

太阳模拟器宽范围辐照连续可调节系统设计

明杉炽^{1,2}, 孙高飞^{1,2*}, 张国玉^{1,2}, 刘石^{1,2}, 徐达^{1,2}, 杨松洲^{1,2}, 苏拾^{1,2}, 张健^{1,2}, 张燃³¹ 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;³ 长春工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 现有太阳模拟器在辐照度调节时存在调节范围窄、数值不连续等缺陷, 这会严重影响辐照不稳定度和光谱匹配度。针对这个问题, 提出基于环带聚光与对称匀光理论的太阳辐照调制方法。首先, 研究椭球聚光镜配光所形成的辐照面的能量分布; 接着, 研究光学积分器的匀光机理, 提出基于通孔的能量调制方法, 结合辐照度分布函数获得均匀的辐照度分布; 最后, 设计辐照调节系统, 通过改变辐照调节板开孔尺寸实现辐照度的连续调节, 利用 Lighttools 软件进行辐照度仿真。仿真结果表明: 太阳模拟器的辐照度在 490.38~1473.78 W/m² 范围内连续可调, 且椭球聚光镜的斜率误差为 $\sigma=2$ mrad 时, 不同辐照度下的不均匀度均优于 1.76% (达到太阳模拟器校准规范的 A 级要求), 实现了太阳模拟器辐照度的宽范围调节, 且辐照度调节不会改变辐照不稳定度和光谱匹配度。

关键词 光学设计; 照明设计; 太阳模拟器; 辐照度; 连续可调; 不均匀度

中图分类号 TB858

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1622002

Continuous Regulation System Design of Wide-Range Irradiance for Solar Simulators

Ming Shanchi^{1,2}, Sun Gaofei^{1,2*}, Zhang Guoyu^{1,2}, Liu Shi^{1,2}, Xu Da^{1,2},
Yang Songzhou^{1,2}, Su Shi^{1,2}, Zhang Jian^{1,2}, Zhang Ran³¹ School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China;² Optical Measurement and Control Instrumentation, Jilin Province Engineering Research Center,
Changchun, Jilin 130022, China;³ Changchun Institute of Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract During irradiance regulation with solar simulators, narrow regulation range, discontinuous values, and other defects seriously affect irradiation instability and spectral matching. Therefore, a method based on the theories of ring concentrated light and symmetric uniform light is proposed for solar irradiation modulation. Firstly, the energy distribution of the irradiated surface formed by the light distribution with an ellipsoidal mirror is studied. Subsequently, the energy modulation method based on through holes is proposed by studying the uniform light mechanism of optical integrators. The irradiance distribution function is combined to obtain a uniform irradiance distribution. Finally, the irradiation regulation system is designed, which continuously adjusts the irradiance by changing the aperture size of the irradiation regulation plate, and the irradiance is simulated with Lighttools. The simulation results show that the irradiance of the solar simulator is continuously adjustable in the range of 490.38–1473.78 W/m², and the nonuniformities under different irradiances are better than 1.76% (meeting the requirements of Class A in the calibration specification of solar simulators) when slope error of ellipsoidal mirror is $\sigma=2$ mrad. In conclusion, the wide-range irradiance regulation of solar simulators is realized, without changing the

收稿日期: 2021-03-05; 修回日期: 2021-05-06; 录用日期: 2021-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(61703057)、吉林省科技发展计划(20200602055ZP)

通信作者: *sungf@cust.edu.cn

irradiance instability and spectral matching.

Key words optical design; illumination design; solar simulator; irradiance; continuous regulation; nonuniformity

OCIS codes 220.2945; 350.6050; 220.3620

1 引言

太阳辐照度是指在单位时间内垂直投射到单位面积上的太阳辐射能量,用来表征太阳光辐射的强弱^[1-3]。太阳模拟器可在实验室条件下模拟太阳辐照度^[4-6],对其进行调节可以使其满足不同的要求。

常用的太阳辐照调节方法有稳压调流法、滤光法和机械衰减法。稳压调流法在工业上已被广泛应用,通过控制电源的电流输出来调节光源的功率,进而实现对太阳模拟器辐照度输出的改变,但难以解决电源输出波动和氙灯发光效率波动等因素造成的辐照度分布变化问题^[7-8]。滤光法将中性滤光片作为光能衰减装置^[9],调节氙灯电源电流引起的低辐照度下的能量分布不稳定问题得以避免,但是滤光片的掺杂和镀膜工艺复杂、成本昂贵,且其改变了光束的光谱分布。机械衰减法有很多。吕文华等^[10]通过在太阳模拟器氙灯光源附近放置等尺寸、等间距的网孔式衰减器来分级降低辐照度,分别实现了 250, 750, 1000 W/m² 的辐照度输出。Najafabadi 等^[11]使用一种自适应模型预测控制器,通过改变接收孔径大小来调控入射光通量和通过孔径的辐射热

损失。与通过控制百叶窗开度进行调节相比,虽然采用调节孔径尺寸的方式进行控制可以获得更高的效率,但是没有涉及接收面辐照均匀性的评价;更换开孔数量及调节衰减器的分布虽然可实现光能衰减,但是非成像系统中的能量分布计算复杂,且不能实现输出辐照度的连续调节^[12]。因此,需要一种辐照调节范围宽、输出辐照度连续且调节过程稳定的太阳辐照调节方法^[13-16]。

本文提出一种太阳辐照连续可调的方法,研究了基于环带聚光与对称匀光理论的太阳辐照调制原理,在不大幅降低辐照不均匀度、不改变辐照不稳定度和光谱失配误差的前提下,实现了太阳辐照度的宽范围调节,为今后太阳辐照模拟及其多场景应用提供了参考。

2 太阳模拟器的光学系统组成与工作原理

太阳模拟器的光学系统主要由氙灯、椭球聚光镜、转向平面反射镜、辐照调节板、光学积分器和准直物镜等组成。太阳模拟器的系统组成如图 1 所示。

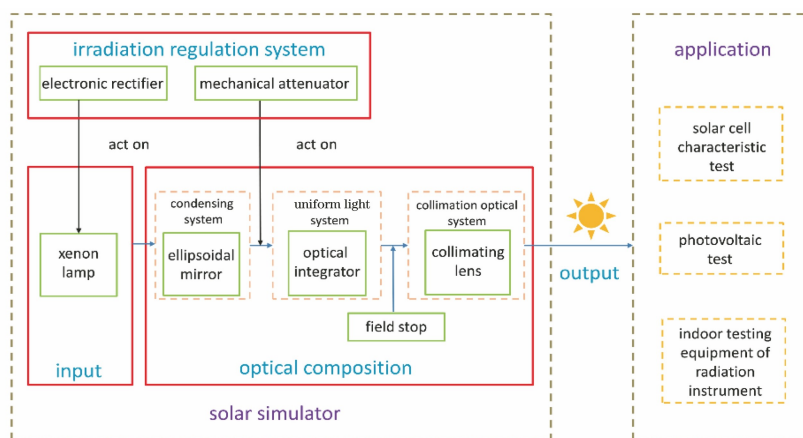


图 1 太阳模拟器系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of solar simulator system

氙灯置于椭球聚光镜第一焦点 F_1 处,光学积分器置于椭球聚光镜第二焦点 F_2 处,且椭球聚光镜第二焦点与准直物镜焦点重合。由氙灯发出的具有轴对称性且光谱接近太阳光谱的光束,在光学积分器的入射端面形成辐照度分布,该分布先经辐照调节板调制,再被光学积分器各通道对称分割,叠加成像后经准直物镜以平行光出射,形成一个辐照度

可调且分布均匀的辐照面。

3 高均匀高稳定辐照模拟与调节系统设计

3.1 椭球聚光镜的能量分布与辐照环带的调制原理

椭球聚光镜作为太阳模拟器的聚光系统,作用是将氙灯发出的能量会聚。为了更直观地研究椭球

聚光镜的会聚作用^[17-19], 基于椭球聚光镜的轴对称关系, 将该反射面看成是不同环带的组合, 发光点在 u_i 角 ($i=1, \dots, j$) 方向上发出的光线经椭球聚光镜上

的各环带反射后, 都会在参考面 $X'-Y'$ 内形成一个辐照度分布环带, 如图 2 所示。 u_1, u_j 分别为子午面内椭球聚光镜 u_i 角方向上环带的起始角和终止角。

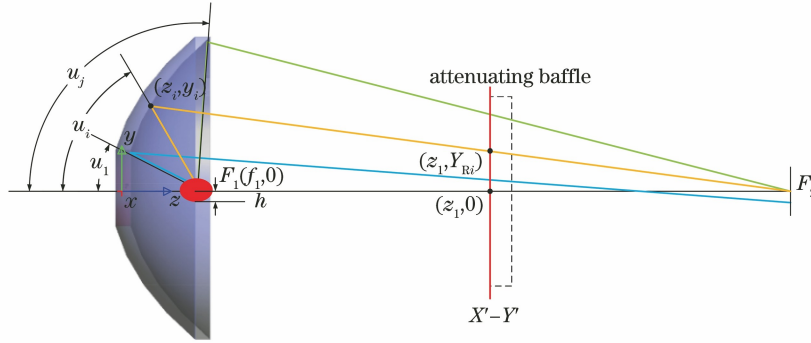


图 2 子午面内椭球聚光镜分析模型图

Fig. 2 Analysis model diagram of ellipsoidal mirror in meridian plane

虽然氙灯的阴极斑附近亮度极高, 可看作是理想的点光源, 但是外围的柱形发光体能量依然存在, 因此在椭球面会聚过程分析中将阴极斑简化为柱形发光体。取氙灯氙弧轴外发光点的高度为 h , 此时发光点的坐标为 (f_1, h) , 由该点发出的不同孔径角 u_i 的光线经椭球面反射后不再会聚到椭球聚光镜的第二焦点, 因此轴外发光点发出的光线到达参考

面 $X'-Y'$ 及第二焦面上时均会形成一定尺寸的光斑。

$$y_{li} - h = (z_{li} - f_1) \cdot \tan(\pi - u_i), \quad (1)$$

$$y_{Ei}^2 = 2rz_{Ei} - (1 - e^2)z_{Ei}^2, \quad (2)$$

$$y_{Ni} - y_i = -\frac{1}{\left. \frac{dy_{Ni}}{dz_{Ni}} \right|_{\substack{z_{Ni}=z_i \\ y_{Ni}=y_i}}}(z_{Ni} - z_i), \quad (3)$$

$$y_{Ri} - y_i = (z_{Ri} - z_i) \frac{\{[r - (1 - e^2)z_i]^2 - y_i^2\}(h - y_i) + 2y_i[r - (1 - e^2)z_i](f_1 - z_i)}{\{y_i^2 - [r - (1 - e^2)z_i]^2\}(f_1 - z_i) + 2y_i[r - (1 - e^2)z_i](h - y_i)}. \quad (4)$$

当孔径角 u_i 给定时, 联立入射光线方程(1)和椭球聚光镜的面型方程(2), 可求出 (f_1, h) 发出的光线到达椭球面上的点 (z_i, y_i) , 进而求得椭球面在点 (z_i, y_i) 处的法线方程, 如(3)式所示, 并根据反射定律, 最终得到反射光线的方程, 如(4)式所示。在(1)~(4)式中, (z_{Ei}, y_{Ei}) 为椭球面在 $y-z$ 平面内任意点的坐标, (z_{li}, y_{li}) 为入射光线在 $y-z$ 平面内任意点的坐标, (z_{Ni}, y_{Ni}) 为法线在 $y-z$ 平面内任意点的坐标, (z_{Ri}, y_{Ri}) 为反射光线在 $y-z$ 平面内任意点的坐标, r 为椭球面顶点处的曲率半径, e 为椭球偏心率。

线经椭球面反射后与参考面 $X'-Y'$ 相交的点的高度 Y_{Ri} , 如图 3 所示。进而可得到由氙灯不同高度发光点发出的环带光线经过椭球面反射后在参考面 $X'-Y'$ 上形成的圆。因该圆关于原点对称, 故可用 1/4 圆弧表示, 该参考面上的能量分布如图 4 所示。

由图 3 和图 4 可知: 随着椭球聚光镜孔径角的变化, 不同高度的发光点发出的光线在参考面上的纵坐标值发生变化, 大孔径角下不同高度点的出射

以某气象太阳模拟器为例, 椭球聚光镜的第一焦距为 $f_1 = 60$ mm, 第二焦距为 $f_2 = 1020$ mm, 椭球偏心率为 $e = 0.88$, 椭球面顶点处的曲率半径为 $r = 113.33$ mm。 z_F 是椭球面出口与光学积分器之间沿光轴的任意一点与椭球面顶点的纵向距离, 将辐照调节板置于 z_F 位置处, 当 $z_{Ri} = z_F$ 时, 根据(1)~(4)式可计算由氙灯不同高度发光点发出的光

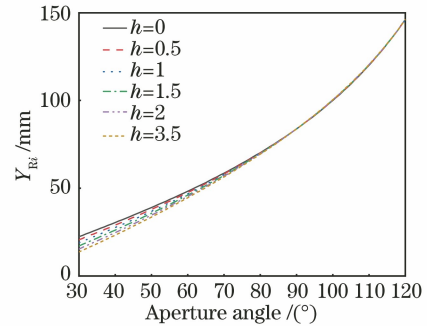


图 3 Y_{Ri} 随着孔径角的变化

Fig. 3 Y_{Ri} versus aperture angle

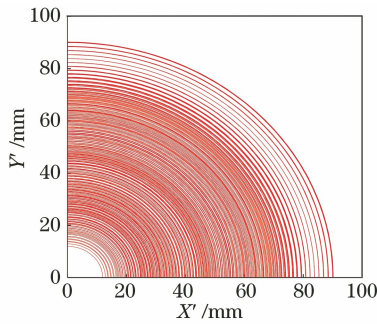


图 4 不同高度的发光点发出的光线在 X'-Y' 上的能量分布

Fig. 4 Energy distributions of light emitted by luminous points at different heights on X'-Y'

光束在参考面上的纵坐标值的差值较小,因此参考面上的能量分布边缘疏、中心密,且外环带比内环带的均匀性高。以高度为 2mm 的发光点被椭球聚光

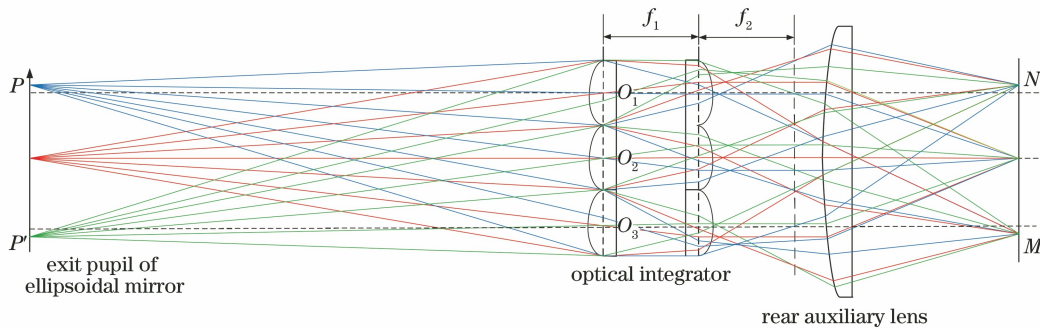


图 5 光学积分器光路图

Fig. 5 Light path diagram of optical integrator

场镜组出瞳被投影镜组及后辅镜成像在出瞳混叠区域 NM。光学积分器各通道的受照情况会直接影响混叠区域的匀光效果。氙弧在 u_i 角方向上,被椭球聚光镜各环带会聚到整个光学积分器场镜组所在表面的辐射通量 $\Phi(u_i)$ 以及椭球聚光镜各个环带的 $d_\varphi(u_i)$ 分别表示为

$$d_\varphi(u_i) = 2\pi t(u_i)(\cos u_1 - \cos u_j) \sum B_0 d_s, \quad (5)$$

$$\Phi(u_i) = \sum d_\varphi(u_i), \quad (6)$$

式中: $t(u_i)$ 为与椭球面聚光镜光轴成 u_i 角方向上的辐射强度与法向辐射强度之比; B_0 为各个基元面积 d_s 的法向亮度; $\sum B_0 d_s$ 为各基元发光面给不同半径环带辐照面提供的辐射通量。

设光学积分器的六边形透镜通道数为 a , 每个通道的辐射通量透过率为 A_a , 则场镜组通光口径所在平面接收的总辐射通量 $\Phi(u_i)$ 的表达式为

$$\Phi(u_i) = \sum A_a d_\varphi(u_i). \quad (7)$$

镜反射后在参考面 X'-Y' 上的能量分布为例,将辐照调节板置于 $z_F = 310$ mm 的位置,取 $u_1 = 30^\circ$, $u_j = 95^\circ$, 由图 3 可知,此时 Y_{Ri} 的最大值为 91.74 mm。据此设计辐照调节板的尺寸,即辐照调节板的半径应略大于该参考面上的光斑半径。

3.2 光学积分器的匀光分布与辐照孔调制原理

光学积分器作为太阳模拟器的匀光系统^[20-23],被放置在椭球聚光镜第二焦面上,作用是将氙弧不同高度发光点对应的各个辐照度分布环带叠加,进而得到整个氙弧经椭球聚光镜的某一个环带反射后在参考面内所形成的辐照度分布。将整个氙弧经椭球聚光镜各个环带反射后在参考面内所形成的总辐照度分布叠加的原理如图 5 所示。其中, PP' 为椭球聚光镜出瞳, O_1, O_2, O_3 为光学积分器场镜组上三个小透镜的中点。

每个通道的辐射通量透过率 A_a 并不相同,这使得场镜组通光口径所在平面接收的辐射通量不均匀,进而影响叠加像面的均匀性。若将辐照调节板上的透光孔均看作是点光源,则所有透光孔出射的辐照形成了类似高斯光束的叠加分布。假设光源阵列所在平面与光源目标照明平面之间的距离为 z , 目标面上有任意点 $Q(x_p, y_q, z)$, 开孔坐标为 (X_w, Y_w) , H 为开孔的个数, 则目标面上产生的辐照度表达式为

$$E(x_p, y_q, z) = \sum_{w=1}^H \sum_{m=0}^9 \frac{z^m I(\theta)}{[(x_p - X_w)^2 + (y_q - Y_w)^2 + z^2]^{\frac{m+2}{2}}}. \quad (8)$$

根据椭球聚光镜聚焦后光源的光强角度分布可以得到光强函数 $I(\theta)$, m 为多项式对应的拟合次数。根据照度分布函数可知,利用 Sparrow 判据可获得一个照度较为均匀的阵列分布。此外,在设计辐照调节板通孔的阵列排布时,为了使光斑

均匀且对称分布,应该尽量保持阵列的对称性^[24-27]。

3.3 辐照调节系统的设计

结合椭球聚光镜的环带辐照分布原理和光学积分器的叠加成像原理,提出在椭球聚光镜和光学积分器之间、靠近椭球聚光器的位置处设计辐照调节系

统。通过改变开孔的大小控制入射到场镜各元素透镜的辐照度,且不同环带的通孔大小不同,进而实现对辐照中心区域和边缘区域的辐射通量控制。设计一种可实现高效衰减的太阳模拟器辐照调节系统,该系统由完全相同的两块或多块不透明辐照调节板叠加构成,每块板上均设有扇环形通孔,如图 6 所示。

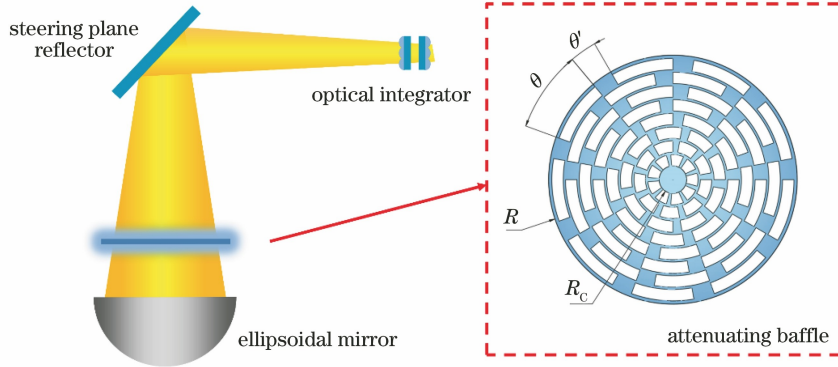


图 6 辐照调节系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of irradiation regulation system

单块辐照调节板的半径为 R ,为了保证辐照度的均匀性,板的中心留有半径为 R_c 的遮挡区域。在相同半径上,通孔数量 k 与单个通孔所对应的中心角 θ 、相邻通孔间隔所对应的中心角 θ' 有关,其表达式为

$$k = 2\pi / (\theta + \theta') \quad (9)$$

根据(9)式可求得任意环带通孔上的扇环内径 R_d 、外径 L_d 以及环带通孔面积 S_d ,其表达式分别为

$$R_d = R_c + (d - 1)(r_h + l), \quad (10)$$

$$L_d = R_d + r_h, \quad (11)$$

$$S_d = \pi(L_d^2 - R_d^2) \frac{k\theta}{2\pi}, \quad (12)$$

式中: d 为任意环带编号,且 $d = 1, 2, \dots, n$; r_h 为通孔径向宽度; l 为径向相邻通孔的间隔。

同时,调节各个板的相对角度,使得通孔遮挡区域所对应的中心角 α 在 0 到最大值 θ 之间调整,通孔的透光率在 0 到最大值之间变化,进而实现辐照调节的细分。单一环带上的透过率 A_α 、所有环带面上对应辐照调节系统的最大透过率 A_{sum} 以及改变角度 α 后的透过率 $A_{\alpha\text{-sum}}$ 的表达式分别为

$$A_\alpha = k \cdot \frac{\theta - \alpha}{\theta}, \quad (13)$$

$$A_{\text{sum}} = \frac{\sum_{d=1}^n S_d \cdot \bar{E}_d}{\bar{E}_{\text{sum}} \cdot \pi R_{\text{max}}^2}, \quad (14)$$

$$A_{\alpha\text{-sum}} = A_{\text{sum}} \cdot \frac{\theta - \alpha}{\theta}, \quad (15)$$

式中: R_{max} 为参考面上的最大半径; \bar{E}_d 为第 d 个通孔的平均辐照度值; \bar{E}_{sum} 为整个参考面上的平均辐照度值。当 d 增大时, S_d 增大,与调节板的整个辐照面积之比增大,同时 \bar{E}_d 减小。又由(5)式和(6)式可知,每个环带的辐射通量衰减比例一致,进而该辐照调节系统可以保持原先输出太阳辐照度的均匀性。如果调节由内向外的环带 k 值的递增关系,使得每个环带的辐射通量尽可能相等,则均匀性可以得到进一步的改善。

单块辐照调节板的尺寸参数如表 1 所示,其中 $l_{\text{thickness}}$ 为单块辐照调节板的厚度。以表中确定的 θ 与 θ' 为例,对应需要 4 片调节板叠加组成的辐照调节系统,以实现辐照度调节。在实际加工过程中,可采用因瓦合金制成板材。

表 1 辐照调节板的尺寸参数

Table 1 Dimension parameters of irradiation regulation plate

Parameter	R /mm	R_c /mm	r_h /mm	θ /($^\circ$)	θ' /($^\circ$)	l /mm	$l_{\text{thickness}}$ /mm
Value	108.82	12.00	10.00	30	10	2	1

4 太阳辐照调节及其均匀度的仿真分析

为验证辐照调节系统设计的合理性和可行性,用 Lighttools 建立光学系统模型。采用蒙特卡罗射线追踪(MCRT)方法确定进入接收器的光通量。椭球聚光器及平面反射镜的反射率为 0.9,接收面为理想的接收面。由于光学积分器处的温度较高,因此光学积分器场镜和投影镜的材料均选为 JGS3 红外光学石英玻璃,其可以防止积分器高温炸裂。准直组合透镜材料选用高透过率的光学玻璃,分别为 K9 和 ZF1。系统其余光学及机械表面设为全吸收。考虑到传输过程中辐射能的各种损耗估计,选择模拟氙灯的功率为 5118.4 W。采样光线数目与结果的相关性分析如图 7 所示,可以发现随着采样光线数量的增大,有效辐照面 X-Y 未加辐照调节系统时的辐照不均匀度及加上辐照调节系统后每个通孔遮挡区域对应中心角不同时的辐照不均匀度均逐渐趋于稳定。因此将采样光线数目设置为 1.0×10^7 时,结果是可靠的。随后的结果皆由 1000 万条采样光线追迹得到。

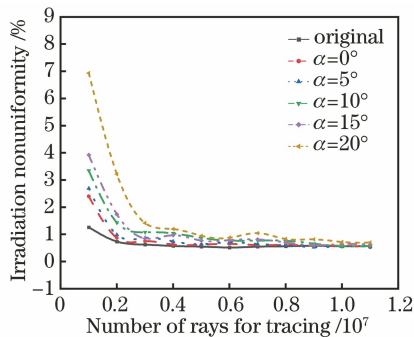


图 7 光线追迹数目对辐照不均匀度的影响

Fig. 7 Effect of number of rays for tracing on irradiation nonuniformity

4.1 未加辐照调节系统时有效辐照面的辐照度仿真分析

未加辐照调节系统时有效辐照面仿真的结果如图 8 所示。在直径为 180 mm 的有效辐照面内,辐照度仿真值为 2374.51 W/m^2 ,辐照度最大值为 2382.38 W/m^2 ,辐照度最小值为 2355.74 W/m^2 ,辐照不均匀度仿真值优于 0.56%,系统能量利用率约为 3.64%。

椭球聚光镜理想形状与实际形状之间的偏差通常用斜率误差表示。有效辐照面上辐照分布的不均匀度随着斜率误差的增大迅速降低,当斜率误差为 $\sigma = 3 \text{ mrad}$ 时,不均匀度为 1.92%。

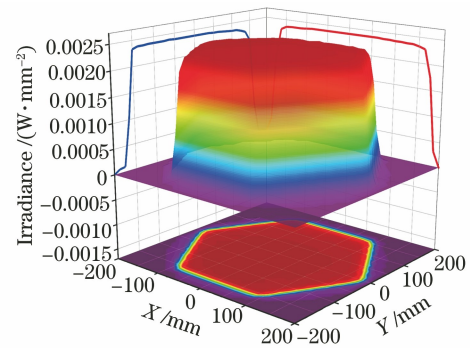


图 8 未添加辐照调节系统下的模拟辐照度分布
Fig. 8 Simulated irradiance distributions without adding irradiation regulation system

4.2 加入辐照调节系统时的系统辐照均匀度仿真分析

对加入辐照调节系统的太阳模拟器进行辐照度及辐照均匀性仿真分析。单块辐照调节板可实现的辐照度调节量如图 9 所示,在直径为 180 mm 的有效辐照面内,辐照度仿真值为 1473.78 W/m^2 ,辐照度最大值为 1478.93 W/m^2 ,辐照度最小值为 1461.84 W/m^2 ,辐照不均匀度仿真值优于 0.58%,并实现了 $A_{\text{r-sum}} = 62.07\%$ 的辐照调节。

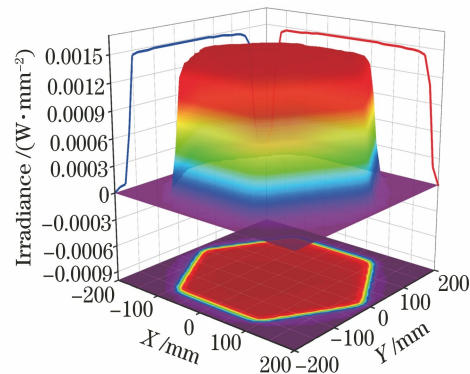


图 9 添加单个辐照调节板所获得的模拟辐照度分布
Fig. 9 Simulated irradiance distributions achieved by adding single irradiation regulation plate

随着每个通孔遮挡区域对应中心角 α 的变化,有效辐照面上的辐照度调节量与极值的变化如图 10(a)~(d)所示。经辐照调节系统作用后的辐照不均匀度如表 2 所示。

由表 2 中数据可知:通过改变辐照调节板的相对角度,可将太阳辐照度从 1473.78 W/m^2 调至 490.38 W/m^2 ,且椭球聚光镜的斜率误差为 $\sigma = 2 \text{ mrad}$ 时,辐照不均匀度始终保持在 2% 以内(满足太阳模拟器校准规范里的 A 级标准)。

在实际工程应用中,假设氙灯功率的稳定调节极限为 50%^[28-30],将该极限调节量叠加至该系统便

可在满足辐照不均匀度 A 级标准的前提下,实现模拟辐照度在 $245.19 \sim 2374.51 \text{ W/m}^2$ 范围内的连续可调(辐照度在 $1187.26 \sim 2374.51 \text{ W/m}^2$ 范围内的连续可调可单独通过调节氙灯功率来实现,辐照度

在 $490.38 \sim 1473.78 \text{ W/m}^2$ 范围内的连续可调可单独使用该辐照调节系统来实现,辐照度在 $245.19 \sim 490.38 \text{ W/m}^2$ 范围内的连续可调可通过调节氙灯功率并配合该辐照调节系统来实现)。

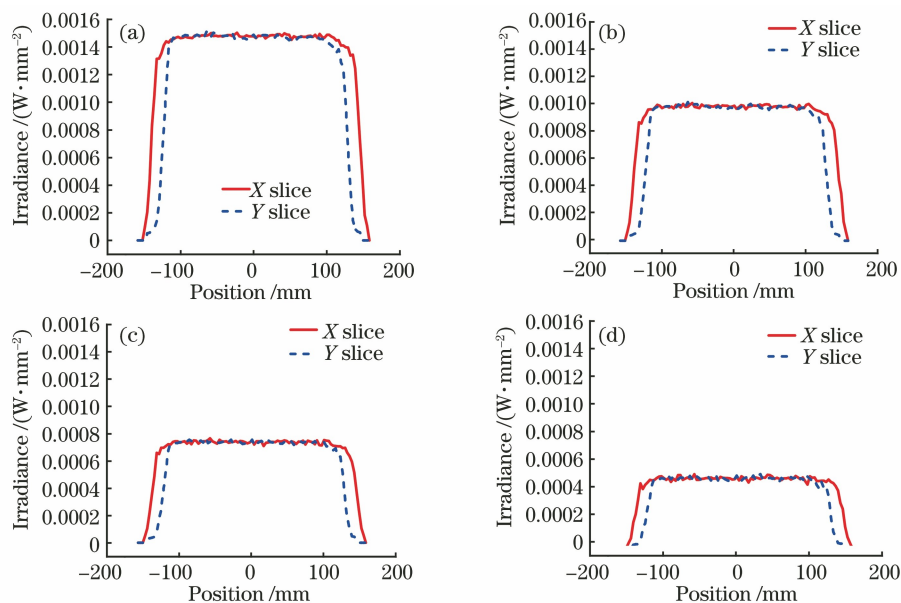


图 10 不同 α 下的模拟辐照度分布。(a) $\alpha=0^\circ$;(b) $\alpha=10^\circ$;(c) $\alpha=15^\circ$;(d) $\alpha=20^\circ$

Fig. 10 Simulated irradiance distributions at different α . (a) $\alpha=0^\circ$; (b) $\alpha=10^\circ$; (c) $\alpha=15^\circ$; (d) $\alpha=20^\circ$

表 2 有效辐照面的辐照度分布变化

Table 2 Changes of irradiance distribution on effective irradiation surface

Angle $\alpha / (^\circ)$	0	5	10	15	20
$A_{a\text{-sum}} / \%$	62.07	51.70	41.36	31.00	20.65
Irradiation nonuniformity when $\sigma=0 / \%$	0.58	0.55	0.56	0.64	0.72
Irradiance on effective irradiation surface $/(W \cdot m^{-2})$	1473.78	1227.62	982.00	736.00	490.38
Irradiation nonuniformity when $\sigma=2 \text{ mrad} / \%$	1.53	1.52	1.62	1.45	1.76

5 结 论

研究了基于椭球聚光镜配光得到的辐照表面的能量分布,提出了一种新型太阳辐照机械调节方法,设计了含有多环带多个微孔的辐照调节板。通过控制场镜各元素透镜的辐射通量,实现了有效辐照区域的辐射通量的控制。并通过改变各辐照调节板的通孔透光面积,实现了辐照度的连续调节,解决了现有太阳模拟器辐照度调节范围窄、数值不连续等缺陷严重影响辐照不均匀度、不稳定性 and 光谱匹配度的问题。仿真结果表明:单独使用该辐照调节系统可实现输出辐照度在 $490.38 \sim 1473.78 \text{ W/m}^2$ 范围内的连续可调,且椭球聚光镜的斜率误差为 $\sigma=2 \text{ mrad}$ 时,不同辐照度下的不均匀度优于 1.76% 。配合稳压调流法,在不改变辐照度不稳定性 and 光谱匹配度的前提下,可实现更宽范围 ($245.19 \sim$

2374.51 W/m^2) 内的辐照度连续调节,为太阳模拟器多场景应用提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Gallo A, Marzo A, Fuentealba E, et al. High flux solar simulators for concentrated solar thermal research: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 77: 1385-1402.
- [2] Chen Y Y, Fang X D, Guo L, et al. Design of a solar radiation simulator for the aircraft cabin thermal load tests [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(9): 0922001. 陈圆圆, 方贤德, 郭龙, 等. 座舱热载荷太阳辐射模拟器设计研究 [J]. 光学学报, 2020, 40(9): 0922001.
- [3] Sun H J, Zhang G Y, Sun G F, et al. Design of variable coefficient ellipsoidal condenser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 0908001. 孙焕杰, 张国玉, 孙高飞, 等. 变系数椭球聚光镜的设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9):

- 0908001.
- [4] Wang W J, Aichmayer L, Garrido J, et al. Development of a Fresnel lens based high-flux solar simulator[J]. *Solar Energy*, 2017, 144: 436-444.
- [5] Garrido J, Aichmayer L, Wang W J, et al. Characterization of the KTH high-flux solar simulator combining three measurement methods[J]. *Energy*, 2017, 141: 2091-2099.
- [6] Levêque G, Bader R, Lipiński W, et al. Experimental and numerical characterization of a new 45 kW_{el} multisource high-flux solar simulator [J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): A1360-A1373.
- [7] Domínguez C, Antón I, Gabriel S, et al. Solar simulator for concentrator photovoltaic systems [J]. *Optics Express*, 2008, 16(19): 14894-14901.
- [8] Zhang R, Li H S, Xiang Y H, et al. Development of KFTA solar simulator [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2009, 26(6): 499, 548-553.
张容, 李竑松, 向艳红, 等. KFTA 太阳模拟器研制 [J]. *航天器环境工程*, 2009, 26(6): 499, 548-553.
- [9] Liu S. Study on key technique of collimation solar simulator with high-precision [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.
刘石. 高精度准直式太阳模拟器及其关键技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
- [10] Lü W H, Mo Y Q, Wang D. Characteristics investigation for pyranometers [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2002, 23(3): 313-316.
吕文华, 莫月琴, 王冬. 总辐射表性能测试研究 [J]. *太阳能学报*, 2002, 23(3): 313-316.
- [11] Najafabadi H A, Ozalp N. Aperture size adjustment using model based adaptive control strategy to regulate temperature in a solar receiver [J]. *Solar Energy*, 2018, 159: 20-36.
- [12] Su S, Meng F L, Zhang G Y, et al. Design method of irradiance attenuator for solar simulator of xenon lamp [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2): 0208001.
苏拾, 孟凡琳, 张国玉, 等. 氙灯光源太阳模拟器辐照衰减器设计方法 [J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 0208001.
- [13] Wu D J. The research on the technique of irradiance control for solar simulator [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
吴大军. 太阳模拟器辐照度控制技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [14] Gordon J M, Babai D, Feuermann D. A high-irradiance solar furnace for photovoltaic characterization and nanomaterial synthesis [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, 95(3): 951-956.
- [15] Li Z G, Tang D W, Li T, et al. A hemispherical-involute cavity receiver for Stirling engine powered by a xenon arc solar simulator [J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(5): 054401.
- [16] Zhu K S, Sun J G, Li G H. Study of the effects of spectral mismatch of LED sun simulator on the testing of solar cells [J]. *China Light & Lighting*, 2015, (9): 10-14.
朱孔硕, 孙健刚, 李果华. LED 太阳模拟器光谱失配对太阳能电池测量影响的研究 [J]. *中国照明电器*, 2015, (9): 10-14.
- [17] Jin J, Hao Y, Jin H G. A universal solar simulator for focused and quasi-collimated beams [J]. *Applied Energy*, 2019, 235: 1266-1276.
- [18] Zhong J G. Methods to calculate the distribution of irradiance by an aspherical collecting mirror [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 1985, 6(1): 41-47.
仲跻功. 非球面聚光镜辐照度分布的计算方法 [J]. *太阳能学报*, 1985, 6(1): 41-47.
- [19] Okuhara Y, Kuroyama T, Tsutsui T, et al. A solar simulator for the measurement of heat collection efficiency of parabolic trough receivers [J]. *Energy Procedia*, 2015, 69: 1911-1920.
- [20] Lü T, Fu D H, Chen X Y, et al. Effect of optical integrator element lenses' number and shape on the lighting uniformity of solar simulator [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2014, 25(10): 1849-1853.
吕涛, 付东辉, 陈小云, 等. 光学积分器的元素透镜数量和形状对太阳模拟器均匀性的影响 [J]. *光电子·激光*, 2014, 25(10): 1849-1853.
- [21] Zheng R, Zhang G Y, Gao Y, et al. Cosine error correction of solar radiation observation instrument [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(1): 112004.
郑茹, 张国玉, 高越, 等. 太阳辐射观测仪余弦误差修正方法 [J]. *光子学报*, 2016, 45(1): 112004.
- [22] Cheng Y, Fang F Z, Zhang X D. Design and manufacture of off-axis optical reflective integrator with faceted structure [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(9): 094001.
- [23] Wang G C, Lin X, Gu C, et al. New type of uniform light device for solar simulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(24): 2436001.
王广才, 林兴, 顾晨, 等. 用于太阳模拟器的新型匀光器 [J]. *光学学报*, 2020, 40(24): 2436001.
- [24] Qin Z, Wang K, Chen F, et al. Analysis of condition for uniform lighting generated by array of light emitting diodes with large view angle [J]. *Optics Express*, 2010, 18(16): 17460-17476.
- [25] Zheng Z R, Hao X, Liu X. Freeform surface lens for LED uniform illumination [J]. *Applied Optics*, 2009,

- 48(35): 6627-6634.
- [26] Tavakoli M, Jahantigh F, Zarookian H. Adjustable high-power-LED solar simulator with extended spectrum in UV region [J]. *Solar Energy*, 2021, 220: 1130-1136.
- [27] Wu D H, Wang J W, Su Z P. Optimization and integration of LED array for uniform illumination distribution [J]. *Optoelectronics Letters*, 2014, 10 (5): 335-339.
- [28] Ma Y L, Jing F L. Some primary ideas of vacuum thermal test for “Chang E-1” lunar exploration satellite [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2004, 21(2): 1-7.
- 马有礼, 景甫林. “嫦娥一号”月球探测卫星真空热试验的初步思路 [J]. *航天器环境工程*, 2004, 21(2): 1-7.
- [29] Costa B A, Lemos J M, Guillot E. Control of a solar furnace using MPC with integral action [J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, 49(7): 961-966.
- [30] Liu S, Zhang G Y, Sun G F, et al. Design of an optical system for a solar simulator with high collimation degree and high irradiance [J]. *Journal of Optical Technology*, 2017, 84(2): 117-121.