

# 全景三维立体头盔显示光学系统设计

卢海平<sup>1,2</sup> 刘伟奇<sup>1</sup> 康玉思<sup>1</sup> 魏忠伦<sup>1</sup> 冯睿<sup>1</sup> 付翰毅<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 空间一部, 吉林 长春 130033)  
<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 为了满足全景三维立体头盔显示器(HMD)对大视场(FOV)、小畸变、高分辨率以及轻量化的要求,设计了全景三维立体 HMD 的目视光学系统。采用 4×3 阵列式排列的 12 组相同的 FOV 角为 33°×24°的高质量成像的目镜光学系统拼接成单眼目视光学系统,实现系统的大 FOV 设计。利用二元衍射面和非球面校正目镜光学系统的初、高级单色像差以及色差;使用有机光发射二极管(OLED)微显示器作为图像源,设计结果表明:单眼目视光学系统水平 FOV 达到 120°,垂直 FOV 为 60°,角分辨率为 43 pixel/(°);传递函数在 45 lp/mm 处轴上 FOV 高于 0.68,周边 FOV 高于 0.45,系统畸变小于 0.2%;系统的双目 FOV 为 160°×60°,双目 FOV 重叠为 80°×60°,系统重量约为 91.2 g。系统设计满足头盔显示光学系统的成像要求,并且实现了系统的轻量化以及低成本。

**关键词** 光学设计;头盔显示器;二元光学;非球面;视场拼接法

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0522002

## Design of Compact Optical System in Panoramic Three-Dimensional Head Mounted Display

Lu Haiping<sup>1,2</sup> Liu Weiqi<sup>1</sup> Kang Yusi<sup>1</sup> Wei Zhonglun<sup>1</sup> Feng Rui<sup>1</sup> Fu Hanyi<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> *The First Laboratory of Spacial Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*  
<sup>2</sup> *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract** To meet the command of panoramic three-dimensional head mounted display that is wide field of view (FOV), high resolving power and compact, light-weight structure, an optical system of eyepieces is designed. The dispersion characteristics of binary optical element (BOE) is used to correct the chromatic aberration, and the aspheric surface is selected to correct the aberrations (spherical aberration, astigmatism, coma and distortion). The organic light-emitting diode (OLED) micro-displayer is used to achieve compact and light-weight structure. Furthermore, the field-of-view-stitching method is used to obtain wide field of view. Obtained optical system can offer the horizontal FOV of 120°, the vertical FOV of 60°. Moreover, resolving power is 43 pixel/(°), the modulation transfer function (MTF) is higher than 0.45 at the spatial frequency of 45 lp/mm across the entire visual field, and the maximum distortion is less than 0.2%. The optical system has perfect performance and can meet the domanical demands of virtual reality display.

**Key words** optical design; head mounted display; binary optics; aspheric surface; field-of-view-stitching method

**OCIS codes** 220.1000; 220.3620; 220.3630; 220.1250

## 1 引言

近几十年来,全景头盔显示技术的发展面临着

技术上的挑战。已经市场化的头盔显示器(HMD)的视场(FOV)都是在 20°~40°范围内,这远远小于

收稿日期: 2011-09-29; 收到修改稿日期: 2011-12-01

基金项目: 国家 863 计划(2009AA032701)资助课题。

作者简介: 卢海平(1984—),男,博士研究生。主要从事光学设计、虚拟环境模拟技术以及空间光学等方面的研究。

E-mail: luhaiping21@yahoo.com.cn

导师简介: 刘伟奇(1958—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光显示技术、图像显示技术以及空间成像与瞄准技术等方面的研究。E-mail: liuwq@ciomp.ac.cn

人眼的可视范围。人单眼 FOV 基本上是  $150^\circ \times 120^\circ$ 。由于人的两只眼睛有 FOV 的重叠,因此人两只眼睛总的 FOV 是  $200^\circ \times 120^\circ$ 。虽然人眼最敏感的 FOV 只有  $6^\circ \sim 8^\circ$ ,这区域外视觉灵敏度下降非常剧烈,但是周边 FOV 在虚拟现实系统中扮演着非常重要的作用。周边 FOV 增强了沉浸感,对周围环境感知能力强,并且大的周边 FOV 可以减少头部运动要求和搜索时间<sup>[1,2]</sup>。

为了满足人眼对大 FOV 的需求,世界各国进行了大量的大 FOV HMD 的研究,主要结构形式有三种:1)采用单一目镜设计,这种结构很难消除畸变,FOV 也受到透镜尺寸的限制,因此这种设计很难实现大 FOV,比如  $120^\circ$ ,并且分辨率也非常低<sup>[3]</sup>。2)采用离轴折/反混合设计,图像从不同于可视方向投影到凹面反射镜上,在该设计中必须采用一个中继光学系统来实现对图像源图像的放大,而且会形成中间像,这必然增加了系统的重量以及复杂性<sup>[4]</sup>。3) Nagahara<sup>[5]</sup>设计了一种独特的折反系统,使用了一组双曲面和椭球面反射镜,实现了  $180^\circ \times 60^\circ$  的 FOV。微显示器的图像首先从外焦点投影到双曲面反射镜上,反射的光线向全方向扩散,最终传播到人眼的位置,也就是椭球面反射镜的一个焦点处。因为椭球反射镜的另一个焦点与双曲面的内焦点重合。虽然这种设计结构比较简单,但是由于出瞳很小,系统有严重的渐晕。当人眼转动时观察者看到的是一幅比较暗淡的图像。

为了解决现有技术所存在的缺陷,本文采用了二元光学技术、非球面技术以及 FOV 拼接技术,进行全景三维立体头盔显示光学系统的设计。由于有机光发射二极管(OLED)显示同时具备自发光、无需背光源、对比度高、厚度薄、重量轻、视角广、反应速度快、可用于挠曲性面板、使用温度范围广、构造及制作过程较简单等优良特性<sup>[6,7]</sup>,本文选用 OLED 微显示器作为图像源。讨论了二元光学元件(BOE)设计要求并且给出了单元目镜光学系统的设计结果。论述了 FOV 拼接技术原理并且采用  $4 \times 3$  阵列式排列的 12 组单元目镜组成单眼目视光学系统,给出了单眼目视光学系统的模型以及模拟结果。单眼目视光学系统设计结果表明满足了全景三维立体 HMD 的轻型、大 FOV 和高分辨的要求。

## 2 目镜系统设计

HMD 要求重量轻,长期佩戴不会有不适反应,本设计中的单眼目视光学系统是由 12 个目镜系统

和 12 片 OLED 微显示器组合而成,所以要求每组目镜结构简单,使用尽量少的透镜,才可以满足重量轻的要求。采用 BOE 取代传统光学元件可以使 HMD 光学系统性能更优、重量更轻。BOE 是指基于光波的衍射理论,利用计算机辅助设计和超大规模集成(VLSI)电路制作工艺,在膜上(或是传统光学元件表面)刻蚀产生两个或是多个台阶深度的浮雕结构,形成纯相位、同轴再现、具有极高衍射效率的一类衍射光学元件<sup>[8~10]</sup>。BOE 具有许多特殊的功能和特点:

- 1) 衍射效率高;
- 2) 独特的色散性能,在折射光学系统中可以同时校正球差和色差;
- 3) 更好的设计自由度,即通过改变波片的位置、模宽、模深与槽形结构产生任意波面,并可集成为多功能元件。

因此,在 HMD 光学系统中用 BOE 替代传统光学元件,可以明显减少光学元件的使用数目,进而减轻 HMD 的重量和减小 HMD 的体积<sup>[11]</sup>。本文仅采用两片透镜,其中一片透镜为一面二元衍射面与一面非球面,实现了很好的像差平衡和校正。

### 2.1 BOE 设计要求

对于设计波长为  $\lambda$  的 BOE,其相位函数表达式为

$$\phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda}(A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + \dots), \quad (1)$$

式中  $r$  为归一化半径坐标; $A_1$  决定该面的光焦度,一般用来校正系统的色差,而后面的非球面项用来校正系统的高级像差。当刻蚀台阶数为 8 时,衍射效率达 95%,已能满足需要。

光阑密接于 BOE 时,其单色初级像差系数为:  
球差系数:

$$S_I = \frac{y^4 \varphi^3}{4}(1 + T^2 + 4TC + 3C^2) - 8mA_2 y^4, \quad (2)$$

彗差系数:

$$S_{II} = \frac{-y^2 \varphi^2 H}{2}(T + 2C), \quad (3)$$

象散系数:

$$S_{III} = H^2 \varphi, \quad (4)$$

佩茨瓦尔场曲系数:

$$S_{IV} = 0, \quad (5)$$

畸变系数:

$$S_V = 0. \quad (6)$$

由于光学系统的出瞳必须与人眼的入瞳相匹

配,因此光阑必须远离 BOE,所以(2)~(6)式还需要进一步修改。设光阑与透镜之间的距离为  $t$ ,对于单片系统或密接的多片系统,有  $y = t\bar{u}$ ,于是各像差系数变为

$$S_I^* = S_I, \quad (7)$$

$$S_{II}^* = S_{II} + \frac{\bar{y}}{y} S_I, \quad (8)$$

$$S_{III}^* = S_{III} + \frac{\bar{y}}{y} S_{II} + \left(\frac{\bar{y}}{y}\right)^2 S_I \quad (9)$$

$$S_{IV}^* = S_{IV}, \quad (10)$$

$$S_V^* = S_V + \frac{\bar{y}}{y} (3S_{III} + S_{IV}) + 3\left(\frac{\bar{y}}{y}\right)^2 S_{II} + \left(\frac{\bar{y}}{y}\right)^3 S_I. \quad (11)$$

考虑到加工方面的简便,二元衍射面的基面为平面,并对无限远物体成像,则(7)~(11)式又可以简化为

$$S_I^* = \frac{y^4}{f^3}, \quad (12)$$

$$S_{II}^* = \frac{y^3 \bar{u}^2 (t-f)}{f^3}, \quad (13)$$

$$S_{III}^* = \frac{y^2 \bar{u}^2 (t-f)^2}{f^3}, \quad (14)$$

$$S_{IV}^* = 0, \quad (15)$$

$$S_V^* = \frac{y \bar{u}^2 t (3f^2 - 3tf + t^2)}{f^3}. \quad (16)$$

为使光学系统更好地消除像差,使初级彗差和象散为零,而且匹兹万场曲也为零。即

$$S_{II}^* = S_{III}^* = S_{IV}^* = 0, \quad (17)$$

可以得到  $t=f$ ,即把光阑放在光学系统的前焦距位置,光学系统是像方远心光学系统。并且使每个 FOV 的像面照度均匀。BOE 单色初级剩余像差系数变为

$$S_I^* = \frac{y^4}{f^3}, \quad (18)$$

$$S_V^* = y \bar{u}^3. \quad (19)$$

可以看出 BOE 剩余球差和畸变,设计时必须考虑其球差和畸变与其他折射元件相互平衡,实现最小像差。并且由于 BOE 的阿贝数绝对值较传统玻璃或晶体的阿贝数小且为负值,表明 BOE 具有较强的色散,同时其色散与折射元件的色散相反,即其光焦度随波长的增大而增大<sup>[12~14]</sup>。这就为系统消除色差提供了可能。所以为了更好地消除像差,需要把光学系统设计为 BOE 的基面为平面,把光阑放在光学系统的前焦距位置,使光学系统为像方远心光路。

## 2.2 目镜光学系统设计

根据单眼目视光学系统设计指标的要求,对于单个目镜光学系统的光学指标要求如表 1 所示。

表 1 单个目镜的光学指标

Table 1 Specification of optical system of single eyepiece

Parameter	Value
Field of view	Horizontal FOV: 33° vertical FOV: 24°
Focal length /mm	$f=26.2$
Wavelength /nm	380~760
Micro-display	OLED
Size of image /mm	15.5×12.43
Size of pixel / $\mu\text{m}$	12
Resolution /pixel	1292×1036
Diameter of the entrance /mm	9
Eye relief /mm	20
Modulation transfer function	$\geq 0.2 @ 45 \text{ lp/mm}$
Distortion /%	$< 1$
Total length /mm	$< 50$

为了实现单个目镜光学系统的指标,以及系统的轻量化,采用两片式目镜结构,并且由于非球面具有多个自由度,有助于校正像差以及减少镜片数<sup>[15,16]</sup>,所以在采用二元衍射面的同时也采用非球面。首先根据像差理论以及系统要求焦距计算出各个面曲率半径,将结构参数输入到光学设计软件,保证焦距不变,然后进行优化。考虑到单元透镜组拼接时单元透镜的尺寸要求、大 FOV 成像质量要求以及各 FOV 间的照度均匀性,选择全 FOV50% 的渐晕。接着选择第三个面为非球面,设定高次项到第 8 次项为优化变量,以焦距不变、畸变小于 1%、以及场曲为 0 作为约束条件,继续进行优化。最后在第 4 个面上加入衍射面,并选择为旋转对称型衍射面,设定高次项到第 6 次项为优化变量,约束条件不变,继续进行优化,得到最佳优化结果。光路及光学结构如图 1 所示。

从图 2 可以看出,该系统完全满足目镜光学系统的指标要求,光学系统接近于远心光路,重量仅为

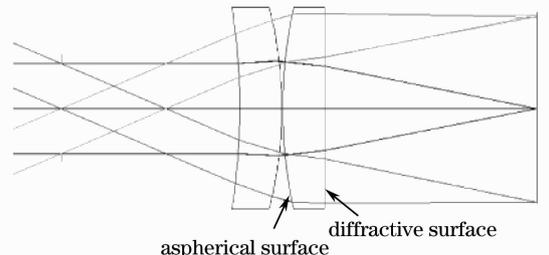


图 1 单个目镜光学系统最后结构

Fig. 1 Final structure of of single eyepiece optical system

3.8 g。轴上 FOV 传递函数在 45 lp/mm 处达到 0.68, 周边 FOV 达到 0.45 以上, 在该空间频率下对应人眼的分辨率为 1.4', 接近于人眼极限分辨率 1'。光斑直径也小于两个像元尺寸。畸变校正得非常

好, 在 0.707 全 FOV 处, 畸变为零, 全 FOV 也是小于 0.2%, 远远高于人眼的分辨能力 (人眼可以分辨 5% 的畸变), 避免眼睛的调节。

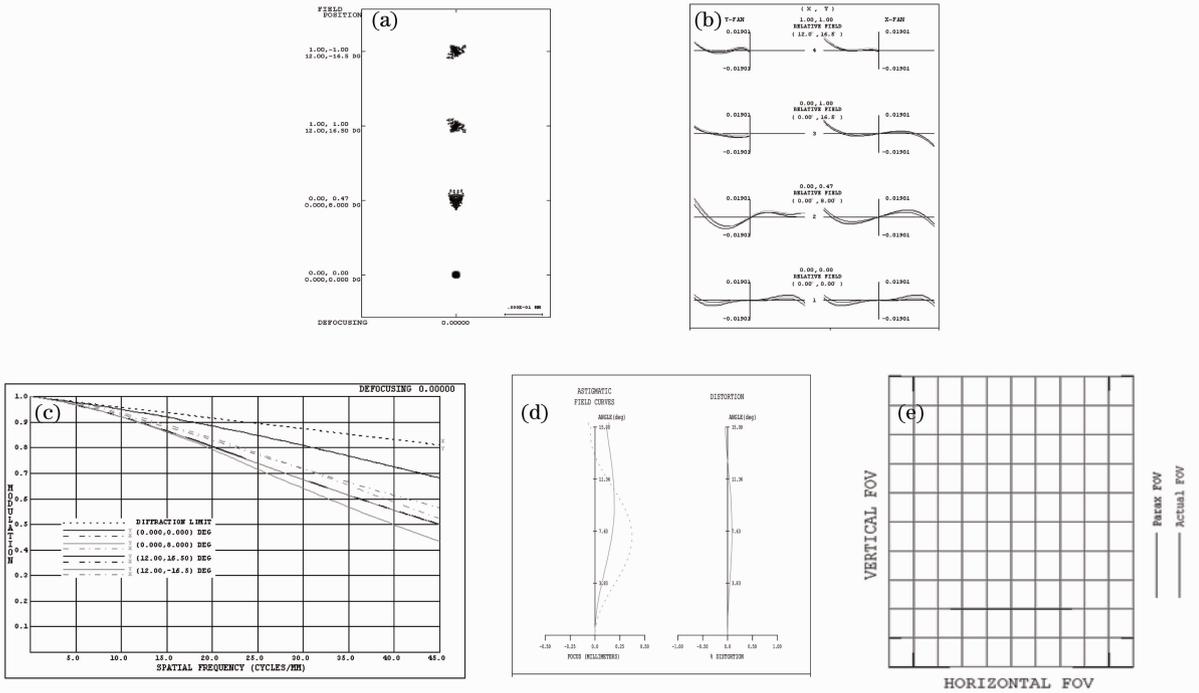


图 2 优化结果。(a)点列图; (b)像差曲线; (c)调制传递函数; (d)场曲与畸变; (e)畸变栅格

Fig. 2 Results of optimization. (a) Spot diagram; (b) aberration curve; (c) modulation transfer function; (d) field curvature and distortion; (e) distortion grid

### 3 FOV 拼接

单个目镜的光学系统设计难于满足全景三维立体 HMD 的 FOV 大、出瞳口径大、出瞳距大、畸变小和成像质量高的要求, 而采用 FOV 拼接技术却很容易实现。因为 FOV 拼接技术就是把大 FOV 分配到多个透镜组, 使每一组透镜实现的 FOV 变小, 所以对于每组透镜的设计会比较简单。如图 3 所示, 每组单元透镜光轴以人眼的转动中心为轴, 以一定角度排列在一起, 也就是每一组单元透镜的图像相互拼接在一起, 形成一幅大型图像。单元透镜组光轴相对于人眼中心视轴偏角为  $\theta$  角, 单元透镜组 FOV 范围为  $\pm\omega'$ 。单元透镜组的任何一个 FOV 相对于眼睛中心视轴形成的人眼 FOV 应该为

$$\omega = \theta + \omega' \quad (20)$$

所以根据单元透镜的 FOV 以及要求相对于眼睛中心视轴的人眼 FOV, 可以计算出单元透镜相对于中心视轴的偏角, 从而为各单元透镜的拼接提供依据。要求设计的双目 FOV 是  $160^\circ \times 60^\circ$ , 双目

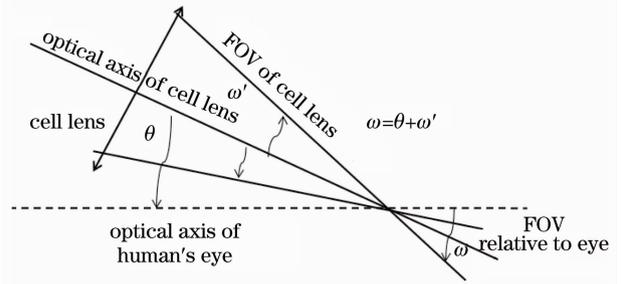


图 3 FOV 拼接

Fig. 3 FOV stitching

FOV 重叠为  $80^\circ \times 60^\circ$ , 因此单目 FOV 为  $120^\circ \times 60^\circ$ 。如果采用  $4 \times 3$  阵列式单元透镜拼接, 则要求每个单元透镜 FOV 至少应该为  $30^\circ \times 20^\circ$ , 为了实现来自不同图像源的图像间能够无缝地拼接, 必须使每个单元透镜间有一定的 FOV 重叠部分。采用单元透镜的 FOV 为  $33^\circ \times 24^\circ$ , 单元透镜间 FOV 重叠为  $4^\circ \times 6^\circ$ 。

头盔显示中的 FOV 拼接分为图像分割以及拼接两部分, 图像分割以及拼接示意图如图 4 所示。

图像分割由视景模拟软件完成,图像的拼接由目视光学系统以及人眼来完成。视景模拟软件在虚拟环境中生成一幅大型图像,然后对这幅图像按照  $4 \times 3$  阵列式分割成 12 幅小图像,而相邻的小图像间均有图像的重叠部分,这 12 幅小图像分别输入到不同的 OLED 微显示器上,通过光学系统以及人眼到达视网膜上,在视网膜上形成一幅完整的图像,而不是分离的 12 幅图像,实现图像的无缝拼接。

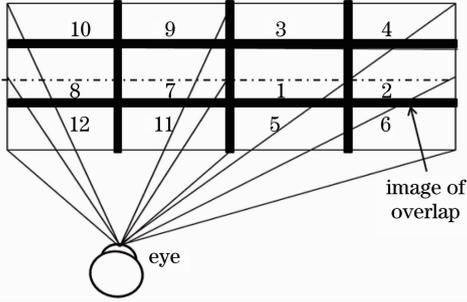


图 4 图像的分割及拼接

Fig. 4 Image segmentation and stitching

根据 FOV 拼接的原理,由 (20) 式计算出各单元透镜组的光轴偏转角度,结果如表 2 所示。

表 2 各单元透镜组的光轴偏转角度

Table 2 Deflection angle of the axis of every cell of the optical system

Cell	Horizontal angle of tilt	Vertical angle of tilt
1	$14.5^\circ$	0
2	$43.5^\circ$	0
3	$14.5^\circ$	$18^\circ$
4	$43.5^\circ$	$18^\circ$
5	$14.5^\circ$	$-18^\circ$
6	$43.5^\circ$	$-18^\circ$
7	$-14.5^\circ$	0
8	$-43.5^\circ$	0
9	$-14.5^\circ$	$18^\circ$
10	$-43.5^\circ$	$18^\circ$
11	$-14.5^\circ$	$-18^\circ$
12	$-43.5^\circ$	$-18^\circ$

#### 4 单眼目视光学系统模拟仿真

根据单元透镜组的设计,以及 FOV 拼接中对各单元透镜组的光轴偏转角度要求,用 LightTools 光学建模软件建立了单眼目视光学系统模型,模型如图 5 所示。

在单眼目视光学系统模型中,对目视光学系统的竖直 FOV  $30^\circ$ 、 $12^\circ$ 、 $6^\circ$ 、 $-12^\circ$  进行光线追迹和仿真,追迹结果如图 6 所示,从图中可以分析出在相对

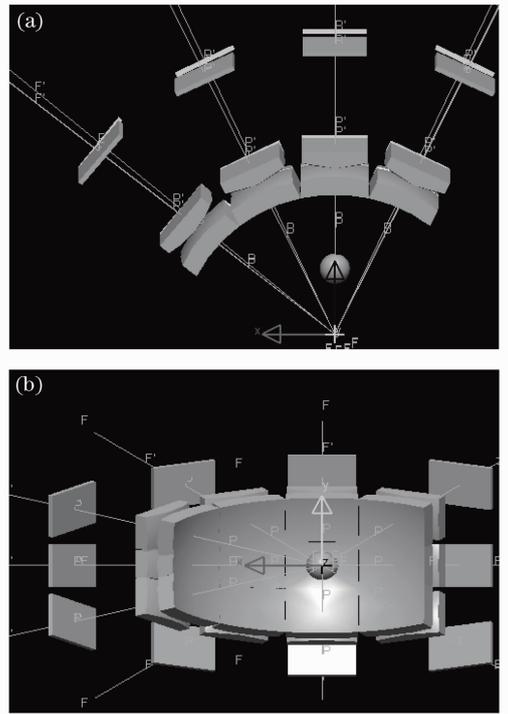


图 5 单眼目视光学系统模型。(a)光学系统模型俯视图;(b)光学系统模型前视图

Fig. 5 Single-eye optical system model. (a) Vertical view of optical system model; (b) front view of optical system model

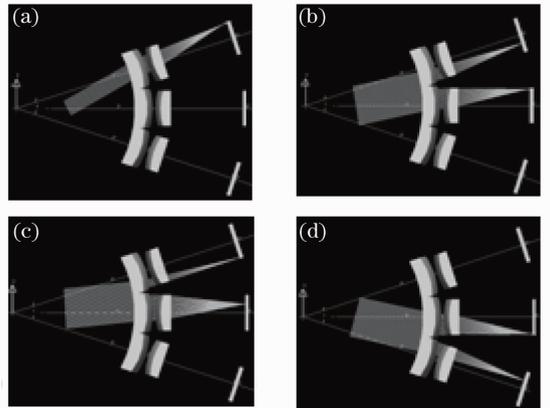


图 6 竖直 FOV 光线追迹。(a)  $30^\circ$ ; (b)  $12^\circ$ ; (c)  $6^\circ$ ; (d)  $-12^\circ$

Fig. 6 Ray-tracing of the vertical FOV. (a)  $30^\circ$ ; (b)  $12^\circ$ ; (c)  $6^\circ$ ; (d)  $-12^\circ$

于人眼视轴 FOV  $12^\circ$ 、 $6^\circ$ 、 $-12^\circ$  处的光线分别聚焦于两片 OLED 微显示器,也就是来自于两片微显示器的相同图像相对于人眼形成相同的 FOV,聚焦于视网膜的相同位置,即实现 FOV 的连续,图像的无缝拼接。所以这种方法可以实现一个水平 FOV 为  $120^\circ$ ,垂直 FOV 为  $60^\circ$  的单眼目视光学系统,通过两只眼睛相互间的 FOV 重叠  $80^\circ \times 60^\circ$ ,双目 FOV 可

以实现  $160^\circ \times 60^\circ$ 。

根据人眼视差原理,两只眼睛由于水平位置相距约 6.5 cm,外界景物在视网膜的像略有不同,愈近差异愈大,愈远则愈小,大脑能判断物体的远近<sup>[17]</sup>。因而在三维立体头盔显示系统中,通过视景模拟软件生成有差异的两幅大型图像分别输入显示屏上,观看者的左右眼只能分别观看到显示在对应屏上的左右视差图,在左右眼视网膜的像略有不同,从而提供给观看者一种沉浸于虚拟世界的沉浸感觉。由于双目系统有  $80^\circ \times 60^\circ$  的 FOV 重叠,因此两只眼睛在  $80^\circ \times 60^\circ$  的大 FOV 范围内可以实现三维立体感,能够满足人眼的视觉需求,给人一种身临其境的感觉。

目视光学系统中各个单元透镜的光轴都相交于人眼平均转轴位置,实现了在人眼转动的过程中,可以凝视任何一片 OLED 显示的图像,人眼的视轴始终与单元透镜的光轴同在一条直线,不会出现 FOV 的丢失以及渐晕,因此在人眼转动的任何角度都可以实现高清、高分辨率以及亮度均匀的图像。单眼目视光学系统重量只有 45.6 g,双目目视光学系统也才 91.2 g,实现了系统的轻量化,长时间佩戴不会有不适应的感觉。

## 5 结 论

采用了 BOE、非球面元件以及 FOV 拼接技术,实现了高性能的全景三维立体头盔显示。讨论了 BOE 设计要求并给出了单元透镜光学系统的设计结果。论述了 FOV 拼接技术原理并且给出了单眼目视光学系统的模型以及模拟结果。单眼光学系统设计结果:水平 FOV 达到  $160^\circ$ ,垂直 FOV 为  $60^\circ$ ,高分辨率 43 pixel/°,畸变小于 0.2%,轴上 FOV 传递函数在 45 lp/mm 处达到 0.68,周边 FOV 达到 0.45 以上。双目系统的 FOV 为  $160^\circ \times 60^\circ$ ,双目重叠 FOV 为  $80^\circ \times 60^\circ$ ,系统重量约为 91.2 g,满足了全景三维立体 HMD 的轻型,大 FOV,高分辨的要求。

## 参 考 文 献

- 1 Wu Weiling. The development of HMD [J]. *Science & Technology Information*, 2010, **33**: 50~52  
吴卫玲. 头盔显示器的技术发展综述[J]. 科技信息, 2010, **33**: 50~52
- 2 Tong Jingbo, Cui Qingfeng, Xue Changxi *et al.*. Optical design of a off-axis dual-channel helmet mounted display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2662~2667  
佟静波, 崔庆丰, 薛常喜等. 离轴双通道头盔显示器光学系统设计[J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2662~2667
- 3 Roger B. Huxford. Wide FOV head mounted display using

- hybrid optics[C]. *SPIE*, 2004, **5249**: 230~237
- 4 Jannick P. Rollad. Wide-angle, off-axis, see-through head-mounted display[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(7): 1760~1767
- 5 Nagahara, Yachid. Super wide field of view head mounted display using catadioptrical optics [J]. *Presence: Teleoper. Virtual Environ.*, 2006, **15**(5): 588~598
- 6 Fan Haiying, Zhang Baoying, Yand Jia *et al.*. Design of compact diffractive-refractive hybrid optical system in ultra-light projective helmets system[J]. *J. Applied Optics*, 2010, **31**(1): 13~18  
范海英, 张宝颖, 杨嘉等. 折/衍混合超轻小型投影式头盔光学系统设计[J]. 应用光学, 2010, **31**(1): 13~18
- 7 Q. L. Zhao, Z. Q. Wang, H. Q. Guo *et al.*. Head mounted display with LCOS using diffractive optical element [J]. *Opt.*, 2004, **115**(1): 11~14
- 8 Zhang Huijuan, Wang Zhaoqi, Zhao Qiulin *et al.*. Hybrid diffractive /refractive optical system design of head-mounted display for augmented reality [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 121~124  
张慧娟, 王肇圻, 赵秋玲等. 折/衍混合增强现实头盔显示器光学系统设计[J]. 光学学报, 2004, **24**(1): 121~124
- 9 Yang Xinjun, Wang Zhaoqi, Sun Qiang *et al.*. Design of the optical system for a see-through refractive/diffractive hybrid helmet mounted display [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(1): 9~12  
杨新军, 王肇圻, 孙强等. 折/衍混合透视型头盔显示器光学系统设计[J]. 光电工程, 2005, **32**(1): 9~12
- 10 Sun Jinxia, Liu Jianzhuo, Sun Qiang *et al.*. A thermal design for hybrid refractive/diffractive conformal optical system[J]. *Opt. & Precision Eng.*, 2010, **18**(4): 792~797  
孙金霞, 刘建卓, 孙强等. 折/衍混合消热差共形光学系统的设计[J]. 光学精密工程, 2010, **18**(4): 792~797
- 11 Zhao Sunlong, Wang Zhaoqi. Design of an ultra-light and compact hybrid refractive-diffractive projection lens of head-mounted projective displays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 249~253  
赵顺龙, 王肇圻. 超轻小型投影式头盔显示系统折/衍混合物镜设计[J]. 光学学报, 2006, **26**(2): 249~253
- 12 Jiang Yang, Sun Qiang, Gu Lishan *et al.*. Design of optical system of HMD using hybrid refractive/diffractive and free form surfaces[J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2011, **19**(3): 508~514  
姜洋, 孙强, 谷立山等. 折/衍混合自由曲面式头戴显示器光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2011, **19**(3): 508~514
- 13 Zhang Hui, Ding Xuemei, Tan Jiubin *et al.*. An achromatic method based on hybrid refractive/diffractive principle for the optical imaging objective with long focal depth [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2008, **17**(10): 1810~1814  
张慧, 丁雪梅, 谭久彬. 基于折/衍混合的长焦深成像物镜消色差方法[J]. 光学精密工程, 2008, **17**(10): 1810~1814
- 14 Zeng Jiyong, Jin Guofan, Wang Mingqiang *et al.*. PWC primary aberration expression of thin lens system including diffractive optical elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 96~100  
曾吉勇, 金国藩, 王民强等. 含衍射光学元件的薄透镜系统初级像差的 PWC 表示[J]. 光学学报, 2006, **26**(1): 96~100
- 15 Meng Xiaochen, Hao Qun, Zhu Qiudong *et al.*. Optimization design of partially compensating lens based on Zemax [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0622002  
孟晓辰, 郝群, 朱秋东等. 基于 Zemax 的部分补偿透镜的优化设计[J]. 光学学报, 2011, **31**(6): 0622002
- 16 Pan Junhua. Fabrication. Design and Test of Aspheric [M]. Beijing: Science Press, 1994  
潘君骅. 光学非球面的加工、设计与检验[M]. 北京: 科学出版社, 1994
- 17 Qi Yan, Bi Yong, Wang Yu. Laser three-dimensional display system based on polarization compensated liquid crystal on silicon optical engine[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0917003  
齐岩, 毕勇, 王宇等. 基于光源偏振补偿的硅基液晶激光三维显示光学引擎[J]. 中国激光, 2011, **38**(9): 0917003