

文章编号: 0253-2239(2009)02-0482-08

空间太阳能电池槽式聚光热电联供系统特性分析

项 明¹ 李 明^{1,2} 王六玲¹ 何建华¹ 李承晴² 徐永锋¹ 张兴华¹ 王云峰¹

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

摘要 建立了空间太阳能电池的热电联供系统在槽式聚光条件下的热电性能模型, 并与实验进行了对比。理论计算与实验结果吻合较好, 最大误差在 5.1% 以内, 证明了该数学模型的正确性。通过此数学模型, 从聚光镜面的光学效率与焦线宽度、导热胶的导热系数、金属平板光照面的吸收率等内部特性参数及风速、太阳直射辐射等外部特性参数出发, 对所设计制造的空间太阳能电池槽式聚光热电联供系统进行分析。较为全面而系统地分析了这些参数的改变对其系统的热电效率、总效率及火用效率等性能指标的影响, 其中聚光镜面的光学效率影响最大, 光学效率从 0.5 增加至 0.95, 系统的总效率和火用效率分别增加 0.9 倍和 0.5 倍, 其余参数对性能也有较强影响。研究结果为新一轮系统装置的制作提供了优化设计基础。

关键词 太阳能; 热电联供系统; 数值模拟; 空间太阳能电池

中图分类号 TK519 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092902.0482

Investigation of Performance on Trough Concentrating Solar Photovoltaic/Thermal System Based on Super Cells

Xiang Ming¹ Li Ming^{1,2} Wang Liuling¹ He Jianhua¹ Li Chengqin²
Xu Yongfeng¹ Zhang Xinhua¹ Wang Yunfeng¹

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

Abstract A mathematic model of a trough concentrating solar PV/T system has been established and verified with experimental data. The calculation based on the model is agreeable with experimental results, the errors between calculations and experiments are less than 5%, which indicates that the model is valid. Through the model, the performance of the trough concentrating solar PV/T system based on super cells is analyzed systematically with internal and external parameters of PV/T system. The internal parameters include optical efficiency of mirror, width of focusing line, thermal conductivity of heat sinking tape and thermal absorption of the lighting plate, while the external parameters include the wind speed and the solar direct radiation. A large number of simulations were undertaken to test the thermal, electricity, total and exergy efficiency of PV/T system for variation of the design parameters. The result indicates that the optical efficiency of mirror has more effect on the performance of system than others, the total and exergy efficiency increase 0.9 times and 0.5 times respectively with the optical efficiency of mirror increasing from 0.5 to 0.95. Other parameters also have strong effects on the performance of system. All these works benefit to further study in optimization design of the system.

Key words solar energy; PV/Thermal system; numerical simulation; super cell

1 引 言

在众多的可再生能源中,太阳能是一种极为丰富的清洁能源,地球每年接受太阳能总量为 1×10^{18} kWh,

是世界年耗总量的一万多倍。但由于太阳能的能流密度较低,一般只有 1000 W/m^2 , 在这种低能流密度下使用光伏发电成本较高,无法与常规能源发电

收稿日期: 2008-06-16; 收到修改稿日期: 2008-08-03

基金项目: 国家 863 计划(2006AA05Z410)和云南省自然科学基金重点资助项目(2007C0016Z;2005E0031M)资助课题。

作者简介: 项 明(1984—),男,硕士研究生,主要从事太阳能热发电领域研究。E-mail: xiangming82609155@126.com

导师简介: 李 明(1964—),男,博士生导师,目前研究方向为太阳能发电领域。E-mail: lmdocyn@public.km.yn.cn

相竞争。为了降低光伏发电成本,采用聚光方法是有效途径之一,但光伏电池在聚光条件下电池表面温度过高,导致其发电效率过低,需在电池背面采取冷却措施。若再利用冷却工质得到的热能,就构成了聚光太阳能电/热联供(PV/T)系统。

针对聚光太阳能 PV/T 系统,国内外已进行了一些研究^[1~3],但所利用的电池大多是聚光电池,价格十分昂贵(每平方米价格一般在 50 元人民币)。而利用价格适中(每平方米价格大致在 2 元人民币)的空间太阳能电池对聚光太阳能 PV/T 系统的研究却还没有相关文献报道。本文建立了空间太阳能电池 PV/T 系统在槽式聚光条件下的热电性能模型,用实验验证了模型的正确性,并从系统装置本身结构(内部特性参数)及外界环境参数变化(外部特性参数)出发,对所设计制造的空间太阳能电池 PV/T 系统性能作了分析与说明。

2 数学物理模型的建立

2.1 太阳能电池阵列的输出功率

太阳能电池的电路电流方程为

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{AkT_p} \right] - 1 \right\}. \quad (1)$$

式中, V 为负载上的电压; A 为 PN 结品质因子; k 为玻尔兹曼常数; T_p 为太阳能电池的工作温度; q 为基本电荷常数; R_s 为电池的串联内阻; I_0 为二极管反向饱和电流; I_L 为光生电流。其中, I_0 与 I_L 的计算可参考文献[4]。

根据(1)式,推得太阳能电池的输出功率为^[5]

$$P = I \left[\frac{AkT_p}{q} \ln \left(\frac{I_L - I}{I_0} + 1 \right) - IR_s \right]. \quad (2)$$

若有 n 个太阳能电池串联构成太阳能电池阵列,其 PN 结品质因子、串联内阻和开路电压分别变为单片太阳能电池的 n 倍^[6],则太阳能电池阵列的输出功率为

$$P = I \left[\frac{nAkT_p}{q} \ln \left(\frac{I_L - I}{I_0} + 1 \right) - nIR_s \right]. \quad (3)$$

2.2 PV/T 系统的传热模型

图 1 为槽式聚光 PV/T 系统的结构模型。当太阳光经槽式聚光镜面反射后聚焦到热电联供系统的吸收体上时,位于吸收体光照面的太阳能电池阵列将一部分太阳辐射能转变成电能输出给负载,其余大部分以热能的形式通过连结电池阵列背面和铝合金腔体之间的绝缘导热胶传给铝合金平板。铝合金平板自身吸收的太阳辐射能和电池阵列传来的热能最

后被强制循环的流体带走并加以利用,既降低了电池阵列温度,又得到了热能,使整个热电联供系统获得了较好的能量收益。

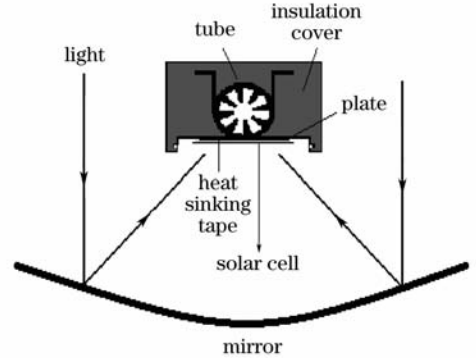


图 1 槽式聚光太阳能 PV/T 系统的模型

Fig. 1 Model of concentrating solar energy PV/T system

根据系统结构,本文建立了 PV/T 系统的一维传热模型。图 2 为 PV/T 系统的热阻网络图,为了简化计算,假设: 1) 传热模型为稳态模型; 2) 材料的热物性和光学参数均为常数; 3) 忽略各部件沿流动方向之间的导热。对各个部件建立能量平衡方程如下:

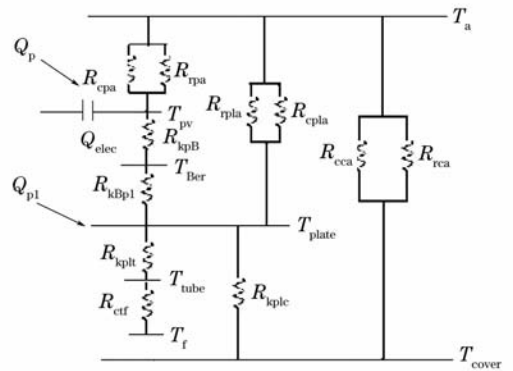


图 2 PV/T 系统的热阻网络

Fig. 2 Thermal network describing a PV/T system based on trough

a) 太阳能电池阵列吸收太阳辐射能,对环境散热,对导热胶导热,并输出电能

$$\left(\frac{T_p - T_a}{R_{cpa}} + \frac{T_p - T_a}{R_{tpa}} \right) + \frac{T_p - T_B}{R_{kpb}} = Q_p - P_{max} t. \quad (4)$$

式中 T_p 和 T_B 分别为太阳能电池阵列和导热胶的平均温度; T_a 为环境温度; R_{cpa} 和 R_{tpa} 分别为电池阵列对环境的对流换热热阻和辐射换热热阻; R_{kpb} 为电池阵列对导热胶的导热热阻; Q_p 为电池阵列吸收的太阳辐射能; P_{max} 为电池阵列峰值输出功率; t 为单位时间。

b) 导热胶吸收太阳能电池阵列的热能, 对金属平板导热

$$\frac{T_B - T_p}{R_{kpB}} + \frac{T_B - T_{plate}}{R_{kBpl}} = 0. \quad (5)$$

式中 T_{plate} 为金属平板的平均温度; R_{kBpl} 为导热胶对金属平板的导热热阻。

c) 金属平板吸收太阳辐射能和导热胶的热能, 对环境散热, 对导管、保温层导热

$$\frac{T_B - T_{plate}}{R_{kBpl}} + Q_{pl} = \frac{T_{plate} - T_{cover}}{R_{kplc}} + \frac{T_{plate} - T_t}{R_{kplt}} + \left(\frac{T_{plate} - T_a}{R_{rpla}} + \frac{T_{plate} - T_a}{R_{cpla}} \right). \quad (6)$$

式中 T_{cover} 和 T_t 分别为保温层和导管的平均温度; R_{kplc} 和 R_{kplt} 分别为金属平板对保温层和导管的导热热阻; R_{cpla} 和 R_{rpla} 分别为金属平板对环境的对流换热热阻和辐射换热热阻; Q_{pl} 为金属平板吸收的太阳辐射能。

d) 导管吸收金属平板的热能, 对流体导热

$$\frac{T_{plate} - T_t}{R_{kplt}} = mc_{p,f}(T_{out} - T_{in}). \quad (7)$$

式中 T_{in} 和 T_{out} 分别为流体的进出口温度; 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。

e) 导管平均温度与流体的进出口温度的关系式

$$\frac{T_t - T_{out}}{T_t - T_{in}} = \exp\left(-\frac{mc_{p,f}}{A_t h_{t-f}}\right). \quad (8)$$

式中 A_t 为导管的内表面积, h_{t-f} 为导管与流体的对流换热系数。

f) 保温层吸收金属平板的热能, 对环境散热

$$\frac{T_{plate} - T_{cover}}{R_{kplc}} = \left(\frac{T_{cover} - T_a}{R_{rca}} + \frac{T_{cover} - T_a}{R_{cca}} \right). \quad (9)$$

式中 R_{rca} 和 R_{cca} 分别为保温层对环境的辐射换热热

阻和对流换热热阻。

(4)~(9)式中各热阻和换热系数的计算可参考文献[7,8]。由模型可看出, 太阳能电池阵列的输出特性和平均温度须采用迭代的方法来得到, 即先假设电池阵列平均温度, 用等分点法和比较选择法, 通过电池阵列的输出功率计算出峰值输出功率, 代入热平衡方程, 得到新的电池阵列平均温度。再依次迭代, 直到满足计算精度为止。

槽式聚光 PV/T 系统的热电效率分别为

$$\eta_t = \frac{mc_{p,f}(T_{out} - T_{in})}{I_d A_m}, \quad (10)$$

$$\eta_{pv} = \frac{P_{max}}{I_d A_m}, \quad (11)$$

式中 I_d 为太阳直射强度; A_m 为聚光有效面积。

PV/T 系统综合性能可用热电总效率评价, 但当系统的热、电效率随参数变化增减不一(热增电减或热减电增)时, 由于热电品质不同, 须采用可用能——火用作为标准进行评价^[3,9]。

3 模型验证

为对所建模型的正确性进行验证, 采用图 1 所设计的实验装置, 并将实验实测结果与理论计算结果进行对比。槽式聚光镜面的有效面积为 1.95 m^2 , 光学效率为 0.69, 聚焦在吸收体上的宽度为 10.0 cm, 实际聚光比为 10.269; 采用的铝合金腔体长 150.0 cm, 宽 12.0 cm, 高 9.0 cm, 导管内直径为 3.0 cm; 16 片串联的空间太阳能电池贴在光照面组成空间太阳能电池阵列。所用实验测试设备为锦州太阳能设备有限公司生产的太阳能发电测试系统。所设计的 PV/T 系统的相关参数列于表 1。

表 1 PV/T 系统的相关参数

Table 1 The parameters of the PV/T system

	Solar cell	Heat sinking tape	Plate	Tube	Insulation cover
Thermal conductivity /W/(m·K)	15.0	0.42	107.0	107.0	0.043
Absorptivity	0.8		0.37		
Emissivity	0.35		0.1		0.2
Thickness /mm	0.3	0.4		4.0	

3.1 空间太阳能电池阵列的电性能模型验证

采用的空间太阳能电池为国外进口, 单片电池参数如下: 规格为 $6 \text{ cm} \times 7 \text{ cm}$; 在环温 25°C 、辐照度 1000 W/m^2 的条件下, 开路电压为 0.55 V, 短路电流为 1.45 A; 在此槽式聚光器下的串联内阻为

0.025Ω 。在实验过程中, 用一个 10Ω 的可变电阻作为负载, 调节可变电阻, 测得相应电流、电压, 并做出 I-V 曲线。同时, 用红外测温仪、直辐射表分别测出电池阵列平均温度及太阳直射。实验结果与理论计算的拟合曲线如图 3 所示。

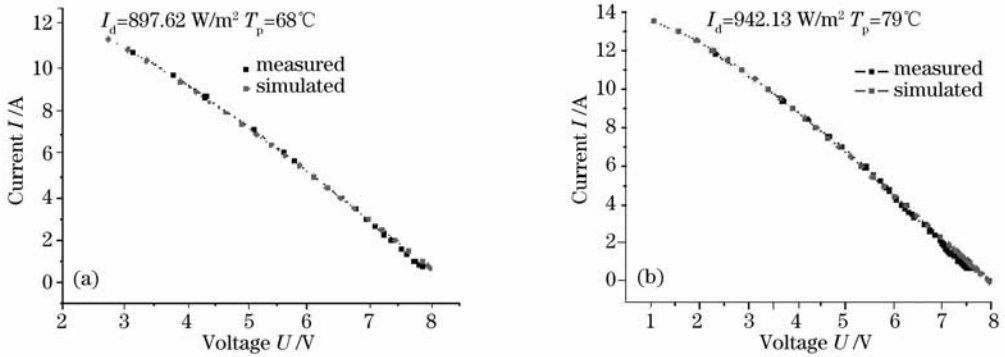


图 3 I-V 曲线实验与理论对比

Fig. 3 Comparison between experiments and calculation for I-V curves

3.2 热电联供系统的热电性能模型验证

为进一步验证热电联供系统的热电性能模型，在实验过程中，用太阳能发电测试系统进行实时跟踪测量，实验测试结果与理论计算如下表所示。由表 2 知，理论计算的出水温度、电池阵列平均温度、电池阵列峰值输出功率、总效率与实验结果基本吻

合，误差在 5.1% 之内。

通过表 2 实测与理论计算结果可知，所建立的数学模型能较好地反映 PV/T 系统的热电性能，可用所建模型对 PV/T 系统的热电特性按内部条件及外部条件的影响作出分析与说明，从而优化系统性能。

表 2 PV/T 系统电热性能的理论实验对比值

Table 2 Comparison between experiments and calculation for the performance of PV/T system

Direct radiation /(W/m ²)	Mass flow /(kg/s)	Inlet fluid temperature /°C	Ambient temperature /°C	Wind speed (m/s)	Outlet fluid temperature /°C		Cell-array temperature/°C		Max electric power /W		Total efficiency /%	
					Measured	Simulated	Measured	Simulated	Measured	Simulated	Measured	Simulated
905.1	0.0050	22.6	16.7	1.7	44.7	45.6	73.4	74.8	36.32	36.12	28.4	29.4
953.7	0.0111	24.1	16.4	3.5	36.6	36.0	53.8	52.8	43.11	43.60	33.7	32.2
949.8	0.0111	24.6	16.9	3.6	36.9	36.4	53.0	52.0	42.99	43.45	33.3	32.1
959.9	0.0083	26.4	18.0	4.8	41.0	40.9	59.6	59.4	41.05	41.30	29.5	29.3
918.9	0.0055	27.3	18.0	1.9	47.5	48.5	73.6	75.1	36.39	36.17	28.3	29.6
856.5	0.0055	28.1	18.7	2.6	45.9	46.8	69.1	70.5	36.96	36.75	27.1	28.3
834.1	0.0053	29.4	18.7	2.2	47.9	48.3	71.6	72.3	35.97	35.92	27.4	28.0
818.7	0.0055	30.0	18.5	1.2	48.6	49.5	72.6	74.0	35.36	35.24	29.4	30.7

4 内部特性对系统性能的影响分析

空间太阳能电池 PV/T 系统的内部参数中，对其性能影响较大且技术关键的参数有槽式聚光镜面的光学效率与焦线宽度、导热胶的导热系数以及金属平板光照面的吸收率。为此，针对这些主要参数，对系统的性能作一剖析。（假定外部条件为：水的流量为 0.008 kg/s，进水温度为 20.0°C，太阳直射强度为 900 W/m²，环境温度为 20.0°C，风速 1.0 m/s。）

4.1 PV/T 系统聚光镜面光学效率及焦线宽度对系统性能的影响

对 PV/T 系统而言，由于聚光镜面将太阳光浓缩并反射给吸收体，使能流密度低的太阳辐射能成为高密度的光能。由此可见，聚光镜面制作的成功

与否直接影响系统的性能好坏。聚光镜面的光学效率决定着吸收体接受太阳能的效率，聚焦的宽度决定着太阳能电池阵列吸收太阳能的效率。因而在镜面聚光反射到吸收体过程中，光学效率和焦线宽度构成了吸收体及电池阵列接受光能效率的最显著特性参数。

图 4 表示聚光镜面光学效率的变化引起系统热电性能变化的曲线（计算中其他参数与所设计的实际系统一致）。从图 4 可看出，聚光镜面的光学效率对系统性能影响很大，聚光镜面的光学效率从 0.5 增加至 0.95，虽然价值高的电效率基本不变，但系统的总效率和显示热电价值不一的火用效率分别增加 0.9 倍和 0.5 倍。

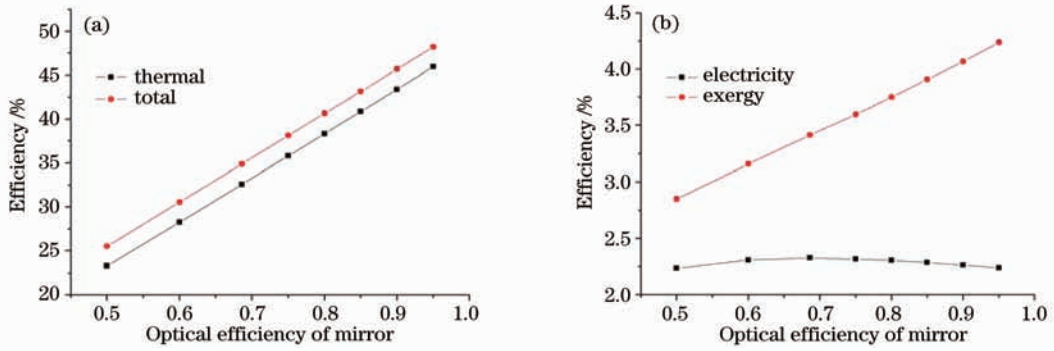


图 4 镜面光学效率的变化对系统性能的影响

Fig. 4 Performance of system versus optical efficiency of the mirror

图 5 表示聚光镜面焦线宽度变化引起系统热电性能变化的曲线(计算中其他参数与实际系统一致)。从图 5 可知,焦线宽度从 10.0 cm 减小到只有电池宽度的 6.0 cm,电效率基本不变,热效率及总效率分别增加近 0.25 倍。理论上,提高镜面光学效率与减

小焦线宽度都使空间太阳能电池阵列获得的辐射能增多,电效率应该提高,但计算结果显示电效率变化不大,主要是由于电池阵列温度升高过快使开路电压减小,以及短路电流增大,串联内阻上的压降增加,限制了峰值输出功率的增大。

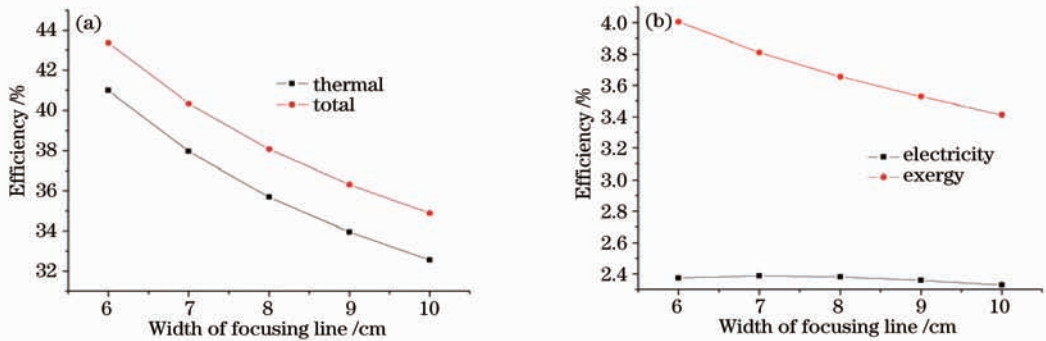


图 5 焦线宽度的变化对系统性能的影响

Fig. 5 Performance of system versus the width of focusing line

图 4、图 5 表明,聚光镜面的光学效率及焦线宽度对 PV/T 系统装置的性能有显著影响。在聚光镜面影响系统性能的参数中,另有聚光的均匀性对电池效率影响较大,后期将从聚光镜面的形状误差及能流密度分布等方面进行研究和改进^[10-12]。因而,从提高镜面的光学效率、减小焦线宽度至电池宽度、

改进聚光的均匀性等这几个方面考虑,改进制作聚光镜面的工艺显得尤为重要。

4.2 导热胶的导热系数

除上述所涉及的聚光镜面光学效率及焦线宽度等参数对系统性能影响较大外,导热胶的导热系数亦有较大影响,因为导热胶的导热系数的大小,反映

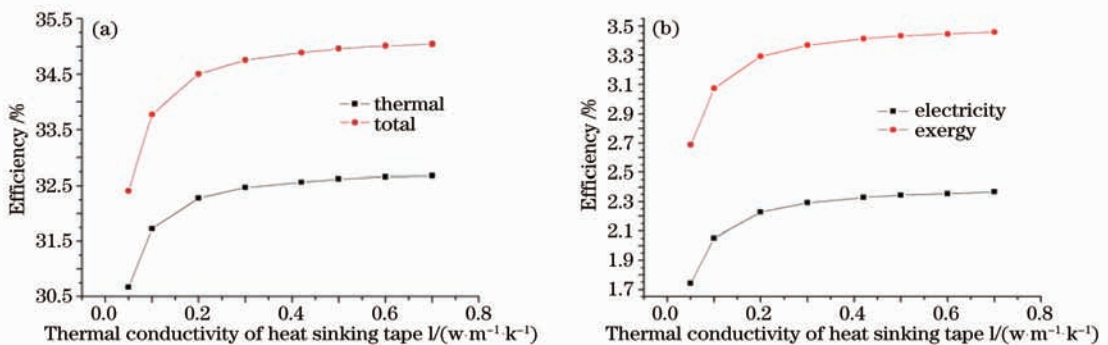
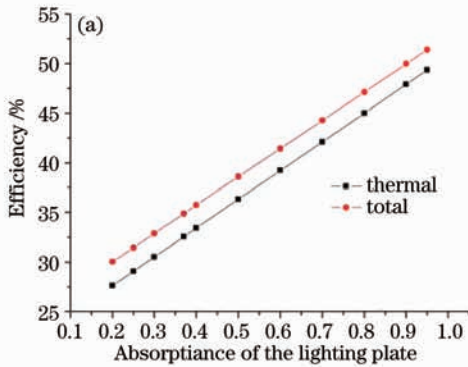


图 6 导热胶导热系数的变化对系统性能的影响

Fig. 6 Performance of system versus thermal conductivity of heat sinking tape

了金属平板吸收太阳能电池阵列热能的好坏,从而直接影响电池阵列温度。图 6 给出了导热胶的导热系数变化引起系统性能变化的曲线(计算中其他参数与所设计的实际系统一致)。

从图 6 可以看出,导热胶的导热系数对系统的热电性能有一定影响,特别是对电效率。导热系数从普通胶带的 $0.05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$ 增加到 $0.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$ 时,电效率增加近 0.31 倍,若再增加导热系数则电效率曲线趋于平缓。同时,导热系数增加,热效率、总效率及火用效率的曲线也均是先增加后趋



于平缓。从理论计算来看,目前系统所使用的导热胶(其导热系数为 $0.42 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$)已能达到导热的目的。

4.3 金属平板光照面的吸收率

由于经聚光镜面反射聚焦到吸收体上的光有一部分被金属平板吸收,对于这部分光的利用率也影响着系统性能。图 7 表示金属平板光照面的吸收率变化引起系统性能变化的曲线(计算中其他参数与所设计的实际系统一致)。

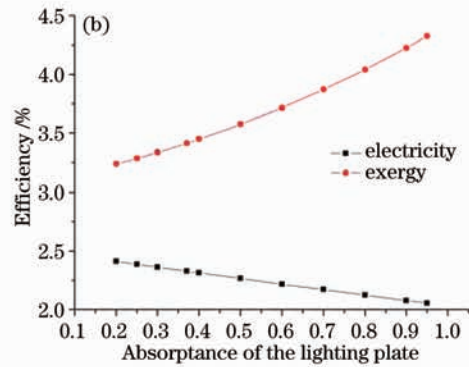


图 7 平板光照面吸收率的变化对系统性能的影响

Fig. 7 The performance of system versus thermal absorptance of the lighting plate

从图 7 可知,平板光照面吸收率的增加,虽引起空间太阳能电池阵列表面温度升高,使系统的电效率少量降低,但热和总效率却大大提高。通过对显示热电价值不一的火用效率进行计算,光照面吸收率从 0.2 增加到 0.9,火用效率增加近 0.31 倍。由此可见,在聚光镜面的制作工艺还没改进完成、焦线还没有减小之前,提高金属平板光照面的吸收率,在其面上用选择性吸收涂层,不失为一种提高系统性能的简单手段。

5 外部特性对系统性能的影响分析

空间太阳能电池 PV/T 系统一经构成,则内部各参数对系统性能的影响亦随之确定。对于所设计的实验装置,其性能完全取决于系统所处的外界环境参数变化。为此,选择风速、太阳直射这两个对系统影响较大的参数来分析系统的热电特性。

5.1 风速的变化

由于风速增大 PV/T 系统外表面的换热系数,一方面降低了太阳能电池阵列表面温度,使系统电池阵列的峰值输出功率增大,另一方面增加了整个系统对环境的散热,使系统的热效率降低。因此,为提高系统性能,分析风速影响系统性能好坏是必要的。

图 8 显示了风速变化对系统热电性能的影响(计算中假定水的流量 0.008 kg/s ,进水温度 20.0°C ,太阳直射辐射强度 900 W/m^2 ,环境温度 20.0°C)。从图 8 可知,随着风速增大,系统的电效率缓慢增加,但热效率大幅降低,总效率及火用效率亦降低。所以,要提高系统综合性能,须将吸收体置于空气流通较小的环境中。

5.2 太阳直射的变化

对 PV/T 系统而言,太阳直射辐射强度影响峰值输出功率及出水温度,能够有效了解太阳直射辐射强度对电池阵列功率的输出及出水温度的影响,对系统的热电性能在实用方面有一定的参考。图 9 显示了峰值输出功率及出水温度随太阳直射辐射强度变化的曲线(计算中假定水的流量为 0.005 kg/s ,进水温度为 20.0°C ,太阳直射辐射强度为 900 W/m^2 ,环境温度为 20.0°C)。

从图 9 可知,出水温度跟太阳辐射强度几乎呈线性关系,光强越强,出水温度越高,但只有当太阳直射辐射强度大于 700 W/m^2 时,出水温度才在 38°C 以上,可作为家用热水使用。为真正利用热能,瞬时出水温度可不必马上利用,而是给系统配备保温水箱,使水箱中的水在系统中进行强制循环,最后对照

射一整天后的水进行利用, 这能提高系统的实用性。

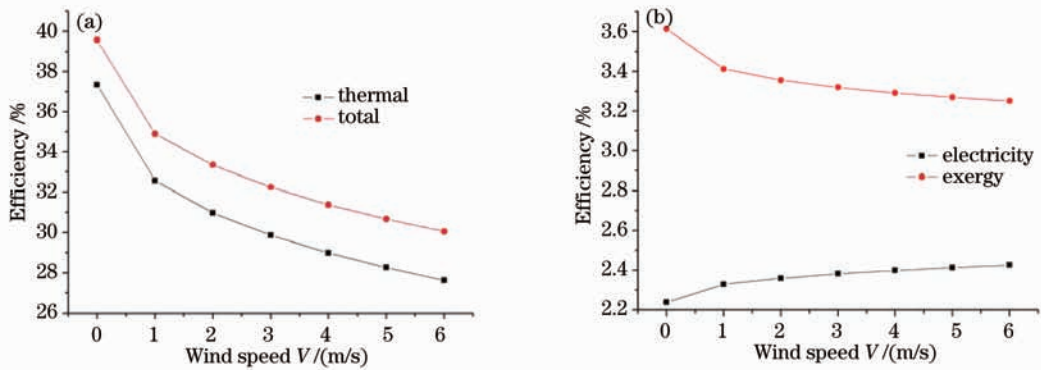


图 8 风速的变化对系统性能的影响

Fig. 8 The performance of system versus the wind speed

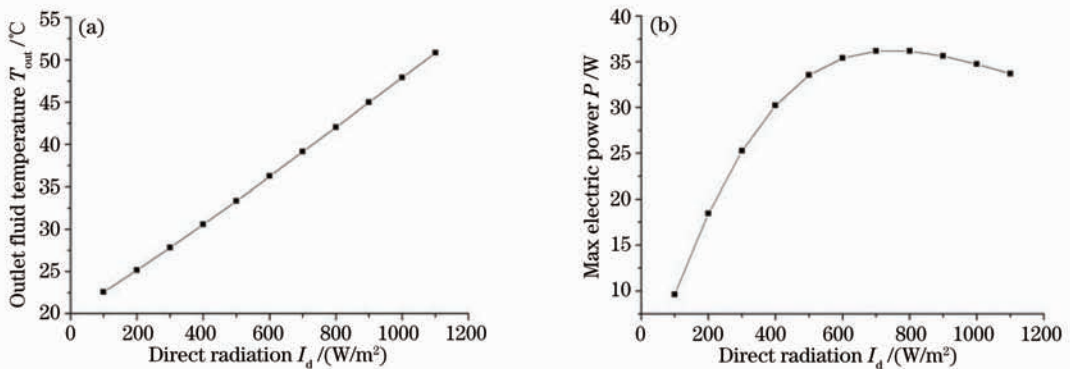


图 9 太阳直射辐射强度的变化对系统性能的影响

Fig. 9 The performance of system versus the solar direct radiation

从图中还可看出, 空间太阳能电池阵列的峰值输出功率, 先随光强的升高而近乎线性升高, 升高到一定程度后曲线变得平缓, 达到最高点后, 又缓慢下降。在此条件下, 电池阵列的最佳太阳辐射强度为 $700 W/m^2$, 即照在吸收体上的光强为 $7 kW/m^2$ 。从中推得, 对于空间太阳能电池阵列并不是光强越强越好, 要取得好的电能收益, 必须合理地对系统进行多参数下的相互耦合优化设计及计算机仿真。

6 结 论

建立了采用空间太阳能电池的 PV/T 系统在槽式聚光下的热电性能模型, 并通过实验进行了验证。通过此模型, 从系统的内部特性参数(聚光镜面的有效反射率与聚焦宽度、导热胶的导热系数、金属平板光照面的吸收率)及外部特性参数(风速、太阳直射)出发, 较为全面地分析了这些参数的改变对空间太阳能电池的槽式聚光 PV/T 系统热电性能的影响: 聚光镜面的光学效率对系统影响最大, 是设计所须考虑的首要因素; 焦线宽度虽对系统影响较大, 但可通过提高金属平板吸收率进行改善; 风速越小, 系统性能越

高; 为提高系统实用性, 应对流体进行强制循环, 以提高出水温度。研究结果为新一轮制造系统装置提供了优化设计基础。为进一步提高系统性能, 还应对系统进行多参数下的耦合优化设计, 以使槽式聚光 PV/T 系统进入商业实用。

参 考 文 献

- 1 B. J. Huang, W. C. Hung, F. S. Sun. Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems[J]. *Solar Energy*, 2001, **70**(5): 433~438
- 2 V. M. Andreev, V. A. Grilikhes, V. P. Khvostikov. Concentrator PV modules and solar cells for TPV systems[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2004, **84**: 3~17
- 3 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
- 4 Wu Yunting, Zhu Hongye, Ren Jianxun *et al.*. Study of the thermal and power characteristics of solar cells in concentration [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2004, **25**(3): 337~340
吴玉庭, 朱宏晔, 任建勋 等. 聚光条件下太阳能电池的热电特性分析[J]. *太阳能学报*, 2004, **25**(3): 337~340
- 5 Wei Jinyun. An approximately exponential characteristic of efficiency and series resistance of solar cells[J]. *Acta Energetica 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
- 6 Zhai Zaiteng, Cheng Xiaofang, Ding Jinlei *et al.*. Determination of serial solar panels' current equation based on maximum power[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, **27**(14): 87~90
- 翟载腾, 程晓舫, 丁金磊 等. 最大功率条件下串联太阳能电池电流方程的确定[J]. 中国电机工程学报, 2007, **27**(14): 87~90
- 7 Li Ming, Wang L L. Investigation of evacuated tube heated by solar trough concentrating system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, **47**: 3591~3601
- 8 Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat Transfer [M]. Third. Beijing: Higher Education Press, 1998, 162~186
- 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第三版. 北京: 高等教育出版社, 1998. 162~186
- 9 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**: 63~72
- 10 Liu ying, Dai Jingmin, Lang zhiguo *et al.*. Finite-element analysis for flux distribution on focal plane of rotating parabolic concentrators[J]. *Acta Optica 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
- 11 Ding Yi, Gu Peifu. Freeform reflector for uniform illumination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 540~544
- 丁 毅, 顾培夫. 实现均匀照明的自由曲面发射器[J]. 光学学报, 2007, **27**(3): 540~544
- 12 He Ning, Liao Xin, Ao Faliang. Application of laser in the measurement of object surface coating uniformity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s1): 189~192
- 何 宁, 廖 欣, 敖发良. 激光在物体表面涂层均匀度探测中的应用[J]. 中国激光, 2008, **35**(s1): 189~192