

doi: 10. 3788/gzxb20134204. 0467

太阳模拟器用光学积分器设计

刘石¹, 张国玉^{1,2}, 孙高飞¹, 苏拾^{1,2}, 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:针对传统太阳模拟器普遍存在辐照均匀度较低的缺陷,改进设计了一种可以有效提高太阳模拟器辐照均匀度的光学积分器.介绍了该光学积分器的组成和工作原理;阐述了光学系统的优化设计技术;对其光机结构进行合理化设计,并使用 ansys 软件对光机结构进行热分析.最后,利用 lightTools 软件对太阳模拟器系统进行模拟仿真.结果表明:使用所设计的光学积分器后,太阳模拟器辐照不均匀度明显降低,在 $\Phi 60$ mm 范围内小于 $\pm 1\%$,在 $\Phi(60\sim 200)$ mm 范围内小于 $\pm 2\%$.该结果与实际检测结果一致,能够满足高准确度的使用要求.

关键词:光学积分器;太阳模拟器;光学设计;光机结构;热分析

中图分类号:V524.2

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)04-0467-4

Design of an Optical Integrator for Solar Simulator

LIU Shi¹, ZHANG Guo-yu^{1,2}, SUN Gao-fei¹, 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: Aiming at lower irradiation uniformity of the traditional solar simulator, an optical integrator is designed which can effectively improve the irradiation uniformity of sun simulator. The composition and working principle of optical integrator is introduced, optical optimization design technology of optical integrator is described, optical and mechanical structure of the optical integrator is designed reasonably, and the ansys software is used for thermal analysis of the machine structure. Finally, lightTools software is used to be simulating for solar simulator. The results show that: after using the optical integrator, irradiation non uniformity of the sun simulator is markedly improved, irradiation non uniformity in 60 mm range is less than $\pm 1\%$, and in (60~200) mm is less than $\pm 2\%$, instability is better than $\pm 1\%/h$, which agree with the test data and can meet the requirements of high-precision.

Key words: Optical integrator; Solar simulator; Optical design; Optical and mechanical structure; Thermal analysis

0 引言

近年来,随着我国科学技术的迅猛发展,太阳模拟器技术受到越来越多的关注.太阳模拟器是一种

模拟太阳光辐照特性的试验与测试设备,可以在地面提供具有真实太阳光谱分布的^[1]、稳定的、均匀的太阳辐射源,且辐照强度可控.伴随太阳模拟器在太阳能利用、农业、航天、国防、生态环境、遥感技术、建

基金项目:国家公益性行业科技专项项目(Nos. GYHY200706003, GYHY201006043)和吉林省科技发展计划项目(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
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:2012-10-15;录用日期:2012-12-21

材行业等多个领域的应用,对太阳模拟器的辐照均匀性要求也愈来愈高.

太阳模拟器主要由氙灯光源、椭球面反射镜、光学积分器、准直物镜等部分组成.由氙灯发出亮度均匀的光经过椭球面反射镜后,经光学积分器,准直物镜成平行光出射,完成了对“无穷远”太阳的模拟^[2].太阳模拟器中,光学积分器是提高辐照均匀性的关键.但是,对于光学积分器光机结构的合理设计报道少见.本文以提高太阳模拟器辐照均匀性为目的,对光学积分器的光学系统及光机结构的合理化设计进行研究.

1 光学积分器组成及工作原理

光学积分器主要由光学积分器光学系统和机械结构两部分组成,如图1.

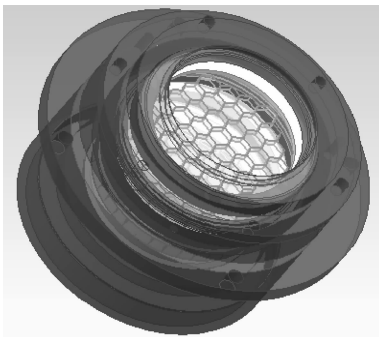


图1 光学积分器的组成结构示意图
Fig. 1 Optical integrator structure

氙灯光源经椭球面反射镜反射到场镜组通光口径内形成的照度分布,经场镜元素透镜分割,投影镜元素透镜成像,然后由附加镜Ⅱ再叠加成像,最后通过准直物镜传递到最佳辐照平面上,从而实现了均匀照明,达到提高太阳模拟器辐照均匀性的目的.光学积分器的工作原理如图2.

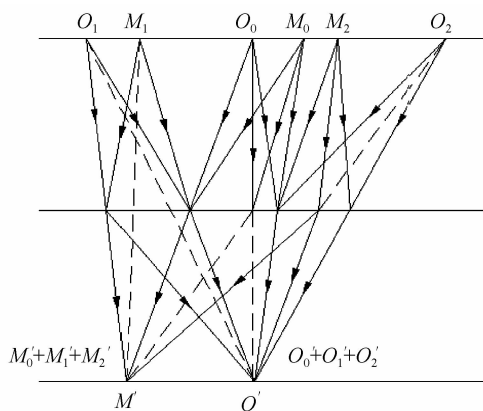


图2 光学积分器成像原理
Fig. 2 The principle of integrator imaging

2 光学积分器光学系统设计

光学积分器光学系统主要由两组前后排列的透

镜阵列、附加镜Ⅰ和附加镜Ⅱ组成,其中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3.

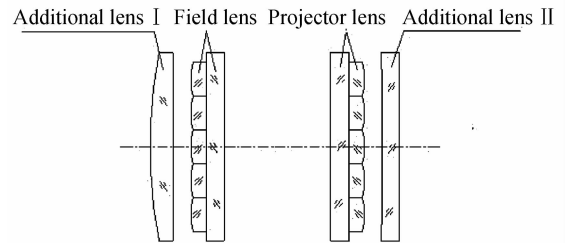


图3 积分器光学系统组成
Fig. 3 An integrator optical system

光学积分器用于改善理想均匀性,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.因此,对于积分器的设计,要注意两个方面.

2.1 光学积分器像差对均匀性影响

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像面上轴外点的辐照度,从而提高整个辐照面内的照度分布均匀性^[3].光学积分器成像的共轭关系如图4所示,场镜元素位于均匀辐照面的共轭面,即物面上;投影镜元素位于聚光镜出瞳的共轭面,即光阑上.图中只给出光学积分器中心光通道的成像关系,其周围光通道的成像关系与此相同.

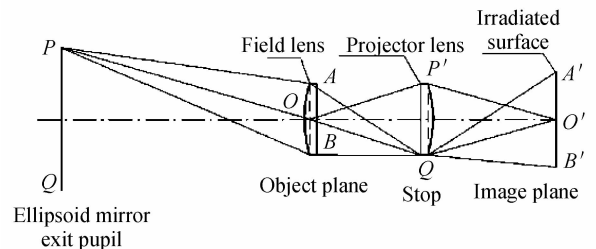


图4 光学积分器成像共轭关系

Fig. 4 The relationship of integrator imaging

由像差分析可确定积分器元素透镜的弯曲状态.物面畸变和光阑彗差受到场镜元素透镜弯曲的影响,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,减小了均匀辐照面边缘辐照度过渡带的宽度,所以增大场镜物面畸变有利于提高辐照均匀度.但在增大物面畸变时场镜元素透镜的光阑彗差和光阑球差也会增大,这样在光学积分器成像时,由于场镜组元素透镜光阑轴外球差的影响,使得经场镜元素透镜边缘带的部分光线落入与其同光通道的投影镜元素透镜外面,成为有害的杂光,减小了辐照面边缘带的辐照度,从而降低了辐照面均匀性.但是实际上光学积分器元素透镜是靠光胶工艺制作的,彼此间无机械间隔,由于光阑轴外球差大而落到场镜元素同光通道中投影镜元素口

径外的光线,其实是落入相邻光通道中投影镜元素口径的边缘,最后投射到均匀辐照面的外围^[4]. 本文认为,场镜元素透镜应当处于光阑球差小的弯曲状态.

2.2 投影镜离焦对均匀性影响

投影镜元素透镜位于光阑上,它的弯曲不影响光阑球差,也就不会影响物面畸变和光阑彗差. 为减小像面上成像光线的离散尺寸,投影镜元素透镜的弯曲应处于物面球差极小值的状态. 但是为使太阳模拟器系统结构紧凑,积分器相对孔径需要取得大些,这样即使投影镜处于球差极小值状态,其球差和轴外球差也很大^[5-7]. 此外,由于像差的存在,光学积分器对称光通道内光线的成像高度不一致. 这两点原因使均匀辐照面内的成像光线离散很大,对系统的辐照均匀度相当不利. 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,其实质是使投影镜离焦^[8].

3 光学积分器光机结构设计

光学积分器是太阳模拟器的重要部件之一,结构比较复杂,如图 5. 光学积分器由积分器场镜筒、投影镜筒、积分器光学元件(包括场镜、投影镜、附加镜)、视场光阑以及垫圈等组成,考虑到积分器位于模拟器光学系统第二焦点处,热量比较集中,为实时散热其端口配置有散热器. 积分器的作用就是以整体离焦或者对积分器投影镜组离焦的手段来改善最佳辐照面上的辐照均匀性,但是由于其特殊工作环境即高温状态,因此必须合理的设计其光机结构,以保证太阳模拟器出射光斑的辐照特性.

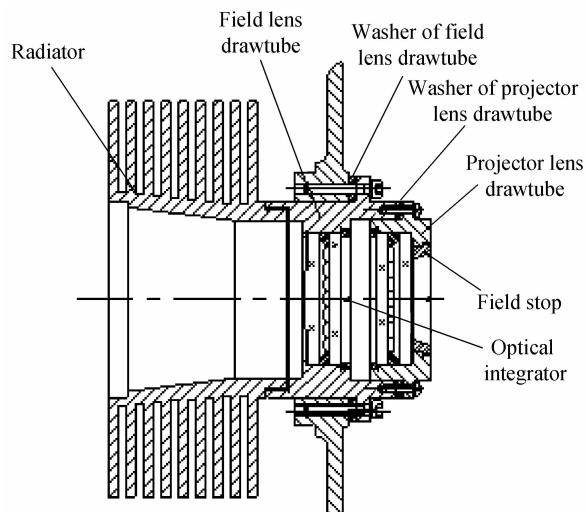


图 5 光学积分器结构
Fig. 5 Structure of optical integrator

光学积分器在整个光学系统中的位置的调整可通过修磨场镜筒调整垫圈厚度来实现. 同时为满足场镜组和投影镜组在调试中相对位置可调,其分别

安装于场镜筒和投影镜筒内,且位置可通过修磨积分器投影镜筒调整垫圈厚度来调整,即对投影镜组件进行适当的离焦. 以上所述结构的设计能更好地改善最终的辐照均匀性. 为保证辐照稳定性,积分器端口的散热机构为空心圆柱翅片型散热结构,通过对流换热,散热片从积分器收集来的热量由风道排出.

4 光机性能分析与检测

4.1 热分析及系统仿真

光学积分器处于聚光镜的第二焦面处,工作时承受着很高的热负荷. 由于积分器所具有的光学特性与模拟器最终均匀性直接相关,其性能的高低是太阳模拟器整体性能的关键影响因素. 虽然所配有的散热机构通过热对流的形式进行散热,但是仍然需对其热变形进行详细的分析,才能设计出更优的结构参量,以保证太阳模拟器工作特性稳定^[9-10]. 考虑其工作环境温度较高,金属元件材料选择膨胀系数较小的钢材,物理参量如表 1.

表 1 材料物理参量
Table 1 Physical parameters of material

Material	Elastic modulus (E)/Pa	Poisson ratio (ν)	Density (ρ)/(kg · m ⁻³)	Linear expansion coefficient (α)/(°C)	Heat capacity (C)/(J · kg ⁻¹ · °C ⁻¹)
Indium steel	150e9	0.25	8300	7.5e-6	502

通过分析积分器作用、光学系统特点和具体的机械结构可以看出,对其热分析的目的就是要得到轴向尺寸的变形量,以确定金属元件在轴向的热变形中所造成光学系统的离焦程度. 建立积分器温度场模型,会聚光束经过积分器,温度场分布由中心向边缘、从左向右依次降低. 采用测温仪对积分器在一个太阳常量工作状态下的测量可知,左边端口的实

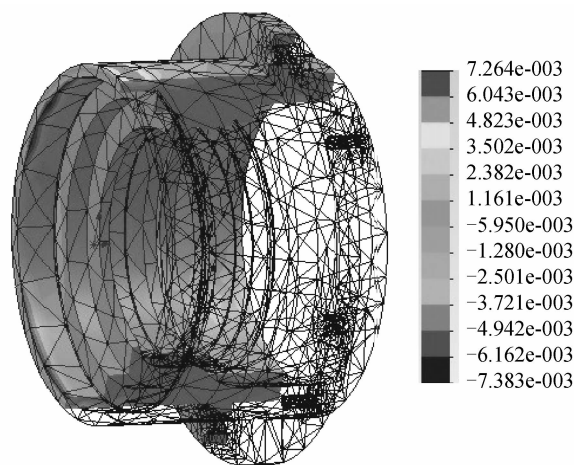


图 6 镜筒热变形图
Fig. 6 The thermal deformation diagram of drawtube

际温度为 $(252 \pm 5)^\circ\text{C}$,右边出射端口为 $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$.运用 ansys 软件对所建立的积分器模型进行分析,传热方式为静态空气对流换热,施加正确的对流边界条件后,所分析结果如图 6.左侧镜筒和右侧镜筒热变形方向相反,取右侧方向伸长为+,左侧方向伸长为-,积分器镜筒在轴向的最大变形量为 $7.26 - (-7.38) = 14.64 \mu\text{m}$.

根据受热可能造成的最大变形量,利用 lightTools 软件对使用此光学积分器的太阳模拟器进行模拟仿真,选择 2000 万条光线进行蒙特卡洛光线追击,系统仿真结果如图 7.可以看出,最大变形量对模拟器辐照特性影响很小,光学积分器光机结构设计合理,仿真结果满足使用要求.

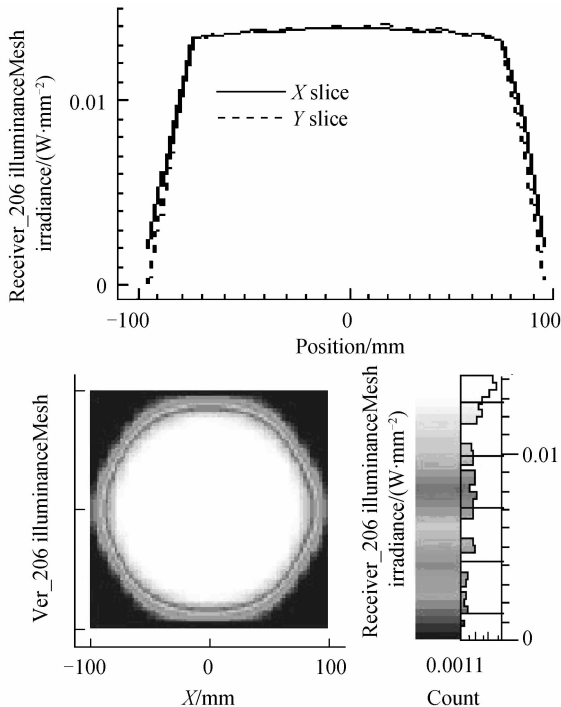


图 7 图 7 仿真结果图
Fig. 7 Simulation results

4.2 数据测试

在最佳辐照面上对辐照不均匀度进行测试.以辐照面中心为圆心,取 $\Phi 30 \text{ mm}$ 、 $\Phi 60 \text{ mm}$ 、 $\Phi 100 \text{ mm}$ 、 $\Phi 150 \text{ mm}$ 、 $\Phi 200 \text{ mm}$ 同心圆,分别在各个圆周上取八等分点,用照度计对各点辐照度进行测试,测试数据如表 2.

表 2 测试数据

Table 2 Text data

Diameter/mm	$\Phi 30$	$\Phi 60$	$\Phi 100$	$\Phi 150$	$\Phi 200$
Maximum/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	1 379	1 379	1 379	1 379	1 379
Minimum/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	1 371	1 365	1 358	1 346	1 332
Ununiformity/(%)	0.3	0.5	0.8	1.2	1.7

由式(1)可以计算出辐照不均匀度,在 $\Phi 60 \text{ mm}$ 范围内为 0.5%,在 $(\Phi 60 \sim \Phi 200) \text{ mm}$ 范围内为

1.7%,与仿真结果相符,且满足使用要求.

$$\sigma = \pm \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\% \quad (1)$$

5 结论

本文设计了一种能有效提高太阳模拟器辐照均匀性的光学积分器.着重分析了光学积分器像差及投影镜离焦对均匀性的影响,同时设计合理的光机结构,保证了积分器具有稳定的光学性能.利用 LightTools 软件得到的太阳模拟器均匀性仿真结果与实际测试结果相一致,说明设计的光学积分器有效的提高了太阳模拟器的辐照均匀性;不均匀度在 $\Phi 60 \text{ mm}$ 范围内为 0.5%,在 $(\Phi 60 \sim \Phi 200) \text{ mm}$ 范围内为 1.7%,满足高准确度的使用要求.

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] 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.
- [3] EDDY R. Design and construction of the JPLSS15B solar simulate [C]. Third Space Simulation Conference, USA, 1968.
- [4] ZHANG Guo-yu, LÜ 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] AN Gui-fang, ZHANG Guo-yu, SU Shi, et al. Optical design of solar simulator for weather sonde experiment [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2011, **32**(9): 1408-1412.
安桂芳,张国玉,苏拾,等.气象探空仪试验用太阳模拟器光学系统设计[J]. *太阳能学报*, 2011, **32**(9): 1408-1412.
- [6] 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.
- [7] 张以谟.应用光学[M].北京:电子工业出版社,2008.
- [8] 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.
- [9] LAN Gong-pu, WANG Xuan, LIANG Wei, et al. Optical design and thermal analysis for the active-focusing aerial camera objective [J]. *Acta Optica sinica*, 2012, **32**(3): 0322006.
蓝公仆,汪旋,梁伟,等.主动调焦式航空相机物镜光学设计及温度仿真分析[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0322006.
- [10] LI An-hu, SUN Jian-feng, ZHU Yong-jian, et al. Optical-mechanical-thermal analysis on prism assembly of precision light beam scanner[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7): 1107-1112.
李安虎,孙建锋,朱勇建,徐荣伟,刘立人.精密光束偏离装置棱镜组件的光机热分析[J]. *光子学报*, 2006, **35**(7): 1107-1112.