

太阳模拟器用新型集束式光学积分器研究

李志强¹ 苏 拾^{1,2} 王国名¹ 张王玉^{1,2}

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

²吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 吉林 长春 130022

摘要 针对当前太阳模拟器辐照均匀性难以提高的问题,设计了一种新型集束式光学积分器。在对称式光学积分器理论分析的基础上,介绍了集束式光学积分器的设计过程,用LightTools软件对太阳模拟器光学系统进行模拟仿真。结果表明,使用集束式光学积分器后,太阳模拟器不均匀度显著降低,在 Φ 50 mm范围内小于0.2%, Φ (50~120) mm范围内小于1.5%,满足高辐照均匀性的使用要求。

关键词 光学器件; 太阳模拟器; 光学积分器; 辐照均匀性; 矩阵

中图分类号 V524.2 文献标志码 A doi: 10.3788/LOP51.122301

Research on a New Cluster-Type Optical Integrator for Solar Simulator

Li Zhiqiang¹ Su Shi^{1,2} Wang Guoming¹ Zhang Guoyu^{1,2}

¹School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

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

Abstract In view of the difficulty in improving the irradiation uniformity of the current solar simulator, the paper introduces a new type of cluster-type optical integrator. The process of the cluster-type optical integrator based on the theoretical analysis of the symmetric optical integrator is introduced. The solar simulator optical system is simulated with LightTools software. The results show that: after using the cluster-type optical integrator, the irradiation non uniformity of solar simulator is significantly improved, irradiation non-uniformity in the range of Φ 50 mm is less than 0.2%, and in the range of Φ (50~120) mm is less than 1.5%. The results satisfy the requirements of high irradiation uniformity.

Key words optical devices; solar simulator; optical integrator; irradiation uniformity; matrix

OCIS codes 230.0250; 080.2740; 080.3620; 110.2945; 130.3120; 240.3990

1 引言

光学积分器是太阳模拟器光学系统中的重要光学器件,将由聚光镜会聚的高斯辐照分布进行均匀化处理,对提高太阳模拟器的辐照均匀性起到关键作用^[1]。

光学积分器按在聚光镜光路中的位置一般分为出瞳光学积分器和光源像面光学积分器。前者位于聚光镜出瞳处,可使光学系统轴向尺寸减小,但径向尺寸较大;后者位于聚光镜像面,光学系统轴向尺寸大,径向尺寸小,又分为对称式光学积分器和虚像式光学积分器,其中对称式光学积分器由于光能损失少,辐照均匀能力强,被广泛应用于太阳模拟器的研制中。然而,由于对称式积分器存在着加工和装配误差,光轴一致性较差,杂光干扰比较严重^[2-3]。靠现有制造水平,对称式光学积分器对辐照均匀化能力难以提高。因此,研究一种新型光学积分器,克服其制造技术瓶颈,对研制高精度太阳模拟器具有重要的借鉴意义。

收稿日期: 2014-06-04; 收到修改稿日期: 2014-07-03; 网络出版日期: 2014-10-31

基金项目: 国家公益性行业科研专项(GYHY200706003, GYHY201006043)、吉林省科技发展计划(20118012)

作者简介: 李志强(1988—),男,硕士研究生,主要从事太阳模拟技术方面的研究。E-mail: 951878970@qq.com

导师简介: 苏 拾(1978—),男,博士,讲师,主要从事空间环境模拟技术方面的研究。E-mail: sushu@cust.edu.cn

2 光学积分器研究

2.1 对称式光学积分器的结构和原理

对称式光学积分器通常由场镜组、投影镜组、叠加透镜组成^[4],如图1所示。场镜组和投影镜组分别采用数个微透镜阵列,呈中心对称分布,通过光胶方法粘接在平行玻璃板上。场镜组中每一个微透镜与投影镜组中每个微透镜一一对应,每个微透镜光学参数相同,组成多个光通道,且各光通道与积分器主光轴平行,最终交于系统光轴上。微透镜阵列可以是正六边形小透镜拼接,或者是矩形小透镜拼接。

光学积分器的主要作用是确保太阳模拟器获得均匀的辐照面。对称式光学积分器原理如图2所示,光源发出的光束经椭球聚光镜会聚并反射后,在光学积分器的入射端形成一个对称的辐照分布,这个辐照分布经积分器场镜组各元素透镜分割成像到对应的投影镜组元素透镜上,再由附加镜II叠加成像,最后把这一辐照度不均匀分布的辐照面进行均匀化,在所要求的位置上形成一个辐照度分布均匀的辐照面。

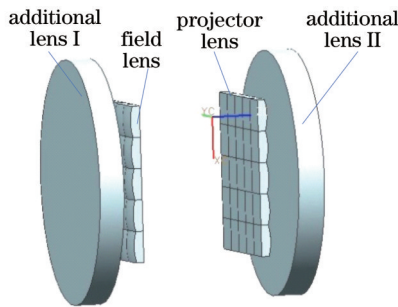


图1 对称式光学积分器结构图

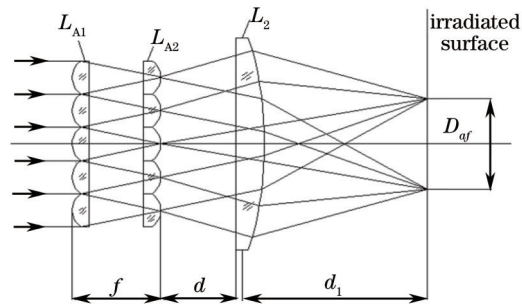


图2 对称式光学积分器原理图

Fig.1 Structure diagram of symmetrical optical integrator

Fig.2 Schematic diagram of symmetrical optical integrator

2.2 集束式光学积分器的原理及特性

集束式光学积分器匀光的引入是为了保证辐照面内的辐照均匀性,具体匀光原理如图3所示。图3(a)为进入积分器前光能的照度曲线,为高斯分布,梯度较大,图3(b)为光通过积分器后的辐照叠加示意图。光入场镜组进行分割后,单个元素透镜上的辐照梯度相对于整体梯度小得多,又因光学积分器左右通道在辐照面形成的分布曲线曲率相反,光束经过光学积分器后,形成中心对称的辐照分布,进行相互补偿,同时与中心通道元素透镜的辐照分布叠加补偿后,其最后输出辐照梯度变得更加平缓,从而达到提高均匀性的目的^[5]。

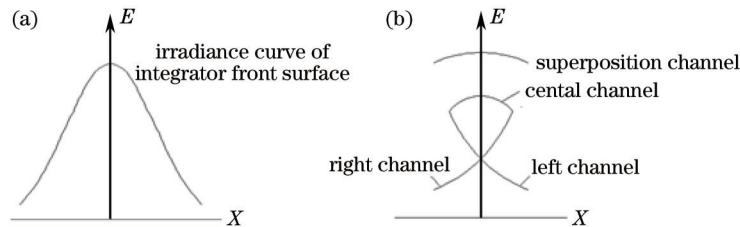


图3 积分器照度分布曲线。(a) 积分器前;(b) 积分器后

Fig.3 Irradiance distribution curves of optical integrator. (a) Before; (b) after

分析目前的对称式积分器可知,积分器对均匀性的影响,在于附加镜焦面处各元素透镜像叠加的影响,即焦面处各元素透镜的像叠加位置准确,则可以达到能量利用的最大化和不均匀性的最大补偿,而导致叠加像的叠加位置误差的主要原因则是积分器各组成部分对应的光轴不一致^[6]。在实际的加工和装调过程中,不可避免地引入各种误差,从而导致场镜组和投影镜组对应的元素透镜间的光轴一致性产生误差,这些误差都会对辐照面的均匀性产生影响。为了避免场镜组和投影镜组对应的元素透镜间的光轴一致性误差对均匀性的影响,提出集束式光学积分器。

2.3 集束式光学积分器的设计

集束式光学积分器打破以往光学积分器结构模式,不是由前后两组紧密排列的透镜阵列组成,而是由25个口径为正方形的棱柱透镜和两块附加镜(附加镜I和附加镜II)组合而成,如图4所示。集束式光学积分器依旧继承通光口径相同的多个小元素透镜按中心对称排列的方式,每一个棱柱透镜为一个光通道,通道

之间不透光,避免彼此通道内的光相互干扰。

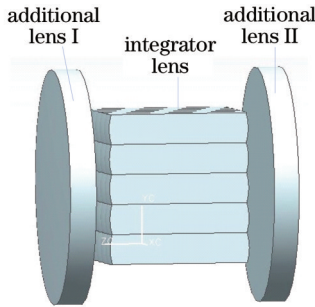


图4 集束式光学积分器结构图

Fig.4 Structure diagram of cluster optical integrator

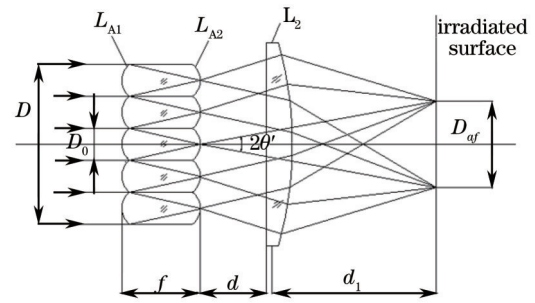


图5 集束式积分器设计原理图

Fig.5 Schematic diagram of cluster optical integrator

积分器的具体设计,先从理想的模型开始。假设光源位于无穷远处,以平行光束入射到积分器前端面形成照度分布^[7]。棱柱前后端面分别记为 L_{A1} 、 L_{A2} ,曲率半径为 R ,棱柱材料折射率为 n , L_{A1} 的焦平面在 L_{A2} 处,则棱柱前端面的焦距为

$$f_{L_{A1}} = n'R(n' - 1). \quad (1)$$

后端面如同场镜,用来聚集大角范围光域。 L_2 距 L_{A2} 为 d ,用来聚光,其焦距为 f_1 。经棱柱前端面分割,棱柱后端面成像。棱柱元素阵列将原始光束分割成小光束,每一个小光束由 L_2 聚光,之后在距离 L_2 为 d_1 的位置叠加,即最佳辐照面上形成均匀的辐照分布^[8-9]。

在此,用6个矩阵来表述整个积分器系统,第一个矩阵为入射矩阵,之后四个为棱柱阵列的矩阵,最后一个为附加镜矩阵^[10]。入射光以光高度 D ,入射角 θ 来表述。

$$\begin{pmatrix} D_{af} \\ \theta' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_{L_{A2}}} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_{L_{A1}}} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_0 \\ \theta \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中给出的为 L_{A1} 、 L_{A2} 的中心元素与附加镜 L_2 组成的光学系统的光学传递矩阵关系。由(2)式可以得到辐照面尺寸与各光学参数的表达式:

$$D_{af} = D_0 \frac{f_1(f_{L_{A1}} + f_{L_{A2}} - f)}{f_{L_{A1}} f_{L_{A2}}}. \quad (3)$$

透镜阵列 L_{A1} 的各个元素透镜像就会叠加在附加镜的焦面上。当 $f_{L_{A1}} = f_{L_{A2}} = f$,则(3)式简化为

$$D_{af} = D_0 \frac{f_1}{f}, \quad (4)$$

积分器的出射发散角为

$$\tan \theta' = \frac{1}{2} \left(\frac{D_{af}}{d + d_1} \right). \quad (5)$$

2.4 辐照均匀性对比分析

太阳模拟器的辐照度和辐照均匀性计算,采用光线追迹的思路,即从建好的光源模型处生成多条光线,经光学系统后投射到最佳辐照面上,而光源处生成光线的方法应用蒙特卡罗光线追迹方法。仿真时参数相同元件及参数如表1所示。

表1 仿真光学系统中相同元件参数

Table 1 The same element parameters in simulation optical system

unit: mm

Spun ellipse	Additional lens I	Additional lens II	Collimating lens	Irradiated surface
Diameter: $\Phi 220$, $f_1=42.06, f_2=967.27$	$\Phi 40$ $f = 878.39$	$\Phi 40$ $f = -708.47$	$\Phi 40$ $f=481.38$	125×125

分别采用对称式光学积分器和集束式光学积分器,用LightTools软件对太阳模拟器光学系统进行模拟仿真,效果如图6所示。

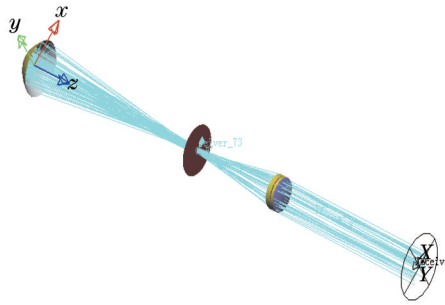


图6 太阳模拟器仿真效果

Fig.6 Simulation diagram of solar simulator

由于实际检测辐照度时使用的探测器口径为 $\Phi 10\text{ mm}$,接收面的口径为 $\Phi 120\text{ mm}$,所以仿真时接收面被划分为 21×21 的网格,追迹 2000 万条光线,分别采用了二维和网格数据来显示整个辐照面的辐照度分布情况。使用对称式光学积分器得到的结果如图 7 和表 2 所示,使用集束式光学积分器得到的结果如图 8 和表 3 所示^[11]。

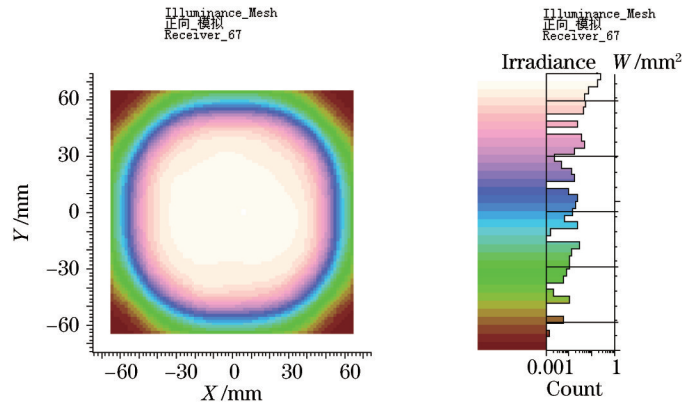


图7 采用对称式光学积分器时辐照度二维分布

Fig.7 Irradiance distribution in two-dimensional of symmetrical optical integrator

表2 采用对称式光学积分器时辐照数据

Table 2 Irradiance data of symmetrical optical integrator

Diameter /mm	$\Phi 25$	$\Phi 50$	$\Phi 75$	$\Phi 100$	$\Phi 120$
Max /(W/mm ²)	1385.9	1385.9	1385.9	1385.9	1385.9
Min /(W/mm ²)	1376.0	1372.7	1363.9	1357.1	1323.6

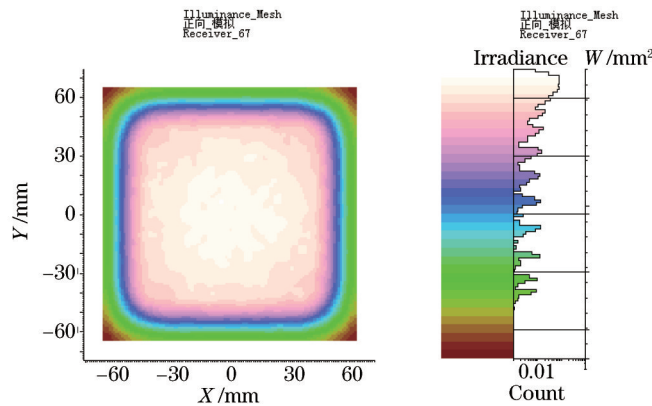


图8 采用集束式光学积分器时辐照度二维分布

Fig.8 Irradiance distribution in two-dimensional of cluster optical integrator

表3 采用集束式光学积分器辐照数据

Table 3 Irradiance data of cluster optical integrator

Diameter /mm	Φ 25	Φ 50	Φ 75	Φ 100	Φ 120
Max /(W/mm^2)	1376.5	1376.5	1376.5	1376.5	1376.5
Min /(W/mm^2)	1374.0	1373.0	1363.3	1352.5	1338.5

由仿真结果数据整理如表4所示。

表4 辐照不均匀度对比分析

Table 4 Contrast analysis of irradiation non-uniformity

Diameter /mm	Φ 25	Φ 50	Φ 75	Φ 100	Φ 120
Symmetrical integrator	0.36%	0.48%	0.80%	1.05%	2.3%
Cluster integrator	0.09%	0.13%	0.48%	0.88%	1.4%

通过表4中的数据可知,在同一光学系统中,使用集束式光学积分器后,太阳模拟器不均匀度显著降低,即这种光学积分器可以提高太阳模拟器的辐照均匀性^[12-13]。

3 结 论

研究一种能有效提高太阳模拟器辐照均匀性的光学积分器,通过改进光学积分器的结构,避免了对称式积分器光轴一致性难以保证的弊端,具有稳定的光学性能。利用LightTools软件对光学系统进行模拟仿真,对同一光学系统分别使用对称式光学积分器和集束式光学积分器,得到太阳模拟器均匀性的仿真结果。分析结果表明,使用集束式光学积分器后,太阳模拟器不均匀度显著降低,在 Φ 50 mm范围内小于0.2%, Φ (50~120) mm范围内小于1.5%^[14],满足高辐照均匀性的使用要求。

参 考 文 献

- 1 Su Shi, Zhang Guoyu, Fu Yun, *et al.*. New development of solar simulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(7): 070003.
苏 拾, 张国玉, 付 芸, 等. 太阳模拟器的新发展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(7): 070003.
- 2 Zhang Guoyu, Lü Wenhua, He Xiaolei, *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.
- 3 Zhong Jigong. Optical integrator and homogenizing effect[J]. Instrument Manufacturing, 1983, 6: 12-15.
仲跻功. 光学积分器及其均匀化效果[J]. 仪器制造, 1983, 6: 12-15.
- 4 Su Shi, Xu Xiping, Zhang Guoyu, *et al.*. The research on slewing mechanism system for solar simulator[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2011, 34(2): 24-27.
苏 拾, 徐熙平, 张国玉, 等. 太阳模拟器回转运动系统研究[J]. 长春理工大学学报, 2011, 34(2): 24-27.
- 5 Liu Shi, Zhang Guoyu, Sun Gaofei, *et al.*. Design of an optical integrator for solar simulator[J]. Acta Photonic 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.
- 6 Lang Yongzhi, Yu Peinuo, Zhong Jigong, *et al.*. Spectral irradiance distribution of a typical Chinese solar simulator[J]. Optics Precision Engineering, 1995, 3(3): 25-29.
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.
- 7 An Guifang, Zhang Guoyu, Su Shi, *et al.*. Analysis on improving irradiation uniformity of the sun simulator by optical integrator[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2010, 33(1): 1-3.
安桂芳, 张国玉, 苏 拾, 等. 利用光学积分器提高太阳模拟器辐照均匀性的分析[J]. 长春理工大学学报, 2010, 3(1): 1-3.
- 8 Zhang Yimo. Applied Optics[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2008.
张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- 9 Wang Yuan, Zhang Linhua. Design of a new type of full-spectrum solar simulator[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2006, 27(11): 1132-1136.
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.

- 10 B Van Giel, Y Meuret, H Thienpont. Using a fly's eye integrator in efficient illumination engines with multiple light-emitting diode light sources[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(4): 043001 .
- 11 Xiang Yanhong, Zhang Rong, Huang Bencheng. Irradiation uniformity simulation of solar simulator[J]. *Space Craft Environment Engineering*, 2006, 23(6): 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(6): 288-292.
- 12 Zhao Jilin, Zhong Jigong, Chen Xing. Research on TM-3000A1 solar simulator[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 1981, 2(4): 417-424.
赵吉林, 仲跻功, 陈 兴. TM-3000A1 太阳模拟器的研究[J]. *太阳能学报*, 1981, 2(4): 417-424.
- 13 Xu Liang. The Optical Design of the Moon Simulator and the Analysis for Irradiance and Uniformity[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009.
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.
- 14 National Standardization Technical Committee. GB/T 12637-1990. Journal General Specification for Solar Simulator [S]. Beijing: China Standard Press, 1991.
国家标准化技术委员会. GB/T 12637-1990. 太阳模拟器通用规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991.