

西藏地区太阳能采暖建筑热工性能优化研究

王磊¹, 冯雅², 曹友传³, 余南阳¹

(1. 西南交通大学 机械学院; 2. 中国建筑西南设计研究院; 成都 610031;

3. 西藏军区后勤部基建营房处, 拉萨 850000)

摘要: 西藏地区太阳能资源非常丰富且冬季温度低, 该地区非常适合大面积推广太阳能采暖系统, 以达到节能减排的目的。但是由于实际大部分太阳能采暖工程, 忽略了建筑围护对太阳能主动式采暖系统初投资与运行费用的影响, 造成了太阳能主动式采暖系统初投资过高、太阳能保证率低。为了分析建筑热工性能对太阳能主动式采暖系统的影响, 笔者利用数值模拟方法, 将建筑热工性能与主动式太阳能采暖系统作为一个整体进行计算分析, 利用初投资费用最低与全寿命周期总费用最低两个目标函数, 对主动式太阳能采暖建筑热工性能的保温性能进行优化。结果表明, 提高建筑围护结构热工性能, 不仅可以降低太阳能采暖建筑的采暖运行费用, 而且可降低整个系统的初投资。

关键词: 太阳能; 可再生能源; 建筑节能; 建筑能耗分析; EnergyPlus; TRNSYS

中图分类号: TU831 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2013)02-0086-06

Thermal Performance Optimization of Solar Heating Building Envelope in Tibet of China

Wang Lei¹, Feng Ya², Cao Youchuan³, Yu Nanyang¹

(1. School of Mech. Eng., Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. China Southwest Architecture Design & Research Institute, Chengdu 610031, China;

3. Infrastructure Construction Department of Xizang Military Region, Lasa 850000, China)

Abstract: Solar heating system is a promising sustainable energy source for buildings. Simulation models using EnergyPlus and TRNSYS were used to optimize the solar heating building envelope thermal insulation. The sensitive analysis of active solar heating system design parameters and energy consumption was conducted to study the influence of building envelope thermal performance on the active solar heating system. The two object functions, investing cost and life-time cost, were used to optimize the building envelope insulation. The results show that not only the energy consumption can be reduced by increasing the building envelope thermal performance, but also can minimize the investing cost.

Key words: solar energy, sustainable energy, building energy efficiency, building energy simulation, EnergyPlus, TRNSYS

西藏地区气候寒冷、太阳辐射照度高, 并且常规能源匮乏, 当地生态环境脆弱。在西藏地区大力推广太阳能采暖系统有非常重要的现实与战略意义。笔者自 2006 一直从事太阳能采暖系统设计、优化与

施工研究。根据现场实践, 笔者最大感受是业主愿意投资大量资金建设太阳能主动采暖系统, 如安装大面积太阳能集热板, 但不愿对提高建筑围护结构热工性能进行投资, 这就造成了建筑基准能耗过高,

收稿日期: 2012-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(50678163)

作者简介: 王磊(1979-), 男, 博士, 博士(后), 主要从事建筑节能研究, (E-mail) wangleihello@163.com。

在同样太阳能保证率情况下(例如 65%保证率),主动式系统投资过大,系统运行能耗过高。本文以某一典型的实际工程为例,利用建筑动态能耗模拟软件(EnergyPlus 与 TRNSYS)对建筑围护结构热工性能对主动式太阳能采暖系统及系统能耗的影响进行定量分析,从全寿命周期出发确定最优建筑热工保温与主动式采暖系统配置。该新建建筑为西藏地区典型四层条式住宅建筑,建筑总面积为 1 840 m²,其中采暖面积为 1 230 m²,非采暖面积为 610 m²。建筑外墙面积 1 150 m²,外窗面积 422 m²,屋顶面积 457 m²,体型系数为 0.37。对该典型建筑进行研究,其结果具有一定的普遍参考意义。

1 建筑基本情况

新建建筑为 4 层条式住宅建筑,总面积为 1 840 m²,各层房间布局与结构完全一样。建筑为砖混结构,外墙为 240 mm 厚实心砼砖块,内墙为 200 mm 厚实心砼砖块;屋顶为 200 mm 厚现浇钢筋混凝土,20 mm 厚水泥保护层,60 mm 厚炉渣找坡,4 mm 厚 SBS 防水卷材,20 mm 厚水泥砂浆;地面贴砖,卫生间吊顶铝合金;外窗为塑钢单层玻璃;外饰面为弹性涂料。图 1 给出了标准层平面图。

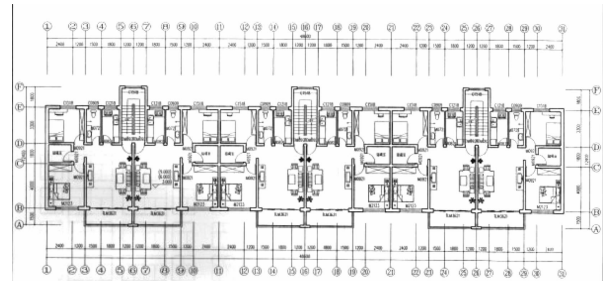


图 1 标准层平面图

2 计算模型及参数

目前建筑动态能耗模拟软件可以分两大类^[3]:
1)建筑能耗模拟软件—此类软件主要用于建筑和系统的动态模拟分析,以 EnergyPlus、DOE-2、DesT 和 ESP-r 等为代表。这类软件的主要模拟目标是建筑和系统的长周期的动态热特性(往往以小时为时间步长),采用的是完备的房间模型和较简单的系统模型及简化的或理想化的控制模型,适于模拟分析建筑物围护结构的动态热特性及模拟建筑物的全年运行能耗。
2)空调采暖系统仿真软件—此类软件主要用于空调系统部件的控制过程的仿真,以 TRNSYS、SPARK 和 HVACSIM+ 等为代表。这类软件的主要

模拟目标是各种模块搭成的系统的动态特性及其在各种控制方式下的响应。它们采用的是简单的房间模型和复杂的系统模型,可以根据需要由使用者灵活地组合系统形式和控制方法,适用于系统的高频(如以几 s 为时间步长)动态特性及过程的仿真分析。
为了研究建筑围护结构动态热特性对主动式太阳能采暖系统的配置优化的影响,需同时采用上述两类软件,对建筑能耗与主动式太阳能采暖系统进行模拟计算。因此分别采用了 EnergyPlus 与 TRNSYS 对建筑能耗与主动式太阳能采暖系统进行模拟计算,其计算模型示意图见图 2 与图 3 所示。EnergyPlus 模型计算所得出的建筑动态负荷,输入 TRNSYS 动态模型中进行主动式太阳能采暖系统模拟计算。

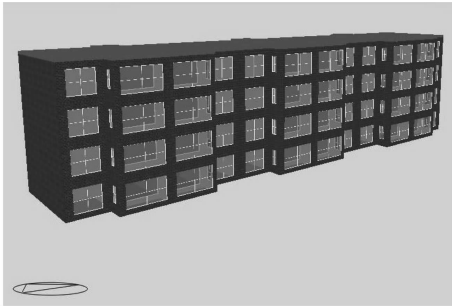


图 2 建筑能耗计算模型

2.1 热工模型输入条件与假设

- 1)围护结构(外墙、屋顶、内墙、外窗)热工性能参数见表 1~表 3 所示。
- 2)建筑换气次数选取 1 次/h
- 3)假设内热源为 0 W/m²。
- 4)房间采暖温度取 18℃
- 5)太阳能集热器选取平板式太阳能集热器,其集热效率选取 ASHRAE Handbook^[5]的典型平板式集热器效率曲线,并选取 0.8 修正系数,以考虑现场因素对集热效率影响。
- 6)室外气象数据选用拉萨市典型气象年^[4]

表 1 现有基准建筑围护结构热工模型

| 材料名称 | 材料厚度/ mm | 导热系数/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹) | 比热容/ (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹) | 热阻/ (m ² · K ⁻¹ · W ⁻¹) |
|--------------|-------------|---|---|--|
| 水泥砂浆 | 20 | 0.93 | 1062 | 0.022 |
| 混凝土砌块 | 240 | 1.28 | 920 | 0.188 |
| 石灰砂浆 | 20 | 0.87 | 1050 | 0.02 |
| 各层之和 | 300 | | | 0.232 |
| Ri + ∑R + Re | | 0.382 (m ² · K ⁻¹ · W ⁻¹) | | |
| 传热系数 | | 2.62 (W · m ⁻² · K ⁻¹) | | |

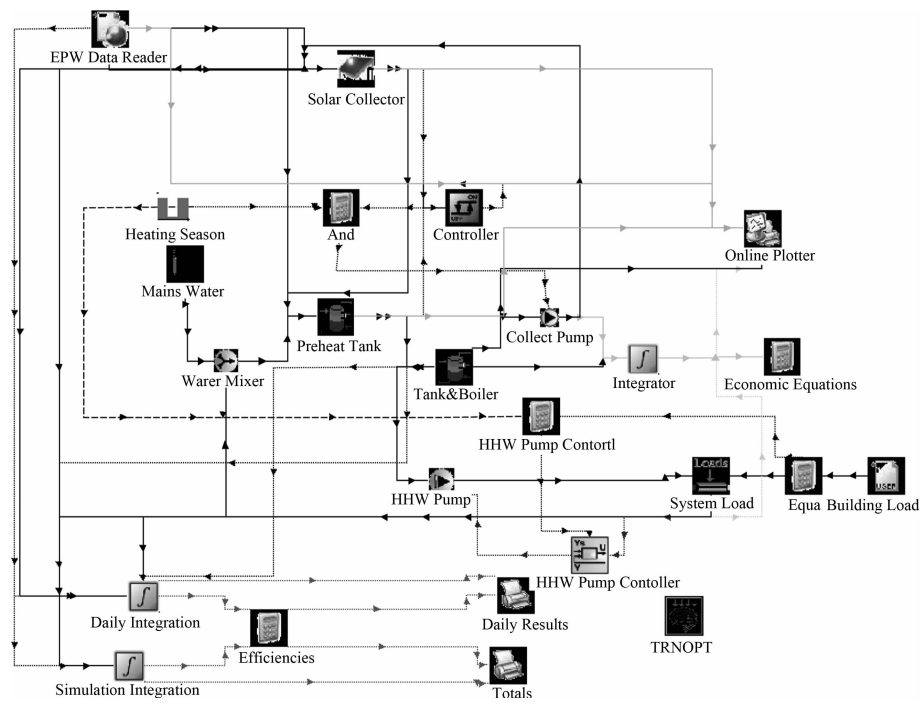


图 3 主动式太阳能采暖系统模型

表 2 建筑物屋顶结构热工参数表

| 材料名称 | 材料厚度/ mm | 导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) | 比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) | 热阻/ ($\text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$) |
|----------------------|-------------|---|---|---|
| 混凝土保护层 | 20. | 1.4 | 840 | 0.014 |
| 防水卷材 | 3. | 0.17 | 400 | — |
| 炉渣找坡 | 60. | 0.86 | 800 | 0.070 |
| 水泥砂浆找平 | 20. | 0.93 | 1062 | 0.115 |
| 钢筋混凝土 | 200. | 1.74 | 920 | 0.022 |
| 各层之和 | 303 | | | 0.22 |
| $R_i + \sum R + R_e$ | | 0.37($\text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$) | | |
| 传热系数 | | 2.7($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) | | |

表 3 建筑物内墙结构热工参数表

| 材料名称 | 材料厚度/ mm | 导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) | 比热容/ ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) | 热阻/ ($\text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$) |
|----------------------|-------------|---|--|---|
| 水泥砂浆 | 20 | 0.93 | 1062 | 0.02 |
| 现混凝土砌块 | 200 | 1.28 | 1000 | 0.156 |
| 石灰砂浆 | 20 | 0.87 | 1050 | 0.02 |
| 各层之和 | 240 | | | 0.201 |
| $R_i + \sum R + R_e$ | | 0.42($\text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$) | | |
| 内墙传热系数 | | 2.37($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) | | |

表 4 建筑物外窗结构热工参数表

| 朝向 | 规格型号 | 窗墙比 | 传热系数 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1})$ | 遮阳系数 |
|----|------|-----|--|------|
| 北 | 塑钢单璃 | 30% | 5.8 | 0.8 |
| 南 | 塑钢单璃 | 60% | 5.8 | 0.8 |
| 东 | — | 0% | — | — |
| 西 | — | 0% | — | — |

2.2 经济模型输入条件与假设

- 1)外窗由单玻改为双玻,初投资增加 200 元/ m^2 。
- 2)屋顶保温采用 XPS 保温,外墙采用 EPS 外墙外保温,初投资增加与保温厚度关系如图 4 所示。
- 3)采暖散热器(铜铝复合)取 700 元/ kW 。
- 4)电锅炉造价取 180 元/ kW 。
- 5)太阳能集热板造价取 600 元/ m^2 。
- 6)蓄热水箱造价取 2 300 元/ m^3 。
- 7)能源单价 0.65 元/ kWh 。

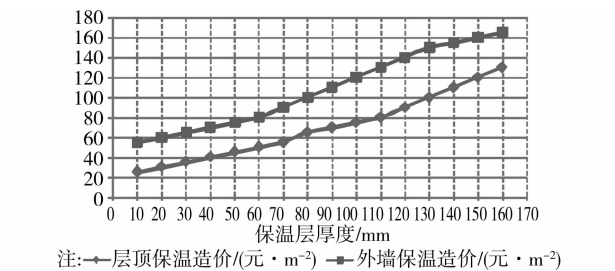


图 4 屋顶与外墙保温成本与厚度关系图

3 计算结果分析

3.1 基准建筑计算结果分析

本文首先对基准建筑的设计负荷、全年动态能耗进行计算,并分析了在基准建筑热工性能条件下,太阳能集热板面积对系统的太阳能保证率与能耗的影响。其计算结果分别见表 5 与图 5。

表 5 基准建筑采暖负荷与能耗结果

| 设计负荷/ kW | 建筑能耗/ kWh | 负荷指标/ (W·m ⁻²) | 能耗指标/ (kWh·m ⁻²) |
|-------------|--------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 137 | 170 135 | 94 | 117 |

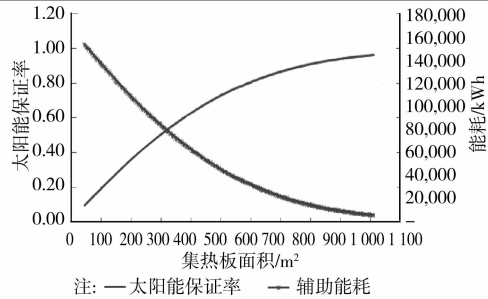


图 5 太阳能保证率、能耗与集热板面积关系图

当太阳能主动式采暖系统选取保证率为 65% 时,对应的太阳能集热板面积为 420 m²,即每平米太阳能板可以服务 3.46 m² 采暖面积。集热水箱的体积与系统保证率的关系如图 6 所示。

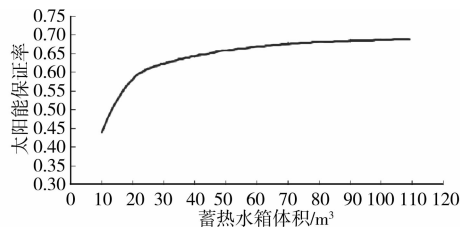


图 6 太阳能保证率与蓄热水箱关系图

从图 6 中可以看出,最优蓄热水箱体积为 42 m³ 即每平米集热板对应于 100 L 蓄热水。采用主动式太阳能采暖系统后,建筑全年的能耗为 59 547 kWh,即 41 kWh/m²。

3.2 不同保温措施热工性能分析

3.2.1 外窗采用中空玻璃(6+6+6) 当外窗由单玻窗,改为双玻窗(6+6+6),建筑的采暖负荷可降低 6%,在满足同样太阳能保证率(65%)条件下,太阳能集热板面积可减少 4.4%,全年能耗减少 4.3%。

3.2.2 增加屋顶保温 屋顶保温层厚度对建筑采暖负荷、集热板面积、全年能耗的敏感性分析见图 7 所示。

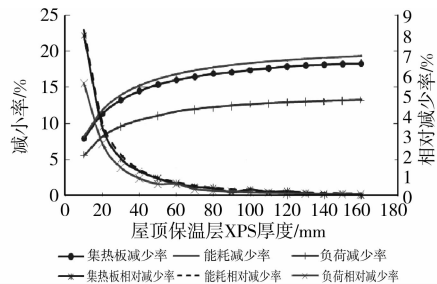


图 7 屋顶保温层 XPS 厚度敏感性分析

从图 7 中可以看出,当屋顶保温层厚度大于 60 mm 时,建筑采暖负荷、集热板面积以及全年能耗的进一步减小的相对变化率低于 1%。此时,建筑采暖负荷降低约 12%,集热板面积降低约 16%,全年能耗降低约 17%。

3.2.3 增加外墙保温 外墙保温层厚度对建筑采暖负荷、集热板面积、全年能耗的敏感性分析见图 8 所示。

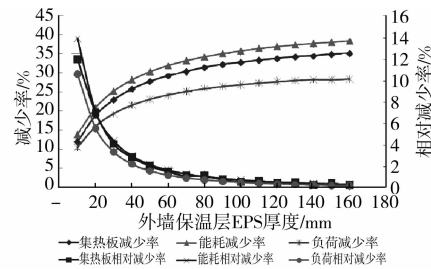


图 8 外墙 EPS 保温厚度敏感性分析

从图 8 中可以看出,当外墙保温厚度大于 50 mm 时,建筑设计负荷、太阳能集热板、全年能耗进一步减少的相对变化率小于 2%。此时建筑采暖负荷率降低了约 23.1%,太阳能集热板面积减少约 27.7%,全年能耗减少约 30.3%。

3.3 不同保温措施经济性分析

在上述敏感性分析的基础上,本节分析建筑热工保温对太阳能采暖系统的初投资、运行费用及全寿命周期费用的影响,以确定最优的建筑热工保温范围。经济计算中,假设建筑保温层与主动太阳能采暖设备系统的寿命为 25 a,不考虑能源价格升高与货币贬值率。

初投资同时考虑,建筑保温提高所造成的投资增加,以及当建筑保温性能提高后,采暖末端、辅助热源、集热板面积、蓄热水箱体积等减少所带来的设备初投资降低。

外窗改为双层玻璃,屋顶保温、外墙保温对建筑与太阳能采暖系统总投资节省、运行费用节省及全寿命周期费用节省的计算结果见表 6,与图 9,图 10,所示。

表 6 外窗计算结果

| 费用节省 | 初投资 | 总运行费用 | 全寿命周期 |
|------------------|---------|--------|--------|
| 元 | -19 628 | 41 625 | 21 980 |
| 元/m ² | -10.7 | 22.6 | 11.9 |

从表 6 中可以看出,当外窗由单玻窗改为双玻窗时,总初投资增加约 19 600 元(10.7 元/m²),总运行费用节省 41 625 元(22.6 元/m²),全寿命周期

费用可以节约 21 980 元(11.9 元/m²)。

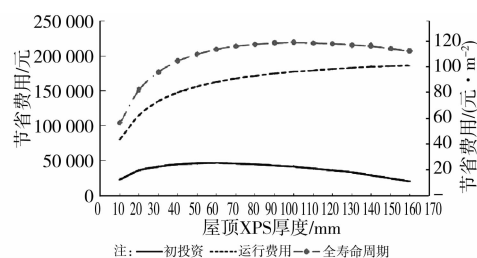


图9 屋顶保温经济性分析

由图9可以看出,当屋顶保温厚度为60 mm时,建筑初投资的节省值最高,约为46 657元(25.4元/m²)。当屋顶保温层厚度为100 mm,全寿命周期节省值最高,约为219 025元(119元/m²),因此对于太阳能采暖建筑屋顶保温层的最优厚度为60~100 mm,对应的传热系数为0.42~0.27 W/m²·K。

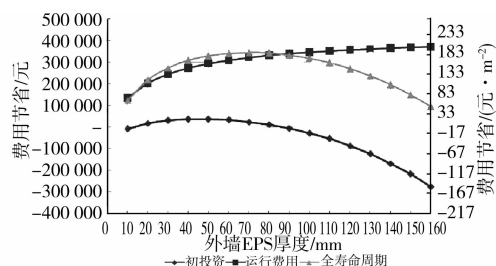


图10 外墙保温经济性分析

图10中可以看出,当外墙保温厚度为50 mm时,初投资费用节省值最高,约为35 793元(19.5元/m²)。当外墙保温层厚度为70 mm,全寿命周期费用节省值最高,约为344 183元(187.1元/m²),因此对于太阳能采暖建筑屋顶保温层的最优厚度为50~70 mm,对应的传热系数为0.60~0.46 W/m²·K。

4 结论

利用数值模拟方法对太阳能采暖建筑的热工性能对主动式太阳能采暖系统设计参数与能耗的影响进行分析。并从初投资与全寿命周期两个方面,确定最佳的太阳能建筑热工性能保温要求,得出了以下结论:

1)当外窗改为中空玻璃时,建筑的采暖负荷降低6%,太阳能集热板面积可减少4.4%,全年能耗减少4.3%。每平方米建筑面积对应初投资增加约10.7元/m²,全寿命周期节省11.9元/m²。

2)当屋顶XPS保温层厚度大于60 mm后,建筑采暖负荷、集热板面积以及全年能耗的相对减小率低于1%。初投资费用最低的屋顶XPS保温层厚

度为60 mm,对应传热系数0.42 W/m²·K,全寿命周期费用最低的屋顶XPS保温层厚度为100 mm,对应的传热系数为0.27 W/m²·K。

3)当外墙EPS保温厚度大于50 mm时,建筑设计负荷、太阳能集热板、全年能耗的相对减少率低于2%。初投资费用最低的外墙EPS保温层厚度为50 mm,对应的传热系数为0.60 W/m²·K;全寿命周期费用最低的外墙EPS保温层厚度为70 mm,对应的传热系数为0.46 W/m²·K。

参考文献:

- [1] Energy Plus. Engineering reference [S]. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2010.
- [2] TRNSYS 16 Manual. Solar energy laboratory [S]. University of Wisconsin-Madison, 2006.
- [3] 燕达, 谢晓娜, 宋芳婷, 等. 建筑环境设计模拟分析软件 DeST 第1讲建筑模拟技术与 DeST 发展简介[J]. 暖通空调, 2004, 34(7): 35-39.
- [4] 宋芳婷, 江亿. 中国建筑热环境分析专用气象数据集 [M]. 中国建筑工业出版社, 2005.
- [5] ASHRAE Handbook HVAC Applications [R]. Chapter 33, SOLAR ENERGY USE, 2007.
- [6] GB 50179—93 建筑气候区划标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1993.
- [7] Weather data for building energy analysis of China [M]. China Architecture & Building Press, 2005.
- [8] Tanbiruj M D J, Masudur M D R, Design of a direct gain passive solar heating system [C]//2010 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Dhaka, Bangladesh, January, 2010.
- [9] Cheung C K, Fuller R J, Luther M B. Energy-efficient envelope design for high-rise apartments [J]. Energy and Buildings, 2005, 37: 37-48.
- [10] Soolyeon C, Jeff S. Haberl, Integrating solar thermal and photovoltaic systems in whole building energy simulation [C]//4th National of IBPSA-USA New York City, New York, August, 2010.
- [11] Lazzarin R M, Castellotti F, Busato F. Experimental measurements and numerical modeling of a green roof [J]. Energy and Buildings, 2005, 37: 1260-7.
- [12] Mei L. Thermal modeling of a building with an integrated ventilated PV facade [J]. Energy and

- Buildings, 2003, 35:605-17.
- [13] Linden B D. Optimization of solar district heating systems: seasonal storage, heat pumps, and cogeneration [J]. Energy, 2000, 25:591-608.
- [14] AlZyood M, Harahsheh H. Thermal economical analysis of renewable energy buildings towards low energy house in Jordan [C]//International Renewable Energy congress, Sousse, Tunisia, November, 2010.
- [15] Neymark J. Applying the building energy simulation test (BESTEST) diagnostic method to verification of space conditioning equipment models used in whole-building energy simulation programs [J]. Energy and Buildings, 2002, 34:917-31.
- [16] ANSI/ASHRAE, Standard 140-2001, Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs, R. American Society of Heating, and Air-Conditioning and Engineers, editors [S]. ASHRAE, Atlanta, GA; 2001.
- [17] Viorel B. Case study for active solar space heating and domestic hot water preparation in a passive house [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2011, 3: 50-55.
- [18] Zogou O, Stamatelos A. Optimization of thermal performance of a building with ground [J]. Energy Convers Manage, 2007, (7):12.
- [19] Viktoria M, Fredrik S. Compact heat storage for solar heating systems [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2009, 131:
- (编辑 胡玲)

(上接第37页)

- Lyu M J, Yan E C. Study on distribution laws of landslide-thrust in double-row embedded anti-slide piles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Sup1): 4866-4871.
- [8] Xiao S G. Comparison of the mechanical characteristics of double-row piles and door-type piles with medium and small row spacing in a large-scale landslide [C]// Proceedings of the 2010 International Conference of Logistics Engineering and Management, Reston; ASCE, 2010.
- [9] 肖世国. 边(滑)坡治理中h型组合抗滑桩的分析方法及工程应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2146-2151.
- Xiao S G. Analytical method for h-type combined anti-slide pile retaining landslide or excavated slope and its application to practical projects [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2146-2151.
- [10] 赵海玲. h形抗滑桩变形性状的研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [11] 张泽坤. h型抗滑桩的有限元分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [12] 戴自航. 抗滑桩滑坡推力和桩前滑体抗力分布规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 517-521.
- Dai Z H. Study on distribution laws of landslide-thrust and resistance of sliding mass acting on antislide piles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 517-521.
- [13] Hassiotis S, Chameau J L, Gunaratne M. Design methods for stabilization of slopes with piles [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(4): 341-323.
- [14] Ito T, Matsui T, Hong W P. Design method for stabilizing piles against landslide-one row of piles[J]. Soils and Foundations, 1981, 21(1): 21-37.
- (编辑 胡英奎)