

1 000 倍聚光的光伏聚光器的非成像设计

赵清亮¹, 陈俊云¹, 吴晓光¹, 胡宜宁²

(1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 150001 哈尔滨, sophiacjy@gmail.com;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 130033 长春)

摘 要: 为了设计一种应用于高倍聚光光伏系统中的具有高光学效率、轻量化、低高宽比和良好的光照均匀性的高倍聚光器, 采用 SMS (simultaneous multiple surfaces) 设计方法, 应用光束扩展原理和边界光线原理, 同时设计具有全内反射功能的光学表面和具折射功能的光学表面, 编写数值计算程序, 优化各光学表面的轮廓, 完成了包含主透镜和二次透镜的高倍聚光器的设计. 优化后的高倍聚光器具有 1 000 倍聚光、小于 0.4 的高宽比和 1.5° 的集光角. 光线模拟分析结果表明: 该聚光器可实现高于 85% 的光学效率和很好的光照均匀性, 应用于高倍聚光光伏系统时易于封装, 且在配置两轴跟踪系统的条件下可实现高效率聚光.

关键词: 光学设计; 高倍聚光器; 光束扩展原理; 边界光线原理; SMS 设计方法

中图分类号: O439

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)05-0061-04

Nonimaging design of a high efficient photovoltaic concentrator with 1 000 X concentration

ZHAO Qing-liang¹, CHEN Jun-yun¹, WU Xiao-guang¹, HU Yi-ning²

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China, sophiacjy@gmail.com;

2. State Key Laboratory of Applied Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 130033 Changchun, China)

Abstract: To design a high gain concentrator with high efficient, light weight, low aspect ratio and good uniformity of solar cell illumination for a high concentration photovoltaic system, the SMS (simultaneous multiple surfaces) method was used for simultaneous design of total internal reflection optical surfaces and refraction optical surfaces on the basis of conservation of etendue and edge-ray principle. In realizing that, the optical surface profiles of the concentrator was calculated and optimized using numeric method to complete the design of the concentrator including a primary lens and a secondary lens. The optimized concentrator has 1 000 X concentration, an aspect ratio less than 0.4 and acceptance angle of 1.5°. Moreover, the result of ray tracing of the concentrator indicates that high efficient more than 85% and good uniformity of the solar cell illumination can be achieved. Therefore, when the designed concentrator is applied to a high concentration photovoltaic system with a 2-axis tracking system, an easy assembly process and high optical efficient can be realized.

Key words: optical design; high gain concentrator; conversation of etendue; edge-ray principle; SMS method

目前, 太阳能光伏发电技术面临的最大问题是成本太高, 传统的光伏发电系统, 半导体材料的成本约占整个系统成本的 50%. 减少产生单位电能所需的半导体材料的使用量是大幅降低光伏发电成本最有效、最快捷的途径. 其中较为可行的方

法是将聚光技术引入到光伏发电系统, 即聚光光伏系统, 它主要由聚光器和太阳能电池组成^[1-2]. 近年来, 随着 III-V 多结太阳能电池制造技术的成熟, 高倍聚光光伏系统的发展成为可能. 与低倍聚光光伏系统相比, 高倍聚光的聚光器可以进一步减少单位面积光伏系统中太阳能电池的使用量及进一步降低光伏系统的单位功率发电成本^[3].

聚光器的几何聚光率高于 100 称为高倍聚光器^[4]. 高倍聚光器的设计方法可分为成像设计方

收稿日期: 2010-02-26.

基金项目: 航天科技创新基金重点项目 (CAST200817); 新世纪优秀人才支持计划资助 (NCET-07-0246).

作者简介: 赵清亮 (1968—), 男, 教授, 博士生导师.

法和非成像设计方法. 如设计菲涅耳透镜作为聚光器就是采用成像设计方法, 但成像方法设计的聚光器在较高倍数聚光(500倍以上)时, 存在高宽比大、电池表面光照均匀性差等问题^[5-7]. 设计聚光器的非成像方法一般可分为: Welford - Winston 方法、Flow - line 方法、Poisson bracket 方法和 SMS (the Simultaneous Multiple Surface) 方法^[1,8]. 与其他非成像设计方法相比, SMS 方法可以实现更小高宽比和更高光学效率的聚光器^[8-9]. 在 1 000 倍左右聚光器的设计中, 一般采用反射镜作为聚光器的一部分, 降低聚光器的高宽比和增加电池表面的光照均匀性^[10]. 但是, 以金属为材料的反射镜致使聚光器的质量很大, 另外由反射引起的光学损失也将在一定程度上降低聚光器的光学效率^[4].

本文采用 SMS 方法设计一种 1 000 倍聚光的高效光伏聚光器. 该高倍聚光器包含具有全反射功能和折射功能的主透镜和具有折射功能的二次透镜, 在不引入反射镜的条件下实现高倍聚光、轻量化、低高宽比和电池表面较好的光照均匀性等性能.

1 聚光器的设计

1.1 设计要求和设计问题分析

本文的设计要求为: 几何聚光率 1 000, 高宽比 < 0.5 , 集光角 $> 1^\circ$, 集光角内所有入射光线经过聚光器的光学效率 $\geq 80\%$.

聚光器设计中光线的传输^[11]如图 1 所示. 设聚光器表面接收的光束为 M_i , 聚光器能接收到的入射光线的集光角为 α_1 , 太阳能电池接收到的光束为 M_o . M_i 和 M_o 的边界光线的定义: 以接收面每点处与该点法线成 α_1 角的光线为 dM_i 的光线; dM_i 的光线经过聚光器后投射到接收面的光线为 dM_o . 设聚光器接收面的半径为 r_i , 面积为 A_i ; 接收器的半径为 r_o , 面积为 A_o ; 则聚光器的几何聚光率 $C_g = A_i/A_o$. 三维空间 M_i 和 M_o 光束的 Etendue 值为

$$E_{M_i} = \iint \cos \theta d\Omega dA = 2\pi A_i \sin^2(\alpha_1),$$

$$E_{M_o} = \iint n^2 \cos \theta d\Omega dA = 2\pi n^2 A_o.$$

则

$$E_{M_i} \leq E_{M_o} \Rightarrow C_g = \frac{A_i}{A_o} \leq \frac{n^2}{\sin^2(\alpha_1)}. \quad (1)$$

设聚光器主透镜接收光束 M_i 的表面为平面, M_{int} 为光束 M_i 经过聚光器主透镜第一个面折

射后的光束, α_2 为 M_{int} 与 z 向的最大夹角.

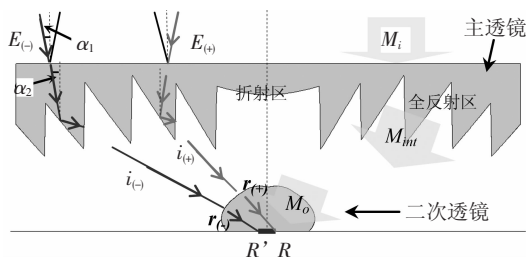


图1 聚光器设计中光线的传输

1.2 设计过程

1) 根据式(1)和几何聚光率 $C_g = 1\ 000$ 确定集光角 α_1 的值. 太阳能电池的中心定义为坐标原点, 如图2所示, 任选 A 点和 B 点作为设计的起点, AD 折射面与 z 轴的夹角为 ϕ , 聚光器全反射区齿数为 N . 主透镜和二次透镜的材料折射率均为 n .

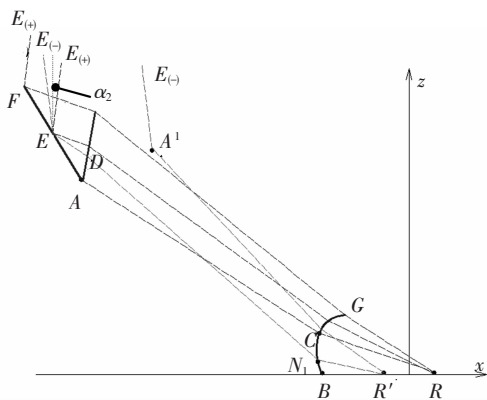


图2 聚光器设计中光线的光路

2) 根据 A 点、 B 点和 R 点的坐标, 依据等光程原理计算出二次透镜表面上的一段二次曲线(笛卡尔椭圆).

3) 设从 A 点到 B 点的光线为 A 点处边界光线 $E_{(-)}$ 的反射光线, 根据 $E_{(-)}$ 光线的光路计算出 A 点处反射面的法线. 再由 A 点处反射面的法线计算出 $E_{(-)}$ 光线经 A 点反射后的光线, 该反射光线与 2) 中描述的二次曲线的交点设为 C 点, 如图 2 所示.

4) 在 B 、 C 之间的椭圆曲线上任取一点 N_1 , 反向追踪 R' 点到 N_1 点的光线 $r_{R'-N_1}$, 经过 N_1 点折射后的光线为 r_{N_1-D} , r_{N_1-D} 投射到主透镜的 D 点; 再由 D 点折射到全反射面上的 E 点; 根据光程相等原理计算出 E 点坐标. 重复上述过程, 设计出全反射区最外侧一个齿的全反射面 (AF 段), 如图 2 所示.

5) 追踪全反射区最外侧齿的全反射面上各点处的边界光线 $E_{(+)}$, 根据光程相等原理, 可以计

算出该齿折射面上一段新的区域和二次透镜上笛卡尔椭圆外的一段新的曲线 CG 段。

6) 从 R' 点反向追踪光线到第5)步计算出的二次透镜上的点,可以确定第2个齿的最低点 A' 和计算出第二个齿全反射面上的点。

7) 重复上述过程,计算出主透镜全反射区的所有齿和二次透镜上的大部分曲线。设主透镜全反射区的内边界点为 P 点。

8) 优化 TIR 区的设计。设接收器接收到得光束 M_0 的 Etendue 值为 E_0 ,聚光器主透镜的全反射区发出的光束的 Etendue 值为 $E_{全反射}$,主透镜折射区接收到的光束和发出的光束的 Etendue 值分别为 $E_{折射}$ 和 $E_{折射'}$ 。由于主透镜折射区的折射面是连续的,则 $E_{折射} = E_{折射'}$ 。根据光束扩展原理,具体的优化条件为:

$$E_{折射} + E_{全反射} = E_0.$$

9) 主透镜折射区的设计。全反射区设计完成后,先把二次透镜上的轮廓曲线补到 z 轴。再从 R' 点反向追踪光线到二次透镜上的点,两次折射后追踪到 $E_{(+)}$ 。根据光程相等原理计算折射区非球面上各点的坐标。

10) 将上述设计的负 x 区域的主透镜和二次透镜上的各点连接成非均匀有理 B 样条曲线,再将上述曲线绕 z 轴旋转,从而完整设计出聚光器的三维模型。

2 设计结果和模拟结果分析

2.1 设计结果分析

本文应用的太阳能电池的有效接收面积为直径 2.3 mm 的圆,在 1 000 倍聚光条件下的光电转换效率为 33%。根据设计过程编写数值计算程序,分别计算主透镜和二次透镜轮廓上的各点坐标,绘出聚光器的二维模型,如图 3 所示。主透镜的上表面为平面,下表面包括全反射区和折射区,全反射区由 6 个齿组成,每个齿包括具有全反射功能的非球面和折射功能的平面,主透镜下表面的折射区是具有折射功能的非球面。二次透镜的上表面为具有折射功能的非球面,太阳能电池被包在二次透镜内部,其接收面与二次透镜的下表面平齐。聚光器的三维模型及相对于太阳能电池的尺寸和位置见图 4。优化设计出的聚光器的几何聚光率为 1 000,高宽比为 0.39,集光角为 1.5° ,主透镜全反射区每个齿折射面与 z 向的夹角 ϕ 为 1° ,太阳能电池可以接收到的光线的范围为 $\pm 78^\circ$ 。上述结果表明,聚光器的设计结果从几何模型角度满足设计要求。

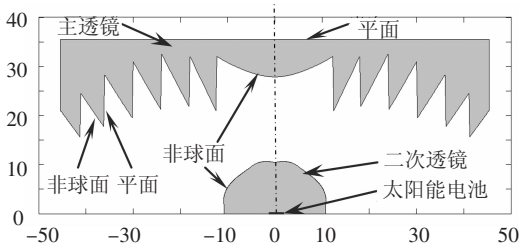


图3 聚光器的二维模型

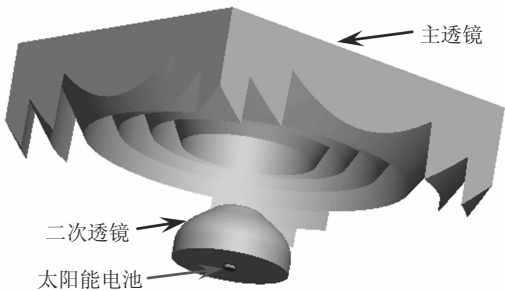


图4 聚光器的三维模型

2.2 模拟结果分析

以 Lighttools 软件为平台模拟分析聚光器的光学性能。将光源设置为面光源,光源发出的光线的波长范围设为 380 ~ 780 nm,主透镜和二次透镜的材料均为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)。材料对光源发出的光线的折射率是根据不同波长光线的折射率通过插值的方法得到的。此外,模拟分析还考虑了材料对光线的吸收和散射,其中材料对不同波长的入射光线的透过率见图 5。

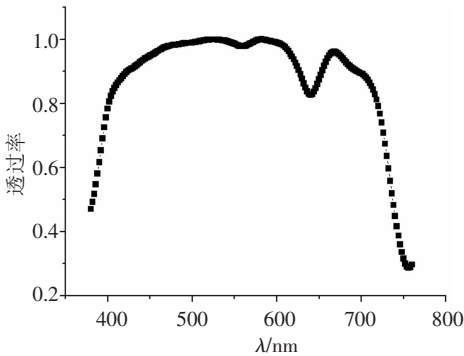


图5 PMMA 对不同波长光线的透过率

聚光器的非成像设计是基于二维光束扩展原理进行的,一般情况下,最后生成的聚光器三维模型不完全满足三维光束扩展原理,这将导致三维模型的光学效率存在一定程度的下降^[9]。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模拟分析,其中聚光器接收到的光线包括入射角小于集光角的所有入射光线。少量光线追踪的模拟分析结果见图 6,可以看出几乎所有光线都经过主透镜的全反射和折射,投射在二次透镜的入射孔径,再经过二次透镜的折射投射在接收区域。上述结果表明,聚光器的设计过程、数值计算程序和计算结果都是正确的。

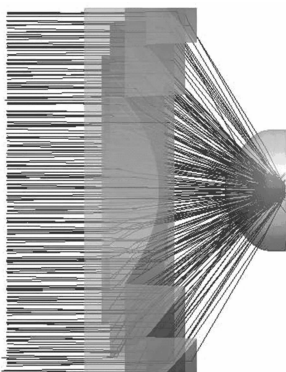
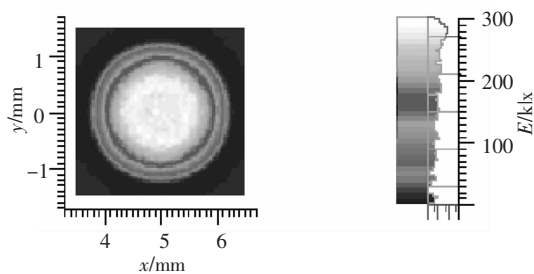
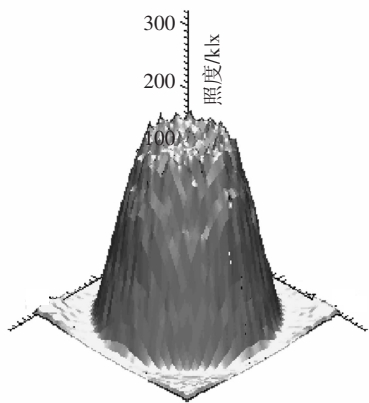


图6 聚光器的模拟分析模型

将光源发出的光通量设为1 lm,进行大量光线追踪的模拟分析.接收面上光照分布见图7,图7(a)表明接收面光斑的直径为2.3 mm.此外,接收面上照度的最大值为315 670.15 lx,最小值为327.21 lx,平均值为162 094.17 lx,这表明接收面的光照分布非常均匀.从图7(b)也可以进一步看出接收面上的照度均匀性非常好.根据接收面接收到的光通量数据,可以计算出聚光器的光学效率为85.75%,其中14.25%的光通量是由于材料对光线的吸收和散射而损失的.



(a) 二维



(b) 三维

图7 接收面上照度分布图

为了模拟聚光器在实际接收太阳光过程中的光学效率,将光源发出的光线设置为具有不同入射角的平行光束,在考虑材料对光线的吸收和散射的条件下进行大量光线的模拟分析.从图8的光学效率结果可以看出,入射角等于0°时的光学

效率为91.59%,随着入射角的增加,聚光器的光学效率缓慢地下降.当平行光线的入射角增加到1.5°(集光角)时,聚光器的光学效率降为80.85%.当入射光线的入射角进一步增加,聚光器的光学效率迅速下降.

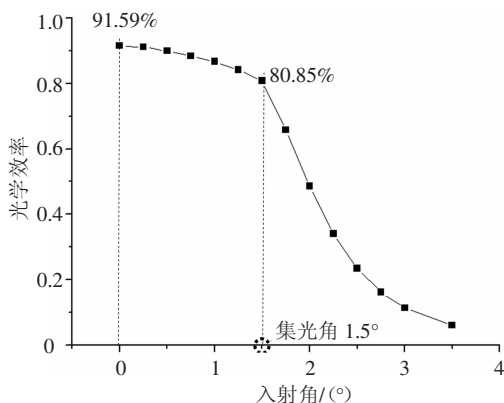


图8 聚光器光学效率与入射角的关系

3 结论

1) 本文基于 SMS 非成像设计方法结合光束扩展原理和边界光线原理,设计了一种1 000倍聚光的高倍光伏聚光器.在由主透镜和二次透镜组成的聚光器的设计中没有引入反射镜,实现了高倍聚光器的轻量化设计.

2) 以高倍聚光、高光学效率、低高宽比,对接收光束入射角的容许误差大及太阳能电池对汇聚光束的要求为指标,采用数值计算的方法进行了1 000倍聚光器的设计和优化,优化后的聚光器参数为:高宽比0.39,几何聚光率1 000,集光角1.5°,电池接收到的光线范围为 $\pm 78^\circ$.

3) 本文设计的高倍聚光器汇聚光线后接收面上的光斑面积与设计中太阳能电池的有效面积一致;在考虑聚光器材料对光线的吸收和散射的条件下,聚光器的光学效率高于85%.

4) 接收面上光照分布均匀,能够满足太阳能电池对光照均匀性的要求.平行光束照射时,集光角内聚光器的光学效率高于80%.在配置两轴跟踪系统的情况下,本文设计的1 000倍聚光的聚光器可以实现高效率聚光.

参考文献:

- [1] ALVAREZ J L, DIAZ V, ALONSO J. Optics design key points for high gain photovoltaic solar energy concentrators [C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. Gena, Germany: SPIE, 2005: 1-9.

(下转第70页)