文章编号：1003-0417(2020)05-38-07

基于 TRNSYS 的 CPC 集热器太阳能热水系统的模拟分析

沈向阳*，李世宇，戚锦洵
(仲恺农业工程学院机电工程学院，广州 510225)

摘 要：通过 TRNSYS 软件搭建了复合抛物面聚光器 (CPC) 集热器太阳能热水系统模型，对广州地区某小型别墅的太阳能热水系统进行了设计，并观察系统在 1 年 (8760 h) 中的运行情况。选取了系统在 4 个典型日的运行情况进行分析，得到了 CPC 集热器在春分日和冬至日的最高出口温度分别为 67.5 ℃和 68.2 ℃，在夏至日和秋分日的最高出口温度分别为 85.7 ℃和 83.3 ℃。CPC 集热器的集热效率随进口流量的增大而增大，随进口温度的下降而升高；经测试，CPC 集热器的最佳安装倾角为 22°。对 CPC 集热器和平板集热器的集热性能进行比较后发现，二者的集热功率基本均随太阳辐照度的增加而增加，在冬至日 12:00～15:00 这个时段，CPC 集热器的集热功率是平板集热器的 1.5 倍。

关键词：CPC 集热器；太阳能热水系统；集热效率；TRNSYS 软件；模拟
中图分类号：TK513.1 **文献标志码**：A

0 引言

太阳能是一种清洁的可再生能源，开发和利用太阳能符合当前节能减排的要求。太阳能热水系统逐渐成为居民日常生活用热水的主要供应方式，其核心装置——太阳能集热器的性能直接影响太阳能热水系统的工作效率。因此，研究太阳能集热器具有重要意义。

常见的 3 种太阳能集热器为平板集热器、真空管集热器和复合抛物面聚光器 (compound parabolic concentrator，CPC) 集热器，其中，CPC 集热器以集热效率高、热容量小等特点受到学者们的广泛关注。ZHENG 等 [1] 提出了一种新型蛇形 CPC 集热器，以提高集热器的集热效率、降低其热损失，实现太阳能装置在寒冷地区加热时的高抗冻性，集热器的集热效率高达 60.5%。杨明等 [2] 对 3 种低聚光比的 CPC 进行了实验对比研究，发现集热温度较低时，聚光比最小的 CPC 的集热效率较高；而集热温度较高时，聚光比最大的 CPC 的集热效率较高。袁航等 [3] 将 CPC 聚光技术应用于热管式真空集热管中，开发了一种新型 CPC 内聚光式热管集热管，可大幅提高太阳能热水系统的输出温度。CPC 聚光比小于 2 时，其一般作为固定式聚光器应用于太阳能热水器。

针对太阳能热水器，AYOMPE 等 [4] 提出了一种针对强制循环太阳能热水系统的 TRNSYS 模型，用于预测太阳能热水系统在不同地点长期运行的性能，并模拟了系统在不同天气下的运行性能。SHAFIEIAN 等 [5] 评估了太阳能热水系统热管的性能，开发了数学模型，并可用于计算太阳能热管收集器的最佳玻璃管数量，评估结果显示，热水提取对太阳能热水系统的集热性能有显著影响。DAGHIGH 等 [6] 提出了一个用于分析太阳能热水系统的真空管集热器性能的数学模型，结果显示，热水消耗量与系统性能之间存在直接

收稿日期：2019-08-16
基金项目：国家自然科学基金项目 (51606227)
通信作者：沈向阳 (1982—)，男，博士、副教授，主要从事太阳能热利用，传热与节能方面的研究。xiangyangshen@126.com

关联。姚莉等[7] 利用 TRNSYS 软件，以平板集热器作为集热装置，搭建了强制循环太阳能热水系统，对广州地区平板集热器的最佳安装倾角进行了分析。付波[8] 针对北京市某高校的公共浴室，利用 TRNSYS 软件搭建了以真空管集热器为集热装置的强制循环直接式太阳能热水系统，对集热器进口水温、室外温度及太阳能辐射量对集热器集热效率的影响进行了分析。杨亚帅等[9] 采用 TRNSYS 软件，针对天津地区某工业大学搭建了太阳能热水系统，并通过实验分析和验证了太阳能热水系统的集热性能。王美地等[10] 以 TRNSYS 软件为平台，对平板太阳能热水器进行了模拟研究，发现不同天气下日总辐照量对太阳能热水器日平均效率的影响不大。龙星等[11] 基于 Perez 辐射模型，借助 TRNSYS 软件，对不同安装倾角及方位角时集热器单位面积采光量的情况进行了探究。

综上可以看出，将 CPC 集热器应用于太阳能热水系统的模拟分析较少。因此，本文以广州地区某小型别墅为例，采用 TRNSYS 软件搭建了 1 套小型 CPC 集热器太阳能热水系统，模拟了该系统 1 年的运行情况，并以 4 个典型日作为分析对象，同时以集热器的进口温度、进口流量、安装倾角作为集热器集热效率的影响因素进行分析。

1 CPC 集热器的数学模型

1.1 CPC 集热器的光学原理

CPC 集热器主要由抛物面反射镜 (聚光器)、接收器 (包括真空玻璃管和金属吸热管)、驱动机构及保温材料组成。为了能获取到尽可能多的能量，集热器应具有较大的聚光比，聚光比为抛物面反射镜净采光面积与接收器表面积的比值。聚光比 C 的表达式为：

$$C=\frac{Bl}{\pi dl} \tag{1}$$

式中，l 为抛物面反射镜的长度，m；B 为抛物面反射镜的槽宽，m；d 为真空玻璃管的直径，m。

1.2 CPC 集热器的光学效率

太阳光投射到聚光器并被其反射，然后在透过真空玻璃管到金属吸热管外表面的过程中存在光学损失和热力学损失。在聚光的过程中，光学损失主要有余弦损失、光损失和遮挡效应损失。光学效率是指在不考虑热力学损失的条件下，集热器所能达到的最大能量接收效率。

CPC 集热器的光学效率 η_o 的表达式为：

$$\begin{aligned}\eta_o&=\eta_a(1-\eta_b)\cos\theta\\&=\frac{CI_rk_gk_b\varepsilon\sigma_cS_1}{I_rS_2}\bullet\frac{2(n-1)d_0\cos\beta-(n-2)B}{(n-1)d_0\cos\beta+B}\bullet\cos\theta\end{aligned} \tag{2}$$

式中，η_a 为光传播效率；η_b 为阴影损失；$\cos\theta$ 为太阳入射角的余弦值；S_1 为集热单元金属吸热管表面积，m^2；β 为聚光器的跟踪角度；S_2 为集热单元采光面积，m^2；k_b 为玻璃盖板的透光率；k_g 为真空玻璃管的透光率；ε 为抛物面反射镜的反射率；σ_c 为集热管吸收率；I_r 为太阳直射辐射强度，W/m^2；d_0 为相邻 2 个 CPC 的抛物面反射镜镜面中心距离，m；n 为集热器的个数。

1.3 CPC 集热器的热力学效率

吸热管的能量平衡方程为：

$$\rho_{abs}C_{p,abs}A_{abs}\frac{\partial T_{abs}}{\partial t}=A_{abs}k_{abs}\frac{\partial^2 T_{abs}}{\partial x^2}+(\tau\alpha)I_{eff}D_{abs,o}-\pi D_{abs,o}h_{r,g,abs}(T_{abs}-T_g)-\pi D_{abs,i}h_w(T_{abs}-T_w) \tag{3}$$

式中，A_{abs} 为金属吸热管的横截面积，m^2；ρ_{abs} 为金属吸热管的密度，kg/m^3；T_{abs} 为金属吸热管的温度，℃；k_{abs} 为金属吸热管的热传导系数；h_w 为工质流体与金属吸热管之间的对流换热系数；$(\tau\alpha)$ 为有效透过率与吸收率的乘积；T_w 为工质流体的温度，℃；T_g 为玻璃外管的温度，℃；$h_{r,g,abs}$ 为玻璃外管与金属吸热管之间的辐射换热系数；t 为时间，s；x 为遮挡区域的宽度，m；$D_{abs,o}$ 为金属吸热管的外径，m；$C_{p,abs}$ 为金属吸热管的比热容，kJ/(kg•K)；$D_{abs,i}$ 为金属吸热管的内径，m；I_{eff} 为有效太阳直接辐射强度，W/m^2。

玻璃外管的能量平衡方程为：

$$\rho_g C_{p,g} A_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = A_g k_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial x^2} + I_{eff} a_g D_{g,o} - \pi D_{g,o} h_a (T_g - T_a) - F_{TS} \pi D_{g,o} \varepsilon_g \sigma (T_g^4 - T_{sky}^4) - \pi D_{g,i} h_{r,g,abs} (T_g - T_{abs}) \tag{4}$$

式中，ρ_g 为玻璃外管的密度，kg/m^3；$C_{p,g}$ 为玻璃外管的比热容；a_g 为玻璃外管的吸收率；$D_{g,o}$ 为玻璃外管的外径，m；$D_{g,i}$ 为玻璃外管的内径，m；A_g 为玻璃外管的横截面积，m^2；k_g 为玻璃外管的热传导系数；T_{sky} 为天空温度，℃；h_a 为玻璃外管外表面的对流换热系数；T_a 为环境温度，℃；F_{TS} 为采集因子修正系数；ε_g 为玻璃外管的表面反射率；σ 为玻尔兹曼常数。

工质流体的能量平衡方程为：

$$\rho_w C_{\rho,w} A_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = \pi D_{abs,i} h_w (T_{abs} - T_w) - m_w C_{\rho,w} \frac{\partial T_w}{\partial x^2} \tag{5}$$

式中，ρ_w 为工质流体的密度，kg/m^3；m_w 为工质流体的质量流量，kg/s；$C_{\rho,w}$ 为工质流体的比热容，kJ/(kg•K)；A_w 为工质流体的横截面积，m^2；$D_{abs,i}$ 为金属吸热管的内径，m。

1.4 CPC 集热器的集热效率

CPC 集热器的集热效率 η 的表达式为：

$$\eta = \frac{m_w C_{\rho,w} (T_{w,out} - T_{w,in})}{I_c - A_c} \tag{6}$$

式中，$T_{w,out}$ 为工质流体的出口温度，℃；$T_{w,in}$ 为工质流体的进口温度，℃；I_c 为投射到抛物面上的太阳辐照度，W/m^2；A_c 为抛物面开口面积，m^2。

2 TRNSYS 软件搭建的模拟系统

2.1 太阳能热水系统的工况设定

利用 TRNSYS 软件对广州地区某小型别墅的太阳能热水系统进行模拟，该别墅 (23° N、112° E) 的用户按 5 人计算，设计热水温度为 60 ℃，设计冷水温度为 15 ℃。根据 GB 50015-2003《建筑给水排水设计规范》[12]，系统日用水量取 50 L/(人 •d)，可计算得到该别墅生活热水用量为 250 L/d。采用 CPC 集热器，通过文献 [12-13] 对该别墅的太阳能热水系统进行设计，得到的集热器总面积为 5 m^2，采用 300 L 容积的储热水箱。

2.2 模拟系统的部件选型

模拟系统采用的部件模块主要有：CPC 集热器 Type74、循环水泵 Type3、储热水箱 Type4d、温度控制器 Type2b、气象参数 Type109、用水负荷情况 Type14b、负载计算器、数据显示器 Type65c。

2.3 CPC 集热器太阳能热水系统的搭建

文献 [14] 指出，针对生活热水日用量小于 600 L 的家用太阳能热水系统，应采用强制循环直接式太阳能热水系统方案。因此本模拟系统采用该系统方案，并对各个模块部件进行连接，模型图如图 1 所示。

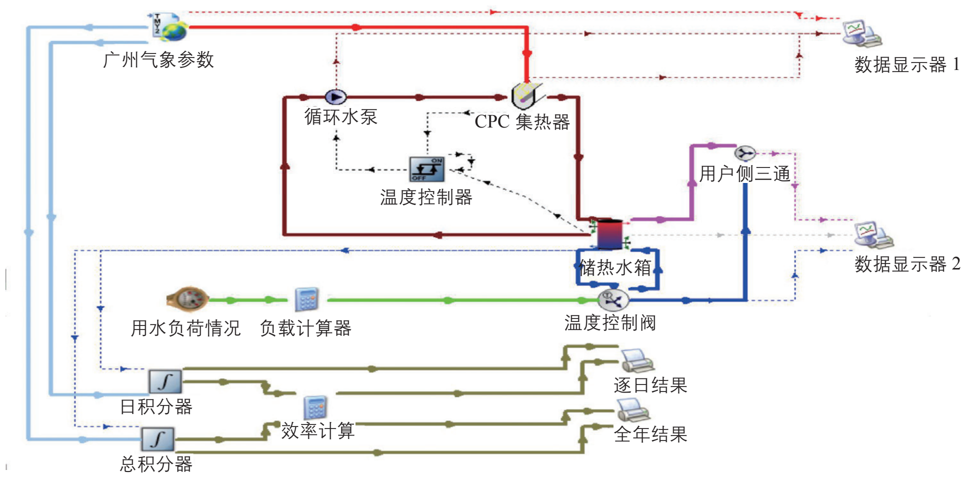


图 1 CPC 集热器太阳能热水系统的 TRNSYS 模型

Fig. 1 TRNSYS model of CPC collector solar water heating system

2.4 各部件参数的设置

CPC 集热器的主要参数设定如表 1 所示。

表 1 CPC 集热器主要参数设定

Table 1 Main parameters of CPC collector

参数	设定值
集热面积 /m^2	5
并联组数 / 组	1
每组并联个数 / 个	2
传热工质比热容 /kJ•(kg•℃)$^{-1}$	4.190
翅片效率	0.7
总热损失系数	0.833

3 模拟结果分析

3.1 广州地区气象模拟

系统的运行时间设定为 1 年 (即 8760 h)，则可得到 1 年内广州地区环境温度的逐时变化曲线，如图 2 所示。

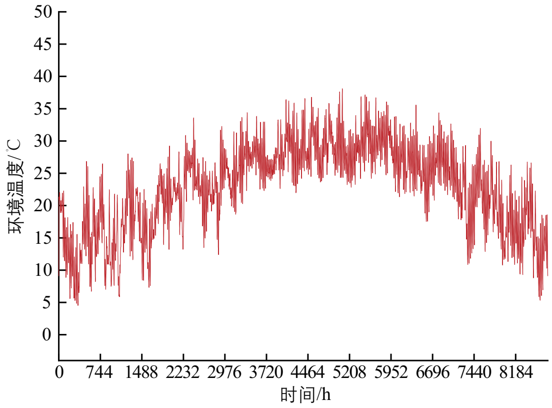


图 2 广州地区环境温度的逐时变化曲线

Fig. 2 Hourly change curve of environmental temperature in Guangzhou

由图 2 可以看出，广州地区夏天的环境温度最高可达到 38 ℃，冬天环境温度最低为 4 ℃，模拟数据符合广州地区的实际气象变化。

图 3 为 TRNSYS 软件模拟的广州地区太阳辐照度的逐时变化图。

由图 3 可知，在夏、秋两季，广州地区的太阳辐照度总体上较高；在春、冬两季，太阳辐照度较低。

3.2 4 个典型日 CPC 集热器的运行情况分析

以春分日、夏至日、秋分日和冬至日为典型

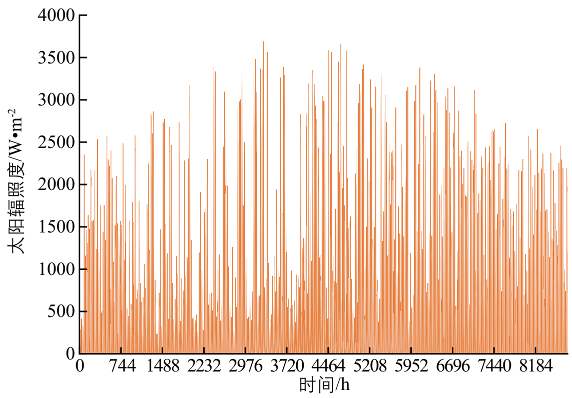
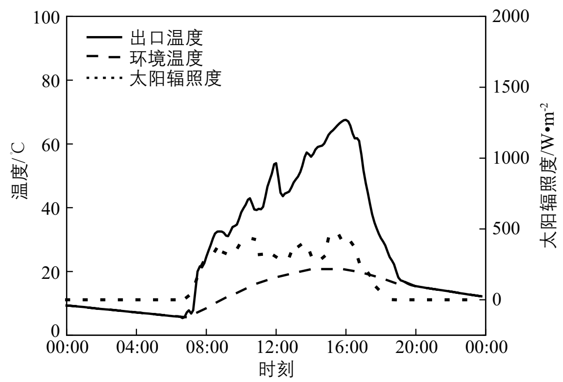


图 3 广州地区太阳辐照度逐时变化曲线

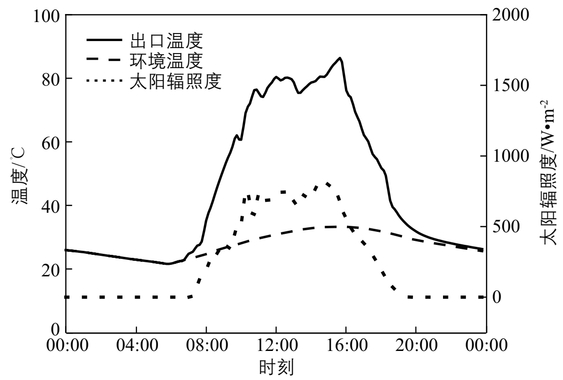
Fig. 3 Hourly variation curve of solar irradiance in Guangzhou

日进行模拟，CPC 集热器的进口流量为 24 kg/h，进口温度为 15 ℃，模拟结果如图 4 所示。

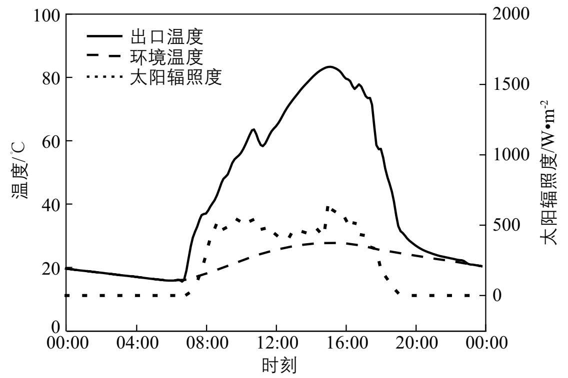
由图 4 可知，在 08:00～12:00，随着太阳辐照度不断增加，CPC 集热器的出口温度上升较快；12:00～15:00，太阳辐照度较高，CPC 集热器的出口温度仍然上升，但增速有所下降，原因是 CPC 集热器内部温度远高于环境温度，所以热损失增大；15:00 之后，太阳辐照度迅速下降，但 CPC 集热器的出口温度下降速度较缓慢，这主要是因为集热器本身具有较好的保温效果。



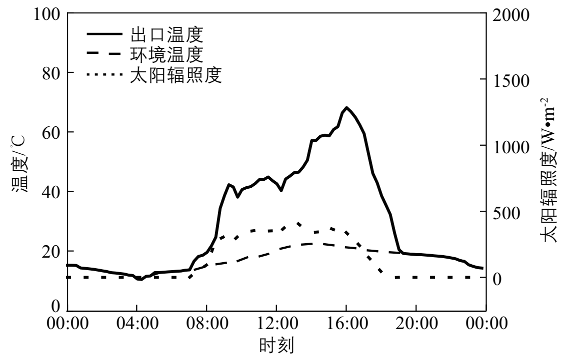
a. 春分日



b. 夏至日



c. 秋分日



d. 冬至日

图 4 4 个典型日 CPC 集热器运行情况的模拟结果

Fig. 4 Simulation results of CPC collector operation with four typical day

从图 4 还可以看出，CPC 集热器的出口温度与太阳辐照度的变化趋势一致，但在时间上变化有所滞后。春分日，最大太阳辐照度出现在 15:30，其值为 479.4 W/m^2；CPC 集热器的最高出口温度出现在 16:00，其值为 67.5 ℃。夏至日，太阳辐照度较高，最大太阳辐照度出现在 14:00，其值为 823.9 W/m^2；CPC 集热器的最高出口温度出现在 15:30，其值为 85.7 ℃。秋分日，最大太阳辐照度出现在 15:00，其值为 658.8 W/m^2；CPC 集热器的最高出口温度出现在 15:00，其值为 83.3 ℃。冬至日，太阳辐照度较小，最大太阳辐照度出现在 13:00，其值为 409.8 W/m^2；CPC 集热器的最高出口温度出现在 16:00，其值为 68.2 ℃。

3.3 CPC 集热器的集热性能分析

3.3.1 CPC 集热器进口流量对集热效率的影响

设置 CPC 集热器的进口温度为 15 ℃，当进口流量分别为 15、18、21 和 24 kg/h 时，CPC 集热器进口流量对集热效率的影响情况如图 5 所示。

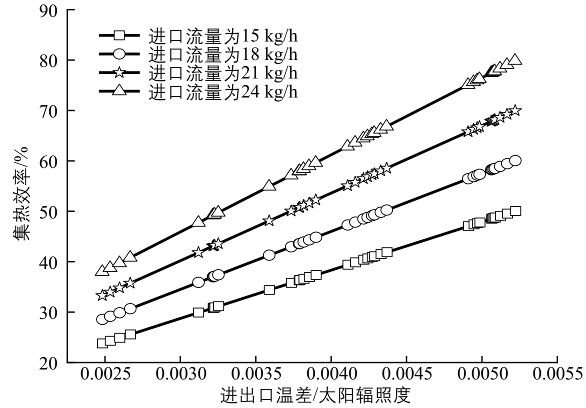


图 5 CPC 集热器进口流量对集热效率的影响

Fig. 5 Effect of the inlet flow rate of CPC collector to heat collecting efficiency

由图 5 可以看出，进口流量越大，CPC 集热器的集热效率越高，这是因为当管径一定时，水流量越大，其湍流强度越大，水与集热器的换热效果就越好。但是随着水量增大，泵功率也需要增大，水的循环次数也会相应增加，因此，需要选择合适的集热器进口流量。

3.3.2 CPC 集热器进口温度对集热效率的影响

设置 CPC 集热器的进口流量为 24 kg/h，当集热器的进口温度分别为 10、20、30、40 ℃时，集热器进口温度对集热效率的影响情况如图 6 所示。

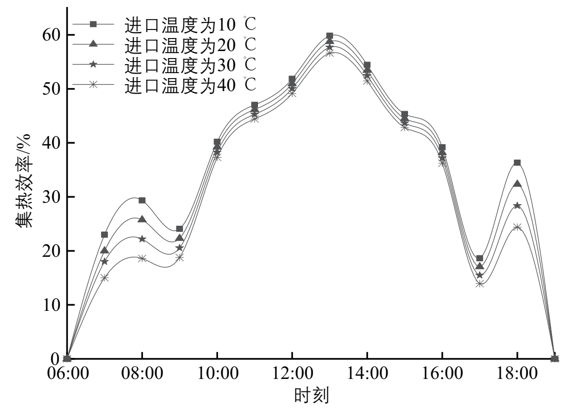


图 6 CPC 集热器进口温度对集热效率的影响

Fig. 6 Effect of the inlet temperature of CPC collector to heat collecting efficiency

由图 6 可知，随着太阳升起，集热效率逐渐上升，但在 08:00～09:00 时集热效率有所降低，这是因为该时间段太阳辐照度的增速较快，而

CPC 集热器的进出口温差变化较小，造成集热效率降低；在 09:00～13:00 时集热效率逐渐增大，在 13:00 达到最大；随后集热效率慢慢降低，但在 17:00～18:00，集热效率短时间内有所上升，原因是太阳辐照度在该时间段内逐渐降低，但集热器的保温性使出口温度下降速度较慢；18:00 之后，太阳辐照度降到最低，CPC 集热器的集热效率也随之降低。由图 6 还可以看出，CPC 集热器的进口温度越高，其集热效率越低。

3.3.3 CPC 集热器安装倾角对集热效率的影响

基于 TRNSYS 软件，对 CPC 集热器安装倾角对集热效率的影响进行模拟，可以得到 CPC 集热器安装倾角与太阳辐照度的关系图，如图 7 所示。

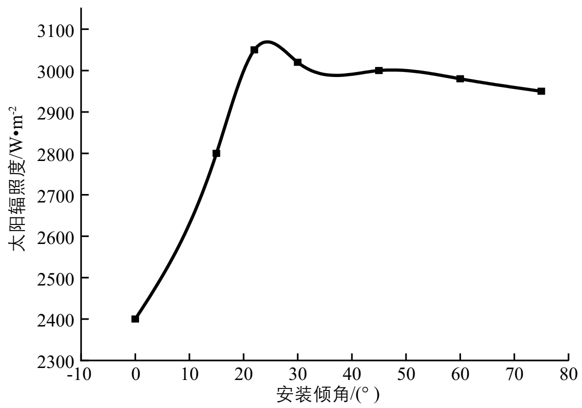


图 7 CPC 集热器安装倾角对集热效率的影响

Fig. 7 Effect of installation inclination of CPC collector to heat collecting efficiency

从图 7 可以看出，当 CPC 集热器安装倾角为 22°时，集热器获得的太阳辐照度最大，此时的集热效率最好。因此，广州地区的 CPC 集热器最佳安装倾角为 22°。

3.4 CPC 集热器与平板集热器的集热性能对比

利用 TRNSYS 软件搭建集热系统模型，以广州地区的数据为基础，在集热器集热面积、进口温度、进口流量和安装倾角都一致的情况下，比较 CPC 集热器和平板集热器的集热性能。模拟运行时间为 1 年，以冬至日的集热功率为例进行比较分析，模拟结果如图 8 所示。

由图 8 可知，CPC 集热器和平板集热器的

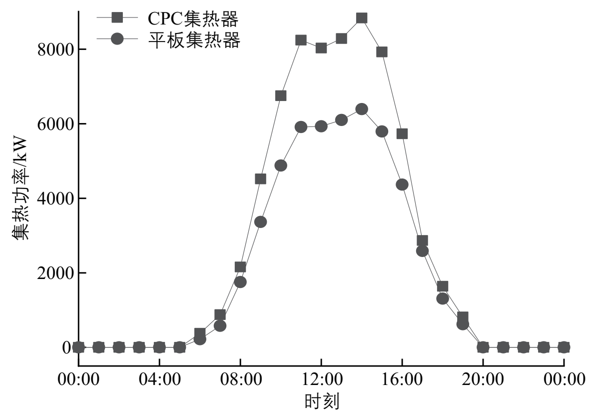


图 8 CPC 集热器与平板集热器的集热功率对比

Fig. 8 Comparison of heat collection power between CPC collector and flat plate collector

集热功率基本都是随太阳辐照度的增加而增加，但冬至日 12:00 左右太阳辐照度有明显波动，所以集热器的集热功率也随之产生波动。CPC 集热器的集热功率比平板集热器的集热功率高，特别是在太阳辐照度最高的 12:00～15:00 这个时段，CPC 集热器的集热功率约是平板集热器的 1.5 倍。

4 结论

本文利用 TRNSYS 软件对广州地区某小型别墅的强制循环直接式 CPC 集热器太阳能热水系统进行了模拟，结果表明：

1) CPC 集热器的出口温度与太阳辐照度的变化趋势一致，但变化在时间上有所滞后。在春分日和冬至日，CPC 集热器的最高出口温度分别为 67.5 ℃和 68.2 ℃；在夏至日和秋分日，CPC 集热器的最高出口温度分别为 85.7 ℃和 83.3 ℃。

2) CPC 集热器的进口流量和进口温度对集热器的集热效率有影响。进口温度越低，则集热器的集热效率越高；集热器的集热效率随进口流量的增大而增大。对于广州地区而言，CPC 集热器的最佳安装倾角为 22°。

3) CPC 集热器和平板集热器的集热功率基本随太阳辐照度的增加而增加；且 CPC 集热器的集热功率比平板集热器的集热功率高，特别是在太阳辐照度最高的 12:00～15:00 这一时段，可达 1.5 倍。

[参考文献]

[1] ZHENG W D, YANG L, ZHANG H, et al. Numerical and experimental investigation on a new type of compound parabolic concentrator solar collector[J]. Energy conversion and management, 2016, 129: 11 － 22.

[2] 杨明 , 裴刚 , 李桂强 , 等 . 三种低倍聚光比的 CPC 的实验对比研究 [J]. 太阳能学报 , 2017, 38(2): 431 － 437.

[3] 袁航 , 张红 , 许辉 , 等 . CPC 内聚光式热管集热管温度特性研究 [J]. 水电能源科学 , 2013, 31(10): 253 － 256.

[4] AYOMPE L M, DUFFY A, MC CORMACK S J, et al. Validated TRNSYS model for forced circulation solar water heating systems with flat plate and heat pipe evacuated tube collectors[J]. Applied thermal engineering, 2011, 31(8 － 9): 1536 － 1542.

[5] SHAFIEIAN A, KHIADANI M, NOSRATI A. Thermal performance of an evacuated tube heat pipe solar water heating system in cold season[J]. Applied thermal engineering, 2019, 149: 644 － 657.

[6] DAGHIGH R, SHAFIEIAN A. Theoretical and experimental analysis of thermal performance of a solar water heating system with evacuated tube heat pipe collector[J]. Applied thermal engineering, 2016, 103: 1219 － 1227.

[7] 姚莉 , 余国保 , 张玲 , 等 . 户用太阳能热水系统集热器最优安装倾角的 TRNSYS 模拟分析 [J]. 太阳能 , 2014(11): 53 － 55.

[8] 付波 . 基于 TRNSYS 的太阳能热水系统的模拟分析 [J]. 区域供热 , 2017(6): 94 － 98.

[9] 杨亚帅 , 张明 , 杨宾 , 等 . 太阳能热水系统的模拟与实验研究 [J]. 能源与节能 , 2018(3): 61 － 62, 78.

[10] 王美地 , 李明 , 季旭 , 等 . 平板型太阳能热水器性能试验及其模拟对比 [J]. 可再生能源 , 2013, 31(5): 22 － 25.

[11] 龙星 , 张孝怡 , 杨柳 , 等 . 昆明地区太阳能集热器采光量的计算 [J]. 可再生能源 , 2014, 32(1): 11 － 14.

[12] 中华人民共和国住宅和城乡建设部 . 建筑给水排水设计规范　非书资料 : GB 50015-2003[S].

[13] 郑瑞澄 . 民用建筑太阳能热水系统工程技术手册 (第二版) [M]. 北京 : 化学工业出版社 , 2011.

[14] 岳秀萍 . 建筑给水排水工程 [M]. 北京 : 中国建筑工业出版社 , 2007.

SIMULATION ANALYSIS OF SOLAR WATER HEATING SYSTEM WITH CPC COLLECTOR BASED ON TRNSYS

Shen Xiangyang，Li Shiyu，Qi Jinxun

(*College of Mechanical & Electrical Engineering*，*Zhongkai University of Agriculture and Engineering*，*Guangzhou* 510225，*China*)

Abstract：The solar water heating system of a small villa in Guangzhou was built base on the modeling of CPC (Compound Parabolic Concentrator) collector and by TRNSYS software. It runs safely for more than a year (8760 hours) and four typical days were selected to analyze the operating condition. It can be observed that the outlet temperature of the CPC collector reached to 67.5 ℃ and 68.2 ℃ on the spring equinox and the winter solstice，while it was 85.7 ℃ and 83.3 ℃ on the summer solstice and autumn equinox，respectively. The collector efficiency of the CPC collector increases as the inlet flow rate increases，while reduces with the inlet temperature drops. The optimum installation angle is 22°. The heat collection power of these two collectors，CPC collector and flat plate collector，increases as the solar irradiance increases. The heat collection power of CPC collector is 1.5 times more than the flat plate collector at 12:00~15:00 of winter solstice.

Keywords：CPC collector；solar water heating system；collecting efficiency；TRNSYS software；simulation