

实现均匀照度光伏聚光镜设计

荆 雷¹ 王 尧¹ 赵会富^{1,2} 许文斌¹ 刘 华¹ 卢振武¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光电技术研发中心, 吉林 长春 130033)
² 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 为满足聚光光伏系统的聚光需求, 解决传统点聚焦式聚光光伏系统中聚焦光斑不均匀、径长比过大和聚光比较小的缺点, 在不增加二次匀光器件的前提下, 设计了径长比小、聚焦光斑相对均匀、聚光比高的聚光光伏系统。根据几何光学柯勒照明原理、等光程原理和反射定律, 通过数值求解等光程方程组获得聚光镜各个面型的轮廓曲线。利用 TracePro 软件对所设计的聚光系统进行光线追迹模拟, 结果表明: 在聚光比为 725 的情况下, 聚焦光斑最大照度仅为太阳照度的 2300 倍, 是点聚焦情况下的 1/10 左右, 系统的径长比为 0.3, 接收角为 0.72°。系统设计实现了结构紧凑, 聚光性能高的设计目标, 为高倍聚光光伏系统的小型化, 简单化提供了一种有效的解决途径。

关键词 几何光学; 非成像光学; 聚光光伏系统; 柯勒照明; 均匀性

中图分类号 O435 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0208001

Design of Uniform-Irradiance Concentrator for Concentration Photovoltaics System

Jing Lei¹ Wang Yao¹ Zhao Huifu^{1,2} Xu Wenbin¹ Liu Hua¹ Lu Zhenwu¹

¹ Opto-Electronic Technology Research Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² School of Electro-Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In order to meet the concentrative requirements of concentration photovoltaics system (CPVs) and resolve the traditional point focus concentrator's problems, including non-uniform irradiance, large aspect ratio and low concentration, a novel concentrator with small aspect ratio, uniform irradiance and high concentration is presented in this paper based on the precondition that no additional secondary optical element is increased. According to the theories of Kohler illuminating, constant optical path length, and Snell's law in geometric optics, we obtain the profiles of concentrator's surface through numerical solution of the constant optical path length equations. Using the optical software TracePro, we trace and simulate the CPVs. The results show that the maximum irradiance value of focal spots on the surface of solar cell is only 2300 times of the sun for the 725 concentration ratio, which is about 1/10 of the case of point focus concentrator. The aspect ratio of system is 0.3, and the acceptant angle is 0.72°. The design realizes the objectives of compact structure and high concentrative performances, which provides an effective way for realizing the high concentration CPVs' miniaturization and simplification.

Key words geometric optics; non-imaging optics; concentration photovoltaics system; Kohler illuminating; uniformity

OCIS codes 080.4298; 080.4225

1 引 言

随着化石能源的日渐枯竭和环境污染的日趋严

重, 可再生新能源的开发利用显得迫在眉睫, 由于太阳能资源具有普遍性、丰富性和永久性等诸多优点,

收稿日期: 2013-04-15; **收到修改稿日期:** 2013-05-13

基金项目: 国家 973 计划(2010CB227101)、中国科学院三期创新项目、吉林省科技发展计划项目(20130206018GX)

作者简介: 荆 雷(1983—), 男, 助理研究员, 主要从事太阳能聚光热发电、光伏发电、LED 照明等非成像光学方面的研究。E-mail: 100jinglei100@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

自 20 世纪第一次能源危机以来,太阳能的开发利用便逐渐成为新能源开发研究的热点^[1-3]。

作为太阳能开发利用方式之一的光伏发电,考虑到现今 III-V 化合物光伏电池成本居高不下,光伏发电系统往往会增加光学聚光元件来相对地降低光伏电池成本,进而降低整个光伏系统发电成本^[4-6],称之为聚光光伏系统(CPVs)。然而,传统聚光元件无论是透射式聚光镜还是反射式聚光镜,一般都是针对点聚焦设计,光伏电池有效接收面上所得到的聚光光斑不同程度地存在照度不均匀的问题,尤其是高倍的聚光镜。相关研究表明,聚光光斑照度的不均匀会极大地降低光伏电池的光电转化效率,甚至会严重地损坏光伏电池,使整个聚光光伏系统不能正常工作^[7-8]。

为了克服上述高倍聚光光伏系统中聚光光斑不均性缺点,有效提高光伏电池的光电转化效率,本文根据柯勒照明原理和几何光学的等光程原理设计出一种结构紧凑、聚光光斑照度相对均匀的高倍聚光透镜,而且利用蒙特卡罗光线追迹方法对该聚光镜系统进行了光线追迹,对聚焦光斑的均匀性和聚光效率、接收角度进行了具体分析。分析结果表明:该柯勒式聚光镜能在 750 倍聚光条件下,实现比较均匀的聚焦光斑,聚焦光斑照度最大值仅为点聚焦情况的 1/10,能够确保光伏电池具有较高的光电转化效率,而此时,聚光系统的聚光效率高达 90% 以上,系统径长比约 0.3。

2 设计原理

该聚光透镜的设计原理主要基于几何光学的柯勒照明原理和等光程原理。柯勒照明是指中继透镜或聚光镜把光源成像在照明镜头的入射光瞳处而非被照明的物体上,由于光源的每一点都照射整个被照物体,因此,所需照明的物体得到均匀照明^[9]。如图 1 所示,把近似无穷远的太阳看作光源,光伏电池看作所需均匀照明的照明面。首先,聚光镜反射面 1 把近似平行的太阳光线成像在反射面 2 上,然后,反射面 2 又把反射面 1 成像在光伏电池上。很显然,太阳光线在整个光伏电池表面进行了多次叠加,光伏电池能够得到均匀性较好的照明。叠加次数取决于反射面 1 和反射面 2 所分的子段数,例如图 1 中分为三段,光伏电池表面相当于有三个子孔径的太阳光线分别进行叠加,从这点上讲,该聚光镜更接近于复眼透镜。

另一个重要原理就是等光程原理,它是几何光

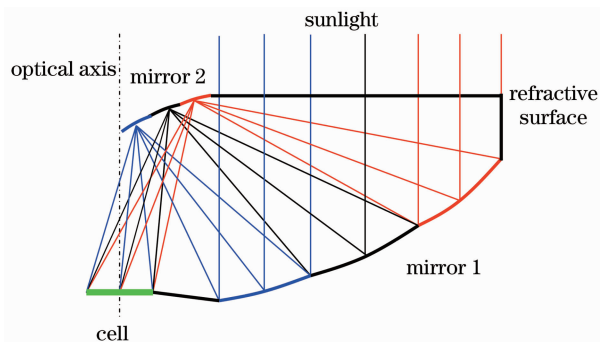


图 1 聚光镜原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of concentrator

学基本原理之一,描述的是入射波面与出射波面对应点之间的光程均为定值^[10],即若光线通过的连续变化的非均匀介质,光线实际经过的路径为一条空间曲线,考虑光线由点 A 到点 B,则光程可以表示为积分形式:

$$s = \int_{A \rightarrow B(L)} n dl, \quad (1)$$

式中 n 为介质的折射率, L 为光线在介质中走过的实际路程,光程 s 为定值。考虑到光线通过的介质为均匀介质,因此,实际光线是由许多段折线组成,其总光程变为多段折线与相应介质折射率乘积的求和:

$$s = \sum_{i=1}^m n_i l_i, \quad (2)$$

式中 n_i 和 l_i 分别为介质的折射率和光路长度。

尽管等光程原理看似十分简单,然而其在非成像光学设计领域中的作用却是不可忽视,等光程原理的合理应用可以避免求解繁琐复杂的偏微分方程来获得面型轮廓^[11-12]。

3 聚光镜设计

如图 1 所示,该聚光光伏系统的聚光镜主要由三个光学面组成,透射面、反射面 1 和反射面 2。透射面为一简单平面,反射面 1 和反射面 2 分别为相同段数的不连续非球面。光伏电池置于聚光镜底部,可用与聚光镜折射率相近的光学胶粘接,因此,可以近似地认为光伏电池与聚光镜直接接触,忽略该介质界面处的菲涅耳损失。设计的聚光镜是旋转轴对称式结构,只考虑其 2D 情况。建立如图 2 所示坐标系,原点位于光伏电池的中心,光伏电池的左右端点分别为 R_1 、 R_2 。值得注意的是,该聚光镜的反射面 1 和反射面 2 是由相同段数的非球面组成,在这里,只描述其中一段面型的计算过程,其他段面

型的求法相同,不再赘述。以聚光镜最边缘段为例,首先,需确定反射面1最边缘段的面型函数。如图2所示,平行光束经反射面1反射会聚于焦点 Q ,若选定反射面1边缘点 P_1 和其焦点 Q ,化简等光程方程(2)式不难知道,反射面1为以 Q 为焦点的一段抛物线:

$$\begin{cases} (x - Q_x)^2 = 2p(y + y_0), \\ p = \sqrt{(P_{1x} - Q_x)^2 + (P_{1y} - Q_y)^2} - P_{1y} + Q_y, \\ y_0 = [\sqrt{(P_{1x} - Q_x)^2 + (P_{1y} - Q_y)^2} - P_{1y} - Q_y]/2, \end{cases} \quad (3)$$

式中 $[P_{1x}, P_{1y}], [Q_x, Q_y]$ 分别为 P_1, Q 点坐标值。仍需要确定该段反射面的另一端点 P_2 ,如图3所示,由光伏电池左端点 R_1 发出的光线 r_1 ,在 Q 点处经反射面2反射会至反射面1的边缘点 P_1 ,此时知道入射光线 R_1Q 和反射光线 QP_1 ,利用反射定律:

$$\theta_i = \theta'_i, \quad (4)$$

不难求出 Q 点法线 N_Q ,此时追迹由光伏电池右端点 R_2 发出的光线 r_2 ,其在 Q 点的反射光线与抛物线的交点 P_2 即为该段反射面的另一端点。

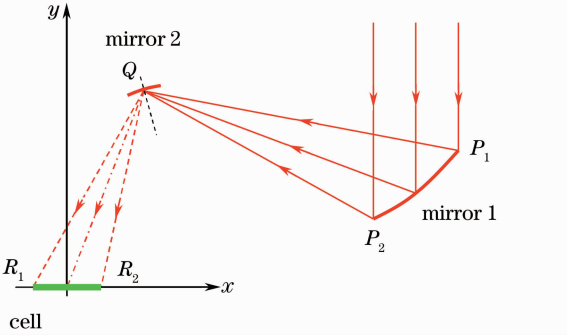
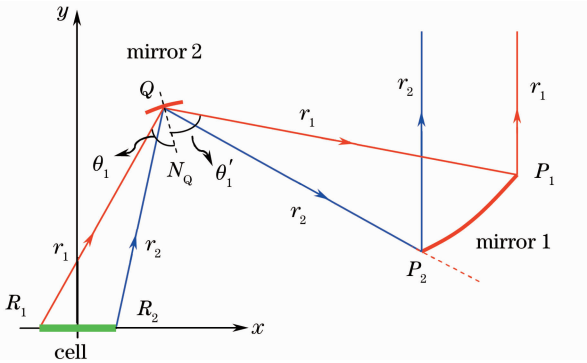


图2 反射面1

Fig. 2 Mirror 1

图3 反射面1端点 P_2 Fig. 3 Endpoint P_2 for mirror 1

接下来确定该聚光镜反射面1所对应的反射面2的最边缘曲面段面型函数。如图4所示,为使边缘光线 r_3 和 r_4 经 P_1 点反射后再经反射面2反射到

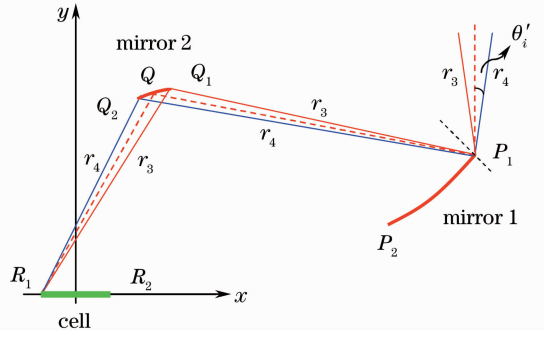


图4 反射面2

Fig. 4 Mirror 2

达光伏电池的左端点 R_1 ,根据等光程原理有:

$$\begin{aligned} s &= \sum_{i=1}^2 n_i l_i = n_1 |Q_n P_1| + n_1 |R_1 Q_n| = \\ &= n_1 \sqrt{(X - P_{1x})^2 + (Y - P_{1y})^2} + \\ &= n_1 \sqrt{(R_{1x} - X)^2 + (R_{1y} - Y)^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中 n_1 是聚光镜材料的折射率, $Q_n(X, Y)$ 为该段反射面上各点坐标,而光程定值可以由定点 P_1, Q 和 R_1 求得:

$$s = \sum_{i=1}^2 n_i l_i = n_1 |QP_1| + n_1 |R_1 Q|. \quad (6)$$

化简方程,很显然,该段反射面为以 R_1 和 P_1 为两焦点且过顶点 Q 的椭圆线。设椭圆的焦距为 C ,长短轴值分别为 A, B ,椭圆长轴与 x 轴夹角为 α ,根据椭圆的几何光学特性,可得椭圆反射镜2的参量方程:

$$C = [\sqrt{(P_{1x} - R_{1x})^2 + (P_{1y} - R_{1y})^2}]/2, \quad (7)$$

$$A = [\sqrt{(P_{1x} - Q_x)^2 + (P_{1y} - Q_y)^2} + \sqrt{(Q_x - R_{1x})^2 + (Q_y - R_{1y})^2}]/2, \quad (8)$$

$$B = \sqrt{A^2 - C^2}, \quad (9)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{P_{1y} - R_{1y}}{P_{1x} - R_{1x}}\right), \quad (10)$$

同样需要确定椭圆反射面2的两个边缘端点 Q_1, Q_2 。利用反射定律,由图3中的 r_1 可以很容易地得到 P_1 点处的法线,如图4所示,入射光线 r_3 和 r_4 在 P_1 点的入射角分别为 θ'_i

$$\theta'_i = \arcsin(\sin \theta_i / n_1), \quad (11)$$

式中 θ_i 为该聚光镜的接收角。根据边缘光线原理^[13],分别追迹入射光线 r_3 和 r_4 ,它们分别与椭圆的交点 Q_1 和 Q_2 即为该反射面的两端点。

至此,聚光镜彼此对应的反射面1、反射面2的最外段面型函数已经根据等光程原理和反射定律求出,其他段的反射面求法相同,可依次求得,直至计算到该聚光镜的旋转中心轴。最终的聚光镜3D结构,

可由求出的 2D 面型轮廓绕旋转中心轴旋转而得。

4 仿真与结果分析

根据以上设计方案,通过给定聚光镜的接收角 θ_i ,几何聚光比 C_g ,光伏电池的尺寸 r 等参数,可以设计出结构紧凑、聚光光斑均匀、效果完全满足光伏电池容忍限度的聚光透镜。下面以一具体实例验证上述设计方法的正确性。聚光镜接收角 $\theta_i = 1.0^\circ$,几何聚光比 725 倍,聚光镜材料选用便于注塑成型的树脂材料聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),折射率 $n_1 = 1.49(\lambda = 0.5461 \text{ nm})$,光伏电池半径 $r = 1 \text{ mm}$ 。

如图 5 所示,经过上述设计方法得到该聚光镜面型轮廓的数值结果[图 5(a)],并将其 2D 数据导入光学软件 TracePro 里,绕其中心对称轴旋转得到其 3D 实体模型,并模拟 2D 光线,如图 5(b)所示,可以看出,对于正入射太阳光线,模拟结果与理论设计结果符合很好,进而验证了该聚光镜 2D 设计的正确性。

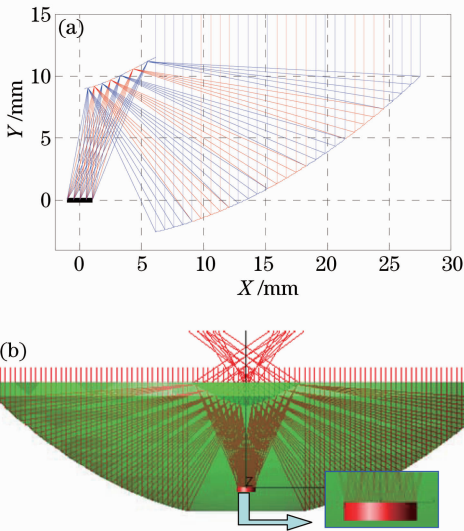


图 5 新聚光镜 2D 光线追迹图。(a)设计过程中光线追迹;(b) TracePro 中光线追迹

Fig. 5 2D ray-tracing of concentrator for novel method.

(a) Ray-tracing in design; (b) ray-tracing in TracePro

根据设计得到的聚光镜系统进行 3D 光线追迹和聚光效果分析。如图 6 所示,光源标准 AM1.5D 太阳光,其有效光谱范围非常宽,从 $0.35 \mu\text{m}$ 到 $2.5 \mu\text{m}$,而且太阳光线并非理想平行光,而是存在 0.27° 的分散半角^[14]。这里进行蒙特卡罗追迹光线条数为 2×10^6 。为了便于对比,对如图 7 所示的具有相同参数的点聚焦透镜也进行了相同参数的光线追迹模拟。从图 7 中可以看出,2D 平行太阳光线并

未理想地会聚于光伏电池中心,这主要由该传统点聚焦聚光镜的建模误差和太阳发散角引起。

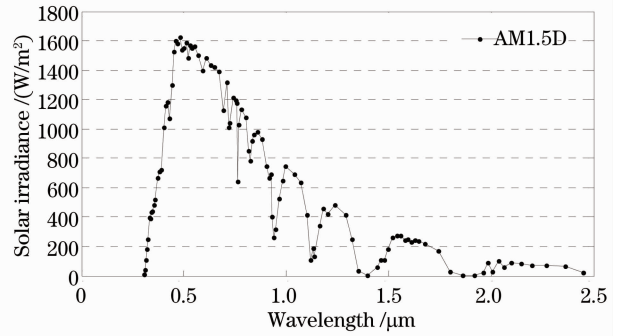


图 6 AM1.5D 太阳光辐射照度曲线

Fig. 6 Solar irradiance of AM1.5D

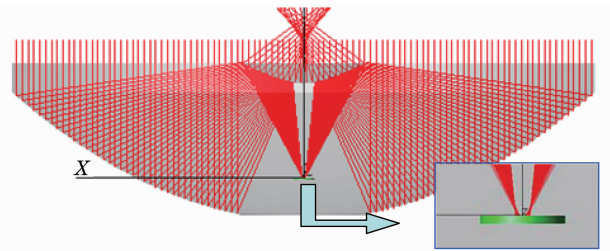


图 7 传统点聚焦聚光镜 2D 光线追迹图

Fig. 7 2D ray-tracing of concentrator for conventional method

图 8 为传统点聚焦聚光镜在不同入射角下,光伏电池表面聚焦光斑照度图,从中可以看出,点聚焦情况下,聚焦光斑的照度极大值远远高于周围照度值,而且随着入射角的增大逐渐偏离光伏电池中心位置。其最大照度大部分保持在 20000 倍太阳照度以上,对于整个光伏电池来讲,局部存在如此高的照度不均匀,由此产生的过大级联电阻会严重影响光电转化效率,甚至烧坏整个光伏电池。

图 9 为采用所提出方法设计的聚光镜在不同入射角下,光伏电池表面聚焦光斑照度图。不难看出,聚焦光斑中心处照度仍然高于边缘处照度,其主要原因是系统的旋转对称性致使中心照度的叠加次数远大于边缘照度的叠加次数。尽管如此,聚焦光斑的最大照度值发生在太阳光正入射时,其值仅为 2300 倍的太阳照度,已经降低为点聚焦情况的 1/10 左右,该值已足以保证现有 III-V 族高倍聚光光伏电池有较高光电转化效率^[8]而不至于因局部照度过大,严重降低光伏电池的光电转化效率。

如图 10 所示,该设计方法设计出聚光镜的聚光效率在正入射时最高,达到 90.11%,主要损失来自两个方面:一是太阳光束在透射面处的菲涅耳损失;二是反射面 2 的遮挡造成了另一部分光能损失。聚

光效率在入射角 0.72° 左右降为正入射的 90% ，因此，可以把该值定义为聚光光伏系统的实际接收角^[5]。值得注意的是，该值与理论设计的 1° 接收角存在一定的差距，这主要是因为在实际模拟时，考虑

了太阳的 0.27° 发散半角和在不同入射角下，不规则斜光线的存在会使在接收角处的理想聚光效率截止线变平滑。

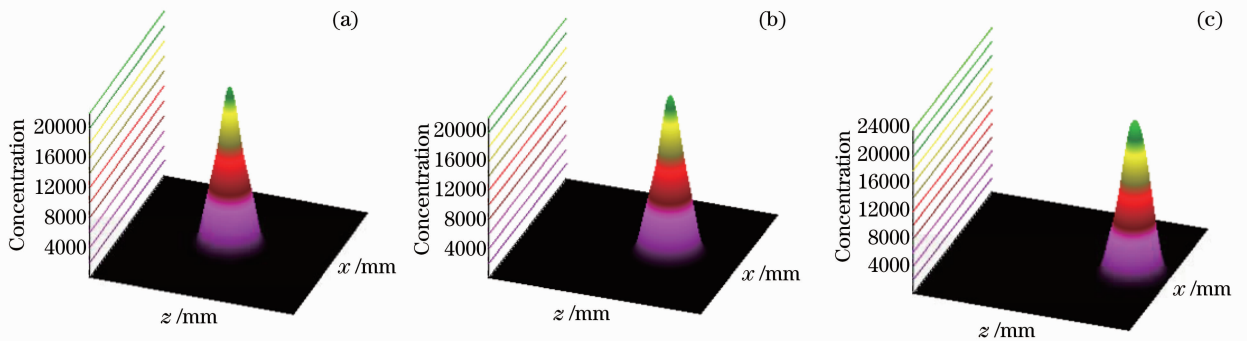


图8 传统聚光镜聚焦光斑照度图。(a) 0° 入射；(b) 0.5° 入射；(c) 1° 入射

Fig. 8 Irradiance map of focal spot for conventional concentrator at incident angle of (a) 0° , (b) 0.5° , (c) 1°

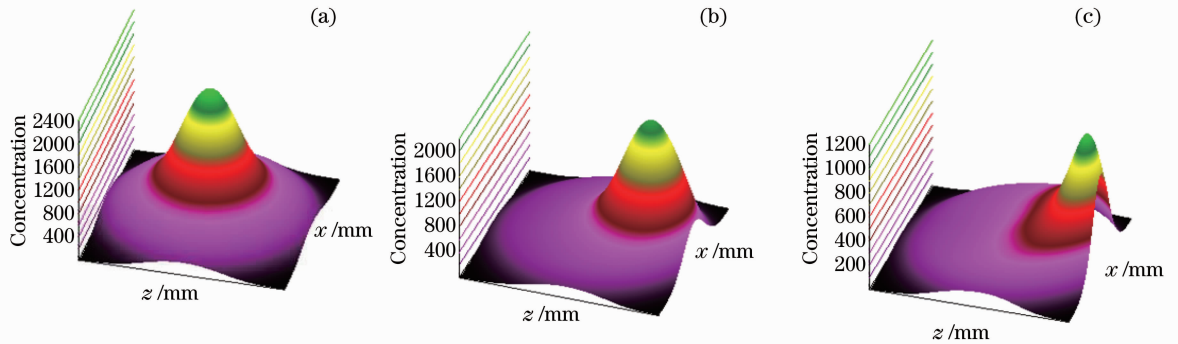


图9 新聚光镜聚焦光斑照度图。(a) 0° 入射；(b) 0.5° 入射；(c) 1° 入射

Fig. 9 Irradiance map of focal spot for novel concentrator at incident angle of (a) 0° , (b) 0.5° , (c) 1°

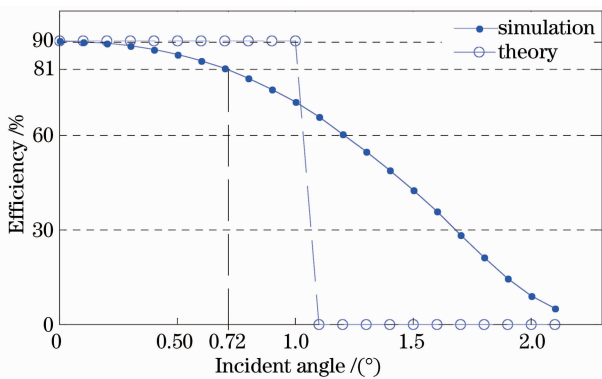


图10 聚光效率曲线图

Fig. 10 Efficiency of concentration

5 结 论

为了提高聚光光伏系统的聚焦光斑均匀性，避免光伏电池因局部照度过强而降低光电转化效率，甚至损坏电池，根据柯勒照明原理和等光程原理，利

用简单的反射定律，设计了一聚焦光斑照度相对均匀、结构紧凑的高倍太阳能聚光镜。通过光线追迹模拟分析，该聚光镜聚焦光斑的照度最大值仅为传统点聚焦式聚光镜的 $1/10$ 的左右，且聚光镜的聚光效率高达 90% ，径长比为 0.3 。该聚光镜的设计方法和其相关理论分析为太阳能聚光光伏技术的利用与普及提供了理论依据。

参 考 文 献

- 1 A L Luque, V M Andreev. Concentrator Photovoltaics [M]. Berlin: Springer Verlag, 2007.
- 2 Liu Hua, Lu Zhenwu. Lateral splittable non-imaging concentrators with large acceptable angles [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(12): 2881—2886.
- 3 刘 华, 卢振武. 可横向分光的大接受角非成像式聚光系统[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12): 2881—2886.
- 4 Hu Xingjun. Accelerating development of global photoelectric industry [J]. Huatongjishu, 2007, 3-4(z2): 36—39.
- 5 胡兴军. 全球光伏产业的加速发展[J]. 华通技术, 2007, 3-4(z2): 36—39.
- 4 J L Alvarez, V Diaz, J Alonso, et al.. Optics design key points

- for high gain photovoltaic solar energy concentrators [C]. SPIE, 2005, 5962: 298–306.
- 5 W T Welford, R Winston. The Optics of Nonimaging Concentrators: Light and Solar Energy [M]. Waltham: Academic Press, 1978. 132–138.
- 6 Wang Wenbo, Li Ming, Ji Xu, *et al.*. Investigation of the output characteristics of GaAs cell based on Fresnel concentrating system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0716003.
王文博, 李明, 季旭, 等. 菲涅耳聚光系统下砷化镓电池输出特性研究[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0716003.
- 7 D G Jenkins. High-uniformity solar concentrators for photovoltaic systems [C]. SPIE, 2002, 4446: 80–87.
- 8 V K Narasimhan, C E Valdivia, N Yastrebova, *et al.*. Performance analysis of III-V triple-junction concentrator solar cells under varying temperature and intensity [C]. IEEE, 2008, 978, 91–92.
- 9 M Born, E Wolf. Principles of Optics [M]. London: Pergamon Press, 1975.
- 10 M Bass, E W V Stryland, D R Williams, *et al.*. Handbook of Optics (2n ed.) [M]. New York: McGraw-Hill Professional, 1995, 1.12–1.14.
- 11 Ding Yi, Gu Peifu. Freeform reflector for uniform illumination [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(3): 540–544.
丁毅, 顾培夫. 实现均匀照明的自由曲面反射器[J]. 光学学报, 2007, 27(3): 540–544.
- 12 Z R Zheng, X Hao, X Liu. Freeform surface lens for LED uniformity illumination [J]. Appl Opt, 2009, 48(35): 6627–6634.
- 13 H Rise, A Rabl. Edge-ray principle of nonimaging optics [J]. J Opt Soc Am A, 1994, 11(10): 2627–2632.
- 14 J A Duffie, W A Beckman. Solar Engineering of Thermal Processes[M]. New York: Wiley Interscience, 1980, 288.

栏目编辑: 韩峰