

# 基于自由曲面的离轴两反头戴显示光学系统设计

叶井飞<sup>1</sup>, 徐凯迪<sup>1</sup>, 杨明珠<sup>1</sup>, 宋真真<sup>1</sup>, 裴世鑫<sup>1</sup>, 卜令兵<sup>1</sup>, 陈露<sup>2</sup>, 高志山<sup>2</sup>, 余俊<sup>3</sup>, 沈正祥<sup>3</sup>

<sup>1</sup>南京信息工程大学物理与光电工程学院, 江苏 南京 210044;

<sup>2</sup>南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;

<sup>3</sup>同济大学物理科学与工程学院, 上海 200092

**摘要** 头戴显示系统在现代教育、医疗和娱乐等领域具有广泛的应用, 离轴反射式头戴显示光学系统是头戴显示系统的一种设计形式, 既能满足小型化和结构紧凑的需求, 又能实现宽光谱成像, 无需校正色差; 然而, 现有离轴反射式头戴显示光学系统的设计难以满足大出瞳直径和小  $F$  数相兼容的要求。针对该问题, 提出基于光学自由曲面的离轴两反头戴显示光学系统, 实现了大出瞳直径和小  $F$  数。该自由曲面头戴显示光学系统分别采用双曲率基面自由曲面和  $XY$  多项式自由曲面, 出瞳直径为 10 mm,  $F$  数为 3.0, 视场角为  $28^\circ$ , 出瞳距大于 15 mm。该系统的成像性能满足要求且优于现有设计结果。

**关键词** 光学设计; 头戴显示光学系统; 光学自由曲面; 大出瞳直径; 小  $F$  数

中图分类号 O435

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0722003

## Design of Off-Axis Head-Mounted Display Optical System Based on Two Reflective Optical Free-Form Surfaces

Ye Jingfei<sup>1</sup>, Xu Kaidi<sup>1</sup>, Yang Mingzhu<sup>1</sup>, Song Zhenzhen<sup>1</sup>, Pei Shixin<sup>1</sup>,  
Bu Lingbing<sup>1</sup>, Chen Lu<sup>2</sup>, Gao Zhishan<sup>2</sup>, Yu Jun<sup>3</sup>, Shen Zhengxiang<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Physics and Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Information  
Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;

<sup>2</sup> School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,  
Nanjing, Jiangsu 210094, China;

<sup>3</sup> School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

**Abstract** The head-mounted display system is widely applied in the fields of modern education, medical treatment, and entertainment. The off-axis reflective head-mounted display optical system is a design form of head-mounted display system, and it can not only meet the requirements of miniaturization and compactness, but also realize broadband spectrum imaging without color aberration correction. However, the existing designs of off-axis reflective head-mounted display optical systems cannot compatibly meet the demands of large diameter of exit pupil and small  $F$  number together. To solve this problem, we design an off-axis head-mounted display optical system based on two reflective free-form surfaces to realize the requirements of large diameter of exit pupil and small  $F$  number. The double-curvature free-form surface and  $XY$  polynomial freeform surface are used in our designed head-mounted display optical system, its pupil diameter is 10 mm,  $F$  number is 3.0, field of view is  $28^\circ$ , and eye relief is larger than 15 mm. The final imaging performance of the system meets the requirements, and it is better than the current design results.

**Key words** optical design; head-mounted display optical system; optical free-form surface; large diameter of exit pupil; small  $F$  number

**OCIS codes** 220.2740; 080.2740; 080.4035; 120.2040

收稿日期: 2017-12-26; 收到修改稿日期: 2018-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(61705108, 61377015, 61505080)、江苏省自然科学基金(BK20170959)、南京信息工程大学人才启动基金(2017R064)、南京信息工程大学大学生实践创新训练计划(201810300206)

作者简介: 叶井飞(1988—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光学自由曲面表征设计及检测方面的研究。

E-mail: yjfei1988@gmail.com

## 1 引 言

随着电子与计算机技术的日益革新,头戴显示系统作为一个多学科交叉的设备<sup>[1]</sup>,在现代教育、医疗、娱乐和军事训练等领域具有较广泛的应用,使得佩戴者能够与虚拟数字世界进行互动。此外,头戴显示系统还能够将现实世界信息与虚拟数字世界进行有机融合,增强用户的真实立体感。

当前,用于头戴显示系统设计的光学元件主要分为全息元件、光波导器件和自由曲面光学元件。其中,采用自由曲面光学元件进行头戴显示光学系统设计的发展较迅速。在20世纪末,日本佳能公司和奥林巴斯公司先后申请了含有自由曲面楔形棱镜的成像显示仪器的专利<sup>[2-3]</sup>,折反射式的光路结构使得系统非常紧凑。自由曲面楔形棱镜主要由连续平滑型光学自由曲面构成,其面型函数可表示为XY多项式或泽尼克(Zernike)多项式等<sup>[4]</sup>。2007年,Cakmakci等<sup>[5]</sup>结合XY多项式自由曲面反射镜和折衍射透镜设计了双元件离轴式头戴显示器。在此基础上,2008年,Cakmakci等<sup>[6]</sup>采用径向基函数自由曲面反射镜代替XY多项式自由曲面反射镜,将头戴显示器的出瞳直径由8 mm增大至12 mm。2009年,Cheng等<sup>[7]</sup>基于XY多项式自由曲面楔形棱镜设计了快焦比、大视场和可透视的头戴显示器。2010年,Zheng等<sup>[8]</sup>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,并制造了原型样机。同年,佟静波等<sup>[9]</sup>利用XY多项式自由曲面反射镜校正离轴像差,设计了出瞳直径为15 mm的大视场离轴双通道可透视的头戴显示器。2011年,杨波等<sup>[10]</sup>基于自由曲面楔形棱镜设计了出瞳直径为10 mm的头戴显示器。2014年,李华等<sup>[11]</sup>基于径向基函数自由曲面反射镜、折衍射透镜和光楔设计了出瞳直径为15 mm、长出瞳距的机载头戴显示器,并与采用泽尼克多项式反射镜的设计结果进行了对比分析。同年,Pan等<sup>[12]</sup>基于XY多项式反射面设计了出瞳直径为8 mm的离轴两反头戴显示器,用于增强轻微眼疾患者的视觉感知;Bauer等<sup>[13]</sup>采用泽尼克多项式设计了离轴两反头戴显示器,并从视觉空间方面对其性能进行分析。

离轴反射式头戴显示光学系统作为头戴显示系统的一种设计形式,具有小型化和结构紧凑的优点。

另外,反射式系统能够实现宽光谱成像,无需校正系统的色差,这是单个自由曲面楔形棱镜难以实现的。现有的离轴反射式结构头戴显示光学系统难以满足大出瞳直径和小 $F$ 数相兼容的高性能要求。大出瞳直径能够适应人眼的转动,小 $F$ 数能够提升系统的分辨率。本文利用光学自由曲面多自由度和像差校正的特点,设计了一款兼具大出瞳直径和小 $F$ 数的离轴两反头戴显示光学系统。该系统的出瞳直径为10 mm, $F$ 数为3.0,出瞳距大于15 mm,对角全视场角为 $28^\circ$ ,成像性能满足要求。

## 2 前期研究


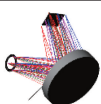
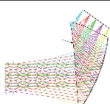
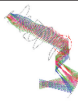
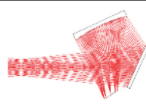
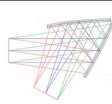
近些年,随着自由曲面光学技术的不断发展<sup>[14-16]</sup>,头戴显示系统已广泛利用光学自由曲面进行设计。前文所述的若干自由曲面型头戴显示光学系统的参数对比分析如表1所示。由表1可知,小型化、轻量型和结构紧凑是当前头戴显示系统的发展趋势,以满足实际使用的物理特性要求。另一方面,大出瞳直径和小 $F$ 数也是高性能头戴显示光学系统的必然要求。自由曲面棱镜作为头戴显示光学系统设计中的一个典型结构,能够满足上述需求。然而,单个自由曲面棱镜难以实现宽波段成像,需要结合其他补偿元件来平衡色差。离轴反射式头戴显示光学系统不仅可以满足头戴显示系统要求的物理特性和光学性能,还能够实现宽波段成像,也是头戴显示光学系统设计中的一种重要结构。以下将对离轴反射式头戴显示光学系统设计实现大出瞳直径和小 $F$ 数的问题进行分析。

## 3 设计方法

为了实现大出瞳直径和小 $F$ 数相兼容的头戴显示光学系统,需要选定系统的结构形式,并结合所采用的显示器尺寸,分析在不同出瞳直径和 $F$ 数条件下,对应的视场角是否满足要求。另外,还要综合分析整体设计的难度。离轴两反头戴显示系统的光学结构如图1所示,其中1为系统的出瞳,2为第一自由曲面反射镜,3为第二自由曲面反射镜,4为显示屏(或像面); $A_1 \sim A_4$ 、 $B_1 \sim B_4$ 和 $C_1 \sim C_4$ 分别为上边缘光线、主光线和下边缘光线与各个光学面的交点。采用离轴两反的结构形式,以实现宽光谱成像,且这种形式符合小型化和结构紧凑的要求。

表 1 若干自由曲面型头戴显示光学系统的设计参数对比分析

Table 1 Comparison of design parameters of several different free-form head-mounted display optical systems

Year	2007 <sup>[5]</sup>	2010 <sup>[17]</sup>	2009 <sup>[7]</sup>	2010 <sup>[8]</sup>	2014 <sup>[13]</sup>	2014 <sup>[12]</sup>
Design result						
Exit pupil /mm	8	3	8	15	≈5	8
EFL /mm	≈30	14.25	15	28.74	≈23	30
$F \#$	≈3.75	4.75	1.875	≈1.9	≈4.6	3.75
FOV	20°	≈24°	53.5°	50°	≈25°	30°
	16(H)×12(V)	19(H)×14.5(V)	45(H)×32(V)	40(H)×30(V)	21(H)×12.4(V)	24(H)×17(V)
Eye relief /mm	15	>15	>17(18.25)	>60(70)	>15(≈17)	15
	>20%	>10%	>10%	>30%	>10%	>40%
MTF value	@35 lp·mm <sup>-1</sup> within central 3 mm pupil	@35 lp·mm <sup>-1</sup> for all fields within all pupil	@30 lp·mm <sup>-1</sup> within central 3 mm pupil	@30 lp·mm <sup>-1</sup> for all fields within all pupil	@50 lp·mm <sup>-1</sup> within central 3 mm pupil	@30 lp·mm <sup>-1</sup> within central 4 mm pupil
Display size	0.44 inch	4.8 mm×3.6 mm	0.61 inch	0.61 inch	8.5 mm×5 mm	0.61 inch
Structure	XY polynomial reflector and diffractive element	Radial basis function based freeform reflector	XY-type polynomial surface with freeform prism	Including XY polynomial freeform surface	Zernike polynomial freeform reflector	XY polynomial freeform reflector
Weight /g	≈250	much light	8	heavy	much light	much light

Note: EFL is effective focal length; FOV is field of view; MTF is modulation transfer function; 1 inch=2.54 cm.

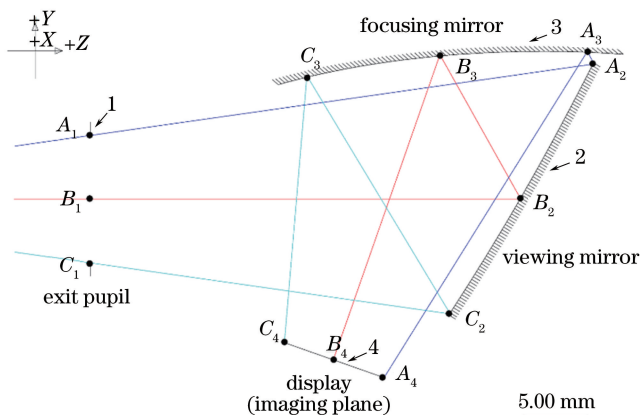


图 1 离轴两反头戴显示系统的光学结构

Fig. 1 Optical configuration of off-axis two mirror head-mounted display system

### 3.1 出瞳直径和 $F$ 数的确定

头戴显示光学系统采用逆向光路设计的方法,即以实际系统的出瞳作为设计时的入瞳,以显示器平面作为设计时的像面。在本设计中,采用常规 0.61 inch(1.5494 cm)的显示器,尺寸为 12.6 mm×9 mm,像素数为 800 pixel×600 pixel,单个像元约为 15 μm。根据物像之间的关系  $h = f \tan \omega$  和  $F$  数满足的关系  $F \# = f/D$  ( $h$  为像高,即显示器对角线半高度; $f$  为系统焦距; $\omega$  为半视场角; $F \#$  为  $F$

数; $D$  为出瞳直径),可以计算出在同一像面尺寸、不同出瞳直径和  $F$  数条件下的系统焦距和视场角。考虑到人眼光瞳直径、明暗视觉瞳孔直径变化及其转动范围, $D$  分别设置为 6,8,10,12,14 mm。系统的  $F$  数分别设置为 2.6,2.8,3.0,3.2,3.4。得到对应的焦距和全视场角分布图如图 2 所示。

由图 2(a)可知,相比于同一出瞳直径、不同  $F$  数对应的焦距变化程度,同一  $F$  数、不同出瞳直径所对应的焦距变化程度更大。由图 2(b)可知,同一

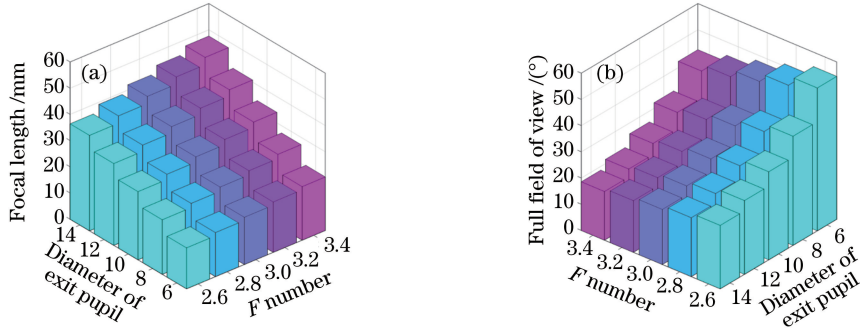


图 2 不同的出瞳直径和  $F$  数条件下对应的(a)系统焦距和(b)全视场角分布图

Fig. 2 Distributions of (a) system focal length and (b) full field of view at different exit pupils and  $F$  numbers

$F$  数、不同出瞳直径对应的全视场角变化程度相对较大。结合该规律可知,对于给定的出瞳直径, $F$  数减小,则对应的焦距相应减小,视场角相应增大。因此,根据人眼出瞳直径在明暗视觉下的变化及其转动范围,并结合现有同类型头戴显示光学系统出瞳直径的设置情况(如表 1 所示),本设计中的出瞳直径确定为 10 mm。此外,当  $F$  数小于或等于 3.0 时,即可作为小  $F$  数。如果  $F$  数更小,相应的系统焦距随之减小,设计难度成倍增加。这也会使得出瞳距无法满足要求,从而降低了人眼观察的舒适度。综上考虑,为了实现大出瞳直径和小  $F$  数相兼容的设计目标,确定出瞳直径为 10 mm, $F$  数为 3.0,此时对应的系统焦距为 30 mm,全视场角约为  $28^\circ$ ,对应的水平方向( $X$  方向)的半视场角为  $11.5^\circ$ ,垂直方向( $Y$  方向)的半视场角为  $8^\circ$ 。

### 3.2 边界条件约束

如图 1 所示,为了确保通过光瞳的所有光线不被反射镜和显示器遮挡,且可在系统内进行追迹,确保第一反射镜 2 和第二反射镜 3 之间不干涉,以及出瞳距满足要求,必须设置相应的边界约束条件,使得后续优化设计能够有效进行。根据离轴两反的光路结构特点,针对两根特征光线进行边界约束,分别是上边缘光线  $A_1A_2A_3A_4$  和下边缘光线  $C_1C_2C_3C_4$ 。特征光线与光学面的交点分别如图 1 所示。以光瞳中心  $B_1$  作为坐标参考点,根据上述边界约束的要求,相应的约束条件为

$$\begin{cases} Z_{C_3} - Z_{B_1} \geq 15 \\ Z_{C_4} - Z_{B_1} \geq 15 \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} Y_{A_3} - Y_{A_2} \geq 1 \\ Z_{A_2} - Z_{A_3} \geq 1 \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} Y_{C_2} - Y_{A_4} > 0 \\ Z_{C_2} - Z_{A_4} > 0 \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} Y_{C_1} - Y_{C_4} > 0 \\ Y_{C_2} - Y_{C_4} > 0 \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $Y$  和  $Z$  为坐标值,其下标为光线与相应光学面的交点。(1)式约束系统的出瞳距离小于 15 mm。(2)式约束第一反射镜和第二反射镜之间相互不干扰。考虑到实际系统进行装调时需要留有一定的间隔,因此第一反射镜的上边缘与第二反射镜的上边缘约束至少大于 1 mm。(3)式和(4)式约束显示器(或像面)的位置。经过多次优化验证,在(1)式和(2)式的约束条件下,(3)式和(4)式满足要求。在优化过程中,(1)~(4)式共同作用于整个离轴两反光学系统。

### 3.3 面型使用和优化设计

本设计中离轴两反头戴显示光学系统关于  $YOZ$  平面对称,关于  $XOZ$  平面非对称,引入倾斜和偏心会导致较大的像散。为了能够有效校正系统的像散,第一反射镜 2 采用双曲率基面自由曲面,即

$$z(x, y) = \frac{c_x x^2 + c_y y^2}{1 + \sqrt{1 - (k_x + 1)c_x^2 x^2 - (k_y + 1)c_y^2 y^2}} + \sum_{n=0}^N a_n [(1 - b_n)x^2 + (1 + b_n)y^2]^{n+2}, \quad (5)$$

式中: $z(x, y)$  为自由曲面的矢高; $c_x$  和  $c_y$  分别为弧矢面和子午面内的曲率半径; $k_x$  和  $k_y$  分别为弧矢面和子午面上的圆锥常数; $n$  为项数; $N$  为多项式的总项数; $a_n$  为旋转对称项的系数; $b_n$  为非旋转对称项的系数。第二反射镜 3 采用  $XY$  多项式自由曲面,目的是进一步降低系统的彗差和像散,并有效控制系统的畸变,即

$$z(x, y) = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (k + 1)c^2(x^2 + y^2)}} + \sum_{j=2}^J a_j x^m y^n, j = \frac{(m + n)^2 + m + 3n}{2} + 1, \quad (6)$$

式中: $c$ 为顶点曲率半径; $k$ 为圆锥常数; $a_j$ 为 $x^m y^n$ 项的系数; $m$ 和 $n$ 为非负整数,且 $m+n \geq 1$ ;  $J$ 为单项式 $x^m y^n$ 的总项数。

根据确定的系统光路结构、基本光学参数及约束条件,在光学设计软件中进行建模并优化。将曲率半径和多项式系数等设置为变量,以横向光线像差作为优化函数,进行初步优化。需要注意,两个自由曲面的基面圆锥常数设置为0,原因是圆锥常数项与多项式中四阶项的作用类似。优化初期,在光学设计软件中因双曲率基面自由曲面自身变量设置的固有特性,其旋转对称项系数的初始值不能为0,因此第一反射镜不能直接设置为双曲率基面自由曲面。利用光学设计软件中部分面型之间可以相互转换的特性,先将第一反射镜的面型设置为XY多项式自由曲面,经过初步优化后,在光学设计软件中将

XY多项式自由曲面转换为双曲率基面自由曲面;然后将双曲率基面自由曲面对应的非旋转对称项设置为变量,进行后续优化。另外,由于该离轴两反光学系统关于YOZ面对称,因此第二反射镜3中含有X的奇次多项式系数设置为0。在后续优化过程中,持续监控两个自由曲面反射镜的倾斜量和偏心量,并在优化结束后进行微调。为了平衡边缘视场的像差,在优化过程中逐步增加XY多项式自由曲面的高阶项。

#### 4 设计结果及分析

根据上述分析,基于光学自由曲面的离轴两反头戴显示光学系统的设计结果如图3所示。该设计兼容了大出瞳直径和小F数的高性能要求,出瞳直径为10 mm, F数为3.0,全视场角为28°。

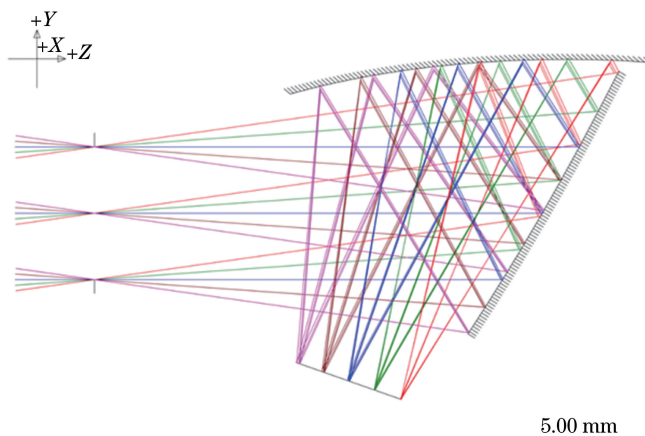


图3 基于光学自由曲面的离轴两反头戴显示光学系统的设计

Fig. 3 Design of off-axis head-mounted display optical system based on two reflective free-form surfaces

进一步分析该系统的成像性能。所用像素尺寸为 $15 \mu\text{m}$ 的显示器,相应的奈奎斯特空间截止频率约为 $33.3 \text{ lp/mm}$ 。本设计中分析截止频率为 $30 \text{ lp/mm}$ 处的调制传递函数(MTF)的变化情况,以便与现有设计进行对比。在中心光瞳6 mm范围内各个视场所对应的MTF曲线如图4所示。由图4可知,中心视场范围内的MTF值均大于0.4,其他各个视场范围内的MTF值均大于0.15,满足成像要求。由图5可知,中心视场附近的畸变值不超过2%,边缘视场最大畸变值不超过4.5%,满足设计要求。

与光路结构相似的现有设计的结果进行对比,结果如表2所示。由表2可知:设计1和设计2都尚未兼容大出瞳直径和小F数的要求;本设计采用双曲率基面自由曲面和XY多项式自由曲面,可以满足大出瞳直径和小F数的设计要求;与此同时,成像性能亦可满足头戴显示系统的要求。基于本设

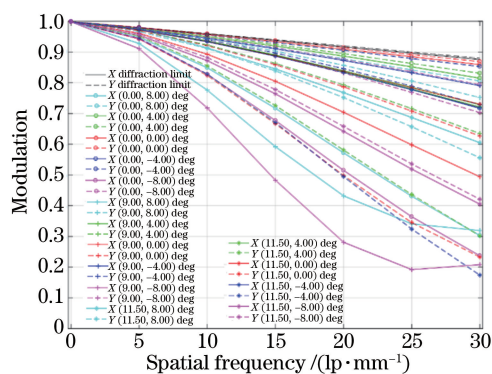


图4 基于光学自由曲面的离轴两反头戴显示光学系统各个视场的MTF曲线

Fig. 4 MTF curves of off-axis head-mounted display optical system based on two reflective free-form surfaces in different fields

计的性能分析可知,由于人眼光瞳在明暗视觉过渡过程中的直径变化范围约为 $3 \sim 8 \text{ mm}$ ,因此将现有

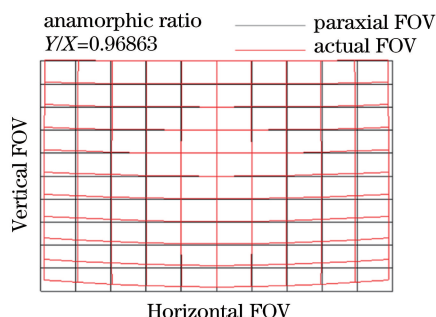


图 5 基于光学自由曲面的离轴两反头戴显示光学系统的畸变曲线

Fig. 5 Distortion curves of off-axis head-mounted display optical system based on two reflective freeform surfaces

表 2 离轴反射式头戴显示光学系统不同设计的结果对比

Table 2 Comparison of different design results of off-axis reflective head-mounted display optical systems

Parameter	Design 1 <sup>[13]</sup>	Design 2 <sup>[12]</sup>	Our design
Exit pupil /mm	≈5	8	10
EFL /mm	≈23	30	30
<i>F</i> #	≈4.6	3.75	3.0
FOV / (°)	≈25	30	28
Eye relief /mm	≈17	15	>15
MTF	>0.1 @50 lp · mm <sup>-1</sup> within central 3 mm pupil	>0.4 @30 lp · mm <sup>-1</sup> within central 4 mm pupil	>0.15 @30 lp · mm <sup>-1</sup> within central 6 mm pupil
Distortion /%	<6.2	<3.5	<4.5
Display size	8.5 mm×5 mm	12.75 mm×9 mm	12.6 mm×9 mm
Surface type	850×500 10 μm · pixel <sup>-1</sup> Zernike polynomial freeform surface	800×600 15 μm · pixel <sup>-1</sup> XY polynomial freeform surface	800×600 15 μm · pixel <sup>-1</sup> Anamorphic+XY polynomial freeform surface

光线,分别是主光线(标记为  $R_1$ )、子午面正  $Y$  方向边缘光线(标记为  $R_2$ )、子午面负  $Y$  方向边缘光线(标记为  $R_3$ )、弧矢面正  $X$  方向边缘光线(标记为  $R_4$ )和弧矢面负  $X$  方向边缘光线(标记为  $R_5$ )。分别记录每个视场的每根特征光线与两个自由曲面反射镜交点的位置坐标值。进一步,利用光学设计软件的宏函数 SAGF(矢高计算函数),将各个交点的坐标值作为输入量,以获得两个自由曲面反射镜的相应矢高值。

5 种特征光线与自由曲面反射镜各自的交点在两个自由曲面反射镜上分别形成了不同位置的光线印迹,如图 6 所示。图 6(a)所示为第一自由曲面反射镜(双曲率基面自由曲面反射镜)的局部矢高,图 6(b)所示为第二自由曲面反射镜(XY 多项式自由曲面反射镜)的局部矢高。由图 6 可知,双曲率基面自由曲面反射镜整体相对较平,尤其在中心视场区域附近,边缘与中心矢高最大偏差约为 0.696 mm。XY 多项式自由曲面反射镜具有较大

设计的中心光瞳 4 mm 的 MTF 评估范围扩大到中心光瞳 6 mm 的评估范围,占系统光瞳的 60%。相比于现有设计 2,本设计在中心光瞳 4 mm 范围内各个视场的 MTF 值也优于 0.4。与现有设计相比,本设计实现了大出瞳直径和小  $F$  数相兼容的要求,并且系统的成像性能优于现有设计水平。

### 5 自由曲面的矢高分析

利用光学设计软件的宏命令获得两个自由曲面反射镜的矢高。将垂直视场( $-8.0^\circ \sim 8.0^\circ$ )和水平视场( $-11.5^\circ \sim 11.5^\circ$ )分别每隔  $0.5^\circ$  进行等分,得到  $33 \times 47$  个视场。在每个视场上分别追迹 5 根特征

的离轴量和倾斜量,在  $Y$  方向上光线位置比较集中,整体矢高最大偏差约为 4.030 mm,与图 3 中的设计结果相一致。两个自由曲面的最高阶次均为 10 阶。相比于第一自由曲面反射镜的四项旋转对称项系数和四项非旋转对称项系数,第二自由曲面反射镜含有超过 30 多项的高阶项系数,其复杂程度相对较高。后续进一步研究其加工制造方面的关键技术,主要包括刀具路径设计和面形在线检测等。另外,两个自由曲面反射镜的矢高在水平视场上具有严格的对称性,在垂直视场上不对称。因此,在轴外视场的像差校正中,两个自由曲面反射镜主要用于平衡彗差和像散。

### 6 结 论

针对现有离轴反射式头戴显示光学系统设计尚未兼容大出瞳直径和小  $F$  数的问题,设计了一种大出瞳直径和小  $F$  数相兼容的基于自由曲面的离轴两反头戴显示光学系统。第一反射镜采用双曲率基

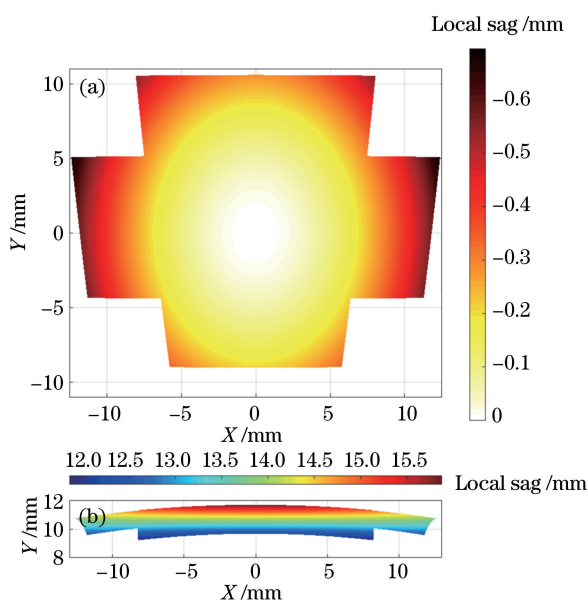


图6 离轴反射式头戴显示光学系统中自由曲面的局部矢高图。

(a)双曲率基面自由曲面;(b)XY多项式自由曲面

Fig. 6 Local sag maps of optical freeform surfaces of the off-axis reflective head-mounted display optical system. (a) Anamorphic free-form surface (the first freeform mirror); (b) XY polynomial freeform surface (the second free-form mirror)

面自由曲面,第二反射镜采用XY多项式自由曲面。该系统的出瞳直径为10 mm, $F$ 数为3.0,视场角为 $28^\circ$ ,出瞳距大于15 mm。对各项设计参数进行对比,结果表明,本研究的设计结果优于其他同类设计。利用光学设计软件的宏命令对两个光学自由曲面的矢高特性进行分析,为后续加工研制工作奠定了基础。

### 参 考 文 献

- [1] Cakmakci O, Rolland J. Head-worn displays: a review[J]. Journal of Display Technology, 2006, 2(3): 199-216.
- [2] Okuyama A, Yamazaki S. Optical system, and image observing apparatus and image pickup apparatus using it: US5706136[P]. 1998-01-06.
- [3] Takahashi K. Image display apparatus comprising an internally reflecting ocular optical system: US5699194[P]. 1997-12-16.
- [4] Ye J F, Chen L, Li X H, *et al.* Review of optical freeform surface representation technique and its application[J]. Optical Engineering, 2017, 56(11): 110901.
- [5] Cakmakci O, Rolland J. Design and fabrication of a dual-element off-axis near-eye optical magnifier[J]. Optics Letters, 2007, 32(11): 1363-1365.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Tong J B, Cui Q F, Xue C X, *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.
- [10] 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.
- [11] Li H, Zhang X, Wang C, *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.
- [12] 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.
- [13] Bauer A, Rolland J P. Visual space assessment of two all-reflective, freeform, optical see-through head-worn displays [J]. Optics Express, 2014, 22(11): 13155-13163.
- [14] Pang Z H, Fan X W, Ma Z, *et al.* Free-form optical elements corrected aberrations of optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0522001. 庞志海, 樊学武, 马臻, 等. 自由曲面校正光学系统像差的研究[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0522001.
- [15] Shi H D, Zhang X, Wang L J, *et al.* Aberration properties of off-axis freeform surface optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0708001. 史浩东, 张新, 王灵杰, 等. 偏轴自由曲面光学系统像差特性研究 [J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0708001.

- [16] Liu X L, Zhang X D, Xu H Y, *et al.* Machining error analysis of freeform surface off-axis three-mirror system based on optical performance evaluation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0812005.  
刘现磊, 张效栋, 徐航宇, 等. 基于光学性能评价自由曲面离轴三反系统加工误差分析[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0812005.
- [17] Cakmakci O, Thompson K, Vallee P, *et al.* Design of a free-form single-element head-worn display[J]. *Proceeding of SPIE*, 2010, 7618: 761803.