

槽式抛物面聚光器能流密度分布的理论研究

马保宏 葛素红 李守义

河西学院物理与机电工程学院, 甘肃 张掖 734000

摘要 理论研究了槽式反射聚光器上平面光伏电池表面可获得的能流密度的分布。研究发现,平面光伏电池板上能流密度的分布呈三个区域,由中心向两侧依次是能流密度为0的区域、能流密度大于入射光区域和小于入射光的区域。对能流密度分布曲线拟合发现,平面光伏电池板上能流密度由中间向边缘呈指数函数减弱,且平面光伏电池板越接近抛物反射面的焦点,平面光伏电池板的半宽越小,平均能流密度越大,但衰减越快,能流密度的分布越不均匀。将计算结果与文献中的测量结果进行比较,证明了计算结果的正确性。

关键词 几何光学; 抛物反射面; 平面光伏电池; 能流密度分布

中图分类号 TE513.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.080801

Investigation of Energy-Flux-Density Distribution of Parabolic Trough Solar Concentrators

Ma Baohong Ge Suhong Li Shouyi

College of Physics and Electromechanical Engineering, Hexi University, Zhangye, Gansu 734000, China

Abstract The flux density distribution on the plane photovoltaic cells of parabolic trough concentrator is theoretically studied. The results show that the flux density on plane photovoltaic cells distributed in three regions, which from the center to both sides are flux density is zero, flux density is greater than incident light and flux density is smaller than incident light. The flux density distribution curve is fitted and flux density goes down exponentially from the center to the edge. The closer the photovoltaic cell stay to parabolic focal and higher flux density is obtained and more quickly the flux density goes down. The validity of the result is demonstrated by comparing result with that in references.

Key words geometric optics; reflecting surface of parabolic trough; plane photovoltaic cells; flux density distribution

OCIS codes 080.2740; 220.2740; 260.2160; 200.1130; 080.1753; 080.2720

1 引言

在化石能源日渐枯竭、环境污染日益严重的今天,寻求替代传统化石能源的可再生绿色能源显得尤为重要。太阳能作为一种清洁无污染的可再生能源,总量极其丰富,可谓取之不尽,用之不竭。因此,太阳能光伏发电技术成为研究的热点之一^[1-3]。然而在技术上获取太阳能时,总要面临能量分散、辐射功率密度低,加之光伏电池制作成本很高,光电转换效率较低^[4-5],严重制约了太阳能光伏发电技术的推广应用。采用聚光方法,可提高太阳能辐射功率密度,进而提高单位面积太阳电池的输出功率,降低光伏发电成本,具有较好的应用前景^[6-10]。聚光可分为高倍率聚光和低倍率聚光。高倍率聚光需要设计制作能在高倍率聚光下工作的光伏组件及冷却装置^[11-13],实现以上技术,提高了系统的成本和复杂度,因此研究低倍聚光具有重要现实意义。槽式抛物面聚光器是一种重要的低倍率聚光器,许多研究小组相继开展了这一课题的研究^[14-16],做了不少有益的工作。许成木等^[14]的研究中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。马宏财等^[16]将设计的凹面型吸收面置于焦点上方时,得到均匀一致的能流密度的分布。然而目前商用的硅太阳能电池都是平面,本文将平面光伏电池板置于槽式反射聚光器焦点的下方,理论研究了平面光伏电池表面可获得的能流密度的分布。研究发现:平面光伏电池板上两侧能流密度的分布为中间高,边缘低,

收稿日期: 2015-01-28; 收到修改稿日期: 2015-03-30; 网络出版日期: 2015-07-16

基金项目: 地区科学基金项目(11464010)、河西学院青年教师科研基金(QN2014-14)

作者简介: 马保宏(1980—),女,硕士,讲师,主要从事聚光光伏利用方面的研究。E-mail: mbh125@126.com

呈指数函数减弱,且平面光伏电池板越接近抛物反射面的焦点,平均能流密度越大,但衰减越快,能流密度的分布越不均匀。这些结果对于聚光光伏系统的优化设计具有一定的参考价值。

2 理论分析

槽式抛物面聚光器由槽式抛物反射面和太阳能吸收接受面(平面光伏电池)组成。为便于分析,取其剖面,建立平面直角坐标系如图1所示。该聚光器关于中心对称,先取 x 轴正半侧进行讨论。槽式抛物反射面方程为 $x^2=2Py$,焦点为 $F(0,P/2)$,半宽为 a 。平面光伏电池半宽为 d ,位于焦点下方 O' 点处, O' 点坐标为 $(0, b)$ 。抛物反射面正对太阳时,入射于抛物反射面边缘 H 点的光线反射于平面光伏电池上 K 点,即平面光伏电池半宽 d 应为 $O'K$ 。设光线1入射于抛物面上 B 点, B 点坐标为 (x, y) ,反射于平面光伏电池上 M 点, M 点横坐标为 X ,则

$$\frac{OM}{AB} = \frac{\frac{p}{2} - b}{\frac{p}{2} - \frac{x^2}{2p}}, \quad (1)$$

K 点横坐标是

$$X_2 = \frac{p^2 - 2pb}{p^2 - a^2} \cdot a, \quad (2)$$

(2)式给出抛物槽半宽与平面光伏电池半宽之间的关系。

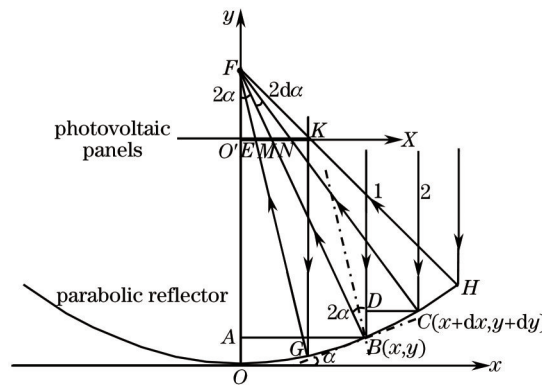


图1 聚光器的光路分析图

Fig.1 Optical path of concentrator

入射于抛物反射面上 C 点的光线被抛物面反射于平面光伏电池板上的 N 点(见图1), C 点横坐标为 $x + dx$,入射光的能流密度为 ρ_1 , M 点的能流密度为 ρ_2 ,现假设反射面无吸收和透射,根据能量守恒可得 $\rho_2 \cdot MN = \rho_1 \cdot DC$ 。

根据反射定律 $\angle O'FM = 2\alpha$, $\angle O'FN = 2\alpha + 2d\alpha$ 。则

$$MN = O'Fd \tan(2\alpha), \quad (3)$$

$$\rho_2 = \frac{\rho_1 \left[\frac{3}{2} \frac{1 - \tan^2 \alpha}{1 + \tan^2 \alpha} - \frac{1}{2} + \tan^2 \alpha \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \frac{1 - \tan^2 \alpha}{1 + \tan^2 \alpha} \right) \right]}{2EFy''}, \quad (4)$$

而 $y' = \frac{x}{p}$, $y'' = \frac{1}{p}$, $EF = \frac{p}{2} - b$,于是

$$\rho_2 = \frac{\rho_1 (p^2 - x^2)^2}{(p^2 + x^2)(p - 2b)p}, \quad (5)$$

(5)式给出 M 点的能量密度随 B 点坐标的变化关系。

M 点的能流密度随 M 点坐标的变化关系为

$$\rho_2 = \frac{\rho_1 [(p^2 - 2pb)^3 + 2(p^2 - 2pb)p^2 X^2 - (p^2 - 2pb)^2 \sqrt{(p^2 - 2pb)^2 + 4p^2 X^2}]}{X^2 [4X^2 p^2 + (p^2 - 2pb)^2 - (p^2 - 2pb) \sqrt{(p^2 - 2pb)^2 + 4p^2 X^2}]} \quad (6)$$

此外,平面光伏电池在抛物面上投下阴影,这部分阴影面积(OG)不能聚光,对应于平面光伏电池板上 $O'E$ 部分不受光。 E 点横坐标为

$$X_1 = \frac{a \cdot (p^2 - 2pb)^2 \cdot (p^2 - a^2)}{p^2(p^2 - a^2)^2 - a^2(p^2 - 2pb)^2} \quad (7)$$

3 结果讨论

3.1 平面光伏电池板和抛物反射面的几何参数

从聚光器的聚光光路图可知,平面光伏电池位于抛物反射面的上方与抛物反射面的焦点的下方,即 $\frac{1}{2P}a^2 < b < \frac{P}{2}$ 。这说明抛物反射面的半宽和焦距及平面光伏电池的位置须满足这一关系式。在此前提下,抛物反射面半宽、焦距及平面光伏电池的位置、半宽之间的关系由(2)式给出。

当抛物反射面的焦距和半宽取定时,平面光伏电池板的位置越接近焦点,即 b 越大,其半宽越小,二者呈线性关系,斜率是 $X_2 = -\frac{2pa}{p^2 - a^2}$ 。

当给定抛物反射面的焦距和平面光伏电池板的位置时,抛物反射面的半宽与平面光伏电池的半宽之间的关系如图2所示,图中曲线1、2、3、4对应平面光伏电池板的位置 b 分别是1.4、1.3、1.2、1.0 m。由图可知,抛物反射面的半宽越大,平面光伏电池的半宽就越大。

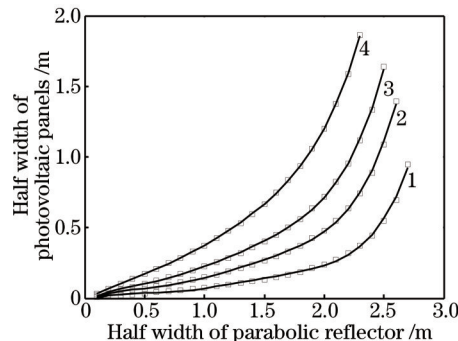


图2 抛物反射面的焦距和平面光伏电池板的位置给定时,抛物反射面半宽与平面光伏电池半宽之间的关系

Fig.2 Relationship of half width between parabolic reflector and photovoltaic panels when focal length of parabolic reflector and position of photovoltaic panels are given

3.2 平面光伏电池表面可获得的能流密度

取入射光能流密度 $\rho_1 = 1 \text{ W/m}^2$, 抛物反射面焦距 $P=3 \text{ m}$, 半宽 a 是 2.80 m , 平面光伏电池的位置 b 是 1.40 m , 半宽是 1.45 m , 作出平面光伏电池板上能流密度的变化曲线如图3所示。由图3可知,平面光伏电池板上能流密度的分布呈三个区域:能流密度为0的 $O'E$ 区域、能流密度大于 1 W/m^2 的 EJ 区域和能流密度小于 1 W/m^2 的 JK 区域。其中 $O'E$ 区域的半宽为 0.13 m ; EJ 区域的宽度仅为 0.32 m , 但光通量占总入射量的71%, 平均能流密度是 2.98 W/m^2 ; JK 区域的宽度为 1.00 m , 光通量仅占总入射量的29%, 平均能流密度仅为

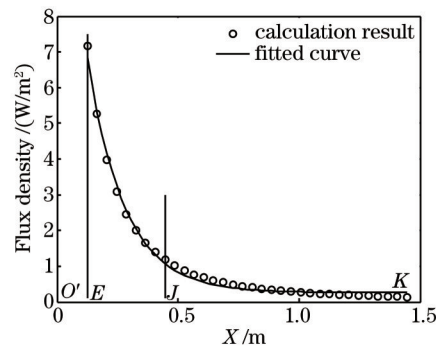


图3 平面光伏电池上能流密度的分布曲线

Fig.3 Flux density distribution curve of photovoltaic panels

0.39 W/m²。此外, EK 区域的能流密度随着 x 增加而迅速减小。 E 点, 能流密度达到最大值 6.83 W/m², K 点, 能流密度达到最小值 0.26 W/m²。对 EK 区域的能流密度进行曲线拟合(见图3中实线), 发现该曲线满足 $0.26 + 14.91 \exp(-6.52x)$ 函数关系。由上述讨论易见, 平面光伏电池对称中心的能流密度为零, 在其两侧能流密度分布为中间高, 边缘低, 呈指数函数减弱。并且在电池边缘较大区域内, 平面光伏电池上的能流密度低于入射光能流密度。

对聚光光伏系统而言, 需要知道平面光伏电池板上能流密度为0的 $O'E$ 区域的宽度; 平面光伏电池板上能流密度大于入射光能流密度, 即电池半宽要小于 $O'J$ 区域宽度, 对应抛物反射面的半宽也不宜太大; EJ 区域能流密度的分布尽量均匀。为此, 考察了抛物反射面半宽, 电池的位置对 $O'E$ 、 $O'J$ 的宽度及 EJ 区域内能流密度的分布等的影响。

首先考察了抛物反射面半宽和平面光伏电池的位置对电池板对称中心 $O'E$ 区域宽度的影响, 如图4所示, 图中曲线1、2、3、4对应平面光伏电池板的位置 b 分别是 1.4、1.3、1.2、1.0 m。可知, 抛物反射面半宽越大, 平面光伏电池中心不受光区域 $O'E$ 宽度越大; 抛物反射面半宽相同时, 平面光伏电池越靠近焦点, b 越大, 平面光伏电池中心不受光区域 $O'E$ 宽度越小。

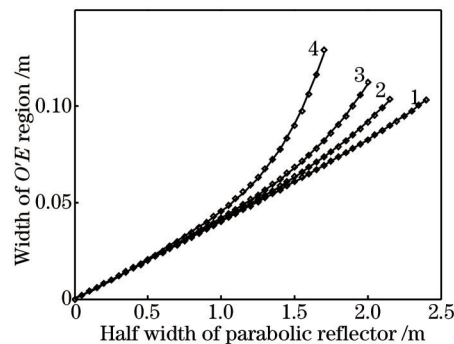


图4 抛物反射面半宽和平面光伏电池的位置与电池板 $O'E$ 区域宽度的关系

Fig.4 Relationship between $O'E$ region width of photovoltaic panels and half width of parabolic reflector as well as position of photovoltaic panels

$O'J$ 区域的宽度与抛物反射面的半宽无关, 仅由平面光伏电池板的位置决定。表1给出平面光伏电池的位置与 $O'J$ 区域的宽度之间的对应关系以及平面光伏电池板的半宽取 $O'J$ 时抛物反射面的对应半宽。由于聚光光伏系统的能流密度须大于入射光, 因此在实际应用时可由平面光伏电池板的位置确定 $O'J$ 区域的宽度, 然后选择合适的抛物反射面的半宽使平面光伏电池板的半宽为 $O'J$ 的宽度, 以去掉能流密度小于入射光的区域。

表1 平面光伏电池的位置与 $O'J$ 区域的宽度之间的对应关系

Table1 Relationship between position of photovoltaic battery with width of $O'J$ region

Parameter	Value						
Position of photovoltaic panels /m	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
Width of $O'E$ region /m	0.90	0.89	0.87	0.82	0.75	0.64	0.48
Half width of parabolic reflector /m	1.47	1.59	1.74	1.87	2.03	2.21	2.44

虽然抛物反射面半宽对 $O'J$ 区域的宽度没有影响, 但是当抛物反射面半宽减小时, 平面光伏电池中心 $O'E$ 区域的宽度减小, 因此 EJ 区域的宽度增加。其关系由图5给出, 图中两条曲线对应的抛物反射面的焦距都是 3 m, 平面光伏电池板的位置 b 都是 1.4 m, 曲线1对应的抛物反射面及平面光伏电池板的半宽分别是 2.80 m 和 1.45 m, 曲线2对应抛物反射面及平面光伏电池板的半宽分别是 2.44 m 和 0.48 m。图5表明, 两条曲线 $O'J$ 段的宽度都是 0.48 m, 但是当抛物反射面的半宽由 2.80 m 减小至 2.43 m 时, 平面光伏电池板中心 $O'E$ 区域的宽度由 0.12 m 减小为 0.10 m, 由此 EJ 区域的宽度由 0.36 m 增加至 0.38 m, 且增加的这一区域能流密度较高。此外, 与曲线1相比, 曲线2中没有能流密度低于 1 W/m²的 JK 段。因此, 与曲线1相比, 曲线2中平面光伏电池板上的 EK 区域平均能流密度增加至 4.66 W/m²。

图6给出了平面光伏电池的位置对 EJ 段内能流密度分布的影响(取焦距 $P=3$ m, 入射光能流密度 $\rho_1 = 1$ W/m²)。图中曲线1、2、3、4对应抛物反射面的半宽分别是 2.43、2.20、2.04、1.72 m, 平面光伏电池的位

置 b 分别是 1.4、1.3、1.2、1.0 m, 平面光伏电池的半宽分别是 0.48 m, 0.64 m, 0.76 m, 0.82 m。图 6 表明, AB 段内能流密度均发生衰减。对曲线 1,2,3,4 进行拟合发现它们都满足指数函数关系, 拟合函数分别是 $0.62 + 17.60 \exp(-7.87x)$ 、 $0.32 + 9.12 \exp(-4.08x)$ 、 $0.20 + 6.1 \exp(-2.75x)$ 、 $-0.08 + 3.85 \exp(-1.48x)$ 。通过计算还发现这 4 条曲线对应的平面光伏电池板上的平均能流密度分别是 4.66、2.92、2.20、1.62 W/m^2 。这说明, b 越大, 即平面光伏电池越靠近焦点, 平面光伏电池板上 $O'J$ 区域的宽度越小, 平均能流密度越大, 但能流密度衰减越快, 能流密度的分布越不均匀。由此可见, 若将平面光伏电池板放在抛物反射面的焦点处, 可以以最小的电池板获得最大的平均能流密度, 但此时光的能流密度的分布最不均匀, 这将严重影响平面光伏电池的输出效率。对于平面光伏电池的输出效率与能流密度分布的均匀度、聚光系统的几何参数之间的优化问题有待更进一步的深入研究。

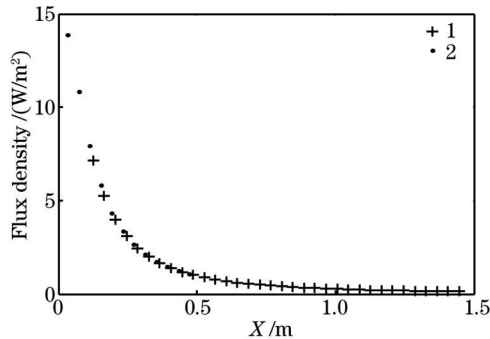


图5 抛物反射面的半宽对能流密度分布的影响

Fig.5 Influence of parabolic reflector's half width on flux density distribution

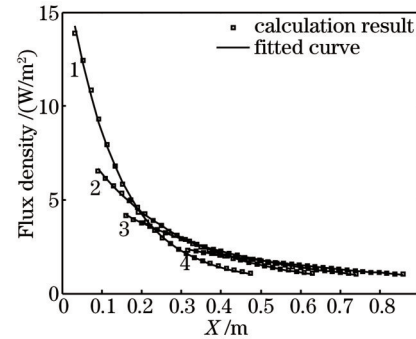
图6 平面光伏电池的位置对 EJ 段内能流密度的影响Fig.6 Influence of position of photovoltaic panels on flux density distribution of EJ area

图 7 是计算结果与许成木等的测量结果^[14]的比较。图中 4 条曲线对应抛物反射面的半宽是 78.25 cm, 焦距是 106 cm, 测量曲线对应吸收面位于焦点处, 曲线 1, 2, 3 对应平面光伏电池板分别位于焦点下方 0.01、0.02、0.03 cm 处。由图易见, 三条曲线在 0~0.3 cm 的区间内, 计算结果与测量结果相差很大。分析认为, 造成这种差别的主要原因是: 实验测量时抛物反射面的焦点不是一个几何点, 而是一微小区域, 且朗伯靶有一定厚度。在 0.3~1.7 cm 区间内, 测量结果和三条曲线对应计算结果基本吻合。其中, 平面光伏电池位于焦点下方 0.01 cm 时的计算结果略低于测量值, 平面光伏电池位于焦点下方 0.03 cm 时的计算结果略高于测量值, 而平面光伏电池板分别位于焦点下方 0.02 cm 时, 计算结果与测量结果吻合最好, 由此证明计算结果的正确性。

此外, 考虑到实际材料的反射率很难达到 100%, 取抛物反射面的半宽是 78.25 cm、焦距是 106 cm、平面光伏电池板位于焦点下方 0.02 cm、反射率为 80% 和 90% 进行计算, 并与反射率为 100% 的极限情况比较 (如图 8 所示) 发现, 三种反射率对应能流密度的分布与测量结果在 0.3~1.7 cm 区间内均能较好吻合, 只是反射率较高时, 平面光伏电池板上的能流密度也略高。

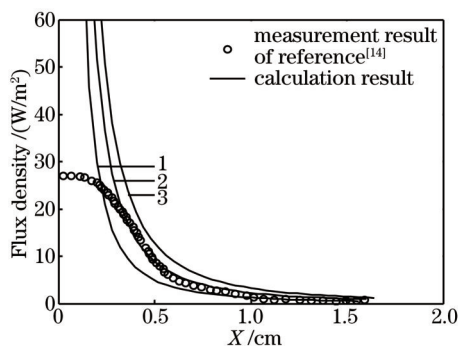


图7 计算结果与测量结果的比较

Fig.7 Comparison of the measurement result with calculation result

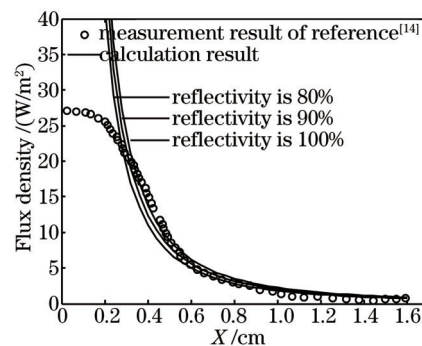


图8 反射率对能流密度的影响

Fig.8 Influence of reflectivity on flux density

4 结 论

分析了槽式抛物面聚光器平面光伏电池板和抛物反射面的几何参数之间的关系。理论研究了平面光伏电池板上能流密度的分布,并与文献中的实测结果进行对比分析,证明了该计算结果的正确性。研究发现,平面光伏电池板上能流密度的分布呈三个区域,这三个区域由中心向两侧依次是能流密度为0的区域、能流密度大于入射光区域和小于入射光的区域。平面光伏电池板上两侧能流密度的分布为中间高,边缘低,呈指数函数减弱,且平面光伏电池板越接近抛物反射面的焦点,平均能流密度越大,但衰减越快,能流密度的分布越不均匀。对于电池板的输出效率与能流密度分布的均匀度、聚光系统的几何参数之间的优化问题有待更进一步的深入研究。

参 考 文 献

- 1 Rafael Illanes, Adolfo De Francisco, Francisco Nunez, *et al.*. Dynamic simulation and modelling of stand-alone PV systems by using state equations and numerical integration methods[J]. *Applied Energy*, 2014, 135(15): 440-449.
- 2 Peter Kovacik, Hazele Assender, Andrew A R Watt, *et al.*. Morphology control in co-evaporated bulk heterojunction solar cells[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2013, 117: 22-28.
- 3 Zhao Lijuan, Hu Linfeng. Synthesis and applications of CdSe nano-tetrapods in hybrid photovoltaic devices[J]. *Pure and Applied Chemistry*, 2012, 84(12): 2549-2558.
- 4 Liu Guodong, Ji Shulin, Xu Guoping, *et al.*. Interface engineering: boosting the energy conversion efficiencies for nanostructured solar cells[J]. *Pure and Applied Chemistry*, 2012, 84(12): 2653-2675.
- 5 Zhao Yuning, Fay Patrick, Wibowo Andre, *et al.*. Via-hole fabrication for III-V triple-junction solar cells[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 2012, 30(6): 06F401.
- 6 Zhou Xizheng, Ma Chunyuan, Wang Junqi, *et al.*. Performance analysis of fixed mirror solar concentrator mirror field [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1008001.
周希正, 马春元, 王军旗, 等. 固定式条形镜面太阳能聚光镜场性能分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1008001.
- 7 Hao Wenwen, Yu Guiying, Hu Xing. Sollar concentrating system based on planar waveguide[J]. *Laster & Optoelectronic Progress*, 2012, 49(8): 082202.
郝雯雯, 余桂英, 胡 兴. 基于平板型导光板的太阳能聚光系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(8): 082202.
- 8 Liao Tianjun, Lin Bihong, Yang Zhimin. Temperature monitoring for concentrated photovoltaic power system based on optical fiber temperature sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(5): 050602.
廖天军, 林比宏, 杨智敏. 基于光纤温度传感器监测的聚光光伏发电系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(5): 050602.
- 9 Cai Weiping, Li Ming, Ji Xu, *et al.*. Influence of concentrated illumination parameters on the output characteristics of back contact solar cell array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5), 0508001.
蔡伟平, 李 明, 季 旭, 等. 聚光能流参数对背接触电池阵列输出特性的影响[J]. *光学学报*, 2013, 33(5), 0508001.
- 10 Zhang Li, Chen Zhiming, Dong Qianmin, *et al.*. Design and analysis of ring-shaped-focus Fresnel concentrator[J]. *Laster & Optoelectronic Progress*, 2012, 49(9): 092201.
张 丽, 陈志明, 董前民, 等. 一种环面焦斑菲涅耳聚光器的设计与分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(9): 092201.
- 11 Yong Sin Kim, Sung Mo Kang, Roland Winston. Tracking control of high-concentration photovoltaic systems for minimizing power losses[J]. *Progress in Photovoltaics*, 2014, 22(9): 1001-1009.
- 12 Yuan Hsiang Zou, Tian Shiang Yang. Optical performance analysis of a HCPV solar concentrator yielding highly uniform cell irradiance[J]. *Solar Energy*, 2014, 107(9): 1-11.
- 13 F Almonacid, P J Perez-Higueras, Eduaido F Fernandez, *et al.*. Relation between the cell temperature of a HCPV module and atmospheric parameters[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2012, 105: 322-327.
- 14 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.
- 15 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.
- 16 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.