

文章编号: 0253-4339(2008)03-0010-08

## 论多联式空调(热泵)系统的季节性能评价方法

石文星 赵伟 王宝龙

(清华大学建筑技术科学系 北京 100084)

**摘要** 多联式空调(热泵)系统(简称多联机)是多末端直接蒸发式空调系统,其多末端结构和不同控制方法决定了其特殊的部分负荷特性。以制冷运行为例,阐述影响多联机性能的因素及其影响关系,给出各种控制方式下多联机在恒定室外温度条件下的部分负荷“性能域”概念图,以及性能域随室外温度的变化趋势;根据多联机的部分负荷特性和变工况特性,指出目前的多联机产品性能评价方法尚存在的不足,进而提出多联机制冷季节评价指标SEER或IPLV(C)的评价方案;建议今后多联机采用APF评价体系更能体现我国标准体系的延续性和系统性。

**关键词** 热工学;多联式空调(热泵)系统;负荷率;仿真;性能评价

中图分类号: TB657.2; TU831.1

文献标识码: A

## Discussion on Performance Evaluation of Multi-connected Air-conditioning (Heat Pump) Systems

Shi Wenxing Zhao Wei Wang Baolong

(Department of Building Science, Tsinghua University, Beijing, China, 100084)

**Abstract** The Multi-connected Air-conditioning (MCAC) system is a direct-expansion air-conditioning system, and its multi-terminal structure and different control methods determine the specific part load performance. The factors affecting the part load performance of the MCAC system were examined under cooling condition, and through simulation, the “performance domain” of the MCAC system using different control methods was presented to describe the COP distribution. The shortcomings of the conventional evaluation methods were analyzed based on the part load performance and variable condition characteristics of the MCAC system. In addition, the improved SEER and IPLV(C) evaluation methods for the MCAC system were proposed. Our results indicate that the APF evaluation method can be used in the MCAC system evaluation system.

**Keywords** Pyrology; Multi-connected Air-condition (heat pump) System (MCAC system); Load ratio; Simulation; Performance evaluation

多联式空调(热泵)系统(简称:多联机)是一类变容量调节风冷式直接蒸发式空调系统,目前已成为中、小型商用和民用建筑最为活跃的中央空调系统形式之一。虽然多联机于1982年起源于日本,但其产品标准制定却经历了相当曲折的过程<sup>[1]</sup>,直到2006年才形成其行业标准JRA 4048<sup>[2]</sup>;而我国多联机从20世纪90年代后期才开始起步,但其产业发展非常迅速,至2006年我国多联机的年产值已达100亿元人民币<sup>[3]</sup>,早在2002年我国就制定了多联机产品国家标准GB/T 18837<sup>[4]</sup>,对于规范行业行为,促进产品技术进步起到了重要作用,并得到世界各国的关注。

目前世界各国对多联机产品标准的研究和建设都非常重视,其公认观点是采用季节性能系数

作为其性能评价指标。如日本采用CSPF(Cooling Seasonal Performance Factor)、HSPF(Heating Seasonal Performance Factor)和APF(Annual Performance Factor)<sup>[2]</sup>、中国采用制冷与制热IPLV(Integrated Part Load Value)<sup>[4]</sup>、美国则建议采用SEER(Seasonal Energy Efficiency Ratio,也就是CSPF)<sup>[5]</sup>。无论采用哪种指标,其核心都必须研究三个本质问题:1)典型建筑的冷热负荷分布(或曲线),2)多联机在典型建筑中的制冷与制热运行时间分布,3)多联机的部分负荷性能及其测试方法<sup>[6]</sup>。其中,问题1)与问题2)与多联机的应用地域、气候特征、建筑结构、使用习惯、消费水平等因素具有直接关系,故对于不同国家而言,在其标准制定时都必须结合本国国情,提出合理的数据或曲

收稿日期: 2008年3月30日

线; 问题3)对于全世界而言都是共同面临的问题, 其研究成果可以相互借鉴和引用。然而, 国内外对多联机的广义部分负荷特性研究尚不充分, 故所提出的性能测试方法还有待于深入探讨和进一步改进。

这里将主要围绕“3)多联机的部分负荷性能及其测试方法”问题进行分析, 以制冷季节运行性能为例, 指出目前主要的产品标准中尚存在的不足, 进而提出采用CSPF或IPLV(C)作为评价指标时的多联机部分负荷性能测试工况点, 为我国多联机标准修订提供参考。

## 1 多联机的部分负荷特性

实际上, 多联机具有广义和狭义两种部分负荷特性, 广义部分负荷特性包括变工况特性和狭义部分负荷特性。变工况特性是指多联机COP、制冷量等性能参数随室内、外工况变化的规律; 而狭义部分负荷特性是指工况一定时多联机所服务的空调区域的负荷变化对其性能参数的影响规律。室外温度变化会导致空调区域的负荷变化, 多联机将根据总负荷的大小输出相应的制冷能力; 另一方面, 即使输出制冷能力相同, 但因各室内机的部分负荷类型(是否开机以及各室内负荷分布)不同将直接影响室内机的能力输出, 进而影响多联机的运行能效, 因此变工况和部分负荷类型均将影响多联机的广义部分负荷特性。下文在室外温度恒定条件下讨论的部分负荷特性属于狭义部分负荷特性, 简称“部分负荷特性”; 而外温变化导致多联机性能变化的特性称为变工况特性。

在变容量直接蒸发式空调系统中, 多联机和变频空调器等单室内机空调用制冷系统具有类似的变工况特性, 但具有不完全类似的部分负荷特性<sup>[1]</sup>。多联机的部分负荷具有三种类型: 1)全部或部分室内机满负荷运行(另一部分停机), 2)所有室内机均为部分负荷运行, 3)部分室内机满负荷运行+部分室内机部分负荷运行或停机。目前的研究大都是针对变工况特性和第1)类部分负荷特性开展的, 如文献[7]通过模拟和实验方法, 研究室内、外环境参数对单模块室外机多联机系统运行性能的影响规律, 指出当室内机运行台数一定时, 多联机系统的运行性能(如制冷量、系统能效比COP等)随室内、外环境工况变化的规律(即变工况特性)与单室内机变频空调器具有相同趋势; 文献[8]以产品样本给定的室内、外机组额定参数为基础, 考察由

单模块与多模块室外机多联机系统在室内机台数变化时的部分负荷性能, 指出室外模块机组并联得越多, 其COP随负荷率LR的变化曲线越平坦, 其结论对认识多联机的第1)类部分负荷特性很有帮助。

夏建军博士在比利时University of Liege建立实验室, 对一套多联机的实际运行性能进行了详细的测量, 给出了室内机通断(ON/OFF)控制和连续控制模式下多联机的部分负荷性能测量结果, 根据分析指出多联机的实际运行性能与多联机的控制方法有密切关系, 并发现在系统负荷率相同但室内机呈现不同负荷率组合时多联机的COP存在差异的特点<sup>[9]</sup>; 文献[1,10]通过仿真研究, 指出多联机在相同负荷率下存在COP差异是由于室内负荷存在不均匀性(导致多联机各室内机出力不均匀)和不同控制方法下多联机具有不同的部分负荷“性能域”所致。

### 1.1 影响多联机系统性能的因素

多联机具有多个室内机组, 诸多因素联合影响其性能, 图1示出了影响多联机性能的因素以及相互关系。其中, 工况条件(室内、外温度和相对湿度)对多联机性能的影响规律虽属于变工况特性, 但与其广义部分负荷特性具有直接关系。

当工况条件一定时, 各室内负荷的分布情况对系统性能产生一定的影响。多联机具有多个室内机组, 各室内的负荷不均匀性将直接决定着各室内机的能力输出及其分布情况, 决定着室内机组换热器的有效利用程度, 从而影响多联机的运行性能, 这正是多联机系统区别于变频空调器等单室内机空调系统的显著特点。而多联机的控制方法因厂家而异, 各种控制方法对系统性能的影响规律不尽相同, 故目前尚无清晰的结论。另外, 多联机室内和室外机风扇是否采用调速、变风量控制, 其耗电量也不相同, 故在一定程度上也影响到机组的整体性能。

### 1.2 多联机系统的部分负荷“性能域”

多联机的控制方法很多, 综合起来可分为室内机连续控制和室内机通断控制两大类, 而各类控制方法中, 室外机又有不同的控制方式。下面针对不同控制方法的多联机系统的部分负荷特性进行分析。

#### 1.2.1 室内机连续控制

文章以容量和结构相同的4台室内机与1台由变频压缩机驱动的单室外机模块构成的多联机系统

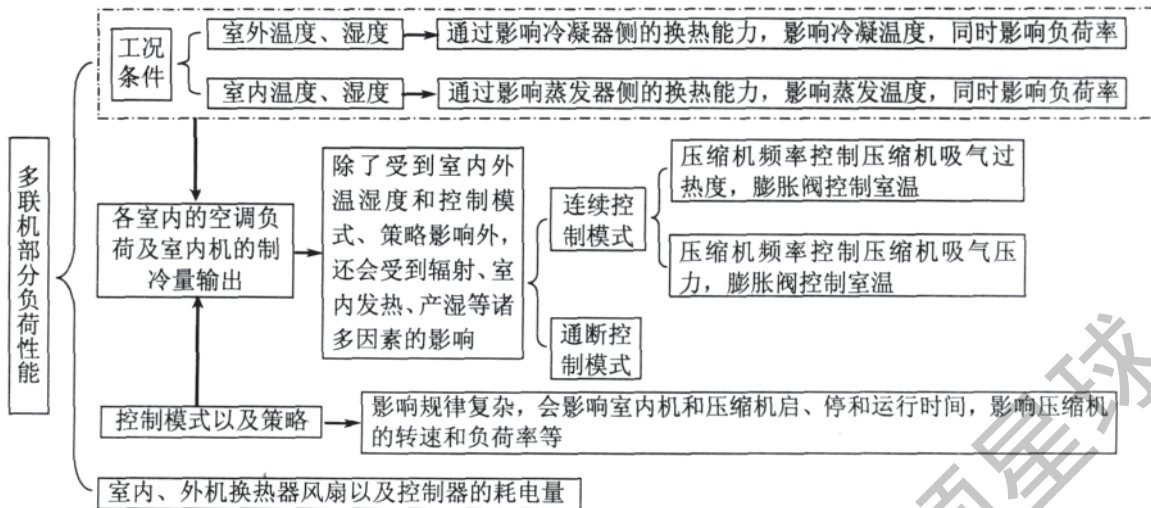


图1 影响多联机制冷运行性能的因素及其相互关系

Fig.1 Factors affecting COP and the relationships between the factors

为对象(其原理如图2所示), 利用仿真方法研究多联机系统的部分负荷运行特性。多联机采用R410A制冷剂, 其室内机采用连续控制模式(用室内机电子膨胀阀 $EV_i$ 开度控制其室温), 室外机分别采用恒定吸气过热度控制和恒定吸气压力控制两种方式, 各方式的主要控制参数如下:

1) 恒定吸气过热度控制(方式1): 室外电子膨胀阀全开, 风扇转速控制冷凝器出口过冷度为 $10^{\circ}\text{C}$ , 压缩机频率控制压缩机吸气过热度为 $5^{\circ}\text{C}$ ;

2) 恒定吸气压力控制(方式2): 室外电子膨胀阀全开, 风扇转速控制冷凝器出口过冷度为 $10^{\circ}\text{C}$ , 压缩机频率控制压缩机吸气压力为 $1\text{MPa}$ ( $7^{\circ}\text{C}$ 对应的饱和压力)。

基于前期的研究基础<sup>[12]</sup>, 编写计算程序, 研究不同室内负荷分布对多联机系统性能的影响。选用蒸气压缩循环冷水(热泵)机组标准<sup>[13]</sup>给定的IPLV(C)测试工况作为计算条件, 即室内温度 $t_{in}=27^{\circ}\text{C}$ , 相对湿度 $RH_{in}=50\%$ ; 室外温度 $t_{out}$ 分别为

$24.5^{\circ}\text{C}$ 、 $28^{\circ}\text{C}$ 、 $31.5^{\circ}\text{C}$ 、 $35^{\circ}\text{C}$ , 其中当 $t_{out}=35^{\circ}\text{C}$ 时称为名义制冷工况。

由于各室内机组完全相同, 故以室内机满负荷运行台数为1、2、3、4台(即开机率分别为25%、50%、75%、100%)分别对应多联机系统的25%、50%、75%、100%负荷率 $LR$ , 在此基础上连续改变多联机系统和各室内机的制冷量, 以此分析系统负荷率 $LR$ 、室内机负荷率 $LR_i$ 和开机率 $OR$ 等对多联机系统性能参数 $COP$ 的影响规律。

图3(a)示出了采用控制方式1的多联机系统制冷运行时 $COP$ (以与 $COP$ 完全等价的 $RCOP$ 来描述,  $RCOP=COP/COP_{\text{额定}}$ )随室内机运行台数 $i$ ( $i=1\sim 4$ , 但每台室内机的 $LR_i$ 同步变化)、室外温度 $t_{out}$ 和多联机系统负荷率 $LR$ 的变化趋势。从模拟结果可以清楚的看到: 采用该控制方式时, 多联机的部分负荷运行性能受各房间的负荷不均匀性影响很大, 当工况条件一定时, 其 $COP$ 分布表现为一个随 $LR$ 和 $LR_i$ 变化的“性能域”。图3(b)所示的曲边多边形(ABCDEFGA)35即为 $t_{out}=35^{\circ}\text{C}$ 时的“性能域”。在某一系统负荷率 $LR$ 时, 室内机运行台数不同, 压缩机通过改变运转频率调节压缩机系统压力, 以保证所运行的蒸发器面积都充分得到利用, 故运行台数多时, 蒸发器面积大故系统 $COP$ 也高; 当室内机开启台数一定时, 随系统负荷率的减小, 压缩机频率降低引起冷凝压力降低和蒸发压力升高以及因低频时压缩机的效率衰减明显, 使得 $COP$ 呈现出上凸抛物线形状。

基于控制方式2的多联机系统的部分负荷特性如图4所示。可以看出,  $LR$ 和 $t_{out}$ 对 $COP$ 的影响规律

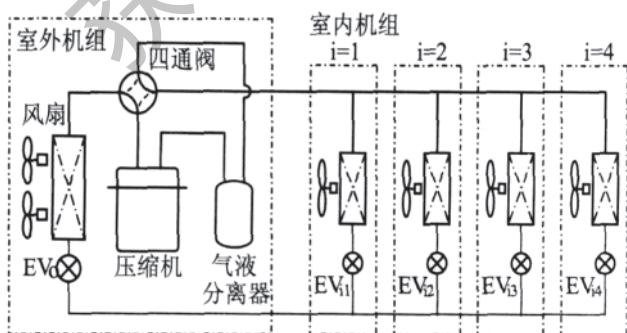
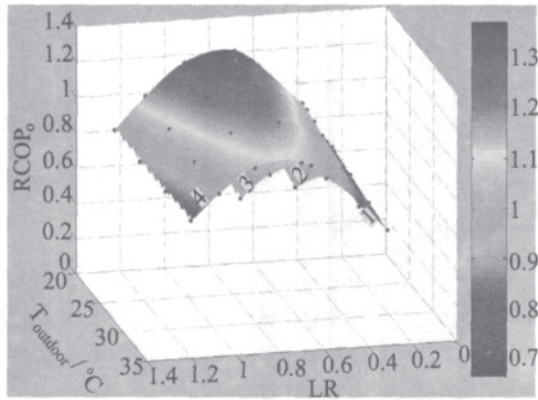


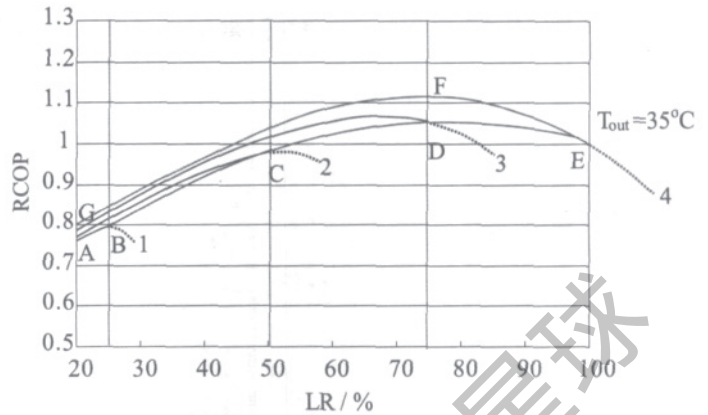
图2 多联机系统结构原理简图

Fig.2 Schematic diagram of the MCAC system



(a) 三维性能域

(a) Three-dimensional performance domain

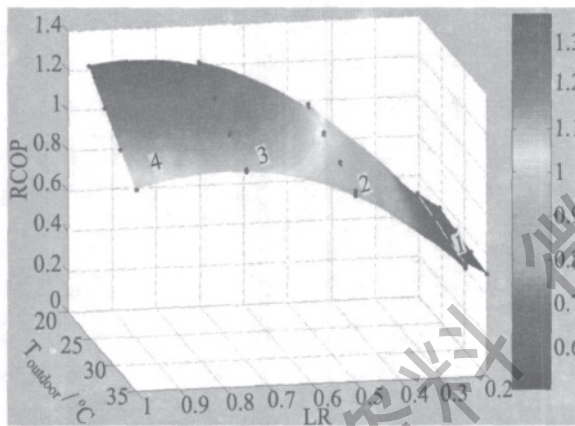


(b) 图(a)的 t<sub>out</sub>=35°C 截面图

(b) Cross section of t<sub>out</sub>=35°C

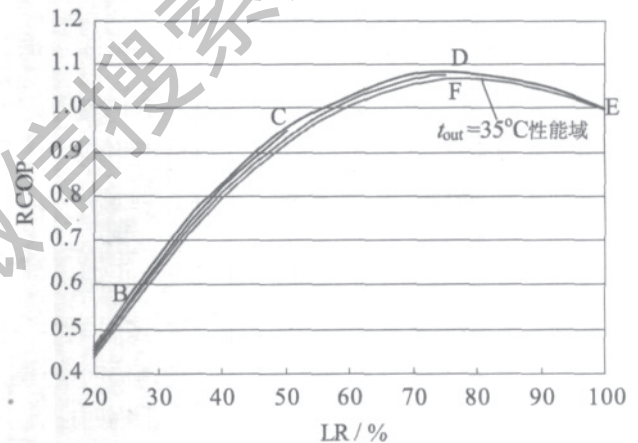
图3 室内机连续控制(方式1)多联机的部分负荷特性模拟结果 (t<sub>in</sub>=27°C, RH<sub>in</sub>=50%)

Fig.3 Simulation results of performance characteristic of MCAC under control method 1 (t<sub>in</sub>=27°C, RH<sub>in</sub>=50%)



(a) 三维性能域

(a) Three-dimensional performance domain



(b) 图(a)的 t<sub>out</sub>=35°C 截面图

(b) Cross section of t<sub>out</sub>=35°C

图4 室内机连续控制(方式2)多联机的部分负荷特性模拟结果 (t<sub>in</sub>=27°C, RH<sub>in</sub>=50%)

Fig.4 Simulation results of performance characteristic of MCAC under control method 2 (t<sub>in</sub>=27°C, RH<sub>in</sub>=50%)

与图3相同,在相同负荷率LR和t<sub>out</sub>条件下依然存在多个COP值,表明该控制方式的多联机仍然存在“性能域”,但随开机台数的变化COP的差异并不明显,换言之,其性能域的幅度变小,更接近于单室内机系统的性能特征。其主要原因是,当t<sub>out</sub>和系统LR一定时,电子膨胀阀实质上是在调节进入其室内机换热器内的制冷剂流量,使得制冷量的大小主要取决于室内机换热器面积的利用程度(剩余部分换热器管内为过热蒸气),从系统层面上看,采用恒定的吸气压力控制方式时,由于各室内机的蒸发压力基本恒定,一定的LR对应有相当的蒸发器有效利用面积,致使性能域变窄;不同COP之间的微小差异主要是由管道阻力和室内、外风扇耗功

存在差别所致。

### 1.2.2 室内机通断控制

室内机通断控制是指通过室内电子膨胀阀的启闭,使制冷剂流过或不流过室内换热器,在电子膨胀阀开启过程中,仍需正常控制室内换热器出口的过热度或过冷度的控制方法。

夏建军博士在比利时University of Liege实验室利用热平衡法和空气焓差法相结合的方法,对一套1拖5采用通断控制的多联机系统(制冷剂为R22)进行了大量实验,得出了不同负荷率条件下多联机系统的实测COP分布,如图5所示<sup>[9]</sup>。从图中可以看出,当LR=0.4时,系统的COP有多个不同的值,图

中的上下两条包络线，很好地说明了室内机启停控制多联机的部分负荷性能也存在有由包络线构成的性能域。

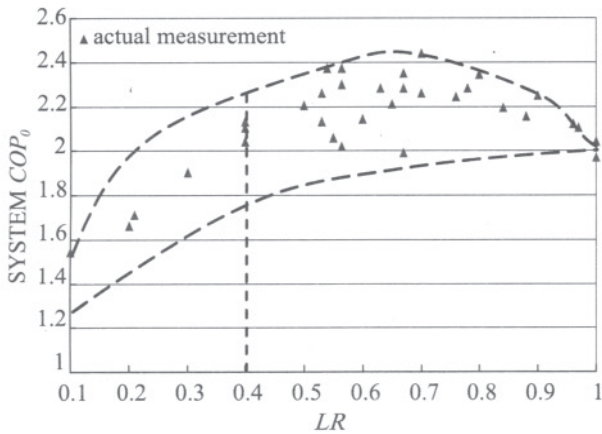


图5 基于通断控制的实验室的测量结果  
( $t_m=23^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{out}=30^{\circ}\text{C}$ )

Fig.5 Laboratory test results under ON/OFF control mode

该类多联机具有性能域特征也是由各室内负荷不均匀性导致的。采用通断控制时，多联机某时段的负荷率LR是该时段各时刻投入运行的室内机的制冷量统计平均值与系统的名义制冷量之比，即为该时段的平均系统COP，取决于该时段各室内负荷分布决定的室内机运行台数的变化。故多联机性能域的上包络虚线是给定工况条件下，系统最多开启台数时的稳态运行COP，下包络线为这些室内机中最少运行台数(极限时为0台运行)时的稳态运行COP，之间的区域是运行台数介于最少与最多之间的系统COP。COP的分布状况与所取时段的长短有关，时段越短其作用域的幅度越宽，时段越长其幅度越窄，更接近室内机连续控制多联机系统。从图中可以看出，当LR>60%时，实际系统的室内机启停概率减小，其能耗性能更接近于稳态运行工况；当LR<40%，实际系统的室内机运行台数变化更为频繁，甚至导致压缩机也频繁启停，使其能耗性能出现振荡现象，因启停损失增大，多联机系统的COP自然低下。

上述分析表明，当室内、外工况不变时，在不同控制方法下，多联机的部分负荷特性呈现出不同的特点，但无论采用何种控制方法，系统COP都不单是一条随LR变化的曲线，而是一个与LR和与室内负荷不均匀性有关的LR<sub>1</sub>的变化区域，即存在有“性能域”。

## 2 多联机性能评价方法分析

在多联机性能评价中，无论对采用何种控制方法的多联机，通常都是以测量有限个工况条件下多联机的稳定运行性能来标定多联机的变工况和部分负荷运行性能的，故其测试工况点的选取应尽可能体现多联机“性能域”这一特征，以便更为客观地反映多联机的实际运行性能。目前行业内最为关注的多联机标准有JRA 4048和GB/T 18837，这两个标准在不同程度上都存在有对多联机的部分负荷特性和变工况特性关注不足的缺点，下面将对此进行分析，并提出其改善方案。

### 2.1 多联机产品典型标准简介

#### 2.1.1 日本标准 JRA 4048

日本的多联机标准包含在单元式空气调节机标准内<sup>[2]</sup>。规定在名义制冷量小于28kW时采用2台和1台满负荷运行的室内机分别测量其名义制冷能力 $\Phi_c$ 和中间制冷能力 $\Phi_{cm}$ (称为1/2能力)及其耗电量 $P_{cr}$ 和 $P_{cm}$ ，即以“两点法”测量多联机的性能。以图3(B)为例，标定工况点为 $t_{out}=t_b=35^{\circ}\text{C}$ 的性能域中 $E_{35}$ 、 $C_{35}$ 两点(室内干/湿球温度=27/19 $^{\circ}\text{C}$ ，与图6中实心圆点对应)，再通过变工况特性修正系数(如： $\Phi_{cr(29)} / \Phi_{cr} = \Phi_{cm(29)} / \Phi_{cm} = 1.015$ ， $P_{cr(29)} / P_{cr} = P_{cm(29)} / P_{cm} = 0.94$ ，这些修正系数是基于日本产品统计平均得出的)计算出 $t_{out}=t_{c0}=29^{\circ}\text{C}$ 时的制冷量和耗电量(图6中的空心圆点)，并考虑低负荷率时压缩机的启停损失，构造多联机的 $\Phi_c(t_j)$ 和 $P_c(t_j)$ 模型，结合典型建筑的负荷曲线 $BL_c(t_j)$ 和各室外温度 $t_j$ 下的运行时间分布 $n_j$ ，计算出多联机的制冷季节性能系数CSPF(或SEER)。即

$$CSPF = \frac{CSTL}{CSTE} \quad (1)$$

式中：CSTL制冷季节的总制冷量(kW·h)；  
CSTE制冷季节的总耗电量(kW·h)。

根据上述分析可以看出，JRA 4048标准具有以下特点：

1) 测试方法简单、适用。在同一室外温度(35 $^{\circ}\text{C}$ )下测量名义制冷能力、中间制冷能力及其耗电量 $P_{cr}$ 和 $P_{cm}$ ，利用变工况特性修正系数换算出29 $^{\circ}\text{C}$ 时制冷量和耗功率。该方法有利于缩短测试工况的制备时间，减少测试工作量；

2) 完全借鉴变频空调器的SEER测试方法，将多联机假想为一拖二的变频空调器，通过两个工况

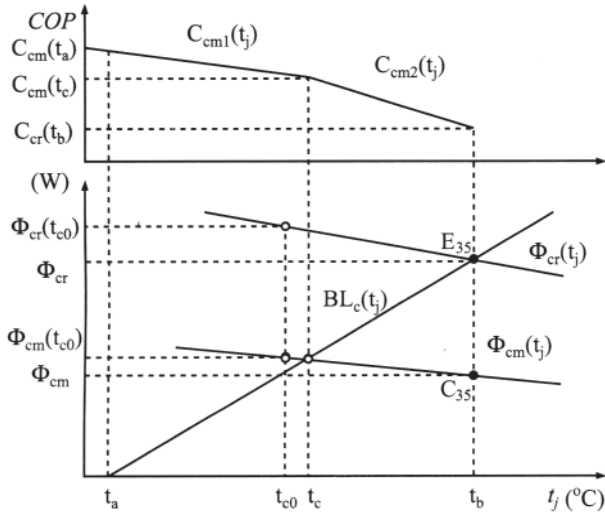


图6 CSPF评价用典型建筑负荷线和多联机性能模型  
Fig.6 Building load and COP mode of CSPF evaluation method

点的测量值和变工况特性修正系数来描述多联机的变工况和部分负荷性能。只考虑了变工况特性和前文所述多联机的第1)类部分负荷,而未考虑第2)、3)类部分负荷。以性能域的下包络线上的点表征该负荷率下多联机的性能,对于采用方式2的室内机连续控制多联机而言误差较小,而对于采用方式1的多联机,则计算结果偏小;由于测试中考虑了低负荷率下的压缩机启停损失,室内机采用通断控制方式多联机的测试结果可能比较准确;

3)利用间接(换算)方法测量29°C时的性能不可能体现各台产品之间的差异,而且仅考虑35°C和29°C两个温度点,难以反映产品大范围的变工况运行性能和技术水平的差别。

### 2.1.2 中国标准 GB/T 18837

在我国GB/T 18837标准中,采用IPLV(C)评价多联机系统的制冷运行性能<sup>[4]</sup>。通过改变满负荷运行的室内机台数来测量多联机在4种负荷率LR<sub>i</sub>(其中1、2、3、4分别代表100%、75%、50%和25%)下的COP<sub>i</sub>,进而根据给定的各部分负荷率LR<sub>i</sub>下的部分负荷系数PLF<sub>i</sub>计算出多联机的IPLV(C)。即

$$IPLV(C) = (PLF_1 - PLF_2)(COP_1 + COP_2)/2 + (PLF_2 - PLF_3)(COP_2 + COP_3)/2 + (PLF_3 - PLF_4)(COP_3 + COP_4)/2 + (PLF_4)(COP_4) \quad (2)$$

GB/T 18837是国际上第一个多联机产品标准,倍受行业关注。该标准具有以下特点:

1)针对4个负荷率测试多联机的性能,更能准确地描述多联机的部分负荷性能、反映多联机的技术水平;将夏季平均室外温度( $t_{out}=27^\circ\text{C}$ )作为制冷运行时的室外侧测试工况,可以缩短多联机性能测试时间,提高测试效率;

2)与日本标准类似,只考虑了多联机的第1)类部分负荷;

3)用恒定室外温度( $t_{out}=27^\circ\text{C}$ )条件下测试的各部分负荷率下的COP<sub>i</sub>来计算IPLV(C),而未对外温变化对系统性能的定量影响加以修正,故这些COP<sub>i</sub>与典型建筑的PLF<sub>i</sub>不相匹配,故难以客观反映多联机的实际运行性能。

参见图3(B),如果室内干/湿球温度=27/19°C、 $t_{out}=27^\circ\text{C}$ 工况下多联机的性能域为(ABCDEFGA)<sub>27</sub>,那么标定点即为其下包络线上的E<sub>27</sub>、D<sub>27</sub>、C<sub>27</sub>、B<sub>27</sub>四个点(对应图7中的空心圆点),使得高外温、高负荷率和低外温、低负荷率时的性能不能客观地得以反映。由此计算得出的IPLV(C)数值可能偏大,虽然可以比较多联机的性能优劣,但由于与风冷式冷水机组的IPLV(C)测试工况不同<sup>[13]</sup>,故难以与风冷式冷水机组等产品进行对比,以致于给设计院空调系统方案论证带来困惑。

## 2.2 多联机系统季节性能指标的评价方案分析

### 2.2.1 季节性能指标的选择

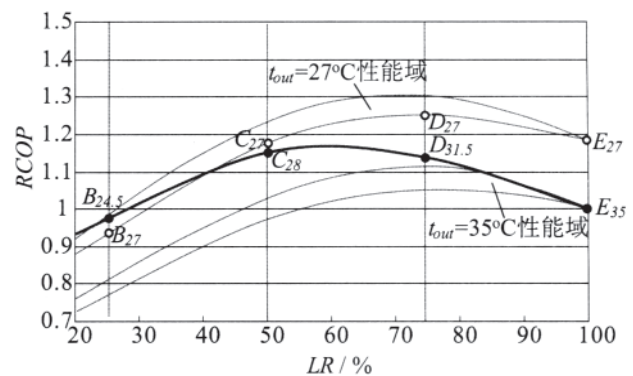


图7 改进的IPLV评价方法示意图  
Fig.7 Improved IPLV evaluation method

SEER(或CSPF)和IPLV(C)指标是评价制冷系统在实际运行过程中的综合性能,其目的是为了促进各种容量调节技术在空调制冷设备中的应用与发展,虽然二者的计算和测量方法有所不同,但其本质是一样的<sup>[14]</sup>,因此采用SEER或IPLV(C)都可以

客观表征多联机的季节运行性能,但是对于一个国家的标准体系而言,相关产品标准要有一定的系统性和延续性,故在确定变容量多联机性能评价指标时,需考虑与单元式空气调节机、蒸气压缩循环冷水(热泵)机组的相关性。

1) 考虑产品标准的延续性。目前我国多联机采用 $IPLV(C)$ 作为其季节性能评价指标,可以延续使用 $IPLV(C)$ ,但需完善其变工况特性的考核方式,以便于与蒸气压缩循环冷水(热泵)机组等产品具有相同的比较基准;

2) 考虑标准体系的系统性。多联机是一种风冷式冷热风空调设备,属于单元式空气调节机范畴,建议将多联机的性能评价指标纳入单元式空气调节机的性能评价体系<sup>[2,15]</sup>,即采用 $SEER$ 评价夏季运行性能,采用 $APF$ 的评价全年运行性能,但仍需根据多联机特点完善其变工况和部分负荷特性的考核方式。

无论是采用 $IPLV(C)$ 还是采用 $SEER$ 指标,都需关注多联机的变工况特性和特殊的部分负荷特性,即需要考虑其部分负荷“性能域”,以尽量接近实际使用情况。由于“性能域”具有上下两条包络线,故以上包络线上的点代表该负荷率下多联机的 $COP$ ,必然导致 $IPLV(C)$ 和 $SEER$ 数值偏大;以下包络线上的点来评价该负荷率下的 $COP$ ,虽然 $IPLV(C)$ 和 $SEER$ 的计算结果略微偏小,但测量简单,且对用户有利;如果能建立稳态结果与性能域之间的关系,通过测量下包络线上的 $COP$ ,并进行合理修正,则更能客观反映实际情况,但该工作尚需进一步研究。

基于目前对多联机的认识现状,现有测试方法中采用性能域下包络线上几个负荷率对应的 $COP$ 计算其季节性能指标,其方法简单且对用户有利,故不失为好的方法。

### 2.2.2 $IPLV(C)$ 的测试方案

以上分析认为,多联机完全可以采用 $IPLV(C)$ 来评价其制冷季节的运行性能。从模拟结果可以看出, $t_{out}$ 对 $COP$ 的影响非常明显,故需全面考核室外温度分布对系统性能的影响。我国已正式修订了冷水机组国家标准<sup>[13]</sup>,其中已经明确给出了风冷式冷水机组 $IPLV(C)$ 的部分负荷性能测试工况,为维护标准的连续性和产品性能评价的客观性,建议在多联机 $IPLV(C)$ 测试时,室内工况采用单元式空调机的测试工况(室内干/湿球温度=27/19℃),室外

工况采用风冷式冷水机组 $IPLV(C)$ 的部分负荷性能测试工况(即在室外干球温度=35℃、31.5℃、28℃和24.5℃时测量其100%、75%、50%、25%负荷率下的性能)。4个标定点都位于各室外温度下性能域的下包络线上,即图7中的4个实心圆点 $E_{35}$ 、 $D_{31.5}$ 、 $C_{28}$ 、 $B_{24.5}$ ,由此计算出的 $IPLV(C)$ 更接近实际运行性能。

### 2.2.3 $SEER$ (或 $CSPF$ ) 的测试方案

目前采用“2点法”测量多联机的 $SEER$  (或 $CSPF$ ) 指标,且1/2能力点采用了间接测量法<sup>[2]</sup>。笔者认为,采用图7所述 $IPLV(C)$ 的 $E_{35}$ 、 $D_{31.5}$ 、 $C_{28}$ 、 $B_{24.5}$ 四点的测量值,利用线性插值等方法构建多联机的性能模型 $\Phi_c(t_j)$ 、 $P_c(t_j)$ 或 $COP_c(t_j)$ ,其 $COP_c(t_j)$ 是变工况条件下多联机性能域的下包络线。在此基础上,利用典型建筑的负荷曲线 $BL_c(t_j)$ 和各室外温度 $t_j$ 下的运行时间分布 $n_j$ ,采用公式(1)计算出多联机的制冷季节性能系数 $SEER$  (或 $CSPF$ )。

## 3 结论

多室内机结构和不同控制方法决定了多联机的特殊部分负荷特性,明确其部分负荷特性是评价多联机性能的重要基础。以制冷运行为例,应用复杂制冷系统数学模型研究多联机的部分负荷特性和变工况特性,分析目前多联机产品标准的特点,进而提出多联机制冷季节评价指标 $SEER$ 和 $IPLV(C)$ 的评价方案,其主要工作和结论如下:

1) 室内负荷不均匀导致的多联机各室内机出力不均匀是多联机最根本的特点,多联机系统的 $COP$ 是一族变化的“性能域”;当室内、外工况一定时,采用不同的控制方法,多联机性能域的分布呈现不同的特点;负荷率、室外温度和出力不均匀性是影响多联机部分负荷特性的三个最重要的因素。

2)  $IPLV(C)$ 和 $SEER$ 在本质上是相同的,都可以作为多联机季节性能评价指标,其测试方法都应该考虑多联机的部分负荷特性和变工况特性,针对目前标准中存在的不足,提出了 $IPLV(C)$ 和 $SEER$ 建议方案;建议多联机采用 $APF$ 评价体系(制冷季节用 $SEER$ )更能体现我国标准系统的延续性和系统性。

参考文献

- [1] 石文星, 王宝龙, 李先庭, 等. 多联机空调系统适应性研究报告[R]. 中国制冷空调工业协会专项研究项目, 2007. (Shi W X, Wang B L, Li X T, et al. Research report on the application of the Multi-connected Air-Condition system [R]. 中国制冷空调工业协会专项研究项目, 2007.)
- [2] JRA 4048-2006 Annual Performances Factor of Package Air Conditioners[S]. The Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association (in Japanese).
- [3] 《机电信息》杂志社调研组. 2006年全国中央空调市场总结报告(第四部分)-多联式空调机组市场总结报告[J]. 机电信息, 2007, (16):8-20. (Investigation group of Mechanical and Electrical Information. Report on national central air-conditioning market part IV: Report on multi-connected air condition system market [J]. Mechanical and Electrical Information, 2007, (16):8-20.)
- [4] GB/T 18837-2002, 多联式空调(热泵)机组[S]. (GB/T 18837-2002, Multi-connected Air-Condition (heat pump) Unit[S].)
- [5] Office of Energy Efficiency and Renewable Energy Department of Energy. 10 CFR Part 430, Part II, Energy Conservation Program for Consumer Products: Test Procedure for Residential Central Air Conditioners and Heat Pumps (Proposed Rule) [S], 2006.
- [6] 石文星, 颜承初, 赵伟. 单元式空气调节机APF性能评价相关问题研究[J]. 冷冻空调标准与检测, 2006, (6): 4-33. (Shi W X, Yan C C, Zhao W. Research on the related issues of APF evaluation method of unitary air conditioners [J]. Standards & Inspection for R & AC., 2006, (6): 4-33.)
- [7] 邵双全. 复杂管网制冷系统仿真研究[D]. 北京: 清华大学, 2005. (Shao S Q. Simulation on complex refrigeration system[D]. Beijing, Tsinghua University, October, 2005.)
- [8] Takashi Nakamura, Hiromi Komina. Energy Saving Performances of Multi-Package Air-Conditioners for Commercial Buildings: Investigation Report on Manufacture Catalogues[J]. Transactions of the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary EnginCOPs of Japan, 2005, (105): 43-47.
- [9] 夏建军. VRF空调系统优化控制研究[D]. 北京: 清华大学, 2005. (Xia J J. Research on optimization control of the variable refrigerant flow (VRF) air-conditioning system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.)
- [10] Shi W X, Zhao W, Wang B L. Part load performance of multi-connected air-conditioning (heat pump) system with single outdoor unit[C]. The 22nd International Congress of Refrigeration, August 21-26, 2007, Beijing, China. (B2-1396)
- [11] Zhao W, Shi W X, Wang B L, et al. Effect of Indoor load unevenness on the performance of variable refrigerant flow systems[J]. International Journal of Refrigeration.
- [12] Shao S Q, Shi W X, Li X T, et al. Simulation model for complex refrigeration systems based on two-phase fluid network - part I: model development[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31 (3): 490-499.
- [13] GB/T18430.1 蒸气压缩循环冷水(热泵)机组—工商业用和类似用途的冷水热泵机组(报批稿)[S]. 2007. (GB/T18430.1 Water chilling (heat pump) packages using the vapor compression cycle: water chilling (heat pump) packages for industrial & commercial and similar application (permission for manuscript) [S]. 2007.)
- [14] 马一太, 刘圣春. 对季节能效比(SEER)和综合部分负荷值(IPLV)两个标准的探讨[J]. 冷冻空调标准与检测, 2007, (2): 24-27. (Mao Y T, Liu S C. Investigation on seasonal energy efficiency ratio (SEER) and integrated part load value (IPLV) standard [J]. Standards & Inspection for R & AC., 2007, (2): 24-27.)
- [15] GB/T17758 单元式空气调节机(报批稿)[S]. 2007. (GB/T17758 Unitary air conditioners (permission for manuscript) [S]. 2007.)