

槽式太阳能集热器光带特性研究

吴鹏程¹ 朱天宇^{1,2} 曹飞¹ 刘庆君¹ 毛宇飞¹

¹河海大学机电工程学院, 江苏 常州 213022

²河海大学南通海洋与近海工程研究院, 江苏 南通 226019

摘要 槽式太阳能集热器集热管下方呈现一条中央为暗黑条纹的高亮光带,该光带是其主要光学特征。在研究集热器光带形成机理的基础上,经过理论推导得出,该高亮光带的弧长特性与抛物面聚光器的开口宽度、抛物面聚光器的焦距以及集热管的直径相关,这三个参数对光带弧长的影响各不相同。光带中央暗黑条纹的弧长也与以上三个参数相关。优化分析后认为,抛物面焦距与集热管直径的比值应远离 12.5。

关键词 测量; 槽式太阳能集热器; 光带弧长; 抛物面聚光器; 集热管

中图分类号 TK51 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.071202

Light Band Characteristics of Parabolic Trough Solar Collectors

Wu Pengcheng¹ Zhu Tianyu^{1,2} Cao Fei¹ Liu Qingjun¹ Mao Yufei¹

¹College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou, Jiangsu 213022, China

²Nantong Ocean and Coastal Engineering Research Institute, Hohai University, Nantong, Jiangsu 226019, China

Abstract The highlighted light band with a dark stripe under the collector tubes is the main optical characteristic of parabolic trough solar collectors. Based on research on the formation mechanism of light band, it is derived theoretically that the arc length of light band is related to three parameters, viz. the opening width and the focal length of parabolic trough concentrator and the diameter of collector tube. In addition, the influence of the three parameters on the arc length is different from each other. At the same time, the arc length of the dark stripe in the light band is related to the three parameters as well. After optimization, it is considered that the ratio of the focal length of paraboloid and the diameter of collector tube should be far away from 12.5.

Key words measurement; parabolic trough solar collector; arc length of light band; parabolic concentrator; collector tubes

OCIS codes 120.5700; 080.2740; 120.6810

1 引言

槽式太阳能热发电技术是一种线聚焦型热发电技术,其热发电系统可拆分为聚光集热子系统、换热子系统、发电子系统、蓄热子系统以及辅助能源子系统等。聚光集热子系统模块主要由抛物面聚光器、集热管和跟踪系统组成^[1]。在槽式太阳能集热器光学性能的研究方面,国内外诸多科研机构 and 专家学者已经进行了很多理论研究和实验探索,取得了骄人的成果。Bendt 等^[2]利用数值积分的方法进行了旋转抛物面集热器的光学分析,总结了太阳形状和镜面光学误差对集热器光学性能的影响。Jeter^[3-4]针对槽式太阳能集热器的光学性能进行分析,在研究集热管壁面热流密度分布趋势后,总结了集热器的光学性能积分方程,并分析比

收稿日期: 2016-01-07; **收到修改稿日期:** 2016-03-09; **网络出版日期:** 2016-06-22

基金项目: 国家 973 计划(2010CB227102)、国家自然科学基金(51506043)、江苏省科技支撑计划(BE2013070)、河海大学中央高校基本科研业务费(2013B19014)

作者简介: 吴鹏程(1992—),男,硕士研究生,主要从事可再生能源开发利用方面的研究。

E-mail: m15206116510@163.com

导师简介: 朱天宇(1961—),男,硕士,教授,主要从事可再生能源开发利用方面的研究。E-mail: zhuty@hhuc.edu.cn

较了数值积分结果和实验数据。马保宏等^[5]研究发现槽式聚光器的平面光伏电池板上能流密度由中心向边缘呈指数函数衰减。许成木等^[6]将聚光器的吸收面放在焦点处,吸收面上能流密度的分布很不均匀。本文在分析槽式太阳能集热器的主要尺寸参数对光带影响的基础上,对聚光系统进行优化设计,提高聚光效率,降低集热管的损坏率,从而提高整个系统的发电效率。

2 光带模拟分析

2.1 集热器光带形成机理

槽式太阳能聚光器横截面为抛物线形状,在抛物线的焦点位置同轴心安装一根集热管,聚光器通过跟踪装置,使得入射的太阳光线始终垂直于抛物面的开口,垂直射入开口方向的太阳光经过抛物面镜面反射之后,必然射向抛物线的焦点位置,从而导致安装在焦点位置的集热管下方出现一条高亮的光带。

槽式太阳能集热器简图如图 1 所示,其中抛物面聚光器开口宽度为 B (mm);抛物面聚光器焦距为 f (mm);集热管直径为 d (mm);位置角为 θ (rad);边缘角为 θ_{\max} (rad);阴影角为 θ_{\min} (rad);不考虑遮蔽效应时光带弧长为 L (mm),考虑遮蔽效应时光带弧长为 L' (mm);阴影弧长为 Δ (mm)。

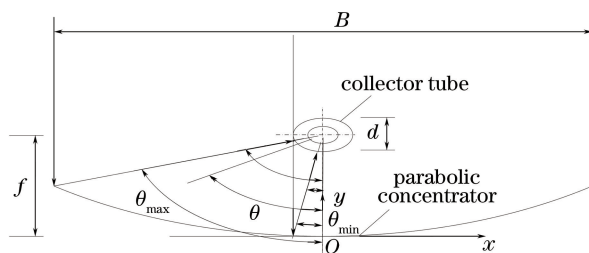


图 1 槽式太阳能集热器截面示意图

Fig. 1 Schematic cross-section of parabolic trough solar collector

设抛物面方程为

$$x^2 = 4fy, \quad (1)$$

当 $x = B/2$ 时,抛物面镜面高度 $h = \frac{B^2}{16f}$, $\tan \theta_{\max} = \frac{8Bf}{16f^2 - B^2}$, 可得边缘角为

$$\theta_{\max} = \arctan\left(\frac{8Bf}{16f^2 - B^2}\right), \quad (2)$$

当 $x = d/2$ 时,同理可得阴影角为

$$\theta_{\min} = \arctan\left(\frac{8df}{16f^2 - d^2}\right), \quad (3)$$

暂不考虑遮蔽效应区的影响,则光带弧长方程为

$$L = d \times \theta_{\max} = d \times \arctan\left(\frac{8Bf}{16f^2 - B^2}\right). \quad (4)$$

实际上,由于集热管的遮挡影响,一部分直射的太阳光线无法到达聚光器镜面,导致该部分太阳光无法经过镜面反射射向焦点位置,肉眼观察时可以看到集热管下方高亮光带的中央出现一条暗黑条纹,即所谓的遮蔽效应区。考虑遮蔽效应区的影响,则光带弧长方程为

$$L' = d \times (\theta_{\max} - \theta_{\min}) = d \times \left[\arctan\left(\frac{8Bf}{16f^2 - B^2}\right) - \arctan\left(\frac{8df}{16f^2 - d^2}\right) \right]. \quad (5)$$

2.2 影响光带的参数分析

从(4)式可以直观地看出,光带弧长与集热管直径呈线性比例关系,但考虑遮蔽效应区时,从(5)式不能得出光带弧长与集热管直径的关系。模拟计算时,抛物面聚光器开口宽度 $B = 2500$ mm,聚光器焦距 $f = 850$ mm,集热管直径 $d \in (40, 120)$ mm,无论是否考虑遮蔽效应区的影响,随着集热管直径的增大,光带弧长都逐渐增大。光带弧长与集热管直径的关系曲线如图 2 所示。

结合(4)、(5)式可知,遮蔽效应区对光带弧长的影响不涉及聚光器开口宽度 B 。模拟计算时,集热管直

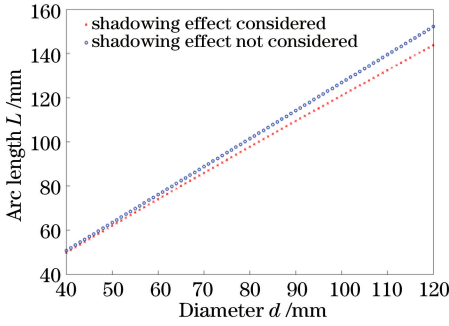


图2 光带弧长与集热管直径的关系

Fig. 2 Relationship between arc length of light band and diameter of collector tube

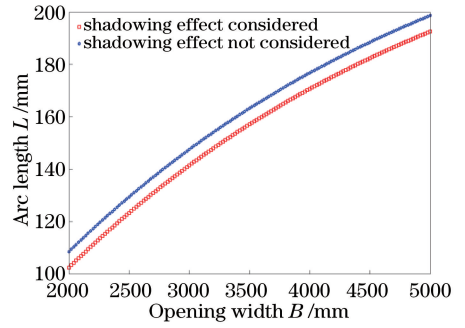


图3 光带弧长与开口宽度的关系

Fig. 3 Relationship between arc length of light band and opening width of concentrator

径 $d=102$ mm, 抛物面聚光器焦距 $f=850$ mm, 聚光器开口宽度 $B \in (2000, 5000)$ mm, 从模拟计算结果可以看出, 随着开口宽度的增大, 集热管周向的光带弧长也随之缓慢增大, 无论是否考虑遮蔽效应区的影响, 开口宽度对光带弧长的变化趋势并无影响。光带弧长与聚光器开口宽度的关系曲线如图3所示。

从(4)、(5)式难以直观分析得到抛物面聚光器焦距 f 对集热管周向光带弧长的影响。当集热管直径 $d=102$ mm, 抛物面聚光器开口宽度 $B=2500$ mm, 聚光器焦距 $f \in (500, 1500)$ mm 时, 模拟仿真结果如图4所示, 可以看出, 随着聚光器焦距的逐渐增大, 无论是否考虑遮蔽效应区的影响, 光带弧长逐渐减小, 二者变化趋势一致。

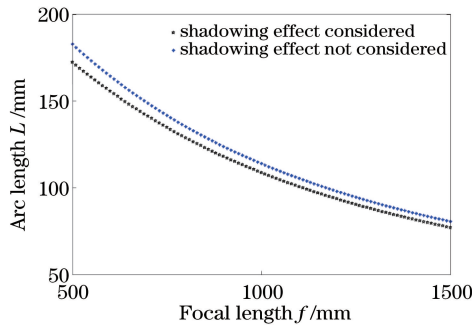


图4 光带弧长与焦距的关系

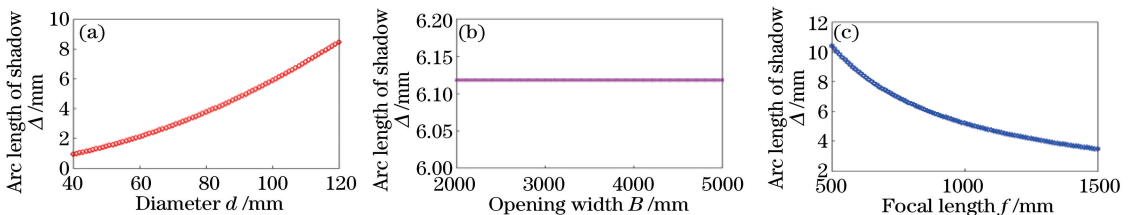
Fig. 4 Relationship between arc length of light band and focal length of concentrator

2.3 遮蔽效应分析

由于集热管的遮挡, 部分太阳光线无法到达聚光器镜面, 该部分太阳光线也就无法经过镜面反射到达集热管底部, 造成集热管底部出现一条暗黑条纹, 即所谓的遮蔽效应区, 其中的阴影弧长计算公式为

$$\Delta = d \times \theta_{\min} = d \times \arctan\left(\frac{8df}{16f^2 - d^2}\right). \quad (6)$$

集热管直径 d 、聚光器开口宽度 B 、聚光器焦距 f 对阴影弧长的影响如图5所示。随着集热管直径的增大, 阴影弧长呈扩大趋势; 开口宽度的变化对阴影弧长无影响; 随着聚光器焦距的逐渐增大, 阴影弧长呈减小趋势。

图5 不同参数下的阴影弧长。(a) $B=2500$ mm, $f=850$ mm; (b) $d=102$ mm, $f=850$ mm; (c) $d=102$ mm, $B=2500$ mmFig. 5 Arc length of shadow under different parameters. (a) $B=2500$ mm, $f=850$ mm;(b) $d=102$ mm, $f=850$ mm; (c) $d=102$ mm, $B=2500$ mm

3 优化分析

聚光器开口宽度过小时,系统接收的太阳辐射能过少,但一味增大聚光器开口宽度,必然导致聚光器玻璃镜面过重,驱动电机的电能增加,并且系统的不稳定性也增大。同时,从图 5(b)可以看出,开口宽度 B 的变化对阴影弧长没有影响,因此可考虑抛物面焦距 f 与集热管直径 d 的搭配比例关系对光带弧长 L 的影响。由图 6 可以看出,当聚光器开口宽度 B 取 2500 mm,抛物面焦距 f 与集热管直径 d 的比值接近 12.5 时,光带弧长最小,使热量过度集中于集热管底部,导致集热管发生热变形甚至损坏,所以设计整套系统参数时应尽量避开这个比值。

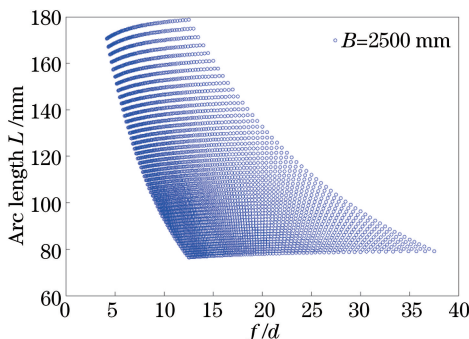


图 6 光带弧长与 f/d 的关系

Fig. 6 Relationship between arc length of light band and f/d

4 结 论

从光学角度分析得出,槽式太阳能集热器集热管周向的光带弧长主要与集热管的直径、抛物面聚光器的开口宽度以及焦距有关。同时,由于集热管的遮挡,会导致高光带中央出现一条暗黑条纹。设计整套系统时应避开导致光带弧长过小的 f/d 比值点。

参 考 文 献

- Huang Xiang, Wang Zhifeng, Li Yanhong, *et al.*. Technology of solar-thermal power generation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
黄 湘, 王志峰, 李艳红, 等. 太阳能热发电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- Bendt P, Rabl A. Optical analysis of point focus parabolic radiation concentrators[J]. Applied Optics, 1981, 20(4): 674-683.
- Jeter S M. Calculation of the concentrated flux density distribution in parabolic trough collectors by a semifinite formulation[J]. Solar Energy, 1986, 37(5): 335-345.
- Jeter S M. Analytical determination of the optical performance of practical parabolic trough collectors from design data [J]. Solar Energy, 1987, 39(1): 11-21.
- Ma Baohong, Ge Suhong, Li Shouyi. Investigation of energy-flux-density distribution of parabolic trough solar concentrators[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 080801.
马保宏, 葛素红, 李守义. 槽式抛物面聚光器能流密度分布的理论研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 080801.
- Xu Chengmu, Li Ming, Ji Xu, *et al.*. Frequency statistics analysis for energy-flux-density distribution on focal plane of parabolic trough solar concentrator[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0408001.
许成木, 李 明, 季 旭, 等. 槽式太阳能聚光器焦面能流密度分布的频数统计分析[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0408001.