

# 以複雜事件處理技術為基礎建置火力電廠智慧吹灰系統 Smart Sootblowing System Based on Complex Event Processing

王秉豐<sup>1</sup>，洪辰坤<sup>2</sup>，曾裕勝<sup>1</sup>，陳鏡宇<sup>1</sup>，邱永發<sup>3</sup>

財團法人資訊工業策進會智慧網通系統研究所<sup>1</sup> 台灣電力公司興達電廠<sup>2</sup>，  
永信能源科技股份有限公司<sup>3</sup>

Ping-Feng Wang, Chen-Kun Hung, Yu-Sheng Tseng, Ching-Yu Chen, Jackson Chiu  
Institute for Information Industry Smart Network System Institute<sup>1</sup>  
Taiwan Power Company Hsin-Ta Power Station<sup>2</sup>, Orion energy Technology<sup>3</sup>  
Email: {pffwang, ysttseng, chingyuchen}@iii.org.tw<sup>1</sup>, u218990@taipower.com.tw<sup>2</sup>  
jyf.chiu@msa.hinet.net<sup>3</sup>

## 摘要

複雜事件處理技術提供事件規則對原始事件資料進行匯集 (aggregation)，並透過所定義規則內容不斷過濾連續到達的資料流，完成事件間的關聯、聚合或分析等模型，處理完成的結果可以當成另一個事件處理規則的輸入資料，或可觸發對應事件的反應行為，進行即時事件的處理，如此，當資料源源不絕如水源接踵而來就形成資料流的處理模式。

本研究藉由串流事件偵測、即時資料分析等複雜事件處理的核心技術，建立燃燒吹灰分析規則模型，提供火力電廠智慧吹灰系統的解決方案，系統擷取火力電廠機組即時運轉情況，提供即時智慧吹灰控制模型，藉由整合操作技術 (Operation Technology, OT) 與資訊技術 (Information Technology, IT) 相關技術，來提供工業物聯網 (Industry Internet of Things) 高值化運轉維護之解決方案 (Advanced Operation & Maintenance Solution)，讓電力工業 (Utility Company) 可提高多種煤源選擇，保障能源安全，降低能源成本，降低污染物排放與提高機組妥善率 (unit reliability)。

關鍵字：複雜事件處理技術、工業物聯網、智慧吹灰系統

## 一、前言

藉由複雜事件處理技術，系統開發者可藉由對原始資料進行匯集，並藉由事件間的關聯、事件聚合以及事件分流等元件定義規則，在通過規則所定義處理事件程序，事件處理引擎可從原始事件或多個事件中擷取有意義的、符合應用需求的複雜事件，提供不同使用者提取各自需要的資訊，並藉由觸發對應事件的反應行為，處理完成的結果可以當成另一個事件處理規則的輸入資料，或可觸發對應事件的反應行為[1]，提供智慧聯網中偵測複雜事件及即時反應處理的解決方案。

複雜事件處理技術提供高效能的串流事件規

則偵測、低延遲的即時資料分析及查詢等[2]核心能力。藉由事件規則的定義，整合操作技術 (Operation Technology, OT) 知識經驗與資訊技術 (Information Technology, IT) 相關技術，來提供高值化運轉維護之解決方案 (Advanced Operation & Maintenance Solution)，可讓物聯網的相關應用，如火力電廠環境中，提供相關設備、人力、物料狀態監控、異常偵測、診斷與預測等事件偵測的能力，以提高機組妥善率 (unit reliability)。

由於火力電廠透過鍋爐設備燃燒煤炭，產生蒸汽推動發電機組，在運轉發電的過程中，時常面臨鍋爐、各種熱交換器的受熱面結渣、積灰等問題，造成燃煤電廠發電機組之維持運轉與提升效率的挑戰。目前國際大廠包含 Emerson、Invensys 以及 Steag 等皆有推出火力電廠之鍋爐吹灰系統，但礙於國內火力電廠採用多元煤種在爐內混燒的運轉模式，相較於國外火力電廠皆為單一煤種的燃燒方式，因此，國外的吹灰系統並無法適用於國內電廠運轉的需求。

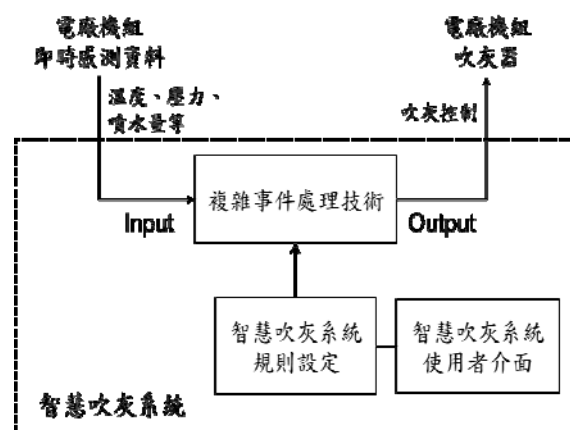


圖 1、智慧吹灰系統範疇

本技術開發智慧型吹灰系統 (如圖 1)，該系統透過擷取電廠機組即時感測資料，藉由複雜事件處理技術過濾多樣化且複雜的事件資訊來源，擷取符合之特徵值進行分析計算的特性，除了參考原設計

與發電機組鍋爐改善設計之外，也增加其它重要資訊，如：配煤配方煤質與煤灰分析資訊、歷史鍋爐內結渣積灰情形，以及現場運轉人員觀察經驗與破管原因分析紀錄等資料，建置複雜事件處理規則，以提供智慧吹灰系統控制邏輯，提升整體的發電運轉效率。

## 二、文獻探討

在智慧聯網的環境中，因應感測串流的資料快速增加及複雜性提升，在多種感測資料的匯集、不同的時間區段、不同的地理位置等資訊，如何快速地整合辨識使用者所需偵測的事件，即時反應事件處理行為，以提供一個事件運作處理的環境系統，已是物聯網技術發展的趨勢。因此，越來越多的物聯網系統藉由複雜事件處理技術來尋找複雜事件樣式[3][5]，透過元模型塑模特定領域的事件模型，以反映真實世界中實體物件的活動，亦有藉由資料探勘或機器學習技術，在複雜事件序列中有效率探勘頻繁目標情節，尋找潛在的事件規則內容[4]。並將事件樣式變成規則提供複雜事件處理引擎進行事件偵測，在複雜事件技術實務應用上也有相關的研究投入在 RFID 應用[6]、智慧生活空間、醫學藥物等應用上，本研究藉由複雜事件技術應用火力電廠在鍋爐燃燒多元煤種時，適時的控制吹灰器對鍋爐受熱面進行不同區域的吹掃，減少附著於金屬管壁上的結渣或積灰，保持受熱面清潔、提高傳熱效果、降低排煙溫度，從而提高鍋爐效率和降低廠內用電，實現節能減碳排放。

目前有多數電廠大多採用 Neural Network 的方式進行智慧吹灰應用系統的建置[8][9][10]，並結合鍋爐清潔度計算[12]以小區域僅計算鍋爐內加熱區域的質能平衡，在吹灰系統的建議上較為省時，對於一般是否進行吹灰之評估過程，具有助益。但是鍋爐清潔度計算的理論方式，僅針對小區域的鍋爐內進行計算，缺乏外在環境因子的考慮，

包含燃料的煤質、煤灰等資訊、鍋爐的結渣積灰程度，以及外在環境的溫度變化等因素，將造成實際清潔度於模型評估的理想清潔度，在實際吹灰時造成明顯差異。或藉由熱力學模型的理論基礎[13]，以固定的燃燒變化與燃燒元素，建置鍋爐、汽機等整廠平衡，推算鍋爐清潔度。但是由於在建置整廠平衡上，需花費許多工程師的人力投入與時間，建立經驗傳承與歷史數據，在模型建置成本上偏高；並且也缺乏率影響吹灰的鍋爐設備老化係數與燃燒資訊，在一段時間後，受到設備老化的影響，也將產生模型失真的情形，需要再投入人力進行模型調整。

由於台灣火力電廠多採用成本較低廉、煤質煤灰變化範圍大的煤源，除了降低購煤成本之外，透過不同煤種熱值的混合配比發電運轉的方式，可達到提高發電量與環保排放的效益，造成台灣火力電廠的發電機組，對於現行國際上所採用吹灰系統方案，未有考量煤質、環保等因素的吹灰模式，無法滿足目前國內電廠日益頻繁之配煤分倉燃燒運轉型態。因此，本研究透過複雜事件處理技術開發智慧吹灰系統，系統考量鍋爐清潔度計算、負載、運轉資訊、燃料資訊等因素，並與系統設備控制的協同運作進行吹灰器邏輯控制，滿足國內電廠多元煤種燃燒的發電運轉模式。

## 三、研究方法

本研究利用複雜事件處理技術開發火力電廠智慧吹灰系統，藉由在設計時，定義智慧吹灰事件偵測規則，並註冊於複雜事件處理引擎，在執行時，擷取即時電廠運轉資訊（如：機組負載、爐管溫度及壓力，清潔度等）、配方煤炭資訊、歷史近似煤炭執行狀況資料等，透過事件偵測規則的制定，來判斷相關事件規則是否觸發，如觸發則會執行規則對應的處理行為，即是控制相關吹灰器程序以進行鍋爐管壁的結渣或積灰清掃，如圖 2 所示。

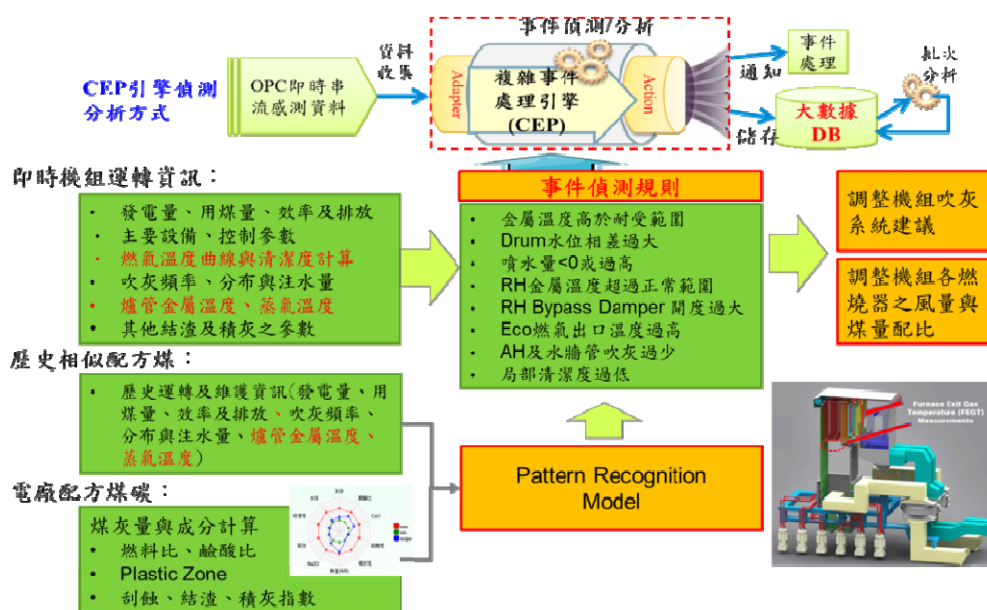


圖 2、複雜事件技術之事件偵測規則運作圖

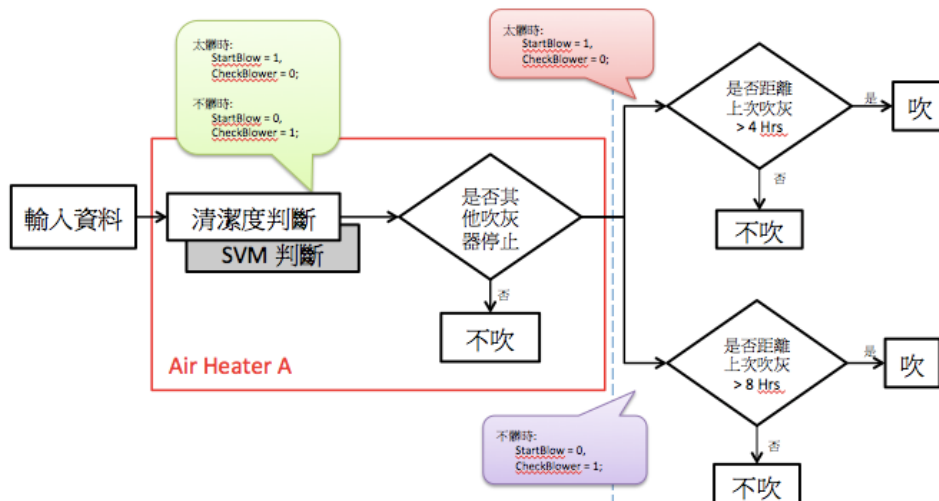


圖 3、吹灰事件規則模板樣式圖

本系統於規則設計階段，藉由吹灰事件規則模板樣式 (template pattern)，提供使用者可以在既定的事件規則模板樣式中，進行智慧吹灰規則的動態設定及調整，在選擇所需的事件規則模板樣式，設定相關參數以用來指揮吹灰事件。以空氣預熱器(Air Heater) 事件規則模板樣式為例，可利用支持向量機器(Support Vector Machine, SVM) 預估的未來溫度，來推斷是否應該發送吹灰事件，如圖 3 所示。使用者可以藉由智慧吹灰之監控及專家規則設定工具，自行定義智慧化的吹灰建議與規則操作修改，制定規則的畫面，每個規則會有規則名稱、吹灰啟動因素（觀測區域）、吹灰動作區域（吹灰器運作的區域）及規則描述（解釋此條規則的制定原因），如圖 4 所示，重要要素說明如下：

- 吹灰器啟動因素

- 清潔度權重：某區域清潔度 低於/等於 /高於 某個數值

- 預測溫度差異：某區域預測的未來溫度 低於/等於/高於 某個數值

- 吹灰器執行吹灰設定：每個規則可以設定其所影響的吹灰器集合
- 規則執行最長間隔時間：為了避免規則太久沒運作，當規則超過此時間仍未執行，則強制進行吹灰檢查。
- 規則執行最短吹灰間隔時間：為了避免規則運作太過頻繁，當規則執行的間隔小於此時間時，則不進行吹灰檢查。

整體來看，不同的區域可藉由制定不同的吹灰規則，經過這些規則判斷後，所生成的吹灰事件，即下達執行吹灰事件，來控制對應的吹灰器，使用者可透過即時圖像方式來監督呈現即時吹灰資訊，如圖 5 所示。

診斷規則與操作設定					
吹灰規則		新增規則	新增限制規則運行	匯出	執行中
限制規則運行					
規則名稱	吹灰器啟動因素	吹灰器動作區域	規則描述	狀態	修改 / 刪除
南側汽鼓水位高	F2400SUB1	[CF21A] A20, B20, A19, B19, A21, B21	南側汽鼓水位高執行 A20, B20, A19, B19, A21, B21吹灰	ON	修改 刪除
北側汽鼓水位高	F2400SUB2	[CF20A] A9, B9, A8, B8, A10, B10	北側汽鼓水位高執行 A9, B9, A8, B8, A10, B10吹灰	ON	修改 刪除
SVM Final Superheater B	Final Superheater B	[ya]	測試 SVM 估計 Final Superheater B 區的出口蒸氣溫度。	OFF	修改 刪除
SVM Final Superheater A	Final Superheater A	[ya]	測試 SVM 估計 Final Superheater A 區的出口蒸氣溫度。	OFF	修改 刪除
SVM Upper Reheater	Upper Reheater	[ya]	測試 SVM 估計 Upper Reheater 區的出口蒸氣溫度。	OFF	修改 刪除
無異常狀況					
SVM Div. Panel Superheater B	Div. Panel Superheater B	[ya]	測試 SVM 估計 Div. Panel Superheater B 區的出口蒸氣溫度。	OFF	修改 刪除

圖 4、智慧型吹灰系統規則制定畫面



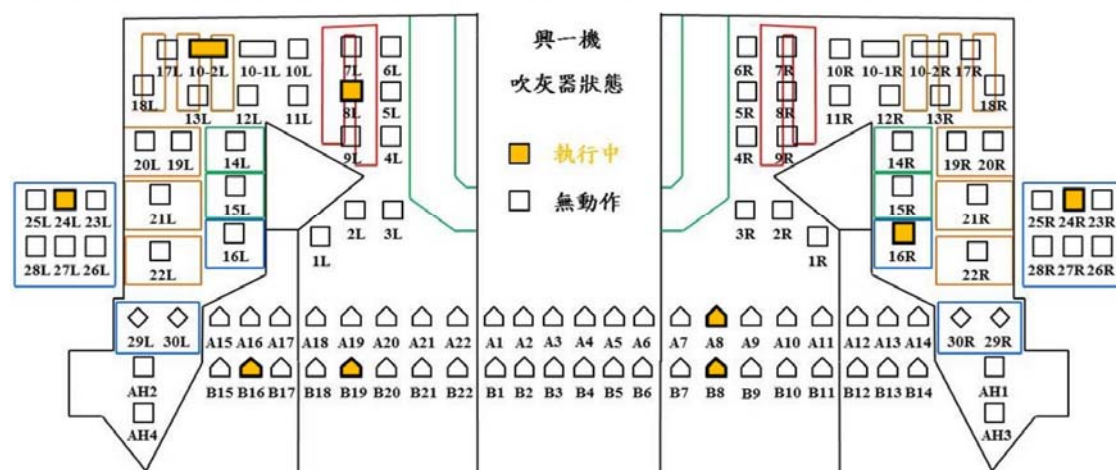


圖 5、智慧吹灰系統吹灰器運作監督畫面

目前複雜事件處理技術開發智慧吹灰系統，在結合電廠的專家經驗知識、歷史近似配煤運轉資料等，制定共有 32 個事件偵測規則，依據即時運轉資料進行鍋爐吹灰器的操作控制。目前吹灰事件偵測規則分為(1)避免跳機吹灰規則類、(2)增加效率吹灰規則類二類，細部說明如下：

(1) 避免跳機吹灰規則類：避免跳機吹灰規則是由即時感測器判斷是否有機組運轉異常有造成跳機疑慮，預先作對應的吹灰動作。

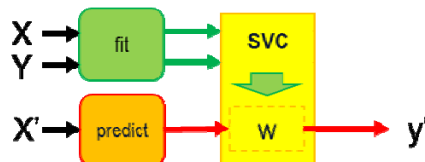
- 空氣預熱器差壓規則：鍋爐是個負壓系統，由空壓機將燃氣帶出鍋爐，內部通道的暢通影響鍋爐是否能不間斷的燃燒，因此通道的出口與入口堵塞會導致鍋爐跳機。
- 汽水鼓水位差異過大規則：在飼水加熱為蒸汽時，汽水鼓主要將液態水與汽態水進行分離的裝置，汽水鼓的水位過高或過低都會影響跳機，過高容易造成液態水進入過熱器，堵塞蒸汽通道，造成內部結垢或打壞渦輪葉片，造成機組損壞。鍋低容易造成蒸汽量不足，使過熱器過熱或上升管無水蒸汽在裡面造成乾燒並導致破管，因此控制汽水鼓的兩邊水位差異不要過高。
- 溫度高於金屬耐受溫度範圍規則：金屬溫

度容易超過材料限制的情況，當有金屬溫度過高時，金屬材料容易出現劣化現象，故在金屬溫度過高時，利用吹灰器的控制吹上游區域，讓上游區域的金屬吸熱增加，使燃氣溫度下降，降低該區域金屬管溫度。

- 噴水量控制吹灰規則：鍋爐基本設計的噴水量為零，當主蒸氣溫度超過額定溫度，機組會自動會對超溫區域進行噴水，以噴水來控制溫度，故可以利用噴水量的多寡來衡量機組運轉的效能。當噴水量過大時，可以控制吹灰清潔水牆管與爐鼻區域，減少該區域的積灰結渣，以增加蒸汽蒸發量。

(2) 增加效率吹灰規則類：增加內部各區域的乾淨程度，預防積灰、結渣等影響鍋爐效率等現象。

- 配方煤質結渣性吹灰調整規則：不同的煤炭組合對鍋爐有不同的影響，故針對煤炭組合的結渣性與積灰性作對應的調整，利用 Support vector clustering (SVC) 的方法，如圖 6 所示，來分類造成噴水量過大的煤配方種類，並預測煤配方是否會造成較嚴重的結渣性，以噴水量做為結渣的判斷依據，作為前爐加強吹灰的依據。



$X$  : 配方煤質屬性 ( $SO_x$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $HGI$ ...), 磨煤機參數(飼煤量)、負載、...

$Y$  : 噴水量

$X'$  : 特定樣本的 $X$ 資料。

$Y'$  : 預測噴水量

$W$  : classifier weighting (選出15個特徵值做計算)

圖 6、配方煤質結渣性 SVC 模型建置圖

- **鍋爐管排區域清潔度吹灰規則：**根據鍋爐各區管排進、出口之溫度與壓力測點數值，計算該區域之熱傳係數，可得知該區是否有因積灰或結渣而導致吸熱的變化。鍋爐管排各區域的清潔度(Cleanliness Factor,  $CF$ )定義為，實際的熱傳係數(Heat Transfer Coefficient)  $U_a$ 除以理想無結渣或積灰時之熱傳係數  $U_d$ 。

$$CF = \frac{U_a}{U_d}$$

由於結渣或積灰會導致管排吸熱變差，因此實際的熱傳係數將比理想時低。 $CF$  的分佈範圍由 0 到 1。

#### 四、實驗評估及結果

為測試火力電廠智慧吹灰系統對鍋爐運轉效益，我們提出了在一段時間內（5/17~ 5/22, 共 6

天），由當天早上 8 點開始到隔天早上 8 點切換自動吹灰與手動吹灰的測試方式。本研究參考電廠提供的火力電廠機組熱耗率因素（如圖 7，每產生 1 度電所需要的熱量稱為熱耗率）提出與本系統有關比較因子（主蒸汽溫度、主蒸汽壓力、再熱氣蒸汽溫度、燃汽出口溫度與噴水量等項目）在電廠人員手動控制及交付本系統自動吹灰控制下的差異比較作參考，把系統切換過後的前 8 小時忽略，避免鍋爐資料是前次吹灰模式反應的結果。因此資料應用從當天下午 4 點到隔天早上 8 點，取得機組運轉每 30 秒一筆的資料進行分析。觀察實際接收到的電廠機組操作資料，將煤炭配方、磨煤機啟停等影響機組變化的因素排除，將資料分成 3 個群組，讓群組內的影響條件的因素相同，故將資料分為 A 群組，B 群組及其他，其他項目因煤炭配方與其他群組不同故不列入比較。

項目	因素	滿載標準值	假設偏離標準量	影響淨熱耗率	
				(%)	(kcal/KWH)
1	汽輪機低壓排汽壓力	55.9mmHg	1mmHg	0.073	1.729
2	汽輪機入口蒸汽溫度	538°C	-1°C	0.037	0.877
3	汽輪機入口蒸汽壓力	169kg/Cm <sup>2</sup>	-1kg/Cm <sup>2</sup>	0.034	0.805
4	汽輪機再熱蒸汽溫度	538°C	-1°C	0.20	0.474
5	再熱器蒸汽壓力降	9.21%	1%	0.80	1.895
6	廠內用電	4.58%	0.1%	0.112	2.653
7	給水溫度	275°C	-1°C	0.20	0.474
8	沖放水	0噸/小時	1噸/小時	0.007	0.166
9	煙囪出口熱氣溫度	129°C	1°C	0.44	1.042
10	蒸汽出口減溫噴水量	0噸/小時	100噸/小時	0.210	4.975

※說明：

1. 「影響淨熱耗率」係以#1、2機滿載設計熱耗率2,369 KC為計算基準。
2. 以廠內用電為例：機組滿載時之設計標準為4.58%(約22,900度/每小時)，設若增加0.1%(約500度/小時)，則影響熱耗率為+2.653 KCal/KWH(即熱耗率由標準之2,369 KCal/KWH昇至2371.6532KCal/KWH)。假設興一機全年度滿載狀況下，淨發電量30億度，浪費熱能即達79.59億仟卡，相當於1,269噸煤炭，價值228萬元。

圖 7、火力電廠機組熱耗率因素

表 1、手動與智慧吹灰實驗結果熱耗率比較

從實驗結果來觀察，在燃氣出口溫度，與噴水量的數值上有顯著的差異。我們把群組 A 與群組 B 中智慧吹灰與手動吹灰進行比較(如表所示)，計算再發每度電需耗費額外的熱耗率看起來，智慧吹灰比手動吹灰效果較優平均熱耗率降低 0.14%。觀察智慧吹灰與手動吹灰的差異，手動吹灰因現場值班人員操作便利下，吹灰排程的安排密集且連續，而反觀智慧吹灰的排程安排則比較分散。因此，在觀察噴水量資料時，手動吹灰有較多的噴水量(平均值 50.8)且有較大的振幅(標準差 19.6)，而智慧吹灰有較少的噴水量(平均值 17.3)且震幅較小(標準差 8.9)。此現象表示手動吹灰的吹灰排程較密集連續，使鍋爐在大量吹灰清掃後，使鍋爐吸熱效果變好，讓過熱器突然超過設定輸出額定溫度，故增加更多的噴水量來降低蒸氣溫度，反而浪費更多熱能。

	滿載標準值	影響 (%)	淨熱耗率	吹灰群組 A		吹灰群組 B	
				手動	智慧	手動	智慧
2. 主蒸氣溫度	538	0.037	0.877	541.4	541.1	540.9	540.9
3. 主蒸氣壓力	169	0.034	0.805	172.1	172.2	172.2	172.3
4. 再熱器出口溫度	538	0.02	0.474	536.5	535.0	537.7	537.3
9. 燃氣出口溫度 A	129	0.044	1.042	149.3	147.3	148.5	143.1
9. 燃氣出口溫度 B	129	0.044	1.042	137.2	136.3	136.6	132.5
10. 噴水量	0	0.21	4.975	50.8	48.0	38.9	17.3
影響熱耗率(%)				0.99%	0.95%	0.90%	0.66%
影響熱耗率(Kcal/KWH)				23.56	22.44	21.32	15.56
群組降低熱耗率 (%)				0.04%		0.24%	
平均降低熱耗率 (%)				0.14%			

複雜事件處理技術利用使用者制定規則的方式進行串流資料的處理，利用 in-memory 技術提供相關事件的辨識，本實驗環境硬體系統採用 CPU：Intel core i7 3.5GHz，RAM：16G 的電腦環境，系統資料庫為 MySQL（Intel Xeon E5-2620 v2 2.10GHz 的虛擬電腦 RAM:32G CPU:16 core）。本實驗分別比較複雜事件處理及傳統資料庫處理的方式計算每秒鐘的平均資料值，並統計個別系統的執行效能，實驗藉由同時到達 10~100,000 筆資料時。

由實驗資料顯示，在大量資料時，傳統資料庫處理時間會比複雜事件處理花費更高的時間，在 1000 筆時為 1.6 倍，10,000 筆時為 17.7 倍，到 100,000 筆時為 459 倍，隨著串流資料同時到達的筆數增多，傳統資料庫處理串流資料也跟愈加的吃重。如圖 8 所示，X 軸顯示串流資料同時進入的資料筆數，Y 軸表示處理完成的時間。

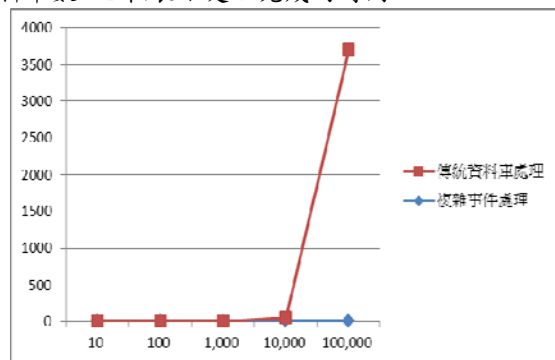


圖 8、複雜事件處理與傳統資料庫處理比較

## 五、結論

由於複雜事件處理技術具有高效能的串流事件偵測、低延遲性的即時資料查詢等特性，將會在物聯網應用系統中被廣泛的應用。本研究結合電廠智慧吹灰的專家知識 (OT 知識經驗) 及複雜事件處理技術 (IT 技術)，提供電廠智慧吹灰解決方案。

有鑑於國內火力電廠採用不同煤種熱值的混合配比的發電運轉方式，造成現有國際智慧吹灰系統的解決方案，無法滿足目前國內電廠之配煤分倉燃燒的運轉型態，因此，本研究可以考量配煤配方煤質與煤灰分析資訊、歷史鍋爐內結渣積灰情形，以及現場運轉人員觀察經驗與破管原因分析紀錄等資料，建置滿足國內電廠多元煤種燃燒的發電運轉模式之智慧吹灰系統。該系統在實驗分析上，智慧吹灰系統操作比電廠人工手動操作吹灰的方式降低熱耗率達 0.14%。

未來如能搭配電廠磨煤機的優化系統，依據不同的煤炭的可磨性係數 (Hardgrove Grindability Index, HGI) 調高煤粉細度，並調整火焰器 (burner) 的一次風量、二次風量、風門開度、調風器 (Air Register) 與火上風門 (over fire air, OFA) 等將可增加鍋爐的燃燒效能，提升智慧吹灰系統的效率，降低煤質變化對機組運轉可靠度與運維費用的衝擊。

## 參考文獻

- [1] C. Y. Chen, J. H. Fu, T. Sung, P. F. Wang, E. Jou, M. W. Feng, "Complex Event Processing for the Internet of Things and its Applications", 2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2014.
- [2] Thomas Heinze, "Elastic Complex Event Processing," MDS' 2011, 2011.
- [3] 謝文哲, 「從資料到服務之事件驅動方法」國立中央大學資訊工程系所, 碩士論文, 102.
- [4] 蔣佩雯, "於複雜事件序列中有效率探勘頻繁目標情節之研究" 國立成功大學資訊工程學系, 碩士論文, 101.
- [5] 陳長志, "在無線射頻辨識技術中一個建構在預先分群的複雜事件處理方法" 國立東華大學資訊工程學系, 碩士論文, 98.
- [6] 陳文盛, "基於服務品質感知動態整合與應用導向事件處理之 RFID 資料管理研究", 國立東華大學資訊工程學系 博士論文, 103.
- [7] Appel, Stefan. "Modeling and execution of event stream processing in business processes." Information Systems 2014.
- [8] G. J. Nakoneczny, K. L. Noel, "Implementing B&W's Intelligent Sootblowing System at MidAmerican Energy Company's Louisa Energy Center Unit 1", Babcock & Wilcox, 2002.
- [9] B. Pena, E. Teruel, L. I. Diez, "Soft-computing models for soot-blowing optimization in coal-fired utility boilers", 2010 Elsevier B.V, 2010.
- [10] Luis M. Romeo, Raquel Garetá, "Hybrid System for fouling control in biomass boilers, Engineering Applications of Artificial Intelligence P915 - 925, 2006.
- [11] N. HARE, M. G. RASUL, AND S. MOAZZEM "A Review on Boiler Deposition/ Foulage Prevention and Removal Techniques for Power Plant", RECENT ADVANCES in ENERGY & ENVIRONMENT, p217~p222, 2010.
- [12] S. J. Piboontum, S. M. Swift, and R. S. Conrad, "Boiler Performance Improvement Due to Intelligent Sootblowing Utilizing Real-Time Boiler Modeling on UP Boilers", The Babcock & Wilcox Company, 2005.
- [13] S. M. Swift, I. Vulicevic, R. S. Conrad, "Boiler Performance Improvement Due to Intelligent Sootblowing Utilizing Real-Time Boiler Modeling on Tangentially Fired Boilers", The Babcock & Wilcox Company, 2006.