

一种基于配光曲线的LED天幕灯矢量设计方法

郑云飞¹ 闫钰¹ 李湘宁^{1,2,3} 隋峰¹ 董懿慧¹ 孙肇崎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 针对发光二极管(LED)天幕灯使用中的非对称大面积照明特点,提出了一种基于配光曲线的LED天幕灯矢量设计方法。根据目标面的能量分布要求计算天幕灯总配光曲线,依据其中的反射配光曲线设计反射面。设计中应用光度学、几何光学、边缘光线原理及Matlab软件中的龙格-库塔法,得出反射面各点坐标。通过Solidworks软件构建反射面模型,应用Zemax软件对其进行照明仿真,结果表明,照明均匀度达到设计要求,能量利用率超过80%,表明该设计方法具有实用价值。

关键词 光学设计;LED天幕灯;几何光学;光能利用率;非对称照明

中图分类号 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.112201

A Vector Design Method for LED Cyclorama Light Based on Light Curves

Zheng Yunfei¹ Yan Yu¹ Li Xiangning^{1,2,3} Sui Feng¹ Dong Yihui¹ Sun Qianqi¹

¹School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

²Engineering Research Centre of Optical Instrument and System, Ministry of Education, Shanghai 200093, China

³Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, Shanghai 200093, China

Abstract Considering the properties of its asymmetric large-area illustration, a vector design approaching for LED cyclorama light is proposed to achieve the asymmetric uniform illumination on backdrop. The total distribution light curve is calculated on the basis of the required energy distribution of the target surface and the reflective surface is designed to follow the reflectivity of distribution light curve. Specifically, the coordinates of points on the reflecting surface are calculated by combining photometrics, geometrical optics, the edge-ray principle and the Runge-Kutta method in Matlab. Besides, an illustration simulation is performed in Zemax after modeling the reflective surface in Solidworks. The simulated results indicate that the illumination uniformity meets the design requirements as well as the energy efficiency is able to reach more than 80%, which show that the design is of great relevance to applications.

Key words optical design; LED cyclorama light; geometric optics; energy efficiency; asymmetric lighting

OCIS codes 220.2945; 220.4298; 080.2740; 080.4295

1 引言

随着科学技术的不断发展,发光二极管(LED)光源以寿命长、能耗低、光效高以及绿色环保等优点,在照明领域的应用越来越广泛。天幕灯是一种在礼堂、演播厅以及舞台等场合中用于大面积幕布照明的灯具,在舞台照明领域中发挥着不可或缺的作用。目前,以卤钨灯为光源的传统天幕灯逐渐被以LED为光源的天幕灯所替代^[1]。而市面上LED天幕灯对幕布的照明均匀度较低,难以实现高度为10 m及以上幕布的大面积

收稿日期: 2014-04-27; 收到修改稿日期: 2014-06-07; 网络出版日期: 2014-10-10

作者简介: 郑云飞(1992—),男,本科生,主要从事应用光学方向的研究。E-mail: zyfusst@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

均匀照明。根据LED的光源特性,光输出在半球形空间近似呈朗伯分布,若要在近距离实现对幕布的大面积非对称均匀照明,需要进行二次光学设计,改变其光强分布。

为实现大面积幕布的非对称均匀照明,国内外关于天幕灯方面的设计,是通过在天幕灯上增加透镜改变其光路,实现设计目标的同时大大增加了成本。本文在对现有天幕灯照明特性分析的基础上,提出了一种基于配光曲线的LED天幕灯矢量设计方法。通过分析幕布照明要求,以均匀照明度和能量利用率为设计目标,结合单个天幕灯应满足的照明特征,建立天幕灯配光曲线模型,依据矢量形式的斯涅耳定律确定光线的反射路径,对LED天幕灯进行二次光学设计,无需透镜,依此方法设计反射面,达到设计目标^[2-3]。

2 设计方法

2.1 构建配光曲线

如图1所示为单个天幕灯照射幕布的示意图,图中 α 表示出射光线与水平面的夹角, L 为天幕灯到幕布的水平距离, h 为光线照射在目标面上某一位置的高度, s 为该光线的射程距离, β 为LED芯片与地面的倾斜角。

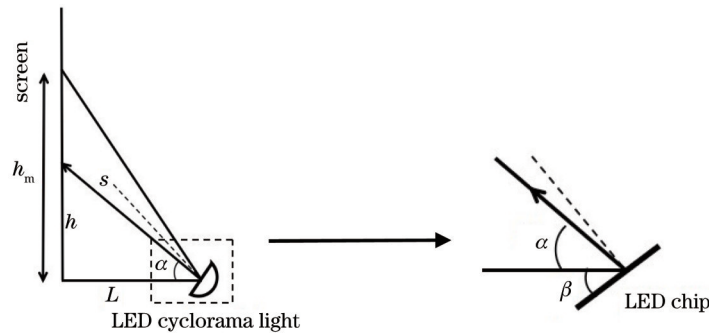


图1 天幕灯照射幕布示意图

Fig.1 Irradiating curtain schematic diagram of cyclorama light

由图1可知,天幕灯对幕布的照射是一种大面积非对称照明方式,为了获得幕布垂直方向的均匀照明,需要两个相同的天幕灯在幕布上下两端同时对目标面进行叠加照射,单个天幕灯的照射则需提供与高度 h 呈线性关系的照度分布^[4],即:

$$E = kh + b, \quad 0 \leq h \leq h_m, \quad (1)$$

式中 k, b 为常数。

根据照度平方反比定律,则可得

$$E = \frac{I_\alpha}{s^2} \times \cos \alpha = \frac{I_\alpha}{L^2} \times \cos^3 \alpha, \quad (2)$$

式中

$$\alpha = \arctan \frac{h}{L}, \quad (3)$$

(1)~(3)式联立可得:

$$I_\alpha = L^2(kh + b)(1 + \tan^2 \alpha)^{1.5}, \quad (4)$$

(4)式中 I_α 为单个天幕灯在 α 方向上总发光强度,根据(1)式的照度要求, I_α 随 α 变化,构成总配光曲线。

在设计中天幕灯的光源采用LED芯片,根据LED的光源特性,光输出在半球形空间近似呈朗伯分布。为了在非对称大角度的照明需求中高效地利用光能,LED天幕灯设计成直射光和反射光叠加的照明方式。因此,单个天幕灯的总光强由直射和反射两部分光强构成^[5],即有关系式:

$$I_\alpha = I_1 + I_2. \quad (5)$$

如图1所示,当LED芯片与地面倾斜 β 角时,天幕灯的直射光强为

$$I_2 = I_0 \cdot \cos(90^\circ - \alpha - \beta), \quad (6)$$

式中 I_0 是LED芯片的法向光强。

由(5)式,总光强减去直射光强得到LED天幕灯的反射光强:

$$I_1 = L^2(kh + b)(1 + \tan^2 \alpha)^{1.5} - I_0 \cdot \cos(90^\circ - \alpha - \beta). \quad (7)$$

(6)式和(7)式即为天幕灯配光曲线的直射部分和反射部分。

为了方便分析,在表1所示初始条件下进行相关配光曲线的计算。

表1 初始条件的设定

Table 1 Initialization conditions	
h_m / m	10
L / m	2
$\beta / (^\circ)$	15
Target surface illumination requirements /lx	1000

在初始条件下,目标面上照度要求为1000 lx,根据(3)式算出 α 范围为 $0^\circ \sim 78.7^\circ$,考虑到环境因素和能量损失, α 范围取 $0^\circ \sim 80^\circ$,目标面上照度要求设为1200 lx,以确保可以达到设计目标。

根据(1)、(3)、(4)式,当 $h = 10 \text{ m}$ 时, $E = 0$,由此可得 $b = -10k$,根据初始条件 $L = 2 \text{ m}$,同时为了方便计算根据归一化算法,设LED中心光强为1,则其总光通量为2(即 $\Phi = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} I_\alpha \cos \alpha d\alpha = 2$),通过Matlab编程求得 $k = -0.01, b = 0.1$,则有:

$$I_\alpha = 4(-0.02 \tan \alpha + 0.1)(1 + \tan^2 \alpha)^{1.5}, \quad (8)$$

$$I_1 = 4(-0.02 \tan \alpha + 0.1)(1 + \tan^2 \alpha)^{1.5} - I_0 \cdot \cos(75^\circ - \alpha). \quad (9)$$

由(8)式得出的垂直方向上总配光曲线和(9)式反射部分的配光曲线分别如图2和图3所示。

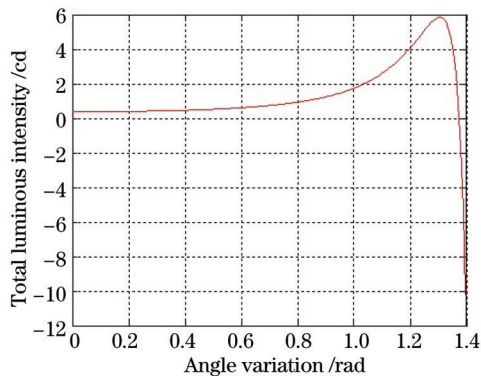


图2 单个LED天幕灯总配光曲线

Fig.2 Total single LED cyclorama light with distribution curve flux

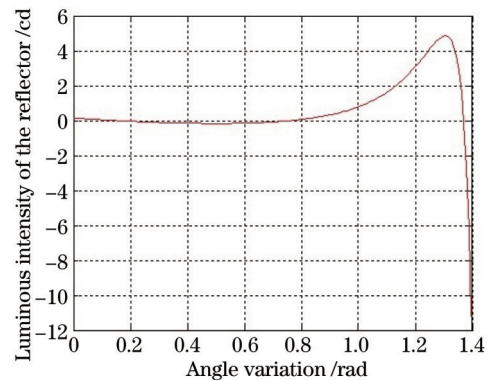


图3 单个LED天幕反射配光曲线

Fig.3 Single LED cyclorama light with reflectance distribution curve flux

2.2 分析幕布照度

对于单个天幕灯,直射光和反射光叠加应当满足(1)式的照度分布,于是有:

$$E = kh + b = kL \tan \alpha + b = E_2 + E_1, \quad (10)$$

其中直射光照度可根据直射光强获得:

$$E_2 = \frac{I_2}{s^2} \cdot \cos \alpha = \frac{I_0 \cdot \cos(90^\circ - \alpha - \beta)}{(L/\cos \alpha)^2} \cdot \cos \alpha = \frac{I_0 \cdot \cos(90^\circ - \alpha - \beta)}{L^2} \cdot \cos^3 \alpha, \quad (11)$$

反射光照度由总光强减去直射光强获得:

$$E_1 = E - E_2 = kL \tan \alpha + b - \frac{I_0 \cdot \cos(90^\circ - \alpha - \beta)}{L^2} \cdot \cos^3 \alpha. \quad (12)$$

2.3 设计反射面

在初始条件下,根据天幕灯的反射配光曲线和反射光照度分布设计反射面。图4为LED天幕灯的反射路径示意图,其中 \mathbf{a}_1 为入射光线矢量, \mathbf{a}_2 为反射光线矢量。

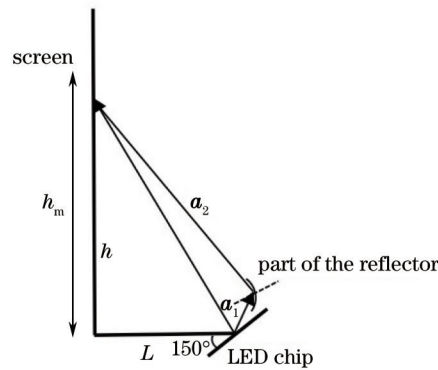


图4 LED天幕灯反射光线示意图

Fig.4 Reflected light schematic of LED cyclorama light

从图4可知,对于某一特定角度,只要确定了 a_1, a_2 ,即可得到该处反射点的坐标。已知矢量 a_1, a_2 与照度和发光强度的关系为

$$E_1 = \frac{I_1}{(|a_1| + |a_2|)^2}. \quad (13)$$

考虑到一束从空间小体积光源发出的光,入射到目标面上的一点,设入射光的单位矢量是 I ,出射光的单位矢量是 O ,界面法向量是 N ,根据矢量形式斯涅耳方程三者满足关系:

$$[n_i^2 + n_o^2 - 2n_i n_o (O \cdot I)]^{1/2} \cdot N = n_o O - n_i I, \quad (14)$$

式中入射和反射介质折射率相等,即 $n_i = n_o$,已知入射光线矢量 a_1 ,反射光线矢量 a_2 和界面法向量 N ,则三者满足关系:

$$[2 - 2(a_2 \cdot a_1)]^{1/2} N = a_2 - a_1, \quad (15)$$

(13)、(15)式两式联立确定矢量 a_1, a_2 ,即确定反射光线的路径。

综上所述,通过分析幕布的照明要求,分别建立了LED天幕灯的总配光曲线、直射配光曲线和反射配光曲线,进而分析了幕布照度,根据LED光源的发光特性,对于特定的角度值,可通过上述计算确定该角度处的光线矢量 a_1 和 a_2 及反射点坐标。在 $0^\circ \sim 80^\circ$ 区间,重复上述计算,通过Matlab软件龙格-库塔法进行编程求解得到随 α 变化的若干 a_1, a_2 值,最终得到反射面自下而上连续的反射点坐标,将连续的反射点坐标应用Solidworks软件进行拟合构成完整的反射面,依此方法设计出反射面模型^[6-8]。

3 设计实例

图5是通过Solidworks建立的LED天幕灯的反射面模型。将此模型导入Zemax软件中,按理论计算进行单个LED天幕灯仿真^[9],仿真结果如图6和图7所示,图6表示单个LED天幕灯投射在目标面上垂直方向

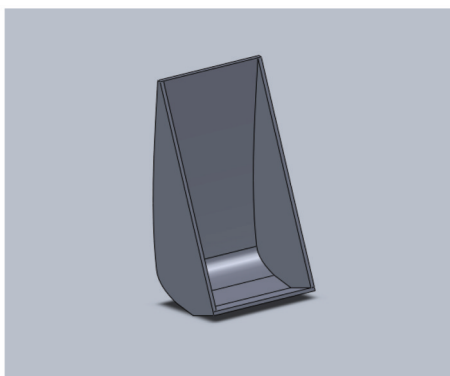


图5 天幕灯反射面模型

Fig.5 Reflective surface of LED cyclorama light

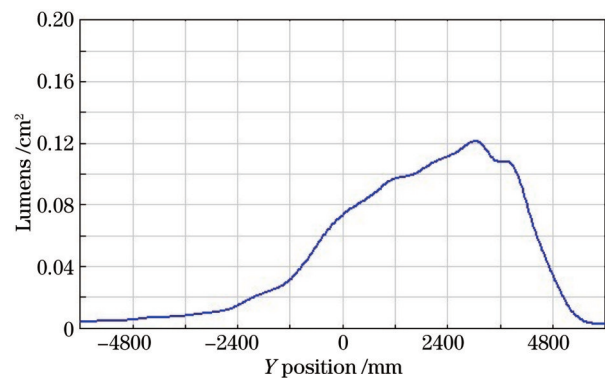


图6 单个天幕灯垂直方向能量分布图

Fig.6 Vertical energy distribution of single LED cyclorama light

的能量分布图;图7表示单个LED天幕灯投射在目标面上水平方向的能量分布图。图6表示的是单个LED天幕灯照度 E 在垂直方向的变化;图2表示的是其发光强度 I 在垂直方向的变化;根据照度距离平方反比定律比较图6与图2,显示设计结果与理论分析高度吻合^[10]。

为了进一步验证设计结果能否满足大面积幕布的照明要求,对以下技术要求进行了仿真:LED天幕灯距幕布的垂直距离小于2 m,幕布高为10 m,宽为20 m,照明区域内的照度大于1000 lx。

因为目标面要求大面积、高亮度,选用欧司朗大功率LED光源,光通量为3000 lm,且每个LED天幕灯内装有5个LED芯片。图7表明单个天幕灯在水平方向2 m范围内的能量分布较均匀,所以每隔2 m放置一盏灯具,天排灯和地排灯上下各为10个,对大小为10 m×20 m的幕布进行均匀照明^[11]。

根据设计目标,应用Zemax软件对整体设计结果进行光线追迹和照度分布计算,其结果分别如图8、图9、图10所示。图8是上下两排LED天幕灯以2 m等间距排列后的能量分布图,图9是LED天幕灯整体在幕布垂直方向的能量分布图,图10是水平方向的能量分布图。

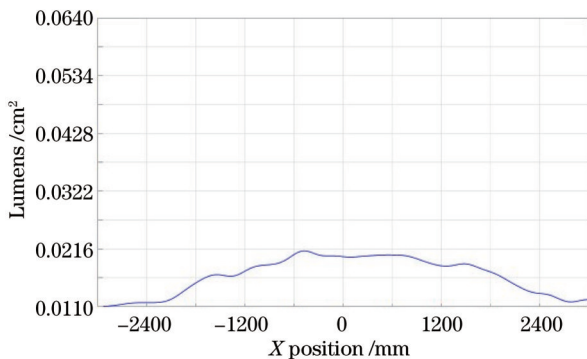


图7 单个天幕灯水平方向能量分布图

Fig.7 Horizontal energy distribution of single LED cyclorama light

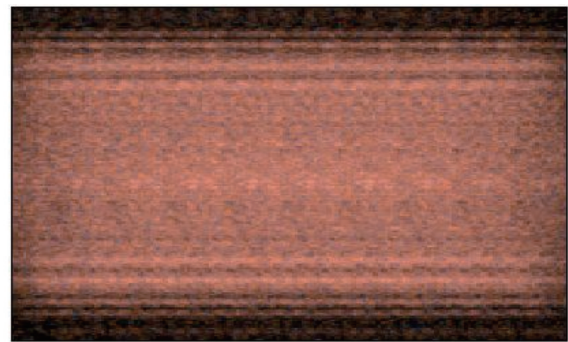


图8 能量分布图

Fig.8 Energy distribution

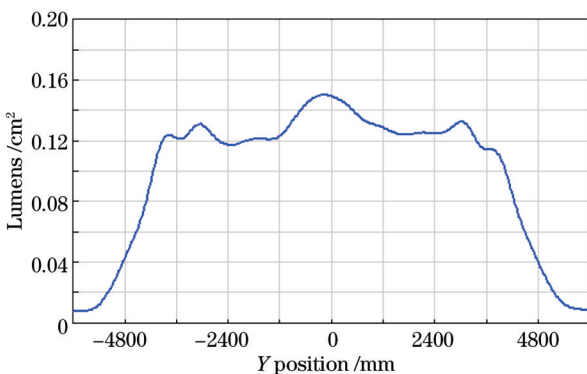


图9 垂直方向能量分布图

Fig.9 Vertical direction of energy distribution

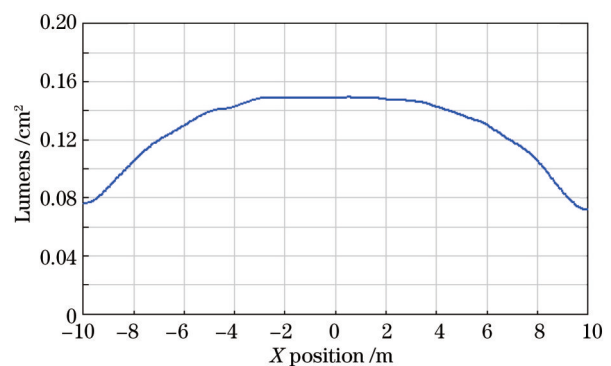


图10 水平方向能量分布图

Fig.10 Horizontal direction of energy distribution

结果显示,基于配光曲线设计的LED天幕灯在大面积幕布上的照度能达到1000 lx以上,照明均匀度满足设计要求;从仿真结果中得到总能量为 2.083×10^5 lm,因为探测器的探测范围为10 m×20 m,最左端和最右端两个天幕灯在水平方向的能量贡献只有50%,所以计算总能量时,以天排灯和地排灯上下各为9个进行计算,经计算可得能量利用率高达80%^[12]。同时验证了只要单个天幕灯满足所需的配光曲线,就可以获得垂直方向的均匀照明,加长面积和高亮度可以通过增加天幕灯的排列数量或单个LED天幕灯的芯片数量和芯片的功率来达到幕布照明要求。依此方法设计的反射面模型对LED光源进行二次配光,有效地改善了其照明效果,实现了大面积区域的均匀照明,并大大提高了照明系统的能量利用率。

4 结 论

根据非成像光学理论,设计了一种基于配光曲线的LED天幕灯。在满足照明要求的条件下,根据LED

光源的发光特性结合斯涅耳定律、非对称成像等计算得到LED天幕灯的配光曲线,应用Matlab软件依据龙格-库塔法编程得到反射面的各点坐标,进而在Solidworks软件中设计出反射面模型。应用Zemax软件对设计结果进行光学模拟仿真,结果表明,通过等间距多个LED天幕灯的叠加照明,可在1.5~2.0 m距离内实现对高10 m、宽20 m大面积的均匀照明,照明均匀度满足设计要求,并且能量利用率高达80%,说明该设计方法适用于大面积非对称均匀照明。该设计方法简单,易于实施,能大大提高LED照明系统的效率,设计方法实用性强。

参考文献

- 1 Xiao Si, Li Lin. A designing of LED stage lighting for long distance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(s1): s100307.
肖 思, 李 林. 大功率LED舞台灯的照明设计[J]. *光学学报*, 2011, 31(s1): s100307.
- 2 Li Lin, Wang Guangzhen, Wang Lili, *et al.*. Lens design for uniform illumination with LED [J]. *Acta Optica Sinica*, 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]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0222002.
- 3 Wu Rengmao, Tu Dawei, Huang Zhihua. Design of uniform illumination projector with high power LED [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(3): 372-376.
吴仍茂, 屠大维, 黄志华. 一种实现大功率LED均匀照明的投射器设计[J]. *应用光学*, 2009, 30(3): 372-376.
- 4 Sun Hui, Li Xiangning, Liu Xiaodong. Design for reflecting stage light with high-power LED [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(4): 042201.
孙 惠, 李湘宁, 刘晓东. 反射式大功率LED舞台灯的设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(4): 042201.
- 5 Xu Chao, Gao Shumei, Su Zhouping, *et al.*. A new optical design method of uniform illumination based on extended LED source [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(2): 022203.
徐 超, 高淑梅, 苏宙平, 等. 一种基于LED扩展光源的均匀照明设计新方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(2): 022203.
- 6 Fu Minghui, Liang Huali. An improved precise Runge-Kutta integration [J]. *Journal of Zhongshan University*, 2009, 48(5): 1-5.
富明慧, 梁华力. 一种改进的精细龙格-库塔法[J]. *中山大学学报*, 2009, 48(5): 1-5.
- 7 Ding Yi, Gu Peifu. Freeform reflector for uniform illumination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(3): 540-544.
丁 毅, 顾培夫. 实现均匀照明的自由曲面反射器 [J]. *光学学报*, 2007, 27(3): 540-544.
- 8 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.
- 9 Yang Bo, Wang Yongtian. Computer aided design of free from reflector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(6): 721-724.
杨 波, 王涌天. 自由曲面反射器的计算机辅助设计 [J]. *光学学报*, 2004, 24(6): 721-724.
- 10 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.
- 11 Song Xianjie, Tu Qifei, Zhou Wei, *et al.*. Prospect of the application for high brightness LED in lighting [J]. *Area. Semiconductor Optoelectronics*, 2002, 23(5): 356-360.
宋贤杰, 屠其非, 周 伟, 等. 高亮度发光二极管及其在照明领域中的应用 [J]. *半导体光电*, 2002, 23(5): 356-360.
- 12 Tian Zhihui, Wang Ruiguang, Chen Yu, *et al.*. Optical design and research of high optical efficiency and high filling ratio of LED display screen [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(2): 251-256.
田志辉, 王瑞光, 陈 宇, 等. LED显示屏高光效高画面填充比光学设计与研究[J]. *发光学报*, 2014, 35(2): 251-256.