

折/反射式离轴头盔显示器光学系统设计

何丽鹏, 曾振煌, 林峰

福建师范大学光电与信息工程学院福建省光子技术重点实验室, 福建 福州 350007

摘要 针对头盔显示器质量小、尺寸合适及结构紧凑方面的需求,利用离轴折/反射式原理设计一款头盔显示器光学系统,采用单片式自由曲面棱镜解决出瞳直径小的问题。设计的系统参数如下:出瞳直径 8 mm,视场角 $20^\circ(\text{H})\times 15^\circ(\text{V})$,出瞳距离 20 mm,配合 0.47 in 的 OLED-XL™ 显示屏,显示区域 $9.6\text{ mm}\times 7.2\text{ mm}$,像素数 $640\text{ pixel}\times 480\text{ pixel}$,像元尺寸 $15\text{ }\mu\text{m}\times 15\text{ }\mu\text{m}$ 。采用单个元件设计,体积小于 $13\text{ mm}\times 25\text{ mm}\times 17\text{ mm}$,所用材料为 K26R,在 30 lp/mm 时全视场调制传递函数大于 0.25。该系统采用单个元件设计,兼顾成像质量的同时,使光学系统的体积和质量更小。

关键词 光学设计; 头盔显示器; 自由曲面棱镜; 折/反射式系统; 离轴光学系统

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.122201

Optical Design of Catadioptric Off-Axis Helmet-Mounted Display

He Lipeng, Zeng Zhenhuang, Lin Feng

*Fujian Provincial Key Laboratory of Photon Technology, College of Photonic and Electronic Engineering,
Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China*

Abstract The helmet-mounted display demands light weight, suitable size, and compact structure. Aiming at the demands, we use the off-axis catadioptric principle to design a helmet-mounted display system, and the monolithic freeform surface prism is utilized to solve the problem of small exit pupil diameter. The designed system parameters are as follows: the diameter of the exit pupil is 8 mm, the angle of field of view is $20^\circ(\text{H})\times 15^\circ(\text{V})$, distance of exit pupil is 20 mm, a 0.47 in OLED-XL™ display is selected, the display area is $9.6\text{ mm}\times 7.2\text{ mm}$, the pixel number is $640\text{ pixel}\times 480\text{ pixel}$, and the pixel size of $15\text{ }\mu\text{m}\times 15\text{ }\mu\text{m}$. A single element is adopted to design the system, whose volume is less than $13\text{ mm}\times 25\text{ mm}\times 17\text{ mm}$. K26R is selected. The modulation transfer function at 30 lp/mm in the full field of view is higher than 0.25. The system is designed with a single element, and realizes small volume and light weight with imaging quality taken into consideration.

Key words optical design; helmet-mounted display; freeform surface prism; catadioptric system; off-axis optical system

OCIS codes 220.4830; 120.2040; 220.3620

1 引言

头盔显示器在娱乐、医疗、教育、航空等领域具有广泛的应用前景。头盔显示器作为一种头上佩戴设备,对结构和质量都有一定的要求,其可佩戴性、视场、质量问题一直难以解决。目前头盔显示器光学系统在结构上可以分成两类:折射式和折/反射式光学系统^[1]。市场上较普遍的头盔显示器大部分利用折射式同轴光学系统,这种结构的缺点是视场小、出瞳距小、质量大^[2]。因而,折射式无法满足市场需求。

折/反射式光学系统的头盔显示器相对折射式的光学系统具有较多的优势,结合离轴光学系统后,头盔显示器的整体性能有较大的提升。折/反射式离轴光学系统在兼顾外形、体积、质量的同时具有良好的成像

收稿日期: 2017-06-13; **收到修改稿日期:** 2017-07-21

基金项目: 福建省科技厅重点项目(2013H0022)、福州市科技计划项目(2014-G-68)

作者简介: 何丽鹏(1992—),女,硕士研究生,主要从事光学设计成像方面的研究。E-mail: 2209748668@qq.com

导师简介: 林峰(1968—),男,副教授,高级工程师,主要从事光学成像设计方面的研究。E-mail: lfeng127@163.com

质量。离轴系统具有同轴系统不可比拟的优势,可以增大视场角和出瞳,能够把无关的视场部分从视野中移出去^[3]。离轴折/反射式光学系统虽然在结构上较为简单、紧凑,但设计方法比传统光学系统复杂得多,如果用常规的设计思维进行优化,会出现很多局限性,且增加了设计者的工作量。

21世纪以来,计算机控制光学加工技术及光学制造技术的发展极大地提高了高端光学曲面的制造质量。自由曲面光学在高性能照明系统以及成像光学系统中都取得显著进展,如祝振敏等^[4]将自由曲面运用于漫反射照明系统中,梁文跃等^[5]利用自由曲面进行照明效果的测试,赵欢等^[6]利用自由曲面改善发光二极管(LED)灯的性能。自由曲面逐渐被应用于头盔显示器的光学设计中^[7-8]。目前国内外关于头盔显示器光学设计的文献报道中,折/反射式结构以及自由曲面棱镜结构是两种最常用的结构^[9-10],本文结合这两种结构的优点,采取两种结构相结合的方法设计了一款小型紧凑的头盔显示器。

2 设计分析及设计参数

2.1 设计分析

头盔显示器作为佩戴在头上的一种光学仪器,其设计不仅要考虑光学性能的因素,还需考虑使用者的人体因素。因此在头盔显示器的光学设计中需要考虑视场、质量、分辨率、出瞳距离、出瞳大小、瞳距及光能利用率等因素。由于人的眼睛对 20° 的视场比较敏感,选择对应的显示器时要保证 20° 视场时的像质。查看近年来军事及商用的流行性头盔显示器发现,水平视场与垂直视场的比值为4:3较为合适。人眼的极限角分辨率,即人眼能分辨两点的距离大小为 $1'$ ^[11]。在明视距离内且照度良好的情况下,人眼的极限分辨距离为 $7.27\ \mu\text{m}$,换算成空间频率为 $14\ \text{lp/mm}$,即对于目视光学系统,为使人眼能够较为清晰地看到物体,光学设计的空间截止频率应该大于 $14\ \text{lp/mm}$ ^[11]。作为一种佩戴在眼睛上的器件,在较舒服的状态下其出瞳距离应大于 $15\ \text{mm}$ 。人眼瞳孔在正常情况下的直径约为 $2\ \text{mm}$,在一定条件下会适当放大,因而出瞳直径远大于 $2\ \text{mm}$ 。综上所述,考虑到成本因素,自由曲面棱镜头盔显示器系统选用 OLED-XLTM 微型显示器(eMagin公司),其对角线长度为 $0.47''$,显示区域的尺寸为 $9.6\ \text{mm} \times 7.2\ \text{mm}$ (对角线 $12\ \text{mm}$),分辨率为 $640\ \text{pixel} \times 480\ \text{pixel}$,像元大小为 $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ 。

2.2 设计参数

根据选取的 OLED-XLTM 微型显示器及设计分析结果,其技术要求如表1所示。

表1 自由曲面棱镜头盔显示器光学系统参数

Table 1 Optical system parameters of freeform surface prism helmet-mounted display

System parameter	Value	System parameter	Value
Size	$0.47''$	Eye distance	$\geq 20\ \text{mm}$
Display size	$9.6\ \text{mm} \times 7.2\ \text{mm}$	Angle of field	$20^\circ(\text{H}) \times 15^\circ(\text{V})$
Resolution	$640\ \text{pixel} \times 480\ \text{pixel}$	Wavelength band	$486\text{--}656\ \text{nm}$
Exit pupil diameter	$8\ \text{mm}$		

3 设计原理及光学结构

3.1 设计原理

自由曲面相对于常规的光学设计解析曲面来说,在像质校正能力、结构调整、优化速度、分辨率及光能利用等方面都有较大的优势。其关键在于自由曲面是一种复杂的、非旋转对称的特殊非球面,因而为光学设计提供了许多优化自由变量,即可以改变成像面各个位置的面型参数从而获得良好的像质。本文采用折/反射相结合的方式,可以有效避免离轴光线的重叠遮挡现象,获得高分辨率及高能量利用率。通过自由曲面的光路折叠,可以最大限度地使光学系统小型化、紧凑化^[12]。

自由曲面棱镜光路示意图如图1所示。整个头盔显示器光学系统由有机发光二极管(OLED)显示器和自由曲面棱镜两部分构成。OLED显示器射出的光线依次经过表面 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_2 。从自由曲面棱镜光路示意图可知,光线从 S_1 面进入棱镜,在 S_1 面发生折射,接着经过 S_2 面进行全反射,之后经过 S_3 面反射到 S_2 面,最后由 S_2 面出射进入人眼,即出瞳位置。在整个光路图中,光线经过了两次折射和两次反射,其中一

次是全反射。为增大光的利用率,在 S_1 面需加镀增透膜。在 S_2 处光既发生了反射又发生了折射,根据全反射的光学原理,从高折射率介质出射到低折射率介质时,当折射角大于 90° 时,光线将发生全反射。因此设计 S_2 面时应该注意此处光线入射角的大小,通过控制入射角使之大于发生全反射的临界角,因此只需在 S_2 外表面镀一层增透膜即可。 S_3 面的镀膜可以根据客户的需求确定,如果系统是常规的光学头盔系统,则在 S_3 外表面镀金属反射膜,从而达到图像源到达人眼时亮度的最大化,如果是增强版的现实光学头盔系统,则 S_3 面需要镀半透半反膜。

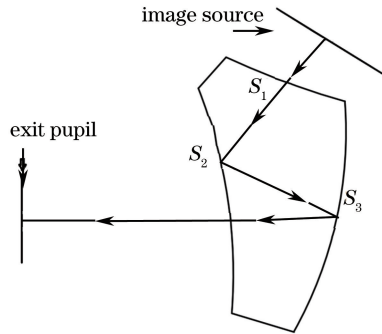


图1 自由曲面棱镜光路示意图

Fig. 1 Light path diagram of freeform surface prism

3.2 光学结构

对于目视光学系统,在进行光学设计时一般将图1中的光路逆转,即将显示器当作像面来进行设计。由于自由曲面棱镜的面型复杂,数据多,还要考虑表面的偏心和倾斜,因此还原现有专利较为困难。本设计利用 Zemax 光学设计软件,建立一个由三个标准球面组成的棱镜作为初始结构。经过不断尝试和修改各表面倾斜角和偏心,观察光路的走向,最终建立图2所示初始结构,其数据如表2所示。

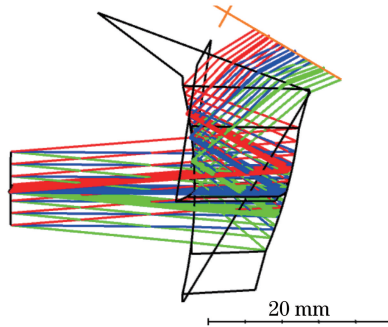


图2 初始结构示意图

Fig. 2 Schematic of initial structure

表2 初始结构基本数据

Table 2 Basic data of the initial structure

Surface	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Decenter in y direction /mm	Tilt in x direction /($^\circ$)
S2	-50	10	PMMA*	0	0
S3	-50	-10	Mirror	0	20
S2	-50	1	Mirror	0	0
S1	Infinity	6		10	-60
Image	Infinity			10	-60

* PMMA: polymethyl methacrylate

4 优化方法

4.1 自由曲面方程

设计采用自由曲面为平面对称的复合曲面,曲面的坐标方程为^[13-14]

$$z = \frac{c_x x^2 + c_y y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_x)c_x^2 x^2 - (1 + k_y)c_y^2 y^2}}, \quad (1)$$

式中 $c_x = 1/R_x$, $c_y = 1/R_y$, 二次曲面常数 k_x , k_y 以及 x , y 方向的基底半径值 R_x , R_y 可以不同。在 Zemax 软件中双二次曲面可以直接定义 R_x , R_y , k_x 和 k_y 。

4.2 直角坐标系下的 Zernike 多项式

将标准 Zernike 圆形多项式转换成直角坐标系下的方程

$$Z(x, y) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2 r^2}} + \sum_{i=1}^N A_i E_i(x, y), \quad (2)$$

式中 r 为轴向半高, $r^2 = x^2 + y^2$; c 为曲率半径; k 为圆锥系数; $\sum_{i=1}^N A_i E_i(x, y)$ 为 Zernike 多项式, A_i 为 Zernike 系数。

Zernike 多项式的项数与光学系统的像差有一定的对应关系。光学设计中像差的 Seidel 系数都可以在 Zernike 多项式中找到与之对应的项。表 3 列出了 Zernike 多项式与初级像差之间的联系。

表 3 Zernike 多项式与 Seidel 像差的对应关系

Table 3 Correspondence between Zernike polynomial and Seidel aberration

Polar coordinate (ρ, θ)	Rectangular coordinate (x, y)	Name of aberration
1	1	Translation
$\rho \cos \theta$	x	x tilt
$\rho \sin \theta$	y	y tilt
$2\rho^2 - 1$	$2(x^2 + y^2) - 1$	Field curvature
$\rho^2 \cos(2\theta)$	$x^2 - y^2$	Primary x axial astigmatism
$\rho^2 \sin(2\theta)$	$2xy$	Primary y axial astigmatism
$(3\rho^2 - 2)\rho \cos \theta$	$x[3(x^2 + y^2) - 2]$	Primary x axial coma
$(3\rho^2 - 2)\rho \sin \theta$	$y[3(x^2 + y^2) - 2]$	Primary y axial coma
$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	$6(x^2 + y^2)^2 - 6(x^2 + y^2) + 1$	Primary spherical aberration

4.3 优化边界条件

对传统的共轴光学系统进行优化时,只是用边界条件简单控制各光学表面之间的边缘厚度和中心厚度。自由曲面棱镜是一个离轴非对称光学系统,优化条件也就更为复杂,不仅要考虑中心与边缘条件,对离轴面的偏心、倾斜及上下边缘光线都要进行一定的约束,因此,控制自由曲面棱镜的外形也是设计的难点所在。

棱镜的边界控制条件如图 3 所示。图中坐标系为右手坐标系,上光线为 y 方向最大视场角的上边缘光线 R_u ,下光线为 y 方向最小视场角的下边缘光线 R_d 。 p_u^1 为光线 R_u 从外表面进入表面 S_1 时与 S_1 的交点, p_d^1 为光线 R_d 从外表面进入表面 S_1 时与 S_1 的交点, p_u^2 为光线 R_u 到达表面 S_2 时与 S_2 的交点, p_d^2 为光线 R_d 到达表面 S_2 时与 S_2 的交点, p_u^3 为光线 R_u 经过 S_2 面反射后到达 S_1 面的内表面时与 S_1 的交点, p_d^3 为光线 R_d 经过 S_2 面反射后到达 S_1 面的内表面时与 S_1 的交点, p_u^4 为光线 R_u 与 S_3 面的交点, p_d^4 为光线 R_d 与 S_3 面的交点。

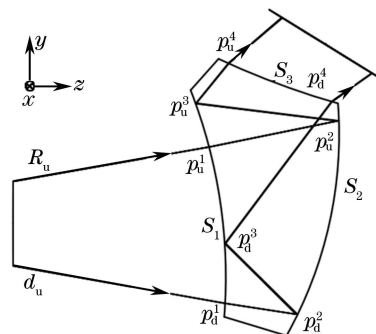


图 3 自由曲面棱镜边界控制示意图

Fig. 3 Schematic of freeform surface prism boundary control

令以上几个交点的全局坐标满足

$$\begin{cases} 1 < z_{p_u^2} - z_{p_u^1} < 3 \\ y_{p_u^2} - y_{p_u^1} < 0 \\ y_{p_u^3} - y_{p_u^1} > 0 \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} y_{p_u^4} - y_{p_d^2} > 0 \\ -2 < z_{p_u^4} - z_{p_d^2} < 0 \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} -2 < y_{p_d^3} - y_{p_d^4} \leq 0 \\ 0 < z_{p_u^3} - z_{p_d^4} < 1 \end{cases}. \quad (5)$$

(3)~(5)式建立的空间全局坐标的原点位置在入瞳中心。 y 和 z 表示该点的全局坐标对应的坐标值。

(3)~(5)式可以利用 Zemax 软件的光线追迹操作数和数学操作数实现,它们间接控制了棱镜各个自由曲面的偏心和倾斜,以及中心厚度和边缘厚度,使得自由曲面棱镜的结构趋于合理。

4.4 全反射控制

全反射控制中光线走向如图 4 所示,光线第一次经过 S_1 的外表面发生折射,第二次经过其内表面发生全反射。根据光学折射与全反射原理,在整个自由曲面棱镜内的所有光线第一次经过 S_1 外表面时入射角都要小于临界角 θ_{\min} ,第二次经过 S_1 内表面时入射角都要大于临界角 θ_{\min} 。考虑到头盔显示器的折射率需高于 1,设计选用塑料材料为环烯烃共聚物 K26R,材料折射率为 1.53,则有

$$\theta_{\min} = \arcsin \frac{1}{n} = \arcsin \frac{1}{1.53} = 40^\circ. \quad (6)$$

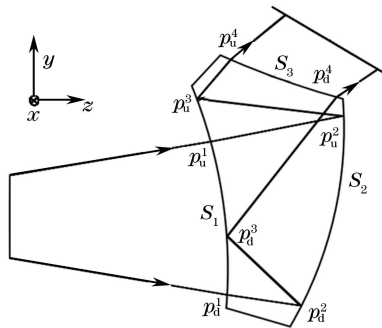


图 4 全反射控制示意图

Fig. 4 Schematic of total reflection control

5 像质评价

利用 Zemax 软件的追迹及优化条件的控制,结合 Zernike 多项式的项数与光学系统 Seidel 像差之间的对应关系进行分析优化,得到的优化结构如图 5 所示。

将 Zemax 软件的设计结果输出为 AutoCAD 文件,并对自由曲面棱镜的元件外形进行修改,得到如图 6

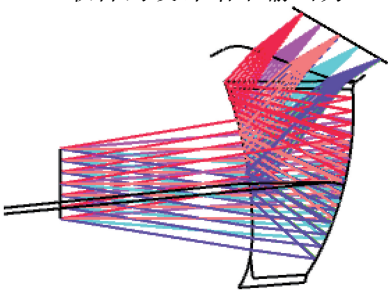


图 5 自由曲面棱镜头盔显示器系统结构

Fig. 5 Structure diagram of freeform surface prism helmet-mounted display system

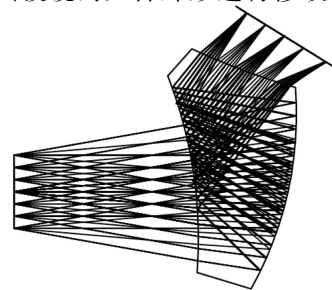


图 6 自由曲面棱镜头盔显示器设计结果

Fig. 6 Design of freeform surface prism helmet-mounted display

所示的自由曲面棱镜头盔显示器设计结果。

图 7 为该光学系统经过优化后的调制传递函数(MTF)曲线,该曲线反映入射光束空间频率成分的传递能力。从图 7 可知在奈奎斯特频率下,全视场、全波段范围内在 30 lp/mm 时 MTF 值高于 0.25,当人眼观看图像时,像质较为清晰。

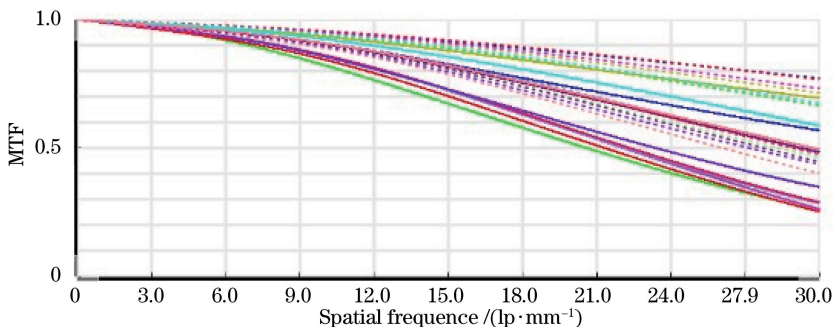


图 7 自由曲面棱镜头盔显示器 MTF 曲线

Fig. 7 MTF curves of freeform surface prism helmet-mounted display

图 8 为光学系统的星点图,反映了几何光线入射到像面上的光线分布情况,图中 12 个视场的均方根半径分别为 10.292,15.273,12.434,8.768,10.476,7.784,11.920,13.427,10.679,12.346,13.565,11.084 μm ,所有视场的星点均在一个像元大小以内,成像可以被人眼所接收。

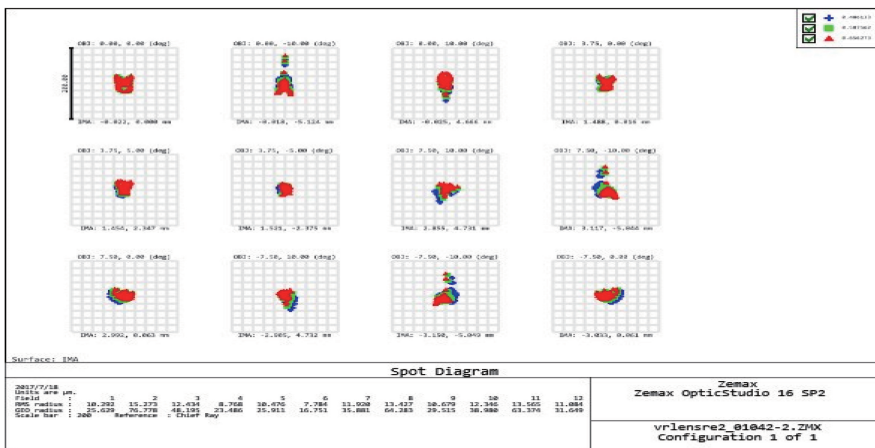


图 8 自由曲面棱镜头盔显示器星点图

Fig. 8 Spot diagram of freeform surface prism helmet-mounted display

图 9 所示为光学系统的格子畸变图,系统的最大畸变位置在视场角(0°, -10°)处,畸变量为 6.49%。

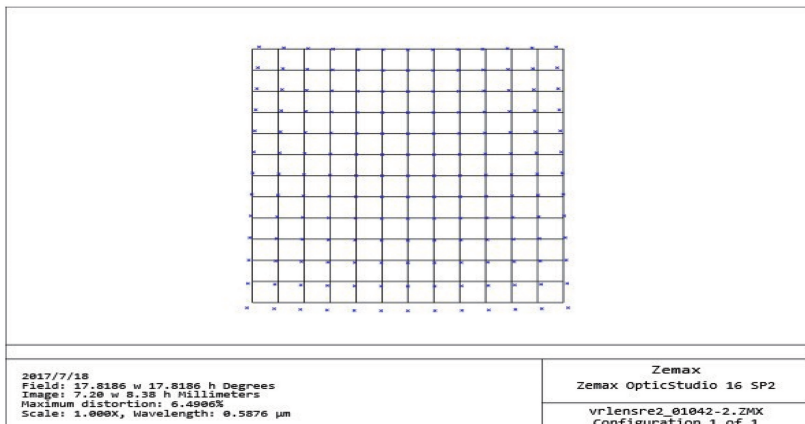


图 9 自由曲面棱镜头盔显示器光学系统畸变

Fig. 9 Distortion of freeform surface prism helmet-mounted display optical system

图 10 为衍射能量分布图,反映了光斑能量集中程度,曲线表明该系统在探测器像元尺寸 $15\ \mu\text{m}$ 内,能量集中度大于 83%。从图 8 和图 10 可知能量较为集中。

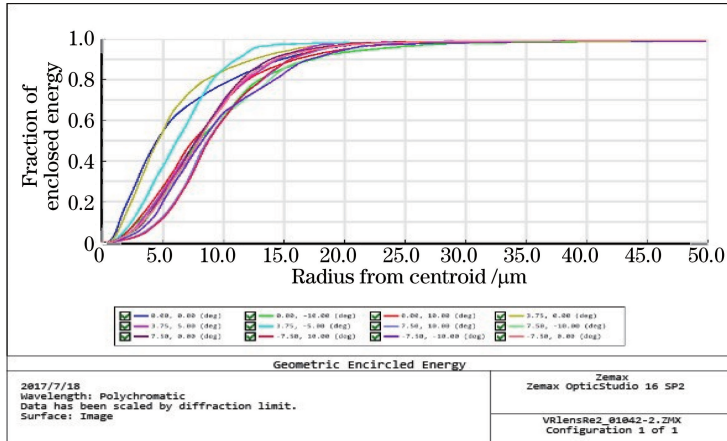


图 10 光系统最终衍射能量分布图

Fig. 10 Final diffraction energy distribution of the optical system

图 11 为利用 Zemax 软件 Image Simulation 成像模拟功能得到的结果,图像为经过自由曲面棱镜后呈现在人眼中的图像。可以看到整个图像虽然有较为明显的梯形畸变,但人眼是一个强大的光学系统,这种畸变对于人眼来说仍是接受的。



图 11 自由曲面棱镜头盔显示器光学系统成像模拟

Fig. 11 Imaging simulation of freeform surface prism helmet-mounted display optical system

6 结 论

对头盔显示器光学系统进行设计。分析了头盔显示器光学系统的结构形式,查找国内外具有代表性的结构,分析相应的设计原理,构建对应的初始结构,控制相应的优化条件进行优化,最后设计出自由曲面棱镜式头盔显示器光学系统。系统的出瞳直径为 $8\ \text{mm}$,视场角为 $20^\circ(\text{H}) \times 15^\circ(\text{V})$,出瞳距离为 $20\ \text{mm}$,配合 $0.47\ \text{in}(1\ \text{in}=2.54\ \text{cm})$ 的 OLED-XL™ 显示屏,显示区域为 $9.6\ \text{mm} \times 7.2\ \text{mm}$,像素尺寸为 $640\ \text{pixel} \times 480\ \text{pixel}$,像元尺寸为 $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$,系统体积小于 $13\ \text{mm} \times 25\ \text{mm} \times 17\ \text{mm}$,所用材料为 K26R。该设计系统光学元件数少、结构紧凑、方法独特、体积小、质量小、成像质量好。

参 考 文 献

- [1] Meng Xiangxiang. Study on large field of view optical system of virtual reality head-mounted display [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.

- 孟祥翔. 大视场虚拟现实头盔显示器光学系统研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [2] Li Hua, Zhang Xin, Wang Chao, *et al.* Optical design of an avionic helmet-mounted displays using freeform surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0322001.
李华, 张新, 王超, 等. 自由曲面机载头盔显示器光学系统设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0322001.
- [3] Gao Yong. Research on optical system of airborne helmet mounted sight/display[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2003.
郜勇. 机载头盔瞄准/显示器光学系统的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2003.
- [4] Zhu Zhenmin, Luo Hui. Design method of diffuse reflection freeform surface[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(5): 052201
祝振敏, 罗慧. 漫反射自由曲面的设计方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(5): 052201.
- [5] Liang Wenyue, Li Yuanxing, Long Yongbing, *et al.* Design of freeform surface lens with chip on board LED sources for uniform illumination[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 012202
梁文跃, 李远兴, 龙拥兵, 等. 板上芯片型 LED 光源均匀照明自由曲面透镜设计[J]. *激光与光电子学展*, 2017, 54(1): 012202.
- [6] Zhao Huan, Li Changgeng, Chen Zhitao, *et al.* Design of collimating lens with uniform illumination for LED based on double freeform surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0422001.
赵欢, 李长庚, 陈志涛, 等. 基于双自由曲面的 LED 均匀照明准直透镜设计[J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0422001.
- [7] Zheng Z R, Liu X, Li H F, *et al.* Design and fabrication of an off-axis see-through head-mounted display with an $x-y$ polynomial surface[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(19): 3661-3668.
- [8] Pan J W, Chiang C W, Huang K D, *et al.* Demonstration of a broad band spectral head-mounted display with freeform mirrors[J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 12785-12798.
- [9] Zhao Xing, Zheng Yi, Zhang Zan, *et al.* Characterization of freeform optical surfaces based on surface slope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1957-1964.
赵星, 郑义, 张赞, 等. 基于面形斜率的光学自由曲面表征[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1957-1964.
- [10] Cheng D W, Wang Y T, Hua H, *et al.* Design of an optical see-through head-mounted display with a low f -number and large field of view using a freeform prism[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(14): 2655-2668.
- [11] Han Xinyan. Design of compact see-through video glasses optical system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
韩昕彦. 紧凑穿透式视频眼镜光学系统设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [12] Sun Xutao. Theoretical and experimental study of ultra thin projection display system using freeform surfaces[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
孙旭涛. 应用自由曲面的超薄投影显示系统理论和实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [13] Nakano T, Tamagawa Y. Design of a wide-angle fast optical system with anamorphic mirrors[C]. *SPIE*, 2002, 4832: 502-509.
- [14] Optical Research Associates. CODE V reference manual[Z]. USA: Optical Research Associates Inc., 2006.