

用于太阳模拟器光束调制的复合抛物面反射器设计

陈佳丽¹, 孙高飞^{1,2*}, 刘石^{1,2}, 张国玉^{1,2}, 张杰瑞¹, 陈思文¹¹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 积分球出射光在远距离处的大辐照面上辐照均匀性及辐照度受出射光角度影响较大。针对这一问题, 提出将复合抛物面聚光器逆用为复合抛物面反射器的积分球出射光角度调制方法。首先, 研究复合抛物面反射器光束调制原理并推导抛物线方程; 其次, 分析复合抛物面反射器的参数对辐照面辐照均匀性及辐照度的影响, 确定复合抛物面反射器的发散角与截取比等尺寸参数; 最后, 建立发散式太阳模拟器光学系统模型并仿真。仿真结果表明: 复合抛物面反射器将积分球出射光半角由 82° 调制为 25° ; 在太阳模拟器有效辐照面 $\Phi 1000$ mm 内, 与未使用复合抛物面反射器相比, 当复合抛物面反射器的截取比为 20% 时, 辐照均匀性提高了 0.24 倍, 为 97.30%, 辐照度提高了 5.1 倍, 为 553.54 W/m², 实现了远距离处高辐照均匀性的大辐照面模拟。

关键词 光学设计; 照明设计; 太阳模拟器; 复合抛物面反射器; 截取比; 光束调制

中图分类号 TB858 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230455

1 引言

太阳模拟器是地面模拟空间太阳辐射特性和几何特性的设备。辐照均匀性作为太阳模拟器的重要指标, 直接决定太阳模拟器性能的好坏^[1]。太阳模拟器常用的匀光器件主要有光学积分器和积分球。光学积分器虽匀光效果好, 但存在受入射光角度的约束, 且角度对匀光效果影响敏感的不足^[2]; 积分球接收的入射光角度范围较大, 且角度对其匀光效果影响不敏感^[3], 因而克服了积分器会产生旁瓣效应的弊端, 但引入了在远距离的大辐照面上辐照度及辐照均匀性降低的问题^[4-5]。

针对提高太阳模拟器的辐照度及辐照均匀性, 复合抛物面聚光器(CPC)广泛应用于太阳能领域的会聚作用中^[6-7]。Li等^[8]设计的一款多源高通量太阳模拟器复合抛物面聚光器, 在 85.4% 的光能利用率下, 辐照度提高了 4.1 倍, 辐照均匀性也有明显提升。该研究主要针对聚光效果, 未对辐照均匀性的影响情况进行深入研究。王昊等^[9]研究的 CPC 聚光系统, 用于在太阳模拟器中反射会聚氙灯发出的光线, 结果表明由 CPC 聚光组合光源系统出射的光的均匀性有很大提高, 光能利用率为 94.86%。该研究利用 CPC 与球面反射器共同会聚氙灯光线, 提高了氙灯能量利用率, 但对辐照均匀性的研究并不确切。Xu等^[10]研究了结构为 S 型与 M 型的复合抛物面聚光器, 结果表明 S 型初始接收角为

60° 时, 光能利用率下降, M 型初始接收角为 70° 时, 光能利用率逐渐上升且辐照均匀性提高了 1.31%。该研究虽给出了辐照均匀性提高的具体数值, 但在研究内容中未对其匀光原理进行具体分析阐述。上述研究表明复合抛物面聚光器进行聚光时可调制光束并且有效提高辐照度, 但大多数研究停留在对复合抛物面聚光器的结构优化及提高光能利用率使辐照度提升等方面, 缺少实现均匀化效果的具体研究分析, 并且鲜有考虑其逆向使用为复合抛物面反射器时, 对出射光角度的调制原理及提升辐照均匀性的影响的研究。

综合上述研究情况, 本文以调制积分球出光孔发散角, 从而提高氙灯光能利用率及大辐照面的辐照均匀性为目的, 基于光路可逆原理及边缘光线原理, 提出复合抛物面聚光器逆用的方法, 研究复合抛物面反射器光束调制原理, 推导复合抛物面反射器抛物面方程, 分析发散半角与截取比对辐照面辐照均匀性及辐照度的影响。在此基础上设计复合抛物面反射器, 解决积分球出射光受工作距离制约而导致的辐照均匀性及辐照度下降的问题, 为日后提高发散式太阳模拟器辐照均匀性及辐照度的研究提供思路。

2 太阳模拟器光学系统组成及工作原理

用复合抛物面反射器进行光束调制实现提高辐照度及辐照均匀性的太阳模拟器光学系统, 主要由氙灯

收稿日期: 2023-01-12; 修回日期: 2023-02-09; 录用日期: 2023-03-15; 网络首发日期: 2023-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(61703057)、吉林省科技发展计划(20200602055ZP, 20210201034GX)

通信作者: *821323880@qq.com

阵列、椭球聚光镜阵列、积分球和复合抛物面反射器组成,如图 1 所示。

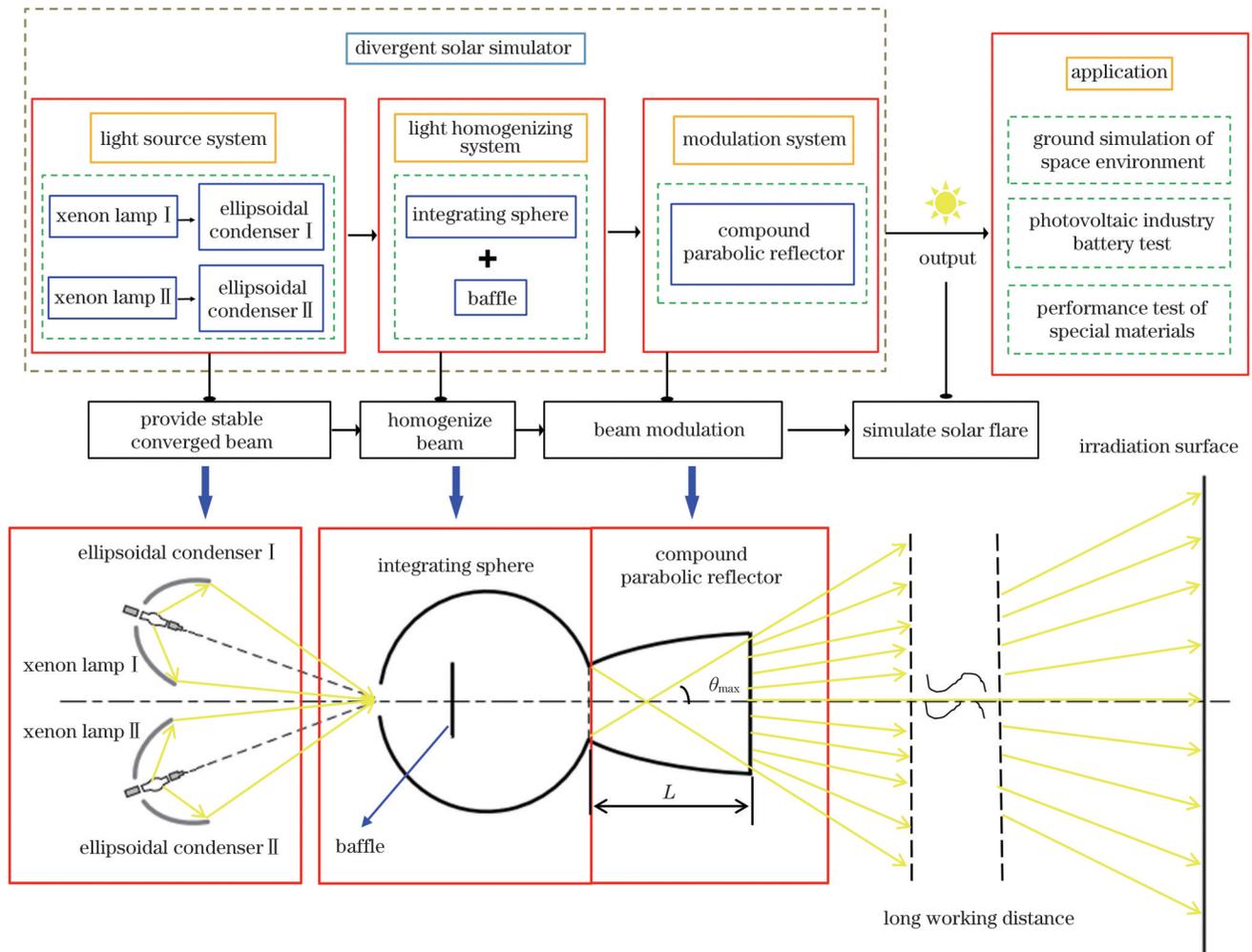


图 1 太阳模拟器光学系统组成及结构图

Fig. 1 Composition and structure diagram of optical system of solar simulator

氙灯阵列置于椭球聚光镜的第一焦点处,积分球入光孔置于椭球聚光镜第二焦点处,复合抛物面反射器入光孔与积分球出光孔衔接。由氙灯发出的光线经椭球聚光镜会聚后进入积分球实现匀光,经积分球出射的光进入复合抛物面反射器进行光束调制。利用复合抛物面反射器的高度对称性及环带对应的叠加作用,将由于工作距离增加而无法进入有效辐照面内的积分球出射光,经过复合抛物面反射器调制后重新叠加分布在辐照面内,提高氙灯的光能利用率,并形成高辐照均匀性的大辐照面^[11-12]。其中,复合抛物面反射器作为光学系统的重要组成部分,可通过设计最大发散半角 θ_{max} 与长度 L ,提高其对积分球出射光角度与光强分布的调制效果。

3 积分球出射光分布情况分析

为研究复合抛物面反射器对积分球出射光角度的调制作用,需先分析积分球出射光的分布情况。本文以某型太阳模拟器光学系统为例,选取半径 $R=250$ mm的积分球,出光孔直径 $D=150$ mm,宽度 $h=$

20 mm。经计算可知积分球出射光与出射平面夹角 $\omega_i=8^\circ$,则积分球出光孔处的出光角度为 $[-82^\circ, 82^\circ]$ ^[13]。积分球出射光示意图与出射光线的角度发散情况如图 2 所示。

由图 2 可知,经积分球匀光作用后的出光角度过大。且经仿真可得,在工作距离为 3000 mm 时,有效辐照面上的辐照均匀性比出光孔处降低了 20.75%,辐照度降低为出光孔处的 0.01%。由此可见,辐照均匀性及辐照度受工作距离的影响,仅靠积分球匀光无法补偿,将导致积分球出射的光斑不具有理想的辐射特性,难以满足太阳辐射模拟需求^[14-15]。因此,需要调制积分球出射光角度以及调整光束分布,提高氙灯椭球聚光镜光源经积分球出射后的光能利用率以及辐照面上的辐照均匀性。

4 复合抛物面反射器调制原理与设计研究

结合积分球出射光角度发散情况以及根据 Frenet-Serret 方程,推导反射面法线的方向余弦进行

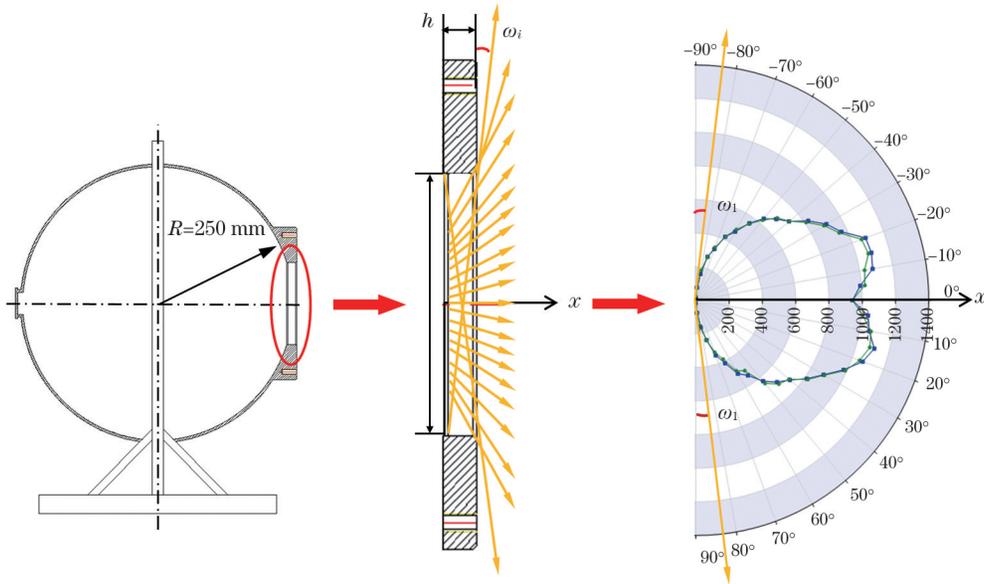


图 2 积分球出光孔处光线角度发散情况
Fig. 2 Light angle divergence at exit hole of integrating sphere

光线追迹,分析复合抛物面反射器的调制原理。将由于工作距离而影响辐照均匀性及辐照度的部分积分球出射光,经复合抛物面反射器调制后,重新叠加分布进入有效辐照面内,进而实现对辐照中心区域和边缘区域的光强度分布控制。工作原理图如图 3 所示。

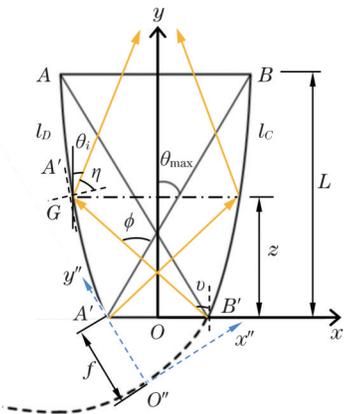


图 3 复合抛物面反射器工作原理图
Fig. 3 Working principle diagram of compound parabolic reflector

复合抛物面反射器主要由抛物线 l_c 与抛物线 l_b 中的截取段 AA' 段与 BB' 段绕对称轴旋转而成^[16]。由边缘光线原理^[17]分析可得,抛物线 BB' 为

$$\left[2\sqrt{fk_1}x + (f - k_1)y\right]^2 + 8af^2x - 8ak_2\sqrt{fk_1}y = 4a^2f(a + k_2), \quad (1)$$

式中: $k_1 = 2a - f$; $k_2 = a + f$; f 为焦距, $f = b \sin \theta_{\max}(1 + \sin \theta_{\max})$; a 为复合抛物面反射器入光孔 $A'B'$ 的半径,即积分球出光孔半径; b 为复合抛物面反射器出光孔 AB 的半径; $a = b \sin \theta_{\max}$; θ_{\max} 为复合抛物面反射器最大发

散半角。

令积分球出射的边缘光线在复合抛物面反射器反射面上的反射点为 G 点,则 G 点所在的子午面的复合抛物面反射器方程为

$$x = \frac{2a(1 + \sin \theta_{\max}) \sin(\phi - \theta_{\max})}{1 - \cos \phi} - a, \quad (2)$$

$$y = \frac{2a(1 + \sin \theta_{\max}) \cos(\phi - \theta_{\max})}{1 - \cos \phi}, \quad (3)$$

式中: ϕ 为复合抛物面反射器最大发散半角与入射光线入射角之和。

根据 Frenet-Serret 方程^[18],可确定反射点 G 处法线的方向余弦 n_c 以及法线 n :

$$n_c = \frac{(F_x, F_y)}{\sqrt{(F_x^2, F_y^2)}}, \quad (4)$$

$$n = \left(\frac{\partial x}{\partial \phi}, \frac{\partial y}{\partial \phi} \right), \quad (5)$$

式中: F_x, F_y 分别为抛物线 BB' 的函数方程 $F(x, y) = 0$ 对 x, y 的偏导。

由余弦定理并结合式(5)可知反射光角度 η 为

$$\eta = \arccos \left(\frac{n \cdot n_2}{|n| |n_2|} \right), \quad (6)$$

式中: n_2 为经过反射点 G 出射光的方向向量, $n_2 = (-\sin \theta_i, \cos \theta_i)$ 。

积分球出射光角度为 θ_i 的光强 $I(\theta_i)_z$ 为积分球直接出射光角度为 θ_i 的光强 I_1 与积分球出射光经复合抛物面反射器反射后出射光夹角为 θ_i 的光强 I_2 之和,即 $I(\theta_i)_z = I_1 + I_2$,

$$I(\theta)_z = I_0 \cos \theta_i + kI_0 \frac{\int_0^L \cos[F(\theta_i, y)] dy}{\int_0^{\theta_{\max}} \int_0^L \cos[F(\theta_i, y)] dy d\theta_i}, \quad (7)$$

式中： $F(\theta_i, y)$ 为 ν 关于 θ_i 与 y 相关的函数； ν 为入射光角度， $\nu = \pi - \theta_i - 2\eta$ ； k 为复合抛物面反射器反射面的表面反射率； L 为复合抛物面反射器长度， $L = \frac{f \cos \theta_{\max}}{\sin^2 \theta_{\max}}$ 。

当 θ_{\max} 越大时， θ_i 可取范围越大，而 θ_i 越大表示反射光线进行反射后越向辐照面两边进行补偿。由式(7)可知，随着 θ_i 的增加， I_1 会下降，而 ν 会减小，即 I_2 将提高。这样互补叠加减小了辐照面上辐照度最大值与最小值的差值，降低了辐照不均匀性。复合抛物面反射器对积分球出射角在 $[-82^\circ, \theta_{\max}]$ 与 $[\theta_{\max}, 82^\circ]$ 的出射光调制前后，工作距离较远处总的整体辐照分布曲线如图4所示。

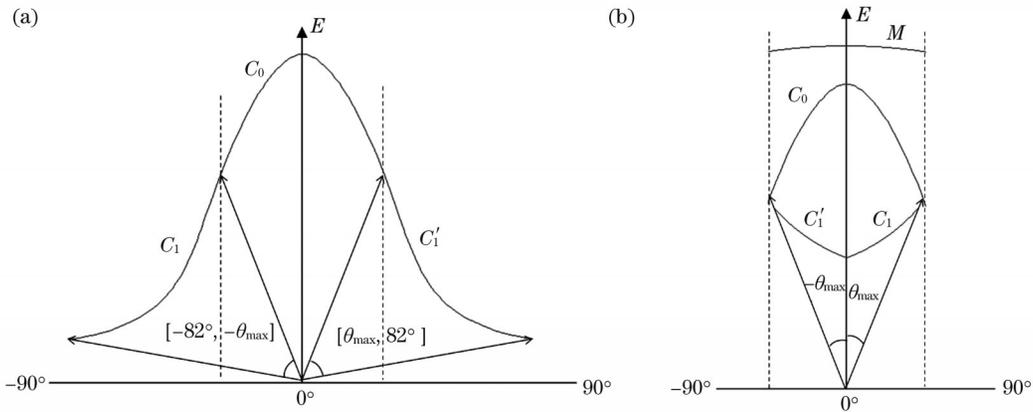


图4 经复合抛物面反射器反射前后的辐照分布分割曲线。(a)调制前辐照分布分割曲线；(b)调制后辐照分布分割曲线

Fig. 4 Partition curve of irradiation distribution before and after reflection by composite parabolic reflector. (a) Partition curve of irradiation distribution before modulation; (b) partition curve of irradiation distribution after modulation

经过复合抛物面反射器光束调制后，各曲线重新利用梯度较大的边缘曲线，经反射后以中间平滑的曲线进行叠加，最终叠加成 M 曲线，实现缩小积分球出射光的发散角、提高氙灯光能利用率和大辐照面上的辐照均匀性的目的。

通过上述分析可知， θ_{\max} 决定反射后出射光的角

度 θ_i 与反射角 η ，影响辐照面上辐照均匀性及辐照度，而最大发散半角与长度之间又相互制约，所以需对 θ_{\max} 与 L 的最优值进行分析选取。由式(1)、式(7)可知复合抛物面反射器 $f, 2a, 2b, \theta_{\max}$ 以及 L 的关系，建立复合抛物面反射器发散半角和长度与其入光孔直径之间的比值关系曲线，如图5所示。

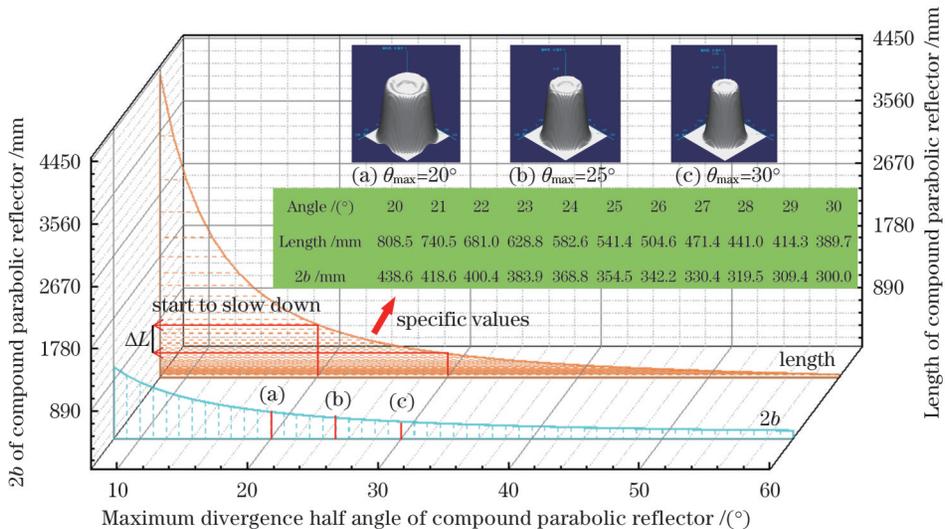


图5 复合抛物面反射器最大发散半角与其长度关系曲线

Fig. 5 Curve of relationship between maximum divergence half angle and length of compound parabolic reflector

由图5可知：发散角在 $[-25^\circ, 25^\circ]$ 范围内时，减小复合抛物面反射器的发散半角，其长度会急剧增加；而 θ_{\max} 超过 25° 时，其长度变化较稳定。进而取复合抛物

面反射器 θ_{\max} 在 $[20^\circ, 30^\circ]$ 范围，分析角度与长度对辐照面辐照均匀性及辐照度的影响。其中，辐照均匀性 $1 - \epsilon$ 用来评判辐照面上辐照分布情况， ϵ 为辐照不均

匀性^[19-20],其计算公式为

$$\epsilon = \pm \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}}, \quad (8)$$

式中: E_{\max} 为辐照度的最大值; E_{\min} 为辐照度的最小值。 ϵ 值越大表示光线分布越不均匀。

首先分析最大发散角度对辐照面辐照均匀性及辐照度的影响。

当 θ_{\max} 在 $[20^\circ, 30^\circ]$ 范围内时,复合抛物面反射器在相同工作距离处的辐照面上的辐照分布情况如图 6 所示。仿真结果如图 7 所示。

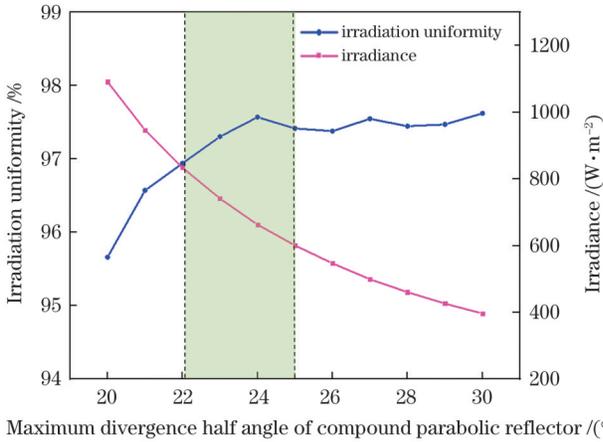


图 6 不同最大发散半角时在相同工作距离辐照面上的辐照均匀性及辐照度情况

Fig. 6 Irradiation uniformity and irradiance on irradiation surface at same working distance for different maximum divergent half angles

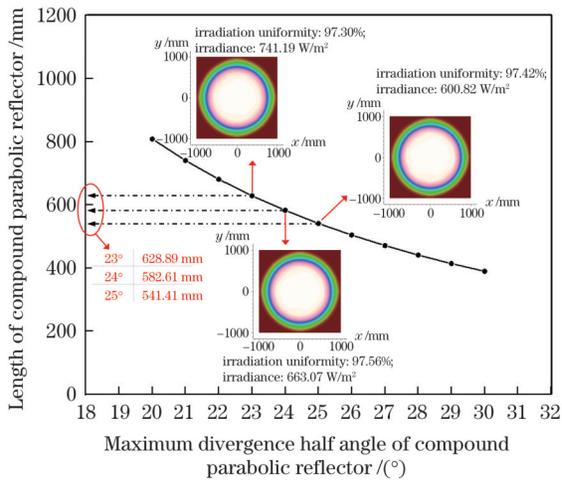


图 7 不同最大发散半角下的复合抛物面反射器仿真结果

Fig. 7 Simulation results of compound parabolic reflectors with different maximum divergent half angles

由图 6 和图 7 可知,最大发散角度对辐照面处的辐照均匀性及辐照度的影响较大,表现为:随着最大发散半角从 20° 增加到 30° ,辐照度急剧下降,甚至其值下降近 40% ;而辐照均匀性呈现先上升后稳定的趋势。若考虑辐照均匀性在 97% 以上且保持较高辐照度,则最优 θ_{\max} 范围为 $(22^\circ, 25^\circ]$ 。而 θ_{\max} 由 23° 增加到 25° 时,复

合抛物面反射器的长度缩短,使其长宽比减小。因此,选择 θ_{\max} 为 25° 的复合抛物面反射器,由 $\omega_i = \frac{\pi}{2} - \theta_{\max}$ 可计算出 $\omega_2 = 65^\circ$ 。积分球出射光线经复合抛物面反射器调制前后角度发散情况如图 8 所示。

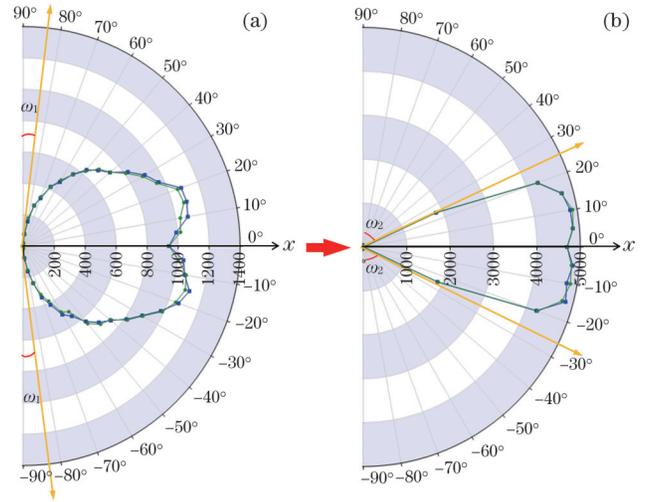


图 8 复合抛物面反射器调制前后积分球出光孔处光线角度发散情况。(a)调制前;(b)调制后

Fig. 8 Light angle divergence at exit hole of integrating sphere before and after modulation of compound parabolic reflector. (a) Before modulation; (b) after modulation

由图 8 可知,复合抛物面反射器将积分球出射光发散角由 $[-82^\circ, 82^\circ]$ 调制成 $[-25^\circ, 25^\circ]$,使原先 $[-82^\circ, 25^\circ]$ 与 $[25^\circ, 82^\circ]$ 这部分因工作距离增加而无法进入有效辐照面内的光线,经过复合抛物面反射器调制后重新叠加分布在辐照面内,提高了光能利用率。

由积分球出光孔直径确定 $2a$ 为 150 mm ,选择 θ_{\max} 为 25° 后,可进一步计算出复合抛物面反射器的长度为 541.41 mm ,出光孔直径为 354.49 mm 。

接下来分析长度对辐照面辐照均匀性及辐照度的影响。

由于复合抛物面反射器越接近出光孔的抛物面越与对称轴平行,对入射光线角度的包容会达到饱和,所以可在不大幅改变其光束调制效果的情况下将其部分截断,以提高其经济性并降低加工成本与难度^[21]。引入截取比 γ ,来描述复合抛物面反射器长度进行截断后的情况,其定义为原长度减去经过截断后的长度 z 与原长度 L 的比值^[22]:

$$\gamma = 1 - \frac{z}{L}. \quad (9)$$

图 9 所示为截取比 γ 在 $0\sim 50\%$ 范围内相同工作距离辐照面上的辐照均匀性及辐照度的分布情况。

由图 9 可知,随着 γ 的增加,辐照度逐渐缓慢下降,而辐照均匀性在 $\gamma \leq 20\%$ 时几乎平稳,从 20% 开始急剧下降。复合抛物面反射器原始长度 $L=541.41\text{ mm}$,截取比 $\gamma=20\%$ 时, $z=433.13\text{ mm}$,辐照均匀性仍有

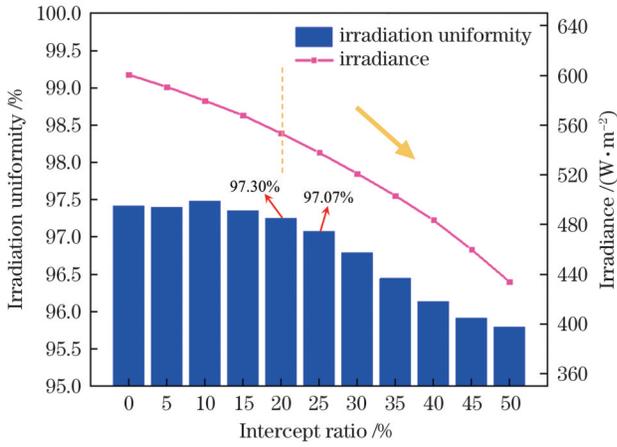


图9 不同截取比条件下在相同工作距离辐照面上的辐照均匀性及辐照度情况

Fig. 9 Irradiation uniformity and irradiance on irradiation surface at same working distance for different intercept ratios

97.30%，表明截断20%对其影响不大。

此时复合抛物面反射器是在原始长度 $L=54.41$ mm 所对应的最大发散角 $\theta_{\max}=25^\circ$ 基础上进行截断设计的,复合抛物面反射器截断20%后的长度为 $z=433.13$ mm,最大发散角也会有变化。因此,需对比直接以原始长度 433.13 mm 所对应的最大发散半角设计的复合抛物面反射器效果,以保证此截取合理且有效。

表1 是否采用截断设计的两种复合抛物面反射器效果对比
Table 1 Comparison between two compound parabolic reflectors with and without intercept

Length / mm	Intercept ratio γ / %	Irradiation uniformity / %	Maximum irradiance / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
433.13	0	97.49	449.10
433.13	20	97.30	553.54

表1为分别使用原始长度 $L=433.13$ mm 及原始长度 $L=541.41$ mm 进行截断后的复合抛物面反射器对辐照面辐照均匀性及辐照度的影响情况。两者相比,截断后的复合抛物面反射器的辐照面辐照均匀性与直接原始长度的接近,而辐照面的辐照度有明显提高。

针对不同的积分球参数,根据复合抛物面反射器工作原理,并考虑截取比 γ 为20%时复合抛物面反射器作用效果影响不敏感,可得复合抛物面反射器长度 L' 计算公式

$$L' = \frac{r_j(1 + \sin \theta_{\max}) \cos \theta_{\max}}{\sin^2 \theta_{\max}} (1 - \gamma), \quad (10)$$

式中: r_j 为积分球出光孔半径, $r_j = a$ 。

故根据不同积分球出光孔的尺寸,由式(1)~式(7)及式(10)可知,不同参数积分球对应的复合抛物面反射器的参数尺寸与抛物线线型具有普适性。

综上所述,所设计的复合抛物面反射器尺寸参数为:入光孔直径 $2a=150$ mm、截取前最大发散半角 $\theta_{\max}=25^\circ$ 、截取前出光孔直径 $2b=354.49$ mm、截取比 $\gamma=20\%$ 、截取后长度 $L'=433.13$ mm 以及焦距 $f=106.6$ mm。

5 光学系统仿真分析

将复合抛物面反射器与前面的光源系统及匀光系统进行配合使用,利用 LightTools 建立整体光学系统仿真模型,光源以 5 kW 为例,后续可根据辐照度要求调整氙灯功率。加入复合抛物面反射器的光学系统仿真模型如图10所示,将复合抛物面反射器的光学属性设置为简单反射,其反射率设置为85%。分析对比系统未加入与加入复合抛物面反射器进行光束调制后,有效辐照面上的辐照均匀性及辐照度情况,仿真结果如图11所示。

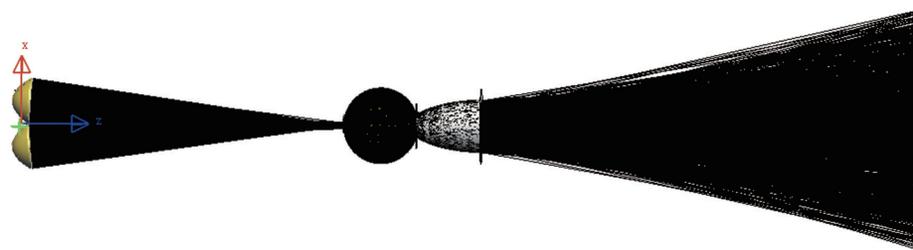


图10 系统加复合抛物面反射器仿真模型

Fig. 10 Simulation model of system after adding compound parabolic reflector

系统有无复合抛物面反射器时辐照面的辐照均匀性及辐照度值如表2所示。未加入复合抛物面反射器时,远距离的辐照面上最大辐照度极低,仅为 90.65 W/m^2 ,这是由于光线从积分球出光孔出射时角度过大。加入复合抛物面反射器后,在工作距离为 3000 mm 时,在有效辐照面 $\Phi 1000$ mm 范围内,辐照均匀性为 97.30%,最大辐照度为 553.54 W/m^2 ,

与未加入复合抛物面反射器时相比,辐照均匀性提高了 0.24 倍,辐照度提高了 5.1 倍,实现了高辐照均匀性的大辐照面模拟。因此,加入复合抛物面反射器提高了氙灯椭球聚光镜的光源系统出射的光经积分球匀光后的光能利用率,并且解决了因工作距离带来的大辐照面上辐照均匀性和辐照度下降的问题。

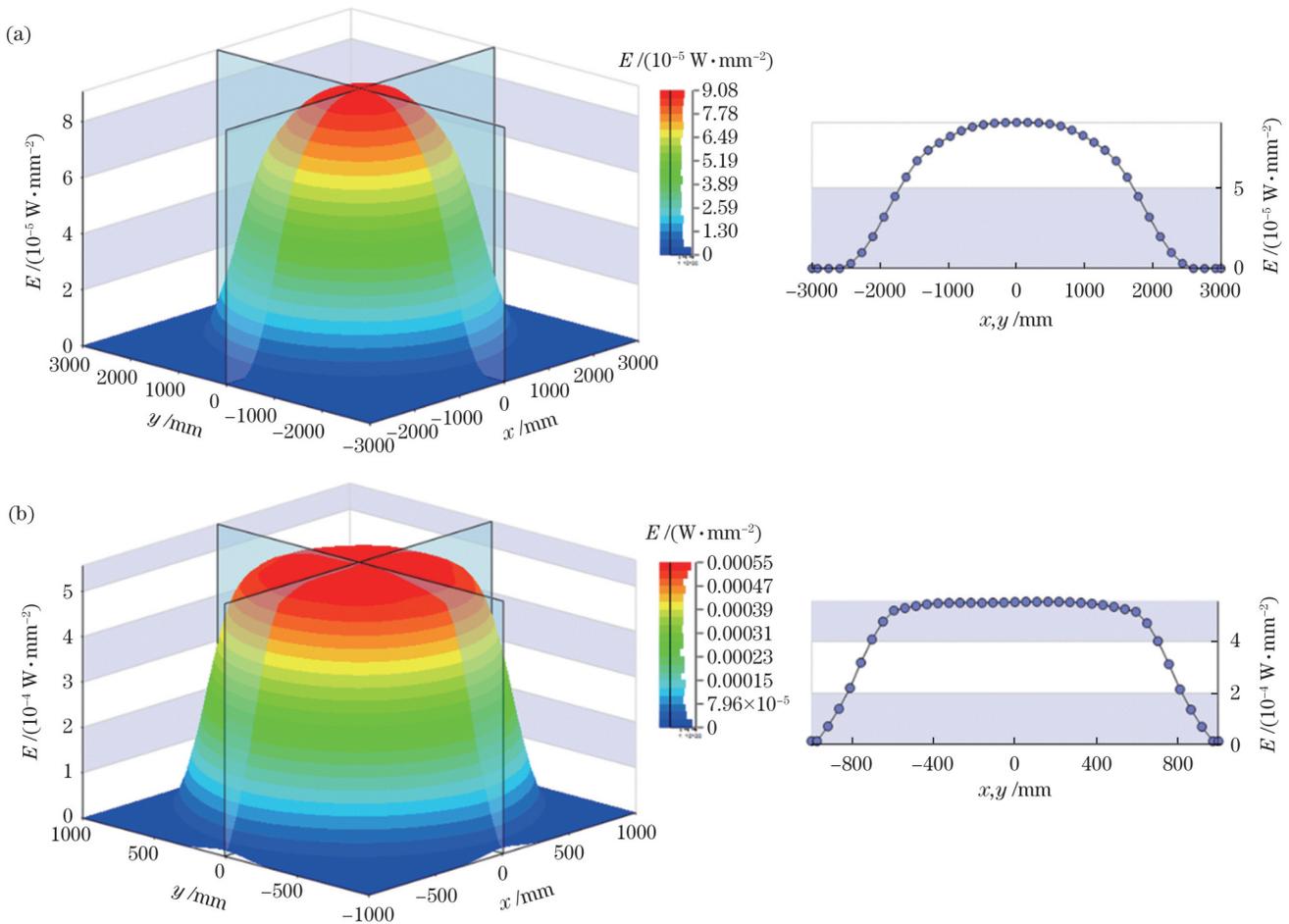


图 11 系统有无复合抛物面反射器辐照分布结果。(a)未加入复合抛物面反射器;(b)加入复合抛物面反射器

Fig. 11 Irradiation distribution results of systems without and with compound parabolic reflector. (a) Without compound parabolic reflector; (b) with compound parabolic reflector

表 2 系统有无复合抛物面反射器时辐照面的辐照均匀性及辐照度值

Table 2 Irradiation uniformity and irradiance on irradiation surface for systems without and with compound parabolic reflector

System type	Irradiation uniformity /%	Maximum irradiance /($W \cdot m^{-2}$)
Without compound parabolic reflector	78.40	90.65
With compound parabolic reflector	97.30	553.54

6 结 论

本文以调制积分球出光孔发散角从而提高氙灯光能利用率及大辐照面的辐照均匀性为目的,提出了复合抛物面聚光器逆用的方法,依据 Frenet-Serret 方程与边缘光线理论,研究了复合抛物面反射器的光束调制原理,推导了抛物线方程,分析了最大发散半角与截取比等参数对辐照面辐照均匀性及辐照度的影响。设计了合理的复合抛物面反射器尺寸参数,解决了积分球出射光在远距离处的大辐照面上,辐照均匀性及辐照度受出射光角度影响较大的问题。仿真结果表明:复合抛物面反射器将积分球出射光半角由 82° 调制为 25° ;当复合抛物面反射器的截取比为 20% 时,在工作距离为 3000 mm 处的太阳模拟器有效辐照面

$\Phi 1000$ mm 内,与未使用复合抛物面反射器相比,辐照均匀性为 97.30%,辐照度为 $553.54 W/m^2$,辐照均匀性提高了 0.24 倍,辐照度提高了 5.1 倍。本文研究结果有助于提高太阳模拟器的辐照度及辐照均匀性,为大辐照面高辐照均匀性的太阳模拟器设计提供新思路。

参 考 文 献

- [1] 孙超, 金志樑, 宋扬, 等. 多源分布式稳态太阳模拟器设计[J]. 光学学报, 2022, 42(10): 1022001.
Sun C, Jin Z L, Song Y, et al. Design of multi-source distributed steady-state solar simulator[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(10): 1022001.
- [2] 仲跻功. 提高光学积分器均匀化效果的有关问题[J]. 光学精密工程, 1983(5): 28-32.
Zhong J G. Some problems about improving the homogenization effect of optical integrator[J]. Optics and Precision Engineering,

- 1983(5): 28-32.
- [3] 苏成志, 曹国华, 徐洪吉. 积分球出射照度与人射光束几何性质关系分析[J]. 激光与红外, 2010, 40(2): 195-199.
Su C Z, Cao G H, Xu H J. Relationship analysis of output illuminance of integrating sphere and incident beam geometry[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(2): 195-199.
- [4] 杨林华, 闫达远, 史瑞良. 积分球太阳辐照模拟源的研制[J]. 航天器环境工程, 2005, 22(2): 116-119.
Yang L H, Yan D Y, Shi R L. Research of integrating sphere solar simulating source[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2005, 22(2): 116-119.
- [5] Francis A, Tang C, Le Ru E C. Quantitative theory of integrating sphere throughput: comparison with experiments[J]. Applied Optics, 2021, 60(18): 5335-5344.
- [6] Bellos E, Korres D, Tzivanidis C, et al. Design, simulation and optimization of a compound parabolic collector[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2016, 16: 53-63.
- [7] 王娅仙, 晋文清. 舰载 LED 搜索灯的关键技术研究[J]. 光学与光电技术, 2015, 13(4): 70-74.
Wang Y X, Xu W Q. Research on the key technology of shipboard LED search light[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2015, 13(4): 70-74.
- [8] Li L F, Wang B, Pottas J, et al. Design of a compound parabolic concentrator for a multi-source high-flux solar simulator[J]. Solar Energy, 2019, 183: 805-811.
- [9] 王昊, 付跃刚, 张国玉, 等. 基于 CPC 的太阳模拟器聚光性能分析[J]. 光子学报, 2020, 49(12): 1223001.
Wang H, Fu Y G, Zhang G Y, et al. Concentration performance analysis of solar simulator based on compound parabolic concentrator[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(12): 1223001.
- [10] Xu J T, Chen F, Deng C G. Design and analysis of a novel multi-sectioned compound parabolic concentrator with multi-objective genetic algorithm[J]. Energy, 2021, 225: 120216.
- [11] 张航, 梁雪, 严金华, 等. LED 准直器设计中复合抛物面同步多曲面方法[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0922004.
Zhang H, Liang X, Yan J H, et al. Compound parabolic concentrator-simultaneous multiple surfaces design methods for LED collimators[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0922004.
- [12] Chaves J. Introduction to nonimaging optics[M]. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [13] InCLabsphere. A guide to integrating sphere theory and applications [EB/OL]. (2012-12-06) [2015-03-24]. <http://www.labsphere.com/technical/technical-guides.aspx>.
- [14] 张贵彦, 王成, 袁宏韬, 等. 积分球出射辐射度的 Monte Carlo 模拟[J]. 光电工程, 2006, 33(11): 75-78.
Zhang G Y, Wang C, Yuan H T, et al. Simulation of the output irradiance of integrating sphere with Monte Carlo method[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(11): 75-78.
- [15] 崇伟, 吕文华, 张健, 等. 双氙灯光源积分球日照计校准系统[J]. 光学学报, 2022, 42(1): 0112004.
Chong W, Lü W H, Zhang J, et al. Calibration system of sunshine duration recorder based on bi-xenon lamp source integrating sphere [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(1): 0112004.
- [16] 苏宙平. 非成像光学系统设计方法与实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
Su Z P. Design methods for non-imaging optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2018.
- [17] 余桂英, 金骥, 倪晓武, 等. 基于光学扩展量的 LED 均匀照明反射器的设计[J]. 光学学报, 2009, 29(8): 2297-2301.
Yu G Y, Jin J, Ni X W, et al. Design for LED uniform illumination reflector based on étendue[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(8): 2297-2301.
- [18] Winston R, Welford W T, Miñano J C, et al. Nonimaging optics [M]. Burlington: Elsevier Academic Press, 2005
- [19] 麻文龙, 邱亚峰. 积分球出光孔亮度衰减测试系统研究[J]. 红外技术, 2017, 39(4): 317-322.
Ma W L, Qiu Y F. Research on integrating sphere light hole brightness attenuation test system[J]. Infrared Technology, 2017, 39(4): 317-322.
- [20] Meng Q L, Li Y P, Gu Y X. Dynamic mesh-based analysis of dynamic irradiance characteristics of solar simulator[J]. Optik, 2015, 126(23): 4658-4664.
- [21] 马鸣, 郑宏飞, 李家春. 复合抛物面聚光器(CPC)截短对其性能的影响[J]. 太阳能, 2011(7): 33-36.
Ma M, Zheng H F, Li J C. Influence of truncation of compound parabolic concentrator (CPC) on its performance[J]. Solar Energy, 2011(7): 33-36.
- [22] 刘灵芝, 李骥洪. 复合抛物面聚光器(CPC)光学分析研究[J]. 能源技术, 2006, 27(2): 52-56, 59.
Liu L Z, Li J H. The optical performance of compound parabolic concentrators (CPC) [J]. Energy Technology, 2006, 27(2): 52-56, 59.

Design of Compound Parabolic Reflector for Beam Modulation of Solar Simulator

Chen Jiali¹, Sun Gaofei^{1,2*}, Liu Shi^{1,2}, Zhang Guoyu^{1,2}, Zhang Jierui¹, Chen Siwen¹

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

²Optical Measurement and Control Instrumentation, Jilin Province Engineering Research Center, Changchun 130022, Jilin, China

Abstract

Objective Solar simulator is a device for simulating the space solar radiation characteristics and geometric characteristics on the ground, and its irradiation uniformity index directly determines the performance of the solar simulator. Traditional light homogenizing devices include optical integrator and integrating sphere. Optical integrator is constrained by the angle of incident light, and has the disadvantage that the angle is sensitive to the effect of light homogenization. Although the integrating sphere has a wide range of incident light angles, it will result in the large irradiance surface at a long distance, and the irradiance and irradiation uniformity will be reduced by the influence of the divergent light angle of the integrating sphere. In the present study, we propose a method to modulate the angle of the light emitted from the integrating sphere by inverting the compound parabolic concentrator into a compound parabolic reflector. This compound parabolic reflector can utilize the light emitted by the integrating sphere that cannot enter the effective

irradiation surface, improve the energy utilization of the light source, and realize the simulation of light spot with large irradiation surface and high irradiation uniformity at a distance.

Methods In this paper, the design of compound parabolic reflector is carried out. Firstly, the parabolic equation is derived by studying the principle of beam modulation of compound parabolic reflector. Then, the influence of the parameters of the compound parabolic reflector on the irradiation uniformity and irradiance on the irradiation surface is analyzed, and the size parameters such as the divergence angle and intercept ratio of the compound parabolic reflector are determined. Finally, the optical system model of the divergent solar simulator is established and simulated.

Results and Discussions The designed compound parabolic reflector modulates the light half angle of the divergent light of the integrating sphere from 82° to 25° (Fig. 8). With the increase of the maximum divergence half angle from 20° to 30° , the irradiance drops sharply, and its value even drops by nearly 40%; the irradiation uniformity shows a trend of rising first and then stabilizing (Fig. 6). The irradiance of the effective irradiation surface decreases gradually with the increase of the length intercept ratio of the compound parabolic reflector. The irradiation uniformity is almost stable when the intercept ratio is not greater than 20%, and the decline is steeper when the intercept ratio is greater than 20% (Fig. 9). With the diameter of the effective irradiation surface of solar simulator being 1000 mm, when the intercept ratio of the compound parabolic reflector used is 20%, the irradiation uniformity on the effective surface is increased by 0.24 times, to 97.30%, and the irradiance is increased by 5.1 times, to 553.54 W/m^2 compared with the system without the composite parabolic reflector (Table 2).

Conclusion In this paper, a compound parabolic reflector is designed for the purpose of modulating the divergence angle of the light hole of the integrating sphere to improve the utilization of the light energy of the xenon lamp and the irradiation uniformity of the large irradiance surface. The compound parabolic reflector can modulate the half angle of the divergent light of the integrating sphere from 82° to 25° . Through the analysis of the length intercept ratio of the compound parabolic reflector, the results show that when the length intercept ratio is 20%, the irradiation uniformity of the intercepted compound parabolic reflector on the effective irradiation surface is still 97.30%, a value comparable to that of the compound parabolic reflector without interception. The overall simulation analysis of the optical system of the solar simulator shows that when the working distance of the solar simulator is 3000 mm and the diameter of the effective irradiation surface is 1000 mm, the irradiation uniformity is 97.30%, and the maximum irradiance is 553.54 W/m^2 , realizing the simulation of large irradiance with high irradiation uniformity.

Key words optical design; illumination design; solar simulator; compound parabolic reflector; intercept ratio; beam modulation