



一种冷水机组季节性能评价新指标与多台机组联合运行性能评价*

清华大学 吴成斌[☆] 石文星[△] 李先庭

摘要 综合部分负荷性能系数 IPLV 是评价冷水机组季节运行性能的重要指标,但在对其合理性的评价上存在诸多争议。从季节性能评价指标的物理本质出发,构建了描述单台冷水机组性能的季节部分负荷性能系数 SPLV 指标;基于 SPLV 的评价思想,提出了描述多台冷水机组联合运行时的季节部分负荷性能系数 SPLV(N) 的计算方法和测试工况,并应用 SPLV(N) 对不同类型冷水机组进行了性能评价。结果表明,所构建的 SPLV 指标可以更为真实地反映冷水机组的季节运行性能;SPLV(N) 的大小与冷水机组的性能曲线形状有很大关系,不同类型的机组各有其适宜的应用形式。

关键词 冷水机组 联合运行 综合部分负荷性能系数 IPLV 季节部分负荷性能系数 SPLV

New evaluating index for seasonal performance and performance evaluation for multiple chillers combined operation

By Wu Chengbin[★], Shi Wenxing and Li Xianting

Abstract Integrated part load value (IPLV) is an important index to evaluate the seasonal performance of chillers. However, there are still some disputes over the rationality of IPLV. According to the physical nature of the index, puts forward a new index, seasonal part load value (SPLV) for evaluating seasonal performance of a single chiller. Based on the evaluating idea of SPLV, presents a method for calculating the seasonal part load value SPLV(N) of multiple chillers combined operation and its work condition. Evaluates different kinds of chillers with SPLV(N). The result shows that SPLV can better reflect the true season operation performance of chillers; the value of SPLV(N) has a close relationship with the performance curve of the chillers and different kinds of chillers have their suitable application modes.

Keywords chiller, combined operation, integrated part load value (IPLV), seasonal part load value (SPLV)

★ Tsinghua University, Beijing, China

①

1 问题的提出

综合部分负荷性能系数 IPLV (integrated part load value) 是目前世界上用于评价冷水机组等设备季节运行性能的重要指标,1986 年起源于美国,1988 年被美国空调制冷学会 (ARI) 采用^[1-2],其含义是“用单一数值表示空调热泵装置在制冷(或制热)季节运行的综合部分负荷性能指标参数”,其数值由式(1)进行计算。目前,我国已将 IPLV 作为冷水机组^[3-4]、水冷式单元式空气调

节机^[5]等制冷设备的季节性能评价指标,并纳入其产品标准中。

$$IPLV = \sum_{i=1}^m a_i A_i \quad (1)$$

式中 m 为测试工况点的数量; a_i 为负荷率 i 时空调热泵装置制冷性能系数 COP_c 或制热性能系数 COP_h 的权重系数(用小数或百分数表示),与负荷率

①☆ 吴成斌,男,1987 年 12 月生,在读硕士研究生
石文星(通讯作者)
100084 清华大学建筑学院建筑技术科学系
(010) 62796114

E-mail: wxshi@tsinghua.edu.cn

收稿日期:2012-05-31

* 国家自然科学基金资助项目(编号:51176084),国家杰出青年基金资助项目(编号:51125030)

和运行时间有关; A_i 为在负荷率 i 及其相应的测试工况下空调热泵装置的 COP_c 或 COP_h ,kW/kW。

一般而言,测试工况点 m 越多,其空调热泵装置的全工况性能模型越准确。为减少测量时间、降低测试成本,实际产品一般较多采用机组负荷率 LR (表示机组的实际制冷量与名义制冷量之比)为100%,75%,50%和25%4个工况点(其测试工况与负荷率 LR 有关)的实测数据来描述其全工况性能。对于冷水机组而言,其 $IPLV$ 公式可表示为

$$IPLV = aA + bB + cC + dD \quad (2)$$

式中 A, B, C, D 分别表示冷水机组在100%,75%,50%和25%负荷率及其对应工况下的 COP_c ,kW/kW; a, b, c, d 分别表示冷水机组在100%,75%,50%和25%负荷率的权重系数,且 $a+b+c+d=1$ 。

自从ARI标准提出以 $IPLV$ 作为衡量冷水机组综合部分负荷性能指标以来,业界一直对其十分关注。现在,很多标准体系已经接受和认可 $IPLV$,但是业内对其合理性一直存在争议,其中以下两个争议最为热烈:

争议一,实际应用效果显示,冷水机组的全年耗电量与其 $IPLV$ 不一定呈负相关关系^{[6-8]①};

争议二, $IPLV$ 计算公式中的4个加权系数仅反映了单台机组的运行时间的百分比,不能反映制冷机房中多台冷水机组(简称:机组群)的联合运行特性^{[7-10]①②③④}。

上述争议是积极的、具有建设性的。引起争议一的本质问题在于 $IPLV$ 的物理意义及其计算公式的表达形式。国家标准GB 50189—2005《公共建筑节能设计标准》^[11]及其支撑文献^[12]以及GB/T 18430.1—2007《蒸气压缩循环冷水(热泵)机组 第1部分:工业或商业用及类似用途的冷水(热泵)机组》^[3]、GB/T 18430.2—2008《蒸气压缩循环冷水(热泵)机组 第2部分:户用和类似用途的冷水(热泵)机组》^[4]明确指出, $IPLV$ 是“用一个单一数值表示的空气调节用冷水机组的部分负荷效率指标”,希望用 $IPLV$ 来评价冷水机组在制冷季节的综合运行性能(即全年制冷运行能耗水平)。然而,文献^[7]根据公式推导和实际运行数据分析指出“机组全年能耗 $\neq$ 全年制冷量/ $IPLV$ ”,认为目前的 $IPLV$ 不能反映冷水机组在制冷季节的综合运行性能,甚至可能出现“ $IPLV$ 较高的机组反

而全年能耗更高”的情况。

调查显示,我国仅约15%的建筑物采用单台冷水机组,而绝大多数建筑物都采用多台(1台以上)冷水机组联合运行^{②③}。在多台冷水机组的制冷机房中,由于控制策略不同,每台冷水机组的负荷率(机组的实际制冷/热量与名义制冷/热量之比)并不一定与建筑负荷率同步变化^{[13]③⑤⑥}。因此,争议二的观点认为按单台冷水机组的4个部分负荷下的加权系数和 COP_c 确定的 $IPLV$ 对多台冷水机组的工程选用与评价冷水机组的全年运行能耗高低没有实际意义。

鉴于上述背景,本文将根据季节性能指标的提出目的及其评价要素,构建一种评价单台冷水机组季节运行性能的新指标,希望其能够更为真实地反映机组的能耗水平;在单台冷水机组性能评价指标计算公式和制冷机房冷水机组运行策略的基础上,探讨如何评价多台冷水机组联合运行性能将更加合理,以期为多机组制冷机房的性能评价提供参考。

2 SPLV 公式的推导

2.1 SPLV 的物理意义及其评价要素

制冷(热泵)设备的季节性能指标应具有明确的物理意义,其目的是为了反映其在制冷或制热季节的运行能耗水平、能够区分不同设备的性能优劣,以便为产品的应用选型提供基础数据。基于此,本文提出采用季节部分负荷性能系数 $SPLV$ 指标来描述制冷(热泵)设备的季节运行性能。 $SPLV$ 的物理意义是:制冷(热泵)设备在制冷(或制热)季节制取的总冷量(kWh)(或总热量)与该季节消耗的总电量(kWh)之比。 $SPLV$ 越大标志其在该季节制取相同冷量(或热量)时的耗电量越少。

对于冷水机组制冷运行而言,其季节部分负荷

- ① 王珏. ARI 550/590-1998 标准中的 NPLV/IPLV 能够用来描述机组部分负荷运行费用吗? 冷冻空调标准与检测, 2004(6): 15-16
- ② 汪训昌. 从冷水机组的优化群控评 ARI 550/590 标准的 IPLV 指标. 冷冻空调标准与检测, 2004, 26(6): 10-14
- ③ William L. Off-design chiller performance. Trane Engineer Newsletter, 1996, 25(5)
- ④ Carrier Corporation. System part load value: a case for chiller system optimization. Carrier HVAC Analysis, 3(3)
- ⑤ York International Corporation. New NPLV rating works “weather” your plant has a single or multiple chillers. York HVAC&R Engineering Update, 1999
- ⑥ Trane Corporation. ARI Standard 550/590-1998 Implication for chilled-water plant design. Trane Engineers Newsletter, 1999, 28(1)

性能系数 $SPLV$ 的定义式为

$$SPLV = \frac{\text{冷水机组全年总制冷量}}{\text{冷水机组全年制冷时消耗的总电量}} \quad (3)$$

基于上述定义可知,如果 1 台机组服务于 1 栋建筑,当已知全年的总制冷量和机组的 $SPLV$ 时,即可方便地预测出该机组全年制冷运行的耗电量,为空调系统冷源机组的选型提供方便。

由于不同地区、不同建筑的负荷特征不一致,故采用季节性能指标来评价冷水机组性能时,必须对气象参数、建筑负荷和机组测量工况等要素进行一定抽象或简化。为与现行 $IPLV$ 等季节性能指标具有可比性,必须保证其 3 个评价要素的一致性,故 $SPLV$ 应采用与 $IPLV$ 相同的评价要素简化模型。

1) 机组的运行时间分布模型。根据 ASHRAE 提出的温频法思想^[1-2,14],考察典型地域位于第 j 温频段(温频段可以采用 1°C 或较小温度范围为分度)的机组制冷运行的时间分布 n_{cj} 。

2) 典型建筑的负荷模型。冷水机组是按设计工况点进行选型的,故机组性能评价时必须建立典型地域、典型建筑的冷负荷模型,即抽象出各温频段对应的负荷分布。设在第 j 温频段典型建筑的负荷率为 BLR_{cj} (BLR_{cj} 是指冷负荷 BL_{cj} (kW) 与设计负荷 DBL_c (kW) 的比值,即 $BLR_{cj} = BL_{cj}/DBL_c$)。当单台机组独立承担建筑负荷时,机组的负荷率 LR_{cj} (定义为机组输出的制冷量与名义工况制冷量之比)就等于建筑负荷率 BLR_{cj} ,但多台机组联合运行时,

$$SPLV = \frac{\sum_{j=1}^{k_{\infty}} DBL_c BLR_{cj} n_{cj}}{\sum_{j=1}^{k_{\infty}} \frac{DBL_c BLR_{cj} n_{cj}}{COP_{cj}}} = \frac{1}{\sum_{j=1}^{k_{\infty}} \frac{BLR_{cj} n_{cj}}{\sum_{j=1}^{k_{\infty}} (BLR_{cj} n_{cj}) COP_{cj}}} \quad (7)$$

取负荷率 100%, 75%, 50% 和 25% 为典型工况点,将这 4 种负荷率下的 COP_{cj} 定义为 A, B, C, D , 并代表相应温频段的 COP_c 。在 $SPLV$ 指标中采用了与 $IPLV$ 相同的评价要素简化模型,故 $IPLV$ 中的

$$a = \frac{\sum_{j=1}^{k_1} BLR_{cj} n_{cj}}{\sum_{j=1}^{k_{\infty}} BLR_{cj} n_{cj}}, b = \frac{\sum_{j=k_1+1}^{k_2} BLR_{cj} n_{cj}}{\sum_{j=1}^{k_{\infty}} BLR_{cj} n_{cj}}, c = \frac{\sum_{j=k_2+1}^{k_3} BLR_{cj} n_{cj}}{\sum_{j=1}^{k_{\infty}} BLR_{cj} n_{cj}}, d = \frac{\sum_{j=k_3+1}^{k_{\infty}} BLR_{cj} n_{cj}}{\sum_{j=1}^{k_{\infty}} BLR_{cj} n_{cj}} \quad (8)$$

式中 $j=1 \sim k_1, j=k_1+1 \sim k_2, j=k_2+1 \sim k_3, j=k_3+1 \sim k_{\infty}$ 分别表示 4 种负荷率所对应的温频段;

对应某一建筑负荷率时,各机组的负荷率与多台机组的运行策略有关,二者不一定相等。

3) 基于实测数据确定的机组性能模型。通过有限个工况点和对应工况下机组的实测性能参数 COP_c 构建机组的全工况性能。试验测试工况点越多,越能更准确地反映机组的性能,但过多的测试工况点,将导致机组的测试成本过高。

当确定了上述 3 个要素模型后,即可根据 $SPLV$ 的物理意义推导出 $SPLV$ 的数学表达式。

2.2 推导过程

根据 $SPLV$ 的物理意义和式(3)可知:

$$SPLV = \frac{\sum_{j=1}^{k_{\infty}} \Phi_{cj}}{\sum_{j=1}^{k_{\infty}} E_{cj}} \quad (4)$$

式中 j 为温频段序号; k_{∞} 为最高温频段序号; Φ_{cj} 为冷水机组在整个供冷季的第 j 温频段需向建筑提供的冷量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; E_{cj} 为冷水机组在整个供冷季的第 j 温频段的能耗, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

$$\Phi_{cj} = BL_{cj} n_{cj} = DBL_c BLR_{cj} n_{cj} \quad (5)$$

$$E_{cj} = P_{cj} n_{cj} = \frac{BL_{cj} n_{cj}}{COP_{cj}} = \frac{DBL_c BLR_{cj} n_{cj}}{COP_{cj}} \quad (6)$$

式(5), (6)中 n_{cj} 为第 j 温频段机组的运行时间, h ; P_{cj} 为第 j 温频段机组运行时的输入功率, kW ; COP_{cj} 为第 j 温频段机组运行时的性能系数, kW/kW 。

因此,由式(4)~(6)可知

$$SPLV = \frac{1}{\sum_{j=1}^{k_{\infty}} \frac{BLR_{cj} n_{cj}}{\sum_{j=1}^{k_{\infty}} (BLR_{cj} n_{cj}) COP_{cj}}} \quad (7)$$

权重系数 a, b, c, d 的构造方法也适用于 $SPLV$ 。根据 AHRI 550/590-2011^[14]、GB 50189—2005《公共建筑节能设计标准》^[11] 以及文献[15-16],可以得到权重系数 a, b, c, d 的计算方法:

$$a = \frac{\sum_{j=1}^{k_1} BLR_{cj} n_{cj}}{\sum_{j=1}^{k_{\infty}} BLR_{cj} n_{cj}}, b = \frac{\sum_{j=k_1+1}^{k_2} BLR_{cj} n_{cj}}{\sum_{j=1}^{k_{\infty}} BLR_{cj} n_{cj}}, c = \frac{\sum_{j=k_2+1}^{k_3} BLR_{cj} n_{cj}}{\sum_{j=1}^{k_{\infty}} BLR_{cj} n_{cj}}, d = \frac{\sum_{j=k_3+1}^{k_{\infty}} BLR_{cj} n_{cj}}{\sum_{j=1}^{k_{\infty}} BLR_{cj} n_{cj}} \quad (8)$$

$j=1 \sim k_{\infty}$ 表示全部温频段,故 $a+b+c+d=1$ 。

根据式(7), (8), $SPLV$ 则可表示为

$$SPLV = \frac{1}{\frac{a}{A} + \frac{b}{B} + \frac{c}{C} + \frac{d}{D}} \tag{9}$$

式(9)是基于“SPLV=全年制冷量/全年运行能耗”的物理意义推导出的,故 SPLV 值大则表示机组的能效水平高,反之亦然。式中 A,B,C,D 与式(2) IPLV 表达式中的意义和测试工况均相同; a,b,c,d 的数值也采用相同方法构建,二者的数值也相同,只是二者的公式表达形式不同而已。值得注意的是,式(2)的目的是为了获得一个加权 COP_c,故其求得的 IPLV 的单位是 kW/kW;而式(9)的含义是机组的总制冷量与总耗电量之比,故其求得的 SPLV 的单位是 kW·h/(kW·h),这也体现了二者的本质区别。

2.3 SPLV 与机组全年电耗的关系分析

表 1 提供了 X,Y 两台名义制冷量相同的冷水机组在实际运行中的实测性能和运行时间数据。

表 1 X,Y 冷水机组的性能参数比较

运行参数				X 机组的性能参数			Y 机组的性能参数		
机组负荷率/ %	制冷量/ kW	运行时间/ h	总制冷量/ (kW·h)	COP/ (kW/kW)	功率/kW	耗电量/ (kW·h)	COP/ (kW/kW)	功率/kW	耗电量/ (kW·h)
100	1 758	30	52 740	5.16	341	10 230	6.84	257	7 710
75	1 319	1 260	1 661 940	6.96	195	245 700	7.75	168	211 680
50	879	1 350	1 186 650	9.25	95	128 250	8.11	107	144 450
25	440	360	158 400	8.45	52	18 720	6.56	67	24 120
实际运行性能	冷水机组全年总制冷量 3 059 730 kW·h			全年总耗电量 396 038 kW·h			全年总耗电量 392 620 kW·h		
	全年总制冷量/全年总耗电量			7.73			7.79		
季节性能指标	按式(11)计算的 SPLV/(kW·h/(kW·h))			7.72			7.79		
	按式(10)计算的 IPLV/(kW/kW)			7.89			7.81		
	按式(12)计算的 IPLV/(kW/kW)			7.99			7.73		

采用三种理念的性能指标的计算结果如表 1 所示。可以看出,在全年制取的总制冷量相同的条件下,机组 X 的全年耗电量(396 038 kW·h)高于机组 Y(392 620 kW·h),可以认为机组 Y 更为节能,该结果与 SPLV 的大小 (SPLV_X = 7.72, SPLV_Y = 7.79)具有一致性。然而,按照式(10)计算出的机组 X 的 IPLV_X(=7.89)高于机组 Y 的 IPLV_Y(=7.81),按照式(12)计算出的 IPLV 也是机组 X(IPLV_X = 7.99)高于机组 Y(IPLV_Y = 7.73),可见,无论式(2)中的系数采用相对时间比还是相对负荷小时数,所计算出的 IPLV 大小都不一定与全年耗电量呈负相关关系,即未能反映“IPLV 大更节能”的期望。

综上所述,季节部分负荷性能系数 SPLV 能更客观、有效地反映机组的全年能耗水平。

3 制冷机房多台冷水机组联合运行时的 SPLV(N)

按照式(8)所述方法,构建 IPLV 或 SPLV 的加权系数 a,b,c,d,其具体数值为 a=0.017,b=0.543,c=0.388,d=0.052。那么,IPLV 和 SPLV 表达式分别为

$$IPLV = 0.017A + 0.543B + 0.388C + 0.052D \tag{10}$$

$$SPLV = \frac{1}{\frac{0.017}{A} + \frac{0.543}{B} + \frac{0.388}{C} + \frac{0.052}{D}} \tag{11}$$

IPLV 最初被提出时,系数 a,b,c,d 是根据相对时间比计算得出的^[1],后来标准修订时改为根据相对负荷小时数计算^[2]。若按照相对时间比计算, a=0.01,b=0.42,c=0.45,d=0.12,则 IPLV 表达式为

$$IPLV = 0.01A + 0.42B + 0.45C + 0.12D \tag{12}$$

机组的性能评价离不开机组的运行特征或方式。当制冷机房中有多台冷水机组时,则需根据机组的实际运行方式和每台机组的性能来评价多台机组联合运行时的全年运行性能(不包括水侧的能耗)。

3.1 机组群的运行方式

制冷机房中最常见的冷水机组运行方式有 2 种:1) 所有机组均开启,且同步调节容量;2) 台数控制,使实际开启的机组台数尽可能少,开启的机组尽可能运行于高负荷率区域。

对于方式 1,无论制冷机房中有多少台机组,每台机组的输出冷量都与建筑冷负荷同步变化,机组群像 1 台容量更大的单机组一样进行容量调节,因此,机组群可以按照单机组的性能评价方法进行评价。但是,由于机组全部开启,在低负荷工况下,尽管有些冷水机组具有很高的 COP_c,却因冷

却水系统和冷水系统的输配能耗和风机能耗不能有效地降低,导致整个空调系统的性能系数(即系统性能系数 COP_{cs})很低,因此,这种运行方式在高负荷率时可行,但在低负荷率时则很少应用,而更多采用台数控制方式。

方式 2 是最为常见的制冷机房冷水机组的运行模式,每台机组的负荷率 LR 与建筑负荷率 BLR 不再同步变化。

下面将重点探讨采用台数控制模式时机组群联合运行的季节性能评价问题。为分析方便,给出如下假设:1) 建筑中选用了 N 台相同的冷水机组(即每台机组的容量和性能曲线相同);2) 建筑的设计负荷与 N 台冷水机组(不包括备用机组)的名义制冷量总和相等;3) 当有 $n(n \leq N)$ 台机组同时运行时,各台机组的负荷率 LR 相同。

3.2 机组群 $SPLV(N)$ 的推导过程

3.2.1 机组群 $SPLV(N)$ 的公式形式

多台机组联合运行时,将机组群看作 1 台大容量机组,故仍可采用 $SPLV$ 指标评价其季节运行性能。对于采用 N 台冷水机组的机组群,其 $SPLV$ 可以用 $SPLV(N)$ 来表示,它同样具有单台机组的 $SPLV$ 表达形式,即

$$SPLV(N) = \frac{1}{\frac{a}{A_N} + \frac{b}{B_N} + \frac{c}{C_N} + \frac{d}{D_N}} \quad (13)$$

式中 A_N, B_N, C_N, D_N 分别为建筑负荷率 $BLR = 100\%, 75\%, 50\%$ 和 25% (但机组负荷率 LR 不一定与此相等)对应于式(2)中 A, B, C, D 测试工况下机组群的性能系数; a, b, c, d 分别为 A_N, B_N, C_N, D_N 的权重系数,与单台冷水机组 $SPLV$ 计算式中的权重系数相同。

$SPLV(N)$ 相当于包含了机组群运行模式和单台机组性能的 1 台大容量机组的 $SPLV$,故式(13)中 A_N, B_N, C_N, D_N 所对应的测试工况(冷凝环境温度,即冷却水或室外空气干球温度)应与单台机组在对应负荷率下的测试工况相同。设单台机组在负荷率 $LR = 100\%, 75\%, 50\%, 25\%$ 时的冷凝环境温度分别为 $t_{100}, t_{75}, t_{50}, t_{25}$ (具体数值参照相关标准^[2-4])。只要获得这 4 个温度条件下机组群的性能系数 A_N, B_N, C_N, D_N ,即可采用式(13)计算出机组群的 $SPLV(N)$ 。

3.2.2 不同建筑负荷率下冷水机组对应工况条件

当制冷机房中有 N 台(≥ 2 台)冷水机组时,一般制冷机房将根据建筑负荷率 BLR 的大小启停部分冷水机组,并在满足需求制冷量的前提下,始终运行最少的机组台数 n 。即,当建筑负荷率为 BLR ,且 $N \times BLR$ 为整数时,则开启 $(N \times BLR)$ 台机组;若 $N \times BLR$ 不为整数,则开启 $([N \times BLR] + 1)$ 台机组,也即

$$n = \begin{cases} N \times BLR, & \text{当 } N \times BLR \text{ 为整数} \\ [N \times BLR] + 1, & \text{当 } N \times BLR \text{ 不为整数} \end{cases} \quad (14)$$

式中的中括号表示取整运算符。

此时,投入运行的冷水机组的实际运行负荷率均为

$$LR = \frac{BLR \cdot N}{n} \quad (15)$$

将式(15)代入式(14),得

$$LR = \frac{BLR \cdot N}{N \times BLR \text{ 或 } [N \times BLR] + 1} \quad (16)$$

式中 中括号表示取整运算符。

一般而言,一个制冷机房中的冷水机组很少超过 5 台(备用机组除外),故当建筑负荷率为 BLR 时,对于布置 $N(=2, 3, 4, 5)$ 台相同冷水机组的制冷机房,其冷水机组的运行台数、实际负荷率如图 2 及表 2 所示。在图 2 中,用横线表示机组运行的台数 n ,图中对应的斜线表示该机组在对应建筑负荷率 BLR 下的机组负荷率 LR 。

表 2 在布置 N 台冷水机组的制冷机房中,机组的实际运行台数 n 、负荷率 LR 及冷凝环境温度 t_w

建筑负荷率 $BLR/\%$	100				75				50				25			
冷凝环境温度 t_w	t_{100}				t_{75}				t_{50}				t_{25}			
制冷机房布置的机组台数 N	机组运行台数 n 和实际运行负荷率 LR															
	n		$LR/\%$		n		$LR/\%$		n		$LR/\%$		n		$LR/\%$	
单台机组	1	1	100	1	75	1	50	1	25							
多台机组	2	2	100	2	75	1	100	1	50							
	3	3	100	3	75	2	75	1	75							
	4	4	100	3	100	2	100	1	100							
	5	5	100	4	94	3	83	2	63							

3.2.3 不同建筑负荷率下冷水机组的性能系数

基于上述分析,式(13)中建筑负荷率 BLR 分别为 $100\%, 75\%, 50\%, 25\%$ 时,机组群的性能系数分别为 A_N, B_N, C_N, D_N ,对应的冷凝环境温度 t_w 分别为 $t_{100}, t_{75}, t_{50}, t_{25}$ 。此时,投入运行的机组的性能系数 COP_c 取决于对应建筑负荷率 BLR 下的冷凝环境温度 t_w 和各机组的负荷率 LR 下的性能参数,将此时机组的性能系数记为 COP_{LR, t_w} 。

评价各种不同台数冷水机组群的季节部分负

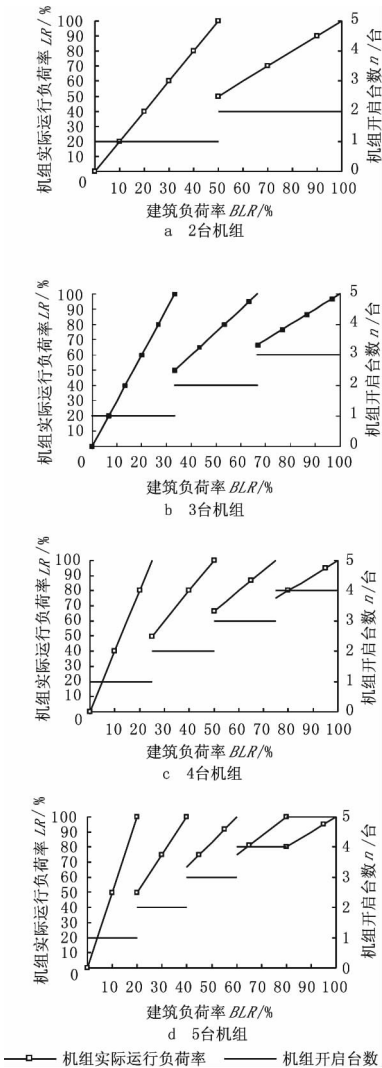


图2 不同台数机组群的实际运行状态

荷性能 $SPLV(N)$, 需要不同冷凝环境温度 t_w 和不同机组负荷率 LR 组合下的机组群性能系数, 在如此众多的工况点测试机组性能, 耗费巨大, 也不现实, 故需优选数量较少且能反映机组性能特征的测试工况点, 以获得更为准确的机组变工况性能。

参考 APF (annual performance factor) 评价体系^[5], 在相同冷凝环境温度 t_w 下, 将负荷率在 50%~100% 之间的机组性能系数 COP_{LR,t_w} 设定为负荷率 LR 的线性函数, 如图 3 所示。这样, 则只需 2 个点的性能系数即可通过线性差值计算出此负荷率段的任意负荷率 LR 下的性能系数 COP_{LR,t_w} , 即

$$COP_{LR,t_w} = COP_{50,t_w} + \frac{LR - 50\%}{100\% - 50\%} \cdot (COP_{100,t_w} - COP_{50,t_w}) \quad (17)$$

$$\text{或 } COP_{LR,t_w} = COP_{75,t_w} + \frac{LR - 75\%}{100\% - 75\%} \cdot (COP_{100,t_w} - COP_{75,t_w}) \quad (18)$$

式(17), (18)中 $COP_{50,t_w}, COP_{100,t_w}$ 分别表示在冷凝温度 t_w 下, 负荷率 50%, 100% 时机组的性能系数。

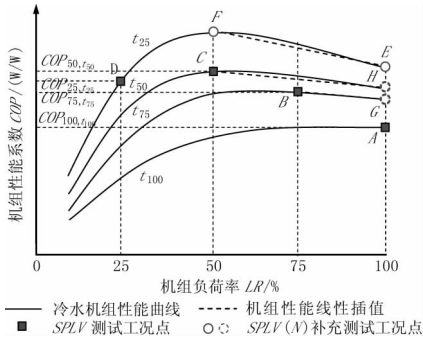


图3 冷水机组的性能曲线及其性能评价示意图

根据式(17), (18)计算 A_N, B_N, C_N, D_N , 需在单台机组 $SPLV$ 评价的 A, B, C, D 4 个测试工况点(也是现行的 $IPLV$ 测试工况)的基础上, 补充 E, F, G, H 4 个测试工况点, 参见图 3 和表 3。

表3 冷水机组 $SPLV$ 性能评价测试工况点

测试点	机组运行负荷率/%	冷凝环境	备注
		温度	
单台机组	A	100 t_{100}	必测工况(即现行的 $IPLV$ 测试工况 ^[3-5,11])
SPLV测 试工况点	B	75 t_{75}	
	C	50 t_{50}	
	D	25 t_{25}	
SPLV(N)	E	100 t_{25}	补充必测工况
补充测试 工况点	F	50 t_{25}	补充必测工况
	G	100 t_{75}	补充选测工况
	H	100 t_{50}	补充必测工况

一般来说, 在正常使用范围内, 冷水机组的性能系数 COP_c 与冷却水进水温度 t_w 近似呈线性关系^[17-18], 故对于 100% 负荷率时, 可以只补测 E 工况点的 COP_c , G, H 2 个工况下的 COP_c 可以通过 A, E 两点的数值进行线性插值获得。基于上述分析, 每台机组至少需要测试 A, B, C, D, E, F 6 个工况点的 COP_c , 才可获得机组群的 A_N, B_N, C_N, D_N , 继而计算出机组群的季节部分负荷性能系数 $SPLV(N)$ 。

3.3 案例分析

表 4 示出了 3 台水冷式冷水机组在 $A \sim H$ 8 个工况点的实测性能系数 COP_c 。其中, 机组 1 和机组 3 是采用导流叶阀开度调节容量的离心机组; 机组 2 是在机组 1 基础上加装调节压缩机转速的变频器后的离心机组, 其容量采用转速与导流叶阀开度联合调节。3 台机组的性能曲线如图 4 所示。

表 4 3 台冷水机组在不同工况下的性能系数 COP_c 。

工况	A	B	C	D	E	F	G	H
机组 1	5.55	6.05	5.64	4.91	6.42	6.68	5.93	6.16
机组 2	5.36	6.92	7.90	9.16	7.61	10.07	5.86	6.55
机组 3	6.38	7.33	7.29	5.96	8.06	7.90	7.02	7.34

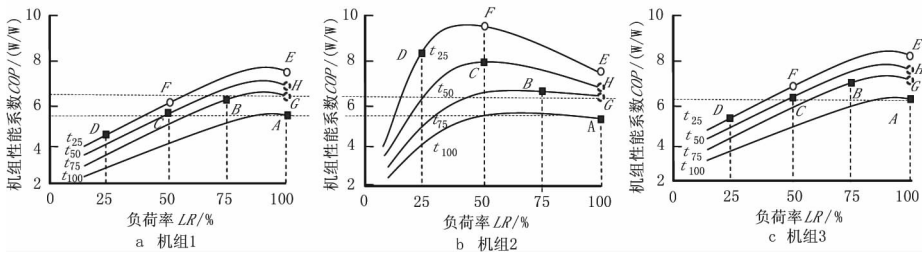


图 4 3 台冷水机组样机的性能曲线

由于变频器存在一定的能耗,故机组 2 的名义 $COP_c (=5.36)$ 比机组 1 ($COP_c =5.55$) 降低了约 3.4%; 机组 3 是定转速高效离心机组,其名义 $COP_c (=6.38)$ 比机组 1 高约 15%。当制冷机房中分别设置 N 台上述 3 种机组时,其机组群的季节部分负荷性能系数 $SPLV(N)$ 即可方便求出。

根据文献[5]给出的南京地区办公建筑的冷负荷线和空调制冷运行室外温度小时数分布数据,可由式(8)计算出冷水机组在南京地区办公建筑中使用时的 $SPLV$ 表达式的加权系数,分别为 $a=0.054, b=0.502, c=0.265, d=0.178$ 。

表 5 给出了 $N=1\sim 5$ 时计算得到的 $SPLV(N)$ 值。从表中可以看出:

表 5 不同台数的机组群的 $SPLV(N)$ 值					
单台机组	多台机组				
	$N=1$	$N=2$	$N=3$	$N=4$	$N=5$
机组 1	5.69	6.16	6.22	6.05	6.13
机组 2	7.38	7.10	7.45	6.27	6.75
机组 3	6.98	7.37	7.57	7.24	7.38

注:当 $N=1$ 时,其 $SPLV(N)=SPLV_c$ 。

1) 当制冷机房仅采用 1 台机组时,选用性能曲线形状类似机组 2 的冷水机组(如转速+导流叶阀开度联合调节容量的离心机组),更能发挥低负荷率时的高 COP_c 优势,其 $SPLV$ 较大。

2) 当制冷机房采用多台冷水机组时,① 加装变频器的机组 2 的 $SPLV$ 得到大幅提高,其机组群的 $SPLV(N)$ 超过机组 1,但随着机组台数的增多,这种优势有逐渐削弱的趋势;② 当选用名义 COP_c 更高的机组 3(导流叶阀开度调节容量的定速离心机组)时,虽然单台机组的 $SPLV (=6.98)$ 低于机组 2 ($SPLV =7.38$),但其 $SPLV(N)$ 却比由机组 2 组成的机组群高,其原因在于机组 2 在低

负荷率时的高 COP_c 。未能在机组群中发挥效益,反而机组 3 在高负荷率时具有较高 COP_c 的优势得到充分体现。如果进一步提高机组 3 的名义 COP_c ,则可使其 $SPLV$ 达到机组 2 的 $SPLV$ 水平,此时机组 3 的 $SPLV(N)$ 将更高于机组 2。

基于上述分析可知,若不考虑其他因素,对于相同 $SPLV$ 的调速型和定速型冷水机组而言,在需要多台冷水机组的制冷机房中,宜选用定速型机组;而在单台冷水机组的制冷机房中,选用调速型冷水机组更为高效,这是由机组性能曲线的形状和机组运行模式决定的。因此,在实际工程中,应综合考虑冷水机组的性能特点和制冷机房中机组群的运行调节方式,选择适宜的冷水机组类型及其台数。

4 结论

4.1 根据“ $SPLV=全年运行能耗/全年制冷量$ ”的物理意义推导出 $SPLV$ 的计算公式,能更为真实地反映冷水机组的性能水平。该性能指标沿用了现行 $IPLV$ 的测试工况点、部分负荷性能系数(A, B, C, D)和加权系数(a, b, c, d),故其构建极为方便。

4.2 分析制冷机房中采用多台冷水机组(机组群)时的“台数控制”特点,根据单台冷水机组的 $SPLV$ 的构建思想,提出用 $SPLV(N)$ 指标来评价机组群的全年运行性能,并推导出 $SPLV(N)$ 的计算公式;在此基础上,分析指出计算 $SPLV(N)$ 需在机组 $SPLV$ 测试工况点(即现行 $IPLV$ 测试工况点)的基础上补充 2 个必测工况点(在 25% 负荷率对应的冷凝环境温度条件测试 50% 和 100% 两个负荷率下的性能系数),以获得计算所需的性能参数。

4.3 在多机组制冷机房中,机组群的 $SPLV(N)$ 与冷水机组性能系数曲线形状和机组的运行方式有着

密切关系。对于具有相同 $SPLV$ 的调速型和定速型冷水机组而言,定速型机组更适宜用于多机组制冷机房,能发挥其高负荷率区域具有高 COP 的优势;而调速型机组则适宜用于单台机组的制冷机房。

本文仅讨论了多台相同机组构建的机组群的 $SPLV(N)$ 的计算方法,今后尚需对不同容量冷水机组构成的机组群进行研究,分析其 $SPLV(N)$ 描述方法,以拓展其适用范围。

参考文献:

- [1] American Air-Conditioning and Refrigeration Institute. ARI 550-1992 Centrifugal and rotary screw water-chilling packages[S]. Arlington, VA, USA, 1992
- [2] American Air-Conditioning and Refrigeration Institute. ARI 550/590-1998 Water chilling packages using the vapor compressor cycle [S]. Arlington, VA, USA, 1998
- [3] 约克(无锡)空调冷冻设备有限公司,合肥通用机械研究院,特灵空调系统(江苏)有限公司,等. GB/T 18430.1—2007 蒸汽压缩循环冷水(热泵)机组 第1部分:工业或商业用及类似用途的冷水(热泵)机组[S]. 北京:中国标准出版社,2007
- [4] 浙江盾安人工环境设备股份有限公司,合肥通用机械研究院,珠海格力电器股份有限公司,等. GB/T 18430.2—2008 蒸汽压缩循环冷水(热泵)机组 第2部分:户用和类似用途的冷水(热泵)机组[S]. 北京:中国标准出版社,2008
- [5] 合肥通用机械研究院,清华大学,南京五洲制冷集团有限公司,等. GB/T 17758—2010 单元式空气调节机[S]. 北京:中国标准出版社,2010
- [6] 贾晶. 变频冷水机组特性及其对 $IPLV$ 的影响分析[C]//2011 中国制冷学会学术年会. 南京,2011

- [7] 贾晶,施敏琪. $IPLV$ 和 COP 对冷水机组全年能耗的影响[J]. 制冷与空调,2012,12(1):89-92,97
- [8] 贾晶,赵锡晶,李杰. 用 $IPLV/NPLV$ 值评估冷水机组全年能耗的局限性[J]. 暖通空调,2010,40(3):19-22
- [9] 韩树衡. 对如何正确应用综合部分负荷系数 $IPLV$ 之我见[J]. 制冷与空调,2005,5(6):80-82
- [10] 张明圣. 冷水机组产品国家标准的修订及 $IPLV$ 应用的探讨[J]. 制冷学报,2006,27(4):57-62
- [11] 中国建筑科学研究院,中国建筑业协会建筑节能专业委员会. GB 50189—2005 公共建筑节能设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2005
- [12] 周辉. 办公建筑空调能耗指标研究[D]. 上海:同济大学,2005
- [13] Chan K T, Yu F W. Part load efficiency of air-cooled multiple-chiller plants [J]. Building Serv Eng Res Technol,2002,23(1):31-41
- [14] American Air-Conditioning, Heating and Refrigeration Institute. ARI 550/590-2011 Performance rating of water-chilling and heat pump water-heating packages using the vapor compression cycle[S]. Arlington, VA, USA, 2011
- [15] 郎四维. 公共建筑节能设计标准宣贯辅导教材[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005
- [16] 王嘉,谢峤,石文星,等. 低温空气源热泵(冷水)机组的 $IPLV(H)$ 评价方法研究[J]. 制冷学报,2008,29(6):9-14
- [17] 白贵平,冀兆良,苏宇贵. 水环热泵在夏热冬暖地区应用的节能性分析[J]. 制冷空调与电力机械,2005,26(2):34-38
- [18] 张秀平,田旭东,钟根仔,等. 水冷冷水机组能效特性变化规律的研究[J]. 流体机械,2008,36(10):54-57

• 会讯 •

第4届既有建筑改造技术交流研讨会召开

为了推动既有建筑绿色化改造,促进绿色建筑发展,由中国建筑科学研究院主办的第4届既有建筑改造技术交流研讨会于2012年6月28—29日在北京召开。住房和城乡建设部建筑节能与科技司武涌巡视员、科学技术部社会发展科技司陈其针副处长、北京市市政市容管理委员会柴文忠副主任、天津市国土资源和房屋管理局路红副局长出席会议并分别致辞。来自全国多家科研机构、大专院校、社会团体、设计院、建筑公司、施工企业、生产厂商、新闻媒体等单位的专家和代表共300余人参加了研讨会。

本届研讨会以“十二五”国家科技支撑计划项目“既有建筑绿色化改造关键技术研究示范”为依托,以“推动建

筑绿色改造,提升人居环境品质”为主题,分设了绿色改造、节能改造、标准政策三个分会场。武涌巡视员、中国建筑科学研究院王俊院长、路红副局长作大会主题报告,30多位既有建筑改造和绿色建筑领域的国内外专家作学术报告,与参会人员共同交流了既有建筑改造的技术、标准、政策、案例等成果与经验,探讨存在的问题和解决的措施。

为了促进既有建筑绿色化改造的“产、学、研、用”相结合,研讨会还同时设立了成果及产品展示区,展示既有建筑改造、绿色建筑方面的成果、专利、产品和示范工程等。

(叶凌)