

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.07.005

相变平板简化热容热阻动态模型

严 天,徐新华,高佳佳

(华中科技大学 环境科学与工程学院,武汉 430074)

摘要:建立了相变平板一维一阶(2R1C)、二阶(4R2C)与三阶(6R3C)热容热阻简化动态模型,利用遗传算法对简化模型的 RC 参数进行辨识。通过模拟,对不同简化模型的准确性与适用性进行了对比。结果表明,在保证准确性的前提下,4R2C 简化模型所需辨识参数较少,适用性更好;与数值模型结果相比,采用 4R2C 简化模型在不同边界条件下模拟得到相变平板表面温度平均温差均小于 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,通过左、右表面热流平均相对误差分别为 10%与 5%左右,表明 4R2C 简化模型在不同边界条件下仍具有很好的准确性与适用性。简化模型的计算时间小于数值模型计算时间的 0.1%,计算效率明显提高。

关键词:相变平板;简化动态模型;遗传算法;数值模型;传热特性

中图分类号:TU831

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2018)07-030-07

Simplified heat capacity and thermal resistance (RC) dynamic model for planar phase change materials

YAN Tian, XU Xinhua, GAO Jiajia

(School of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of
Science and Technology, Wuhan 430074, P.R.China)

Abstract: A simplified dynamic heat transfer model with different heat capacity and thermal resistances (2R1C, 4R2C and 6R3C) of planar phase change materials is proposed. The RC parameters of the simplified model are identified by genetic algorithm (GA). The accuracy and applicability of different simplified models are analyzed. The results show that the identification parameters are less and the application is better for 4R2C model with good accuracy. Compared with the results of numerical model, the average difference of the surface temperature is less than $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the average relative difference of the heat flow through the left and right surfaces are respectively about 10% and 5%. The accuracy and applicability of the simplified dynamic model is reasonable under the different boundary conditions. The computational efficiency of the simplified model is much higher, for the computational time of the simplified model is less than 0.1% of that needed by the numerical model.

Keywords: planar phase change material; simplified dynamic model; genetic algorithm; numerical model; heat transfer characteristics

收稿日期:2017-11-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678263)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51678263).

作者简介:严天(1994—),男,博士研究生,主要从事建筑节能与相变传热技术研究,(E-mail)yantian@hust.edu.cn;

徐新华(联系人),男,教授,博士生导师,(E-mail)bexhxu@mail.hust.edu.cn.

相变材料通过相态变化实现潜热存储与释放,解决能源供应时间与空间矛盾,提高能源的利用效率^[1-3]。在建筑及暖通领域,相变材料多以平板的形式嵌入墙体,以实现建筑围护结构的蓄能隔热^[4-5]。文献[6]提出了一种新型双层相变墙系统,通过模拟发现该相变墙系统能够降低建筑 35.4% 的峰值负荷与 12.8% 的全年能耗。文献[7]将相变材料置于房间墙体,对波兰、法国马赛等不同气候区下房间的夏季得热量模拟进行模拟,发现该相变墙体能够减少房间 20% 的得热量。文献[8]提出了一种结合太阳能集热器的相变蓄能地板采暖系统,实验结果表明,该相变蓄能地板能有效的维持房间温度,提高房间热舒适性。

近年来,不少学者对相变材料的传热模型进行了研究。文献[6]基于有效焓的方法建立了相变平板的传热模型,采用有限差分法对模型进行求解计算。文献[9]基于有效热容假设对相变墙房间进行了数值模拟,进一步分析了相变墙表面温度及热流响应。文献[10]分别利用有效热容法及有效焓法建立了相变材料的传热模型,通过数值模拟对相变温度区间的 2 种模型的适用性及准确性进行了验证。传统数值求解方法求解复杂,计算效率低,文献[11]探讨了将相变板与墙体结合在一起采用动态简化模型应用于轻型建筑结构、中型建筑结构、重型建筑结构的传热计算的准确性。文中指出该模型在相变板与轻型墙体、中型墙体结合在一起时可获得更好的准确度。但相变板与重型墙体结合在一起时,采用该简化模型计算结果准确性较差,该文献并未就相变平板本身简化模型的准确性及适用性进行分析。

文中分别建立了相变平板可变热容热阻的一维一阶、二阶与三阶动态简化模型,利用数值模型的计算结果辨识模型的相关参数,并对相变平板的传热特性进行模拟。利用数值结果对不同的简化模型进行对比分析,进一步验证简化模型的准确性与适用性,并指出二阶模型计算量适中、计算结果准确性也很高,可为相变板或相变板与普通墙体集成的传热计算提供参考。

1 动态简化传热模型

相变平板的结构如图 1(a)所示,图 1(b)~图 1(d)分别为相变平板一阶(2R1C)、二阶(4R2C)与三阶(6R3C)一维简化 RC 动态传热模型原理图,该简化模型能够模拟相变材料在不同边界条件下的动态传热过程,计算相变材料表面的温度与通过相变材料的热流,进而模拟相变平板材料的传热特性。以 4R2C 简化传热模型为例,采用集总参数^[12]的思想将相变材料的总热容分为 2 个集总等效热容(C_1, C_2),总热阻分为 2 个集总等效热阻(R_1, R_2, R_3, R_4),进而根据利用热力学第三定律建立相变平板的一维动态简化 RC 传热模型。

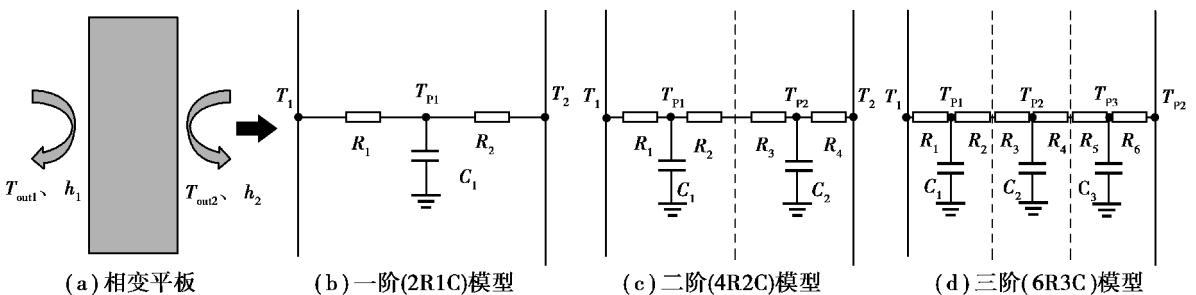


图 1 相变平板结构与动态简化模型

Figure 1 Structure and dynamic simplified models of planar PCM

在对流边界下,4R2C 简化传热模型如式(1)与式(2)所示,通过左、右表面的热流 q_1 与 q_2 ,可根据式(3)进行计算,相变平板左、右表面的温度 T_1, T_2 可根据式(4)~式(5)进行计算,其中 T_{out1} 与 T_{out2} 分别为相变平板左、右侧环境温度,℃; T_{p1} 与 T_{p2} 分别表示材料内节点的温度,℃; h_1 与 h_2 分别为左右两边的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; t 为时间变量, s。同理,可依次建立对流边界下,相变平板的 2R1C 与 6R3C 简化传热模型,如图 1 所示。在简化模型中,假设相变材料是各向同性的均匀连续介质,其 R, C 参数通过辨识获取。

$$C_1 \frac{dT_{p1}}{dt} = \frac{T_{out1} - T_{p1}}{1/h_1 + R_1} - \frac{T_{p1} - T_{p2}}{R_2 + R_3} \quad (1)$$

$$C_2 \frac{dT_{p2}}{dt} = \frac{T_{p1} - T_{p2}}{R_2 + R_3} - \frac{T_{p2} - T_{out2}}{R_4 + 1/h_2} \quad (2)$$

$$q_1 = \frac{T_{out1} - T_{p1}}{1/h_1 + R_1}, q_2 = \frac{T_{p2} - T_{out2}}{R_4 + 1/h_2} \quad (3)$$

$$T_1 = (h_1 R_1 T_{out1} + T_{p1}) / (h_1 R_1 + 1) \quad (4)$$

$$T_2 = (h_2 R_4 T_{out2} + T_{p2}) / (h_2 R_4 + 1) \quad (5)$$

2 模型参数辨识

在非稳态边界条件下,获取相变材料热特性的理论解十分困难,多采用数值方法^[6,9-10]求解,其数值结果能够较为准确地反映相变材料的热特性。相变平板的总热阻与总热容 R_{to} 、 C_{to} ,可根据平板节点温度利用式(6)与式(7)进行计算^[13],简化模型 R 、 C 参数辨识可以简化为寻找1组最优的 R 、 C 分配比例(β_i),进而确定各节点之间的热阻 R_i 、热容 C_i 参数,使得相变平板的温度与热流响应与数值解的误差最小。以一阶与二阶模型为例, $(\beta)_{2R1C}$ 为2R1C简化模型 R 、 C 参数的分配比例,其 R_i 、 C_i 参数可利用式(8)计算;在4R2C简化模型中,将相变平板分为节点 p_1 与节点 p_2 的2部分, $(\beta_2)_{4R2C}$ 表示其节点分配比, $(\beta_2)_{4R2C}$ 与 $(\beta_3)_{4R2C}$ 分别表示每个节点部分前后的热阻参数配比,模型 R_i 、 C_i 参数如式(9)~式(11)所示。同理,可确定6R3C简化模型的 R_i 、 C_i 参数,进而依次对各个模型的 R 、 C 参数进行辨识。

$$R_{to}(T_{pi}) = \delta / K_{pcm}(T_{pi}), K_{pcm}(T_{pi}) = \begin{cases} K_s, T_{pi} < T_s; \\ (T - T_s) \frac{(K_1 - K_s)}{(T_1 - T_s)}, T_s \leq T_{pi} \leq T_1; \\ K_1, T_{pi} > T_s. \end{cases} \quad (6)$$

$$C_{to}(T_{pi}) = \delta C_{pcm}(T_{pi}), C_{pcm}(T_{pi}) = \begin{cases} \rho_s c_{ps}, T_{pi} < T_s; \\ \frac{\rho_s c_{ps} + \rho_l c_{pl}}{2} + \frac{\rho_s + \rho_l}{2} \left(\frac{\lambda}{T_1 - T_s} \right), T_s \leq T_{pi} \leq T_1; \\ \rho_l c_{pl}, T_{pi} > T_s. \end{cases} \quad (7)$$

$$C_1 = C_{to}(T_{p1}), R_1 = (\beta_1)_{2R1C} * R_{to}(T_{p1}), \quad (8)$$

$$R_2 = (1 - (\beta_1)_{2R1C}) * R_{to}(T_{p1}),$$

$$R_1 = (\beta_1)_{4R2C} * (\beta_2)_{4R2C} * R_{to}(T_{p1}), \quad (9)$$

$$R_2 = (\beta_1)_{4R2C} * (1 - (\beta_2)_{4R2C}) * R_{to}(T_{p1}),$$

$$R_3 = (1 - (\beta_1)_{4R2C}) * (\beta_3) * R_{to}(T_{p2}), \quad (10)$$

$$R_4 = (1 - (\beta_1)_{4R2C}) * (1 - (\beta_2)_{4R2C}) * R_{to}(T_{p2}),$$

$$C_1 = (\beta_1)_{4R2C} * C_{to}(T_{p1}), \quad (11)$$

$$C_2 = (1 - (\beta_1)_{4R2C}) * C_{to}(T_{p2}),$$

式中: δ 为相变平板的厚度,m; K_s 、 K_1 分别为相变材料固相与液相时的导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; c_{ps} 、 c_{pl} 分别为相变材料固相与液相时的比热, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; ρ_s 、 ρ_l 分别为相变材料固相与液相时的密度, kg/m^3 ; λ 为相变潜热, J/kg ; T_{pi} 表示平板节点 i ($1 \sim 3$)的温度, $^\circ C$, T_s 、 T_1 分别为相变材料的凝固温度与熔化温度, $^\circ C$ 。

文中以时域内通过简化模型计算相变平板的表面温度、热流与数值模型求解结果的误差最小值作为优化目标,利用遗传算法(GA)^[14-15]分别对不同RC简化模型参数进行辨识。图2表示RC简化模型参数的辨识过程,其中, J 为优化目标函数,如式(12)所示, T_{sz2} 、 q_{sz2} 表示相变平板右壁面温度以及通过右壁面热流的数值解, $N-1$ 为误差样本总数, W 为权重,可根据材料热阻确定。 β_i 优化变量(R 、 C 分配比例), R 、 C 参数越多,优化变量的数量也越多,其中,2R1C模型优化变量为1个,4R2C模型优化变量为3个,6R3C模型优化变量为5个。

$$J(\beta_i) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (q_2 - q_{sz2})^2}{N-1}} + W \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (T_2 - T_{sz2})^2}{N-1}} \quad (12)$$

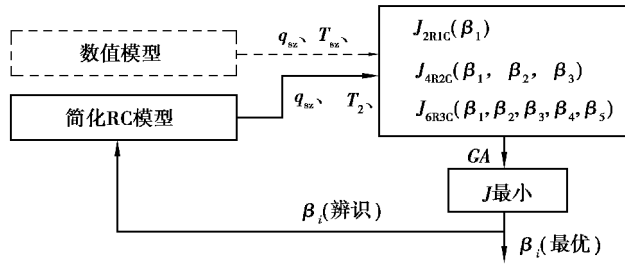


图 2 模型参数辨识原理示意图

Figure 2 Schematic of parameters identification

3 案例计算

3.1 数值参考模型

文中以某相变平板为例,利用 ANSYS 建立该相变平板的数值模型^[16],模拟不同边界条件下,相变平板材料的动态传热过程。相变平板材料选用 SP29^[17],厚度为 0.01 m,热物性参数如表 1 所示。对数值模型进行网格无关性验证,确定网格数量为 2 万个,模拟时间步长为 1.0 s,相变模型的迭代收敛精度为 10^{-6} ,数值模型计算结果作为 RC 简化模型的参数辨识与验证依据。

表 1 相变平板材料物性参数

Table 1 Physical properties of Planar PCM

相变材料	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$c_p/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1})$	$K/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1})$	$\lambda/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	$T/(\text{m} \cdot \text{°C})$
SP29	1 530 (ρ_s)	2 000	0.6	190 000	28(T_s)
	1 520 (ρ_l)				30(T_l)

3.2 工况模拟

根据式(1)~式(5)依次建立上述相变平板的简化 RC 模型,设计 2 种工况对简化模型的参数辨识及模型准确性进行研究,其周期性边界条件如式(13)~式(14)所示,各工况材料初始温度均为 25 °C,左、右表面对流换热系数分别为 $60 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$ 与 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$ 。利用数值模型模拟工况 1 边界条件下相变平板的温度与热流响应,建立式(12)所示目标函数 J ,利用遗传算法依次辨识 2R1C、4R1C 及 6R3C 简化模型的 R 、 C 参数,并对不同简化模型的计算结果进行对比分析。此外,进一步利用数值模型与简化模型模拟了工况 2 (工况 1 与工况 2,周期与极值不同)边界条件下的相变平板的温度与热流,如式(3)~式(5),进而验证简化模型在不同边界条件下的准确性及适用性。

工况 1(参数辨识):

$$T_{\text{out}1} = 29 + 8 \times \sin\left(\frac{\pi}{12 \times 3\,600}t + \frac{\pi}{3}\right),$$

$$T_{\text{out}2} = 27. \quad (13)$$

工况 2(模型验证):

$$T_{\text{out}1} = 27 + 8 \times \sin\left(\frac{\pi}{6 \times 3\,600}t + \frac{\pi}{3}\right),$$

$$T_{\text{out}2} = 27. \quad (14)$$

4 结果与验证

4.1 R 、 C 参数

利用 ANSYS 数值模型模拟工况 1 边界条件下相变平板材料的温度与热流响应,图 3 为 ANSYS 数值模

型计算收敛图,数值模型在进行模拟计算时,由于边界的变化,计算残差呈现周期性变化(存在非相变与相变过程),但都小于设定的迭代收敛精度(10^{-6}),表明数值模拟结果收敛(计算时间为 $1.800\ 0\ e+05\ s$,约 2.1 个周期)。

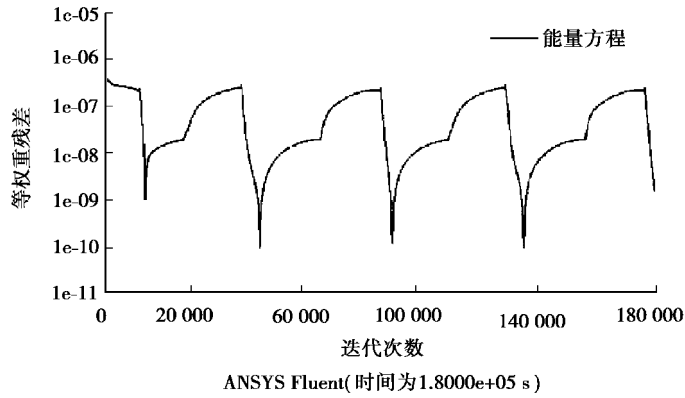


图3 数值模型计算收敛图

Figure 3 Convergence graph of numerical model

根据工况 1 边界条件下数值模型的计算结果,对简化模型的 R 、 C 参数进行辨识,结果如表 2 所示,总热容 C_{to} 、热阻 R_{to} 可由式(6)~式(7)计算得到。

表2 动态简化模型 RC 参数辨识结果

Table 2 RC parameters of dynamic simplified models

模型	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	C_1	C_2	C_3
2R1C	$0.466R_{to}$	$0.534R_{to}$					C_{to}		
4R2C	$0.403R_{to}$	$0.222R_{to}$	$0.349R_{to}$	$0.026R_{to}$			$0.624C_{to}$	$0.376C_{to}$	
6R3C	$0.379R_{to}$	$0.081R_{to}$	$0.043R_{to}$	$0.114R_{to}$	$0.362R_{to}$	$0.021R_{to}$	$0.460C_{to}$	$0.157C_{to}$	$0.383C_{to}$

4.2 验证分析

4.2.1 模型对比

根据表 2 中的 R 、 C 参数,分别利用 2R1C、4R2C 及 6R2C 动态简化模型模拟工况 1 边界条件下,相变平板的表面温度及热流,并与数值模型的计算结果进行对比,如表 3 所示。表面热流平均相对误差与温度平均误差可按式(15)与式(16)进行计算, q_{sz} 、 T_{sz} 表示采用数值模型计算的表面热流与温度, q_{sm} 、 T_{sm} 表示采用简化模型计算的表面热流与温度。结果表明,采用不同的简化模型模拟时,通过左表面的热流平均相对误差基本一致;4R2C 简化模型计算得到的表面温度与右表面热流误差明显小于 2R1C 简化模型的计算结果,准确性更好;6R2C 简化模型与 4R2C 简化模型计算结果误差相差不大,但采用 6R2C 简化模型时,需要辨识 5 个参数(4R2C 辨识 3 个),模型更复杂,计算成本更大。因此,在保证准确性的同时,4R2C 简化模型计算成本更小,适用性更好。

$$\Delta q = \sum_{k=1}^N |q_{sz} - q_{sm}| / \sum_{k=1}^N |q_{sz}| \times 100\% \quad (15)$$

$$\Delta T = \sum_{k=1}^N |T_{sz} - T_{sm}| / \sum_{k=1}^N |T_{sz}| \times 100\% \quad (16)$$

表 3 工况 1 边界条件下的简化模型与数值模型误差对比

Table 3 Comparisons between simplified model and numerical model in case 1 %

模型	Δq_1	ΔT_1	Δq_2	ΔT_2
2R1C	11.2	1.0	8.3	0.8
4R2C	10.7	0.7	3.5	0.4
6R3C	10.9	0.7	2.3	0.4

注:下标 1、2 分别表示相变平板材料的左表面与右表面

4.2.2 适用性分析

为进一步验证动态简化模型在不同边界条件下的适用性,利用 4R2C 简化模型对工况 2 边界条件下相变平板材料的传热过程进行模拟。图 4、图 5 分别为工况 2 边界条件下,相变平板材料左、右表面的温度与热流(纵坐标)随时间(横坐标)的变化曲线。结果可知,4R2C 简化模型计算结果与数值结果十分吻合,相变平板左、右表面的温度平均误差分别为 0.26 °C (0.7%)与 0.12 °C (0.4%);热流平均相对误差分别为 10.4%与 5.1%,进一步表明在不同的边界条件下,4R2C 简化模型仍具有很好的准确性与适用性。

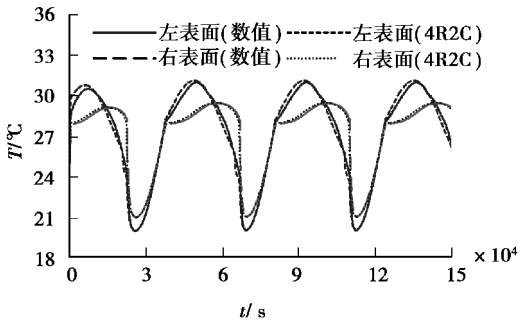


图 4 工况 2 下相变平板表面温度
Figure 4 Surface temperature of Planar PCM in case 2

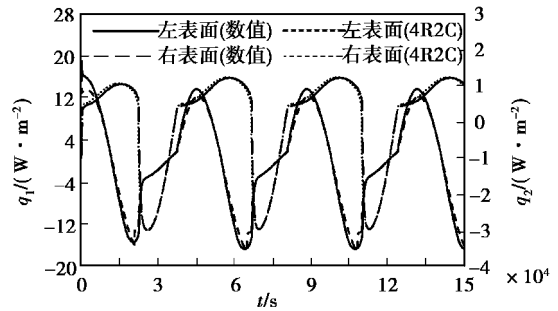


图 5 工况 2 下通过相变平板左表面的热流(q_1)与右表面热流(q_2)
Figure 5 Heat flux of left surface (q_1) and Heat flux of right surface (q_2) in case 2

4.3 计算效率

文中所建立的动态简化模型能够有效提高计算效率。以工况 2 边界为例,在同一台计算机(i7 处理器,8 核 16 线程并行)上,利用 ANSYS 数值模型模拟 5 个周期(单个周期为 12 h)内相变平板的传热特性所需耗时约 2 d,采用简化模型在进行模拟求解时仅需 1 min 左右,小于数值模型计算所需时间的 0.1%,计算效率明显提高。

5 结 论

针对相变平板分别建立了一阶(2R1C)、二阶(4R2C)及三阶(6R3C)热容热阻动态简化传热模型,根据具体工况(工况 1)下数值模型的求解结果对简化模型的 RC 参数进行辨识,进而模拟相变平板材料的动态传热过程,并根据模拟结果对不同 RC 简化模型的准确性进行了对比分析。此外,进一步研究了 4R2C 简化模型在不同边界条件(工况 2)下的适用性。

1)在进行参数辨识后,4R2C 与 6R3C 简化模型的准确性优于 2R1C 简化模型,在工况 1 边界条件下,4R2C 与 6R3C 简化模型模拟的表面温度误差及热流相对误差分别为 0.2 °C (0.7%)与 10%左右。在保证准确性的前提下,4R2C 简化模型所需辨识参数较少,计算成本更小,适用性更好。

2)在工况 2 边界条件下,采用二阶(4R2C)简化模型计算得到的相变平板左、右表面的温度及通过左、右表面的热流与数值模型的结果基本一致,其左、右表面温度温差均小于 0.3 °C,通过左、右表面热流平均相对

误差分别为 10.4% 与 5.1%，表明在不同边界条件下，4R2C 简化模型仍具有很好的准确性与适用性。

3) 采用简化模型计算时，计算时间远小于数值模型的计算时间，计算效率明显提高。

参考文献：

- [1] Pieliowska K, Pieliowski K. Phase change materials for thermal energy storage[J]. Progress in Materials Science, 2014, 65(10):67-123.
- [2] Soares N, Costa J J, Gaspar A R, et al. Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency[J]. Energy and Buildings, 2013, 59: 82-103.
- [3] Rodriguez U E, Ruiz V L, Vega S, et al. Applications of phase change material in highly energy-efficient houses[J]. Energy and Buildings, 2012, 50(7):49-62.
- [4] Kuznik F, David D, Johannes K, et al. A review on phase change materials integrated in building walls[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(1):379-391.
- [5] Zhou D, Zhao C Y, Tian Y. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications[J]. Applied Energy, 2012, 92(4):593-605.
- [6] Diaconu B M, Cruceu M. Novel concept of composite phase change material wall system for year-round thermal energy savings [J]. Energy and Buildings, 2010, 42(10): 1759-1772.
- [7] Kosny J, Kossecka E, Brzezinski A, et al. Dynamic thermal performance analysis of fiber insulations containing bio-based phase change materials (PCMs)[J]. Energy and Building, 2012, 52(3):122-131.
- [8] 肖伟, 王馨, 张群力, 等. 结合太阳能空气集热器的定形相变蓄能地板采暖系统实验研究[J]. 太阳能学报, 2008, 29(11): 1319-1323.
XIAO Wei, WANG Xin, ZHANG Qunli, et al. Experimental study on underfloor air supply system with air solar collector and shape-stabilized PCM[J]. Acta Energetica solaris sinica, 2008, 29(11):1319-1323. (in Chinese).
- [9] Kant K, Shukla A, Sharma A. Heat transfer studies of building brick containing phase change materials[J]. Solar Energy, 2017, 155(C):1233-1242.
- [10] Jin X, Hu H, Shi X, et al. Comparison of two numerical heat transfer models for phase change material board[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 128:1331-1339.
- [11] Zhu N, Wang S W, Xu X H, et al. A simplified dynamic model of building structures integrated with shaped-stabilized phase change materials[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2010, 49(9): 1722-1731.
- [12] 章熙民, 任泽霖. 传热学(第四版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
ZHANG Ximin, REN Zepei. Heat transfer (fourth edition) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001. (in Chinese).
- [13] Alawadhi E M. Thermal analysis of a building brick containing phase change material[J]. Energy and Buildings, 2008, 40(3):351-357.
- [14] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
ZHOU Ming, SUN Shudong. Principle and application of genetic algorithm[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999. (in Chinese).
- [15] Wang S W, Xu X H. Simplified building model for transient thermal performance estimation using GA-based parameter identification[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2006, 45(4):419-432.
- [16] 柴国荣. 基于 ANSYS 的相变墙体传热特性计算分析[J]. 新型建筑材料, 2011, 38(7): 79-81.
CHAI Guorong. Numerical analysis of the heat transfer characteristics of phase change wall through ansys[J]. New Building Materials, 2011, 38(7): 79-81. (in Chinese).
- [17] Meng E, Yu Hang, Zhan G Y, et al. Experimental and numerical study of the thermal performance of a new type of phase change material room[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 74:386-394.