

# 太阳能-热泵地板供暖系统的热经济性分析

刘立平<sup>1,2</sup>, 阙炎振<sup>3</sup>, 张华<sup>2</sup>

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 上海理工大学动力工程学院, 上海 200093; 3. 上海复旦规划建筑设计研究院, 上海 200433)

**摘要** 建立了太阳能-热泵地板供暖系统的数学模型, 以上海一 300 m<sup>2</sup> 的单体住宅为研究对象, 分析了太阳能集热器的集热效率、面积及价格对太阳能-热泵地板供暖系统的热经济性的影响, 为该系统的设计及应用提供了参考。

**关键词** 太阳能-热泵; 地板供暖; 太阳能保证率; 热经济分析

**中图分类号** TK519 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2009)10-08804-02

## Thermal and Economic Analysis of the Solar Energy-Heat Pump Floor Heating System

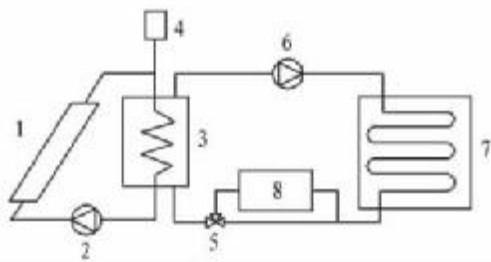
LIU Li-ping et al (College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306)

**Abstract** The mathematical model of the solar energy-heat pump floor heating system was established. Taking a monomer house of 300 m<sup>2</sup> in Shanghai as the study object, thermal and economic effects of solar collector efficiency, area, price on the solar energy-heat pump floor heating system were analyzed which provide the reference for the design and application of the system.

**Key words** Solar energy-heat pump; Floor heating; Solar fraction; Thermal and economic analysis

地板辐射供暖由于其舒适性、热稳定性好, 节能效果显著且清洁卫生<sup>[1]</sup>, 近年在我国应用逐渐增多。地板辐射供暖的热媒是低温热水, 一般不超过 60 °C, 这使得太阳能作为热源成为可能<sup>[2]</sup>。然而, 太阳能具有低密度、间歇性和不稳定性等缺点, 在太阳能应用中需与其他热源联合运行。热泵作为热源具有独特的优势, 它可以节省高品位的电能, 减少化石类能源的消耗, 减少环境的污染。由此可见, 利用太阳能与热泵联合运行作为热源的地板供暖系统是一种有效利用太阳能供暖的理想方式。

太阳能-热泵地板供暖系统包括太阳能集热系统、蓄热系统、热泵系统以及地板辐射供暖系统, 其原理图如图 1 所示。系统运行时优先利用太阳能供暖, 热量不足时, 启动热泵进行供暖。



注: 1 为太阳能集热器; 2 为集热循环水泵; 3 为蓄热水箱; 4 为膨胀水箱; 5 为三通阀; 6 为地暖循环水泵; 7 为供暖盘管; 8 为热泵。

Note: 1 stands for solar collector; 2 stands for collector cycling water pump; 3 stands for heat storage water tank; 4 stands for expansion water tank; 5 stands for triple valve; 6 stands for floor heating cycling water pump; 7 stands for heat coil; 8 stands for heat pump.

图 1 太阳能-热泵地板供暖系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of the solar energy-heat pump floor heating system

## 1 系统数学模型

### 1.1 太阳能集热器模型 该研究采用平板太阳能集热器,

基金项目 上海重点建设课程(6700308)。

作者简介 刘立平(1974-), 女, 辽宁铁岭人, 博士, 讲师, 从事太阳能热利用方面的研究。

收稿日期 2009-03-20

其有效得热量可由下式来计算<sup>[3]</sup>:

$$Q_U = A_c F_R [I(\tau\alpha) - U_L(t_f - t_a)] \quad (1)$$

式中,  $Q_U$  为太阳能集热器有效得热量(W);  $A_c$  为太阳能集热器的面积(m<sup>2</sup>);  $I$  为太阳辐射强度(W/m<sup>2</sup>);  $\tau\alpha$  为穿透吸收系数(取 0.76);  $F_R$  为热转移因子(取 0.95);  $U_L$  为总热损失系数[W/(m<sup>2</sup>·°C)];  $t_f$  为集热器工质进口温度(°C);  $t_a$  为环境温度(°C)。

### 1.2 蓄热水箱模型

$$Q_U = Q_{scol-h} - Q_i \quad (2)$$

式中,  $Q_{scol-h}$  为太阳能集热器供给建筑的热量(W);  $Q_i$  为蓄热水箱内的热损失, 取太阳能有效得热量的 20%(W)。

1.3 供暖热负荷的计算 建筑的供暖瞬时热负荷可由下式来计算。

$$Q_B = (UA)_B (t_{iref} - t_a) \quad (3)$$

$$\text{且 } (UA)_B = Q_{des} / (t_{iref} - t_{ored}) \quad (4)$$

式中,  $Q_B$  为建筑的供暖瞬时热负荷(W);  $(UA)_B$  为建筑的热损失系数(W/°C);  $t_{iref}$  为供暖室内计算温度(°C);  $Q_{des}$  为供暖设计热负荷(W);  $t_{ored}$  为供暖室外计算温度(°C)。

### 1.4 热经济分析指标

#### 1.4.1 集热效率。

$$\eta = Q_u / IA \times 100\% \quad (5)$$

式中,  $\eta$  为太阳能集热器的集热效率(%)。

#### 1.4.2 太阳能保证率。

$$F = Q_H / Q_{al} \times 100\% \quad (6)$$

式中,  $F$  为太阳能保证率(%);  $Q_H$  为整个供暖期内太阳能集热器供给建筑的热量(MJ);  $Q_{al}$  为整个供暖期内的总供暖量(MJ)。

1.4.3 系统节省费用净现值。采用简化了的  $P_1$  和  $P_2$  法<sup>[4]</sup>, 系统节省费用净现值为:

$$S = (P_1 C_F Q_{save} - P_2 C_S) \times 10^{-4} \quad (7)$$

$$\text{且 } Q_{save} = Q_{al} F + \frac{Q_{al}(1-F)}{COP} (COP-1) \quad (8)$$

$$C_S = C_A A_c + C_P + C_E - C_B \quad (9)$$

式中,  $S$  为太阳能-热泵地板供暖系统节省费用净现值(元);  $Q_{save}$  为系统的节能量(MJ);  $C_S$  为系统的增投资(元);  $C_F$  为常规能源热价(取 0.18 元/MJ);  $C_A$  为太阳能集热器单

位面积的价格(元/m<sup>2</sup>);C<sub>p</sub>为热泵系统的初投资(取12 000元);C<sub>E</sub>为太阳能集热系统、热泵系统的初装费(取增投资的10%~20%);C<sub>B</sub>为电热锅炉系统的初投资及安装费(取21 600元)。

$$另 P_1 = [(1 + d_f) / (d_f - i)] \{ 1 - [(1 + i) / (1 + d_f)]^N \} \quad (10)$$

$$及 P_2 = 1 + P_1 M_s - R_v (1 + d_f)^{-N} \quad (11)$$

式中,d<sub>f</sub>为银行贷款年利率(取7%);年燃料价格上涨率(取1%);N为经济分析年限,系统寿命期(取15年);M<sub>s</sub>为每年用于系统有关的维修管理费(取增投资的百分率,一般为1%);R<sub>v</sub>为系统的净残值率(取增投资的10%)。

1.4.4 投资回收期<sup>[4]</sup>。

$$N_p = \ln[1 - (P_2 C_s / C_F Q_{save}) (d_f - i) / (1 + d_f)] / \ln[(1 + i) / (1 + d_f)] \quad (12)$$

式中,N<sub>p</sub>为投资回收期(年)。

2 实例分析

笔者以上海某单体住宅为研究对象,建筑面积为300 m<sup>2</sup>,室内设计温度为18℃,考虑到地板本身具有很强的蓄热能力,供暖时间取为16 h。太阳能集热器正南放置,倾斜角为34°10'。热泵为水源热泵,其制热系数取3.0。气象条件取2004年12月~2005年3月的实测数据,供暖天数为109 d。

所给建筑供暖量的计算结果见表1,从表1中可以得出,该系统在整个供暖期内总的供暖量为50 708 MJ。

表1 供暖期内建筑的供暖量

Table 1 Heating load of building during heating period

月份	供暖天数//d	室外平均温度//℃	平均太阳辐射强度//MJ/(m <sup>2</sup> ·d)	建筑的月平均供暖量//MJ
Month	Days of heating period	Outdoor mean temperature	Average intensity of solar radiation	Monthly mean heating load
12月 December	31	12.12	13.04	7 446
1月 January	31	3.39	14.41	18 503
2月 February	28	2.97	15.76	17 196
3月 March	19	8.26	16.68	7 563

从图2~7可以看出:①太阳能集热器效率随总热损失系数的增加而减小,当总热损失系数为2.5 W/(m<sup>2</sup>·℃)时,集热效率约为60%;总热损失系数每减少2.5 W/(m<sup>2</sup>·℃)时,集热效率约将减少5%。②太阳能保证率随着太阳能集热器面积的增加呈线性增加,但增加的幅度随着太阳能集热器总热损失系数的增加而减小,即随太阳能集热器集热效率

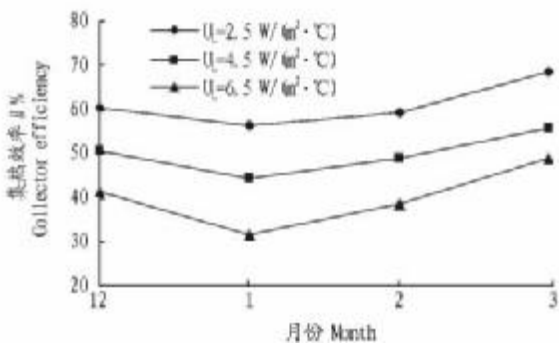


图2 太阳能集热器效率  
Fig.2 Solar collector efficiency

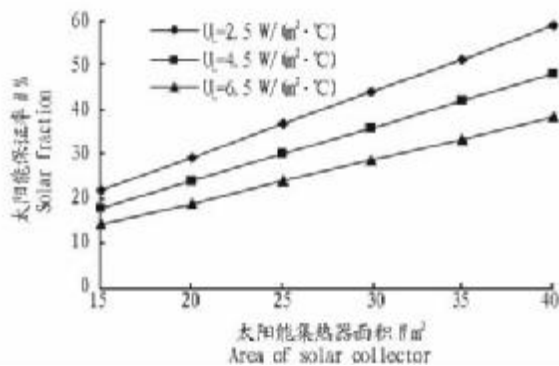


图3 太阳能保证率  
Fig.3 Solar fraction

的减小而减小。③太阳能集热器面积越大,系统节省费用越小;且集热器面积越大,系统节省费用受集热器价格和效率的影响越明显。④太阳能集热器面积越大,系统投资回收期

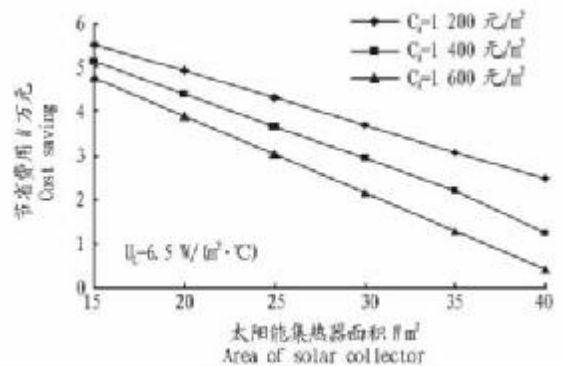


图4 系统节省费用随集热面积及价格的变化  
Fig.4 Variation of system cost saving with collector area and price

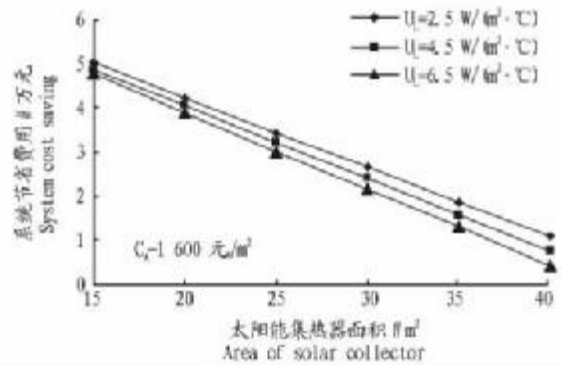


图5 系统节省费用随集热面积及效率的变化  
Fig.5 Variation of system cost saving with collector area and efficiency

越长;同样集热器面积越大,系统投资回收期受太阳能集热器价格和效率的影响越明显。⑤对于所给建筑,总热损失系数为6.5 W/(m<sup>2</sup>·℃),即集热效率约为40%,集热器面积为15~40 m<sup>2</sup>,集热器单位面积价格为1 200~1 600 元/m<sup>2</sup>时,系统节省费用在0.5万~5.5万元;在集热器价格为1 600

(下转第 8808 页)

农把握农时,适时耕作。RSS 是 Netscape 推出的一种称为聚合新闻服务的技术,借助 RSS 技术在服务器上针对不同的用户群提供不同的新闻频道。香蕉小助手中加入 RSS 技术,蕉农可以通过无线网络访问科技人员定制的信息,既可传播新闻,也可以发布台风、病虫害等紧急公告。图 2(b)是香蕉快讯的目录,可以选择条目查看详细内 容。这一功能有助于蕉农提前应对突发灾害,并且实时跟踪香蕉市场信息,了解香蕉产业的经济动态。图 2(c)是病虫害模块的典型图片,蕉农可以根据详细的病虫害形态特征、生活习性,结合典型图片确定病虫害,进而按软件提供的防治方法进行科学防治,有效地抑制病虫害的发生发展,减少不必要的损失。智能决策模块包括蕉园选择、种植时期、种植苗量等功能模块,发挥移动农业专家的作用,辅助蕉农智能决策。蕉园选择根据土质、水源、地下水位等因素,分析园地种植香蕉的适宜度,图 2(d)是对当前蕉园适宜度进行智能决策的结果。种植时期根据地理位置、品种、土壤肥力等因素对香蕉种植时间进行决策;种植苗量根据地理位置、品种、土壤肥力等因素确定定植密度,进而对所需的种苗数量进行决策。

在香蕉小助手中实现了移动农业应用软件的主要功能,表明面向中低端手机的移动农业应用软件具备深入研究和应用推广的条件。

### 3 结 语

该文研究移动农业应用软件,通过开发香蕉小助手验证移动农业应用软件的主要功能。随着手机的普及和性能的提高,在可预期的时间内,移动农业应用软件将进入农业生产管理中,推动农业信息进村入户,为解决农业信息化“最后一公里”问题做出贡献。即使将来计算机在农村得到普及,移动农业应用软件仍将因它的移动便携性继续适用于田间生产管理。下一步的研究重点是完善香蕉小助手、健全网络服务,并针对橡胶、胡椒等作物进行研究和验证。

### 参 考 文 献

- [1] 陈斐,康松. 加快推进我国农业信息化进程的思考[J]. 农业现代化研究,2006(2):139-143.
- [2] 冯加根,高辉,戴其根,等. 农业应用软件及其开发创新问题[J]. 中国农学通报,2006(8):536-539.
- [3] 陈立平,王东辉,赵春江,等. 掌上电脑农业专家系统开发平台的研究与开发[J]. 农业工程学报,2002(3):142-145.
- [4] 杨毅. 基于 Windows CE 的油菜栽培专家咨询系统的开发[D]. 雅安:四川农业大学,2003.
- [5] 孟志军,王秀,赵春江,等. 基于嵌入式组件技术的精准农业农田信息采集系统的设计与实现[J]. 农业工程学报,2005(4):91-96.
- [6] 陈立平,姚光强,赵春江,等. 基于掌上电脑的饲料配方系统的设计与开发[J]. 农业工程学报,2008(6):179-183.
- [7] 牟伶俐,刘钢,黄健熙. 基于 Java 手机的野外农田数据采集与传输系统设计[J]. 农业工程学报,2006(11):165-169.
- [8] 石礼娟,谢新港,景秀. 基于 J2ME 的病虫害诊断专家系统[J]. 农机化研究,2008(8):170-172.
- [9] 中国互联网络信息中心. 2008 年农村互联网调查报告[EB/OL]. (2008-03-28). <http://www.cnnic.net.cn/html/Dir/2008/03/28/5036.htm>.

(上接第 8805 页)

元/m<sup>2</sup> 时,系统投资回收期最长可达 14 年,而当集热器单位

面积价格下降为 1 200 元/m<sup>2</sup> 时,系统投资回收期最少为不到 3 年。

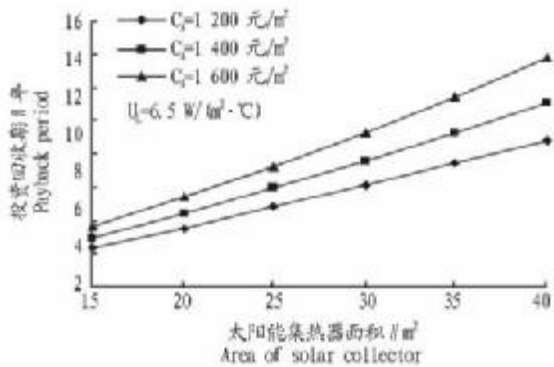


图 6 系统节投资回收期随集热面积及价格的变化

Fig 6 Variation of system payback period with collector area and price

### 3 结 论

(1) 太阳能集热器的集热效率和价格在很大程度上决定了太阳能-热泵地板供暖系统的经济性能,有效提高集热效率及合理确定集热器价格将有助于该系统的推广应用。

(2) 合理确定太阳能保证率,即优化配置太阳能集热器面积与热泵容量,同样可以改善太阳能-热泵地板供暖系统的经济性,这有待于进一步研究。

(3) 不同地区,气象条件、能源价格有很大的差异,太阳

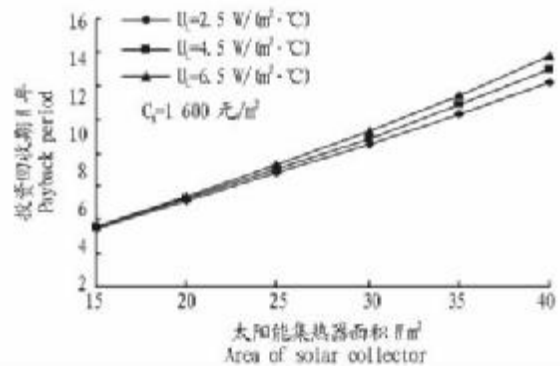


图 7 系统节投资回收期随集热面积及效率的变化

Fig 7 Variation of system payback period with collector area and efficiency

能-热泵地板供暖系统的热经济性应根据具体情况进行分析。

### 参 考 文 献

- [1] 杨文帅,王荣光,凌继红,等. 地板辐射供暖在生理卫生方面的特点[J]. 煤气与热力,2002(2):151-152.
- [2] 中华人民共和国建设部. JGJ142-2004 地面辐射供暖技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [3] 王如竹,代彦军. 太阳能热制冷用[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- [4] DUFFIE J A, BECKMAN W A. Solar engineering of thermal process[M]. New York: Wiley Interscience, 1991.