

[雙壓磁浮離心式冰水機對提升 IPLV 與減排效益之評析]

一、前言

商業空調設備中以製造冰水方式進行降溫與除濕之製冷機組稱之為冰水機，以壓縮機型式可以區分為渦卷式、螺旋式與離心式；冰水機組主要的散熱方式則為氣冷式與水冷式兩種。如果以製冷能力區分，國內 100USRT 以下的冰水機組主要採用容積式的壓縮機、包括渦卷式與螺旋式；100~300USRT 的冰水機組由於近年來磁浮離心式壓縮機的上市，原本主要採用的螺旋式壓縮機、有部分被磁浮離心式壓縮機所取代；300~1,000USRT 的冰水機組，雖然有部分採用螺旋式壓縮機，但主要還是以離心式壓縮機為大宗，壓縮機的型式可分為油潤滑軸承的傳統離心式壓縮機與無油的磁浮離心式壓縮機。不論是採用傳統離心式壓縮機或磁浮離心式壓縮機，以變頻或馬達直驅是技術應用發展趨勢，利用壓縮機變轉速的容量調節機制，可有效提升整合性部分負載效率效率(Integrated part load value，後簡稱 IPLV)達到節能效果。近 10 年來 150~1,000RT 的水冷離心式冰水機則因為磁浮離心式壓縮機的無油化、低運轉噪音、低震動以及高性能係數(Coefficient of performance，後簡稱 COP)與高 IPLV 等特點、且技術成熟度與可靠度愈趨完備，磁浮離心式冰水機逐漸獲得國內外市場的青睞。

由於磁浮離心壓縮機的小型化以及高效率化的發展，已逐漸侵蝕到原本以螺旋式壓縮機與傳統離心式壓縮機為主流的市場，特別值得注意的是，將磁浮離心式壓縮機以多壓縮機並聯設計的磁浮離心式冰水機，在國內外的發展已相當成熟，儼然成為市場的主流。多壓縮機並聯設計的冰水機，對使用者而言，具有高 IPLV 的優點以及降低空調與製程冷卻中斷的風險；對冰水機業者而言，可以減少壓縮機種規格來發展完整的冰水機產品群組、且大量採購具有議價的好處；對壓縮機生產者而言，大量生產可以降低生產成本與元件備料規格。因此國內在建構磁浮離心式冰水機產業時，在開發壓縮機的同時即需考慮以最少的壓縮機機種規格來滿足冰水機產品群組，以對應不同能力級距之冰水機產品的市場需求。

雖然多壓縮機並聯組合的磁浮離心式冰水機有上述好處，然而國內外對於冰水機組的能源效率是以冰水機的能力級距為標的進行能源效率基準的規範，如我國於 109 年 7 月頒布表 1 所示之冰水機組能源效率基準表所示，以水冷離心式冰水機組 3 級能源效率基準為例，製冷能力 $<528\text{kW}(150.17\text{USRT})$ 、COP 需 ≥ 5.00 ；製冷能力 $\geq 528\text{kW}(150.17\text{USRT})$ 、 $<1,055\text{kW}(300.06\text{USRT})$ 、COP 需 ≥ 5.55 ；製冷能力 $>1,055\text{kW}(300.06\text{USRT})$ 、COP 需 ≥ 6.10 。雙壓以上的組合經常會跨入更大能力級距的能源效率基準，COP 要求提高 9~11%，如果原本壓縮機單體的能源效率不夠高，必須藉由冰水機系統設計的優化，投入更多的成本達到最低的能源效率基準，對冰水機業者來說，當然希望以最低的系統成本來達到最低的能源效率基準，相對地，如何使壓縮機單體的效率能跨越至更高一級能力級距之基準，就是對壓縮機設計、生產製造者的挑戰。

表 1、冰水機組製冷能源效率分級基準表[1]

冰水機組類型		標示額定製冷能力	製冷能源效率分級基準		
			性能係數(COP)		
			3 級	2 級	1 級
水冷式	容積式	< 528kW	4.45	4.80	5.15
		≥528kW <1758kW	4.90	5.30	5.70
		≥1758kW	5.50	5.90	6.35
	離心式	<528kW	5.00	5.40	5.80
		≥528kW <1055kW	5.55	5.95	6.40
		≥1055kW	6.10	6.60	7.10
氣冷式		全機種	2.79	3.00	3.20

註：

1.冰水機組性能係數(COP)依 CNS 12575 (96 年版)「蒸氣壓縮式冰水機組」於全載標準試驗條件，及各積垢容許值皆為零值下，實測所得之額定製冷能力除以額定製冷消耗電功率，採四捨五入計算至小數點後第二位，須符合附表一規定。

2.實測所得之額定製冷能力及性能係數應大於產品標示值 95%以上。

3.經中央主管機關審核具有 CNS 12575 中所述熱回收功能之冰水機組，不適用本表分級基準。

本文將以雙壓並聯的磁浮離心式冰水機為例，探討系統的設計型式以及經由性能實測驗證，分析比較同為 1 級能源效率之雙壓縮機(後簡稱雙壓)與單壓縮機(後簡稱單壓)磁浮離心式冰水機其部分負載性能的差異，進而模擬試算年度運轉對節能減排的效果。

二、 雙壓磁浮冰水機系統循環型式

雙壓縮機並聯之磁浮離心式冰水機系統依據冷媒循環迴路的設計，主要分為共用冷媒循環(雙壓縮機單冷媒循環系統、後簡稱雙壓單冷媒循環)以及獨立冷媒循環(雙壓縮機雙冷媒循環系統、後簡稱雙壓雙冷媒循環)的兩種系統設計，其設計種類與型式影響冰水機的性能表現與系統控制。如圖 1 為雙壓縮機並聯、冷凝與蒸發兩器共用之雙壓單冷媒循環磁浮離心式冰水機；圖 2 為雙壓縮機並聯、冷凝與蒸發兩器獨立之雙壓雙冷媒循環磁浮離心式冰水機；圖 3 為單壓縮機單冷媒循環磁浮離心式冰水機。

雙壓單冷媒循環磁浮離心式冰水機系統之優點為部分負載運轉時可充分利用其熱交換面積，有助於提高 IPLV，系統的製造成本較低，困難度則是冷媒系統共用，壓縮機的啟動易受背壓之影響，以及壓縮機負載均衡之控制；雙壓雙冷媒循環磁浮離心式冰水機系統其優點則為壓縮機的啟動與運轉較不受背壓之影響，兩台壓縮機的可較不用考慮其負載均衡性，缺點則無法享有部分負載時更大熱交換面積來提高蒸發溫度與降低冷凝溫度，以降低壓縮機的壓縮比達到節省壓縮功率的好處，同時相對製造本也比較高。

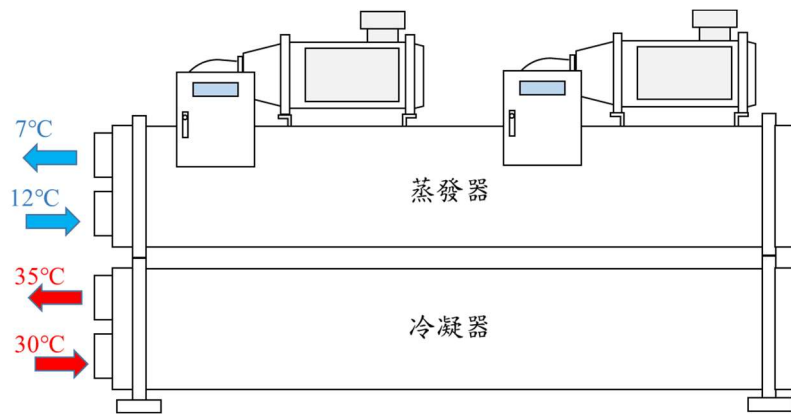


圖 1、雙壓單冷媒循環磁浮離心式冰水機系統

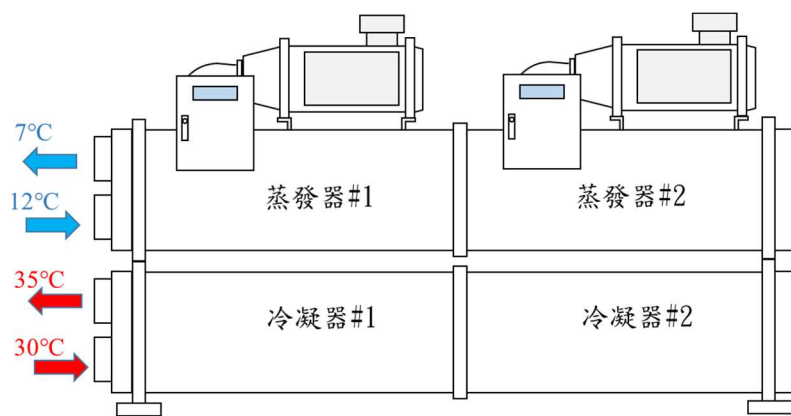


圖 2、雙壓雙冷媒循環磁浮離心式冰水機系統

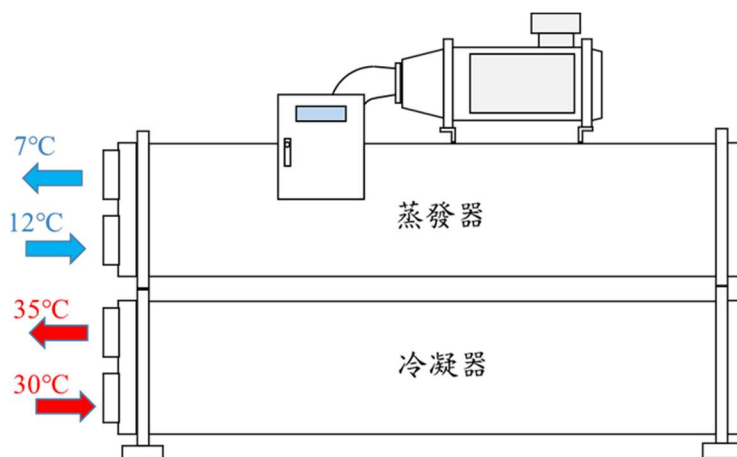


圖 3、單壓單冷媒循環磁浮離心式冰水機系統

表 2、雙壓並聯磁浮離心式冰水機系統之優缺點比較

系統	優點	缺點
雙壓單冷媒循環	■ 系統製造成本較低 ■ 部分負載運轉效率較高	■ 基載壓縮機運轉、備載壓縮機投入時，需克服背壓、卸載以及壓縮機同步運轉問題
雙壓雙冷媒循環	■ 基載壓縮機運轉、備載壓縮機投入時，不用考慮背壓、卸載以及壓縮機同步問題	■ 系統製造成本高 ■ 部分負載運轉無法降低壓縮機的壓縮比、節省壓縮功率

離心式冰水機組的性能主要取決於壓縮機單體於設定運轉條件(如 CNS 12575 的水溫與流量條件)下，壓縮機吸氣與排氣冷媒狀態點，決定其製冷能力與能源效率(即性能係數、COP)；而壓縮機操作的吸氣與排氣冷媒狀態點，則取決於在額定的水溫與流量條件下冷凝與蒸發兩器的設計，能否滿足壓縮機需求的吸氣與排氣條件。多壓縮機並聯之磁浮離心式冰水機系統設計，由於製冷能力通常會跨入更高能力級距的能源效率，因此壓縮機本體的效率將影響冷凝與蒸發兩器以及系統的設計，以及需投入的成本。

在相同的熱交換器漸進溫度差的設計條件下，雙壓雙冷媒循環磁浮離心式冰水機系統由於熱交換器的水溫差只有 1/2，因此要達到設計的漸進溫度差，熱交換器需要投資的成本將超過 25%以上甚至 50%，機體尺寸也將增加，對於現在以每冷凍噸單價固定的市場生態，基於成本競爭力考量，冰水機製造業者不會主動生產製造此種設計之產品。雙壓雙冷媒循環的好處在於冷媒循環獨立，維修時冷媒的處理比較簡單，也可以不影響另一機的運轉，不至於製冷完全中斷，雖然成本較高，會採用雙壓雙冷媒循環的磁浮離心式冰水機系統通常是業者基於使用上的考量與需求。從以上的說明，就可以了解為何雙壓並聯機組為何以雙壓單冷媒循環為主流，主要還是價格與成本問題。

四、單/雙壓磁浮冰水機系統部分負載性能實測分析

本文針對同為 1 級能源效率的雙壓與單壓磁浮離心式冰水機部分負載性能實測研究結果，透過電力排碳轉換係數分析評估其年碳排放量的差異。評估同為國家 1 級能源效率、製冷能力 250USRT 之雙壓單冷媒循環與單壓單冷媒循環之水冷磁浮離心式冰水機的部分負載性能、及其年運轉時間對碳排放量的影響。表 3 為 AHRI551/591-2020 整合性部分負載測試條件；表 4 為雙壓單冷媒循環與單壓單冷媒循環之水冷磁浮離心式冰水機之部分負載性能測試與計算結果。

表 1、AHRI 551/591-2020 IPLV 測試條件與計算方法[2]

■ 水冷式冰水機組				
負載	冰水入口溫度	冰水出口溫度	冷卻水入口溫度	冷卻水出口溫度
100%	12.0±0.28°C	7.0±0.28°C	30.0±0.28°C	35.0±0.28°C
75%	-	7.0±0.28°C	24.5±0.28°C	-
50%	-	7.0±0.28°C	19.0±0.28°C	-
25%	-	7.0±0.28°C	19.0±0.28°C	-
※ 75%、50%、25%負載冰水與冷卻水流量以 100%流量為準 ※ 部份負載性能 IPLV 計算公式: $IPLV=0.01*A+0.42*B+0.45*C+0.12*D$ A=100%負載之 COP 值、B= 75%負載之 COP 值、C= 50%負載之 COP 值 D= 25%負載之 COP 值				

表 4 、雙壓 vs 單壓 250USRT 水冷磁浮離心式冰水機 IPLV 性能

負載比例	雙壓 磁浮離心式冰水機	單壓 磁浮離心式冰水機
100%	6.30	6.26
75%	8.36	8.43
50%	12.30	11.73
25%	12.84	9.78
IPLV	10.65	10.06

備註：本案例乃以工研院冰水機 TAF 實驗室研究開發與委託測試的機組之實測性能為例所進行的分析結果，實際的節能效益視所使用之壓縮機的廠牌、規格以及冰水機系統設計與使用條件將會有所差異。

評估方法乃參考 AHRI 551/591-2020 部分負載性能測試數據，估算冰水機年運轉耗電量(瓩時)=100%製冷能力/COP×運轉時數+ 75%製冷能力/COP×運轉時數+ 50%製冷能力/COP×運轉時數+ 25%製冷能力/COP×運轉時數，年平均性能效率 COP=年製冷能力總量(瓩時)/年運轉耗電總量(瓩時)。排碳量乃根據台電依據歷年發購電量各能源別占比，在 111 年電力排碳轉換係數 0.495 公斤 CO₂e/瓩時的數據進行估算。

圖 3 為交通部中央氣象局 2022 年於臺北、台中、高雄每月氣象統計資料的月平均溫度，由於冷卻水入水溫與環境溫度息息相關，因此以線性分割成 4 組區間對應部分負載 IPLV。負載 100%冷卻水入水溫 30℃ 占比 4 個月(33%)、負載 75%冷卻水入水溫 24℃ 占比 5 個月(42%)、負載 50%、25%冷卻水入水溫 19℃ 占比分別 17%(2 個月)、8%(1 個月)。

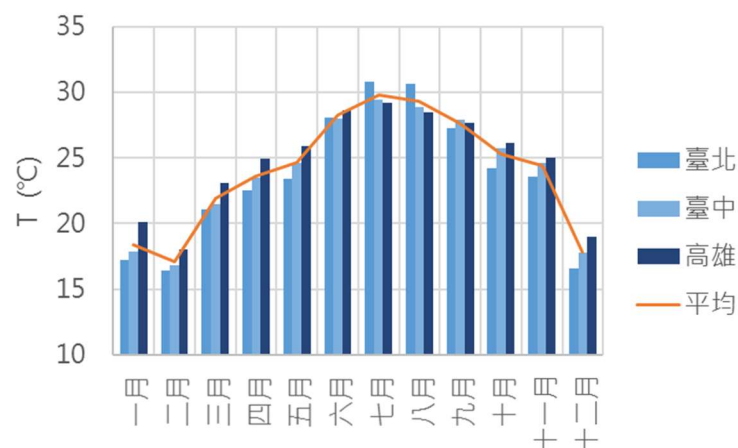


圖 3、2022 年臺北、台中、高雄氣象統計月平均溫度

假設冰水機年運轉時數為 8,760 小時，依上述冷卻水溫統計資料比例分配於部分負載運轉時數分別為 2,920、3,650、1,460、730 小時。以部分負載製冷能力×運轉時數可計算部分負載年運轉總製冷容量分別為 2,566,680(44.4%)、2,406,263(41.7%)、641,670(11.1%)、160,418(2.8%)(瓩時)，加總後之年製冷總量為 5,775,030 (瓩時)。

部分負載冰水機年運轉耗電量(瓩時)= 各部分負載年運轉製冷容量(瓩時)/COP。以本研究之雙壓單冷媒循環系統 1 級能源效率磁浮離心式冰水機的部分負載效率 IPLV=10.651、部分負載之性能係數 COP 分別為 6.30、8.36、12.30、12.84；單壓 1 級能源效率磁浮離心式冰水機的部分負載 IPLV=10.06、性能係數 COP 分別為 6.26、8.43、11.73、9.78，單壓磁浮離心式冰水機相較於雙壓磁浮離心式冰水機於部分負載 IPLV 性能效率提升-0.6%、0.8%、-4.6%、-23.8%。

圖 4 為冰水機依各部分負載性能係數 COP 所計算之年運轉耗電量。雙壓單冷媒循環水冷磁浮離心式冰水機的部分負載年運轉耗電量分別為 407,410(53.6%)、287,830(37.9%)、52,168(6.9%)、12,494(1.6%)(瓩時)，加總年運轉耗電量為 759,902(瓩時)，年平均性能係數 COP 為 7.60；單壓水冷磁浮離心式冰水機的部分負載年運轉耗電量分別為 410,013(53.5%)、285,440(37.2%)、54,703(7.1%)、16,403(2.1%)(瓩時)，加總年運轉耗電量為 766,559 (瓩時)，年平均性能係數 COP 為 7.53，雙壓水冷磁浮離心式冰水機相較於單壓水冷磁浮離心式冰水機之年運轉耗電量降低 6,657(瓩時)、相當於降低 0.9%，其中全載運轉條件時 1 級能源效率雙壓機組相較於單壓機組之年運轉耗電量降低 2,603(瓩時)、相當於降低 0.63%。

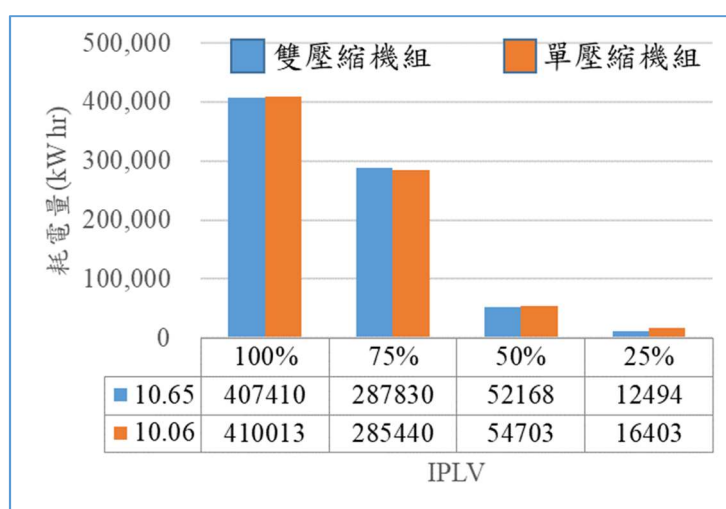


圖 4、額定能力 250USRT 之雙壓與單壓水冷磁浮離心式冰水機部分負載耗電量模擬計算例

圖 5 為冰水機依部分負載年運轉耗電量 $\times$ 電力排碳轉換係數所計算之年碳排放量。雙壓單冷媒循環之水冷磁浮離心式冰水機的年碳排放量分別為 201,668、142,476、25,823、6,184 (公斤 CO₂e)，加總年碳排放量為 376,151 (公斤 CO₂e)；單壓水冷磁浮離心式冰水機的部分負載年碳排放量分別為 202,956、141,293、27,078、8,119(公斤 CO₂e)，加總年碳排放量為 379,447。雙壓縮機組相較於單壓縮機組之年排碳量降低 3,295 公斤(CO₂e)、相當於降低 0.9%，其中 1 級能源效率雙壓縮機相較於單壓縮機組 100%、75%、50%與 25%各部分負載之年排碳量降低 2,603、-2,390、1,255、1,935(公斤 CO₂e)、相當於降低 0.63%、-0.84%、4.63%、23.83%。

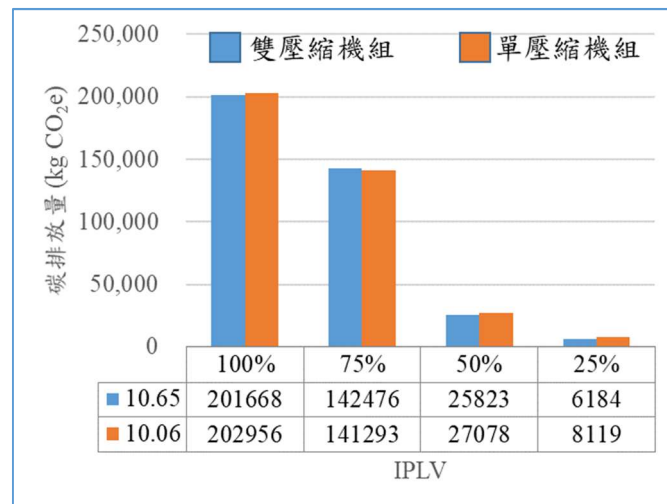


圖 5、額定能力 250USRT 之雙壓與單壓水冷磁浮離心式冰水機部分負載年碳排放量模擬計算例

五、結論

本文以實測整合性部分負載效率(IPLV)及其權重與平均氣溫條件，假設水冷磁浮離心式冰水機各負載的運轉時數模擬計算其年平均 COP、耗電量與碳排放量。從模擬分析結果發現在假設的運轉條件，較高部分負載效率的雙壓水冷磁浮離心式冰水機雖然具有較佳的節能效果與碳排放量，**雖未如預期來得多**，然而實際的節能效果與減少碳排放量仍需考慮實際負載的占比及變動量，相信對於低

部分負載占比較高以及負載變動量大之型態，雙壓水冷磁浮離心式冰水機將更適合於此種負載型態的場合應用。

六、參考文獻

1. 中華民國蒸氣壓縮式冰水機組能源效率分級標示管理系統，
<https://ranking.energylabel.org.tw/LBICE/index.aspx>。
2. ANSI/AHRI Standard 551/591 (SI)，Performance Rating Of Water – Chilling and Heat Pump Water-Heating Packages Using the Vapor Compression Cycle，2020。