

平板式与槽式聚光太阳能电池组件性能分析

王云峰¹ 李明^{1,2} 林文贤² 王六玲¹ 魏生贤^{1,2} 徐永锋¹ 张兴华¹ 项明¹

(¹云南师范大学物理与电子信息学院, ²云南师范大学太阳能研究所, 云南 昆明 650092)

摘要 对平板单晶硅太阳能电池板和槽式聚光太阳能热联供(PV/T)系统进行实验对比,从系统热、电性能方面进行比较,并用“净现值”法对两套系统经济性进行分析。结果表明,槽式聚光 PV/T 系统的最大输出功率是传统平板式 PV 系统的 7~10 倍,且通过回收电池的余热,全年可产热 2929.433 MJ。在 20 年的寿命周期中,槽式聚光 PV/T 系统可获得更多盈余,能较早收回投资成本。用聚光装置进行太阳能发电,可有效提高太阳能的综合利用率,减少投资成本。

关键词 太阳能电池;性能分析;实验对比;槽式聚光器;平板式

中图分类号 TK519 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092908.2287

Performance Analysis on Solar Cell Modules of Flat-Plate and Trough Concentrating Photovoltaic System

Wang Yunfeng¹ Li Ming^{1,2} Lin Wenxian² Wang Liuling¹ Wei Shengxian²
Xu Yongfeng¹ Zhang Xinghua¹ Xiang Ming¹

(¹Department of Physics and Electric Information, ²Institute of Solar Energy,
Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650092, China)

Abstract The comparative experiments of solar cell module of single crystalline silicon and trough concentrating photo-voltaic/thermal (PV/T) system of super cells were made from the thermal and electrical perspectives, and the economics of these two systems were also analyzed with the method of “net present value”. The results indicate that the maximum output electric power of trough concentrating PV/T system is 7–10 times that of flat-plate photovoltaic (PV) system. The PV/T system can generate heat about 2929.433 MJ per year by recycling the surplus heat of solar cell. Within the life time of 20 years, The PV/T system can acquire more surpluses and take investment cost back soon. Using concentrator for solar cell, the utilization of solar energy can be enhanced effectively with reduction in the investment cost.

Key words solar cell module; performance analysis; experimental comparison; trough concentrator; flat plate

1 引言

太阳能光伏发电是将太阳辐射能转换为电能,其发电系统主要由太阳能电池组、蓄电池组、控制器、逆变器构成。太阳能电池组是太阳能光伏发电系统的核心部分,也是光伏发电系统中价值最高的部分,它的质量和成本将直接决定整个系统的质量和成本。目前,太阳能电池板的价格约为每平方米 3000~4000 元,若再考虑其配套装置成本,光伏发电系统成本将增至每

平方米 6000 元左右。为降低光伏发电成本,国内外学者对聚光光伏技术进行了大量研究,考虑用廉价的光学材料代替昂贵的半导体材料,并提出可同时获取电能和热能(photovoltaic/thermal, PV/T)的系统^[1~6]。本文通过对平板 PV 系统和自行研制的槽式聚光 PV/T 系统的电性能和经济性等方面进行研究,从热、电性能和减少成本角度对两种系统进行了评价和比较,以期为进一步发展光伏发电提供参考。

收稿日期: 2008-10-06; 收到修改稿日期: 2008-12-16

基金项目: 国家 973 计划前期预研项目(2007CB216405)、国家 863 计划(2006AA05Z410)和云南省自然科学基金重点项目(2007C0016Z,2007GA008)资助课题。

作者简介: 王云峰(1984—),男,硕士研究生,主要从事太阳能热利用方面的研究。E-mail: yn_wyf@yeah.net

导师简介: 李明(1964—),男,教授,主要从事太阳能利用方面的研究。E-mail: lmdocyn@public.km.yn.cn

2 实验装置及原理

2.1 平板式光伏系统

图1为平板太阳能电池组件实物。该组件由2组单晶硅电池板并联而成,朝向正南以水平面成 30° 角倾斜放置。每组电池板规格为 $1.176\text{ m} \times 0.531\text{ m}$,在大气质量1.5、标准光照强度 1000 W/m^2 、环境温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下测得的额定开路电压为 22 V ,短路电流为 4.97 A ,峰值电压、电流分别为 18 V 、 4.44 A ,峰值功率为 80 W 。每组电池板又由 $36(9 \times 4)$ 片单晶硅电池串联组成,每片单晶硅电池的规格为 $0.125\text{ m} \times 0.125\text{ m}$,单片电池的实际面积为 0.0149 m^2 。

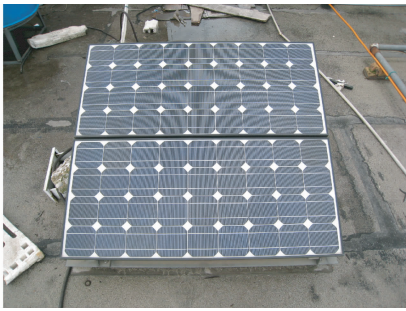


图1 平板光伏组件实物

Fig. 1 Photograph of the flat-plate photovoltaic solar cell modules

平板电池组件的填充因子 f_{FF} 和光电转换效率 η_e 可由下式求得^[7]:

$$f_{\text{FF}} = \frac{P_m}{V_{\text{oc}} I_{\text{sc}}}, \quad (1)$$

$$\eta_e = \frac{P_m}{A_t P_{\text{in}}}, \quad (2)$$

式中 P_m 为最大输出功率; V_{oc} 为开路电压; I_{sc} 为短路电流; A_t 为包括栅线图面积在内的太阳能电池总面积; P_{in} 为单位面积入射光功率;PV板的受光面积为 1.2455 m^2 ,若按太阳能电池面积计算,实际受光面积为 1.0698 m^2 。

考虑到封装玻璃盖板对太阳光透过率 τ 的影响,电池对入射太阳光的实际吸收率 μ_p 可按下式计算^[6]:

$$\mu_p = (\tau\alpha)_{\text{eff}} = \frac{\tau_{\text{enc}}\alpha_{\text{cell}}}{1 - \rho_{\text{enc}}\rho_{\text{cell}}}, \quad (3)$$

式中 τ_{enc} 为封装玻璃层的透过率,取 0.90 ; ρ_{enc} 为封装玻璃层的反射率,取 0.10 ; α_{cell} 为电池吸收面的吸收率,取 0.95 ; ρ_{cell} 为电池吸收面的反射率,取 0.05 ^[6]。将数值代入(3)式得 $\mu_p = 0.86$ 。于是有

$$P_{\text{in}} = \mu_p G_{\text{tilt}}, \quad (4)$$

式中 G_{tilt} 为辐射表测得的PV板倾斜面上单位面积

入射光功率。

2.2 槽式聚光 PV/T 系统

图2(a)和(b)分别为槽式聚光太阳能PV/T系统实验装置示意图和实物图。抛物反射面有效面积

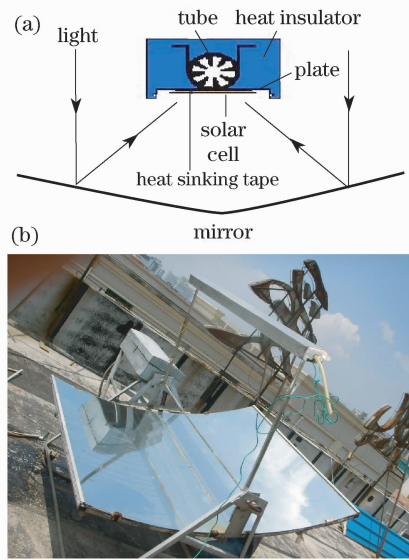


图2 槽式聚光太阳能PV/T系统实验装置示意图

(a), 系统实物图(b)

Fig. 2 Experimental apparatus (a), photograph (b) of the trough concentrating solar PV/T system

为 1.95 m^2 ,聚焦宽度 0.1 m ,实际聚光比 10.269 。铝合金吸收体长 1.5 m ,宽 0.12 m ,高 0.09 m ,吸收体内直径 0.03 m 。16片单晶空间太阳能电池串联贴于吸收体光照面上,单片空间太阳能电池规格为 $0.06\text{ m} \times 0.07\text{ m}$,出厂测试的 U_{oc} 为 0.55 V , I_{sc} 为 1.45 A 。入射太阳光经槽式抛物面反射后聚焦到吸收体上,通过吸收体聚光面上的太阳能电池把太阳辐射能转换成电能。在聚光情况下,太阳能电池温度迅速升高,将导致其光电转换效率明显下降。为保证太阳能电池效率不受温度影响,以水作为冷却工质,通过其在吸收体内强制循环换热,降低太阳能电池温度并同时获得有用热能。经研究,对导热管和吸收体光照面进行分析和优化^[8],并从形状误差等方面对聚光镜面进行了改进^[9],已经大幅提高了系统热效率。

槽式聚光PV/T系统中空间太阳能电池的 f_{FF} 和 η_e 仍可按(1)式,(2)式计算,但(2)式中的 $A_t P_{\text{in}}$ 应按下式计算:

$$A_t P_{\text{in}} = \mu_t G_{\text{direct}} A, \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho F_{\text{shape}} F_{\text{dirt}} F_{\text{shade}}. \quad (6)$$

(5)式中, μ_t 为镜面对入射太阳光的实际光学效率; G_{direct} 为槽式聚光镜面接受的直射光功率,由直射

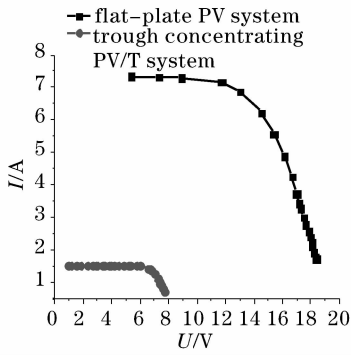


图3 普通光强下两系统的 $I-U$ 曲线

Fig. 3 $I-U$ curves of flat-plate PV and concentrating PV/T with common irradiation

表测得; A 为槽式聚光反射镜面面积。(6)式中^[10], ρ 为镜面反射率; F_{shape} 为镜面形状精确率因子, 由加工因素确定; F_{dirt} 为镜面污染指数, 由使用环境确定; F_{shade} 为玻璃镜面遮挡指数, 由使用过程中相关物体对玻璃反射面的遮挡情况确定。将数值代入(6)式得 $\mu_t = 0.7$ 。

该系统除输出电能外, 还获得热能, 其热效率为

$$\eta_t = \frac{mc_{p,f}(T_{\text{out}} - T_{\text{in}})}{P_{\text{in}}A_t}, \quad (7)$$

式中 m 为流体的质量流量, $c_{p,f}$ 为流体平均温度下的定压比热容, T_{out} 为流体出口温度, T_{in} 为流体入口温度, $A_t P_{\text{in}}$ 仍按(5)式计算。

3 实验结果和性能分析

在不同时段, 不同辐照度下对上述平板式 PV 系统和槽式聚光 PV/T 系统进行多次测试。所用

测试仪器的型号和测量精度分别为: 锦州阳光科技有限公司生产的 TBQ-2 型总辐射表, $\pm 2\%$; TBS-2-2型直辐射表, $\pm 2\%$; EC-9S(X) 风速传感器, $\pm (0.3 + 0.03 V) \text{ m/s}$; 昆明光伏科技有限公司自主研发的 TFC40/450 光伏方阵/组件测试仪, $\pm 1\%$ 。测量数据及相关参数列于表 1 和表 2 中。聚光下的空间太阳能电池经吸收体内流动水的冷却, 其表面温度和一倍太阳下平板 PV 系统中的单晶硅太阳能电池表面温度相差不大。虽然聚光后电效率有所下降, 但是功率成倍增加, 并且有可观的热能产出。图 3 是平板式 PV 系统中所用的单晶硅太阳能电池与槽式聚光 PV/T 系统中所用的空间太阳能电池在不聚光下的 $I-U$ 曲线对比图。在同一辐照度, 两种电池 $I-U$ 曲线形状相似, 其差异只是由于电池片面积大小不同和串并联片数不同引起的。此时平板式 PV 系统最大电功率为 90.2522 W, 而槽式聚光 PV/T 系统最大电功率为 9.3951 W, 平板式系统的最大电功率几乎是槽式聚光系统的 10 倍, 最大电流约 5 倍, 最大电压接近 2.5 倍。图 4 是单晶硅太阳能电池与聚光条件下空间太阳能电池的 $I-U$ 曲线对比图。在同一辐照度时, 聚光条件下的槽式聚光 PV/T 系统 $I-U$ 曲线与未聚光条件下(图 3)完全不同, 已近似为一条直线。此时槽式聚光系统的最大电功率为 39.427 W, 是其未聚光条件下的 4 倍多, 最大输出电流已增至平板式 PV 系统的 1.7 倍, 最大输出电压也比未聚光时有所增加。

为比较两套系统的电性能, 现比较两系统等面积受光时的输出电功率, 并做出最大电功率随太阳

表 1 平板式 PV 系统实验数据

Table 1 Measured data of the flat-plate solar PV system

total irradiation /(W/m^2)	ambient temperature / $^{\circ}\text{C}$	wind speed /(m/s)	cell temperature / $^{\circ}\text{C}$	max electric power / W	electrical efficiency / $\%$
234	22.0	1.1	31	24.883	11.558
672	24.3	1.5	37	56.392	9.1213
814	24.5	0.9	41	69.860	9.3285
994	25.1	0.1	49	90.252	9.8692
1056	28.0	1.0	55	96.252	9.9073
1208	28.5	2.7	50	102.124	9.1890
1280	29.0	1.4	59	109.242	9.2766

辐射变化的对比图, 如图 5 所示。从图中可知, 虽然两系统的最大电功率随太阳辐照度的增加都有所增加, 但当辐照度小于 $700 \text{ W}/\text{m}^2$ 时, 槽式聚光 PV/T 系统电功率曲线斜率比平板式 PV 系统电功率曲线斜率更大, 这说明槽式聚光 PV/T 系统电功率对光强更敏感。随光强的增加, 其功率增大更快。当辐

照强度大于 $700 \text{ W}/\text{m}^2$ 时, 槽式聚光 PV/T 系统的最大输出电功率曲线变得平缓, 甚至有下降的趋势, 而平板式 PV 系统最大输出电功率仍然呈现出上升趋势。当辐照度低于 $700 \text{ W}/\text{m}^2$ 时, 槽式聚光 PV/T 系统所用空间太阳能电池每平米的输出功率约为平板式 PV 系统所用单晶硅太阳能电池每平米输出功

率的 10 倍。但辐照强度超过 700 W/m^2 后,两系统逐渐缩小。最大输出功率相差约 7 倍,并随光强增大其差距

表 2 槽式聚光 PV/T 系统实验数据

Table 2 Measured data of the trough concentrating solar PV/T system

direct radiation / (W/m^2)	mass flow / (kg/s)	ambient temperature / $^{\circ}\text{C}$	wind speed / (m/s)	inlet fluid temperature / $^{\circ}\text{C}$	outlet fluid temperature / $^{\circ}\text{C}$	cell temperature / $^{\circ}\text{C}$	max electric power / W	electrical efficiency / %	thermal efficiency / %
968.36	0.011	16.0	4.0	19.6	34.6	53	43.407	6.50	36.7
976.08	0.011	16.0	1.3	21.0	37.4	57	42.137	6.26	39.7
978.40	0.011	16.4	2.9	21.6	37.1	56	42.571	6.31	37.5
982.25	0.011	16.5	2.4	22.4	38.1	57	42.190	6.22	38.01
976.08	0.011	16.8	3.8	22.9	37.9	56	42.467	6.30	36.4
953.70	0.011	16.4	3.5	24.1	38.7	57	42.095	6.40	36.3
949.85	0.011	16.9	1.0	24.6	40.6	60	40.971	6.25	39.9

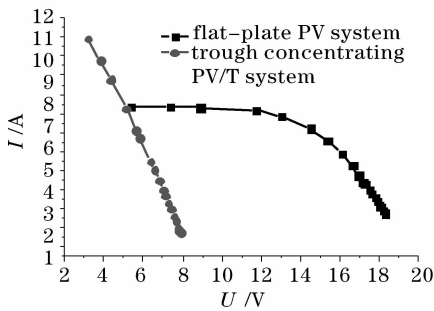
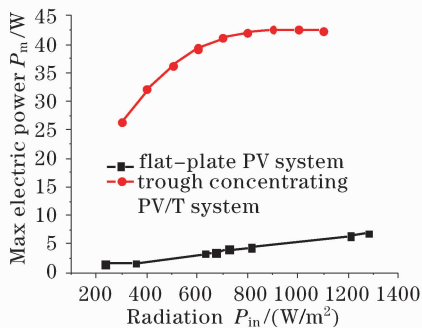
图 4 聚光下的太空电池与普通光强下的单晶硅电池的 I - U 曲线Fig. 4 I - U curves of super cell with concentrating and single crystalline silicon solar cell with common irradiation

图 5 两系统最大电功率对比

Fig. 5 Comparison of the maximum electric power of the two systems

相同受光面积时,槽式聚光 PV/T 系统不仅输出高于平板式 PV 系统的电能,还输出热能。该 PV/T 系统在晴天工况下连续运行 200 min,每隔 10 min 对吸收体进出口处水温记录一次,其温度随时间变化曲线如图 6 所示。随着工作时间的增加进水温度越来越高,随着进水温度的升高,进出水温差逐渐减小。出水温度出现起伏是由于受到外界环境因素变化的影响,这些因素包括瞬时风速,瞬时太阳

辐照度或反射镜面有遮挡等。储热水箱中 152.5 L 水经过 200 min 的循环工作后,水温从最初的 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $42 \text{ }^{\circ}\text{C}$,共吸收热量 10.8 MJ,其热功率为 903.05 W。

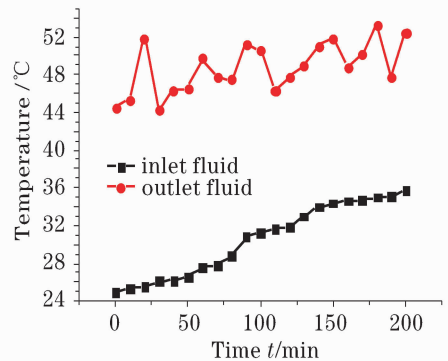


图 6 进出水温随工作时间变化

Fig. 6 Temperature of inlet and outlet fluid versus time

4 经济性分析

通过对两套系统的性能进行比较分析,可知在相同工况下,槽式聚光 PV/T 系统能够获得更多能量收益。

根据能源分析基本原理,借鉴常规能源系统的经济分析法,本文采用“寿命周期法”^[11]和“净现值(Net present value, NPV)分析法”^[12]对两系统进行对比分析。即将 PV 或 PV/T 系统的全部投资成本和寿命年限内的盈余折算成现时等价总金额,通过计算出两套系统在寿命周期内的供能盈余值,比较分析出两套系统经济上的优劣。

系统净现值(NPV)由下式给出^[11]:

$$V_{\text{NP}} = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+i)^t} - C, \quad (8)$$

式中 C 为项目初始投资额的现值; F_t 为第 t 年现金净流量(包括项目终结时终结现金流量); i 为项目

投资的预期报酬率,即设定的贴现率; n 为整个投资期年数(包括建设期和运营期)。系统成本包括初期投资和运行费用两部分,由于两系统运行简单、运行费用较少、为简化分析,下面只讨论二者的初期投资。

4.1 平板式太阳能 PV 系统的经济性

该系统的峰值功率为 160 W,有效采光面积为 1.0698 m^2 。设该系统蓄电池库仑效率为 0.9,太阳电池衰减系数为 0.95,其经济寿命为 20 年。根据昆明市气象局提供的相关气象统计数据,见表 3,并根据参考文献[12]和[13]计算得该套系统年总发电量约为 241.903 kWh。

单套平板式 PV 系统的初始投资(包括单晶硅

电池板及其安装费用)为 5000 元。昆明市区现行居民用电价格为为千瓦时 0.5 元。假设电价的通货膨胀率为 8%,贴现率在系统整个使用期内保持 10% 不变。计算得系统建造使用后的第一年可节省电费 120.95 元。对系统按直线法折旧,并按照(8)式计算得 20 年寿命周期盈余值为 1154.06 元,可见按此种情况约 15 年即可收回投资。

4.2 槽式聚光太阳能 PV/T 系统的经济性

受天气和季节变化的影响,槽式聚光太阳能 PV/T 系统的热、电效率均随季节的变化而变化。根据实验数据得出的系统热效率 η_t 、电效率 η_e 及表 3 给出的昆明地区月平均日辐照量,可计算出该系统的月有效发电量 Q_e 和产热量 Q_w ,如表 4 所示。

表 3 昆明市相关气象资料

Table 3 Related meteorologic data of Kunming city

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
average temperature / $^{\circ}\text{C}$	8.1	9.9	13.2	16.6	19	19.9	19.8	19.4	17.8	15.4	11.6	8.2
average daily globe irradiation /($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)	13.322	15.928	18.368	19.423	17.655	14.565	13.571	14.681	12.950	11.638	11.590	11.884
average monthly sunshine hours /h	231.5	227.2	264	252.8	219.6	140.2	128.4	149.5	127.8	149	175.7	206.6
Maximum temperature / $^{\circ}\text{C}$	31.5											
Minimum temperature / $^{\circ}\text{C}$		5.4										
Rainy days (annual) /day			134.6									
Snowy days (annual) /day					2.2							
Latitude /($^{\circ}$)						25.017						
Longitude /($^{\circ}$)							102.68					
Altitude /m												1892.4

表 4 槽式聚光太阳能 PV/T 系统的月发电量和产热量

Table 4 Monthly thermal and electrical output of the trough concentrating solar PV/T system

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
average daily globe irradiation /($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)	13.322	15.928	18.368	19.423	17.655	14.565	13.571	14.681	12.950	11.638	11.590	11.884
electrical efficiency /%	6.16	6.27	6.83	6.90	6.44	6.23	6.18	6.21	6.08	6.03	6.03	6.06
thermal efficiency /%	36.8	39.0	43.4	45.8	43.3	41.7	39.6	40.5	39.3	35.9	35.3	35.6
monthly electric generation /kWh	9.646	10.603	14.746	15.245	13.364	10.322	9.858	10.716	8.956	8.249	7.950	8.465
monthly heat generation /MJ	207.45	237.42	337.32	364.28	323.48	248.71	227.41	251.60	208.41	176.79	167.54	179.02

根据表 4 可知,该槽式聚光 PV/T 系统所用的 0.0672 m^2 空间太阳电池每年可发电 128.12 kWh,可产热 2929.433 MJ。若该热量完全是由管道煤气燃烧供给,在燃烧效率为 80% 条件下,需用煤气 242.5 m^3 ,目前昆明地区居民用煤气价为每平方米 0.79 元,则费用约为 191.6 元。可知该系统每年可为用户节省供暖和供电费用分别为 191.6 元和 64 元,即共节省费用 255.6 元。

规模化后一台小型槽式聚光 PV/T 系统的初期投资包括太阳电池、跟踪控制装置、储热水箱和支承结构,共计 4000 元。同样假设系统使用周期为

20 年,且按直线法折旧,能源通货膨胀率为 8%,贴现率为 10%,则按(8)式计算得 20 年寿命周期盈余值为 3558.4 元,且收回投资成本只需 10 年即可。

由分析可知,槽式聚光 PV/T 系统在寿命周期内的盈余值约是平板 PV 系统的 3 倍,且收回投资成本的时间也远小于平板 PV 系统。为进一步分析槽式聚光 PV/T 系统,在相同辐照强度下实验得每平米空间太阳能电池未聚光时最大输出功率为 127.5W,而聚光后最大输出功率是 643.7 W,约是聚光前的 5 倍。目前每平米空间太阳能电池价格为 238 美元,聚光后能节省 4 m^2 太阳能电池,即节约

成本 952 美元,约合人民币 6664 元。按目前聚光比计算,聚光器可代替 80% 的太阳能电池,而每平方米太阳能电池需 33.3 m² 反射镜面,显然可用 133.2 m² 的反射镜面代替 4 m² 的太阳能电池,即投资 2200 元在反射镜面上就能创造原本需 6664 元的太阳能电池才能获得的价值,节省了 4464 元。这就是聚光光伏系统的最大优势,可用相对廉价的聚光装置代替昂贵的光伏电池。

5 结 论

选取单晶硅太阳能电池板和单晶空间太阳能电池槽式聚光系统,通过实验对两套系统在相同条件下的最大输出功率等方面的性能进行了测试对比。结果表明,在晴天辐照稳定下,每平米空间太阳能电池聚光下的最大输出功率约是其不聚光下的 5~6 倍,是单晶硅太阳能电池板的 7~10 倍,而生产成本约为不聚光下的 70%。从经济角度分析,槽式聚光 PV/T 系统比平板 PV 系统能更快收回投资成本,且可获得更多盈余。因此性价比高的槽式聚光太阳能 PV/T 系统具有广阔的发展前景。

参 考 文 献

- 1 T. T. Chow. Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model[J]. *Solar Energy*, 2003, **75**(2):143~152
- 2 J. S. Coventry, K. Lovegrove. Development of an approach to compare the 'value' of electrical and thermal output from a domestic PV/thermal system[J]. *Solar Energy*, 2003, **75**(1): 63~72
- 3 Volker Quaschnig. Technical and economical system comparison of photovoltaic and concentrating solar thermal power systems depending on annual global irradiation[J]. *Solar Energy*, 2004, **77**(2):171~178

- 4 H. A. Zondag, D. W. de Vries, W. G. J. van Helden *et al.*. The yield of different combined PV-thermal collector designs[J]. *Solar Energy*, 2003, **74**(3):253~269
- 5 Zhai Hui, Dai Yanjun, Wu Jingyi. Investigation of concentrating solar photovoltaic/thermal system performance based on Fresnel lens[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, **28**(5): 725~728
翟 辉,代彦军,吴静怡. 基于菲涅尔透镜的聚焦太阳能 PV/T 系统热电性能研究[J]. *工程热物理学报*, 2007, **28**(5):725~728
- 6 Ge Xinshi, Ye Hong. The simplified performance analysis of the PV/T system under ideal conditions [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2006, **27**(1):30~35
葛新石,叶 宏. PV/T 电、热联产系统在理想条件下的性能简化分析[J]. *太阳能学报*, 2006, **27**(1):30~35
- 7 Zhao Fuxin, Wei Yanzhang. *Solar Cell and Application* [M]. Beijing: National Defence industry Press, 1985. 84~85
赵富鑫,魏言章. *太阳能电池及其应用* [M]. 北京:国防工业出版社,1985. 84~85
- 8 Xiang Ming, Li Ming, Wang Liuling *et al.*. Investigation of performance on trough concentrating solar photovoltaic/thermal system based on super cells[J]. *Acta Optic Sinica*, *accepted*, 2009, **29**(2):482~489
项 明,李 明,王六玲等. 空间太阳能电池槽式聚光热电联供系统特性分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2):482~489
- 9 Liu Ying, Dai Jingming, Lang zhiguo *et al.*. Finite-element analysis for flux distribution on focal plane of rotating parabolic concentrators[J]. *Acta Optic Sinica*, 2007, **27**(10):1775~1778
刘 颖,戴景民,郎治国等. 旋转抛物面聚光器焦面能流密度分布的有限元分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10):1775~1778
- 10 J. S. Coentry. *A Solar Concentrating Photovoltaic/Thermal Collector* [D]. Canberra: Australian National University, 2004
- 11 Edward Andrew. *The Basis of Solar Energy Conversion* [M]. Li Guangze *et al.*. Transl. Xi'an: Institute of Solar Energy of Xi'an, 1986. 294~322
爱德华·安德逊. *太阳能转换基础* [M]. 李广泽等译. 西安:西安太阳能利用所,1986. 294~322
- 12 Xu Shiguo, Lü Shaoqin. Economic analysis of solar photovoltaic systems[J]. *New Energy Sources*, 1995, **17**(4):24~28
徐世国,吕绍勤. 太阳能光伏电源系统的经济性分析[J]. *新能源*, 1995, **17**(4):24~28
- 13 Zhuang Su. How to switch the globe irradiation to total irradiation[J]. *Solar Energy*, 1998, (01): 20~21
庄 肃. 如何将水平面上太阳总辐射转换成倾斜面上太阳总辐射[J]. *太阳能*, 1998, (01):20~21