

聚光模组二次光学元件优化设计与研究

杨光辉^{1,2} 刘友强¹ 尧舜¹ 郭丽敏¹ 陈丙振¹ 王智勇¹

¹北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

²96658部队202分队, 北京 100094

摘要 聚光光伏模组中,二次光学元件对增加太阳能电池接收到的入射光能量,提高聚焦光斑均匀性和增大菲涅耳透镜接收角具有重要作用。设计了一种用于聚光光伏模组的全反射式二次光学元件,用Solidworks软件建立了三维模型,结合实际工程应用,借助Zemax软件光学模拟仿真手段,对二次光学元件的倾角和高度等重要参数进行了优化。并制作了不同参数的二次光学元件,配合菲涅耳透镜、太阳能电池,搭建了实物聚光发电单元,在太阳模拟器下进行I-V性能测试,结果表明当二次光学元件高度为6 mm,上圆直径为7 mm时,太阳能电池的输出功率达到最大值720 mW,与不加二次光学元件相比,输出功率提高了16%。说明该二次光学元件对提高聚光模组效率作用显著。

关键词 光学设计;二次光学元件;优化;聚光模组

中图分类号 O435

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0322006

Optimized Design and Research of Secondary Optics in Concentrating Photovoltaic Module

Yang Guanghui^{1,2} Liu Youqiang¹ Yao Shun¹ Guo Limin¹

Chen Bingzhen¹ Wang Zhiyong¹

¹Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

²202Unit, PLA 96658 Troop, Beijing 100094, China

Abstract In concentrating photovoltaic module, employment of secondary optics can be effective in increasing the acceptance angle and incident light, as well as improving the energy uniformity of focal spot. A design of reflective secondary optics for concentrating photovoltaic module is presented. The 3D model of this design is established by Solidworks software and important parameters such as inclination angle and component height get optimized using Zemax software. According to the design and simulation results, several secondary glass prisms with different parameters are fabricated and tested in combination with Fresnel lens and multi-junction solar cell. The sun-simulator I-V test results show that the combination has the highest output power when secondary optics height is 6mm and upper circle diameter is 7 mm. The output power can reach 720 mW, which improves 16% compare to without secondary optics. It shows that secondary optics is very important in concentrating photovoltaic module.

Key words optical design; secondary optics; optimization; concentrating photovoltaic module

OCIS codes 220.1770; 220.3630; 220.4840

1 引言

随着聚光光伏技术的发展,其应用日益广泛,一些兆瓦级的大规模聚光光伏电站相继建立。据世界知名市场研究机构 HIS 称,全球聚光光伏市场即将呈现爆发式增长,到 2020 年全球装机量将猛增 750%。高倍

收稿日期: 2014-09-16; 收到修改稿日期: 2014-11-10

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-09-0002)、国家自然科学基金(61006040)

作者简介: 杨光辉(1976—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事大功率半导体激光器和高倍聚光太阳能方面的研究。

E-mail: yang3881@sina.com

导师简介: 王智勇(1970—),男,博士,研究员,主要从事大功率半导体激光器和高倍聚光太阳能方面的研究。

E-mail: zywang@bjut.edu.cn(通信联系人)

聚光光伏技术是将直射到菲涅耳透镜上的较大面积的太阳光聚焦到小面积的太阳能电池上,通过采用较为便宜的光学材料降低昂贵的太阳能电池面积^[1-3]。高倍聚光光伏模组一般包括主聚光器、二次光学元件、太阳能电池和散热器等。太阳光经主聚光器透射或反射后进入二次光学元件,光线进一步汇聚,聚焦在太阳能电池上,产生电流。主聚光器和二次光学元件是研究的热点,荆雷等^[4-6]对太阳能主聚光器进行了深入的研究。二次光学元件可以增加太阳能电池上的辐射光强度、提高聚光光斑均匀性以及增大接收角,进而提高太阳能电池的输出功率,多个研发机构都在考虑把二次聚光器引入聚光系统^[7-8]。茹占强等^[9]提出了一种棱镜结构的全反射式二次聚光器设计,明显增加了聚焦光斑均匀性,增大了接收角。但此结构增加了反射面,一定程度上增加了入射光损失。郭丽敏等^[10]设计了一种可拆卸式二次反射镜,并进行了光学模拟仿真,结果表明对增加聚焦光斑均匀性和增大接收角同样作用明显,但未进行实验验证。本文结合实际工程应用,提出了一种结构简单、工作面少、成本较低、效果较好的聚光模组用二次光学元件。

2 二次光学元件的聚光原理

图1为菲涅耳透镜和二次光学元件的聚光光路图。太阳能电池位于菲涅耳透镜的焦平面上,二次光学元件的出射面和太阳能电池表面重合,出射面的形状、大小和太阳能电池的接收面一致。

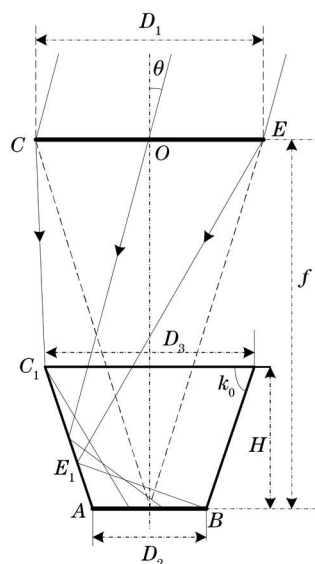


图1 菲涅耳透镜和二次光学元件的聚光光路图

Fig.1 Optical path of Fresnel lens and the secondary optics

图中以所有光线经过二次光学元件一次反射后都能到达电池接收面为例说明,其他多次反射情形类似。图1中菲涅耳透镜的轴外平行光入射角为 θ ,聚焦菲涅耳透镜为 $D_1 \times D_1$ 的正方形,菲涅耳透镜焦距为 f ,太阳能电池的有效接收区域为一个直径为 D_2 的圆形,二次光学元件的入射面口径为 D_3 ,高为 H ,反射面倾角为 k_0 。则推导可得 D_2 、 D_3 、 H 和 k_0 满足关系^[10]:

$$\tan k_0 = \frac{2H}{D_3 - D_2}. \quad (1)$$

若要所有菲涅耳透镜的出射光线都入射到该二次光学元件的开口内,则需要满足以下条件:

$$f \cdot \tan \theta + H \cdot \left(\frac{\sqrt{2} D_1}{2f} - \tan \theta \right) \leq \frac{D_3}{2} \leq \frac{\sqrt{2} D_1}{2}, \quad (2)$$

若要光线 EE_1 能在 E_1 点处产生反射并入射到电池上,则可推导得出需要满足以下条件:

$$k_0 > 90^\circ - \arctan \left(\tan \theta + \frac{\sqrt{2} D_1}{2f} \right). \quad (3)$$

只要边缘光线 EE_1 能够在二次光学元件内表面上经过一次反射入射到电池上,则其他光线都可以满足该条

件。推导得出边缘光线 EE₁ 反射一次即可达到电池接收面的条件为

$$\frac{\sin \left[\operatorname{arccot} \left(\tan \theta + \frac{\sqrt{2} D_1}{2f} \right) \right] \cdot \left(f \cdot \tan \theta - \frac{D_2}{2} \right)}{\sin \left[2k_0 + \operatorname{arccot} \left(\tan \theta + \frac{\sqrt{2} D_1}{2f} \right) - 180^\circ \right]} \leq D_2. \quad (4)$$

根据已知的 θ 、 f 、 D_1 和 D_2 的值, 由(1)式以及不等式(2)~(4)式的条件即可确定出满足要求的二次光学元件的各个参数。其中, D_3 取值范围 D_2 与 $\sqrt{2} D_1$ 之间, H 取值小于 f 。

3 二次光学元件的设计

3.1 设计思想

二次光学元件的主要作用是将经过菲涅耳透镜的入射光线二次聚焦, 会聚在太阳能电池的表面上。

根据图 1 所述基本原理, 结合实际工程应用中的条件约束, 确定二次光学元件的初始参数, 用 Solidworks 软件建立三维模型, 导入 Zemax 光学模拟软件, 对二次光学元件高度和倾角两个变量进行优化仿真计算, 确定最优解, 搭建实验平台, 对模拟结果进行实验验证。

3.2 设计实例

二次光学元件的三维模型如图 2 所示。工作面为一个倒置截锥体的侧壁。上圆直径为 D_3 , 下圆直径为 D_2 , 高为 H , 倾角为 K_0 。设菲涅耳透镜的口径为 50 mm×50 mm, 焦距为 93.5 mm。太阳能电池接收面为直径为 2.5 mm 的圆形。

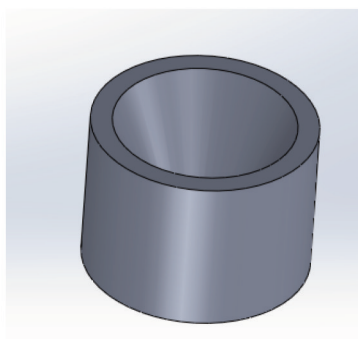


图 2 二次光学元件模型
Fig.2 Secondary optics model

4 二次光学元件的优化模拟

理论上讲二次光学元件的入射面要能收集到经过菲涅耳透镜的所有光线, 出射面要与电池接收面保持一致, 但由于装配误差存在, 二次光学元件的出射面不可能完全对准电池的接收面, 若前者大于后者, 则可能会有光线遗漏; 反之可能会造成遮挡。另一方面, 满足可接收所有入射光线这一设计条件的二次光学元件的高度和倾角都是一个范围, 而不是确定的数值, 那么就存在一个找出最优解的问题。因此, 在实际工程应用需要综合考虑设备、工艺、成本等各个要素, 在此基础上确定二次光学元件的最佳高度、倾角, 以及出射面的形状和大小等参数。

综合考虑工程应用中设备精度、工艺和经济性等因素, 确定初始参数 D_2 为 2.6 mm。应用该二次光学元件后, 设轴外平行光入射角 $\theta=1^\circ$, 则由(1)式以及不等式(2)~(4)式可得出, $k_0 \in [59.87^\circ, 90^\circ)$ 和 $H > 1.73$ mm。将 Solidworks 软件中建立的三维模型导入 Zemax 软件中进行优化模拟。设从菲涅耳透镜外入射的光强为 1000 W/m², 太阳能电池接收到的能量为 P 。

4.1 倾角优化

设定二次光学元件的高度初始值 $H=6$ mm, 已知下圆直径 $D_2=2.6$ mm, 改变上圆直径即可改变二次光学

元件的倾角。 D_3 取 5~9 mm,间隔 0.5 mm 取一个值,通过 Zemax 软件进行仿真计算,得到太阳能电池接收到的能量如表 1 所示,上圆直径与能量对应的曲线如图 3 所示。

表 1 不同上圆直径的二次元件接收的能量

Table 1 Energy received by the secondary optics of different upper circle diameters

D_3 /mm	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9
Energy /W	2.3770	2.4165	2.4320	2.4369	2.4375	2.4359	2.4318	2.4226	2.4037

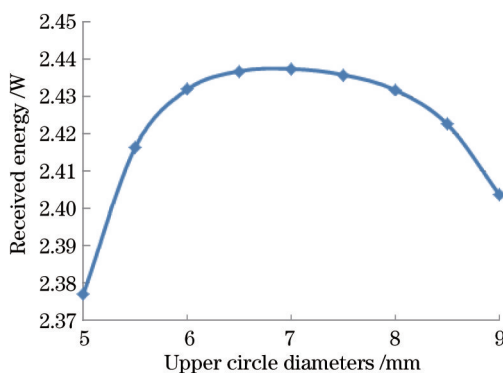


图 3 不同上圆直径二次元件与接收能量的对应关系

Fig.3 Correspondence between the secondary optics of different upper circle diameters and the received energy

由上可知,二次光学元件高度为 6 mm,下圆直径为 2.6 mm,上圆直径为 7 mm 时,太阳能电池接收的能量最大,对应的倾角 k_0 为 69.86°,此时太阳能电池接收面上的能量分布如图 4 所示。

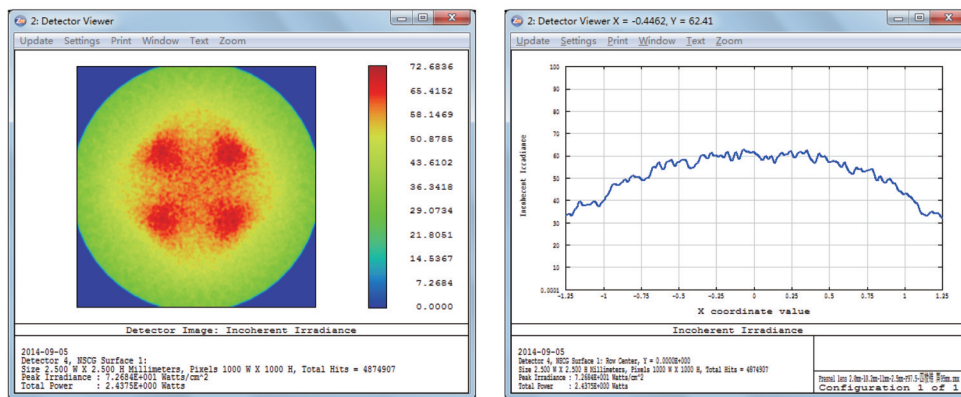


图 4 二次元件倾角最优时电池接收面上的能量分布

Fig.4 Energy distribution of the solar cell surface with the optimal inclination of secondary optics

4.2 高度优化

由 4.1 节结果,取二次光学元件下圆直径 2.6 mm,上圆直径 7 mm,即保持倾角不变,求解其高度的最优解。取高度 H 为 3~10 mm,间隔 1 mm 取一个值,通过 Zemax 软件进行仿真计算,得到太阳能电池接收的能量如表 2 所示,二次元件高度与能量对应的曲线如图 5 所示。

表 2 不同高度的二次元件接收的能量

Table 2 Energy received by secondary optics of different heights

H /mm	3	4	5	6	7	8	9	10
Energy /W	2.4329	2.4360	2.4375	2.4375	2.4371	2.4373	2.4371	2.4373

由上可知,二次光学元件下圆直径为 2.6 mm,上圆直径为 7 mm,高度为 5 mm 或 6 mm 时,太阳能电池接收的能量最大。此后,只要倾角一定,随着二次元件高度增加,太阳能电池接收的能量基本保持不变。太阳能电池接收能量最大时,接收面上的能量分布如图 6 所示。

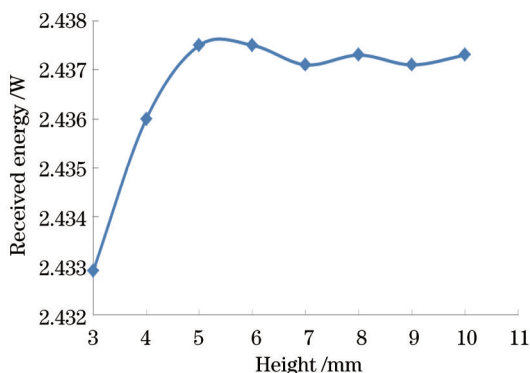


图 5 不同高度二次元件与接收能量的对应关系

Fig. 5 Correspondence between the secondary optics of different heights and the received energy

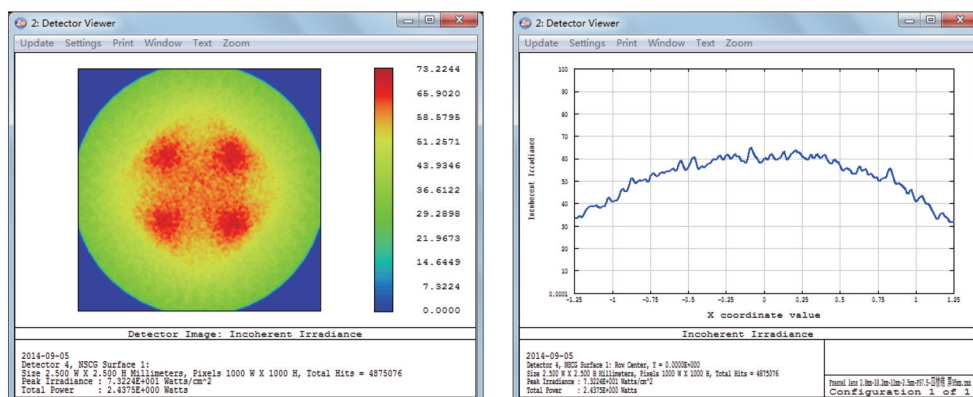


图 6 二次元件高度最优时电池接收面上的能量分布

Fig.6 Energy distribution of the solar cell surface with the optimal height of secondary optics

结合 4.1 节,4.2 节可知,当二次光学元件下圆直径为 2.6 mm,上圆直径为 7 mm,高度为 6 mm 时,各项参数达到最优,太阳能电池接收的能量最大,为 2.4375 W。且只要保持倾角不变,高度进一步增加时,能量仍然保持不变,即在实际工程应用中,根据设备精度、工艺和经济性等约束条件,可增加二次元件的高度。若不带二次光学元件,同样条件下,模拟结果显示,太阳能电池接收的能量为 1.8760 W,接收面上能量分布如图 7 所示。

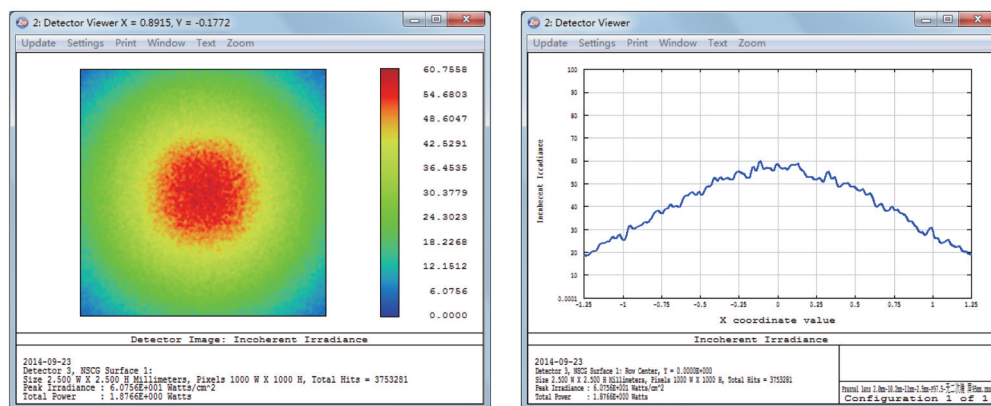


图 7 无二次元件时电池接收面上的能量分布

Fig.7 Energy distribution of the solar cell surface without secondary optics

5 实验验证

为节约成本,根据优化仿真得到的参数,仅制作了下圆直径为 2.6 mm 的三种规格的二次光学元件,分别

是:元件 I($D_3=7\text{ mm}$ 、 $H=6\text{ mm}$),元件 II($D_3=9\text{ mm}$ 、 $H=6\text{ mm}$),元件 III($D_3=7\text{ mm}$ 、 $H=3\text{ mm}$)。搭建实物实验平台,该实验平台构成完整的聚光光伏发电单元,如图 8 所示。为保持一致性,使用相同的菲涅耳透镜和太阳能电池,每次只更换二次光学元件。实验中,使用国产太阳能电池,由广东某企业生产,效率为 40%;透镜由德国某厂家生产,聚光效率为 80%;在某型聚光模组太阳模拟器下进行 $I-V$ 测试。每种二次光学元件测试 10 组数据,取平均值。光强设置为 1000 W/m^2 。

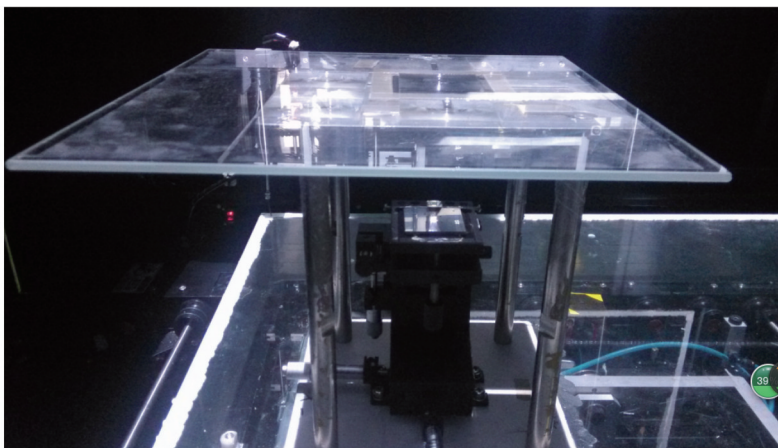


图 8 $I-V$ 测试实验平台

Fig.8 $I-V$ test experimental platform

分别对二次光学元件 I、II、III 以及不带二次光学元件时的 4 种情形进行测试,实验结果见表 3。由表 3 可知,使用元件 I 时,太阳能电池的输出功率最高,达到 720 mW 。 $I-V$ 测试曲线如图 9 所示。

表 3 不同二次元件实验数据

Table 3 Experimental data of different secondary optics

Type	I	II	III	Without secondary optics
Simulated result /W	2.4375	2.4037	2.4329	1.8760
Experimental result /mW	720	712	719	622

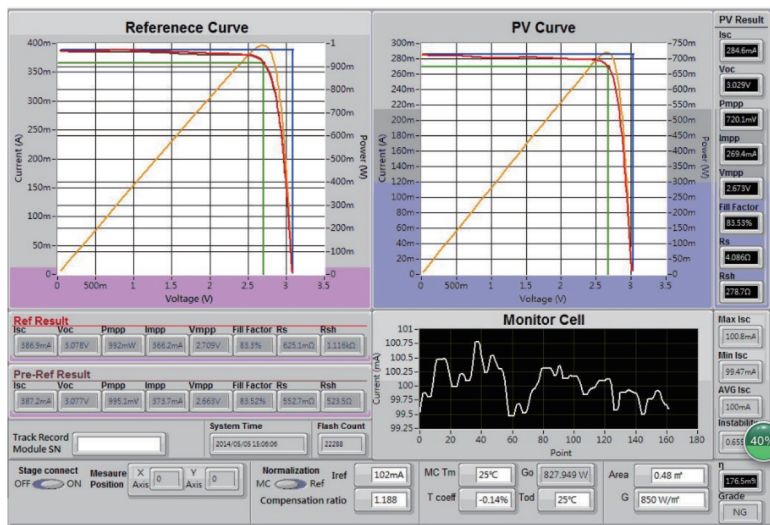


图 9 太阳能电池 $I-V$ 测试曲线

Fig.9 $I-V$ test curves of solar cell

由以上实验数据可知:二次光学元件对增加电池输出功率作用明显,功率最大提升 16%;二次光学元件 I 的效果优于 II 和 III,对应电池输出功率高出 1.12%;二次光学元件 II 和 III,对应电池的输出功率基本相当。实验数据与模拟结果一致性较好。

该聚光发电单元中,太阳能电池的理论输出功率为 800 mW ,实际输出功率为 720 mW ,此时该聚光单元

对应的光电转化效率为29%。与理论功率相比,损失主要来源于二次光学元件尺寸、面形等实际加工精度与理论精度的差异;反射面理论材料反射率与实际反射率的差异;菲涅耳透镜、二次光学元件和太阳能电池三者配合时位置精度与理论精度的差异等。

6 结 论

设计了一种用于聚光模组的二次光学元件,通过对倾角及高度两个参数的进行模拟仿真,得出了最优解,并搭建了实物聚光发电单元,对仿真结果进行验证,实验结果与仿真结果符合较好,数据表明当二次光学元件高度为6 mm,上圆直径为7 mm时,太阳能电池的输出功率达到最大值720 mW,与不加二次光学元件相比,输出功率提高了16%。可见此二次光学元件对提高聚光模组效率具有重要作用。

参 考 文 献

- 1 M Stan. Design and performance of high efficiency III-V space solar cells with monolithic bypass diode architecture [C]. IEEE Piscataway, 2006, 2: 1865-1868.
- 2 F Dimroth. High-efficiency solar cells from III-V compound semiconductors [J]. Phys Stat Sol, 2006, (3): 373-377.
- 3 G F X Strobl. European roadmap of multijunction solar cells and qualification status [C]. IEEE Piscataway, 2006: 1793-1796.
- 4 Jing Lei, Wang Yao, Zhao Huifu, *et al.*. Design of uniform-irradiance concentrator for concentration photovoltaics system [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0208001.
荆 雷, 王 尧, 赵会富, 等. 实现均匀照度光伏聚光镜设计[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0208001.
- 5 Ma Hongcai, Jin Guang, Zhong Xing, *et al.*. Arrangement and shape optimization of solar concentrating receivers using Monte Carlo method [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0308001.
马宏财, 金 光, 钟 兴, 等. 基于蒙特卡罗法的太阳能聚光接收器布局及形状优化设计[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0308001.
- 6 Ren Lanxu, Wei Xiudong, Niu Wenda, *et al.*. Surface error of parabolic trough solar concentrators based on the theoretical overlay photographic method [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0412001.
任兰旭, 魏秀东, 牛文达, 等. 基于吸热管反射成像法测量抛物槽式太阳能聚光器的面形误差[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0412001.
- 7 K Araki, M Kondo, H Uourni, *et al.*. Experimental proof and theoretical analysis on effectiveness of passive homogenizers to 3J concentrator solar cells [C]. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003, 1: 853-856.
- 8 R Leutz, A Suzuki. Nonimaging Fresnel Lenses-Design and Performance of Solar Concentrators [M]. Berlin: Springer, 2001.
- 9 Ru Zhanqiang, An Zhiyong, Song Helun, *et al.*. Design and performance analysis of total reflection-type secondary optics in concentrated photovoltaic module [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(2): 262-266.
茹占强, 安志勇, 宋贺伦, 等. 应用于聚光光伏模组的全反射式二次聚光器的设计与性能分析[J]. 红外激光与工程, 2011, 40(2): 262-266.
- 10 Guo Limin, Wei Ming, Yang Guanghui, *et al.*. Design and research of removable secondary mirror in high concentration photovoltaic technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(S2): 422-425.
郭丽敏, 卫 明, 杨光辉, 等. 高倍聚光光伏可拆卸型二次反射镜设计与研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S2): 422-425.

栏目编辑: 韩 峰