

文章编号:0253-4339(2015)01-0113-06

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2015.01.113

土壤源 VRF 空调系统冬季运行部分负荷特性实验研究

闫俐君 张旭 赵德印 武佳琛

(同济大学机械与能源工程学院 上海 201804)

摘要 利用土壤源 VRF 空调系统实验台,对冬季制热工况进行实验研究,分析单位面积小时功耗、机组性能系数、系统性能系数随部分负荷率(PLR)的变化规律。研究表明:冬季制热工况下部分负荷率主要集中在 40%~70% 范围内,单位面积小时功耗随部分负荷率呈下凹曲线分布,机组性能系数和系统性能系数随部分负荷率变化存在呈上凸趋势的性能域。

关键词 土壤源 VRF 空调系统;部分负荷率;冬季运行;实验研究

中图分类号:TU831.3;TK523

文献标识码:A

Experiments on Part Load Performance of Ground Source Variable Refrigerant Flow System in Winter

Yan Lijun Zhang Xu Zhao Deyin Wu Jiachen

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

Abstract Based on the measured data of the ground source variable refrigerant flow system (GSVRFS) in the heating season, this research analyzes the variation of hourly system power consumption per square meter, coefficient of performance (COP) of unit and COP of system along with the change of part load ratio (PLR). The results show that the PLR is distributed mainly from 40% to 70%. Hourly power consumption per square meter varies with PLR in concave form. The COPs of the unit and system vs. the system part load ratio are within a convex performance domain.

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

变制冷剂流量多联机空调系统,也称 VRF 系统 (Variable Refrigerant Flow System, VRFS),是通过控制制冷剂流量,适时地满足室内冷热负荷要求的直接蒸发式制冷系统^[1],具有良好的独立调节性、在部分负荷工况有较高的能效比以及便于控制管理的特点^[2]。土壤源 VRF 空调系统 (Ground Source Variable Refrigerant Flow System, GSVRFS) 作为新一代的 VRF 空调系统,集合了变制冷剂流量空调系统和土壤源热泵空调系统二者的优点,利用低品位热源——土壤源中的热能进行制冷供暖,克服了传统风冷 VRF 系统存在的噪声大、受外界气温影响大、长连管大落差的限制等缺点,具有能效比高、机组性能稳定、不受气候影响等特点^[3]。

目前多联机已经成为我国中央空调的一种主要形式,其中风冷 VRF 所占份额较大,因此国内外学者对风冷 VRF 系统研究较多,包括运行特性^[4-5]、除霜特性、节能特性^[6]、部分负荷特性^[2,7-8]等方面。但土壤源 VRF 空调系统在我国的应用刚刚起步,对该

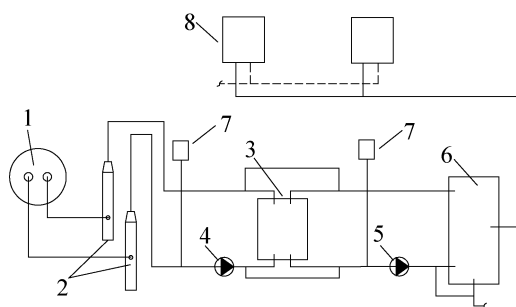
系统运行特性的研究仍处于初步探索阶段。我国学者在该技术的理论和实验研究方面取得了一些成果,主要包括系统运行特性^[9-10]、能耗对比^[11-12]等方面,但对土壤源 VRF 空调系统部分负荷特性研究较少。而土壤源 VRF 空调系统大部分时间都在部分负荷工况下运行,对部分负荷率分布及部分负荷率对系统能耗影响的研究十分关键。

对土壤源 VRF 空调系统冬季制热连续运行工况进行了实验研究,根据实测数据分析该工况下部分负荷率的分布以及部分负荷率对土壤源 VRF 空调系统运行能耗的影响。

1 实验台及空调系统介绍

实验台地源侧主要包括 10 口埋深 80 m 的埋管井 (编号 1#~10#) 和 2 口埋深 100 m 的埋管井 (编号 11#、12#),铺设在建筑物周围的绿化带下方。埋管换热器的形式为单 U 型 PE 管,内径 25 mm,外径 32 mm。

该空调系统主要由地埋管换热器、VRF 机组、室内机、管道系统等组成,如图 1 所示,满足 2 间面积均为 100 m² 办公用房的空调和供暖需求。



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 实验台系统图^[9]

Fig. 1 Schematic of the experimental rig

一拖四土壤源 VRF 空调系统的主要设备参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 土壤源 VRF 机组技术参数

Tab. 1 Technical specification of VRF unit

额定制冷/制热能力 /kW	28/31.5
制冷/制热额定功率 / kW	6.1/5.8

注:1)土壤源 VRF 机组名义制冷工况,组合容量系数 100%,地源侧循环水流量 80 L/min,进水温度 30 ℃,室内湿球温度 19 ℃;名义制热工况,组合容量系数 100%,地源侧循环水流量 100 L/min,进水温度 20 ℃,室内干球温度 20 ℃。

表 2 室内机技术参数

Tab. 2 Technical specification of indoor unit

室内机编号	数量	制冷量/ kW	制热量/ kW
a	2	9.0	10.0
b	1	5.6	6.3
c	1	4.5	5.0

2 测试方法与原理

2.1 测试系统

测试系统包括测量部分和数据采集部分,测量系统主要包括温度、流量、耗电功率等参数的探测元件。

1)温度测试包括气温、水温 and 土壤温度的测试。气温测试采用 WZY-1 温度自计议,误差 ± 0.3 ℃,测量室内外空气温度;水温测试采用 Pt100 铂电阻传感器,误差为 ± 0.15 ℃,设置在埋管换热器进出口、VRF 机组水环路和制冷剂环路进出口、板式换热

器进出口,测量各部位的水温。

2)流量测试。采用 LWGY-25-B 涡轮流量计测量机组地源侧的循环水流量,标准量程为 2 ~ 10 m³/h,误差为 $\pm 0.2\%$;采用 LWGY-10-B 涡轮流量计测量各地埋管换热器环路的水流量,标准量程为 0.2 ~ 1.2 m³/h,误差为 $\pm 0.5\%$ 。

3)耗电量的测量分两类,一类为变频电机耗电量的测量,包括 VRF 机组(主要是变频压缩机)和地源侧循环水泵,采用阿尔泰 DAM-3505 电量采集模块(电压量程 400 V,电流量程 50 A,测量精度 $\pm 0.2\%$),实现耗电量的实时采集。另一类包括四台室内机耗电量及主循环水泵(定频泵)耗电量的测量,采用功率分析仪测定耗电量。

4)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 ADAM4520 通过 RS232 连接。利用专用组态软件对采集到的数据进行集成,实现对测量温度、流量、耗电量等数据的采集、存储和显示,数据存储时间间隔设为 10 min。

2.2 测试方法

冬季工况实验从 2014 年 2 月 11 日进行到 2014 年 3 月 15 日,空调系统全天连续运行。实验期间地源侧开启 1#、2#、3#、6#、11#地埋管井,为 VRF 机组提供热量。4 台室内机均以最大风量开启。室内设定温度为 20 ℃,室内实测温度在 17.58 ~ 23.42 ℃ 范围内。

布置机组进出口水管上的测点,分别测量机组地源侧进出口水温和循环水流量,根据式(1)和式(2)可以计算得到机组地源侧实际取热量 Q'_h 和系统实际制热量 Q :

$$Q'_h = \frac{c_p m'(t'_{out} - t'_{in})}{3.6} = \frac{c_p \rho V'(t'_{out} - t'_{in})}{3.6} \quad (1)$$

$$Q = Q'_h + W \quad (2)$$

式中: Q'_h 为机组地源侧实际取热量, 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 为系统输入功率, kW。

其中系统输入功率主要包括 VRF 机组输入功率 W_u 、水泵的输入功率 W_p 、室内机风机的输入功率 W_f , 即:

$$W = W_u + W_p + W_f \quad (3)$$

机组性能系数和系统性能系数分别按照公式(4)和式(5)计算。

$$\text{机组 COP} = \frac{Q}{W_u + W_f} \quad (4)$$

$$\text{系统 COP} = \frac{Q}{W} \quad (5)$$

3 测试结果及分析

3.1 部分负荷率分布情况

美国 ASHRAE 手册将部分负荷率 PLR (part load ratio) 定义为实际负荷与相应非设计工况下满负荷容量的比例。而在工程应用中将部分负荷率定义为实际制热(冷)量与设备额定容量(即铭牌上的制冷/制热容量数值)的比例。相关研究表明,这两种部分负荷率定义值的误差在 7% 以内,使用工程定义的部分负荷率可以满足工程应用中的精度要求^[13]。因此采用工程定义的部分负荷率来分析土壤源 VRF 空调系统的部分负荷特性,同时工程定义的部分负荷率可在一定程度上反映实际制热(冷)量的相对大小。

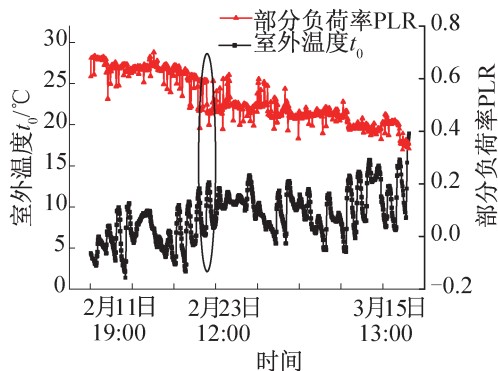


图 2 部分负荷率及室外温度变化

Fig. 2 Part load ratio variation with outdoor temperature

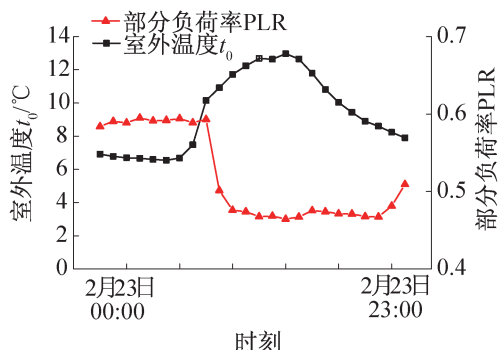


图 3 2 月 23 日部分负荷率及室外温度变化

Fig. 3 Part load ratio variation with outdoor temperature on Feb. 23rd

图 2 ~ 图 3 为逐时部分负荷率与逐时室外温度变化。由图 2 可知:部分负荷率随室外温度在一定区域内变化,总体上看,部分负荷率随室外温度的增加而减小。室外温度变化会导致空调区域的负荷变化,

机组将根据总负荷的大小提供相应的制热量。由图 3 可知:室外温度随时间的变化以日为单位有明显的周期性,部分负荷率随时间的变化周期性不明显。在实验期间,部分负荷率最小值为 0.33,出现在 2014 年 3 月 15 日 13:00,此时的室外温度为 18.9 °C;部分负荷率最大值为 0.72,出现在 2014 年 2 月 14 日 20:50,此时的室外温度为 4.7 °C。

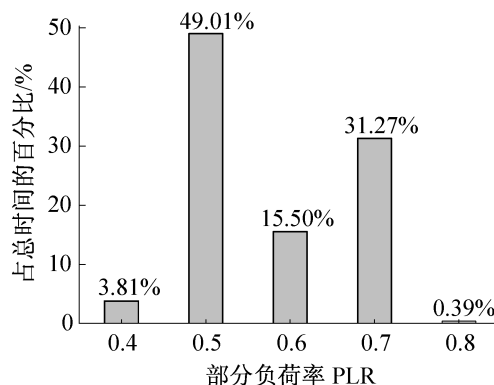


图 4 部分负荷率分布

Fig. 4 Part load ratio distribution

实验期间共记录了 761 h 的数据,图 4 给出了部分负荷率分布情况,可以看出,实验期间部分负荷率主要集中在 0.4 ~ 0.7 范围内,占实验总小时数的 96% 左右。其中共有 373 h,部分负荷率在 0.4 ~ 0.5 范围内占实验总小时数的 49.01%;共有 118 h,部分负荷率在 0.5 ~ 0.6 范围内,占实验总小时数的 15.50%;共有 238 h,部分负荷率在 0.6 ~ 0.7 范围内,占实验总小时数的 31.27%。了解部分负荷率的分布情况能够更具针对性地减小所占比重较大范围内的部分负荷率的耗电量,提高对应范围内机组和系统的 COP,从而进一步提高土壤源 VRF 空调系统的节能性。

3.2 不同范围部分负荷率的比较

除了对实验期间部分负荷率的分布进行了分析以外,还考察了实验期间不同范围内部分负荷率对系统能耗特性的影响。根据图 4 部分负荷率分布可以看出:部分负荷率主要集中在 0.4 ~ 0.7 之间,因此下文对部分负荷率在 0.4 ~ 0.5、0.5 ~ 0.6、0.6 ~ 0.7 范围内分段进行分析。分析内容包括:不同部分负荷率范围内单位面积小时功耗的分布情况;不同部分负荷率范围内机组制热 COP 的分布情况;不同部分负荷率范围内系统制热 COP 的分布情况。

1) 单位面积小时功耗分析

单位面积小时功耗是以供暖面积为计算依据,即 1 h 内系统总输入功率与供暖面积之比,其中系统总

输入功率包括 VRF 机组及水泵和末端风机等动力设备功率^[14]。单位面积小时功耗可供系统方案选择阶段估算系统能耗之用。

当室内温度的变化忽略不计(约 20℃)单位面积小时功耗受部分负荷率、机组地源侧进水温度等影响。在整个实验期间,地源侧进水温度在 13.89 ~ 17.28℃ 范围内变化,变化范围不大,因此单位面积小时功耗主要随部分负荷率变化。图 5 给出了单位面积小时功耗随部分负荷率变化的情况,可以看出:单位面积小时功耗随部分负荷率的增加先减小后增大,呈现下凹的趋势。以单位面积小时功耗(e)为因变量,部分负荷率(PLR)为自变量进行一元二项式回归,得到如下结果:

$$e = 168.62 \cdot \text{PLR}^2 - 145.78 \cdot \text{PLR} + 48.55 \quad (6)$$

由 Origin 输出的 R-Square,即决定系数 r^2 值为 0.90096,说明单位面积小时功耗与部分负荷率有较大相关性。

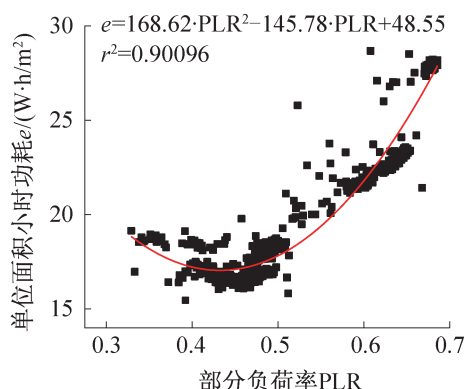


图 5 单位面积小时功耗随部分负荷率变化的情况

Fig.5 Variation of hourly power consumption per square meter under different part load ratio

从图 5 还可以看出,部分负荷率在 0.4 ~ 0.5 范围内,单位面积小时功耗主要集中在 16 ~ 19 W/m²,部分负荷率小于 0.44 时,单位面积小时功耗随部分负荷率的增大而减小,部分负荷率大于 0.44 时,单位面积小时功耗随部分负荷率的增大而增大。部分负荷率在 0.5 ~ 0.6 范围内时,单位面积小时功耗主要集中在 18 ~ 22 W/m²,此范围内,单位面积小时功耗随部分负荷率的增大而增大。部分负荷率在 0.6 ~ 0.7 范围内时,单位面积小时功耗主要集中在 21 ~ 28 W/m²,此范围内,单位面积小时功耗随部分负荷率的增大而增大。

2) 土壤源 VRF 机组的性能系数分析

土壤源 VRF 空调系统并不是工作在完全的稳

态,而是一个周期循环的较为稳定的动态过程,一个周期大约耗时 10 ~ 15 min^[2]。考虑到室外环境温度在 1 h 内基本能维持某一温度,而机组地源侧进口水温在 1 h 温度波动更小,因此可以用机组 COP 的时均值来表征土壤源 VRF 机组的性能,下文中的系统 COP 也以时均值来表征土壤源 VRF 空调系统的性能。

由于多联机具有多室内机特征,当机组地源侧进水温度一定时,土壤源 VRF 机组在实际运行中存在一个由部分负荷率 PLR 和负荷不均匀指数 UI 所决定的“性能域”^[5,15]。图 6 给出了不同机组地源侧进水温度的“性能域”的重叠域。由于机组地源侧进水温度变化不大,图 6 可以显示土壤源 VRF 机组 COP 随部分负荷率变化的情况。随着部分负荷率的增大,机组 COP 先增大后减小,呈现出上凸曲线的变化趋势,机组最大 COP 值出现在 45% ~ 52% 区间内,此趋势与文献[11]的测试结果基本一致。

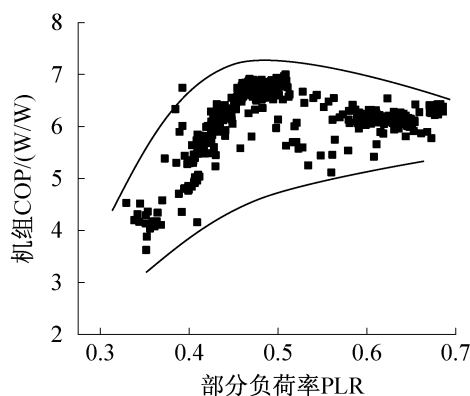


图 6 机组 COP 随部分负荷率变化的情况

Fig.6 COP variation of the unit under different part load ratio

从图 6 还可以看出:部分负荷率在 0.4 ~ 0.5 范围内时,机组 COP 主要集中在 4.1 ~ 6.9,随部分负荷率的增大而增大,在部分负荷率为 0.46 时,机组 COP 达到最大值随后基本稳定在最大值。部分负荷率在 0.5 ~ 0.6 范围内时,机组 COP 分散地分布在 5.1 ~ 7.0,随部分负荷率的增大而减小的趋势。部分负荷率在 0.6 ~ 0.7 范围内时,机组 COP 分布也较为分散,分布在 5.4 ~ 6.5 范围内。由此可以说明,土壤源 VRF 空调机组在部分负荷工况运行时具有很好的节能特性。

3) 土壤源 VRF 空调系统的性能系数分析

系统 COP 是表征整个空调系统运行情况的指标,有别于机组 COP。分析部分负荷率下系统 COP 的变化情况对于土壤源 VRF 空调系统能效特性具有重要意义。与机组 COP 相同,土壤源 VRF 空调系统

在实际运行中也存在“性能域”。图 7 给出了不同机组地源侧进水温度条件下的“性能域”的重叠域。图 7 可以显示土壤源 VRF 空调系统的性能系数随部分负荷率变化的情况。随着部分负荷率的增大,系统 COP 先增大后减小,与机组 COP 相近,呈现出上凸曲线的变化趋势,最大系统 COP 出现在 45% ~ 65% 区间内。

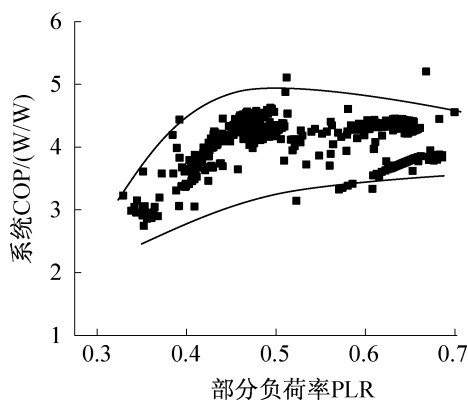


图 7 系统 COP 随部分负荷率变化的情况

Fig. 7 COP variation of the system under different part load ratio

从图 7 还可以看出,部分负荷率在 0.4 ~ 0.5 范围内,系统 COP 主要集中在 3.4 ~ 4.5,随部分负荷率的增大而增大。部分负荷率在 0.5 ~ 0.6 范围内,系统 COP 分散地分布在 3.5 ~ 4.5 之间。部分负荷率在 0.6 ~ 0.7 范围内,系统 COP 分布主要集中在 3.5 ~ 4.5 范围内。

与土壤源 VRF 机组 COP 相比,土壤源 VRF 空调系统 COP 有明显的减小,其原因在于土壤源 VRF 空调系统需要地源侧循环水泵提供热源介质循环所需动力,水泵输入功耗占系统输入功耗的 20% ~ 40%,所以系统输入功耗相比机组输入功耗有很大增加,相应系统 COP 比机组 COP 有明显下降。因此建议地源侧循环水泵采用变频水泵,以提高土壤源 VRF 空调系统的性能。

4 结论

在室内实测温度 17.58 ~ 23.42 °C,机组地源侧进水温度 13.89 ~ 17.28 °C,多联机连接管路长度为 8 m 条件下,得到下列结论:

1) 部分负荷率的分布受到室外温度、使用情况等影响,从测试结果看,部分负荷率分布主要集中在 0.4 ~ 0.7 范围内。

2) 单位面积小时功耗随部分负荷率变化呈现出二次函数关系,部分负荷率在 0.4 ~ 0.5 范围内,单位

面积小时功耗主要集中在 16 ~ 19 W/m²;部分负荷率在 0.5 ~ 0.6 范围内时,单位面积小时功耗主要集中在 18 ~ 22 W/m²;部分负荷率在 0.6 ~ 0.7 范围内时,单位面积小时功耗主要集中在 21 ~ 28 W/m²。

3) 机组 COP 随部分负荷率的增大先增大后减小,变化范围在 4.1 ~ 7.0,机组最大 COP 值出现在 45% ~ 52% 区间内。

4) 土壤源 VRF 空调系统在部分负荷工况下运行具有较高的 COP,系统 COP 随部分负荷率的增大先增大后减小,呈现出上凸曲线的变化趋势,变化范围在 2.74 ~ 5.2,最大系统 COP 值出现在 45% ~ 65% 区间内。

参考文献

- [1] 王志刚,徐秋生,俞炳丰. 变频控制多联式空调系统[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [2] 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 Shen, et al. Experimental study of VRF system under part load condition [J]. Building Science, 2010, 26(10): 151-156.)
- [3] 宋应乾,范蕊,龙惟定. 水冷多联机系统运行性能[J]. 暖通空调, 2011, 41(9): 128-132. (Song Yingqian, Fan Rui, Long Weiding. Operation performances of water cooling VRF system [J]. Journal of HVAC, 2011, 41(9): 128-132.)
- [4] 薛卫华,刘传聚,陈沛霖. 变频控制热泵式 VRV 空调机组冬季运行特性研究[J]. 节能技术, 2000, 18(5): 3-6. (Xue Weihua, Liu Chuanju, Chen Peilin. The study of operating performance of variable frequency control VRV air-conditioner in winter [J]. Energy Conservation Technology, 2000, 18(5): 3-6.)
- [5] 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.)
- [6] 薛卫华,陈沛霖,刘传聚. 变频控制热泵式 VRV 空调机组运行特性与节能性能实验研究[J]. 节能技术, 2003, 21(3): 3-5. (Xue Weihua, Chen Peilin, Liu Chuanju. The experimental study of the operating characteristic and energy consumption of the VRV air-conditioning system [J]. Energy Conservation Technology, 2003, 21(3): 3-5.)
- [7] 赵伟. 多联式空调系统部分负荷特性分析[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [8] Zhang D, Zhang X, Liu J. Experimental study of perform-

- ance of digital variable multiple air conditioning system under part load conditions[J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(6): 1175-1178.
- [9] 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.
- [10] 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 (Sichuan)*, 2014, 28(2): 129-135.)
- [11] 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.)
- [12] 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.
- [13] 周宴平, 吴静怡, 王如竹. 两种部分负荷比 PLR 的定义辨析[J]. *制冷与空调(北京)*, 2008, 8(1): 24-26. (Zhou Yanping, Wu Jingyi, Wang Ruzhu. Definition identification of two kinds of part load ratio(PLR)[J]. *Refrigeration and Air Conditioning (Beijing)*, 2008, 8(1): 24-26.)
- [14] 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.)
- [15] 冯玉伟. 数码涡旋多联式空调系统部分负荷特性的研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.

通信作者简介

张旭,男,教授,博士生导师,同济大学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及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, Dr. director of Department of HVAC and Thermal 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.