

# HUD 的景深与对焦变化研究

张达 李宏\*

西安工业大学

DOI:10.12238/etd.v6i1.11767

**[摘要]** 本研究针对车载平视显示器(HUD)使用引发的视觉疲劳与图像扭曲变化问题,通过对人眼的景深计算,对HUD设计结果进行优化与SPEOS多物理场仿真相匹配的实验方法,探究HUD的景深范围,以及人眼动态观察图像时所允许的对焦变化范围。随着智能座舱发展,驾驶员需频繁处理HUD信息叠加的复杂界面,但由于焦平面的不平整导致人眼反复调节晶状体,引发视觉疲劳与认知效率下降。研究验证了人眼的景深范围以指导HUD设计的景深要求,并根据其范围对人眼动态观察图像时调焦的范围进行梳理,能有效缓解HUD使用中的视觉疲劳问题,为HUD设计提供了重要理论依据。

**[关键词]** HUD; 场曲; 对焦变化; 人眼景深

**中图分类号:** O437.5 **文献标识码:** A

## Field curvature and focus variation studies for the HUD

Da Zhang Hong Li\*

Xi'an Technological University

**[Abstract]** This study addresses the issues of visual fatigue and image distortion caused by the use of in-vehicle head-up displays (HUDs). By calculating the depth of field of the human eye, the study optimizes the HUD design results and matches them with the SPEOS multi-physics simulation experimental method to explore the depth of field range of HUDs and the allowable focus variation range when the human eye dynamically observes images. With the development of smart cockpits, drivers need to frequently process complex interfaces with superimposed HUD information. However, the unevenness of the focal plane causes the human eye to repeatedly adjust the lens, leading to visual fatigue and reduced cognitive efficiency. The study verifies the depth of field range of the human eye to guide the depth of field requirements for HUD design, and organizes the focus adjustment range when the human eye dynamically observes images according to this range. This effectively alleviates visual fatigue issues in HUD usage and provides important theoretical basis for HUD design.

**[Key word]** HUD; Field Curvature; Focus Variation; Human Eye depth of field

## 引言

抬头显示技术(Head-Up Display, HUD)自20世纪中叶诞生以来,经历了从航空领域到汽车工业的跨领域技术迁移与迭代升级,逐步成为现代交通工具智能化与安全性的的重要组成部分。其核心目标是通过将关键驾驶信息(如车速、导航、预警等)投射至驾驶员视野前方,减少视线切换频率,从而提升驾驶安全性与交互效率。然而,随着HUD技术的普及与应用场景的复杂化,其面临的挑战也日益凸显,尤其是人眼动态观看HUD图像的畸变问题,已成为制约技术性能提升的关键瓶颈。

21世纪初,随着光学自由曲面设计的突破,HUD进入高速发展阶段。风挡式HUD(W-HUD)通过直接利用汽车前挡风玻璃作为投影介质,大幅扩展了虚拟图像的视场范围(可达 $10^\circ$ 以上),并实现了与实景环境的初步融合。2015年后,增强现实型

HUD(AR-HUD)的问世进一步推动了技术革新:通过高分辨率投影模组、眼动追踪技术以及实时场景匹配算法,AR-HUD能够将导航路径、障碍物预警等信息动态叠加于真实道路场景中,虚拟图像的纵深距离可达10米以上,显著提升了驾驶情境感知能力。据行业预测,至2030年全球车载HUD市场规模将突破百亿美元,技术渗透率在高端车型中接近80%。

HUD技术的性能提升始终与光学系统的物理限制紧密交织。在驾驶场景中,投影图像因驾驶员头部位移导致的动态扭曲,成为阻碍用户体验提升的核心问题。这种扭曲不仅表现为几何形变,还可能引发虚像位置漂移问题,严重时甚至会导致驾驶信息误读,威胁行车安全。动态扭曲的产生源于自由曲面镜与挡风玻璃曲率的设计误差会引入静态像差以及驾驶员头部在眼盒范围内的自由移动变化。传统解决方案主要依赖几何校正算法,通过

预标定畸变参数建立静态映射模型,但其难以应对动态环境下的实时畸变补偿需求。针对上述问题,本文聚焦于人眼所能容许的HUD图像动态扭曲的景深范围与对焦变化范围,系统分析人眼的景深范围,进行HUD设计与仿真,评价其场曲与对焦变化的范围是否在人眼所允许的范围,旨在为高动态HUD系统的设计与优化提供理论支撑与技术路径。研究结果将助力突破AR-HUD普及化的关键技术障碍,并为景深式HUD的设计提供光学的新思路。

1 人眼的景深计算

人眼的景深是一个复杂而精妙的视觉现象,指人眼在某一瞬间能清晰感知到的空间范围。与相机不同,人眼的景深并非固定不变,而是通过动态调节机制适应不同观察需求,其背后涉及瞳孔、晶状体、视网膜等结构的协同作用。人眼的“光圈”由瞳孔控制。强光下瞳孔收缩至1-2毫米,增大景深,使远近物体均相对清晰;弱光下瞳孔扩大至7-8毫米,景深缩小,仅焦点区域清晰。晶状体通过睫状肌调节曲率:看近物时变凸缩短焦距,看远时扁平延长焦距。从几何光学角度探讨,景深显然与视网膜的模糊圈的容许直径有关,而不同视力的人的视网膜模糊圈直径也不相同<sup>[1]</sup>,这与人眼的极限分辨力以及瞳孔径和物距等因素息息相关。人眼的景深计算公式为:

$$V_F = V + \frac{P}{Rd}(RD + V)$$

$$V_N = V - \frac{P}{Rd}(RD + V)$$

表1 人眼景深计算

投影距离 (m)	瞳孔大小 (mm)	视力
8	8	2
眼睛后焦距 (mm)	模糊直径 (mm)	人眼总折光力
17.05	0.002479822	58.64
入瞳倍率	出瞳倍率	瞳径倍率
1.1313	1.03	0.910456996
理想景深 (m)	前景深	-1.013751983
	后景深	1.357893888
实际景深 (m)	前景深	-1.013565983
	后景深	1.35756019

公式中V为物体的聚散度,P为视网膜的模糊圈直径,d为瞳孔直径,R为瞳径倍率,D为人眼的总折光力。本文研究中,HUD的

设计指标定为8米,人眼的视力采用小数视力表的2.0,由于HUD在日间与夜间都会使用,所以瞳孔直径设为8mm。由公式与相关参数得到表1。

人眼视觉系统的景深计算需要结合生理参数与光学原理进行综合分析。根据眼解剖学研究,成年人眼的总屈光力约为+58.6D,等效焦距约22mm。但在实际计算中需采用等效焦距转换法,将人眼参数映射至35mm全画幅系统,此时等效焦距f约为43mm。计算引入容许弥散圆直径参考人眼视网膜的模糊圈直径。相机系统的景深公式推导为:

$$V_N = \frac{PV^2}{(f^2 - PVd)}$$

$$V_F = \frac{PV^2}{(f^2 + PVd)}$$

由公式与相关参数得到下表2。

表2 相机近似人眼景深计算

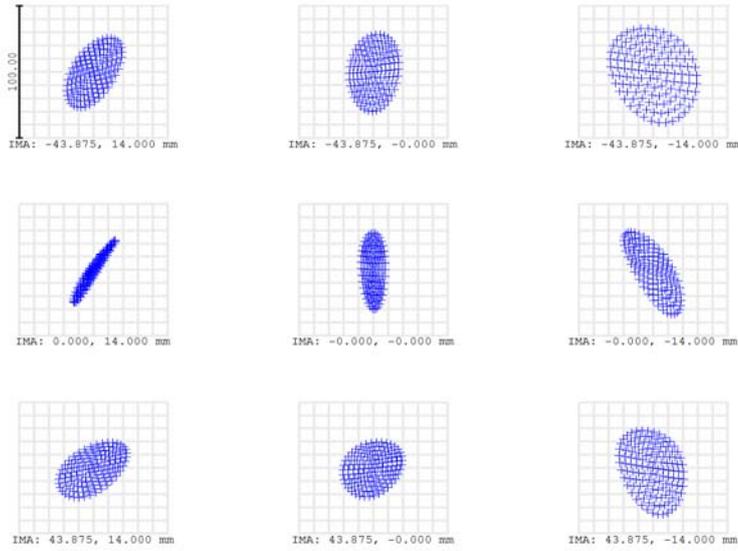
投影距离 (mm)	瞳孔大小 (mm)	视力
8000	8	2
等效焦距 (mm)	模糊直径 (mm)	等效光圈
43	0.006254097	5.375
入瞳倍率	出瞳倍率	瞳径倍率
1.1313	1.03	0.910456996
理想景深 (mm)	前景深	1015.809359
	后景深	1361.587756
实际景深 (mm)	前景深	1115.713717
	后景深	1495.499251

根据两份表格对人眼的景深计算,基本可以定出在投影距离8米的HUD系统中人眼的景深范围,即前景深1米,后景深1.5米。

1.1 HUD光学系统架构与设计

本课题中搭建的作为研究对象的HUD视场角为13°×5°,投影距离为8000mm,所搭建HUD架构参数如表3所示。

表3中Stop面为光阑面,Windshield面为风挡玻璃面,Mirror2面为二级反射镜面,其在X方向存在-19.5°的倾斜,Mirror1为一级反射镜面,其在X方向有一个33°的倾斜,像面即PGU面,其在X方向存在-15°的倾斜,以适应LCOS的像面倾斜。同时,二级反射镜与一级镜之间的间距为210mm,像面与一级镜之间的间距为-85mm,将间距认为在Z方向上的偏心。其都在以风挡玻璃为全局坐标的前提下设置<sup>[2]</sup>。



Surface: IMA

Spot Diagram										
Units are $\mu\text{m}$ . Legend items refer to Wavelengths										
Field :	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
RMS radius :	17.309	18.033	24.761	14.845	16.229	19.840	16.602	15.421	20.790	
GEO radius :	29.105	30.117	39.351	28.071	30.103	36.837	27.411	23.114	35.864	
Scale bar :	100									
										Reference : Chief Ray

图1 HUD点列图

表3 HUD架构参数

光学面	间距(mm)	偏心(mm)		倾斜(°)		
		X	Y	X	Y	Z
Object	-8000					
Stop	757.037					
Windshield	-375			-62.674	4.212	0
Mirror2	210			-19.5	0	0
Mirror1	-85			33	0	0
Image				-15	0	0

1.2 HUD设计结果

点列图作为分析光学成像效果的一个重要指标,通过追迹物点发出的数百至数千条光线,在像面形成二维分布,直观呈现光斑形态(圆形/椭圆/彗差等),揭示球差、彗差、像散等几何像差类型及严重程度。支持分析不同视场角、波长、离焦位置的像质变化,辅助优化设计参数(如非球面系数、镜片间距),确保全视场-全波段性能均衡。弥散斑的大小将显示此光学系统成像

效果的优劣,是否符合设计标准,因此通过优化分析,设计完成后点列图如图1所示。

通过详细优化光路,本文可以得出当光阑设置为 $8 \times 8$ 时,RMS radius最大值为 $24.761\mu\text{m}$ ,而光学系统的Airy Radius为 $32.84\mu\text{m}$ 。所以设计得到的弥散斑数值符合要求。

调制传递函数是评价光学系统成像分辨率与对比度传递性能的核心工具,尤其适用于验证系统是否达到衍射极限、分析空间频率响应特性。MTF的数值越大,越接近衍射极限,那么就表示系统的成像质量越好。通过详细优化得到的MTF的曲线如图2所示。

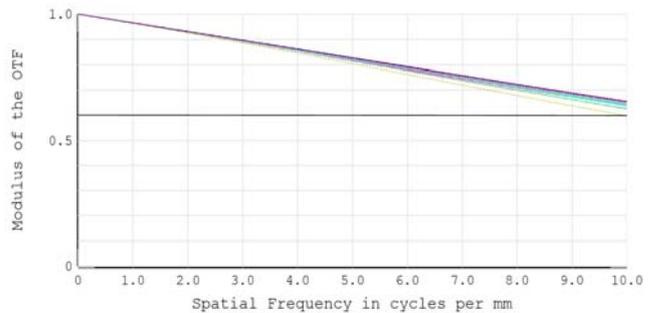


图2 HUDMTF图

表4 HUD-ZEMAX场曲变化

场曲(mm)	-923.47mm	-692.6mm	-461.74mm	-230.87mm	0mm	230.87mm	461.74mm	692.6mm	923.47mm
355.18mm	-227.61	118.89	150.7	83.01	86.51	194.55	292.57	149.96	-377.17
177.59mm	-178.44	149.99	185.02	115.31	106.94	200.02	297.74	201.51	-198.61
0mm	-199.48	61.84	87.67	18.41	0	72.91	158.32	96.98	-172.47
-177.59mm	-265.4	-119.75	-116.84	-185.02	-211.85	-163.42	-103.38	-152.06	-321.07
-355.18mm	-340.51	-362.24	-397.76	-467.09	-501.93	-481.59	-459.5	-523.32	-647.18

表5 HUD-ZEMAX对焦变化

对焦变化	65mm	48.8mm	32.5mm	16.3mm	0mm	-16.3mm	-32.5mm	-48.8mm	-65mm
25mm	976.87	717.22	196.13	-87.02	-180.07	-99.03	165.36	650.08	832.76
12.5mm	1067.61	803.23	277.13	-9.73	-104.71	-23.63	242.87	731.82	920.67
0mm	1202.58	926.08	390.58	97.65	0	81.9	352.98	850.86	1053.87
-12.5mm	1380.1	1085.49	537.04	236.31	135.81	219.9	498.76	1011.23	1237.82
-25mm	1498.85	1281.64	717.56	407.89	304.89	393.1	683.62	1217.25	1478.1

通过详细优化光路,本文可以得出在Freq=10处,其MTF值大于0.6,所以设计得到的MTF数值符合要求。

网格畸变在绘制图畸变图时,这个工具会用逆转换把像空间坐标的偏移转换回物空间。此转换可引入旋转和拉伸/挤压,因此可能导致网格畸变图看起来与直接利用文本选项卡中数据绘图有较大差别<sup>[3]</sup>。

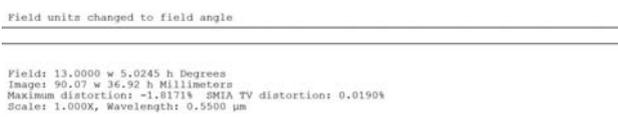
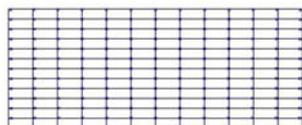


图3 HUD畸变图

通过详细优化光路,本文可以得出在网格畸变最大值为1.8171%,且SMIA TV畸变小于1%,所以设计得到的畸变数值符合要求。

### 2 HUD的场曲和对焦变化

场曲是指光学系统成像时,最佳成像面(焦平面)并非理想平面,而是一个弯曲的曲面<sup>[4]</sup>。场曲在HUD中的表现形式是虚像的扭曲,通常驾驶人员会感觉到左远右近或者左近右远等现象时,大部分是由于场曲造成的,这是由于场曲变化距离导致放大倍率的变化使驾驶者感受到图像的扭曲。通过合理的光学设计确保驾驶员在宽广视场内获得均匀、稳定的显示效果。根据人眼辐辏调节的方式,在ZEMAX中使用宏输出该光路的场曲的结果,如表4。

对焦变换表述的是当人眼在眼盒中移动时,驾驶员看到的虚拟图像的投影距离在不断变化之间的差异,这个差异点是由于风挡面型曲率与不同眼盒的放大倍率不同导致的,这会使驾驶员观看HUD图像时有忽远忽近的感觉,而且不利于HUD的道路

表6 HUD-SPEOS 仿真场曲变化

场曲(mm)	-923.47mm	-692.6mm	-461.74mm	-230.87mm	0mm	230.87mm	461.74mm	692.6mm	923.47mm
355.18mm	594.623	505.59	432.931	363.835	321.619	297.311	474.311	428.795	435.342
177.59mm	667.09	524.364	358.997	195.294	83.934	158.704	394.395	445.355	553.423
0mm	649.696	502.242	333.277	171.783	0	161.156	403.735	470.635	596.128
-177.59mm	759.648	623.551	505.22	424.223	402.381	425.814	532.245	607.196	682.626
-355.18mm	911.127	764.113	596.838	476.049	429.78	472.13	609.874	747.928	915.077

表7 HUD-SPEOS 仿真对焦变化

对焦变化	65mm	48.8mm	32.5mm	16.3mm	0mm	-16.3mm	-32.5mm	-48.8mm	-65mm
25mm	825.637	862.161	666.561	439.055	313.641	463.421	638.421	691.956	910.997
12.5mm	896.02	817.076	695.335	439.808	126.578	481.895	771.343	667.338	749.44
0mm	907.584	984.111	970.572	502.273	0	396.961	710.249	680.115	771.644
-12.5mm	1333.435	1159.791	925.629	716.531	457.704	563.3	873.607	1139.399	1367.262
-25mm	1252.319	879.811	640.774	794.151	605.04	508.971	535.22	960.47	1280.8

融合。本文最终的目标是提升HUD的观感体验,所以需要控制这个投影距离的变化量在人眼可接受的范围内。根据人眼辐辏调节的方式,在ZEMAX中使用宏输出该光路的对焦变化的结果,如表5。

SPEOS作为ANSYS公司开发的专业光学仿真软件,在HUD的设计与验证中发挥着核心作用。HUD通过将关键驾驶信息投影至驾驶员视线前方,需确保复杂光学系统在真实环境中的显示清晰度、亮度均匀性及抗干扰能力,而SPEOS通过高精度光学建模对HUD光源、透镜、反射面及挡风玻璃的全参数化建模,结合非序列光线追迹技术,可模拟光路传播中的折射、反射及衍射效应,精准预测虚拟图像的位置、畸变和光斑分布。通过使用SPEOS进行HUD的光路仿真模拟得到HUD的仿真结果文件中的Field Curvature、Focus Variation分别对应场曲变化与对焦变化的结果:

### 3 技术局限性

由于当前的HUD的检测设备大多数使用双目相机对点阵图进行测试,其测量HUD虚像距离的方式为双目的三角定位计算得到测试结果,HUD的测试尚无针对场曲和对焦变化的测试,而空间光场相机对于虚像的测试并不精准且价格昂贵,所以本文确实实际HUD的场曲与对焦变化的测试,本文设计结果实机人眼观

测像面较为平整,无左近右远或者左远右近的现象。HUD实机的图像拍摄如下:

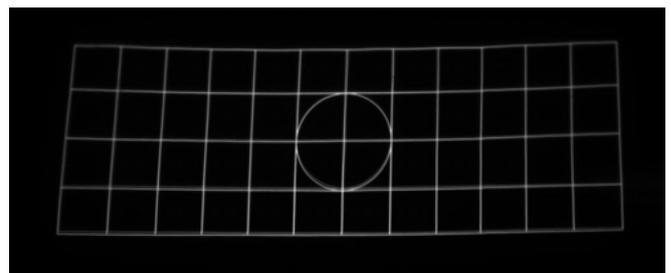


图4 HUD 畸变图

### 4 结束语

在HUD光学设计中,场曲变化与对焦变化的控制是提升成像质量与用户体验的核心问题<sup>[5]</sup>。场曲作为像差的一种表现形式,会导致HUD虚像平面在不同视场位置呈现非均匀弯曲,进而引起边缘视场的离焦模糊或畸变。而对焦变化则涉及不同人眼位置下的动态补偿需求,其参数的意义为确保虚像在不同观测条件下保持清晰稳定。本文通过以人眼的景深为基础,对HUD设计与仿真确定相关像质指标,为HUD的高精度、高鲁棒性设计提供理论依据,为后续研发的景深式HUD提供理论基础。

**[参考文献]**

[1]宋慧琴.人眼的焦深与景深[J].眼科视光知识,2003,17(1):6-9.

[2]张九红,吕坤洁,李田田,等.亮度变化下人眼适应性与舒适度的实验研究[J].照明工程学报,2021,32(01):46-52.

[3]欧高焱.车载增强现实抬头显示光学系统设计与研究[D].中国科学院大学(中国科学院重庆绿色智能技术研究院),2019.

[4]王东平.车载抬头显示系统的研究[D].南京邮电大学,2015.

[5]张晓彬.基于矢量像差理论的离轴反射系统失调校正研究[D].中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2018.

**作者简介:**

张达(1995--),男,汉族,河北省石家庄市人,本科,光学工程师,研究方向:光学工程。

**\*通讯作者:**

李宏(1968--),男,汉族,陕西西安人,硕士,教授,研究方向:光学工程。