

# Study on Operation Characteristics of Solar Energy Heating System in Hongyuan Airport

Jingzhong Xiong<sup>1</sup>, Jianping Lin<sup>1</sup>, Hongtao Xia<sup>1</sup>, Jun Lu<sup>2</sup>

1. Xinan Branch of Civil Aviation Airport Construction Corporation of China, Chengdu, 6102021

2. Chongqing University, Chongqing, 400030

## Abstract:

In order to study the operating characteristics of the solar heating system in the plateau region, the TRNSYS simulation model of the solar energy heating system in Hongyuan Airport was established, and the validity of the model was verified by the measured data. The efficiency of the collector, the temperature of the storage tank and the running time of each mode were analyzed by running the simulation model. The results show that the maximum daily collector efficiency is 0.40, the average value of heating is about 0.3; the temperature of regenerator in 50 °C and above is 5 ~ 6 hours in December and January. And the Initial period and the final phase of heating can reach up to 13 to 15 hours. The direct solar heating, heat pump heating and the combined heating mode are 40.76%, 37.03% and 22.21% of the total heating time respectively. The results provide a reference for the application of solar heating system in high altitude and cold regions.

**Keywords:** Solar Energy; Water Source Heat pump; TRNSYS; Operating Characteristics

Classification number TK513.5

## 红原机场太阳能供暖系统的运行特性研究\*

熊京忠<sup>1</sup>, 林建平<sup>1</sup>, 夏洪涛<sup>1</sup>, 卢 军<sup>2</sup>

1. 中国民航机场建设集团公司西南分公司, 成都 6102021

2. 重庆大学, 重庆 400030

**摘 要:** 为研究高寒地区太阳能供暖系统的运行特性, 建立了红原机场太阳能供暖系统的 TRNSYS 仿真模型, 并利用实测数据验证了模型的有效性。通过运行仿真模型分析了集热器的效率、蓄热水箱的温度及各模式的运行时间。研究表明, 集热器的日平均集热效率最大值为 0.40, 供暖中期平均值在 0.3 左右; 12 月和 1 月蓄热装置温度在 50°C 以上的时间可达 5~6 个小时, 供暖初期和末期最高可达 13~15 个小时; 太阳能直接供暖、热泵单独供暖及两者联合供暖模式分别占总供暖时间的 40.76%、37.03% 和 22.21%。研究结果为太阳能供暖系统在高海拔寒冷地区的应用提供了参考。

**关键词:** 太阳能; 水源热泵; TRNSYS; 运行特性

分类号 TK513.5

## 引言

我国化石燃料的蕴藏量均低于世界平均水平, 同时供暖面积大, 供暖和空调方面的能源消耗占能源总消耗量的比重越来越大。

我国位于北半球亚欧大陆的东部, 年日照时间超过 2000h 的区域占全国面积的 2/3, 处于有利于利用太阳能的区域<sup>[1]</sup>。热泵是一种以消耗少量的高品位能为代价, 将从低温环境吸收的热量传递给温度较高的物体或环境的装置<sup>[2][3]</sup>, 鉴于两者各自的优点, 将太阳能和热泵结合在一起的供暖系统的研究对于解决我国环境和能源问题具有深远的

\*基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51478058)

意义<sup>[4][5]</sup>。

然而如何保证太阳能供暖系统各组成部分可靠稳定的运行从而使系统更加节能成为各国学者竞相研究的问题。Bakirci和Ozyurt等人<sup>[6]</sup>对土耳其寒冷地区供暖季太阳能-地源热泵系统的供热效率及在住宅供暖中适用性进行了实验研究; Chaturvedi研究了直膨式太阳能辅助热泵低温供暖系统在美国的应用,并对该系统进行了长期的热经济性分析,研究表明,该系统在经济性和节能性方面均优于传统供暖系统<sup>[7]</sup>; Arkar研究了太阳能空气集热器在斯洛文尼亚某轻型建筑供暖系统中的应用,其中采用潜热蓄热方式蓄热,研究表明,太阳能保证率可高达63%<sup>[8]</sup>。曲世琳等人<sup>[9][10]</sup>对以水源热泵作为辅助热源,以热管式真空管太阳能集热系统为主要热源形式,以地板辐射采暖系统为末端装置的太阳能-水源复合热泵地板辐射供暖系统进行研究,同时研究了蓄热水箱对系统的影响,刘会芳等人<sup>[11]</sup>对位于大庆地区全玻璃真空管集热器与水源热泵耦合的供暖系统进行了实测,研究了太阳能集热器的效率,太阳能保证率等参数,并对系统做了经济性分析,龚光彩等人建立了太阳能水源热泵复合系统的火用分析模型,并对试验测试和模拟结果进行了火用分析。海拔3000米以上的高原地区具有气压低、昼夜温差大、天气背景温度低和太阳辐射强等独特的气候特征,其丰富的太阳能资源具有巨大的开发潜力,尤其是在供暖方面的应用更会产生巨大的经济效益和社会效益,然而目前几乎没有对高海拔寒冷地区太阳能供暖系统的研究。

本研究的目的在于对高海拔寒冷地区太阳能-水源热泵供暖系统的运行特性进行研究,本系统已经在高寒地区的一个实际工程中进行了应用,通过现场实测和模拟对系统的各部件的运行性能及运行模式进行了研究,并且在实际运行环境的基础上对系统的节能性进行了讨论。本研究可以作为太阳能热泵系统在实际工程中,尤其是高海拔寒冷地区的设计和施工的参考。

## 1 工程概况

四川阿坝红原民用机场(以下简称“红原机场”),场址位于红原县龙日坝乡,定位为国内小型支线机场,主要为旅游业的开发服务。航站楼3600m<sup>2</sup>,机场同时配套建设有空管、气象、导航、通信等辅助工程。



图1 红原机场

热能中心为航站区所有供暖建筑提供热源,总热负荷为1560kW。集中供暖系统的热源由位于热能中心、中心变电站、消防救援站、办公综合楼等屋面的太阳能集热器及水源热泵机组组成,太阳能集热器选用耐压防冻型平板太阳能集热器,太阳能集热系统作为辅助热源系统,采用短期蓄热形式以充分利用天然能源;采用容积百分比浓度为50%的乙二醇作为循环工质,与供暖系统之间为间接式连接,冬季室内供暖水系统为闭式机械循环,供/回水温度为:48oC/40 oC,为解决夏季太阳能集热器“超温”问题,设置一台换热器,把太阳能集热器的热量导入地下。系统形式如下图所示:

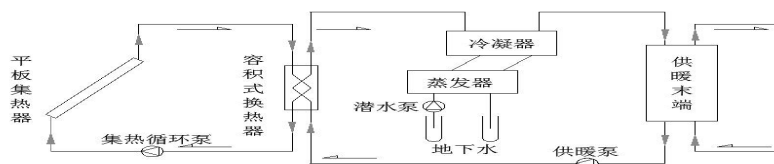


图2 供暖系统原理图

供暖循环热水采用全自动钠离子交换器进行软化处理。系统采用隔膜自动气压密闭式低位膨胀水箱定压、自动补水方式。太阳能系统采用隔膜自动气压密闭式低位膨胀水箱定压、自动补液方式。



图3 能源站

2 仿真模型的建立和验证

论文采用TRNSYS动态性能模拟软件为平台，建立太阳能+水源热泵系统模型。利对拉萨建设厅的测试结果对红原机场的太阳能供暖系统TRNSYS模型进行验证。

表1 气象模块主要参数设置

地面太阳光反射系数 $\rho_g$	斜面倾斜角度 $\theta$	斜面朝向方位角 $\gamma$
0.2	38°	0

表2 太阳能集热器模块主要参数设置

集热器面积 $m^2$	测试流量 $kg/s$	a0	a1	a2
1130	0.02	0.761	4.106	0.012

表3 集热器侧控制器参数设置

切断温度上限 $^{\circ}C$	温差上限 $^{\circ}C$	温差下限 $^{\circ}C$
60	5	2

表4 蓄热水箱主要参数设置

蓄热水箱体积 $m^3$	8.5	水箱高度 $m$	3.2
内部流体比热 $kJ/(kg \cdot K)$	4.190	内部流体密度 $kg/m^3$	1000
热损失系数 $W/(m^2 \cdot K)$	0.833	内部流体导热系数 $W/(m \cdot K)$	0.6
换热盘管内流体种类	3	乙二醇体积分数	50%
盘管换热面积 $m^2$	21.4	分层数目	3
盘管材料导热系数 $W/(m \cdot K)$	100	内部计算步长/标准欧拉步长	6
自然对流 Nu 常数	0.50	自然对流 Nu 指数	0.25

表5 负荷侧控制器参数设置

水源热泵温度 上限 $^{\circ}C$	水源热泵温度 下限 $^{\circ}C$	水源热泵额定 出水 $^{\circ}C$	水源热泵 2 开启负荷 $kW$	地下水温度 $^{\circ}C$
53	47	50	780	13

模拟验证环节考虑太阳能集热器和水箱，辅助热源部分不考虑。水箱供暖模式的 TRNSYS 模型如图 4 所示。

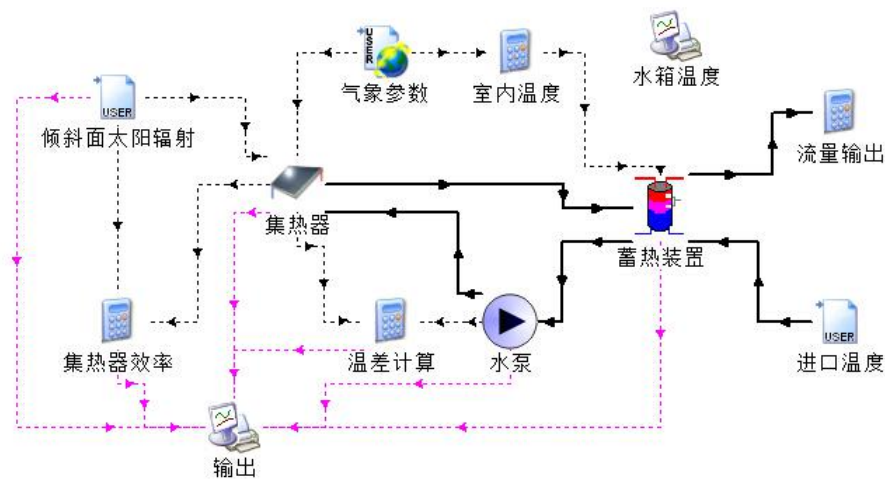
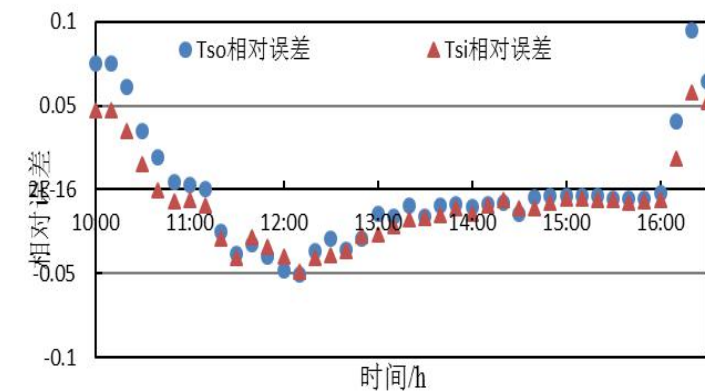
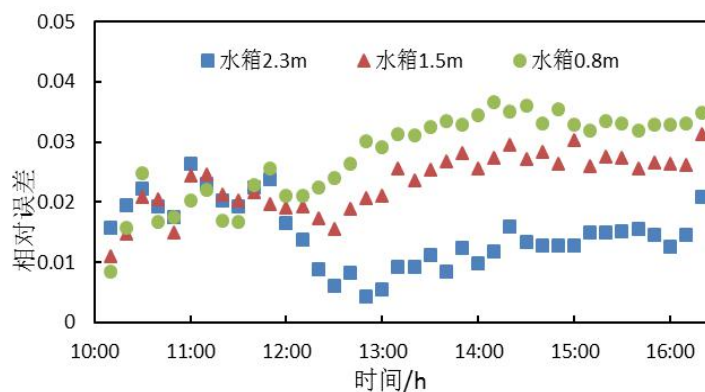


图4 水箱供暖模式 TRNSYS 仿真模型

按照以上仿真模型对系统进行仿真，将模拟结果与实测结果进行对比，水箱供暖模式下集热器进出口温度模拟值与实测结果之间的相对误差如图 5(a)所示，水箱供暖模式水箱分层温度模拟值与实测值之间的相对误差如图 5(b)所示：



(a) 集热器出入口水温



(b) 水箱水温

图5 模拟值与实测值之间的相对误差

由图 5(a)可以看出，集热器集热器进出口温度模拟与实测相对误差基本均在 5%以内，除了在测试开始和结束时段在 5%~10%的范围。说明太阳能集热器效率的模型及取值是合理的。由图 5(b)可以看出，水箱不同高度的温

度模拟值与实测值的误差均在 5%以内，说明水箱分层的模型是合理的。

### 3 系统性能的仿真研究

#### 3.2 集热器性能分析

##### 3.1.1. 集热器出口温度

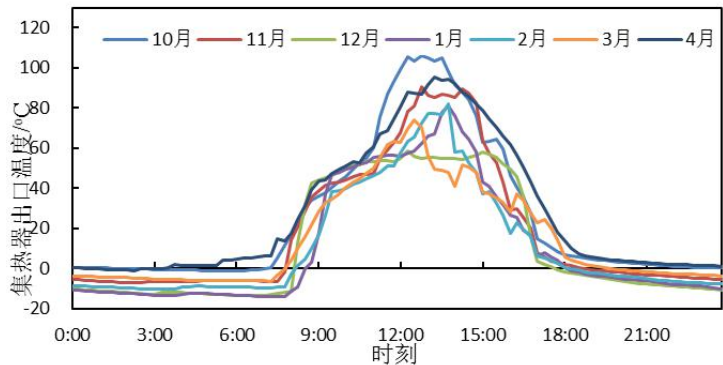


图 6 集热器出口温度在一天中随时间的变化

由图 6 可以看出，除了 12 月集热器出口温度在白天比较平稳外，供暖季其他时间集热器的出口温度都会出现超过 75℃，会导致水箱过热，在 12 月和 1 月集热器出口温度能达到 50℃的时间有 5~6 个小时，太阳能直接供暖在高海拔寒冷地区是可行的，但是要综合考虑集热器在供暖初期和末期的过热与在供暖中期的集热器蓄热时间较短两个问题，合理选择系统的配置及控制策略。

##### 3.1.2. 集热器效率

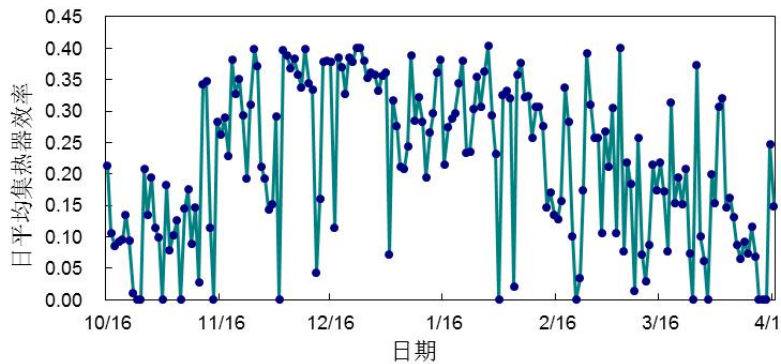


图 7 供暖期内日平均集热器集热效率

表 6 供暖期内月平均集热效率

月份	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月
集热器效率	0.10	0.21	0.32	0.29	0.23	0.16	0.11

由图 7 和表 6 可以看出，集热器的集热效率在供暖初期和末期的比较低，在供暖中期明显高于初期和末期，这主要是由供暖初期和末期集热器的出口温度比较高。另外，集热器的日平均集热效率在整个供暖期都不高，最大值为 0.40，供暖中期平均值在 0.3 左右。而文中所选集热器的瞬时集热效率最大值为 0.77，但由于集热器的效率只是在中午太阳辐射很强时集热效率才能接近最大集热效率。晴天时，集热器在一天中的集热效率曲线类似正



态分布的曲线，集热器的平均集热效率不理想，严重影响了太阳能的利用。

3.2 蓄热装置的温度

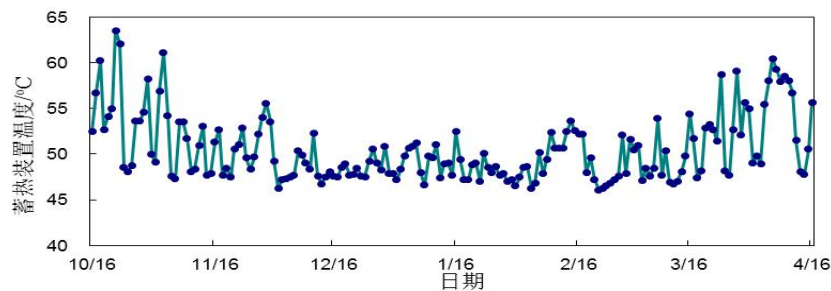


图 8 供暖期内日平均蓄热装置温度

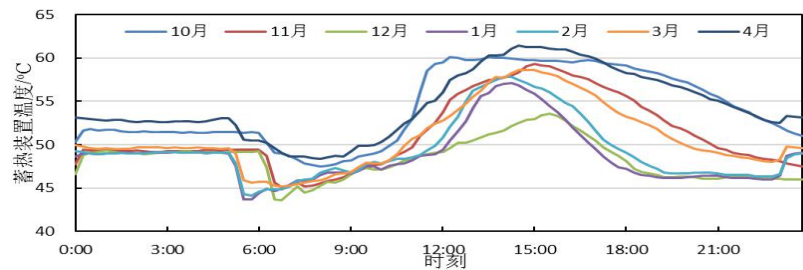


图 9 蓄热装置温度的在一天中随时间的变化

图 8 及图 9 给出了供暖期内蓄热装置的日平均温度和在一天中的温度变化。从图 8 中可以看出，由于供暖初期和末期热负荷需求较小，蓄热水箱温度明显高于供暖中期，在 10 月和 4 月甚至可以维持在 50oC 以上长达十几个小时，可以全天保持在 46oC 以上，需要开启辅助热源的时间很少。

由图 9 可知，蓄热装置最低温度均在 40℃ 以上，这是本文由于所研究的系统蓄热装置与末端回水直接相连，夜间由于无太阳辐射，水箱温度变化不明显，蓄热装置温度在 6:00 左右会突降，这主要是由于作为红原机场的主要建筑航站楼在 6:00 开始运行，9:00 以后由于集热器开始供热蓄热装置温度开始上升，直至 15:00 左右，此后由于太阳辐射减弱，热负荷需求增大，蓄热装置温度开始下降，蓄热装置为供暖提供热量在寒冷的 12 月和 1 月可以维持到 18:00。从图中还可以看出，在寒冷的 12 月和 1 月蓄热装置温度在 50℃ 以上的时间可达 5~6 个小时，在供暖初期和末期最高可达 13~15 个小时，因此太阳能直接供暖在高原太阳辐射较强地区具有广阔的应用前景。

3.3 各模式的运行时间

经统计，各模式每月运行时长及所占比例如图 10 所示。

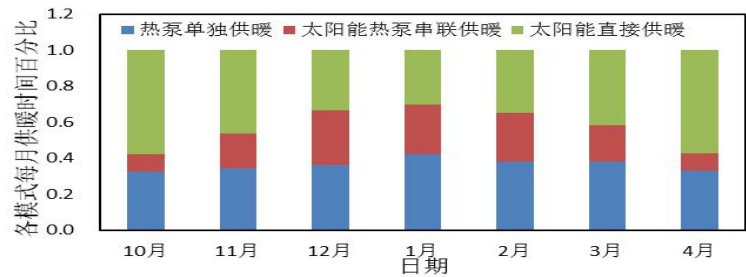


图 10 每月各模式运行时长所占比例

从图 10 可以看出,太阳能直接供暖模式的运行时长所占百分比与室外空气温度的变化趋势一致,在 10 月~11 月和 3 月~4 月,太阳能直接供暖模式的运行时长所占比例比较长,最高可达 0.58,在 12 月~1 月,太阳能直接供暖的运行时长所占比例仍可达 0.30 左右。这是由于供暖初期和末期,建筑热负荷较小。太阳能与热泵串联供暖模式的运行时长与太阳能直接供暖模式的运行时长的变化趋势相反,在 10 月~11 月和 3 月~4 月,太阳能与热泵串联供暖模式的运行时长所占比例比较小,在 0.09~0.20 之间,而在 12 月~1 月,太阳能与热泵串联供暖模式的运行时长所占比例均在 0.20 以上,最高达到 0.30,热泵单独供暖各月之间的区别不大。由于蓄热装置的配置较小,导致供暖初期和末期集热器的过热现象较严重,导致该时期太阳能的利用率较低,蓄热装置的蓄热量比较小,夜间没有太阳辐射时就需开启热泵制热。

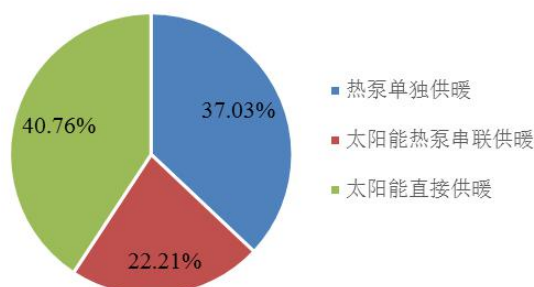


图 11 供暖期内各模式运行时间所占比例

图 11 给出了各模式运行总时间占整个供暖期的比例。通过统计计算,太阳能直接供暖 1790 小时,占总供暖时间的 40.76%,热泵单独供暖运行 1626.5 小时,占总供暖时间的 37.03%,太阳能与热泵串联供暖运行 975.5 小时,占总供暖时间的 22.21%。

## 4 小结

本文建立了高寒地区太阳能-水源热泵供暖系统的 TRNSYS 模型,并利用实测数据验证了模型的正确性。通过运行 TRNSYS 模型对系统的性能进行分析,得到如下结论:

(1) 供暖期最高日太阳能保证率为 1,大部分天数太阳能保证率在 0.2 左右,整个供暖期的太阳能保证率为 0.19。供暖期每月的太阳能保证率,最大值为 0.45,出现在 4 月,1 月的太阳能保证率最低,为 0.15。

(2) 供暖季所有月份集热器的出口温度都会出现超过 75°C,会导致水箱过热。集热器的集热效在供暖初期和末期的比较低,在供暖中期明显高于初期和末期,集热器的日平均集热效率在整个供暖期都不高,最大为 0.4,供暖中期平均值在 0.3 左右。这主要与系统的配置有关,需要优化系统的配置。

(3) 在寒冷的 12 月和 1 月蓄热装置温度在 50°C 以上的时间可达 5~6 个小时,在供暖初期和末期最高可达 13~15 个小时。通过统计计算,占总供暖时间的 40.76%,因此太阳能直接供暖在高海拔寒冷地区是值得推广的。

## 参考文献

- [1] 韩宗伟,郑茂余,刘威等.严寒地区太阳能-土壤源热泵相变蓄热供暖系统[J].太阳能学报.2006,27(12):1214-1218
- [2] Ardehali M M,Shahrestani M,Adams C C.Energy simulation of solar assisted absorption system and examination of clearness index effects on auxiliary heating[J].Energy Conversion and Management,2007,48(3):864-70.
- [3] Zhai X Q,Yang J R,Wang R Z Design and performance of the solar-powered floor heating system in a green building[J].Renewable Energy,2009,34:1700-1708.
- [4] 旷玉辉,王如竹,于立强.太阳能供暖系统的实验研究[J].太阳能学报.2002,23(4):408-413
- [5] Kuang Y H,Wang R Z,Yu L Q.Experimental study on solar assisted heat pump system for heat supply[J].Energy Conversion&management,2003,44:1089-1098
- [6] Bakirci, K., Ozyurt, O., Comakli, K., & Comakli, O.. Energy analysis of a solar-ground source heat pump system with vertical closed-loop

for heating applications. Energy,36(5),3224–3232.

- [7] C. Arkar, T. Šuklje, B. Vidrih, S. Medved, Performance analysis of a solar air heating system with latent heat storage in a lightweight building, Appl. Therm. Eng. 95 (2016) 281-287.
- [8] S.K. Chaturvedi, V.D. Gagrani, T.M. Abdel-Salam, Solar-assisted heat pump-A sustainable system for low-temperature water heating applications, Energy Convers Manage. 77 (2014) 550-557.
- [9] 曲世琳, 马飞, 吉玉宝等.非直膨式太阳能-水源热泵地板辐射供暖实验系统研究[J].南京理工大学学报(自然科学版).2010,34(1):141-145
- [10] 旷玉辉, 孙峙峰, 吉玉宝等.蓄热水箱对太阳能-水源热泵系统性能特性的影响分析及实验研究[J].太阳能学报.2012,33(8):1405-1410
- [11] Huifang Liu, Yiqiang Jiang, Yang Yao. The field test and optimization of a solar assisted heat pump system for space heating in extremely cold area [J] Sustainable Cities and Society, 2014, 13: 97-104.
- [12] 龚光彩, 王立军, 苏欢.太阳能水源热泵复合系统的火用分析及实验研究[J].太阳能学报.2013,34(6):1051-1056



作者简介: 熊京忠(1968年生), 北京人, 本科, 高级工程师, 中国民航机场建设集团公司西南分公司副总工, 研究方向为高原机场绿色能源。