

文章编号 1004-924X(2016)08-1884-10

基于发光二极管配光曲线设计自由曲面透镜

冯奇斌, 李亚妮, 李其功, 吕国强*

(合肥工业大学 特种显示技术教育部重点实验室 特种显示技术国家工程实验室
现代显示技术省部共建国家重点实验室 光电技术研究院, 安徽 合肥 230009)

摘要:针对头盔显示器(HMD)液晶像源的特殊要求,选择了一款小尺寸、高光效的发光二极管(LED)作为背光光源。基于此LED的光强分布曲线,利用非成像光学理论设计了双自由曲面透镜阵列,以期进一步提高背光光效。首先对单个LED设计了3款不同半径的双自由曲面透镜,形成了亮度均匀的圆形光斑。然后对单个透镜进行切割,形成矩形光斑,并用4个矩形透镜拼接成透镜阵列。选择了效果最优的透镜进行了加工和测试。结果表明:与传统的采用两层扩散膜的背光结构相比,采用透镜阵列和两层扩散膜后的背光的光能利用率提高了13.94%,背光亮度提高了96.4%,非均匀性由23.8%略提高到23.1%,半亮度视角由37°降低到19°。用设计的透镜及其阵列对LED光源发出的光线进行准直,易形成高亮度的均匀矩形光斑,满足头盔显示器液晶像源背光的要求。

关键词:头盔显示器;发光二极管(LED);LED背光;非成像光学;自由曲面透镜

中图分类号: TN141.9; TN312.8 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162408.1884

Design of double freeform surface lens based on LED radiation characteristics

FENG Qi-bin, LI Ya-ni, LI Qi-gong, LÜ Guo-qiang*

(Key Laboratory of Special Display Technology of the Ministry of Education, National Engineering Laboratory of Special Display Technology, National Key Laboratory of Advanced Display Technology, Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

* Corresponding author, E-mail: guoqianglv@hfut.edu.cn

Abstract: For the special requirements of the liquid crystal image source of a Helmet-Mounted Display (HMD), this paper chooses a smaller size and higher effective Light Emitting Diode(LED) as the backlight source. On the light intensity distribution curve of the LED, a double-freeform-surface lens array was designed based on the no-imaging optical theory to improve the backlight efficiency of the source. Three lens arrays with different radii were firstly designed to form a round light spot with uniform lightness. Then single round lens was cut to become a rectangular light spot and 4 lenses were combined to become a lens array. One lens with the best simulation results was selected to be fabricated and the backlight unit with such lens array was tested. The measurement results show that compared with the common backlight source, the luminous efficiency of the backlight source with 2 diffus-

收稿日期:2016-03-07;修订日期:2016-05-03.

基金项目:安徽省科技攻关项目(No. 1501021043)

ers and the lens array increases by 13.94%, the luminance increases by 96.4%, the non-uniformity is slightly improved from 23.8% to 23.1%, and the viewing angle of full width of half maximum decreases from 37 degree to 19 degree. The designed lens array was used to collimate the light from LED sources, satisfying the requirements of the LED backlight in LC imaging engine of the HMD.

Key words: Helmet-mounted Display(HMD); Light Emitting Diode(LED); LED backlight; non-imaging optics; freeform surface lens

1 引言

随着液晶显示(Liquid Crystal Display, LCD)技术的发展成熟, LCD 已经取代阴极射线管成为主流显示器件。发光二极管(Light Emitting Diode, LED)具有响应速度快、启动电压低、低功耗、无汞环保、寿命长等优点,被广泛使用在液晶显示背光源中^[1-3]。

头盔显示器(Helmet-Mounted Display, HMD)在现代军事以及虚拟显示中有着非常重要的应用^[4-5]。由于特殊的工作环境,机载头盔显示器对液晶像源提出了重量轻、体积小、功耗低、亮度高,坚固耐用等^[6-7]特殊要求。在用于液晶像源的传统直下式 LED 背光中,通常采用 $M \times N$ 个 LED 阵列,在一定混光空间内通过扩散膜形成矩形均匀光斑,存在主视角亮度不高的问题;而 HMD 液晶像源要求低功耗和高亮度,即对光效提出了较高要求,传统直下式 LED 背光无法满足 HMD 液晶像源的特殊使用要求,需要利用非成像光学理论对 LED 进行二次光学设计,以提升亮度和光效。

相比于传统的成像光学而言,非成像光学关注的不是目标的平面成像以及成像质量,而是光源的能量利用率以及能量分布情况^[8-9]。非成像光学研究的核心内容就是通过准确地控制入射光中每条光线的走向,使其在到达目标区域时各个光学参量符合预期希望。目前,应用非成像光学理论针对 LED 的二次设计在各个光学领域都得到了应用。Anne T^[10]等设计了全反射透镜,对彩色 LED 进行匀色。冯奇斌等^[11]针对选取的 LED 发光特性,采用混合集光方法设计了 LED 准直透镜,这种透镜的光效很高,但光斑均匀性较差。肖一胜等^[12]研究了复眼透镜阵列在 LED 透镜设计中的应用,虽然使用复眼透镜阵列可以得到较高的光效和比较均匀的光斑,但其光路及尺

寸均过大,不适用于 HMD 背光设计中。在室内和道路照明领域,芦佳宁等^[13]设计了可以在 3 m 远的接收面上形成直径为 10 m 的圆形均匀光斑的自由曲面透镜。闫国栋^[14]设计了用于 LED 路灯的能实现特定形状照明光斑的自由曲面透镜。LI 等^[15]设计了一款厚度小于 10 mm、在 10 m 远的距离形成 10 m \times 30 m 的矩形光斑的自由曲面透镜。这些自由曲面透镜大多能在远距离、大面积的情况下获得特定形状均匀光斑,主要针对可以将 LED 光源视为单一点光源、设计单一透镜的情况。而在传统的直下式 LED 背光中,由于尺寸限制,液晶屏和 LED 光源之间的距离较小,多颗 LED 阵列很难被视为单一光源,进而难以设计单个透镜进行光线调制。因此,需要对单颗 LED 设计单个透镜,然后通过多个透镜拼接组合的方式形成满足要求的照明区域。

本文针对 HMD 液晶像源的特殊要求,选择了一款小尺寸、高光效的 LED 作为背光光源,并利用非成像光学理论针对此 LED 的光强分布曲线设计了双自由曲面透镜阵列,以期较大程度地提高背光光效,并在较短的设计距离上形成高亮度的均匀矩形光斑。

2 LED 光线强度分布拟合

机载头盔显示器要求图像源重量轻、体积小、光效高,因此需选择外形尺寸小、光效高的 LED 灯做光源。通过比较各个公司不同系列的 LED,选取了 OSRAM 公司一款 LED 作为发光光源,其外形和光强分布曲线如图 1 所示。

采用最小二乘法建立光线的走向(角度) θ 和强度 I 之间的关系。从图 1 可以看出,光强分布曲线在 53°左右存在明显的拐点,故进行分段处理。 I 和 θ 之间的拟合方程为:

$$I(\theta) = a_2 \theta^2 + a_1 \theta + a_0. \quad (1)$$

故首先在曲线上取一组数据点 (θ_i, I_i) , $i=0,$

将光线入射角均匀分割为 120 个区间,第 i 条光线的入射角度 θ_i 为:

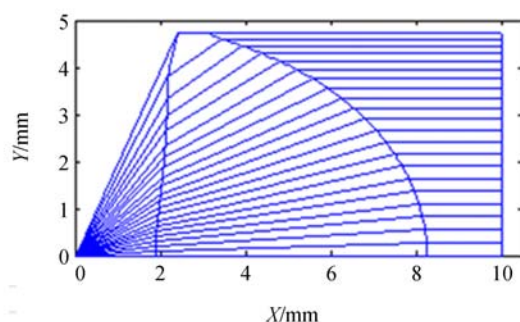
$$\theta_i = 0.5i, i = 0, 1, 2, \dots, \quad (6)$$

结合 Snell 定律,联立并求解式(7)即可得到 LED 发出的 $0^\circ \sim 60^\circ$ 的光线对应的自由曲面透镜前表面 S_1 和后表面 S_2 上的相应坐标点。

$$\left\{ \begin{array}{l} n_1 \sin(\theta_1 + \alpha_1) = n_2 \sin(\theta_2 + \alpha_1) \\ n_2 \sin(\alpha_2 - \theta_2) = n_1 \sin \alpha_2 \\ \tan \theta_1 = \frac{y_{11} - y_0}{x_{11} - x_0} = \frac{y_{11}}{x_{11}} \\ \tan \theta_2 = \frac{y_{21} - y_{11}}{x_{21} - x_{11}} \\ \tan(90 - \alpha_1) = \frac{y_{11} - y_{10}}{x_{11} - x_{10}} \\ \tan(90 - \alpha_2) = -\frac{y_{21} - y_{20}}{x_{21} - x_{20}} \\ y_{21} = y_{31} \end{array} \right. , \quad (7)$$

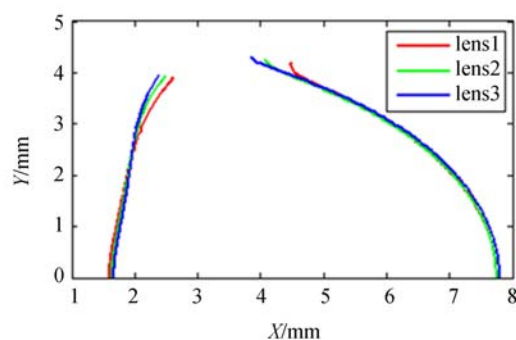
其中: (x_0, y_0) 代表 LED 光源的位置; (x_{10}, y_{10}) 、 (x_{20}, y_{20}) 是透镜前后两个表面 (S_1 和 S_2) 的初始点; (x_{30}, y_{30}) 是显示面 S_3 的初始点; (x_{11}, y_{11}) 是入射光线和 S_1 面的交点; (x_{21}, y_{21}) 是折射光线和 S_2 面的交点; (x_{31}, y_{31}) 是出射光线与 S_3 面的交点; θ_1 是光线的入射角; α_1 是入射光线和 S_1 面的交点的法线方向与水平方向的夹角; θ_2 是 S_1 面出射光线与水平方向的夹角; α_2 是 S_2 面出射光线与 S_2 面交点的法线方向的夹角; n_1 和 n_2 分别为空气和透镜材料的折射率。

背光提供的照明面积应该略大于显示面积,故对于 $9.9 \text{ mm} \times 13.2 \text{ mm}$ 的显示面积,背光面积设计为 $10.1 \text{ mm} \times 13.4 \text{ mm}$, 布置 2×2 的 LED 阵列,每个 LED 对应的透镜大小应为 $5.05 \text{ mm} \times 6.7 \text{ mm}$ 。因此,单个透镜至少应该覆盖 $5.05 \text{ mm} \times 6.7 \text{ mm}$ 的矩形,因此应满足半径 $r \geq 4.195 \text{ mm}$ 。选择 3 组半径 ($r_1 = 4.2 \text{ mm}$, $r_2 = 4.25 \text{ mm}$, $r_3 = 4.3 \text{ mm}$) 设计 3 款透镜。 (x_0, y_0) 和 (x_{30}, y_{30}) 确定为 $(0, 0)$ 和 $(10, 0)$, 通过 MATLAB 求解方程组(7)的数值解即可得到表示双自由曲面面型的多组坐标值。光路图如图 3(a) 所示,外形对比图如图 3(b) 所示,3 款透镜的设计参数如表 1 所示。



(a) 初始透镜光路示意图

(a) Optical path of original lens



(b) 3 款透镜外形对比图

(b) Outlines of 3 lenses

图 3 初始透镜

Fig. 3 Original lenses

表 1 3 款透镜的设计参数

Tab. 1 Design parameters of 3 lenses (mm)

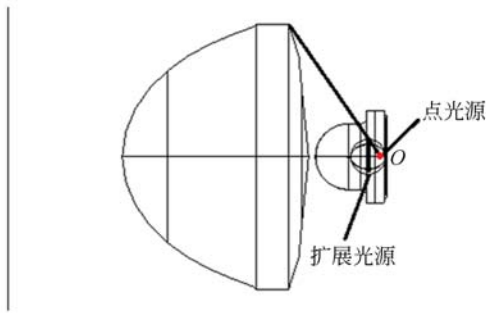
	半径 r	x_{10}	x_{20}
lens1	4.20	1.600	7.75
lens2	4.25	1.650	7.75
lens3	4.30	1.665	7.85

4 透镜仿真分析

4.1 单个透镜的仿真分析

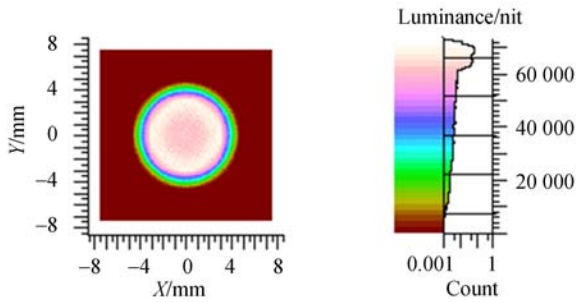
将所设计的 3 款透镜面型数据导入光学软件 LightTools 进行仿真分析。仿真中 LED 均采用了面光源,发光面尺寸为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, 单个 LED 出射的光通量为 1 lm 。考虑到理论设计的点光源和实际 LED 发光面积不同,本文采用了一种扩展光源的设计方法,即根据边缘光线原理,将设计的点光源放置在实际面光源边界的延长线

上,以此降低理论设计和实际情况的差距,提高设计精度。LED 放置示意图如图 4(a)所示。图中点光源到透镜外边缘的连线是点光源发出的入射角度为 60° 的光线,点 O 即为设计时点光源的位置,扩展光源即为面光源所在的位置,两者间的距离由透镜半径 r 、扩展光源面积和 60° 角确定。3 款透镜的亮度仿真图如图 4 所示。这 3 款透镜的视角亮度图几乎一致,如图 4(e)所示。可以看出:透镜将 LED 发出的光准直为直径大约为 10 mm 的圆形光斑,在直径为 8 mm 的中心区域内亮度均匀,半光强角度为 6.5° 左右。将单个透镜切割为 $5.05\text{ mm} \times 6.7\text{ mm}$ 的矩形,切割后的透镜外形图、仿真亮度图和视角图如图 5 所示。



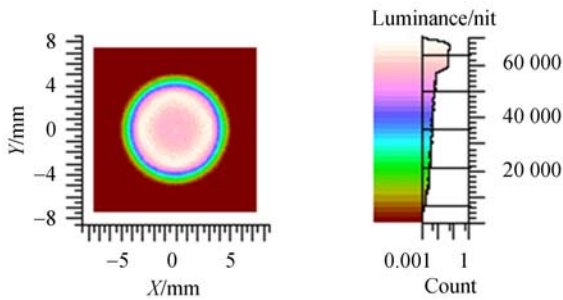
(a) 仿真模型

(a) Simulation model of single round lens



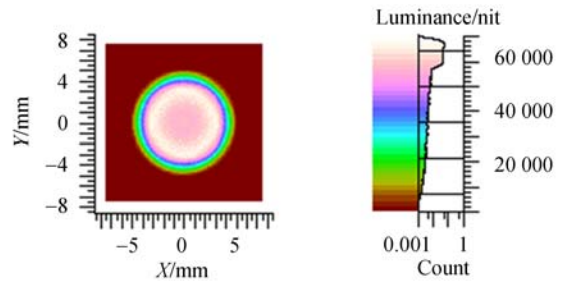
(b) lens1 仿真亮度图

(b) Luminance map of original lens1



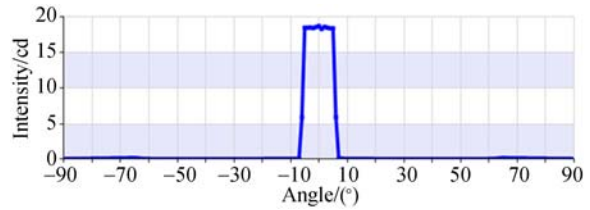
(c) lens2 仿真亮度图

(c) Luminance map of original lens2



(d) lens3 仿真亮度图

(d) Luminance map of original lens3

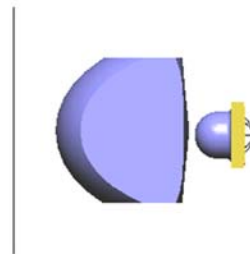


(e) 视角曲线图

(e) Viewing angle curve of original lenses

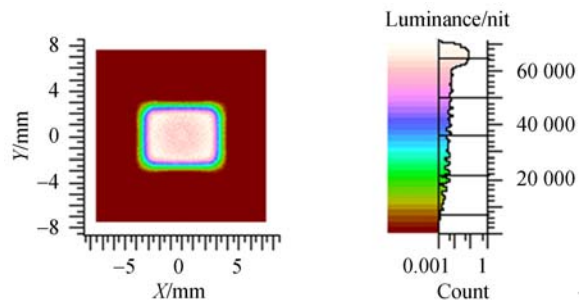
图 4 原始透镜仿真模型、仿真亮度图和视角曲线图

Fig. 4 Simulation model, luminance and viewing angle simulations of original lenses



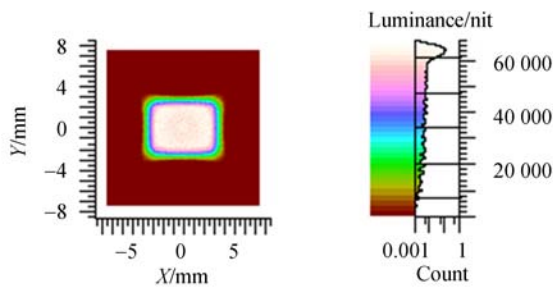
(a) 仿真模型

(a) Simulation model of single rectangular lens

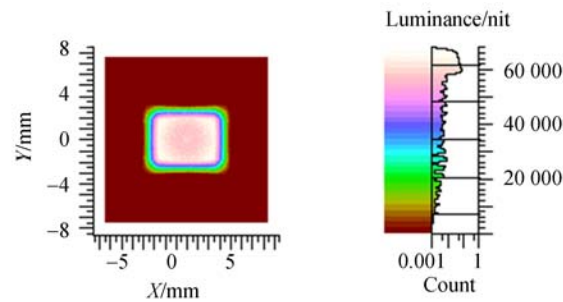


(b) lens1 仿真亮度图

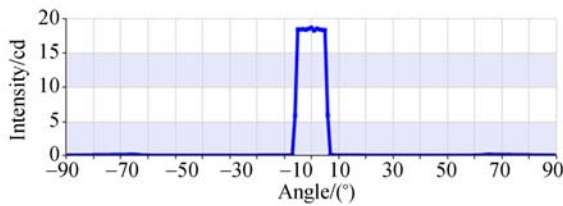
(b) Luminance map of rectangular lens1



(c) lens2 仿真亮度图
(c) Luminance map of rectangular lens2



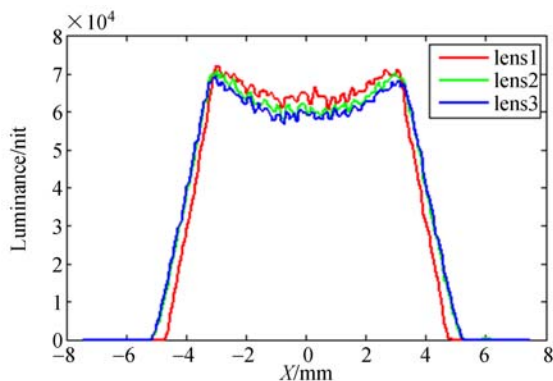
(d) lens3 仿真亮度图
(d) Luminance map of rectangular lens3



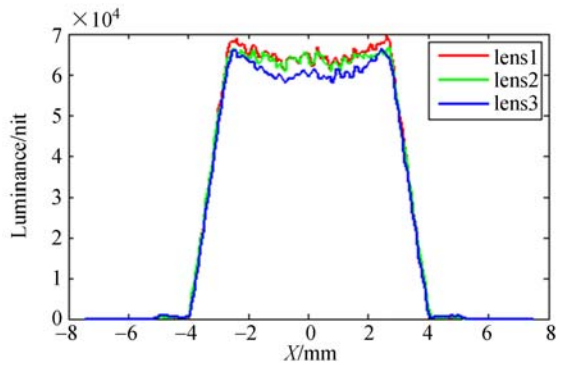
(e) 视角曲线图

(e) Viewing angle curve of rectangular lenses

图 5 切割后透镜的仿真模型、仿真亮度图和坎德拉图
Fig. 5 Simulation model, luminance and viewing angle simulations of rectangular lenses



(a) 未切割透镜
(a) Original lens



(b) 切割透镜
(b) Cut lens

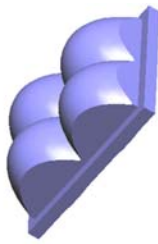
图 6 三款透镜中心线上的亮度对比

Fig. 6 Comparison of luminance along horizontal line among 3 lenses

图 6(a)表示 3 款透镜未切割时中心线上($Y=0$ mm 处)的亮度对比,图 6(b)表示 3 款透镜切割后中心线上的亮度对比。从图 6 的亮度变化趋势来看,越靠近中心部分,亮度越均匀;而在边缘区域,亮度则明显下降。从图 6(a)中可以看出:透镜切割前,在 $|X| \leq 3.2$ mm 时,随着半径增大,亮度减小;当 $|X| \geq 3.2$ mm 时,亮度随着半径增大而提高。从图 6(b)中可以看出:透镜切割后,在 $|X| \leq 2.3$ mm 时,随着半径增大,亮度减小;在 $|X| \geq 2.3$ mm 后,边缘亮度变化趋势不明显。对于 $5.05 \text{ mm} \times 6.7 \text{ mm}$ 的矩形,在长边中心处(对应图 4 亮度图中 $X=0$ mm, $Y=2.525$ mm),经切割后的 3 款透镜的亮度分别是 33 790, 33 431, 30 760 nit。在 $X=3.35$ mm, $Y=2.525$ mm 处,经切割后的 3 款透镜在位置 5.05 mm 处的亮度分别是 13 822, 15 850 和 14 282 nit。

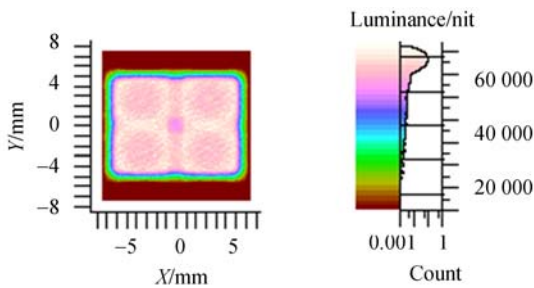
4.2 透镜阵列仿真

将上文得到的 3 款透镜分别拼接成 2×2 透镜阵列,考虑到加工时的定位需求,在透镜阵列周围增加了厚度为 1 mm 的一圈底板。透镜阵列模型及仿真结果如图 7 所示。可以看出:采用 lens1 的亮度图中心处有暗区,均匀性不佳;而采用 lens2 和 lens3 的照度图则比较均匀。其原因是透镜四角拼接处(对应图 7 中 $X=0$ mm, $Y=0$ mm)距离单个透镜中心最远,亮度最低,而 lens1 半径最小,此处最暗,拼接后依然较暗; lens2 和 lens3 由于半径较大,此处亮度稍高,拼接后没有出现暗区。



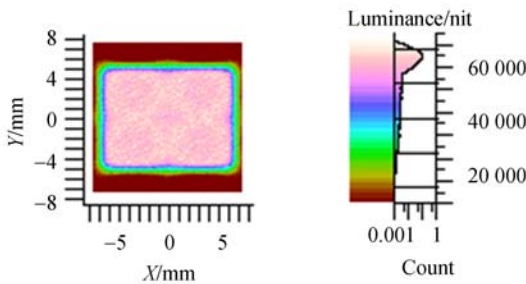
(a) 透镜阵列外形图

(a) Simulation model of lens array



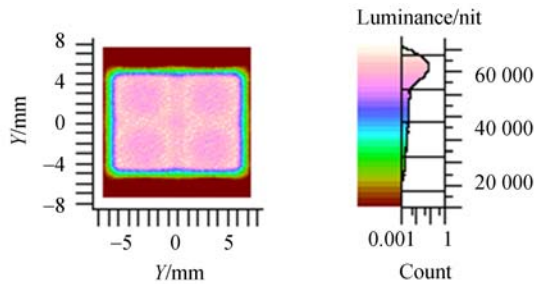
(b) lens1 仿真亮度图

(b) Luminance map of lens1



(c) lens2 仿真亮度图

(c) Luminance map of lens2



(d) lens3 仿真亮度图

(d) Luminance map of lens3

图 7 透镜阵列及其仿真亮度图

Fig. 7 Simulation model and luminance map of lens arrays

为了更精确地分析透镜的均匀性和性能,选择 5 个具有代表性的点,如图 8 所示。 P_1 是单个

透镜中心, P_2 是长轴中心, P_3 是四角拼接处, P_4 是短轴中心, P_5 是前 4 个点的中心。3 款透镜阵列的仿真结果中这 5 点的亮度如表 2 所示。亮度的非均匀性公式为:

$$\text{亮度非均匀性} = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}} \quad (8)$$

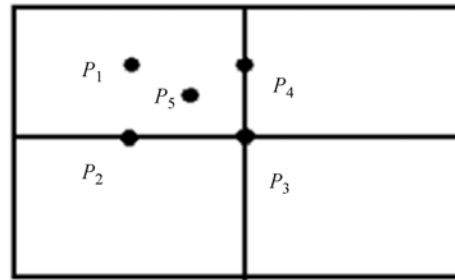


图 8 5 点位置示意图

Fig. 8 Location diagram of 5 sample points

表 2 5 点位置仿真亮度值

Tab. 2 Luminance simulation results at 5 points

nit	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	非均匀性 /points
lens1	68 251 65 700	55 629 69 508	63 178			11.09
lens2	66 234 64 953	63 870 69 530	61 589			6.06
lens3	64 238 63 970	59 298 63 206	56 067			6.79

由图 6、图 7 及表 2 可得:透镜半径越大,透镜中心 P_1 亮度越小,透镜边缘部分亮度越大。这是因为透镜半径越大,同样的光能覆盖面积就越大,此面积内的亮度就越小,因此半径在满足可切割条件的情况下越小越好。但若半径过小,例如 $r=4.2 \text{ mm}$ 时, P_3 处亮度又会过低导致均匀性变差,因此设计透镜时半径应取较合适的值才能使亮度和均匀性都达到最优。lens2 构成的拼接阵列的平均亮度比另外两款 lens 稍高,均匀性最好,所以是效果最佳的模型。

5 实际测量结果与讨论

根据最优设计结果,采用整体压铸工艺加工了 2×2 透镜阵列模型,如图 9 所示。

将此模型放入背光腔中进行亮度测试,为增大视角及提高均匀性,实际工作时在透镜阵列上方放置了两层扩散膜(乐凯公司,CD178)。采用



图 9 透镜阵列及背光模组

Fig. 9 Prototype of lens array and backlight unit

积分球和色度亮度计分别测试了采用和不采用透镜阵列的背光模组的光通量和 9 点亮度^[16],测试时驱动电流为 30 mA,9 点亮度值如表 3 所示。表 4 给出了相关的其他测量结果及计算结果,其中非均匀性是将 9 点亮度的最大值和最小值带入式(8)计算得到的。

表 3 9 点亮度测量值

Tab. 3 Measured luminances of 9 points

测试点	LED+2 层扩散膜	LED+透镜阵列 +2 层扩散膜
1	40 700	79 920
2	39 180	75 670
3	27 410	67 800
4	26 700	83 020
5	25 850	53 900
6	31 000	77 400
7	24 990	51 910
8	34 780	79 270
9	25 960	61 560
亮度非均匀性/%	23.9	23.1

表 4 各项指标测试值

Tab. 4 Measured results of BLU with and without lens array

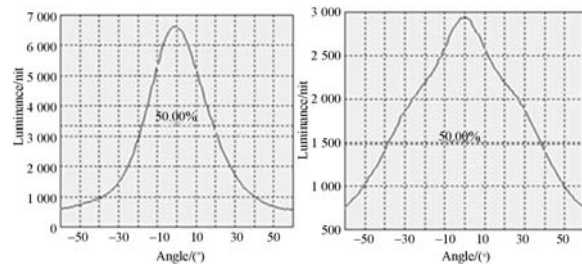
指标	LED+两层	LED+透镜阵列
	扩散膜	+两层扩散膜
光通量/lm	8.721 2	9.937 4
能量利用率/%	50.27	57.28
亮度非均匀性/%	23.10	23.90
半亮度视角/(°)	37	19

为便于比较,测得背光腔中 LED 辐射的光通量为 17.35 lm,不使用透镜的只加两层扩散膜的传统背光的光通量为 8.7212 lm,光能利用率为 $8.7212/17.35=50.27\%$;采用透镜阵列后光能利用率为 $9.9347/17.35=57.28\%$,所以提高了 13.94%。

采用透镜阵列后,中心亮度(第一点亮度)增

加了 $(79\ 920-40\ 700)/40\ 700=96.4\%$,亮度非均匀性为 23.1%,比传统两层扩散膜的非均匀性略有提高(23.9%)。

采用 ELDIM 公司的视角测试仪 EZ-LITE 测试了两种情况下的视角曲线。由于驱动电流为 30 mA 时亮度值超过 EZ-LITE 的量程,考虑到视角特性不随背光亮度发生改变,因此降低驱动电流到 3 mA,测试结果如图 10 所示。图 10(a)和 10(b)分别是两层扩散膜加透镜阵列及不加透镜阵列的视角图。图中黑色水平虚线对应的亮度值是最高亮度的 50%。可以看出:传统的采用两层扩散膜的半亮度视角为 37°,加透镜阵列后的半亮度视角为 19°左右。采用两层扩散膜和透镜阵列,在提高中心亮度的同时降低了视角。尽管采用透镜阵列后光能利用率提高了 13.94%,不过根据能量守恒,亮度和视角仍是两个相互矛盾的指标。



(a) 两层扩散膜+透镜阵列 (b) 两层扩散膜
(a) Two diffusers+lens array (b) Two diffusers

图 10 视角测试图

Fig. 10 Viewing angle curves

6 结 论

本文设计了一种采用双曲面透镜阵列的头盔显示器液晶像源背光。和传统的采用两层扩散膜的背光结构相比,该背光在不改变现有外形结构的情况下,光能利用率提高了 13.94%,中心亮度提升了 96.4%,亮度非均匀性略有提高,半亮度视角从 37°减少为 19°。该透镜及其阵列对 LED 光源发出的光线进行准直,使得整形后的光束在距透镜后表面很近(毫米级)的探测面上就可形成所需的能量分布,因此适合用在限制尺寸、需要提高光效的光学系统中。

参考文献:

- [1] Daniel D E,童林凤.背光源的发展趋势[J].光电子技术,2006,26(2):74-80.
DANIEL D E, TONG L S. Trends of backlights [J]. *Optoelectronic Technology*, 2006, 26 (2): 74-80. (in Chinese)
- [2] 常锋,孙志远,王瑞光,等. LED 显示图像的非均匀度校正改进方法[J]. 光学精密工程,2011,19(4):929-937.
CHANG F, SUN ZH Y, WANG R G, *et al.*. Improvement of non-uniformity correction of LED display images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19 (4):929-937. (in Chinese)
- [3] SHIN-T W. Next generation LCD technology[J]. *Journal of Information Display*, 2010, 26(1):3.
- [4] 刘玉.透视型液晶头盔显示器应用研究[D].杭州:浙江大学,2001:6-20.
LIU Y. *Application Study of Transitive LC Head-mounted Display* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001:6-20. (in Chinese)
- [5] 孙远航.基于 LCoS 的头盔显示系统的研究[D].南京:东南大学,2008:5-18.
SUN Y H. *LCoS-based Heat-Mounted Display System* [D]. Nanjing: South-East University, 2008:5-18. (in Chinese)
- [6] 刘涛,赵国荣,陈穆清.一种新的头盔显示器光学系统设计方案[J].光电技术应用,2005,20(6):14-17.
LIU T, ZHAO G R, CHEN M Q. A new design of optical system of helmet-mounted display[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2005, 20(6): 14-17. (in Chinese)
- [7] 赵国荣,刘涛,李冀鑫.头盔显示器图像源技术研究[J].光电子技术与信息,2006,19(2):64-68.
ZHAO G R, LIU T, LI J X. Research on the image source technology of HMD [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2006, 19(2):64-68. (in Chinese)
- [8] 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.
LUO Y, ZHANG X P, WANG L, *et al.*. Non-imaging optics and its application in solid state lighting [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2008, 35(7): 963-971. (in Chinese)
- [9] 黄锦胜.通过自由曲面设计实现 LED 路灯特定形状光斑的研究[D].广州:华南理工大学,2013:34-47.
HUANG J SH. *Free-form Surface Design for LED Street light's Uniform Illumination of Special Area* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013:34-47. (in Chinese)
- [10] ANNE T, KRISTER B. Color uniformity in spotlights optimized with reflectors and TIR lenses [J]. *Optics Express*, 2015,3(23):118-123.
- [11] 冯奇斌,杨光磊,井长龙,等.固态体积式真三维立体显示发光二极管投影光源[J].光学精密工程,2014,22(5):1113-1119.
FENG Q B, YANG G L, JING CH L, *et al.*. LED-based projection light source for solid-state volumetric true-3D display [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014,22(5):1113-1119. (in Chinese)
- [12] 肖一胜,张继勇.复眼透镜阵列在 LED 透镜设计中的应用研究[J].照明工程学报,2010(21):33-37.
XIAO Y SH,ZHANG J Y. Research on application of compound eyes display to design of LED lenses [J]. *Chinese Illuminating Engineering Journal*, 2010(21):33-37. (in Chinese)
- [13] 芦佳宁,余杰,童玉珍,等.实现大范围均匀照明 LED 透镜二次光学设计[J].半导体光电,2012(3):334-337.
LU J N, YU J, TONG Y ZH, *et al.*. Secondary optical design for light emitting diodes lens with wide range and high uniformity illumination [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2012 (3): 334-337. (in Chinese)
- [14] 闫国栋.大功率 LED 集成光源的二次光学系统设计方法研究[D].广州:广东工业大学,2013:22-36.
YAN G D. *Study on Secondary Optical System Design for High-power LED Integrated Source* [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2013:22-36. (in Chinese)
- [15] LI H T, CHEN SH C, HAN Y J, *et al.*. A fast

feedback method to design easy-molding freeform optical system with uniform illuminance and high light control efficiency [J]. *Optical Express*, 2013, 21(1):1258-1268.

- [16] 国军标 GJB 5435-2005. 机载有源矩阵液晶显示器光度和色度测量方法[S]. 北京:中国标准出版社,

2006.

National military standard GJB 5435-2005. *The photometric and colorimetric measurement method for active matrix liquid crystal display in aircraft cockpit* [S]. Beijing: China Standard Press, 2006. (in Chinese)

作者简介:



冯奇斌(1970—),女,天津人,博士,副教授,1995 于华东工业大学获得硕士学位,2006 年于维也纳工业大学获得博士学位,主要从事立体显示、LED 背光等方面的研究。E-mail: fengqibin@hfut.edu.cn

通讯作者:



吕国强(1962—),男,浙江新昌人,教授,1983 年、1986 年于浙江大学分别获得学士、硕士学位,现为合肥工业大学光电技术研究院常务副院长,主要从事立体显示、液晶显示等方面的研究。E-mail: guoqianglv@hfut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)