

DOI: 10.13957/j.cnki.tcx.2015.01.017

## 新型平板太阳能PV/T空气集热器传热特性的数值研究

孙健, 徐银文, 黄章峰, 李杰  
(景德镇陶瓷学院, 江西 景德镇 333403)

**摘要:**文中设计了一款新型PV/T一体化空气集热器,建立了新型PV/T空气系统内部传热过程的一维非稳态数学模型,并利用差分法对模型进行了数值计算。根据计算结果对一体化系统的性能及影响因素进行了分析。结果表明:在一定的光照强度下,随着空气质量流量增加,电池板温度 $T_p$ 逐渐下降,空气温升逐渐降低;而热效率、光电转化效率、联合效率随空气流量的增加有所升高。模型的建立为高性能太阳能PV/T一体化空气集热器的优化设计提供较好理论依据。

**关键词:** PV/T; 数值模拟; 耦合特性

**中图分类号:** TQ174.75    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1000-2278(2015)01-0078-05

## Numerical Simulation of Thermal Performance of a New Type of Flat-Plate Solar PV/T Air Collector

SUN Jian, XU Yinwen, HUANG Zhangfeng, LI Jie  
(Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen 333403, Jiangxi, China)

**Abstract:** In this paper, a new type of integrated solar PV/T air collector is designed. A one-dimensional unsteady mathematical model is developed, the internal heat transfer process is calculated by finite difference approach. The performance of PV/T solar air collector is predicted under different parameters and conditions. Results indicate that the temperature of solar cell and outlet air decrease with the increase of air mass flow rate under the same incident solar intensity. Then, the thermal efficiency, electrical efficiency and total efficiency of PV/T system increase with the rising of the inlet air mass flow rate. The models provide valuable theoretical basis for the optimal design of high-performance solar PV/T integrated air system.

**Key words:** PV/T; numerical simulation; coupled properties

### 0 引言

在全球范围内,随着能源越来越紧张,环境也逐渐恶化,太阳能作为一种清洁的可再生能源日益受到了人们的重视。太阳能的利用方式主要有两种,一种是光能转换成热能,另一种是光能直接转换成电能,即光伏发电系统。在光伏发电系统中,太阳能电池的发电功率一般为10%~15%,大部分的太阳能转化为热能散失在空气中。此外,如果热量没有被及时排走,就会导致太阳能电池温度升高,从而直接降低太阳能电池的光电转化效率<sup>[1]</sup>。太阳能PV/T系统主要目的是在保证太阳能电池安全稳定运行情况下,通过降低电池温度来增大光转换效率,同时收集太阳能转化成的热量,收集的热量在不同地方都有不同的用途。例如:建筑供热,

干燥陶瓷坯体等。

为了设计出高效、廉价的且能适应不同实际环境的太阳能PV/T系统,研究人员进行了大量研究工作。Ong<sup>[2]</sup>建立了稳态的数学模型并为预测四种平板太阳能空气集热器的传热性能提供了解决方案。Sopian等<sup>[3]</sup>提出了新型双通道太阳能集热器,并在稳态的条件下,把其与单通道太阳能集热器的性能进行了比较。Garg and Adhikar<sup>[4]</sup>对预测太阳能PV/T系统瞬态性能提出了一个计算机仿真模型。他们设计的是进口的空气在吸收板和背部板之间流动,后来, Garg和Adhikar<sup>[5]</sup>对在单通道PV/T空气集热器加上一个复合抛物面聚光镜,并在稳态的条件下,进行了能量传递的理论分析。Hegazy<sup>[6]</sup>比较研究了四种光电性能的太阳能空气集热器,并为每种类型的集热器建立了数学模型且进行了数值求解。

收稿日期: 2014-07-19。

修订日期: 2014-08-23。

基金项目: 江西省对外科技合作项目(编号: 20142BDH80024)。

通信联系人: 孙健(1973-), 男, 博士, 副教授。

Received date: 2014-07-19.

Revised date: 2014-08-23.

Correspondent author: SAN Jian(1973-), male, Ph. D., Associate professor.

E-mail: ajian933@163.com

Sopian等<sup>[7]</sup>在稳态的条件下，对双通道PV/T太阳能集热器的理论研究和实验研究进行了进一步的深化。Sopain<sup>[8]</sup>也对单通道和双通道太阳能集热器的进行了成本—收益的计算。Tripanagnotopoulos等<sup>[9]</sup>建立和测试了以水和空气为流动介质的集热器。Zondag等<sup>[10]</sup>比较了七种不同设计的太阳能集热器的热效率和光电转换效率。Othman等<sup>[11]</sup>设计并制作了一个带有翅片的双通道太阳能集热器的原型。Othman等<sup>[12]</sup>在稳态的条件下，还从理论和实验上面研究了翅片固定在吸收板背部的双通道PV/T空气集热器的传热性能。

为了分析电热联供PV/T空气系统的运行特性和能量利用效率，优化空气集热器的运行参数。文中建立了带有强化传热结构的平板太阳能PV/T双通道空气回流集热器非稳态传热模型，采用数值分析的方法对模型进行了计算，对空气质量流速、入射光强度对集热器的热、电及总效率的影响进行了分析，研究结果可为该类系统的性能评价与运行及优化设计提供理论上的参考依据。

1 空气集热器组成及传热过程

1.1 系统组成

图1是一种双通道回流式带有翅片的PV/T空气

集热器及其传热过程原理图。该热电一体化集热器主要由透明的低铁玻璃盖板、风机、电池板、吸热板和翅片及保温层组成。阳光透过上表面玻璃盖板进入系统内，照射到电池和吸热板表面上，电池板沿系统长度方向采用串联方式连接，冷却电池的

空气通过风机从上部通道进入系统，再沿吸热板背部装有翅片的下部通道内流出，翅片强化了空气与吸热板间的换热。系统底部和侧部采取了保温措施，以减少系统向环境的散热。图2是该结构集热器传热过程的热阻网络图。玻璃通过上表面以对流和辐射的方式向天空和环境中散热，下表面则通过对流和辐射的方式与吸热板和电池板进行换热。吸热板下表面及翅片通过对流和通道内的空气进行换热，且通过辐射的方式和底板进行热交换，底板通过导热、对流和辐射向环境散热。

1.2 系统传热过程的数学模型

为简化分析，对系统的传热过程作了如下的假设：传热过程是非稳态，并且是一维的；空气通道是光滑的且不漏气；忽略系统各表面的热容对传热过程的影响；没有转化成电能的太阳能全部转化成了热能被吸热板和电池板吸收；电池板，吸热板和玻璃盖板的温度不沿流体流动的方向变化，只随时间变化，只是时间的函数；在离散后的单元内各表

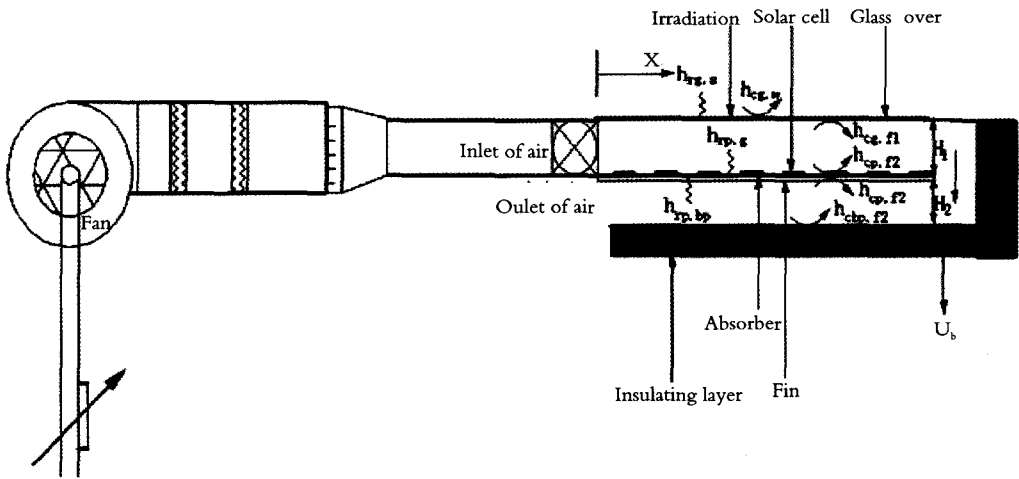


图1 带翅片双通道太阳能PV/T集热系统原理图  
Fig.1 Schematic diagram of double pass PV/T air collector with fins

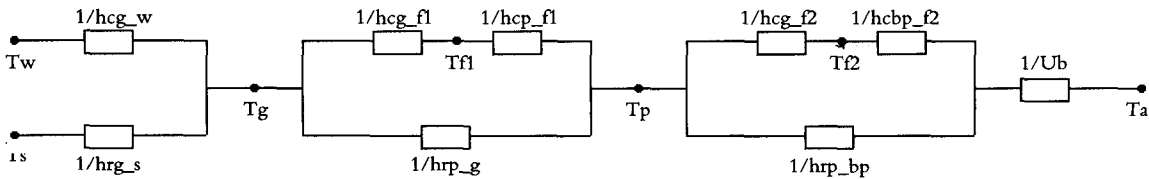


图2 PV/T集热系统传热过程热阻网络图  
Fig.2 Schematic of heat resistance network of hybrid photovoltaic/thermal system

面温度是均匀一致的；由于电池板很薄和吸热板接触良好，忽略它们内部的传热热阻，每个单元里电池和吸热板的温度是相等；根据上述假设，可以列出系统各表面的能量平衡关系：

对玻璃板：

$$t_g \rho_g C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \alpha_g G + h_{r,g,s}(T_s - T_g) + h_{c,g,w}(T_w - T_g) + h_{c,g,f1}(T_{f1} - T_g) + h_{r,g,p}(T_p - T_g) \quad (1)$$

对上部通道空气：

$$H_1 \rho_{f1} C_{f1} \frac{\partial T_{f1}}{\partial t} = \frac{-m_{f1} C_{pf1}}{W} \frac{\partial T_{f1}}{\partial x} + h_{c,g,f1}(T_g - T_{f1}) + h_{cp,f1}(T_p - T_{f1}) \quad (2)$$

对吸热板：

$$t_p \rho_p C_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \tau_g \alpha_g G(1-P) + \tau_g \alpha_{pv} G(1-\eta_{pv})P + h_{cp,f1}(T_{f1} - T_p) + h_{rp,g}(T_g - T_p) + h_{cp,f2} \frac{A_{ab(B)}}{A_c} \eta_p (T_{f2} - T_p) + h_{rp,bp} \frac{A_{ab(B)}}{A_c} (T_{bp} - T_p) \quad (3)$$

其中，吸热板的肋面总效率为<sup>[13]</sup>： $\eta_p = \frac{A_c + A_{fin} \eta_f}{A_{cb}}$ ，

$$\text{肋效率：} \eta_f = \frac{\tanh(mH_f)}{\lambda_f \delta_f}, \quad m = \left( \frac{2h_f}{\lambda_f \delta_f} \right)^{\frac{1}{2}}。$$

电池的光电转换效率可通过下式进行计算<sup>[1]</sup>：

$$\eta_{pv} = \eta_{ref} [1 - 0.0054(T_p - 298.15)], \quad \text{其中 } \eta_{ref} = 10\%。$$

对下部空气通道：

$$H_2 \rho_{f2} C_{pf2} \frac{\partial T_{f2}}{\partial t} = \frac{-m_{f2} C_{pf2}}{W} \left( \frac{\partial T_{f2}}{\partial x} \right) + h_{cbp,f2}(T_{bp} - T_{f2}) + h_{cp,f2} \frac{A_{ab(B)}}{A_c} \eta_p (T_p - T_{f2}) \quad (4)$$

对背部板：

$$t_{bp} \rho_{bp} C_{pbp} \frac{\partial T_{bp}}{\partial t} = U_b(T_a - T_{bp}) + h_{cbp,f2}(T_{f2} - T_{bp}) + h_{rp,bp} \frac{A_{ab(B)}}{A_c} (T_p - T_{bp}) \quad (5)$$

能量平衡方程中的对流和辐射换热系数分别以下脚标‘c’和‘r’表示，及相应的空气的热物性参数可根据文献[2,4,5]中提供的有关公式进行计算。

## 2 系统的性能参数

系统获得的热，电效率及总能量效率可以通过下面的公式进行计算。

$$\eta_{PV/T} = \eta_{thermal} + \eta_{electrical} \quad (6)$$

$$\eta_{PV/T} = \frac{\int \bar{m} C_p (T_0 - T_i) dt + \int \tau_g \alpha_{pv} A_c G \eta_{pv} P dt}{A_c \int G dt} \quad (7)$$

## 3 计算结果与讨论

通过Matlab语言编写程序来求解能量方程组。在求解过程中，在不同的参数和条件下，基于时间上采取一阶向前差分，空间上采取二阶中心差分来计算PV/T太阳能集热器的传热特性。计算中系统的相关的特性参数，如表1中所示。系统的外型尺寸：吸热平板的尺寸为L=2 m，W=0.8 m，背部肋片高度H=0.12 m，厚度δ=1.5 mm；平板表面沿长度方向布置4排规格为130 mm×120.5 mm的太阳能电池板，覆盖率为80%。

当入口空气温度为30℃时，在不同光照强度时，空气的质量流量对电池板温度的影响如图3所示。结果表明在一定的光照强度下，电池板的温度Tp随着空气质量流量的增加而逐渐下降。当入口空气质量不变时，电池板的温度随着光照强度的增加而升高。仔细观察还可以从图中发现，电池温度升高的幅度在较低入口空气质量流量下更加明显，而随着质量流量的提高升高的幅度越来越小。这主要是因为空气的定压热容比较小，当空气流量较小时，在一定的光照强度下空气的温度升比较快，对电池的冷却效果变差，造成电池温升比较大。光伏电池板温度的增加会降低光电转化效率。因此，为了维持较高的光伏转化效率，必须使电池板在较低的温度下工作，也就是要保持一个合理的空气入口流速。图4空气进出口的温度差值(即空气在上下通道内温度的升高)与空气的质量流量有关系。从图可以看出，在不同的光照强度下，空气温度升高的数值随着空气质量流量增加而降低，并且在质量流量不变的情况下，高光照强度时比低光照强度条件

表1 一体化系统参数值一览表  
Tab.1 Parameters of PV/T air collector

| Param-<br>eters | Values        | Param-<br>eters    | Values | Param-<br>eters | Values |
|-----------------|---------------|--------------------|--------|-----------------|--------|
| $\alpha_p$      | 0.95          | $\alpha_{pv}$      | 0.90   | $\alpha_g$      | 0.04   |
| $\rho_p$        | 0.05          | $\varepsilon_b$    | 0.95   | $\varepsilon_g$ | 0.86   |
| $\varepsilon_p$ | 0.96          | $H_1$              | 0.1 m  | L               | 2 m    |
| $\tau_g$        | 0.90          | $\rho_g$           | 0.06   | W               | 0.8 m  |
| $\lambda_b$     | 11.8 W/(m.k)  | $t_f$              | 1.5 mm | $H_2$           | 0.18 m |
| $V_w$           | 1.5 m/s       | $t_g$              | 3 mm   | $t_{bp}$        | 2 mm   |
| P               | 0.8           | $k_{n2}$           | 14.7   | $h_f$           | 0.12 m |
| N               | 18            | $t_p$              | 2 mm   | $T_a$           | 298 k  |
| $\lambda_f$     | 202.4 W/(m.k) | $\varepsilon_{bp}$ | 0.04   | $\alpha_{pv}$   | 0.90   |

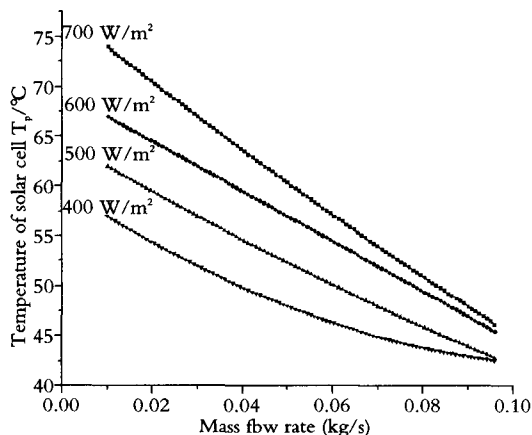


图3 不同光照强度下质量流量对电池板温度的影响  
Fig. 3 Effects of mass flow rate of the air on temperature of solar cell at different radiation intensity

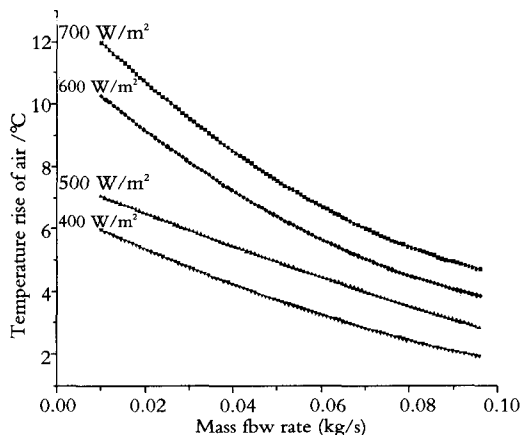


图4 不同光照强度下质量流量对空气温度的影响  
Fig. 4 Effects of mass flow rate of the air on temperature of the air at different radiation intensity

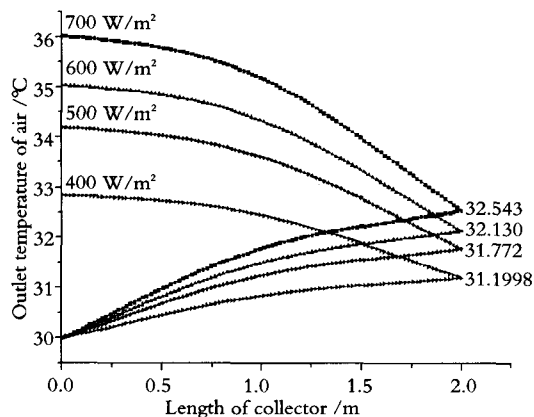


图5 不同光照强度下空气温度沿集热器长度变化情况  
Fig. 5 Variation of temperature of the air along the length of the collector at different radiation intensity

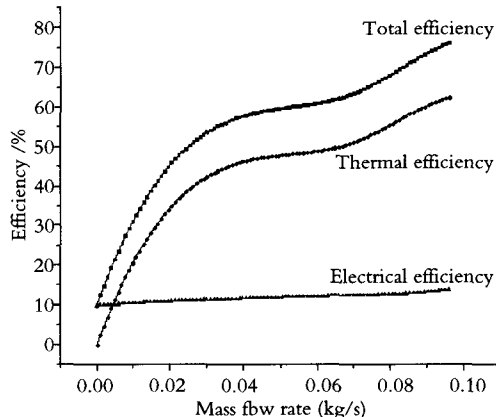


图6 在一定光照强度下质量流量对系统各效率的影响  
Fig. 6 Effects of mass flow rate of the air on efficiencies of the collector at co

下空气温度升高的值要大。

图5展示的是在不同光照强度下,当空气质量流量为0.06 kg/s,流体在上部通道和下部通道内流动时,空气温度的变化情况。从图中可以看出,不管是在上部通道还是在下部通道,流体在运动的过程中温度都是升高的,因为下部通道有肋片的作用,电池板散热增加,所以下部通道流体温度升高的幅度会更大。图6显示的是在光照强度为700 W/m²时,空气质量流量变化对PV/T空气系统的热、电及光电总效率的影响情况。从图中可以看出,系统的各效率随空气质量流量的增加而增大,光照强度为700 W/m²时,空气质量流量为0.1 kg/s时系统总效率可以达到80%,系统的热效率接近65%,电效率接近15%。系统的总效率较单一的热利用或电利用都有明显的提高。

## 4 结论

建立了以空气作为冷却介质的新型太阳能PV/T系统一维非稳态传热及热、电性能数学模型,通过对模型进行数值求解发现:冷却空气质量流量、光照强度和入口空气的温度是影响电池板表面温度和系统热、电及总效率的主要因素。在一定的光照强度下,电池板的温度随着空气质量流量的增加是逐渐下降的;在一定的质量流量下,电池板的温度随着光照强度的增加而升高。在不同的光照强度下,空气温升随着质量流量的升高而降低;在相同的质量流量情况下,高光照强度比低光照强度时空气温升要大。系统的热、电及总效率随空气质量流量的增加而增大,光照强度为700 W/m²时,空气质量流量为0.1 kg/s时系统总效率可以达到80%。

## 参考文献:

- [1] FLORSCHUETZ L W. Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic thermal flat collector. *Solar Energ.*, 1979, 22: 361~366.
- [2] ONG K S. Thermal performance of solar air heaters: Mathematical model and solution procedure. *Solar Energ.*, 1995, 55: 93~109.
- [3] SOPIAN K, YIGIT K S, LIU H T, et al. Performance analysis of photovoltaic thermal air heaters. *Energ. Convers. Manage.*, 1996, 37: 1657~1670.
- [4] GARG H P, ADHIKARI R S. Transient simulation of conversional hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) air heating collectors. *Int. J. Energy Res.*, 1998, 22: 547~62.
- [5] GARG H P, ADHIKARI R S. Performance analysis of a hybrid Photovoltaic/Thermal (PV/T) collector with integrated CPC troughs. *Int. J. Energy Res.*, 1999, 23: 1295~12304.
- [6] HEGAZY A A. Comparative study of the performance of four photovoltaic/thermal solar air collectors. *Energ. Convers. Manage.*, 2000, 41: 861~881.
- [7] SOPIAN K, YIGIT K S, LIU H T, et al. Performance of a double pass photovoltaic thermal solar collector suitable for solar drying system. *Energ. Convers. Manage.*, 2000, 41: 53~365.
- [8] SOPIAN K, OTHMAN M Y H. On the cost-effectiveness of photovoltaic thermal solar collector. *Proceeding of the World Renewable Energy Congress VI*, 2000, Brighton, UK: 2057~2060.
- [9] TRIPANAGNOSTOPOULOS Y, NOUSIA T, SOULIOTIS M, et al. Hybrid photovoltaic/thermal solar system. *Solar Energy*, 2002, 72: 217~234.
- [10] ZONDAG H A, DE VRIES D W, VAN HENDEL W G J, et al. The yield of different combined Pv-thermal collector designs. *Solar Energy*, 2003, 74: 253~269.
- [11] OTHMAN M Y, YATIM B, SOPIAN K, et al. Performance analysis of a double-pass photovoltaic/thermal (PV/T) solar collector with CPC and fins. *Renewable Energy*, 2005, 30: 2005~2017.
- [12] OTHMAN M Y, YATIM B, SOPIAN K, et al. Performance studies on a finned double-pass photovoltaic-thermal (PV/T) solar collector. *Desalination*, 2007, 209: 43~49.
- [13] 杨世铭. 传热学(第三版)[M]. 北京, 高等教育出版社, 1998: 162~196.