

# 用于头显液晶像源LED背光的双自由曲面透镜阵列设计

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** 发光二极管(LED)已经成为头盔显示器液晶像源主流背光源。LED发散角较大,大量的光线无法得到有效利用而造成能量的浪费,故需要对LED进行二次光学设计以有效提高光效。背光包括由若干个LED组成的阵列。对单个LED设计了双曲面透镜,形成了8 mm直径的均匀圆形光斑。对单个透镜进行切割,以形成矩形光斑。但由于切割面的全反射,矩形面积内存在亮斑。对透镜进行了优化设计,获得了亮度均匀的矩形光斑。4个矩形透镜拼接成透镜阵列。为消除杂散光斑,对透镜再次进行了优化设计。根据设计结果加工了透镜阵列并对背光进行了实际测试。测试结果表明:和传统背光结构相比,采用两层扩散膜和透镜阵列后,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39°降低到23°。满足头盔显示器液晶像源背光的要求。

**关键词** 光学器件;液晶像源;头盔显示;发光二极管背光;自由曲面

中图分类号 TN141.9; TN312.8

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1123003

## Lens Array with Double Freeform Surface for LED Backlight in LCD Imaging Engine of Helmet-Mounted Display

Feng Qibin Li Yani Li Qigong Lü Guoqiang

*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, Anhui 230009, China*

**Abstract** Light emitting diode (LED) has become a mainstream backlight technology for liquid crystal display (LCD) imaging engine of helmet-mounted display. With large emitting angle, a lot of lights from LED can't be used effectively, causing power waste. The backlight consists of LED array. The secondary optical design can help to improve the luminous efficiency. A double-freeform-surface lens is proposed, which forms a circle spot with a 8mm diameter. The lens is cut to form a rectangle spot. However, the hot spot appears, caused by the total reflection. The lens is then optimized, forming a rectangle spot with high uniformity. 4 lens are combined to become a lens array. In order to eliminate stray lights, the optimization on lens is performed again. The prototype of lens array is developed and the backlight unit with lens array is measured. The measurement results show that compared with the common backlight, the luminance of the backlight with 2 diffusers and lens array increases by 96.4%, the non-uniformity of 23.1% is slightly improved from 23.8%, the viewing angle of half-luminance decreases from 39° to 23°. The designed lens array satisfied the requirements of the LED backlight in LCD imaging engine of helmet-mounted display.

**Key words** optical devices; liquid crystal image engine; helmet-mounted display; light emitting diode backlight; freeform surface

**OCIS codes** 230.3720; 230.3670; 110.2960

收稿日期: 2015-05-20; 收到修改稿日期: 2015-06-30

基金项目: 安徽省自然科学基金(1408085MKL86)

作者简介: 冯奇斌(1970—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事液晶显示、LED背光等方面的研究。

E-mail: fengqibin@hfut.edu.cn

\*通信联系人。Email: guoqianglv@hfut.edu.cn

# 1 引 言

头盔显示器(HMD)在现代军事以及虚拟显示中有极其重要的应用<sup>[1-3]</sup>。作为HMD的主要组成部分之一,像源性能直接决定了HMD性能。液晶显示(LCD)经过多年发展已经逐渐代替阴极射线管成为主流像源显示器件。HMD液晶像源需要满足几个特殊要求,包括重量轻、体积小、发热量小、功耗低、亮度高等<sup>[4]</sup>。提高背光源的发光亮度/功耗比(光效)能够在同等功耗下获得更高的亮度,减少发热量,是提高像源显示性能的有效技术途径。

发光二极管(LED)具有响应速度快、启动电压低、寿命长、固态发光等优点,已经成为液晶显示主流背光源<sup>[5-7]</sup>。但LED属于朗伯发光,发散角较大,大量的光线无法得到有效利用而造成能量的浪费。故需要对LED进行二次光学设计以提高其光效。

目前对于LED的二次设计主要集中在路灯照明领域,如Li Hongtao等<sup>[8]</sup>设计了一款厚度小于10 mm、在10 m远的距离形成10 m×30 m的矩形光斑的自由曲面透镜;Hsichao Chen等<sup>[9]</sup>针对LED光源设计了圆柱形透镜满足了路灯照明要求;Xianglong Mao等<sup>[10]</sup>设计了一款体积小巧的自由曲面透镜,能够在10 m远的距离形成20 m×40 m的矩形光斑。闫国栋<sup>[11-12]</sup>设计了能实现特定形状照明光斑的用于LED路灯的自由曲面透镜。张奇辉<sup>[13-14]</sup>探讨了用于路灯照明的针对大功率LED的二次光学设计方法。分析如上的应用,大多是在远距离、大面积内获得特定形状均匀光斑,而且主要是针对可以将光源视为单一面光源、设计单一透镜的情况。而在用于液晶像源的直下式LED背光中,通常采用M×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。由于尺寸限制,液晶屏和LED光源之间的距离较小,很难将多颗LED阵列视为单一光源进而设计单个透镜进行光线调制。故需要对单颗LED设计单个透镜,然后通过多个透镜组合的方式形成满足要求的照明区域。本文就是针对HMD液晶像源的特殊设计要求,开发自由曲面透镜阵列,以期较大程度地提高背光光效,在较短的距离上形成高亮度的满足使用要求的均匀矩形光斑。

# 2 单个自由曲面透镜设计

现有HMD的像源模块结构如图1所示,显示面积为12.8 mm×9.6 mm,LED为2×2阵列,距离LED 10 mm处放置LCD,4颗LED发出的光线通过2层扩散膜(diffuser1和diffuser2)进行匀光,在LCD处实现均匀矩形照明。采用自由曲面透镜阵列后,希望在不改变现有外形尺寸和不降低均匀性的前提下,将背光亮度提高60%以上。

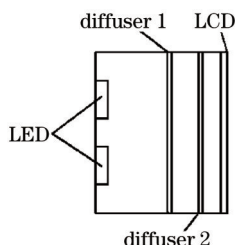


图1 现有HMD像源背光结构

Fig.1 HMD image engine backlight structure

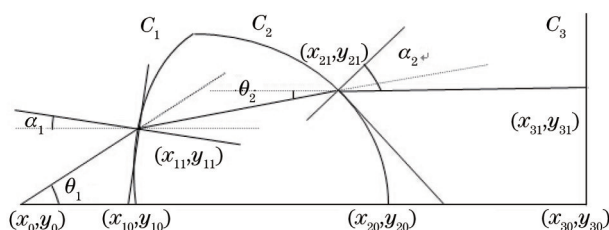


图2 自由曲面透镜设计原理

Fig.2 Design principle of freeform surface lens

采用双自由曲面透镜阵列的背光设计思路为:每个透镜对应一个LED,鉴于设计的透镜形成的是圆形光斑,故对单个透镜进行切割,然后将4个切割后的透镜拼接为2×2阵列,与LED阵列对应放置,从而形成矩形照明区域。

单个自由曲面透镜设计原理如图2所示:LED放置在 $(x_0, y_0)$ 处,发射光束呈朗伯形式,即光能遵循余弦定理,LCD位于 $C_3$ 面上,此面上光能为均匀分布。LED发出的光线通过 $C_1$ 和 $C_2$ 两个曲面后,平行出射,即入射到 $C_3$ 面上的光线呈平行分布。由于光源发射光线的能量遵循余弦定理,即中间光线能量大而边缘光线能量小,为了保证 $C_3$ 面的亮度均匀性,必须调整 $C_3$ 面上入射光线的疏密程度,做到中间稀疏而边缘密集。假设透镜收集的光线最大角度为 $60^\circ$ ,入射到 $C_3$ 面的 $r$ 处。LED发出的角度为 $\theta_1$ 的光线经过双曲面后入射到 $C_3$ 面的 $y_{31}$ 处。 $C_3$ 面上的能量是均匀分布的:

$$\frac{y_{31}}{r} = \frac{\int_0^{\theta_1} \cos \theta_i di}{\int_0^{60^\circ} \cos \theta_i di} = \frac{\sin \theta_1}{\sin 60^\circ}, \quad (1)$$

$$y_{31} = \frac{r}{\sin 60^\circ} \times \sin \theta_1, \quad (2)$$

式中  $r$  是透镜半径,  $\sin 60^\circ$  表示设计的透镜收集到的 LED 发出光线的最大角度为  $60^\circ$ 。结合斯涅尔定律, 联立下列方程, 即可得到 LED 从  $0^\circ$  到  $60^\circ$  之内的发出光线对应的透镜前表面  $C_1$  和后表面  $C_2$  上的坐标点:

$$\left\{ \begin{array}{l} n_1 \sin(\theta_1 + \alpha_1) = n_2 \sin(\theta_2 + \alpha_1) \\ n_2 \sin(\alpha_2 - \theta_2) = n_1 \sin \alpha_2 \\ \tan \theta_1 = \frac{y_{11} - y_0}{x_{11} - x_0} = \frac{y_{11}}{x_{11}} \\ \tan \theta_2 = \frac{y_{21} - y_{11}}{x_{21} - x_{11}} \\ \tan(90^\circ - \alpha_1) = \frac{y_{11} - y_{10}}{x_{11} - x_{10}} \\ \tan(90^\circ - \alpha_2) = -\frac{y_{21} - y_{20}}{x_{21} - x_{20}} \\ y_{21} = y_{31} \end{array} \right., \quad (3)$$

式中  $(x_0, y_0)$  是 LED 光源的位置;  $(x_{10}, y_{10})$ 、 $(x_{20}, y_{20})$  是透镜前后两个表面 ( $C_1$  和  $C_2$ ) 的初始点;  $(x_{30}, y_{30})$  是显示面  $C_3$  的初始点;  $(x_{11}, y_{11})$  是入射光线和  $C_1$  面的交点;  $(x_{21}, y_{21})$  是折射光线和  $C_2$  面的交点;  $(x_{31}, y_{31})$  是出射光线与  $C_3$  面的交点;  $\theta_1$ : 光线的入射角;  $\alpha_1$ : 入射光线和  $C_1$  面的交点的法线方向与水平方向的夹角;  $\theta_2$ : 折射光线与水平方向的夹角;  $\alpha_2$ : 折射光线和  $C_2$  面的交点的法线方向与水平方向的夹角;  $n_1$  和  $n_2$  分别为空气和透镜材料的折射率。

根据设计要求,  $(x_0, y_0)$  和  $(x_{30}, y_{30})$  确定为  $(0,0)$  和  $(10,0)$ 。设定初始的  $x_{10}=2$ ,  $x_{20}=8.45$ ,  $r=4.8$ , 得到双曲面多个点的坐标值, 光路图如图 3 所示。

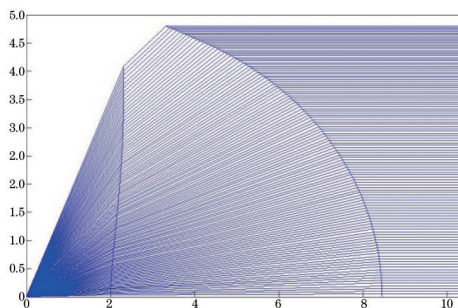


图 3 初始透镜光路示意图

Fig.3 Optical path of original lens

### 3 单个透镜仿真分析

根据上面的设计数据, 用 SolidWorks 软件建立模型, 导入光学软件进行仿真分析, 其外形、仿真照度图和视角亮度图如图 4 所示。可以看出: 该透镜产生直径大约为 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  $7^\circ$  左右。

为形成需要的矩形光斑, 配合背光包含的  $2 \times 2$  个 LED, 将单个透镜切割为  $6.6 \text{ mm} \times 5.2 \text{ mm}$  的矩形。切割后的透镜外形图、仿真照度图和视角图如图 5 所示。从照度图可以看出, 在照明面积内存在明显的亮斑。经过分析发现是切割面的全反射光线引起的, 故对初始的透镜进行重新设计。

经过多次尝试发现, 当  $x_{10}=1.985$ 、 $x_{20}=7.36$ 、 $r=4.25$  时, 切割后的透镜在显示区域内没有亮斑, 仿真照度图及视角亮度图如图 6 所示。从图中可以看出: 优化后的透镜并没有完全消除切割面全反射造成的亮斑, 只是将其移出了显示区域, 视角特性没有太大变化。

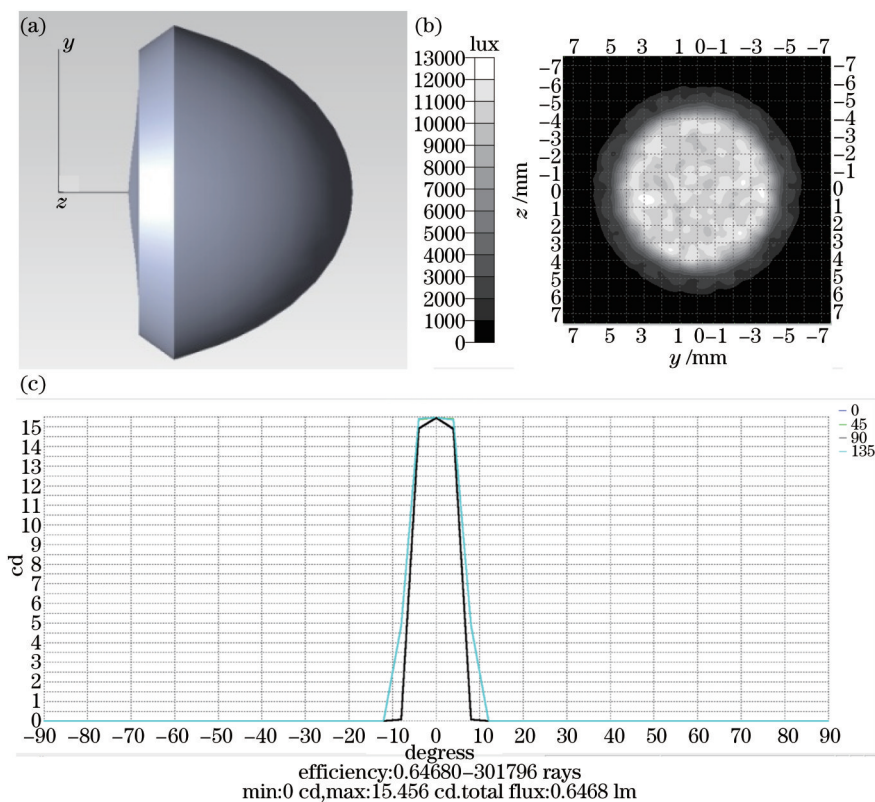


图4 初始设计透镜的(a)外形图、(b)仿真照度图和(c)坎德拉图

Fig.4 (a)Outline, (b)illumination and (c)viewing angle simulations of the original lens

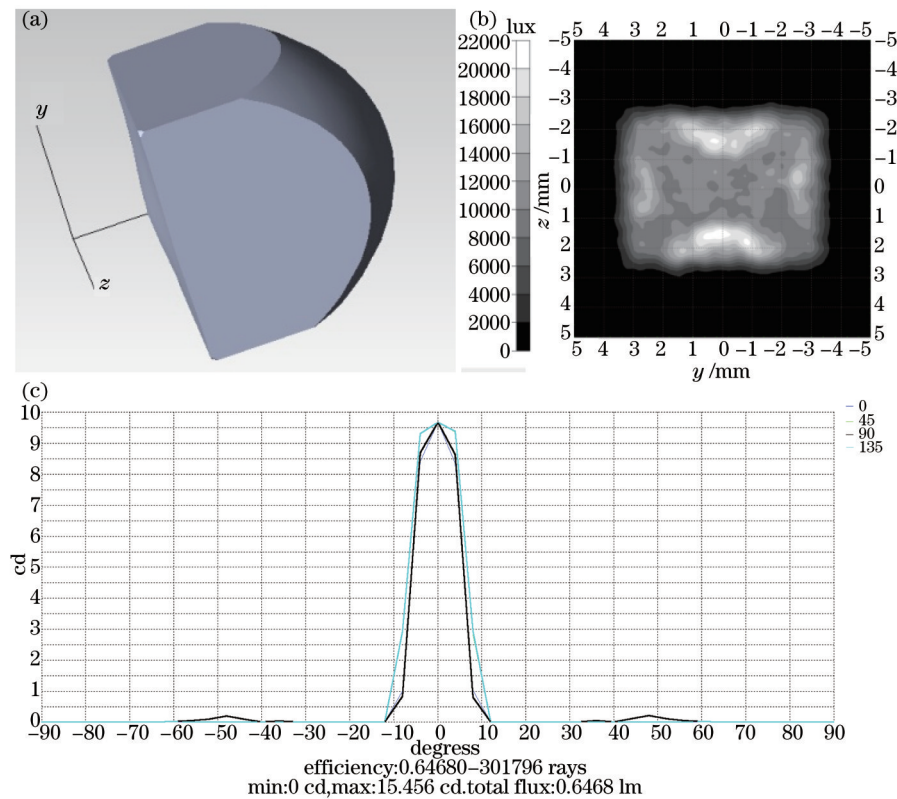


图5 初始透镜切割后的(a)外形、(b)仿真照度图和(c)坎德拉图

Fig.5 (a)Outline, (b)illumination and (c)viewing angle simulations of the cutted lens

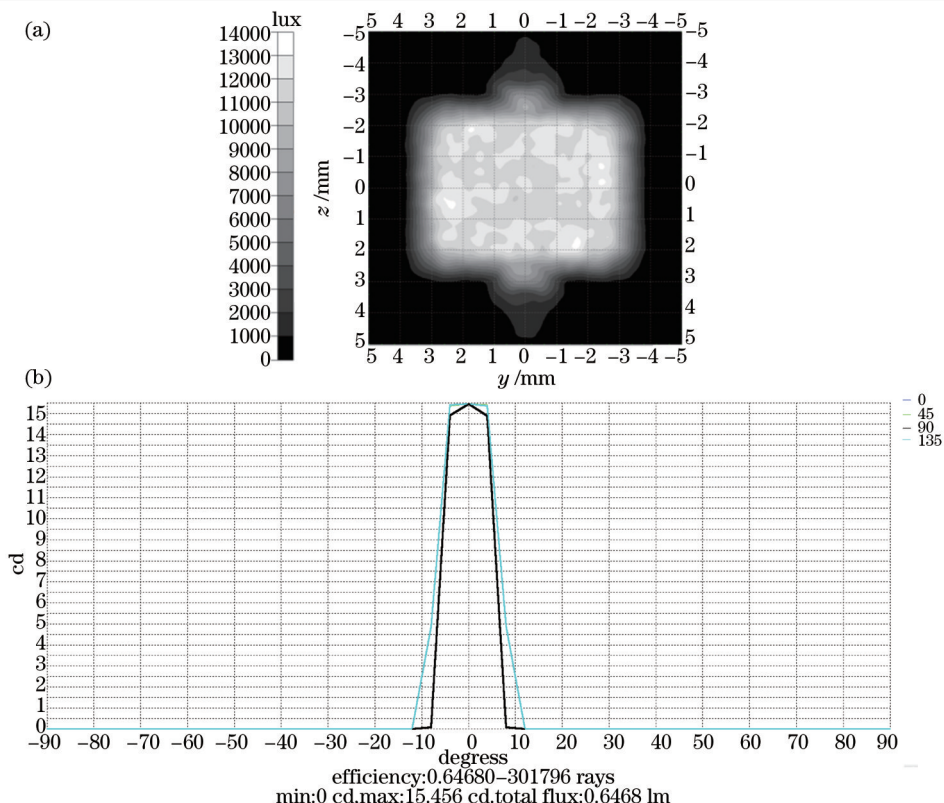


图 6 优化后的透镜(a)仿真照度图和(b)坎德拉图

Fig.6 (a)Illumination and (b)viewing angle simulations of the optimized lens

#### 4 透镜阵列仿真

将如上优化设计得到的单个透镜拼接成 2×2 透镜阵列,仿真结果如图 7 所示。由于单个透镜在长边存在上下两个全反射亮斑,形成阵列后一个亮斑叠加在相邻透镜的显示区域上,另一个则呈现在显示区域之外。

考虑到加工时的定位需求,在透镜阵列周围增加了一圈底板。底板和透镜材料一致,破坏了最外围切割面的全反射条件,使得图 7 中长边附近的全反射光斑基本消除,如图 8 所示。可以看出,虽然长边的光斑基本消除了,但短边拼接处存在明显的暗线。从图 4 的单个透镜仿真照度图看,越靠近圆心部分,亮度越均匀,而边缘区域,亮度则明显下降,用矩形切割时,矩形短边离圆心距离较长边远,故导致短边亮度较长边低 5%左右,拼接后亮度叠加造成短边亮度比长边低 10%,形成较明显的暗线。为解决这个问题,需要增加单个透镜亮度均匀的区域,即增大透镜半径  $r$ ,保证切割后的长短边亮度不存在明显的差别。重新设计后  $x_{10}=1.985$ 、 $x_{20}=7.38$ 、 $r=4.5$  时的仿真结果如图 9 所示,显示区域内不存在明显的光斑和亮暗线,半光强角度为  $6.8^\circ$ 。

#### 5 实际测量结果与讨论

根据最终版设计结果采用整体压铸的工艺加工了 2×2 透镜阵列模型,如图 10 所示。实际工作时在透镜阵列上方放置了一层扩散膜(乐凯公司,CD178)。正视时没有明显的亮暗光斑,侧视角度稍大时会明显感到亮度的下降。增加一张扩散膜以加大视角。采用 TOPCON 公司的色度亮度计 BM-7A 按照国军标测试了配合透镜阵列使用一层扩散膜和两层扩散膜的 9 点亮度<sup>[15]</sup>,测试数据如表 1 所示。为便于比较,测试了不使用透镜的采用两层扩散膜的传统背光的 9 点亮度。表中的亮度不均匀性根据(4)式计算得到。可以看出:采用一层扩散膜和透镜阵列后,中心亮度增加了  $(170800-40700)/40700=320\%$ ,但均匀性比传统两层扩散膜降低了 4.6%,达到 28.5%,超过 25%的设计指标,不能满足要求。采用两层扩散膜和透镜阵列后,中心亮度增加了  $(79920-40700)/40700=96.4\%$ ,亮度非均匀性  $V_{\text{nonuni}}$  为 23.1%,比传统两层扩散膜的非均匀性略有提高(23.9%),满足设计要求:

$$V_{\text{nonuni}} = \frac{L_{\text{max}} - L_{\text{min}}}{L_{\text{max}} + L_{\text{min}}} \quad (4)$$

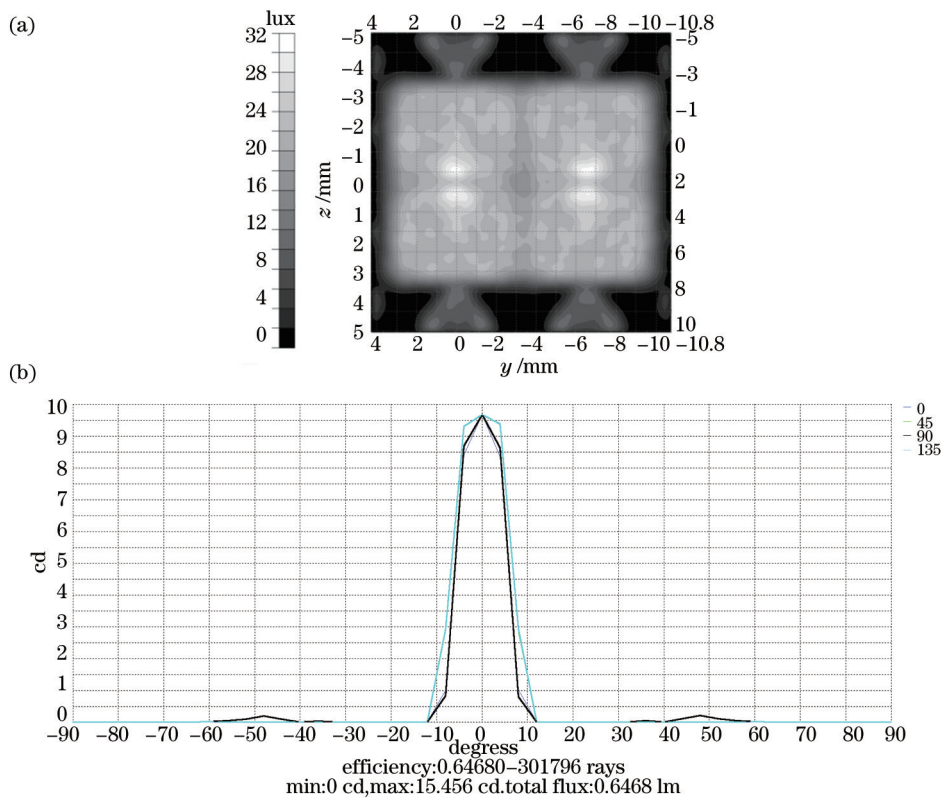


图 7 透镜阵列(a)仿真照度图和(b)坎德拉图

Fig.7 (a)Illumination and (b)viewing angle simulations of the optimized lens array

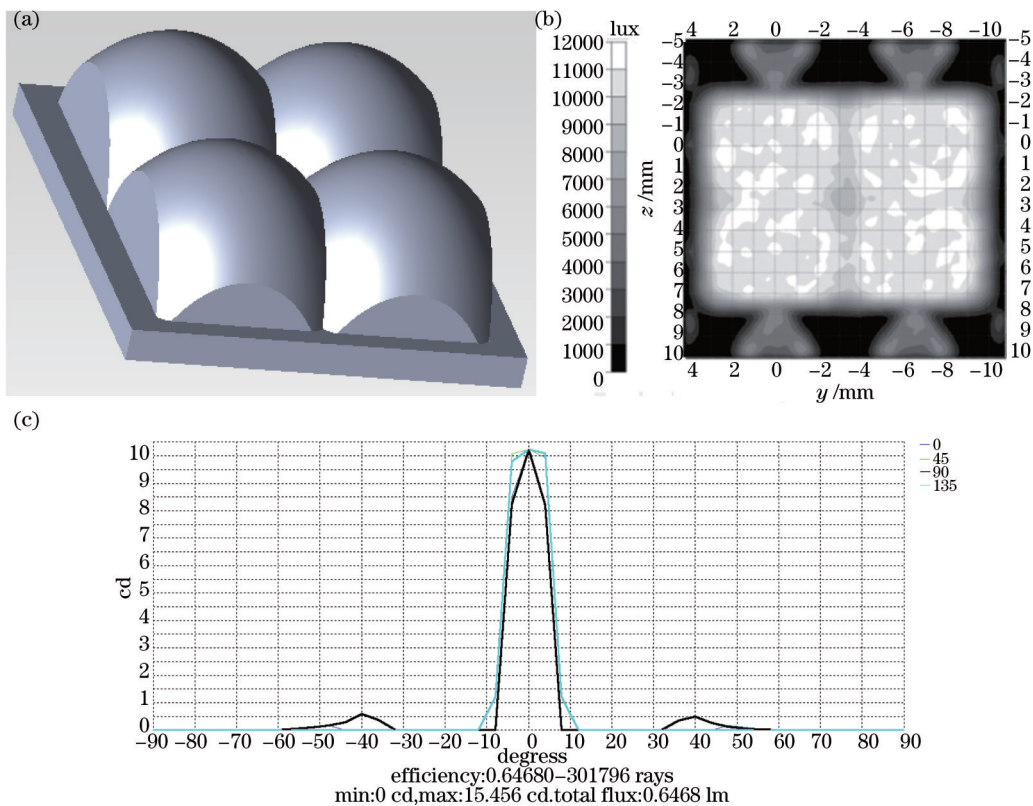


图 8 加底板的透镜阵列(a)外形、(b)仿真照度图和(c)坎德拉图

Fig.8 (a)Outline, (b)illumination and (c)viewing angle simulations of the lens array with baseplate

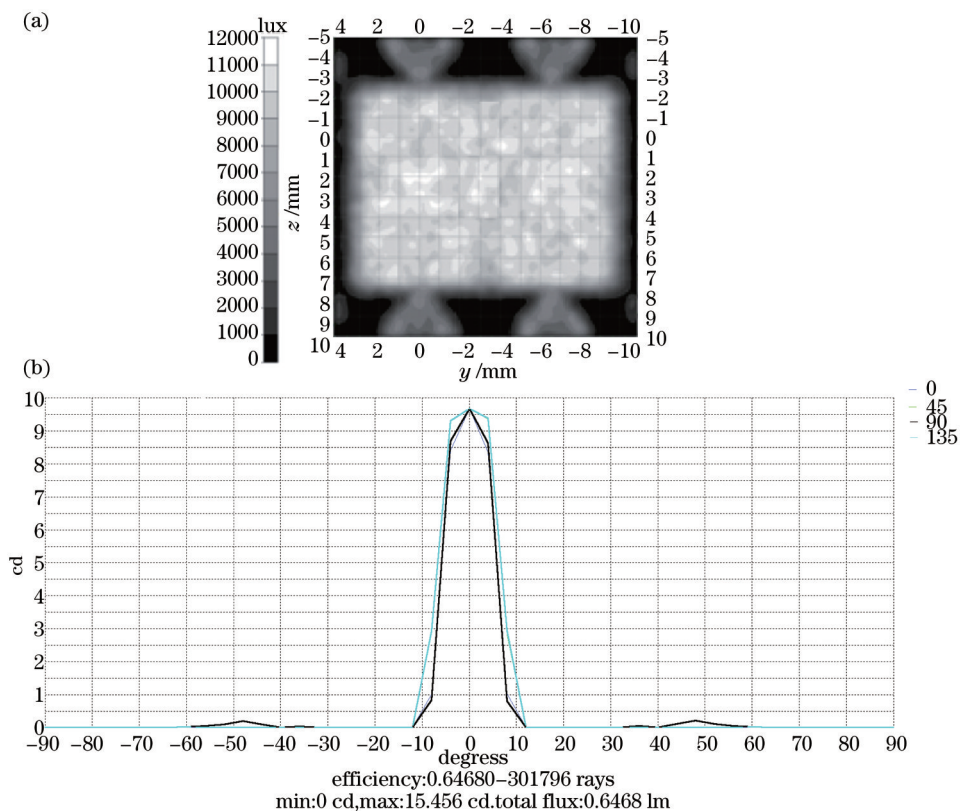


图 9 最终版透镜阵列(a)仿真照度图和(b)坎德拉图

Fig.9 (a)Illumination and (b)viewing angle simulations of the final lens array

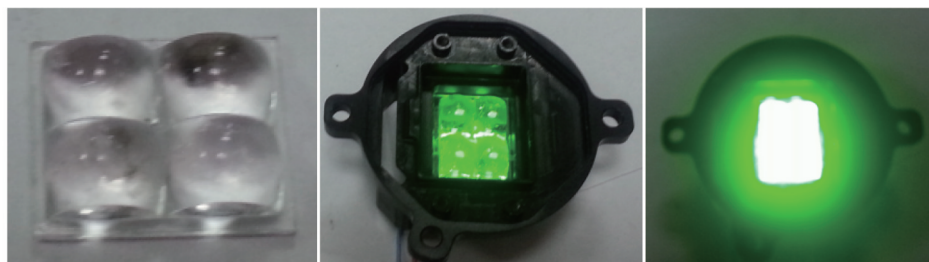


图 10 透镜阵列及背光模组

Fig.10 Prototype of lens array and backlight unit

表 1 9点亮度测试值

Table 1 Luminance measurement results of 9 points

Test Point	2 diffusers	1 diffuser + lens array	2 diffusers + lens array
1	40700	170800	79920
2	39180	150950	75670
3	27410	139750	67800
4	26700	163050	83020
5	25850	104800	53900
6	31000	142000	77400
7	24990	95100	51910
8	34780	150950	79270
9	25960	126250	61560
$V_{\text{mini}}$	23.9%	28.5%	23.1%

采用 ELDIM 公司的视角测试仪 EZ-LITE 测试了三种情况下的视角曲线,如图 11 所示,(a)、(b)、(c)图分别

是一层扩散膜加透镜阵列、两层扩散膜加透镜阵列及两层扩散膜的视角图。图中黑色曲线是亮度为最高亮度50%的等高线。可以看出:传统的采用两层扩散膜的半亮度视角为 $39^\circ$ ,一层扩散膜加透镜阵列和两层扩散膜加透镜阵列的半亮度视角分别为 $12^\circ$ 和 $23^\circ$ 左右。采用一层扩散膜和透镜阵列,虽然中心亮度有大幅度的提高,但视角随之大幅度减低,加上均匀性的考虑,无法应用于实际产品。采用两层扩散膜和透镜阵列,中心亮度提高的同时视角有所降低。考虑到能量守恒,亮度和视角实际是两个相互矛盾的指标。头显液晶像源的显示尺寸较小,对于视角的要求不高,故开发的透镜阵列可以获得实际应用。

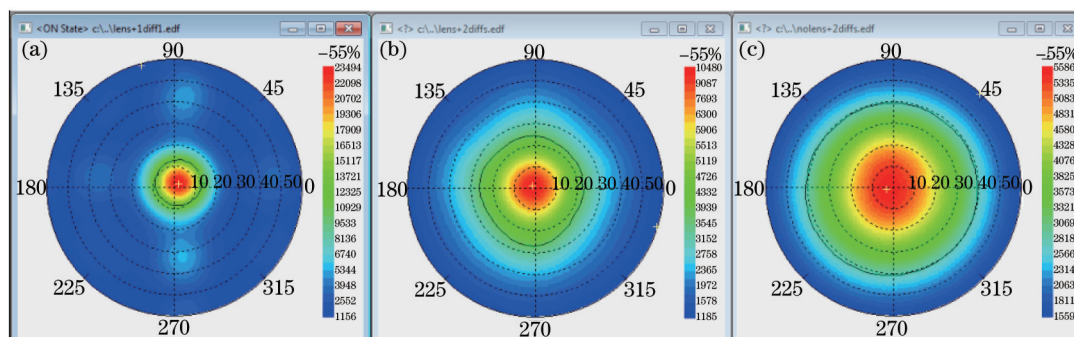


图 11 视角测试图。(a)一层扩散膜和透镜阵列;(b)两层扩散膜和透镜阵列;(c)两层扩散膜  
Fig.11 Viewing angle. (a) 1 diffuser and lens array; (b) 2 diffusers and lens array; (c) 2 diffusers

## 6 结 论

和传统的采用两层扩散膜的背光结构相比,采用双曲面透镜阵列的头显显示器液晶像源背光的中心亮度提升了96.4%,亮度非均匀性略有提高,半亮度视角从 $39^\circ$ 减少为 $23^\circ$ 。由于头显液晶像源的显示面积较小,对视角的要求不高,故透镜阵列满足实际产品的使用要求。但采用的设计方法实际上是将相邻透镜产生的杂散光斑控制在显示区域之外,当LED的数量大于4个时,杂散光斑将进入显示区域,故需要采用其他的方法尽量控制杂散光。本课题组正在进行相关的研究工作。

## 参 考 文 献

- 1 Liu Yu. Application Study of Transitive LC Head-Mounted Display[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001: 6-20.  
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.
- 2 Liu Tao, Zhao Guorong, Chen Muqing. A new design of optical system of helmet-mounted display[J]. Electro-Optic Technology Application, 2005, 20(6): 14-17.  
刘 涛, 赵国荣, 陈穆清. 一种新的头盔显示器光学系统设计[J]. 光电技术应用, 2005, 20(6): 14-17.
- 3 Sun Yuanhang. LCos-based Head-Mounted Display system[D]. 南京: 东南大学, 2008: 5-18.  
孙远航. 基于LCoS的头盔显示系统的研究[D]. Nanjing: Southeast University, 2008: 5-18.
- 4 ZhaoGuorong, Liu Tao, Li Jixin. Research on the image source technology of HMD[J]. Optoelectronic Technology & Information, 2006, 19(2): 64-68.  
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.
- 5 Daniel den Engelsen, Tong Linsu. Trends of backlights[J]. Optoelectronic Technology, 2006, 26(2): 74-80.  
Daniel den Engelsen, 童林夙. 背光源的发展趋势[J]. 光电子技术, 2006, 26(2): 74-80.
- 6 Chang Feng, Sun Zhiyuan, Wang Ruiguang, *et al.*. Improvement of nonuniformity correction of LED display images[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(4): 929-937.  
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.
- 7 Wu S T. Next generation LCD technology[J]. Journal of Information Display, 2010, 26(1): 3.
- 8 Li Hongtao, Chen Shichao, Han Yanjun, *et al.*. A fast feedback method to design easy-moldingfreeform optical system with uniformilluminance and high light control efficiency[J]. Opt Express, 2013, 21(1): 1258-1268.
- 9 Hsichao Chen, Junyu Lin, Hsuanyi Chiu. Rectangular illumination using a secondaryoptics with cylindrical lens for LED street light[J]. Opt Express, 2013, 21(3): 3201-3211.



- 10 Xianglong Mao, Hongtao Li, Yanjun Han, *et al.*. Two-step design method for highly compact three-dimensional freeform optical system for LED surface light source[J]. *Opt Express*, 2014, 22(S6): 1491-1506.
- 11 Yan Guodong. Study on Secondary Optical System Design for High-Power LED Integrated Source[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2013: 22-36.  
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.
- 12 Huang Jinsheng. Free-Form Surface Design for LED Street Light's Uniform Illumination of Special Area [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013: 34-47.  
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.
- 13 Zhang Qihui. Study on Optical Design Methods for High-Power LED Lighting[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010: 43-55.  
张奇辉. 大功率LED照明系统光学设计方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010: 43-55.
- 14 Wang Huihong. Study on Optical Design Methods for High Power LED Extended Sources[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011: 32-42.  
王海宏. 大功率LED扩展光源的光学设计方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010: 32-42.
- 15 The Commission of Science, Technology and Industry for National Defense of the PRC. National military standard GJB 5435-2005. The Photometric and Colorimetric Measurement Method for Active Matrix Liquid Crystal Display in Aircraft Cockpit[S]. 2006.  
中华人民共和国国防科学技术工业委员会. 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]. 2006.

栏目编辑: 韩 峰