

國立臺灣大學工程學院化學工程學所

碩士論文

Department of Chemical Engineering

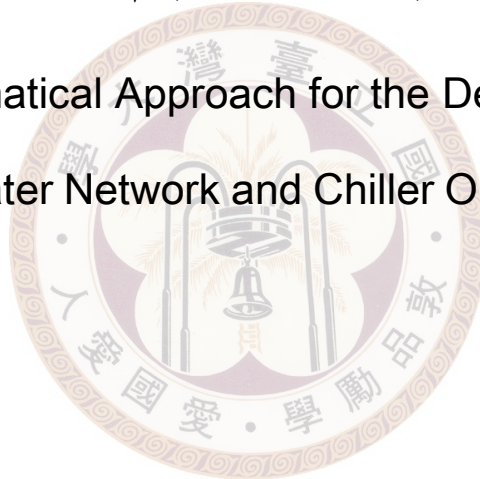
College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

應用數學規劃法設計冰水網路及冰水主機操作策略

A Mathematical Approach for the Design of
Refrigerated Water Network and Chiller Operating Strategy



李孟達

Meng-Da Lee

指導教授：陳誠亮 博士

Advisor: Cheng-Liang Chen, Ph.D.

中華民國 100 年 7 月

July, 2011



國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

應用數學規劃法設計冰水網路及
冰水主機操作策略

A Mathematical Approach for the Design of
Refrigerated Water Network and Chiller Operating Strategy

本論文係 李孟達君 (R98524085) 在國立臺灣大學化學
工程研究所完成之碩士學位論文，於民國 100 年 7 月 26 日
承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

陳誠定

(簽名)

(指導教授)

毛子奇

陳誠定

鄭昭成

陳誠定

劉村峰

系主任、所長

(簽名)



誌謝

首先感謝恩師陳誠亮教授兩年來的指點與鼓勵，在學術研究上，指引我思考的方向並時常提醒我做研究應有的態度，讓我從中培養了分析與解決問題的能力，得以順利完成本論文，在此致上最高的敬意與感謝。感謝錢義隆教授與 Ward Jeff 教授亦對我的研究工作提供許多寶貴的建議，在此至上由衷的敬意與感謝。

感謝中國文化大學王子奇教授及台北科技大學鄭智成教授，在口試期間提出許多寶貴的意見與指正，使論文更臻完善，於此亦致上最高的敬意。

在研究期間，特別感謝瑞元、志曜學長在研究上提供許多寶貴的經驗與協助，另外，亦感謝乾元、建凱、一寬、士暉、義章、玉龍、惠楚、玠廷等學長姐，在生活與學業方面給我許多協助；除此之外，也要感謝研究夥伴：均諺、育賢、宗翰、鎮宇、傳真、郁迪、哲維，能夠一起度過兩年有苦有樂的時光，是難得的緣分；感謝學弟：子軒、桐霖、旻澤、恒嘉、紹群、騰允的陪伴，讓實驗室有很好的研究氣氛。珍重，祝福你們。

最後，感謝我的家人多年來的支持與鼓勵，讓我心無旁騖的專注於課業與研究上，本論文才得以誕生，在此獻上最真摯的感謝。



摘要

本文同時針對冰水網路系統及冰水主機操作策略，提出以數學規劃法的方式進行整體最適化的設計。

首先我們提出一個可以描述所有可能的冰水網路超結構，針對超結構中的每一個單元逐步建立規範方程式，即可將冰水網路系統的最適化問題變成一個典型的混合整數非線性規劃 (MINLP) 數學問題，再經求解可以獲得冰水網路系統的最適化設計。目標函數 (1) 為最小總冰水消耗量，對一個虛擬的例子作不同情境的最適化並比較其結果；接著，基於目標函數 (1) 的結果，我們為了得到唯一解，所以提出目標函數 (2) 為每一冰水使用單元最小通過量。

再者，我們也提出冰水主機之超結構，考慮不同的冰水主機操作上下限，利用目標函數 (3) 為最少固定及變動操作成本去探討不同網路結構對其操作策略之影響。接著透過目標函數 (4) 使得冰水操作方式可以獲得一個唯一解。

最後我們利用一個簡單的冰水網路合成例子，驗證本研究所提出之數學模型及超結構上可設計出適當的冰水網路設計與冰水主機操作策略組織架構與操作條件。



Abstract

This work aims to develop a mathematical model for the synthesis of refrigerated water network systems and chiller operating strategy simultaneously.

First of all, we proposed one model which includes all possible configurations of refrigerated water network system under all conditions. By setting relevant constraints up for each part of the superstructure, the design problem of refrigerated water network system is formulated as a mixed-integer nonlinear program that can be solved for optimal configuration of refrigerated water network. Objective functions 1 and 2 are considered which involving the minimization of refrigerated water supply and obtaining a unique network structure.

Furthermore we also proposed a superstructure for chillers' operation, considering different operating upper and lower bounds. In this work, two objective functions are considered to minimize fixed and variable operating cost.

Finally, numerical examples are used to show that the proposed approach can provide the optimal design of refrigerated water network system and chiller operating strategy.

Key words: Optimization, Superstructure, Refrigerated Water Network Systems, Chiller, Mixed-integer nonlinear programming (MINLP)



目 錄

致謝	i
摘要	iii
Abstract	v
附圖目錄	xi
附表目錄	xv
1 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 整合性冰水網路與冰水主機操作策略之發展與說明	4
1.3 文獻回顧	6
1.4 研究動機與目的	8
1.5 組織章節	9
2 冰水網路最適化之模型建構	11
2.1 模型建立之背景說明與想法	11
2.2 模型建立之基本假設條件	17
2.3 模型建立之圖解說明	18
2.4 模型之符號、集合、系統參數與變數 (Indices, Sets, Parameter, and Variables)	22
2.4.1 下標符號說明 (Indices)	22
2.4.2 集合說明 (Sets)	23

2.4.3	系統參數 (Parameters)	24
2.4.4	系統變數 (Variables)	25
2.5	冰水網路限制式	27
2.5.1	冰水使用單元流量平衡與能量平衡	27
2.5.2	供應儲存槽流量平衡與能量平衡	29
2.5.3	中間儲存槽流量平衡與能量平衡 (Water/energy Balance)	30
2.5.4	回流儲存槽流量平衡與能量平衡 (Water/energy Balance)	31
2.5.5	物流流量之上限與下限 (Upper and Lower Bounds in the Flow Rate)	32
2.6	各網路結構下的額外限制式	33
2.6.1	Re-use Separate Design 之額外限制式	34
2.6.2	Re-use Separate Design with Inner Mains 之額外限制式	35
2.6.3	Re-use with Inter-Plant Mains 之額外限制式	36
2.6.4	Re-use with Inter/Inner-Plant Mains 之額外限制式	37
2.7	目標函數 (Objectives)	38
2.7.1	目標函數 (1)：最少總冰水消耗量 (To Minimize Total Refrigerated Water)	39
2.7.2	目標函數 (2)：每一冰水使用單元最小通過量 (To Minimize Throughput of RW Units)	40
3	冰水主機之操作策略	41
3.1	模型建立之背景說明與想法	41
3.2	模型建立之基本假設條件	43
3.3	模型建立之圖解說明	44
3.4	模型之符號、集合、系統參數與變數 (Indices, Sets, Parameter, and Variables)	46
3.5	冰水主機限制式	48
3.5.1	冰水主機流量平衡	48
3.5.2	冰水主機能量平衡	49

3.5.3	冰水主機邏輯限制	51
3.6	目標函數 (Objectives)	52
3.6.1	目標函數 (3)：最少固定/變動操作成本 (To Minimize Fixed/variable Operating Cost)	53
3.6.2	目標函數 (4)：每一冰水主機最小通過量 (To Minimize Throughput of Chillers)	54
4	冰水網路及冰水主機操作策略之模擬與結果分析	57
4.1	最適化軟體	58
4.2	兩個工廠及十一個冰水使用單元之冰水網路模擬	58
4.3	冰水主機間之冰水不考慮熱整合之問題(without HI)	61
4.3.1	操作點下限為 0.5，操作點上限為 1.0	64
4.3.2	操作點下限為 0.75，操作點上限為 1.0	73
4.3.3	操作點下限為 1.0，操作點上限為 1.0	77
4.4	冰水主機間之冰水考慮熱整合之問題(with HI)	81
4.4.1	操作點下限為 0.5，操作點上限為 1.0	81
4.4.2	操作點下限為 0.75，操作點上限為 1.0	81
4.4.3	操作點下限為 1.0，操作點上限為 1.0	83
5	結論與未來展望	91
5.1	結論	91
5.2	未來展望	92
	參考文獻	95



附圖目錄

1.1 再循環冰水系統 (Recirculating Refrigerated Water System)	3
1.2 冰水主機循環	4
1.3 冰水網路的設計選擇 (a) 並聯設計， (b) 串聯設計	5
2.1 Single Plant: Parallel Design	12
2.2 Single Plant: Direct Design	12
2.3 Single Plant: RW Mains Design	12
2.4 Single Plant: Parallel Design	13
2.5 Multiple Plant: Separate Design	15
2.6 Multiple Plant: Separate Design with Inner Mains	15
2.7 Multiple Plant: With Inter-Plant Main	16
2.8 Multiple Plant: With Inter/Inner-Plant Mains	16
2.9 冰水網路系統之超結構	18
2.10 冰水網路之超結構 (a) Using Unit (b) Supply Main	20
2.11 冰水網路之超結構 (c) RW Main (d) Return Main	21
2.12 在冰水使用單元進口端的物流流量與能量平衡示意圖	27
2.13 在冰水使用單元本身的物流流量與能量平衡示意圖	28
2.14 在供應儲存槽單元進口端的物流流量與能量平衡示意圖	29
2.15 在中間儲存槽單元進口端的物流流量與能量平衡示意圖	30
2.16 在回流儲存槽單元進口端的物流流量與能量平衡示意圖	31
3.1 Single Chiller: Parallel Design	42
3.2 Multiple Chillers: (a) two chillers (b) three chillers	42

3.3 冰水主機之超結構	45
3.4 在冰水使用單元進口端的物流流量與能量平衡示意圖	48
4.1 操作上下限分別為 0.5、1.0 之冰水供需圖	63
4.2 操作上下限分別為 0.75、1.0 之冰水供需圖	63
4.3 操作上下限分別為 1.0、1.0 之冰水供需圖	63
4.4 Base Case 冰水網路與冰水主機操作策略設計結果	64
4.5 Separate Design 之網路與冰水主機操作策略設計結果	65
4.6 Separate Design with Inner Mains 之網路與冰水主機操作策略設計 結果	67
4.7 With Inter-Plant Main 之網路與冰水主機操作策略設計結果	69
4.8 With Inter/Inner-Plant Mains 之網路與冰水主機操作策略設計結果	70
4.9 Base Case 冰水網路與冰水主機操作策略設計結果	73
4.10 Separate Design 之網路與冰水主機操作策略設計結果	74
4.11 Separate Design with Inner Mains 之網路與冰水主機操作策略設計 結果	74
4.12 With Inter-Plant Main 之網路與冰水主機操作策略設計結果	75
4.13 With Inter/Inner-Plant Mains 之網路與冰水主機操作策略設計結果	75
4.14 Base Case 冰水網路與冰水主機操作策略設計結果	77
4.15 Separate Design 之網路與冰水主機操作策略設計結果	78
4.16 Separate Design with Inner Mains 之網路與冰水主機操作策略設計 結果	78
4.17 With Inter-Plant Main 之網路與冰水主機操作策略設計結果	79
4.18 With Inter/Inner-Plant Mains 之網路與冰水主機操作策略設計結果	79
4.19 操作點上下限分別為 0.5、1.0 之模擬結果	82
4.20 操作點上下限分別為 0.75、1.0 之模擬結果	82
4.21 Base Case 冰水網路與冰水主機操作策略設計結果	84
4.22 Separate Design 之網路與冰水主機操作策略設計結果	85

4.23 Separate Design with Inner Mains 之網路與冰水主機操作策略設計
結果 86

4.24 With Inter-Plant Main 之網路與冰水主機操作策略設計結果 . . . 87

4.25 With Inter/Inner-Plant Mains 之網路與冰水主機操作策略設計結果 88





附表目錄

1.1 典型工廠用水量比較表 (Rosain, 1993)	2
2.1 冰水網路下標符號說明	22
2.2 冰水網路系統集合	23
2.3 冰水網路系統參數	24
2.4 冰水網路連續變數	25
2.5 冰水網路 0-1 變數	26
3.1 冰水主機系統參數	46
3.2 冰水主機連續變數	47
3.3 冰水主機 0-1 變數	47
4.1 所需給定之參數	59
4.2 工廠操作資料	59
4.3 操作點上下限分別為 0.5、1.0 之目標函數 (1) 結果	71
4.4 操作點上下限分別為 0.5、1.0 之目標函數 (3)、(4) 結果	72
4.5 操作點上下限分別為 0.75、1.0 之目標函數 (3)、(4) 結果	76
4.6 操作點上下限分別為 1.0、1.0 之目標函數 (3)、(4) 結果	80
4.7 考慮熱整合與否之結果	89



1

緒論

1.1 前言

水，不論在日常生活或是工業上都扮演著極為重要的角色，雖然地球表面占了大概 70% 的含量，但大部分都是鹹水，不能直接被人類有效的利用，我們必須體認，水資源並非以往大眾所認為是取之不盡，用之不竭的資源。然而，近幾年隨著科技化之發展，不但人民日常用水量與日俱增，對供水水質及穩定性之需求亦日益提高，所以相關的節水問題越來越普遍受到大家的關注。

對於水的使用，大致可以分為兩個部分：民生用水與工業用水，而後者占了大部分的使用量。不論是傳統產業或是高科技的半導產業，水的重要性都不在話下。在工業上，因為其具有極性以及高沸點，而且可以產生氫鍵，所以在反應程序中它是很好的一個溶劑，而在分離程序中常常可以扮演挾帶劑來純化物質。

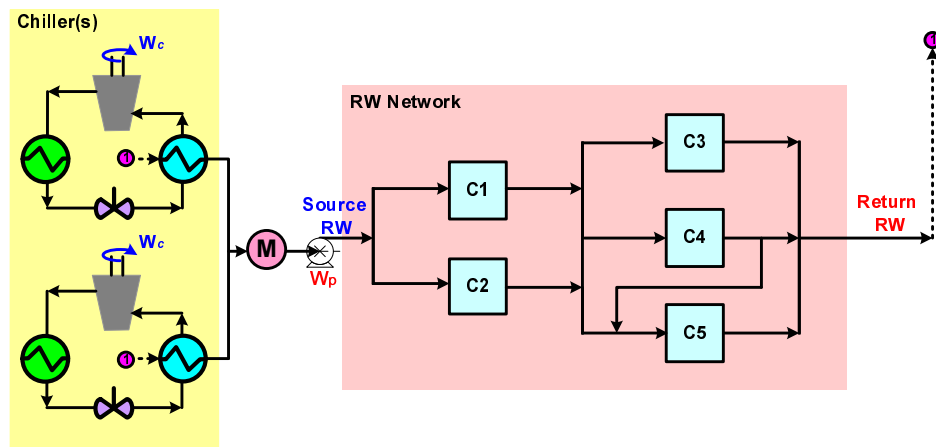
表 1.1 典型工廠用水量比較表 (Rosain, 1993)

Purpose	Description	Relative usage
RW/CW system	Direct contact/indirect (HEs)	High
Cleaning	Washing, hygiene, rinsing for product quality	Medium
Process equipment	Water circulation (e.g. scrubbers)	Medium
General plant services	Hoses (dilute/disperse spills) Pump seal water	Medium
Steam system	Boiler feed water make-up	Medium/low
Potable/sanitary	Drinking, washing, toilets	Low

表 1.1 [23]為工業用水的相對使用情形，我們可以看出冷卻系統對於整個工廠的相對使用量是相當高的。而冷卻系統包含了冷卻水系統 (Cooling Water System) 以及冰水系統 (Refrigerated Water System)，冷卻水是使用在室溫的冷卻系統；而本研究著重於冰水，因為在低於室溫的冷卻系統在工廠上也是相當的常見，尤其在於半導體產業上。而冰水的製造是相當耗能的一個程序，工廠的電費一年可以到達數億元台幣，所以當總成本越來越高時，工廠內冰水網路的設計就越來越重要，其目的為使用水的最佳分配以及最少的使用量，進而達成成本最小化。

而本研究是針對冰水網路系統以及冰水主機的操作策略以數學規劃法作最適化的研究。再循環冰水系統 (Recirculating Refrigerated Water System) 的操作，冰水扮演著吸收熱量的角色，而將工廠中每個冰水使用單元的熱量予之移除，進而達成降溫的效果。

圖 1.1 再循環冰水系統 (Recirculating Refrigerated Water System)



此研究主要包含了兩個子系統，如圖 1.1：

1. 冰水網路系統 (Refrigerated Water Network)
2. 冰水主機的操作策略 (Chiller Operating Strategy)

1.2 整合性冰水網路與冰水主機操作策略之發展與說明

什麼是冰水呢? 它是一種低於室溫的水，用在冷卻系統中。如圖 3.1 所示，冰水的產生是利用傳統的冷凍壓縮機循環所製造的，它是由四個主要部分所組成，包括了壓縮器 (Compression)、冷凝器 (Condensation)、膨脹筏 (Expansion Valve) 及蒸發器 (Evaporator)。冰水主機 (chiller) 即為熱幫浦 (heat pump)，冷凝器的溫度為相對高溫，而蒸發器的溫度為相對低溫，所以此程序是一個不可自發的反應 (Non- Spontaneous Process)，必須對此程序作功，才能使此程序發生。飽和的低壓氣體經由壓縮機壓縮，形成高溫高壓的過熱氣體；此時冷媒經由冷凝器移除部分能量後形成高壓液體；而後在膨脹過程中，高壓高溫的液態冷媒經過膨脹筏後形成低壓低溫液氣共存的冷媒；最後冷媒可以藉由蒸發器吸收程序提供的能量成為低溫低壓氣體，而冰水就是在此步驟產生的。

圖 1.2 冰水主機循環

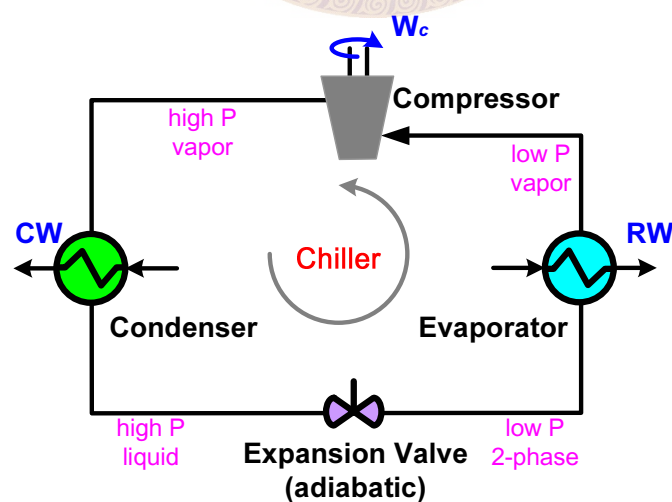
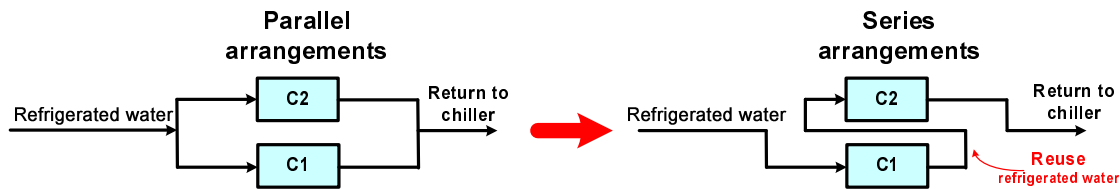


圖 1.3 冰水網路的設計選擇 (a) 並聯設計，(b) 串聯設計



在循環冰水網路中，起初的設計是每一個單元 (C1,C2) 皆採用並聯 (Parallel) 的設計，如圖 1.3 所示。

在此設計中，每一個單元都使用新鮮的冰水，而每一單元使用完的相對高溫冰水就直接回到冰水主機做再循環使用，在此種設計下，完全沒有再利用的想法，故此種設計下，所需的冰水量是最大，最耗能的。

為了因應並聯設計所造成的浪費問題，Kim 與 Smith[2] 利用串聯 (Series) 的方法來設計冷卻水系統 (Cooling Water System)，而我們可以利用類似的觀念應用在設計冰水系統的網路結構上，在串聯的概念下，新鮮的冰水提供給單元一 (C1) 使用，若是單元一 (C1) 出口的溫度還低於單元二 (C2) 入口的最大容許溫度 (Maximum Allowable Temperature) 時，我們可以給單元二 (C2) 再利用，如圖 1.3，由於單一股流使用了兩次而且滿足兩個單元的需求，如此一來可以降低冰水使用量，所以在串聯設計的條件下，我們可以得到就低的操作及固定成本。

1.3 文獻回顧

在水與冷卻水網路配置設計領域中，有許多學者提出看法與研究，相關文獻不勝枚舉，而我們將其應用到冰水網路設計，此處只列出幾個與本文有關的文獻，逐一詳述如下：

Kim 和 Smith[28]首先運用狹點分析法 (Pinch technology) 來解決水網路配置的問題，而 Kim 和 Smith 在 2001 年[11]之後更進一步將此方法延伸到冷卻水網路系統，而將串聯 (Series) 的設計方式運用在冷卻器網路系統設計，使用串聯的設計方式可以使得冷卻水網路系統回流冷卻水流量最小，而回流冷卻水平均溫度最高，這樣的條件下冷卻塔達到最高的操作效率。文中也討論若回流冷卻塔溫度有最高溫度限制時，要如何重新配置冷卻器網路。

Kim 和 Smith[12]之後又對一個設計好的冷卻水網路系統，使用數學規劃法的方式，建構一個混合整數的非線性數學模式 (MINLP) 進行設計結構上的一些改進，特別考慮降低冷卻水網路的壓力差，同時也考慮增加冷卻塔的使用效率。

Feng 等人[5]針對冷卻水網路系統提供一個新的設計方法，就是在冷卻網路系統中多了中間儲存槽 (intermediate cooling-water main) 的觀念，在以往傳統的冷卻水網路系統設計上，大多採用串聯的方式，在這種設計的冷卻水網路中，常常因為前一個單元出口端的流量、濃度或溫度一有變化，就會馬上影響到下一個單元入口端的條件，進而產生操作上的影響，而使得系統具有較差的操作韌性 (operational flexibility)，為了

解決這樣的問題，作者在系統中加入中間儲存槽，使得單元之間沒有直接的管線相連，並控制中間儲存槽的溫度，進而提高系統的韌性。

Chen 等人[3]延續了具有中間儲存槽的冷卻水網路系統，使用數學規劃法方式進一步探討，若系統有多個中間儲存槽的冷卻水網路設計，並且也考慮在保有系統韌性的情況下，允許部分的冷卻器單元之間可以有管線直接連結，這樣的作法更能兼顧減低系統冷卻水消耗量。

Chew[9]這篇文獻針對跨廠區水網路系統作設計上的分析，用兩種情境 (Direct and Indirect allocation) 對這樣的問題去做配置，再比較兩種情境的優缺；文中第一個部份使用最少用水量為目標函數，而第二個部份以最小年總成本 (TAC) 為目標函數去做分析，最後也討論在不同的污水處理費用下，年總成本的最適化結果。

以上文獻雖然是水與冷卻水網路系統，但是所提及的概念與冰水網路系統非常相似，可將同樣的觀念，應用在跨廠區冰水網路上。

1.4 研究動機與目的

在過去研究冷卻水網路的文獻，如 Smith[11][13][12][10]、Feng[5]、Chen[3]和 Chew[9]等學者，雖然考慮的都是網路系統，但冷卻水網路與冰水網路還是有一些不相同的地方，所以我們利用冷卻水網路系統的概念，應用在冰水網路上。

由文獻中可以得知，研究網路系統配置的設計主要有兩方面的文章，其一是以狹點分析 (Pinch Analysis) 為主要的研究，其二則是以混合整數的非線性規劃 (MINLP) 為主的數學模式，配合運算軟體作最適化分析的研究。正如之前說明過，前者對於較簡單的系統而言，確實能得到不錯的解答，但是對於實際複雜的工廠操作來看，分析上有著一定的難度；而後者的超結構模式，卻能夠對於複雜度較高的網路配置，求得一個完整的整合性網路配置。

因此本研究在研究方向上，採用以超結構的方式，分析跨廠區冷卻水網路系統，意即是具有多個冰水使用單元網路的冰水系統，提出一個完整且通用的超結構模式。此模型除了能應用在跨廠區的冰水水網路，也能夠包含只具有單一冰水使用單元網路的系統，並且利用此模型對問題，求得最適化的網路配置結果。

另一方面我們同時還考慮冰水主機的操作策略，我們將會討論其操作上下限對其影響，最後我們將會討論不同的網路結構討論不同的操作策略，試著比較其對成本的影響。

1.5 組織章節

本文共分為五個章節，包含：

第一章 緒論

介紹冰水系統，包括冰水網路系統及冰水主機操作策略，並回顧近幾年相關的文獻所提出的數學模型如何解決冰水網路的最適化問題，並從中歸納出研究動機。

第二章 冰水網路最適化之模型建構

首先說明建構模型的背景，規劃本研究適合的問題範圍，然後提出所需要的假設條件，接下來解釋數學模型所會用到的符號、參數、變數的物理意義，最後是相關限制式的解釋，並討論目標函數所能考慮的狀況。

第三章 冰水主機操作策略之模型建構

規劃本研究適合的問題範圍，提出所需要的假設條件，並解釋數學模型所會用到的符號、參數、變數的物理意義，最後是相關限制式的解釋，及討論目標函數所能考慮的狀況。

第四章 冰水網路及冰水主機操作策略之模擬與結果分析

對於本研究所建立的數學模型，針對幾個例子做最適化，比較在不同情境下所得到的最適化結果，並加以分析討論。

第五章 結論與未來展望

為本論文做出總結並討論未來可能的發展性。



2

冰水網路最適化之模型建構

2.1 模型建立之背景說明與想法

首先，我們先從最簡單的單一工廠 (Single Plant) 說起，有三種模型，第一種網路結構是並聯模式 (Parallel Design) 如圖 2.1 所示，此時每一個冰水使用單元皆使用新鮮冰水，此種結構是我們研究的最基本的例子，用來跟其他例子作比較；而第二種網路結構為 (Direct Design)，此結構為重覆使用冰水，發揮它的最大效益，使冰水充分被利用，如圖 2.2 所示；最後第三種網路結構為 (RW Mains Design)，它依然可以重覆使用冰水，但是此結構多了儲存槽 (Mains)，統一匯集冰水，再進行分配，它被視為一個緩衝槽，不僅可以使整個網路結構更簡潔，還可以使操作更有彈性，如圖 2.3 所示。

圖 2.1 Single Plant: Parallel Design

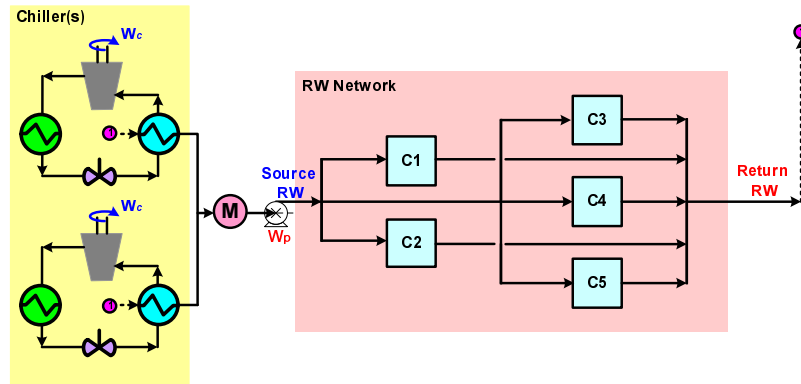


圖 2.2 Single Plant: Direct Design

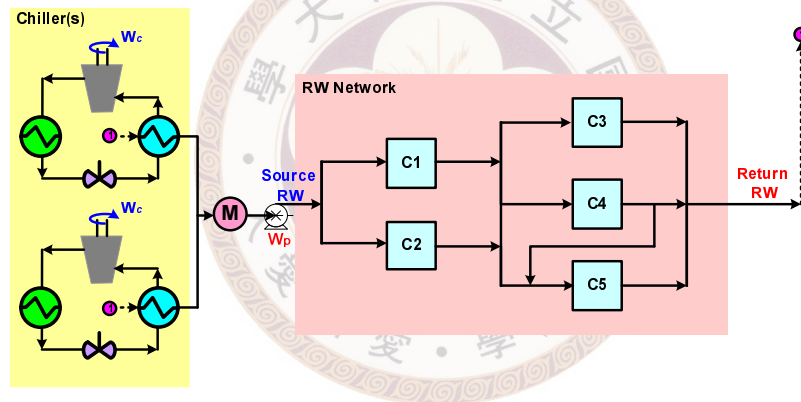
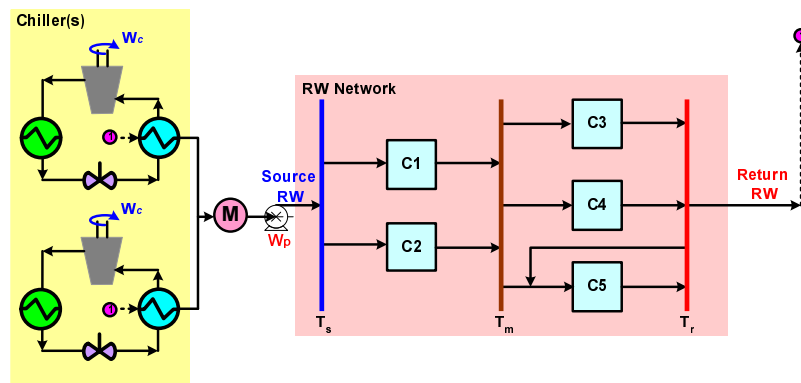
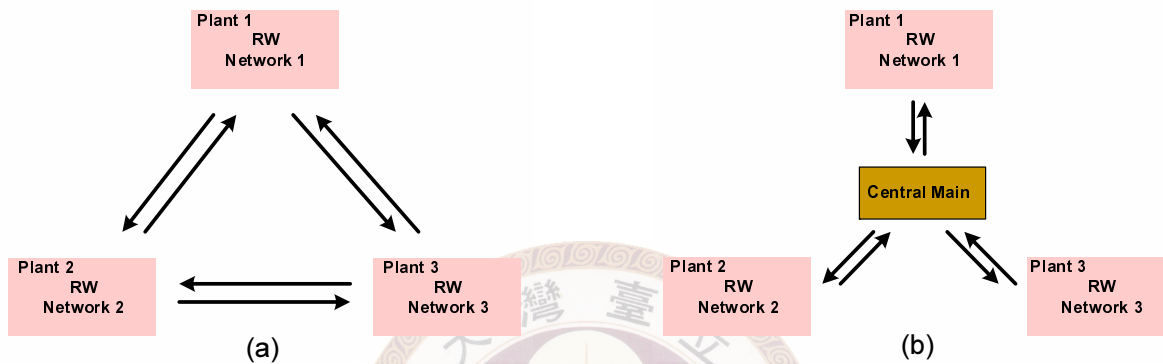


圖 2.3 Single Plant: RW Mains Design



而要提出跨廠區網路 (Inter-plant Network) 的概念前，我們必須要先討論兩種整合的問題，分別是 (a) Direct Integration (b) Indirect Integration，如圖 2.4 所示。

圖 2.4 Single Plant: Parallel Design



Direct Integration 的架構下，若各個單元屬於不同的工廠，那麼冰水的再使用就必須透過跨廠區的管線 (Cross-plant Pipeline) 進行整合，如圖 2-5(a) 所示。而圖 2-5(b) 的架構，在說明跨廠區的冰水整合，必須透過一個中央儲存槽 (Central Main)，先統一匯集冰水，再進行分配，因為通常工廠內部的管線相當複雜，若將工廠與工廠間的管線蒐集在一起，除了便於管理，也可以降低總體的成本。

接下來，我們考慮多工廠 (Multiple Plant)，我們延續 Chew 等人的觀念，將跨廠區的整合問題，根據工廠可能操作情況的不同，分成幾個情境；包括 Separate Design，如圖 2.5 所示。Separate Design with Inner Mains，如圖 2.6 所示。With Inter-Plant Main，如圖 2.7 所示。With Inter/Inner-Plant Mains，如圖 2.8 所示。

如圖 2.5 所示，Separate Design 為工廠間不具有中間儲存槽 (Central Main)，而工廠內部的單元間可以直接相連，意指單一工廠內冰水可以再利用；而工廠與工廠之間沒有冰水再使用。

如圖 2.6 所示，Separate Design with Inner Mains 為工廠內部具有中間儲存槽 (Inner-plant mains)，而單一工廠內部，各個單元間不可以直接相連，這樣的結構可以使得冰水網路系統複雜度降低以及提高較高的操作彈性。

如圖 2.7 所示，With Inter-Plant Main 為工廠內部允許各個單元直接連接，但是在工廠間的管線，只能經由中央儲存槽才允許連接，它的功用除了具有緩衝的效果，還可以使複雜的管線更趨簡單化。

如圖 2.8 所示，With Inter/Inner-Plant Mains 為工廠內部具有中間儲存槽 (Inner-plant mains)，而工廠間具有中央儲存槽 (Central Main)，所以不論工廠內部與外部，各個單元皆透過中間儲存槽或中央儲存槽再連接，若能控制這些儲存槽的溫度，避免因為單元出口溫度而擾動影響下一單元的情況，就能有效提高系統操作的韌性；另外，如同先前提到，跨廠區的管線透過中央儲存槽統一管理，比較能是用於實際的工廠運作。

圖 2.5 Multiple Plant: Separate Design

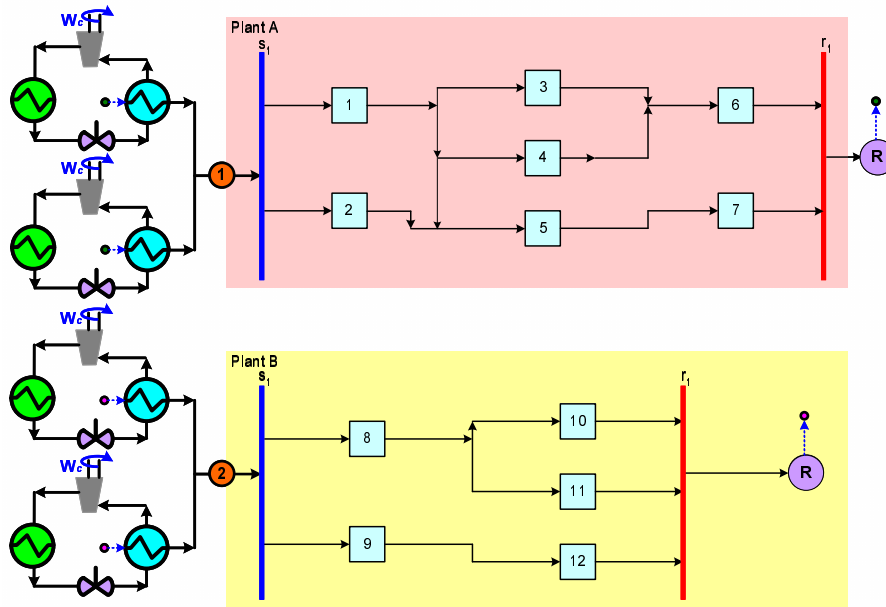


圖 2.6 Multiple Plant: Separate Design with Inner Mains

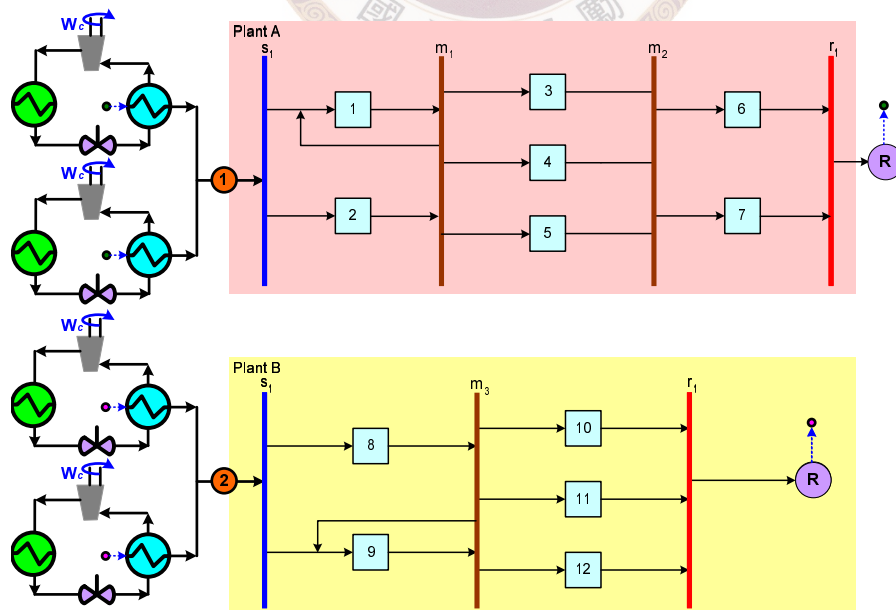


圖 2.7 Multiple Plant: With Inter-Plant Main

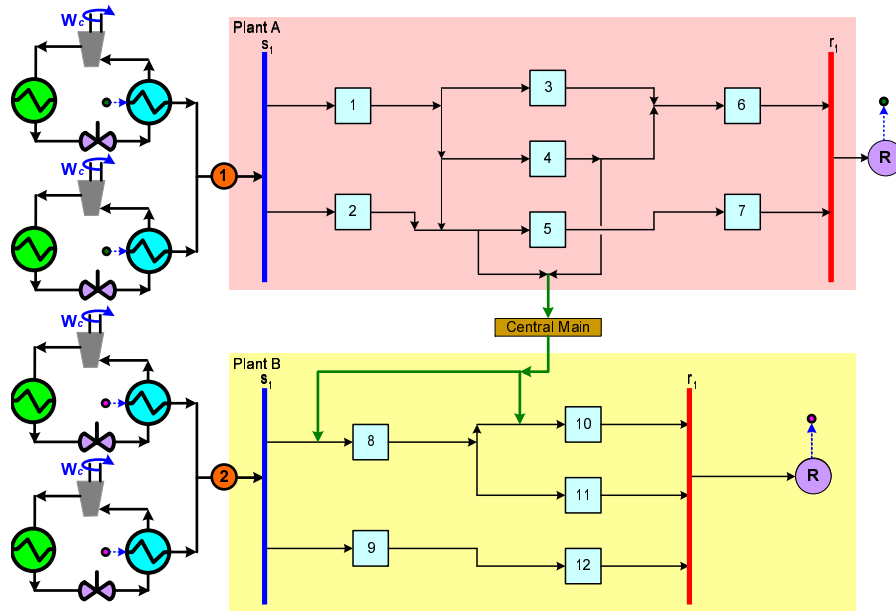
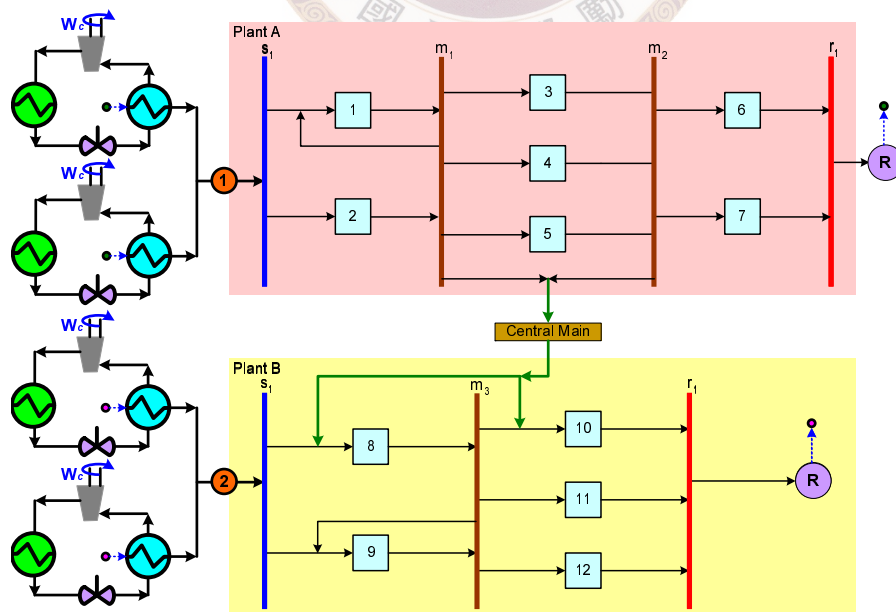


圖 2.8 Multiple Plant: With Inter/Inner-Plant Mains



2.2 模型建立之基本假設條件

由於真實工廠的冰水網路結構相當複雜，本研究為了簡化問題的複雜度，在建構模型前，必須做下列假設：

1. 每一冰水使用單元的數量是已知且固定的。
2. 每一冰水使用單元中，必須被移除的熱負載是固定的。
3. 每個冰水使用單元皆具有最高容許的進口溫度與出口溫度。
4. 在混合過程中，可以忽略熱的損耗。

因此模型可以描述如下：

1. 決策者提供：
 - (a) 每一連接管線流量的上下限制
 - (b) 每一冰水使用單元熱負載的大小
 - (c) 每一冰水使用單元最高可容許的進出口溫度
 - (d) 每單位流量冰水的價格
2. 以模型計算出：
 - (a) 各冰水使用單元間管線相互連接的情形
 - (b) 各存在管線的流量值
 - (c) 各冰水使用單元實際進出口端溫度狀況

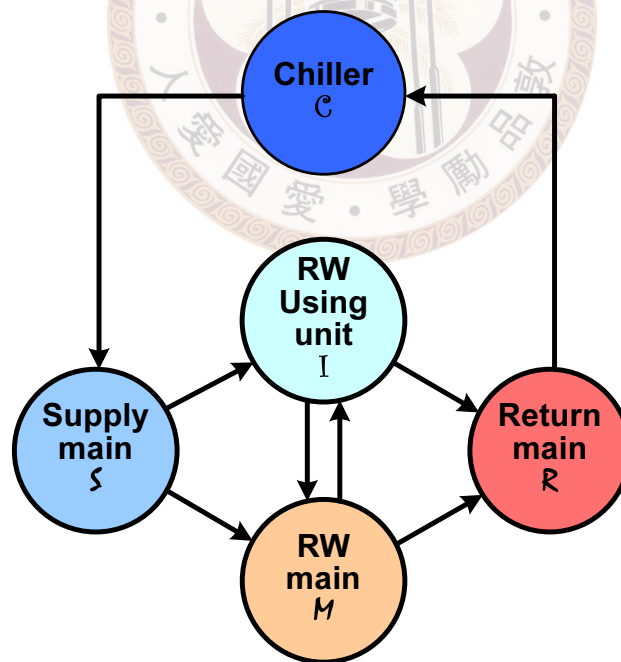
3. 模型的目標是使冰水網路系統設計，經過模擬計算得到一個最適化的結構決策，以達成：

冰水網路所需的消耗量最小化。

2.3 模型建立之圖解說明

圖 2.9 為整個冰水網路的超結構的示意圖，在此圖中冰水主機提供冰水給供應儲存槽 (Supply Main)，將冰水提供給各個冰水使用單元 (RW Using Unit) 使用，或流至中間儲存槽 (RW Main) 儲存，而後匯集至回流儲存槽 (Return Main)，最後回流至冰水主機完成循環。

圖 2.9 冰水網路系統之超結構



為了讓讀者更了解模型中各符號的意義與限制式的物理意義，從之前的示意圖中我們可以看出一個冰水網路系統是由四個單元所組成的，分別是：

1. 冰水使用單元 (RW Using Unit)
2. 供應儲存槽 (Supply Main)
3. 中間儲存槽 (RW Main)
4. 回流儲存槽 (Return Main)

而我們針對這四種不同功能的單元做一個簡單的結構示意圖，意義為在系統中此單元對其他單元所有連接的可能，如圖 2.10、圖 2.11 所示。我們可以從圖中看出，在每個單元之前都有一個混和器 (Mixer)，它的目的是用來將來自不同來源的冰水匯集在一起，之後再一併送入單元中；此外，在單元出口端也有一個分離器 (Splitter)，其目的是將準備流往其他單元的冰水做適當的分流。

圖 2.10 冰水網路之超結構 (a) Using Unit (b) Supply Main

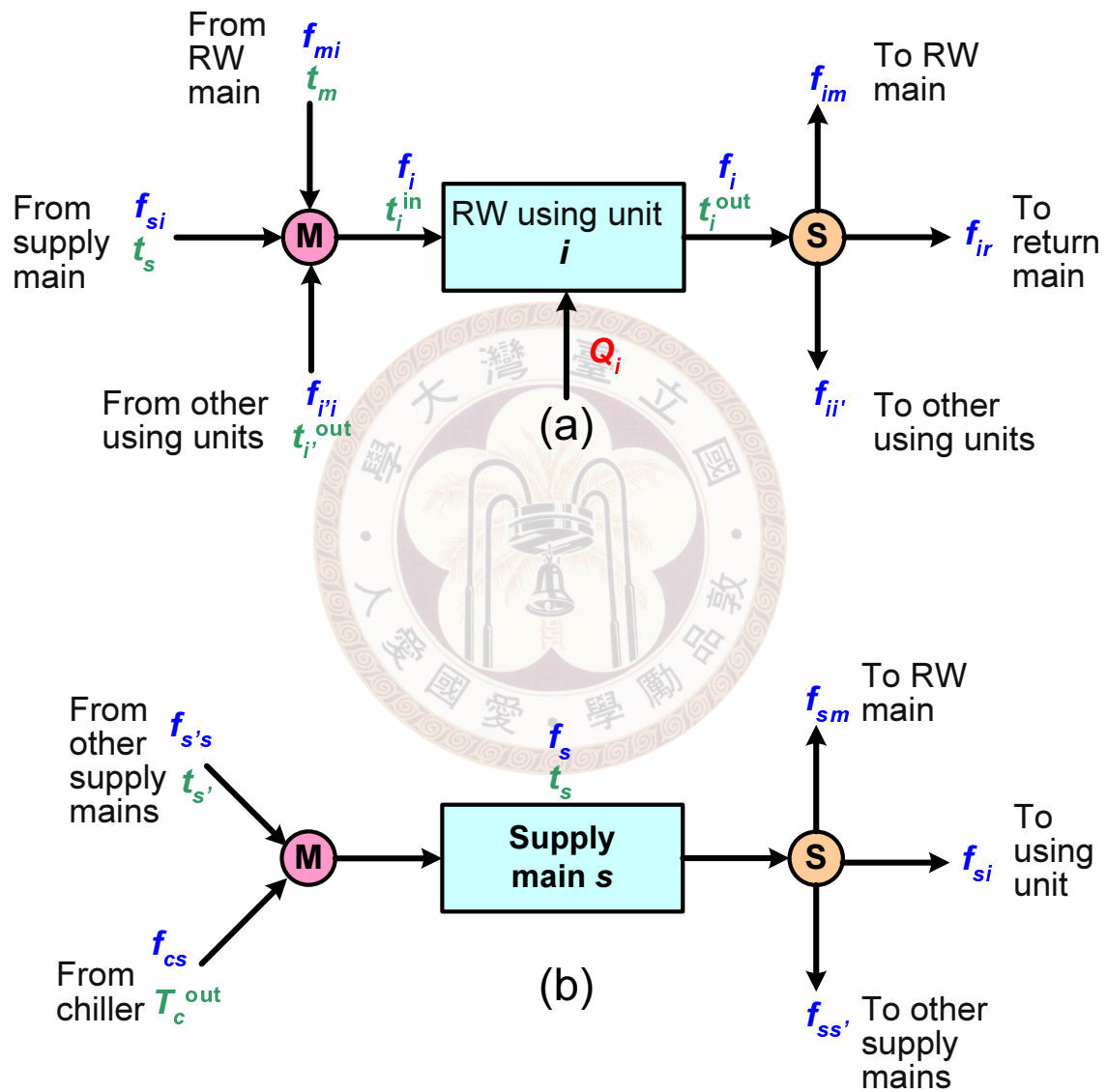
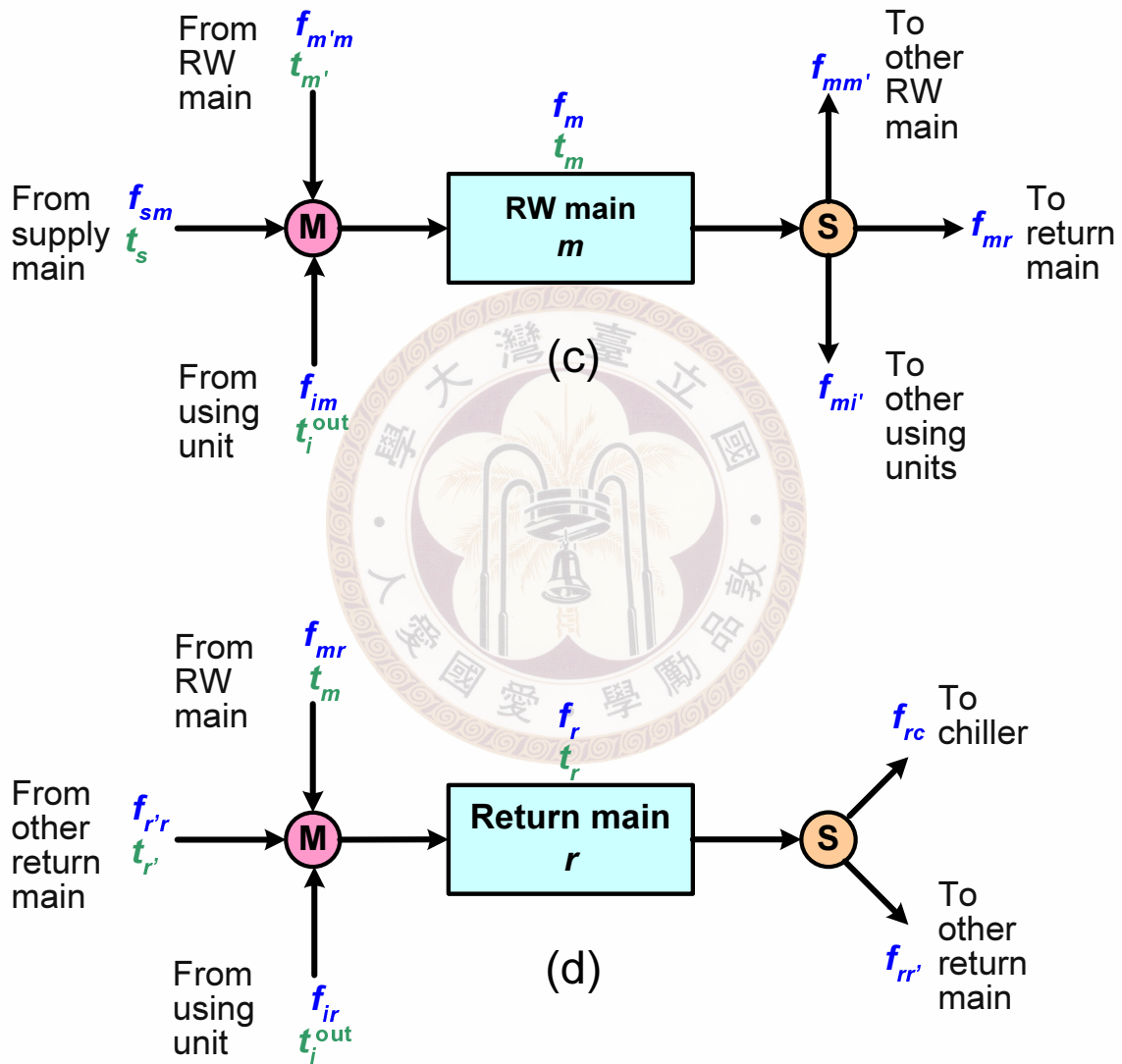


圖 2.11 冰水網路之超結構 (c) RW Main (d) Return Main



2.4 模型之符號、集合、系統參數與變數 (Indices, Sets, Parameter, and Variables)

在數學規劃法所建構的超結構中，是把單元間所有可能的管線連接全部都先考慮進來，再藉由超結構去建立數學模式，而建立模式的首要步驟就是決定系統中的符號 (indices)、集合 (sets)、系統參數 (parameter) 以及系統變數 (包括連續變數與 0-1 變數)(variables)，本文將分別列於 2.4.1 節~2.4.4 節。

2.4.1 下標符號說明 (Indices)

在這裡下標符號是指代表物件的符號，例如： i 是指冰水使用單元， p 是代表工廠... 等，其他下標符號如表 2.1 所示；而在模型中所使用的任何參數及變數均會出現下標符號。

表 2.1 冰水網路下標符號說明

p	工廠
i	冰水使用單元
m	儲存槽
s	供應儲存槽
r	回流儲存槽

2.4.2 集合說明 (Sets)

本節將介紹模型中所需要的集合。例如： \mathcal{I} 為所有冰水使用單元的集合， \mathcal{P} 為所有工廠之集合...等，其他系統集合說明如表 2.2 所示。另外值得注意的是，在本模型中，代表所有中間儲存槽的集合 \mathcal{M} ，包含兩個子集合 \mathcal{M}^{cen} 與 \mathcal{M}^{inn} ，分別代表中央儲存槽 (central main) 與工廠內的中間儲存槽 (inner-plant RW main)。

表 2.2 冰水網路系統集合

\mathcal{P}	所有工廠之集合
\mathcal{I}	所有冰水使用單元之集合
\mathcal{I}_p	工廠 p 內冰水使用單元之集合， $\mathcal{I}_p \subseteq \mathcal{I}$
\mathcal{M}	所有儲存槽之集合， $\{\mathcal{M} = \mathcal{M}^{\text{cen}} \cup \mathcal{M}^{\text{inn}}\}$
\mathcal{M}^{cen}	中心儲存槽之集合
\mathcal{M}^{inn}	工廠內部中間儲存槽之集合， $\mathcal{M}^{\text{inn}} = \{M_p, p \in \mathcal{P}\}$
\mathcal{S}	所有供應儲存槽之集合
\mathcal{S}_p	工廠 p 內供應儲存槽之集合， $\mathcal{S}_p \subseteq \mathcal{S}$
\mathcal{R}	所有回流儲存槽之集合
\mathcal{R}_p	工廠 p 內回流儲存槽之集合， $\mathcal{R}_p \subseteq \mathcal{R}$

2.4.3 系統參數 (Parameters)

本節將介紹模型中所需要的基本資訊，及需要決策者所輸入的參數，例如： F_i^{\max} ，表示冰水使用單元 i 進口端最大流量。或是 Q_i 代表冰水使用單元 i 所需被吸收的熱量；而其他參數之定義與此類似，如表 2.3 所示。

表 2.3 冰水網路系統參數

F_i^{\max}	冰水使用單元 $i \in \mathcal{I}$ 進口端最大流量
Q_i	冰水使用單元 $i \in \mathcal{I}$ 所需被吸收的熱負載
$T_i^{\text{in},\max}$	冰水使用單元 $i \in \mathcal{I}$ 進口端最大容許溫度限制
$T_i^{\text{out},\max}$	冰水使用單元 $i \in \mathcal{I}$ 出口端最大容許溫度限制
T_c^{out}	冰水主機 $c \in \mathcal{C}$ 出口端供應冰水溫度



2.4.4 系統變數 (Variables)

本節將介紹決策變數，及模型輸出的變數，包括一般的連續變數與邏輯變數 0-1 變數，兩種不同的系統變數。

連續變數 (Continuous Variable)，是指在一定範圍內所有可能由數學運算得到的結果，為任何大於零或等於零的數值，其變數如表 2.4 所示；

表 2.4 冰水網路連續變數

連續變數	物理意義
f_i	冰水使用單元 $i \in \mathcal{I}$ 進出口端流量
f_c	冰水主機 $c \in \mathcal{C}$ 進出口端流量
t_i^{in}	冰水使用單元 $i \in \mathcal{I}$ 進口端的溫度
t_i^{out}	冰水使用單元 $i \in \mathcal{I}$ 出口端的溫度
t_s	供應儲存槽 $s \in \mathcal{S}$ 的平均溫度
t_m	中間儲存槽 $m \in \mathcal{M}$ 的平均溫度
t_r	回流儲存槽 $r \in \mathcal{R}$ 的平均溫度
f_{si}	供應儲存槽 $s \in \mathcal{S}$ 到冰水使用單元 $i \in \mathcal{I}$ 的流量
f_{sm}	表示供應儲存槽 $s \in \mathcal{S}$ 到中間儲存槽 $m \in \mathcal{M}$ 的流量
$f_{ss'}$	表示供應儲存槽 $s \in \mathcal{S}$ 到供應儲存槽 $s' \in \mathcal{S}$ 的流量
f_{cs}	表示冰水主機 $c \in \mathcal{C}$ 到供應儲存槽 $s \in \mathcal{S}$ 的流量
$f_{ii'}$	表示冰水使用單元 $i \in \mathcal{I}$ 到冰水使用單元 $i' \in \mathcal{I}$ 的流量
f_{im}	表示冰水使用單元 $i \in \mathcal{I}$ 到中間儲存槽 $m \in \mathcal{M}$ 的流量
f_{ir}	表示冰水使用單元 $i \in \mathcal{I}$ 到回流儲存槽 $r \in \mathcal{R}$ 的流量
f_{mi}	表示中間儲存槽 $m \in \mathcal{M}$ 到冰水使用單元 $i \in \mathcal{I}$ 的流量
f_{mr}	表示中間儲存槽 $m \in \mathcal{M}$ 到回流儲存槽 $r \in \mathcal{R}$ 的流量
$f_{mm'}$	表示中間儲存槽 $m \in \mathcal{M}$ 到中間儲存槽 $m' \in \mathcal{M}$ 的流量
f_{rc}	表示回流儲存槽 $r \in \mathcal{R}$ 到冰水主機 $c \in \mathcal{C}$ 的流量
$f_{rr'}$	表示回流儲存槽 $r \in \mathcal{R}$ 到回流儲存槽 $r' \in \mathcal{R}$ 的流量

0-1 變數 (binary variable)，是用來表示一個事件存在或不存在的邏輯變數，該數值只能存在於 0 或 1 兩者之一，亦即 0-1 變數的結果不是 0 就是 1。例如當 $Z_{si} = 1$ 時，表示供應儲存槽 s 到冰水使用單元 i 的管線是存在的；而當 $Z_{si} = 0$ 時，則表示供應儲存槽 s 到冰水使用單元 i 的管線是不存在的。其他的 0-1 變數如表 2.5 所示。

表 2.5 冰水網路 0-1 變數

0-1 變數	值等於 1 時的物理意義
Z_{si}	表示供應儲存槽 $s \in S$ 到冰水使用單元 $i \in I$ 的管線存在
Z_{sm}	表示供應儲存槽 $s \in S$ 到中間儲存槽 $m \in M$ 的管線存在
$Z_{ss'}$	表示供應儲存槽 $s \in S$ 到供應儲存槽 $s' \in S$ 的管線存在
Z_{cs}	表示冰水主機 $c \in C$ 到供應儲存槽 $s \in S$ 的管線存在
$Z_{ii'}$	表示冰水使用單元 $i \in I$ 到冰水使用單元 $i' \in I$ 的管線存在
Z_{im}	表示冰水使用單元 $i \in I$ 到中間儲存槽 $m \in M$ 的管線存在
Z_{ir}	表示冰水使用單元 $i \in I$ 到回流儲存槽 $r \in R$ 的管線存在
Z_{mi}	表示中間儲存槽 $m \in M$ 到冰水使用單元 $i \in I$ 的管線存在
Z_{mr}	表示中間儲存槽 $m \in M$ 到回流儲存槽 $r \in R$ 的管線存在
$Z_{mm'}$	表示中間儲存槽 $m \in M$ 到中間儲存槽 $m' \in M$ 的管線存在
Z_{rc}	表示回流儲存槽 $r \in R$ 到冰水主機 $c \in C$ 的管線存在
$Z_{rr'}$	表示回流儲存槽 $r \in R$ 到回流儲存槽 $r' \in R$ 的管線存在

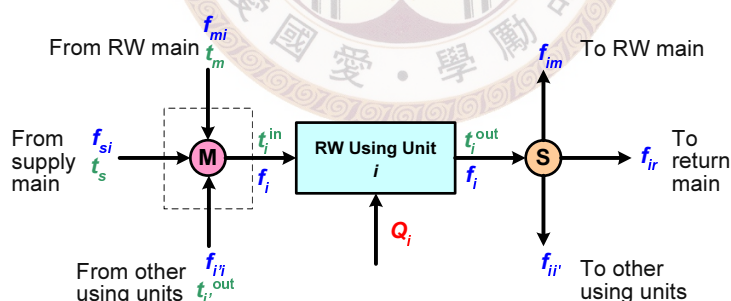
2.5 冰水網路限制式

依據所提出的冰水網路超結構，可以建立冰水網路系統的模型，在這有一些限制式來規範冰水網路結構圖，一一詳述如下。

2.5.1 冰水使用單元 (RW Using Unit) 流量平衡與能量平衡

如圖 2.12 的虛框部份所示，冰水使用單元可能有三種來源，分別從中間儲存槽供應到冰水使用單元的流量 (f_{mi})、從供應儲存槽到冰水使用單元的流量 (f_{si}) 以及從其他冰水使用單元到該冰水使用單元的流量 (f_{ii})，這三個來源與冰水使用單元的進口端達成流量平衡，式 (2.1) 可說明。而式 (2.2) 則是說明冰水使用單元出口端的流量平衡。最後在式 (2.3) 是說明冰水使用單元進口端的能量平衡，其中 T_{ref} 為參考溫度。

圖 2.12 在冰水使用單元進口端的物流流量與能量平衡示意圖



$$f_i = \sum_{s \in \mathcal{S}} f_{si} + \sum_{m \in \mathcal{M}} f_{mi} + \sum_{i' \in \mathcal{I}} f_{i'i} \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (2.1)$$

$$f_i = \sum_{m \in \mathcal{M}} f_{im} + \sum_{r \in \mathcal{R}} f_{ir} + \sum_{i' \in \mathcal{I}} f_{ii'} \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} f_i(t_i^{\text{in}} - T_{\text{ref}}) &= \sum_{s \in \mathcal{S}} f_{si}(t_s - T_{\text{ref}}) + \sum_{m \in \mathcal{M}} f_{mi}(t_m - T_{\text{ref}}) \\ &+ \sum_{i' \in \mathcal{I}} f_{i'i}(t_{i'}^{\text{out}} - T_{\text{ref}}) \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (2.3) \end{aligned}$$

如圖 2.13 的虛框部份所示，式 (2.4) 為冰水使用單元本身所需被移除的能量式 (2.5)、式 (2.6) 與式 (2.7) 分別代表，冰水使用單元進出口端的最高溫度限制與冰水使用單元所能通過的最大流量限制。

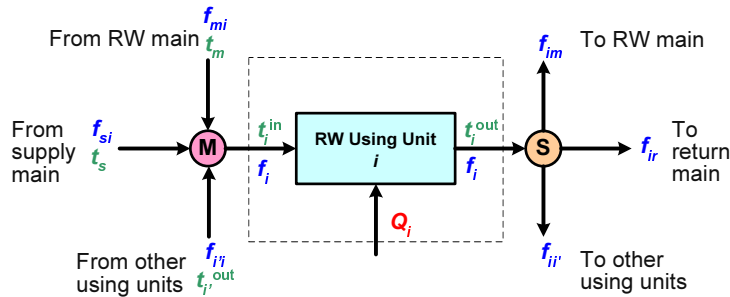
$$Q_i = f_i(t_i^{\text{out}} - t_i^{\text{in}}) \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (2.4)$$

$$t_i^{\text{in}} \leq T_i^{\text{in,max}} \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (2.5)$$

$$t_i^{\text{out}} \leq T_i^{\text{out,max}} \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (2.6)$$

$$f_i \leq F_i^{\text{max}} \quad \forall i \in \mathcal{I} \quad (2.7)$$

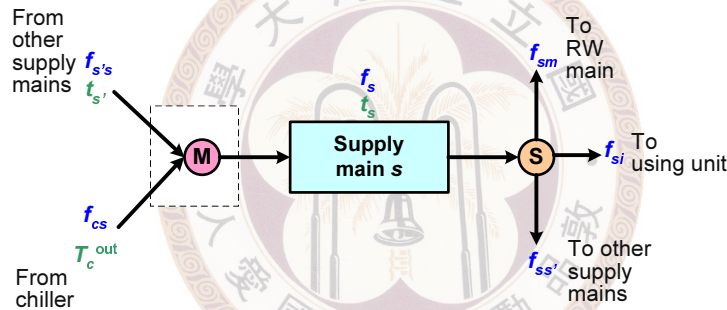
圖 2.13 在冰水使用單元本身的物流流量與能量平衡示意圖



2.5.2 供應儲存槽 (Supply Main) 流量平衡與能量平衡

式 (2.8) 中，說明供應儲存槽有兩種可能的來源，分別是從其他的供應儲存槽以及冰水主機供應而來，如圖 2.14 的虛框部分所示，此兩種來源的流量之總和等於供應儲存槽進口端的流量。而式 (2.9) 是說明供應儲存槽的出口端有三個去向，到中間儲存槽、冰水使用單元、以及其他的供應儲存槽，此三種流量的總和會等於供應儲存槽的出口端流量。而在式 (2.10) 則是說明此三個來源與供應儲存槽的能量平衡關係。

圖 2.14 在供應儲存槽單元進口端的物流流量與能量平衡示意圖



$$f_s = \sum_{c \in C} f_{cs} + \sum_{s' \in S} f_{s's} \quad \forall s \in S \quad (2.8)$$

$$f_s = \sum_{m \in M} f_{sm} + \sum_{i \in I} f_{si} + \sum_{s' \in S} f_{ss'} \quad \forall s \in S \quad (2.9)$$

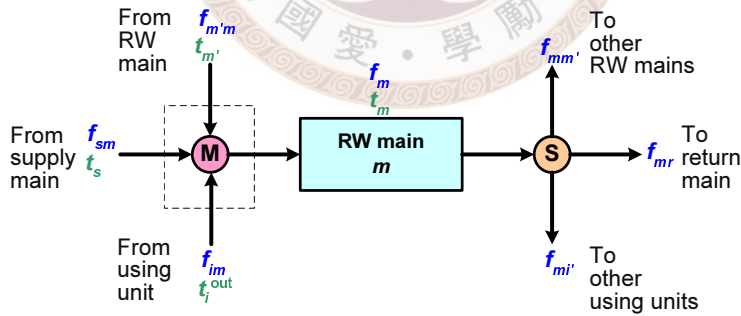
$$f_s(t_s - T_{ref}) = \sum_{c \in C} f_{cs}(T_c^{out} - T_{ref}) + \sum_{s' \in S} f_{s's}(t_{s'} - T_{ref}) \quad \forall s \in S \quad (2.10)$$

2.5.3 中間儲存槽流量平衡與能量平衡 (Water/energy Balance)

式 (2.11) 中，說明中間儲存槽有三種可能的來源，分別是從其他的中間儲存槽、供應儲存槽以及冰水使用單元，如圖 2.15 的虛框部分所示，此三種來源的流量之總和等於供應儲存槽進口端的流量。而式 (2.12) 是說明中間儲存槽的出口端有三個去向，到其他的中間儲存槽、回流儲存槽、以及冰水使用單元，此三種流量的總和會等於中間儲存槽的出口端流量。而在式 (2.13) 則是說明此三個來源與中間儲存槽的能量平衡關係。

另外值得注意的是，如之前所提及，在本模型中，代表所有中間儲存槽的集合 \mathcal{M} ，包含兩個子集合 \mathcal{M}^{cen} 與 \mathcal{M}^{inn} ，分別代表中央儲存槽 (central main) 與工廠內的中間儲存槽 (inner-plant cooling water main)。

圖 2.15 在中間儲存槽單元進口端的物流流量與能量平衡示意圖



$$f_m = \sum_{i \in \mathcal{I}} f_{im} + \sum_{m' \in \mathcal{M}} f_{m'm} + \sum_{s \in \mathcal{S}} f_{sm} \quad \forall m \in \mathcal{M} \quad (2.11)$$

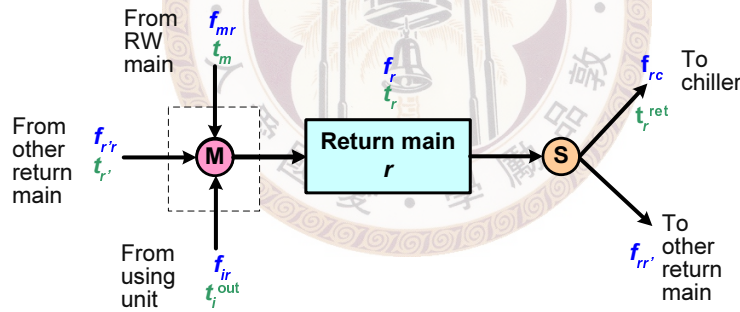
$$f_m = \sum_{i' \in \mathcal{I}} f_{mi'} + \sum_{m' \in \mathcal{M}} f_{mm'} + \sum_{r \in \mathcal{R}} f_{mr} \quad \forall m \in \mathcal{M} \quad (2.12)$$

$$f_m(t_m - T_{\text{ref}}) = \sum_{i \in \mathcal{I}} f_{im}(t_i^{\text{out}} - T_{\text{ref}}) + \sum_{m' \in \mathcal{M}} f_{m'm}(t_{m'} - T_{\text{ref}}) + \sum_{s \in \mathcal{S}} f_{sm}(t_s - T_{\text{ref}}) \quad \forall m \in \mathcal{M} \quad (2.13)$$

2.5.4 回流儲存槽流量平衡與能量平衡 (Water/energy Balance)

回流儲存槽的意義是收集各工廠中相對高溫的冰水，再一併送回冰水主機移除熱負載，式 (2.14) 中，說明回流儲存槽有三種可能的來源，分別是從中間儲存槽、其他的回流儲存槽以及冰水使用單元，如圖 2.16 的虛框部分所示，此三種來源的流量之總和等於供應儲存槽進口端的流量。而式 (2.15) 是說明回流儲存槽的出口端有兩個去向，到冰水主機、以及其他的回流儲存槽，此兩種流量的總和會等於回流儲存槽的出口端流量。而式 (2.16) 則是說明此三個來源與回流儲存槽的能量平衡關係。

圖 2.16 在回流儲存槽單元進口端的物流流量與能量平衡示意圖



$$f_r = \sum_{i \in \mathcal{I}} f_{ir} + \sum_{m \in \mathcal{M}} f_{mr} + \sum_{r' \in \mathcal{R}} f_{r'r} \quad \forall r \in \mathcal{R} \quad (2.14)$$

$$f_r = \sum_{c \in \mathcal{C}} f_{rc} + \sum_{r' \in \mathcal{R}} f_{r'r} \quad \forall r \in \mathcal{R} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} f_r(t_r - T_{\text{ref}}) &= \sum_{i \in \mathcal{I}} f_{ir}(t_i^{\text{out}} - T_{\text{ref}}) + \sum_{m \in \mathcal{M}} f_{mr}(t_m - T_{\text{ref}}) \\ &\quad + \sum_{r' \in \mathcal{R}} f_{r'r}(t_{r'} - T_{\text{ref}}) \quad \forall r \in \mathcal{R} \quad (2.16) \end{aligned}$$

2.5.5 物流流量之上限與下限 (Upper and Lower Bounds in the Flow Rate)

本節介紹各股流量可允許的上下限；其中 U_* 是表示相關管線中冰水流量的上限參數、 L_* 則是相關管線中之冰水流量的最低可允許流量；另外，式 (2.17) 引入了 0-1 變數 (Binary variables)。

$$Z_* = \begin{cases} 1 & \text{pipeline } * \text{ exists.} & \Rightarrow F_*^L \leq f_* \leq F_*^U \\ 0 & \text{pipeline } * \text{ do not exist.} & \Rightarrow f_* = 0 \end{cases}$$

舉例來說，如果冰水使用單元 1(i_1) 的出口端流量供應給冰水使用單元 2(i_2) 再使用，那麼 $f_{i_1 i_2}$ 就有流量值，而流量 $f_{i_1 i_2}$ 就會受到上下限的規範。反之，若該管線流量值等於零的時候，相對的 Z_* 也會等於零，表示該管線不存在。而限制每一股流量的最低門檻，會有助於冰水網路設計時，減少不合理的過小流量的管線存在，並有效控制冰水網路設計的簡單性。

$$Z_* F_*^L \leq f_* \leq Z_* F_*^U \quad (2.17)$$

$$* \in \left\{ \begin{array}{l} si, sm, ss', cs, im, ir, mi, \\ mr, mm', rc, rr', m, c, s, r \\ \forall i, i' \in \mathcal{I}, s, s' \in \mathcal{S}, m, m' \in \mathcal{M}, \\ c, c' \in \mathcal{C}, r, r' \in \mathcal{R} \end{array} \right\}$$

2.6 各網路結構下的額外限制式

如同前面所提及，本研究將跨廠區冰水網路的整合，劃分成四種結構來考量，為了能用數學式的方式來描述這樣的作法，因此定義式 (2.1) ~ 式 (2.17) 為限制式集合 Ω_0 為數學模式 (model) 中必要的方程式 (necessary constrains)，如下所示：

$$\Omega_0 = \{ \boldsymbol{x} \mid \text{Equations (2.1)-(2.17)} \}$$

，而另外定義限制式集合 Ω_{\dagger} ，代表要描述各種結構下所需要的額外的限制式，如下所示： $\Omega_{\dagger}, \dagger \in \{a, b, c, d\}$ ，所以，只要將必要的限制式 Ω_0 與 Ω_{\dagger} 做交集，就代表不同結構下的限制式集合形成的可行解區域。如下所示： $\Omega_{1\dagger} \equiv \Omega_0 \cap \Omega_{\dagger}$ ，本文將於 2.6.1 節 ~ 2.6.4 節將對不同結構所需要的額外限制式做說明。

2.6.1 Re-use Separate Design 之額外限制式


如圖 2.5 所示，Separate Design 為工廠內部不具有中間儲存槽，工廠內部冰水使用單元可以連接；而工廠與工廠之間沒有冰水再使用，Separate Design 在這裡的目的是當作一個對照組，用於比較具有跨廠區冷卻水整合的情境。

$$\Omega_a \equiv \left\{ \begin{array}{l} \sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{inn}} - \mathcal{M}_p} [Z_{mi} + Z_{im}] + \sum_{i' \in \mathcal{I} - \mathcal{I}_p} Z_{ii'} + \sum_{s \in \mathcal{S} - \mathcal{S}_p} Z_{si} + \sum_{r \in \mathcal{R} - \mathcal{R}_p} Z_{ir} = 0 \\ \sum_{i \in \mathcal{I} - \mathcal{I}_p} Z_{si} + \sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{inn}} - \mathcal{M}_p} Z_{sm} + \sum_{s' \in \mathcal{S} - \mathcal{S}_p} Z_{ss'} = 0 \\ \sum_{i \in \mathcal{I} - \mathcal{I}_p} Z_{ir} + \sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{inn}} - \mathcal{M}_p} Z_{mr} + \sum_{r' \in \mathcal{R} - \mathcal{R}_p} Z_{rr'} = 0 \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} \sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{cen}}} Z_m = 0 \\ \sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{inn}}} Z_m = 0 \\ \forall i \in \mathcal{I}_p, \forall p \in \mathcal{P} \\ \forall s \in \mathcal{S}_p, \forall p \in \mathcal{P} \\ \forall r \in \mathcal{R}_p, \forall p \in \mathcal{P} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{No central RW main} \\ \text{No inner-plant RW main} \\ \text{No inter-plant connection for RW using unit } i \\ \text{No inter-plant connection for supply main } s \\ \text{No inter-plant connection for return main } r \end{array}$$

2.6.2 Re-use Separate Design with Inner Mains 之額外限制式

在上一個網路結構 (Re-use Separate Design) 中冰水雖然可以充分的再使用，但是會增加系統的複雜度，所以在本結構會於工廠內部增加中間儲存槽 (Inner Mains)，如圖 2.6 所示。除了工廠內部具有中間儲存槽，工廠內部冰水使用單元不可以連接，必須透過中央儲存槽混合後再分配再使用，這樣的結構，是由 Feng 等學者[5]在水網路有提出，可以使冰水網路系統複雜度降低和提高系統操作韌性；而工廠與工廠之間也沒有冰水再使用，此結構也同樣當作一個對照組，用於比較具有跨廠區冷卻水整合的情境。

$$\Omega_b \equiv \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{x} \\ \sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{cen}}} Z_m = 0 \\ \sum_{i \in \mathcal{I}} Z_{ii'} = 0, \quad \forall i' \in \mathcal{I} \\ \sum_{m \in \mathcal{M}_p} Z_{mm'} = 0, \quad \forall m' \in \mathcal{M}^{\text{inn}} - \mathcal{M}_p \\ \sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{inn}} - \mathcal{M}_p} [Z_{mi} + Z_{im}] + \sum_{i' \in \mathcal{I} - \mathcal{I}_p} Z_{ii'} + \sum_{s \in \mathcal{S} - \mathcal{S}_p} Z_{si} + \sum_{r \in \mathcal{R} - \mathcal{R}_p} Z_{ir} = 0 \\ \quad \forall i \in \mathcal{I}_p, \forall p \in \mathcal{P} \\ \sum_{i \in \mathcal{I} - \mathcal{I}_p} Z_{si} + \sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{inn}} - \mathcal{M}_p} Z_{sm} + \sum_{s' \in \mathcal{S} - \mathcal{S}_p} Z_{ss'} = 0 \\ \quad \forall s \in \mathcal{S}_p, \forall p \in \mathcal{P} \\ \sum_{i \in \mathcal{I} - \mathcal{I}_p} Z_{ir} + \sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{inn}} - \mathcal{M}_p} Z_{mr} + \sum_{r' \in \mathcal{R} - \mathcal{R}_p} Z_{rr'} = 0 \\ \quad \forall r \in \mathcal{R}_p, \forall p \in \mathcal{P} \end{array} \right.$$



$\sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{cen}}} Z_m = 0$ } No central RW main

$\sum_{i \in \mathcal{I}} Z_{ii'} = 0, \quad \forall i' \in \mathcal{I}$ } No direct connections between RW using unit i

$\sum_{m \in \mathcal{M}_p} Z_{mm'} = 0, \quad \forall m' \in \mathcal{M}^{\text{inn}} - \mathcal{M}_p$ } No connections between inner-plant mains

$\sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{inn}} - \mathcal{M}_p} [Z_{mi} + Z_{im}] + \sum_{i' \in \mathcal{I} - \mathcal{I}_p} Z_{ii'} + \sum_{s \in \mathcal{S} - \mathcal{S}_p} Z_{si} + \sum_{r \in \mathcal{R} - \mathcal{R}_p} Z_{ir} = 0$
 $\forall i \in \mathcal{I}_p, \forall p \in \mathcal{P}$ } No inter-plant connection for RW using unit i

$\sum_{i \in \mathcal{I} - \mathcal{I}_p} Z_{si} + \sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{inn}} - \mathcal{M}_p} Z_{sm} + \sum_{s' \in \mathcal{S} - \mathcal{S}_p} Z_{ss'} = 0$
 $\forall s \in \mathcal{S}_p, \forall p \in \mathcal{P}$ } No inter-plant connection for supply main s

$\sum_{i \in \mathcal{I} - \mathcal{I}_p} Z_{ir} + \sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{inn}} - \mathcal{M}_p} Z_{mr} + \sum_{r' \in \mathcal{R} - \mathcal{R}_p} Z_{rr'} = 0$
 $\forall r \in \mathcal{R}_p, \forall p \in \mathcal{P}$ } No inter-plant connection for return main r

2.6.3 Re-use with Inter-Plant Mains 之額外限制式

如圖 2.7 所示，With Inter-Plant Mains 為工廠內部允許冰水使用單元的管線直接連接，但是工廠與工廠間的管線，卻必須要通過中央儲存槽 (central main) 才允許連接，中央儲存槽功能除了具有緩衝的效果，避免冰水使用單元間直接連接時，前一個單元的出口溫度有擾動時，會影響到下一個單元的入口溫度，進而影響單元運作，另外，工廠的管線實際上十分複雜，對於跨廠區的管線集中管理，比較適用於實際的工廠操作。

$$\Omega_c \equiv \left\{ \mathbf{x} \left| \begin{array}{l} \sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{inn}} - \mathcal{M}_p} [Z_{mi} + Z_{im}] + \sum_{i' \in \mathcal{I} - \mathcal{I}_p} Z_{ii'} + \sum_{s \in \mathcal{S} - \mathcal{S}_p} Z_{si} + \sum_{r \in \mathcal{R} - \mathcal{R}_p} Z_{ir} = 0 \\ \sum_{i \in \mathcal{I} - \mathcal{I}_p} Z_{si} + \sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{inn}} - \mathcal{M}_p} Z_{sm} + \sum_{s' \in \mathcal{S} - \mathcal{S}_p} Z_{ss'} = 0 \\ \sum_{i \in \mathcal{I} - \mathcal{I}_p} Z_{ir} + \sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{inn}} - \mathcal{M}_p} Z_{mr} + \sum_{r' \in \mathcal{R} - \mathcal{R}_p} Z_{rr'} = 0 \end{array} \right. \right.$$

$\sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{inn}}} Z_m = 0$

$\left. \begin{array}{l} \text{No inner-plant RW mains} \\ \text{No inter-plant connection for RW using unit } i \\ \text{No inter-plant connection for supply main } s \\ \text{No inter-plant connection for return main } r \end{array} \right\}$

$\forall i \in \mathcal{I}_p, \forall p \in \mathcal{P}$

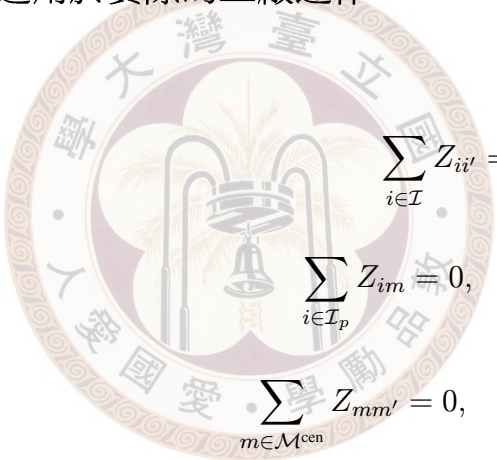
$\forall s \in \mathcal{S}_p, \forall p \in \mathcal{P}$

$\forall r \in \mathcal{R}_p, \forall p \in \mathcal{P}$

2.6.4 Re-use with Inter/Inner-Plant Mains 之額外限制式

如圖 2.8 所示，With Inter/Inner-Plant Mains 為工廠內部具有中間儲存槽 (inner-plant cooling water mains)，而工廠與工廠間具有中央儲存槽 (central main) 的情境，所以不論工廠內部與外部，冰水使用單元是透過中間儲存槽或中央儲存槽再連接，若能控制這些儲存槽的溫度，避免因為冰水使用單元出口溫度擾動影響下一冰水使用單元的情況，而能提高系統操作韌性；另外，如同 2.6.3 節所提，跨廠區的管線透過中央儲存槽統一管理，比較能適用於實際的工廠運作。

$$\Omega_d \equiv \left\{ \begin{array}{l} x \\ \sum_{i \in \mathcal{I}} Z_{ii'} = 0, \quad \forall i' \in \mathcal{I} \\ \sum_{i \in \mathcal{I}_p} Z_{im} = 0, \quad \forall m \in \mathcal{M}^{\text{cen}} \\ \sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{cen}}} Z_{mm'} = 0, \quad \forall m' \in \mathcal{M}^{\text{inn}} \\ \sum_{m \in \mathcal{M}_p} Z_{mm'} = 0, \quad \forall m' \in \mathcal{M}^{\text{inn}} - \mathcal{M}_p \\ \sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{inn}} - \mathcal{M}_p} [Z_{mi} + Z_{im}] + \sum_{i' \in \mathcal{I} - \mathcal{I}_p} Z_{ii'} + \sum_{s \in \mathcal{S} - \mathcal{S}_p} Z_{si} + \sum_{r \in \mathcal{R} - \mathcal{R}_p} Z_{ir} = 0 \\ \quad \forall i \in \mathcal{I}_p, \forall p \in \mathcal{P} \\ \sum_{i \in \mathcal{I} - \mathcal{I}_p} Z_{si} + \sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{inn}} - \mathcal{M}_p} Z_{sm} + \sum_{s' \in \mathcal{S} - \mathcal{S}_p} Z_{ss'} = 0 \\ \quad \forall s \in \mathcal{S}_p, \forall p \in \mathcal{P} \\ \sum_{i \in \mathcal{I} - \mathcal{I}_p} Z_{ir} + \sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{inn}} - \mathcal{M}_p} Z_{mr} + \sum_{r' \in \mathcal{R} - \mathcal{R}_p} Z_{rr'} = 0 \\ \quad \forall r \in \mathcal{R}_p, \forall p \in \mathcal{P} \end{array} \right.$$



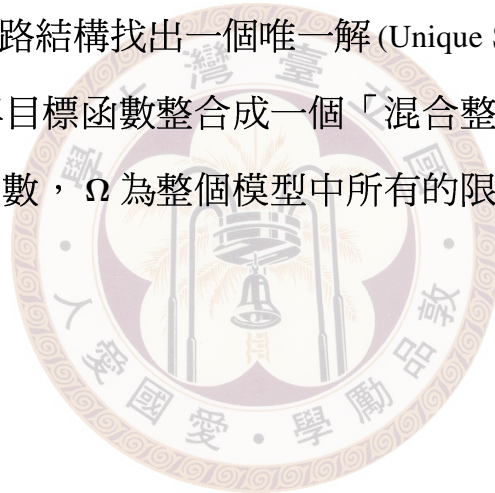
$$\left. \begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} \sum_{i \in \mathcal{I}} Z_{ii'} = 0, \quad \forall i' \in \mathcal{I} \\ \sum_{i \in \mathcal{I}_p} Z_{im} = 0, \quad \forall m \in \mathcal{M}^{\text{cen}} \\ \sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{cen}}} Z_{mm'} = 0, \quad \forall m' \in \mathcal{M}^{\text{inn}} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{No direct connec-} \\ \text{tions between} \\ \text{RW using units} \\ \text{No connections} \\ \text{from RW using unit} \\ i \text{ to central mains} \\ \text{No connections} \\ \text{from central mains} \\ \text{to inner mains} \end{array} \\ \left. \begin{array}{l} \sum_{m \in \mathcal{M}_p} Z_{mm'} = 0, \quad \forall m' \in \mathcal{M}^{\text{inn}} - \mathcal{M}_p \\ \sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{inn}} - \mathcal{M}_p} [Z_{mi} + Z_{im}] + \sum_{i' \in \mathcal{I} - \mathcal{I}_p} Z_{ii'} + \sum_{s \in \mathcal{S} - \mathcal{S}_p} Z_{si} + \sum_{r \in \mathcal{R} - \mathcal{R}_p} Z_{ir} = 0 \\ \quad \forall i \in \mathcal{I}_p, \forall p \in \mathcal{P} \\ \sum_{i \in \mathcal{I} - \mathcal{I}_p} Z_{si} + \sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{inn}} - \mathcal{M}_p} Z_{sm} + \sum_{s' \in \mathcal{S} - \mathcal{S}_p} Z_{ss'} = 0 \\ \quad \forall s \in \mathcal{S}_p, \forall p \in \mathcal{P} \\ \sum_{i \in \mathcal{I} - \mathcal{I}_p} Z_{ir} + \sum_{m \in \mathcal{M}^{\text{inn}} - \mathcal{M}_p} Z_{mr} + \sum_{r' \in \mathcal{R} - \mathcal{R}_p} Z_{rr'} = 0 \\ \quad \forall r \in \mathcal{R}_p, \forall p \in \mathcal{P} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{No connections} \\ \text{between} \\ \text{inner-plant mains} \\ \text{No inter-plant} \\ \text{connection for} \\ \text{RW using unit } i \\ \text{No inter-plant} \\ \text{connection for} \\ \text{supply main } s \\ \text{No inter-plant} \\ \text{connection for} \\ \text{return main } r \end{array} \end{array} \right\}$$

2.7 目標函數 (Objectives)

在這一小節將會討論冰水網路處理的兩個不同目標函數，

1. 最少總冰水消耗量 (To Minimize Total Refrigerated Water)
2. 每一冰水使用單元最小通過量 (To Minimize Throughput of RW Units)

這兩個目標是根據不同的需求所提出的；第一個目標是考慮到成本問題，冰水的消耗量在冰水網路系統中是佔成本的最大部份；第二個目標函數則是將多個網路結構找出一個唯一解 (Unique Solution)。接著將之前所討論的限制式與目標函數整合成一個「混合整數非線性規劃問題」，其中 x 為決策變數， Ω 為整個模型中所有的限制式集合形成的可行解區域。



2.7.1 目標函數 (1)：最少總冰水消耗量 (To Minimize Total Refrigerated Water)

回流循環冰水進入到冰水主機的時，如果冰水流量越少，越能降低所需的成本，因此定義了目標函數 (1) 為最小的冰水主機供應冰水量，換句話說就是系統中冰水的消耗量。下式所表示的是一個混合整數的非線性規劃 (Mixed-Integer Non-Linear Programming, MINLP) 的數學模式，在這裡 $x_{1\dagger}$ 是指變數， Ω_0 是指必要的限制式， Ω_{\dagger} 表示不同情境下額外的限制式，所以由 Ω_0 聯集 Ω_{\dagger} ，就可以求出在不同情境下最小的冰水消耗量。

$$\begin{aligned}
 \min_{\mathbf{x}_{1\dagger} \in \Omega_{1\dagger}} J_{1\dagger} &= \sum_{c \in \mathcal{C}} \sum_{s \in \mathcal{S}} f_{cs} & (2.18) \\
 \mathbf{x}_{1\dagger} &\equiv \left\{ \begin{array}{l} f_i, f_c, f_{si}, f_{sm}, f_{ss'}, f_{cs}, f_{ii'}, \\ f_{im}, f_{mi}, f_{ir}, f_{mr}, f_{mm'}, f_{rc}, f_{rr'}, \\ t_i^{\text{in}}, t_i^{\text{out}}, t_c^{\text{in}}, t_s, t_m, t_r^{\text{ret}}, Z_* \\ \forall i, i' \in \mathcal{I}, m, m' \in \mathcal{M}, \\ c \in \mathcal{C}, s \in \mathcal{S}, r \in \mathcal{R} \end{array} \right\} \\
 \Omega_{1\dagger} &= \{ \mathbf{x}_{1\dagger} \mid \Omega_0 \cap \Omega_{\dagger} \} \\
 \dagger &\in \{a, b, c, d\} \\
 \implies (f_{cs})_{\dagger} &= (f_{cs}^*)_{\dagger} \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad \forall s \in \mathcal{S}
 \end{aligned}$$

2.7.2 目標函數 (2)：每一冰水使用單元最小通過量 (To Minimize Throughput of RW Units)

因為目標函數 (1) 解出的網路結構有多重解 (Multiple Solutions)，但我們必須得到唯一解 (Unique Solution)，因此目標函數 (2) 即為冰水使用單元的最小負荷 (也就是每一冰水使用單元有最小的通過量) 時的網路結構來當我們的唯一解 (Unique Solution)，其中 $f_{cs\dagger}$ 為目標函數 (1) 依不同的情境解出的結果， $\Omega_{2\dagger}$ 為 $\Omega_{1\dagger}$ 與 $f_{cs\dagger} = f_{cs\dagger}^*$ 的交集則代表目標函數 (2) 的可行解區域， \dagger 在前面已經定義過，代表不同的情境。

$$\min_{\mathbf{x}_{1\dagger} \in \Omega_{2\dagger}} J_{2\dagger} = \sum_{i \in \mathcal{I}} f_i \quad (2.19)$$

$$\Omega_{2\dagger} = \Omega_{1\dagger} \cap \{ \mathbf{x}_{1\dagger} \mid (f_{cs})_{\dagger} \leq (f_{cs}^*)_{\dagger} (1 + 0.0001) \} \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad \forall s \in \mathcal{S}$$

$$\dagger \in \{a, b, c, d\}$$

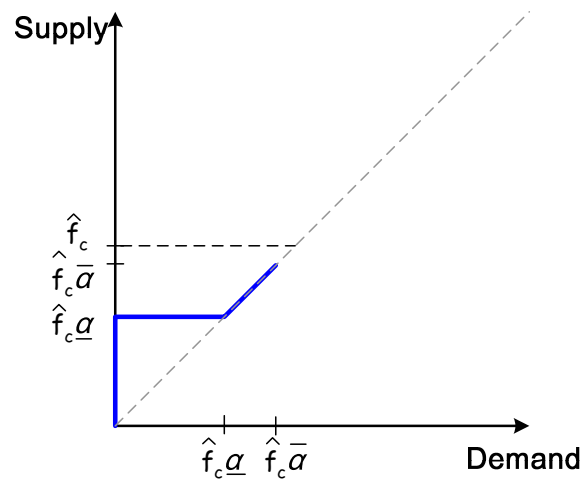
3

冰水主機之操作策略

3.1 模型建立之背景說明與想法

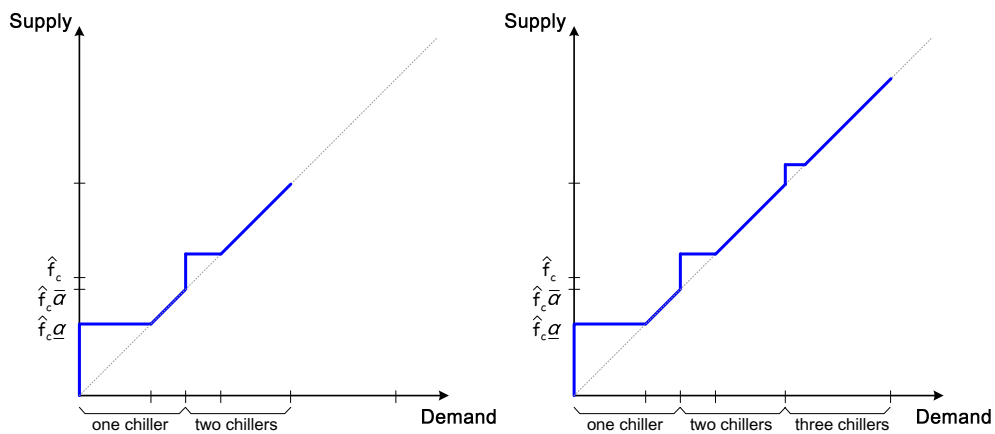
本章，我們將要討論冰水主機的操作策略，我們一樣先討論單一冰水主機，為了使操作更有效率，每台冰水主機都有其操作的上限 ($\bar{\alpha}_c$) 與下限 (α_c)，如圖 3.1 所示，x 軸是需求端使用量；而 y 軸是冰水主機的冰水提供量，此圖的軌跡永遠在 45 度線以上，以確保供應量大於使用量。它是一種半連續的來源，當啟動冰機時，就會有一定的基本量，然後基本量到其上限間皆是連續的操作。

圖 3.1 Single Chiller: Parallel Design



當需求量增大時，我們必須多台冰水主機一起並聯使用，確保軌跡在 45 度線以上，如圖 3.2(a) 所示，此為兩台冰機並聯；如圖 3.2(b) 所示，此為三台冰機並聯。

圖 3.2 Multiple Chillers: (a) two chillers (b) three chillers



3.2 模型建立之基本假設條件

在建構冰水主機模型時，必須做下列假設：

1. 冷媒 (Refrigerant) 比熱為一定值。
2. 每一冰水主機為了其操作效率，進出口溫度必須要有一個範圍。
3. 冰水在混合過程中，可以忽略熱的損耗。

因此模型可以描述如下：

1. 決策者提供：
 - (a) 每一冰水主機的負載最大量 (Capacity)
 - (b) 每一冰水主機的固定操作成本 (Fixed operating cost)
 - (c) 每一冰水主機的變動操作成本 (Variable operating cost)
 - (d) 每一冰水主機其操作的上限以及下限
 - (e) 從 problem2 得到，其一網路結構所需的冰水使用量
2. 以模型計算出：
 - (a) 實際操作點 (α_c)
 - (b) 各種冰水主機所需要的台數
 - (c) 冰水主機出口的流量
 - (d) 冰水主機入口的溫度以及流量

3. 模型的目標是使冰水主機，經過模擬計算得到一個最適化的決策，以達成：

冰水主機固定 / 變動的操作成本最小化。

3.3 模型建立之圖解說明

圖3.3 為整個冰水主機的超結構的示意圖，在此圖中冰水主機提供冰水給供應儲存槽 (Supply Main)，而提供給冰水使用單元使用後，匯集於回流儲存槽 (Return Main)，最後冰水流回冰水主機，完成一個循環。而如果供應量大於使用量，冰水可能有兩種路徑：

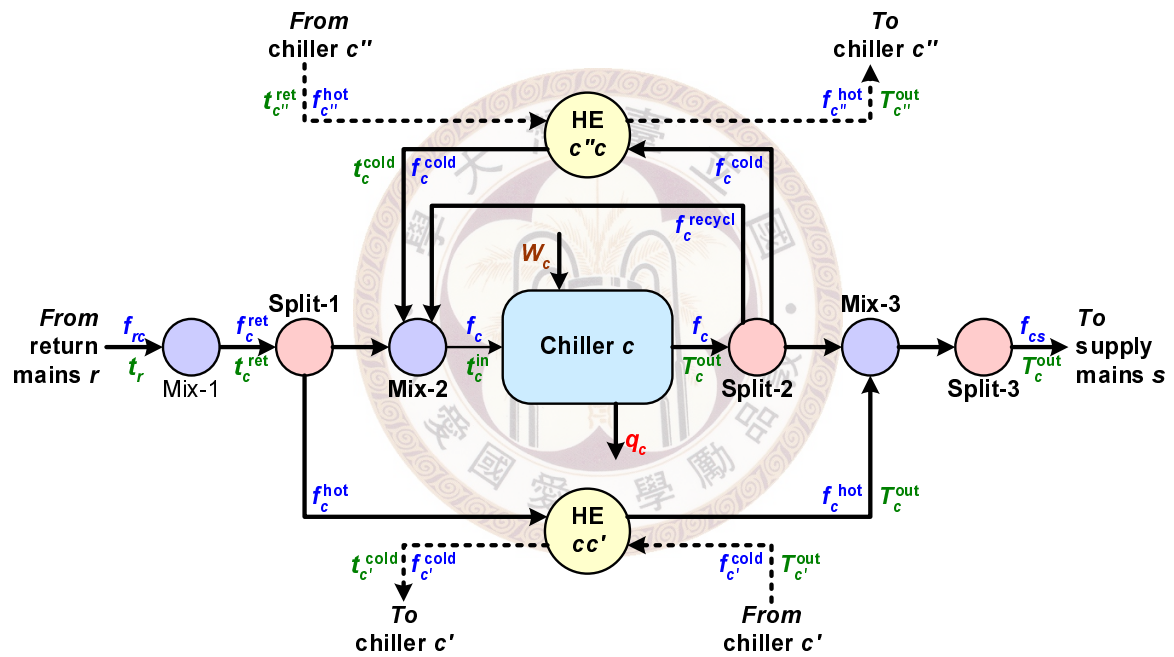
1. 冰水回收至冰水主機

此目的是為了維持冰水主機的操作效率，因為當進出口溫度過大時，會造成冰水主機過大的負荷

2. 跟另一股冰水做熱交換

如果處於較低溫冰水主機的冰水，它可以與較高溫的冰水主機的冰水回流做熱交換，使得多餘的較低溫冰水能有效利用

圖 3.3 冰水主機之超結構



3.4 模型之符號、集合、系統參數與變數 (Indices, Sets, Parameter, and Variables)

本節將介紹模型中所需要的下標符號， c 表示冰水主機、 C 表示冰水主機之集合、系統參數，如表 3.1 所示、系統變數；而此模型需要用到的系統變數除了之前介紹的連續變數，如表 3.2 所示與邏輯變數，如表 3.3 所示外，還有一個整數變數 (Integer Variable)，本模型用到 n_c ，它是表示冰水主機的數量。

表 3.1 冰水主機系統參數

F_c^{\max}	冰水主機 $c \in C$ 進出口端最大流量
f_{cs}	表示冰水主機 $c \in C$ 到供應儲存槽 $s \in S$ 之流量
f_{rc}	表示回流儲存槽 $r \in R$ 到冰水主機 $c \in C$ 之流量
\hat{f}_c	冰水主機 $c \in C$ 的負載最大量
T_c^{out}	冰水主機 $c \in C$ 出口端供應冰水溫度
ΔT_c^{\max}	冰水主機 $c \in C$ 進出口溫度最大可容許之溫度差
$\underline{\alpha}_c$	冰水主機 $c \in C$ 操作下限
$\bar{\alpha}_c$	冰水主機 $c \in C$ 操作上限
C_c^{fix}	冰水主機 $c \in C$ 固定操作成本
C_c^{var}	冰水主機 $c \in C$ 變動操作成本

表 3.2 冰水主機連續變數

連續變數	物理意義
f_c	冰水主機 $c \in \mathcal{C}$ 進出口端的流量
f_c^{hot}	冰水主機 $c \in \mathcal{C}$ 的冰水做熱交換時，提供能量那股管線之流量
f_c^{cold}	冰水主機 $c \in \mathcal{C}$ 的冰水做熱交換時，吸收能量那股管線之流量
f_c^{recycl}	冰水主機 $c \in \mathcal{C}$ 的冰水回收流量
t_c^{in}	冰水主機 $c \in \mathcal{C}$ 入口的平均溫度
t_c^{cold}	冰水主機 $c \in \mathcal{C}$ 的冰水做熱交換時，吸收能量之平均溫度
t_c^{ret}	冰水主機 $c \in \mathcal{C}$ 入口混合前的平均溫度
q_c	冰水主機 $c \in \mathcal{C}$ 所移除的熱
$q_{cc'}$	冰水主機 $c \in \mathcal{C}$ 與冰水主機 $d' \in \mathcal{C}$ 之間冰水熱交換之能量
α_c	冰水主機 $c \in \mathcal{C}$ 實際的操作點

表 3.3 冰水主機 0-1 變數

0 – 1 變數	值等於 1 時的物理意義
y_c^{hot}	表示冰水主機 $c \in \mathcal{C}$ 的冰水做熱交換時，提供能量的那股管線存在
y_c^{cold}	表示冰水主機 $c \in \mathcal{C}$ 的冰水做熱交換時，吸收能量的那股管線存在
y_c^{recycl}	表示冰水主機 $c \in \mathcal{C}$ 的冰水回收流量管線存在
$y_{cc'}$	表示冰水主機 $c \in \mathcal{C}$ 到冰水主機 $d' \in \mathcal{C}$ 的熱交換存在

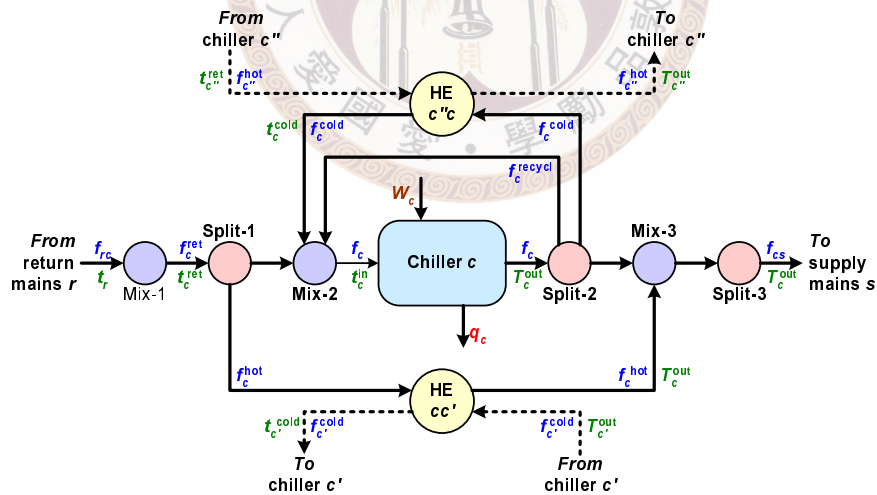
3.5 冰水主機限制式

依據提出的冰水主機超結構，可以建立冰水主機系統的模型，可利用一些限制式來規範冰水主機結構圖，一一詳述如下。

3.5.1 冰水主機 (Chiller) 流量平衡

式 (3.1) 為 Mix-1 的流量平衡，我們考慮每一股來自不同的回流存儲槽的冰水，混合成 f_c^{ret} ；而式 (3.2) 與式 (3.3) 分別為 Split-1, Mix-2 與 Split-2, Mix-3 的流量平衡，而式 (3.4) 為冰水主機需要提供的冰水總量，因為每一冰水主機皆有其操作的上下限，如式 (3.5)，其中冰水主機實際的操作點 α_c 需維持在上下限之間，以確保其操作效率。

圖 3.4 在冰水使用單元進口端的物流流量與能量平衡示意圖



$$f_c^{\text{ret}} = \sum_{r \in \mathcal{R}} f_{rc} \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (3.1)$$

$$f_c^{\text{ret}} + f_c^{\text{cold}} + f_c^{\text{recycl}} = f_c^{\text{hot}} + f_c \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (3.2)$$

$$f_c + f_c^{\text{hot}} = f_c^{\text{recycl}} + f_c^{\text{cold}} + \sum_{s \in \mathcal{S}} f_{cs} \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (3.3)$$

$$f_c = n_c \alpha_c \hat{f}_c \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (3.4)$$

$$\underline{\alpha}_c \leq \alpha_c \leq \bar{\alpha}_c \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (3.5)$$

3.5.2 冰水主機 (Chiller) 能量平衡

式 (3.6) 為 Mix-1 的能量平衡；而式 (3.7) 為 Split-1, Mix-2 的能量平衡。式 (3.8) 是說明每一台冰水主機需移走的熱量；因為冰水主機的進出口溫度必須有所規範，所以由式 (3.9) 限制了冰水主機的入口溫度 t_c^{in} ，必須要有一個上限，避免進出口溫度過大而影響操作效率。

$$f_c^{\text{ret}} t_c^{\text{ret}} = \sum_{r \in \mathcal{R}} f_{rc} t_r \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (3.6)$$

$$f_c^{\text{ret}} t_c^{\text{ret}} + f_c^{\text{cold}} t_c^{\text{cold}} + f_c^{\text{recycl}} T_c^{\text{out}} = f_c^{\text{hot}} t_c^{\text{ret}} + f_c t_c^{\text{in}} \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (3.7)$$

$$q_c = f_c (t_c^{\text{in}} - T_c^{\text{out}}) \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (3.8)$$

$$t_c^{\text{in}} - T_c^{\text{out}} \leq \Delta T_c^{\text{max}} \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (3.9)$$

當熱交換存在時， $y_c^{\text{hot}} = y_c^{\text{cold}} = 1$ ，所以式 (3.10) ,式 (3.11) 的 $q_{cc'}$ 會有所限制；反之，如果冰水主機間的冰水沒有熱交換存在時， $q_{cc'}$ 則不會有所限制。而式 (3.12) ~式 (3.14) 則是要一起考慮，式 (3.13) 所表示的意思為，只有當 $y_c^{\text{hot}} = y_{c'}^{\text{cold}} = 1$ 時，才會讓 $y_{cc'} = 1$ ；而當 $y_{cc'} = 1$ 時，可以看式 (3.12)，此式子是說明熱交換時熱量會有一個範圍，不可超過此範圍；而式 (3.14) 則是表示一個冰水主機 c 最多只能支援另一台冰水主機 c' 。

式 (3.15)，式 (3.16) 則表示熱交換器的最小溫度差，因為熱交換器必須要有驅動力 (Driving Force) 才能使其發生。

$$\Theta(y_c^{\text{hot}} - 1) \leq \sum_{c' \in \mathcal{C}} q_{cc'} - f_c^{\text{hot}}(t_c^{\text{ret}} - T_c^{\text{out}}) \leq \Theta(1 - y_c^{\text{hot}}) \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (3.10)$$

$$\Theta(y_c^{\text{cold}} - 1) \leq \sum_{c' \in \mathcal{C}} q_{c'c} - f_c^{\text{cold}}(t_c^{\text{cold}} - T_c^{\text{out}}) \leq \Theta(1 - y_c^{\text{cold}}) \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (3.11)$$

$$Q^L y_{cc'} \leq q_{cc'} \leq Q^U y_{cc'} \quad \forall c, c' \in \mathcal{C} \quad (3.12)$$

$$y_{cc'} \leq \frac{y_c^{\text{hot}} + y_{c'}^{\text{cold}}}{2} \quad \forall c, c' \in \mathcal{C} \quad (3.13)$$

$$\sum_{c' \in \mathcal{C}} y_{cc'} \leq 1 \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (3.14)$$

$$\Delta T^{\text{min}} \leq T_c^{\text{out}} - T_{c'}^{\text{out}} + \Gamma(1 - y_{cc'}) \quad \forall c, c' \in \mathcal{C} \quad (3.15)$$

$$\Delta T^{\text{min}} \leq t_c^{\text{ret}} - t_{c'}^{\text{cold}} + \Gamma(1 - y_{cc'}) \quad \forall c, c' \in \mathcal{C} \quad (3.16)$$

3.5.3 冰水主機邏輯限制

式 (3.17) ，式 (3.18) ，式 (3.19) 是在規定各物流流量的範圍。式 (3.20) 則表示最低溫的冰水主機，在熱交換器提供能量的物流流量為零 ($f_c^{\text{hot}} = 0$)；而式 (3.21) 則表示最高溫的冰水主機，在熱交換器吸收能量的物流流量為零 ($f_c^{\text{cold}} = 0$)。

從式子可以看出，當 $Y_c = 1$ 時，表冰水主機間的冰水有熱整合，意即熱交換器存在；而當 $Y_c = 0$ 時，則表示無熱交換器存在。式 (3.22) ，式 (3.23) 則表示熱整合存在與否，流量是否考慮其上下限。

$$F_c^L y_c^{\text{hot}} \leq f_c^{\text{hot}} \leq F_c^U y_c^{\text{hot}} \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (3.17)$$

$$F_c^L y_c^{\text{cold}} \leq f_c^{\text{cold}} \leq F_c^U y_c^{\text{cold}} \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (3.18)$$

$$F_c^L y_c^{\text{recycl}} \leq f_c^{\text{recycl}} \leq F_c^U y_c^{\text{recycl}} \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (3.19)$$

$$y_c^{\text{hot}} = 0 \quad \text{for } c = 1 \text{ (lowest T)} \quad (3.20)$$

$$y_c^{\text{cold}} = 0 \quad \text{for } c = C \text{ (highest)} \quad (3.21)$$

$$y_c^{\text{hot}} \leq Y_c \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (3.22)$$

$$y_c^{\text{cold}} \leq Y_c \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (3.23)$$

$$Y_c = \begin{cases} 1 & \text{with Heat Integration} \\ 0 & \text{w/o Heat Integration} \end{cases}$$

3.6 目標函數 (Objectives)

在本小節將會討論兩個不同的目標函數，

1. 最少固定 / 變動操作成本 (To Minimize Fixed/variable Operating Cost)
2. 每一冰水主機的最小通過量 (To Minimize Throughput of Chillers)

這兩個目標是根據不同的需求所提出的；第一個目標是考慮到固定操作成本以及變動操作成本的問題；而第二個目標函數則是將無窮多解找出一個唯一解 (Unique Solution)。接著將之前所討論的限制式與目標函數整合成一個「混合整數非線性規劃問題」，其中 x 為決策變數， Ω 為整個模型中所有的限制式集合形成的可行解區域。



3.6.1 目標函數 (3)：最少固定 / 變動操作成本 (To Minimize Fixed/variable Operating Cost)

本目標函數是考慮成本問題，而本模型的冰水主機所考慮的成本可以分兩種：

1. 固定操作成本

為式 (3.24) 的 $n_c C_c^{\text{fix}}$ ，表每當多開一台冰水主機時，其所需的固定成本將會增加。

2. 變動操作成本

為式 (3.24) 的 $n_c C_c^{\text{var}} \alpha_c \hat{f}_c (t_c^{\text{in}} - T_c^{\text{out}})$ ，變動成本考慮三個部分，包含所需開的冰水主機台數、真實的操作點，以及冰水主機的進出口溫度。

因此我們定義了目標函數 (3) 為固定操作成本與變動操作成本的總和，換句話說就是系統中冰水主機所需的成本。下式所表示的是一個混合整數的非線性規劃 (Mixed-Integer Non-Linear Programming, MINLP) 的數學模式，在這裡 $x_{3\uparrow}$ 是指變數， Ω_3 是指必要的限制式，所以可以求出最小的成本總和。

$$\min_{\mathbf{x}_3 \in \Omega_3} J_3 = \sum_{c \in \mathcal{C}} n_c \left(C_c^{\text{fix}} + C_c^{\text{var}} \alpha_c \hat{f}_c (t_c^{\text{in}} - T_c^{\text{out}}) \right) \quad (3.24)$$

$$\mathbf{x}_3 \equiv \left\{ \begin{array}{l} n_c, y_c^{\text{hot}}, y_c^{\text{cold}}, y_c^{\text{recycl}}, y_{cc'}; \\ f_c^{\text{hot}}, f_c^{\text{cold}}, f_c^{\text{recycl}}, f_c; t_c^{\text{in}}, t_c^{\text{cold}}, t_c^{\text{ret}} \\ \forall c, c' \in \mathcal{C} \end{array} \right\}$$

$$\Omega_3 = \{ \mathbf{x}_3 \mid \text{Equations (3.1)-(3.23)} \}$$

$$\implies \alpha_c (t_c^{\text{in}} - T_c^{\text{out}}) = \alpha_c^* (t_c^{\text{in}*} - T_c^{\text{out}}) \quad \forall c, c' \in \mathcal{C}$$

C_c^{var} : variable operating cost for c-temp. RW ($\frac{\$}{\text{kW}}$)

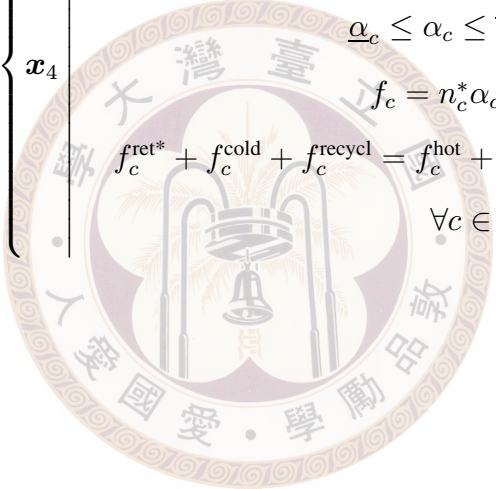
C_c^{fix} : fixed operating cost for working chiller on c-temp. level (\$)

3.6.2 目標函數 (4)：每一冰水主機最小通過量 (To Minimize Throughput of Chillers)

我們解出的目標函數 (3) 發現冰水主機操作策略有多重解 (Multiple Solution)，意即有多組的 α_c 與 t_c^{in} ，而我們必須得到唯一解 (Unique Solution)，因此目標函數 (4) 即為冰水主機的最小負荷 (也就是每一冰水主機有最小的通過量) 時的操作策略來當我們的唯一解 (Unique Solution)，其中 $\alpha_c (t_c^{\text{in}} - T_c^{\text{out}}) = \alpha_c^* (t_c^{\text{in}*} - T_c^{\text{out}})$ 為目標函數 (3) 所解出的結果，我得到其比值，而在目標函數 (4) 中，固定此比值並使冰水負荷最小化，則可得到唯一解。而其中 Ω_4 為目標函數 (4) 的可行解區域。

$$\min_{\mathbf{x}_4 \in \Omega_4} J_4 = \sum_{c \in \mathcal{C}} \alpha_c \quad (3.25)$$

$$\mathbf{x}_4 \equiv \left\{ \begin{array}{l} \alpha_c, t_c^{\text{in}}, f_c, f_c^{\text{recycl}}, f_c^{\text{hot}}, f_c^{\text{cold}} \\ \forall c, c' \in \mathcal{C} \end{array} \right\}$$

$$\Omega_4 = \left\{ \mathbf{x}_4 \left| \begin{array}{l} \alpha_c(t_c^{\text{in}} - T_c^{\text{out}}) = \alpha_c^*(t_c^{\text{in}*} - T_c^{\text{out}}) \\ t_c^{\text{in}} - T_c^{\text{out}} \leq \Delta T_c^{\text{max}} \\ \underline{\alpha}_c \leq \alpha_c \leq \bar{\alpha}_c \\ f_c = n_c^* \alpha_c \hat{f}_c \\ f_c^{\text{ret}*} + f_c^{\text{cold}} + f_c^{\text{recycl}} = f_c^{\text{hot}} + f_c \\ \forall c \in \mathcal{C} \end{array} \right. \right\}$$




4

冰水網路及冰水主機操作策略之模擬與結果分析

對於冰水網路系統以及冰水主機操作策略的最適化，本研究將透過一個例子，利用第二、三章所建立的數學模型，搭配對應的限制式，得到最佳化的設計結果，並進一步作深入的分析與討論。

本章節談及一個虛擬的例子，並採用四個目標函數去作最適化設計，目標函數(1)、(2)是為了設計冰水網路系統，一般來說，冰水網路中冰水的產生是非常耗能的，所以我們盡可能的減少它的使用量，所以先對第二章所提出的模型作冰水消耗量最適化；而目標函數(3)、(4)則是為了設計冰水主機的的操作策略，利用目標函數(1)解出的冰水最少需求量為基礎下，求出最佳的冰水主機操作策略。以往大部分的研究都只考慮到網路系統的設計，而沒去討論供應的設備它的操作策略，

本例子將會同時考慮兩個如何降低整個冰水系統的成本，包括：

1. 冰水網路系統
2. 冰水主機操作策略

4.1 最適化軟體

本研究是採用一套著名的高階模式系統軟體 (Generalized Algebraic Modeling System, GAMS, Brooke et al., 1988)，來求解最適化數學規劃問題。本研究的數學模型是一種典型的混合整數的非線性規劃 (Mixed-Integer Non-Linear Programming, MINLP) 問題，而在求解最適化問題的解題器 (solver) 使用上，使用的 MINLP solver 為 BARON。

4.2 兩個工廠及十一個冰水使用單元之冰水網路模擬

本研究是由兩個虛擬的工廠所架構，包含了十一個冰水使用單元 (RW Using Units)。其中 1 號工廠固定提供 5°C 冰水；而 2 號工廠固定提供 9°C 冰水。表 4.1 提供了模型中會用到的參數，而表 4.2 是提供了每一冰水使用單元的操作資料，有每一冰水使用單元的固定移除熱負載 (Heat Load, kW)、每一冰水使用單元入口端的最高可容許的溫度 ($T_i^{\text{in,max}}$, °C)，以及出口端的最高可容許的溫度 ($T_i^{\text{out,max}}$, °C)，而最後一欄所表達的 Maximum Heat Capacity Flow Rate (kW/°C)，為質量流率與水熱容量 (Heat Capacity of Water, $C_p=4.18(\text{J/g}^\circ\text{C})$) 的乘積。

表 4.1 所需給定之參數

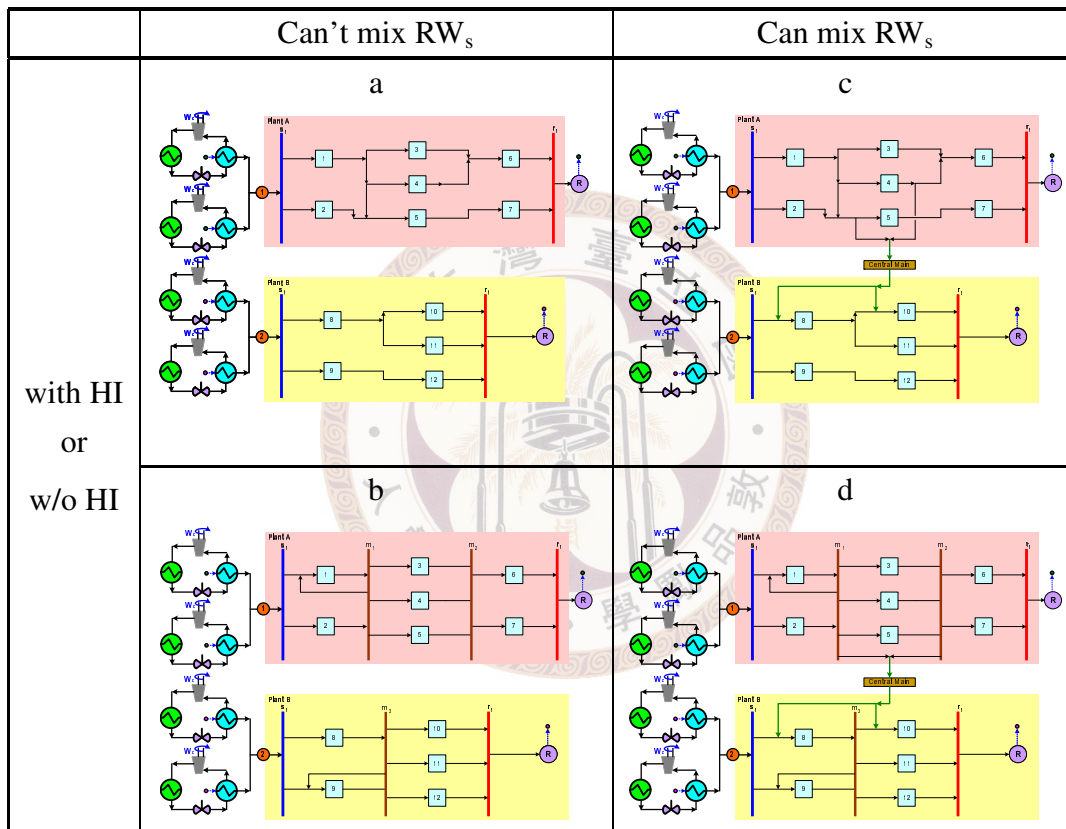
RW	ΔT_c^{\max}	Capacity (\hat{f}_c)		C_c^{fix}	C_c^{var}
	($^{\circ}\text{C}$)	(kW/ $^{\circ}\text{C}$)	(ton/hr)	($\frac{\$}{\text{kW}}$)	($\$$)
5 $^{\circ}\text{C}$	10.0	20.0	17.1	100.0	0.9
9 $^{\circ}\text{C}$	10.0	45.0	38.6	60.0	0.6

表 4.2 工廠操作資料

Plant	RW using unit i	Heat load (kW)	Max. Temp.($^{\circ}\text{C}$)		Max. Heat Capacity Flow rate (kW/ $^{\circ}\text{C}$)
			inlet	outlet	
1	1	15	5	10	7.0
	2	15	7	12	7.0
	3	25	9	16	8.0
	4	50	9	18	6.0
	5	100	14	23	12.0
	6	150	16	23	25.0
2	7	150	9	14	30.0
	8	100	9	16	20.0
	9	15	14	23	2.5
	10	15	15	23	2.5
	11	15	16	23	2.5

在此章我們以冷媒(在本模型為冰水)是否可混合及在冰水主機間的冰水是否作熱整合做一個劃分。

冰水不可混合包括 a、b；而冰水可混合包括 c、d。本研究分別對 a、b、c、d 去探討冰水主機間的冰水考慮熱整合及不考慮熱整合問題，比較它們的結果並分析討論。



4.3 冰水主機間之冰水不考慮熱整合之問題 (without HI)

本章節不考慮冰水主機間冰水熱整合的問題。我們給定不同的操作上下限，分別討論各網路結構及冰水主機操作的上下限對其結果有何影響。

我們先採用目標函數 (1)，(2) 去解最少冰水消耗量的網路結構

$$\min_{\mathbf{x}_{1\uparrow} \in \Omega_{1\uparrow}} J_{1\uparrow} = \sum_{c \in \mathcal{C}} \sum_{s \in \mathcal{S}} f_{cs}$$

$$\min_{\mathbf{x}_{1\uparrow} \in \Omega_{2\uparrow}} J_{2\uparrow} = \sum_{i \in \mathcal{I}} f_i$$

，再利用目標函數 (3)，(4) 去探討冰水主機操作策略。

$$\min_{\mathbf{x}_3 \in \Omega_3} J_3 = \sum_{c \in \mathcal{C}} n_c \left(C_c^{\text{fix}} + C_c^{\text{var}} \alpha_c \hat{f}_c (t_c^{\text{in}} - T_c^{\text{out}}) \right)$$

$$\min_{\mathbf{x}_4 \in \Omega_4} J_4 = \sum_{c \in \mathcal{C}} \alpha_c$$

接下來三個小節 4.3.1~4.3.3，分別討論三種冰水主機的上下限，分別為：

1. $\underline{\alpha} = 0.5$, $\bar{\alpha} = 1.0$

如圖 4.1，此種操作策略屬於連續的冰水供應 (Continuous Supply)，即冰水網路需要 (Demand) 多少，冰水主機就提供 (Supply) 多少冰水供給冰水網路。

2. $\underline{\alpha} = 0.75$, $\bar{\alpha} = 1.0$

如圖 4.2，為較一般的狀況，有一定的基本量，而隨需求到達一定的量時，冰水的供應就會呈連續的提供。

3. $\underline{\alpha} = 1.0$, $\bar{\alpha} = 1.0$

如圖 4.3，此種操作策略屬於步階函數的冰水供應 (Step Supply)，即冰水主機為 on/off 的裝置，一旦打開冰水主機，將會發揮它最大的效率，所以會有冰水浪費的情況。

圖 4.1 操作上下限分別為 0.5、1.0 之冰水供需圖

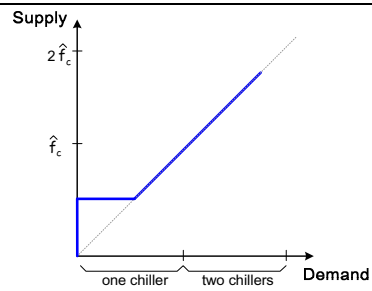


圖 4.2 操作上下限分別為 0.75、1.0 之冰水供需圖

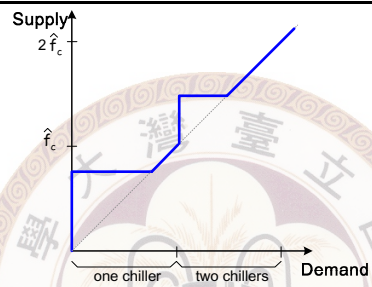
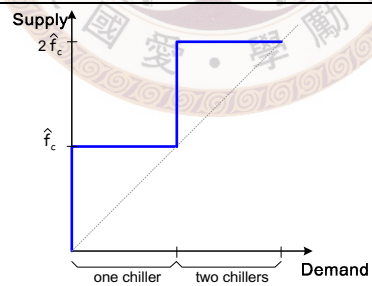


圖 4.3 操作上下限分別為 1.0、1.0 之冰水供需圖



4.3.1 操作點下限為 0.5，操作點上限為 1.0

由圖 4.4，每一個冰水使用單元皆是使用新鮮冰水，完全沒有再利用的空間，在此是做一個 Base Case，跟其他網路結構比較。

最適化後的冰水網路消耗量為 5°C 冰水 25.1(kW/°C)，9°C 冰水 47.6(kW/°C)，因為之前有提及，冰水主機的回流溫度不可過高，所以在 5°C 冰水主機有回流 10.3(kW/°C) 使得進出口溫度不會超過其上限 10°C，所以最後冰水主機所提供的冰水量為 5°C 冰水 35.4(kW/°C)，9°C 冰水 47.6(kW/°C)，而所需的冰水主機各為兩台，其真實的操作點為 0.885 與 0.529。

圖 4.4 Base Case 冰水網路與冰水主機操作策略設計結果

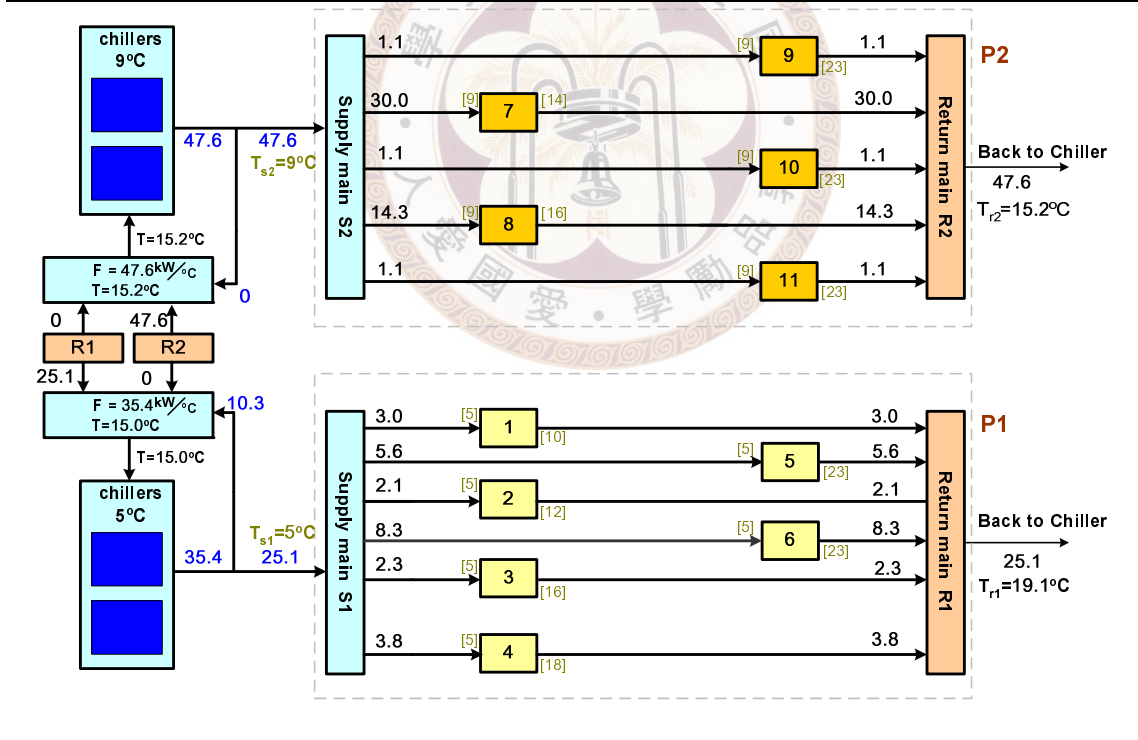


圖 4.5 為 Separate Design，可以觀察位於第 2 號工廠的冰水使用單元 7 號，其出口流量為 30(kW/°C) 的冰水，溫度 14°C，對於冰水使用單元 9、

10、11 號都算是偏低溫的冰水，分別有 $1.7(\text{kW}/^\circ\text{C})$ 的冰水流至冰水使用單元 9、10、11 號，而剩下的 $24.9(\text{kW}/^\circ\text{C})$ 卻直接排到回流儲存槽 (Return Main)，沒有被其他的冰水使用單元再重覆使用，造成冰水使用效率不佳；同樣的情形也發生在第 2 號工廠的冰水使用單元 8 號，直接排放掉 16°C 流量 $14.3(\text{kW}/^\circ\text{C})$ 的冰水。

由於 Separate Design 中，並不允許工廠與工廠間的冰水再利用，所以損失了很多冰水整合的機會，而最適化後的冰水網路消耗量為 5°C 冰水 $19.7(\text{kW}/^\circ\text{C})$ ， 9°C 冰水 $44.3(\text{kW}/^\circ\text{C})$ ，而 5°C 冰水主機有回流 $15.8(\text{kW}/^\circ\text{C})$ 使進出口溫度不會超過其上限，所以最後冰水主機所提供的冰水量為 5°C 冰水 $35.5(\text{kW}/^\circ\text{C})$ ， 9°C 冰水 $44.3(\text{kW}/^\circ\text{C})$ ，而所需的冰水主機為 5°C 兩台、 9°C 一台，其真實的操作點為 0.887 與 0.984。

圖 4.5 Separate Design 之網路與冰水主機操作策略設計結果

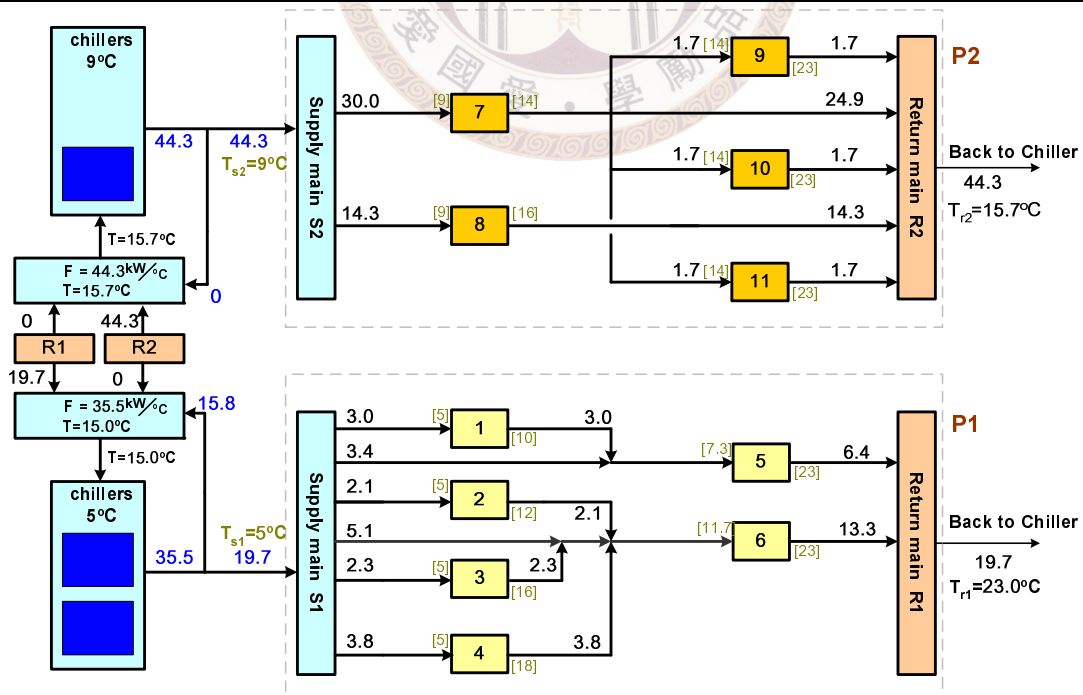


圖 4.6 為 Separate Design with Inner Mains 最適化後的網路結構及冰水操作策略，在此網路結構下，單元間並不允許管線直接相連，而必須透過工廠內部的中央儲存槽 (Inner-plant Water Main) 來連接單元之間的再使用冰水，由圖中可以看到位於 2 號工廠的冰水使用單元 7 號，其出口流量為 $30(\text{kW}/^\circ\text{C})$ 的冰水，溫度 14°C 算是偏低溫的冰水，雖然 $30(\text{kW}/^\circ\text{C})$ 的冰水完全的進入中央儲存槽 (m2)，但有高達 80% 的冰水直接排放到回流儲存槽沒有被其他的冰水使用單元重覆使用。

由於此網路結構與 Separate Design 同樣不允許工廠與工廠間的冰水再使用，而且單元間不能直接相連，照理講其冰水的消耗量會比 Separate Design 來的多一些，但是我們可以發現此兩種結構的 1 號工廠都需要額外的新鮮冰水；而 2 號工廠都擁有過多的較低溫冰水，所以造成這兩種的結果會一樣。

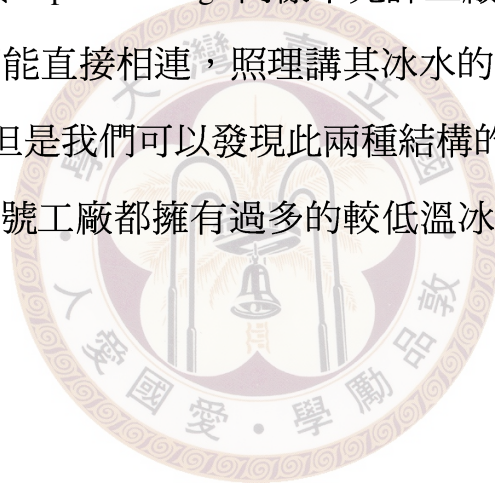
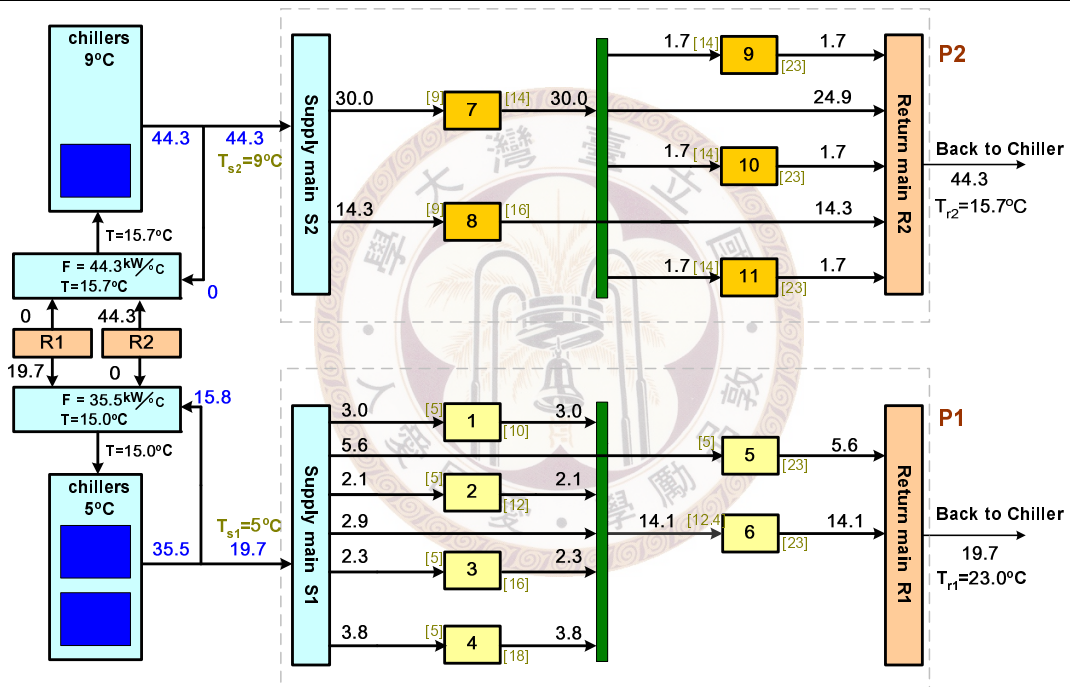


圖 4.6 Separate Design with Inner Mains 之網路與冰水主機操作策略設計結果

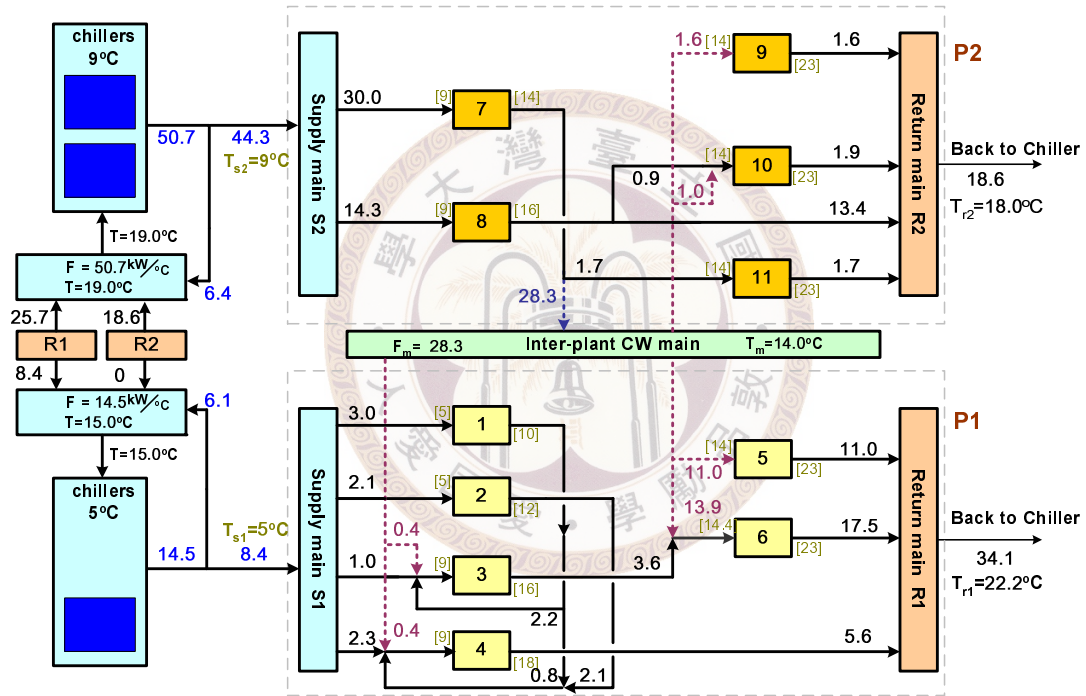


由圖 4.7 之結構中，同一工廠內部的冰水使用單元的再使用可以在單元間有直接的管線相連，如：1 號工廠的冰水使用單元 1 號供給 $2.2(\text{kW}/^\circ\text{C})$ 給冰水使用單元 3 號及冰水使用單元 4 號 $0.8(\text{kW}/^\circ\text{C})$ 再使用，同樣的再使用情形也可在其他單元觀察到，在此不一一詳述。

由於實際工廠中的管線連接情況可能非常複雜，考慮到實際的操作可行性及其操作上的韌性 (Operating Flexibility)，在本結構中，跨廠區的再使用冰水不可以直接連接位於不同工廠的冰水使用單元，必須透過中央儲存槽 (Central Main) 來進行冰水的再使用，如圖 4.7，2 號工廠的冰水使用單元 7 號，提供了 14°C 流量為 $28.3(\text{kW}/^\circ\text{C})$ 冰水給中央儲存槽，它可以分別給 1 號工廠的冰水使用單元 3、4、5、6 號，2 號工廠的冰水使用單元 9、10 號使用。

最適化後的冰水網路消耗量為 5°C 冰水 $8.4(\text{kW}/^\circ\text{C})$ ， 9°C 冰水 $44.3(\text{kW}/^\circ\text{C})$ ，因為之前有提及，冰水主機的回流溫度不可過高，所以在 5°C 冰水主機有回流 $6.1(\text{kW}/^\circ\text{C})$ ， 9°C 冰水主機有回流 $6.4(\text{kW}/^\circ\text{C})$ 使得進出口溫度不會超過其上限 10°C ，所以最後冰水主機所提供的冰水量為 5°C 冰水 $14.5(\text{kW}/^\circ\text{C})$ ， 9°C 冰水 $50.7(\text{kW}/^\circ\text{C})$ ，而所需的冰水主機為 5°C 一台、 9°C 兩台，其真實的操作點為 0.722 與 0.563。

圖 4.7 With Inter-Plant Main 之網路與冰水主機操作策略設計結果



由圖 4.8 之結構中，位於 1 號工廠中的冰水使用單元 1、2 號分別提供 10°C 冰水 $3.0(\text{kW}/^{\circ}\text{C})$ ， 12°C 冰水 $2.1(\text{kW}/^{\circ}\text{C})$ 及 2 號工廠中的冰水使用單元 7 號提供 14°C 冰水 $22.8(\text{kW}/^{\circ}\text{C})$ 彙整至中央儲存槽，進入中央儲存槽的冰水經過混合後平均溫度為 13.4°C 總流量為 $27.9(\text{kW}/^{\circ}\text{C})$ ，再分別配置給 1 號工廠的冰水使用單元 3、4、5、6 號。

最適化後的冰水網路消耗量為 5°C 冰水 $9.9(\text{kW}/^{\circ}\text{C})$ ， 9°C 冰水 $44.3(\text{kW}/^{\circ}\text{C})$ ，在 5°C 冰水主機有回流 $7.0(\text{kW}/^{\circ}\text{C})$ ， 9°C 冰水主機有回流 $3.6(\text{kW}/^{\circ}\text{C})$ ，所以最後冰水主機所提供的冰水量為 5°C 冰水 $16.9(\text{kW}/^{\circ}\text{C})$ ， 9°C 冰水 $47.9(\text{kW}/^{\circ}\text{C})$ ，而所需的冰水主機為 5°C 一台、 9°C 兩台，其真實的操作點為 0.846 與 0.533。

圖 4.8 With Inter/Inner-Plant Mains 之網路與冰水主機操作策略設計結果

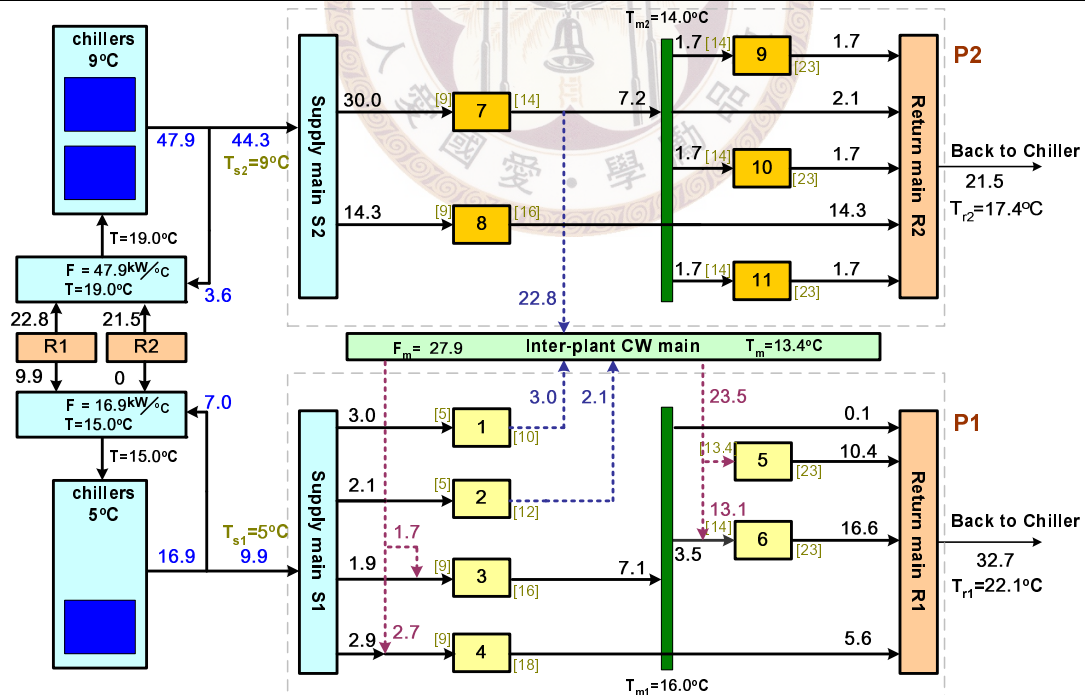


表 4.3 操作點上下限分別為 0.5、1.0 之目標函數 (1) 結果

RWN Requirement kW/°C (ton/hr)	Parallel	Re-use Separate Design	Re-use Separate Inner mains	Re-use Inter-plant Main	Re-use Inter-plant Inner-plant mains
5°C	25.1 (21.5)	19.7 (16.9)	19.7 (16.9)	8.4 (7.2)	9.9 (8.5)
9°C	47.6 (40.8)	44.3 (38.0)	44.3 (38.0)	44.3 (38.0)	44.3 (38.0)

表 4.3 整理了目標函數 (1)：最少冰水消耗量的結果，我們可以看出 Parallel Design 因為完全沒有冰水的再使用，所以兩種冰水 (5°C、9°C) 皆需要最多的消耗量；而 With Inter-Plant Main 的網路結構中，因為單一工廠內冰水使用單元間沒有任何的限制，可以直接再使用 (Reuse)，且工廠間可以利用中央儲存槽 (Central Main) 有再使用的空間，所以本結構在各種網路結構中消耗量最少的。

Separate Design 與 Separate Design with Inner Mains 皆是只有工廠內有冰水整合而跨廠區間無整合的設計，犧牲了很多冰水再使用的機會，所得的冰水消耗量會比其他具有跨廠區整合的設計高的許多；而 With Inter/inner-Plant Main 的網路結構為工廠內與工廠間皆具有中間與中央儲存槽的結構，在這樣的條件下，系統可以具有較高的操作韌性。

表 4.4 操作點上下限分別為 0.5、1.0 之目標函數 (3)、(4) 結果

RW Supply kW/°C (ton/hr)	Parallel	Re-use Separate Design	Re-use Separate Inner mains	Re-use Inter-plant Main	Re-use Inter-plant Inner-plant mains
5°C	35.4 (30.3)	35.5 (30.4)	35.5 (30.4)	14.5 (12.4)	16.9 (14.5)
no.of chillers (α_c)	2 (0.885)	2 (0.887)	2 (0.887)	1 (0.722)	1 (0.846)
9°C	47.6 (40.8)	44.3 (38.0)	44.3 (38.0)	50.7 (43.5)	47.9 (41.1)
no.of chillers (α_c)	2 (0.529)	1 (0.984)	1 (0.984)	2 (0.563)	2 (0.533)
Cost(\$)	815.6	757.2	757.2	654.0	659.9

表 4.4 整理了目標函數 (3)、(4) 的結果，包括了各種網路結構的變數

1. 各冰水主機所需的台數 (n_c) 及實際提供的冰水量 (kW/°C)
2. 各冰水主機真實的操作點 (α_c)
3. 由目標函數 (3) 所解出的成本 (\$)

4.3.2 操作點下限為 0.75，操作點上限為 1.0

本小節是改變冰水主機操作的上下限，為 $\alpha = 0.75, \bar{\alpha} = 1.0$ ，模擬了我們提出的網路結構。因為只改變冰水主機上下限，所以目標函數 (1)、(2) 都不會有改變，也代表著整個冰水網路結構跟之前的例子完全一樣，不同的是在冰水操作的策略不同而已。

模擬的結果在圖 4.9~ 圖 4.13，整個冰水網路結構就不再詳述。主要是探討不同冰水主機操作上下限對其有何影響。

圖 4.9 Base Case 冰水網路與冰水主機操作策略設計結果

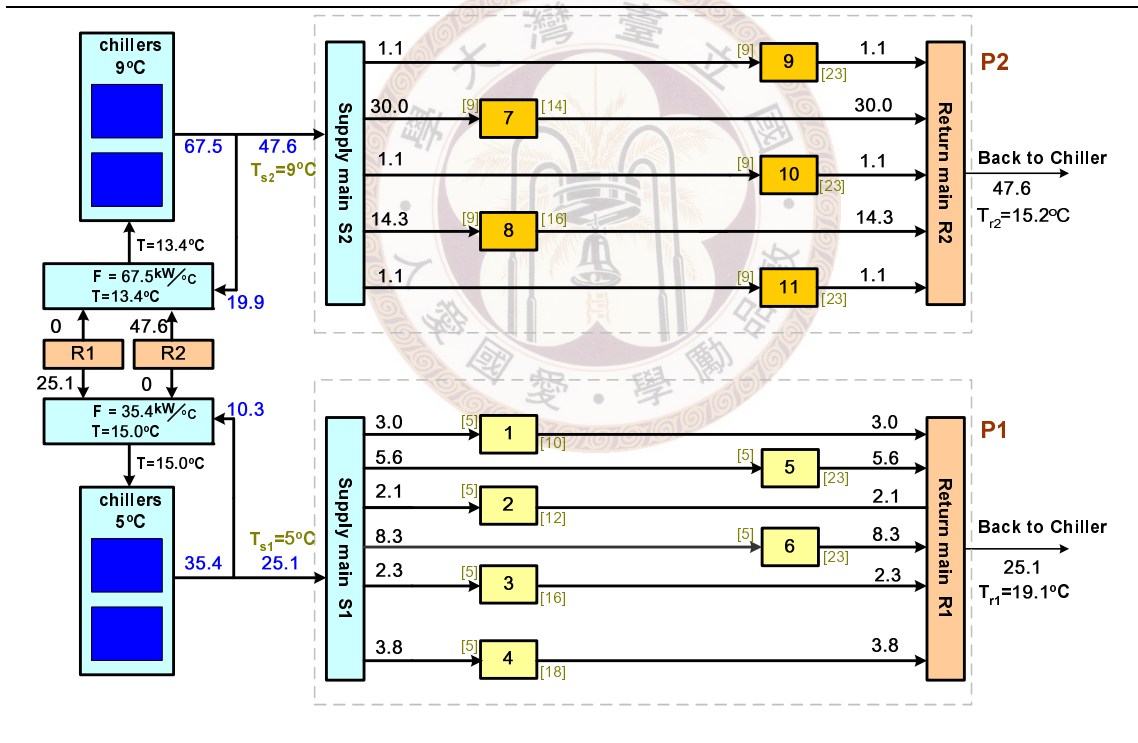


圖 4.10 Separate Design 之網路與冰水主機操作策略設計結果

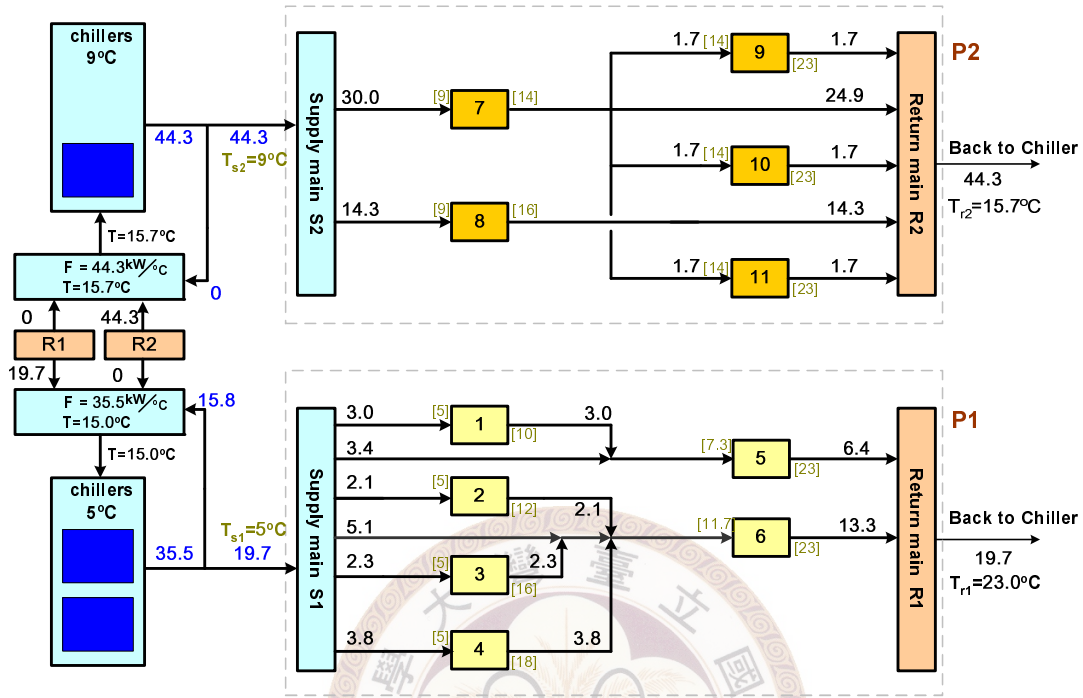


圖 4.11 Separate Design with Inner Mains 之網路與冰水主機操作策略設計結果

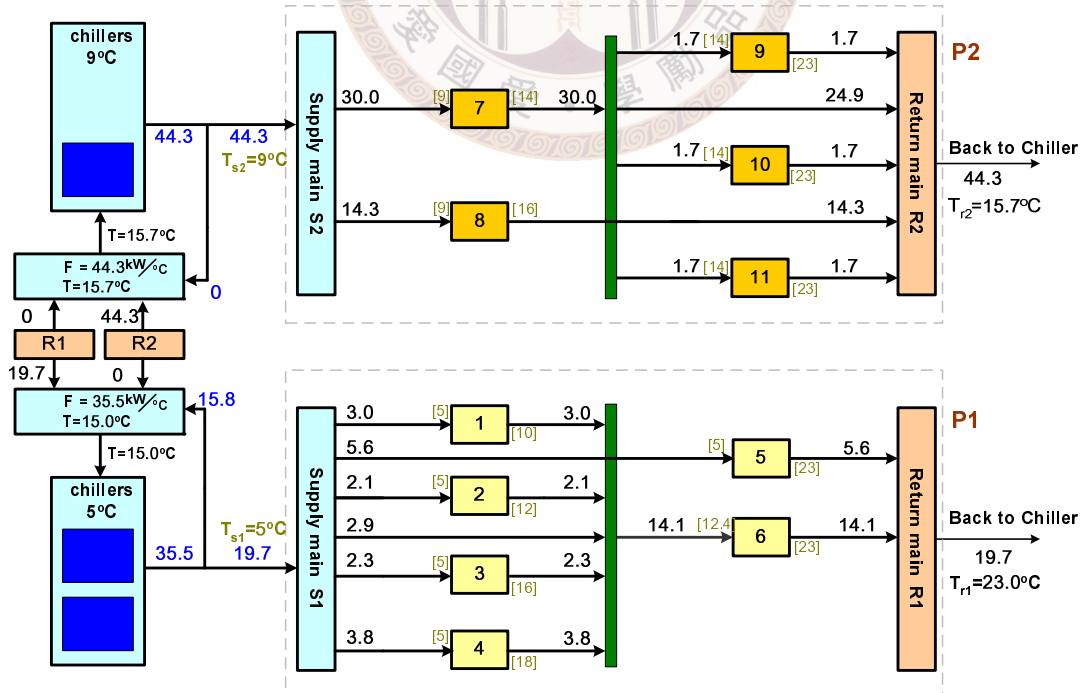


圖 4.12 With Inter-Plant Main 之網路與冰水主機操作策略設計結果

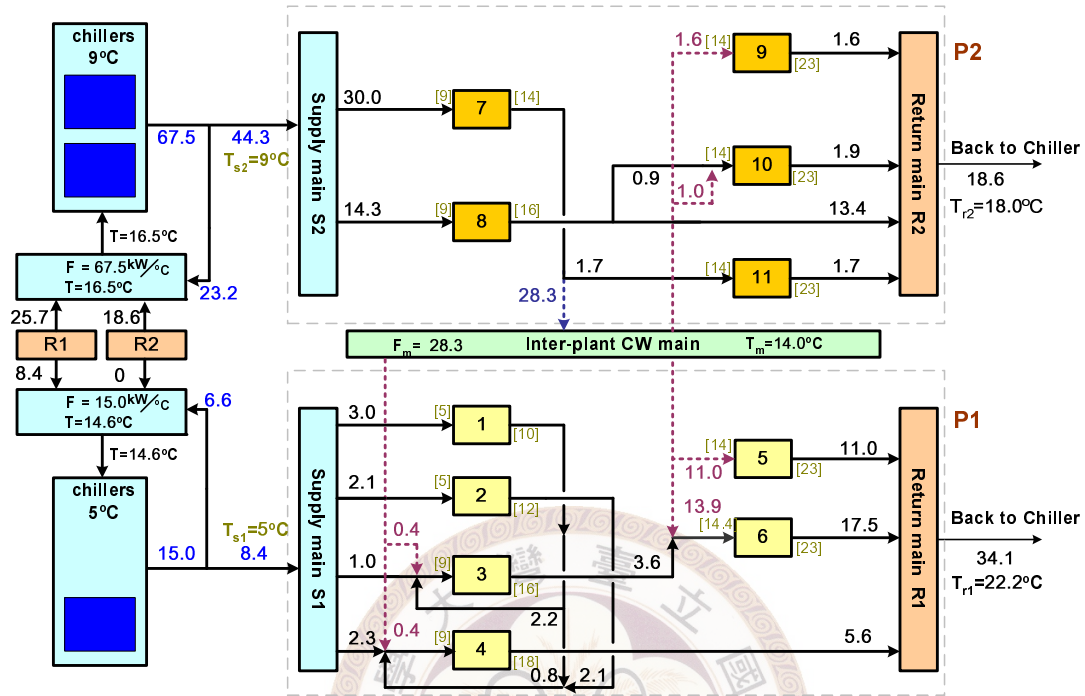


圖 4.13 With Inter/Inner-Plant Mains 之網路與冰水主機操作策略設計結果

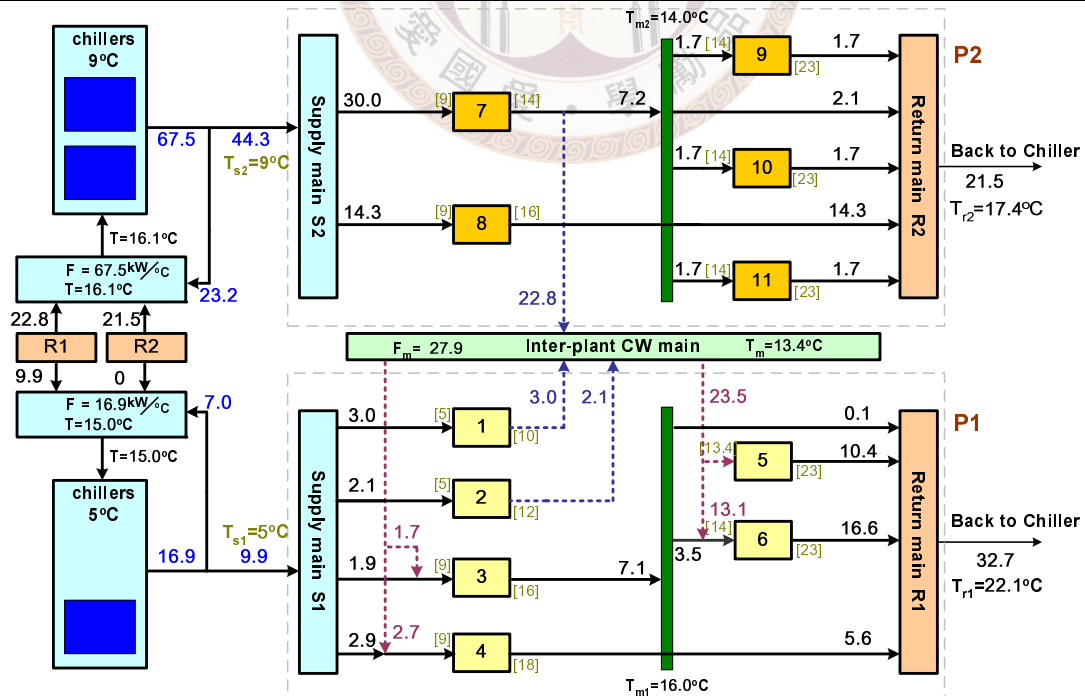


表 4.5 操作點上下限分別為 0.75、1.0 之目標函數 (3)、(4) 結果

RW Supply kW/°C (ton/hr)	Parallel	Re-use Separate Design	Re-use Separate Inner mains	Re-use Inter-plant Main	Re-use Inter-plant Inner-plant mains
5°C	35.4 (30.3)	35.5 (30.4)	35.5 (30.4)	15.0 (12.9)	16.9 (14.5)
no.of chillers (α_c)	2 (0.885)	2 (0.887)	2 (0.887)	1 (0.750)	1 (0.846)
9°C	67.5 (57.9)	44.3 (38.0)	44.3 (38.0)	67.5 (57.9)	67.5 (57.9)
no.of chillers (α_c)	2 (0.750)	1 (0.984)	1 (0.984)	2 (0.750)	2 (0.750)
Cost(\$)	815.6	757.2	757.2	654.0	659.9

我們可以從表 4.5 看出，當冰水主機操作上下限改為分別為 0.75、1，代表著只要一啟動冰水主機，其效率至少就要開到 75%，遠比上下限為 0.5、1 的高出 25%，所以可想而知的是，其真實操作點 (α_c) 一定要來的比較高，或是相同。

比較表 4.4 與表 4.5 可以發現，Parallel、With Inter-plant Main、With Inter/inner-plant Mains，這三種冰水網路結構的真實操作點都比之前來的高；而 Separate Design 與 Separate with Inner mains 這兩種冰水網路結構在不同的操作點上下限有相同的操作點。

4.3.3 操作點下限為 1.0，操作點上限為 1.0

在本小節將討論冰水主機操作上下限皆調至 1.0，也就是之前提及的，每一冰水主機都屬於全開或全關 (on/off) 的裝置。模擬的結果分別在圖 4.14~ 圖 4.18，我們可以從這些圖發現一個共同的現象，供應的冰水會遠超過冰水網路所需的消耗量，造成過多的冰水將會回流於冰水主機 (f_c^{recycl} 因此大增)，所以冰水主機回流溫度 (t_c^{in}) 也都較前幾個例子還來的低。

圖 4.14 Base Case 冰水網路與冰水主機操作策略設計結果

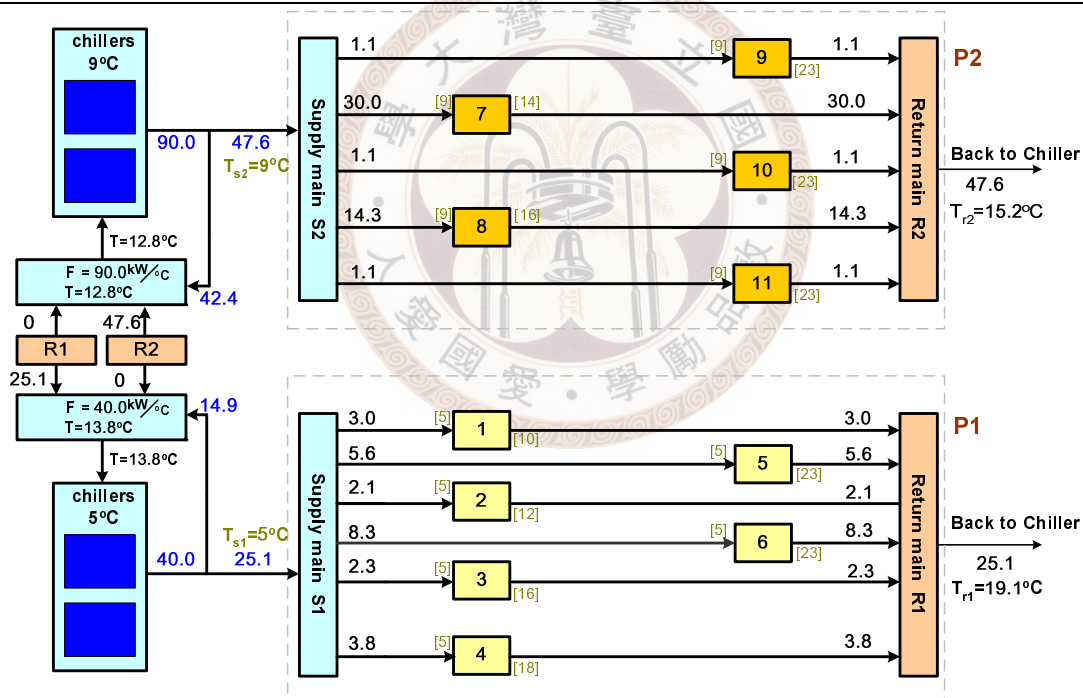


圖 4.15 Separate Design 之網路與冰水主機操作策略設計結果

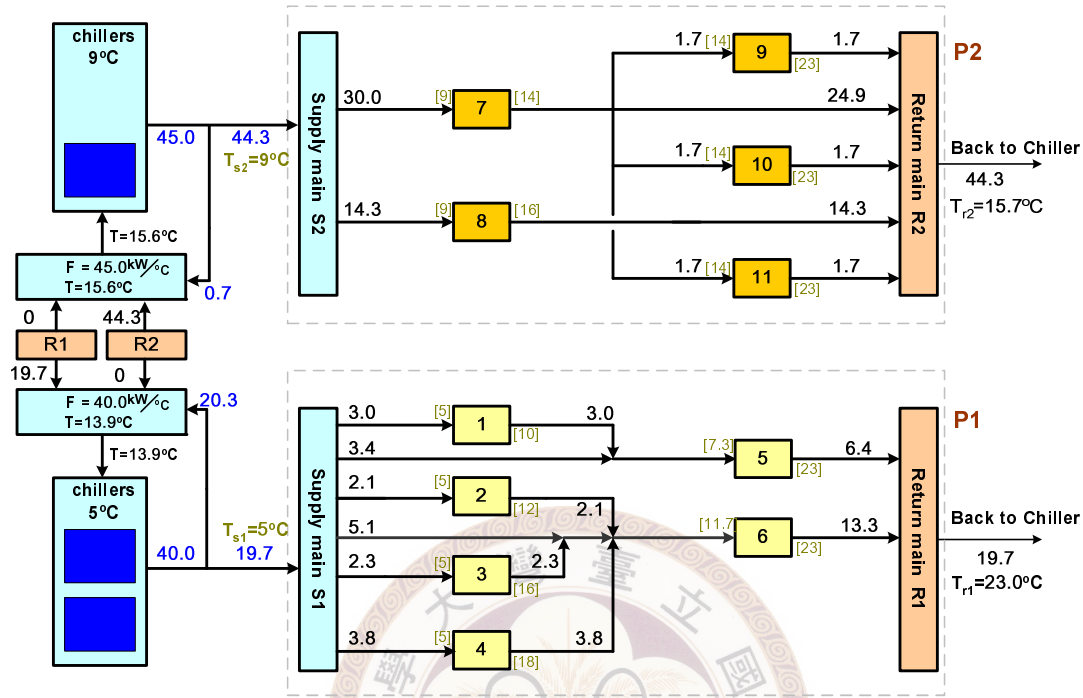


圖 4.16 Separate Design with Inner Mains 之網路與冰水主機操作策略設計結果

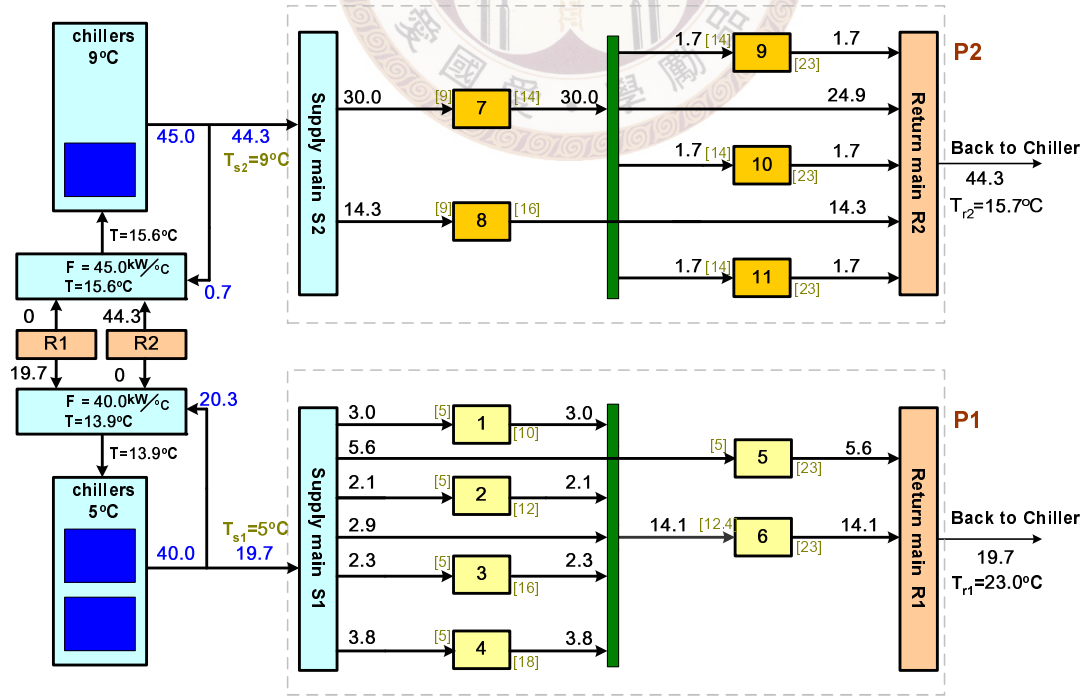


圖 4.17 With Inter-Plant Main 之網路與冰水主機操作策略設計結果

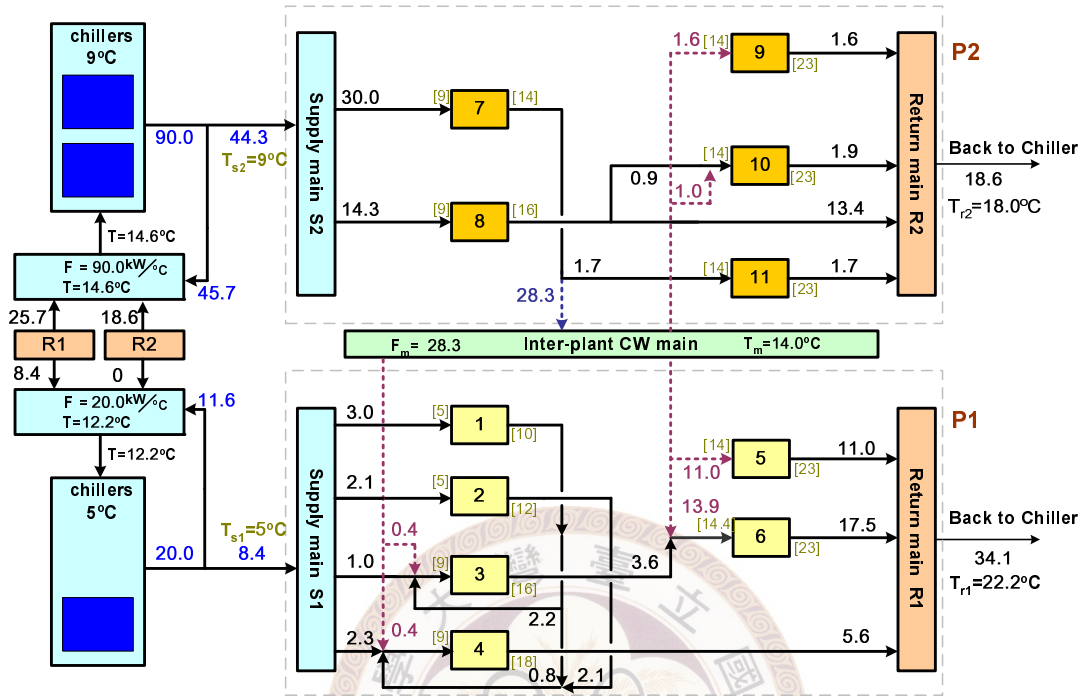


圖 4.18 With Inter/Inner-Plant Mains 之網路與冰水主機操作策略設計結果

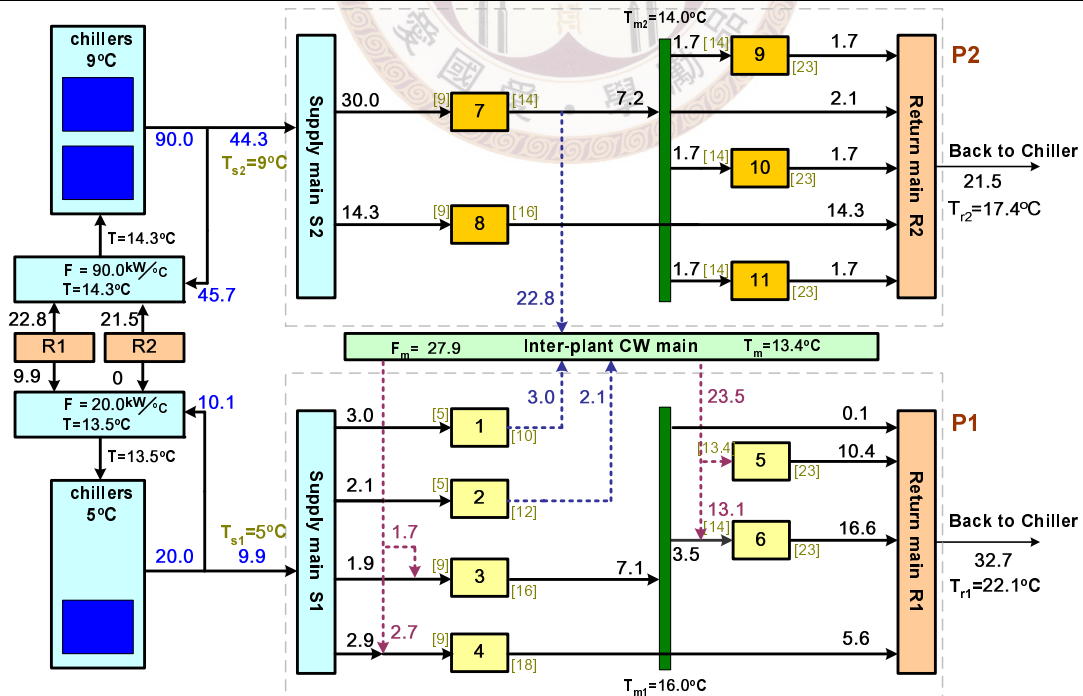


表 4.6 操作點上下限分別為 1.0、1.0 之目標函數 (3)、(4) 結果

RW Supply kW/°C (ton/hr)	Parallel	Re-use Separate Design	Re-use Separate Inner mains	Re-use Inter-plant Main	Re-use Inter-plant Inner-plant mains
5°C	40.0 (34.3)	40.0 (34.3)	40.0 (34.3)	20.0 (17.1)	20.0 (17.1)
no.of chillers (α_c)	2 (1.000)	2 (1.000)	2 (1.000)	1 (1.000)	1 (1.000)
9°C	90.0 (77.1)	45.0 (38.6)	45.0 (38.6)	90.0 (77.1)	90.0 (77.1)
no.of chillers (α_c)	2 (1.000)	1 (1.000)	1 (1.000)	2 (1.000)	2 (1.000)
Cost(\$)	815.6	757.2	757.2	654.0	659.9

因為改變操作上下限並不會改變目標函數 (1) 的結果，所以表 4.3 仍然適用。表 4.3 是說明每一種冰水網路結構所需的冰水消耗量 (Refrigerated Water Network Requirement)，我們比較表 4.3 與表 4.6 可以發現，冰水供應量遠大於冰水網路消耗量，此乃冰水主機操作上下限的影響。

4.4 冰水主機間之冰水考慮熱整合之問題 (with HI)

本節將要考慮冰水主機間冰水的熱整合問題，我們也將熱整合問題依操作上下限的不同分為三個小節。

4.4.1 操作點下限為 0.5，操作點上限為 1.0

在此操作上下限，我們可以發現較低溫 (5°C) 的冰水主機，原本只需提供 $9.9(\text{kW}/^{\circ}\text{C})$ 的冰水提供給冰水網路使用，但是冰水主機的進出口溫度有一個最大值，所以又必須多提供 $7.0(\text{kW}/^{\circ}\text{C})$ 的冰水使得冰水主機的入口溫度不超過 15°C ，因此並無多餘的 5°C 冰水與工廠 2 號的回流作熱交換，以至於其模擬結果與之前的一樣，因此我們只舉最複雜的結構為例 (With Inter/Inner-Plant Mains)，如圖 4.19。所以當操作點下限為 0.5，操作點上限為 1.0，冰水主機間的冰水並無熱整合的空間。

4.4.2 操作點下限為 0.75，操作點上限為 1.0

在此操作點的範圍我們可以發現，如圖 4.20 所示，一樣沒有多餘的 5°C 冰水提供作熱交換，所以當操作點下限為 0.75，操作點上限為 1.0，冰水主機間的冰水一樣並無熱整合的空間。

圖 4.19 操作點上下限分別為 0.5、1.0 之模擬結果

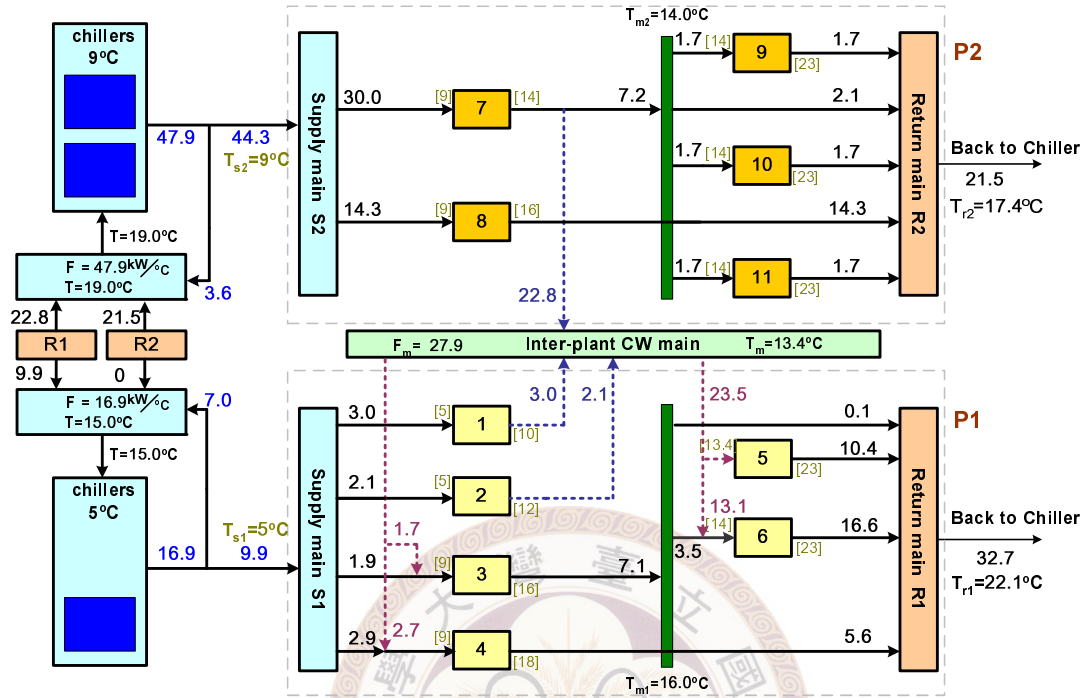
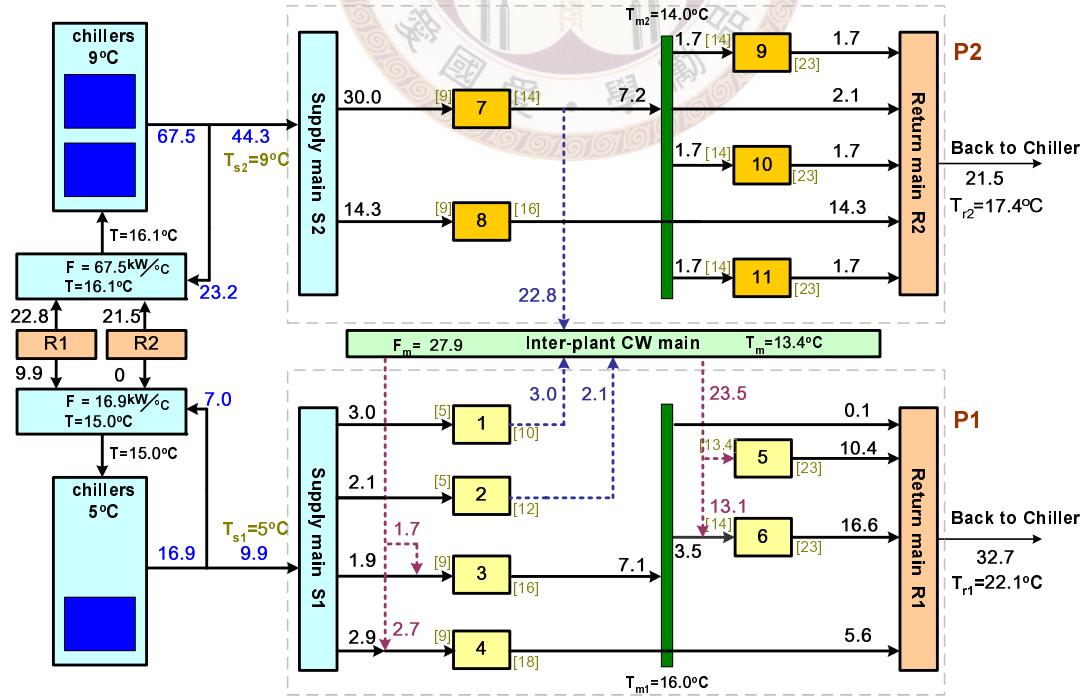


圖 4.20 操作點上下限分別為 0.75、1.0 之模擬結果



4.4.3 操作點下限為 1.0，操作點上限為 1.0

本節因為操作上下限皆為 1.0，代表將會有多餘的冰水產生，而之前沒有考慮熱整合的作法就直接將多餘的新鮮冰水回流至冰水主機，沒有將其有效利用；而如果考慮熱整合的話，其作法是將低溫的冰水主機 (5°C) 之多餘新鮮冰水與較高溫冰水主機 (9°C) 的回流作熱交換，使得較高溫冰水主機可以降低其負荷，甚至可以少開幾台冰水主機。圖 4.21 是模擬的結果，可以看出 5°C 冰水主機將多餘的 $2.6(\text{kW}/^{\circ}\text{C})$ 與二號工廠的部分回流 $14.9(\text{kW}/^{\circ}\text{C})$ 有 16.1kW 的熱交換。

圖 4.21 與圖 4.14 比較，因為有了熱交換，所以較高溫的冰水主機 (9°C) 從啟動兩台變成一台，而因為回流的冰水變少了，所以可以發現入口溫度 (t_c^{in}) 皆會變高。



圖 4.21 Base Case 冰水網路與冰水主機操作策略設計結果

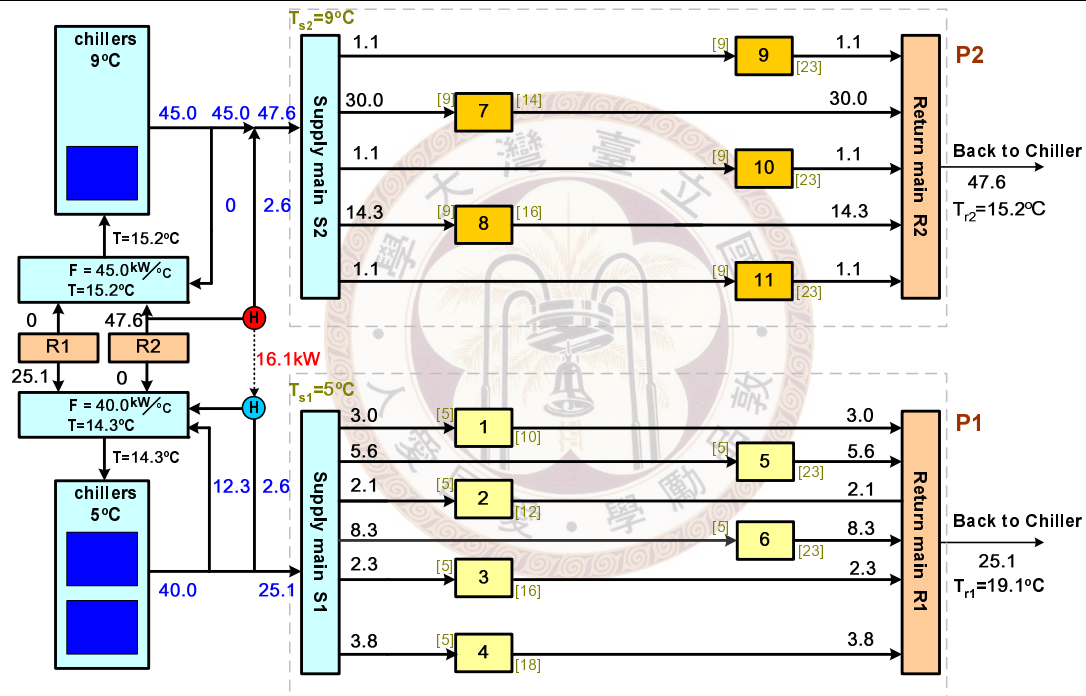


圖 4.23 與圖 4.16 比較，可以發現情況與 Separate Design 相同，其模擬的結果與不考慮熱整合的情況是一樣的，所以在此狀況的這個結構，熱整合並不會降低其成本。

圖 4.23 Separate Design with Inner Mains 之網路與冰水主機操作策略設計結果

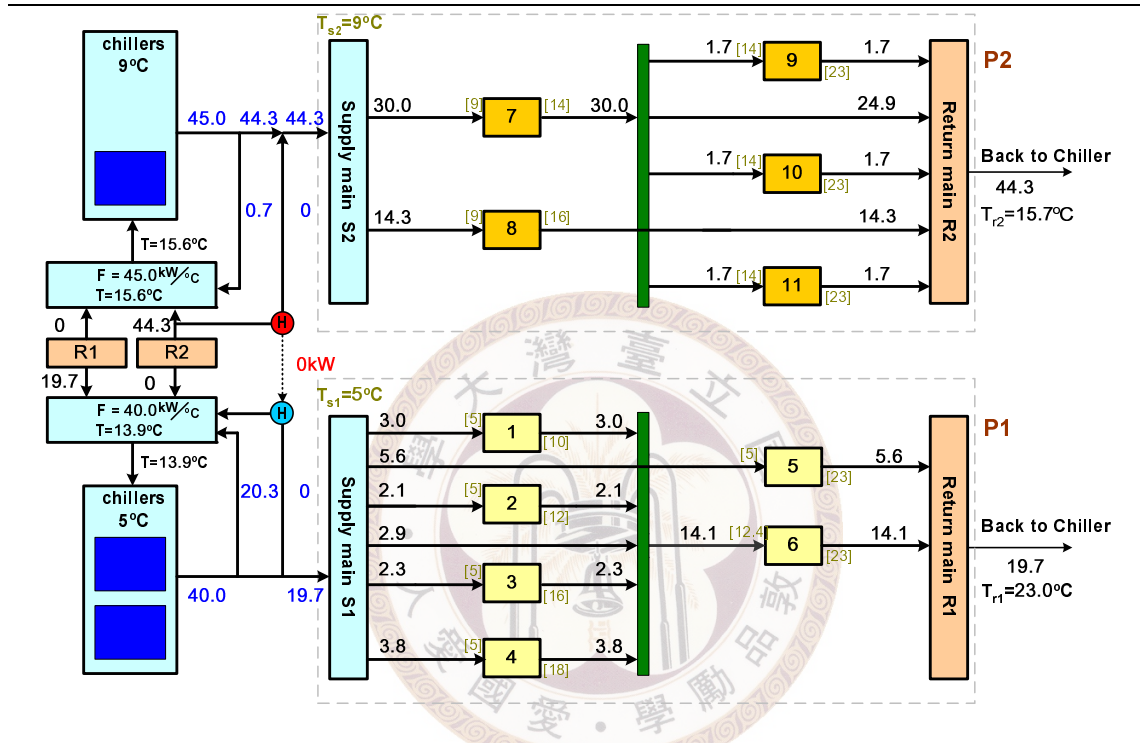


圖 4.24 與圖 4.17 比較，我們可以看出原本不考慮熱整合，其冰水主機所需啟動的台數分別為 5°C 一台、9°C 兩台，而當作完熱整合模擬之後可以發現 9°C 從原本的兩台降為一台；此外，回流冰水主機的溫度也會提升，因為當考慮熱整合，我們會將多餘的新鮮冰水作有效的利用，而不會使之直接回流於冰水主機。

圖 4.24 With Inter-Plant Main 之網路與冰水主機操作策略設計結果

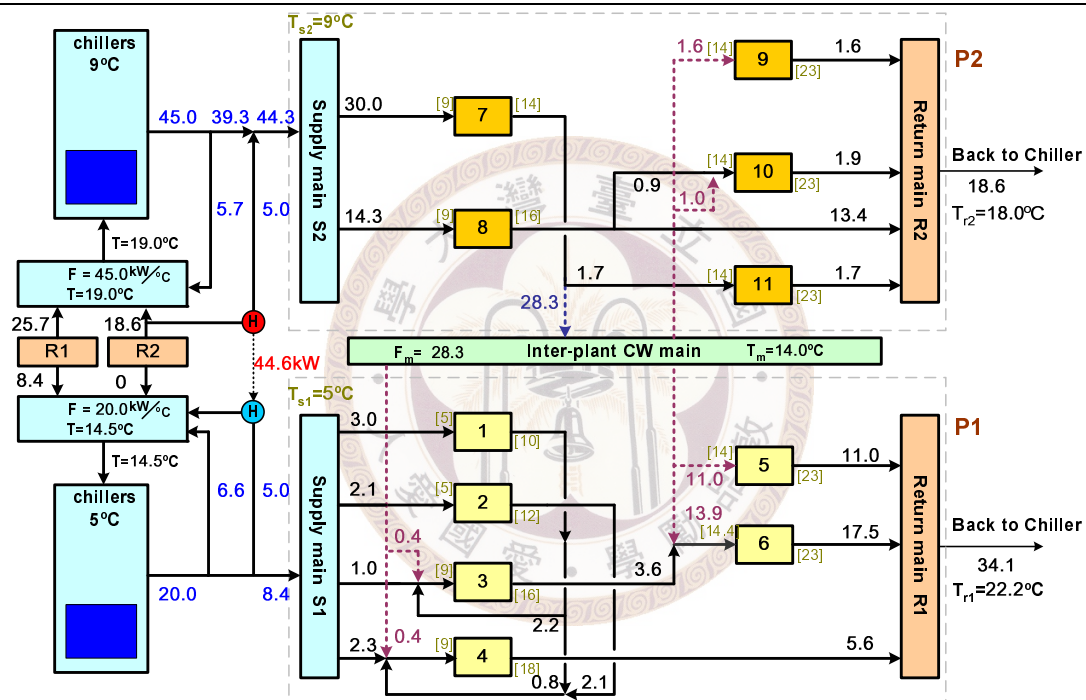


圖 4.25 與圖 4.18 比較，可以發現同樣的情況，我們節省了一台的 9°C 冰水主機，也可以從圖中發現，回流溫度分別從原本的 13.5°C 升為 14.6°C 及從原本的 14.3°C 升為 19°C，回流溫度都高了許多，所以從這可以發現我們更有效的利用冰水，進而降低一台冰水主機的使用。

圖 4.25 With Inter/Inner-Plant Mains 之網路與冰水主機操作策略設計結果

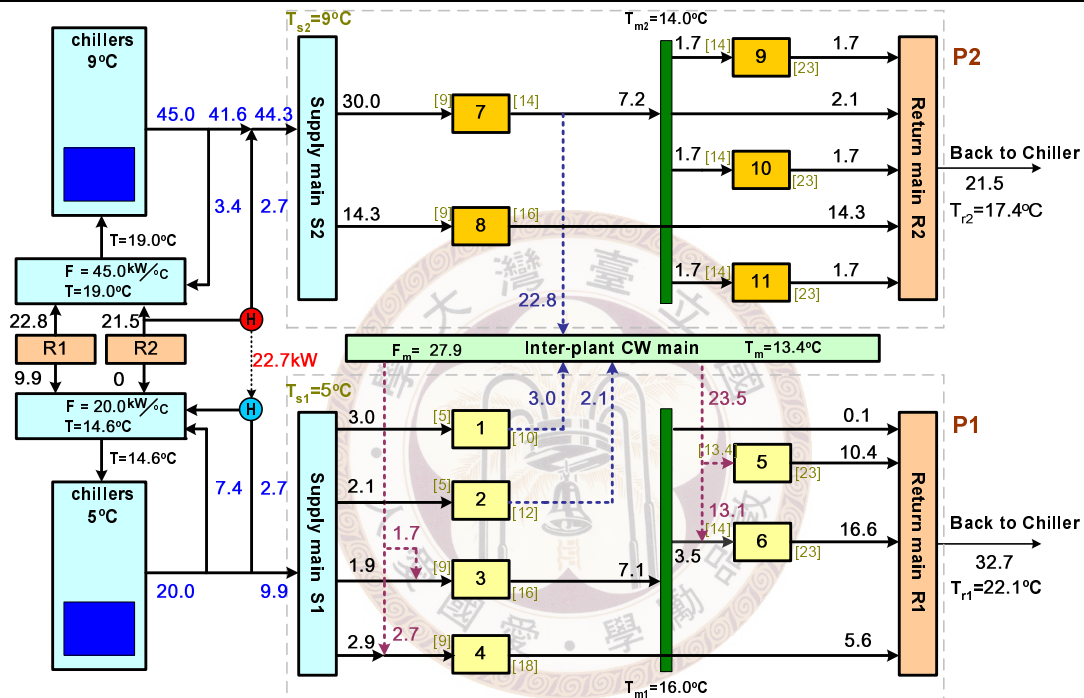


表 4.7 考慮熱整合與否之結果

	RW Supply kW/°C (ton/hr)	Parallel	Re-use Separate Design	Re-use Separate Inner mains	Re-use Inter-plant Main	Re-use Inter-plant Inner-plant mains
w/o HI	5°C	40.0 (34.3)	40.0 (34.3)	40.0 (34.3)	20.0 (17.1)	20.0 (17.1)
	no.of chillers	2	2	2	1	1
	9°C	90.0 (77.1)	45.0 (38.6)	45.0 (38.6)	90.0 (77.1)	90.0 (77.1)
	no.of chillers	2	1	1	2	2
	Cost(\$)	815.6	757.2	757.2	654.0	659.9
with HI	5°C	40.0 (34.3)	40.0 (34.3)	40.0 (34.3)	20.0 (17.1)	20.0 (17.1)
	no.of chillers	2	2	2	1	1
	9°C	45.0 (38.6)	45.0 (38.6)	45.0 (38.6)	45.0 (38.6)	45.0 (38.6)
	no.of chillers	1	1	1	1	1
	Cost(\$)	760.4	757.2	757.2	600.1	602.8

從表 4.7 可以看出考慮熱整合之成本大致比不考慮熱整合還來得低，只有 Re-use Separate Design 與 Separate with Inner mains 這兩種網路結構因為有無考慮熱整合，其模擬結果一樣，所以它們的成本是一樣的；Re-use Inter-plant Main 與 Re-use Inter/inner-plant Main 這兩種皆是利用多餘的 5°C 與 2 號工廠的回流冰水作熱整合，使得 2 號工廠的 9°C 冰水主機可以從兩台減少為一台，以至於降低其總成本。



5

結論與未來展望

5.1 結論

近年來，由於能源成本越來越高，在化工程序中對於能源有效使用的議題逐漸被重視。而冰水系統在工業中是一個低溫、複雜、耗能的程序，因此對於冰水程序之改善，在近來已有許多研究探討。本文分別針對冰水網路系統與冰水主機，提出數學規劃法的方式進行最適化的設計。

首先我們考慮不同跨廠區的冰水網路設計，提出所有可能的結構圖，並提出完整的超結構圖，針對其所有的單元，逐步建立規範方程式，包括質能平衡，與其需要的限制式，提出一套完整的數學模型，經由最少總冰水消耗量最適化的模擬比較各種網路結構與冰水消耗量的差異。其次，我們也考慮冰水主機的超結構，提出數學模型，給定不同的操作上下限，去探討其對固定/變動操作成本的影響。最後我們用

一個簡單的虛擬工廠來模擬我們提出的模型，採交叉的探討，將不同的網路結構分別改變其操作上下限，並討論其影響。

5.2 未來展望

在冰水系統的數學模型中，本研究採用了簡化的方式去討論冰水系統的操作，我們提出的操作數據皆是虛擬的工廠例子，其目的是為了驗證模型的可行性，未來我們可以將此模型應用在真實的工廠內，去模擬其冰水網路設計及冰水主機操作策略最適化。

另外，在本文我們並沒有考慮冰水主機之壓縮機所需的功，我們是直接給定固定操作成本及變動操作成本等變數來計算冰水主機的總操作成本，未來或許我們可以加入冰水主機所需的功，讓整個冰水主機考慮更趨完整。

此外，我們所提出的操作數據，其中熱負載是固定的，而我們知道一般工廠設備的熱負載不可能一年四季皆是固定的，夏天的熱負載一定來得特別高；而冬天或是淡季相對來講一定會來得比較低，所以未來我們可以依照不同的季節給定不同的熱負載，並模擬其結果。

最後，本研究建立的數學模式，是一個標準的混合整數規劃 (MINLP) 問題，其中使用了許多非線性 (Non-linear) 的限制式來表達系統中各種現象的物理意義，再配合非線性的目標函數求解。然而，在求解混合整數規劃問題 (MINLP) 的過程中，往往會得到許多不同的區域解 (local solution)，而不容易的到全域解 (global solution)；未來如何可以利用效率更高的解題工具，以保證解出全域最佳解，也是應該繼續努力的課題

。因此，如何有效的求得較大型且複雜的真實工廠冰水網路與冰水主機操作設計之全域解，為未來的挑戰工作之一。





參考文獻

- [1] Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., Raman, R., and Rosenthal, R. E. *GAMS: A User's Guide*. GAMS Development Corporation, 1988.
- [2] Chaplin Tyler, S.M. *Chemical Engineering Economics*. McGraw-Hill Book Company, 1984.
- [3] C.L.Chen, L.F. Lin, Y.J. Ciou and W.C. Chen. Superstructure-based MINLP formulation for synthesis of re-circulating cooling-water network with intermediate mains. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 40:235, 2007.
- [4] Feng, X. and Seider, W.D. New structure and design methodology for water networks. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 40:6140, 2001.
- [5] Feng, X. and Shen B. Wang. Recirculating Cooling-water Network with an intermediate Cooling-Water Main. *Energy and Fuels*, 19:1723, 2005.
- [6] FENG Xiao, LI Yucai and YU Xinjiang . Improving Energy Performance of Water Allocation Networks. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 16(3):480, 2008.
- [7] Gunarantam, M., A.-A. K. A. J.-K. and Smith, R. Automated design of total water systems. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 44(2005):588.
- [8] H. Rodera and M.J. Bagajewicz. Targeting procedures for energy saving by heat integration across plants. *AIChE*, 45(8):1721, 1999.
- [9] Irene Mei Leng Chew, Raymond Tan, Denny Kok Sum Ng, Dominic Chwan Yee Foo. Synthesis of Direct and Indirect Interplant Water Network. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 47:9485, 2008.
- [10] Jin-Kuk Kim and R. Smith. Cooling system design for water and wastewater minimization. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 43:608, 2004.
- [11] Kim, J., R. Smith. Cooling water system design. *Chem. Eng. Sci.*, 56:3641, 2001.
- [12] Kim, J., R. Smith. Automated retrofit design of cooling-water systems. *AIChE J.*, 49:1712, 2003.

- [13] Kim, J., Savulescu. L., R. Smith. Design of cooling system for effluent temperature reduction. *Chem. Eng. Sci.*, 56:1811, 2001.
- [14] Kuo, W., and Smith, R. Effluent treatment system design. *Chem. Eng. Sci.*, 52:4273, 1997.
- [15] Kuo, W., and Smith, R. Design of water-using systems involving regeneration., 76:94, 1998.
- [16] L.E. Savulescu, M. Sorin and R.Smith. Direct and indirect heat transfer in water network systems. *Applied Thermal Engineering*, 22:981, 2002.
- [17] Liu,Y., Duan, H. and Feng, X. The design of water-reusing network with a hybrid structure through mathematical programming. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 16:1, 2008.
- [18] M. AMIDPOUR and G. T. POLLEY. APPLICATION OF PROBLEMDECOMPOSITION IN PROCESS INTEGRATION. *Institution of Chemical Engineers*, 15(12):809, 1991.
- [19] M.H. Panjeshahi, A. Ataei, M. Gharaie, R. Parand. Optimum design of cooling water system for energy and water conservation. *Chemical Engineering Research and Design*, 87:200, 2009.
- [20] Miguel Bagajewicz and H.Rodera . Energy savings in total site heat integration across many plants. *Computers and Chemical Engineering*, 24:1237, 2000.
- [21] M.M. Castro, T.W. Song and J.M. Pinto. Minimization of operational costs. *Trans IchemE*, 78(part A):part A, 2000.
- [22] Robin Smith. *Chemical Process Design and Integration*. Wiley, 2005.
- [23] Rosain RM. Reusing water in CPI plants. *Chemical engineering progress*, 89(4):28.
- [24] S. AHMAD and D. C. W. Htn. Heat recovery between areas of integrity. *Computers chem. Engng.*, 15(12):809, 1991.
- [25] S.V. Bedekar, P. Nithiarasu and K.N. Seetharamu. Experimental investigation of the performance of a counter-flow, packed-bed mechanical cooling tower. *Energy*, 23(11):943, 1998.
- [26] T. Majozzi and A. Moodley. Simultaneous targeting and design for cooling water system with multiple cooling water supplies. *Computers and Chemical Engineering*, 32:540, 2008.
- [27] Wang, Y. and Smith, R. Design of distributed effluent treatment system. *Chem. Eng. Sci.*, 49:3127, 1994.

- [28] Wang, Y. and Smith R. Wastewater minimization. *Chem. Eng. Sci.*, 49:981, 1994.
- [29] Xiao Feng ., Jie Bai, Huimin Wang, Xuesong Zheng. Grass-roots design of regeneration recycling water networks. *Computers and Chemical Engineering*, 32:1892, 2008.

