

光学学报

投影距离可变的平视显示系统设计及优化

孙奕晗¹, 吴慎将^{1*}, 王波², 陈晓伟², 张一明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 516006

摘要 设计了一种基于离轴反射式光学结构、投影距离可以改变的增强现实型平视显示(AR-HUD)系统,以降低驾驶员的视觉疲劳。其中,眼盒的大小为130 mm×50 mm,虚像投影距离为3~10 m,可以通过改变图像生成单元(PGU)到一级镜的距离和像源尺寸的方式实现投影距离连续可调。通过随机取样的方式,在投影距离变化范围内随机选取一个投影距离对系统进行像质分析,证明投影距离连续可变。视场角(FOV)在投影距离的可调范围内恒为15°×5°,畸变小于5%,动态畸变小于5',MTF在5 lp/mm处优于0.5。结果表明,当车辆与前方物体距离较近时,AR-HUD系统可以根据需要改变虚像的投影距离,且能保证像质始终符合规格。

关键词 光学设计; 平视显示器; 光学变倍; 投影距离; 离轴三反系统

中图分类号 U471 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231914

1 引言

随着智能驾驶技术的不断发展,驾驶汽车所要判断的信息越来越多,加上移动社交的普及发展,驾驶者所需处理的信息量急剧增加,安全行车和信息交互的矛盾问题更为突出^[1]。平视显示(HUD)系统是一种车载辅助驾驶系统,汽车上的平视显示器能够将重要的行车信息实时地显示在驾驶员的视野中,驾驶员不必低头就可以看到行车信息,从而避免分散对前方道路的注意力,消除了潜在的行车隐患^[2]。

随着HUD系统的发展,逐渐演变出双光路平视显示器^[3],可以在两个不同的投影距离处同时显示虚像,两个投影距离分为相对的近距离和远距离,近距离投影显示仪表盘关于车速、车辆状态等信息,远距离投影显示导航、车道偏移等信息。在城市中行驶时,如果遇到高峰期导致的堵车,远距离投影图像在视觉感知上可能会进入前方车辆内,降低驾驶员的驾驶体验。欧高焱等^[4]从实际参数及车身空间要求出发,利用逆向思维确定光学设计的初始结构,同时通过Zemax像质评价和实际样机测试对设计结果进行综合评价。李熠琳等^[5]使用反射式微棱镜阵列结构,能有效减少体积,但是成本较高。Chen等^[6]研究了一种基于硅基液晶空间光调制器的液晶全息HUD系统,该系统不需要机械运动就能改变图像位置,且能

在3~30 m范围内改变图像位置,显著减小了系统占用的车内空间。陈璐玲^[7]采用改变一级镜位置的方式,实现了在视场角恒为10°×3°的前提下,系统的投影距离在3~10 m范围内连续可调的平视显示器光学系统设计。但是,在只调整一级镜而不改变像源面出光角度的情况下,会引起下视角和图像生成单元(PGU)位置的改变。PGU位置改变的问题可通过旋转二级镜或者改变出光角度解决。一般情况下,由于二级镜需要通过旋转才能对虚像高度进行调整,再负担其他角度调整任务会加大设计难度并降低精度,因此最好的方式是改变出光角度,但是这样会增加设计难度和PGU成本,且无法解决下视角改变的问题。

本文拟使用光学变倍的方式,不调整曲面镜之间的位置关系,仅改变PGU位置,设计一款投影距离连续可变的增强现实型平视显示(AR-HUD)系统(以下简称“变距HUD系统”),这样的设计不会造成下视角改变,不需要使用出光角度可变的PGU,在设计上也会更加简便,同时也能降低PGU成本。虽然所设计的结构有针对性,但是设计的思路及方法具有普遍性。

2 基本原理

2.1 AR-HUD系统的基本成像原理

考虑到车内空间的限制,HUD系统的结构选择离轴反射光路^[8]进行设计。同时,由于汽车风挡自身面

收稿日期: 2023-12-11; 修回日期: 2024-01-20; 录用日期: 2024-01-29; 网络首发日期: 2024-02-20

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(XAGDYJ220202)

通信作者: *wsj@xatu.edu.cn

形为自由曲面,需要有对应的光学表面对汽车风挡带来的像差进行校正,而自由曲面的非旋转对称性为光学系统设计提供了更多的自由度,将其应用在离轴三反光学系统中可以极大地提升像差校正水平,使光学系统成像质量接近衍射极限^[9]。HUD 光学系统初始结构可以使用过往的设计结构,再根据实际空间进行

优化设计,或使用同轴反射光路^[10]进行设计。HUD 系统的经典结构包括像源面、一级镜、二级镜和风挡。如图 1 所示,M1、M2 为一级镜和二级镜,U 为下视角,图像从 PGU 系统输出,经过 M1、M2 反射后通过汽车风挡进入人眼,而驾驶员的大脑会反向追迹,认为看到的图像位于风挡外。

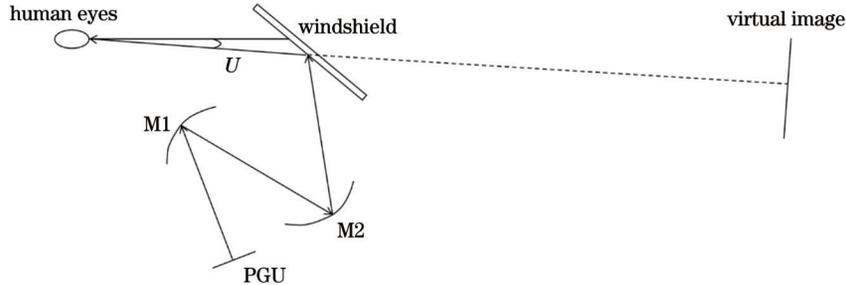


图 1 离轴反射式光学系统结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of off-axis three-mirror optical system

常见的自由曲面镜的面形选择方法有泽尼克多项式和扩展多项式^[11](XY 多项式),本文使用扩展多项式设计自由曲面镜面形,所得曲面没有旋转对称性,面形描述简单、设计自由度高、校正像差能力强且与光学曲面数控加工的形式一致,目前已得到广泛应用。同时,多项式描述方法具有较高的表示精度,用它描述的自由曲面面形是连续光滑的,而且便于加工和检验^[12]。XY 多项式的表达式为

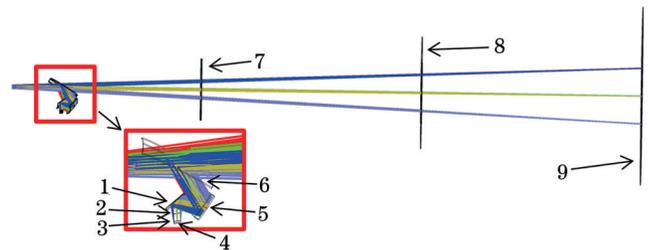
$$z(x, y) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{(1 - (1 + k)c^2r^2)}} + a_1x + a_2y + a_3x^2y + a_4xy + \dots, \quad (1)$$

式中: z 表示 Z 轴方向的矢高差; c 为曲率半径; k 表示圆锥曲面常数; $r^2 = x^2 + y^2$; a_1, a_2, a_3 均为高次项系数。利用 XY 多项式优化光学系统,就是通过求解各阶系数得到更优的自由曲面表面解,从而优化系统像差来实现优质成像^[13]。

2.2 投影距离可变式 HUD 系统设计原理

在变距过程中,激光测距单元反馈距离信息,软件根据变距曲线数据改变图像源的尺寸和 PGU 与一级镜之间的距离,从而改变投影距离。这是因为在 HUD 离轴反射系统中,驾驶员看到的是图像经过一级镜和二级镜反射,再经风挡折射后的虚像,就像照镜子一样,物距越大,虚像越远。因此,要想减小投影距离,就必须减小物距。减小物距的方法可以通过调整一级镜和 PGU 的位置实现。本文通过对比,选择移动 PGU 的方法。此外,在减小投影距离的同时,PGU 与一级镜的距离也在减小。由于现有的 PGU 所显示的图像都不可能以平行光出射,因此 PGU 离反射镜越近,反射镜所反射的图像面积越小,随着投影距离的减小,虚像相对于人眼的张角就会减小。为了补偿视场角的损失,在减小投影距离的同时,需要增

大 PGU 所显示图像的尺寸。如果物高不变,仅改变物距,则随着投影距离的减小,视场角会减小,但一般情况下产品的视场角不能改变,因此必须对物高进行调整。综上所述,为了实现投影距离的变化,需要改变一级镜到 PGU 的距离,并调整 PGU 所显示图像的尺寸。本设计在具体优化时,固定曲面镜面形、曲面镜旋转角度等参数,仅将一级镜到 PGU 的距离作为变量,通过不断改变图像源大小进行优化,从而得到不同投影距离下的相关参数。图 2 为投影距离可变式 AR-HUD 的光路结构示意图,包含了 3、6.5、10 m 3 个投影距离下的光路,序号 2~4 分别对应投影距离为 3、6.5、10 m 时 PGU 的位置。



1: first mirror; 2: PGU position 1; 3: PGU position 2; 4: PGU position 3; 5: secondary mirror; 6: windshield; 7: image at a projection distance of 3 m; 8: image at a projection distance of 6.5 m; 9: image at a projection distance of 10 m

图 2 投影距离可变式 AR-HUD 光学系统结构示意图

Fig. 2 Schematic structure of projection distance variable AR-HUD optical system

3 投影距离可变式 AR-HUD 设计

3.1 设计参数

投影距离可变式 AR-HUD 是以 AR-HUD 为基础进行设计的,需要指定一个投影距离,以此距离为基准

设计出一级镜、二级镜的面形,并保持面形不变,只改变投影距离进行后续设计。抬头显示系统的性能指标主要有虚像距离、虚像尺寸、眼动范围等。可以通过部分参数粗略计算设计时需要设置的参数,如图像显示单元大小、分辨率等。

本设计的指标见表 1,其中视场角在投影距离变化过程中保持不变,畸变包括菱形畸变、TV 畸变、梯形畸变。本文还对其他参数进行分析,如点列图、网格畸变等。

表 1 投影距离可变式 AR-HUD 光学系统的设计参数
Table 1 Design parameters of projection distance variable AR-HUD optical system

AR-HUD system parameter	Parameter value
VID /m	3-10
FOV /[(°)×(°)]	15×5
Eyebox /(mm×mm)	130×50
Wavelength / μm	Visible light
Distortion /%	<5
Dynamic distortion /(′)	<5
MTF	Center: >0.5@5 lp/mm
	Other: >0.3@5 lp/mm
Image rotation /(°)	<±2

根据 MTF 在 5 lp/mm 处优于 0.5 的要求,可以对图像源大小进行理论计算;通过视场角和投影距离同样可以计算出虚像面大小,以此辅助分辨率计算。

本设计需要分别计算投影距离为 10 m 和 3 m 时的虚像水平宽度。虚像的水平宽度是指图像源经光学系统放大后所呈现的水平宽度。根据式(2)即可计算出虚像在距离人眼 10 m 和 3 m 时的水平宽度分别为 2633.05 mm 和 789.91 mm。先计算虚像水平宽度,再结合人眼极限分辨率,可以确定图像源的像素数。由于图像源的尺寸在现阶段无法确定,而像素数经过光学系统后不发生改变,仅尺寸发生变化,因此根据虚像尺寸计算得出的像素数可以推算图像源的像素数。

$$N_{\text{Pixel}} = 2 \times R_{\text{VID}} \times \tan \frac{\theta}{2}, \quad (2)$$

式中: θ 为水平 FOV; R_{VID} 为投影距离。同理,可通过视场角计算得出垂直高度。

通过式(3)可以计算出人眼在投影距离为 10 m 时的可分辨像素尺寸 μ 为 2.91 mm,同理可得 3 m 时的可分辨像素尺寸为 0.873 mm。分辨率可以用来描述图像的锐度和清晰度,像素数越多,图像的清晰度越高,在图像尺寸一定的情况下,像素数越多意味着单个像素的尺寸越小,对于硬件的要求越高,成本也会更高,因此选择合适的像素数在 HUD 设计中十分重要。人眼的极限分辨率为 1′,是人眼可以分辨出两

个物体的最小角度。只要像素尺寸小于这个参数,人眼就无法分辨两个像素,此时再增加像素数的收益较低。

$$\mu = 10000 \times \tan(1/60^\circ). \quad (3)$$

结合式(2)和式(3),可以通过式(4)计算出图像水平方向分辨率 ω 的最大值和最小值分别为 905 pixel 和 314 pixel。

$$\omega = \frac{N_{\text{Pixel}}}{\mu}. \quad (4)$$

当投影距离为 10 m 时,可以使用 PGU 中分辨率为 1280 pixel×427 pixel 的部分。大多数情况下,HUD 设计中不会用满整个显示屏幕,因为需要给畸变校正留出空间。MTF 是光学性能的一种度量方式,可以描述系统的分辨能力。可以通过式(5)计算 MTF 的频率(即每毫米可以分辨的线对数)。MTF 大于 0.5 是指在要求的截止频率处,每个线对的对比度大于 0.5。MTF 值可以根据需要设定,由该线对的最高与最低亮度之差,除以最高与最低亮度之和得到,理论上只要不大于衍射极限在该截止频率处的对比度即可。根据 MTF 在 5 lp/mm 处大于 0.5 的技术指标要求,通过式(5)可以计算出理论像源面大小:

$$F = \frac{1}{2 \times \sigma_{\text{Pixel}}}, \quad (5)$$

式中: σ_{Pixel} 为像源面的像素尺寸; $F=5$ lp/mm。由式(6)可得到理论像源面大小。

$$\sigma_{\text{Pixel}} = \frac{1}{F \times 2} = \frac{W}{1280}, \quad (6)$$

式中: W 为图像源的水平宽度初始值。由此可知,当投影距离为 10 m 时,图像源的水平宽度初始值 W 可以设置为 128 mm,具体大小由优化后的最佳效果决定,实际运用中还要考虑汽车空间的限制和成本要求。在设计完成后,根据投影距离为 3 m 时的图像源尺寸最终确定 PGU。

3.2 设计优化方式

为了保证像质,优化时会选取 9 个视场和结构,这是因为选取 9 个视场和结构才能较好地保证优化时能覆盖整个像面,否则就可能出现部分没有优化区域的畸变过大的情况,对最终成像质量和用户体验产生不好的影响。另外,可以根据需要添加其他视场。为了更好地控制成像质量,本设计在优化时虽然只设置了 9 个视场,但是在操作数编辑上会对眼盒中的 25 个位置进行控制,即在每两个视场之间再取一个位置进行控制,从而达到更精细的控制效果。图 3 为眼盒及九重结构选取示意图,也是视场位置选取示意图。

图 4 分别展示了九重结构及其 9 个视场在一级镜与二级镜上的光迹。可以看出,所选取的视场已经较为全面地覆盖了成像面。图 4 中包含九重结构,每个结构在一级镜上的位置都不同,且存在两侧向下弯曲

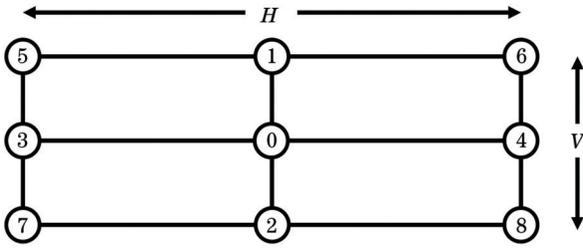


图 3 眼盒及九重结构选取示意图

Fig. 3 Schematic of eyebox and nine-fold configuration selection

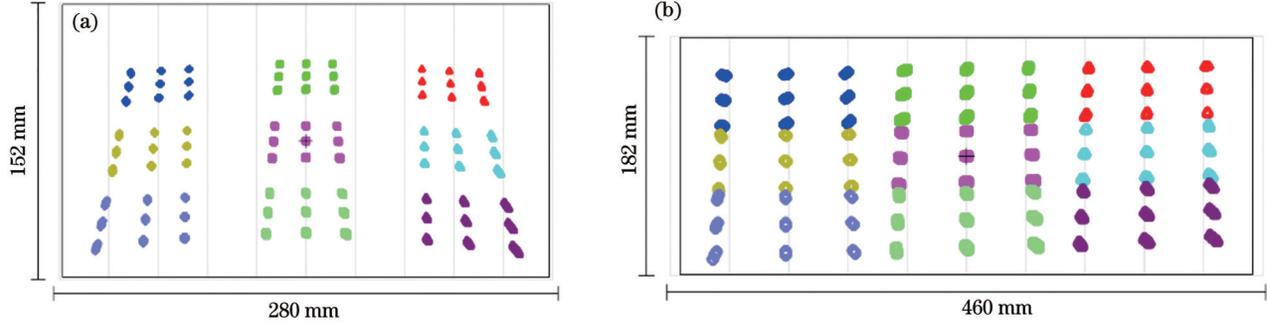


图 4 不同反射镜上的光迹。(a)一级镜的光迹;(b)二级镜的光迹

Fig. 4 Light traces on different mirrors. (a) Light traces on first mirror; (b) light traces on secondary mirror

4 像质分析

4.1 畸变计算方式

1) 梯形畸变

梯形畸变 D_T 的示意图如图 5 所示,其计算公式见式(7)~(9)。

$$D_{T1} = \frac{\Delta Y_{up}}{Y} \times 100\%, \quad (7)$$

$$D_{T2} = \frac{\Delta Y_{down}}{Y} \times 100\%, \quad (8)$$

$$D_{T3} = \frac{\Delta X}{X} \times 100\%, \quad (9)$$

式中 D_{T1} 、 D_{T2} 、 D_{T3} 分别为上端高度畸变、下端高度畸变和宽度畸变。

宽度梯形畸变 D_W 和高度梯形畸变 D_H 的示意图

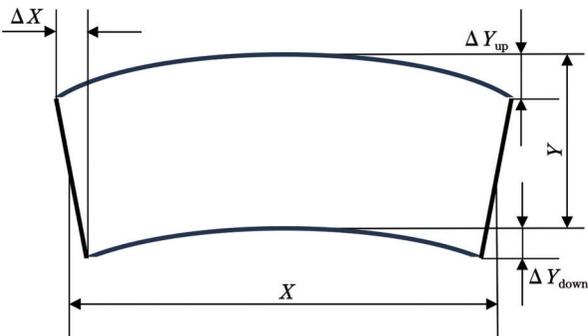


图 5 梯形畸变示意图

Fig. 5 Trapezoidal distortion schematic

的形状畸变;二级镜处的图像位置及整体形状畸变已经得到改善,经过风挡成像后,9个结构就会重叠在一起。

为了降低软件设计的难度,本设计通过撰写“宏”进行优化。通过“宏”在不同投影距离下调整像面大小,最终优化出合适的PGU到一级镜的距离。在设计中不断改变像面大小,是为了保证视场角在变倍过程中保持不变,如果不改变像面大小,那么投影距离的减小会导致整体系统的视场角变小,与设计指标不符。

如图 6 所示,其计算公式见式(10)和式(11)。

$$D_W = \frac{H_2 - H_1}{H_2 + H_1} \times 100\%, \quad (10)$$

$$D_H = \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} \times 100\%. \quad (11)$$

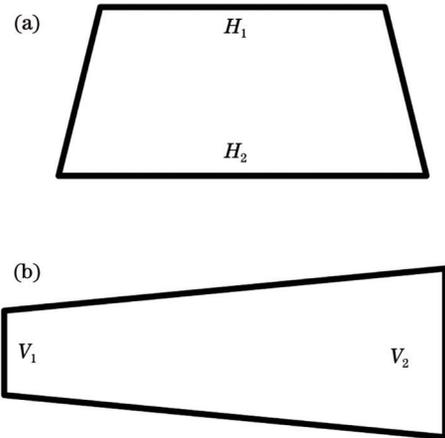


图 6 宽度梯形畸变和高度梯形畸变示意图。(a)宽度梯形畸变;(b)高度梯形畸变

Fig. 6 Width trapezoidal distortion and height trapezoidal distortion schematics. (a) Width trapezoidal distortion; (b) height trapezoidal distortion

2) 菱形畸变

菱形畸变 D_R 的示意图见图 7,其计算公式见式(12)。

$$D_R = \frac{2(|L_1 - L_2|)}{L_1 + L_2} \times 100\%, \quad (12)$$

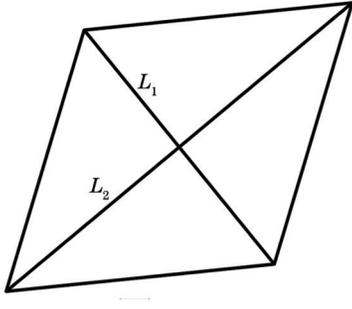


图 7 菱形畸变示意图

Fig. 7 Rhombic distortion schematic

式中： L_1 和 L_2 为实际图像的对角线。

3) TV 畸变

TV 畸变 D_{TV} 的示意图如图 8 所示, 将实际图像上边和下边的中点相连, 长度为 G , 再将左边与右边的中点相连, 长度为 J , 理想图像的上边和下边的长度分别为 H_1 和 H_2 , 左边和右边的长度分别为 V_1 和 V_2 。计算公式见式(13)和式(14)。

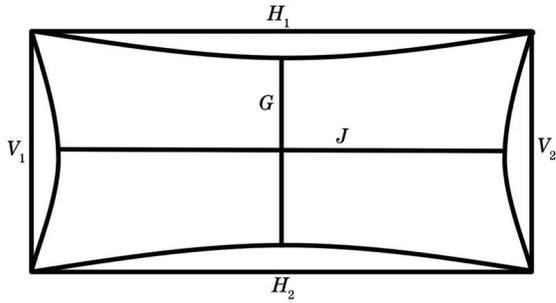


图 8 TV 畸变示意图

Fig. 8 TV distortion schematic

$$D_{TV1} = \frac{\frac{H_1 + H_2}{2} - J}{\frac{H_1 + H_2}{2}} \times 100\%, \quad (13)$$

表 2 投影距离为 10 m 时的光学设计评价结果

Table 2 Optical design evaluation results at the projection distance of 10 m

Evaluation project	Standard value	Design value	Clarification
Spot diameter / μm	<100	24.418	8 mm \times 8 mm
Mesh distortion / %	<5	-0.5014	Eyebox center
	<5	-0.8371	Full eyebox
Rotational distortion / ($^\circ$)	< ± 2	0.0379	—
Trapezoidal distortion / %	<5	0.0291	—
Rhombic distortion / %	<5	0.0061	—
TV distortion / %	<5	-0.1538	—
FOV / %	< ± 10	-0.036	—
MTF	>0.5@5 lp/mm	0.7471	—
Eyebox / (mm \times mm)	130 \times 50	130 \times 50	—
Aspect ratio distortion / %	< ± 10	0.6154	—

$$D_{TV2} = \frac{\frac{V_1 + V_2}{2} - G}{\frac{V_1 + V_2}{2}} \times 100\%, \quad (14)$$

式中 D_{TV1} 、 D_{TV2} 分别为水平 TV 畸变和垂直 TV 畸变。

4) 动态畸变及双目视差

动态像差 E 也被称为动态畸变, 是指人眼在眼盒范围内移动时, 在眼盒不同位置看到的图像在形状和位置上与眼盒中心的图像有所不同, 用户在遇到颠簸路段时, 会发现图像不断变化, 从而影响驾驶。动态像差对的计算公式如式(15)所示。

$$E = 60 \times \arctan \left[\left[(x_{ij}, y_{ij}) - (x_{0j}, y_{0j}) \right] \div L \right], \quad (15)$$

式中： i 表示中心结构以外的其他结构的序号, 即结构 1 到 8; j 为第 i 个结构处某一个视场的编号, 即视场 0 到 8; L 为投影距离。动态像差的计算思路是: 先分别计算除中心结构外的其他结构与中心结构对应视场坐标之间的距离, 再计算这个距离相对于人眼的张角, 并将角度单位换算成“分”(′)以方便与人眼分辨率进行对比。

动态畸变是动态的, 而双目视差是静态的。由于人的左右眼在眼盒中的位置不同, 因此左右眼看到的 HUD 图像在位置和形状上有所不同, 从而导致人眼看到的两幅 HUD 图像不能完全重叠。这两幅图像的对应视场坐标之间的距离相对人眼的张角就是双目视差, 计算方法与动态畸变类似, 不同之处在于, 双目视差计算的是水平方向上相隔 65 mm 的两个结构间存在的差异。

4.2 像质评价

表 2 和表 3 分别展示了投影距离为 10 m 和 3 m 时的像质分析结果。表 2 中长宽比失真、图像倾斜角度等数据可以通过操作数获取各端点实际光线的 X 向坐标和 Y 向坐标, 计算两个端点的距离, 再与理想图像的相关数据进行对比得到。

续表

Evaluation project	Standard value	Design value	Clarification
Dynamic distortion / (')	<5	3.34	FOV of 1 to 4
	<5	3.55	FOV of 5 to 8
Binocular parallax / (')	<5	3.26	Horizontal parallax
	<5	-1.43	Vertical parallax

表 3 投影距离为 3 m 时的光学设计评价结果

Table 3 Optical design evaluation results at the projection distance of 3 m

Evaluation projects	Standard value	Design value	Clarification
Spot diameter / μm	<100	42.004	8 mm \times 8 mm
Mesh distortion / %	<5	-1.2225	Eyebox center
	<5	1.8776	Full eyebox
Rotational distortion / ($^\circ$)	< ± 2	1.1764	-
Trapezoidal distortion / %	<5	1.0882	-
Rhombic distortion / %	<5	0.0633	-
TV distortion / %	<5	0.6950	-
FOV / %	< ± 10	-2.738	-
MTF	>0.5@5 lp/mm	0.6661	-
Eyebox / (mm \times mm)	130 \times 50	130 \times 50	-
Aspect ratio distortion / %	< ± 10	3.5544	-
Dynamic distortion / (')	<5	3.91	FOV of 1 to 4
	<5	4.09	FOV of 5 to 8
Binocular parallax / (')	<5	3.81	Horizontal parallax
	<5	1.55	Vertical parallax

设计时需要给实际制造预留误差空间,因此实际设计时需要尽量严苛。动态畸变和网格畸变往往存在矛盾,通常情况下无法二者兼顾,需要进行取舍。

由于 8 mm 的直径可将点列图 RMS 半径优化到更小,最终的成像效果更优异^[14],因此将光阑直径设置为 8 mm,此时人眼位于眼盒中心的点列图如图 9 所示。由

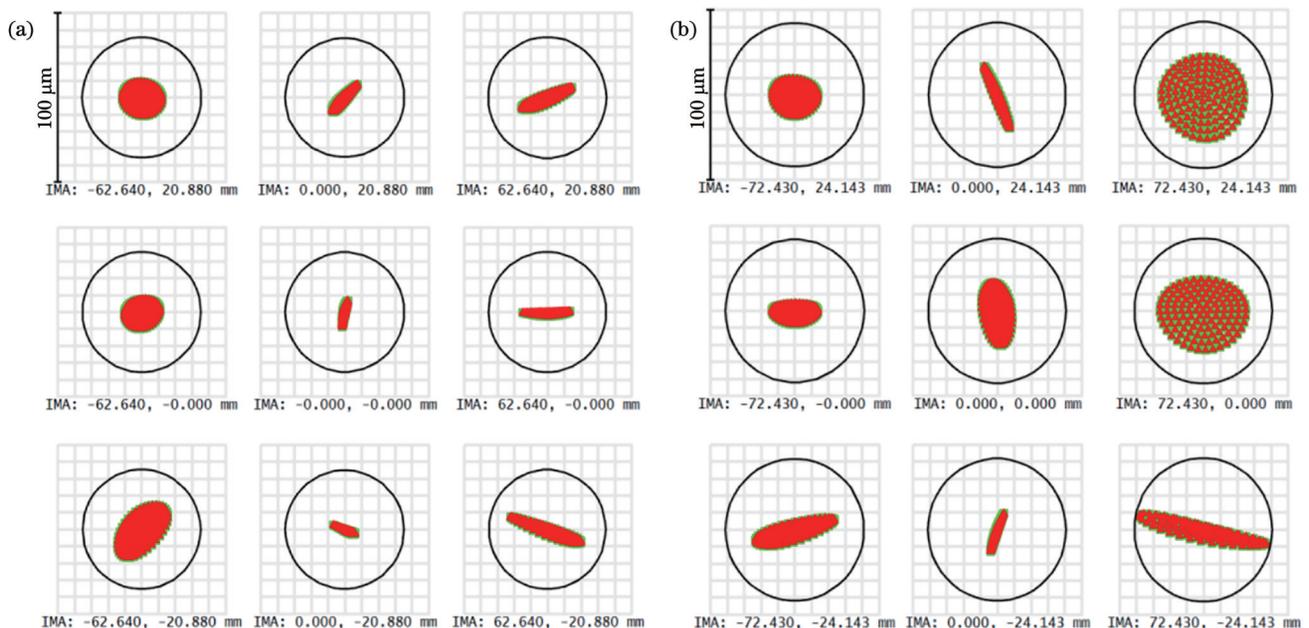


图 9 不同投影距离下的点列图。(a)投影距离为 10 m 时系统的点列图;(b)投影距离为 3 m 时系统的点列图

Fig. 9 Spot diagrams under different projection distances. (a) Spot diagrams at the projection distance of 10 m; (b) spot diagrams at the projection distance of 3 m

图 9 可知,两种投影距离下点列图的 RMS 半径均小于艾里斑,且直径小于 100 μm ,因此系统像差较小。

投影距离为 10 m 和 3 m 时,眼盒不同位置的点列斑直径最大值见表 4。

表 4 眼盒不同位置的点列斑直径最大值
Table 4 Maximum spot diameters in different locations of eyebox

FOV	Maximum spot diameter of 10 m / μm	Maximum spot diameter of 3 m / μm
(-62.64, 20.88)	19.631	73.200
(0, 20.88)	15.857	64.852
(62.64, 20.88)	28.989	67.432
(-62.64, 0)	20.270	42.200
(62.64, 0)	28.552	43.340
(-62.64, -20.88)	124.406	46.136
(0, -20.88)	20.231	25.368
(62.64, -20.88)	38.781	35.256

由表 4 可知,眼盒左下角的点列斑直径最大值大于 100 μm ,但是小于 138 μm (人眼在该距离下可分辨出两个物体的最小距离),即人眼依然无法分辨两个光斑,而且这个区域位于图像左下角,一般情况下是没有图像显示的。同时,这个区域位于风挡使用区域的左下角区域,是因为风挡在该区域的曲率偏差率不符合要求,并非设计原因,且这种问题仅存在于 8.65~10 m 这

一范围内,如果减小投影距离,或者缩小风挡的使用区域,此状况将有明显改善,因此这个问题属于风挡本身的缺陷,只能通过风挡供应商优化面形或者建议车企减小视场角来解决,对本文所设计的改变投影距离的方法没有影响。

图 10 为不同投影距离下的 MTF 曲线,中心视场 MTF 在 5 lp/mm 处均大于 0.5,符合设计要求。

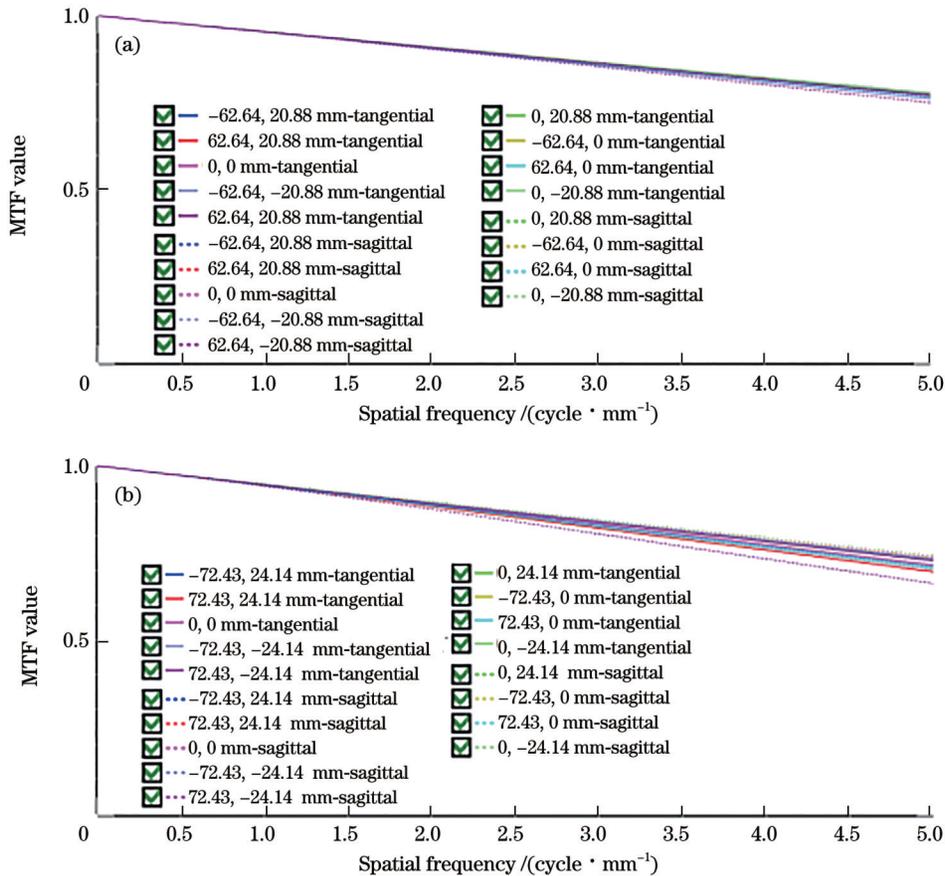


图 10 不同投影距离的 MTF 曲线。(a)投影距离为 10 m 时系统的 MTF;(b)投影距离为 3 m 时系统的 MTF

Fig. 10 MTF curves under different projection distances. (a) MTF at the projection distance of 10 m; (b) MTF at the projection distance of 3 m

眼盒其余眼位 MTF 的最小值见表 5, 由于玻璃风挡的曲率变化偏差率及变化趋势会影响其他眼位的成

像效果, 除了中心眼位的 MTF 要求在 5 lp/mm 时大于 0.5 外, 其余眼位的 MTF 只需要大于 0.3 即可。

表 5 眼盒其余眼位 MTF 的最小值
Table 5 Minimum of MTF for remaining positions of eyebox

FOV	Minimum MTF of 10 m	Minimum MTF of 3 m
(-62.64, 20.88)	0.7152	0.5237
(0, 20.88)	0.7226	0.5655
(62.64, 20.88)	0.6489	0.5483
(-62.64, 0)	0.7005	0.6588
(62.64, 0)	0.6121	0.6882
(-62.64, -20.88)	0.3052	0.6686
(0, -20.88)	0.7054	0.6661
(62.64, -20.88)	0.4869	0.6759

图 11 展示了投影距离为 10 m 和 3 m 时系统的网格畸变图, 它们的最大畸变均小于 5%, 没有明显变形, 符合设计要求。

多条纵横交错的网格线, 可以更直观地展示图像畸变情况, 较细的线条在仿真图像的评价中较为严苛。综合图 12、表 2 和表 3 的数据, 认为所设计光学系统的成像效果良好。

图 12 所示为用户界面 (UI) 仿真结果。仿真图有

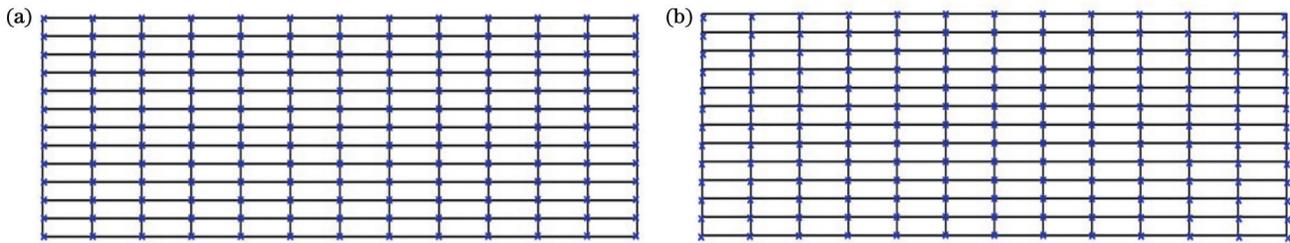


图 11 不同投影距离的网格畸变图。(a) 投影距离为 10 m 时系统的网格畸变图; (b) 投影距离为 3 m 时系统的网格畸变图
Fig. 11 Mesh distortion at different projection distances. (a) Mesh distortion at the projection distance of 10 m; (b) mesh distortion at the projection distance of 3 m

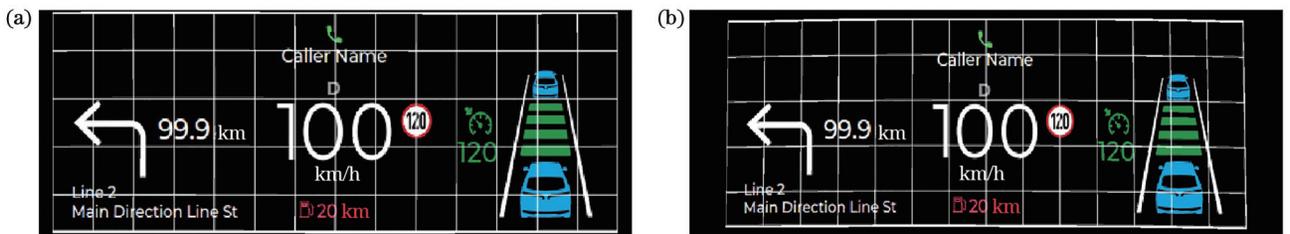


图 12 不同投影距离的 UI 仿真图。(a) 投影距离为 10 m 时系统的 UI 仿真图; (b) 投影距离为 3 m 时系统的 UI 仿真图
Fig. 12 UI simulation at different projection distances. (a) UI simulation at the projection distance of 10 m; (b) UI simulation at the projection distance of 3 m

4.3 投影距离连续可变功能验证

本设计不断改变像面大小和 PGU 与一级镜的距离, 投影距离以 50 mm 为步长, 像面大小以 0.01 mm 为步长, 并在相同投影距离下不断改变 PGU 显示图像的尺寸进行优化, 得到优化评价函数最小时的 PGU 到一级镜的距离, 从而得到 PGU 图像尺寸和

PGU 到一级镜的距离分别与投影距离的关系, 形成的变距曲线如图 13 所示。根据仿真结果, 在 50 mm 投影距离下, 相互使用数据不会导致像质发生剧烈变化, 因此这个步长是合理的。但是, 步长设置如果只靠设计者手动优化和收集数据, 会使工作量、时间损耗及人力损耗巨大, 因此本设计使用“宏”进行优

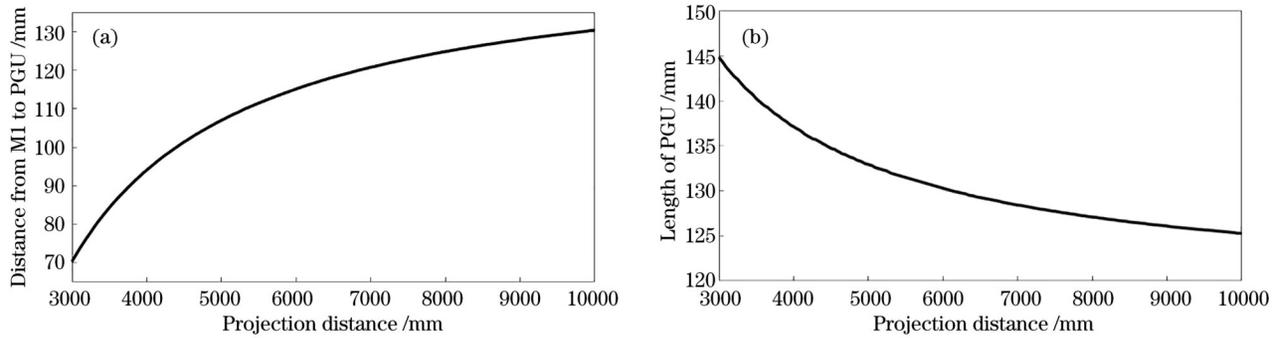


图 13 变距曲线。(a)M1到PGU的距离随投影距离的变化曲线;(b)PGU图像长度随投影距离的变化曲线

Fig. 13 Variable distance curves. (a) Distance from M1 to PGU varies with projection distance; (b) length of PGU varies with projection distance

化。通过“宏”实现不同投影距离下的参数优化,同时收集数据,将设计时间缩短到1 d内,这个工作时长在HUD的整体光学设计阶段所占的比例很小,从而显著提高了工作效率。同时,由于变距曲线的收集在光学设计阶段就完成了,软件设计的负担也明显降低。

为了验证所设计的系统在3~10 m投影距离范围内连续可变,使用随机取样的方式,选取投影距离为7.784 m时的图像进行像质分析,结果见表6。由表6可知,所有参数均符合设计要求。因此可以认为,在3~10 m范围内,任意投影距离处均能呈现满足要求的图像。

表 6 投影距离为 7.784 m 时的光学设计评价结果

Table 6 Optical design evaluation results at the projection distance of 7.784 m

Evaluation project	Standard value	Design value	Clarification
Spot diameter / μm	<100	27.386	8 mm \times 8 mm
Mesh distortion /%	<5	-0.5204	Eyebox center
	<5	0.9214	Full eyebox
Rotational distortion /($^{\circ}$)	$<\pm 2$	0.1737	-
Trapezoidal distortion /%	<5	0.1483	-
Rhombic distortion /%	<5	0.0133	-
TV distortion /%	<5	-0.2006	-
FOV /%	$<\pm 10$	0.3560	-
MTF	$>0.5@5 \text{ lp/mm}$	0.7423	-
Eyebox /(mm \times mm)	130 \times 50	130 \times 50	-
Aspect ratio distortion /%	$<\pm 10$	0.9646	-
Dynamic distortion /($'$)	<5	3.32	FOV of 1 to 4
	<5	3.54	FOV of 5 to 8
Binocular parallax /($'$)	<5	3.21	Horizontal parallax
	<5	-1.51	Vertical parallax

图 14 展示了投影距离为 7.784 m 时的点列图,点列图 RMS 半径小于艾里斑半径,其直径小于 100 μm ,像质符合要求,可以初步判断像差较小。

投影距离为 7.784 m 时,眼盒不同位置的点列斑直径最大值见表 7。显然,在随机选取的投影距离

下,根据变距曲线的参数所得的图像像质依然符合要求。

图 15 展示了投影距离为 7.784 m 时中心视场的 MTF 图。可以看出,MTF 曲线平直且依然满足在 5 lp/mm 处大于 0.5 的设计要求。

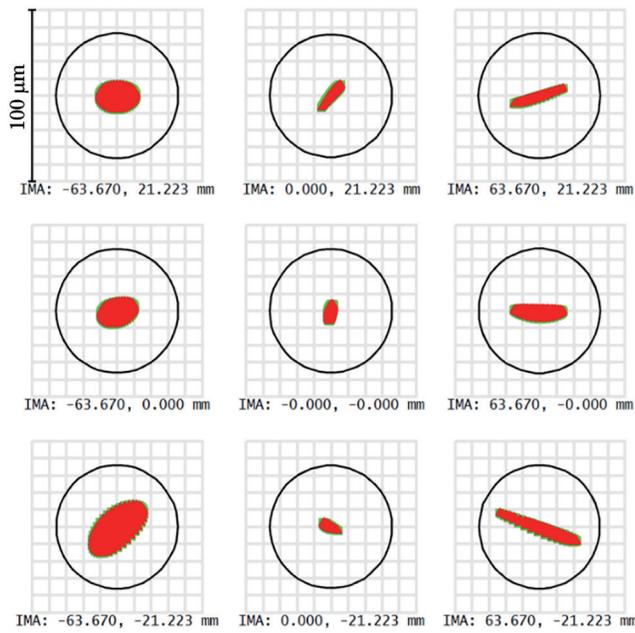


图 14 投影距离为 7.784 m 时的点列图

Fig. 14 Spot diagrams at the projection distance of 7.784 m

表 7 眼盒不同位置的点列斑直径最大值

Table 7 Maximum spot diameters in different locations of eyebox

FOV	Maximum spot diameter of 7.784 m / μm
(-62.64, 20.88)	41.112
(0, 20.88)	36.476
(62.64, 20.88)	54.644
(-62.64, 0)	32.248
(62.64, 0)	43.642
(-62.64, -20.88)	82.678
(0, -20.88)	40.112
(62.64, -20.88)	57.070

当投影距离为 7.784 m 时,眼盒不同位置的 MTF 最小值见表 8。显然,结果符合指标要求。

图 16 展示了投影距离为 7.784 m 时中心视场的网格畸变图,可以看到,图形无明显变形,满足设计要求。

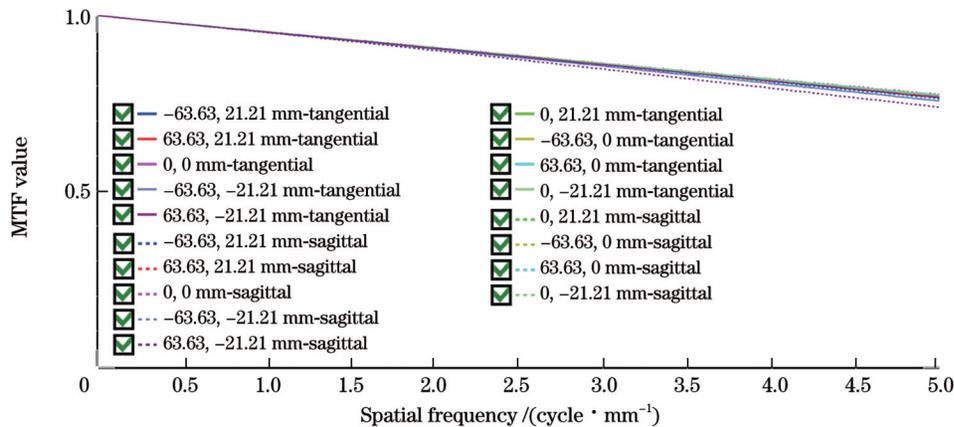


图 15 投影距离为 7.784 m 时的 MTF 曲线

Fig. 15 MTF curves at the projection distance of 7.784 m

表 8 眼盒不同位置 MTF 的最小值

Table 8 Minimum of MTF for different locations of eyebox

FOV	Minimum MTF of 7.784 m
(-62.64, 20.88)	0.7034
(0, 20.88)	0.7156
(62.64, 20.88)	0.6378
(-62.64, 0)	0.7253
(62.64, 0)	0.6718
(-62.64, -20.88)	0.5138
(0, -20.88)	0.7034
(62.64, -20.88)	0.6159

图 17 展示了投影距离为 7.784 m 时中心视场的 UI 仿真图,结合图 17 和表 4 可以得出图像无明显变形

的结论。由此可以证明,所设计的变距 HUD 系统可以实现虚像投影距离连续变化的功能。

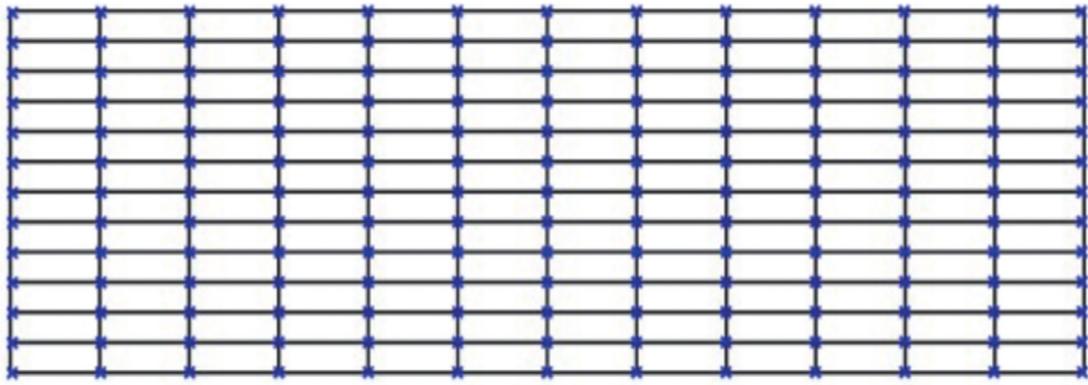


图 16 投影距离为 7.784 m 时的网格畸变图

Fig. 16 Mesh distortion at the projection distance of 7.784 m

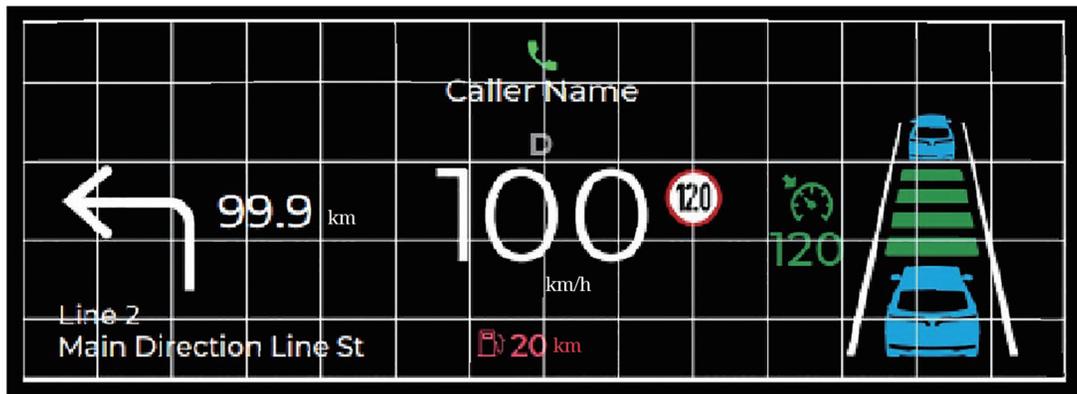


图 17 投影距离为 7.784 m 时的 UI 仿真图

Fig. 17 UI simulation at the projection distance of 7.784 m

4.4 设计方案比对

变距 HUD 的设计方案除了移动 PGU 外,还可以通过移动一级镜,甚至同时移动一级镜和二级镜,这两个方案改变了曲面镜位置和系统的焦距,也可以达到投影距离可变的目的,但是这两个方案都存在缺陷。

1) 方案一:只移动一级镜

根据陈璐玲^[7]的设计方案,只移动一级镜会增加设计难度,这是因为只移动一级镜的方案在设计上主要改变一级镜与二级镜的距离,但是一级镜的移动必然也会影响到 PGU 的移动(图 18)。



图 18 只改变一级镜到二级镜距离的光路图

Fig. 18 Optical path for changing the distance from first mirror to secondary mirror

如图 19 所示,为了保证 PGU 位置不发生改变,进行以下调整:通过调整虚像高度,即改变下视角可以解决 PGU 移动的问题,但是会导致所设计的下视角与主机厂给出的要求不一致。同时可以看出,PGU 的出光角度发生变化,意味着要达到图 19 的设计结果,还需要使用出光角度可变的 PGU。以上情况会带来很多的风险。

2) 方案二:移动 PGU 和一级镜

如图 20 所示,方案二相比于方案一多了 PGU 的移动,这样就能保持下视角不变。在优化结果上,一级镜和 PGU 的移动距离都小于只移动 PGU 时的移动距离,适用于光学空间有限的系统,但是所带来的问题是结构设计难度增大,需要 PGU 随一级镜移动,同时 PGU 自身也要移动,至少需要使用两组运

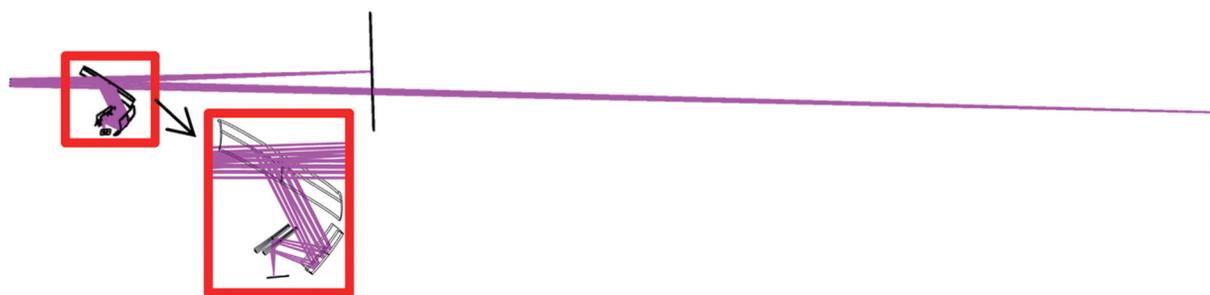


图 19 PGU 保持不动的光路图

Fig. 19 Optical path for PGU immobile

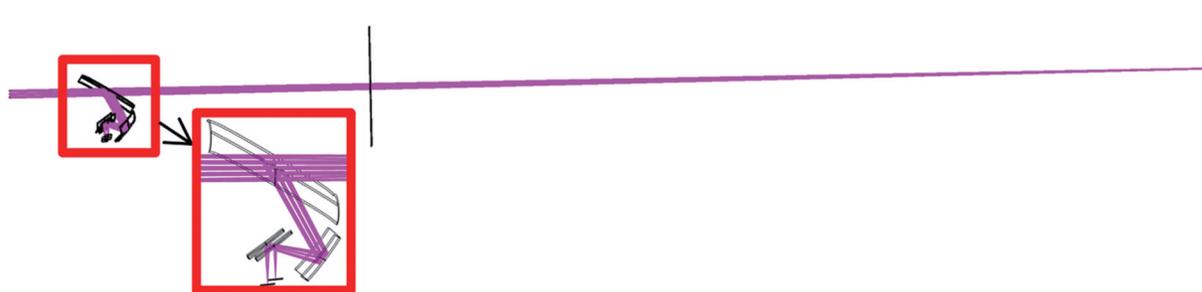


图 20 同时移动 PGU 与一级镜的光路图

Fig. 20 Optical path for moving PGU and first mirror

动机构,所带来的误差也会远大于只移动 PGU 的方案。

综上所述,本设计最终确定使用移动 PGU 的方式实现连续变距的目的。

3 种方案的光学元件所占空间测量方式如图 21 所示。本文使用 CATIA 的惯量测量对光学系统所占空间进行测量,3 种方案所占空间相同,均为 21 L,这是因为 3 种方案都以相同的初始架构进行设计,

无论使用何种方案,初始架构所占空间都是最大的,所以三者体积相等。虽然 3 种方案在体积上没有明显区别,但是需要结合实际车型设计结构部分才能更准确。理论上,方案二的体积是最大的,因为这个方案需要使用两组运动机构。受离轴反射镜组光学原理限制,FOV、VID 与系统体积形成一组矛盾体,顾此失彼,无法兼得,从而制约了该技术的发展^[15]。

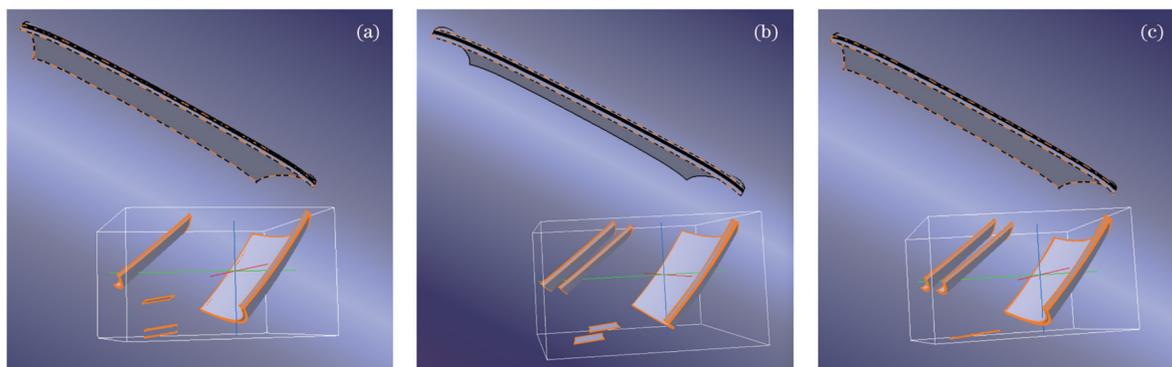


图 21 3 种方案的体积测量示意图。(a)只移动 PGU 的方案;(b)移动一级镜和 PGU 的方案;(c)只移动一级镜的方案

Fig. 21 Schematic of volume measurements for three schemes. (a) Only move PGU; (b) move first mirror and PGU; (c) only move first mirror

4.5 公差分析

公差分析在光学设计中至关重要。公差既不能过大也不能过小,过大会导致系统成像质量不稳定,过小则会导致成本增加,甚至降低合格率。根据表 9 所设置的公差,运用 Zemax 软件中的公差分析进行

计算,选取 1000 个蒙特卡罗样本,得到的结果如表 10 所示。可以看出,在空间截止频率为 5 lp/mm 处,光学系统在 3 个投影距离下有 98% 的 MTF 大于 0.67,因此认为公差分配比较合理,系统设计结果比较理想。

表 9 系统公差分配
Table 9 System tolerance allocation

Tolerance parameter	Radius of curvature /mm	Spacing /mm	X direction offset /mm	Y direction offset /mm	Amount of rotation on X axis /($^{\circ}$)	Amount of rotation on Y axis /($^{\circ}$)
Windshield	1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
First 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 10 蒙特卡罗分析结果
Table 10 Results of Monte Carlo analysis

Percentage /%	MTF at projection distance of 10 m	MTF at projection distance of 7.784 m	MTF at projection distance of 3 m
98	0.71970370	0.72347328	0.67672304
90	0.72321333	0.72753425	0.67933063
80	0.72533448	0.73193082	0.68074754
50	0.73112707	0.73735927	0.68370849
20	0.73555387	0.73930492	0.68634830
10	0.73672822	0.73998048	0.68755508
2	0.73776523	0.74067423	0.68949523

4.6 光学系统检测方法

光学设计的结果仅能作为参考,实际的制造生产中往往无法完全实现设计效果,因此需要对供应商生产的产品进行光学、结构、硬件等测试,本文主要分析光学测试。

1) 面形检测

面形检测主要检测实际产品面形与理论面形的差别,使用面形检测设备获取实际产品面形数

据,通过设备软件拟合面形,再导入理论面形的点云数据进行比对,最终分析实际产品面形与理论面形点云坐标之间距离的峰谷值(PV),如图 22 所示,其中图 22(a)所示为理想点云数据组成的曲面镜面形,图 22(b)所示为理想面形与实际面形重叠后的偏差。曲面镜尺寸不同,对于 PV 值的要求也不相同,曲面镜尺寸越大,允许的 PV 值越大。

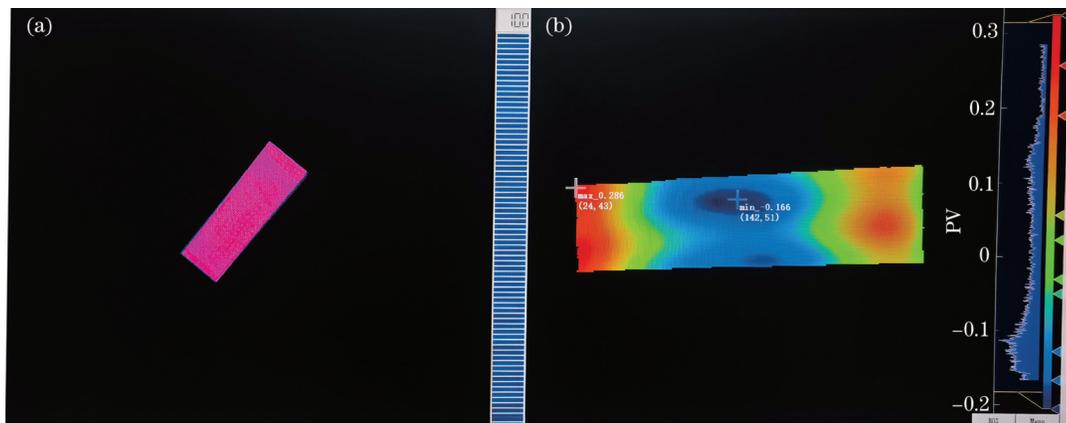


图 22 自由曲面镜面形检测结果。(a)理想点云数据组成的曲面镜面形;(b)理想面形与实际面形重叠后的偏差
Fig. 22 Results of free-form curved-mirror face form test. (a) Curved-mirror face form composed of ideal point cloud data; (b) deviation of ideal face form and actual face form

测试结果会标明正负方向 PV 的最大值及其坐标,正负号仅代表偏差方向。PV 值为正负方向偏差值之和,理论上 PV 值应为 0。可以通过改变 PV 值范围,分析 PV 较大区域的分布位置,也可以导出实际面形的点云数据进行仿真。

2) 折反射率检测

曲面镜的绝对反射率也是需要管控的指标之一。光源的最高亮度需要通过虚像最高亮度反向计算获得,在设计图纸中对于曲面镜反射率会有明确要求。反射率测试包括可见光全波段及红外波段测试,红外

波段测试主要检测镀膜效果,可见光波段测试主要测试反射率是否存在较大波动,如果存在波动,则有可能导致图像出现偏色现象。反射率测试结果示例如图 23 所示。可以看出,该曲面镜并未镀膜,但是反射率曲线并不平直,这意味着反射镜对可见光及红外波段的反射率不一致。但是,可见光波段的反射率平均值高于 90%,也符合规格。如果出现入射太阳能量较高的情况,可以考虑镀膜,以减少红外波段的反射率。

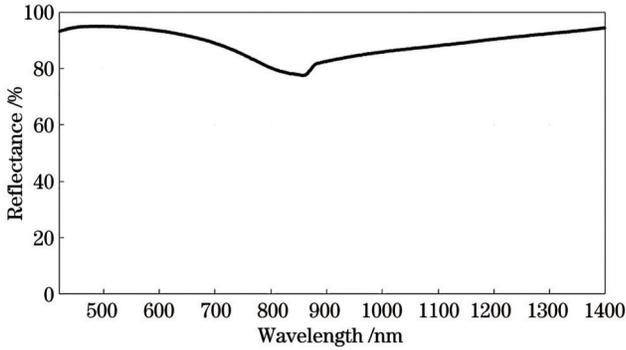


图 23 反射率检测结果

Fig. 23 Reflectance test results

以相对反射率测试为例。如图 24 所示,两个出光口分别沿 B 和 A 光路传播,分别照射在硫酸钡 ($BaSO_4$) 固体上,积分球会得到两组光通量,两组光通量的比值即为相对反射率,初始值为 100%。当待测物取代 A 光路的硫酸钡固体,测得的光通量出现变化,比值自然也会发生变化,新的比值就是相对反射率。如果要测试曲面镜的反射率,则需要通过 A 和 C 两条光路,这是因为反射镜存在入射角度,无法通过 B 光路测得。如果要测试防尘膜的透过率,可以将反射镜换

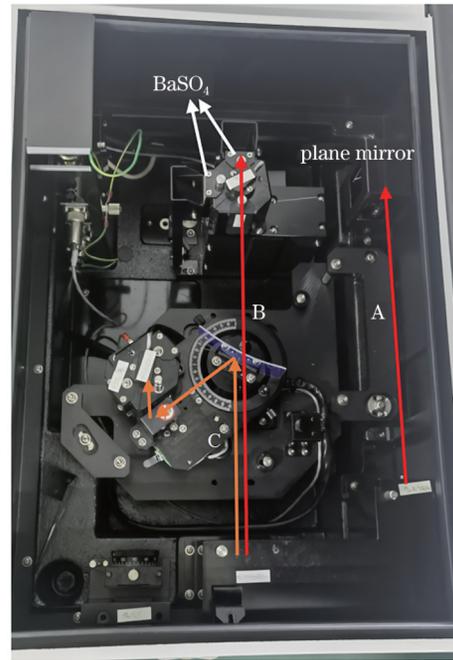


图 24 反射率测试机器的光路图

Fig. 24 Light path diagram of reflectance testing equipment

成防尘膜,通过 A 和 B 两条光路进行测试。不同的测试项目需要调整对照光路与测试光路的出光口。

3) 图像效果检测

通过玻璃风挡台架对实际图像进行分析。图 25 为玻璃风挡台架实物图。图像的形状及其在眼盒中的变化规律应满足 Zemax 设计后的图像特征。如图 26 所示,测试软件可以通过 CCD 拍摄 45 点图测试图像畸变、实际 FOV、实际 VID、下视角等信息,而白场图可以测试亮度及均匀性。



图 25 玻璃风挡台架。(a)整体外形结构;(b)玻璃风挡安装方式

Fig. 25 Windshield stand. (a) Overall shape structure; (b) windshield installation

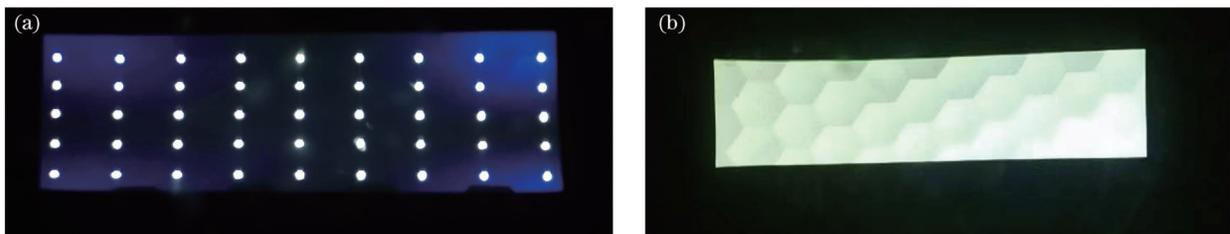


图 26 成像结果。(a)45点测试图像;(b)白场测试图像

Fig. 26 Imaging results. (a) 45-point test image; (b) white field test image

通过移动 CCD 位置可以测试不同眼盒及对应眼盒中不同位置的双目视差。通过玻璃风挡台架还可以观察图像实际情况,模拟驾驶员驾驶体验,观察杂散光情况等。此外,由于金属风挡台架面形相比于玻璃风

挡面形更接近理想情况,可以在排除玻璃风挡导致的重影问题的前提下,测试 HUD 的成像情况,有助于分析曲面镜的问题,还能证明玻璃风挡面形是否与设计不符。金属风挡及测试用双目相机如图 27 所示。



图 27 金属风挡

Fig. 27 Metal windshield

变距 HUD 与传统 AR-HUD 的测试方法有一点不同,即需要随机选取投影距离,根据对应的参数测试图像质量,以此验证运动机构精度是否合适。

5 结 论

对投影距离连续可变的系统进行设计,给出连续变距的方法和思路,并对结果进行像质分析。同时,采用随机取样的方式,证明利用本文方法采集的设计数据,在 3~10 m 的投影距离内任意位置的图像 MTF 均大于 0.5,动态畸变小于 5',菱形、梯形、TV、网格畸变小于 5%,RMS 半径小于艾里斑半径,投影距离偏差及图像长宽比失真小于 5%,成像质量良好。本设计能很好地解决由 HUD 图像与障碍物之间距离关系导致的驾驶员视觉疲劳或驾驶体验不好的问题,进一步减少驾驶员的视觉负担。本文设计的系统结构有针对性,但是设计方法具有普遍性,能够为投影距离可变的 HUD 系统设计提供参考。未来还需继续解决 PGU 运动过程中漏光等结构设计上的问题。

参 考 文 献

- [1] 鲁宇,张靖,冉舒文,等. 抬头显示系统成像参数测量技术现状分析[J]. 激光杂志, 2020, 41(2): 5-10.
Lu Y, Zhang J, Ran S W, et al. Analysis of present status of imaging parameter measurement technology in head-up display system[J]. Laser Journal, 2020, 41(2): 5-10.
- [2] 沈春明,侯丽敏,许超,等. 车载平视显示器光学检测技术的发展及趋势[J]. 照明工程学报, 2018, 29(5): 64-67, 93.
Shen C M, Hou L M, Xu C, et al. Development and trend of optical detection technology for vehicle head up display[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2018, 29(5): 64-67, 93.
- [3] 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.
- [4] 欧高焱,江海波,张靖,等. 基于双自由曲面的增强现实抬头显示系统设计[J]. 汽车实用技术, 2019(16): 70-73, 87.
Ou G H, Jiang H B, Zhang J, et al. Design of augmented reality head-up display system based on double freeform reflectors[J]. Automobile Applied Technology, 2019(16): 70-73, 87.
- [5] 李熠琳,陈建军,孙秀辉,等. 基于微棱镜阵列光波导的车载抬头显示系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(17): 1722004.
Li Y L, Chen J J, Sun X H, et al. Design of vehicle-mounted head-up display system based on microprism array optical waveguide[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(17): 1722004.
- [6] Chen C H, Lin W T, Lee S, et al. Holographic augmented reality head up display for vehicle application[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2019, 50(1): 680-682.
- [7] 陈璐玲. 某车载抬头显示光学系统设计研究[J]. 中国新技术新产品, 2020(13): 19-21.
Chen L L. Design and research on optical system of a vehicle-mounted head-up display[J]. New Technology & New Products of China, 2020(13): 19-21.
- [8] 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.
Li Y, Li Y, He Y L, et al. Design of compact freeform off-axis three-mirror system[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(6): 780-784.
- [9] 项建胜,潘国庆,孟卫华. 一种含自由曲面的离轴三反光学系统设计[J]. 激光与红外, 2022, 52(7): 1073-1077.
Xiang J S, Pan G Q, Meng W H. The design of an off-axis three-mirror optical system with a freeform surface[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(7): 1073-1077.
- [10] 陈晓伟,曹妍,薛嘉隆,等. 双自由曲面平视显示系统光学模组优化设计[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(9): 0922001.
Chen X W, Cao Y, Xue J L, et al. Optimal design of optical modules for double free-form surface head-up display systems[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(9): 0922001.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 刘璐, 胡斌, 周峰, 等. 二维大视场紧凑型离轴四反光学系统设计[J]. 航天返回与遥感, 2020, 41(1): 73-84.
Liu L, Hu B, Zhou F, et al. Design of compact off-axis four-mirror optical system with two-dimensional large field of view [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2020, 41(1): 73-84.
- [14] 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-mounted head-up display system[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2022.
- [15] 周婷, 乔文, 华鉴瑜, 等. 增强现实抬头显示现状与展望[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(8): 0811008.
Zhou T, Qiao W, Hua J Y, et al. Status and prospect of augmented reality head-up display[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(8): 0811008.

Design and Optimization of a Head-Up Display System with Variable Projection Distance

Sun Yihan¹, Wu Shenjiang^{1*}, Wang Bo², Chen Xiaowei², Zhang Yiming¹

¹*School of Opto-Electrical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China;*

²*FORYOU Multimedia Electronics Co., Ltd., Huizhou 516006, Guangdong, China*

Abstract

Objective Head-up display (HUD) systems reduce driver visual fatigue and improve driving safety. Existing HUD only alleviates visual fatigue by reducing the times a driver looks at the dashboard. However, conventional augmented reality heads-up display (AR-HUD) system can usually only image at a fixed projection distance. When drivers approach an object, it is perceived that the image passes through the object. This causes drivers to constantly distinguish the distance between the object and the virtual image, which will lead to visual fatigue. Indeed, there is a need for a new type of HUD that makes the projection distance variable. Existing designs use an off-axis three-mirror system, by adjusting the position of the first mirror to achieve the projection distance variable. However, it will change the down angle and also need the picture generation unit (PGU) with variable angle of light output. This will increase the cost and design difficulty. It is necessary to study another way to realize the function of variable projection distance.

Methods Unlike traditional co-axial zoom optics, for HUD with variable projection distances, changing focus is not the only way. Changing the object distance and size can also realize it. We use changing magnification to realize variable projection distance and only change the position and size of the PGU. This is because, like looking in a mirror, as the object distance is larger, the virtual image is farther away. Furthermore, the distance between the PGU and the first mirror decreases at the same time as the projection distance decreases. Since none of the images of PGU emitting by the way of parallel light, as the PGU is closer to the reflector, the image reflected by the mirror is smaller. As the projection distance decreases, the tensor angle of the virtual image relative to the human eyes decreases. This design does not cause the down angle to change, and there is no need to use the PGU with a variable angle of light output. The off-axis three-mirror system generally determines the initial structure by calculating the curvature and optical spacing of the co-axial tri-reflector system. Then we adjust the off-axis angle and optimize the free-form mirror. It is complicated to obtain the different position parameters of the PGU through theoretical calculations. The theoretical data also need to be modified in combination with simulation, which will increase the workload. We design “macro” to obtain the relevant parameters directly through simulation to improve efficiency. The optimization is based on the projection distance of 10 m to optimize the free-form surface and determine the off-axis angle. The change step of the projection distance is 50 mm, and the change step of the image source size is 0.01 mm. We use random sampling to verify the function of continuously variable projection distance of the virtual image. The image quality evaluation includes transverse vertical (TV) distortion, rhombic distortion, trapezoidal distortion, grid distortion, dynamic distortion, binocular parallax, image tilt, aspect ratio distortion, MTF, spot diagrams, and field of view distortion. We evaluate the image quality in detail to better assess the imaging situation after actual manufacturing and guide suppliers to improve their products. The above information is represented in the tables and simulation diagrams.

Results and Discussions We use “macro” to obtain parameters related to the continuous variation of the projection distance. The image quality is analyzed when the projection distance is 10 m and 3 m respectively. The image quality is

analyzed by random sampling to randomly select any projection distance within the changing range. The RMS radii of the spot diagrams in the three cases are all within the Airy spot and less than $25\ \mu\text{m}$. In addition, the grid distortion, TV distortion, rhombic distortion, and trapezoidal distortion are all less than 5%. Dynamic distortion and binocular parallax are less than $5'$. The field of view distortion and aspect ratio distortion are less than 5%. Mutually using parameters of a projection distance apart 50 mm does not result in a dramatic change in image quality. In the range of the variable projection distance, the image quality meets design requirements. The designed projection distance can be continuously varied and the change step of the projection distance setting is reasonable.

Conclusions The AR-HUD with variable projection distance can further reduce the driver's visual fatigue and improve driving safety. The means of equipment and software correction can affect the criteria for assessing image quality, but the design direction is the same. The design value of each distortion parameter should be as small as possible when conditions allow. This can give the actual manufacturing enough tolerance range. Within the space constraints of the car, we need to trade off dynamic distortion and mesh distortion. Under limited conditions, it is not possible to consider both distortions at the same time. In general, the focus should be on controlling dynamic distortion rather than mesh distortion. Appropriate distortion can be corrected by software. Compared to several design approaches, this design does not pose the risk of down angle perspective changes. The method of this design is applicable to all kinds of HUD systems based on the off-axis three-mirror system. In addition, we give the optical detection methods for reference. While our HUD architecture is relevant, the method of realizing variable projection distances is general in nature.

Key words optical design; head-up display; optical zoom; projection distance; off-axis three-mirror system