



指向型热辐射装置对室内人员热舒适影响的实验与仿真研究

冉科呈, 马景辉, 李兴宇, 陶 盛, 张海滨

(浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

摘 要: 为明确在微冷环境中指向型热辐射(Directional heat radiation, DHR)装置作用下的室内人员热舒适改善效果并得到装置的最佳运行工况, 首先通过在微冷环境中利用 DHR 装置主动干预室内局部热环境开展人体热舒适实验, 获得装置作用下人体局部热舒适、热感觉与全身热舒适的改善情况; 然后通过计算流体力学软件模拟分析了不同运行工况下的室内整体热环境和人体周围局部热环境的差异, 得到了 DHR 装置的最佳运行工况以及此工况下室内的 PMV-PPD 等热舒适指标的分布规律。人体热舒适实验结果显示: 微冷环境中 DHR 装置垂直向下设置时, 在 30 min 的运行时间内, 室内人员的全身平均热感觉从 -0.4 变化到 -0.6 , 优于装置未开启时的热感觉变化(从 -0.4 到 -1.6), 人体热舒适下降趋势明显减缓。模拟结果显示, 装置最佳运行工况为: 辐射管表面温度 40°C , 管径 DN32, 管间距 15 cm, 作用距离 85 cm; 此时人体周围热环境的等效温度约为 21°C , PMV 值在 $-0.5 \sim 0.5$ 之间, PPD 值约为 5%。研究表明, 在微冷环境中引入 DHR 装置可改善人体周围热环境, 提高人体周围平均辐射温度和等效温度, 并显著改善在室人员的局部感觉和全身热舒适。该研究可为室内人员局部热环境和整体热舒适的改善方法提供新思路。

关键词: 指向型热辐射; 人体热舒适; 局部热环境; 计算流体力学; PMV-PPD

中图分类号: TU832.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2025)07-0541-15

引用格式: 冉科呈, 马景辉, 李兴宇, 等. 指向型热辐射装置对室内人员热舒适影响的实验与仿真研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2025, 53(4): 541-555.

Reference Format: RAN Kecheng, MA Jinghui, LI Xingyu, et al. An experiment and simulation study on the influence of directional thermal radiation device on occupants' thermal comfort[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2025, 53(4): 541-555.

An experiment and simulation study on the influence of directional thermal radiation device on occupants' thermal comfort

RAN Kecheng, MA Jinghui, LI Xingyu, TAO Sheng, ZHANG Haibin

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To clarify the improvement of thermal comfort of occupants under the influence of directional heat radiation (DHR) device in a slightly cold environment, and to explore the most effective setting conditions, first, an experimental study on human thermal comfort under the DHR device's active intervention of the local thermal environment was conducted, and the improvement of local thermal comfort, thermal sensation and whole-body thermal comfort were obtained. Then, the differences in the overall indoor thermal environment and the local thermal environment near the human body under different setting conditions were compared and analyzed through computational fluid dynamics (CFD) software, and the most effective setting conditions and the distribution law of thermal comfort indexes such as PMV-PPD

收稿日期: 2025-01-05 网络出版日期: 2025-04-03

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52206029)

作者简介: 冉科呈(2001—), 男, 四川达州人, 硕士研究生, 主要从事绿色节能建筑方面的研究。

通信作者: 马景辉, E-mail: mjh58@zstu.edu.cn

under this condition were obtained. According to the results of the human thermal comfort experiment, when the DHR device was vertically oriented in a slightly cool environment, within a 30-minute operation time, the average thermal sensation of the occupants changed from -0.4 to -0.6 , which was better than the change from -0.4 to -1.6 without the device. This configuration significantly mitigated the declining trend in human thermal comfort. According to the simulation results, the most effective setting condition of the device was a surface temperature of $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ for the radiant pipe, a pipe diameter of DN32, a pipe spacing of 15 cm , and a distance of 85 cm . Under this condition, the equivalent temperature of the thermal environment around the human body was about $21\text{ }^{\circ}\text{C}$, the PMV value was between -0.5 and 0.5 , and the PPD value was about 5% . Results show that deploying the DHR device in a slightly cool environment can improve the thermal environment around the human body, and can significantly improve the local sensation and overall thermal comfort of occupants by raising the average radiative temperature and equivalent temperature. The research could provide new ideas for the improvement of the thermal environment occupants' local and thermal comfort.

Key words: directional heat radiation; thermal comfort; local thermal environment; computational fluid dynamics; PMV-PPD

0 引言

辐射供暖是冬季常用的一种供暖方式,现有辐射供暖方式主要包括辐射地板、热辐射板、人体局部辐射加热器等^[1-3]。辐射供暖末端与室内空间的换热过程主要涉及辐射和自然对流两种方式,且以辐射为主。相较于传统空调系统,辐射供热的房间温度场分布更均匀,垂直温度梯度更小,因而能较好改善人体热舒适^[4]。

为了探究不同辐射供暖方式对人体热舒适及室内热环境的影响,国内外研究者主要针对不同辐射末端形式的复合供暖方式对室内热环境及人体热舒适改善效果进行了研究。彭冬根等^[5]探究了地板辐射采暖复合机械送风的两种送风气流组织(上送风和下送风)对人体热舒适的影响,并综合考虑室内温度分布以及头足温差等指标,发现在地板辐射采暖复合机械送风情况下,下送风气流组织的效果更好。颜金波^[6]通过实验对冬季办公区域的工位辐射供暖末端的室内热环境调节效果进行了研究,发现在一定条件下工位辐射供暖末端能改善受试者的局部热感觉和全身热舒适,空调的设定温度区间可以显著降低,在节约建筑能耗方面具有一定的潜力。于国清等^[7]在室内环境温度为 $12\sim 16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的微冷环境下,研究辐射供暖地板与座椅(普通座椅与保温座椅)对人体全身、局部热感觉的影响,发现辐射供暖地板与保温座椅的组合方式对提升受试者下半身的热感觉效果显著。

个性化热舒适系统(Personal comfort system, PCS)能满足个人局部热环境自主控制,并减少传统

HVAC 系统因空间总体加热或冷却所消耗的额外能耗,因此关于辐射供暖方式结合个性化设备的研究近年来受到广泛关注^[8]。Zhang 等^[9]对冬季使用低功率暖足器(反射式热灯)来改善局部热感的效果进行了调查,发现在最初的“较高加热设定值无暖足器”条件和“较低加热设定值加上可控暖足器”条件下,热舒适性相同,说明低功率暖足器具有显著的节能潜力。Zeiler 等^[10]在室内环境温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的凉爽环境下,使用辐射手加热器照射全身热感觉低于热中性的受试者的手部,结果显示适当提高指尖温度可使全身热感觉趋近中性,同时发现远程感应的皮肤温度可用于局部辐射加热控制。Wang 等^[11]研究了冬季办公室中辐射式暖腿器对改善人体热舒适的效果,发现在寒冷的环境中,辐射式暖腿器能有效提高局部皮肤温度,人的热感觉和热舒适度得到了明显的改善,但辐射腿部暖腿器的不对称加热使得小腿局部热感觉不一致。

上述研究表明,在微冷的环境中通过采用不同形式的辐射末端与辅助装置组合的复合供暖方式,或者个性化的局部辐射加热装置,均可以改善在室者的局部热感觉和热舒适,但既有的调节装置大多固定于工位附近对空间的使用有较大的限制。为了提高空间的使用效果,Dai 等^[12]提出一种兼顾热舒适改善和空间有效利用的指向型热辐射(Directional heat radiation, DHR)装置,并对其热环境调节机理进行了研究,但该装置的最佳运行工况和装置运行下人体局部热感觉和热舒适的改善效果尚不明确。

为了解决上述问题,本文通过 DHR 装置作用

下的人体热舒适主观调查实验,探讨装置对人体局部热感觉和整体热舒适的改善效果;然后通过计算流体力学(Computational fluid dynamics,CFD)软件对比分析 DHR 装置不同设置运行工况下的室内整体热环境和人体周围局部热环境的差异,获得本装置的最佳运行工况与最佳工况运行下人体周围热舒适指标的分布,从而为室内人体局部热环境和整体热舒适的改善提供新的思路。

1 人体热舒适实验

本文通过开展室内局部热环境在 DHR 装置主动干预下的人体热舒适实验,对受试者的局部热感觉、局部热舒适、全身热感觉和全身热舒适投票值进行分析,以研究 DHR 装置对受试者全身和局部热

舒适的影响,得到局部热舒适、局部热感觉与全身热舒适的关系。

1.1 人体热舒适实验装置

人体热舒适实验装置如图 1 所示,由恒温热源、保温水箱、自吸泵和 DHR 装置等组成。在实验过程中,热介质先从恒温热源进入保温水箱,通过自吸泵进入辐射管内部,提高辐射管表面温度并使之维持在设定温度。DHR 装置中 DHR 单元的辐射管表面覆盖有高发射率的涂层,与圆柱形反射罩的高反射率涂层相互作用,可以提高辐射能量利用率。DHR 装置通过辐射管输出辐射能量,通过反射罩的旋转调节辐射能量输出方向,可以对人体周围不同区域进行局部加热,调节人体的局部辐射热环境,改善人体局部热感觉。

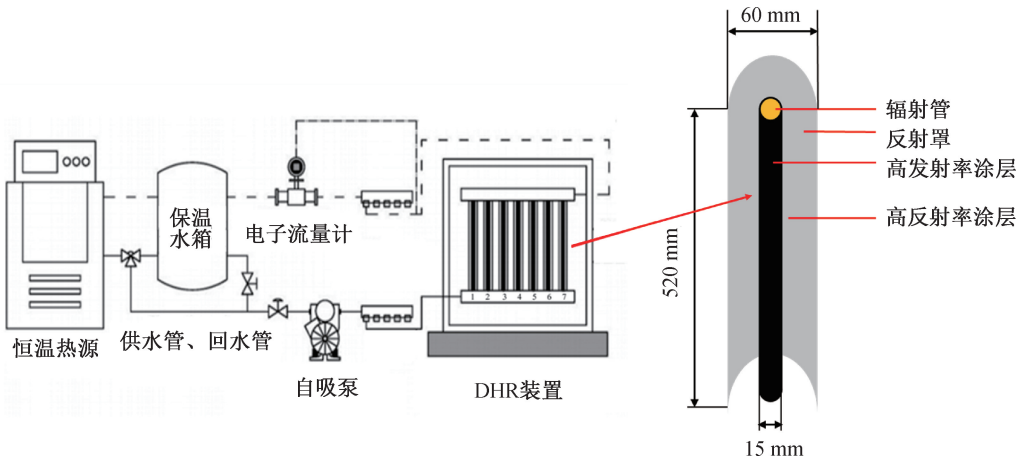


图 1 人体热舒适实验装置示意图

DHR 装置由多个平行布置的 DHR 单元组成。DHR 单元的工作原理示意图如图 2 所示。DHR 单元是一个可以旋转的漫射单元,由一根辐射管和 一个半圆柱形反射罩组成,反射罩背后为保温层。将反射罩开口表面视为一个假想面(黑体),其热力学

温度为 T_{ro} ,DHR 单元的反射罩开口表面法线为 N_1 ,被辐射表面的法线为 N_2 。当 DHR 单元反射罩固定在一个位置并竖直设置(正向设置)或者有一定角度(指向设置)时,法线 N_1 和 N_2 与连接线的夹角分别为 β_1 和 β_2 。

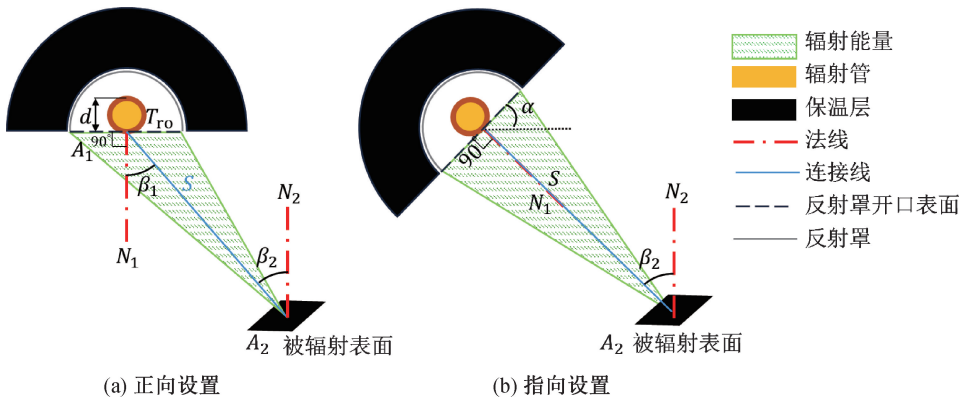


图 2 DHR 单元工作原理示意图

DHR 单元对被辐射表面输出的辐射能量如式(1)所示:

$$Q_{1-2}=\sigma A_1T_{ro}^4F_{1-2}=\sigma A_1T_{ro}^4\frac{\cos\beta_1\cos\beta_2}{\pi S^2}A_2$$

(1)

其中: Q_{1-2} 为 DHR 单元对被辐射表面输出的辐射能量,J; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $W/(m^2\cdot K^4)$; A_1 为 DHR 单元开口表面面积, m^2 ; A_2 为被辐射表面面积, m^2 ; F_{1-2} 为反射罩开口表面对被辐射表面的角系数; S 为连接线长度,m。

从图 2(b)可以看出:当 DHR 单元旋转角度为 α 并朝向被辐射表面时,反射罩开口表面法线 N_1 与连接线 S 重合(指向设置),反射罩开口表面对

被辐射表面的角系数 F_{1-2} 随角度 β_1 减少到 0° 而增大($\alpha = \beta_1$),指向设置的 DHR 单元开口表面对被辐射表面的辐射能上升,被辐射表面的辐射温度升高。

1.2 人体热舒适实验设计

人体热舒适实验房间示意图与实验场景照片如图 3 所示。实验房间分为 A 室与 B 室两部分,主观评价实验在 B 室内进行。房间地面距离实验室地面 0.2 m,两个房间内的温湿度均能实现独立控制,B 室被 A 室包围,A 室的围护结构由保温材料构成,确保室内热环境不受外部影响。在实验过程中,控制 A 室与 B 室的室内温度为 $(16.5\pm0.5)^\circ\text{C}$,室内湿度为 $(50\pm10)\%$ 。

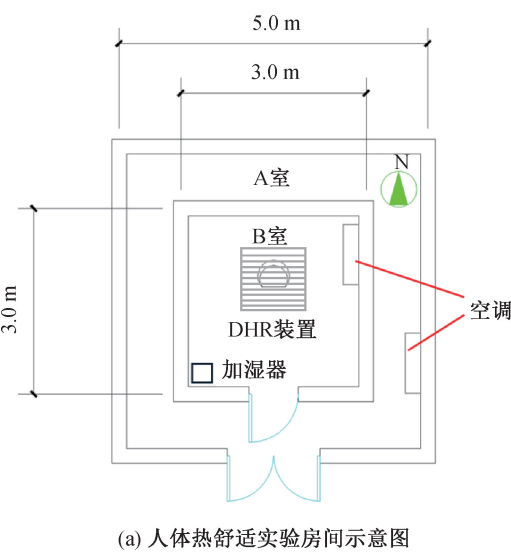


图 3 人体热舒适实验房间示意图与实验场景照片

人体热舒适实验参考 *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy* (ANSI/ASHRAE Standard 55-2010) 和 *Ergonomics of the physical environment-Subjective judgement scales for assessing physical environments* (DS/ISO 10551: 2019) 中的热舒适性主观评价体系进行设计。受试者的热感觉通过 7 点量表进行评估,包括寒冷(−3)、凉(−2)、稍凉(−1)、适中(0)、稍暖(+1)、暖(+2)、热(+3)等 7 个方面。对于热舒适度,受试者需要从舒适(0)、稍有不适(−1)、不舒适(−2)、非常不舒适(−3)、无法忍受(−4)等 5 个方面评估局部和全身的热舒适。通过 G*power 3 软件确定受试者人数为 10 人。在样本数量为 10、样本效应值在 ~ 0.8 时,在组间对照的情况下,样本的统计功效即置信度可以达到 0.87。在浙江理工大学随机抽取 5 名健康男性和 5 名健康女性,受试者基础数据平均值如表 1 所示。

表 1 受试者基础数据平均值				
性别	年龄/岁	身高/m	体重/kg	BMI
男	23.5	1.762	70.6	22.74
女	23.1	1.601	52.9	20.61

在人体热舒适实验开始前,受试者需避免剧烈运动、饮酒等行为,并在中性环境下适应 20 min,确保在评价阶段有平稳的心理及生理状态。在服装方面,受试者穿着冬季的普通衣服,如外套、内衣、长袖打底衫或者衬衫、毛衣、裤子、袜子和鞋子,实验开始前受试者应脱掉外套。通过受试者衣服的热阻(平均总衣服热阻为 1.39 Clo 或 1.4 Clo,比冬天最典型的办公室着装略多)和室内环境参数计算得到 PMV 值为 -0.69 ,为微冷环境。人体热舒适实验工况设置如表 2 所示,DHR 装置设置在头部上方 70 cm 处,实验过程中受试者需对 DHR 装置开启和关闭 2 种工况下的局部和全身热舒适进行评价。

表 2 人体热舒适实验工况设置

工况	室内温度/℃	室内湿度/%	DHR 装置	DHR 装置位置	距离/cm	辐射管温度/℃
工况 1	16.5±0.5	50±10	关	头部上方	70	
工况 2	16.5±0.5	50±10	开	头部上方	70	30

人体热舒适实验流程如图 4 所示,在经过 20 min 的适应阶段后,受试者填写问卷,问卷内容包括受试者全身的热感觉和热舒适,以及手部、足部、头

部、腿部的局部热感觉和热舒适,此后每隔 10 min 再次填写问卷。在实验过程中,受试者不允许增减衣服,并且在不调整椅子位置的情况下保持坐姿。

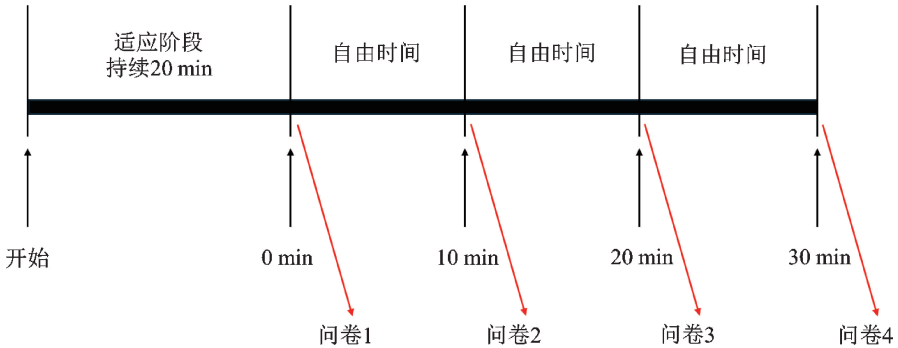


图 4 人体热舒适实验流程示意图

1.3 人体热舒适实验结果

1.3.1 受试者对热环境评价情况

人体热舒适实验中受试者的局部与全身热感觉投票值如图 5 所示。图 5(a)显示:在装置未开启的情况下(工况 1),受试者的全身热感觉投票值最初为-0.4,每 10 min 降低~0.4,在实验结束时降低至-1.6,说明受试者全身热感觉越来越冷;4 个部位的局部热感觉投票值的变化情况说明了足部和腿部的热感觉投票值在实验过程中逐渐降低,从开始的 0 降低至实验结束时的-1.6,头部的热感觉投票值在前 10 min 维持不变但在后 20 min 降低,而手部的热感觉投票值基本保持不变,出现这种情况的原因是,在微冷环境中,人体在平静状态下,对外界的散热量大于人体自身产生的热量,在肢体末端出现寒冷感觉,并逐渐影响全身热感觉,受试者的全身

和局部热感觉投票值逐渐降低。从图 5(b)可以看出:在装置开启的情况下(工况 2),受试者的全身热感觉投票值最初为-0.4,每 10 min 降低~0.1,在实验结束时降低至-0.8,全身热感觉降低程度较工况 1 更小;从 4 个部位的局部热感觉投票值的变化情况可以看出,受试者足部和腿部的热感觉从最初的一0.4 降低至实验结束的一0.8,降低趋势比工况 1 更小,手部、头部的热感觉均有向暖趋势,其原因是,在微冷环境中开启 DHR 装置后,受试者受到 DHR 装置的热辐射,得到一部分热量,受试者人体对外界的散热量仍大于人体自身产生的热量与 DHR 装置对人体的辐射能量之和,受试者的热感觉下降趋势得到明显改善。以上结果表明在微冷环境中开启 DHR 装置,可以改善受试者的全身热感觉和局部热感觉,并且避免受试者出现寒冷感觉。

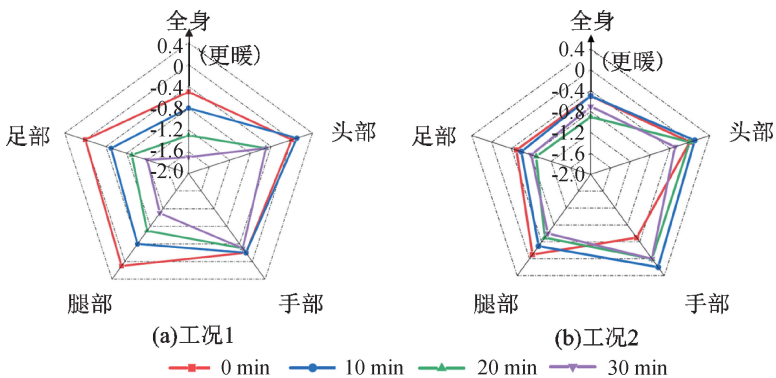


图 5 人体热舒适实验中受试者局部与全身热感觉投票值雷达图

人体热舒适实验中受试者的局部与全身热舒适投票值如图 6 所示。图 6(a)表明:在装置未开启的情况下(工况 1),受试者的全身热舒适投票值最初为-0.4,状态为稍有不适,每 10 min 降低~0.4,在实验结束时降低至-1.6,说明受试者在实验中越来越不舒适;4 个部位的局部热舒适投票值的变化情况说明了受试者足部和腿部的局部热舒适在实验开始后逐渐降低,从实验开始时的-0.4 和 0 降低至实验结束时的-1.5 和-1.1,达到不舒适状态,手部和头部的局部热舒适从-0.1 降低至-0.8,其原因是,人体在感觉到寒冷后,寒冷感没有及时消除,则会产生不适感,受试者的全身和局部热舒适投票

值逐渐降低。从图 6(b)可以看出:在装置开启的情况下(工况 2),受试者的全身热舒适投票值在最初为-0.4,在实验结束时降低至-0.8,为稍有不适状态,整体降低程度小于工况 1;从 4 个部位的局部热舒适投票值的变化情况可以看出,受试者足部和腿部的热舒适从最初的一0.4 降低至实验结束的一1.0,而手部的局部热舒适基本保持不变,其原因是,在微冷环境中开启 DHR 装置后,受试者的全身热感觉和局部热感觉得到改善,寒冷感得到缓解,从而不适感也得到缓解。以上结果表明 DHR 装置可以改善冬季室内微冷环境中人员的局部热舒适,消除室内人员出现的局部不适从而改善室内人员的全身热舒适。

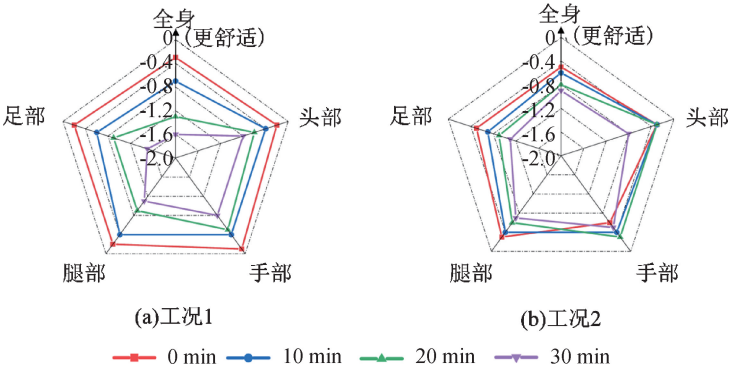


图 6 人体热舒适实验中受试者局部与全身热舒适投票值雷达图

1.3.2 局部热感觉与全身热舒适的关系

局部热感觉、局部热舒适、全身热舒适等评价指标的相互关系是合理评价不均匀热环境的重要问题^[13]。通过对实验结果进行多元线性回归分析,可以得出 DHR 装置作用下局部热感觉与全身热舒适之间的关系,如式(2)所示:

$$OTCV = -0.0957 + 0.298TSV_1 + 0.354TSV_2 + 0.51TSV_3 + 0.55TSV_4 \quad (2)$$

其中:OTCV 为全身热舒适投票值;TSV₁为头部热感觉投票值;TSV₂为手部热感觉投票值;TSV₃为腿部热感觉投票值;TSV₄为足部热感觉投票值。

从式(2)中的常数项可以看出,当所有局部热感

觉投票值为 0 时,全身热舒适值为-0.0957,表示在本实验环境下,当受试者各部位局部热感觉为中性时,状态为基本舒适。

局部热感觉与全身热舒适多元线性回归结果如表 3 所示。从表 3 可以看出:手部和足部的局部热感觉样本数据 P 值最小,说明数据差异最显著;多元线性回归结果的决定系数 R² 为 0.97,表明结果置信度较高,参数系数值是衡量自变量与因变量关系强度的指标,系数绝对越大,该项自变量对因变量影响越显著;在 DHR 装置作用下,腿部和足部的热感觉对全身热舒适的影响最显著,而头部的热感觉对全身热舒适的影响最小。

表 3 局部热感觉与全身热舒适多元线性回归结果

参数	系数值	标准误差	t 值	P 值	R ²
截距	-0.0957	0.167	-0.573	0.000	0.97
TSV ₁	0.298	0.346	0.863	0.451	
TSV ₂	0.354	0.140	2.522	0.086	
TSV ₃	0.510	0.484	1.055	0.369	
TSV ₄	0.551	0.152	3.614	0.036	

注:t 值与 P 值用于检验样本数据之间的差异是否显著,t 值越大,P 值越小,意味着样本数据差异越显著。

1.3.3 局部热舒适与全身热舒适的关系

局部热舒适与全身热舒适之间的关系如式(3)

所示,局部热舒适与全身热舒适的关系和局部热感觉与全身热舒适的关系类似。式(3)中的常数项表

示在本实验环境下,当受试者头部、手部、腿部和足部的热舒适为中性即各部位局部热舒适投票值为 0 时,全身热舒适值为-0.0306,为基本舒适状态。

$$OTCV = -0.0306 - 0.133TCV_1 + 0.332TCV_2 + 0.623TCV_3 + 0.709TCV_4 \quad (3)$$

其中: TCV_1 为头部热舒适投票值; TCV_2 为手部热舒适投票值; TCV_3 为腿部热舒适投票值; TCV_4 为足部热舒适投票值。

局部热舒适与全身热舒适多元线性回归结果如

表 4 局部热舒适与全身热舒适多元线性回归结果

参数	系数值	标准误差	t 值	P 值	R ²
截距	-0.0306	0.066	-0.461	0.000	0.98
TCV_1	-0.133	0.237	-0.561	0.061	
TCV_2	0.332	0.202	1.651	0.197	
TCV_3	0.623	0.246	6.289	0.008	
TCV_4	0.709	0.208	1.018	0.384	

2 CFD 仿真实验

本文通过建立 DHR 不同设置工况的物理模型,经过 CFD 模拟计算得到不同辐射管表面温度、不同管径、不同作用距离、不同管间距设置下模拟房间的稳态温度场;通过对比不同工况设置下的房间温度分布,得到装置最佳运行工况。

2.1 物理模型

本文建立的 DHR 不同设置工况的物理模型如图 7(a)所示,CFD 模拟对象房间尺寸为 2.0 m×1.4 m×2.4 m,人体模型为坐姿,高 1.3 m。在建

表 4 所示。表 4 显示:头部和腿部的局部热感觉样本数据 P 值最小,说明数据差异最显著;多元线性线性回归结果的决定系数 R² 为 0.98,说明结果置信度较高;腿部和足部的局部热舒适同样也是影响全身热舒适最显著的部位,手部的局部热舒适对全身热舒适影响较小。综上所述,在偏冷环境中调节人体全身热舒适应以改善人体腿部、足部局部热舒适为重点,同时应尽量兼顾头部和手部的热舒适,这与已有文献结论^[14-15]相符。

立的几何模型中对人体模型进行简化处理,通过删除对房间内流场影响较小的人体几何特征保证计算速度。使用 ANSYS 软件划分网格,通过对人体周围区域及装置周围区域局部加密保证计算精度,网格划分情况如图 7(b)所示,网格划分采用四面体网格。图 7(c)给出了不同网格数量下 Y=1.4 m 截面平均温度变化曲线,除了网格数量为 5.27×10⁵ 和 6.74×10⁵ 的计算结果偏低外,其他网格数量计算结果接近。考虑到计算精度与计算时间,选取 8.59×10⁵ 的网格数量进行计算,该数量下网格整体收敛性较好,平均网格质量为 0.85,平均偏斜系数为 0.21。

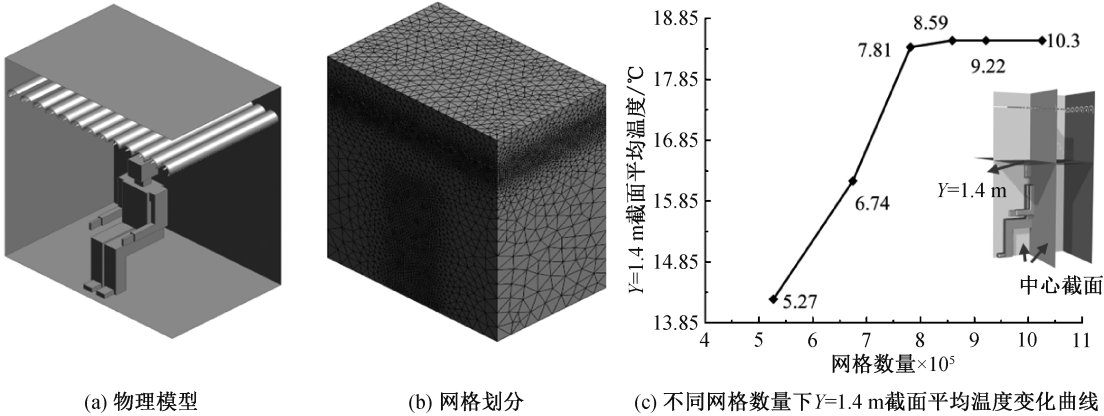


图 7 物理模型、网格划分与不同网格数量下 Y=1.4 m 截面平均温度变化曲线

2.2 边界条件与求解器设置

本仿真实验主要探究 DHR 装置冬季最佳运行工况,故在模拟过程中忽略室外气温波动。设置 DHR 装置主要照射部位为人体上半部及腿部上表面,房间各壁面温度为恒定 15.00 °C,反射罩上壁面绝热,人体模型头部皮肤温度 33.00 °C,手臂温度

32.00 °C,腿部温度 32.00 °C,手部温度 31.00 °C,足部温度 29.00 °C^[16],除裸露皮肤如头与手外,其余皮肤表面均设置薄壳传热(通过自定义材料传热系数)用于模拟冬季着衣。本文设置了如表 5 所示的 8 种仿真实验工况,在计算过程中,除 DHR 装置工况设置不同外,其余条件均相同。

表 5 仿真实验工况设置

工况	表面温度			管径		作用距离			管间距	
	30.00 ℃	40.00 ℃	50.00 ℃	DN20	DN32	70 cm	85 cm	100 cm	15 cm	30 cm
工况 0				●		●			●	
工况 1	●			●		●			●	
工况 2		●		●		●			●	
工况 3			●	●		●			●	
工况 4		●			●	●			●	
工况 5		●			●		●		●	
工况 6		●			●			●	●	
工况 7		●			●	●				●

注：●表示模拟实验所选取工况参数，表面温度为辐射管外壁面温度，管径为辐射管管径，作用距离为辐射管中心与人体模型头部距离，管间距为相邻辐射管距离。

Fluent 求解器设置如表 6 所示，为了获得人体周围辐射热环境，仿真实验过程不设置流体进出口，室内空气流速较小，房间内流域可以看作不可压缩的湍流运动，Realizable $k-\epsilon$ 模型对不可压缩的湍流运动模拟效果较好，因此湍流模型采用 Realizable $k-\epsilon$ 模型。DO 模型适用范围最广泛，能用于计算如烟 气、水蒸气等介质参与辐射的情况，模拟效果较真实情况接近，本文中辐射换热过程选择 DO 模型。

表 6 Fluent 求解器设置

项目	设置
流体	不可压缩流
湍流模型	Realizable $k-\epsilon$
辐射模型	DO
压力和速度耦合算法	SIMPLE
动量	一阶迎风
湍流动能	一阶迎风
能量	二阶迎风

2.3 仿真实验结果

2.3.1 DHR 装置有效性验证

图 8 为工况 0 和工况 1 中的房间温度稳定时的人体中心截面温度分布云图。图 8(a)显示：在装置关闭情况下(工况 0)，房间内温度稳定后，温度分布集中在 15.00~17.50 ℃之间，从人体表面到距离人体表面 10 cm 处环境温度整体偏低，为 17.50~18.25 ℃，人体皮肤表面温度与周围空气温度温差约为 13 ℃。图 8(b)表明：在装置开启情况下(工况 1)，房间内温度稳定后，温度分布集中在 17.50~22.50 ℃之间，从人体表面到距离人体表面 10 cm 处温度分布在 18.25~22.50 ℃之间，人体皮肤表面温度与周围空气温度平均温差为 9 ℃。以上结果表明了，人体周围热环境温度在开启 DHR 装置后升高，人体皮肤表面温度与周围空气温度温差减小，人体对外散热量减小。

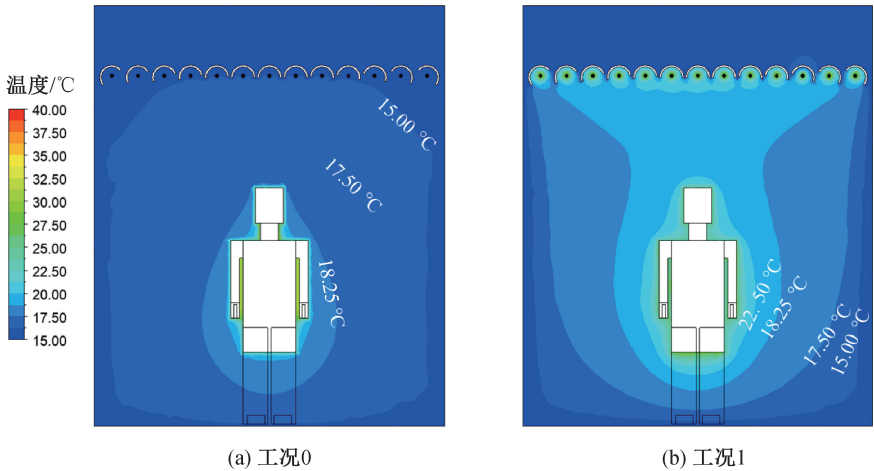


图 8 工况 0 和工况 1 中的人体中心截面温度分布云图

2.3.2 不同辐射管表面温度设置下房间的温度分布

图 9 为工况 1、2、3 中的房间温度稳定时的人体中心截面温度分布云图。图 9(a)显示：当辐射管表

面温度为 30.00 ℃时(工况 1)，房间内温度分布集中在 17.50~22.50 ℃之间；图 9(b)与图 9(c)显示：当辐射管表面温度分别为 40.00、50.00 ℃时(工况 2

和工况 3), 房间内温度分布集中在 17.50~25.00℃ 之间, 从人体表面到距离人体表面 10 cm 处温度分布以 22.50~25.00℃ 为主, 人体皮肤表面温度与周围空气温度温差约为 8℃。从图 9 可以看出: 随着辐射管表面温度的升高, 房间内温度随之上升, 温度分布以更高温度为主, 具体表现为较低温度等温面面积变

小, 较高温度等温面面积变大; 距离人体表面 10 cm 处的温度也随着辐射管表面温度的升高而升高, 在辐射管表面温度从 30.00℃ 变为 40.00℃ 时, 距离人体表面 10 cm 处温度从 18.25℃ 升高至 22.50℃; 辐射管表面温度从 40.00℃ 升高至 50.00℃ 时, 距离人体表面 10 cm 处温度从 22.50℃ 升高至 23.50℃。

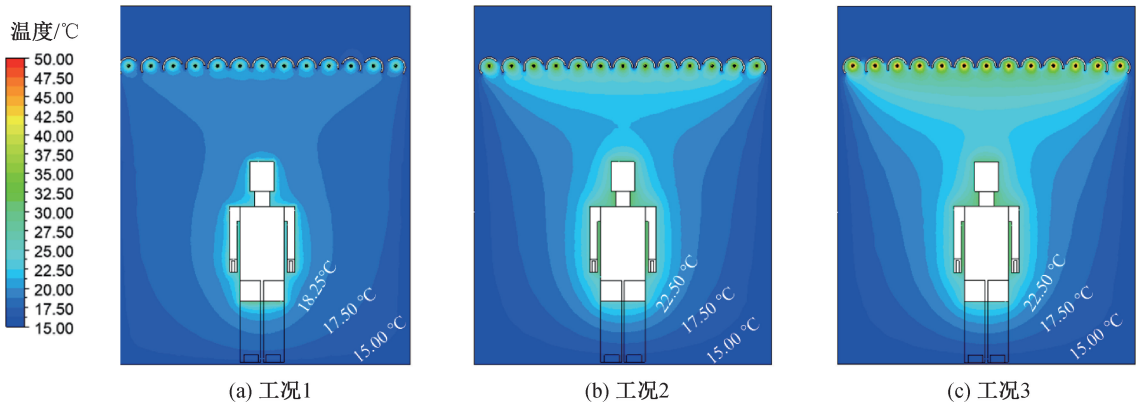


图 9 工况 1、2、3 中的人体中心截面温度分布云图

图 10 为工况 1、2、3 中的房间温度稳定时的距离地面高度 1.4 m 处的截面温度分布云图。图 10(a) 显示: 当辐射管表面温度为 30.00℃ 时(工况 1), 截面温度分布集中在 17.00~19.00℃ 之间, 在中心以 20.00℃ 为主; 图 10(b) 显示: 当辐射管表面温度为 40.00℃ 时(工况 2), 截面温度分布在 17.00~21.00℃ 之间, 在中心以 21.00~23.00℃ 为主; 图 10(c) 显示: 当辐射管表面温度为 50.00℃ 时(工况 3), 截面温度分布集中在 17.00~23.00℃ 之间, 在中心以 23.00~26.00℃ 为主。从图 10 可以看出: 随着辐射管表面温度升高, 截面温度平

均值随之上升, 具体表现为从截面中心到房间壁面的温度梯度变大, 中心区域温度分布更均匀; 截面中心温度也随辐射管表面温度升高而升高, 在辐射管表面温度从 30.00℃ 升高至 40.00℃ 时, 截面中心温度从 20.00℃ 升高至 23.00℃, 在辐射管表面温度从 40.00℃ 变为 50.00℃ 时, 截面中心温度从 23.00℃ 升高至 26.00℃, 在辐射管周围出现较强的热量堆积现象, 不利于人体热舒适。以上结果表明, 辐射管表面温度为 40.00℃ 时房间内部的热环境可以更好满足室内人员热舒适需求。

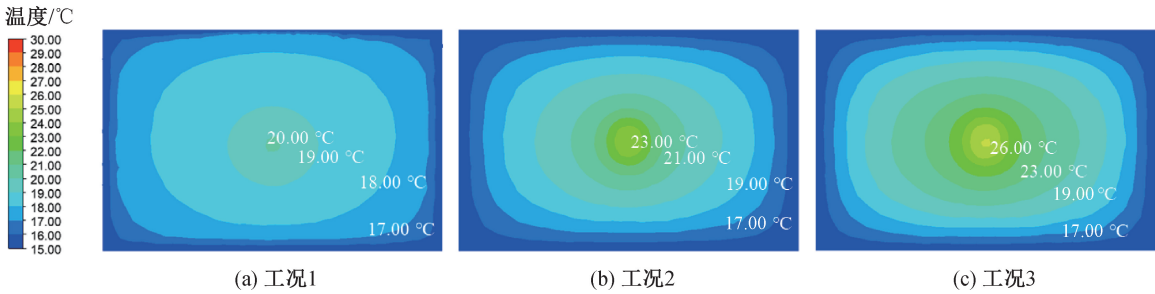


图 10 工况 1、2、3 中的截面 Y=1.4 m 处温度分布云图

2.3.3 不同辐射管管径设置下房间的温度分布

图 11 为工况 2 与工况 4 中的房间温度稳定时的人体中心截面温度分布云图。图 11(a) 显示: 当辐射管管径为 DN20(工况 2)时, 房间内温度分布集中在 17.50~22.50℃ 之间, 从人体皮肤表面到距离人体表面 10 cm 处温度分布以 22.25~25.00℃ 为主, 人体皮肤表面温度与周围空气温度温差约为 8

℃; 图 11(b) 显示: 当辐射管管径为 DN32(工况 4)时, 房间内温度分布集中在 17.50~23.25℃ 之间, 从人体皮肤表面到距离人体表面 10 cm 处温度分布以 23.25~25.00℃ 为主, 人体皮肤表面温度与周围空气温度温差约为 7℃。从图 11 可以看出: 随着辐射管管径增大, 房间内温度随之升高, 具体表现为较低温度等温面面积变小, 较高温度等温面面积变大; 距离人

体表面 10 cm 处的温度也随着辐射管管径的增大而升高,当辐射管管径从 DN20 增大到 DN32 时,距离人体表面 10 cm 处温度从 22.50℃升高至 23.50℃。

主要原因是辐射管表面积增大,单位时间内输出的辐射能量增多,在温度场分布中表现为照射部位附近的温度升高,人体皮肤表面与周围空气的温度差更小。

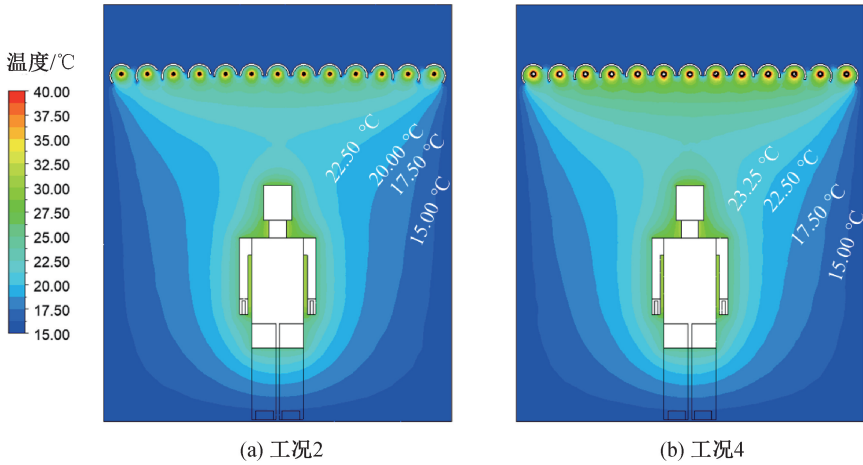


图 11 工况 2 和工况 4 中的人体中心截面温度分布云图

图 12 为工况 2 和工况 4 中的房间温度稳定时的距离地面高度 1.4 m 处的截面温度分布云图。图 12(a)显示:当辐射管管径为 DN20 时(工况 2),截面温度分布集中在 17.00~21.00℃之间,在中心区域以 21.00~23.00℃为主;图 12(b)显示,当辐射管管径为 DN32 时(工况 4),截面温度分布集中在 20.00~25.00℃之间,在中心区域以 22.00~25.00℃为主。从图 12 可以看出,随着辐射管管径增大,截面温度随

之升高,具体表现从截面中心到房间壁面温度梯度变大,中心区域温度分布更均匀;截面中心温度也随辐射管管径增大而升高,当辐射管管径从 DN20 增大到 DN32 时,截面中心温度从 23.00℃升高至 25.00℃。工况 4 中在辐射管周围也出现了热量堆积现象,但相较于表面温度为 50.00℃的工况 3,辐射管周围温度更低,热量堆积更少。以上结果表明,DN32 管径下的房间温度和人体周围热环境能够更好满足人体热舒适。

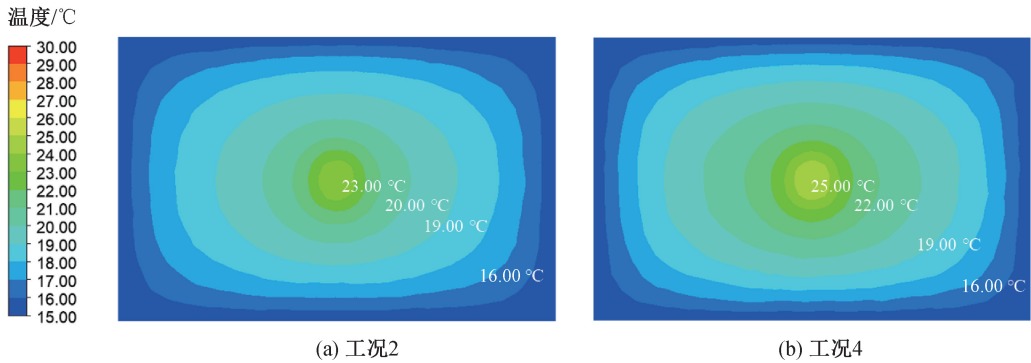


图 12 工况 2 和工况 4 中的 Y=1.4 m 处截面温度分布云图

2.3.4 不同辐射管管间距设置下房间的温度分布

图 13 为工况 4 和工况 7 中的房间温度稳定时的人体中心截面温度分布云图。图 13(a)显示:当管间距为 15 cm(工况 4)时,房间内温度分布集中在 17.50~23.25℃之间,从人体表面到距离人体表面 10 cm 处温度分布以 23.25~25.00℃为主,人体皮肤表面温度与周围空气温度温差约为 7℃。图 13(b)显示:当管间距为 30 cm(工况 7)时,房间内温度分布集中在 15.00~20.00℃,从

人体表面到距离人体表面 10 cm 处温度分布在 18.25~20.00℃之间,人体皮肤表面温度与周围空气温度温差约为 11℃。从图 13 中可以看出,当辐射管管间距增大时,房间温度随之下降,具体表现为较低温度等温面面积变大,较高温度等温面面积变小;距离人体表面 10 cm 处温度也随辐射管管间距增大而减小,当辐射管管间距从 15 cm 增大到 30 cm 时,距离人体表面 10 cm 处温度从 23.25℃降低至 20.00℃。

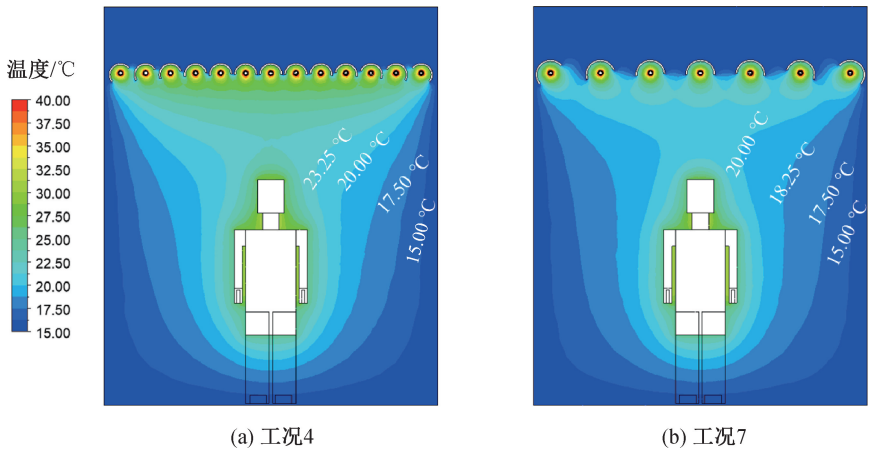


图 13 工况 4 和工况 7 中的人体中心截面温度分布云图

图 14 为工况 4 和工况 7 中的房间温度稳定时的距离地面高度 1.4 m 处的截面温度分布云图。图 14(a)显示:当辐射管间距为 15 cm 时(工况 4),截面温度分布集中在 20.00~25.00 °C 之间,在中心区域以 22.00~25.00 °C 为主;图 14(b)显示,当辐射管管间距为 30 cm 时,截面温度分布集中在 16.00~21.00 °C 之间,在中心区域以 21.00~23.00 °C 为主。从图 14 中可以看出:辐射管管间距增大时,截面温度随之降低,具体表现为截面平均温度降低,中心到房间壁面温度梯度变小,整体温度分布更不均匀;截面中心温度也随辐射管管间距增大而降低,当辐射管管间距从 15 cm 增大到 30 cm 时,截面

中心温度从 25.00 °C 降低至 23.00 °C。工况 7 的截面中心区域的温度更低,表明该工况下截面中心区域收到的辐射能较工况 4 更少。主要原因是由于管间距变大,反射罩周围空气受自然对流影响增大,导致在部分有角度的反射罩周围出现了热量散佚的现象。在相同 DHR 装置铺设宽度情况下,管间距的增大意味着更少的 DHR 单元数量,在其他条件不变的情况下,DHR 单元数减小,会使 DHR 装置辐射功率减小,单位时间内被辐射面获得的辐射能量更少。以上结果表明,在 DHR 装置设置时,应当选择更小的管间距来提高 DHR 装置辐射功率,以获得更均匀的温度分布。

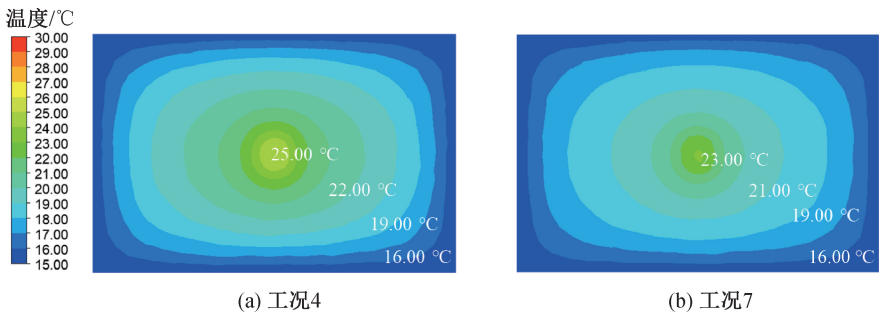


图 14 工况 4 和工况 7 中的 Y=1.4m 处截面温度分布云图

2.3.5 不同辐射作用距离设置下房间的温度分布

图 15 为工况 4、5、6 中的房间温度稳定时的人体中心截面温度分布云图。图 15(a)显示:当辐射作用距离为 70 cm 时(工况 4),房间内温度分布集中在 17.50~23.25 °C 之间,从人体皮肤表面到距离人体表面 10 cm 处温度分布以 23.25~25.00 为主,人体皮肤表面温度与周围空气温度温差约为 7 °C;图 15(b)显示:当辐射作用距离为 85 cm 时(工况 5),房间内温度分布集中在 17.50~22.50 °C,从人体皮肤表面到距离人体表面 10 cm 处温度分布以为 22.50~25.00 °C 为主,人体皮肤表面温度与

周围空气温度温差约为 9 °C;图 15(c)显示:当辐射作用距离为 100 cm 时(工况 6),房间内温度分布集中在 15.00~22.50 °C,距离人体表面 10 cm 处环境温度为 20.00~22.50 °C,人体皮肤表面温度与周围空气温度温差约为 10 °C。从图 15 中可以看出,当辐射作用距离增大时,房间温度随之降低,温度分布以更低温度为主,具体表现为较低温度等温面面积变大,较高温度等温面面积变小,22.50 °C 等温线离人体越来越近,人体周围温度降低;距离人体表面 10 cm 处温度也随辐射作用距离增大而降低,当辐射作用距离从 70 cm 增大到

85 cm 时,距离人体表面 10 cm 处温度从 23.25 ℃ 降低至 22.50 ℃;当辐射作用距离从 85 cm 增大

到 100 cm 时,距离人体表面 10 cm 处温度从 22.50 ℃降低至 20.00 ℃。

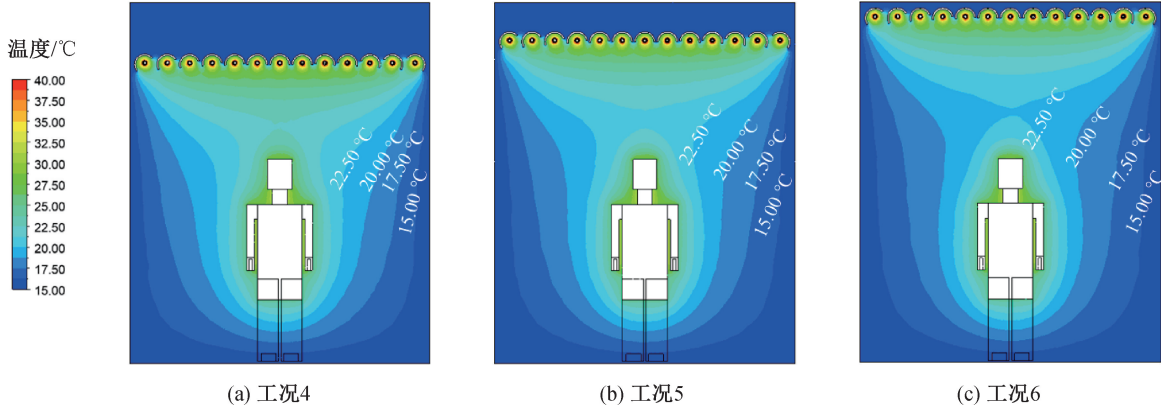


图 15 工况 4、5、6 中的人体中心截面温度分布云图

图 16 为工况 4、5、6 中的房间温度稳定时的距离地面高度 1.4 m 处的截面温度分布云图。图 16 (a)显示:当作用距离为 70 cm 时(工况 4),截面温度分布集中在 20.00~25.00 ℃,在中心区域以 22.00~25.00 ℃为主;图 16 (b)显示:当作用距离为 85 cm 时,截面温度分布集中在 19.00~24.00 ℃之间,中心区域以温度分布 22.00~24.00 ℃为主;图 16 (c)显示:当作用距离为 100 cm 时,截面温度分布集中在 19.00~22.00 ℃之间,中心区域温度分布以 22.00~23.00 ℃为主。从图 16 中可以看出,当辐射作用距离增大时,截面温度降低,具体表现为从截面中心到房间壁面温度梯度变小,整体温度分布更不均匀;截面中心温度也随辐射作用距离增大

而减小,当作用距离从 70 cm 增大到 85 cm 时,截面中心温度从 25.00 ℃降低至 24.00 ℃;当作用距离从 85 cm 增大到 100 cm 时,截面中心温度从 24.00 ℃降低至 23.00 ℃。产生这种现象的主要原因是辐射能量随作用距离增大而减小,但更近的作用距离并不意味着室内人员的感受会更好。辐射作用距离为 85 cm 时人体周围温度分布与 70 cm 辐射作用距离下的人体温度分布较为接近。人体在模拟工况下为坐姿,考虑到在实际情况中,当人体需要站立时,70 cm 并不是一个足够的空间,可以通过适当增大管径和作用距离,来满足室内人员实际需求。以上结果表明,在 85 cm 的辐射距离作用下,房间内温度分布较好,可以同时满足室内人员热舒适需求和空间需求。

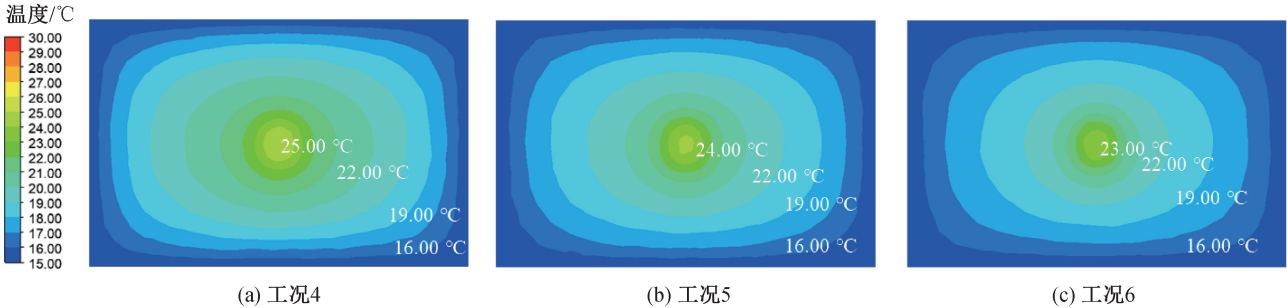


图 16 工况 4、5、6 中的 Y=1.4 m 处截面温度云图

综合上述结果,本装置的最佳运行工况为,表面温度 40.00 ℃,管径 DN32,管间距 15 cm,作用距离 85 cm,此时,人体表面 10 cm 处的温度为 22.50 ℃,满足冬季供暖需求。

3 最佳运行工况下热环境分析

通过模拟实验得出本装置的最佳有效运行设置工况后,对其热环境影响参数进行分析;通过编程实

现 PMV-PPD 及等效温度 T_{eq} 的可视化,得到最佳运行工况下的热舒适指标值具体分布情况。

3.1 平均辐射温度

DHR 装置主要通过热辐射改善人体周围热环境来提高人体热舒适。平均辐射温度是影响人体热舒适的一个重要参数,在微冷环境中,相同的空气温度下,更高的平均辐射温度能带来更高的人体热舒适。

在最佳运行工况下,人体中心截面的平均辐射温度分布如图 17 所示。被照射部位头部、肩部附近的平均辐射温度在 24.29℃,比未被照射部位的平

均辐射温度更高。由于装置设置于人体正上方,人体上表面附近区域比下表面附近区域平均辐射温度更高。

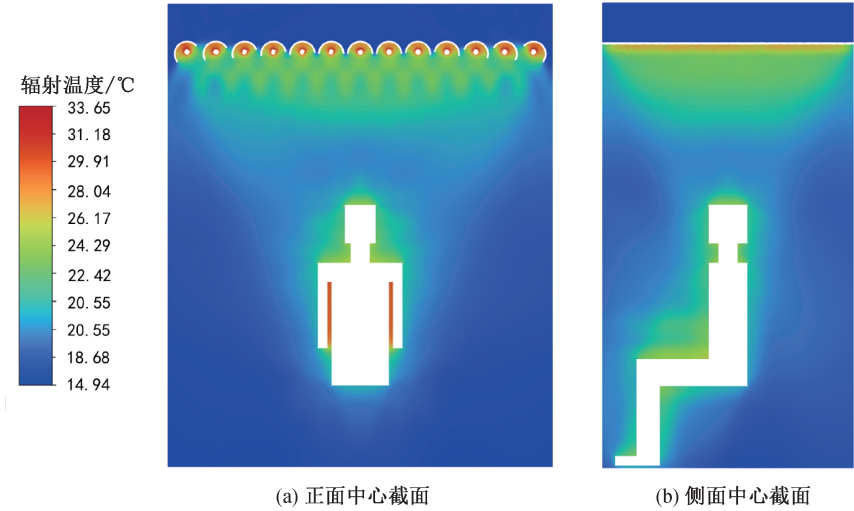


图 17 工况 4 中的人体中心截面平均辐射温度分布

3.2 PMV-PPD 热舒适评价

Fanger^[17]提出的 PMV-PPD 整体热舒适性评价指标,适用于评价健康人群在同一热环境中的热舒适。PMV 值用来描述同一热环境下绝大多数人的冷热感觉,计算公式如下:

$$\begin{aligned} V_{PM} = & (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \{ (M - W) - \\ & 3.05 \times 10^{-3} [5733 - 6.99(M - W) - P_a] - \\ & 0.42(M - W - 58.15) - 1.7 \times \\ & 10^{-5} M(5867 - P_a) - 0.0014M(34 - T_a) - \\ & 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl} + 273)^4 - \\ & (T_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) \} \end{aligned} \tag{4}$$

其中: V_{PM} 表示 PMV 值; M 代表人体新陈代谢率, W/m^2 ; W 表示人体对外做功, W/m^2 ; P_a 表示水蒸气分压力, Pa; T_a 表示空气温度, $^{\circ}C$; f_{cl} 表示穿衣人体与人体裸体表面积之比, T_{cl} 表示着衣外表面温度, $^{\circ}C$; T_r 表示平均辐射温度, $^{\circ}C$; h_c 表示对流传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

PMV 值根据人体对环境的感知程度由冷至热分布在 $-3.0 \sim 3.0$ 的区间内,大于 3.0 或者小于 -3.0 的值没有意义。人体直接受到热辐射的部位,如头顶、肩部、大腿上方等,PMV 值较大,在 $0 \sim 0.6$ 之间,说明人体在此处的热感觉为中性到微暖;在未受到直接辐射区域,如背部、足部、大腿下侧等,PMV 值较低,在 $-0.5 \sim 0$ 之间,说明人体在此处的热感觉为稍冷至中性。

PPD 值代表在一定热环境下,感到不适人员占

整体人员的比例,当 PMV 值为 0 时,代表热环境最为适中,此时 PPD 的值为 5,表示仍会有 5% 的人员对环境感到不适。PMV 与 PPD 的数学关系式如下:

$$D_{PP} = 100 - 95e^{-0.3353V_{PM}^4 - 0.2197V_{PM}^2} \tag{5}$$

其中: D_{PP} 表示 PPD 值。利用 Fluent 求解器中的 UDF 模块对 PMV 值和 PPD 值的数学分析式进行编程,实验热舒适性评价指标的可视化,人体中心截面的 PMV 值和 PPD 值分布如图 18 与图 19 所示。

当室内环境达到稳态后,人体周围的 PMV 值分布在 $-0.5 \sim 0.5$,主要受到热辐射的区域,出现了稍高的 PMV 值,达到 ~ 0.6 ,说明 DHR 在最佳工况运行下,室内人员的热舒适性较好,人体不会感到寒冷。人体周围的 PPD 值在 $\sim 5\%$,整体热环境呈现出离照射部位越远,预测不满意率越高的规律。

3.3 等效温度 T_{eq} 热环境评价

Nilsson 等^[18]提出了等效温度概念,该概念定义为一个假想的外壳的温度。当空气流速为 0 或空气流速小于 0.1 m/s 时,平均辐射温度与空气温度相等。Madsen 等^[19]在久坐的条件下,通过总结空气温度、平均辐射温度、风速、服装热阻与等效温度的关系,得出该经验公式,可用式(6)表示:

$$T_{eq} = 0.5(T_a + T_r) \tag{6}$$

其中: T_{eq} 表示等效温度, $^{\circ}C$; T_a 表示空气温度, $^{\circ}C$; T_r 表示平均辐射温度, $^{\circ}C$ 。

利用 Fluent 求解器中的 UDF 模块对等效温度的数学分析式进行编程,得到人体中心截面等效温度分布,如图 20 所示。从图 20 中可以看出,DHR

装置在最佳运行工况下运行时,能够有效改善偏冷环境中人体周围热环境。此时,人体周围辐射温度

高于 20.12℃,等效温度在~21℃,人体周围的热舒适指标分布说明在室人员的热舒适情况较好。

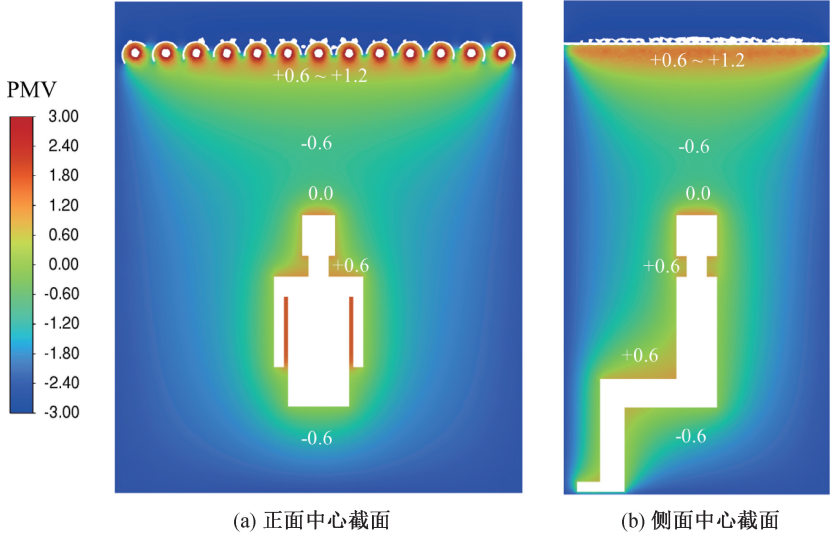


图 18 工况 4 中的人体中心截面 PMV 值分布

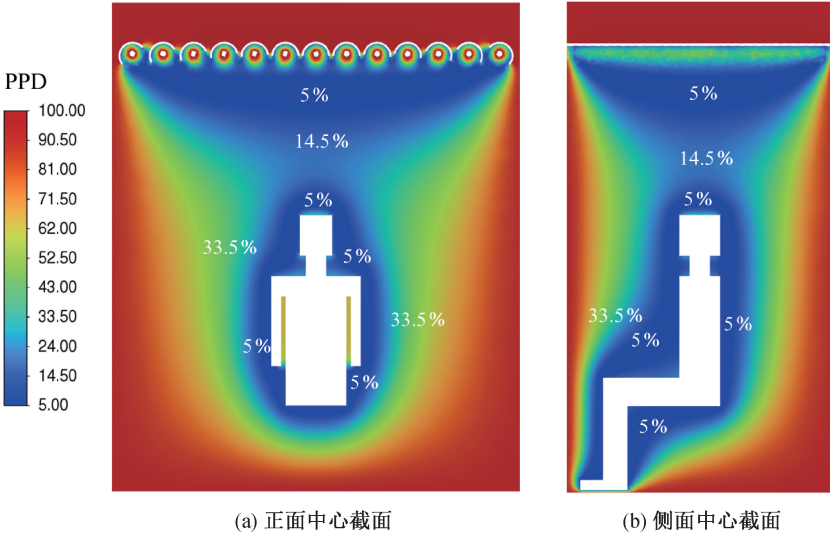


图 19 工况 4 中的人体中心截面 PPD 值分布

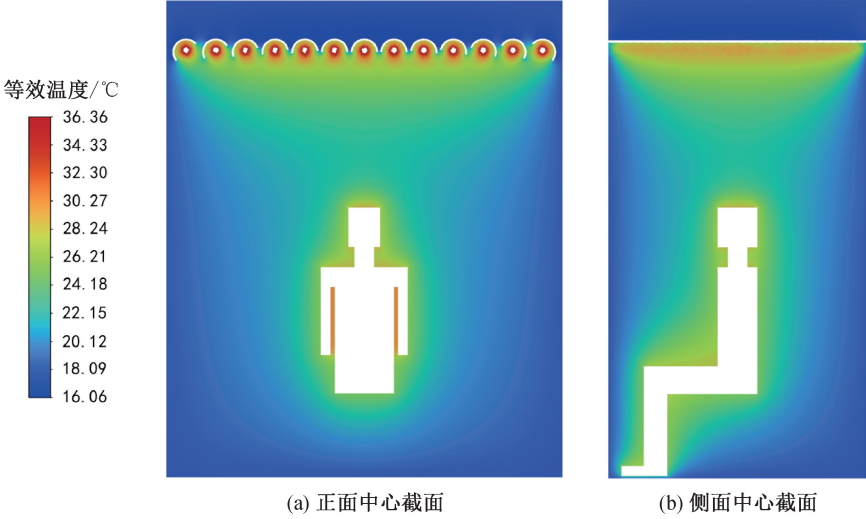


图 20 工况 4 中的人体中心截面等效温度分布

4 结 论

本文通过人体热舒适主观调查实验研究了在该装置作用下室内人员局部和全身热舒适的变化情况,通过分析得到了 DHR 装置对室内人员热舒适改善效果;通过多元线性回归得到了局部热感觉、局部热舒适和全身热舒适的关系;通过模拟分析和 Fluent 编程得到了该装置的最佳运行工况,实现了热舒适指标的可视化,为本装置实际应用提供相应模型和数据参考,得出如下结论:

a) 在其他室内环境均相同的情况下,引入 DHR 装置后,受试者全身热舒适下降值减小 1.2,显著减小人体热舒适下降趋势;装置垂直向下指向设置时,能有效改善手部和腿部局部热舒适;通过多元线性回归分析得出,在微冷环境中,腿部和足部的局部热舒适是影响全身热舒适最显著的部位。

b) CFD 仿真实验中,DHR 装置运行下的人体周围平均辐射温度均在 18℃以上;不同运行工况下的热环境对比结果表明,装置的最佳运行工况为表面温度 40℃,管径 DN32,管间距 15 cm,作用距离 85 cm,此时人体周围平均辐射温度比其他工况高~2℃。

c) DHR 装置在最佳运行工况下运行时,人体周围热环境 PMV 分布在-0.5至+0.5之间,PPD 值为~5%,等效温度为~21℃,此时室内人员有较好的全身热舒适、局部热舒适和接受度。实验和仿真结果可为室内人员局部热环境和整体热舒适的改善方法提供新思路。

由于实际条件限制,本文仅在实验室环境中开展小型装置人体热舒适实验和模拟实验。为了获得本装置在实际建筑中的应用效果,后续应按照最佳工况设置补充制作装置模型,并在实际建筑内部进行供暖温度范围及人体适应性实验。

参考文献:

[1] 赵胜凯,杨柳,高斯如,等.不同供暖末端办公建筑室内热环境和人体热舒适调研[J].暖通空调,2024,54(7):98-105.
[2] 牛建会,王海超,吕天舒,等.空气源热泵毛细管地板辐射供暖系统实验研究[J].制冷学报,2025,46(1):46-52.
[3] 程向明,张玉瑾,李翠敏.低温辐射供暖系统末端温控策略的正

交试验研究[J].建筑节能(中英文),2022,50(10):58-62.
[4] Kilkis İ B, Sager S S, Uludag M. A simplified model for radiant heating and cooling panels[J]. Simulation Practice and Theory, 1994, 2(2): 61-76.
[5] 彭冬根,孙小月,王浙明,等.CFD技术在地板辐射采暖复合机械送风下人体热舒适性的应用[J].南昌大学学报(工科版),2024,46(3):351-356.
[6] 颜金波.基于新型工位辐射供暖末端的热舒适性实验与模拟研究[D].长沙:湖南大学,2019:43-48.
[7] 于国清,顾赵季,闫振业,等.夏热冬冷地区基于座位的个性化供暖系统研究[J].暖通空调,2021,51(3):89-94.
[8] Rawal R, Schweiker M, Kazanci O B, et al. Personal comfort systems: A review on comfort, energy, and economics[J]. Energy and Buildings, 2020, 214: 109858.
[9] Zhang H, Arens E, Taub M, et al. Using footwarmers in offices for thermal comfort and energy savings[J]. Energy and Buildings, 2015, 104: 233-243.
[10] Zeiler W, Vesely M, Vissers D, et al. Thermal response of different body parts: The fingertip as control sensor for personalized heating[J]. Energy Procedia, 2015, 78: 2766-2771.
[11] Wang H, Wang J, Li W, et al. Experimental study on a radiant leg warmer to improve thermal comfort of office workers in winter[J]. Building and Environment, 2022, 207: 108461.
[12] Dai B B, Ma J H, Zhu D, et al. Thermal performance of a directional heat radiation device utilizing the Monte Carlo ray tracing method[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 217: 119257.
[13] 苏小文,王昭俊,杨宇鑫,等.严寒地区不均匀环境可接受冷壁温限值研究[J].建筑科学,2021,37(12):38-43.
[14] 王玉,钟雷钧,陈剑波,等.风机盘管加新风系统室内微循环热舒适性研究[J].建筑节能(中英文),2024,52(9):50-54.
[15] 金玲,陈俊哲,刘高源,等.夏热冬冷地区局部取暖建筑的热环境特征与能效分析[J].建筑科学,2024,40(10):153-162.
[16] 程成,闫海燕.寒冷地区非空调建筑内季节对人体局部皮肤温度及热感觉影响[J].建筑与文化,2024,(9):51-53.
[17] Fanger P O. Calculation of thermal comfort, introduction of a basic comfort equation[J]. ASHRAE Transactions, 1967, 73(2):1-20.
[18] Nilsson H O, Holmér I. Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models[J]. Indoor Air, 2003, 13(1):28-37.
[19] Madsen T L, Olesen B W, Kristensen N K. Comparison between operative and equivalent temperature under typical indoor conditions[J]. ASHRAE Transactions, 1984, 90(12): 1077-1090.

(责任编辑:康 锋)