

大视场虚拟现实光学系统设计

范君柳^{1,2} 赵 蒙² 王 军² 沙金巧^{1,2} 陈宝华² 吴泉英² 周心媛²

(¹苏州科技大学天平学院, 江苏 苏州 215000; ²苏州科技大学物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215009)

摘 要 虚拟现实技术由于具有良好沉浸感和人机交互性强的特点而被广泛应用于军事训练、教育和医疗等领域。本文设计一款适用于虚拟现实头盔显示器的两片式大视场光学系统。利用单透镜作为初始结构, 根据设计要求调整出瞳直径, 出瞳距离, 逐渐增大视场角, 并采用非球面来优化提高光学系统的成像质量, 减小畸变。设计完成的头盔显示器光学系统全视场角达到 92°, 所有视场下的调制传递函数值在奈奎斯特频率处均大于 0.1, 系统最大畸变为 9%, 并且在全视场范围内实现每度 16.8 像素数的角分辨率。实验结果表明: 与单片式光学系统相比, 本文设计的两片式系统具有更好的成像质量、更出色的边缘视场畸变和色差控制效果。此外, 该光学系统重量轻、结构紧凑、成本低, 可应用于新一代虚拟现实设备的头盔显示系统。

关键词 虚拟现实; 头盔显示器; 视场角; 角分辨率; 调制传递函数

OPTICAL DESIGN ON THE VIRTUAL REALITY OPTICAL SYSTEM WITH A WIDE FIELD OF VIEW

FAN Junliu^{1,2} ZHAO Meng² WANG Jun² SHA Jinqiao^{1,2} CHEN Baohua²

WU Quanying² ZHOU Xinyuan²

(¹ Tianping College of Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215000;

² School of Physical Science and Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009)

Abstract The virtual reality (VR) technology is widely used in the military training, education, health care and other fields due to its characteristics of being highly immersive and human-computer interactive. A two-element optical system with a large field of view is designed which is suitable for the head mounted display (HMD) of the VR. A singlet lens is selected as the initial structure of the design. The diameter and distance of exit pupil are adjusted, and the field of view (FOV) is increased gradually according to the design specifications. The lens adopts the aspheric surfaces to improve the image quality and decrease the distortion of the system. The finished HMD optical system achieves a full FOV of 92 degrees. The modulation transfer functions (MTF) of all the FOVs are greater than 0.1, and the maximum distortion of the system is 9%. The angular resolution of the HMD optical system achieves 16.8 pixels per degree (PPD). The experimental results indicate that the two-element HMD system is ca-

收稿日期: 2021-11-27; 修回日期: 2022-04-08

基金项目: 苏州科技大学天平学院教育教学改革研究课题(No. 2020TJGB-08); 江苏省高等教育教改研究课题(No. 2021JSJG370); 苏州科技大学校级教学改革与研究项目(No. 2021JG-17)。

作者简介: 范君柳, 男, 高级实验师, 主要从事物理实验教学工作, 主要研究方向为光学设计, fj1280@163.com。

引文格式: 范君柳, 赵蒙, 王军, 等. 大视场虚拟现实光学系统设计[J]. 物理与工程, 2022, 32(5): 144-149.

Cite this article: FAN J L, ZHAO M, WANG J, et al. Optical design on the virtual reality optical system with a wide field of view[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(5): 144-149. (in Chinese)

pable of producing images with higher quality and performs better in controlling the distortion and chromatic aberrations of the marginal FOV compared with the single-element system. In addition, the optical system has advantages of light weight, compact structure and low cost. It can be applied to a new generation of the VR HMD.

Key words virtual reality; head mounted display; field of view; angular resolution; modulation transfer function

虚拟现实(Virtual Reality, VR)是利用计算机生成具有视、听、触觉感知的数字化环境,结合辅助设备,可使人与数字化环境发生交互作用的技术^[1-3]。VR技术包括完全脱离现实环境的沉浸式虚拟现实(immersive VR)^[4],也包括叠加于现实环境之上的增强现实(Augmented Reality, AR)^[5,6]。两种技术均通过光学和电子等技术手段给使用者提供丰富的场景信息。

VR技术设备主要包括显示屏、头盔显示器(Head Mounted Display, HMD)以及相关控制设备。其中HMD作为虚拟场景的输出工具,是一种利用光学系统直接将显示屏产生的景象进行放大并虚拟地呈现在眼前的头戴式设备。为使VR设备能输出具有良好沉浸感以及高质量的画面,HMD中的光学系统需要同时满足大视场角(Field of View, FOV)和高分辨率的条件^[7-8]。然而随着视场角的增大,光学系统中与视场相关的轴外像差如象散、场曲、畸变以及倍率色差也随之增加。为校正这些像差,光学系统的结构通常比较复杂,考虑到普通人头部的承受能力以及穿戴的舒适性,HMD需尽量同时实现小型化和轻量化,这对系统的光学设计结构以及镜头材料选择均提出了较高的要求。

目前市场上比较热销的高端VR设备如Oculus Rift, HTC Vive的光学系统均采用单块菲涅尔透镜^[9]。相比于普通透镜,菲涅尔透镜尽管可实现100°以上的全视场角,厚度也更薄,但成本较高,其校正畸变的能力有限,往往需要通过软件来预先反向扭曲图像,从而和透镜产生的畸变相互抵消,但这会降低透镜的成像质量。中低端VR设备的光学系统通常由单块普通非球面透镜构成,此类透镜的成像质量普遍较差,边缘视场存在较为严重的畸变和色差。

对于HMD光学系统,视场角越大,光学镜头

所呈现的沉浸感就越强,但过大的视场角会影响HMD的成像质量,而且还容易导致晕眩。此外在显示屏尺寸固定的前提下,视场角与系统的焦距成反比。大视场角会导致光学系统焦距变小,从而使得HMD的角分辨率变小,屏幕像素结构所导致的“纱窗效应”就更为明显^[10]。为消除“纱窗效应”可采用分辨率更高的显示屏,但分辨率越高,也就意味着需要更高的屏幕刷新率、性能更好的CPU以及更高的硬件成本。

本文设计了一款由两片塑料透镜组成,全视场角为92°的HMD光学系统,并通过加工镜片对该系统进行了成像实验。与单片式HMD光学系统相比,两片式HMD光学系统通过不同材料的组合、结构参数的优化有效地减小了系统边缘视场的畸变和色差,且中心和边缘视场均具有较高的成像质量。

1 HMD的光学系统设计

1.1 设计要求

为了保证良好的沉浸感,防止由于人眼的转动而丢失图像信息,出瞳直径取7mm,考虑到使用者佩戴眼镜等因素,取出瞳距离为17mm。为了提高HMD光学系统的成像质量,减轻系统重量,采用两片塑料镜头进行光学设计。设计中选用一款对角线尺寸为5.5in的TFT LCD作为HMD光学系统的显示屏,分辨率为1440×2560。考虑到加工及装调公差所造成的系统调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)下降,并且兼顾HMD光学系统中心和边缘视场的成像质量,故在奈奎斯特频率12lp/mm处设定所有视场的MTF值均大于0.1。同时由于视场角过大会导致图像产生严重的畸变,设定HMD光学系统的最大畸变不超过10%。HMD光学系统的具体设计参数及规格如表1所示。

表 1 HMD 光学系统参数

参数	规格
出瞳直径	7mm
出瞳距	17mm
视场角	92°×92°
工作波长	486~656nm
LCD 对角线尺寸	5.5in(139.7mm)
LCD 分辨率	1440×2560
最大畸变	<10%
成像质量	MTF>0.1 at 12lp/mm

1.2 设计过程

采用单块透镜作为初始结构,材料选用 PMMA,利用 ZEMAX 软件进行光学设计,为保证光学系统出瞳与眼睛入瞳相匹配,在设计 HMD 光学系统时,采用反向追迹方法,即光线从眼瞳开始追迹^[11]。根据视场角、显示屏尺寸以及焦距的关系 $y = f \tan \theta$,其中 y 为显示屏尺寸, f 为焦距, θ 为半视场角,可算出 46°半视场角和 5.5 英寸显示屏对应的焦距约为 29mm。据此对初始结构进行缩放,并且逐步调整入瞳距离为 17mm,入瞳直径为 7mm。

当视场角逐渐增大时,在出瞳距离固定的前提下,斜入射光束在透镜表面的入射角和入射高度随之增加,导致与视场相关的高阶轴外像差急剧增加,光学系统的成像质量也随之下降。为了减小像差,提高成像质量,单透镜前后表面采用偶次非球面进行优化。图 1 和图 2 分别为当全视场角增加到 92°时,优化后的单透镜结构以及 MTF 曲线图。由图 2 可知,尽管采用了非球面,但由于单透镜可优化的变量仍较少,无法通过进一步优化来提高成像质量,导致单透镜边缘视场的 MTF 截止频率远低于奈奎斯特频率。由图 3 和图 4 可以看出,优化后的单透镜边缘视场仍存在严重的畸变和色差。为了校正和平衡各种高阶轴外像差,在优化过程中加入第二块塑料透镜,通过多次的优化,反复地修改结构参数逐步逼近最佳结果。为了进一步改善边缘视场的成像质量和畸变,第二块塑料透镜前后表面均采用偶次非球面,并对其折射率和色散系数进行优化。

在优化过程中采用的偶次非球面表面矢高的表达式为

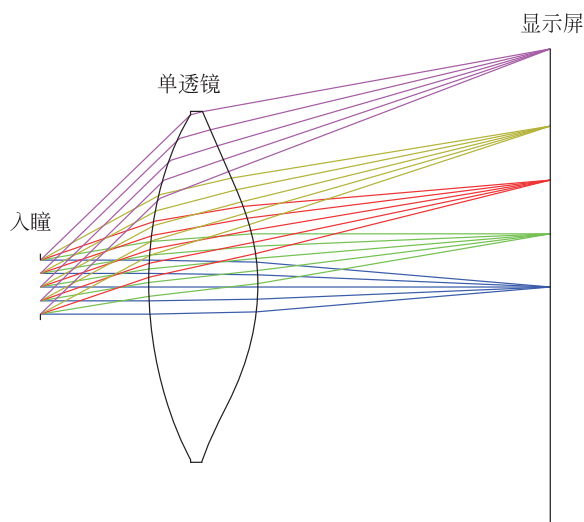


图 1 单透镜 HMD 光学系统结构图

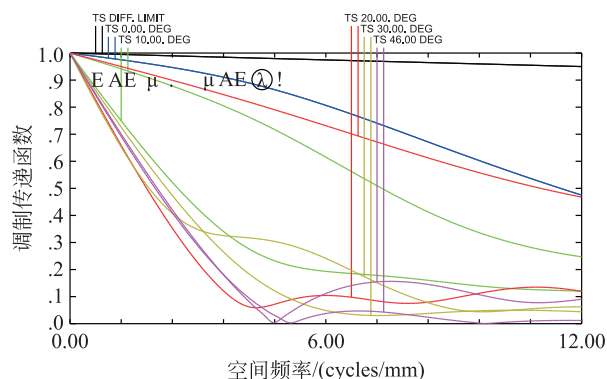


图 2 单透镜 HMD 光学系统 MTF 曲线图

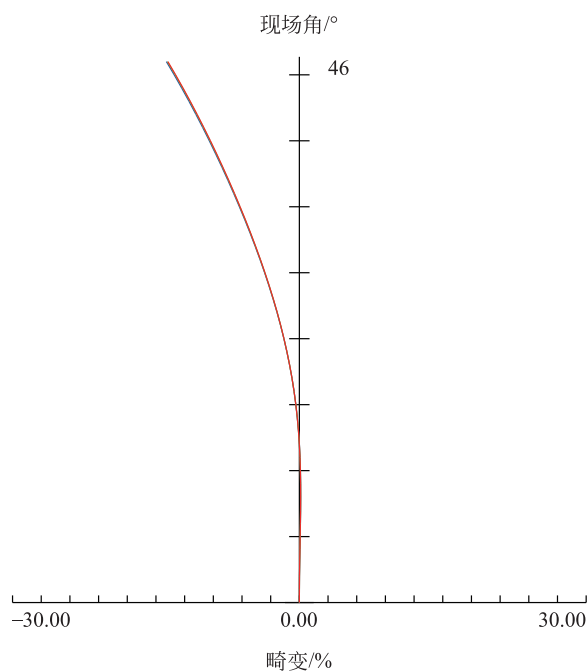


图 3 单透镜 HMD 光学系统畸变图

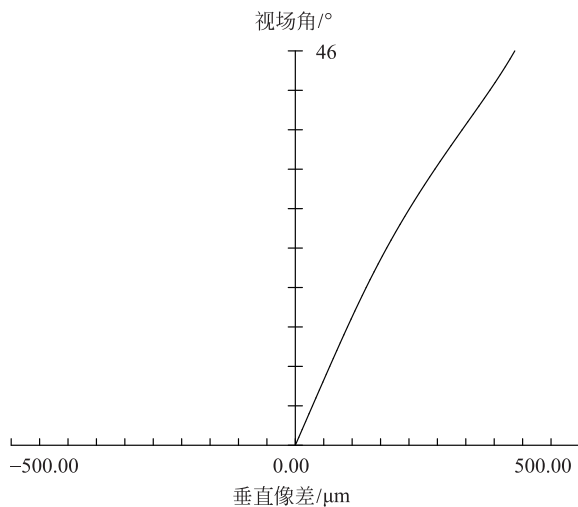


图4 单透镜 HMD 光学系统垂轴色差图

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \alpha_4 r^8 + \alpha_5 r^{10} + \alpha_6 r^{12} + \alpha_7 r^{14} + \alpha_8 r^{16} \quad (1)$$

其中, z 是表面矢高, r 为表面顶点到表面上任意一点的垂直距离, c 为表面顶点的曲率, k 为表面圆锥系数, $\alpha_1 \sim \alpha_8$ 分别为第一项至第八项非球面系数。

2 设计结果及分析

2.1 两片式 HMD 光学系统成像质量分析

设计完成的两片式 HMD 光学系统结构如图 5 所示, 其中第一片透镜具有正光焦度, 主要承担大视场光线的偏折能力, 第一片透镜的后表面由于具有较小的曲率半径而导致较为严重的场曲和畸

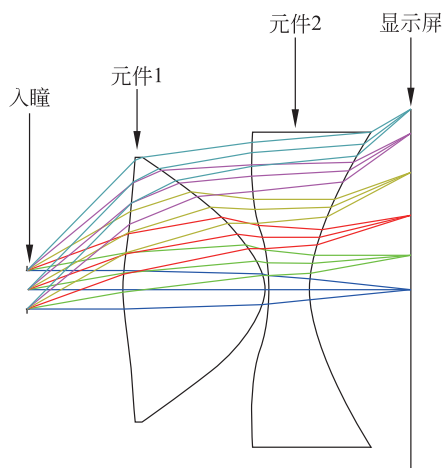


图5 两片式 HMD 光学系统结构图

变。第二片透镜具有负光焦度, 其前后表面引入偶次非球面主要用于产生和第一片透镜后表面符号相反的场曲和畸变。第一片透镜的材料为 PMMA, 第二透镜的材料为 OKP1, 具体参数如表 2 所示。光学系统的总质量为 73.9g, 系统总长度为 25.3mm, 重量和体积均满足 HMD 的使用要求。

表2 两片式 HMD 光学系统透镜材料

元件序号	材料	折射率	阿贝数	密度/(g/mm ³)
1	PMMA	1.49	57.4	1.16
2	OKP1	1.64	22.5	1.22

系统的 MTF 曲线如图 6 所示, 在奈奎斯特频率 12lp/mm 处, 各视场的 MTF 值均超过 0.1。由图 7 可知, 0~46°半视场范围内系统最大畸变为 9%, 以上指标均满足设计要求。图 8 为系统的垂轴色差图, 和单透镜相比, 两片式光学系统的边缘视场色差有了明显的改善。

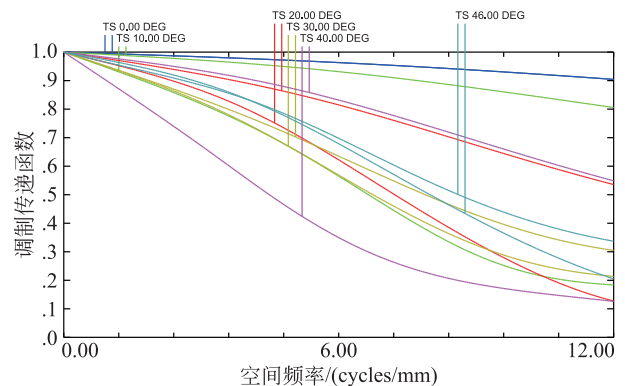


图6 两片式 HMD 光学系统 MTF 曲线图

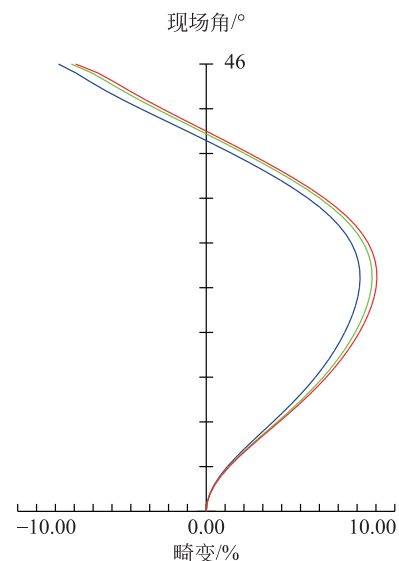


图7 两片式 HMD 光学系统畸变曲线图

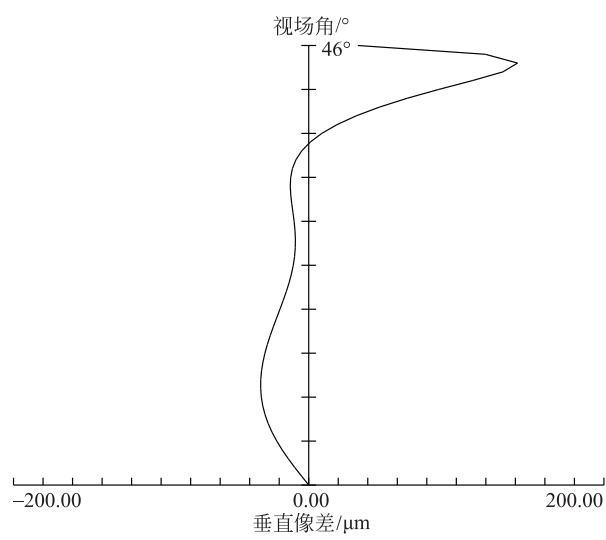


图8 两片式 HMD 光学系统的垂轴色差图

2.2 两片式 HMD 光学系统的角分辨率分析

手机屏幕通常是用 PPI(Pixel per inch)来定义屏幕清晰度,而 HMD 是透过光学系统看显示屏放大的虚拟图像,并非直接观看显示屏,因此利用 PPI 无法衡量 HMD 清晰度,HMD 的清晰度可通过角分辨率来衡量,角分辨率是指视场角 1°内所包含的像素数(Pixel Per Degree, PPD)。人眼正常视力下的角分辨率为 60PPD,HMD 的角分辨率越接近 60PPD,图像的清晰度就越接近人眼的分辨极限,人眼观看图像就觉得越清晰且无像素颗粒感。但目前市场上尚无能达到如此高角分辨率的显示屏。表 3 列出了本文设计的 HMD 光学系统在各视场角范围内的角分辨率值。

表 3 HMD 光学系统各视场角范围内的角分辨率值				
视场角 /°	$f \tan \theta$	总像素数	像素增量	角分辨率 (PPD)
10	5.96	143	143	14.3
20	12.30	295	152	15.2
30	19.51	468	173	17.3
40	28.36	680	212	21.2
46	35.00	840	160	16.0

通过表 3 计算可知两片式 HMD 在整个视场范围内的平均角分辨率为 16.8 PPD。根据目前市场上主流 VR 产品披露的参数可分别计算出各款产品的角分辨率如表 4 所示,通过比较可知,本文所设计的 HMD 光学系统具有较高的角分辨率,用户在使用时可以获得较好的图像清晰度。

表 4 其他 VR 产品的角分辨率值

品牌	角分辨率 (PPD)	品牌	角分辨率 (PPD)
Oculus Rift	10.4	DPVR M2	14.2
HTC Vive	10.4	PICO NEO	11.2
PS VR	10.2	3glasses S1	13.1
DPVR E2	8.5	Pimax4K	18.6

注:品牌没有对应中文。

3 实验结果

通过单点金刚石车床分别对透镜 1 和透镜 2 的毛坯进行车削加工,加工和检测完成后的透镜 1 和透镜 2 如图 9(a)所示。在保证公差要求的前提下为了尽可能减轻系统的质量,镜筒采用密度为 1.2g/mm³ 的聚乳酸(Polylactic Acid, PLA)加工而成,装配好的镜筒如图 9(b)所示。搭建如图 9(c)所示的成像光路,在镜筒前侧放置显示屏,显示屏的左右两侧均显示完全相同的图像,利用人眼进行观测,通过观测位置的调整即可感受到大视场光学系统所呈现的沉浸感。同时为了比较成像效果,加工了本文 1.2 节中设计的单透镜 HMD 系统,加工后的镜片如图 9(d)所示。

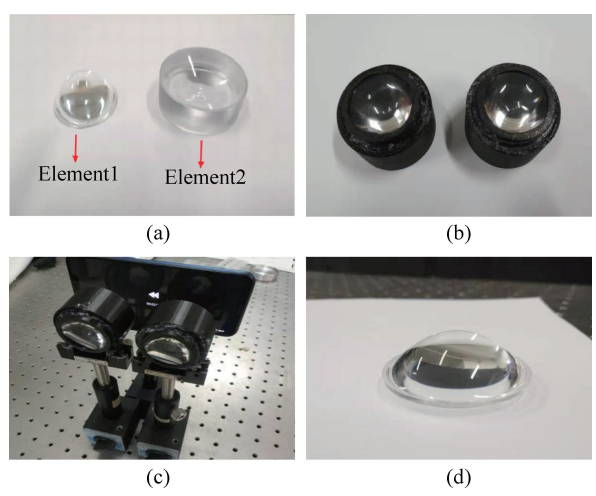


图 9 两片式和单片式 HMD 光学系统结构图

(a) Diagram of the finished lens; (b) Diagram of the fabricated lens; (c) Imaging layout of the lens; (d) Diagram of the single-element HMD system

由于两片式 HMD 光学系统中左右镜筒的成像效果相同,为了评价系统的成像质量,取任一镜

筒对图 10(a)所示的目标物进行成像,成像结果如图 10(b)所示,图 10(c)为单片式 HMD 系统的成像结果。与图 10(b)相比,图 10(c)中飞机的螺旋桨和尾翼发生了明显的形变,且出现颜色模糊的情形,故两片式 HMD 光学系统具有更好的边缘

畸变和色差控制效果。通过比较机翼上的图案与字母可知,两片式 HMD 系统对目标物的成像也更为清晰。然而由于两片式 HMD 系统的透过率要低于单片式系统,故图 10(b)要比图 10(c)略暗一些,上述问题可通过镀增透膜的方式解决。

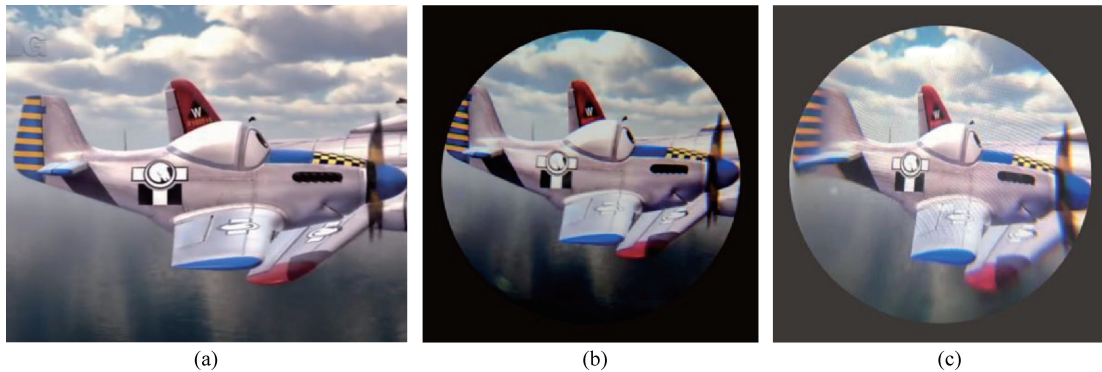


图 10 两片式和单片式 HMD 实验结果图

(a) 原图; (b) 两片式 VR 光学镜头成像结果; (c) 单片式 VR 光学镜头成像结果

4 结语

利用分辨率为 1440×2560 , 对角线尺寸为 5.5in 的 LCD 显示屏作为图像源, 本文设计了一款适用于 VR 头盔显示器, 全视场角为 92° 的两片式光学系统。通过镜头材料的选择以及采用非球面进行优化, 有效地改善了光学系统的调制传递函数, 抑制了边缘视场的畸变和色差, 并且该光学系统具有较高的角分辨率。实验表明, 相比于单片式的 HMD 光学系统, 两片式的 HMD 系统无论是在成像质量, 还是畸变和色差控制方面都有明显的提高。此外, 该光学系统采用塑料透镜, 具有质量轻和结构紧凑的特点, 可应用于新一代 VR 设备。

参 考 文 献

- [1] 曾芬芳. 虚拟现实技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1997.
- [2] LASSE J, FLEMMING K. A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education and training[J]. Education & Information Technologies, 2017(11): 1-15.
- [3] 安兴, 李刚, 徐林伟, 等. 虚拟现实技术在美军模拟训练中的应用现状及发展[J]. 光电与控制, 2011, 18(10): 42-46. AN X, LI G, XU L W, et al. A survey on application of virtual reality Technology in U. S. Military Simulation Training[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(10): 42-46. (in Chinese)
- [4] WANG Y Q, LIU W Q, MENG X X, et al. Development

of an immersive virtual reality head-mounted display with high performance[J]. Appl. Opt, 2016, 55(25): 6769-6977.

- [5] HONG H, HU X D, GAO C Y. A high-resolution optical see-through head-mounted display with eyetracking capability[J]. Opt. Exp, 2013, 21(25): 30993-30998.
- [6] ROLLAND J P. Wide-angle off-axis, see-through head-mounted display[J]. Opt. Eng, 2000, 39(7): 1760-1767.
- [7] CHEN B, HERKOMMER A M. Alternate optical designs for head-mounted displays with a wide field of view[J]. Appl. Opt, 2017, 56(4): 901-906.
- [8] 王士铭, 程德文, 黄一帆, 等. 大视场高分辨率光学拼接头盔显示器的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 062201. WANG S M, CHENG D W, HUANG Y F, et al. Design of wide FOV optical-tiled head-mounted display with high-resolution[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(6): 062201. (in Chinese)
- [9] WANG Q F, CHEN D W, WANG Y T, et al. Design, tolerance, and fabrication of an optical see-through head-mounted display with free-form surface elements[J]. Appl. Opt, 2013, 52(7): C88-C99.
- [10] NEMIRE K. Evaluating an immersive virtual environment prototyping and simulation system[C]. Proc. SPIE, 1997, 3012: 408-416.
- [11] 徐越. 沉浸式虚拟现实头盔显示器光学系统的研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2019. Xu Y. Research of the virtual reality helmet display optical system[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)