

文章编号 1674-2915(2011)06-0594-06

## 高倍聚光太阳模拟器的设计

刘洪波, 高雁, 王丽, 顾国超, 冯伟昌

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033)

**摘要:** 研究了一种高倍聚光、高均匀性太阳模拟器, 它主要由短弧氙灯、椭球聚光镜、高速快门和积分器构成, 辐射功率超过 5 kW, 辐射峰值超过 1 800 个太阳常数(标准 AM1.5:1 太阳常数 = 1 kW/m<sup>2</sup>)。介绍了该模拟器的光学设计, 主要工程特点和仿真结果。应用蒙特卡洛光线追迹技术优化几何配置, 以使光源到目标面的辐射能量转换效率最大化。仿真结果显示: 在直径 20 mm 的圆形目标区域其平均辐射超过 1 000 kW/m<sup>2</sup>, 相应的辐照不均匀度小于 6%。利用该装置模拟了高倍聚光太阳系统的辐射特性, 为研究高效率太阳能电池的热化学过程和测试先进的高温材料提供了实验平台。

**关键词:** 太阳模拟器; 高倍聚光; 光学系统

**中图分类号:** TK513 **文献标识码:** A

## Design of high-flux solar simulator

LIU Hong-bo, GAO Yan, WANG Li, GU Guo-chao, FENG Wei-chang

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

**Abstract:** A high-flux solar simulator capable of delivering a radiative power over 5 kW at peak radiative fluxes exceeding 1 800 suns(AM1.5:1 sun = 1 kW/m<sup>2</sup>) is studied in this paper. It comprises an array of ten Xe arcs, and each of them is coupled closely with ellipsoidal specular reflectors of common focus. Its optical design, main engineering features, and operating performance are described. The Monte Carlo ray-tracing technique is applied to optimization of the geometrical configuration for maximizing the source-to-target transfer efficiency of radiative power. Calorimeter measurements indicate an average flux over 1 000 kW/m<sup>2</sup> at a circular target with 20 mm diameter, which corresponds to radiation uniformity of below 6%. This research facility is used to simulate the radiation characteristics of highly concentrating solar systems and serves as an experimental platform for investigating the thermo chemical processing of solar fuels and for testing advanced high-temperature materials.

**Key words:** solar simulator; high-flux; optical system

## 1 引言

太阳模拟器主要用于模拟非集中和集中的太阳光辐射。前者的特征是在较大的辐照面积内提供与太阳光谱分布相匹配的、均匀的、准直稳定的太阳光辐照,主要用来测试太阳能电池光伏特性和收集太阳能;后者的特征是在小辐照面积内获取极高且均匀的辐射通量,主要应用于测试部件和材料的高热特性和热化学特性。

本设计是一种用来模拟集中太阳光辐射,在目标平面可获得高度集中且均匀性良好的太阳能模拟系统。由于氙灯的光谱与太阳光谱近似,故高倍聚光太阳模拟器辐射源通常是高功率氙弧灯或氙弧灯,配合适当精度的光学反射镜来提供连续等强度的热辐射,具有集中太阳能系统热辐射的特性。由于配有适当的匀光系统,被照面的辐射强度也较为均匀。例如国外研究机构研制的一种由高功率线性氙弧灯(功率达到 200 kW)和一个椭球聚光镜组成的聚光系统<sup>[1]</sup>,其焦平面的连续辐射能量达到 75 kW,峰值能量达到 4 250 个太阳常数(AM1.5:1 太阳常数 = 1 kW/m<sup>2</sup>)。短弧氙灯和椭球聚光镜配合,可以在目标平面上提供轴对称分布的光斑,这对接收器和反射器为圆形或者轴对称的几何形状时非常有利。通常采用的氙灯最大电功率达 20 kW。

本文介绍了高倍聚光太阳模拟器的光学设计、构成和仿真结果;利用蒙特卡洛光线追迹技术,优化设计装置的最大转换效率。由氙灯弧发出的一部分光经过椭球镜反射,然后通过焦平面附近的积分器在目标区域内可形成均匀的高亮度光斑。

## 2 系统光学设计

高倍聚光太阳模拟器系统采用氙灯作光源,用椭球聚光镜汇集能量,经由高速快门照在光学积分器上。积分器是一个由精密斜面切片构成的正方形管,管内形成反射面。汇聚的光束通过多次反射后穿过积分器,在出口孔形成均匀的交叉

光束。简单的光学布局如图 1 所示。

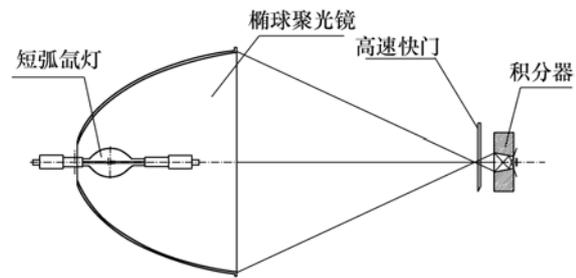


图 1 光学布局

Fig. 1 Diagram of optical layout

### 2.1 聚光镜设计

聚光镜设计是为了在焦平面上汇集最高的亮度。椭球镜焦点是光学变化点,在一个焦点处发出的所有光线通过镜面反射后必然汇聚到另一个焦点。当光源和目标在两个焦点上时,椭球镜提供了很高的转换效率。然而,由于辐射源是一个有限的区域,它的像通过反射后被放大,但一些光线通过一次或多次反射不能达到目标区域,因此椭球反射镜辐射效率降低。

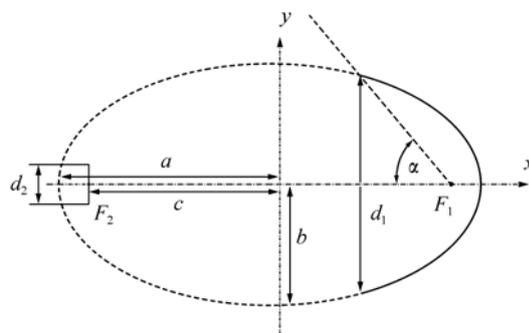


图 2 椭圆的成像特性

Fig. 2 Schematic diagram of elliptical imaging characteristic

回转椭球镜如图 2 所示,设长半轴为  $a$ ,短半轴为  $b$ ,第一焦点为  $F_1$ ,第二焦点为  $F_2$ ,两个焦点之间的距离为  $2c$ ,故  $c = \sqrt{a^2 - b^2}$ ,离心率为  $e = c/a$ 。辐射源(氙灯)位于第一焦点  $F_1$  处,目标是直径为  $d_2$  的圆盘,位于第二焦点  $F_2$  上,垂直于椭球镜的长轴。椭圆顶点的曲率半径  $R = b^2/c$ 。 $\alpha$  为椭球镜的半包容角,大开口直径为  $d_1$ ,长半轴  $a$

和短半轴  $b$  可以由焦距  $c, \alpha$  和  $d_1$  表示<sup>[2]</sup>:

$$a^2 = b^2 + c^2$$

$$b^2 = \frac{0.5d_1^2(1 + \tan^2\alpha) + d_1(-2c\tan\alpha + \xi)}{4\tan^2\alpha}$$

$$\xi = \sqrt{(1 + \tan^2\alpha) \left[ (d_1^2/4)(1 + \tan^2\alpha) - 2cd_1\tan\alpha + 4c^2\tan^2\alpha \right]}. \quad (1)$$

$d_1$  越大,反射的能量越多。

聚光镜汇聚到第二焦面的辐射通量占氙弧发出的全部辐射通量的比率<sup>[3]</sup>定义为椭球聚光镜的转换效率  $\eta$ 。 $\eta$  取决于氙弧辐射强度在不同方向上的相对分布  $t(\alpha)$  和聚光镜汇聚角的范围,其表达式为:

$$\eta = \frac{Q_{\text{target}}}{Q_{\text{source}}} = \frac{\int_0^\alpha t(\alpha) \sin(\alpha) d\alpha}{\int_0^{180^\circ} t(\alpha) \sin(\alpha) d\alpha}. \quad (2)$$

椭球镜第二焦面内的理想辐照度分布曲线如图3所示,近似于正态分布。在椭球聚光镜设计中,相对于第一焦点的离焦量成像倍率和氙弧峰值亮度点是两个重要参数<sup>[4]</sup>。

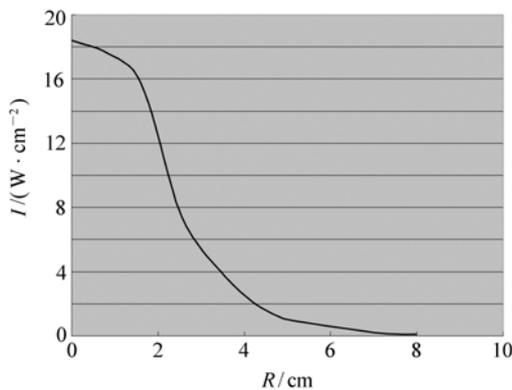


图3 椭球镜第二焦面辐照度分布

Fig.3 Radiation distribution on the second focal plane of ellipsoidal mirror

## 2.2 光学积分器设计

光学积分器主要用于接收焦平面上的高强度辐射,并在出光口提供一个高均匀性光束。目前光学积分器有两种形式:复眼透镜式和通道反射式。本文采用通道反射式,光束的均匀性是由光束通过光学积分器经多次反射来实现的。通道的横截面可以为圆形、方形和三角形,且可以设计成为带有一定角度以加速光线收敛。本文采用通道为方形并成一定角度的光学积分器。具有一定汇

聚角的光线进入光学积分器后,在其内部的反射次数随入射角度不同而变化,不同角度的光线充分混合,出口目标面上每一点的光强来自光源不同角度光的积分,从而形成较为均匀分布的辐照面。

光学积分器的设计主要考虑长度和截面积两个参数。长度的选取基于系统对辐照均匀性的要求,通道越长,光线的反射次数越多,也就越均匀;截面积的选择需要综合考虑有效辐照面的大小和系统的能量利用率。通常情况下,设计的长度应使聚光镜边缘光线在积分器内部反射3次以上。可先根据经验确定反射次数为3次,然后根据反射次数和入射角度算出长度。

光学积分器的位置取决于焦平面上氙弧像的入瞳口径,如图4所示。假如没有积分器,能量将交叉照亮一个半径为  $R$  的圆形。积分器的作用是细分该区域为正方形,然后在出光口重合在一起。正方形的数量产生于细分的过程,与内在反射次数相关,其关系式为  $N = (2F + 1)^2$ ,其中  $F$  是反射次数,3次反射即产生49层区域<sup>[5]</sup>。

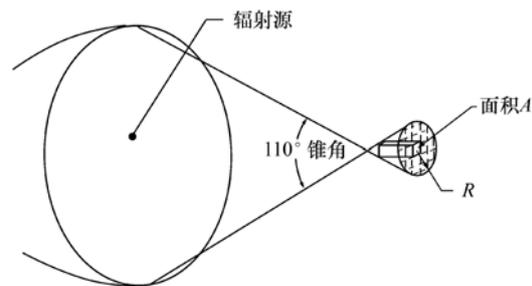


图4 光学积分器原理图

Fig.4 Principle diagram of optical integrator

均匀度主要取决于积分器的长度和通过装置时的最终反射次数。两者并没有定量关系,反射次数越多均匀性越好。对输出热流量要求较高的系统,积分器不再提供必要的均匀性,因能量损失与反射次数相关,因此应该尽量减少反射次数。

调节适当的均匀度和输出高亮度光束是系统调焦的一个重要功能。顺光轴的轻微离焦可以增加系统的均匀度,但降低了亮度。

### 3 系统原理及组成

#### 3.1 系统原理

位于椭球镜第一焦点附近氙灯氙弧发出的光辐射通量,经椭球聚光镜内表面反射并以给定的光束包容角汇聚投影到椭球镜第二焦点上。与汇聚光束形成耦合关系的光学积分器位于聚光镜第二焦点前给定的距离处。为保证有效辐照面辐照的均匀性,给定汇聚角的光线耦合进入立方锥体光学积分器后,内部光线入射角度不同,反射次数也不同,最后各个角度的光线充分混合,在距立方锥体输出端给定距离处的有效辐照面上的每一点都将得到不同角度的光束,从而形成均匀分布的辐照面。为保证目标平面的高亮度,应使边缘光线在积分器内部反射3次,再经整个系统的调试,最终得到满意的均匀度和辐照度。

#### 3.2 系统组成

高倍聚光太阳模拟器系统结构布局如图5所示。系统主要由安装定位基座、椭球聚光镜支撑定位组件、风冷却系统、氙灯安装及调整机构、AM1.5滤光片、水冷高速快门及支撑机构、光学积分器组件支撑机构、光学积分器安装定位及微调机构等组成。

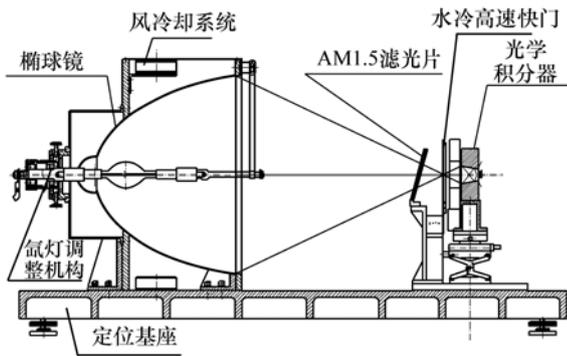


图5 系统结构布局

Fig.5 Structural layout of system

AM1.5滤光片可以根据试验内容来确定是否添加,如果系统用来测试太阳能电池的热化学

特性,则需要滤光片来保证辐射光谱与太阳光谱相一致。安装位置如图5所示,滤光片基底材料采用耐高温JGS3石英玻璃,由于膜层不能承受高温,所以滤光片装置前必须加水冷快门,避免滤光片被长时间照射,图中未给出水冷快门的结构;如果用来测试高温材料的性能,则不需要滤光片。

#### 3.2.1 灯模块

选用德国欧司朗公司的5 kW的氙灯作为太阳模拟器的光源,根据其能量转换效率,可以计算出系统的辐照能量。氙灯的大致轮廓如图6所示,氙灯有一个尖端阴极和一个圆形阳极均设置在一个直径为 $d_{\text{bulb}}$ 的玻璃泡壳里,电极间距为 $d_{\text{arc}}$ ,氙灯通过高压击穿灯泡中阴极和阳极之间的氙气而发光。5 kW氙灯的光辐射通量为200 000 lm,估算光电转换效率为0.4,即产生的光功率为2 kW。另外还可选用7 kW和10 kW的氙灯以增加目标平面的辐照强度。

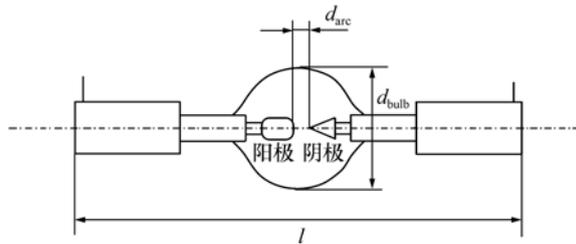


图6 氙灯的大致轮廓

Fig.6 Schematic diagram of a Xe-arc lamp

#### 3.2.2 椭球镜

本文所采用的椭球镜大开口直径 $d_1 = 570 \text{ mm}$ ,由于口径较大,采用了与以往制作椭球聚光镜不同的新方法,即电铸镍基底金属椭球镜。该技术的突出优点是加工周期短、成本低,在国外已得到广泛应用。所谓电铸就是利用金属的电解沉积原理来精确复制某些复杂或特殊形状工件的特种加工方法。

电铸的金属通常有铜、镍和钢3种,有时也用金、银、铂镍-钴、钴-钨等合金,但以镍的电铸应用最广。电铸层厚度一般为0.02~6 mm,也有厚达25 mm的。采用电铸技术制作的镍基底椭球聚光镜如图7所示。电铸椭球聚光镜电铸镍层的厚度选为5 mm,以利于聚光镜换热,并确保其机械强度,然后直接镀铝膜和二氧化硅保护膜。二氧化

硅保护膜用于防止铝膜氧化并提供一个可以清理的平面。

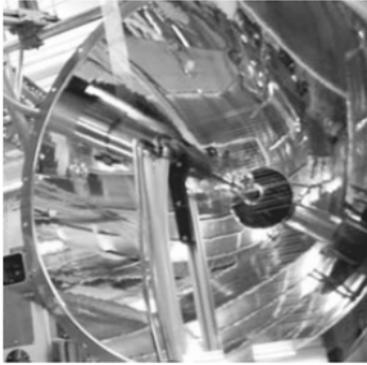
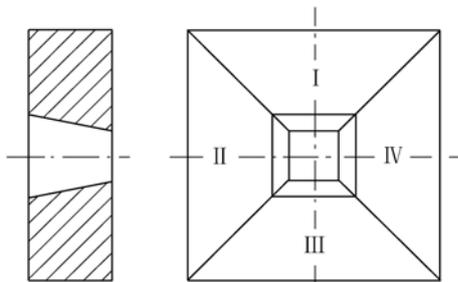


图7 电铸椭球镜

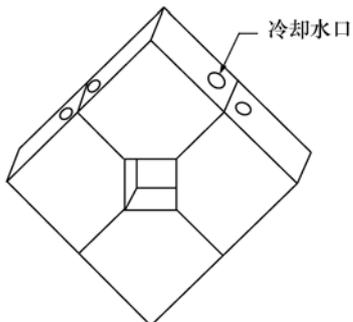
Fig. 7 Graph of electroformed elliptical mirror

### 3.2.3 光学积分器

光学积分器由4个精密的斜面构成,并形成一个正方形的光通道,如图8(a)所示。4个反射面镀镍层,经细磨、抛光后,镀铝膜和二氧化硅保护膜。材料选用的是热传导性好,内腔中空的立



(a) 光学积分器正视及左视图  
(a) Front and left views



(b) 光学积分器冷却水口示意图  
(b) Outlet of cooling water

图8 光学积分器

Fig. 8 Structural diagram of optical integrator

方锥体无氧铜,整个装置为水冷式,如图8(b)所示。

考虑到积分器加工制作工艺的难易程度,采用由4块分别加工,再拼凑组合成的整体光学积分器。光学积分器通水制冷,每块设有单独的进出水接口,使用时可将水路串联起来,如图8(b)所示。

### 3.2.4 快门

曝光快门是系统工作时的有效快门,它由两层构成,一层是通水制冷快门,另一层是曝光快门。通水制冷快门用于防止稳态聚光太阳模拟器在没有进行有效曝光工作时汇聚的辐射能量进入曝光快门处烧坏曝光快门。选用无杆汽缸作为快门的驱动机构,由于汽缸的速度很快(4 m/s),所产生的冲击力很大,故需考虑对汽缸的固定支撑以及缓冲,以免冲击力引起整机的震动。

## 4 蒙特卡洛分析

应用 LightTools6.0 照明仿真软件对设计的光学系统进行蒙特卡洛光线追迹计算,该技术主要应用于计算光线的转移效率。

通过蒙特卡洛分析进行系统优化,系统按照光学系统外形尺寸排布后,对光学元器件的设计参数稍加修改,如光源对于聚光镜的离焦、积分器的轴向位移等,每次改变参数后进行蒙特卡洛光线追迹计算,从而得出系统的最优设计结果。系统的光路安排如图9所示。

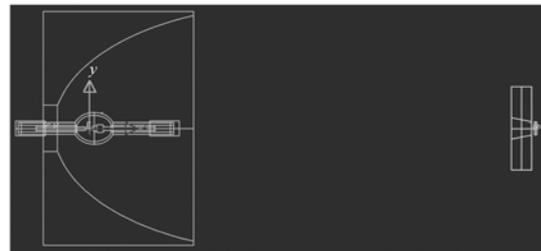


图9 光学系统

Fig. 9 Diagram of optical system

将光学积分到椭球镜第二焦点的距离作为变量分析系统的结果,每次运行  $3 \times 10^5$  条样本光线,得到距光学积分器出口6mm处目标平面的

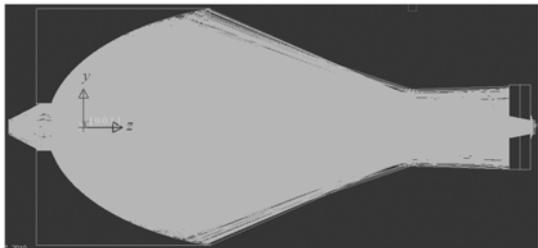


图10 蒙特卡洛光线追迹

Fig. 10 Diagram of Monte Carlo ray-tracing

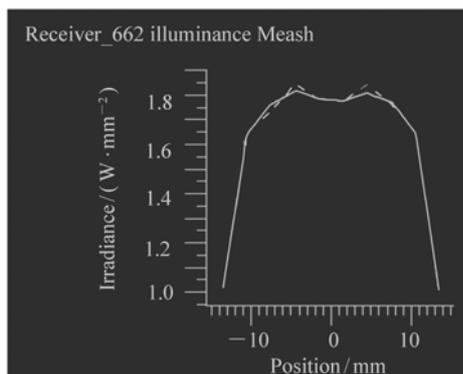


图11 目标平面的辐照度分布

Fig. 11 Radiation distribution curve of target plane

辐照度分布图,目标平面的有效辐照面直径为20 mm。仿真光线追迹如图10所示。

最优仿真结果如图11所示。辐照不均匀度按下式计算<sup>[6]</sup>:

$$\frac{\Delta E}{E_{\text{sum}}} = \pm \frac{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}{E_{\text{max}} + E_{\text{min}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $\Delta E/E_{\text{sum}}$ 为辐照不均匀度, $E_{\text{max}}$ 为辐照面上(或体积内)的辐照度最大值, $E_{\text{min}}$ 为辐照面上(或体积内)的辐照度最小值。

根据上述公式进行计算,通过积分器孔径的不均匀度约为 $\pm 6\%$ 。

## 5 结 论

利用蒙特卡洛光线追迹技术,设计了一种高倍聚光高均匀性太阳模拟器。仿真结果显示,在直径20 mm的圆形目标区域上,太阳模拟器的平均辐射超过1 000 kW/m<sup>2</sup>,相应的辐照不均匀度小于6%。该研究装置模拟了高倍聚光太阳系统的辐射特性,为研究高效率太阳能电池的热化学过程和测试先进的高温材料提供了实验平台。

## 参考文献:

- [1] ULMER S, REINALTER W, HELLER P, *et al.*. Beam characterization and improvement with a flux mapping system for dish concentrators[J]. *Sol. Energy Eng.*, 2002, 124(2): 182-188.
- [2] KENNEY S, DAVIDSON J. Design of a multiple-lamp large scale solar simulator[J]. *Sol. Energy Eng.*, 1994, 116(4): 200-205.
- [3] GARG H, SHUKLA A, INDRAJIT M, *et al.*. Development of a simple low-cost solar simulator for indoor collector testing [J]. *Appl. Energy*, 1985, 21(1): 43-54.
- [4] HIRSCH D, v ZEDTWITZ P, OSINGA T, *et al.*. A new 75 kW high-flux solar simulator for high temperature thermal and thermo chemical research[J]. *Sol. Energy Eng.*, 2003, 125(1): 117-120.
- [5] 王素平, 凌健博, 刘立伟, 等. 一种应用于太阳仿真器的照明系统设计[J]. *光电工程*, 2006, 33(9): 32-35.  
WANG S P, LING J B, LIU L W, *et al.*. Simple lighting system applied to the solar simulation[J]. *Opto-Electronic Eng.*, 2006, 33(9): 32-35. (in Chinese)
- [6] 张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.  
ZHANG Y M. *Applied Optics* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. (in Chinese)

作者简介: 刘洪波(1956—), 男, 吉林长春人, 研究员, 主要从事太阳模拟技术方面的研究。E-mail: hbliu120@sina.com  
高雁(1982—), 男, 吉林长春人, 助理研究员, 硕士, 主要从事太阳模拟技术方面的研究。  
E-mail: ynogg@163.com