

便携式太阳模拟器设计

刘家国¹, 邓蓉¹, 魏阿满², 于振红²

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

摘要: 针对太阳模拟器小型化、便携性的实际需求, 设计了一种便携式的太阳模拟器。要求在辐照面积 1.2 m×1.2 m 的矩形区域内的照度不小于 0.02 个太阳常数, 且被照面的不均匀度小于 5%。模拟器系统主要由短弧氙灯、椭球面反射镜、光纤传光束、积分棒和准直镜组组成。通过软件仿真及实验验证, 结果均符合要求。实验结果表明, 利用短弧氙灯、椭球面反射镜、光纤传光束、积分棒和投影准直透镜组设计便携式太阳模拟器的方法是有效、可行的。

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(2014)10-3352-04

Design of portable solar simulator

Liu Jiaguo¹, Deng Rong¹, Wei Aman², Yu Zhenhong²

(1. Science and Technology on Optical Radiation Laboratory, Beijing 100854, China;
2. Beijing Institute of Environmental Characteristics, Beijing 100854, China)

Abstract: For the miniaturization and portability demands of solar simulator, a portable solar simulator was designed. Illumination in 1.2 m×1.2 m rectangular irradiated area not less than 0.02 solar constant was required; furthermore, the un-uniformity of irradiated surface less than 5% was also needed. The system mainly consisted of short-arc xenon lamp, ellipsoidal reflector, fiber optic beams, and a group of collimating lens. Through software simulation and experimental verification, the results met all the requirements. Experimental results show that the method that designing a portable solar simulator with short-arc xenon lamp, ellipsoidal reflector, fiber optic beams, integral stick, and projection collimator lens group is effective and feasible.

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

收稿日期: 2014-02-25; 修订日期: 2014-03-26

基金项目: 光学辐射重点实验室基金

作者简介: 刘家国(1980-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事光电系统设计方面的研究。Email: liu_jiaguo@126.com

0 引言

太阳模拟器是模拟阳光辐照特性的一种实验与测试设备。早期的太阳模拟器多被用于空间飞行器的空间环境模拟实验。现在其应用领域更为广泛,如卫星的热平衡试验、太阳能电池的检测与标定、植物发育和良种培育、材料的耐辐照老化试验、汽车空调检验、军用产品试验等^[1]。近年来,高精度小型太阳模拟器作为太阳光的模拟光源,获得了越来越多的应用。

设计了一种便携式太阳模拟器,要求在辐照面积 $1.2\text{ m}\times 1.2\text{ m}$ 的矩形区域照度不小于 0.02 个太阳常数,有效光照范围的不均匀度小于 5% 。

1 便携式太阳模拟器工作原理

便携式太阳模拟器主要由短弧氙灯、椭球面反射镜、光纤传光束、正方形的玻璃柱体(积分棒)和一组准直透镜组成。短弧氙灯放置在椭球面反射镜第一焦点处,短弧氙灯所发出的光经椭球形反射镜反射后会聚在反射镜的第二焦点处,并耦合进光纤传光束。由于从光纤传光束的后端面出射光线的强光主要集中在光斑的中心,不能够提供系统所需的均匀性。为了达到均匀性的要求,在光纤传光束的后端面处放置一个积分棒,积分棒将光纤传光束出射的光线经过多次反射,在积分棒的后端面得到一个均匀的输出,最后积分棒出射的光线经过准直透镜后照射被照面,如图 1 所示。

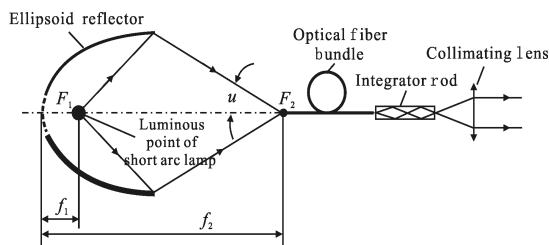


图 1 便携式太阳模拟器原理图

Fig.1 Schematic diagram of portable solar simulator

2 主要部件的选择和设计

2.1 光源的功率计算

按照设计要求,需要在辐照面积为 $1.2\text{ m}\times 1.2\text{ m}$ 的矩形区域内照度不小于 0.02 个太阳常数。1 个太阳常数取 $1.3\times 10^5\text{ lx}$,所以在辐照面积 $1.2\text{ m}\times 1.2\text{ m}$ 的矩形区域内 0.02 个太阳常数对应的光通量 Φ 应为:

$$\Phi = E \cdot S \approx 3\,744(\text{lm}) \quad (1)$$

式中: E 为被照面的照度; S 为被照面的面积。

系统的效率 η 可由下式表示:

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5 \approx 0.16 \quad (2)$$

式中: $\eta_1=0.7$ 为聚光镜收集率; $\eta_2=0.8$ 为聚光镜反射率; $\eta_3=0.4$ 为光纤传光束效率; $\eta_4=0.8$ 为积分棒效率; $\eta_5=0.983$ 为准直透镜组透过率。

光源的光视效能 K 取 40 lm/W ,则光源的功率 P 为:

$$P = \Phi / K / \eta = 585(\text{W}) \quad (3)$$

考虑到氙灯的性能减退和光源使用条件等因素,选用功率为 1 kW 氙灯,设计上留有比较大的冗余。

2.2 短弧氙灯

氙灯是利用氙气放电而发光的电光源^[2]。光谱能量分布中连续光谱很强,线光谱较弱,在可见区与 $6\,200\text{ K}$ 黑体辐射接近,光色接近日光,一般显色指数超过 94 ,故又有“小太阳”之称。氙灯的发光光谱曲线如图 2 所示。但在 $800\sim 1\,000\text{ nm}$ 的近红外区,有氙气放电的强辐射集中,使得该波段的光谱分布与真实太阳光谱分布有较大差异。对近红外波段的光谱要求匹配时需光路里插入滤光片^[3],文中只关注可见光部分的光谱,所以在椭球面反射镜内表面镀制反可见光透近红外的干涉膜系,以减少进入后续光路的热量。

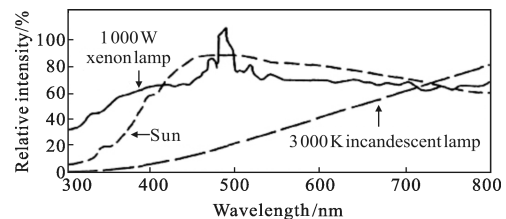


图 2 氙灯、太阳与白炽灯发光光谱对比

Fig.2 Spectrum comparison of xenon lamps, the sun and incandescent lamps

短弧氙灯发光效率约 40 lm/W 。直流燃点时,在离开阴极 $0.07l_0$ (l_0 为极距)处有一个称之为阴极光斑的最亮点,该点的辐射光达到的总辐射光通量的 70% 以上,这使超高压短弧氙灯成为近乎理想的点光源,尤其有利于光学系统的设计和使用。该系统选用的是玉宇 $1\,000\text{ W}$ 短弧氙灯。

2.3 椭球面反射镜

短弧氙灯光源具有轴对称性,采用椭球面聚光镜应具有很大的包容角,从而获得较高的聚光效率。对这种形式的聚光镜,氙弧峰值亮度区位于椭球面聚光镜的前焦点处,被椭球面聚光镜无球差地成像

于第二焦平面处。椭球面聚光镜的设计就是优选 f_1 、 f_2 , 使椭球面聚光镜的聚光效率和积分棒的口径利用率较高, 且第二焦点处的光束孔径角不能超出光纤的数值孔径。 f_1 根据选用氙灯的外形尺寸确定。确定原则是氙灯泡壳与聚光镜不相碰, 保证安装方便, 要有足够的空间供氙灯散热。第二焦点处的光束孔径角 u 由系统拉氏不变量计算求得。选定 f_1 后, 根据光线在第二焦点处的孔径角和像高选择合适的 f_2 , 以保证和光纤传光束之间有足够的耦合效率, 各变量定义见图 1。

设计聚光镜的口径为 360 mm, 第一焦距 f_1 为 60 mm, 第二焦距 f_2 为 800 mm。

2.4 光纤传光束

光纤传光束是以直径为 30~70 μm 的光纤尽可能紧密填充的光纤束。光纤束直径范围从数毫米到数厘米, 在端部的光纤填充率达 70%~85%。根据不同的用途, 传光束具有不同的形状、尺寸和材质。

使用光纤传光束照明具有照明方式多、发光端体积小、设计自由度和安全性高等优点^[4]。

结合短弧氙灯及椭球冷反射镜的结构和性能参数, 系统采用了直径为 8 mm 的圆形端面石英光纤传光束, 以保证在传光束直径尽量小的情况下达到更高的耦合效率。

2.5 积分棒

积分棒可以是空心或实心的, 空心棒需要在其内表面镀高反射率膜层, 而实心棒则是利用光从光密介质到光疏介质时发生的全反射特性。不同孔径角的入射光束在棒内发生不同次数的反射后在出射面上相互叠加, 使出射面上的辐射出射度变得均匀。

该设计采用了熔融石英玻璃为材料的实心积分棒。积分棒出射光的均匀性随方棒长度变化的情况是振荡衰减的曲线, 方棒的最佳长度可由下式计算^[5]:

$$\Lambda = \frac{l \tan \Phi_{\max}}{\sqrt{h^2 + w^2}} \quad (4)$$

式中: l 为积分棒长度; Φ_{\max} 为积分棒中光源的最大孔径角, 实际为 $\Phi_{\max} = \sin^{-1}(NA/n)$, NA 为椭球镜第二焦点处空气中的数值孔径, n 为积分棒的折射率; $\sqrt{h^2 + w^2}$ 为积分棒端面的对角线长度。这个最佳长度对应的 Λ 值为 1.824^[6], 已选光纤传光束的直径为 8 mm, 由此计算得到积分棒的最佳长度约为 $l=70$ mm。

2.6 准直镜组

根据要求, 模拟光照范围在距离目标模型约 4 m 处不小于 1.2 m × 1.2 m 的矩形, 如图 3 所示。

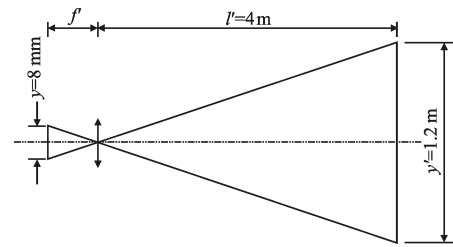


图 3 准直镜组的成像关系

Fig.3 Imaging relationship of collimating lens

根据成像关系:

$$\frac{y}{f'} = \frac{y'}{l'} \quad (5)$$

式中: y 为积分棒的边长 8 mm; y' 为辐照面有效边长 1.2 m; l' 为准直镜组到被照面的距离 4 m; f' 为投影透镜组的焦距。计算得准直镜组的焦距 f' 约为 26.7 mm, 考虑到投影面边缘照度不均匀, 取 $f'=25$ mm, 以保证有效辐照面积。

光线在积分棒后端面为均匀出射, 为了提高准直镜组出射光照度的均匀性, 投影透镜组为物方远心设计, 即各视场的主光线均垂直于积分棒后端面, 并且各视场均不允许产生渐晕, 如图 4 所示。

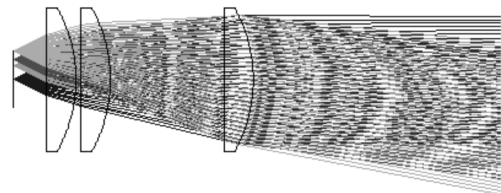


图 4 准直镜组光路图

Fig.4 Layout of collimating lens

利用光学设计软件 ZEMAX 的照度分析功能分析该准直镜组在像面的相对照度分布, 结果如图 5 所示, 可以看出投影透镜组出射的光在像面的照度很均匀。

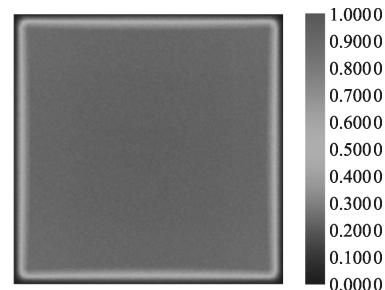


图 5 ZEMAX 软件中分析得到的像面相对照度分布

Fig.5 Relative illumination distribution from ZEMAX

3 全系统仿真及实验结果

3.1 全系统仿真

根据前述的选择和设计, 在光学软件 Lighttools

中建立了整个系统的模型,其中光纤传光束用一根直径为 8 mm 的圆柱代替,系统模型如图 6 所示。

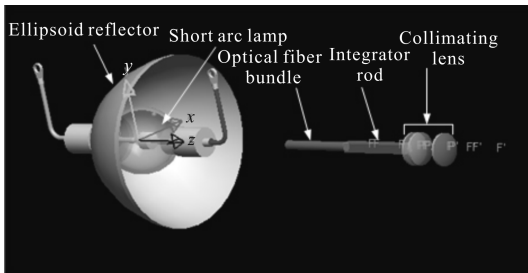


图 6 Lighttools 建立的便携式太阳模拟器模型

Fig.6 Model of portable solar simulator modeled with Lighttools

被照射面的照度不均匀度 U 采用以下方法表示:

$$U = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}} \times 100\% \quad (6)$$

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

在 Lighttools 软件中追迹 1 000 万条光线,得到被照射面的不均匀度为 3.1%,如图 7 所示。

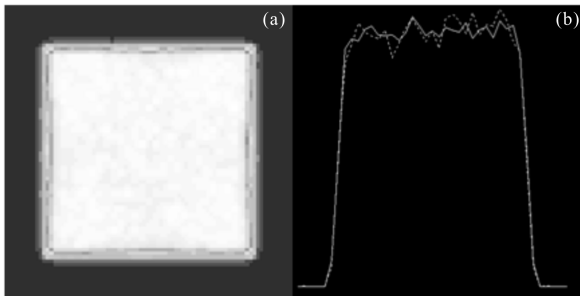


图 7 被照明面的照度均匀性分析结果

Fig.7 Results of illumination uniformity analysis

3.2 实验结果

在实验室里对便携式太阳模拟器的性能进行了测试。图 8 为便携式太阳模拟器加电时的照片。



图 8 便携式太阳模拟器加电效果图(5 台设备同时加电的效果)

Fig.8 Picture of working solar simulator (5 solar simulators are working together)

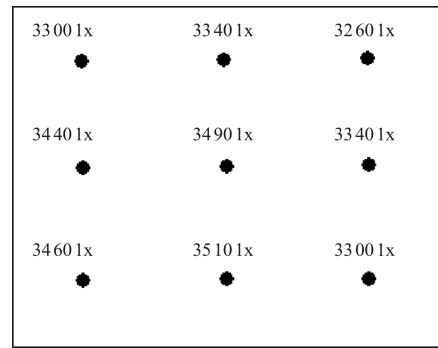


图 9 被照面照度分布图

Fig.9 Illumination distribution map of illuminated surface

经测试,准直镜组投射的光斑为正方形,在距离准直镜组出光口 4 m 的被照面上,有效光斑尺寸为 1.3 m × 1.3 m。被照面平均照度为 3 382 lx,不均匀度为 3.8%,实测的被照面照度分布如图 9 所示。

4 结 论

文中设计的便携式太阳模拟器体积小、便于移动、结构简单。经过实验室测试,性能指标符合要求。便携式太阳模拟器采用了柔性的光纤传光束,可以灵活调整照射的方向,通过更换不同焦距的准直镜组可以方便地实现不同的光束发散角,能够满足不同的使用需求。

参 考 文 献:

- [1] Liu Hongbo. Solar simulation technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(2): 177-181. (in Chinese)
- [2] Chen Dahua. The characteristics of xenon lamp and its applications [J]. *Lamps and Lighting*, 2002 (4): 18-20. (in Chinese)
- [3] Pan Yongqiang, Bai Tao, Hang Lingxia. Study on AM1.5 filter in solar simulator for photovoltaic module solar simulator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2484-2488. (in Chinese)
- [4] Jiang Yuan. The characteristics of light guide bundle of polymer optical fiber (POF)[J]. *Fiber Glass*, 2004(6): 36-43. (in Chinese)
- [5] Jacobson B A, Gdngelbach R D, Ferri J M. Beamshape transforming devices in high-efficiency projection systems [C]//SPIE, 1997, 3139: 141-150.
- [6] Jin Xinhua, Zheng Xiaodong, Wang Zheng. Study on illumination uniformity of the end surface's radiation of polygon rod integrating lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(12): 1964-1968. (in Chinese)