

氙灯光源太阳模拟器辐照衰减器设计方法

苏拾^{1,2,3*}, 孟凡琳¹, 张国玉^{1,2,3}, 刘石^{1,2,3}, 孙高飞^{1,2,3}, 张健^{1,2,3}, 杨松洲^{1,2,3}, 徐达^{1,2,3}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;³ 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

摘要 针对应用于太阳模拟器辐照衰减器设计上的不足, 提出一种新的衰减器设计方法, 旨在提高其辐照均匀性。基于光学扩展量计算衰减器上的网孔面积, 对会聚光路的辐射通量进行调制; 利用聚光镜环带法, 理论上分析衰减器上的辐射分布; 利用网孔非均匀分布的结构对会聚光路的辐射分布进行调制, 给出具体设计参数; 对比分析了网孔均匀分布和非均匀分布对辐射调制效果和辐照均匀性的影响。实验表明: 安装网孔非均匀分布的衰减器, 调节氙灯功率, 能够连续输出 0.1~1.0 个太阳常数的辐照度; 基于网孔非均匀分布的衰减器对辐射分布调制后, 光斑内辐照不均匀度降低率最高为 48.7%, 低辐照不均匀度下可以实现辐照度的大范围调整, 对提高太阳模拟器的使用性能具有一定的借鉴意义。

关键词 几何光学; 太阳模拟器; 辐照衰减器; 环带法; 辐照均匀性

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0208001

Design Method of Irradiance Attenuator for Solar Simulator of Xenon Lamp

Su Shi^{1,2,3*}, Meng Fanlin¹, Zhang Guoyu^{1,2,3}, Liu Shi^{1,2,3},Sun Gaofei^{1,2,3}, Zhang Jian^{1,2,3}, Yang Songzhou^{1,2,3}, Xu Da^{1,2,3}¹ College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;² Jilin Engineering Research Center of Photoelectric Measurement and Control Instruments, Changchun, Jilin 130022, China;³ Key Laboratory of Optoelectric Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Aiming at the deficiency of the design of irradiance attenuators for solar simulators, we proposed a new design method of attenuators to improve their irradiance uniformity. According to the theory of Etendue, the mesh area of an attenuator was calculated and the radiation flux in the convergent optical path was modulated. Furthermore, the radiation distribution on the attenuator was theoretically analyzed by the zoned method of condenser. Then, the structure of non-uniform mesh distribution was designed to modulate the radiation distribution in the convergent optical path and the specific design parameters were provided. In addition, the effects of attenuators with uniform and non-uniform mesh distributions on radiation modulation and irradiance uniformity were compared and analyzed. The results suggest that the irradiance of 0.1–1.0 solar constant can be output continuously after an attenuator with non-uniform mesh distribution was installed and the power of xenon lamp was adjusted.

收稿日期: 2020-05-18; 修回日期: 2020-07-12; 录用日期: 2020-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(61603061)、吉林省科技计划项目(20190302064GX)、长春理工大学科技创新基金(XJJLG-2018-02)

* E-mail: sushu@cust.edu.cn

Besides, after the modulation of radiation distribution, the maximum reduction rate of irradiance non-uniformity in the spots is 48.7%, and the wide adjustment of irradiance at low irradiance non-uniformity can be realized, which has certain reference significance for improving the performance of solar simulators.

Key words geometrical optics; solar simulator; irradiance attenuator; zoned method; irradiance uniformity

OCIS codes 080.2740; 080.3620; 080.4298; 120.3260; 120.4570

1 引言

太阳模拟器是一种在室内模拟太阳辐射特征的重要检测设备^[1-2]。以氙灯光源为代表的中小型太阳模拟器商业化日趋成熟,已在太空探索、太阳能利用、新材料开发、气象科学研究、农林育种、医疗保健等方面具有广泛的应用^[3-6]。

近年来,太阳模拟器的技术指标愈来愈高,辐照均匀性是衡量太阳模拟器的主要技术指标之一,如何提高辐照均匀性已成为重点研究方向。太阳模拟器通常采用椭球面聚光镜作为聚光系统,位于第一焦点处的氙灯光源发出的光经椭球面聚光镜反射会聚于第二焦点,由于氙灯光源有一定的体积,第二焦点处会形成一个呈高斯分布的光斑,提高了积分器的匀光难度,对辐照均匀性有一定的影响。

氙灯由于低功率下弧光漂移严重,频闪加剧,限制了太阳模拟器辐照度的调节范围,降低了辐照稳定性、光谱一致性等^[7-8],影响了氙灯光源太阳模拟

器性能。一些知名的太阳模拟器厂商,如美国的 Newport、德国的 ATLAS、日本 SAN-EI,在氙灯功率调节的基础上,利用辐照衰减器分级降低辐照度,拓宽了太阳辐射照度的模拟范围。目前商用太阳模拟器的辐照度衰减器多采用等尺寸、等间距的网格孔结构^[9-10],设计上没有考虑对辐照均匀性的影响。

因此,本文基于光学扩展量和聚光镜环带法,以提高辐照均匀性为目的,对辐射通量和辐射分布进行调制,提出一种氙灯光源太阳模拟器辐照度衰减器的设计方法。

2 太阳模拟器辐照衰减器的设计方法

2.1 基于衰减器的太阳模拟器辐照度大范围调整方法

中小型太阳模拟器通常采用准直透射式光学结构,由氙灯光源、椭球面聚光镜、辐照衰减器、光学积分器、准直物镜等组成^[11-12],如图 1 所示。

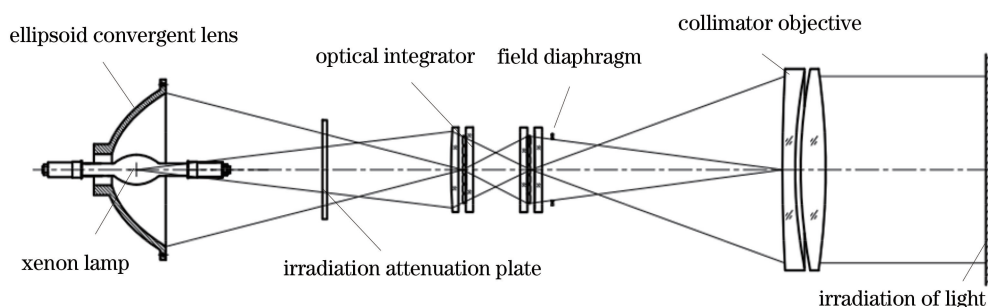


图 1 基于衰减器的辐照度大范围调整方法

Fig. 1 Wide range irradiance adjustment method based on the attenuator

辐照衰减器对会聚的辐射通量进行有规律的调制,目的是在不改变氙灯光谱,不影响辐照均匀性、稳定性的前提下,降低光斑内的辐照度值,实现太阳模拟器输出辐照度的大范围调整。

2.2 基于衰减器的辐射通量调制

根据太阳模拟器光路特征,衰减器为圆盘形,其几何中心位于光轴上,整体面积应能覆盖当前位置的辐射通量。通过在圆盘上开数个透光网孔,实现对会聚辐射通量的调制。首先利用光学扩展量,分析辐射传递规律,确定衰减器网孔面积。光学扩展量定义为

$$U = n^2 \iint \cos \theta dA_s d\Omega, \quad (1)$$

式中, n 为介质中的折射率, θ 是面积微元 dA_s 法矢量与中心光线的夹角, $d\Omega$ 是光束的立体角微元。

已知空间折射率 $n=1$ 。将衰减器出射面作为一个面光源,则

$$U_s = n^2 \iint \cos \theta dA d\Omega = A \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\theta \cos \theta \sin \theta d\theta = \pi A \sin^2 \theta, \quad (2)$$

式中, U_s 为面光源的光学扩展量, A 为衰减器出光

面积,即衰减器网孔面积。

将积分器入光口作为目标面,假设自聚光镜出光口至积分器入光口的辐射传递过程中,光能没有损失,由光学扩展量守恒条件 $U_s = U_t$ 可知, θ 对应的积分器入光口上的辐照度为

$$E = \frac{LU_t}{A'} = \frac{LU_s}{A'} = \frac{L\pi A \sin^2 \theta}{A'}, \quad (3)$$

式中, L 为照明面辐亮度, U_t 为积分器入光口的光学扩展量, A' 为积分器入光口面积。

由 (3) 式可以证明,在其他参数不变的情况下,目标面辐照度大小与衰减器出光面积成正比。因此可根据目标面辐照度要求来合理设计衰减器上通光网孔的结构。已知衰减器的有效辐照面积,根据辐照度衰减率计算出网孔总面积,具体表达式为

$$A = \alpha S, \quad (4)$$

式中, A 为衰减器网孔总面积, S 为衰减器的有效辐照面积, α 为辐照度衰减率。

通过选取不同衰减率,可计算得出不同的网孔总面积,利用辐照衰减器分级降低辐照度,拓宽了太阳辐射照度的模拟范围。

2.3 衰减器上的辐射分布理论分析

衰减器不仅要目标面上的辐照度进行衰减,还需提高目标面的辐照均匀性。由于积分器入光口处的光斑辐射分布呈高斯分布,为提高光斑辐照均匀性,需要利用辐照衰减器对辐射分布进行调制,以提高边缘辐射通量,改善积分器入光口处的辐照均匀性,提高积分器匀光效果。因此首先利用椭球聚光镜环带法对衰减器上的辐射分布进行理论分析,再根据衰减器各环带的辐照度值对各环带内的网孔面积进行分配,使各环带上经网孔透后被光学积分器接收的辐射通量相等。

环带法主要是将椭球镜反射面根据光线入射角度分为若干圆环,先分析光线经某一环带反射后会聚在半径为 R_i 的辐照面上的辐射通量 $F_{j(R_i)}$,再将所有环带所贡献的辐射通量求和,得出半径为 R_i 的辐照面上的辐射通量 $F_{i(R_i)}$ ^[13-14]。将衰减器以不同半径划分为若干同心圆,其面上 R_i 到 R_{i-1} 环带内的辐照度可以表示为

$$E_i = \frac{F_{i(R_i)} - F_{i-1(R_i)}}{\pi R_i^2 - \pi R_{i-1}^2}. \quad (5)$$

子午面内聚光镜环带示意图如图 2 所示,将氙弧法向亮度分布划分成很多大小相同的网格,每一个网格表示一个基元的发光面,氙弧法向辐射强度是各基元发光面在法向单位立体角内贡献的辐射能

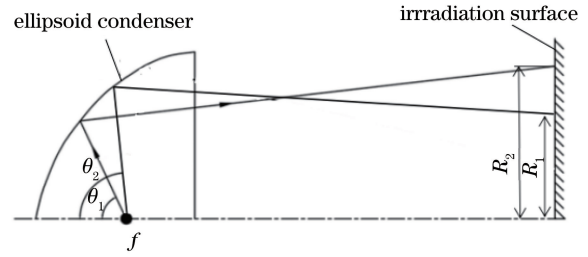


图 2 子午面内聚光镜环带示意图

Fig. 2 Meridian surface condenser band diagram

通量的总和。

任意与聚光镜光轴成 θ 角的方向上的辐射强度 I_θ 与法向辐射强度 I_0 之比为

$$t_\theta = \frac{I_\theta}{I_0} = \frac{N_x(\theta) S_x \cos \beta}{N_x S_x}, \quad (6)$$

式中, N_x 为氙弧辐射亮度分布中第 x 个基元发光面中心处的法向辐射亮度, $N_x(\theta)$ 为该基元发光面在 θ 角方向上的辐射亮度, S_x 为沿法向方向俯视该基元发光面的面积, β 为 θ 角方向与法向的夹角。

该基元发光面经 θ 角方向上聚光镜的环带发出的辐射通量 $F_{x(R_i)}$ 表示为

$$F_{x(R_i)} = 2\pi t_\theta (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) N_x S_x, \quad (7)$$

式中, θ_1 、 θ_2 分别为子午面内聚光镜 θ 角方向上环带上的起始角和终止角,且 $\theta = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$ 。

光线经 θ 角所对应的环带反射后会聚在半径为 R_i 的辐照面上的辐射通量 $F_{j(R_i)}$ 为各基元发光面对该环带贡献的辐射通量的总和,即

$$F_{j(R_i)} = \sum F_{x(R_i)} = 2\pi t_\theta (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \sum (N_x S_x). \quad (8)$$

半径为 R_i 的辐照面上的全部辐射通量 $F_{i(R_i)}$ 为聚光镜各个环带所输出的辐射通量之和,即

$$F_{i(R_i)} = \sum F_{j(R_i)}. \quad (9)$$

同理,计算整个辐照面的辐射通量 $F_{i(\text{all})}$,此时得到的 $F_{i(R_i)}$ 和 $F_{i(\text{all})}$ 是相对数值。利用椭球镜聚光率可以得出整个辐照面辐射通量 $F_{i(\text{all})}$ 的绝对数值,根据 $F_{i(R_i)}$ 和 $F_{i(\text{all})}$ 的比例关系,可以得出半径为 R_i 的辐照面内的辐射通量 $F_{i(R_i)}$ 的绝对数值。对不同的 R_i ,计算得出相应的 $F_{i(R_i)}$,根据 (5) 式即可计算出辐照面内以圆环分布的辐照度。

2.4 基于衰减器的辐射分布调制

以聚光镜方程 $y^2 = 76.9231x - 0.0059x^2$, 出光口径 $\varphi = 295$ mm, 积分器入光口径 $\varphi = 65$ mm 的 5 kW 氙灯太阳模拟器为例,设计有效辐照口径 $\varphi =$

240 mm, 衰减率为 20% 的辐照衰减器。由 (4) 式可得通光网孔总面积约为 10618.6 mm², 以半径间隔 30 mm 将衰减器划分为 4 个环带, 如图 3 所示。聚光镜子午面 θ 角范围为 26.5°~102.25°, 绝对辐射通量 $F_{i(\text{all})} = 507 \text{ W}$, 经 (6)~(9) 式计算 R_i 相应的 $F_{i(R_i)}$, 再由 (5) 式计算得到每个环带内的辐照度 E_i , 如表 1 所示。

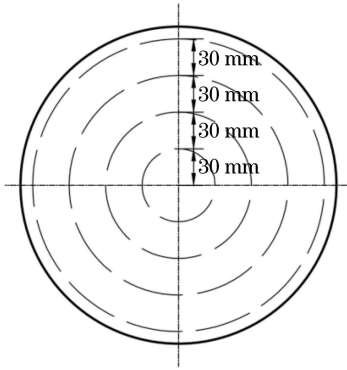


图 3 衰减器环带分布

Fig. 3 Attenuator band distribution

表 1 衰减器各环带内辐照度

Table 1 Irradiance in each band of attenuator

R_i / mm	$F_{i(R_i)} / \text{W}$	$E_i / (\text{W} \cdot \text{mm}^{-2})$
30	158.336	0.056
60	565.486	0.048
90	975.464	0.029
120	1232.760	0.013

为提高光斑辐照均匀性, 需对辐照衰减器上的辐射分布进行调制, 提高边缘辐射通量, 改善积分器

表 2 衰减器网孔设计参数

Table 2 Mesh design parameters of attenuator

Radius /mm	Total mesh area /mm ²	Radius of mesh /mm	Number of mesh
0~30	1262.7	6	8
30~60	1474.9	6.5	12
60~90	2438.3	8	12
90~120	5442.6	10	18

3 不同结构衰减器对比分析

如图 4 所示为网孔均匀分布和网孔非均匀分布

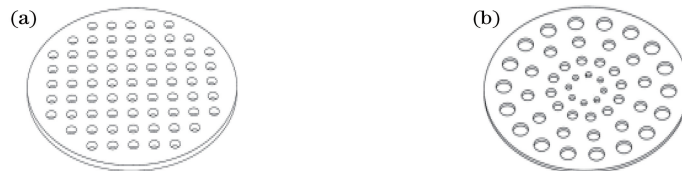


图 4 不同结构形式的辐照衰减器模型。(a)网孔均匀分布辐照衰减器;(b)网孔非均匀分布辐照衰减器

Fig. 4 Models of irradiance attenuators with different structures. (a) Irradiance attenuator with uniform mesh distribution; (b) irradiance attenuator with non-uniform mesh distribution

入光口处的辐照均匀性, 提高积分器匀光效果, 因此对各个环带内的网孔面积进行分配, 使各环带上经网孔透光后的辐射通量相等, 即

$$E_1 A_1 = E_2 A_2 = E_3 A_3 = \dots = E_i A_i = \dots = E_n A_n, \quad (10)$$

式中: $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n$ 为各个环带分配的通光网孔面积; $E_1, E_2, \dots, E_i, \dots, E_n$ 为各个环带辐照度。各环带分配的通光网孔面积之和为衰减器上总的通光面积, 即

$$A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_i + \dots + A_n = A. \quad (11)$$

已知总的通光面积为 10618.6 mm², 每个环带的辐照度如表 1 所示, 由 (10) 式和 (11) 式可确定每个环带分配的网孔面积。

由于圆形通光网孔照射的光线更均匀, 因此设计通光网孔形状为圆形。根据各环带分配的网孔面积确定衰减器上所设计的网孔数量、大小、布置方式等。设各环带内网孔个数为 $N_1, N_2, \dots, N_i, \dots, N_n$, 网孔半径为 $R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_n$, 则目标面上第 i 个环带分配的网孔面积表示为

$$A_i = N_i \pi R_i^2. \quad (12)$$

以第 4 个环带为例, 第 4 个环带分配的网孔面积为 5442.6 mm²。为使辐射分布更加均匀, 令环带上的通光网孔阵列分布, 根据加工工艺需要, 选择适合的网孔数量, 取网孔个数 N_4 值为 18, 则 R_4 为 10 mm。同理计算出各环带分配网孔的数量、大小、布置方式, 设计参数如表 2 所示。

辐照度衰减器结构模型。

利用 Lighttools 软件, 对太阳模拟器进行系统建模仿真, 如图 5 所示。



图 5 太阳模拟器光学系统建模仿真

Fig. 5 Sun simulator optical system modeling and simulation

将软件中的接收器置于衰减器出光面、积分器入光口、最终光斑内,对比分析两种衰减器的辐射调制效果和对辐照均匀性的影响,如图 6~8 所示。

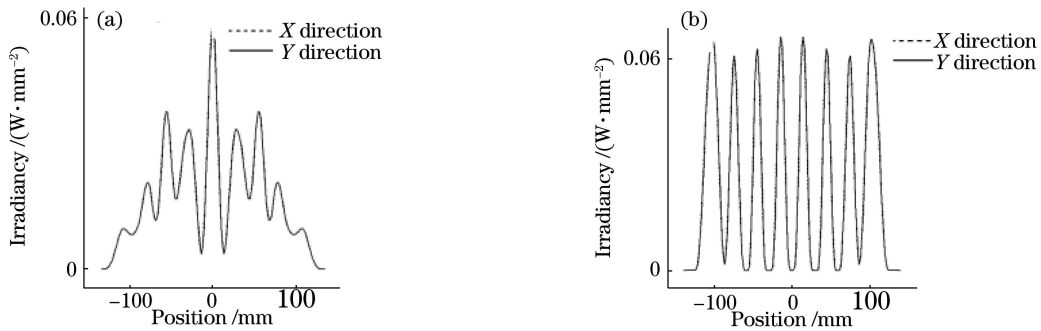


图 6 不同衰减器下的出光面辐射分布。(a)网孔均匀衰减器下的辐射分布;(b)网孔非均匀衰减器下的辐射分布

Fig. 6 Radiation distribution of the light output area under different attenuators. (a) Radiation distribution under attenuator with uniform mesh distribution; (b) radiation distribution under attenuator with non-uniform mesh distribution

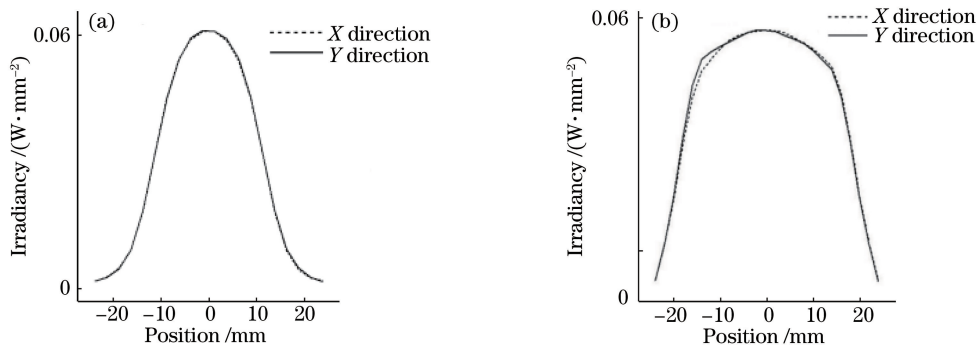


图 7 不同衰减器下的积分器入光口辐射分布。(a)网孔均匀衰减器下的辐射分布;(b)网孔非均匀衰减器下的辐射分布

Fig. 7 Radiation distribution of the light inlet of the integrator under different attenuators. (a) Radiation distribution under attenuator with uniform mesh distribution; (b) radiation distribution under attenuator with non-uniform mesh distribution

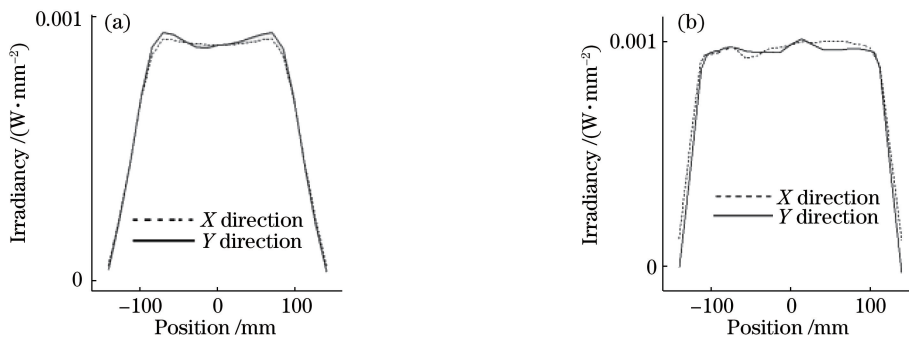


图 8 不同衰减器下的辐照光斑均匀性。(a)网孔均匀衰减器下的辐照均匀性;(b)网孔非均匀衰减器下的辐照均匀性

Fig. 8 Irradiance uniformity in the spot under different attenuators. (a) Irradiance uniformity under attenuator with uniform mesh distribution; (b) irradiance uniformity under attenuator with non-uniform mesh distribution

由图 6~8 可见,经网孔非均匀衰减器调制后,积分器入光口的高斯辐射分布变化缓慢,提高了积分器的匀光效果,最终光斑内的辐射边缘能量有所提高,改善了辐照均匀性。

4 实验与结果

在太阳模拟器中应用本研究设计的辐照衰减器(图 9),测试辐照度实际调整范围和不同衰减器下的辐照不均匀度。采用北京师范大学光电仪器厂的 FZ-A 型太阳辐射照度计对均匀性进行测量与评估。FZ-A 型太阳辐射照度计的波长范围为 400~1000 nm,最小分辨率为 10^{-4} mW/cm²,测量上限为 199.9 mW/cm²。



图 9 辐照衰减器试验

Fig. 9 Irradiance attenuator test

4.1 辐照度调整范围测试

点亮氙灯,将标准太阳辐射计放在太阳模拟器辐照面上,感光面正对太阳模拟器镜筒,将氙灯电源功率调整至最大,未安装辐照衰减器时,用标准太阳辐射计测得最后光斑内最大辐照度为 1416 W/m²;在氙灯额定功率下,再次调整氙灯电源功率,使光斑中心辐照度值达 510 W/m²,安装衰减率为 20% 的辐照衰减器,测得最低辐照度为 106 W/m²,能够对输出辐照度进行 0.1~1.0 个太阳常数(1 个太阳常数为 1335 W/m²) 的调整。通过调整氙灯电源功率

可以实现连续可调。

4.2 不同衰减器下的辐照不均匀度测试

分别安装网孔均匀分布衰减器和网孔非均匀分布衰减器,点亮氙灯,将标准太阳辐射计的探测器放在太阳模拟器辐照面上,调整氙灯电源功率至设定的输出辐照度值,感光面正对太阳模拟器镜筒,待光源稳定后,选取光斑面 17 个采样点快速测量辐照度值,消除光强不稳定性带来的误差,图 10 为辐照不均匀度测试方法示意图,测得数据如表 3 所示,经计算可分别得出不同衰减器下的辐照不均匀度^[15-16],辐照不均匀度计算公式为

$$\epsilon = \pm \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\%, \quad (13)$$

式中, ϵ 表示辐照不均匀度; E_{\max} 表示有效辐照面内最大辐照强度值; E_{\min} 表示有效辐照面内最小辐照强度值。

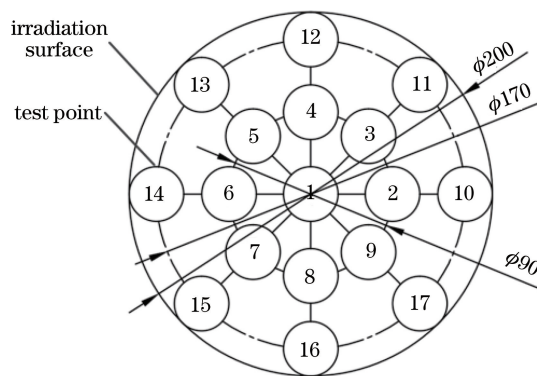


图 10 辐照不均匀度测试方法

Fig. 10 Test method of irradiance non-uniformity

表 3 不同衰减器下的辐照不均匀度测试

Table 3 Irradiance non-uniformity test under different attenuators

Central irradiance setting value / (W · m ⁻²)	Attenuator with uniform mesh distribution			Attenuator with non-uniform mesh distribution			Lower value Δ / %	Reduction rate η / %
	E_{\max} / (W · m ⁻²)	E_{\min} / (W · m ⁻²)	ϵ_u / %	E_{\max} / (W · m ⁻²)	E_{\min} / (W · m ⁻²)	ϵ_n / %		
600	624	581	±3.57	613	590	±1.91	±1.66	46.5
500	522	483	±3.88	511	491	±1.99	±1.89	48.7
400	419	387	±3.97	409	392	±2.12	±1.85	46.6
300	315	290	±4.13	307	294	±2.16	±1.97	47.7
200	209	192	±4.24	204	195	±2.26	±1.98	46.7
100	105	96	±4.48	106	101	±2.42	±2.06	46.0

辐照不均匀度降低率计算公式为

$$\eta = \frac{\Delta}{\epsilon_u} \times 100\% = \frac{\epsilon_u - \epsilon_n}{\epsilon_u} \times 100\%, \quad (14)$$

式中, η 表示辐照不均匀度降低率; Δ 表示辐照不均匀度降低值; ϵ_u 表示网孔均匀分布的衰减器的辐照

不均匀度; ϵ_n 表示网孔非均匀分布的衰减器的辐照不均匀度。

由表 3 可知,相比安装均匀分布网孔的衰减器,安装非均匀分布网孔的衰减器后,辐照不均匀度降低率最高为 48.7%,光斑内的辐照均匀性有所改善。

5 结 论

根据光学扩展量计算了衰减器的网孔面积,对会聚光路的辐射通量进行调制;利用聚光镜环带法理论分析了衰减器上的辐射分布,以提高辐照均匀性为目的,采用网孔非均匀分布的结构形式对辐射分布进行调制,阐述了网孔参数的设计方法;最后对比分析了网孔均布和非均布衰减器的辐射调制效果和网格布置对辐照均匀性的影响。实验结果表明,安装网孔非均匀分布的衰减器,调节氙灯电源,能够连续输出 0.1~1.0 个太阳常数的辐照度;相比网孔均布的衰减器,基于网孔非均匀分布衰减器对辐射分布调制后,光斑内的辐照不均匀度降低率最高为 48.7%,可以实现辐照度的大范围调整,这对提高太阳模拟器使用性能具有一定的借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Su S, Zhang G Y, Wang L Y, et al. Solar simulators based on light emitting diodes [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 070003.
苏拾, 张国玉, 王凌云, 等. 基于发光二极管的太阳模拟器的研究现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(7): 070003.
- [3] Jin J, Hao Y, Jin H G. A universal solar simulator for focused and quasi-collimated beams[J]. *Applied Energy*, 2019, 235: 1266-1276.
- [4] Siddiqui R, Kumar R, Jha G K, et al. Comparison of different technologies for solar PV (Photovoltaic) outdoor performance using indoor accelerated aging tests for long term reliability [J]. *Energy*, 2016, 107: 550-561.
- [5] Zaini H, Yoo J K, Park S, et al. Indoor calibration method for UV index meters with a solar simulator and a reference spectroradiometer [J]. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 2016, 7(1): 101.
- [6] Tawfik M, Tonnelier X, Sansom C. Light source selection for a solar simulator for thermal applications: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 90: 802-813.
- [7] Esen V, Saglam S, Oral B. Light sources of solar simulators for photovoltaic devices: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 77: 1240-1250.
- [8] Leary G, Switzer G, Kuntz G, et al. Comparison of xenon lamp-based and led-based solar simulators [C]// 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), June 5-10, 2016, Portland, OR, USA. New York: IEEE Press, 2016: 3062-3067.
- [9] Lu W H, Bian Z Q, Chong W, et al. Research on nonlinear error test of solar radiation measuring instrument [C] // 2013 IEEE 11th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, August 16-19, 2013, Harbin, China. New York: IEEE Press, 2013: 302-305.
- [10] Wu R Y. Dimmer for adjusting irradiance of direct-injection solar simulator and adjusting method thereof: CN109991692A[P]. 2019-07-09.
吴瑞阳. 一种调节直射式太阳模拟器辐照度的减光器及其调节方法: CN109991692A[P]. 2019-07-09.
- [11] Sun G F, Zhang G Y, Liu S, et al. Designing an optical system of a high precision solar simulator for meteorological application [J]. *Journal of Optical Technology*, 2017, 84(8): 552-556.
- [12] 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.
- [13] Liu X. Design of reflector using zoned method based on non-imaging optics[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(4): 608-613.
刘希. 基于非成像光学环带法的反射器设计[J]. *应用光学*, 2014, 35(4): 608-613.
- [14] Zhong J G. Methods to calculate the distribution of irradiance by an aspherical collecting mirror[J]. *Acta Energetica 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.
- [15] Parupudi R V, Singh H, Kolokotroni M. Sun simulator for indoor performance assessment of solar photovoltaic cells[J]. *Energy Procedia*, 2019, 161: 376-384.
- [16] Su S, Wang Y W, Zhang G Y, et al. Design of LED array light source and collimating optical system for mobile solar simulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8): 0808001.
苏拾, 王逸文, 张国玉, 等. 运动式太阳模拟器 LED 阵列光源及其准直光学系统设计[J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0808001.