

激光与光电子学进展

基于双棱镜结构的双通道头盔显示光学系统设计

李仕伟, 刘钧*, 高明, 吕宏

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 针对头盔显示系统高像质、全彩显示、结构简单紧凑的应用需求, 提出双自由曲面棱镜结构, 利用离轴折/反射的原理, 设计了一款双通道头盔显示光学系统。通过自定义约束函数, 构建了双棱镜模型, 运用矩形阵列光瞳采样算法结合矢量像差理论, 迭代优化了离轴非旋转对称系统。所设计的投影和透射双通道系统工作波段为 400~700 nm, 出瞳直径为 8.5 mm, 出瞳距离为 21 mm, 体积为 41.5 mm×31.5 mm×14.1 mm。投影通道视场为 45°, 全视场调制传递函数值在 61 lp/mm 处大于 0.3, 透射通道视场为 52°, 全视场调制传递函数值在 30 cycle/(°) 处大于 0.4。对双通道系统进行了眼球动态像质分析, 结果表明, 在出瞳直径范围内, 人眼所接收到的像质基本不受眼球姿态的影响。该双棱镜结构为下一代双通道头盔显示系统提供了可参考的设计方向。

关键词 光学设计; 头盔显示器; 自由曲面棱镜; 离轴光学系统; 双通道系统

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221866

Design of Optical System for Dual-Channel Helmet-Mounted Display Based on Dual-Prism Structure

Li Shiwei, Liu Jun*, Gao Ming, Lü Hong

School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China

Abstract Because of the application requirements of high image quality, full-color display, and the simple and compact structure of a helmet-mounted display system, a dual-free-form prism structure is proposed. A dual-channel helmet-mounted display optical system is designed using the off-axis folding/reflection principle. Furthermore, a dual-prism model is constructed using the custom constraint function, and the off-axis non-rotational symmetry system is optimized using the rectangular array pupil sampling algorithm, which is combined with vector aberration theory. In the design of the projection and transmission dual-channel system, which has a working wavelength of 400–700 nm, the diameter and distance of the pupil are 8.5 mm and 21 mm, respectively, and the volume is 41.5 mm×31.5 mm×14.1 mm. The field of view of the projection channel is 45°, and the full field of view modulation transfer function value is greater than 0.3 at 61 lp/mm. The transmission channel field of view is 52°, and the full field of view modulation transfer function value is greater than 0.4 at 30 cycle/(°). The dynamic image quality analysis of the dual-channel system is conducted, and the analysis results show that the image quality received by the human eye is unaffected by the attitude of the eyeball within the range of the diameter of the pupil. This dual-prism structure provides a reference design direction for the next generation of the dual-channel helmet-mounted display system.

Key words optical design; helmet-mounted display; free-form surface prisms; off-axis optical systems; dual-channel system

1 引言

头盔显示器主要作用是将计算机生成的实时的虚拟影像信息, 与真实的场景信息进行无缝融合, 成像为用户视野前虚拟的放大画面, 从而使用户得到增强现

实的超感官体验。头盔显示器拥有小巧、无需手持、实时性、私密性的人机交互特点, 在军事、工业、娱乐、教育、医疗等领域得到广泛的应用^[1-3]。然而, 如何设计出一款佩戴舒适、像质优良、全彩显示、结构轻巧的双通道头盔显示器, 仍是目前研究的热点问题^[4]。

收稿日期: 2022-06-20; 修回日期: 2022-07-28; 录用日期: 2022-08-05; 网络首发日期: 2022-08-15

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JM-470)、陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(18JS048)

通信作者: junliu1990@163.com

针对头盔显示系统的研究热点问题,国内外众多学者提出了不同的设计方案。目前主流的光学设计方案有:离轴耦合反射、离轴双曲面反射、光波导显示、自由曲面棱镜。Wilson等^[5]采用离轴耦合反射方案,凭借着离轴曲面反射的优势,可以获得优良的成像质量和全彩显示,但是耦合器中有较多的倾斜、偏心镜片,导致系统体积重量较大,增加了制造成本,影响佩戴舒适度。刘军等^[6]采用离轴双曲面反射方案,实现了较大的视场且系统无色差,显著减轻了系统的重量,但是很难校正系统中的离轴像差。Lin等^[7]采用光波导显示方案,体积重量可以做得很轻薄,但是受限于目前的设计方法和加工工艺,实现可见光波段全彩显示较困难,会有较多的杂散光、色散严重,难以应用于像质要求较高的场景。孙路通等^[8]采用单个自由曲面棱镜方案,设计了一款小视场、窄波段头盔显示系统。程德文等^[9]为解决单个自由曲面棱镜难以校正色差的问题,采用单个自由曲面棱镜加衍射面的方案,实现了可见光波段全彩显示。如何协调好头盔显示器佩戴舒适度、成像质量、全彩显示、体积重量和制造成本等因素,设计出一款成像质量优良、结构简单紧凑、实现全彩显示的双通道头盔显示系统,是光学设计中的一个挑战。

为了设计出一款性能优良的头盔显示系统,本文利用自由曲面的像差校正优势,摒弃衍射面的复杂加工工艺,提出双自由曲面棱镜结构,并对双自由曲面棱镜结构的设计原理和空间位置约束方法进行了详细描述。结合矩形阵列光瞳采样算法和矢量像差理论,逐步迭代优化了离轴双通道系统。根据眼球的实际运动情况,分析了瞳孔不同位置状态下的双通道成像质量,设计出了基于双棱镜结构的双通道头盔显示光学系统。

2 系统原理与参数

2.1 设计原理

目前基于自由曲面棱镜方案的头盔显示器如图 1 所示,利用光的折射和全反射原理,采用半透半反棱镜

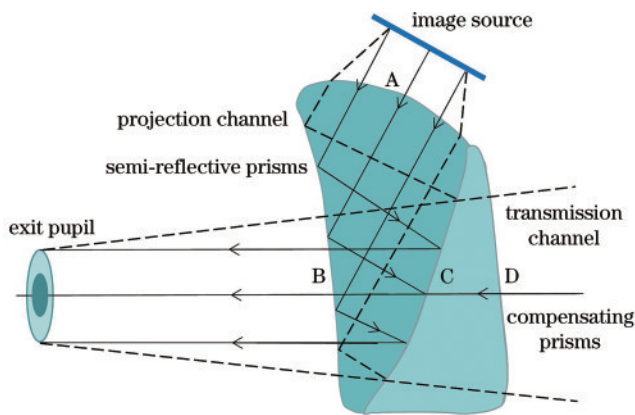


图 1 自由曲面棱镜结构
Fig. 1 Free-form prism structure

与补偿棱镜胶合的方式实现双通道,这种结构形式的投影通道,仅由单个自由曲面棱镜构成,受限于单一材料,无法实现可见光波段色差校正^[8]。对于部分设计方案^[9],需要二次加工,即先注塑成型自由曲面棱镜,再在 A 面上刻蚀衍射面,加工工艺复杂,且产品良率较低。

基于目前的自由曲面棱镜方案,本文提出对投影通道采用双棱镜结构,选用不同色散系数的材料,以校正系统的轴外色差。辅助棱镜和半透半反棱镜均采用注塑成型的方式^[10],一次性加工完成,取消衍射面的二次加工,简化系统的加工工艺,提高了加工良率,具体设计结构如图 2 所示。在投影通道中,图像源发出的光线经过表面 S_1 的折射进入辅助棱镜,再通过表面 S_2 的反射,由表面 S_3 折射出辅助棱镜,再经表面 S_4 折射进入半透半反棱镜。通过优化控制光线在表面 S_5 的入射角,得到所有入射角大于半透半反棱镜材料的临界角,光线在表面 S_5 全反射到表面 S_6 。由于是双通道系统,表面 S_6 需要镀半透半反膜。光线经过表面 S_6 的反射,再次经过表面 S_5 折射到人眼。光线两次经过表面 S_5 ,第一次结合材料特性控制光线全反射,第二次光线折射出自由曲面棱镜,为了增加通光量,需要在表面 S_5 上镀增透膜。在透射通道中,与投影通道共用半透半反棱镜,故需增加补偿棱镜,来补偿半透半反棱镜引起的透视畸变。由于透射通道仅存在畸变,补偿棱镜可选择与半透半反棱镜一样的材料。

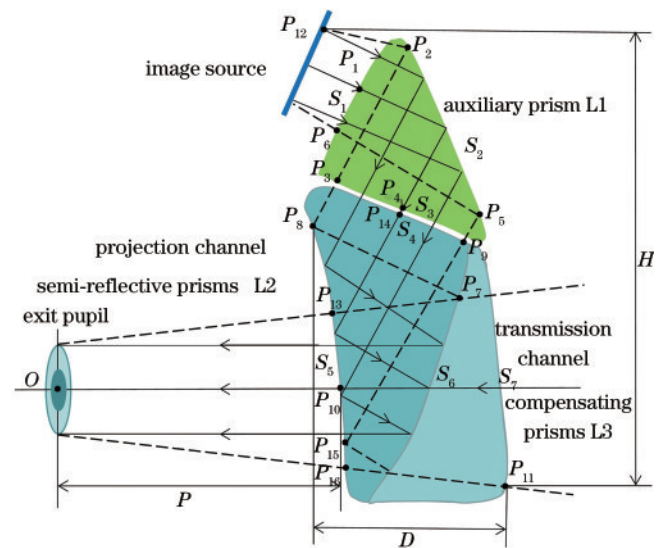


图 2 双自由曲面棱镜结构
Fig. 2 Dual-free-form prism structure

2.2 设计参数

双通道头盔显示器主要是为用户提供文字、图片和视频信息,系统的分辨率是设计的核心目标。本文选用图像源的分辨率为 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$,单个像素尺寸为 $8.2 \mu\text{m}$,纵横比为 0.56,为了充分利用分辨率,视场角与图像源的纵横比应一致。视场角与头

盔显示器的分辨率应满足如下关系^[11]

$$\theta = \min \left\{ \frac{2 \tan(\omega/2)}{m}, \frac{2 \tan(\nu/2)}{n} \right\}, \quad (1)$$

式中： θ 、 ω 、 ν 分别为头盔显示器的角分辨率、水平视场角、垂直视场角； m 和 n 分别为图像源的水平分辨率。当图像源确定后，视场角越大，单位视场内的像素数就越少，分辨率就越低。为了得到一个合适的视场角和高分辨的光学系统，结合人眼的角分辨率 δ ，则头盔显示器的角分辨率应满足：

$$\delta < \theta < 2\delta. \quad (2)$$

结合式(1)、(2)，得到光学系统水平视场角应满足：

$$2 \arctan\left(\frac{\delta m}{2}\right) < \omega < 2 \arctan(\delta m). \quad (3)$$

取 $\delta=0.017^\circ$ ，则水平视场角需满足：

$$31.1^\circ < \omega < 58.2^\circ. \quad (4)$$

同理，垂直视场角需满足：

$$17.8^\circ < \nu < 34.8^\circ. \quad (5)$$

人眼的瞳孔大小会随着光照亮度的变化而变化，当人眼通过头盔显示器观察图像源时，瞳孔的大小一般在 2.24~3.04 mm 之间变化。再考虑眼球的转动和头盔轻微的晃动，系统的出瞳直径应不小于 6 mm。考虑到人眼的生理特性和需要佩戴眼镜的特殊群体，系统的出瞳距离应大于 18 mm。

综合上述分析，对本次设计的双通道头盔显示系统提出如下设计指标，如表 1 所示。

表 1 双通道头盔显示光学系统设计指标

Table 1 Design indicators of dual-channel helmet-mounted display optical system

Design parameter	Value
Exit pupil /mm	8.5
Eye distance /mm	21
Projection channel field of view angle /[(°)×(°)]	39×22.5 (diagonal 45°)
Transmission channel field of view angle /[(°)×(°)]	45×25.5 (diagonal 52°)
Projection distortion /%	<8
Transmission distortion /%	<3
Resolution / (pixel×pixel)	1920×1080@8.2 μm
Working wavelength /nm	400-700
Volume (H×W×D) / (mm×mm×mm)	< (43×32×15)

3 双通道系统优化控制

3.1 结构约束

本文设计的双通道系统为离轴非旋转对称的自由曲面棱镜系统，其相对传统的旋转对称共轴系统而言，边界条件不仅要考虑元件的中心、边缘厚度，还要约束表面的离轴和倾斜量，这使得离轴非旋转对称系统的结构控制变得异常复杂^[12]。针对双通道系统，进行如下结构约束。总体尺寸控制、双棱镜结构控制、表面倾斜控制、离轴偏心控制、全反射条件控制公式分别为

$$\begin{cases} H = Y_{P_{12}} - Y_{P_{11}} \Rightarrow 30 < H < 43 \\ W = O + 2L \cdot \tan \omega \Rightarrow 20 < W < 32 \\ D = Z_{P_{11}} - Z_{P_8} \Rightarrow 8 < D < 15 \\ P = Z_{P_{10}} - Z_O \Rightarrow L > 18 \end{cases}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} d_{(P_1 \rightarrow P_2 P_3)} > 0 \\ d_{(P_4 \rightarrow P_5 P_6)} > 0 \\ d_{(P_{11} \rightarrow P_7 P_8)} > 0 \\ d_{(P_7 \rightarrow P_9 P_{15})} > 0 \end{cases}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} K_{P_2 P_3} > 0 \\ K_{P_9 P_{15}} > 0 \\ K_{P_5 P_6} < 0 \\ K_{P_7 P_8} < 0 \end{cases}, \quad (8)$$

$$\begin{cases} Y_{P_8} > Y_{P_7} > Y_{P_{13}} \\ Y_{P_{15}} > Y_{P_{16}} \end{cases}, \quad (9)$$

$$\theta_{\min} = \arcsin \frac{1}{n} = \arcsin \frac{1}{1.53} = 40.8^\circ. \quad (10)$$

双通道系统的总体结构尺寸通过式(6)控制，式中 H 、 W 、 D 、 P 分别为系统的总体高度、宽度、厚度和出瞳距离， Y 、 Z 为系统的全局 Y 、 Z 坐标， O 为系统的出瞳直径。投影通道的双棱镜结构由式(7)进行约束，光线都控制在自由曲面棱镜内部。式(8)控制上下视场边缘光线表面交点对构成的直线斜率，从而间接控制离轴表面的斜率 K 。通过式(9)约束上下视场边缘光线的全局 Y 坐标，确保离轴系统在优化过程中整体结构稳定。 S_5 面的反射角通过式(10)进行约束，使其达到全反射条件。半透半反棱镜的材料选用 K26R，其折射率为 1.53，按照式(10)计算可知，在 S_5 面上所有的入射角要大于 40.8° 。

3.2 光瞳采样方法

双棱镜结构形式的双通道头盔显示系统,在不同表面上的孔径类型具有不一致性,且不同孔径具有离轴和偏心特性。离轴和偏心带来的高阶离轴矢量像差,使得常规的高斯求积算法不再适用^[13]。在设计初始阶段,需要快速进行光线追迹,采用高斯求积光瞳采样算法,采样的环数和臂数依据系统的像差阶次逐步增加,直至评价函数不再发生明显变化。在设计的中后期,考虑到离轴偏心和高阶离轴矢量像差的影响,结合矢量像差理论^[14],换用矩形阵列光瞳采样算法,该算法通过采样更多的光线来弥补优化精度的不足。两种光瞳采样原理如图 3 所示。

3.3 逐步迭代法

根据式(6)~(10)的结构约束方法,构建平面初始结构,通过对离轴矢量像差的分析可知,采用逐步迭代的方法^[15],如图 4 所示。经历从平面到球面再到自由曲面的转换,逐步提高光瞳采样数量、视场数量、视场大小、出瞳直径、自由曲面的阶次。先优化投影通道的双棱镜结构,然后将投影通道的 S_5 和 S_6 面固定,增加 S_7 面,再优化透射通道。

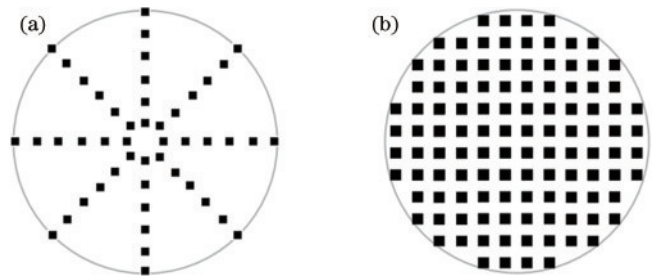


图 3 两种光瞳采样原理。(a)高斯求积光瞳采样 6 环 8 臂; (b)矩形阵列光瞳采样 12×12

Fig. 3 Two optical pupil sampling principles. (a) Gaussian product pupil sampling 6 rings 8 arms; (b) rectangular array pupil sampling 12×12

本次设计的双通道头盔显示光学系统是关于 YOZ 平面对称的,故自由曲面面形选用 XY 多项式,并使 x 奇次幂的多项式系数全为 0^[16],其面形表达式为

$$z(x, y) = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2(x^2 + y^2)}} + \sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^p A_{i,j} x^i y^j, \quad (11)$$

式中: c 为顶点处的曲率; k 为圆锥系数; p 为 XY 多项式最大项数, $1 \leq i+j \leq p$; $A_{i,j}$ 为多项式系数。

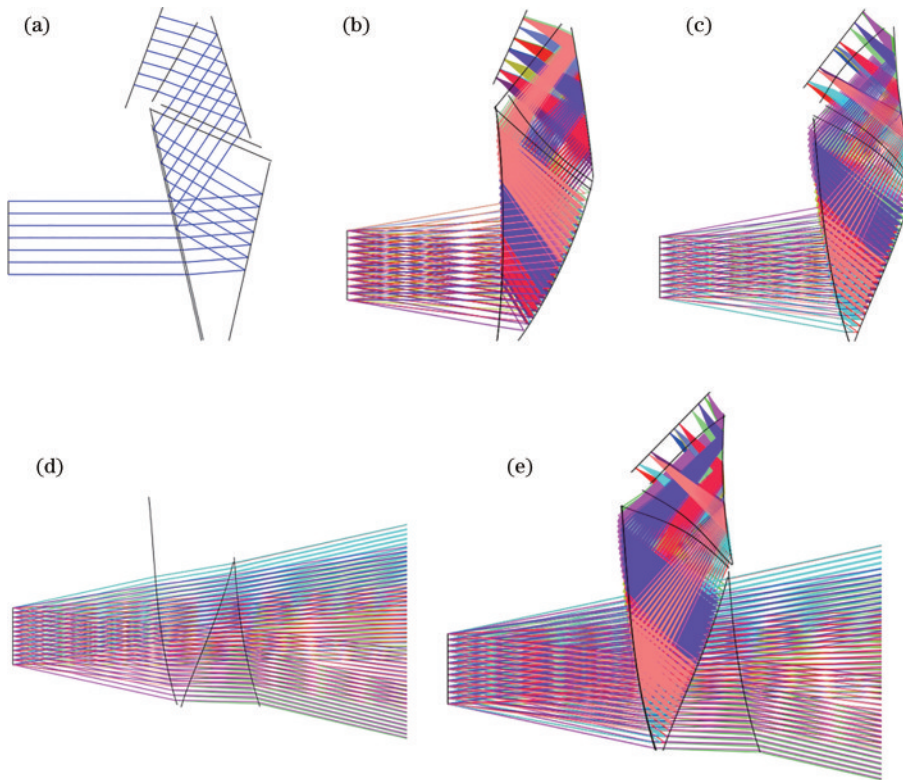


图 4 迭代优化顺序。(a)平面结构;(b)球面结构;(c)自由曲面结构;(d)透射通道结构;(e)双通道结构

Fig. 4 Iterative optimization sequence. (a) Planar structure; (b) spherical structure; (c) free-form structure; (d) transmission channel structure; (e) dual-channel structure

4 设计结果

4.1 整体分析

整体结构设计尺寸为 41.5 mm×31.5 mm×

14.1 mm(高×宽×厚),投影通道视场为 39°×22.5°(对角视场为 45°),透射通道视场为 45°×25.5°(对角视场为 52°)。聚焦模式下的投影通道的双棱镜选用不同的材料,其中,辅助棱镜选用折射率较大、阿贝数较

小的 EP7000, 半透半反棱镜选用折射率较小、阿贝数较大的 K26R, 两种材料均为耐热性好、机械性能优良、密度低的塑料, 注塑成型的过程中良率较高。无焦模式下的透射通道采用补偿棱镜与半透半反棱镜胶合的方式, 补偿棱镜主要是用来补偿透射通道与投影通道共用部分产生的畸变, 故材料选择和半透半反棱镜一样的 K26R。

双通道系统的调制传递函数 (MTF) 曲线如图 5 所示。在投影通道中, 设计时采用的图像源单个像素尺寸为 $8.2 \mu\text{m}$, 依据奈奎斯特采样定律得出光学系统

的截止频率为 61 lp/mm 。在截止频率处: 当出瞳直径为 8.5 mm 时, 中心视场大于 0.3 , 边缘视场大于 0.2 ; 当出瞳直径为 3 mm 时, 中心视场大于 0.5 , 边缘视场大于 0.3 , 满足高分辨头盔显示系统的设计要求。在透射通道中, 系统为无焦模式, 人眼作为接收系统时的最小分辨角为 0.017° , 则类比奈奎斯特采样定律, 在无焦模式下的 MTF 截止频率为 $30 \text{ cycle}/(^\circ)$ 。在截止频率处: 当出瞳直径为 8.5 mm 时, 中心视场大于 0.5 , 边缘视场大于 0.2 ; 当出瞳直径为 3 mm 时, 中心视场大于 0.55 , 边缘视场大于 0.4 , 满足目视系统设计要求。

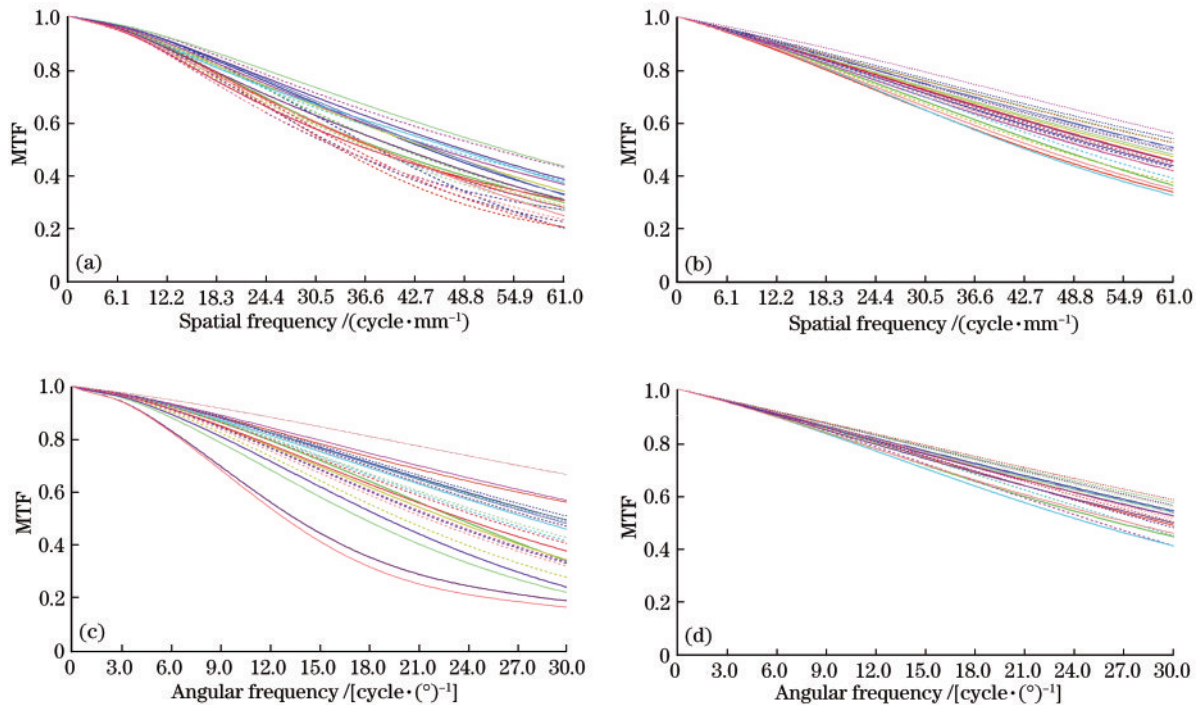


图 5 双通道系统 MTF 曲线。(a) 投影通道 MTF 曲线 (出瞳直径 8.5 mm); (b) 投影通道 MTF 曲线 (出瞳直径 3 mm); (c) 透射通道 MTF 曲线 (出瞳直径 8.5 mm); (d) 透射通道 MTF 曲线 (出瞳直径 3 mm)

Fig. 5 MTF curves of dual-channel system. (a) MTF curves of projection channel (exit pupil diameter 8.5 mm); (b) MTF curves of projection channel (exit pupil diameter 3 mm); (c) MTF curves of transmission channel (exit pupil diameter 8.5 mm); (d) MTF curves of transmission channel (exit pupil diameter 3 mm)

双通道系统的网格畸变如图 6 所示。在投影通道中, 全视场最大畸变为 7.2% , 主要出现在 $(+y, +x)$ 和 $(+y, -x)$ 处, 0.7 视场内最大畸变为 3.1% , 可以对

输入图像源的图像上边缘进行轻微的畸变预处理。在透射通道中, 全视场最大畸变为 -1.92% , 满足目视系统畸变设计要求。

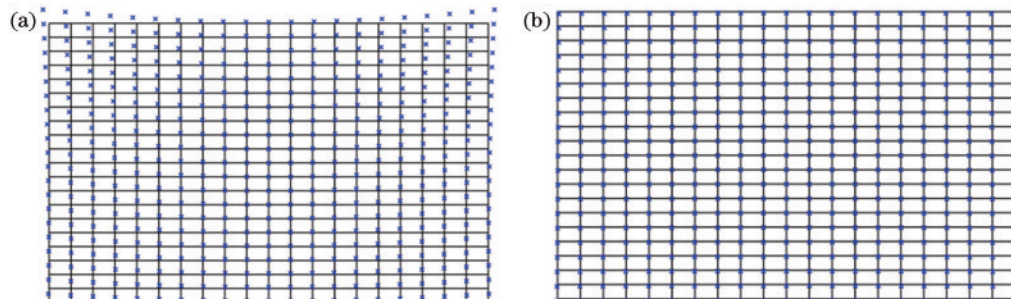


图 6 双通道系统网格畸变。(a) 投影通道; (b) 透射通道

Fig. 6 Grid distortion of dual-channel system. (a) Projection channel; (b) transmission channel

图 7 为双通道系统通过卷积具有点扩散函数阵列的光源位图进行的成像模拟,该模拟过程考虑了光学系统的衍射效应、几何像差、相对照度等。在图 7(a)的投影通道中,通过设置 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel} @ 8.2 \mu\text{m}$

分辨率的位源图像来模拟成像,结果显示,在全视场范围内相对照度一致、对比度明显、色差校正优异,真正实现了可见光波段全彩显示。在图 7(b)的透射通道中,整体像质均匀良好。

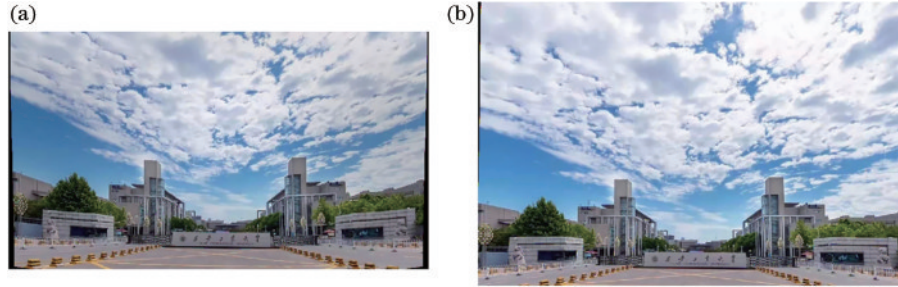


图 7 双通道系统图像模拟。(a)投影通道;(b)透射通道

Fig. 7 Image simulation of dual-channel system. (a) Projection channel; (b) transmission channel

4.2 眼球动态像质分析

当眼球转动或佩戴者运动姿态变化,导致瞳孔中心与设计光轴中心相对位置发生变化时,所观察到的像质必然会受到影。图 8 为双通道头盔显示系统在人眼瞳孔中心与设计出瞳孔径中心相对位置发生变化时的示意图,图中点 a~i 分别为瞳孔中心相对出瞳孔径中心的偏离位置,出瞳孔径为设计值 8.5 mm ,以人眼瞳孔直径 3 mm 为参考,进行像质评价。

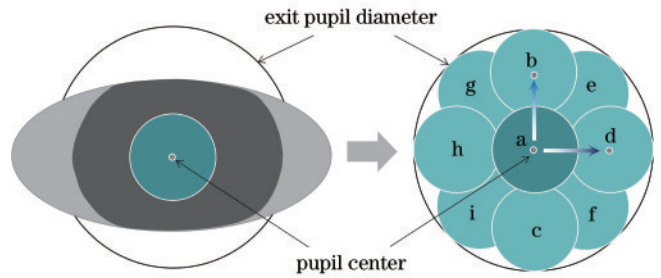


图 8 眼球运动示意图

Fig. 8 Schematic diagram of eye movements

当系统的瞳孔中心与设计出瞳孔径中心完全重合时,双通道头盔显示系统的均方根(RMS)二维(2D)视场图如图 9 所示。在图 9(a)的投影通道中, 0.7 视场以内的 RMS 光斑半径均小于 $8.2 \mu\text{m}$,最大 RMS 光斑半径为 $19.7 \mu\text{m}$,只出现在水平边缘视场,对整体视觉效

果影响不大。在图 9(b)的透射通道中,全视场范围内最大 RMS 波前差为 0.147λ ,小于 0.25λ ,满足目视系统设计要求的。

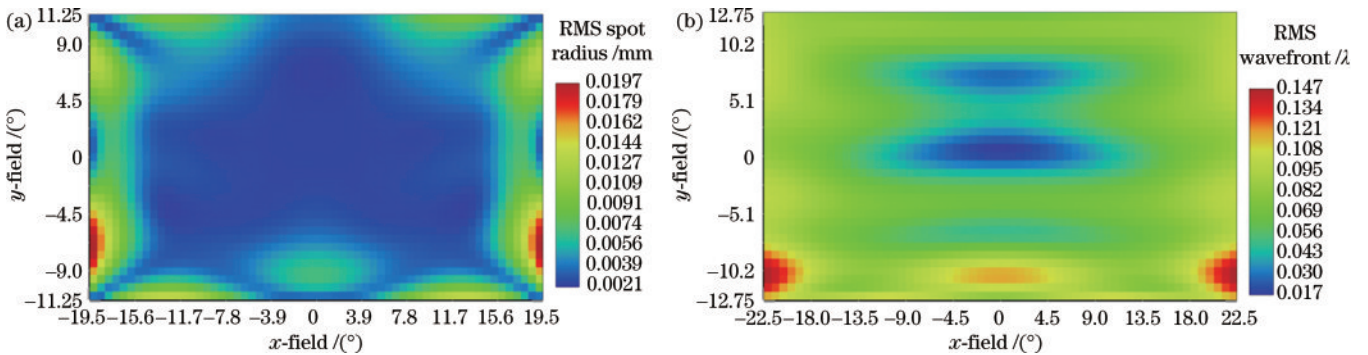


图 9 双通道系统 RMS 二维视场图。(a)投影通道 RMS 光斑半径二维视场图;(b)透射通道 RMS 波前差二维视场图

Fig. 9 2D field of view diagrams of RMS for dual-channel system. (a) 2D field of view of RMS spot radius of projection channel; (b) 2D field of view of RMS wavefront difference of transmission channel

当瞳孔中心与设计的出瞳孔径中心相对位置发生偏离时,各偏离点处的平均 RMS 如图 10 所示。双通道系统的平均 RMS 光斑半径约为一个像元 $8.2 \mu\text{m}$,平均 RMS 波前差在 0.25λ 以内。双通道平均 RMS 像质反映了三个特性:全视场全孔径像质关于系统的 Y 轴对称;瞳孔越靠近出瞳孔径中心,像质越好;整体像质表现出,上孔径像质优于下孔径像质。

的变化引起瞳孔中心发生偏离时,佩戴者依旧可以正常使用该双通道头盔显示光学系统,且不会有明显的视觉偏差。

4.3 公差分析

本文设计的离轴非旋转对称自由曲面系统,在面形公差这一项,无法直接分析。面形公差的最本质来源是各点的矢高相对理想矢高发生偏离,导致面形发生变化。为引入面形公差,均匀地在自由曲面上取任

综上所述可知,当眼球转动或者佩戴者运动姿态

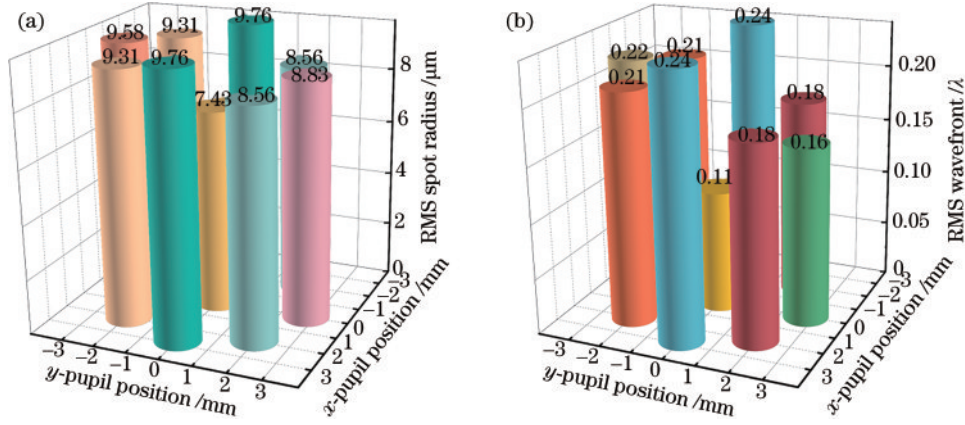


图 10 双通道系统眼球动态像质评价。(a)投影通道平均RMS光斑半径;(b)透射通道平均RMS波前差

Fig. 10 Evaluation of dynamic image quality of eye movement in dual-channel system. (a) Average RMS spot radius of projection channel; (b) average RMS wavefront difference of transmission channel

意多个点,由式(11)可以得到自由曲面任意点的矢高为 $z_{i,j}$,引入加工误差矢高增量为 $\Delta z_{i,j}$,则加工后任意点的矢高 $z'_{i,j}$ 表示为

$$z'_{i,j} = z_{i,j} + \Delta z_{i,j}, \quad (12)$$

式中: $\Delta z_{i,j} = H \cdot \delta_{rand}$, H 为衡量面形精度的面形误差峰谷(PV)值, δ_{rand} 为0~1之间的随机数,用于模拟在当前PV值下,不同点的矢高起伏情况^[17]。

将引入加工误差的任意点矢高按式(11)重新拟合出自由曲面多项式,提取多项式系数输入光学仿真软件,进行光线追迹观察MTF变化。按照上述随机统计方法,最终经多次迭代拟合,得到表2的公差分配结果,装配时以L2为装配基准,面形公差PV值最小为 $0.15 \mu\text{m}$,低于目前我国自由曲面最小加工精度 $1/30\lambda$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)^[18]。

表 2 双通道头盔显示系统公差分配

Table 2 Tolerance allocation for dual-channel helmet-mounted display system

Prism	Surface type	Machining tolerance		Assembly tolerance			Material tolerance	
		Surface / μm	Thickness / μm	Interval / μm	Decenter / μm	Tilt / (')	Index	Abbe / %
L1	S_1 -free-form	±0.15						
	S_2 -even asphere	±0.5	±3.00	±5.00	±5.00	±0.2	0.0008	0.08
	S_3 -free-form	±0.15						
L2	S_4 -free-form	±0.15						
	S_5 -even asphere	±0.50	±5.00	—	—	—	0.0008	0.08
	S_6 -even asphere	±1.00						
L3	S_6 -even asphere	±1.00	±5.00	±5.00	±10.00	±0.2	0.0008	0.08
	S_7 -free-form	±0.25						

依据表2的公差分配,利用4.2节的评价方法,得到如图11所示的公差分析结果,根据图11可以得到与4.2节类似的结论。虽然引入加工公差和装配公差会导致系统像质有所下降,但是双通道平均MTF依然有70%的样本概率大于0.25,公差分析的结果满足目视系统加工要求。

4.4 技术对比

表3为本次设计的双通道头盔显示系统与同类型设计结果的技术对比。设计1采用离轴折反加耦合镜的方案,该方案可以确保良好的像质和理想的视场,但是其不可避免自身体积庞大、装调困难的问题。设计2采用离轴两反的方案,该方案不需要校正色差,但是难以设计出较大的视场,且分辨率不高。设计3采用单

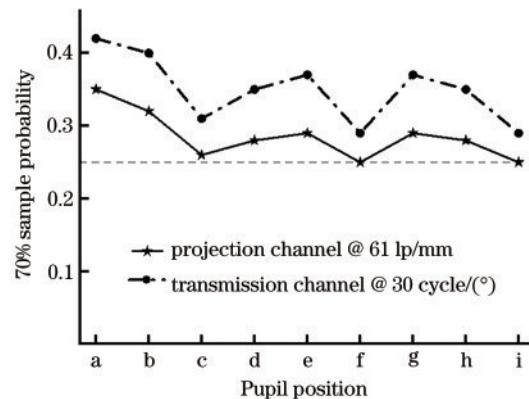
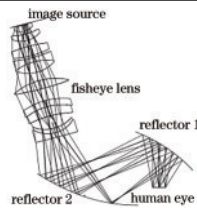
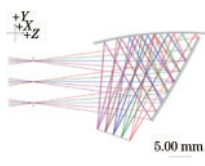
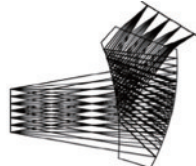
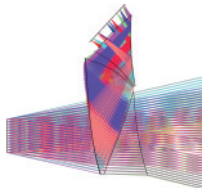


图 11 公差分析结果

Fig. 11 Tolerance analysis results

表 3 不同结构形式的头盔显示系统设计结果对比

Table 3 Comparison of design results of helmet-mounted display systems with different structural forms

Item	Design 1	Design 2	Design 3	Proposed design
Result				
Exit pupil /mm	8	10	8	8.5
Eye distance /mm	21	20	20	21
Field of view angle /[(°)×(°)]	67, 60(H)×30(V)	28, 23(H)×16(V)	25, 20(H)×15(V)	45, 39(H)×22.5(V)
MTF	>0.25@52 lp/mm	>0.15@30 lp/mm	>0.25@30 lp/mm	>0.2@61 lp/mm
Resolution /(pixel×pixel)	1920×1200@9.6 μm	800×600@15 μm	640×480@15 μm	1920×1080@8.2 μm
Volume /(mm×mm×mm)	>170×100×34	>20.7×23×20	>25×17×13	41.5×31.5×14.1
Special surface	Free-form	Free-form	Free-form diffraction	Free-form

个自由曲面棱镜的方案,以及二次加工刻蚀衍射面的方式,实现了全彩显示,提高了工艺复杂度。最后是本文方案的设计结果,创新性地采用双自由曲面棱镜结构,一次性注塑完成,取消了衍射面的二次加工。

综合对比来看,本文设计方案不仅满足了成像性能优良、结构紧凑的应用需求,而且简化了工艺复杂度,使大规模的批量化生产成为了可能。

5 结 论

本文结合矩形阵列光瞳采样算法,采用逐步迭代的方法,设计了一款双通道头盔显示光学系统。通过建立双自由曲面棱镜结构模型,取代了现有单个自由曲面棱镜加衍射面的结构,简化了加工工艺,实现了全彩显示。并模拟了人眼瞳孔在不同位置时的系统像质,结果表明,本设计在全出瞳直径范围内,像质无明显偏差。经公差分析可知,70%的样本概率在当前可加工、装配的条件下,投影通道 MTF 大于 0.25@61 lp/mm,透射通道 MTF 大于 0.3@30 cycle/(°)。与同类型的头盔显示系统进行了技术对比可知,本文提出的双棱镜结构满足头盔显示系统高像质、全彩显示、结构简单紧凑的应用需求。

参 考 文 献

- [1] 史晓刚, 薛正辉, 李会会, 等. 增强现实显示技术综述[J]. 中国光学, 2021, 14(5): 1146-1161.
Shi X G, Xue Z H, Li H H, et al. Review of augmented reality display technology[J]. Chinese Optics, 2021, 14(5): 1146-1161.
- [2] Cheng D W, Wang Q W, Liu Y, et al. Design and manufacture AR head-mounted displays: a review and outlook[J]. Light: Advanced Manufacturing, 2021, 2(3): 350-369.
- [3] Funk S, Lee D H. Optical head-mounted computer display for education, research, and documentation in hand surgery[J]. The Journal of Hand Surgery, 2016, 41(1): 150-153.
- [4] 黄颂超, 冯云鹏, 程灏波. 非对称轻小型头盔显示器光学系统设计[J]. 中国光学, 2020, 13(4): 832-841.
Huang S C, Feng Y P, Cheng H B. Non-symmetrical design of a compact, lightweight HMD optical system[J]. Chinese Optics, 2020, 13(4): 832-841.
- [5] Wilson A, Hua H. Design and demonstration of a vari-focal optical see-through head-mounted display using freeform Alvarez lenses[J]. Optics Express, 2019, 27(11): 15627-15637.
- [6] 刘军, 黄玮. 反射式自由曲面头盔显示器光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 1018001.
Liu J, Huang W. Optical system design of reflective head mounted display using freeform surfaces[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(10): 1018001.
- [7] Lin W K, Matoba O, Lin B S, et al. Astigmatism correction and quality optimization of computer-generated holograms for holographic waveguide displays[J]. Optics Express, 2020, 28(4): 5519-5527.
- [8] 孙路通, 王灵杰, 王蔚松, 等. 基于单图像生成单元的双焦面头盔显示光学系统设计[J]. 光学学报, 2020, 40(13): 1322004.
Sun L T, Wang L J, Wang W S, et al. Design of dual-focal-plane helmet mounted display based on single picture generation unit[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(13): 1322004.
- [9] 程德文, 王涌天, 常军, 等. 轻型大视场自由曲面棱镜头盔显示器的设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 309-311.
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.
- [10] 徐乾智, 王洋, 黄蕴涵, 等. 便携多表面反射式望远系统光学设计[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 0722001.

- Xu Q Z, Wang Y, Huang Y H, et al. Optical design of portable multi-surface reflective telescope system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 0722001.
- [11] 周学鹏, 赵渊明, 常颖. 离轴反射式双通道头盔显示器光学系统设计[J]. 激光杂志, 2018, 39(6): 98-102.
- Zhou X P, Zhao Y M, Chang Y. Optical system design of off-axis reflective dual-channel helmet mounted display [J]. Laser Journal, 2018, 39(6): 98-102.
- [12] 何丽鹏, 曾振煌, 林峰. 折/反射式离轴头盔显示器光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 122201.
- He L P, Zeng Z H, Lin F. Optical design of catadioptric off-axis helmet-mounted display[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 122201.
- [13] Forbes G W. Optical system assessment for design: numerical ray tracing in the Gaussian pupil[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1988, 5(11): 1943-1956.
- [14] Gray R W, Dunn C, Thompson K P, et al. An analytic expression for the field dependence of Zernike polynomials in rotationally symmetric optical systems[J]. Optics Express, 2012, 20(15): 16436-16449.
- [15] 杨增鹏, 李政言, 浦恩昌, 等. 基于离轴三反光学系统的高分辨率中阶梯光栅光谱仪[J]. 光学学报, 2021, 41(22): 2212001.
- Yang Z P, Li Z Y, Pu E C, et al. High-resolution echelle grating spectrometer based on off-axis three-mirror reflective optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(22): 2212001.
- [16] 罗越, 李立波, 冯玉涛, 等. 一种自由曲面光学系统初始结构设计方法[J]. 光学学报, 2021, 41(24): 2422002.
- Luo Y, Li L B, Feng Y T, et al. Design method for initial structure of freeform surface optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(24): 2422002.
- [17] 张杨柳, 苏宙平, 潘红响, 等. 自由曲面车载抬头显示器的光学设计及公差分析[J]. 光子学报, 2020, 49(9): 0922002.
- Zhang Y L, Su Z P, Pan H X, et al. Optical design and tolerance analysis of freeform automotive head-up display [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(9): 0922002.
- [18] 孙永雪, 夏振涛, 韩海波, 等. 大口径红外离轴三反光学系统设计及公差分析[J]. 应用光学, 2018, 39(6): 803-808.
- Sun Y X, Xia Z 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.