

變流量冰水系統 節能效益分析

■ 謝文健、曾文生

摘要

本文說明空調冰水系統的技術演進，分析不同冰水系統的運轉特性及其節能效益。文中探討定流量冰水系統、一次/二次分耦合系統以及主機變流量冰水系統，比較各系統的特性與優缺點，以期發揮冰水系統變頻節能的最大效益。

前言

有關全球氣候變遷的哥本哈根會議在熱鬧聲中結束，會議結束雖然沒有簽定眾所期待具法律約束力的議定書，但至少取得了各方共識的協議書，內容對全球氣候變遷的問題取得共識，確立各國所應採取行動的原則，國際間的合作框架與溫室氣體的管制目標(將全球溫升控制在攝氏2度以內)。因此節能減碳，將會從理想口號逐步落實到現實生活中，我們在生活中直接感受到的即是能源價格高漲，耗能設備的效率標準提升，節能、高效率設備的大行其道，相對的在過去低價能源所安置的低效率設備也將被重新檢視與探討。



表1 辦公大樓用電分項耗能EUI 值 (kWh/m² · yr)

季節別	空調	照明	動力
夏季(6~9月)	0.47	0.4	0.13
春秋季(3~5、10~11月)	0.41	0.46	0.13
冬季(12~2月)	0.34	0.49	0.17

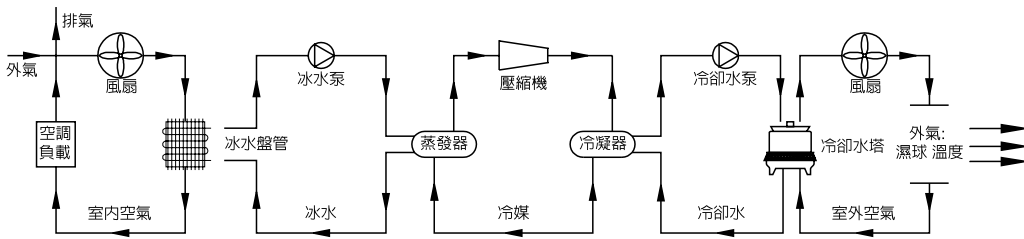


圖1 中央空調冰水系統

空調設備在現代化建築中幾乎屬於建築本體中不可或缺的設備，同時其耗電量在整個建築物耗電中也佔了相當的比例，依(辦公類建築節能技術手冊)辦公大樓用電分項耗能EUI 值 (kWh/m² · yr)的比例(表1)，在夏季空調用電幾乎佔了全建築物耗電的一半(47%)，即使在冬季也佔了三成(34%)。

因此空調設備的耗能在整個建築物的能耗中佔了相當的比例，進行節能工程，空調部份是不可忽略的一環。中央空調冰水系統為大型空調的主要設備，其構造如圖1所示，冰水系統是用來連結主機能力與空調負載。通常主機能力是以最大負載為設計條件，而空調負載會隨著季節與使用狀況變化，所以在正常操作條件下，主機的額定能力大於實際的空調負載需求，如果設計時有過大設計，則此差額會更大，必須調整主機能力與冰水流量來匹配負載，如何經濟有效的循環冰水為冰水系統的設計目的。控制冰水流量通常由水閥(兩通閥 — 變水量，或三通閥 — 定流量)或控制水泵轉速來達到。

冰水系統流量控制元件

常用的水流量控制方式有閥控制與泵轉速控制。

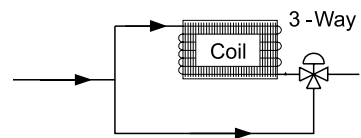


圖2 三通閥流量控制

控制閥

三通閥用在定流量系統，以旁通方式達到控制盤管水量(圖2所示)，這種流量控制方式雖然可以達到溫度控制的目的，但定水量設計的方式使泵功不會因負載減少而降低，沒有省能的效果，同時旁通大量的冰水時回水溫度過低。

二通控制閥(如圖3所示)，由於直接控制通過盤管水流量，因此可以在負載變化時減少水量。

但二通閥在流量控制時，有下列因素會影響閥對盤管能力的控制：

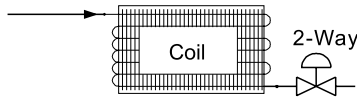


圖3 二通流量控制

1. 閥開度與流量的控制特性。
2. 盤管熱交換能力與水流量的關係，
3. 閥兩側壓力的變化。

一般控制閥依其流量對開度的控制特性可分成三種：

- (1) 快開閥(Quick opening)：閥在小開度(20%)，其流量可接近全開流量(70%)。
- (2) 線性閥(Linear)：流量與閥的開度成等比例增加。

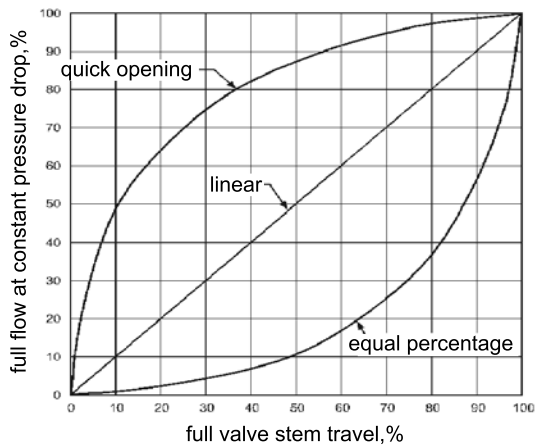


圖4 控制閥特性曲線

(3) 等比例閥(Equal percentage)：流量與閥的開度成等比例增加。

圖4為各種閥在兩側壓降固定下的流量與開度變化圖。

由於盤管能力與流量的關係並非線性，而成一類似快開的特性，要使盤管能力正比例於閥的開度，使系統控制特性穩定，因此通常選用等比例閥來做為盤管的控制閥。(圖5)

圖4與圖5的控制閥是在定壓下的操作情形。但在實際使用時控制閥經常與盤管、平衡閥、關斷閥以及接頭法蘭等管件連接，因此流量在變化過程中，控制閥兩側的實際壓降並非固定，有可能因操作條件改變而變化。為了描述這個情形，定義閥權重(Valve Authority)作為閥在操作過程中的壓力變化參數。

閥權重 = 閥接近全開時的最小壓降 / 閥關斷時的
最大壓降

一般為了獲得適當的控制性以及避免泵功過大，閥權重通常取25%~50%之間。

圖6為等比例閥在閥權重0.1至1.0間的控制特性圖，圖中可看出當閥權重太小時，等比例閥的流量控制特性近似線性閥，若再加上盤管的能力特性(圖5)，整個系統的控制特性將變得不良。控制閥的這種特性將使變流

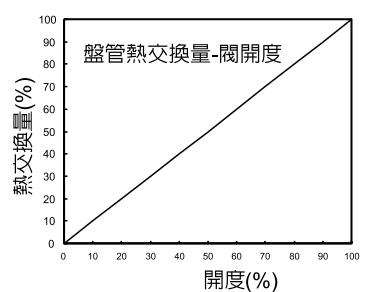
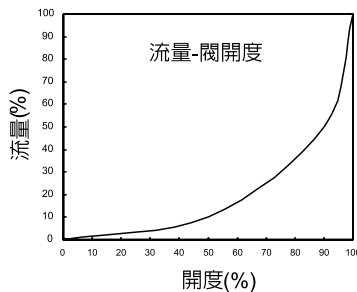
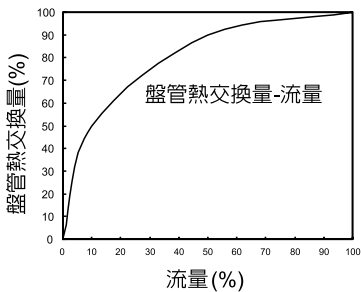


圖5 盤管與等比例閥組合的控制特性

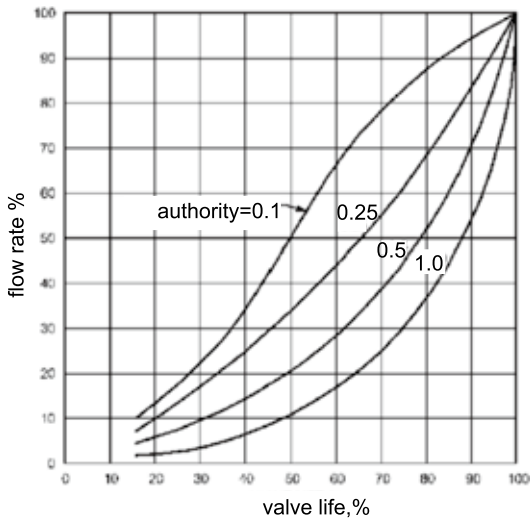


圖6 等比例閥的閥權重影響

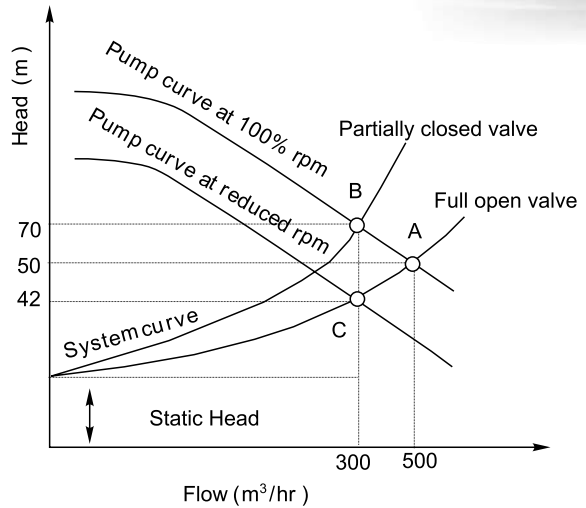


圖8 泵的流量控制模式比較

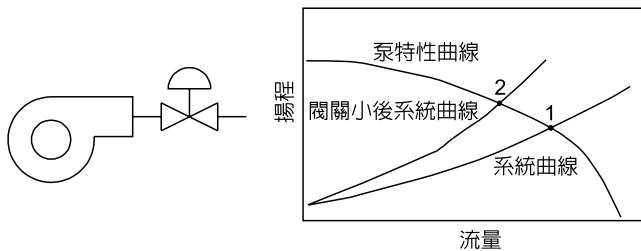


圖7 以閥控制泵的流量

量系統在部分負載時水流量不穩定，導致冰水系統水溫差過小，降低系統效率，增加泵功。

泵

吐出閥與轉數變頻為常用的泵流量控制方式。吐出閥控制是在泵的出口裝一流量控制閥，使泵沿著特性曲線爬升至較小流量的位置，如圖7中的操作點1至2，流量雖然減小，但泵的揚程增加，使泵的耗功漸少有限。

相對於閥的阻流式流量控制，轉數變頻為泵的另一種流量控制方式，透過改變泵的轉速來達到改

變流量的目的，如圖8所示，同一個系統曲線(AC)，泵的轉速由高轉速改變至低轉速，其流量從 $500\text{m}^3/\text{h}$ 下降到 $300\text{m}^3/\text{h}$ ，揚程也會隨著從 50m 下降至 42m ，其理論耗功雖由泵的相似定律與轉速成三次方比，但在實際操作時是無法達到如此高程度的節能。反觀如果以控制閥來調節流量(A→B)，揚程則上升至 70m 。由泵的理论耗功來計算(不考慮效率)，在圖八例子中，以變頻方式調節流量較控制閥調節流量，可節省約40%的泵功($(70-42)/70=0.4$)。

冰水系統

冰水系統的功能在有效率的循環冰水主機與負載(空調箱、送風機、大樓建築等)間的循環冰水，使冰水主機能有效的運轉，並滿足大樓的空調需求，因此最直接的方式就是以冰水管

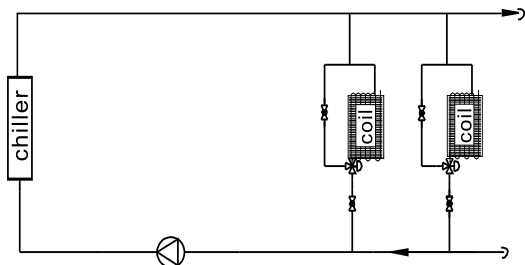


圖9 單機定流量系統

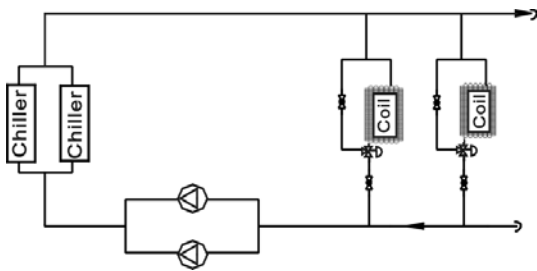


圖10 多機定流量系統

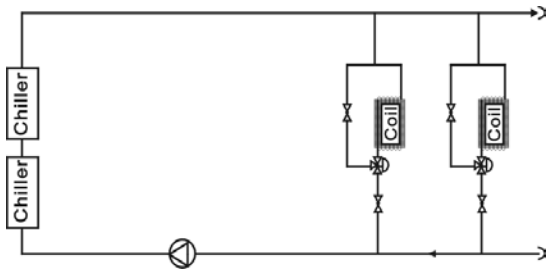


圖11 定流量串聯式冰水系統

路將冷凍系統的蒸發器與負載冰水盤管串聯起來，如圖1所示。但冰水機與負載間對冰水循環的需求卻不太一樣，早期冰水機技術要求冰水機啟動後必須維持固定循環水量以避免冰水器凍結，但負載側所需冰水卻必須因負載的變化而調整，以因應負載的需求，因此最簡單的設計為如圖9所示，一部冰機供應負載所需冰水，由於冰機定流量的需求，負載側為三通閥。

為了改善單機系統的負荷比(turndown

ratio)與系統可靠性，採取如圖10所示的多機系統。負載側盤管以三通閥控制流量，但主機為全流量，可採取分段啟動或做為備載之用。但以上這種方式所需的循環水量為固定(因使用三通閥)，因此在卸載時，過量的水循環，使系統的供回水溫差(ΔT)變小，降低冰機效率與增加泵的耗功，當一部主機停機時，形成旁通管，提高供水溫度，因此如果要固定供水溫度，則必須同時開兩部主機。串聯冰水機系統則改善了並聯系統水溫不定的情形，在定流量下提供穩定的供水溫度，如圖11所示，但串聯式冰水機系統其所需的主機冰水揚程明顯高過並聯式冰水機系統。上述定流量系統，由於負載側水量固定，負載以回水溫度控制，因此水量必須以負載的尖峰狀態設計，並維持最大水流量，相當耗能。

為改善定流量系統的缺點，遂發展出一次/二次水循環系統(Primary/secondary system)或稱分耦合系統(Decoupled system)，如圖12所示。為了將需要定流量的主機迴路與需要配合負載變化的負載迴路在流力上分離，在這兩個循環間加入一公用管(common pipe)，使這兩個迴路產生流力分耦合，分別使用獨立的循環泵。為了達到流力分耦合，熱力耦合的目的，公用管在最大旁通流量下的壓降必須小於 $1.5ftAq$ ，但其管長必須大於三倍的管直徑以避免供回水混合，公用管的位置會影響到主機群卸載的模式，當公用管介於主機側與負載側時(虛線)，啟動的每一部主機回水溫度相同，同步卸載，當公用管介於主機側一邊時(實線)，主機卸載會由公用管旁邊的主機開始卸載，隨著負載減小往負載側移動。每一主機配一定轉速主機泵同步於主機的啟停，負載側的泵則以變頻方式固定最遠端負載的壓降來控制，負載的水量則以二

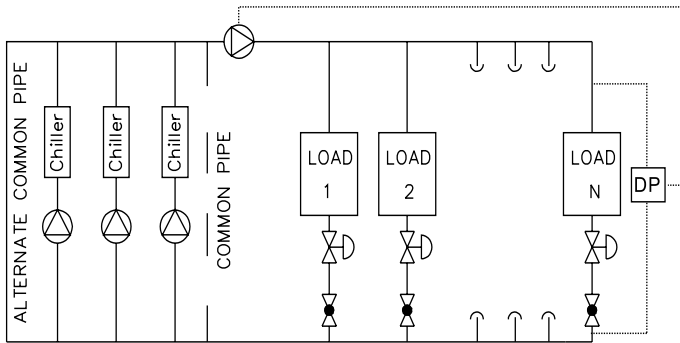


圖12 一次/二次分耦合水循環系統

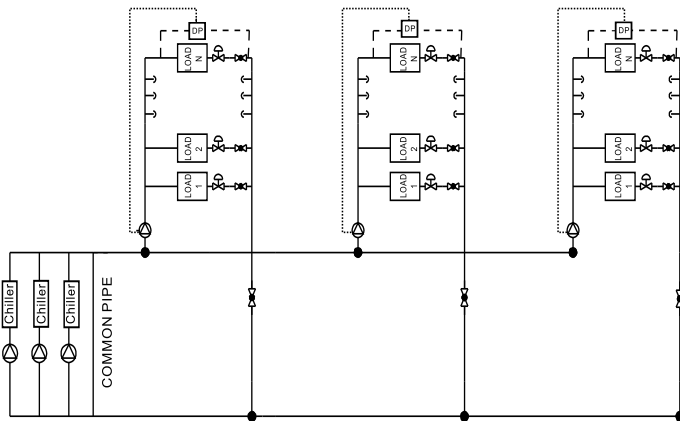


圖13 分耦合區域泵系統

通控制閥依照負載需求調整。當主機側的水量大於負載側時，多餘的冰水經由共用管與負載側的回水混合短循環回主機，由於冰水與負載回水混合使主機回水溫度降低，減少主機的負載。當負載側的水量大於主機側時，多餘的回水經由共用管與主機側的供水混合，使供水溫度升高。

由於主機側的揚程通常遠小於負載側，因此系統維持主機所需的定流量，但在部分負載時經由二通控制閥調變負載側的流量，由泵的相似定律，水流量減低1/3，其耗電約為設計負載的 $(2/3)^3 = 0.296$ ，雖然因為機械效率，實際節省的用電不會那麼多，但考慮空調負載一年當中處於設計負載的時間通常不到5%，如果加上過大設計的情形，則其所節省的電費當更可觀。

由於分耦合系統使用二通閥控置水流量，因此其水流量設計不必像定流量系統般以所有負載的尖峰負載來設計，考慮負載的分散性(diversity)，大幅降低系統的規模，以0.75分散性計，則可減小系統規模25%。

在主機側，主機泵的啟動可同步於主機停運，不似定流量系統，在主機停止時仍須維持全流量運轉。因此分耦合系統在系統設置成本與運轉費用上均可比定流量系統節省很多。

當空調系統規模很大，使用單一的負載循環泵將無法滿足系統的要求，必須使用區域泵系統或三次泵系統以減低系統循環泵的揚程。

圖13為分耦合區域泵系統，其差異在使用各個區域的區域泵來取代單一的負載泵循環冰水，由於使用區域泵，使得系統比傳統的分耦合系統更容易控制與擴充，同時由於使用區域泵，使得接近冰機側的系統管路不需要過度加壓以滿足遠端區域的輸送要求，因此在安裝與運轉費用上可節省很多，但此系統的區域泵與管線必須有效的平衡且主幹管線其配管壓降根據最大水量計算必須低於 $4ftAq/100ft$ ，以避免區域間產生干擾。

圖14為分耦合三次泵系統，系統二次泵將冰水送至各個區域，再由三次泵將冰水循環

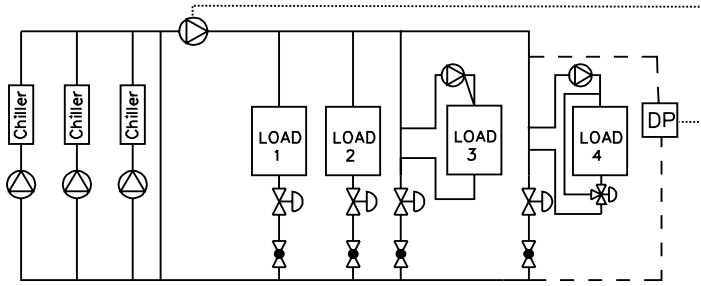


圖14 分耦合三次泵系統

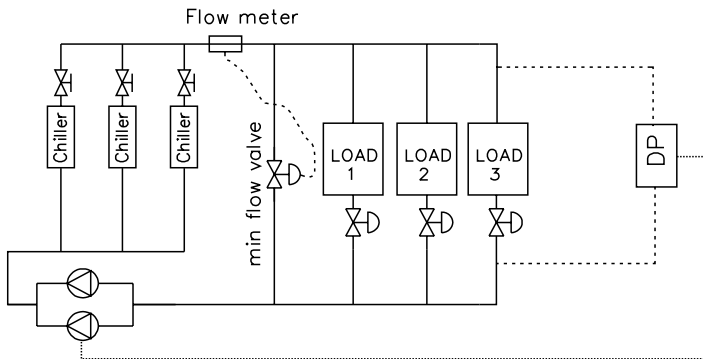


圖15 一次側變流量系統 (以流量計控制最小流量)

至三次側遠端區域，經由三次側的共用管，遠端區域的水管路系統與二次側形成流力分耦合、熱力耦合的情形，且各個獨立的三次側區域不會像分耦合區域泵系統產生耦合的情形。系統中二次泵的功能為輸送冰水至各個區，通常為最大的泵，必須滿足末端或最大負載揚程所需的控制壓力。三次泵則視負載位置與負載所需揚程裝置，在接近主機側的負載，如果系統揚程足夠提供水量控制則可免裝三次泵，如圖14中的負載1、2，二次泵與三次泵相同，均必須考慮使用泵的最小流量以提供泵最低負載的要求。

以上分耦合系統由於使用直接回水配管，承襲過去三通閥定流量系統的習慣，在負載側均安裝平衡閥以平衡各個負載間的流量，但對手動平衡閥而言，其平衡點通常均取在設計操作點，變流量系統部分負載時，水泵會依據終

端壓差降載，此時平衡閥反而有可能導致系統無法平衡。不論系統是否能達到平衡，系統中的平衡閥終年均會耗掉泵的部份壓降，而這些耗功又再度成為冰水系統的負載，降低整個冰水系統的效能。因此在變流量系統中建議(Rishel 1997, Taylor&Stein 2002, Durkin 2005)移除手動平衡閥，而直接以二通流量控制閥來平衡並控制負載。

以上所討論的分耦合系統，其主機側的泵均為定轉速，以維持冰水主機定流量的需求。但隨著控制與冰水主機技術的進步，冰水主機定流量的限制不再那麼嚴格，目前大部分的冰水主機只要流量變化在規定的範圍內，皆可接受適度的流量變化，但必須維持冰水主機的最小流量(一般主機大約可減少至設計流量的60%，經過調整甚至可降至40%的流量)，如圖15所示。主機與負載間沒有共用管，代之以裝設有最小流量控制閥的旁通管。冰水主機的一次泵與負載側的二次泵由系統泵取代，為了避免負載降低，流量過小，因此裝設有流量計以確保運轉主機的最小流量，或者以冰水主機兩側的壓差作為維持冰水主機最小流量的根據(圖16)。

一次側變流量系統比分耦合系統少了負載泵，節省安裝空間與管線施工成本，在滿載



時一次側變流量系統與分耦合系統所需的泵功相差不大(主機側水量與負載側水量平衡)，但在部分負載的條件下，一次側變流量系統的泵功比分耦合系統節省。一次側變流量系統雖然可節省負載側泵系統，但必須增加最小流量控制系統，提高系統控制的複雜性。在低回水溫度問題上，一次側變流量系統雖然消除了主機側與負載側流量不平衡造成的低回水溫度問題，但由於冰水主機與負載水管路系統耦合，因此負載波動對主機的影響也就較分耦合系統來得明顯。例如當負載由一部主機滿載運轉逐漸增加時，系統加開一部主機以滿足系統要求，第二部冰水主機隔離閥打開，此時第一部滿載運轉冰水主機有可能因變頻泵與最小流量旁通閥沒有同步增加水量而降至原先滿載水量的一半，在冰水主機滿載、水量減半的情形下，其冰水溫差會雙倍於設計值，以空調常用的7℃供水、12℃回水，第一部冰水供水溫度將降至2℃，有可能使主機防凍開關跳脫，嚴重時管路凍結。最小流量控制閥的閥開度與流量必須在各種操作壓力下維持線性，才能穩定的維持冰水主機的最小流量，傳統控制閥(圖6)很難達到這個要求，因此建議使用穩壓控制閥(pressure independent control valve)以滿足系統穩定控制的要求。

所謂穩壓控制閥(圖17)即是將穩壓器件與控制閥件結合，以穩壓器消除系統的壓力波動使控制閥件端的壓力穩定而達到穩定水量控制的目的(圖18)。

一次側變流量系統除了最小流量旁通控制閥必須能有效控制流量外，負載側的二通流量控制閥亦有同樣的問題。假設圖16中的

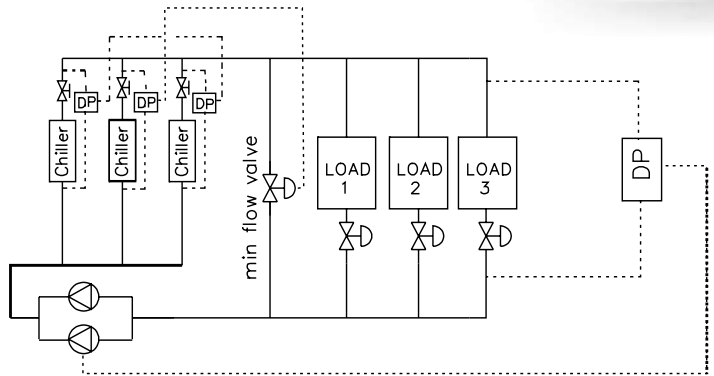


圖16 一次側變流量系統 (以冰水機壓差控制最小流量)

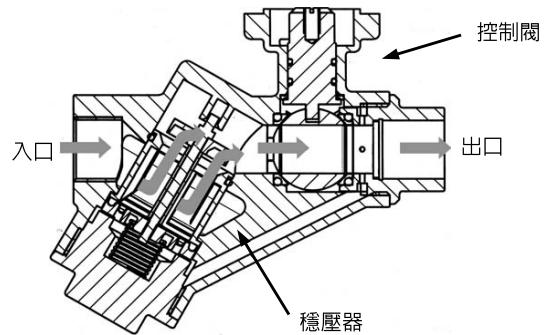


圖17 穩壓控制閥(Belimo)

負載1、2、3為相同空調箱，滿載時三個閥均為全開，流量相同，但閥兩側所需的壓降卻差異很大，由於沒有使用平衡閥，空調箱以外的壓降全部落在控制閥上，負載1控制閥所需的壓差最大，負載3控制閥的壓差最小。但如果操作條件為負載1負荷100%，負載2與3關斷，則在此操作條件下的負載1在相同的壓差控制下將無法滿足負荷需求，必須提昇泵的轉速增加揚程，才能滿足這個條件下的負載。以上的例子說明了在變流量系統中任何一個閥與泵的變化均會影響到整個系統的操作條件，而導致系統尋求新的平衡點，而穩壓控制閥則可以將這些波動隔離，將系統的

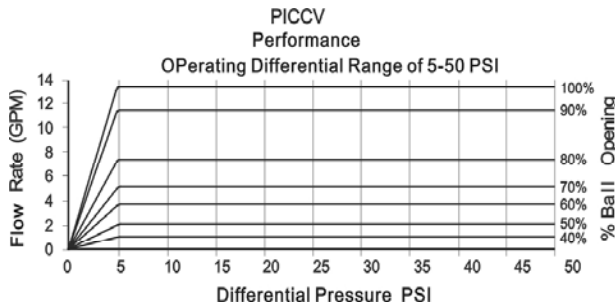


圖 18 穩壓控制閥特性(Belimo)

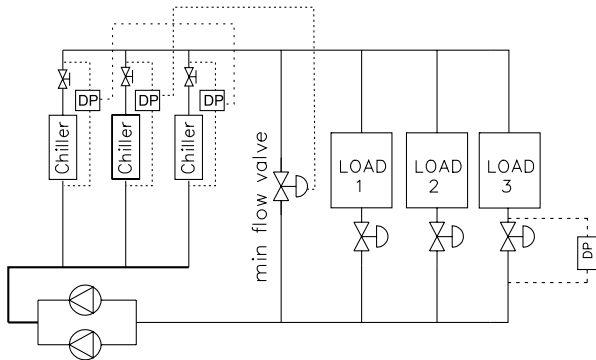


圖 19 一次側變流量控制閥壓差控制

波動降低，提升系統的穩定度。同時，變頻泵只需控制末端流量控制閥兩側的壓降即可，只要每個控制閥的壓降均落在操作壓力範圍內，則穩壓控制閥即可很穩定的控制流量，滿足負載的要求。

系統特性分析

針對各個冰水系統的耗能特性與優缺點如表2所示。

結語

在節能減碳的環保議題下，如何減少產品製造、安裝與運轉過程所產生的碳足跡為大家所重

視。空調系統中主要的耗電設備冰水主機有相關的測試規範與效率標準可供參考，但冰水主機設備效率通常不含冰水泵等相關附屬設備的耗能，而這些設備的安裝施工又會影響主機性能，因此整個空調系統除了個別元件的性能，系統的設計關係著這些設備安裝後的表現。目前除了設備製造技術的進步(如高效率主機、變流量蒸發器)所有的驅動元件包含壓縮機、泵、風機等都朝向變頻控制，電子式膨脹閥與系統控制器也走向數位化，這些特性與過去類比的時代有很多不同，因此雖然同樣設計冷氣系統，但其思維與作法必須與過去有所不同，才能充分發揮現代設備的性能。[4]

參考資料

- [1] ASHRAE 2008, Chapter 12, "HYDRONIC HEATING AND COOLING SYSTEM DESIGN", ASHRAE Handbook.
- [2] Taylor, S.T. 2002."Primary-only vs. Primary-Secondary Variable Flow Systems", ASHRAE Journal, Feb. 2002.
- [3] Schwedler, M. and B. Bradley, 1999, "Variable-Primary-Flow Systems", Engineers Newsletter volume 28-3, American Standard Inc.
- [4] M. Schwedler, 2002."Variable-Primary-Flow, Systems Revisited." Engineers Newsletter, volume



表2 各個冰水系統的耗能特性與優缺點

系統名稱	節能效益	優點	缺點
單機定流量系統	冰水以各個負載尖峰負荷運轉，水泵無法卸載，但冰機本身可視負載卸載	設計簡單，控制容易	系統過大設計，效率差
多機定流量系統	主機可依負載分段啟動，但冰水系統仍為全量運轉	改善單機系統的負載調變範圍	系統過大設計，當壓縮機分段啟動時，造成冰水旁通，提高供水溫度，要固定供水溫度則必須兩部主機啟動
定流量串聯式冰水系統	冰水系統為定流量，前段冰水機操作溫度較高，可提升主機效率	維持穩定的供水溫度	壓降過大
一次/二次水循環系統	負載冰水流量依負載變化，主機可視負載需求啟動	負載側以最大總負載設計，降低系統規模	主機側定流量，各個負載水量仍需平衡
分耦合區域泵系統	各區域冰水系統變流量獨立控制，主機可視負載調控	近冰水主機側的系統不會壓力過載	下游必須使用較大的泵以泵送較長的距離，區域間控制不當可能產生熱耦合
分耦合三次泵系統	二次泵與三次泵可分別分擔冰水輸送，主機可視負載調控	各負載間流力、熱力分耦合，近二次泵的負荷可省泵	控制複雜，近冰水主機側的系統壓力較大
一次側變流量系統(二通控制閥)	主機側與負載側冰水流力耦合，主機能力與泵獨立控制減少泵功	省去二次泵與負載平衡閥，降低機房空間需求	控制複雜，需要主機最小流量控制(流量計或壓差控制)，無法完全避免低溫差的影響
一次側變流量系統(穩壓控制閥、控制閥壓差控制)	降低系統泵所需揚程以及部份低溫差造成的耗功	提升系統的運轉穩定性	無法完全避免低溫差的影響

31-4,American Standard Inc.

[5] LUTHER,R. K., 1998, Applying Variable Volume Pumping,HPAC,October.

[6] LUTHER,K. R., 1998, "Variable Volume Pumping Fundamentals", HPAC, Aug.

[7] Pressure Independent Characterized Control Valves, www.belimo.com.

[8] 柯明村、鄭錫譯、邱品逢，「一次側冰水變流量個案性能分析與檢討」，中華水電冷凍空調月刊，2008年7月。

[9] 李文興、李永裕、黃緒耀，「中央空調系統冰水變流量的溫差探討」，能源節約技術報導，55,2004年12月。

作者

謝文健、曾文生/國立勤益科技大學 冷凍空調與能源系