

2.4 m 太阳模拟器设计

刘家国^{1,2}, 邓 蓉^{1,2}, 王景峰^{1,2}, 曾克思¹

(1. 北京环境特性研究所, 北京 100854; 2. 光学辐射重点实验室, 北京 100854)

摘 要: 针对目标特性研究需求, 设计了有效辐照面直径 2.4 m 的太阳模拟器。要求辐照面内的照度不小于 0.3 个太阳常数, 出射光束准直角不大于 $\pm 1^\circ$ 且被照面的不均匀度不大于 $\pm 3\%$, 光谱失配误差达到 C 级。太阳模拟器主要由四个短弧氙灯、四个椭球面反射镜、两个平面反射镜、一组积分器和一个准直反射镜组成。对设计结果进行了软件仿真分析和实验测试。测试结果表明: 太阳模拟器的有效光斑直径为 2.43 m, 被照面平均照度为 3 382 lx, 光束准直角 $\pm 0.97^\circ$, 不均匀度为 $\pm 2.8\%$, 光谱失配误差达到 C 级, 满足设计要求。

关键词: 应用光学; 太阳模拟器; 氙灯; 不均匀度

中图分类号: TH74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3348-05

Design of 2.4 m solar simulator

Liu Jiaguo^{1,2}, Deng Rong^{1,2}, Wang Jingfeng^{1,2}, Zeng Kesi¹

(1. Beijing Institute of Environmental Characteristics, Beijing 100854, China;

2. Science and Technology on Optical Radiation Laboratory, Beijing 100854, China)

Abstract: According to the demands of target characteristics research, a solar simulator with 2.4 m-diameter effective illuminated area was designed. Several targets were required that the illumination of irradiated area was not less than 0.3 solar constant; the collimating angle of outgoing beam was less than $\pm 1^\circ$, the un-uniformity of irradiated surface was less than $\pm 3\%$ and the spectral mismatch error reached level C. The solar simulator consisted of four short-arc xenon lamps, four ellipsoidal reflectors, two flat reflectors, a group of optical integrator, and a collimating reflector. Software simulation analysis and experiment test were carried out for the design. Test results show that the diameter of effective illuminated area is 2.43 m, the mean illumination of irradiated area is 3 382 lx, the collimating angle of outgoing beam is $\pm 0.97^\circ$, the un-uniformity of irradiated surface is $\pm 2.8\%$ and the spectral mismatch error reaches level C, which meet all the requirements.

Key words: applied optics; solar simulator; xenon lamp; un-uniformity

0 引言

太阳模拟器能够模拟阳光照度、均匀性、光谱和发散角等辐照特性,有着广泛的用途。大型太阳模拟器是航天技术中卫星空间环境模拟的主要组成部分;中小型太阳模拟器可用于太阳敏感器地面模拟试验与标定地球资源卫星多光谱扫描仪太阳光谱辐照响应的地面定标;在太阳光伏科学与工程中,这种类型的太阳模拟器又可用于太阳能电池的检测与标定、遥感技术中室内模拟太阳光谱辐照以及农业科学中研究植物发育和培育良种、建材行业中材料的耐辐照老化试验等^[1]。在目标特性研究领域,太阳模拟器可用于在地面模拟空间目标对太阳光的反射和散射特性,为目标特性研究提供试验数据支撑^[2]。

设计了有效辐照面直径为 2.4 m 的太阳模拟器,主要技术指标如下:有效辐照面直径-大于等于 2.4 m (距离准直反射镜 5 m 处);光谱-AM1.5;光谱失配误差-满足 GB/T6495.9-2006 等级 C 要求;准直角-小于等于 $\pm 1^\circ$;辐照度-大于等于 0.3 个太阳常数;辐照不均匀度-小于等于 $\pm 3\%$ 。

1 太阳模拟器组成及工作原理

太阳模拟器主要包括短弧氙灯、椭球面反射镜、积分器和准直反射镜等部分。短弧氙灯通常采用垂直点燃方式以保证光弧稳定,其发光点置于椭球面反射镜第一焦点处,椭球面反射镜收集短弧氙灯所发出的光并会聚在反射镜的第二焦点处,位于第二焦点处的积分器把通光口径内的辐照分布分割再叠加,提高辐照均匀性,再由准直反射镜准直输出,形成均匀的辐照面。如图 1 所示。

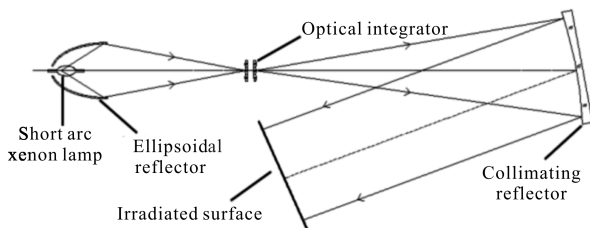


图 1 太阳模拟器工作原理

Fig.1 Working principle of solar simulator

2 太阳模拟器主要参数设计

2.1 准直反射镜

按照设计要求,距离准直反射镜 5 m 处有效辐照面的直径不小于 2.4 m,因为出射光束有 $\pm 1^\circ$ 的发散,所以准直反射镜的口径应不小于 $2.4+5 \times 2 \times \tan(1^\circ) \approx 2.57$ m,取 2.6 m。准直反射镜的口径一定时,其焦距越长,则像差对准直角的影响就越小;但准直反射镜的焦距越长,系统所占空间也就越大。根据安装场地实际情况,准直反射镜的焦距取 8 m,即曲率半径为 16 m。为避免出射光束与入射光束相干涉,准直反射镜离轴 10° 使用。

2.2 积分器

积分器由两组前后排列的透镜阵列组成,前透镜阵列为积分器场镜,后透镜阵列为积分器投影镜。积分器的场镜把椭球面反射镜的出瞳成像到准直镜的视场光阑处,积分器的投影镜把氙灯光弧经过椭球面反射镜的像成像到准直镜的入瞳,如图 2 所示。

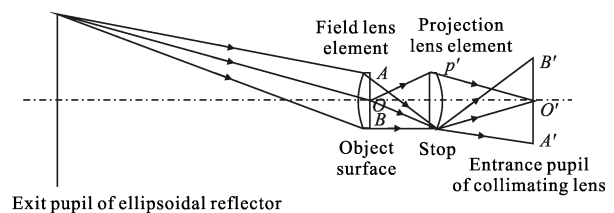


图 2 积分器的成像关系图

Fig.2 Imaging relationship of optical integrator

积分器透镜单元的相对孔径不宜过大,因此积分器场镜和投影镜的距离不宜过小,取 120 mm,根据几何光学成像高斯公式

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'} \quad (1)$$

计算出积分器的场镜和投影镜透镜单元的焦距 $f_{\text{场}}' \approx f_{\text{投影}}' \approx 133$ mm,为降低加工成本,积分器的场镜和投影镜采用相同的设计,并且透镜单元设计成平凸透镜,材料选用耐高温的石英玻璃。

口径 2.6 m、焦距 8 m 的球面反射镜在离轴 10° 使用时,在视场为 $\pm 1^\circ$ 情况下,通过光学设计软件仿真分析得到其最大点列图几何半径为 26 mm,换算成角度误差为 $\arctan(26/8000) \approx 0.186^\circ$,即准直镜的像差会带来约 $\pm 0.2^\circ$ 平行度误差。系统要求准直

角 $\leq\pm 1^\circ$ ，则积分器的有效口径为 $2\times 8\,000\times \tan(1^\circ-0.2^\circ)\approx 223\text{ mm}$ ，由于加工装配存在误差，为确保准直角不超差，取 200 mm 。积分器场镜和投影镜均采用19通道蜂窝状排列，如图3所示。

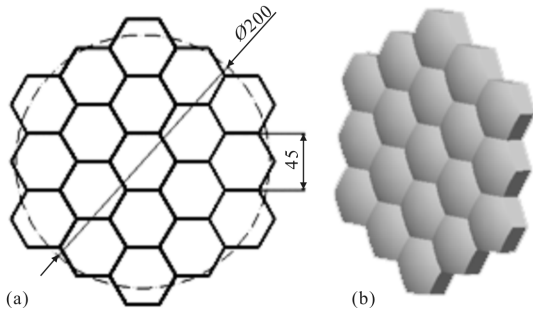


图 3 积分器排列示意图

Fig.3 Schematic diagram of optical integrator structure

根据上述计算，在光学设计软件中优化得到积分器的场镜和投影镜元素的中心厚为 15 mm ，凸面的曲率半径为 60.98 mm 。

2.3 椭球面反射镜

短弧氙灯的配光曲线呈蝴蝶形，具有轴对称性，椭球面反射镜的包容角 u_m 应与光源的配光曲线相匹配以获得高的聚光效率。椭球面反射镜具有两个共轭点 F_1 和 F_2 ，位于椭球面反射镜的前焦点 F_1 处氙弧峰值亮度区，能够被椭球面反射镜无球差的成像于第二焦点 F_2 ，如图4所示。

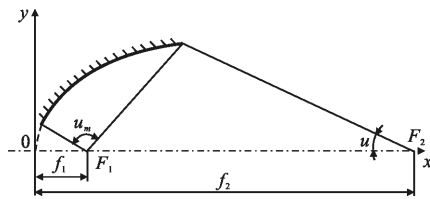


图 4 椭球面反射镜主要结构参数示意图

Fig.4 Primary structural parameters of ellipsoidal reflector

椭球面反射镜的设计就是优选 f_1 、 f_2 ，使短弧氙灯便于安装和散热，且第二焦点处的像高与积分器口径相匹配。 f_1 的确定应保证氙灯泡壳与聚光镜不干涉，且给氙灯留有足够的散热空间。选定 f_1 后，根据光线在第二焦点处的孔径角 u 和像高选择合适的 f_2 ，以使氙灯发出的光既尽可能照射到积分器有效孔径内，又尽可能在积分器上均匀分布。

根据短弧氙灯的发光特性^[3](见图5)，聚光镜的口径设计为 380 mm ，第一焦距 f_1 取 60 mm ，第二焦距 f_2 取 $3\,200\text{ mm}$ 。由于第二焦距较长，系统中增加两个平面反射镜将椭球面反射镜与积分器之间的光路进行折转，以减小系统体积。

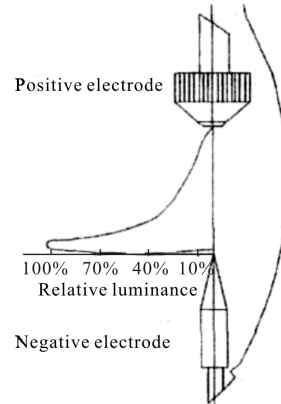


图 5 短弧氙灯发光特性

Fig.5 Luminous properties of short arc xenon lamp

2.4 短弧氙灯

早期的太阳模拟器选用碳弧灯作为光源，碳弧灯的光谱与太阳光线光谱的分布接近，但碳弧灯的紫外辐射很强并会产生剧毒的氰气，且设备的操作强度大。第二阶段曾采用过镝灯来代替碳弧灯，镝灯发光效率高、显色性好、亮度高、使用寿命长，但光谱波长范围较宽，近红外线外的光辐射都将被浪费，而且镝灯一旦使用不当，其释放的紫外线会影响操作者的身体健康^[4]。目前航天系统的太阳模拟系统和大型的聚光型太阳模拟器都采用氙灯作为光源。

氙灯是利用氙气放电而发光的电光源^[5]。在可见区与 $6\,200\text{ K}$ 黑体辐射接近，故又有“小太阳”之称。但在近红外波段区域，由于有大量氙气放电导致的强辐射使得这一谱段与太阳光谱差异较大，如图6所示。

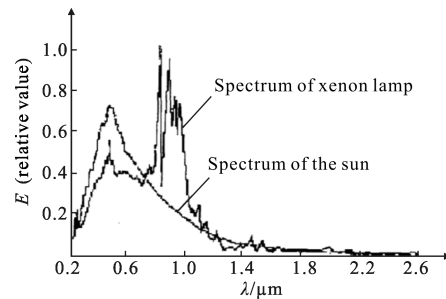


图 6 氙灯与太阳发光光谱对比

Fig.6 Spectrum comparison of xenon lamps and the sun

文中在两个平面反射镜的基底采用耐高温的高硼玻璃,表面镀反可见光透近红外的滤光膜,滤除氙灯的近红外辐射,以使太阳模拟器的输出光谱接近太阳光谱,同时减小进入后续光学路的热量。

指标要求直径为 2.4 m 被照区域内照度不小于 0.3 个太阳常数。1 个太阳常数取 $1.3 \times 10^5 \text{ lx}$,则在直径 2.4 m 的辐照面积区域内的光通量 Φ 应为:

$$\Phi = E \cdot S \approx 1.8 \times 10^5 \text{ (lm)} \quad (2)$$

式中: E 为被照面的照度; S 为被照面的面积。

系统的效率 η 可由下式计算:

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5 \cdot \eta_6 \approx 0.28 \quad (3)$$

式中: $\eta_1=0.7$ 为聚光镜收集率; $\eta_2=0.9$ 为聚光镜反射率; $\eta_3=\eta_4=0.9$ 为第一和第二平面反射镜的反射率; $\eta_5=0.7$ 为积分器效率; $\eta_6=0.8$ 为准直反射镜的反射率。

光源的光视效能 K 约为 40 lm/W , 则光源的功率 P 为:

$$P = \Phi / K / \eta \approx 16\,000 \text{ (W)} \quad (4)$$

考虑到被照面边缘存在无效区域及氙灯的发光效率下降等因素,选用氙灯总功率为 20 kW , 留有一定的设计余量。由于大功率氙灯对散热要求高且寿命短,文中采用 4 个 5 kW 的中等功率氙灯组合使用。

4 个氙灯分别与 4 个椭球面反射镜同轴安装,且氙灯的发光点位于椭球面反射镜的第一焦点处。根据椭球面反射镜的口径及焦距,对角的两组氙灯相距约 450 mm ,每组均向中心倾斜 4° ,则 4 个氙灯发出的光可在第二焦点处重合,如图 7 所示。

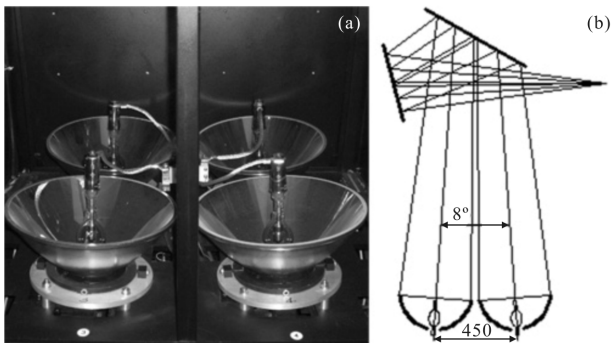


图 7 氙灯布局示意图

Fig.7 Schematic diagram of xenon lamp layout

3 仿真分析及实验测试结果

3.1 系统仿真分析

根据前述设计,利用光学仿真软件 LightTools

对太阳模拟器的性能进行仿真分析,系统的光学模型如图 8 所示。

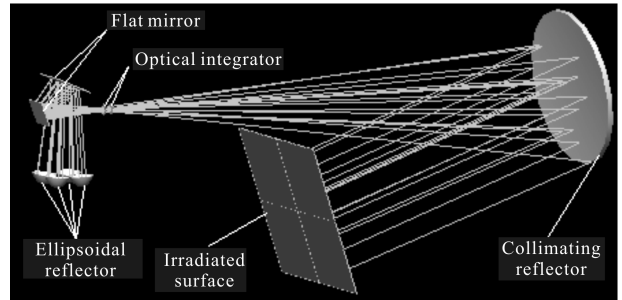


图 8 LightTools 建立的太阳模拟器模型

Fig.8 Model of solar simulator modeled with LightTools

被照射面的照度不均匀度 U 定义为:

$$U = \pm \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: E_{\max} 、 E_{\min} 分别为被照射面的最大照度和最小照度。

根据仿真结果,被照面的不均匀度为 $\pm 2.3\%$,仿真曲线如图 9 所示。

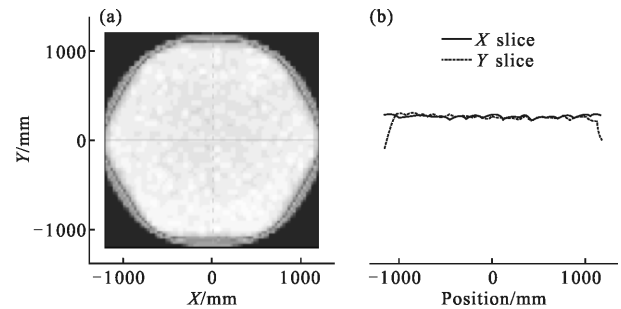


图 9 被照面的照度均匀性分析结果

Fig.9 Results of illumination uniformity analysis

3.2 测试结果

在实验室里对 2.4 m 太阳模拟器的主要性能指标进行了测试。图 10 为太阳模拟器工作时的照片。



图 10 2.4 m 太阳模拟器加电图

Fig.10 Picture of working solar simulator

经测试,在距离准直反射镜 5 m 处的被照面上,有效光斑直径 2.43 m,被照面平均照度为 3 382 lx,不均匀度为 $\pm 2.8\%$,光束准直角 $\pm 0.97^\circ$,光谱与太阳光谱对比曲线如图 11 所示,满足等级 C 要求。

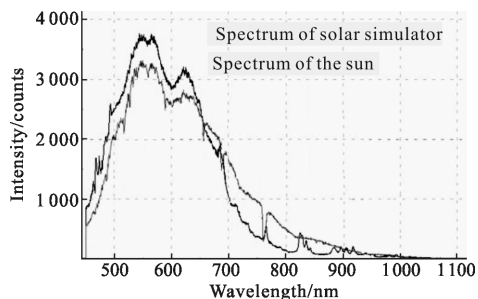


图 11 太阳模拟器光谱与太阳光谱对比曲线

Fig.11 Spectrum comparison of solar simulator and the sun

4 结论

文中设计了有效辐照面直径 2.4 m 的太阳模拟器。系统光源采用 4 个 5 kW 氙灯组合,以降低散热要求,延长光源寿命。经过实验室测试,性能指标满足要求。

参考文献:

- [1] Liu Hongbo. Solar simulation technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(2): 177-181. (in Chinese)
- [2] Bao Wenzhuo, Cong Mingyu, Zhang Wei, et al. A verification and validation method for calculation model of space target characteristics used for short range optical navigation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2249-2256. (in Chinese)
鲍文卓, 丛明煜, 张伟, 等. 近程光学导航空间目标特性计算模型校验方法[J]. *光学学报*, 2010, 30(8): 2249-2256.
- [3] Jiang Yongping, Xu Qinyu. High-pressure short arc Xenon lamp and its applications [J]. *Advanced Motion Picture Technology*, 2007(4): 30-37. (in Chinese)
蒋永平, 徐琴玉. 高压短弧氙灯及其应用 [J]. *现代电影技术*, 2007(4): 30-37.
- [4] Shan Qiusha. The researchment of a small collimated solar simulator [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
单秋莎. 一种小型准直式太阳模拟器的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [5] Chen Dahua. The characteristics of xenon lamp and its applications[J]. *Lamps and Lighting*, 2002(4): 18-20. (in Chinese)
陈大华. 氙灯的技术特性及其应用 [J]. *光源与照明*, 2002(4): 18-20.