

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 半導體廠冰水供應系統之最佳化設計

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2622-E-002-019-CC3

執行期間：91年06月01日至92年05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：江沅晉,林彥翔

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫為提升產業技術及人才培育研究計畫，不提供公開查詢

中 華 民 國 92 年 9 月 8 日

# 行政院國家科學委員會

## 九十一年度提升產業技術及人才培育研究計畫成果摘要報告

### 半導體廠冰水供應系統之最佳化設計

計畫編號：NSC91-2622-E-002-019-CC3

執行期限：91年6月1日至92年5月31日

主持人：陳希立教授 台灣大學 機械工程學研究所教授

計畫參與人員：江沅晉 台灣大學 機械工程學研究所博士班研究生

計畫參與人員：林彥翔 台灣大學 機械工程學研究所碩士班研究生

#### 一. 中文內容摘要

半導體廠的冰水供應系統，主要是提供製程所需要的冰水，或供應空調箱所需的冷、熱水，以及洗淨機台所需的超純水熱交換。在設計時考量的因素相當複雜，包括流量、流速、供水及回水溫度、部分負載的操作性能、空間限制、以及投資與運轉成本的最佳化等，而這些因素多半是互相牽制的。因此在設計時該如何在不違反流速、管長、管徑、與降載要求等限制條件的情形下，設計出最佳節能的冰水系統是設計者的一大挑戰。

傳統的半導體廠冰水系統設計方法以等摩擦率法進行設計，無法達成全壓的平衡以及成本的最佳化，為了改進傳統設計方法的缺失，本計畫提出流體力學設計法、動態規劃最佳化設計法與動態模擬法進行半導體廠冰水供應系統之設計，並以一個實際案例做設計與模擬，來比較和討論此三種設計法的優缺點、限制條件及適用程度，並據以提出建議供設計者作為設計時的參考。

首先提出流體力學設計法，其以生命週期成本為目標函數，並利用流體力學的計算方式使各管段達到全壓的平衡，雖然流體力學設計法可同時兼顧全壓的平衡與成本的最佳化，但

在有限制條件的情形下卻無法滿足最佳化。為了滿足有流速、管徑或管長等限制條件，本計畫提出動態規劃法於冰水供應系統的最佳化設計，並以一個實際案例的測試結果作為設計與模擬的比較依據，來比較和討論此三種設計法的準確性與優缺點、限制條件及適用程度，並據以提出建議供設計者作參考。

#### *ABSTRACT*

The chiller water system supplies the chiller water for manufacturing, air conditioning and wet bench etc. It is complicated in designing in order to satisfy the limitation of operation conductions, such as flowrates, velocities, water temperature, partial load operation and cost optimization.

Traditional design uses the equal frictional method which does not follow the total pressure balance and cost optimization. In order to improve the traditional design method, this project intends to develop fluid mechanics design method, dynamics programming method and dynamics simulation method to give the optimized design in

chiller water supply system. Fluid mechanics method uses the cost life cycle as an objective function and applies system condensing and expansion to meet the pressure balance. However, it cannot get the solution in the existence of limitation, such as flowrates, velocities and tube length. This project also applies the dynamics programming method to optimize the chiller water supply system and satisfy requirements. This project will simulate a real case to study the advantage and disadvantage of three different design methods. From the comparison of experiment results, detail discussion will provide for design reference. Partial load operation needs a variable speed pump to meet the chiller supply. A dynamic simulation model will also develop to study the different location arrangements for inverter pump to optimize the electrical usage and to reach the energy conservation purpose. A control strategy for chiller water supply system will also be documented for the designer reference.

## 二. 計劃緣由與目的

半導體廠冰水供應系統在運轉時會消耗大量的電能，約占了整個半導體廠的 45% 左右，而這些耗電量主要來自於泵浦、冰水主機、冷卻水塔以及風機的運轉。在台灣夏季尖峰用電時電力系統供電能力不足的情況下，節省空調設備耗電量之課題乃更形重要。因此設計一具有最佳化的冰水供應系統，不僅能夠滿足設計條件，同時也降低半導體廠的投資成本與運轉

成本，達到能源節約的效益。冰水供應系統其在設計時所需考量的因素相當複雜，包括流量、流速、供水及回水溫度、空間限制、以及成本的最佳化等等，而這些因素多半是互相牽制的。因此在設計時該如何在不違反各個限制條件的情形下，設計出最佳的水管管路系統是設計者的一大挑戰。

傳統之水管管路設計方法，設計者利用 ASHRAE HANDBOOK 之摩擦率圖，配合欲設計之流量和 ASHRAE 所建議在不同工作場合及操作時間之流速，查表找出適合之管徑尺寸和單位長度摩擦率。接著，考慮整個設計的圖面來決定盤管位置和實際的管路長度。由這些資料，可以計算出管段的全壓損失。通常在建議的流速內，會有多種管徑尺寸的選擇，若選擇較大的尺寸，如此初始成本會稍微增加，但單位長度摩擦率較低整個泵浦的揚程需求也降低，反之，小尺寸的管徑減少初始成本，卻增加了泵浦揚程的需求。

而此方法的缺點為管路全壓的不平衡，系統之揚程為單位摩擦率乘上管段之等效長度，因此當每條路徑總等效長度相差很多時，所設計出的系統必然有嚴重的壓力不平衡性，因此總揚程較小的路徑需要加入平衡閥來調整流量與流速。另外其亦缺乏對成本的考慮，故設計出來的結果無法達到最佳化的目的，造成能源的浪費。此外，為了滿足系統運轉的最大流量以及以後擴廠的擴充性，傳統設計往往會以採取 over design 的設計方式，使得在大部分的時間內系統會在過大的流量下運轉，而造成能源的浪費、冰水主機性能降低與運轉成本的提高。

為了達到最佳化的設計，本計劃提出流體力學設計法，其以生命週期成本為目標函數，並利用流體力學的計算方式使各管段達到全壓的平衡，雖然流體力學設計方法可同時兼顧全壓的平衡與成本的最佳化，但卻是在

沒有限制條件的情形下才可達到，基於此本計劃再提出以動態規劃法應用於冰水系統的設計，以期能達到最佳化的目標，此即為本計劃執行之一大重點。

現有之冰水系統仍存有許多節能的空間。如用變流量的設計方式，使得系統所提供之流量可以隨著負載的變動而調節，ASHRAE 就規定，對使用 10HP 以上的揚水泵浦之系統，需配置變流量控制裝置。而如果使用變頻器控制泵浦的轉速，節能效果將更加的明顯。針對部分負載的操作條件下，本計劃將建立一套動態模擬理論模式，模擬冰水供應系統之負載隨時間而變動，以變頻器控制變速泵浦之轉速，並討論冰水系統之控制策略與運轉成本，據以提出最佳化的節能設計。

### 三. 流體力學設計法

流體力學設計方法(Fluid Method)以系統的生命週期成本(life-cycle cost)為最佳化目標函數，透過最佳管徑及最佳泵浦全壓的選擇，使生命週期成本達到最低。

管路系統的生命週期成本包括了擁有成本(owning cost)及運轉成本(operating cost)，由於最佳化方法是尋找可使成本最低的泵浦壓力，因此必須被列入目標函數的只有初始成本及能源成本，目標函數可以(1)式表示：

$$E = E_p(PWEF) + E_s \quad (1)$$

其中

- E : 生命週期成本(元)
- $E_p$  : 第一年的運轉能源成本(元)
- $E_s$  : 初始成本(元)

PWEF : 現值上升因子 (present worth escalation factor)

系統的能源成本實際上就是電力

的消耗成本，主要的電力消耗來自泵浦，因此  $E_p$  可寫成

$$E_p = \frac{Q_{\text{pump}} P_{\text{pump}}}{\gamma_p \gamma_e} \cdot E_c \cdot Y \quad (2)$$

其中

- $Q_{\text{pump}}$  : 泵浦之流量( $\text{m}^3/\text{sec}$ )
- $P_{\text{pump}}$  : 泵浦全壓(kPa)
- $\eta_p$  : 泵浦之效率
- $\eta_e$  : 驅動馬達之效率
- $E_c$  : 電力單價(元/kW-h)
- Y : 系統年運轉時數(hr/year)

由於系統的運轉年限可能長達數年或數十年，為了正確地估算能源成本，必須將未來的物價年增率及利率變動一併考慮，因此在(2)式中將  $E_p$  乘上了一個現值上升因子 PWEF。

系統的初始成本  $E_s$ ，為傳輸水管每單位面積成本乘上該管段的總表面積。此單位面積成本應包括材料費、搬運費及安裝建造的工資等，而配件的成本也應在此一併計入。對於圓形截面管段：

$$E_s = S_d (\pi DL) \quad (3)$$

其中

- $S_d$  : 水管的單位面積成本(元/ $\text{m}^2$ )
- L : 管段長度(m)
- D : 圓形管段之直徑(m)

將(2)式及(3)式代入(1)式，可以得到圓管的生命週期成本：

$$E = \left( \frac{Q_{\text{pump}} P_{\text{pump}}}{\gamma_p \gamma_e} \cdot E_c Y \right) PWEF + S_d (\pi DL) \quad (4)$$

流體在水管中流動所造成的全壓損失，包含了摩擦損失及動態損失，可由 Darcy-Weisbach 方程式計算：

$$\Delta P_t = \left( \frac{f L}{D} + \sum C \right) \cdot \frac{\rho V^2}{2} \quad (5)$$

流體流經水管時的流速 V，可藉著連續方程式求出：

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{4}{\pi} \cdot Q D^{-2} \quad (6)$$

透過 Darcy-Weisbach 方程式，可找出全壓損失及管段尺寸之間的關

係。為了表達上的簡潔，定義一係數  $\mu$ ：

$$\mu = \left( \frac{fL}{D} + \sum C \right) \cdot D = fL + (\sum C) \cdot D \quad (7)$$

將(7)式代入(5)式，可得到如下的結果，

$$\begin{aligned} \Delta P_t &= \frac{\mu}{D} \cdot \frac{V^2}{2} = \frac{\mu}{D} \cdot \frac{Q^2}{2 \left( \frac{\pi D^2}{4} \right)^2} \\ &= \frac{8}{f^2} \cdot \frac{\mu \dots Q^2}{D^5} \end{aligned} \quad (8)$$

由(8)式，可將水管的直徑  $D$  以全壓損失項  $\Delta P_t$  表示為

$$D = \left( \frac{8}{f^2} \right)^{0.2} \cdot \left( \frac{\mu \dots Q^2}{\Delta P_t} \right)^{0.2} \quad (9)$$

### 3-1.3 目標函數

流體力學設計方法的主要目的，是希望能透過管段尺寸與泵浦壓力的適當選擇，使整個管路系統的成本最小，因此最佳化的目標函數就是生命週期成本。

$$\text{令數 } Z_1 = \left( \frac{Q_{\text{pump}}}{Y_p Y_c} \cdot E_c Y \right) \text{PWEF},$$

則系統之能源成本為

$$E_p(\text{PWEF}) = \left( \frac{Q_{\text{pump}} P_{\text{pump}}}{Y_p Y_c} \cdot E_c Y \right) \text{PWEF} = Z_1 P_{\text{pump}} \quad (10)$$

若系統僅為單一管段，則泵浦所提供的壓力應等於該管段的全壓損失，即  $P_{\text{pump}} = \Delta P_t$ 。因此單一管段的運轉能源成本應為：

$$E_p(\text{PWEF}) = Z_1 \Delta P_t \quad (11)$$

將(3-10)式代入(3)式：

$$E_s = S_d L \left( \frac{8}{f^2} \right)^{0.2} \left( \frac{\mu \dots Q^2}{\Delta P_t} \right)^{0.2} = (8/f^2)^{0.2} S_d L \left( \frac{\mu \dots Q^2}{\Delta P_t} \right)^{0.2}$$

令係數  $K = L (\mu \dots Q^2)^{0.2}$ ， $Z_2 = (8/f^2)^{0.2} \cdot S_d \dots^{0.2}$ ，則單一管段的初始成本為：

$$E_s = Z_2 K (\Delta P_t)^{-0.2} \quad (12)$$

由(11)式及(12)式，可得到只有單一管段系統的最佳化目標函數為：

$$E = Z_1 \Delta P_t + Z_2 K (\Delta P_t)^{-0.2} \quad (13)$$

此目標函數為單變數函數，只與該管段的全壓損失有關，因而可很容易地進行最佳化。

## 四. 動態規劃法

傳統的供水管路系統設計方法，在設計時不能使系統的壓力平衡，更沒有考慮到成本的最佳化；而流體力學設計法雖然可以使得系統壓力平衡，達成生命週期成本的最小化，但這是在沒有任何限制條件的情況下才會成立，若加入了限制條件(如管徑或是流速的限制等)，計算過程將難以收斂。

鑑於上述兩種設計方法之缺點，無法滿足設計者的需求，故本計劃提出第三種設計方法-動態規劃最佳化設計法，希望藉由本方法可以協助設計者，在滿足管徑與流速的限制下，使得系統的壓力平衡，並且能夠達到成本最佳化的目的。

### 4-1 動態規劃法之意義與特性

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。

有些問題需要作一連串的決策，而每個決策所尋求最有利的答案，除了要根據該階段的已知條件外，尚須視其前項決策的結果而定。在此種情形下，每項決策都必須考慮到它受前項決策的影響，以及對相連接的後項決策可能產生的影響。因此應用動態規劃求解的問題都含有許多相互關連

的決策過程。所以動態規劃的主要特性就是此種重複出現，而且是多階段的決策過程。此外動態規劃的另一特性是比較缺少規律性的求解法則，因此在求解過程中並無有效且規律性之法則可循。

在一項多階段的決策過程中，每一階段的最有利決策，都提供相連接的下一階段決策之基礎。在最初階段時，問題比較單純，根據已知條件即可選出較有利的決策；以後各階段的情況即較複雜，除了需要參考該階段的已知條件之外，還要根據上一階段的最有利決策之結果，才能求出該階段的最有利決策；依此順序逐次進行，直至求出最後階段的最有利決策。動態規劃根據此種重複出現的特性，尋求一項可應用於整體問題的連串決策(chain-like decision)，以求解決問題；並使預期的目標函數(objective function)為最大(或最小)。若目標函數為追求利益，則求其最大；若目標函數為控制成本，則求其最小，此即為動態規劃的主要基本精神。此種使總效益為最大(或總費用為最小)的一連串決策，即稱為最有策略(policy of optimality)。而動態規劃的目的即在應用計量方法為多階段的決策問題尋求一項最有利的策略。

#### 4-2 動態規劃法之運算模式

動態規劃的求解技巧是依據拜勒曼(Richard Bellman)的最有利原理(principle of optimality)。其要點如下：「最有策略的特性是無論最初階段的情況如何，也不管起初的決策是什麼，其餘各階段的決策都必須對於由最初階段決策所產生的現階段情況構成最有利的策略」。動態規劃所運用的求解模式(model)就是基於此“最有原理”而來。但此項原理太過於抽象，不容易獲得具體的概念，必須要與以下的運算模式及動態

規劃之應用實例相對照，才能瞭解其真意，由圖 3-1 的動態規劃網路圖(network chart)，可用來說明動態規劃的運算技巧。

應用動態規劃求解的問題，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。吾人可以運用不同的方式，將某種資源的部份或者全部，分配給某項或某些營業項目，以求獲得若干效益。至於效益的多寡，則視各營業項目的營利能力及分配資源數量的多少而定。假定各項營業活動彼此獨立，而且由不同營業活動所獲致的收益，可以用一種共同價值單位予以測度，則運用某種資源於各項營業活動的總收益，應該是各別營業活動收益的總和。研究此類問題之目的是如何將有限的可用資源，適當的分配於各項有利的營業活動，以求總收益最大(或總成本最小)。

### 五. 供水系統節能技術探討

#### (1) 流量的控制

##### 1. 二通閥控制

當系統操作曲線是已知的，而且全壓降隨著流量的平方而變化，是條平方律的曲線；泵浦性能曲線則是製造廠經測試而建立的，系統控制曲線與泵浦性能曲線的交點則是系統的操作點。由圖中可知當冰水量的需求由流量 1 降低到流量 2 時，關小二通閥的開度提高系統的阻抗，此時系統的操作曲線會往左偏，操作點則沿著泵浦的性能曲線由操作點 A 移至操作點 B，故雖然系統的流量減少，泵浦的需求壓力是在壓力 2，但是固定轉速的泵浦藉由二通閥的控制壓力卻增加到壓力 1，不但提高了運轉費用造成能源的浪費，亦容易對二通閥產生損

害，增加系統滲漏的機會與維護保養成本。

## 2 變頻控制

對泵浦的轉速予以變頻控制，泵浦的性能曲線會隨著轉速的變化而改變。此時泵浦的出口壓力是依照系統的操作曲線變化，故能夠隨著實際負載來決定實際的操作點，而滿足實際系統運轉的壓力與流量。其中變頻的控制曲線顯示因需求流量減少，而必須在出口壓力上來補償因流量減少而導致在管路上所減少的摩擦損失，以維持固定的設定值。較低的設定值能夠得到較好的節能空間及效率。在比較二通閥控制和變頻控制的後，可知變頻控制的效率比二通閥控制節能效益更大，

### (2) 一次側變流量系統

一次側變流量是有經濟上的效益的，在許多的空調應用上是清楚且是正確的選擇，而要成功的應用一次側變流量系統，仍然要考慮某些狀況與條件，如下所述：

建議使用 VPF 的條件及狀況：

- (1) 系統流量至少可以減少 30% 的設計流量。
- (2) 二組以上冰水主機群設計。
- (3) 操作者知道如何應用及運轉。
- (4) 系統可以容忍冰水出水溫度適度的變化。
- (5) 冰水主機因容量不足，將被汰舊換新，且一次側冰水流量可以改變。

不建議使用 VPF 的條件及狀況：

- (1) 系統冰水溫度是有迫切性及危險性的，如潔淨室或晶片製程控制應用。
- (2) 在只有三通閥的使用上，此時系統的流量無法變化。
- (3) 業主及操作者不同意在這

設計環境下應用及運轉。

## 六. 冰水管路系統模擬

供水系統的設計結果與實際運轉值一定會有所差異，然而差異到底有多少？過去像這樣的系統測試，完全必須依賴實驗的方法，耗費了許多成本與時間，而且在實際上也不可能建立像半導體廠規模大小的系統以供實驗測試用，因此本計劃利用流體力學的計算導入一模擬方法，以模擬實際運轉時整個系統的性能表現，在設計階段就可以先了解各種不同設計下的運轉結果，進而設計出更符合需要的系統。本計劃所提出的流體力學模擬方法是用來針對一個已經設計完成的供水管路系統，在所有管段的管徑尺寸與配件資料都為已知的條件下進行系統性能的模擬，以系統收縮的 (system condensing) 方法計算出管路系統實際運轉時的運轉曲線，接著配合泵浦系統的性能曲線選擇操作點，以決定系統運轉時的冰水流量與泵浦所提供的壓力，最後再以系統展開 (system expansion) 的方式將冰水流量分配到各管段，進而得到實際運轉時各管段內的冰水流量及流速。故進行系統運轉的模擬有三個主要步驟，分別是系統收縮 (system condensing)、泵浦操作點選擇 (pump operating point) 及系統展開 (system expansion)。

## 七. 結果與討論

本計劃針對半導體廠冰水供應系統設計方法進行研究，成功地建立一套設計的程序與方法，包括了初始設

計與系統模擬，期望藉由電腦的分析與模擬，在設計初期便可對整個系統作全盤的規劃，圖 10 為最佳化設計流程而此流程亦可作為爾後設計者設計時的標準流程。本計劃主要結論整理如下：

### (1) 流速的比較

圖 2 所示為各設計方法於設計點之流速的比較，由圖中可以發現，在各設計方法中，摩擦率法所設計出來的流速偏高，此與摩差率法所設計出的全壓損失較大有關，全壓損失與流速成正比關係，故較大的全壓損失意味著流速的增加。流體力學法與動態規劃法因為其目標函數乃是要求管路初始成本最低，經過迭代的計算，流體力學法與動態規劃法皆選擇較大之管徑，因此造成部分管段流速有偏低的趨勢。由圖 2 中亦可看出，流體力學法並無法對流速予以限制，導致有些管段的流速無法滿足限制條件。

### (2) 全壓損失的比較

圖 3 所示為各路徑壓損比較圖，每條路徑都對應著一個負載區 (MAU)，由圖中可知，摩擦率法所設計出的路徑壓損較大，其次是動態規劃法，流體力學法最小。

比較各設計方法的壓力平衡性，摩差率法的路徑壓降差異非常大，表示摩擦率法所設計的系統壓力最不平衡，這是因為摩擦率法的基本假設為：「系統內所有管段的單位長度全壓損失都相同」。所以假設系統管路的配管方式為逆回水管路的配管時，因為每個路徑的長度都相等，使用摩擦率法進行設計，將可以設計出不錯的壓力平衡之系統；然而本案例的系統為直接回水配管的管路系統，各個路徑

的長度差異很大，因此造成所得的系統壓力相當的不平均。而流體力學法與動態規劃法所設計出的路徑壓損幾乎完全相同。

### (3) 流量的比較

圖 4 所示為各負載區管段的流量誤差，其定義為流量模擬值減去流量設計值(需求值)，並取其絕對值，而後再除以流量設計值，所得結果以百分比表示，比較三種設計方法的流量誤差，以摩差率法的流量誤差較大，其最大的誤差高達 69.50%，第二大的誤差也有 60.40%；而流體力學法最大的誤差為 2.64%；動態規劃法最大的誤差為 2.33%；整體而言，動態規劃法與流體力學法的誤差量都較小亦較平均，最大的誤差亦不超過 3%，且沒有流量不足的現象。圖 5 為各設計方法的流量設計值與模擬值的平均誤差，由當中可以發現使用動態規劃法所設計的系統，流量誤差最小，而摩擦率法所設計的系統誤差最大。

### (4) 運轉成本的分析

圖 6 所示。由圖中可以看出三種設計方法中，以動態規劃法與流體力學法的運轉成本較低，而摩擦率法的設計結果運轉成本則有偏高的趨勢，其中又以動態規劃法所設計的一次側變流量系統運轉成本最小，摩差率法所設計出的定流量系統運轉成本最大。這是因為動態規劃法設計的操作點壓力乘以流量所得的值最小，而摩擦率法的操作點壓力乘以流量所得的值最大。

以圖形來表示在各操作時間下消耗的電力，則如圖 7、圖 8 與圖 9 所示，圖中各系統面積的差即代表節省的能源，比較三個案例可看出以二通閥控

制流量的變流量系統，其節能效果相當有限，所消耗的能源與定流量系統相差不大，這是因為本案例的定流量系統搭配了四台冰水主機運轉，流量的控制較為靈活，可以比較接近負載的變動。

另由圖中亦可看出，變頻器的使用具有非常明顯的節能效果。其中又以摩差率法的設計案例節能效果最大，對二次側變流量系統予以變頻運轉每年可節省 23.14 % 的電力；若使用一次側變流量系統，節能效益更高達 39.08 %。這是因為摩差率法所設計的系統管路摩差損耗較大，故使用變頻控制減少系統在管路的阻抗所得到利益將最為明顯。而對於動態規劃法與流體力學法的設計案例，最小的節能效果也有 19.06 %。

## 八. 參考文獻

- [1] ASHRAE, 1995, ASHRAE Handbook - Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications, Chapter 34,36, Atlanta, GA: ASHRAE Inc.
- [2] ASHRAE, 1997, *ASHRAE Handbook - Fundamentals*, Chapter 33, Atlanta, GA: ASHRAE Inc
- [3] Carrier, W. H., Cherne, R. E., and Grant, W. A., 1940, *Modern Air Conditioning, Heating, and Ventilating*, New York/Chicago, Pitman Publishing Corporation.
- [4] Carrier, 1960, *Handbook of Air Conditioning System Design*, Part 2, Chapter 3, Syracuse: Carrier Corporation.
- [5] Colebrook, C. F., 1939, "Turbulent Flow in Pipes with Particular Reference to the Transition Region Between the Smooth and Rough Pipe Laws," *Journal of the Institute of Civil Engineers*, Vol. 11, p. 133.
- [6] D. H. Jacobson and D. O. Mayne, 1970, *Differential dynamic Programming*, American Elsevier Publishing Co.Inc, New York.
- [7] Fujiwara, O., 1987, "A modified linear programming gradient method for optimal design of looped water distribution network," *Water Resources Research*, v23, n6, p977-982.
- [8] G. Avery, 1990, "The pros and cons of balancing a variable flow water system," *ASHRAE journal*, pp 30-35
- [9] G. Avery, 1993, "Designing and commissioning variable flow hydronic systems," *ASHRAE journal*, pp 45-49.
- [10] Harris, N. C., 1990, *Modern Air Conditioning Practice*, 3rd ed., Chapter 18, New York, NY : McGraw-Hill.
- [11] Hartman, Thomas B., 1996, "Design issues of variable chilled-water flow through chillers." *ASHRAE Transactions*, v102, n2, p679-940.
- [12] Havrella, R. A., 1995, *Heating, Ventilating, and Air Conditioning*, 2nd ed., Chapter 17, Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall.
- [13] Howell, R. H., H. J. Sauer, Jr., and W. J. Coad, 1998, *Principles of Heating, Ventilating, and Air Conditioning*, Chapter 9, Atlanta,

GA: ASHRAE Inc.

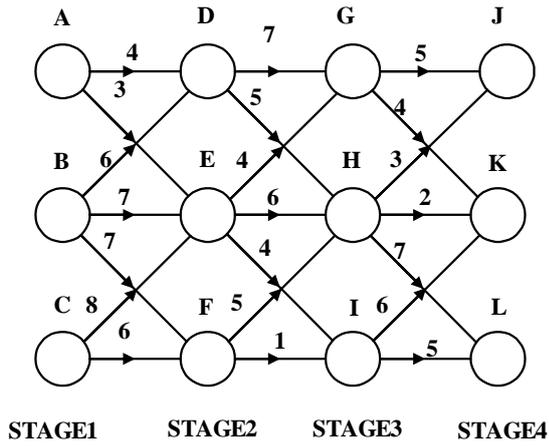


圖 1 動態規劃網路分析圖

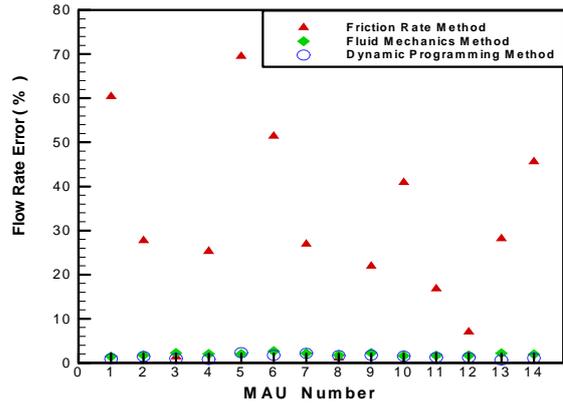


圖 4 各負載區流量誤差

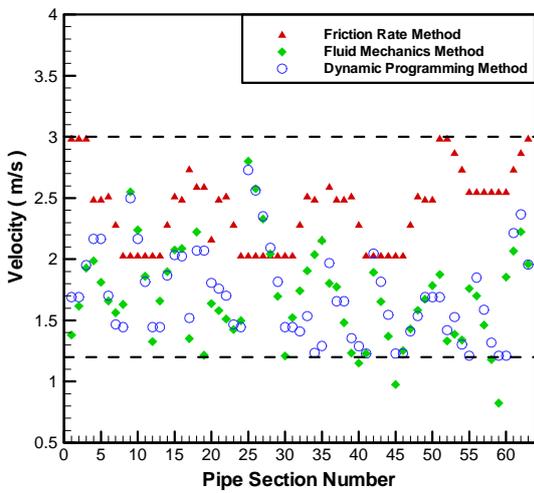


圖 2 各設計法於設計點流速之比較

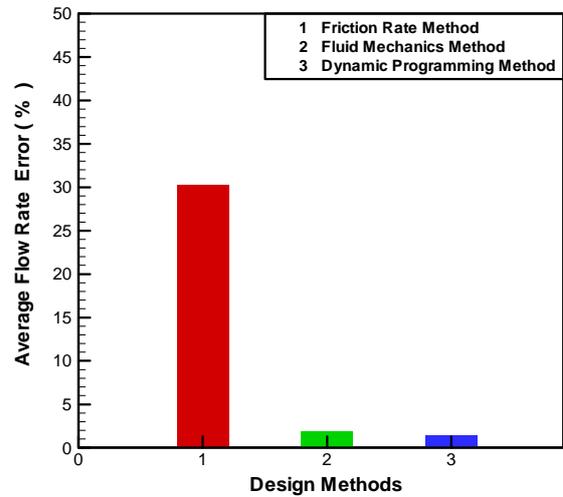


圖 5 各負載區流量的平均誤差

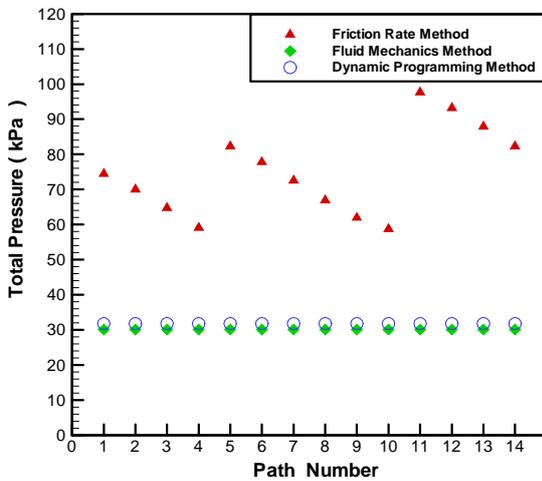


圖 3 各路徑壓損比較

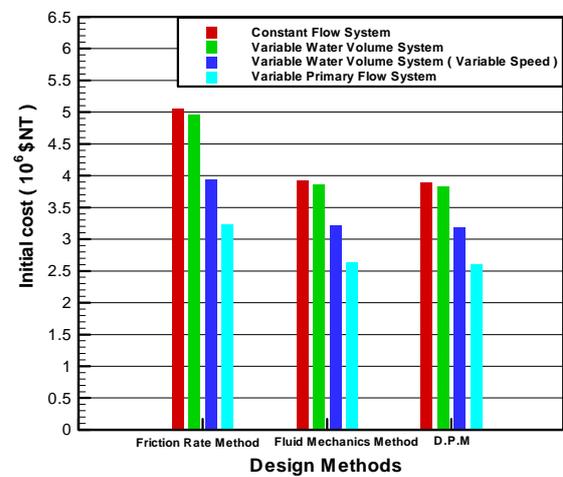


圖 6 運轉成本比較

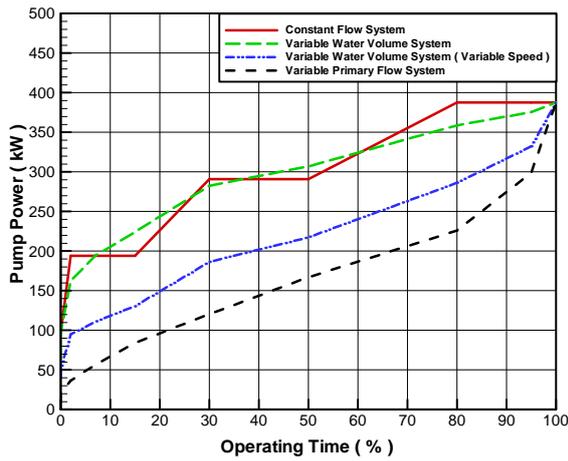


圖 7 各系統節能效果比較

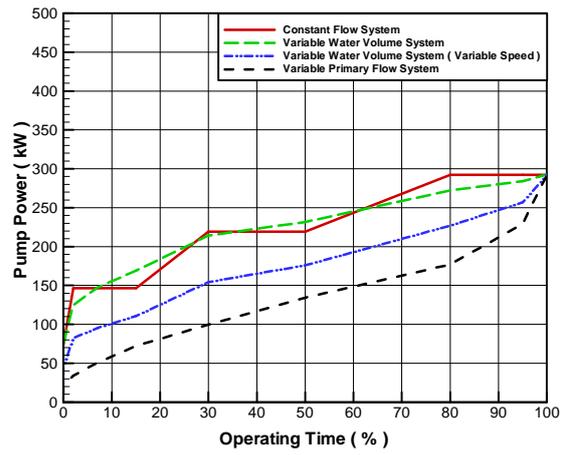


圖 9 各系統節能效果比較

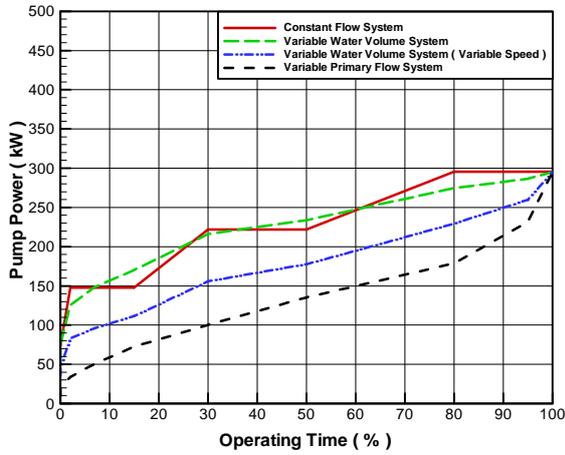


圖 8 各系統節能效果比較

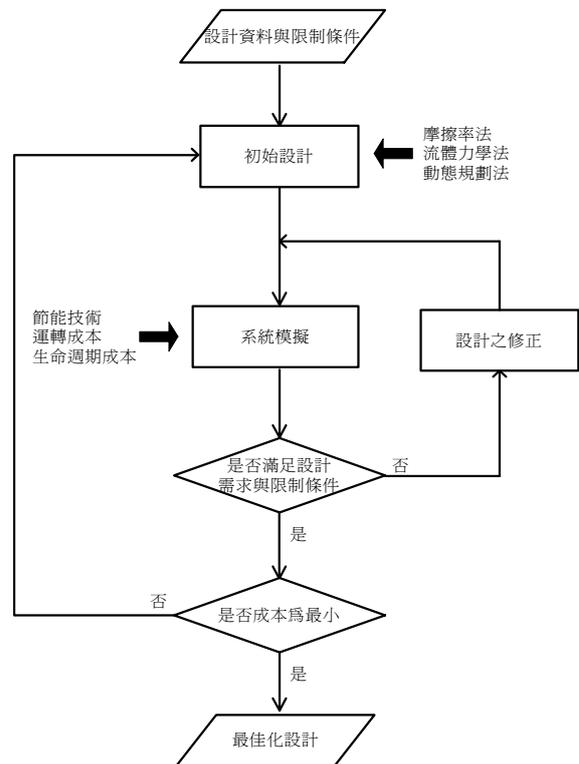


圖 10 最佳化設計流程

表 1 三種設計方法的比較

| 設計法   | 設計的考量因素       |      |      |       |
|-------|---------------|------|------|-------|
|       | 流速限制          | 管徑限制 | 全壓平衡 | 成本最佳化 |
| 摩差率法  | ×             | ×    | ×    | ×     |
| 流體力學法 | ×             | ×    | ○*   | ○*    |
| 動態規劃法 | ○             | ○    | ○    | ○     |
| 附註    | *代表在無限制條件下才成立 |      |      |       |

