

主動式建築空調能源管理系統應用實例

Example of Active Building Air Conditioning Energy Management System

林龍杰、黃緒耀、林頤璋

Lung-Chieh Lin, Hsu-Yao Huang, Ye-Chang Lin

基於軟硬體技術快速發展，能源管理系統的使用逐漸成熟，本研究提供一個新的發展方向，可以在不增加任何新硬體設備的情況下，達到一定程度的節能效果。將資料探勘、建築能耗模擬軟體、氣象預測等技術整合到主動式建築物能源管理系統，對建築物能源進行主動式管理，最佳化空調系統運轉模式，經實際應用案例之空調系統節能率為 7.6%。本研究結果可以提供給未來進行節能改善的人員參考，透過軟體的分析後系統主動控制可以有效達到節能效果。

With the advancements of both software and hardware technologies, the application of integrating both into energy management information systems has gradually matured. This research provides a new application direction of developing an active building energy management system by integrating data exploration and building energy consumption simulation software. Combining meteorological forecast data with the newly developed water chiller start-up optimizing model, the energy saving rate of an actual case study post application was 7.6%. This research provides evidence of effective energy saving results achieved through the analysis and control of software for future energy conservation personnel.

一、建築能源管理系統現況

為了削減開支增加競爭力，近年來建築節能成為企業十分關注的議題。目前經由適當的建築能耗評估，大多數的案例皆能找到值得優先投資的節能項目，並能夠在規劃中的回收年限後開始產生正效益。

利用建築能源管理系統隨時修正優化操作條件，則可以在不增加任何新硬體設備的情況下，達到一定程度的節能效果。過去的專案經驗證明，此類僅涉及系統運作最佳化的節能方案回收年限明顯短於其他節能方式，應列為最優先考量實施的節能項目。

除了節能之外，另一個困擾是缺乏設備故障的預警系統。以空調而言，目前的技術大多只做到，當設備故障時通知相應人員等。然而空調設備從故障到廠商前來維修完畢這段時

間，業主將可能面臨業務停擺的損失。若是該設備係由國外進口，則漫長的等待更是一大問題。其實不少設備故障的情形都是一個漸進過程，如果能夠加以監測，則能從歷史紀錄清楚地發現設備性能已經漸漸劣化，再輔以大數據的分析，要找出設備高故障風險的特徵值並非不可能。利用該數據比照業主業務停擺時間長度與損失的關係，則可以提供一個最佳設備更換時機，而非目前的損壞通知更換模式。

二、國內外技術發展現況及產業面臨技術瓶頸

建築能源管理系統屬於資料採集與監控系統 (supervisor control and data acquisition, SCADA) 的一種應用，一般而言在開發過程中會選用一種供應商提供之數據採集與監控系統，然後再依據功能需求來做客製化。數據採集與監控系統的選擇相當多，大部份的可程式化邏輯控制器 (programmable logic controller, PLC) 供應商都有提應數據採集與監控系統以便提供完整的控制解決方案。

以國內自主研發的系統而言，大部份仍侷限於公司內部區網應用，目前已逐步走向雲端功能。目前台灣有雲端功能的數據採集與監控系統僅有少數的廠商進行開發，且其系統都處於被動式的監控，還未支援第一次出現 AI (artificial intelligence, AI) 大數據優化空調設備的相關功能。相較之下目前國際大廠的開發腳步較快，主流供應商的數據採集與監控系統皆已支援雲端功能。然而目前亦無建築空調能源管理系統專用的數據採集與監控系統，而僅是以額外模組的方式提供建築能源管理系統的開發支援，且支援相當有限。

建築空調能源管理系統有很多面向，而其主要目標為監看能耗數據及控制相關設備，以達成運行效率的最佳化。以系統運轉策略最佳化為例，目前主流的技術與其簡介如下：

1. 手動排程法

手動排程法係由設備操作人員依照經驗，判斷當日應該開啟的設備編號與數量，例如在空調系統中，設備操作人員會依據當天的氣象情況，由過往經驗對空調主機進行開關機。常見的開機邏輯包括輪替法及視負載加機法等等。

2. 性能曲線法

一般而言，設備商對其推出的冰水主機均做過詳盡的測試並備有性能曲線圖。因此，詳盡分析各台冰水主机的性能曲線圖後，理論上可以推得各負載條件下的最佳運轉策略。此方法最主要的問題之一是沒有考慮到現場的狀況。冰水主机的性能是在設備齊全的實驗室中依照指定的規範方法所測得，但現場安裝未必與實驗室的條件相同，且冰水主機在系統上的位置亦有影響。另一個問題是相同規格的主機依然會因為生產公差而有不同的性能表現，以冰水主機生產性能規範而言，一般正負 4% 以內均為合格。換言之兩台完全相同的主機最多可能會有 8% 的性能差異、但此法完全無法判斷此差異。除此之外，此法亦無考慮到主機因為老化磨損導致的效率下降，這些因素使得性能曲線法未能使系統保持在最佳化的狀態下運轉。

3. 數據分析法

數據分析法通常以專案的形式執行。利用現場既有 (或依專案需求加裝) 感測器收集的

歷史運轉數據，經由人工進行數據分析來導出各負載條件下的最佳運轉策略。相對於性能曲線法，此方法因為是以實際量測數據為基礎，因此推導出來的策略更能接近該案場的最佳運轉策略。

4. 人工智能法

第一次出現人工智能法 (AI) 可以想像成是一個天天反覆進行的數據分析法，故具有跟數據分析法相似的優勢與劣勢。主要差別在於整個數據分析的流程改交給人工智慧來處理，然後利用其高速運算效率的優勢，每天分析近期的運轉數據並更新運轉策略。因此當新型主機取代老舊機種時，人工智能法能夠偵知該機器的效率變化並改變建議的運轉策略，完全不需要人工重新修改系統參數。也因為人工智能法能夠即時監控系統的效率變化，因此當某個元件效率發生顯著變化時，系統能馬上通知相關人員調查，此特性相當適合被利用來開發故障預警系統。另外一個重大優點是，人工智能法能夠從歷史數據中推定人類不容易分析出來的趨勢，這使得其推薦的開機策略並不僅限於過去曾經運轉過的策略，而是能建議其他可能的高效開機組合。

表 1. 現有能源管理系統技術功能比較。

主要規格	人工智能法	手動排程法	性能曲線法	數據分析法
佳化策略基礎	依監控數據	無最佳化	依設備規格	依監控數據
系統是否持續保持在最佳化狀態	是	否	否	否
新策略建議	可	不可	可	不可
系統運作模式	自動	手動／自動	自動	自動
系統持續進化	是	否	否	否
感測器需求	有	無	無	有
人力需求	建置初期	常駐	建置初期	週期性

三、主動式建築空調能源管理系統介紹

本篇主要介紹目前國內首次開發之主動式建築空調能源管理系統，一般建築空調能源管理系統僅被動地將現場設備參數回傳自中控室，或由排程進行設備運轉控制，此舉本身並無節能效果，且須透過有經驗的工程師耗費可觀時間進行分析，才能找出相應的節能運轉模式。在此我們將稱為被動式能源管理系統。

本篇所提出之主動式建築空調能源管理系統能夠自動分析回傳之現場設備參數，並利用大數據搭配未來負載預測的方式來自動決定最佳運轉模式。因此能夠時時讓系統在最高效率的模式運轉，進而達到節能效果。

一般導入能源管理系統的建築可以分為兩類，一種為使用多年之既有建築，另外一種為規劃中之新建築，主動式建築空調能源管理系統可以透過目前軟體技術整合，應用於不同的建築形式，在新建築物時可以透過能耗模擬程式先進行能耗模擬，提供使用者最佳化運轉策略；在既有建築應用上可以透過資料的收集，在使用 AI 的技術進行數據分析，提供使用者最佳化運轉策略。

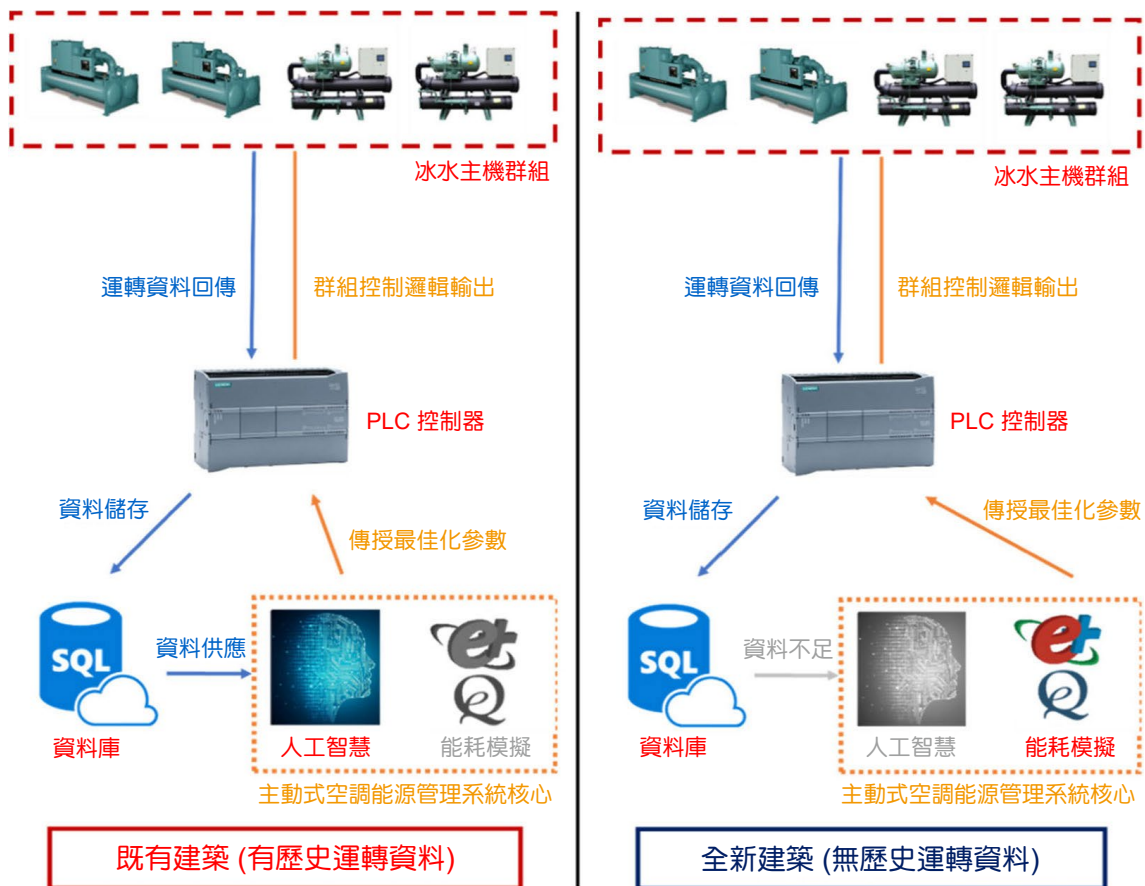


圖 1. 主動式空調能源管理系統在既有建築／全新建築下的不同運作模式。

主動式空調能源管理系統功能主要有四大項，分別為 AI 分析系統最佳化、Energy Pluse 模擬系統最佳化、故障預警、歷史數據與性能指標分析等四大項功能。

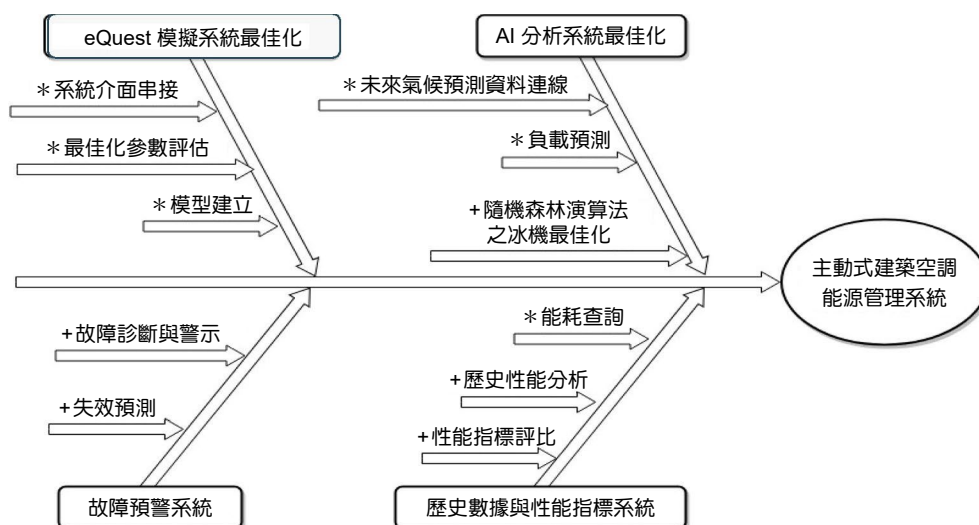


圖 2. 主動式建築空調能源管理系統功能圖。

1. AI 分析系統最佳化

AI 分析系統最佳化使用監控之歷史能耗相關運轉數據進行分析，提供最佳化運轉策略。

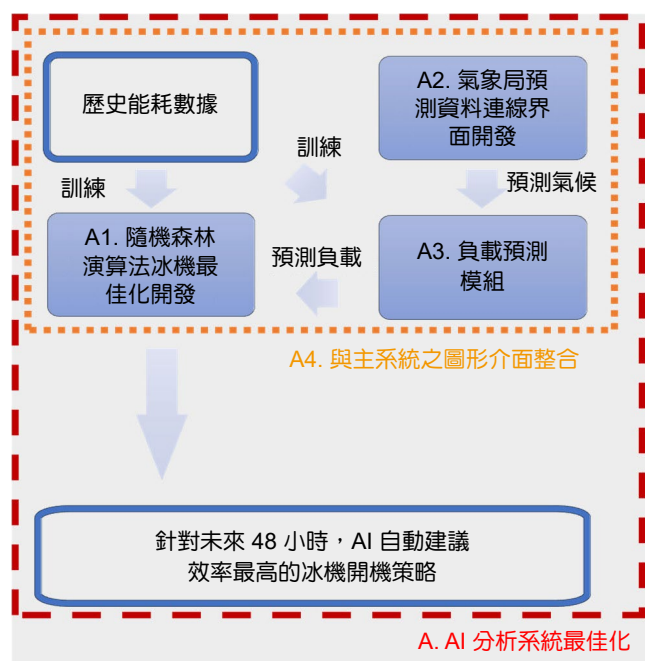
首先，先進行氣象資料來預測未來空調負載，為了要預測未來的空調負載，需先知道未來的室外空氣環境條件，除了現場的氣象監測資料外，要預測室外環境，此屬中央氣象局的專業工作。目前政府正積極公開非敏感性資料供民間運用，其中氣象資料亦屬開放項目之一，透過擷取氣象局公告之氣象資料來作為基礎，分析未來 48 小時天氣情況，並即時比對現場氣象資料，修正模擬未來氣象資料。

以現今的技術而言，氣象局的天氣預報仍有其準確性上的限制，例如此時此刻預測明日為大晴天，到了明日卻發生午後雷雨的情形。目前氣象局的預報更新頻率為 6 小時一次，所以本系統將設定為每 6 小時從氣象局抓取資料並更新預測負載。

在氣象局尚未更新資料的 6 小時間隔中，如果發生了實際溫溼度與預測值顯著不同的情形 (定義為溫度差正負 4 度以上或相對濕度差正負 20% 以上)，則系統將會自動進行預測負載的修正。修正的方式採用實際值與預測值的平均，取代原本的預測氣象資料成為新的輸入項目，並帶入負載預測模組以求得新的預測負載。

有了未來 48 小時氣象資料就可以進行，未來 48 小時的建築物負載預測，將運轉資料、氣象資料等數據提供給 AI 的演算法進行分析，分析出最佳的運轉策略。

在 AI 的演算法上本研究採用隨機森林演算法，隨機森林演算法是機器學習的一種方法學，是一種分群的演算法，隨機森林演算法需要透過資料的訓練才能預測未來運轉策略，本研究將空調系統中各項監控資料提供給演算法進行訓練，例如冰水主機、泵浦、冷卻水塔等設備運轉數據。訓練完成後的模型便可以冰機負載、室外空氣溫度、室外空氣濕度、冷卻水回水溫度、冰水出水溫度等參數為輸入項目，計算產生該狀態的空調系統最佳開機模式成為輸出。在這裡所謂的系統最佳運轉模式，指的是在某特定外氣條件下 (特定乾球溫度與相對



溼度)、不同開機組合中其 kW/ton 最低者。kW/ton 是冰水主機常用的性能指標，係指主機提供一冷凍噸冷卻能力時所需耗費的 kW 電力。同一台冰水主机的性能，會隨著外部條件的不同 (例如蒸發器與冷凝器的溫度)、以及部份負載的比例等等而有性能上的差異，在冰水系統有複數台主機時，可以利用操作策略來達成更佳的運轉性能，即為本研究的主要成果之一。

2. EnergyPlus 模擬系統最佳化

EnergyPlus 為基於 DOE-2 程式架構，由美國勞倫斯柏克萊國家實驗室從 1998 年便開始進行整合所開發出來的建築能耗分析軟體，將 DOE-2 的強項功能納入並且同時發展新的功能模組，包括熱負荷計算模組、空調系統模組、機房模組、經濟分析模組。目前開發的最新版本為 9.2 版，已在 2019 年 9 月釋出。與 DOE-2 相較之下，EnergyPlus 目前同樣也是國際公認的建築能耗分析軟體，並且該軟體是免費軟體，由於其模擬功能更為完整並且持續進行軟體版本的更新，使用人數和範圍也非常廣泛，因此目前已有逐步取代 DOE-2 的趨勢。

EnergyPlus 同樣可以提供整棟建築物每小時的能量消耗分析，用於計算系統運行過程中的能效和總費用，也可以用來分析建築結構、空調系統、電器設備和照明對能耗的影響。而其模擬結果的輸出型式包括 txt、excel 以及 html 等，使用者必需透過後處理方式才能獲得圖形化結果。

EnergyPlus 軟體有內設的冰水主機負載分配方案，稱為 Load Distribution Schemes，五種方案如下：佳化負載、平均負載、次序負載、平均部分負載、次序平均部分負載。

(1) 佳化負載 (Optimal)

為自動根據各台冰水主机的性能曲線，計算出在每台冰水主機都有分配到負載下，整體冰水主機系統的最佳節能開機組合順序。

(2) 平均負載 (UniformLoad)

為不管現場實際負載大小多少，都平均分配至各台冰水主機，並無先後順序之分，此方案適用於所有冰水主機冷凍能力大小皆相近之案例使用。

(3) 次序負載 (SequentialLoad)

為無論現場所需負荷大小多少，都依照次序進行開機運轉。當第一台冰水主機已達滿載，現場負載卻依然無法滿足時，再啟動第二台冰水主機進行運轉，以滿足所需負載，以此類推進行冰水主機負載分配規劃。

(4) 平均部分負載 (UniformPLR)

為不論系統實際負載大小多少，都平均依照各台冰水主機之冷凍能力大小進行部分負載分配，並無先後順序之分。

(5) 次序平均部分負載 (SequentialUniformPLR)

為按照系統所需負荷大小，如第一台冰水主機之冷凍能力可以滿足，就先開第一台，如果系統所需負荷還是不夠，再依第一台與第二台冰水主機之冷凍能力大小進行部分負載分配，以滿足系統所需負荷大小，以此類推進行冰水主機負載分配規劃。

能效策略 (energy efficient measures, EEM) 是建築能耗分析軟體的其中一項功能，可以輸入各種不同的能源策略，或是修改建築設計，並與原本的模型比較並輸出能耗報告。在經濟方面也可以修改單位能源費用與稅率，藉此功能達到能耗或經濟佳化的目標。再研究將透過程式操作對開機策略進行佳化，進而得到較少的能源使用，在此使用 kW/RT (單位冷凍噸需

要的耗功) 作為性能指標。

比較各種開機組合性能指標及不同冰水主機負載分配方案耗電量，判斷該日適切開機運轉方式，以此達到節能的效果。

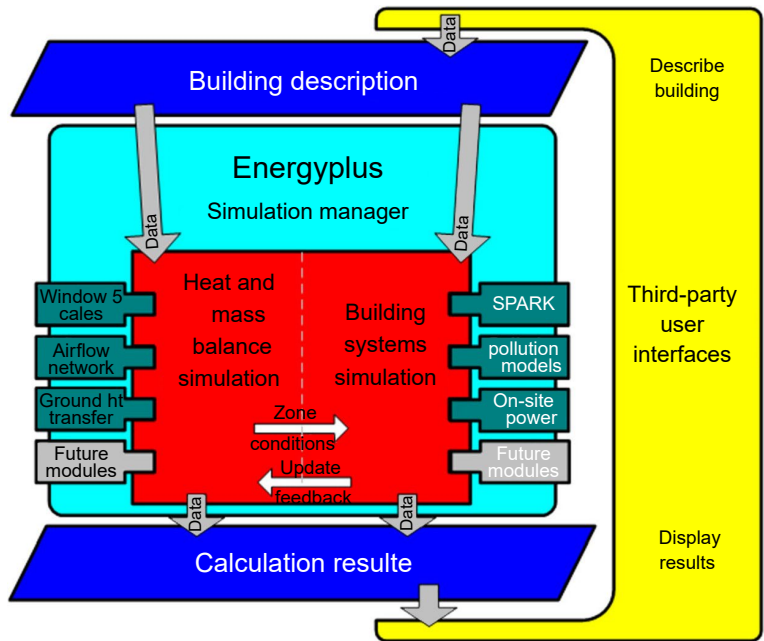


圖 4. EnergyPlus 建築能耗分析軟體架構圖^(1, 2)。

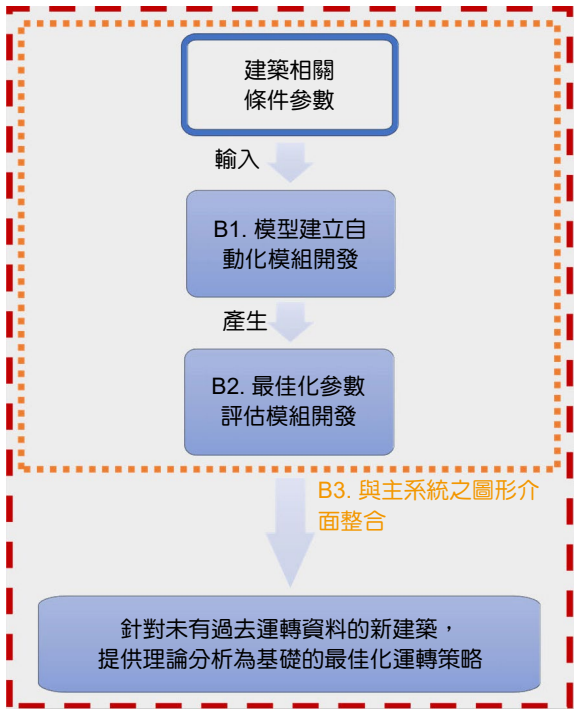


圖 5. EnergyPluse 模擬系統最佳化運作流程圖。

3. 故障預警系統

故障警示系統是大部份能源管理系統強調的功能之一，但是其主要的缺點是只能在系統發生問題時通報處理，因此從問題發生到維修完畢這段時間，大樓的運轉可能會受到影響甚至被迫停擺。以管理的角度而言，這是十分希望能夠避免的商業損失。換言之若能在問題發生之前即可做失效預警，則其價值遠超過故障通報。本研究項目參考 Beghi,A 等人於 2016 年發表之論文「Data-driven fault detection and diagnosis for HVAC water chillers」進行失效預測之開發⁽³⁾，並將重點放在用歷史資料建立冰機壓縮機的等熵效率基線 (isentropic efficiency baseline)、監測其隨時間之變化，並在降幅過大時進行警示 (大於 30%)。當收集足夠的壓縮機等熵效率的變化情形以及其故障／不正常作動的紀錄後，則可歸納出在目前情形下未來 30 天的故障機率，讓業主決定預先更換或者預先準備備用元件，將系統故障的影響降到最低。

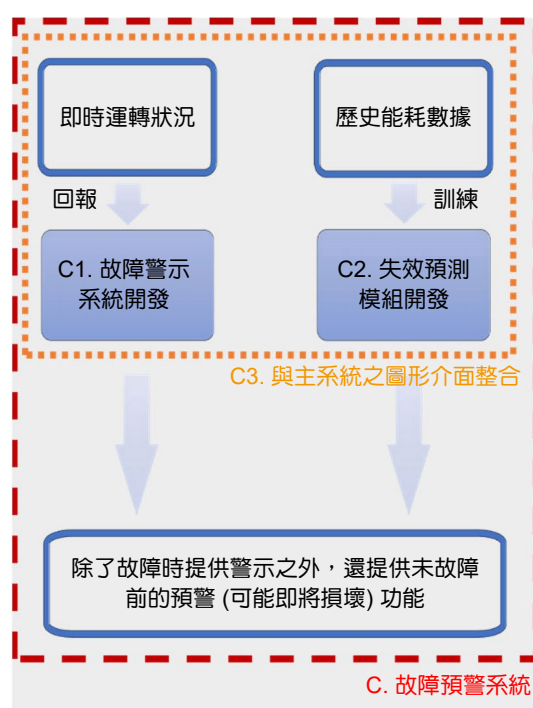


圖 6. 故障預警系統運作流程圖。

4. 歷史數據與性能指標分析系統

過去建築物的性能指標一直是一個問題，一般建築能耗以能耗密度 (energy usage intensity, EUI) 來表示，固然直接表示了每單位面積的能耗，但是建築物的使用場合不一樣時，本身的特性會導致不公平的結果。舉例而言，醫院為了住院病人必須要 24 小時營業，另外急診室也沒有關門休息的可能性，相比於一般商業辦公大樓一天可能僅有 10 小時營業時間，一個用盡節能手段的醫院可能其能耗 EUI 還是遠超過一個並不注重節能的辦公大樓。除此之外，在赤道附近炎熱氣候的辦公大樓，當然不能跟位於涼爽地區的辦公大樓相比。本研究項目以相對效率的概念建立性能指標，避免 EUI 未考慮到使用場合、僅以能源密度作為能耗優劣標準的缺點。與資料庫連線，顯示目前建築操作情形與其他類似建築相比的結果。

四、主動式建築空調能源管理系統應用情況

本研究將主動式建築空調能源管理系統實際應用於台北市地下 4 層、地上 16 層之辦公大樓，大樓結構為鋼筋混凝土，大樓基地面積約 2.3 萬 m²，建築面積為 1 萬 m²，總樓地板面積為 113,270 m²。

在主動式建築空調能源管理系統實際應用時有三項主要成果：

1. AI 最佳化運轉策略控制夏季節能率較過去節省 4%

在使用 AI 最佳化運轉策略上，負載預測模組的運算結果設為輸入，搭配中央氣象局預測之溫度濕度分析得到該條件下之最佳冰機運轉策略，比對過去資料找出溫度正負 1 °C、相對溼度正負 5%，由於建築物根據本系統推薦之開機策略運轉，故無法驗證節能率，因此選取該建築前一年度 7 至 9 月空調使用情況下進行比對，因 7 至 9 月空調使用率較高所以採用 7-9 月數據進行比較，在相同外氣條件及負載下進行比較，實際應用後平均節能率約 7.6%，詳如圖 7，節能率的計算方式如下：

$$\text{節能率} = \frac{(\text{歷史平均 kW/RT}) - (\text{預測最佳開機模式 kW/RT})}{(\text{歷史平均 kW/RT})}$$

	Time	SavingRate
1	2019-08-31	0.0863981784003875
2	2019-08-30	0.0814126778115985
3	2019-08-29	0.0807683821074277
4	2019-08-16	0.0841832802648191
5	2019-08-15	0.0747226167268039
6	2019-08-14	0.0680824494907075
7	2019-08-13	0.0776187451072373
8	2019-08-12	0.0829396447586046
9	2019-08-11	0.0796627175534412
10	2019-08-10	0.0739568375870832
11	2019-08-09	0.0448479796774846

圖 7. 應用案例節能率。

2. EnergyPlus 模擬提供無負載資料時運轉策略

透過程式及能效策略 (energy efficient measures, EEM) 功能對開機策略進行佳化，模擬不同負載分配策略並比較年總耗電量，可得最佳開機策略。

透過 EnergyPlus 模擬結果如，可知選用次序負載 (Sequential Load) 最為節能，節能率可達 3.81%。節能率計算如下：

$$\frac{(\text{過去相似環境下所有開機策略之年總耗電平均值}) - (\text{最佳負載分配策略年總耗電})}{\text{過去相似環境下所有開機策略之年總耗電平均值}}$$

表 2. 不同負載分配策略年總耗電量。

負載分配策略	年總耗電 (MWh)
Optimal	12107.82674
Sequential Load	12055.65343
Sequential Uniform PLR	12117.69812
Uniform Load	13221.66564
Uniform PLR	12684.80316
過去相似環境下所有開機策略之平均值	12532.99841
節能率	3.81%

3. 系統失效預測

以這個月或當下的情況尋找過去相似的資料當作基準線 (偵測到的冰水及冷卻水溫差及流量等數值差異小於 5% 以內)，即可知道現在的效率與過去相似情況時的差異，若效率差異達到一定範圍時即可得知該冰水主機需要檢修。

再加以時間序列的方法來推斷該冰水主機在未來 30 日內的性能差異，得知該冰水主機在 30 日之後是否需要檢修或準備備用元件，將系統故障的影響降到最低。呈現方式如圖 8。

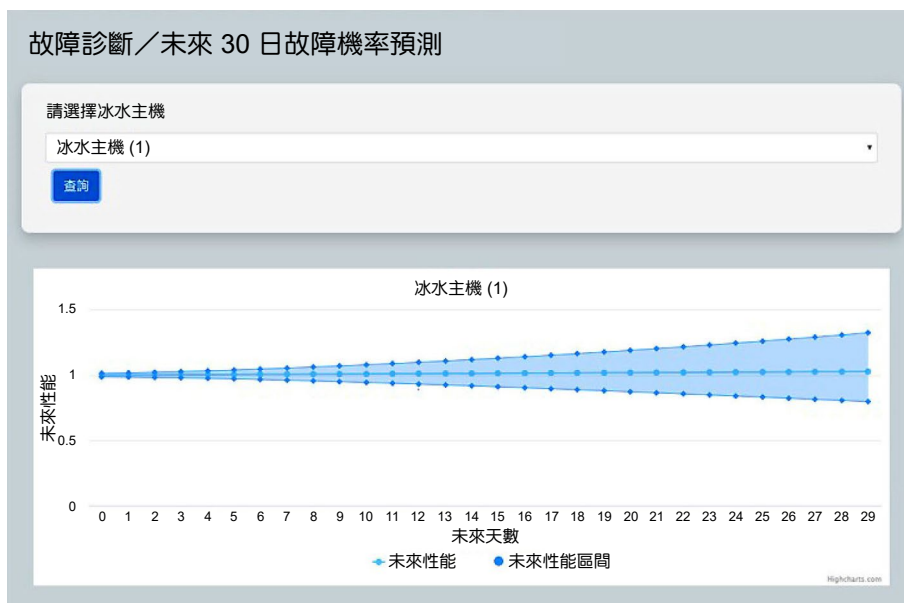


圖 8. 未來 30 日故障機率預測。

五、結論與建議

本研究以建築空調系統運轉數據為基礎，建立並記錄不同氣候條件下之空調系統負載變化與耗電之關係後，產出最佳化開機運轉模式。並實際運用於實際案場，導入最佳化開機策略之案場，經過與歷史紀錄相同氣候條件與空調系統運轉狀態下之耗電比對，可減少空調系統耗能 7.6%，具有相當節能效益。

在 AI 演算之幫助下，能發掘空調系統之運轉節電空間，與市面上之監視系統需人工判斷最佳化操作再進行開機策略調整之方式，不僅冰水系統節能，對於商業及工業應用，不僅可減少專業人才之時間成本，進而減少業主之人力成本與增加企業之競爭力。

建議將此技術推廣應用於工業及商業領域，不僅可協助建立各產業之空調系統相關耗能指標，更可協助各產業掌握空調系統用電與節電關係。

後續可針對相同區域之不同案場進行比較分析，找出共通之節能開機原則，進而以共通之區域性操作策略推廣至工業及商業能源大用戶，可協助能源大用戶達成每年節電 1% 之要求外，同時減少能管員之時間成本與減少各產業之設備運轉成本，更可協助各產業達成節能減碳之目標。

誌謝

在此感謝經濟部能源局業界能專計畫補助及臺北科技大學李文興教授團隊技術支援，讓本次研究順利完成。

參考文獻

1. EnergyPlus-the big picture, please refer to the web site:
https://www.energyplus.net/sites/default/files/docs/site_v8.3.0/GettingStarted/GettingStarted/index.html
2. EnergyPlus -- Internal elements, please refer to the web site:
https://www.energyplus.net/sites/default/files/docs/site_v8.3.0/GettingStarted/GettingStarted/index.html
3. Beghi,A.,et al., *Control Engineering Practice*, **79**, 53 (2016).

作者簡介

林龍杰先生為國立臺北科技大學能源與冷凍空調所博士，現為高齊能源科技股份有限公司副總。
Lung-Chieh Lin received his Ph.D. in Energy and Refrigerating Air-conditioning Engineering from National Taipei University of Technology. He is currently a vice president at Cozeta Service Co., Ltd..

黃緒耀先生為國立臺北科技大學能源與冷凍空調所博士，現為高齊能源科技股份有限公司總經理。

Hsu-Yao Huang received his Ph.D. in Energy and Refrigerating Air-conditioning Engineering from National Taipei University of Technology. He is currently a general manager at Cozeta Service Co., Ltd..

林頤璋先生為國立臺北科技大學能源與冷凍空調所碩士，現為高齊能源科技股份有限公司經理。
Ye-Chang Lin received his M.S. in Energy and Refrigerating Air-conditioning Engineering from National Taipei University of Technology. He is currently a manager at Cozeta Service Co., Ltd..