

太阳模拟器辐照均匀性分析

张国玉^{1,2}, 吕文华³, 贺晓雷³, 徐亮¹, 徐熙平^{1,2}

- (1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022 ;
2. 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022 ;
3. 中国气象局气象探测中心, 北京 100080)

摘要 太阳模拟器中最重要的技术指标之一是辐照均匀度, 文中论述了太阳模拟器的工作原理, 并对太阳模拟器辐照面辐照均匀性进行了深入研究。根据太阳模拟器的工作原理, 分析了光学积分器的像差、投影镜离焦量及边缘补偿对太阳模拟器辐照面辐照均匀性的影响, 并采用 ZEMAX 软件仿真分析了准直物镜对辐照面均匀性的影响。结果表明, 准直物镜对辐照均匀性影响较小, 而影响系统辐照均匀性的主要因素是光学积分器。通过理论分析, 计算得出了所设计的太阳模拟器系统辐照不均匀度为 2.7% , 结果满足设计要求。

关键词 太阳模拟器; 光学系统; 辐照度; 均匀性分析

中图分类号: V524.3 文献标识码: A

Analysis on irradiation uniformity of sun simulator

ZHANG Guo-yu^{1,2}, LÜ Wen-hua³, HE Xiao-lei³, XU Liang¹, XU Xi-ping^{1,2}

(1. College of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China ;

2. Key Laboratory of Optoelectronic Measuring-controlling and Optical Information Transmitting Technology, Ministry of Education, Changchun 130022, China ;

3. The Meteorological Detection Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract : Irradiance uniformity is one of the significant qualifications of a sun simulator. In this paper, the operating principle of the sun simulator is introduced, and the irradiance uniformity of the sun simulator is studied in detail. Then, based on the operating principle of sun simulator, the effects of the aberration, defocus for projective lens and the edge compensation of the optical integrator on irradiance uniformity of the sun simulator are analyzed, and by ZEMAX software the influence of a collimator lens on the irradiance uniformity is simulatelly analyzed also. Analyzed results show that main effect factor on the irradiance uniformity of sun simulator is optical integrator, and the collimatator lens has a little effect on it only. By theoretical analysis, the irradiance non-uniformity of designed sun simulator is 2.7%, which meet the design requirements.

Key words : sun simulator; optical system; irradiance; uniformity analysis

1 引言

太阳模拟技术是利用人工光源模拟太阳光辐照特性的一门技术,其应用领域非常广泛,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]。太阳模拟器是模拟太阳光辐照特性的一种试验与测试设备,其主要作用是提供具有一定辐照度和辐照均匀性的光源,本文所研究的太阳模拟器主要用于标定气象探测用的深空仪太阳辐射表。衡量太阳模拟器的主要技术指标有辐照强度、辐照均匀性、准直角、太阳视张角等。

辐照均匀性是太阳模拟器的主要技术指标之

一,本文阐述了太阳模拟器的工作原理,并详细分析了太阳模拟器辐照面的辐照均匀性。

2 太阳模拟器光学系统组成与工作原理

太阳模拟器采用了同轴透射式准直光学系统,如图1所示,其主要由氙灯、椭球面聚光镜、光学积分器(场镜和投影镜)、准直物镜等组成,系统总长为3 773 mm。采用具有轴对称性且接近太阳光谱的氙灯作为光源,位于椭球面聚光镜第一焦点处光源发出的光束会聚后反射通过光学积分器、视场光阑和准直物镜后以平行光射出,形成一个辐照度均匀分布的辐照面^[2]。这样朝准直物镜前方看去,如同来自“无穷远”处的太阳,从而模拟了太阳光辐照。

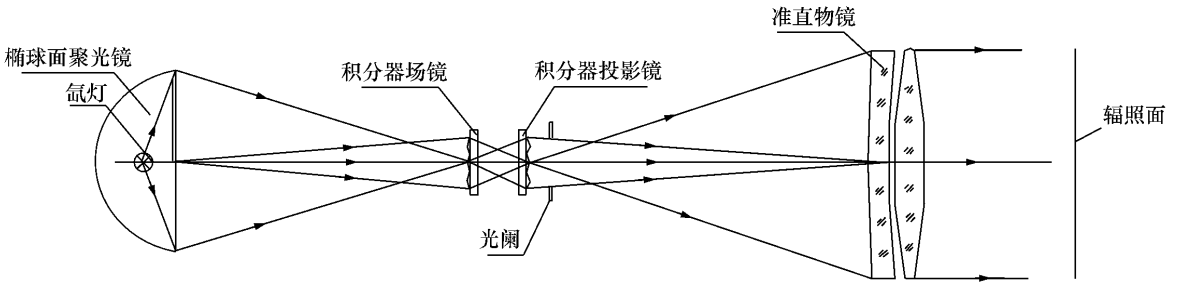


图1 太阳模拟器工作原理

Fig. 1 Operating principle of sun simulator

3 光学积分器对辐照均匀性影响的分析

光学积分器由两组前后排列的透镜阵列组成,其小透镜的相对孔径为1:4,小透镜焦距 $f = 22.32 \text{ mm}$ 。如图2所示,前透镜阵列为积分器场镜,后透镜阵列为积分器投影镜,光学积分器的作用主要有两个:一是将所接收到的椭球面聚光镜的光线交错叠加后,形成的辐射光线投向准直物镜,以保证射出平行光线的均匀性;另一个作用是将椭球镜出瞳面通过积分器镜组成像在准直物镜的焦面上,即准直物镜的视场光阑处,并把氙灯的

氙弧经积分器镜组和准直物镜成像在最佳辐照面上。为保证系统均匀照明,常采用光学积分器,既可以得到较高的光能利用效率,又可以达到比较理想的均匀照明效果。

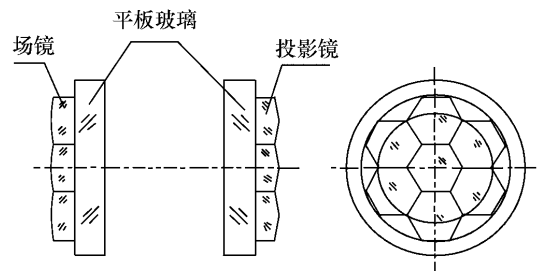


图2 光学积分器结构图

Fig. 2 Construction diagram of optical integrator

3.1 积分器像差对均匀性的影响

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轴外的照度。如图 3 所示,场镜位于均匀辐照面的共轭面,即物面上,投影镜位于聚光镜出瞳,即光阑上。场镜、投影镜的弯曲影响物面畸变和光阑彗差。增大场镜的物面畸变,则均匀辐照面轴外点光线高度向辐照面中心收敛,减少了均匀面边缘辐照过渡带的宽度,所以增大场镜物面畸变对提高均匀性有利。但在光学积分器系统中聚光镜的出瞳经场镜成像在该场镜同一光通道中的投影镜的通光口径之内,场镜光阑彗差大时,其光阑球差也大,大的光阑轴外球差使得聚光镜出瞳边缘的成像光线中,有相当一部分落在同一光通道的投影镜通光口径之外,这些光线在无像差影响时本应由场镜同一光通道的投影镜投射到均匀辐照面的边缘,但由于场镜光阑轴外球差的影响,这些光线却落到了相应投影镜口径外而成为有害的杂光。这实际上降低了辐照面边缘的辐照度,也即降低了辐照面的均匀度,同时减少了均匀辐照面内的有效辐射通量^[3]。

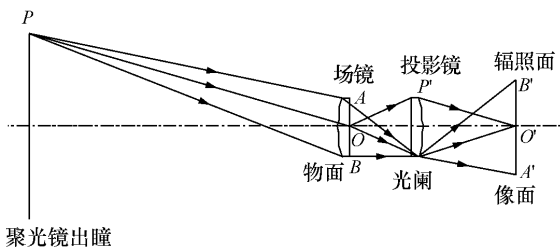


图 3 光学积分器成像的共轭关系

Fig. 3 Conjugate imaging relation of optical integrator

3.2 投影镜离焦量对均匀性的影响

一般情况下积分器的相对孔径不宜过大。有时为使太阳模拟器系统的结构紧凑,要求缩短光学系统轴向尺寸,于是就不得不加大积分器的相对孔径。这样,即使积分器的球差处于极小值状态,其球差与轴外球差也大。此外,由于像差的存在,积分器对称光通道内对应的光线在辐照面内成像高度不一致,这两点原因使均匀辐照面边缘处成像光线离散尺寸很大。因此,缩短场镜组和投影镜组之间的间隔可明显减小这种离散尺寸,改善均匀度。缩短场镜和投影镜的间隔实质上使

投影镜离焦^[4]。当场镜和投影镜的间距一定时,积分器边缘光通道和中心光通道在辐照面中心处的成像光线离散尺寸相等且最大,在辐照面边缘处的成像光线离散尺寸最小且相等,这种辐照面中心到边缘成像光线的离散尺寸由大变小,显然对均匀度是有利的。利用这种补偿方法,在积分器相对孔径较大时也可获得较好的均匀度。

3.3 积分器边缘补偿对辐照均匀性影响

通常情况下,是由光学积分器通光口径边缘补偿来实现均匀辐照面边缘带区辐照度补偿,但是由于某些原因辐照面边缘的辐照度往往低于中心范围的辐照度,尤其是场镜组透镜数为奇数时多是这样。所以补偿辐照面边缘带辐照度,显然可以提高整个辐照面的辐照均匀度。因此,本文在光学积分器通光口径外面加入了部分元素透镜,其通光口径如图 4 所示。通光口径里的 6 个 120°等腰三角形部分即是积分器边缘补偿部分,每一个加入部分与原积分器的透镜各光学参数相同,不同的只是外形。通过这些补偿透镜,提高了边缘辐照度,使得整个辐照面辐照度分布更均匀,补偿的范围取决于加入部分的尺寸。

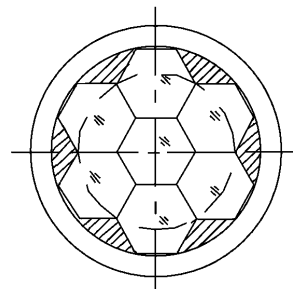


图 4 补偿后的积分器通光口径

Fig. 4 Limiting aperture of compensated integrator

4 准直物镜对辐照均匀性影响的仿真分析

由于准直物镜存在像差,尤其是球差很大,所以设计时应考虑准直物镜对整个光学系统辐照均匀性的影响。这里通过光学设计软件 ZEMAX 对其进行仿真。

准直物镜的像差已得到一定的校正,在这里

把一束分布均匀的光照射准直镜,通过对准直镜出射光辐照面分布特性来考察其像差对辐照均匀性的影响。图5、图6、图7分别给出了辐照面距准直物镜2 000、3 000和4 000 mm时的辐照面照度分布。

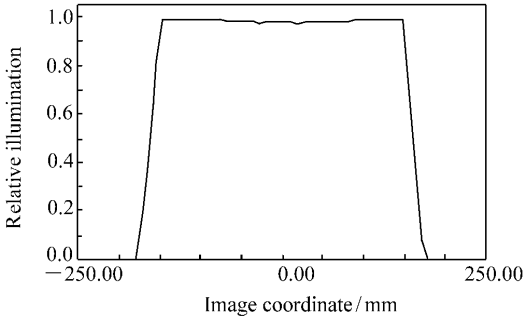


图5 辐照面距物镜2 000 mm的照度能量分布图

Fig. 5 Illumination energy distribution of surface radiation to object lens in 2 000 mm

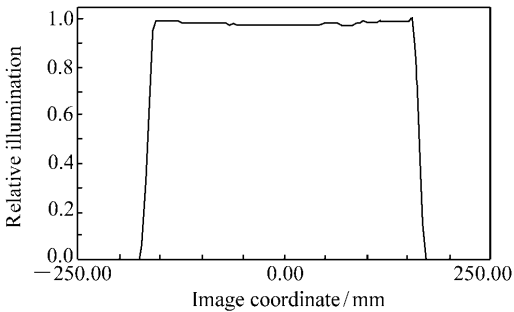


图6 辐照面距物镜3 000 mm的照度能量分布图

Fig. 6 Illumination energy distribution of surface radiation to object lens in 3 000 mm

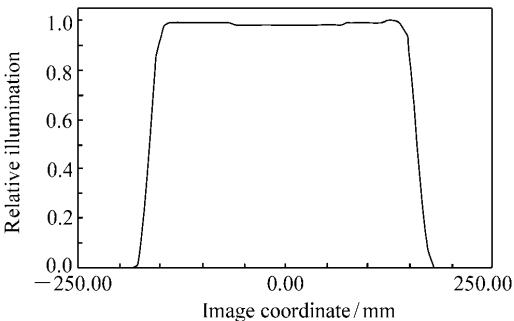


图7 辐照面距物镜4 000 mm的照度能量分布图

Fig. 7 Illumination energy distribution of surface radiation to object lens in 4 000 mm

由图5、图6、图7可以看出,当均匀光线经过物镜时,像差对均匀性的影响很小,在理想情况下,可认为像差对辐照均匀性“无贡献”,但是实际上,太阳模拟器光源经过聚光镜后出射的光是一束高斯分布的光线,所以采用光学积分器是很必要的。若加上光学积分器,经过软件计算可知,3种情况辐照面在有效口径内的不均匀理论值分别为0.76%、0.80%、0.83%。

5 辐照不均匀度计算

系统辐照面照度不均匀度 ε 和聚光镜第二焦点(即积分器场镜组前表面)上的辐照度分布 $E(y, z)$ 、积分器通道数目以及系统成像的像差有关,其准直物镜的像差影响很小,可以认为是“无贡献”,因此影响系统辐照度均匀性的主要因素是光学积分器。

若不考虑光学积分器自身像差的影响,根据系统成像原理,系统辐照面上各微面元的辐照度是对应光学积分器场镜组表面各个小透镜上共轭微面元辐照度的叠加。如图8所示, $E_{01}, E_{02}, \dots, E_{07}$ 就是一组共轭微面元,成像时叠加于同一微面元。

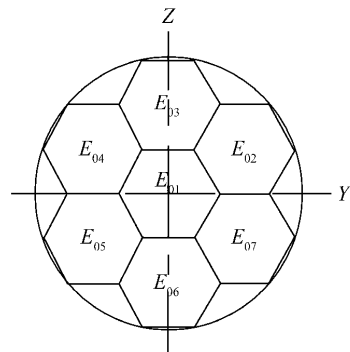


图8 光学积分器的共轭微面元图

Fig. 8 Tiny conjugate plane of optical integrator

对于积分器场镜组前表面各个小透镜上的共轭微面元 ds ,其辐照度为 $E(y_i, z_i)$ ($i = 1, 2, 3, \dots, k$),积分器的通道数目为 k 。而共轭微面元 ds 在系统重叠像面成像为 ds' ,辐照度为 $E(y', z')$ 。若不考虑能量损失,则系统辐照面辐照度的理想

分布关系^[5] :

$$E(y', z') ds' = \sum_{i=1}^k E(y_i, z_i) ds, \quad (1)$$

据高斯光学 :

$$\frac{ds}{ds'} = \frac{1}{\beta'^2}, \quad (2)$$

所以 :

$$E(y', z') = \frac{\sum_{i=1}^k E(y_i, z_i)}{\beta'^2}, \quad (3)$$

系统辐照面辐照度不均匀度 ε :

$$\varepsilon = \pm \frac{\max E(y', z') - \min E(y', z')}{\max E(y', z') + \min E(y', z')} \times 100\%, \quad (4)$$

根据理论分析 , 将设计的太阳模拟器辐照面测试值代入公式 (4) 得 ε 为 2.7%^[6]。

6 结 论

本文详细讨论了太阳模拟器辐照均匀性的影响因素 , 重点分析了光学积分器像差、投影镜离焦量及边缘补偿对辐照均匀性的影响 , 并通过 ZEMAX 软件分析了准直物镜对辐照均匀性的影响 , 得出其辐照不均匀度 < 0.85% , 表明准直物镜对辐照均匀性影响较小。最后 , 通过理论分析计算了太阳模拟器系统辐照不均匀度为 2.7% , 满足使用要求。

参考文献 :

- [1] 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.
WANG J , HUANG B CH , WAN C D *et al.* . *Environment simulation technology* [M]. Beijing : National Defense Industry Press , 1996. (in Chinese)
- [2] EDD Y. Design and construction of the JPL SS15B solar simulator [C]. *Third Space Simulation Conference* , USA , 1968.
- [3] 郎永志 , 于培诺 , 仲跻功 , 等. 太阳模拟器的光谱辐照度分布 [J]. 光学 精密工程 , 1995 , 3(3) : 25-29.
LANG Y ZH , YU P N , ZHONG J G *et al.* . Spectral irradiance distribution of a typical Chinese solar simulator [J]. *Opt. and Precision Eng.* , 1995 , 3(3) : 25-29. (in Chinese)
- [4] 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.
ZHONG J G. On some questions in optical system of the solar simulator [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica* , 1983 , 4(2) : 187-193. (in Chinese)
- [5] 王元 , 张林华. 一种新型全光谱太阳模拟器设计 [J]. 太阳能学报 , 2006 , 27(11) : 1132-1136.
WANG Y , ZHANG L H. Design of a new type of full-spectrum solar simulator [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica* , 2006 , 27(11) : 1132-1136. (in Chinese)
- [6] 徐亮. 月亮模拟器光学系统设计与辐照度均匀性分析 [D]. 长春 : 长春理工大学 , 2009.
XU L. The Optical Design of the Moon Simulator and the Analysis for Irradiance and Uniformity [D]. *Changchun University of Science and Technology* , 2008. (in Chinese)

作者简介 : 张国玉 (1962—) , 男 , 吉林松原人 , 博士 , 教授 , 博士生导师 , 主要从事空间科学与技术、光电仪器与检测技术等方面的教学与研究工作。E-mail : zh_guoyu@ yahoo. com. cn