

激光与光电子学进展

三像面增强现实式车载平视显示光学系统设计

王思婧¹, 蒋世磊^{1*}, 王波², 张锦¹, 陈晓伟², 和强², 王少颖¹, 弓旭航¹¹西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021;²惠州市华阳多媒体电子有限公司, 广东 惠州 516005

摘要 车载平视显示(HUD)系统是一种汽车辅助驾驶技术,它可以将车辆信息以可视化方式投影到驾驶员的前方视野。为了使驾驶员在行驶过程中在远、中、近不同的距离下都能通过HUD获取信息,采用双自由曲面离轴三反射系统,设计了一款虚像距离为10 m、7.5 m、3.5 m,对应的视场角为 $15^\circ \times 5^\circ$ 、 $12^\circ \times 3^\circ$ 、 $6^\circ \times 1^\circ$ 的AR-HUD光路。该光路中,在虚像距离为3.5 m处的像面仅显示车速、油量等基本驾驶信息,为固定像面;在虚像距离为7.5 m和10 m处的像面显示辅助驾驶虚拟信息,其中10 m处的像面可以和实景相融合,且这两个像面会根据当前车辆与前方障碍物的距离切换,有效缓解驾驶员的视觉疲劳。三个距离中心眼点处的光斑均落于艾里斑之内,调制传递函数均接近衍射极限,网格畸变值均小于5%,动态畸变值均小于5'。

关键词 车载平视显示; 自由曲面; 三像面; 光学设计; 虚像距离

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232481

Optical System Design for Three Virtual Plane Augmented Reality in Vehicle Head-Up Display

Wang Sijing¹, Jiang Shilei^{1*}, Wang Bo², Zhang Jin¹, Chen Xiaowei², He Qiang²,
Wang Shaoyin¹, Gong Xuhang¹¹School of Opto-Electronical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China;²Foryou Multimedia Electronics Co., Ltd., Huizhou 516005, Guangdong, China

Abstract The automotive head-up display (HUD) system is a type of driving assistance technology that visually projects vehicle information into the driver's frontal field of vision. To meet the diverse needs of drivers for accessing information at various distances—ranging from far to near—during driving, we employ a dual free face-off three-reflection system to design an AR-HUD light path. This design facilitates virtual image distances of 10, 7.5, and 3.5 m, accompanied by corresponding field-of-view angles of $15^\circ \times 5^\circ$, $12^\circ \times 3^\circ$, and $6^\circ \times 1^\circ$, respectively. In this setup, the optical path's image plane at the 3.5 m projection distance shows only essential driving information like speed and fuel level; it is a static image plane. At distances of 7.5 and 10 m, the image planes show additional information such as road conditions, navigation, and other auxiliary driving information. The image plane at a 10-m projection distance can seamlessly integrate virtual imagery with the actual road, with the two image planes dynamically switching based on the proximity to obstacles ahead, effectively alleviating visual fatigue in drivers. Notably, all three light spots at the eye point's center fall within Airy spots while achieving a modulation transfer function closely approaching the diffraction limit. Furthermore, the mesh distortion value is $<5\%$, and the dynamic distortion value is $<5'$.

Key words automotive head-up display; free-form surface; three-image planes; optical design; virtual image distance

1 引言

平视显示(HUD)系统起源于军事领域,随着科技的发展,逐渐被应用到汽车上^[1]。HUD可以将车辆信息以可视化方式通过汽车前挡风玻璃投影到驾驶员的

视野中,这些信息包括车速、油量、导航指示、前方障碍物警示^[2]等。目前,解洪升^[3]根据偏振分光片的特性设计了两个不同光程的光路,此方案很难保证图像的稳定性。Seo等^[4]通过划分像源显示面上的区域,设计了一款虚像距离为2 m和5 m的双光路光学系统,但是

收稿日期: 2023-11-13; 修回日期: 2024-01-02; 录用日期: 2024-01-04; 网络首发日期: 2024-01-10

通讯作者: jiangshilei8@163.com

该系统的虚像距离和视场角较小。王元鹏^[5]设计了一款可变焦 HUD 系统,系统中的一组镜片沿着光轴前后移动,以此调节光学系统的焦距,但在变焦的过程中,可能会出现画面模糊的情况。孔祥旭等^[6]采用两组图像生成单元,设计了一款虚像距离分别为 2.5 m 和 7.5 m 的双光路系统,虽然成像质量有所保障,但是整体体积较大。任进伟等^[7]基于单光机进行图像划分,设计了一款双光路 AR-HUD 系统,但是没有划分基础信息和驾驶辅助信息。朱良富等^[8]通过单光学引擎获得两束不同出射区域的光束,再利用衍射光波导的原理实现双焦面的显示,此方法成本较高。Jiang 等^[9]提出了一种近场和远场双层虚拟图像显示的 AR-HUD 系统,且在远场显示采用 8 m、16 m、24 m 三种深度的采样,但该系统除挡风玻璃外还需要 4 个镜片,成本较高,且在连续深度调节时需要移动其中的 3 个镜片,这一设计会给实际加工增加难度。中国台湾 Qin 等^[10]使用单个曲面镜,通过使用两个平面镜光学中继部分,使单个 PGU 产生两个不同的投影距离,并对成像质量进行了实验验证,但是眼盒设置的范围不够大。韩国的 Kim 等^[11]设计了一款虚像距离为 2 m 的间接集成式 HUD,该系统使用非球面镜对像质进行了优化并取得了较好的结果。但圆柱透镜的使用给系统带来了色差,并不适用于有挡风玻璃参与反射的 HUD 系统。Kim 等^[12]设计了一款虚像距离分别为 2 m 和 9 m 的 AR-HUD 系统,通过将 Petzval 表面匹配到近距离的光路中来平衡像差和视差,为双像面 AR-HUD 系统的像差分析提供了一种思路。Moon 等^[13]利用一个空间光调制器和光波导,提出了一种大视场的 AR-HUD,将设计好的光波导和算法相结合,使该系统能产生真实

的 3D 内容,此方法不能保证成像清晰度,且用激光作为光源可能会带来散斑的问题。尽管上述研究对 HUD 光学系统进行了不同程度的改进,但是对于 AR-HUD 来说,虚像距离和视场角都不够大,并且两个像面的系统已不能满足 AR-HUD 的市场。

本文提出的三像面 AR-HUD 将基础信息和 AR 信息划分开来,不管远场的 AR 信息如何切换,近场的像面上的信息都不会受到影响。其中,在近距离处的像面显示车速、油量等仪表盘上的基础信息,为固定像面;7.5 m 和 10 m 处的像面与 AR 技术相结合,显示路况、导航等信息,其中 10 m 处的像面可以与车外的实景信息相融合。当汽车与前车的距离为 7.5~10 m 时,显示 7.5 m 处的虚像面,当汽车与前车的距离大于 10 m 时,显示 10 m 处的虚像面。且分别设置了 $6^\circ \times 1^\circ$ 、 $12^\circ \times 3^\circ$ 、 $15^\circ \times 5^\circ$ 三组视场角,在 10 m 处显示的像面几乎全覆盖前挡风玻璃,可让驾驶员获得更好的驾驶体验。

2 基本原理

为了保证驾驶员通过汽车前挡风玻璃观看图像时视线不被遮挡,且满足 HUD 结构紧凑的特点^[14],本文基于同轴三反射系统的原理,将光路离轴化,最后对离轴三反射系统进行设计优化。设计的三像面 AR-HUD 系统的原理如图 1 所示,3 个不同距离下的像源面发出的光到达反射镜 M_1 ,光线依次被反射镜 M_1 和 M_2 反射到达挡风玻璃处,再被挡风玻璃反射进入人眼,由于光沿直线传播,因此人眼会看到位于挡风玻璃前方的放大的 3 个虚像面,3 个光路之间互不影响,3 个虚像之间互不交叉。

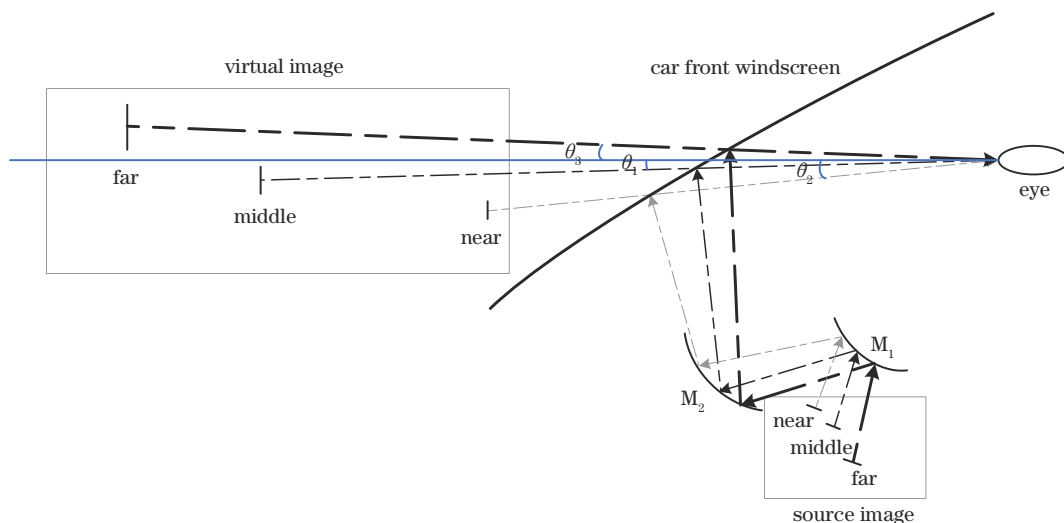


图 1 三像面虚像显示原理图

Fig. 1 Schematic of three virtual image display

基于上述工作原理,汽车前挡风玻璃作为一个反射面参与成像设计,由于挡风玻璃面型复杂,传统 HUD 结构中使用的球面和非球面面型都无法很好地平衡由它

带来的像差^[15],所以设计的 AR-HUD 采用自由曲面,能够有效地减小像差,提高系统的成像质量^[16]。采用扩展多项式来表征自由曲面的面型,面型矢高定义为

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

式中: z 表示 z 方向的矢高; c 表示曲面顶点处的曲率; r 为径向坐标; k 为圆锥曲面常数; 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。

3 系统设计及优化

3.1 设计参数

所提光学系统的设计参数主要有: 眼盒尺寸 (S_{eyebox})、虚像距离 (D_{VI})、虚像尺寸、视场角 (θ_{FOV})、下视角 (θ) 等。

S_{eyebox} 即驾驶员在驾驶过程中眼睛移动的范围, 根据人双眼距的平均宽度, 设置了一个 $130 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 尺寸的矩形眼盒。在 AR-HUD 技术中, 虚像距离至少要达 7.5 m , 横向的视场角至少要达 10° 。因此, 设置了 3 个虚像距离, 分别为 10 m 、 7.5 m 、 3.5 m , 对应的 3 组视场角分别为 $15^\circ \times 5^\circ$ 、 $12^\circ \times 3^\circ$ 、 $6^\circ \times 1^\circ$ 。虚像尺寸就是驾驶员看到的虚像的大小, 如图 2 所示, 可根据虚像距离和视场角, 通过三角函数表示, 即

$$\begin{cases} \alpha = 2 \cdot \arctan^{-1}\left(\frac{H}{2/D_{\text{VI}}}\right) \\ \beta = 2 \cdot \arctan^{-1}\left(\frac{V}{2/D_{\text{VI}}}\right) \end{cases}, \quad (2)$$

式中: α 为水平方向的视场角; H 为水平方向的虚像尺寸; β 为竖直方向的视场角; V 为竖直方向的虚像尺寸。利用式 (2) 可计算出 3 个虚像尺寸, 分别为

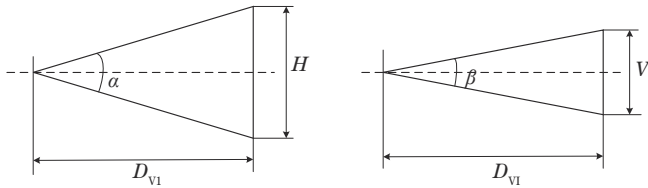


图 2 虚像尺寸原理

Fig. 2 Schematic of virtual image size

表 2 挡风玻璃拟合数据

Table 2 Fitting data of windshield

Surface	X1Y0	X0Y1	X2Y0	X1Y1	X0Y2	X3Y0	X2Y1	X1Y2
Fitting data	0	0	-6.319	0.544	-3.658	-0.079	0.102	0.036
Surface	X0Y3	X4Y0	X3Y1	X2Y2	X1Y3	X0Y4	X5Y0	X4Y1
Fitting data	-0.011	0.017	0.039	5.5×10^{-3}	-9.5×10^{-3}	-6.7×10^{-3}	-1.1×10^{-3}	-8.8×10^{-3}
Surface	X3Y2	X2Y3	X1Y4	X0Y5	X6Y0	X5Y1	X4Y2	X3Y3
Fitting data	-2.5×10^{-3}	-4×10^{-3}	-1×10^{-3}	-3.4×10^{-3}	-1.1×10^{-3}	-1.5×10^{-3}	-5×10^{-3}	-1.8×10^{-3}

采用反向设计, 把人眼的眼瞳作为整个光学系统的孔径光阑, 由于人眼的眼瞳直径在 $1 \sim 4 \text{ mm}$ 之间, 为保证所有光线都能够进入人眼, 将入瞳半径设置为 4 mm 。为了更好地对成像质量进行分析, 将 eyebox 分为上、中、下、左、右、左上、左下、右上、右下 9 个坐标点, 中心点坐标为 $(0, 0)$, 并添加到多重结构中, 即 9 重结构, 由于本文有

$2633.05 \text{ mm} \times 873.22 \text{ mm}$ 、 $1576.53 \text{ mm} \times 392.79 \text{ mm}$ 、 $366.85 \text{ mm} \times 61.09 \text{ mm}$, 根据人眼极限分辨率 $1'$, 分别计算虚像距离为 10 m 、 7.5 m 、 3.5 m 时人眼能分辨的两点之间的最小距离, 得 2.91 mm 、 2.18 mm 、 1.02 mm ; 然后, 分别计算出 3 个距离下人眼能分辨的最小像素 μ , 得 905 pixel 、 723 pixel 、 340 pixel 。这里取像素 910 pixel , 根据式 (3) 计算出本光学系统的最大截止频率。

$$\lambda = \frac{1}{2 \times p}, \quad (3)$$

式中: λ 为光学系统的极限分辨率; p 为像素尺寸。计算出最大的截止频率 4.7 , 要求系统的光学传递函数在 4.7 lp/mm 处大于 0.3 。

下视角为驾驶员观看图像中心时与水平方向的夹角。为了将 3 个虚像面区分开来, 需要 3 个下视角, 其中 7.5 m 处的下视角为 3° , 其他两个距离处的下视角通过 Zemax 软件优化得来。具体设计参数如表 1 所示。

表 1 光学系统设计参数

Table 1 Design parameters of the optical system

System parameter	Parameter value
VID /m	Far: 10; Middle: 7.5; Near: 3.5
FOV /[($^\circ$) \times ($^\circ$)]	Far: 15×5 ; Middle: 12×3 ; Near: 6×1
S_{eyebox} /(mm \times mm)	130×50
Wavelength /nm	550
MTF /(lp \cdot mm $^{-1}$)	$>0.3@4.7$
Distortion /%	<5

3.2 系统设计与优化

在进行三像面 AR-HUD 系统设计时, 为了更好地贴近实际应用, 使用车厂提供的挡风玻璃数据。在使用前需要借助 CATIA 软件将挡风玻璃的有效使用区域提取出来, 然后使用 Zemax 软件对该区域进行面型拟合^[17], 并用扩展多项式来表征。所用到的汽车前挡风玻璃拟合数据如表 2 所示。

3 个虚像距离, 即共 27 重结构。此外, 两个镜片之间的距离、镜片的偏移角度等变量需根据车厂要求和整体光路去调整, 直至所有结构下的所有光线均稳定。图 3 为优化完成后的光路 3D 图。表 3 为光路结构设计参数。

优化后的反射镜 1 和反射镜 2 的面型参数如表 4 和表 5 所示。

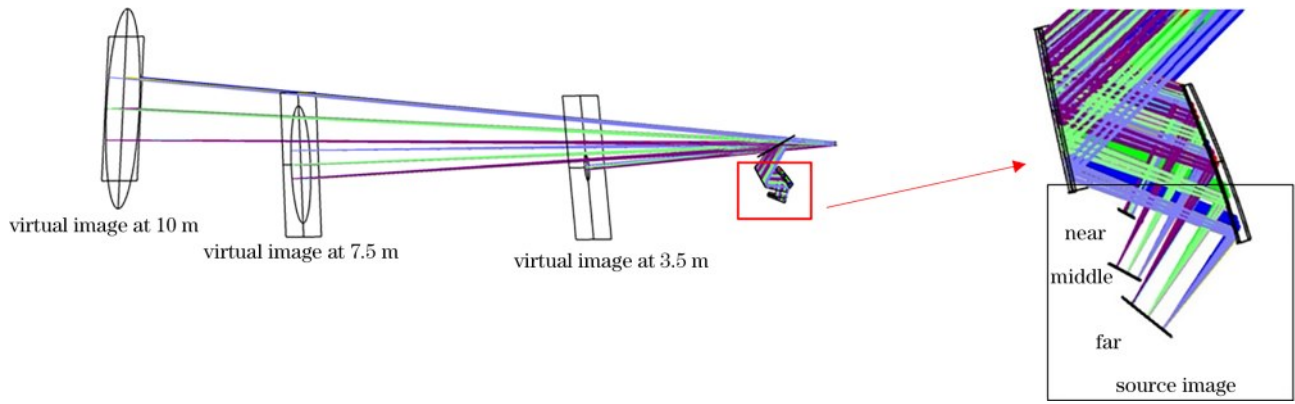


图3 优化的3D图

Fig. 3 Optimized 3D result

表3 光路结构设计

Table 3 Optical path structure design

Surface	Radius /mm	Thickness /mm	Tilt along X / (°)	Tilt along Y / (°)
Object field	-	Far: -10000; Middle: -7500; Near: -3500;	-	-
Windshield	-	-450	-62.262	4.955
M ₂	1034.833	285	-30.00	1.976
M ₁	-646.977	Far: -342.416 Middle: -310.535 Near: -181.094	40.00	-2.909
Image plane	-	-	Far: -10.189 Middle: 0 Near: 0	-

表4 反射镜1的优化参数

Table 4 Optimized parameters of M₁

Surface	X1Y0	X0Y1	X2Y0	X1Y1	X0Y2	X3Y0	X2Y1	X1Y2
Fitting data	0	0	23.501	-0.981	13.197	0.130	1.786	-0.981
Surface	X0Y3	X4Y0	X3Y1	X2Y2	X1Y3	X0Y4	X5Y0	X4Y1
Fitting data	0.0027	-0.755	0.268	1.267	1.040	-0.04	-0.406	-1.485
Surface	X3Y2	X2Y3	X1Y4	X0Y5	X6Y0	X5Y1	X4Y2	X3Y3
Fitting data	1.125	-0.949	0.126	-0.657	0.47	0.027	-0.186	-1.492
Surface	X2Y4	X1Y5	X0Y6	X7Y0	X6Y1	X5Y2	X4Y3	X3Y4
Fitting data	0.181	-0.513	0.541	0.154	0.611	-0.214	-0.092	0.571
Surface	X2Y5	X1Y6	X0Y7					
Fitting data	0.22	0.138	-0.169					

表5 反射镜2的优化参数

Table 5 Optimized parameters of M₂

Surface	X1Y0	X0Y1	X2Y0	X1Y1	X0Y2	X3Y0	X2Y1	X1Y2
Fitting data	0	0	35.844	-1.691	21.44	0.044	1.716	-0.705
Surface	X0Y3	X4Y0	X3Y1	X2Y2	X1Y3	X0Y4	X5Y0	X4Y1
Fitting data	0.76	0.011	0.249	0.979	1.295	-0.802	-0.106	-0.557
Surface	X3Y2	X2Y3	X1Y4	X0Y5	X6Y0	X5Y1	X4Y2	X3Y3
Fitting data	0.512	-1.135	-0.081	-2.808	0.129	-0.035	-0.085	-1.723
Surface	X2Y4	X1Y5	X0Y6	X7Y0	X6Y1	X5Y2	X4Y3	X3Y4
Fitting data	0.155	-1.094	4.947	0.032	0.171	-0.016	0.0038	1.138
Surface	X2Y5	X1Y6	X0Y7					
Fitting data	0.689	0.43	-2.38					

下视角优化结果如表 6 所示,规定以人眼为端点,水平向前为 0°,顺时针方向为正,逆时针方向为负。根据优化结果,虚像距离为 10 m 时的虚像刚好可以投影在半空,符合上述提到的实景融合功能。

表 6 下视角优化结果

Table 6 Optimized results of lower perspective

D_{VI}/m	$\theta/(^\circ)$
3.5	5.5
7.5	3
10	-1.5

4 成像质量分析

由于采用反向设计,根据光路可逆原理,如果一

个理想的虚像能在像源平面上生成一个满足像质评价指标的实像,那么一个满足指标的实像也可以生成一个合格的虚像,因此可以通过评判像源面是否满足像质评价指标来判断虚像是否合格。对于上述设计好的光学系统,将从点列图、调制传递函数(MTF)、网格畸变、动态畸变这 4 个指标分析其成像质量。

4.1 点列图结果

图 4 分别为远、中、近三个距离下眼睛位于 eyebox 中心时的点列图大小。表 7~9 分别为三个距离下中心眼点处各视场下的半径均方根(RMS)值。从设计优化结果发现,点列图光斑半径最大值远小于 AR-HUD 设计经验值 80 μm ,且均小于艾里斑,所以此光学系统像差较小。

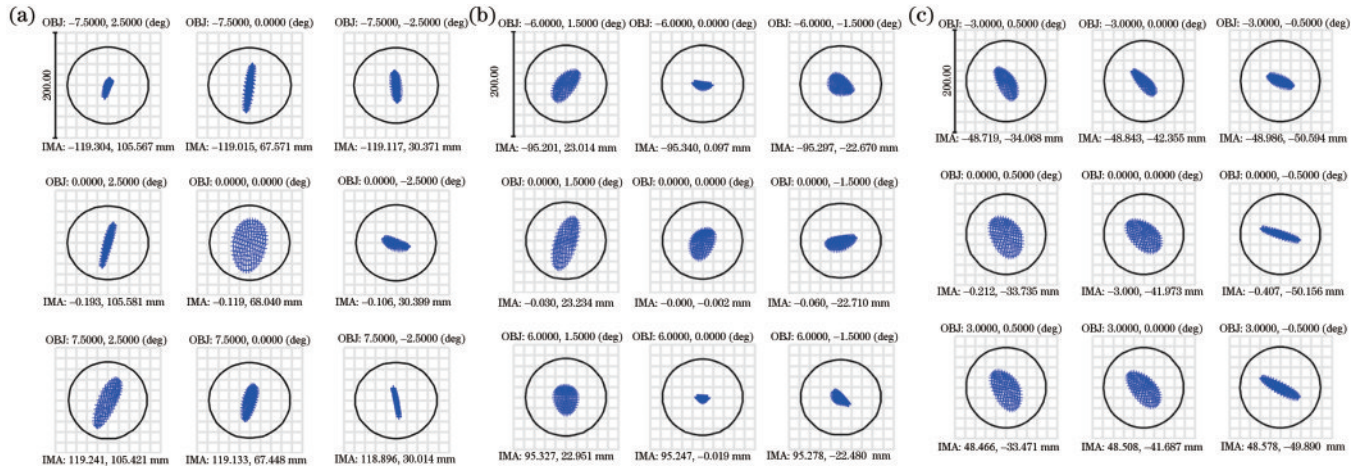


图 4 不同虚像距离下中心眼点处的点列图。(a)10 m;(b)7.5 m;(c)3.5 m

Fig. 4 Dot-column diagrams at the centre eye point at different virtual image distances. (a) 10 m; (b) 7.5 m; (c) 3.5 m

表 7 10 m 时的中心眼点处的半径 RMS 值

Table 7 Radius RMS at the centre eye point at 10 m

Field	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Radius RMS	9.613	23.725	15.192	22.226	30.569	13.570	27.186	18.552	15.225

unit: μm

表 8 7.5 m 时的中心眼点处的半径 RMS 值

Table 8 Radius RMS at the centre eye point at 7.5 m

Field	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Radius RMS	19.874	9.247	15.287	28.702	19.134	15.955	17.981	6.407	10.717

unit: μm

表 9 3.5 m 时的中心眼点处的半径 RMS 值

Table 9 Radius RMS at the centre eye point at 3.5 m

Field	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Radius RMS	19.251	16.764	13.975	26.247	23.951	20.004	25.098	24.248	21.905

unit: μm

4.2 MTF 结果

图 5 为本光学系统三个虚像距离下的 MTF 曲线,最大空间频率设置在 4.7 lp/mm 处,根据设计优化结果可知,在截止频率处,MTF 曲线均大于 0.5,且都接近衍射极限,成像质量满足目视光学系统要求。

4.3 网格畸变

图 6 为本系统的网格畸变图。图 6(a)是投影距离为 10 m 时中心视场的网格畸变图,最大畸变为 1.1327%,9 个视场的最大畸变为 2.0395%,没有明显的画面变形。图 6(b)是投影距离为 7.5 m 时中心视场的网格畸变图,最大畸变为 -1.5933%,9 个视场的最

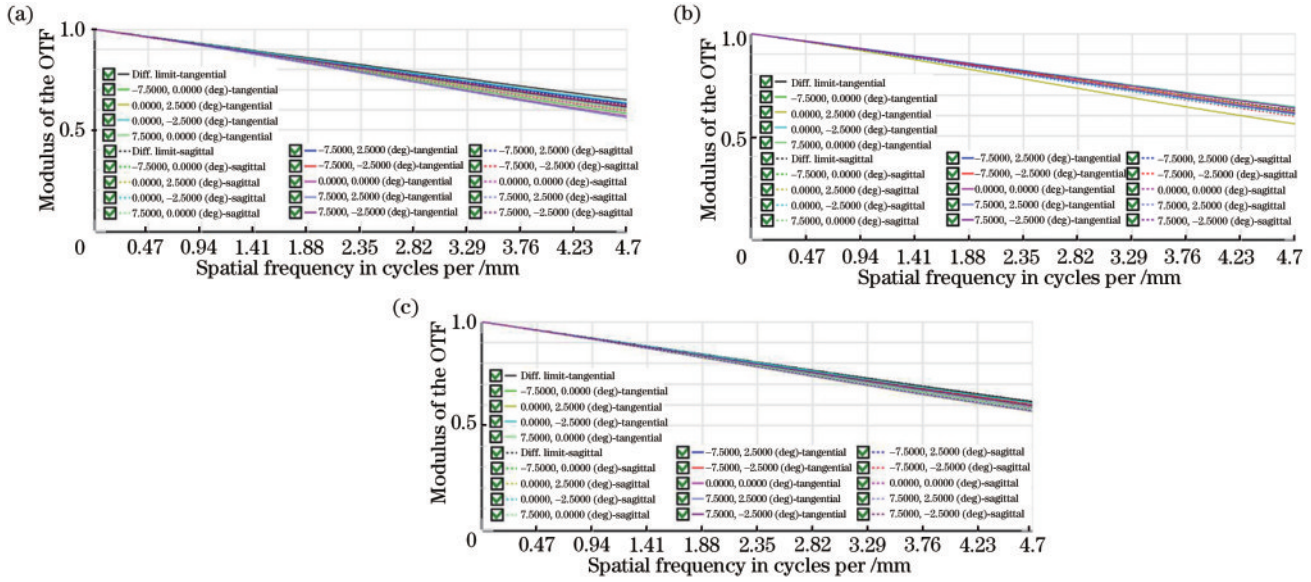


图5 不同虚像距离下中心眼点处的MTF曲线。(a)10m;(b)7.5m;(c)3.5m

Fig.5 MTF at the centre eye point at different virtual image distances. (a) 10 m; (b) 7.5 m; (c) 3.5 m

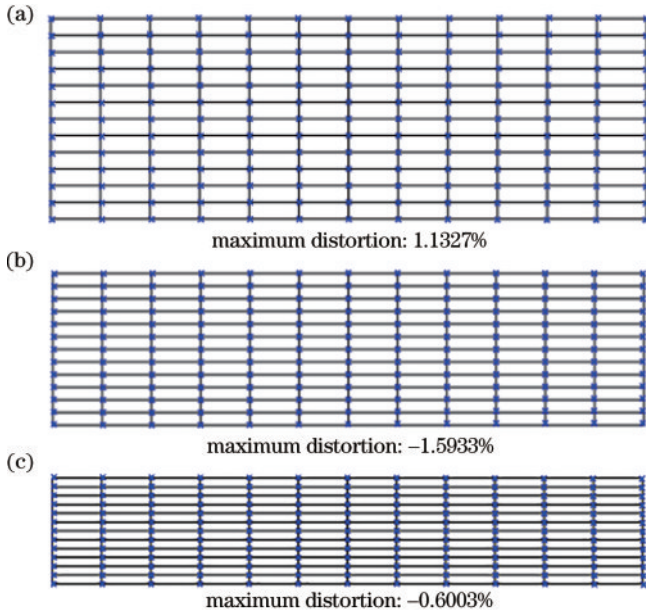


图6 不同虚像距离下中心眼点处的网格畸变。(a) 10 m; (b) 7.5 m; (c) 3.5 m

Fig.6 Grid distortion at the centre eye point at different virtual image distances. (a) 10 m; (b) 7.5 m; (c) 3.5 m

大畸变为-2.5752%，画面变形程度较小。图6(c)是投影距离为3.5 m时中心视场的网格畸变图，最大畸变为-0.6003%，9个视场的最大畸变为-1.6338%，画面无明显变化。根据设计优化结果可知，三个投影光路的最大畸变均小于AR-HUD设计经验值5%，满足成像要求。

4.4 动态畸变

动态畸变反映成像位于不同视角时，显示的图像的差别，即驾驶员在eyebox范围内的不同位置观看虚像面时，显示的图像的差别，如图7所示。其中点1为人眼在eyebox中心观看图像时的图像位置，点10为眼

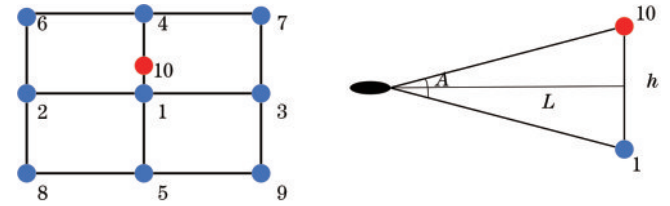


图7 动态畸变原理

Fig.7 Schematic of dynamic distortion

睛移动到某一点之后观看图像时的图像位置，点1和点10之间的偏差值就是动态畸变，可以用角度来表示，公式为

$$A = \arctan(h/2/L) \times 2, \quad (4)$$

式中： L 为虚像距离； h 为点偏移的直线距离； A 为动态畸变角度。

三个距离下的动态畸变如表10~12所示。表格中上方、下方、左侧、右侧与中心眼点位置的角度差应该小于 $5'$ ；左上、右上、左下、右下与中心眼点位置的角度差应该小于 $7'$ 。设计优化结果表明，本系统的动态畸变较小，满足像质评价指标。

4.5 眼盒偏移

考虑到驾驶员的身高变化，将光学系统的眼盒分别向上和向下各偏移50 mm，如图8所示。

根据实际情况，身高较高的驾驶员，眼盒较高，身高矮的则相反，因此将眼盒分别向上和向下偏移以对应驾驶员的身高变化。为了保证眼盒偏移之后驾驶员依然能看到虚像面，需要转动自由曲面镜 M_2 。可以通过控制转动前后自由曲面镜 M_1 和像源显示面的坐标位置不变，优化得到曲面镜 M_2 的转动角度。最终得到优化结果，即眼盒向上偏移50 mm时，曲面镜 M_2 逆时针转动 1.369° ；眼盒向下偏转50 mm时，曲面镜 M_2 顺时针转动 1.336° 。

表 10 10 m 时的动态畸变

Table 10 Dynamic distortion at 10 m of projected distance

unit: (')

Position	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Config2-Config1	0.27	0.60	1.22	0.44	1.82	1.02	0.61	1.70	0.63
Config3-Config1	0.87	0.97	1.94	1.04	2.43	1.07	0.53	1.86	0.63
Config4-Config1	0.23	0.34	1.13	0.62	1.91	1.27	1.02	2.14	1.79
Config5-Config1	1.48	1.74	1.94	1.66	1.81	1.40	0.31	0.80	0.14
Config6-Config1	0.58	0.41	0.46	0.13	0.30	0.35	1.12	0.58	1.33
Config7-Config1	0.64	0.95	1.04	0.66	2.32	0.97	1.23	2.25	0.95
Config8-Config1	1.86	2.40	2.87	2.11	3.21	1.72	0.54	2.02	0.55
Config9-Config1	1.08	1.28	1.85	1.35	2.75	1.27	1.30	1.80	0.56

表 11 7.5 m 时的动态畸变

Table 11 Dynamic distortion at 7.5 m of projected distance

unit: (')

Position	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Config11-Config10	1.03	1.45	1.28	0.76	1.12	0.79	1.17	1.19	0.97
Config12-Config10	1.40	0.81	1.05	0.99	0.89	0.34	1.23	1.21	0.81
Config13-Config10	1.24	0.81	1.21	1.01	1.11	1.26	1.05	1.54	1.11
Config14-Config10	1.24	1.91	1.43	0.83	1.68	1.06	0.79	0.96	1.01
Config15-Config10	0.10	0.36	0.22	0.95	0.41	1.08	1.23	0.80	1.22
Config16-Config10	1.37	0.55	1.08	1.59	1.07	1.43	2.27	1.54	2.24
Config17-Config10	1.97	3.24	2.07	1.02	2.38	1.51	0.53	1.76	0.51
Config18-Config10	0.92	1.81	1.64	1.29	2.01	0.58	2.07	1.45	1.34

表 12 3.5 m 时的动态畸变

Table 12 Dynamic distortion at 3.5 m of projected distance

unit: (')

Position	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Config20-Config19	0.67	1.62	1.81	0.73	1.71	1.99	0.80	1.86	2.29
Config21-Config19	1.37	1.60	1.18	1.44	1.70	1.31	1.52	1.85	1.55
Config22-Config19	0.66	1.59	1.82	0.70	1.70	2.07	0.73	1.89	2.43
Config23-Config19	1.33	1.59	1.60	0.76	1.01	1.12	0.63	0.32	0.29
Config24-Config19	0.42	0.25	0.32	0.42	0.25	0.30	0.58	0.38	0.38
Config25-Config19	1.50	1.52	1.39	1.54	1.60	1.45	1.74	1.81	1.70
Config26-Config19	1.17	1.96	2.07	0.66	1.61	1.77	1.19	1.86	1.99
Config27-Config19	2.42	2.57	2.04	2.12	2.26	1.72	1.64	1.95	1.43

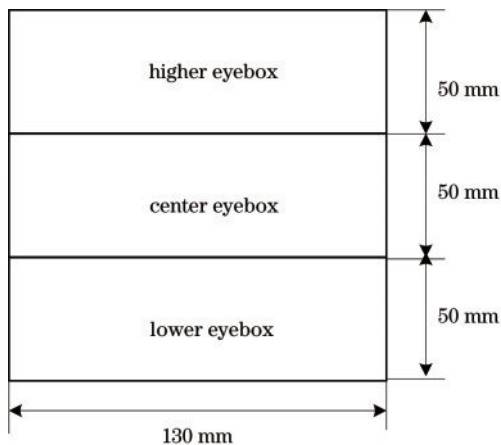


图 8 眼盒偏转示意图

Fig. 8 Schematic of eyebox deflection

像的影响,需要对本光学系统进行公差分析,公差要求过小会提高光学元件的加工和装调难度,还有可能造成成像不稳定的情况^[18]。表 13 为公差分配的范围。

表 13 系统公差分配

Table 13 System tolerance allocation

Parameter	Windscreen	M ₁	M ₂
Radius of curvature /mm	1	1	1
Spacing /mm	0.2	0.2	0.2
X direction offset /mm	0.2	0.2	0.2
Y direction offset /mm	0.2	0.2	0.2
Amount of rotation on the X axis / (°)	0.2	0.2	0.2
Amount of rotation on the Y axis / (°)	0.2	0.2	0.2

通过 Zemax 软件,随机抽取 1000 个蒙特卡罗样本,得到系统的光学传递函数统计结果,如表 14 所示,可以看出,在空间截止频率 4.7 lp/mm 处,本光学系统 90% 以上的 MTF 大于 0.5,表明本系统公差分配比较

5 公差分析

考虑到后续制造、加工和装配过程对光学系统成

表 14 蒙特卡罗分析结果
Table 14 Results of Monte Carlo analysis

Percentage	MTF at 10 m virtual image distance	MTF at 7.5 m virtual image distance	MTF at 3.5 m virtual image distance
90%	0.55338520	0.59094188	0.58008748
80%	0.55858614	0.59510540	0.58269619
50%	0.56767183	0.60199468	0.58722231
20%	0.57532117	0.60751383	0.59075959
10%	0.57775279	0.60992915	0.59234608

合理,容差能力较强,设计结果比较理想。

6 结 论

从提高驾驶员的驾驶体验感及安全角度出发,采用双自由曲面离轴三反光学系统,设计了一款在 10 m、7.5 m、3.5 m 三处不同距离投影显示的 AR-HUD 光学系统,三个像面不交叉重叠,共用一个光学系统,可以满足基础信息和辅助信息分别或同时显示的功能,有效解决了两个虚像面来回切换导致基础信息混乱的问题。设计结果表明,在三个虚像距离处,均可获得较好的成像质量,像质接近衍射极限,网格畸变和动态畸变满足成像要求。此外,考虑到驾驶员身高的变化,通过翻转其中一个曲面镜调节虚像显示高度,保证不同身高的驾驶员都能观察到像面。后续,可以把本文设计的系统与硬件电路和软件算法相互配合,从而显示更丰富的驾驶信息,为未来 AR-HUD 的发展提供有益参考。

参 考 文 献

- [1] Eklund R, Osvalder A L. Optimising aircraft taxi speed: design and evaluation of new means to present information on a head-up display[J]. *Journal of Navigation*, 2021, 74(6): 1305-1335.
- [2] 黄兴洲, 胡诗杰, 汤国茂, 等. 远距离成像汽车平视显示光学结构设计[J]. *应用光学*, 2019, 40(5): 894-900.
Huang X Z, Hu S J, Tang G M, et al. Optical structure design of automotive head-up display with long-distance imaging[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(5): 894-900.
- [3] 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: CN208921975 U[P]. 2019-05-31.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.

- [7] Kong X X, Xue C X. Optical design of dual-focal-plane head-up display based on dual picture generation units[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(14): 1422003.
- [7] 任进伟, 陈晓伟, 王波, 等. 基于单光机的双光路车载平视显示光学系统设计[J]. *光子学报*, 2023, 52(8): 0822001.
Ren J W, Chen X W, Wang B, et al. Design and optimization of dual-focal vehicle head-up display optical system based on single-optical machine[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(8): 0822001.
- [8] 朱良富, 朱以胜. 一种基于单光学引擎的双焦面车载抬头显示系统及车辆: CN115826247A[P]. 2023-03-21.
Zhu L F, Zhu Y S. A bifocal surface in-vehicle head-up display system and vehicle based on a single optical engine: CN115826247A[P]. 2023-03-21.
- [9] Jiang Q B, Guo Z Y. AR-HUD optical system design and its multiple configurations analysis[J]. *Photonics*, 2023, 10(9): 954.
- [10] Qin Z, Lin S M, Luo K T, et al. Dual-focal-plane augmented reality head-up display using a single picture generation unit and a single freeform mirror[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(20): 5366-5374.
- [11] Kim B H, Park S C. Optical system design for a Head-up display using aberration analysis of an off-axis two-mirror system[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2016, 20(4): 481-487.
- [12] Kim K H, Park S C. Optical system design and evaluation for an augmented reality head-up display using aberration and parallax analysis[J]. *Current Optics and Photonics*, 2021, 5(6): 660-671.
- [13] Moon W, Jeon H, Na S, et al. Accommodation-capable holographic waveguide head-up display with extended field of view[J]. *Displays*, 2024, 81: 102617.
- [14] Jakus G, Dicke C, Sodnik J. A user study of auditory, head-up and multi-modal displays in vehicles[J]. *Applied Ergonomics*, 2015, 46: 184-192.
- [15] 袁封林, 赵文川, 陈文静. 车载抬头显示系统自由曲面反射镜点云匹配算法[J]. *光学与光电技术*, 2021, 19(2): 15-24.
Yuan F L, Zhao W C, Chen W J. Point cloud matching algorithm for freeform mirror of vehicle head up display system[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2021, 19(2): 15-24.
- [16] 宗卉, 杨波, 顾鹏翔. 自由曲面反射式投影成像系统的设计[J]. *智能计算机与应用*, 2021, 11(6): 92-95.
Zong H, Yang B, Gu P X. Design of freeform surface reflective projection imaging system[J]. *Intelligent Computer and Applications*, 2021, 11(6): 92-95.
- [17] 曹妍. 车载平视显示系统光学模组优化设计[D]. 西安: 西安工业大学, 2022.
Cao Y. Optimization design of optical module of vehicle head-up display system[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2022.
- [18] 任进伟. 双光路平视光学系统设计及优化[D]. 西安: 西安工业大学, 2023.
Ren J W. Design and optimization of dual-optical head-up optical system[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2023.