

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.02.003

多空间被动式太阳能采暖建筑热工设计

桑国臣, 王文康, 朱轶韵, 赵 钦, 方 倩

(西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 结合拉萨地区气象数据和民居建筑模型,建立多空间太阳能建筑热平衡方程,分析内外墙体传热系数对室内热环境的影响规律,提出了多空间太阳能建筑墙体热工设计方法。结果表明,该方法能够在保证辅助房间温度处于舒适区间的同时,将室内有限的热能尽可能多地分配到主要房间,达到持续提高主要房间温度,兼顾辅助房间温度的目的。当主要房间温度需要达到某一值时,可利用拟合出的函数表达式计算出其相对应的内外墙传热系数。以本文模式 c 为例,当起居室内温度设定为 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$,厨房温度为 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其对应的外墙传热系数为 $0.33\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,内墙传热系数为 $1.25\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,该方法可为被动式太阳能采暖乡村建筑的墙体热工设计提供一定的借鉴。

关键词: 拉萨地区; 多空间太阳能建筑; 墙体传热系数; 室内热环境

中图分类号: TK512

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2018)02-0141-06

Study of thermal design of multi space passive solar heating building

SANG Guochen, WANG Wenkang, ZHU Yiyun, ZHAO Qin, FANG Qian

(School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on the meteorological data and residential building model in Lhasa area, the heat balance equation to the multi space solar energy building is established, with the influence law of exterior wall heat transfer coefficient on indoor thermal environment analyzed. The results show that the method can maintain the auxiliary room temperature in a comfortable range and the heat distribution of the main room as much as possible to continuously increase the main room temperature and take into account the auxiliary room temperature. When the temperature of the main room needs to reach a certain value, the corresponding heat transfer coefficient of the inner and outer walls can be calculated through the fitted function expression. The results deduced from the model c show that when the indoor temperature of living room is $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the indoor temperature of kitchen is $8\text{ }^{\circ}\text{C}$, the corresponding heat transfer coefficient of the exterior wall is $0.33\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ and the internal wall heat transfer coefficient is $1.25\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. The method can be used as a reference for the thermal design of the wall of passive solar heating rural buildings.

Key words: Lhasa area; multi space solar building; wall heat transfer coefficient; indoor thermal environment

墙体作为建筑围护结构的主体部分,其热工性能对建筑热损失及室内温度具有显著的影响^[1-2]。近年来,国内外学者对太阳能采暖建筑的墙体热工设计做了细致的研究,推动了乡村太阳能采暖建筑的发展。但现有研究多是在单一空间的基础上进行被动式太阳能建筑墙体热工设计,虽然在一定程度上简化了其传热过程,但对建筑功能区划下各房间室内温度随外墙热工性能变化的差异性考虑不足^[3]。被动式太阳能采暖建筑集热总量相对有限,

若将有限的太阳能资源均匀地分配给每个房间,将会导致整个室内温度降低^[4-5]。为此,可将热能利用与房间功能相匹配,通过合理的室内分区来有效利用有限的热能资源,实现对被动式太阳能建筑室内热环境的调节。而室内空间的划分需要通过内隔墙来实现,因此,内隔墙的热工性能对室内热能的非均匀化调节起着非常重要的作用。在室内空间分区模式下,研究内外墙体热工性能对不同使用功能房间室内温度的影响规律,以持续提高主要房间温度,兼

收稿日期: 2017-07-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678482)

作者简介: 桑国臣,男,教授,博士,研究方向为建筑热工与建筑材料。E-mail:sanguochen@xaut.edu.cn

顾辅助房间温度为目的,探索太阳能建筑墙体热工设计方法,以期为多空间太阳能建筑的设计提供理论基础。

本文以拉萨地区太阳能建筑为例,分析内外墙体热工性能对室内空间分区模式乡村太阳能建筑室内温度的影响规律,探索该模式下太阳能建筑的热工设计方法,以期被动式太阳能采暖乡村建筑墙体热工设计提供一定的借鉴。

1 采暖期室内外气象参数与基础模型

1.1 室外边界条件

建筑外围护结构不仅存在与室外空气的热交换,还要受到太阳的辐射,其中包括太阳直射辐射、天空散射辐射、地面的反射辐射与长波辐射等^[6]。

拉萨地处青藏高原,海拔高、日照时间长且天空透明度好,其每年的太阳辐射总量超过 8 160 MJ/m²,全年日照时数达 3 000 h 以上^[7],是我国太阳能资

源最丰富的地区。与一般内陆地区相比,拉萨地区不同朝向的太阳辐射强度差异性尤为突出。为更准确地反映出不同朝向太阳辐射强度的差异性对太阳能建筑的影响,应采用“室外综合温度”作为太阳能建筑墙体热工设计时的外边界条件。

室外综合温度的计算^[6]:

$$\overline{t_{sa}} = \overline{t_e} + \frac{I\rho_s - q_e}{\alpha_a} \tag{1}$$

式中, $\overline{t_e}$ 为室外空气温度,℃; I 为外墙受到的太阳辐射热量, W/m²; ρ_s 为墙体外表面对太阳辐射热量的有效吸收系数, 本文取 0.70^[8]; q_e 为有效辐射, W/m²; α_a 为墙体外表面总换热系数, 本文取 23.0 W/(m² · K)^[8]。

由文献[9]中的典型气象年数据可知拉萨地区采暖期室外空气温度与太阳辐射强度,将其平均值代入式(1)中,可求得拉萨地区不同朝向的室外综合温度值,如表 1 所示。

表 1 拉萨地区采暖期室外综合温度平均值
Tab.1 Average sol-air temperature of heating period in Lhasa area

南立面太阳总辐射平均强度/ (W/m ²)	室外综合温度平均值/℃					室外空气温度平均值/ ℃
	水平面	南向垂直面	东向垂直面	西向垂直面	北向垂直面	
220.6	1.3	5.0	1.8	1.2	−0.5	0.9

1.2 室内热状况

课题组于 2016 年 12 月 26 日对一栋具有代表性的建筑进行了室内热环境测试,如图 1 所示。



图 1 典型建筑
Fig.1 Typical building

该建筑室内空间主要由佛堂、卧室、杂物间、客厅和厨房构成,建筑室内净高 2.5 m,外墙为 500 mm 厚土坯墙且外立面粉刷白色涂料,屋顶构造从上往下依次为黏土泥、碎石层、细木条、椽、檩结构,约 500 mm 厚;客厅与厨房之间用隔板分隔,约 2.5 mm 厚,其余内隔墙均为 500 mm 厚的土坯墙;窗户为铝合金单玻窗,所有房间外门均为木门,南向窗墙面积比为 0.42,东向为 0.2,北向为 0.1,客厅与厨房存在辅助热源,其他房间均无辅助热源,利用测试

仪器持续测试 24 小时。该典型建筑的平面图与室内温度测试值如图 2 和图 3 所示。

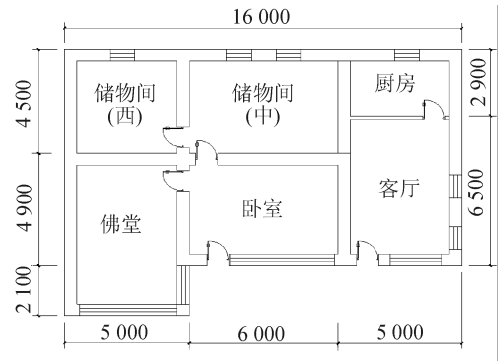


图 2 建筑平面图
Fig.2 Architectural plan

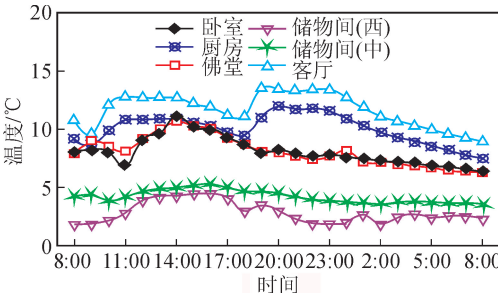


图 3 室内温度测试值
Fig.3 Test value of indoor temperature

由图3可知,南向主要房间的温度为8.1℃(佛堂、卧室的温度平均值),北向辅助房间的温度仅为3.6℃(两个储物间的温度平均值),比南向房间室内平均温度低4.5℃。测试结果表明,对多空间太阳能建筑的室内空间进行合理布局,就可以将有限的太阳能资源更多地分配给南向房间,使得位于建筑南向的主要房间室内温度保持在较高的水平。但建筑室内温度整体水平较低,若要使得室内整体热

环境质量提高,还需改善围护结构的热工性能,减少热损失。

1.3 基础建筑模型

根据课题组近几年对西藏地区乡村太阳能建筑的实地调研,并结合文献[10]~[11]对被动式太阳能建筑的平面形式、窗墙面积比以及围护结构热工参数下限值的规定,确定建筑分析模型及围护结构基本热工参数,如表2所示。

表2 建筑分析模型及围护结构基本热工参数

Tab.2 Building analysis model and basic thermal parameters of enclosure structure

建筑面积/m ²	层高/m	南向窗墙比	平面尺寸/m		围护结构传热系数/(W/(m ² ·K))					
			东西轴线	南北轴线	外墙	内隔墙	屋顶	外窗	户门	地面
143.60	3.30	0.50	16.70	8.60	2.0	2.0	0.40	2.3	2.5	0.3

1.4 室内空间分区模式

根据课题组对拉萨地区现有被动式太阳能建筑基本空间分区模式的调研,并结合当地居民对室内

空间分区的意愿,确定了3种适合于当地的典型的室内空间分区模式,如图4所示。

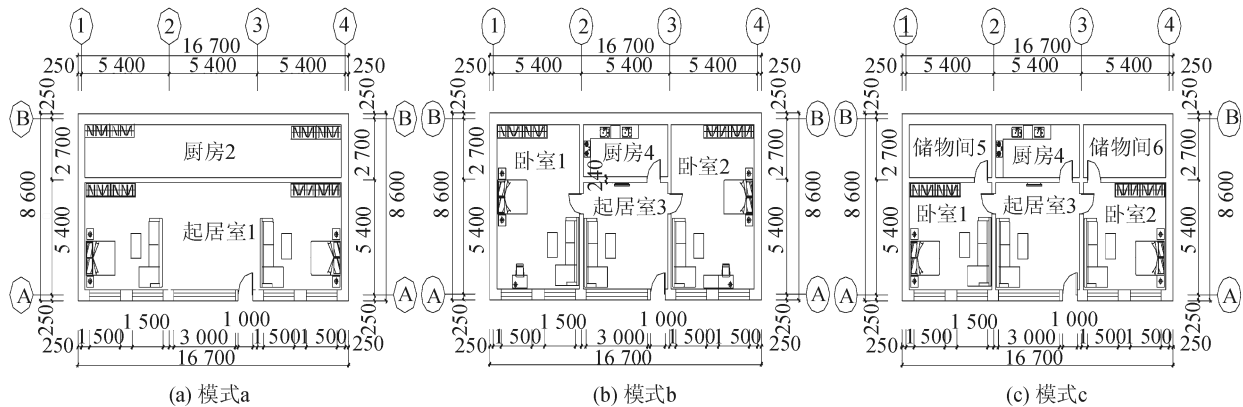


图4 室内空间分区模式
Fig.4 Indoor space partition model

2 墙体热工参数对室内热环境的影响

2.1 空间分区模式下的建筑热平衡分析

多空间太阳能建筑的各房间所处位置不同,自然运行条件下每个房间的得失热量不同,从而造成各房间空气温度也不尽相同。

采暖期内,第j个房间的稳态热平衡方程^[12]为:

$$q_{cc,j} + q_{1.H,j} - q_{H.T,j} - q_{INF,j} = 0 \tag{2}$$

式中, $q_{cc,j}$ 为单位建筑面积的集热量,W/m²; $q_{1.H,j}$ 为单位建筑面积的建筑物内部得热,本文取3.8 W/m²^[11]; $q_{H.T,j}$ 为单位建筑面积通过围护结构及邻室隔墙的传热量,W/m²; $q_{INF,j}$ 为单位建筑面积的空气渗透耗热量,W/m²。

根据建筑室内外得失热量及邻室之间的传热现象,由式(2)进一步整理得到室内任一房间(j房间)的稳态热平衡方程:

$$q_{cc,j} \cdot A_{0,j} + 3.8A_{0,j} - \sum_{x=1}^n K_1 F_{W,x,j} (\overline{t_{i,j}} - \overline{t_{sa,x,j}}) - \sum_{y=1}^m K_2 F_{W,y,j} \overline{\Delta t_{y,j}} - \sum_{z=1}^l K_{dw,z} F_{dw,z,j} (\overline{t_{i,j}} - \overline{t_e}) - K_R F_{R,j} (\overline{t_{i,j}} - \overline{t_{sa,R,j}}) - K_G F_{G,j} (\overline{t_{i,j}} - \overline{t_e}) - (c_p \rho N V_j) (\overline{t_{i,j}} - \overline{t_e}) = 0 \tag{3}$$

式中, $A_{0,j}$ 为j房间的室内面积,m²; K_1 、 K_2 、 K_R 、 K_G 、 $K_{dw,z}$ 分别为外墙、内隔墙、屋顶、地面以及门(窗)的传热系数,W/(m²·K); $F_{W,y,j}$ 、 $F_{W,x,j}$ 、 $F_{R,j}$ 、 $F_{G,j}$ 、 $F_{dw,z,j}$ 分别为j房间邻室隔墙y的面积、外墙x的面积、屋顶面积、地面面积、门(窗)面积,m²; $\overline{t_{i,j}}$ 为j房间的室内空气温度,℃; $\overline{\Delta t_{y,j}}$ 为j房间与邻室y的温差,℃; $\overline{t_{sa,x,j}}$ 为j房间外墙x所对应的室外综合温度采暖期平均值,℃; $\overline{t_{sa,R,j}}$ 为j房间水平面室外综合温度采暖期平均值,℃; c_p 为干空气的定压质量比热容,本文取

$0.28 \text{ W} \cdot \text{h}/(\text{kg} \cdot \text{K})^{[12]}$; ρ 为室外温度下的空气密度, kg/m^3 ; N 为换气次数, 取 $0.5 \text{ h}^{-1[12]}$; V_j 为 j 房间换气体积, m^3 ; $x=1, 2, \dots, n$; $y=1, 2, \dots, m$; $z=1, 2, \dots, l$; n, m, l 分别为 j 房间外墙、内隔墙、门(窗)的数量。

根据式(3)可以得出三种室内空间分区模式下所有房间的热平衡方程。在此基础上, 代入表1、表2、图4中的相关参数, 分别对各房间的热平衡方程进行联立并整合, 得出与三种室内空间分区模式相对应的三种组合空间热平衡方程组:

$$(62.4K_1 + 106.9K_2 + 175.3)t_{a1} - (71.3K_1 + 106.9K_2 + 30.6)t_{a2} - 187.1K_1 - 2960.5 = 0 \quad (4)$$

$$-(53.5K_1 + 35.6K_2 + 77.2)t_{b1} - (53.5K_1 + 35.6K_2 + 77.2)t_{b2} + 1048.2 + (8.9K_1 + 106.9K_2 + 58.4)t_{b3} - (17.8K_1 + 71.3K_2 + 10.2)t_{b4} + 115.8K_1 = 0 \quad (5)$$

$$-(26.7K_1 + 71.3K_2 + 58.4)t_{c1} - (26.7K_1 + 71.3K_2 + 58.4)t_{c2} + (8.9K_1 + 106.9K_2 + 58.4)t_{c3} + 98.1K_1 - (17.8K_1 + 71.3K_2 + 10.2)t_{c4} - (26.7K_1 + 53.5K_2 + 10.2)t_{c5} - (26.7K_1 + 53.5K_2 + 10.2)t_{c6} + 1032.8 = 0 \quad (6)$$

式中, t_{a1} 、 t_{a2} 分别为室内空间分区模式 a 下的起居室1、厨房2的采暖期室内空气温度平均值, $^{\circ}\text{C}$; t_{b1} 、 t_{b2} 、 t_{b3} 、 t_{b4} 分别为室内空间分区模式 b 下的卧室1、卧室2、起居室3、厨房4的采暖期室内空气温度平均值, $^{\circ}\text{C}$; t_{c1} 、 t_{c2} 、 t_{c3} 、 t_{c4} 、 t_{c5} 、 t_{c6} 分别为室内空间分区模式 c 下的卧室1、卧室2、起居室3、厨房4、储物间5及储物间6的采暖期室内空气温度平均值, $^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 外墙传热系数对室内温度的影响

对于拉萨地区不同空间分区模式下的建筑模型, 当基础建筑外墙传热系数变化时, 自然运行条件下冬季采暖期室内平均温度的变化如图5所示。

从图5可看出, 虽然减小外墙的传热系数有利于提高室内热环境, 但等量减小外墙传热系数对多空间下不同位置房间的热环境改善效果却并不相同, 且室内空间分区模式不同, 其温度增加值不同。当外墙传热系数由 $2.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 减小到 $0.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时, 室内空间分区模式 a 中起居室的室内温度增加了 3.3°C , 厨房室内温度增加了 4.3°C ; 模式 b 中起居室的室内温度增加值为 2.8°C , 卧室的室内温度增加值为 3.8°C (卧室1和卧室2的平均值, 下同), 厨房的室内温度增加值为 4.2°C ; 模式 c 中起居室的室内温度增加值为 2.8°C , 卧室的室内

温度增加值为 3.5°C , 厨房的室内温度增加值为 4.2°C , 储物间的室内温度增加值为 4.3°C (储物间1和储物间2的平均值, 下同)。

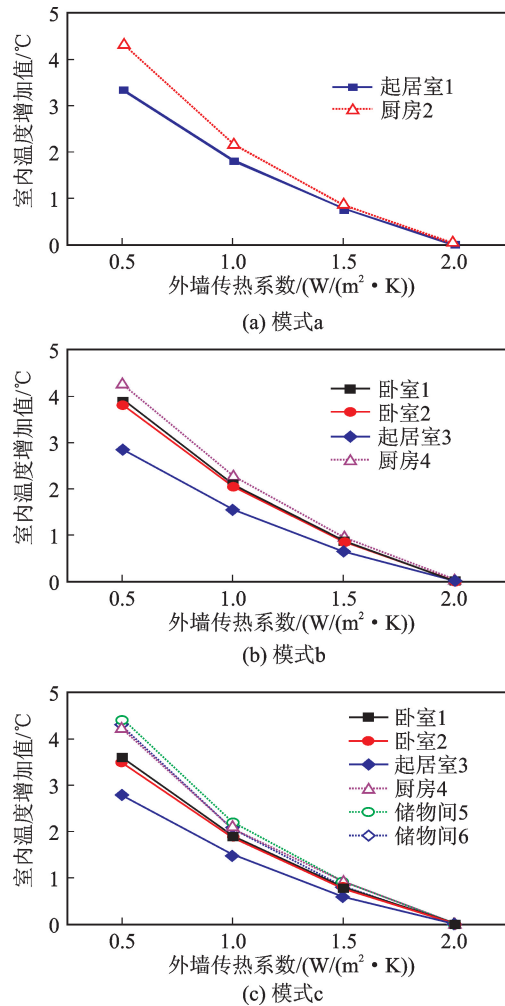


图5 外墙传热系数对室内温度的影响

Fig. 5 Influence of the external wall heat transfer coefficient on the indoor temperature

此外, 通过对比图5中三种不同空间分区模式下不同位置房间室内温度的增加值还可以发现, 等量减小外墙传热系数时, 北向辅助房间的温度增加值大于南向主要房间。以模式c为例, 当外墙传热系数由 $2.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 减小到 $0.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时, 厨房的温度增加值比起居室高 1.2°C 。原因在于, 外墙传热系数的减小可以有效减少南向主要房间的热量损失, 但同时也使得太阳辐射经南墙传入室内的热量减小, 总体上有利于得热, 但收益不大。

2.3 内隔墙传热系数对室内温度的影响

随着建筑模型空间分区模式的日趋复杂和建筑功能的日益丰富, 建筑内隔墙占围护结构的比例逐渐增大, 对室内热环境的影响也在逐渐加强。对于拉萨地区不同空间分区模式的建筑模型而言, 当基础建筑内隔墙传热系数变化时, 自然运行条件下冬

季采暖期室内平均温度的变化如图6所示。

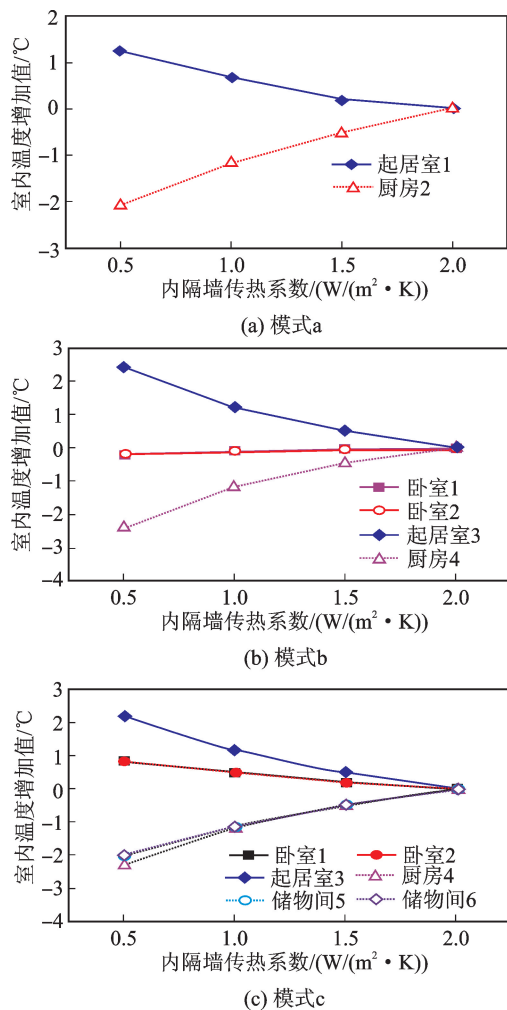


图6 内隔墙传热系数对室内温度的影响

Fig. 6 Influence of the internal partition heat transfer coefficient on the indoor temperature

由图6可见,随着内隔墙传热系数的减小,主次房间的温度增加值呈现出不同的变化规律。当内隔墙传热系数由 $2.0 W/(m^2 \cdot K)$ 减小到 $0.5 W/(m^2 \cdot K)$ 时,室内空间分区模式a中起居室的室内温度增加了 $1.2^{\circ}C$,厨房的室内温度增加了一 $2.0^{\circ}C$;模式b中起居室的室内温度增加值为 $2.4^{\circ}C$,卧室的室内温度增加值为一 $0.2^{\circ}C$,厨房的室内温度增加值为一 $2.4^{\circ}C$;模式c中起居室的室内温度增加值为 $2.2^{\circ}C$,卧室的室内温度增加值为 $0.9^{\circ}C$,厨房的室内温度增加值为一 $2.3^{\circ}C$,储物间的室内温度增加值为一 $2.0^{\circ}C$ 。

通过以上分析可知,减小内隔墙传热系数能够将有限的热能尽可能多地分配到主要房间,有效提高南向主要房间的室内温度,促进室内热能的非均匀化调节,但这也使得北向辅助房间获得的热量减少,从而导致辅助房间的温度降低。

3 多空间太阳能建筑墙体热工设计方法

由前文分析可知,各个房间的室内温度随着外墙传热系数的减小而显著提高。其中,北向辅助房间的温度增加较大,南向主要房间的温度增加较小。而减小内隔墙传热系数,南向主要房间的室内平均温度提高,北向辅助房间的室内平均温度却降低。也就是说,减小内外墙传热系数,南向主要房间的室内温度都会提高,而北向辅助房间的室内温度是否提高,则取决于内外墙传热系数的减小值。因此,若想在提高主要房间室内温度的同时,能够兼顾到辅助房间的温度,则需寻求内外墙传热系数之间的关联性。

根据文献[13]可知,拉萨地区采暖期热舒适指标为:北向中间位置的房间最低温度不低于 $8^{\circ}C$,北向东西两侧房间为 $6^{\circ}C \sim 7^{\circ}C$ 。因此,假设北向中间位置房间(厨房)的室内温度为 $8^{\circ}C$,并将此温度作为固定值,代入式(4)、(5)、(6)中,当外墙传热系数变化时,其主次房间的温度和内隔墙传热系数的变化如图7所示。

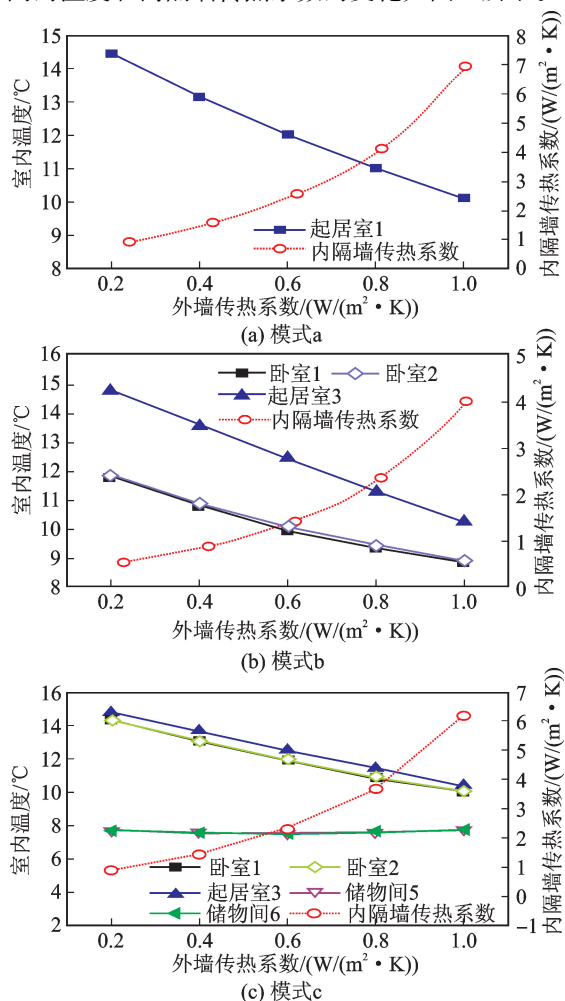


图7 主次房间温度和内隔墙传热系数的变化

Fig. 7 Variation of temperature and internal partition heat transfer coefficient in primary and secondary rooms

由图7可见,当北向中间房间(厨房)温度设定为 8°C 后,随着外墙传热系数的减小,北向其余辅助房间的温度基本保持不变,维持在舒适的区间内,而南向主要房间的温度持续升高。外墙传热系数由 $1.0\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 减小到 $0.2\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时,室内空间分区模式a中主要房间(以起居室为例,下同)的室内温度从 10.1°C 提高到了 14.4°C ;模式b中主要房间的室内温度从 10.2°C 提高到了 14.8°C ;模式c中主要房间的温度从 10.4°C 提高到了 14.8°C 。内隔墙传热系数随着外墙传热系数的减小而减小,内隔墙传热系数的减小加剧了室内热能分配的非均匀化,当辅助房间的室内温度达到舒适温度后,减少向辅助房间的热量传递,将更多的热能分配到主要房间,在保证辅助房间温度的同时,持续提高主要房间的温度。

此外,对三种不同空间分区模式中主次房间温度和内隔墙传热系数进行拟合,可以得到三种空间分区模式下主次房间温度和内隔墙传热系数随外墙传热系数变化的函数曲线。当主要房间温度需要达到某一值时,就可以通过拟合的函数曲线求出其相对应的内外墙传热系数以及其他房间的温度。如图8所示,以模式c的主要房间(起居室)为例,当主要房间室内温度为 14°C ,辅助房间温度为 8°C 时,通过拟合出的函数表达式可计算出外墙传热系数为 $0.33\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,内隔墙传热系数为 $1.25\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。该方法可为被动式太阳能采暖乡村建筑的墙体热工设计提供一定的借鉴。

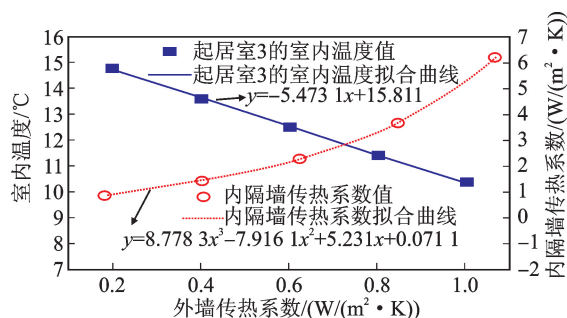


图8 模式c起居室温度和内隔墙传热系数的拟合曲线图
Fig. 8 Curve fitting of living room temperature and internal partition heat transfer coefficient in model c

4 结 论

1) 拉萨典型建筑的室内热环境测试结果表明,合理的室内空间布局可以将室内有限的太阳能资源更多地分配给南向房间,使得位于建筑南向的主要房间室内温度保持在较高的水平。但建筑室内温度整体水平较低,若要使得室内整体热环境质量提高,

还需改善围护结构的热工性能,减少热损失。

2) 外墙传热系数减小有利于提高室内热环境,但减小外墙传热系数对多空间下不同位置房间的热环境改善效果却并不相同,北向辅助房间的温度增加值大于南向主要房间。

3) 减小内隔墙传热系数能够将有限的热能尽可能多地分配到主要房间,有效提高南向主要房间的室内温度,促进室内热能的非均匀化调节,但同时会减少北向辅助房间的传热量,导致北向辅助房间的温度降低。

4) 对三种不同空间分区模式中主次房间温度和内隔墙传热系数进行拟合,可以得到三种空间分区模式下主次房间温度和内隔墙传热系数随外墙传热系数变化的函数曲线。对于拉萨地区自然运行下的太阳能建筑,当南向主要房间温度需要达到某一值时,都可以通过拟合的函数求得其相对应的内外墙传热系数以及其他房间的温度。该方法可为被动式太阳能采暖乡村建筑的墙体热工设计提供一定的借鉴。

参考文献:

- [1] 杨善勤. 民用建筑节能设计手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [2] 桑国臣, 刘加平. 太阳能富集地区采暖居住建筑节能构造研究 [J]. 太阳能学报, 2011, 32(3): 416-422.
SANG Guochen, LIU Jiaping. Study of energy efficiency envelope configuration of heating residential buildings in solar radiation zone [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2011, 32(3): 416-422.
- [3] 桑国臣, 韩艳, 朱轶韵, 等. 自然运行下乡村太阳能建筑热工参数对室内空气温度的影响 [J]. 西安理工大学学报, 2016, 32(1): 30-34.
SANG Guochen, HAN Yan, ZHU Yiyun, et al. Effect of thermal parameters of rural solar buildings on indoor air temperature under natural operating conditions [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2016, 32(1): 30-34.
- [4] 王登甲, 刘艳峰, 刘加平. 青藏高原被动太阳能建筑供暖性能实验研究 [J]. 四川建筑科学研究, 2015, 41(2): 269-274.
WANG Dengjia, LIU Yanfeng, LIU Jiaping. Experiments analysis on the heating performance of the passive solar house in the Qinghai-Tibet plateau [J]. Sichuan Building Science, 2015, 41(2): 269-274.

(下转第171页)

- photographs of document image skew adjusting [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(10): 1116-1120.
- [10] 任玲辉, 刘凯, 张海燕, 等. 一种彩色印刷图像套印检测新方法研究 [J]. *机械科学与技术*, 2013, 32(3): 399-404.
- REN Linghui, LIU Kai, ZHANG Haiyan, et al. A new method for detecting color printing image registration error [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2013, 32(3): 399-404.
- [11] SU M C, HUNG C H. A neural-network-based approach to detecting rectangular objects [J]. *Neuro-computing*, 2007, 71(1-3): 270-283.
- [12] LIU Yangxing, IKENAGA T, GOTO S. An MRF model-based approach to the detection of rectangular shape objects in color images [J]. *Signal Processing*, 2007, 87(11): 2649-2658.
- [13] SIRICHAROENCHAI R, SINTHUPINYO W, SUN-PETCHINYOM T. A novel shape descriptor for rectangle-like classification [J]. *Procedia Computer Science*, 2012, 13: 128-132.
- [14] 秦开怀, 王海颖, 郑辑涛. 一种基于 Hough 变换的圆和矩形的快速检测方法 [J]. *中国图象图形学报*, 2010, 15(1): 109-115.
- QIN Kaihuai, WANG Haiying, ZHENG Jitao. A unified approach based on Hough transform for quick detection of circles and rectangles [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2010, 15(1): 109-115.

(责任编辑 王绪迪)

(上接第 146 页)

- [5] 刘艳峰, 刘加平, 杨柳, 等. 拉萨地区被动太阳能传统民居测试研究 [J]. *太阳能学报*, 2008, 29(4): 391-394.
- LIU Yanfeng, LIU Jiaping, YANG Liu, et al. Measuring study of passive solar house for traditional dwelling building in Lhasa area [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2008, 29(4): 391-394.
- [6] 彦启森, 赵庆珠. 建筑热过程 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.
- [7] 西安建筑科技大学, 西藏建筑勘察设计院. 西藏自治区居住建筑节能设计标准: DB54/0016-2007 [S]. 拉萨: 西藏人民出版社, 2008.
- [8] 刘加平. 建筑物理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [9] 张晴原, Joe Huang. 中国建筑用标准气象数据库 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [10] 中国建筑设计研究院. 被动式太阳能建筑技术规范: JGJ/T267-2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [11] 中国建筑科学研究院, 中国建筑设计研究院. 农村居住建筑节能设计标准: GB/T50824-2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [12] 中国建筑科学研究院. 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准: GJ26-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [13] 桑国臣. 青藏高原低能耗居住建筑构造体系研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
- SANG Guochen. Study on construction system of low energy consumption residential building in Tibet Plateau [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2009.

(责任编辑 周 蓓)