

文章编号: 1671-6612 (2023) 01-066-07

# 窗墙比对供暖房间热舒适及系统能耗影响研究

刘娜 刘东 李涪宇 周浩天

(西南科技大学土木工程与建筑学院 绵阳 621010)

**【摘要】** 建筑围护结构直接影响室内热湿负荷, 而窗户作为三大围护结构中热工性能最差的构件, 其对室内热负荷的影响最大, 尤其是当存在太阳辐射时会直接影响室内热舒适性。搭建空气源热泵对流-辐射联合供暖系统测试台, 并在大窗墙比的情况下增设保温材料设置等效墙的形式, 研究了窗墙比对冬季不同供暖模式下室内热舒适及能耗的影响。结果表明, 在空气源热泵供水温度一定时, 地板辐射末端供暖比风机盘管末端具有更舒适的室内热环境、垂直温度梯度较小并且能耗相对较少; 受到太阳辐射的影响, 随着窗墙比的增加, 地板辐射供暖系统下室内温度波动减小, 能耗增加, PMV 值变化在热舒适范围内。

**【关键词】** 窗墙比; 能耗; 热舒适; 地板供暖; 风机盘管

中图分类号 TK24 文献标识码 A

## Study on the Influence of Window-wall Ratio on Thermal Comfort and System Energy Consumption in Heating Rooms

Liu Na Liu Dong Li Guanyu Zhou Haotian

(School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, 621010)

**【Abstract】** The building envelope directly affects indoor heat and humidity. Windows, which has the weakest thermal performance among the three envelopes, has the biggest impact on the indoor heat load, especially when solar radiation is present, which directly impacts indoor thermal comfort. To study the impact of window-to-wall ratio on indoor thermal comfort and energy consumption under various terminal units in winter, a test bench for air source heat pump convection-radiation combined heating systems was constructed, and equivalent walls were set up in the form of large windows with additional insulation materials. The findings demonstrate that, compared to a fan coil terminal unit, a radiant floor heating system has a more comfortable indoor thermal environment, a smaller vertical temperature gradient, and consumes less energy when the air source heat pump's supply temperature is established. When solar radiation is present, however, the indoor temperature variation decreases and energy consumption increases as the window-to-wall ratio increases.

**【Keywords】** window-wall ratio; energy consumption; thermal comfort; radiant floor heating; fan coil

## 0 引言

公共建筑不断呈现出窗墙比不断扩大的趋势, 但采用了大面积玻璃窗、玻璃幕墙等透明围护结构后, 会极大影响建筑能耗及舒适度<sup>[1]</sup>。研究者也对开窗的影响进行了相关研究<sup>[2-5]</sup>。Hassouneh 等人<sup>[6]</sup>

通过模拟研究不同类型的玻璃窗户对建筑能源平衡的影响, 研究发现在冬季, 根据不同的玻璃类型, 增加南向的玻璃面积可以节省更多的能源, 而在北方方向节能的最佳途径是尽可能减少玻璃面积, 在东西方向增加各种类型玻璃的玻璃面积, 可以提供

作者简介: 刘娜 (1997-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: 675425910@qq.com

通讯作者: 刘东 (1984-), 男, 博士, 副教授, E-mail: dtld123@126.com

收稿日期: 2022-09-30

很好的节能机会; Ochoa 等人<sup>[7]</sup>从能耗和光环境舒适综合评价窗墙比, 结果表明, 能带来良好视觉舒适度的最佳窗户尺寸通常会导致大量的能源消耗。

当室外拥有较强的太阳辐射时, 窗户开大使得更多的太阳辐射照射到室内, 有利于营造良好的室内热环境; Marino 等人<sup>[8]</sup>研究了太阳辐射对室内环境热舒适的影响及其对建筑能耗的影响, 研究发现尽管太阳辐射可以改善室内舒适度, 但它可能会导致建筑的能源需求增加; 刘艳峰等人<sup>[9]</sup>对拉萨建筑的室内外环境进行了测试, 研究结果表明, 即使在没有采暖系统的房间里, 南向房间室内温度仍然可以满足任意热舒适, 而且没有内外遮阳的房间室温比有内外遮阳的室温高出 1.1℃, 由此得出太阳辐射对冬季采暖有积极影响。Gasparella 等人<sup>[2]</sup>通过 TRNSYS 模拟研究发现大玻璃的使用提高了冬季性能, 但稍微恶化了冬季负荷的峰值。Mohamed 等人<sup>[10]</sup>通过模拟证实了太阳斑在地板辐射上的唯一会导致辐射区的过热, 影响室内热舒适。陈辰等人<sup>[11]</sup>通过 CFD 模拟研究发现, 太阳辐射直射到室内地面时会造成地面温度升高, 热水供热量明显减少, 并且室内太阳直射区和非直射区地面平均温差高达 5.6℃。

为了更明确夏热冬冷地区窗墙比对冬季采暖系统的运行特性影响, 本文搭建不同辐射末端供暖

实验台, 对风机盘管和地板辐射末端形式下的供暖特性进行实验测试, 并分别就窗墙比对室内温度, 垂直温差, 室内舒适度等的影响进行分析。

## 1 实验

### 1.1 实验系统及测试房间介绍

在夏热冬冷地区(四川绵阳)办公楼内安装空气源热泵为主机的风机盘管和地板辐射双末端供暖系统, 系统如图 1 所示, 系统由空气源热泵、对流末端、辐射末端、蓄热水箱、分集水器、一次水泵和二次水泵等组成, 其中热源为户式空气源热泵机组(YVAG02RS)一台, 该机额定供热量为 12.6kW, 制热输入功率为 3.8kW; 其中对流末端为风机盘管(TBFL-56)两台, 额定供热量为 9.9kW; 其中辐射末端为地板辐射系统采用干式地暖模块, 其构造如图 2 所示, 地盘管采用螺旋迂回形布管方式, 管径为 10mm, 管间距为 90mm。

测试房间尺寸为 8.25m×7.89m×3.2m, 其外墙立面朝西, 传热系数 0.83W/(m<sup>2</sup>·K), 东墙毗邻走廊, 其余均为内墙, 内墙传热系数为 1.57W/m<sup>2</sup>。外窗采用断桥铝合金双层中空钢化玻璃(6+9A+6), 传热系数 3.40W/(m<sup>2</sup>·K), 太阳得热系数 SHGC 为 0.61。室内主要蓄热体包括地板和墙面, 测试房间墙面反射系数 0.75, 地面铺设木质地板, 其表面反射率为 0.4。

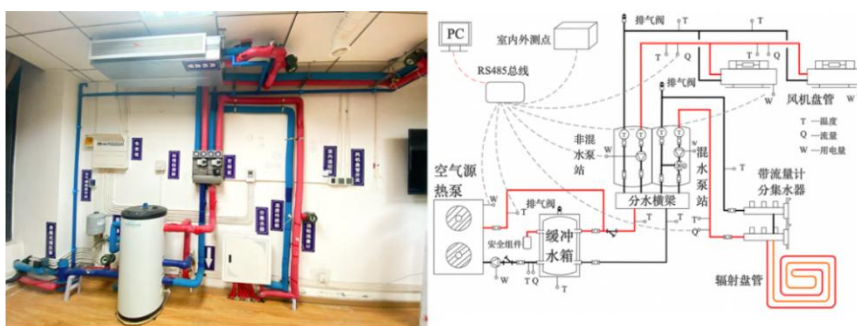


图 1 实验系统图

Fig.1 Experimental system

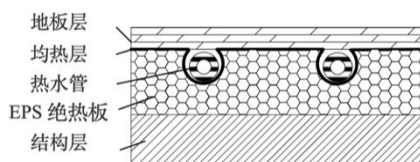


图 2 地板结构示意图

Fig.2 Floor structure

### 1.2 实验测量

测试时间为冬季供暖期(12月、1月)。实验

期间室内遮阳窗帘处于开启状态并且实验系统全天开启, 进行风机盘管供暖(FC)和地盘管供暖(RF)两种不同系统的连续性实验研究。实验测试期间将主机供水温度统一设定为 40℃, 风盘和地盘管室内温控器分别设置为 21℃和 22℃; 实验期间为减少室外空气的渗透作用, 将室内窗户关闭, 并开启室内新风机以满足室内人员新风需求; 实验时办公人员穿着 1.2clo 的冬季服装并以坐姿

状态静坐办公，为了保证测试的真实性，实验中允许办公人员有较轻的活动。

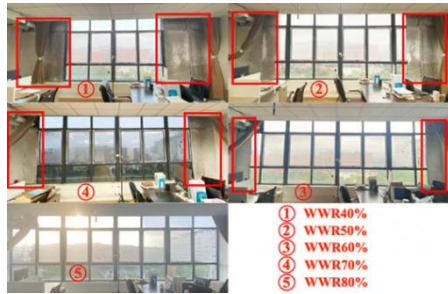


图3 窗墙比改变形式

Fig.3 Window-wall ratio changes form

为了更好地进行窗墙比的影响测试，利用等效热阻的方法在玻璃面上粘贴一层 30mm 厚的铝箔隔热棉替代建筑围护结构，从而实现外窗玻璃面积大小的改变。按照 Peng 等人<sup>[5]</sup>的研究结果，结合实验室

的实际情况，将窗墙比的研究范围设定为 40%~80%，以 10%递减，除窗墙比为 80%外，其余情况均是通过粘贴铝箔隔热棉实现，如图 3 所示。

### 1.3 测点分布

为了更好地进行实验测试，建立实验测量系统，本实验所涉及的测试参数主要有室内空气温度、相对湿度，围护结构内表面温度，室内垂直空气温度，室内风速，室外空气温度、相对湿度，设备用电量。实验期间，室内外温湿度采用温湿度传感器测量；室内壁面温度采用温度传感器测量；室内垂直温度采用热电偶测量；室内风速采用分体式风速传感器测量；系统设备用电量用单相电子式电能表测得。实验所有测量仪器在实验期间持续工作，并以 10 分钟为单位进行数据记录。实验所用测试仪器参数介绍如表 1 所示，实物如图 4 所示。

表 1 仪器测量范围与误差

Table 1 Instrument measurement range and error

名称	温湿度传感器	壁面温度传感器	测温热电偶	分体式风速传感器
测量用途	空气温湿度	辐射面温度	空气温度	室内风速
测量范围	-40~+80℃ 0~100%RH	-40~+80℃	-200℃~260℃	0~5m/s
误差	±0.3℃ ±2%RH	±0.5℃	±1.1℃	±0.02m/s



(a) 温湿度传感器



(b) 温度传感器



(c) 风速传感器



(d) K 型测温热电偶



(e) 单相电子式电能表

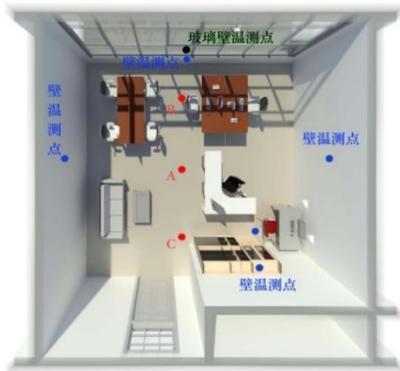


(f) 数据采集仪

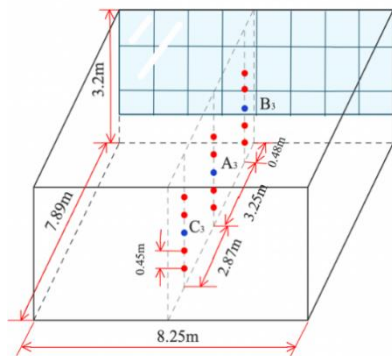
图 4 环境测试仪器

Fig.4 Environmental testing instrument

本文实验测试房间的测点分别为室内空气温湿度测点、围护结构内表面温度测点与室内垂直温度测点。室内空气温湿度测点及房间风速测点均位于房间中心位置, 放置在距楼板高度分别为 0.79m 和 0.76m; 围护结构内表面温度的测点布置如 5(a) 所示, 垂直温度测点分布位置从门到窗分别为 C、A、B, 分别连续测量距地 0.45m、0.90m、1.35m、1.80m、2.25m 处空气温度值, 具体位置如图 5(b) 所示。



(a) 整体测点布置



(b) 垂直温度测点布置

图 5 室内测点布置图

Fig.5 Indoor measuring points

## 1.4 数据处理

### 1.4.1 平均辐射温度

平均辐射温度 ( $\bar{t}_r$ ) 是人体热计算中的一个关键因素。它是与受试者在实际环境中辐射换热量相等的一个假想的温度均匀的黑色封闭空间的辐射温度<sup>[12]</sup>。平均辐射温度可以通过式 (1), 从周围环境表面的角系数和壁面表面的测量温度计算出来。

$$\bar{t}_r = \sum_{j=1}^k (F_j t_j) \quad (1)$$

式中,  $F_j$  为周围环境第  $j$  个表面的角系数;  $t_j$  为周围环境第  $j$  个表面的温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。本文  $F_j$  使用的

是周围环境第  $j$  个表面的面积比重, 即  $\frac{A_j}{A}$ ,  $A$  指

测试房间表面积,  $A_j$  指周围环境第  $j$  个表面的面积。

### 1.4.2 热舒适评价

本实验中监测系统通过将实测值 (室内空气温度、壁面温度、室内风速等) 和输入值 (人体能量代谢率、人体所做机械功、服装热阻和壁面面积等) 带入系统内 PMV (Predicted Mean Vote) 和 PPD (Predicted Percentage Dissatisfied) 计算式, 得出不同室内热环境下的 PMV 与 PPD 值。通过与 Fanger 教授提出的 7 级分度的 PMV 指标对比来评价一个热环境舒适与否, 如表 2 所示。

表 2 PMV 热感觉标尺

Table 2 PMV thermal sensing scale

热感觉	热	暖	稍暖	适中	稍凉	凉	冷
PMV 值	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3

### 1.4.3 垂直温度无量纲化

为了更好地对比不同时间点、不同测点处沿垂直方向温度的变化, 将每一点的垂直温度进行无量纲化处理, 具体操作如下:

$$\eta = \frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (2)$$

式中:  $\eta$  为垂直温度无量纲化后的值;  $T_{\max}$  为垂直温度最大值,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\min}$  为垂直温度最小值,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T$  为该时间点、该测点下的垂直温度值,  $^{\circ}\text{C}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 室内外温度

图 5(a) 为不同窗墙比下两种末端形式下室外空气温度随时间变化的曲线。为了减小室外空气温度对室内热环境的影响, 本文选取冬季室外温度变化相近的进行实验对比。从图中可以看出, 除了 WWR50% (FC) 这一工况外, 其余工况的室外温度范围和温度波动趋势一致, 中午 12:00, 在太阳辐射的作用下, 室外温度均出现上升趋势。

图 5(b) 为不同窗墙比下两种实验系统的室内空气温度的分布情况 (图中左侧表示为 RF 系统, 右侧表示为 FC 系统)。从图中可以看出, 在 RF 末端作用下, 不同窗墙比的温度分布范围始终维持在  $18.5^{\circ}\text{C} \sim 20.5^{\circ}\text{C}$  之间, 波动幅度较小, 变化相对稳

定。并且随着窗墙比的不断增加，图形也变得更宽，波动更小，表明室内温度在舒适范围内出现频率增加，并且变化趋于稳定，说明太阳辐射对冬季采暖有积极的影响；在 FC 末端作用下，不同窗墙比的温度分布范围大多数维持在 18.5℃~23.5℃ 之间，对比 RF 末端作用下的室内温度图形，FC 末端作用下的室内温度波动更大，变化相对不稳定，这是由于在 FC 末端作用下当室内温度达到一定值时，其存在间歇运行的状态。因此，随着窗墙比的增加，不论是 FC 系统还是 RF 系统，其温度波动都会变大，但 FC 系统比 RF 系统室内温度波动更为明显。

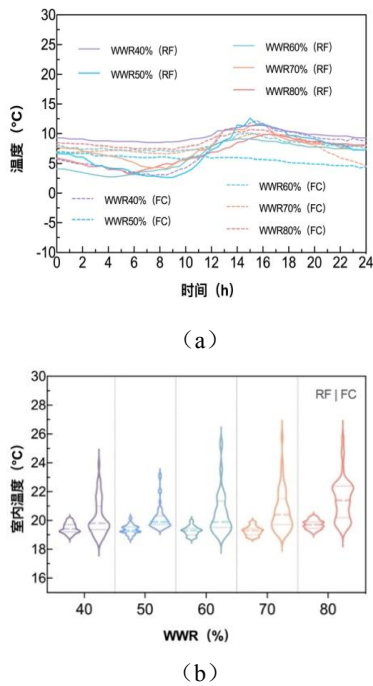


图 5 室内外空气温度

Fig.5 Indoor and outdoor air temperature

### 2.2 室内垂直温度

当有太阳辐射照射时，窗户玻璃面积的大小会影响摄入室内的辐射量进而影响室内热环境。为了清楚的观察到不同测点沿垂直方向温度的变化，图 6 和图 7 绘制了各工况在 6:00、12:00、18:00 时的无量纲化垂直温度的分布热图，图上各方格上的值为对应高度的无量纲温度值。如图所示不同窗墙比下各对应 3 列，从左到右分别表示测点 C、A 和 B 处对应高度的无量纲温度值，从图中可以清楚的观察到室内纵向温度变化呈现出随高度的增加而升高的趋势；由于不对称辐射的影响，室内 C、A、B 三点温度变化不同，室内中心处垂直温度相对高

于靠窗及靠墙位置。

对比图 6 和图 7 可以发现，当 FC 系统供暖时，由于冷空气密度大于热空气密度，冷空气沉在房间下方，热空气就长时间停留在房间上空，使得上方空气温度升高，而与房间下方空气温度相差较大，会出现“上热下冷”的温度分布不均匀的情况。而 RF 系统供暖的室内垂直温度梯度变化较小，沿垂直方向温度分布均匀，符合人体生理取暖的舒适要求。当有太阳辐射存在时，不论是 FC 系统还是 RF 系统，室内各测点垂直温度都会随着窗墙比的增加有所上升。但是在 RF 末端作用下，当太阳辐射照射在地板上，地面温度升高较为明显。

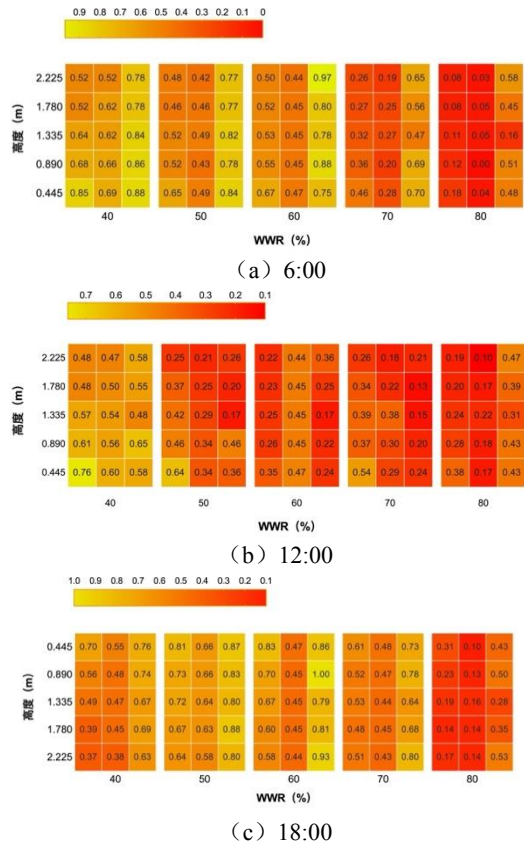
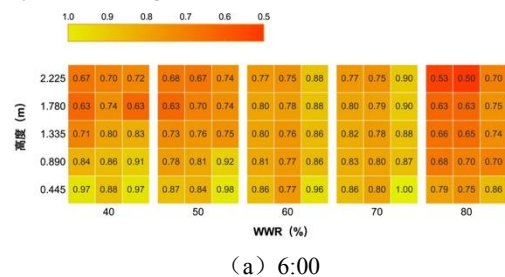


图 6 不同窗墙比下 RF 系统供暖时室内垂直温度分布图

Fig.6 Indoor vertical temperature distribution of RF system heating under different window-wall ratios



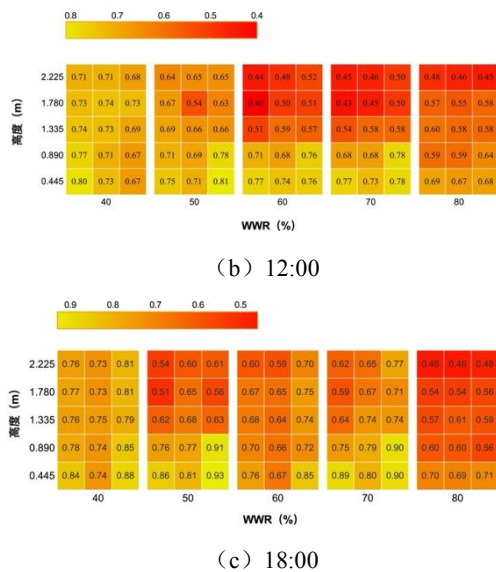


图 7 不同窗墙比下 FC 系统供暖时室内垂直温度分布图

Fig.7 Indoor vertical temperature distribution of FC system heating under different window-wall ratios

2.3 室内热舒适

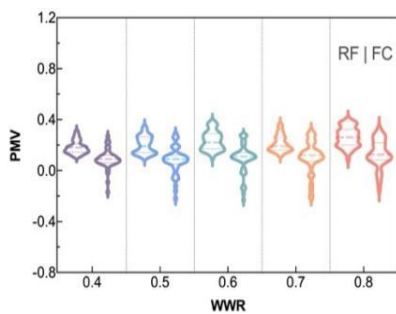


图 8 不同窗墙比不同系统下室内 PMV 分布情况

Fig.8 Indoor PMV distribution in different systems with different window-wall ratios

图 8 为不同窗墙比不同供暖系统下室内人员热感觉评价 PMV 分布情况 (图中左侧表示为 RF 系统, 右侧表示为 FC 系统)。从图中可以看到在 RF 系统下, PMV 值大致范围在 0~0.5 之间, 即大部分处于“适中”和“稍暖”的中间状态, 随着窗墙比的增加, 进入室内的太阳辐射量增加, 平均辐射温度有所增加, 使得 PMV 值有所升高, 逐渐偏向于更“稍暖”的状态; 并且图形的宽度增加, 表明 PMV 值在舒适范围内出现的频率增加。在 FC 系统下, PMV 值大致范围在-0.3~0.4 之间, 大部分热感觉处于“适中”状态, 随着窗墙比的增加, FC 末端作用下的 PMV 值在舒适范围内出现的频率有所增加, 但是没有 RF 末端作用下的效果明显。

对比 RF 末端作用下的 PMV 值的图形, FC 末端作用下的 PMV 值波动更大, 变化相对不稳定, 这是由于太阳辐射对平均辐射温度的影响很大, PMV 又受平均辐射的影响, 而 RF 末端作用下辐射作用更加强烈。因此, 在 RF 系统下, 室内热舒适性更好。

2.4 系统能耗

本文系统能耗用电量表示, 当日能耗指所有设备 (主机、末端设备、水泵等) 运行耗电量之和。图 9 为不同窗墙比不同末端作用下系统能耗情况 (图中左侧表示为 RF 系统, 右侧表示为 FC 系统)。从图中可以发现窗墙比为 60% 时不同末端作用下的系统当日所消耗的能耗差别不大。在 RF 末端作用下, 由于窗墙比为 40% 和 70% 的室外温度较高, 所以其当日系统能耗略低, 而其余工况的系统每日能耗随着窗墙比的增加略微的增加, 这说明随着窗墙比的增加, 虽然由于窗户作用, 晚上会使热损耗增加, 但是白天进入室内的太阳辐射量增加有利于增加室内得热量。由于对流作用能使室内温度达到设计温度的时间相对较快, 当满足室内设计温度时, 其会存在间歇运行状态, 再一次开始运行时能源消耗较多, 因此在 FC 末端作用下, 随着窗墙比的增加能耗有所增加, 并且增加的幅度大于 RF 末端作用下的。对比两种不同末端可以发现, 在系统供水温度相同的情况下, 为满足室内设计温度的要求, 创建舒适的室内热环境, RF 系统相比于 FC 系统耗能较少。

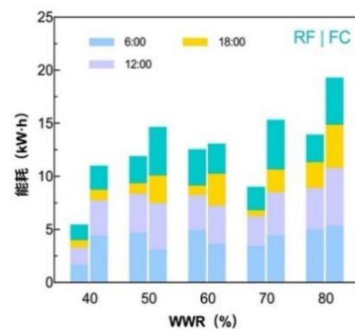


图 9 不同窗墙比不同系统下系统当日能耗

Fig.9 The energy consumption of different systems under different window-wall ratios

3 结论

本文为探究夏热冬冷地区窗墙比对冬季采暖

系统的运行特性影响,进行风机盘管和地板辐射两种不同末端形式的供暖特性实验测试,并分别就窗墙比对室内温度,垂直温差,室内舒适度等的影响进行分析,得到以下几点结论:

(1) 随着窗墙比的增加,两种供暖系统室内温度波动增大。RF 供暖系统下室内温度范围在  $18.5^{\circ}\text{C}\sim 20.5^{\circ}\text{C}$  之间波动,而 FC 供暖系统下室内温度范围在  $18.5^{\circ}\text{C}\sim 23.5^{\circ}\text{C}$  之间波动,但 RF 系统比 FC 系统室内温度波动幅度小,变化稳定。

(2) 由于不对称辐射影响,室内中心处垂直温度高于靠窗及靠墙位置;两不同末端作用下的室内各测点垂直温度随着窗墙比的增加有所上升。在 RF 末端作用下,地面温度升高较为明显,并且 RF 系统作用下的室内垂直温度梯度变化较小,符合人体生理舒适要求。

(3) 当白天室外温度升高,随着窗墙比的增加,进入室内的太阳辐射量增加,辐射作用下平均辐射温度增加明显,PMV 值随着窗墙比的增加而增加,并且变化相对稳定。在 FC 系统下,PMV 值大致范围在  $-0.3\sim 0.4$  之间;在 RF 系统下,PMV 值大致范围在  $0\sim 0.5$  之间。因此,RF 末端作用下的供暖系统,房间热舒适性更好。

(4) 两种不同末端作用形式的系统每日能耗均随着窗墙比的增加而增加,由于 FC 末端作用时存在间歇运行状态,其系统能源消耗高于 RF 系统。

#### 参考文献:

- [1] Marino C, Nucara A, Pietrafesa M. Does window-to-wall ratio have a significant effect on the energy consumption of buildings? A parametric analysis in Italian climate conditions[J]. *Journal of Building Engineering*, 2017,13:169-183.
- [2] Gasparella A, Pernigotto G, Cappelletti F, et al. Analysis and modelling of window and glazing systems energy performance for a well-insulated residential building[J]. *Energy and Buildings*, 2011,43(4):1030-1037.
- [3] Ihm P, Park L, Krarti M, et al. Impact of window selection on the energy performance of residential buildings in South Korea[J]. *Energy Policy*, 2012,44:1-9.
- [4] Inanici M N, Demirbilek F N. Thermal performance optimization of building aspect ratio and south window size in five cities having different climatic characteristics of Turkey[J]. *Building and environment*, 2000,35(1):41-52.
- [5] Xue Peng, Li Qian, Xie Jingchao, et al. Optimization of window-to-wall ratio with sunshades in China low latitude region considering daylighting and energy saving requirements[J]. *Applied Energy*, 2019,233:62-70.
- [6] Hassouneh K, Alshboul A, Al-Salaymeh A. Influence of windows on the energy balance of apartment buildings in Amman[J]. *Energy Conversion and Management*, 2010,51(8):1583-1591.
- [7] Ochoa C E, Aries M B C, Van Loenen E J, et al. Considerations on design optimization criteria for windows providing low energy consumption and high visual comfort[J]. *Applied energy*, 2012,95:238-245.
- [8] Marino C, Nucara A, Pietrafesa M. Mapping of the indoor comfort conditions considering the effect of solar radiation[J]. *Solar Energy*, 2015,113:63-77.
- [9] 刘艳峰,王登甲,刘加平.拉萨市建筑冬季热环境影响因素测试分析[J].*建筑科学*,2010,(8):23-26.
- [10] Benzaama M H, Lachi M, Maalouf C, et al. Study of the effect of sun patch on the transient thermal behaviour of a heating floor in Algeria[J]. *Energy and buildings*, 2016,133:257-270.
- [11] 陈辰,雷波.太阳辐射影响下地板辐射供暖传热特性研究[J].*制冷与空调*,2021,(4):527-531.
- [12] ISO I. 13731: Ergonomics of the thermal environment—Vocabulary and symbols[S]. Geneva: International Standard Organization, 2001.