

# 一种菲涅尔式高倍聚光光伏光热系统的实验研究

金祝岭, 季 杰, 徐 宁, 孙 炜, 李 晶, 黄文竹

(中国科学技术大学热科学与能源工程系, 合肥 230027)

**摘 要:** 提出并搭建一种新型的高倍聚光光伏光热综合利用系统, 实现菲涅尔式点聚焦光伏系统与PV/T系统的有效结合, 并对其实验研究。通过户外测试, 对数据进行分析得出: 直流电流与直射辐照呈正相关线性关系; 在开始水箱温度低于约为40℃时, 对输出直流电压影响小; 水箱温度过高时, 输出直流电压上升趋势减缓; 系统峰值电功率可达12.10 kW; 09:40~17:00, 系统发电量为77 kWh; 瞬时最高电效率高达28.90%, 平均电效率为27.36%; 瞬时最高热效率可达33.54%, 平均热效率为30.02%; 系统综合效率高达60.00%。

**关键词:** 菲涅尔; 高倍聚光; PV/T; 热效率; 电效率

**中图分类号:** TM615; TK513 **文献标识码:** A

## 0 引 言

太阳能聚光光伏(concentrator photovoltaic, CPV)发电技术是采用光学器件将阳光汇聚到一块面积很小的太阳电池上。聚光光伏发电技术最早由美国 Sandia 国家实验室设计研发, 解决了当时与聚光光伏系统相关的主要难题, 并建造了世界上第一台1 kW的聚光光伏阵列。近年来在世界各地建立了光伏示范电站<sup>[1,2]</sup>。如日芯光伏科技有限公司已经在青海省格尔木建成了50 MW的聚光光伏电站, 采用菲涅尔透镜作为聚光器, 可达到1000倍以上的聚光效果。

许多研究者采用聚光式太阳能光伏发电系统, 虽然会降低系统成本, 但太阳电池板会产生更多热量, 如何有效降低太阳电池板温度成为系统优化关键之一。

太阳能发电集热技术最早是由 Kern 基于光电光热综合利用(photovoltaic/thermal, PV/T)的思想提出的, 即在光伏组件的背面铺设流道, 通过流体将耗散热能带走, 并对这部分热能加以收集利用<sup>[3]</sup>。

王云峰等<sup>[4]</sup>提出, 将蝶式高倍聚光与PV/T系统相结合, 并搭建实验测试平台, 对热、电性能、综合效率进行实验初步研究。陈海飞等<sup>[5]</sup>提出, 将平面

镜阵列高倍聚光器和CPV/T模块结合, 并搭建实验测试平台, 对系统热效率、电效率、系统综合效率进行了实验测试和结果分析。

本文在上述研究基础上, 将菲涅尔点式聚光与水冷换热进行有效结合, 提出新型的非涅尔高倍聚光GaAs发电供热系统(Fresnel high concentrator photovoltaic/thermal, FHCPV/T), 包括聚光系统、双轴追踪系统、水冷换热系统、数据采集系统。该文采用液体冷媒介质(纯净水)强化冷却高能流密度下太阳电池的同时, 对热能进行收集, 进而转化利用, 提高太阳能综合利用率。

## 1 FHCPV/T系统介绍

本文在1个支架上安装4个模组, 组成1个聚光系统(简称1跨), FHCPV/T系统由8跨组成, 工作原理——太阳辐照由菲涅尔透镜聚集, 经高倍聚光接收器聚光匀光投射在太阳电池上, 实现光电转换, 没有转换的太阳辐照由水冷换热装置收集。冷媒介质水贮存在保温水箱中, 通过水泵将低温水从水箱下部出口泵出, 经进水管流入每个模组的换热装置, 对光伏组件进行冷却换热, 换热后的高温水流入回水主管道, 进入水箱。如此循环, 水温持续升高, 实现热能收集。FHCPV/T系统创新点在于:

1)采用菲涅尔点式高倍聚光光伏光热联供系统。该系统具有较高聚光比,几何聚光比可达1090倍。

2)采用主动式水冷换热系统。许多研究中采用被动式换热,如风冷。本文采用主动式换热,有效冷却太阳电池温度,提高光电转换效率,并将热能进行收集利用,提高太阳能综合利用效率。

3)建立小型示范系统。许多研究者只是进行模组单元测试和研究,而本文将光伏系统与PV/T系统相结合,建立了小型示范系统。整个系统如图1。



图1 FHCPV/T系统实物图

Fig. 1 Photograph of the FHCPV/T system

## 1.1 FHCPV/T聚光系统

### 1.1.1 光路系统介绍

4个模组安装在1个支架上,8跨装置组成菲涅尔高倍聚光阵列系统。每一块聚光模组有15块相同菲涅尔透镜和15块相同三结GaAs太阳电池。菲涅尔透镜长和宽为330.2 mm×330.2 mm,透射率0.93;太阳电池长和宽为10.0 mm×10.0 mm,吸收率0.94。模组上菲涅尔透镜和底部太阳电池均采用5×3矩阵排列,一块菲涅尔透镜对应一块太阳电池,电池之间通过串联连接。太阳电池通过导热硅胶层压在水冷换热器装置上,导热硅胶热导率为1.7 W/(m·K)。PV/T模组规格参数如表1,测试条件是AM1.5,太阳直射辐照度9000 W/m<sup>2</sup>,环境温度20℃,风速4 m/s。

表1 PV/T模组的主要出厂电性能参数

Table 1 The main performance parameters of a PV/T model

参数	数值	参数	数值
工作电压/V	40.9	尺寸/m	1.74×1.08×0.64
峰值功率/W	450	短路电流/A	12.5
工作电流/A	11.9	光电转换效率/%	28
开路电压/V	45.2		

运用“菲涅尔透镜-二次棱镜-太阳电池-换热模块”结构,即太阳辐射到菲涅尔透镜,菲涅尔透镜将太阳直射辐射聚焦到二次棱镜上,再均匀照射到太阳电池表面,其几何聚光比可达1090倍,光学聚光比可达880倍,换热装置对太阳电池冷却,并收集热能进一步转化利用。模型如图2,

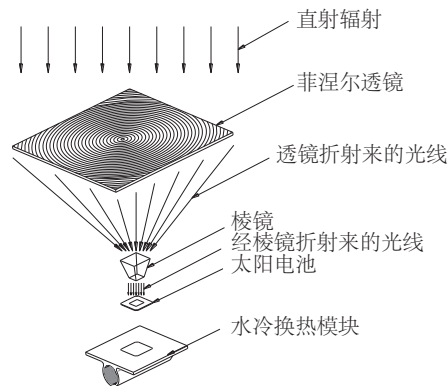


图2 聚光模组结构模型

Fig. 2 Schematic of a concentrator

### 1.1.2 换热模块设计

许多研究中,采用风冷,即铝制肋片式散热器通过自然对流方式降低电池温度,这种方式不仅受当地环境影响,而且未考虑热能利用,降低了系统综合利用效率。鉴于此,本文采用主动式水冷换热模块,对太阳电池进行降温,收集热能进一步利用。FHCPV/T系统水冷换热模块如图3。

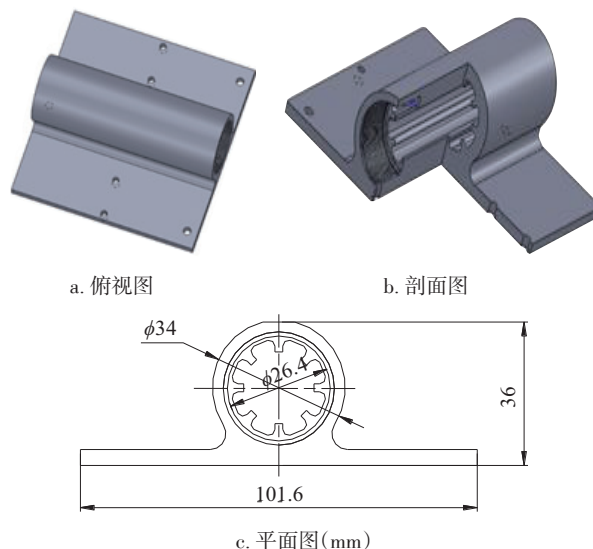


图3 槽道式水冷换热模块三维图

Fig. 3 Schematic of a PV/T component with grooved tube

水冷换热模块采用和风冷模块同种铝材料。根据换热要求,内部设计成8个肋片,以增强对流换热。管道外径34.0 mm,内径26.4 mm。在水冷换热模块底部,用硅胶将太阳能电池层压在换热模块下表面。系统运行时,水从换热模块一端口流入到另一端口,冷却太阳能电池。实物如图4。

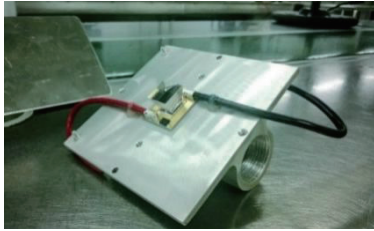
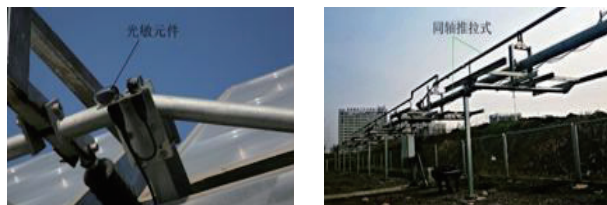


图4 水冷换热模块的实物图

Fig. 4 Physical photograph of the heat-sink

## 1.2 跟踪系统设计

太阳能电池的电输出量和太阳入射角相关,当太阳光垂直照射到非涅尔透镜表面时,系统电性能输出最大。该文采用双轴跟踪系统,通过聚光器公用滚轴的转动和聚光器独立转轴的倾斜来实现太阳追踪,即在其中一跨的支架上安装光敏元件,并以这跨模组为基础,用光斑进行模组调平,并结合天文算法的同轴推拉式闭合回路,实现系统精准追日。跟踪装置如图5,



a. 东西和南北方向安装的光敏元件

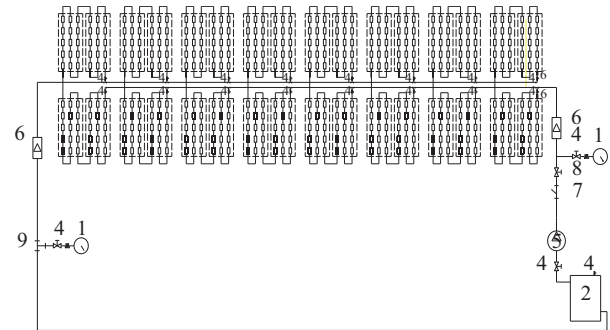
b. 同轴推拉式追踪

图5 东西和南北方向安装的光敏元件和同轴推拉式追踪

Fig. 5 Photosensor in north and south & track based on coaxial push-pull type

## 1.3 管路系统设计

每跨模组换热器之间采用串联,由进水主管道导入水,流经一跨后,回到出水主管道。每跨之间采用并联。为使每跨外部环境相同,考虑沿程阻力等因素,采用同程系统连接方式,即每跨从水箱出水口到回水口路程相同。系统水路和实物分别如图6、图7所示。



1. 压力表 2. 补水箱 3. 排气阀 4. 球阀 5. 水泵  
6. 电池流量计 7. Y型过滤器 8. 安全排气阀  
9. PPR三通,即PPR(polypropylene random)材料制作的3个开口的管接头

图6 FHCPV/T系统原理图

Fig. 6 Schematic of a FHCPV/T system of the FHCPV/T system



图7 FHCPV/T管路连接

Fig. 7 Physical photograph of tube connection

## 1.4 实验仪器

FHCPV/T 实验系统测试包括热电性能、流量、温度、太阳直射辐射等。电磁流量计测量系统质量流量。水箱内布置8根热电偶,对水温进行分层测量,温度由便携式数据采集仪测出,水温取其平均值。水箱容量为1000 L。光伏并网逆变器测出系统输出功率及输出电流和电压。测试仪器相关参数如表2。

表2 实验仪器相关参数

Table 2 Experimental equipment related parameters

测试仪器	型号	精度
电磁流量计	Lmag-W800	1%
热电偶	T-type	$\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$
太阳直射辐射测试仪	TBS-2-2	2%
光伏并网逆变器	GuanyaGSG-100KTT-TV	3%
便携式数据采集仪	LR8401-21	$\pm 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$

## 2 理论分析

### 2.1 系统电效率

模组表面收集太阳直射辐射为:

$$G_z = \rho_m C D S_p \quad (1)$$

式中,  $G_z$ ——聚焦到光伏层太阳能直射辐射,  $W^2$ ;  $\rho_m$ ——聚光镜面透射率;  $C$ ——菲涅尔聚光模组几何聚光比;  $D$ ——直射辐射强度,  $W/m^2$ ;  $S_p$ ——聚光模组表面面积,  $m^2$ 。

因此,系统电效率<sup>[6]</sup>为:

$$\eta_e = E_t / G_z \quad (2)$$

式中,  $\eta_e$ ——系统电效率;  $E_t$ ——系统发电量,  $W$ , 由光伏并网逆变器测出。

### 2.2 系统热效率

水箱容量 1000 L, 根据式(3)可算出系统得热量:

$$Q_t = c_w \dot{m} (T_{out} - T_{in}) \quad (3)$$

因此,系统热效率为:

$$\eta_t = Q_t / G_z \quad (4)$$

式中,  $Q_t$ ——水箱换热热量,  $W$ ;  $\dot{m}$ ——介质水质量流量  $kg/s$ ;  $c_w$ ——水的比热容, 取  $4.2 \times 10^3 J/(kg \cdot K)$ ;  $T_{out}$ ——水箱出水口温度,  $^{\circ}C$ ;  $T_{in}$ ——水箱进水口温度,  $^{\circ}C$ ;  $\eta_t$ ——系统热效率。

### 2.3 系统总效率

在光伏光热联供系统中, 在国内外已有诸多应用实例, 现在研究者们普遍采用系统电效率与系统热效率之和为系统综合效率<sup>[7,8]</sup>, 即:

$$\eta_s = \eta_t + \eta_e \quad (5)$$

式中,  $\eta_s$ ——系统综合效率。

## 3 结果与讨论

本文测试系统位于安徽省淮南市高新区日芯光伏科技有限公司实验区。对系统进行大量测试, 选取 2015 年 8 月 4 日的数据进行分析说明。在该天环境条件下, 图 8 给出实验过程中水箱温度  $T_w$ 、环境温度  $T_a$  以及太阳直射辐射随时间动态变化情况。如图 8, 环境温度约为  $33^{\circ}C$ , 水箱温度随着时间从  $29.24^{\circ}C$  升高到  $62.04^{\circ}C$ 。

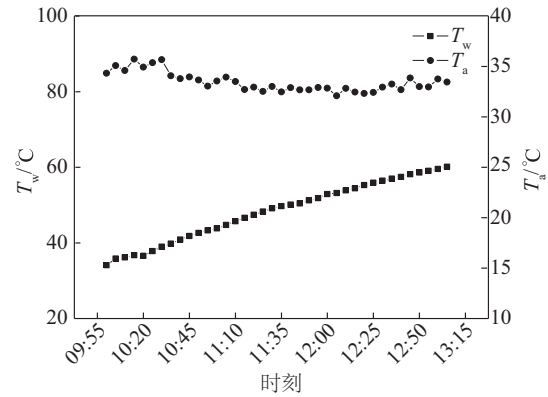
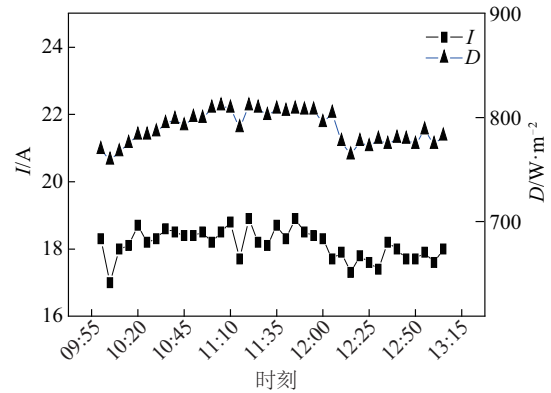


图 8 环境温度和水箱温度随时间的变化

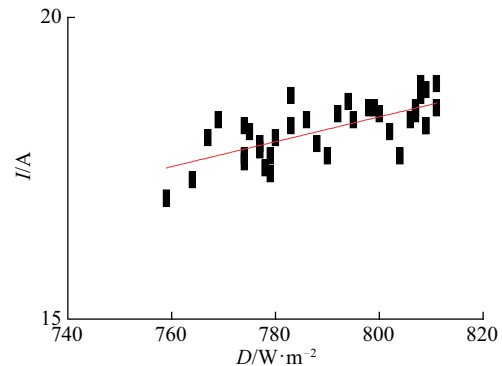
Fig. 8 The change of ambient temperature and tank temperature over time

### 3.1 直射辐射强度 $D$ 对系统电效率 $\eta_e$ 的影响

如图 9, 比对  $I$  和  $D$  曲线, 输出电流与太阳直射辐射变化呈正相关线性关系。通过图 9b  $I$  和  $D$  的线性拟合, 可知输出电流主要受太阳直射辐射影响, 随太阳直射辐射强度的增大而增大。



a. 太阳直射辐射强度和直流电流随时间的变化



b. 输出电流随太阳直射辐射强度变化的拟合曲线

图 9 电流与太阳直射辐射强度变化的正相关线性关系

Fig. 9 The change of direct solar radiation and direct current over time fitting curve of  $I$  versus  $D$



直射辐射强度先缓慢上升,到 12:00 下降,后保持在小范围波动;系统输出电效率整体呈下降趋势,如图 10a。系统电效率受太阳直射辐射强度的直接影响,如图 10b。

从整体看,系统电效率波动比较小,范围 26.4%~28.7%。在太阳直射辐照变化时,10:00 到 11:59,太阳直射辐射强度增加 6.5%,输出电流主要受太阳直射辐照强度影响,而系统输出电压受太阳直射辐照强度的影响较小,根据公式  $P=UI$  知,输出功率随输出电流的增大而增加,即成正比。由式(2)得,在太阳直射辐射强度变化不超过 6.5%时,系统电效率主要受输出功率影响。

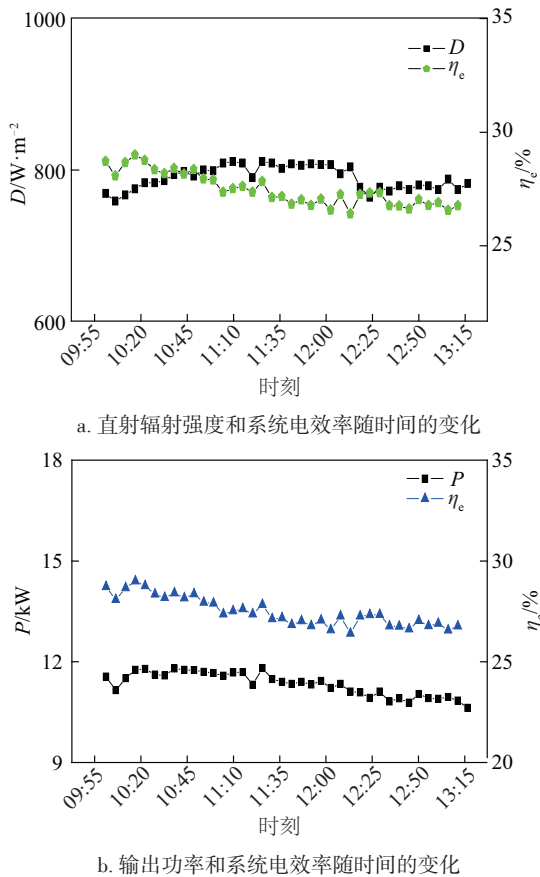


图 10 直射辐射、输出功率和系统电效率随时间的变化

Fig. 10 The change of direct solar radiation and the change of output power electrical efficiency over time

### 3.2 水箱温度 $T_w$ 对系统电效率 $\eta_e$ 的影响

系统输出功率先增加后逐渐下降,水温逐步升高后上升趋势减慢,如图 11。当水箱温度低于 40 °C 时,对输出功率影响不大,光伏电池受温度影响小,光电转换效率高;但当水箱温度较高时,随着

水温上升,太阳电池受水温影响大,光电转换效率降低,系统输出功率呈下降趋势。

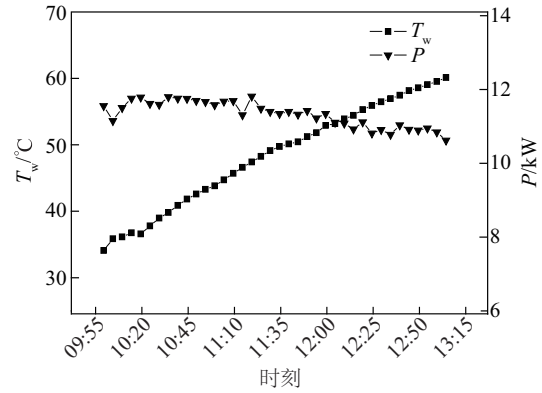


图 11 水箱温度和输出功率随时间的变化

Fig. 11 The change of tank temperature and output power over time

随着水温升高,系统电效率呈缓慢下降趋势,范围 26.4%~28.7%,如图 12 所示。水箱温度过高,太阳电池换热效果减弱,其光电转换效率下降,导致系统电效率降低。主要因为水温低于 40 °C 时,水温与太阳电池温差较大,能快速冷却太阳电池,电池光电转换效率不受水温影响。当水温过高,已接近太阳电池表面温度,换热效果减弱。太阳电池温度无法快速冷却,在高温下太阳电池转换效率下降,输出电功率降低。

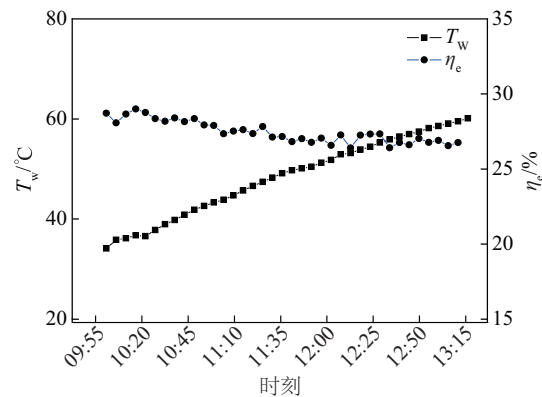


图 12 水箱温度和系统电效率随时间的变化

Fig. 12 The change of tank temperature and electrical efficiency over time

### 3.3 输出电流 $I$ 、电压 $U$ 对系统电效率的影响

输出电流主要受太阳直射辐射影响,输出电压受水箱换热温度影响。输出功率受输出电压和电流共同影响,如图 13。

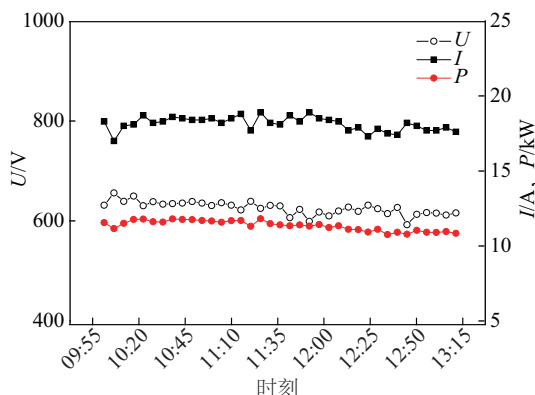


图13 输出电流、输出电压和输出功率随时间的变化

Fig. 13 The change of direct current, direct voltage and output power over time

系统输出电压受换热水温影响,在水温超过一定温度时,输出电压随水温升高而下降。这一点在文献[8]已有证明,本文也证明了这点。输出电流主要受太阳直射辐射影响,和太阳直射辐射呈线性关系。根据图13可知,输出电流先增大后缓慢下降。输出功率先短暂升高后呈下降趋势。

主要因为,在开始测试时,水温低于40℃,输出电流随太阳直射辐射升高而升高,而输出电压基本不变,根据公式 $P=UI$ 知,输出功率增大。随着水箱温度的升高,输出电压下降;输出电流先保持稳定后下降,根据公式 $P=UI$ 知,输出功率下降,系统电效率下降。

### 3.4 水箱温度 $T_w$ 对系统热效率 $\eta_t$ 的影响

根据热效率式(3)、式(4)可知,系统得热主要受到水箱温差变化影响;系统热效率受太阳直射辐射和水箱温差变化的共同影响。如图14,在测试开始,水箱温度上升到约为40℃时,系统热效率随水温上升而快速上升。因为水箱中水温较低,而聚光模组已聚光使太阳电池有了一定温度,导致管路中水温高于水箱中温度,在进行换热时,水箱中水温会快速上升。此时太阳直射辐射变化较小,而系统还没有达到稳态,无法用式(3)、式(4)进行计算说明。水温变化快,系统热效率偏高主要是受到系统热容等因素影响。

当水箱温度继续上升时,系统达到稳态,系统热效率继续下降。因为水温高于太阳电池温度时,换热模块换热效果减弱,水箱温度上升趋势减慢,导致系统瞬态热效率逐渐下降。在10:35,水箱温

度44.52℃,系统热效率31.43%,相比于12:35,水温60.77℃,热效率21.55%,热效率下降了31.43%。

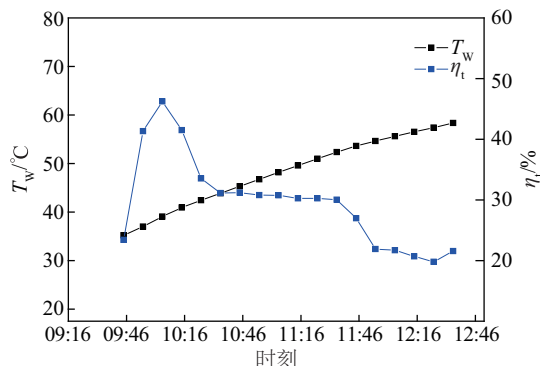


图14 水箱温度和系统热效率随时间的变化

Fig. 14 The change of tank temperature and thermal efficiency over time

### 3.5 系统综合效率

系统峰值电功率可达到12.10 kW,当天09:40~17:00,系统发电量为77 kWh。系统瞬时最高电效率高达到28.90%,平均电效率为27.36%;系统瞬时最高热效率可达33.54%,平均热效率为30.02%;系统综合效率可达60.00%以上。

## 4 结 论

该文对菲涅尔高倍聚光三结GaAs光伏光热系统进行介绍,包括:聚光系统、水冷换热冷却系统、双轴追踪系统、数据采集系统。其中,聚光模组是“菲涅尔透镜-二次棱镜-太阳电池-换热装置”结构,系统采用双轴追踪系统,有效提高追踪精度。太阳电池为三结GaInP/GaAs/Ge电池,且太阳电池采用肋片式水冷换热装置,以主动冷却方式降低太阳电池温度,提高光电转换效率并将热能加以收集利用,从而大大提高系统太阳能综合利用率。通过对实验数据分析得出以下结论:

1) 输出电压受换热水温影响。水温低于40℃时,输出电压受水温影响小;当水温过高时,随水温升高输出电压逐渐下降。

2) 输出电流与太阳直射辐射强度呈正相关性关系。根据 $P=UI$ 可知,系统输出功率开始受 $I$ 影响较大;当水温过高时,输出电压下降,这时输出功率受 $U$ 和 $I$ 的共同影响。

3) 在开始测试时,系统电效率随直射辐射强度升高而升高;当水温超过一定温度时,随水温升高

而下降。系统热效率主要受水温变化影响。

4)系统峰值电功率可达到 12.10 kW, 09:40~17:00, 系统发电量为 77 kWh。系统瞬时最高电效率高达 28.90%, 平均电效率为 27.36%; 系统瞬时最高热效率可达 33.54%, 平均热效率为 30.02%; 系统综合效率可达 60.00%。

#### [参考文献]

- [1] Luther J, Luque A, Bett A, et al. Concentration photovoltaics for highest efficiencies and cost reduction [A]. 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference[C], Barcelona, 2005, 6—10.
- [2] 田 玮, 王一平, 韩立君, 等. 聚光光伏系统的技术进展[J]. 太阳能学报, 2005, 26(4): 597—604.
- [2] Tian Wei, Wang Yiping, Han Lijun, et al. Technology development of photovoltaic[J]. Acta Energaie Slaris Sinica, 2005, 26(4): 597—604.
- [3] Bergene T, Lovvik O M. Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells[J]. Solar Energy, 1995, 55(6): 453—462.
- [4] Ji Jie, Wang Yunfeng, Chow Tin-Tai, et al. A Jet impingement/chanel receiver for cooling of densely packed photovoltaic under paraboloidal dish solar concentrator[J]. Heat Transfer Research, 2012, 43(8): 767—778.
- [5] Chen Haifei, Ji Jie, Wang Yungfeng, et al. Thermal analysis of a high concentration photovoltaic / thermal system[J]. Solar Energy, 2014, 107: 372—379.
- [6] Ji Jie, lu Jianping, Chow Tintai, et al. A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation[J]. Applied Energy, 2007, 84(2): 222—237.
- [7] Xu Ning, Ji Jie, Wei Sun, et al. Outdoor performance analysis of a 1090x point-focus Fresnel high concentrator [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 100: 191—200.
- [8] 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.
- [8] Ji Jie, Cheng Hongbo, He Wei, et al. Experment study on a hybrid photovoltaic/thermal solar system[J]. Acta Energaie Slaris Sinica, 2005, 26(2): 170—173.

## EXPERIMENTAL STUDY OF A POINT-FOCUS FRESNEL HIGH CONCENTRATOR PHOTOVOLTAIC/THERMAL SYSTEM

Jin Zhuling, Ji Jie, Xu Ning, Sun Wei, Li Jing, Huang Wenzhu

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** This paper proposes and builds a novel type of high concentration photovoltaic/thermal (HPV/T) system, combines the Fresnel type point-focus photovoltaic system with PV/T system effectively, and carries on the experimental study. Through outdoor test and analysis of data, the result showed that direct current rises with the rise of direct irradiation. At first, when the tank temperature is low, there is little fluctuation on the output direct voltage. When the temperature in water tank is too high, the output of direct voltage rises slowly. The peak power can reach 12.10 kWh. From 09:40 to 17:00, power generating capacity is 77 kWh in this system. The highest instantaneous electrical efficiency is as high as 28.9%, and the average electrical efficiency is 27.36%. The highest instantaneous thermal efficiency is more than 33.54%, and the average thermal efficiency is 30.02%. The overall efficiency of the system is more than 60.00%.

**Keywords:** Fresnel; high concentrator; PV/T; thermal efficiency; electrical efficiency