

# 内蒙古西部草原民居太阳能、风能集成供热系统

金国辉<sup>1,2</sup> 杨鹏<sup>1\*</sup> 丁超<sup>1</sup> 王振华<sup>1</sup> 梁娜飞<sup>1</sup>

(1. 内蒙古科技大学土木工程学院 包头 014010;

2. 西部绿色建筑国家重点实验室/西安建筑科技大学 西安 710043)

## Residential Heating in Western Inner Mongolia with Clean Solar-Wind Energies: A Simulation Study

Jin Guohui<sup>1,2</sup>, Yang Peng<sup>1\*</sup>, Ding Chao<sup>1</sup>, Wang Zhenhua<sup>1</sup>, Liang Nafei<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering Inner Mongolia University of Science and Technology Baotou 014010, China;

2. State Key Laboratory of Western Green Building Xi'an University of Architecture and Technology Xi'an 710055, China)

**Abstract** The energy consumption for heating a three-bedroom house in western Inner Mongolia by solid fuel burning in adobe-bed and with solar/wind energies, was modeled and simulated with Design-Builder software. The novel heating system comprises windmill generator, batteries, solar panels, energy-saving construction materials, electrical heaters and control unit. The simulated results show that the newly-developed residential heating makes the difference. For example, the annual energy consumption decreases by 10994.71 kW·h, a reduction by 62.69%; the temperatures in master/second bedrooms and sitting-room increase by 7.05°C, 5.29°C and 3.38°C, respectively. Moreover, the investment recovery period was estimated to be 16.99 years. We suggest that the residential heating with solar-wind energies be of some technological interest in construction and interior-decoration of houses in western Inner Mongolia, because of greater economic and social impact, better living comfort, and less carbon-dioxide release.

**Keywords** Western Inner Mongolia, Prairie houses, Solar energy, Wind energy, Integrated heating

**摘要** 为解决内蒙古西部草原民居室内供热系统热效率低下而造成的室内热环境质量差、能源浪费量大及经济效益差的问题。文章构建了太阳能、风能集成供热系统,利用 Design-Builder 分析了土暖气+吊炕与集成供热系统两种不同的供热方式在内蒙古西部草原民居的能源消耗量及热环境状况。通过增量成本支出、年运行费用降低额及盈利能力分析,计算出了集成供热系统的投资回收期。结果表明:集成供热系统每年可减少能耗 10994.71 kWh,采暖能耗降低率为 62.69%;在集成供热系统下主卧温度提高了 7.05°C、PMV 值提高了 1.69,客厅温度提高了 3.38°C、PMV 值提高了 1.1,次卧温度提高了 5.29°C、PMV 值提高了 2.27;集成供热系统方案静态投资回收期为 16.99 年,  $P_i < P_c$ , 方案可行。

**关键词** 内蒙古西部 草原民居 太阳能 风能 集成供热

中图分类号: TU111.19

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjovst.2020.08.12

内蒙古西部分布了全区 27% 的牧区及 33% 半牧区,受到地理、交通及经济的影响,内蒙古西部农牧区发展较为缓慢。当地草原民居住宅大多建于

2000-2005 年,建筑室内供暖系统单一、围护结构热工性能较差,且在供暖周期内所需煤炭等石化能源消耗量较大。近些年,随着新农村建设与农村人

收稿日期: 2019-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51768053); 内蒙古自然科学基金项目(2019MS05007, 2017MS(LH)0532); 西部绿色建筑国家重点实验室培育基地开放研究基金资助(编号: LSKF201803)

\* 联系人: Tel: 15661669960; E-mail: yangpeng071558@163.com

居环境整治行动的推进落实,内蒙古西部草原民居在室内供暖方面有了一定的改善,土暖气与吊炕代替了原来的火炉与落地炕,但土暖气与吊炕组合供暖的方式依旧存在着一定的缺陷。所以,如何改变内蒙古西部草原民居当前存在的痛点、提出高效节能的供暖方案,成为了一项重要课题。

在民居室内供热系统方面,许多学者做了广泛的研究。林丽琼<sup>[1]</sup>在北方农村地区提出了太阳能、风能与地源热泵互补的供热系统,并定量分析出互补供热系统的环境影响、能源消耗和技术经济效益。王博渊等<sup>[2]</sup>提出了基于太阳能的多能源互补供热装置,利用 Trnsys 构建装置模型并利用实测数据进行了验证;邹晓锐等<sup>[3]</sup>提出了太阳能和地源热泵生活热水系统复合式供暖模式,通过动态模拟软件对不同组合下系统性能进行考察,并对试验结果统计分析,得出复合式热水系统中主要的设备及控制参数的最优匹配方案;郭宏伟等<sup>[4]</sup>对寒冷地区空气源热泵耦合太阳能集热器系统在供暖期的运行能效进行了评价,为多能供热系统在寒冷地区的能效评价计算方法提供参考。综上所述,对民居室内供热系统的研究大多以太阳能与热泵的结合为主,对太阳能、风能多能集成供热系统的研究不为常见,因此,研究内蒙古西部草原民居室内集成供热系统对该地区民居建筑降低采暖能耗、提高居住舒适度具有重要意义。

## 1 模型构建及分析

### 1.1 典型民居模型构建

选取内蒙古西部鄂托克旗具有代表性的典型民居作为研究对象,该民居建筑坐北朝南,为单层砖混结构,室内供热系统为土暖气和吊炕。根据测量该建筑开间进深为  $10.2\text{ m} \times 7.2\text{ m}$ ,层高  $3\text{ m}$ ,平面图如图 1 所示。

### 1.2 集成供热系统模型构建

在典型草原民居基础上构建集成供热系统,该系统包括直接受益式透光窗及高侧窗子系统、节能型电炕子系统、风能供热子系统。

#### (1) 直接受益式透光窗及高侧窗子系统

直接受益透光窗是被动式采暖中最高效的方式之一,其特点在于房屋向阳面设置较大面积的透光窗,并配合屋顶高侧窗增加室内阳光直射面积<sup>[5]</sup>。在白天阳光充足的时候,太阳光通过直接

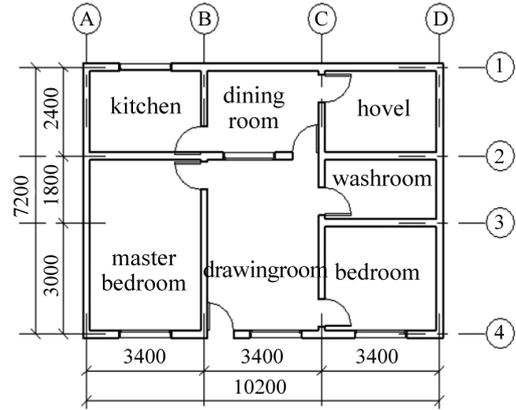


图1 典型民居平面图

Fig.1 Floor plan of the typical residential house

受益式透光窗及高侧窗以太阳能辐射的方式向室内传热,太阳光通过折射、反射将热量保存到空气、墙体中;夜晚太阳能辐射逐渐减少,当室外温度较低时室内温度逐步向室外扩散,此时保温窗帘就有效地减缓了室内热量的流失,使温度保持在一个相对平稳的区间<sup>[6]</sup>。透光窗尺寸设置为  $1.8\text{ m} \times 1.8\text{ m}$ 、材质为  $6 + 12 + 6$  中空玻璃,主卧、次卧及客厅南向各设置一扇。屋顶高侧窗尺寸为  $1.2\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ 、材质为  $6 + 12 + 6$  中空玻璃,设置在客厅屋顶处。直接受益式透光窗及高侧窗子系统如图 2 所示。

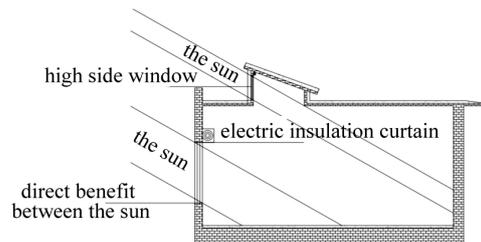


图2 直接受益式透光窗及高侧窗子系统

Fig.2 Schematic diagram of the window structure with high solar energy absorption

#### (3) 节能型电炕子系统

节能型电炕,由炕体、炕面槽、碳钎维电热板、控制器组成,在炕面槽中安装碳钎维电热板,电热板之间由连接线路及开关组成;电热板链接温控器;温控器链接风能发电电源及电网电源,电热板设有过热保护,温度超出设定值后自动断电,每立方功率  $180\text{ W}$ ,温度可通过遥控器及控制器调节<sup>[7]</sup>。主次卧各设置一个电炕,如图 3 所示。

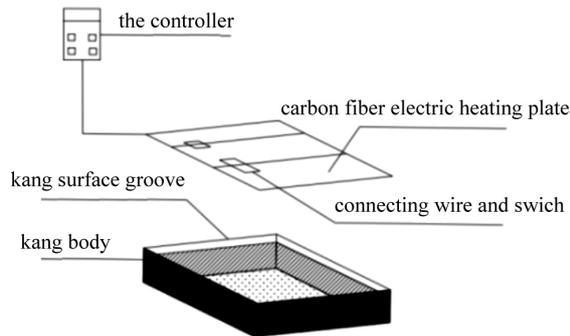


图3 节能型电炕

Fig.3 Schematic representation of the electric heating bed

#### (4) 风能供热子系统

风能供热子系统将风能资源通过风力发电转变为电能,供暖末端为电散热器。电热转化端设有多处接口,除电散热器外,还供给节能型电炕控制器及电动保温窗帘所需电能。风电转化端为家用风力发电机,额定功率范围:1000~5000 W,启动风速2.5 m/s,电散热器功率1500~2000 W<sup>[8]</sup>。电散热器客厅设置3组,主卧设置2组。次卧、厨房及餐厅均设置1组,

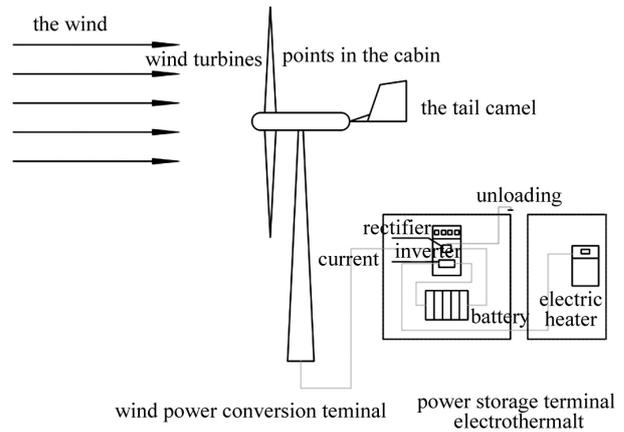


图4 风能供热子系统

Fig.4 Residential heating setup for wind energy

其他房间为非供暖房间。风能供热系统如图4所示。

### 1.3 Design-Builder 模拟分析

在 Design-Builder 中构建典型民居模型及集成供热民居模型,相关系数设置如下:

(1) 围护结构参数设定。围护结构参数如表1所示。

表1 围护结构参数设定

Tab.1 Energy saving architecture and interior decoration design

结构名称	构造做法	传热系数/W/(m <sup>2</sup> ·K)
外墙	20 mm 厚水泥砂浆 + 370 mm 厚烧结砖 + 20 mm 厚水泥砂浆 + 胶粘剂 + EPS 板 + 5 mm 厚抗裂砂浆耐碱玻纤网格布 + 饰面层	0.469
平屋面	饰面层 + 细石混凝土保护层 + XPS 保温板 + 防水层 + 20 mm 厚 1:3 水泥砂浆找平 + 找坡层 + 50 mm 厚混凝土板面	0.419
内墙	5 mm 厚墙漆白色 + 240 mm 烧结砖 + 5 mm 厚墙漆白色	1.681
窗	6 + 12 + 6 中空玻璃	2.508
门	金属保温夹板门	2.7
照度/lx	100	
换气次数/(次/h)	0.5	

(2) 室内人员活动量设定。内蒙古西部人民的生产生活方式主要以畜牧、农耕为主,所以工作日与休息日的设置只针对家中在校青少年,主卧活动人员一般为成年夫妇,人员热扰取值0.93;客厅人员热扰值为所有活动人员热扰的平均数0.84;次卧活动人员为两名青少年,人员热扰取值0.7。

(3) 供暖设置。在主卧设置电炕尺寸3 m × 2 m,功率1080 W,次卧设置电炕尺寸2 m × 2 m,功率720 W;主次卧及客厅设置透光窗1.8 m × 1.8 m,材质为6 + 12 + 6 中空玻璃,客厅屋顶处设置高侧窗尺寸为1.2 m × 0.6 m,材质为6 + 12 + 6 中空玻璃;电

散热器功率每组1500 W,客厅设置3组,主卧设置2组。次卧、厨房及餐厅均设置1组,其他房间为非供暖房间。

## 2 综合效益分析

### 2.1 节能性分析

利用 Design-Builder 分析了土暖气 + 吊炕和集成供热系统两种供热方式在室内最低温度18℃的约束条件下草原民居采暖季室内所需能耗需求量,如图5所示。

利用土暖气 + 吊炕采暖所需能耗为17539.38

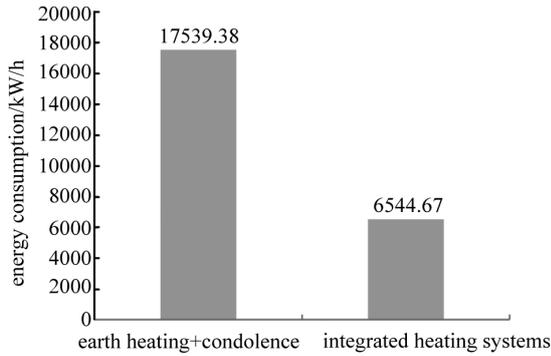


图5 采暖能耗需求对比图

Fig.5 Energy consumption of the conventional and novel heating techniques

$\text{kW} \cdot \text{h}$  集成供热系统采暖所需能耗为  $6544.67 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。二者相比,采用集成供热系统每年可减少能耗  $10994.71 \text{ kW} \cdot \text{h}$ , 采暖能耗降低率为  $62.69\%$ , 大量减少了石化能源的使用量及碳氧化物的排放量。根据煤电折算标准<sup>[9]</sup>,集成供热系统每年采暖季可节约标准煤  $1352.35 \text{ kg}$  折算为原煤  $1892.29 \text{ kg}$ , 减少  $3371.40 \text{ kg}$  二氧化碳、 $329.84 \text{ kg}$  二氧化硫、 $164.92 \text{ kg}$  氮氧化物排放。

### 2.2 热舒适性分析

在土暖气与吊炕的供热系统下鄂托克旗典型草原民居冬季最冷月(1月1日-1月31日)室内热环境状况如图6所示。在集成供热系统下鄂托克旗优化后的草原民居冬季最冷月室内热环境状况如图7所示。

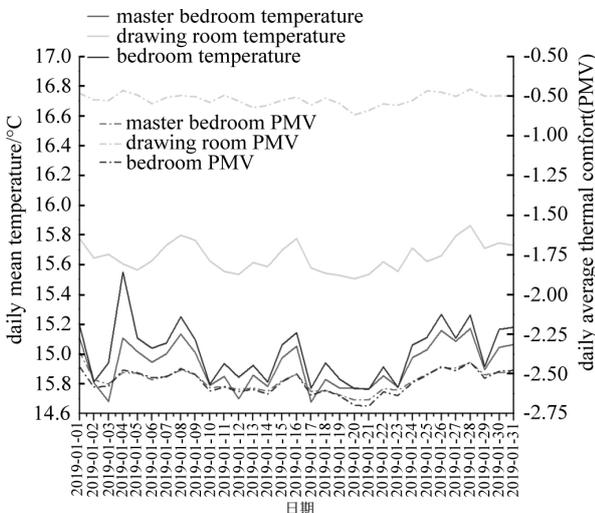


图6 土暖气与吊炕的供热系统下热环境状况

Fig.6 Simulated time evolution of average temperature by conventional heating

《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》中

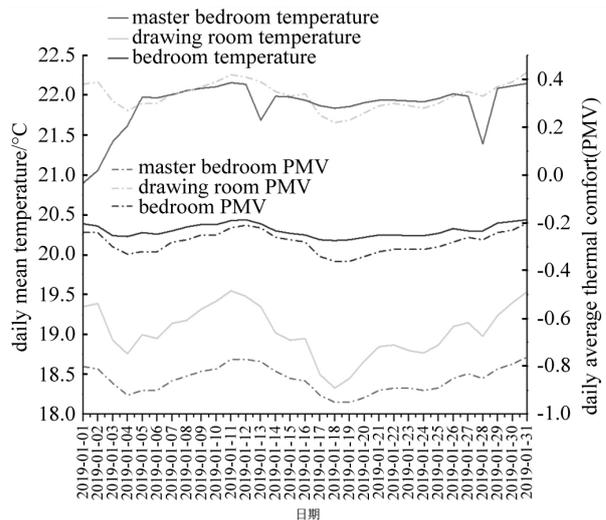


图7 集成供热系统下热环境状况

Fig.7 Thermal environment conditions by novel heating technique

规定冬季室内采暖温度最低值为  $18^\circ\text{C}$ <sup>[10]</sup>, 而该民居冬季最冷月室内平均温度范围为  $14.97 \sim 15.53^\circ\text{C}$ , PMV 值为  $-2.06 \sim -1.84$ 。可见,在土暖气和吊炕结合的供热模式下该民居冬季室内温度和舒适度不能满足人体热舒适的要求。而在集成供热系统下主卧温度提高了  $7.05^\circ\text{C}$ 、PMV 值提高了  $1.69$ 、客厅温度提高了  $3.38^\circ\text{C}$ 、PMV 值提高了  $1.1$ 、次卧温度提高了  $5.29^\circ\text{C}$ 、PMV 值提高了  $2.27$ 。

### 2.3 经济性分析

#### 2.3.1 增量成本支出分析

集成供热系统相比传统供热系统,增设了直接受益式透光窗及高侧窗子系统、节能型电炕子系统、风能供热子系统。通过算量,直接受益式透光窗及高侧窗子系统初期增量成本支出为  $8219.6$  元;节能型电炕子系统初期增量成本支出为  $1600$  元;风能供热子系统初期增量成本支出为  $12070$  元。各子系统均不计期末残值。整个集成供热系统期初增量成本支出为  $21889.6$  元。各子系统细部构造及成本支出如表2所示。

#### 2.3.2 年运行费用降低额分析

通过3.1节的计算,集成供热系统每年采暖季可节约原煤  $1892.29 \text{ kg}$ ,按照目前市场价格每吨原煤  $750$  元的价格,年采暖费用降低  $1419.2$  元。在非采暖期,风力发电系统可供民居室内日常用电,按照每月电费  $30$  元计算,年降低用电费用  $180$  元;在采暖期,除日常生活用电外,风力发电系统还向室内供热,按照每月电费  $40$  元计算,年降低用电费用  $240$  元。综上,集成供热系统每年运行费用降低额为  $1839.2$  元。

表2 各子系统细部构造及成本支出

Tab. 2 Structures and cost of the heating hardware

子系统名称	部件名称	规格型号/做法	价格/元	使用年限/年
直接受益式透光窗 及高侧窗子系统	透明围护集热部件	6 + 12 + 6 中空玻璃, 铝合金窗框	2305.6	30
	外墙保温	60 mm 厚膨胀聚苯板外保温	2784	30
	电动保温窗帘	电机 + 窗帘 + 单轨道	1750	10
	高侧窗	饰面层 + XPS 保温板 + 防水层 + 20 厚水泥砂浆 + 370 厚烧结砖	1380	30
风能供热子系统	风力发电机	2 kW AC48V(含叶片)	4800	30
	6 m 拉索杆	双面热镀锌, 含地下预埋件	1260	30
	蓄电池组	12 V 150 AH(带隔离变压器)	2000	10
	逆变器	2 kW	1570	15
	风机控制器	B-2 kW 48 V	1000	15
	电散热器	1500 W	1440	10
节能型电炕子系统	碳纤维电热板	180 W/m <sup>2</sup>	1600	15

### 2.3.3 盈利能力分析

投资回收期也称返本期,不考虑资金时间价值的情况下,采用静态投资回收期作为集成供热系统方案盈利能力的指标。

静态投资回收期  $p_t$  (以年表示) 的计算公式如下

$$p_t = (\text{累计净现金流量出现正值的年份} - 1) + \frac{\text{上一年累计净现金流量的绝对值}}{\text{出现正值年份的净现金流量}}$$

集成供热系统方案净现金流量如表3所示,基准投资回收期  $P_c$  为30年。

由表3可知,累计净现金流量从第17年开始出现正值,计算得知  $p_t = (17 - 1) + 1822.6/1839.2 = 16.99$  (年),故集成供热系统方案静态投资回收期为16.99年,  $p_t < P_c$ ,该系统经济效益较好。

表3 集成供热系统方案净现金流量

Tab. 3

年份	净现金流量(元)	累计净现金流量(元)
1	-20050.40	-20050.40
2~9	1839.20	-18211.20 ~ -5336.80
10	-3351.00	-8687.80
11~14	1839.20	-6848.60 ~ -1331.00
15	-2330.80	-3661.80
16	1839.20	-1822.60
17	1839.20	16.60
18	1839.20	1855.80
19	1839.20	3695.00
20	-3351.00	344.00
21~30	1839.20	2183.20 ~ 18736.00

### 3 结论

文章以内蒙古西部草原民居为研究对象,构建了集成供热系统,通过计算机模拟及数值分析,得到如下结论:

(1) 集成供热系统较土暖气 + 吊炕的采暖方式年降低采暖能耗 10994.71 kW·h,且集成供热系统节能率为 62.69%,大量减少了石化能源的使用量及碳氧化物的排放量,提高了清洁能源利用率;

(2) 土暖气和吊炕结合的供热模式下该民居冬季室内温度和舒适度不能满足人体热舒适的要求,使用集成供热系统后,该民居冬季最冷月室内主卧温度提高了 7.05℃、PMV 值提高了 1.69,客厅温度提高了 3.38℃、PMV 值提高了 1.1,次卧温度提高了 5.29℃、PMV 值提高了 2.27,且温度与 PMV 值趋于稳定,波动幅度较小;

(3) 整个集成供热系统期初增量成本支出为 21889.6 元,每年运行费用降低额为 1839.2 元,采用工程经济学中静态投资回收期作为方案盈利能力的指标,得出集成供热系统方案静态投资回收期为 16.99 年,方案从第 18~30 均盈利,故方案可行;

### 参 考 文 献

- [1] 林丽琼. 地源热泵与太阳能、风能互补利用效益分析模型[D]. 北京: 华北电力大学, 2015
- [2] 王博渊, 何涛, 黄祝连, 等. 基于太阳能的多能源互补供热装置的研究与开发[J]. 建筑科学, 2017, 33(12): 70-75
- [3] 邹晓锐, 周晋, 邓星勇, 等. 太阳能-地源热泵耦合式热水系统优化匹配研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38

- (05): 1281 - 1290
- [4] 郭宏伟,王宇,高文学,等. 寒冷地区空气源热泵耦合太阳能集热器系统供暖季运行能效评价[J]. 建筑科学 2018, 34(08): 37 - 43 + 50
- [5] 郑瑞澄,路宾,李忠,等. 太阳能供热采暖工程应用技术手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社 2012
- [6] 方蕾,李桂文,方修睦,等. 严寒地区农村住宅保温窗帘的试验分析[J]. 暖通空调 2012, 42(06): 123 - 126
- [7] 王璇,韩伟国. 碳晶电热板辐射采暖系统的研究与应用[J]. 中国新技术新产品 2015(04): 145
- [8] 姜拓,徐飞,闵勇,等. 利用富余风能进行清洁供热的交易机制研究[J]. 中国电机工程学报 2017, 37(15): 4286 - 4295 + 4568
- [9] GB/T2589 综合能耗计算通则[s]
- [10] JGJ26-2018 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准[s].