DOI:10.1347/j.cnki.acta.snus.2015.01.010

一种新型聚光光伏组件的光学设计*

陈镇光[1,2]，邢 涛[1,2]，王学孟[2]，沈 辉[1,2]
（1. 中山大学太阳能系统研究所，广东 广州 519000；
2. 顺德中山大学太阳能研究院，广东 佛山 528300）

摘 要： 传统的聚光光伏组件（CPV）采用菲涅耳透镜聚光或者大型反射式聚光。这些组件的尺寸较大，不利于聚光光伏组件的小型化与模块化。该文主要设计制作了一种新型平板反射式聚光器，并应用到聚光光伏系统中完成相关测试，上述工作均在顺德中山大学太阳能研究院完成。该文提出了一种新型的平板反射式聚光器的设计方法。文章首先介绍聚光器的建模方法，然后进行软件模拟与分析，最后制作聚光器并组装成聚光光伏组件（CPV）进行相关测试，组件的结构设计也将详细介绍。测试结果表明通过该光学设计方法能够灵活，有效的设计适应不同应用要求的反射式聚光器。

关键词： 聚光光伏；非成像光学；高倍聚光；低倍聚光；反射聚光
中图分类号： N39 **文献标志码：** A **文章编号：** 0529-6579（2015）01-0047-05

Optical Design of a New Concentrator

CHEN Zhenguang[1,2], *XING Tao*[1,2], *WANG Xuemeng*[2], *SHEN Hui*[1,2]
(1. Institute for Solar Energy Systems, Sun Yat-sen University, Guangzhou 519000, China;
2. Shunde SYSU Institute for Solar Energy, Foshan 528300, China)

Abstract: Concentrated solar panel can effectively save semiconductor consumption of solar cells because of its high photoelectric conversion efficiency. However, traditional concentrated optical design is inflexible so that the overall dimensions of such panels are very large, coming with high installation and maintenance cost. Flat plate concentrated solar module using proportionate light compression, with small thickness, is flexible to design and fabricate according to sunshine condition. An optical design principle of flat plate solar module is proposed, and software simulation will show the optical performance of the concentrators.

Key words: concentrated photovoltaic; non-image optics; high-concentrated solar system; low-concentrated solar system; reflective concentrated solar systems

目前，太阳能光伏发电技术面临的主要问题是单位发电成本过高，传统的光伏发电系统消耗的半导体材料约占整个系统的生产成本的50%[1]。聚光光伏技术能够有效的降低单位电能的半导体消耗量，因而是降低光伏发电成本最有效、最快捷的途径。近年来，随着多节电池制造技术的成熟，例如美国Solar Junction在2012年10月实现III-V族聚光电池效率44%的世界纪录（947倍聚光）[2]、2013年4月美国Amonix公司实现了34.9%的聚光组件世界最高效率[3]，高倍聚光光伏系统的大规模发展成为可能。在自然资源日益枯竭的今天，节省半导体材料是太阳能光伏领域可持续发展的途径之一。

聚光光伏技术以聚光倍数可细分为低、中、高

* **收稿日期：** 2014-01-10
基金项目： 国家高技术研究发展计划（863计划）资助项目（2012AA050302）
作者简介： 陈镇光（1988年生），男；**研究方向：** 聚光光伏组件及系统研究；E-mail：czg_zh@163.com

倍聚光光伏技术[4]。从聚光形式的几何特点可以分为线聚光和面聚光。低倍线性聚光技术主要应用在晶硅电池的聚光，研究表明LGBC晶体硅电池较适合做中低倍聚光光伏系统接收器[5]。高倍聚光领域（大于100倍聚光）主要采用III-V族多结电池。

聚光器的设计方法分为非成像设计方法和成像设计方法[6]。成像设计方法主要考虑色差对聚光性能的影响，其在高倍数聚光器设计时往往带来高宽比大，光照均匀性差等问题[7]。非成像设计方法能够带来比较好的均匀性及较低的高宽比[8]。

本文提出一种新型反射式聚光器的非成像设计方法，并分别设计了一种具有较低高宽比的平板式低倍聚光器和高倍聚光器。该设计方法的主要特点在于采用了等比例光压缩原理。光学仿真软件TRACEPRO模拟了聚光器的设计效果并给后续设计提供优化指导。最后分别制作了一个低倍硅电池聚光光伏组件和一个高倍III-V族电池聚光光伏组件并完成相关测试。

1 聚光器设计

1.1 设计要求和设计问题分析

传统的高倍聚光组件，其聚光接收器通常位于组件的底部，形式单一[9]。该种方式安装的组件往往高宽比较大，因而组件较厚，对跟踪支架承受强度、防风防水性能要求高，不便于组件的运输、安装、调试，进而增加系统成本（图1）[10]。另外，大面积聚光元件在光照受到部分遮挡时功率下降明显[11-12]。

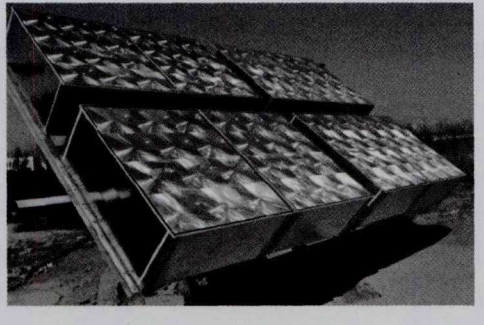


图1 蓝天太阳能高倍聚光组件

Fig. 1 Lantian HCPV modules

传统的中低倍聚光组件，其系统模块较大，运输安装成本高昂，调试繁琐，对场地的要求高，不利于大规模推广（图2）[13]。



图2 大规模线聚光系统

Fig. 2 Large-scale line-concentrated system

综合高、低倍聚光组件遇到的问题，本文提出一种小型轻薄，模块化的反射式聚光组件聚光器设计方法。本设计方法所设计的聚光组件的特点在于，其聚光接收器位于聚光组件的侧面，聚光组件结构紧凑，具有较小的高宽比。

1.2 设计过程

1.2.1 线聚光设计过程 线性聚光器的详细设计流程如图3所示，设计模型如图4所示，其中直射太阳光与Y轴平行入射。

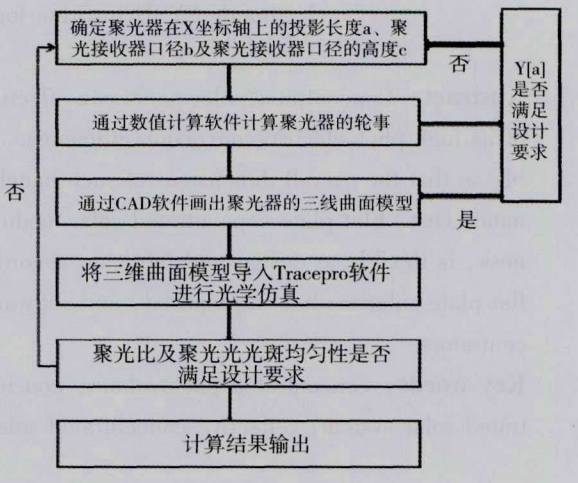


图3 设计流程图

Fig. 3 Design procedure

1）根据聚光器的尺寸及聚光比的设计要求，分别确定聚光器在X坐标轴上的投影长度a、聚光接收器的口径b及该口径的下边沿的高度c（即口径的下边沿到X坐标轴的距离）的数值，其中，几何聚光比$c = \frac{a}{b}$，通常b为确定值，根据c推出a的数值，并后续模拟优化中得到c的最佳值；

$$x = x_0$$

$$(0, c + b(1 - \frac{a}{b}x_0))$$

2）满足 $x = x_0$ 在处入射的太阳直射光被反射到 $(0, c + b(1 - \frac{a}{b}x_0))$ 上的条件，计算反射面上各点的笛卡尔坐标。

3）通过第 2）步得到的边界坐标点，判断聚光器的几何尺寸，高宽比等指标是否满足设计要求，如不满足要求，如不满足要求修改相应参数重新设计优化。

4）运用第 2）步得到的坐标点在 CAD 软件中建立样条曲线。

5）样条曲线沿着 Z 轴拉伸可以做成线性聚光器。

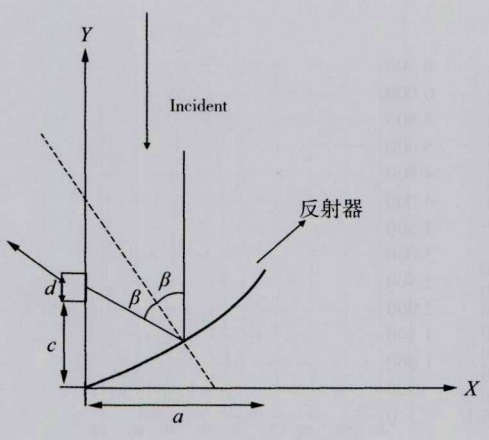


图 4　聚光器光路图

Fig. 4　Light path of concentrator

1.2.2　*面聚光设计过程*　等比例面聚光的设计要求把 *XZ* 平面的光等比例的反射到在 *YZ* 平面的聚光接收器上。因而其设计方法建立在分别对 *X*、*Z* 轴的光进行等比例压缩之上。

1）对 *Z* 轴运用等比例压缩原理，把 *Z* 轴上的光等比例压缩。其压缩原理与 2）相同。

2）*X* 轴，*Z* 轴都进行过等比例压缩后得到的曲线能够组合成曲面。

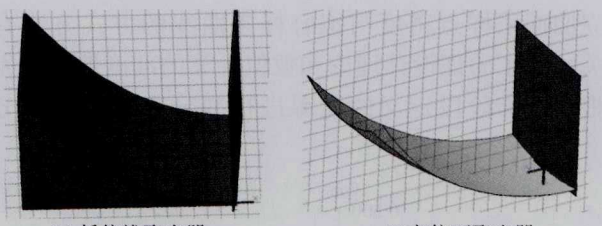
3）判断曲面所形成的反射式聚光器的几何尺寸，高宽比等指标是否满足要求，如不满足要求修改相应参数重新设计优化。

2　设计结果分析和模拟结果分析

2.1　设计结果分析

本文分别设计了一个低倍线聚光器和一个高倍面聚光器，其中低倍线聚光器设计目的是为 25 mm * 150 mm 的晶体硅太阳电池提供 4.7 ~ 5 倍的聚光，聚光器的尺寸为 150 mm * 150 * 90 mm（长宽高）；高倍面聚光器是为 5.5 mm * 5.5 mm 的 III-V 族多结电池提供 300 倍的聚光，聚光器的尺寸为 150 mm * 80 mm * 85 mm（长宽高）。

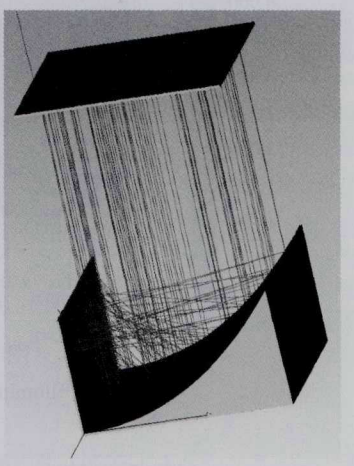
根据设计过程编写的数值计算程序，分别计算线聚光器和面聚光器反射镜轮廓上的各点的坐标，绘出聚光器的二维模型，再通过组合拉伸形成三维模型，如图 5、6 所示。



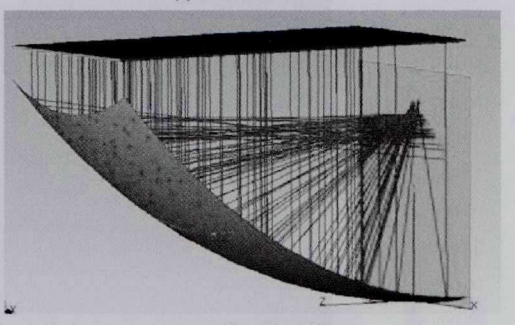
(a) 低倍线聚光器　　(b)高倍面聚光器

图 5　低倍线聚光器和高倍面聚光器

Fig. 5　Low line-concentrator and high surface-concentrator



(a) 低倍线聚光器



(b) 高倍面聚光器

图 6　低倍线聚光器和高倍面聚光器的模拟分析模型

Fig. 6　Simulation model of low line-concentrator and high surface-concentrator

2.2 模拟结果分析

以 Tracepro 软件为平台模拟分析聚光器的光学性能。将光源设置成面光源，光线垂直面源出射，光源发出的光线的波长范围设为 300 ~ 1800 nm，光源的照度为 1000 反射材料采用镀铝镜面，镜面反射率为 0.8。

由于聚光器的设计过程基于光等比例压缩原理进行的，一般情况下，最后生成的聚光器三维模型并不严格符合等比例原理，这将导致三维模型的光学效率存在一定程度的下降。导致下降的因素与建立曲面采样点密度与拟合样条曲线的方式方法有关。为了验证设计理论和数值计算的准确性，首先根据设计阶段定义的光源进行部分光线的模拟分析，如图 6 所示，所有光线都经过反射面的反射，并投射到设计之初所设定的聚光接收器表面。上述结果表面，聚光器的设计过程、数值计算程序和计算结果都是正确的。

进行大量的光线追踪模拟分析，接收面的照度分布图如图 7、8 所示。图 7 表明接收面的光斑宽度为 30 mm，最大照度为 6 600 Wm^2，最低照度为 5 300 W/m^2，平均值为 5 600 W/m^2，光学效率为 85.2%；图 8 表面接收面的光斑大小为 5.5 mm * 5.5 mm，最大照度为 203 000，最低照度为 120 000，平均值为 160 000，光学效率为 79.9%。综合上述两种聚光器的模拟结果及图示，线聚光器的聚光光斑均匀性良好，初步达到预定效果；面聚光器的光

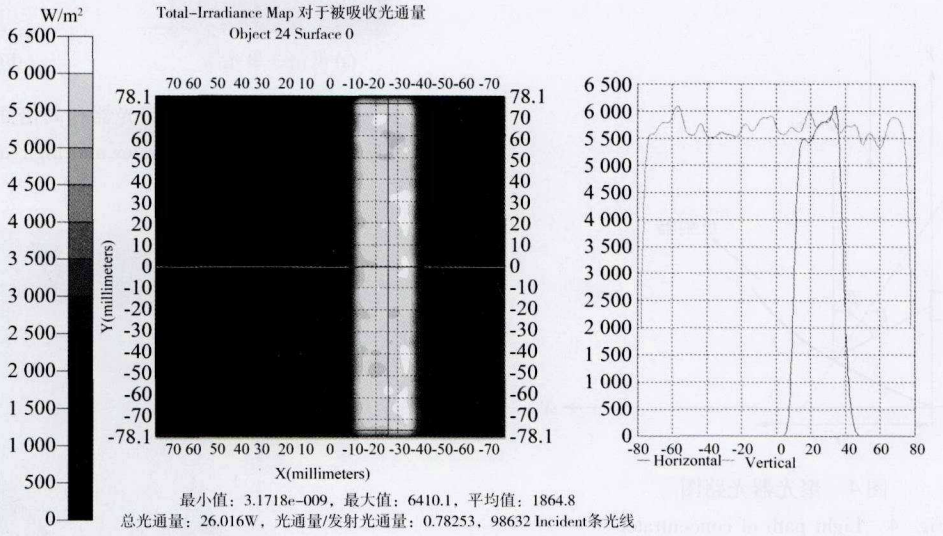


图 7 线聚光器照度接收面照度模拟

Fi. 7 Illumination simulation of receiver of line-concentrator

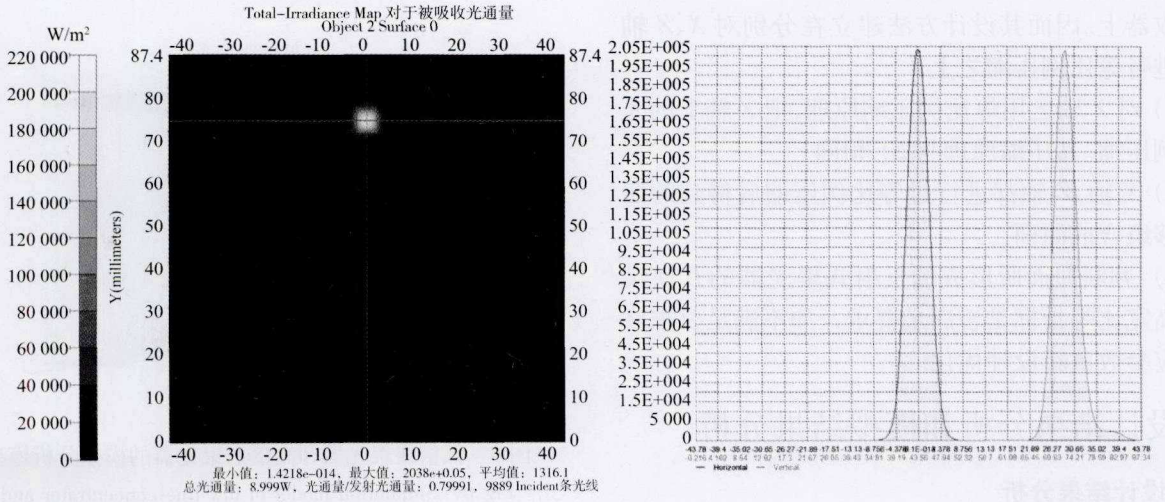


图 8 面聚光器接收面照度模拟

Fig. 8 Illumination simulation of receiver of surface-concentrator

斑形状在底部出现偏移，主要原因在于 CAD 建模过程中的样本采集点的数量不够，导致聚光器特定区域的曲面出现误差，只需加大样本采集点密度，便能得出较好的光斑形状，为了增加光斑照度的均匀性，可以增加棱镜平衡光斑的照度和增大聚光器的集光角。

3 总　结

1）本文主要阐述了一种基于非成像方法的等比例光压缩设计原理。作为验证该方法的有效性，本文分别设计了一个低倍线聚光器和一个高倍面聚光器。该设计原理的优点在于，其设计方法的灵活性能够满足聚光器轻量化的设计要求。

2）本文设计的低倍线聚光器汇聚光线后在接收面上的光斑面积与设计中太阳电池的有效面积一致；光学效率在使用镀铝反射面的情况下高于 85%。

3）本文设计的高倍面聚光器汇聚光线后在接收面上的光斑面积比设计中太阳电池的有效面积稍大，主要原因在于 CAD 的建模精度不够。对于高倍聚光器，可以增加投射棱镜以增加集光角及光斑均匀性。

4）该设计方法所设计的聚光光伏组件，能够增加组件小型模块化程度，方便组件的制造，运输，安装以及调试维护。

参考文献：

[1] HU Y. Nonimaging design of a 1000 times concentrator [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011,43(5):61 - 64.

[2] SOLAR S J. Junction breaks its own world record silicon valley based solar energy company achieves 44% cell efficiency[EB/OL]. (2012 - 09 - 28)[2012 - 12 - 30]. www. sj-solar. com.

[3] AMONIX, Amonix achieves world record for PV module efficiency in test at NREL[EB/OL]. (2013 - 09 - 30)[2013 - 12 - 30]. www. nrel. gov.

[4] ROLAND W. Light collection within the framework of geometrical optics[J]. Journal of the Optical Society of America, 1970,60(2):245 - 247.

[5] VENKAT S. Novel, single-crystalline-like templates on low-cost, flexible substrates for high efficiency photovoltaics[C]//Proc 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Honolulu, H,2010:001048 - 51.

[6] BOES E C. A summary of recent photovoltaic concentrator technology developments[C]//IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1988.

[7] LIN J S, HUANG W C, HSU H C. A study for the special Fresnel lens for high efficiency solar concentrators [J]. Process of SPIE, 2005,5942:1 - 9.

[8] RALF L, AKIO. Design of nonimaging fresnel lens for solar concentrators[J]. Solar Energy, 1999,65:379 - 387.

[9] GEOFFREY S K. Weighing the merits of solar power plants using concentration photovoltaics[J]. Photovoltaics International,2012,15:169 - 177.

[10] GARBOUSHAIN V, SEWANG Y, TURNER G. A novel high-concentration PV Technology for cost competitive utility bulk power generation[C]//Proc lst World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Hawaii, Dec 5 - 9,1994:1060 - 1063.

[11] 谢丽莹,孙韵琳,李祥志,等. 遮挡现象对大型并网光伏电站输出性能的影响[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2013, 52(6): 129 - 132.

[12] LANTIAN Solar. High concentrated solar module[EB/OL]. (2012 - 10 - 30)[2013 - 12 - 30]. www. tjsolartech. com.

[13] ANDREEV. Concentrator photovoltaic[M]. New York: Springer,2007.