

# 槽式复合多曲面太阳能聚光集热器光热性能研究

常泽辉<sup>1</sup>, 李文龙<sup>1</sup>, 王 帅<sup>1</sup>, 侯 静<sup>2,3</sup>, 张 杰<sup>4</sup>

(1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古工业大学化工学院, 呼和浩特 010051;  
3. 内蒙古建筑职业技术学院机电与暖通工程学院, 呼和浩特 010070; 4. 内蒙古科技大学建筑学院, 包头 014010)

**摘 要:** 该文提出一种槽式复合多曲面太阳能聚光集热器, 并对其进行光学仿真计算和实验测试研究, 通过光学仿真软件模拟计算, 研究跟踪误差、接收体位置和入射偏角等对其聚光效率的影响, 基于光学仿真研究结果, 在实际天气条件下对集热器的光热性能进行实验研究。结果表明, 当跟踪误差为 $5^{\circ}$ 时, 其光线接受率仍可达到82.26%, 装置聚光效率随接收体距槽底的距离增加呈先增后减的趋势, 晴天运行时, 跟踪误差为 $10^{\circ}$ 时集热器出口油温比正入射时低 $3^{\circ}\text{C}$ , 当集热器中导热油流速为 $100\text{ kg/h}$ 时, 装置集热效率最高可达65.04%。

**关键词:** 集热效率; 入射辐射; 太阳能聚光器; 热性能

**中图分类号:** TK513.5

**文献标识码:** A

## 0 引 言

复合多曲面聚光器 (compound parabolic concentrator, CPC) 是根据边缘光学原理设计的, 可将设定接收角范围内入射太阳光汇聚到接收体上以提高能流密度的非成像聚光器<sup>[1-3]</sup>。早在1974年, 美国科学家 Winston 等在研究辐射探测器时提出复合多曲面聚光器的概念<sup>[4]</sup>。其具有结构简单、价格低廉、入射光线接收角度较大, 尤其是当聚光比在3以下时, 可采用固定方式聚光集热<sup>[5]</sup>, 且除可吸收直射光外还可以吸收部分散射光; 近几年CPC得到国内外研究学者的关注, 并在太阳能光导聚能领域得到了很好的应用, 如槽式聚光太阳能海水淡化<sup>[6]</sup>、聚光光伏发电<sup>[7,8]</sup>、建筑光导照明<sup>[9]</sup>和光伏光热燃煤发电联供系统<sup>[10]</sup>等。

William 等<sup>[11]</sup>建立复合多曲面聚光器模型, 研究了光比、截断比等对聚光器性能的影响机理。裴 刚等<sup>[12]</sup>对3种低聚光比CPC进行实验对比研究, 测试不同进口温度CPC的集热效率, 结果表明, CPC集热效率随聚光比增加而升高, 最高可达约68%。肖红升等<sup>[13]</sup>提出一种无渐开线尖状凸起筒易复合多曲面聚光器, 对其进行光学分析和实

验研究, 结果表明, 该聚光器具有较高经济性。王银峰等<sup>[14]</sup>研制了一种聚光比为2.3的跟踪式CPC集热器, 利用TracePro光学软件分析其聚光特性, 并实验研究不同跟踪模式下的集热效率, 结果表明, 采用间歇跟踪时, 系统全天集热效率为40%~53%, 连续跟踪时, 其全天集热效率约为40%。

本文在以往研究的基础上, 设计一种新型槽式复合多曲面太阳能聚光集热器, 通过平移和旋转所组成的抛物线以增大其接收半角, 利用光学仿真软件LightTools分析影响聚光器聚光效率的因素, 在实际天气条件下, 对聚光器在不同安装倾角、不同导热介质质量流量运行工况下装置运行温度和光热转换效率进行试验研究和分析。

## 1 CPC结构优化

鉴于CPC的接收角度较大, 使其无需实时跟踪太阳, 只需每年按季度适当调整对日角度即可。为了更好地利用太阳能, 使CPC聚光器全天接收太阳能达到最大值, 有必要通过优化其结构尺寸增大接收角以提高其采光性能。

对于给定接收体规格的全尺寸CPC, 通常有

收稿日期: 2017-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(51666013; 51668051); 内蒙古自然科学基金(2013MS0704; 2015MS0545); 内蒙古自治区“草原英才”工程青年创新人才资助项目(一层次); 内蒙古工业大学成果转化基金(CGZH 201601)

通信作者: 常泽辉(1978—), 男, 博士、副教授、硕士生导师, 主要从事太阳能热利用技术方面的研究。changzehui@163.com

3 种方式可增大其接收角:①截短 CPC 以增大出光口尺寸;②抛物面沿远离对称轴方向平移;③以抛物面下端点即对称抛物线焦点为旋转点,将抛物面向远离对称轴方向旋转。本文对组成 CPC 的抛物线进行平移和旋转,提高其接收半角,如图 1 所示。

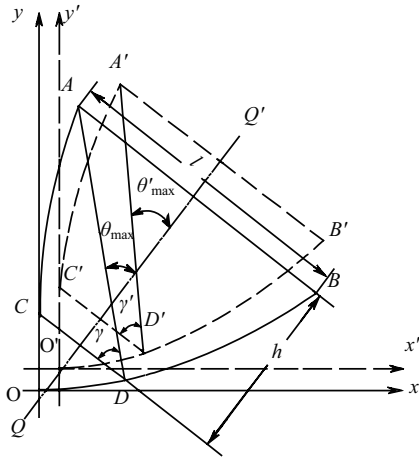


图 1 复合多曲面太阳能聚光器优化几何示意图

Fig. 1 Optimize geometrical diagram of solar CPC

图 1 中  $A'B'D'C'$  是常用 CPC, 其中  $C'$  是抛物线  $B'D'$  的焦点, 同理  $D'$  是抛物线  $A'C'$  的焦点, 其最大接收半角为  $\theta'_{\max}$ , 与  $\gamma'$  互为余角。优化过程为将  $A'B'D'C'$  沿对称轴  $QQ'$  分别向远离对称轴方向平移, 同时以抛物面下端点  $C$  和  $D$  为旋转中心, 适当向远离对称轴方向旋转形成了新的复合多曲面聚光器  $ABDC$ , 其最大接收半角为  $\theta_{\max}$ , 显然  $\theta_{\max} > \theta'_{\max}$ 。则 2 条对称抛物线  $AC$  和  $BD$  方程为:

$$y = \frac{1}{4f}(x+a)^2 + b \quad (1)$$

$$y = \frac{1}{4f}(x-a)^2 + b \quad (2)$$

式中,  $f$  —— 抛物线焦距;  $a$  —— 抛物线焦点与  $y$  轴的水平距离;  $b$  —— 抛物线焦点与  $x$  轴的竖直距离。

设定 CPC 入光口  $AB$  宽度为  $l$ , 出光口宽度为  $l'$ , 高度为  $h$ , 则 CPC 高宽比 (聚光器高度与入光口宽度的比值)  $m$  为:

$$m = \frac{h}{l} = \frac{(\frac{l}{2} - \frac{l'}{2})(\frac{l}{2} + \frac{l'}{2} + 2a)}{4fl} \quad (3)$$

CPC 最大接收半角  $\theta_{\max}$  为:

$$\theta_{\max} = 90^\circ - \gamma = 90^\circ - \arcsin \frac{h}{\sqrt{(\frac{l+l'}{2})^2 + h^2}} \quad (4)$$

所设计的 CPC 用于北纬  $40^\circ 50'$  地区冬季建筑采暖聚光集热, 考虑到该地区冬季采暖期间正午太阳高度角平均值为  $48^\circ$ , 配合季度调整对日角度, 可满足低成本固定式太阳能聚光集热建筑采暖要求, 则经过优化后 CPC 接收半角为  $48^\circ$ , 同时考虑到所采用 CPC 接收体为商用的宽度为 90 mm 翅片式玻璃真空管, 根据接收体运行温度范围, 聚光比选定为 4.0。则通过对所选用焦距  $f$  为 80 mm 的 CPC 分别绕  $C$  和  $D$  向远离对称轴方向旋转  $20^\circ$ , 沿对称轴分别向两侧平移 52 mm, 可得到优化后的 CPC。利用光学软件 LightTools 光线追迹模拟计算, 优化后 CPC 可满足接收半角和聚光比的需求。

CPC 的高宽比对聚光器应用过程中重心位置和安装稳定性具有决定作用, 当接收体尺寸固定时, 高宽比越小, CPC 建造成本越少, 安装重心越低, 风阻越小, 装置稳定性越好, 但是 CPC 聚光比会随高宽比减小而减小, 进而影响聚光器集热品位。优化后 CPC 高宽比和最大接收半角随入光口宽度变化曲线如图 2 所示。

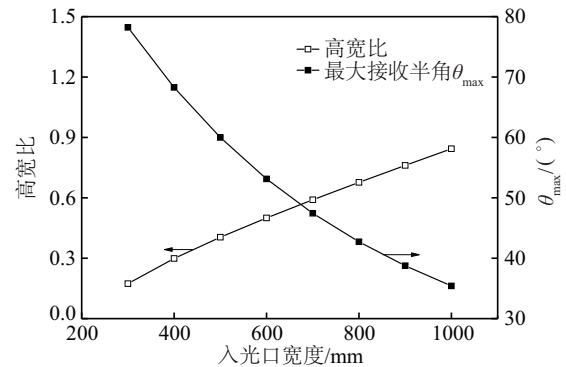


图 2 CPC 高宽比和最大接收半角变化曲线

Fig. 2 Variation of  $m$  and  $\theta_{\max}$  of CPC with aperture width

从图 2 可看出, CPC 高宽比随入光口宽度增加而增大, 这也是由 CPC 结构特点所决定的, 而最大接收半角随入光口宽度增加而减小。本文优化后 CPC 的入光口宽度选为 700 mm, 高宽比为 0.67, 对应高宽比和接收半角均位于 2 条曲线交点附近。本文将对入光口宽度为 700 mm 的新型 CPC 光学性能及光热转换效率展开仿真计算和试验研究。

## 2 新型CPC结构及试验测试系统

### 2.1 新型CPC结构

为了提高CPC集热品位,在现有结构基础上,于出光口下方设置焦点在接收体上的第3个抛物面,并通过2条竖直反射面与对称抛物反射面连接形成完整的聚光器。新型CPC结构及尺寸如图3所示。

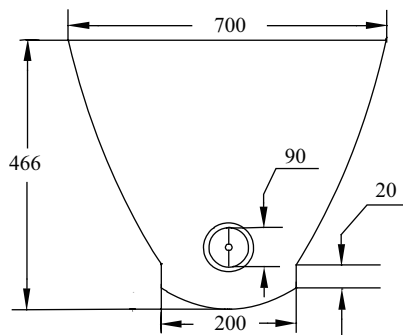


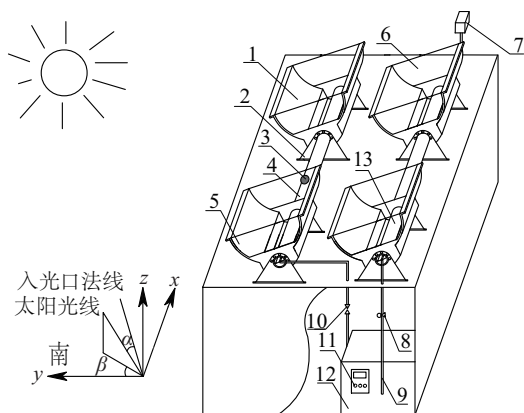
图3 复合多曲面聚光器结构尺寸图(mm)

Fig. 3 Schematic view and parameters of CPC(mm)

新型CPC内接收体采用内置翅片铜管的全玻璃真空管,位于CPC内聚焦焦斑位置,铜管内部导热介质采用高温导热油,带翅片全玻璃真空管可近似为90 mm的板式接收体,则CPC理论几何聚光比约为4.0。

### 2.2 新型CPC试验测试系统

新型CPC光热性能测试试验系统如图4所示。



1. 槽式复合多曲面聚光器 2. 支架 3. 太阳总辐射表
4. 连接管 5. 侧面透光窗 6. 玻璃盖板 7. 膨胀油箱
8. 变频油泵 9. 循环油管 10. 电磁阀 11. 控制柜
12. 储热水箱 13. 全玻璃真空管

图4 槽式复合多曲面太阳能聚光器光热性能测试系统

Fig. 4 Structure diagram of thermal performance of trough solar CPC

CPC东西方向水平放置,入光口朝南,可通过调节旋转螺栓改变CPC的安装倾角,实现对太阳高度角单轴跟踪(即 $\alpha=0$ ),但无法对太阳方位角跟踪(即 $\beta \neq 0$ )。带翅片铜管中的高温导热油在变频油泵驱动下对外输出热能,导热油质量流量由流量计实时测量,真空管进出口油温由K型热电偶测量,太阳辐照度由总辐射表实时测量,试验数据由20路测试巡检仪实时采集,数据采集间隔为1 min。

## 3 新型CPC光学性能仿真

### 3.1 光学特性分析方法

采用美国Optical Research Associates (ORA®)公司开发的基于蒙特卡洛法的光学仿真软件LightTools对新型CPC进行光学仿真计算,得到光线在CPC内部的传播路径、光线接收率和聚光效率随太阳高度角跟踪误差、太阳方位角跟踪误差和接收体位置变化的规律,通过对计算结果分析,为进一步优化CPC提供明确的思路 and 方向。

CPC的聚光效率 $\eta_0$ 和接收体光线接收率 $\eta_n$ 为:

$$\eta_0(\alpha, \beta) = \frac{D(\alpha, \beta)}{D(0, 0)} \quad (5)$$

$$\eta_n(\alpha, \beta) = \frac{N(\alpha, \beta)}{N(0, 0)} \quad (6)$$

式中, $D(\alpha, \beta)$ ——太阳高度角跟踪误差为 $\alpha$ 和方位角跟踪误差为 $\beta$ 时接收体表面能流密度,  $\text{W/m}^2$ ;  $D(0, 0)$ ——正入射时接收体表面能流密度,  $\text{W/m}^2$ ;  $N(\alpha, \beta)$ ——太阳高度角跟踪误差为 $\alpha$ 和方位角跟踪误差为 $\beta$ 时接收体表面汇聚的光线数量;  $N(0, 0)$ ——正入射时接收体表面汇聚的光线数量。

### 3.2 新型CPC内光线追迹

利用SolidWorks建立的三维模型导入LightTools中。设置接收体为板式接收器,设定光源为面光源,入射光线为等间距平行光束,数量为5000条,辐照度为 $800 \text{ W/m}^2$ ,每条光线携带的能量相同,发射光谱近似太阳光谱,抛物反射面材质为铝,光学性质为镜面反射,反射率为0.8。当正入射时,入射光线在CPC内光线追迹如图5所示。

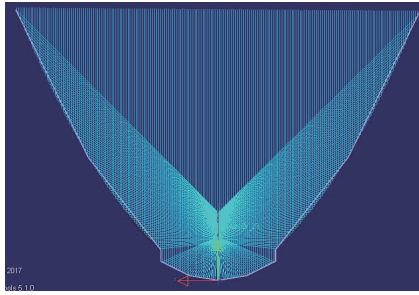


图5 复合多曲面聚光器内光线追迹图

Fig. 5 Ray tracing of CPC

### 3.3 接收体位置变化对 CPC 光学性能影响

新型 CPC 内平板式接收体与对称轴重合,将接收体底部距离聚光器底部的高度差变化表示为接收体位置变化,这也是影响 CPC 光学性能的主要因素之一,尤其是当太阳高度角跟踪误差存在时,影响效果会更加凸显。设定 CPC 跟踪太阳高度角误差  $\alpha=10^\circ$ ,其光线接收率和聚光效率随接收体位置变化曲线如图 6 所示。

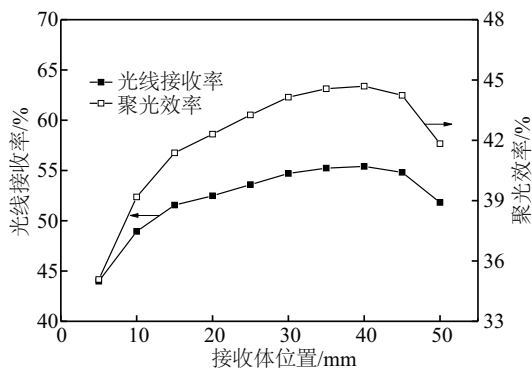


图6 接收体位置对复合多曲面聚光器性能的影响

Fig. 6 Variation of concentrating performance of CPC at different receiver position

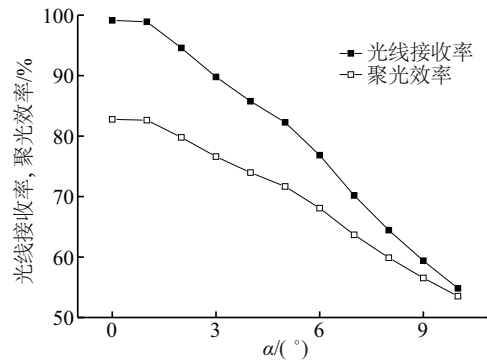
从图 6 可看出,CPC 光线接收率和聚光效率均随接收体距离底部高度的增加呈先增后减的趋势。当接收体位置为 40 mm 时,光线接收率和聚光效率均达到最大,分别为 55.4% 和 44.69%,比接收体位置为 5 mm 时增加了 25.97% 和 27.30%。这表明即使太阳高度角跟踪误差为  $10^\circ$ ,仍有 55.4% 的光线被接收体吸收。

### 3.4 跟踪误差对 CPC 光学性能影响

CPC 的结构决定了其对太阳方位角和高度角跟踪要求低,甚至可以不跟踪。通过对 CPC 跟踪误

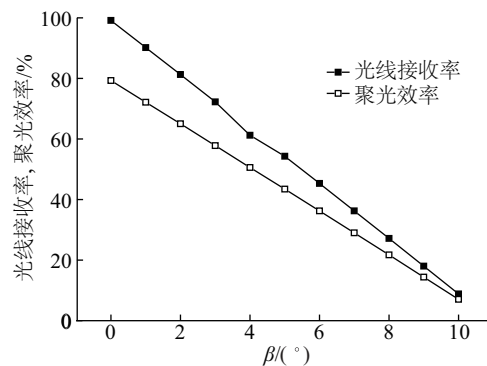
差的计算分析,为确定其对日跟踪策略提供重要的参考价值。

设定 CPC 跟踪太阳高度角存在误差,即入射光线在进入 CPC 后与对称轴存在径向入射偏角,  $\alpha \neq 0$ 。其光学性能随  $\alpha$  增加的变化规律如图 7 所示。

图7  $\alpha$ 对复合多曲面聚光器聚光性能的影响Fig. 7 Variation of concentrating performance of CPC at different incidence angle  $\alpha$ 

从图 7 可看出,当  $\alpha$  增大时,CPC 的光线接收率和聚光效率随之减小。对太阳高度角无跟踪误差时,聚光效率为 79.31%,主要原因是抛物反射面反射率为 0.8,未经反射直接入射到接收体上的辐射能量未计算在内。当 CPC 跟踪太阳高度角误差在  $0^\circ \sim 3^\circ$  时,光线接收率保持在 90% 以上,当跟踪误差为  $9^\circ$  时,仍有约 60% 的光线被接收体吸收。

设定 CPC 跟踪太阳方位角存在误差,即入射光线在进入 CPC 后与对称轴存在轴向偏角,  $\beta \neq 0$ 。在太阳日运行过程中,  $\beta$  呈现先减后增的对称变化趋势。CPC 聚光性能随入射偏角  $\beta$  增加的变化规律如图 8 所示。

图8  $\beta$ 对复合多曲面聚光器聚光性能的影响Fig. 8 Variation of concentrating performance of CPC at different incidence angle  $\beta$



从图 8 可看出,CPC 的光线接收率和聚光效率随太阳方位角跟踪误差的增大而呈近似直线下降趋势,当太阳方位角跟踪误差为零时,光线接收率为 99.14%,跟踪误差为 5°时,接收体上汇聚的光线仍占入射光线的 54.3%。

## 4 新型 CPC 光热性能测试

### 4.1 实验测试及方法

为了准确测定新型 CPC 光热性能,同时验证其聚光特性,搭建槽式复合多曲面太阳能聚光集热测试实验系统。实验中的测试数据包括太阳辐照度、环境温度、导热油进出口温度、导热油质量流量以及环境风速等。太阳辐照度由 TBQ-2 总辐射表测量,环境温度和风速由 TRM-GPS1 测试系统测量,导热油质量流量由 HTS-1 流量计测量,导热油进出口温度由 K 型热电偶测量。

测试时间为 2017 年 4 月 5 日~4 月 28 日,测试地点为内蒙古呼和浩特市(40°50'N,111°42'E)独栋节能建筑平屋顶。

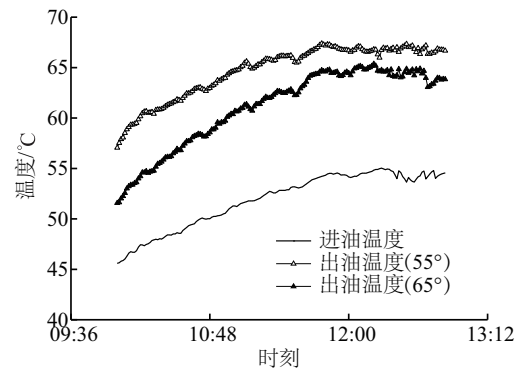
实验中,分别对 CPC 光热性能随太阳高度角和方位角跟踪误差以及导热油流速变化规律进行对比研究分析。实验选择在晴天和多云天条件下分别进行。CPC 瞬时光热转换效率为:

$$\eta_t = \frac{Q_t}{G_{\text{sun}} A} = \frac{mc(T_{\text{out}} - T_{\text{in}})}{G_{\text{sun}} A} \quad (7)$$

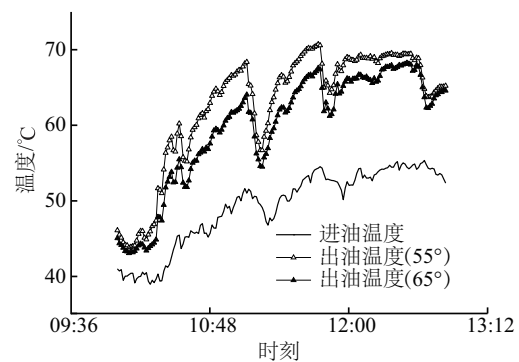
式中,  $Q_t$  ——集热器输出热能, W;  $G_{\text{sun}}$  ——太阳辐照度, W/m<sup>2</sup>;  $A$  ——聚光器入光口面积, m<sup>2</sup>;  $m$  ——导热油质量流量, g/s;  $c$  ——对应运行温度下导热油比热容, J/(kg·K);  $T_{\text{in}}$ 、 $T_{\text{out}}$  ——聚光器内接收体进出口温度, K。

### 4.2 安装倾角对 CPC 光热性能的影响

实验中,通过调节 2 组 CPC 安装倾角以实现改变太阳高度角跟踪误差,使得 1 组 CPC 玻璃盖板与入射太阳光垂直,即  $\alpha=0^\circ$ ;另 1 组 CPC 玻璃盖板与入射太阳光成 10°夹角,即  $\alpha=10^\circ$ 。测试日选择在 2017 年 4 月 5 日(晴)和 4 月 6 日(多云),分别测试安装倾角为 55°和 65°时,2 组 CPC 接收体在相同进口油温运行条件下的出口油温变化趋势,如图 9 所示。



a. 2017-04-05



b. 2017-04-06

图9 不同安装倾角条件下聚光器集热温度变化曲线

Fig. 9 Variation curve of temperature of CPC under different title angles

从图 9 可看出,在测试中,安装倾角为 55°时,CPC 内接收体出口油温均高于安装倾角为 65°时的出口油温,验证了光学仿真的计算结果。晴天时,安装倾角为 55°的出口油温随运行时间延长而升高,最高可达 67.34℃,比安装倾角为 65°时出口油温高 2.47℃。多云天气时,2 组测试 CPC 出口油温变化出现了波动。安装倾角为 55°的出口油温最高可达 70.71℃;而安装倾角为 65°的出口油温最高为 67.58℃。

### 4.3 导热油流速对 CPC 光热性能的影响

CPC 内铜管中导热油的流速也是影响聚光器光热转换效率的因素之一。流速的大小直接影响到经 CPC 聚光集热的导热油温差变化,进而影响到换热介质的黏性和驱动油泵的功耗。测试中,通过改变导热油的质量流量,研究太阳辐照度、进出口油温变化对 CPC 光热性能的影响,得到导热油流速与 CPC 光热转换效率之间关系。测试日

选择在 2017 年 4 月 24 日(晴天),安装倾角分别为 65°和 75°时,换热介质为导热油的温差变化随太阳辐照度变化曲线如图 10 所示。不同质量流量运行条件下,CPC 聚光集热瞬时转换效率计算如表 1 所示。

图 10 中,安装倾角为 65°时,正午太阳光正入射 CPC,导热油进出口温差高于安装倾角为 75°时的进出口温差,且随太阳辐照度增加而减小,究其原因这是由于随着太阳辐照度增加,导热油集热温度升高,与环境对流和辐射换热增加,热损失增大导致的。

从表 1 计算结果可看出,在太阳辐照度相近条件下,CPC 光热转换效率随着导热油质量流量的减少而增大,主要是由于导热油流速的降低增加了装

置的换热效率。当导热油质量流量为 100 kg/h 时,光热转换效率为 65.04%,比质量流量为 142 kg/h 时效率提高了 28.26%。

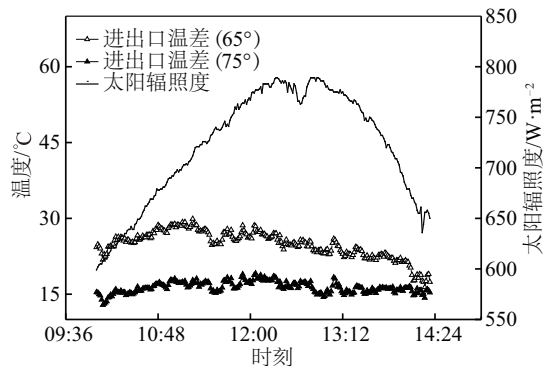


图 10 聚光器集热温差随太阳辐照度变化曲线

Fig. 10 Variation curve of temperature difference of CPC under solar radiation

表 1 3 种不同质量流量下的光热效率对比

Table 1 Comparison of light thermal efficiency under three different mass flow rates

质量流量 $q_m/\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	辐照度 $G_0/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	聚光面积 $A/\text{m}^2$	进口油温 $T_{in}/\text{K}$	出口油温 $T_{out}/\text{K}$	光热转换率 $\eta/\%$
100	786	0.28	316.02	340.51	65.04
128	783	0.28	322.66	340.43	60.69
142	794	0.28	329.61	343.12	50.71

## 5 结 论

本文提出一种新型槽式复合多曲面太阳能聚光器,通过对组成 CPC 的抛物线进行调节,增大了 CPC 的接收半角,利用光学仿真软件对影响 CPC 聚光效率的因素进行计算分析,在实际天气下,对比分析不同安装倾角和不同质量流量运行条件下 CPC 的温差变化和瞬时光热转换效率,验证光学仿真计算结果。

新型 CPC 高宽比随入光口宽度增加而增大,接收半角随入光口宽度增加而减小,对于给定的 CPC 存在最优的入光口宽度。

光学计算结果表明,当入射光发生偏转时,CPC 光线接收率和聚光效率随板式接收体距离底部高度增加呈先增后减的趋势,对于给定规格的接收体存在最优的聚焦位置。新型 CPC 对太阳高度角跟踪误差为 0°~3°时,光线接收率仍可达到 90%以上,CPC 聚光效率随对太阳方位角跟踪误差的增大而直线减小。

实际天气运行条件下,当导热油进口油温相同

时,正入射的出口油温高于入射偏角为 10°的出口油温约 3℃。CPC 光热转换效率随导热油质量流量减小而增大,质量流量为 100 kg/h 时,正入射的 CPC 瞬时光热转换效率为 65.04%,集热温差为 24.49℃。

## [参考文献]

- [1] Zheng Wandong, Yang Lin, Zhang Huan, 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] Singh D B, Tiwari G N. Effect of energy matrices on life cycle cost analysis of partially covered photovoltaic compound parabolic concentrator collector active solar distillation system [J]. Desalination, 2016, 397: 75—91.
- [3] 余 雷,王 军,张耀明. 内聚光 CPC 热管式真空集热管的光学效率分析 [J]. 太阳能学报, 2012, 33(8): 1392—1397.
- [3] Yu Lei, Wang Jun, Zhang Yaoming. Optical analysis of

- heat-pipe evacuated tubular solar collector with inner CPC[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2012, 33(8): 1392—1397.
- [4] Santos-González I, García-Valladares O, Ortega N, et al. Numerical modeling and experimental analysis of the thermal performance of a compound parabolic concentrator[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 114: 1152—1160.
- [5] Ortega N, García-Valladares O, Best R, et al. Two-phase flow modelling of a solar concentrator applied as ammonia vapor generator in an absorption refrigerator[J]. *Renewable Energy*, 2008, 33: 2064—2076.
- [6] Singh D B, Tiwari G N. Performance analysis of basin type solar stills integrated with  $N$  identical photovoltaic thermal (PVT) compound parabolic concentrator (CPC) collectors: A comparative study[J]. *Solar Energy*, 2017, 142: 144—158.
- [7] Singh D B, Tiwari G N. Exergoeconomic, enviroeconomic and productivity analyses of basin type solar stills by incorporating  $N$  identical PVT compound parabolic concentrator collectors: A comparative study[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 135: 129—147.
- [8] Bahaidarah Haitham M, Gandhidasan P, Baloch Ahmer A B, et al. A comparative study on the effect of glazing and cooling for compound parabolic concentrator PV systems- Experimental and analytical investigations[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 129: 227—239.
- [9] Vu Ngoc-Hai, Shin Seoyong. Cost-effective optical fiber daylighting system using modified compound parabolic concentrators[J]. *Solar Energy*, 2016, 136: 145—152.
- [10] 陈海平, 于鑫玮, 魏进家, 等. 复合抛物面聚光器—光伏/光热与燃煤发电机组联合供能系统性能分析[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(14): 2251—2260.
- [10] Chen Haiping, Yu Xinwei, Wei Jinjia, et al. Performance analysis of CPC-PV/T hybrid electric-thermal device combined with coal-fired unit power generation system[J]. *Proceeding of the CSEE*, 2014, 34(14): 2251—2260.
- [11] Vance William, K Michael, Huang Hong, et al. Computational study of a fixed orientation photovoltaic compound parabolic concentrator[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2017, 139: 1—9.
- [12] 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.
- [12] Yang Ming, Pei Gang, Li Guiqiang, et al. Experimental comparison of compound parabolic concentrator with three low concentration ratio[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2017, 38(2): 431—437.
- [13] 肖红升, 夏宁, 严冬春. 一种无渐开线形凸起的简易CPC聚光器的设计与性能研究[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(1): 167—172.
- [13] Xiao Hongsheng, Xia Ning, Yan Dongchun. Design and performance research of a simple non-involute convex CPC condenser[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2015, 36(1): 167—172.
- [14] 王银峰, 陈海军, 张鑫, 等. 跟踪式CPC热管真空管集热器聚光及集热特性[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(11): 2643—2650.
- [14] Wang Yinfeng, Chen Haijun, Zhang Xin, et al. Optical and thermal performance of sun-tracking CPC heat pipe evacuated tubular collector[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2015, 36(11): 2643—2650.

## INVESTIGATION OF THERMAL PERFORMANCE OF A TROUGH SOLAR COMPOUND PARABOLIC CONCENTRATOR

Chang Zehui<sup>1</sup>, Li Wenlong<sup>1</sup>, Wang Shuai<sup>1</sup>, Hou Jing<sup>2,3</sup>, Zhang Jie<sup>4</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. College of Chemical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051 China;

3. College of Mechanical Electrical Heating and Ventilation Engine, Inner Mongolia Technical College of Construction, Hohhot 010070, China;

4. School of Architecture, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China)

**Abstract:** A novel trough solar Compound Parabolic Concentrator (CPC) was presented in this study. The optical simulation and experimental research were carried out. The relationship between concentration efficiency and tracking error, receiver position and incidence angle were studied by using optical simulation. Based on the optical simulation results, an experimental set-up was built to evaluate the thermal performance of the device under actual weather. Results show that the overall ray's receiving rate of 82.26% is obtained at the tracking error of 5°. Its concentration efficiency increases at the beginning with increasing the distance between the receiver and the device bottom and decreases when the distance is increased continuously. In sunny day, the outlet temperature of thermal oil of the device under the tracking error of 10° is lower than that of the device at the incidence angle of 0° by about 3 °C. The concentrator efficiency of the device can be reached 65.04% when mass flow rate of working fluid is 100 kg/h.

**Keywords:** collector efficiency; incident solar radiation; solar concentrator; thermal performance