

# 高科技廠房冰水主機之節能策略與效益分析

## High-tech plant chiller energy strategy and benefit analysis

謝志明、吳友烈

C-M Hsieh、Y-L Wu

國立勤益科技大學冷凍空調與能源系

Department of Refrigeration, Air-Conditioning and Energy Engineering,  
National Chin-Yi University of Technology

E-mail : m884140@msn.com、wuyi@ncut.edu.tw

### 摘要

本文是探討在歐美日早已盛行多年之空調系統：一次變水量系統(VPF, variable primary flow), 其與傳統一次定水量系統(POS, primary only system)、一次定水量/二次變水量系統在(P-S, primary-secondary system)(又稱為 de-couple 系統)在能源消耗量之不同;再者,進一步探討組成一次變水量系統的主要設備——如冰水主機、泵浦、變頻器及控制系統等需注意選用的事項,以期能達到更省能源、更省電之狀態,為防止全球暖化、溫室氣體排放盡一點心力。

**關鍵字詞：**一次變水量系統；一次定水量系統；一次定水量/二次變水量系統。

### Abstract

The article is discussion of vogue in the European and American recent day many years in air-conditioning system —variable primary flow system (VPF), compared with the primary only system (POS) and primary-secondary/de-couplesystem(P-S) in the power consumption, further discusses composes of which the VPF system .The main equipment — like chiller, pump, variable frequency driver, control system and so on, must pay attention to selected. By the time can achieve saves the energy and condition of the electricity power. In order to prevent the whole world is warm and the greenhouse gas discharges a mental effort.

**Keywords:** variable primary flow system；primary only system；primary-secondary system

## 1. 前言

在國際油價日漸高漲,而工業與商業建築物中,空調系統的使用占建築物總耗能的60%以上,使用有效、可靠的節能方式來降低能源使用費,已成為建築物所有者之要務。採取在美、歐、日等國早已普遍的一次側冰水變頻(variable primary flow chilled water)技術於空調系統,已成為新系統與舊系統改建不可忽視之節能方式[1]。

美國綠建築協會(USGBC)之 LEED 綠建築評估系統規範了永續建築基地、用水效率、能源與大氣環境、材料與資源、室內環境品質等永續建築議題,其中包含規範了建築及其所有耗能設備從設計、建造、完工及運轉每個環節之性能驗證、冷媒管控、能源最佳化、可再生能源及運轉性能驗證之評價標準。由於能源使用量與氣候有相當大之關係,能源最佳化技術必須因地制宜,且對於跨國企業集團之廠房綠建築節能政策制度推行與運籌帷幄而言,其所遵循之節能規範應能適合全世界各地氣候。LEED 綠建築評估系統適用於全世界所有氣候區,因此採用 LEED 整體建築節能設計之性能分析法,有助於國際企業集團之溫室氣體盤點與管理,再者該評估系統是全世界最廣為採用與認知之綠建築及節能指標,因此適合跨國企業集團企業社會責任(CSR)之宣傳與評價。[2]

建築物裡冰水主機、冷卻水塔、水泵與空調箱的馬達佔去中央空調系統的絕大部分耗電量,近年

來最佳的策略即是加裝變頻器去改變電源的頻率以變化馬達的轉速來應付建築物之負荷變動,以節省能源。冰水主機是多數商業建築物中的單一最大的用電負載,依照美國冷凍空調協會對離心式主機使用於建築物空調之部份負載效率 IPLV/NPLV 進行評估指出,典型冰水主機有99%的操作時間處於部分負載狀態之中[3]。

## 2. 研究內容

### 2.1 空調系統架構介紹

空調系統架構與組成元件如圖1所示,其主要之組成元件包含製冷系統、散熱系統、空調負載端,各系統之元件類型及功能說明如下:

1. 製冷系統:製冷系統為廠房冷卻之心臟,提供廠內所需之冰水,製冷系統之冰水主機。
2. 散熱系統:散熱系統將製冷系統所吸收之機房熱量排放到機房外界環境,其散熱設備類型包含開放式冷卻水塔。
3. 空調負載端:MAU、RCU、Dry-coil、Fan-coil、製程設備。

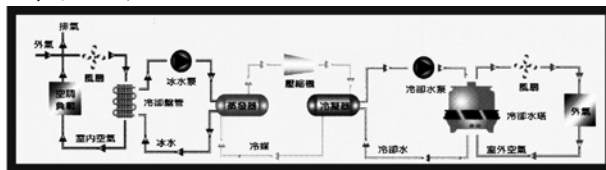


圖 1. 空調系統流程圖

## 2.2 冰水主機 KPI 效率因子

若要節約空調系統之電能，就需先了解空調系統是如何耗能。總體來說，構成中央空調系統的元件主要是熱交換器與流體機械二種。熱交換器是作為高低溫二種工作流體能量交換的設備，諸如冰水盤管、蒸發器、冷凝器與冷卻水塔散熱材等；流體機械則是推動工作流體循環的動力源，諸如風車、泵與冷媒壓縮機等。當任何一組熱交換器之效果不好時，會增加系統耗電率(每一冷凍負載所需之設備耗電量，kW/RT)，不是系統耗電量增加，就是冷凍能力下降。例如冰水主機之蒸發器或冷凝器內管排表面上結垢時會使熱傳效果變差，而使其接近溫度變大，冰水機高低壓差也跟著變大，耗電率也就變差。流體機械的耗電量，一般可以用下列數學式表示：

$$kWh = Q \times H \times hr / \eta$$

該式中的 kWh 是指流體機械的耗電量，而耗電量的多寡決定於運轉時數(hr)、輸送的工作流體流量(Q)、工作流體循環所需之揚程(H)以及效率( $\eta$ ，包括流機效率、機械效率、馬達效率等)。

首先如果要省電當然就是不啟動流體機械，只要不運轉當然就不用電。但這並不是要大家停止使用空調系統，而是要當用則用，當省則省。如何降低運轉時數，端賴有效而合理的管理，避免設備做不必要的運轉。其次，減少輸送的流體也是方法之一。所以採用變流量設計，如 VAV(variable air volume)、VWV(variable water volume)及 VRV(variable refrigerant volume)，分別使風量、冰水量及冷媒流量依負載需求調整，都是減少系統在部分負載(Partial Load)時之耗能量的方法之一。

冰水主機能源效率表示方法：

- (1) 性能係數 (coefficient for performance)

$$COP = \frac{\text{製冷能力 [kW]}}{\text{輸出功 [kW]}}$$

- (2) 能源效率比

$$EER = \frac{\text{製冷能力 (Btu/hr, Kcal/hr)}}{\text{輸入功 (w)}}$$

- (3) 每噸的電功率

$$\frac{\text{kW}}{\text{refrigeration}} = \frac{\text{輸入功 [kW]}}{\text{製冷能力 [Ton]}}$$

註：

輸入功(KW)=冰機耗電量+冷卻水 PUMP 耗電量+冰水 PUMP 耗電量+冷卻水塔耗電量。

製冷能力(Ton)=( $Q \times \Delta T \times 1000$ )/3024

## 2.3 空調冰水系統架構

### 2.3.1 定流量系統運轉特性

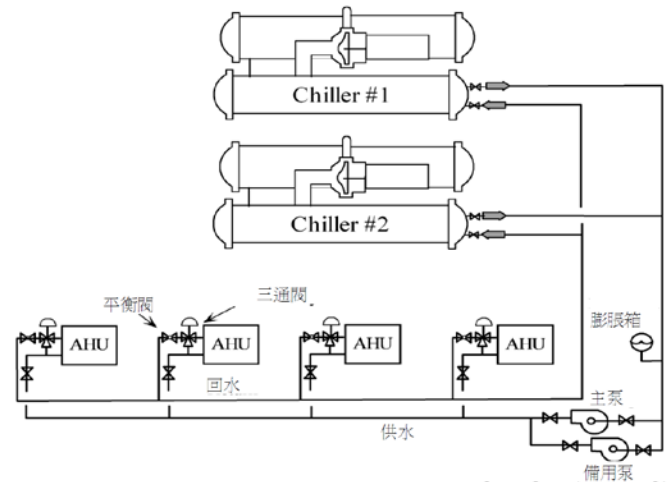


圖 2.定流量空調冰水系統

傳統上空調冰水系統之送水迴路會採用三通閥來控制進入送風機冰水盤管之冰水量，以維持適當之空調送風溫度，並且確保冰水主機蒸發器之流通水量維持固定。圖 2 是具有兩台冰水機及四台採用三通閥控制的空調箱(Air-Handling Unit, 簡稱 AHU)之定水量冰水系統，空調箱利用冰水主機所提供之 7 °C 冰水以冷卻建築空間。

在全載時，AHU 吸收空間熱負荷，而被空間熱空氣所加熱後之冰水以 12°C 之狀態重新回到冰水機系統，然後冰水主機藉由蒸發器重新冷卻溫水，並控制約 7 °C 之冰水出水，再藉由冰水泵將冰水輸送至 AHU。AHU 入口處三通閥完全開啟通往 AHU 冰水盤管之通路，以確保百分之百的冰水進入 AHU 冰水盤管，提供最大之空調冷卻能力。然而，當建築空間對於 AHU 提供的空調冷卻需求量降低時，必須減少進入 AHU 冰水盤管之冰水量，此時三通閥適度增加其旁通迴路之流量，以降低流通 AHU 冰水盤管之冰水流量。

旁通之 7°C 冰水與流出冰水盤管之 12°C 溫水混合後之回水水量維持和全載運轉時相同的流量，但是此時重新流入冰水主機蒸發器的混合冰水溫度低於全載時之 12°C，若冰水主機繼續維持在原有之冷凍能力，則蒸發器之冰水出水溫度將會低於正常之 7°C 的設定值。

因此，為了確保空調系統之正常運作，當冰水主機感測蒸發器出水溫度低於正常設定值時，必須適度降低壓縮機運轉台數或是進行降載運轉。以上所述之系統特徵是採用三通閥控制 AHU 冰水量，故連接冰水主機與空氣側之水路幹管內的總體水流量維持固定，因此稱之為定流量

### 2.3.2 變流量系統運轉特性

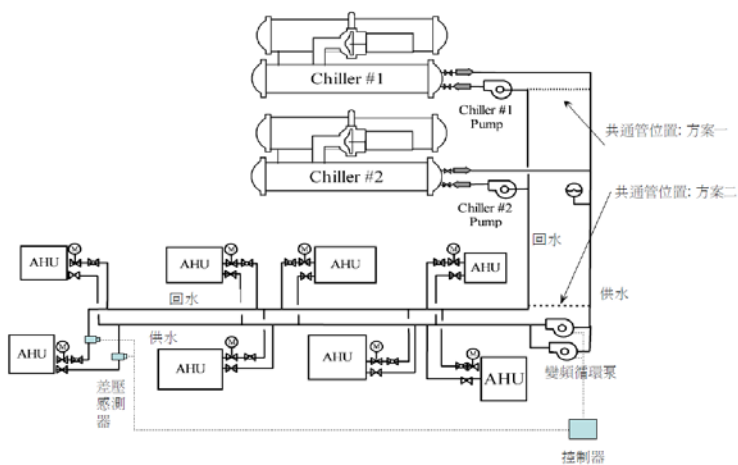


圖 3. 二次側變流量空調冰水系統  
(Primary-Secondary VWV)

圖 3. 所示之空調冰水系統為變流量系統 (Variable Water Volume System, 簡稱 VWV), 相對於 CWV 系統, VWV 系統會隨著建築空間之空調冷卻需求, 而調整連接冰水主機與空氣側之水路幹管內的總冰水流量。VWV 系統之特徵是採用二通閥來控制進入送風機冰水盤管之冰水量, 而有別於 CWV 系統之三通閥設計。

VWV 系統具有藉由變頻器控制之可變轉速的冰水泵, 如前所述, 通常冰水主機提供 7°C 之供水給送風機冰水盤管, 以及接受從送風機冰水盤管回來之 12°C 溫水, 當建築所需之空調冷卻負載降低時, 部分二通閥關閉或減小開度, 以降低進入送風機冰水盤管之冰水量, 與此同時 VWV 系統之冰水泵控制系統將藉由差壓感測器感測到冰水幹管內因部分二通閥關閉或減小開度所造成之壓力差上升, 當壓力差上升到正常設定值時, 控制器命令變頻器降低冰水泵之轉速, 如此 VWV 系統可因空調負載降低, 控制冰水幹管較低的水流量及伴隨較低的水流動阻抗, 而獲得冰水泵之節能效果。

VWV 系統可分為一次側變流量系統 (Primary Only VWV) 及二次側變流量系統 (Primary-Secondary VWV), 如圖 3. 所示之空調冰水系統屬於一般業界較常用的二次側變流量系統, 由系統流程圖可看到二次側變流量系統具有一次側冰水泵與二次側冰水泵, 以及其對應之可各自獨立運作的二個冰水迴路。一次側冰水泵迴路與二次側冰水泵迴路是藉由共通管連接, 以保持若即若離之關係。該系統之一次側冰水泵為定轉速, 二次側冰水泵則可依送風機冰水盤管之水量需求進行轉速調整, 以降低冰水幹管總體的水流量。當空調冷卻需求全載時, 二次側冰水泵以最高設計轉速運轉, 引入一次側泵迴路所提供之全部冰水流量, 因此共通管內沒有水流動;

反之, 當空調冷卻需求降低時, 二次側冰水泵降低轉速運轉, 只引入一次側泵迴路所提供之局部水流量, 因此有部分一次側泵送出的 7°C 冰水由此共通管旁通並且與 12°C 回水混合, 重新回到一次側泵之入口, 與此同時冰水主機亦將感受較低之回水溫度或冷卻需求, 以適度進行卸載動作, 確保 7°C 之冰水出水溫度。

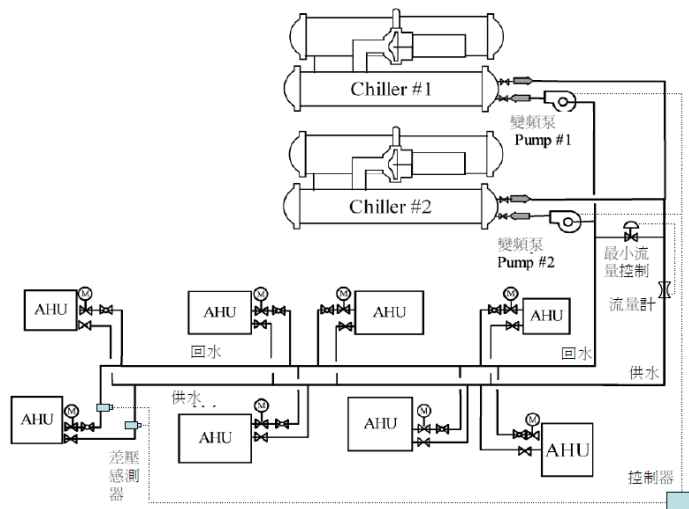


圖 4. 一次側變流量空調冰水系統  
(Variable Primary Flow, VPF)

如圖 4 所示之系統為一次側變流量空調冰水系統 (VPF), 相對於二次側變流量系統而言, 一次變流量系統只有一次側泵, 也就是省略二次泵之設計, 並且直接以一次側泵進行變頻控制。

因此, 一次側變流量空調冰水系統具有更高之節能潛力、節省初置成本、較低之機房空間需求。為了確保冰水主機之安全運轉, 流通冰水主機之水量有一極限低值, 因此, 一次側變流量系統必須設置旁通管。當空氣側之冰水需求量降到某一設定值時, 冰水泵不允繼續降低轉速, 因此須開啟旁通管之控制閥, 讓多餘之冰水由旁通管回流至冰水主機。通常可利用流量計或是由冰水主機之冰水進出口的壓差推算流量, 決定旁通管控制閥之開度。

不論是一次側或二次側變流量系統, 旁通閥或旁通管應該儘可能安裝在水泵附近, 以使旁通水流之壓降減至最小, 如此可將水泵耗能減至最低。另一方面, 將旁通閥安裝在水泵附近也能降低控制系統成本, 因為距離較遠的閥口的位置需要另增加控制線路安裝費。

## 2.4 空調系統之節能機會

### 2.4.1 冰水主機側

冰水主機在中央空調系統中是不可或缺的設備, 其最大的功能就是將低於外氣溫度的熱負載, 轉換成高於室外溫度之熱量, 使系統能利用溫度梯



度將熱負載傳遞至室外。其節能的機會有下列幾項：

(a) 更換符合負載需求之高效率冰水主機為了安全起見，絕大部分之冰水主機容量要比實際尖峰熱負載大 20% 以上，再加上實際尖峰熱負載在全年出現的頻率相當低，而全年平均的熱負載大約是尖峰熱負載的 60~70%，使得全年平均的熱負載只有冰水主機容量的 50~60%，造成冰水主機大部分的時間都在低負載下運轉，冰水主機負載率在 60% 以下運轉效率是不佳的。再加上生產製造技術的提昇，近年來新上市之冰水主機的耗電率已經普遍下降。

由下圖 5 可知新型冰水主機的耗電率比二十年前所生產的冰水主機降低約 35% 左右，因此在適當機會時將舊主機汰換成高效率的冰水主機是非常可行的。

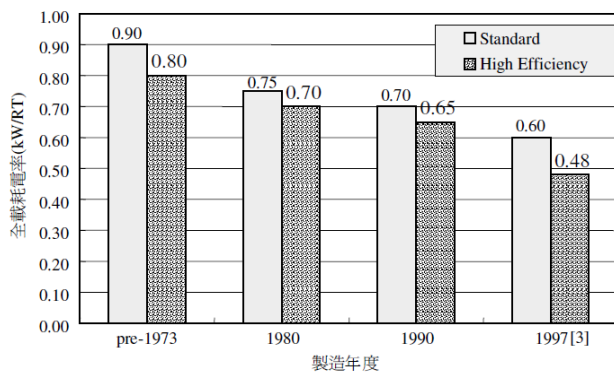


圖 5 歷年來主機耗電率變化圖

(b) 適當地調整冰水主機之設定溫度：冰水溫度愈高，則主機耗電率愈低，亦即其效率愈佳。其主要原因是冰水主機之壓力頭變小了，圖 6 即解釋何為壓力頭，壓力頭分為指示壓力頭及實際壓力頭，指示壓力頭是指冷凝器進水溫度與蒸發器出水溫度間所對應冰水主機所使用冷媒之飽和壓力差，而實際壓力頭是指冰水主機冷凝壓力與蒸發壓力之壓力差。若能降低壓力頭便可減少壓縮功，亦即減少壓縮機的耗電率。

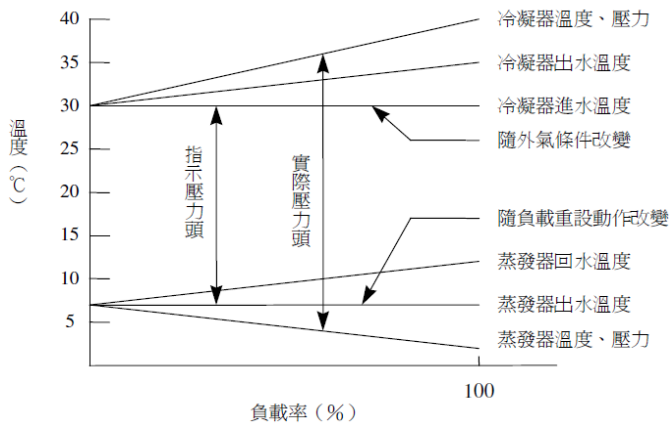


圖 6 冰水主機負載率與壓力頭關係變化

由上圖 6 可知欲降低壓力頭可從兩方面得到：一是降低冷卻水溫，此項容後探討。一是調高冰水設定溫度。而在調高冰水設定溫度時，需符合負載端之溫度需求。圖 7 為 1400RT 之離心式冰水主機，在冷卻水側條件不變的情況下，冰水出水溫度分別設定在 5°C 及 9°C 時之耗電率變化狀況圖。由圖中可很明顯的看出，冰水溫度設定在 9°C 時之耗電率較低，這結果與前面的說法是一致的。

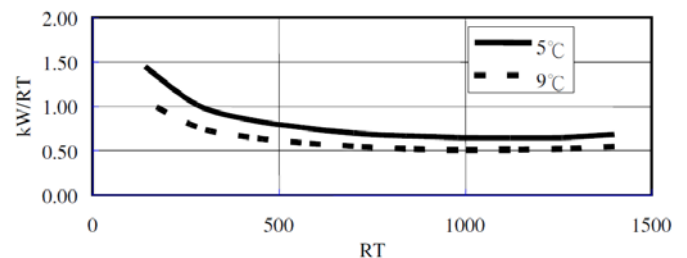


圖 7 冰水溫度對冰水主機耗電率的影響

調高冰水之設定溫度有兩種方法：

- (1) 冰水溫度隨外氣狀況重置(Reset)，由於空調負載常隨外氣狀況而改變，故可用外氣狀況重置冰水溫度，適用於一般辦公大樓舒適性空調之冰水溫度隨外氣溫度重置設定值。
- (2) 冰水溫度隨熱負載重置，可以精確地符合負載端需求。由於需要了解空調系統中各設備之特性(譬如冷卻盤管在部分負載下熱傳的變化狀況、控制閥之特性...等等)，而且必須隨時監視溫度及(或)流量的變化，防止室內濕度過高，因此一套成熟的監控系統是必要的。

#### 2.4.2. 冷卻水側

冷卻水塔並聯運轉，且冷卻水溫隨外氣濕球溫度重置在大多數的設計，一台冰水主機會搭配一台冷卻水塔，且水塔的起停是與冰水主機連動。由於中大系統冰水主機台數偏多，使得冷卻水塔台數亦多而不易管理及維護，且無法隨著空調負載及外氣條件變動而調整風車耗電量。從一般的經驗知道，冷卻水溫度每降低 1°C 可省電 1.5~2.0%。冷卻水入口溫度應在符合冰水主機特性及外氣濕球溫度的限制下，儘可能地降低來節約冰水主機用電。也就是說，冷卻水塔應與冰水主機的運轉一併考量，才得使系統整體效率提升。

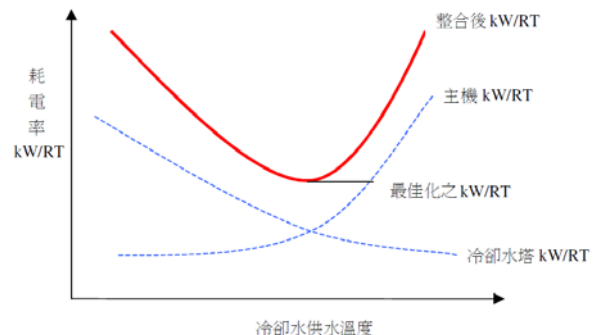


圖 8 主機與水塔在不同冷卻水溫度下的耗電率變化

圖 8 是冰水主機與冷卻水塔在不同的冷卻水溫度下的耗電率變化，在較低的冷卻水溫冰水主機耗電降低，但冷卻水塔耗電上升，合計二者耗電存在一最佳運轉效率點。欲達成最佳化控制，冷卻水設定溫度應隨外氣濕球溫度重置(Reset)。一般冷卻水塔合理的接近溫度為 3°C，因此冷卻水溫的重置溫度亦應以此為基準，其目的在使冷卻水塔的散熱能力完全發揮，同時避免接近溫度過低而消耗太多的風車耗電。圖 8 說明冷卻水溫設定隨外氣濕球溫度重置的情形。但冷卻水溫也不是可以無限制地降低，最低設定溫度應諮詢冰水主機製造廠的意見，一般離心式冰水主機應可低至 18°C，但是雙螺旋冰水機在沒有特別的裝置(如熱氣旁通負載控制，其旁通量與負載率有關)時，最低設定溫度可能在 27~28°C 之間。冷卻水塔風車轉速可依實測冷卻水溫與設定溫度之間的差值做變頻控制。如此一來，冰水主機可因冷卻水溫隨季節變動調低而使耗電減少，冷卻水塔風車也可全力運轉，但不致於浪費過多電力。

### 3. 結果與討論

中央空調系統的各個次系統是環環相扣的，就如同五支連接在一起的水管，任何一支出現阻塞將使整體水流量降低。因此任何一環次系統循環不良(即熱交換效果不佳)都將使系統整體性能(冷卻能力或效率)降低。即使各別元件採用高效率設備，如果不從系統節能觀點考量，也不一定是一套節能的空調系統。

同時再次強調，設計之初即應採取所有可行的方式降低空調負載，如此才能重根本著手，同時必須儘量避免過大設計(Over sizing)，因為它不但增加初設成本，也增加了將來的運轉費用，是得不償失的。

空調系統不是標準化的工業產品，因此需要精心設計才能得到節能的效果。事先良好的規劃、設計及施工更勝於事後的補救。除了良好的規劃、設計及施工，良好的維護保養制度更是維持系統在最佳狀況下運轉的不二法門。最好在規劃設計之初就設置計量、監測儀器，長期持續追蹤考核系統性能。因為唯有透過資料擷取系統(DAS, Data Acquisition System)將運轉數據蒐集、整理、及分析才能獲致有用的資訊及做出合理的改善行動。改善行動執行後仍需靠資料擷取系統持續地蒐集、分析資料以追蹤改善成效，並藉此累積經驗成為有用的知識。

### 參考文獻

- [1]柯明村，一次側冰水變流量個案性能分析與檢討。
- [2]電信網路機房節能應用技術手冊。
- [3]劉青龍，變頻離心式冰水主機之節能分析。
- [4]空調系統能源查核與節約能源案例手冊。
- [5]ASHRAE,ASHRAE Handbook。