

## 國產磁浮離心式冰水機之性能概述

### 一、前言

冰水機為建築物空調與工業製程冷卻的重要設備，佔中央空調總耗電 50% 以上，對應我國總耗電量達 10% 以上，其相關規範已由經濟部公告蒸氣壓縮式冰水機組容許耗用能源基準與能源效率分級標示事項方法及檢查方式，於中華民國 109 年 7 月 1 日起實施。冰水機性能係數(COP)依製冷能源效率分級基準分成三級，以水冷離心式冰水機標示額定能力 $\geq 528\text{kW}$ 、 $< 1055\text{kW}$  為例，1 級能源效率為 6.4，2 級能源效率為 5.95，3 級能源效率為 5.55。1 級與 2 級能源效率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。能源效率標示 1 級比 2、3 級的省電，鼓勵用戶採用 1 級能源效率冰水機產品。

影響冰水機之性能之一在於壓縮機性能與冰水機系統設計，其中磁浮離心式壓縮機因導入磁浮軸承技術減少了傳統接觸式軸承的摩擦損失、馬達變頻直驅排除了齒輪傳動損失以及系統無油化降低了熱交換效率損失，使其年運轉效率較既有技術產品提升 20~30% 以上，磁浮離心壓縮機已成為新世代冰水機產品的必要機種。

工研院研發之 300 RT 級國產磁浮離心壓縮機，依 CNS12575[1]全載性能規範，額定能力運轉範圍 250~320 RT，製冷能力容量調節除了以變頻器改變轉速之外，亦搭配可變擴壓器機構，調整葉輪出口之擴壓器流道寬度，縮小擴壓器寬度，減少冷媒氣體之流動面積以增加氣流之流速，避免發生失速來增大運轉範圍[2]，實測降載比例可達額定能力之 90%，可穩定運轉於高負載變化之場域應用，單機即可滿足全年不同環境不同負載變化的使用需求[3]。

此設備展現國產高效率冰水機系統技術，採用噴淋式蒸發器專利技術增強熱傳導效率，降低系統阻抗充分發揮壓縮機性能，成功打造國產 1 級能源效率之冰水機機種，如圖 1 所示。



圖 1、國產 1 級能源效率 300 RT 級磁浮離心式冰水機

## 二、實驗測試方法

本設備由工研院 TAF 認證冰水機性能測試實驗室進行性能測試，依 CNS 12575 蒸氣壓縮機式冰水機組與 AHRI 551/591(SI)-2018[4]測試標準，採用水側熱量計法，根據量測冰水流率與蒸發器出、入口水溫而求得該機之製冷能力；以電力分析儀測得消耗電功率。在量測儀器與資料擷取方面，溫度感知器使用 PT100 DIN 1/10B(誤差 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ )、記錄器使用 YOKOGAWA GP20、流量計使用 YOKOGAWA Electrical Magnetic(誤差 $\pm 2\%$  of Full Scale)、電力分析儀使用 WT230 Power Meter(誤差 $\pm 5\%$ )，每 5 秒刷新一筆平均數據須符合測試規範水溫條件，連續紀錄 15 分鐘穩態平均數據，15 分鐘內如有一筆水溫條件不符規範則重新記錄。

備註說明：

1.  $1 \text{ RT(冷凍噸)} = 3.516 \text{ kW}$
2.  $\text{COPR} = \text{蒸發器製冷能力 kW} \div \text{耗電 kW}$

實驗對象為在同一台國產磁浮離心式冰水機分別以額定能力 300、280、250 RT 進行 CNS 12575 條件之全載性能測試，設定冰水出水溫度  $7 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、冰水流量 10 LPM/RT；冷卻水入水溫  $30 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、冷卻水流量 12.5 LPM/RT。

依三個不同滿載額定能力來調整所對應的額定冰水與冷卻水流量，應用變頻調節馬達轉速，使其成為不同滿載額定能力的冰水機。再調整測試站進口水溫，使其進入 CNS 要求的水溫條件。

部分負載依 AHRI 551/591 性能測試規範，設定 AHRI 全載冰水入/出水溫度  $12/7\pm0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，冷卻水入/出水溫  $30/35\pm0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，調整冰水與冷卻水流量符合溫差  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，在 AHRI 部分負載依照全載流量及冰水出水溫  $7\pm0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，其中在 IPLV 75 % 工況冷卻水入口水溫設定  $24.5\pm0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、IPLV 50 %、25 % 工況冷卻水入口水溫設定  $19\pm0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，部分負載製冷能力須符合目標能力  $\pm 2\%$ 。

IPLV 部分負載的定義如下所示：

$$\text{IPLV} = 0.01A + 0.42B + 0.45C + 0.12D \quad (1)$$

其中：

A = COP @ 100% Load

B = COP @ 75% Load

C = COP @ 50% Load

D = COP @ 25% Load

IPLV 權重係數在於 25%、50%、75% 冰水機性能係數，分別為 0.12、0.45、0.42，冷卻水溫入口條件  $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $24.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，全載冷卻水入口溫度  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，權重係數 0.01。將各點冰水機性能係數與加權係數計算得出 IPLV 值。

最後進行最大額定能力實驗，依 CNS12575 測試標準，評估本機最大可達之額定能力與效率。

### 三、實驗結果與討論

依 CNS12575 冰水機性能測試規範實驗結果，如表 1 所示。在同一台磁浮離心式冰水機可運轉於額定能力 300、280、250 RT，對應冰水機性能係數 COP 分別為 6.45、6.45、6.28，三者皆為國家能源效率 1 級，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。在額定能力 300 RT 與 280 RT 效率相同。運轉於額定能力 250 RT 性能效率降低 2.6 %，其原因為磁浮離心壓縮機操作於非額定設計點工況造成效率降低[5]。

以上結果顯示，透過流量和水溫調整，使三種能力的冰水機系統運轉於相近的蒸發溫度/壓力與冷凝溫度/壓力，亦即具有相近的運轉條件(壓縮比)，運轉於磁浮離心壓縮機額定設計點之性能係數 COP 表現更佳。如果維持相同水測流量進行實驗，在相同冷卻入口水溫與製冷能力增加，而造成冷卻出水溫提高使冰水機系統之冷凝器壓力上升，故製冷能力越大則造成更大的壓縮比，須提高更多轉速維持所需的製冷能力使耗電量增加，在節電效益上冰水機系統耗電與水測泵流量及冷卻水塔風扇需取得最佳效率點。

表 1、 300 RT(USRT)級磁浮離心式冰水機全載測試結果

測試規範CNS12575			額定能力		
項目		單位	300 USRT	280 USRT	250 USRT
冰水測	入水溫度	°C	12.058	12.260	12.043
	出口溫度	°C	7.061	7.061	7.090
	溫差(DT)	°C	4.997	5.2	4.95
	冰水流量	LPM	2989.5	2712.3	2,516.60
冷卻水測	入水溫度	°C	29.918	29.964	29.997
	出口溫度	°C	34.560	34.642	34.728
	溫差(DT)	°C	4.642	4.677	4.731
	冷卻水流量	LPM	3775.4	3529.3	3,119
電源	電壓	V	370.65	371.12	371.83
	電流	A	267.2835	251.2397	229.01
	頻率	Hz	59.96	60.01	60.00
	功率因數		0.9436	0.946	0.94
	電功率	kW	161.91	152.78	138.79
總性能	蒸發器	kW	1,043.9	985.44	870.96
	製冷能力	kcal/h		847327	748,893
		RT	296.84	280.2	247.7
	COPR		6.45	6.45	6.28
	每冷凍噸消耗電功率	kW/RT	0.545	0.545	0.560
熱平衡百分比		%	-0.63	-0.41	-1.18

部分負載性能測試結果如表 2 所示。依 AHRI 551/591 測試規範於額定能力 300 RT 全載 IPLV100%測試結果 COP 6.39，相較於 CNS12575 全載性能測試 COP 6.45 降低 0.93 %，主要差異在於冷卻水出水溫度影響，使冰水機冷凝溫度增加造成磁浮離心壓縮機運轉壓縮比增加，兩者測試規範定義不同，在 AHRI 551/591 規範冷卻水出水溫度為  $35 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ，實測冷卻水溫為  $35.078^{\circ}\text{C}$ ；而 CNS12575 規範冷卻水流量為 12.5 LPM/RT，實測冷卻水溫為  $34.56^{\circ}\text{C}$ 。

部分負載 IPLV 75%、50%測試結果，冰水機性能係數 COP 分別為 8.51、11.35 具有高效率的表現，而在 IPLV 25 %測試結果須藉由可變擴壓器容量調節進行運轉，COP 為 9.10，經由 IPLV 加權平均計算結果為 9.84。

表 2、額定能力 300 RT 磁浮離心式冰水機部分負載測試結果

測試規範AHRI551/591			額定能力300 USRT			
項目		單位	100%	75%	50%	25%
冰水測	入水溫度	$^{\circ}\text{C}$	11.992	10.781	9.496	8.403
	出口溫度	$^{\circ}\text{C}$	7.204	7.154	7.078	7.121
	溫差(DT)	$^{\circ}\text{C}$	4.788	3.627	2.418	1.282
	冰水流量	LPM	3155.7	3120.4	3118.4	3115.2
冷卻水測	入水溫度	$^{\circ}\text{C}$	30.085	24.502	19.127	18.954
	出口溫度	$^{\circ}\text{C}$	35.078	28.103	21.514	20.312
	溫差(DT)	$^{\circ}\text{C}$	4.993	3.601	2.387	1.357
	冷卻水流量	LPM	3539.8	3572.2	3568.5	3566.4
電源	電壓	V	368.01	368.67	370.47	373.08
	電流	A	274.95	155.88	81.16	57.19
	頻率	Hz	60.03	60	60	60
	功率因數		0.945	0.934	0.892	0.831
	電功率	kW	165.62	92.97	46.45	30.71
總性能	蒸發器	kW	1,055.9	791.2	527.4	279.4
	製冷能力	kcal/h	907,937	680,226	453,501	240,197
		RT	300.2	225	150	79.4
	COPR		6.38	8.51	11.35	9.10
	每冷凍噸消耗電功率	kW/RT	0.552	0.413	0.310	0.387
熱平衡百分比		%	-0.41	-0.33	-0.25	-0.31
IPLV			9.84			

在額定能力 280 RT 部分負載性能測試結果如表 3 所示。全載 IPLV100%性能係數 COP 為 6.30，相較於額定能力 300 RT 性能係數降低 1.25 %；部分負載 IPLV75%、50%性能係數 COP 分別為 8.31、11.24，相較於額定能力 300 RT 性能係數分別降低 2.35 %、0.97%；部分負載 IPLV25%性能係數 COP 為 8.49，相較於額定能力 300 RT 性能係數降低 6.7 %，差異明顯，主要原因也是製冷能力降低使葉輪入口攻角增加導致效率降低。經由 IPLV 加權平均計算結果為 9.63，相較於額定能力 300 RT 部分負載 IPLV 效率降低 2.1 %

表 3、額定能力 280 RT(USRT)磁浮離心式冰水機部分負載測試結果

測試規範 AHRI551/591			額定能力 280 USRT			
項目		單位	100%	75%	50%	25%
冰水測	入水溫度	°C	11.954	10.777	9.491	8.205
	出口溫度	°C	7.119	7.151	7.031	7.001
	溫差(DT)	°C	4.835	3.625	2.460	1.204
	冰水流量	LPM	2,917.9	2,917.10	2,919.20	2,921.10
冷卻水測	入水溫度	°C	30.041	24.576	18.954	19.055
	出口溫度	°C	35.118	28.293	21.430	20.349
	溫差(DT)	°C	5.077	3.717	2.477	1.295
	冷卻水流量	LPM	3,272.5	3,273.4	3,272.7	3,272.7
電源	電壓	V	370.54	370.18	373.31	376.26
	電流	A	258.21	148.92	78.08	54.63
	頻率	Hz	60	60	60	60
	功率因數		0.94	0.93	0.89	0.81
	電功率	kW	156.44	88.99	44.68	28.98
總性能	蒸發器	kW	985.81	739.29	502.23	246.13
		RT	280.3	210.2	142.8	70.0
	COPR		6.30	8.31	11.24	8.49
	每冷凍噸消耗電功率	kW/RT	0.558	0.423	0.313	0.414
熱平衡百分比		%	-0.42	-0.33	-0.26	-0.32
IPLV			9.63			

在額定能力 250 RT 分負載性能測試結果如表 4 所示。全載 IPLV100%性能係數 COP 為 6.21，相較於額定能力 300 RT 性能係數降低 2.7 %；部分負載 IPLV75%、50%性能係數 COP 分別為 8.05、10.29，相較於額定能力 300 RT 性能係數分別降低 5.4 %、9.3%，嚴重影響 IPLV 加權平均計算結果；部分負載

IPLV25%性能係數 COP 為 7.93，相較於額定能力 300 RT 性能係數降低 12.86 %，經由 IPLV 加權平均計算結果為 9.02，相較於額定能力 300 URST 部分負載 IPLV 效率降低 8.3%。

表 4、額定能力 250 RT 磁浮離心式冰水機部分負載測試結果

測試規範 AHRI551/591			額定能力 250 USRT			
項目		單位	100%	75%	50%	25%
冰水測	入水溫度	°C	12.025	10.871	9.548	8.456
	出口溫度	°C	7.042	7.104	7.028	7.193
	溫差(DT)	°C	4.983	3.767	2.520	1.263
	冰水流量	LPM	2,494.90	2,494.10	2,494.60	2,487.40
冷卻水測	入水溫度	°C	30.046	24.537	19.954	18.937
	出口溫度	°C	35.058	28.238	21.427	20.263
	溫差(DT)	°C	5.012	3.701	2.473	1.326
	冷卻水流量	LPM	2,918.0	2,917.9	2,919.2	2,964.3
電源	電壓	V	367.28	373.30	375.61	373.55
	電流	A	233.45	136.31	75.13	52.63
	頻率	Hz	59.99	60.02	60.00	60.01
	功率因數		0.94	0.93	0.87	0.81
	電功率	kW	139.90	81.62	42.72	27.72
總性能	蒸發器	kW	868.73	656.75	439.63	219.73
		RT	247.0	186.7	125.0	62.5
	COPR		6.21	8.05	10.29	7.93
	每冷凍噸消耗電功率	kW/RT	0.566	0.437	0.342	0.444
熱平衡百分比		%	-0.43	-0.34	-0.27	-0.35
IPLV			9.02			

以同一台國產磁浮離心式冰水機分別以額定能力 300、280、250 RT 部分負載性能測試結果，如圖 2 所示。在額定能力 300 RT 部分負載 IPLV 效率表現最佳，性能效率皆高於額定能力 280、250 RT。在 IPLV100%全載性能表現差異最小 2.6 %，而在 IPLV 25%性能表現差異最大 12.85 %。而在部分負載 IPLV 50%在額定能力 300、280RT 性能效率表現較佳。而在額定能力 250 RT 性能效率表現有明顯降低 9.35 %，由此觀察這台國產磁浮離心式冰水機，運轉於冷卻水溫 19 °C 入口條件，製冷能力需求增加有助於提高冰水機性能係數。

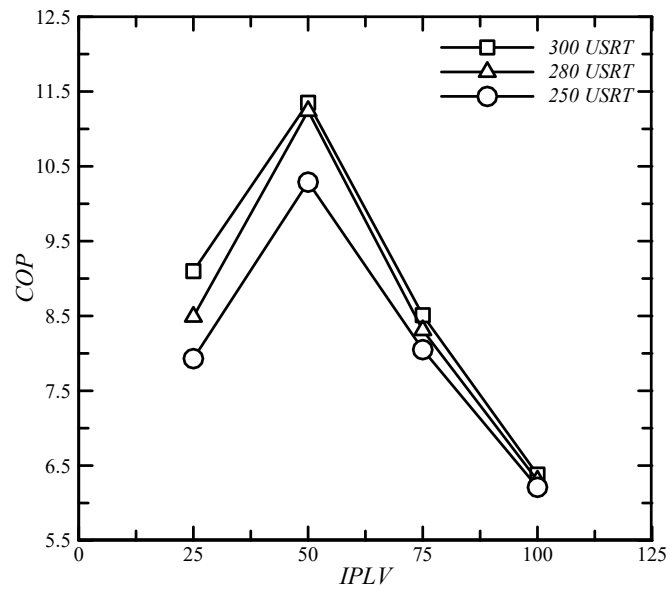


圖 2、不同額定能力之部分負載效率

國產磁浮離心式冰水機最大額定能力實驗，以 CNS12575 測試標準之額定能力 320 RT 測試結果，如表 5 所示。在製冷能力 312.4 RT、冰水機性能係數 6.53 為本次實驗結果的最佳效率點。實測最大製冷能力為 319.7 RT，冰水機性能係數 6.35，性能效率相較於最佳點降低 2.76 %。根據實驗數據顯示磁浮離心式冰水機製冷能力增加 7.3 RT 低於電功率增加 8.65 kW。推斷此時磁浮離心壓縮機已發生堵塞(choke)現象，故最大額定能力滿足 CNS12575 測試條件之 320RT。



表 5、磁浮離心式冰水機最大額定能力性能測試結果

測試規範CNS12575			最大額定能力		
項目		單位	320 USRT		
冰水測	入水溫度	°C	11.972	12.062	12.058
	出口溫度	°C	7.146	7.111	7.074
	溫差(DT)	°C	4.825	4.951	4.984
	冰水流量	LPM	3257.8	3226.3	3227.7
冷卻水測	入水溫度	°C	29.902	30.091	30.07
	出口溫度	°C	34.35	34.657	34.67
	溫差(DT)	°C	4.449	4.566	4.6
	冷卻水流量	LPM	4138.3	4101.2	4098.1
電源	電壓	V	371.31	371.01	372.16
	電流	A	277.1673	287.7051	290.12725
	頻率	Hz	60.01	59.95	59.97
	功率因數		0.944	0.946	0.946
	電功率	kW	168.27	174.90	176.92
總性能	蒸發器	kW	1,098.5	1,116.14	1,124.2
		RT	312.4	317.4	319.7
	COPR		6.53	6.38	6.35
	每冷凍噸消耗電功率	kW/RT	0.539	0.551	0.553
熱平衡百分比		%	-0.49	-0.50	-0.49

#### 四、結論與展望

國產磁浮離心式冰水機性能分析，依 CNS12575 測試規範，在額定能力 300、280、250 RT 運轉範圍皆可滿足國家 1 級能源效率標準，特別適用於長時間高負載運轉的場域。測試結果顯示在額定能力為 300 RT 時，部分負載效率 IPLV 的表現最佳，此完整測試結果可以提供空調業主與技師，應用評估導入場域長時間運轉之條件與製冷能力需求，預測用戶達到最佳的年運轉節電效益。

本設備壓縮機目前乃採用 IM 感應馬達，根據研發用 PM 永磁馬達原型機的實測結果，冰水機性能係數整體提升部分負載 IPLV 效率 6%，其中在 IPLV25% 工況點提升 16% 最為顯著，表示 PM 永磁馬達技術相較於 IM 感應馬達更適合

運轉於低負載工況，滿足不同情境之需求。現階段國產 PM 磁浮離心壓縮機正積極進行測試的商品化工程，相信很快就可以上市跟國人見面，提升部分負載效率與國際品牌競爭。

## 五、參考文獻

- [1] 蒸氣壓縮式冰水機組容許耗用能源基準 CNS12575 與能源效率分級標示事項方法及檢查方式。
- [2] Effects of Diffuser Width on Performance Improvement for a Centrifugal Refrigerant Compressor (Asian Conference on Refrigeration and Air Conditioning 2018), Jun Jie Lin Kuo Shu Hung, Jenn Chyi Chung, Chung Che Liu,
- [3] 廣域高效率離心式冰水機系統技術，冷凍空調與能源雜誌，劉中哲、陳景富、洪財旺、江時昌、鐘震麒。
- [4] AHRI Standard ANSI/AHRI Standard 551/591 (SI), Performance Rating Of Water – Chilling and Heat Pump Water-Heating Packages Using the Vapor Compression Cycle, 2018
- [5] Centrifugal Compressor Design and Performance; David Japikse, Concepts ETI, Inc.