

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2024.12.002

# 耦合中置式光伏 Trombe 墙的室内热舒适性评价

杨宏亮<sup>1</sup>, 秦靓靓<sup>2</sup>, 吴双应<sup>2</sup>

(1. 国家能源集团 重庆电力有限公司, 重庆 401120; 2. 重庆大学 能源与动力工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 基于能量平衡原理对耦合中置式光伏 Trombe 墙的房间建立热舒适性动态评价模型, 在冬季供暖模式下, 对室内热舒适性进行评价, 并研究了吸热板安装位置对室内热舒适性的影响。结果表明, 中置式光伏 Trombe 墙虽能提升室内热舒适性, 但仅能将室内热环境维持在基本舒适状态, 从 9:00 到 13:00 室内热环境都偏冷, 人体感觉不舒适。在太阳辐射强度较低时, 太阳能电池板和玻璃盖板形成的封闭空气夹层能使室内仍可以维持在较为舒适的温度。将吸热板安装到集热墙外表面, 能在不增加成本的前提下, 有效改善室内热环境, 缩短室内不舒适时间 1 h。采用文中构建的热舒适性评价模型可以方便地预测不同时刻室内热舒适性的变化情况, 实现室内温度的动态管理。

**关键词:** 光伏 Trombe 墙; 室内热环境; 热舒适性; 标准有效温度; 评价模型

中图分类号: TK519

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)12-013-11

## Indoor thermal comfort evaluation of a room coupled with built-middle PV-Trombe wall

YANG Hongliang<sup>1</sup>, QIN Liangliang<sup>2</sup>, WU Shuangying<sup>2</sup>

(1. CHN Energy Chongqing Power Co., LTD., Chongqing 401120, P. R. China; 2. School of Energy and Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** A thermal comfort evaluation model, based on energy balance principles, is developed for assessing indoor thermal comfort in a room equipped with a built-middle PV-Trombe wall during the heating season. The study also investigates how the installation location of the absorber plate affects indoor thermal comfort. Results show that while the built-middle PV-Trombe wall improves indoor thermal comfort, it maintains only a basic level of comfort overall. Between 9:00 and 13:00, the indoor environment remains cold, resulting in occupant discomfort. However, when solar radiation is low, the enclosed air layer formed by the photovoltaic panel and glass cover can still help maintain a more comfortable room temperature. Positioning the absorber plate on the outer surface of the massive wall enhances the indoor thermal environment, reducing discomfort duration by one hour without additional costs. The thermal comfort evaluation model constructed here allows for easy prediction of indoor thermal comfort variations over time, facilitating dynamic management of indoor temperature.

**Keywords:** PV-Trombe wall; indoor environment; thermal comfort; standard effective temperature; evaluation model

收稿日期: 2024-03-26

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项项目 (cstc2019jscx-msxmX0213)。

Supported by the Project of Technological Innovation and Application Development of Chongqing (cstc2019jscx-msxmX0213).

作者简介: 杨宏亮 (1971—), 男, 工程师, 主要从事能源安全生产和环保方向研究, (E-mail) 815265795@qq.com。

通信作者: 吴双应 (1968—), 男, 教授, (E-mail) shuangyingwu@cqu.edu.cn。

太阳能 Trombe 墙是一种被动式太阳能利用技术,能有效改善室内环境,被广泛使用。目前,国内外对太阳能 Trombe 墙的研究主要集中在多功能型 Trombe 墙上<sup>[1]</sup>。作为一种常见的多功能型 Trombe 墙,根据太阳(光伏)电池板安装位置不同,光伏 Trombe 墙(PV-TW)分为外置式(OPV-TW)<sup>[2]</sup>、中置式(MPV-TW)<sup>[3]</sup>和内置式(IPV-TW)<sup>[4]</sup>3种类型。由于 OPV-TW 受外界环境影响较大,所以 IPV-TW 的热效率会高于 OPV-TW,但 IPV-TW 的太阳电池板温度偏高,导致其电效率低于 OPV-TW<sup>[5]</sup>。通过对 OPV-TW 建立二维理论分析模型发现<sup>[2]</sup>,光伏玻璃和普通玻璃的温差能达到 10.6 °C,带有 OPV-TW 的房间室内温度能比普通房间高 13.4 °C。对于 IPV-TW,当流道高度为 3 m,流道宽度为 0.4 m 时,通风量最大,且当流道宽度大于 0.5 m 时,流道内会出现回流<sup>[6]</sup>。对于垂直入口的 IPV-TW,当流道宽度与流道高度的比为 1/5 时通风量最大<sup>[7]</sup>。通过对 MPV-TW 进行理论分析和实验研究发现<sup>[8]</sup>,MPV-TW 的平均电效率、热效率和总效率分别为 12%、38.2% 和 58.5%。虽然,MPV-TW 的电效率比 OPV-TW 低 2.5%,但 MPV-TW 的热效率和总效率均高于 OPV-TW,因此 MPV-TW 更适合在冬季使用<sup>[9]</sup>。

目前,对 PV-TW 的研究主要集中在通过不同方法提升 PV-TW 的热电性能<sup>[10]</sup>,把 PV-TW 和室内环境耦合在一起进行综合分析和性能评价的文献还较少。作为室内温度管理和建筑节能的基础,热舒适性评价也是太阳能 Trombe 墙性能评价的一个重要组成部分。只有少量研究采用温度、湿度<sup>[11]</sup>或预测平均评价指标(PMV)<sup>[3]</sup>等对带有 Trombe 墙的房间室内热舒适性进行评价。研究表明,人体的热感觉受很多因素影响<sup>[12]</sup>,虽然 PMV 能反映温湿度等因素的影响,可以对室内热舒适性进行定性分析,但由于其简化了人体对环境的热反应,比较适合稳态环境的热舒适性评价<sup>[13]</sup>。耦合太阳能 Trombe 墙的建筑会引起室内环境的变化,只使用 PMV 评价室内热舒适性是不合适的。标准有效温度(SET)能反映人体对环境的动态响应,更适合用来评价耦合太阳能 Trombe 墙房间的室内热舒适性<sup>[14]</sup>。基于 SET 对耦合 PV-TW 的室内热舒适性进行评价还少有文献报道。

鉴于 MPV-TW 自身具有较高的热效率和总效率,文中以耦合中置式 PV-Trombe 墙的房间为研究对象,使用 SET 作为评价指标,构建室内热舒适性动态评价模型,在冬季运行模式下,对室内热舒适性进行分析和评价。

## 1 物理和数学模型

### 1.1 物理模型

如图 1 所示,MPV-TW 由玻璃盖板、太阳能电池板、吸热板、空气流道、4 个通风口、4 个通风挡板和集热墙组成,其中太阳能电池板和吸热板之间使用 EVA 黏合,玻璃盖板和太阳能电池板组成封闭空气夹层,吸热板和集热墙组成空气流道。在冬季供暖模式下,2 个室外通风口保持关闭,2 个室内挡板打开。流道内的空气被加热后从室内上通风口进入室内,室内空气由于热虹吸作用,从室内下通风口进入空气流道。一部分太阳能被太阳能电池板转化成电能,另一部分太阳能被太阳能电池板和吸热板转化成热能。

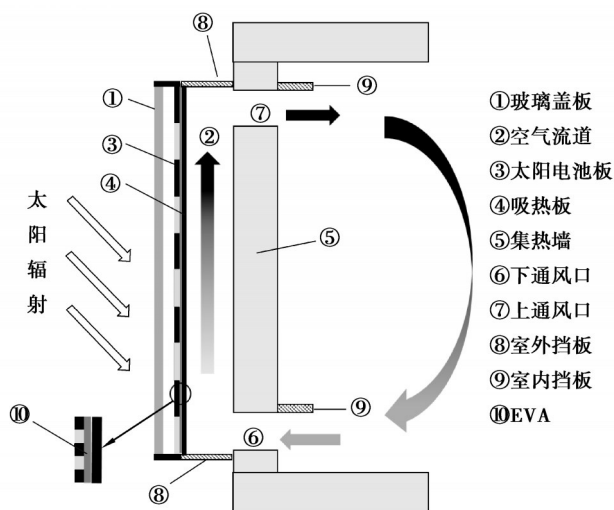


图1 MPV-TW 的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of MPV-TW

图 2 给出了带有 2 个 MPV-TW 的单个房间的物理模型,该物理模型由 Trombe 墙模型、室内空气模型和围护结构模型 3 部分耦合而成。Trombe 墙模型和围护结构模型的详细参数如表 1 和表 2 所示。

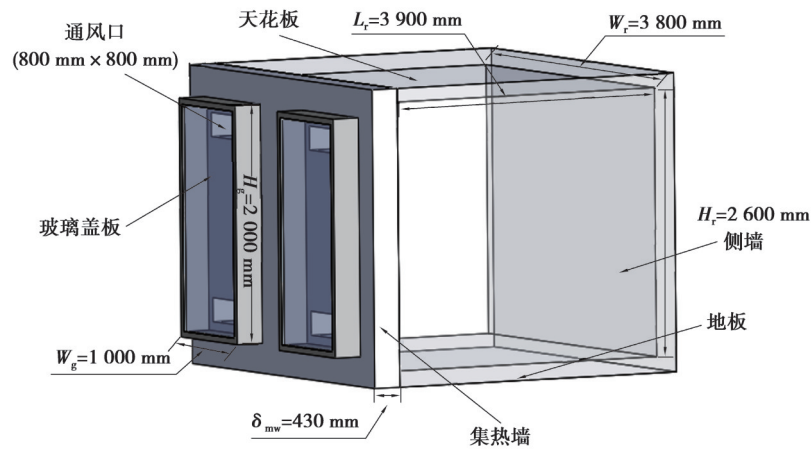


图 2 带有 2 个 MPV-TW 的房间物理模型

Fig. 2 The physical model of a room with two MPV-TWs

表 1 Trombe 墙模型详细参数<sup>[9]</sup>

Table 1 Table 2The specific parameters of Trombe wall model<sup>[9]</sup>

名称	参数	符号	单位	数值
玻璃盖板	厚度	$\delta_g$	mm	3.2
	密度	$\rho_g$	kg/m <sup>3</sup>	2 500
	比热容	$c_g$	J/(kg·K)	840
	吸收率	$\alpha_g$	—	0.1
	透射率	$\tau_g$	—	0.92
	发射率	$\varepsilon_g$	—	0.8
吸热板	厚度	$\delta_{ab}$	mm	0.5
	密度	$\rho_{ab}$	kg/m <sup>3</sup>	2 702
	比热容	$c_{ab}$	J/(kg·K)	903
	吸收率	$\alpha_{ab}$	—	0.95
	发射率	$\varepsilon_{ab}$	—	0.95
电池板	厚度	$\delta_{pv}$	mm	2.5
	密度	$\rho_{pv}$	kg/m <sup>3</sup>	2 300
	比热容	$c_{pv}$	J/(kg·K)	750
	吸收率	$\alpha_{pv}$	—	0.9
	发射率	$\varepsilon_{pv}$	—	0.9
空气	密度	$\rho_a$	kg/m <sup>3</sup>	1.18
	比热容	$c_a$	J/(kg·K)	1 100
	导热系数	$\lambda_a$	W/(m·K)	0.026
	运动黏度	$\nu$	m <sup>2</sup> /s	1.58×10 <sup>-5</sup>

表 2 围护结构模型详细参数<sup>[15]</sup>Table 2 The specific parameters of building envelopes model<sup>[15]</sup>

构件名称	材料组成	厚度/ mm	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	导热系数/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	比热容/ ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
集热墙(南墙)	水泥砂浆	15	1 800	0.93	1 048
	黏土砖	400	1 800	0.81	870
	水泥砂浆	15	1 800	0.93	1 048
外墙(除南墙)	水泥砂浆	15	1 800	0.93	1 048
	黏土砖	240	1 800	0.81	870
	水泥砂浆	15	1 800	0.93	1 048
屋顶	水泥砂浆	15	1 800	0.93	1 048
	混凝土	200	2 344	1.84	770
	水泥砂浆	15	1 800	0.93	1 048
地面	水泥砂浆	15	1 800	0.93	1 048
	混凝土	200	2 344	1.84	770
	水泥砂浆	15	1 800	0.93	1 048
	保温层	50	30	0.027	1 975

## 1.2 能量平衡模型

### 1.2.1 相关假设

为了研究带有 MPV-TW 房间的室内热舒适性变化,在模型建立过程中,假设:1)所有材料的物性参数均为常数<sup>[16]</sup>;2)由于厚度很小,忽略玻璃盖板、太阳能电池板和吸热板沿厚度方向的导热热阻<sup>[9]</sup>;3)忽略门窗冷风渗透和室内人员活动的影响,室内无其他热源<sup>[15]</sup>;4)围护结构的导热为一维导热<sup>[3]</sup>;5)室内温度沿高度方向变化,水平方向分布均匀<sup>[9]</sup>。

### 1.2.2 能量平衡分析

对于玻璃盖板,有

$$m_g c_g \frac{dT_g}{dt} = h_{\text{amb},g} A_g (T_{\text{amb}} - T_g) + h_{\text{sky},g} A_g (T_{\text{sky}} - T_g) + h_{\text{pv},g} A_g (T_{\text{pv}} - T_g) + h_{\text{al},g} A_g (T_{\text{al}} - T_g) + \alpha_g I A_g, \quad (1)$$

式中: $m_g$ 为玻璃盖板的质量,kg; $c_g$ 为玻璃盖板的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T_g$ 为玻璃盖板的温度,K; $A_g$ 为玻璃盖板的面积, $\text{m}^2$ ;  $h_{\text{amb},g}$ 为玻璃盖板与外界环境之间的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $T_{\text{amb}}$ 为外界环境温度,K; $h_{\text{sky},g}$ 为玻璃盖板与外界环境之间的辐射换热系数, $h_{\text{sky},g} = \sigma \varepsilon_g (T_{\text{sky}}^2 + T_g^2)(T_{\text{sky}} + T_g)$ ( $\sigma$ 为 Stefan-Boltzman 常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ );  $\varepsilon_g$ 为玻璃盖板的发射率; $T_{\text{sky}}$ 为等效天空温度,K; $T_g$ 为玻璃盖板温度,K; $T_{\text{pv}}$ 为太阳能电池板温度,K; $h_{\text{al},g}$ 为玻璃盖板与封闭空气夹层内空气的对流换热系数, $h_{\text{al},g} = Nu_{\text{al}} \lambda_a / (\delta_{\text{al}}/2)$ (其中, $Nu_{\text{al}}$ 为 Nusselt 数; $\lambda_a$ 为空气的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ; $\delta_{\text{al}}$ 为太阳能电池板与玻璃盖板间的空气夹层的厚度, $\delta_{\text{al}} = 20 \text{ mm}$ )<sup>[16]</sup>, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $T_{\text{al}}$ 为封闭空气夹层内空气温度,K; $\alpha_g$ 为玻璃盖板吸收率; $I$ 为太阳辐射强度, $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $h_{\text{pv},g}$ 为玻璃盖板与太阳能电池板之间的辐射换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,可由下式计算<sup>[16]</sup>:

$$h_{\text{pv},g} = \frac{\sigma (T_{\text{pv}}^2 + T_g^2)(T_{\text{pv}} + T_g)}{1/\varepsilon_{\text{pv}} + 1/\varepsilon_g - 1}, \quad (2)$$

式中, $\varepsilon_{\text{pv}}$ 为太阳能电池板的发射率。

$Nu_{\text{al}}$ 可用式(3)计算<sup>[16]</sup>,

$$Nu_{\text{al}} = \max \left\{ 1, 0.288 (Ra/F_{\text{al}})^{0.25}, 0.039 Ra^{0.33} \right\}, \quad (3)$$

式中: $F_{\text{al}}$ 为封闭空气夹层的结构系数, $F_{\text{al}} = H_{\text{al}}/\delta_{\text{al}}$ ( $H_{\text{al}}$ 为封闭空气夹层的高度,m);  $Ra$ 为 Rayleigh 数,可用式(4)计算<sup>[16]</sup>,

$$Ra = \frac{g\beta_{al}(T_g - T_{pv})(\delta_{al}/2)^3}{av}, \quad (4)$$

式中:  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $\beta_{al}$  为封闭空气夹层内空气的热膨胀系数,  $K^{-1}$ ;  $v$  为封闭空气夹层内空气的运动黏度,  $m^2/s$ ;  $a$  为热扩散系数,  $m^2/s$ 。

太阳能电池板的电池覆盖率对 MPV-TW 的性能有显著影响,随着电池覆盖率的增加,系统发电量会增加,但热效率会下降,确定电池覆盖率  $\theta=0.6$ <sup>[3]</sup>。因此,对于太阳能电池板,有

$$m_{pv}c_{pv}\frac{dT_{pv}}{d\tau} = h_{al,pv}A_{pv}(T_{a1} - T_{pv}) + h_{g,pv}A_{pv}(T_g - T_{pv}) + \frac{A_{pv}(T_{ab} - T_{pv})}{\delta_{EVA}/\lambda_{EVA}} + \theta\tau_g\tau_{pv}\alpha_{pv}A_{pv}I - E_{pv}, \quad (5)$$

式中:  $m_{pv}$  为太阳能电池板的质量,  $kg$ ;  $c_{pv}$  为太阳能电池板的比热容,  $J/(kg \cdot K)$ ;  $h_{al,pv}$  为太阳能电池板与封闭空气夹层内空气的对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $h_{g,pv}$  为太阳能电池板与玻璃盖板之间的辐射换热系数,  $h_{g,pv} = h_{pv,g}$ ,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $\lambda_{EVA}$  为 EVA 的导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $\delta_{EVA}$  为 EVA 层厚度,  $m$ ;  $T_{ab}$  为吸热板温度,  $K$ ;  $\tau_g$  为玻璃盖板透射率;  $\tau_{pv}$  为太阳能电池板的透射率(取 0.93);  $\alpha_{pv}$  为太阳能电池板的吸收率;  $E_{pv}$  为发电量,  $E_{pv} = \tau_g\tau_{pv}\alpha_{pv}\theta A_{pv}I\eta_{ref}[1 - 0.0045(T_{pv} - 298.15)]$ (其中,  $\eta_{ref}$  为太阳能电池板的标准电效率,取 0.15)<sup>[3]</sup>,  $W$ 。

对于吸热板,有

$$m_{ab}c_{ab}\frac{dT_{ab}}{d\tau} = \frac{A_{ab}(T_{pv} - T_{ab})}{\delta_{EVA}/\lambda_{EVA}} + h_{a,ab}A_{ab}(T_a - T_{ab}) + h_{mws,ab}A_{ab}(T_{mws} - T_{ab}) + \tau_g\tau_{pv}\alpha_{ab}(1 - \theta)A_{ab}I, \quad (6)$$

式中:  $m_{ab}$  为吸热板的质量,  $kg$ ;  $c_{ab}$  为吸热板的比热容,  $J/(kg \cdot K)$ ;  $h_{a,ab}$  为空气流道内空气与吸热板之间的对流换热系数,与 Nusselt 数  $Nu$  有关,  $h_{a,ab} = Nu\lambda_a/H$ (其中,  $H$  为空气流道的高度,  $m$ ),  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $T_a$  为空气流道内空气的温度,  $K$ ;  $h_{mws,ab}$  为集热墙与吸热板之间的辐射换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $T_{mws}$  为集热墙外表面温度,  $K$ ;  $\alpha_{ab}$  为吸热板吸收率。

$Nu$  可用式(7)计算<sup>[16]</sup>,

$$Nu = \begin{cases} Nu = 0.68 + \frac{0.67Ra^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}}, & Ra < 10^9; \\ Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2, & Ra > 10^9; \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $Pr$  为 Prandtl 数;  $Ra$  可由式(4)计算,只是需把其中的温差改为吸热板温度与集热墙外表面温度之差,特征尺寸改为空气流道的高度。

对于空气流道内空气,有

$$m_a c_a \frac{dT_a}{d\tau} = h_{ab,a}A_{ab}(T_{ab} - T_a) + h_{mws,a}A_{mws}(T_{mws} - T_a) + q_m c_a(T_{out} - T_{in}), \quad (8)$$

式中:  $m_a$  为空气流道内空气的质量,  $kg$ ;  $c_a$  为空气流道内空气的比热容,  $J/(kg \cdot K)$ ;  $h_{ab,a}$  为吸热板与空气流道内空气的对流换热系数,  $h_{ab,a} = h_{a,ab}$ ,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $h_{mws,a}$  为集热墙外表面与空气流道内空气之间的对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ; 其中,  $q_m$  为空气流道内空气的质量流量,  $q_m = \rho_a u_a A_a$  ( $\rho_a$  为空气流道内空气的密度,  $kg/m^3$ ;  $u_a$  为空气流道内空气的流速,  $m/s$ ;  $A_a$  为空气流道的截面积,  $m^2$ ),  $kg/s$ ;  $T_{out}$  为空气流道出口空气温度,  $K$ ;  $T_{in}$  为空气流道进口空气温度,  $K$ 。

$u_a$  可用式(9)计算<sup>[3]</sup>,

$$u_a = \sqrt{\frac{0.5g\beta(T_{out} - T_{in})H}{f_{in}(A_a/A_{in})^2 + f_{out}(A_a/A_{out})^2 + f(H/d)}}, \quad (9)$$

式中:  $f_{in}$  为空气流道进口局部阻力系数;  $A_{in}$  为空气流道进口截面积,  $m^2$ ;  $f_{out}$  为空气流道出口局部阻力系数;  $A_{out}$  为空气流道出口截面积,  $m^2$ ;  $f$  为空气流道沿程阻力系数;  $d$  为空气流道的水力直径(单位:  $m$ ),  $d = 4A_a/C$  ( $C$  为空气流道截面的湿周,  $m$ )。

湍流时,  $f = 0.3164Re^{-0.25}$ <sup>[16]</sup>; 层流时,  $f$  用式(10)计算<sup>[17]</sup>,



$$f = \frac{96}{Re} (1 - 1.202438\gamma + 0.881188\gamma^2 + 0.888193\gamma^3 - 1.698125\gamma^4 + 0.723659\gamma^5), \quad (10)$$

式中:  $\gamma$  为空气流道截面的纵横比,  $\gamma$  值小于 1。

当吸热板安装在集热墙外表面上时, 吸热板的能量平衡方程为

$$m_{ab} c_{ab} \frac{dT_{ab}}{d\tau} = h_{pv,ab} A_{ab} (T_{pv} - T_{ab}) + h_{a,ab} A_{ab} (T_a - T_{ab}) + \frac{A_{ab} (T_{mw} - T_{ab})}{\delta_{cm,mw} / \lambda_{cm,mw}} + \tau_g \tau_{pv} \alpha_{ab} (1 - \theta) A_{ab} I, \quad (11)$$

式中:  $h_{pv,ab}$  为太阳能电池板与吸热板间的辐射换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $\lambda_{cm,mw}$  为集热墙水泥砂浆层的导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $\delta_{cm,mw}$  为集热墙水泥砂浆层厚度,  $m$ ;  $T_{mw}$  为集热墙外表面内节点的温度,  $K$ 。

由于集热墙内具体的温度分布并不是文中的研究重点, 因此, 对集热墙面层即水泥砂浆层采用两节点法得到集热墙表面温度<sup>[18]</sup>, 如图 3 所示, 即取集热墙面层两侧表面的温度为节点温度, 且每个节点温度分别代表一半面层的温度, 分别对每个节点建立相应的能量平衡方程式即可。

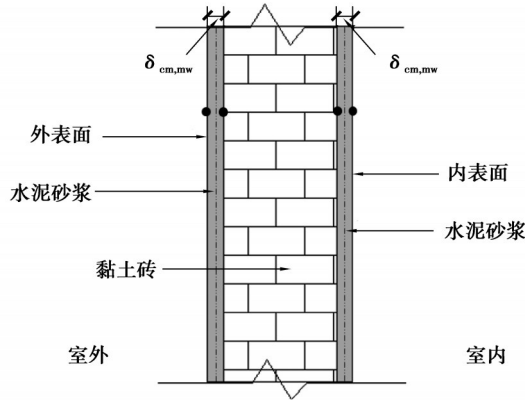


图3 集热墙结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of massive wall

在带有太阳能 Trombe 墙的房间中, 室内空气温度  $T_r$  在水平方向上近似相等, 在垂直方向上分层, 房间上部空气温度高, 下部空气温度低, 这些特点与置换通风类似, 对室内空气采用四节点法<sup>[16]</sup>。4 个节点分别为屋顶表面温度、地面温度、屋顶附近空气温度和地面附近空气温度, 且室内空气温度在地面附近空气温度和屋顶附近空气温度之间呈线性增加<sup>[16]</sup>。室内空气的能量平衡方程为

$$m_r c_a \frac{dT_r}{d\tau} = 2c_a q_m (T_{out} - T_{in}) + h_{in,c} (T_{in,c} - T_{out}) A_c + \sum_{i=1}^5 h_{in,i} (T_{in,i} - T_r) A_i, \quad (12)$$

式中:  $m_r$  为室内空气质量,  $kg$ ;  $T_{in}$  为 Trombe 墙进口空气温度 (单位:  $K$ ),  $T_{in} = T_{a,c} - k(H_r - H_{in})$ <sup>[16]</sup> (其中,  $T_{a,c}$  为屋顶附近空气温度,  $K$ ;  $k$  为室内空气的温度梯度;  $H_{in}$  为 Trombe 墙进口距地面的高度,  $m$ );  $h_{in,c}$  为 Trombe 墙出口空气与屋顶表面的对流换热系数 (单位:  $W/(m^2 \cdot K)$ ),  $h_{in,c} = -0.166 + 0.484ACH^{0.8}$  ( $ACH$  为房间换气次数,  $ACH = 3600u_a A_a / L_r W_r H_r, 1/h$ )<sup>[16]</sup>;  $T_{in,c}$  为屋顶内表面温度,  $K$ ;  $T_{in,i} (i=1, 2, \dots, 5)$  分别表示房间三面侧墙内表面温度  $T_{in,w}$ 、集热墙内表面温度  $T_{in,mw}$  和地板表面温度  $T_{in,f}$ ,  $K$ ;  $h_{in,i}$  为各内表面与室内空气的对流换热系数,  $h_{in,i} = 2.03(T_r - T_{in,i})^{0.14}$ <sup>[16]</sup>,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $A_i$  为各内表面面积,  $m^2$ 。

$T_{a,c}$  和  $k$  分别用式 (13) 和式 (14) 计算<sup>[16]</sup>:

$$2c_a q_m (T_{out} - T_{a,c}) = h_{in,c} (T_{out} - T_{in,c}) A_c, \quad (13)$$

$$k = \frac{T_{a,c} - T_r}{H_r/2}. \quad (14)$$

### 1.3 热舒适性模型

标准有效温度 (SET) 是指当人体在实际环境和标准环境中具有相同的皮肤温度  $t_{sk}$  和皮肤湿润度  $P_{wet}$  时, 如果产生相同的皮肤散热量  $q_{sk,en}$  和相同的热感觉, 此时标准环境的温度即为 SET<sup>[14]</sup>。二节点模型是计算 SET 的基础, 二节点模型将人体分为核心层和皮肤层两个部分, 核心层和皮肤层的能量平衡方程分别为

$$m_{cr} c_{cr} \frac{dt_{cr}}{d\tau} = A_{bd} (-q_{cr,sk} - q_{cr,en} + M + \Delta M_{shiv} - W), \quad (15)$$

$$m_{sk} c_{sk} \frac{dt_{sk}}{d\tau} = A_{bd} (q_{cr,sk} - q_{sk,en}), \quad (16)$$

式中:  $m_{cr}$  为核心层的质量, kg;  $m_{sk}$  为皮肤层的质量, kg;  $c_{cr}$  为核心层的比热容;  $c_{sk}$  为皮肤层的比热容,  $c_{cr}=c_{sk}=3500 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ ;  $t_{cr}$  为核心层温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{sk}$  为皮肤层温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $A_{bd}$  为人体表面积,  $A_{bd}=1.83 \text{ m}^2$ ;  $q_{cr,sk}$  为核心层和皮肤层的换热量,  $\text{W/m}^2$ ;  $q_{cr,en}$  为核心层和环境的换热量,  $\text{W/m}^2$ ;  $q_{sk,en}$  为皮肤层和环境的换热量,  $\text{W/m}^2$ ;  $M$  为人体代谢率,  $M=70 \text{ W/m}^2$  [16];  $W$  为人体所做的机械功,  $W=0 \text{ W/m}^2$  [19];  $\Delta M_{shiv}$  为冷颤代谢率,  $\text{W/m}^2$ 。

SET 可依据图 4 所示流程计算。表 3 给出了不同 SET 温度范围所对应的热感觉和生理状态。

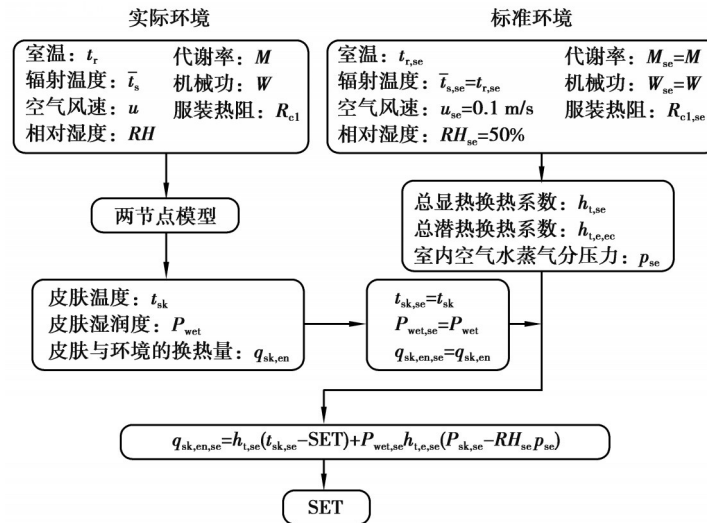


图 4 SET 计算流程图

Fig. 4 Flow chart of SET calculation

表 3 不同 SET 范围所对应的热感觉和生理状态 [20]

Table 3 Thermal sensations and physiological states corresponding to the SET ranges [20]

SET 范围/ $^{\circ}\text{C}$	热感觉	生理状态
37.5~44.0	很热、极其不舒适	影响汗液蒸发
34.5~37.5	热、非常不舒适	大量出汗
30.0~34.5	温暖、不舒适	出汗
25.6~30.0	微暖、基本舒适	血管舒张、轻微出汗
22.2~25.6	舒适	生理热中性
17.5~22.2	微凉、基本舒适	出现血管收缩
14.5~17.5	凉、不舒适	身体缓慢冷却
10.0~14.5	冷、非常不舒适	开始打冷颤

图 4 中的变量下标“se”表示标准环境,  $p_{sk}$  表示皮肤表面的水蒸气分压力, Pa; 人体与环境的总显热换热系数  $h_t$  可由下式得到 [19]

$$h_t = \frac{1}{R_{cl} + 1/f_{cl}(h_{clr} + h_{clc})}, \quad (17)$$

式中:  $R_{cl}$  为服装热阻,  $\text{m}^2\cdot\text{K/W}$ ;  $f_{cl}$  为服装的面积系数;  $h_{clr}$  为衣物与环境的辐射换热系数,  $h_{clr}=4.7 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ;  $h_{clc}$  为衣物与环境的对流换热系数,  $h_{clc}=\max\{12.1u^{0.5}, 2.38(t_{cl}-t_r)^{0.25}\}$  ( $u$  为室内风速,  $\text{m/s}$ ;  $t_{cl}$  为衣服表面温度,  $^{\circ}\text{C}$ ) [16],  $\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 。

人体与环境的总潜热换热系数  $h_{t,e}$  由下式得 [19]

$$h_{te} = \frac{1}{(R_{cl}/LR \cdot i_{cl}) + (1/LR \cdot f_{cl} \cdot h_{clc})}, \quad (18)$$

式中:  $LR$  为 Lewis 数,  $LR=16.5 \text{ K/kPa}^{[19]}$ ;  $i_{cl}$  为衣服的水蒸气渗透系数,  $i_{cl}=0.45$ 。

值得指出的是,以上的能量平衡模型和热舒适性模型是针对中置式光伏 Trombe 墙而构建的,对于其他类型的光伏 Trombe 墙,其主要组成部件与中置式光伏 Trombe 墙相同,只是太阳能电池板在 Trombe 墙中的相对位置不同,所以只需对上述的能量平衡方程按照实际能量传输路径稍加修改,便可建立不同类型光伏 Trombe 墙的能量平衡模型。另外,由于未涉及房间的具体结构,文中的热舒适性模型适用于耦合不同类型的光伏 Trombe 墙的室内热舒适性评价。

## 2 模型验证

使用 MATLAB R2016a 软件耦合求解 Trombe 墙模型、室内空气模型、围护结构模型和热舒适性模型。Lin 等<sup>[3]</sup>对 MPV-TW 的性能进行了研究,实验结果验证了文中模型的可靠性。文中模型尺寸与文献[3]中实验房间尺寸一致,均为  $3\,800 \text{ mm} \times 3\,900 \text{ mm} \times 2\,600 \text{ mm}$ ,且本模型中的 MPV-TW 也与文献[3]中 MPV-TW 尺寸相同,为  $1\,000 \text{ mm} \times 2\,000 \text{ mm}$ 。为定量比较模型验证结果,引入平均相对误差  $Er$ ,计算公式为

$$Er = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_{\text{exp},i} - X_{\text{cal},i}}{X_{\text{exp},i}} \right| \times 100\%。 \quad (19)$$

图 5 给出了实验结果与文中模型计算结果的比较。可以看出,实验结果与计算结果有相同的变化趋势,且  $t_g$ 、 $t_{pv}$  和  $t_r$  的平均相对误差分别为 7.45%、6.28% 和 8.03%。因此,文中所建立的模型是可靠的。

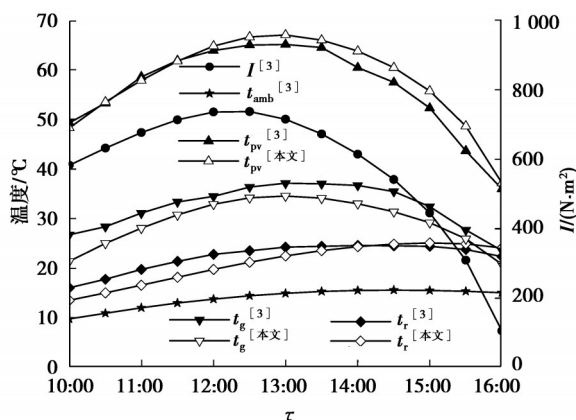


图 5 实验结果与文中结果对比

Fig. 5 Comparisons between experimental and present values

根据 ASHRAE Standard 55-2017<sup>[19]</sup>的要求,SET 的热舒适性模型需要与该标准所给出的标准值相验证。表 4 给出了在人体所做机械功  $W=0 \text{ W/m}^2$ 、服装热阻  $R_{cl}=0.08 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  情况下,SET 的计算值  $SET_{pre}$  和标准值  $SET_{sta}$  之间的比较,平均相对误差为 2.27%,因此,文中所使用的热舒适性模型是可靠的。

表 4 SET 标准值与计算值的比较

Table 4 Comparisons between standard and present values of SET

$t_r/^\circ\text{C}$	$t_s/^\circ\text{C}$	$RH/\%$	$u/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$M/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$SET_{sta}/^\circ\text{C}$	$SET_{pre}/^\circ\text{C}$	$Er/\%$
0	25	50	0.15	58.2	12.3	11.7	4.88
10	25	50	0.15	58.2	23.8	23.5	1.26
15	25	50	0.15	58.2	17.0	16.5	2.94
25	10	50	0.15	58.2	15.2	14.7	3.29
25	40	50	0.15	58.2	31.8	31.1	2.20



续表 4							
$t_r/^\circ\text{C}$	$t_s/^\circ\text{C}$	$RH/\%$	$u/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$M/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	$\text{SET}_{\text{Sta}}/^\circ\text{C}$	$\text{SET}_{\text{Pre}}/^\circ\text{C}$	$Er/\%$
25	25	10	0.15	58.2	23.3	23.0	1.29
25	25	90	0.15	58.2	24.9	24.3	2.41
25	25	50	0.10	58.2	24.0	23.6	1.67
25	25	50	0.60	58.2	21.4	21.1	1.40
25	25	50	0.15	46.6	23.3	23.0	1.29
25	25	50	0.15	116.4	29.7	30.4	2.36

3 结果分析与讨论

图 6 给出了带有 MPV-TW 的房间室内温度  $t_r$  和热舒适性评价指标 SET 随时间变化情况。可以看出,随着太阳辐射强度的变化,室内温度  $t_r$  先上升后下降,  $t_r$  在 15:00 达到最大值 20.1  $^\circ\text{C}$ 。从 9:00 到 17:00,带有 MPV-TW 的房间室内平均温度为 16.5  $^\circ\text{C}$ 。从室内温度变化可以看出,随着 MPV-TW 的运行,室内热舒适性得到改善,且下午的室内热舒适性要优于上午。从图 6 还可以看出,随着太阳辐射强度的变化,SET 先增大后减小。9:00 时室内温度较低,SET 仅为 13.4  $^\circ\text{C}$ ,此时人体感觉冷,室内热环境非常不舒适。随着 MPV-TW 的运行,室温增加,SET 逐渐增大,室内热舒适性也得到改善。10:24 时,SET 达到 14.5  $^\circ\text{C}$ ,人体热感觉从冷过渡到凉,室内热环境也从非常不舒适过渡到不舒适。之后,SET 继续增大,到 13:00 时,达到 17.5  $^\circ\text{C}$ ,此时人体热感觉从凉过渡为微凉,室内热环境也从不舒适过渡为基本舒适。随后,SET 在 15:30 达到最大值 19.6  $^\circ\text{C}$  后开始减小。在整个有效运行时间内,从 9:00 到 10:24 室内热环境为冷,人体感觉非常不舒适;从 10:24 到 13:00 室内热环境为凉,人体感觉不舒适;从 13:00 到 17:00 室内环境为微凉,人体感觉基本舒适。17:00 时,室外太阳辐射强度  $I$  已低于 200  $\text{W}/\text{m}^2$ ,但此时室内环境在 15.6  $^\circ\text{C}$ ,仍能维持在基本舒适状态,这说明光伏电池板和玻璃盖板形成的封闭空气夹层起了良好的保温作用。由此可以发现,在 MPV-TW 运行时间内,室内热舒适性在上午较差,在下午却能维持一个较为舒适的状态。总之,MPV-TW 在一定程度上可以提升室内热舒适性,但在冬季单纯依靠 MPV-TW 供暖并不能完全满足用户的供暖需求。

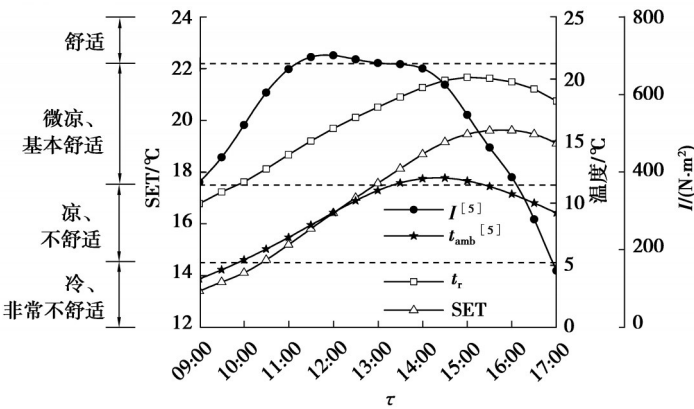


图 6  $t_r$  和 SET 随时间变化

Fig. 6 Variation of  $t_r$  and SET with time

一般情况下,MPV-TW 的吸热板是放置在太阳能电池板的背面,且对集热墙外表面没做特殊处理,在研究中发现集热墙外表面的温度最高只能达到 35  $^\circ\text{C}$ 。因此,提出将吸热板安装在集热墙外表面上,从而增加通过集热墙向室内传递的热量,以提高室内温度。图 7 给出了改变吸热板位置后的室内温度  $t_{r,\text{mod}}$  和室内热舒适性评价指标  $\text{SET}_{\text{mod}}$  随时间变化情况。可以发现,  $t_{r,\text{mod}}$  要高于  $t_r$ ,两者之间最大温差能达到 2.5  $^\circ\text{C}$ 。这是由于吸热板的集热效果优于集热墙外表面,从而导致吸热板的温度会达到 70  $^\circ\text{C}$ ,高于集热墙外表面温度,通过集热墙向室内传递的热量增加,室内温度得到提升。从图 7 中还可以看出,由于室温的提高,室内热舒适性较未

改变吸热板位置前也得到了改善。在11:47后室内人体热感觉都为基本舒适,15:30时 $SET_{mod}$ 达到最大值21.2℃。在整个有效运行时间内,从9:00到9:41室内热环境为冷,人体感觉非常不舒适;从9:41到11:47室内热环境为凉,人体感觉不舒适;从11:47到17:00室内环境为微凉,人体感觉基本舒适。与未改变吸热板位置的MPV-TW相比,人体感觉非常不舒服的时间减少了43 min,人体感觉不舒服的时间减少了73 min,人体感觉基本舒适的时间增加了73 min。因此,通过对室内热舒适性动态分析发现,将吸热板安装在集热墙外表面与将吸热板安装在太阳能电池板背面相比,能在不增加额外成本的前提下有效改善室内热环境,提高室内热舒适性,减少室内不舒适的时间。

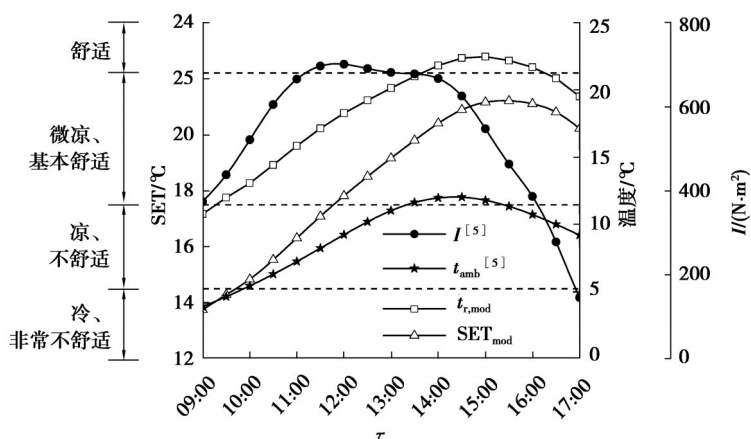


图7  $t_{r,mod}$ 和 $SET_{mod}$ 随时间变化  
Fig. 7 Variation of  $t_{r,mod}$  and  $SET_{mod}$  with time

## 4 结 论

通过建立热舒适性动态评价模型,研究了带有MPV-TW房间的室内热舒适特性,并讨论了吸热板位置对室内热舒适性的影响。主要结论如下:

1) 基于能量平衡原理对耦合MPV-TW的室内热舒适性提出了综合评价模型,并验证了其可靠性。使用文中模型可以方便地预测不同时刻室内热舒适性的变化情况,实现室内温度的动态管理,在保障室内热舒适性的前提下减少建筑运行能耗,为MPV-TW在不同地区的实际应用和运行管理提供理论依据。

2) MPV-TW中光伏电池板和玻璃盖板形成的封闭空气夹层起了良好的保温作用,当太阳辐射强度较低时,MPV-TW的空气流道仍能保持较高温度,从而使耦合MPV-TW的室内在太阳辐射强度低于 $200 \text{ W/m}^2$ 时,仍可以维持在较为舒适的温度。

3) 吸热板位置对耦合MPV-TW的室内热舒适性有重要影响,将MPV-TW的吸热板安装在集热墙外表面上可提高室温 $1\sim 2^\circ\text{C}$ ,与未改变吸热板位置的MPV-TW相比,人体感觉非常不舒服的时间减少了43 min,人体感觉基本舒适的时间增加了73 min,即改变MPV-TW中的吸热板位置,能在不增加额外成本的前提下减小热量向室内传递的热阻,改善室内热舒适性,延长MPV-TW的有效运行时间。

4) 多功能型Trombe墙除了光伏Trombe墙之外,还有净化型Trombe墙,文中以中置式光伏Trombe墙为对象,评价了耦合光伏Trombe墙的室内热舒适性,未来可结合室内污染物浓度的变化进一步研究净化型Trombe墙对室内热舒适性和空气洁净度的影响。

## 参考文献

- [1] Sergei K, Shen C, Jiang Y Q. A review of the current work potential of a Trombe wall[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 130: 109947.
- [2] Ji J, Yi H, He W, et al. Modeling of a novel Trombe wall with PV cells[J]. Building and Environment, 2007, 42(3): 1544-1552.
- [3] Lin Y, Ji J, Lu X Y, et al. Thermal and electrical behavior of built-middle photovoltaic integrated Trombe wall: experimental and numerical study[J]. Energy, 2019, 189: 116173.
- [4] Xu X W, Su Y X. Modeling of natural ventilation in built-in photovoltaic-Trombe wall[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 448: 1537-1541.

- [ 5 ] 马杨,季杰,孙伟,等. 2 种 PV-Trombe 墙的光电光热性能对比研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(8): 2323-2329.  
Ma Y, Ji J, Sun W, et al. Comparative study of two types of pv-Trombe wall on thermal and photovoltaic performance[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2019, 40(8): 2323-2329.(in Chinese)
- [ 6 ] 徐小伟,苏亚欣. 内置式 PV-Trombe 墙自然通风的数值研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(5): 23-28.  
Xu X W, Su Y X. Numerical analysis of natural ventilation in built-in photovoltaic-Trombe wall[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2014, 36(5): 23-28.(in Chinese)
- [ 7 ] 雷菲宁,苏亚欣,徐小伟. 宽度对内置式 PV-Trombe 墙内通风与换热影响的数值研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(7): 1710-1716.  
Lei F N, Su Y X, Xu X W. Numerical modeling of effect of channel width on heat transfer and ventilation in a built-in PV-Trombe wall[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2015, 36(7): 1710-1716.(in Chinese)
- [ 8 ] Lin Y, Ji J, Zhou F, et al. Experimental and numerical study on the performance of a built-middle PV Trombe wall system[J]. *Energy and Buildings*, 2019, 200: 47-57.
- [ 9 ] 林媛. 不同结构 PV-Trombe 墙系统性能的理论及实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.  
Lin Y. Numerical and experimental study on the performance of diff-structure PV-Trombe wall system[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)
- [ 10 ] Lin Y L, Zhong S L, Yang W, et al. Multi-objective design optimization on building integrated photovoltaic with Trombe wall and phase change material based on life cycle cost and thermal comfort[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 46: 101277.
- [ 11 ] Özdenefe M, Atikol U, Rezaei M. Trombe wall size-determination based on economic and thermal comfort viability[J]. *Solar Energy*, 2018, 174: 359-372.
- [ 12 ] Ganesh G A, Sinha S L, Verma T N, et al. Investigation of indoor environment quality and factors affecting human comfort: a critical review[J]. *Building and Environment*, 2021, 204: 108146.
- [ 13 ] Zhang S, Lin Z. Predicted Mean Vote with skin wettedness from standard effective temperature model[J]. *Building and Environment*, 2021, 187: 107412.
- [ 14 ] 杜衡,杨昌智. 基于二节点模型的热舒适评价指标新标准有效温度(SET<sup>\*</sup>)存在问题的研究[J]. 暖通空调, 2018, 48(12): 12-17.  
Du H, Yang C Z. Existing problems of thermal comfort index standard effective temperature(SET<sup>\*</sup>) based on two-node model [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2018, 48(12): 12-17.(in Chinese)
- [ 15 ] 王登甲. 间歇采暖太阳能建筑热过程及设计优化研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.  
Wang D J. Study on the thermal process and the design optimization of intermittent heating solar building[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011. (in Chinese)
- [ 16 ] He W, Hu Z T, Luo B Q, et al. The thermal behavior of Trombe wall system with Venetian blind: an experimental and numerical study[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 104: 395-404.
- [ 17 ] Spiga M, Morino G L. A symmetric solution for velocity profile in laminar flow through rectangular ducts[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 1994, 21(4): 469-475.
- [ 18 ] Luo Y Q, Zhang L, Liu Z B, et al. Thermal performance evaluation of an active building integrated photovoltaic thermoelectric wall system[J]. *Applied Energy*, 2016, 177: 25-39.
- [ 19 ] ANSI/ASHRAE. Thermal environmental conditions for human occupancy[S]. ANSI/ASHRAE Standard 55-2017. Atlanta, Georgia: American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2017.
- [ 20 ] Nazarian N, Fan J P, Sin T, et al. Predicting outdoor thermal comfort in urban environments: a 3D numerical model for standard effective temperature[J]. *Urban Climate*, 2017, 20: 251-267.

(编辑 陈移峰)