

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202103001



# 地板直喷式多联机热泵系统 夏季供冷实验及模拟分析

李兆函<sup>1</sup>, 田琦<sup>1</sup>, 郭卫强<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原 030024;

2. 山西恒星瑞邦供热有限公司, 山西 太原 030024)

**摘要:** 文中提出一种地板直喷式多联机热泵系统,以水平管程相差约 35 m 的山西省太原市内某建筑二层内两个房间为研究对象,对该系统在夏季供冷时的房间内地板表面平均温度、竖直温度分布、室内温湿度进行测量实验. 利用 Airpak 3.0 软件,模拟房间的温度场、速度场,以及 PMV (predicted mean vote),PPD (predicted percent dissatisfied)的分布. 结果表明:模拟结果与实验结果基本一致,即采用地板直喷式多联机热泵系统夏季供冷,可以有效保证管程较长房间的地板表面平均温度,且与管程较短的房间地板表面平均温度相差在 1 ℃左右;各房间同等高度温差也小于 2 ℃;地板表面无结露现象;人员工作区域内 $-1.5 \leq \text{PMV} \leq 1.2$ ,  $\text{PPD} \leq 20\%$ ,舒适性良好.

**关键词:** 地板直喷式; 辐射供冷; 多联机热泵系统; 舒适性; 夏季供冷; 太原市

**中图分类号:** TB 69; TU 832.51

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2021)05-0636-08

## Experiment and Simulation on Summer Cooling of Floor Direct Injection Multi- Line Heat Pump System

LI Zhaoan<sup>1</sup>, TIAN Qi<sup>1</sup>, GUO Weiqiang<sup>2</sup>

(1. Taiyuan University of Technology, Civil Engineering College, Taiyuan 030024, China;

2. Shanxi Hengxing Ruibang Heating Limited Liability Company, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** A floor direct injection multi-line heat pump system was proposed to cool the building in Taiyuan City. Taking two rooms with the difference of about 35 m in the horizontal pipe length on the second floor as the research objects, the average floor surface temperature, vertical temperature distribution, indoor temperature and humidity during summer were measured. The temperature field, velocity field, predicted mean vote (PMV) and predicted percent dissatisfied (PPD) distribution of the rooms were simulated by Airpak 3.0 software. The simulation results are in good agreement with the experimental results. The results show that using the floor direct injection multi-line heat pump system in summer, the floor surface temperature of the room with long pipe length can be effectively guaranteed, and the average floor surface temperature difference to the room with short pipe length is about 1 ℃. The temperature difference of each room at the same height is less than 2 ℃; no condensation phenomenon on the floor surface; in the working area,  $-1.5 \leq \text{PMV} \leq 1.2$ ,  $\text{PPD} \leq 20\%$ , good comfort in two rooms.

**收稿日期:** 2021-03-01

**通信作者:** 田琦(1966-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事可再生能源利用及建筑节能新技术的研究. E-mail: 412559908@qq.com.

**基金项目:** “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAJ04B02)

**Keywords:** floor direct injection; radiation cooling; multi-line heat pump system; comfort study; summer cooling; Taiyuan City

制冷剂直接地板辐射供冷暖系统是近年来新兴的一种无水地板辐射供冷暖系统<sup>[1]</sup>, 常与空气源热泵<sup>[2]</sup>、太阳能热泵<sup>[3]</sup>、太阳能-空气源热泵<sup>[4]</sup>等相结合. 它主要利用制冷剂作为换热介质, 直接进入盘管内进行蒸发吸热或冷凝放热, 来达到夏季制冷或冬季制热的效果. 相比低温水地板辐射供冷暖系统, 制冷剂直接地板辐射供冷暖系统省略了制冷剂与水的二次传热, 能够有效地提高传热效率, 而且不会存在管道漏水和冻裂的隐患, 有着较高的安全性和节能性.

在热舒适性方面, 贺兴旺等<sup>[5]</sup>认为地板辐射供冷用于太原市居住建筑夏季降温理论上可行. 周致田等<sup>[6]</sup>以艺术厅为研究对象, 发现地板表面温度在 21.56℃ 以下, 空气湿度为 55%~65% 时, 室内的人体舒适性较好. 王园园等<sup>[7]</sup>通过模拟采用制冷剂辐射式供冷系统的办公室, 发现仅距离地板 0.36 m 以上范围内能满足人体热舒适性要求. 在地板辐射供冷如何防止地板结露方面, 主要是通过降低室内空气相对湿度, 常用的方法有与置换通风、风机盘管等形式相结合<sup>[8-12]</sup>. 在多联辐射供暖系统方面, 马小丹<sup>[13]</sup>提出了多联干式毛细管辐射热泵系统, 对比分析了风管机制热和毛细管辐射制热时供暖末端的热舒适性, 发现毛细管辐射制热时各指标均优于风管机.

以上所提到的地板辐射供冷暖系统末端大都只匹配一个盘管末端, 最多 3 个, 无法满足面积大, 多个房间供冷暖的需求. 此类系统通常只能单一供热或供冷, 需要与其他系统联合, 才能实现冬季供热夏季供冷, 管路复杂, 系统整体成本较高, 造成资源浪费. 因此本文提出将空气源热泵与以制冷剂为冷热媒的多联式地板辐射供冷暖相结合, 形成地板直喷式多联机热泵系统<sup>[14]</sup>.

## 1 地板直喷式多联机热泵系统

文中所提出地板直喷式多联机热泵系统, 是由室外的空气源热泵、制冷剂管道、冷媒控制箱、分集器及多个室内的盘管所组成的. 夏季工况下, 室内的盘管代替蒸发器, 而冬季工况下则代替冷凝器. 室外空气源热泵连接一组配管, 作为主管道, 后通过管道分歧管连接各分管道; 各分管道再通过分集器连接各室内盘管末端, 从而实现多联供冷暖. 系统的制冷剂选择 R410A<sup>[15]</sup>. 相比于其他制冷剂, 它具有较好的环保性及更低的流动阻力, 热力性能也良好, 无毒不易燃, 安全性较好. 另外, 设有独立的新风系统, 保证室内新风供给, 降低室内空气湿度, 降低地板结露可能.

文中采用实验加模拟的方法, 探究地板直喷式多联机热泵系统夏季供冷时, 管程较长的房间与管程较短的房间地板表面平均温度差别大小、房间供冷效果差异及房间舒适性、地板表面结露情况. 在山西省太原市使用该系统供冷的建筑二层内, 以水平管程相差约 35 m 的两个房间为研究对象, 对夏季供冷时的房间内地板表面平均温度进行了测量, 并查看是否有结露现象; 然后, 用 Airpak 3.0 软件建立房间模型, 通过实验及模拟数据来检验模型的正确性; 最后, 模拟出两个房间典型截面的水平温度场、竖直温度场及 PMV (predicted mean vote)-PPD (predicted percent dissatisfied) 分布云图, 并进行对比分析.

目前, 国内外普遍采用的热舒适性评价指标为 PMV-PPD. 国际标准 ISO 7730:2005 规定,  $-0.5 \leq PMV \leq 0.5$ ,  $PPD \leq 10\%$  时的热环境为满意的热舒适环境. 但是, 由于国情和生理情况的不同, 我国的热舒适性 PMV 和 PPD 推荐值为  $-1.5 \leq PMV \leq 1.2$ ,  $PPD \leq 20\%$ <sup>[16]</sup>. 文中将选取国内的推荐值作为模拟的热舒适评价标准指标.

## 2 实验结果与分析

### 2.1 实验方法

图 1 为实验系统简图. 实验在 7:30 开启系统, 待地板表面中心处温度下降且不再超过 0.5℃, 系统稳定后开始进行测量. 实验时间

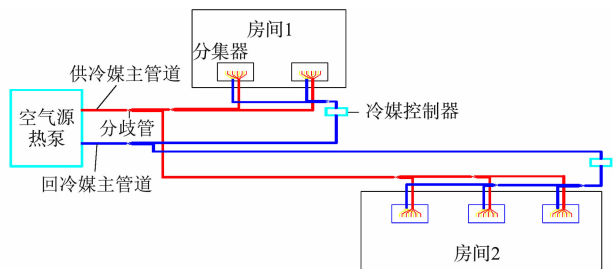


图 1 实验系统简图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

为 9:00—18:00,每隔 30 min 测量一次下列相关数据.

- 1) 地板表面温度. 使用红外测温枪,对地板表面均匀布置的 16 个测点和中心位置处的测点进行测量记录.
- 2) 非辐射壁面温度. 使用红外测温枪,对四周墙壁中心及天花板中心的各个测点进行测量记录.
- 3) 室内温度纵向梯度温度. 在室内中心竖直处,根据梅花状分布确定 5 个测点,根据国家标准 GB/T 50785—2012《民用建筑室内热湿环境评价标准》规定,在分别在 0.1,0.6,1.1,1.7 m 的高度处布置测点,分别对应着人体脚踝处,坐姿时人体膝盖位置处、呼吸位置处及站姿时人体呼吸位置处;采用水银温度计,固定在相应位置处;水银球采用锡箔纸进行遮光处理,避免光照辐射影响. 实验开始前一天,将实验装置放置在房间内,使其稳定.
- 4) 风速. 实验房间送风均采用上送上回形式,条形风口,送风温度为 20 ℃,相对湿度为 55%,送风风速为  $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,回风温度为 23 ℃,相对湿度为 62%,回风速度为  $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . 使用热线风速仪,在送风口下竖直距地面 1.7,0.6 m 处,房间中心竖直线上 0.1,0.6 m 处的各测点分别进行测量记录.
- 5) 室内外温湿度. 将两个温湿度计分别固定在室外背光处及房子中心位置处,水银球遮光处理.
- 6) 太阳辐射强度. 使用太阳辐射照度仪,调整好仪器角度,固定放置在房间窗前.

## 2.2 实验结果

各房间的典型时间实验测量数据,如表 1 所示. 表 1 中: $t_F$  为温度;RH 为湿度.

表 1 各房间的典型时间实验测量数据

Tab.1 Experimental measurement data of typical time in each room

房间	实验时间	$t/^\circ\text{C}$								RH/%	
		室外	室内	地板表面平均温度	东外墙	北内墙	南内墙	西内墙	顶棚	室外	室内
房间 1	9:30	23.10	21.70	20.06	19.70	19.30	19.30	19.20	19.50	65.4	66.3
	11:30	25.30	21.40	20.13	20.10	19.70	19.50	19.60	20.70	66.2	68.5
	12:30	33.60	22.00	20.68	21.40	20.80	20.20	20.30	21.00	50.6	67.5
	13:30	35.40	23.43	20.65	21.50	21.20	20.80	20.80	23.20	39.5	66.0
	15:00	29.70	22.59	20.28	20.70	20.10	20.20	20.10	22.10	45.1	64.1
	17:00	27.20	21.70	20.01	20.20	19.80	19.70	19.70	21.30	49.3	63.4
房间 2	9:30	23.10	22.20	20.61	19.10	19.00	19.20	19.20	20.60	65.4	61.8
	11:30	25.30	23.30	21.11	22.90	20.90	20.80	20.90	22.90	66.2	60.5
	12:30	33.60	24.00	21.35	25.00	21.10	21.20	21.20	23.90	50.6	59.2
	13:30	35.40	24.50	21.64	29.20	22.50	22.40	22.40	25.80	39.5	57.8
	15:00	29.70	25.30	21.75	28.20	23.30	23.10	23.10	25.70	45.1	51.8
	17:00	27.20	23.40	21.43	24.50	22.60	22.50	22.30	23.80	49.3	51.7

## 2.3 实验结果分析

2.3.1 地板表面平均温度 两个房间的地板表面温度都很均匀,没有出现局部过冷或者局部温度较高的情况. 在实验期间,两房间各时刻的地板表面平均温度( $\bar{t}$ )变化,如图 2 所示.

从图 2 可知:两个房间地板表面平均温度变化趋势大致相同,但达到峰值的时间有所不同. 这是由于两个房间位置不同,地板表面受照时间不同. 房间 1 在 13:00 的太阳辐射强度最大,房间 2 在 14:30 的太阳辐射强度最大,因此峰值出现在这两个时刻. 房间 2 位于西方向,存在西晒问题,因此实验时间末尾地板表面温度比初始时稍高,但不超过 1 ℃. 管程相差 35 m 的两个房间地板表面的日平均温度分别为 20.28 和 21.36 ℃,水平管程较长的房间 2 的地板表面平均温度略高,各时间管程较长的房间 2 的地板表面平均温度与管长较小的房间 1 仅相差 1 ℃左右,最大不超过 2 ℃.

2.3.2 房间中心竖直温度分布 各房间典型时间中心处竖直温度分布,如表 2 所示. 由表 2 可知:房

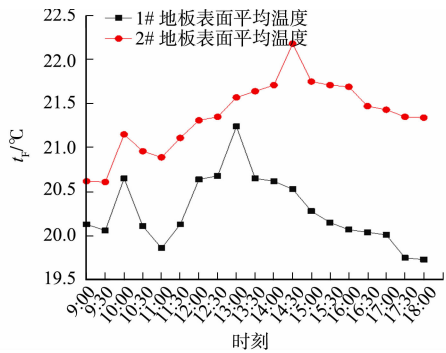


图 2 地板表面平均温度对比图  
Fig. 2 Comparison of average temperature of floorsurface

间内竖直方向的温度都随着高度的增加而逐渐增大,每个房间相邻测点之间的温差小于  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ ,最低点与最高点温差小于  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,温度梯度为正值.

表 2 各房间的典型时间中心处竖直温度实验测量数据

Tab. 2 Experimental measurement data of vertical temperature at typical time center in each room

典型时间	房间 1				房间 2			
	0.1 m	0.6 m	1.1 m	1.7 m	0.1 m	0.6 m	1.1 m	1.7 m
9:30	22.1	22.3	22.4	22.6	22.5	22.8	23	23.4
11:30	22.0	22.4	22.6	22.7	23.0	23.3	23.5	23.8
12:30	22.9	23.0	23.2	23.3	23.3	23.5	23.6	24.0
13:30	22.9	23.0	23.2	23.5	23.6	23.9	24.2	24.4
15:00	22.3	22.5	22.7	22.8	23.7	23.9	24.4	24.8
17:00	21.6	21.7	21.9	22.0	22.5	22.6	23.1	23.3

各时刻两个房间内距地面不同位置处的温度( $t$ )对比,如图 3 所示. 由图 3 可知:各时刻各房间内距地面 0.1,0.6 m 处的温度相差均小于  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,距地面 0.1,1.1 m 处的温度差均小于  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,距地面 0.1 m 脚踝处温度高于  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,满足相关要求. 此外,房间 1 和房间 2 在各时刻同等高度的温度差均小于  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,竖直温度分布情况差距较小.

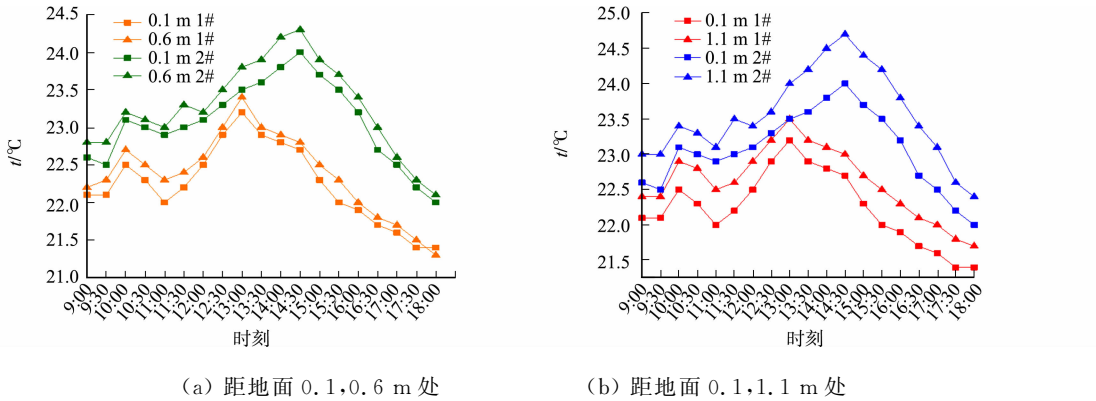


图 3 各房间内距地面不同位置处的温度对比图

Fig. 3 Comparison of temperature at different positions in each room from ground

2.3.3 房间风速情况 实验结果可知:送风口下的风速略大于房间中心处的风速,但小于  $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,房间中心处的风速小于  $0.25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,满足风速方面的舒适度要求.

2.3.4 室内温度和温湿度 各时刻房间内的室内温度( $t$ )变化,如图 4 所示. 从图 4 可知:房间 1 的室内平均温度在  $21\sim 24\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间,湿度在  $63\%\sim 69\%$  之间;而房间 2 的室内平均温度在  $22\sim 26\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间,湿度在  $51\%\sim 63\%$  之间. 表明,两个房间的平均温度均在舒适范围内.

2.4.6 结露情况 实验过程中,两个房间距地面 0.1 m 处的温度均在空气的露点温度以上,最低高出  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且房间湿度较低,没有达到结露条件. 即两个房间地板均没有结露情况出现.

实验结果表明:采用地板直喷式多联热泵供冷暖系统夏季供冷时,管程差约为 35 m 的两个房间,各房间内地面表面温度分布均匀,竖直温度场温度梯度均为正值,同等高度温度相差较小,室内平均温度相差不超过  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,房间内风速较为舒适. 管程较长的房间 2 地板表面平均温度高于管程较短的房间  $11\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,最大差值不超过  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,无结露情况. 这说明对于面积较大、多房间的场所,地板直喷式多联机热泵系统对管程较大的末端房间仍能提供较好的末端温度,与其他供冷房间地板表面平均温度相差较小,不会出现管程大的房间末端效果不好的现象.

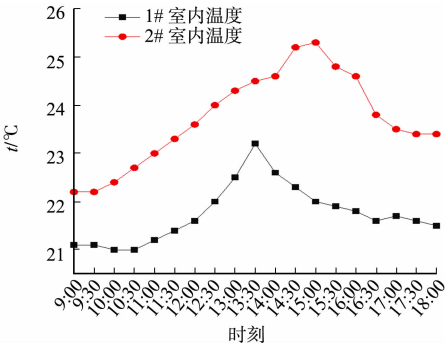


图 4 各时刻房间室内温度变化

Fig. 4 Room temperature change at each time



3 数值模拟分析

3.1 物理模型

本次模拟研究的对象是实验的两个房间,其物理模型如图 5 所示.

房间 1 的尺寸为 4.2 m×6.2 m×3.5 m(长×宽×高),东外墙上有个尺寸为 3.5 m×1.1 m 的双层中空玻璃塑钢窗,窗台高 1.4 m,除屋顶外其余三面墙均为内墙,西内门的尺寸为 0.9 m×2.6 m. 房间 2 的尺寸为 6.2 m×8

m×3.5 m(长×宽×高),西外墙上有个尺寸为 7 m×2.8 m 的双层中空玻璃塑钢窗,窗台高 0.2 m. 除屋顶和北外墙外其余两面墙均为内墙. 东内门的尺寸为 0.9 m×2.6 m.

两个房间地面上均铺设同种类型的大理石地板砖. 房间内均有一人,一盏荧光灯. 为简化模型,将荧光灯简化为 0.4 m×0.2 m×0.05 m(长×宽×高)的长方体模型,功率为 35 W,人体站立发热量按 75 W 计算. 两个房间内物品均简化为立方体,各物品尺寸如下:桌子为 2.8 m×0.95 m×0.75 m(长×宽×高);沙发为 2 m×1 m×0.8 m(长×宽×高);柜子为 3.2 m×0.5 m×2.2 m(长×宽×高).

送风方式采用上送上回方式,送风口、回风口均布置在天花板上.

3.2 数学模型

该系统室内的送风速度较小,可以视室内空气为不可压缩流体且符合 Boussinesq 假设,房间内的空气流动均属于稳态湍流,送风口送风均匀. 室内空气的比热容、导热系数等热物性参数均设置为定值. 假定盘管内制冷剂温度不变,在计算中选取  $k-\epsilon$  两方程模型和离散坐标(DO)辐射换热模型. 对房间离散采用六面体非结构化网格;X,Y,Z 方向上网格的最大单元尺寸为 0.15 m,对外窗等温度梯度较大的地方局部加密后表面的网格数为 5,细化后网格信息的网格数为 233 444,节点数为 246 821.

3.3 边界条件及相关的参数设置

设置房间 1 的地板表面温度为 20 ℃,房间 2 的地板表面温度为 21 ℃;外墙、外窗均为常热流边界,除地板、外窗、外墙外,其余围护结构皆为绝热边界. 人员穿着短袖短裤,站立状态,轻微活动量. 非辐射壁面温度设为 22 ℃. 送风温度为 20 ℃,相对湿度为 55%,送风风速为 2 m·s<sup>-1</sup>,回风温度为 23 ℃,相对湿度为 62%,回风速度为 1 m·s<sup>-1</sup>. 风口边界条件为默认条件.

3.4 模拟结果及分析

3.4.1 模拟与实验结果对照 两个房间各测点的温度均高于模拟值,最大差值为 1.8 ℃,最小差值为 0.5 ℃,偏差值在 5%以内,在可接受范围内. 总体而言,Airpak 3.0 软件的模拟结果与实验结果基本一致,表明文中所建立的数学模型和选取的边界条件是较合理的,模拟结果也是可靠的. 因此,文中利用 Airpak 3.0 软件,对上述工况和边界条件下房间内的温度场、速度场、湿度场及 PMV-PPD 云图进行模拟和分析;验证采用地板直喷式多联机热泵供冷暖系统夏季供冷时,管程差为 35m 的两个房间是否都满足舒适性要求,且比较差异大小.

3.4.2 水平温度场 各房间内距地面 0.1 m 截面处的温度场变化,如图 6 所示. 由图 6 可知:两个房间温度场都较均匀,房间 1 截面温度小于房间 2,但不超过 2 ℃,且均大于 20 ℃,满足脚踝处温度大于 20 ℃要求.

3.4.3 房间中心处竖直方向温度场 各房间中心处竖直方向的温度场变化,如图 7 所示. 图 7 中:Z 为截面位置. 由图 7 可知:竖直方向上温度的分层现象较为明显,两个工作区域内温度均保持在 21~23 ℃之间,距地面 0.1 和 1.7 m 处的垂直温差均不超过 3 ℃,满足舒适度要求.

3.4.4 流速场 在 Y=0.6 m,不同空气流速( $v$ )下各房间的截面空气流速矢量图,如图 8 所示. 由图 8 可知:两个房间内的室内空气最大流速都不超过 0.5 m·s<sup>-1</sup>,在工作区域内空气流速约为 0.05 m·s<sup>-1</sup>. 达到舒适性空调供冷工况下,人员长期滞留区域空调室内风速应不超过 0.25 m·s<sup>-1</sup>的要求,工作区域内人员无吹风感,舒适性较好.

3.4.2 舒适性 各房间不同截面的 PMV 图,如图 9 所示. 由图 9(a),(b)可知:地板辐射制冷时,地面

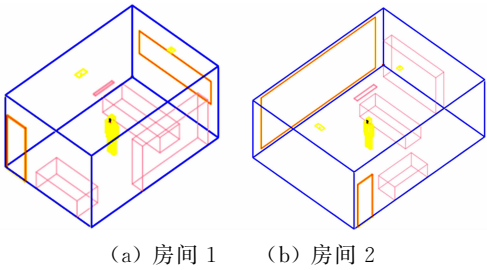


图 5 房间物理模型图

Fig. 5 Room physical model

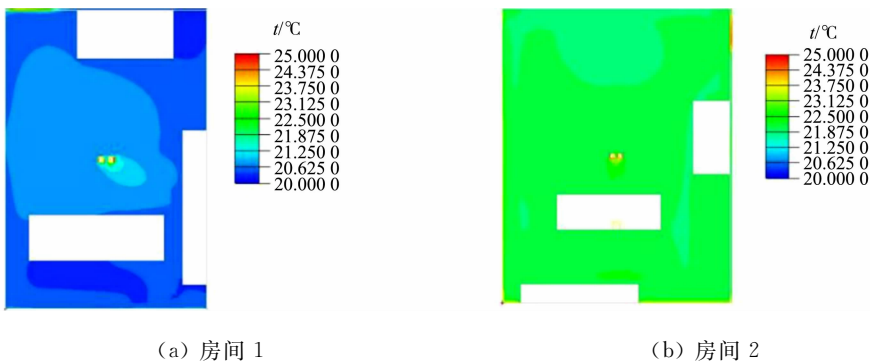


图 6 各房间内距地面 0.1 m 截面处的温度场变化

Fig. 6 Change of temperature field in each room at 0.1 m section from ground

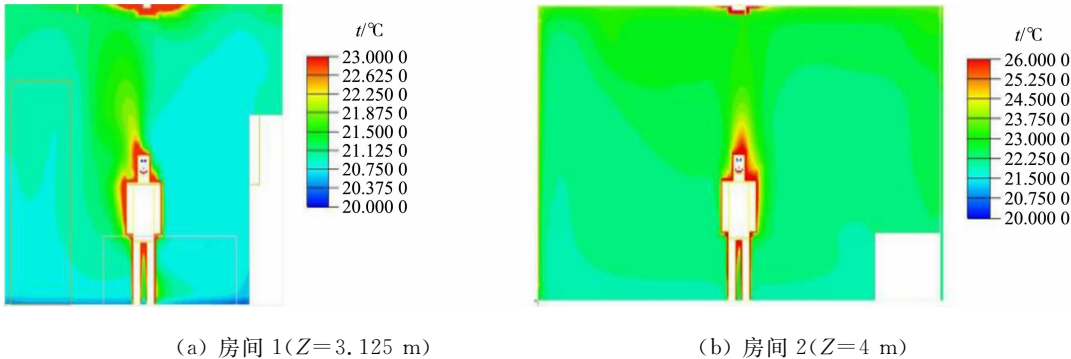


图 7 各房间不同截面的温度场变化

Fig. 7 Temperature field changes of different cross-sections in each room

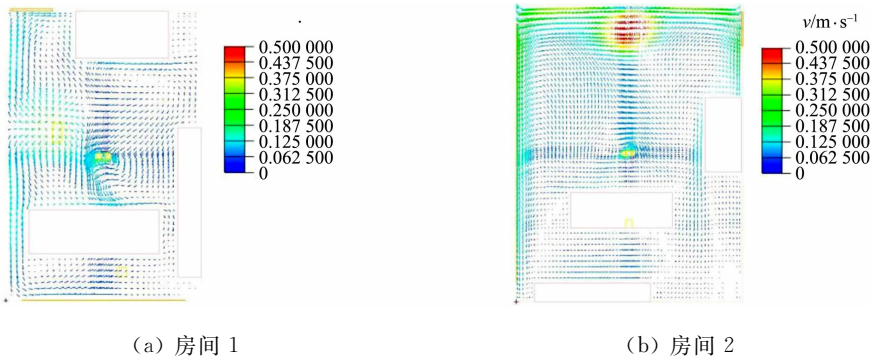
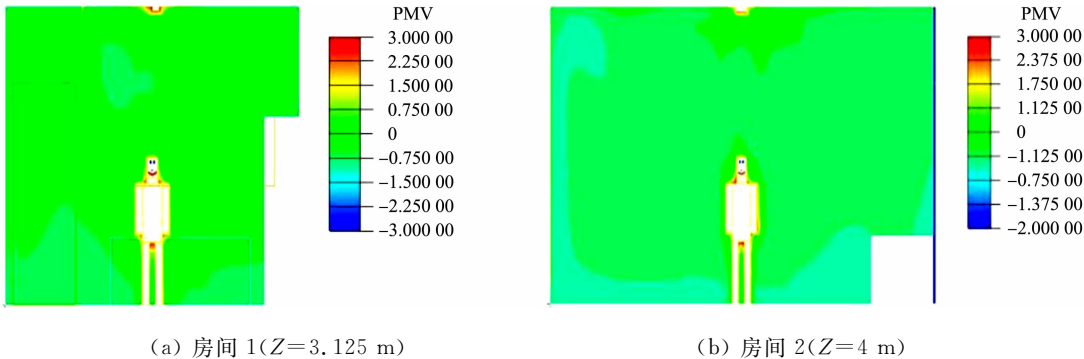


图 8 各房间的截面空气流速矢量图(Y=0.6 m)

Fig. 8 Vector cross-sectional air velocity of each room (Y=0.6 m)

附近人员稍有不满意,PMV 值在-1.5 以上,感觉稍凉;但随着高度的升高,PMV 值逐渐增大. 风口下,PMV 值稍有降低,但仍满足要求. 从图 9(c),(d)可知:在工作区域内,PMV 值均在 0 以上,风口下的 PMV 值稍有降低,但-1.5≤PMV≤1.2,舒适度良好.

各房间不同截面的 PPD 图,如 10 所示. 由图 10 可知:在竖直方向上,PPD 值随着高度的增加而逐



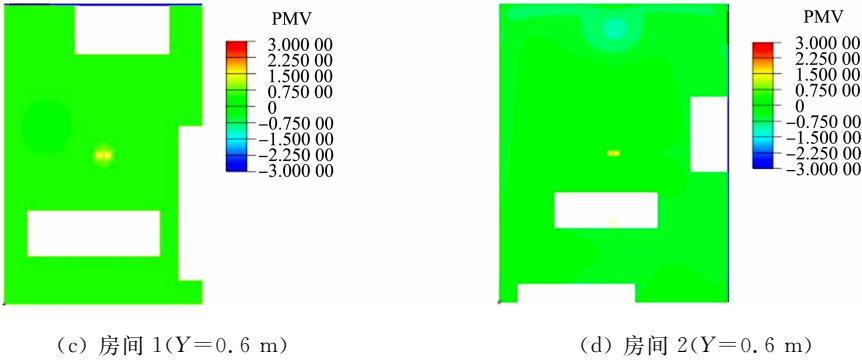


图 9 各房间不同截面的 PMV 图

Fig. 9 PMV diagram of different cross-sections in each room

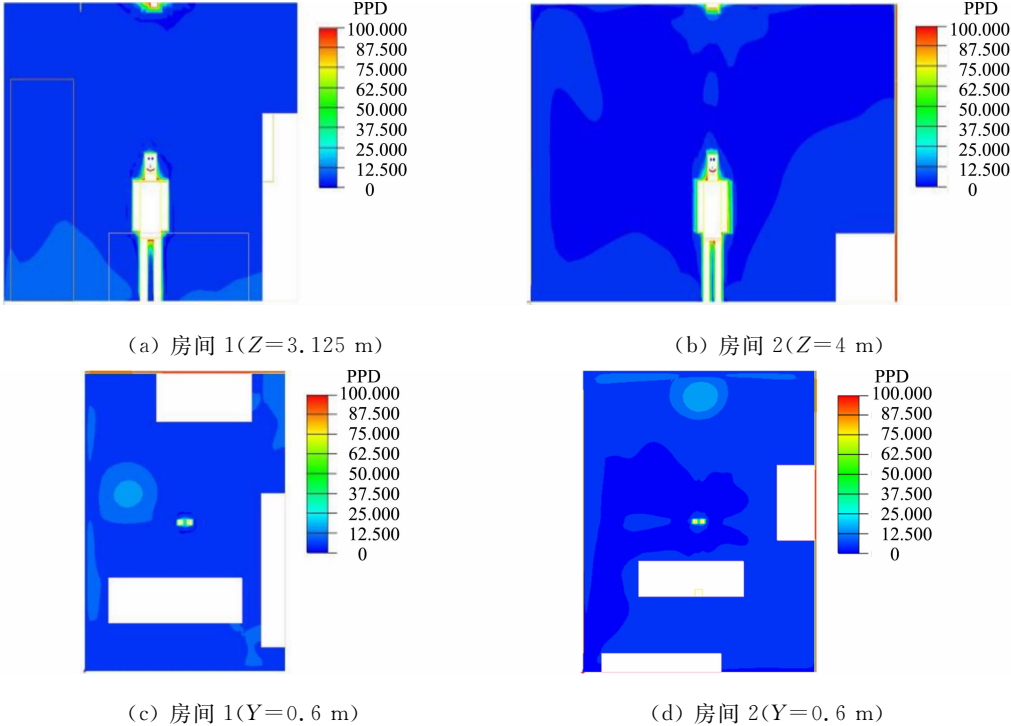


图 10 各房间不同截面的 PPD 图

Fig. 10 PMV diagram of different cross-sections in each room

渐降低,但波动幅度不大;而在平面内风口下,PPD 值稍高,但  $PPD \leq 20\%$ ,满足舒适性要求.

模拟结果显示,采用地板直喷式多联机热泵系统夏季供冷时,管程差约为 35 m 的两个房间内各项指标均在标准范围内,都满足舒适性要求.说明采用地板直喷式多联机热泵系统时,管程较大的房间也能有着较好的舒适性,且与管程较小的房间舒适性差别不大.

4 结论

通过实验对比了太原市采用地板直喷式多联机热泵系统夏季供冷的建筑内,水平管程相差约 35 m 的两个房间中的地板表面温度、竖直温度分布、室内温湿度,验证了数学物理模型的正确性.采用 Airpak 3.0 模拟了两个房间的温度场、速度场、PMV 值和 PPD 值的分布,得出以下 3 点主要结论.

1) 采用地板直喷式多联机热泵系统夏季供冷时,管程较长的房间地板表面平均温度略高,两个房间平均相差 1℃左右,最大不超过 2℃.这说明采用地板直喷式多联机热泵系统,虽然房间较远,管程较长,也可以有较好的末端温度,可适用于面积大、有多房间供冷需求的场所.

2) 采用地板直喷式多联机热泵系统夏季供冷的两个房间,距地面 0.1 m 处温度都高于 20℃,竖直温度梯度都为正值;而距地面 0.1 与 1.7 m 处的温差均小于 3℃,室内风速均小于 0.5 m·s<sup>-1</sup>.各房间同等高度温差也小于 2℃.说明,管程较长与管程较短的房间舒适性均满足相关要求.

3) 两个房间平均温度维持在  $21\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,夏季较为舒适.近地面处,风口下人员稍有不满意,但工作区域内温度场均匀,PMV 值和 PPD 值均在标准范围内,舒适性良好.

因此,地板直喷式多联机热泵系统在夏季供冷时,即使最远端的房间管程较长,也可以保证房间舒适性,且有着良好的供冷效果,与其他供冷房间差异较小.地板直喷式多联机热泵系统对面积大、有多房间供冷需求的场所更加适用.

## 参考文献:

- [1] 王李子.关于空气源热泵直接地板辐射供暖效果的研究[J].西部皮革,2019,41(6):50. DOI:CNKI:SUN:XBPG.0.2019-06-044.
- [2] 杜彦,田琦,杨晋明,等.空气源热泵直接地板辐射供暖系统优化运行方式[J].华侨大学学报(自然科学版),2015,36(2):199-204. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.02.0199.
- [3] 吴兆武.太阳能直接地板辐射采暖系统参数的优化研究[D].山西:太原理工大学,2011. DOI:10.7666/d.d198862.
- [4] 杜海存,叶茂杰,戴源德.太阳能-空气源热泵直接地板辐射采暖系统的实验研究[J].科学技术与工程,2016,16(20):275-279. DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2016.20.050.
- [5] 贺兴旺,苏保青.浅析太原市地板辐射供冷的应用[J].山西建筑,2008,34(5):27-28. DOI:10.3969/j.issn.1009-6825.2008.05.015.
- [6] 周致田,李琦芬,赵林辉,等.地板辐射供冷系统的实验与分析[J].上海电力学院学报,2013,29(4):410-414. DOI:10.3969/j.issn.1006-4729.2013.04.024.
- [7] 王园园.冷剂辐射式供冷暖系统舒适性研究和能耗分析[D].郑州:中原工学院,2016. DOI:10.7666/d.D01035931.
- [8] 张东亮,王子介,张旭.干式地板辐射供冷结合置换通风复合式系统实验研究[J].建筑科学,2009,25(6):38-42. DOI:10.3969/j.issn.1002-8528.2009.06.009.
- [9] CEN Chao,JIA Yihong,LIU Kuixing,*et al.* Experimental comparison of thermal comfort during cooling with a fan coil system and radiant floor system at varying space heights[J]. Building and Environment,2018,141:71-79. DOI:10.1016/j.buildenv.2018.05.057.
- [10] 顾文涛.地板辐射供冷模拟及相应的降湿问题分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009. DOI:10.7666/d.D270535.
- [11] LIU Jiying,DALGO D A,ZHU Shengwei,*et al.* Performance analysis of a ductless personalized ventilation combined with radiant floor cooling system and displacement ventilation[J]. Building Simulation,2019,12(5):905-919. DOI:10.1007/s12273-019-0521-9.
- [12] 杨华,赵福松,李少雄,徐疆.地板辐射加风盘冷暖两联供系统的应用分析[J].建设科技,2018(23):69-71. DOI:10.16116/j.cnki.jskj.2018.23.013.
- [13] 马小丹,王梦飞,蒲宇航,等.多联干式毛细管辐射热泵室内热舒适性实验研究[J].制冷学报,2020,41(3):102-110. DOI:10.3969/j.issn.0253-4339.2020.03.102.
- [14] 刘刚,钱叶,刘魁星,等.地板辐射供冷系统建筑空间尺寸参量对热感觉的影响[J].天津大学学报,2020,53(8):777-784. DOI:10.11784/tdxbz201907061.
- [15] 李龙新,尚少文.空气源热泵直接地板辐射供暖系统的发展与展望[J].建筑与预算,2017,(8):32-35. DOI:10.13993/j.cnki.jzyys.2017.08.009.
- [16] 郭利华,朱能,蒋薇.人体热舒适性的实验研究[C]//全国暖通空调制冷 2002 年学术文集.珠海:中国制冷学会,2002:2065-2069.

(责任编辑:黄仲一 英文审校:方德平)