

激光与光电子学进展

基于全内反射透镜的扩展光源准直照明系统特性研究

康学亮^{1*}, 石成相¹, 王丽^{1,2}, 刘启隆¹, 雪瑞¹, 任婷婷¹, 孙伟康¹, 韦先涛³

¹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;

³中国科学技术大学物理学院, 安徽 合肥 230026

摘要 在理论上,全内反射透镜可对所有光线进行收集,因而是远距离准直照明系统二次光学设计的首选结构。利用光学软件进行仿真和实验测试,分析了基于该类型配光元件的扩展光源准直照明系统的照明特性,包括光强分布特性、光斑照度均匀性和光通量利用率,并揭示了出射光束发散特性的决定机制。研究发现:与同口径平凸准直透镜的配光效果相比,全内反射透镜的光通量利用率提升显著,但出射光束发散角也明显增大,使得二者出射光束光强无明显差别;且由于中心折射部分和边缘全反射部分的出射光束发散角不同,故全内反射透镜的照明光斑照度均匀性明显变差。

关键词 几何光学; 二次光学设计; 扩展光源; 准直照明; 全内反射; 照明特性

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2108001

Characteristics of Collimating Illumination System with Extended Source Based on Total-Internal-Reflection Lens

Kang Xueliang^{1*}, Shi Chengxiang¹, Wang Li^{1,2}, Liu Qilong¹, Xue Rui¹, Ren Tingting¹, Sun Weikang¹, Wei Xiantao³

¹School of Electrical & Information Engineering, North Minzu University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

²School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;

³School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract In theory, the total-internal-reflection lens can collect all the rays from the source, thus it is the preferred structure for secondary optical design in long-distance collimating illumination systems. The illumination characteristics of a collimating illumination system with extended source based on this type of light distribution element, including the intensity distribution characteristic, spot illuminance uniformity, and flux utilization, are analyzed by using optical software and experiment measurement, and the determining mechanism of divergence characteristic of the outgoing beam is explored. It is found that compared with the light distribution effect of the same-aperture plano-convex collimating lens, the flux utilization of the total-internal-reflection lens is improved significantly. However, the divergence angle of the outgoing beam is also remarkably increased, which leads to no essential difference in the outgoing beam intensities of these two light distribution elements. Because the divergence angle of the outgoing beam from the core refraction part is different from that

收稿日期: 2021-02-23; 修回日期: 2021-03-08; 录用日期: 2021-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(11564001)、宁夏自然科学基金(2018AAC03109)、北方民族大学研究生创新项目(YCX20113)

通信作者: *wnkanger@163.com

from the edge total-internal-reflection part, the illuminance uniformity of illumination spot for the total-internal-reflection lens is obviously deteriorated.

Key words geometric optics; secondary optical design; extended source; collimating illumination; total-internal-reflection; illumination characteristic

OCIS codes 080.4295; 220.3620; 350.4600

1 引言

随着半导体技术的发展,单颗LED的功率越来越大。相较于传统光源设计的灯具,采用大功率LED作为光源的船舶巡航灯、高速车辆照明灯、舞台追光灯及搜救探照灯等特种准直照明灯具在体积、质量、功耗、寿命、抗震性能和响应速度上均具有明显优势。然而,在大功率特种照明灯具的研制中,还有许多关于扩展光源二次光学设计的理论问题亟待解决。

科研工作者为准直照明系统提出了多种二次光学设计方法,并设计了具体的配光元件^[1-8]。在所有配光元件中,设计加工最为简单的当属平凸型自由曲面准直透镜^[9]。苏州医工所基于该透镜研制出了性能极其优异的超远距离探照灯^[10],针对采用该透镜作为配光元件的准直照明系统,康学亮等^[5]从理论和实验上详细研究了其照明特性与配光元件结构参数的关系。然而,平凸透镜只能收集光源发出的小角度光线,导致能量利用率不高。基于边缘光线理论的同步多曲面(SMS)法是另一种极具理论创新的准直照明二次光学设计方法^[11-13],但该方法理论复杂,且光通量利用率甚至比平凸型准直透镜更低。复合抛物面(CPC)-SMS法^[14-19]设计的混合式配光元件光通量利用率得以大幅提高,但理论与设计均较为复杂,且在工程上引入了装配误差。因此,作为可收集全部光线的一体式紧凑型配光元件,全内反射(TIR)透镜^[20-28]的光通量利用率可达90%,长期以来一直被认为是准直照明系统二次光学设计中配光元件结构的最佳选择。

然而,对于TIR准直透镜的配光特性,如出射光束发散特性和远场的照度分布特性却鲜有文献报道。同时,平凸型自由曲面准直透镜作为准直照明系统配光元件的有效性虽然已在理论上和工程实践中被证明,但仍然存在很多质疑。因此,将平凸型自由曲面准直透镜与TIR准直透镜的配光特性进行对比,对于完善准直配光理论具有重要意义。

2 TIR准直配光元件的设计原理

图1(a)给出的是一种典型的TIR准直透镜过

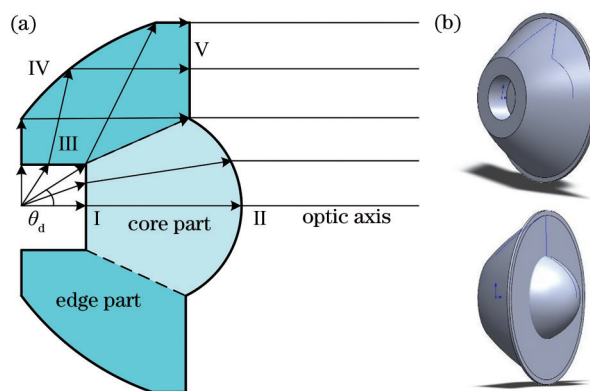


图1 TIR准直透镜。(a)剖面结构示意图;(b)不同视角的立体图形

Fig.1 TIR collimating lens. (a) Diagram of section structure; (b) stereograms of different perspectives

光轴的剖面结构,该结构关于光轴呈旋转对称;图1(b)则是其不同视角下的立体图形。

该配光元件由中心部分和边缘部分组成。中心部分为一平凸准直透镜,前表面I为平面,后表面II为自由曲面;与之拼接的边缘部分为全反射准直元件,有3个光学表面,III面为以光轴为中心轴的圆柱面,IV面为自由曲面,V面为垂直于光轴的圆环状平面。

TIR准直透镜的折射与全反射分界角记为 θ_d ,如图1(a)所示。从LED光源发出的倾斜角为 $\theta < \theta_d$ 的光线将先入射到中心折射部分的平面I上,折射后进入平凸透镜,最后经自由曲面II折射后平行于光轴出射,实现小倾斜角光线的准直。而倾斜角为 $\theta > \theta_d$ 的光线将先经边缘全反射部分的圆柱面III折射,传播一段距离后再投射至自由曲面IV上;此时,只要保证该折射光线在IV面上的入射角大于配光元件材料的全反射临界角 θ_c ,则其将在此面上发生全反射;合理设计该自由曲面的面型,可使得全反射后的光线平行于光轴,即垂直于平面V,因此经V面时,方向不会变化,仍然平行于光轴出射,从而实现大倾斜角光线的准直。综上所述,在TIR准直透镜的中心部分和边缘部分的共同作用下,实现光源全部光线的准直。

III面与V面之间的环形平面是用来保证中心

折射部分的出射光束和边缘全反射部分的出射光束在空间上紧密拼接,两部分光束不留空隙也不互相干扰。而 IV 面和 V 面之间的圆柱面则无实际光学作用,在配光元件口径限定的前提下,为了尽可能压缩出射光束的发散角,根据文献[5]的理论,该圆柱面高度应尽可能小。单从结构上就可以看出,与平凸透镜等纯折射型准直配光元件相比,TIR 准直透镜的光通量收集效率大幅提高;而与 CPC-SMS 复合型配光元件相比,其结构紧凑,装配简单。

TIR 准直透镜的材料为 polymethyl methacrylate(PMMA),在 550 nm 波长处的折射率 $n=1.493$,元件口径 $2r=100$ mm,折射-全反射分界角 $\theta_a=45^\circ$ 。根据文献[29]中介绍的自由曲面构建方法,即可计算出中心折射部分的自由曲面 II 和边缘全反射部分的自由曲面 IV 的面型数据。在文献[5]的理论指导下,通过多次优化,取 LED 到配光元件 I 面的距离 $a=14$ mm, I 和 II 面中心距离 $b=41$ mm,此时所获得的配光元件准直效果最佳,面型及光线准直示意图如图 2 所示。

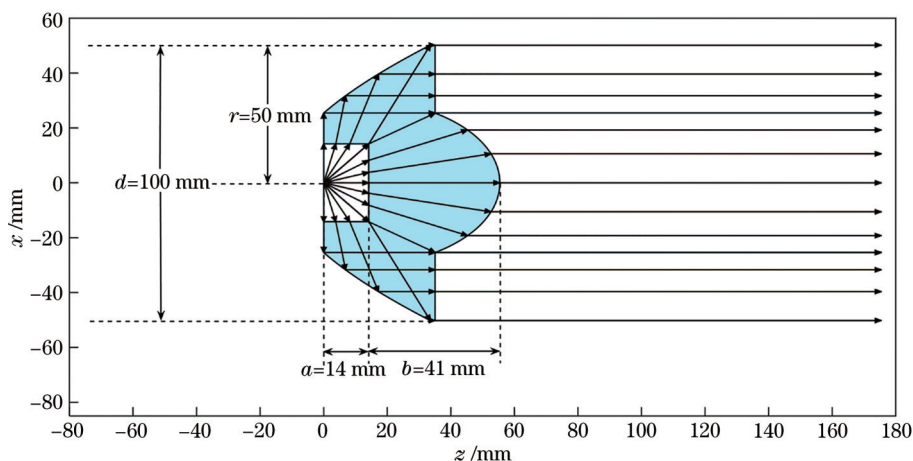


图 2 100 mm 口径 TIR 准直透镜的面型及光线准直示意图

Fig. 2 Schematic diagram of surface shape and light collimation of TIR collimating lens with 100-mm aperture

3 TIR 准直照明系统性能的仿真与分析

通过照明光学软件 TracePro 对由扩展光源和 TIR 准直透镜组成的准直照明系统的性能进行仿真分析。

3.1 出射光束的发散特性

在照明光学软件 TracePro 中,对图 2 的 100 mm 口径 TIR 准直透镜进行建模。设置一个光通量为 1030 lm,配光曲线为 $I=I_0 \cos^{0.8} \theta$,直径为 5.7 mm

的圆形表面光源(该光源各个参数对应于 11.6 V 工作电压下的 Cree XHP50.2 型 LED 光源^[30]);紧贴透镜后表面,即距光源 $z=a+b=55$ mm 处放置一垂直于光轴的探测面。为了单独研究中心折射部分和边缘全反射部分的出射光束特性,分别在 TIR 准直透镜边缘全反射部分的圆柱面 III 和中心折射部分的前表面 I 上设置光阑,只让中心折射部分或边缘全反射部分收集并准直光源的部分辐射光线。选取 100 万条光线进行追迹,仿真所得探测面上的光强 I 分布分别如图 3(a)和图 3(b)所示。不加任何

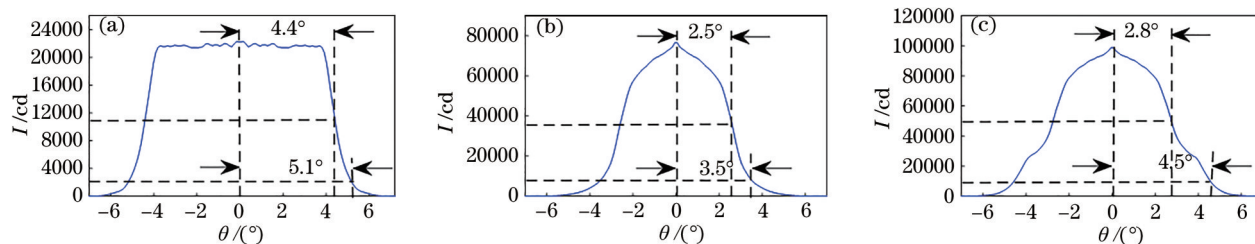


图 3 TIR 准直透镜各部分及整体出射光强 I 的一维分布。(a)中心部分;(b)边缘部分;(c)整体

Fig. 3 One-dimension intensity I distribution of outgoing beams from each part and entirety of TIR collimating lens.

(a) Core part; (b) edge part; (c) entirety

光阑时, TIR 配光元件整体出射光束的光强 I 分布如图 3(c) 所示。

从图 3 中可以看出: 中心部分和边缘部分的出射光束二分之一光强发散角 $\theta_{1/2}$ 分别为 4.4° 和 2.5° , 与文献[5]求得的理论值符合较好; 中心部分和边缘部分的出射光束十分之一光强发散角 $\theta_{1/10}$ 分别为 5.1° 和 3.5° 。边缘部分属于非共轴光学系统, 由于光路折叠, 焦距明显大于中心部分的焦距, 根据文献[5]给出的出射光束发散角与配光元件焦距成反比理论, 边缘部分出射光束的发散角明显小于中心部分的发散角。由于此两光束的陡边性均较好, 故它们各自的光束发散特性用 $\theta_{1/2}$ 即可较为精确地描述。然而, 图 3(c) 显示出整体出射光强陡边性明显变差, 呈显著的台阶分布, 中心峰状源于边缘部分的出射光束, 而台阶部分则对应于中心部分的出射光束, 必须同时给出二分之一和十分之一光强发

散方可描述其发散特性。整体出射光束的 $\theta_{1/2}$ 为 2.8° , 与边缘部分出射光束的 $\theta_{1/2}$ 较为接近; $\theta_{1/10}$ 为 4.5° , 与中心部分出射光束的 $\theta_{1/2}$ 较为接近。鉴于整体出射光束光强分布呈明显台阶状, 以 $\theta_{1/10}$ 作为 TIR 准直照明系统出射光束的发散角更为合理^[31]。

因此 TIR 准直透镜的出射光束发散角完全由中心折射部分决定, 但发散特性较为复杂, 由中心折射部分和边缘全反射部分共同决定。

3.2 照明光斑在传播过程中的演化

因为 TIR 准直照明系统的出射光束由发散角不同的两部分构成, 所以出射光束的能量分布将随着传播距离的增大而变化。为了清晰观察 TIR 准直透镜各部分和整体的出射光束能量分布在传播过程中的演化过程, 在仿真软件中多个位置处设置探测面。仿真得到的这些探测面上的二维照度分布和过光斑中心的一维照度分布分别如图 4 和图 5

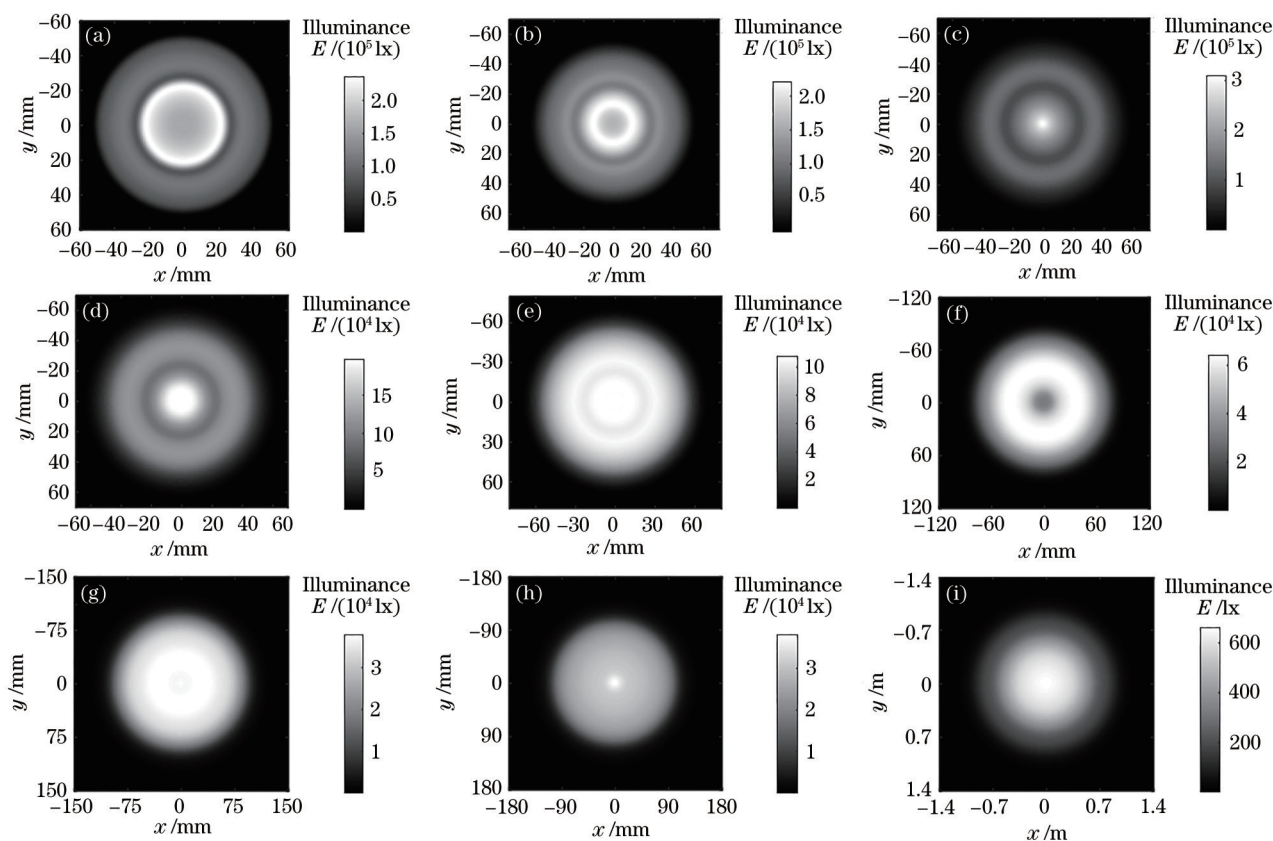


图 4 TIR 准直透镜整体出射光束在不同照明距离处照度 E 的二维分布。(a) 距光源 55 mm 处; (b) 距光源 150 mm 处; (c) 距光源 260 mm 处; (d) 距光源 360 mm 处; (e) 距光源 490 mm 处; (f) 距光源 860 mm 处; (g) 距光源 1.2 m 处; (h) 距光源 1.4 m 处; (i) 距光源 12 m 处

Fig. 4 Two-dimension illuminance E distribution of entire outgoing beams from TIR collimating lens at different illumination distances. (a) 55 mm away from source; (b) 150 mm away from source; (c) 260 mm away from source; (d) 360 mm away from source; (e) 490 mm away from source; (f) 860 mm away from source; (g) 1.2 m away from source; (h) 1.4 m away from source; (i) 12 m away from source

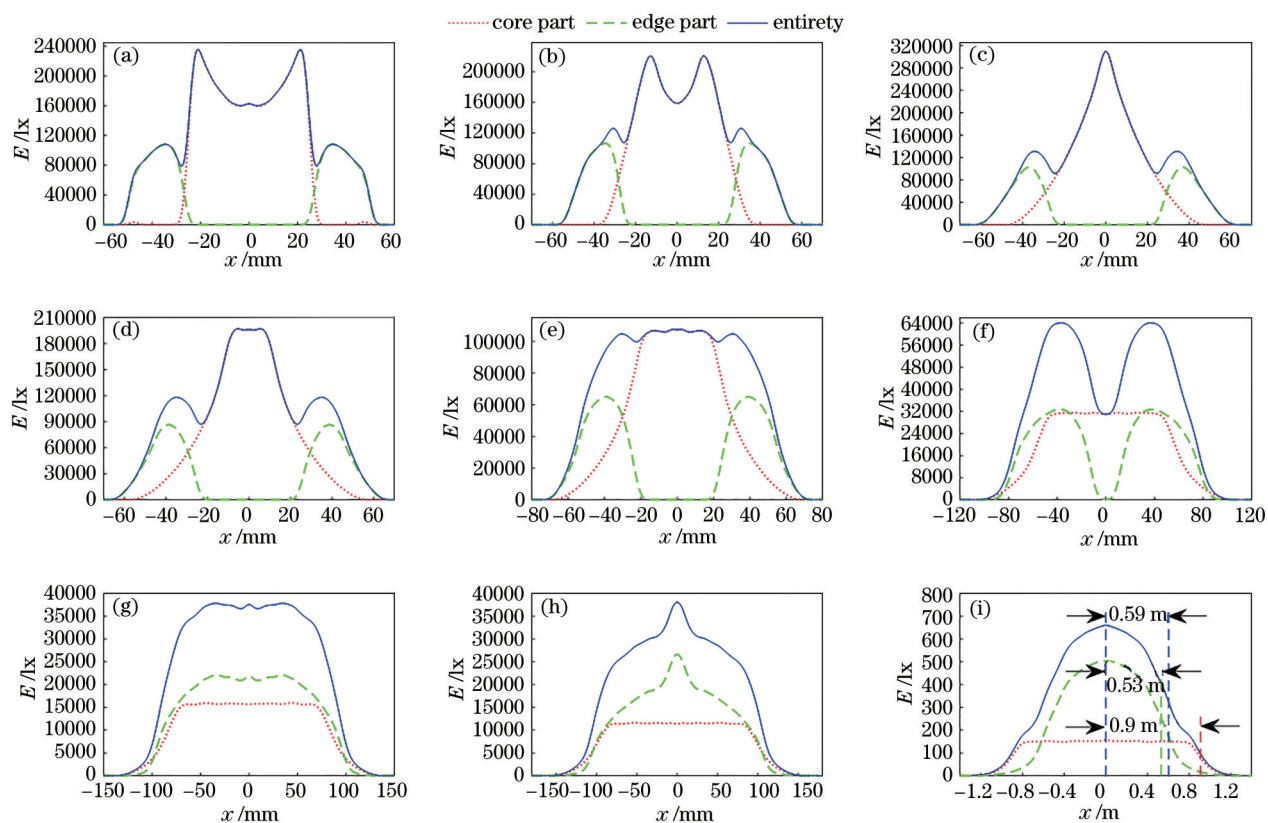


图 5 TIR 准直透镜各部分及整体出射光束在不同照明距离处照度 E 的一维分布。(a) 距光源 55 mm 处; (b) 距光源 150 mm 处; (c) 距光源 260 mm 处; (d) 距光源 360 mm 处; (e) 距光源 490 mm 处; (f) 距光源 860 mm 处; (g) 距光源 1.2 m 处; (h) 距光源 1.4 m 处; (i) 距光源 12 m 处

Fig. 5 One-dimension illuminance E distribution of the outgoing beams from each part and entirety of TIR collimating lens at different illumination distances. (a) 55 mm away from source; (b) 150 mm away from source; (c) 260 mm away from source; (d) 360 mm away from source; (e) 490 mm away from source; (f) 860 mm away from source; (g) 1.2 m away from source; (h) 1.4 m away from source; (i) 12 m away from source

所示,图 5 中点线、虚线和实线分别代表配光元件中心折射部分、边缘全反射部分和整体出射光束在探测面上所形成的照度分布。

图 4(a) 给出的是紧贴 TIR 准直透镜后表面处探测面上的二维照度分布,中心较亮的圆形光斑是从中心折射部分出射的光束所形成的,而边缘较暗的圆环则由从边缘全反射部分出射的光束形成。由与之对应的图 5(a) 中的一维照度分布可以清晰看出,由于 LED 光源的朗伯辐射特性,中心折射部分出射光束所形成的圆形光斑照度分布呈现中心凹陷状,边缘全反射部分的出射光束投射在一环形照明区域。鉴于中心部分出射光束具有更大的发散角,随着传播距离增大,对应的光斑陡边性明显变差,顶部宽度变窄;而边缘全反射部分出射光束发散角较小,所对应的圆环状光斑虽有展宽、照度减小趋势,但不明显,如图 4(b) 和图 5(b) 所示。从

图 4(c) 和图 5(c) 中可以看出:传播至距光源 260 mm 处时,中心折射部分对应的光斑顶部呈尖峰状,照度因叠加效应显著增大;而边缘全反射部分对应的圆环状光斑开始有明显展宽、照度减小之势。此后,中心圆形光斑逐渐因光束进一步发散而展宽,顶部呈平顶状,如图 4(d) 和图 5(d) 所示。至距光源 490 mm 处,中心和边缘两部分各自的光斑照度分布恰好形成互补,叠加后的整体照度呈平顶分布,如图 4(e) 和图 5(e) 所示。但此平顶形状不能保持,随传播距离增大,中心圆形光斑和边缘圆环光斑均继续展宽,二者叠加后的整体照度呈中心凹陷分布,如图 4(f) 和图 5(f) 所示。图 5(g) 给出的是距光源 1.2 m 处的照度分布,边缘全反射部分对应光斑照度分布不再凹陷,而是呈平顶状,且宽度与中心折射部分的光斑宽度基本相同,因此叠加后的整体照度分布也呈平顶状,二维分布如图 4(g) 所

示。但此平顶状的照度分布仍然不能保持,随着出射光束继续传播,中心折射部分的光斑继续展宽,且保持平顶状照度分布,但边缘全反射部分的光斑因光束发散的叠加效应,照度分布的中心出现尖峰,如图 4(h)和图 5(h)所示。在距光源 12 m 处,配光元件各部分和整体出射光束所形成照度分布如图 4(i)和图 5(i)所示,此后照度相对分布稳定下来,不再随传播距离增大而改变,只是光斑半径会等比增大,而照度反比于传播距离的平方。

根据图 3 中的数据,中心折射部分出射光束的发散角明显大于边缘全反射部分的发散角,前者约为后者的 1.8 倍。因此,在光斑照度相对分布稳定后,中心折射部分对应的光斑半径约为边缘全反射部分对应光斑半径的 1.8 倍,与图 5(i)中的光斑半径仿真值之比 $0.76 \text{ m}/0.43 \text{ m}=1.8$ 完全吻合。同时,从图 5(i)也可以看出,边缘全反射部分对应光斑的照度 724 lx 约为中心折射部分对应光斑照度 224 lx 的 3.2 倍。而对于仿真所采用的 Cree XHP50.2 型光源^[30],可解析求得折射-全反射分界面角 $\theta_d=45^\circ$ 的 TIR 准直透镜中心折射部分收集的光通量是边缘全反射部分的 0.87,故可计算出边缘全反射部分的照度应为中心折射部分的 3.6 倍,与仿真结果的 3.2 倍基本相符。仿真与理论之间的误差主要源于配光元件的损耗和边缘全反射部分对应光斑的照度不均匀性。

TIR 准直透镜中心折射部分和边缘全反射部分出射光束的发散角不同,导致在远距离照明中,照度分布稳定后,各自照明光斑的半径不同。故该类

型配光元件整体照度的均匀性很差,即在中心折射部分所形成的平顶状照度上叠加了一个由边缘全反射部分所形成的半径更小的高峰。因此,TIR 准直照明系统的整体光斑陡边性较差,呈现明显的台阶状分布,如图 4(i)和图 5(i)所示。

3.3 配光元件口径对照明性能的影响

将 TIR 准直透镜的设计口径 $2r$ 改为 150 mm,经多次优化,取 $a=22 \text{ mm}$, $b=60 \text{ mm}$,其余参数不变,获得元件面型结构后在 TracePro 中建模仿真,并在不同位置处设置多个探测面。从仿真结果观测到光斑照度分布的演化过程与 100 mm 口径 TIR 准直透镜的情况基本相似:第一次光斑照度呈现平顶分布时距光源 1.1 m;第二次光斑照度呈现平顶分布时距光源 2.65 m;在与光源距离大于 18 m 后照度分布开始趋于稳定。具体的光强分布、照度二维分布和一维分布分别如图 6~8 所示。在图 8 中,点线、虚线和实线分别代表配光元件中心折射部分、边缘全反射部分和整体配光元件所形成的照度,形成机理与图 5(e)、图 5(g)和图 5(i)分别一一对应。

从图 6 中可以看出,150 mm 口径 TIR 准直透镜中心折射部分、边缘全反射部分和整体的出射光束发散角 $\theta_{1/2}$ 仿真值分别为 3.0° 、 1.7° 和 1.8° , $\theta_{1/10}$ 仿真值分别为 3.5° 、 2.4° 和 3.1° 。这些数值均减小至 100 mm 口径 TIR 配光元件相应值的 $1/1.5$ 左右,各部分和整体出射光束的光强增大了约 1.5^2 倍。这完全符合文献[5]的理论,即配光元件收集角度固定时,准直照明系统出射光束发散角与透镜口径成反比。

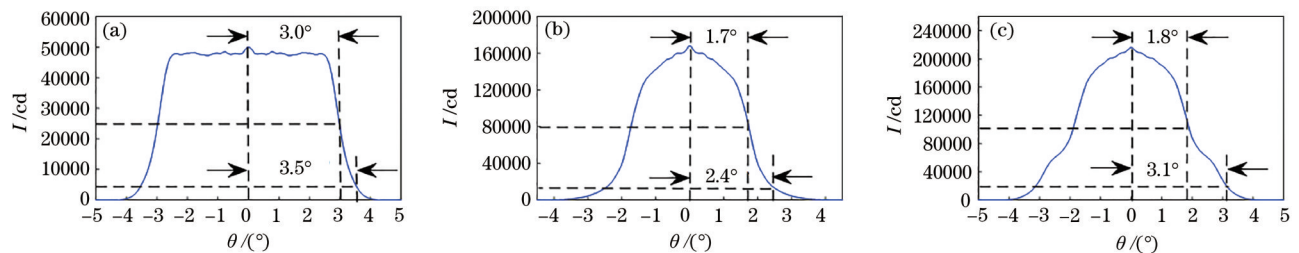


图 6 150 mm 口径 TIR 准直透镜各部分及整体出射光强 I 的一维分布。(a)中心部分;(b)边缘部分;(c)整体

Fig. 6 One-dimension intensity I distribution of outgoing beams from each part and entirety of TIR collimating lens with 150 mm aperture. (a) Core part; (b) edge part; (c) entirety

4 与同口径平凸型透镜配光效果的对比

根据文献[5]的研究,在 100 mm 口径平凸型准直配光透镜的最佳结构中,光源到透镜前表面距离取 84 mm,透镜中心厚度取 31 mm,透镜材料依然为

PMMA。根据文献[29]中的单自由曲面准直透镜生成方法,该透镜的面型如图 9 所示,可对光源 30° 孔径角内的所有光线进行收集。

在 TracePro 软件中对该透镜建模,光源设置同前述仿真,仿真得出射光束的光强分布如图 10

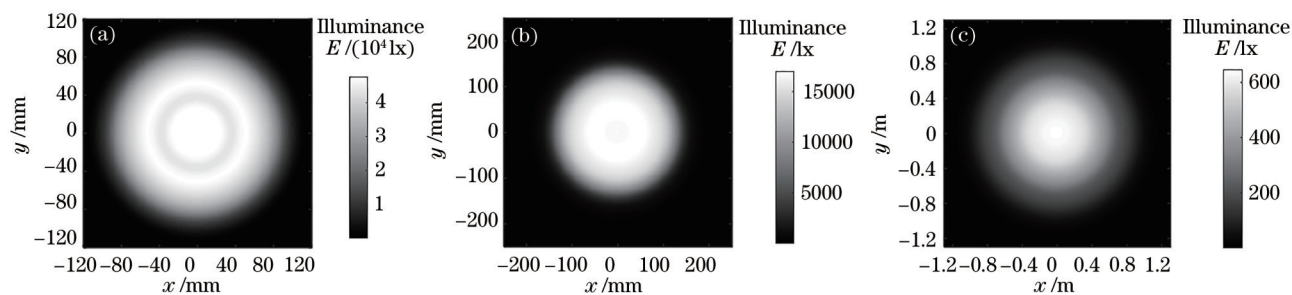


图 7 TIR 准直透镜整体出射光束在不同照明距离处照度 E 的二维分布。(a) 距光源 1.1 m 处; (b) 距光源 2.65 m 处; (c) 距光源 18 m 处

Fig. 7 Two-dimension illuminance E distribution of entire outgoing beams from TIR collimating lens at different illumination distances. (a) 1.1 m away from source; (b) 2.65 m away from source; (c) 18 m away from source

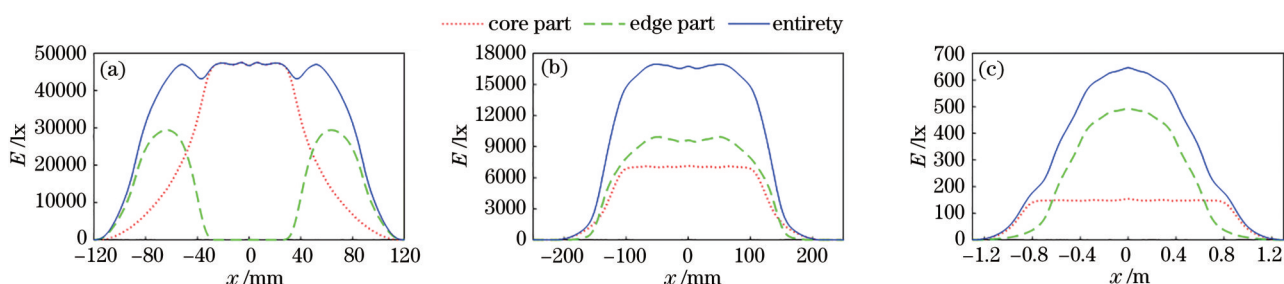


图 8 TIR 准直透镜各部分及整体出射光束在不同照明距离处照度 E 的一维分布。(a) 距光源 1.1 m 处; (b) 距光源 2.65 m 处; (c) 距光源 18 m 处

Fig. 8 One-dimension illuminance E distribution of outgoing beams from each part and entirety of TIR collimating lens at different illumination distances. (a) 1.1 m away from source; (b) 2.65 m away from source; (c) 18 m away from source

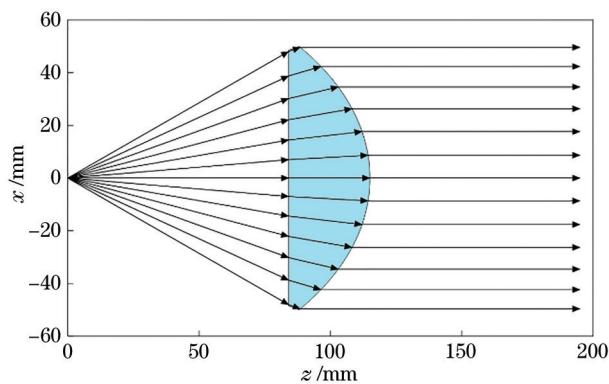


图 9 收集角为 30° 的平凸准直透镜面型及光线准直示意图
Fig. 9 Schematic diagram of surface shape and light collimation of plano-convex lens with 30° collecting angle

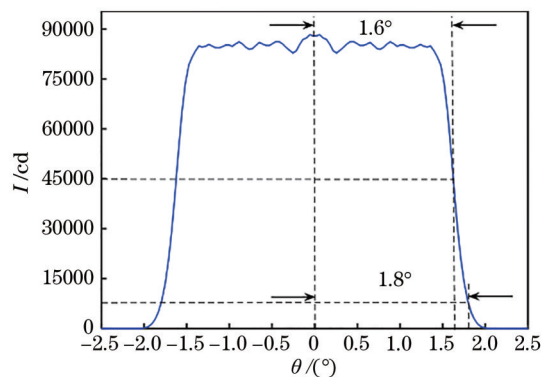


图 10 平凸准直透镜出射光强 I 的一维分布图
Fig. 10 One-dimension intensity I distribution of outgoing beams from plano-convex collimating lens

所示,从中可读出发散角 $\theta_{1/2}$ 为 1.6° 。在不同位置处形成的光斑照度分布如图 11 所示,其中图 11 (a) 为紧贴透镜后表面处的照度分布,中心凹陷;但随着传播距离增大,从距光源 10 m 处开始,照度分布变为平顶状且形成稳定分布,如图 11 (b) 所示。

为了对比 TIR 准直配光透镜和平凸型纯折射准直配光透镜的配光特性,设计 3 种配光元件,

100 mm 口径 TIR 准直透镜、150 mm 口径 TIR 准直透镜和 100 mm 口径平凸准直透镜对应的光强分布,在 25 m 远处所形成的光斑照度一维分布如图 12 所示。同时,将仿真所得的照明性能参数在表 1 中列出。

从图 12(a) 可以看出,与同口径的平凸准直配光透镜相比,TIR 准直透镜对应出射光束的发散角更大,光强稍有提升。从图 12(b) 可以看出,TIR 准

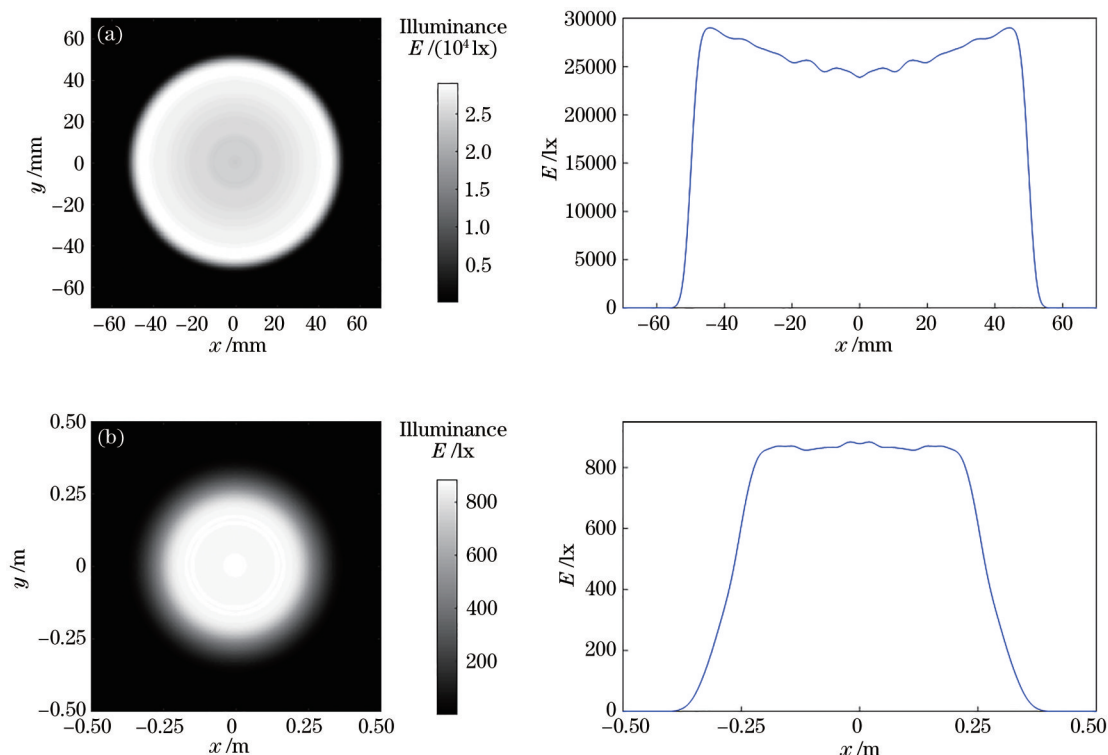


图 11 平凸准直透镜在不同照明距离处的照度 E 二维分布(左)和一维分布(右)。(a)距光源 116 mm 处；
(b)距光源 10 m 处

Fig. 11 Two-dimension (left) and one-dimension (right) illuminance E distribution of plano-convex collimating lens at different illumination distances. (a) 116 mm away from source; (b) 10 m away from source

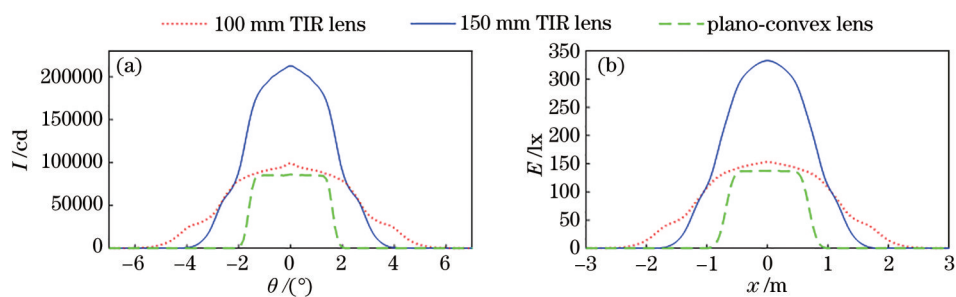


图 12 各配光元件的配光效果对比。(a)光强分布；(b)距光源 25 m 处的照度一维分布

Fig. 12 Comparison of light distribution effects of various light distribution elements. (a) Intensity distribution; (b) one-dimension illuminance distribution at 25 m away from source

直透镜形成的稳定光斑照度相对分布均呈圆环台阶围绕的尖峰状；平凸准直配光透镜的光斑均匀性和陡边性极好。因此，在要求硬边照明的场合，如舞台追光灯的设计中，平凸型准直配光透镜具有更大的优势。此外，同口径的平凸准直透镜比 TIR 准直透镜更薄，质量更轻，光线在其中行进的路程更短，吸收损耗和由此引发的热效应更小，色散效应也更弱。但 TIR 准直透镜的光通量利用率高，照明范围更为广阔，故在搜救、巡逻等场合更具应用潜力。

从图 12 和表 1 中可以看出：150 mm 口径的 TIR 准直透镜对应出射光强为 100 mm 口径的 2.25 倍，后者的发散角是前者的 1.5 倍；TIR 准直透镜的光源光通量利用率高达 88% 以上，且该数值与元件口径关系不大；与 TIR 准直透镜相比，同口径平凸准直透镜对应的出射光束发散角明显更小，但光通量利用率不足前者的 1/4，导致二者出射光强相近。

理论上，TIR 准直透镜可收集点光源发出的所有光线，光学损耗主要源于前后表面的反射损耗和

表 1 各配光元件的配光特性参数对比

Table 1 Comparison of light distribution characteristics of various light distribution elements

Type of light distribution element	Aperture $2r$ /mm	Intensity I /cd	Divergence angle /($^{\circ}$)		Flux utilization η /%
			$\theta_{1/2}$	$\theta_{1/10}$	
TIR	100	9.8×10^4	2.8	4.5	88.4
TIR	150	2.2×10^5	1.8	3.1	89.0
Plano-convex	100	8.8×10^4	1.6	1.8	20.8

扩展光源倾斜角在配光元件折射-全反射分界面附近光线的丢失。

5 实验

图 13 是本实验组设计的 100 mm 口径 TIR 准直透镜、150 mm 口径 TIR 准直透镜和 100 mm 口径平凸准直配光透镜的实物图。选取 CREE 公司的

XHP50.2 型 LED 作为光源,在 11.6 V 工作电压下测得电流为 0.7 A,光通量为 $1030 \text{ lm}^{[30]}$ 。采用此 LED 光源与 3 种配光元件分别组成 3 套准直照明系统。分别点亮它们,在 25 m 远处幕布上形成的光斑照明度如图 14 所示。测得过各光斑中心的一维照明度分布,如图 15 所示。同时,实验测得的 3 套准直照明系统性能参数如表 2 所示。

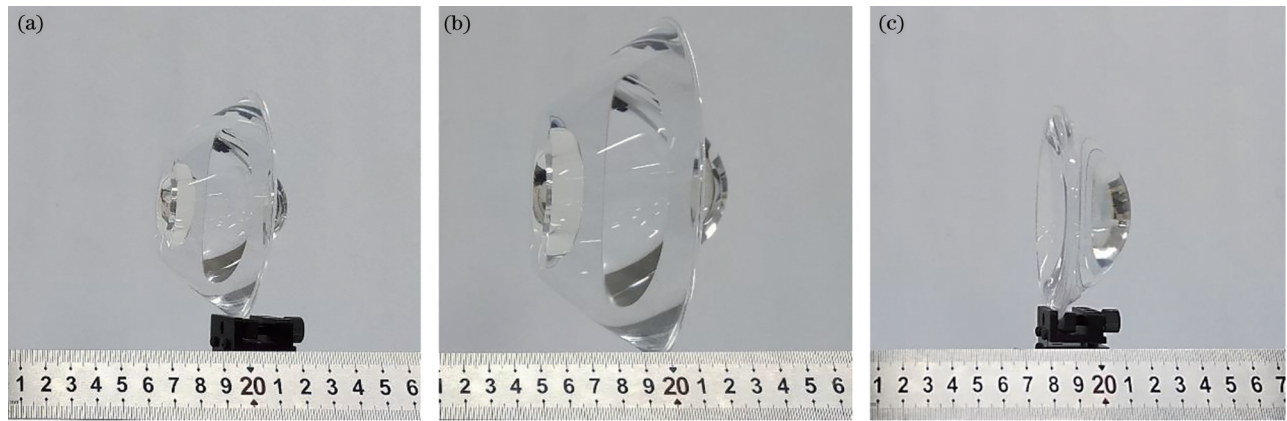


图 13 各配光元件实物图。(a) 100 mm 口径 TIR 透镜;(b) 150 mm 口径 TIR 透镜;(c) 平凸透镜

Fig. 13 Photos of various light distribution elements. (a) TIR lens with 100-mm aperture; (b) TIR lens with 150-mm aperture; (c) plano-convex lens

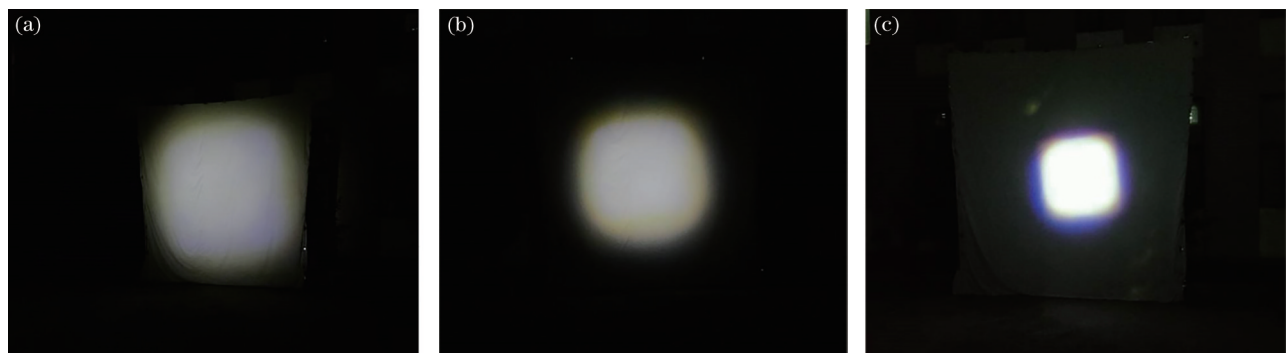


图 14 各准直照明系统的照明光斑。(a) 100 mm 口径 TIR 透镜;(b) 150 mm 口径 TIR 透镜;(c) 平凸透镜

Fig. 14 Illumination spots of various collimating illumination systems. (a) TIR lens with 100-mm aperture; (b) TIR lens with 150-mm aperture; (c) plano-convex lens

从图 14 可以直接看出:在同一距离的照明幕布上,100 mm 口径 TIR、150 mm 口径 TIR 和 100 mm 口径纯折射型准直照明系统出射的光斑依次减小,说明它们的出射光束发散角依次减小,准

直效果依次增强;另外,光斑呈明显的圆角矩形,原因在于所选用光源的发光区域是一圆角矩形。图 15 给出的实测照明度一维分布与图 12(b)的仿真结果完美吻合,只是在具体照明度值上稍有减小。从

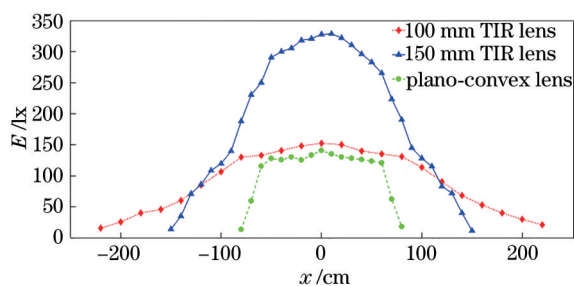


图 15 各准直照明系统实测照度的一维分布

Fig. 15 Measured one-dimension illuminance E distribution of various collimating illumination systems

表 2 各准直照明系统的实测性能参数对比

Table 2 Comparison of measured performance parameters of various collimating illumination systems

Type of light distribution element	Aperture $2r$ /mm	Illumination E /lx	Spot radius R /m	Divergence angle / ($^{\circ}$)	Flux utilization η /%
TIR	100	150.4	1.3	3.0	81.4
TIR	150	328.8	0.9	2.1	85.1
Plano-convex	100	136.5	0.7	1.6	17.2

6 结 论

利用光学软件进行仿真和实验测试,详细研究了采用 TIR 准直透镜的扩展光源准直照明系统的特性。

研究发现:与同口径最优结构的纯折射型准直照明系统相比,TIR 扩展光源准直照明系统的出射光强提升虽不明显,但光源光通量利用率增大了 4 倍;发散角增大显著,因而照明范围更大;同时,TIR 准直透镜中心折射部分出射光束发散角明显大于边缘全反射部分的出射光束发散角,因而整个 TIR 准直照明系统的出射光强分布呈台阶状,出射光束能量分布随传播距离演化;发散特性复杂,由中心折射部分和边缘全反射部分共同决定;出射光束发散角应采用十分之一光强发散角来描述,取决于中心折射部分。此外,TIR 准直照明系统的出射光束发散角与口径成反比,而出射光强与口径的平方成正比。

TIR 准直照明系统光通量利用率高,照明范围大,在搜救、巡逻、巡航灯具的二次光学设计中宜采用 TIR 准直透镜;而纯折射型准直照明系统的光斑照度均匀性和陡边性更优,故在硬边照明如舞台追光灯的设计中平凸准直配光透镜更有优势。研究结论可作为扩展光源准直照明系统二次光学设计中配光元件结构的选择依据。

表 2 可以看出:100 mm 口径 TIR 准直照明系统的光斑半径约为 150 mm 口径 TIR 准直照明系统的 1.5 倍,由此求得前者发散角约为后者的 1.5 倍,平凸透镜的发散角最小;100 mm 和 150 mm 口径 TIR 准直照明系统的光通量利用率分别为 81.4% 和 85.1%,100 mm 口径纯折射型准直照明系统的光通量利用率为 17.2%。这些数值均与表 1 的仿真值非常接近,误差主要源于两个方面:仿真光源与实际光源在发光区域和光通量上的差别;准直照明系统中光源与配光元件的装配误差。

参 考 文 献

- [1] Yang F, He C, Zhang X S. Design and analysis of a primary-secondary system for LED collimating illumination[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 082201.
杨帆,何川,张旭升.一种主次镜组合 LED 准直照明系统设计与分析[J].激光与光电子学进展,2018,55(8): 082201.
- [2] 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.
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.
- [3] Meng X X, Liu W Q, Feng R, et al. Design of LED collimator for uniform illumination with double freeform surfaces[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(8): 0822003.
孟祥翔,刘伟奇,冯睿,等.双自由曲面 LED 均匀照明准直透镜设计[J].光子学报,2014,43(8): 0822003.
- [4] Luo X X, Liu H, Lu Z W, et al. Automated optimization of free-form surface lens for LED collimation[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(9): 1351-1355.
罗晓霞,刘华,卢振武,等.实现 LED 准直照明的优化设计[J].光子学报,2011,40(9): 1351-1355.

- [5] Kang X L, Liu Q L, Wang L, et al. Divergence characteristics of outgoing beam from a collimating illumination system with an extended source[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(15): 150801.
康学亮, 刘启隆, 王丽, 等. 扩展光源准直照明系统出射光束发散特性的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(15): 150801.
- [6] Lü J Q, Zhang N, Yin P, et al. Research progress on optically designed solar photovoltaic concentrators [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(23): 230002.
吕家祺, 张宁, 尹鹏, 等. 太阳能光伏聚光器光学设计类型研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(23): 230002.
- [7] Zeng Y, Zhao H F, Duan W J. Design of optical system with illumination uniform and high distance-height ratio based on double freeform-surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(24): 2422001.
曾翌, 赵会富, 段文举. 基于双自由曲面高距高比照度均匀的光学系统设计[J]. *光学学报*, 2020, 40(24): 2422001.
- [8] Jiao F Y, Wen S S, Ma B X, et al. Design of stereo LED plant light source system with high spatial illumination uniformity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(18): 1822002.
焦飞宇, 文尚胜, 马丙戌, 等. 立体化高空间照明均匀度 LED 植物光源的设计[J]. *光学学报*, 2020, 40(18): 1822002.
- [9] Zhao S, Wang K, Chen F, et al. Lens design of LED searchlight of high brightness and distant spot [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, 28(5): 815-820.
- [10] Zhou J Y. Outstanding floodlight with an illumination distance of 10 kilometers[N]. *Suzhou Daily*, 2016-06-16(A02).
周建越. 霸气投光灯照射 10 公里[N]. *苏州日报*, 2016-06-16(A02).
- [11] Gimenez-Benitez P, Minano J C, Blen J, et al. Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions[J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(7): 1489-1502.
- [12] Hou Z, Nikolic M, Benitez P, et al. SMS2D designs as starting points for lens optimization[J]. *Optics Express*, 2018, 26(25): 32463-32474.
- [13] Chen R, Cen S Y, Jin S Z. A machine vision illumination system based on simultaneous multiple surfaces design[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(8): 956-961.
陈瑞, 岑松原, 金尚忠. 基于同步多曲面法的发光二极管机器视觉照明设计[J]. *光子学报*, 2013, 42(8): 956-961.
- [14] 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.
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.
- [15] 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.
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.
- [16] Wu D Z, Li M, Li G L, et al. Photothermal properties of compound parabolic concentrator under low interception ratio[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(8): 082201.
吴德众, 李明, 李国良, 等. 低截取比下复合抛物面聚光器的光热性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(8): 082201.
- [17] 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.
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.
- [18] 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.
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.
- [19] 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.
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.
- [20] Parkyn W A, Pelka D G. New TIR lens applications for light-emitting diodes[J]. *Proceedings of SPIE*,

- 1997, 3139: 135-140.
- [21] Tsai C Y. Free-form surface design method for a collimator TIR lens[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2016, 33(4): 785-792.
- [22] 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.
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.
- [23] 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.
- [24] Xin D, Liu H, Lu Z W, et al. Optical design of the LED illumination system with adjustable view angle [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0522003.
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, 33(5): 0522003.
- [25] Huang B Y, Lin Z X, Chen E G, et al. Design and implementation of optical coupling module in side-LED backlight system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0222003.
黄碧云, 林志贤, 陈恩果, 等. 侧入式 LED 背光模组中光耦合模块的设计与实现[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0222003.
- [26] Wang T, Han B, Shi K, et al. Underwater LED communication based on secondary light distribution with total internal reflection lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8): 0806001.
王涛, 韩彪, 史魁, 等. 基于全内反射透镜二次配光的水下 LED 通信研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0806001.
- [27] 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.
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.
- [28] 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.
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.
- [29] Kang X L, Yao H B, Liu Q L, et al. Secondary optical design for uniform illumination of extended sources based on refractive index pre-compensation method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(15): 152202.
康学亮, 姚海兵, 刘启隆, 等. 基于折射率预补偿方法的扩展光源匀光照明二次光学设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(15): 152202.
- [30] Anonymous. XHP family of LEDs[EB/OL]. (2019-07-01)[2021-03-04]. <https://cree-led.com/products/xlamp-leds-arrays/xhp-leds>.
- [31] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. China standard book numbering: GB/T 5795—2002[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中国标准书号: GB/T 5795—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.