規範資料交付標準。移交的資料從設計端一路

延續至施工端，自然確保了極高的完整性與正確性，締造高品質的數位化成果。

### 4. 靈活的知識互動性

市面軟體多偏向單向的資料展示，缺乏知識互動功能。CTCI 的平台特別重視「儲存知識，多維互動」，允許業主編輯、儲存操作維修指引，並使其與龐大的數據庫、圖文件及 3D 模型產生有機的雙向互動。

## 七、結論與未來展望：全生命週期的永續守護

業界對於工程服務最大的期望，莫過於「確保 3D 模型與現場實體絕對一致」。CTCI 透過提供「中小工程 EPC + 數位化服務」，以開發對應的功能來確保這份虛實一致性。

統包工程的數位雙生，絕非僅是一個專案結案時的附屬品，而是貫穿了石化廠全生命週期的核心神經系統。從 EPC 階段的精準設計與建造，跨越至 Handover 階段的平滑移交，再深入到 O&M 階段的操作與維修優化，乃至於應對未來的變更管理 (Management of Change) 與工廠改擴建 (Revamping)。

未來，隨著物聯網 (IoT)、人工智慧 (AI) 與大數據分析技術的進一步融合，這套結合維修與操作的數位雙生系統，有望從目前的「資訊呈現與輔助決策」，進階至「預測性維護與自主優化」。透過持續發掘可靠的價值 (Discover Reliable)，統包商所驅動的數位轉型，必將引領傳統石化工業成功蛻變，邁向安全、高效、智慧的新世代。