

文章编号 1004-924X(2026)13-1969-12

## 自由曲面折反式头盔显示光学系统设计

张义民<sup>1,2</sup>, 曾伟明<sup>3,4</sup>, 迟英昊<sup>2</sup>, 王 芙<sup>1,2</sup>, 王世勇<sup>1,2</sup>, 丁学专<sup>5\*</sup>

(1. 中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国航空无线电电子研究所, 上海 200233;

4. 航空电子综合与体系集成全国重点实验室, 上海 200233;

5. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**为满足机载场景下的应用需求,针对高性能头盔显示系统追求大视场、大出瞳直径与轻量化结构之间的设计矛盾,选用对侧倾斜投影结构,设计了一种面罩呈流线型的自由曲面折反式光学系统。先采用倒追光线的设计方式与逐步替代的渐进式优化策略,对中继透镜组和自由曲面的面型进行优化以校正系统像散、畸变和慧差;再将中继透镜组镜片数量缩减至 5 片并同轴放置,降低系统结构与装配的复杂度。设计得到的光学系统对角视场为 50°,出瞳直径为 11 mm,出瞳距为 40 mm,各视场 MTF 在 30 lp/mm 时均大于 0.46,单目光机仅重 84.5 g。公差分析显示,在常规加工精度下,全视场 MTF 及畸变控制均表现出较低的敏感度,验证了设计的工程可行性。样机实验结果表明,该系统透射与投影光路成像清晰,为紧凑型、易装调的机载头盔显示系统提供了一种高稳定性的解决方案。

**关键词:** 光学设计; 自由曲面; 头盔显示光学系统; 折/反射式系统; 大出瞳直径

**中图分类号:** O435 **文献标识码:** A

**doi:** 10. 37188/OPE. 20263413. 1969

**CSTR:** 32169. 14. OPE. 20263413. 1969

## Design of catadioptric helmet-mounted displays optical system with freeform surface

ZHANG Yimin<sup>1,2</sup>, ZENG Weiming<sup>3,4</sup>, CHI Yinghao<sup>2</sup>, WANG Fu<sup>1,2</sup>,

WANG Shiyong<sup>1,2</sup>, DING Xuezhuan<sup>5\*</sup>

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. China Aeronautical Radio Electronic Research Institute, Shanghai 200233, China;

4. National Key Laboratory of Avionics Integration and Aviation System-of-Systems Synthesis, Shanghai 200233, China;

5. School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

\* Corresponding author, E-mail: dingxuezhuan@163.com

**Abstract:** To meet the requirements of airborne applications and resolve the design trade-offs among wide

收稿日期: 2026-03-30; 修订日期: 2026-05-06.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2024YFB3614405)

field of view, large exit pupil diameter, and lightweight structure in high-performance helmet-mounted displays, an opposite-side oblique projection optical system based on freeform surfaces is proposed, featuring a streamlined configuration. A reverse ray-tracing method combined with an incremental optimization strategy was employed to refine the surface profiles of the relay lens group and the freeform combiner, effectively correcting astigmatism, distortion, and coma. To reduce structural and assembly complexity, the number of relay lens elements was limited to five and arranged coaxially. The resulting system achieves a diagonal field of view of  $50^\circ$ , an exit pupil diameter of 11 mm, and an eye relief of 40 mm, with the modulation transfer function exceeding 0.46 at 30 lp/mm across the full field, while maintaining a total weight of 84.5 g. Tolerance analysis indicates low sensitivity of both MTF and distortion to standard manufacturing errors, confirming the engineering feasibility of the design. Prototype validation demonstrates clear imaging in both transmission and projection paths, providing a robust solution for compact and easily aligned airborne helmet-mounted display systems.

**Key words:** optical design; freeform surface; helmet-mounted display optical system; catadioptric system; large diameter of exit pupil

## 1 引言

头盔显示系统(Helmet-Mounted Display, HMD)是一种头戴式显示装置,主要用于飞行员获取作战信息。通过将光学系统嵌入头盔内部,飞行员在可目视观测外界环境的同时,观测显示器画面。该系统可替换传统的多块显示屏幕,将目视和控制显示系统相结合,使信息获取更加方便快捷,且不影响目视观测,是下一代飞机的关键必备显示设施。

头盔显示光学系统的设计要求主要有出瞳直径大、出瞳距大、图像清晰、视场大和质量轻等。而如何实现大出瞳直径、大出瞳距与大视场的协同设计,以满足使用者头部与头盔发生相对位移时画面不丢失视场,成为头盔显示系统的实用化核心挑战之一。为满足上述要求,不断有新的结构形式、新兴技术及元件被应用于机载头盔显示光学系统的设计中,例如离轴折反式<sup>[1]</sup>、几何波导<sup>[2-3]</sup>、衍射波导<sup>[4]</sup>、自由曲面棱镜<sup>[5]</sup>、超表面<sup>[6]</sup>等方案。

20 世纪 60 年代初,美国为满足直升机的控制需求,首次提出了头盔瞄准具的概念。为使飞行员能方便获取信息,将瞄准数据与飞行数据甚至图像信息同时投影在眼前,研制了头盔瞄准显示系统。第一代的典型 HMD 是美国的 VTAS (Visual Target Acquisition Set),配装在 F-4 飞行器上的 VTAS 使用右眼单目镜显示发光二极管

产生瞄准光环;第二代 HMD 为护目镜式,如 JHMCS 1.0,单目视场为  $20^\circ$ ,出瞳距为 50 mm;如今 HMD 发展到第三代,典型产品为 F-35 飞行器的 HMDS<sup>[7]</sup>。Cakmakci 等<sup>[8-9]</sup>提出径向基函数自由曲面并代替 XY 多项式自由曲面反射镜,设计出具有 15 mm 出瞳距,3 mm 出瞳,  $24^\circ$  对角视场的头显光学系统。Zheng<sup>[10]</sup>等采用 XY 多项式自由曲面反射镜设计了一款离轴结构形式的头戴显示系统,并制造出原型样机。2018 年,叶井飞<sup>[11]</sup>采用双曲率基面自由曲面和 XY 多项式自由曲面设计了离轴两反式头盔显示系统,出瞳直径为 10 mm 且出瞳距大于 15 mm。Cheng<sup>[12]</sup>等提出包含 3 个楔形自由曲面棱镜和两个中心对称透镜的头盔显示系统,对角视场为  $45.3^\circ$ ,出瞳尺寸为 12 mm $\times$ 8 mm,出瞳距为 18 mm。

不同结构形式的头戴显示系统各有特点,比如 OST-HMD 集成了投影光学系统与光波导,可以实现小型化与轻量化,但几何波导的杂散光会降低显示质量;衍射波导也很难开发出没有伪像的全色域高分辨率显示器;超表面在通信、红外成像等领域展现了其超强的光场调控能力,但加工技术与成本的限制使它们暂时无法在可见光成像与显示领域推广。在飞行员头盔显示系统中,离轴反射式头盔显示光学系统以其清晰的全彩色显示,高透过特性与高亮度投影的优点,可适应户外高亮度阳光及较暗场景下的应用场景,已成为飞行员头盔的主流方案。

现有的离轴反射式头盔显示光学系统存在较多问题:首先,结构复杂、体积质量大;其次,中继光学系统内部元件的偏心与倾斜大大提高了后续公差控制难度和装调过程的复杂度;最后,在机载状态下,为了稳定清晰显示,对头盔显示器的视场、出瞳直径和重心偏移量等方面具有高性能的要求。

针对以上问题,本文提出一种由同轴中继透镜组与自由曲面面罩组合而成的离轴折反式头盔显示光学系统。利用自由曲面像差校正能力强与多自由度的特点,减小了头盔显示光学系统的体积和质量,使飞行员长期佩戴不疲劳;提出了出瞳与视场的协同设计方法,在拥有大出瞳直径与大视场的同时,实现较高的分辨率;采用同轴中继光学透镜组件,显著降低结构复杂度与装调难度。

## 2 原 理

### 2.1 出瞳直径与视场的协同设计

离轴折反式头盔显示光学系统的物像关系可以由 $f = \frac{y'}{\tan \omega}$ 定义,其中 $f$ 为系统焦距, $y'$ 为像高, $\omega$ 为半视场角。由于采用倒追光线的设计方式,即像面位置为显示器,此时像高 $y'$ 即表示显示器对角线高度的一半。所以当显示器型号确定时,系统视场角大小仅与系统焦距 $f$ 有关。系统焦距 $f$ 与系统的出瞳直径 $D$ 存在 $F\# = f/D$ 的关系,其中 $F\#$ 为系统 $F$ 数, $D$ 为出瞳直径。由此可知,视场角 $\omega$ 与出瞳直径 $D$ 之间的关系如下:

$$F\# = \frac{y'}{D \tan \omega}. \quad (1)$$

在头盔显示光学系统设计过程中,通常选用较小的 $F$ 数来提高系统的衍射极限,从而为实现高分辨率提供更高的理论上限。因为半视场角 $\omega$ 存在 $0^\circ < \omega < 90^\circ$ ,所以当 $F$ 数与显示器型号确定时,存在 $D \propto \frac{1}{\tan \omega}$ 。通过量化出瞳直径与视场角之间的关系,在设计过程中实现性能权衡。

考虑到亮度需求,本设计采用 SONY 的高亮高分辨率商用 micro-OLED 像源(1 920×1 080 像素,5 000 cd/m<sup>2</sup> 峰值亮度,刷新率为 60~120 Hz),显示器具有自发光功能且无需添加照

明单。为避免飞行过程中头部移动发生渐晕,HMD 的出瞳直径必须大于人眼瞳孔的大小。人眼瞳孔直径根据周围环境亮度在 2~8 mm 内变化<sup>[13]</sup>,出瞳直径应不小于 10 mm,此时对应系统视场角约为 50°,水平方向视场角为 42°,垂直方向视场角为 30°。

出瞳距是指最后一个光学表面到出瞳中心的距离。为满足飞行员佩戴各型护目镜与氧气面罩的空间需求,出瞳距需要足够大且不小于 40 mm<sup>[13]</sup>。由此可以确定该光学系统的设计指标如表 1 所示。

表 1 光学系统的设计指标

Tab. 1 Design specifications of optical system

| Parameter              | Value          |
|------------------------|----------------|
| FOV/(°)                | 42(H)×30.8(V)  |
| Exit pupil diameter/mm | 11             |
| Eye relief/mm          | 40             |
| MTF value              | >0.46@30 lp/mm |
| Distortion/%           | ≤32            |

### 2.2 结构选择与边界条件

折反式头盔显示光学系统主要有 3 种投影方式,分别是自上而下的投影系统、同侧倾斜投影系统和对侧倾斜投影系统。其中,自上而下的投影系统中继透镜组位于眼睛的正上方,如图 1(a)所示。为了防止投影模块与用户头部之间的干涉,通常需要增加反射镜的倾斜角度,导致重心前移。反射镜倾斜角度的增加不仅加剧了离轴像差,也扩大了上端视场的出瞳距离,双目拼接时易造成上方横向视场的丢失。这种结构在双目拼接后的面罩无法保持流线型,容易导致透射光路视野的丢失。如图 1(b)所示,同侧倾斜投影系统虽然减小了投影模块与用户头部之间的干涉程度,但同样无法使面罩保持流线型以保证透射光路视野的完整性。而对侧倾斜投影系统很好地解决了这些问题,如图 1(c)所示,右侧投影模块将光线投向左侧反射镜,将虚像呈现给左眼。这种方法使得护目镜保持流线型形,而不需要在中心区域缝合,以保证透射光路视野完全不受限。因此本设计选用对侧倾斜的投影结构。

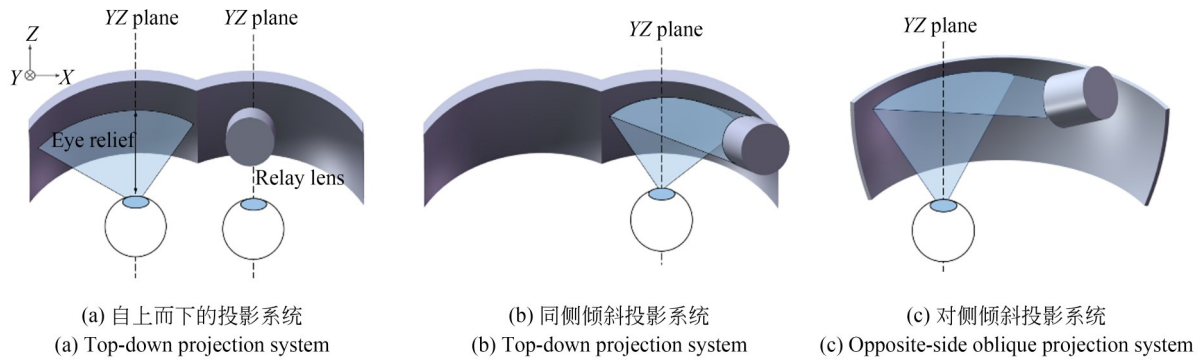


图 1 三种折反式头盔显示光学系统

Fig. 1 Three kinds of reflective helmet display optical systems

为避免光学系统内部出现光线遮挡与光学元件干涉的情况,需对光线追迹坐标与各元件位置进行约束。根据离轴折反式头盔显示光学系统的结构特征,选取 3 个代表视场的特征光线,其与光学系统各表面相交于  $A_1A_2A_3A_4A_5$ ,  $B_1B_4B_5$ ,  $C_1C_2C_3C_4C_5$ , 如图 2 所示,所有坐标参考全局坐标系,原点位于出瞳中心  $B_5$ 。因此结构约束可以表示为:

$$\begin{cases} Y_{C_1} - Y_{C_2} > 0 \\ Y_{A_1} - Y_{A_2} > 0 \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} Y_{A_3} - Y_{A_4} > 0 \\ Y_{C_3} - Y_{A_4} > 0 \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} Y_{A_3} - Y_{A_5} > 0 \\ Y_{C_3} - Y_{A_5} > 0 \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} Z_{A_3} - Z_{B_4} \geq 40 \\ Z_{B_3} - Z_{B_4} \geq 40, \\ Z_{C_3} - Z_{B_4} \geq 40 \end{cases}, \quad (5)$$

其中:  $Y$  和  $Z$  为坐标值,下标为对应光线与光学表面的交点。式(2)约束显示器位于中继透镜组上方且互不干涉;式(3)约束中继透镜组位于组合器上方且互不干涉;式(4)约束出瞳位置,且出瞳与中继透镜组互不干涉;式(5)约束出瞳距不小于 40 mm。式(2)~式(5)共同作用于整个离轴折反式头戴显示光学系统,同时需要结合优化过程实时做出合理调整。

结构约束需要考虑光学系统与使用者之间的交互关系,避免光学系统与使用者面部发生干涉或光线遮挡。根据离轴折反式头盔显示光学系统的结构特征与人体面部轮廓特征,光学系统的折转角应大于人体面部鼻尖水平面到额头的

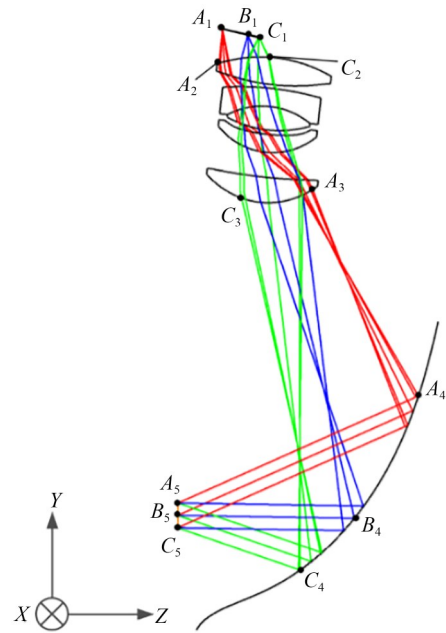


图 2 结构约束示意图

Fig. 2 Diagram of structural constraints

夹角,即  $\angle C_3B_4B_5 > 70^\circ$ 。

### 2.3 优化设计

根据上文设计指标与结构约束,尝试以相关专利为基础进行优化。但光学元件的离轴、偏心和反射面复杂的面形,在优化过程中会导致结构和表面曲率急剧变化。因此,需以简单的同轴光学系统为出发点进行优化。

基于近轴光学理论与成像公式进行计算,将最后一面设为反射面,得到的初始结构如图 3 所示。其中各表面均为球面,光阑位置与像面重合,一次像面位于中继透镜组和反射面之间便于进行像差校正。表面参数如表 2 所示。

表 2 光学系统的初始结构参数  
Tab. 2 Parameters of initial optical of system structure

| Element  | Surface label | Surface type | Radius/mm | Thickness/mm | Material |
|----------|---------------|--------------|-----------|--------------|----------|
| Combiner | 1             | Spherical    | −57.36    | −78.00       | MIRROR   |
|          | 2             | Spherical    | 102.10    | −3.00        |          |
| Lens 1   | 3             | Spherical    | −981.569  | −1.00        | H-ZK5    |
|          | 4             | Spherical    | −40.633   | −10.196      |          |
| Lens 2   | 5             | Spherical    | 101.356   | −18.142      | H-ZK3    |
|          | 6             | Spherical    | −38.0470  | −5.00        |          |
| Lens 3   | 7             | Spherical    | 207.45    | −22.656      | H-QK3L   |
|          | 8             | Spherical    | −119.358  | −3.00        |          |
| Lens 4   | 9             | Spherical    | Inf       | −8.62        | H-ZK9B   |
|          |               |              |           |              |          |

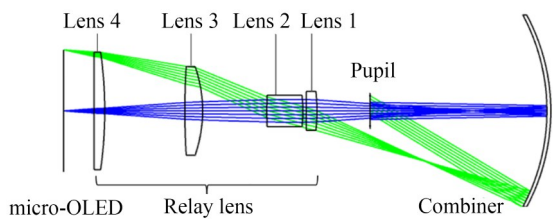


图 3 光学系统初始结构光路  
Fig. 3 Optical path of initial system design

采用倒追光线的设计方式,将初始结构倒置进行光线追迹。并采取逐步替代的渐进式优化策略,对矩形网格进行采样,随着系统性能的提升,逐步提高采样量和参数量,将球面逐步替换为非球面,最后替换为 Zernike Fringe 多项式表征的自由曲面,以避免结构与表面曲率的急剧变化。

对侧倾斜的投影结构在设计时,需要将光学系统绕 Z 轴旋转 45°,以实现右侧投影模块将光线投向左侧反射镜,将虚像呈现给左眼的功能。这样的旋转会使矩形视场在像面上失去关于 YOZ 平面的对称性,增加了在设计过程中像差控制与边缘视场像质提升的难度与复杂性。同时,反射面的倾斜和偏心会导致光学系统像差场分布不一致,引入较大的离轴像差,使中间像面弯曲倾斜。因此,需使像面、中间像面和中继透镜组主面交于一条直线满足 Scheimpflug 成像条件对中间像面进行校正。反射面选用校正高阶像差能

力较强的自由曲面,置于孔径光阑附近。常用的自由曲面表征方式有 XY 多项式和 Zernike 多项式。其中,Zernike 多项式的基函数在单位圆域内是连续正交完备的,其正交性表明多项式各项系数之间互不影响,并且 Zernike 多项式与像差存在对应关系,可根据矢量像差理论针对性地进行像差校正。因此,本文选用 Zernike 多项式曲面类型,即:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^8 \alpha_i r^{2i} + \sum_{i=1}^N A_i Z_i(\rho, \varphi), \tag{6}$$

其中: $z$ 为矢高坐标, $c$ 为曲率, $k$ 为圆锥系数, $N$ 为级数中 Zernike 系数的个数, $A_i$ 是第  $i$  个 Zernike Fringe 多项式的系数, $r$ 是径向的光线坐标, $\rho$ 为归一化的径向光线坐标, $\varphi$ 为角向的光线坐标。

### 3 性能与公差分析

#### 3.1 性能分析

根据上述分析与优化过程,基于自由曲面的离轴折反式头盔显示光学系统设计结果如图 4 所示。该系统采用对侧倾斜投影的结构形式,由一个自由曲面组合器和一个 4 组 5 片同轴中继透镜组构成,单目光机重量为 84.5 g,系统视场为 42°×30.8°,对角视场为 50°,出瞳距为 40

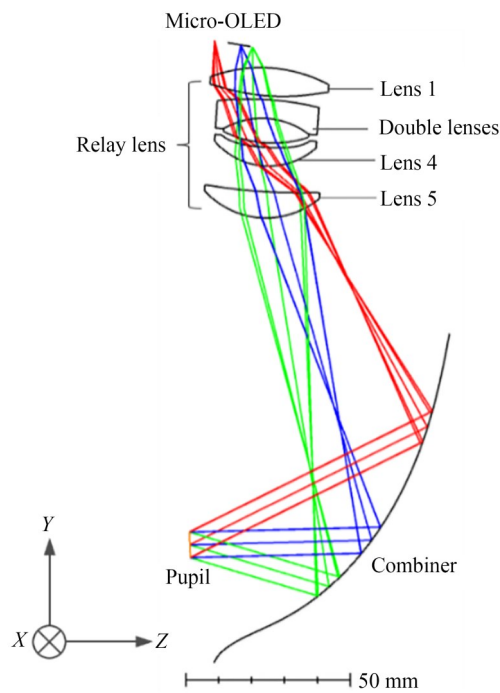


图4 光学系统最终结构

Fig. 4 Ultimate structure of HMD

mm,出瞳直径为 11 mm,光学系统的整体结构非常简单且紧凑,光学系统各元件的详细参数在表 3 中给出。

该系统包含透射光路和投影光路,由于组合器采用较薄的透明光学表面,所以通视光路成像不受面型影响。投影光路包含组合器和中继透镜组,组合器是一个倾斜放置的自由曲面,其内表面镀有半反射膜,允许外光线透射使虚拟图像与真实场景重合。中继透镜组由 4 组 5 片镜组成,其中包含一片消色差双胶合透镜和 3 片非球面镜。为降低中继透镜组的装调难度,其中各光学元件光轴一致。

该系统各视场的 MTF 曲线如图 5(a)所示,在 30 lp/mm 的空间频率下,该光学系统在全视场范围内 MTF 值均大于 0.46。如图 5(b)网格畸变图所示,最大畸变为 32%,虽然由中继系统与倾斜组合器引起的 keystone 畸变在光学设计过程中难以完全校正,但其并不影响光学系统的分辨率,并且可以通过确定输出图像与原图像的映射关系,运用数字预畸变校正方法对畸变进行校正。具体处理流程如图 6 所示,采用基于 RBF 网络插值的畸变映射方法,确立输出图像与源图像之间的映射关系<sup>[14]</sup>,通过数字预畸变校正进行修复。经预畸变处理后,光学系统的网格畸变不大于 3%。

表 3 光学系统参数

Tab. 3 Parameters of optical system

| Element       | Surface label | Surface type    | Radius/mm | Thickness/mm | Material  | Conic |
|---------------|---------------|-----------------|-----------|--------------|-----------|-------|
| Combiner      | 1             | Zernike Fringe  | 78.80     | −134.80      | MIRROR    | 0     |
|               | 2             | Even aspherical | −24.43    | −8.00        | D-ZPK7    | 0     |
| Lens 5        | 3             | Spherical       | −166.27   | −7.80        | —         | —     |
|               | 4             | Spherical       | −21.60    | −5.66        | D-QK3L    | —     |
| Lens 4        | 5             | Even aspherical | −71.80    | −1.36        | —         | 0     |
|               | 6             | Spherical       | −34.00    | −7.40        | H-ZPK2A   | —     |
| Double lenses | 7             | Spherical       | −23.40    | −5.74        | H-ZF73    | —     |
|               | 8             | Spherical       | 90.48     | −1.16        | —         | —     |
| Lens 1        | 9             | Even aspherical | −62.97    | −8.50        | D-ZLAF85A | 0     |
|               | 10            | Spherical       | 43.70     | −5.40        | —         | —     |

在头盔显示器的穿戴与使用过程中,不同使用者的瞳距、飞行过程中振动都会使瞳孔相对系

统出瞳中心发生位移。鉴于人眼瞳孔直径随环境亮度在 2 mm 至 8 mm 之间波动,评估眼动范围

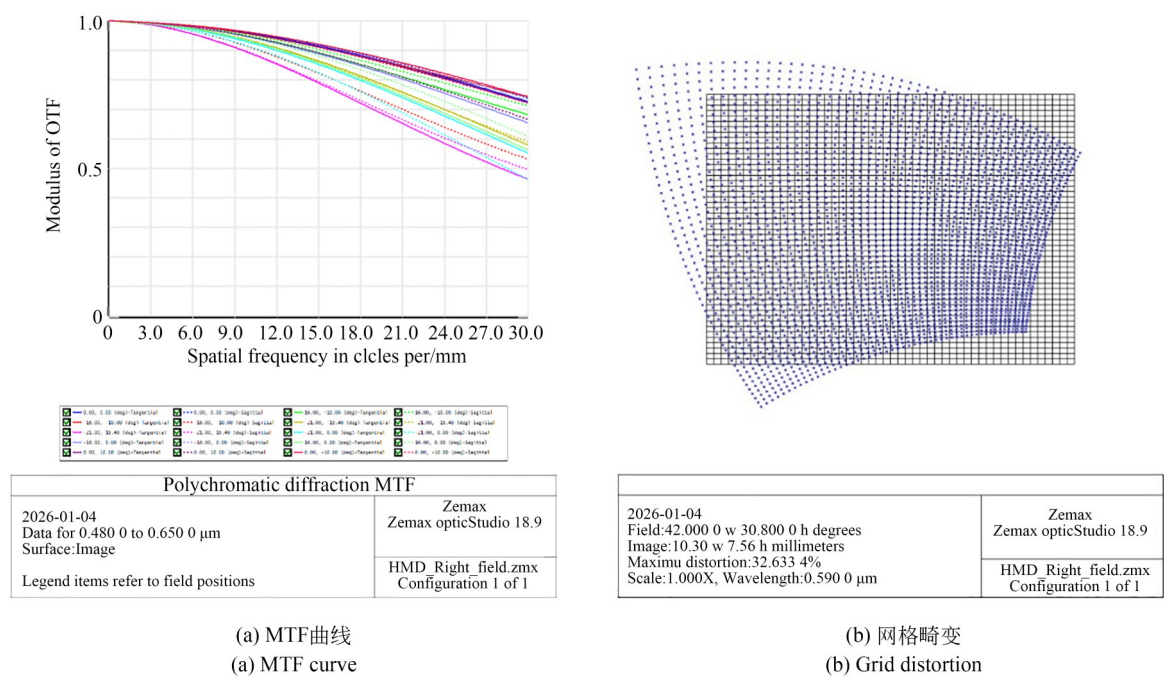


图 5 离轴折反式头盔显示光学系统性能分析

Fig. 5 Performance analysis of off-axis catadioptric helmet-mounted display optical system

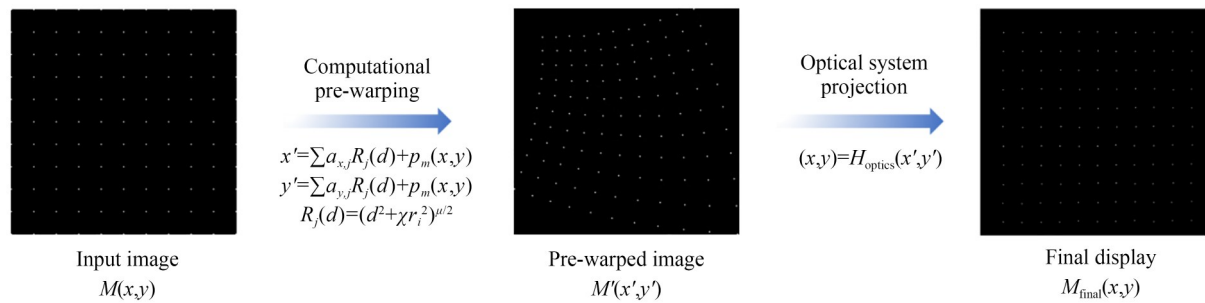


图 6 预畸变处理示意图

Fig. 6 Schematic of image pre-warping process

内不同位置的成像性能至关重要。

本设计针对出瞳在 4 个偏移位置进行了仿真分析,分别为横向偏移 4 mm 以及纵向偏移 5 mm。图 7 展示了上述 4 个位置的 MTF 曲线。具体而言,图 7(a)与 7(b)分别描述了系统在向左和向右偏移 4 mm 时的 MTF 情况;观察可见,在 30 lp/mm 的空间频率下,全视场的 MTF 值均保持在 0.45 以上,表明位移对图像保真度的影响微乎其微。图 7(c)与 7(d)则给出了出瞳向前和向后偏移 5 mm 时的 MTF 曲线,尽管部分视场的曲线波动较为明显,但在 30 lp/mm 处 MTF 值仍一致高于 0.4。上述结果表明,本设计在眼动范围

内的成像质量具有良好稳定性。

本设计与近年折反式 HMD 光学系统结构与性能参数对比结果如表 4 所示。相比设计 1 与设计 2 采用自上而下的投影形式,本设计采用对侧倾斜投影的结构形式,保证双目拼接后面罩保持流线型,而不需要在中心区域缝合,以保证透视线光路视野完全不受限;另外,本设计仅有 5 片透镜与 1 面反射镜,单目光机质量为 84.5 g,相较设计 1 的元件数量减少了 50%,单侧质量减少 105.5 g,大幅降低了光机质量。在降低光学系统复杂度的同时提高了出瞳直径;相比设计 2,除了结构的优化能够大大提高机载应用的可行性以外,光学

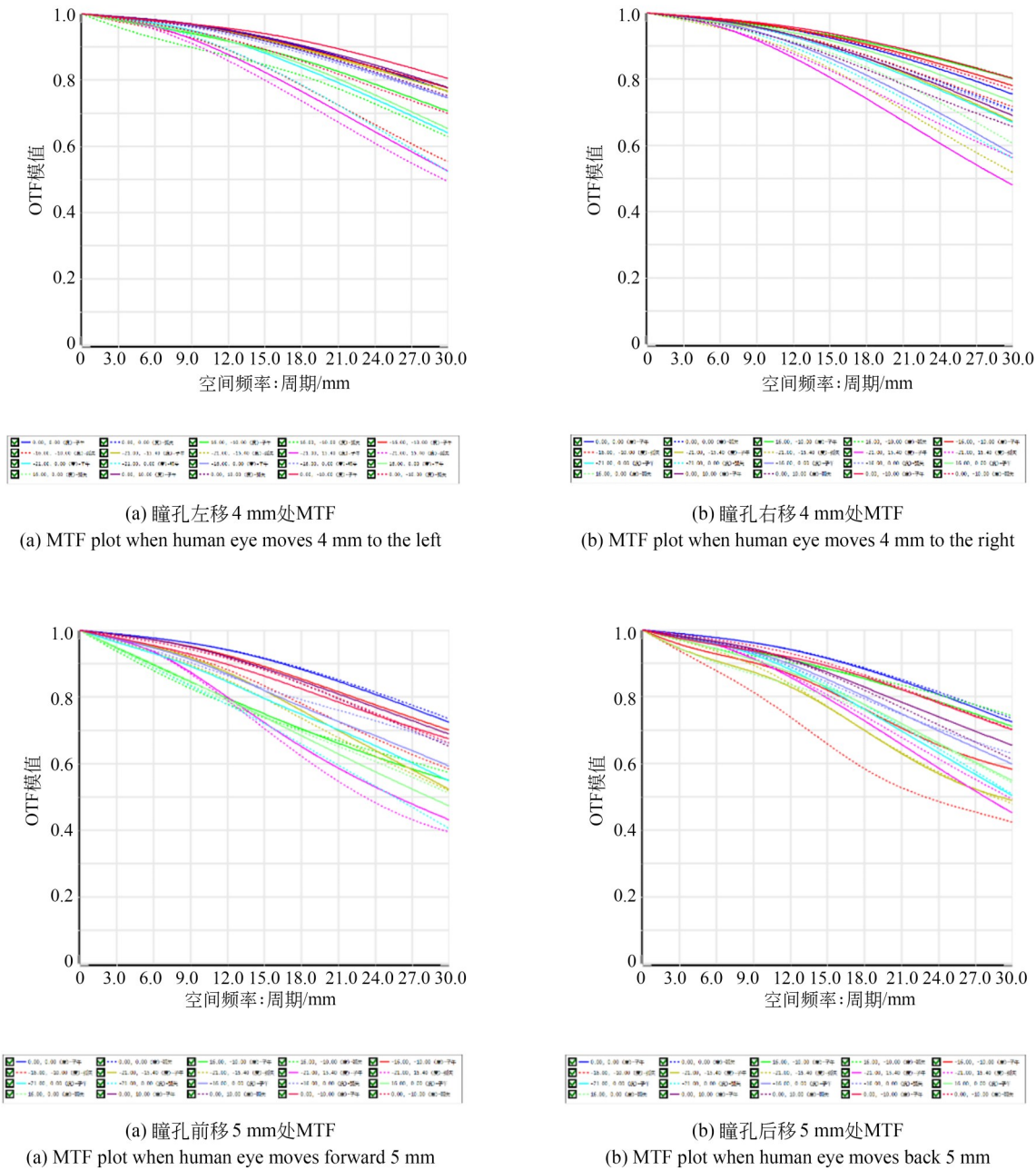


图 7 瞳孔偏移至 4 个不同位置时光学系统的 MTF  
Fig. 7 MTFs of optical system when pupils shifted to four different positions

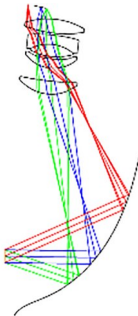
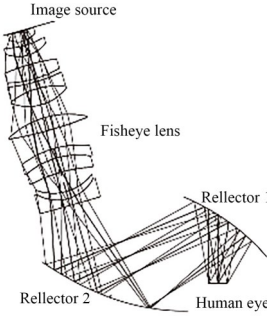
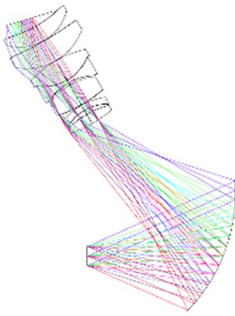
表 4 离轴折反式头盔显示光学系统设计结果对比

Tab. 4 Comparison of design results of off-axis catadioptric helmet-mounted display optical systems

| Parameter       | Our design                                | Design 1 <sup>[15]</sup>       | Design 2 <sup>[16]</sup>      |
|-----------------|-------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Structural form | Oblique projection from the opposite side | Top-down projection            | Top-down projection           |
| Element Count   | 5 coaxial lens group+1 mirror             | 10 coaxial lens group+2 mirror | 7 coaxial lens group+1 mirror |
| Weight/g        | 84.5                                      | 190                            | /                             |

续表 4 离轴折反式头盔显示光学系统设计结果对比

Tab. 4 Comparison of design results of off-axis catadioptric helmet-mounted display optical systems

| Parameter              | Our design                                                                        | Design 1 <sup>[15]</sup>                                                           | Design 2 <sup>[16]</sup>                                                            |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| FOV/(°)                | 50                                                                                | 65                                                                                 | 52                                                                                  |
| Exit pupil diameter/mm | 11                                                                                | 8                                                                                  | 12                                                                                  |
| MTF                    | >46% @ 30 lp/mm                                                                   | >30% @ 30 lp/mm                                                                    | >50% @ 30 lp/mm                                                                     |
| Design result          |  |  |  |

元件数量减少了 25%,并且在不影响光学系统视场与 MTF 的情况下,降低了结构与装配的复杂度,大大提高了加工可行性。

3.2 公差分析

公差分析是光学设计的重要组成部分,与光学制造、装配的成本密切相关。通过评估参数的敏感度,有效地进行公差分配,确定其加工参数和装配要求,避免过度设计的同时确保加工装调的可行性。

与旋转对称系统不同,基于自由曲面的离轴折反式头盔显示光学系统中各个非球面与

光学元件的倾斜和偏心都会降低容差,使公差分析更为复杂<sup>[17]</sup>。根据表 5 中列出的曲率半径、厚度、各表面与元件在  $x$  和  $y$  方向的倾斜和偏心各项公差,使用 ZEMAX 对离轴折反式 HMD 光学系统进行 Monte Carlo 模拟,得到 30 lp/mm 下 MTF 在不同累积概率下的变化值,如图 8 所示。在累积概率为 98% 时,MTF 最大可能变化为  $-0.153$ 。同时,在累积概率为 90% 时,MTF 最大可能变化为  $-0.096$ 。上述公差分析结果表明,本设计具有较高的加工可行性。

表 5 光学系统公差值

Tab. 5 Tolerance values of optical system

| Tolerance items                      | E1         | E2         | E3         | E4         | E5         | E6         |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Radius of curvature (Fringe)         | 3          | 3          | 3          | 3          | 3          | 3          |
| Thickness/mm                         | $\pm 0.02$ | $\pm 0.02$ | $\pm 0.02$ | $\pm 0.02$ | $\pm 0.02$ | $\pm 0.02$ |
| Surface tilt around $x$ axis/mrad    | 0.145      | 0.145      | 0.145      | 0.145      | 0.145      | 0.145      |
| Surface tilt around $y$ axis/mrad    | 0.145      | 0.145      | 0.145      | 0.145      | 0.145      | 0.145      |
| Surface decenter in $x$ direction/mm | 0.01       | 0.01       | 0.01       | 0.01       | 0.01       | 0.01       |
| Surface decenter in $y$ direction/mm | 0.01       | 0.01       | 0.01       | 0.01       | 0.01       | 0.01       |
| S+A irregularity(Fringe)             | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        | 0.5        |
| Index                                | 0.001      | 0.001      | 0.001      | 0.001      | 0.001      | 0.001      |

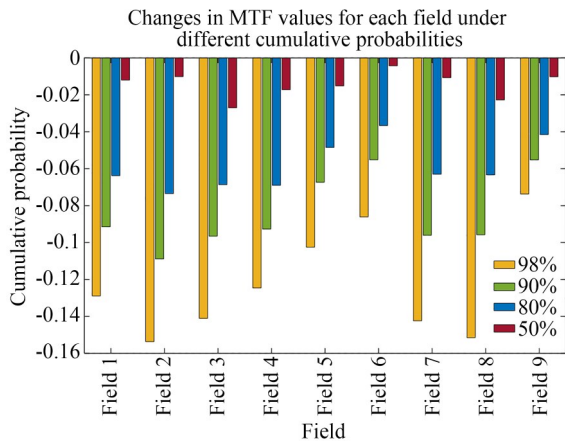


图 8 各视场在不同累积概率下 MTF 的变化值

Fig. 8 Changes in MTF values for each field under different cumulative probabilities

#### 4 原理样机与测试结果

根据前文公差分析结果,加工出原理样机进行测试,图 9 为双目配置的离轴折反式 HMD 光学系统原理样机测试示意图,中继透镜组镜筒与两块反射镜通过支架进行固定。相机被固定在电动位移台上,通过电动位移台控制相机 XY 方向的位移,并通过光学平台下方的高精度剪式升降台调整相机在 Z 轴的相对位置,将相机位置调整到光学系统的最佳出瞳位置。中继透镜组包含一片胶合透镜和 3 片非球面镜,非球面面型均为玻璃基底的偶次非球面。中继透镜组材料均采用玻璃材料,非球面透镜采用低熔点模压材

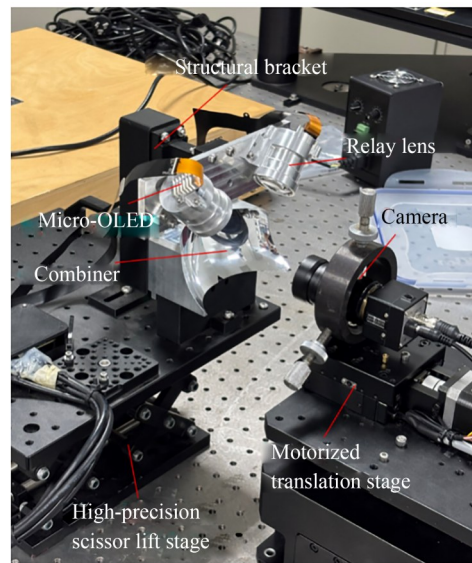


图 9 离轴折反式 HMD 光学系统原理样机

Fig. 9 Prototype of off-axis catadioptric HMD optical system

料。为验证离轴折反式 HMD 光学系统的显示质量,将相机置于光学系统的出瞳处获取投影与透射图像,如图 10 所示。

图 10(a)为透过组合器拍摄的分辨率卡,可以看出透射光路受光学系统影响较小。图 10(b)是分辨率卡图片经预畸变处理后显示,再由 HMD 光学系统投影在出瞳处的图像。此外,相机拍摄的 HMD 彩色投影与场景叠加效果如图 11 所示。实验测试结果表明,本文设计的紧凑型离轴 HMD 具有良好的图像显示性能,展示了该

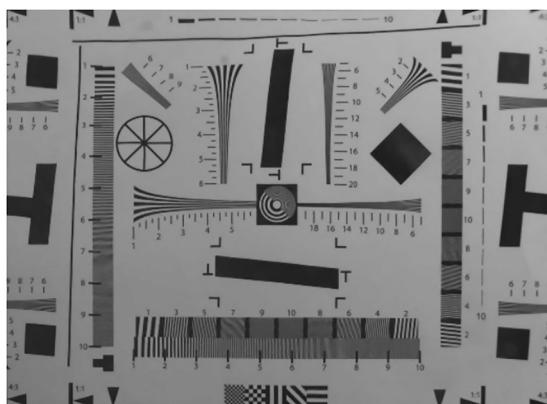
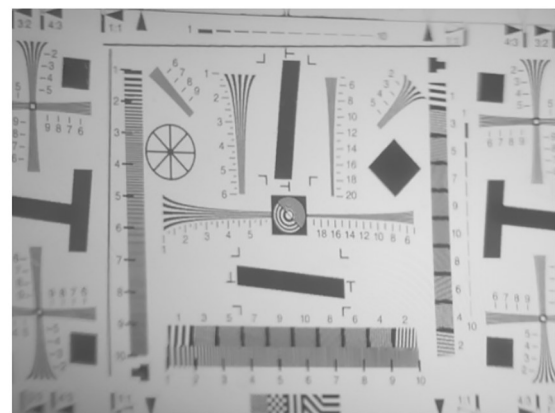
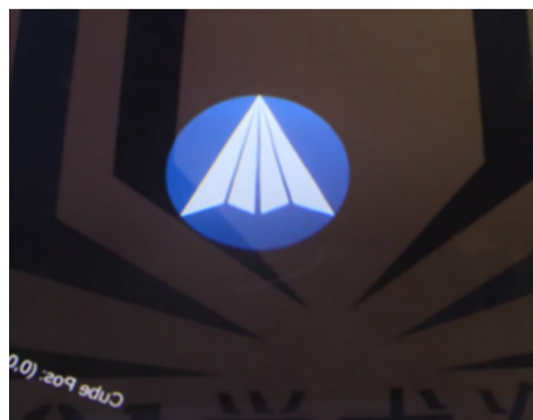
(a) 透射光路分辨率测试卡图像  
(a) Real scene through combiner captured by camera(b) 投影光路分辨率测试卡图像  
(b) Virtual image reflected by combiner from micro-OLED captured by camera

图 10 透射和投影光路分辨率测试卡图像

Fig. 10 Real scene and virtual images via combiner captured by camera



(a) HMD彩色投影效果  
(a) HMD color projection effect



(b) HMD投影与场景叠加效果  
(b) Augmented reality experiment result captured at pupil by camera

图 11 彩色图像投影效果

Fig. 11 Color image projection rendering

HMD 光学系统在机载头盔显示领域的应用潜力。

## 5 结 论

本文设计并实现了一种大出瞳、大出瞳距的轻量化离轴折反式头盔显示光学系统,系统采用对侧倾斜投影的结构形式,由一个自由曲面组合器和一个 4 组 5 片同轴中继透镜组构成,单目光机重量为 84.5 g,系统视场为  $42^\circ \times 30.8^\circ$ ,对角视场为  $50^\circ$ ,出瞳距为 40 mm,出瞳直径为 11 mm,光学系统整体结构非常简单且紧凑。该头盔显示器在拥有大出瞳直径的基础上满足出瞳距的需求,实现用户头部在头盔内移动时的视觉

连续性及快速穿戴兼容性。文中给出初始结构并讨论了设计过程中的结构约束和优化策略,设计了基于自由曲面的离轴折反式头盔显示光学系统,该系统 MTF 值在 30 lp/mm 处大于 0.46。在进行全面的公差分析后,加工原理样机进行成像效果验证,实验结果说明该头盔显示光学系统具有良好的成像性能,展现了本设计在机载头盔显示领域的应用价值。

### 作者贡献声明:

张义民:选题确立,方案制定,实验验证及论文撰写;

曾伟明、迟英昊、王笑:提供资源;

王世勇、丁学专:技术指导,论文审阅。

### 参考文献:

- [1] WEI L D, LI Y C, JING J J, *et al.* Design and fabrication of a compact off-axis see-through head-mounted display using a freeform surface[J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 8550.
- [2] CHEN S L, FU L W, HUANG J W, *et al.* Geometric lightguide for near-eye light field displays[J]. *Applied Optics*, 2024, 63(6): 1457-1470.
- [3] 许恒深,姜玉婷,胡跃强. 高性能几何光波导头戴显示器设计[J]. *光学精密工程*, 2026, 34(1): 35-43.
- XU H SH, JIANG Y T, HU Y Q. Design of high-

performance geometric waveguide head-mounted displays[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2026, 34(1): 35-43. (in Chinese)

- [4] XIAO J S, LIU J, HAN J, *et al.* Design of achromatic surface microstructure for near-eye display with diffractive waveguide[J]. *Optics Communications*, 2019, 452: 411-416.
- [5] 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.

- [6] LEE G Y, HONG J Y, HWANG S, *et al.* Meta-surface eyepiece for augmented reality [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 4562.
- [7] 李仕伟. 增强型头盔显示光学系统设计[D]. 西安: 西安工业大学, 2023.  
LI SH W. *Enhanced Helmet Display Optical System Design*[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2023. (in Chinese)
- [8] CAKMAKCI O, MOORE B, FOROOSH H, *et al.* Optimal local shape description for rotationally non-symmetric optical surface design and analysis [J]. *Optics Express*, 2008, 16(3): 1583-1589.
- [9] CAKMAKCI O, VO S, FOROOSH H, *et al.* Application of radial basis functions to shape description in a dual-element off-axis magnifier[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(11): 1237-1239.
- [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.
- [11] 叶井飞, 徐凯迪, 杨明珠, 等. 基于自由曲面的离轴两反头戴显示光学系统设计[J]. 光学学报, 2018, 38(7): 0722003.  
YE J F, XU K D, YANG M ZH, *et al.* Design of off-axis head-mounted display optical system based on two reflective optical free-form surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0722003. (in Chinese)
- [12] CHENG D W, DUAN J X, CHEN H L, *et al.* Freeform OST-HMD system with large exit pupil diameter and vision correction capability [J]. *Photonics Research*, 2022, 10(1): 21-32.
- [13] HSIANG E L, YANG Z Y, YANG Q, *et al.* AR/VR light engines: perspectives and challenges [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2022, 14(4): 783-861.
- [14] 朱铮, 贾渊斐. 用于战斗机的典型瞄准显示头盔研究[J]. 中国个体防护装备, 2025(2): 18-21.  
ZHU ZH, JIA Y F. Research on typical helmet mounted display systems for fighter aircraft [J]. *China Personal Protection Equipment*, 2025(2): 18-21. (in Chinese)
- [15] BAUER A, VO S, PARKINS K, *et al.* Computational optical distortion correction using a radial basis function-based mapping method [J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 14906-14920.
- [16] 黄颂超, 冯云鹏, 程灏波. 非对称轻小型头盔显示器光学系统设计[J]. 中国光学, 2020, 13(4): 832-841.  
HUANG S CH, FENG Y P, CHENG H B. Non-symmetrical design of a compact, lightweight HMD optical system [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2020, 13(4): 832-841. (in Chinese)
- [17] WANG J H, ZHOU Q, CHEN J, *et al.* Design of a See-through Off-Axis Head-Mounted-Display Optical System with an Ellipsoidal Surface [J/OL]. *Current Optics and Photonics*, 2018, 2(3): 280-285. <https://opg.optica.org/copp/abstract.cfm?URI=copp-2-3-280>.

## 作者简介:



张义民(1999—),男,浙江衢州人,博士研究生,2021年于宁波大学获得学士学位,主要从事光学设计、计算成像领域的研究。E-mail: yiminzhang@mail.ustc.edu.cn

## 通讯作者:



丁学专(1984—),男,湖北英山人,副研究员,博士,主要研究领域为红外及光谱探测技术。E-mail: dingxuezhuan@163.com