

# 基于单图像生成单元的双焦面头盔显示光学系统设计

孙路通<sup>1,2</sup>, 王灵杰<sup>1\*</sup>, 王蔚松<sup>1</sup>, 刘铭鑫<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 增强现实头盔显示器(HMD)需要两个或更多焦平面,用以显示不同焦距上的画面,既能增强景深效果又能减少单焦面带来的视觉辐辏冲突及不适感。较为传统的解决办法是使用两块分离的图像生成单元(PGU)分别显示两个焦面的内容,增加了成本,降低了可靠性并且体积庞大。使用单个图像生成单元和单个自由曲面棱镜设计了一个新的结构,在图像生成单元上设置两个分开的区域,并通过平面反射镜将其中一个图像区域中继到新的较远位置以实现双焦面显示,最终得到一个视场角为 $18^{\circ} \times 16^{\circ}$ ,出瞳直径为 8 mm,波长为 540~640 nm,出瞳距大于 15 mm,焦距为 95.2 mm 和 35.2 mm 的双焦面头盔显示光学系统。

**关键词** 光学设计; 头盔显示; 双焦面; 自由曲面

中图分类号 TB133

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1322004

## Design of Dual-Focal-Plane Helmet Mounted Display Based on Single Picture Generation Unit

Sun Lutong<sup>1,2</sup>, Wang Lingjie<sup>1\*</sup>, Wang Weisong<sup>1</sup>, Liu Mingxin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Augmented reality helmet mounted display (HMD) requires two or more focal planes to display pictures at different focal lengths, which not only enhances the depth of field effect, but also reduces the visual conflict and discomfort caused by a single focal plane. A relatively traditional solution is to use two separate picture generation units (PGUs). However, it increases the cost, reduces the reliability, and is bulky. We design a new structure using a single PGU and a single free-form surface prism. By setting two separate areas on the PGU and making one of the image areas relayed to the new remote position through two flat mirrors, we achieve a bifocal surface display. Finally, a HMD optical system is designed, which possesses a field-of-view angle of  $18^{\circ} \times 16^{\circ}$ , an exit pupil diameter of 8 mm, a working wavelength of 540–640 nm, an exit pupil distance greater than 15 mm, and two focal lengths of 95.2 mm and 35.2 mm.

**Key words** optical design; helmet mounted display (HMD); dual-focal-plane; free-form surface

**OCIS codes** 120.2820; 220.0220; 120.4570

## 1 引 言

头盔显示器(HMD)技术起源于 20 世纪初,当时的头盔显示器体积大,重量大,不便于携带。随着设计技术、工业制造与光电技术产业的不断发展,HMD 的外形向着小型化与轻量化方向发展,其在军事、教育培训、医疗保健和广告设计等领域都得到了广泛应用且需求日益旺盛。

随着 HMD 应用领域的不断扩大和功能需求的增加,HMD 光学系统的设计需求也变得更加严苛,通常对头盔显示器的设计要求为高成像质量和大视场,除此之外佩戴的舒适性和较为紧凑的轻量设计结构也极为重要。在传统的 HMD 中,通常每只眼睛只有一个图像生成单元为其提供图像信息,且信息仅显示在一个固定的焦平面上。在长时间使用后,由于聚焦和辐辏信息的不一致,佩戴者常常会感

收稿日期: 2020-03-13; 修回日期: 2020-03-19; 录用日期: 2020-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(61675100)

\* E-mail: wanglingjie@126.com

1322004-1

到眼部不适,头晕甚至头痛。如果所提供信息为 3D 视频图像且具有一定的深度,即位于聚焦面的前后,立体感越强,聚焦和辐辏两者之间的差异就越大,更容易造成用户眼部的疲劳<sup>[1]</sup>。为了解决聚焦和辐辏之间不一致导致的视觉辐辏冲突,前人提出了多种解决方法,例如分时复用式解决方案和空间并行式解决方案。分时复用式解决方案是指在某个特定时刻只使用一个深度的焦面,通过改变自身光焦度或改变物像关系,在几个特定深度之间进行快速切换。Shiwa 等<sup>[2]</sup>提出通过改变显示器和目镜之间距离的方式来调整人眼聚焦距离,用户通过控制步进电机来改变目镜在光轴方向上的位置,从而使人眼的聚焦距离始终与双眼会聚的深度保持一致。该系统可在 0.3 s 内实现 30 cm 到 10 m 图像深度的切换。这类系统元件较多,体积庞大并不实用,更重要的是这种设备还需要借助辅助设备来获取人眼聚焦的深度,这样才能将画面调整到所需的位置,用户体验大打折扣。空间复用式解决方案是使用多个显示器,通过在不同的显示器上显示不同深度的图像来产生不同深度信息,但是随着所需焦面数量的增加,显示器数量也相应增加,这会导致设计结构复杂,成本增加,不利于实现小型轻量化。Rolland 等<sup>[3]</sup>提出一种多焦面显示方式,使用多个不同深度的显示器堆栈,将待显示的三维场景按空间位置进行切分,并将其显示在最近的显示器上,但目前这个构想还没有得到真正的实现。Cheng 等<sup>[4-5]</sup>利用两个自由曲面棱镜,设计出可以佩戴的双通道头盔显示器,可以产生分别在 1.25 m 和 5 m 处的焦面。但双棱镜和双显示器的采用在一定程度上增加了整体系统的体积和重量,无法满足佩戴舒适性的需求。

本文提出了一种新的设计结构,从设计原理、像差特性和参数计算方面讨论了设计方案的可行性。最终通过使用单个图像生成单元、单片自由曲面棱镜和两片平面反射镜,设计出一种轻巧、便携且可同时显示两个不同深度焦面的头盔显示光学系统。

## 2 设计原理

根据几何光学的基本原理可知,在反射光学系统中,焦距内不同物距图像对应不同透射距离的虚像。高斯成像公式<sup>[6]</sup>为

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}, \quad (1)$$

式中: $f$  为焦距; $u$  为物距; $v$  为像距。本文所提双焦面头盔显示器光学系统便是依据此原理进行设计

的,但是设计中两个具有不同物距的图像均来自同一个图像生成单元。图 1 为生成双焦面的图像源结构示意图,一个独立的图像生成单元被分为了两个区域 R1 和 R2。R2 区域的出射光线直接投射至自由曲面棱镜之中,而 R1 发出的光线则经两片平面反射镜 M1, M2 后传递至一个新的空间位置,从而在理论上产生一个比 R2 更远的成像距离。为了在头盔有限的空间中折叠光路,R1 区域光线经过两个平面镜 M1 和 M2,并形成两个中间像 R1' 和 R1''。最终,R1'' 和 R2 分别在不同的物距下投射出具有不同像距的画面,该画面分别对应上、下两个视场的出射结果。通常在包含两个分离光路的系统中会出现一定的杂散光干扰。为了抑制这种现象,在显示器上增加了吸收壁以隔离 R1 和 R2 两个区域的光线。此外,图像生成单元上发出的光通常是高度准直的,可满足 HMD 对超高亮度的需求,这也有助于进一步抑制杂散光<sup>[7]</sup>。

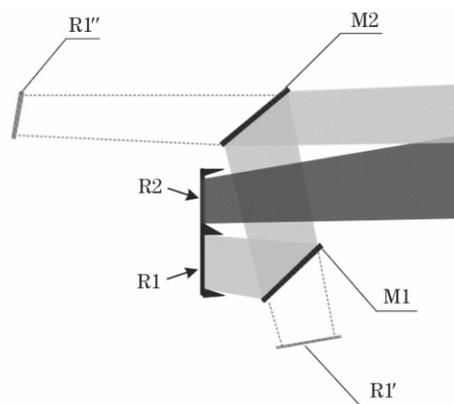


图 1 双焦面光路结构

Fig. 1 Optical path structure of dual-focal-plane

## 3 像差特性与光学结构

头盔显示器采用棱镜作为光学系统的主要部分,系统属于离轴式非旋转对称结构,利用基于传统旋转对称式光学系统波像差的 Hopkins 标量不能有效地分析此类系统的像差。Thompson<sup>[8]</sup>将视场和光瞳转换为矢量形式,得到矢量像差表达式为

$$W = \sum_j \sum_p \sum_n \sum_m (W_{klm})_j (\mathbf{H} \cdot \mathbf{H})^p (\mathbf{r} \cdot \mathbf{r})^n (\mathbf{H} \cdot \mathbf{r})^m, \quad (2)$$

式中: $j$  为光学系统中光学表面序号; $p, n, m$  为各项展开项的幂级数; $k = 2p + m; l = 2n + m; W_{klm}$  为波像差系数; $\mathbf{H}$  为归一化视场矢量; $\mathbf{r}$  为归一化孔径矢量。

在离轴系统中,元件的偏心和倾斜引入了像差

偏移矢量  $\sigma$ , 此时有效视场高度矢量为  $H - \sigma$ , 如图 2 所示, 其中  $\phi$  为归一化孔径的方位角,  $H_x$  和  $H_y$  为像面视场坐标。代入 (2) 式中便得到离轴光学系统的波像差表达式为

$$W = \sum_j \sum_p \sum_n \sum_m (W_{klm})_j \times [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}) \cdot (\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma})]^p (\mathbf{r} \cdot \mathbf{r})^n [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}) \cdot \mathbf{r}]^m. \quad (3)$$

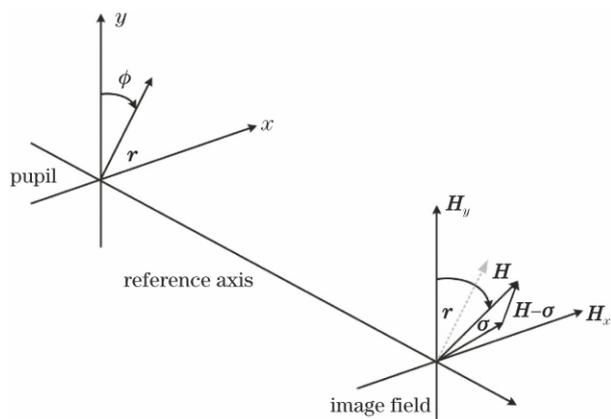


图 2 光瞳和视场的矢量示意图

Fig. 2 Vector diagrams of pupil and field

由于各个元件是以离轴的方式进行组合的, 光学系统进行像差校正时并不会与共轴光学系统一样, 而是会存在大量具有共性的像差。离轴系统中各视场的像差特性也具有很大差异, 传统的球面和非球面校正离轴非对称像差的能力十分有限, 所以本文引入了自由曲面以校正离轴所带来的矢量像差, 并使用了  $xy$  多项式表达自由曲面, 面型方程为

$$Z(x, y) = \frac{qh^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k')q^2h^2}} + \sum_i A_i E_i(x, y), \quad (4)$$

式中:  $(x, y)$  为点坐标;  $\sum_i A_i E_i(x, y)$  为  $xy$  多项式,  $A_i$  为系数,  $i = 1, 2, 3, \dots$ ;  $h$  是轴向半高,  $h^2 = x^2 + y^2$ ;  $q$  是曲率半径;  $k'$  是圆锥系数。  $xy$  多项式不属于正交函数, 而是泰勒函数的一种, 在相应域下进行正交化后得到的正交多项式与笛卡儿坐标系下的具有相同函数形式。又因为泽尼克多项式与光学系统像差存在对应关系, 且  $xy$  多项式与泽尼克多项式具有固定的转换关系<sup>[9-10]</sup>, 所以  $xy$  多项式与像差具有间接的对应关系,  $xy$  多项式表征面型的能力与正交多项式相同。另外, 考虑到体积小且便携需求, 且视场角、出瞳距和成像质量彼此制约, 本文采用自由曲面棱镜作为系统的初始结构<sup>[11-12]</sup>, 通过折/反射相结合的方式, 有效地避免了离轴光线的重叠遮挡问

题, 且光学系统整体结构紧凑。该光学系统的初始结构如图 3 所示, 棱镜包含两个自由曲面 1、3 和一个非球面 2。在实际光路中, 最后一个出射面 3 为自由曲面, 位于孔径光阑附近, 利用其本身的负光焦度可以有效地校正系统的离轴彗差。折射面 1 也为自由曲面, 它与非球面反射面 2 在校正系统倾斜时均具有产生像散的能力, 有利于平衡各视场像差。

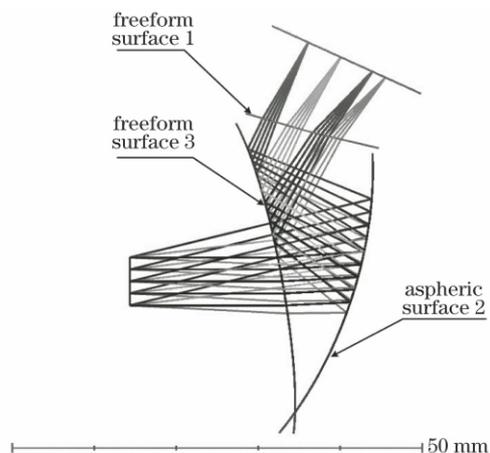


图 3 自由曲面棱镜的初始结构

Fig. 3 Initial structure of free-form surface prism

## 4 设计分析与结果

### 4.1 设计要求

#### 4.1.1 视场角

视场角是评价头盔显示器性能指标中的一个重要参数, 表征了头盔显示器的视野范围。但是在头盔显示器设计中, 存在着视场角越大分辨率越低的问题, 除此之外, 视场角的大小与显示尺寸、体积大小、输出内容等均有关, 并且彼此存在相互制约的关系。本文使用像元大小为  $15 \mu\text{m}$ , 分辨率为  $800 \times 640$  的图像生成单元 (PGU), 因使用隔离壁将 PGU 划分为两个工作区域, 分辨率进一步减小, 且上方显示在较远距离处, 因此可适当减小纵向视场。综合考虑, 将视场角定为上方远视场  $16^\circ \times 4^\circ$ , 下方近视场  $16^\circ \times 10^\circ$ 。

#### 4.1.2 出瞳距离

在目视光学系统中, 人眼的瞳孔位置需要与系统的出瞳位置相匹配才便于人眼看清楚整个视场, 同时为了保证佩戴方便, 目视光学系统的出瞳距离一般应大于  $10 \text{ mm}$ <sup>[13-14]</sup>, 考虑到不同用户的佩戴习惯和部分需要佩戴护目镜的场景等, 本文将出瞳距离设定为  $18.25 \text{ mm}$ 。

#### 4.1.3 出瞳直径

一般情况下人眼瞳孔大小的浮动范围为  $3 \sim 5 \text{ mm}$ , 小的出瞳直径可能导致在观察过程出现视野

丢失,或眼球转动产生的渐晕导致用户易出现视觉疲劳。此外,对于不同用户来说,小的出瞳直径还需要通过调节瞳距来配合系统的使用<sup>[15]</sup>。所以,对于此项参数指标的设定,应在允许范围内尽可能地提供大出瞳直径。因此,本文的出瞳直径设定为 8 mm。

综上所述,双焦面头盔显示器光学系统设计参数如表 1 所示,其中 FOV 为视场,MTF 为调制传递函数。

表 1 光学系统指标

Table 1 Specifications of optical system

Design parameter	Near focal plane	Far focal plane
FOV/(°)	-3—11	2-6
Distance of exit pupil /mm	18.25	18.25
Diameter of exit pupil /mm	8	8
MTF	>0.4@30 lp·mm <sup>-1</sup>	>0.3@30 lp·mm <sup>-1</sup>
Focal length/mm	35.2	95.2

#### 4.2 设计结果

根据上节确定的头盔显示器光学系统的结构设计方案与设计参数,利用 Zemax 设计并优化得到了双焦面头盔显示器光学系统。设计实例剖面图如图 4 所示。图 4(a)是近焦面光学系统结构示意图,图 4(b)是远焦面光学系统结构示意图,图 4(c)是光学系统展开之后的示意图,图 4(d)是在光学系统图像生成单元中加入两面反射镜之后的真实光路示意图,其中经过中继反射镜之后的光线对应上方远焦面视场,直接入到棱镜的光线对应下方近焦面视场。由于此设计是为了实现两个不同倍率焦面的同步成像,如果两个焦面共用三个反射/折射面,各焦面对应的光线将使用同一面公共部分进行传播,设计自由度将大大降低,因此选取第一入射面边缘位置,两束光线视场在该位置处分离。使用两个不同的自由曲面表达函数来分别描述两个面型,其分别对应两个视场不同光线的透射面,这种方法增加了

优化自由度,并大幅度提高成像质量。使用标准面将上下方视场透射面之间的断层连接起来,并增加一层不透光涂层以减少杂散光影响。

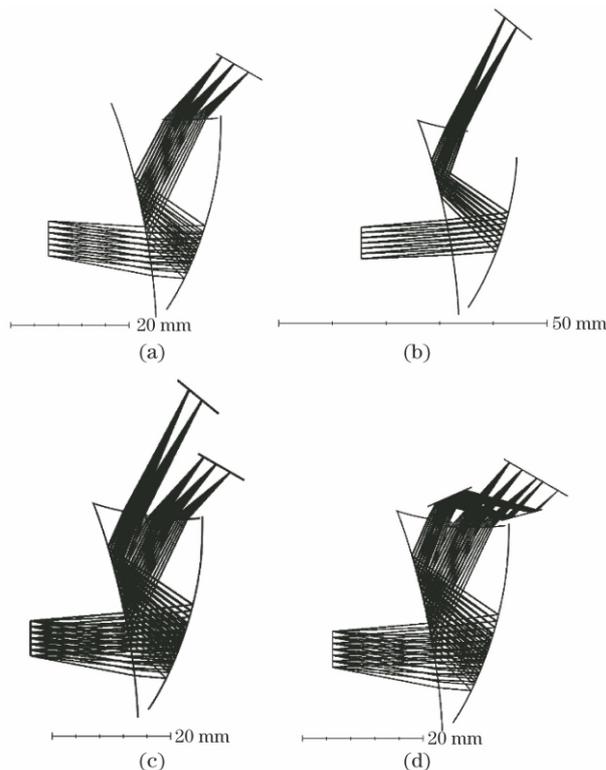


图 4 光学系统设计实例。(a) 近焦面光路结构示意图; (b) 远焦面光路结构示意图; (c) 光学系统展开后的光路结构示意图; (d) 光学系统实际结构示意图  
Fig. 4 Design examples of optical system. (a) Near-focal-plane optical path; (b) far-focal-plane optical path; (c) expanded structure of optical system; (d) actual structure of optical system

图 5 为光学系统两个焦面的 MTF 曲线,设计中图像生成单元采用像元大小为 15 μm 的微显示器,因此截止频率设定在 33.33 lp·mm<sup>-1</sup> 处。其中图 5(a)对应近焦面视场,图 5(b)对应远焦面视场。在截至频率处,各焦面的中心视场均大于 0.5;边缘

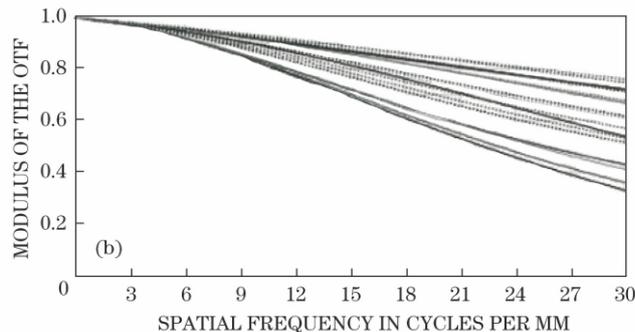
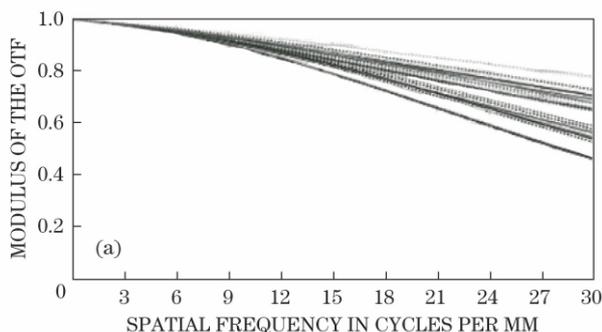


图 5 不同焦面的 MTF 曲线。(a) 近焦面;(b) 远焦面

Fig. 5 MTF maps under different focal planes. (a) Near-focal-plane; (b) far-focal-plane

视场较低,近焦面最低视场大于 0.4,远焦面最低视场大于 0.3。成像质量仍然满足目视系统要求。

图 6 为系统的网格畸变图。图 6(a)为近焦面视场的网格畸变图,最大畸变为 3.53%,没有明显的画面变形,可以不对图像进行预处理;图 6(b)为远焦面视场的网格畸变图,边缘最大畸变为 7.66%,画面变形相对下方较大。对于不理想畸变结果,可根据实际情况对原图像进行预处理以使实际投射至人眼的画面达到理想预期效果。图 7 为光学系统对图片的仿真效果,图 7(a)、(b)分别对应近焦面视场和

远焦面视场。从仿真图中看出,远焦面视场和近焦面视场的亮度分布不均匀,近焦面视场的下部亮度较低,远焦面视场的上部亮度较低。在调整视场后,其余部分视场会出现亮度不均匀,因此分析得出,产生亮度不均匀的原因有可能是远焦面视场和近焦面视场分离过远,边缘出现渐晕,亮度较低。可采用两种方法解决此问题:一是缩小纵向视场,但这种办法有背于头盔显示器的设计发展趋势;另一种办法是适当减小出瞳的距离以减轻亮度不均匀的现象。

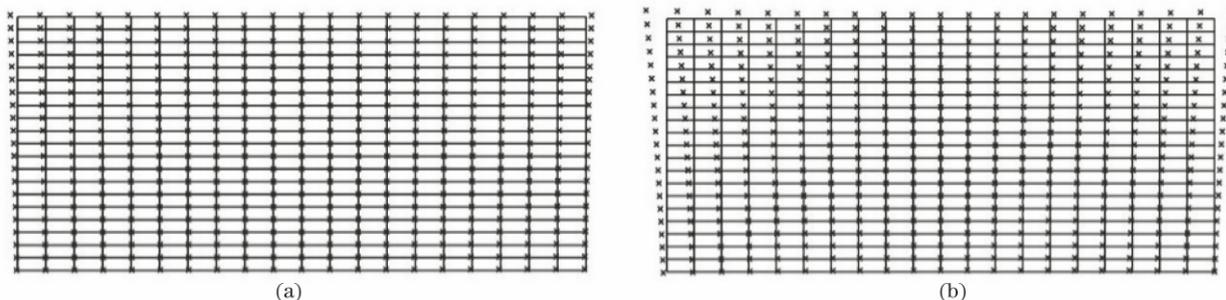


图 6 不同视场的网格畸变图。(a) 近焦面视场;(b) 远焦面视场

Fig. 6 Grid distortion under different fields. (a) Near-focal-plane field; (b) far-focal-plane field



图 7 不同视场的仿真结果。(a) 近焦面视场;(b) 远焦面视场

Fig. 7 Simulation results under different fields. (a) Near-focal-plane field; (b) far-focal-plane field

## 5 结 论

根据物像关系理论,利用单个图像生成单元和自由曲面棱镜,实现了单目双焦面头盔显示器的光学系统设计。研究表明,利用所设计的光学系统,可以得到较好的像质,解决了传统多焦面头盔显示器的结构复杂、体积庞大的问题,对多焦面头盔显示器光学系统的设计具有一定的参考意义。

### 参 考 文 献

[1] Zhou X P, Zhao Y M, Chang Y. Optical system design of off-axis reflective dual-channel helmet mounted display

[J]. Laser Journal, 2018, 39(6): 98-102.

周学鹏, 赵渊明, 常颖. 离轴反射式双通道头盔显示器光学系统设计[J]. 激光杂志, 2018, 39(6): 98-102.

[2] Wang Y T, Cheng D W, Xu C. Display technologies in virtual reality systems[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2016, 46(12): 1694-1710.

王涌天, 程德文, 许晨. 虚拟现实光学显示技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 46(12): 1694-1710.

[3] Rolland J P. Wide-angle, off-axis, see-through head-mounted display[J]. Optical Engineering, 2000, 39(7): 1760-1767.

[4] Cheng D W, Wang Y T, Chang J, et al. Design of a lightweight and wide field-of-view HMD system with

- free-form-surface prism [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(3): 309-311.
- 程德文, 王涌天, 常军, 等. 轻型大视场自由曲面棱镜头盔显示器的设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 309-311.
- [5] Cheng D W, Liu Y, Wang Y T. Free-form surface bifocal monocular stereoscopic helmet display device; CN201110404197.1[P]. 2012-04-04.
- 程德文, 刘越, 王涌天. 自由曲面双焦面单目立体头盔显示器装置; CN201110404197.1[P]. 2012-04-04.
- [6] Zhang Y M. Applied optics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- 张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [7] Qin Z, Lin S M, Luo K T, et al. Dual-focal-plane augmented reality head-up display using a single picture generation unit and a single freeform mirror [J]. Applied Optics, 2019, 58(20): 5366-5373.
- [8] Thompson K. Aberration fields in tilted and decentered optical system[D]. Arizona: University of Arizona, 1980.
- [9] Shi H D, Jiang H L, Zhang X, et al. Research on freeform optical system aberration characteristic based on vector aberration[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1208003.
- 史浩东, 姜会林, 张新, 等. 基于矢量像差的自由曲面光学系统像差特性研究[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1208003.
- [10] 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.
- 郑振蓉, 刘旭, 李海峰, 等. X-Y 多项式曲面的离轴透视头盔显示器系统设计[J]. 应用光学, 2010, 49(19): 3661-3668.
- [11] Li L. Modern optical design[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009.
- 李林. 现代光学设计方法[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
- [12] Chen Y L, Li T C, Qiu X H. Design of free-form-surface prism in head mounted display[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(4): 552-557.
- 陈云亮, 李铁才, 邱祥辉. 头戴显示器中自由曲面棱镜的设计[J]. 应用光学, 2009, 30(4): 552-557.
- [13] Yang B, Wei X N, Zhang W, et al. Design method of a free-form HMD system with large pupil size[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(7): 1051-1054.
- 杨波, 韦晓娜, 张薇, 等. 大出瞳自由曲面头盔显示器光学系统的设计[J]. 光子学报, 2011, 40(7): 1051-1054.
- [14] Jiang Y, Sun Q, Gu L S, et al. Design of optical system of HMD using hybrid refractive/diffractive and free-form surfaces [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(3): 508-513.
- 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): 508-513.
- [15] Zhou L, Kang M W, Li X X, et al. Design of a compact catadioptric optical system for HMDs[J]. Electronics Optics&Control, 2013, 20(3): 66-68.
- 周亮, 康明武, 李晓霞, 等. 紧凑型折反式头盔光学系统设计[J]. 光电与控制, 2013, 20(3): 66-68.