

基于层次分析法的太阳能利用技术综合评价*

秦汉时^{1,2,3,4}, 赵黛青^{1,2,3†}, 蔡国田^{1,2,3}, 王乐^{1,2,3,4}

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640;
3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本文首先利用一个非稳态传热模型对同一环境条件下光伏光热一体化(PV/T)系统、光伏系统(PV)和太阳能热水器的能效进行分析, 然后采用层次分析法(AHP)对不同品质终端能源输出的太阳能利用系统的能效统一表征, 并以北京、广州和银川为代表的不同城市自然环境及用电价格为条件的三种情景, 对三种太阳能利用系统的综合能源利用效率、累计净收益和投资回收期进行分析。结果表明, 太阳能利用系统的经济性不仅受到系统能源利用效率和成本的影响, 系统所在地的自然环境和电价水平也会引起系统经济性发生变化, 因此考虑多种因素的综合评价可以为太阳能技术推广提供更客观和准确的参考。

关键词: 太阳能; 投资回收期; 情景分析; 层次分析法

中图分类号: TK519

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2016.04.011

Economic Evaluation of Solar Technologies Based on Analytic Hierarchy Process

QIN Han-shi^{1,2,3,4}, ZHAO Dai-qing^{1,2,3}, CAI Guo-tian^{1,2,3}, WANG Le^{1,2,3,4}

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
2. Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper, an unsteady heat transfer model was established to simulate the energy efficiency of different solar systems such as solar photovoltaic-thermal (PV/T) system, photovoltaic (PV) system and solar water heater system under different climate conditions. The Analytic Hierarchy Process (AHP) method was then used to make a comprehensive analysis about the accumulated net income and payback period of these solar systems on equal terms, by using the results of the heat transfer model under three different electricity price in Beijing, Guangzhou and Yinchuan. Results showed that the economy of solar systems is not only interacted by cost and efficiency, but also by natural environment and electricity price. Under consideration with multi-elements, the evaluation may provide reference for the solar technology application.

Key words: solar energy; payback period; scenario analysis; Analytic Hierarchy Process (AHP)

0 引言

太阳能利用技术发展迅速, 光伏光热一体化(PV/T)技术作为一种新的技术, 被认为综合了光伏发电和太阳能热水器的优点, 可以有效提高太阳能利用率^[1]。如徐寅等^[2]制作的低倍聚光PV/T实验装置热效率为39.4%, 电效率为14.1%, 总能源效率为53.5%。

对于PV/T技术和其他太阳能利用技术的经济性对比分析已有不少研究报道, 如文献[3]指出在塞浦路斯采用PV/T系统可以获得比PV系统更高的经济效益。IBRAHIM等^[4]认为太阳能利用随着其技术进步有可能使投资回收期小于10年。ZHANG等^[5]回顾了太阳能利用技术的发展, 指出现有的经济性分析虽然表明PV/T系统能够带来比PV系统和太阳能热水器更高的投资回报, 但在考虑不同地区的自

* 收稿日期: 2015-12-30

修订日期: 2016-06-23

基金项目: 中国科学院战略研究与决策支持系统建设专项项目(0707Y41001)

† 通信作者: 赵黛青, E-mail: zhaodq@ms.giec.ac.cn

然条件和政策因素对经济性分析结果的影响方面，其研究还不够充分。

现有研究很少将 PV/T 技术同 PV 技术与太阳能热水器等其他太阳能技术置于同一外部条件下进行能效和经济性对比分析。难点在于太阳能热利用和光伏发电的能量转化原理不同，运行方法上也存在很大区别。不同系统生产的热价或电价也不相同^[6]。因此，为了客观合理地对不同太阳能利用技术进行能效和经济性评价，有必要建立一个纳入太阳能技术使用地区的自然环境和能源价格作为条件，能同时分析多种太阳能系统的评价模型。鉴于太阳能 PV/T 技术面临综合能源效率提高但成本增加的问题，本研究将采用新构建的评价模型，对太阳能光伏发电、太阳能热水器和太阳能 PV/T 系统进行综合分析和评价，研究结果可为判断不同太阳能利用技术在我国不同地区的商业推广前景提供依据和参考。

1 系统分析及建模

1.1 系统原理图

整个系统主要由玻璃盖板、光伏/集热器、冷却水流道、水箱以及连接管路组成（如图 1）。其中光伏模块由多晶硅电池组成，光伏模块输出电力，其他未被光伏板吸收转化的太阳能被铜管内的冷却水吸收产生热水，水循环还起到降低光伏板温度、减少因为光伏材料温度上升导致光伏转换效率降低的作用。在同样占地面积下，PV/T 系统的能源总效率得到了提高^[4,7-9]。

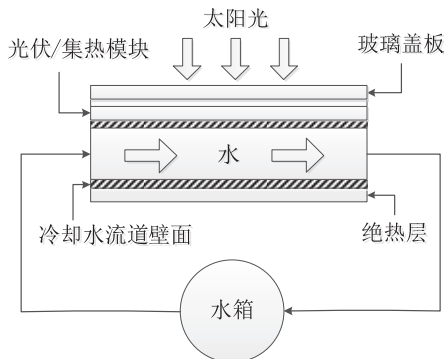


图 1 太阳能 PV/T 利用系统示意图（部分流道）
Fig. 1 Level section of PV/T system (partial channel)

1.2 传热模型

本节采用文献[10]中的 PV/T 物理模型，按照每个主要部件来逐层分析太阳能利用系统非稳态时的传热过程。同时做以下假设：

- (1) 忽略部件之间的接触热阻；
- (2) 整个系统侧面以及储水箱近似绝热；
- (3) 为了将 3 种系统置于同一条件下进行对比，假设 PV/T 系统中的电池覆盖率近似为 1；
- (4) 忽略流道内的流动阻力。

1.2.1 玻璃盖板

玻璃盖板的传热方程为：

$$\rho_g \delta_g c_g \frac{dT_g}{dt} = G(1 - \gamma_g) + (h_w + h_{r_{ga}})(T_a - T_g) + (h_{cg} + h_{r_{cg}})(T_c - T_g) \quad (1)$$

式中：角标 g、a、c 指代玻璃、环境和集热器，T 为温度，t 为时间，c 为比热容，ρ 为密度，δ 为厚度，G 为阳光辐照强度，γ 为透过率，h_w 为空气的对流换热系数，h_{r_{ga}} 为玻璃和环境的辐射换热系数，h_{cg} 为玻璃和集热器的对流换热系数，h_{r_{cg}} 为玻璃板与集热器的辐射换热系数。

1.2.2 光伏/集热模块

光伏/集热模块传热方程为：

$$\rho_c \delta_c c_c \frac{dT_c}{dt} = G\gamma_g \alpha_c - E + (h_{cg} + h_{r_{cg}})(T_g - T_c) + h_{cf} A_f (T_f - T_c) + \frac{T_a - T_c}{R_{in}} \quad (2)$$

式中：角标 f 指代冷却水，h_{cf} 为冷却水的对流换热系数，A_f 为集热器单位面积下冷却水流道的内表面积，α 为吸收率，E 为单位面积下的多晶硅光电转化平均功率。

$$E = G\eta_e [1 - \beta(T_c - 293)] \quad (3)$$

式中：η_e 为光伏电池在基准条件下（293 K）的光电转化效率，β 为温度系数。

公式（2）中 R_{in} 为系统的热损，若假设该装置四周绝缘良好，R_{in} 可以被近似表示为^[10]：

$$R_{in} = \frac{1}{h_w} \quad (4)$$

1.2.3 冷却水流道

冷却水流道传热方程为：

$$\rho_f A_z c_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = h_{cf} A_f (T_c - T_f) - mc_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \quad (5)$$

$$m = \rho_f u_f A_z \quad (6)$$

式中: A_z 为系统冷却水流道的总横截面积, u_f 为冷却水在流道中的流速, x 为沿流道方向的长度, m 为质量流量。

1.2.4 水箱

水箱的传热方程为:

$$m_{tk} c_{tk} \frac{dT_{tk}}{dt} = mc_f (T_{tk,i} - T_{tk,o}) \quad (7)$$

式中: 角标 tk 指代水箱, m_{tk} 为水箱容纳水的总质量, $T_{tk,i}$ 和 $T_{tk,o}$ 分别代表水箱进口和出口温度。

1.2.5 相关参数

h_w 和 h_{cg} 可以根据公式 (8) 和 (9) 求得^[11]:

$$h_w = 3.8u + 5.7 \quad (8)$$

$$h_{cg} = 1.613 \frac{(T_c - T_g)^{0.281}}{L_{gc}^{0.157}} \times \left[1 - 0.0018 \left(\frac{T_c + T_g}{2} - 283.15 \right) \right] \quad (9)$$

式中: u 为环境风速, L_{gc} 为玻璃盖板和光伏面板之间的间隙。

h_{rga} 和 h_{rcg} 则通过公式 (10) 和公式 (11) 计算:

$$h_{rga} = \varepsilon_g \sigma (T_g^2 + T_a^2) (T_a + T_g) \quad (10)$$

$$h_{rcg} = \frac{\sigma (T_g^2 + T_a^2) (T_a + T_g)}{\frac{1}{\varepsilon_g} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} \quad (11)$$

式中: ε 为发射率, σ 为斯蒂夫-玻尔兹曼常数。

h_{cf} 通过式 (12) 和式 (13) 计算:

$$h_{cf} = \frac{Nu_f k_w}{D_h} \quad (12)$$

$$D_h = \frac{2a_1 c_1}{a_1 + c_1} \quad (13)$$

式中: Nu_f 为努塞尔数, $Nu_f = 4.11^{[10]}$; k_w 为水的热导率; D_h 为水利直径; a_1 和 c_1 为铜管横截面的宽和高。

方程 (1)、(2)、(5) 和 (7) 构成的方程组描述了 PV/T 的传热及太阳能利用过程。考虑到非稳态传热中冷却水流道和水箱水温在传热过程中互为边界条件, 计算机编程采用迭代法来计算和完成对系

统热效率的分析, 流程如图 2 所示, 此时水箱传热方程由方程 (7) 转换为方程 (14)。

$$T1_{f-new} = \frac{n \times m \times T_f |_{x=L} + (m_{tk} - n \times m \times \Delta t) T1_f}{m_{tk}} \quad (14)$$

式中: n 为换热管个数; $T1_f$ 为水箱中水的温度; L 为太阳能吸热装置的长度; $T1_{f-new}$ 为水箱受到加热后的水温; Δt 为迭代时间, 在本文中 $\Delta t = 1$ s。 N 为计算总时长。

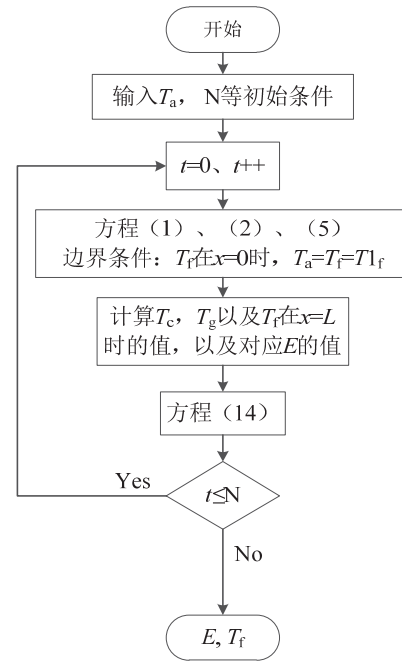


图 2 计算流程

Fig. 2 Computational flow chart

该模型不但能够对 PV/T 系统的传热过程进行较精确的分析, 而且还可以通过数学变换来计算太阳能光伏和平板式太阳能热水器的传热过程: 在不考虑玻璃盖板、冷却水和水箱的换热时, 模型即简化为太阳能光伏系统的传热和效率模型; 在不考虑光电转换效率时, 模型即为平板式太阳能热水器的传热和效率模型。

2 系统能源利用效率分析

2.1 日辐照强度对系统热效率的影响分析

利用图 2 所示的计算方式, 分析不同日辐照强度下三种太阳能系统的能源利用效率。

计算中所需要的系统参数如表 1 所示。

表1 计算中所输入的相关参数

Table1 Input parameters of the simulation model	
玻璃面板	面积: 1 m × 1 m
	透过率: 0.85
	发射率: 0.88
	与光伏面板间距: 0.025 m
光伏面板	面积: 1 m × 1 m
	温度系数: 0.045
	基准条件下光电转化效率: 0.15
	吸收率: 0.80 发射率: 0.80
吸热面板	面积: 1 m × 1 m
	铜管尺寸: 0.01 m × 0.03 m × 1 m (H × W × L)
	铜管个数: 8
	水的导热系数: 0.58 W · m ⁻¹ · K ⁻¹
	水的密度: 1 000 kg · m ⁻³
	比热容: 4 200 J · kg ⁻¹ · K ⁻¹
	流道内水的流速: 1 m · s ⁻¹
水箱容积: 100 L	
环境条件	室外温度: 293 K
	风速: 1 m · s ⁻¹

表2为计算得到的三种太阳能利用系统在不同阳光辐照条件下的太阳能转换效率, 表中 η_{se} 为太阳能光电转换效率, η_{sh} 为太阳能光热转换效率。

表2 三种系统在不同辐照强度下的太阳能转化效率
Table 2 The efficiency performance of the three systems under different radiation intensities

辐照强度 $G/(W \cdot m^{-2})$	PV/T 系统		PV 系统	太阳能热水器
	η_{se}	η_{sh}	η_{se}	η_{sh}
500	0.1260	0.51	0.1321	0.61
600	0.1256	0.51	0.1284	0.60
700	0.1253	0.50	0.1247	0.62
800	0.1250	0.51	0.1209	0.61
900	0.1247	0.51	0.1171	0.61
1000	0.1244	0.50	0.1132	0.61

表4 三个城市的平均气温

Table 4 Average temperatures of the three cities

城市	月平均气温 / °C												年平均气温 $T_a / °C$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
北京	-4.6	-2.2	4.5	13.1	19.8	24.0	25.8	24.4	19.4	12.4	4.1	-2.7	11.50
广州	13.3	14.4	17.9	21.9	25.6	27.2	28.4	28.1	26.9	23.7	19.4	15.2	21.83
银川	-9.0	-4.8	2.8	10.6	16.9	21.4	23.4	21.6	16.0	9.1	0.9	-6.7	8.52

由表2可以看出, PV系统由于系统本身吸收转化成电力之外的太阳光, 导致光伏面板升温, 使得光电转化效率随太阳能辐照强度增加而减少; 太阳能热水器由于系统传热效率的稳定, 使其光热效率基本不随太阳辐照强度的不同而发生变化, 维持在60%左右; PV/T系统由于其中的热水系统除了可以将未被光伏系统转化的太阳能利用起来产生热水, 还可以起到冷却光伏板的作用, 使得光伏面板的光电转化效率能基本保持在12.5%左右, 光热效率维持在50%左右。

2.2 考虑地区日照条件差异下的系统热效率分析

在实际运用过程中, 不同的地区辐照条件不同, 环境温度也不同, 把两者同时纳入分析更能反映太阳能利用系统实际应用中的问题。选定北京、广州、银川为代表的三个不同地区的气象环境为条件, 利用表3和表4的数据, 进一步分析三种系统的太阳能转化效率。表3的平均日总辐照强度 G_t :

$$G_t = \frac{R_a}{365} \quad (15)$$

式中, R_a 为年辐照总量。表3和表4均为2001年中国气象资料年册中的对应城市的统计数据。

表3 三个城市的平均辐照参数

Table 3 Average radiation parameters of the three cities

城市	平均日总辐照强度	平均日辐照时间
	$G_t / (MJ \cdot m^{-2})$	t / h
北京	13.46	3.73
广州	11.60	3.22
银川	15.85	4.40

根据以上条件计算出的三种系统能源转化效率如表 5, 不同地区的同一系统、不同系统在同一地区的太阳能转化效率以及转化的二次能源在品质和数量上都存在很大差异, 而不同品质

的能源在不同地区的价格也不一样, 导致了如在广州的 PV/T 系统与在北京的太阳能热水器以及在银川的 PV 系统的能效和经济性难以进行直接对比。

表 5 三种系统在不同条件下的太阳能转化效率

Table 5 Efficiency of the three systems under different conditions per day

城市	PV/T 系统				PV 系统		太阳能热水器	
	T_{1f}/K	η_{sh}	输出电力/kW·h	η_{se}	输出电力/kW·h	η_{se}	T_{1f}/K	η_{sh}
北京	298.5	0.44	0.47	0.126 5	0.40	0.108 4	301.4	0.53
广州	307.3	0.45	0.39	0.121 0	0.35	0.108 7	309.8	0.54
银川	297.4	0.42	0.56	0.127 6	0.48	0.108 1	300.8	0.51

2.3 基于能量综合利用准则的能效分析

由于单独光伏、光热或者光伏光热一体化这三种太阳能利用技术的不同能源转化终端产品——电力以及不同温度的热水之间难以直接进行定量分析, 本研究采用文献[12]提出的能量联产系统的新评价准则, 利用层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 将不同的能源转换方式转化的能源综合利用效率来对比分析不同的太阳能利用系统产出的能量利用率:

$$\eta = q_e \eta_{se} + k_h q_h \eta_{sh} \quad (16)$$

式中: η 为系统的能源综合利用效率, q_e 和 q_h 为基准点温度 (基准点温度为确定的环境温度) 下的发电能量利用率和发热量利用率的权重系数, k_h 为热能温度修正系数。

建立 AHP 模型与判断矩阵^[13], 判断矩阵如表 6 所示。

表 6 判断矩阵

Table 6 Judgement matrix

	电	热
电	1	3
热	1/3	1

计算权重指标 q_e 和 q_h 如表 7 所示。

表 7 各权重指标

Table 7 Weight target

	电	热	q
电	0.75	0.75	0.75
热	0.25	0.25	0.25

计算热能温度修正系数 k_h ^[13]:

$$k_h = (T_f - T_a) / \Delta T \quad (17)$$

式中, ΔT 为基准点温差, 按照一般家用热水适宜温度 325 K 和环境基准温度 293 K 计算, 则 $\Delta T=32$ K。表 8 为按照能量综合利用准则计算出来的三种太阳能系统在不同城市的综合能源利用效率。

表 8 三种系统的综合能源利用效率

Table 8 Equivalent efficiency of the three systems

城市	综合能源利用效率		
	PV/T	PV	太阳能热水器
北京	0.14	0.08	0.07
广州	0.13	0.08	0.06
银川	0.15	0.08	0.08

由表 8 可知, 转化为综合能源利用效率后, PV/T 系统和太阳能热水器在广州的综合能效最低, 银川最高; 三个地区的 PV 系统综合能效基本一致。

3 经济性计算

考虑到 PV/T 系统比 PV 和太阳能热水器相对节约支架等成本, 不同太阳能系统的成本和维护费用如表 9 所示。

表 9 三种系统的成本

Table 9 Costs of the three systems

系统	单位成本 / (元/m ²)	
	购置成本	年维护费用
PV/T	850	30
PV	500	20
太阳能热水器*	400	10

*太阳能热水器价格为不带电加热系统的价格。

以表 8 所示不同系统的综合能源利用效率为基础，将综合能源利用效率折合为电力转换效率以方便用电力价格来计算出北京、广州和银川三个地区气候和电力价格条件下不同系统的年收益 S 。

$$S = 365 \times \lambda G_t \eta P_e \quad (18)$$

式中： P_e 为居民电价，北京为 0.49 元/(kW·h)，广州为 0.61 元/(kW·h)，银川为 0.45 元/(kW·h)； λ 为综合能源利用效率与光电转化效率的权重系数。

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^3 \eta_{se-i}}{\sum_{i=1}^3 \eta_i} \quad (19)$$

式中，角标 $i = 1、2、3$ 分别指代三个城市； $\lambda = 1.5$ 。

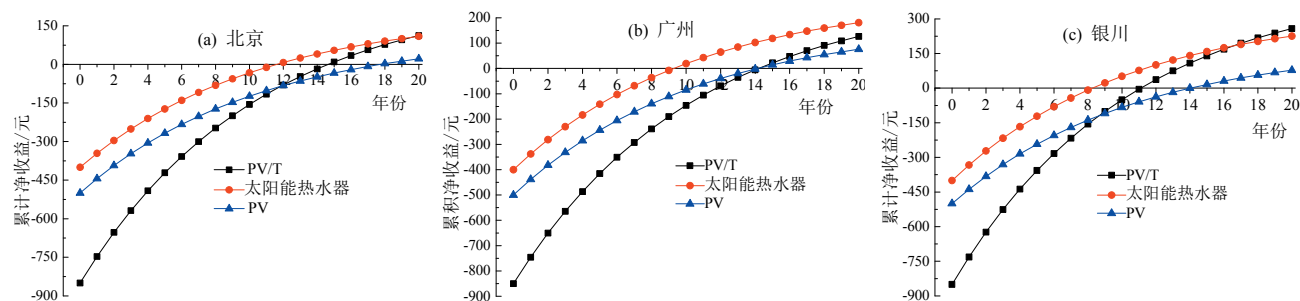


图 3 不同城市中不同系统的收益

Fig. 3 Performance of accumulated net income and cost payback period of different systems in different cities

银川在三个地区中太阳能资源最丰富，三种太阳能系统的累计净收益和投资回收期都优于其他两个地区；日辐照强度最低的广州，虽然其三种系统的综合能效最低，但由于其单位电价最高，使得这三种太阳能利用系统在广州的累计净收益和投资回收期反而优于阳光辐照条件更好的北京。

4 结 论

本文基于非稳态传热模型评价了不同地区自然条件下的 PV 系统、太阳能热水器和 PV/T 系统的能源利用效率，并在考虑地区不同电价条件下，利用层次分析法对比了 3 种系统的经济性，得到以下结论：

(1) 在相同辐照条件下，三种不同太阳能利用系统中 PV/T 系统的能源利用效率最好，但小于 PV 和热水器效率之和，而 PV 系统的能源利用效率最低。

(2) 在考虑了三个被选取城市的自然条件后，

表 10 三种系统在不同地区的年收益

Table 10 The income comparison of the three systems in different districts

城市	$S_{PV/T}$ / 元	S_{PV} / 元	S_h / 元
北京	143.10	81.35	69.84
广州	144.73	87.67	78.25
银川	160.24	87.89	83.50

按照年折旧率 0.09 来考虑，则在 20 年寿命期内，三种系统从开始投资到 20 年后寿命完结时在不同地区各自累计净收益曲线如图 3，并由该曲线与 X 轴的交点可以知道各个设备的投资回收期。

发现 3 种系统在阳光资源最少，平均温度最高的广州具备最高的能源利用效率，而在阳光资源最多和平均气温最低的银川能源利用效率反而最低。说明除阳光辐照强度这一被广泛考虑的重要因素外，气温也是影响太阳能设备利用的重要因素。因此，评价太阳能利用系统的效率和经济性，必须考虑到设备所在地区的气候条件。

(3) 基于能量综合利用理论，采用层次分析法，对比了三种系统的综合能源效率和经济性后发现，三种系统的经济性并不完全只受能源效率的影响，如综合能源效率最高的 PV/T 系统在三种情景下，在其设备寿命内并不一定经济性最好，而是会受到设备成本、当地环境和电力价格的综合影响。

综上所述，在不同地区推广太阳能利用技术时，不能单以技术的能效或成本的高低来进行判断，还需综合考虑所在地的自然环境和能源价格对该技术的经济性造成的影响。

参考文献:

- [1] WOLF M. Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences[J]. *Energy conversion*, 1976, 16(1/2): 79-90. DOI: 10.1016/0013-7480(76)90018-8.
- [2] 徐寅, 华永明, 王程遥, 等. 对采用定容式冷却的低倍聚光光伏/光热系统的设计与研究[J]. *太阳能学报*, 2013, 34(9): 1638-1643.
- [3] KALOGIROU S A, TRIPANAGNOSTOPOULOS Y. Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production[J]. *Energy conversion and management*, 2006, 47(18/19): 3368-3382. DOI: 10.1016/j.enconman.2006.01.012.
- [4] IBRAHIM A, OTHMAN M Y, RUSLAN M H, et al. Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2011, 15(1): 352-365. DOI: 10.1016/j.rser.2010.09.024.
- [5] ZHANG X X, ZHAO X D, SMITH S, et al. Review of R&D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (PV/T) technologies[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2012, 16(1): 599-617. DOI: 10.1016/j.rser.2011.08.026.
- [6] 杜凤丽, 谢宏. 太阳能热发电经济性分析和产业激励政策建议[J]. *新能源进展*, 2013, 1(3): 197-207. DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2013.03.001.
- [7] HUANG B J, LIN T H, HUNG W C, et al. Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems[J]. *Solar energy*, 2001, 70(5): 443-448. DOI: 10.1016/S0038-092X(00)00153-5.
- [8] MARION B. A method for modeling the current-voltage curve of a PV module for outdoor conditions[J]. *Progress in photovoltaics: research and applications*, 2002, 10(3): 205-214. DOI: 10.1002/pip.403.
- [9] 季杰, 程洪波, 何伟, 等. 太阳能光伏光热一体化系统的实验研究[J]. *太阳能学报*, 2005, 26(2): 170-173. DOI: 10.3321/j.issn:0254-0096.2005.02.006.
- [10] CHOW T T, HE W, JI J. Hybrid photovoltaic-thermosyphon water heating system for residential application[J]. *Solar energy*, 2006, 80(3): 298-306. DOI: 10.1016/j.solener.2005.02.003.
- [11] 符慧德, 裴刚, 季杰, 等. 槽式聚焦光电/光热综合利用系统的性能研究[J]. *太阳能学报*, 2010, 31(9): 1161-1167.
- [12] 王云波, 李政, 倪维斗. 层次分析法在多联产系统综合性能评价中的应用[J]. *动力工程*, 2006, 26(4): 580-586. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7607.2006.04.028.
- [13] 和彬彬, 段立强, 杨勇平. 冷热电联产系统新评价准则研究[J]. *热能动力工程*, 2009, 24(5): 592-596.

作者简介:

秦汉时 (1985-), 男, 博士研究生, 主要从事可持续能源技术评价、能源战略研究。

赵黛青 (1958-), 女, 博士, 研究员, 主要从事可持续能源发展战略、能源经济和能源政策研究。

蔡国田 (1975-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事能源战略研究。

王乐 (1984-), 女, 博士研究生, 主要从事低碳政策与制度、碳排放交易体系研究。