

空調水側系統整合控制技術與自我學習功能

摘要

空調水側系統整合控制技術是以全系統的觀點對各設備的運轉參數做出最佳的搭配組合，使全系統能源效率達到最高。主流大廠如 Johnson Controls 已具有相關產品，並宣稱該技術可節能 20~60%。另一方面，此類技術需要先對受控系統建立數值模型，根據模型的預測來選擇最佳運轉參數組合，而數值模型則需根據已知的設備性能曲線來建立，當設備性能曲線資料不完整時，上述作法可能遭遇困難。其中一種可能的解決方案，是將自我學習的功能加到此類控制系統中，利用系統運轉的歷史資料，自動建立系統數值模型。如此可讓此類控制系統自動適應所對應的受控系統，簡化系統建置的程序，讓此類控制技術便於複製應用。

一、簡介

中央空調系統可粗略劃分為氣側系統和水側系統兩部份，氣側系統包括了外氣空調箱、室內風機盤管等等。水側系統則包括了冰水主機、冰水泵、冷卻水泵、冷卻水塔、冰水管路、冷卻水管路等，圖 1 為水側系統之示意圖。水側系統運作概述如下：冰水泵驅動冰水於管路內流動，經過冰水主機時，部份熱量被移除，降溫到某一設定溫度，傳統設定為 7°C，再經由管路流到各氣側設備，吸收熱量提供冷卻效果，於是冰水的溫度升高，然後經由管路回到冰水主機，周而復始。冰水主機從冰水所移除的熱量，需要排放到外界環境中，此功能則由冷卻水系統來提供。冷卻水泵驅動冷卻水在管路內流動，經過冰水主機時，吸收了熱量，包括從冰水而來的熱量，以及冰水機耗功所產生的熱量，於是冷卻水的溫度升高。然後冷卻水

經由管路流向冷卻水塔，在此將熱量釋放到戶外空氣中，於是冷卻水的溫度下降，再經由管路回到冰水主機，如此周而復始。

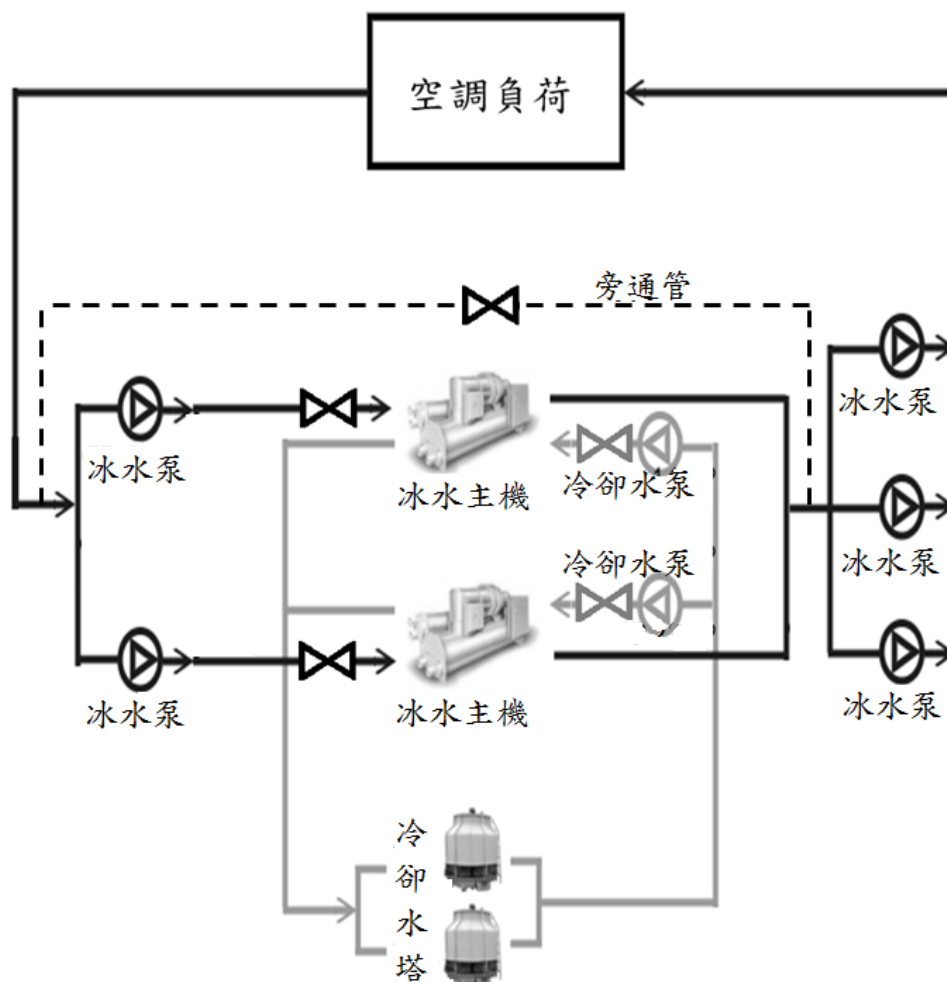


圖 1 空調水側系統示意圖

根據氣象狀況與建築空間的空調負荷，空調系統也需要作即時的調整，而非維持在一個固定的工作狀態。傳統的控制方法之一，會在冰水管路末端的供水側與回水側裝設壓差計，並且控制並聯冰水泵的運轉台數，維持供水側與回水側的壓差在設定值附近，藉由壓差確保氣側設備有足夠的冰水流通，提供足夠的冷卻效果。而冰水主机的控制主要是以回饋控制的方式使冰水供水溫度達到一個預設的值，一般的設計是 7°C 。對於冷卻水系

統而言，則是根據需排放的熱量控制冷卻水泵，並控制冷卻水塔的運轉台數與風扇轉速，使得冷卻水出回水的溫度落在適當的範圍。由以上的討論可知，傳統水側系統的控制被區分為數個部份，各部份有各自的控制邏輯，整個水側系統的各個控制參數並沒有作最適當的匹配，因此在系統效率上仍然有改善的空間。空調系統個別設備效率能夠再進步的空間有限，因此運用各設備的整合控制以提高系統整體效能是值得考慮的方式^[1]。

二、國際大廠的水側整合控制技術：

Johnson Controls 與 Hartman Company 等大廠的水側整合控制技術能夠根據設備的已知性能曲線進行冰水機、水泵、水塔的整合最佳化控制^[2,3]。此類控制功能可藉由模型預測控制法來達成，概念如下：首先取得系統各設備的性能曲線，彙整後建構出全系統的性能曲線，也就是輸入參數與輸出參數的量化關係，或稱為該系統的數值模型。藉由該模型，系統製冷量與耗電量可以根據氣象、空調負載狀況、以及各設備的運轉參數來求得。於是控制系統可以對所有可能的設備運轉參數組合進行評估，預測其對應的性能，然後選出其中製冷量滿足負荷需求，且耗電量最低的一個運轉參數組合，再使用這組運轉參數來控制各設備。Johnson Controls 的 CPO 30 技術宣稱可節省水側系統能耗 20~60%^[2]。

三、未來可能的發展方向

由於每一套空調水側系統都是獨特的，不會與其它系統完全相同，因此這類控制技術在應用時需要對個別受控系統建立系統數值模型，且各水側設備的性能曲線資料不一定都足夠完備，重新分析性能曲線需要專業技術人員與較長的工時，這些因素會對此類技術的複製推廣造成困難。其中

一種可能的解決方案是讓控制系統自動學習受控系統的特性。首先將系統相關參數區分為自變數和應變數，區分的方法並不唯一，表 1 是一個範例。

表 1 空調水側系統變數表

自變數	可控變數	S_i	第 i 台冰水主機開關(0:off; 1:on)
		R_{EPi}	第 i 台一次側冰水泵轉速(Hz)
		R_{CPi}	第 i 台冷卻水泵轉速(Hz)
		T_{EOi}	第 i 台主機冰水出水溫度(°C)
		T_{CTO}	冷卻水塔出水溫度(°C)
	不可控變數	T_{EOSET}	機房冰水出水設定溫度(°C)
		T_A	室外氣溫(°C)
		RH_A	室外相對濕度(%)
		Q_L	空調系統總負載(kW)
		m_{REQ}	二次側冰水流量(kg/s)
	應變數	P_{CHi}	第 i 台冰水主機的耗電量(kW)
		P_{EPi}	第 i 台一次側冰水泵耗電量(kW)
		P_{CPi}	第 i 台冷卻水泵耗電量(kW)
		P_{CTi}	第 i 座冷卻水塔的風扇耗電量(kW)
		m_{Ei}	第 i 台冰水主機的冰水流量(kg/s)
		m_{Ai}	第 i 座冷卻水塔的風量(kg/s)
		m_{Ci}	第 i 台冰水主機的冷卻水流量(kg/s)
		T_{CO}	機房冷卻水出水溫度(°C)
		T_{CI}	機房冷卻水回水溫度(°C)
		T_{EO}	機房冰水出水溫度(°C)
		T_{EI}	機房冰水回水溫度(°C)
		其 它 應 變 數	

其次，根據物理條件分析各應變數受到哪些自變數的影響，也就是判斷各應變數是哪些自變數的函數，結果如下，其中 $y=f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ 代表了 y 是 x_1, x_2, \dots, x_N 的函數。

$$m_{Ei}=f(R_{EPi});$$

$$T_{EO}= f(m_{Ei}, T_{EOi})$$

$$P_{CHi}=f(S_i, m_{Ei}, m_{Ci}, T_{EI}, T_{EOi}, T_{CTO});$$

$$m_{Ci}=f(R_{CPI});$$

$$T_{EI}=f(m_{Ei}, T_{EOi}, Q_L)$$

$$P_{EPI}=f(R_{EPI});$$

$$P_{CPI}=f(R_{CPI});$$

$$P_{CT}=f(\sum_i m_{Ci}, T_{CO}, T_{CTO}, T_A, RH_A);$$

$$T_{CO}=f(T_{CTO}, Q_L, \sum_i P_{CHi}, \sum_i m_{Ci});$$

常用的自我學習方式是用簡單的函數型式，例如一次或二次多項式，來近似原本的函數^[4]：例如假設 $y=a_0+a_1 \cdot x_1+ a_2 \cdot x_2+...+ a_N \cdot x_N$ ；然後根據系統運轉的的累積數據（ y 和 $x_1, x_2, ..., x_N$ 的值）進行迴歸分析，求出各係數 $a_0, a_1, ..., a_N$ 的值。也就是說，利用 x 和 y 的歷史數據，來建立 x 和 y 的函數關係。

以上的程序可以建置在控制軟體中，當此類控制系統應用於一個新的受控系統時，首先需在控制器內定義各輸入輸出訊號所代表的變數，其次需取得一段時間的運轉數據，例如讓系統按照傳統方式運轉一週的時間，每 5 分鐘記錄一次各變數的值，然後讓控制軟體進行上述迴歸分析，獲得應變數與自變數的迴歸函數關係，也就是受控系統的數值模型。如此即可進行上述模型預測控制，達到節能的效果。

四、結論

系統效率除了與各設備效率有關，也和各設備之間的協調運作有關，在個別設備效率能夠再進步空間有限的情況下，利用各設備的整合控制以提高系統整體效能是值得考慮的方式，主流大廠如 Johnson Controls 已具有相關產品，並宣稱該技術可節能 20~60%。此類技術彙整各設備的性能曲線成為全系統的性能曲線，也就是系統的數值模型，描述了輸入與輸出參數的量化關係。然後利用此模型，找出一組輸入參數使得輸出參數的性能

達到最佳化，藉此提高系統效率，達到節能的效果。另一方面，當設備性能曲線資料不完整時，上述作法可能遭遇困難。其中一種可能的解決方案，是將自我學習的功能加到此類控制系統中，利用系統運轉的歷史資料，自動建立系統數值模型。其中常用的作法包括迴歸分析，求取輸出入參數間的迴歸函數來作為系統數值模型。如此可讓此類控制系統自動適應所對應的受控系統，簡化系統建置的程序，讓此類控制技術便於複製應用。

參考資料

[1] Richard Lord , Future HVAC Efficiency Improvements, 2013

[2] CPO 30 Brochure - Johnson Controls:

http://www.johnsoncontrols.com/~media/jci/be/united-states/services-and-support/optimization-and-retrofit-services/files/be_brochure_cpo30.pdf?la=en

[3] Chiller Plant Optimization - Hartman Company:

<https://www.hartmanco.com/innovate/chillopt/index.htm>

[4] ASHRAE HVAC Applications Handbook (2011), Chapter 42