

基于双图像生成器的双焦面抬头显示系统光学设计

孔祥旭^{1,2}, 薛常喜^{1,2*}

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

²长春理工大学先进光学设计与制造技术吉林省高校重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要 增强现实型抬头显示器拥有比传统抬头显示器更加丰富的显示内容。理想的增强现实型抬头显示器需要显示多个不同深度的虚像来呈现基础与交互信息,但传统的解决方案多为通过高速旋转反射镜或光学变焦系统来显示两种深度的内容,可靠性较低,存在驾驶安全隐患。提出了一种采用两块图像生成单元和单块自由曲面镜实现双焦面显示的离轴反射式光学结构,通过添加一块平面反射镜增加远场光路物距,从而实现双焦面的显示,最终得到一个视野盒大小为 130 mm×50 mm、视场角分别为 5°×1°和 10°×5°、虚像距离分别为 2.5 m 和 7.5 m 的双焦面抬头显示器系统。该研究结果不仅满足了近场基础信息与远场交互信息同时显示的需求,景深的显示效果也同样得到了改善。

关键词 光学设计; 抬头显示器; 增强现实; 自由曲面; 双焦面

中图分类号 O435

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1422003

Optical Design of Dual-Focal-Plane Head-Up Display Based on Dual Picture Generation Units

Kong Xiangxu^{1,2}, Xue Changxi^{1,2*}

¹School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

²Key Laboratory of Advanced Optical System Design and Manufacturing Technology of Jilin Province, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China

Abstract Compared with conventional head-up displays (HUDs), augmented reality HUDs (AR-HUDs) can display richer information, and an ideal AR-HUD requires the display of multiple virtual images at different depths to present basic and interactive information. In most traditional solutions, however, the display of information at the two depths is achieved by rotating the reflective mirror at high speed or using the optical zoom system, with lower reliability and potential safety hazards. Therefore, the optical off-axis reflective structure is proposed to achieve the dual-focal-plane display using two picture generation units (PGUs) and a single free-form surface mirror. By adding a plane mirror to increase the object distance of the far-field optical path, we achieve a display of two focal planes. Finally, a dual-focal-plane HUD is obtained, with an eye box of 130 mm×50 mm, field-of-view angles of 5°×1° and 10°×5°, and virtual image distances (VIDs) of 2.5 m and 7.5 m. The research results meet the requirement of the simultaneous display of near-field basic information and far-field interactive information, and the display effects of depth of field are enhanced.

Key words optical design; head-up display; augmented reality; free-form surface; dual-focal-plane

1 引言

随着汽车朝更高智能化、网联化的方向发展,智能座舱也随之进入发展快车道,而增强现实型抬头显示

器(AR-HUD)则是智能座舱中高效的人机交互窗口。它产生的虚像与路面进行实时叠加,驾驶员在开车的过程中不低头就可以看到所有的重要信息,缩短了驾驶员的盲区时间。

收稿日期: 2022-01-04; 修回日期: 2022-02-15; 录用日期: 2022-02-21

基金项目: 国家自然科学基金(61905024)

通信作者: *xcx272479@sina.com

随着增强现实(AR)技术与HUD相结合,HUD光学系统的设计要求也更加苛刻。近年来HUD朝向大视场、远虚像距的趋势不断发展,除此之外,成本与结构紧凑型设计也十分重要^[1-3]。根据人眼的视觉特性,驾驶员眼睛的聚焦位置会随着车速变化而自然地前后移动。而传统的AR-HUD通常为定焦结构,系统只配备了一块图像生成单元来显示全部内容。长时间观看后,由于画面的纵深感、立体感差,且系统焦面位置与人眼聚焦位置不一致,驾驶员会感到视线模糊甚至眩晕。合理的AR-HUD应投影多个不同深度的虚像,用来分别显示AR信息与基础安全信息^[4-6]。国内外已经有多位学者对多焦面HUD的设计进行过研究。解洪升^[7]提出了一种多焦面AR-HUD显示方案,采用一块图像生成单元(PGU)交替投射近景和远景图像,同时通过特定角度翻转反射镜形成不同的成像光路,利用人眼视觉停留差能够同时观看远景与近景的图像。但此方案中反射镜高速旋转,电机寿命有限,成像稳定性、连续性也难以保证。王元鹏^[8]提出了一种可变焦HUD结构,系统中的反射镜和透镜可沿着光轴前后移动以调节可变焦光学系统的焦距。考虑到实际驾驶情况,变焦时的模糊画面会为驾驶带来潜在的危险,这些隐患在设计时需要进行规避。Seo等^[9]将PGU划分为两块工作区域,设计出一种基于单块激光扫描PGU的双焦面HUD,它可以同时生成虚像距离(VID)分别在2 m和5 m处的投影,但划分工作区域后分辨率、视场角(FOV)减小,画面大小与清晰度有所下降,且激光扫描PGU不耐高温,暂不满足车规级别使用。

针对增强现实技术的实现对参数提出的新要求,同时结合人眼特性,本文提出并设计了一种新的光学结构。通过使用双PGU、单片自由曲面主镜、单片平面折叠镜,实现了远视距AR交互信息与近视距基础信息两焦面同时显示的功能,该工作为增强现实抬头显示器的设计提供了一种可选的方案。

2 双焦面AR-HUD结构与原理

HUD的显示主要依据虚像成像原理。在可产生虚像的光学元件中,凸透镜与凹面镜拥有在远处产生放大虚像的光学特性。为了尽可能地将光路小型化,采用反射式结构将光路折叠,增加光程长度。反射系统所具有的无色差优势也为系统优化提供了有利的条件。使用凹面反射镜为主要设计元件,以在提供放大倍率的同时校正光路与挡风玻璃所带来的像差。

根据光学成像原理,在焦距范围内,不同的物距也会使系统投影出不同像距的虚像。本文所提的双焦面抬头显示器为反射式目视光学系统,同样依据此原理进行设计,通过使用两块PGU构建两套独立且物距不同的光路,以实现双焦面显示效果。图1为所提出的双焦面AR-HUD反射成像单元内部光路结构示意图。系统采用了两块像源PGU1和PGU2。PGU1发出的光线经过自由曲面反射主镜M1的反射直接投射至挡

风玻璃上。而PGU2发出的光线则先经过平面镜M2进行一次光路的折叠,这样可增加物距,可投射出一个与PGU1相比视距更远、画面更大的虚像。采用单自由曲面镜校正系统像差,考虑到单镜双光路共用难以将两焦距的像质同时校正到最佳,参考多焦点设计的思路,利用自由曲面的面型优势,对镜面采用双光路共面分区域划分,从而实现复用一块大自由曲面反射镜的目的。

HUD常用的光路结构可依据光路的走向不同分为垂直式与水平式两类。源自三镜消像散系统的离轴三反结构拥有更强的像差校正能力^[10-11]。但较大结构体积使其难以在车内安装。此次设计针对远视距光路,采用了垂直式“三角形”两镜结构,该结构中心主光线与图像生成器法线之间的夹角较小,使其更有利于照明与成像质量的优化。

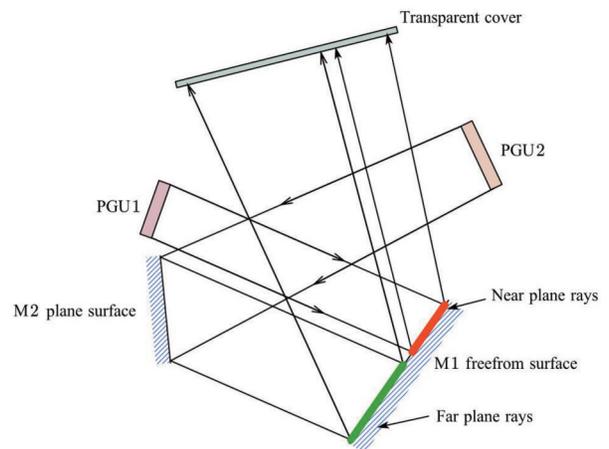


图1 双焦面AR-HUD内部光路结构示意图

Fig. 1 Internal optical path structure of dual-focal-plane AR-HUD

3 双焦面AR-HUD的重要参数分析

双光路AR-HUD的实现对系统的虚像视距、视场、分辨率、亮度、视野盒等主要参数提出了更高的要求,需要分别对两焦面的实际使用场景与预定参数进行分析。

在双焦面AR-HUD中,与道路交互的AR画面具有较大的视距,这样可将虚像与真实路面进行贴合,避免视觉冲突。适当缩短基础信息的视距,可避免其与前车覆盖造成的视野遮挡。视距与视场两参数可以清晰地表述AR-HUD虚像的画面大小。另外,视场的大小也与反射镜口径大小、虚像大小、结构的紧凑程度等参数相互制约。同时,视场的大小与分辨率的大小存在着反比关系。在PGU尺寸确定后,分辨率决定了理想成像的清晰度观感极限。AR-HUD需要保证在白天和晚上都能正常工作,考虑到白天的户外亮度可达到 15000 cd/m^2 ,而夜晚的户外亮度又会低至 3 cd/m^2 ,为了使驾驶员整天都可以清晰地看到虚像,采用数字光处理(DLP)与薄膜晶体管型液晶显示屏(TFT-LCD)双PGU的方案,该方案不仅同时满足了两光路

对最高亮度与亮度动态调节的需求,分辨率与照度得以保证,相比双DLP方案也控制了成本。AR-HUD的视野盒是驾驶员可以查看整个显示画面的区域范围。视野盒越大代表可活动范围越大,但同时需要更多的光通量,反射镜的口径也随之更大,大口径的元件也不利于结构的小型化。小尺寸的视野盒则会限制驾驶员的移动范围。

综合考虑,双焦面AR-HUD光学系统的设计参数如表1所示。本文设置上方远场的参数FOV为 $10^\circ \times 5^\circ$,VID为7.5 m;下方近场的参数FOV为 $5^\circ \times 1^\circ$,VID为2.5 m。在两视场之间留出 1.5° 的间隔,避免显示画面重叠,也便于后期显示内容的设计。系统采用的PGU尺寸分别为 $70.49 \text{ mm} \times 39.64 \text{ mm}$ 与 $68.20 \text{ mm} \times 41.32 \text{ mm}$,分辨率分别为 854×480 与 800×480 。通过两者的像素尺寸,可以计算出光学系统的极限分辨率 f :

$$f = \frac{1}{2 \times p}, \quad (1)$$

式中: p 代表像素尺寸。

通过计算得出该系统两光路的最大截止频率均约为6 lp/mm。为保证成像质量,要求系统的光学传递函数(MTF)在6 lp/mm处大于0.3,畸变率小于5%。

表1 光学系统设计指标

Table 1 Design specifications of AR-HUD

Parameter	Value
FOV / ($^\circ$)	Far: 10×5 ; near: 5×1
VID / m	Far: 7.5; near: 2.5
Eyebox size / mm	130×50
Pupil diameter / mm	5
Distortion / %	< 5
Wavelength / μm	0.55
PGU	TFT-LCD 800×480 DLP 854×480
MTF at $6 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$	> 0.3

AR-HUD的画面大小可以通过视场与虚像视距等参数进行评估^[12],它们的关系为

$$H = V \left(\tan F_{v_{\max}} - \tan F_{v_{\min}} \right), \quad (2)$$

$$W = 2 \times V \times \tan \left(\frac{F_H}{2} \right), \quad (3)$$

式中: H 为虚像高度; W 为虚像宽度; V 为虚像投影距离; $F_{v_{\max}}$ 为纵向视场角最大值; $F_{v_{\min}}$ 为纵向视场角最小值; F_H 为横向视场角大小。

根据式(2)、(3)计算出本系统远场虚像尺寸为 $1.312 \text{ m} \times 0.520 \text{ m}$,近场虚像尺寸为 $0.218 \text{ m} \times 0.044 \text{ m}$ 。远场虚像面积足以显示AR带来的丰富交互信息,近场虚像面积不会因过大造成视野遮挡。综上,该参数确定较为合理。

4 双焦面AR-HUD光学系统设计与像质评价

4.1 双焦面AR-HUD的设计

为了简化系统孔径的定义、便于角度与视场的固定,HUD采用反向光路设计。根据光路可逆原理,设计时光线从虚像位置出发,若在PGU位置形成一个理想的实像,则PGU发出的光通过此系统同样也可以形成一个理想的虚像。

由于带有不规则面型的挡风玻璃在此系统中也参与光学反射,因此车载HUD为高度定制的光学系统^[13]。在设计之前,需获取车辆的挡风玻璃的面型数据。理想的方法则是在进行设计之前先将挡风玻璃的工程文件进行拟合,并将面型拟合数据插入序列模式进行优化设计。此次设计使用的前挡风玻璃拟合数据为某汽车厂商所提供,采用Zernike标准矢高面型描述方式表达。其曲率半径为 -4459.483 ,圆锥系数为 65.49507 ,4阶项系数为 $6.486257640152000 \times 10^{-11}$,6阶项系数为 $1.968793084069000 \times 10^{-16}$,归一化半径为215 mm,并附有13个泽尼克系数,依次为0, -0.055 , 0.00231 , 0.00385 , 0.01308 , -0.91620 , 0.00109 , -0.01966 , 0.00786 , -0.02512 , 0.00298 , -0.00321 , 0.03304 。同时,车用挡风玻璃具有一定厚度,投射过来的影像会在挡风玻璃内部表面和外部表面产生两个亮度相近的虚拟图像,造成重影。在双层玻璃中加入楔形膜,可使内外表面形成夹角,进而消除重影现象。

HUD的设计采用了离轴反射式结构,离轴结构带来了大量的矢量像差。传统的球面与对称非球面无法校正此类非对称像差。同时,挡风玻璃的不规则面型也增加了系统中像差的复杂程度。所以本文采用自由曲面来对各类像差进行校正。在以往的自由曲面目视光学系统设计中,常见的自由曲面面型表达方式为Zernike多项式与XY多项式。但由于在HUD的设计中使用Zernike多项式不便于后期重影分析,并且其自身携带平移与旋转系数,使用前需要进行预处理。而XY多项式在摒弃了Zernike多项式的缺点的同时,软件追迹的效率也更高。更重要的是,XY多项式与数控机床的良好兼容性为后期的加工提供了更大的准确性与便利性^[14]。

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^N A_i E_i(x, y), \quad (4)$$

式中: $r^2 = x^2 + y^2$; z 表示Z轴方向的矢高差; c 表示曲率; k 表示圆锥曲面常数; N 为级数中多项式系数的总数; A_i 为第 i 项扩展多项式的系数; $E_i(x, y)$ 为XY多项式子项。

在建立结构前,对两光路分别设定9个视场点,用于覆盖并定义整个视场,如图2(b)所示。根据光路成像原理,设计时先建立共轴光路,再通过赋予适当的旋转与偏心的变量,对系统进行离轴化处理。利用函数编辑器对畸变加以限定,同时添加边界条件(如像面尺寸、通光孔径、中心视场位置、镜片中心位置、像面入射

光线角度、成像尺寸等)进行约束。合理设定点与线的距离范围以防止元件重叠或光线遮挡的情况发生。虽然 HUD 反射的光线会充满整个视野盒,但只有穿过瞳孔光束的质量才代表了人眼接收时的成像效果。为了保证视野盒内像质的均匀性,在优化时首先将视野盒设为光阑,优化整个视野盒内的成像质量,然后通过

多重结构将 5 个代表瞳孔的光瞳布置在视野盒的 4 个角落,继续进行优化。优化时,采用逐步逼近优化的思路,针对远近两光路中的光学元件曲率、厚度、旋转与偏心、多项式系数等进行最佳设计。图 2(a)为双焦面 AR-HUD 的实际光路结构示意图,图 2(b)为视场设置示意图。

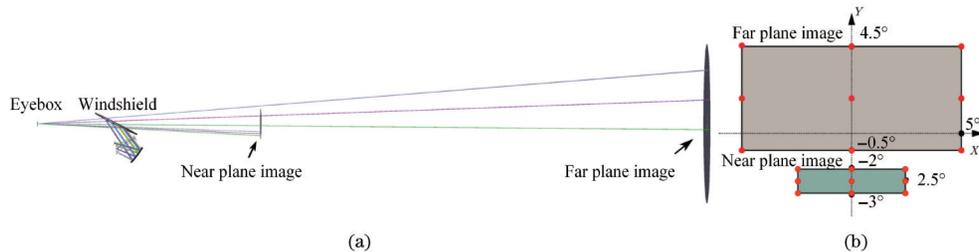


图 2 双焦面 AR-HUD 实际结构和视场设置。(a)双焦面 AR-HUD 实际结构图;(b)视场设置示意图

Fig. 2 Actual structure of dual-focal plane AR-HUD system and set-up of field of view. (a) Actual structure of dual-focal plane AR-HUD system; (b) set-up of field of view

4.2 抬头显示器的质量分析

为了评价人眼实际接收的成像质量,评价时用多重结构功能将瞳孔设置为光阑。在视野盒中心与角落处分别设置 5 个光瞳点,用于模拟人眼在各个位置的观看状态。人眼瞳孔直径通常在 2~5 mm 之间,为保证光线充满瞳孔,瞳孔直径取 5 mm。由于本文所提结构为双光路设计,在分析时需要对比远视距与近视距光路分别进行像质评价。

图 3 与图 4 分别为光瞳位于视野盒中心远视场与近视场的点列图、MTF 图、F-TAN(Theta)畸变图

和网格畸变图。网格畸变图与 F-TAN(Theta)畸变图可以直观地展现出系统畸变的情况,不难看出视野盒中心位置(E5)的畸变满足预期要求。MTF 综合反映了成像系统的分辨率和对比度的衰减程度,与点列图相结合可以有效地对系统成像质量进行评价。根据本图像生成器的参数,当最大截止频率为 6 lp/mm 时,此系统 MTF 为 0.5 以上,且逼近衍射极限。同时从点列图也可以看出视野盒中心各个视场的结果均收敛在艾里斑范围之内,成像质量满足预期要求。

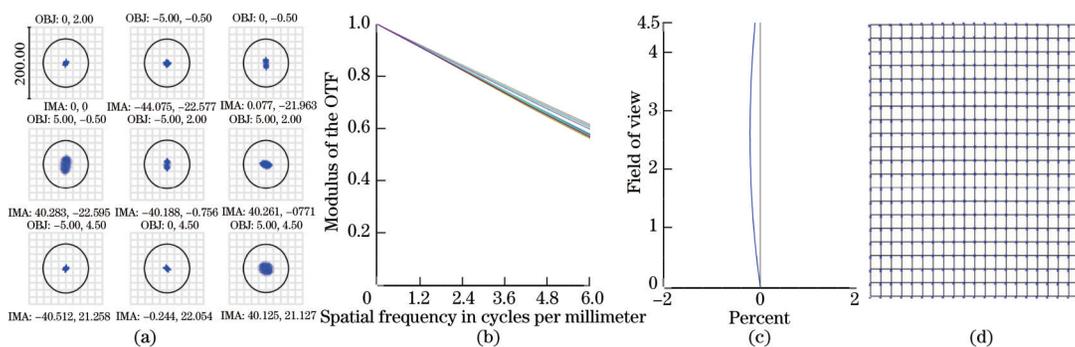


图 3 光瞳位于视野盒中心远视场的结果。(a)点列图;(b) MTF 图;(c) F-TAN(Theta)畸变图;(d)网格畸变图

Fig. 3 Results of far field when pupil is located in center of eyebox. (a) Spot diagram; (b) MTF; (c) F-TAN (Theta) distortion; (d) grid distortion

将孔径光阑设置在视野盒内的 4 个角落(E1~E4),通过光线追迹后的结果评价视野盒边缘处的成像质量。图 5 总结了光瞳位于视野盒内 4 个角落处的最低 MTF 值与最低畸变率,边缘处的 MTF 值与畸变率均有劣化,但所有视场 MTF 值在 6 lp/mm 处均高于 0.3。在任意视野盒范围内和视场下畸变也小于预期的 5%。

综上所述,该光学设计在全视野盒内均能得到较好的像质,且畸变较小。所得结果满足人眼观察的质量需求,达到预计指标。

公差分析是光学设计中重要的一步,主要评估调和制造时的参数灵敏度^[15]。通过设置表 2 中的系统公差范围,对视野盒内预设的 5 个 5 mm 直径的光瞳单独进行公差分析,设定空间频率为 6 lp/mm,随机抽取 500 个蒙特卡罗样本,将得到的子午 MTF 和弧矢 MTF 响应的平均值进行叠加,并分别列出各光路平均 MTF 最低组的结果。

从表 3 与表 4 得知 E4 与 E2 分别为远、近两光路 MTF 最低的光瞳位置。但两者在最大截止频率为 6 lp/mm 时也可满足 90% 以上的公差,样本 MTF 平

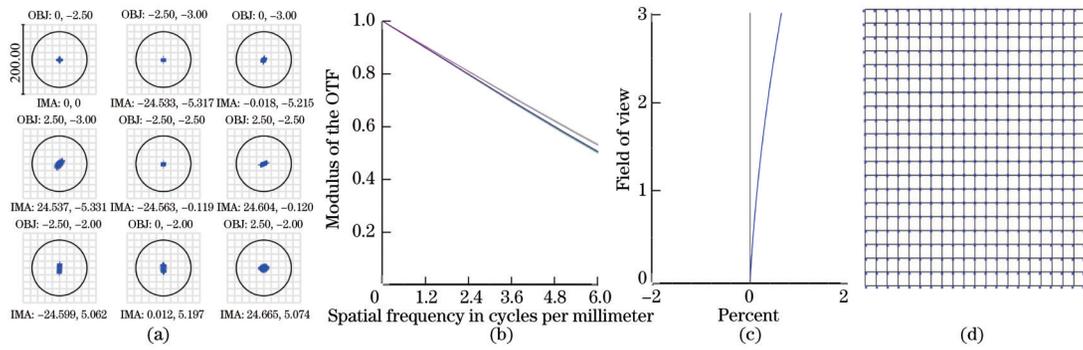


图 4 光瞳位于视野盒中心近视场的结果。(a)点列图;(b) MTF 图;(c) F-TAN(Theta)畸变图;(d)网格畸变图

Fig. 4 Results of near field when pupil is located in center of eyebox. (a) Spot diagram; (b) MTF; (c) F-TAN (Theta) distortion; (d) grid distortion

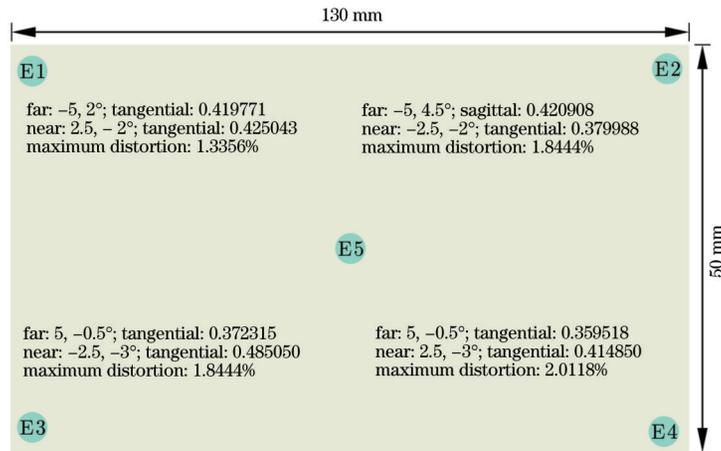


图 5 视野盒的设置与光瞳位于视野盒内 4 个角落处的最低 MTF 值和畸变率

Fig. 5 Setting of eyebox and minimum MTF and distortion value when pupil is located in four corners of eyebox

表 2 光学系统公差范围分配

Table 2 Distribution of tolerance range of optical system

Mirror	Radius delta /mm	Irregularity per fringe	Thickness /mm	Decentered distance in X direction /mm	Decentered distance in Y direction /mm	Tilt angle in X direction / (°)	Tilt angle in Y direction / (°)
M1	—	2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
M2	1	2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1

表 3 远场 E3 光瞳位置处蒙特卡罗分析结果。

Table 3 Monte-Carlo analysis results of far plane image at E3 pupil

Percentage /%	Average MTF
90	0.37146524
50	0.40804404
10	0.42786411

表 4 近场 E2 光瞳位置处蒙特卡罗分析结果。

Table 4 Monte-Carlo analysis results of near plane image at E2 pupil

Percentage /%	Average MTF
90	0.39292137
50	0.40904404
10	0.41950030

均值达到 0.3 以上。此结果表明该系统对制造和装调的参数容错力较强。综上所述,本设计达到预期要求。

5 结 论

本文针对 AR-HUD 对显示效果提出的新要求,结合了人眼视觉特性与实际驾驶的现实情况,提出并设计了一种双焦面 AR-HUD。采用分区域划分的方式

复用一块大自由曲面反射镜,以提供放大倍率并校正像差,其中远场光路额外增加一块平面反射镜,这样可增加光路的物距,从而投射出 2.5 m 与 7.5 m 两个不同视距的虚像。设计结果表明该双焦面 AR-HUD 系统可获得较好的成像质量。双 PGU 方案使得显示分辨率高、照度大,也解决了传统多焦面 AR-HUD 可靠性差、结构复杂的问题,为增强现实抬头显示器的设计

提供了一种可选的方案。

参 考 文 献

- [1] Kress B C. Occlusions[M]//Optical architectures for augmented-, virtual-, and mixed-reality headsets. Bellingham: SPIE, 2020.
- [2] Zhang J W, Dai S Q, Ma C J, et al. A review of common-path off-axis digital holography: towards high stable optical instrument manufacturing[J]. Light: Advanced Manufacturing, 2021, 2(3): 23.
- [3] 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): 336.
- [4] 安喆, 徐熙平, 杨进华, 等. 结合图像语义分割的增强现实型平视显示系统设计与研究[J]. 光学学报, 2018, 38(7): 0710004.
An Z, Xu X P, Yang J H, et al. Design of augmented reality head-up display system based on image semantic segmentation[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0710004.
- [5] 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.
- [6] 陈佳琦, 李郑阳, 钟泽林, 等. 车用多光路 HUD 显示系统及方法: CN110161694A[P]. 2019-08-23.
Chen J Q, Li Z Y, Zhong Z L, et al. Vehicle multi-optical path HUD display system and method: CN110161694A[P]. 2019-08-23.
- [7] 解洪升. 一种基于液晶偏振方向旋转器的车载 AR-HUD 光学系统: CN208921975U[P]. 2019-05-31.
Xie H S. An on-board AR-HUD optical system based on liquid crystal polarization direction rotator: CN208921975U[P]. 2019-05-31.
- [8] 王元鹏. 一种可变焦光学系统及抬头显示系统: CN104932104B[P]. 2017-08-04.
Wang Y P. A zoom optical system and head-up display system: CN104932104B[P]. 2017-08-04.
- [9] Seo J H, Yoon C Y, Oh J H, et al. 59-4: a study on multi-depth head-up display[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2017, 48(1): 883-885.
- [10] 张庭成, 王涌天, 常军, 等. 三反变焦系统设计[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 3034-3038.
Zhang T C, Wang Y T, Chang J, et al. Design of reflective zoom systems with 3 mirrors[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 3034-3038.
- [11] Shi B C, Hong T, Wei W, et al. 34.3: a dual depth head up display system for vehicle[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2018, 49: 371-374.
- [12] 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.
- [13] Qin Z, Lin F C, Huang Y P, et al. Maximal acceptable ghost images for designing a legible windshield-type vehicle head-up display[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(6): 17282283.
- [14] 杨通, 段瓌哲, 程德文, 等. 自由曲面成像光学系统设计: 理论、发展与应用[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0108001.
Yang T, Duan Y Z, Cheng D W, et al. Freeform imaging optical system design: theories, development, and applications[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0108001.
- [15] Gu L, Cheng D W, Liu Y, et al. Design and fabrication of an off-axis four-mirror system for head-up displays[J]. Applied Optics, 2020, 59(16): 4893-4900.