

反射式大功率 LED 舞台灯的设计

孙 惠¹ 李湘宁^{1,2,3} 刘晓东¹

¹ 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093
² 教育部光学仪器与系统工程研究中心, 上海 200093
³ 上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093

摘要 针对 LED 作为舞台灯需要进行二次光学设计的问题, 根据面向扩展光源的设计原理, 提出一种反射式的大功率 LED 舞台灯的设计方法, 实现对舞台背景幕布的大面积非对称均匀照明。在二维坐标系中建立反射面模型, 控制目标面上某一点的两条边缘光线, 使它们形成的光锥在目标面上逐点扫过, 结合反射定律、边缘光线原理以及光学扩展量理论, 得到反射面的母线上各点坐标, 母线拉伸后得到反射面。利用 TracePro 软件对所设计的系统进行模拟仿真, 结果表明, 多个舞台灯的照明叠加, 可在 1.5~2.0 m 的距离范围内实现宽 20 m、高 11 m 的均匀照明, 其均匀度可达 80%, 说明该结构适用于大面积非对称的均匀照明。

关键词 光学设计; 均匀照明; 非成像光学; 大功率 LED; 自由曲面

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP50.042201

Design for Reflecting Stage Light with High-Power LED

Sun Hui¹ Li Xiangning^{1,2,3} Liu Xiaodong¹

¹ School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China
² Engineering Research Center of Optical Instrument and System, Ministry of Education, Shanghai 200093, China
³ Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, Shanghai 200093, China

Abstract In view of the need for secondary optical design of LED as the stage light, a design for reflecting stage light with high-power LED is proposed to achieve the asymmetric uniform illumination on stage backdrop, according to the principle of extended light source. By creating a reflecting surface model in a two-dimensional coordinate system and controlling the two marginal rays of a certain point on the target surface, the light cone formed by the two marginal rays can sweep point by point. Combined with the laws of reflection, the edge ray principle and the étendue conservation theory, the coordinates of each point on the generatrix are obtained and then the reflection surface is generated after stretching the generatrix. The ray-tracing simulations with TracePro software show that by superposition of several stage lights, in the illuminated region of 20 m width and 11 m height within a distance range of 1.5~2.0 m, the luminous uniformity is able to reach 80%. Hence, this structure enables LED light source to be applied in wide-range lighting system to get uniform illumination.

Key words optical design; uniform illumination; non-imaging optics; high-power LED; freeform surface

OCIS codes 220.2945; 220.4298; 080.4295; 230.3670

1 引言

LED 作为一种具有巨大发展潜力的固体发光光源, 在照明领域的应用越来越广泛。近年来, 随着白光 LED 技术逐渐成熟, LED 芯片的发光效率提高, 价格降低, 开始出现以 LED 为光源的舞台灯。相较传统光

收稿日期: 2012-11-26; **收到修改稿日期:** 2012-12-30; **网络出版日期:** 2013-03-05

基金项目: 上海市重点学科项目第三期项目(S30502)资助课题。

作者简介: 孙 惠(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事照明光学设计方面的研究。E-mail: nicolesun77@gmail.com

导师简介: 李湘宁(1956—), 女, 硕士, 教授, 主要从事光学设计、光学测量和视光学等方面的研究。

E-mail: lxning@usst.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

源舞台灯,大功率 LED 舞台灯具有节能高效、寿命长、开关快速、调光方便、色光亮艳、使用方便等优点^[1,2]。由于 LED 芯片本身是一个近似的朗伯光源,辐射角大,发光面积小,容易产生眩光,直接采用 LED 照明难以满足照明要求,因此需要根据不同的应用需求,对 LED 进行二次光学设计,改变其光强分布^[3]。

在剧场、演播室的舞台布光中,常用到一种照射大面积背景幕布的舞台灯,以使幕布明亮、颜色艳丽,提升演出效果。幕布的高度一般在 10 m 左右,要获得幕布上的均匀照明,需要上下两个灯具的照明叠加。目前,用于均匀照明的设计方法主要有两种:重叠法和裁剪法。重叠法是将光源发出的光细分为多个部分,然后在照明区域上相互重叠以消除光源总体光束的不均匀性,如复眼照明、光管照明和微透镜阵列的设计,但在实际应用加工中这些结构较复杂。裁剪法是在已知光源光强分布的情况下,通过裁剪反射镜或透镜的面形来控制波前的走向,获得均匀的能量或照度分布,近几年应用较广^[4,5]。

本文介绍了一种用于舞台幕布均匀照明的舞台灯的设计方法。依据光源的发光特性和照面上的照度分布,以能量利用率为设计目标,依据裁剪法的基本思想,结合边缘光线原理以及光学扩展量理论,实现了系统的均匀照明。用实例对光学系统进行模拟仿真,仿真结果表明该光学系统可满足设计要求。该设计方法主要适用于大面积的非对称均匀照明。

2 设计原理

2.1 理论分析

图 1 为未经二次光学设计的 LED 光源。在二维坐标系 YZ 中,设 LED 光源位于原点处,光轴朝上,与 Y 轴的夹角为 α ,目标面到原点的距离为 l 。LED 芯片发出的一部分光直接照射到目标面上,由于光源到目标面的距离远大于光源尺寸,可将光源看作是一个点光源,LED 芯片为朗伯光源,发光特性满足

$$I_{\theta} = I_0 \cos \theta, \quad (1)$$

根据距离平方反比定律,直接照射到目标面上的光照度为

$$E = \frac{I_0 \cos \theta \sin^3(\theta + \alpha)}{l^2}, \quad (2)$$

式中 I_0 为发光表面在法线方向的发光强度, I_{θ} 为与法线成角度 θ 方向的发光强度, E 是目标面上 M 点的照度。由(2)式可知, θ 越大,照度 E 越小,即目标面上, M 点越往上照度越小。

为在目标面上获得均匀照明,必须进行 LED 的二次光学设计。相比透射式透镜元件,反射式元件无需考虑材料内部的吸收和散射等耗损,且具有结构简单、加工容易和成本低廉等优点^[6],因此选择反射式的设计方法。如图 2 所示,通过反射面将 LED 光源发出的光通量密度大的光反射到目标面的上方,光通量密度小的光反射到目标面的下方,这样,随着发光角度 θ 的减小,反射的光依次向目标面的上方移动。

在舞台上和下方放置反射式 LED 天幕灯,通过上下两个灯的照度叠加可在垂直方向上获得目标面上的均匀照明;水平方向的均匀照度可以通过左右舞台灯的排列获得。

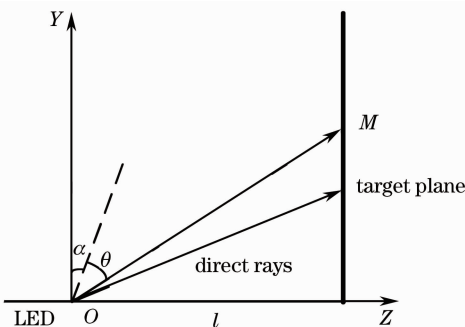


图 1 未经二次光学设计的大功率 LED 光源
Fig. 1 High-power LED without secondary optical design

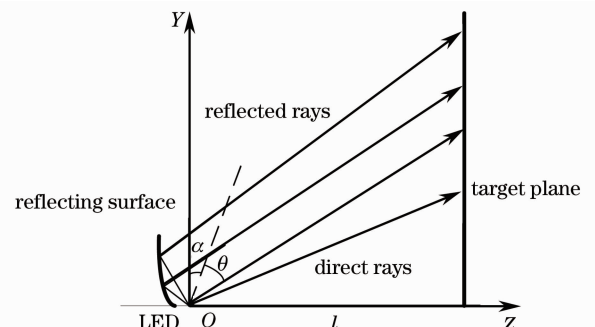


图 2 反射式大功率 LED 舞台灯原理图
Fig. 2 Reflecting stage light with high-power LED

2.2 反射面的设计

当光源的尺寸远远小于它到反射或折射界面的最小距离时,可以将光源理想化,忽略它的尺寸,这称为“点光源近似”,是对实际情况的简化处理。然而在光源尺寸较大或者光学系统的总体积比较小时,光学器件的尺寸并不能远远大于光源的尺寸。在这种情况下,使用面向点光源的设计方法得到的光学系统的性能必然会发生恶化。下面,采用面向扩展光源的非成像光学设计反射面。

根据前面的分析可知,通过反射补偿的方法可以获得目标面的均匀照明。图3为反射面设计原理图,以LED光源中心作为坐标系原点,采用直角坐标系。

由于LED芯片为朗伯光源,所以其各个方向的亮度是一常量 L 。考虑目标面上的一点 A , A 点的照度 E_{h_n} 一部分由光源直接照射产生,用 E_I 表示,另一部分光能由光经过反射面反射后产生,用 E_R 表示。根据边缘光线理论^[7~9],在二维坐标系中, A 点的照度 E_{h_n} 由照射到上面的边缘光线决定,其表达式为^[10]

$$E_{h_n} = E_I + E_R = L \left(\int_{\theta_{2n+1}}^{\theta_{2n}} \cos \theta d\theta + \int_{\theta'_{2n+1}}^{\theta'_{2n}} \cos \theta d\theta \right) = L (\sin \theta_{2n} - \sin \theta_{2n+1} + \sin \theta'_{2n} - \sin \theta'_{2n+1}). \quad (3)$$

由前面的分析可知,需要上下两个灯的叠加产生均匀照明,则 A 点的照度为

$$E = E_{h_n} + E_{h-h_n}. \quad (4)$$

在上述公式中, θ_{2n} 和 θ_{2n+1} 分别表示直射光束的两条边缘光线与目标面上 A 点法线的夹角; θ'_{2n} 和 θ'_{2n+1} 分别表示反射光束两条边缘光线与目标面上 A 点法线的夹角,由 A 的坐标 (l, h_n) 确定。

若已知照明面的高度 h ,沿 Y 轴方向等分为 N 份,则

$$\Delta h_n = \frac{h}{N}. \quad (5)$$

随着 h_n 的等距增大,通过调整反射面的曲率控制两条边缘光线,使它们形成的光锥在目标面上逐点扫过,其中一条边缘光线始终在前,称之为引导边,另一条称为跟随边。合理选取 N ,使反射的光线和直射的光线在目标面上叠加,获得均匀照明。

由于LED芯片与 Z 轴间的夹角为 α ,所以出射光线与反射面上点的坐标有如下关系:

$$\tan \beta_{2n} = \frac{y_{2n} - \frac{1}{2}b \sin \alpha}{z_{2n} - \frac{1}{2}b \cos \alpha}, \quad \tan \beta_{2n+1} = \frac{y_{2n+1} + \frac{1}{2}b \sin \alpha}{z_{2n+1} + \frac{1}{2}b \cos \alpha}. \quad (6)$$

根据反射定律,从光源出射的光线与其在目标面上的位置对应关系为

$$\theta'_n = 2\gamma_n - \beta_n, \quad (7)$$

$$\theta'_{2n} - \theta'_{2n+1} = \gamma_{2n} - \gamma_{2n+1}, \quad (8)$$

$$\tan \theta'_n = \frac{h_n - y_n}{l + z_n}, \quad (9)$$

反射面上点的坐标关系为

$$\frac{y_{2n+1} - y_{2n}}{z_{2n+1} - z_{2n}} = \tan \left(\frac{\pi}{2} - \gamma_n + \beta_n \right), \quad (10)$$

以上公式中 b 为LED的边长, l 为LED到目标面的垂直距离, β_n 为LED出射光线与 Z 轴的夹角, γ_n 为反射光线与反射面法线的夹角, (z_n, y_n) 为反射面上任意一点的坐标, h_n 为光线到达目标面上的位置。由(3)~(10)式及初始条件通过编程,求出反射面上自下而上许多离散点,将这些离散点连成一条曲线。所得曲线是二维系统的任意横截面,将曲线拉伸后即可得到满足设计要求的反射面,并可根据设计要求的照度和照明范

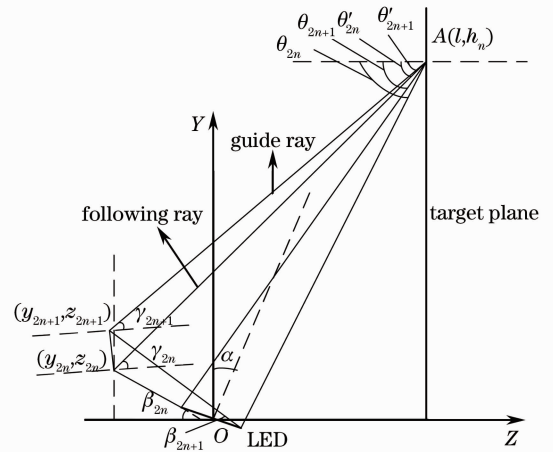


图3 反射面设计原理图

Fig. 3 Design principle of reflecting surface

围增加 LED 光源的数量。

3 舞台灯的照明设计仿真

本实例中,设计一种用于舞台背景幕布照明的大功率 LED 舞台灯,其性能指标是均匀照明一个 2 m 外的 20 m×11 m 的区域,照明区域内的光照强度在 850 lx 左右,采用 OSRAM 公司生产的大功率 LED 芯片作为光源,其功率为 30 W,光通量为 3000 lm,尺寸为 36 mm×36 mm。

本实例中,目标面上要求的照度值高、照明面积大,因此每个舞台灯内有 5 个 LED 芯片,上下各放置一个舞台灯,且舞台灯以 2.1 m 的间距等距排列,实现垂直和水平方向上大面积的均匀照明。由于实际光源与计算过程中的朗伯发光光源存在一定差异,因此将计算所得的参数进行了一定的优化^[11]。图 4 为采用 Solidworks 建立的 LED 舞台灯的灯具模型,其曲面和两侧平面均为反射面。

将舞台灯模型导入 TracePro,对设计结果进行仿真。图 5 为单个大功率 LED 舞台灯在目标面上子午方向的照度图。

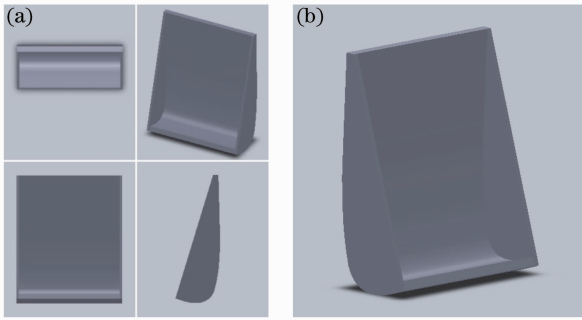


图 4 LED 舞台灯的灯具模型

Fig. 4 Model of LED stage light

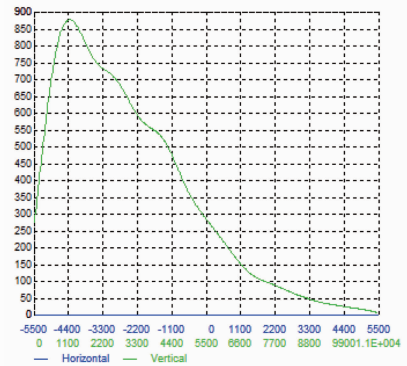


图 5 单个 LED 舞台灯在目标面上子午方向的照度图

Fig. 5 Illumination of meridian direction on target surface of single reflecting LED stage light

图 6 为舞台灯以 2.1 m 间距排列后在照面上的照度分布图。采用平均照度与最大照度的比值来表征接收面上的均匀度,由整个接收面的照度分布可以看到在宽 20 m、高 11 m 的区域内,均匀度可以达到 80%。

在实际应用中,可以通过减小灯具间的间距来提高目标面上的光照强度,图 7 为舞台灯间距为 1.8 m 时照面上的照度分布图。

比较图 6 和图 7 可以看出,调整舞台灯之间的距离可以改变目标面上的照度值,在间距由 2.1 m 减小到

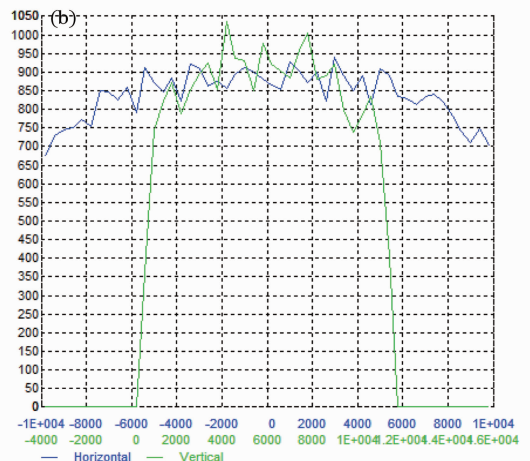
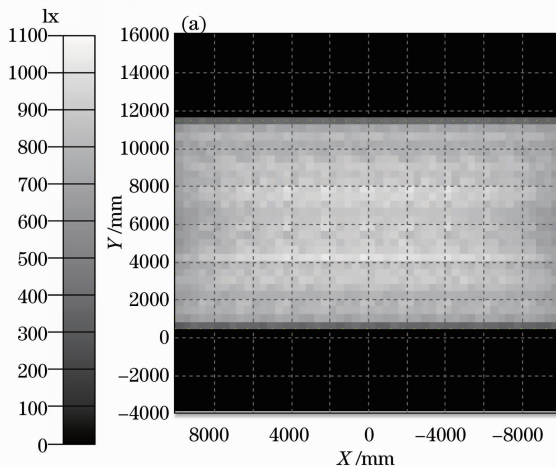


图 6 舞台灯间距为 2.1 m 时照面上的照度分布图

Fig. 6 Simulation results of illuminance distribution on the target plane with 2.1 m spacing between stage lights

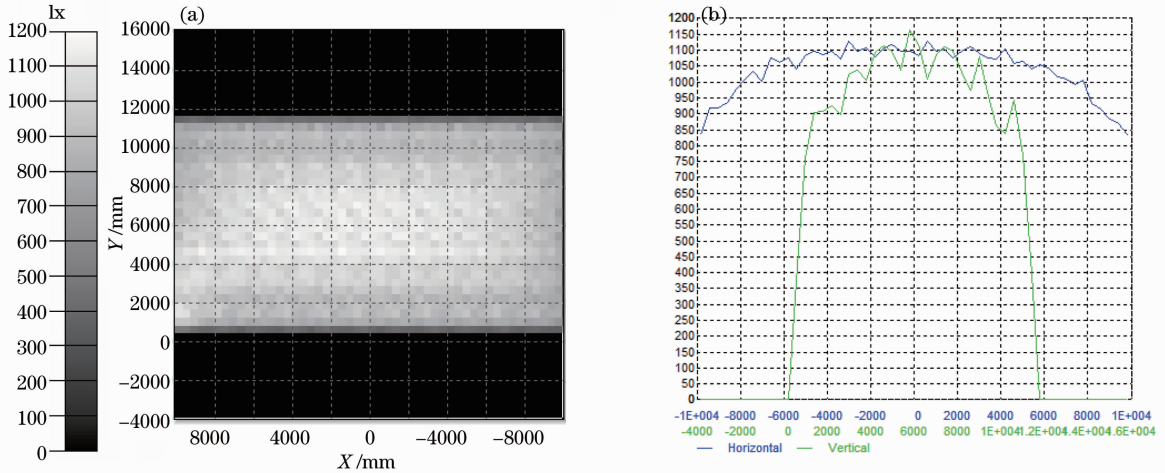


图7 舞台灯间距为 1.8 m 时照面上的照度分布图

Fig. 7 Simulation results of illuminance distribution on the target plane with 1.8 m spacing between stage lights 1.8 m 时, 目标面上的平均光照强度由 850 lx 增加到 1000 lx, 且均匀度仍然在 80% 左右。这样, 可以根据实际应用中目标面上所需要的光照强度来调整舞台灯的间距, 操作简单、方便。

当舞台灯与接收面之间的距离 l 改变时, 可通过旋转舞台灯来获得不同距离下的均匀照明。表 1 为舞台灯间距为 2.1 m 时, 不同距离下均匀照明区域内的照明均匀度。

表 1 不同距离下均匀照明区域的照度均匀度

Table 1 Illuminance uniformity of target plane in uniformly illuminated region at different distance

Distance l / mm	E_{ave} / lx	E_{max} / lx	Uniformity / %
2000	800.5	987.0	81.1
1900	815.6	993.4	82.1
1800	823.3	1022.7	80.5
1700	829.5	1032.0	80.4
1600	865.1	1067.2	81.1
1500	854.3	1018.1	83.9

综上所述, 采用反射补偿方法设计的大功率 LED 舞台灯, 放置在舞台上和下方, 并以一定间距在水平方向排列, 可实现幕布的非对称大面积均匀照明; 并且, 可以根据目标面上的照度要求, 调整舞台灯之间的距离, 使目标面上的照度相应增大或减小, 且不影响均匀度。当舞台灯与目标面的距离在一定范围内改变时, 对均匀度影响不大, 可通过增减舞台灯的数量, 增大或减小照明面积, 适用于不同大小的舞台使用。

4 结 论

采用面向扩展光源的设计方法, 设计出一款反射式的大功率 LED 舞台灯, 根据光学扩展量、边缘光线理论、能量补偿和反射定律, 计算出反射曲面母线上各点的坐标所对应的几何关系, 编程得出曲面母线上各点对应的坐标, 将各点连线后拉伸得到所需的曲面。对设计好的系统采用实例仿真, 在 TracePro 中进行了验证, 结果表明采用大功率的 LED 光源设计的反射式舞台灯可以满足实际照明要求。该设计方法简单, 所设计的 LED 舞台灯能量利用率高, 加工方便, 适用于远距离的非对称大面积均匀照明。

参 考 文 献

- Fang Zhilie, Liu Muqing. Technology status of light emitting diodes [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(6): 062502
- 方志烈, 刘木清. 半导体照明光源的技术进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(6): 062502
- Ding Shushu, Yu Guiying, Hao Wenwen. A freeform surface lens for indoor uniform illumination [J]. *Laser &*

Optoelectronics Progress, 2012, **49**(4): 042201

丁纾姝, 余桂英, 郝雯雯. 用于室内照明的自由曲面均匀配光透镜设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(4): 042201

3 Yan Rui, Xiao Zhisong, Deng Sisheng *et al.*. Progress and prospect of LED optical design [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2011, **20**(2): 38~42

闫 瑞, 肖志松, 邓思盛 等. LED 光学设计的现状与展望[J]. *照明工程学报*, 2011, **20**(2): 38~42

4 Yan Xingtao, Yang Jianfeng, Zhang Guoqi *et al.*. Freeform LED lens design based on longitude-latitude division and tangent-plane iteration [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(2): 022201

闫兴涛, 杨建峰, 张国琦 等. 基于经纬划分和切面迭代的自由曲面 LED 透镜设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(2): 022201

5 Yu Guiying, Jin Ji, Ni Xiaowu *et al.*. Design for LED uniform illumination reflector based on étendue [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2297~2301

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

6 Liu Zhengquan, Sun Yaojie, Lin Yandan. Freeform reflector design for rectangular illuminance distribution based on differential geometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(10): 1022006

刘正权, 孙耀杰, 林燕丹. 基于微分几何的矩形照度分布自由曲面反射器设计[J]. *光学学报*, 2012, **32**(10): 1022006

7 P. A. Davis. Edge-ray principle of nonimaging optics [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(4): 1256~1259

8 H. Ries, A. Rabl. Edge-ray principle of nonimaging optics [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(10): 2627~2632

9 H. Ries, W. Winston. Tailored edge-ray reflectors for illumination [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(4): 1260~1264

10 Yang Yi, Qian Keyuan, Luo Yi. A novel LED uniform illuminance system based on nonimaging optics [J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(1): 110~115

杨 毅, 钱可元, 罗 毅. 一种新型的基于非成像光学的 LED 均匀照明系统[J]. *光学技术*, 2007, **33**(1): 110~115

11 Hai Yang, Yang Daoguo, Hou Fengze. Secondary optical simulation of LED based on goniophotometer experiment [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(3): 032302

海 洋, 杨道国, 侯峰泽. 基于分布光度计测试实验的 LED 二次光学仿真[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(3): 032302