

## 激光与光电子学进展

## 双自由曲面平视显示系统光学模组优化设计

陈晓伟<sup>1</sup>, 曹妍<sup>1,2\*\*</sup>, 薛嘉隆<sup>3</sup>, 任进伟<sup>3</sup>, 王波<sup>1</sup>, 吴慎将<sup>3\*</sup><sup>1</sup>惠州市华阳多媒体电子有限公司, 广东 惠州 516006;<sup>2</sup>西安工业大学兵器科学与技术学院, 陕西 西安 710021;<sup>3</sup>西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

**摘要** 为了保证增强现实式平视显示系统(AR-HUD)的虚像像质清晰、虚像距离更远,在视场角更大需求的基础上应尽可能减小 AR-HUD 的体积。采用自由曲面离轴双反射系统,设计了一款虚像距离为 10 m、视场角为  $10^\circ \times 5^\circ$  的虚像显示光路。该光路用孔径光阑偏移范围(Eyebow)模拟驾驶员视野移动范围并分为 9 个结构,利用多重结构进行优化仿真,每个视场光斑均落于艾里斑之内,图像的调制传递函数均接近衍射极限,畸变、动态像差值均小于行业规定值。满足成像要求后绘制了平视显示系统(HUD)防尘膜并进行光害仿真分析,避免太阳光害进入人眼。最后,绘制 AR-HUD 外壳,测得其体积为 10 L,并通过用户界面(UI)图像对显示效果进行仿真,验证了设计的正确性与可行性。

**关键词** 光学设计; 平视显示系统; 自由曲面; 光学系统; 多重结构

中图分类号 U471

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213312

## Optimal Design of Optical Modules for Double Free-Form Surface Head-Up Display Systems

Chen Xiaowei<sup>1</sup>, Cao Yan<sup>1,2\*\*</sup>, Xue Jialong<sup>3</sup>, Ren Jinwei<sup>3</sup>, Wang Bo<sup>1</sup>, Wu Shenjiang<sup>3\*</sup><sup>1</sup>FORYOU Multimedia Electronics Co., Ltd., Huizhou 516006, Guangdong, China;<sup>2</sup>School of Defence Science and Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China;<sup>3</sup>School of Optoelectronics Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China

**Abstract** To ensure high quality of virtual images in augmented reality head-up display (AR-HUD) systems, the size of the AR-HUD should be reduced as much as possible to achieve a longer distance and a larger field of view. Using an off-axis dual-reflection system with a free-form surface, a virtual image display optical path with a virtual image distance of 10 m and a field of view angle of  $10^\circ \times 5^\circ$  is designed. Furthermore, the Eyebow (aperture diaphragm offset range) is divided into the moving range of a driver's field of view. The system has nine structures, and multiple structures can be used for the optimization simulation. The light spot from each field of view falls within the Airy disk. The modulation transfer function of the image is close to the diffraction limit, and both the distortion and dynamic aberration values are less than the industry standard values. Once the imaging requirements are satisfied, the dust-proof film of the head-up display (HUD) system is drawn, and the light damage simulation is performed; based on the results, sunlight can be prevented from entering the eyes. Finally, the AR-HUD shell is drawn, and the measured volume is 10 L. The display effect is simulated through a user interface (UI) image to verify the correctness and feasibility of the design.

**Key words** optical design; head-up display; free-form surface; optical system; multiple structure

## 1 引言

车载平视显示系统(HUD)能够将行车信息通过挡风玻璃投影到驾驶员视野正前方一定距离处形成虚像,驾驶员无需低头就可以掌握此时的车速、油量、异

常等提示信息<sup>[1]</sup>。这对于驾驶者而言更为安全,同时使得驾驶员不必在观察远方的道路和近处的仪表之间调节眼睛,避免眼睛疲劳,极大地改进了驾驶体验<sup>[2]</sup>。

目前,车载 HUD 在市场上主要分为直接反射式 HUD(C-HUD)、挡风玻璃式 HUD(W-HUD)、增强现

录用日期: 2022-02-21; 收稿日期: 2021-12-22; 修回日期: 2022-02-07; 网络首发日期: 2022-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(61701385)、西安工业大学研究生联合培养基金(XAGDYJ210202)

通信作者: \*bxait@xatu.edu.cn; \*\*caoyan1902@163.com

实式 HUD(AR-HUD)<sup>[3]</sup>。C-HUD 是在汽车仪表台上放置一块树脂板作为组合器进行虚像显示,虽然价格较低、适配性高,但成像区域较小,且掉落会对驾驶员造成安全隐患,因此逐渐被市场边缘化。W-HUD 将前挡风玻璃作为成像区域,较 C-HUD 而言,成像范围更大且成像区域更远。王睿等<sup>[4]</sup>设计了一个投影距离为 2.5 m 的 W-HUD 系统,使用自由曲面进行设计,将挡风玻璃当成平面进行处理,未考虑挡风玻璃自身带来的像差,光路中同时使用折射和反射元件,导致光路复杂,无法很好地在汽车仪表台内进行安装;Wu 等<sup>[5]</sup>在其研究中,通过组合两个 90°棱镜和一个全息光学元件来产生图像分割元件,并与虚像投影系统集成以产生基于宽视角激光的平视显示器,缩小了体积但投影距离较短,在挡风玻璃 1.6 m 后,距离太短,无法与增强现实(AR)技术结合,不能和路面信息进行更好的匹配。近年来,随着汽车技术的不断发展,市场对 HUD 提出了更高要求,车载 HUD 将与 AR 技术进行融合,将距离做到更远且能够将路面信息投影至挡风玻璃与驾驶员实现更好交互。对于 AR-HUD 的设计,黄兴洲等<sup>[6]</sup>使用数字光处理(DLP)投影,研究了消除重影的方法,设计了一种焦距为 -309 mm、虚像视距为 7.5 m、虚像视场角为 9.8°×5.5°的虚像显示光路,投影距离满足 AR-HUD 的设计距离,但未考虑 AR-HUD 的体积;马冬林等<sup>[7]</sup>提出了自由曲面离轴三反镜系统设计结构,研究了确定初始结构及如何优化的分析方法,实现了 80 mm×40 mm 超大光瞳范围内的清晰成像,为 AR-HUD 初始结构计算提供了一种更好的方法。目前,投影距离增长、光瞳与视场角增大都会造成 AR-HUD 的体积过大,过大体积将会影响其在仪表板处的布置。因此,如何在提高视场角和成像距离的基础上又能将体积控制在较小范围是本文设计的主要内容。

## 2 原理分析

### 2.1 AR-HUD 结构分析

本文中的 AR-HUD 采用双自由曲面进行设计。将自由曲面<sup>[8]</sup>应用到系统设计中,能够有效地减少像差,提高系统的成像质量,并达到缩小体积的目的。

如图 1 所示,源图像发出的光线 L1 通过两片自由曲面镜 M1、M2 进行反射折射,将光源输出的像进行

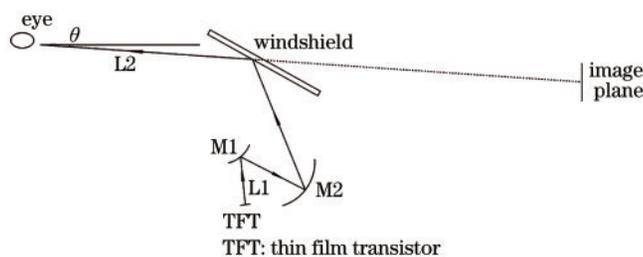


图 1 AR-HUD 原理图

Fig. 1 Schematic diagram of AR-HUD

放大,最终光线 L2 通过挡风玻璃反射至人眼。

由于挡风玻璃是不规则面型,参与成像会产生较大的像差,为了在校正像差的同时又能保持光路结构的精简,可采取自由曲面进行校正。

在 Zemax 光学设计软件里,主反射镜设计中引入 Zernike 边缘矢高形式的自由曲面<sup>[9]</sup>。在优化阶段主要考虑三个因素对系统的影响:像质、体积、杂光。采取逐步逼近的优化方法,在保证系统像质满足要求的前提下,优化得到体积更小的设计结果。经过多次优化迭代,实现了性能优良、结构紧凑、杂光可控的双自由曲面镜<sup>[10]</sup>。

光学表面的矢高可以表示为

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

式中: $k$ 为圆锥系数; $c$ 为曲率半径; $a_i$ 是非球面系数; $r$ 是光轴方向的半径高度,可写成  $r^2 = x^2 + y^2$ ;  $A_i$  是 Zernike 多项式系数,多项式可用下式展开:

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

多项式的系数为  $N = \frac{1}{2}j(j+1) + k$ 。

Zernike 多项式也可以表达为极坐标形式:

$$Z(x, y) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^N B_i F_i(\rho, \theta) (0 \leq \rho \leq 1, 0 \leq \theta \leq 2\pi). \quad (3)$$

Zernike 多项式具有良好的数学性能,可将其正交归一化成单位圆,因此 Zernike 多项式所具有的这种单位圆上的正交性恰好满足圆形光瞳的特点,而且其正交性使拟合多项式的系数之间相互独立,系数之间不会相互影响。Zernike 多项式与光学系统的初级像差有着一定的对应关系,并且很容易与 Seidel 像差相对应,可以有选择地处理像差。

### 2.2 技术指标

AR-HUD 的主要设计指标为:眼盒尺寸(Eyebbox)、投影距离(VID)、视场角(FOV)、下视角( $\theta$ )、体积等。

Eyebbox 是指汽车驾驶员以正常姿态坐在座椅上,眼睛在车身坐标中的统计分布范围。即以默认眼睛位置为中心的矩形区域内,眼睛在任何位置移动都能看到完成的虚像。此值为经验值,由汽车厂商规定,本文设计定为:130 mm×50 mm。

$\theta$  是指驾驶员观察 HUD 图像时,眼睛与水平方向形成的夹角,如图 2 所示。本文特指眼睛注视图像中心时候的视线角度。由于 AR-HUD 投影距离较远,下视角越小,在不干涉引擎盖的基础上  $\theta$  可以做到 2.5°。

FOV 在 HUD 中指虚像的边缘相对于人眼的夹角,分为水平方向  $H$  和垂直方向  $V$ ,如图 3 所示。图中,  $\alpha$  为水平夹角,  $\beta$  为竖直夹角,  $D_{\text{VID}}$  为虚像距离, 本文设计中为 10 m。

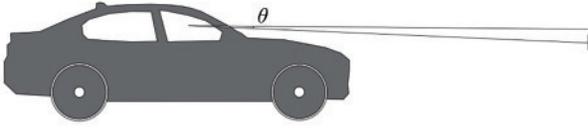


图 2 下视角示意图

Fig. 2 Schematic diagram of lower perspective

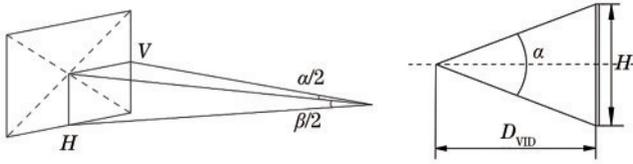


图 3 FOV 示意图

Fig. 3 Schematic diagram of field of view (FOV)

$$\alpha = 2 \cdot \tan^{-1} \left( \frac{H}{2} \times D_{\text{VID}} \right), \quad (4)$$

$$\beta = 2 \cdot \tan^{-1} \left( \frac{V}{2} \times D_{\text{VID}} \right). \quad (5)$$

体积是 AR-HUD 能实际应用到车辆的重要指标, 缩小体积也是本次光学设计最想要解决的问题。由于 AR-HUD 的视场角过大且投影距离长, 导致其体积过大, 但过大的体积会影响汽车厂商给 HUD 预留空间, 因此 HUD 的设计应该使镜片合理布局, 减小体积。

本文 AR-HUD 的设计具体参数如表 1 所示。

表 1 AR-HUD 设计参数

Table 1 Design parameters of AR-HUD

HUD parameter	Parameter value
VID	10 m
FOV	$10^\circ \times 5^\circ$
Eyebox	130 mm $\times$ 50 mm
TFT	4.1
Volume	12 L
Distortion	2%

表 2 汽车挡风玻璃拟合数据

Table 2 Fitting data of windshield

Surface	Radius	Conic	K1	K2	K3	K4	K5
Windshield	-3963.9300	3.7926	0.0140	-1.8859	4.7072	3.0362	0.0636

离轴三反系统是在同轴三反系统的基础上, 通过视场离轴或光阑离轴得到<sup>[11]</sup>。图 4 所示为同轴三反系统的初始结构,  $M_1$ 、 $M_2$  和  $M_3$  分别代表三反系统中的主镜、次镜和三镜, 其结构参量有 8 个, 包括 3 个反射面的半径 ( $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$ )、主镜到次镜的距离  $d_1$ 、次镜到三镜的距离  $d_2$  以及 3 个非球面的二次非球面系数 ( $k_1$ 、 $k_2$  和

### 3 AR-HUD 的光学系统设计

#### 3.1 设计思路

通过以下 4 个步骤对 AR-HUD 的光学系统进行设计:

1) 根据光学系统的使用场景、成像要求确定其技术要求, 包括结构类型 (折射式或反射式)、焦距大小、视场大小、相对孔径等;

2) 根据系统所要求的性能参数, 在已有的经典结构设计中选择能够近似符合要求的结构作为初始结构;

3) 确定好初始结构后, 在光学软件中进行建模, 根据系统的参数要求设定初始结构的参数范围, 包括光学元件的曲率半径、圆锥系数、面型、材料、厚度, 修改光学元件间的距离、相对旋转角、偏心等参数, 然后建立评价函数, 优化系统像差, 当像差减小到一定程度后, 对成像质量进行评估;

4) 评估当前系统成像的质量, 如果满足系统的成像要求就可以进行防尘膜设计、外壳设计并测量其体积, 看体积是否满足要求, 设计步骤完成, 进行用户界面 (UI) 成像仿真分析, 观察效果是否良好。

#### 3.2 设计实例

在 AR-HUD 设计时, 挡风玻璃对系统有很大影响。由于车厂挡风玻璃在造型设计时会有一定的弯曲, 会引入一定像差和畸变, 这种误差无法忽视, 因此在设计时不可将挡风玻璃近似为平板玻璃。因此, 使用 Catia 软件找出挡风玻璃应用区域, 并使用 Zemax 提取出面型进行光学系统结构搭建, 挡风玻璃面型数据如表 2 所示, 实际提取与设计时, Zernike 系数为前 20 项, 但由于前 5 项影响最大, 因此表格中只列出前 5 项。

由于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, 而离轴反射光路结构紧凑、视场大, 容易实现无遮拦, 能够更有效地控制 AR-HUD 的体积, 故选择离轴三反结构; 相对于同轴三反结构, 离轴三反结构具有更多的变量, 布局更加多样性, 通过合理设计, 能够更好地压缩 AR-HUD 的体积, 实现更加优异的光学性能。

$k_3$ )。应用高斯光学理论可以得到系统的结构参数, 其表达式为

$$R_1 = \frac{2}{\beta_1 \beta_2} f', \quad (6)$$

$$R_2 = \frac{2\alpha_1}{(1 + \beta_1)\beta_2} f', \quad (7)$$

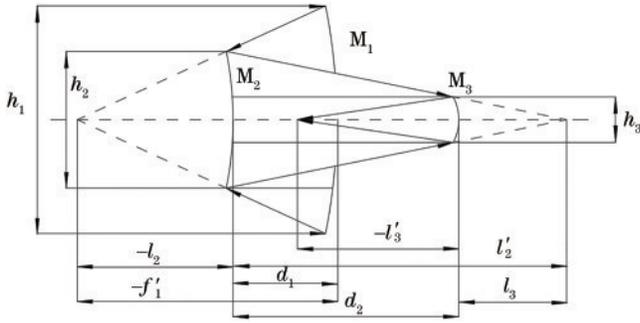


图 4 同轴三反光学系统的初始结构

Fig. 4 Initial structure of coaxial three-mirror optical system

$$R_3 = \frac{2\alpha_1\alpha_2}{1 + \beta_2} f', \quad (8)$$

$$d_1 = \frac{1 - \alpha_1}{\beta_1\beta_2} f', \quad (9)$$

$$d_2 = \frac{\alpha_1(1 - \alpha_2)}{\beta_2} f', \quad (10)$$

$$d_3 = l'_3 = \alpha_1\alpha_2 f', \quad (11)$$

式中： $f'$ 为光学系统总焦距；次镜对主镜的遮拦系数为  $\alpha_1 = \frac{l_2}{f_1}$ ；三镜对次镜的遮拦系数为  $\alpha_2 = \frac{l_3}{l'_2}$ ；次镜的放大率为  $\beta_1 = \frac{l'_2}{l_2}$ ；三镜的放大率为  $\beta_2 = \frac{l'_3}{l_3}$ 。

为实现像面平场，令  $S_4=4$ ，为了消除球差慧差和像散，令  $S_1 = S_2 = S_3 = 0$ 。可以求取三个镜面的二次非球面系数  $k_1, k_2$  和  $k_3$ 。将求取的初始结构参数输入到光学设计软件中。

在本文中，AR-HUD 镜头设计主要有以下参数，设计过程中将 HUD 投影距离、眼距、挡风玻璃曲率、挡风玻璃入射角度和挡风玻璃副入射角度测量得到后，设为定量；将一级镜曲率、二级镜曲率、一级镜与二级镜的距离和角度；一级镜与薄膜晶体管(TFT)的距离和角度等作为变量使用评价函数进行优化，优化过程中，不得一次性将其所有作为优化变量去控制，否则会造成结构无效等后果。因此光路优化应经过不断尝试积累经验进行逐个或多个优化。

变量设置完成应进入评价函数编辑器内对评价函数进行设置，评价函数首先选择其默认的优化函数，根据所设计的光学系统的像差大小，选择采用光斑半径或波前差优化的方式。初步优化完成后，在根据像差分析的数据和调制传递函数(MTF)曲线图等地针对性地设置优化函数。由式(4)~(5)可计算，HUD 投影最终成像的实际大小为  $874.89 \text{ mm} \times 436.61 \text{ mm}$ ，使用操作数 REAX(实际光线在 X 表面上的坐标)、REAY(实际光线在 Y 表面上的坐标)去控制成像位置、大小，使成像规整，减小畸变。可以通过自定义曲率大于(CVGT)、曲率小于(CVLT)等改变双曲面镜曲率，达到优化效果。还可以通过改变光学系统焦距(EFFL)、畸变(DIST)、球差(SPHA)等对光路系统进行优化，也可通过更改权重使其达到目标效果。

经过中心眼点处多次优化，及对多重结构进行同时多次优化，得到 AR-HUD 光路设计参数结果如表 3 所示，其中，优化完成后一级镜和二级镜的面型参数分布如表 4 和表 5 所示，3D 渲染图如图 5 所示。

表 3 AR-HUD 光路结构参数

Table 3 Optical path structure parameters of AR-HUD

Surface	Radius	Thickness /mm	Tilt about X / (°)	Tilt about Y / (°)
Object field	-	-10000.00	-	-
Windshield	-3963.93	-345.00	-62.15	7.22
Zernike standard sag	807.62	154.32	-19.03	0
Zernike standard sag	-2594.48	-148.08	26.00	0
Image plane	Infinity	-	-10.00	6.00

表 4 一级镜面型参数

Table 4 Primary mirror type parameters

Surface	Radius	Conic	K1	K2	K3	K4	K5
Zernike	-2594.485	0	14.234	-10.405	-4.826	4.746	-0.635
			K6	K7	K8	K9	K10
			3.105	0.006	0.242	0.715	-0.324
			K10	K11	K12	K13	K14
			-0.324	0.006	-0.040	-0.126	-0.778
			K15	K16	K17	K18	K19
			0.228	0.090	-0.050	0.105	0.056

表 5 二级镜面型参数  
Table 5 Secondary mirror type parameters

Surface	Radius	Conic	K1	K2	K3	K4	K5
Zernike	807.616	0	-15.597	-6.132	0.583	0.241	-0.051
			K6	K7	K8	K9	K10
			1.651	0.095	-0.036	0.131	-0.041
			K10	K11	K12	K13	K14
			-0.041	-0.006	0.016	-0.003	-0.040
			K15	K16	K17	K18	K19
			-0.006	-0.002	-0.009	-0.008	-0.008

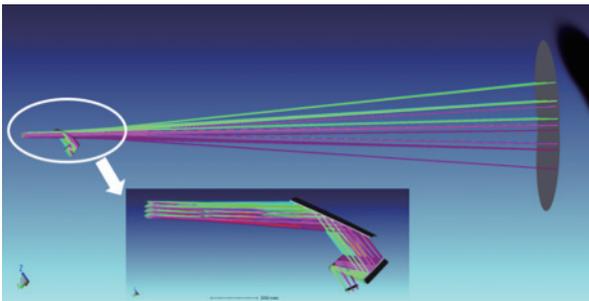


图 5 AR-HUD 3D 渲染图  
Fig. 5 3D rendering of AR-HUD

由 Zemax 输出参数得到汽车 AR-HUD 虚像显示光路的虚像像距为 10 m, 水平视场角为 10.2892°, 竖直视场角为 5.1523°, 满足设计要求。

### 3.3 优化体积

将设计好的光线导入 Catia 软件中绘制外壳, 如图 6 所示, 由绘制的防尘膜切割 HUD 外壳出光口, 外壳边缘与光线和曲面镜最近距离约为 10 mm, 留有较足容差空间。目前体积已缩小至 10 L。

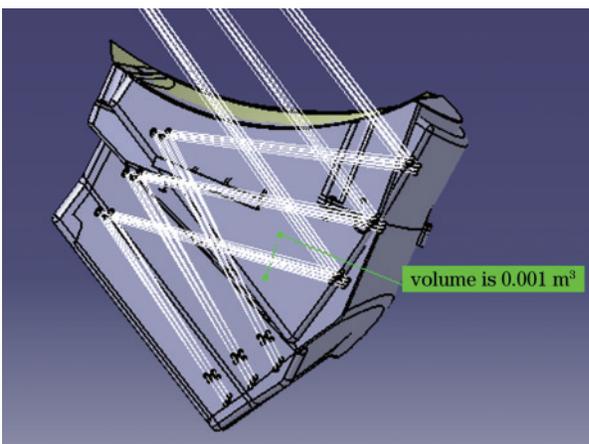


图 6 体积测量图  
Fig. 6 Volume measurement chart

## 4 仿真分析

### 4.1 成像质量与仿真分析

图 7 是将瞳孔直径设为 4 mm 时, 眼睛位于

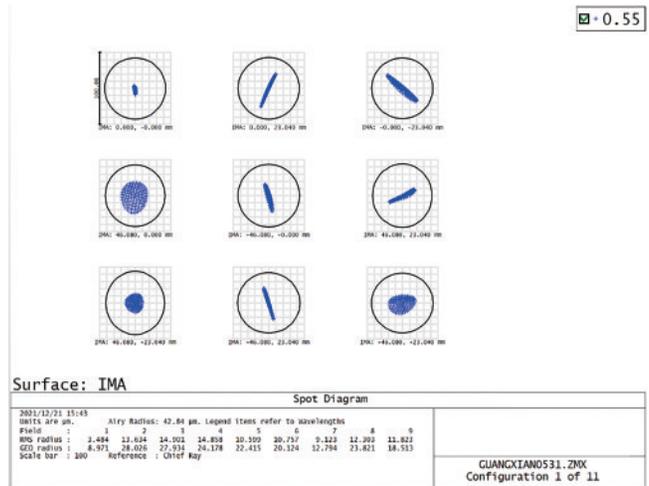


图 7 成像质量评价图(点列图)

Fig. 7 Image quality evaluation diagram (point column diagram)

Eyebox 中心处时点列图大小。由图可见, 9 个视场的点列图均小于艾里斑, 且均方根(RMS)半径远小于 AR-HUD 设计经验值 80, 可见光学系统像差较小。

图 8 是中心结构孔径光阑在 Eyebox 范围内中心位置时的虚像空间的 MTF, MTF 曲线已达到衍射极

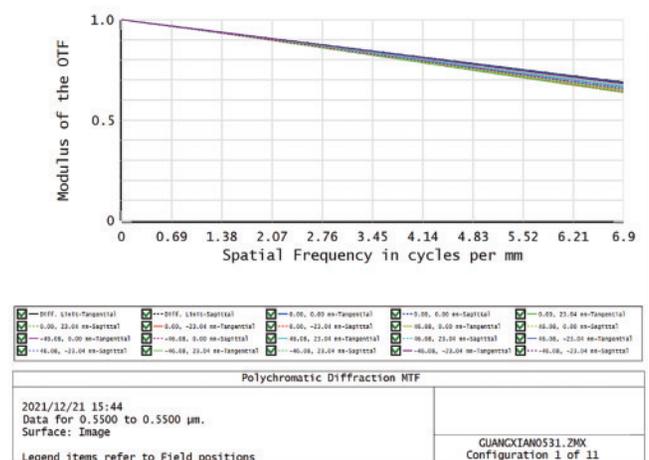


图 8 成像质量评价图(MTF 曲线图)

Fig. 8 Image quality evaluation diagram (modulation transfer function curve)

限,当最大空间频率为 6.9 lp/mm 时均大于 0.6,可以看出 Eyebox 中心成像质量良好。

图 9 是 Zemax 软件原有的网格畸变图,可定性定量反映畸变量大小,网格交点为理想成像位置,\*点为实际设计成像图像,观察实际图像与理想成像位置区别,则可得到畸变量,畸变量为 1.152%,小于指标 2%,已得到较好的成像效果。

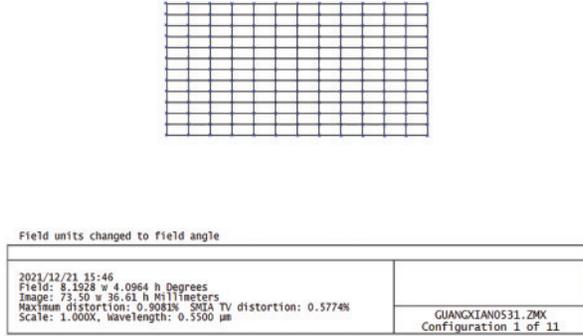


图 9 畸变评价图

Fig. 9 Distortion evaluation diagram

动态畸变反映的是人眼在不同位置观察时,成像位于不同视角显示的图像会有差别,因此会引入动态视差,表 6 前 4 行是上方、下方、左侧、右侧与中心眼点位置的角度差,最大值为 2.91',小于规定值 5';后 4 行是左上、右上、左下、右下与中心眼点位置的角度差,最大值为 3.28',小于规定值 7'。数据表明,动态像差对

人眼观察影响不大。

#### 4.2 Ansys-Speos 成像仿真

为保证 AR-HUD 光学设计的正确性、指导性,使光学设计工作可以高效率地满足设计要求,可采用 Ansys-Speos 软件进行仿真分析。

将 Zemax 设计得到的光路图导入 Catia 软件中,提取中心眼点和左右眼点、防尘膜、一级镜、二级镜、挡风玻璃、TFT 像源面,再将所提取的表面导入 Ansys-Speos 软件中进行仿真,得到 HUD 最终显示图像。为了可以直观看到畸变程度与实际使用效果,采用了网格 UI 图像与实际 UI 图像进行仿真。

图 10(a)是网格图像,图 10(b)为中心眼点图像,图 10(c)为实际汽车原 UI 图像仿真效果,图 10(d)为实际汽车中心眼点 UI 图像仿真效果。由网格 UI 仿真可看出白色直线相对于原图像有轻微畸变,但使用实际车上 UI 显示效果仿真,中心眼点与原图像人眼差异不大,不影响显示效果。

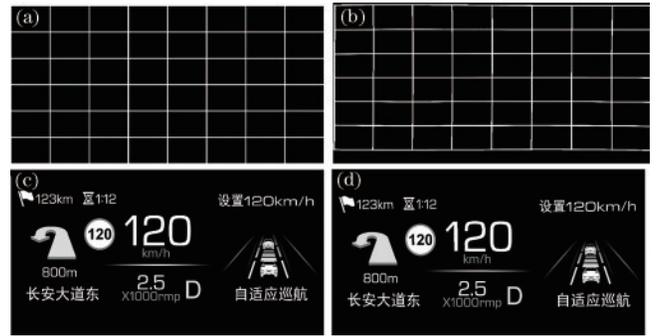


图 10 图像显示 UI 仿真效果

Fig.10 Image display of user interface (UI) simulation effect

表 6 动态畸变

Table 6 Dynamic distortion

Position	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Config2-config1	0.60	0.18	0.99	0.25	0.64	1.92	0.28	0.63	0.94
Config3-config1	1.20	0.54	0.97	1.54	1.03	0.33	0.90	0.68	0.90
Config4-config1	0.74	0.96	2.44	0.18	0.10	2.91	1.38	2.18	2.71
Config5-config1	1.56	2.02	1.88	1.49	1.76	0.58	0.60	1.51	0.62
Config6-config1	1.41	0.11	2.69	1.08	0.39	3.28	1.53	2.72	3.22
Config7-config1	2.73	1.05	1.86	2.50	2.44	2.70	0.82	2.79	2.15
Config8-config1	1.12	2.73	2.81	0.58	1.12	2.66	0.87	0.91	2.39
Config9-config1	1.79	2.50	1.03	1.95	1.88	0.56	1.42	0.48	1.41

## 5 结 论

在提高 AR-HUD 像质基础上,为进一步减小其体积,采用双自由曲面的结构,利用 Zemax 光学仿真软件进行优化设计与评价,使用 TracePro 进行防尘膜光害仿真分析,并利用 Catia 绘制 AR-HUD 外壳,得到 HUD 体积为 10 L,成像质量也满足 AR-HUD 更远距离、更大视角的设计要求。最后,使用 Ansys-Speos 软件对 AR-HUD 不同位置眼点成像进行仿真分析,仿真图像效果良好,满足人眼观察图像的要求。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 王东平. 车载抬头显示系统的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2015.  
Wang D P. Investigation on the automotive head-up display system[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2015.

- [3] Peter O. Optic design of head-up displays with freeform surfaces specified by NURBS[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7100: 7100Y-1.
- [4] 王睿, 江伦, 宋志化. 基于微型投影的集成式车载平显光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 112201.  
Wang R, Jiang L, Song Z H. Optical design of ensemble head-up display system based on mini-projector[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 112201.
- [5] Wu P J, Chuang C H, Chen C Y, et al. An augmented reality head-up display system with a wide-view eyebox [J]. International Journal of Optics, 2020, 2020: 4719268.
- [6] 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.  
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.
- [7] Wei S L, Fan Z C, Zhu Z B, et al. Design of a head-up display based on freeform reflective systems for automotive applications[J]. Applied Optics, 2019, 58(7): 1675-1681.
- [8] 李旭阳, 倪栋伟, 杨明洋, 等. 基于自由曲面的大视场空间相机光学系统设计[J]. 光子学报, 2018, 47(9): 0922003.  
Li X Y, Ni D W, Yang M Y, et al. Design of large field of view space camera optical system based on freeform surfaces[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(9): 0922003.
- [9] 孙文军, 赵立萍, 孙京南, 等. 基于三片曲面反射镜的离轴投影成像系统[J]. 光子学报, 2012, 41(6): 654-657.  
Sun W J, Zhao L P, Sun J N, et al. Off-axis projection system based on three reflectors with Zernike polynomial surfaces and even aspheric surfaces[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(6): 654-657.
- [10] 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): 1822002.  
Zhang Y L, Shi H D, Wang C, et al. Research on polarization aberration characteristics of off-axis freeform surface optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(18): 1822002.
- [11] 陈太喜, 伍雁雄, 宋绍漫, 等. 折叠式离轴三反光学系统设计及装调[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1722001.  
Chen T X, Wu Y X, Song S M, et al. Design and alignment of folded off-axis three-mirror optical system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1722001.