

运动式太阳模拟器 LED 阵列光源及其准直光学系统设计

苏拾^{1,2,3,*}, 王逸文¹, 张国玉^{1,2,3}, 张宇⁴, 张健^{1,2,3}, 孙高飞^{1,2,3}, 刘石^{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 光电测控与光电信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;

⁴ 北京控制工程研究所, 北京 100080

摘要 运动式太阳模拟器是编码式太阳传感器在装星阶段用于现场测试的一种重要设备, 为传感器测试提供模拟的太阳光信号和太阳光矢量信号。论述了运动式太阳模拟器的结构组成与工作原理, 着重对其 LED 阵列光源和准直光学系统进行研究与设计。通过功率计算确定了 LED 数量, 依据 Sparrow 判据分析了 LED 间距对辐照均匀性的影响, 确定了阵列间距。基于边缘光线原理, 建立了圆柱面镜的数学模型, 设计了准直光学系统, 借助 LightTools 软件进行仿真。实验结果表明: 设计的运动式太阳模拟器在工作距离为 50 mm 处的辐照范围为 10 mm × 50 mm, 最低辐照度为 393 W · m⁻², 在 -13°、0°、38° 三种光线入射角下的辐照不均匀度均优于 ±7.3%, 出射角为 0.78°, 满足编码式太阳传感器装星后现场测试的要求。

关键词 几何光学; 运动式太阳模拟器; LED 阵列光源; 边缘光线原理; 准直光学系统

中图分类号 O432.1; TH703

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0808001

Design of LED Array Light Source and Collimating Optical System for Mobile Solar Simulator

Su Shi^{1,2,3,*}, Wang Yiwen¹, Zhang Guoyu^{1,2,3}, Zhang Yu⁴, Zhang Jian^{1,2,3},
Sun Gaofei^{1,2,3}, Liu Shi^{1,2,3}

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

² Optoelectronic Measurement and Control Instrumentation, Jilin Provincial Engineering Research Center,
Changchun, Jilin 130022, China;

³ Key Laboratory of Optoelectronic Measurement and Optical Information Transmission Technology of the
Ministry of Education, Changchun, Jilin 130022, China;

⁴ Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100080, China

Abstract A mobile solar simulator is a requisite apparatus for conducting the field test prior to launching a coded solar-sensor-equipped satellite, which can provide simulated sunlight signal and sunlight vector signal for the test. This study provides a discussion on the structural configuration and working principle of the mobile solar simulator. Specifically, we present the description and design of the LED array light source and the collimating optical system in the device. For the light source, a power formula is applied to determining the number of LEDs, and the Sparrow criterion is considered to be the basis for analyzing the LED spacing. In particular, the array spacing is determined from the effect of irradiation uniformity. Furthermore, a mathematical model of cylindrical mirror is established based on the principle of an edge ray. The design and simulation of the collimating optical system are performed using the LightTools software. The experimental results denote that the mobile solar simulator has an irradiation area of 10 mm × 50 mm, where the irradiance becomes 393 W · m⁻² at a working distance of 50 mm. Further, the

收稿日期: 2019-02-21; 修回日期: 2019-04-10; 录用日期: 2019-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(61603061)、吉林省科技发展计划重点项目(20150204048G)、吉林省省级产业创新专项资金项目(2016C084)

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

irradiation nonuniformities at three incident angles of -13° , 0° , 38° are better than $\pm 7.3\%$, and the exit angle is 0.78° . This solar simulator can complete the encoded solar sensor field test after the installation of a satellite.

Key words geometric optics; mobile solar simulator; LED array source; principle of edge ray; collimating optical system

OCIS codes 080.2740; 080.3620; 080.4298; 120.4570

1 引 言

太阳模拟器是一种在室内模拟外层空间太阳辐射特征的重要测试设备^[1-2],在空间探索领域不仅提供了模拟的太阳热辐射环境,还为航天器上的姿态控制部件——太阳敏感器,提供了模拟的太阳目标信号,以便在地面进行实验与标定^[3-5]。

目前,太阳敏感器实验与标定多采用高准直太阳模拟器与二轴转台组成的物理仿真实验系统。太阳模拟器提供模拟的太阳辐射信号;敏感器放置在二轴转台上,通过调整俯仰与方位角度,完成太阳辐射运动的仿真实验^[6]。太阳模拟器通常采用氙灯作为光源,存在光效低、发热量大、结构复杂、可靠性与安全性差等不足,已逐渐被具有体积小、成本低、节能高效、清洁环保、可控性强等优点的以发光二极管(LED)为光源的太阳模拟器取代^[7-11]。而且这种实验系统结构复杂,体积庞大,难以满足敏感器装星后发射阶段测试的需求。

针对编码式太阳敏感器装星后需要进行功能性验证测试的要求,本文提出了一种以LED为光源的运动式太阳模拟器,为敏感器提供模拟的太阳光及太阳光矢量测试信号。文中重点对模拟器的LED阵列光源及其准直光学系统的设计方法进行了研究。

2 运动式太阳模拟器的组成与工作原理

运动式太阳模拟器主要由LED光源模块、光线矢量调整装置、控制系统三部分组成,如图1所示。LED光源模块提供准直的模拟太阳光信号,光线矢量调整装置用于调整光信号的照射方向。工作时,LED光源模块对准敏感器探头,模拟的光信号经过敏感器柱面镜、狭缝、码盘后成像在硅光电池上,码盘和硅光电池将不同入射角度的光信号调制成二进制码,由此确定出太阳光线与太阳敏感器之间的矢量关系,实现航天器的姿态控制。

运动式太阳模拟器能够在工作距离50 mm处形成 $10\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的辐照光斑,辐照度大于0.2个太阳常数($270\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$),在 -13° 、 0° 、 38° 矢量角下

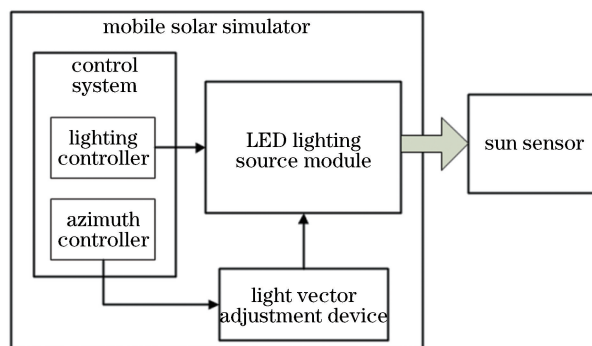


图1 运动式太阳模拟器的组成与工作原理

Fig. 1 Composition and working principle of mobile solar simulator

的辐照不均匀度均优于 $\pm 10\%$,张角均优于 $1^\circ\pm 2'$ 。

LED光源模块作为运动式太阳模拟器的核心部件,主要由准直光学系统、LED光源、光源座、轴流风机组成,如图2所示。光源采用LED线性阵列,圆柱面镜对光源的辐射通量进行准直处理,光源座设计有散热槽,采用小型轴流风机对光源进行冷却。

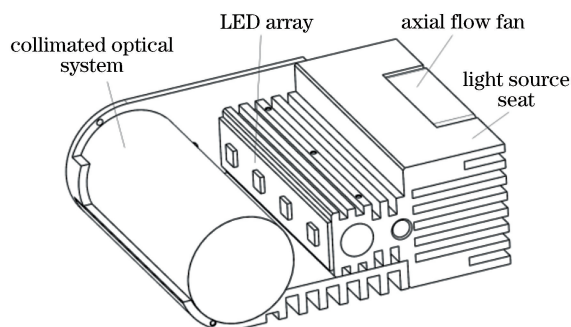


图2 LED光源模块的结构

Fig. 2 Structure of LED light source module

3 LED阵列光源设计

3.1 LED光源选取与功率计算

根据太阳敏感器的光谱响应范围,光源选取主波长为575 nm的正白色LED,其功率为1 W。在无损条件下,空间照度分布均匀的朗伯体光源在光学系统中的输出通量 Φ 可表示为

$$\Phi = L_s \xi \tau / n^2, \quad (1)$$

式中: L_s 为光源亮度; ξ 为系统光学扩展量,在理想情况下 ξ 守恒^[12]; τ 为光学系统利用率; n 为空间折

射率。由此可见,影响模拟器输出光通量的因素包括光源亮度、光学系统效率、光学扩展量限制及空间折射率。

根据输出辐照度的要求,对光学系统传输效率进行估算,确定所需光源功率 P 为

$$P = ES/\tau, \quad (2)$$

式中: E 为辐照度; S 为辐照面积。其中,光学系统利用率 τ 可表示为^[13]

$$\tau = \tau_e \cdot \tau_L \cdot \tau_C \cdot K_A, \quad (3)$$

式中: τ_e 为 LED 的电光转换效率,取 $\tau_e = 0.3$; τ_L 为 LED 自带光学透镜的透过率,取 $\tau_L = 0.9$; τ_C 为圆柱面镜的透过率,取 $\tau_C = 0.8$; K_A 为渐晕系数,取 $K_A = 0.31$ 。计算得出光源功率 $P = 1.99$ W,考虑到冗余设计,选取 4 个 1 W 的 LED,总功率为 4 W。

3.2 LED 阵列设计

为了获得 $10 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的矩形光斑,采用多个大功率 LED 进行线性阵列排布。LED 的光强近似于高斯分布,阵列光源的光强等于每个 LED 光强的线性叠加。取任意两个 LED 研究辐照均匀性,LED 间距过大时,中间的照度低于两边,间距过小时,则中间的照度高于两边。为此,利用 LED 辐照面辐射分布模型对 LED 线性阵列间距 d 进行分析,寻找使均匀性达到最优的值。

垂直于 LED 照射方向的光强分布 E_θ 可表示为^[14]

$$E_\theta = E_0 \cos^m \theta, \quad (4)$$

式中: θ 为 LED 边缘光线与光轴的夹角; E_0 为 LED 在 $\theta = 0^\circ$ 时辐照面上的光强分布; m 为与光源半强角 $\theta_{1/2}$ 有关的参数,其表达式为

$$m = -\ln 2 / \ln(\cos \theta_{1/2}). \quad (5)$$

在空间范围内,设两个 LED 的坐标分别为 $(-d/2, 0, 0)$ 、 $(d/2, 0, 0)$,光源距接收面的距离 $z = 50 \text{ mm}$ 。此时辐照面上的光强分布 E 为

$$E(x, y, z) = \frac{z^m I}{[(x - d/2)^2 + y^2 + z^2]^{(m+2)/m}} + \frac{z^m I}{[(x + d/2)^2 + y^2 + z^2]^{(m+2)/m}}, \quad (6)$$

式中: I 为 LED 的发光强度。根据 Sparrow 判据^[15],当(6)式满足 $\partial x^2 / \partial y^2 = 0$,且 $x = 0$ 、 $y = 0$ 时,辐照面的均匀性最佳,求得间距 d 为

$$d = z \sqrt{4/(m + 3)}. \quad (7)$$

为保证准直效果,选用发散角为 50° 的 LED,其半强角 $\theta_{1/2} = 10^\circ$,求得 $m = 45$,将其代入(7)式求得 $d \approx 14.4 \text{ mm}$ 。利用 LightTools 软件模拟阵列中任意两个 LED 间距为 14.4 mm 时的照度分布,结果如图 3 所示,此时辐照光斑的均匀性最佳。

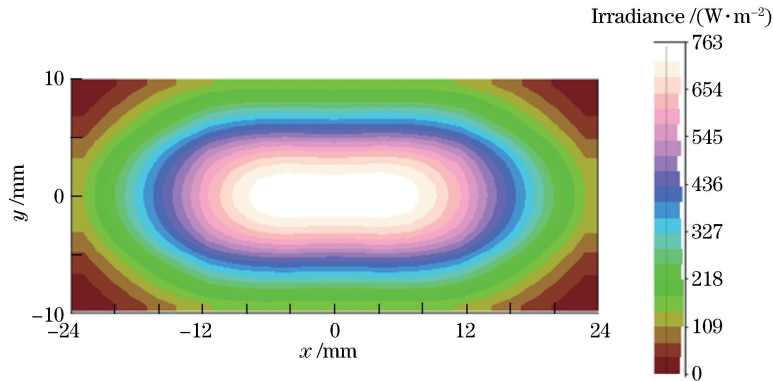


图 3 LED 间距为 14.4 mm 时的辐照分布图

Fig. 3 Radiation distribution of LED with 14.4 mm spacing

4 准直光学系统设计

利用非成像光学理论中的边缘光线原理进行准直光学系统设计。边缘光线原理如下:光源边缘出射的光线在通过后续光学系统后将会投射到辐照面边缘,而光源内部光线经光学系统后将全部落入辐照面内部。设计中只需确定边缘光线的路径,就可确定工作面上光斑的形状及大小。

根据光线在圆柱面镜中的几何光路,建立各参

数之间的函数关系,如图 4 所示。 O 为圆心, S 为光源所在位置, L_1 为光源与圆心 O 的距离, α 为光源发散角, I_1 为光源出射边缘光线, I_1 在圆柱面镜的后表面发生折射, θ_1 为光线 I_1 的入射角, A 为入射点, θ_2 为折射角, I_2 为出射光线。 I_2 在圆柱面镜的前表面发生折射, θ_3 为光线 I_2 的入射角, B 为入射点, θ_4 为折射角, I_3 为出射光线, C 点为边缘光线落在接收面上的点。设空气折射率为 n_1 ,圆柱面镜折射率为 n_2 。 CB 的延长线与光轴交于 Q 点, β 为 QC

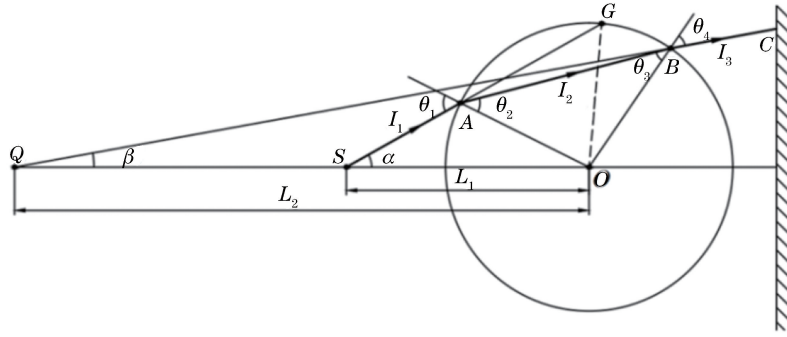


图 4 光线在圆柱面镜中的几何光路

Fig. 4 Optical path of light passing through cylindrical lens

与光轴的夹角,SA 的延长线与圆柱面镜的截面圆相交于 G 点。

根据图 4,结合正弦定理可得

$$\begin{cases} \frac{L_1}{\sin \theta_1} = \frac{r_0}{\sin \alpha} \\ \frac{L_2}{\sin \theta_1} = \frac{r_0}{\sin \beta} \end{cases}, \quad (8)$$

式中: r_0 为圆柱面镜横截面半径。根据 $\triangle SGO$ 与 $\triangle QBD$ 的内角关系,近似认为各角弧度值与其正弦值相等,从而可以推导出

$$2(\theta_1 - \theta_2) = \alpha - \beta. \quad (9)$$

联立(8)式和(9)式,可以得到

$$\left(\frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_2}\right)r_0 = \frac{2(n_2 - n_1)}{n_2}. \quad (10)$$

设计要求圆柱面镜对光线具有准直作用,则由(10)式可得

$$r_0 = \frac{2L_1(n_2 - n_1)}{n_2}. \quad (11)$$

设空气的折射率 n_1 取 1。圆柱面镜材料为 K9 玻璃,其折射率 n_2 为 1.516,从而可求得圆柱面镜半径

$r_0 = 14.93$ mm。准直光学系统结构如图 5 所示,结构参数如表 1 所示。

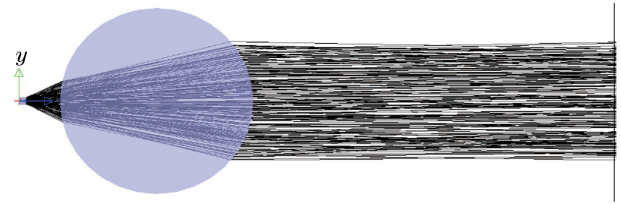


图 5 准直光学系统结构

Fig. 5 Structure of collimating optical system

5 光学系统仿真分析

设置 4 个发光面积为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的 LED 芯片,导入正白色光谱,发散角设为 50° ,建立圆柱面镜模型,在工作距离 50 mm 处设置接收面,辐照面的面积为 $10 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$,划分为 2×10 个网格,追迹光线 1000 万条。仿真过程中改变接收面与 x 轴的夹角,分别模拟三种太阳光矢量角 (-13° 、 0° 、 38°) 下的入射情况,仿真结果如图 6 所示。

表 1 准直光学系统参数

Table 1 Parameters of collimating optical system

Refractive index of cylindrical lens	Bottom radius of cylindrical lens /mm	Height of cylindrical lens /mm	Focus /mm	Aperture angle / ($^\circ$)	Field / (mm \times mm)
1.516	14.93	62	21.93	50	1×47.2

对仿真输出工作面的辐照分布数据进行分析,分析结果如表 2 所示。

通过上述数据可知:在光源入射角度最大时,工作面接收到的辐照度最小为 $565.02 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,大于 0.2 个太阳常数;三种光线矢量角下的辐照不均匀性最大为 $\pm 4.4\%$,满足指标要求的 $\pm 10\%$ 。

6 实验验证

6.1 辐照光斑与辐照度测试

保证光源垂直入射接收面且工作距离为 50 mm,待太阳模拟器工作稳定后,利用卡尺测量得到光斑的面积大于 $10 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。调节辐照度

至最大,从辐照面中心向两侧等距选 5 个点进行辐照度测量,然后计算平均值。取 -13° 、 0° 、 38° 三种特

殊光线入射角,测试三组数据,辐照度测量数据如表 3 所示。

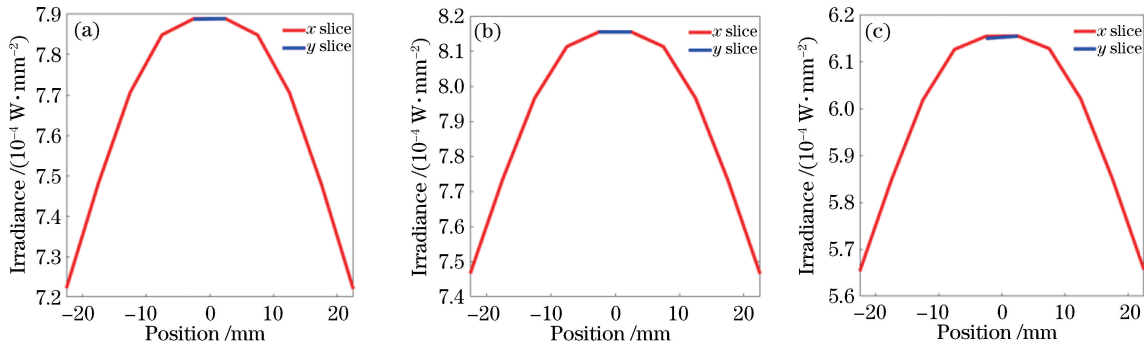


图 6 光学系统的仿真结果。(a) 13° 入射角下接收面上的辐照分布;(b) 0° 入射角下接收面上的辐照分布;(c) 38° 入射角下接收面上的辐照分布

Fig. 6 Simulation results of optical system. (a) Irradiation distribution of receiving surface when incident angle is 13° ; (b) irradiation distribution of receiving surface when incident angle is 0° ; (c) irradiation distribution of receiving surface when incident angle is 38°

表 2 不同入射角下仿真辐照面的不均匀性测试结果

Table 2 Test results of non-uniformity for simulated radiation surface

Incident angle / ($^\circ$)	Maximal incidence / ($W \cdot m^{-2}$)	Minimal incidence / ($W \cdot m^{-2}$)	Non-uniformity / %
-13	788.89	721.92	4.4
0	815.48	746.53	4.4
38	615.59	565.02	4.3

表 3 三种特殊光线入射角下各点辐照度的测量结果

Table 3 Measurement results of irradiance under three special incident angles

Incidence angle / ($^\circ$)	Irradiance / ($W \cdot m^{-2}$)				
	Point1	Point2	Point3	Point4	Point5
-13	482	511	551	525	489
0	497	530	564	540	506
38	388	414	450	424	393

测试结果表明,在 -13° 、 0° 、 38° 三种特殊光线入射角下,平均辐照度分别为 511.6, 520.5, $413.8 W \cdot m^{-2}$,最低值为 $393 W \cdot m^{-2}$,均大于 0.2 个太阳常数。

表 4 三种光线入射角下辐照不均匀性的测试结果

Table 4 Test results of irradiation non-uniformity for three incident angles

Incident angle / ($^\circ$)	Maximal incidence / ($W \cdot m^{-2}$)	Minimal incidence / ($W \cdot m^{-2}$)	Non-uniformity / %
-13	549	481	± 6.1
0	563	495	± 5.6
38	452	389	± 7.3

6.2 辐照不均匀度测试

以辐照面中心为基准,将 $10 mm \times 50 mm$ 的辐照面以 2×10 的方式划分为 20 个面积为 $5 mm \times 5 mm$ 的方形检测区域。待太阳模拟器工作稳定后,将辐照计沿垂直于光轴方向依次放置在 20 个方形区域的中心,测量每个区域的辐照度,辐照不均匀度计算公式为^[16]

$$N_{Nu} = \pm \left(\frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} \right) \times 100\%, \quad (12)$$

式中: N_{Nu} 为辐照不均匀度(%); E_{max} 为辐照面上的最大辐照度; E_{min} 为辐照面上的最小辐照度。取 -13° 、 0° 、 38° 三种光线入射角进行辐照度不均匀度测试,每种情况下测试三组数据,所得辐照不均匀性结果如表 4 所示。

测试结果表明,在 $10\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的辐照面上,三种光线入射角下,辐照不均匀度的最大值为 $\pm 7.3\%$,优于 $\pm 10\%$ 。

6.3 出射张角测试

将 LED 光源模块平放在工作台上,保证工作台水平,点亮 LED,在距出光口 50 mm 处垂直于工作台固定一张黑纸,使辐照光斑清晰地显示在纸上,利用卡尺测量辐照光斑的宽度,记录数据,并利用三角函数计算出射张角。如图 7 所示,测得出光口宽为 10 mm ,工作距离为 50 mm 处的有效辐照光斑宽度为 10.68 mm ,计算得出射张角为 0.78° 。

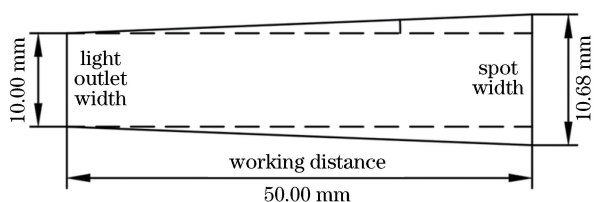


图 7 出射张角测试示意图

Fig. 7 Diagram of emergence angle test

7 结 论

为解决航天器姿态控制部件——编码式太阳敏感器装星后发射前进行现场测试的难题,提出了一种以 LED 光源模块为核心部件的运动式太阳模拟器,用以提供测试所需的模拟太阳光信号和太阳光矢量信号。研究了 LED 阵列光源及其准直光学系统的设计方法,确定了 LED 数量和阵列间距,优化设计了准直光学系统,并通过软件进行仿真分析,最后对 LED 光源模块进行了测试。结果表明,在工作距离为 50 mm 处可以形成 $10\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的辐照光斑,辐照度最小为 $393\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,大于 0.2 个太阳常数,辐照不均匀度最大为 $\pm 7.3\%$,出射张角为 0.78° ,可以满足设计指标要求。

参 考 文 献

[1] Gao Y, Zhang G Y, Zheng R, *et al.* Solar simulator irradiation uniformity based on optical integrator[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0623003.
高越, 张国玉, 郑茹, 等. 光学积分器对太阳模拟器辐照均匀性的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0623003.

[2] Du Z Q, Zhang L M, Si X L, *et al.* Optical design of large-area projection solar simulator[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0623003.
杜志强, 张黎明, 司孝龙, 等. 大面积投影式太阳模拟器的光学设计[J]. 光学学报, 2017, 37(6):

0623003.

[3] Zhang P S, Zhang B L, Wang D Y, *et al.* Development of a high collimated solar simulator[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2018, 35(1): 71-75.
张鹏嵩, 张博伦, 王丹艺, 等. 高准直太阳模拟器研制[J]. 航天器环境工程, 2018, 35(1): 71-75.

[4] Jiang J, Wen Z M, Zhang G J, *et al.* High performance complex optical system design for sun sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(2): 344-348.
江洁, 温志明, 张广军, 等. 一种高性能太阳敏感器复合光学系统设计[J]. 光学学报, 2008, 28(2): 344-348.

[5] Kong L Q, Yu F, Zhao Y J, *et al.* Theoretical and numerical analysis of solar shape and intensity in state of solar occultation[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1201002.
孔令琴, 于飞, 赵跃进, 等. 掩星状态下的太阳形状及强度的理论及数值分析[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1201002.

[6] Wei X G, Zhang G J, Fan Q Y, *et al.* Calibration of transform matrix between sun sensor measurement and cubic prism coordinate systems[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(4): 849-853.
魏新国, 张广军, 樊巧云, 等. 太阳敏感器测量坐标系与立方镜坐标系转换矩阵的标定[J]. 光学精密工程, 2009, 17(4): 849-853.

[7] 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.

[8] Hao F, Shi J F, Zhu S Q, *et al.* Optimal positioning of forward installed square LED arrays for machine vision system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1215001.
郝飞, 史金飞, 朱松青, 等. 机器视觉系统前置矩形 LED 阵列的优化布置[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1215001.

[9] Bari D, Wrachien N, Tagliaferro R, *et al.* Reliability study of dye-sensitized solar cells by means of solar simulator and white LED [J]. Microelectronics Reliability, 2012, 52(9/10): 2495-2499.

[10] Kohraku S, Kurkawa K. New methods for solar cells measurement by LED solar simulator[C]//3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, May 11-18, 2003, Osaka, Japan. New York: IEEE, 2003: 1977-1980.

[11] Chen J B, Yu J H, Gao Y F, *et al.* Study on tunable

- color temperature white LED light source with ultra-high color rendering index [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1023002.
- 湛江波, 余建华, 高亚飞, 等. 超高显色指数和色温可调的 LED 白光照明光源研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1023002.
- [12] John Koshel R. *Illumination engineering: design with nonimaging optics* [M]. Ge P, Zhao M, Liu X B, Transl. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2016: 30-32.
- R. John Koshel. *照明工程: 非成像光学设计* [M]. 葛鹏, 赵茗, 刘祥彪, 译. 武汉: 华中科技大学出版社, 2016: 30-32.
- [13] Su S, Zhang G Y, Wang L Y, *et al.* Solar simulator based on LED array light source [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(2): 307-315.
- 苏拾, 张国玉, 王凌云, 等. 基于 LED 阵列光源的太阳模拟器 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(2): 307-315.
- [14] Hua H, Mao X L, Tan J H, *et al.* Dynamic illumination design method based on LED array [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 102202.
- 花卉, 毛祥龙, 谭家海, 等. 基于 LED 阵列的动态照明设计方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 102202.
- [15] Chen X R, Han J H, Li H R, *et al.* Optimal design of LED arrays for near-field uniform illumination [J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(1): 122-127.
- 陈新睿, 韩敬华, 李洪儒, 等. 基于近场均匀照明的 LED 阵列的优化设计 [J]. *应用光学*, 2014, 35(1): 122-127.
- [16] Wang J Q, Su S, Zhang J, *et al.* Design of optical system of spherical array led solar simulator [J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(1): 117-123.
- 王基强, 苏拾, 张健, 等. 球面阵列 LED 太阳模拟器光学系统设计 [J]. *应用光学*, 2018, 39(1): 117-123.