

大面积投影式太阳模拟器的光学设计

杜志强^{1,2}, 张黎明¹, 司孝龙¹, 陈洪耀¹, 徐伟伟¹, 汪少林³, 马文佳³, 杨春燕³

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230031;

³上海卫星工程研究所, 上海 200240

摘要 为模拟大面积空间太阳光辐照环境, 提出一种新型投影式太阳模拟系统设计方法。根据光学扩展量理论分析系统的能量传递过程, 采用 4 个短弧氙灯阵列作为光源, 设计物方远心投影系统以实现大面积均匀照明。通过 Zemax 软件模拟仿真及实际系统测量来验证系统设计的合理性。实验结果表明: 太阳模拟器的有效辐照面尺寸为 1000 mm×1000 mm, 辐照度可达 1263 W/m², 且辐照面不均匀度优于±4.82%。该研究可为卫星载荷的空间环境实验提供准确可靠的太阳光辐照, 弥补传统大型太阳模拟器体积大、造价高的局限。

关键词 光学设计; 太阳模拟器; 投影系统; 大面积; 均匀性

中图分类号 O435 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0623003

Optical Design of Large-Area Projection Solar Simulator

Du Zhiqiang^{1, 2}, Zhang Liming¹, Si Xiaolong¹, Chen Hongyao¹, Xu Weiwei¹,
Wang Shaolin³, Ma Wenjia³, Yang Chunyan³

¹Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230031, China;

³Shanghai Satellite Engineering Research Institute, Shanghai 200240, China

Abstract In order to simulate the large-area solar irradiation in the space environment, a systematic design procedure for a new projection solar simulator is presented. Based on etendue theory, the energy transfer process of the system is analyzed. An array of four xenon lamps is used as light source. An object-space telecentric projection system is designed to realize a large area and uniform illumination. The simulation of Zemax software and the actual measurement for the system are carried out to verify the rationality. The results show that the effective irradiance surface of the solar simulator is 1000 mm×1000 mm, the irradiance can get 1263 W/m², and the irradiance non-uniformity is less than ±4.82%. The solar simulator can provide a reliable solar radiation for the space environment test of satellites, which conquers the limitations of large size and high cost of the traditional large solar simulators.

Key words optical design; solar simulator; projection system; large area; uniformity

OCIS codes 230.1150; 120.4570; 350.6050; 110.2945

1 引言

太阳模拟器是模拟空间太阳辐照环境的设备, 能够较为准确地模拟不同大气质量条件下的太阳光照特性, 如辐照强度、辐照均匀性、辐照面积、辐照稳定性、光谱分布、准直角等等, 以满足实验研究对太阳辐照的

收稿日期: 2017-01-19; 收到修改稿日期: 2017-02-27

基金项目: 国家 863 计划(2012AA12A302-2)、安徽省自然科学基金(12080805Qd74)

作者简介: 杜志强(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事光学系统设计及光辐射测量技术方面的研究。

E-mail: duzhiqiang666@qq.com

导师简介: 张黎明(1958—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学遥感辐射定标与标准传递等方面的研究。

E-mail: lmzhang@aiofm.ac.cn

特殊要求^[1]。20世纪60年代起,美国^[2]、欧空局^[3]、俄罗斯等航天大国及组织相继研制大型太阳模拟器对航天器进行热平衡实验。此后,太阳模拟器广泛应用于太阳能光伏组件的标定、卫星姿态部件的测试标定、遥感技术中太阳光谱辐照模拟、材料的老化性能测试等领域^[4]。随着我国载人航天工程、探月工程等国家重大专项工程的开展,结构外形复杂的航天器越来越多,大型太阳模拟器在航天器的空间环境模拟实验中优势更加明显^[5]。以往大型太阳模拟器大多以离轴式光学系统为主,通常采用单块大口径反射镜或者多块小口径反射镜拼接技术获得较大的辐照面。然而,离轴式太阳模拟器的结构复杂,体积及重量大,装调难度大,研制成本极高,无法满足当前越来越迫切的空间环境模拟测试需求。因此,深入研究太阳模拟器的关键技术,在保证较高光学性能的同时,更大程度地降低成本,实现高效率、大面积、均匀的太阳辐照模拟是目前研究的重点方向之一^[6]。

本文设计了一种新型投影式太阳模拟系统,根据光学扩展量对太阳模拟系统的能量传递效率进行分析,提出了物方远心投影系统实现大面积均匀照明,解决小口径光学系统实现大辐照面光斑的难题,有效地模拟地球轨道空间光辐照环境,为光学遥感器的实验室定标和性能测试提供可靠的空间光辐照环境。

2 光学系统设计

2.1 原理及设计指标

太阳模拟器的光学系统主要由光源系统、匀光系统和投影系统三部分组成,结构如图1所示。光源系统由多个氙灯光源阵列排布而成,氙灯光线经椭球反光镜的第一焦点后反射汇聚于第二焦点位置,以提供足够的光能量。匀光系统采用光学积分器组件将光源系统发出的光束分割和叠加形成一个均匀的空间分布,同时起到调整光斑形状的作用。投影系统则是将匀光系统的出射光投射到辐照面上,形成一定尺寸和发散角的照明光束,模拟空间太阳光辐照特征。主要技术指标如表1所示。

表1 主要技术指标

Table 1 Main technical indices

| Item | Parameter |
|-------------------|--------------------|
| Illumination area | 1000 mm×1000 mm |
| Spectrum range | 400~1000 nm |
| Non-uniformity | <6.5% |
| Irradiance | 1.5 solar constant |

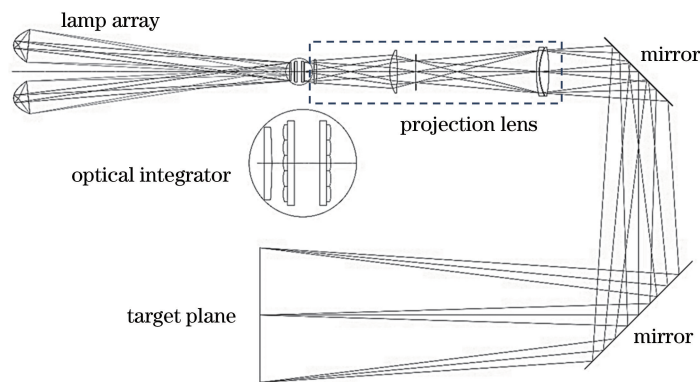


图1 太阳模拟器光学系统

Fig. 1 Optical system of solar simulator

光学扩展量是非成像光学系统中的重要概念,用于描述具有一定孔径角和截面积的光束的几何特性^[7]。其定义为

$$E = n^2 \iint \cos \theta dA d\Omega, \quad (1)$$

式中 θ 为面积 dA 与立体角 $d\Omega$ 的中心轴之间的夹角。由(1)式可见,光束的扩展量实际上是光束所通过的截面积与光束所占据的空间立体角的积分。

对于理想光学系统,在不考虑折射、反射、散射、吸收等损失的情况下,太阳模拟器的输出光通量可以表示为

$$\Phi' = \eta L_{\text{source}} \cdot E_{\text{max}}, \quad (2)$$

式中 η 为光学系统的效率, L_{source} 为光源的亮度, E_{max} 为系统的光学扩展量。

由(2)式可知,影响太阳模拟系统输出光通量的主要因素为光源的亮度、光学系统的效率及光学扩展量的限制。因此,在太阳模拟器的光学系统设计过程中,需要综合考虑系统的成本、体积及实验指标要求,合理的光学系统结构,并通过系统各部分之间的光学扩展量匹配,实现高效率照明。

2.2 光源系统

太阳模拟器对光源的选择要求较高,光源应具有高的发光效率、高亮度、适当的光谱分布等特性。短弧氙灯具有连续光谱特性,其可见光光谱近似于太阳光,所以常用太阳模拟器的光源^[8]。为了充分利用氙灯的光能量,采用深椭球反射镜作为聚光系统。光路原理如图2所示,光源放置在 f_1 的位置,光线经深椭球反射镜聚光后会聚于 f_2 点。

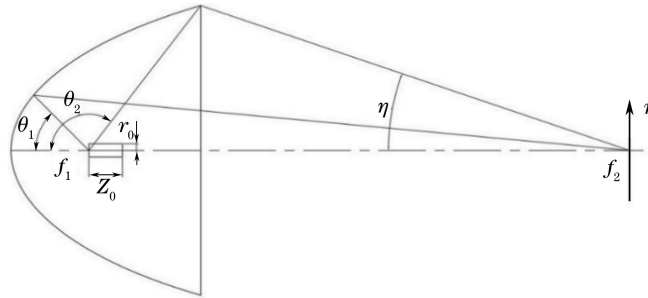


图2 椭球反射镜的光学参数

Fig. 2 Optical parameters of ellipsoidal reflector

椭圆在极坐标下的方程为^[9]

$$R(\theta) = \frac{f(1+e)}{1+e\cos\theta}, \quad (3)$$

式中 f 为椭球的第一焦距, e 为椭球的偏心率, θ 为孔径角。

当电弧长度远小于椭球反光镜尺寸时,根据椭圆方程几何关系可以得到光线在第二焦平面上的矢高 $r(\theta)$ 和角度 $\eta(\theta)$, 即

$$r(\theta) = \sqrt{Z_0^2 + r_0^2} \cdot \sin \left[\theta + \arctan \left(\frac{r_0}{Z_0} \right) \right] \cdot \frac{(1+e^2+2e\cos\theta)^2}{(1-e^2)[2e+(1+e^2)\cos\theta]}, \quad (4)$$

$$\sin \eta(\theta) = \frac{1-e^2}{1+e^2+2e\cos\theta} \sin \theta, \quad (5)$$

从而椭球反光镜输出的光学扩展量可以表示为

$$E_{\text{Ellipse}} = \pi^2 r_{\text{max}}^2 \sin^2 \eta_{\text{max}}. \quad (6)$$

从(6)式可知,在灯弧尺寸一定的条件下,光学扩展量主要受到孔径角 θ 和偏心率 e 的影响。由于光源内部发光电弧服从一定的发光强度和角度分布,椭球反光镜的有效包容角范围应该与氙灯光源相匹配,一般椭球反光镜的有效包容角范围在 $45^\circ \sim 135^\circ$ 区间内即可获得较高的能量收集率。假定短弧氙灯的发光电弧的长度为 10 mm,半径为 1 mm,则不同偏心率 e 值的椭球反光镜对应不同的最大光源扩展量,如图3所示。

从图3可见,随着偏心率 e 的增加,椭球反光镜的光学扩展量逐渐增加。然而,实际加工制造过程中,椭球反光镜的偏心率 e 值的选取不仅要考虑到氙灯光源的外形尺寸及椭球反光镜的加工制造能力,同时也要满足与光学积分器相对孔径匹配的原则,这就限制了单个椭球反光镜实际的光学扩展量^[10]。

为了进一步提高光源系统的照明效率,可采用多个光源单元的阵列形式来增加系统光学扩展量,通过控制光源单元的夹角、距离和位置,将氙灯发出的光束会聚叠加在椭球镜的第二焦平面位置上的相同位置,实现氙灯光源照明效率最大化。这里,光源灯室采用4个椭球反光镜按照正方形的结构形式排列,每个反光镜的安装端口直径为 80 mm,出射端口直径为 350 mm,椭球镜出射端口至第二焦点距离为 2800 mm。氙灯光

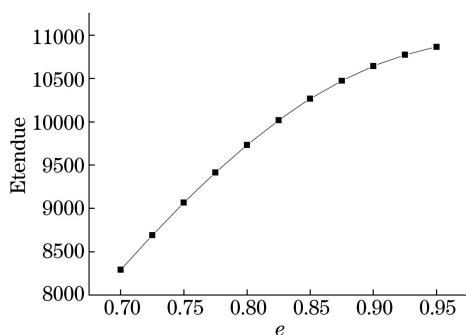


图 3 不同偏心率的椭球反射镜对应的光源扩展量

Fig. 3 Etendue corresponding to ellipsoidal reflector with different eccentricities

源与椭球反光镜同轴安装,均向中心光轴倾斜 5.64° ,则氙灯发出的光经反射镜在第二焦点处会聚,如图 4 所示。

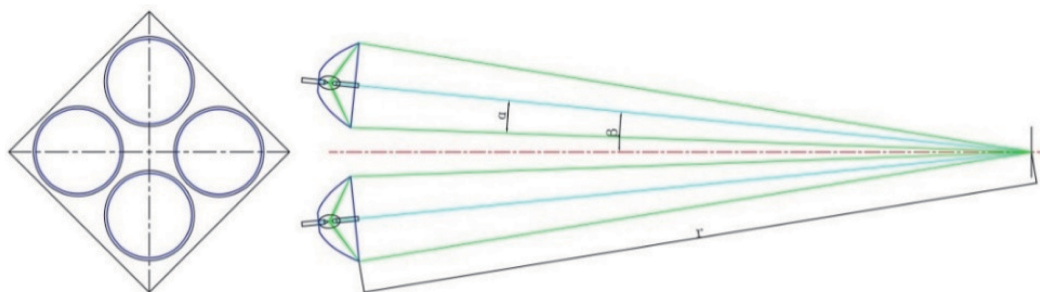


图 4 氙灯光源阵列原理图

Fig. 4 Schematic diagram of xenon Lamps array

2.3 匀光系统

光学积分器是匀光系统的核心部件,它是由前后两组对称排列的透镜阵列组成,两组元素透镜的孔径、焦距、厚度是相同的,互相对方的焦平面位置^[11]。工作原理如图 5 所示,光源上的一点发出的光经准直镜平行入射到光学积分器,前组透镜阵列将入射的宽光束分割为许多尺寸相同的细光束,这些细光束聚焦在后组透镜阵列上形成多个光源像照明,而后组透镜阵列将前排对应透镜成像于无穷远后,再由聚光镜叠加成像于照明面上,获得具有极高均匀性的照明面。

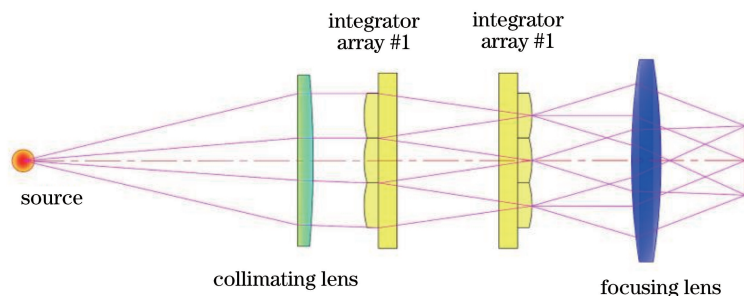


图 5 光学积分器成像原理图

Fig. 5 Imaging principle of optical integrator

任何光学系统所能收集的扩展量是有限的,如果光束的扩展量比这个限制大,那么光学系统将只能收集一部分光线。在太阳模拟器中,光学积分器的面积和元素透镜的数值孔径就限制了所能收集的最大扩展量。光学积分器的扩展量可以表示为^[12]

$$E = n^2 A \cdot \pi \sin^2 \theta_{1/2} = \frac{n^2 \pi A}{4F^2}, \tag{7}$$

式中 n 为光学积分器所在介质折射率, A 为光学积分器的有效面积, F 是透镜的数值孔径。

从(7)式可知,光学积分器的有效通光面积和元素透镜的数值孔径限制了所能收集的最大光学扩展量。根据氙灯光源的发散角及排列方式可知,选取光学积分器的元素透镜的数值孔径 F 为 3,可实现光学积分器与光源系统的良好匹配。为了保证较高的能量利用率,光学积分器的有效通光面积应与光源系统在第二焦平面的光斑面积相同。

光学积分器的阵列数目是影响照明均匀性的关键因素。光学积分器的光通道数目过少,则无法达到匀光效果。透镜阵列数目过多,通常能改善照明均匀性,但在通光面积一定的前提下,每个元素透镜的口径就会变小,这不仅会增加器件加工的难度,同时由小透镜之间过渡区域引起的能量损失也会增加。综合考虑实际加工的难度和匀光作用,光学积分器通道数目选择为 37,则正方形元素透镜的边长为 24 mm,焦距 f 为 101.82 mm。积分器的实物如图 6 所示。

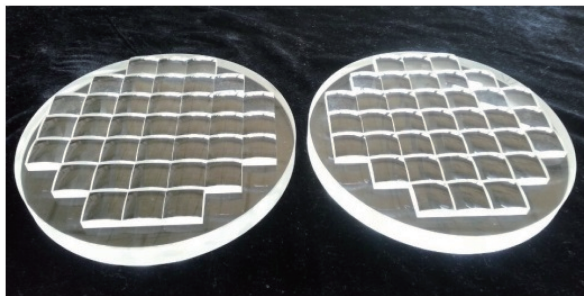


图 6 光学积分器结构图

Fig. 6 Structure of optical integrator

2.4 投影系统

大型太阳模拟器准直系统的类型决定了总体方案结构和总体技术指标的高低,其设计过程既要考虑光学扩展量守恒、能量利用率及均匀性等因素,更需要顾及到系统的空间布局合理性。太阳模拟器的光学系统可以分为同轴透射式与离轴反射式两类。同轴式光学系统具有结构简单、成本较低等优点。传统同轴发散式太阳模拟系统通过增大会聚透镜的焦距来保证照明光斑的面积,这将导致光路结构的尺寸增大,系统的紧凑性降低,而且也无法满足均匀性的要求。

因此,本文基于柯勒照明原理设计了物方远心投影系统,光路如图 7 所示。投影系统由叠合镜、聚光镜和投影镜构成,其中叠合镜和聚光镜将物方无穷远的光线汇聚形成照明高度均匀的二次光源面,投影镜将此二次光源面成像于辐照面的位置,实现大面积的均匀照明,同时光学积分器的出瞳被叠合镜和聚光镜成像于投影镜的位置,这样既保证了像面的均匀性,又保证了光学积分器与光学系统的光瞳匹配。

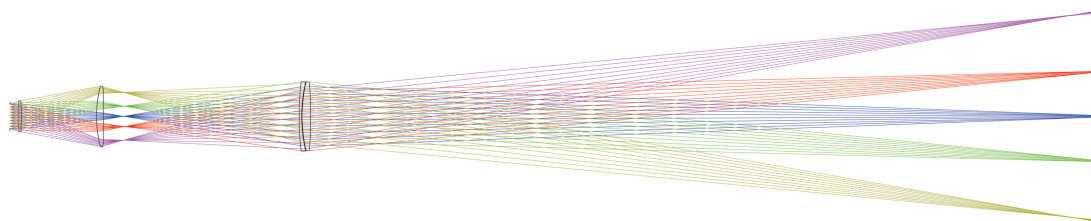


图 7 投影系统光学原理

Fig. 7 Optical principle of projection system

太阳模拟系统的设计过程中,不仅需要考虑到辐照面的尺寸、光学利用率、均匀性等技术指标,同时必须考虑减小投影系统的像差对能量收集率的不良影响,实现更高要求的太阳光照模拟。叠合镜的作用是将光学积分器出射的相同方向平行光进行会聚,主要减小其球差和彗差。聚光镜放置在叠合镜的焦平面附近,其作用相当于场镜,可以减小后续光路的尺寸,其本身不产生球差、彗差、像散和色散,只会产生少量的畸变和场曲。对投影光学系统畸变的校正非常重要,投影镜头的畸变过大会使辐照面的光斑发生变形,影响太阳模拟器出射的光束角度的一致性。因此,投影镜头采用双分离物镜的结构形式,其对玻璃组合的要求相对自由一些,可采用折射率值和色散值相差较大的玻璃材料,一方面平衡前组光学系统的残留像差,另一方面可减小

投影系统的色差和球差,提高辐照面的照明质量。

太阳模拟器的投影系统是一种大像差系统,其成像质量主要以场曲、畸变及像面照度来进行评价。从图 8 的像差曲线可以看到,像面畸变小于 1.35%。图 9 给出了像平面上相对照明变化情况,从图中可以估计出视场边缘的照度相当于视场中心的 98%。设计结果符合实际使用要求。

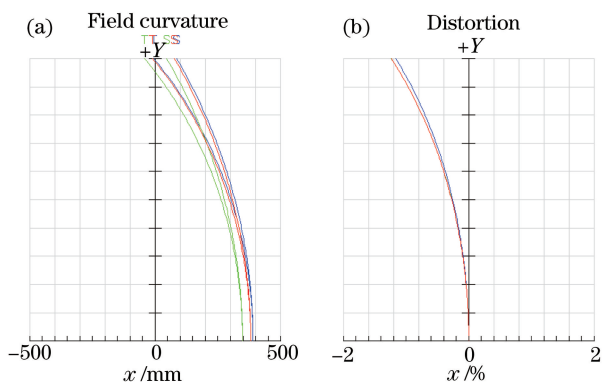


图 8 (a)场曲和(b)畸变

Fig. 8 (a) Field curvature and (b) distortion

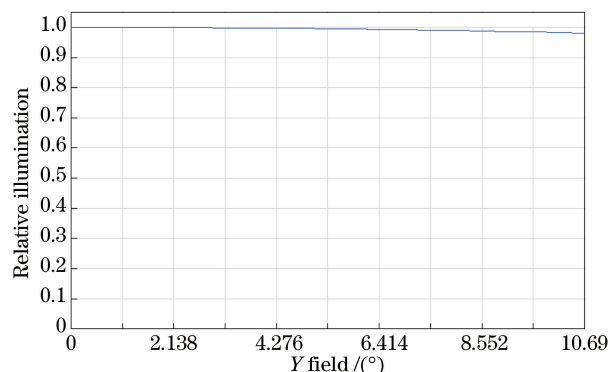


图 9 像面相对照度

Fig. 9 Relative illumination of image plane

3 分析和讨论

在太阳模拟器设计过程中,准确地评估辐照度和辐照均匀性是一项重要的工作,可以判断系统性能是否达到设计要求,指导和完善光学系统设计,降低研发周期的成本。

3.1 系统效率分析

太阳模拟系统是一种复杂照明系统,系统输出能量由光源、光学系统结构及各光学元件的效率共同决定^[11]。由非成像光学理论可知,系统结构效率为匀光系统的光学扩展量与光源系统光学扩展量的比值。此外,光学元件自身的散射和吸收也会造成光能的损失,降低系统整体的效率。因此,根据光学系统的设计结果,系统的传递效率表示为

$$k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4^m \cdot k_5^n \cdot k_6 \cdot k_7, \quad (8)$$

式中 k_1 为氙灯光电转换效率,取 0.45; k_2 为椭球镜的聚光效率,根据氙灯的配光曲线,取 0.75; k_3 为椭球镜的镜面反射率,取 0.8; k_4 为光学透镜的透射率,取 0.9,透镜的数目 m 为 7; k_5 为平面镜的反射率,取 0.8,平面镜的数目 n 为 2; k_6 为系统的结构效率,取 0.73; k_7 为氙灯光谱可见近红外的比率,取值 0.71。经过计算,可得系统的传递效率为 $k = 0.0486$ 。

为了在不小于 1000 mm×1000 mm 的辐照光斑上达到 1.5 倍太阳常数,太阳模拟器采用 4 个 7 kW 的氙灯作为光源,结合系统传递效率分析,辐照面上可见-近红外波段(400~1000 nm)的光谱辐照度为 1.36 kW/m²,是大气层外太阳光谱相同波段内的 1.62 倍,满足设计指标。

3.2 系统建模仿真

太阳模拟器辐照均匀性是太阳模拟器最重要的技术指标之一,因此必须对太阳模拟器辐照均匀性进行仿真计算^[14]。根据光学系统的尺寸及布局,在 Zemax 光学软件的非序列模式里建立光学系统模型,采用蒙特卡罗方法对太阳模拟系统进行光线追迹,如图 10 所示。

氙灯光源随机向空间发出大量的光线,带有能量的光线经过光学系统的各个元件,投射到照明平面上,通过统计落在照明平面上不同小区域内的光线数目来确定照度的分布情况。这里探测面的尺寸为 1200 mm×1200 mm,划分为 120×120 个网格,追迹光线为 4 亿条。系统仿真结果如图 11 所示,在 1000 mm×1000 mm 的有效辐照面内,辐照面的不均匀度为±4.26%,说明太阳模拟系统设计的合理性。

4 实验验证

采用安徽光学精密机械研究所研制的大动态范围辐照度计对投影式太阳模拟器的光学性能进行检测,

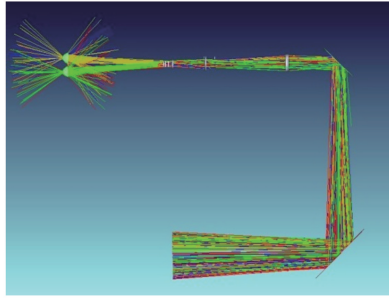


图 10 系统的蒙特卡罗光线追迹

Fig. 10 Monte Carlo ray-tracing for the system

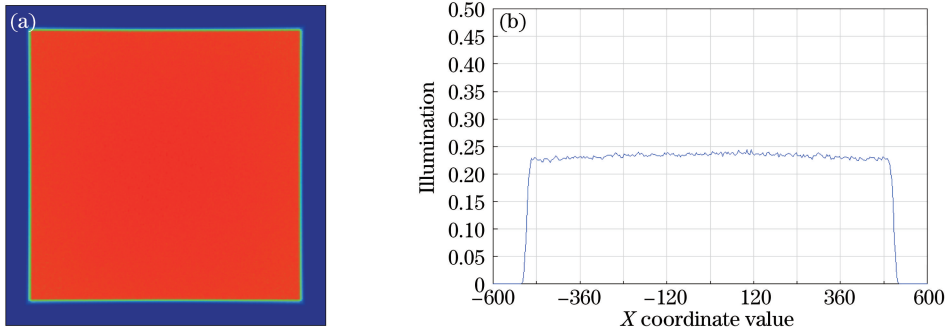


图 11 系统仿真结果。(a)辐照面的辐照度分布图;(b)辐照面的辐照度分布一维显示图

Fig. 11 Simulation result of the system. (a) Irradiation distribution on the irradiation plane;

(b) one dimension irradiation distribution on the irradiation plane

通过辐照度和辐照面均匀性等实验参数的分析,进一步验证光学系统设计与软件模拟仿真结果的正确性。

4.1 辐照度检测

调节系统的输出功率,将大动态范围辐照度计放置在辐照面中心的测试点,通过数据采集器获取辐照度计响应值 D_N ,利用实验室得到的定标系数 K 可得到可见-近红外波段(400~1000 nm)的辐照度值 E_s ,即

$$E_s = D_N \cdot K. \quad (9)$$

将 4 个氙灯电源的输出功率都调至 6200 W,待太阳模拟器光源输出稳定后,多次测量辐照度取平均值,结果表明在 400~1000 nm 波段范围内辐照面上的积分光谱辐照度为 1263 W/m^2 ,是太阳光谱相应波段内辐照度的 1.5 倍,满足设计要求。

4.2 面不均匀性检测

太阳模拟器的辐照面不均匀性检测涉及两个重要因素,一个是被检测的辐照面上测试区域点数量的选取,另一个是测试器件的窗口面积选取。根据太阳模拟器均匀度测试的原则^[15],将测试的辐照面分成不少于 36 等分,测试器件窗口面积应选择独立等分面积的 25% 以上。在实际测试中,将辐照度计固定在垂直于入射光束方向放置的二维平移台上,使其在 $1200 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$ 辐照平面内分别沿水平方向(X 轴)和垂直方向(Y 轴)平移运动,步长为 50 mm,扫描测试辐照面上各点的辐照度,结果如图 12 所示。

开启太阳模拟器电源,待光源稳定后,根据辐照面不均匀性测量方法对照明面进行扫描测试。辐照不均匀度的计算公式为^[16]

$$E = \pm \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\%, \quad (10)$$

式中 E 为辐照不均匀度, E_{\max} 为辐照面上的辐照度最大值, E_{\min} 为辐照面上的辐照度最小值。

实验结果表明,在辐照面上 $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ 范围内,太阳模拟器的辐照面不均匀度优于 $\pm 4.82\%$ 。实验结果与仿真分析的结果基本一致。影响测量不确定度的因素包括:光源稳定性、探测器稳定性、探测器非线性以及其它因素等,详细情况如表 2 所示。光源的稳定性是根据测量面均匀性时探测器同步监视光源的输出值给出,其不确定度优于 1%;根据探测器的实验室定标检测报告,探测器稳定性的不确定度为 0.5%,

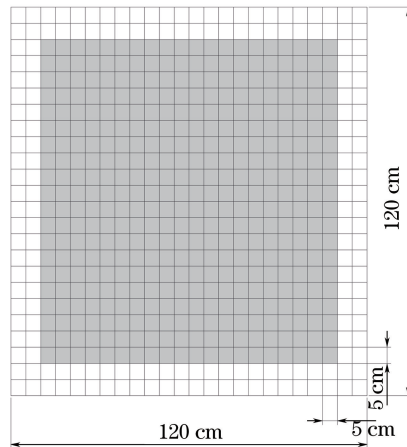


图 12 辐照不均匀度的测试示意图

Fig. 12 Test of the irradiance non-uniformity

探测器非线性的不确定度为 0.1%；考虑到环境的杂散光、系统装调误差等其他因素，通过多次重复测量，其不确定度可优于 0.5%。基于以上分析，在置信水平 95% ($k=2$) 的情况下，辐照面不均匀性测量的合成相对不确定度为 1.2%。

表 2 测量不确定因素

Table 2 Uncertainty of measurement

| Sources | Uncertainty ($k=2$) / % |
|-----------------------|---------------------------|
| Source stability | 1 |
| Detector stability | 0.5 |
| Detector nonlinearity | 0.1 |
| Other uncertainty | 0.5 |
| Combined uncertainty | 1.2 |

5 结 论

本文设计了一种投影式太阳模拟系统，采用物方远心投影系统实现同轴光学系统的大面积均匀照明，系统结构紧凑，光能利用率高，造价成本相对较低。经测试，辐照光斑的有效尺寸为 1000 mm × 1000 mm，辐照度达 1.5 倍太阳常数，辐照面不均匀度优于 ±4.82%。这为大型太阳模拟器的研制提供了技术借鉴和参考，对于我国空间环境模拟技术的多样化发展具有一定的意义。

参 考 文 献

- [1] Yang Linhua, Li Hongsong. The development of large solar simulators in the world [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(2): 162-167.
杨林华, 李泓松. 国外大型太阳模拟器研制技术概述 [J]. 航天器环境工程, 2009, 26(2): 162-167.
- [2] Eddy R. Design and construction of the JPL SS15Bsolar simulator [C]. 3rd Space Simulation Conference, 1968:22-35.
- [3] Frey. Study of a large solar simulator at ESTEC [R]. N83-13127.
- [4] Gao Yan, Liu Hongbo, Wang Li. Solar simulation technology [J]. Chinese Optics and Applied Optics, 2010, 1(2): 104-111.
高 雁, 刘洪波, 王 丽. 太阳模拟技术 [J]. 中国光学与应用光学, 2010, 1(2): 104-111.
- [5] Yang Linhua. Large solar simulator development technologies [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(2): 173-178.
杨林华. 大型太阳模拟器研制技术综述 [J]. 航天器环境工程, 2012, 29(2): 173-178.
- [6] Fu Ming, The design of large solar simulator divergent optical system [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014: 21-30.
付 明. 大型发散式太阳模拟器光学系统设计 [D]. 长春: 长春理工大学, 2014: 21-30.

- [7] Winston R. Nonimaging optics[M]. New York: Academic Press,1991: 26-81.
- [8] Li Qian, Wang Cheng, Zha Jun, *et al.* Spectral characteristic of short-arc xenon lamp and application in solar simulators[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(6): 1447-1450.
李倩, 王城, 查俊, 等. 短弧氙灯光谱特性及其在太阳模拟器中应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(6): 1447-1450.
- [9] Jacobson B A, Gengelbach R D. Metal halide lighting systems and optics for high efficiency compact LCD projectors [C]. SPIE, 1998, 3296: 38-45.
- [10] Ren Lanxu, Wei Xiudong, Niu Wenda, *et al.* A high flux solar simulator based on array of non-coaxial ellipsoidal reflector[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1022002.
任兰旭, 魏秀东, 牛文达, 等. 非共轴椭球面聚光阵列式高焦比太阳模拟器[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1022002.
- [11] Li Guangyun, Zhang Guoyu, Fu Ming, *et al.* Design and analysis of square integrator in solar simulator[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(1): 48-52.
李光云, 张国玉, 付明, 等. 太阳模拟器中正方形光学积分器的设计与分析[J]. 应用光学, 2014, 35(1): 48-52.
- [12] Brennesholtz M S. Light collection efficiency for light valve projection systems[C]. SPIE, 1996, 2650: 71-79.
- [13] Chang C M, Shieh H P D. Design of illumination and projection optics for projectors with single digital micromirror devices[J]. Applied Optics, 2000, 39(19): 3202-3208.
- [14] Xiang Yanhong, Zhang Rong, Huang Bencheng. Irradiation uniformity simulation of KFTA solar simulator [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006, 23(5): 288-292.
向艳红, 张容, 黄本诚. KFTA 太阳模拟器辐照均匀性仿真[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(5): 288-292.
- [15] Gu Lishan. The testing of AM0 solar simulator with large irradiance surface[J]. Analytical Instrumentation, 2013(4): 83-87.
谷立山. 大辐照面 AMO 太阳模拟器检测[J]. 分析仪器, 2013(4): 83-87.
- [16] Gao Yue, Zhang Guoyu, Zheng Ru, *et al.* Solar simulator irradiation uniformity based on optical integrator[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0623003.
高越, 张国玉, 郑茹, 等. 光学积分器对太阳模拟器辐照均匀性的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0623003.