

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202001020



冷冻水调节模式对冷辐射板性能的影响

马琛¹, 丁云飞^{1,2}

(1. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006;
2. 广州大学 广东省建筑节能与应用技术重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要: 通过实验测试,研究冷辐射板表面快结露时,冷冻水阀门调节模式对冷辐射板的防结露效果、制冷能力和室内热舒适性的影响.结果表明:在冷辐射板表面快要结露时,冷冻水阀门通断调节模式下有较好的防结霜效果,但辐射板制冷能力会下降,室内热舒适性变差;冷冻水阀门比例积分微分(PID)调节模式下的供水流速为 $0.30\sim 0.45\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,冷辐射板既有较好的防结霜效果和制冷能力,又能维持较好的室内热舒适性.

关键词: 冷辐射板; 冷冻水调节; 通断模式; PID 模式

中图分类号: TU 831.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2020)05-0589-06

Effect of Cooling Water Regulation Mode on Performance of Cold Radiation Plate

MA Chen¹, DING Yunfei^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Building Energy Efficiency and Application Technologies,
Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: By means of experimental test, the influence of regulation mode of the cooling water valve on the anti-condensation performance, refrigeration capacity and indoor thermal comfort of the cold radiant panel was investigated, when the surface of the cold radiant panel is about to condense. The results show that the best anti-condensation effect of the cooling water valve in the on-off regulating mode is benign, however, the cooling capacity of the radiator plate decreases, and the indoor thermal comfort degrades. When the flow rate of the cooling water valve in the proportion integration differentiation (PID) regulating mode is $0.30\sim 0.45\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, the cold radiation plate has better anti-condensation performance and refrigeration ability, and can maintain better indoor thermal comfort.

Keywords: cold radiant panel; cooling water regulation; on-off mode; PID mode

辐射空调是一种新型的空调,在辐射空调系统末端的换热形式中,辐射换热形式的占比在 50% 以上^[1]. 冷辐射板的换热主要是通过与人体、室内壁面和家具等进行辐射换热,达到制冷的效果^[2-4]. 辐射空调系统能够很好地避免传统空调带来的垂直温差大、吹风感大等问题,并减少能源的浪费^[5]. 但是,冷辐射板的制冷量小和易结露一直是困扰其工程应用的问题. 针对冷辐射板结露问题,学者们进行了大量研究,主要集中在以不同的送风方式防止冷辐射板结露^[6-12] 及特殊冷辐射板结构^[13-14] 等方面. Yang 等^[6] 通过模拟分析,认为辐射空调系统与置换通风相结合会形成“空气湖”,从而使室内的通气效果较好、气体混合均匀,能够有效地防止冷辐射板表面结露;文献^[7-8] 通过实验分析,认为冷却地板与置换

收稿日期: 2020-01-25

通信作者: 丁云飞(1967-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事建筑节能技术的研究. E-mail:dingyf@126.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878187)

通风相结合工艺风险低,热舒适性高,能够有效弥补地板供冷系统的不足,减少冷辐射板结露;安迎超^[9]通过对比分析,认为置换通风能够增强地板辐射供冷的对流换热效果;周根明等^[10]通过实验对比分析,认为贴附射流与辐射空调系统相结合能够形成类似置换通风的分层效果,并在辐射板表面形成干燥的空气隔离层,起到较好的防结露效果;钱佳炜等^[11]将辐射空调系统与置换通风和贴附射流两种通风形式相结合,认为结合的系统不易让人产生吹风感,能够更高效地防止结露;于志浩等^[12]将置换通风和贴附射流两种结合的通风形式与单一的通风系统进行对比,认为两种通风方式结合的防结露效果远比单种通风系统好,还会有更好的节能性和舒适性;Kang 等^[13]在置换通风上附加喷射器,发现空调系统明显优于地板辐射冷却置换通风空调系统;Tang 等^[14]在不改变辐射板换热性能的条件下,制备新型辐射板,使冷辐射板表面形成疏水的状态,减少冷辐射板的表面结露;刘龙斌等^[15]通过模拟实验分析,确定出水系统的布置形式及水冷机组设备投入情况会对辐射板的性能产生影响。

在冷辐射板的运行过程中,由于室内散湿量突然发生变化,极易导致冷辐射板结露。目前,常用的方法是当室内空气露点高于冷冻水供水温度时,将冷冻水阀门关闭,防止辐射板表面结露,但这导致冷辐射板表面温度上升及制冷量大幅衰减,从而降低人体的热舒适感。利用电动调节阀对冷辐射板冷冻水进水进行比例积分微分(PID)调节,可以在一定程度上改善上述现象。本文借助冷辐射顶板实验台,从冷辐射板的防结霜效果、制冷能力和室内热舒适性 3 个方面,对冷冻水阀门通断调节模式和 PID 调节模式进行比较。

1 实验装置及方案

1.1 实验装置

冷冻水系统由制冷机组、保温水箱、水泵、控制阀门和测量仪器等组成,其控制原理图,如图 1 所示。制冷机组为 2 台制冷量 19.5 kW 的水冷式机组,保温水箱容积约为 4 m³。流量计为玻璃转子流量计,测量精度为±0.5%;冷量为超声波冷热量表,测量精度为±0.1℃。

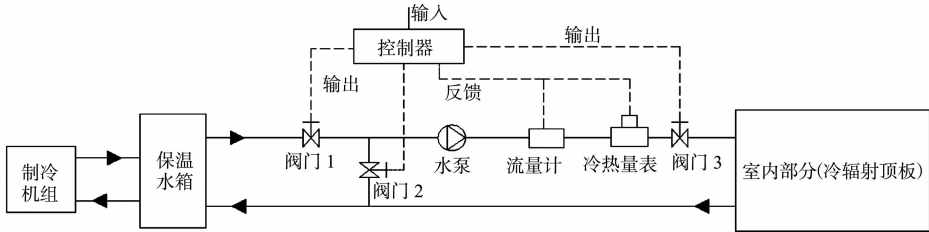


图 1 冷冻水系统控制原理图

Fig. 1 Control schematic diagram of cooling water system

实验开始前,首先启动制冷机组,将保温水箱的水降至所需要的温度。通过水泵及阀门 3 联合调节维持冷辐射板供应水量,通过调节阀门 2 维持冷冻水供水温度。冷冻水供水温度的控制精度为±0.2℃,冷冻水供水流速控制精度为±0.03 m·s⁻¹。

冷辐射实验室的室内尺寸(长×宽×高)为 5.2 m×4.6 m×2.7 m,各冷辐射板并联连接在供回水管上。冷辐射板平面图和剖面图,如图 2 所示。

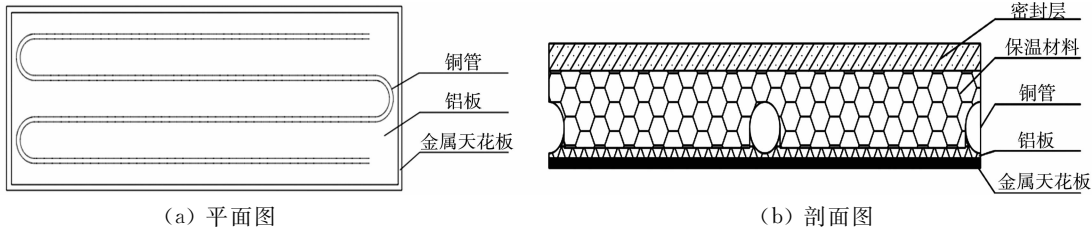


图 2 冷辐射板平面图和剖面图

Fig. 2 Plan and section views of cold radiation panel

实验室顶板共有 44 块冷辐射板,冷辐射板的形状均为长方形,每块辐射板的长度为 1.2 m,宽度为 0.42 m。冷辐射板的剖面结构形式为常规的辐射板形式。测点的编号和实景,如图 3 所示。图 3 中的单元

编号分别与测试点相对应,并在每个编号单元的中央位置及其下方 0.1 m 处分别布置 12 个 T 型热电偶,用于测量板表面温度的变化及板下方空气温度的变化,测量精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$.按照美国采暖、制冷与空调工程师学会(ASHARE)和欧洲辐射测量标准(EN 14240—2004)的要求,将黑球温度计布置于室内的正中央,离地高 1.2 m 处,测量精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

冷辐射板间的水管采用常见的并联连接形式实现制冷(图 3(a)).按照 EN 14240—2004 的要求对模拟热源进行标准制作(图 3(b)),并选用 24 个模拟热源均匀布置,每个模拟热源的发热量为 180 W,以确保室内单位面积的冷负荷为 $180\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.根据 EN 14240—2004 的测量要求,四周的墙壁和地板均选用白色表面的隔热壁面,壁面发射率大于 0.95,且具有良好的隔热效果,可以减少外界环境带来的干扰.

1.2 测试方案

结合欧洲标准 EN 14240—2004 的要求,测量方案有如下 6 个步骤.

步骤 1 将模拟热源均匀布置于室内,使室内的单位面积冷负荷为 $180\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.确保室内密闭,避免外来因素的干扰.

步骤 2 利用室内空调的通风系统对室内空气进行除湿,使室内的相对湿度为 $(60\pm 3)\%$,并设定辐射板冷冻水系统的初始参数,即供水温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,供水流速为 $(0.75\pm 0.03)\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

步骤 3 待室内空气参数稳定后,降低供水温度,直到冷辐射板的表面温度快要降低至室内空气露点温度时,关闭阀门 3;测试室内参数,每 30 s 测一次,共测量 600 s.

步骤 4 重复步骤 2,待空气状态参数稳定后降低供水温度,直至冷辐射板的表面温度降低到室内空气露点温度时,调节阀门 3;控制进入辐射板冷冻的流速为 $0.60\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,测试相关参数.

步骤 5 重复步骤 4,分别控制流速为 $0.45, 0.30, 0.15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,测试相关参数.

步骤 6 将室内的模拟热源取出,抽选身体健康,内穿长袖衬衣、外穿长裤和普通外衣(服装热阻为 $0.155\text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$,即在空气温度 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、空气流速不超过 $0.05\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、相对湿度不超过 50% 的环境中,静坐者感到舒适所需要的服装热阻^[4])的男、女各 12 名,静坐于室内,重复步骤 1~5(每组测试工况前均对室内进行除湿,确保室内的湿度为 $(60\pm 3)\%$),测试人体对不同工况环境的逐时评价情况.

2 实验结果与分析

为避免冷辐射板表面结露,供水阀门通常采用通断调节模式,但这会使冷辐射板表面温度升幅过快、室内热舒适性变差.而供水阀门采用 PID 调节模式可以有效地改善这种情况.实验从冷辐射板的防结霜效果、制冷能力和室内热舒适性 3 个方面,分析通断调节和 PID 调节模式下的冷辐射板性能.

2.1 通断模式下冷辐射板的性能

2.1.1 防结霜效果 冷辐射板结露是由于冷辐射板的表面温度低于周围空气的露点温度时,引起周围空气结露,但冷辐射板的表面温度大于周围空气露点温度时不会引起结露;同样,防结露温差(冷辐射板表面温度与周围空气露点温度的正差值)越大,冷辐射板就越不容易结露,并且冷辐射板在受外界环境因素干扰下出现结露的可能性越小,防结霜效果就越好.通断模式下的平均防结露温差变化,如图 4 所示.图 4 中: $\Delta\theta$ 为防结露温差; t 为实验进行的时间.

由图 4 可知:在阀门通断模式下,冷辐射板的平均防结露温差在短暂平稳后迅速上升,在 600 s 内平均上升率约为 $0.55\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$,并在 330 s 时,平均防结露温差已经大于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,能够满足 EN 14240—2004 的运行要求.说明阀门通断模式下的防结露效果较好,能够在短时间内有效地避免冷辐射板表面结露现象的出现.

2.1.2 制冷能力 冷辐射板的表面平均温度能反映冷辐射板制冷能力的大小.表面平均温度的数值和上升幅度越大,说明冷辐射板表面通过辐射等形式产生的冷量无法满足室内的散热需要,使冷辐射板表

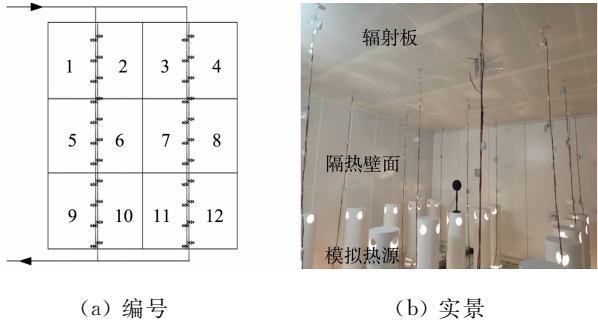


图 3 测试点的编号和实景
Fig. 3 Numbering and scene of test points

面温度急剧上升;表面平均温度越低、上升幅度越小,说明冷辐射板的制冷能力就越强. 通断模式下的表面平均温度变化情况,如图 5 所示. 图 5 中: θ 为表面平均温度.

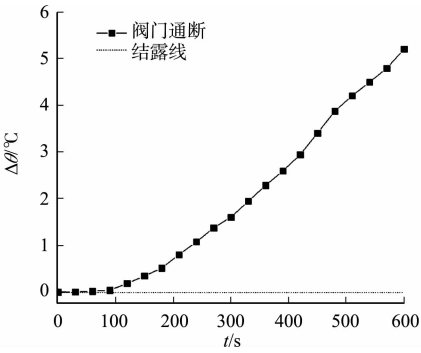


图 4 通断模式下的平均防结露温差变化
Fig. 4 Average temperature variation of anti-condensation under on-off mode

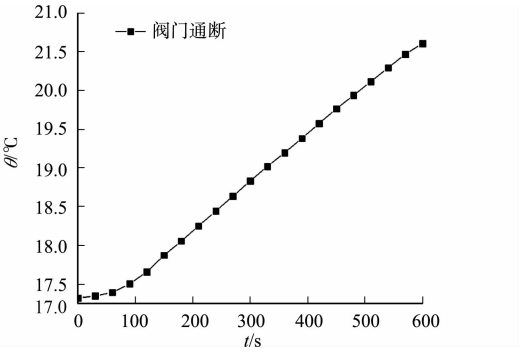


图 5 通断模式下的表面平均温度变化
Fig. 5 Average surface temperature variation under on-off mode

由图 5 可知:在阀门通断后的 90 s,由于冷辐射板内的水管仍有少量的冷冻水,冷辐射板的表面温度变化不大,此时的冷辐射板依然有一定的制冷能力;此后,冷辐射板表面平均温度呈稳定的直线上升状态,并在 300 s 内,表面平均温度上升 2 °C,此时的冷辐射板制冷能力较低.

2.1.3 室内热舒适性 预测平均评价(PMV)指标表示同一工况条件下,绝大多数人的热感觉可以作为评价热环境舒适与否的衡量标准^[16]. 根据人体的冷热情况,可将 PMV 指标分成 7 个级别分度^[4],正值越大,人体就感觉越热. 经测试,实验只使用了 4 个 PMV 指标+3,+2,+1,0,对应使用的 PMV 热感觉标尺分别为很热、热、有点热和中性.

根据热感觉标尺,对身体健康,内穿长袖衬衣、外穿长裤和普通外衣(服装热阻为 $0.155 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$),静坐于室内的 24 人的热感觉情况进行求和平均,得到相应工况条件下的室内热舒适变化情况. 通断模式下的 PMV 变化,如图 6 所示.

由图 6 可知:在阀门通断后的 90 s 内,由于换热的延时,室内的热舒适情况没有出现明显变化,室内的人体依旧处在较为舒适的状态;但是在阀门通断 90 s 后,人体的热舒适情况迅速发生变化,冷辐射板的制冷量不能满足室内的散热需要,室内人体的热负荷正值快速增大,炎热感觉会越来越强;在进行到 300 s 时,人体已经开始感觉到炎热;在进行到 540 s 时,人体已经出现明显的炎热状态,此时,人体感觉到明显的不适.

2.2 PID 调节模式下冷辐射板的性能

2.2.1 防结霜效果 PID 调节模式下的平均防结露温差

变化,如图 7 所示. 图 7 中: v 为供水流速. 由图 7 可知:PID 调节模式下的供水流速越低,平均防结露温差就越大. 当 $v=0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,防结露温差和升幅都最大,上升率约为 $0.21 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$,改善结露的效果最好;当供水流速为 $0 \sim 0.45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,平均防结露温差的最低上升率约为 $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$,在测量的时间内至少能够上升 $0.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$;当 $v>0.45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,平均防结露温差最大仅上升 $0.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$,上升率小于 $0.05 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$,不同供水流速下的平均防结露温差波动范围小于 $0.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$,改善结露的效果相近且不明显. 因此,当 PID 调节模式下的供水流速为 $0 \sim 0.45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,冷辐射板的防结霜效果较好.

2.2.2 制冷能力 PID 调节模式下的表面平均温度变化,如图 8 所示. 由图 8 所示:当 PID 调节模式下的供水流速 $v \leq 0.30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,其表面平均温度曲线呈现先水平稳定后迅速升高的状态,且在不同供水流速 ($0.15, 0.30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 下,产生的制冷效果差异大,表面温度最大差值大于 $1.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$;当 $v > 0.30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,其表面平均温度曲线在短时间上升后逐渐平稳或以较低幅度的速度增长,在不同供水流速 ($0.45, 0.60, 0.75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 下,产生的制冷效果变化小;当供水流速由 $0.30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $0.75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

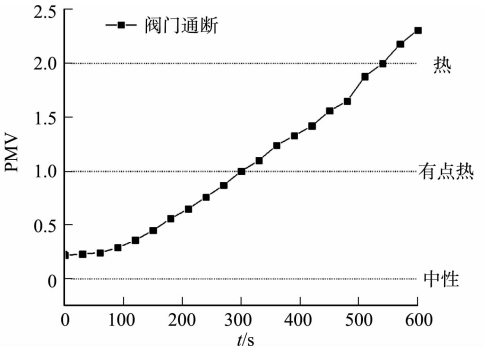


图 6 通断模式下的 PMV 变化
Fig. 6 PMV variation under on-off mode

时,其表面温度最大差值小于 0.9℃.

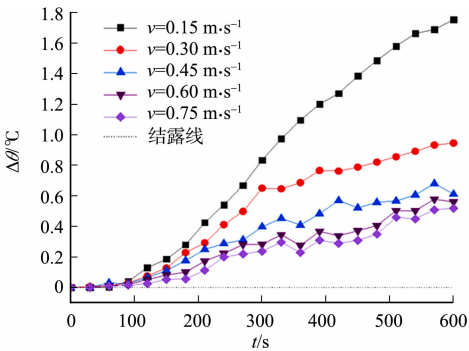


图 7 PID 调节模式下的平均防结露温差变化
Fig. 7 Average temperature variation of anti-condensation under PID regulation mode

综上可知,当 PID 调节模式下的供水流速 $v \leq 0.30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,消耗较少的能量就能有效地改善冷辐射板的制冷能力,通过消耗能量带来的回报成果多,回报率较高;相比之下,当 $v > 0.30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,空调系统消耗更多的能量却不能明显地改善室内的制冷效果,回报率低.可见,在空调系统消耗等量的能量后, $v \leq 0.30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的制冷效果会有很明显的改善,但当 $v > 0.30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的制冷效果改善不明显.因此,在 PID 调节模式下, $v = 0.30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的工况条件不仅能够满足室内的制冷需要,还能在最大程度上减少空调能耗,同时,供水流速越大,制冷效果越好,但是耗能会更大,回报率低.

PID 调节模式下的 PMV 变化,如图 9 所示.由图 9 可知:在冷辐射板表面快要结露时,不同流速下的 PID 调节模式会产生不同的室内舒适效果.在刚开始的 120 s 内,由于换热的延时性,室内的 PMV 值均没有出现明显变化,但随着 PMV 值的不断上升,流速越小,相应的热舒适水平变化就越快,室内越炎热,当 $v = 0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,PMV 值上升最明显,在 330 s 时人体就会感觉到热,在 510 s 时人体出现明显的热感觉;当 $v = 0.30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,在 480 s 时人体才有一点热感觉;但当 $v > 0.30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,在测试的 600 s 内,PMV 曲线普遍小于 1,人体不会出现热感觉,此时的室内环境较为舒适.

综上可知,在辐射板表面快要结露时,启动 PID 调节模式后,室内人体开始感觉到热的时刻会随着供水流速的增大而延迟.

2.2.3 室内热舒适性 冷辐射板快要结露时,PID 调节模式下冷辐射板各项性能较好的供水流速范围,如表 1 所示.

由表 1 可知:在测量范围内,当供水流速 $v > 0.30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,不同 PID 调节模式下的冷辐射板制冷能力相近,流速增大,相应的制冷效果提升不多,故 PID 调节模式下的供水流速大于 $0.30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 即可.在辐射板表面快要结露时,为使冷辐射板的各项性能均达到较佳的效果,阀门 PID 调节模式的供水流速应控制在 $0.30 \sim 0.45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时较为合适,此时的供水流速不仅能够保证辐射板的防结霜效果和制冷能力较好,还能维持室内的热舒适性.

3 结束语

在冷辐射板表面快要结露时,冷冻水阀门通断调节模式能有效改善冷辐射板表面结露的问题,但会使室内的制冷效果大幅下降,热舒适性明显降低;相比之下,冷冻水阀门 PID 调节模式则可在一定程度

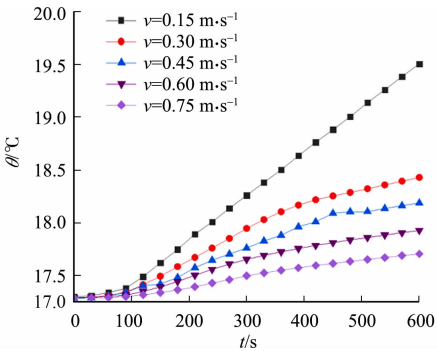


图 8 PID 调节模式下的表面平均温度变化
Fig. 8 Average surface temperature variation under PID regulation mode

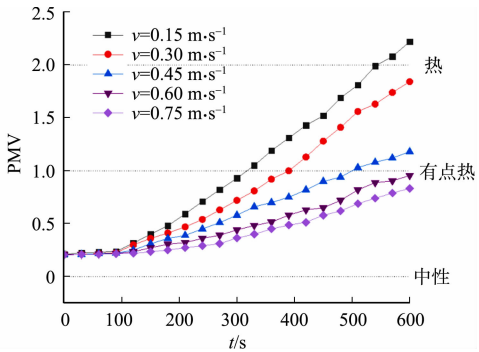


图 9 PID 调节模式下的 PMV 变化
Fig. 9 PMV variation under PID regulation mode

表 1 冷辐射板各项性能较好的供水流速范围
Tab.1 Flow speed range for benign performance of cold radiation plate

冷辐射板性能	$v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
防结霜效果	$0 \sim 0.45$
制冷能力	> 0.30
室内热舒适性	> 0.30

上改善该缺点. 实验结果表明: 在冷辐射板表面快要结露时, 冷冻水阀门在 PID 调节模式下, 供水流速为 $0.30 \sim 0.45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 冷辐射板能有效地减少结露现象, 并保持较好的制冷效果和室内热舒适性.

参考文献:

- [1] 王晨光, 马小飞, 言树清, 等. 辐射空调系统的发展研究现状综述[J]. 建筑热能通风空调, 2014, 33(5): 47-50. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0344.2014.05.012.
- [2] 龚光彩, 杨厚伟, 苏欢, 等. 空气载能辐射空调末端系统辐射传热简化算法研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(12): 31-38. DOI: 10.3969/j.issn.1674-2974.2013.12.005.
- [3] 康宁, 宣永梅, 殷清海. 辐射供冷现状及发展趋势[J]. 建筑节能, 2009, 37(5): 81-83. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7237.2009.05.025.
- [4] 朱颖心. 建筑环境学[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [5] SI Qiang, ZHANG Xiaosong. Performance evaluation and experimental study of the induction radiant air-conditioning system[J]. Procedia Engineering, 2015, 121: 1795-1804. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.09.159.
- [6] YANG Yujia, WANG Yu, YUAN Xiaolei, *et al.* Simulation study on the thermal environment in an office with radiant cooling and displacement ventilation system[J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 3146-3153. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.142.
- [7] KRAJCIK M, TOMASI R, SIMONE A, *et al.* Thermal comfort and ventilation effectiveness in an office room with radiant floor cooling and displacement ventilation[J]. Science and Technology for Built Environment, 2016, 22: 317-327. DOI: 10.1080/23744731.2016.1131568.
- [8] 吴洁, 时爱红. 毛细管辐射空调加置换通风系统在夏热冬冷地区应用可行性分析[J]. 区域供热, 2015(3): 37-42. DOI: 10.16641/j.cnki.cn11-3241/tk.2015.03.008.
- [9] 安迎超. 置换通风-地板辐射供冷系统分析与研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2013.
- [10] 周根明, 施颖, 路诗奎, 等. 辐射供冷与贴附射流复合空调系统防结露研究[J]. 建筑热能通风空调, 2011, 30(5): 20-22. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0344.2011.05.005.
- [11] 钱佳伟, 李念平, 苏林, 等. 贴附射流作用下辐射冷顶板加置换通风空调系统评价分析[J]. 建筑科学, 2015, 31(6): 86-89. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2015.06.015.
- [12] 于志浩, 金梧凤, 刘艳超. 辐射吊顶供冷与不同新风系统复合时的性能研究[J]. 制冷技术, 2013, 33(4): 37-40. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4468.2013.04.109.
- [13] KANG Zhiqiang, PENG Xinying, CHENG Xiacong, *et al.* Analysis of condensation and thermal comfort of two kinds of compound radiant cooling air conditioning systems based on displacement ventilation[J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 1529-1534. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.233.
- [14] TANG Haida, LIU Xiaohua. Experimental study of dew formation on metal radiant panels[J]. Energy and Buildings, 2014, 85: 515-523. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.09.067.
- [15] 刘龙斌, 丁云飞, 聂文庆. 热湿地区直膨式辐射顶板空调系统模拟分析[J]. 节能, 2018, 37(1): 27-30. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7948.2018.01.005.
- [16] 黑赏罡, 姜曙光, 杨骏, 等. Fanger PMV 热舒适模型发展过程及适用性分析[J]. 低温建筑技术, 2017, 39(10): 125-128. DOI: 10.13905/j.cnkidwjz.2017.10.034.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 方德平)