

双自由曲面大视场头盔显示光学系统设计

孟祥翔^{1,2}, 刘伟奇¹, 张大亮¹, 姜国华³, 朱秀庆³, 杨建明^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国航天员科研训练中心人因工程重点实验室, 北京 100094)

摘要: 视场大小是评价头盔显示器在虚拟现实等领域的关键性能指标, 为了克服视场增加带来各类像差急剧增大的困难, 提出了一种基于双自由曲面的大视场头盔显示光学系统。首先, 分析了双椭球结构实现大视场与低畸变的基本原理, 指出了其难以校正除畸变以外其他像差的原因。接着, 提出根据系统对称性和光路走向采用竖直方向对称、水平方向不对称的自由曲面反射镜校正离轴像差, 完成了基于双自由曲面反射镜的大视场头盔显示光学系统设计。系统视场范围为 $106.3^\circ(\text{H}) \times 80^\circ(\text{V})$, 最大相对畸变为 6.97%, 出瞳直径 8 mm, 点眼距 19 mm。单目系统向外倾斜 8° 时, 双目视场范围为 $122.3^\circ(\text{H}) \times 80^\circ(\text{V})$, 双目重叠视场为 $90.3^\circ(\text{H}) \times 80^\circ(\text{V})$, 瞳距在 55~71 mm 范围内可调节。对系统性能分析结果表明: 相比双椭球结构, 系统成像质量得到较大提高; 视场范围和相对畸变满足虚拟现实领域的应用要求。

关键词: 头盔显示器; 大视场; 自由曲面; 光学设计

中图分类号: TN74; O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0418004

Design of wide field-of-view head-mounted display optical system with double freeform surfaces

Meng Xiangxiang^{1,2}, Liu Weiqi¹, Zhang Daliang¹, Jiang Guohua³, Zhu Xiuqing³, Yang Jianming^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. National Key Laboratory of Human Factors Engineering, China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China)

Abstract: Field-of-view (FOV) is the key performance indicator to evaluate a head-mounted display (HMD) in areas such as virtual reality. In order to overcome the difficulties of a sharp increase of optical system aberrations with the increased FOV, a wide FOV HMD optical system with double freeform surfaces was proposed. First, the principles of the double ellipsoid HMD which could achieve large FOV and low distortion were analyzed, and the reason of the aberration correction limitations of the double ellipsoid HMD was pointed out. Then wide FOV HMD optical system with double freeform mirrors was proposed. Two free-form mirrors were used by the new optical system which were symmetrical in vertical direction and asymmetrical in horizontal direction to correct off-axis aberrations brought by increasing FOV. The FOV of the new optical system was $106.3^\circ(\text{H}) \times 80^\circ(\text{V})$. The maximum relative

收稿日期: 2015-04-24; 修订日期: 2015-05-09

基金项目: 国防基础科研计划(B1720132001)

作者简介: 孟祥翔(1988-), 男, 博士生, 主要从事复杂光学系统设计等方面的研究。Email: mengxx326@126.com

导师简介: 刘伟奇(1958-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事虚拟现实、激光显示、空间目标成像方面的研究。Email: liuwq@ciomp.ac.cn

distortion is 6.97%. The exit pupil diameter was 8 mm and the eye clearance distance was 19 mm. Through tilt outside 8° the binocular FOV was 122.3°(H)×80°(V) and the binocular overlapped FOV was 90.3°(H)×80°(V). The IPD is adjustable within 55–71 mm. The analysis of optical performance indicates that image quality is greatly improved, and the relative distortion and FOV can meet the application requirements of the virtual reality.

Key words: head-mounted display(HMD); wide FOV; freeform surfaces; optical design

0 引言

头盔显示器(HMD)是虚拟现实技术中的关键设备,承担着视觉信息的模拟仿真,广泛应用于航空航天、军事训练、虚拟设计、仿真、医疗、教育、娱乐等领域^[1-4]。不论是沉浸式虚拟现实还是增强型虚拟现实,头盔显示器都起着极为重要的作用。头盔显示器的视场大小决定着虚拟现实技术的一个重要特征——沉浸感,视场越大,沉浸感越强。沉浸感影响着人对数字化环境的融入程度,对于虚拟训练等应用极为重要。

目前,头盔显示器结构形式多种多样,但单目光学系统视场范围大都在 80°以下^[5]。视场拼接^[6-7]是一种增大视场、提高分辨率的有效方法,该类头盔显示器由多个视场较小、成像质量较好的子光学系统严格拼接而成。视场拼接的代表产品为 Sensics 公司的 piSight™,其单目光学系统包括 4×3 个 27.5°(H)×20°(V)子光学系统,实现的双目视场范围为 150°(H)×60°(V)。Cheng^[7]等人利用自由曲面棱镜研制了 2×1 视场拼接轻型头盔显示器,视场范围为 56°(H)×45°(V)。视场拼接头盔显示器需要多个微显示屏和对应的视频传输通道,普通的个人计算机和笔记本电脑远不能实现类似 piSight™ 排列形式的图像处理与输出,而且当人眼偏离入瞳中心时会看到明显的拼接缝隙。折反结构可以实现头盔显示器紧凑、轻质等要求,但由于离轴像差的存在具有单个护目镜的折反结构很难实现大视场设计,且随着视场增加畸变校正愈加困难。Roger^[8]采用折衍混合光学元件及多个非球面透镜设计了单目视场为 80°(H)×67°(V)的折反结构头盔显示器,并采用部分双目重叠方式使得双目视场达到 120°(H)×67°(V)。Ashok^[9]等人根据离轴光学系统像差的节点理论设计了大出瞳距折反头盔显示器,其单目视场为 65°(H)×50°(V)。Yang^[10]提出了一种新的双椭球结构,可以在实现大视场的

同时进行非常优良的畸变校正。而在使用该结构将折射部分设置为易于加工装调的旋转对称面形^[9]时,会凸显出双椭球结构在对畸变以外的其他离轴像差校正困难的缺陷,并使折射部分出现多个难以加工的“W”或“M”形的玻璃非球面。而目前具有体积小、轻质等优势的自由曲面棱镜头盔显示器和全息光波导头盔显示器的视场范围还大都在 60°以下。

文中提出一种基于双自由曲面反射镜的大视场头盔显示光学系统,根据系统的对称性,采用竖直方向对称、水平方向不对称的自由曲面校正视场增大带来的离轴像差,不仅能大大提高系统成像质量,还能简化折射部分透镜组。

1 双椭球结构原理

双椭球结构头盔显示光学系统^[11]示意图如图 1 所示。按逆向光路,系统的入瞳位于椭球 1 的右焦点处,各视场的光线从入瞳处入射,经过椭球 1 的反射后向其左焦点处会聚;在其左焦点处设置一个中继透镜组,保证宽光束光线出射方向不变;椭球 2 的右焦点和椭球 1 的左焦点重合,由中继透镜组出射的光线再经过椭球 2 反射后会聚到椭球 2 的左焦点处;在椭球 2 的左焦点处设置一个后继透镜组,后继透镜组将从椭球 2 反射来的光线会聚到像面。

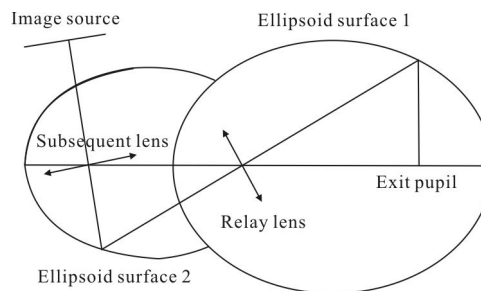


图 1 双椭球结构系统示意图

Fig.1 Diagram of double ellipsoid structure

如图 2 所示,双椭球结构的入瞳位于椭球 1 的右焦点处,从右焦点处入射的各角度的光线在经过椭球反射后都会入射到椭球的左焦点处,如此便可很好地使大视场光线会聚,实现光学系统的大视场设计。然而,若光线只经过椭球 1 的一次反射在左焦点处成像,椭球面会带来很大的畸变,并且很难校正。单个椭球面引入的畸变如图 3(a)所示,这种畸变形式在使用单片护目镜的机载 HMD 中很常见。在小视场情况下,这种畸变通常需要通过各光学元件的偏心倾斜来校正,但对于大视场情况,各项高级离轴像差迅速增加,很难再进行较好的校正。如图 2 所示,在光束经过椭球 1 一次反射后再加入另一个二次曲面系数相同的椭球 2,同时让椭球 2 右焦点与椭球 1 的左焦点重合。椭球 2 则会引入与椭球 1 相反的畸变,如图 3(b)所示。在经过椭球 2 的反射后,光线聚焦在其左焦点位置,同时畸变得到了很好的补偿,经过椭球 2 补偿后的畸变如图 3(c)所示。

若将两个椭球反射面看作透镜,这种畸变补偿类似于同轴对称结构中孔径光阑前后光学元件抵消

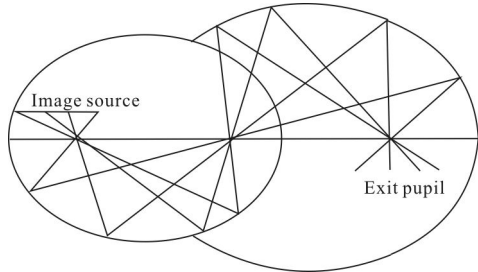


图 2 双椭球反射面成像原理
Fig.2 Double ellipsoidal mirrors imaging principle

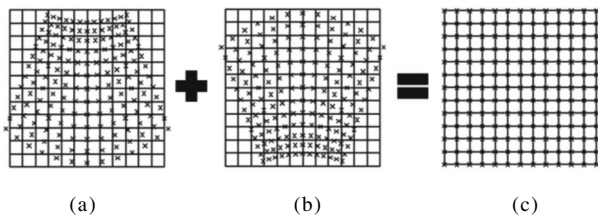


图 3 双椭球反射面的畸变补偿。(a) 椭球 1 引入的畸变;
(b) 椭球 2 引入的畸变;(c) 双椭球畸变补偿后的结果

Fig.3 Distortion compensation of double ellipsoidal mirrors structure.(a) Distortion introduced by ellipsoid surface 1;
(b) Distortion introduced by ellipsoid surface 2;
(c) Double ellipsoidal distortion after compensation

垂轴像差的原理,两椭球重叠的焦点类似于同轴对称结构的孔径光阑中心。但双椭球结构的像差校正并不完全等同于同轴对称结构中的垂轴像差相消原理。对于从椭球 1 右焦点处入射的宽光束,只有经过入瞳中心的主光线才具有反射后经过另一个焦点的特点,其他孔径的光线由于偏离了椭球 1 的右焦点,在经过椭球面反射后会出现光束严重发散的情况。若在中继透镜组和后继透镜组中全部使用旋转对称面形的透镜,很难校正离轴彗差、像散和场曲,而且多个玻璃透镜表面会出现类似“W”或“M”形状的面形^[9]。就目前的加工水平来说,这种多拐点的玻璃非球面面形精度不能得到保证。双椭球结构中对畸变的校正主要是因为畸变只与主光线位置有关,是主光线像差。两个椭球面不仅不能在其他像差校正中提供有效的帮助,还会由于双焦点的反射性质带来更加严重的离轴像差,如彗差、像散、场曲等。

2 双自由曲面结构系统设计

双椭球结构的光学系统在水平方向不具有对称性,而两个椭球面均是水平对称结构,限制了两个反射面的像差校正能力。文中根据系统的对称性,采用两个竖直方向对称、水平方向不对称的自由曲面反射镜进行像差校正,设计所得双自由曲面大视场头盔显示光学系统光路图如图 4 所示,其实现的光学性能参数如表 1 所示。

系统采用 0.86 in (1 in=2.54 cm)、1 920×1 200 分辨率的 OLED 显示屏,像元尺寸 9.6 μm × 9.6 μm;视场为 106.3°(H)×80°(V),全视场范围内最大相对畸变为 6.97%;出瞳直径 8 mm,轴上出瞳距离 52 mm,点眼

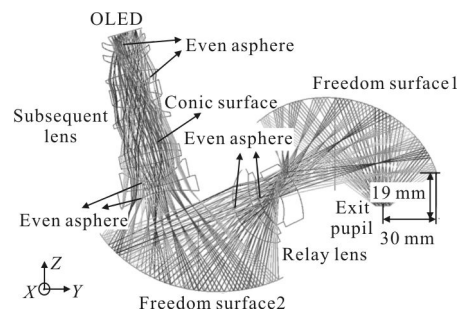


图 4 双自由曲面大视场头盔显示光学系统
Fig.4 Wide field-of-view head-mounted display optical system with double freeform surfaces

距为 19 mm。系统中继透镜组和后继透镜组中的透镜均共轴,中继透镜组为两个双胶合透镜。系统所有透镜元件均为旋转对称面形,并没有出现“W”或“M”形的非球面。系统共有 16 个光学元件,其中两个自由曲面反射镜,14 个透镜,其中含有 6 个偶次非球面、一个二次曲面,其余均为球面。系统中非球面的口径在 20~40 mm 之间,后继透镜组的前两个透镜为光学塑料非球面透镜,两个非球面相对于各自最佳拟合球面的最大去除深度分别为 0.864 09 mm 和 0.726 47 mm;其他 5 个玻璃非球面相对于各自最佳拟合球面的最大去除深度最大值为 0.532 30 mm。可见,系统中的非球面相对于当前非球面加工水平来说并不难加工。系统玻璃透镜均采用成都光明玻璃库中的光学玻璃材料,塑料透镜材料为日本瑞翁公司的 E48R。

表 1 双自由曲面头盔显示光学系统参数

Tab.1 Performance parameters of HMD optical system with double freeform surfaces

Parameter	Specification
Microdisplay	OLED
Resolution	1 920×1 920
Pixel size	9.6 μm×9.6 μm
Field of view	106.3°(H)×80°(V)
Exit pupil diameter	8 mm
Eye clearance distance	19 mm
Eye relief	52 nm(on axis)
Distortion	6.97%
Weight	<25.3%

系统中的自由曲面为扩展多项式面形,可用下式表示^[12-13]:

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

式中:第一项与二次曲面方程一致, r 为径向口径,且 $r^2 = x^2 + y^2$, k 为二次曲面系数, $c = 1/R$, R 为中心曲率半径;其他项为多项式项,代表在二次曲面的基础上点 (x,y) 处发生的矢高变化, N 为多项式的数目, A_i 为第

个多项式的系数, $E_i(x,y)$ 代表多项式的第 i 项,为最高阶为 20 的 x 与 y 大于等于零的整数次幂的乘积。上式中求和项展开后表示为:

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

式中:多项式数目 $N = \frac{i(i+1)}{2} + j$,在 ZEMAX 光学设计软件中 N 最大为 230。

系统虽然在水平方向非对称,但在竖直方向对称,即关于 YOZ 面对称。因此,在使用公式(1)时可进行简化,只选择关于 x 的偶次项即可。在实际设计中,取 $N=40$,关于 x 的偶次幂共 22 项。当前超精密光学制造技术发展迅速,使得光学自由曲面的加工与检测成为现实。系统中的双自由曲面反射镜可以通过超精密单点金刚石车削技术进行高精度加工,并利用计算全息图(CGH)检测法进行检测。

该双自由曲面大视场头盔显示光学系统既可应用在沉浸式虚拟现实领域,又可应用在增强型虚拟现实领域。在沉浸式虚拟现实领域,若使用铝作为两反射镜材料,厚度为 3 mm,并根据视场大小选择需要的面形区域,单目系统的质量约为 253 g;若使用密度更低的光学塑料作为两反射镜材料,可进一步降低系统质量。

3 系统性能分析

在入瞳直径为 8 mm 时,文中系统部分视场 MTF 曲线如图 5(a)所示,在 50 lp/mm 处各视场最低 MTF 值在 0.3 左右。图 5(b)为视场范围、入瞳直径和微显示屏均与文中设计相同且在透射部分全采用旋转对称面形透镜(含有 8 个偶次非球面)的双椭球结构^[9]在相同视场下的 MTF 图。对比图 5(a)和 5(b)可知,系统在成像质量上得到很大提升,且系统避免了“W”或“M”形的非球面,减少了透镜非球面的数量。

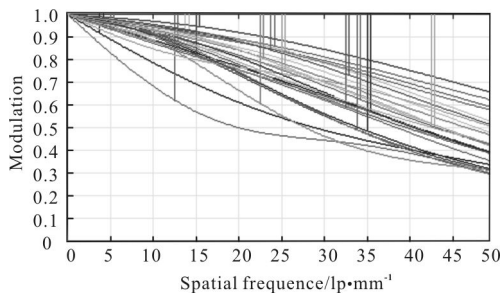
文中系统为大视场离轴系统,12 个视场不能完全反应出离轴光学系统的成像质量。以圆的半径长度表示 MTF 值的大小,以 MTF=1 和 MTF=0.1 的圆大小作对比,在全视场范围内选取一定的视场节点,评价其 MTF 大小,以此来分析系统在全视场内的成像质量。设计竖直方向视场以 0°水平视场线上下对

称, 竖直 $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 视场范围即可代表竖直方向全视场。以 5° 为步长在水平 $-53.17^{\circ}\sim 53.17^{\circ}$ 、竖直 $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 视场范围选取节点, 考察得到各节点视场在 50lp/mm 处子午、弧矢方向平均 MTF 见图 6, 全视场 50lp/mm 处平均 MTF 值均大于 0.25, 95.6% 的视场 MTF 大于 0.3。

图 7 为全视场 $106.3^{\circ}(\text{H})\times 80^{\circ}(\text{V})$ 范围内的网格畸变, 最大畸变为 6.97%。

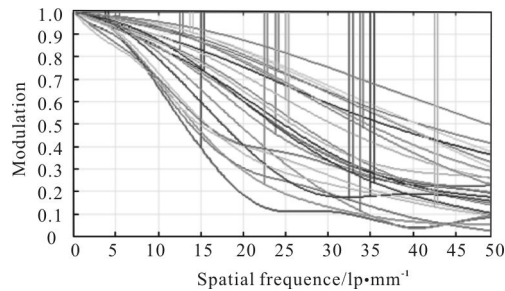
由于头盔显示光学系统采用逆向设计, 在设计时微显示屏作为像面, 经过入瞳的各视场光线以一定的 NA 角会聚到像面上。而在实际应用中, 微显示屏作为图像源发出光线, 每一点发出光线的物方 NA

角远大于逆向设计时的会聚 NA 角, 造成很多杂光进入光学系统, 影响系统性能。将中继透镜组和后继透镜组的隔圈内壁、透镜的非光学面均设为光线吸收表面, 并依据中继透镜组前后两个表面的通光口径加入挡光片, 进行杂光抑制。模拟结果如图 8 所示, 从显示屏发出的大 NA 角杂光大部分都被隔圈内壁、透镜非光学面和挡光片吸收。



(a) 双自由曲面结构 MTF

(a) MTF of double freeform surface structure



(b) 双椭球面结构 MTF

(b) MTF of double ellipsoid structure

图 5 系统性能对比

Fig.5 Performance comparison of system

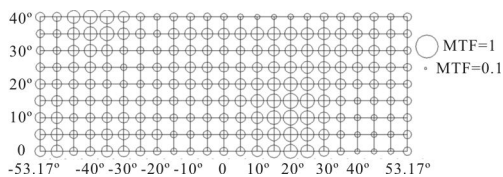


图 6 50lp/mm 处子午、弧矢平均 MTF

Fig.6 Average MTF of meridian and sagittal direction at 50lp/mm

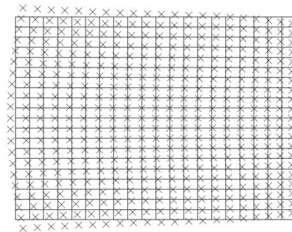


图 7 全视场 $106.3^{\circ}(\text{H})\times 80^{\circ}(\text{V})$ 范围内的网格畸变

Fig.7 Grid distortion of FOV within $106.3^{\circ}(\text{H})\times 80^{\circ}(\text{V})$

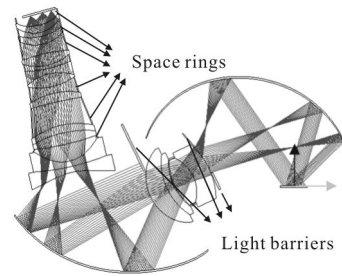


图 8 正向光线传播路径

Fig.8 Forward ray paths

在单目系统光路图 5 中, 系统入瞳中心距离自由曲面反射镜 1 的右侧边缘 30mm , 可知, 若采用左右眼视场全部重叠的方式, 双目头盔显示器的瞳距最小值为 60mm 。采用光轴向外倾斜的发散部分双目重叠方式, 将单目光学系统以入瞳中心为定点, 向外侧倾斜 8° , 如图 9 所示, D_1 表示瞳距, D_2 为倾斜后单目光学系统入瞳中心与自由曲面反射镜 1 边缘的水平距离 $D_2=27\text{mm}$, D_3 为双目光学系统的最近水平

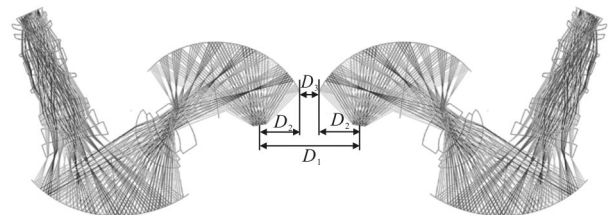


图 9 部分双目重叠双目系统结构

Fig.9 Binocular system architecture with partial binocular overlap structure

距离。可知, $D_1=2D_2+D_3$, 选取 $1\text{ mm}\leq D_3\leq 17\text{ mm}$, 即可使得瞳距 D_1 在 $55\sim 71\text{ mm}$ 范围内可调。此时, 双目水平视场为 122.3° , 双目重叠水平视场为 90.3° 。

4 结论

针对当前高性能头盔显示器视场较小的缺陷, 文中提出了一种采用双自由曲面反射镜的大视场头盔显示光学系统。根据对双椭球结构在校正除畸变以外其他离轴像差局限性的分析, 按照系统光路对称性, 采用竖直方向对称、水平方向不对称的自由曲面反射镜校正离轴像差。设计结果表明, 新系统成像质量有了较大提高, 并实现了 $106.3^\circ(\text{H})\times 80^\circ(\text{V})$ 的单目视场范围和全视场小于 7% 的相对畸变。

参考文献:

- [1] Keler K, State A, Fuchs H. Head mounted displays for medical use [J]. *Journal of Display Technology*, 2008, 4(4): 468-472.
- [2] Meizer J E. Design evolution of a wide field of view head-mounted display for aircraft training and simulation [C]// SPIE, 2001, 4361: 24-29.
- [3] Hu Xinrong, Liu Ying, Wang Jian, et al. Current progress in head-mounted display based on retinal scanning[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 871-878. (in Chinese) 呼新荣, 刘英, 王健, 等. 基于视网膜扫描的头戴显示器研究现状[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 871-878.
- [4] Bai Yu, Xing Tingwen, Jiang Yadong, et al. Design of head-mounted display optical system with DOE [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2753-2757. (in Chinese) 白瑜, 邢廷文, 蒋亚东, 等. 基于衍射光学的头盔显示光学系统[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2753-2757.
- [5] Cakmakci O, Rolland J. Head-worn displays: a review [J]. *Journal of Display Technology*, 2006, 2(3): 199-216.
- [6] Hoppe M J, Melzer J E. Optical tiling for wide field-of-view head-mounted displays [C]//SPIE, 1999, 3779: 146-153.
- [7] Cheng D W, Wang Y T, Hua H, et al. Design of a wide-angle, lightweight head-mounted display using free-form optics tiling [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(11): 2098-2100.
- [8] Roger B Huxford. Wide FOV head mounted display using hybrid optics [C]//SPIE, 2004, 5249: 230-237.
- [9] Ashok Sisodia, Riser A, Rogers J R, et al. Design of an advanced helmet mounted display (AHMD)[C]//SPIE, 2005, 5801: 304-315.
- [10] Yang J M, Liu W Q, Lv W Z, et al. Method of achieving a wide field-of-view head-mounted display with small distortion[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(12): 2035-2037.
- [11] Liu Weiqi, Yang Jianming, Jiang Guohua, et al. A wide field-of-view head-mounted display optical system of double ellipsoid structure with rotating symmetric Lenses: Chinese Patent, 201510143657.8[P]. 2015-04-02. (in Chinese) 刘伟奇, 杨建明, 姜国华, 等. 采用旋转对称透镜的双椭球结构大视场头盔显示光学系统: 中国专利, 201510143657.8 [P]. 2015-04-02.
- [12] ZEMAX Development Corporation. Optical Design Program User's Guide [EB/OL]. [2009-06-09]. <http://www.zemax.com>.
- [13] Zheng Z R, Liu X, Li H, 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.