

辽南地区农村住宅优化设计

邵妮娜, 张吉礼, 马良栋*

(大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 面向辽宁南部地区农村住宅,对住宅围护结构热工性能、冬季室内热环境等方面展开实地调研,提出基于自然室温的农村住宅优化设计方法,并基于正交试验设计通过数值模拟分析研究围护结构各参数、平面布局、住宅体型对室内温度的影响.结果表明:南向窗墙比是影响室内温度的主要因素,南向窗户尺寸是农村住宅优化设计的重点.依据获得的各参数最佳组合,提出一套适用于辽宁南部地区的优化住宅,为该地区新农村建设提供理论指导.

关键词: 农村住宅;住宅优化;正交试验;低能耗;TRNSYS

中图分类号: TU111.195 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201604010

0 引言

近几年,节能、低碳、可持续已成为社会发展的主流.据2012年数据统计,我国建筑总能耗为8.62亿tce,农村住宅能耗占建筑总能耗的1/3,其单位面积用能 11 kgce/m^2 ,更是高于城镇住宅的单位面积用能 9 kgce/m^2 ^[1].农村住宅建造不规范,外墙、屋顶、门窗仍采用传统做法,围护结构保温性能差,冬季冷风渗透严重等,皆是农村用能量大、能耗强度高的主要原因^[2-5].优化住宅热工性能、规范农村住宅建造是降低农村住宅能耗、实现农村住宅可持续发展的重要手段.

本文以辽宁南部地区农村住宅为例,在实地调研了解农村住宅现状基础上,采用数值模拟方

法分析研究围护结构各参数对室内温度的影响,确定室内温度的主要影响因素及各参数的最佳组合形式,以此得到适用于辽宁南部地区的优化住宅,为该地区新农村建设提供理论指导.

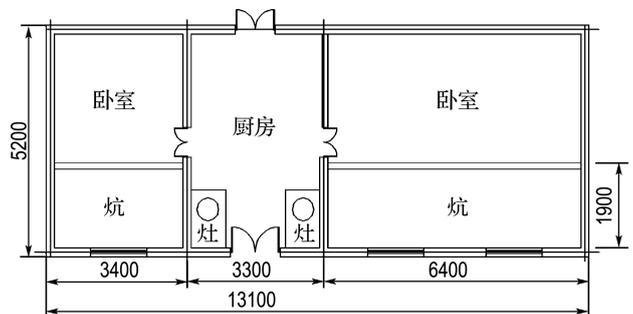
1 农村住宅现状

为获取农村住宅平面布局及围护结构、建造施工、室内热环境等情况,课题组于2013年8月面向大连市安波镇4个典型村102户住户展开调研,并于2014年1月19日至2月25日连续测试5户典型传统住宅卧室温度,拍摄记录墙面温度.

图1为辽宁南部地区典型农村住宅外观及室内布局形式.从调研情况来看,辽宁南部地区农村



(a)



(b)

图1 典型农村住宅外观及室内布局

Fig. 1 Appearance and indoor layout of typical rural residence

住宅外墙、屋顶、门窗等围护结构仍采用传统做法. 外墙以砖石结构为主, 无保温措施, 传热系数约 $3.24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. 窗户多采用单层塑钢、木质窗框, 木窗由当地木工加工定做, 密闭性差, 使用一段时间后易发生变形, 冷风渗透严重, 传热系数为 $3.5 \sim 5.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. 屋顶以“檩子+椽子”为构架, 其上敷设 8 mm 石瓦, 无保温措施, 传热系数约 $0.95 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. 整体而言, 住宅保温隔热性能差, 不利于营造舒适的室内热环境. 除此之外, 由于住宅进深较短, 在 $5 \sim 6 \text{ m}$, 不论采用当地

较常见的“一明两暗式”或部分住宅采用的“南北通透式”平面布局, 北向墙体冷辐射均会直接影响住宅热环境, 降低室温.

图2给出了测试期间住宅室内外温度分布状况, 农村住宅室内温度整体偏低, 绝大部分温度处在 $9 \sim 14 \text{ }^\circ\text{C}$, 部分住宅温度甚至在 $4 \sim 12 \text{ }^\circ\text{C}$, 住宅冬季较冷. 为改善住宅热环境, 降低采暖能耗, 有必要从影响室内温度的因素着手, 对农村住宅进行优化.

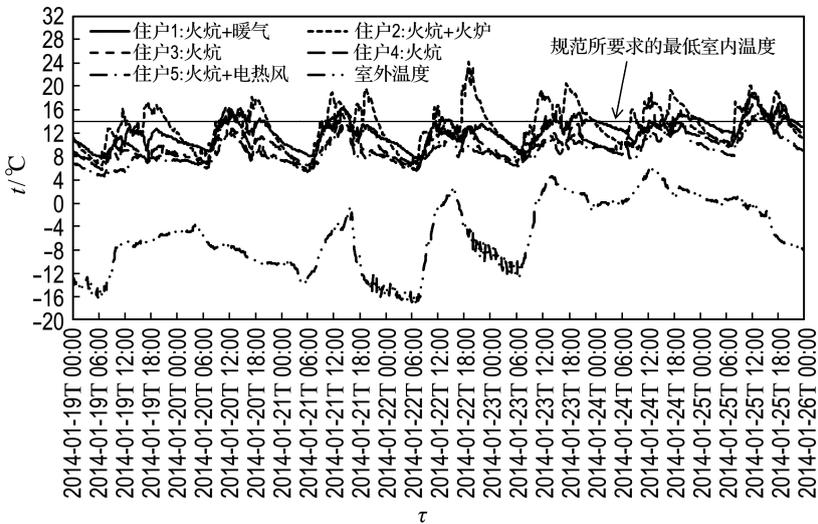


图2 测试期间住宅室内外温度

Fig. 2 Indoor and outdoor temperature of residence during test period

2 基于自然室温的农村住宅优化

2.1 研究方法

目前, 国内外建筑优化、改造及设计大多以建筑冷热负荷为研究基准, 通过设定室内温度在规范要求的范围内模拟建筑全年总耗热量, 以耗热量的大小判断确定最优方案^[6-9]. 农村住宅由于面积小, 自身耗热量相对较低, 受模拟计算误差影响, 不同模拟条件下的住宅耗热量相差不大, 因此对于农村住宅而言, 通过判定耗热量大小确定住宅是否最优并不理想.

被动式住宅旨在通过提高住宅自身性能而非过多依赖其他手段降低能源消耗量, 使室内温度满足住户要求, 室内温度不能满足要求时再在此基础上借助其他手段. 当住宅无采暖时, 室内温度的高低反映出住宅的性能优劣, 此时室内温度即为自然室温, 其数值越高, 住宅性能越好. 在东北农村, 受生活模式、生活习惯的影响, 农户对不

同房间的温度需求不同^[10], 主卧的温度需求明显高于其他房间. 这就要求农村住宅设计时, 应尽量提高主卧温度. 为此本文在住宅无热源情况下进行模拟, 以各房间自然温度作为模拟目标, 通过比较模拟目标值确定住宅最优方案.

建筑室内温度的影响因素众多, 涉及墙体、屋顶、门窗等建筑围护结构、平面布局、体型系数等, 而体型系数又受住宅进深、开间、高度控制, 若每个因素有3种取值, 则共有 3^7 种方案, 即 2 187 种, 若采用能耗模拟软件进行研究则意味着相当大的工作量. 为降低模拟分析工作量, 提高研究效率, 这里采用正交试验指导模拟.

2.2 正交试验设计

正交试验能否以少量的试验次数较准确地反映结果, 关键在于因素及对应水平值的选取^[11-12]. 考虑到初期对问题的简化以及研究时间、模拟规模, 选定9个影响因素, 表1给出了模拟因素及水平. 根据选取的因素及水平选用 $L_{18}(2 \times 3^7)$ 正交表.

表1 正交试验模拟因素及对应水平

Tab.1 Simulation factor and level of orthogonal experiment

水平	A	B	C	D	E	F	G	H
	外墙保温 层厚度/mm	屋顶保温 层厚度/mm	窗户类型	南向窗墙 比/%	北向窗墙 比/%	住宅 进深/m	辅助房间 进深/m	住宅 高度/m
1	40	40	单框单层塑钢	10	0	6	0	2.8
2	60	60	双框单层塑钢	20	10	7	1.5	3.0
3	80	80	单框双层塑钢	30	20	8	2.0	—

注:辅助房间指北向房间及门斗

2.3 模拟工况

本文采用 TRNSYS (transient system simulation program, 瞬态系统模拟程序) 软件进行研究, TRNSYS 最初由美国威斯康星大学开发设计, 后经欧洲一些研究所逐步完善, 是目前使用较广、可靠性较高的商业软件. 建筑模型平面布局采用辽西南部地区农村最常见的典型四间房形式 (平面图见图 1(b)), 外墙为 300 mm 水泥实心砖, 砂浆厚 20 mm; 屋顶为钢筋混凝土, 屋面敷设灰色玻纤瓦; 采用 EPS (聚苯板) 保温, 受其价格及传热系数变化率的综合制约, 外墙、屋顶的保温层选用投入产出比较高的 40、60、80 mm 3 种厚度; 窗户类型共 3 种, 单框单层塑钢、双框单层塑钢、单框双层塑钢. 气象参数取软件自带的大连典型气象年数据. 农村住宅属低层建筑, 冷风渗透可忽略热压, 只考虑风压作用, 通过渗透次数来确定, 其数值为房间不同朝向的冷风渗透空气量与该房间体积之比, 其中冷风渗透空气量为当地室外平均风速下每米门窗缝隙渗入室内的空气量、门窗缝隙计算长度与渗透空气量的朝向修正系数三者之积. 模拟在住宅无热源情况下进行, 即自然室温下, 其结果以建筑主卧平均自然温度及其他房间平均自然温度为指标, 采用综合平衡法对结果进行分析. 综合平衡法先对单项指标进行分析, 找出各项指标较优的水平值, 再将各项指标较优的水平值综合平衡, 进而确定兼顾各项指标都尽可能好的因素组合.

2.4 试验结果分析讨论

表 2 给出了基于 TRNSYS 软件模拟得到的采暖季 (12 月至次年 3 月) 住宅主卧及其他房间平均温度情况.

在上述模拟方案中, 17 号试验主卧平均温度及其他房间平均温度均达到最大值, 然而由于进行的 18 次试验仅占全面试验 $2 \times 3^7 = 4\ 374$ 的 $1/243$, 通过直接对比得到的最优因素组合并不一

定是全面试验中最好的组合. 极差分析通过分组控制其他因素在各组中出现的频数相同以保证其对指标影响对等, 通过比较待研究因素各水平对应指标和的大小确定该因素不同水平的优劣程度, 通过对比各因素极差大小确定因素对指标的影响程度. 具体如下: 若要求指标越大越好, 则指标和最大时对应的水平值即为该因素的好水平; 因素极差越大, 表明该因素对指标影响程度越大. 该分析方法在比较某一因素不同水平优劣程度及不同因素对指标的影响程度时消除了其他因素对指标的影响, 较直接对比法能得到更为全面的结论. 极差分析结果见表 3.

表 2 正交试验的室内温度模拟结果

Tab.2 Simulation results of indoor temperature in orthogonal experiment

试验号	因素								指标	
	A	B	C	D	E	F	G	H	主卧平均 温度/℃	其他房间 平均温度/℃
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.65	1.35
2	1	2	2	2	2	2	2	1	2.97	1.94
3	1	3	3	3	3	3	3	1	4.36	2.84
4	2	1	1	2	2	3	3	1	2.63	1.66
5	2	2	2	3	3	1	1	1	3.89	3.21
6	2	3	3	1	1	2	2	1	2.24	1.64
7	3	1	2	1	3	2	3	1	1.80	1.25
8	3	2	3	2	1	3	1	1	3.00	2.51
9	3	3	1	3	2	1	2	1	4.30	2.87
10	1	1	3	3	2	2	1	2	3.36	2.69
11	1	2	1	1	3	3	2	2	1.78	1.08
12	1	3	2	2	1	1	3	2	3.69	2.47
13	2	1	2	3	1	3	2	2	3.66	2.60
14	2	2	3	1	2	1	3	2	2.48	1.72
15	2	3	1	2	3	2	1	2	2.16	1.78
16	3	1	3	2	3	1	2	2	3.45	2.37
17	3	2	1	3	1	2	3	2	4.45	3.32
18	3	3	2	1	2	3	1	2	2.00	1.69

表3 正交试验极差分析结果

Tab.3 Range analysis results of orthogonal experiment

因素	主卧温度					其他房间温度				
	I	II	III	R	最优水平	I	II	III	R	最优水平
A	17.81	17.06	19.00	1.94	3	12.37	12.61	14.01	1.64	3
B	16.55	18.57	18.75	2.20	3	11.92	13.78	13.29	1.86	2
C	16.97	18.01	18.89	1.92	3	12.06	13.16	13.77	1.71	3
D	11.95	17.90	24.02	12.07	3	8.73	12.73	17.53	8.80	3
E	18.69	17.74	17.44	1.25	1	13.89	12.57	12.53	1.36	1
F	19.46	16.98	17.43	2.48	1	13.99	12.62	12.38	1.61	1
G	16.06	18.40	19.41	3.35	3	13.23	12.50	13.26	0.76	3
H	26.84	27.03	—	0.19	2	19.27	19.72	—	0.45	2

注：I、II、III分别为各因素所在列水平“1”“2”“3”所对应的指标值之和；

R为极差，即各因素的I、II、III中最大值与最小值之差

分析发现：

(1)围护结构、平面布局等不同因素对住宅室内温度的影响程度不同，本文中农村住宅各因素对室内主卧温度的影响程度依次为南向窗墙比(D) > 辅助房间进深(G) > 住宅进深(F) > 屋顶保温层厚度(B) > 外墙保温层厚度(A) > 窗户类型(C) > 北向窗墙比(E) > 住宅高度(H)；对辅助房间温度的影响程度依次为南向窗墙比(D) > 屋顶保温层厚度(B) > 窗户类型(C) > 外墙保温层厚度(A) > 住宅进深(F) > 北向窗墙比(E) > 辅助房间进深(G) > 住宅高度(H)。对住宅主卧温度、其他房间温度而言，南向窗墙比均为主要影响因素，因此对住宅进行优化设计时，优化重点为南向窗户尺寸。

(2)因素D(南向窗墙比)、G(辅助房间进深)、F(住宅进深)、A(外墙保温层厚度)、C(窗户类型)、E(北向窗墙比)、H(住宅高度)分别取 D_3 、 G_3 、 F_1 、 A_3 、 C_3 、 E_1 、 H_2 时，住宅主卧温度、其他房间温度均达到各因素对应的最大值；因素B(屋顶保温层厚度)对其他房间温度为主要影响因素，对主卧温度为次要影响因素，由综合平衡法的一般原则可知当各指标的重要性不一样时，选取水平应保证重要的指标^[11]，故取 B_3 。经综合平衡，最后得到的较优的组合为 $A_3B_3C_3D_3E_1F_1G_3H_2$ 。该优化组合条件下，采暖期间住宅主卧平均温度为 $5.91\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，其他房间平均温度为 $4.30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，均高于表2中18次模拟温度。

3 农村住宅优化对比

3.1 优化方案选取

由综合平衡法得到的优化组合具体如下：外墙保温层厚度为80 mm、屋顶保温层厚度为80 mm、单框双层塑钢、南向窗墙比30%、北向无窗、

住宅进深6 m、辅助房间进深2 m、住宅高度3 m。理论上该优化组合为全面试验的最优组合形式，然而住宅优化设计时还需考虑实际情况。上述优化组合中，北向无窗，只能通过相邻房间透过的光提高亮度，房间较暗，不能满足农户对住宅亮度的需求。另外研究表明，建筑总进深越小对提高室内主要房间温度越有利，但在北向辅助房间进深一定时，南向主要房间的进深也随之减小，狭小的空间使得农户日常活动受限。为提高房间亮度、满足农户对主要房间面积的基本需求，对优化组合参数进行调整，调整后的方案为北向墙体设窗户，窗户面积尽可能小，窗墙比取10%，住宅进深为7 m，其他参数均不变。调整后的优化方案中，采暖期间住宅主卧平均温度为 $5.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，其他房间平均温度为 $3.77\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。室内温度较最优方案有所降低，但较已进行的18次试验均高，可认为调整后的方案较优，且调整后的优化方案中房间亮度提高，更贴近农户对住宅亮度需求。调整后的优化方案平面图见图3。

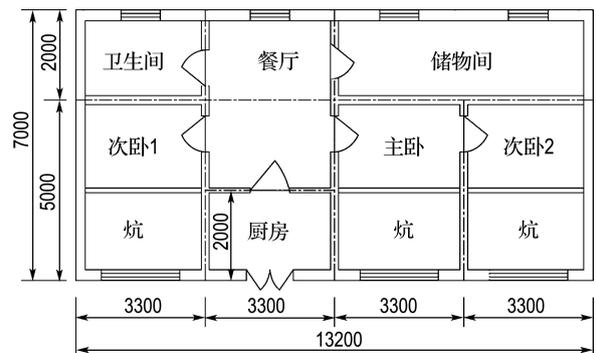


图3 农村住宅优化平面图

Fig.3 Plane graph of optimized rural residence

3.2 优化效果

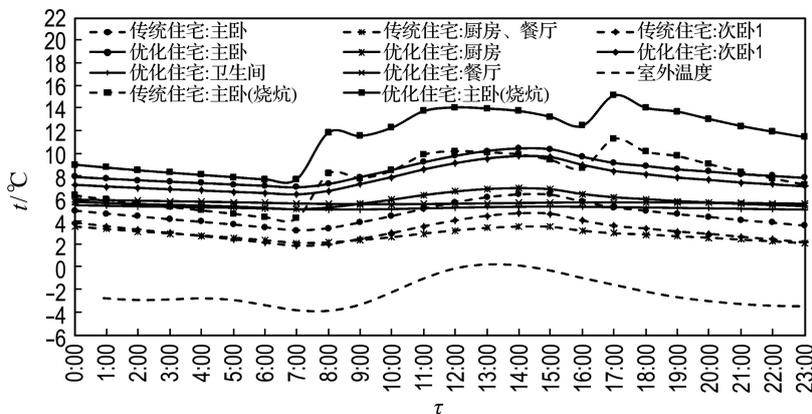
传统住宅、优化住宅、设计标准围护结构热工参数、平面布局、体型系数对比见表4。较传统农村住宅而言,优化后的住宅增设保温层,热工性能得到提高;住宅进深、高度变大,体型系数减小,降低

了单位面积耗热量;平面布局由简单的南北通透式转变为单元化的布局形式,辅助房间的存在相当于在南向主要房间与北向墙体之间增设温度缓冲空间,南向主要房间温度提高了近4℃。图4给出了传统住宅与优化住宅在1d内的室内温度对比情况。

表4 传统住宅、优化住宅、设计标准围护结构热工参数、平面布局、体型系数对比

Tab. 4 Comparison of thermal parameter of building envelope, plane layout, shape coefficient of traditional and optimized residence and design standard

住宅类型	围护结构传热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)				平面布局	体型系数	
	外墙	屋顶	门	窗			
传统住宅	3.24	0.95	4.25~5.80	3.5~5.8	一明两暗式、南北通透式	0.89	
优化住宅	0.39	0.47	1.80	2.6	单元化式	0.77	
农村居住建筑节能设计标准	0.65	0.50	2.50	南向 2.8	其他 2.5	主要房间布置在南侧或内墙侧, 辅助房间布置在北侧或外墙侧	—



注:烧炕时间为早上7:00~8:00,中午10:00~10:30,晚上16:00~17:00

图4 传统住宅与优化住宅室内温度对比

Fig. 4 Comparison of indoor temperature of traditional residence and optimized residence

4 结 语

本文提出以温度为参考标准的住宅优化设计方法,以室内温度作为模拟目标,基于 TRNSYS 数值计算软件模拟研究建筑围护结构热工参数、平面布局、住宅体型等对室内温度的影响,通过对各试验工况下室内温度变化情况,确定了影响室内温度的主次因素:对于农村住宅主卧而言,南向窗墙比为主要影响因素,其次为辅助房间进深、住宅进深、屋顶保温层厚度,北向窗墙比和住宅高度对主卧温度影响非常小;对其他次要房间而言,南向窗墙比仍然为主要影响因素,其次为屋顶保温层厚度、窗户类型、外墙保温层厚度、住宅进深及北向窗墙比,辅助房间进深和住宅高度对其影响很小。影响室内温度的主次因素的确定为住宅优化设计找到了行之有效的突破口,设计人员在

住宅优化设计时可根据各因素的主次顺序来确定重点优化部位。另外,本文提出的优化住宅较传统住宅围护结构热工性能、平面布局、体型系数均有改善,且主要房间温度提高了近4℃,可作为辽宁南部地区新农村建设的参考。

参考文献:

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 2012 中国建筑节能年度发展研究报告[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
Building Energy Conservation Research Center, Tsinghua University. **China Building Energy Efficiency Annual Development Report in 2012** [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012. (in Chinese)
- [2] 李刚,冯国会,王丽,等. 严寒地区农村住宅节能改造能耗模拟[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学

- 版), 2012, **28**(5):884-890.
- LI Gang, FENG Guo-hui, WANG Li, *et al.* Energy consumption simulation and analysis on energy saving reconstruction of rural house in China extreme cold areas [J]. **Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)**, 2012, **28**(5):884-890. (in Chinese)
- [3] 杨旭东, 郑竺凌, 单明, 等. 新农村房屋节能技术[M]. 北京: 中国社出版社, 2006.
- YANG Xu-dong, ZHENG Zhu-ling, SHAN Ming, *et al.* **The New Rural Building Energy Saving Technology** [M]. Beijing: China Society Press, 2006. (in Chinese)
- [4] 程强. 北京延庆地区农村住宅节能设计研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
- CHENG Qiang. A research of rural housing energy-saving in Yanqing district of Beijing [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese)
- [5] 郑竺凌, 李永红, 杨旭东. 北京市农村住宅节能研究[J]. 建筑科学, 2008, **24**(4):9-14.
- ZHENG Zhu-ling, LI Yong-hong, YANG Xu-dong. Study on energy efficiency of rural residential building in Beijing [J]. **Building Science**, 2008, **24**(4):9-14. (in Chinese)
- [6] WANG Li-ping, Gwilliam J A, Jones P. Case study of zero energy house design in UK [J]. **Energy and Buildings**, 2009, **41**(11):1215-1222.
- [7] 詹翔, 李文龙, 胡铁军. 重庆地区建筑围护结构形式对能耗的影响[J]. 建筑技术, 2012, **43**(6):554-556.
- ZHAN Xiang, LI Wen-long, HU Tie-jun. Influence of building enclosure structure on building energy consumption in Chongqing [J]. **Architecture Technology**, 2012, **43**(6):554-556. (in Chinese)
- [8] 李爱旗, 白雪莲. 居住建筑能耗预测分析方法的研究[J]. 建筑科学, 2007, **23**(8):32-35.
- LI Ai-qi, BAI Xue-lian. Study on predication of energy consumption in residential buildings [J]. **Building Science**, 2007, **23**(8):32-35. (in Chinese)
- [9] 李国富, 韩学廷, 朱建章, 等. 围护结构热工性能权衡判断方法探讨[J]. 建筑技术, 2013, **44**(3):219-221, 263.
- LI Guo-fu, HAN Xue-ting, ZHU Jian-zhang, *et al.* Exploratory discussion on methodology for building envelope trade-off option [J]. **Architecture Technology**, 2013, **44**(3):219-221, 263. (in Chinese)
- [10] MA Liang-dong, SHAO Ni-na, ZHANG Ji-li, *et al.* A study on indoor thermal environment of rural residence in south Liaoning province [J]. **Procedia Engineering**, 2016, **146**:366-374.
- [11] 赵选民. 试验设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- ZHAO Xuan-min. **Experimental Design Methodology** [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [12] 《正交试验法》编写组. 正交试验法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1976.
- Orthogonal Experiment Method Writing Group. **Orthogonal Experiment Method** [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1976. (in Chinese)

Optimization design of rural residence in southern region of Liaoning province

SHAO Ni-na, ZHANG Ji-li, MA Liang-dong*

(School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Aiming at rural residence in southern region of Liaoning province, a site survey is carried out on thermal performance of building envelopes and indoor thermal environment in winter. And rural residential optimization design method based on natural indoor temperature is given. The influence of parameters of building envelope, plane layout and building shape on indoor temperature is studied through numerical simulation by using orthogonal experimental design. The simulation results indicate that south window to wall ratio is the main factor that influences indoor temperature and the size of south window is the key point for rural residential optimization design. According to the obtained optimal combination of parameters, an optimized residence is proposed, which can be applied to southern region of Liaoning province. It will provide theoretical guidance to new rural construction in this region.

Key words: rural residence; residential optimization; orthogonal experiment; low energy consumption; TRNSYS