

## 折叠光路结构头戴显示器的光学设计

柏香虎, 朱向冰, 庄亚宝, 程芳芳, 许子豪, 朱俊峰

### Optical design of pancake structured head-mounted display

引用本文:

柏香虎, 朱向冰, 庄亚宝, 程芳芳, 许子豪, 朱俊峰. 折叠光路结构头戴显示器的光学设计[J]. *激光技术*, 2024, 48(5): 746–751.

BAI Xianghu, ZHU Xiangbing, ZHUANG Yabao, et al. Optical design of pancake structured head-mounted display[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 48(5): 746–751.

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### 1. 外鼓式热敏CTP制版机光学系统设计

引用本文: 王诗昊, 向阳, 申屠功伟. 外鼓式热敏CTP制版机光学系统设计[J]. *激光技术*, 2023, 47(1): 98–102.

### 2. 测风激光雷达光学参量对相干效率的影响

引用本文: 彭涛, 王茜, 石磊, 等. 测风激光雷达光学参量对相干效率的影响[J]. *激光技术*, 2023, 47(6): 751–756.

### 3. 一种多波长多编码合束输出的新型激光源研究

引用本文: 郑雅文, 陈国胜, 陈文建, 等. 一种多波长多编码合束输出的新型激光源研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(5): 632–638.

### 4. 光纤SPR传感器参数对折射率测量灵敏度的影响

引用本文: 陈强华, 丁锦红, 韩文远, 等. 光纤SPR传感器参数对折射率测量灵敏度的影响[J]. *激光技术*, 2023, 47(3): 329–334.

### 5. 用于高功率径向偏振光的组合轴锥镜设计

引用本文: 王智用, 胡友友, 李波, 等. 用于高功率径向偏振光的组合轴锥镜设计[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 846–851.

文章编号: 1001-3806(2024)05-0746-06

## 折叠光路结构头戴显示器的光学设计

柏香虎, 朱向冰\*, 庄亚宝, 程芳芳, 许子豪, 朱俊峰  
(安徽师范大学 物理与电子信息学院, 芜湖 241002, 中国)

**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且结构轻量化等要求, 采用逆向光路设计方法, 对折叠光路 pancake 结构展开研究; 采用两片透镜进行设计, 进行了理论分析和软件仿真, 对设计的光学系统进行了公差分析。结果表明, 全视场角为  $96^\circ$ 、出瞳直径为 10 mm、出瞳距离为 14.94 mm 时, 在奈奎斯特频率 (20.83 lp/mm) 处调制传递函数 (MTF) 大于 0.2, 最大畸变为  $-26.5\%$ , 最大垂轴色差为  $13.84 \mu\text{m}$ ; 此结构具有更高的 MTF 值、更小的垂轴色差和弥散斑均方根半径, 像差平衡合理。该研究为折叠光路结构的头戴显示器提供了参考。

**关键词:** 光学设计; 头戴显示器; 折叠光路; 虚拟现实

中图分类号: O439; TN873

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2024.05.020

### Optical design of pancake structured head-mounted display

BAI Xianghu, ZHU Xiangbing\*, ZHUANG Yabao, CHENG Fangfang, XU Zihao, ZHU Junfeng  
(School of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China)

**Abstract:** In order to meet the requirements of large field of view, large exit pupil, high imaging quality and light and small structure of virtual reality head-mounted display, a reverse optical path design method was adopted to study pancake structure of a folding optical path. Two lenses were designed for theoretical analysis and software simulation, and the tolerance analysis of the designed optical system was carried out. The results show that the full field Angle is  $96^\circ$ , the exit pupil diameter is 10 mm, the exit pupil distance is 14.94 mm, the modulation transfer function (MTF) is greater than 0.2 at Nyquist frequency (20.83 lp/mm), the maximum distortion is  $-26.5\%$ , and the maximum vertical color difference is  $13.84 \mu\text{m}$ , respectively. This structure has higher MTF value, smaller vertical color difference and root mean square radius of dispersion class, and reasonable aberration balance. This study provides a reference for the folding optical path structure of the head-mounted display.

**Key words:** optical design; head mounted display; folding optical path; virtual reality

## 0 引言

在新的人机交互技术中, 虚拟现实头戴显示器 (virtual reality head-mounted display, VR HMD) 是重要的设备<sup>[1]</sup>。它提供了基本的设施和入口, 并且已经在许多领域得到了广泛的应用<sup>[2-4]</sup>。在现有产品中, 成像质量和体积难以满足用户不断增长的需求<sup>[5-13]</sup>, 为了改进成像质量及减小体积, 国内外开发研究了多种光学结构, 其中折叠光路 pancake 结构能够显著减小体积。在 pancake 结构中光线多次穿过同一光学元件, 可以利用有限数量的透镜实现大视场角、高分辨率, 具有整机体积小、重量轻的优点, 对 pancake 结构 VR HMD 进行优化设计具有重要的意义<sup>[14-15]</sup>。

1969年, LA 申请了应用于沉浸式飞行模拟器的 pancake 结构光学系统的专利<sup>[16]</sup>。2004年, ROEST 设计了一种基于单个透镜和反射型多层偏光

增亮膜的 pancake VR HMD<sup>[17]</sup>。2017年, WONG 等人在 pancake 结构中使用多层双折射偏振反射器<sup>[18]</sup>。2018年, 马德里理工大学的 NARASIMHAN 研制了视场角为  $100^\circ$  的 pancake VR HMD, 但存在大视场角畸变较大、调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 较差等问题<sup>[19]</sup>。2022年, 北京理工大学的 CHENG 等人设计了一款可在屈光度为  $-1 \text{ m}^{-1}$  下实现  $96^\circ$  的对角线视场的 pancake 结构 VR HMD<sup>[20]</sup>。

为了进一步减小 pancake 结构的头戴显示器的体积并提高它的成像质量, 本文中使用两片透镜, 针对不同屈光度, 设计了一种成像质量较好的 pancake 结构 VR HMD。

## 1 设计要求与设计流程

本文中光学系统的主要要求如下: (a) 视场角不小于  $90^\circ$ ; (b) 最大畸变小于  $27\%$ ; (c) 出瞳直径 10 mm; (d) 可调节屈光度在  $0 \text{ m}^{-1} \sim -3 \text{ m}^{-1}$  之间;

\* 通信作者: zxbing@mail.ahnu.edu.cn

收稿日期: 2023-08-04; 修回日期: 2023-09-25

(e) 光学系统总长小于 25 mm, 光学系统重量不超过 25 g。设计流程如图 1 所示。根据任务需求确定图像源; 然后搭建出初始结构, 利用光学设计软件进一步优化, 直至满足需求。

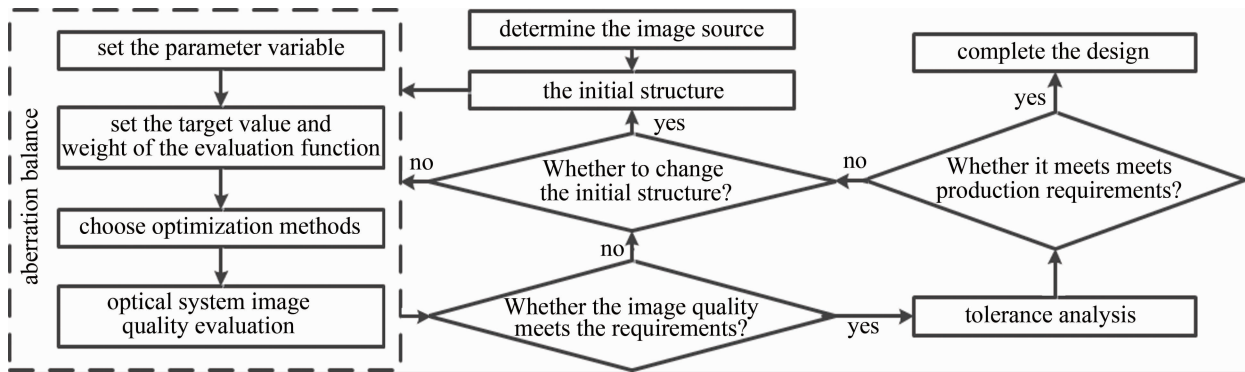


图 1 VR HMD 光学系统设计流程<sup>[11]</sup>

Fig. 1 VR HMD optical structure design flowchart<sup>[11]</sup>

## 2 光学结构设计

### 2.1 图像源

在 HMD 光学结构的设计过程中, 先明确图像源, 再选取适当的初始结构, 然后进行光学系统的优化。在选择图像源时, 重点关注图像源的尺寸、像素数量和亮度。使用以下公式计算图像源的尺寸:  $h = f \times \tan \theta^{[5]}$ , 其中  $h$  为图像源对角线长度的一半;  $f$  是系统的有效焦距;  $\theta$  是半视场角。pancake 结构 HMD 的焦距较小, 图像源尺寸也较小。图像源的像素数量至少是 1600 pixel  $\times$  1600 pixel, 选取一款 a-Si 薄膜电晶体液晶显示器 (thin-film transistor liquid crystal display, TFT-LCD) 作为像源, 主要参数如表 1 所示。

表 1 图像源参数

Table 1 Some parameters of the image source

specification	parameters
resolution	1600 pixel $\times$ 1600 pixel
physical dimension	38.4 mm $\times$ 38.4 mm
display brightness	450 cd/m <sup>2</sup>
contrast	650 : 1
frame frequency	90 Hz
support color	16.7 $\times$ 10 <sup>6</sup> color

根据显示区域尺寸以及分辨率大小, 计算得到像元大小为 24  $\mu\text{m}$ , 进一步计算得到奈奎斯特频率为 20.83 lp/mm, 这是本文中光学结构的最低空间分辨率。

### 2.2 初始结构

参考公开发表的学术论文和专利中的光学结构, 搭建初始结构, 常见的 pancake VR HMD 有单片式<sup>[17]</sup>、双片式<sup>[18]</sup>、三片式<sup>[20]</sup>。

本文中采用两片式结构, 如图 2 所示。像源发出  $s$  光 (线偏振光), 穿过圆偏振器后成为  $l$  光 (左旋圆偏振光), 到达透镜  $L_1$  的半反射面  $S_1$  后, 部分光线透射进入透镜组, 经过透镜  $L_1$  和相位延迟片 (图中使用  $\lambda/4$  波片作为相位延迟片), 成为  $s$  光, 进入透镜  $L_2$ ,  $S_4$  处的偏振反射元件只能透射  $p$  光, 将  $s$  光全部反射向像源方向, 再次经过透镜  $L_2$  和  $\lambda/4$  波片, 成为  $r$  光 (右旋圆偏振光), 进入透镜  $L_1$ , 并被透镜  $L_1$  的半反射面  $S_1$  反射向出瞳, 经过透镜  $L_1$  和  $\lambda/4$  波片后, 成为  $p$  光, 经过透镜  $L_2$  和透射面  $S_4$  处的偏振反射元件, 进入光瞳。上述结构中, 圆偏振器贴合在像源上, 半反射面  $S_1$  可以是曲面,  $\lambda/4$  波片贴合在透镜平面上, 偏振反射元件可以应用在面型复杂的曲面上, 可以在大入射角范围 ( $\pm 60^\circ$ ) 内保持高偏振反射率。此时, 由于  $S_4$  处的偏振反射元件只能透射  $p$  光, 因此偏振光学系统能够有效阻挡直接透射的杂散光。理想情况下, 光线经过其它元件无能量损耗, 由于经过半透半反面两次, 因此能量利用率可以达到 25%。

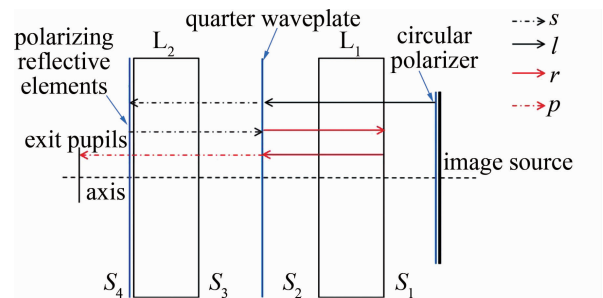


图 2 pancake 结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pancake

搭建初始结构如图 3 所示。初始结构的光瞳直径为 8 mm, 视场角为  $90^\circ$ , 焦距为 34 mm, 总长为 43 mm。

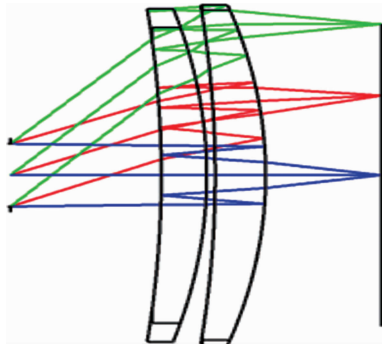


图3 初始结构光路图

Fig. 3 Initial structure light path diagram

### 2.3 优化设计

在初始结构基础上进行分步优化,主要分为以下步骤。

(a)根据设计的视场角和选取屏幕的尺寸进行缩放焦距,初始结构中的视场角为 $90^\circ$ ,满足设计要求中视场角的最低值,为了确保满足参数指标,在设计时将视场角设为 $96^\circ$ ,根据公式计算出焦距为 $24.449\text{ mm}$ ;通过光学设计软件的缩放功能,将初始结构的焦距缩放到 $24.449\text{ mm}$ ,此过程会导致光瞳等成比例缩放,在后续优化中再逐步改变光瞳的大小。

(b)采用远心光路减小辐辏冲突<sup>[21]</sup>,根据逆向光路设计法(此时像就是图中的像源)在屈光度为 $-2\text{ m}^{-1}$ 情况下进行优化,控制像源面的入射角不大于 $3^\circ$ ,并控制焦距不变,优化各光学元件表面的曲率半径、厚度等。

(c)将面 $S_3$ 设置为偶次非球面,进一步减小像差,并将透镜材料设置成替代模式,在树脂玻璃库中,采用锤型优化进而减轻重量,优化后透镜材料为OKP-4和ARTON\_D4531。

(d)在光学设计的多重组态编辑器里构建4个组态,并在评价函数编辑器里添加各个组态的评价函数开始优化,改变透镜的曲率和厚度,直至MTF、透镜厚度满足设计要求。优化完成后,对角线视场为 $96^\circ$ ,光瞳直径为 $10\text{ mm}$ ,光瞳距离为 $14.94\text{ mm}$ ,厚度为 $19.8\text{ mm}$ ,单目光学系统透镜重量 $16.9\text{ g}$ 。

图4是优化后,屈光度为 $-2\text{ m}^{-1}$ 情况下的VR HMD单目光学结构。其它屈光度下的光学结构与图4类似,仅仅是像源的位置稍有移动。图中 $S_3$ 为偶次非球面,最高为10次方项。

表2中列出了优化后屈光度为 $-2\text{ m}^{-1}$ 情况下的VR HMD光学系统的面型结构参数,单位是 $\text{mm}$ 。表中的stop(光阑)面、面2、面3、面4、面5、image(像面)面分别对应图4中的光瞳、 $S_4$ 、 $S_3$ 、 $S_2$ 、 $S_1$ 、像源。

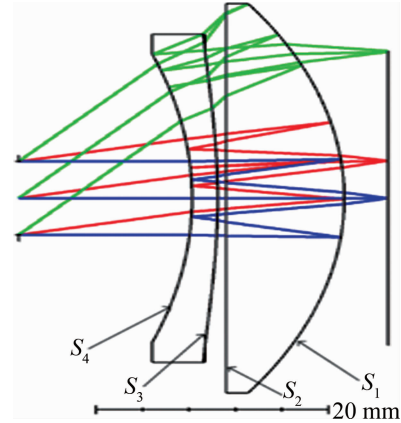


图4 单目光学结构

Fig. 4 Monocular optical structure

表2 VR HMD 透镜数据

Table 2 Lens data of VR HMD

surface	radius/mm	thickness/mm	glass
object	infinity	-500	
stop	infinity	14.94	
2	-57.869	2.20	OKP-4
3	-144.661	0.74	
4	infinity	10.17	ARTON_D4531
5	-46.594	2.75	
image	infinity		

面3为偶次非球面,圆锥系数为 $-100$ ,4次项系数为 $-2.525 \times 10^{-6}$ ,6次项系数为 $-1.096 \times 10^{-8}$ ,8次项系数为 $-2.183 \times 10^{-11}$ ,10次项系数为 $1.942 \times 10^{-14}$ 。

object面(人眼看到的像)都在stop面的右侧,不同屈光度对应的距离不一样,相应的image面到面5的距离也不一样,表3中给出了它们之间的对应关系。

表3 结构参数

Table 3 Structural parameters

diopeter/ $\text{m}^{-1}$	actual virtual image distance/mm	distance from $S_1$ to the image source/mm
0	infinity	3.75
-1	1000	3.24
-2	500	2.75
-3	333.333	2.27

### 3 像质评价

优化完成后VR HMD光学系统的MTF曲线如图5所示。最大空间频率( $20.83\text{ lp/mm}$ )为奈奎斯特频率。与参考文献[20]中使用了3片透镜、空间频率只达到了 $10.4\text{ lp/mm}$ 的光学结构相比,屈光度为无穷且 $-3\text{ m}^{-1}$ 下满足最小视场角 $90^\circ$ ,实现屈光度为 $-1\text{ m}^{-1}$ 与 $-2\text{ m}^{-1}$ 下最大视场角为 $96^\circ$ 。本文中采用两片透镜,得到的光学结构的MTF明显优于该文献。

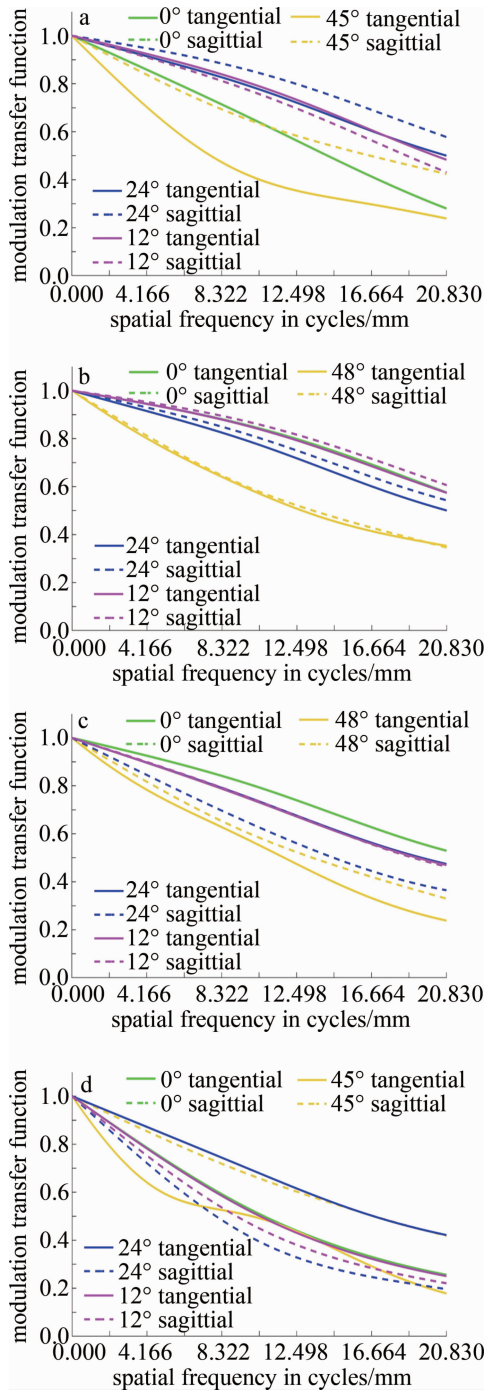


图5 MTF 曲线图

a—屈光度为无穷 b—屈光度为  $-1 \text{ m}^{-1}$  c—屈光度为  $-2 \text{ m}^{-1}$  d—屈光度为  $-3 \text{ m}^{-1}$

Fig. 5 MTF curve

a—diopter of  $\infty$  b—diopter of  $-1 \text{ m}^{-1}$  c—diopter of  $-2 \text{ m}^{-1}$  d—diopter of  $-3 \text{ m}^{-1}$

从图6中可以看到,屈光度为无穷和  $-3 \text{ m}^{-1}$  的情况下弥散斑均方根(root mean square, RMS)光斑半径较大,分别达到  $43.92 \mu\text{m}$ 、 $43.86 \mu\text{m}$ ;屈光度为  $-1 \text{ m}^{-1}$  和  $-2 \text{ m}^{-1}$  的像质稍好,RMS 不超过  $39.88 \mu\text{m}$ 、 $40.31 \mu\text{m}$ 。最大光斑半径:无穷远对应的  $43.92 \mu\text{m}$ ,相比明显优于参考文献[20]。

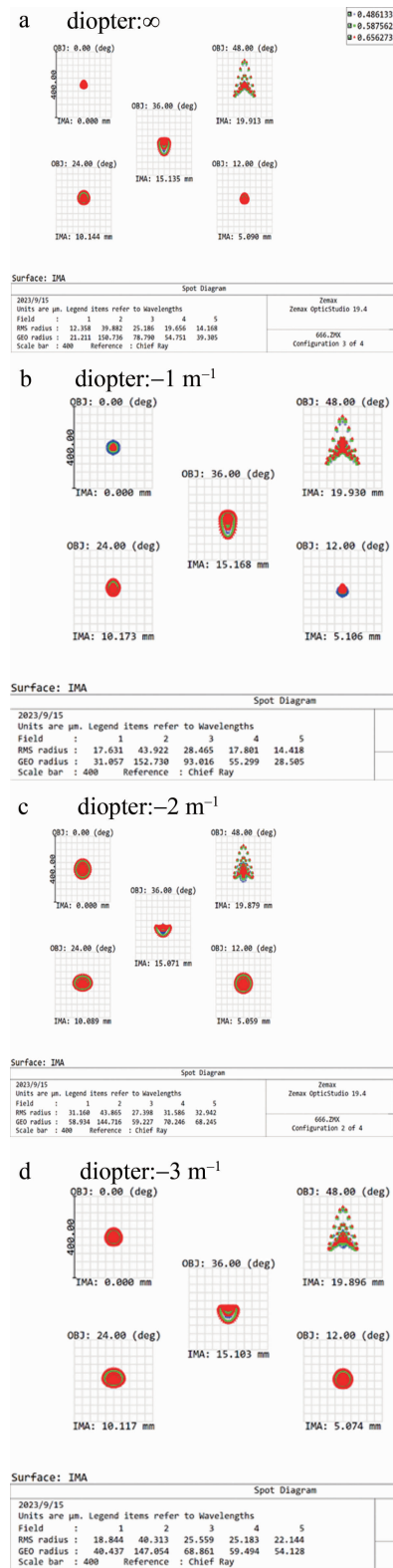


图6 点列图

Fig. 6 Spot diagram

图7是屈光度为  $-3 \text{ m}^{-1}$  时的畸变图,各个屈光度的畸变几乎一致。光学系统的最大畸变为  $-26.5\%$ ,在屈光度为无穷的最大视场处,与参考文献[20]中的  $-24\%$  接近。



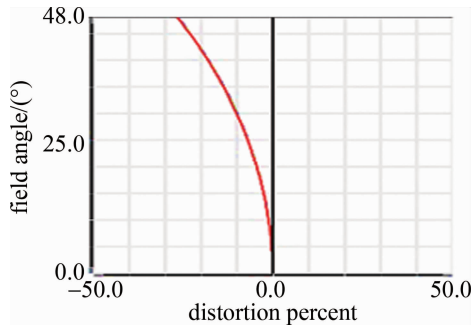
图7 屈光度为  $-3 \text{ m}^{-1}$  的情况下的畸变曲线Fig. 7 Distortion with diopter of  $-3 \text{ m}^{-1}$ 

图8为优化后各屈光度下的场曲,各屈光度下的场曲都比较小。由图8可见,光波长分别为486.1 nm、

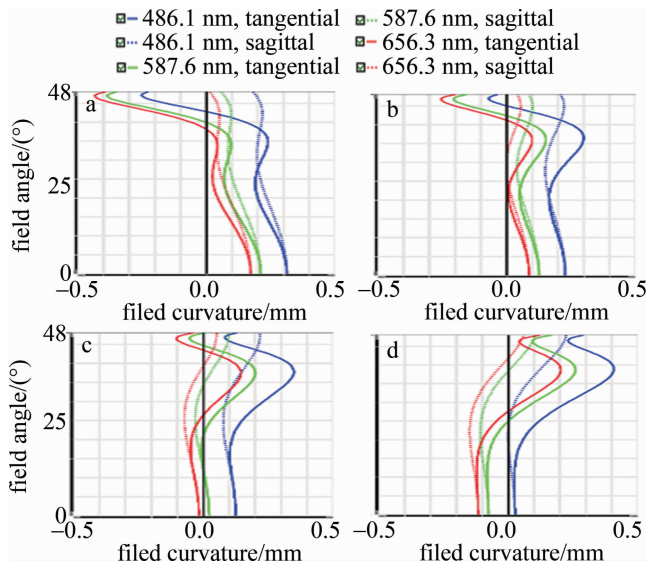


图8 场曲曲线图

Fig. 8 Field curvature

587.6 nm、656.3 nm 优化后各屈光度下的场曲。

由图9可见,光波长分别为486.1 nm、587.6 nm、656.3 nm 优化后的光学系统的垂轴色差曲线图,各个屈光度的垂轴色差几乎一致,最大的垂轴色差为  $13.84 \mu\text{m}$ , 小于1个像素尺寸 ( $24 \mu\text{m}$ )。

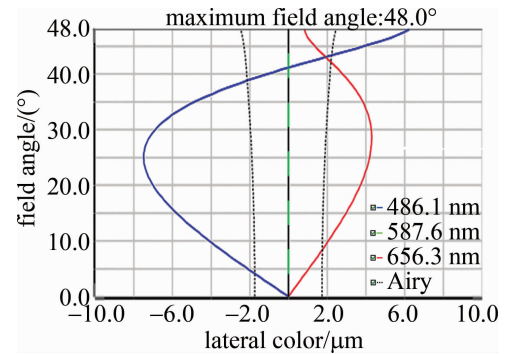


图9 垂轴色差曲线图

Fig. 9 Lateral chromatic aberration curve

## 4 公差分析

合理的公差分配可以降低加工装配难度,减低成本。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。表4中是公差分配数据。

在光学设计软件公差编辑器中设置公差,在公差分析窗口中选取敏感度分析方法,每个组态进行500次蒙特卡罗(Monte Carlo)分析,计算各组态/视场的20.83 lp/mm 频率处的MTF平均值。光学设计软件给出的结果如表5所示。

表4 光学系统的公差

Table 4 Tolerance distribution of optical system

surface	surface tolerances					material tolerances		element tolerance	
	peak-to-valley value/ $\mu\text{m}$	radius/mm	thickness/mm	decenter X/Y/mm	tilt X/Y/ $^\circ$	index	Abbe/%	decenter X/Y/mm	tilt X/Y/ $^\circ$
$S_1$	0.587	$\pm 0.02$	$\pm 0.02$	$\pm 0.01$	$\pm 0.03$	$\pm 0.001$	$\pm 1$	$\pm 0.02$	$\pm 0.03$
$S_2$	0.6	$\pm 0.02$	$\pm 0.02$	$\pm 0.01$	$\pm 0.03$	$\pm 0.001$	$\pm 1$	$\pm 0.02$	$\pm 0.03$
$S_3$	0.587	$\pm 0.02$	$\pm 0.02$	$\pm 0.01$	$\pm 0.03$	$\pm 0.001$	$\pm 1$	$\pm 0.02$	$\pm 0.03$
$S_4$	0.587	$\pm 0.02$	$\pm 0.02$	$\pm 0.01$	$\pm 0.03$	$\pm 0.001$	$\pm 1$	$\pm 0.02$	$\pm 0.03$

表5 公差分析结果

Table 5 Probability after Monte Carlo operation

Monte Carlo analysis/%	average value of MTF
>90	0.329
>80	0.331
>50	0.336
>20	0.335
>10	0.336

## 5 结论

本文中设计一款 pancake 结构的 VR HMD, 采用两片透镜, 设计使用了塑料透镜和1个非球面以及3个偏振元器件, 减小了直通式杂散光。为减少偏振元器件所增加的重量, 将偏振反射元件用偏振反射膜替代, 使用聚合物相位延迟膜贴合在透镜的平面  $S_2$  上。光学透镜系统厚度应在 20.2 mm 左右, 单目光学系统透镜重量小于 17.3 g。整体采用远心光路结构, 并

进行了光学系统的公差分析,公差满足加工要求。与参考文献[20]相比,本文中少使用了1片透镜和1个非球面,但成像质量更好。当空间频率不大于20.83 lp/mm时,MTF值大于0.2,最大畸变为-26.5%。本文中的设计结果具有更高的MTF值、更小的垂轴色差和RMS光斑半径。

### 参 考 文 献

- [1] WANG W X, ZHOU F, WAN Y L, *et al.* A survey of metaverse technology [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(4): 744-756 (in Chinese).  
王文喜,周芳,万月亮,等.元宇宙技术综述[J].*工程科学学报*, 2022, 44(4): 744-756.
- [2] HAN D D, BERGS Y, MOORHOUSE N. Virtual reality consumer experience escapes: Preparing for the metaverse [J]. *Virtual Real*, 2022, 26(4): 1443-1458.
- [3] WANG T J. Application and prospect forecast of VR/AR technology in education [J]. *Digital Education*, 2017, 3(1): 1-10 (in Chinese).  
王同聚.虚拟和增强现实(VR/AR)技术在教学中的应用与前景展望[J].*数字教育*, 2017, 3(1): 1-10.
- [4] LIU Y, HU B H, YIN H H, *et al.* How can immersive VR environment achieve deeply oriented learning engagement: Study on learning effects in complex task-solving situations[J]. *Journal of Distance Education*, 2021, 39(4): 72-82 (in Chinese).  
刘妍,胡碧皓,尹欢欢,等.虚拟现实(VR)沉浸式环境如何实现深度取向的学习投入?——复杂任务情境中的学习效果研究[J].*远程教育杂志*, 2021, 39(4): 72-82.
- [5] LI P F, ZHU X B, CHEN Zh Zh. Optical design of light and small head-mounted display [J]. *Laser Technology*, 2021, 45(2): 202-207 (in Chinese).  
李鹏飞,朱向冰,陈壮壮.轻小型头戴显示器的光学设计[J].*激光技术*, 2021, 45(2): 202-207.
- [6] 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).  
陆驰豪,李海峰,高涛,等.基于拼接的大视场虚拟现实头戴显示装置[J].*光学学报*, 2019, 39(6): 0612002.
- [7] SAHINF E. Design of hybrid refractive/diffractive lenses for wearable reality displays[J]. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2019, 7(1): 94-98.
- [8] LI P F. Research on optical structure of virtual reality head mounted display[D]. Wuhu: Anhui Normal University, 2021: 40 (in Chinese).  
李鹏飞.头戴显示器产品中的光学系统设计研究[D].芜湖:安徽师范大学, 2021: 40.
- [9] DONG Zh Ch. Research on real walking and wandering in large scenes in virtual reality[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020: 2-7 (in Chinese).  
董智超.虚拟现实中的大场景真实行走漫游研究[D].合肥:中国科学技术大学, 2020: 2-7.
- [10] LI Sh Ch, QI Zh T. Design of attitude tracking system for virtual reality head-mounted display based on arduino [J]. *Integrated Circuit Applications*, 2021, 38(1): 74-75 (in Chinese).  
李舒驰,齐占涛.基于Arduino的虚拟现实头戴显示器姿态跟随系统设计[J].*集成电路应用*, 2021, 38(1): 74-75.
- [11] ZHUANG Y B, ZHU X B, LIU J, *et al.* Optical structure design of virtual reality head-mounted display with large-field[J]. *Laser Technology*, 2022, 46(4): 486-491 (in Chinese).  
庄亚宝,朱向冰,刘杰,等.大视场虚拟现实头戴显示器光学结构设计[J].*激光技术*, 2022, 46(4): 486-491.
- [12] CHEN Zh Zh, ZHU B, GONG M Y, *et al.* Design of immersive head-mounted display optical system[J]. *Laser Technology*, 2021, 45(4): 470-474 (in Chinese).  
陈壮壮,朱标,宫明艳,等.沉浸式头戴显示器光学系统设计[J].*激光技术*, 2021, 45(4): 470-474.
- [13] WANG Y Q. Research on the key technology of immersion head-mounted display optical system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018: 20 (in Chinese).  
王蕴琦.沉浸式头戴显示光学系统关键技术研究[D].长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018: 20.
- [14] HOU Q C, CHENG D W, LI Y, *et al.* Stray light analysis and suppression method of a pancake virtual reality head-mounted display [J]. *Optics Express*, 2022, 30(25): 44918-44932.
- [15] PENG F L, CHEN D, KIM C, *et al.* Display panel with backreflection suppression comprising first and second birefringent layers and a reflectivity layer: US, 11493800[P]. 2022-11-08.
- [16] LA R J. Infinite optical image-forming apparatus: US, 3443858[P]. 1969-05-13.
- [17] ROEST W. Head-mounted display with a polarization-dependent mirror: US, 6710928[P]. 2004-03-23.
- [18] WONG T L, YUN Z S, AMBUR G, *et al.* Folded optics with birefringent reflective polarizers[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2017, 10335: 84-90.
- [19] NARASIMHAN B A. Ultra-compact pancake optics based on thin-eyes super-resolution technology for virtual reality headsets[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2018, 10676: 359-366.
- [20] CHENG D W, HOU Q C, LI Y, *et al.* Optical design and pupil swim analysis of a compact, large EPD and immersive VR head mounted display[J]. *Optics Express*, 2022, 30(5): 6584-6602.
- [21] SUN L T. Design of helmet display based on free-form surface[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020: 27-28 (in Chinese).  
孙路通.基于自由曲面的头盔显示器设计[D].长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020: 27-28.