

光学学报

超短焦偏振折反射虚拟现实镜头设计方法

程德文^{1,2*}, 黄逸伦^{1,2}, 李阳^{1,2}, 侯起超^{1,2}, 李丹阳^{1,2}, 张甜^{1,2}, 陈海龙^{1,2}, 王涌天^{1,2}

¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;

²北京市混合现实与新型显示工程技术研究中心, 北京 100081

摘要 超短焦偏振折反射虚拟现实(VR)镜头是新兴的近眼显示光学解决方案,能满足用户对大视场、大出瞳和高清晰度的需求。本文详述了超短焦偏振折反射VR镜头的光路原理,说明了偏振折反射VR光学方案相较于传统VR光学方案的优势,并研究了低应力镜片的设计方法。为增加设计自由度,提出将非球面转化为环形拼接非球面,并介绍了拼接非球面的数学描述与优化策略。针对不同视场的像质差异问题,引入了像质自动平衡优化算法。采用上述方法先后设计了47°视场角和96°视场角的两款超短焦偏振折反射VR镜头,在像质平衡优化后,全视场调制传递函数值较采用普通非球面的系统提升了0.35以上。研究结果证明了环形拼接非球面在VR镜头设计中的可行性与高自由度优势,并体现了像质平衡优化算法的实用性。介绍了超短焦偏振折反射VR镜头的研发流程,原理样机的测试结果验证了该光学系统的良好显示性能。本文提出的设计方法对VR近眼显示设备的高清化与轻量化发展具有指导意义。

关键词 光学设计; 虚拟现实; 近眼显示; 拼接非球面; 超短焦偏振折反射镜头

中图分类号 O435

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230757

1 引言

虚拟现实(VR)与增强现实(AR)技术是元宇宙(Metaverse)^[1]的重要入口,是实现“无屏”显示与交互的关键技术,同时也是公认的继计算机、手机之后的下一代计算平台^[2-3],广泛应用于军事模拟^[4]、导航^[5]、医疗^[6]、教育培训^[7-8]、生产制造^[9]和游戏娱乐^[10]等领域。其中,VR技术能够隔绝外界因素的干扰,呈现出独立于现实世界之外的数字化世界^[11],为用户带来深度的沉浸感^[12-13]。在VR技术的众多载体之中,近眼显示设备以其便携性独树一帜,而光学系统是承载其视觉信息的核心组分。

随着光学设计、精密加工、显示技术的飞速发展,用户对VR近眼显示设备提出了更高的体验需求。在视觉体验方面,VR光学系统应具备尽量大的视场角和细腻的显示画面以营造高度的沉浸感;为适应不同的观察者,VR光学系统还需具备较大的出瞳直径和出瞳距离。另一方面,为了改善用户的佩戴体验,VR光学系统需要有紧凑的结构和轻巧的质量^[14-16]。因此,大视场、轻薄化、高清晰度以及大出瞳成为VR技术的主要发展趋势,但以上指标之间往往相互掣肘,难以同时满足^[17]。

VR光学方案的发展主要经历了三个阶段:非球面直透式光学方案、菲涅耳光学方案和超短焦偏振折反射光学方案。早期的非球面直透式光学方案在大出瞳和大视场角的指标下会牺牲系统清晰度^[18],体积和质量也大幅增加,并且由于表面自由度的大程度利用,光学面型反复弯曲,像面的主光线发射角大,照度均匀性不佳,甚至出现“瞳游”现象,即人眼在eye box(译为“眼盒”,指的是人眼在观看近眼显示设备时可见最清晰图像的一块锥形活动区域)内移动,图像的成像质量,尤其是畸变发生变化,从而产生类似“游动感”的现象^[19]。菲涅耳光学方案虽然能实现更轻的镜片质量和更广的视场角^[20-21],但系统光学总长仍然较大,且存在环形“伪像”。在产品方面,Sony公司^[22]于2016年发布了采用传统非球面直透式光学方案的PS VR,其视场角约100°,单目分辨率为1920 pixel×1080 pixel,整机质量达到600 g,在长时间佩戴后可能会导致不适。在目前采用菲涅耳光学方案的VR设备中,质量最轻的Oculus Quest 2也依然超过了500 g,其视场角约100°,单目分辨率为1832 pixel×1920 pixel^[23]。

相较之下,超短焦偏振折反射光学方案主要由透镜、偏振元件、相位延迟片等构成^[24-26]。该方案通过调控光线传输过程中的偏振态,使光线在较短的空间内

收稿日期: 2023-03-30; 修回日期: 2023-05-16; 录用日期: 2023-05-22; 网络首发日期: 2023-06-30

基金资助: 国家重点研发计划(2021YFB2802100)、北京市科学技术委员会和中关村科技园区管理委员会资助项目(Z221100006722011)

通信作者: *cdwlxk@bit.edu.cn

进行多次折反,可将光学模组的质量和体积至少缩小至菲涅耳方案的 $1/2\sim 1/3$;光学面的复用减轻了每个光学面的光焦度压力,进而得到平缓的光学面型和较小的光线入射角,提高了成像质量和像面照度均匀性。在产品方面,2022年发布的Pico4(采用超短焦偏振折反射光学方案)视场角达到 105° ,主机质量小于300 g,较Pico3(采用菲涅耳光学方案)的视场角提升7%,质量减少26%,厚度减少39%,光学清晰度提升近86%,实现了佩戴体验和视觉体验的双重提升^[27]。总的来看,超短焦偏振折反射光学系统能兼顾大视场、大出瞳、超轻薄、高清晰度、高亮度均匀性等光学指标,并提升佩戴舒适度与美观性,成为VR近眼显示设备的主流光学方案,对超短焦偏振折反射镜头的研究可以进一步推动VR技术的高清化、轻量化和市场化发展。

结构形式的创新和膜材工艺的提高是加速超短焦偏振折反射光学系统突破瓶颈的重要因素。超短焦偏振折反射光学方案最初由美国科学家LaRussa^[28]于1969年提出。在其1978年发表的论文中,超短焦偏振折反射光学系统的反射腔采用了一个平面分束器与一个全息反射镜^[29]。然而,该光学系统存在光能利用率较低及杂散光问题^[30-33]。在之后的研究中,为提高光效,Lacroix^[34]将初始设计中的平面分束器改为3M反射偏振器;2004年,Huxford^[35]使用平面线栅偏振器代替了平面分束器。2017年,3M公司的Wong等^[32]使用弯曲的聚合物、双折射、多层反射偏振器以实现像差校正,并且搭建了视场角为 70° 、总长约32 mm的全彩色两片式超短焦偏振折反射VR镜头原理样机。2021年, Lee团队^[20]采用菲涅耳透镜阵列和菲涅耳透镜作为准直和聚焦透镜,并利用光场分析,实现了视场角为 102° 的轻薄型超短焦偏振折反射VR系统,但是该系统像差较大,存在串扰。2022年,北京理工大学程德文团队^[26,36]对超短焦偏振折反射光学系统的“瞳游”和杂光等关键问题进行了系统分析讨论,并设计了一款视场角为 96° 、总长小于20 mm的超短焦偏振折反射VR镜头原理样机,表现出良好的性能和工艺性。然而,目前的超短焦偏振折反射方案大多关注于偏振技术的改良,镜片多采用普通非球面,并未对该系统的像质高清化做进一步探索,亟需相关的优化设计方法指导超短

焦偏振折反射VR镜头设计。

本文提出了一种带有环形拼接非球面的超短焦偏振折反射VR镜头设计方法,详细介绍了超短焦偏振折反射VR镜头的光路原理和偏振原理,明确了该方案的优势和关键问题。为抑制光学元件残留应力双折射导致的杂散光,提高成像对比度,通过光焦度公式对镜片的曲率分配进行推导,得到面型平缓的镜片组合,从而在设计过程中降低镜片应力。针对超短焦偏振折反射VR镜头,创新性地将普通非球面转化为环形拼接非球面以提高设计自由度,并讨论了环形拼接非球面的优化策略。针对不同视场的像质差异,编写了基于误差评价函数的像质自动平衡优化算法,实现全视场像质均衡。结合三个优化策略,设计得到一款小视场角和一款大视场角的带有环形拼接非球面的超短焦偏振折反射VR镜头,相较普通非球面超短焦镜头,边缘视场的像差明显减小,具有优良的像质与微小的畸变。设计结果验证了环形拼接非球面的可行性,显示出环形拼接非球面为VR镜头带来的高自由度,同时验证了像质平衡优化算法对中高视场VR镜头具有良好的像质均衡与提升效果。最终展示了超短焦偏振折反射VR镜头的研发流程和一款原理样机,实验测试结果展示出该样机高清晰、高色彩还原度的显示性能,验证了前文所述设计及加工方法的有效性。

2 超短焦偏振折反射VR镜头的光学原理

超短焦偏振折反射VR镜头通过折叠光路来有效减小近眼显示器的系统厚度,示意图如图1(a)所示,其中至少存在2个反射面,以确保光线在光学系统中形成折反光路,使得光在两个反射面(S1、S2)之间传输三倍的光程,但只占用一倍光程的物理空间。这种光学解决方案可以同时实现三个重要指标:大视场角、大出瞳直径和短焦距,相应的 F 数能达到2.3,这对于传统VR光学系统而言一般很难实现。在此前文献中^[26],本文作者团队曾在532 nm波长下简单设计了一个单透镜折反射系统和一个单透镜折射式系统来探究二者产生上述差异的原因,如图1所示,两种透镜的厚度、焦距、出瞳直径均相等。

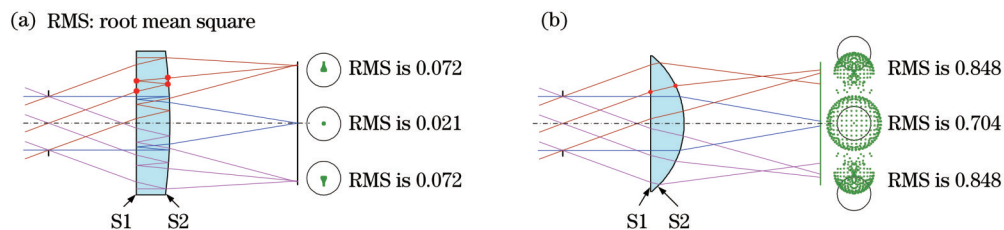


图1 设计对比。(a)折反射镜头设计示意图和光斑图;(b)传统透射镜头设计示意图和光斑图

Fig. 1 Design comparison. (a) Schematic diagram and spot diagram of catadioptrical lens design; (b) schematic diagram and spot diagram of traditional transmission lens design

假定透镜的 S1 面为平面,两个单透镜的光焦距近似表示为

$$\phi = (3n - 1)c_2, \quad (1)$$

$$\phi' = (n' - 1)c'_2, \quad (2)$$

$$c'_2/c_2 = (3n - 1)/(n' - 1), \quad (3)$$

式中:S2面的曲率分别为 c_2 和 c'_2 ;两个透镜的折射率分别为 n 和 n' 。假设 $n=n'=1.5$,则在透镜光焦距一致条件下,折反射系统的 c'_2 大约比 c_2 大6倍,这意味着折反射系统中的反射面承担了大部分光焦距,可以显著降低其他光学面的曲率,进而获得更平缓的光学表面。从图1中还可以看出,传统折射式系统的均方根(RMS)半径在0.704 mm以上,而折反射系统得益于光学面的复

用,其像面光斑RMS半径大约是前者的1/10,成像质量明显提升。若采用多波长进行设计,由于反射面不会引入色差,折反射系统的成像质量优势还会进一步增大。

虽然超短焦偏振折反射VR镜头有诸多优点,但在实际研发过程中,仍有一些关键问题需要解决,比如偏振元件的选择。图2所示为一种三片式超短焦偏振折反射VR镜头,假设系统中的反射/分光面S2和S6均采用传统半透半反膜,系统中则会存在强烈的直透式杂光,如图中下方虚线光束所示,显示器上的部分光线将直接透过S6和S2,进入人眼,导致在人眼看见折反光路所成大幅虚像的同时,叠加亮度更强的杂光虚像,严重影响观影体验^[36]。

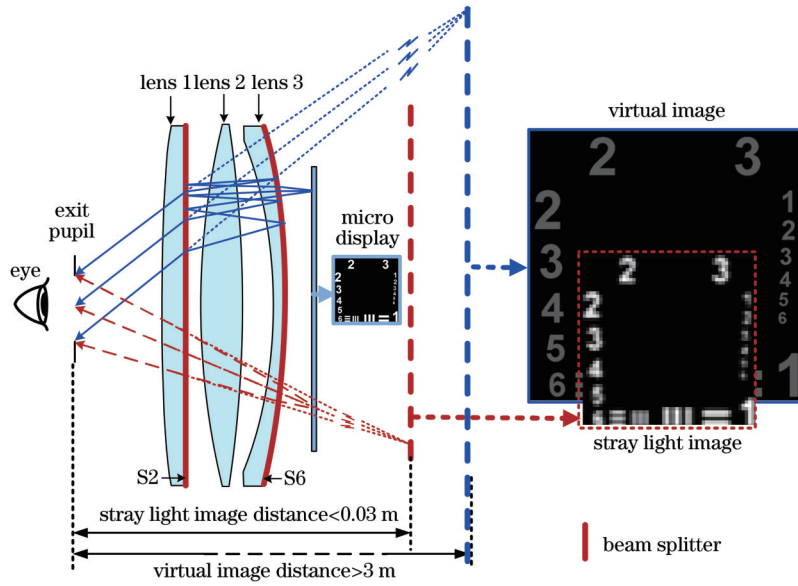


图2 基于半透半反膜的超短焦折反射VR镜头系统正常成像光路与直透式杂光光路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of normal imaging light path and straight-through stray light path within ultrashort focal polarization catadioptric VR lens system based on semi transparent and semi reflective film

假设两个分光面均为半透半反膜,且所有透镜均无能量损失,则正常放大虚像的光学效率、直透式杂光的光学效率,以及二者的对比度分别计算如下:

$$\eta_{\text{image}} = T_6 \times R_2 \times R_6 \times T_2, \quad (4)$$

$$\eta_{\text{straylight}} = T_6 \times T_2, \quad (5)$$

$$\frac{\eta_{\text{straylight}}}{\eta_{\text{image}}} = \frac{1}{R_2 \times R_6}, \quad (6)$$

式中: T_2 是光线经过S2面的透过率; R_2 是S2面的反射率; T_6 是S6面的透过率; R_6 是S6面的反射率; η_{image} 为系统能量利用率; $\eta_{\text{straylight}}$ 为系统杂光效率。又因为两个分光面均为半透半反,即 $T_2=R_2=T_6=R_6=50\%$,故

$$\frac{\eta_{\text{straylight}}}{\eta_{\text{image}}} = \frac{1}{R_2 \times R_6} = 4. \quad (7)$$

因此,如果两个分光面都是半透半反膜,则直透式杂散光的亮度是正常折反光路所成虚像亮度的4倍,并且由于杂光图像位于人眼观看正常虚像画面的视野范围内,会严重影响用户体验。

对于上述问题,引入偏振光学元件则可以在理论上消除直透式杂散光,比如在S2面上采用偏振光学元件替代一般分光面,控制光线在传输过程中的偏振态,令光线第一次到达S2面时全部反射,第二次到达S2面时全部透射。具体的光线偏振态调控原理如图3所示,光线从圆偏光显示器出射[假设为左旋圆偏光(LCP)],依次经过S6面上的半透半反膜和lens 2,此时依然为LCP光,通过1/4波片(QWP)后变为垂直线偏光(S光),然后第一次到达S2面处的反射偏振器,此时光线偏振方向与反射偏振器的偏振方向垂直,故无法透射,而是被反射回镜组内,并保持偏振态不变,再次通过QWP后变成LCP光,到达S6面后被反射,此时偏振态变为右旋圆偏光(RCP),第三次经过QWP后变成水平线偏光(P光)并从S2面处的反射偏振器透射,最终到达出瞳进入人眼。如图3所示,该偏振光学系统能有效阻挡杂散光的直接透射。理想情况下,能量利用率可以达到25%。

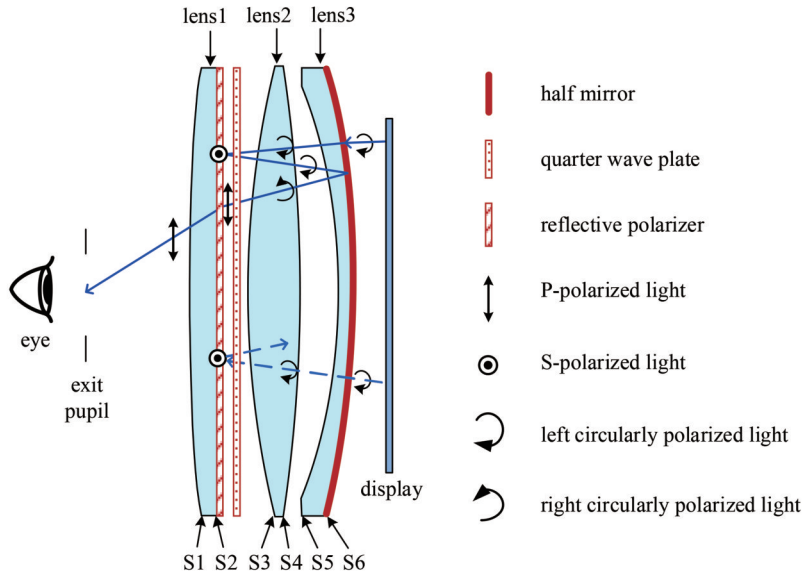


图 3 超短焦折反射 VR 镜头系统光线偏振态调控原理图^[26]

Fig. 3 Schematic diagram of light polarization state regulation within ultrashort focal polarization catadioptric VR lens system^[26]

3 超短焦偏振折反射 VR 镜头的设计方法

3.1 低应力镜片的光焦度分配策略

超短焦偏振折反射 VR 镜头中一般包含 1~3 个镜片,为了满足较高的光学性能要求,本文采用 3 个镜片来实现光学系统设计。对于偏振折反射系统而言,在设计阶段需要考虑杂散光的抑制问题,以保证镜头具有更高的成像清晰度和对比度。在此前的研究中^[26,36],发现除了直透式杂散光之外,还受到所选用树脂材料本身特性、注塑工艺参数和镜片形状等多种原因的影响,该系统可能存在光学元件残留应力双折射导致的杂散光,对最终模组的成像效果影响很大。在光学设计阶段,可以通过选择低应力的材料和控制镜片的形状来降低树脂镜片应力。对于镜片的形状而言,需要约束光学镜片中心厚与边缘厚的比值,同时,控制镜片曲率一阶导数和二阶导数,镜片边缘厚度大于 1.5 mm,中心厚度在 1~6 mm 之间,以保证镜片平缓且匀称。

为了得到相对平缓的镜片组合,以如图 4 所示的三片式超短焦折反射 VR 镜头为例,依据薄透镜光焦度公式和透镜组合光焦度公式,对系统的光焦度分配方法进行推导,从而确定各个镜片表面的曲率取值范围。在计算过程中,将整个系统根据其光线的入射顺序,拆解为多个单透镜的组合形式,根据光线从显示器发出到入瞳的顺序,分别为 lens 3 的透射光焦度、lens 2 的透射光焦度、lens 1 的反射光焦度、lens 2 的透射光焦度、lens 3 的透射光焦度、lens 3 的反射光焦度、lens 2 的透射光焦度、lens 1 的透射光焦度。先将 lens 3 的透射光焦度、lens 2 的透射光焦度看成一个透镜组,利用透镜组合公式,计算出该透镜组的光焦度。接下来将该光焦度作为一个新的透镜,与 lens 1 的反射光焦度形成透镜组,重新计算其光焦度。以此类推,直到将所有透镜的光焦度计算完毕。其中,为了简化计算和降低系统的复杂程度,假设所有的镜片都是薄透镜,并且假设第一片镜片的 S2 面为平面;第二片镜片的表面 S3 和 S4 的曲率相等,符号相反;第三片镜片的表面 S5 和 S6 的曲率相等,即 lens 3 在透射状态下无任何光焦度,仅在反射情况下具备光焦度。

最终得到三片式超短焦偏振折反射 VR 系统的总光焦度^[26]为

最终得到三片式超短焦偏振折反射 VR 系统的总光焦度^[26]为

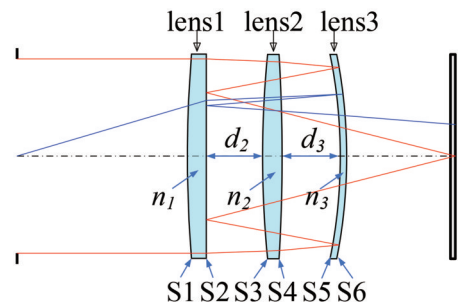


图 4 三片式超短焦折反射 VR 镜头光路图^[26]

Fig. 4 Optical path diagram of three-slice ultrashort focal polarization catadioptric VR lens^[26]

$$\begin{aligned} \Phi = & \phi_1 + 3\phi_2 + \phi_3 + 2d_2^2 d_3^2 \phi_1 \phi_2^3 \phi_3 - 2d_2^2 d_3 \phi_1 \phi_2^3 - 2d_2^2 d_3 \phi_1 \phi_2^2 \phi_3 - 3d_2 d_3^2 \phi_1 \phi_2^2 \phi_3 - 2d_2 d_3^2 \phi_2^3 \phi_3 + \\ & 2d_2^2 \phi_1 \phi_2^2 + 3d_2 d_3 \phi_1 \phi_2^2 + 3d_2 d_3 \phi_1 \phi_2 \phi_3 + 2d_2 d_3 \phi_2^3 + 4d_2 d_3 \phi_2^2 \phi_3 + d_3^2 \phi_1 \phi_2 \phi_3 + d_3^2 \phi_2^2 \phi_3 - \\ & 3d_2 \phi_1 \phi_2 - 4d_2 \phi_2^2 - 2d_2 \phi_2 \phi_3 - d_3 \phi_1 \phi_2 - d_3 \phi_1 \phi_3 - d_3 \phi_2^2 - 2d_3 \phi_2 \phi_3, \end{aligned} \quad (8)$$

式中： ϕ_1 和 ϕ_2 分别为镜片 lens 1 和 lens 2 的光焦度； ϕ_3 是 lens 3 在反射模式下的光焦度； d_2 是 lens 1 和 lens 2 之间的距离； d_3 是 lens 2 和 lens 3 之间的距离。进一步

假设镜片之间距离相等，即 $d_2=d_3$ ，则整个光学系统光焦度^[26]可以描述为

$$\Phi = \phi_1 + 3\phi_2 + \phi_3 + 2d_3^4\phi_1\phi_2^3\phi_3 - 2d_3^3\phi_1\phi_2^3 - 5d_3^3\phi_1\phi_2^2\phi_3 - 2d_3^3\phi_2^3\phi_3 + 5d_3^2\phi_1\phi_2^2 + 4d_3^2\phi_1\phi_2\phi_3 + 2d_3^2\phi_2^3 + 5d_3^2\phi_2^2\phi_3 - 4d_3\phi_1\phi_2 - d_3\phi_1\phi_3 - 5d_3\phi_2^2 - 4d_3\phi_2\phi_3 \quad (9)$$

从以上方程可以得出，光学系统的主要光焦度由 ϕ_1 、 $3\phi_2$ 和 ϕ_3 提供，其他高阶项均是包含因数 d 和 ϕ 的多项式项。由于 ϕ 远小于 1，故高阶项对整个光焦度提供的贡献较小，可以将系统的光焦度简化为 ϕ_1 、 $3\phi_2$ 和 ϕ_3 这三者之和。此外，由薄透镜公式可知系统中每个镜片的光焦度^[26]为

$$\phi_1 = (n-1)c_1, \phi_2 = (n-1)(c_3 - c_4), \phi_3 = -2c_5, \quad (10)$$

式中：透镜的折射率均为 n ，且 n 介于 1 和 2 之间； c_1 、 c_3 、 c_4 和 c_5 分别是 S1、S3、S4 和 S5 的曲率。由前文假设，lens 2 的表面 S3 和 S4 的曲率半径相等，符号相反，即 $c_3 = -c_4$ ，故式(10)可简化为

$$\phi_1 = (n-1)c_1, \phi_2 = 2(n-1)c_3, \phi_3 = -2c_5 \quad (11)$$

假定将 3 个透镜的材料均设置为 HK9L（在 532 nm 处的折射率为 1.5163），从式(11)可以看出，如果每个镜片都具有相同的光焦度，则表面 S5 的曲率值 c_5 最小，即面型最平缓，而表面 S1 的曲率值 c_1 最大，镜

片前表面相对陡峭，这对于像差的校正和应力的消除而言是不利的。因此，结合式(9)与式(11)，为保证各个镜片的表面相对平缓，将 3 个镜片承担的光焦度分布初步分配^[26]如下（该分配比例为特定焦距下保证各镜片面型平缓且曲率接近的一个特解）：

$$\phi_1 = \Phi/8, \phi_2 = \Phi/6, \phi_3 = 3\Phi/8 \quad (12)$$

结合式(11)与式(12)，在已知特定透镜折射率的情况下可以通过以下方程计算所有表面的曲率^[26]：

$$c_1 = \Phi/8(n-1), c_3 = -c_4 = \Phi/12(n-1), c_5 = c_6 = -3\Phi/16 \quad (13)$$

当光学系统焦距为 25 mm（即系统光焦度为 0.04）、透镜折射率为 1.5163 时，S1、S3、S5 的曲率半径分别为 103.26、154.89、133.33 mm。在 CODE V 中搭建的初始结构及其点列图如图 5 所示，通过评估光学参数、光路图和点列图等光学指标可以看出，由本文提出的光焦度分配公式计算出的初始结构光学面平缓，光路合理，可以作为后续优化的良好起点。

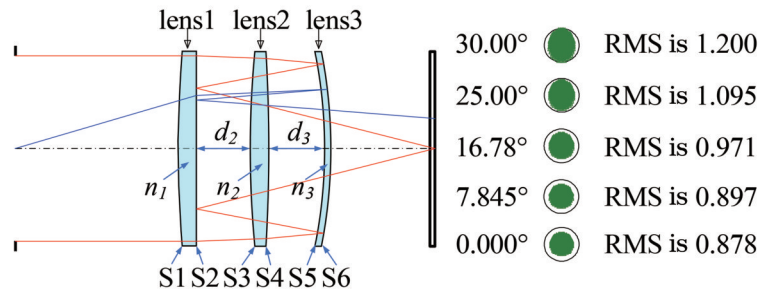


图 5 三片式超短焦折反射 VR 镜头的初始结构^[26]

Fig. 5 Initial structure of three-slice ultrashort focal polarization catadioptric VR lens^[26]

至此，得到了一种光焦度分配均匀、具有平缓面型的低应力镜片初始结构求解方法。该初始结构求解方法旨在保证光学系统的焦距符合要求，并且各个光学表面都具有平缓的面型，从而实现良好的镜片形态和成像光路。由于光学面型“平缓”为定性条件，因此对于各个面的光焦度分配方式存在多种优解，只要满足特定焦距和面型平缓的要求即可。

3.2 拼接非球面的描述与实现方法

由于超短焦折反射 VR 镜头为旋转对称的结构，目前一般采用球面或非球面镜片进行设计和优化。从非球面被提出至今，已经有多种描述光学非球面的方法，随着近年来加工制造水平的提高和应用需求的膨胀，亟需新的方法使得在实际系统设计中能够灵活多

变地使用非球面。

普通球面由曲率半径一个参数定义，而非球面的局部曲率是不断变化的，比传统球面更加灵活多变，能更有效地校正球差、改善像质。非球面由二次曲面基底和形变量组成，偶次非球面的面型定义为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=2}^n a_{2i}r^{2i} \quad (14)$$

式中： $c=1/R$ ， R 为半径； r 为表面上某一点到光轴的径向距离； k 为二次曲面系数； a_{2i} 为高阶项系数，一般情况下 a_2 等于 0。

在此基础上，本文提出的拼接非球面是以非球面和 Sasian^[37] 提出的环形面为基础的，曲面仍为旋转对称，它的定义^[38]为

$$z = \begin{cases} \frac{c_1 r^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_1) c_1^2 r^2}} + A_1 r^4 + B_1 r^6 + \dots, & 0 < r \leq r_1 \\ \frac{c_2 r^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_2) c_2^2 r^2}} + A_2 r^4 + B_2 r^6 + \dots + \Delta z_1, & r_1 < r \leq r_2 \\ \frac{c_3 r^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_3) c_3^2 r^2}} + A_3 r^4 + B_3 r^6 + \dots + \Delta z_2, & r_2 < r \leq r_3 \\ \vdots & \end{cases}, (15)$$

$$\Delta z_1 = \left(\frac{c_1 r_1^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_1) c_1^2 r_1^2}} + A_1 r_1^4 + B_1 r_1^6 + \dots \right) - \left(\frac{c_2 r_1^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_2) c_2^2 r_1^2}} + A_2 r_1^4 + B_2 r_1^6 + \dots \right)$$

$$\Delta z_2 = \left(\frac{c_2 r_2^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_2) c_2^2 r_2^2}} + A_2 r_2^4 + B_2 r_2^6 + \dots \right) - \left(\frac{c_3 r_2^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_3) c_3^2 r_2^2}} + A_3 r_2^4 + B_3 r_2^6 + \dots \right) + \Delta z_1$$

式中： z 为轴向距离； r 为径向距离； $r_i (i=1, 2, 3, \dots)$ 为不同环形拼接曲面的内外半径值； $c_i (i=1, 2, 3, \dots)$ 为曲率； $k_i (i=1, 2, 3, \dots)$ 为二次曲面系数； $A_i, B_i, \dots (i=1, 2, 3, \dots)$ 为不同环形拼接非球面的形变系数； $\Delta z_i (i=1, 2, 3, \dots)$ 为在交线两侧曲面区域矢高的差值。中心区域参数下标为 1，中心到外层区域的参数下标逐级递增。

这种环形拼接非球面是由中心区域的圆形非球面以及一个或多个外层的环形非球面组成的，自由度较普通非球面成倍地增加，且表面加工难度低于自由曲面，可以使设计的光学系统具有更高的数值孔径和更高的成像质量，适合用于超短焦偏振折反射 VR 镜头

的优化设计。

在确定了曲面各个拼接区域的表达式后，还需要对曲面拼接处的连续性进行讨论。在光学系统中，不连续的镜片面型不仅会增加表面加工和装调的难度，还会产生杂光和波前不连续的问题，影响成像质量，故通常希望镜片的面型为连续曲面^[38]。为了使整个有效孔径区域内的表面保持光滑的面型，本文要求拼接曲面是 C^1 连续的，即曲面连接处两侧的一阶导数相等^[39]。

接下来以含有两个区域的环形拼接非球面为例进行讨论，如图 6 所示，中心区域为 zone 1，外围区域为 zone 2，二者拼接处交线用虚线表示。

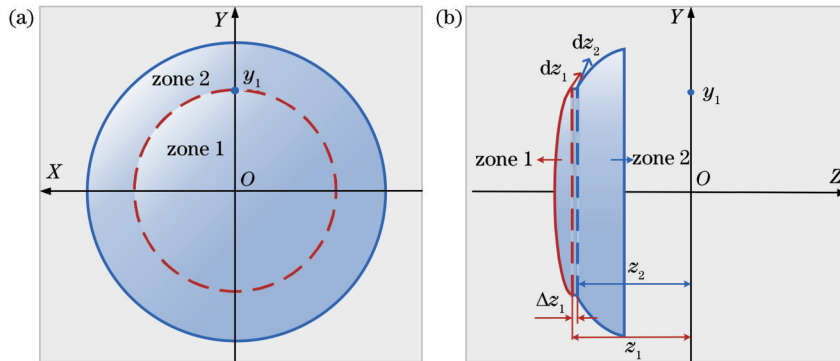


图 6 含有两个区域的环形拼接非球面。(a) 拼接曲面的 XOY 视图；(b) 拼接曲面的 YOZ 视图

Fig. 6 Annular stitched aspheric surface with two zones. (a) XOY view of stitched surface; (b) YOZ view of stitched surface

假定两个区域在相交处的矢高分别为 $z=z_1$ 和 $z=z_2$ ，选取拼接点 $x=0, y=y_1$ ，由 C^1 连续的数学定义可以得到曲面拼接处光滑的条件^[38]为

$$\begin{cases} z_1 = z_2 \\ \left. \frac{dz_1}{dy} \right|_{x=0, y=y_1} = \left. \frac{dz_2}{dy} \right|_{x=0, y=y_1} \end{cases}. (16)$$

式(16)即为确保环形拼接非球面 C^1 连续的数学表达式。对此，程德文等^[38]还进一步证明了当拼接非球面上的径向曲线满足 C^1 连续的要求时，表面上的任意曲

线都可以满足该要求，即该表面是满足 C^1 连续要求的。这种光滑的表面在生产加工时，计算机数控工具可以产生没有间断点的合理路径，因而可以提高加工精度和效率^[38]。

为了确保这种 C^1 连续的拼接非球面在实际设计中可行，还需要确立具体的优化策略和约束条件^[40]。在光学设计软件 CODE V 中建立新型自定义面型有两种方法：1) 使用非序列表面(NSS)，光线没有预定义路径，不同光线的表面顺序可以不一样；2) 使用用户自定义面型(UDS)，按照链接路径，用户自己编写满足

$F(x, y, z) = 0$ 的程序链接到光学设计软件。对于本文设计, NSS 无法完成超短焦偏振折反射 VR 镜头最后的凹面分光反射镜的分段建模。如图 7 所示, 模拟了中心视场光线(F1)和最大视场光线(F2)在 NSS 镜头中的传输路径, 凹面分光反射镜(S6)采用两段拼接非球面, 中心区域为 zone 1, 外围区域为 zone 2, 需要分别建立非球面面型, 并将 zone 1 的表面属性设置为光线第一次经过时反射, 第二次经过时透射, zone 2 同理。对于 F1 而言, 光线先后经 zone 1 反射、透射, 最后到达像面。对于 F2 而言, 光线第一次经过 S6 时, 先到达 zone 2, 此时被反射; 第二次到达 S6 时, 到达 zone 1, 此时原本应该透射, 但 F2 是第一次到达 zone 1, 因而会被反射, 与正常光路路径不符。

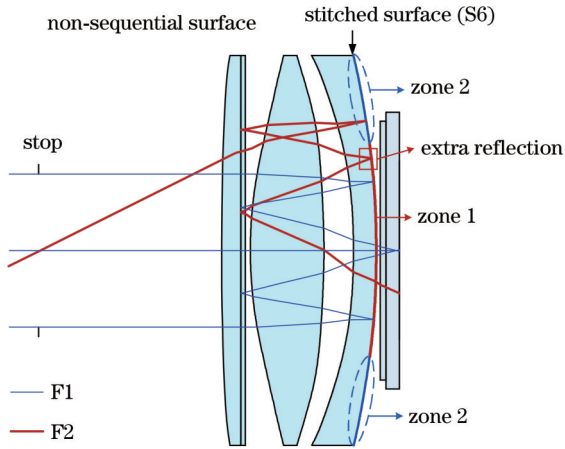


图 7 NSS 模式下的环形拼接非球面

Fig. 7 Annular stitched aspheric surface based on NSS mode

因此, 采用 UDS 的方法实现环形拼接非球面的建立和优化。建立面型时, 选取对像差影响较大的面作为面型转换的对象, 并根据光线实际路径选取合适的拼接位置, 比如选取曲率变化较快的位置作为分段点^[40]。优化过程中, 由于是在采用普通非球面的超短焦偏振折反射 VR 镜头的基础上进行优化, 初始拼接面型的各个区域由同一个非球面公式定义, 已经满足 C^0 连续的条件, 但仍要保证拼接曲面在设计优化时始终符合 C^1 连续条件, 需要施加特殊的约束。以含有两个区域的拼接非球面为例, 伪代码为

$$\begin{cases} @C_{OE1} = z_1 - z_2 \\ @C_{OE2} = dz_1 - dz_2 \end{cases}, \quad (17)$$

$$\begin{cases} @C_{OE1} = 0 \\ @C_{OE2} = 0 \end{cases}, \quad (18)$$

式中: z_1 和 z_2 分别表示中心和外层区域曲面在拼接处的全局 Z 坐标; $C_{OE1} = 0$ 则保证了两个区域彼此相接; dz_1 和 dz_2 分别表示中心和外层区域曲面在拼接处的一阶导数值; $C_{OE2} = 0$ 则保证了两个相邻区域在交线处的导数相等^[41]。

在超短焦偏振折反射 VR 镜头的设计中, 对采用自

定义面型的表面引入式(17)和式(18)的特殊约束, 可以实现具有高自由度且平滑的环形拼接非球面优化设计。

3.3 像质平衡优化算法

除了对杂光的抑制和对面型的优化之外, 在超短焦偏振折反射 VR 镜头的设计过程中还可以引入像质平衡优化算法, 在优化后期进一步提升整体成像质量。

对于本文采用的光学设计软件而言, 优化结束的判断依据之一是光学系统的误差评价函数降至最小。误差评价函数用于描述系统的整体成像质量, 是系统结构参数的函数, 该值越小, 则系统就越靠近设计目标。误差评价函数由波长权重函数 W_w 、光瞳函数 W_A 、视场权重函数 (W_x, W_y) 以及像差函数 ($\Delta x, \Delta y$) 组成, 其定义^[42]为

$$\omega = \sum_Z \sum_F \sum_\lambda \sum_R \left\{ \left[W_w(Z, \lambda) W_A(Z, R) W_x(Z, F) \Delta x \right]^2 + \left[W_w(Z, \lambda) W_A(Z, R) W_y(Z, F) \Delta y \right]^2 \right\}, \quad (19)$$

式中: Z 是当前结构的重数/变焦数; n_z 是所有多重结构系统的总重数; F 是当前视场数; n_f 是所有抽样视场的总数; λ 是当前波长; n_w 是所有波长的总数; R 是当前追迹的光线; n_r 是所追迹光线的总数。

本文设计属于中高视场、大出瞳光学系统, 整个像面内各处的成像质量差异越小, 用户在观看画面时的体验感越好。在系统的成像质量已经得到了一定程度的优化后, 利用视场权重函数 (W_x, W_y) 可以有效平衡和提高系统各视场的像质: 为成像质量优良的视场和方位设置相对较低的权重, 为视场成像质量差的视场和方位设置较高的权重, 然后进一步优化提高系统在整个像面上成像质量的均衡程度。视场权重函数 (W_x, W_y) 的表达式^[42]为

$$W_x(Z, F) = \begin{cases} \left\{ 1 + [\bar{\zeta} - \zeta_x(Z, F)] \right\} \times m_h \times W_{x_{i-1}}(Z, F) & \zeta_x > \bar{\zeta} \\ \left\{ 1 + [\bar{\zeta} - \zeta_x(Z, F)] \right\} \times m_l \times W_{x_{i-1}}(Z, F) & \zeta_x < \bar{\zeta} \end{cases}, \quad (20)$$

$$W_y(Z, F) = \begin{cases} \left\{ 1 + [\bar{\zeta} - \zeta_y(Z, F)] \right\} \times m_h \times W_{y_{i-1}}(Z, F) & \zeta_y > \bar{\zeta} \\ \left\{ 1 + [\bar{\zeta} - \zeta_y(Z, F)] \right\} \times m_l \times W_{y_{i-1}}(Z, F) & \zeta_y < \bar{\zeta} \end{cases}, \quad (21)$$

$$\bar{\zeta} = \frac{\sum_z \sum_f [\zeta_x(Z_z, F_f) + \zeta_y(Z_z, F_f)]}{2 \times n_z \times n_f}, \quad (22)$$

式中: i 是当前迭代循环的次数; m_h 和 m_l 是缩放因子; $W_{x0}(Z, F)$ 和 $W_{y0}(Z, F)$ 是弧矢和子午方向视场的初始权重值, 此处设定为 100; $\zeta_x(Z, F)$ 和 $\zeta_y(Z, F)$ 分别代表指定的结构重数 Z 中特定视场 F 的成像质量, 可以为某一空间频率处的传递函数值或是点列图均方根

半径的倒数等; $\bar{\xi}$ 是所有抽样视场成像质量的平均值。

由于不同视场、方位之间的权重的大小是相对值, 因此可在进行下一轮优化前对其做归一化处理。此像质平衡算法在优化后期, 由于各视场的权重变化越来越小, 优化收敛性变差, 因此需要额外设定退出条件, 比如定义最小优化变化阈值, 并在循环优化的最外层设置循环次数的计数器及其阈值, 从而避免了优化过程中可能出现的死循环情况。

4 超短焦偏振折反射 VR 镜头设计

4.1 设计指标

基于普通非球面的超短焦偏振折反射 VR 镜头可以将光学厚度压缩至普通直透式系统的 1/3, 在相同的视场角和出瞳直径下能够实现更高的成像质量和更轻薄的结构; 在此基础上, 采用环形拼接非球面的超短焦偏振折反射 VR 镜头则可以进一步提升像质, 压缩

厚度, 实现类似“墨镜”形态的 VR 眼镜外观。

设计的超短焦偏振折反射 VR 镜头的规格如表 1 所示, 其中 Overall length 表示从镜头最靠近人眼的光学表面到显示屏的距离。

4.2 普通非球面超短焦折反射 VR 镜头

对目视系统一般采用反向设计, 本文设计中, 光线从入瞳出发, 在镜组内反射两次之后到达像面, 按照此光线路径进行镜片排布。需要注意的是, 目前市场上大多数反射式偏振器为平面, 故在应保证靠近人眼的第一个反射面为平面。

设计得到的普通非球面超短焦折反射 VR 镜头结构如图 8(a) 所示, 系统厚度为 10 mm, 视场角达到 47°。畸变网格如图 8(b) 所示, 最大视场的畸变小于 3%; 垂轴色差图如图 8(c) 所示, 全视场垂轴色差小于 0.013 mm; 系统的调制传递函数 (MTF) 曲线如图 8(d) 所示, 在截止频率 (30 lp/mm) 处全视场 MTF 大于 0.07。

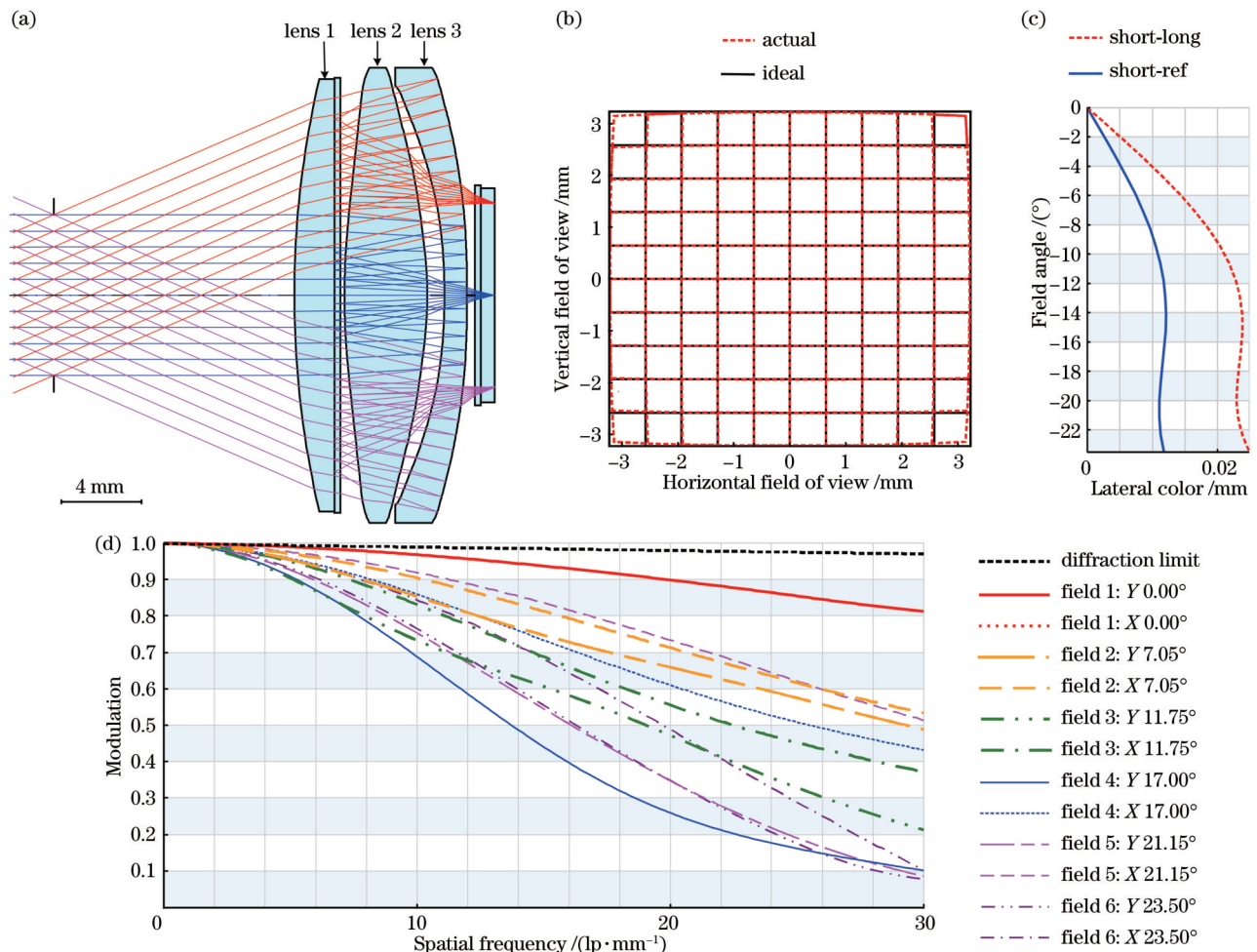


图 8 普通非球面超短焦折反射 VR 镜头设计结果。(a) 系统结构图; (b) 畸变网格图; (c) 垂轴色差曲线; (d) MTF 曲线
Fig. 8 Design results of ultrashort focal polarization catadioptric VR lens with common aspheric surface. (a) Structure diagram; (b) distortion grid; (c) lateral chromatic aberration curve; (d) MTF curve

4.3 环形拼接非球面超短焦折反射 VR 镜头

从 4.2 节可以看出, 采用普通非球面设计时, 由于表面自由度的限制, 超短焦折反式 VR 镜头的边缘视

场像质较低。为了更好地满足大出瞳、小畸变和高像质的要求, 考虑引入环形拼接非球面, 提高镜头设计的灵活性。

表 1 超短焦偏振折反射 VR 镜头参数

Specification	Value
Field of view	47°
Screen size	0.9 cm
Image height	9 mm
Optical clear aperture	22 mm
Focal length	10.8 mm
Overall length	9.5 mm
Exit pupil diameter	8 mm
Eye relief	12 mm
Distortion	<3%
Modulation transfer function	>0.5 @30 lp/mm
Material	3P
Weight	< 4 g

环形拼接非球面超短焦折反射 VR 镜头的建立和优化步骤如下。

1) 面型转换。一般选取对像差影响较大的面作为面型转换对象, 由于光线在 lens 1 的前表面入射角较大, 而 lens 3 的后表面同时承担了反射和透射的功能,

因此将这两个面转换为拼接非球面, 且令每个表面的两个拼接区域均以原本的非球面作为优化的起点。考虑到本设计的视场角和光学口径不大, 选择拼接段数为两段。分段位置的选取依据如下: 根据普通非球面超短焦折返 VR 镜头的点列图、MTF 等像质评估结果, 可以看到成像质量随着视场的增大而下降。找到成像质量下降较明显的某中间视场, 通过光线追迹得到该视场与待分段曲面的交点位置 (Y 方向高度), 以此作为第二环分段区域的起始位置, 从而增加外围视场所经曲面的自由度, 提高对应视场光线的成像质量。

2) 面型控制。限制两个拼接区域的非球面系数不过大, 同时引入式 (17)~(18) 以保证拼接处满足 C' 连续。优化过程中, 如果某视场跨越多段非球面, 可以在优化过程中用该视场的参考光线在该表面上的 Y 坐标来有效地控制该光线在分段非球面中的具体位置, 从而保证该光线连续可控。

3) 像质平衡。在优化后期, 将式 (19)~(22) 写入优化代码中, 设置适当的迭代次数与退出条件, 以自动调整不同视场的优化权重, 提升全视场像质均匀性。

最终得到的系统如图 9 所示, 图 9(a) 为超短焦折

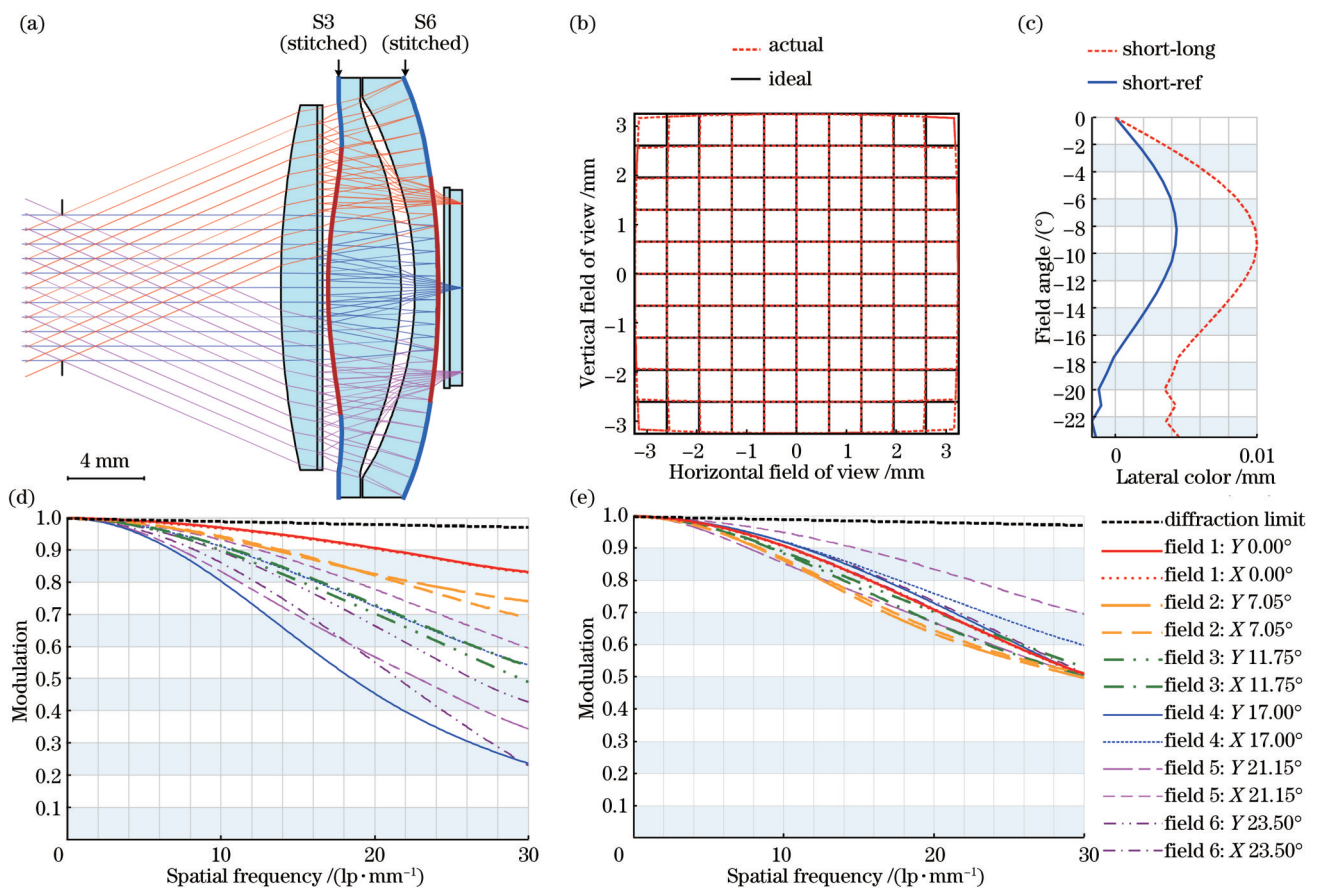


图 9 拼接非球面超短焦折反射 VR 镜头设计结果。(a) 系统结构图; (b) 畸变网格图; (c) 垂轴色差曲线图; (d) 像质自动平衡优化前的 MTF 曲线; (e) 像质自动平衡优化后的 MTF 曲线

Fig. 9 Design results of ultrashort focal polarization catadioptric VR lens with stitched aspheric surface. (a) Structure diagram; (b) distortion grid; (c) lateral chromatic aberration curve; (d) MTF curve before automatic image performance balancing; (e) MTF curve after automatic image performance balancing

反射 VR 镜头的结构图,采用了两个两段拼接非球面,总长仅为 9.5 mm;图 9(b)为畸变网格,最大视场的畸变小于 3%;垂轴色差图如图 9(c)所示,全视场垂轴色差小于 0.007 mm,约减小至普通非球面系统的 1/2。采用视场像质平衡算法前的系统 MTF 曲线如图 9(d)所示,全视场像质较普通非球面系统提高了 0.15 以上;而经过像质平衡算法的几轮优化后,充分发挥了拼接非球面高自由度、高灵活性的优势,如图 9(e)所示,边缘视场的 MTF 值再次得到明显提升,在截止频率 (30 lp/mm)处全视场的 MTF 均达到 0.50 及以上,且各个视场像质均匀性好。

在这一款低畸变超短焦折反射 VR 镜头的基础上,为进一步验证前述优化方法的效果,沿用同样的材料和结构,设计了另一款具有更大视场角的超短焦折反射 VR 镜头,具体设计指标如表 2 所示。

经过几轮优化后,得到视场角为 96°、总长小于 22 mm 的普通非球面超短焦折反射 VR 镜头,如图 10(a)所示。由于总长限制在 22 mm 以内,故该系统成像质量不高,从图 10(b)的 MTF 曲线中看出,在 30 lp/mm 处全视场 MTF 大于 0.04。在系统参数不变的基础上,将 S6 的非球面转换为两段环形拼接非球面,将第二段拼接范围选取在光线仅经过一次反射的光学区域。最后采用像质平衡算法优化各视场权重,得到一款拼接非球面超短焦折反射式 VR 镜头,如图 10(c)所示。MTF 曲线如图 10(d)所示,全视场 MTF 值在 30 lp/mm 处高于 0.45,相较于普通非球面系统有显著的提升。

该设计结果具有大出瞳、大视场角、高清像质和轻薄结构,体现出折反射 VR 光学系统相较于传统折射式 VR 光学系统的结构优越性,并验证了前述优化方

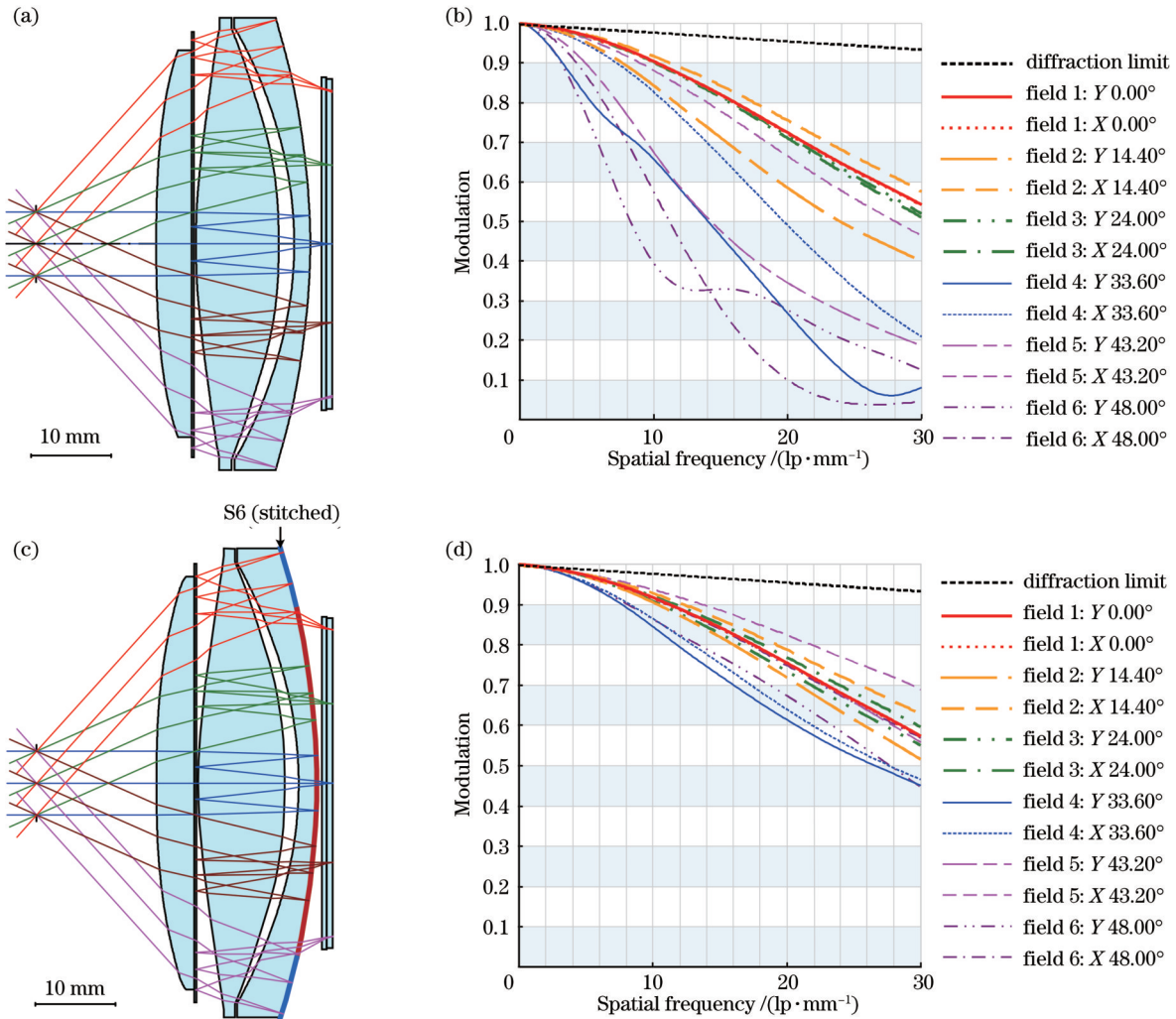


图 10 大视场超短焦折反射 VR 镜头设计结果。(a)普通非球面超短焦折反射 VR 镜头结构图;(b)普通非球面超短焦折反射 VR 镜头 MTF 曲线;(c)拼接非球面超短焦折反射 VR 镜头结构图;(d)拼接非球面超短焦折反射 VR 镜头 MTF 曲线

Fig. 10 Design results of ultrashort focal polarization catadioptric VR lens with large field of view. (a) Structure diagram of ultrashort focal polarization catadioptric VR lens with common aspheric surface; (b) MTF curve of ultrashort focal polarization catadioptric VR lens with common aspheric surface; (c) structure diagram of ultrashort focal polarization catadioptric VR lens with stitched aspheric surface; (d) MTF curve of ultrashort focal polarization catadioptric VR lens with stitched aspheric surface

表 2 大视场角超短焦折反射 VR 镜头参数
Table 2 Specifications of ultrashort focal polarization catadioptric VR lens with large field of view

Specification	Value
Field of view	96°
Screen size	2.1 inch
Overall length	22 mm
Exit pupil diameter	8 mm
Eye relief	15 mm
Distortion	< 28%
Modulation transfer function	>0.45 @30 lp/mm
Material	3P
Weight	< 33 g

法的合理性,进一步表明了环形拼接非球面对于 VR 镜头的成像质量具有显著的改善作用,且在大视场 VR 镜头中的像质优化效果比在中视场 VR 镜头中的优化效果具有更明显的提升。

4.4 样机搭建与实验验证

超短焦折反射 VR 光学模组的生产流程如图 11 所示。在光学优化设计完成之后,进行低双折射率镜片注塑成型加工与表面精度检测,同时完成合理的机械结构设计。接着进行偏振元件贴合与检测、光机精密装调和 6 自由度像面调节。经过光学指标检测后,对合格的单目模组完成双目装调,最终获得大视场、高沉浸感的超短焦折反射 VR 光学模组。

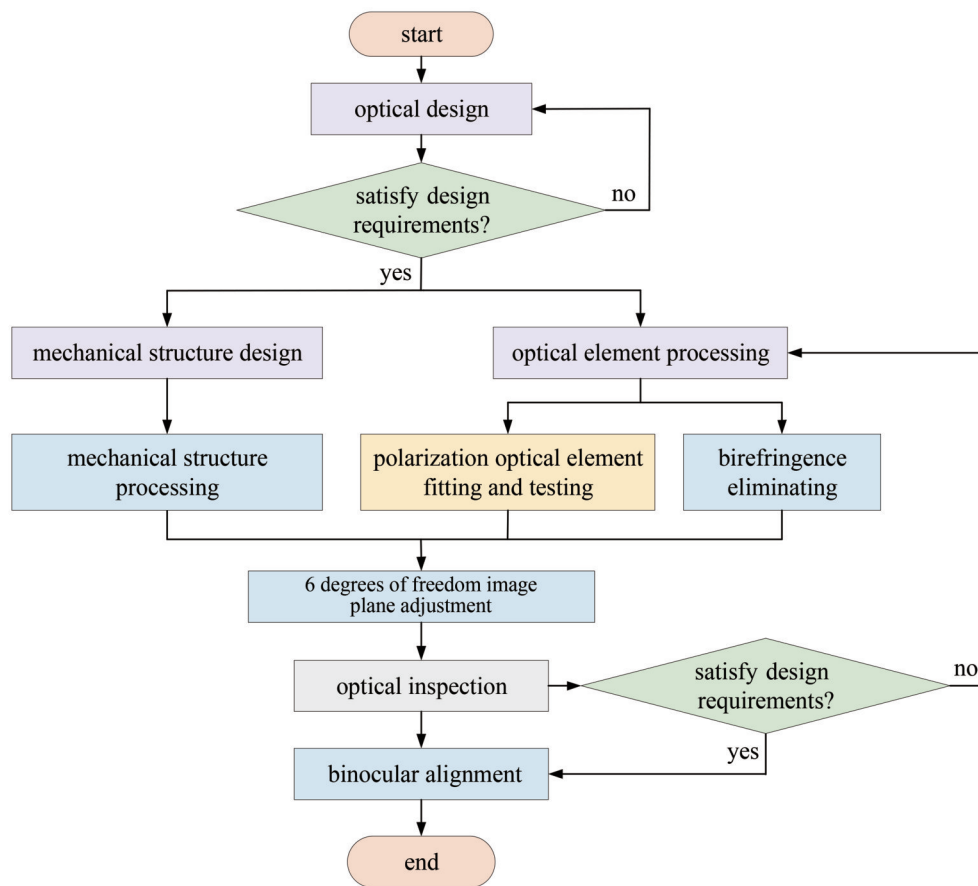


图 11 超短焦折反射 VR 光学模组生产流程图

Fig. 11 Production flow chart of ultrashort focal polarization catadioptric VR optical module

在此前研究中,曾设计了一款 96°视场角的超短焦折反射 VR 镜头,并依据上述流程搭建了原理样机^[26,36],如图 12(a)所示。为了满足用户的需求,采用了具有屈光度调节的光机设计,调节范围在远视 200 度到近视 700 度之间,内部结构如图 12(b)所示。从图 12(c)中可以看出,样机整体厚度小于 20 mm,大约是传统 VR 光学系统的 1/3。

本文选择了高对比度的分辨率目标图片进行杂散光测试^[26,36],如图 13(a)所示。经过超短焦折反射 VR

镜头样机成像后,如图 13(b)所示,相机拍摄到的画面没有肉眼可见的杂散光,验证了前文所述杂光抑制方法的有效性;由于测试镜头本身存在畸变,故照片中边角处的分辨率板有一定的畸变。对于如图 13(c)所示的彩色图片,该样机也呈现出良好的显示性能,如图 13(d)所示,成像画面清晰,色彩还原度高。对于图 13(d)边缘视场的模糊现象,原因是实验者拍摄显示画面时的测试镜头产生了歪斜,造成了场曲,导致照片边缘视场不清晰。

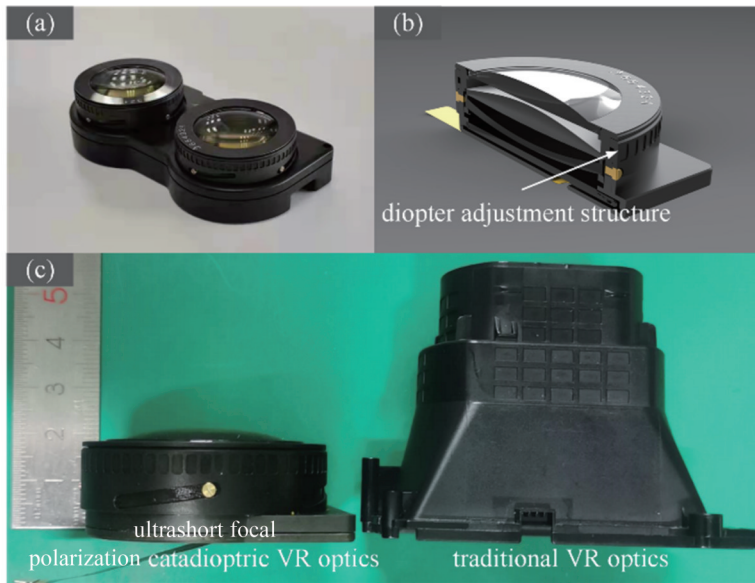


图 12 超短焦折反射 VR 镜头样机模组。(a)外观照片;(b)内部结构图;(c)超短焦偏振折反射 VR 镜头与传统直透式 VR 镜头的对比图

Fig. 12 Prototype module of ultra short focus catadioptric VR lens. (a) Photograph of appearance; (b) internal structure diagram; (c) comparison of ultrashort focal polarization catadioptric VR lens and traditional straight-through VR lens

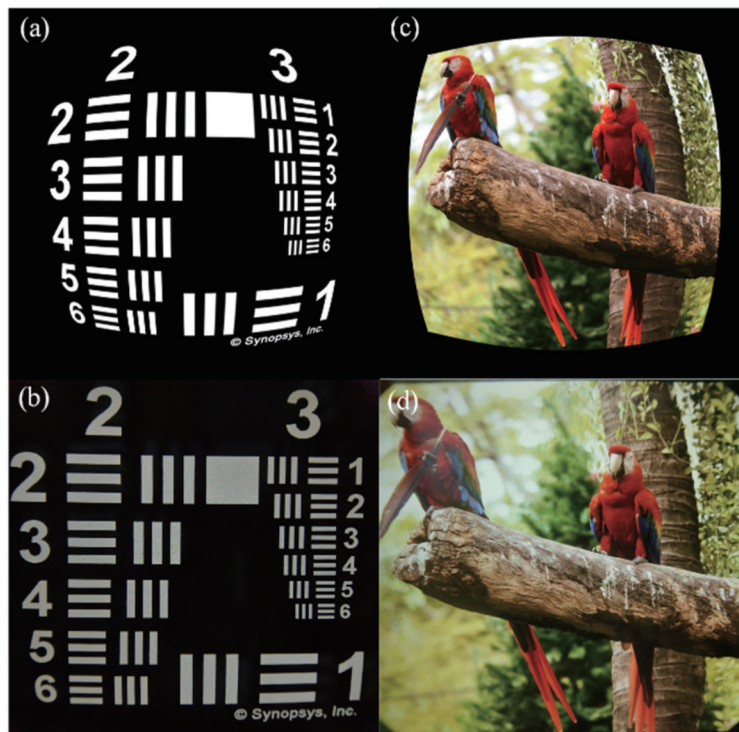


图 13 实验结果。(a)带有预畸变校正的高对比度图片;(b)VR 镜头显示的高对比度图像;(c)带有预畸变校正的彩色图片;(d)VR 镜头显示的彩色图像

Fig. 13 Experimental results. (a) High-contrast picture with pre-distortion correction; (b) high-contrast image displayed by VR lens; (c) color picture with pre-distortion correction; (d) color image displayed by VR lens

5 结 论

本文在分析超短焦偏振折反射 VR 镜头结构优势和偏振原理的基础上,探究了影响系统光学效率的因素,介绍了低应力镜片的光焦度分配策略与初始结构

求解过程,从而得出在设计阶段对元件表面残留应力双折射导致的杂散光进行抑制的方法。针对超短焦偏振折反射 VR 镜头,提出将普通非球面转化为环形拼接非球面以提高设计自由度,并研究了环形拼接非球面的数学定义、建立过程与优化策略。结合误差评价

函数,讨论了设计优化后期的各视场像质平衡问题,将视场权重函数引入每一轮优化评估。综合上述优化设计方法,利用环形拼接非球面设计了一款视场角为 47° 、总长小于 9.5 mm 的超短焦偏振折反射VR镜头,最大畸变小于 3% ,在像质平衡优化后,全视场MTF值在 30 lp/mm 处大于 0.50 ,像质较采用普通非球面的系统有明显的提升。在此基础上,沿用相同的设计方法优化了一款视场角为 96° 的环形拼接非球面超短焦折反射VR镜头,全视场MTF值在 30 lp/mm 处大于 0.45 。通过两个不同视场角的设计实例,详述了超短焦偏振折反射VR镜头的具体设计方法,两个结果均验证了环形拼接非球面的可行性和高自由度的优点,体现了像质平衡优化算法的实用性。最后介绍了超短焦偏振折反射VR镜头的研发流程,展示了一款原理样机,经杂散光测试后,该镜头呈现出高清晰、高色彩还原度的显示性能,验证了前文所述杂光抑制方法的有效性。本文提出的杂光抑制、拼接非球面和像质自动平衡优化方法可以指导VR镜头的设计,推进VR近眼显示设备的高清化、轻量化发展。

参 考 文 献

- [1] Mystakidis S. Metaverse[J]. Encyclopedia, 2022, 2(1): 486-497.
- [2] Cheng D W, Wang Q W, Liu Y E, et al. Design and manufacture AR head-mounted displays: a review and outlook[J]. Light: Advanced Manufacturing, 2021, 2(3): 336.
- [3] 王涌天, 郑臻荣, 程德文, 等. "VR/AR显示技术及应用"专题前言[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(20): 2011000.
Wang Y T, Zheng Z R, Cheng D W, et al. Preface to the special topic "VR/AR display technology and applications"[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(20): 2011000.
- [4] Bhagat K K, Liou W K, Chang C Y. A cost-effective interactive 3D virtual reality system applied to military live firing training[J]. Virtual Reality, 2016, 20(2): 127-140.
- [5] 孔祥旭, 薛常喜. 基于双图像生成器的双焦面抬头显示系统光学设计[J]. 光学学报, 2022, 42(14): 1422003.
Kong X X, Xue C X. Optical design of double focal plane head-up display system based on double image generator[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(14): 1422003.
- [6] 陶陈凝, 郑臻荣. 面向手术导航的增强现实计算光谱成像系统[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(20): 2011014.
Tao C N, Zheng Z R. Augmented reality computational spectral imaging system for surgical navigation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(20): 2011014.
- [7] Wang P, Wu P, Wang J, et al. A critical review of the use of virtual reality in construction engineering education and training[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(6): 1204.
- [8] Jensen L X, Konradsen F. A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education and training[J]. Education and Information Technologies, 2018, 23(4): 1515-1529.
- [9] Choi S S, Jung K W, Do Noh S. Virtual reality applications in manufacturing industries: past research, present findings, and future directions[J]. Concurrent Engineering, 2015, 23(1): 40-63.
- [10] Katzourin M, Ignatoff D, Quirk L, et al. Swordplay: innovating game development through VR[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2006, 26(6): 15-19.
- [11] 罗栩豪, 董思禹, 王占山, 等. 超表面VR/AR显示技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(20): 2011002.
Luo X H, Dong S Y, Wang Z S, et al. Research progress of metasurface-based VR/AR display technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(20): 2011002.
- [12] Xiong J H, Hsiang E L, He Z Q, et al. Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10: 216.
- [13] Hecht J. Optical dreams, virtual reality[J]. Optics and Photonics News, 2016, 27(6): 24-31.
- [14] Yao C, Cheng D W, Wang Y T. Matrix optics representation and imaging analysis of a light-field near-eye display[J]. Optics Express, 2020, 28(26): 39976-39997.
- [15] Maimone A, Wang J R. Holographic optics for thin and lightweight virtual reality[J]. ACM Transactions on Graphics, 2020, 39(4): 1-14.
- [16] Zou J Y, Zhan T, Hsiang E L, et al. Doubling the optical efficiency of VR systems with a directional backlight and a diffractive deflection film[J]. Optics Express, 2021, 29(13): 20673-20686.
- [17] 高源, 刘越, 程德文, 等. 头盔显示器发展综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(6): 896-904.
Gao Y, Liu Y, Cheng D W, et al. A review on development of head mounted display[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(6): 896-904.
- [18] Wang Y Q, Liu W Q, Meng X X, et al. Development of an immersive virtual reality head-mounted display with high performance[J]. Applied Optics, 2016, 55(25): 6969-6977.
- [19] Geng Y, Gollier J, McNally S J, et al. Field curvature corrected display: US20170255015[P]. 2017-09-07.
- [20] Bang K S, Jo Y J, Chae M S, et al. Lenslet VR: thin, flat and wide-FOV virtual reality display using Fresnel lens and lenslet array[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2021, 27(5): 2545-2554.
- [21] Cakmakci O, Qin Y, Bosel P, et al. Holographic pancake optics for thin and lightweight optical see-through augmented reality[J]. Optics Express, 2021, 29(22): 35206-35215.
- [22] Sony Interactive Entertainment LLC. PlayStation VR technical specifications (Chinese Mainland)[EB/OL]. (2023-02-01)[2023-05-07]. <https://www.playstation.com/zh-hans-cn/ps-vr/tech-specs/>.
- [23] Meta. Meta Quest 2: immersive all-in-one VR headset[EB/OL]. (2023-05-05) [2023-05-07]. <https://www.meta.com/quest/products/quest-2/>.
- [24] Narasimhan B A. Ultra-compact pancake optics based on ThinEyes super-resolution technology for virtual reality headsets[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10676, 106761G.
- [25] Li Y N Q, Zhan T, Yang Z Y, et al. Broadband cholesteric liquid crystal lens for chromatic aberration correction in catadioptric virtual reality optics[J]. Optics Express, 2021, 29(4): 6011-6020.
- [26] 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.
- [27] 范丽亚, 张克发, 侯守明. 2022年扩展现实(XR)热点回眸[J]. 科技导报, 2023, 41(1): 184-193.
Fan L Y, Zhang K F, Hou S M. Review on hot spots of extended reality (XR) in 2022[J]. Science & Technology Review, 2023, 41(1): 184-193.
- [28] LaRussa J A. Infinite optical image-forming apparatus: US3443858[P]. 1969-05-13.
- [29] LaRussa J A, Gill A. The holographic pancake window TM[J]. Proceedings of SPIE, 1978, 0162: 120-129.
- [30] Xiong J H, Wu S T. Planar liquid crystal polarization optics for augmented reality and virtual reality: from fundamentals to applications[J]. eLight, 2021, 1(1): 1-20.
- [31] Li Q A, He W, Deng H A, et al. High-performance reflection-type augmented reality 3D display using a reflective polarizer[J]. Optics Express, 2021, 29(6): 9446-9453.
- [32] Wong T L, Yun Z S, Ambur G, et al. Folded optics with

- birefringent reflective polarizers[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10335: 103350E.
- [33] Geng Y, Gollier J, Wheelwright B, et al. Viewing optics for immersive near-eye displays: pupil swim/size and weight/stray light[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10676: 1067606.
- [34] Lacroix M. Collimation device of small size: FR2690534[P]. 1993-10-29.
- [35] Huxford R B. Wide-FOV head-mounted display using hybrid optics[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5249: 230-237.
- [36] 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.
- [37] Sasian J M. Annular surfaces in annular field systems[J]. Optical Engineering, 1997, 36(12): 3401-3403.
- [38] Cheng D W, Chen X J, Xu C, et al. Optical description and design method with annularly stitched aspheric surface[J]. Applied Optics, 2015, 54(34): 10154-10162.
- [39] Barsky B A, DeRose T D. Geometric continuity of parametric curves: three equivalent characterizations[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1989, 9(6): 60-69.
- [40] 陈海龙, 高阳, 程德文, 等. 分段环形曲面的光学描述和设计方法[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0522002.
- Chen H L, Gao Y, Cheng D W, et al. Optical description and design method of annularly piecewise surface[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0522002.
- [41] 程德文, 陈海龙, 王涌天, 等. 复杂光学曲面数理描述和设计方法研究[J]. 光学学报, 2023, 43(8): 0822008.
- Cheng D W, Chen H L, Wang Y T, et al. Mathematical description and design methods of complex optical surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(8): 0822008.
- [42] Cheng D W, Wang Y T, Hua H. Automatic image performance balancing in lens optimization[J]. Optics Express, 2010, 18(11): 11574-11588.

Design Method of Ultrashort Focal Polarization Catadioptric Virtual Reality Lenses

Cheng Dewen^{1,2*}, Huang Yilun^{1,2}, Li Yang^{1,2}, Hou Qichao^{1,2}, Li Danyang^{1,2}, Zhang Tian^{1,2},
Chen Hailong^{1,2}, Wang Yongtian^{1,2}

¹School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²Beijing Engineering Research Center of Mixed Reality and Advanced Display, Beijing 100081, China

Abstract

Objective Virtual reality head-mounted displays (VR-HMDs) are experiencing increasing demands for improved imaging performance and enhanced user comfort. This has led to the popularity of VR lenses that offer a wide field of view (FOV), large pupil size, and compact form factor. However, achieving these desired properties simultaneously presents significant challenges. Three generations of VR optical solutions have been developed, each with its own limitations. The earlier smooth aspherical VR lenses, while capable of providing a wide FOV, are bulky and fall short in terms of image quality. Fresnel VR lens offers a larger FOV and reduced weight, but it suffers from "ring artifacts" that result in low contrast and poor resolution. A more recent solution, an ultrashort focal polarization catadioptric VR lens, takes advantage of polarized light transmission to fold the optical path three times within a short physical length. This design reduces the thickness of the catadioptric optical module to approximately half that of the Fresnel lens, alleviates focusing challenges, and enables smoother optical surfaces. As a result, ultrashort focal polarization catadioptric VR lenses have become the mainstream optical solution for VR-HMDs, offering significant benefits such as a large FOV, large exit pupil, ultra-thin structure, and high resolution. However, despite their advantages, most of these lenses employ aspherical surfaces, and the theoretical model and design process of the system have not been extensively elaborated upon, nor has the image quality of the system been thoroughly explored. Consequently, there is an urgent need for new optimization design methods to guide the development of ultrashort focal polarization catadioptric VR lenses. These methods will not only contribute to the design process but also facilitate the high-definition, lightweight, and market-oriented evolution of VR-HMDs.

Methods A mathematical model is established to describe the ultrashort focal polarization catadioptric VR lens, demonstrating its structural and imaging advantages compared with traditional straight-through optical schemes (Fig. 1). The selection of polarization elements (Fig. 2) and the conversion of the polarization state of light within the lenses are explained. By constraining the shape of each lens, the birefringence of the plastic lens is minimized, resulting in improved optical efficiency. The optical focal length distribution formula is derived based on the optical path diagram of the three-piece ultrashort focal polarization catadioptric VR lens (Fig. 4), enabling the determination of the initial structure of low birefringence lenses with uniform focal distribution and smooth optical surfaces (Fig. 5). Additionally, the application of annular stitched aspheric surfaces to enhance imaging quality is introduced, along with the mathematical definition of the

annular stitched aspheric surface and the constraints necessary for smooth stitching (Fig. 6). Finally, an automatic image quality balance optimization algorithm based on an error function is presented, allowing for the improvement of image quality in each field.

Results and Discussions By combining the three optimization strategies of optical focus allocation, stitched aspheric surface, and the weight adjustment method, an ultrashort focal polarization catadioptric VR lens with a field angle of view of 47° and a total length of less than 9.5 mm is designed (Fig. 9), with a maximum distortion of less than 3%. Compared with that of the ordinary aspheric ultrashort focal polarization catadioptric VR lens (Fig. 8), the aberration of the edge FOV is significantly reduced, while the aberration maintains small. Another ultrashort focal polarization catadioptric VR optics with a field angle of view of 96° is designed with the same optimization strategy, and the image quality of the system before and after using the stitched aspheric surface is compared (Fig. 10). The image quality improvement is more obvious in the lens with a FOV of 96° compared with that in the lens with a FOV of 47° . Finally, the development process of a ultrashort focal polarization catadioptric VR lens (Fig. 11) is introduced, and a prototype with a large pupil, large FOV, high resolution, and ultra-thin structure is displayed (Fig. 12). Stray light test is carried out (Fig. 13), verifying the effectiveness of the stray light suppression method described in the previous section.

Conclusions The structural advantages and polarization principle of the ultrashort focal polarization catadioptric VR lens are analyzed, the factors affecting the optical efficiency of the system are explored, and the focal-distribution strategy and the process of solving the initial structure are introduced. The method to suppress the stray light caused by the birefringence on the component surface is obtained in the optimization stage. The transformation of an ordinary aspheric surface into an annular stitched aspheric surface is proposed for the first time to improve design freedom. The mathematical definition, establishment process, and optimization strategy of ring splicing aspheric surface are studied. Combined with the error function, the automatic image performance balance algorithm of each FOV is discussed. The feasibility of stitched aspheric surfaces is proved via the design results, providing a higher degree of freedom for VR lens optimization. Additionally, the image quality balancing algorithm is verified to realize image quality balance and improvement effect on VR lens of medium and high FOVs. The fabrication process of ultrashort focal polarization catadioptric VR lens is introduced, and the prototype demonstrates good performance and compact sunglass form after comprehensive analysis and experimental test. The proposed design approach is instructive for the development of high-definition and lightweight VR-HMDs.

Key words optical design; virtual reality; near-eye display; stitched aspheric surface; ultrashort focal polarization catadioptric lens