

引用格式: 金国辉, 张东杰, 李雨泽, 等. 内蒙古西部农牧区被动式住宅围护结构优化[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(7): 223—227

Jin Guohui, Zhang Dongjie, Li Yuze, et al. Structural optimization of passive residential in agricultural and pastoral areas of western inner mongolia[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(7): 223—227

建筑科学

内蒙古西部农牧区被动式住宅围护结构优化

金国辉¹ 张东杰¹ 李雨泽² 沈强³

(内蒙古科技大学土木工程学院¹, 包头 014000; 华侨大学机电及自动化学院² 厦门大学建筑与土木工程学院³ 厦门 361000)

摘要 为提升内蒙古西部农牧区被动式住宅室内热环境、降低采暖能耗,对当地被动式住宅进行调研,选取了影响冬季采暖能耗的因素并进行了量化。采用能耗模拟分析软件 DeST-h 和正交实验的方法研究了住宅朝向、南向窗墙比、北向窗墙比、透明围护结构材质、保温层厚度、非透明围护结构材质、附加阳光间进深等 7 个主要因素。通过对 18 种组合方案的分析,以采暖能耗为评价指标得出优选组合方式。最后建立了内蒙古西部农牧区被动式住宅采暖能耗预测模型,为农牧区被动式住宅设计提供参考。研究结果能提升农牧区被动式住宅的节能设计水平。

关键词 农牧区住宅 采暖能耗 附加阳光间 正交实验

中图分类号 TU111.4; 文献标志码 A

随着农牧区经济发展水平的不断提高,人们对住宅的室内热环境和舒适度要求也越来越高,附加阳光间等被动式住宅也随之发展;但由于内蒙古西部农牧被动式住宅的构造简单,围护结构热工性能较差,使得农牧区住宅的冬季采暖能耗也越来越高。内蒙古西部地区具有温带大陆性气候的特点:春季气温骤升,多大风天气,夏季短促而炎热,秋季气温剧降,冬季漫长严寒,热工分区中属严寒I(C)区。内蒙古西部农牧区年太阳总辐射量为 1 658.05 ~ 1 775.14 kW·h·m⁻²之间,发展被动式太阳房住宅具有独特优势。

目前有很多学者对被动式住宅的热环境和热舒适做了研究。Baños R^[1]等研究了太阳能等可再生能源在住宅中的使用,以达到节约建筑能耗。Firlağ^[2]研究了被动式住宅的室内热环境,认为被动房的围护结构热工性能优于普通住宅,室内发热量对住宅能耗的影响也高于普通住宅。孔文慷^[3]对被动房冬季运行室温响应做了实测分析,结果表明,在冬季室内无人无供暖的情况下,被动式住宅的室内温度能稳定在 18℃,短时间开窗有利于改善室内空气质量;但对室温影响不大。李恩等^[4,5]对拉萨和青海的被动式附加阳光间分别做了数值模拟研究和优化设计研究。结

果表明,附加阳光间室内温度冬季受太阳得热影响较大,温度波动较大。张国艳等^[6]基于 Energyplus 对附加阳光间太阳房做了室内热环境和经济性分析,结果表明附加阳光间太阳房只需 15.93 W/m²能满足室内采暖需求,在北方地区建造是可行的。阮方等^[7,8]对使用者行为与被动式住宅的室内热环境和外墙保温节能效果做了研究。

总体而言,对被动式设计住宅研究主要在西藏拉萨地区,而内蒙古西部农牧被动式住宅室内热环境的研究较少。本研究以内蒙古西部典型农牧被动式住宅为研究对象,对其围护结构热工性能进行优化。对比分析优化前后室内热环境和采暖能耗。对改善内蒙古西部农牧区被动式住宅冬季室内热环境,减少采暖能耗具有重要意义。

1 农牧区住宅能耗影响因素分析

1.1 理论分析

内蒙古西部农牧区住宅冬季采暖耗热量指标按式(1)~式(3)计算^[9]:

$$q_H = q_{HT} + q_{INF} - q_{IH} \quad (1)$$

$$q_{HT} = q_{Hq} + q_{Hw} + q_{Hd} + q_{Hmc} + q_{Hy} \quad (2)$$

$$q_{INF} = (t_n - t_e) (C_p \rho NV) / A_0 \quad (3)$$

式中 q_H 为住宅耗热量指标, W·m⁻²; q_{HT} 为住宅围护结构传热量, W·m⁻²; q_{INF} 为空气渗透耗热量, W·m⁻²; q_{IH} 为住宅内部的热量,取 3.8 W·m⁻²; q_{Hq} 、 q_{Hw} 、 q_{Hd} 、 q_{Hmc} 分别为通过墙、屋面、地面、门窗的传热量,

2017年8月1日收到 国家自然科学基金(51668051、51768053), 内蒙古自然科学基金(2016MS0516、2017MS(LH)0532)和西部绿色建筑国家重点实验培育基地开放研究基金(LSKF201803)资助
第一作者简介: 金国辉(1965—), 硕士, 教授。研究方向: 建筑节能与绿色建筑。E-mail: jinguohuimba@163.com。

$W \cdot m^{-2}$; q_{Hy} 为非采暖封闭阳台传热量, $W \cdot m^{-2}$; C_p 为空气比热容, 取 $0.28 W \cdot h \cdot (kg \cdot K)^{-1}$; ρ 为空气密度 $kg \cdot m^{-3}$; N 为换气次数, 取 $0.5 h^{-1}$; V 为换气体积 m^3 ; t_n 为室内计算温度, 按 $18^\circ C$ 计算; t_e 为采暖季室外均温, $^\circ C$; A_0 为建筑面积 m^2 。

由式(1)~式(3)可以看出, 对内蒙古西部农牧区住宅采暖能耗与室内热环境影响因素包括, 室内外温度、墙地面等围护结构的传热系数、换气次数和换气体积等。

1.2 实地调研

对内蒙古西部农牧区住宅做了较为系统的调研, 总结了影响农牧住宅的主客观因素。客观因素主要包括住宅朝向、住宅各向窗墙比、透明和非透明围护结构的材质、外墙保温层厚度等。主观因素包括农牧区居民的生活用能习惯、室内的行为模式、采暖方式等。

通过上述理论与调研分析, 确定影响农牧区住宅采暖能耗的重要因素, 运用数值模拟分析方法对因素与能耗之间的关系量化研究。选取因素分别为住宅朝向(A)、南向窗墙比(B)、北向窗墙比(C)、透明围护结构材质(D)、非透明围护结构材质(热惰性)(E)、保温层厚度(F)、阳光间进深(G)。

2 研究方法

2.1 典型住宅的选取

选取的农牧区典型被动式住宅如图1所示, 被动式住宅平面呈正方形, 结构和方位与砖混住宅相似。共有5间房屋, 客厅和餐厅相通尺寸为 $5.0 m \times 7.8 m$, 两个卧室尺寸为 $4.0 m \times 5.4 m$, 附加宽 $1.8 m$ 的阳光间。内外墙体做法与砖混住宅基本相同, 四周立面贴瓷砖。室内地面铺设地板砖, 屋面为传统双坡屋顶。围护结构参数见表1。

2.2 软件选择

以能耗计算软件 DeST-h 为工具, 以典型住宅为基础建立内蒙古西部农牧区被动式住宅模型, 量化分析不同节能设计方案下的建筑全年能耗, 比较不同的设计方案从而分析优化方案。

3 参数设置

模拟所用气象参数选择为中国标准气象数据库(CSWD)模拟时间内蒙古采暖期(10月15日~次年4月15日), 室内温度设定为 $18^\circ C$, 换气次数为 $0.5 h^{-1}$, 各房间热扰设置按照文献[10]的相关规定: 主次卧室和客厅灯光发热量最大值为 $5 W \cdot m^{-2}$, 客厅、餐厅和厨房设备发热量最大值为 9.3 和 $48.2 W \cdot m^{-2}$ 。结合农牧区居民作息时间, 人员热扰

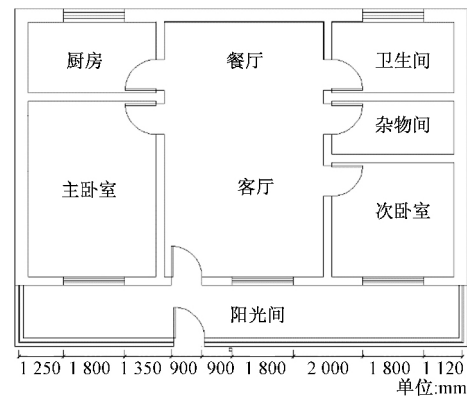


图1 典型被动式住宅平面图

Fig. 1 Typical passive residential floor plan

设为2人, 发热量 $53 W$, 作息时间为采暖期的 $8 \sim 22$ 时, 太阳辐射得热量依据建筑的实际情况和软件内部参量设定。

表1 典型被动式住宅基准模型构造组成
Table 1 Structure of typical passive residential benchmark model

部位	详细构造	传热系数
外墙	370 mm 黏土砖砌体, 30 mm 聚苯保温颗粒材料, 内外 10 mm 水泥砂浆抹面	0.898
内墙	240 mm 黏土砖砌体, 内外 10 mm 水泥砂浆抹面	1.596
屋顶	100 mm 混凝土, 20 mm 水泥砂浆抹面, 30 mm 聚苯保温颗粒材料	1.489
门	单层木质平开门, 室内门 $0.9 m \times 2.0 m$	
窗	外窗为 $1.5 m \times 1.8 m$ 普通玻璃塑钢窗, 附加阳光间为普通玻璃塑钢窗	

4 正交实验结果与分析

4.1 计算结果

采用 $L_{18}(3^7)$ 型的正交试验表来进行分析, 不考虑各因素间的相互影响作用, 一个因素占一列, 得到18个采暖能耗优化热环境优化方案。以因素住宅朝向(A)为例, 正交实验表计算方法如下:

$$K_{11} = (y_1 + y_2 + y_3 + y_{10} + y_{11} + y_{12}) / 6 = 4890.66 \quad (4)$$

$$K_{21} = (y_4 + y_5 + y_6 + y_{13} + y_{14} + y_{15}) / 6 = 4319.55 \quad (5)$$

$$K_{31} = (y_7 + y_8 + y_9 + y_{16} + y_{17} + y_{18}) / 6 = 4396.89 \quad (6)$$

$$R_1 = \max\{K_{ij}\} - \min\{K_{ij}\} = 571.11 \quad (7)$$

式中 K_{11} 、 K_{21} 、 K_{31} 表示为因素 A(住宅朝向)第1、2、3水平相同时的6个方案的冬季采暖能耗平均值。 R_1 为极差, 表示为三个均值中最大值与最小值之差。其他因素计算过程与 A 一致, 过程省略, 结果如表2所示。

表 2 正交实验计算结果
Table 2 Results of orthogonal experiment

因素	A	B	C	D	E	F	G	结果
实验 1	1	1	1	1	1	1	1	5 073. 95
实验 2	1	2	2	2	2	2	2	5 200. 59
实验 3	1	3	3	3	3	3	3	4 319. 20
实验 4	2	1	1	2	2	3	3	4 719. 19
实验 5	2	2	2	3	3	1	1	3 366. 54
实验 6	2	3	3	1	1	2	2	4 887. 43
实验 7	3	1	2	1	3	2	3	4 769. 66
实验 8	3	2	3	2	1	3	1	4 593. 98
实验 9	3	3	1	3	2	1	2	3 753. 20
实验 10	1	1	3	3	2	2	1	4 381. 82
实验 11	1	2	1	1	3	3	2	4 407. 94
实验 12	1	3	2	2	1	1	3	5 960. 48
实验 13	2	1	2	3	1	3	2	3 877. 81
实验 14	2	2	3	1	2	1	3	5 120. 22
实验 15	2	3	1	2	3	2	1	3 946. 16
实验 16	3	1	3	2	3	1	2	4 873. 73
实验 17	3	2	1	3	1	2	3	4 329. 11
实验 18	3	3	2	1	2	3	1	4 061. 69
K_{1j}	4 890. 66	4 616. 03	4 371. 59	4 720. 15	4 787. 13	4 691. 35	4 237. 36	
K_{2j}	4 319. 56	4 503. 06	4 539. 46	4 882. 36	4 539. 45	4 585. 79	4 500. 12	
K_{3j}	4 396. 89	4 488. 03	3 696. 06	4 004. 61	4 280. 54	4 329. 97	4 864. 64	
R_i	571. 11	128. 00	324. 47	877. 72	506. 56	361. 39	632. 29	

4.2 方案优选

由表 2 计算的各因素极差,按大小排列为透明围护结构材质 > 阳光间进深 > 住宅朝向 > 保温层厚度 > 非透明围护结构材质 > 北向窗墙比 > 南向窗墙比。极差越大说明对实验结果影响越大,即最主要的影响因素,由此可知透明围护结构材质对内蒙古西部农牧区被动式住宅采暖能耗影响最大。这一结果也说明了太阳辐射量的多少对内蒙古西部农牧区住宅的采暖能耗影响较大,实验结果效应曲线如图 2 所示。

由图 2 可知,被动式住宅采暖能耗值最优方案为 A2→B3→C1→D3→E3→F3→G1 即:南偏东 30°、南向窗墙比为 0.4、北向窗墙比为 0.0、透明围护结构材质真空玻璃、保温层厚 100 mm、非透明围护结构材质为粉煤灰砌块、附加阳光间进深 1.2 m。经过计算,最优方案下的被动式住宅采暖能耗为 2 861. 81 kW·h,比 18 个实验方案中能耗最大值方案 2 少 2 338. 78 kW·h,比最小值方案 5 少 504. 73 kW·h。可见,此方案对内蒙古西部农牧区被动式住宅减少采暖能耗与提升室内热环境是切实有效的。

5 农牧区住宅采暖能耗预测

为分析在多个设计因素共同影响下的内蒙古西部农牧区被动式住宅的采暖能耗情况,建立多元线性回归分析,该模型将住宅朝向、南向窗墙比、北向

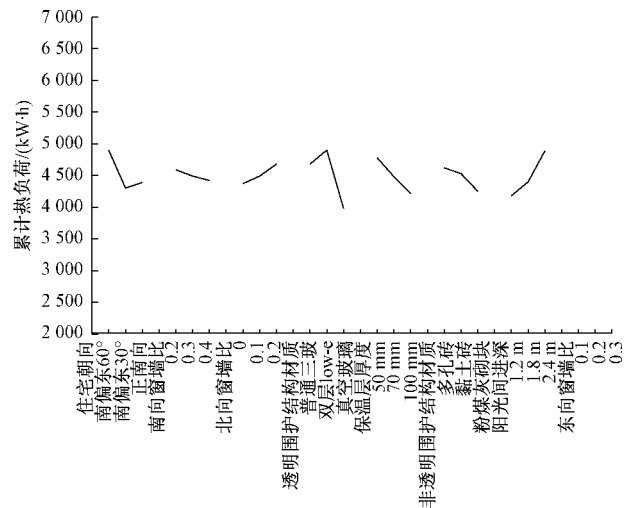


图 2 效应曲线图

Fig. 2 Effect curve diagram

窗墙比、透明围护结构材质、保温层厚度、非透明围护结构材质、附加阳光间进深共 7 项因素作为自变量,将农牧区被动式住宅的采暖能耗作为因变量,应用 MATLAB 进行多元线性回归^[11],回归模型如式(8):

$$E_c = aA + bB + cC + dD + eE + fF + gG + h \quad (8)$$

式(8)中: E_c 为农牧区被动式住宅的采暖能耗, kW·h; A、B、C、D、E、F 分别为住宅朝向等 7 项因素; a、b、c、d、e、f、g、h 分别为系数,计算结果见式(9)。

$$E_c = (5.66A + 0.21B + 0.01C + 1.62D + 0.99E +$$

$$1.00F + 1.74G + 0.53) \times 10^3 \quad (9)$$

a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 、 g 、 h 的置信区间分别为 $[3.91, 7.41]$, $[-0.49, 0.91]$, $[-0.34, 2.32]$, $[-0.48, 3.72]$, $[-1.43, -0.54]$, $[-1.84, -0.17]$, $[-0.24, 3.72]$, $[0.18, 0.88]$ 。

6 结论

将正交实验法引入内蒙古西部农牧被动式住宅节能设计优化中,结合能耗软件 DeST-h 对影响被动式住宅的 7 个设计因素进行组合实验,选出冬季采暖能耗优选方案,得出以下结论:

(1) 内蒙古西部农牧区被动式住宅围护结构优选方案为南偏东 30° 、南向窗墙比为 0.4、北向窗墙比为 0.0、透明围护结构材质真空玻璃、保温层厚 100 mm、非透明围护结构材质为粉煤灰砌块、附加阳光间进深 1.2 m。

(2) 通过 MATLAB 对 7 个影响因素建立多元回归模型,该模型有助于预测内蒙古农牧被动式住宅的冬季采暖能耗,也为农牧区被动式住宅节能设计提供参考。

参 考 文 献

- Baños R, Manzano-Agugliaro F, Montoya F, *et al.* Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: a review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2011; 15(4): 1753—1766
- Firliag S, Zawada B. Impacts of airflows, internal heat and moisture gains on accuracy of modeling energy consumption and indoor parameters in passive building. *Energy & Buildings*, 2013; 64(5): 372—383
- 孔文慷, 龚延风, 于昌勇, 等. 被动房冬季运行室温响应实测分析. *建筑科学*, 2016; 32(4): 71—76
Kong Wenliang, Gong Yanfeng, Yu Changyong, *et al.* Field study on temperature response of passive house running in winter. *Building Science*, 2016; 32(4): 71—76
- 李恩, 杨柳, 刘加平, 等. 拉萨市附加阳光间式住宅建筑被动式优化设计研究. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2016; 48(2): 258—264
Li en, Yang liu, Liu Jiaping, *et al.* Analysis on the design optimization for residential buildings in Lhasa based on the case study of attached sunroom system for apartment buildings. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2016; 48(2): 258—264
- 刘志坚, 庾汉成, 马文生, 等. 青藏高寒农牧区被动式太阳能采暖热性能数值模拟研究. *建筑科学*, 2016; 32(4): 15—19
Liu Zhijian, Yu Hancheng, Ma Wensheng, *et al.* Numerical simulation of thermal performance of passive solar house in the Qinghai alpine pastoral areas. *Building Science*, 2016; 32(4): 15—19
- 张国艳, 丁 昀, 杨 庆, 等. 基于 Energyplus 的附加阳光间式太阳房节能分析. *土木建筑与环境工程*, 2015; 37(增 1): 32—35
Zhang Guoyan, Ding Yun, Yang Qing, *et al.* Simulation analysis and evaluation of passive solar house on Energyplus. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2015; 37(s1): 32—35
- 阮 方, 钱晓倩, 钱匡亮, 等. 入行为模式对外墙内外保温节能效果的影响. *哈尔滨工业大学学报*, 2017; 49(2): 109—115
Ruan Fang, Qian Xiaoqian, Qian Kuangliang, *et al.* Influence on energy saving effects of internal and external wall insulations for different occupant behaviors. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017; 49(2): 109—115
- 刘念雄, 莫 丹, 王牧洲. 使用者行为与住宅热环境节能研究. *建筑学报*, 2016; (2): 33—37
Liu Nianxiong, Mo Dan, Wang Muzhou. A study on occupants' behavior and thermal environmental energy efficiency of dwellings. *Architectural Journal*, 2016; (2): 33—37
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准: JGJ 26—2010. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
Ministry of Housing and Urban—Rural Development of the People's Republic of China. Design standard for energy efficiency of residential buildings in severe cold zones: JGJ 26—2010. Beijing: China Construction Industry Press, 2010
- 金国辉, 赵茜健. 呼包鄂地区住宅建筑围护结构节能潜力的 DeST 正交模拟. *土木工程与管理学报*, 2016; 33(6): 63—66
Jin Guohui, Zhao Xijian. Orthogonal simulation of the potential energy saving of residential buildings palisade structure in Hubaoe based on DeST. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2016; 33(6): 63—66
- 甄 蒙, 孙 澄, 董 琪. 东北严寒地区农村住宅热环境优化设计. *哈尔滨工业大学学报*, 2016; 48(10): 183—188
Zhen Meng, Sun Cheng, Dong Qi. Thermal environment optimization design of rural residential buildings severe cold regions of north-east China. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2016; 48(10): 183—188

Structural Optimization of Passive Residential in Agricultural and Pastoral Areas of Western Inner Mongolia

JIN Guo-hui¹, ZHANG Dong-jie¹, LI Yu-ze², SHEN Qiang³

(School of Civil Engineering ,Inner Mongolia University of Science and Technology¹ ,Baotou 014000 ,China;

College of Mechanical Engineering and Automation ,Huaqiao University² ,

School of Architecture and Civil Engineering ,Xiamen University³ ,Xiamen 361000 ,China)

[Abstract] In order to improve the indoor thermal environment and reduce the heating energy consumption of the passive residential buildings in western Inner Mongolia , an investigation was conducted on the passive residential buildings , with the factors influencing the heating energy consumption in winter selected and quantified. The energy consumption simulation and analysis software DeST-h and orthogonal experiment method were used to study 7 main factors , including residential orientation , Southward window-wall ratio , northward window-wall ratio , transparent envelope material , insulation layer thickness , non-transparent envelope material , and depth of added sunlight. Through the analysis of 18 kinds of combination schemes , the optimal combination mode was obtained with heating energy consumption as the evaluation index. Finally , a prediction model of passive residential heating energy consumption in western Inner Mongolia was established , which provided a reference for the design of passive housing in agricultural and pastoral areas. The research results can improve the level of energy saving design of passive housing in agricultural and pastoral areas.

[Key words] farming and stock raising residential heating energy consumption extra sun room orthogonal optimization