

水冷式冰水機組整合式部分負載效率 (IPLV) 介紹

Introduction of integrated part - load value (IPLV) for water-cooled chiller.

羅進鴻 Chin-Hung Lo、賴楷元 Kai-Yuan Lai

工業技術研究院 綠能與環境研究所

Green Energy Environment Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute

摘要

冰水機組之整合式部分負載效率IPLV(Integrated Part-Load Value)為評定冰水主機能效的指標之一，可彌補以往冰水主機之選擇單以滿載效能-性能係數COP(Coefficient Of Performance)做為參考，無法反映實際長期運轉性能之不足，故整合式部分負載效率為冰水主機在不同操作條件下之性能效率之加權計算值。本文以冰水主機測試標準“AHRI Standard 551/591 (SI), Performance Rating Of Water – Chilling and Heat Pump Water-Heating Packages Using the Vapor Compression Cycle, 2020”為主。深入淺出的方式說明及介紹相關資訊，除提供空調系統設計者能更適切地選擇所需設備外，亦期能提供冰水機組之製造廠及相關領域從業人員參考，期望對於水冷式冰水機組之部分負載效率有所認識。

關鍵字：冰水機組、整合式部分負載效率、性能係數

abstract

The IPLV (Integrated Part-Load Value) of a chiller is one of the indicators for evaluating the energy efficiency of the chiller, it is the weighted calculation value of the performance efficiency of the chiller under different operating conditions. It can better reflect the long-term operating performance of the chiller. This paper focuses on the chiller test standard "AHRI Standard 551/591 (SI), Performance Rating of Water–Chilling and Heat Pump Water-Heating Packages Using the Vapor Compression Cycle, 2020". It Explains and introduces relevant information simply and Provide knowledge about IPLV to practitioners in related fields.

Keywords : chiller , Integrated Part-Load Value , Coefficient Of Performance

一、前言

冰水機組之性能測試，主要目的是依據冰水機組相關測試標準，來驗證冰水主機之額定性能及效率是否符合要求。冰水主機之量測的物理量為：溫度、流量、電量三大類。量測項目：包括冰水側、冷卻水側、電源側。而量測參數有冰水側：入口溫度、出口溫度、冰水流量；冷卻水側：入口溫度、出口溫度、冷卻水流量；電源側：電壓、電流、功率因數等量測值。另壓力或壓損值之量測可供參考，非必要項目。壓力量測以冷媒

側、冷凍油側為主，壓損則以冰水側、冷卻水側為主。加以計算能力與效率：蒸發器製冷能力/冷凝器散熱能力/機組消耗功率、性能係數(COP)/整合式部分負載效率(IPLV)/能源效率比(EER)/每冷凍噸總消耗功率(kW/RT)、熱平衡(Heat Balance)等項目，其中性能係數 (COP, Coefficient Of Performance)，定義為：COP = 製冷能力 kW / 機組消耗功率 kW。針對冰水機組此類商品習用測試標準：國內製定測試標準 CNS 12575 「蒸氣壓縮式冰水機組」(CNS: Chinese National Standard/

中華民國國家標準)[1]已於2007年2月27日修訂公布及美國製冷空調供熱工業協會(Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute, AHRI) Standard 551/591 (SI), Performance Rating Of Water – Chilling and Heat Pump Water-Heating Packages Using the Vapor Compression Cycle, 2020標準(國際單位制/簡稱公制)[2]。

而隨著國際管制趨勢情況下，政府已著手推動各項能源效率的管制計畫，並訂定相關的法律規範，在政府的安排下順利將能源短缺問題降到最低，並於2019年8月20日中央主管機關行政院公報經濟部公告修正「空調系統冰水主機能源效率標準」，名稱並修正為「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」[3]，並自2020年7月1日生效，此法規更具強制性管理機制。國內在空調設備省能之管制上，經由能源法案的推動，目前國內已建立冰水機組等耗能設備的規範，配合空調設備檢測技術的提昇與相關認證體系之建立，大幅提昇國內空調設備的運轉效率，節能成效非凡，而整合式部分負載效率(IPLV)尚未制定相關的規範及管理機制。筆者從國際及國內實施IPLV現況探討，期望對於國內相關業者對冰水機組部分負載效率有所認識。

二、冰水機組整合式部分負載效率 (IPLV) 緣由

依據美國 AHRI Standard 551/591 (SI)-2020 於附錄 D.「整合式部分負載效率 (IPLV) 推導」文中說明：在發布美國國家標準協會 (American National Standards Institute, ANSI) 及美國冷凍空調學會(American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE)標準 90.1-1989 之前，其中包括針對整合式部分負載效率 IPLV(Integrated Part-Load Value)的建議。標準額定條件，設計效率(滿載/設計環境)是唯一用於比較冰水機組相對效率的指標。單一冰水機組的設計額定條件代表了滿負荷和設計環境條件(通常為 ASHRAE 1%天氣條件)同時發生時的性能。設計效率不包含代表冰水機組在任何非設計條件下(部分負荷，降低的環境)的運行效率的訊息。

IPLV 度量標準是根據4種不同的運行條件模擬出的單個冰水機組的數值等級，通過考慮混合的氣候數據並結合各種負載和環境運行條件來建

立。目的是創建一個部分負載/降低的環境效率的度量標準，該度量標準除了設計等級外，還可以為監管機構指定最低冰水機組效率水平，以及為工程公司比較同類技術的冰水機組提供有用的手段。IPLV 值無意用於預測在任何特定應用或運行條件下冰水機組的年度能耗。

在估算實際使用中的冰水機組效率時，要考慮許多問題。IPLV 或設計評級指標本身都無法預測建築物的能源使用。另外，冰水機組效率只是許多因素的一個組成部分，而冰水機組效率卻是冰水機組工廠總能耗的一部分。出於這個原因，美國製冷空調供熱工業協會建議使用符合美國國家標準協會及美國冷凍空調學會標準 ASHRAE 140「建築能耗分析程序」，該程序不僅可以對建築物結構和天氣數據進行建模擬，還可以反映建築物和冰水機組的運行方式。這樣，建築設計師和運營商將更好地了解冰水機組和其他冰水機組組件對冰水機組總能耗的貢獻。模擬軟體也可以是用於評估不同操作順序的有用工具，目的是獲得整個冰水機組的最低能耗。使用這些工具，應在冰水機組的完整運行模型下，預期的負載和運行條件下使用。

總之，在計算冰水機組和系統效率時，最好使用能夠反映實際天氣數據，建築物負荷特性，運行時間，冰水機組功能以及輔助設備(例如水泵和冷卻塔)消耗的能量綜合分析。整合式部分負載效率及非標準部分負載效率(Non-standard Part-Load Value, NPLV)等級的預期用途是比較類似技術的性能，並排進行相對比較，並可以提供另一個可認證等級。諸如設計效率或 IPLV 之類的單一指標不得用於量化節能量上。

由以上論述可以了解：IPLV 能效指標使用有其限制性，非單一能效指標。

三、AHRI Standard 551/591 (SI)-2020 水冷式冰水機組整合式部分負載效率 (IPLV) 介紹

美國製定的 IPLV 計算式作法，目前廣為世界各國引用，讀者可詳參 AHRI Standard 551/591 (SI)-2020，附錄 D.資訊。整合式部分負載效率 (IPLV)，依部分負載測試條件測得各部分負載的效率值，以加權計算得到一個效率值，簡稱 IPLV。冰水主機除了滿載 COP 效率值外，IPLV 是另一個部分負載的綜合效率值。依據冰水機組習用測試標準其水冷式冰水機組 IPLV 測試條件，如表 1 所示，兩者測試條件有些微之差異。

表 1、CNS 12575 / AHRI 551/591(SI)試驗條件

標準		CNS 12575 (2007)	AHRI Standard 551/591 (SI)-2020
蒸發器	冰水出口溫度	7.0°C	7.00°C
	冰水入口溫度	NA	12.00°C
	冰水流量	10.0 L/min/RT	額定冰水流量由額定滿載製冷量下的水溫決定
冷凝器	100%負載冷卻水入口溫度	30.0°C	30.00°C
	75%負載冷卻水入口溫度	24.0°C	24.50°C
	50%負載冷卻水入口溫度	19.0°C	19.00°C
	25%負載冷卻水入口溫度	19.0°C	19.00°C
	冷卻水出口溫度	NA	35.00°C
	冷卻水流量	12.5 L/min/RT	冷凝器額定冷卻水流量為 100%時，冷凝器冷卻水入口溫度 30.00°C/冷卻水出口溫度 35.00°C，由額定滿載製冷量和額定效率下的計算決定
水流量允差		± 5%	≤ 5.000%
溫度允差		± 0.5°C	冰水出口溫度及冷卻水入口溫度 ≤ 0.28°C 冰水入口溫度及冷卻水出口溫度無要求

由上表中 AHRI Standard 551/591 (SI)-2020 可以了解 IPLV 之測試要求：水流量與水溫、製冷量，需調控至測試標準允許範圍內。冰水/冷卻水目標流量調控至 ≤ 5.000%；冰水出口/冷卻水入口目標水溫溫度允差調控至 ≤ 0.28°C。

依據 AHRI Standard 551/591 (SI)-2020 第 7.3 章節說明：冰主機組水側特性計算方法。應採用下列計算方法之一。在這兩種情況下，用作輸入的水溫或壓力值取決於使用密度和比熱項的計算。當這些方法與 ANSI/ASHRAE 標準 30 規定的方法之間存在差異時，應使用本標準(AHRI 551/591)為主。方法 1. 使用 NIST REFPROP 軟體（版本 10.0 或更高版本）計算物理性質密度和比熱，作為壓力和溫度的函數。方法 2. 分別用多項式，如圖 1 所示，計算水的密度和比熱作為僅溫度函數。其中，能力計算其 ρ ：密度(kg/m³)及 C_p ：比熱 J/(kg.K)為非定值。另第 5.1.4 章節說明：(1) ρ ：密度計算時，其溫度以入口溫度為主。(2) C_p ：比熱計算時，其溫度以入口/出口平均溫度為主。 V_w ：體積流率(m³/s)， m_w ：質量流率(kg/s)， ρ ：密度(kg/m³)， C_p ：比熱 J/(kg.K)。單位換算： $m_w = \rho_{in} * V_w$ (kg/s = kg/m³ * m³/s)，常用體積流率(L/min)轉換成質量流率(kg/s)，說明：先轉換成(m³/s)：L/min*1m³/1000L*1min/60sec{ L/min除以 1000 再除以 60)，再乘以密度(kg/m³)就成為質量

流率(kg/s)}。範例計算： Q_{ev} ：Net Refrigeration Capacity (淨製冷能力)， $Q_{ev}=12.6(\text{kg/s}) * 4.194 \text{ kJ}/(\text{kg.K}) * (12.02^\circ\text{C} - 6.97^\circ\text{C}) = 266.17 \text{ kW}$ 。

$$\rho = (\rho_4 \cdot T^4) + (\rho_3 \cdot T^3) + (\rho_2 \cdot T^2) + (\rho_1 \cdot T) + \rho_0$$

Where:

$$\begin{aligned} \rho_0 &= 1000.2 \text{ kg/m}^3 \\ \rho_1 &= 4.6734 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^3 \\ \rho_2 &= -7.3948 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3 \\ \rho_3 &= 4.0229 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}^3 \\ \rho_4 &= -1.2556 \cdot 10^{-7} \text{ kg/m}^3 \\ T &= \text{Water temperature (0 to 100) }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$c_p = (c_{p5} \cdot T^5) + (c_{p4} \cdot T^4) + (c_{p3} \cdot T^3) + (c_{p2} \cdot T^2) + (c_{p1} \cdot T) + c_{p0}$$

Where:

$$\begin{aligned} c_{p0} &= 4.2160 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \\ c_{p1} &= -3.1103 \cdot 10^{-3} \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \\ c_{p2} &= 9.4433 \cdot 10^{-5} \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \\ c_{p3} &= -1.3901 \cdot 10^{-6} \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \\ c_{p4} &= 1.0770 \cdot 10^{-8} \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \\ c_{p5} &= -3.2220 \cdot 10^{-11} \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \cdot \text{K} = \text{Water temperature (0 to 100) }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

圖 1、計算水的密度和比熱

而製冷能力的調控範圍：(1)無段容調：負載 100%：未超過全載允許誤差，需調控 ± 5.17%(全載時冰水出水及入水水溫之溫度差 5°C 為例)範圍，負載 75%、50%、25%：需調控 ± 2% 範圍。(2)有段容調：負載 100%：需調控 > 5.17%(溫度差 5°C 為例) 以內範圍，負載 75%、50%、25%：需調至最接近處。以利整合式部分負載效率(IPLV)計算。

以 AHRI Standard 551/591 (SI)-2020 規定之水溫/水流量測試條件，測得冰水主機部分負載 100%、75%、50%、25% 之測試數據，計算出各負載點之 COP，則權重值 IPLV. SI or NPLV. SI = $0.01 \cdot A + 0.42 \cdot B + 0.45 \cdot C + 0.12 \cdot D$ ，其中 A = 於 100% 製冷能力時之 COP；B = 於 75% 製冷能力時之 COP；C = 於 50% 製冷能力時之 COP；D = 於 25% 製冷能力時之 COP。

四、AHRI Standard 551/591 (SI)-2020 水冷式冰水機 IPLV 計算範例

表 2、1,750 kW 測試結果

測試點	額定目標負載百分比 (%)	目標值 (kW)	量測能力值 (kW)	量測目標負載百分比 (%)	能力偏離值 (%)	冷卻水目標入口水溫 (°C)	機組消耗功率 (kW)	COP (W/W)
1	100.0	1,750	1,802	103.0	2.971	30.00	296.0	6.088
2	75.0	1,313	1,333	76.17	1.171	24.50	196.6	6.780
3	50.0	875.0	931.0	53.20	3.200	19.70	140.7	6.618
4	50.0	875.0	836.5	47.80	-2.200	19.00	131.1	6.379
5	25.0	437.5	455.0	26.00	1.000	19.00	97.50	4.667

測試點 1：100% 之 COP 值未超過全載允許誤差 ($\pm 5.17\%$) 直接計算；測試點 2：75% 之 COP 值未超過部分負載 $\pm 2\%$ 直接計算；測試點 5：25% 之 COP 值未超過部分負載 $\pm 2\%$ 直接計算；由於 50% 測試結果，無法控制及調控至 $\pm 2\%$ 內範圍，需引用內插法計算 50% 之 COP。53.20% 之冷卻水入口水溫修正，冷卻水目標值依公式計算 EWT(冷卻水入口溫度)： $2(T_{100\%}-19)(\%Load-1/2)+19 = 2(30-19)(0.532-0.50)+19 = (22 \cdot 0.032)+19 = 19.7^{\circ}\text{C}$ 。利用內插測試點 3 及測試點 4；得到 50% 之 COP 為 6.475。因此本機組之 $IPLV.SI = 0.01 \cdot A + 0.42 \cdot B + 0.45 \cdot C + 0.12 \cdot D = (0.01 \cdot 6.088) + (0.42 \cdot 6.780) + (0.45 \cdot 6.475) + (0.12 \cdot 4.667) = 6.382 (W/W)$ 。

依據美國 AHRI Standard 551/591 (SI)-2020，於附錄 F 提供了水冷式冰水機 IPLV 範例計算以闡明標準的要求。

範例 1 (引用內插計算)：冰水主機是具有無段容調(比例容量)控制的水冷離心式冰水機，測試對於 50% 點，冰水機無法調控到所需額定點負載 50% 的 $\pm 2\%$ 以內範圍。表 2 顯示了計算 IPLV.SI 所需的測試結果。

範例 2 (引用公式修正計算)：本例為非標準部分負載效率 (Non-standard Part-Load Value, NPLV)，測試條件之冷卻水目標入口水溫不同而已，計算方法與 IPLV 相同，並無差異。冰水主機是具有無段容調(比例容量)控制的水冷離心式冰水機，可在 100%、75% 和 50% 部分負荷額定點運行，但在低於 27.7% 和要求的 25% 時不能卸載測試點 D 無法運行。因為該單元是可配置單元並且被選擇用於與這些非標準操作條件相關，所以不應使用 IPLV.SI 指標，而應使用 NPLV.SI 指標及 NPLV.SI 條件和要求一起使用。表 3 顯示了計算 NPLV.SI 所需的測試結果。

表 3、2,730 kW 測試結果

測試點	額定目標負載百分比 (%)	目標值 (kW)	量測能力值 (kW)	量測目標負載百分比 (%)	能力偏離值 (%)	冷卻水目標入口水溫 (°C)	機組消耗功率 (kW)	COP (W/W)
1	100.0	2,730	2,743	100.5	0.476	32.0	507.9	5.400
2	75.0	2,048	2,075	76.0	1.007	25.5	316.9	6.549
3	50.0	1,365	1,360	49.8	-0.183	19.0	183.3	7.419
4	25.0	682.5	755.9	27.7	2.688	19.0	136.9	5.520

測試點 1：100%之 COP 值未超過全載允許誤差(±5.17%)直接計算；測試點 2：75%之 COP 值未超過部分負載±2%直接計算；測試點 3：50%之 COP 值未超過部分負載 ±2%直接計算；由於無法卸載至 25%測試結果±2%內，需引用公式計算 25%之 COP。25%之 COP 值，不能使用外插，所以要使用公式求得：本台冰水主機額定能力 2730kW

(Load factor 負載因素)

$$LF = \frac{(\%Load)(Q_{100\%})}{(Q_{min\%Load})} = \frac{0.25 \times 2,730}{755.9} = 0.902935$$

(Degradation factor 降級因素)

$$C_D = (-0.13 \times LF) + 1.13$$

$$= (-0.13 \times 0.902935 + 1.13) = 1.012619$$

得到 25%之修正 COP=5.520/1.012619 = 5.451。因此本機組之 NPLV.SI = 0.01·A + 0.42·B + 0.45·C + 0.12·D = (0.01*5.400) + (0.42*6.549) + (0.45*7.419) + (0.12*5.451) = 6.797 (W/W)。

範例 3(引用公式修正計算)：冰水主機是水冷式冰水機，該裝置只能在滿載下運行，因此需要額外的性能，該裝置在 B 額定點的 24.50°C 進入冷凝器水溫度和 C 和 D 額定點在 19.00°C 冷凝器進入水溫度下運行。50%和 25%額定點的冷凝器水溫均為 19.00°C，因為負載等於或小於 50%，因此只需 3 個測試點即可生成 IPLV.SI 額定數據。表 4 顯示了計算 IPLV.SI 所需的測試結果。

表 4、53 kW 測試結果

測試點	額定目標負載百分比例(%)	目標值(kW)	量測能力值(kW)	量測目標負載百分比例(%)	能力偏差值(%)	冷卻水目標入口水溫(°C)	機組消耗功率(kW)	COP (W/W)
1	100.0	53.00	54.06	102.00	2.000	30.00	11.90	4.543
2	75.0	39.75	61.13	115.33	40.33	24.50	10.60	5.767
3	50.0	26.50	69.96	132.00	82.00	19.00	11.30	6.191

測試點 1：100%之 COP 值直接計算；測試點 2：75%之 COP 值；測試點 3：50%之 COP 值；測試點 4：25%之 COP 值引用(Load factor 負載因素)

LF 公式及(Degradation factor 降級因素) CD 計算，得到表 5 計算值。

表 5、53 kW 計算值

測試點	額定目標負載百分比例(%)	量測能力值(kW)	機組消耗功率(kW)	Load factor 負載因素	Degradation factor 降級因素	COP (W/W)	註解
A	100.0	54.06	11.90	-	-	4.543	測試點 1 直接計算
B	75.00	-	-	0.650254	1.045467	5.516	將測試點 2 與降級因素一起使用
C	50.00	-	-	0.378788	1.080758	5.728	將測試點 3 與降級因素一起使用
D	25.00	-	-	0.189394	1.105379	5.601	將測試點 4 與降級因素一起使用

因此本機組之 IPLV.SI = 0.01·A + 0.42·B + 0.45·C + 0.12·D = (0.01*4.543) + (0.42*5.516) + (0.45*5.728) + (0.12*5.601) = 5.612 (W/W)。

由以上範例論述可以了解：測試水冷式冰水機如調控至負載 100%：未超過全載允許誤差範圍，負載 75%、50%、25%：需調控± 2%範圍，則其

IPLV 值可直接計算。如無法調控± 2%要求範圍，則引用內插計算或引用負載因素/降級因素之公式修正計算 IPLV 值。

五、結論

台灣目前冰水機組測試方法及步驟依照“CNS 12575，蒸氣壓縮式冰水機組，2007”測

試標準。法規規定所有國內使用冰水機組全載性能係數(COP)至少要符合第三級能源效率基準，屬強制性。礙於 CNS 測試標準，尚未納入 IPLV 權重值，以至無法有效蒐集國內各級冰水機組 IPLV 值。

冰水機組應用部分負載效率或 IPLV 之規劃，應評估國內冰水機組實際運轉狀況、國際管制趨勢、測試能量、測試費用及對節能之效益等因素，宜由工研院計畫團隊結合國內學者專家先提出方案，再找業者討論，可使相關從業人員更了解冰水機組與機房中的其他元件對機房總用電的影響。

IPLV 主要的用意，單台冰水機組在不同氣候條件及不同負載條件下去量測冰水機組的效率。此 IPLV 數據更能有效的去比較冰水機組效率水平，提供工程界比較冰水機組效率的技術，ILPV 值不能用來預測年度能源的消耗量。評估冰水機組的實際使用效率有許多因素要考慮，非 IPLV 或額定性能可預測建物的用電量。IPLV 的權重值制定已刻不容緩，此問題即需解決，才能提供 IPLV 最低效率建議給主管機關作為能源效率管制之依據。

台灣應如何訂定 CNS 12575(2007) IPLV 權重值，只要有足夠的相關數據，制定 CNS 12575 IPLV 權重值其實不難，然而除了氣候資料外，其餘資料尚屬欠缺。為了彌補相關資料之不足，建議(1)：蒐集 2 年台灣每天 0 至 24 時之乾溼球溫度。(2)挑選台灣北、中、南部建築物具有監控冰水機組製冷能力，耗電量及運轉時間表之辦公大樓。(3)因應台灣氣候，可參考美國 IPLV 權重值的來由之數據去分析，制定適合台灣 IPLV 權重值。有關台灣 CNS 12575 (2007) IPLV 權重值訂定，目前尚需集思廣益，推出可行之方案[4]。

目前美國、加拿大、澳洲、中國、歐盟均已制定 IPLV 權重值，但 CNS 12575 IPLV 合理權重值還停留在研究及討論階段。建議集合國產官學研各界，並結合公會建立產業溝通平台，邀請各品牌製造及進口廠商參與工作會議，尋求一致的共識，共同制定適合台灣「IPLV 權重值」的執行方向。

六、感謝詞

本文承為經濟部能源局之能源研究發展基金贊助完成，特此誌謝。

七、參考文獻

[1] CNS 12575 「蒸氣壓縮式冰水機組」，2007 年 2 月 27 日修訂公布。

[2] AHRI Standard 551/591 (SI), Performance Rating Of Water – Chilling and Heat Pump Water-Heating Packages Using the Vapor Compression Cycle, 2020

[3] 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，經濟部公告，2019 年 8 月 20 日，發文字號：經能字第 10804603470 號

[4] 許柳煌，「冰水機能源效率管理與 IPLV 公式權重值研究計畫」，台灣區冷凍空調工程工業同業公會，2015 年 11 月。