

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-12
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250424001

太阳辐射局部暴露下在室人体热调节模型研究

刘国丹 纪铨行 朱国栋 钟会阳 李文斌 梁树维 张瑶 朱辉 胡松涛

(青岛理工大学环境与市政工程学院 青岛 266520)

摘要 人体热调节模型可以反映身体对周围热环境的生理反应,然而现有热调节模型未考虑到太阳辐射对室内热环境及人体影响的非均匀性。因此,本文修改并建立了局部暴露于太阳辐射的室内人体热调节模型。区分直射和非直射区域,修正平均辐射温度的计算方法;区分直射和非直射部位,修改模型中皮肤和服装温度以及热损失的计算;并在换热量计算上增加了太阳辐射得热部分。经过实验验证,修改后的模型在预测平均皮肤温度时的相对误差小于5%,预测总热损失时的相对误差约为4%。利用该模型,进行了不同活动水平下平均皮肤温度的预测,并探讨了不同太阳辐射强度下人体整体和直射部位的热舒适区偏移规律。结果表明:400 W/m²时人体整体的可接受空气温度比200 W/m²时低2℃。本研究为太阳辐射条件下室内环境的分区控制提供了理论依据。

关键词 热调节模型;室内热舒适;太阳辐射;热舒适区;平均皮肤温度

中图分类号:TB61⁺1;TU119⁺.5

文献标识码:A

Modeling of Human Thermal Regulation in the Room for Local Exposure to Solar Radiation

Liu Guodan Ji Yihang Zhu Guodong Zhong Huiyang Li Wenbin Liang Shuwei Zhang Yao
Zhu Hui Hu Songtao

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, 266520, China)

Abstract Human thermal regulation models reflect the physiological response of the body to the surrounding thermal environment. However, existing thermal regulation models do not account for the non-uniform impact of solar radiation on indoor thermal environments and the human body. Therefore, a new model was established by modifying the thermal regulation model of the human body to include local exposure to direct sunlight in buildings. First, the calculation of mean radiant temperature was revised by distinguishing between direct and indirect areas. Second, the calculations of skin and clothing temperatures and heat loss in the model were modified by distinguishing between direct and indirect parts. In addition, solar radiation heat gain was added to the heat transfer calculations. After experimental verification, the modified model demonstrated a relative error of less than 5% in predicting mean skin temperature, and approximately 4% in predicting total heat loss. Using the model, the mean skin temperature at different activity levels was predicted, and the thermal comfort zone offset laws of the human body as a whole and in direct parts were explored at different solar radiation intensities. The results show that the acceptable air temperature of overall body at 400 W/m² is 2℃ lower than that at 200 W/m². This study provides a theoretical basis for zoning control of indoor environments under direct sunlight.

Keywords thermal regulation model; indoor thermal comfort; solar radiation; thermal comfort zone; mean skin temperature

太阳辐射直射人体时,人体的体温调节系统会对太阳辐射做出动态热反应,并将身体的核心温度维持在适宜的范围内。人体热反应包括血管的收缩和扩张、人体与周围环境的热交换(辐射、对流、蒸发和呼吸)等。

体温调节模型常用于研究人体对热环境的生理响应^[1-2],包括单节点模型^[3]、Gagge两节点模型^[4-5]、

Fiala多节点模型^[6]和三维人体体温调节模型^[7]等。其中,Gagge两节点模型常用于不同环境下的热响应研究。该模型将人体简化为2个同心圆柱体:由骨骼、肌肉及所有器官组成的内圆柱体(核心层)和由多层皮肤构成的外圆柱体。新陈代谢在核心层产生,产生的热量通过皮肤层向周围环境散失,热量传递效率由皮肤血流量和出汗量控制。基于该模型输

基金项目:国家自然科学基金(51978349)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51978349).)

收稿日期:XXXX-XX-XX;修回日期:XXXX-XX-XX;录用日期:XXXX-XX-XX

出结果,Gagge提出了标准有效温度指标,用于评估环境温度、湿度、风速和服装对人体热感觉的影响。P. R. Lyons等^[8]基于两节点模型,研究发现太阳直射对人体热舒适具有显著影响。M. L. Gennusa等^[9]研究表明太阳辐射会导致直射区域平均辐射温度(mean radiant temperature, MRT)的急剧升高。另有研究显示,室内太阳辐射不仅会增强人体的辐射换热,还会导致辐射分布的不对称性^[10-12]。本课题组前期的研究^[13-15]同样发现,太阳辐射不仅会导致室内平均辐射温度与空气温度的不对称性,还会引发皮肤温度分布的非均匀性,并显著影响热交换与热舒适。

近年来,为定量分析太阳辐射对环境和人体的影响效应,学者们采用不同方法建立了多种理论模型。M. L. Gennusa等^[16]提出了一种太阳辐射对环境作用的分析模型(solar-adjusted mean radiant temperature, SMRT),Li Jianong等^[17]分析了快速同步太阳辐射对人体生理及热感觉响应的作用机制。Zhang Huan等^[18-19]改进了太阳辐射下人体整体热交换与服装表面温度的计算方法,并提出预测平均评价修正模型(corrected predicted mean vote, CPMV)以评估不同日照条件下的室内热舒适。E. Arens等^[20]开发的太阳辐射计算模型(solarcal model, SC Model)可计算室内人体接收的太阳辐射量,并将其转化为平均辐射温度的增量。此外,多项研究亦将太阳辐射变量纳入热舒适评价指标与模型中^[21-24]。然而,上述研究均未进行太阳辐射下人体热调节模型的研究。

现有两节点模型通常将房间或人员视为整体,而忽视了太阳辐射引起的非均匀影响:一方面,它使室内直射区与非直射区的平均辐射温度产生显著差异;另一方面,也导致人体受直射与未受直射部位的皮肤温度分布不对称。上述影响会导致人体与周围环境热交换的变化,且局部热反应显著不对称会直接影响整体热舒适。因此,为提升两节点模型在室内太阳辐射条件下的适用性,必须综合考虑太阳辐射对房间和人体的非均匀作用。

基于上述分析,本研究在Gagge两节点模型基础上,建立局部暴露于太阳辐射的室内人体热调节模型,通过室内太阳直射人体的实验进行模型验证。利用该模型分析不同活动水平下平均皮肤温度的变化,探究不同辐射强度下整体和直射部位的舒适区变化,为具有高源强太阳辐射建筑或空间(如机场航站楼、高铁站候车室等)的空调分区控制提供理论依据。

1 模型建立与校验

本研究对既有的人体热调节模型进行改进,针对太阳辐射对室内热环境的影响,区分直射区与非直射区,修正了平均辐射温度(边界条件)的计算方法;针对太阳直射对人体的非均匀影响,区分直射与非直射部位,改进了模型中皮肤和服装温度(初始条件)以及热损失的计算方法,增加了太阳辐射得热的计算模块。通过对前期研究的实验场景^[25]进行简化,建立太阳辐射条件下的人体热调节模型。

1.1 边界条件计算

1.1.1 平均辐射温度

MRT是影响人体热感觉与热交换的关键环境参数^[26-27]。在人体热调节模型中,MRT的计算精度直接影响模型预测结果的准确性。王志欣^[15]研究发现,在太阳直射条件下,MRT会出现显著变化,此外,该研究对比了3种平均辐射温度计算方法在太阳辐射条件下的准确性,发现文献^[16]提出的计算方法准确性更高,如式(1)所示。该方法综合考虑太阳辐射直射与散射。

$$t_r = \sqrt[4]{\frac{\sum_{i=1}^N F_{s \rightarrow i} T_i^4 + \frac{C_{dn}}{\varepsilon_s \sigma}}{(\alpha_{irr,d} \sum_{j=1}^M F_{s \rightarrow j} I_d + C_s \alpha_{irr,b} f_p I_b)}} - 273 \quad (1)$$

式中: t_r 为平均辐射温度, $^{\circ}\text{C}$; $F_{s \rightarrow i}$ 为人体与第*i*个围护结构内表面之间的辐射角系数; $F_{s \rightarrow j}$ 为人体与第*j*个玻璃表面之间的辐射角系数; T_i 为第*i*个围护结构内表面温度, K ; C_{dn} 为昼夜系数,白天取值为1,夜晚取值为0; C_s 为阴影系数,受照射时取值为1,未受照射时取值为0; ε_s 为人体表面辐射发射率,取值为0.95; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; $\alpha_{irr,d}$ 、 $\alpha_{irr,b}$ 分别为人体对于漫射/直射辐射的吸收系数,取值均为0.7; I_d 、 I_b 分别为进入房间的漫射/直射辐射量, W/m^2 ; f_p 为投影面积系数。

本研究重点关注太阳直射对人体的影响,因此对相关方程进行了简化和改进。首先,利用实验实测得到太阳辐射的入射角、方位角以及房间的几何尺寸和窗户位置等,确定直射和非直射区域。再分别计算两个区域MRT。直射区域平均辐射温度 $t_{r,ir}$ 和非直射区域平均辐射温度 $t_{r,unir}$ 计算如式(2)和式(3)所示。

$$t_{r,ir} = \sqrt[4]{\frac{\sum_{i=1}^N F_{s \rightarrow i} T_i^4 + \frac{C_{dn}}{\sigma \varepsilon_s} C_s \alpha f_{cl} f_p f_{eff} f_{bes} \tau_{sol} I}{\sigma \varepsilon_s}} - 273 \quad (2)$$

$$t_{r,unir} = \sqrt[4]{\sum_{i=1}^N F_{s-i} T_i^4} - 273 \quad (3)$$

式中: $t_{r,ir}$ 、 $t_{r,unir}$ 分别为直射/非直射区域平均辐射温度,°C; α 为人体对于太阳辐射吸收率,取值为0.7; f_{cl} 为服装面积系数; f_{eff} 为太阳辐射有效系数,静坐时取值为0.696,站立时取值为0.792; f_{bes} 为暴露在太阳辐射下着装人体外表面积与总外表面积之比,直射区域取值为1; τ_{sol} 为玻璃透光率,取值为0.8; I 为太阳辐射强度, W/m^2 。

1.1.2 操作温度

操作温度综合了平均辐射温度与空气温度的环境参数。当室内存在太阳直射时,其不仅会影响室内热环境的不对称度,从而改变平均辐射温度;同时也会直接提升室内空气温度。操作温度能更准确地反映存在太阳直射时的室内热环境状况,操作温度计算如下:

$$t_0 = \frac{(h_r t_r + h_c t_a)}{(h_r + h_c)} \quad (4)$$

根据ASHRAE 55—2020标准^[28],操作温度可采用简化算法进行计算,该算法仅需输入空气温度与平均辐射温度2个参数,计算如下:

$$t_0 = A t_a + (1 - A) t_r \quad (5)$$

$$A = \frac{h_c}{(h_r + h_c)} \quad (6)$$

式中: t_0 为操作温度,°C; h_r 为辐射传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; t_r 为平均辐射温度,°C; h_c 为对流传热表面传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; t_a 为空气温度,°C; A 为系数,可根据平均空气速度 V_a 取值, $V_a < 0.2$ m/s时, $A=0.5$, 0.2 m/s $<V_a < 0.6$ m/s, $A=0.6$, 0.6 m/s $<V_a < 1.0$ m/s, $A=0.7$ 。

1.2 初始条件计算

1.2.1 皮肤表面温度

皮肤温度作为热调节模型中的关键初始条件,其计算具有重要研究意义。针对太阳直射对人体产生的非均匀热效应,本模型在传统“五点法”^[29-30]基础上,通过补充对称部位皮肤表面温度测点进行改进(图1)。

平均皮肤温度 t_{sk} 采用式(7)进行计算。此外,在皮肤温度计算过程中,本研究同时考虑了受太阳直射部位与非直射部位的温度差异,计算分别如式(8)和式(9)所示。

$$t_{sk} = 0.07 t_{sk,forehead} + 0.18(t_{sk,back} + t_{sk,chest}) + 0.07(t_{sk,left,upperarm} + t_{sk,right,upperarm}) + 0.2(t_{sk,left,thigh} + t_{sk,right,thigh}) + 0.03(t_{sk,left,hand} + t_{sk,right,hand}) \quad (7)$$

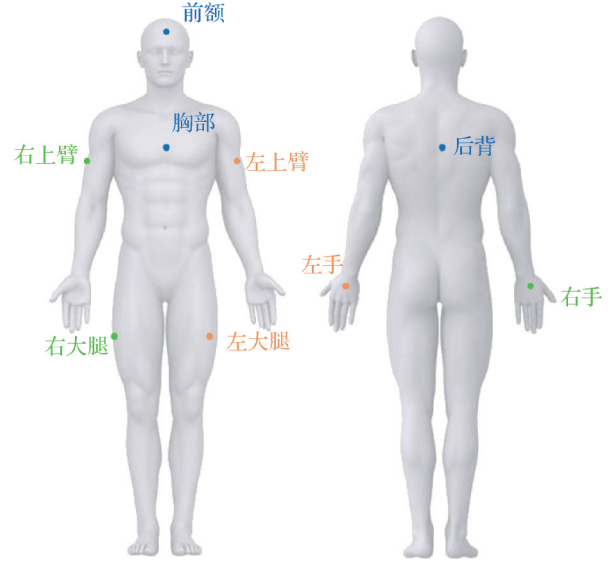


图1 皮肤测点分布

Fig.1 Skin surface temperature distribution

$$t_{sk,ir} = 0.07 t_{sk,forehead} + 0.18(t_{sk,back} + t_{sk,chest}) + 0.14 t_{sk,left,upperarm} + 0.4 t_{sk,left,thigh} + 0.06 t_{sk,left,hand} \quad (8)$$

$$t_{sk,unir} = 0.07 t_{sk,forehead} + 0.18(t_{sk,back} + t_{sk,chest}) + 0.14 t_{sk,right,upperarm} + 0.4 t_{sk,right,thigh} + 0.06 t_{sk,right,hand} \quad (9)$$

式中: t_{sk} 为平均皮肤温度,°C; $t_{sk,ir}$ 、 $t_{sk,unir}$ 分别为直射/非直射区域平均皮肤温度,°C; $t_{sk,forehead}$ 为前额温度,°C; $t_{sk,back}$ 为背部温度,°C; $t_{sk,chest}$ 为胸部温度,°C; $t_{sk,left,upperarm}$ 、 $t_{sk,right,upperarm}$ 分别为左、右上臂温度,°C; $t_{sk,left,thigh}$ 、 $t_{sk,right,thigh}$ 分别为左、右大腿温度,°C; $t_{sk,left,hand}$ 、 $t_{sk,right,hand}$ 分别为左、右手背温度,°C。

1.2.2 服装表面温度

服装表面温度 t_{cl} 的计算推导基于人体热平衡方程建立,如式(10)~式(14)所示。整体服装温度的最终计算表达式如式(15)所示^[31]。

$$\frac{t_{sk} - t_{cl}}{0.155 f_{cl} I_{cl}} = R + C \quad (10)$$

$$R = R_{lw} - R_{sw} \quad (11)$$

$$R_{lw} = h_r (t_{cl} - t_r) \quad (12)$$

$$R_{sw} = \alpha f_{cl} f_p f_{eff} f_{bes} \tau_{sol} I \quad (13)$$

$$C = h_c (t_{cl} - t_a) \quad (14)$$

$$t_{cl} = \frac{t_{sk}}{1 + 0.155 f_{cl} I_{cl} (h_r + h_c)} + \frac{0.155 f_{cl} I_{cl} (h_r t_r + h_c t_a + \alpha f_{cl} f_p f_{eff} f_{bes} \tau_{sol} I)}{1 + 0.155 f_{cl} I_{cl} (h_r + h_c)} \quad (15)$$

式中: t_{cl} 为服装表面温度,°C; I_{cl} 为服装热阻,clo(clo为服装热阻的国际通用指标, $1 \text{ clo}=0.155 \text{ (m}^2 \cdot ^\circ C)/W$); R 为辐射传热量, W/m^2 ; R_{lw} 为长波辐射传热量, W/m^2 ; R_{sw} 为短波辐射传热量, W/m^2 ; C 为对流传热量, W/m^2 。

太阳直射对皮肤温度、服装温度及环境参数产

生的非均匀效应导致人体直射区与非直射区的热平衡关系存在显著差异。为此,本研究在服装温度计算中区分直射区域服装温度 $t_{cl,ir}$ 和非直射区域服装温度 $t_{cl,unir}$,计算方法如式(16)和式(17)所示。

$$t_{cl,ir} = \frac{t_{sk,ir}}{1 + 0.155f_{cl}I_{cl}(h_{r,ir} + h_{c,ir})} + \frac{0.155f_{cl}I_{cl}(h_{r,ir}t_{r,ir} + h_{c,ir}t_a + R_{sw})}{1 + 0.155f_{cl}I_{cl}(h_{r,ir} + h_{c,ir})} \quad (16)$$

$$t_{cl,unir} = \frac{t_{sk,unir}}{1 + 0.155f_{cl}I_{cl}(h_{r,unir} + h_{c,unir})} + \frac{0.155f_{cl}I_{cl}(h_{r,unir}t_{r,ir} + h_{c,unir}t_a)}{1 + 0.155f_{cl}I_{cl}(h_{r,unir} + h_{c,unir})} \quad (17)$$

式中: $t_{cl,ir}$ 为直射区域服装表面温度, $^{\circ}\text{C}$; $h_{r,ir}$ 、 $h_{c,ir}$ 分别为直射区域辐射传热系数、对流传热表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; $t_{cl,unir}$ 为非直射区域服装表面温度, $^{\circ}\text{C}$; $h_{r,unir}$ 、 $h_{c,unir}$ 分别为非直射区域辐射传热系数、对流传热表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

1.3 热损失计算

本研究在既有文献^[15,32]中热损失计算方法的基础上,考虑太阳直射人体时的非均匀性,区分直射与非直射部位,分别修正了对流传热系数与辐射传热系数。

1.3.1 对流传热系数

对流传热系数与服装表面温度及室内空气温度相关,P. O. FANGER^[33]提出的对流传热表面传热系数 h_c 计算如下:

$$h_c = 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} \quad (18)$$

本研究采用分区计算方法,分别确定直射区对流传热表面传热系数 $h_{c,ir}$ 与非直射区对流传热表面传热系数 $h_{c,unir}$ 。

直射部位:

$$h_{c,ir} = 2.38(t_{cl,ir} - t_a)^{0.25} \quad (19)$$

非直射部位:

$$h_{c,unir} = 2.38(t_{cl,unir} - t_a)^{0.25} \quad (20)$$

1.3.2 辐射传热系数

辐射传热系数可通过斯蒂芬-玻尔兹曼定律与对流传热关系联立求解获得。基于实验结果,本研究对区分了直射部位与非直射部位的辐射换热系数。

直射部位:

$$h_{r,ir} = 4 \times 0.72 \times 5.67 \times 10^{-8} \times \left(\frac{t_{cl,ir} + t_{r,ir}}{2} + 273 \right)^3 \quad (21)$$

非直射部位:

$$h_{r,unir} = 4 \times 0.72 \times 5.67 \times 10^{-8} \times \left(\frac{t_{cl,unir} + t_{r,unir}}{2} + 273 \right)^3 \quad (22)$$

1.4 计算流程

本研究在人体热调节模型中增加了太阳辐射得热的独立计算模块。该模块基于进入室内的太阳辐射分布特征,将短波辐射按空间分布划分为直射区与非直射区。此外,考虑到个体受太阳辐射源的差异化暴露,模型对每位受试者分别设置了直射与非直射部位。

1.4.1 短波辐射计算

在建立太阳直射条件下的人体热调节模型时,需综合考虑人体与太阳辐射源的相对空间位置、人体姿态及辐射方向等关键因素。为此,本模型整合了以下环境参数:太阳辐射高度角与方位角、窗玻璃透光率、人员站/坐姿状态、服装热阻以及服装对短波辐射的吸收率等。太阳短波辐射的计算如式(13)^[34]所示,计算流程如图2所示。

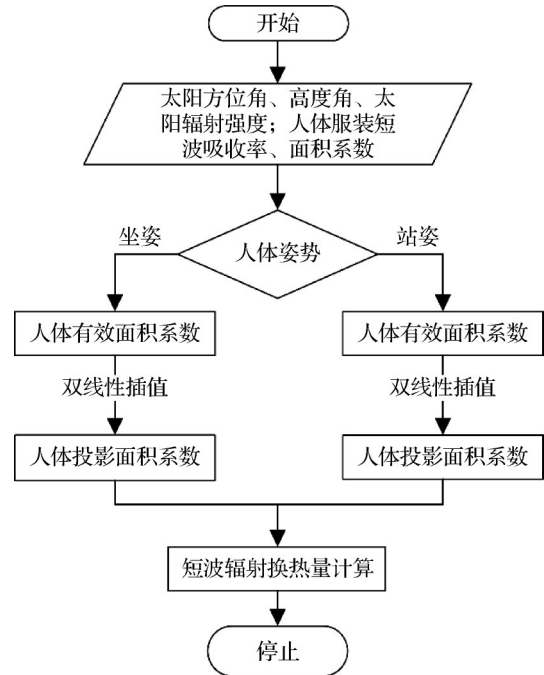


图2 短波辐射换热量计算

Fig.2 Solar shortwave radiation calculation

1.4.2 热平衡模型

基于 Gagge 两节点模型^[4],人体核心层产生代谢热量,并通过皮肤层向环境散发热量。本研究建立了人体与环境的传热模型。

人体核心层的动态热平衡:

$$C_{res} + E_{res} + (K + \rho_{bl}m_{bl}c_{bl})(t_{cr} - t_{sk}) + m_{cr}c_{cr} \frac{dt_{cr}}{d\tau} = M + \Delta M - W \quad (23)$$

式中: C_{res} 为呼吸对流散热量, W/m^2 ; E_{res} 为呼吸蒸发散热量, W/m^2 ; c_{cr} 为核心层比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; m_{cr} 为核心层质量, kg/m^2 ; τ 为时间, s ; M 为代谢产热量, W/m^2 ;

ΔM 为颤抖产热量, W/m^2 ; W 为对外做功消耗的热量, W/m^2 ; K 为组织导热系数, 取值为 $5.28 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; ρ_{bl} 为血液密度, kg/m^3 ; c_{bl} 为血液比热容, 取值为 $4187 J/(kg \cdot ^\circ C)$; m_{bl} 为血液质量流量, $kg/(m^2 \cdot s)$; t_{cr} 为核心层温度, $^\circ C$ 。

人体皮肤层的动态热平衡:

$$(K + \rho_{bl} m_{bl} c_{bl})(t_{cr} - t_{sk}) = Q_{sk} + m_{sk} c_{sk} \frac{dt_{sk}}{d\tau} \quad (24)$$

$$Q_{sk} = Q_{dry} + Q_{latent} = \frac{t_{sk} - t_0}{R_a + I_{cl}} + E_{sk} \quad (25)$$

$$R_a = \frac{1}{h_c + h_r} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} E_{sk} &= E_{diff} + E_{rsw} = 0.06(E_{max} - E_{rsw}) + E_{rsw} \\ &= 0.06E_{max} + 0.94E_{rsw} = 0.06 \frac{P_{sk} - P_a}{(R_{ea} + R_{ocl})} + \\ &\quad 0.94(t_{b, set} - t_{b, set}) e^{\frac{(t_{sk} - 34)}{10.7}} \end{aligned} \quad (27)$$

式中: c_{sk} 为皮肤层比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; m_{sk} 为皮肤层质量, kg/m^2 ; Q_{sk} 为皮肤层到外部环境的总散热量, W/m^2 ; τ 为无量纲时间; Q_{dry} 、 Q_{latent} 分别为皮肤层到外部环境的显热/潜热散热量, W/m^2 ; E_{sk} 为皮肤层向外外部环境的潜热散热量, W/m^2 ; R_a 为对流传热与辐射传热总热阻, $(m^2 \cdot ^\circ C)/W$; E_{diff} 为皮肤水分扩散散热量, W/m^2 ; E_{rsw} 为汗液蒸发散热量, W/m^2 ; E_{max} 为皮肤层最大潜热散热量, W/m^2 ; P_{sk} 为皮肤表面水蒸气分压力, kPa ; P_a 为外部环境水蒸气分压力, kPa ; R_{ea} 为空气层汗液蒸发热阻, $(m^2 \cdot kPa)/W$; R_{ocl} 为服装层汗液蒸发热阻, $(m^2 \cdot kPa)/W$; h_{fg} 为水的汽化潜热, 取值为 $2430 J/kg$; m_{sw} 为出汗速率, $kg/(m^2 \cdot s)$; $t_{b, set}$ 为整体温度设定点, $^\circ C$; $t_{sk, set}$ 为皮肤温度设定点, $^\circ C$ 。

1.5 输出变量

1.5.1 皮肤湿润度

皮肤湿润度是指相同环境下, 皮肤实际蒸发散热量与皮肤完全湿润状态下最大潜热散热量的比值。该参数的大小直接影响人体的蒸发散热效率。针对太阳直射室内环境的人体热调节模型, 还可模拟不同辐射强度下的皮肤湿润度变化, 用以评估人体热舒适。本研究中的皮肤湿润度计算如下:

$$\frac{r_{ev} \dot{m}_{sw} h_{fg}}{3600} = \omega E_{max} \quad (28)$$

式中: r_{ev} 为蒸发汗液百分比; \dot{m}_{sw} 为出汗量, $g/(m^2 \cdot h)$; h_{fg} 为水蒸气汽化潜热, 一般取 $2430 kJ/kg$; ω 为皮肤湿润度。

1.5.2 标准有效温度

标准有效温度(standard effective temperature, SET)是由 Gagge 等^[35]提出并被 ASHRAE 标准^[28]采用的热

舒适评价指标, 常用于比较不同热环境条件下的人体热感觉。针对太阳直射室内环境的人体热调节模型, 还可模拟不同辐射强度与活动强度下的 SET, 该指标可作为界定人体舒适区的基础依据。直射区与非直射区的 SET* 计算如下:

$$Q_{sk} = h_{c, SET}(t_{sk} - SET) + \omega h_{r, SET}(P_{sk} - 0.5P_{SET}) \quad (29)$$

$$h_{c, SET} = h_c + h_e \quad (30)$$

$$1/h_{r, SET} = 0.06/(h_c + 0.133(I_{cl} - \frac{1 - \frac{1}{f_{cl}}}{h_c + h_r})) \quad (31)$$

式中: $h_{c, SET}$ 为标准环境下显热换热系数, $W/(m^2 \cdot kPa)$; $h_{r, SET}$ 为标准环境下潜热换热系数, $W/(m^2 \cdot kPa)$; P_{SET} 为标准环境下皮肤表面水蒸气分压力, kPa ; h_c 为传质系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

1.6 太阳直射室内人体热调节模型

在人体热调节模型中, 皮肤温度与核心温度作为待求解变量, 可利用 Matlab 对该模型进行数值求解。图 3 所示为太阳直射室内人体热调节模型流程图。

2 研究方法

在模型的构建和验证过程中使用了大量实验数据, 本节主要介绍实验概况。

2.1 实验地点

本实验在包含 A 室和 B 室的人工环境室内进行, 如图 4 所示。

房间 A 的热环境可精确调控, B 室配备 2 台太阳辐射模拟器用于模拟人体直射阳光。房间 A 采用孔板均匀送风系统, 空调最低送风温度设定为 $16^\circ C$ (精度为 $\pm 0.5^\circ C$), 相对湿度控制精度 $\pm 5\%$, 工作区风速低于 $0.1 m/s$ 。实验过程中, A 室温度恒定维持在 $18^\circ C$, 相对湿度保持为 40% 。

2.2 受试者

本次实验共招募 24 名受试者, 着装是由实验室统一提供的蓝色工装套装及秋衣秋裤。根据 ASHRAE Standard 55—2020 标准^[28], 站立和坐姿人体的服装热阻值分别为 $1.11 clo$ 和 $1.21 clo$ 。受试者基本信息如表 1 所示。实验要求受试者与窗户保持 $1.1 m$ 的距离(图 3), 其身体左侧(即图示右侧)接受太阳辐射。

B 室作为准备间使用, 受试者可在此更换实验服装并佩戴测试设备。实验采用便携式皮肤温度记录仪(型号: i-Button DS1923; 量程: $-40 \sim 85^\circ C$; 精度: $\pm 0.1^\circ C$)采集受试者皮肤温度, 其测点布置如图 1 所示。

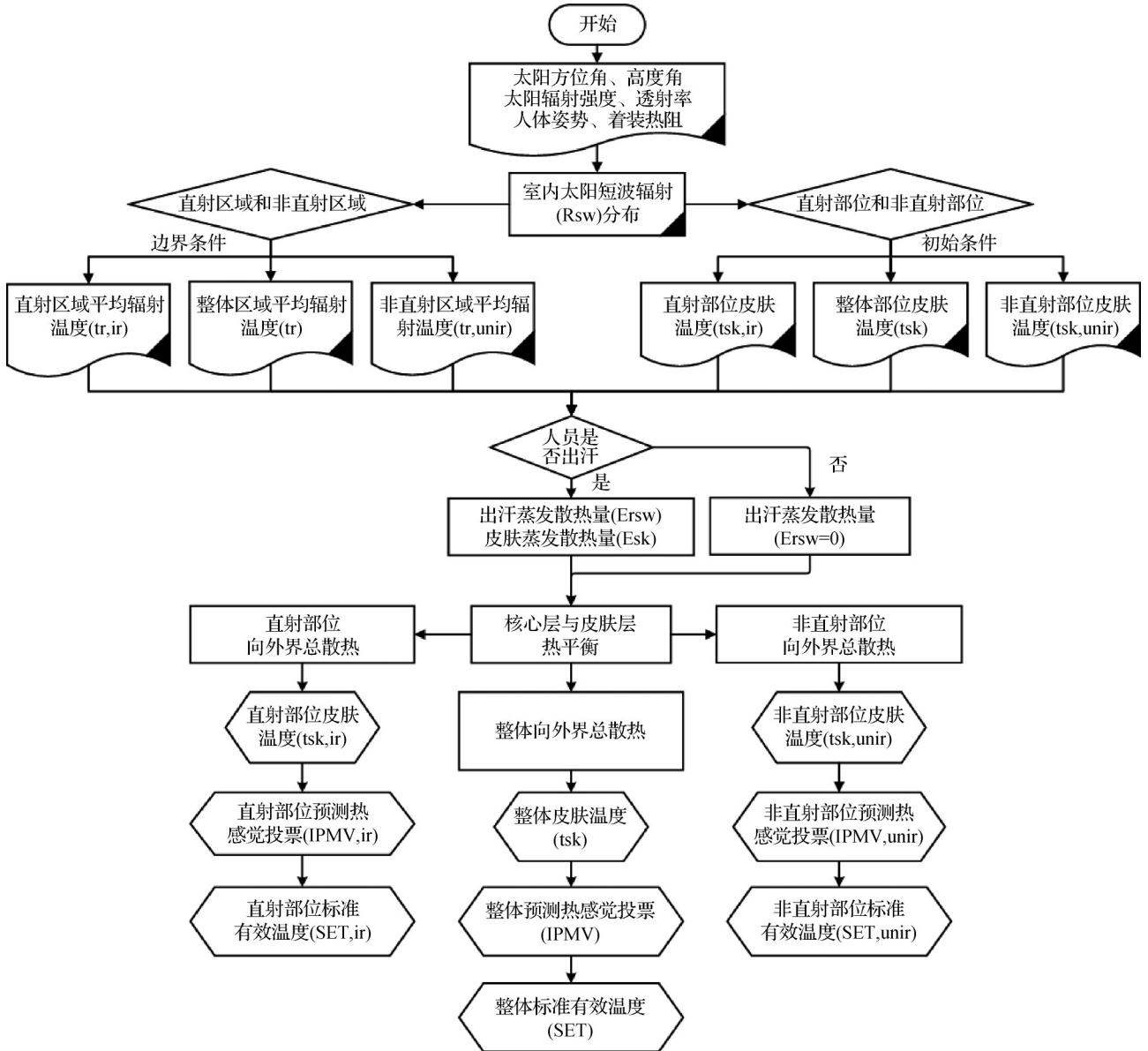


图3 太阳直射室内人体热调节模型流程图

Fig.3 Block diagram of indoor human body thermal regulation model with direct sunlight exposure

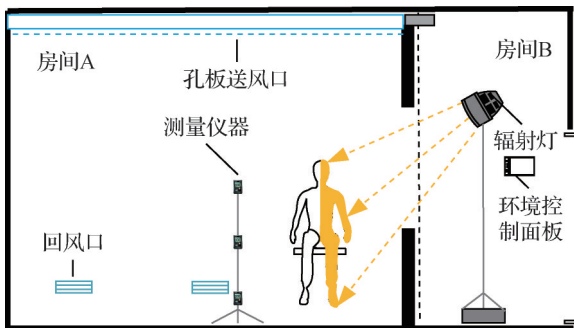


图4 人工气候室示意图

Fig.4 Schematic of the climate chamber

2.3 实验条件

为增加模型适用性,本研究考虑了多个变量。首先,太阳辐射强度会显著影响室内热环境及人体

表1 受试者基本信息

Tab.1 Basic information of the subjects

性别	人数/名	年龄/岁	身高/cm	体重/kg	BMI/(kg/m ²)
男	12	24.1±0.8	176.1±5.6	74.1±12.4	24.0±4.3
女	12	23.4±1.3	164.4±6.4	59.3±8.4	21.9±2.2

热反应,因此模型中考虑了太阳辐射强度对人体的影响。本团队在前期研究中发现^[36],进入窗内的最大太阳辐射强度在冬季约为 600 W/m²,在其他季节低于 550 W/m²,对于玻璃性能良好的建筑物,太阳辐射强度更低^[13]。因此,本研究的实验选择了 0、200、400 W/m²这 3 种辐射强度。此外,冬季人们更倾向于在健身房等室内场所进行锻炼,而太阳辐射对运动过程中的人体同样具有显著影响。因此,本研究将

活动强度作为实验中的另一个变量。按照 ISO 8996^[37]规定,一个身高为 175 cm,体重为 70 kg 的成年健康男性,静坐且保持舒适状态时的新陈代谢率,即基础代谢率,定义为 1 met,1 met=58.15 W/m²。本研究选取了 1、2、3 met 这 3 个活动水平,分别对应人体静坐状态、3.2 km/h 和 5 km/h 的运动状态^[28]。其中 2 met 和 3 met 的活动水平通过跑步机实现。实验现场照片如图 5 所示。

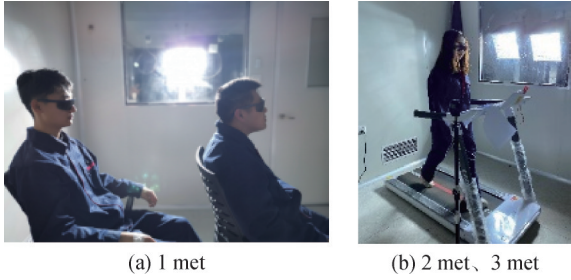


图 5 实验现场图

Fig.5 Photographs of the experimental site

2.4 实验流程

每种工况的持续时间为 70 min,包括 20 min 静坐阶段(无太阳辐射)、40 min 辐照阶段(0、200、400 W/m², 1、2、3 met,共 9 种工况)以及 10 min 恢复阶段(无太阳辐射,静坐)。实验开始前,受试者需在房间 B 更换实验服装、熟悉问卷内容并粘贴皮肤温度测点。准备完毕后进入房间 B 静坐 20 min,待皮肤温度稳定后,填写热感觉问卷。问卷完成后开启太阳辐射模拟器,实验进入辐射阶段,辐射 40 min 内每 10 min 填写 1 次热感觉问卷。

3 结果

平均皮肤温度利用式(7)进行计算,不同实验工况下的平均皮肤温度结果如图 6 所示。通过单因素方差分析,分别对“相同辐射强度+不同活动水平”以及“相同活动水平+不同辐射强度下”的平均皮肤温度进行了显著性差异分析。

由图 6 可知,相同辐射强度下,活动水平越大,平均皮肤温度越高;而活动水平仅在无太阳辐射,即 0 W/m² 工况,会对平均皮肤温度产生显著影响,无辐射时,1 met、3 met 下的平均皮肤温度存在显著性差异。相同活动水平下,辐射强度越大,平均皮肤温度越高;不同活动水平下,太阳辐射强度均会对平均皮肤温度产生显著影响,辐射强度差异越大,工况间的平均皮肤温度显著性水平越高。值得注意的是,当活动水平在 1 met 和 2 met 时,0 W/m² 和 200 W/m² 下的平均皮肤温度存在显著性差异,而在 3 met 时,这 2 种

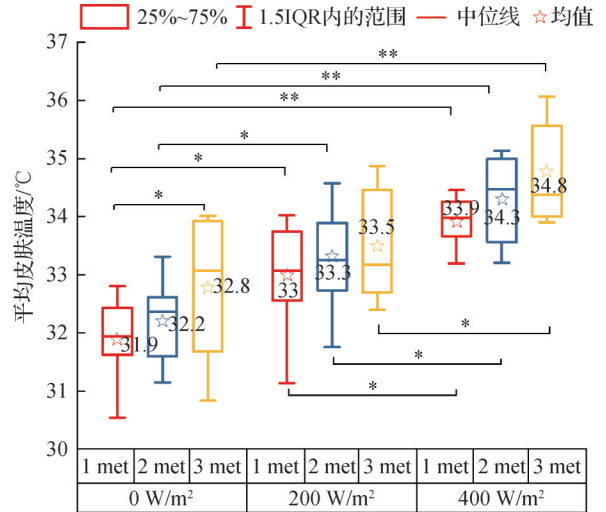


图 6 平均皮肤温度

Fig.6 Mean skin temperature

辐射强度下的平均皮肤温度不存在显著性差异,说明在低强度辐射(200 W/m²)和高强度活动水平(3 met)时,活动水平对皮肤温度的影响超过辐射强度;除上述特殊情况外,太阳辐射强度对皮肤温度的影响均超过活动水平。

t_r 、 t_a 、 h_c 及 h_r 等参数通过实验测得的环境和人员参数利用第 2 节中公式计算获得。以 1 met 为例,各基础参数计算结果如表 2 所示,活动水平为 1 met 时,环境温度及传热系数受太阳辐射强度影响较大。以整体作为研究对象和区分直射部位得到的基础参数结果也存在较大差异,这证明了在太阳辐射下考虑直射和非直射环境区域以及人体部位的必要性。

上述参数均被用作人体热调节模型仿真与构建过程中的初始条件及边界条件。

4 讨论

4.1 模型验证

由于太阳直射室内人体热调节模型重点研究室内非均匀太阳辐射对热调节模型在预测皮肤温度、传热计算等方面的影响。因此,本研究从热损失和平均皮肤温度两方面验证模型的准确性。

4.1.1 热损失模拟值与实测值的对比分析

以 400 W/m² 太阳辐射强度为例,受试者热损失的模拟值与实验值对比结果,如图 7 所示。由 7 图可知,总热损失的模拟值与实验值相对误差约为 4%。该模型对蒸发散热损失的预测误差较大,而对其他形式热损失的预测误差均不超过 10%。蒸发散热预测的偏差可能源于以下原因:当太阳辐射强度达到 400 W/m² 时,人体获得的热量增加,为维持热平衡,体温调节机制会启动主动散热过程,而本模型未充分

表2 1met活动强度下基础参数计算结果

Tab.2 Basic experimental parameters at 1met activity level

工况	时间/ min	$t_i/^\circ\text{C}$	$t_a/^\circ\text{C}$	$h_c/$ [W/(m ² ·K)]	$h_r/$ [W/(m ² ·K)]
200 W/m ² 整体	10	21.47	18.32	4.52	4.38
	20	23.48	19.29	4.49	4.44
	30	23.94	19.92	4.46	4.46
	40	24.09	20.16	4.45	4.47
200 W/m ² 直射部位	10	23.75	18.32	4.54	4.43
	20	26.87	19.29	4.54	4.53
	30	27.31	19.92	4.52	4.55
	40	27.46	20.16	4.52	4.56
400 W/m ² 整体	10	24.3	18.56	4.65	4.48
	20	28.6	20.54	4.54	4.59
	30	29.49	21.68	4.48	4.63
	40	29.64	22.13	4.45	4.64
400 W/m ² 直射部位	10	28.66	18.56	4.69	4.59
	20	35.03	20.54	4.61	4.76
	30	35.56	21.68	4.56	4.79
	40	36.01	22.13	4.54	4.8

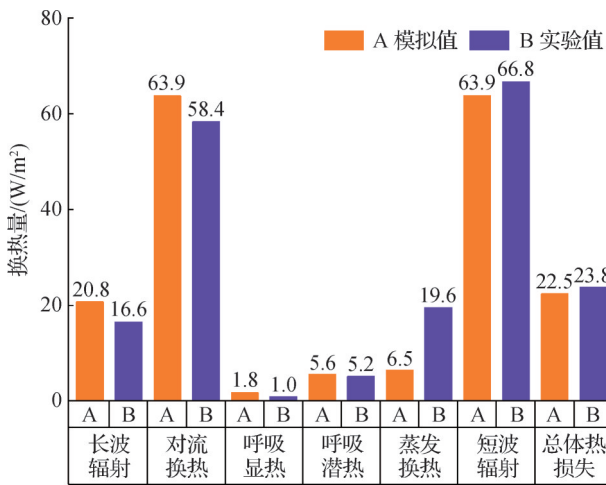


图7 400 W/m²下散热量模拟值与实验值

Fig.7 Comparison of analog and experimental values of heat loss under 400 W/m²

考虑该调节机制的影响。但模型总体误差在工程允许范围内。

4.1.2 平均皮肤温度模拟值与实测值的对比分析

不同辐射强度下平均皮肤温度的模拟值与实验值对比结果如图8所示。由图8可知,达到稳定状态时,模拟值与实测值的相对误差始终在5%以内。随着辐照时间增加,模拟的平均皮肤温度呈近似线性上升,而实测值则表现为先上升后趋于稳定。这是

由于该模拟未考虑人体的自主体温调节机制。文献[38]表明,在太阳辐射暴露初期(10 min内),皮肤温度会快速上升;随后为维持热平衡,体温调节机制开始发挥作用,使得皮肤温度上升速率减缓,并在一段时间后达到相对平衡状态。

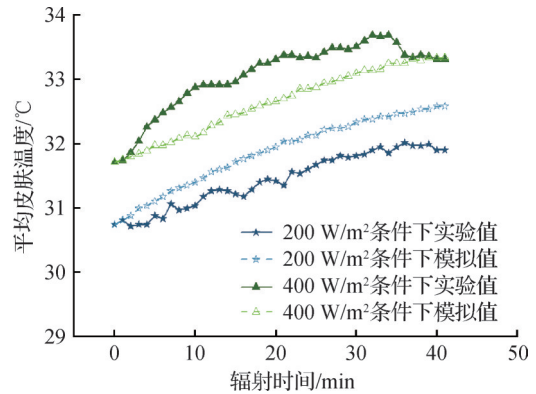


图8 平均皮肤温度模拟值与实验值

Fig.8 Comparison of analog and experimental values of mean skin temperature

4.2 应用

4.2.1 不同活动水平下的平均皮肤温度分析

本研究利用太阳辐射室内人体热调节模型预测了不同代谢水平下的皮肤温度,图9所示为400 W/m²辐射强度条件下,皮肤温度随辐照时间的变化规律。

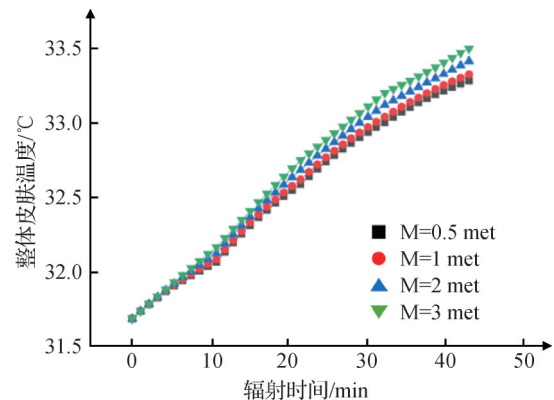


图9 400 W/m²人体整体皮肤温度

Fig.9 400 W/m² human body overall skin temperature

由图9可知,不同活动水平下,人体整体皮肤温度的差异会随着辐照时间的增加而增大。在太阳辐射照射10 min内,活动水平对皮肤温度的影响较小,这是由于在短期太阳辐射和活动时长较短时,身体的适应能力较强,会使得皮肤温度相对稳定;而当“太阳辐射+运动”的时间较长时,即在辐射10~30 min内,人体吸收的能量及代谢产热的增加均会使得皮肤温度升高;在人体自我调节机制的作用下,当吸

热+产热达到一定程度时,人体会通过出汗等方式向周围环境释放更多的热量,从而使皮肤温度开始趋于稳定,该趋势从辐射时间大约为 30 min 时开始体现;随后,不同活动水平下整体皮肤温度的差异趋于稳定。此外,皮肤温度受辐射时间的影响超过活动水平变化,与图 6 的结果一致,即在高辐射强度下,皮肤温度受太阳辐射影响更大。

4.2.2 太阳辐射条件下人体热舒适区研究

利用太阳辐射室内人体热调节模型,可以得到标准有效温度 SET,该指标可用于预测热舒适区。因此,本研究进一步分析了太阳辐射强度对人体整体及直接受辐射部位热舒适区的影响。

利用热调节模型获得皮肤温度模拟值,分别计算整体和直射部位在不同工况下的 SET 值;然后,选取整体的实际热感觉投票(Thermal sensation vote, TSV)、直射部位的预测平均投票(Irradiation Predicted Mean Vote, IPMV),分别与对应工况下的 SET 值进行拟合,得到方程(32)~(35)。

200 W/m²辐射工况整体热感觉:
 $TSV_1 = 0.4027SET_1 - 10.76R^2 = 0.924 \quad (32)$

400 W/m²辐射工况整体热感觉:
 $TSV_2 = 0.2005SET_1 - 4.7R^2 = 0.9088 \quad (33)$

200 W/m²直射部位预测平均投票:
 $IPMV_{1,ir} = 0.376SET_{1,ir} - 10.44R^2 = 0.9801 \quad (34)$

400 W/m²直射部位预测平均投票:
 $IPMV_{2,ir} = 0.1695SET_{2,ir} - 3.753R^2 = 0.778 \quad (35)$

式中:TSV₁/TSV₂、SET₁/SET₂分别为 200/400 W/m²下整体的实际热感觉投票和标准有效温度;IPMV_{1,ir}/IPMV_{2,ir}、SET_{1,ir}/SET_{2,ir}分别为 200/400 W/m²下直射部位的预测平均投票和标准有效温度。

根据公式计算出不同工况下的热中性 SET 值分别为 26.71、23.44、27.76、22.14 °C。研究表明,尽管环境条件存在差异,舒适 SET 值应保持相对稳定区间。进一步分析发现,在相同辐射强度条件下,其他实验参数恒定时,随着辐射时间的延长,人体直射部位的 SET 值呈现上升趋势。

根据 ISO 标准^[39]的热感觉分级:TSV(-0.2, 0.2)对应 A 级,TSV(-0.5, 0.5)对应 B 级,TSV(-0.7, 0.7)对应 C 级。基于这 3 个等级,将各级别的上下限分别代入式(37)~(40),可获得不同热感觉等级下的 SET₁、SET₂、SET_{1,ir}和 SET_{2,ir}。每个标准有效温度均对应上限值和下限值。通过焓湿图分析获得不同舒适度等级下的热舒适区范围如表 3 所示。

图 10 所示为 A 级舒适区在焓湿图中的变化规律。在 400 W/m²太阳辐射下的热舒适区低于 200

表 3 标准有效温度对应的热舒适区
 Table 3 Comfort zones that corresponded to standard effective temperatures

SET	TSV(-0.2,0.2)	TSV(-0.5,0.5)	TSV(-0.7,0.7)
SET ₁	(25.58,26.55)	(24.86,27.28)	(24.37,27.76)
SET ₂	(22.44,24.43)	(20.94,25.93)	(19.95,26.93)
SET _{1,ir}	(27.23,28.29)	(26.43,29.09)	(25.9,29.62)
SET _{2,ir}	(20.96,23.32)	(19.19,25.09)	(18.01,26.27)

W/m²太阳辐射下的热舒适区,且热舒适区范围更宽。对于人体整体而言,400 W/m²辐射条件下可接受室内温度比 200 W/m²条件低 2 °C;对于直射部位,400 W/m²辐射条件下的可接受室内温度比 200 W/m²条件低 4.5 °C。因此,较低的室内环境下,高太阳辐射强度直射人体局部时,适当降低空调系统设计的温度不仅可以满足人体局部和整体的热感觉需求,还可以在在一定程度上减少空调需求。

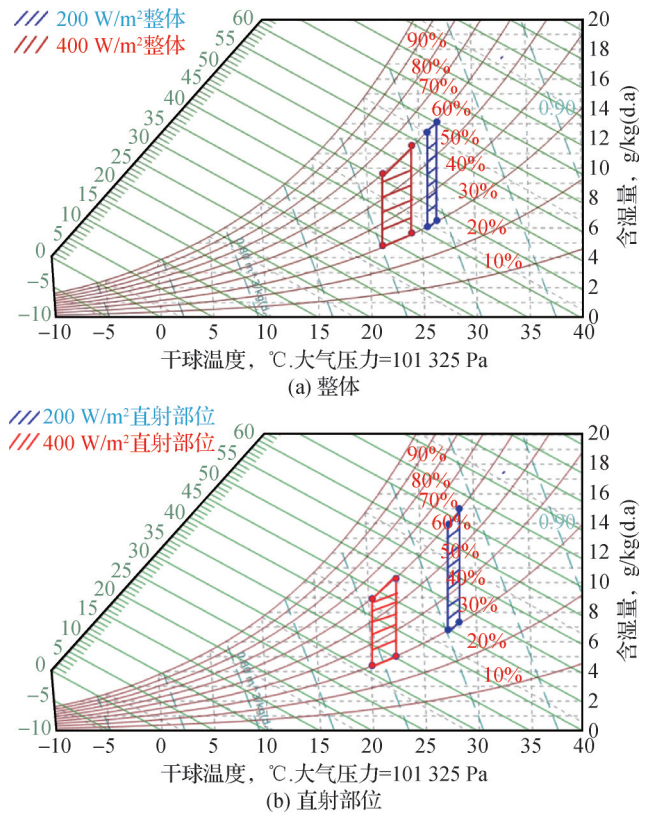


图 10 A 级舒适区
 Fig.10 Grade A comfort zone

5 结论

基于两节点模型,本研究以室内太阳辐射局部暴露下的人体热舒适实验获得的环境参数和生理参数作为边界条件和初始条件,建立了 1 个同时考虑太

阳辐射强度和活动水平的室内人体热调节模型。开展了0、200、400 W/m²辐射强度和1、2、3 met代谢率条件下的人体气候室实验,验证了该模型的准确性。利用该模型,研究了不同活动水平下的平均皮肤温度变化,以及太阳辐射强度对人体整体及受直射部位舒适区的影响。得到结论如下:

1)太阳直射室内人体热调节模型主要修正了以下内容:对边界条件中平均辐射温度区分直射和非直射区域进行计算;对初始条件中的皮肤温度区分直射和非直射部位进行计算;修正了散热量计算模型,包括对对流和辐射换热系数区分直射和非直射部位、增加太阳辐射得热部分。

2)通过将太阳直射室内人体热调节模型得到的数值和实验值进行对比发现,该模型在预测平均皮肤温度时的相对误差小于5%,在预测总热损失时的相对误差约为4%,具有较高的准确性。

3)利用该模型进行了不同活动水平下平均皮肤温度的预测,研究表明,人体整体皮肤温度随代谢水平升高而增加。该辐射强度下,活动水平对整体皮肤温度的影响会随着辐射时间的增加而增大,但一定时间之后,不同活动水平下整体皮肤温度的差异趋于稳定。

4)利用该模型探讨了不同太阳辐射强度下人体整体和直射部位的热舒适区偏移规律。结果表明,对于人体整体而言,400 W/m²辐射条件下的可接受室内温度比200 W/m²条件低2℃;对于直射部位,400 W/m²辐射条件下的可接受室内温度比200 W/m²条件低4.5℃。

太阳直射室内人体热调节模型还存在不足之处。例如,当辐射强度超过400 W/m²时,人体的太阳辐射得热量较大,在人体体温调节机制的主导下,存在着出汗等主动散热形式,而该模型还缺乏该部分的修正,因此,在后面的研究中,我们将对该部分进行改进。此外,本研究的适用场景单一,仅为某单侧直射室内人体的场景,后续将增加多角度辐射场景的研究。

参考文献

- [1] Tanabe S I, Kobayashi K, Nakano J, et al. Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD) [J]. *Energy and Buildings*, 2002, 34 (6): 637-646.
- [2] Fiala D, Havenith G, BrÖde P, et al. UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 56(3): 429-441.
- [3] Givoni B, Goldman R F. Predicting heart rate response to work, environment, and clothing [J]. *Journal of Applied Physiology*, 1973, 34(2): 201-204.
- [4] Gagge A P, Stolwijk J A J, Saltin B. Comfort and thermal sensations and associated physiological responses during exercise at various ambient temperatures [J]. *Environmental Research*, 1969, 2(3): 209-229.
- [5] Gagge A P, Stolwijk J A J, Nishi Y. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response [J]. *ASHRAE Transactions*, 1971, 77(1): 21-36.
- [6] Fiala D, Lomas K J, Stohrer M. A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system [J]. *Journal of Applied Physiology*, 1999, 87(5): 1957-1972.
- [7] Guedes J, Baptista J S, Carvalho J M S D. 3D human thermoregulation model: bioheat transfer in tissues and small vessels [C]//10th International Symposium on Occupational Safety and Hygiene, SHO 2014, 2014: 669-673.
- [8] Lyons P R, Arasteh D, Huizenga C. Window performance for human thermal comfort [J]. *Transactions-American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers*, 2000, 106(1): 594-604.
- [9] La Gennusa M, Nucara A, Pietrafesa M, et al. A model for managing and evaluating solar radiation for indoor thermal comfort [J]. *Solar Energy*, 2007, 81(5): 594-606.
- [10] Marino C, Nucara A, Pietrafesa M. Thermal comfort in indoor environment: effect of the solar radiation on the radiant temperature asymmetry [J]. *Solar Energy*, 2017, 144: 295-309.
- [11] 袁宸章. 太阳辐射影响下的室内非均匀辐射场特性研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2021. (Yuan Chenzhang. Research on indoor inhomogeneous radiation field under the influence of solar radiation [D]. Changsha: Hunan University, 2021.)
- [12] 袁宸章, 李念平, 阿勇嘎, 等. 太阳辐射的不对称性对室内人员热舒适的影响 [J]. *暖通空调*, 2021, 51(12): 63-69. (Yuan Chenzhang, Li Nianping, A Yongga, et al. Influence of asymmetry of solar radiation on thermal comfort of indoor occupants [J]. *Journal of HV&AC*, 2021, 51(12): 63-69.)
- [13] Liu Guodan, Wang Zhixin, Li Chuanrui, et al. Heat exchange character and thermal comfort of young people in the building with solar radiation in winter [J]. *Building and Environment*, 2020, 179: 106937.
- [14] 纪铨行. 着装颜色对太阳辐射作用下的室内人体热舒

- 适影响研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2022. (Ji Yihang. Study on the influence of clothing color on indoor human thermal comfort under solar radiation [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2022.)
- [15] 王志欣. 太阳直射室内人体时的热感觉及舒适区研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2021. (Wang Zhixin. Study on thermal sensation and comfort zone when the sunshines directly on indoor human body [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2021.)
- [16] La Gemusa M, Nucara A, Rizzo G, et al. The calculation of the mean radiant temperature of a subject exposed to the solar radiation—a generalised algorithm [J]. *Building and Environment*, 2005, 40(3): 367–375.
- [17] Li Jianong, Niu Jianlei, Mak C M. Study of pedestrians' mixed thermal responses when experiencing rapid and simultaneous variations in sun and wind conditions in urban continuums [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 87: 104169.
- [18] Zhang Huan, Yang Xueqing, Zheng Wandong, et al. The CPMV* for assessing indoor thermal comfort and thermal acceptability under global solar radiation in transparent envelope buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2020, 225: 110306.
- [19] Yang Ruiqiao, Zhang Huan, You Shijun, et al. Study on the thermal comfort index of solar radiation conditions in winter[J]. *Building and Environment*, 2020, 167: 106456.
- [20] Arens E, Hoyt T, Zhou Xin, et al. Modeling the comfort effects of short-wave solar radiation indoors [J]. *Building and Environment*, 2015, 88: 3–9.
- [21] 刘魁星, 游伟洁, 甘婷婷. 寒冷地区室外辐射特性对人体热舒适影响研究[J]. *建筑科学*, 2024, 40(2): 142–149. (Liu Kuixing, You Weijie, Gan Tingting. Study on the influence of outdoor radiation characteristics on human thermal comfort in cold regions [J]. *Building Science*, 2024, 40(2): 142–149.)
- [22] Pan Jingjing, Li Nianping, Zhang Wen, et al. Investigation based on physiological parameters of human thermal sensation and comfort zone on indoor solar radiation conditions in summer [J]. *Building and Environment*, 2022, 226: 109780.
- [23] Liu Qiuping, Li Nianping, He Yingdong, et al. Quantifying the effects of indoor non-uniform solar radiation on human thermal comfort and work performance in warm season [J]. *Energy and Buildings*, 2024, 306: 113962.
- [24] 赵康, 桂雪晨, 葛坚. 高大空间中太阳辐射对热舒适的影响及室内参数设计[J]. *太阳能学报*, 2019, 40(9): 2655–2662. (Zhao Kang, Gui Xuechen, Ge Jian. Influence of solar radiation on thermal comfort in large spaces and corresponding design of indoor parameters [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2019, 40(9): 2655–2662.)
- [25] 刘国丹, 乔美杰, 纪铤行, 等. 太阳辐射作用下不同活动水平的室内人体传热特性及热舒适研究[J]. *制冷学报*, 2024, 45(1): 70–78. (Liu Guodan, Qiao Meijie, Ji Yihang, et al. Research on heat transfer characteristics and thermal comfort of indoor human body at different activity levels under the solar radiation condition [J]. *Journal of Refrigeration*, 2024, 45(1): 70–78.)
- [26] 高洁, 李莹莹, 韦会东, 等. 高温热源建筑室内不对称辐射热环境评价指标[J]. *建筑科学*, 2022, 38(10): 59–64. (Gao Jie, Li Yingying, Wei Huidong, et al. Evaluation index for indoor asymmetric radiant environment with high-temperature heat source [J]. *Building Science*, 2022, 38(10): 59–64.)
- [27] Hou Miaomiao, Aviv D, Chatterjee A, et al. Resolving indoor shortwave and longwave human body irradiance variations for mean radiant temperature and local thermal comfort[J]. *Energy and Buildings*, 2023, 301: 113581.
- [28] Thermal environment conditions for human occupancy: ASHRAE STD 55[S]. Atlanta: ASHRAE, 2020.
- [29] Bulcao F C, Frank M S, Raja N S, et al. Relative contribution of core and skin temperatures to thermal comfort in humans[J]. *Journal of Thermal Biology*, 2000, 25: 147–150.
- [30] Liu Weiwei, Lian Zhiwei, Deng Qihong, et al. Evaluation of calculation methods of mean skin temperature for use in thermal comfort study [J]. *Building and Environment*, 2011, 46(2): 478–488.
- [31] Jones B W, Transient interaction between the human and the thermal environment[G]//ASHRAE. ASHRAE Trans, 1992, 98: 189–195.
- [32] De Dear R J, Arens E, Hui Z, et al. Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments[J]. *International Journal of Biometeorology*, 1997, 40(3): 141–156.
- [33] Fanger P O. Thermal comfort [M]. Malabar: Robert E. Krieger Publishing Company, 1982.
- [34] Zhang Huan, Yang Ruiqiao, You Shijun, et al. The CPMV index for evaluating indoor thermal comfort in buildings with solar radiation[J]. *Building and Environment*, 2018, 134: 1–9.
- [35] Gagge A, Fobelets A, Berglund L. A standard predictive index of human response to the thermal environment [J]. *ASHRAE Transactions*, 1986, 92 (2): 709–731.
- [36] Ji Yihang, Liu Guodan, Zhang Yao, et al. Effects of the clothing colors on heat transfer and thermal sensation under indoor solar radiation in winter[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 53: 103899.

- [37] Ergonomics of the thermal environment —Determination of metabolic rate: ISO 8996: 2021[S]. Geneva: ISO, 2021.
- [38] Liu Guodan, Li Wenbin, Qiao Meijie, et al. INDOOR AIR 2022: research on the thermal sensation and comfort zone of indoor sitters in direct sunlight in winter [R]. Finland: International Society of Indoor Air Quality and Climate, 2022.
- [39] Ergonomics of the thermal environment-analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria: ISO-7730[S]. Geneva: ISO, 2005.

通信作者简介

刘国丹,女,教授,青岛理工大学环境与市政工程学院,13963901912, E-mail: lgd@qut.edu.cn。研究方向:人体热舒适。

About the corresponding author

Liu Guodan, female, Professor, School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, 86-13963901912, E-mail: lgd@qut.edu.cn. Research fields: human thermal comfort.