

地面局部辐射供暖典型热环境特征化表征研究

苏 玲², 王登甲^{1,2}, 董斌彦², 王天慧²

(1. 西安建筑科技大学 西部绿色建筑国家重点实验室, 陕西 西安 710055;

2. 西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 局部精细化采暖是满足室内人员舒适前提下降低采暖能耗、实现采暖能源高效利用的重要方式之一。为提高采暖效率, 给精细化辐射供暖提供方法参考, 本文选取具有显著工位布局要求的办公场所作为对象, 对地面局部辐射供暖模块影响下, 室内不同区域热环境分布情况进行典型化研究分析, 得到了不同局部模块供暖工况下室内非均匀热环境分布特征。分析结果表明, 局部辐射面积为 16.7% 时辐射区域与非辐射区域平均辐射温度相差 3 °C 以上, 具有明显的局部环境营造效果; 地面局部辐射供暖辐射区域与非辐射区域不对称辐射温度差异显著; 将局部辐射源设置在靠近外墙区域, 可以提高整体平均辐射温度, 使室内平均辐射温度分布更为均匀。本研究初步给出基于地面局部辐射供暖的典型化热环境共性特征表述, 可为后续局部辐射供暖系统的精细化设计提供参考。

关键词: 地面局部辐射供暖; 非均匀热环境; 数值模拟

中图分类号: TU83

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)01-0141-09

Study on characterization of typical thermal environment for ground local radiant heating

SU Ling², WANG Dengjia^{1,2}, DONG Binyan², WANG Tianhui²

(1. State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an 710055, China;

2. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Local fine heating is one of the important ways to reduce heating energy consumption and realize efficient utilization of heating energy under the premise of satisfying the comfort of indoor personnel. In order to improve heating efficiency and provide a method reference for refined radiation heating, the office space with significant station layout requirements is selected as the object in this study to conduct typical research and analysis on the distribution of thermal environment in different indoor areas under the influence of ground local radiation heating modules, and the distribution characteristics of indoor non-uniform thermal environment under different local module heating conditions are obtained. The analysis results show that when the local radiation area is 16.7%, the average radiation temperature difference between the radiation area and the non-radiation area is more than 3 °C, which has obvious local environment construction effect. There is a significant difference in the asymmetric radiation temperature between the radiation area and the non-radiation area of the ground local radiation heating. Setting the local radiation source near the outer wall area can increase the overall average radiation temperature and make the indoor average radiation temperature distribution more uniform. This study gives a preliminary description of the common characteristics of typical thermal environment based on ground local radiant heating, which can provide a reference for the fine design of subsequent local radiant heating systems.

Key words: local floor radiant heating; non-uniform thermal environment; numerical simulation

收稿日期: 2022-11-23

修回日期: 2023-02-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52078408)

第一作者: 苏 玲(1998—), 女, 硕士, 主要研究方向为局部供暖与建筑热环境。E-mail: suling0824@foxmail.com

通信作者: 王登甲(1984—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为太阳能供暖与建筑热环境。E-mail: wangdengjia@xauat.edu.cn

近十年来,我国建筑能耗占社会总能耗的20%~30%,并持续快速上涨^[1],其中公共建筑采暖空调系统能耗占建筑总能耗的50%~60%。在我国双碳目标的发展要求下,如何在保障室内热环境舒适的前提下,降低供暖系统能耗与碳排放,是建筑供暖领域面临的重要问题。常见办公场所对室内环境的供暖方式和效果要求较高,在我国的北方地区,主要采用集中供暖。相当于传统对流型供暖方式,辐射供热具有热舒适性高、节能、卫生条件好的优点,根据《辐射供冷供暖技术规程》^[2],辐射条件下温度工况设置可低2~3℃,降低采暖系统10%~30%的能耗,并且辐射供暖具有较低的室内垂直温度梯度;室内空气流动速度低;减少扬尘,保证室内空气品质等特点,是较为理想、舒适的供暖方式。

由于工位制度的存在,各类办公建筑无差别的全空间供暖模式通常导致能源浪费、花销过高等问题。而局部采暖可以精确有效地满足局部区域的热需求,进而降低采暖能耗。大量学者采用实验和 Computational Fluid Dynamics(CFD)对局部供暖进行了广泛深入的研究。P. E. McNall 等^[3]研究了墙壁和顶棚不同辐射位置、供冷和供热条件下,坐姿受试者的热感觉和热舒适状况。Bojic M 等^[4]研究了采用地板、墙壁、顶板和顶板-地板辐射供暖辐射方式时的室内温度分布,研究结果表明,顶板-地板辐射供暖的室内温度与预期值偏差较大。Myhren J A 和 Holmberg S^[5]利用 CFD 软件仿真模拟研究了在瑞典冬季条件下,采用低温地板辐射供暖和采用传统散热器供暖的室内垂直温度和风速的差异。Koca A 等^[6]通过实验的方法研究了辐射板布置在不同位置 and 不同供回水温度的情况,测量了室内的环境参数。Holmberg 等^[7]采用 CFD 模拟与实测相结合的方法研究了不同形式辐射供暖,包括散热器、地辐、侧板辐射等,分析不同形式下的房间垂直温差、空气流速以及吹风感等。J. A. Myhren 等^[8]通过 CFD 模拟的方法对比研究了侧墙辐射、顶棚辐射和地板辐射的室内空气流速和热舒适。张东亮等^[9]研究了干式地板辐射供暖,通过实验测量了系统运行过程中的室内温度、围护结构表面温度等。李金平等^[10]以西北地区新农村住宅为研究对象,通过实验的方法对比研究了冬季太阳能地板辐射供暖和散热器供暖的室内热环境。杨雨佳等^[11]采用 CFD 软件对冷辐射顶板布置在办公室顶板、地面、侧

墙上部、侧墙下部的室内温度场和流场进行了仿真模拟研究。田彩霞^[12]采用 CFD 软件对不同布置位置的室内热湿环境进行了仿真模拟。韩成^[13]建立了三种面积相同的辐射末端布置方式(顶板,顶板+地面,顶板+地面+墙壁)传热模型,研究其室内热环境表征参数的影响。

对比传统的辐射供暖,局部辐射供暖基于工位制度下精细而有效地满足了局部工位供暖需求。对于工位空间功能有较大差异需求的办公场合,局部可调式辐射供暖是高效的供暖方式。但这种局部辐射供暖方式会导致室内不同区域环境参数不一致,形成明显的不对称环境。因此,本文以办公建筑为对象,研究不同区域热物理场分布的差异性是非常有必要的。

1 地面局部辐射模拟设置

1.1 物理模型

本文地面局部辐射采暖及房间模型如图1所示。房间某典型办公室(6.0 m×5.0 m×3.4 m),其中西墙尺寸为5.0 m×3.4 m,北墙6.0 m×3.4 m,两面均为外墙,北外窗尺寸为1.5 m×2.1 m,西外墙上有两个外窗对称且尺寸均为1.2 m×2.1 m,外窗上边缘距顶面0.4 m,均采用保温面覆盖外窗进行保温隔热。东墙尺寸5.0 m×3.4 m,在距南墙0.9 m处有0.9 m×2.1 m的门,与走廊直接相连。在数值模拟过程前在X=1.25 m和X=3.75 m处截取截面,以便从侧向分析室内温度场分布情况。

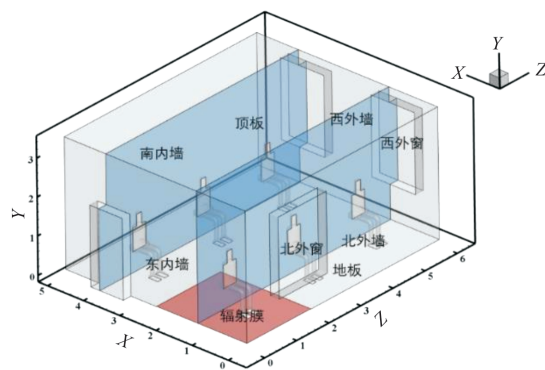


图1 地面局部辐射采暖模型图

Fig. 1 Model of local radiant heating on the ground

模型面积30 m²,人体工位区域面积约5 m²,因此将空间划分为6个区域,便于研究局部辐射源不同工况下不同区域的物理场分布情况,人体处于区域中心。由图2所示,对室内空间区域进行划分将区域①~⑥依次编号。

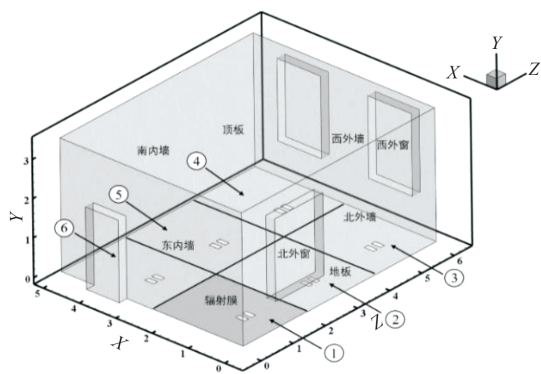


图2 典型办公室及空间区域划分抽象图

Fig. 2 Abstract diagram of typical office and space division

1.2 边界条件设置

本文采用CFD模拟局部供暖过程。根据《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB 50736—2012^[14]，西安市供暖室外计算温度设置为 -3.4°C ，墙体导热系数为 $0.81\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，西、北外墙为第三类边界条件类型。西、北外窗同是第三类边界条件，导热系数为 $3.4\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，玻璃窗上附有厚度 36 mm 、导热系数为 $0.03\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的绝热保温材料。东墙、南墙、地面、顶板作为内墙与其他供暖房间相连，设为绝热壁面，为第二类边界条件；人体设置为热流边界，热流密度为 $75\text{ W}/\text{m}^2$ 。由于考虑到辐射模型，一般认为各围护结构内表面的发射率 $\epsilon=0.8$ 。

1.3 求解方法设置

对室内气体流动进行如下假设：

①室内气体引用 Boussinesq 假设^[15]，室内气体流动形式为稳态紊流；②室内空气在房间内壁面上满足无滑移边界条件；③作为辐射热源的地面表面温度均匀，各向发射率相同；④假设房间各表面都为漫射灰表面；⑤设空气为非吸收性透热介质，不参与辐射换热。

CFD模拟设置中，本文选择了 Coupled 算法进行压力-速度耦合方程的求解，考虑重力的影响，在y方向上设置 -9.81 m/s^2 ，选用伪瞬态(Pesudo)进行计算。采用 Green-Gauss Node Based 空间离散化，压力选择 Body Force Weighted，动量方程、湍动能方程和湍动能耗散率方程采用一阶迎风离散化格式，能量方程采用二阶迎风离散化格式，亚松弛因子均采用默认取值。模拟过程中采取残差收敛进行监控，压力、动量等残差限值均采用默认值。

2 工况设置

局部辐射供暖主要工况分为改变局部辐射源

面积、局部辐射源温度及局部辐射源敷设位置，具体设置如图3~图5所示。改变局部辐射源面积为将局部辐射源的面积由 5 m^2 、 10 m^2 、 15 m^2 ，即局部辐射面积占壁面面积的 16.7% 、 33.3% 、 50% 。根据《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB 50736—2012^[14]，人员经常停留区域地板温度范围应处于 $25\text{--}29^{\circ}\text{C}$ ，本文在规定范围内采取 $25\text{、}27\text{、}29^{\circ}\text{C}$ 三种温度对地面局部供暖温度变化进行研究；改变局部辐射源敷设位置是将 5 m^2 局部辐射源由内墙-外墙-内墙的顺序改变局部辐射源的位置，研究局部辐射源处于室内6个不同辐射位置时室内热环境非均匀分布特征。本文对改变局部辐射源位置时，局部辐射源温度为 25 与 29°C 时的非均匀热环境进行分析讨论。

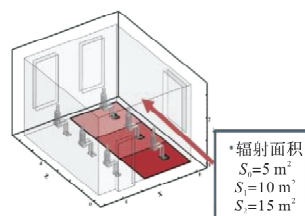


图3 局部辐射源面积工况

Fig. 3 Local radiation source area conditions

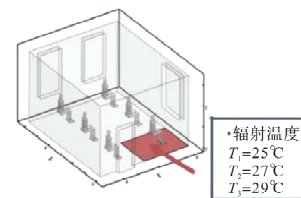


图4 局部辐射源温度工况

Fig. 4 Temperature condition of local radiation source

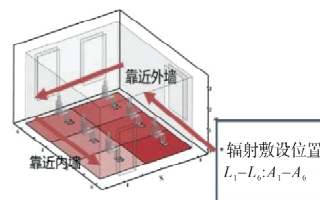


图5 局部辐射源敷设位置工况

Fig. 5 Local radiation source laying position condition

3 评价参数

本文用于评价室内不同区域非均匀温度分布情况的参数包括平均辐射温度、不对称辐射温度和空气温度。

(1) 空间平均辐射温度分布

平均辐射温度(T_{mrt})是假想的一个等温围合面温度，该表面与人体间的辐射热交换量等于人体

与周围实际围合面的辐射热交换量^[17]。空间某点平均辐射温度可由式(1)计算所得

$$T_{\text{mrt}}^4(x, y, z) = \sum_{i=1}^N F_{p-i} T_i^4(x, y, z) \quad (1)$$

式中: $T_{\text{mrt}}(x, y, z)$ 为空间区域某点平均辐射温度, $^{\circ}\text{C}$; F_{p-i} 为房间内表面 i 到放置在平均辐射温度评估点的表面 p 的角系数; $T_i(x, y, z)$ 为空间坐标系下中心位于 (x, y, z) 的表面 i 的平均温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 不对称辐射温度

由于局部辐射源的温度与其他表面不同, 人可能感受到不同表面不同强度的辐射换热。Fanger^[19] 提出了不对称辐射温度 (ΔT_{pr}) 的概念, 即空间某位置两个相反微元面的平面辐射温度之差。不对称辐射温度是指房间中相对两个壁面的平板辐射温度之差的最大值, 它的值取决于房间不同方向的不对称性。在计算不对称辐射温度时应考虑垂直和水平两个方向, 将空间分别做上、下及左、右的划分, 分别计算垂直和水平不对称辐射温度。本文不对称辐射温度取绝对值进行分析。具体的计算公式如下。

$$T_{\text{pr}} + F_1 t_1 + F_2 t_2 + \dots + F_N t_N \quad (2)$$

$$\Delta T_{\text{rp}} = T_{\text{pr1}} - T_{\text{pr2}} \quad (3)$$

式中, T_{pr} 为平面辐射温度, $^{\circ}\text{C}$; F_N 为微元面对第 N 个表面的角系数; t_N 为第 N 个表面的温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{pr1} 、 T_{pr2} 分别为地面辐射供暖时下、上空间的平均辐射温度, $^{\circ}\text{C}$; ΔT_{pr} 为不对称辐射温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 空气温度

本文在模拟结果上截取空间宽度 1/4 等分处及 3/4 等分处的空间截面, 即 $X=1.25 \text{ m}$ 和 $X=3.75 \text{ m}$, 以此来观察地面局部辐射供暖时不同区域空气温度的分布情况。

4 数值模拟及分析

4.1 实验验证

如图 6 在规格为 $6 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3.4 \text{ m}$ 的实验室, 利用电热膜进行地板局部辐射供暖实验。地板局部辐射供暖工况面积工况包括局部面积比为 16.7%、33.3%、50% 工况, 温度工况包括 25、27 和 29 $^{\circ}\text{C}$ 工况。

空气测点布置如图 7 所示, 各个区域位置中心处为人所在处, 分别在距离室内人员的东、南、西、北 0.5 m 处设置竖线, (共 24 根竖线), 在 0.1、0.6、1.1、1.7 m 处设置 K 型热电偶, 以测量实验进行时人体周围空气温度。根据《民用建筑室内热湿环境评价标准》GB/T 50785—2012^[16] 在

每个壁面两条对角线五等分点上设置温度测点, 壁面温度为测点测得温度的平均值。壁面温度测点布置如图 8 所示。



图 6 局部辐射供暖实验

Fig. 6 Local radiant heating experiment

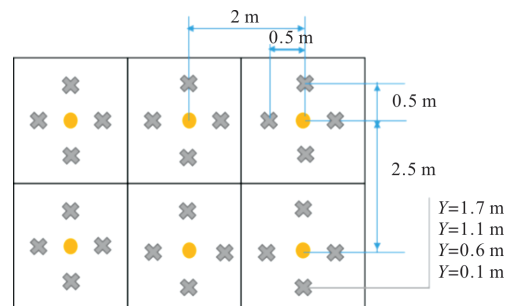


图 7 局部辐射供暖室内空气温度测点

Fig. 7 Local radiant heating indoor air temperature measurement point

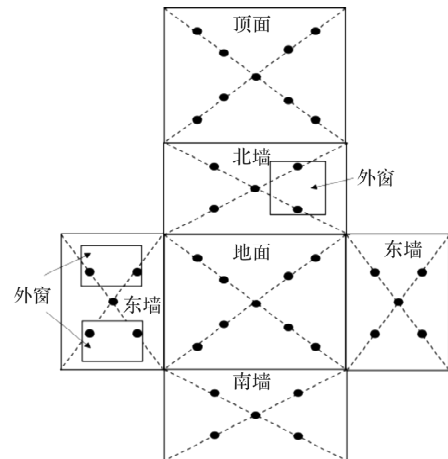


图 8 局部辐射供暖室内壁面测点

Fig. 8 Local radiant heating indoor wall measuring point

为验证模型的可靠性, 利用局部辐射面积为 16.7%, 局部辐射温度为 29 $^{\circ}\text{C}$ 时, 辐射区域一根竖线的实验数据与模拟数据进行对比验证。对实验竖线上增加 2.2 m、2.7 m、3.1 m、3.3 m 的测点, 对布置的温度测点同模拟结果进行验证如图 9, 相对误差可以用相对误差 = (模拟值 - 实验值) / 实验值 $\times 100\%$ 表示。可以看出实测数据和模

拟数据的温差基本在 1°C 以内,相对误差在5%以内 SST k-w 湍流模型与实验结果吻合程度较好.

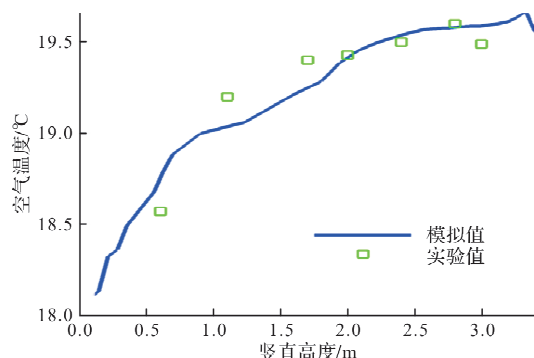


图9 CFD模拟验证结果

Fig. 9 CFD simulation verification results

4.2 地板局部辐射源面积和温度的影响

不同局部辐射面积下室内热环境如图10-12所示. 室内空气温度沿垂直高度出现较为明显的空气温度分层现象, 由于受到室外寒冷气流的影响, 在靠近外墙外窗处室内空气会急剧改变, 由外墙方向往室内存在较大的温度梯度. 增加辐射面积和提高辐射温度可以有效降低外墙温度的影响, 靠近辐射顶板处的空气由于对流作用较强, 空气温度较高. 增大局部辐射面积或者提高局部辐射面温度可以削弱室外寒冷气流的影响, 使室内垂直梯度温度分布更加均匀.

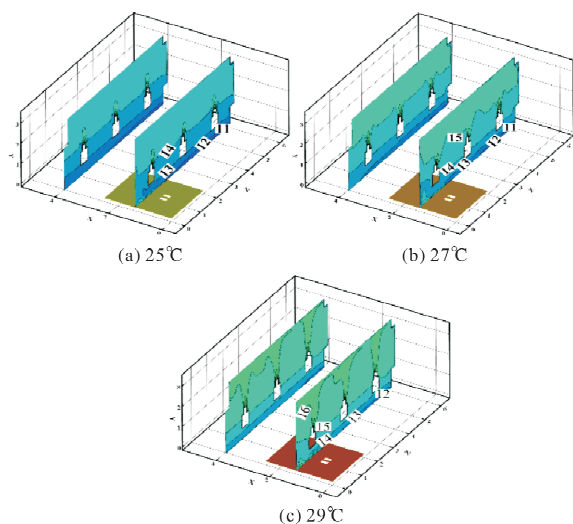


图10 局部辐射面积16.7%

Fig. 10 Local radiation area 16.7%

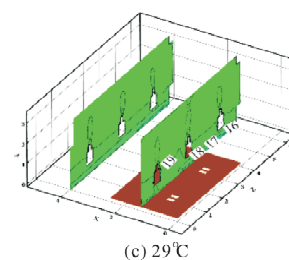
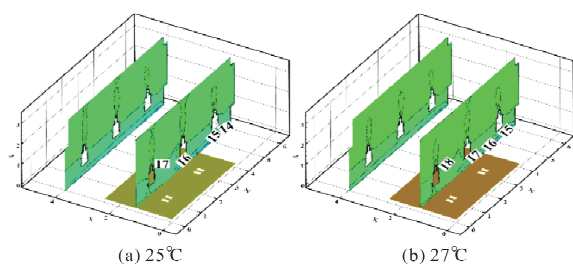


图11 局部辐射面积33.3%

Fig. 11 Local radiation area 33.3%

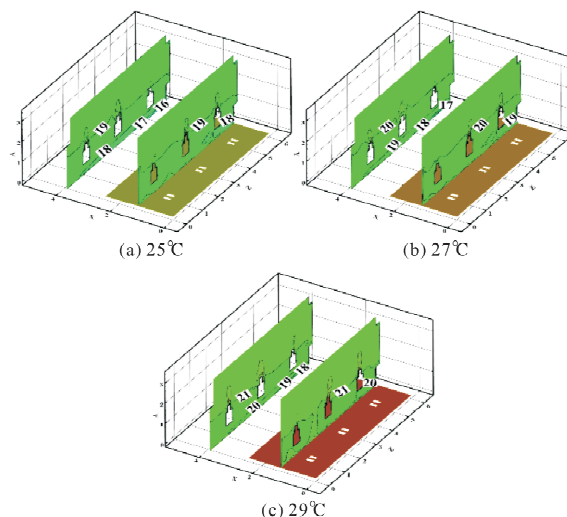


图12 局部辐射面积50%

Fig. 12 Local radiation area 50%

改变地板局部辐射源面积占比及温度后室内各个区域的平均辐射温度、不对称辐射温度分布情况如图13所示. 当改变局部辐射源的面积和区域后, 各个区域的平均辐射温度差值随着温度的升高而增大, 随着辐射面积的增大而减小. 当局部辐射面积为16.7%、辐射温度为 25°C 时, 辐射区域与非辐射区域3的最大差值为 3°C . 而当局部辐射面为 29°C 时, 最大差值为 4.1°C . 这表明局部辐射面面积较小时室内不同区域平均辐射温度差异性较大, 其中室内最低平均辐射温度出现在靠近外墙的区域3处. 该区域位于两面外墙交界处, 与外墙的辐射换热占人员热量交换主导地位, 所以平均辐射温度常处于空间最低值. 增加局部辐射区域面积可以提高整个空间各个区域局部辐射面对人体的角系数, 同时降低室内不同区域平均辐射温度的差异性. 当局部辐射供暖面积为50%、辐射温度为 25°C 时, 最大值与最小值仅差 1.1°C .

不对称辐射温度分布情况如图13所示, 辐射区域和非辐射区域的不对称辐射温度相差较大, 这是由于不同区域人员与局部换热源及各个壁面之间的辐射换热强度差异导致的. 辐射区域的不对称辐射温度随着局部辐射源温度的升高和面积

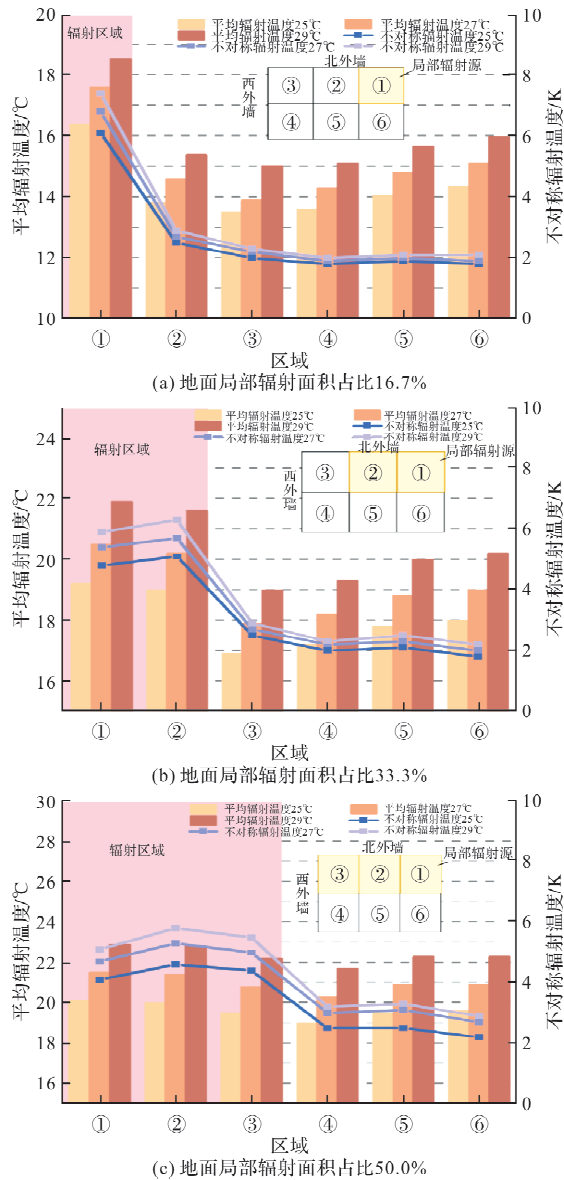


图13 室内各区域平均辐射温度、不对称辐射温度分布

Fig. 13 Average radiant temperature and asymmetric radiant temperature distribution in each area of the room

的增加而降低,而非辐射区域的不对称温度随着温度的升高和面积的增加而升高。在不改变局部辐射源面积的情况下,不同温度下各个区域不对称辐射温度变化规律类似。根据《建筑环境学》^[20]中关于房间内辐射不均匀性的描述,当不对称辐射温度超过10 K,人们就会感到不舒适。当局部辐射面积较小且温度较高时,辐射区域人员与地面局部辐射源进行高强度的辐射换热,同时与顶面的辐射换热交换量相对较小,导致该区域垂直方向不对称辐射温度过大。如当局部辐射面积16.7%且辐射温度为29℃时,辐射区域不对称辐射温度高达7.4 K,此时室内局部辐射供暖营造的非均匀热环境较为明显,区域之间的差异性较大,能满足局部区域的供暖要求,但较人体热舒适而言,人员处于该区域时会感觉较为明显的壁面辐

射波动差异,不对称辐射温度较高。

4.3 地板工况局部辐射源敷设位置的影响

改变地板局部辐射源敷设位置后室内空气温度分布情况如下图14所示。随着局部辐射源敷设位置靠近外墙(图14(a)~(c)),室内各个区域受室外寒冷气流影响显著降低,各个区域不同高度空气温度分布差异较小,空气分布较为均匀。这是由于靠近外墙区域受室外寒冷气流影响最大,局部辐射热源靠近外墙时,热源辐射优先与该区域的壁面、人体进行换热,有效满足了外墙区域的供暖需求。

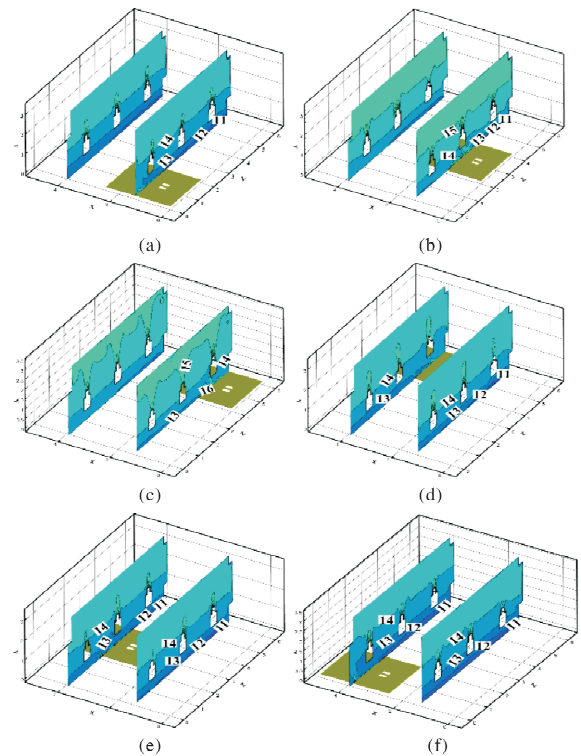


图14 不同局部辐射源敷设位置室内空气温度变化图

Fig. 14 Variation of indoor air temperature at different locations of local radiation sources

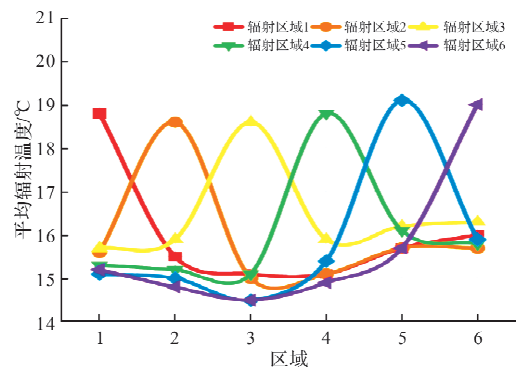


图15 地板局部辐射面积为16.7%下敷设位置对空间平均辐射温度分布的影响

Fig. 15 Influence of laying position on spatial average radiant temperature distribution when the local radiant area of the floor is 16.7%

当局部辐射源敷设于靠近内墙交界处时(图 14(d)~(f)), 室内空气温度受靠近外墙处的寒冷气流影响较大, 室内空气温度受室外波动较大, 空气温度显著降低。

局部辐射面敷设于室内 6 个不同区域时各个区域的平均辐射温度情况如图 15 所示。辐射区域 1 至辐射区域 3 依次靠近两面外墙交界处, 辐射区域 4~辐射区域 6 依次靠近两面内墙交界处。纵坐标的差值代表同一区域不同工况平均辐射温度的编号情况。由图 16 可知: 在初始温度不变的情况下, 将局部辐射源敷设于靠近外墙处能有效提高室内各区域整体温度、降低室内不同区域平均辐射温度差。其中, 将局部辐射源设置于两面外墙交界处(工况 3)时, 室内各区域整体平均辐射温度为 14.7 °C, 室内不同区域平均辐射温度最大差值为 2.2 °C。而将局部辐射源设置在两面内墙交界处为最不利工况(工况 6), 整体平均辐射温度为 13.9 °C, 最大差值为 3.8 °C, 此时虽然辐射区域的温度相比于局部辐射面敷设于靠近外墙处时的工况略高, 但是靠近外墙区域受局部辐射面影响更小, 因此室内各个区域之间的平均辐射温度分布差异性更大。所以, 在相同能耗的情况下, 将局部辐射源设置在靠近外墙区域, 使局部辐射源优先与外墙区域进行换热, 可以提高整体平均辐射温度, 使室内平均辐射温度更均匀。

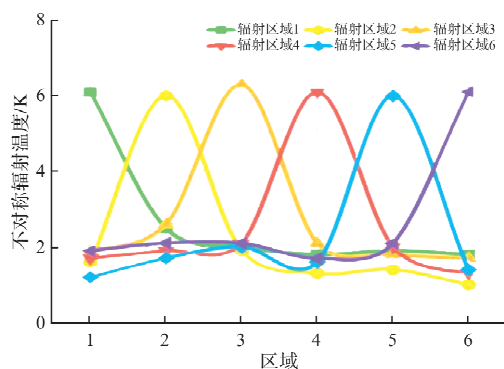


图 16 地板局部辐射面积为 16.7% 下敷设位置对空间不对称辐射温度分布的影响

Fig. 16 Influence of laying position on spatial asymmetric radiant temperature distribution when the local radiant area of the floor is 16.7%

将局部辐射面敷设于室内 6 个不同区域时各个区域的不对称辐射温度情况如图 16 所示, 此时局部辐射膜温度为 25 °C。此时各个工况辐射区域不对称辐射温度在 6~7 K 之间波动, 当局部辐射源设置在两面外墙交界处时最大, 为 6.3 K。总体而言将局部辐射源设置在靠近两面外墙交界处时室内各区域不对称辐射温度相对更大, 波动范围在

1.7~6.1 K, 而将局部辐射源设置在区域 2 时室内各区域不对称辐射温度相对较小, 在 1~6 K 之间波动。室内空间各个区域不对称辐射温度随着温度的升高而升高, 将局部辐射源设置在靠近外墙处也会较设置在靠近内墙处更高。这是由于局部辐射面敷设于靠近外墙处时的热量交换强度大于局部辐射面敷设于靠近内墙处。同时当局部辐射面积较小的时候, 局部辐射源温度过高会导致辐射区域垂直空间平板辐射温度相差过大, 会导致该区域人体不舒适。超过 10 K 的区域为工况 3(两个外墙交界处)的局部辐射区域。同时当局部辐射面积较小的时候, 局部辐射源温度过高会导致辐射区域垂直空间平板辐射温度相差过大, 会导致该区域人体不舒适。如局部辐射面积为 16.7%, 温度为 29 °C 时, 此时应当增大局部辐射面来改善局部热环境情况。

4.4 结果分析

对局部辐射供暖模拟数据进行总结, 得到不同工况下室内平均辐射温度和不对称辐射温度波动范围如表 1 所示。

其中为了定量描述不同工况下室内平均辐射温度和不对称辐射温度的不均匀程度, 引入不均匀系数公式(4)、(5), 即


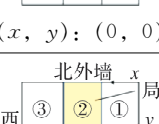
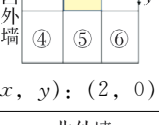
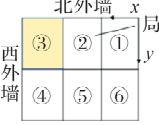
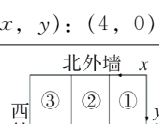
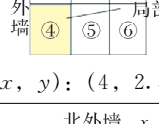
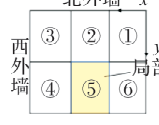
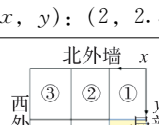
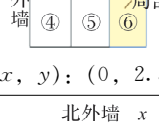
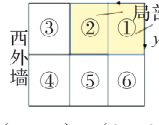
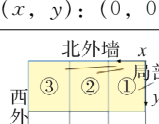
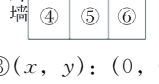
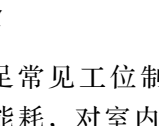
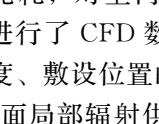
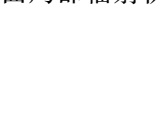

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i(x, y, z) - \mu)^2}{n}} \quad (4)$$

$$\sigma_n = \sigma / \bar{T} \quad (5)$$

由表 1 可知, 地面局部辐射供暖面积为 16.7% 时, 平均辐射温度不均匀系数范围在 0.051~0.098, 不对称辐射温度不均匀系数范围在 0.522~0.781。其中, 平均辐射温度不均匀系数的最小值和不对称辐射温度不均匀系数最大值均出现在工况 3。当局部辐射温度为 29 °C 时不对称辐射不均匀系数达到最大值, 此时室内各区域不对称辐射温度波动较大。当局部辐射面积为 33.3% 时, 平均辐射温度不均匀系数波动范围为 0.046~0.053, 不对称辐射温度波动范围为 0.443~0.468。当局部辐射面积为 50% 时, 平均辐射温度不均匀系数均为 0.019, 不对称辐射温度不均匀系数为 0.271~0.298。平均辐射温度不均匀系数和不对称辐射温度系数均随着局部辐射面积的增大而减小, 随着温度的增大而增大。当地面局部辐射面敷设于两面外墙交界处的工况且温度为 29 °C 时, 平均辐射温度不均匀系数和不对称辐射温度近似达到最值, 此时各区域平均辐射温度波动最小, 各区域人体不对称辐射温度波动最大。

表 1 不同工况室内参数分布情况

Tab. 1 Indoor parameter distribution under different working conditions

工况		平均辐射温度/℃			不对称辐射温度/℃	
面积	敷设区域(坐标范围)	温度/℃	波动范围	温度不均匀系数	波动范围	温度不均匀系数
16.7%	 ①(x, y): (0, 0)~(2, 2.5)	25	13.2~16.5	0.075	1.8~6.1	0.522
	 ②(x, y): (2, 0)~(4, 2.5)	25	13.9~17.6	0.08	1.9~6.8	0.607
	 ③(x, y): (4, 0)~(6, 2.5)	29	14.7~18.8	0.083	2.0~7.4	0.613
	 ④(x, y): (4, 2.5)~(6, 5)	25	13.8~16.7	0.064	1~6	0.781
	 ⑤(x, y): (2, 2.5)~(4, 5)	29	15.0~18.6	0.078	1.2~7.5	0.835
	 ⑥(x, y): (0, 2.5)~(2, 5)	25	14.1~16.4	0.051	1.7~6.3	0.591
	 ⑦(x, y): (0, 5)~(2, 7.5)	29	15.7~18.6	0.06	1.8~7.6	0.666
	 ⑧(x, y): (2, 5)~(4, 7.5)	25	13.5~16.6	0.072	1.3~6.1	0.640
	 ⑨(x, y): (4, 5)~(6, 7.5)	29	15.1~18.8	0.079	1.8~7.5	0.601
	 ①(x, y): (0, 0)~(2, 2.5)	25	13.0~16.8	0.089	1.2~6	0.711
	 ②(x, y): (2, 0)~(4, 2.5)	29	14.5~19.1	0.095	1.6~7.3	0.697
	 ③(x, y): (4, 0)~(6, 2.5)	25	12.9~16.7	0.093	1.7~6.1	0.588
	 ④(x, y): (2, 2.5)~(4, 5)	29	14.5~19.0	0.098	1.9~7.4	0.625
33.3%	 ①②(x, y): (0, 0)~(4, 2.5)	25	16.9~19.2	0.046	1.8~5.1	0.443
	 ②③(x, y): (2, 0)~(6, 2.5)	27	17.9~20.5	0.05	2.0~5.7	0.459
	 ①②③(x, y): (0, 0)~(6, 2.5)	29	19.0~21.9	0.053	2.2~6.3	0.468
50%	 ①②③(x, y): (0, 0)~(6, 2.5)	25	19.0~20.1	0.019	2.2~4.6	0.298
	 ②③(x, y): (2, 0)~(6, 2.5)	27	20.3~21.5	0.019	2.7~5.3	0.271
	 ①②③(x, y): (0, 0)~(6, 2.5)	29	21.7~22.9	0.019	2.9~5.8	0.277

5 结论

为满足常见工位制办公场所局部供暖需求,降低供暖能耗,对室内局部供暖营造的非均匀热环境情况进行了CFD数值模拟,考虑局部辐射源面积、温度、敷设位置的影响,得到结论如下:

(1)地面局部辐射供暖模式下室内不同区域热

环境差异性较大,局部辐射面积为16.7%室内不同区域平均辐射温度相差3℃以上,随着局部辐射温度的升高区域之间平均辐射温度不均匀程度显著增加;

(2)辐射区域的不对称辐射温度随着局部辐射源温度的升高和面积的增加而降低,而非辐射区域的不对称温度随着温度的升高和面积的增加而

升高。当局部辐射面积较小且温度较高时,辐射区域人员与局部辐射源进行高强度的辐射换热,同时与顶面的辐射换热交换量较小,导致该区域垂直方向不对称辐射温度过大,此时应采取增大局部辐射面积的方式改善局部热环境;

(3)在相同能耗的情况下,将局部辐射源设置在靠近外墙区域,可以提高整体平均辐射温度,使平均辐射温度不均匀系数降低45%左右,室内平均辐射温度更均匀。

参考文献 References

- [1] 侯恩哲.《中国建筑节能年度发展研究报告 2022》发布[J]. 建筑节能, 2022, 50(4): 146.
HOU Enzhe. "China building energy efficiency annual development research report 2022" released [J]. Journal of Energy Conservation in Buildings, 2022, 50(4): 146.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 辐射供暖供冷技术章程: JGJ 142—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Regulation of Radiant Heating and Cooling: JGJ 142—2012[S]. Beijing: China Architecture and Construction Press, 2012.
- [3] MCNALL P E, BIDDISON R E. Thermal and comfort sensations of sedentary persons exposed to asymmetric radiant fields[J]. ASHRAE Transactions. 1970, 76(1): 123-136.
- [4] Bojić M, Cvetković D, Marjanović V, et al. Performances of low temperature radiant heating systems[J]. Energy and Buildings, 2013, (61): 233-238.
- [5] MYHREN J A, HOLMBERG S. Flow patterns and thermal comfort in a room with panel, floor and wall heating [J]. Energy and Buildings, 2008, 40(4): 524-536.
- [6] KOCA A, GEMICI Z, TOPACOGLU Y, et al. Experimental investigation of heat transfer coefficients between hydronic radiant heated wall and room[J]. Energy and Buildings, 2014, 82(1): 211-221.
- [7] HOLMBERG S, CHEN Q. Air flow and particle control with different ventilation systems in a classroom. [J]. Indoor Air (Print), 2003, 13(2): 200-204.
- [8] MYHREN Jonn Are, HOLMBERG Sture. Flow patterns and thermal comfort in a room with panel, floor and wall heating[J]. Energy and Buildings, 2008, 40(4): 524-536.
- [9] 张东亮, 王子介, 张旭. 干式地板辐射供暖系统实验研究[J]. 太阳能学报. 2010. 31(7): 834-838.
ZHANG Dongliang, WANG Zijie, ZHANG Xu. Experimental study on dry floor radiant heating system [J]. Journal of Solar Energy. 2010. 31(7): 834-838.
- [10] 黄立志, 李念平, 何颖东, 等. 不同辐射供冷方式下室内热舒适和能耗模拟分析[J]. 建筑科学, 2017, 33(8): 90-102.
HUANG Lizhi, LI Nianping, HE Yingdong, et al. Simulation analysis of indoor thermal comfort and energy consumption under different radiation cooling methods [J]. Building Science, 2017, 33(8): 90-102.
- [11] 杨雨佳, 刘金祥, 牛晓峰, 等. 冷辐射板布置方式对办公室热环境影响的模拟研究[J]. 流体机械, 2017, 45(1): 77-81.
YANG Yujia, LIU Jinxiang, NIU Xiaofeng, et al. Simulation study on the influence of cold radiant panel layout on office thermal environment [J]. Journal of Fluid Machinery, 2017, 45(1): 77-81.
- [12] 田彩霞. 辐射供冷方式室内舒适性数值模拟[J]. 制冷与空调, 2013, 13(5): 97-103.
TIAN Caixia. Numerical simulation of indoor comfort in radiant cooling system [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2013, 13(5): 97-103.
- [13] 韩成. 辐射末端布置方式对辐射供冷供暖室内热环境的影响机理研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
HAN Cheng. Study on the influence mechanism of radiant end arrangement on the thermal environment of radiant cooling and heating room [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB 50736—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design Code for heating, ventilation and air conditioning of civil buildings: GB 50736—2012 [S]. Beijing: China Architecture and Construction Press, 2012.
- [15] ANSYS. ANSYS Fluent Theory Guide, Version 19.0 [M]. PA: ANSYS, Inc, 2018.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑室内热湿环境评价标准: GB/T 50785—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Evaluation standard for indoor heat and humidity environment of civil buildings: GB/T 50785—2012[S]. Beijing: China Architecture and Construction Press, 2012.
- [17] ASHRAE. ASHRAE Handbook Fundamentals [M]. Atlanta, PA, USA: ASHRAE, 2017.
- [18] 杨荣贤, 马庆芳, 原庚新. 辐射角系数手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
YANG Rongxian, MA Qingfang, YUAN Gengxin. Radiation angle coefficient coefficient manual [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982.
- [19] FANGER P O, Ba'nhidi L, OLESEN B W, et al. Comfort limits for heated ceilings [J]. ASHRAE Transactions, 1980, 86(2): 141-156.
- [20] 黄晨. 建筑环境学[M]. 第二版. 北京: 机械工业出版社, 2015.
HUANG Chen. Building environment [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2015.

(编辑 郑晓龙 沈 波)