

用于 LED 准直的 TIR 透镜与反光杯效果研究

王海洋, 金志樑, 王沛沛, 熊大曦*

中国科学院苏州生物医学工程技术研究所光健康中心, 江苏 苏州 215163

摘要 为了对比 TIR (Total Internal Reflection) 透镜和自由曲面反光杯用于 LED (Light-Emitting Diode) 光源准直的效果, 基于 TracePro 分别仿真 LED 光源在相同口径的 TIR 透镜和反光杯下的有效射程和光斑直径, 对比相同口径的 TIR 透镜和反光杯下的准直特点。研究结果表明, 随着口径的增加, 射程均有所增加, 光线形态经历三个阶段, 对应光斑有三种形态, 即矩形形态、复峰形态和驼峰形态; 光源经过反光杯后的光斑直径更小且存在滞后效应; LED 光源经过 TIR 透镜后的射程更远, 但相差较小; 当光斑口径过大时, 两种光学系统均形成光环。

关键词 光学设计; LED; TIR 透镜; 反光杯; 仿真

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1922001

Study on Effect of TIR Lens and Reflector for LED Collimation

Wang Haiyang, Jin Zhiliang, Wang Peipei, Xiong Daxi*

Light Health Center, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology,
Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China

Abstract In order to compare the collimation effect of TIR (Total Internal Reflection) lens and free-form reflector for LED (Light-Emitting Diode) light source. Based on TracePro, the effective range and spot diameter of LED light source are simulated under TIR lens and reflector of the same caliber, and the collimation characteristics of TIR lens and reflector of the same caliber are compared. The results show that with the increase of aperture, the range increases, and the light pattern goes through three stages, and the corresponding light spot has three forms, namely rectangular shape, double peak shape and hump shape. After the light source passes through the reflector, the spot diameter is smaller and there is lag effect. The range of LED light source after passing through the TIR lens is longer, but the difference is small. When the aperture of the spot is too large, both optical systems form rings.

Key words optical design; LED; TIR lens; reflector; simulation

OCIS codes 220.2740; 220.2945

1 引言

在远程照明领域, 发光二极管 (Light-Emitting Diode, LED)^[1] 以其寿命长、成本低和配光方便等优点逐渐成为主流光源之一, 而且得到了越来越多的应用。LED 输出光的发散角较大, 在远程照明的过程中能量较分散, 而且在目标面上的照度较低, 很

难满足照明要求, 因此将 LED 应用于手电筒和信号投射灯需要合理的二次光学设计以减小 LED 输出光的发散角。

实际应用中, 通常使用透镜或反光杯对 LED 进行准直, 目前已经有大量研究对两种配光器件进行优化。TIR (Total Internal Reflection) 透镜是将小角度的光通过折射面进行准直, 将大角度的光通过反

收稿日期: 2021-01-12; 修回日期: 2021-01-13; 录用日期: 2021-01-29

通信作者: hoijuon@cc.edu.rs

射面进行准直^[2-5],从而得到准平行光。根据自由曲面数量的不同,TIR透镜分为单自由曲面TIR透镜和双自由曲面TIR透镜。目前广泛应用的TIR透镜多是由PMMA(Polymethyl Methacrylate)制成,折射率均为1.5。由于透镜是自由曲线的设计,在实际加工过程中无论是在设计或制造过程中产生的微小偏差,还是透镜中存在的少量杂质,都会对光线的传播方向和能量分布产生很大的影响。反光杯是通过反射面将光线射出,通常通过镀膜来提高反射率,具有结构简单、加工方便和成本低的优点。

然而,现有文献关注于两种配光方式在结构上的优化,缺少关于准直效果的对比评价。两种配光方式均对于点光源的准直效果最优,而LED是朗伯体光源,其光束角度可达180°^[6-7]。为了对比TIR透镜和自由曲面反光杯用于LED准直的效果,本文基于TracePro仿真了LED在相同口径的TIR透镜和反光杯下的有效射程,通过改变光源尺寸和配光结构直径来分析在相同口径的TIR透镜和反光杯下的射程变化,进而评价两种配光结构的优劣,弥补相关领域的空白,为远程照明领域对于LED光源的选择提供指导。

2 设计与仿真

2.1 TIR透镜

图1为本文采用的含单透射自由曲面的TIR透镜,其中 Φ_{TIR} 为TIR透镜出射面的口径, H_{TIR} 为TIR透镜出射面到焦点的距离。这种结构的内表面采用球面的设计,透射部分和反射部分的外表面均使用自由曲面,这种结构更为简单,加工容易,具有更强的实用性。本文根据文献[8]中TIR透镜透射与反射部分的计算方法,设计不同尺寸的含单

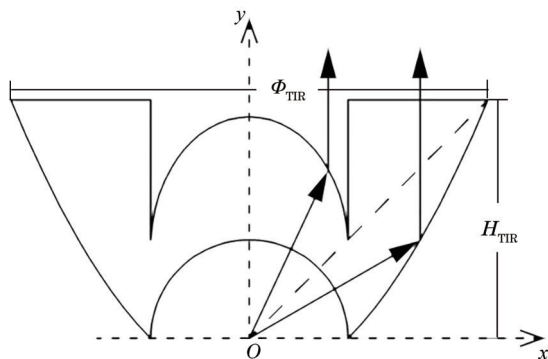


图1 TIR透镜的示意图
Fig. 1 Diagram of TIR lens

透射自由曲面的TIR透镜。本文给定TIR透镜的材料为PMMA,折射率为1.49。

2.2 反光杯

图2为建立的坐标系,光源为原点,其中 Φ_R 为反光杯的出射口径, H_R 为反光杯出射面到焦点的距离。根据文献[8]中TIR透镜反射部分的计算方法,设计不同尺寸的自由曲面反光杯。本文在仿真过程中设定反光杯为“mirror”,反射率为94.87%。

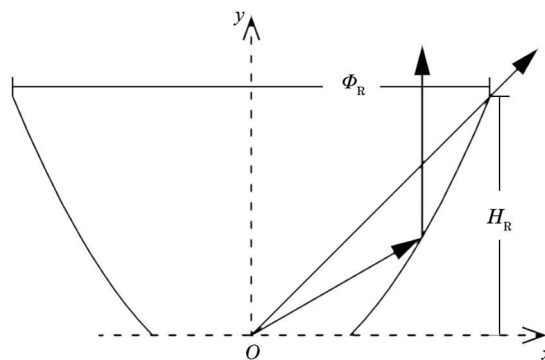


图2 反光杯的示意图
Fig. 2 Diagram of reflector

2.3 光源

本文使用朗伯体发光的LED作为光源,发散角为180°,光源尺寸为1 mm×1 mm,光通量为250 lm。LED光线如图3所示,其中I为任意方向上的光强, I_0 为LED法向上的最大光强, θ 为LED法向上的最大光强。

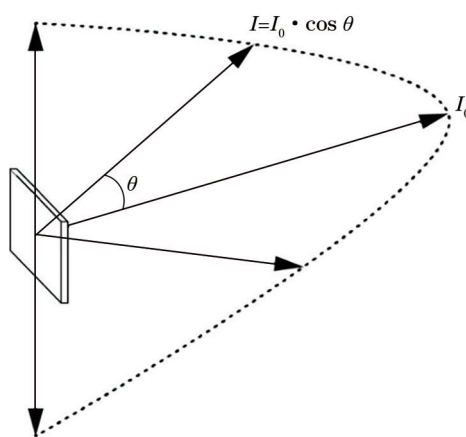


图3 LED光线示意图
Fig. 3 Light of LED

2.4 射程

本文根据LED手电筒ANSI/PLATO FL-1-2019标准的定义,寻找照度减小到0.25 lux的目标面,将光源与目标的距离定义为射程。

2.5 光斑直径

本文使用半峰全宽 (Full Width at Half Maxima, FWHM) 定义光斑直径, 即光斑照度降低至峰值一半处的光斑直径。在非成像光学中, 使用光学扩展量来描述具有一定孔径角和截面积的光束的几何特性, 光学扩展量是光束所通过的面积和光束所占有的立体角的积分, 即 $E = n^2 \iint \cos \theta dA d\omega$, 其中 n 为介质的折射率, A 为面积, ω 为立体角。对于不考虑由散射和吸收造成能量损失的理想光学系统, 光束经过光学系统后的光学扩展量守恒。显而易见, 光学系统的截面积越大, 光束的立体角越小, 在相同距离上的光斑尺寸也随着口径的增加而减小。本文为了保证两种配光方式的可比性, 分别比较距离光源 100 m 处和光学系统口径的 1 万倍距离处的光斑直径变化。

3 实验结果

本文给定 TIR 透镜的口径和高度与反光杯相同, 在 10~500 mm 的口径之间仿真 TIR 透镜和反光杯的准直效果, 设定 TIR 透镜的反射部分与透射部分的空间占比均为 50%, 通过给定口径来计算透镜高度, 再利用照度第一定律来计算射程, 根据 2.5 节的定义来计算光斑直径, 结果如表 1 所示, 其中光斑直径是在光学系统口径的 1 万倍距离处的数据。

表 1 仿真结果

Table 1 Simulation results

Diameter / mm	Hight / mm	TIR lens /m		Reflector /m	
		Spot diameter	Range	Spot diameter	Range
10	5.0	17.42	147.0	15.31	137.8
20	10.0	17.11	293.9	15.39	274.2
30	15.0	16.95	440.9	15.39	411.3
50	25.0	17.27	731.4	15.47	681.9
75	37.5	17.50	1097.2	15.55	1017.3
100	50.0	18.20	1449.1	15.63	1356.5
150	75.0	19.45	2173.7	16.72	2012.5
200	100.0	20.23	2828.4	17.50	2653.3
250	125.0	24.61	2958.0	16.95	3278.7
300	150.0	27.66	—	18.98	3979.9
350	175.0	30.35	—	22.62	3897.4
400	200.0	32.70	—	26.37	—
450	225.0	35.04	—	27.77	—
500	250.0	37.15	—	29.18	—
1000	500.0	60.47	—	44.53	—

3.1 射 程

根据表 1 的数据来绘制射程与光学系统口径的关系, 如图 4 所示。从图 4 可以看到, 当光斑直径为小口径时, 射程与口径呈线性关系, 随着口径的增加, 光源经过 TIR 透镜和反光杯后的射程均增加; 相同口径下, LED 经过 TIR 透镜后的射程更远, 但两种配光方法的射程相差较小; 直到口径达到一定值后, 光源经过两种光学系统后的射程开始下降; TIR 透镜的射程极值所对应的口径为 200 mm, 反光杯的射程极值所对应的口径为 300 mm; 继续增加口径, 两种光学系统会形成光环, 则光斑中心照度变低。

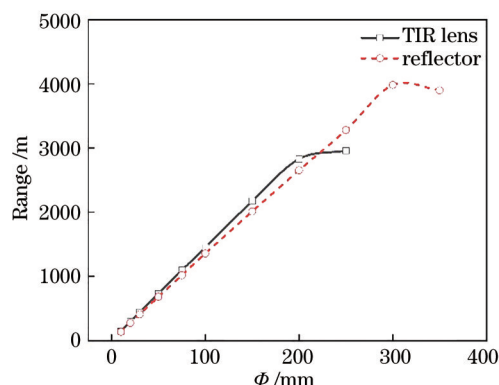


图 4 TIR 透镜和反光杯在不同口径下的射程

Fig. 4 Range of TIR lenses and reflector at different calibres

3.2 光 斑

图 5 为 TIR 透镜与反光杯在不同距离处的光斑直径 φ 和光斑直径对口径 ϕ 的导数, 其中图 5(a) 为距光源 100 m 处光斑直径和光斑直径对口径的导数, 图 5(b) 为光学系统口径的 1 万倍距离处的光斑直径和光斑直径对口径的导数。

从图 5 可以看到, 相同条件下, 光源经过 TIR 透镜后的光斑直径稍大一些, 距离光源 100 m 处的光斑直径的变化规律与光学系统口径的 1 万倍距离处基本相同, 若与光学系统口径的 1 万倍距离处的光斑直径相同, 则要求反光杯光学系统的口径更大, 如图 6 所示。

从图 5(a) 可以看到, 当口径小于 250 mm 时, 距离光源 100 m 处的光斑直径快速减小; 当口径从 250 mm 增加到 500 mm 时, 光斑直径呈先增加后基本保持不变的趋势; 当口径继续增加时, 光斑直径继续增大。从图 5(b) 可以看到, 随着口径的增加, 光学系统口径的 1 万倍距离处的光斑直径总体上保持增加的趋势, 曲线呈三段式增加态势, 即小口径

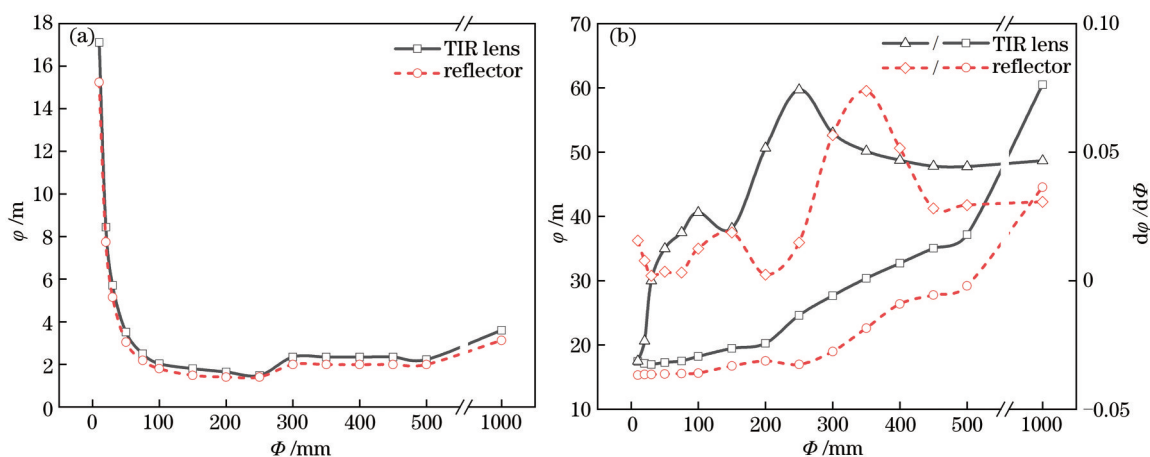


图 5 TIR 透镜与反光杯在不同距离处的光斑直径。(a) 100 m;(b)光学系统口径的 1 万倍

Fig. 5 Spot diameters of TIR lens and reflector at different distances. (a) 100 m; (b) 1×10^4 times aperture of optical system

下,光斑直径的增加趋势较缓;中等口径下,光斑直径的增加趋势较快;大口径下,光斑直径急速增加,曲线的导数也体现了这一点。

绘制光学系统口径的 1 万倍距离处的光斑照度

曲线如图 6 所示,其中连线的两幅图表明照度分布曲线规律相同。从图 6 可以看到,照度分布曲线有三种形态,即矩形形态、复峰形态和驼峰形态,分别对应于图 5(b)的三个阶段。

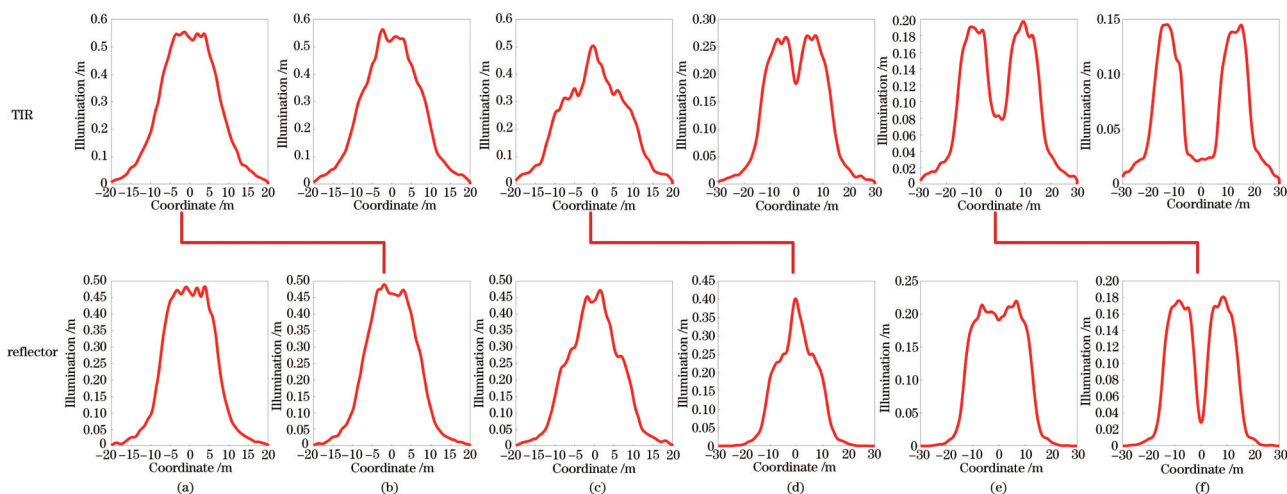


图 6 不同情况下的照度分布曲线。(a) $\Phi_{TIR}=50$ mm, $H_{TIR}=25$ mm, 距离为 500 m; (b) $\Phi_{TIR}=100$ mm, $H_{TIR}=50$ mm, 距离为 1 km; (c) $\Phi_{TIR}=200$ mm, $H_{TIR}=100$ mm, 距离为 2 km; (d) $\Phi_{TIR}=300$ mm, $H_{TIR}=150$ mm, 距离为 3 km; (e) $\Phi_{TIR}=400$ mm, $H_{TIR}=200$ mm, 距离为 4 km; (f) $\Phi_{TIR}=500$ mm, $H_{TIR}=250$ mm, 距离为 5 km

Fig. 6 Illuminance distribution curves under different conditions. (a) $\Phi_{TIR}=50$ mm, $H_{TIR}=25$ mm, distance is 500 m; (b) $\Phi_{TIR}=100$ mm, $H_{TIR}=50$ mm, distance is 1 km; (c) $\Phi_{TIR}=200$ mm, $H_{TIR}=100$ mm, distance is 2 km; (d) $\Phi_{TIR}=300$ mm, $H_{TIR}=150$ mm, distance is 3 km; (e) $\Phi_{TIR}=400$ mm, $H_{TIR}=200$ mm, distance is 4 km; (f) $\Phi_{TIR}=500$ mm, $H_{TIR}=250$ mm, distance is 5 km

矩形形态:小口径下,照度曲线类似于矩形,不外加匀光系统即可达到一定匀光的目的,适合照明使用。随着口径的增加,光线的发散角逐渐减小,相同距离下的光斑直径减小,照度增加。

复峰形态:中等口径下,照度曲线出现一个主峰,伴随两个副峰,主峰位于光斑中心处,但与矩形形态相比,最大照度开始降低(如图 4 所示),呈现出

带有亮环的光斑。随着口径的增加,主峰强度逐渐降低,副峰强度逐渐增加,光斑直径逐渐增加。

驼峰形态:大口径下,照度曲线呈现驼峰形态,光斑中心照度比周围低,出现暗斑,即光斑以光环形态呈现。随着口径的增加,光斑直径逐渐增加,中心暗斑直径逐渐增加。观察近距离的光斑(未给出)可知,光斑呈现矩形形态且发散角小,但已不适

合远程照明,因此无法通过增加光学系统的口径来实现更远距离的照明。

4 分析与讨论

TIR 透镜的基本工作原理与反光杯基本相同, TIR 透镜相比于反光杯而言具有更大的控制权, 因为 TIR 透镜有透射面, 光源的每条光线都经过透镜折射, 而光源的很大一部分光线在经过反光杯的过程中不接触反射面, 如图 7 所示, 这是 TIR 透镜和反光杯的本质区别。因此, 反光杯的光型没有 TIR 透镜锐利, 反光杯的副光斑更大, 而 TIR 透镜可以产生软边光束, 光的强度从中心向外逐渐减弱, 从而平滑地融入环境。但是, 由于本文关注的是光线准直和远程照明, 而目标面距离光源和光学系统足够大, 所以未经过反光杯反射的光线在目标面上的照度极低, 因此图 6 未表现出反光杯的副光斑。

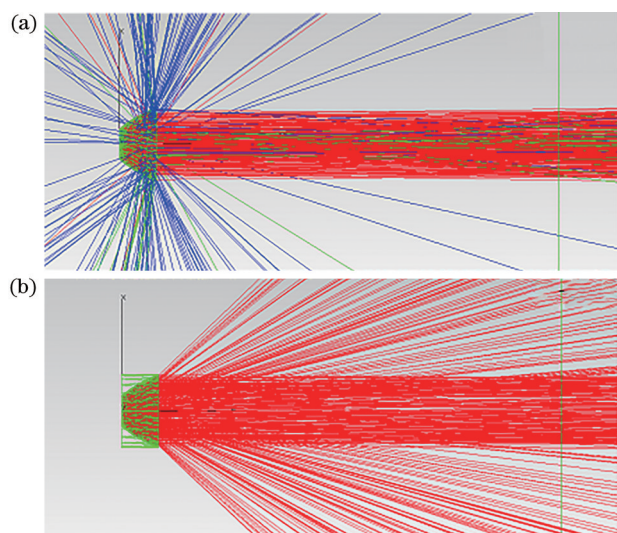


图 7 TIR 透镜与反光杯的光线图。(a)TIR 透镜;(b)反光杯
Fig. 7 Ray diagram of TIR lens and reflector. (a) TIR lens; (b) reflector

通常 TIR 透镜是轴对称的设计结构, 为此可以提供漂亮的圆形光斑, 既可以组合成多颗 LED 成为阵列透镜, 也可以单颗安装来控制光线。但是 TIR 透镜的加工难度大, 通常采用注塑工艺, 目前市场上 TIR 透镜的主要材料是 PMMA, 其具有良好的可塑性和高透光率(高达 93%), 但耐温性相对较低, 只有 90 °C 左右。TIR 透镜由自由曲面构成, 加工难度相对较大, 微小偏差就会对光线的传播方向产生很大的影响, 限制了 TIR 的应用。

反光杯的加工过程简单, 容许误差更大, 在非成像领域的应用更加广泛。反光杯分为金属反光

杯和塑料反光杯。其中金属反光杯需要冲压打磨, 成本低, 耐温, 经常用于低的品位照明; 塑料反光杯需一次性脱模, 光学精度高, 成本适中, 常用于要求高的低温照明。但是, 即使反光杯的 H_r 值很大, 也会有光线在经过反光杯的过程中不接触反射面, 从而导致能量损失, 而且有时会产生不必要的眩光。

LED 照明必须尽可能多地利用 LED 所发出的光以发挥其最大潜力, 而光学系统的设计是非常重要的, 但是必须在光的强度和扩散, 以及光学系统成本、尺寸和组装方面妥协。因此, 在实际应用中选择 TIR 透镜还是反光杯主要取决于需求, 即想要达到什么效果, 只要达到预期的光学效果就是最好的二次光学设计。

5 结 论

本文基于 TracePro 分别仿真 LED 光源在相同口径的自由曲面反光杯和 TIR 透镜下的有效射程。研究表明, 当光斑直径为小口径时, 射程与口径呈线性关系; 随着口径的增加, 射程逐渐增加; 相同口径下, LED 经过 TIR 透镜后的射程更远, 但与反光杯相差较小; 口径达到一定值后, 两种光学系统会形成光环, 光斑中心照度变低; 随着口径的增加, 光线形态有三个阶段, 光斑有三种形态, 即矩形形态、复峰形态和驼峰形态; 相同条件下光源经过 TIR 透镜后的光斑直径稍大一些。考虑到 TIR 透镜的加工工艺和加工成本, 反光杯比 TIR 透镜更适宜应用在非成像领域。

参 考 文 献

- [1] Cheng Y K, Cheng K W E. General study for using LED to replace traditional lighting devices[C]//2006 2nd International Conference on Power Electronics Systems and Applications, November 12-14, 2006, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2006: 173-177.
- [2] Parkyn W A, Pelka D G. New TIR lens applications for light-emitting diodes[J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3139: 135-140.
- [3] Hwang J H, Shin D M, Gong D W, et al. P-121: enhancement of brightness and uniformity by LED backlight using a total internal reflection (TIR) lens [J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2008, 39(1): 1645-1647.
- [4] Parkyn W A, Falicoff W, Minano J C, et al. Off-axis TIR lens for conformal luminaires[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5186: 56-60.

- [5] Chen C, Zhang X H, Liu D H. Design of optical system for collimating light of LED uniformly[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2015, 27(4): 103-107.
陈琛, 张晓晖, 刘典宏. LED均匀准直光学系统设计[J]. 海军工程大学学报, 2015, 27(4): 103-107.
- [6] Wang L, Qian K, Luo Y. Discontinuous free-form lens design for prescribed irradiance[J]. Applied Optics, 2007, 46(18): 3716-3723.
- [7] Ye R N. The discnsion of LED lamp used in urban lighting association[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2009, 20(S1): 83-91.
叶荣南. LED路灯用于城市道路照明的探讨[J]. 照明工程学报, 2009, 20(S1): 83-91.
- [8] Su Z P. Design method and example of non imaging optical system[M]. Beijing: China Machine Press, 2017: 10-14.
苏宙平. 非成像光学系统设计方法与实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 10-14.