

激光与光电子学进展

准直照明系统中光源参数对其性能的影响分析

康学亮^{1*}, 任婷婷¹, 葛瑞婷¹, 石成相¹, 王丽^{1,2}, 张白¹¹北方民族大学电气信息工程学院, 宁夏 银川 750021;²合肥工业大学机械工程学院, 安徽 合肥 230009

摘要 尽可能地增大出射光强, 提高光通量利用率, 是准直照明系统二次光学设计的研究目标。分别针对纯折射型和全内反射型的准直照明系统, 研究了光源参数对其照明性能的影响, 从理论上推导了系统出射光强、光通量利用率与光源出射度和配光曲线指数之间关系的表达式, 并进行了实验验证。研究表明, 系统出射光强与光源出射度成正比。光源配光曲线指数较小时, 相比纯折射型准直照明系统, 全内反射型准直照明系统的光通量利用率更高、出射光强更大、照明范围更广; 但当光源配光曲线指数较大时, 纯折射型准直照明系统具有更大的出射光强和更优的光斑陡边性。该结论可为准直照明系统二次光学设计中光源参数与配光元件结构的匹配优化提供理论依据。

关键词 准直照明; 二次光学设计; 光源参数; 出射光强; 光通量利用率

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222774

Analysis of Influence of Source Parameters on Performance of Collimating Illumination System

Kang Xueliang^{1*}, Ren Tingting¹, Ge Ruiting¹, Shi Chengxiang¹, Wang Li^{1,2}, Zhang Bai¹¹School of Electrical & Information Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;²School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China

Abstract The objective of the secondary optical design of a collimating illumination system is to increase the outgoing light intensity and improve flux utilization. In this study, the influence of the source parameters on the illumination performance of pure-refraction-type and total-internal-reflection-type collimating illumination systems are investigated. The expressions for the relationship between the system's outgoing light intensity, flux utilization, source luminous exitance, and light distribution curve index are derived theoretically and verified by experiments. The results show that the system's outgoing light intensity is proportional to the source luminous exitance. For the total-internal-reflection-type collimating illumination system, a small light distribution curve index leads to a higher light flux utilization, larger outgoing light intensity, and wider lighting range compared to those of the pure-refraction-type collimating illumination system. In contrast, a large light distribution curve index leads to a larger outgoing light intensity and better spot slope in the pure-refraction-type collimating illumination system. This conclusion can provide a theoretical basis for matching and optimizing the source parameters and light distribution element structure in the secondary optical design of collimating illumination systems.

Key words collimating illumination; secondary optical design; source parameter; outgoing light intensity; light flux utilization

1 引言

发光二极管(Light emitting diode, LED)作为一种半导体光源有着诸多优点,在指示、背光、传统照明

和特种照明等领域的应用越来越广泛。然而,在大多数场合中,为了达成照明要求,需要对LED进行二次光学设计^[1-4],即配光设计。近些年来,随着大功率LED制造技术的成熟和大功率LED性能的提升,以其

收稿日期: 2022-10-13; 修回日期: 2022-10-17; 录用日期: 2022-11-15; 网络首发日期: 2022-11-21

基金项目: 宁夏自然科学基金(2021AAC03214)、北方民族大学中央高校基本科研业务费专项资金(FWNX02)、北方民族大学研究生创新项目(YCX22124)、国家自然科学基金(11564001)

通信作者: *wnkanger@163.com

为光源的准直照明系统的二次光学设计成为照明光学中的研究热点^[5-6]。

在准直照明的二次光学设计中,单自由曲面平凸透镜和全内反射(Total-internal-reflection, TIR)透镜是 2 种最为典型的准直配光元件。已有研究证明,平凸透镜结构简单,易于加工,以其为配光元件的纯折射型准直照明系统所产生的光斑照度均匀性非常优异,陡边性好,但受到透镜口径的限制,其光通量利用率较低^[7-8]。而理论上 TIR 透镜可收集 LED 光源发出的全部光线,以其为配光元件的 TIR 型准直照明系统具有极高的光源光通量利用率^[9-13]。因此,一经提出,TIR 透镜就被认为是最有潜力的准直配光元件。随后,又有许多针对 TIR 透镜的改进结构或优化方法被提出^[14-15]。此外,同步多曲面(Simultaneous multiple surfaces, SMS)法^[16-19]以及复合抛物面(Compound parabolic concentrator, CPC)结合 SMS 法^[20-23]也被用来实现准直照明的二次光学设计。

综上所述,当前关于准直照明二次光学设计的研究大多集中于配光元件的设计优化或自由曲面生成方法的革新。然而,在准直照明系统中,除了配光元件,光源的参数也必然影响准直照明系统的性能。因此,从理论上探讨准直照明系统的照明性能参数与光源特性参数之间的关系,对于选择适当参数的光源和与之匹配的配光元件结构,提升准直照明系统的照明性能,具有重要指导意义。已有少量文献对准直照明系统出射光束发散角与光源发光尺寸、配光元件焦距之间的关系进行了研究^[24],但至今尚无对光源特性参数对系统其他照明性能参数的影响的研究。

本文针对 2 种典型结构的准直照明系统,从理论上研究其出射光强、光通量利用率与光源出射度、配光曲线指数之间的关系,并进行实验测试。

2 理论与仿真分析

通常 LED 光源为近朗伯光源,其配光曲线为余弦指数函数,即光强为

$$I(\theta) = I_0 \cos^\gamma \theta, \quad (1)$$

式中: I_0 为 LED 光源法向光强; γ 为配光曲线指数; θ 为光线方向与光源法线的夹角。在半空间内对式(1)求积分,可得到此 LED 光源辐射的总光通量

$$\phi_0 = \frac{2\pi I_0}{\gamma + 1}. \quad (2)$$

常见光源的配光曲线指数 γ 在 0.6~1.5 范围内^[25]。为了考察配光曲线指数对光源发光特性的影响,现设 LED 光通量为 100 lm 且保持不变,令配光曲线指数 γ 依次为 0.8、1.0、1.2,则其对应的配光曲线如图 1 所示。由此可见,配光曲线指数越大,曲线的峰值越大,峰宽越小,这表明光源光通量集中于光源法向附近的角度范围内。

在准直照明系统中,设配光元件对光源光通量的

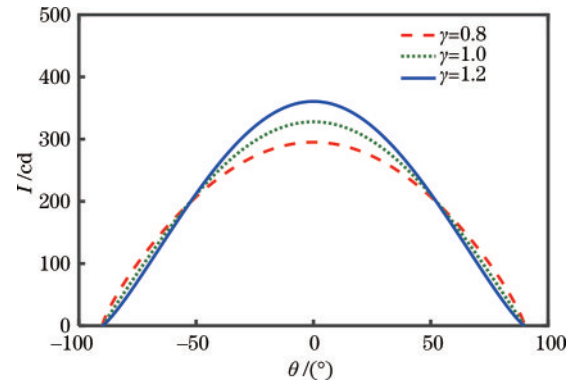


图 1 不同配光曲线指数对应的配光曲线

Fig. 1 Light distribution curves corresponding to different light distribution curve indices

收集效率为 η_1 ,将该参数定义为配光元件前表面入射光通量与光源总光通量之比。考虑材料吸收、散射和表面反射损耗,则配光元件的透射率为 η_2 ,将该参数定义为配光元件后表面出射光通量与前表面入射光通量之比,则系统出射光通量为

$$\phi_{\text{out}} = \eta_1 \eta_2 \phi_0 = \eta \phi_0, \quad (3)$$

式中: $\eta = \eta_1 \eta_2$,为配光元件的总光通量利用率。若出射光通量皆分布在有效照明区域内,则此值也是该准直照明系统的光通量利用率。记准直照明系统出射光束的半发散角为 θ_0 ,则对应的立体角为

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \theta_0), \quad (4)$$

在准直照明系统中半发散角 θ_0 通常不超过 5° ,则上式可近似为

$$\Omega \approx \pi \theta_0^2. \quad (5)$$

假设准直照明系统的出射光通量 ϕ_{out} 在该发散角范围内均匀分布,则其出射光强为

$$I_{\text{out}} = \frac{\phi_{\text{out}}}{\Omega} = \frac{\eta_1 \eta_2 \phi_0}{\pi \theta_0^2} = \frac{2\eta_1 \eta_2 I_0}{(\gamma + 1) \theta_0^2}. \quad (6)$$

2.1 纯折射型准直照明系统

在以平凸透镜为配光元件的纯折射型准直照明系统中,扩展光源发光区域的直径为 d ,透镜折射率为 n ,光源与透镜前表面距离为 a ,透镜中心厚度为 b ,出射光束的半发散角 θ_0 由光源尺寸和配光元件参数决定^[24],其原理见图 2。根据仿真和实验结果进行修正后,半发散角 θ_0 的具体表达式为

$$\theta_0 \approx \tan \theta_0 = \beta_1 \frac{d}{2f}, \quad (7)$$

式中: f 为配光元件焦距,对于图 2 所示的透镜,其值为 $a + b/n$; β_1 为出射光束发散角修正因子。 β_1 的值为准直照明系统出射光束发散角的仿真值与理论值的比值,具体取值满足

$$\begin{cases} \beta_1 = 1, & \theta_{\text{max}} \leq 30^\circ \\ \beta_1 > 1, & \theta_{\text{max}} > 30^\circ \end{cases}, \quad (8)$$

式中: θ_{max} 为平凸透镜的光线收集角。需要修正的原因在于,当光线收集角大于 30° 时,准直配光用平凸透镜

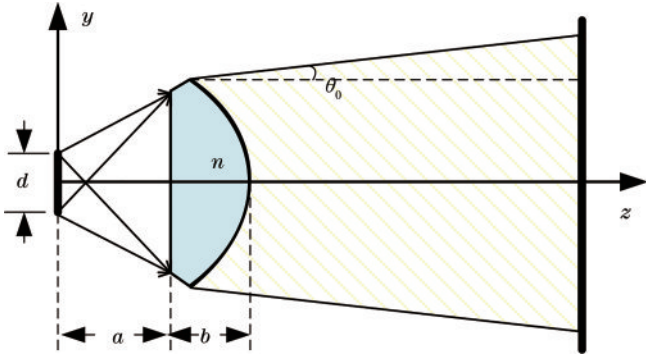


图 2 纯折射型准直照明系统出射光束发散原理
Fig. 2 Divergence principle of outgoing beam in pure-refraction-type collimating illumination system

与理想光学系统偏离较远,需要对基于理想光学系统得出的理论进行修正。

将式(7)代入式(6),得到纯折射型准直照明系统的出射光强为

$$I_{out} = \frac{\eta_1 \eta_2 f^2}{\beta_1^2} \frac{4\phi_0}{\pi d^2} \quad (9)$$

对于光线收集角为 θ_{max} 的平凸透镜,其前表面入射光通量可由式(1)求积分得到,可表示为

$$\phi_{in} = (1 - \cos^{\gamma+1} \theta_{max}) \frac{2\pi I_0}{\gamma + 1}, \quad (10)$$

则根据收集效率 η_1 的定义,有

$$\eta_1 = \frac{\phi_{in}}{\phi_0} = 1 - \cos^{\gamma+1} \theta_{max} \quad (11)$$

对于由聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)等吸收系数较小的材料制成的平凸透镜,当光线收集角在 60° 以内时,其吸收损耗和反射损耗均较小^[24,26],因此,平凸透镜透射率 η_2 可取 90%,则系统的光通量利用率为

$$\eta = \eta_1 \eta_2 = \eta_2 (1 - \cos^{\gamma+1} \theta_{max}) \quad (12)$$

可见,对于纯折射型准直照明系统,光通量利用率与配光元件的光线收集角和光源的配光曲线指数有关。记光源的光出射度(即单位面积辐射的光通量)为

$$\sigma = \frac{4\phi_0}{\pi d^2} \quad (13)$$

将式(11)和(13)代入式(9),得到纯折射型准直照明系统出射光强的表达式

$$I_{out} = \frac{\eta_2 \sigma f^2}{\beta_1^2} (1 - \cos^{\gamma+1} \theta_{max}) \quad (14)$$

由上式可知,系统出射光强不仅与配光元件的焦距和光线收集角有关,还与光源配光曲线指数和出射度有关。同时可以明确看出,系统出射光强与光源出射度成正比,但出射光强与光源配光曲线指数的关系较复杂。

文献[24]设计的 100 mm 口径准直平凸透镜的光线收集角 $\theta_{max} = 30^\circ$, 焦距 $f = 104.7$ mm, 取出射光束发散角修正因子 $\beta_1 = 1$ 。科锐(CREE)公司生产的 XHP

50.2 型 LED 光源在 11.6 V 工作电压下的光通量 $\phi_0 = 1030$ lm, 发光区域按照直径为 5.7 mm 的圆面计^[25]。据此,可求得其出射度 $\sigma = 40.4$ lm/mm²。为了研究在其他参数给定的情况下,纯折射型准直照明系统出射光强与光源配光曲线指数 γ 的关系,假设 γ 的取值可以变动(实际上,通过对配光曲线的拟合可估计出该 LED 的配光曲线指数 $\gamma = 0.80$)。图 3(a)、(b)分别给出了由前述平凸透镜和 LED 组成的准直照明系统的光通量利用率、出射光强与配光曲线指数的关系,其中中间区域对应常见光源配光曲线指数 γ 的取值范围。从图 3 可以看出,纯折射型准直照明系统的光通量利用率、出射光强均与配光曲线指数近似成正比。这是因为,光源配光曲线指数越大,光通量越集中在光源法向附近角度范围内,纯折射型配光元件的光通量收集效率越高,这使得照明系统的出射光强随之增大。

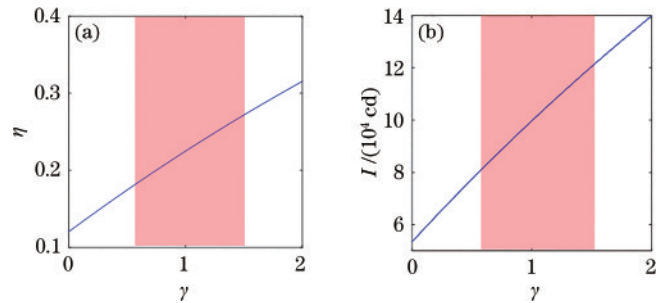


图 3 纯折射型准直照明系统照明特性参数与配光曲线指数的关系。(a)光通量利用率与配光曲线指数的关系;(b)出射光强与配光曲线指数的关系

Fig. 3 Relation between illumination characteristic parameters and light distribution curve index in the pure-refraction-type collimating illumination system. (a) Relationship between light flux utilization rate and light distribution curve index; (b) relationship between outgoing light intensity and light distribution curve index

2.2 TIR 型准直照明系统

在图 4 所示的以 TIR 透镜为配光元件的 TIR 型准直照明系统中,配光元件由中心折射部分和边缘全内

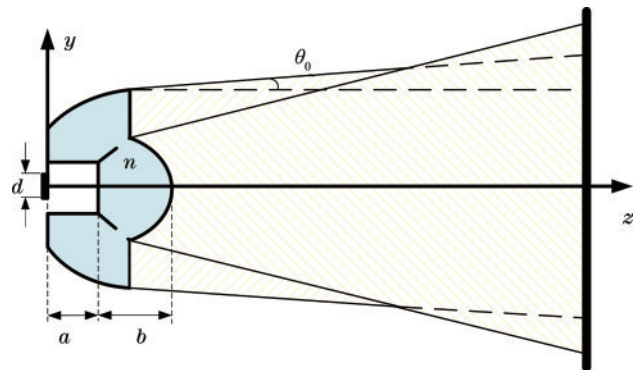


图 4 TIR 型准直照明系统出射光束发散原理
Fig. 4 Divergence principle of outgoing beam in TIR-type collimating illumination system

反射部分构成。两部分的焦距不同,出射光束半发散角也不同,故该系统的总出射光强 I_{out} 为中心部分出射光强 I_{core} 与边缘部分出射光强 I_{edge} 的叠加,即

$$I_{\text{out}} = I_{\text{core}} + I_{\text{edge}} \quad (15)$$

记 TIR 透镜的折射-全内反射分界角为 θ_d , 该角度也是中心平凸透镜的光线收集角。因此,可将 θ_d 代入式(10)、(7)和(14),从而分别计算出 TIR 透镜中心部分的入射光通量($\phi_{\text{in, core}}$)、出射光束半发散角(θ_{core})和出射光强(I_{core}),其表达式分别为

$$\phi_{\text{in, core}} = \frac{2\pi I_0}{\gamma + 1} (1 - \cos^{\gamma+1} \theta_d), \quad (16)$$

$$\theta_{\text{core}} = \beta_2 \frac{d}{2f}, \quad (17)$$

$$I_{\text{core}} = \frac{\eta_2 f^2 \sigma}{\beta_2^2} (1 - \cos^{\gamma+1} \theta_d), \quad (18)$$

式中: β_2 为中心平凸透镜出射光束发散角的修正因子,对于 $\theta_d=45^\circ$ 的 TIR 透镜,可取 $\beta_2=1.1$ [24]。

TIR 透镜在理论上能够收集光源的全部光线,故 TIR 型准直照明系统的光能损耗只与配光元件材料吸收损耗和表面反射损耗有关,与光源参数无关,因此光通量利用率恒为

$$\eta = \eta_2 \circ \quad (19)$$

光源总光通量减去中心部分的入射光通量,即边缘部分的入射光通量,可由式(2)减去式(16)得到,有

$$\phi_{\text{in, edge}} = \cos^{\gamma+1} \theta_d \frac{2\pi I_0}{\gamma + 1}, \quad (20)$$

则边缘部分的出射光通量为

$$\phi_{\text{out, edge}} = \eta \phi_{\text{in, edge}} = \eta_2 \phi_0 \cos^{\gamma+1} \theta_d \circ \quad (21)$$

对于 TIR 透镜,边缘部分的焦距与中心部分的焦距之比完全由折射-全内反射分界角 θ_d 决定,该比值也决定了边缘部分的半发散角 θ_{edge} 与中心部分半发散角 θ_{core} 之比 k 。对于 $\theta_d=45^\circ$ 的 TIR 透镜,有 $k=0.6$ [24], 即有

$$\theta_{\text{edge}} = k \theta_{\text{core}} = k \beta_2 \frac{d}{2f} \circ \quad (22)$$

假设 TIR 透镜边缘部分出射光通量也均匀分布在其对应的发散角内,联立以上两式,便可求得边缘部分出射光强为

$$I_{\text{edge}} = \frac{\phi_{\text{out, edge}}}{\pi \theta_{\text{edge}}^2} = \frac{\eta_2 \sigma f^2}{(k \beta_2)^2} \cos^{\gamma+1} \theta_d \circ \quad (23)$$

将式(18)和(23)代入式(15)可得总的出射光强为

$$I_{\text{out}} = \frac{\eta_2 \sigma f^2}{\beta_2^2} \left(1 + \frac{1 - k^2}{k^2} \cos^{\gamma+1} \theta_d \right) \circ \quad (24)$$

由上式可知,同纯折射型准直照明系统一样, TIR 型准直照明系统的出射光强也与光源的出射度成正比,但出射光强与光源配光曲线指数的关系依然复杂。TIR 透镜参数与文献[24]设计的 100 mm 口径 TIR 透镜相同:中心部分焦距 $f=41.5$ mm, 折射-全内反射分

界角 $\theta_d=45^\circ$; LED 其余参数见 2.1 节。改变配光曲线指数 γ , 根据式(18)、(23)和(24), 得到 TIR 型准直照明系统中心部分、边缘部分和整体的出射光强与配光曲线指数的关系,如图 5 所示。

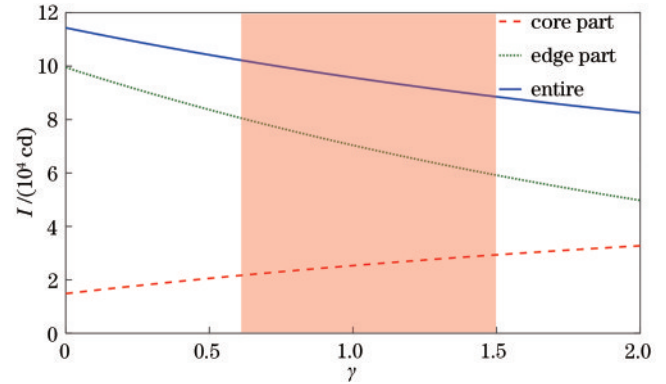


图 5 TIR 型准直照明系统出射光强与配光曲线指数的关系
Fig. 5 Relation between outgoing light intensity and light distribution curve index in the TIR-type collimating illumination system

从图 5 可以看出, TIR 型准直照明系统中心部分出射光强与配光曲线指数正相关, 而边缘部分出射光强与配光曲线指数负相关。这是由于随着配光曲线指数增大, 光源光通量越发向法线附近的角范围集中, 被 TIR 透镜边缘部分收集的光通量减少, 即式(21)给出的边缘部分光通量收集效率降低, 从而使得边缘部分出射光强减小。此时, 尽管 TIR 透镜中心部分的入射光通量在增加, 使得其对应的出射光强增大, 但是由于边缘部分的出射光束发散角较中心部分更小, 边缘部分出射光强的减小程度要比中心部分出射光强的增大程度更甚, 最终使 TIR 透镜整体的出射光强减小。

3 实 验

实验光源为 CREE 公司生产的 XD16、XHP50.2、XTE 和 XPE 型 LED, 其实物见图 6, 参数如表 1 所示。实验所用配光元件有 2 种, 分别为光线收集角 $\theta_{\text{max}}=30^\circ$ 、焦距 $f=104.7$ mm 的 100 mm 口径平凸透镜和折射-全内反射分界角 $\theta_d=45^\circ$ 、中心焦距 $f=41.5$ mm 的

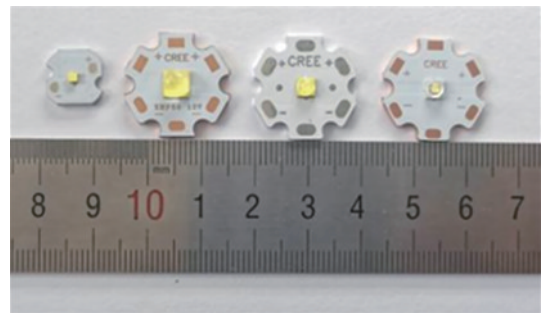


图 6 CREE XD16、XHP50.2、XTE 和 XPE 型 LED 实物图
Fig. 6 Photos of CREE XD16, XHP50.2, XTE, and XPE LED

表1 CREE XD16、XHP50.2、XTE 和 XPE 型 LED 参数
Table 1 Parameters of CREE XD16, XHP50.2, XTE, and XPE LED

Type of source	Size / (mm×mm)	Working voltage / V	Luminous flux ϕ_v / lm	Luminous exitance σ / (lm·m ⁻²)	Light distribution curve index γ
XD16	1.6×1.6	2.90	111	4.34×10 ⁷	0.68
XHP50.2	5.7×5.7	11.6	1030	4.04×10 ⁷	0.80
XTE	3.45×3.45	3.30	311	3.33×10 ⁷	1.00
XPE	3.45×3.45	3.50	235	2.51×10 ⁷	1.28

100 mm 口径 TIR 透镜, 结构参数均与文献[24]介绍的参数相同, 其实物见图 7。将这 4 种光源和 2 种透镜组合, 获得 8 套准直照明系统, 分别点亮它们, 让光束投射在 25 m 远处 4 m×4 m 的幕布上。图 8 给出的是 4 种 LED 分别与由平凸透镜组合形成的纯折射型准直照明系统在幕布上产生的照明光斑, 图 9 则是 4 种 LED 分别与由 TIR 透镜组合形成的 TIR 型准直照明

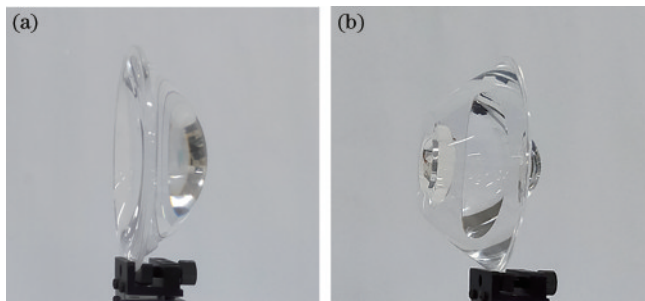


图 7 配光元件实物图。(a)平凸透镜;(b)TIR 透镜

Fig. 7 Photos of the light distribution elements. (a) Plano-convex lens; (b) TIR lens

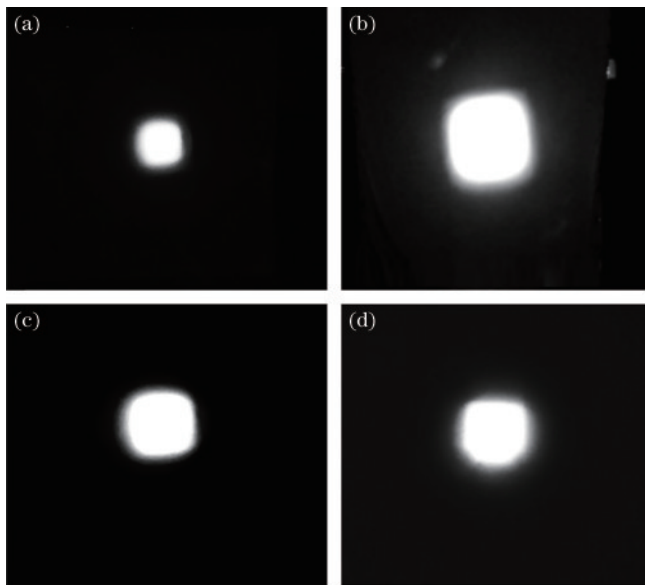


图 8 选用不同光源的纯折射型准直照明系统的照明光斑。
(a)XD16;(b)XHP50.2;(c)XTE;(d)XPE

Fig. 8 Illumination spots of the pure-refraction-type collimating illumination systems with different sources. (a) XD16; (b) XHP50.2; (c) XTE; (d) XPE

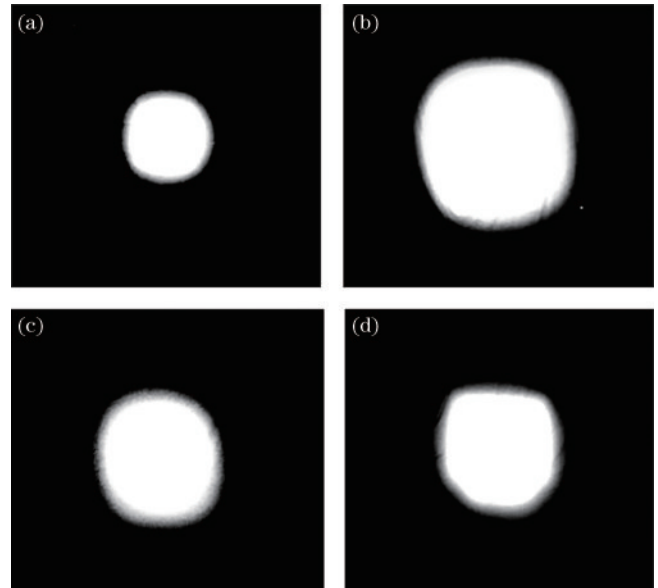


图 9 选用不同光源的 TIR 型准直照明系统的照明光斑。
(a)XD16;(b)XHP50.2;(c)XTE;(d)XPE

Fig. 9 Illumination spots of the TIR-type collimating illumination systems with different sources. (a) XD16; (b) XHP50.2; (c) XTE; (d) XPE

系统在幕布上产生的照明光斑。

实验中各准直照明系统的照明特性参数, 如半发散角、出射光强和光源光通量利用率等的值如表 2 所示, 同时作为对照, 该表也给出了根据本文理论求得的理论值。各准直照明系统光强的测量值见图 10。此外, 在图 10 中, 针对这 8 种准直照明系统, 建立其光学模型, 采用蒙特卡洛算法进行光线追迹仿真, 给出光强分布的仿真值。

表 2 显示, 当光源依次为 CREE XD16、XHP50.2、XTE 和 XPE 型 LED 时, 出射度变小, 配光曲线指数增大。对于分别以它们为光源的纯折射型准直照明系统, 出射光强呈减小趋势, 可见此时, 尽管光源光通量在角度范围内更集中, 其利用率更高, 但光源的出射度的减小对出射光强的影响更大; 对于分别以它们为光源的 TIR 型准直照明系统, 出射光强依次急剧减小, 减小程度远大于纯折射型准直照明系统。在配光元件确定时, 系统出射光束半发散角与光源尺寸成反比。在 TIR 型准直照明系统中, 光通量利用率与光源出射度、配光曲线指数无明显相关性, 但当光源发光面积较

表 2 各准直照明系统的照明性能参数

Table 2 Illumination characteristic parameters of collimating illumination systems

Type of light distribution element	Type of Source	Spot radius / m	Half divergence angle $\theta_0 / (^\circ)$		Intensity I / cd		Flux utilization $\eta / \%$	
			Experimental value	Theoretical value	Experimental value	Theoretical value	Experimental value	Theoretical value
Plano-convex	XD16	0.19	0.43	0.44	112750	117140	16.6	19.3
	XHP50.2	0.69	1.58	1.55	85314	91040	17.8	20.5
	XTE	0.42	0.96	0.94	77500	82207	19.8	22.5
	XPE	0.42	0.96	0.94	66938	69474	24.4	25.2
TIR	XD16	0.42	0.96	0.61	129750	140700	87.6	90.0
	XHP50.2	1.28	2.93	2.16	94000	98939	81.4	90.0
	XTE	0.76	1.74	1.31	75625	81650	86.4	90.0
	XPE	0.79	1.80	1.31	55438	59012	87.9	90.0

大,即光源为 XHP50.2 LED 时,由于折射-全内反射分界面附近光线泄露,光通量利用率明显下降;而在纯折射型准直照明系统中,配光曲线指数增大时,光通量利用率明显升高。所有以上实验结论高度符合理论预期,误差主要来源于以下 2 个方面:一是在理论和仿真建模推导中,均假设光源发光区域为圆形,而在实验中,发光区域为圆角矩形或者矩形;二是在理论推导中,假设出射光通量在发散角内均匀分布,但实际情况则不然。这 2 个原因均会导致出射光强的理论值较实验测量值更大,出射光束半发散角的理论值普遍较实验测量值更小。当然,实验中配光元件的加工误差、光

源与配光元件装配误差以及元件材料和大气的气散、吸收等因素也对结果有重要影响。

如图 10(a)所示,当光源为 XD16 LED 时,配光曲线指数较小,在 TIR 型准直照明系统中,光源光通量大多被 TIR 透镜边缘部分收集并准直,中心部分对应的出射光束在整体出射光束中占比较小,整体出射光束的光强分布中无明显台阶分布,光斑陡边性较好;而此时纯折射型准直照明系统的光通量利用率太低,使得其出射光强明显小于 TIR 型准直照明系统的出射光强。当光源依次为 XHP50.2、XTE LED 时,随着配光曲线指数增大,TIR 型准直照明系统的光强分布出

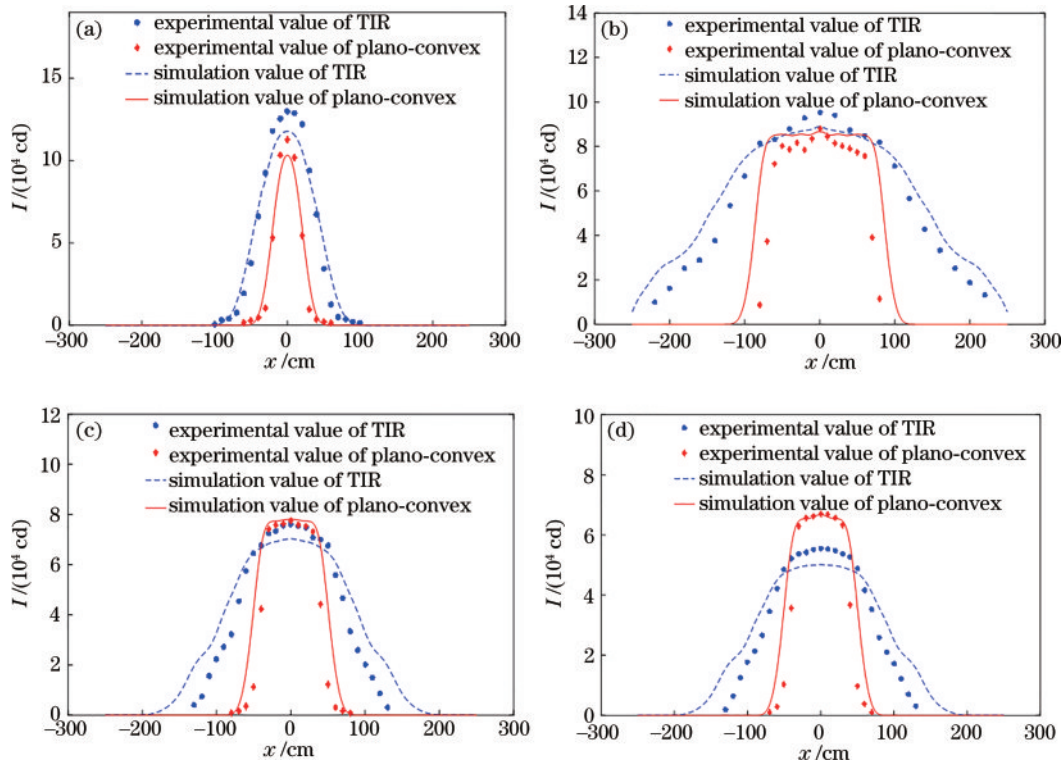


图 10 不同光源对应的各准直照明系统一维光强分布的实测与仿真值。(a)XD16;(b)XHP50.2;(c)XTE;(d)XPE

Fig. 10 Experimental and simulation value of one-dimensional intensity distribution of collimation illumination systems with different sources. (a) XD16; (b) XHP50.2; (c) XTE; (d) XPE

现了明显的台阶,且其出射光强与纯折射型准直照明系统出射光强的差值逐渐减小,甚至其出射光强被后者反超。当光源为 XPE LED 时,配光曲线指数较大,光通量集中在光源法线附近角度范围内,因此纯折射型准直照明系统的光通量利用率大幅提高,出射光强增大;而在 TIR 型准直照明系统中,光源光通量大多被 TIR 透镜中心部分收集并准直,但由于其对应的出射光束发散角比同口径的纯折射型准直照明系统的要大得多,TIR 型准直照明系统的出射光强显著小于纯折射型准直照明系统的出射光强。由此可见,当 LED 配光曲线指数较小时,以其为光源的 TIR 型准直照明系统无论在出射光强还是光通量利用率上,均明显优于纯折射型准直照明系统,且由于前者的发散角大,使得其照明范围更广阔,二者光斑的陡边性相当。当 LED 配光曲线指数接近 1 时,TIR 型和纯折射型准直照明系统的出射光强相近,前者光通量利用率大,发散角也大,使得其照明范围更广阔,但后者光斑的陡边性更优。当 LED 配光曲线指数较大时,纯折射型准直照明系统的出射光强更大,光斑的陡边性更好,TIR 型准直照明系统只在光通量利用率和照明范围方面仍然占优。

4 结 论

研究了 2 种不同结构的准直照明系统的光源参数对其照明性能的影响,推导了系统出射光强、光通量利用率与光源出射度、配光曲线指数的关系式,并进行了实验测试。研究发现:准直照明系统的出射光强与光源的出射度成正比,而配光曲线指数对不同结构的准直照明系统的影响不同。为了使得纯折射型准直照明系统的光通量利用率更高,出射光强更大,应选用配光曲线指数更大的 LED;若 LED 的配光曲线指数较小,则应选取 TIR 透镜作为配光元件来设计准直照明系统,以获得更大的出射光强,此时照明光斑陡边性也与纯折射型准直照明系统的相当。

根据系统出射光强、光通量利用率与光源出射度、配光曲线指数的关系式,参照具体的照明设计指标和光源的特征参数,通过计算对比即可合理选择光源以及确定与之对应的配光元件结构和参数,以实现准直照明系统中光源参数和配光元件结构的最优匹配。因此,研究结果对准直照明系统二次光学设计有重要的理论指导意义。

参 考 文 献

- [1] 张世鑫,赵爽,王一璋,等.自由曲面透镜白光 LED 光束整形技术[J].激光技术,2021,45(3):357-361.
Zhang S X, Zhao S, Wang Y Z, et al. White LED beam shaping technology based on free-form surface lens[J]. Laser Technology, 2021, 45(3): 357-361.
- [2] 刘展宇,王沛沛,金志樑,等.用于 LED 集鱼灯稳定照明的自由曲面透镜设计[J].光学学报,2021,41(5):

0522003.

Liu Z Y, Wang P P, Jin Z L, et al. Free-form lens design for LED fishing lamp with stable illumination[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0522003.

- [3] 段文举,朴明旭,全向前,等.适于扩展光源的紧凑型双自由曲面匀光透镜设计[J].光学学报,2022,42(15):1522001.
Duan W J, Piao M X, Quan X Q, et al. Design of compact double freeform surface lens with uniform illumination for extended light source[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(15): 1522001.
- [4] 朱民,楼俊,潘玉珏,等.基于新型 LED 准直系统的自由曲面均匀照明设计[J].光学学报,2018,38(4):0422002.
Zhu M, Lou J, Pan Y J, et al. Design of freeform surface with uniform illumination based on new LED collimation system[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0422002.
- [5] 程颖,郑书强,卢永斌.准直型自由曲面 LED 二次光学元件设计与加工[J].光学技术,2018,44(3):315-319.
Cheng Y, Zheng S Q, Lu Y B. Design and manufacture of collimated LED secondary optics with freeform surface[J]. Optical Technique, 2018, 44(3): 315-319.
- [6] 付倩,苏成悦,薛涛,等.基于虚拟目标面的 LED 均匀光强透镜设计方法[J].光电工程,2013,40(11):46-50.
Fu Q, Su C Y, Xue T, et al. LED uniform luminous intensity lens based on virtual target surface[J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(11): 46-50.
- [7] Sun W S, Tien C L, Chen J A, et al. Optical design for a cost-effective low-beam headlamp with a white light LED[J]. Optical and Quantum Electronics, 2020, 52(11): 474.
- [8] 李澄,李农.一种用于均匀照明的 LED 透镜设计方法[J].照明工程学报,2010,21(3):46-49.
Li C, Li N. A LED lens design method for uniform illumination[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2010, 21(3): 46-49.
- [9] Sun X, Zhu Z M, Yuan J, et al. Design of high-efficient TIR lens for tailored illumination with high contrast[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 111: 240-248.
- [10] 乐能友,石智伟,史新刚.一种折反式 LED 准直透镜设计[J].光电子技术,2018,38(4):258-261,281.
Le N Y, Shi Z W, Shi X G. Design of a reflect and refract LED collimating lens[J]. Optoelectronic Technology, 2018, 38(4): 258-261, 281.
- [11] 甄艳坤,白燕,陈恩果.基于 Skew-Ray 追迹法的均匀准直照明 TIR 透镜设计[J].光学技术,2019,45(6):647-652.
Zhen Y K, Bai Y, Chen E G. The design of TIR lens based on the Skew-Ray tracing method for uniform and collimated illumination[J]. Optical Technique, 2019, 45(6): 647-652.
- [12] Parkyn W A, Pelka D G. New TIR lens applications for light-emitting diodes[J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3139: 135-140.
- [13] 周彦辰,郭亮,陈志涛,等.基于全内反射结构的多自由曲面准直透镜设计[J].光学学报,2021,41(4):0422003.

- Zhou Y C, Guo L, Chen Z T, et al. Design of collimating lens with multiple freeform surfaces based on total internal reflection structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(4): 0422003.
- [14] 胡甜甜, 曾春梅, 芮丛珊, 等. 用于 LED 均匀照明的自由曲面菲涅耳 TIR 透镜光学设计[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(2): 20200183.
- Hu T T, Zeng C M, Rui C S, et al. Optical design of freeform Fresnel TIR lens for LED uniform illumination [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(2): 20200183.
- [15] 刘畅. 基于“二次光源分割法”与照度反馈的自由曲面透镜设计研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2019.
- Liu Y. Design of free-form lens based on “Secondary light source segmentation” and illumination feedback[D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2019.
- [16] Gimenez-Benitez P, Miñano J C, Blen J, et al. Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions[J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(7): 1489-1502.
- [17] Hou Z, Nikolic M, Benitez P, et al. SMS2D designs as starting points for lens optimization[J]. *Optics Express*, 2018, 26(25): 32463-32474.
- [18] 蒋水秀, 孙翔, 冯华君, 等. 一种优化 LED 照明的三维 SMS 设计方法[J]. *光电工程*, 2012, 39(6): 91-95.
- Jiang S X, Sun X, Feng H J, et al. Three-dimensional SMS design to optimize LED lighting[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(6): 91-95.
- [19] 张航, 梁雪, 严金华, 等. LED 准直器设计中复合抛物面同步多曲面方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0922004.
- Zhang H, Liang X, Yan J H, et al. Compound parabolic concentrator-simultaneous multiple surfaces design methods for LED collimators[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0922004.
- [20] 林文硕, 石梦静, 白莹, 等. 矩形复合抛物面空间双向照明节能多功能反光杯设计[J]. *应用光学*, 2019, 40(2): 323-333.
- Lin W S, Shi M J, Bai Y, et al. Design of rectangular composite paraboloid three-dimensional two-way lighting and energy-saving reflective cup[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(2): 323-333.
- [21] 汪宇青, 李湘宁, 黄慧, 等. 一种基于复合抛物面聚光器的面向大尺寸 LED 的反射器设计方法[J]. *光学技术*, 2014, 40(5): 450-453.
- Wang Y Q, Li X N, Huang H, et al. Reflector design method based on compound parabolic concentrator(CPC) for big size LED[J]. *Optical Technique*, 2014, 40(5): 450-453.
- [22] 林文硕, 石梦静, 白莹, 等. 基于 LED 照明与弱光收集的节能车灯双向二次配光设计[J]. *应用光学*, 2018, 39(6): 908-915.
- Lin W S, Shi M J, Bai Y, et al. Bidirectional secondary light distribution design for energy-saving headlights based on LED lighting energy and weak light collection [J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(6): 908-915.
- [23] 白莹, 林文硕, 谢国庆. 基于复合抛物面集光器的 LED 教室灯具的配光设计[J]. *应用光学*, 2014, 35(3): 395-399.
- Bai Y, Lin W S, Xie G Q. Light distribution design of LED lamps in classroom based on compound parabolic collector[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(3): 395-399.
- [24] 康学亮, 石成相, 王丽, 等. 基于全内反射透镜的扩展光源准直照明系统特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(21): 2108001.
- Kang X L, Shi C X, Wang L, et al. Characteristics of collimating illumination system with extended source based on total-internal-reflection lens[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(21): 2108001.
- [25] Anonymous. XHP family of LEDs[EB/OL]. (2019-07-01)[2021-03-04]. <https://cree-led.com/products/xlamp-leds-arrays/xhp-leds>.
- [26] 康学亮, 姚海兵, 王宇, 等. LED 配光透镜吸收损耗的建模与计算[J]. *江苏科技信息*, 2018, 35(35): 31-34.
- Kang X L, Yao H B, Wang Y, et al. Modeling and calculation of absorption loss of LED distribution lens[J]. *Jiangsu Science & Technology Information*, 2018, 35(35): 31-34.