

基于卡塞格林结构的高倍太阳能聚光镜

潘其坤^{1,2}, 张来明^{1*}, 谢冀江¹, 阮鹏^{1,2}, 高飞^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:针对传统聚光系统聚光倍数低、造价昂贵且结构复杂的弊端,对高倍太阳能聚光镜进行了设计研究。利用卡塞格林结构具有高倍聚光及光束耦合的优点进行编程建模,设计了新型高倍太阳能聚光镜,给出了设计方法及运用光学软件ZEMAX以不同入射角度入射时的模拟结果。模拟结果表明,设计的太阳能聚光镜消除了球差的影响,在太阳光入射角为 0.5° 时,实现有效聚光比为544,光学效率为84.835%。该聚光镜较传统聚光镜有更高的光学效率,并且结构简单、价格低廉,有望商业化。

关键词:非成像光学;太阳能聚光镜;卡塞格林结构;聚光比

中图分类号:TK513.1 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20120504.0388

High power solar condenser based on Cassegrain structure

PAN Qi-kun^{1,2}, ZHANG Lai-ming^{1*}, XIE Ji-jiang¹, RUAN Peng^{1,2}, GAO Fei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: lightcoming@163.com

Abstract: In consideration of the defects of traditional condenser systems in low condensing rates, high costs and complex structures, high-power solar condensers were studied and designed. Based on the advantages of Cassegrain structure in high light gathering and beam coupling, a new type of high-power solar condenser was designed, and the optical design software ZEMAX was used to simulate the structure in different incident angles. The simulation results show that the Cassegrain structure eliminates the impact of spherical aberration. When arrival angle of sunshine is 0.5° , a concentration ratio of 544 and an optical efficiency of 84.835% can be obtained. Compared with traditional condenser systems, this device has a simple structure, high optical efficiency and a low cost. It has opened up a new path for the commercialization of solar condensers.

Key words: non-imaging optics; solar concentrate mirror; Cassegrain structure; concentration ratio

1 引言

化石能源储量的有限性是影响可再生能源开发的主要因素之一。世界各国对能源供应安全及全球气候异常变化的担忧,推动了世界范围内可再生能源技术和产业的迅速发展,以太阳能为代表的可再生能源已成为实现能源多样化、应对全球气候变化和实现可持续发展的重要替代能源。地球表面接收到的总太阳能辐射量是巨大的,但是辐射能流密度却很低,在阳光直射时,地表最大太阳能接收量仅为 1 mW/mm^2 ^[1-2]。因此,为了有效利用太阳能,必须增大接收光能的面积。目前已经成熟的方案是采用巨大的太阳能电池帆板,如神州五号载人航天飞船的太阳能电池帆板,其有效面积达到了 32 m^2 ,但如此巨大的面积,将消耗大量的 Ge、GaInP、GaInAs 等昂贵的太阳能电池材料,增大了利用太阳能的成本,不利于太阳能产业的发展。高倍聚光镜可运用价格便宜的玻璃、普通金属等材料部分代替昂贵、稀少的 Ge、GaInP、GaInAs 等材料,将利用太阳能的成本压力成功地转移到了光学设计上^[3-4],因此,研制高倍太阳能聚光镜成为国内外的热点课题。纵观太阳能聚光镜发展进程,比较有代表性的聚光器件有菲涅耳聚光镜(光学效率 92%,聚光比为 18)^[5]、组合抛物面聚光镜(光学效率 90%,聚光比为 20)^[6],它们有较高的光学效率,且在较大入射角时可以正常工作,但是它们的聚光比明显偏低,且结构比较笨重。聚光比较高的聚光器件有折射式及折反式聚光镜^[7],折射式聚光镜在入射角为 1° 时的理论聚光比可达 3 000,光学效率可达 90% 以上;折反式聚光镜在入射角为 1° 时的理论聚光比可达 7 000,光学效率可达 90% 以上,但是它们都运用了非球面设计,在加工和检测方面都存在较大的困难。本文提出了基于卡塞格林结构的高倍太阳能聚光镜的设计方法,并运用 ZEM-AX 软件进行了模拟,模拟结果证明基于卡塞格林结构的高倍聚光镜具有实际的应用前景,其特点是聚光比高、光学效率高、结构简单、成本低。

2 卡塞格林结构聚光原理

卡塞格林结构由主镜和副镜组成,主镜采用旋转抛物面,副镜采用旋转双曲面。它利用了抛物面和双曲面的反射特性:抛物凹面反射镜可以将平行于光轴的所有光线汇聚到它的焦点上;双曲面反射镜有两个焦点,它将所有通过其中一个焦点的光线反射聚焦到另一个焦点上。卡塞格林结构主镜的焦点与副镜的焦点重合,可以将来自无穷远的太阳光全部聚焦到副镜的另一个焦点上。如果在此焦平面上安置具有较高光电转换效率的太阳能电池,那么主镜所接收到的所有太阳光线都将经过两次反射汇聚到太阳能电池板上。该系统虽为非成像光学系统,但是由于所有的入射光线均满足等光程条件,因此,消除了球差。基于非成像光学中的边缘光线原理保证了所有入射光线即出射光线(入射光束的光学扩展不变量等于出射光束的光学扩展不变量),从而达到了光束的完全耦合^[8]。

3 聚光比及遮拦比定义

聚光比是评价聚光镜性能的一个重要指标。通常所说的聚光比为几何聚光比,本文所提及的聚光比为有效聚光比。文中聚光镜所涉及到的参量含义如下: a_1 为聚光主镜半口径, r_1 为主镜表面反射率, a_2 为聚光副镜半口径, r_2 为副镜表面反射率, t 为玻璃外罩的透光率, a_3 为太阳能电池(正方形)的边长, n_1 为几何聚光比, n_2 为有效聚光比,如式(1)所示:

$$\begin{aligned} n_1 &= \pi(a_1^2 - a_2^2)/a_3^2, \\ n_2 &= \pi(a_1^2 - a_2^2) \times r_1 \times r_2 \times t/a_3^2. \end{aligned} \quad (1)$$

纵横比为聚光镜的总厚度与主镜口径的比值,它是评价聚光镜结构合理性的一个指标。实践中器件的最佳纵横比在 0.2 ~ 0.5 之间,它既能保证器件结构紧凑,又易于加工和维护。如果纵横比较大,则器件笨重,浪费材料;纵横比较小,则不易于加工和维护。

副镜的遮拦比等于副镜的口径与主镜的口径之比^[9],它是评价聚光镜聚光能力的一个重要参量。如果遮拦比大,主镜中央暗斑的面积也大,这样将降低聚光镜的聚光比,降低系统的效率;遮拦比较小时,虽能得到较高的聚光比,但是副镜的加工、检测、装调都面临着巨大的困难,因此在工程设计中要选择合适的遮拦比,美国 SolFocus 公司研发的聚光镜遮拦比为 0.2^[10]。

4 聚光镜初始结构设计

聚光镜的结构参数及光学参数为:纵横比 0.25,副镜遮拦比 0.2,有效聚光比 500,太阳能电池有效面积为 100 mm²,主镜、副镜镀铝膜,在 400 ~ 1 600 nm 波段的平均反射率在 95% 以上^[11],聚光镜玻璃外罩为普通钠钙酸盐玻璃,厚度为 10 mm,可见光波段透光率 ≥ 94%。该结构在理论上满足光学扩展不变量耦合匹配条件。将上述数据代入式(1)中第 2 式,可得聚光镜半口径 $a_1 = 152.5$ mm, $a_2 = 30.5$ mm。为了便于装调,取 $a_1 = 160$ mm, $a_2 = 32$ mm,此时理论上聚光镜的有效聚光比达到了 550。

主镜的数学模型为以 x 轴为主线、抛物线为母线的旋转抛物面(开口向左),副镜的数学模型为以 x 轴为主线、双曲线左支为母线的旋转双曲面。抛物线和双曲线标准方程为:

$$\begin{aligned} y^2 &= -2px \quad (p > 0), \\ x^2/a^2 - y^2/b^2 &= 1 \quad (a > 0, b > 0). \end{aligned} \quad (2)$$

以主镜的顶点原点,建立平面直角坐标系。抛物线开口向左,纵横比为 0.25,则点(-80, 160)为抛物线上一点。将其代入式(2)中第 1 式,可得抛物线方程为:

$$y^2 = -320x. \quad (3)$$

它的焦点坐标为(-80, 0),双曲线的左焦点与之重合,右焦点位于坐标原点。由双曲线的性质可知:

$$2c = 80, \quad c^2 = a^2 + b^2. \quad (4)$$

由以上分析知,(-80, 32)为双曲线上一点。将(-80, 32)及式(4)代入式(2)中第 2 式,可得双曲线的方程为:

$$(x + 40)^2/733.3978 - y^2/866.6022 = 1. \quad (5)$$

用 MATLAB 软件画出该结构的模拟曲线图和三维曲面图,如图 1 所示。

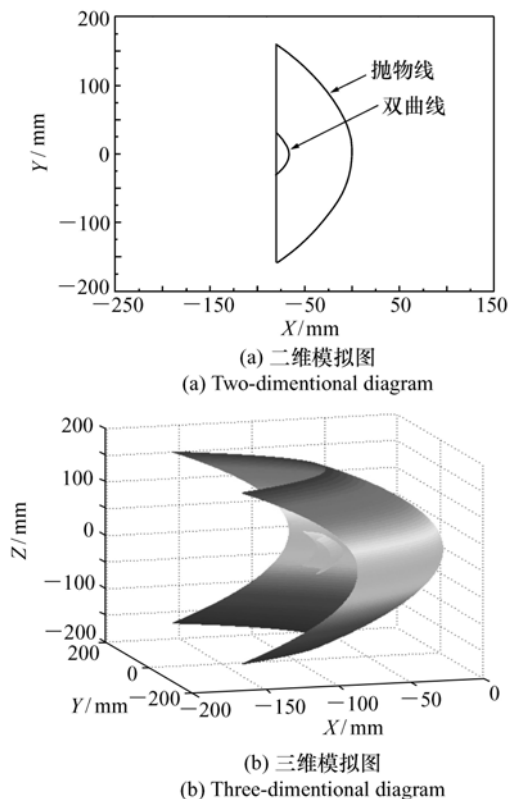


图 1 聚光镜的二维模拟图和三维曲面图

Fig. 1 Two-dimension and three-dimension diagrams of solar condenser

5 ZEMAX 建模及分析评价

利用上面数学建模所得的偶次非球面的初始数据,运用 ZEMAX 软件进行仿真模拟,模拟过程中各个表面均按理想表面处理,软件模拟过程中的像面位置即为太阳能电池与非成像聚光镜的相对位置,分析不同接收角度时像面的相对照度,考虑整个聚光镜的光学效率,可以推算出光伏电池在相应入射角度时的光照强度。聚光镜入射角为 0.5° 时,软件模拟截图如图 2 所示:图 2(a)为总体结构的截面;图 2(b)为聚光镜聚光焦点处的放大图。

聚光镜入射角为 1° 时,软件模拟截图如图 3 所示:图 3(a)为总体结构的截面;图 3(b)为聚光镜聚光焦点处的放大图。

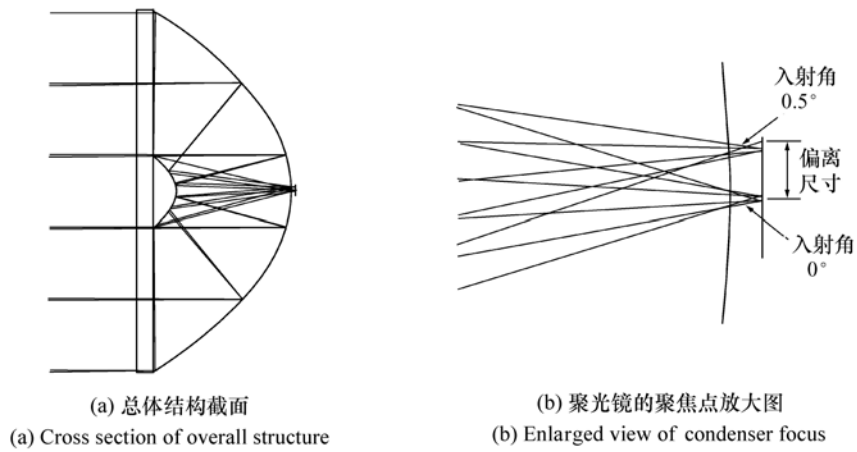


图2 入射角为 0.5° 时模拟图
Fig. 2 Simulated diagram with incident angle of 0.5°

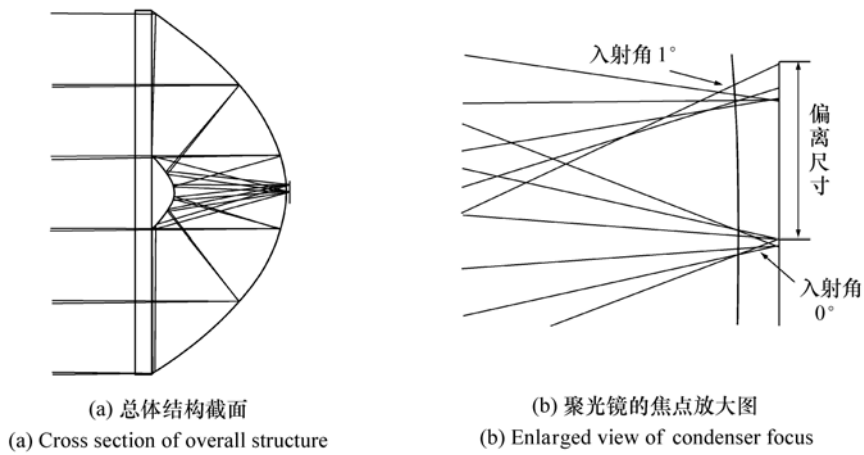


图3 入射角为 1° 时模拟图
Fig. 3 Simulated diagram with incident angle of 1°

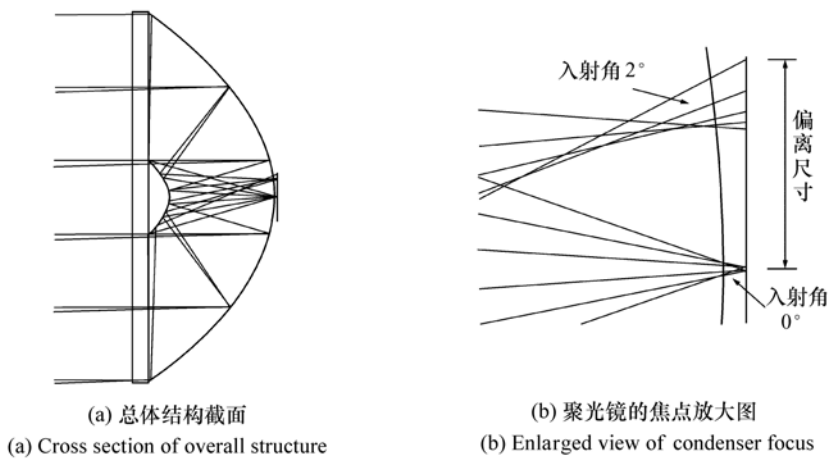


图4 入射角为 2° 时模拟图
Fig. 4 Simulated diagram with incident angle of 2°

聚光镜入射角为 2° 时,软件模拟截图如图4所示:图4(a)为总体结构的截面;图4(b)为聚光

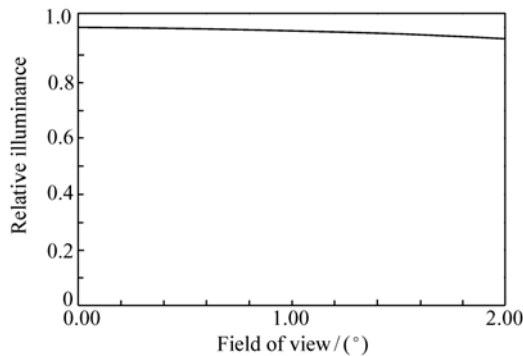


图5 不同视场时相对光照度

Fig. 5 Relative illumination at different fields

表1 卡塞格林式太阳能聚光镜参数

Tab. 1 Parameters of solar condenser based on Cassegrain structure

聚光器参量	入射角/($^\circ$)		
	0.5	1	2
有效聚光比	544	542	537
纵横比/%	0.425	0.425	0.425
遮拦比/%	0.211 5	0.223	0.239 1
偏离尺寸/mm	2.186 5	4.151 3	9.852 1
光学效率/%	84.835	83.138	81.442

镜聚光焦点处的放大图。

像面上不同视场相对光照度的分布如图5所示。对于口径面积为 S 的聚光镜,当太阳光线入射角为 α 时,有效口径将缩小为原来的 $\cos(\alpha)^2$ 倍,即随着入射角偏离量的增大,相对光照度值将逐渐降低。

500倍卡塞格林式太阳能聚光镜的各项参数如表1所示。从表1可知,基于卡塞格林结构设计的聚光镜面型正确,可以得到高倍的聚光比及光学效率,入射角 $<0.5^\circ$ 时得到的聚光比为544;聚光镜的性能参数受入射角的变化很敏感,在满足光学扩展不变量的条件下,入射角为 2° 时的偏离尺寸为入射角为 0.5° 时的4.5倍,即在给定太阳能电池尺寸时,入射角较大的入射光线将无法被太阳能电池吸收,所以该系统在应用时必须借助于二维追日系统。

6 结 论

本文基于卡塞格林结构及相关理论设计了高倍太阳能聚光镜,给出了该聚光镜的设计和模拟实例。在太阳光入射角为 0.5° 时,实现有效聚光比为544,光学效率为84.835%。

参考文献:

- [1] JEFFREY G. Probing concentrator solar cell performance at high flux with localized irradiation[J]. *SPIE*, 2006, 6339: 63390B.
- [2] WISDON R, GORDON J M. Planar concentrators near the etendue limit[J]. *Opt. Lett.*, 2005, 30(19): 2617-2619.
- [3] KING R R, LAW D C, EDMONDSON K M, et al.. 40% Efficient metamorphic GaInP/GaInAs/Ge multijunction solar cells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90: 183516.
- [4] JOSEPH J. Nonimaging solar concentrator with uniform irradiance[J]. *SPIE*, 2004, 5529: 237-239.
- [5] 汪韬, 李辉, 李宝霞, 等. 用于光伏系统新型非涅耳线聚焦聚光透镜设计[J]. *光子学报*, 2002, 31(2): 196-199.
WANG T, LI F, LI B X, et al.. A new design of line-focus fresnel lens for photovoltaic power system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(2): 196-199. (in Chinese)
- [6] 郑宏飞, 李正良, 陶涛, 等. 漏斗式二级复合抛物面太阳能聚光器的优化设计[J]. *太阳能学报*, 2008, 29(7): 820-826.
ZHENG H F, LI ZH L, TAO T, et al.. The optimizing design of the tundish type two stage solar compound paraboloid concentrator[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2008, 29(7): 820-826. (in Chinese)
- [7] 朱瑞, 卢振武, 刘华, 等. 基于非成像原理设计的太阳能聚光镜[J]. *光子学报*, 2009, 38(9): 2251-2255.
ZHU R, LU ZH W, LIU H, et al.. The solar concentrator design method based on nonimaging optics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(9): 2251-2255. (in Chinese)

- [8] VAHAN G, ROBERT G. Optical design considerations for high-concentration photovoltaics [J]. *SPIE*, 2006, 6339: 633905.
- [9] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检测[M]. 苏州:苏州大学出版社,2004.
PAN J H. *The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces* [M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004. (in Chinese)
- [10] MARK M, STEVE H, GARY C. Concentrator design to minimize LCOE [J]. *SPIE*, 2007, 6649: 66490B.
- [11] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 浙江:浙江大学出版社,2006.
TANG J F, GU P F, LIU X, *et al.*. *Modern Optical Thin Film Technology* [M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2006. (in Chinese)

作者简介:潘其坤(1985—),男,河南开封人,博士,主要从事光学设计、激光器件等方面的研究。

E-mail:panqikun2005@163.com

张来明(1979—),男,山东青州人,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事光学设计、激光器件、激光与物质相互作用等方面的研究。E-mail:lightcoming@163.com