

辐射-新风复合系统室内热环境影响因素模拟研究

黄萍, 曲明璐, 黑迎晓, 张饶

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 以苏州市采用辐射-新风复合系统的一个次卧室为研究对象, 运用 TRNSYS 软件进行模拟研究。研究在夏季工况下室内设定温度、辐射末端供水流量、供水温度对辐射-新风复合系统室内热环境和室内温度滞后时间的影响, 并探究了系统合适的预冷时间。结果表明, 在夏季工况下, 室内设定温度和供水温度改变时室内热环境变化较大, 供水流量对室内热环境有一定的影响, 供水流量从 220 kg/h 增加到 260 kg/h 时, 室内温度达到设定温度的时间提前了 1 h, 供水流量不同, 室内热环境达到稳定的时间也不同; 供水温度对室内热环境的影响比供水流量明显, 供水温度越低, 预计平均舒适度 PMV 达到 I 级舒适范围的时间越短; 为满足室内热舒适的要求可提前 1.0~1.5 h 开启系统。

关键词: 辐射-新风复合系统; 室内热环境; 热舒适; TRNSYS 软件模拟

中图分类号: TU 831.1 **文献标志码:** A

Effecting factors of radiation-fresh air system on indoor thermal environment

HUANG Ping, QU Minglu, HEI Yingxiao, ZHANG Rao

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A secondary bedroom with radiation-fresh air composite system in Suzhou was taken as the research object. By using TRNSYS software simulation method, the influence of indoor setting temperature, radiation terminal water supply flow and water supply temperature on indoor thermal environment and indoor temperature lag time of radiation-fresh air composite system was studied under summer working conditions, and the appropriate precooling time of the system was explored. The results show that the indoor thermal environment changes greatly when the indoor setting temperature and water supply temperature change in summer, and the water supply flow has a certain impact on the indoor thermal environment. When the water supply flow increases from 220 kg/h to 260 kg/h, the time for the indoor temperature to reach the setting temperature is 1.0 h ahead of time. When the water supply flow is different, the time for the indoor thermal environment to reach stability is also different. The impact of water supply temperature on the indoor thermal environment is more obvious than that of water supply flow. Obviously, the lower the water supply temperature is, the shorter the time for PMV to reach class I comfort range is. In order to meet the requirements of indoor thermal comfort, the system

收稿日期: 2020-10-18

第一作者: 黄萍 (1996-), 女, 硕士研究生. 研究方向: 空气源热泵. E-mail: huangping519@126.com

通信作者: 曲明璐 (1984-), 女, 副教授. 研究方向: 空气源热泵、建筑设备传热传质. E-mail: quminglu@126.com

can be opened 1.0~1.5 h in advance.

Keywords: radiation-fresh air system; indoor thermal environment; thermal comfort; TRNSYS software simulation

在辐射空调系统中,室内引入新风系统不仅能除去室内的潜热负荷,而且还能满足除湿、通风及防止结露的要求,从而满足人们对于室内环境的要求^[1]。孙凯^[2]通过模拟研究表明,在其他条件都相同的情况下,地板辐射加置换通风系统比其他系统舒适度更高。陈剑波等^[3]研究发现,多联机户式辐射空调系统比其他常规系统更节能。刘杰等^[4]通过研究发现,辐射-新风复合系统要求的送风含湿量比常规空调系统更低。陈付齐^[5]对户式辐射空调系统进行了研究,在保证新风除湿的要求下提高供水温度会降低建筑能耗。刘前龙^[6]研究发现,在辐射空调系统运行过程中对换热能力影响较大的参数为供水温度。崔新阳等^[7]研究了系统运行过程中毛细管间距和供水温度这2个参数对毛细管顶棚温度场的影响。隋学敏等^[8]对辐射供冷空调室内热环境控制变量的选择进行了研究。吴长风等^[9]研究了在不同启动模式下,辐射顶板加新风系统的辐射顶板表面温度和室内空气露点温度等参数的动态特性。

供水流量和供水温度是空调系统的重要参数,供水流量和供水温度的改变直接会对空调系统的回水温度、系统中水泵的耗电量造成影响,同时影响室内温度和舒适度。本文采用数值模拟方法对夏热冬冷地区住宅内的辐射-新风复合系统进行研究,研究在夏季工况下室内设定温度、辐射末端供水温度和供水流量的改变对室内热环境的影响,可为辐射-新风复合系统的运行和调控提供理论基础。

1 系统原理及实验设置

1.1 实验系统

本辐射-新风复合系统的辐射末端形式为顶板毛细管网,新风系统采用下送上回,系统如图1所示。辐射-新风复合系统由空气源热泵机组、水-水板式换热器、新风除湿机、分水器、集水器和毛细管网辐射末端组成。其中,空气源热泵机组作为冷源、热源同时对辐射末端和新风除湿机

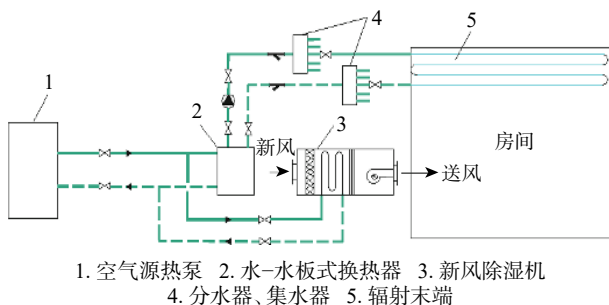


图1 辐射-新风复合系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of radiation-fresh air composite system

供冷/供热。系统可实现温度、湿度独立控制,房间温度通过调节辐射末端水流量进行控制,房间湿度通过调节新风除湿机水流量和新风量进行控制。

1.2 实验设置

实验建筑为位于苏州市工业园区内的某8层住宅,实验的样板房位于第6层,层高为3 m,建筑面积为120 m²,空调面积为94.2 m²,主要包括客厅、主卧、次卧及书房等,样板房的平面图如图2所示。

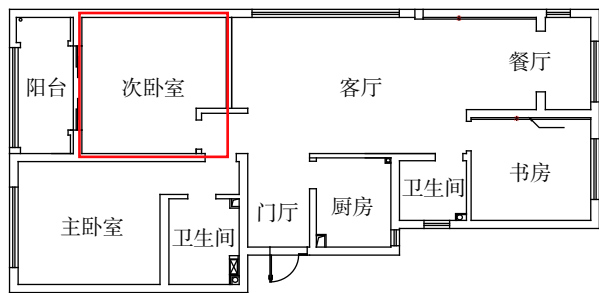


图2 样板房的平面图

Fig.2 Plan of model house

图2中框选出的次卧室为本次实验研究的对象。实测数据都来自于对次卧室的实测,次卧室围护结构参数如表1所示。

夏季实验时间为2018-08-07—2018-08-10,实验期间室内温度设为24℃。主要对室外温度、次卧室的室内温度、吊顶表面温度、西墙壁温度进行实测。使用温度传感器来测量西墙内表面温度和顶板表面温度,温度传感器为T型热电偶。

表 1 次卧室围护结构参数

Tab.1 Parameters of secondary building envelope

围护结构参数	材料	厚度/ mm	导热系数/ (W·m ⁻² ·K ⁻¹)	比热容/ (kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
砖墙 17-240-2	水泥砂浆抹灰	20	0.93	0.84
	砖墙	240	0.81	0.88
	防潮层	5	0.17	1.47
	脲醛泡沫塑料	48	0.05	1.47
	隔汽层	5	0.17	1.47
	钉板条及钢网抹灰	20	0.21	2.51
双层6 mm 外窗	平板玻璃	18	0.76	0.84
	热流水平(垂直)10 mm	12	0.08	1.01
	平板玻璃	15	0.76	0.84

实验数据通过安捷伦 34901A 数据采集仪进行采集。住宅内装有后台智能控制系统，室内温度和室外温度通过该系统读取和记录。

2 模型

2.1 系统模型

根据实际建筑中次卧室具体的围护结构参数，运用 TRNSYS 软件建立所需要的系统模型。如图 3 所示，模型中的建筑(即 Type56)部件是实际建筑中的次卧室，其具体的围护结构参数设置是参照次卧室的围护结构来进行逐步设定的。气象参数通过 Weather data 模块(TMY2)来设置，该模块可通过读取天气文件数据库中苏州地区的气象参数，并将室外空气温度、室外空气相对湿度等气象参数连接到后续模块中，以保证室外动态气象参数的输入。在 Type108 模块中，设置系统设定的温度，并允许有±0.5 °C 的波动。在“新风”、“供水流量及温度”、“温度”、“边界温度”、“启停”以及“服装热阻”等计算器内输入相应的参数，将输入部件与输出部件进行连接，系统正常

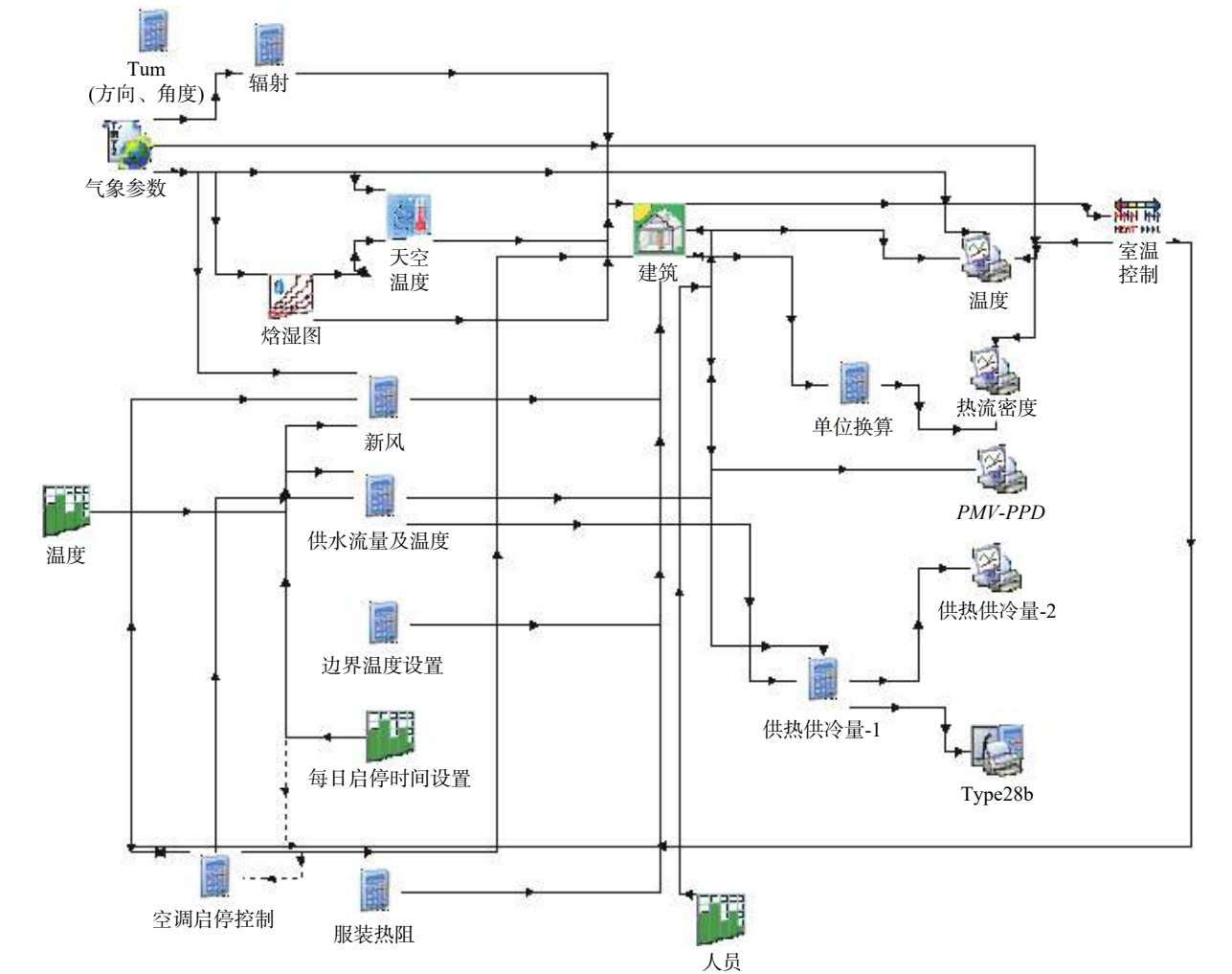


图 3 辐射-新风复合系统模拟图

Fig.3 Simulation diagram of radiation-fresh air system

运行后, 在“温度”、“热流密度”、“*PMV-PPD*”等输出部件中会输出相应的数据和图像, 便于后续的分析。

根据已有的实验和实测结果^[10-11], 系统中的新风机可以承担湿负荷, 保证系统不结露, 因此, 将新风参数设置为固定值, 新风干球温度为 22.0℃, 相对湿度为 60%, 风速为 0.3 m/s, 本文仅研究改变辐射末端参数对室内热环境的影响。模拟中设定室内人数为 1 人, 夏季服装热阻为 0.5 clo, 新陈代谢率 1.2 met。采用预计平均舒适度 *PMV* 和预计不满意率 *PPD* 来评价人体热舒适, 在《民用建筑室内热湿环境评价标准》GB/T50785-2012^[12]中规定: 当 $-0.5 \leq PMV \leq +0.5$, $PPD \leq 10\%$ 时室内热舒适等级为 I 级。当夏季供冷, 热舒适等级为 I 级时, 相对湿度应为 40%~60% 之间。

2.2 实验验证

为验证所建模型的可靠性, 根据夏季实测条件, 选取 2018-08-10 的室外气象参数, 通过 Weather data 模块输入, 系统实测运行时间为 8:00—21:00, 选取该时段进行模拟。在保证外部参数一致的情况下, 按照表 2 的实测参数作为系统输入参数, 对模型进行仿真模拟, 输出结果, 将室内温度、西墙内表面温度和屋顶内表面温度的模拟数据与

表 2 实测参数
Tab.2 Measured parameters

室内温度/℃	供水温度/℃	供水流量/(kg·h ⁻¹)
24	17	240

实测数据进行对比分析。

由图 4 可以看出, 室内温度、西墙内表面温度和屋顶内表面温度的实测值与模拟值的趋势基本一致, 室内温度的实测平均值为 23.74℃, 模拟平均值为 23.68℃, 实测平均值与模拟平均值之间的相对误差为 0.25%。西墙内表面、屋顶内表面温度的实测平均值与模拟平均值之间的相对误差分别为 0.3% 和 0.17%。模拟得出的数值与实测数值之间的误差较小, 数据基本吻合, 因此, 本模型合理、可靠, 可以用来进行下一步的模拟工作。

3 模拟及结果分析

3.1 不同室内设定温度模拟结果分析

选取夏季工况, 在其他参数不变的情况下, 设定不同的室内温度时, 对系统开启后室内热环境及热舒适的动态变化情况进行研究, 具体模拟参数设置如表 3 所示。

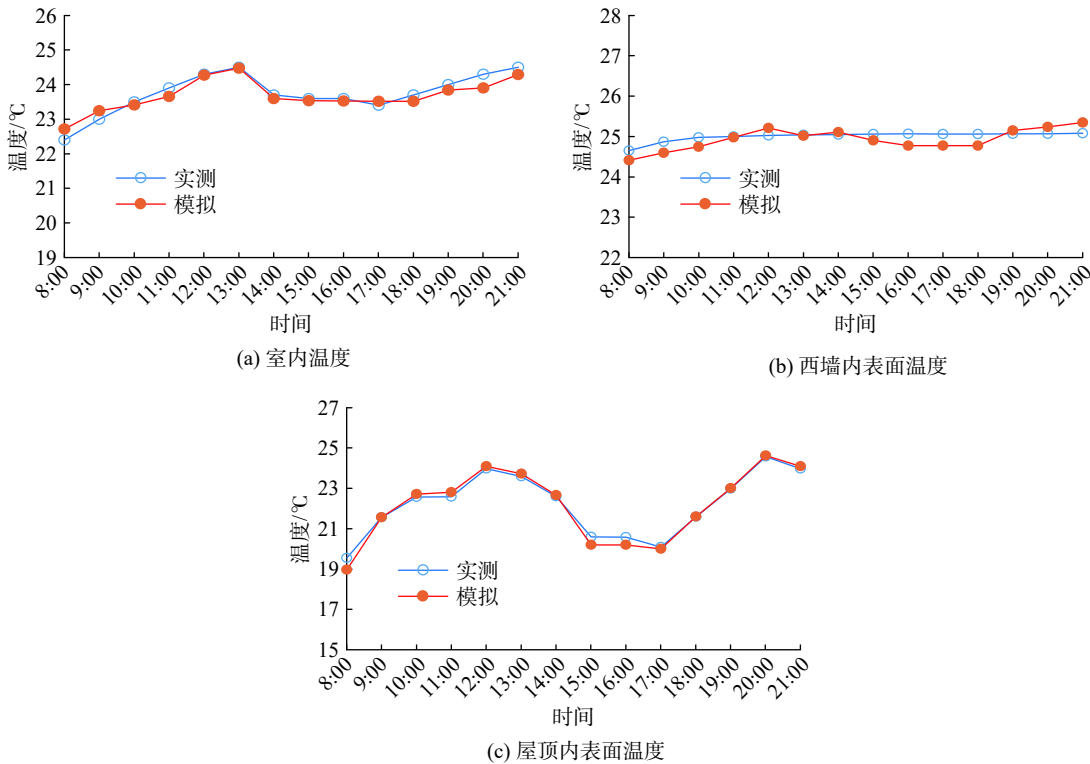


图 4 实测结果与模拟结果对比
Fig.4 Comparison of measured and simulated results

表 3 夏季不同室内设定温度时参数设置

Tab.3 Parameter setting under different indoor setting temperatures in summer

室内温度/℃	供水温度/℃	供水流量/(kg·h ⁻¹)
25	17	240
26	17	240
27	17	240
28	17	240
29	17	240

选取 2018-07-28 进行模拟仿真。未开启系统时,室内的初始温度为 30.0℃,0:00 开启系统并观察在不同室内设定温度下的室内温度变化趋势。在整个模拟过程中,室内温度波动范围为设定温度的±0.5℃。

由图 5 可知,当室内设定温度为 25.0℃时,系统开启后,室内温度一直下降,到 10:00 时,室内温度降为 25.5℃,主要原因是辐射换热方式供冷能力较弱、处理负荷速度较慢,不能在较短的时间内使室内温度达到设定值。当室内设定温度为 26.0℃时,在 5:00 时,室内温度达到 26.5℃,此后温度在 25.5~26.5℃之间波动;当室内设定温度为 27.0℃时,在 3:00 时,室内温度为 27.3℃,随后室内温度在 26.5~27.5℃之间波动;当室内设定温度分别为 28.0℃和 29.0℃时,在 1:00 左右,室内温度均达到了设定的温度,并且在后续运行时间内,室内温度一直在设定温度的波动范围内。由于辐射空调系统具有一定的热惯性,辐射末端系统开启后室内温度达到设定温度的时间较长。

由图 6 可知,当系统稳定后,室内设定温度为 28.0℃时,PMV 在 0.5 左右波动,这个值是标

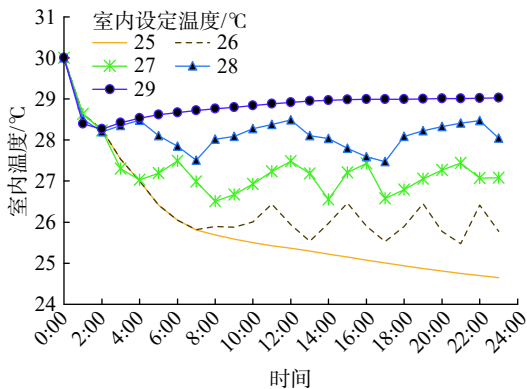


图 5 夏季不同室内设定温度时室内温度变化

Fig. 5 Variation of indoor temperature under different indoor setting temperatures in summer

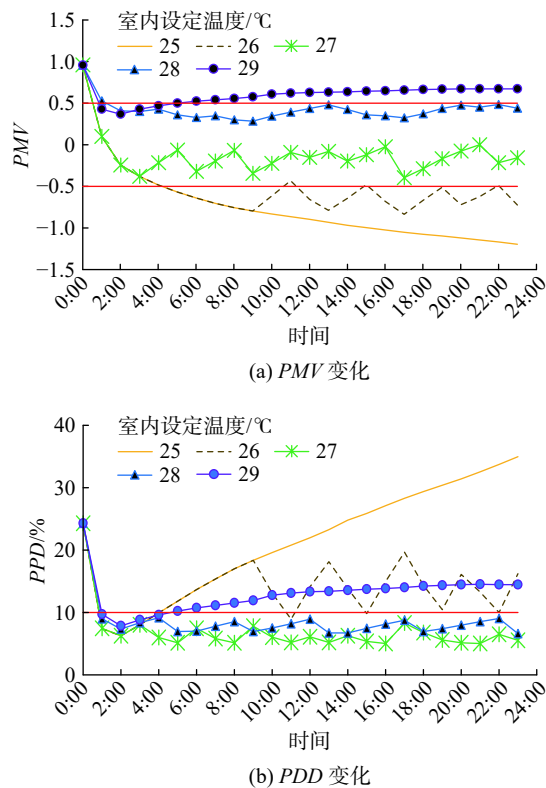


图 6 夏季不同设定温度时室内 PMV, PPD 变化

Fig. 6 Variation of indoor PMV and PPD under different setting temperatures in summer

准规定的人体 I 级舒适的临界值,该温度下人体也会感觉到比较舒适,PPD 的范围为 5%~10%,在 I 级舒适范围内。而当室内温度低于 28.0℃时,室内环境稳定后,PPD 的值大于 10%,不能满足 I 级舒适要求。当温度为 29.0℃时,PMV 已经超过了 0.5,人体会感觉偏热。综合考虑室内温度变化和舒适性,推荐夏季室内温度设为 28.0℃。

3.2 不同辐射末端供水流量下模拟结果分析

选取夏季工况,将夏季室内温度设定为 28.0℃,辐射末端供水温度为 17.0℃,仅改变辐射末端供水流量,并且控制系统运行过程中其他参数不变,实测时供水流量为 240 kg/h,模拟时在 240 kg/h 上下取值,将供水流量分别设定为 220, 230, 240, 250, 260 kg/h。

由图 7 可知,当供水流量设为 220 kg/h 时,在系统开启 2 h 内,室内温度下降较快,2 h 后室温达到 28.5℃,然后缓慢下降,一直在 27.5~28.5℃之间波动。当供水流量设为 260 kg/h 时,在系统开启 1 h 内,室内温度达到 28.3℃,1 h 后室内温度一直在室内设定温度波动范围内。当供水流量从 220 kg/h 增加到 260 kg/h 时,供水流量提高了大约 18.2%,室内温度达到室内设定温度波动范围的

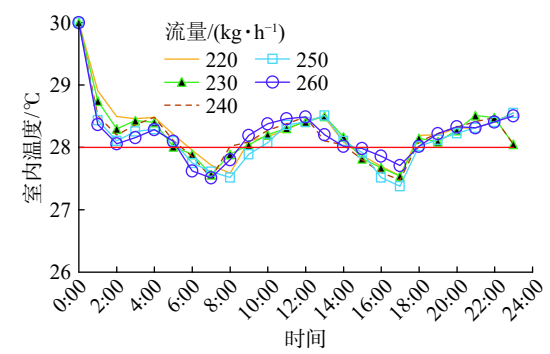


图 7 夏季不同辐射末端供水流量时室内温度变化

Fig. 7 Variation of indoor temperature under different water supply flow at radiation end in summer

时间提前了 1 h。

由图 8 可知, 在不同工况下, 平均辐射温度在 27.5~28.5 °C 之间上下波动。

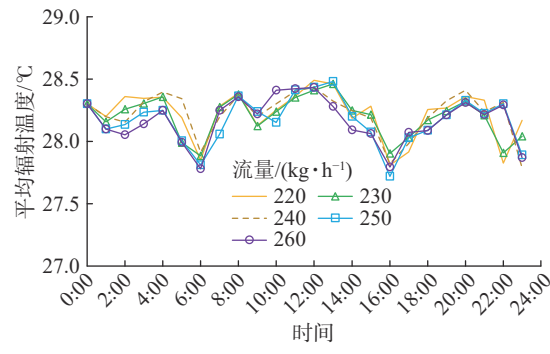


图 8 夏季不同辐射末端供水流量时室内平均辐射温度变化

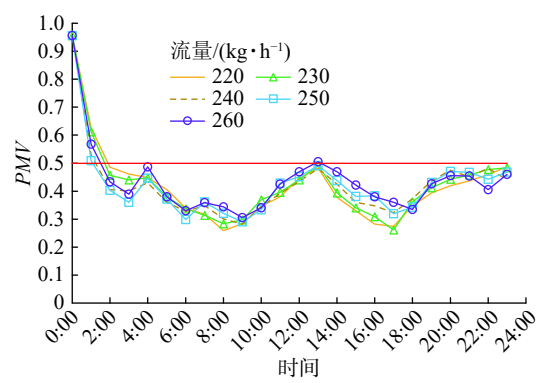
Fig.8 Variation of indoor average radiation temperature under different water supply flow at radiation end in summer

由图 9 可知, 当供水流量设为 220 kg/h 时, 在 2:00 后 $PMV \leq 0.5$, 当供水流量设为 230 kg/h 时, PMV 在 2:00 时达到 0.5, 当供水流量设为 240~260 kg/h 时, 在 1:00 后 $PMV \leq 0.5$ 。当供水流量为 220~250 kg/h 时, 在 3:00 后 $PPD < 10\%$, 当供水流量为 260 kg/h 时, 在 2:00 后 $PPD < 10\%$, 由此可见, 供水流量不同, PMV , PPD 达到 I 级舒适范围的时间并不相同, 改变供水流量会对夏季室内热环境及热舒适产生一定的影响。但是, 同一时刻, 不同工况下的 PMV , PPD 值相差较小。

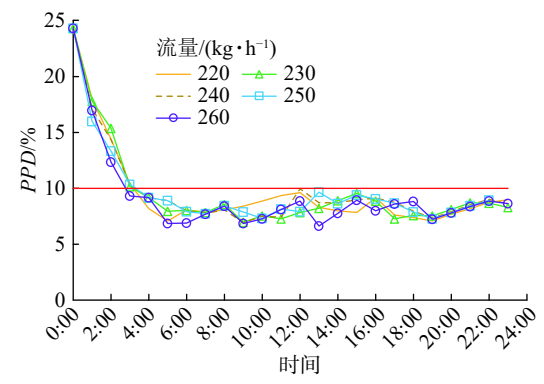
3.3 不同辐射末端供水温度下模拟结果分析

在系统运行过程中, 将夏季辐射末端供水流量设定为 240 kg/h, 室内温度设定为 28.0 °C, 仅改变供水温度, 其他参数保持不变, 实测时供水温度为 17.0 °C, 模拟时在 17.0 °C 上下取值, 将供水温度设定为 16.0, 17.0, 18.0, 19.0 °C。

由图 10 可知, 在系统开启到室内温度稳定的



(a) 室内 PMV 变化



(b) 室内 PPD 变化

图 9 夏季不同辐射末端供水流量时室内 PMV, PPD 变化

Fig. 9 Variation of indoor PMV and PPD under different water supply flow at radiation end in summer

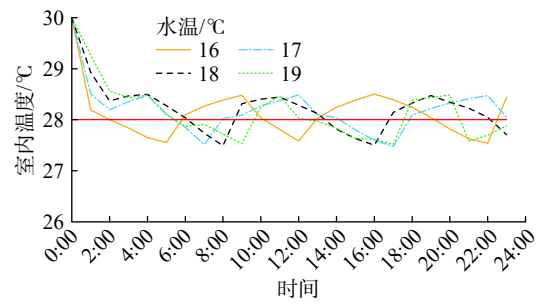


图 10 夏季不同辐射末端供水温度时室内温度变化

Fig. 10 Variation of indoor temperature under different water supply temperatures in summer

阶段, 供水温度越低, 室内温度达到室内设定温度的时间就越短, 反之亦然。当供水温度为 16.0, 17.0 °C 时, 系统开启后 1 h, 室内温度就达到了室内温度设定范围, 而当供水温度设置为 18.0, 19.0 °C 时, 系统开启 2 h, 室内温度才达到室内温度设定的范围 27.5~28.5 °C。室内温度稳定后, 室内温度在室内设定温度的范围内波动。

图 11 为夏季不同的辐射末端供水温度下, 在系统运行过程中, 平均辐射温度一直处于 27.5~

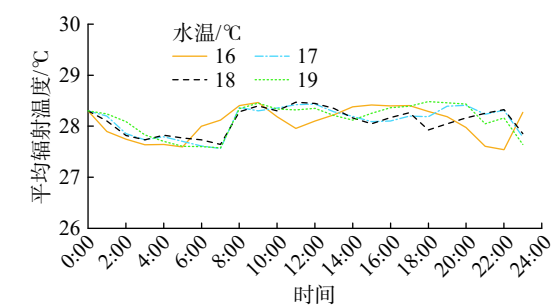
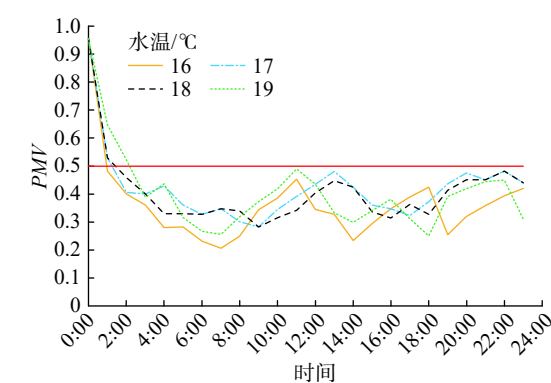


图 11 夏季不同辐射末端供水温度时平均辐射温度的变化

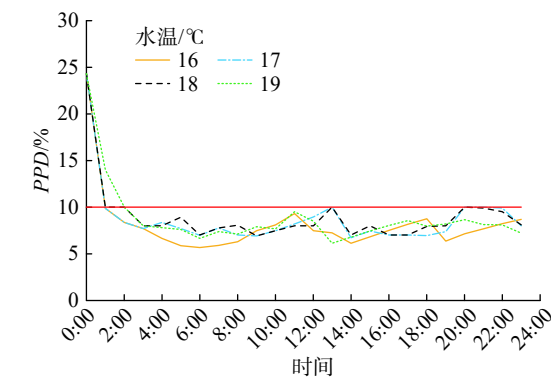
Fig. 11 Variation of mean radiation temperature under different water supply temperatures at radiation end in summer

28.5℃范围内。

由图 12 可知,当供水温度为 16.0, 17.0, 18.0℃时,在 1:00 后, $PMV < 0.5$ 。当供水温度为 19.0℃时,在 2:00 后, $PMV < 0.5$,水温越低, PMV 达到 I 级舒适范围的时间越短。同样,供水温度为 19.0℃时,在 2:00 后, $PPD < 10\%$,达到 I 级舒适范围的时间最长。供水温度设定为 16.0, 17.0, 18.0, 19.0℃时,系统稳定后,室内 PMV 和 PPD 指标均在 I 级



(a) 室内 PMV 变化



(b) 室内 PPD 变化

图 12 夏季不同辐射末端供水温度时室内 PMV , PPD 变化

Fig. 12 Variation of indoor PMV and PPD under different water supply temperatures at radiation end in summer

舒适范围内波动,均满足室内舒适要求,但综合考虑室内热环境稳定所需时间、 PMV 的整体变化和辐射的影响,推荐夏季系统运行过程中,供水温度设为 18℃。

由上述分析可知,由于辐射系统具有热惯性,室内温度达到设定温度的时间和室内达到热舒适要求的时间较长,因此,为了满足室内舒适性的要求,有必要研究提前开启系统时室内热环境和热舒适的情况。

3.4 夏季系统提前开启时模拟结果分析

研究的夏季工况在 13:00 时室外温度为 34.9℃, 5:00 时室外温度为 28.0℃,分别为该天的室外最高温度和最低温度。由于该建筑为住宅,因此,在工作日时,设定人在 18:00 时到家,即在 18:00 时正常开启系统。在 18:00 前开启系统对室内温度进行预冷。分别对不提前以及提前 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 h 开启系统进行模拟,研究不同工况下室内热环境和热舒适的动态变化。只选取系统开启前、后几个小时来进行分析,具体的参数设置如表 4 所示。

图 13 为夏季提前开启系统时室内温度变化情况。由图 13 可知,系统提前开启的时间越长,

表 4 夏季系统提前开启时参数设置

Tab.4 Parameter setting for early start of system in summer

室内温度/℃	供水温度/℃	供水流量/(kg·h ⁻¹)	提前开启时间/h
28	19	240	0
28	19	240	0.5
28	19	240	1.0
28	19	240	1.5
28	19	240	2.0

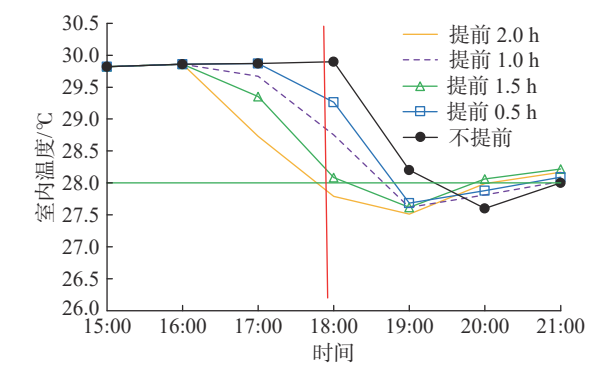
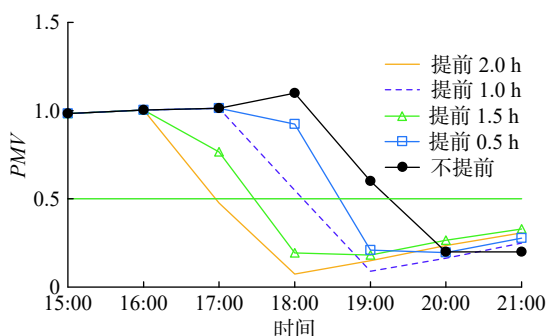


图 13 夏季系统提前开启时室内温度变化

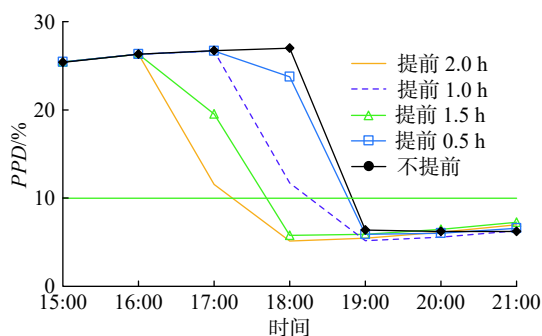
Fig. 13 Variation of indoor temperature when the system is turned on ahead of time in summer

18:00 时室内温度就越低,达到室内设定温度后在 27.5~28.5 °C 之间波动。在不同工况下,18:00 室内温度分别为 27.8, 28.1, 28.8, 29.3, 29.9 °C。

图 14 分别表示夏季系统提前开启时室内 PMV 和 PPD 的变化情况。由图 14 可知,在不同工况下,18:00 时室内 PMV 的值分别为 0.1, 0.2, 0.5, 0.9 和 1.1, PPD 的值分别为 5.1%, 5.8%, 10.7%, 23.8% 和 27.0%。



(a) 室内 PMV 变化



(b) 室内 PPD 变化

图 14 夏季系统提前开启时室内 PMV , PPD 变化

Fig.14 Variation of indoor PMV and PPD when the system is turned on ahead of schedule in summer

结合以上分析可知,在系统提前 1.0 h 开启时,18:00 室内温度为 28.8 °C, PMV 和 PPD 指标分别为 0.5 和 10.7%,室内温度以及热舒适均略高于室内设定温度和室内 I 级舒适的指标。而在提前 1.5 h 开启系统,18:00 时室内温度在设定温度的波动范围内并且室内热舒适处于 I 级舒适范围,因此,夏季时可以考虑提前 1.0~1.5 h 开启系统。

4 结 论

模拟研究了在夏季工况下,改变辐射末端供水流量和供水温度对室内热环境的影响,得出结论:

a. 供水流量从 220 kg/h 增加到 260 kg/h,室内

温度达到室内设定温度的时间提前了 1 h,对 PMV 和 PPD 达到 I 级舒适范围的时间也有一定的影响;供水温度不同时平均辐射温度、 PMV 和 PPD 变化较大,供水温度对室内热环境的影响较大,供水温度越低,室内温度的滞后时间越短,室内热环境达到稳定的时间越短。

b. 针对苏州地区夏季工况的模拟研究,综合考虑 PMV 和 PPD 的整体变化和辐射的影响,推荐夏季辐射末端供水温度为 18.0 °C。

c. 辐射系统具有一定的热惯性。在不同室内设定温度下,室内温度达到室内设定温度的时间均大于或等于 1 h;为了达到室内热舒适的要求,可以提前 1.0~1.5 h 开启系统预冷。

参考文献:

- [1] MUMMA S A. Overview of integrating dedicated outdoor air systems with parallel terminal systems[J]. ASHRAE Transactions, 2001, 107(1): 545-552.
- [2] 孙凯. 辐射供冷与供热和新风复合系统的模拟与实验研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2016.
- [3] 陈剑波, 赵蒙, 王飞. 多联机户式辐射空调系统节能分析 [J]. 暖通空调, 2018, 48(9): 54-57.
- [4] 刘杰, 侯青燕, 苗艳芳. 辐射空调新风除湿系统设计计算 [J]. 暖通空调, 2015, 45(6): 27-29.
- [5] 陈付齐. 夏热冬冷地区住宅建筑空气源热泵户式辐射空调的能耗分析 [D]. 上海: 上海理工大学, 2018.
- [6] 刘前龙. 毛细管辐射吊顶加独立新风系统运行特性研究 [D]. 上海: 上海工程技术大学, 2016.
- [7] 崔新阳, 李永安, 尹纲领. 毛细管平面空调系统热工参数设计探讨 [J]. 山东建筑大学学报, 2009, 24(6): 581-586.
- [8] 隋学敏, 张旭, 韩光辉. 辐射供冷空调室内热环境控制变量的选择 [J]. 流体机械, 2013, 41(3): 68-73.
- [9] 吴长风, 刘泽华, 阳晓君, 等. 毛细管辐射顶板+新风系统启动特性研究 [J]. 建筑热能通风空调, 2017, 36(1): 27-31.
- [10] 于海照. 基于 VRF 的户式化辐射空调系统的应用研究 [D]. 上海: 上海理工大学, 2015.
- [11] LI Z, CHEN J B, YU H Z, et al. The development and experimental performance evaluation on a novel household variable refrigerant flow based temperature humidity independently controlled radiant air conditioning system[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 122: 245-252.
- [12] 中国建筑科学研究院. GB 50736-2012 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.