

# LED 阵列用作定标光源的照明均匀性研究

叶 钊 王 超 曹启鹏 朱 军

(航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

**摘要** 采用理论推导和计算仿真的方法对 LED 阵列光源的照明均匀性进行了研究。重点分析了 LED 阵列的空间角度辐射分布和平面照度分布, 结合实验室辐射定标对光源均匀性的要求, 设计了 LED 阵列光源模型, 并利用 LightTools 软件对该模型的照明均匀性进行仿真。仿真结果表明 LED 阵列面均匀性可达 98.3%, 空间角度辐射均匀性可达 98.2%。对 Labsphere 积分球进行均匀性测试, 并将 LED 阵列模型的仿真结果与积分球测试结果进行了比较。对比结果表明, LED 阵列仿真结果达到与积分球接近的指标, 证明设计的 LED 阵列光源满足实验室辐射定标对光源均匀性的要求。

**关键词** 光学设计; 辐射定标; 照明均匀性; 计算仿真; LED 阵列

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.s116007

## Study of Illumination Uniformity of LED Arrays for Radiation Calibration

Ye Zhao Wang Chao Cao Qipeng Zhu Jun

(DFH Satellite Co., Ltd, Beijing 100094, China)

**Abstract** Illumination uniformity of LED arrays is studied through theoretical derivation and computing simulation. The spatial angle distribution and plane illuminance distribution are analyzed. A source model of LED arrays is designed based on the requirement of illumination uniformity of laboratory radiation calibration. The illumination uniformity of the model is simulated using LightTools. Simulation results show that the LED arrays' irradiance uniformity is 98.3% and the spatial angle radiation uniformity is 98.2%. The Labsphere integrating sphere is tested and compared with simulation results. The simulation results are close to the test results of integrating sphere, which indicate that the designed LED arrays satisfy the requirement on source uniformity of laboratory radiation calibration.

**Key words** optical design; radiation calibration; illumination uniformity; computing simulation; LED arrays

**OCIS codes** 100.1160; 220.0220; 230.3670

### 1 引 言

实验室辐射定标是光学成像测试以及遥感仪器研制中的一个重要环节, 其作用是建立光学仪器辐射输入与最终电信号输出之间的响应函数。辐射定标遵循全孔径、全视场、端对端的原则<sup>[1]</sup>, 扩展辐射源作为相机实验室辐射定标的标准光源, 要求能够对相机进行全孔径、全视场的照明, 因此应具有较大的开口直径和较为理想的余弦辐射性能。大口径积分球光源是一种较为理想的均匀、漫射扩展源, 是公认的空间光学遥感器辐射定标扩展辐射源。随着空

间光学的发展, 空间遥感器的口径、视场越来越大, 这就要求积分球定标光源的直径越来越大, 造成了制作难度和成本的成倍增加。并且定标时移动困难, 需要外场定标时无法将积分球带到发射场地。因此研究体积小、重量轻, 又能满足均匀、漫射扩展源要求的定标光源已成为当前极为迫切的任务。针对大孔径光学遥感器的辐射定标需求, 提出了使用 LED 阵列代替积分球作为定标光源的方案。相比传统大口径积分球光源, LED 阵列具有体积小、重量轻、功耗低、移动方便、制作简单等优点, 并且可以

收稿日期: 2013-09-01; 收到修改稿日期: 2013-10-01

作者简介: 叶 钊(1985—), 男, 博士, 工程师, 主要从事光学遥感器设计及遥感图像辐射校正等方面的研究。

E-mail: njst@qq.com

根据传感器的口径大小进行拼接,灵活性高。该定标光源如果能通过合理的设计达到定标要求,将会给超大口径传感器的定标带来方便。

LED作为近年来飞速发展的半导体光电器件,其应用已经渗透到生活中的各个方面,但是LED作为均匀扩展光源应用在传感器实验室辐射定标上的研究还很少,目前只有在星上定标中尝试过用LED光源,并取得了较好的定标效果。2004年,Nieke等<sup>[2]</sup>首次将LED用作星上定标光源,2008年,任建伟等<sup>[3]</sup>对LED用作星上定标光源的可行性进行了分析研究,并在之后的相机星上定标中进行了验证,再次证明LED可作为定标光源使用。本文从实验室辐射定标的要求出发,分析了影响LED阵列照明均匀性的因素,设计了LED阵列模型,通过LightTools仿真比较LED模型与积分球光源的照明均匀性,证明所设计的LED阵列能够满足实验室定标对光源照明均匀性的要求。

## 2 定标光源的均匀性

目前公认的空间光学传感器辐射定标扩展辐射源是大口径积分球光源,因为它是一种较为理想的均匀、漫射扩展源。评价积分球辐射源的技术指标主要有绝对光谱辐亮度、系统稳定性、出光口平面辐射均匀性和空间角度辐射均匀性以及各亮阶的线性等<sup>[4]</sup>。其中平面辐射均匀性和空间角度辐射均匀性是积分球设计中的关键指标。

平面辐射均匀性即平面内不同位置的辐亮度的相对偏差程度,通常以多个测量值( $n$ 次)之间的相对偏差表征:

$$u = \left[ 1 - \frac{d(I_i)}{\bar{I}} \right] \times 100\%, \quad (1)$$

式中 $I_i$ 为平面上各点辐亮度测量值, $\bar{I}$ 为各测量值的均值, $d(I_i)$ 表示各测量点辐亮度值的标准偏差。

空间角度辐射均匀性表征平面法线一定角度范围内的朗伯偏差,常用多个角度辐亮度值相对法线辐亮度值的最大相对偏差表述:

$$v = \max \left( \left| 1 - \frac{P_j}{P_0} \right| \times 100\% \right), \quad (2)$$

式中 $P_j$ 为各角度辐亮度测量值, $P_0$ 为平面法线位置的辐亮度值。

积分球内壁均匀喷涂多层中性漫射材料,在理想情况下球内壁各点的漫反射是均匀的,并服从朗伯定律,入射光经过积分球内壁的多次漫反射,在出口形成一个朗伯光源。但在实际中由于制造误差等各

种因素的影响,积分球的漫射特性只在小于 $60^\circ$ 以内时较好,辐照度非均匀性可以保持在1%左右<sup>[5-6]</sup>。

由于实际中积分球光源的辐射特性并非理想,出射面的辐照度也不是完全均匀的,出光口的尺寸与积分球直径之间应当满足一定的比例关系。经验表明,如果要保证出光口辐照度非均匀性在1%左右,出射窗口的面积要小于球内表面面积的0.05<sup>[6]</sup>。

## 3 LED阵列照明均匀性分析

### 3.1 LED空间角度分布均匀性

LED可近似认为是朗伯光源,其光强分布可表示为<sup>[7]</sup>

$$I(\theta) = I_0 \cos^m \theta, \quad (3)$$

当 $\theta = \theta_{1/2}$ 时,可求得

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln \cos \theta_{1/2}}, \quad (4)$$

式中 $\theta$ 为观察方向与法线的夹角, $\theta_{1/2}$ 为半强度角,即当LED在某一方向的发光强度下降到法向光强的一半时,该方向与法向方向的夹角。 $m$ 值依赖于LED的发光区域与球形封装的曲率中心之间的相对位置,如果发光中心的位置与曲率中心一致,则 $m \approx 1$ 。

由(4)式可知,当 $m = 1$ 时, $\theta_{1/2} = 60^\circ$ ,LED为理想的朗伯光源,空间角度分布符合余弦定律,有理想的空间角度辐射均匀性。

### 3.2 LED平面辐照度均匀性

理想情况下,LED光源是朗伯辐射体,其辐照度分布是发散角的余弦函数,而实际中大多是角度余弦的指数函数,LED辐照度分布的实际近似表示为<sup>[8]</sup>

$$E(r, \theta) = E_0(r) \cos^m \theta, \quad (5)$$

式中 $E_0(r)$ 为法线方向上与LED距离为 $r$ 处的辐照度。

由(5)式推出在直角坐标系中,与LED阵列距离为 $z$ 的平面上任一点 $(x, y, z)$ 的辐照度可表示为<sup>[9]</sup>

$$E(x, y, z) = \frac{z^m L_{\text{LED}} A_{\text{LED}}}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z^2]^{(m+2)/2}}, \quad (6)$$

式中 $L_{\text{LED}}$ 为LED芯片的辐亮度, $A_{\text{LED}}$ 为LED的发光面积。

实际上低质量封装材料的不均匀性和形状不规则都会影响LED的辐照度分布,而最主要的辐照度不均匀是由LED发光芯片后面的微型反射镜引起的。现在高亮度的LED封装质量高,而且荧光粉层能避免微型反射镜引起的辐照度不均匀,因此LED辐照度模型接近(5)式。但是为便于快速估计,同时

考虑实际因素,应用(6)式给出的 LED 辐照度分布,并且假设阵列中所有 LED 具有相同的  $m$  值和  $L_{\text{LED}}$ 、 $A_{\text{LED}}$  值,分析 LED 阵列的辐照度分布均匀性。

改变 LED 的阵列分布形式和 LED 之间的间距可以得到不同的辐照度分布,每种分布均可得到不同的面均匀性。目前应用比较广泛的 LED 阵列形式主要有环形、矩形、三角形等。研究表明,当 LED

各项参数都相同的情况下,三角形阵列的照明均匀区域相比其他排列的照明均匀区域大<sup>[9]</sup>,因此分析三角形阵列的辐照度分布规律。

对于  $\{(N \times M) - 0.25[2M + (-1)^M - 1]\}$  个 LED 组成的三角形 LED 阵列,如图 1 所示(其中  $N=M=7$ ),其在平面上某一点  $(x, y, z)$  的辐照度  $E$  为所有 LED 辐照度的叠加<sup>[9]</sup>,即:

$$E(x, y, z) = z^m A_{\text{LED}} L_{\text{LED}} \times \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \{ [x - (N_{\pm} - 2i)(d/2)]^2 + [y - (M + 1 - 2j)(\sqrt{3}d/4)]^2 + z^2 \}^{-(m+2)/2}, \quad (7)$$

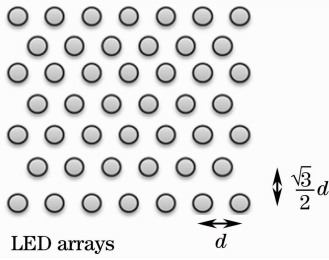


图 1 三角形 LED 阵列

Fig.1 Triangular LED arrays

式中  $N_{\pm} = N + [(-1)^j \pm 1]/2$ ,  $d$  为两个 LED 之间的

间距,  $m$  为由(4)式求得值,决定 LED 的角度分布。

为了在被照面上获得最大的均匀照明区域同时减少 LED 的使用量,需要合理调整 LED 之间的间距  $d$ 。经过计算仿真,结果表明 LED 之间的间距  $d$  存在一个最大值  $d_m$ <sup>[10-11]</sup>,当  $d \leq d_m$  时,被照面上可以得到 LED 阵列间距  $d$  下尽可能均匀的辐照度分布,如图 2(a)所示;当  $d > d_m$  时,中间区域的照明出现暗斑,如图 2(b)所示。根据衍射分辨率准则,对(5)式求两阶导并令  $\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = 0$ ,  $x=0$ ,  $y=0$ ,得到关于  $d$  的函数为

$$f(d) = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \left\{ \left[ (N_{\pm} - 2i)^2 + 3/4 (M + 1 - 2j)^2 \right] \left[ \left( \frac{d}{z} \right)^2 / 4 \right] + 1 \right\}^{-(m+6)/2} \cdot \left\{ 1 - [(m+3)(N_{\pm} - 2i)^2 - 3/4(M+1-2j)^2] \left[ \left( \frac{d}{z} \right)^2 / 4 \right] \right\}. \quad (8)$$

当  $N$  和  $M$  均为偶数时,  $d_m$  为  $f$  函数的零点;当  $N$  和  $M$  均为奇数时,  $d_m$  为  $f$  函数的最小值;当  $N$  和  $M$  为其他情况时,  $d_m$  为  $f$  函数的第一个极小值。

## 4 照明均匀性仿真与结果分析

### 4.1 LED 阵列均匀性仿真

设计模型选择 LED 光源时,需考虑 LED 的尺寸、排列方式、功率、发光角度等问题。增加 LED 数量的同时也会增加光源的光学扩展量,所以不能一味地增加 LED 的数量,否则既会浪费光能量,又会增加光源的散热难度。LED 阵列可以采用多种形式排列,每一种排列方式都会有不同的效果,最终目的是使光源有较好的余弦特性,在照明面上达到较高的光强度和辐照度均匀性<sup>[12]</sup>。根据上述分析确定设计模型为三角形阵列。

选取的 LED 模型为 OSRAM 公司的 LW W5SG-HX,其发散角为  $120^\circ$ ,理论上为朗伯光源,其外形和光强分布曲线如图 3 所示。

图4是根据(8)式得出的  $d$  与函数  $f(d)$  的关

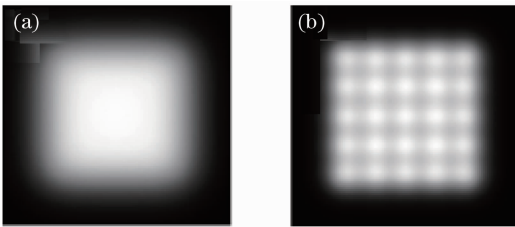


图 2 LED 阵列照度分布。(a)  $d \leq d_m$ ; (b)  $d > d_m$

Fig.2 Irradiance distribution of LED arrays.

(a)  $d \leq d_m$ ; (b)  $d > d_m$

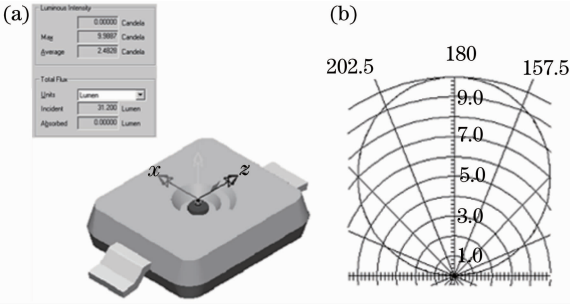


图 3 LED 模型。(a) 外形；(b) 光强分布

Fig. 3 LED model. (a) Figuration; (b) intensity distribution

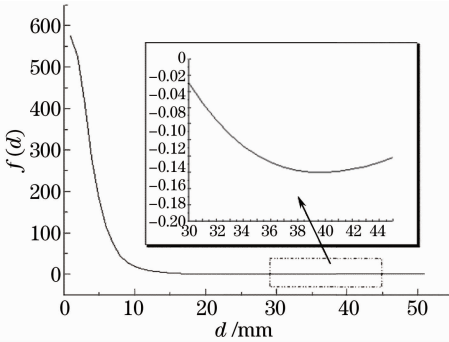


图 4  $d$  与  $f(d)$  的关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between  $d$  and  $f(d)$

系曲线可知,函数极小值出现在  $d=39$  mm,即 LED 排列的最大间距为 39 mm。模型中设定  $d=30$  mm,并于  $d=39$  mm 的极限仿真情况进行对比。

经过以上分析,设计出由 105 个 LED 组成的三角形阵列模型,其中  $N=11, M=10$ ,间距  $d=30$  mm,LED 阵列离被照面的距离  $z=30$  mm。模型如图 5 所示。

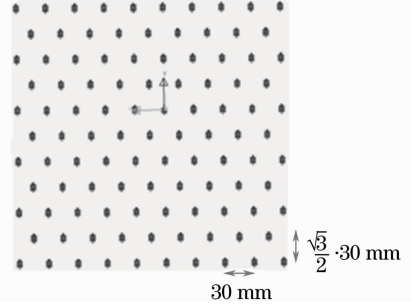


图 5 设计的 LED 阵列模型

Fig. 5 Designed arrays model of LED

图 6 为  $d=39$  mm 的模型仿真情况。由图 6(a) 可知,在  $20$  mm $\times$  $20$  mm 的区域内,面均匀性小于 90%,由图 6(b) 可知,LED 间辐照度下降,出现明显的照明搭接区域,照明均匀性变差。故间距  $d$  极限情况下的 LED 阵列不能满足设计需求。

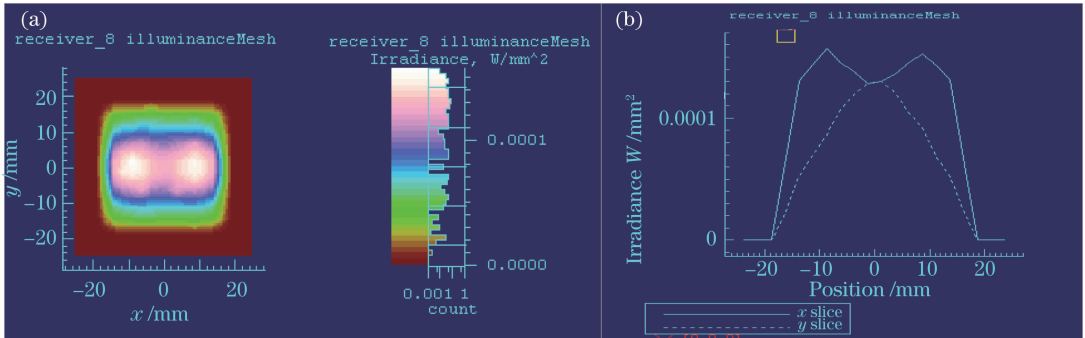


图 6  $d=39$  mm 的 LED 阵列的照明均匀性仿真结果。(a) 照度分布图；(b) 相对照度分布

Fig. 6 Uniform illumination distribution of LED arrays,  $d=39$  mm. (a) Irradiance distribution; (b) corresponding irradiance distribution

图 7 为  $d=30$  mm 的模型仿真结果。辐照度如图 7(a) 所示,在  $200$  mm $\times$  $200$  mm 的区域内,面均匀性达到 95.1%,图 7(b) 为  $y=0$  时沿  $x$  轴的辐照度分布曲线,在  $-70$  mm $<x<70$  mm 之间曲线很平坦,说明在此范围内均匀性更好,可以达到 98.3%;由辐亮度图 7(c) 可知,从  $-30^\circ\sim 30^\circ$  之间辐亮度变化 1.801%。由图 7(d) 所示的 LED 模型的光强分布和理想朗伯光源的余弦分布可知,在  $-60^\circ\sim 60^\circ$  之间 LED 阵列的光强分布与朗伯余弦分布能很好的吻合,用标准化互相关函数 $[\nu_{NCC}, (9)$  式]可以评价仿真值与理想值之间的差距<sup>[13]</sup>,图 7

(d) 中  $\nu_{NCC}=98.99\%$ ,图 7(c) 和图 7(d) 共同说明 LED 阵列的空间角度分布接近余弦分布,LED 阵列可以近似为朗伯光源,进而证明 LED 阵列光源的空间角度均匀性能够满足辐射定标的要求。 $\nu_{NCC}$  可利用

$$\nu_{NCC} = \frac{\sum_x (A_x - \bar{A})(B_x - \bar{B})}{\left[ \sum_x (A_x - \bar{A})^2 \sum_x (B_x - \bar{B})^2 \right]^{1/2}}, \quad (9)$$

获得,其中  $A_x$  为仿真值,  $B_x$  为理想值,  $\bar{A}$  和  $\bar{B}$  分别为  $A_x$  和  $B_x$  的平均值。

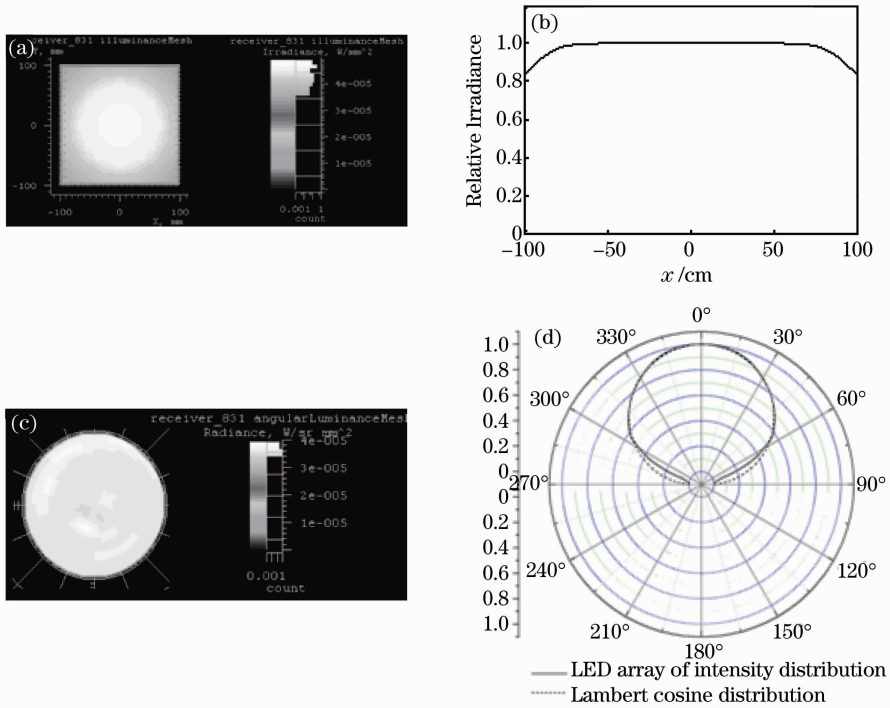


图 7 LED 阵列的照明均匀性仿真结果。(a) 辐照度分布图；(b)  $y=0$  时沿  $x$  轴的相对辐照度分布；(c) 亮度分布图；(d) 光强分布曲线

Fig. 7 Uniformity simulation distribution of LED arrays. (a) Irradiance distribution; (b) relative irradiance distribution along the  $x$  direction at  $y=0$ ; (c) luminance distribution; (d) intensity distribution curves

#### 4.2 积分球均匀性测试

为了比较 LED 阵列模型与实际积分球的差异，对 Labsphere 的直径  $\Phi 500$  mm，出光口直径  $\Phi 200$  mm 的积分球光源进行了均匀性测试。分别测试了球的面均匀性和空间角度辐射均匀性。

将自行研制的硅陷阱探测器固定在高精度二维导轨上，用软件控制步进电机，进行逐行扫描，以球开口圆心为中心点，步进步长为 2 cm，在同一平面内扫描 57 个点，测得的数据如表 1 所示，由表中数据计算得积分球的平面辐照度非均匀性为 0.71%。

表 1 积分球出口的平面辐照度相对分布

Table 1 Relative irradiance distribution of integrating sphere exit port

		Uniformity						
		0.97012	0.97752	0.97248				
		0.97265	0.97818	0.98774	0.9779	0.97818		
	0.97879	0.97895	0.98917	0.98939	0.98879	0.97835	0.97851	
0.97215	0.97851	0.97928	0.9895	0.99554	0.98884	0.9784	0.97768	0.98112
0.97761	0.98015	0.98507	0.98134	0.99753	1.0000	0.98191	0.97753	0.97472
0.97116	0.97807	0.97879	0.98939	0.99369	0.9889	0.97873	0.97746	0.97601
		0.97624	0.9895	0.99034	0.98972	0.98895	0.97851	0.97012
			0.9801	0.97956	0.99067	0.97906	0.9801	
			0.98043	0.98246	0.97632			

以  $2^\circ$  为步进角度扫描  $-30^\circ \sim 30^\circ$  范围内积分球的辐亮度角度分布，测试结果如图 8 所示。在  $\pm 30^\circ$  范围内，辐亮度值趋于一致，计算得到积分球的空间角度辐射非均匀性为 0.61%。最后比较 LED 阵列的模拟结果与积分球的测试结果。当被考察的照明区域面积相同时，如本例中面积为  $200 \text{ cm}^2$  (以 LED

阵列中心为中点的正方形)，LED 阵列的平面均匀性达到 98.3%，积分球为 99.29%；在  $-30^\circ \sim 30^\circ$  范围内，LED 阵列的辐亮度变化为 1.8%，积分球为 0.61%。由此看出 LED 阵列的平面辐照度均匀性和空间角度辐射均匀性都能达到与积分球接近的指标，而且 LED 阵列的体积明显小于积分球。

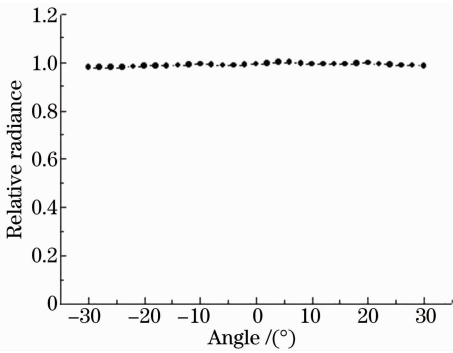


图 8 积分球开口的相对辐亮度分布

Fig. 8 Relative radiance distribution of intergrating sphere exit port

## 5 结 论

通过分析定标光源对均匀性的要求以及影响 LED 阵列辐照度分布和亮度分布的因素,设计了相应的 LED 阵列光源模型并进行了照明均匀性仿真。仿真结果表明,在体积明显小于积分球的优势下,相同的照明区域,LED 阵列的平面辐照度均匀性达到 98.3%,空间角度辐射均匀性达到 98.2%,与积分球的指标接近,可以尝试应用于实验室辐射定标。由于仿真的结果与实际情况会有一定差异,需要进一步的测试验证。影响 LED 阵列照明均匀性的因素有很多,在实际设计时要综合考虑各方面的影响,理论推导与仿真结果能够为以后的光源实体设计提供一定的参考。

## 参 考 文 献

1 Ren Jianwei, Wan Zhi, Li Xiansheng, *et al.*. Radiation transfer characteristic and calibrating method for space optical remote sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(8): 1186-1190.  
任建伟, 万志, 李宪圣, 等. 空间光学遥感器的辐射传递特性与校正方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1186-1190.

2 J Nieke, M Solbrig. Space borne spectrometer calibration with LEDs[C]. SPIE, 2004, 4135: 384-394.  
3 Ren Jianwei, Mai Zhenqiang, Wan Zhi, *et al.*. Feasibility of LED light source in spaceborne calibration[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(3): 398-405.  
任建伟, 麦镇强, 万志, 等. 天上 LED 定标光源的可行性研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(3): 398-405.  
4 Yang Xiaohu, Wang Shurong, Qu Yi, *et al.*. Research of UV spectral radiance characteristics of the integrating sphere based on calibration by the absolute radiance radiometer[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(10): 1008007.  
杨小虎, 王淑荣, 曲艺, 等. 基于绝对辐亮度计定标的积分球紫外光谱辐射特性研究[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1008007.  
5 Jin Weiqi, Hu Weijie. Radiometry. Photometry, Colorimetry and it's Measurement [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009. 200-220.  
金伟其, 胡威捷. 辐射度光度与色度及其测量[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009. 200-220.  
6 Ohno, Yoshihiro. Integrating sphere simulation; application to total flux scale realization[J]. Appl Opt, 1994, 33(13): 2637-2647.  
7 Li Lin, Wang Guangzhen, Wang Lili, *et al.*. Lens design for uniform illumination with LED[J]. Chinese J Lasers, 2012, 32(2): 0222002.  
李林, 王光珍, 王丽莉, 等. 实现均匀照明的 LED 系统设计方法[J]. 中国激光, 2012, 32(2): 0222002.  
8 David Wood. Optoelectronic Semiconductor Devices [M]. US: Prentice-Hall, 1994. 84-88.  
9 Ivan Moreno, Maximino Avendaño-Alejo, Rumen I Tzonchev. Designing LED arrays for uniform near-field irradiance[J]. Appl Opt, 2006, 45(10): 2265-2272.  
10 Ivan Moreno, Rumen I Tzonchev. Effects on illumination uniformity due to dilution on arrays of LEDs[C]. SPIE, 2004, 5529: 268-275.  
11 Ivan Moreno, Chingcherg Sun. LED array: where does far-field begin? [C]. SPIE, 2008, 7058: 70580R.  
12 Yuan Yinlin, Xu Jun, Zhai Wenchao, *et al.*. Design and test of a spectrally tunable integrating sphere reference light source with large exit aperture [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0712004.  
袁银麟, 徐骏, 翟文超, 等. 大孔径可调光谱积分球参考光源研制和检测[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0712004.  
13 Kai Wang, Xiaobing Luo, Zongyuan Liu, *et al.*. Optical analysis of an 80-W light-emitting-diode street lamp [J]. Optical Engineering, 2008, 47(1): 1-13.

栏目编辑: 韩峰