

文章编号: 1001-3806(2021)04-0470-05

沉浸式头戴显示器光学系统设计

陈壮壮^{1,2}, 朱 标^{1,3}, 官明艳¹, 翟从鸿¹, 朱向冰^{1,2*}

(1. 安徽师范大学 物理与电子信息学院, 芜湖 241002; 2. 安徽师范大学 安徽省光电材料科学与技术重点实验室, 芜湖 241002; 3. 中航华东光电有限公司, 芜湖 241000)

摘要: 为了满足虚拟现实头戴显示器大视场、大出瞳和高成像质量等要求, 采用非球面透镜设计了1种3片式虚拟现实头戴显示器光学系统, 对光学系统进行了公差分析。结果表明, 光学系统的平均调制传递函数(MTF)值均满足传递函数的要求; 系统视场角为90°、出瞳直径为8mm、系统重量为33.67g、总长小于60mm、频率为9.31lp/mm时的MTF值均优于0.272, 最大畸变为8.17%, 最大垂轴色差为36.2 μ m, 小于一个像素尺寸; 与已有研究相比, 增加了视场角、出瞳直径和出瞳距离等参量的信息, 提高了成像质量。该研究为沉浸式头戴显示器的光学设计提供了参考。

关键词: 光学设计; 头戴显示器; 虚拟现实; 非球面; 公差分析

中图分类号: TN873 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2021.04.010

Design of immersive head-mounted display optical system

CHEN Zhuangzhuang^{1,2}, ZHU Biao^{1,3}, GONG Mingyan¹, ZHAI Conghong¹, ZHU Xiangbing^{1,2}

(1. School of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China; 2. Anhui Province Key Laboratory of Optoelectric Materials Science and Technology, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China; 3. AVIC Huadong Photoelectric Co. Ltd., Wuhu 241000, China)

Abstract: In order to meet the requirements of the virtual reality head-mounted display with large field of view, large exit pupil, and high imaging quality, a three-piece virtual reality head-mounted display optical system was designed using aspheric lenses, and the tolerance analysis of the optical system was carried out. The results show that the average modulation transfer function (MTF) value of the optical system meets the transfer function requirements. The field of view of the system is 90°, the exit pupil diameter is 8mm, the system weight is 33.67g, the total length is less than 60mm, the MTF value at 9.31lp/mm is better than 0.272, the maximum distortion is 8.17%, and the maximum vertical chromatic aberration is 36.2 μ m that less than a pixel size, respectively. Compared with the literature, the field of view, exit pupil diameter, and exit pupil distance is respectively increased, and the imaging quality is improved. This study can provide a reference for the optical design of immersive head-mounted displays.

Key words: optical design; head-mounted display; virtual reality; aspheric surface; tolerance analysis

引 言

虚拟现实技术^[1] (virtual reality, VR) 是利用计算机模拟生成视觉、听觉、触觉等多感官体验, 通过辅助设备, 佩戴者可与虚拟环境进行交互作用的技术。头戴显示器(head-mounted display, HMD) 作为VR技术的关键设备和最佳载体, 是一种将图像源输出的图形成像于人眼的目视光学系统, 在军事、航天、教育、医

学、工业生产、娱乐^[2-7]等领域具有极其重要的作用。

随着光学技术与工艺技术的发展与进步, 传统的折射型目镜光学系统已无法满足HMD的光学特性要求, 于是出现了非球面、自由曲面、折/衍混合等新型HMD光学系统^[8]。

2011年, CHENG等人^[9]设计了一种离轴自由曲面的拼接HMD光学结构, 但系统视场角较小, 且人眼偏离入瞳中心时会看到拼接缝隙。2015年, LÜ等人^[10]采用非球面结构, 设计了一种具有70°视场角的轻量化HMD光学系统, 但系统视场角相对较小。2018年, CHEN^[11]设计了一种非球面VR光学系统, 但系统出瞳直径和出瞳距离较小且成像质量不高。2019年, LU^[12]等人采用菲涅耳透镜加非球面透镜结构, 设

作者简介: 陈壮壮(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: 13855312793@126.com

收稿日期: 2020-08-26; 收到修改稿日期: 2020-09-16

计了一种基于拼接方法的超大视场的沉浸式 VR HMD,但系统出瞳直径较小。

上述部分文献中存在视场角较小、出瞳直径、出瞳距离较小以及成像质量不高等问题,无法完全满足 VR HMD 的光学特性要求。相比传统球面,非球面具有更大的自由度和灵活性,能够有效校正像差,减少系统透镜数量和提高成像质量^[13]。针对 VR HMD 的光学特性要求,作者采用非球面透镜设计了一种光学系统,系统视场角、出瞳直径和出瞳距离较大,重量较轻,成像质量较好,满足沉浸式 VR HMD 光学系统要求。

1 光学系统性能参量

沉浸式 HMD 一般采用非瞳孔成像结构。该结构更加紧凑轻便,且光阑即为人眼瞳孔,光阑大小随瞳孔大小变化。一般采用逆向光学系统设计的方法,系统入瞳即为实际光学系统的出瞳。

人眼的瞳孔直径随着外界环境的光亮度变化范围约为 2mm~8mm,HMD 出瞳直径过大,会增加设计难度,增加系统重量,本文中瞳孔直径选取为 8mm。一般,HMD 出瞳距离应不小于 12mm,出瞳距离选取为 12mm。HMD 的视场角越大,沉浸感就越强^[14],结合人眼特征,本文中设定光学系统全视场角为 90°。

畸变是 HMD 光学系统的重要参量,与视场呈三次方关系,视场越大,畸变就越大,不同视场角的目视光学系统所允许的畸变值不同,本文将光学系统最大畸变值设定在 10% 以内。

调制传递函数(modulation transfer function, MTF)能充分反映光学系统实际成像质量,对于目视光学系统而言,MTF 设计值要求在奈奎斯特频率处不小于 0.1,为获得较好的成像质量,本文中设计将 MTF 值设定为不小于 0.2。

系统重量和总长也是衡量光学系统的重要指标,本文中重量控制在 50g 内,总长(包括出瞳距离)控制在 60mm 内。

HMD 光学系统性能具体参量要求如表 1 所示。

Table 1 Performance parameters of HMD optical system

parameter	specification
wavelength	visible light
field of view	90°
exit pupil diameter	8mm
exit pupil distance	12mm
total length	<60mm
distortion	<10%
MTF	≥0.2@9.31lp/mm
weight	<50g

2 光学系统设计

2.1 图像源

根据光学系统性能参量指标,设计中选用对角线为 77.6mm 的夏普液晶显示屏作为光学系统图像源,像素尺寸为 53.7μm×53.7μm,分辨率为 1920pixel×1080pixel,分成相同的左右两部分,分别对应左右眼睛。

由光学系统性能参量指标可知,半视场角为 45°,图像源屏幕按左右眼分成完全相同的两块,可计算出每个屏幕的对角线为 77.6mm,则半像高为 38.8mm。光学系统视场角、有效焦距和图像源半像高之间存在以下关系:

$$h = f \times \tan\theta \quad (1)$$

式中, f 为光学系统的有效焦距,若 h 为图像源的半像高, θ 为光学系统的半视场角,根据(1)式可进一步求出系统的有效焦距为 38.8mm。

2.2 非球面设计

非球面采用偶次非球面,相较于奇次非球面,偶次非球面更容易加工,其表达式为:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_2r^2 + \alpha_4r^4 + \alpha_6r^6 + \alpha_8r^8 + \alpha_{10}r^{10} + \alpha_{12}r^{12} + \alpha_{14}r^{14} + \alpha_{16}r^{16} \quad (2)$$

式中, z 为表面矢高, c 为曲面顶点的曲率, $c = 1/r_0$, r_0 为顶点曲率半径, r 为光线与曲面交点的径向坐标; k 为二次曲面系数, $k = e^2$; $\alpha_2, \alpha_4, \alpha_6, \alpha_8, \alpha_{10}, \alpha_{12}, \alpha_{14}, \alpha_{16}$ 为非球面系数。

2.3 初始结构

初始结构的选取方法有两种:一种是运用像差理论方法计算求解得出光学系统的初始结构参量;另一种是直接已在已有文献中选择与所需的参量指标相近的结构作为初始结构^[15]。

作者从已有资料上选取凯尔纳目镜作为光学系统的初始结构,图 1 为初始结构光路图。其半视场为 22.5°,出瞳直径为 4mm,出瞳距离为 22mm,有效焦距

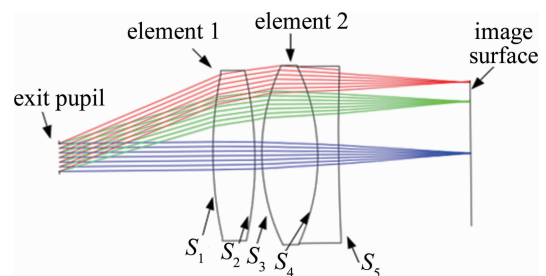


Fig. 1 Initial structure light path diagram

为28mm。

显然,初始结构的视场角、出瞳直径和出瞳距离与HMD光学系统性能参量要求具有较大差距,需要对其进行进一步优化。

2.4 优化过程

通过ZEMAX光学软件在初始结构的基础上进行多次结构调整和系统优化,大致可分为以下3个过程。

(1)将初始结构系统焦距缩放至38.8mm;将系统中 $S_1 \sim S_5$ 5个光学面的曲率半径、透镜1和透镜2的间距以及厚度作为变量,并添加相应操作数控制其范围,如有效焦距操作数控制系统有效焦距大小;通过最大畸变操作数,将系统最大畸变控制在10%内;逐步调整出瞳直径、出瞳距离和视场角,在视场角增加一定程度后手动分离双胶合透镜。

(2)引入偶次非球面增加系统的变量和自由度,替换玻璃材料,改变材料折射率和阿贝数;继续调整视场角和出瞳距离,添加相应操作数控制系统二次项系数值、表面曲率、表面间距离,非球面系数取到10阶即可,阶数过高会使面型过于复杂。

(3)添加相应操作数控制系统的像差,进一步提升系统成像质量。如通过子午衍射调制传递函数操作数和弧矢衍射调制传递函数操作数控制系统传递函数值, y 方向主光线横向像差操作数和减法运算操作数控制垂轴色差,广义子午场曲操作数和广义弧矢场曲操作数控制场曲。

图2为最终得到的系统光路图。图3为光学系统3-D模型切面图。光学系统视场角为 90° ,出瞳直径为8mm,出瞳距离为12mm,系统总长为59.3mm,单目重量为33.67g,满足光学系统性能参量要求。透镜1为正透镜,透镜2和透镜3为负透镜, $S_1 \sim S_6$ 均为偶次非球面。表2为光学系统的透镜材料参量。其中COC

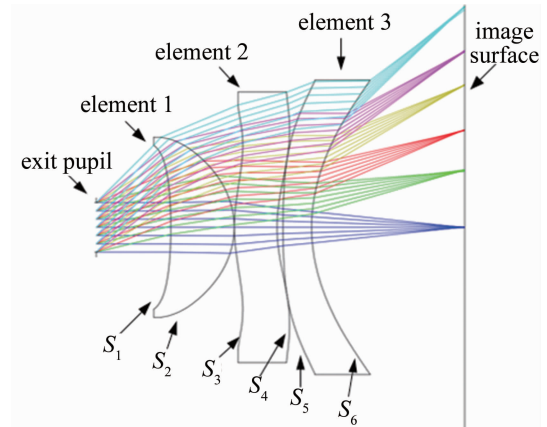


Fig. 2 Optical system structure of HMD

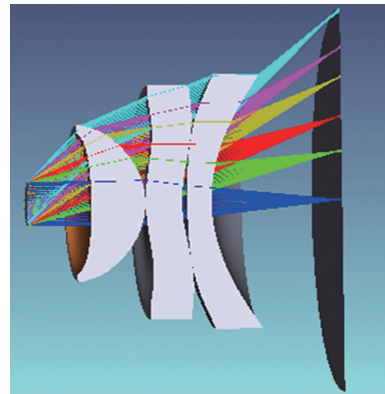


Fig. 3 3-D model cutaway

Table 2 Material parameters of optical system lens

No.	material	index	abbe	density/($g \cdot cm^{-3}$)
element 1	COC	1.533	56.227	1.020
element 2	OKP-A1	1.649	21.451	1.210
element 3	OKP-A1	1.649	21.451	1.210

(copolymers of cycloolefin)为环烯烃共聚物;DKP-A1为以芳香族为原料的聚酯树脂。表3为光学系统的非球面参量。其中conic为圆锥曲线函数,the n th order为非球面的高阶系数。

Table 3 Optical system aspheric parameters

	conic	the 2nd order	the 4th order	the 6th order	the 8th order	the 10th order
S_1	37.935	0.000	-1.495×10^{-5}	-2.685×10^{-7}	3.526×10^{-9}	-1.522×10^{-11}
S_2	-0.154	0.000	-2.954×10^{-6}	1.508×10^{-7}	-2.170×10^{-11}	1.724×10^{-12}
S_3	-11.883	0.000	-2.604×10^{-5}	-7.817×10^{-9}	-2.977×10^{-11}	1.957×10^{-13}
S_4	-5.355	0.000	-3.490×10^{-5}	2.005×10^{-8}	-2.722×10^{-11}	-1.532×10^{-14}
S_5	-94.629	0.000	2.331×10^{-5}	-2.406×10^{-8}	-1.263×10^{-11}	-8.860×10^{-15}
S_6	-0.044	0.000	-1.184×10^{-5}	1.009×10^{-8}	-1.389×10^{-11}	-1.419×10^{-14}

3 像质评价

图4为光学系统调制传递函数(optical transfer function,OTF)曲线图。在奈奎斯特频率(9.31lp/mm)

处,全视场内调制传递函数值均优于0.272,边缘视场和中心视场成像质量较好。图中,分别表示了现场角为 $0^\circ, 13.50^\circ, 22.50^\circ, 31.82^\circ, 38.25^\circ, 45.00^\circ$ 时子午光线传递函数值 T (每一个角度值对应的前一条竖线)

和弧矢光线传递函数值 S (所对应的后一条竖线)。图 5 为光学系统场曲/畸变图。从图中可以看出,最大场曲出现在 0.97 倍视场处,最大畸变为 8.17%。图 6 为光学系统垂轴色差曲线图。最大垂轴色差出现在 0.94 倍视场处,为 $36.2\mu\text{m}$,小于一个像素尺寸。以上所述完全满足 VR HMD 光学系统参量要求。

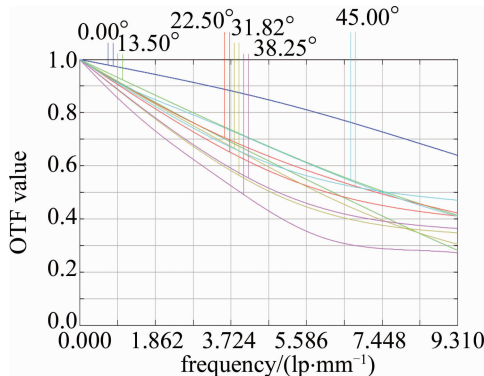


Fig. 4 Diagram of the MTF curve

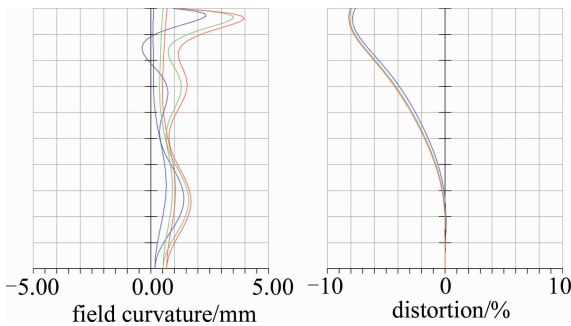


Fig. 5 Distortion curve

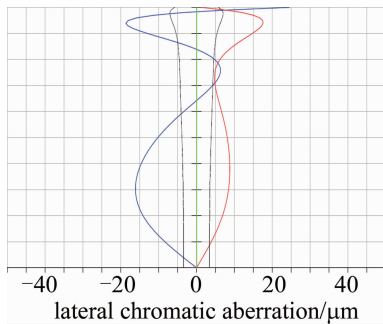


Fig. 6 Lateral chromatic aberration curve

差,使产品偏离设计结果。为提高产品的成像质量,降低加工装配难度和成本,需要进行合理的公差分配,增加光学系统的可行性^[16],因此,光学系统设计完成后,对其进行公差分析具有十分重要的意义。

常用的公差有表面公差和元件公差,具体包括曲率半径、厚度、 x/y 偏心、 x/y 倾斜、折射率、阿贝数等公差^[17]。此外,通过 MATLAB 软件对高次非球面的面形精度进行数值分析,建立各面型矢高矩阵,采用非线性最小二乘法拟合出偶次非球面方程,将相应系数输入到 ZEMAX 中,分析公差对光学系统的成像质量的影响。

公差分配好后,通过 ZEMAX 光学软件进行 Monte Carlo 分析。本文中计算分析了 200 个 Monte Carlo 样本,实际上每一个样本就是一个模拟加工、装调后的光学系统,通过计算得到光学系统视场内 9.31lp/mm 处的平均 MTF 值。表 4 为光学系统的公差分配表。表中峰谷值 (peak-to-valley, PV) 用来表示面型精度。表 5 为平均 MTF 值 Monte Carlo 分析结果。

Table 4 Tolerance distribution table of optical system

	type	tolerances
surface tolerances	radius/mm	± 0.01
	thickness/mm	± 0.05
	decenter x /mm	± 0.02
	decenter y /mm	± 0.02
	tilt x /($^\circ$)	± 0.02
	tilt y /($^\circ$)	± 0.02
	index	± 0.001
element tolerances	abbe/%	± 0.5
	decenter x /mm	± 0.02
	decenter y /mm	± 0.02
	tilt x /($^\circ$)	± 0.02
surface accuracy PV/ μm	tilt y /($^\circ$)	± 0.02
	S_2	0.19
	S_3	0.52
	S_4	0.41
	S_5	0.29
	S_6	0.83
	S_7	1

4 公差分析

光学系统在加工和装配过程中会存在一定的误

Table 5 Monte Carlo analysis results

Monte Carlo analysis	MTF value	field 1(0 $^\circ$)	field 2(13.5 $^\circ$)	field 3(22.5 $^\circ$)	field 4(31.815 $^\circ$)	field 5(38.25 $^\circ$)	field 6(45 $^\circ$)
>90%	0.33145	0.57739	0.27418	0.35553	0.29823	0.24950	0.21730
>80%	0.33513	0.58377	0.28219	0.36636	0.30420	0.25775	0.23047
>50%	0.3455	0.59278	0.30030	0.38006	0.31381	0.27928	0.26116
>20%	0.35466	0.60065	0.31483	0.38966	0.32330	0.30321	0.30798
>10%	0.35847	0.603317	0.32443	0.39385	0.32805	0.31568	0.33064

表 5 中给出了 Monte Carlo 数据大于 90% ,80% ,50% ,20% ,10% 的产品所能达到的传递函数。从数据可以看出,按照表 4 中的公差分配设置加工、装调后,在 9.31lp/mm 处,90% 以上的产品 MTF 平均值优于 0.33145,90% 以上的产品在视场 6 处的传递函数优于 0.21730,均满足光学系统传递函数设计要求值。

5 结 论

基于沉浸式虚拟现实头戴显示器光学特性要求,本文中选用彩色液晶显示屏作为图像源,采用非球面结构,通过 ZEMAX 光学软件设计了一种三片式虚拟现实头戴显示器光学系统,并对光学系统进行像质评价和公差分析。设计的光学系统视场角为 90°,出瞳直径为 8mm,系统总长小于 60mm,系统重量为 33.67g,最大畸变为 8.17%,9.31lp/mm 处的 MTF 值均优于 0.272,成像质量较好,满足沉浸式 VR HMD 的光学系统要求;其 Monte Carlo 分析结果表明,光学系统的平均 MTF 值均满足传递函数要求,进一步验证了光学系统的合理性与可行性。

本文中设计的头戴显示器光学系统结果与参考文献[11]相比,视场角增加了 10°,出瞳距离与出瞳直径均增加了 4mm,图像源的像素更高,畸变、垂轴色差以及 MTF 值均有改善,成像质量更好。

参 考 文 献

- [1] ZHAO Q P. Virtual reality review[J]. Science in China, 2009, F39(1):246(in Chinese).
- [2] ZHANG Zh Y, WANG H, ZHU H X, *et al.* Design and realization of adaptive training system for immersive military battlefield[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(6): 24-26(in Chinese).
- [3] SANJOG J, KARMAKAR S, PATEL T, *et al.* Towards virtual ergonomics: Aviation and aerospace[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2015, 87(3): 32-37.
- [4] JIANG J, ZHI L, XIONG Z. Application of virtual reality technology in education and teaching[C]//2018 International Joint Conference on Information, Media and Engineering (ICIME). New York, USA: IEEE, 2018: 300-302.
- [5] JAVAID M, HALEEM A. Virtual reality applications toward medical field[J]. Clinical Epidemiology and Global Health, 2019, 8(2): 600-605.
- [6] HE J. Application of virtual reality technology in industrial design[J]. Journal of Physics, 2019, 1345(6): 062013.
- [7] CRUZ-NEIRA C, FERNÁNDEZ M, PORTALÉS C. Virtual reality and games[J]. Multimodal Technologies and Interaction, 2018, 2(1): 2010008.
- [8] 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(in Chinese).
- [9] CHENG D W, WANG Y, 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.
- [10] LÜ X B, WANG Zh, WEI Zh F. Lightweight design of a helmet-mounted display optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1022007 (in Chinese).
- [11] CHEN J K. Design of virtual reality optical system based on human eye characteristics[D]. Suzhou: Soochow University, 2018 :23-35 (in Chinese).
- [12] LU Ch H, LI H F, GAO T, *et al.* Virtual reality head-mounted display with large field of view based on stitching[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6):0612002(in Chinese).
- [13] WANG Zh Q, WANG Y, QUAN W. Design of aspheric FFA camera based on eye model[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(7):1511-1519(in Chinese).
- [14] MENG X X, LIU W Q, ZHANG D L, *et al.* Design of wide field-of-view head-mounted display optical system with double freeform surfaces[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(4):189-194 (in Chinese).
- [15] GAO X Y, CHEN P B, LI M F, *et al.* Design of wide angle wide depth double telecentric system[J]. Laser Technology, 2017, 41(2):182-186(in Chinese).
- [16] SUN Y X, XIA Zh T, HAN H B, *et al.* Design and tolerance analysis of infrared off-axis three-mirror optical system with large aperture [J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(6):803-808(in Chinese).
- [17] DOU X X, ZHU J W, DING G L. Design of optical system of mobile phone lens and simulation of stray light [J]. Laser Technology, 2016, 40(4):500-505(in Chinese).