

# Economic Analysis of Hybrid PV/T Solar System for Domestic Hot Water in Changsha

Xianping Liu<sup>1,2\*</sup>, Shenghua Zou<sup>1</sup>, Jianwu Huang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

<sup>2</sup>School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan

<sup>3</sup>Changsha Heaven and Earth Blending Energy Saving Technology Co., LTD., Changsha Hunan

Email: [xpliu@hnust.edu.cn](mailto:xpliu@hnust.edu.cn)

Received: Aug. 27<sup>th</sup>, 2015; accepted: Sep. 25<sup>th</sup>, 2015; published: Sep. 28<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Dynamic system simulation software TRNSYS is adopted to establish the photovoltaic/thermal hybrid domestic hot water system for a typical family scale, for which the hourly meteorological data in Changsha area, Hunan province are used to simulate the annual output of power and heat. Based on the TRNSYS results and the local prices data, the system economic analysis and sensitivity analysis are performed. The results show that the dynamic payback period of investment is 7.6 - 16 a, the present values of comprehensive energy price remain less than 0.3 CNY/KWh, and internal rates of return range from 11% to 24%. The results of economic analysis verify the economic feasibility of the PV/T domestic hot water system. Sensitivity analysis indicate that the annual growth rate of electricity and base discount rate are important factors and the increases of annual growth rate of electricity improve the economic property of the system obviously.

## Keywords

Hybrid PV/T Solar System, Hot Water System, TRNSYS, Economical Analysis

---

# 长沙地区太阳能光伏/光热复合家用热水系统经济性分析

刘仙萍<sup>1,2\*</sup>, 邹声华<sup>1</sup>, 黄建武<sup>3</sup>

\*通讯作者。

<sup>1</sup>湖南科技大学能源与安全工程学院, 湖南 湘潭

<sup>2</sup>中南大学能源科学与工程学院, 湖南 长沙

<sup>3</sup>长沙天地融节能科技有限公司, 湖南 长沙

Email: [xpliu@hnust.edu.cn](mailto:xpliu@hnust.edu.cn)

收稿日期: 2015年8月27日; 录用日期: 2015年9月25日; 发布日期: 2015年9月28日

## 摘要

采用动态系统模拟软件TRNSYS建立4人用水规模的典型家庭光伏/光热复合热水系统模型, 以长沙地区的气象参数逐时模拟系统的全年发电和产热量。根据TRNSYS计算结果和当地的电价, 对系统进行经济性分析和影响经济性因素的敏感性分析。结果表明: 生命周期内该系统在长沙区域使用的动态投资回收期范围为7.6~16 a, 能源综合价格现值小于0.3元/KWh, 内部收益率范围为11%~24%, 具有投资经济可行性。敏感性分析得出, 电价增长率和基准折现率对系统的经济性影响较大, 系统的经济性随电价增长率增加得到显著提高。

## 关键词

光伏/光热复合, 热水系统, TRNSYS, 经济性分析

## 1. 引言

太阳能集热热水器拥有很长的应用和研究历史, 然而能同时产生电能和热能的太阳能光伏/光热复合集热系统(简称 PV/T 系统)直到近 30 年[1]才被提出并引起诸多研究者的关注[2]-[4]。太阳能光伏/光热复合集热器(简称 PV/T 集热器)为 PV/T 系统的核心部件, 它将太阳能集热组件与光伏组件合二为一, 能同时产生电能和热能并提高太阳能的利用率。目前国内外对 PV/T 热水系统的经济性研究主要包括: 文献[5]采用电子表格的方法分析太阳能热水系统的寿命周期、寿命周期成本。文献[6]根据印度的气象数据对主动式和被动式 PV/T 太阳能蒸发器进行经济性分析。文献[7]根据希腊的气象数据对 PV/T 系统的单位面积投资成本、投资回收期等方面进行分析, 得出多晶硅 PV/T 系统的投资回收期小于 10 a。文献[8]运用 SimaPro 5.1 软件, 用生命周期法分析不同温度下的投资回收期, 得出 PV/T 系统的投资成本效益高。以上的经济性研究不足之处均是对集热器的年产热量或者发电量进行估算, 以此计算太阳能集热器年收益值。本文在动态系统模拟软件 TRNSYS (Transient System Simulation Program) [9]的平台上建立太阳能光伏/光热复合家用热水系统模型, 对全年发电和产热量进行全年逐时模拟, 并进行经济性评价, 为我国太阳能光伏/光热复合家用热水系统的应用提供参考。

## 2. 系统模型

本文建立的太阳能光伏/光热复合家用热水系统为典型的家庭热水系统, 如图 1 所示, 包括 PV/T 复合集热器(光伏电池组、管板式热水通道)、保温水箱、上/下循环管, 蓄电池、控制器和逆变器等部件。用热水人数为 4 人, 24 小时供生活热水, 生活热水的使用水温为 40℃ [10], 日热水用水量小时变化与家庭成员结构、作息规律、生活习惯等因素有关, 热水用水量小时变化曲线如图 2 所示[11], 若生活热水的出水温度达不到使用要求, 则开启辅助电加热器进行补偿。光伏组件发电不并网, 光伏组件的采光面积依据满足热水需求的设计采光面积而定, 配备蓄电池, 用于日常家用电器供电, 不足部分由市电供给。根据中国标准气象数据[12], 以长沙地区为例经过计算[10], 太阳能集热器采光面积取 2 m<sup>2</sup>, 外形尺寸为

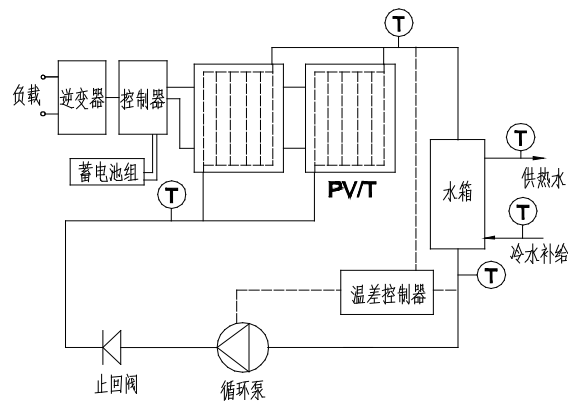


Figure 1. Schematic of PV/T hybrid domestic hot water system

图 1. PV/T 复合家用热水系统示意图

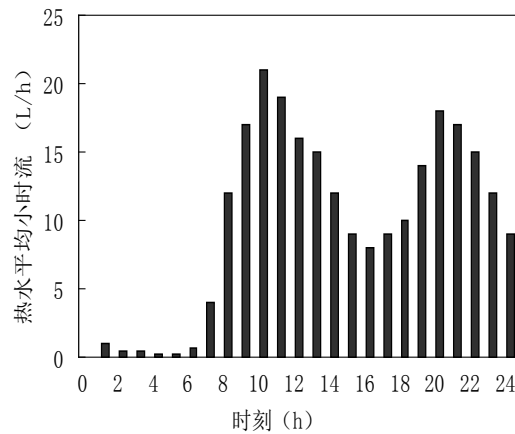


Figure 2. Daily change curve of hot water consumption

图 2. 日热水用水量小时变化曲线

2000 × 1000 mm<sup>2</sup>, 2 台集热器并联。光伏组件采用多晶硅电池片, 单片面积为 156 × 156 mm<sup>2</sup>, 72 片(6 × 12), 单台集热器的电池有效采光面积为 1.752 m<sup>2</sup>, 最大功率为 250 w。水箱容积取 200 L, 辅助电功率为 1500 W。

PV/T 复合家用热水系统模型在 TRNSYS 中的模块连接示意图如图 3, 主要包括 PV/T 复合集热器模块、气象数据处理模块 Type15-3、用于参数计算的运算器、能量计算的积分模块 Type24、保温水箱 Type4c、温控分流及合流三通 Type11、控制模块 Type2b、循环泵模块 Type3b 和用水模式 Type14b, 其中 PV/T 复合集热器模块为 TRNSYS 自编模块, 其数学模型及其计算流程见文献[13]所示。气象数据处理模块 Type15-3 采用的气象数据来自于 EnergyPlus [14]根据中国标准气象数据[12]整理成的数据格式, 输出长沙地区冷水月平均温度和月总辐射分布如图 4。

### 3. 经济性分析

#### 3.1. 系统能耗分析

太阳能光伏/光热复合家用热水系统的能耗主要包括全年辅助电加热能耗和循环泵能耗, 能量收益包括全年热水产热量和发电量。通过模拟计算, 系统运行 1 a 的热水产热量为 1296 KWh, 电辅助加热耗热

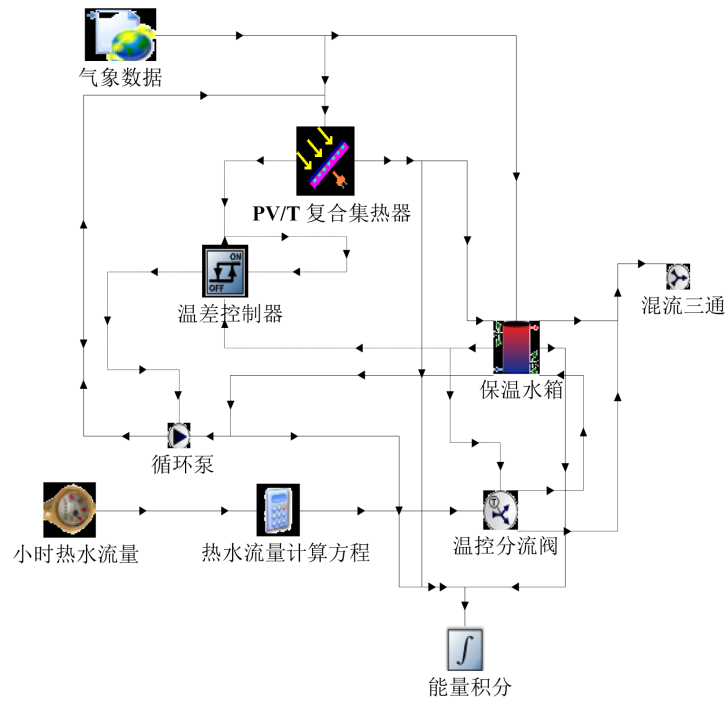


Figure 3. TRNSYS information flow diagram for the PV/T hybrid domestic hot water system

图 3. PV/T 复合家用热水系统的 TRNSYS 模块连接示意图

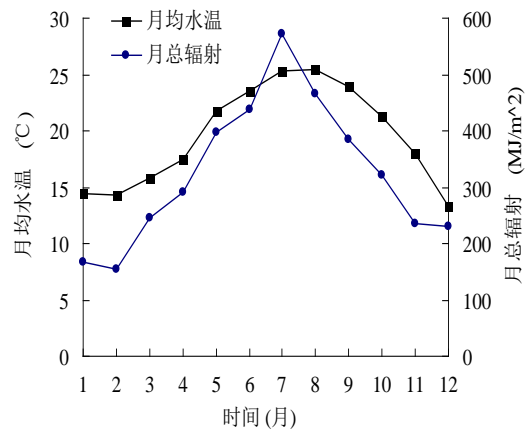


Figure 4. Mean monthly temperature of cold water and total radiation

图 4. 冷水月平均温度和月总辐射

量为 1361 KWh, 发电量为 292 KWh, 循环水泵功耗为 24 KWh, 热水需热量为 2411 KWh。图 5 为产热量、电辅助耗热量、发电量和热水需热量的月平均值。由图 5 得出, 系统热水产热量月均值最大值出现在 7 月份, 热水需热量最小值的月份同时也是 7 月, 7 月电辅助能耗值最小, 12 月至 3 月电辅助能耗相对较大, 系统全年使用热水的太阳能保证率约为 0.44。

### 3.2. 综合能源价格现值

综合能源价格是一个将初投资考虑在内的全面反映经济分析对象相对于提供单位能量所需费用的参数。基于李军[15]提出的太阳能热水器综合能源价格现值的表达式, 本文研究的太阳能光伏/光热复合家

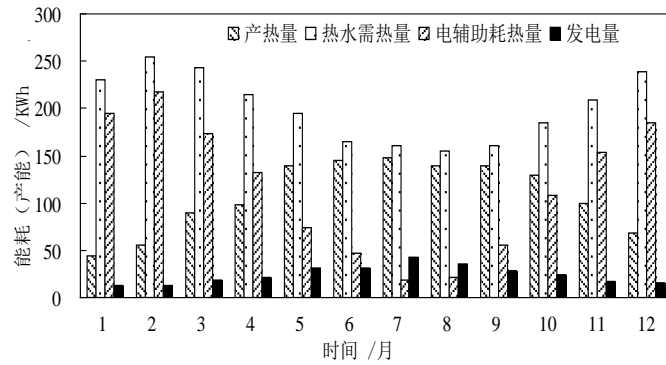


Figure 5. Monthly average energy consumption and power generation of the system  
图 5. 系统各项能耗及发电量月平均值

用热水系统的寿命周期内综合能源价格现值可以表示为:

$$M = \frac{V + \sum_{t=1}^n (E_{au,t} + E_{p,t} - E_{pvt}) P_0 (1+d)^t / (1+i)^t}{\sum_{t=1}^n E_t} \quad (1)$$

式中,  $M$ ——综合能源价格现值, 元/KWh;  $V$ ——将安装等费用计入的热水系统初投资, 元/台;  $t$ ——计算年数,  $a$ ;  $n$ ——热水器寿命周期,  $a$ ;  $E_{au,t}$ 、 $E_{p,t}$  和  $E_{pvt}$  ——第  $t$  年电辅助加热耗热量、循环泵功耗和发电量, KWh/a;  $P_0$  ——第 0 年电价, 元/KWh;  $i$ ——基准折现率。

系统的寿命取值为 20 a, 系统设备投资成本如表 1 所示, 其中蓄电池寿命为 5 a, 每年用于与太阳能热水系统有关的维修费用(包括太阳集热器维护、集热系统管道维护和保温等费用)占总增投资的百分率取 0.5%, 安装费用约占设备费用的 4.5%, 基准折现率取 10%。电价年上涨率分别取 1%和 3%, 不考虑阶梯电价, 假设第 0 年电价为市电价格 0.6 元/KWh。

图 6 为光伏/光热复合家用热水系统全生命周期的初投资费用现值, 可得出当电价年上涨率分别取 1%和 3%时, 系统运行 20 a 的投资费用现值分别为 1.316 万元和 1.413 万元, 由 TRNSYS 模拟计算所得系统运行 20 a 所需热水加热量为 48,223 KWh, 由此得出系统的寿命周期内综合能源价格现值分别为 0.273 元/KWh 和 0.293 元/KWh。

### 3.3. 动态投资回收期

太阳能光伏/光热复合家用热水系统设计使用寿命为 20 a, 为了克服静态投资回收期未考虑资金时间价值的缺点, PV/T 系统的动态投资回收期方程为:

$$\sum_{t=0}^{T_p^*} (CI - CO)_t (1+i)^{-t} = 0 \quad (2)$$

式中,  $T_p^*$  ——动态投资回收期;  $CI_t$ 、 $CO_t$  ——第  $t$  年的现金流入、流出额;  $i$ ——基准折现率;  $t$ ——计算年数,  $a$ ;  $n$ ——热水器有效使用年限,  $a$ 。

以电价增长率  $d = 3\%$  为例, 动态投资回收期计算表如表 2 所示, 寿命周期内各年净现金累积折现值如图 7, 可得出当电价年上涨率分别取 1%和 3%时, 动态投资回收期分别为 13.2 a 和 11.06 a。

### 3.4. 内部收益率

内部收益率为净现值为零时的折现率, 是所有的经济评价指标中最重要的评价指标之一, 被认为是

项目投资的盈利率，PV/T 系统的内部收益率为：

$$IRR = \sum_{t=0}^n (CI - CO)_t (1 + IRR)^{-t} \quad (3)$$

式中， $IRR$ ——内部收益率；其他符号同式(2)。

根据现金流量计算表，可得出当电价年上涨率分别取 1% 和 3% 时，寿命周期内太阳能光伏/光热复合家用热水系统的内部收益率分别 12.8% 和 15.4%。

### 3.5. 敏感性分析

通过改变电价的年增长率和基准折现率，对太阳能光伏/光热复合家用热水系统进行全生命周期内综合能源价格、动态回周期和内部收益率进行敏感性分析，结果如表 3 所示。表 3 结果表明，当电价增长率变化范围为 0%~10%，电价增长率对太阳能光伏/光热复合家用热水系统的经济性影响较大，当能源紧张，电价持续上涨时，电价增长率对内部收益率影响很大，内部收益率与电价上涨率正相关，随着电价上涨率增加而趋于上涨，同时，项目的动态投资回收期随着电价增长率增加而缩短，使项目取得较好的收益。基准折现率不影响内部收益率，但是会对投资回收期影响较大，当基准折现率变化范围为 0%~15%，项目的投资动态回收期变化范围为 7.69~16.04 a，在项目的寿命周期之内。综合能源价格现值在寿命周期内随基准折现率与电价增长率变化比较小，在分析范围之内均保持较低，小于 0.3 元/KWh。

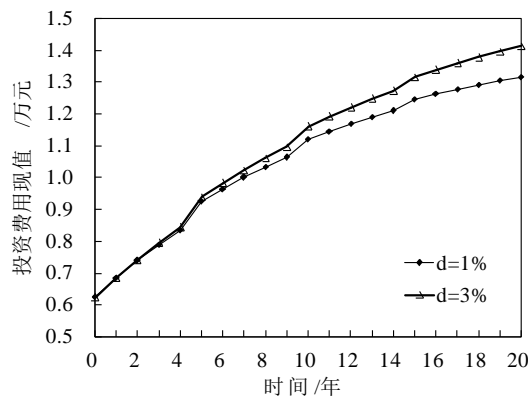


Figure 6. Present value of life cycle investment cost  
图 6. 寿命周期内投资费用现值

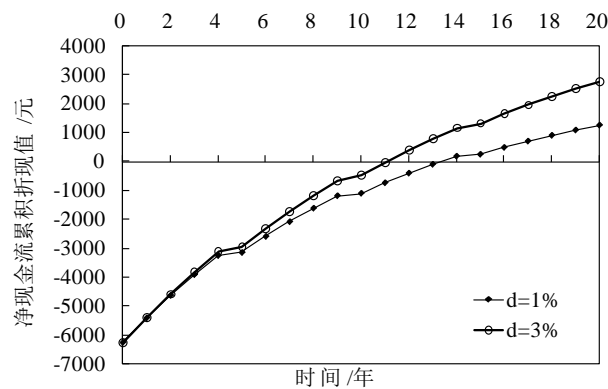


Figure 7. Cumulative discounted values of life cycle net cash flow  
图 7. 寿命周期内净现金流量累积折现值

**Table 1. System equipment investment cost**  
**表 1. 系统设备投资成本**

费用构成	规格	数量	金额/元
光伏部分	组件 250 W	2	1300
	控制器 24 V 20 A	1	90
	逆变器 24 V 1000 W	1	600
	配电柜	1	180
	电缆及配件	1	200
	蓄电池 12 V 100 A	2	800
	支架	1	208
光热部分	集热器	2	1000
	保温水箱 200 L	1	900
	控制系统	1	400
	管道、其他配件	1	300
设备成本			5978
安装成本			269
年维护费			30

**Table 2. Calculation table for dynamic payback period of investment**  
**表 2. 动态投资回收期计算表**

年份	投资支出 (初投资 + 电池更换)	其他支出 (安装费 + 年管理费)	收入 (产热水 + 发电)	净现金流量	折现值	累积折现值
0	5978.0	269.0		-6247.0	-6247.0	-6247.0
1		30.0	981.7	951.7	865.2	-5381.8
2		30.0	1011.2	981.2	810.9	-4570.9
3		30.0	1041.5	1011.5	760.0	-3811.0
4		30.0	1072.7	1042.7	712.2	-3098.8
5	800.0	30.0	1104.9	274.9	170.7	-2928.1
6		30.0	1138.1	1108.1	625.5	-2302.6
7		30.0	1172.2	1142.2	586.1	-1716.5
8		30.0	1207.4	1177.4	549.3	-1167.2
9		30.0	1243.6	1213.6	514.7	-652.5
10	800.0	30.0	1280.9	450.9	173.8	-478.7
11		30.0	1319.3	1289.3	451.9	-26.8
12		30.0	1358.9	1328.9	423.4	396.7
13		30.0	1399.7	1369.7	396.7	793.4
14		30.0	1441.7	1411.7	371.7	1165.2
15	800.0	30.0	1484.9	654.9	156.8	1321.9
16		30.0	1529.5	1499.5	326.3	1648.3
17		30.0	1575.4	1545.4	305.7	1954.0
18		30.0	1622.6	1592.6	286.4	2240.5
19		30.0	1671.3	1641.3	268.4	2508.8
20		30.0	1721.4	1691.4	251.4	2760.3



**Table 3. Sensitive analysis**  
**表 3. 敏感性分析**

经济性参数	综合能源价格/元·KWh <sup>-1</sup>	动态回收期/a	内部收益率
<i>d</i>	0	0.22	14.59
	10%	0.27	7.57
<i>i</i>	0	0.24	7.69
	15%	0.23	16.04

#### 4. 结论

1) 太阳能光伏/光热复合家用热水系统运用于长沙地区典型 4 人家庭热水模式时, 当基准折现率为 10% 时, 分别考虑电价年上涨率为 1% 和 3%, 寿命周期内综合能源价格现值分别为 0.273 元/KWh 和 0.293 元/KWh, 动态投资回收期分别为 13.2 a 和 11.06 a, 内部收益率分别为 12.8% 和 15.4%。

2) 全年逐时能耗模拟表明, 太阳能光伏/光热复合家用热水系统热水产热量和发电量月均值最大值出现在 7 月份, 热水需热量最小值的月份出现在 7 月, 因此电辅助能耗值最小, 12 月至 3 月电辅助能耗相对较大, 全年太阳能保证率约为 0.44。

3) 敏感性分析表明, 电价的年增长率和基准折现率对系统的经济性能影响很大。当基准折现率变化范围为 0%~15%, 系统的投资动态回收期变化范围为 7.69~16.04 a, 在系统的寿命周期可接受范围之内, 综合能源价格小于 0.3 元/KWh。当电价增长率变化范围为 0%~10%, 电价格年增长率上涨时, 内部收益率显著提高, 取得较好的项目收益, 同时系统的动态投资回收期随着电价增长率增加而缩短, 因此当能源紧缺导致电价上涨时, 经济性优势更显著, 具有广阔的应用前景。

#### 基金项目

湖南省科技厅计划项目(2013FJ3003)。

#### 参考文献 (References)

- [1] Kern, E.C. and Russell, M.C. (1978) Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems. *Proceedings of the 13th IEEE Photovoltaic Specialists*, Washington DC, June 1978, 1153-1157.
- [2] Chow, T.T., Pei, G., Fong, K.F., et al. (2009) Energy and exergy analysis of photovoltaic-thermal collector with and without glass cover. *Applied Energy*, **86**, 310-316. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.04.016>
- [3] Zondag, H.A. (2008) Flat-plate PV-thermal collectors—A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **12**, 891-959.
- [4] 季杰, 陆剑平, 何伟, 等 (2006) 一种新型全铝扁盒式 PV/T 热水系统. *太阳能学报*, **8**, 765-773.
- [5] Kalogirou, S.A. (1996) Economic analysis of solar energy systems using spreadsheets. *Proceedings of the World Renewable Energy Congress IV*, **2**, 1303-1307.
- [6] Kumar, S. and Tiwari, G.N. (2009) Life cycle cost analysis of single slope hybrid (PV/T) active solar still. *Applied Energy*, **89**, 1995-2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.03.005>
- [7] Tselepis, S. and Tripanagnostopoulos, Y. (2001) Economic analysis of hybrid photovoltaic/thermal solar systems and comparison with stand PV modules. *Proceedings of the International Conference on PV in Europe*, 7-11 October 2001, 2515-2518.
- [8] Tripanagnostopoulos, Y., Souliotis, M., Battisti, R., et al. (2005) Energy, cost and LCA results of PV and hybrid PV/T solar systems. *Progress in Photovoltaics: Research and Appliances*, **13**, 235-250. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.590>
- [9] TRNSYS (2006) TRNSYS 16, a transient system simulation program. Solar Energy Laboratory, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, Madison.
- [10] GB 50015-2003 (2009) 建筑给水排水设计规范. 80-100.
- [11] ASHRAE (2011) 2011 ASHRAE handbook: HVAC applications, chapter 50 service water heating. Atlanta, American



Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc.

- [12] 中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学建筑技术科学系 (2005) 中国建筑热环境分析专用气象数据集. 中国建筑工业出版社, 北京, 51-58.
- [13] 刘仙萍, 饶政华, 廖胜明 (2013) 太阳能光伏/光热复合集热器能量转换性能的数值模拟. *中南大学学报(自然科学版)*, **6**, 2554-2560.
- [14] EnergyPlus Energy Simulation Software [EB/OL].  
[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather\\_data3.cfm/region=2\\_asia\\_wmo\\_region\\_2/country=CHN/cname=China](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=2_asia_wmo_region_2/country=CHN/cname=China)
- [15] 李军 (2002) 家用太阳热水器的经济性分析. *太阳能学报*, **5**, 564-570.