文章编号：1008－8857(2015)03－0136－06 DOI：10.13259/j.cnki.eri.2015.03.003

大冷量制冷机组匹配实验

方 杰，李 瑛，钱 芳，柳胜耀
（上海理工大学 能源与动力工程学院，上海 200093）

摘 要：依据多联式空调(热泵)机组及实验室设计相关要求初步选取制冷机组类型，根据实验室负荷计算确定制冷机组的容量，采用变频与定频相结合技术选取匹配的制冷机组.通过极限低温工况试验、工况调整速度试验检测制冷机组的匹配性并在试验的基础上进行能耗分析.试验结果表明，采用变频与定频相结合技术比定频机组在冷量测试时节能13%以上.合理高效的匹配制冷机组有助于改善各种工况的稳定速率，同时有效地控制制冷系统能耗，节约能源.

关键词：制冷机组；定频；变频；节能试验

中图分类号：TU 831.4 **文献标志码**：A

Matching test for large capacity refrigeration units

FANG Jie, LI Ying, QIAN Fang, LIU Shengyao
(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Based on the VRF air-condition(heat pump) unit and the requirements for the laboratory design, the type of refrigeration unit was preliminarily selected. Based on the load calculation of the unit, the capacity was determined. The matching refrigeration units were selected by combining the fixed frequency and variable frequency technology. The matching of the refrigeration units were verified through the extreme temperature test and the adjusting speed test. In addition, the power consumption was calculated. The results showed that using the combination of variable frequency and fixed frequency could save more than 13% power during the cold quantity test. The matching refrigeration units can improve the steady rate. It also can reduce the power consumption of the refrigeration system effectively and save energy.

Keywords: refrigeration unit; fixed frequency; variable frequency; energy saving test

随着多联机空调器的广泛应用，对测试其性能的实验装置进行研究具有十分重要的意义.国内外对多联机性能测试的研究主要采用空气焓差法，该方法不仅使得工厂、研发中心、研究所等机构减少了对实验室的初期投资，还大大缩短了实验所需要的时间，降低了能源的消耗，减少了运行成本.

国内外研究热点主要集中在空气焓差法测试实验室中的环境温度和湿度等的测量方法、测试对象的拓展，测试精度的提高，测试系统软件的改进，实验装置的设计和布置等方面[1－4].制冷机组是多联机实验室的主要装置，选取的制冷机组匹

收稿日期：2014－03－30
第一作者：方 杰(1989—)，男，硕士研究生. 研究方向：制冷测试控制技术. E-mail：elyison_fi@163.com

配与否决定着整个实验室的成败. 其中压缩机的能耗占整个制冷系统能耗的 95%. 因此，对制冷机组匹配性的研究，不仅有助于改善各种工况的稳定速率、波动范围，而且能有效地控制系统能耗[5].

1　制冷机组选择

依据 GB/T 7725—2004 房间空气调节器[6]和 GB/T 17758—2010 单元式空气调节机[7]以及上海市质量监督局的相关要求，设计、建造了一套最大可用于测试 62.5 kW 多联机性能的测试实验室。该实验室布置如图 1 所示.

25 kW室内/室外 B室	12.5 kW室内 A室
62.5 kW室外 D室	25 kW室内 C室

图 1　实验室布局

Fig. 1　Laboratory layout

目前常用的制冷方式主要分为蒸气压缩式制冷和吸收式制冷两类. 表 1 为常用制冷机组的容量范围和能耗. 根据表 1 和实验室相关设计要求(最大测试制冷量 62.5 kW)可初步确定该实验室的机组应选择水冷活塞式制冷机组.

表 1　制冷机组的容量范围和能耗[8]

Tab. 1　Capacity and power consumption of this refrigeration unit

制冷机类型	机组名称	容量范围/kW	动力能耗
蒸气压缩式	水冷活塞式	69.8～139.5	0.315 kg·(kW·h)$^{-1}$
	水冷螺杆式	348.9～1 744.2	0.307 kg·(kW·h)$^{-1}$
	水冷离心式	697.7～1 744.2	0.281 kg·(kW·h)$^{-1}$
	风冷活塞式	69.8～139.5	0.353、0.333 kg·(kW·h)$^{-1}$
	风冷螺杆式	348.9～3 489	0.301、0.533 kg·(kW·h)$^{-1}$
吸收式	蒸气单效	348.9～3 489	2.53 kW·(kW·h)$^{-1}$
	蒸气双效	348.9～3 489	1.38 kW·(kW·h)$^{-1}$
	直燃机	348.9～3 489	0.075 7 kg·(kW·h)$^{-1}$

变频制冷系统可根据室内热负荷的变化对压缩机转速进行调节. 在初始运行阶段，压缩机全速运行，随着负荷的减少压缩机转速降低，从而平衡室内的热负荷. 实际情况下，制冷系统的运行工况都低于所设计的额定工况，因此变频压缩机通常可以在低频、低制冷量的情况下运行，功耗较小[9].

定频制冷系统采用开停控制，室内温度波动较大，存在开停损失. 压缩机启动后，排气压力迅速增加，吸气压力迅速下降，蒸发器液态工质闪蒸，导致蒸发器内部温度迅速下降，大量的液态工质转移到气液分离器中气化，而以液态形式离开蒸发器的工质未能起到制冷作用，导致开机阶段冷量反而下降. 停机时，系统高温高压区的液态工质通过节流装置转移到低温低压区. 这个节流过程是高度不可逆的自发过程，存在可用能的损失. 相比于低转速连续工作的变频制冷系统而言，定频系统功耗较大.

因此，实验室 A、B 两室采用变频与定频相结合的技术. 而 C、D 两室由于所需冷负荷较大，压缩机转速较大，故不宜采用变频与定频相结合的技术，且由于在高速状态下，定频制冷机组相对节能，故 C、D 两室采用定频制冷机组.

2　压缩机选型计算

由于该实验室具有受周围环境限制，以及半封闭压缩机可拆卸、维护方便的特点，故选用半封闭式压缩机.

2.1　实验室冷负荷的计算[6]

由于 A、B、C、D 各室的结构基本相同，只是大小和对室内环境工况的要求不同等，所以它们的计算过程基本相同. 此处计算均以 B 室为例，B 室作为室内侧，被试机制热运行. B 室长度 L、宽度 W、高度 H 分别为 6 500、5 500、4 400 mm.

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \tag{1}$$

式中：Q 为 B 室的耗冷量；Q_1 为被测设备发热量，最大值为 25.725 kW；Q_2 为库板漏热量(由于库房建在厂房内，所以由太阳辐射所引起的辐射热忽略不计)；Q_3 为由于房间内各种发热设备工作时产生的热量，简称操作热；Q_4 为房间降温速度所需的冷量.

2.1.1　库板漏热量

库板漏热量即由于库房内外空气温差而渗入的热量，计算式为

$$Q_2 = KA(t_h - t_m) \tag{2}$$

式中：K 为围护结构传热系数；t_h 为室外计算温度，对上海地区，取 $t_h = 35$ ℃；t_m 为室内设计温度，应根据最低室温计算，$t_m = -15$ ℃；A 为 B 室的围护结构总面积，为 177.1 m^2.

围护结构材料为硬质聚胺酯泡沫塑料，内外面板采用喷塑钢板，隔热材料厚度 $\delta = 100$ mm. 内外喷塑钢板面板的热阻忽略不计，则传热系数计算式为

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \tag{3}$$

式中：α_1 为外面板的表面传热系数，取 $\alpha_1 = 23.26\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$；$\alpha_2$ 为内面板的表面传热系数，取 $\alpha_2 = 17.45\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$；$\lambda$ 为隔热材料的热导率，$\lambda = 0.028\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$；

由式(2)得 $Q_2 = 1.948$ kW.

2.1.2 操作热

实验室内配有一台循环风机，功率为 2.8 kW，每个库房内装有四台 50 W 日光灯. 因此，操作热 Q_3 为 3.0 kW.

2.1.3 房间降温速度所需的冷量

$$Q_4 = mc_p\Delta t/\tau \tag{4}$$

式中：m 为室内空气质量，$m = \rho V$，ρ 为密度，可取 1.205 $kg \cdot m^{-3}$，V 为室内空气体积，$V = 157.3\ m^3$，则 $m = 189.5$ kg；c_p 为空气定压比热，可取 1.005 $kJ \cdot kg^{-1} \cdot ℃^{-1}$；$\Delta t$ 为室内最大空气温差，为 70 ℃；τ 为工况调节时间，$\tau = 1.5$ h.

由式(4)得 $Q_4 = 2.469$ kW. 因此，B 室耗冷量为 33.142 kW.

在上述选型计算的基础上，综合考虑房间的最大冷负荷及更多的余量，最终各室压缩机选型结果如表 2 所示. 定频制冷机组采用比泽尔定速半封闭活塞式压缩机 4DC-7.2-40S，制冷剂选用 R22，电气参数为 400 V/50 Hz. 该系列半封闭压缩机具有能效高、可靠性强的特点. 变频机组采用效率高、有效质流量大、噪声低、振动小的 Dorin 变频半封闭活塞式压缩机 HI550CC/2.

表 2 各室制冷机组选型

Tab. 2 Selection of the refrigeration unit in each chamber

实验室	机组容量
A	变频 12.5 kW×1 台
B	变频 12.5 kW×1 台，定频 17.5 kW×1 台
C	定频 17.5 kW×2 台
D	定频 37.5 kW×2 台

3 运行测试

该实验室全部房间可作为一套多联机实验室或两套焓差实验室使用. A、B、C、D 室可组合成一拖多不超过 62.5 kW 多联机焓差实验室；A、B 室可组合成一套 12.5 kW 焓差实验室；B、D 和 C、D 室可分别组合成一套 25 kW 焓差实验室.

3.1 极限工况测试

多联机性能测试实验室投入使用前需通过极限工况实验以检验该制冷机组是否匹配. 极限工况实验主要为低温极限工况、高温极限工况、湿度极限工况实验.

3.1.1 低温极限工况实验

低温极限工况实验是为检测制冷机组能否达到制冷工况要求. 室内侧工况温度设定为 10 ℃，室外侧工况温度设定为 -15 ℃. 室内侧、室外侧低温极限工况实验曲线如图 2 所示.

由图 2 可知，实验室的室内侧和室外侧均能在 1.5 h 内达到设计的低温极限工况. 在工况稳定之后，室内侧 PID 的输出为 39%，室外侧为 45%. 空气处理装置和实验室制冷系统均尚有裕量，完全能够满足低温极限工况的要求.

3.1.2 湿度极限工况实验[10]

湿度极限工况实验是为检验制冷系统提供的加湿量能否满足需要. 由于高温高湿工况和高温低湿工况下湿度极限工况都较难达到且不易控制，故本文在低温下进行湿度极限工况实验. 选取一个室外侧和一个室内侧进行低温下的湿度极限工况实验，室内侧的设计极限低温为 10 ℃，室外侧的设计极限低温为 -15 ℃. 实验结果如图 3 所示.

从图 3 可以看出，30 min 左右室内侧、室外侧温度均达到指定的极低温，40 min 左右相对湿度达到 90%，并保持稳定.

根据以上实验数据可看出，所选取的制冷机组均能够达到设定工况并保持稳定，完全满足设计要求.

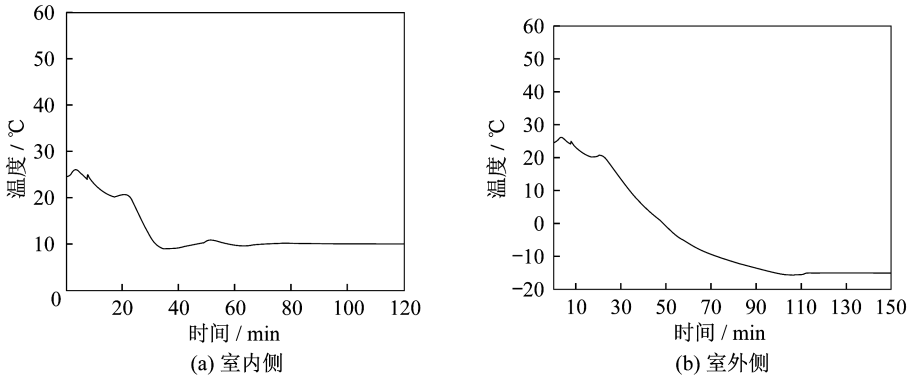

图 2　室内侧、室外侧低温极限工况曲线

Fig. 2　Curves of the low temperature limited conditions(indoors and outdoors)

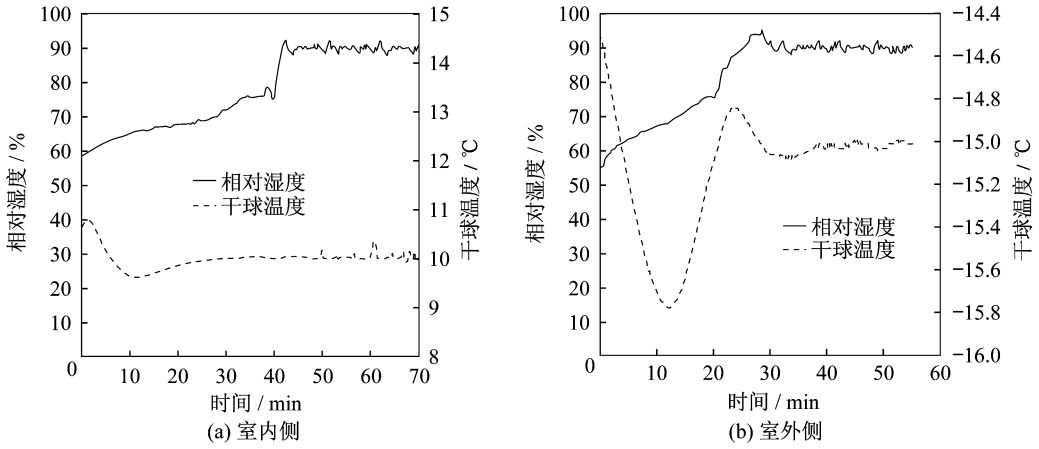

图 3　室内侧、室外侧低温下湿度极限工况曲线

Fig. 3　Curves of the humidity limited conditions at low temperature(indoors and outdoors)

3.2　工况调整速度实验

工况调整速度实验目的是检测制冷机组能否在规定时间内,从一工况调整到所需工况.工况调整速度实验分为升温速度实验和降温速度实验.实验要求所耗时间不能超过 1.5 h.

3.2.1　升温速度实验

室内侧初始工况设为 10 ℃,待工况稳定后,升温为 45 ℃,升温速度实验曲线如图 4 所示.

从图 4(a)可知,在室内侧升温速度实验中,室内温度由设计最低温度 10 ℃升温到设计最高温度 45 ℃,耗时约为 40 min.前 30 min 内,室内侧温度平稳迅速上升,由于温度调节过程存在延时,所以温度升高至 48 ℃左右,接着温度下降到 45 ℃并趋于稳定.

室外侧升温速度实验中,将初始工况温度稳定在设计最低温度 - 15 ℃,一段时间后,将工况设定为最高温度 55 ℃.

从图 4(b)中可以看出,在室外侧升温速度实验中,室外侧温度匀速上升,由设计最低温度 - 15 ℃升温到设计最高温度 55 ℃,耗时 50 min.在前 40 min 左右,室内温度平稳迅速上升,达到并超过 55 ℃的最高设计温度,为 59 ℃左右,然后下降至 55 ℃附近,并维持稳定.

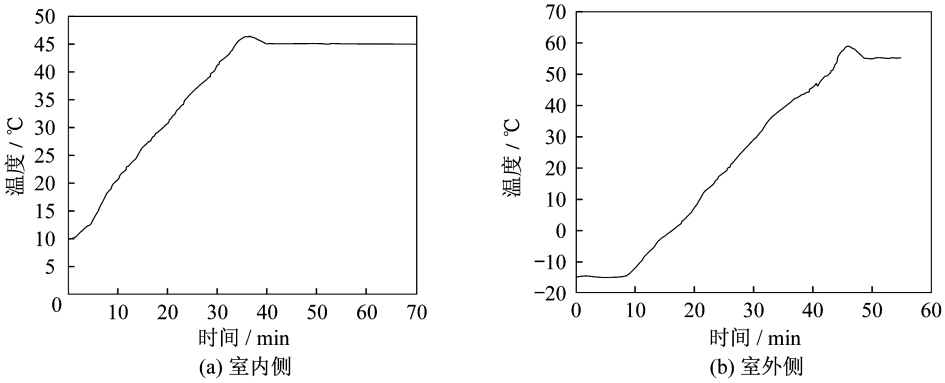

图 4 室内侧、室外侧升温速度实验

Fig. 4 Temperature rising speed test(indoors and outdoors)

3.2.2 降温速度实验

将室内侧温度设定在设计最高温度 45 ℃，待工况稳定一段时间后，将温度设定为设计最低温度 10 ℃，其降温速度实验曲线如图 5 所示. 室外侧的降温速度实验与室内侧的降温速度实验相同，先将实验室的温度稳定在设计最高温度 55 ℃，再将温度设定为设计最低温度 - 15 ℃，其实验曲线如图 5 所示.

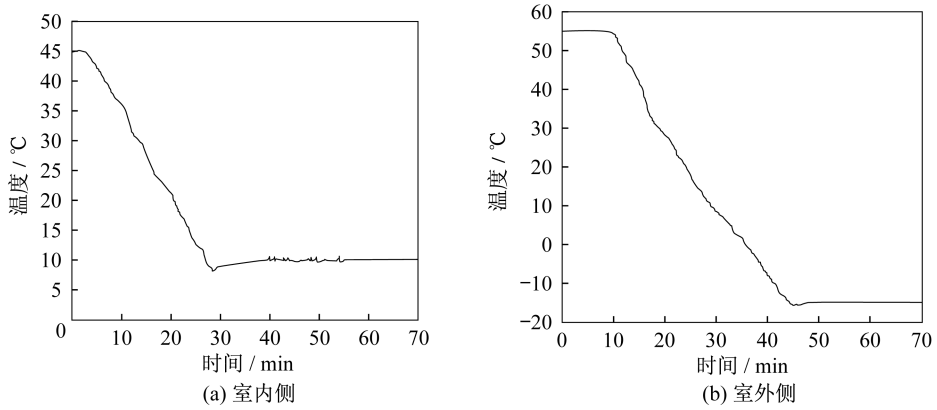

图 5 室内侧、室外侧降温速度实验

Fig. 5 Temperature cooling speed test(indoors and outdoors)

从图 5 中可看出，室内侧温度匀速下降，温度由设计最高温度 45 ℃ 降低到设计最低温度 10 ℃，耗时 38 min. 在前 30 min，室内侧温度平稳迅速下降到低于 10 ℃的设计最低温度，后平稳上升稳定在 10 ℃. 室外侧亦是如此，从设计最高温度 55 ℃降到设计最低温度 - 15 ℃，耗时 50 min，其中前 8 min 左右为室外侧降温速度实验前，温度恒定. 从第 8 min 至 45 min，室外侧温度平稳迅速下降，达到并低于 - 15 ℃ 的设计最低温度后，降温速度开始减小，达到 - 17 ℃后慢慢升温并稳定在设计最低温度处.

在工况调整速度实验中，无论是升温速度试验还是降温速度实验，所选取的制冷机组均能够稳定快速地达到设定工况，完全满足设计要求.

3.3 变频和定频机组的能耗比较

A、B 室组成 12.5 kW 焓差实验室，当测试 7.5 kW 制冷设备时，只需开启 12.5 kW 变频机组即能满足需要. 运行时冷凝温度为 40 ℃，蒸发温度为0 ℃，依据 HI550CC/2 Dorin 变频压缩机性能参数，其功率为 4.906 kW，相对定频机组(功率为 5.66 kW)运行时约节能 13.3%. 变频和定频机组能耗对比如图 6 所示.

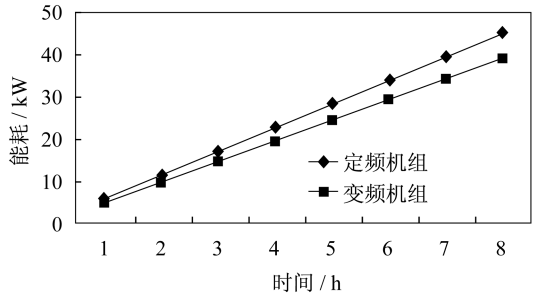

图 6　变频和定频机组能耗对比

Fig. 6　Power consumption comparison between the variable frequency unit and the fixed frequency one

同样，B、D 组成的 25 kW 焓差实验室，测试 12.5 kW 以上的制冷设备时，B 室采用变频与定频相结合的技术，开启一台 12.5 kW 定频制冷机组和一台 12.5 kW 变频制冷机组，相比两台 12.5 kW定频制冷机组约节能 14.6%.

4　结　论

依据实验室相关设计要求初步选择水冷活塞式制冷机组，通过负荷计算、能耗分析等理论分析可知，在多联式实验中采用变频和定频相结合技术匹配制冷机组不仅满足实验室要求而且具有较大的节能效益. 在经极限工况实验、工况调整速度实验的基础上进行的能耗对比实验，有力地验证了变频与定频相结合的技术比定频机组在冷量测试时约节能 13%以上. 因此，合理地选择制冷机组对工况的稳定性、系统能耗经济性具有重要意义.

参考文献：

[1] ASHRAE. Methods of testing for rating room fan-coil air conditioners[S]. ASHRAE, 2002: 78 - 79.

[2] 吴姮. 焓差法空调性能测试台的研究与设计[J]. 测试技术学报，2011，**25**(3)：239 - 244.

[3] 胡胜德，胡益雄，胡烨. 空气焓差法湿度测量方法的研究[J]. 长沙铁道学院学报，2000，**18**(2)：71 - 74.

[4] 张小松，王立，凌辰. 热泵空气侧制热量测量方法的探讨[J]. 流体机械，2000，**28**(10)：55 - 58.

[5] 韦波，李征涛. 多联机实验室的研制及实验研究[J]. 制冷空调与电力机械，2008(6)：19 - 21.

[6] 国家标准委员会. GB/T 7725—2004 房间空气调节器[S]. 北京：中国标准出版社，2004.

[7] 国家标准委员会. GB/T 17758—2010 单元式空气调节机[S]. 北京：中国标准出版社，2010.

[8] 路诗奎，姚寿广. 空调制冷专业课程设计指南[M]. 北京：化学工业出版社，2005.

[9] 田健，朱瑞琪，葛高明. 制冷系统变频运行的能量分析与实验研究[C]// 中国制冷学会 2005 年制冷空调学术年会论文集，昆明，2005.

[10] 黄海滨，李征涛，李蒙蒙，等. VRV 机组性能测试室的研制与实验环境研究[J]. 低温与超导，2010，**38**(7)：48 - 51.

信息

我国首台海上风机在江苏省如东项目成功吊装

9 月 4 日，经中国广核集团（简称中广核）风电公司专业技术人员验收，中广核如东海上风电示范项目（简称如东项目）第一台风电机组成功吊装，这标志着我国实现海上风电零的突破，也为我国风电项目进军深蓝海域做出示范.

相对于国内已有的滩涂及潮间带海上风电而言，如东项目是我国满足“双十”要求（即指离岸距离 10 km、水深 10 m 以上）的第一个真正意义上的海上风电场. 据了解，中广核如东海上风电项目计划安装 38 台 4 MW 风电机组，装机容量约为 152 MW，建设一座 220 kV 海上升压站，年上网发电量将达 3.88 亿 kW·h.

截至目前，中广核累计投运风电装机达 740 万 kW，装机规模排名进入全国前五，并具备营运质量高、工程建设快等优势，盈利能力与发展速度处于业内领先水平.

（王　波）