

# 基于微型投影的集成式车载平显光学系统设计

王睿<sup>1\*</sup>, 江伦<sup>2\*\*</sup>, 宋志化<sup>1</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup>长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022

**摘要** 车载平显系统(HUD)可以让驾驶员更快速地查看车速、导航等相关信息,缩短驾驶视觉盲区时间,减少交通事故,改善驾驶体验。为加快车载 HUD 的普及,研究基于数字微镜元件(DMD)的微型投影系统,并以符合车身结构的反射式光学系统为核心,给出了仿真模型。借助投射投影屏,图像多次反射后进入人眼,形成位于挡风玻璃前端的虚像。设计目标显示,虚像距离为 2.5 m,驾驶员不需要改变视距便可查看图像内容;水平可视范围为 140 mm,垂直可视范围为 60 mm,得到眼睛在不同位置看到的图像的光学传递函数,均接近衍射极限,表明图像清晰,设计效果较好。图像视场角为水平 12°,垂直 6.75°,在不干扰驾驶员视线的情况下提供了足够的显示面积。

**关键词** 光学设计; 光学系统; 车载平显; 软件仿真; 反射式光学系统; 微型投影

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.112201

## Optical Design of Ensemble Head-Up Display System Based on Mini-Projector

Wang Rui<sup>1\*</sup>, Jiang Lun<sup>2\*\*</sup>, Song Zhihua<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Aero and Ground Laser Communication Technology,  
Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** The head-up display (HUD) system can help drivers to check the speed, navigation, and other related information conveniently, shorten the visual blind spot, thus reduce traffic accidents, and improve the driving experience. In order to speed up the popularization of the vehicle-mounted HUDs, a mini-projector system based on the digital micro-mirror device (DMD) is proposed, which focuses on the reflective optical system conforming to the vehicle structures, and the simulation model is provided. The image enters into human eyes through multiple reflections by the projection screen, thus forming a virtual image in front of the windshield. The design result shows the virtual image distance can reach 2.5 m so that the driver can view the image without changing sight distance. The horizontal and vertical viewing ranges reach 140 mm and 60 mm, respectively. The optical transfer functions at different positions are all close to the diffraction limit, which indicates the clear image and good projection effect. The horizontal and vertical fields of view are 12° and 6.75°, respectively, which can provide sufficient display area without disturbing the drivers' visual field.

**Key words** optical design; optical systems; vehicle-mounted head-up display; software simulation; reflective optical system; mini-projector system

**OCIS codes** 220.3620; 120.4830; 220.2740; 120.2820

## 1 引言

平视显示系统(HUD)利用光学反射的原理将

信息投射在玻璃上,最早应用于军用飞机。飞行员不需要低头,可以直接在挡风玻璃上读取飞行信息。随着汽车保有量的提高,驾驶的安全性、舒适性越来越

收稿日期: 2018-04-17; 修回日期: 2018-05-06; 录用日期: 2018-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(61701045)、吉林省优秀青年人才基金(20170520163JH)、长春理工大学创新基金(2016·[03])

\* E-mail: 568688731@qq.com; \*\* E-mail: jlciomp@163.com

越受到重视,近几年国内外一些高端车型上陆续出现了不同类型的车载 HUD,将车速、转速、油耗等信息显示在汽车的挡风玻璃上,与外景叠加,驾驶员不用低头,便能读取车辆信息,减少驾驶盲区时间造成的交通事故。同时,中国的交通和路况复杂,导航信息对大部分驾驶员来说至关重要,汽车导航信息的显示位置也是一个问题,车载 HUD 还能将导航信息显示在挡风玻璃上,提高行车可靠性和安全性<sup>[1]</sup>。未来的车载 HUD 还能与互联网连接,承载更多信息的显示,例如增强现实的显示。

现有的车载 HUD 解决方案大致可分为三种:投射式,后装式,集成式。投射式结构简单,只能显示车速、转速等简单信息,而且图像存在重影。1988年,通用旗下的奥兹莫比车型上选装的车载 HUD 采用的便是投射式,受限于当时的技术水平,只能显示车速<sup>[2]</sup>,现在市场上销售的百元级别的车载 HUD 配件也是基于投射式。后装式与车辆的联动性差,很多车主使用后反映显示不够清晰,图像会晃动,而且需要占用额外的空间。北京乐驾科技有限公司推出的第二代车萝卜 HUD 智能机器人是后装式的代表,功能丰富,但发热不易控制,造成图像亮度不够,而且车辆在不平稳的路面上行驶时图像晃动严重。集成式车载 HUD 是 HUD 在汽车上的完美应用,将需要的图像直接投射在挡风玻璃上,可作为第二块仪表盘,克服了投射式和后装式方案的缺点,已成为国内外的发展趋势。宝马的部分车型配备了基于液晶显示器件的集成式平视显示器<sup>[3]</sup>,作为驾驶者辅助系统,该项技术目前并没有全面普及。

近年来,多位学者对车载 HUD 开展了各方面的研究。杨飞等<sup>[4]</sup>调查了 HUD 在汽车上的应用实例,对比了不同成像原理的优缺点;王兴等<sup>[5]</sup>分析了技术原理,提出使用自由曲面、像合成器件等方法来提高图像质量;陈方等<sup>[6]</sup>设计了基于数字光处理(DLP)技术的 HUD 微型投影显示光学系统,这是车载 HUD 的重要组成部分,但并没有给出光学系统反射部分的设计方案。

本文对车载 HUD 的光学构造进行了研究、设计,详细阐述了 HUD 系统的各项系统参数之间的关系和确定方法。分析实际需求,拟定各项系统参数,利用反射式光学结构,与车辆结合较好。通过 DLP 投影镜头成像,设计了微型投影系统和反射式光学系统,可在挡风玻璃上形成视野足够大、显示内容丰富并且清晰的图像,并对仿真结果进行了分析。

## 2 光学系统原理

### 2.1 车载 HUD 系统

车载 HUD 系统主要包括反射系统、微型投影显示系统和电子信息处理系统。电子信息处理系统控制投影光源和显示芯片,经过微型投影显示系统后会成为所需的图像,然后反射系统再将图像投射到需要的位置<sup>[7]</sup>。本文主要讨论光学系统部分。

反射式光学系统的放置要考虑车身结构、系统的体积和散热。图像需要投射在方向盘后方。方向盘后面并没有充足的空间容纳投影模块,因此要利用折叠镜使光路发生偏转,同时可加入自由曲面镜减小像差,偏转方式如图 1 所示。

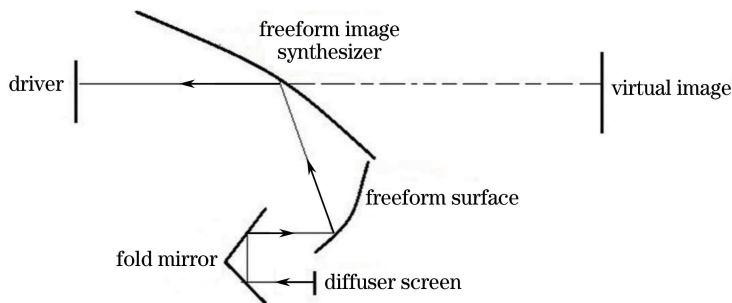


图 1 反射式光学系统

Fig. 1 Reflective optical system

DLP 投影技术以数字微镜元件(DMD)作为成像芯片,亮度对比度高,光学利用率可以达到 90% 以上<sup>[8]</sup>,与液晶显示器相比适合高低温等极端工作条件。工作原理如下:将视频信号调制成电信号,用此信号控制上百万个 DMD 的偏转,从而控制光线是否通过镜头,在屏幕上产生图像<sup>[9]</sup>。将

DLP 投影镜头与反射式光学系统结合,如图 2 所示。

反射式光学系统和 DLP 投影镜头之间还需加入投射投影屏<sup>[10]</sup>,投影镜头将图像投影到投影屏上,产生的图像再由反射系统反射后进入人眼,在人眼中形成位于车辆前的虚像。

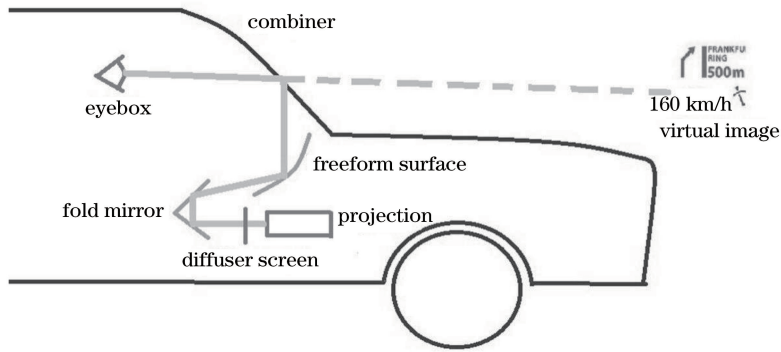


图 2 整体结构示意图

Fig. 2 Overall structure diagram

2.2 光学系统指标分析

视场角(FOV)是 HUD 系统中的一项重要参数,决定了虚像的大小。视场角过小,驾驶员不易分辨图像上的内容,视场角过大将会影响驾驶员视野。中国高速公路的车道宽约 3.7 m,在驾驶员前方 18 m 处、水平方向 12° 的视场角正好跨越整个车道(图 3)。可视范围是指全部图像至少能被驾驶员的一只眼睛观察到所需的范围,查询数据可得人眼瞳孔平均距离为 65 mm,对不同驾驶员视线位置进行分析(图 4),水平可视范围应至少为 140 mm,垂直范围至少为 60 mm,同时系统应具备高度调节能力。

虚像距离(VID)是观看者的眼睛与虚拟图像之

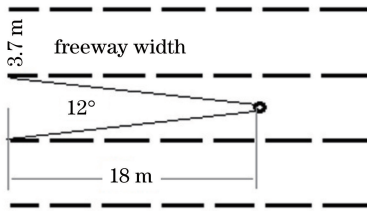


图 3 水平视场角大小示意图

Fig. 3 Diagram of horizontal FOV size

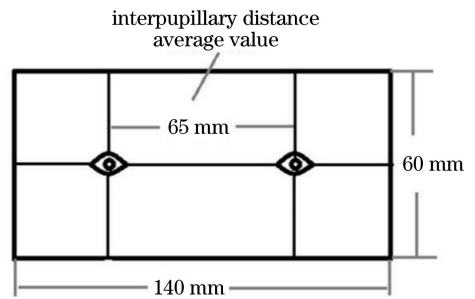
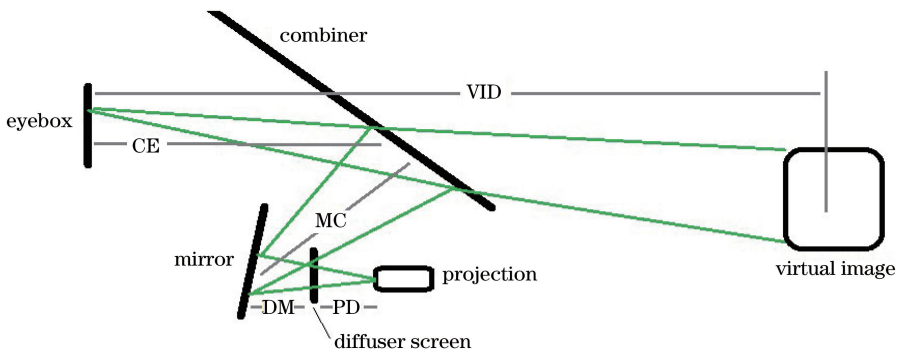


图 4 可视范围大小示意图

Fig. 4 Diagram of eyebox size

间的距离,虚像距离无穷远会造成驾驶员的视线被虚像吸引,视野就会变窄。VID 取 2.5 m,使得驾驶期间 HUD 在正常视距处呈现信息,驾驶员不需要改变视距就能很方便地观察到虚像内容。人眼的典型分辨率约为 1 pixel/rad,水平方向 12° 至少需要 720 pixel。为了获得更好的清晰度,选择高分辨率(HD, 1280 pixel × 720 pixel)的 DLP 投影系统,具体型号为某公司的 DLP3010。相应的视场角为水平方向 12°,垂直方向 6.75°。各元件位置如图 5 所示,图中镜片指折叠反射镜和自由曲面镜的组合。



VID: virtual image distance  
 MC: distance between mirror and combiner  
 PD: distance from projection to diffuser screen  
 CE: distance between combiner and eyebox  
 DM: distance between diffuser screen and mirror

图 5 元件位置示意图

Fig. 5 Component location diagram

HUD系统应当有非常大的亮度调节范围。根据赵晓枫等<sup>[11]</sup>、李珊珊等<sup>[12]</sup>研究指出的图像亮度标准,HUD系统的使用环境可能是夜晚的星光下,也可能是烈日当空的白天,亮度至少要达到1500 cd/m<sup>2</sup>。亮度调节通过改变LED光源的功率来实现。

入瞳亮度计算公式为

$$L = 4 \times E_x \times E_y \times B_{\max} \times \tan\left(\frac{1}{2}F_H\right) \times \tan\left(\frac{1}{2}F_V\right), \quad (1)$$

式中: $L$ 为入瞳亮度,单位为流明; $E_x$ 为水平可视范围大小; $E_y$ 为垂直可视范围大小; $B_{\max}$ 为最大亮度; $F_H$ 为水平视场角大小; $F_V$ 为垂直视场角大小。

由(1)式可得入瞳亮度为3.12 lm。

图像在光学系统中传播时存在各种损失,经测算可得成像面反射效率为20%,物镜转换效率为90%,进入可视范围的光线占40%~50%。计算得到投影单元所需亮度约为43.33 lm。

物镜到投影屏的距离计算公式为

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{D_M + D_C} - \frac{1}{D_V - D_E}, \quad (2)$$

$$\frac{1}{D_P} = \frac{1}{f} + \frac{1}{D_E}, \quad (3)$$

式中: $f$ 为计算过程中间量,无具体含义; $D_M$ 为投影屏到反射镜距离; $D_C$ 为反射镜到挡风玻璃距离; $D_V$ 为虚像距离; $D_E$ 为挡风玻璃到可视范围的距离; $D_P$ 为物距。

计算得到物距为323 mm,物镜到投影屏的距离即为323-200=123 mm。

投射投影屏的大小、虚像距离、视场角依据人眼与成像面的距离而定。经研究,尺寸计算公式为

$$W_D = \left[ 2 \times D_V \times (D_M + D_C) \times \tan\left(\frac{1}{2}F_H\right) \right] / (D_V - D_E), \quad (4)$$

$$H_D = \left[ 2 \times D_V \times (D_M + D_C) \times \tan\left(\frac{1}{2}F_V\right) \right] / (D_V - D_E), \quad (5)$$

式中: $W_D$ 为投影屏宽; $H_D$ 为投影屏高。

计算可得投射投影屏宽60.06 mm,高33.70 mm。

进一步分析成像面尺寸,计算公式为

$$W_C = 2 \times D_E \times \tan\left(\frac{1}{2}F_H\right) \times E_x \times \left(1 - \frac{D_E}{D_V}\right), \quad (6)$$

$$H_C = 2 \times D_E \times \tan\left(\frac{1}{2}F_V\right) \times E_y \times \left(1 - \frac{D_E}{D_V}\right), \quad (7)$$

式中: $W_C$ 为成像面宽; $H_C$ 为成像面高。

计算可得成像面宽255.65 mm,高130.46 mm。具体光学设计参数如表1所示。

表1 光学设计参数

System parameter	Value
Display band	486-656 nm
Highest brightness	1500 nits
Light intensity contrast	1.2 at 50% brightness HD (1280 pixel × 720 pixel)
Resolution	720 pixel)
Distance from projection to diffuser screen (PD)	123 mm
Distance between diffuser screen and mirror (DM)	50 mm
Distance between mirror and combiner (MC)	150 mm
Virtual image distance (VID)	2500 mm
Eyebox size	140 mm × 60 mm
Distance between combiner and eyebox (CE)	750 mm
Field of view	12° × 6.75°

### 3 设计结果及分析

#### 3.1 反射式光学系统设计

反射式光学系统的设计指标如表2所示。

表2 光学系统相关参数

Parameter	Value
Wavelength range	486-656 nm
Image resolution	1280 pixel × 720 pixel
Virtual image distance	2500 mm
Eyebox	140 mm × 60 mm
Distance from eye to image	750 mm
Field of view	12° × 6.75°

参照图2可知,反射式光学系统包括挡风玻璃、非球面反射镜、折转反射镜及部分透镜组、投射式投影屏组成。设计结果如图6所示。

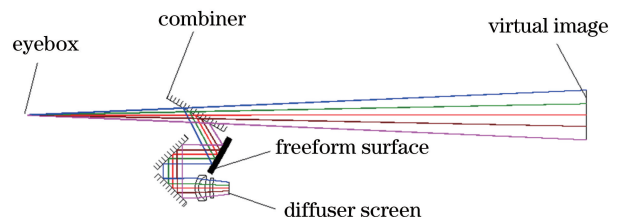


图6 反射系统光路图

Fig. 6 Optical path of reflection system



图 7 中投射式投影屏为高增益值的扩散屏。基于 DLP 的投影镜头将图像投影到扩散屏上,产生的图像再由折转反射镜、自由曲面镜、挡风玻璃反射后进入人眼,形成前方 2.5 m 处的虚像。为满足不同身高、不同坐姿的驾驶员的观测要求,人眼在水平 140 mm、竖直 60 mm 的观测范围内均可观测到完整的投影图像。

考虑到挡风玻璃具有一定厚度,光线会发生反射和折射,驾驶员看到的图像会存在重影。为了抑制图像经过挡风玻璃造成的重影,还需要对挡风玻璃的厚度进行调整,如图 8 所示,采用上薄下厚的结构。光线经过两次反射后,两条光路会聚,可消除重

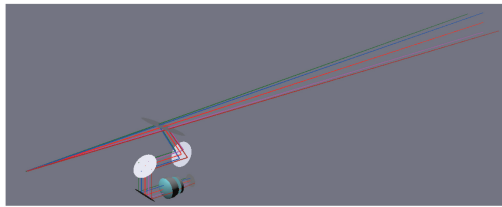


图 7 反射系统 3D 图

Fig. 7 3D image of reflection system

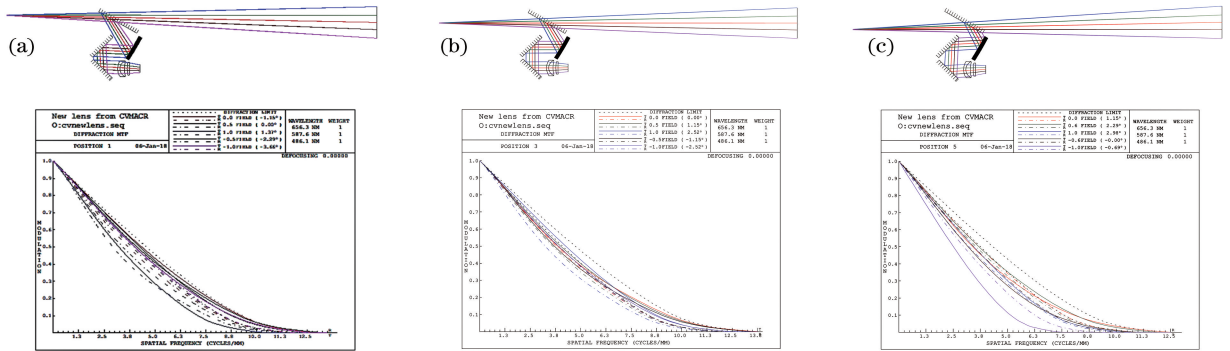


图 9 人眼处于可视范围不同位置时系统的光学传递函数。(a)上边缘;(b)中间;(c)下边缘

Fig. 9 Optical transfer functions when human eyes are at different positions in the eyebox.

(a) Upper limb; (b) middle; (c) lower limb

### 3.2 DLP 投影镜头光学系统设计

设计采用 DMD 芯片,其长宽比为 16:9。基于 DLP 的 HUD 微型投影镜头的光学参数如表 3 所示。

表 3 光学设计参数

Table 3 Optical design parameters

Parameter	Value
Spectrum range	486-656 nm
Focus	10 mm
Field of view	38.12°×22.01°
Image size	6.91 mm×3.89 mm (7.93 mm)
F number	4
Length-width ratio	16:9
DMD	0.3 inch (1 inch=2.54 cm)

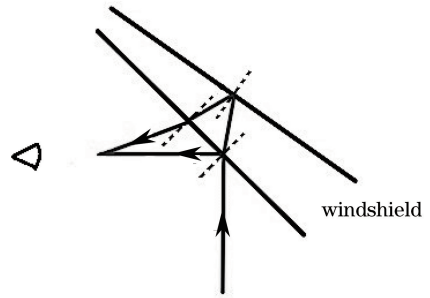


图 8 挡风玻璃反射光路图

Fig. 8 Reflection path diagram of windshield

影。为了达到更好的成像质量,还需要为挡风玻璃的相应区域镀上半反射半透射的膜层。

图 9(a)~(c)分别为人眼在可视范围上边缘、中间、下边缘时的光路图与光学传递函数。光学传递函数是评价光学系统设计质量的重要指标,设计时将人眼与反射式光学系统作为整体进行评价,人眼入瞳大小为 4 mm。从图 9 可以看出,人眼在可视范围内移动时,观察到的虚像像质均接近衍射极限,表明反射式光学系统成像质量满足人眼观察图像的要求。

投影镜头是 HUD 光学系统的重要组成部分,其成像质量直接关系到整个系统的成像质量。投影镜头设计时按照反向的成像系统设计,DMD 为图像源,设计时相当于像面。DMD 和投影镜头间有全内反射(TIR)棱镜<sup>[13]</sup>转折光路,投影镜头设计时,可将 TIR 棱镜等效为相同光程的平板玻璃。投影镜头设计光路如图 10 所示。

投影镜头主要使用调制传递函数(MTF)和弥散圆均方根值(RMS)来进行评价。DMD 芯片规格为 1280 pixel×720 pixel,单元大小为 5.4 μm×5.4 μm,投影镜头倍率为 7,故该光学系统像质可在像方空间频率 14 lp/mm 处进行评价,其调制传递

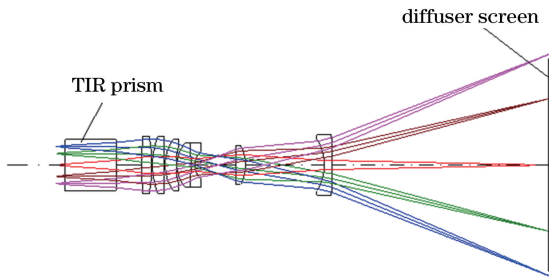


图 10 投影镜头光路

Fig. 10 Optical path of projection lens

函数如图 11 所示。

图 11 中横坐标代表空间频率,纵坐标代表 MTF 值的大小。从图中看出镜头的分辨率 14 lp/mm 处各个波段的 MTF 值均在 0.45 以上,表明该结构具有较好的分辨率,满足设计要求。

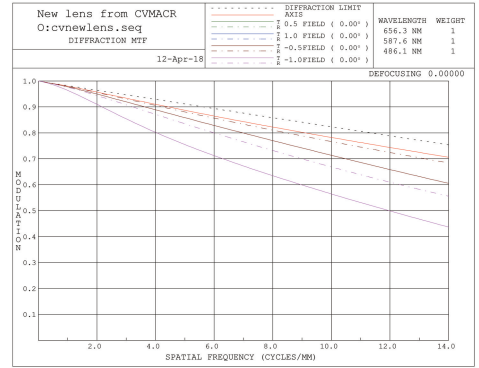


图 11 投影镜头光学传递函数

Fig. 11 Optical transfer functions of projection lens

从图 12 可以看出投影镜头的弥散圆尺寸的均方根值均小于  $75 \mu\text{m}$ , 表明该投影镜头的像差得到了较好的控制,有望实现较好的成像质量。

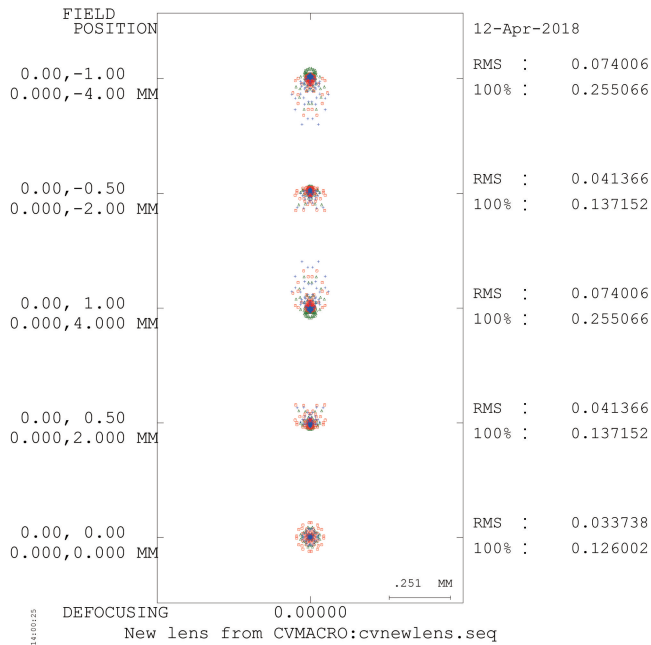


图 12 投影镜头均方根值

Fig. 12 RMS of projection lens

## 4 结 论

借助车载 HUD, 驾驶员可以方便地查看车辆信息和导航信息, 有巨大的市场潜力。针对车载 HUD 的设计要求, 基于 DLP 的车载 HUD 光学系统, 设计了一种反射式光学结构, 通过投射式投影屏将反射式光学系统与微型投影显示系统相结合, 分析图像的光学传递函数和 RMS。验证结果表明该结构符合使用要求。利用该车载 HUD 解决方案, 有望提高驾驶信息的成像质量, 带来更好的驾驶体验。

## 参 考 文 献

- [1] Zhou L H. Vehicle-mounted head-up display has sprung up [J]. New Economy Guide, 2016 (7): 69-72.  
周路菡. 汽车抬头显示器异军突起[J]. 新经济导刊, 2016(7): 69-72.
- [2] Chen H. Vehicle-mounted head-up display system [J]. Light Vehicles, 2009(5): 34-25.  
陈浩. 车载平视显示器 HUD 系统[J]. 轻型汽车技术, 2009(5): 34-35.
- [3] Liu C H, Wei J M. Analysis of the new BMW 7

- series head-up display HUD technology [J]. *Auto Electric Parts*, 2014(7): 29-36.
- 刘春辉, 魏金铭. 新款宝马 7 系平视显示屏 HUD 技术剖析[J]. *汽车电子*, 2014(7): 29-36.
- [4] Yang F, Lin S H, Wu C J. Application of head-up display system in automobile [J]. *Light Vehicles*, 2013(11): 24-26.
- 杨飞, 林绍华, 吴春建. 抬头显示系统在汽车上的应用[J]. *轻型汽车技术*, 2013(11): 24-26.
- [5] Wang X, Qin Q. Technologies of head-up display for automobiles [J]. *Electronics Optics & Control*, 2014, 21(1): 55-58.
- 王兴, 秦齐. 车载平视显示技术[J]. *电光与控制*, 2014, 21(1): 55-58.
- [6] Chen F, Cui X Q, Li S H. Design of HUD mini projector display optical system based on DLP [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2017, 15(1): 86-89.
- 陈方, 崔小强, 李升辉. 基于 DLP 的 HUD 微型投影显示光学系统设计[J]. *光学与光电技术*, 2017, 15(1): 86-89.
- [7] Hu Y. The research of vehicle-mounted head-up display system[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012: 13-22.
- 胡宇. 车载抬头显示器系统的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012: 13-22.
- [8] Li D, Xue Y Y, Cao W, et al. Optimization of DMD illumination system with microlens array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33 (1) : 0122002.
- 李丹, 薛芸芸, 曹雯. 基于微透镜阵列的 DMD 芯片投影系统照明优化 [J]. *光学学报*, 2013, 33 (1) : 0122002.
- [9] Benjamin L. Introduction to digital micro-mirror device (DMD) technology [R]. Texas Instruments Application Report, 2013: 1-10.
- [10] Vivek T, John F. TI DLP © Pico™ technology for aftermarket head-up displays[R]. Texas Instruments Application Report, 2016: 1-13.
- [11] Zhao X F, Liu C Q, Cai W, et al. Research on brightness perception model based on night vision vehicle head up display[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 121501.
- 赵晓枫, 刘长青, 蔡伟, 等. 基于夜视车载平显的亮度感知模型研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 121501.
- [12] Li S S, Wang Q, Feng X L. A novel quality metric based on luminance and contrast model for image fusion[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(6): 061001.
- 李珊珊, 王琦, 冯兴乐. 基于亮度和对比度模型的图像融合质量评估标准[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(6): 061001.
- [13] Li D, Yao L F, Xu X Y, et al. Design and optimization of a total-internal-reflection prism in the digital micromirror device projection system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(2): 0216004.
- 李丹, 姚连芳, 徐西印, 等. 数字微镜器件投影系统的全反射式棱镜设计及系统性能优化[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0216004.