

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

中央空調系統之運轉模擬與最佳化設計 研究成果報告(完整版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 95-ET-7-002-010-ET
執行期間：95年01月01日至95年12月31日
執行單位：國立臺灣大學機械工程學系暨研究所

計畫主持人：陳希立

計畫參與人員：博士班研究生-兼任助理：王榮昌
碩士班研究生-兼任助理：李明坤、黃啟泰

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 96年03月22日

行政院國家科學委員會/經濟部能源局
「能源科技學術合作研究計畫」成果報告

計畫名稱

中央空調系統之運轉模擬與最佳化設計

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：95-ET-7-002-010-ET

執行期間：95年01月01日至95年12月31日

計畫主持人：陳希立

計畫參與人員：王榮昌、李明坤、黃啟泰

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告
 完整報告

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權，

一年 二年後可公開查詢

執行單位：國立臺灣大學機械工程學系暨研究所

中 華 民 國 96 年 3 月 31 日

一、前言

隨著經濟不斷的發展，國內用電量也不斷的攀升，但電源的開發不易與環保勢力的抬頭，加上於今年 2 月正式實施的「京都議定書」，對已開發中國家強制規範抑制其溫室氣體排放之目標與時程，未來將嚴重影響我國經濟發展，因此如何提高能源使用效率以減少對電力的需求，以成為產學界重要的努力方向與目標。而台灣目前空調用電佔全部用電量的 30%，夏季尖峰時段更高達 40%，因此空調系統的節約能源是非常重要的課題。

空調系統中主要是由空氣側、水路側與冰水主機三大系統所組成，雖然此三系統是獨立元件所組成，但是實際運轉時；此三系統卻是息息相關。舉例而言；當室內空間的負荷量增加時，會導致空氣側系統的進出口溫度也隨之增加，而為了維持固定的供風溫度，此時水路系統所需供應的冰水流量也要增加，導致主機的負載提高，並造成運轉費用的提高。而空調系統於實際運轉時，負荷量總是瞬息萬變，相對的系統的運轉狀況也是不斷改變，因此如何在負荷改變的情況下，設計最佳化的空調系統，成為設計者的一大挑戰。

傳統的空調系統設計方法在設計階段無法考慮系統負荷變化之實際運轉情形，所以往往針對最大負載量進行設計，因而設計出過大之系統，而造成能源的浪費。因此若能在設計階段即藉由電腦輔助模擬的方式；進行空調系統各元件實際運轉的模擬，以模擬在不同負荷下，系統運轉時的性能表現，在設計階段就可針對系統的負載變化情形，對操作策略做一縝密的規劃，並據此選擇及設計出適當的空調系統，不但可節省各元件運轉之耗電量外，更可達到一空調系統最佳化設計，進而達到節約能源之目的。

二、研究目的

本研究的主要目的是利用全方位空調的設計方法「回饋模擬法與動態規劃法」，應用於既有之中央空調系統，並針對此既有中央空調系統進行實際量測、驗證、回饋模擬法分析與動態規劃法最佳化設計。本計劃之流程圖如圖 1 所示，首先針對此既有中央空調系統進行量測，並藉由量測結果與模擬結果進行比較，並驗證回饋模擬法之模擬模式準確性。接著採用回饋模擬法針對此既有空調系統進行逐時模擬，分析此既有空調系統目前運轉狀況與耗能情形，最後採用泵浦變頻的節能方式進行模擬，以提出不同泵浦變頻策略與節能效益。在本計劃中並以動態規劃法針對此既有中央空調系統冰水主機的匹配組合進行最佳化分析，並利用回饋模擬法針對冰水主機匹配組合實際運轉進行模擬，綜合這些模擬與分析結果將可用以評估此既有中央空調系統之節能效益，作為全方位解決(total solution)的方法。

三、文獻探討

近年來由於我國經濟的快速成長及國民所得不斷提高，生活水準也因此相對提高，都市群聚現象更為顯著。由於都市的土地有限，房屋建築日益高聳且密集化，造成都市中大氣自由流動減緩，減少都市中風的生成條件，造成都市散熱不易及吸收較多太陽輻射，形成都市熱島效應的高溫現象，再加上高科技產業蓬勃發展，以致無論是工業用電乃至民生用電均大幅成長，尤其夏日尖峰負載的成長更是逐年攀升。天氣炎熱，為了維持舒適的溫度環境，使得用電量屢創高峰，電力備載容量明顯不足。

目前在空調系統節能技術中，冰水主機採用改變轉速來降低冰水主機設備耗能[1]，以及改變冰水流量來降低輸送冰水耗能的設計方式，來因應在不同的空調負載率下，均能維持高效率運轉的離心式冰水主機[2]。另一種節能方法為水系統變流量設計，依空調需求改變負載側泵浦送水量來達到節能目的，James Burt Rishel[3]指出泵浦送系統之電力到流體之效率，包含了泵浦效率、馬達效率、變頻器效率泵浦進出口端壓降等因素。在冰水主機方面，Austin[4]探討主機處於部份負荷下之性能改變，配合現場量測數據，提出離心式主機最佳的操作負荷管理，其建議在多部主機的運轉管理中，應使主機朝最接近滿載的操作為宜。另外 Steve T. Taylor[5]利用電腦模擬一次側定流量系統與傳統變流量系統之差異性。Gil Avery[6]則是實際查核工廠案例，分析得知送回水間之共通管混水現象，由於溫差變小，結果造成冰水主機於輕載運轉而效率變差。從前述的文獻回顧可知，傳統空調設計方法中，皆無法考慮系統負荷變化之實際運轉情形[7]，往往針對最大負載量進行設計，因而設計出過大(over size)之系統[7,8]，造成不必要的能源浪費。

四、研究方法

(一) 節能策略—回饋模擬法

本研究以回饋模擬法應用於既有中央空調水路系統的模擬，模型建構流程如圖 2，回饋模擬法應用於水路系統的模擬流程包括下列幾個步驟，第一步驟是參數的輸入，針對既有中央空調系統之輸入參數包括了冰水主機、水路系統的水泵以及空調箱的風車等之操作性能，第二步驟是模型的建立，包括既有中央空調系統之系統管路配置包括

管路長度、尺寸、接頭與相關零組件，第三步驟是限制條件的輸入，包括熱傳與流速等的限制，第四步驟是系統模擬，針對水路系統建立模擬分析的數學模式，包括質量、動量與能量守恆，第五步驟是模擬值與實際值之比較，並將誤差信號回饋至第六步驟的修正程序，藉由全壓平衡及能量平衡調整閥件開口度，以達到系統的平衡操作。除此之外第七步驟進行逐時空調負荷之模擬與分析，使的系統在操作平衡的條件下，同時滿足空調負荷的需求。

1.物理模式建立

在步驟四系統模擬是依照模型建立物理模式，在既有空調系統的模式建構時，首先將系統初始參數及限制條件輸入並建立物理模型後，經模擬軟體之物理模式(質量守恆、動量守恆、能量守恆)模擬後得到模擬結果，由輸出結果與實際負載流量比較，再經由壓力平衡與能量平衡修正程序修正不同路徑之二通閥的開度。此外，使用泵浦變頻節能策略時，隨著系統負荷逐時變化，泵浦轉速也會隨之有所改變，在此亦應用回饋模擬法於泵浦的變頻調整，進行負載平衡修正程序完成逐時模擬的目標。

利用流體力學的基本原理，對於複雜的管路系統，假設流體流動為一維穩態不可壓縮，可將質量方程、動量方程和能量方程以系統流率連續方程式、壓力平衡與能量平衡關係式來表示。這些關係式是複雜的管路系統中處處均須滿足的。

2.壓力平衡修正程序

第六步驟修正程序中系統的壓力平衡必須滿足各路徑全壓損失與泵浦所提供揚程的平衡，在一個具有 n 條路徑的系統中，流經各個空調箱的流量分別為 Q_1 、 Q_2 、...、 Q_n ，則系統所需的總流量為：

$$Q_{sys} = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (1)$$

在變流量水路系統中，二次側泵浦提供的流量須和系統總流量一樣：

$$Q_{pump} = Q_{sys} \quad (2)$$

由二次泵浦的性能曲線，我們可由流經二次側泵浦的流量得知所提供的揚程 P_{pump} 。各個路徑中由於管段及建築物高度所造成的壓力損失為 ΔP_{r1} 、 ΔP_{r2} 、...、 ΔP_m ，而因二通閥開度不同所造成的壓降為 ΔP_{t1} 、 ΔP_{t2} 、...、 ΔP_m ，則可知各個路徑的總壓降為：

$$\Delta P_n = \Delta P_{rn} + \Delta P_{tn} \quad (3)$$

所以在二通閥開度改變後所增加的壓力，必須使各路徑之總壓力等於泵浦所提供之全壓：

$$\Delta P_n = P_{pump} \quad (4)$$

所以二通閥提供的壓降為：

$$\Delta P_{tn} = P_{pump} - \Delta P_{rn} \quad (5)$$

二通閥流量與流經二通閥造成的壓降關係：

$$Q = C_v \sqrt{\Delta P_{tn}} \quad (6)$$

由上式可以求得二通閥的 C_v 值，將其輸入軟體進行模擬。

3. 能量平衡修正程序

第六步驟修正程序中能量平衡修正是依據冰水流過各空調箱所提供的能量滿足逐時的空調負荷，當空調負荷變動時為了維持空調箱進口水溫的溫差，修正程序是改變流過空調箱的冰水流量。假設於不同時刻 t_1 、 t_2 、...、 t_m 時之冰水主機負載分別為 L_1 、 L_2 、...、 L_m ，為滿足不同時刻之負載，系統提供流經一次側泵浦之冰水流量為 $Q_{ch,1}$ 、 $Q_{ch,2}$ 、...、 $Q_{ch,m}$ ，流經二次側泵浦之流量為 $Q_{sys,1}$ 、 $Q_{sys,2}$ 、...、 $Q_{sys,m}$ ，一次側與二次側流量有如下關係：

$$Q_{ch} \geq Q_{sys} \quad (7)$$

在變流量系統中，當 Q_{ch} 等於 Q_{sys} 時，流經共通管的流量為零，冰水主機的入口溫度即為流經空調箱後回流的工作流體溫度，知道冰水主機的出入口流體溫度差 ΔT 及流體密度 r 後就可以計算出冰水主機負載：

$$L = r \cdot C_p \cdot Q_{ch} \cdot \Delta T \quad (8)$$

此外，假設工作流體密度不變，當轉速 w 改變，流經泵浦的流量與泵浦轉速成正比之關係，已知二次側泵浦在全速運轉 w_0 時，提供的流量為 Q_0 ，則二次測泵浦在全載與降載的頻率比為：

$$r_f = \frac{w}{w_0} = \frac{Q_{sys}}{Q_0} \cdot 100\% \quad (9)$$

運用此修正方法，即可得到系統逐時變頻運轉的操作模式。

(二) 最佳化設計—動態規劃法

本研究中並以動態規劃法針對此既有中央空調系統冰水主機的開機策略進行最佳化分析。希望藉由此設計方法能讓設計者於設計過程時在不違反各項限制條件的前提，且考量到整體系統成本最佳化的情況下，而能夠設計出一最佳化的冷凍空調系統，以減少冷凍空調系統運轉時所耗費之能源。綜合這些模擬與分析結果將可用以評估既有空調系統之節能效益。

動態規劃(dynamic programming)是一種計量的運算技巧，用以分析各種複雜的多階段決策程序(multi-stage decision procedure)，以尋求最有利的策略來解決連續性的決策問題(sequential decision making problem)。動態規劃的求解方法是將一個整體的複雜問題，依照順序分解成許多個彼此相關連的局部問題(sub-problems)，而使問題單純或簡化，以便個別分析考慮，逐次尋求最有利的答案。

應用動態規劃的運算模式，通常都含有某種或某些數量有限的經濟資源(成本考量)，如人員、機器、資金、或者廠房的空間等。茲以 n 代表營業活動的項數，若以 X_i 代表分配給第 i 項營業活動的資源數量，則 $g_i(X_i)$ 可代表其收益函數式。假定其各項營業活動是彼此獨立的，各項營業活動之收益可以相加以求其和；因此，總收益函數式可用下式表示之：

$$R(X_1, X_2, \dots, X_n) = g_1(X_1) + g_2(X_2) + \dots + g_n(X_n) \quad (10)$$

如果以 Q 代表某項資源的數量，而該項資源又是有限的，則有以下的限制式，

$$Q = X_1 + X_2 + \dots + X_n \geq 0 \quad (11)$$

目標函數必須要在合乎限制式的條件下，以求各項營業活動的總收益為最大。總收益 R 之最大值需視資源的數量 Q 以及營業活動項數 n 而定，此種相依關係可用以下的函數式表示之：

$$f_n(Q) = \text{Max}[R(X_1, X_2, \dots, X_n)] \quad (12)$$

其中函數 $f_n(Q)$ 代表將資源 Q 分配給 n 項營業活動所能獲得之最大預期總收益。若沒有資源分配給第 i 項營業活動，則其預期收益必定為 0，

$$f_i(0) = g_i(0) = 0 \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (13)$$

同理，若將全部資源分配給第 i 項營業活動，則其預期收益應如下式：

$$f_i(Q) = g_i(Q) \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (14)$$

設 n 和 Q 為任意值，若 X_n 代表分配給第 n 項營業活動的資源數量， $0 \leq X_n \leq Q$ ，則該種資源的餘額應為 $Q - X_n$ ；由其它 $n-1$ 項營業活動所可能獲得的收益之函數式應為 $f_{n-1}(Q - X_n)$ 。因此，由 n 項營業活動所可能獲得的總收益應為：

$$g_n(X_n) + f_{n-1}(Q - X_n) \quad (15)$$

關於分配給第 n 項營業活動的資源數量 X_n 之適當選擇，應當能

使此函數式的總收益為最大之數量。將此函數式代入式，即得以下的動態規劃基本運算式：

$$f_n(Q) = \underset{0 \leq X_n \leq Q}{\text{Max}} [g_n(X_n) + f_{n-1}(Q - X_n)] \quad (16)$$

總括以上的說明，可以將動態規劃的運算模式歸納如下：

$$n=1 \text{ 時, } f_1(Q) = g_1(Q)$$

$$n=2 \text{ 時, } f_2(Q) = \underset{0 \leq X_2 \leq Q}{\text{Max}} [g_2(X_2) + f_1(Q - X_2)]$$

因為 $0 \leq X_2 \leq Q$

$$\text{所以 } [g_2(X_2) + f_1(Q - X_2)] \Rightarrow \begin{pmatrix} g_2(0) + f_1(Q - 0) \\ g_2(1) + f_1(Q - 1) \\ g_2(2) + f_1(Q - 2) \\ \text{LLLLLLL} \\ g_2(Q) + f_1(0) \end{pmatrix}$$

其中， $g_2(X_2)$ 及 $f_1(Q - X_2)$ 皆為已知之函數值。

$$n=3 \text{ 時, } f_3(Q) = \underset{0 \leq X_3 \leq Q}{\text{Max}} [g_3(X_3) + f_2(Q - X_3)]$$

同理，當 n 為任意自然數時，以此類推可得所需之函數值。所以當營業活動的項數 $n=1$ 時，式中 $f_1(Q)$ 的值可以由上述方程式求得；當 $n=2$ 時，將求得之 $f_1(Q)$ 代入 $f_{n-1}(Q - X_n)$ ，即可求得使 $f_2(Q)$ 的總收益為最大之 X_2 值，同樣方法依次進行，即可求得各階段的最有利決策；最後階段的最有利決策，即為使整個問題總收益為最大的最有利決策。

動態規劃法求解程序，如圖 3 的動態規劃網路圖(network chart)，可用來說明動態規劃的運算技巧。圖中顯示該項網路有 A、B 及 C 三個可供選擇的起點，經過四個決策階段(stage)，而有 J、K 及 L 三個可能的終點。各箭形線段上的數字，用以代表各項營業活動的成本。依照最有利的階段策略，無論起點是怎樣選的，通往終點的途徑必須是最有利的。這樣即可運用簡易的計算而確定出最有利的階段策略。

即是每階段節點的最小值，運用同樣方法循序進行，即可求出最有利的四階段策略。

動態規劃提供一項比直接運算更簡易有效的求解技巧；因此，動態規劃用於解決多階段的連續性決策問題是一種非常經濟有效的運算工具。

(三)實際案例量測與模擬

本研究以一實際案例作為分析對象，並針對此實際案例進行水路系統量測與分析，以瞭解在各種不同空調負荷情況下，泵浦之流量、耗電量與相關設備及元件之運轉情形，並藉由此量測結果以驗證後續模擬之準確性。本研究首先針對此實際案例之既有中央空調水路系統進行量測，此實際案例為一大型賣場，此大型賣場為地下三層、地上三層之建築物。系統配置如圖 4 所示，在此實際案例中，空調機房位於地下二樓，現有冰水主機為離心式 300 噸兩台，以供應賣場中之空調負荷使用。冰水系統則採用一次側與二次側方式設計，其中一次側泵浦有兩台，採用並聯運轉，每台之運轉功率皆為 10 hp，並隨著主機的開關而定頻運轉。二次側區域泵浦有兩台，為並聯運轉，每台之運轉功率皆為 20 hp，並隨空調負載變化而變頻運轉，一次側泵浦與二次側泵浦性能曲線如圖 5 所示。

為瞭解系統實際運轉之情形，本研究首先針對此實際案例進行冰水泵流量與耗電量之量測，再以回饋模擬法之分析結果比較。一次側泵浦與二次側泵浦之流量是以超音波流量計量測。其中圖 6 為一次側泵浦流量之模擬值與實測值，細黑線與細虛線分別代表一次側泵浦 P-1 與 P-2 流量之實測值，由圖形中可知，在量測時間 24 小時內，兩台一次側泵浦之流量皆在 1950 至 2000 LPM 間，並未有太大之變化。

而圖 7 為二次側泵浦流量之模擬值與實測值，細黑線與細虛線分別代表二次側泵浦 P-3 與 P-4 流量之實測值，在量測時間 24 小時內，二次側泵浦的流量有較大幅度的變化。由圖 7 中可知二次側泵浦的流量可以概分為尖、離峰二個狀態，尖峰狀態為清晨 3 點半至 5 點半與早上 10 點至晚上 10 點半，此時兩台二次測泵浦流量皆為 1750 LPM，而離峰狀態為從晚上 10 點半至翌日清晨 3 點半與 5 點半至早上 10 點，此段時間內二次側泵浦的流量約為 1500 LPM。圖 8 為一次側泵浦耗電量之實測值及圖 9 為二次側泵浦耗電量之實測值，由於泵浦耗電量與泵浦所輸送流量有密切關係，因此呈現與流量相同趨勢分布。

本研究採用回饋模擬法，針對此實際案例進行分析，並與實測值作比較，在所有管段的管徑、尺寸與閥件等相關參數為已知的條件下，於不同運轉情況進行系統實際運轉的模擬，以分析出在各種不同運轉條件下，系統各管段內的流量、溫度、壓力變化，與泵浦輸入功率及主機之耗電量。由於系統負荷隨一日內各時間需求不同而變動，所以將一日內的系統負載分成 24 小時不同時段，利用回饋模擬法的修正程序來完成逐時變化的系統模型，讓模擬結果更貼近實際情況。本研究節中模擬結果的皆針對一次側泵浦及二次側泵浦的流量與功率進行分析，再將模擬結果與本案例的實際量測值比較，以驗證此電腦模擬軟體之準確性。

模擬過程中，利用模擬運轉結果來修正系統模型的參數設定，也就是利用回饋控制的觀念，系統傳回一個誤差訊號，來調整下一次輸入的參數。在實際案例模擬流程又可詳細列出其模擬過程如圖 2，在進行模擬之前，先輸入系統初始參數，如工作流體性質及空調箱、二通閥、管路摩擦係數等各元件的規格設定，以及一次側泵浦與二次側泵浦的性能曲線，如此便能建構出此實際案例的模擬架構。完成模擬

系統所需的限制條件及參數設定後，就可以進行水路系統模擬，當模擬結果與實際量測值誤差超過 5%時，則進行系統的修正，直到系統中各管段的流量誤差小於 5%時，模擬結束。

經由水路系統模擬，可以得知流經一次側泵浦與二次側泵浦的流量、揚程及泵浦運轉效率，並由(17)式求得一次側泵浦與二次側泵浦的耗電量。

$$P = \frac{Q \times \Delta H}{6120 \times h_{p,2} \times h_{m,2} \times h_v} \quad (17)$$

其中： P 泵浦消耗電量 (kW)

Q 泵浦流量 (L/min)

ΔH 泵浦揚程 (m)

h_p 泵浦效率

h_m 馬達效率

h_v 變頻器效率

(A) 泵浦變頻節能分析

在系統節能運轉的額定問題上，除了要滿足所需的系統空調負荷外，還需考量到能源的耗用問題，如何以最節約能源的運轉模式，達到系統運轉時滿足空調負荷的需求，也是相當重要的課題。本研究中將以回饋模擬法針對各種不同的泵浦節能技術進行節能效益分析，以期望設計者在設計階段即能考慮節能技術，或對於既有的空調系統，在已有的運轉限制條件下能得到最佳化的運轉控制策略。

如圖 4 所示，變流量冰水系統藉由共通管將水路系統分割成一次側及二次側，一次側為定流量系統又稱主機側，每台冰水主機搭配一冰水泵浦使一次側迴路內工作流體循環於冰水主機之蒸發器，使工作

流體溫度降低，二次側為變流量系統又稱供水側，由二次次泵浦負責輸送工作流體至各負荷終端，滿足空調負荷需求。大多的空調系統設計皆以滿足最大的負載為首要考量，但最大負荷通常只有特定的一段時間會發生，因此大部分的時間系統處於降載的狀況，所以提升系統在部分負荷運轉時的效率，可節約能源的消耗。目前的節能策略是利用變頻器控制泵浦葉輪轉速，調節泵浦輸出揚程和系統之流量，在部分負荷的情況下，可得較高的泵浦運轉效率，本研究將以回饋模擬法分析採用變頻技術作為節能策略之的節能效益。

在一次側是採用定流量模擬，於二次側則是採用變流量模擬，在二次側變頻的模擬流程中，泵浦運轉方式如表 1，可分為三種模式進行模擬：

- (1)一次側泵浦二台定轉速運轉，二次側泵浦二台定轉速運轉。
- (2)一次側泵浦二台定轉速運轉，二次側泵浦一台變頻運轉。
- (3)一次側泵浦二台定轉速運轉，二次側泵浦二台變頻運轉。

此三種模式模擬流程皆如同圖 2 回饋模擬流程圖所述，差別在於二次側泵浦的運轉方式及台數相異。模式(1)二次側泵浦二台定轉速運轉即為實際案例所建立的系統模型，亦即原有水路系統的運轉方式，而模式(2)與模式(3)則式則針對模式(1)的二次側泵浦做變頻改變，因此在圖 2 的模擬流程中，仍須將逐時模擬後的流量誤差控制在誤差 5%之內，使此三種運轉模式都能提供空調負荷終端相同的冰水流量，計算出各自的泵浦耗電量後再將模式(2)及模式(3)的模擬結果與模式(1)的模擬結果之流量與耗電量做比較，進行節能效益分析。

(B)冰水主機組合之最佳化匹配與節能運轉策略

一個最佳化全方位的中央空調系統冰水主機組合匹配設計，必須同時考慮到冰水主機組合最佳化匹配設計與實際運轉節能策略，因此為了獲得全方位最佳化的中央空調系統設計，必須考慮到系統冰水主機設備選用規格與匹配問題，同時也要考慮系統於實際運轉下，在節約能源操作模式的額定問題。中央空調系統冰水主機的設計問題，需在滿足各種限制條件下，於系統在空調負荷變動時，在運轉成本最佳化的考量下，設計出最佳化的冰水主機組合匹配。系統運轉的額定問題，是針對已設計完成或既有之中央空調系統，在壓力平衡與能量平衡的條件下，滿足負荷與環境各種之要求，得到中央空調系統實際運轉下節約能源的控制策略。

本研究針對既有中央空調系統，在離心式冰水主機為兩台 300 RT 的組合於一次水路側定轉速冰水泵與二次側變頻泵浦提供空調在尖峰和離峰所需之空調負荷，藉由回饋模擬法分別與實測值比較並提出節約能源的運轉策略，本研究將針對既有中央空調系統離心式冰水主機的組合，在滿足空調負荷尖離峰的變動下，利用動態規劃法得出最佳化冰水主機的組合匹配，使離心式冰水主機(不含冰水泵與冷卻水泵)組合的總耗電量最低。動態規劃法的最佳化設計無法模擬實際運轉情況與提出節能運轉策略，包含一次側泵浦、二次側泵浦與空調箱的實際運轉模式，因此有賴於本研究所提出回饋模擬法來補足動態規劃法設計之不足。

為了得到全方位最佳化中央空調系統冰水主機組合匹配與節能運轉策略，本研究以動態規劃法針對此既有中央空調系統冰水主機的組合策略進行最佳化匹配分析，比較各種不同噸數的冰水主機組合，在滿足空調負荷的限制條件下，配合運轉策略並建立有效設計方法及流程，得到不同空調負荷下最佳離心式冰水主機匹配組合。隨著離心

式冰水主機選用的不同，一次側泵浦所需提供之流量與揚程也會隨之不同，為了提供中央空調系統實際運轉的節能策略，本研究並以回饋模擬法針對各種離心式冰水主機匹配組合，一次側泵浦、二次側泵浦與空調箱進行模擬分析，以滿足系統所需之流量。最後綜合動態規劃法最佳化分析與回饋模擬法的模擬結果，作為本研究所提出新的設計方法，能夠全方位解決空調系統設計的案例說明。

(1) 動態規劃法之最佳化主機匹配

離心式冰水主機的負載不同，會有不同的操作性能，圖 10 所示為 300 RT 離心式冰水主機的性能曲線圖，實線表示於不同負載下冰水主機所需之耗電量，虛線則代表每冷凍噸之耗電量 (kW/RT)，虛線值越低，表示每冷凍噸所需之耗電量愈少，而有較佳之性能。由圖中可知；當離心式冰水主機負載為 50%，每冷凍噸所需耗電量為 0.75 kW，當離心式冰水主機負載為 80%，每冷凍噸所需耗電量為 0.67 kW 有最佳的性能。因此當一台離心式冰水主機的降載條件不同，也會有不同之性能，由性能曲線圖可看出在額定容量的 80% 條件下運轉有最佳的運轉性能。在多台離心式冰水主機組合下，滿足空調負荷的變動，如何使各離心式冰水主機降載之匹配組合能在最佳性能的狀況下運轉是相當重要的課題。本計劃將應用動態規劃法說明多台離心式冰水主機在滿足空調負荷的條件下，冰水主機組合匹配之最佳化設計。

在進行最佳化冰水主機組合匹配前，首先需得到本實際案例之空調逐時負荷，本研究中空調逐時負荷可由一次側泵浦流量實測值，與能量平衡定律將此實際案例的空調逐時負荷求出，本案例空調負荷分佈如圖 11 所示。本研究中假設不同冷凍噸數離心式冰水主機的性能假設有相似性，因此可藉由已知的 300 RT 離心式冰水主機的性能曲

線為基礎，依冷凍噸不同而作等比例的變化。為了比較各種不同離心式冰水主機的匹配組合性能，既有案例使用兩台 300 RT 之離心式冰水主機，將作為各種其他不同匹配組合之比較。

在滿足空調負荷的限制條件下，還有許多其他不同噸數的離心式冰水主機匹配組合，為了尋求最佳化的冰水主機組合匹配方式，本研究應用動態規劃法，在滿足空調負荷的限制條件下，針對六種不同離心式冰水主機匹配組合進行運轉成本最佳化分析，包括了(I) 300 RT + 300 RT、(II) 200 RT + 400 RT、(III) 250 RT + 350 RT、(IV) 200 RT + 200 RT + 200 RT、(V) 200 RT + 300 RT、(VI) 250 RT + 250 RT 等六種不同離心式冰水主機噸數組合進行討論。

動態規劃法進行最佳匹配組合運轉，依據能源運轉成本及初始成本所建立之成本 E 為目標函數：

$$E = E_p + E_s \quad (18)$$

其中， E_p 為系統運轉成本，包括了冰水主機、冰水泵等之耗電量。

E_s 為初始成本，包括冰水主機及附屬設備。

動態規劃法設計已知條件是系統於各時刻下之空調負荷，本分析案例中此部分資料可由實測值得到。動態規劃法需輸入限制條件，離心式冰水主機的組合匹配的限制條件包括了主機供冷量的限制與滿足空調負荷的限制。主機供冷量的限制與大氣溫度及冰水主機出口溫度有關，主機的供冷量不可超過該條件下主機的最大供冷能力。

$$L_{ch} \leq L_{ch,n}(T_{wb}, T_{out}) \quad (19)$$

其中 L_{ch} 為主機供冷量 (RT)， $L_{ch,n}$ 為主機標稱供冷量 (RT)， T_{wb} 為環境的濕球溫度， T_{out} 為冰水主機出口水溫。而在任一時刻下，冰水主機的供冷量 L_{ch} 必須滿足該時刻的空調負荷 L_k

$$L_{ch} \geq L_k \quad (20)$$

動態規劃法之計算方式為將每個小時當作層級(stage)，在每個小時內，各種不同冰水主機組合的匹配組合方式之耗電量為狀態值，每個小時各種冰水主機組合的匹配組合可以有多種選擇，亦即每層級中具有數個狀態。

假設全部的空調時間為 m 小時，系統中各時間的空調負荷分別為 L_1 、 L_2 、...、 L_m ，而在第 m 小時中，各種不同冰水主機的匹配組合有 s 種，提供之冷凍能力為 $Y_m^{(s)}$ ，為滿足第 m 個小時的空調負荷，冰水主機所提供之冷凍能力須滿足以下之關係

$$L_m = Y_{m \sim m+1}^{(s)} \quad (21)$$

上式中 L_m 代表第 m 個小時的空調負荷， $Y_{m \sim m+1}^{(s)}$ 代表在第 s 種冰水主機組合下，第 m 個小時所提供之冷凍能力。

當已知冰水主機所提供的冷凍能力後，如果此時主機供冷量不符合限制條件的要求，則此種冰水主機組合將被剔除。若滿足限制條件的要求，即可計算出第 m 個小時中的能源運轉成本 $P_{m \sim m+1}^{(s)}$ 。同樣地，可再計算其它冰水主機組合及其相對應的能源運轉成本，如 $P_{m \sim m+1}^{(1)}$ 、 $P_{m \sim m+1}^{(2)}$ 、...、 $P_{m \sim m+1}^{(s)}$ ，將這些冰水主機組合與其耗電量以陣列型態儲存。

相同的計算方法可運用於其它時間 $m + 1$ 、 $m + 2$ 、...、24，並且在每一個時間間隔內皆計算其能源運轉成本，如表 3 所示。並以上一個時間間隔的計算結果做為下一個時間間隔計算的基礎，如此重覆上面的計算步驟，直到第 24 小時計算結束，並求出最佳化的冰水主機匹配組合。

(2) 回饋模擬法之冰水主機組合運轉節能策略

本研究以動態規劃法所設計的最佳化冰水主機匹配組合為模式，以回饋模擬法應用於冰水主機組合運轉節能策略的模擬，回饋模

擬法的流程圖仍如圖 2 所示之既有中央空調系統回饋模擬流程，所改變的是不同冰水主機組合匹配。其模擬流程包括下列幾個步驟，第一是參數的輸入，此步驟輸入參數包括了六種不同匹配組合的冰水主機性能、一次側泵浦與二次側泵浦，以及空調箱的風車等之操作性能，第二是模型的建立，包括既有中央空調系統之系統管路配置包括管路長度、尺寸、接頭與相關零組件，如圖 4 所示，第三是限制條件的輸入，包括熱傳與流速等的限制，第四是系統模擬，針對水路系統建立模擬分析的數學模式，包括質量、動量與能量守恆，第五是模擬值與實際值之比較，並將誤差信號回饋至第六步驟的修正程序，藉由全壓平衡及能量平衡調整閥件開口度，以達到系統的平衡操作。除此之外步驟七進行逐時空調負荷之模擬與分析，使得系統在操作平衡的條件下，同時滿足空調負荷的需求。

回饋模擬法於模擬分析時，一次側冰水泵浦規格選用隨著離心式冰水主機噸數不同。這是由於選用不同噸數的離心式冰水主機，一次側泵浦所需提供之流量與揚程也會隨之不同，當選用較大噸數離心式冰水主機時冰水泵需配合流量的要求而選用較大之一次側泵浦，所以一次側冰水泵浦規格選用隨著離心式冰水主機噸數不同等比例的變化。且模擬分析時，一次側泵浦皆為定流量運轉，並隨著主機的啟停而開關。於回饋模擬法分析中二次側泵浦的運轉模式是依據表 2 中二次側兩台泵浦皆採用變頻運轉，空調負荷的需求是如圖 11 所示。

五、結果與討論

經由模擬後，泵浦流量模擬值與實際量測值的比較如圖 6 為一次側泵浦流量及圖 7 為二次側泵浦流量，並計算出模擬的泵浦耗電量曲

線如圖 8 為一次側泵浦耗電量及圖 9 為二次側泵浦耗電量，逐時比較各量測值與模擬值的差異後，誤差都在 $\pm 5\%$ 以內。由圖形中可得知，經由模擬後的一次側泵浦與二次側泵浦的流量與耗電量曲線分佈皆與實際量測趨勢相同，且由於誤差在 $\pm 5\%$ 以內，可證實此電腦模擬軟體的準確度，也確保後續進行的節能運轉分析結果之可信度，其中驗證電腦模擬的準確性及建立實際案例的模擬模型，模擬的流程如圖 2 所示，接著為不同節能效益的分析，目的在探討不同節能技術的效益比較。本研究中所用的節能技術為(1)泵浦變頻節能技術與(2)冰水主機開機策略。利用此二種節能技術，針對既有的中央空調系統進行模擬，並將模擬結果進行節能效益分析，比較各種不同節能技術的差異，並作為此既有中央空調系統節能診斷的依據。

(1) 泵浦變頻節能技術之模擬

二次側泵浦三種運轉模式的逐時模擬後，流量變化如圖 12 所示，從圖形中可知道三種流量誤差範圍在 5% 以內，滿足原有的冰水流量，圖 13 為三種不同運轉模式的耗電量，明顯看出變頻運轉後的泵浦耗電量低於原有系統的泵浦耗電量，並依流動電費 1.96 元/度計算，可將三種運轉模式一年內所耗的電費比較如表 2(儘針對二次泵浦耗電費用)，可以看出最佳的運轉方式為兩台二次側泵浦變頻運轉。從模擬結果得知，應用變頻於二次側泵浦流量控制，使得泵浦輸送的水量依據負載之多寡而適當調整，與利用流量控制閥的方式比較，顯示此一節能方法具有非常好的效益，節省的能源可達 48.3%。

(2) 冰水主機組合之最佳化匹配與節能運轉策略

1. 動態規劃法之最佳化主機匹配

基於離心式冰水主機運轉性能相似性的假設，由已知的 300 RT

離心式冰水主機的性能曲線，可得其它噸數冰水主機的性能曲線，進而計算出離心式冰水主機組合的運轉性能曲線。例如圖 14 所示 200 RT 離心式冰水主機性能曲線及 400 RT 離心式冰水主機性能曲線，當冰水主機為 200 RT 與 400 RT 的組合時，本研究假設各冰水主機所分擔的負荷與冰水主機的噸數成正比亦即在負荷變動下 200 RT 與 400 RT 離心式冰水機所分擔的負荷為 1：2，則可得到 200 RT 與 400 RT 離心式冰水主機組合下之運轉的性能曲線。

圖 14 所示為離心式冰水主機 200 RT 與 400 RT 的組合，在不同的空調負荷下匹配分析結果。由圖中的粗黑線當空調冷凍負荷大於 400 RT 時，則兩台主機全開運轉，當負荷低於 220 RT 時，僅啟動 200 RT 的冰水主機，當負荷介於 220 至 400 RT 時，則開 400 RT 的冰水主機為最佳的主機匹配運轉策略。例如，當空調負荷為 300 RT 時，若兩台主機皆運轉的狀況下，系統總耗電量為 0.75 kW/RT，但若僅開 400 RT 的冰水主機，系統耗電量則下降為 0.67 kW/RT。因此，在多台冰水主機的匹配組合運轉策略上，可由圖中得出空調負荷變動下，使用何種冰水主機匹配運轉策略可以最省電，進而得到負荷隨時間改變下，冰水主機的最佳匹配組合。

表 4 所示為根據動態規劃法計算結果，分別列出六種不同冰水主機匹配組合的初始成本、能源運轉成本、生命週期成本與經濟效益，冰水主機總冷凍噸為 600 RT 與 500 RT。前四種不同冰水主機組合，總冷凍噸數為 600 RT，後兩種冰水主機組合，總冷凍噸數為 500 RT。於表中所分析的結果，皆滿足空調負荷的需求，換句話說以既有中央空調系統 600 RT 選用冰水主機總噸數為過大設計。表 4 之經濟效益分析計算依據，包括初始成本假設冰水主機每一冷凍噸價格為 10,000 元，能源運轉成本以每千瓦小時 1.96 元計算，假設此系統使用 10 年，

現值上升因子為 8.567，年運轉時數為 8760 小時。

表 4 第二行所示之初始成本，前 4 種不同冰水主機組合，總冷凍噸數為 600 RT，初始成本均為 6,000,000 元；後兩種冰水主機組合，總冷凍噸數為 500 RT，其初始成本為 5,000,000 元。表中第三行所示之當冰水主機總冷凍噸為 600 RT 與 500 RT 皆滿足本案例的空調負荷條件下，各種不同冰水主機匹配組合的能源運轉成本，目前既有中央空調系統的冰水主機為 300 RT + 300 RT 的組合，其能源運轉成本為 27,099,540 元最大；當冰水主機組合為 200 RT + 400 RT 或 3 台 200 RT 時，有最低的能源運轉成本為 25,999,900 元；於 200 RT + 300 RT 或 250 RT + 250 RT 的組合運轉成本為 26,279,960 元。可看出 200 RT+400 RT 或 3 台 200RT 的組合有較低的運轉成本，但其初始成本較高。

表 4 中亦說明各種不同冰水主機組合的生命週期成本，生命週期成本為初始成本與能源運轉成本總合，目前既有中央空調系統的冰水主機為 300 RT + 300 RT 的組合，其生命週期成本為 33,099,540 元為最大；冰水主機組合為 200 RT + 300 RT 或 250 RT + 250 RT，有最低的生命週期成本 31,279,960 元。可見目前既有中央空調系統 300 RT + 300 RT 的組合並非最佳化的組合，而以 200 RT + 300 RT 或 250 RT + 250 RT 此兩種冰水主機組合為最佳的匹配組合，雖然其能源運轉成本較 200 RT + 400 RT 或 3 台 200 RT 為高，但是冰水主機總冷凍噸數為 500 RT，不僅有較低的初始成本，同時能夠滿足空調負荷的需求。於表中所示各冰水主機的組合匹配下的經濟效益，經濟效益是以既有中央空調系統離心式冰水主機為兩台 300 RT 的生命週期成本作為比較的百分比，由表中可看出當冰水主機匹配組合為 200 RT + 300 RT 或 250 RT + 250 RT 可得經濟效益為 5.5 %。

動態規劃法的最佳化設計雖然提供了在滿足空調負荷的限制條

件下，以六種冰水主機匹配的分析，選擇最佳化的組合。但動態規劃法只提供了冰水主機組合匹配下，初始成本、運轉成本與生命週期成本最佳化的設計，無法模擬實際運轉耗能情況與提出節能運轉策略，包含一次側泵浦、二次側泵浦與空調箱的實際運轉模式，因此有賴於本研究所提出回饋模擬法來補足動態規劃法設計之不足。

2. 回饋模擬法之冰水主機組合運轉節能策略

表 5 為以回饋模擬法分析各種不同冰水主機組合泵浦運轉費用與經濟效益結果，表中所列為在各種不同冰水主機組合下，一次側泵浦每年運轉成本、一次側與二次側泵浦每年運轉成本與經濟效益分析。表 5 第二行所示為一次側泵浦每年運轉成本，目前既有中央空調系統的冰水主機為 300 RT + 300 RT 的組合，一次側與二次側泵浦皆為定轉速運轉，其一次側泵浦每年運轉費用為 102,863 元最高；冰水主機組合為 200 RT + 400 RT 或 3 台 200 RT 時，一次側泵浦有最低的運轉成本為 68,575 元。表中第三行所示為一次側泵浦與二次側泵浦每年運轉成本，目前既有中央空調系統的組合，一次側泵浦與二次側泵浦每年運轉成本為 348,254 元最高；當冰水主機組合為 200 RT + 400 RT 或 3 台 200 RT 時，一次側泵浦與二次側泵浦每年運轉成本為 195,320 元最低。於表中所示各冰水主機組合匹配下泵浦運轉成本的經濟效益，經濟效益是以既有中央空調系統一次側泵浦與二次側泵浦每年運轉成本作為比較的百分比，由表中可看出當冰水主機匹配組合為 200 RT + 400 RT 或 3 台 200 RT 時經濟效益為 44.0%。

當回饋模擬法結果考慮到在不同冰水主機組合下之冰水主機的耗電量，如表 5 中第五行所示為在各種不同冰水主機組合匹配下包括了一次側冰水泵浦、二次側變頻泵浦與冰水主機組合之總耗電。目前既有中央空調系統的冰水主機為 300 RT + 300 RT 的組合，一次側與

二次側泵浦皆為定轉速運轉，其總耗電費用每年為 3,058,208 元為最大；其次冰水主機組合為 250 RT + 350 RT，節能經濟效益為 6.0 %；接著冰水主機組合為 200 RT + 300 RT 或 250 RT + 250 RT，節能經濟效益為 7.6 %；最低的冰水主機組合為 200 RT + 400 RT 或 3 台 200 RT 總耗電費用每年為 2,795,310 元，節能經濟效益為 8.6 %。由回饋模擬法針對既有中央空調系統的模擬的分析結果可看出既有中央空調系統的運轉節能方式有很大的改善空間。

六、計畫成果自評

本計畫透過產學合作的方式，由元福公司提供一實際工程之案例，並由本計劃對此實際案例進行分析與模擬，透過空調系統最佳化設計方法之應用，可得到生命週期成本最低之最佳化設計，以減少能源的浪費。在計劃執行期間，雙方互動良好，並已輔導元福公司由一工程公司轉型為兼具工程與研發能力的公司。本計劃完成後之成果已完成技術移轉，並輔導元福公司獲得一項專利，將有效的提昇產業界在空調系統全方位設計能力與競爭力，進而達到節約能源的目標。

本研究所提出創新設計方法，可將廣泛應用於空調系統或半導體廠的製程排氣系統，除了可應用於系統的設計階段之外，亦可針對既有之空調系統提供最佳化的運轉策略，為一種可以同時滿足設備最佳化設計與實際節能運轉的全方位解決方法，達到生命週期成本最小與省時省力之全方位解決工具。綜合動態規劃法最佳化分析與回饋模擬法節能運轉策略，將可用以評估空調系統之節能效益，進而作為未來空調系統最佳化節能設計之參考。

參考文獻

- [1] Thomas Hartman, “All Variable Speed Centrifugal; Chiller Plants” ,*ASHRAE Journal*, pp. 43-51, September 2001.
- [2] Gregor P. Hence, “Overview of Optimal Control for Central Cooling Plants with Ice Thermal Energy Storage”, *Solar Energy Engineering Journal*, Vol. 125, August 2003.
- [3] James Burt Rishel, “Wire-to-Water Efficiency of Pumping Systems”, *ASHRAE Journal*, pp.40-46, April 2001.
- [4] Austin, S. B., “Optimum Chiller Loading”, *ASHRAE Journal*, pp.40-43, 1991.
- [5] Steven T. Taylor, “Primary-Only vs. Primary-Secondary Variable Flow Systems”, *ASHRAE Journal*, pp.25-39, February 2002.
- [6] Gil Avery, P.E Fellow ASHRAE “Improving the Efficiency of Chilled Water Plants” *ASHRAE Journal*, pp.14-18, May. 2001.
- [7] ASHRAE, *ASHRAE Handbook - Fundamentals*, Chapter 32, GA: ASHRAE Inc, Atlanta, 1997.
- [8] Kirby P. Nelson, “Dynamics of Primary/Secondary Chilled Water Systems”, *ASHRAE Transactions*, Vol. 105, Part. 2, 1999.

表 1、以回饋模擬法分析水路系統泵浦運轉模式

運轉模式	泵浦		備註
	一次側	二次側	
1	兩台定轉速運轉	兩台定轉速運轉	目前系統運轉模式
2	兩台定轉速運轉	一台變頻運轉	二次側泵浦更換為揚程較大之泵浦。
3	兩台定轉速運轉	兩台變頻運轉	

表 2、以回饋模擬法分析水路系統二次側泵浦於各種運轉模式之耗電費

運轉模式	二次側泵浦運轉費用(元/年)	二次側泵浦省能效益(元/年)	二次側泵浦省能效益(%)
1	245,391	0	0
2	142,118	103,273	42.1%
3	126,745	118,646	48.3%

表 3、第 m 個小時動態規劃法計算結果

L_{m+1}	$Y_{m+1 \sim m+2}^{(1)}$	$P_m^{(\min)} + P_{m+1 \sim m+2}^{(1)} = P_{m+1}^{(1)}$
L_{m+1}	$Y_{m+1 \sim m+2}^{(2)}$	$P_m^{(\min)} + P_{m+1 \sim m+2}^{(2)} = P_{m+1}^{(2)}$
....
L_{m+1}	$Y_{m+1 \sim m+2}^{(s)}$	$P_m^{(\min)} + P_{m+1 \sim m+2}^{(s)} = P_{m+1}^{(s)}$

表 4、以動態規劃法分析各種冰水主機組合之成本分析與經濟效益

冰水主機運轉策略	冰水主機 初始成本 (元)	冰水主機 運轉成本 (元)	冰水主機 生命週期成本 (元)	冰水主機 經濟效益 (%)
I (300 RT + 300 RT)	6,000,000	27,099,540	33,099,540	0
II (200 RT + 400 RT)	6,000,000	25,999,900	31,999,900	3.3
III (250 RT + 350 RT)	6,000,000	26,698,230	32,698,230	1.2
IV (200 RT × 3)	6,000,000	25,999,900	31,999,900	3.3
V (200 RT + 300 RT)	5,000,000	26,279,960	31,279,960	5.5
VI (250 RT + 250 RT)	5,000,000	26,279,960	31,279,960	5.5

表 5、以回饋模擬法分析各種冰水主機組合之泵浦運轉費用與經濟效益

冰水主機 運轉策略	一次側泵浦 運轉費用 (元/年)	一、二次側 泵浦運轉 費用 (元/年)	一、二次 側泵浦經 濟效益 (%)	一、二次 泵浦與冰 水主機運 轉費用 (元/年)	一、二次側 泵浦與冰 水主機經 濟效益(%)
I (300RT+300RT)	102,863	348,254	0	3,058,208	0
II (200RT+400RT)	68,575	195,320	44.0	2,795,310	8.6
III (250RT+350RT)	79,625	206,370	40.7	2,876,193	6.0
IV (200RT×3)	68,575	195,320	44.0	2,795,310	8.6
V (200RT+300RT)	71,433	198,178	43.1	2,826,174	7.6
VI (250RT+250RT)	71,433	198,178	43.1	2,826,174	7.6

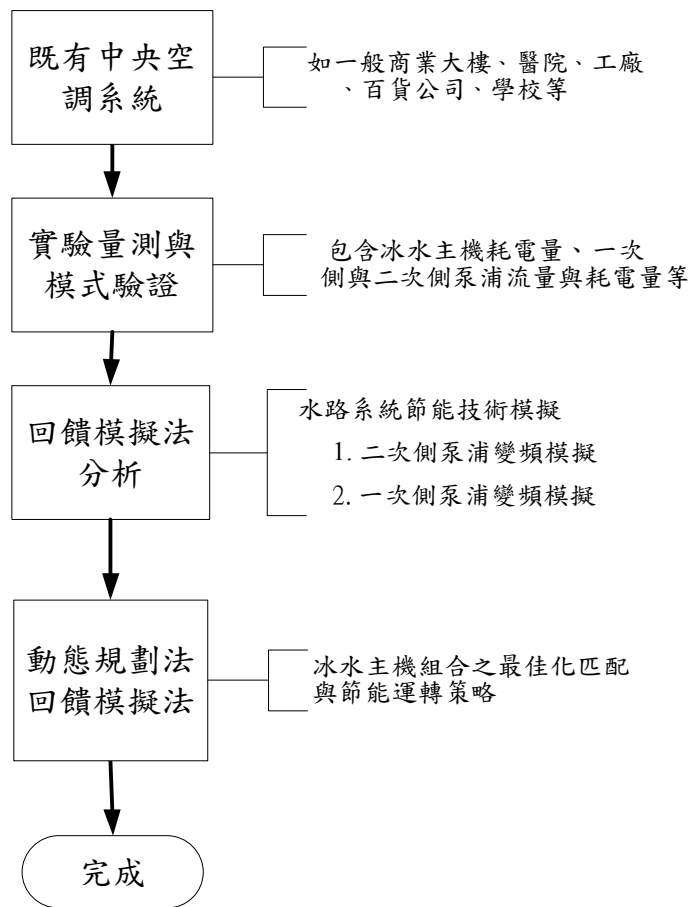


圖 1、既有中央空調系統模擬與分析架構圖

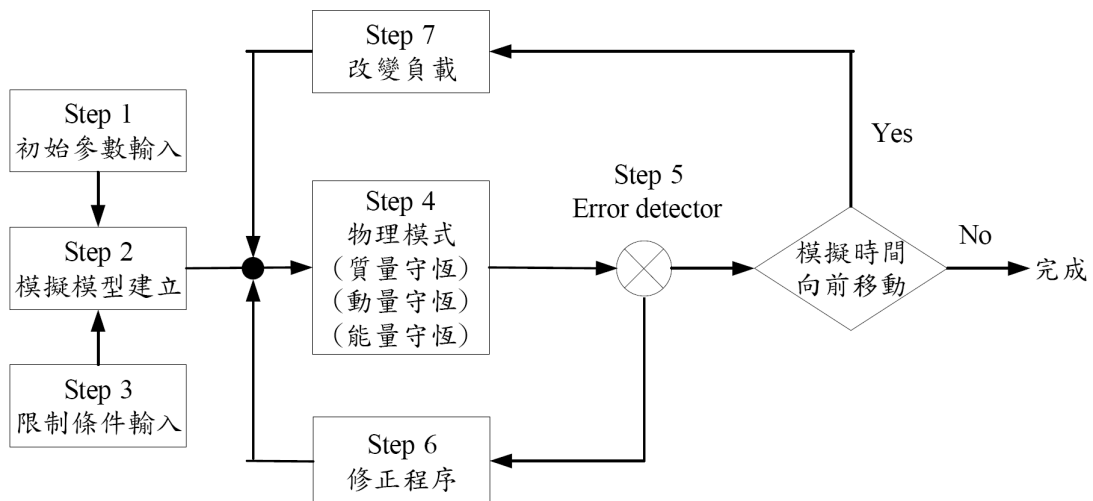


圖 2、既有中央空調系統回饋模擬流程圖

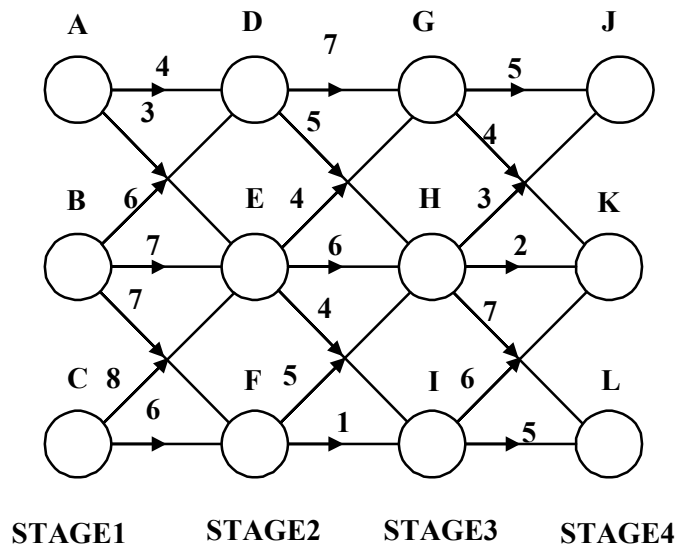


圖 3、動態規劃網路分析圖

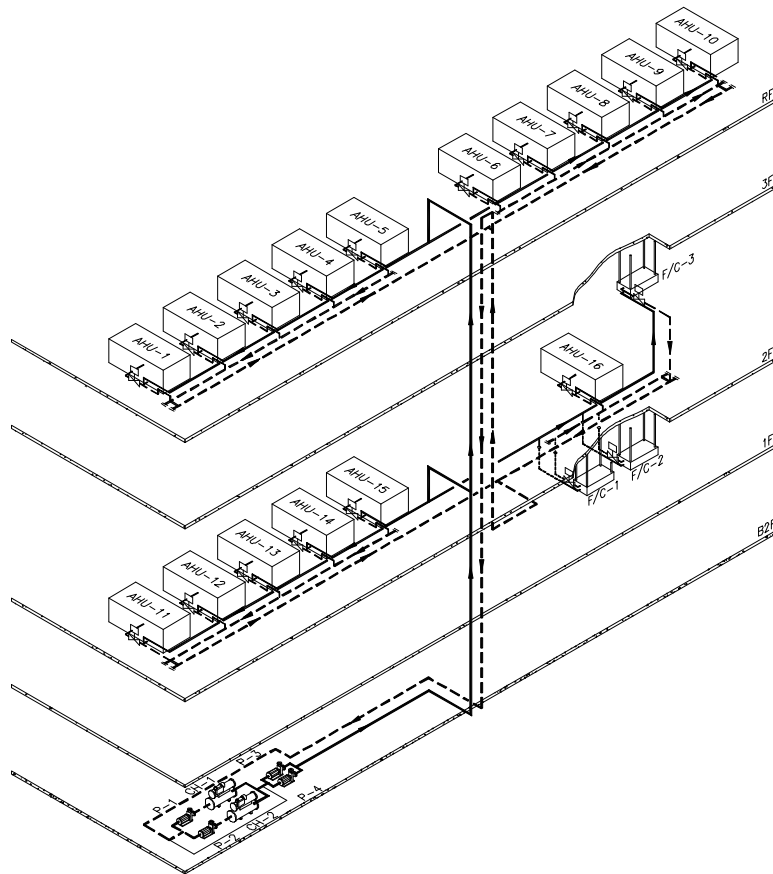
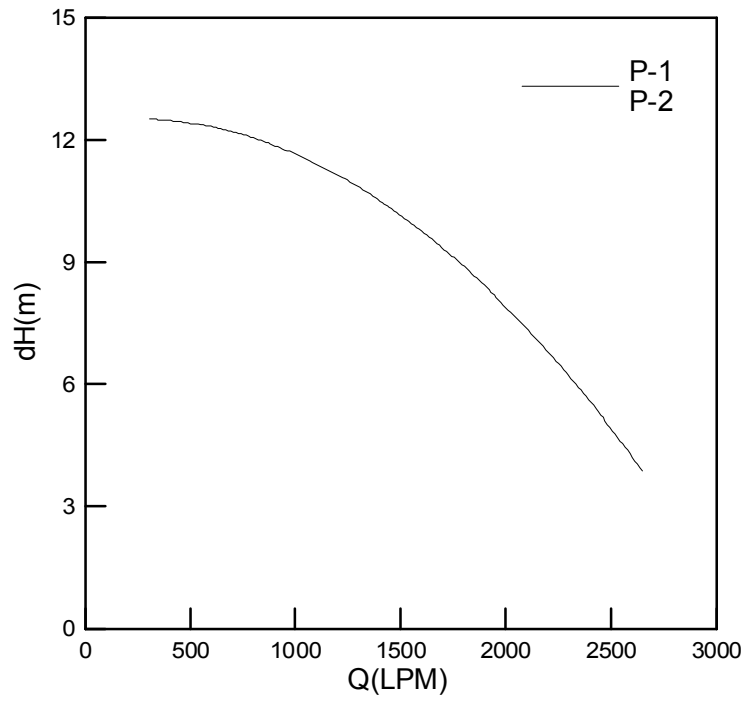
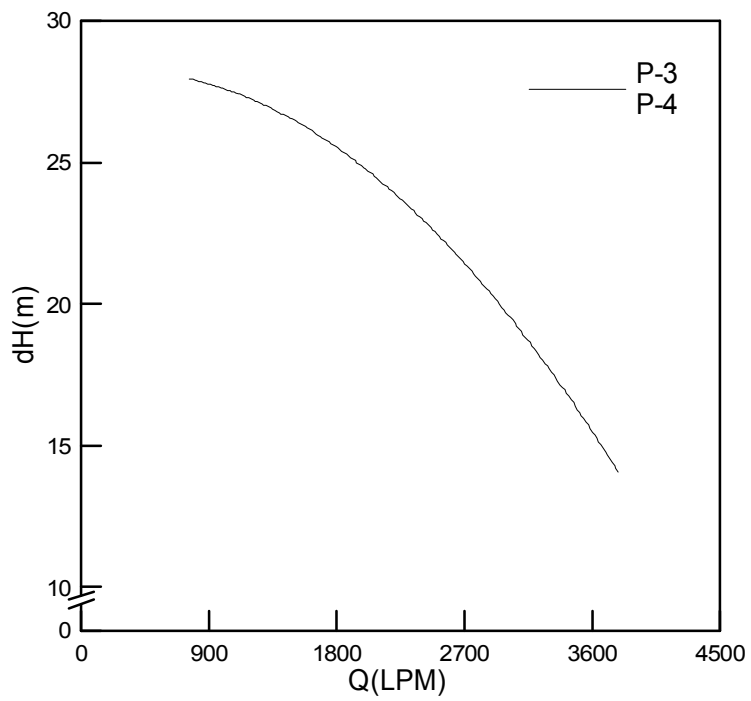


圖 4、既有中央空調系統配置圖



(a)



(b)

圖 5、(a)一次側泵性能曲線 (b)二次側泵性能曲線

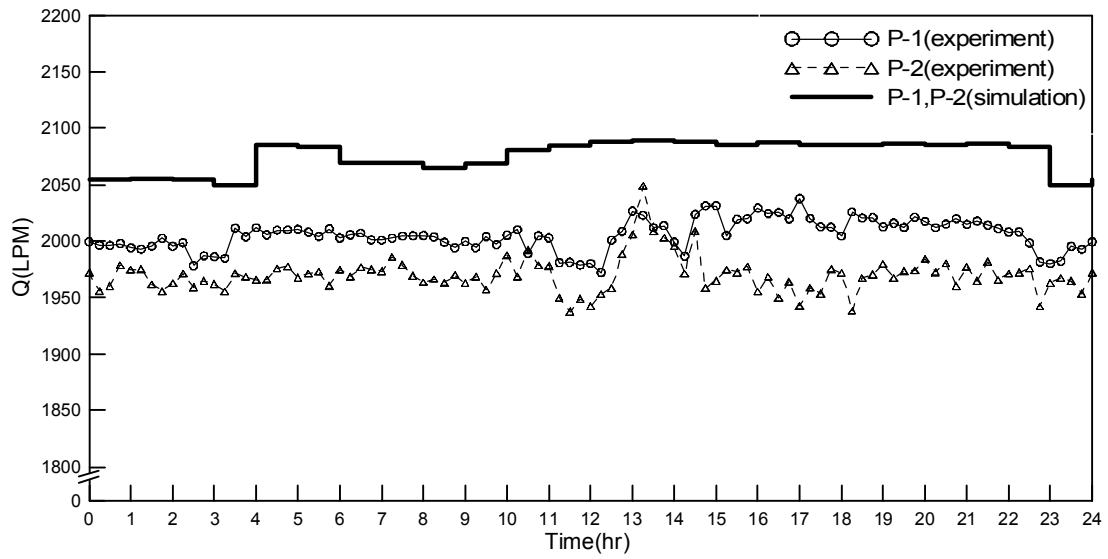


圖 6、一次側泵浦流量模擬值與量測值

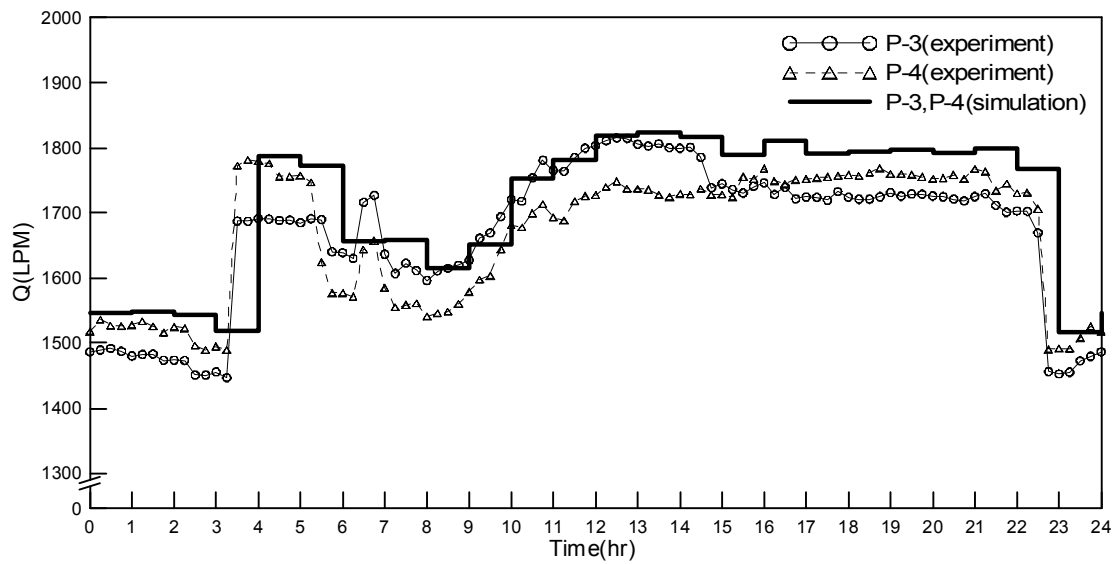


圖 7、二次側泵浦流量模擬值與量測值

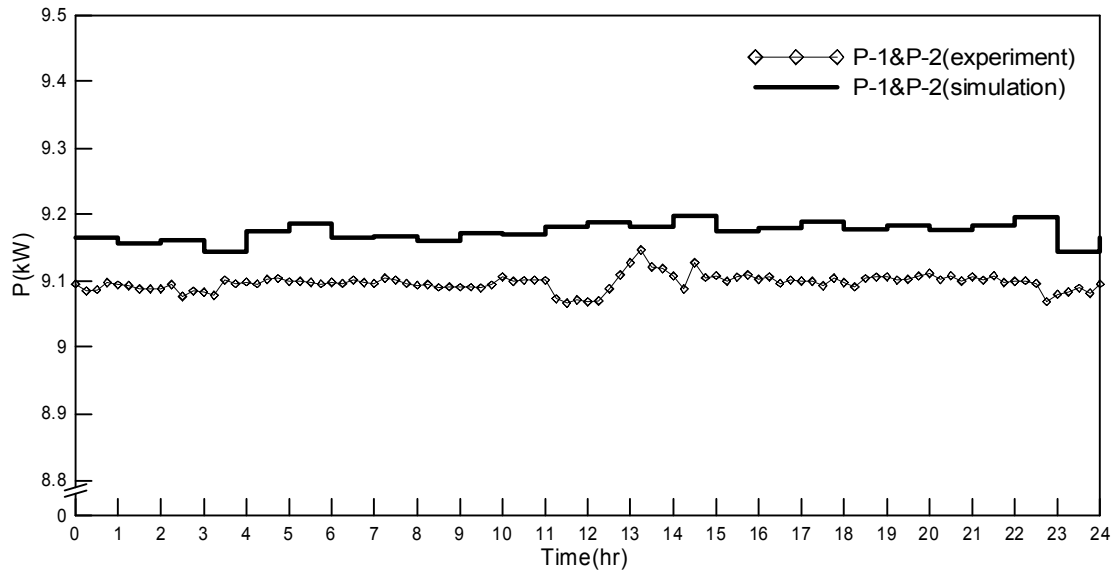


圖 8、一次側泵浦耗電量模擬值與量測值

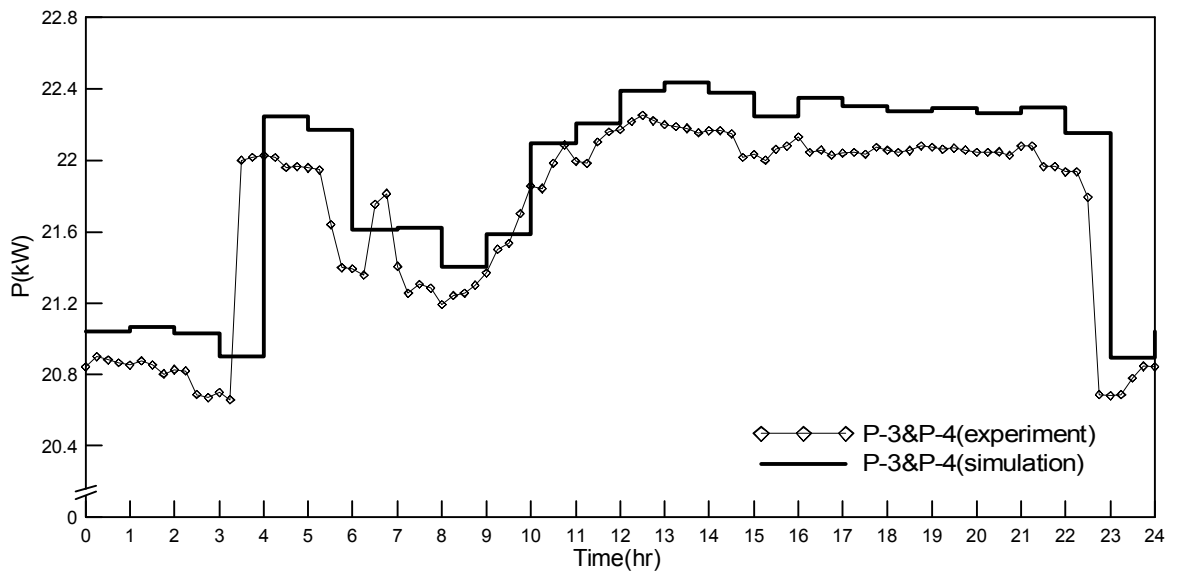


圖 9、二次側泵浦耗電量模擬值與量測值

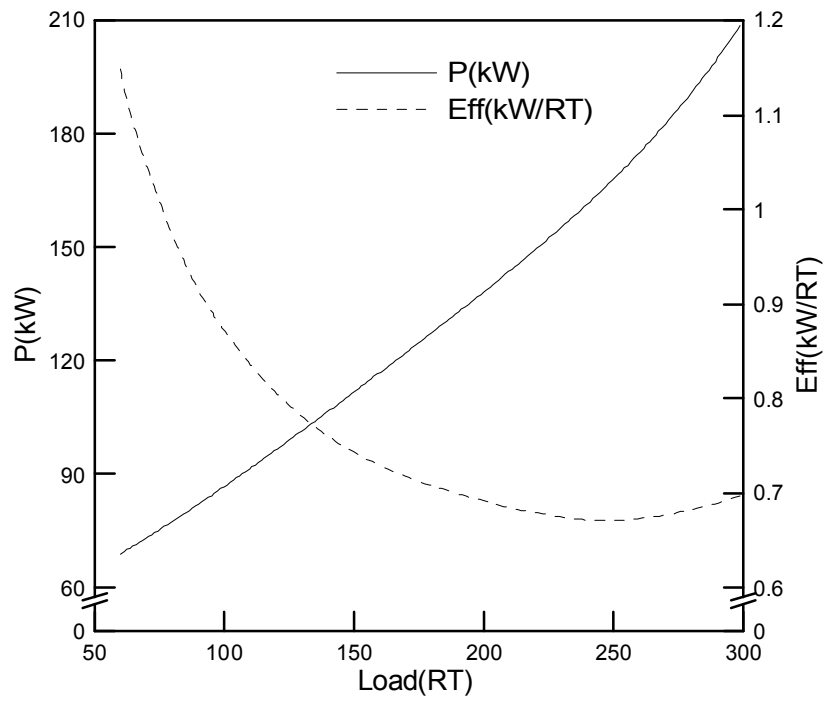


圖 10、冰水主機性能曲線(300RT)

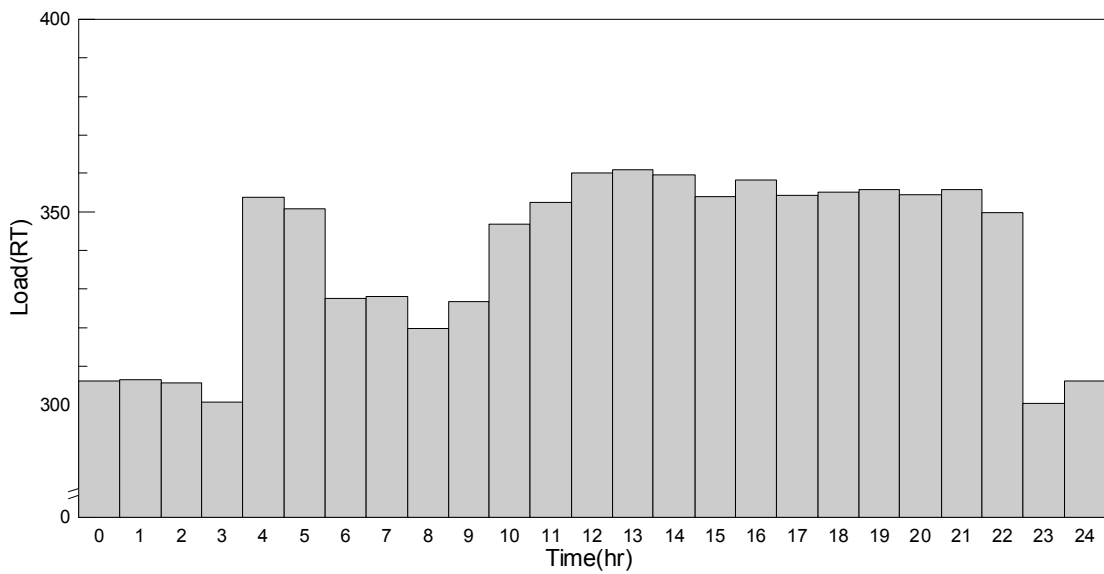


圖 11、既有空調系統的主機負載量測值

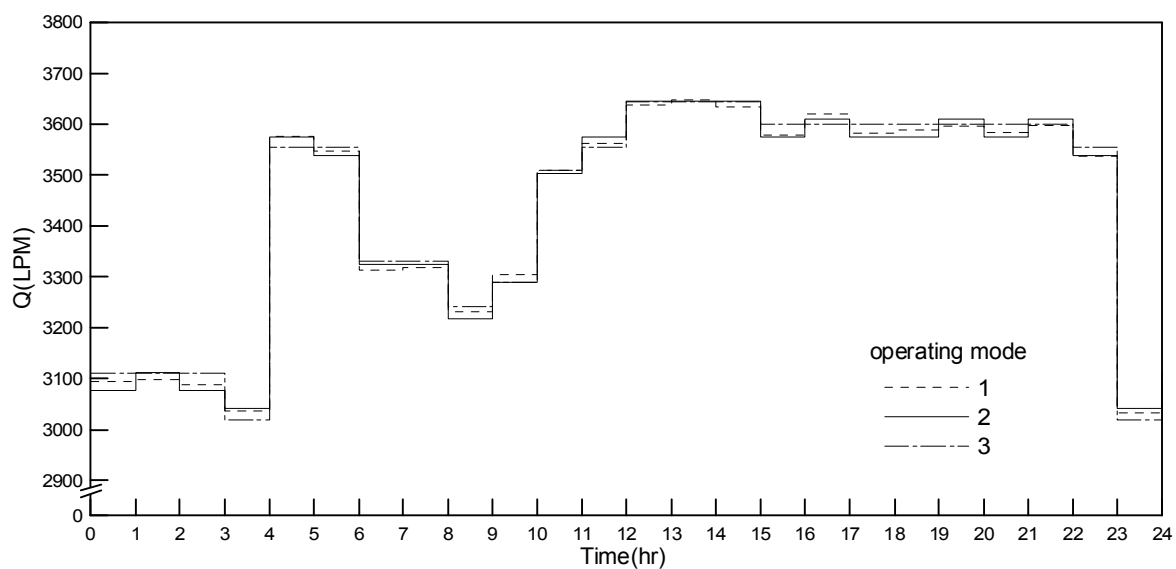


圖 12、二次側三種模式運轉流量比較

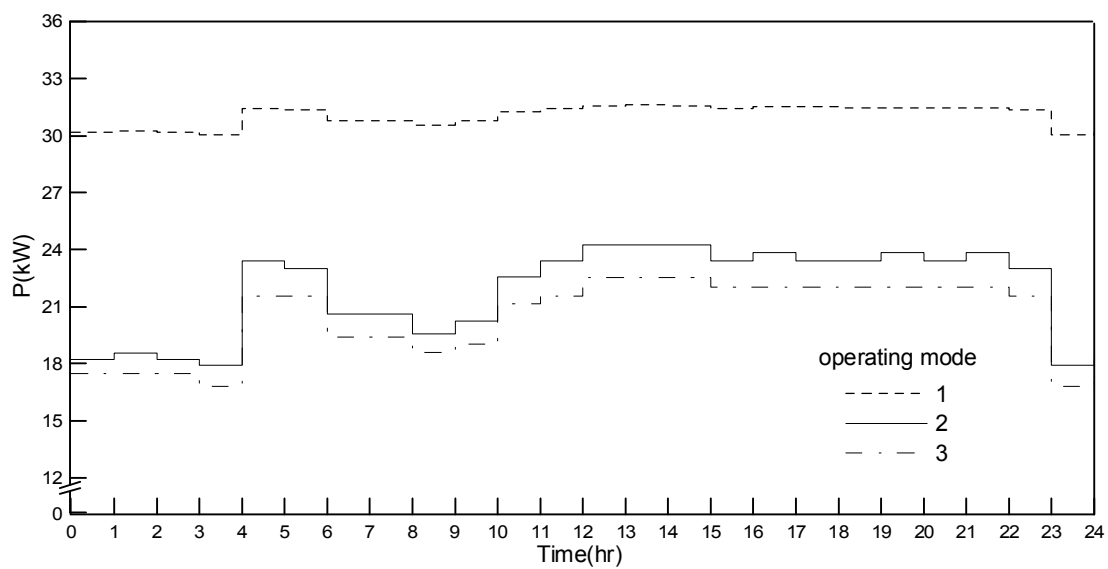


圖 13、二次側三種模式運轉耗電量比較

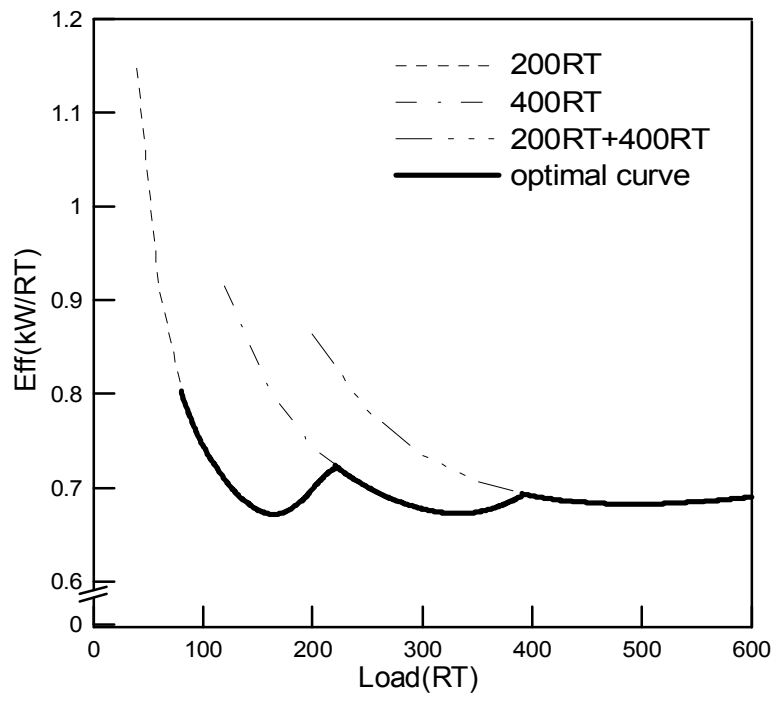


圖 14、冰水主機最佳運轉策略曲線圖