

doi:10.3788/gzxb20144311.1122005

具有一个太阳常量的高准直太阳模拟器 光学系统设计

刘石¹, 张国玉^{1,2}, 孙高飞¹, 王国名¹, 王凌云^{1,2}, 高玉军³

(1 长春理工大学, 长春 130022)

(2 吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 长春 130022)

(3 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130022)

摘 要:为解决现有太阳模拟器无法同时模拟真实太阳张角和真实辐照度(一个太阳常量)的难题,设计了一种新型太阳模拟器光学系统,阐述了光学系统中聚光镜的设计、光学积分器的优化技术及投影镜组的离焦对辐照不均匀度的影响.利用 Zemax 软件,以序列与非序列功能相结合的方式对积分器的光学参量进行优化,并设计了视场光阑和准直物镜系统.利用 LightTools 软件对光学系统进行仿真,结果表明:设计的太阳模拟器可以实现 $32'$ 的真实太阳张角模拟,且辐照度达到一个太阳常量.同时,辐照面小于 $\Phi 100$ mm 时,不均匀度优于 $\pm 1.6\%$;辐照面在 $\Phi(100\sim 300)$ mm 时,不均匀度优于 $\pm 3.8\%$.

关键词:太阳模拟器;太阳张角;辐照度;光学积分器;不均匀度;视场光阑;准直物镜

中图分类号:V524.2

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)111122005-6

Design of Optical System for the High-collimating Solar Simulator with One Solar Constant

LIU Shi¹, ZHANG Guo-yu^{1,2}, SUN Gao-fei¹, WANG Guo-ming¹,
WANG Ling-yun^{1,2}, GAO Yu-jun³

(1 Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 Jilin Engineering Research Center of Photoelectric Measurement & Control Instruments,
Changchun 130022, China)

(3 Changchun Institute of Optics, Fine Machines and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130022, China)

Abstract: In order to solve the problem that the real solar angle and true irradiance (one solar constant) can not be simulated by the existing solar simulator at the same time, a new type of solar simulator optical system was designed. The design method of the optical system of the condenser was described, and the optimization technique of optical integrator and defocusing effect of projector lens were discussed. Using Zemax, optical integrator was designed by sequence and non-sequence, and the field diaphragm and the collimating lens system were also designed. The optical system was simulated with LightTools software, and the results show that $32'$ of real solar angle and a constant solar irradiance can be achieved by the solar simulator, irradiation non uniformity in $\Phi 100$ mm range is less than $\pm 1.6\%$ and in $\Phi(100\sim 300)$ mm is less than $\pm 3.8\%$.

Key words: Solar simulator; Solar angle; Irradiance; Optical integrator; Non uniformity; Field stop; Collimating lens

OCIS Codes: 220.0220; 230.0230; 230.4040; 220.2945; 220.4840

基金项目:国家公益性行业科技专项(Nos. GYHY200706003, GYHY201006043)和吉林省科技发展计划(No. 20118012)资助

第一作者:刘石(1986-),男,博士研究生,主要研究方向为光学设计、航天器地面标定与测试. Email:363860604@qq.com

导师(通讯作者):张国玉(1962-),男,教授,博士,主要研究方向为空间科学与技术、光电仪器与检测技术等. Email:zh_guoyu@yahoo.com.cn

收稿日期:2013-07-09;录用日期:2013-11-01

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

太阳模拟器作为一种在室内利用人工光源模拟太阳光辐照特性的试验、定标设备,已在诸多领域得到了广泛应用^[1].近年来,随着科学技术的发展,对太阳模拟器的要求也愈来愈高,美国 Abet Technologies, Inc.先后研制 Sun2000 系列、Sun3000 系列太阳模拟器;美国 Newport 公司研制了 Sol1A Class ABB 太阳模拟器、Sol2A Class ABA 太阳模拟器.向艳红等研制出 KFTA 太阳模拟器^[2];天津大学罗青青采用氙灯与变温黑体双光源相结合的方式设计了一宽光谱的太阳模拟器^[3];511 所研制的 KF7706 是一台离轴式太阳模拟器;长春理工大学先后研制了卫星物理仿真试验用运动式太阳模拟器和自主导航试验用太阳模拟器^[4].然而,从目前公开的文献报道来看,国内外现有的太阳模拟器,由于系统中设计参量相互制约,不能同时满足模拟太阳光辐照特性中太阳张角 $32'$ 和太阳辐射强度大于一个太阳常量这两项指标^[5-6].尤其对空间航天器的地面环境试验和标定用太阳模拟器,要求其能真实模拟空间太阳光特性,即辐射光束输出特性应具有真实的太阳辐射强度、太阳张角(准直角)、光谱分布、辐射稳定性、均匀性和足够大的光束口径^[6].

本文设计了一种新型光学系统,突破了同时模拟真实太阳张角和太阳辐射强度大于一个太阳常量的技术瓶颈,并保证了太阳模拟器的高均匀性.

1 太阳模拟器的组成及工作原理

太阳模拟器采用同轴透射式准直光学系统,主要由组合聚光镜、短弧氙灯、光学积分器(场镜与投影镜)、视场光阑、准直物镜组成,如图 1.

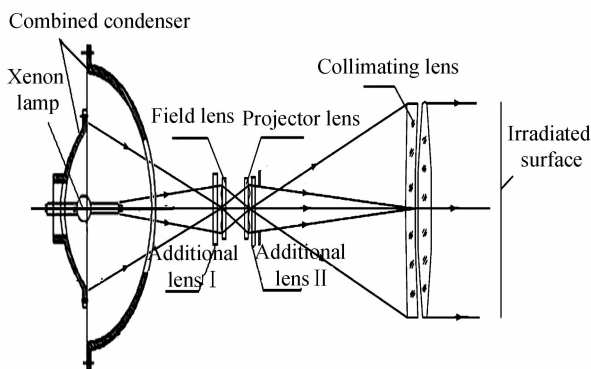


图 1 太阳模拟器的组成及工作原理

Fig. 1 The composition and working principle

使用具有轴对称性且接近太阳光谱的短弧氙灯作光源,组合聚光镜将位于第一焦点处光源(短弧氙灯)发出的光束会聚到其第二焦点处,并在光学积分器的入射端面(场镜组)形成一个辐照度分布^[6-7],这个分布被光学积分器各通道对称分割,叠加再成像后经视场

光阑和准直物镜后以平行光出射,形成一个辐照度均匀分布的辐照面.这样从准直物镜前方看去,辐射光束来自位于准直物镜焦面上的光阑,如同来自“无穷远”处的太阳,从而模拟了太阳光辐照.

2 组合聚光镜与光学积分器的设计

2.1 组合聚光镜的设计

聚光镜作为太阳模拟器光学系统的关键之一,其作用在于会聚光源发出的辐射通量,并在光学积分器的入射端面形成所需的辐照度分布,该辐照度分布直接影响太阳模拟器的辐照强度和辐照均匀度指标.

传统的太阳模拟器聚光系统所选用的椭球聚光镜,其光能利用率受到包容角的限制,收集光线的能力直接影响到光学系统利用光能的效率.

图 2 为短弧氙灯的配光曲线图.从图中可以看出氙灯的配光曲线是轴对称分布的,并且氙灯的发光角度约为 110° .

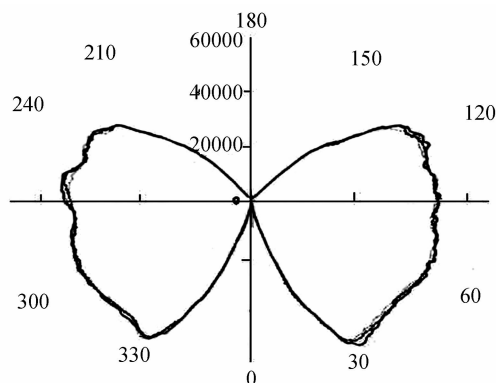


图 2 短弧氙灯配光曲线

Fig. 2 The light distribution curve of short arc xenon lamp

为充分利用光源光能,椭球面反射镜的包容角 α 取值越大越好,如图 3.然而,随着包容角的增大,聚光镜的深度也在不断增加,给非球面光学加工及表面镀膜造成极大困难.并且,未经聚光镜的直射光线,还会作为杂散光影响系统均匀性^[7].

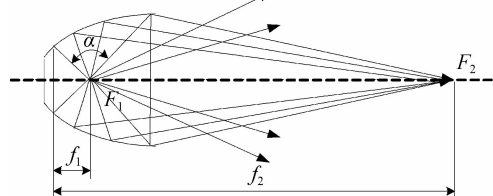


图 3 椭球聚光镜

Fig. 3 Ellipsoidal condenser

为解决此难题,提出椭球聚光镜与球面反光镜的组合使用方法,如图 4.椭球聚光镜和球面反光镜光轴重合,球面反光镜的球心与椭球聚光镜的第一焦点 F_1 也相互重合,并且在球面反光镜底部开有通光孔.将点光源放置在 F_1 处,由光源发出的光线,一部分经椭

球聚光镜反射后会聚在 F_2 处,另一部分直接照射在球面反光镜上,直射到球面反光镜上的光线经反射后穿过球心 F_1 照射在椭球聚光镜上,再经过反射会聚在 F_2 处,由此,不但避免了未经反射的直射光作为杂散光影响系统均匀性,还有效地提高了光源的能量利用率。

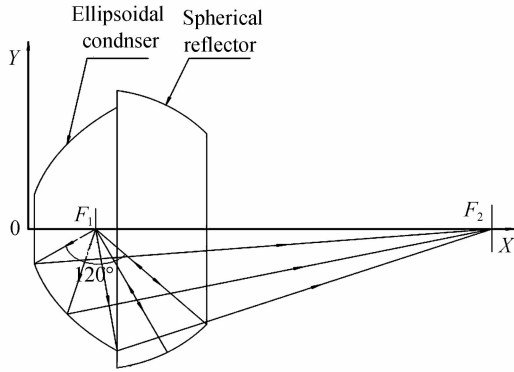


图4 组合聚光镜

Fig. 4 Structure of the optical integrator

2.2 光学积分器的优化设计

2.2.1 光学积分器的组成及原理

积分器由两组前后排列的透镜阵列组成,前组透镜阵列为场镜组,后组透镜阵列为投影镜组,场镜组的前面和投影镜组的后面依次是附加镜 I 和附加镜 II,其结构如图 5。

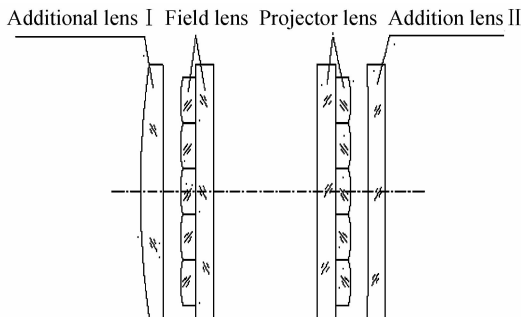


图5 光学积分器的结构

Fig. 5 Structure diagram of the optical integrator

在图 6 中前一组合的小透镜分别将聚光镜的出瞳(或者光源像),成像到后一组对应的小透镜上,避免了光能损失,而后一组的小透镜分别将前一组合的对应小透镜成像到被照面。又由于被照面和每一个前组小透镜共轭,因此前一组小透镜的像在被照面上重叠在

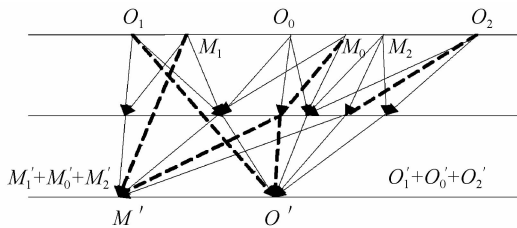


图6 积分器成像关系图

Fig. 6 The relationship of optical integrator imaging

一起。前组小透镜是它所在照明面的一部分,所以小透镜上的照明均匀性(也就是与其共轭的被照面上照明均匀性)要好于前组所在面的照明均匀性,小透镜数目越多,均匀性愈好,这是光学积分器改善均匀性的原因之一^[8-12]。图 6 为积分器成像关系图。

2.2.2 光学积分器的优化

积分器前组所在面的照度分布是中心对称的,对称通道在被照面上的照度均匀性能相互补偿,如图 7,积分器左通道在被照面上形成照度分布曲线与右通道的斜率刚好反号,即均匀性反号,两曲线是“镜对称”,在叠加时相互补偿提高了被照面的均匀性。对于中心对称的照度分布,这是光学积分器改善均匀性的主要原因。

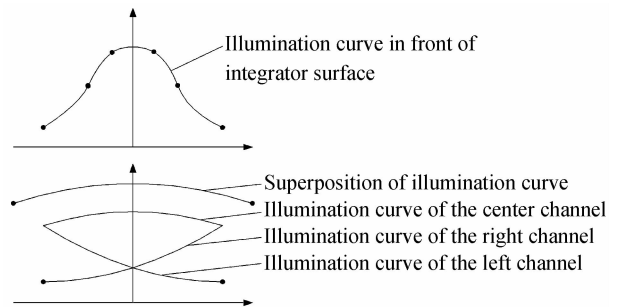


图7 积分器照度分布曲线

Fig. 7 The illumination curve of optical integrator

依据高斯光学,可以建立光学积分器重叠像面的理想照度分布关系式^[13],即

$$E'(x', z') = \frac{\sum_{i=1}^k E(x_i, z_i)}{\beta^2} \quad (1)$$

式中: $E'(x', z')$ 是重叠像面上点 (x', z') 的辐照度; $E(x_i, z_i)$ 是与点 (x', z') 共轭的前组小透镜上的点 (x_i, z_i) 的辐照度; β 是光学积分器重叠像的线放大率; k 是光学积分器的通道数目。

由此可计算理想辐照均匀性为

$$\epsilon = \frac{E'(x', z')}{\bar{E}'} - 1 = \frac{\sum_{i=1}^k E(x_i, z_i)}{\bar{E}' \times \beta^2} - 1 \quad (2)$$

式中, \bar{E}' 是重叠像面上辐照度的平均值。

光学积分器只改善理想均匀性,而由光学像差产生的辐照不均匀度误差,要靠对光学系统的优化设计完成。特别是对光学积分器的优化设计。

在设计光学积分器时,应考虑和注意以下两个问题:

1) 通常光学积分器元素透镜的弯曲状态由其像差分析确定。提高光学积分器所形成的均匀辐照面边缘带的辐照度,可增大辐照面有效均匀范围,并且提高均匀度。由像差理论可知,增大像面弯曲、畸变、光阑彗差等像差可提高像面上轴外点的照度。

2) 投影镜组阵列最佳离焦,可改善光学积分器的

光学性能. 一般情况下光学积分器的相对孔径不宜过大. 有时为使整个太阳模拟器系统结构紧凑, 要求缩短光学系统轴向尺寸, 光学积分器相对孔径必须取得大些. 这样投影镜元素透镜即使处于球差极小值状态, 其球差和轴外球差也很大. 此外, 由于像差的存在, 光学积分器对称光通道内对应光学在辐照面上成像高度不一致. 这两点原因使得均匀辐照面边缘处成像光线离散尺寸很大. 缩短场镜组和投影组之间的间隔可明显减小这种离散尺寸, 以改善均匀度. 缩短场镜组和投影镜组之间的间隔实质上是使投影镜离焦.

采用 Zemax 序列与非序列功能结合的方式对积分器的结构参量进行优化. 从成像关系的角度采取的积分器序列优化, 不仅避免了非序列光线追迹效率低、时间长的缺点, 也为均匀性照明设计提供了一种新的方法, 得到良好的设计效果. 将优化完成的光学系统再使用 Zemax 非序列功能建立积分器模型, 通过光线追迹得到积分器优化前后元素透镜叠加像面辐照图如图 8. 从图中可以看出, 优化后元素透镜的叠加效果更好, 大大提高了辐照面的均匀性^[13].

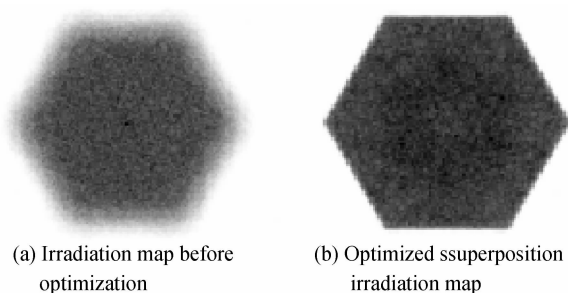


图 8 元素透镜叠加像面辐照图
Fig. 8 Superposition irradiation map

3 准直物镜与视场光阑的设计

3.1 准直物镜的设计

准直光学系统的作用是产生平行光辐射, 并保证沿光轴方向, 在一定深度内的辐照均匀性. 准直光学系统的视场光阑口径与焦距之比决定了太阳模拟器的光线准直度, 考虑到准直角($32' \pm 1'$)较小, 准直物镜选用双分离结构形式, 可较好地校正球差、色差和正弦差等像差, 改善输出光束的准直性和辐照均匀性.

太阳模拟器的光学系统作为一种照明光学系统, 虽然对像差没有严格要求, 但是从光束准直性角度考虑对其像差进行了分析. 双分离物镜比双胶合透镜多了一个面, 增加了一个校正因素, 能更好地校正球差、彗差和轴向色差等像差, 中心光线的平行度误差受准直物镜的球差和轴向色差的影响, 而光束的准直角误差则受各种轴外像差的影响. 准直物镜的相对孔径和视场角都不大, 产生的球差、彗差和轴向色差等像差也不会很大, 这样更容易校正各种像差, 更好地改善输出

光束的平行度误差和准直角误差, 图 9~图 12 依次给出了准直物镜的二维光学结构图、点列图、球差和轴向色差曲线图和像差曲线图.

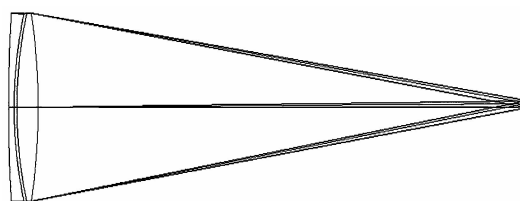


图 9 二维结构图
Fig. 9 Construction diagram of collimator lens

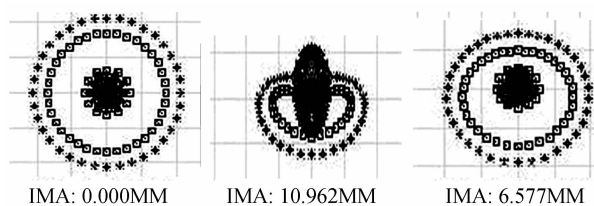


图 10 点列图
Fig. 10 Spot diagram

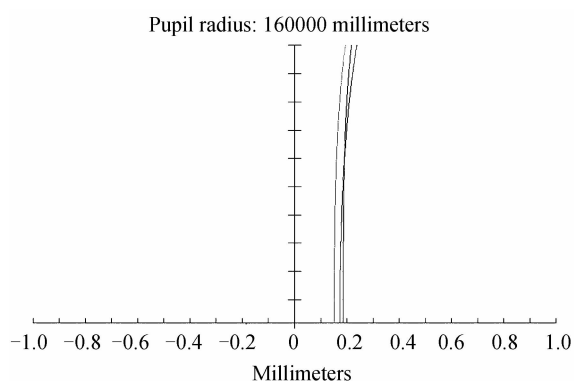
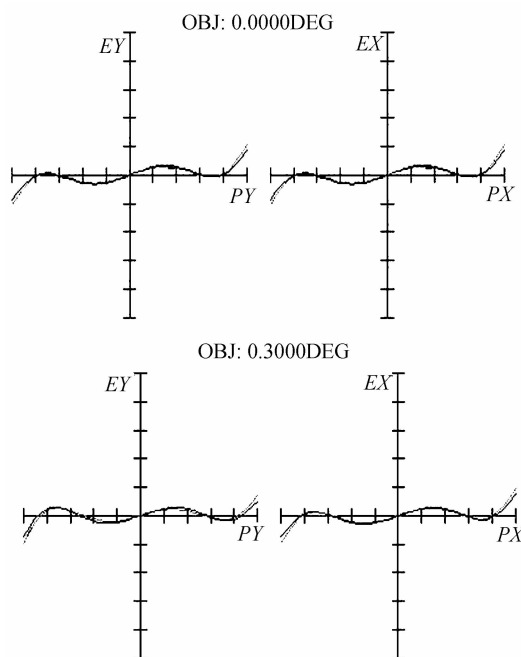


图 11 球差和轴向色差曲线图
Fig. 11 Characteristic curves of system aberration



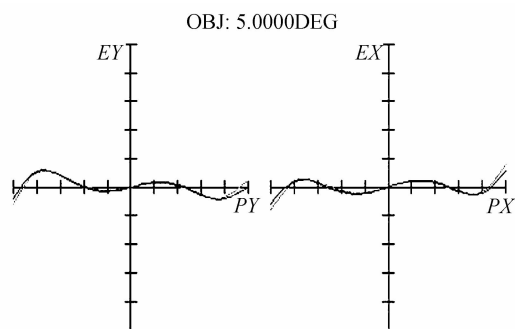


图 12 像差曲线

Fig. 12 Characteristic curves of system aberration

图 10 中可看出,优化后的透镜弥散斑不大,结合图 11 和图 12 可知球差和正弦差都满足要求,各个视场的各种像差比较均衡,虽然存在一定的二级光谱,但对于照明光学系统而言,对二级光谱的校正要求不严格.因此,选择的双分离透镜经优化后满足太阳模拟器光学系统像差的要求,以此来产生所需要的平行光束^[14].

3.2 视场光阑的设计

考虑到太阳模拟器模拟的光束准直角有严格的要求,而且比较小,通过在准直物镜焦面上放置视场光阑来实现,即在光学积分器的后面安装一个视场光阑,几何关系如图 13^[15-16].

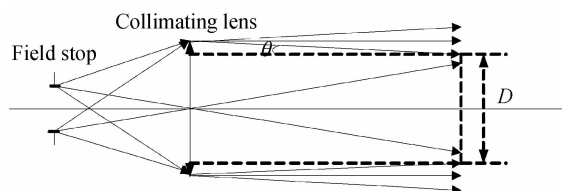


图 13 光阑位置

Fig. 13 Stop position

视场光阑位于准直镜的焦面处,由图分析可得到视场光阑计算公式为

$$\frac{d}{2f'} = \tan \theta_0 \quad (3)$$

式中: d 为光阑孔直径; f' 为准直物镜焦距; θ_0 为光束准直半角, $\theta_0 = \pm 16'$.

4 系统仿真分析

使用 lightTools 软件在给定光学设计参量的基础上,对 2000 万条光线进行蒙特卡洛光线追击,并对设计参量进行仿真调试,系统仿真结果如图 14.

由仿真结果可知,辐照面整体趋势平缓,设计结果合理,由式(4)计算出辐照不均匀度,结果如表 1.

$$\sigma = \pm \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\% \quad (4)$$

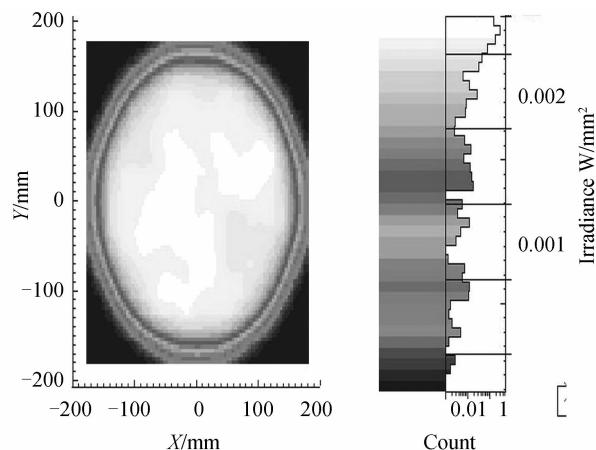


图 14 仿真结果

Fig. 14 Simulation result

表 1 辐照不均匀度计算结果

Table 1 Irradiation non-uniformity results

Diameter/mm	Φ100	Φ200	Φ260	Φ300
Maximum/(W · m ⁻²)	2 559	2 559	2 559	2 559
Minimum/(W · m ⁻²)	2 491	2 476	2 407	2 375
Ununiformity/(%)	1.2%	1.6%	3.06%	3.73%

5 结论

本文设计了一种新型的太阳模拟器光学系统,采用组合聚光镜的设计方法,大大提高了系统的能量利用率;对光学积分器的优化技术进行理论分析,并采用 Zemax 序列和非序列功能结合的方式对积分器的光学参量进行优化,优化后的元素透镜叠加效果更好,有效地解决了能量均匀性难题;优化设计了准直物镜和视场光阑,不但实现了真实模拟太阳张角的目的,而且保证了太阳光的准直准确度.使用 lightTools 软件进行仿真分析,结果表明,本文设计的太阳模拟器,模拟的太阳张角为 32',太阳辐照度为一个太阳常量.并且,在辐照面小于 Φ100 mm 时,不均匀度优于 ±1.6%;辐照面在 Φ(100—300)mm 时,不均匀度优于 ±3.8%.

参考文献

- [1] CHEN Wen-zhi., JIANG Lu-lin, JIANG Li, et al. Experimental research of spectral design of solar simulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0222002. 陈文志,蒋绿林,姜黎,等.太阳模拟器的光谱设计实验研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0222002.
- [2] XIANG Yan-hong, ZHANG Rong, HUANG Ben-cheng. 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.
- [3] 罗青青. 宽光谱太阳模拟器的理论分析与整体设计[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [4] ZHANG Guo-yu, LV Wen-hua, HE Xiao-lei, et al. Analysis on irradiation uniformity of sun simulator[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, **2**(1): 41-45.

- 张国玉,吕文华,贺晓雷,等. 太阳模拟器辐照均匀性分析[J]. 中国光学与应用光学,2009,**2**(1):41-45.
- [5] CHEN Jia-qi, CHEN Lan-feng, WANG Li, *et al.* Design and simulation of high-collimating solar simulator [J]. *OME Information*, 2011, **28**(11): 68-74.
陈家奇,陈兰峰,王丽,等. 高准直太阳模拟器的设计与仿真[J]. 光机电信息,2011,**28**(11):68-74.
- [6] LI Gang, ZHOU Yan-ping. Design of solar simulator and earth simulator for satellite attitude simulation[J]. *Infrared Technology*, 2007, **29**(5): 283-287.
李刚,周彦平. 卫星仿真测试用太阳模拟器和地球模拟器设计[J]. 红外技术,2007,**29**(5):283-287.
- [7] LIU Hong-bo. Solar simulator technique [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, **9**(2): 177-181.
刘洪波. 太阳模拟技术[J]. 光学精密工程,2001,**9**(2):177-181.
- [8] 王俊,黄本城,万才大,等. 环境模拟技术[M]. 北京:国防工业出版社,1996.
- [9] EDD Y. Design and construction of the JPLSS15B solar simulate [C]. Third Space Simulation Conference, USA, 1968.
- [10] ZHANG Guo-yu, LV Wen-hua, HE Xiao-lei, *et al.* Analysis on irradiation uniformity of sun simulator [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, **2**(1): 41-45.
张国玉,吕文华,贺晓雷,等. 太阳模拟器辐照均匀性分析[J]. 中国光学与应用光学,2009,**2**(1):41-45.
- [11] KOHRAKU S. A fundamental experiment for discrete-wavelength LED solar simulator[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2006, **90**: 3364-3370.
- [12] POWELL I. New concept for a system suitable for solar simulation[J]. *Applied Optics*, 1980, **19**(2): 329-334.
- [13] LIU Shi, ZHANG Guo-yu, SUN Gao-fei. Design of optical integrator for solar simulator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(4): 467-470.
刘石,张国玉,孙高飞,等. 太阳模拟器用光学积分器设计[J]. 光子学报,2013,**42**(4):467-470.
- [14] AN Gui-fang, ZHANG Guo-yu. Research of the solar simulator for weather sonde experiment[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2011, **32**(9): 1408-1412.
安桂芳,张国玉,等. 气象探空仪试验用太阳模拟器研究[J]. 太阳能学报,2011,**32**(9):1408-1412.
- [15] ZHONG Ji-gong. On some questions in optical system of the solar simulator[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 1983, **4**(2): 187-193.
仲跻功. 太阳模拟器光学系统的几个问题[J]. 太阳能学报,1983,**4**(2): 187-193.
- [16] 张以谟. 应用光学[M]. 北京:电子工业出版社,2008.
- [17] LIU Shi, ZHANG Guo-yu, SUN Gao-fei. The design of solar simulator in the meteorological radiation calibration system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(5): 1345-1349.
刘石,张国玉,孙高飞. 气象辐射标定系统中太阳模拟器的设计[J]. 红外与激光工程,2013,**42**(5):1345-1349.
- [18] REN Lan-xu, WEI Xiu-dong, NIU Wen-da. *et al.* A high flux solar simulator based on an 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.