

文章编号:0253 – 4339(2016) 06 – 0049 – 06
doi:10. 3969/j. issn. 0253 – 4339. 2016. 06. 049

土壤源 VRF 空调系统冬季运行特性实验研究

郑晓薇 张旭 赵德印 罗仲

(同济大学机械与能源工程学院 上海 201804)

摘 要 以土壤源 VRF 空调系统为研究对象,利用土壤源 VRF 实验台对其冬季运行特性进行了实验研究,分析在不同开机率时,小时制热量、小时耗功量、机组 COP 随部分负荷率的变化规律。结果表明:小时制热量与小时耗功量随开机率的升高基本呈现增大趋势,且耗功量对开机率的变化更为敏感;不论室内机的开启率为何值,小时制热量随部分负荷率的增大而增大,小时耗功量、机组 COP 随部分负荷率的增加呈现下凹、上凸的变化趋势,即土壤源 VRF 空调机组在部分负荷运行条件下具有较为良好的节能性。

关键词 土壤源 VRF 空调系统;开机率;部分负荷率;冬季运行

中图分类号:TU831.3 **文献标识码:**A

Experimental Study on Operating Performance of Ground Source Variable Refrigerant Flow System in Winter

Zheng Xiaowei Zhang Xu Zhao Deyin Luo Zhong

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai, 201804, China)

Abstract The operational characteristics of ground source variable refrigerant flow (GSVRF) system in winter was investigated based on the measured data in GSVRF test rig. The variations of hourly heating capacity, hourly system power consumption and coefficient of performance (COP) of unit under different operation rate and part load ratio (PLR) were obtained. The results of the experiments indicate that the hourly heating capacity and hourly system power consumption increased substantially with the growing amount of operation rate, and the amount of hourly system power consumption is more sensitive to changes in the operating rate; regardless of the operation rate, hourly heating capacity increases with the rise of PLR; hourly system power consumption and COP of unit exhibits concave and convex trends with the rise of PLR, which shows that GSVRF system has more favorable energy efficiency at part load operating conditions .

Keywords ground source variable refrigerant flow system; operation rate; part load ratio; operation in winter

变制冷剂流量多联机系统,也称 VRF (variable refrigerant flow) 空调系统,它是采用制冷剂蒸发冷却空气或冷凝加热空气,通过控制制冷剂流量实时地满足室内冷、热负荷要求的高效率系统空调^[1]。土壤源 VRF 空调系统作为新一代的 VRF 空调系统,集合了 VRF 空调系统和地埋管地源热泵空调系统的优点,既能实现智能化控制又具有高效节能性,延伸了传统多联机系统的适用范围,克服了传统多联机系统连管长、室内外高度差大的缺点,有效节约铜管用量,拓展了多联机的使用范围和发展空间,具有巨大的市场潜力和广阔的应用前景^[2]。

土壤源 VRF 空调在我国的应用刚刚起步,对该系统的运行特性仍处于初步探索中。国内外关于该方面的研究主要集中在系统运行特性^[3-7]、能耗对比分析^[8-13]、部分负荷特性^[14]等方面,但对于土壤源

VRF 空调系统实际运行方面的研究还不够深入,缺乏实验的支撑。

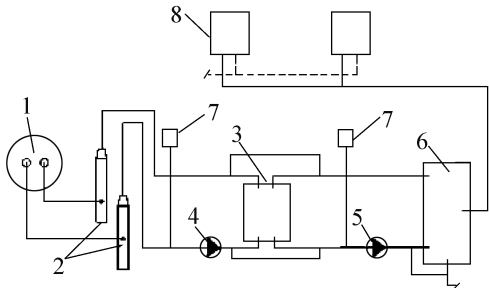
因此,本文通过现场实测土壤源 VRF 空调系统在冬季制热连续运行工况的基础上,针对多联机系统的室内机具有个性化调节的特点,从开机率方面来分析其部分负荷条件下的运行特性,其结果为该类型系统的性能优化与能耗计算提供了实验依据。

1 实验系统简介

实验系统由地源侧、机组侧和用户侧三部分组成,系统的构成见图 1^[3]。

地源侧主要包括 10 口埋深 80 m 的地埋管井和 2 口埋深 100 m 的地埋管井,铺设在同济大学嘉定校区机械与能源工程学院大楼外的绿化带下方。钻孔

孔径均为 135 mm,采用单 U 型 PE 地埋管,内径 25 mm,外径 32 mm。



1 地埋管井(12 口);2 分集水器;3 板式换热器;
4 地源侧循环水泵;5 主机侧循环水泵;
6 主机;7 定压罐;8 室内机(4 台)

图 1 测试系统图
Fig. 1 Testing system

机组侧的核心部分是由某公司提供的水冷 VRF 机组(型号 RWXYQ10AY1),其主要设备参数见表 1。

表 1 土壤源 VRF 机组设计参数
Tab. 1 Design parameters of VRF unit

设计参数	取值/kW	输入功率/kW
额定制冷能力	28	6.1
额定制热能力	31.5	5.8

用户侧主要包括两个实验用房(A214 和 A314),建筑面积均为 100 m²,坐南朝北,各自选用两台天花板嵌入式室内机,其主要参数见表 2。

表 2 室内机技术参数
Tab. 2 Technical parameters of indoor unit

室内机编号	机组型号	制冷量/kW	制热量/kW
I	FXFP56	5.6	6.3
II	FXFP45	4.5	5.0
III	FXFP90	9.0	10.0
IV	FXFP90	9.0	10.0

注:室内机 I、II 号位于办公室 A214,III、IV 号位于办公室 A314。

2 测试系统

测试系统包括测量系统和数据采集系统。
测量系统主要包括温度、流量、耗电功率等参数的探测元件。室外气温测试采用 WZY-1 温度自计

议,误差为 ±0.3 ℃;室内气温采用温湿度自记仪 WSZYW-1,误差为 ±0.3 ℃,根据《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002)^[15]布置 5 个测点并成梅花式均匀分布;机组地源侧的循环水流量采用 LWGY-25-B 涡轮流量,标准量程为 2 ~ 10 m³/h,误差为 ±0.2%;各地埋管换热器环路的水流量采用 LWGY-10-B 涡轮流量计,标准量程为 0.2 ~ 1.2 m³/h,误差为 ±0.5%;VRF 机组(主要是变频压缩机)和地源侧循环水泵的耗电量采用阿尔泰 DAM-3505 电量采集模块(电压量程 400 V,电流量 50 A,测量精度 ±0.2%);四台室内机耗电量及主循环水泵(定频泵)耗电量采用功率分析仪测定。

数据采集系统主要构成有工控机、数据采集模块、通讯模块等,数据采集模块将采集到的信号通过现场总线 RS485 传输至通讯模块 ADAM4520,工控机与通讯模块通过 RS232 连接。利用专用组态软件(力控 ForceControl16.1)对采集到的数据进行集成,实现对测量温度、流量、温湿度、压力、耗电量等数据的采集并存储,实时数据显示,数据存储时间间隔设为 1 min。

3 测试方法

冬季工况实验测试时间为 2016 年 1 月 1 日至 2016 年 1 月 31 日,实验期间地源侧开启 1#、2#、3#、6#、7#、8#、10#、11#、12#地埋管井,为 VRF 机组提供热量。每个实验工况时间周期设定为 24 h,各工况时间段为当天 8:00—第二天 8:00。在各种工况中,室内机和室外机的风量均保持不变(4 台室内机以最大风量 HH 开启),室内设定温度为 25 ℃。

土壤源 VRF 多联机空调系统可以根据实际能耗需要灵活组合,因此设计实验时,按照开满 4 台、3 台、2 台和 1 台室内机来搭配出不同的工作容量,即定义实验过程中所开启室内机的额定制热量之和与全部室内机额定制热量之和的比值为开机率^[16]。本实验台将 4 台室内机组合成不同开机率的工况进行研究,具体组合方式见表 3。

本文通过连续测量各台室内机送回风的干球温度来得到相应的制热量。在室内机送回风口布置温湿度测点,采用温湿度自记仪,型号为 WZY-1,测量精度 ±0.3 ℃,测量送回风口的干球温度。室内机实际处理的风量应等于送风量或回风量,但由于送风口为条形,不便测量风量,因此在回风口处测量风量,本文采用套帽式风量罩(TSI8375)测量。根据式(1)来计算实验中各台室内机的实际制热量。

表 3 室内机的开启与开机率

Tab.3 The opening of indoor unit and operation rate

开启的室内机	开机率/%
4 台全开	100
I + III + IV	84.03
I + II + III	68.05
I + III	52.07
I + II	36.1
II	15.97

$q = Q_n c_p (T_{ri} - T_{si})$ (1)

式中: q 为各台室内机的实际制热量,kW; Q_n 为室内机处理的风量,kg/s; c_p 为空气的定压比热容,取 1.01 kJ/(kg·℃); T_{ri} 为各个室内机回风干球温度,℃; T_{si} 为各个室内机送风干球温度,℃。

采用机组水流量法在机组进出口水管上布置测点,分别测量机组地源侧进出口水温 and 循环水流量,根据式(2)、式(3)可以计算得到机组地源侧实际取热量 Q' 和系统实际制热量 Q :

$$Q' = \frac{c'_p m' (t'_{out} - t'_{in})}{3.6} = \frac{c'_p \rho V' (t'_{out} - t'_{in})}{3.6}$$
 (2)

$$Q = Q' + W$$
 (3)

式中: Q' 为机组实际取热量,kW; Q 为系统实际制热量,kW; c'_p 为水的定压比热,J/(kg·℃); ρ 为水的密度,kg/m³; V' 为循环水流量,m³/h; t'_{out} 、 t'_{in} 为机组地源侧进出口温度,℃; W 为系统总输入功率,kW。

系统总输入功率主要包括以下三部分:

$$W = W_{unit} + W_p + W_f$$
 (4)

式中: W_{unit} 为水冷 VRF 机组制热的实时功率,kW; W_p 为水泵的输入功率,kW; W_f 为室内机风机的输入功率,kW。

机组的瞬时能效比 COP 按照式(5)计算。

$$COP = \frac{Q}{W_{unit} + W_f}$$
 (5)

4 实验结果分析

部分负荷特性是指室内外工况一定时,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^[17],由于多联机系统的室内机具有个性化调节的特点,开机率以及室内机负荷均匀性将直接影响室内机的能力输出,从而影响多联机的运行性能^[18]。因此,本文主要从开机率方面来分析其部分负荷条件下的运行特性。

ASHRAE 手册将部分负荷率 (partial load ratio)

定义为实际制热(冷)量与该工况下满负荷时的制热(冷)量之比,而在实际工程中则将其定义为实际制热(冷)量与设备额定容量(即铭牌上的制热/制冷容量数值,对于某一固定具体的设备,其值为定值)之比。相关研究表明^[19]这两种部分负荷率定义值的误差 7% 以内,使用工程界中常用的部分负荷率的定义完全可以满足工程应用的精度。因此本文采用工程上所使用的部分负荷率的定义,此法在一定程度上可以反映实际制热(冷)量的大小。

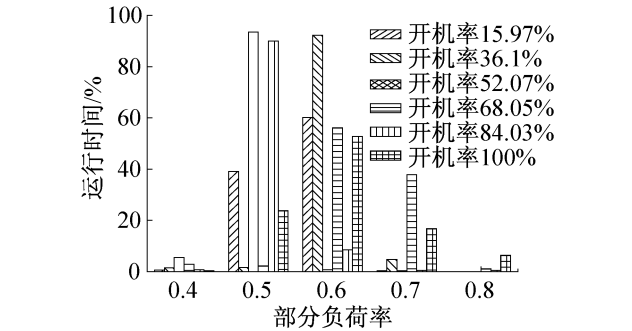


图 2 不同开机率下部分负荷率的分布情况
Fig.2 The distribution of part load ratio at different operation rates

在实验期间对不同开机率下部分负荷率的分布进行统计,图 2 给出了部分负荷率分布情况。由图 2 可知,当开机率为 15.97% 和 100%,其部分负荷率主要集中在 0.4 ~ 0.6 之间;当开机率为 52.07% 和 84.03%,其部分负荷率主要在 0.4 ~ 0.5 之间;当开机率为 36.1%、68.05%,其部分负荷率主要集中在 0.5 ~ 0.7 之间。了解部分负荷率的分布情况能够更具针对性地减小占比较大范围的部分负荷率的耗电量,提高对应范围内机组的 COP,从而进一步提高土壤源 VRF 空调系统的节能性^[14]。故本文对部分负荷率在 0.3 ~ 0.4、0.4 ~ 0.5、0.5 ~ 0.6、0.6 ~ 0.7、0.7 ~ 0.8 范围内进行分析讨论。

1) 开机率相同

在冬季制热工况下,室内设定温度 25℃ (室内实测温度在 20.7℃ 上下波动,幅度较小),选取机组蒸发器进水温度 (即地埋管出水温度) 为 10℃、12℃、14℃、16℃ (在正常工况下,机组蒸发器都工作在 12 ~ 17℃,进水温度在 10℃ 以下为极限工况),开机率为 100% 时,将实验结果拟合得到一拖四的土壤源 VRF 空调机组 COP 随部分负荷率的拟合曲线如图 3 所示。

由图 3 可知,在开机率为 100%,地埋管出水温度为 16℃ 时,部分负荷率处在 0.31 ~ 0.48 的范围内,机组的 COP 随着部分负荷率的增加而增加,在

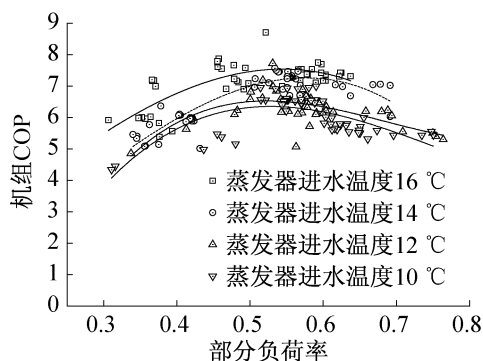


图 3 开机率 100% 时机组 COP 随部分负荷率的变化情况

Fig. 3 COP variation of the unit with partial load ratio changes at 100% operation rate

0.45 ~ 0.55 的范围内趋于稳定并达到最大值(限值),在 0.55 ~ 0.76 的范围内,机组的 COP 随着部分负荷率的增加而逐渐减少,整体机组 COP 随部分负荷率的变化呈现上凸的曲线分布,其与文献[13-14]的测试结果基本一致,在实际运行过程中存在一个由部分负荷率 PLR 和负荷不均匀指数 UI(直接反映室内负荷的不均匀程度)所决定的“性能域”^[17]。同时也说明土壤源 VRF 空调机组在部分负荷的运行条件下具有较为良好的节能特性。这是因为随着部分负荷率的不断减小,压缩机的输出容量不断减小,使蒸发压力升高、冷凝压力降低,压缩机的耗功量随之减少,然而压缩机的效率随着压力比的降低逐渐增大,而增大的程度随着压力比的不断减小而相应的降低,导致压缩机耗功量减少的速率与部分负荷率降低的速率不一致,使曲线呈现上凸的变化趋势。

从图 3 还可以看出,机组的 COP 随着地埋管的出水温度的逐渐升高而逐步增大,但增长速率较缓慢。在蒸发器进水温度为 10 °C,部分负荷率处于 0.31 ~ 0.48、0.61 ~ 0.75 时,机组的 COP 较低,均在 6 以下。这主要与地埋管换热能力有关,并且随着地埋管出水温度的降低,制冷剂的温度波动越大,机组的压缩比增大导致机组工作不稳定使 COP 下降。

2) 开机率不同

在冬季制热工况下,室内设定温度 25 °C(室内实测温度在 20.7 °C 上下波动幅度较小),室外温度约为 7 °C,选取 36.1%, 52.07%, 84.03%, 100% 的开机率进行研究,将实验结果拟合得到一拖四的土壤源 VRF 空调机组的小时制热量、系统的小时耗功量及机组 COP 随部分负荷率的曲线如图 4 ~ 图 6 所示。

由图 4、图 5 可知,土壤源 VRF 空调机组的小时制热量与系统的小时耗功量随开机率的升高基本呈现增大趋势,且耗功量对开机率的变化更为敏感,这

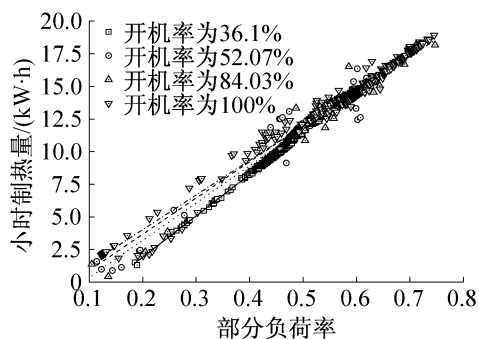


图 4 机组小时制热量随部分负荷率的变化情况

Fig. 4 The variation of hourly heating capacity of unit with different partial load ratio

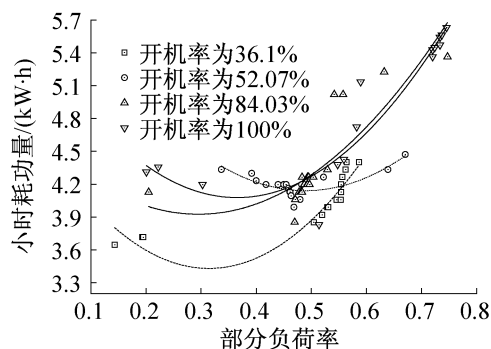


图 5 系统小时耗功量随部分负荷率的变化情况

Fig. 5 The variation of hourly system power consumption with different partial load ratio

与文献[3,5]的测试结果基本一致。当房间内的室内机开启数量减少时,机组的小时制热量和系统小时耗功量都随之减少,且当部分负荷率处在 0.1 ~ 0.4 时,开机率对机组的小时制热量的作用更为明显,当部分负荷率集中在 0.15 ~ 0.65 之间时,开机率对系统的小时耗功量的影响更大。这是因为较低的开机率使得制冷剂的流量不断减少,进而制热量逐步减少。

从图 4、图 5 还可以看出,当室内外工况一定时,不论室内机的开启率为何值,土壤源 VRF 空调机组的小时制热量均随部分负荷率的增大呈线性增长趋势;而系统的小时耗功量均随部分负荷率的增加呈现下凹的变化规律,室内机全开时,当部分负荷率小于 0.39 时,系统的小时耗功量随部分负荷率的增大而减小,当部分负荷率大于 0.39 时,系统的小时耗功量随部分负荷率的增大而增大,且随着开机率逐渐增大,系统小时耗功量的最低点逐渐向右侧偏移,由开机率为 36.01% 时的 0.31 偏移至开机率为 100% 时的 0.39。

在评价 VRF 系统的制热(冷)能耗特性时,一般

采用瞬时能效比 IEER (instantaneous energy efficiency rate), 定义为: 空调系统在某一时刻系统总制冷量与空调系统总耗电量的比值^[20]; 而在土壤源 VRF 空调系统中, 其运行并不完全处于稳态, 它是一个周期约为 10 ~ 15 min 的较为稳定的动态过程, 在非稳态运行的情况下瞬时状态对于表征系统性能是没有意义的^[21], 由于室外干球温度在 20 min 内基本保持不变, 因此用 20 min 内的机组和系统 COP 的平均值来评价土壤源空调系统的性能。

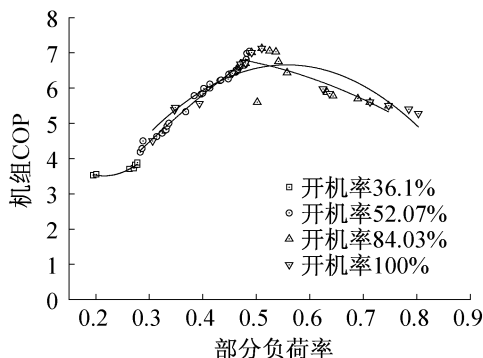


图 6 不同开机率机组 COP 随部分负荷率的变化情况

Fig. 6 COP variation of the unit with partial load ratio changes at different operation rate

由图 6 可知, 在部分负荷率相同时, 由于开机率不同而引起的机组 COP 变化并不显著, 差异相对较小, 仅在部分负荷率处于 0.53 ~ 0.75, 100% 开机率的拟合曲线略高于 84.03% 的工况, 这是因为由于室内机的关闭, 土壤源 VRF 系统蒸发器的面积减小, 削弱了换热效果, 机组的 COP 有所降低, 当室内机开启数量增加时, 压缩机调节其输出容量使得已开启的室内机的蒸发器面积得到充分地利用, 故而机组 COP 有所增加。此外, 无论开机率如何变化, 机组 COP 随部分负荷率的变化仍然呈现上凸的变化趋势。

5 结论

通过对土壤源 VRF 系统冬季制热运行的现场测试, 得到如下结论:

1) 在冬季制热工况, 室内设定温度为 25 ℃, 开机率为 100% 的实验条件下: 整体机组 COP 随部分负荷率的变化呈现上凸的曲线分布, 且机组的 COP 随着地埋管出水温度的逐渐升高而逐步增大, 但增长速率较为缓慢。

2) 在冬季制热工况, 室内设定温度为 25 ℃, 开机率为 36.1%, 52.07%, 84.03%, 100% 的实验条件下: 小时制热量与小时耗功量随开机率的升高基本呈现增大趋势, 且耗功量对开机率的变化更为敏感。

当室内外工况一定时, 不论室内机的开启率为何值, 土壤源 VRF 空调机组的小时制热量均随部分负荷率的增大呈线性增长趋势; 而系统的小时耗功量均随部分负荷率的增加呈现下凹的变化规律, 且随着开机率的增大, 小时耗功量的最低点逐渐向右偏移。

在开机率不同时, 部分负荷率相同的情况下, 由于开机率不同而引起的机组 COP 变化并不显著, 差异相对较小, 且并不影响机组 COP 随部分负荷率的变化趋势。

参考文献

- [1] 刘传聚, 郑文. 多联式空调 (热泵) 机组性能及应用述评[J]. 制冷技术, 2006, 26(4): 7-11. (LIU Chuanju, ZHENG Wen. Commentary on performance and application of multi-connected air conditioning (heat pump) unit [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2006, 26(4): 7-11.)
- [2] 杨筱静, 由世俊. 埋管式多联机热泵系统的应用研究[C]//全国暖通空调制冷 2008 年学术年会论文集. 重庆: 中国建筑学会, 中国制冷学会, 2008.
- [3] 位耀华. 土壤源水冷多联机系统供热特性实验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2011.
- [4] 林博. 土壤源水冷多联机系统全年运行特性研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2012.
- [5] 董丽娟. 土壤源多联机系统运行特性实验研究[D]. 上海: 同济大学, 2012.
- [6] 董丽娟, 张旭, 杨洁. 土壤源多联机系统极限工况运行特性实验研究[J]. 制冷与空调 (四川), 2014, 28(2): 129-135. (DONG Lijuan, ZHANG Xu, YANG Jie. Study on operation performance of ground source VRF system under limiting conditions [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2014, 28(2): 129-135.)
- [7] 周柯岑. 土壤源水冷多联机系统特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [8] 罗仲, 张旭. 小型土壤源热泵冬季间歇运行的地温恢复特性实验研究[J]. 制冷技术, 2015, 35(4): 1-5. (LUO Zhong, ZHANG Xu. Experimental investigation on ground temperature restorative characteristics under intermittent operation condition in winter for a small ground source heat pump system [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2015, 35(4): 1-5.)
- [9] 张志强. 水源 VRF 变频空调系统能耗分析及其在我国应用的评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [10] 卢广宇. 土壤源—冷却塔复合式 VRF 空调系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [11] 潘黛岱. 水冷多联机系统能效平衡点的研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010.
- [12] 聂斌. 办公建筑土壤源多源复合热泵系统能效特性研

- 究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2013.
- [13] 刘海霞,张旭,杨洁,等. 复合式土壤源 VRF 系统夏季节能特性的实验研究[J]. 暖通空调, 2013, 43(1): 100-104. (LIU Haixia, ZHANG Xu, YANG Jie, et al. Experiments on energy saving characteristics of hybrid ground-source VRF system in summer [J]. Journal of HV&AC, 2013, 43(1): 100-104.)
- [14] 闫俐君,张旭,赵德印,等. 土壤源 VRF 空调系统冬季运行部分负荷特性实验研究[J]. 制冷学报, 2015, 36(1): 113-118. (YAN Lijun, ZHANG Xu, ZHAO Deyin, et al. Experiments on part load performance of ground source variable refrigerant flow system in winter [J]. Journal of Refrigeration, 2015, 36(1): 113-118.)
- [15] 中国疾病预防控制中心. GB/T 18883—2002, 室内空气质量标准[S]. 北京:中国标准出版社,2002.
- [16] 杨刚. 数码涡旋多联式空调夏季运行特性的实验研究[D]. 上海:同济大学, 2006.
- [17] 石文星,赵伟,王宝龙. 论多联式空调(热泵)系统的季节性能评价方法[J]. 制冷学报, 2008, 29(3): 10-17. (SHI Wenxing, ZHAO Wei, WANG Baolong. Discussion on performance evaluation of multi-connected air-conditioning(heat pump) systems [J]. Journal of Refrigeration, 2008, 29(3): 10-17.)
- [18] 张东亮,张旭,冯玉伟. 数码涡旋多联式空调系统制冷运行部分负荷特性实验[J]. 太阳能学报, 2010, 31(10): 1275-1280. (ZHANG Dongliang, ZHANG Xu, FENG Yuwei. Experimental study of digital variable multiple air conditioning system under cooling condition [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2010, 31(10): 1275-1280.)
- [19] Zhou Yanping, Wu Jingyi, Wang Ruzhu. Definition identification of two kinds of part load ratio(PLR) [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2008, 8(1): 24-26
- [20] 魏明华. 深圳市公共建筑空调系统运行能效比影响因素分析[D]. 重庆大学,2008.
- [21] 王旭辉,夏建军,彭琛,等. VRF 空调系统部分负荷特性的实测研究[J]. 建筑科学, 2010, 26(10): 151-156. (WANG Xuhui, XIA Jianjun, PENG Chen, et al. Experimental study of VRF system under part load condition [J]. Building Science, 2010, 26(10): 151-156.)

通信作者简介

张旭,男,教授,博士生导师,同济大学机械工程学院,暖通空调及燃气研究所所长,(021)65983605, E-mail: zhangxu-hvac@tongji.edu.cn. 研究方向:建筑节能及新能源在建筑系统的应用;建筑物能量系统生命周期评价方法和评价指标体系的研究;面向小城镇及农村的低成本能源系统的技术集成和新能源综合利用;复杂空间通风技术。

About the corresponding author

Zhang Xu, male, professor, doctoral supervisor, director of Department of HVAC and Thermal Engineering, School of Mechanical Engineering, Tongji University, + 86 21-65983605, E-mail: zhangxu-hvac@tongji.edu.cn. Research fields: energy conservation and renewable energy in building, LCA, low-energy in rural area, ventilation in complicated space.