

小型槽式太阳能集热器优化设计与试验研究

姚 远^{1,2}, 陈 颖², 廉永旺¹, 王显龙¹

(1.中国科学院 广州能源研究所, 广东 广州 510640; 2.广东工业大学 材料与能源学院, 广东 广州 510006)

摘 要: 按照高性能低成本的原则设计并制作了集热面积为 12 m² 的商用小型槽式集热器。其主要创新优化之处包括:①通过免背板设计减少了槽式反射镜面结构的重量和用材,提高了镜面曲率精度;②通过推杆联动机构减少了驱动装置;③反射镜面分离式结构起到了自清洁功能,减轻了清扫的工作强度;④将闭环反馈技术应用到太阳能跟踪控制系统,可实现四季全天候跟踪。现场试验结果表明:在太阳辐射强度为 540~660 W/m² 时,该集热器可将循环水加热至 170 ℃ 以上,系统整体集热效率最高可达 0.52,但随水温的升高逐渐降低。

关键词: 槽式太阳能集热器; 太阳辐射; 集热效率; 太阳跟踪装置

中图分类号: TK6; TK511 文献标志码: A 文章编号: 1671-5292(2016)06-0791-06

DOI:10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2016.06.001

0 引言

聚光型太阳能集热器通过聚焦太阳光可以获得高温热能,为太阳能发电、太阳能制冷、太阳能海水淡化等需要高温热源的太阳能利用设备创造了更好的工作条件。聚光集热器中应用较多的类型是槽式太阳能集热器,目前对槽式太阳能集热器的研究主要集中在集热器集热效率方面,研究方法大多是建立理论模型,根据流体工质温度、质量流量、工作压力、光照强度等影响因素进行数值分析,建立这些影响因素与集热效率之间的对应变化关系^[1]。研究表明,大部分理论模型推导出的槽式太阳能集热器的最高集热效率为 0.6 以上^{[2],[3]}。此种研究方法虽然理论逻辑性强,但没有考虑到实际槽式集热器的成本效益问题。本文通过对槽式集热器结构设计的创新,在确保高集热效率的同时,尽量减少制造成本和维护成本,为实现槽式集热器的商业化推广扫除障碍。

1 小型槽式集热器的设计

1.1 光路设计与理论计算

本文研制的小型槽式集热器采用抛物柱面反光镜面,接受器采用翅片管外套真空管,其光路图如图 1 所示,曲线为抛物线,是反光镜面的横截面,圆形为真空管横截面。

当太阳中心光线平行于 Y 轴入射时,由于太阳圆面张角 θ ($\theta=32'$) 的存在,反射光不是一条光

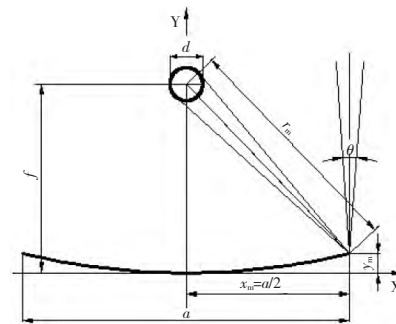


图 1 抛物柱面集热器光路图

Fig.1 Schematic drawing of light in the reflector

线,而是夹角同样为 θ 的放射光束^[4]。本文假设翅片管尺寸恰好为聚光器反射镜面边缘光所形成的太阳像尺寸。图中: d 为翅片管的直径, m ; r_m 为翅片管中心到反射镜面边缘的距离, m ; a 为抛物面的开口宽度, m ; f 为焦距, m ; x_m 为反射镜面边缘到集热管中心轴 X 方向上的距离, m ; y_m 为反射镜面在平行于 Y 轴方向上的高度, m 。

聚光比是聚光集热器的特征参数,其数学表达式为 $C=Aa/Ar$ ^[5],其中 Aa , Ar 分别为采光面积和聚光面积。聚光比反映出聚光集热器使能量集中的可能程度。集热器几何尺寸的确定是以实现最大聚光比为设计目标,其计算推导过程如下。

一般将开口宽度 a 与焦距 f 的比值设为 n ,即 $n=af$,称为开口比。聚光比 C 与开口比 n 的关系为

收稿日期: 2016-02-24。

基金项目: 广东省产学研合作项目(2013B091500059);广东省科技计划项目(2014A020223001)。

作者简介: 姚 远(1976-),男,河南开封人,博士研究生,工程师,主要从事太阳能热利用、中低温余热制冷及高效传热传质等方面的研究工作。E-mail: yaoyuan@ms.giec.ac.cn

$$C=Aa/Ar=nf/\pi d \quad (1)$$

经过一系列数学推导^[6],可得:

$$r_{\max}=f(1+n^2/16) \quad (2)$$

由图 1 几何关系可知,当翅片管直径 d 一定时,

$$r_{\max}=d/2\sin 16' \quad (3)$$

将式(2),(3)代入式(1),可得:

$$C=nf/2\sin 16' \pi [f(1+n^2/16)]=34.2n/(1+n^2/16) \quad (4)$$

令 $dC/dn=0$, 可得 $n=4$ 时最大聚光比 $C_{\max}=68.3$ 。

1.2 整体机械设计

根据上述计算结果,设计槽式集热器集热单元的主要结构尺寸,其结构如图 2 所示。

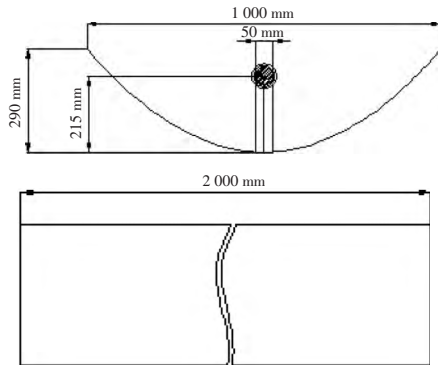


图 2 槽式集热器集热单元结构图

Fig.2 Structuredrawing of trough collector unit

每个集热单元的开口采光面积为 $S_1=1\ 000\ \text{mm} \times 2\ 000\ \text{mm}=2\ \text{m}^2$ 。

槽式集热器整体结构如图 3 所示,图 4 为实物照片。整个小型槽式集热器共由 6 个集热单元组成,平行放置在水平支架上,每个集热单元各有一个固定回转轴,回转轴与南北方向平行(用正午

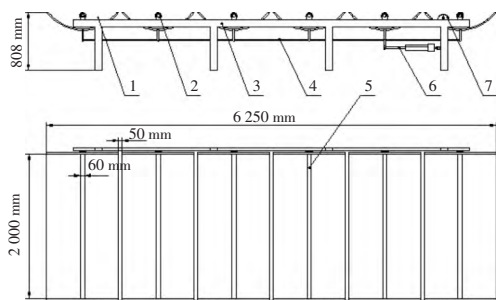


图 3 槽式集热器整体结构图

Fig.3 Structure drawing of trough collector

1-集热单元;2-固定回转轴;3-支架;4-同步拉杆;5-真空管套装翅片管;6-电动推杆;7-太阳跟踪器

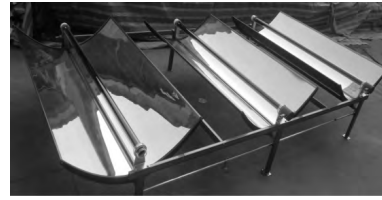


图 4 槽式集热器实物照片

Fig.4 Photograph of trough collector

的太阳方位定向)。集热单元下方铰接一个同步拉杆,同步拉杆固定在电动推杆上。电动推杆的电机转动使推杆伸缩,推杆的伸缩带动同步拉杆东西方向平行移动,同步拉杆的位移产生了带动集热单元绕固定回转轴旋转的动力,推杆电机的启停受太阳跟踪器电路的控制。以上机械结构设计与跟踪器电路设计实现了槽式集热器的太阳单轴跟踪。

1.3 结构设计创新

1.3.1 免背板反光镜面

现有的槽式集热器的反光镜面几乎都是依靠支架和背板作为支撑并曲面定型的,支架和背板都需要采用高强度材料并进行曲面成型加工^[7]。此设计方案虽然增加了可靠性和稳定性,但制造成本很高,单位重量大,运输和安装成本也随之加大。根据市场调查,国内槽式集热器的成本价格为 $2\ 000\sim 2\ 500\ \text{元}/\text{m}^2$ (包括安装费用)。

本文研制的槽式集热器不采用支架和背板,直接将玻璃热弯成型并喷涂成反光镜面,只将镜面两曲线端固定在侧板上的卡槽内。该设计方案简单节材,镜面精度靠玻璃热弯工艺保证,不需机械加工,单位重量大大降低,一个集热单元($2\ \text{m}^2$ 采光面积)的重量只有 $15\ \text{kg}$ 。根据成本核算,该槽式集热器的制造和安装成本只有 $1\ 000\sim 1\ 200\ \text{元}/\text{m}^2$,是现有槽式集热器成本的 50%。

1.3.2 推杆联动机构

槽式集热器采用太阳单轴跟踪,各集热单元的反光镜面均可绕焦点轴旋转,随着太阳方位角的移动而调整倾斜角度,保证太阳光的垂直入射,准确聚焦^[8]。各集热单元的自动旋转系统采用连杆机构实现联动,不必每个单元都用独立的驱动装置。各单元的拉杆都由一个电动推杆统一驱动,依靠四连杆机构的传动约束原理,使所有集热单元保持动作的统一性和反光镜面旋转角度的一致性。由于整个集热器的轻量化设计,电动推杆的电

机功率大为减小,因此也降低了集热器工作的电力成本。

1.3.3 反射镜面的自清洁设计

槽式集热器是利用反射太阳光聚焦来实现高温集热功能,因此对反光镜面的反射率要求很高。当反光镜面上有灰尘或其他遮光物存在时会极大降低镜面反射率^[9]。由于槽式集热器是露天放置,镜面容易污染,所以清洁反射镜面是维持槽式集热器高效运转的必要工作^[10]。该集热器采用分离式镜面结构,两块左右对称的镜面板中间留有空隙,空隙宽度等于翅片管管径,空隙设计在反射镜面最下端。这样的设计有两个优点,一是空隙所在位置任何时候都不会接受到垂直入射的太阳光,因此不会因为反射镜面面积的减少而降低反射率,二是落在反射镜面上的污物可以通过雨水冲刷从空隙中自动掉出来。另外,将反射镜面的前后两端设计成开放式结构,当有风沿集热管轴向吹过时,同样可以将反射镜面上的污物吹落。如果长时间没有雨水或风吹,也可以人工射水冲刷。

1.3.4 闭环反馈的太阳跟踪

太阳光跟踪器由本研发团队自主研制,实物照片见图5。采用光电跟踪的闭环随机系统,用硅光管作为光敏传感器反馈信号。安装时,跟踪器底板与开口面平行,遮光板垂直于聚光轴。在半球形的透光玻璃罩内,两个光电管分置黑色遮光板两边。当两边的光电管受到阳光照射后,输出相同大小的微电流时,说明遮光板没有挡住任何一个光电管,遮光板与太阳光平行,即太阳光直射反光面。如果两边的光电管输出的电流有偏差,其差值就作为偏差信号,经放大电路放大,由伺服机构调整遮光板角度,直至消除偏差,使遮光板与太阳光达到平行。

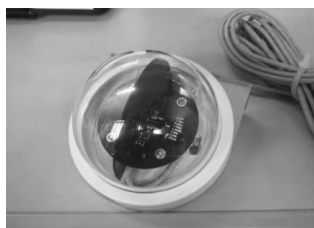


图5 太阳光跟踪器实物照片
Fig.5 Photograph of sun tracking device

2 试验与结果

2.1 试验客观环境条件

时间:2015年9月17日;天气:晴,微风;地点:广州,纬度23.117°;方向:聚光轴与南北方向平行放置;太阳辐射:540~660 W/m²。

2.2 试验原理与装置

试验装置如图6所示,传热工质为自来水,高压保温水箱1为蓄水箱,热电偶2紧贴在水箱金属壳外壁测温,数据线连接无纸记录仪3记录温度变化,水箱下出口连接水泵4和阀门5,水泵推动自来水在连接管道6内循环流动。连接管道将6个集热单元内的翅片管串联,使自来水依次流经6个集热单元进行吸热,然后进入保温水箱,如此循环往复,不断使水温升高。整个循环系统有良好的保温措施,能将热损失降到最低。太阳辐射仪7实时记录太阳辐射强度。

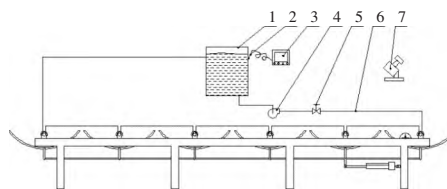


图6 槽式集热器实验装置示意图

Fig.6 Diagram of trough collector testing device

1-高压保温水箱;2-热电偶;3-无纸记录仪;4-水泵;5-阀门;6-连接管道;7-太阳辐射仪

2.3 试验结果与讨论

根据试验时间和地点,可推算出正午太阳出现在12:10左右,即太阳高度角最大的时刻,一般也是辐射最强的时候^[10]。因此,试验选择在11:10开始,13:10结束,每隔1min无纸记录仪自动记录一次热电偶测得的水箱温度。根据记录的原始数据,绘制出如图7和图8的曲线。

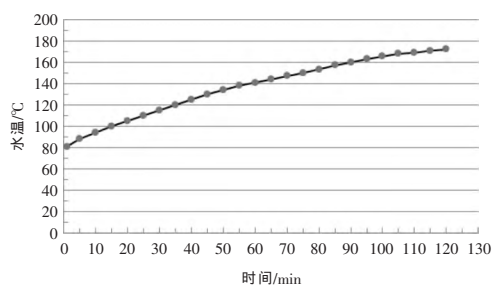


图7 循环水水温与加热时间的变化关系

Fig.7 The relationship between water temperature and heating time

槽式集热器中的循环水是吸收太阳辐射热并传递热量的媒介工质,把它作为测量对象可以间接测试出集热器系统的整体集热效率。

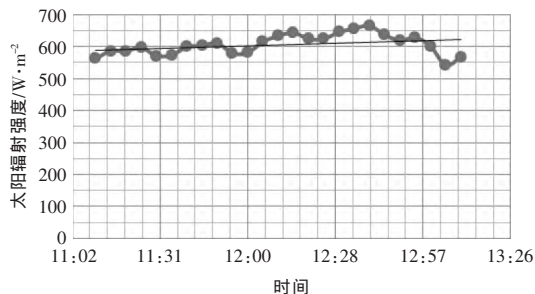


图8 太阳辐射在试验进行期间的变化趋势

Fig.8 Solar radiation intensity change during the experiment

由图7可以看到,循环水的温度随时间的变化曲线大致是斜率逐渐变小的弧线。开始时,曲线斜率为1.5℃/min左右,随着温度的升高,曲线斜率不断降低,达到170℃时,斜率降低至0.2℃/min。该曲线基本符合集热器整体实际加热能力的变化趋势。水温越高,水温与外界气温温差越大,散热量越大,循环水的温升就越慢。由图8的变化曲线可以看出,太阳辐射强度基本在600W/m²上下浮动,最高值出现在当天12:40,为665W/m²,最低值为542W/m²。除非天气非常好,没有任何云雾遮挡阳光,太阳辐射强度可以保持稳定,否则都是随时变化的,因此该变化曲线也反映了实际的太阳辐射强度变化过程。从图7和图8的曲线对比来看,太阳辐射强度的短时变化不会对温升速率造成明显的影响。

判断太阳能集热器系统性能优劣的主要参数是系统集热效率 $\eta_{系统}$, $\eta_{系统}$ 可以描述为集热器向外供热的热量 $Q_{供}$ 与集热器接受太阳辐射热量 $Q_{辐射}$ 之比,即 $\eta_{系统}=Q_{供}/Q_{辐射}$,系统集热效率将系统各部分的热损失也考虑在内,是一种更有工程意义的性能参数。本试验通过循环水的吸热升温来测量 $Q_{供}$,通过太阳辐射强度与集热器开口面积之积来测量 $Q_{辐射}$,其计算公式为

$$Q_{供}=(c_{水} \cdot M_{水} \cdot \Delta T_{水})/\Delta t \quad (5)$$

式中: $c_{水}$ 为循环水的比热,4.2kJ/(kg·℃); $M_{水}$ 为循环水的总质量,36kg; $\Delta T_{水}$ 为循环水的温升,℃; Δt 为循环水温升所经历的时间,s。

$$Q_{辐射}=I \cdot A \quad (6)$$

式中: I 为太阳辐射强度,W/m²; A 为集热器开口面积,2m²。

根据以上公式计算出来的系统集热效率 $\eta_{系统}$ 与循环水温之间的对应关系如图9所示。

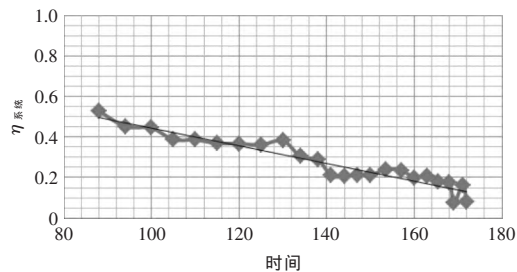


图9 集热器系统集热效率随循环水温度的变化

Fig.9 The relationship between water temperature and the heat collecting efficiency

从图9可以看出,集热器系统集热效率整体趋势是随循环水温度的上升而下降,个别出现的异常现象是因为在该时间段内太阳辐射强度比较低,水温上升的速率并没有显著下降而导致的瞬时热效率反常升高。从数值上来看,在水温为90℃左右时,系统集热效率最高,达到0.52,在水温超过170℃后,系统集热效率最低,只有0.08左右,说明此时集热器系统的热损失和得热量几乎相同,达到了热平衡状态。

3 结论

本文研制的小型槽式集热器是以成本效益为优化目标的可推广的工程应用型槽式集热器,与目前实验性质的槽式集热器相比,更注重制造成本的降低、维护的方便以及生产组装的模块化。本集热器的创新设计主要有4点:①免背板的反光镜面;②镜面单轴旋转采用推杆联动机构;③镜面的自清洁设计;④闭环反馈的太阳跟踪器。根据成本核算,槽式集热器的制造和安装成本只有1000~1200元/m²,是现有槽式集热器成本的50%。现场试验结果表明,在太阳辐射强度为600W/m²左右时,集热器可将循环水加热至170℃以上,系统整体集热效率最高可达0.52,但随水温的升高逐渐降低。该类型槽式集热器可为太阳能热发电、太阳能吸收式空调、太阳能干燥、太阳能海水淡化等太阳能利用设备提供所需的高温热源,市场推广前景广阔。

参考文献:

- [1] 东朝阳,张明智,耿士敏.抛物槽式集热器热效率研究[J].节能,2012(7):28-32.
- [1] Dong Chaoyang,Zhang Mingzhi,Geng Shimin. Study on heat efficiency of parabolic trough collector [J]. Energy

- Conservation,2012(7):28-32.
- [2] 崔映红,卑振华.抛物面槽式太阳能集热器热力性能研究[J].华北电力大学学报,2010,37(3):49-54.
- [2] Cui Yinghong, Bi Zhenhua. Study on the thermal performance of parabolic trough solar collector [J]. Journal of North China Electric Power University, 2010,37(3):49-54.
- [3] 罗银恒,吴琪,王利民,等.槽式太阳能集热器的聚光模拟和余弦效应分析 [J]. 东方电气评论,2013,27(27):66-69.
- [3] Luo Yinheng, Wu Qi, Wang Limin, et al. Focusing simulation and cosine effect analysis of trough solar collectors [J]. Dongfang Electric Review, 2013,27(27):66-69.
- [4] 何梓年.太阳能热利用[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2009.
- [4] He Zinian. Solar Thermal Technology [M]. Hefei:Press of University of Science and Technology of China, 2009.
- [5] 王志峰.抛物跟踪式太阳高温集热器的研究[J].太阳能学报,2000,21(1):69-76.
- [5] Wang Zhifeng. Research on parabolic tracking solar heat collector [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2000,21(1):69-76.
- [6] 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 [J]. 工程热物理学报,2010,31(3):495-498.
- [6] Xiong Yaxuan, Wu Yuting, Ma Chongfang, et al. Numerical study on thermal performance of trough solar concentrator [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010,31(3):495-498.
- [7] Behar O, Khellaf A, Mohammedi K. A review of studies on central receiver solar thermal power plants [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013,23(7):12-39.
- [8] Kalogirou S A. A detailed thermal model of a parabolic trough collector receiver[J]. Energy, 2012,48(1):298-306.
- [9] Padilla R V, Demirkaya G, Goswami D Y, et al. Heat transfer analysis of parabolic trough solar receiver [J]. Applied Energy, 2011,88(12):5097-5110.
- [10] Hachicha A A, Rodriguez I, Castro J, et al. Numerical simulation of wind flow around a parabolic trough solar collector [J]. Applied Energy, 2013,107:426-437.
- [11] Kumaresan G, Sridhar R, Velraj R. Performance studies of a solar parabolic trough collector with a thermal energy storage system [J]. Energy, 2012,47(1):395-402.

Optimum design and experimental study of small parabolic trough solar receivers small trough type solar collector

Yao Yuan^{1,2}, Chen Ying², Lian Yongwang¹, Wang Xianlong¹

(1.Guangzhou Institute of Energy Conversion, CAS, Guangzhou 510640, China; 2.Guangdong University of Technology, School of Material and Energy, Guangzhou 510006, China)

Abstract: According to the principle of high performance and low cost, a small l trough type solar collector small parabolic trough solar receiver was designed and made developed for market, which collecting sunlight area is 12 m². Its the main optimization points including: ① The free backplane design reduces the trough reflector structure the weight and materials of the trough reflector structure and improve the precision the reflector surface accuracy. ② The push rod linkage mechanism of push rod linkage reduces the number of driving devices. ③ The separation type structure of reflector panel plays a self-cleaning function and reduces the intensity of manual cleaning. ④ The closed loop feedback technology is applied to the solar tracking control systems so that it can work all year. When solar radiation intensity is 540~660 W/m², the experiment results show: circulating water can be heated to more than 170 degrees and the heat collecting efficiency is up to 0.52, but decreases with temperature of water increasing.

Key words: trough type solar collector; solar radiation; heat collecting efficiency; sun tracking device