

[文章编号] 1007-7405(2015)03-0230-06

大功率 LED 路灯二次光学设计的模拟仿真

王敏帅, 黄晓菁, 蔡晓梅, 杨 兰, 郑 凯, 王兴焱

(集美大学理学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 以大功率 LED 路灯配光问题为研究对象, 将二次光学设计和蒙特卡罗研究方法相结合, 提出大功率 LED 路灯的配光设计. 通过 tracepro 仿真实验, 得到了大强度光通量和高匹配光场的大功率 LED 路灯二次光学设计结果. 采用凹槽填涂增反膜的多颗 LED 路灯相比同样输入功率的弧形底面多颗 LED 路灯提高 1.36 倍, 而且空间光场分布更合理, 出光集中在 $\pm 15\%$.

[关键词] 大功率; LED 路灯; 二次光学设计; 优化; 模拟

[中图分类号] O 472.8; O 484.3

[文献标志码] A

Second Optical Design and Optimization for High-power LED Street Lamp

WANG Min-shuai, HUANG Xiao-jing, CAI Xiao-mei, YANG Lan, ZHENG Kai, WANG Xing-yan

(School of Science, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Studying on light distribution of high-power LED (light-emitting diode) street lamp, by combining the second optical design and monte-carlo method, we proposed optimal designs on the light distribution of high-power LED street lamp. Based on the simulation experiment of tracepro, we achieved extraordinary performance of second optical design, which is very intensive flux and high matching light field. Comparing to other LED lamp model, LED lamp model 4 with antireflective notch has 1.36 times more output optical power. And the light distribution is more reasonable around $\pm 15\%$.

Key words: high-power; LED street lamp; second optical design; optimization; simulation

0 引言

目前, 路灯光源以高压气体放电灯为主, 包括高压钠灯、金属卤化物灯等, 同时卤钨灯、荧光灯、低压钠灯等也在广泛使用. 尽管高压钠灯的使用已经相当普遍, 但高压钠灯的低效率、高能耗、光污染等问题仍较为突出. 随着近年来人们环保意识的增强以及能源紧缺的现实, 建立一个优质、高效、经济、舒适、安全可靠、有益环境的照明系统就成为照明领域的发展趋势. 大功率 LED 以定向发光、功耗低、驱动性好、响应速度快、使用寿命长、绿色环保等优势逐渐走进人们的视野, 成为目前世界上最具有替代传统光源的新一代节能光源. 当前, 市面上单颗 LED 光源实际已经可以做到每瓦 100 流明, 采用传统 250 瓦钠灯作光源的路灯, 用 LED 光源代替之后, 只需要 60 多颗 LED 就可以产生相同的亮度, 从而极大地节省了能源的消耗. 大功率 LED 已经逐步取代传统照明, 成为商业照明的新核心. 尤其是大功率 LED 在路灯上的应用, 已经成为城市照明的重要组成部分. 因此, 大

[收稿日期] 2014-05-25

[修回日期] 2014-10-09

[基金项目] 福建省自然科学基金资助项目 (2012J01280); 福建省教育厅基金资助项目 (2013JA13187); 集美大学科研基金项目 (2013C613015)

[作者简介] 王敏帅 (1982—), 男, 讲师, 博士, 从事大功率 LED 及其应用研究.

功率 LED 路灯成为道路照明节能改造的最佳选择^[1-4]。本文采用二次光学设计和蒙特卡罗研究方法相结合，并利用 Tracepro 光学仿真软件，对大功率 LED 路灯进行模拟设计与仿真。

1 设计方法

1.1 TracePro 软件设计

TracePro 仿真软件是一款基于蒙特卡罗法 (Monte Carlo) 的非序列光线追迹软件 (Non-Sequential Ray Tracing)，为美国 Lambda Research 公司开发，主要用于照明设计和杂散光分析。TracePro 通过实体对象来构建光路系统，同时通过计算反射、折射、吸收等行为来模拟光线与实体表面的作用，在 LED 一次和二次配光设计中占有重要地位^[5-7]。

TracePro 使用上只要 5 步：1) 建立几何模型；2) 设置光学材质；3) 定义光源参数；4) 进行光线追迹；5) 分析模拟结果。图 1 为 Tracepro 软件设计的流程图。

- Tracepro 模拟路灯的过程：
- 1) 确定 LED 光源数目，设计 LED 灯的布灯方式；
 - 2) 加反射器或折射器，放置光源在合适的位置；

3) 进行照明计算，包括被照面上光照度的计算，空间各点光强的计算和总的光通量的计算等。首先计算光通量，通过 tracepro 的软件模拟，可以得到辐照到被照面上的光线追踪情况，通过光线的条数计算总的光通量。再通过公式 (1)：

$$I_0 = d\Phi/d\omega, \omega = 4\pi\sin^2\alpha/2,$$

(1)

将光通量的数值除以发光角度的数值，就可以得到空间个点的光强了。式 (1) 中： $d\omega$ 为某一发光方向的立体角； $d\Phi$ 为这个立体角内的光通量； α 是光源的发射半角。

- 4) 检查灯具的配光中的各项参数 (包括光通量、光束角度、功率、灯具效率) 是否满足预定要求；
- 5) 如未达到设计要求，针对配光曲线中尚未满足要求的参数，再次进行结构优化并重新计算，反复修改；
- 6) 通过 4)、5) 两步骤得到优化后的设计结果，包括灯具配光参数中的反射结构参数和布点参数，灯杆参数中的灯杆高度、挑臂长度、灯具倾斜角度等；
- 7) 对计算结果进行评估，确定结果满足标准后，对灯具进行安装调试并验收。

1.2 设计原理与数学模型

首先在 LED 路灯的使用过程中，由于其尺寸相比距离路面的高度很小，所以可以把 LED 光源看作点光源，单位受光面积上所接收的光通量称为光照度，符号为 E ，单位为勒克斯 (lx)。光照度 E 可由下式表示：

$$E = d\Phi/dS = I_0\cos\theta/r^2,$$

(2)

其中： I_0 是 LED 光轴法向光强； dS 为光轴法向单位面积； θ 为 LED 发光面与路面夹角； r 为点光源距路面距离。LED 法向光强与发光角度的关系如式 (1)，由此可知，LED 光轴上的光强要比较大，3 W

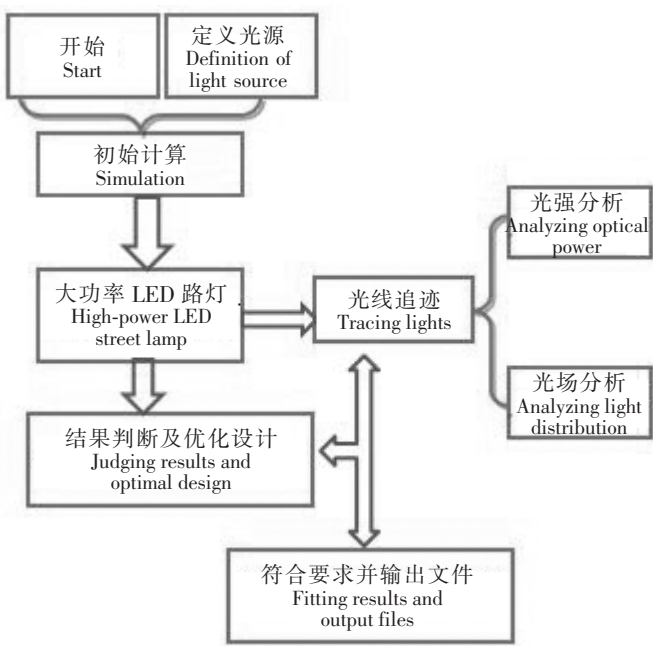


图 1 Tracepro 模拟设计框图

Fig.1 Functional diagram of tracepro simulation and design

白光 LED 光轴上的光强为 1 W 白光 LED 的 2~3 倍. 可以根据式 (1)、(2) 进行计算和仿真, 将 1 W 大功率白光 LED 设置为光源, 得到各种模型的光强数据和光场数据, 从而进行分析.

1.3 结构模型

1.3.1 单颗大功率 LED 路灯结构

大功率 LED 路灯主要由 LED 芯片、反射杯、热沉、树脂透镜等部分组成. 确定 LED 光源数目, 设计 LED 路灯的布灯方式, 每组 LED 的总光通量为 1 W, 并进行发光模拟. 单颗 1 W 大功率 LED 路灯, 如图 2a 称为 LED 模型 1.

1.3.2 多颗大功率 LED 路灯结构

本文同时也进行了多颗 LED 构建大功率的路灯模拟实验, 如图 2b—图 2d 所示. 图 2b 为多颗构成的大功率 LED (称为 LED 模型 2), 可以根据它的图形称为草帽型多颗 LED 路灯. 图 2c、图 2d 为其他不同形状的多颗 LED 路灯模型, 分别称为 LED 模型 3 和模型 4.

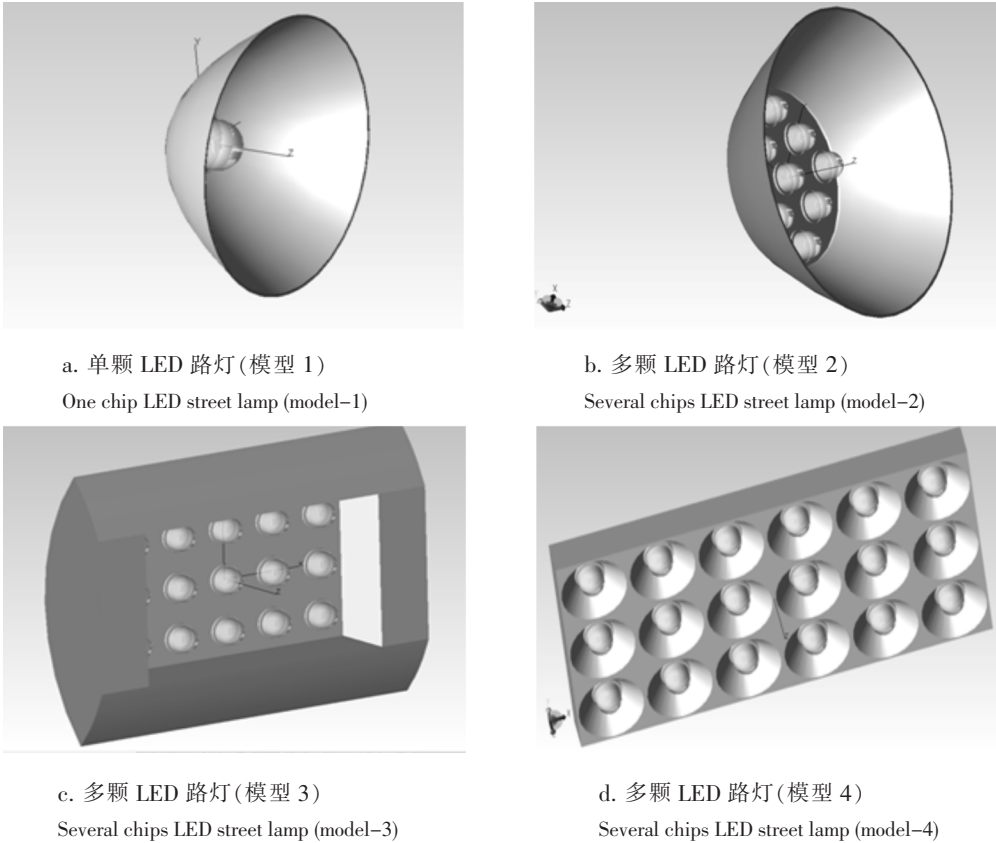


图 2 几种大功率 LED 路灯模型

Fig.2 Several high-power LED street lamp models

2 结果与讨论

首先对不同反射结构和灯具参数的 1 W 大功率 LED 路灯的路面光辐射量进行计算仿真, 并将结果对比分析. 固定灯杆高度为 3 m, 分别设置反射结构为抛物面、平面、半球面、椭圆面, 同时让灯具的倾斜角度在 10°~50°范围内变化. 在 10 m×10 m 的地面范围内采集光辐射量, 数据见表 1.

表 1 不同反射结构、灯具倾角的 1 W 大功率 LED 路灯的光辐射量
Tab.1 The light radiant of 1 W LED street lamps by different reflectors and tilt angles

角度 Angle/°	光辐射量 Light radiant				W/m ²
	抛物面 Paraboloid	平面 Plane face	半球面 Hemisphere face	椭圆面 Ellipsoid	
10	0.020 44	0.020 89	0.019 22	0.020 38	
20	0.019 20	0.019 96	0.018 19	0.019 15	
30	0.017 95	0.018 82	0.017 00	0.017 93	
50	0.014 88	0.015 47	0.013 90	0.014 84	

从表 1 可以看出，对这 4 个不同反射结构的路灯，当灯具的倾斜角度增大时，光辐射量在逐渐降低。这是因为倾斜角度的不断增加，LED 路灯在地面的投射面积也不断地扩大，路面上的平均光辐射度相对于小角度投射时愈来愈小。而另一方面，当对比相同角度时，平面反射结构获得的光辐射量较大，抛物面反射结构次之。从对光线的会聚功能看，抛物面的会聚作用应该是最好的，其次是半球面、椭圆面等。而平面的反射结构从形式看即是芯片的反射罩四周都是平面的。从结果看，平面反射结构的辐射量超过曲面（抛物面等）的辐射量，一个可能原因是平面反射结构利用了更多的光线。曲面的会聚作用其实是多次反射，会有部分光能的损失。表 1 中关于不同反射结构和灯具参数的对比结果是初步的，因此本文通过以下 4 个 1 W 大功率 LED 路灯模型进一步对路灯的发光强度、光场分布进行分析与优化。根据初步试验结果，选定 20°这个灯具的倾斜角度为参考，对 LED 路灯的反射结构和 LED 布点情况进行研究。

模型 1 为单颗 1 W 大功率 LED 路灯采用抛物面的反射结构，它的发光状态即出光角度取决于 LED 芯片位置和反光杯的形状。从图 3a、b 的照度分析和空间光强分析结果看，单颗 LED 路灯光强有些偏低（光强达到 0.87 W），而空间光场的角度看光线过于集中在最中心的 ±3% 范围内。整个的配光情况非常不好，并不适合应用与路灯的使用，因此进行下面几项采用多颗 LED 进行路灯的配光实验。

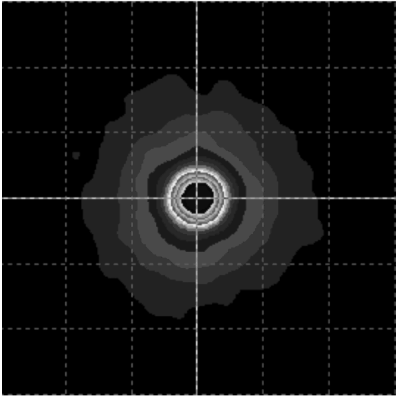
为了更好地达到路灯照明的要求，一个简单的方法是由多个发光二极管组合在一起形成点光源、面光源或者体光源。影响系统发光效果的主要因素有：芯片的个数以及放置的位置、透镜和反射镜的形状、特性和位置。

为了满足照明要求，LED 路灯模型 2 采取 9 个 LED 芯片的组合，如图 2b 所示。选取底面为平面，四周围仍为抛物面的反射结构。从光强分布和照度分布的图 3c、d 可以看出，采用抛物面做反射杯的 9 颗 LED 路灯，光强空间分布出现分叉的两个峰，照度分布也有同样的状况。整体的光强也有些偏低（光强只有 0.5 W，比单颗路灯光强降低 60%），而且从空间光场分布来说是有缺陷的，需要一定的调制才适合大功率 LED 路灯的配光使用。相比于模型 1，模型 2 路灯总光强有所降低，光场分布略宽，而且主光强出现分岔，原因可能为多颗效率芯片的发光经反射后出射光线分散不集中所致。

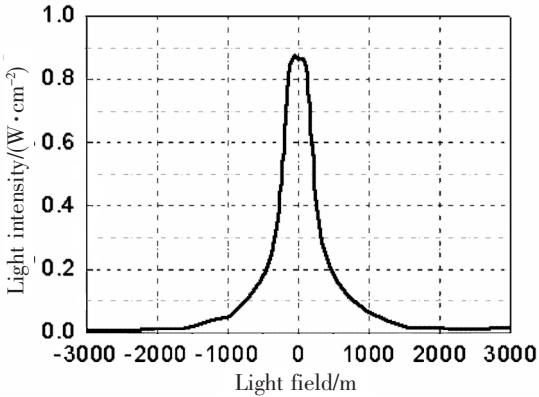
大功率 LED 路灯模型 3 由 12 颗 LED 芯片组成，具有不同于模型 1、2 的反射结构，布灯方式上保持芯片的间距和模型 2 相同。对大功率 LED 模型 3 进行光强和照明计算，包括被照面上光照度的计算和空间各点光强的计算。

图 4a、图 4b 为模型 3 路灯的光场和光强分布图，从结果看，与 LED 路灯模型 1、2 相比，不仅光强得到很大提高（达到 1.25 W，比单颗路灯光强提高 47%），空间光场分布也得到极大优化。其反射结构为：底面是弧形，四周为平面。因为弧形底面和平面四周的结构限制使得多颗芯片出光呈现阶梯式。

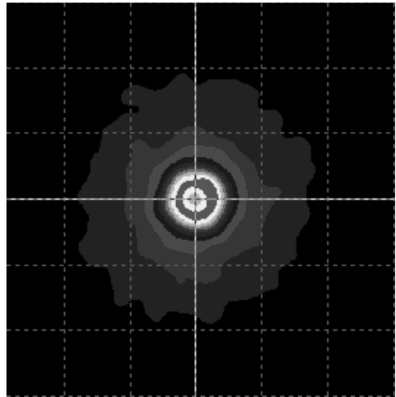
对 LED 路灯模型 4 进行光场和照明计算。模型 4 的 LED 路灯的反射结构为四周和底面都是平面的结构，LED 光源的数目为 18 颗。同时对布灯参数略作调整，将芯片间距拉大为模型 2、3 间距的 1.2 倍，同时在单颗芯片四周设置小凹槽，一方面可以增加 LED 芯片的散热性能，另一方面可以对凹



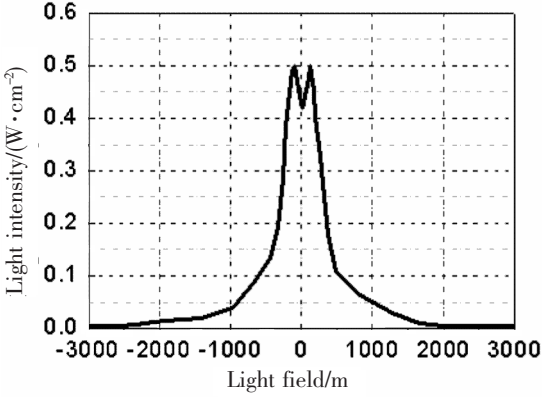
a. 单颗 LED 路灯模型 1 照度图
The light field diagram of model-1



b. 单颗 LED 路灯模型 1 空间光场图
The illumination diagram of model-1



c. 多颗 LED 路灯模型 2 照度图
The illumination diagram of model-2



d. 多颗 LED 路灯模型 2 空间光场图
The light field diagram of model-2

图 3 大功率 LED 路灯模型 1 和模型 2 的仿真结果

Fig.3 The simulation result of model-1 and model-2

槽填充增反膜增加反射。

图 4c、图 4d 为模型 4 路灯光场和照度分布图。从该结果可看出，模型 4 对光强提高很大，达到 1.7 W，是单颗路灯光强的 2 倍，是模型 3 路灯光强的 1.36 倍，空间光场分布也得到极大优化，出光集中在 $\pm 15\%$ 左右。这说明，采用四周平面结构和单颗芯片四周的微观结构对优化路灯光场分布是有好处的。

3 结论

本文从大功率 LED 路灯的二次光学设计角度出发，首先将 LED 路灯的基本的反射结构和灯具参数进行初步的模拟计算，结果表明，表面平面和抛物面的反射结构的路灯光辐射量比较高。重点考察了 4 种不同反射结构和布灯模式的 LED 路灯，从中得知抛物面单颗和平底多颗 LED 路灯光场分布和发光强度并不适合实际大功率 LED 路灯的使用。而采用大功率 LED 路灯的模型 3 和 4 对路灯的光强的提高都较大，模型 4 由于其四周平面结构和单颗细微结构的结果最好，光强最高可达抛物面单颗型路灯光强的 2 倍，而且光场分布更加符合路灯的使用。

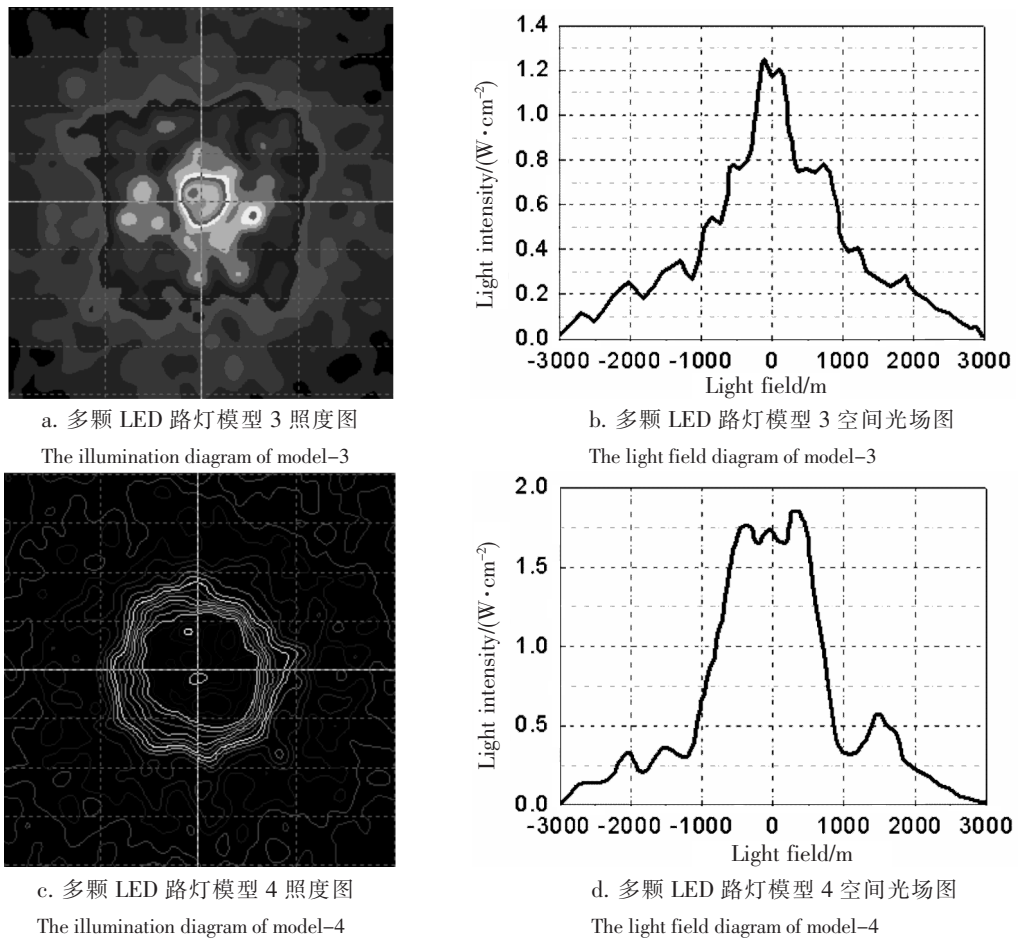


图 4 大功率 LED 路灯模型 3 和模型 4 的仿真结果
Fig.4 The simulation result of model-3 and model-4

[参 考 文 献]

[1] ZHANG W, XUE J S, ZHOU X W, et al. Effect of Si doping in wells of AlGaIn/GaN superlattice on the characteristics of epitaxial layer [J]. Chinese Physics B, 2012, 27(2): 077103-077107.

[2] WU Y, ZHANG L, LIANG C, et al. Catalytic growth and photoluminescence properties of semiconductor single crystal ZnS nanowires [J]. Chemical Physics Letters, 2002, 357(4): 314-318.

[3] 陈波, 李伟平, 黄杨程. 一款 LED 后位灯的光学设计与仿真 [J]. 光学仪器, 2006, 28(5): 37-41.

[4] 李澄, 李农. 非成像光学应用于 LED 照明研究 [J]. 照明工程学报, 2011, 22(5): 90-94.

[5] 顾方嘉. 日本 LED 照明技术的开发 [J]. 电子世界, 2007, 48(4): 52-53.

[6] 辛迪, 刘华, 卢振武, 等. 可变视场角 LED 照明光学系统设计 [J]. 光学学报, 2013, 5(5): 34-37.

[7] 王晓媛, 奇维贵. 我国城市道路照明节电技术研究与应用 [J]. 照明工程学报, 2010(1): 1-4.

(责任编辑 马建华 英文审校 黄振坤)