

# 小槽式集热系统热性能测试和理论研究

王显龙<sup>1</sup> 廉永旺<sup>1</sup> 李华山<sup>1,2</sup> 姚远<sup>1</sup> 卜宪标<sup>1</sup>

(1. 中国科学院广州能源研究所, 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 为拓宽太阳能应用领域, 基于新研发的小型槽式太阳能聚光集热器, 定义当量采光面积参数概念, 建立吸热和散热数学模型。以广州地区为例, 给出东西向放置的槽式聚光集热器在典型日期跟踪状态下太阳光入射角和直射光利用率的变化规律。通过散热数学模型计算, 分析系统各项热损失的变化规律, 提出改善系统热性能的有效解决方案并通过测试进行验证。实验测试表明, 所开发小槽式聚光集热器在中温段有高热效率, 在工质 150 °C 时系统热效率在 50% 左右。

**关键词** 小槽式聚光集热器 当量采光面积 系统热效率

中图分类号 TK513.3 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)03-4572-05

## Thermal performance testing and theory study of small parabolic trough collector system

Wang Xianlong<sup>1</sup> Lian Yongwang<sup>1</sup> Li Huashan<sup>1,2</sup> Yao Yuan<sup>1</sup> Bu Xianbiao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** To broaden the application field of solar energy, a small solar parabolic trough collector system has been developed. In this paper, with the concept of equivalent aperture area for the collector system defined, a mathematical model for heat absorption and heat loss of the system is established. The variation tendency of solar incident angle and beam radiation availability is summarized for the collector system rotated about a horizontal east-west axis in Guangzhou at a typical date. With the mathematical model, the variation of the collector system heat loss is analyzed, and a method validated against test for improving its thermal performance is presented. The experiment shows that the collector system has high thermal efficiency in mid-temperature ranges, and at 150 °C, the system thermal efficiency reaches about 50%.

**Key words** small parabolic trough collector; equivalent aperture area; thermal efficiency

现阶段, 中高温太阳能热利用的研究和应用主要集中在规模化聚光热发电行业<sup>[1-4]</sup>, 特别是对大型槽式聚光热发电产品的研究, 如集热管<sup>[5-7]</sup>、风速<sup>[8]</sup>、蓄热<sup>[9]</sup>、热流分布<sup>[10-11]</sup>、涂层<sup>[12]</sup>、系统热效率<sup>[13-15]</sup>等, 国内外学者进行了广泛的研究。

大型槽式聚光集热器系统成本高, 运行和维护要求苛刻, 更适用于 300 °C 以上应用领域。电子、化工等工商业应用领域的热源要求一般在 80 ~ 200 °C<sup>[16]</sup>, 成本低、运行要求低、规模灵活多变的小槽式聚光集热器更适应这些领域。小槽式集热器尺寸、结构、吸热和散热等方面都与大型槽式集热器不同, 需要重新进行研究和测试。

本研究介绍一种开口宽度为 1 m 的模块化小聚光比槽式集热器, 通过系统理论模拟, 分析聚光系统热损失的变化规律和改善途径; 对长时间实验测量的数据整理, 与模拟结果进行比较和验证, 提出改善

系统热效率的有效途径。

### 1 小槽式聚光系统结构

聚光集热系统由支架、循环泵、连接管、6 个模块化聚光集热器和蓄热箱组成, 后三者由橡塑管进行保温。启动循环泵后, 低温水从承压蓄热水箱中进入连接管, 在串联的槽式集热器集热管中被聚光加热, 进入水箱形成一个循环。蓄热箱上部有管道对外部进行供热或者供蒸汽。聚光加热系统简图和实物图如图 1、图 2 所示, 主要包括 6 根真空集热管

基金项目: 广东省科技计划项目(2013B010405013); 广州市产学研合作项目(2013Y2-00091); 广东省重大科技专项(2013A011405001, 2012A010800024, 2013A011404007)

收稿日期: 2014-11-05; 修订日期: 2015-02-04

作者简介: 王显龙(1979—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向: 太阳能热利用和余热利用。E-mail: wangxl@ms.giec.ac.cn

( $\phi 70 \text{ mm} \times 2\,000 \text{ mm}$ )、6 块抛物面反射玻璃镜(1 900 mm  $\times$  1 000 mm  $\times$  210 mm)、23 m 长不锈钢连接管和 40 L 不锈钢承压水箱。

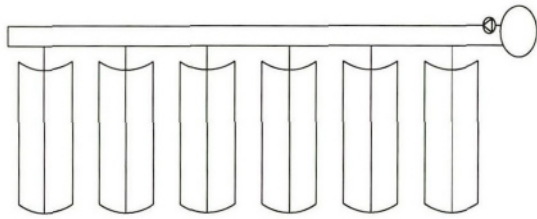


图 1 槽式聚光集热实验系统循环简图  
Fig. 1 Schematic of working fluid circulation of parabolic trough system

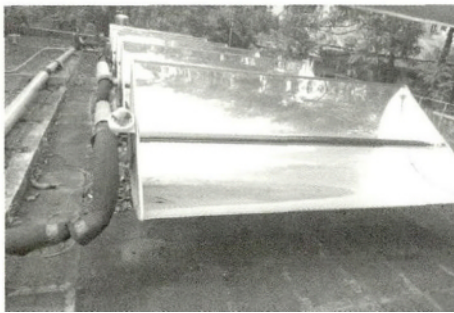


图 2 实验系统实物图  
Fig. 2 Photo of parabolic trough collector system

本次循环系统测试采用东西向放置,南北跟踪模式。跟踪系统采用自行研发制造的光敏元件电路板,跟踪精度  $\pm 2^\circ$ 。传动系统为小型液压传动元件,由控制系统对跟踪、传动系统耦合。连管和承压水箱外部保温层厚度为 30 mm。

数据采集使用仪器主要包括无纸记录仪(精度  $\pm 0.2\%$ )、铜-康铜热电偶(精度 0.4%)、电子秤(感量 20g)和直射辐射仪(准确度  $\pm 0.5\%$ )等。

## 2 光热转换理论计算

太阳能直射辐射光为循环系统提供热量的过程中,直射辐射仪通过二维跟踪测得直射辐射数据,而槽式聚光集热器采用一维跟踪系统,因此,在使用辐射数据进行得热量计算时需要进行转换。系统散热通过计算各个部件的散热量进行叠加给出。

### 2.1 系统得热计算

系统得热  $q_{ab}$  来源于太阳直射光:

$$q_{ab} = I \cdot \rho \cdot \tau \cdot \alpha \cdot A_r \quad (1)$$

式中:  $I$  为直射辐射强度,  $W/m^2$ ;  $\rho$  为反射镜反射率;  $\tau$  为玻璃管太阳光透射率;  $\alpha$  为选择性吸收涂层的太阳光吸收率;  $A_r$  为槽式聚光集热器的当量采光

面积,  $m^2$ 。

受限于聚光集热器长度,照射到反射镜上的太阳光有部分不能聚焦到集热管上;在太阳能由二维测量值计算一维实际值转换计算时,使用折算的当量采光面积计算实际得热量。

$$A_r = A \cdot \cos\theta \cdot \left(1 - \frac{h}{l} \cdot \tan\theta\right) \quad (2)$$

$$\cos\theta = (1 - \sin^2\gamma \cdot \cos^2\alpha)^{1/2} \quad (3)$$

式中:  $\theta$  为倾斜面太阳射线与平面法线夹角;  $A$  为槽式聚光集热器采光面积,  $m^2$ ;  $h$  为槽式聚光集热器的焦距,  $m$ ;  $l$  为槽式聚光集热器的开口长度,  $m$ ;  $\gamma$  为倾斜面方位角;  $\alpha$  为太阳能高度角。

将槽式聚光集热器的几何尺寸代入公式(1)~(3),计算广州地区的春分、秋分、夏至和冬至 4 个典型日期的太阳能入射角和当量采光面积与几何采光面积之比,如图 3 和图 4 所示。

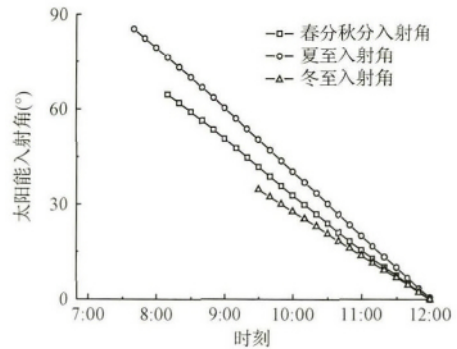


图 3 太阳入射角随时间的变化  
Fig. 3 Change of solar incident angle with time

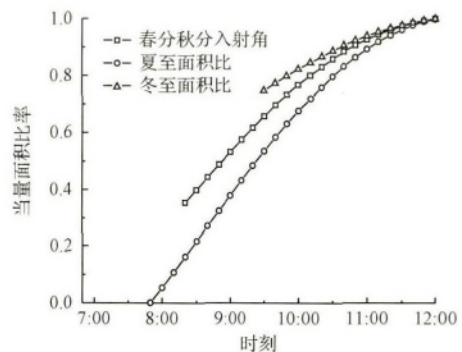


图 4 系统当量面积比率随时间的变化  
Fig. 4 Change of system equivalent area rate with time

由图 3 可以看出,广州地区槽式聚光集热器可利用太阳能时长在冬至日仅为 5 h 左右(考虑到阴影遮挡和大气质量因素,计算仅统计高度角大于  $30^\circ$  时长),春秋分日接近 8 h,而夏至日最长,接近 9 h。考虑到时长和角度随季节变化差异较大,在推

广小槽式聚光集热器时,需根据主要用热季节来估算安装面积。

图 4 显示在典型日期、不同时刻太阳能辐射的利用率,即是当量采光面积与几何采光面积比率。图中可以看出,对比类直线规律变化的太阳光入射角,当量面积比率的变化规律以曲线规律变化,在同一时刻,冬至日面积比率高于夏至,春分和秋分介于二者之间。在图 4 中曲线横纵坐标包围的面积(直射辐射强度与测量时间乘积)即为所求时间间隔内的太阳能直射辐射入射总量。

### 2.2 系统散热计算

散热损失包括集热管、连接管、水箱、水泵等部分的辐射、对流和导热散热,计算公式汇总于表 1。其中集热管散热内管辐射传热外管,外管与空气为对流和辐射散热;连接管、水箱、水泵等为外表面辐射和对流耦合散热,散热量由内部导热提供;水泵内部导热为金属导热进行忽略。

为简化计算,做如下假设:(1)槽式聚光集热器是理想抛物面;(2)系统无跟踪误差;(3)吸热管表面在轴向上的辐射能流分布均匀,且径向温度分布均匀。

表 1 小槽式聚光系统散热计算式汇总

Table 1 Calculation equation summary of small parabolic trough concentration system

结构	计算式	迭代式
集热管	$q_{lv12} = \frac{\sigma \cdot A_{v1t} (T_{v1}^4 - T_{v2}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{v1t}} + \frac{1 - \varepsilon_{v2}}{\varepsilon_{v2}} \frac{D_{v1}}{D_{v2}}} + \frac{\sigma \cdot A_{v1n} (T_{v1}^4 - T_{v2}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{v1n}} + \frac{1 - \varepsilon_{v2}}{\varepsilon_{v2}} \frac{D_{v1}}{D_{v2}}}$	$q_{lv2w} = \frac{\varepsilon_{v2} \cdot \sigma \cdot A_{v2} (T_{v2}^4 - T_s^4)}{+ h_v \cdot A_{v2} (T_{v2} - T_\infty)}$ $q_{lv12} = q_{lv2w}$
连接管	$q_{ln12} = \frac{2\pi \cdot L_n \cdot k_n (T_{n1} - T_{n2})}{\ln(D_{n2}/D_{n1})}$	$q_{ln2w} = \frac{\pi \cdot L_n \cdot D_{n2} [\varepsilon_n \cdot \sigma (T_{n2}^4 - T_s^4) + h_n (T_{n2} - T_\infty)]}{}$ $q_{lv2wl} = \frac{\pi \cdot L_w \cdot D_{w2} [\varepsilon_w \cdot \sigma (T_{w2l}^4 - T_s^4) + h_{w2l} (T_{w2l} - T_\infty)]}{}$ $q_{lv2wd} = \frac{\pi \cdot D_{w2}^2 [\varepsilon_w \cdot \sigma (T_{w2d}^4 - T_s^4) + h_{w2d} (T_{w2d} - T_\infty)]}{2}$ $q_{lv12d} = q_{lv2wd}$
水箱	$q_{lw12l} = k_w (T_{w1} - T_{w2l}) \frac{2\pi \cdot L_w}{\ln(D_{w2}/D_{w1})}$ $q_{lw12d} = 2k_w (T_{w1} - T_{w2d}) \frac{\pi \cdot D_{w1}^2}{4b_w}$	
水泵	$q_{lb2w} = A_{b1} \cdot [\varepsilon_b \cdot \sigma \cdot (T_{b1}^4 - T_s^4) + h_b \cdot (T_{b1} - T_\infty)]$	

注:  $q_l$  为各项散热损失, W;  $A$  为不同结构部分的表面面积,  $m^2$ ;  $T$  为各结构温度, K;  $T_s$  为天空温度, K;  $T_\infty$  为环境温度, K;  $\varepsilon$  为各项发射率;  $D$  为各项直径, m;  $h$  为对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $L$  为各部分长度, m;  $k$  为导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $b_w$  为保温棉厚度, m。下标  $v1t, v1n, v2$  为真空管内管有涂层部分、内管无涂层部分和外管; 下标  $n1, n2$  为连接管保温层内外表面; 下标  $w1, w2l, w2d$  为水箱保温层内表面、侧面和顶部外表面; 下标  $b$  为水泵未保温外表面积。

各迭代式两侧均只含有同一个未知中间温度, 而系统热效率随集成模块数量的增加而提高。通过迭代计算得出此温度, 进而求出各散热量。

系统理论热效率计算公式为:

$$\eta = \frac{q_{ab} - q_{lv2w} - q_{ln2w} - q_{lv2w} - q_{lb2w}}{I \cdot A_r} \quad (4)$$

### 3 实验和理论计算对比

将实验台几何参数带入表 1 中公式, 计算得出不同工质温度时的系统散热量, 如图 5 所示。集热管散热和水泵散热损失以指数规律递增, 其他散热损失项以接近线性规律增加。实际运行时, 除集热管散热项, 其他 4 项散热均可通过保温手段加以改善。在大规模集中应用时, 单一水箱和水泵所供应的集热器数量大大提高, 对应单位集热面积散热量大大降低, 而单位面积的集热管和连接管散热损失以及得热量随使用模块的增加而基本维持不变, 因

而系统热效率随集成模块数量的增加而提高。图 6 给出了按照表 1 中的公式, 基于本实验台几何参数下模拟的不同太阳能直射辐射强度时的系统效率对比图, 随着太阳能直射辐射强度的提高, 系统热效率在高温段变化较大。

在晴天时对槽式聚光集热系统进行实验测试, 实测数据如图 7 所示, 与理论计算结果对比的系统热效率如图 8 所示。

其中实验测试的系统热效率计算公式为:

$$\eta_t = \frac{G_w \cdot \Delta h_w + G_p \cdot h_p + G_a \cdot h_a}{I \cdot A_r} \quad (5)$$

式中:  $G_w, G_p, G_a$  分别为工质质量、连接管道质量和吸热体质量, kg;  $\Delta h_w, \Delta h_p, \Delta h_a$  分别为测定时间间隔内因温升导致的工质、连接管道和吸热体的焓升, kJ/kg。

测试过程中, 蓄热箱中的高压水超过 170 °C 后

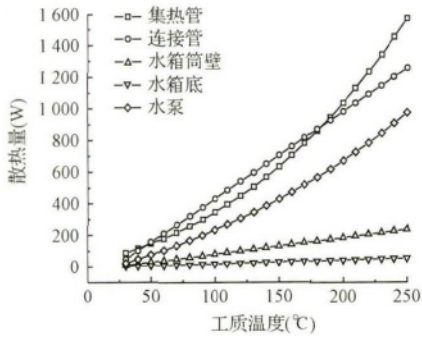


图 5 系统散热损失随工质温度的变化

Fig. 5 Change of system heat loss with working fluid temperature

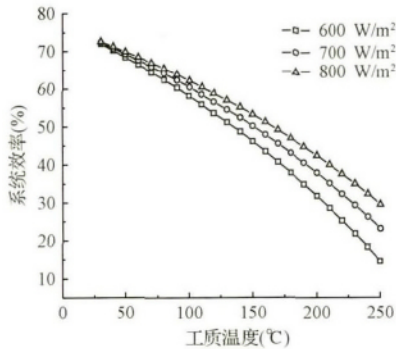


图 6 不同辐射强度下系统效率随工质温度的变化

Fig. 6 Change of system thermal efficiency with working fluid temperature at different solar radiation intensity

由安全阀自动排放蒸汽,所以本次实验测试数据截取到 170 °C 为止。

由图 8 可以看出,系统热效率的实验测试和模拟计算结果的衰减规律基本相同,数值相差不大,实验测试结果略低于理论模拟计算值。分析数值有所不同的主要原因在于:连接管和水箱保温性能未能达到最优,实际散热损失对比理论计算有所增加;水箱有安全阀、进水管、排污阀和电磁阀等结构,其散热损失在理论模拟计算过程中未曾体现。

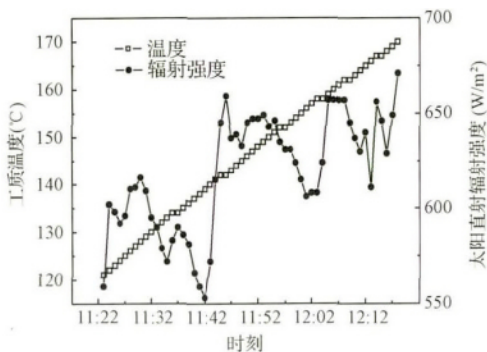


图 7 工质温度与太阳直射辐射强度随时间的变化

Fig. 7 Change of working fluid temperature and solar beam radiation intensity with time

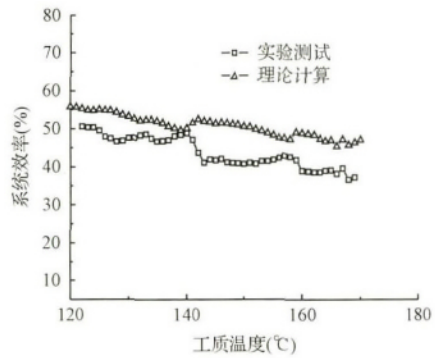


图 8 系统热效率的实验和理论值对比

Fig. 8 Comparison between experimental and theoretical results of system thermal efficiency versus working fluid temperature

为验证以上研究结果,在太阳能资源更优秀的云南昆明安装 10 个模块的聚光集热器系统,由专业施工人员进行保温,循环工质为导热油,测试数据表明,150 °C 时系统热效率超过 50%,与模拟计算结果的对比误差更小。

为测试新的小聚光集热器产品的寿命和长久使用后的性能,对单个模块的小集热器进行跟踪闷晒测试,进行多日、多次重复实验,系统运行正常,集热模块性能无衰减。

### 4 结 论

通过引入当量采光面积概念,对广州地区典型日期的太阳能聚光热利用的利用时长和太阳能直射辐射利用率进行计算汇总,为小聚光集热器的应用计算提供数据。

基于新开发的小型槽式聚光集热器进行实验测试和理论模拟研究,分析表明,保温性能和集热器数量对系统性能有较大影响。模拟和实际测试证明,本次开发的小槽式聚光集热系统在 80 ~ 180 °C 中温阶段可以实现高效供热。

### 参 考 文 献

[1] 陈伟,张军. 聚光型太阳能热发电现状及在我国应用的风险分析. 可再生能源, 2010, 28(2): 148-151  
Chen Wei, Zhang Jun. The status of concentrating solar power and risk analysis on application in China. Renewable Energy Resources, 2010, 28(2): 148-151 (in Chinese)

[2] 周颖霏,钱伯章. 聚光类太阳能热发电技术进展及工程市场动态. 太阳能, 2010, (9): 30-34  
Zhou Yingfei, Qian Bozhang. Technical progress and engineering market dynamics of concentrating solar power technology. Solar Energy, 2010, (9): 30-34

- neering development trends of concentrating solar power. *Solar Energy* ,**2010** ,(9) : 30-34( in Chinese)
- [3] 黄湘. 太阳能热发电技术在国内外的应用. *太阳能* ,**2010** ,(20) : 27-32
- [4] Lilliestam J. , Bielicki J. M. , Patt A. G. Comparing carbon capture and storage ( CCS ) with concentrating solar power ( CSP ) : Potentials , costs , risks , and barriers. *Energy Policy* ,**2012** ,47: 447-455
- [5] Behar O. , Khellaf A. , Mohammedi K. A review of studies on central receiver solar thermal power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* ,**2013** ,23: 12-39
- [6] Padilla R. V. , Demirkaya G. , Goswami D. Y. , et al. Heat transfer analysis of parabolic trough solar receiver. *Applied Energy* ,**2011** ,88( 12) : 5097-5110
- [7] Kalogirou S. A. A detailed thermal model of a parabolic trough collector receiver. *Energy* ,**2012** ,48( 1) : 298-306
- [8] Hachicha A. A. , Rodríguez I. , Castro J. , et al. Numerical simulation of wind flow around a parabolic trough solar collector. *Applied Energy* ,**2013** ,107: 426-437
- [9] Kumaresan G. , Sridhar R. , Velraj R. Performance studies of a solar parabolic trough collector with a thermal energy storage system. *Energy* ,**2012** ,47( 1) : 395-402
- [10] Cheng Z. D. , He Y. L. , Cui F. Q. , et al. Comparative and sensitive analysis for parabolic trough solar collectors with a detailed Monte Carlo ray-tracing optical model. *Applied Energy* ,**2014** ,115: 559-572
- [11] 王志峰. 抛物跟踪式太阳高温集热器的研究. *太阳能学报* ,**2000** ,21( 1) : 69-76  
Wang Zhifeng. The optical analysis and heat transfer of parabolic solar collector. *Acta Energetica Solaris Sinica* ,**2000** ,21( 1) : 69-76( in Chinese)
- [12] 文玉良, 丁静, 杨建平, 等. 聚光太阳能热发电中吸热器吸收涂层的选择. *太阳能学报* ,**2009** ,30( 6) : 764-768  
Wen Yuliang , Ding Jing , Yang Jianping , et al. Selection of solar coatings in concentrating solar power. *Acta Energetica Solaris Sinica* ,**2009** ,30( 6) : 764-768( in Chinese)
- [13] 熊亚选, 吴玉庭, 马重芳, 等. 槽式太阳能聚光集热器热性能数值研究. *工程热物理学报* ,**2010** ,31( 3) : 495-498  
Xiong Yaxuan , Wu Yuting , Ma Chongfang , et al. Numerical study on thermal performance of parabolic trough collector. *Journal of Engineering Thermophysics* ,**2010** ,31( 3) : 495-498( in Chinese)
- [14] Lu Jianfeng , Ding Jing , Yang Jianping , et al. Nonuniform heat transfer model and performance of parabolic trough solar receiver. *Energy* ,**2013** ,59: 666-675
- [15] García I. L. , Álvarez J. L. , Blanco D. Performance model for parabolic trough solar thermal power plants with thermal storage: Comparison to operating plant data. *Solar Energy* ,**2011** ,85( 10) : 2443-2460
- [16] 何梓年. 太阳能热利用. 合肥: 中国科学技术大学出版社, **2009**