

# 大功率 LED 舞台灯的照明设计

肖 思 李 林

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

**摘要** 二次光学是直接决定舞台灯的输出效率、均匀度的重要环节。绿色环保的舞台照明要求 LED 舞台灯能够在增加总光通量的前提下,于 30 m 远处,形成一个 4~6 m 的均匀圆形光斑。而目前市场上的 LED 舞台灯在远距离的照明方面,不论是输出效率还是光斑的均匀性,都难以满足舞台照明的需求。设计了一种照明设计的模型,可以实现较高的输出功率和较均匀的圆形光斑。采用匀光棒、反光棱镜和反光碗的组合,可以比较好地实现远距离的照明要求。且该模型易于加工,最终的输出效率可以达到 26% 左右。

**关键词** 非成像光学;几何光学设计;照明设计

**中图分类号** TN312<sup>+</sup>.8 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100307

## A Designing of LED Stage Lighting for Long Distance

Xiao Si Li Lin

(School of Optoelectronic, Beijing Insititute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** A LED secondary-optics designing is an important step which decides the output efficiency and the uniformity of stage lighting. A green stage lighting requires that LED stage lights can increase the total flux and form a 4~6 m uniform circular spot at 30 m away. However, the LED stage lights currently on the market cannot meet these requirements. This article describes a new model of lighting design which can achieve both higher output power and more uniform circular spot. The model uses a uniform light stick, reflective prism and reflector to meet a longrange requirements. And the final output efficiency can be as high as 26%.

**Key words** nonimaging optics; geometric optical design; illumination design

**OCIS codes** 220.4298; 220.2740; 220.2945

## 1 引 言

目前市场上的舞台灯大多采用传统光源,存在着一些缺点。首先,是耗能的问题。据北京市演出行业协会统计,北京 51 家主要演出过去 3 年的用电量分别是 1432 万、2350 万<sup>[1]</sup>和 2547 万 kWh。这样的能量消耗,显然不符合最近国家所倡导的绿色照明;其次,是散热的问题。舞台使用的卤钨灯把 95% 的电能都转化为热能散发掉了,不仅效率低,造成很大浪费,演员们脸上所感觉到的灼热感更是一个很大的问题。而如果采用大功率的 LED 作为光源,就能很好地解决这些问题。以 2009 年为例,若北京的 51 家剧场舞台均换成 LED 灯,将节电 2038 万 kWh。而 LED 灯也没有灼热感,可以免去演员们频繁补妆之劳<sup>[2]</sup>。

LED 固态半导体照明技术被认为是 21 世纪的

战略节能技术。中国、欧洲和北美的许多国家和城市都已经进行了 LED 照明技术的开发和大力推广,相比于金属卤素灯(MH)和高压钠灯(HPS),LED 灯拥有更长的寿命(大于前者的 5 倍);除此之外,LED 还具有更好的可控性和光效,可以节能 50% 之多。LED 灯的另一个绿色能源的特征是光源本身不含有害物质汞。光学方面,LED 芯片的小光源特性可以比较容易地实现精确的配光和二次光学的优化设计,准确控制光线的方向,把光充分分配到需要照明的地方,防止光污染和眩光<sup>[3]</sup>。

LED 的二次光学设计技术,不同于其他的学科,是一门涵盖非成像光学和三维曲面建模的光学学科,二次光学的设计可以有效解决 LED 舞台灯的出光效率、均匀性等问题,真正实现环保和绿色的照明<sup>[4]</sup>。

**收稿日期**: 2011-01-12; **收到修改稿日期**: 2011-03-04

**基金项目**: 国家 863 计划资助课题。

**作者简介**: 肖 思(1985—),男,硕士研究生,主要从事非成像光学设计及理论等方面的研究。

E-mail: xsxshr1985@163.com

**导师简介**: 李 林(1957—),男,博士,教授,主要从事光电仪器设计、光学设计、光学测量、空间光学及红外仿真等方面的研究。E-mail: li\_lim@263.net

因此,采用大功率 LED 代替传统光源已经成为舞台照明的大趋势。而目前市场上,也已经出现了一些 LED 的舞台灯,这些舞台灯在短距离的照明上,还可以满足要求。但如果是长距离的照明,例如,希望在 30 m 远处,用非常小的角度,形成一个均匀的光斑,就很难达到要求了。而这样的问题一旦得以解决,将成为 LED 节能风暴横扫剧场舞台的重要突破<sup>[5]</sup>。

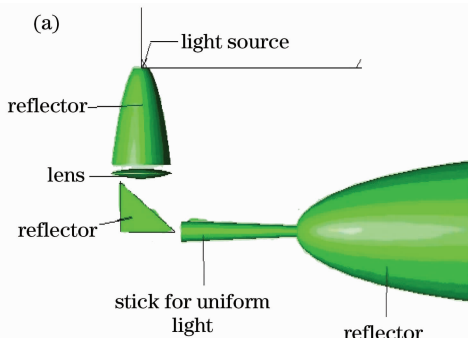
本文以发光角度为 120° 的 LED 光源为例,设计了一个照明系统,使光源在 30 m 处,得到了一个 6 m 左右的均匀光斑。本设计不仅在效率和均匀度上超过了目前市场上的照明系统,而且结构简单,加工方便,成本低廉。

## 2 二次光学照明系统的设计

### 2.1 设计构思

增大总光通量的最直接的办法就是增加光源的数量,那么如何让多个光源“融合”在一起,便是本设计的重点。设计一个进口端大,出口端小的锥形匀光棒。由大端入射的光线,在匀光棒内部每经过一次反射,入射角  $I$  减小圆锥角  $\alpha$  的两倍,直到  $I$  小于临界角而逸出光纤。因此,需要对匀光棒的长度、入口和出口端的大小进行优化设计。匀光棒的进口端大可以方便将多个光源的光线收集在一起,出口端小则是为了可以获得更加均匀的光斑。光棒使用折射率较高的 H-zf52A 光学玻璃,这样可以让更多的人光线发生全发射。光线在匀光棒中进行全反射之后,再出射出来。然后再通过反光碗的反射,使光线以非常小的角度出射。但是,LED 是一个 120° 的发散光源,并且是一个 6 mm 直径的面光源,那么如何让多个光源都进入匀光棒的入口端,就成为了另一个棘手的难题。

使用反光碗和透镜分别对每一个光源进行光源



会聚,使得大部分光线可以进入匀光棒的入口端。在对反光碗和透镜进行优化,使得匀光棒入射端的光斑直径达到要求之后,就开始对光源位置的摆放进行设计了。模型中采用反射棱镜,在不改变成像质量的情况下,让光路改变了 45° 左右。

### 2.2 所采用的光源

如图 1 所示,采用的光源为一个 6 mm 的正方形面光源,呈 120° 发散角均匀发光。



图 1 所使用的光源

Fig. 1 Light source used

## 3 模型介绍

为了能够更全面地展示模型的特点,对比了在不同的光源数量时候,辐照度图的差别。下面将分别介绍单个、2 个、3 个和 4 个光源的模型以及各自的辐照度图。

### 3.1 单个光源的模型介绍

如图 2 所示,模型由 5 部分组成,分别是 2 个反光碗,1 个透镜,1 个反射棱镜和一根匀光棒,其中反光碗为二次曲面,二次曲面的方程为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - [1 + (1 + k)]c^2r^2}} + \sum_{i=1}^N \alpha_i r^i, (1)$$

两个反光碗的中轴线约成 45°, 将模型导入 TracePro 中进行光路模拟。

如图 3 所示,光源由原点发射,经过反光碗反射后,光线大体上平行于  $y$  轴,再通过透镜将光线会

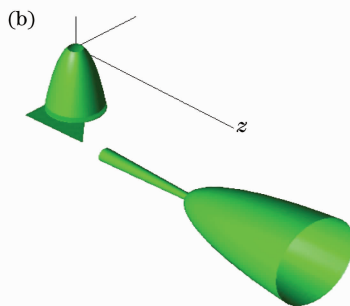


图 2 单个光源的模型。(a)侧面,(b) 45° 俯视

Fig. 2 Model of a single light source. (a) sideview, (b) overlooking view at 45°

聚到聚光棒的入口端,为了使光线改变方向,途中经过了反射棱镜。光线进入匀光棒中,并在匀光棒内发生全发射,再从出口端射出。将匀光棒的出口端放到反光碗的内部,并在反光碗内发生反射,目的是

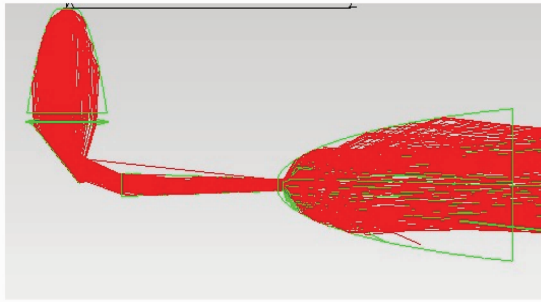


图 3 在 TracePro 中光路模拟的结果

Fig. 3 Result of light path simulation in TracePro

让出射的光线尽量平行。

### 3.2 单个光源的辐照度图

在坐标原点处设置 1 个 6 mm 的正方形面光源,呈  $120^\circ$  均匀发光,追踪 25 万条光线,为了让结果更直观,计算更方便,每条光线的辐射通量假设为 1 W,即从光源发射出的总辐射通量为 250 kW。在 30 m 远处设置一个接收面,图 4 为接收面的辐照度图。

如图 4 所示,最后照射到接收面的总辐射通量为 56684 W,效率为 22.67%。光斑的直径约为 6 m,均匀度差。在图中可以看出,光斑的中间部分并不是最明亮的,明亮处是在坐标  $(0, -1500)$  处。造成这样的原因是光源的主光线不是从光棒的中间垂直进入,而是偏离光棒的中心,从侧面进入。

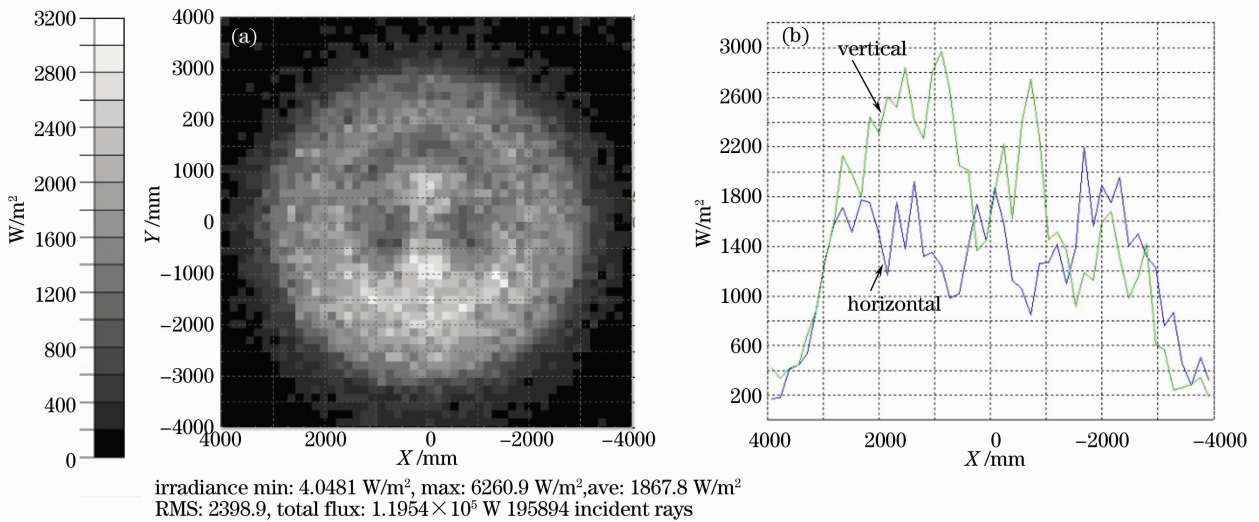
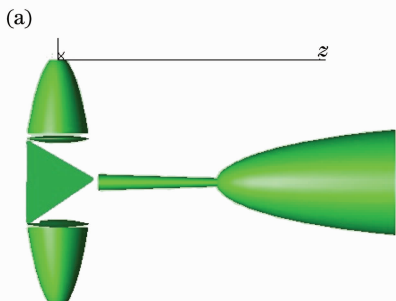


图 4 单个光源的(a)辐照度图及其(b)曲线

Fig. 4 (a) Irradiance map and (b) curve of a single light source

### 3.3 两个光源的模型介绍

如图 5 所示,在单光源模型的基础上,增加了 1 个反光碗,1 个透镜和 1 个反射棱镜。这样就可以使用两个光源,增加了总的光通量。两个光源的位



置是完全相对于匀光棒对称的。将模型导入 TracePro 中模拟光路。

如图 6 所示,增加了 1 个光源之后,总的光通量增加了。

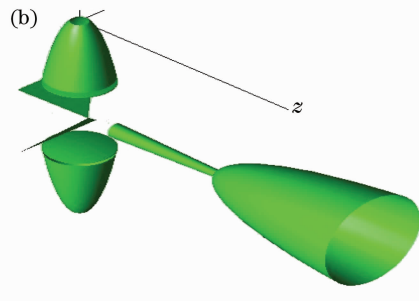


图 5 2 个光源的模型。(a)侧面;(b)45°俯视

Fig. 5 Model of two light sources. (a) Sideview; (b) overlooking view at  $45^\circ$

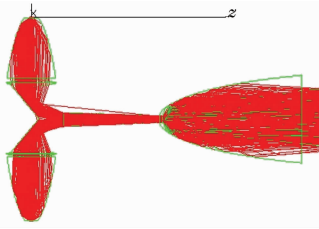


图 6 在 TracePro 中光路模拟的结果

Fig. 6 Result of light path simulation in TracePro

### 3.4 两个光源的辐照度图

如图 7 所示,最后照射到接收面的总辐射通量为 119540 W,效率为 23.9%。光斑的直径约为

6 m,均匀度差。从图中可以明显的看出,光斑的中间部位,依然比较暗,但是最明亮的部位,由原来的 1 个变成了两个,并且相互对称。这就说明,2 个光源的主光线都没有在光棒的中心进入,并且在最后的辐照度图中,各自在上下方形成了对称的亮斑。

### 3.5 3 个光源的模型介绍

如图 8 所示,相比于 2 个光源的模型,又增加了 1 个反光碗,1 个透镜和 1 个反射棱镜,各个反光碗的对称轴的夹角为 120°,3 个反射棱镜组合在一起,成 1 个四面体,四面体的底面为全等三角形,其余 3 个面为等腰三角形。在 TracePro 中模拟光路。

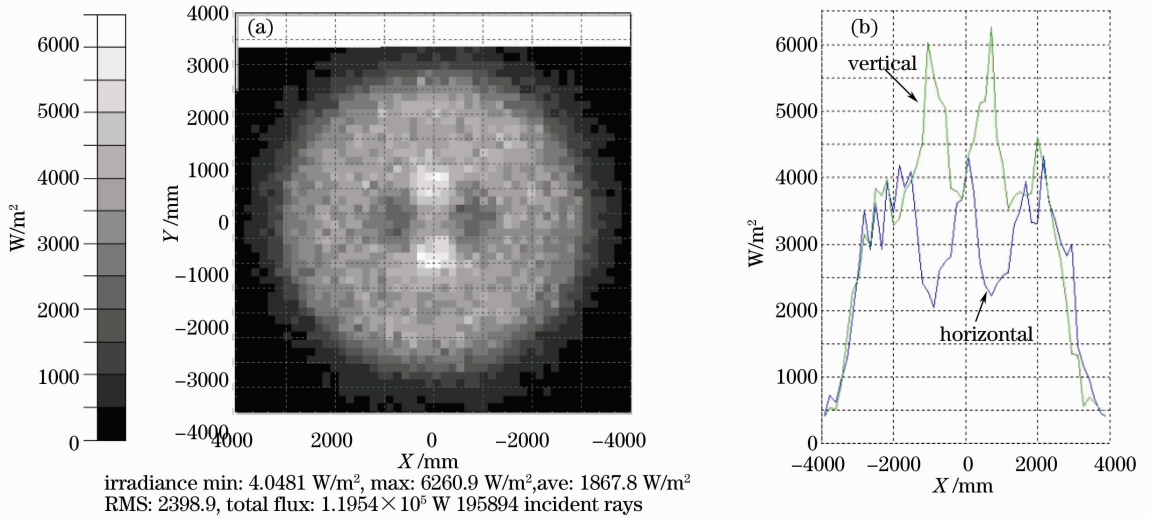


图 7 2 个光源的辐照度图及其曲线。(a)辐照度图; (b)曲线

Fig. 7 (a) Irradiance map and (b) curves of two light sources

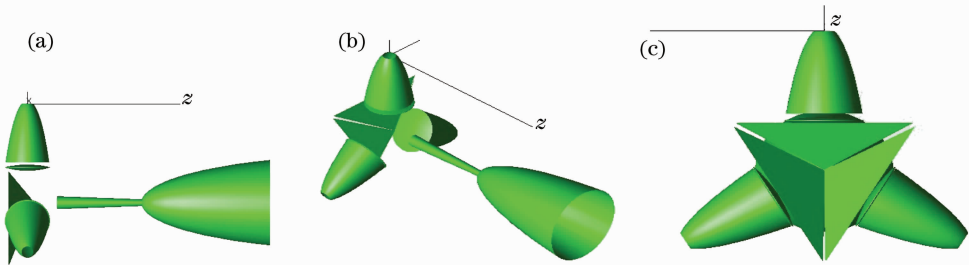


图 8 3 个光源的模型。(a)侧面; (b)45°俯视; (c)底面

Fig. 8 Model of three light sources. (a) Side view; (b) overlooking view at 45°; (c) bottom view

### 3.6 3 个光源的辐照度图

如图 9 所示,增加了 3 个光源时,总的光通量增加了。如图 10 所示,照射到接收面的总辐射通量为 259860 W,效率为 25.986%。光斑的直径约为 6 m。此时光斑的均匀度已经有了很大的改善,在 4 m 内,单点的辐照度平均为 8000 W/m<sup>2</sup>,在 4~6 m 之间,迅速衰减到 10%,即 800 W/m<sup>2</sup>。这样的衰减幅度,符合目前市场的舞台照明要求。在使用了 3 个光源之后,虽然每个光源的主光线都不是从均光

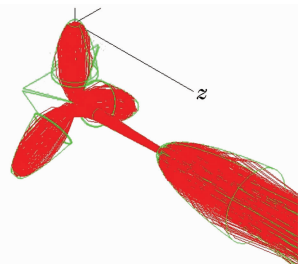


图 9 在 TracePro 中光路模拟的结果

Fig. 9 Result of light path simulation in TracePro

棒的中心进入,但是 3 个光源在最后接收面上所成的像,形成了一个均匀的光斑,这就是采用对称结构

的原因。

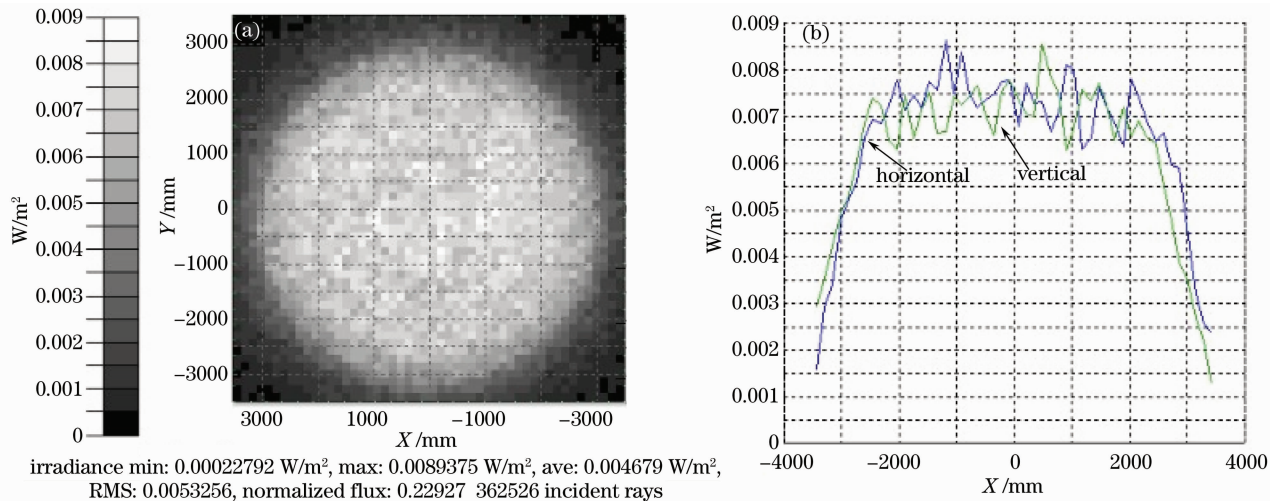


图 10 3 个光源的 (a) 辐照度图及其 (b) 曲线

Fig. 10 (a) Irradiance maps and (b) curves of three light sources

### 3.7 4 个光源的模型介绍

如图 11 所示,相比于 3 个光源的模型,又增加了 1 个反光碗,1 个透镜和 1 个反射棱镜,各个反光

碗的对称轴的夹角为 90°,4 个反射棱镜组合在一起,成 1 个五面体,五面体的底面为正方形,其余 4 个面为等腰直角三角形。将模型导入 TracePro 中。

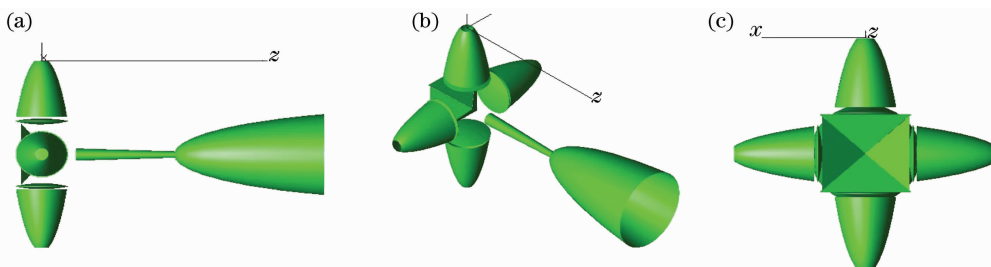


图 11 4 个光源的模型。(a) 侧面, (b) 45° 俯视, (c) 底面

Fig. 11 Model of four light sources. (a) sideview, (b) overlooking view are 45°, (c) bottom view

### 3.8 4 个辐照度图的对比

增加到 4 个光源时,光路模拟结果如图 12 所示。由表 1 可以看出,3 个光源的输出效率要高于其他 3 种。因为 3 个光源所使用的反射棱镜的面积

更大,这样就有更多的光线反射进入匀光棒。如果每个光源使用 70 W 的 LED,3 个光源的输出效率就等于 54.576 W,4 个光源的输出效率等于 64.1956 W。因此,4 个光源的输出效率虽然要低于 3 个光源,但是接收面的总光通量依然是最大的。

### 3.9 四个光源的辐照度图

如图 13 所示,总辐射通量为 229270 W,效率为 22.927%,光斑直径约为 6 m,光斑比较均匀。在 4 m 内,单点的辐照度平均为  $(7.5 \times 10^3)$  7500 W/m<sup>2</sup>,随后在 4~6 m 之间,迅速衰减到 10%,即 750 W/m<sup>2</sup>。如同使用 3 个光源的时候一样,对称的 4 个光源也形成了均匀的光斑。

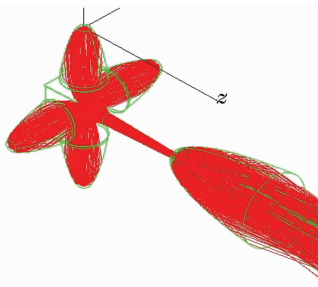


图 12 在 TracePro 中光路模拟的结果

Fig. 12 Result of light path simulation in TracePro

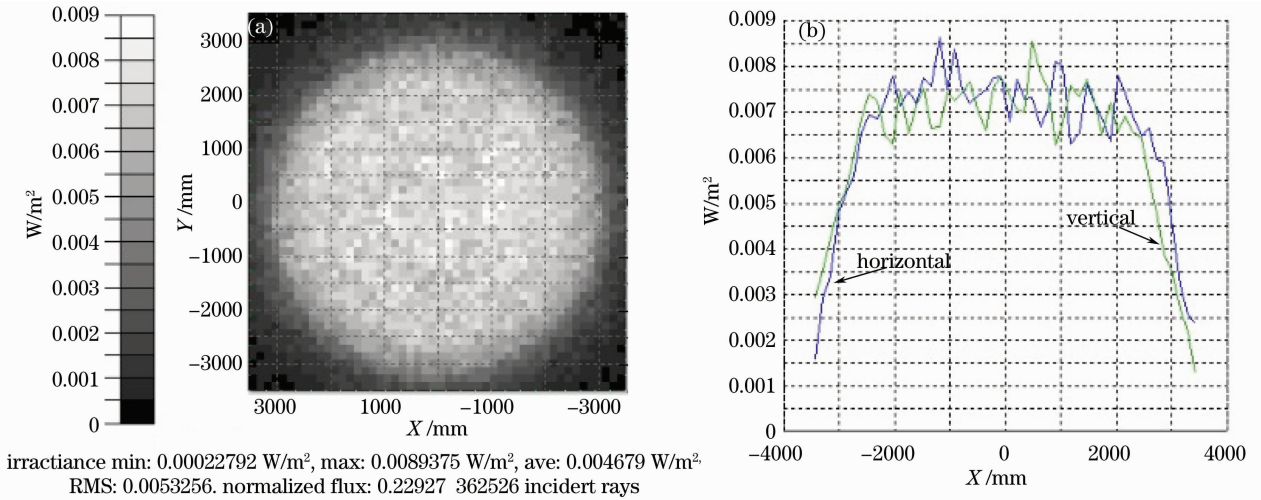


图 13 4 个光源的辐照度图(a)及其(b)曲线  
 Fig. 13 (a) Irradiance maps and its curve

表 1 4 个辐照度图的对比  
 Table 1 Comparison of the four irradiance maps

	Single light source	Double light sources	Triple light sources	Four light sources
Source output efficiency / %	22.67	23.9	25.986	22.927
Uniformity	Nonuniform	Nonuniform	Uniform	Uniform

## 4 结 论

光照度和均匀性是舞台照明的两项重要的指标。本模型采用了多个光源,通过对反光碗和透镜的优化设计,使得大部分光源照射进入匀光棒。通过调整匀光棒的入口端和出口端的大小,让光线在匀光棒中发生 2~3 次的全反射,并在出口端折射出去。最后,对反光碗和匀光棒的位置进行优化设计,使得光斑的大小和均匀度达到要求。在保证均匀性和光照度的前提下,为了便于加工和降低成本,没有使用复杂的光学原件,所有的透镜均为球面透镜。本模型的各个部件的设计是通过 Zemax 软件完成,并在 TracePro 中进行仿真。

### 参 考 文 献

1 Yu Guiying, Jing 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

2 Luo Yi, Zhang Xianpeng, Yang Yi *et al.*. Non-imaging optics and its application in solid state lighting [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, 罗 毅, 张贤鹏, 王 霖 等. 半导体照明中的非成像光学及其应用[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 963~971

3 Li Baicheng, Zhang Dawei, Huang Yuanshen *et al.*. Development of packaging design of high-power white LED [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(9): 35~39  
 李柏承, 张大伟, 黄元申 等. 功率型白光 LED 封装设计的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(9): 35~39

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): 22201  
 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): 22201

5 Liu Muqing, Li Jie, Fang Zhilie. Technology status of light emitting diodes [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(6): 062502  
 方志烈, 刘木清, 李 杰. 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