

引用格式: REN Jinwei, CHEN Xiaowei, WANG Bo, 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

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

# 基于单光机的双光路车载平视 显示光学系统设计

任进伟<sup>1</sup>, 陈晓伟<sup>2</sup>, 王波<sup>2</sup>, 曹妍<sup>2</sup>, 孙奕晗<sup>1</sup>, 李新宇<sup>1</sup>, 吴慎将<sup>1</sup>

(1 西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021)

(2 惠州市华阳多媒体电子有限公司, 惠州 516006)

**摘要:** 基于传统增强现实型平视显示器的设计只能显示单一虚像, 并且可能会导致驾驶者在行驶中产生视觉疲劳, 从而引发安全事故。本文提出一种采用单一的数字光处理光机(DLP光机)使其分拆出两块图像生成单元的方法。改变光路物距并结合两块自由曲面反射镜, 搭建离轴反射式双光路车载平视显示光学系统, 最终实现双投影虚像显示。其中采用 5.74 inch DLP 光机, 设置的视野眼盒大小为 130 mm×50 mm, 远投影视场角 10°×3°, 近投影视场角 4°×1°, 虚像投影距离分别为 3.8 m 和 7.5 m。该设计结果不仅能保证近投影虚像面和远投影虚像面同时或者分时显示, 也能提高驾驶者的视觉体验感。

**关键词:** 平视显示; 自由曲面; 光学系统; 投影距离; 双光路

中图分类号: U471

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235208.0822001

## 0 引言

近年来, 随着汽车技术的不断发展, 各个行业对车载平视显示系统(Head-Up Display, HUD)的研究不断延伸拓展, 从而满足人们需求。HUD 作为一种综合电子显示设备, 可以将车辆信息投影到前挡风玻璃或者其他显示介质上, 供驾驶者查看, 从而减少驾驶者因低头或视线转移而带来的安全隐患<sup>[1]</sup>。在汽车智能化的深入发展下, HUD 结合增强现实(Augmented Reality, AR)技术进行融合的设计方式慢慢崛起, 它可以通过车前风挡玻璃将投影距离做的更远并且信息显示更丰富, 实现更好的人机交互<sup>[2]</sup>。

到目前为止, 对于传统增强现实型平视显示器(Augmented Reality Head-Up Display, AR-HUD)设计, 黄兴洲<sup>[3]</sup>使用数字光处理(Digital Light Processing, DLP)投影光机, 设计了一种虚像视距为 7.5 m, 虚像视场角为 9.8°×5.5°左右, Eyebow 范围为 120 mm×50 mm 的虚像显示光路, 这种 AR-HUD 设计的虚像面投影距离是固定的, 如果驾驶者在行驶过程中长时间使用可能会有视觉眩晕的感觉。SEO J H 等<sup>[4]</sup>在 PGU 上划分出两块工作区域, 设计出可以同时投影出虚像距离分别在 2 m 和 5 m 处的虚像, 但是源图像是激光扫描 PGU 生成的, 无法承受高温, 不满足车载使用要求, 并且划分出来的图像生成单元(Picture Generation Unit, PGU)工作区分辨率较低, 视场角较小, 清晰度下降, 无法让驾驶者得到较好的体验。孔祥旭、薛常喜<sup>[5]</sup>设计的双焦面 AR-HUD 采用的是采用数字光处理与薄膜晶体管型液晶显示屏(TFT-LCD)双 PGU 的方案, 这种设计虽然成像质量会有所保证, 但是整体的体积较大, 不容易放进车身内部。

对于传统 HUD 显示单一的虚像面而言, 驾驶员的目视中心距离是随着车速的变化而变化, 在行驶过程中车速变化的情况下, 驾驶者长时间观看固定投影焦面上的信息会造成眼部疲劳的问题。合理的

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61701385), 西安工业大学研究生联合培养基金(No. XAGDYJ210202)

第一作者: 任进伟, 1547718315@qq.com

通讯作者: 吴慎将, wsj@xatu.edu.cn

收稿日期: 2022-11-30; 录用日期: 2023-03-06

<http://www.photon.ac.cn>

AR-HUD应随着驾驶者目视焦点的变化投影出多个不同深度的虚像,用来分别显示AR信息与车况信息。针对这些问题,本文提出基于单光机的双投影车载平视显示光学系统的设计思路,保证近距离和远距离都能够投影出虚像面,从而降低安全事故发生的概率。

## 1 原理分析与面型选择

### 1.1 成像结构原理

驾驶员透过前挡风玻璃观察虚像时不能被其他元件所遮挡是HUD光学系统设计的关键,而且车内空间有限,为了保证结构紧凑,视场范围较大<sup>[6]</sup>,如图1所示,本光学系统设计的初始结构是同轴反射光路,然后在此基础上进行离轴化,最后对离轴反射光路进行优化设计<sup>[7]</sup>。

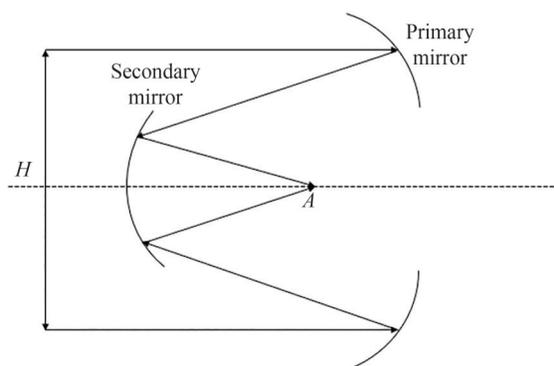


图1 同轴反射光路图

Fig.1 Coaxial reflected optical path

如图2所示为HUD光路虚像显示原理。源图像(PGU)发出光束,光线沿着L1、L2、L3、L4路线进行传输,依次经过反射镜M1、M2,然后在汽车前挡风玻璃内外表面之间经过多次反射和折射,最终以出射光束L4进入人眼。但是驾驶员大脑会以光线沿直线传播的原理对接收到的光线进行逆向追迹,认为出射光束的发光源位于车正前方投影的虚像面处。

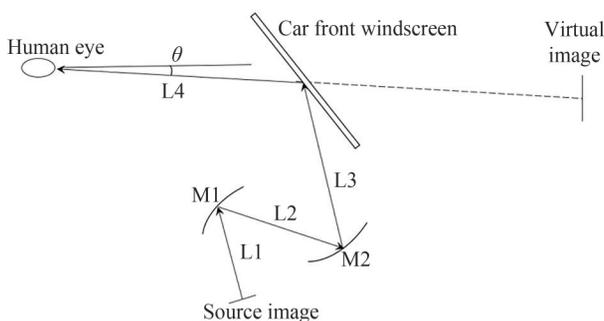


图2 虚像显示原理图

Fig.2 Schematic diagram of virtual image display

### 1.2 自由曲面选型

由于挡风玻璃面型复杂,使用传统结构中的球面和非球面面型无法很好平衡系统内的像差<sup>[8]</sup>。使用自由曲面进行光路设计,自由度更高,结构更加紧凑,可以在缩小光路体积同时对光学系统的光学性能进行提升<sup>[9]</sup>。

多项式自由曲面主要表征函数是由一个圆锥曲面作为基础上加上与坐标相关的多项式组表征,函数的种类有很多,如泽尼克多项式、切比雪夫多项式、拉盖尔多项式、埃尔米特多项式、Q-TYPE多项式和径向基函数等<sup>[10]</sup>。泽尼克多项式的表达形式较为清晰,是被广为使用的的面型之一,Zernike自由曲面的顶点曲率、非球面系数、以及多项式的系数均可成为优化函数的参数变量。因此在HUD系统中最为广泛使用,泽尼克多

项式自由曲面由垂度方程定义的表达式为

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

$$\sum_{i=1}^N A_i E_i(x, y) = A_1 x^1 y^0 + A_2 x^0 y^1 + A_3 x^2 y^0 + A_4 x^1 y^1 + A_5 x^0 y^2 + \dots + A_N x^{j-k} y^k \quad (2)$$

式中,  $Z$  为自由曲面矢高;  $c$  为顶点处曲面曲率;  $k$  为二次曲线常数;  $a$  为非球面系数;  $A$  为 Zernike 标准多项式上的系数;  $r$  为径向长度;  $\rho$  是归一化径向坐标;  $\varphi$  为角坐标。

Zernike 多项式的系数在其数学表达式中是相互独立的<sup>[11]</sup>, 互不影响, 这样就可以很方便的校正像差, 并且 Zernike 多项式可以正交归一化成单位圆, 这种单位圆上的正交性恰好满足圆形光瞳的特点, 符合设计要求。

## 2 设计参数

AR-HUD 系统的主要设计参数有: 眼盒尺寸 (Eyebox)、虚像距离 (Virtual Image Distance, VID)、视场角 (Field Of View, FOV)、下视角 ( $\theta$ )、像源 (PGU) 等。

本设计的参数如表 1 所示, 其中设置的上方远投影 FOV 为  $10^\circ \times 3^\circ$ , 下方近投影 FOV 为  $4^\circ \times 1^\circ$ , 并且在设计过程中会保证远投影虚像面和近投影虚像面在纵向分隔开, 避免同时投影两个画面时显示信息重叠, 对驾驶者产生负面影响。该光学系统采用的像源尺寸为 5.74 inch, 分辨率为  $1\,152 \times 576$ 。通过以上数据可以计算出光学系统的极限分辨率  $f$  为

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

式中,  $p$  代表的是像素尺寸。利用式 (3) 可以得出该光学系统的最大截止频率约为 4.42 lp/mm。为保证成像质量, 要求系统的光学传递函数 (Optical Transfer Function, MTF) 在 4.42 lp/mm 处大于 0.4, 畸变率小于 5%。

表 1 双光路 AR-HUD 光学系统设计参数

Table 1 Design parameters of dual optical path AR-HUD optical system

HUD system parameters	Parameter value
VID/m	Far: 7.5; Near: 3.8
FOV/(°)	Far: $10^\circ \times 3^\circ$ ; Near: $4^\circ \times 1^\circ$
Lower perspective/(°)	Far: $1.6^\circ$ ; Near: $4.6^\circ$
EYEBOX/mm	130 × 50
DLP/inch	5.74
Wavelength/ $\mu\text{m}$	0.55
Distortion/%	<5

## 3 系统设计与成像质量分析

### 3.1 光学系统设计

在双光路 AR-HUD 系统设计时, 挡风玻璃面型对光学系统影响很大, 并且车厂造型师设计的挡风玻璃面型是不规则的, 会引入像差和畸变, 这种面型带来的影响在设计时需要考虑。因此, 在设计光路之前使用 CATIA 软件提取挡风玻璃的有效使用区域, 并使用 ZEMAX 软件对相应区域进行面型拟合, 挡风玻璃面型拟合数据如表 2 所示。实际提取与设计时, 为了减小拟合误差, 该设计将泽尼克系数设置为 54 项, 归一化半径为 260 mm, 但由于前 7 项系数的影响较大, 因此表格中只列出前 7 项。

表 2 汽车挡风玻璃拟合数据

Table 2 Fitting data of windshield

Surface	Radius	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$
Windshield	-8 370.069	-2.066	-0.012	0.039	-1.197	0.457	-1.344	0.013

根据光路可逆的原理,本文设计的双光路AR-HUD光学系统采用传统的反向光路设计,该设计利用汽车前挡风玻璃作为组合器,系统的其他部分装配在汽车仪表台下方,由于车身内部空间有限,因此采用离轴反射式的光路结构。汽车前风挡玻璃的面型不规则,参与光路成像时会引入很大的像差<sup>[12]</sup>,为了解决这个问题,一级反射镜M1和二级反射镜M2的面型选为泽尼克自由曲面。其光学架构示意图如图3所示,源图像1和源图像2分别发出光线,都依次经过自由曲面一级反射镜M1和自由曲面二级反射镜M2,然后投射到风挡玻璃上,最终光线进入人眼。该行业内的每一款HUD都是针对特定的一种车型设计的,本文设计的双光路AR-HUD只是对于车厂某种车型适用,但是这种设计的光学架构具有普遍性<sup>[13]</sup>。

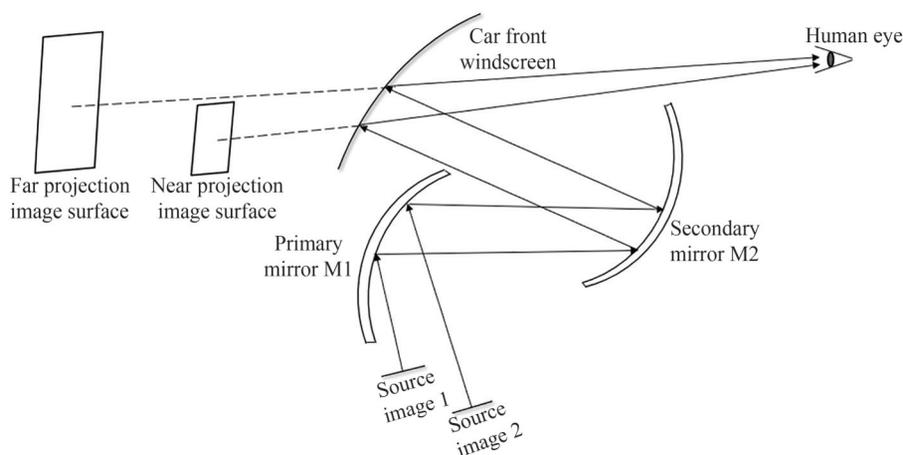


图3 双光路AR-HUD光学架构示意图

Fig.3 Schematic diagram of dual optical path AR-HUD optical architecture

如图4所示,在DLP光机投影距离的不同位置处放入平面反射镜P1和平面反射镜P2,使单PGU分割成一远一近两个像源,从而满足光源布置的要求,也能保证远投影虚像和近投影虚像互不串扰。上述布置方式会在ZEMAX软件中通过多重结构中设置多个组态并分别改变源图像1和源图像2到一级反射镜的距离实现光路搭建。

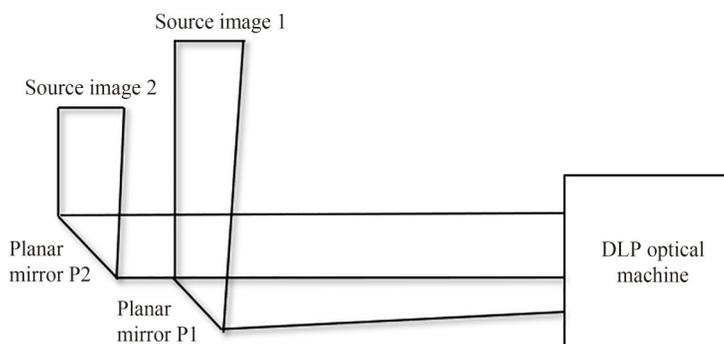


图4 DLP光机分解像源结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of DLP photo-mechanical decomposition image source structure

人眼瞳孔在正常情况下使用时其尺寸的浮动范围为3~5 mm。如果该光学系统的出瞳直径设计较小,可能会出现观察过程中视野丢失或者眼球转动产生的渐晕,引起驾驶者视觉疲劳。此外,对于不同驾驶者来说,需要调节自身瞳孔大小或者瞳距来配合系统的使用<sup>[14]</sup>。所以,针对该光学系统本项参数的设定,应在允许范围内设置较大的出瞳直径。因此,本文的出瞳直径(即光阑孔径)设定为8 mm。

进行初始设计时,先依据光路成像原理搭建共轴光路,再根据车厂提供的布置空间,通过设置两个自由曲面反射镜以及光机整个部件的偏心和旋转实现离轴化。在优化之前对两光路分别设定视场角。再通过多重结构设定眼盒(Eyebow)内部九个点位置(中心、左侧、右侧、上方、下方、左上、右上、左下、右下)。最后利用函数编辑器限定添加边界条件(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,并对畸变、MTF、点列图等进行详细优化。优化时,不断改变目标值大小,逐步逼近最佳成像状态,并针对光路中的光学元件曲率、厚度、旋转与偏心、多项式系数等进行设计。图5(a)为远投影光路HUD三维布局图,图5(b)为近投影光路HUD三维布局图,图5(c)是Eyebox取点示意图。

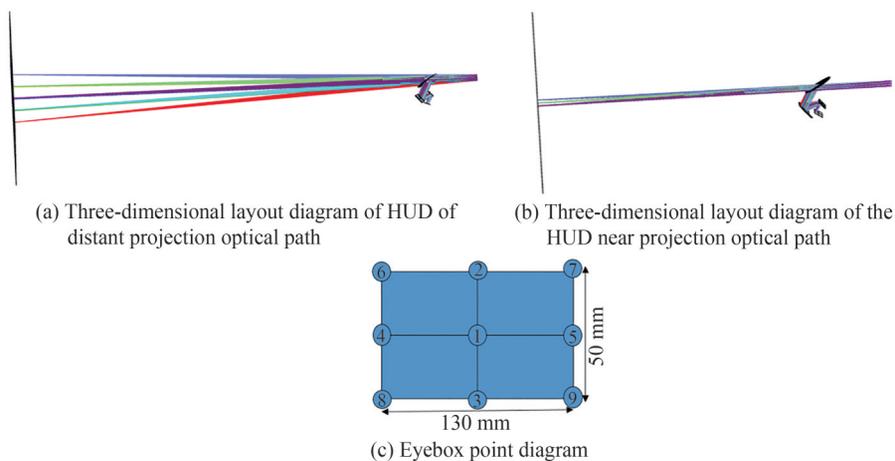


图5 双光路AR-HUD三维布局图和Eyebox取点示意图

Fig.5 Three dimensional layout of dual optical path AR-HUD and point taking diagram of Eyebox

### 3.2 像质评价

图6是将光阑直径设为8 mm时,人眼位于Eyebox中心处的点列图。根据设计结果发现,远投影光路和近投影光路的9个视场的点列图均小于艾利斑,且RMS半径最大为23.873  $\mu\text{m}$ ,小于AR-HUD设计经验值30  $\mu\text{m}$ ,因此光学系统像差较小。

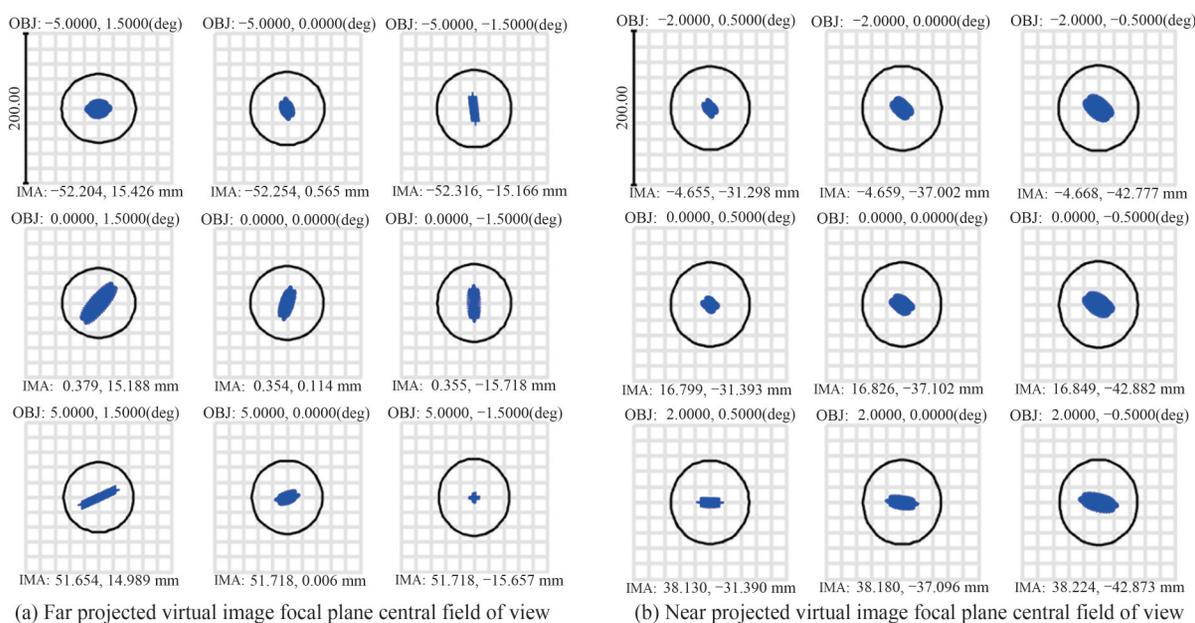


图6 不同投影位置虚像焦面的点列图

Fig.6 Dot-column diagram of virtual focal plane at different projection positions

图7为光学系统两个焦面的MTF曲线,设计中图像生成单元像元大小约为0.113 mm,因此截止频率设定在4.42 lp/mm处。根据设计结果可知,在截至频率处,各焦面的中心视场均大于0.5,边缘视场大于0.4,成像质量满足目视光学系统要求。

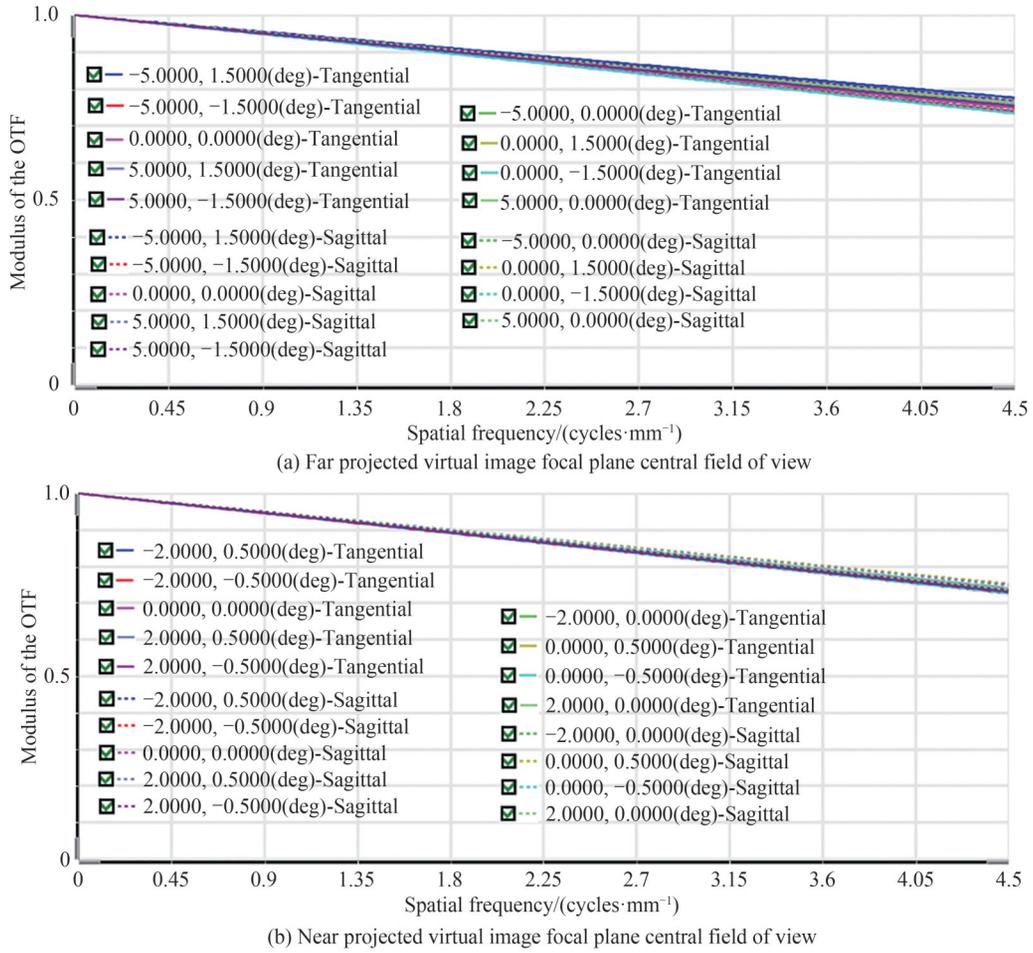


图7 不同投影位置虚像焦面的MTF曲线  
Fig.7 MTF curve of virtual focal plane at different projection positions

图8为系统的网格畸变图。图8(a)为远投影焦面中心视场的网格畸变图,并且九个视场的最大畸变为2.662 3%,没有明显的画面变形,图像预处理步骤可以省略。图8(b)为近投影焦面中心视场的网格畸变图,边缘最大畸变为0.647 3%,画面变形程度相对不大。根据设计结果可知,两个投影光路的最大畸变均小于5%,满足成像需求。如果设计中出现不理想的畸变结果,可根据实际情况对原图像进行预处理从而使驾驶者的体验感更佳。

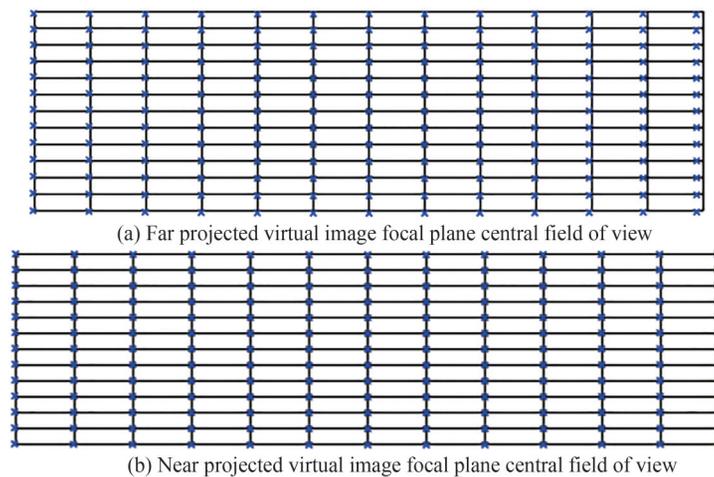


图8 不同投影位置虚像焦面的网格畸变图  
Fig.8 Mesh distortion plot of virtual focal plane at different projection positions

图9为双光路AR-HUD光学系统眼盒中心位置处投影虚像的相对照度曲线图,图9(a)、(b)分别对应近投影虚像的相对照度曲线图和远投影虚像的相对照度曲线图。不难看出眼盒中心位置投影的虚像照度变化趋势满足预期要求。

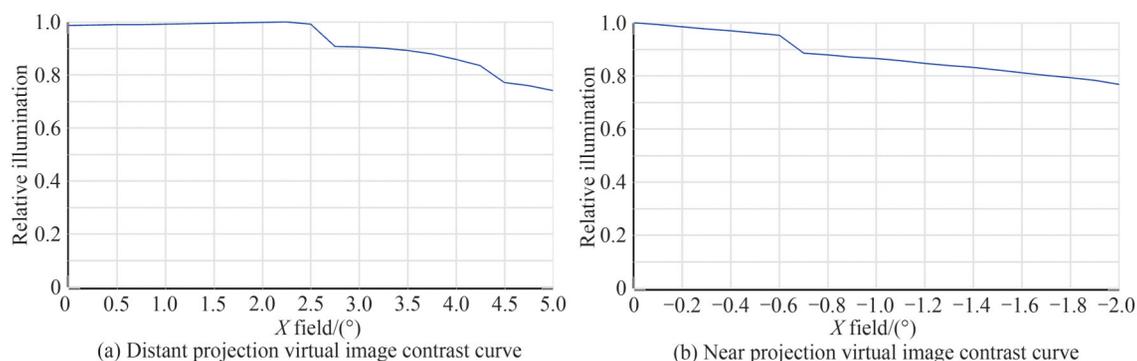


图9 眼盒中心位置处投影的虚像相对照度曲线图

Fig.9 Contrast curve of virtual image projected at the center position of the eye box

图10为光学系统对汽车UI图像的仿真效果,可以更直观的展现出投影虚像面的状态,图10(a)、(b)分别对应近投影焦面中心视场和远投影焦面中心视场。根据仿真效果可知,远投影光路眼盒中心和近投影光路眼盒中心对应的成像效果较好。



图10 UI仿真效果

Fig.10 UI simulation effect

### 3.2 公差分析

公差分析在光学系统设计中具有重要作用,特别是对于如图5(a)所示的HUD光学系统,公差分析有助于确定不同的制造和对准误差的允许限度。生产制造中对准误差可以在不影响光学系统图像退化的情况下将成本降低到适当的限度。如果公差要求过小会提高光学元件的加工、装调难度,还可能导致系统在实际使用过程中成像质量不稳定<sup>[15]</sup>。因此,使用Zemax软件对该系统的公差做初步分析是很有必要的。按照表5给出的公差分配范围,随机抽取了1000个蒙特卡罗样本,得到的系统虚像面的光学传递函数统计结果如表6所示。从表6可以看出,在空间截止频率4.42 lp/mm处该光学系统90%以上的MTF大于0.63,因此系统公差分配比较合理,容差能力较强,设计结果比较理想。

表5 系统公差分配  
Table 5 System tolerance allocation

Tolerance parameters	Radius of curvature/mm	Spacing/mm	X direction offset/mm	Y direction offset/mm	The amount of rotation on the X axis/(°)	The amount of rotation on the Y axis/(°)
Front windscreen	1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Primary mirror	1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Secondary mirror	1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

表6 蒙特卡罗分析结果  
Table 6 Results of Monte Carlo analysis

Percentage/%	Far projection optical path MTF value	Near projection optical path MTF value
90	0.641 038 41	0.747 032 07
80	0.641 790 26	0.747 636 64
50	0.643 107 51	0.748 615 63
20	0.668 274 13	0.749 260 67
10	0.685 100 22	0.749 542 14

## 4 结论

本文双光路AR-HUD的设计是在传统AR-HUD基础上的升级版本,通过对单一的DLP光机像源的拆分,并且只采用两个自由曲面反射镜,以及利用物像关系理论,从而实现近距离3.8 m处和远距离7.5 m处投影出虚像。仿真结果显示该光学系统的成像质量较好,最后考虑到实际应用,使用蒙特卡罗方法对系统的公差分布做了分析,验证了公差分配的合理性。该光学系统还解决了驾驶者在行驶过程中由于单一的投影距离的图像导致的视觉疲劳问题和多个光源显示器带来的体积庞大的问题。后续还可以通过软件算法实现近投影虚像面和远投影虚像面同时或者分时显示,从而提高驾驶者的体验感,为以后多焦面车载平视显示光学系统的发展提供有益参考。

### 参考文献

- [1] WU Gang, ZHAO Guangqi, LI Jian. Research on on-board HUD system [J]. *Automotive Practical Technology*, 2020, 45(18): 27-33.  
武刚, 赵光琪, 李剑. 车载抬头显示器系统研究[J]. *汽车实用技术*, 2020, 45(18): 27-33.
- [2] WANG Dongping. Research on on-board head up display system [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2015.  
王东平. 车载抬头显示系统的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2015.
- [3] HUANG Xingzhou, HU Shijie, TANG Guomao, et al. Optical structure design of automotive head-up display with long-distance imaging[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(5): 894-900.  
黄兴洲, 胡诗杰, 汤国茂, 等. 远距离成像汽车平视显示光路结构设计[J]. *应用光学*, 2019, 40(5): 894-900.
- [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] KONG Xiangxu, XUE Changxi. Optical design of bifocal head up display system based on dual image generator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(14): 188-193.  
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): 188-193.
- [6] QIN Z, LIN S M, LUO G C, 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.
- [7] WAN J Y, TSIMHONI O. Effects of luminance contrast and font size on dual-plane head-up display legibility ("The Double 007 Rule for HUDs")[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2021, 29(5): 328-341.
- [8] YUAN Fenglin, ZHAO Wenchuan, CHEN Wenjing. Point cloud matching algorithm for free-form reflector of vehicle mounted head up display system [J]. *Optics and Optoelectronics*, 2021, 19(2): 15-24.  
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.
- [9] ZONG Hui, YANG Bo, GU Pengxiang. Design of a reflective projection imaging system for free-form surfaces [J]. *Intelligent Computers and Applications*, 2021, 11(6): 92-95.  
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.
- [10] ZHANG Yilan, SHI Haodong, WANG Chao, et al. Research on polarization aberration characteristics of Off-Axis

- freeform surface optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(18): 190-200.
- 张艺蓝, 史浩东, 王超, 等. 离轴自由曲面光学系统偏振像差特性研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(18): 190-200.
- [11] YANG Tong, DUAN Yingzhe, CHENG Dewen, et al. Design of free form imaging optical system: theory, development and application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 115-143.
- 杨通, 段瓔哲, 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): 115-143.
- [12] JAKUS G, DICKE C, SODINK J. A user study of auditory, head-up and multi-modal displays in vehicles[J]. *Applied Ergonomics*, 2015, 46: 184-192.
- [13] CAO Yan. Optimization design of optical module of vehicle head-up display system [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2022.
- 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.
- [14] LI Yuan, LI Yan, HE Yulan, et al. Design of compact freeform off-axis three-mirror system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(6): 780-784.
- 李元, 李艳, 何玉兰, 等. 紧凑型自由曲面离轴三反系统设计[J]. *应用光学*, 2018, 39(6): 780-784.
- [15] SUN Yongxue, XIA Zhentao, HAN Haibo, et al. Design and tolerance analysis of large-aperture infrared off-axis three-mirror optical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(6): 803-808.
- 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.

## Design and Optimization of Dual-focal Vehicle Head-up Display Optical System Based on Single-optical Machine

REN Jinwei<sup>1</sup>, CHEN Xiaowei<sup>2</sup>, WANG Bo<sup>2</sup>, CAO Yan<sup>2</sup>, SUN Yihan<sup>1</sup>,  
LI Xinyu<sup>1</sup>, WU Shenjiang<sup>1</sup>

(1 School of Optoelectronics Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

(2 FORYOU Multimedia Electronics Co., Ltd, Huizhou 516006, China)

**Abstract:** As society continues to progress, automobiles have become a common sight in households worldwide. However, the increase in the number of vehicles on the road has led to a series of traffic safety issues. As a result, automotive safety has become one of the most popular research topics worldwide. Among them, Head-Up Display (HUD) systems can be applied to cars, serving as an assistant to driving and improving driving safety. Through the use of a head-up display optical system, drivers can see virtual images that display important driving information and road conditions in the direction of their line of sight, eliminating the need to look down at instrument panel information and navigation information. This reduces driver distraction and improves driving safety. As HUD technology continues to advance and develop, it will gradually integrate with autonomous driving systems, becoming a standard feature in future high-tech vehicles. Nowadays, the technology of automotive HUD on the market is gradually maturing, mainly including Windshield HUD (W-HUD) and Augmented Reality HUD (AR-HUD). However, the current car-mounted HUD can only display virtual images on a single projection distance. When the driver changes the observation due to changes in vehicle speed, the visual focus distance needs to be adjusted to adapt to the HUD projection distance. Long-term and high-frequency adjustments can lead to eye fatigue for the driver. To address this issue, this paper proposes the design of a car-mounted binocular parallax optical system. Based on the current research status, a method of using a single DLP micro-projection machine to separate two images and generate two Projection Generating Units (PGUs) to display binocular virtual images for AR-HUD is proposed. According to the initial architecture of the HUD optical system, which is a coaxial reflection optical system, an off-axis reflection vehicle-mounted parallax display optical system is constructed by using an off-axis rotating reflection mirror. Then, by changing the object distance of the PGUs to the primary reflection mirror, the two free-form reflection mirrors are combined to construct an off-axis reflection binocular parallax vehicle-mounted display optical system, thereby ensuring the projection of two virtual images at different distances. The optical system uses a 5.74 inch DLP micro projector with an eyebox size of 130 mm×50 mm, a far projection field of view of 10°×3° and a near projection field of view of 4°×1°, and a virtual image projection distance of 3.8 m and 7.5 m. Image quality evaluation is analyzed and explained from the aspects of the point cloud diagram, MTF curve diagram, grid

distortion, illumination curve diagram, and image simulation. The key to the optical system is tolerance analysis, which helps to determine the allowable limits of different manufacturing and alignment errors. Manufacturing and calibration errors can be reduced to an appropriate level without degrading the image quality of the optical system. If the tolerance requirements are too strict, it may increase the difficulty in processing and arranging the optical components and may also lead to unstable imaging quality during actual use. By designing the tolerance range of the curvature radius of the lens and the windshield usage area, the distance between lenses and the windshield usage area, the X-axis offset lens and the windshield usage area, the Y-axis offset lens and the windshield usage area, the axial rotation of the lens and the windshield usage area, and the axial rotation of the lens and the windshield usage area, the statistical results of the optical transfer function of the system's virtual image plane were obtained using Monte Carlo method with 1 000 randomly selected samples. It can be seen that at a spatial cutoff frequency of 4.42 lp/mm, more than 90% of the MTF of the optical system is greater than 0.63, indicating that the tolerance distribution of the system is reasonable, the tolerance capability is strong, and the design results are ideal. The design result of the dual-path AR-HUD optical system in this paper shows that, through software control, the near projection virtual image plane and the far projection virtual image plane can be displayed simultaneously or in a time-sharing manner, which improves the driver's visual experience.

**Key words:** Head-up display; Free-form surface; Optical system; Projection distance; Dual optical path

**OCIS Codes:** 220.4830; 110.1080; 110.1085