

局部辐射板铺设方案的热舒适性研究

向万福¹ 崔文智^{1,2} 通讯作者

1 重庆大学能源与动力工程学院，重庆，400044；

2 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室，重庆，400044；

摘要：本研究聚焦于优化单人卧室睡眠热环境，探讨了三种局部辐射板铺设方案（A、B、C）对热舒适度的影响，并与无辐射板工况（0）进行对比。通过数值模拟，分析了空气温度、头部和躯干平均辐射温度以及PMV-PPD指标的变化规律。结果表明，辐射板对空气温度影响较小，但辐射板布局显著影响局部辐射温度，头部和躯干辐射温度因铺设位置不同而呈现明显差异。其中，方案C（辐射板贴近床铺墙面铺设）能够更均匀地调节床铺周围热环境，使人体头部和躯干均处于适宜温度范围，PMV和PPD指标表现最优，显著提升了热舒适性。本研究为优化卧室热环境提供了理论依据。

关键词：热舒适；辐射板；CFD

DOI:10.69979/3041-0673.25.04.057

引言

睡眠作为人类生命活动中不可或缺的一部分，占据了人一生约三分之一的时间，其质量直接影响个体的身心健康。良好的睡眠能够帮助身体恢复机能、促进大脑发育、增强免疫力，而睡眠质量不佳则可能严重影响生活品质与工作效率^[1,2]。

在影响睡眠质量的诸多因素中，热环境起着至关重要的作用，热舒适则是衡量睡眠热环境优劣的关键指标。为了改善人员的睡眠热环境以提高睡眠质量，学者们对睡眠环境进行了深入研究。如Mao^[3,4]和Lan等人^[5,6]设计了卧室使用床边个性化通风系统，发现该系统可有效满足人员睡眠期间的热舒适需求。然而这类直吹式的系统设计易引起人员的吹风感，因此Du等人^[7,8]进一步提出了基于辐射的R-TAC系统，通过实验与模拟分析表明，该系统在避免吹风感的同时也能很好地满足热舒适需求。Ismail等^[9]也对针对睡眠舱环境设计了基于辐射顶板的个人舒适系统。辛亚鲁等人^[10]建立了一套基于睡眠环境的辐射空调系统（R-PCS），并对躺卧状态人体的热舒适进行了实验研究。得到最佳的热舒适系统参数，且在保持同等热舒适状态时，其能耗较传统对流式空调具有降低了20%以上。

辐射空调在睡眠热环境调控中应用广泛，但现有研究主要集中于床铺正上方顶板的辐射板铺设，对其他位置的布局优化研究较少。为此，本研究通过数值模拟，分析单人卧室中不同局部辐射板铺设方案的热环境效果，为优化卧室热环境提供理论参考。

1 模型建立与网格划分

1.1 卧室物理模型

本研究所选取的研究对象为一个典型的单人卧室，房间内布置有衣柜、书桌、窗户、单人床和壁挂式空调，分别位于东北角、西北角、北墙、东南角和西墙，整体布局紧凑且功能齐全。如图1所示。

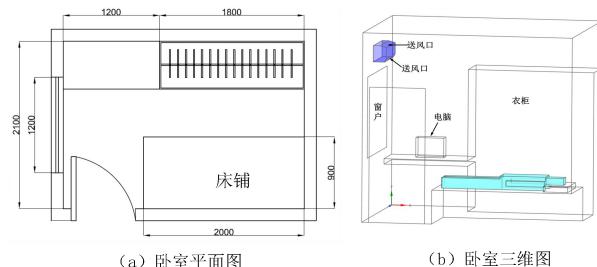


图1 卧室平面图及三维模型

1.2 网格划分与无关验证

本研究采用ANSYS软件中集成的Mesh模块进行网格划分。在网格划分过程中要求最低正交质量始终大于0.2、最大偏度小于0.8、横纵比在可接受的范围内。在对比了网格数目为50万、60万、80万、100万、120万的室内温度数据发现，当网格数量达到100万时，各个测点的温度值趋于稳定。因此，本文将在后续的模拟工作中选择100万的网格数量。

2 边界条件与工况

2.1 边界条件

依据Mao^[11]、Gong等^[12]学者的研究成果，本研究选定并固定空调入口风量为52L/s（对应入口速度为1.4m/s）。模拟室内气流模式时，通过Boussinesq假设模拟空气受热导致密度变化，进而产生密度差所引发的浮力效应，以此更为准确地模拟复杂的气流运动与热传递

过程^[13,14]。空调入口速度 1.4 m/s, 温度 19°C; 回风口为 Pressure-outlet; 人体表面温度 34.6°C, 薄壳换热阻 0.16 W/(m² · K); 辐射板温度 23°C; 电脑热流密度 376 W/m²; 窗户和门定温分别为 29°C 和 28°C; 壁面温度东墙 28.1°C, 西墙 28.8°C, 南墙 28°C, 北墙 27.3°C; 其余壁面为绝热。

2.2 模拟工况

本章研究了三种 1.5 m² 辐射板铺设方案对热环境及热舒适度的影响, 并与无辐射板工况对比。空调温度设为 23°C, 辐射板温度为 19°C。A 方案沿床长墙面铺设, B 方案靠近头部墙面铺设, C 方案贴近床铺墙面铺设, 共四种模拟工况。如图 2 所示:

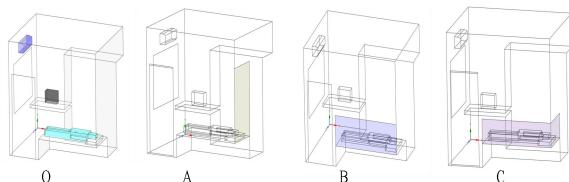


图 2 不同辐射板铺设方案

3 结果与分析

3.1 热环境参数分析

图 3(a) 展示了在四种工况下 (0、A、B、C 方案), 空气温度、头部平均辐射温度和躯干平均辐射温度的变化趋势。

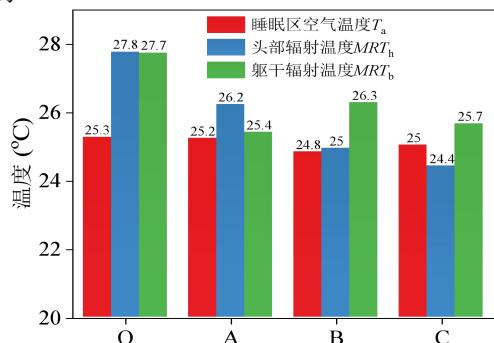
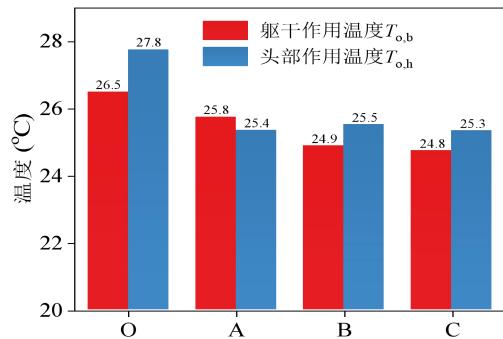


图 3 (a) 空气温度与辐射温度随不同铺设方案变化



(b) 作用温度随不同铺设方案变化

其中空气温度在 0 (无辐射板) 和 A、B、C 方案之

间差异不大, 整体在 23.2°C 到 25.3°C 之间。也即睡眠区空气温度在不同方案之间的差异主要由空调送风的影响引起, 而辐射板主要依靠辐射的方式进行热交换, 对空气温度的影响较小, 最大仅为 0.5°C。

头部平均辐射温度在不同方案中存在较大的差异, 可以发现, 相较于无辐射板供冷的工况, 头部辐射温度从高到低分别为方案 A (26.2°C)、方案 B (25°C)、方案 C (24.4°C)。这验证了不同的辐射板布局对局部热环境的调控作用。而躯干平均辐射温度最低时为 A 方案 (25.4°C), 相较于无辐射板供冷的工况降低了 2.3°C, 其降温效果优于 C 方案 (25.7°C) 和 B 方案 (26.3°C)。由于睡眠区空气温度差异并不显著, 因此平均作用温度主要受到平均辐射温度的影响。

3.2 睡眠热舒适指标 PMV-PPD

图 4 展示了 PMV-PPD 随不同铺设方案变化。对比各方案的 PMV 和 PPD 指标可以发现, 无辐射板的方案人员将处于偏热的状态 (PMV=0.64), 此时的不满意率 PPD 约为 13.5%。而随着辐射板的加入, 人员的热舒适度将被显著提升, 降低了不满意百分比。这说明辐射板的铺设对于改善人体热舒适具有积极作用。其中 C 方案表现最优。这是因为该方案下辐射板沿着贴近床铺的墙面共同铺设, 能够更均匀地调节床铺周围的热环境, 使人体头部和躯干都能处于较为适宜的辐射温度范围内。而 A 方案和 B 方案虽然也有较好的效果, 但由于辐射板的集中铺设位置不同, 导致热环境调节的均匀性稍逊于 C 方案。

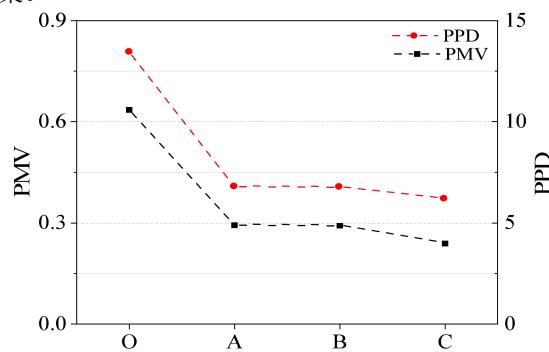


图 4 PMV-PPD 随不同铺设方案变化

综上所述, 辐射板铺设位置对睡眠区域热环境有显著影响, 尤其是对头部和躯干的辐射温度。无辐射板的工况下, 热环境仅能由空调调节, 若入口风温度较高, 则对睡眠环境局部的热调节能力稍有欠缺。因此, 从热舒适性的角度来看, 方案 C 的热舒适性最佳, 其次是方案 B 与方案 A。在实际应用中, 选择合理的辐射板铺设方案对于提高室内热舒适具有重要作用。

4 结论

本文通过数值模拟研究了不同局部辐射板铺设方

案对单人卧室睡眠热环境及热舒适度的影响，旨在优化卧室热环境，提升睡眠质量。研究选取了三种辐射板铺设方案（A、B、C），并与无辐射板工况（0）进行对比，分析了空气温度、头部和躯干平均辐射温度、PMV-PPD等指标的变化规律，主要结论如下：

（1）辐射板对空气温度影响有限。不同辐射板铺设方案对睡眠区空气温度的影响较小，温度变化范围在 23.2°C 到 25.3°C 之间，差异主要由空调送风引起，辐射板对空气温度的最大影响仅为 0.5°C 。

（2）辐射板布局显著影响局部辐射温度。辐射板铺设位置对头部和躯干的平均辐射温度有显著影响。头部辐射温度从高到低依次为方案A(26.2°C)、方案B(25°C)、方案C(24.4°C)；躯干辐射温度最低为方案A(25.4°C)，相较于无辐射板工况降低了 2.3°C ，降温效果优于方案B和方案C。

（3）方案C的热舒适性最佳。方案C（辐射板贴近床铺墙面铺设）能够更均匀地调节床铺周围的热环境，使人体头部和躯干均处于适宜的辐射温度范围内，PMV和PPD指标表现最优，显著提升了人员的热舒适度。

参考文献

- [1] Tong L K, Li Y Y, Liu Y B, 等. The mediating role of sleep quality in the relationship between family health and depression or anxiety under varying living status[J]. Journal of Affective Disorders, 2025, 369: 345–351.
- [2] Wang F, Sun Z, Lin F, 等. Nonlinear relationships between sleep duration, mental health, and quality of life: The dangers of less sleep versus more sleep[J]. Sleep Medicine, 2024, 19: 565–573.
- [3] Mao N, Hao J, He T, 等. PMV-based dynamic optimization of energy consumption for a residential task/ambient air conditioning system in different climate zones[J]. Renewable Energy, 2019, 142: 41–54.
- [4] Mao N, Hao J, Cui B, 等. Energy performance of a bedroom task/ambient air conditioning (TAC) system applied in different climate zones of China[J]. Energy, 2018, 159: 724–736.
- [5] Zhou X, Lian Z, Lan L. Experimental study on a bedside personalized ventilation system for improving sleep comfort and quality[J]. Indoor and Built Environment, 2014, 23(2): 313–323.
- [6] Lan L, Lian Z, Zhou X, 等. Pilot study on the application of bedside personalized ventilation to sleeping people[J]. Building And Environment, 2013, 67: 160–166.
- [7] Du J, Chan M, Pan D, 等. A numerical study on the effects of design/operating parameters of the radiant panel in a radiation-based task air conditioning system on indoor thermal comfort and energy saving for a sleeping environment[J]. Energy and Buildings, 2017, 151: 250–262.
- [8] Du J, Chan M, Deng S. An experimental study on the performances of a radiation-based task/ambient air conditioning system applied to sleeping environments[J]. Energy and Buildings, 2017, 139: 291–301.
- [9] Ismail O A, Kassem M A, Hassan M A. Sleeping pods with radiant cooling panels: A first assessment of thermal comfort and cooling capacity[J]. Energy and Buildings, 2021, 250: 111282.
- [10] 辛亚鲁. 睡眠环境下的局部空间毛细管辐射空调系统热舒适性实验研究[D]. 重庆大学, 2020.
- [11] Mao N, Pan D M, Chan M, 等. Experimental and numerical studies on the performance evaluation of a bed-based task/ambient air conditioning (TAC) system[J]. Applied Energy, 2014, 136: 956–967.
- [12] Gong N, Tham K W, Melikov A K, 等. The acceptable air velocity range for local air movement in the Tropics[J]. HVAC&R Research, 2006, 12(4): 1065–1076.
- [13] Huang Z, Li Q, He Y, 等. Coupled heat and mass transfer analysis for indoor air quality and thermal comfort in naturally ventilated offices[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 269: 126019.
- [14] Li X, Yan Y, Tu J. The simplification of computer simulated persons (CSPs) in CFD models of occupied indoor spaces[J]. Building and Environment, 2015, 93: 155–164.

作者简介：向万福(1999-)，男，汉族，贵州贵阳人，硕士，重庆大学22级动力工程及工程热物理，研究方向：制冷空调。

通讯作者：崔文智(1973-)，男，汉族，安徽泗县人，博士生导师，研究方向：传热，空调制冷方向。