

反射式自由曲面头盔显示器光学系统设计

刘 军^{1,2,3}, 黄 玮^{2,3}

- (1. 中国科学院大学, 北京 100049;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
3. 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘 要: 头盔显示器(HMD)作为一种头戴目视设备,具有小型化、轻量化的特点,同时为了获得良好的佩戴体验,要求合理的出瞳距、出瞳直径以及视场。为了同时满足头盔显示器的上述要求,采用紧凑的双反射镜结构来满足头盔显示器对体积和重量的要求,应用自由曲面增加设计自由度来校正大视场和非旋转对称结构引入的像差,并阐述了自由曲面补偿非旋转对称光学系统像差的基本原理以及该光学系统的设计方法与过程。该光学系统无色差,视场为 $50^\circ \times 25^\circ$,出瞳大小为 8 mm,出瞳距大于 27 mm。在奈奎斯特频率处全视场的调制传递函数大于 0.4,可应用于新一代头盔显示技术。

关键词: 光学设计; 自由曲面; 头盔显示; 反射式光学系统

中图分类号: TN27 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.1018001

Optical system design of reflective head mounted display using freeform surfaces

Liu Jun^{1,2,3}, Huang Wei^{2,3}

- (1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physic, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
3. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun 130033, China)

Abstract: Head mounted display (HMD) as a kind of visual systems requires a large field of view (FOV), a large exit pupil distance, a small volume, and light in weight. In order to meet these requirements, a compact two-mirror structure and free form surfaces were introduced to the system. Two-mirror structure was benefit to minimize the weight and volume of the system. Free form surfaces was used to correcte the aberrations introduced by wide FOV and non-rotationally symmetry of the HMD. The aberration compensate theory and design method were also described in detail. An achromatic HMD with $50^\circ \times 25^\circ$ FOV, 8 mm pupil, 27 mm eye clearance was designed. The modulation transfer function (MTF) value was more than 0.4 within the entire FOV. The system could be applied to the next generation HMD technology.

Key words: optical design; free form surface; head mounted display; reflective optical system

收稿日期: 2016-02-14; 修订日期: 2016-03-15

作者简介: 刘军(1987-),男,博士生,主要从事空间光学系统以及光刻物镜设计方面的研究。Email:ciomplj@sina.com

导师简介: 黄玮(1965-),男,研究员,博士生导师,主要从事光学系统设计方面的研究。Email:huangw@ciomp.ac.cn

0 引言

头盔显示器(HMD)已经从原来的军用领域扩展到工业、医疗、教育、游戏等民用领域,具有广泛的应用前景。头盔显示器的可佩戴性与大视场、高像质之间的矛盾一直是光学设计者的研究重点和难点。作为一种头戴设备,其对体积和重量有着严格的要求,意味着在设计过程中必须使用尽量少的光学元件以及紧凑的结构。光学元件数量的减少导致设计自由度减少,因此传统的目镜很难同时达到大视场、小型轻量化的设计目标。

自由曲面的非对称性为光学设计者提供了更多的设计自由度,同时其灵活的空间布局能够平衡由于光学结构的非对称性而引入的像差,常用的自由曲面数学描述方式包括 XY 多项式、Zernike 多项式、 ϕ 多项式以及径向基函数等。随着光学设计理念及精密加工技术的不断发展,自由曲面在照明系统以及成像光学系统中已经取得实际应用,同时自由曲面逐渐被应用到头盔显示器的光学设计中^[1-3]。在国内外已发表的关于 HMD 光学设计的文献中,折反式结构以及自由曲面棱镜结构是两种最常用的结构^[4-8],折反式结构通常使用较多的光学元件,能够获得更高的图像显示质量,但是很难实现小型、轻量化的设计要求;自由曲面棱镜具有非常紧凑的结构,通常难以获得大的显示视场。这两种结构中均采用了玻璃材料,不可避免地引入了色差。

反射式结构光路折叠、结构紧凑、无色差,适用于小型、轻量化光学系统的设计,被广泛用于航空航天领域。基于 HMD 的使用要求,文中将离轴双反射镜结构应用于 HMD 的设计,并在设计中应用基于 Zernike 与 XY 多项式描述的自由曲面校正像差。一个具有 8 mm 出瞳、27 mm 出瞳距、 $50^\circ \times 25^\circ$ 视场、无色差的头盔显示器作为设计实例在文中给出。

1 HMD 的光学设计

1.1 设计分析

双反射镜结构头盔显示器由两片反射镜以及有机发光二极管(OLED)显示器组成。为了保证眼瞳与目视光学系统的出瞳匹配,在对目视光学系统设计时通常将物空间与像空间进行翻转,光线追迹

从出瞳开始。通常人眼接收到的光为平行光或者近似于平行光,在 HMD 的设计过程中,平行光从出瞳处开始被追迹,经过反射镜 M1 和 M2 的反射之后到达 OLED,即设计过程中的像面,通过对像面成像质量的评估来间接评估 HMD 的设计结果。

通常人眼的入瞳直径为 2~6 mm,照明条件越好,眼瞳直径越小,在良好的照明条件下,人眼入瞳直径通常小于 3 mm。为了获得比较舒适的佩戴体验,HMD 的出瞳直径通常要求大于 6 mm,以满足眼球的自然转动要求,出瞳距离通常不少于 15 mm。HMD 的体积随着出瞳直径以及出瞳距离的增大而急剧增大;另一方面,根据像差理论,Seidel 像差随着光学系统的孔径以及视场的增大而增大,因此出瞳直径和视场的大小直接决定了光学系统像差校正的难易程度。综合考虑 HMD 的佩戴体验和像差校正的难度,HMD 的出瞳直径设置为 8 mm,出瞳距离设置为 27 mm。反射式光学系统设计的一个重要工作就是避免光线遮拦,文中采用离轴结构设计,通过反射镜合理的空间布局来避免光线遮拦。

1.2 优化控制

双反射镜光学系统结构简单,可以应用光学设计软件 CODE V 方便地构造初始结构。首先在确定了合理的系统参数的基础上,通过合理地布局平面反射镜获得合适的光路走势;然后将平面反射镜的面型设置为球面,简单地约束光学系统的焦距后对平面镜光学系统进行初步优化,得到初始结构如图 1 所示,其中 M1 绕其局部坐标 X 轴倾斜 -23° , M2 绕其局部坐标 X 轴倾斜 -25° ,倾斜模式为“Decenter and Bend”;最后将反射镜的面型复杂化,增加光学系统的设计自由度来校正像差。

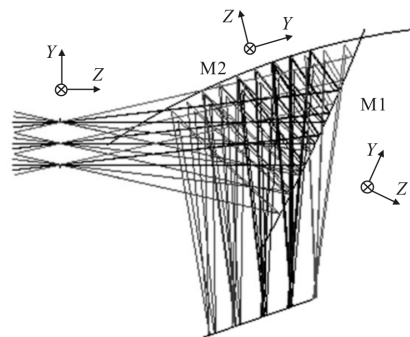


图 1 HMD 的初始结构

Fig.1 Initial structure of HMD

在设计优化过程中,通过对 HMD 中特定点和特定光线的约束来保证 HMD 在外形结构上满足佩戴要求和避免光线遮拦。如图 2 所示, $V_1 \sim V_8$ 这些关键点被选来约束整个光学系统的外形。 V_1 为 $(-25^\circ, 0^\circ)$ 视场下光线与反射镜 M2 的交点, V_2 为 $(25^\circ, 0^\circ)$ 视场上光线与反射镜 M2 的交点, V_3 为 $(25^\circ, 0^\circ)$ 视场上光线与反射镜 M1 的交点, V_4 为 $(-25^\circ, 0^\circ)$ 视场下光线与反射镜 M1 的交点, V_5 为 $(25^\circ, 0^\circ)$ 视场主光线与 OLED 的交点, V_6 为 $(-25^\circ, 0^\circ)$ 视场主光线与 OLED 的交点, V_7 为出瞳边缘与 $(25^\circ, 0^\circ)$ 视场下光线的交点, V_8 为出瞳边缘与 $(25^\circ, 0^\circ)$ 视场下光线的交点。这些点的位置直接决定了该光学系统的外形特点,在设计过程中,这些点须满足条件(单位: mm):

$$\begin{cases} Z_{V1} - Z_{V8} > 18 \\ Y_{V1} - Y_{V8} > 5 \\ Y_{V2} - Y_{V3} > 2 \\ Z_{V4} - Z_{V5} > 2 \\ Y_{V4} - Y_{V5} > 6 \\ Y_{V7} - Y_{V6} > 6 \\ Z_{V7} - Z_{V6} > 18 \end{cases} \quad (1)$$

式中: Y 为这些点的 y 轴坐标; Z 为这些点的 z 轴坐标。这些点具有一个共同的全局参考坐标系,即出瞳所在的坐标系。这些约束条件有效地保证了出瞳距离大于 15 mm,避免了光线在光学系统中的遮拦,同时用于直接调节光学系统的紧凑性。

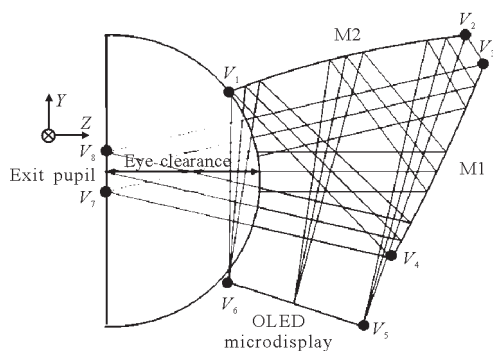


图 2 双反射镜 HMD 光路图

Fig.2 Optical path of the two mirrors HMD

1.3 自由曲面的应用

离轴结构的使用破坏了 HMD 旋转对称性。球面以及传统的旋转对称非球面对这种由非对称结构引起的像差的校正能力非常有限,文中采用非旋转

对称自由曲面来校正光学系统的像差。主流光学设计软件收录了常用的自由曲面面型,包括该设计中采用的 Zernike 和 XY 多项式描述的自由曲面。Zernike 自由曲面可以描述为:

$$z(\rho, \varphi) = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{[1 - (1+k)c^2\rho^2]}} + \sum_{i=1}^N C_i Z_i(\rho, \varphi) \quad (2)$$

式中: $z(\rho, \varphi)$ 为 Zernike 多项式; C_i 为相应的系数; c 为顶点的曲率; k 为二次曲面系数; N 为被采用的 Zernike 多项式的项数。XY 自由曲面描述为:

$$z(x, y) = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{[1 - (1+k)c^2\rho^2]}} + \sum_{i=1}^N A_i E_i \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N A_i E_i = A_1 x^0 y^0 + A_2 x^0 y^1 + A_3 x^2 y^0 + A_4 x^1 y^1 + A_5 x^0 y^2 + \dots + A_n x^m y^m \quad (4)$$

式中: XY 多项式是一系列关于 x 和 y 的级数; A_i 为对应多项式的系数。Zernike 和 XY 自由曲面均由两部分组成;第一部分为公式(2)和公式(3)中第一项描述的 Conical 曲面,具有旋转对称性;第二部分为公式(2)和公式(3)中第二项描述的曲面,可以看作相对于 Conical 曲面的偏离,具有非旋转对称性。

自由曲面对光学系统像差的影响与其相对于光阑的位置有关^[9]。公式(2)和公式(3)中的第一部分决定了光学系统的一阶性质,第二部分表现出强的像差校正能力。将公式(2)和公式(3)第二部分描述的自由曲面看成一种面型偏离,考虑其对光学系统像差的影响。对于反射表面而言,光线经过偏离部分两次,因此自由曲面引入像差为:

$$W = -\frac{2n}{\lambda} \sum_{i=1}^N c_i \cdot P(\rho, \varphi) \quad (5)$$

式中: W 为自由曲面引入的像差; λ 为成像光束的波长; n 为折射率,对于反射光学系统 $n=1$; $P(\rho, \varphi)$ 为极坐标系下自由曲面的非旋转对称部分,文中指公式(2)和(3)中的第二项。当自由曲面位于光阑位置时,不同视场的成像光束经过自由曲面的区域重叠,自由曲面给每个视场引入相同大小的像差。当自由曲面偏离光阑位置时,不同视场光束在自由曲面的投影区域相对于中心视场光束在自由曲面上的投影区域发生了偏离。因此,自由曲面对不同视场成像光束的像差的贡献也随着视场的不同变得复杂。不同视场的成像光束中心在自由曲面上的偏离用 Δh 表示,如图 3 所示。

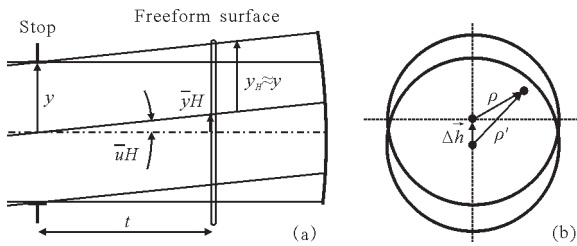


图 3 不同视场成像光束经过自由曲面上的区域

Fig.3 Footprint of different field of view on freeform surface

当视场不是很大的时候，偏离量 Δh 与视场 H 为线性关系：

$$\Delta h \equiv \left(\frac{\bar{y}}{y} \right) H = \left(\frac{\bar{u}Ht}{y} \right) \quad (6)$$

式中： H 为归一化视场； \bar{y} 为主光线在自由曲面上的高度； y 为轴上视场边缘光线的高度； \bar{u} 为主光线与光轴的夹角； t 为自由曲面偏离光阑位置的轴上距离。考虑到不同视场成像光束在自由曲面上投影的偏离，将公式(5)中的 ρ 用 $\rho + \Delta h$ 代替，得到自由曲面偏离光阑位置时，自由曲面给不同视场引入的像差 W_H ：

$$W_H = -\frac{2n}{\lambda} \sum_{i=1}^N c_i \cdot P(\rho + \Delta h, \varphi) \quad (7)$$

公式(5)和公式(7)中的 $P(\rho, \varphi)$ 和 $P(\rho + \Delta h, \varphi)$ 具有非旋转对称性，相比于传统的非球面能够引入更加复杂的像差，即对光学系统具有更强的像差校正能力。当自由曲面靠近光阑位置时，自由曲面给每个视场引入相同大小的像差，因此更有利于校正与光学系统口径相关而与视场无关的像差（例如球差）；当自由曲面偏离光阑位置时，自由曲面给每个视场引入的像差随视场变化而变化，因此更有利于校正与光学系统视场相关的像差（例如彗差）。

2 设计实例与性能分析

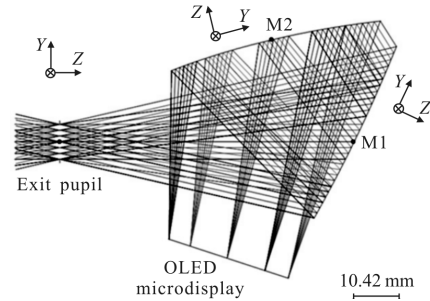
HMD 光学系统的详细光学特性参数如表 1 所示。

表 1 HMD 的光学特性参数

Tab.1 Specifications of the HMD system

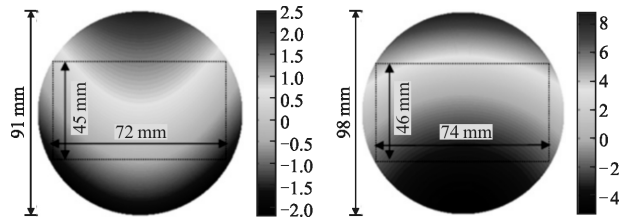
| Parameters | Specifications |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| Configuration | Off-axis reflective configuration |
| Exit pupil diameter | 8 mm |
| Effective focal length | 50 |
| Field of view | $50^\circ(H) \times 25^\circ(V)$ |
| Eye clearance | 27 mm |
| Pixel size of the micro-display | $15 \mu\text{m}$ |

最终设计结果如图 4(a)所示；经过多次尝试，当 M1 为 Zernike 自由曲面、M2 为 XY 自由曲面时光学系统能够获得更好的成像质量，反射镜 M1 的面型如图 4(b)所示；反射镜 M2 的面型如图 4(c)所示。



(a) 系统元件布局

(a) Layout of the elements in the system



(b) 第一片反射镜面型

(c) 第二片反射镜面型

(b) First mirror M1

(c) Second mirror M2

图 4 HMD 最终设计结果

Fig.4 Final design result of HMD system


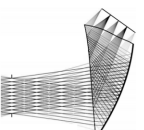
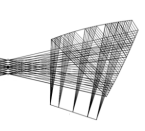
通过应用自由曲面，离轴双反射镜 HMD 达到了：出瞳直径 8 mm，有效焦距 50 mm，出瞳距离大于 27 mm，矩形视场 $50^\circ \times 25^\circ$ 。优化后，反射镜 M1 的倾斜角变为 -23.26° ，尺寸为 72 mm \times 45 mm，反射镜 M2 的倾斜角变为 -23.86° ，尺寸为 74 mm \times 46 mm。折反式结构^[1]以及自由曲面棱镜结构^[4]HMD 与双反射镜结构 HMD 的简单对比如表 2 所示。

从表 2 可以看出，三种结构均为非旋转对称结构，均采用了自由曲面来校正像差。折反式结构使用最多的光学元件，能够获得更大的出瞳以及出瞳距，通常用于高成像质量的 HMD 的设计，其缺点在于光学系统结构复杂，通过多个透射元件的偏心和倾斜来校正像差，给光学系统的装调带来了难度；自由曲面棱镜结构和双反射镜结构相对简单、紧凑，更有利于小型、轻量化 HMD 的设计；反射镜结构的一个重要的优点就是不使用玻璃材料，不存在色差，适合目视光学系统。

HMD 的调制传递函数曲线如图 5 所示。在奈奎斯特频率 33 lp/mm 处,在 8 mm 出瞳直径范围内,整个视场的调制传递函数值优于 0.1,在中心 4 mm 出瞳直径范围内,整个视场的调制传递函数值优于 0.4。调制传递函数曲线表明,该光学系统在全视场范围内拥有良好的成像质量。

表 2 不同结构 HMD 设计结果对比

Tab.2 Comparison of HMDs with different structures

| | Catadioptric system | Dioptric system | Mirrors system |
|----------------------------|---|---|---|
| Parameters |  |  |  |
| Field of view | 40°×30° | 45°×32° | 50°×25° |
| Eye clearance | >60 mm | >18 mm | >27 mm |
| Exit pupil | 15 mm | 8 mm | 8 mm |
| Effective focal length | 28 mm | 15 mm | 50 mm |
| Number of freeform surface | 2 | 3 | 2 |

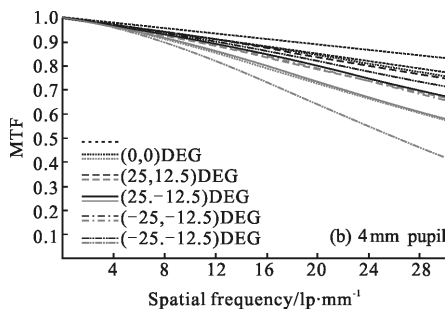
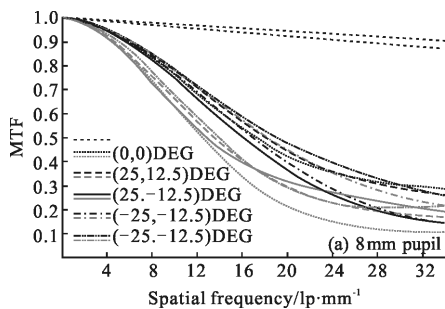


图 5 HMD 的 MTF 曲线

Fig.5 MTF plots of the HMD

像散是评价目视光学系统的一个重要指标。像散在视觉上表现为子午方向与弧矢方向分辨率的差别。在 4 mm 出瞳直径时,该 HMD 的像散随视场的分布如图 6 所示。在整个视场范围内,最大像散为 0.057 mm,平均像散为 0.028 mm,这个数值已经小到眼睛能够轻易调节的范围^[10]。

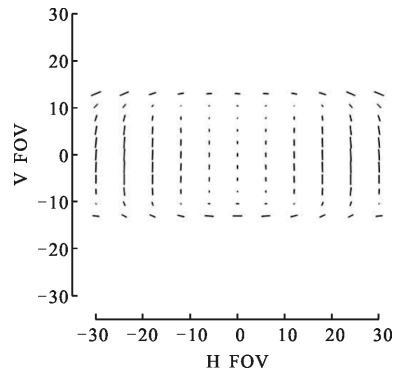


图 6 出瞳直径 4 mm 时 HMD 的像散

Fig.6 Astigmatism plot of the HMD system on 4 mm pupil

畸变是唯一不影响成像清晰度的像差,该光学系统的网格畸变如图 7 所示。从图中可以看出该系统存在一些比较复杂的畸变,如弓形畸变、梯形畸变畸变等。人眼可接受的畸变为 2%~2.5%,图 7 中最大畸变达到了-11.43%,明显超出了人眼的可接受范围。在机器视觉、计算机图形学等相关研究领域有许多关于畸变校正的数学模型。图像预处理是一种校正 HMD 畸变的有效方法^[11]。这种校正方法可以简单地描述为三步:(1)通过对网格畸变进行拟合得到预畸变函数;(2)将预畸变函数作用于待显示的图像,产生预畸变图像;(3)将预畸变图像用于头盔显示器中作为图像源,人眼在出瞳处接收到无畸变图像。

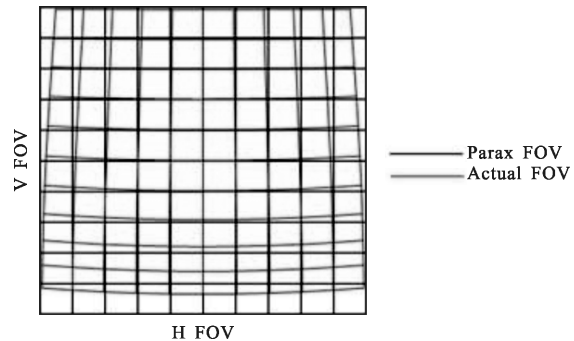


图 7 HMD 的畸变

Fig.7 Distortion of the HMD system

3 公差分析

取HMD 正常工作的出瞳直径 4 mm，对光学系统进行公差分析。分析的加工公差包括反射镜的半径公差,面型不规则度公差;装调公差包括反射镜分别沿 x -、 y -、 z -轴的平移公差，以及反射镜分别绕 x -、 y -、 z -轴的倾斜公差,后工作距离设为补偿器。在 30 lp/mm 频率处对光学系统进行反向敏感度分析得到公差如表 3 所示。

表 3 反射镜 M1 和 M2 的公差

Tab.3 Tolerances list of mirrors M1 and M2

| Manufacturing tolerance | | Alignment tolerance/mm & rad | | | | | | |
|-----------------------------|-----------|------------------------------|--------|--------|---------------|--------------|---------------|--------|
| Shape error RMS / λ | Radius/mm | Dec. x | Dec. y | Dec. z | Tilt α | Tilt β | Tilt γ | |
| M1 | 0.035 | 1.50 | 0.20 | 0.20 | 0.30 | 0.0025 | 0.0015 | 0.0050 |
| M2 | 0.045 | 0.34 | 0.04 | 0.04 | 0.10 | 0.0025 | 0.0025 | 0.0025 |

从表 3 可以看出,光学系统的面型公差较严,仍在可接受的范围内,其他公差比较宽松。在为 30 lp/mm 空间频率处,该光学系统有 90%的概率在子午方向的 MTF 超过 0.5,如图 8 所示。

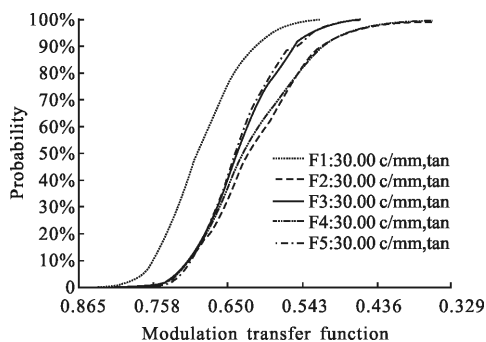


图 8 30 lp/mm 处公差分析结果

Fig.8 Results of tolerancing at 30 lp/mm

4 结论

反射式光学系统无色差、光路折叠的特点使得其在高像质、小体积、轻量化的光学系统中得到广泛应用。文中将反射式结构引入到头盔显示器的设计中,并在紧凑的双反射镜光学系统的基础上引入了自由曲面。详细阐述了自由曲面对非旋转对称光学系统像差补偿的基本原理以及设计方法和过程。成

功设计出一款无色差,具有 8 mm 出瞳,27 mm 出瞳距,50°×25°视场,满足小型化、轻量化要求的头盔显示器。该设计方法对非旋转对称光学系统的设计具有一定的指导意义,设计结果有望用于下一代头盔显示技术。

参考文献:

- [1] Zheng Zhenrong, Liu Xu, Li Haifeng, et al. Design and fabrication of an off-axis see-through head-mounted display with an x - y polynomial surface [J]. *Appl Opt*, 2010, 49(19): 3661-3668.
- [2] Pan Juiwen, Chiang Chewen, Huang Kuanda, et al. Demonstration of a broad band spectral head-mounted display with freeform mirrors[J]. *Opt Express*, 2014, 22(11): 12785-12798.
- [3] 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. (in Chinese)
- [4] Cheng D, Wang Y, 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]. *Appl Opt*, 2009, 48(14): 2655-2668.
- [5] 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. (in Chinese)
- [6] Cheng Dewen, Wang Yongtian, Chang Jun, et al. Design of a light weight and wide field-of-view HMD system with free-form-surface prism[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 309-311. (in Chinese)
- [7] Yang Xinjun, Wu Huaxia, Yu Xiaofen, et al. Distortion correction for optical system of helmet visor display[J]. *Acta Photonics Sinica*, 2010, 39(3): 455-459. (in Chinese)
- [8] Wang Qingfeng, Cheng Dewen, Wang Yongtian, et al. Design, tolerance, and fabrication of an optical see-through head-mounted display with free-form surface element [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(7): C88-C99.
- [9] Fuerschbach K, Rolland J P, Thompson K P. Theory of aberration fields for general optical systems with freeform surfaces[J]. *Opt Express*, 2014, 22(22): 26585-26606.
- [10] Sun Qiang, Wang Jian, Dong Keyan, et al. Optical design method for 3D virtual helmet display based on ZEMAX[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 279-282. (in Chinese)
- [11] Aaron Bauer, Sophie Vo, Keith Parkins, et al. Computational optical distortion correction using a radial basis function-based mapping[J]. *Opt Express*, 2012, 20(14): 14906-14920.