

A Property Analysis of Trough PV/T System under Different Width Focus Line

Zhang Xinghua^{1,2}, Li Ming^{1,3}

1. School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China;

2. College of Solar Energy Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330013, China

3. Solar Energy Research Institute, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China

1. E-mail zhangxinghua28@163.com.cn, 2. E-mail lmllldy@163.com

Abstract: In order to analyze the impact of the thermoelectric properties of the trough concentrating combined solar Photovoltaic/Thermal system with focus line width, A mathematic model of the thermoelectric properties of the trough concentrating PV/T system had been established. The impact of the thermoelectric properties of the trough concentrating combined solar Photovoltaic/Thermal system with focus line width had been analyzed. The calculation based on the model is agreeable with experimental results, the average errors between calculations and experiments are less 6.5%. When the focal line width reduces 10 percents, experimental data and the theoretical data of heat exergy power of super cell and polycrystalline silicon cell respectively have an average increase of 0.296 W and 0.30 W、0.12 W and 0.13 W; When the focus line width decreases 1%, the maximum output power of super cell with better electrical properties reduces 0.1342 W-0.2566 W. All those work are benefits to further study in improving the efficiency of solar concentrating trough system and cosmically making use of concentrating PV/T system.

Key words: Trough concentrating; combined solar Photovoltaic/Thermal system; the maximum output power ; the total exergy efficiency

焦线宽度对槽式聚光热电联供系统性能影响的火用分析

张兴华^{1,2}, 李明^{1,3}

1. 云南师范大学物理与电子信息学院, 昆明, 中国 650092

2. 南昌理工学院太阳能工程学院, 南昌, 中国 330013

3. 云南师范大学太阳能研究所, 昆明, 中国 650092

1. E-mail zhangxinghua28@163.com.cn, 2. E-mail lmllldy@163.com

摘要: 为分析焦线宽度对槽式聚光热电联供系统热电性能的影响, 建立了该系统的热电模型, 分析了焦线宽度对槽式 PV/T 系统热电性能的影响。与实验结果对比研究发现, 理论计算与实验吻合较好, 平均误差在 6.5% 以内。对于太空电池和多晶硅电池, 焦线宽度每减少 10%, 热的有用能功率之实验值和理论值分别平均增加 0.296 W 和 0.30 W, 0.12 W 和 0.13 W; 而对于电性能较优的太空电池, 焦线宽度每减小 1%, 其最大输出功率降低 0.1342 W-0.2566 W。本研究成果可对提高槽式聚光系统效率和大规模利用聚光光伏发电提供一定的依据。

关键词: 槽式聚光; 热电联供系统; 最大输出功率; 火用效率

1 引言

能源危机促使太阳能研究成为热点之一, 在降低

基金项目: 国家高技术研究发展(863)计划(2006AA05Z410); 云南省自然科学基金重点资助项目(2007C0016Z)

光伏发电成本基础上提高光伏电池转化效率是高效利用太阳能的重点。采用聚光方法, 提高单位面积太阳能电池的输出功率, 降低光伏发电成本, 具有较好的应用前景。国际上, 20 世纪 70 年代末至 80 年代初, 美

国 Brown 大学的 Russell 教授最先涉及光伏与光热的研究^[1,2]；不久挪威学者也对 PV/T 系统进行了实验研究^[3,4]；2002 年希腊学者对 PV/T 系统进行了实验研究^[5]，较为详细的报道了用水或空气作为太阳电池板冷却工质时系统的供电与供热特性；澳大利亚国立大学可再生能源研究中心对槽式聚光系统在热电联供方面做了较系统的研究^[6]。本文在对空间太阳电池和多晶硅太阳电池 PV/T 系统在槽式聚光条件下的热电性能模型进行实验验证的基础上，分析焦线宽度对 PV/T 系统性能的影响。并进行了较为深入的探讨和理论分析，以期提高太阳能利用综合效率。

2 实验装置及工作原理

太阳能热电联供系统装置图如图 1 所示，系统装置主要包括：太阳电池腔体、抛物面反射镜、跟踪控制装置、数据采集装置、用电器、水箱、水泵和流量计等。太阳能热电联供系统的核心部件是太阳电池腔体，其由太阳电池、绝缘导热胶、腔体和保温材料构成，结构如图 1 所示。腔体由导热性能良好的铝合金材料加工而成，长 300.0cm、宽 12.0cm、高 9.0cm、内直径为 3.0cm，在光照面上贴有电池。腔体中间为冷却介质流道，流道内壁有导热肋片，可加快散热，减小由于太阳电池温度过高而导致效率下降的影响。太阳电池用绝缘导热胶粘结在腔体外表面，既使腔体和电池绝缘，同时把热量由电池传递到腔体。为减少系统热量损失，腔体外表面须用绝缘材料保温。抛物面反射镜的有效面积为 3.00m²，反射面镀铝，反射率为 0.7，系统实际聚光比为 21.29。

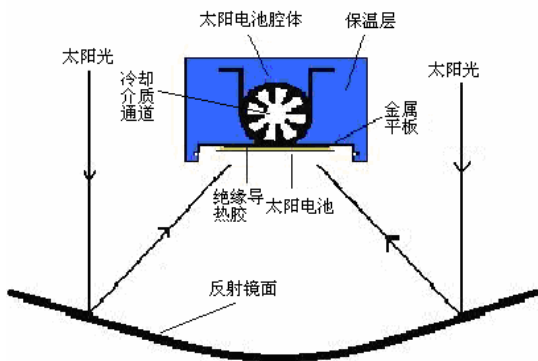


Figure 1. Schematic diagram of experimental device

图 1 实验装置截面示意图

太阳光由镜面反射汇集在腔体表面的电池上，成

倍增加单位面积电池的输出功率，通过腔体背面介质流道中的水强制冷却电池温度，热水流出后被存储在水箱中对外供热。在聚光的条件下，太阳电池阵列输出电效率，同时得到热能，系统实现热电联供。

3 理论模型

3.1 系统电性能模型

为了简化计算，假设：(1)被照到部分光强均匀分布；(2)焦线在电池正中央。光伏电池直流模型电流方程^[7-9]：

光照面电池直流

$$I_L = I_{LG} - (J_{DOI} S_I) \exp\left[\frac{q(v + I_L r_s / S_I)}{kT}\right] \quad (3)$$

其中

$$r_s = \frac{1}{3} R_{De} d^2 + \rho \varepsilon + r \frac{d}{w} \quad (4)$$

未被照光面电池直流

$$I_D = -(J_{DOD} S_D \exp\left[\frac{q(v + I_D r_s / S_D)}{kT}\right]) \quad (5)$$

旁路电流

$$I_B = -I_{po} \exp\left[\frac{q(v + R_p I_B)}{kT}\right] \quad (6)$$

输出电压

$$V = V_{out} + (I_L + I_D + I_B) R_B \quad (7)$$

$$V_{out} = R_I I_{out} \quad (8)$$

$$V_{out} = V - (I_L + I_D + I_B) R_B \quad (9)$$

输出电流

$$I_{out} = I_{LG} - I_D - I_B - I_L \quad (10)$$

式中， I_L 、 I_{LG} 、 I_D 、 I_B 和 I_{out} 分别为光照面电流、光生电流、非光照面电池电流、旁路电流和输出电流， J_{DOI} 和 J_{DOD} 均为二极管反向饱和电流， S_I 和 S_D 分别为电池光照面面积和未被照面电池面积， v 、 U_{out} 、 r_s 、 R_p 和 R_B 分别为开路电压、输出电压、串联内阻、并联内阻和串联内阻， T 为电池表面温度。

由上述模型可知，太阳电池的输出特性计算方法是先假设 $R_I = 0$ ，求出 V_{out} 和 I_{out} ，然后依次增大 R_I ，

找出 V_{out} 和 I_{out} 乘积的最大值，此最大值即为系统最大输出功率。相关参数算法见参考资料[8, 9]。

3.2 系统热性能模型

为了简化分析，假设：(1)传热为稳态传热；(2)材料的热物性和光学物性均一；(3)焦线处于电池正中央；(4)忽略未被阳光照到太阳电池的热辐射和热对流；(5)太阳电池底面温度相同；(6)忽略在传导过程中导热胶的热辐射和热对流。被照到电池作为热源对各个部件建立能量平衡方程如下：

电池：

$$\left(\frac{T_p - T_a}{R_{cpa}} + \frac{T_p - T_a}{R_{rpa}} \right) + \frac{T_p - T_B}{R_{kpB}} + \frac{T_p - T_c}{R_o} = Q_p - P_m t \quad (11)$$

式中， T_p 、 T_a 、 T_B 和 T_c 分别表示太阳电池表面温度、环境温度、导热胶表面温度和太阳电池边缘温度， R_{cpa} 、 R_{rpa} 、 R_{kpB} 和 R_o 分别表示太阳电池表面对环境的对流换热热阻和辐射换热热阻， P_m 为电池阵列最大输出功率， t 为单位时间。

导热胶：

$$\frac{T_p - T_B}{R_{kpB}} = \frac{T_o - T_{plate}}{R_{kpB}} + \frac{T_B - T_{plate}}{R_{kBpl}} \quad (12)$$

T_o 和 T_{plate} 分别表示太阳电池底面温度和金属板表面温度， R_{kBpl} 为导热胶的导热电阻。

金属平板：

$$\frac{T_B - T_{plate}}{R_{kBpl}} = \frac{T_{plate} - T_{cover}}{R_{kplc}} + \frac{T_{plate} - T_t}{R_{kplt}} \quad (13)$$

式中， T_{cover} 、 T_t 为保温层和介质流道的平均温度， R_{kplc} 、 R_{kplt} 分别为金属板对保温层和介质流道的导热热阻。

保温层：

$$\frac{T_{plate} - T_{cover}}{R_{kplc}} = \left(\frac{T_{cover} - T_a}{R_{rca}} + \frac{T_{cover} - T_a}{R_{cca}} \right) \quad (14)$$

式中， R_{rca} 、 R_{cca} 分别表示为保温层对流体的辐射换热热阻和对流换热热阻。

导管^[10]：

$$\frac{T_{plate} - T_t}{R_{kplt}} = Q = m C_{p,f} (T_{out} - T_{in}) \quad (15)$$

导管温度 T_t 与进出水温度 T_{in} 、 T_{out} 的关系式：

$$\frac{T_t - T_{out}}{T_t - T_{in}} = \exp\left(-\frac{m C_{p,f}}{A_t h_{t-f}}\right) \quad (16)$$

式中， Q 表示介质通道中流体所吸收的热量， m 、 $C_{p,f}$ 、 T_{in} 和 T_{out} 分别为介质流量、流体平均温度下的定压比热容和进出口温度； A_t 和 h_{t-f} 分别表示介质流道的表面积和介质流道与流体间的对流换热系数。

将电性能模型得出 P_m ，并且测出 Q_p 、 T_p 、 T_a 、 T_c ，就可求出系统中 T_{out} 、 T_{in} 和 m 。式(12) - (16) 中各热阻和换热系数的计算可参考文献[11, 12]。

3.3 系统电性能模型

由于 PV/T 系统所产生的热能和电能品质明显不同，利用可用能作为标准来评价系统的性能是一种较为合理的方法。故采用总的能量输出或者能量效率来评价整个系统的不合理^[13]。因此，太阳辐射的可用能可用下式计算^[14]。

$$E_l = I_d \times \left(1 - \frac{T_a}{5777}\right) \quad (17)$$

$$S_{in} = C_p \ln\left(\frac{T_{in}}{T_a}\right) \quad (18)$$

$$S_{in} = C_p \ln\left(\frac{T_{in}}{T_a}\right) \quad (19)$$

$$S_{in} = C_p \ln\left(\frac{T_{in}}{T_a}\right) \quad (20)$$

$$S_{out} = C_p \ln\left(\frac{T_{out}}{T_a}\right) \quad (21)$$

式中， E_l 为太阳辐射有用能、 I_d 为太阳直射照强度、 $T_a = (20+273.15)$ K 为环境温度、 h 和 s 分别表示焓和熵。热有用能及热火用效率可用下式计算^[15]

$$Q_{th-use} = m c_{p,w} \{h_2 - h_1 - T_0 (S_2 - S_1)\} \quad (22)$$

$$\eta_{th} = Q_{th} / (E_l S_m) \quad (23)$$

式中， Q_{th-use} 为热有用能、 η_{th} 为热能的火用效率， S_m 为系统反射面的有效面积。所以，整个系统

的电能及可用能输出为

$$E_{el} = P_m t \quad (24)$$

$$\eta_{el} = \frac{E_{el}}{S_m E_I} \quad (25)$$

$$E_{use} = E_{el} + Q_{th} \quad (26)$$

$$\eta = \frac{E_{use}}{S_m E_I} \quad (27)$$

4 实验结果及分析

4.1 焦线宽度对系统那个热性能的影响

焦线宽度对槽式聚光系统性能的影响，实验测试结果见表 3 和图 2 所示。

1) 对太空电池，焦线宽度为电池宽度的 67.21% 时，热有用能最大为 21.11J；焦线宽度等于电池宽度时，热有用能最小为 20.14J。对多晶硅电池，焦线宽度为电池宽度的 62.67% 时，热有用能最大为 19.91；焦线宽度等于电池宽度，热有用能最小为 19.51J。由于进出水温度都相对较低，因此热能对热有用能的转化率非常低，在 90.80-92.93 之间。

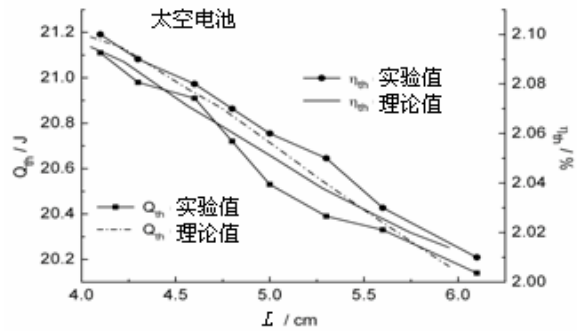
Table 1. Results of the experiment

表 1. 实验结果

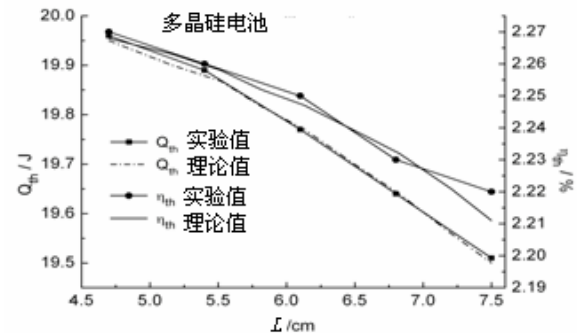
	L	I _d	E _I	T _m	T _{out}	I _m	U _m	E _{el}	I _{sc}	U _{oc}
	(cm)	(J)	(J)	(°C)	(°C)	(A)	(v)	(J)	(A)	(V)
太空 电池	6.1	1056	1002.4	20.1	26.3	8.53	13.0	110.89	12.94	20.9
	5.6	1053	999.6	20.1	26.33	8.60	12.9	110.71	13.11	20.9
	5.3	1046	992.9	20.1	26.34	8.73	12.5	109.13	13.22	20.9
	5.0	1050	996.7	20.1	26.36	8.51	12.6	107.23	13.1	20.8
	4.8	1050	996.7	20.1	26.39	8.00	12.8	105.44	13.00	20.6
	4.6	1060	1006.2	20.1	26.42	9.50	10.7	104.88	12.83	20.6
	4.3	1058	1004.3	20.1	26.43	9.10	11.5	104.65	12.72	20.6
	4.1	1060	1006.2	20.1	26.45	8.20	12.6	103.32	12.56	20.5
多 晶 硅 电 池	7.5	926	879.5	20.0	26.20	1.38	2.92	4.029	2.14	5.56
	6.8	926	879.5	20.0	26.22	1.39	2.85	3.961	2.30	5.53
	6.1	926	879.5	20.0	26.24	1.42	2.76	3.919	2.26	5.49
	5.4	926	879.5	20.0	26.26	1.46	2.68	3.913	2.17	5.50
	4.7	926	879.5	20.0	26.27	1.45	2.68	3.886	2.27	5.47

2) 太空电池系统热火用效率在 2.01%-2.10% 之间，多晶硅电池系统热火用效率在 2.22%-2.27% 之间，略大于太空电池系统热火用效率，主要因为多晶硅电池表面积 (7.5cm × 11.5cm) 大于太空电池表面积 (6.1cm × 7.1cm)，而电池吸收率为 0.8，腔体光照面吸收率为 0.37，即多晶硅电池系统吸收热量多于太空电池系统，故多晶硅电池系统热火用效率略大于太空

电池。



(a) 太空电池热火用及其效率



(b) 多晶硅电池热火用及其效率

Figure 2. The curves of thermal exergy and its efficiency of system

图 2. 系统的热火用及其效率变化曲线

3) 对太空电池，当焦线宽度每减少 10%，实验值和理论值热有用能平均增加 0.296W 和 0.30W；对多晶硅电池焦线宽度每减少 10%，实验值和理论值热有用能平均增加 0.12W 和 0.13W（焦线宽度不大于电池宽度的前提下）。这是因为当焦线宽度小于电池宽度时，一部分电池由于没被照到，产生热斑效应，电池本身会产生一部分热能，故热有用能增加。实验值和理论值相差略大，最大为 8%，表明该模型基本合理。但是由于在模型设计中只考虑一维导热，并忽略材料的热物性和光学参数的变化、焦线位置的偏差、未被照到太阳电池的热辐射和热对流、太阳电池底面温度差异及传导过程中导热胶的热辐射和热对流，使该模型还略显粗略，还应在这些方面加以优化。

4.2 焦线宽度对系统电性能的影响

从图 3 可知，电性能最优的太空电池在焦线宽度 L=6.1cm 时（恰好等于电池面积），其电效率最高，为 11.06%，随着焦线变窄其 FF 和电效率均变低。由

串联电池内阻 R_s 及最大输出功率公式有^[16,17]

$$R_s = R_{01}(1 + \alpha T) + R_{02}e^{BT} \quad (28)$$

$$P_m = \frac{nAKTI_{out}}{q} \ln\left(\frac{I_{LG} - I_{out}}{I_0} + 1\right) - I_{out}^2 R_s \quad (29)$$

式中, R_{01} 、 R_{02} 分别为定值系数, B 为半导体材料常数。 I_{LG} 为光生电流; I_0 为反向饱和电流; I 为负载电流; R_s 为电池的串联内阻; n 为太阳电池串联的片数。由系统的热性能实验及理论模拟可知, 当焦线变窄时系统热能增加, 被照到电池部分温度升高, 又由式 (28) 可知 R_s 随电池温度的升高而增大, 故当电池焦线变窄时 R_s 增大, 未被照到电池部分, 由于光伏电池具有与二极管相似的 P-N 结结构, 即具有反向特性与雪崩击穿现象, 此部分电池会带负压, 相当于增加一个负载, 由 (29) 式可知当有大电流通过时, 如电池的串联内阻大, 内阻上损失的功率多, 则输出功率相应变小, 故 FF 和 η_{el} 也急剧下降。所以当焦线宽度减小时, 系统电性能较低。

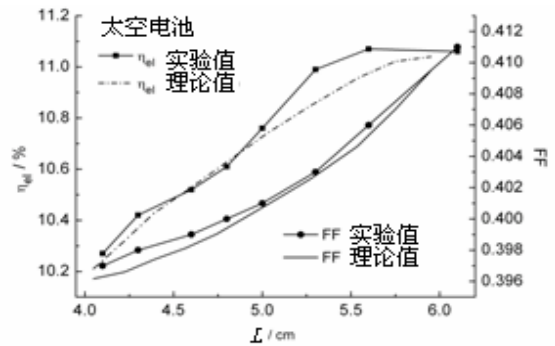
由实验和理论模拟可知, 理论模拟电性能误差在 6.2% 以内, 表明该模型可用。并且实验和理论模拟都表明两种电池的电效率和 FF 并不是随着焦线宽度的变窄而线性减小的, 电效率都是在焦线宽度为 80% 时发生转折, 当焦线宽度小于 80% 时, 随宽度变窄电效率相对变化缓慢, 电性能较优的太空电池, 焦线宽度每减小约 1% 最大输出功率降低 0.1342W; 当焦线宽度大于 80% 时, 随宽度变窄电效率相对变化, 电性能较优的太空电池, 焦线宽度每减小约 1% 最大输出功率降低 0.2566W。

另由于多晶硅电池使用时间比较长, 电性能衰减较大, 故其电效率较低; 抛物镜面的制造工艺精度和镜面厚度引起光强的不均匀, 对电池阵列的输出特性也有严重的影响, 为减小光强不均匀性的影响, 尽量用自身内阻小和单片面积小的太阳电池。

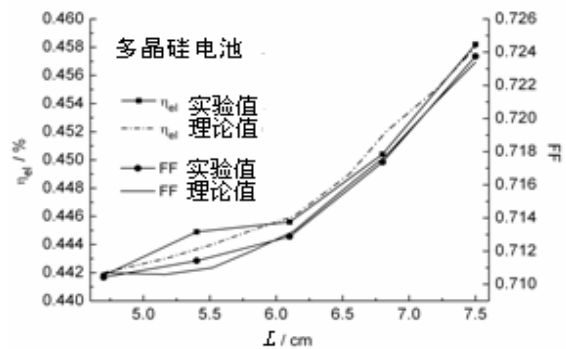
4.3 焦线宽度对系统总有用功的影响

由图 4 可知, 对太空电池, 该槽式 PV/T 系统火用效率和总有用功在焦线宽度小于电池的 90% 时, 随着焦线宽度增加而增加; 焦线宽度等于电池宽度的 90% 时 P_m 、 η 分别达到最大, 为 131.04J、13.11%; 当焦线宽度大于电池面积的 90% 时, 可用能总量和火用效率基本保持不变; 对多晶硅电池, 该槽式 PV/T 系统实验和理论均表明火用效率和总有用功随着焦线宽度增加而增加, 在焦线宽度等于电池宽度时系统 P_m 、

η 分别达到最大, 为 30.23J 和 3.43%。



(a) 太空电池的电效率及其填充因子



(b) 多晶硅电池的电效率及其填充因子

Figure 3. The electrical characteristics curve under different width of focus line

图 3. 不同焦线宽度下电池电特性曲线

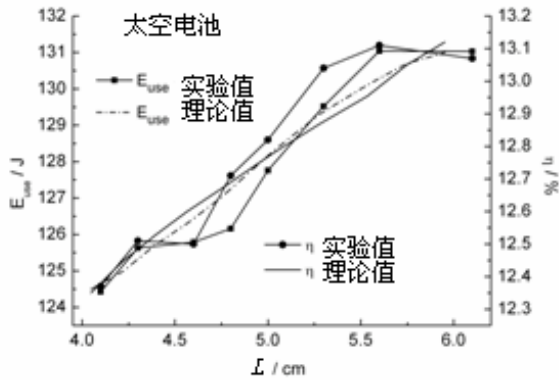
但实验数据分布比较零散, 此因热电性能的影响因素还有很多未考虑, 例如, 导热胶的厚度变化、风速、风向的变化、太阳辐射量的改变, 最重要的是由于反射镜面采用热弯工艺加工而成, 由于加工工艺问题, 没有热弯成标准的抛物面, 造成聚焦面光强分布不均, 形成热斑效应, 导致功率损失, 无法做到对电池温度的控制, 电池大部分时间的工作温度都在 35℃ 以上, 如果工作时间高于 1 个小时, 则太阳电池温度一般在 70℃ 左右, 与实际标况 25℃ 相比, 输出功率将减少。

5 结论

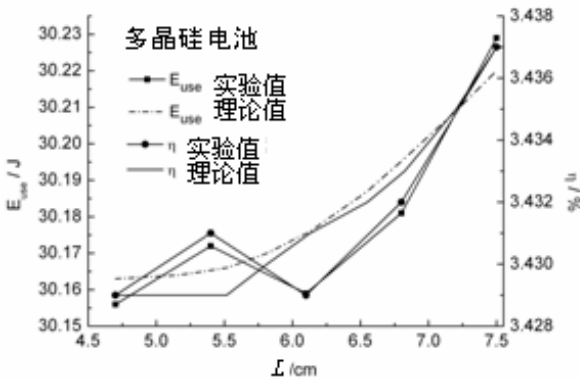
本文设计并制作槽式聚光太阳能热电联供系统, 对不同种太阳电池阵列的性能进行实验研究, 结果表明:

- 1) 对太空电池和多晶硅电池, 焦线宽度分别等于

焦线宽度 67.21%和 62.67%时,热有用能均达到最大,其后两种电池的热有用能均随焦线宽度的增大而下降;且太空电池系统热有用效率(2.01%-2.10%)略小于多晶硅电池系统热有用效率(2.22%-2.27%);太空电池相对来说比较稳定。



(a) 太空电池系统总有用能及其效率



(b) 多晶硅电池系统总有用能及其效率

Figure 4. The overall useful energy and systematic efficiency curves under different width focus line of system

图 4. 不同焦线下总有用能及系统的火用效率曲线

2) 聚光后,内阻大的电池阵列在内阻上损失的功率大,其输出功率相应的减少,电池阵列的η下降较快。故多晶硅电池电效率对焦线宽度的变化因子相对较大。太空电池是相对比较理想的聚光电池。

3) 理论模拟电性能误差在 6.2%以内,表明该模型误差相对较大,还应进行进一步的优化。对系统进行正确的建模,对分析影响系统性能的因素,为实验研究提供重要的参考价值,也为本槽式聚光太阳能 PV/T 系统的热性能与电性能的最佳耦合提供依据。

4) 电性能、热性能和系统总性能曲线拐点并不一致,如何匹配才能使系统达到最佳必须视实际情况来

定。但是,由于本实验的聚光比为 21.29,相对较低,故本结论不适用于高倍聚光下系统性能关系。

References (参考文献)

- [1] HENDRIE,S.D. Photovoltaic/thermal collector development program-Final Report MIT[R].New-york: Lincoln Laboratory, 1982.
- [2] RUSSELL.T, BEALL.J, LOFERSKI.J.J.et.al. Combined Photovoltaic/thermal collector panels of improved design[R].Network: Proceedings of IEEE Photovoltaic specialist's conference, 1981.
- [3] ZONDAG.H.A, DEVRIES.D.W,VAN HELDEN.W.G.J. The yield of different combined PV-thermal collector designs[J]. Solar energy, 2003(74):253-269.
- [4] SANDNES.B, PEKSTAD.J. A Photovoltaic/thermal(PV/T) collector with polymer absorber plate. Experimental and analytical model[J]. Solar energy, 2002(72):63-73.
- [5] TRIPANAGNOSTOPOULOUS.Y, NOUSIS.T, SOULISTS.M. Hybrid Photovoltaic/thermal solar systems[J]. Solar energy, 2000(72):217-234.
- [6] JOES. Coventry. Performance of concentrating Photovoltaic/thermal solar collector[J]. Solar energy, 2005(78): 211-222.
- [7] Yang Deren. Solar materials[M].Beijing: Chemical Industry Press,2006.
杨德仁编著, 太阳能电池材料[M].北京: 化学工业出版社, 2006..
- [8] Zhao Fuxin, Wei Yanzhang. Solar cell and application[M].Beijing: National defence Industry Press.1985.
赵富鑫, 魏彦章编著. 太阳能电池及其应用[M].西安: 国防工业出版社, 1985.
- [9] LUQUE.A, SALA .G, ARBOIRO. J.C.Electric and thermal model for non-uniformly illuminated concentration cells[J].Solar Energy Materials and Solar Cells.1998,51 269-290.
- [10] Xiang Ming, Li Ming, Wang Liuling. 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.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
- [11] WEI Jin-yun. An approximately exponential characteristic of efficiency and series resistance of solar cells [J].Acta Energiae Solaris Sinica,2004,25(3):356-358
魏晋云. 太阳能电池效率与串联电阻的近似指数关系[J].太阳能学报,2004,25(3):356-358.
- [12] Li Ming, Wang Liuling . Investigation of evacuated tube heated by solar trough concentrating system. Energy Conversion and Management,2005,(47):3591-3601.
- [13] BERGENE T, LOVVIK O M. Model Calculation on a Flat-Plate Solar Hear Collector with Integrated Solar Cells [J]. Solar Energy, 1995, 55(4):453-462.
- [14] Zhu Mingshan. Exergy Analysis of energy system[M].Beijing: Tsinghua University Press,1985
朱明善, 编著.能量系统的火用分析[M].北京: 清华大学出版社, 1985.
- [15] Zhai Hui,Dai Yanjun,Wu Jingyi.Investigation of concentrating Photovoltaic/Thermal system performance based on Fresnel lens[J].Journal of engineering thermophics, 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
- [16] Cheng Xiaofang, Li Jian, Yu Shijie. Expression of the series resistance of solar cells[J].Acta energiae solaris sinica, 2004, 25(3) : 345-349

程晓舫,李 坚,余世杰.晶体硅太阳能电池串联内阻的函数形式[J].太阳能学报,2004, 25(3): 345-349

- [17] Xu Yongfeng,Li Ming,Wang Liuling,Experimental study on solar cell arrays of trough concentrating solar system[J] Chinese Journal of Semiconductors, 2008 , 29 (12) :

2421-2425

徐永锋,李 明,王六玲.槽式聚光太阳能系统太阳能电池阵列的实验研究[J].半导体学报,2008 , 29 (12) : 2421-2425.