

引用格式:ZHANG Yang-liu, SU Zhou-ping, PAN Hong-xiang, *et al.* Optical Design and Tolerance Analysis of Freeform Automotive Head-up Display[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(9):0922002

张杨柳, 苏宙平, 潘红响, 等. 自由曲面车载抬头显示器的光学设计及公差分析[J]. *光子学报*, 2020, **49**(9):0922002

# 自由曲面车载抬头显示器的光学设计及公差分析

张杨柳<sup>1,2</sup>, 苏宙平<sup>1,2</sup>, 潘红响<sup>1,2</sup>, 陈兴涛<sup>1,2</sup>, 张文裕<sup>1,2</sup>

(1 江南大学 理学院, 江苏 无锡 214122)

(2 江苏省轻工光电工程技术研究中心, 江苏 无锡 214122)

**摘 要:**设计了一种自由曲面车载抬头显示器(Head-up Display, HUD)光学系统.在 HUD 光学系统初始结构设计中,基于种子曲线扩展算法,对 HUD 中两个自由曲面上的采样数据点进行计算,并拟合成扩展多项式.将设计的 HUD 光学系统初始结构进行光线追迹,验证了设计结果.结果表明,在 0.5 mm 光线采样间隔下,初始光学系统的性能达到了衍射极限,可作为进一步全视场优化的起点.对系统进行优化,利用多重结构模拟人眼在孔径光阑移动范围(眼动范围)内的观察情况,对于不同的孔径光阑位置,光学系统的调制传递函数在 6 lp/mm 下均大于 0.5,接近衍射极限,并且系统畸变小于 2%.最后对系统中的自由曲面反射镜进行面形公差分析,两个曲面在其各自面形公差峰谷值分别为 0.42  $\mu\text{m}$  和 0.62  $\mu\text{m}$  下的调制传递函数均高于 0.3,完全满足现在自由曲面加工精度.

**关键词:**抬头显示器;种子曲线扩展法;自由曲面;采样间隔;公差分析

中图分类号:O435; O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204909.0922002

## Optical Design and Tolerance Analysis of Freeform Automotive Head-up Display

ZHANG Yang-liu<sup>1,2</sup>, SU Zhou-ping<sup>1,2</sup>, PAN Hong-xiang<sup>1,2</sup>, CHEN Xing-tao<sup>1,2</sup>, ZHANG Wen-yu<sup>1,2</sup>

(1 School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

(2 Jiangsu Provincial Research Center of Light Industrial Optoelectronic Engineering and Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**Abstract:** A freeform optical system of automotive Head-Up Display (HUD) was designed. In the initial layout design of the HUD optical system, the sample points on two optical freeform surfaces of the HUD optical system are calculated by the seed curve extension algorithm. And the two freeform surfaces are expressed by the extended polynomials. Then the ray tracing is performed for the initial layout of the HUD optical system at center field of view with 0.5 mm ray sampling interval. The results show that the performance of the initial layout of the HUD optical system is the diffraction-limited, which can be used as the starting point for further optimization at full field of view. After optimization, the final HUD optical system is obtained. In order to simulate the observation of human eyes, several test points in the Eyebox are taken as object points, which are imaged on the image plane by the HUD optical system. The modulation transfer function plots of the several test points are greater than 0.5 at 6 lp/mm, which are close to diffraction limit. And the distortions of the final HUD system are less than 2%. Finally, the manufacture tolerances of two optical freeform surfaces are analyzed. The results show that the modulation transfer function plots of the HUD optical system are higher than 0.3 with the tolerance PV values of 0.42  $\mu\text{m}$  and 0.62  $\mu\text{m}$  of the two optical freeform surfaces respectively. For the current

基金项目:上海市全固态激光器与应用技术重点实验室开放课题(No.2012ADL03)

第一作者:张杨柳(1995—),女,硕士研究生,主要研究方向为成像系统光学设计.Email:zhangyl9595@163.com

导师(通讯作者):苏宙平(1978—),男,副教授,博士,主要研究方向为成像与非成像光学系统设计.Email:zpsu\_optics@163.com

收稿日期:2020-05-13;录用日期:2020-07-02

machining capacity, the tolerance requirements are reasonable.

**Key words:** Head up display; Seed curve extension algorithm; Freeform surface; Sample point interval; Tolerance analysis

**OCIS Codes:** 220.2740; 080.4035; 080.1753; 080.4228

## 0 引言

抬头显示器(Head-Up Display, HUD)在汽车上使用越来越普遍,它能将车速、导航地图等信息投影到汽车前挡风玻璃的驾驶员平视范围内,驾驶员无需低头就可以看到这些信息,减少了因低头查看信息而导致交通事故的可能,缩短了驾驶盲区时间,可以有效提升行车的安全性<sup>[1-4]</sup>.车载 HUD 分为前装 HUD 和后装 HUD,前装 HUD 是车厂在汽车出厂的时候就配置好的,前装 HUD 为了使其结构更加紧凑,光学系统多采用离轴式光学结构,这种结构可以有效折叠光路,但会引入非对称性像差,传统的球面或非球面难以校正这类像差,而自由曲面<sup>[5-6]</sup>可以很好地平衡这种非对称性像差,被广泛应用于 HUD 系统中.后装 HUD 由于是后续装上的,因此与汽车的联动性较差,它通常采用一块显示屏作为组合器进行虚像显示,但由于体积受限,显示屏尺寸无法做大,这就直接限制了虚像的尺寸,同时,后装 HUD 受温度影响较大,存在强光下无法清晰成像的缺点,显示效果不够理想.因此设计离轴自由曲面 HUD 是本领域内研究的一个热点,国内外已经有多位学者对 HUD 的设计进行过研究<sup>[7-8]</sup>.王兴<sup>[7]</sup>分析比较了几种 HUD 结构的优缺点,采用自由曲面反射式结构,设计了一款虚像视距 2 m、全视场  $9.15^\circ \times 6.81^\circ$  的 HUD 系统;马东林团队<sup>[8]</sup>设计了一种自由曲面离轴三反式 HUD 系统,该系统结构紧凑,实现了  $80 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  超大光瞳范围内清晰成像等.然而,这些 HUD 光学系统的设计大多采用参数优化<sup>[9]</sup>的方法,将面形系数设置为变量,太过依赖光学软件的优化功能,需要丰富的设计经验和大量的时间.因此,如何设计一个具有良好初始结构的 HUD 光学系统非常重要,初始结构的性能对后续的优化及系统最终可以达到的性能是至关重要的.韩国的 KIM B H<sup>[10]</sup>等通过求解方程参数,获得了线性色散及球差均被校正的 HUD 离轴双镜系统的初始结构,但其采用的是两个非球面和一个圆柱透镜的组合,初始结构的成像质量还有待提高,针对离轴自由曲面的 HUD 光学系统初始结构设计至今未见相关报道.

本文利用种子曲线扩展方法<sup>[11]</sup>设计了一种离轴自由曲面 HUD 光学系统初始结构,在初始结构的基础上,经过简单的优化就得到比较好的性能.在文献[11]中,种子曲线扩展的算法被用来设计离轴双反的望远系统,该系统中只有 1 个自由曲面是被直接设计的.本文使用种子曲线扩展的算法设计了含有 2 个自由曲面的 HUD 光学系统初始结构,该初始结构的性能良好,可作为系统进一步优化的起点,优化过程速度很快,经过优化后的系统在整个孔径光阑移动范围(眼动范围)内都具有优异的光学性能.论文也分析了采样光线不同间距对设计结果的影响,给出了最佳的采样间距.最后基于随机统计的方法对自由曲面加工误差进行了分析.

## 1 HUD 光学系统设计原理

### 1.1 HUD 光路结构及设计指标

HUD 光学系统初始结构如图 1 所示,是一个离轴结构,由两个自由曲面反射镜以及挡风玻璃组成.来自图像源的光线经两个自由曲面反射镜反射到挡风玻璃上,后经挡风玻璃反射到人眼.图像经过反射后成像为虚像,虚像的位置在人眼沿着入射光线的反向延长线上,即在挡风玻璃外,因此人眼最终在车辆前方观察到放大的虚像.在 HUD 光学系统设计过程中,采用反向设计的思路,即光线由虚像面出发,经人眼及反射系统后到达像源处,由于光路是可逆的,若像源处的成像质量良好,那么,由像源发

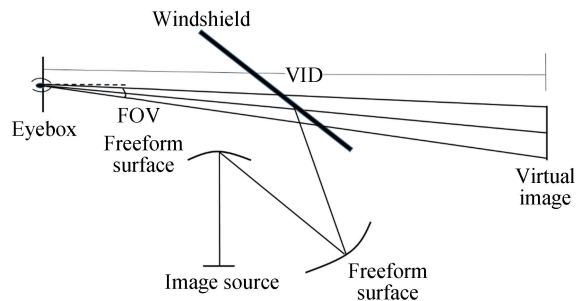


图 1 HUD 光学系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of HUD optical system

出的光线也能在人眼中成理想的虚像.抬头显示器系统的光学设计主要指标为<sup>[12]</sup>:视场角(Field of View, FOV)、虚像视距(Virtual Image Distance, VID)、眼动范围(Eyebbox)、下视角等,如图 1 所示.其中,视场角

FOV 是指虚像的纵横边缘与人眼中心连线所成的立体角,它是决定虚像大小的关键因素.虚像视距 VID 代表着人眼与虚像之间的直线距离,该距离不宜过大,否则虚像会与前方的景物重叠,一般情况下 HUD 的虚像视距在 2-3 m 左右,虚像位于车头引擎盖上方.在驾驶过程中人的头部难免会左右移动,而 Eyebox 就是驾驶员可以自由移动而不会影响虚像可视化的移动空间范围<sup>[12]</sup>.下视角即为人眼与虚像中心的连线与水平面之间的夹角,它决定着虚像的空间高度,通常情况下,人眼中心水平线偏下的位置为适宜人眼观看的虚像位置.

结合上面提到的一些关键参数,本文设计的离轴自由曲面 HUD 系统的性能参数如表 1 所示.

表 1 HUD 系统设计参数

Parameters	Value
Wavelength range	486~656 nm
Virtual image size	260 mm×130 mm
Eyebox	80 mm×40 mm
Virtual image distance	2 500 mm
Field of view	6°×3°
Distortion	Less than 2%

## 1.2 基于种子曲线扩展法设计 HUD 系统中的自由曲面

种子曲线扩展法<sup>[11]</sup>是基于一定的几何物像关系,通过给定初始条件,建立自由曲面相邻采样点之间的递推关系,根据这种递推关系建立一条种子曲线,然后对种子曲线上各采样点沿指定方向进行扩展,可以计算出自由曲面上所有采样点.图 2 为 HUD 系统初始结构的 3D 视图,利用种子曲线扩展算法可以对 HUD 系统中自由曲面上的数据采样点进行计算,即图 2 中的自由曲面 Q 和 M 上的采样点,挡风玻璃用平面镜替代.由于光路可逆,设计过程中采取逆向设计的方法,即由人眼到图像源的光路计算.由于人眼有一定的可移动空间,在设计之初将 Eyebox 作为系统的孔径光阑,若由 Eyebox 经光学系统后最终在图像源处成理想的实像,那么逆向过来,无论眼睛移动到什么位置,均能观察到清晰的表盘图像.

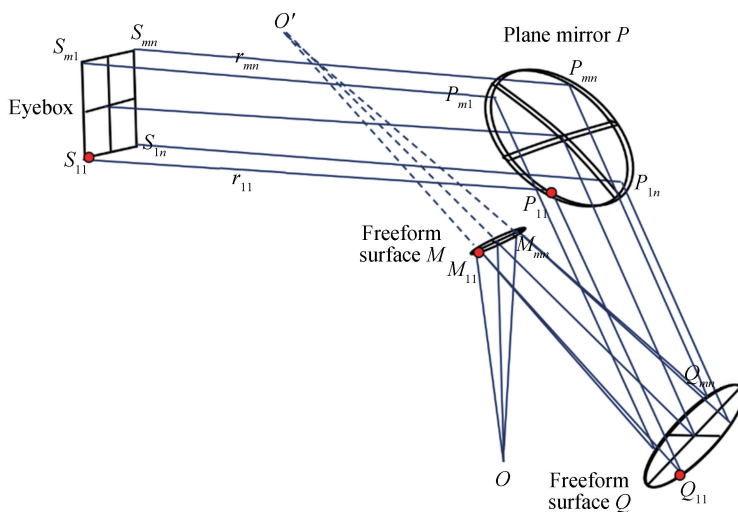


图 2 HUD 光学系统 3D 视图  
Fig.2 3D view of HUD optical system

基于种子曲线扩展算法<sup>[11]</sup>设计 HUD 光学系统初始结构过程如下.

1) 设定采样光线及初始条件.

将 Eyebox 作为一个发光面,在该面上均匀设置  $m \times n$  个采样点,每个采样点出射一条光线作为采样光线,光线之间相互平行,每个采样点的位置都是已知的,作为初始条件,如图 2 所示.自由曲面 Q 上的第 1 个采样点  $Q_{11}$ ,自由曲面 M 上的第 1 个采样点  $M_{11}$  都是已知的,作为初始条件, $O'$  和  $O$  分别为虚拟像点和实际像点,这两个点的位置也是作为初始条件已知的,如图 3 所示.面 P 是挡风玻璃,设为平面,所有采样光线入射到 P 上面的交点都可以获得,采样光线经过 P 面反射后平行出射,这些平行光线的方向矢量也可计算出

来,这里设置为 $(\cos \alpha i, \cos \beta j, \cos \gamma k)$ .

2) 计算自由曲面上种子曲线的采样点.

由图 3 可以看出第一条光线路径为  $S_{11} \rightarrow P_{11} \rightarrow Q_{11} \rightarrow M_{11} \rightarrow O$ , 接下来主要是计算自由曲面  $Q$  和自由曲面  $M$  上面的第一条曲线. 首先来看自由曲面  $Q$ , 点  $Q_{11}$  是作为初始条件设置的, 接下来根据所有已知条件来求自由曲面  $Q$  上的第 2 点  $Q_{12}$ . 为了更好地描述计算过程, 这里规定  $P$  面上任意一点的坐标为  $(x_{p_{ij}}, y_{p_{ij}}, z_{p_{ij}})$ ,  $Q$  面上任意一点坐标为  $(x_{q_{ij}}, y_{q_{ij}}, z_{q_{ij}})$ , 虚像点  $O'$  坐标已知, 为  $(x_{o'}, y_{o'}, z_{o'})$ .

经过  $P$  面上的第一点  $P_{11}$  反射后的第一条采样光线  $r_{11}$  入射到  $Q_{11}$  点后, 经  $Q_{11}$  点反射后入射到虚像点  $O'$ , 如图 3 所示, 入射光线单位矢量  $\mathbf{r}'_{11} = \overrightarrow{P_{11}Q_{11}} / |\overrightarrow{P_{11}Q_{11}}|$  和出射光线单位矢量  $\mathbf{r}''_{11} = \overrightarrow{Q_{11}O'} / |\overrightarrow{Q_{11}O'}|$  均已知.

$$\mathbf{r}'_{11} = \frac{(x_{q11} - x_{p11})\mathbf{i} + (y_{q11} - y_{p11})\mathbf{j} + (z_{q11} - z_{p11})\mathbf{k}}{\sqrt{(x_{q11} - x_{p11})^2 + (y_{q11} - y_{p11})^2 + (z_{q11} - z_{p11})^2}}$$

$$\mathbf{r}''_{11} = \frac{(x_{o'} - x_{q11})\mathbf{i} + (y_{o'} - y_{q11})\mathbf{j} + (z_{o'} - z_{q11})\mathbf{k}}{\sqrt{(x_{o'} - x_{q11})^2 + (y_{o'} - y_{q11})^2 + (z_{o'} - z_{q11})^2}} \quad (1)$$

此时可由反射定律的矢量形式<sup>[13]</sup>求得点  $Q_{11}$  对应的法向量  $\mathbf{n}_{11}$ .

$$\mathbf{n}_{11} = \frac{\mathbf{r}''_{11} - \mathbf{r}'_{11}}{|\mathbf{r}''_{11} - \mathbf{r}'_{11}|} \quad (2)$$

过点  $Q_{11}$  的切平面表达式为

$$\mathbf{n}_{11} \cdot (X - x_{q11}, Y - y_{q11}, Z - z_{q11}) = 0 \quad (3)$$

第二个采样点  $Q_{12}$  可由第二条采样光线  $r_{12}$  与过点  $Q_{11}$  切平面的交点求得. 已知第二条光线的起点坐标  $P_{12}(x_{p12}, y_{p12}, z_{p12})$  及单位方向矢量  $\mathbf{r}'_2(\cos \alpha_2 \mathbf{i}, \cos \beta_2 \mathbf{j}, \cos \gamma_2 \mathbf{k})$ , 可求得其直线方程为

$$\frac{X - x_{p12}}{\cos \alpha_2} = \frac{Y - y_{p12}}{\cos \beta_2} = \frac{Z - z_{p12}}{\cos \gamma_2} \quad (4)$$

将式(3)和式(4)联立方程, 得到点  $Q_{12}$  的坐标为

$$(x_{q12}, y_{q12}, z_{q12}) = (x_{p12}, y_{p12}, z_{p12}) + \frac{\mathbf{n}_{11} \cdot (x_{q11} - x_{p12}, y_{q11} - y_{p12}, z_{q11} - z_{p12})}{\mathbf{n}_{11} \cdot \mathbf{r}'_{12}} \times \mathbf{r}'_{12} \quad (5)$$

以此类推, 点  $Q_{13}$  为采样光线  $r_{13}$  与点  $Q_{12}$  处切平面的交点, 因此可以构建相邻两个采样点之间的迭代关系如式(6).

$$Q_{1j} = P_{1j} + \frac{\mathbf{n}_{1j-1} \cdot (Q_{1j-1} - P_{1j})}{\mathbf{n}_{1j-1} \cdot \mathbf{r}'_{1j}} \times \mathbf{r}'_{1j} \quad (n \geq j \geq 2) \quad (6)$$

式中,  $\mathbf{r}'_{1j} = \overrightarrow{P_{1j}Q_{1j}} / |\overrightarrow{P_{1j}Q_{1j}}|$  为光线的入射单位矢量. 重复上述过程, 自由曲面  $Q$  上第 1 条曲线上的所有采样点  $Q_{1j}$  可全部计算出来, 即第一条种子曲线, 如图 4(a) 所示.

接着, 以第一条种子曲线为起点, 将采样光线  $r_{21}$  与点  $Q_{11}$  切平面的交点作为点  $Q_{21}$ , 将  $r_{22}$  与过点  $Q_{12}$  切平面的交点作为点  $Q_{22}$ , 不断重复此过程可得到第二条曲线上的采样点  $Q_{2j}$ . 采样光线入射到第二条曲线上的对应采样点后反射到虚像点  $O'$ , 这些采样点对应的法向量  $\mathbf{n}_{2j}$  及其切平面均可计算出来, 然后用第 3 行的任一条采样光线  $r_{3j}$  与过  $Q_{2j}$  点的切平面求交点, 即点  $Q_{3j}$ , 这样可以得到自由曲面  $Q$  上面的第 3 条采样曲线. 依照此原理, 已知第  $i-1$  条曲线上的采样点可扩展计算出第  $i$  条曲线上的采样点, 这样自由曲面  $Q$  上的点可全部计算出来, 如图 4(c) 所示.

同理, 可计算  $M$  镜上的所有采样点. 入射到  $Q$  镜上的采样光线经  $Q$  镜反射后入射到  $M$  镜上, 从  $Q$  镜出射的光线作为入射到  $M$  镜上的入射光线, 这些入射光线的起点和方向矢量都已经知道,  $M$  镜上的第 1 个采样点  $M_{11}$  也已经知道, 入射光线经过  $M$  点后反射到像点  $O$ , 根据这些条件, 利用计算自由曲面  $Q$  上采样点的

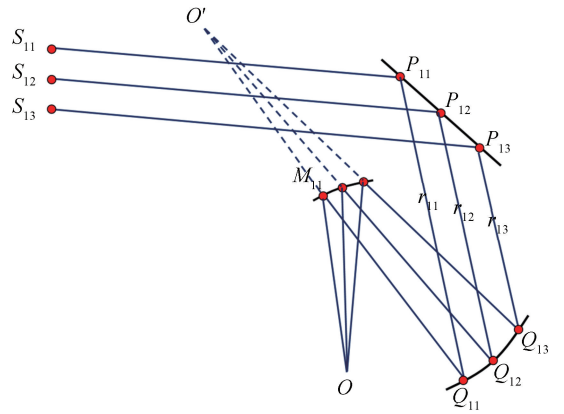


图 3 HUD 光学系统反射部分的 2D 视图  
Fig.3 2D view of reflective system of HUD

方法同样可以计算出自由曲面  $M$  上的所有采样点.

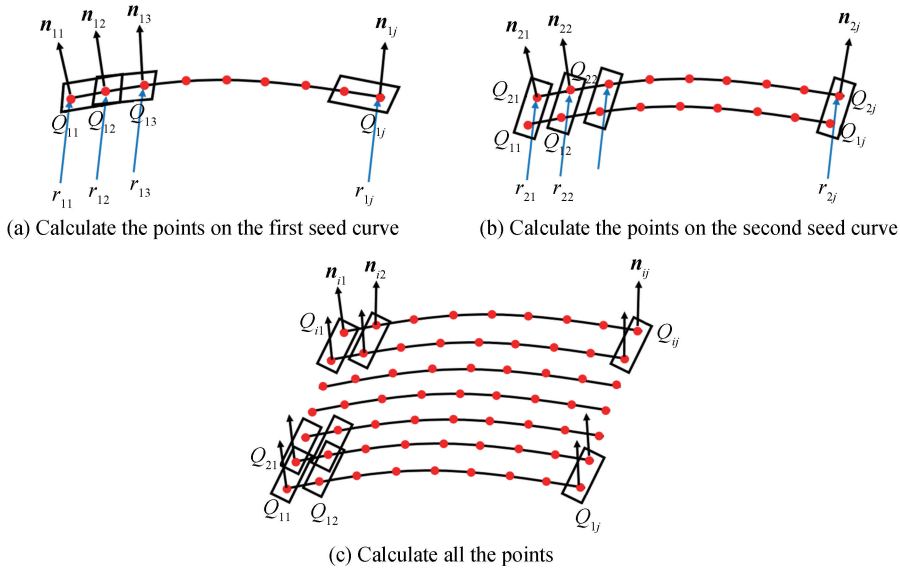


图 4 自由曲面上采样点的计算过程

Fig.4 The calculation of sample points on freeform surface

### 3) 自由曲面的拟合.

当获得两个自由曲面上的采样点后,需要将自由曲面上的采样点拟合成多项式,以便在光学设计软件中对自由曲面进一步优化,这里采用  $XY$  扩展多项式来表征自由曲面.由于整个 HUD 系统关于  $YOZ$  平面对称,故只保留  $XY$  多项式的偶次项,其表达式如式(7), $c$  为曲面的曲率, $k$  为圆锥系数, $A_i$  为多项式系数.拟合过程中使用了 Matlab 拟合工具箱对所求采样数据点进行自由曲面拟合,拟合的精度用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)来评价.

$$z = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2(x^2 + y^2)}} + A_2 y + A_3 x^2 + A_5 y^2 + A_7 x^2 y + A_9 y^3 + A_{10} x^4 + A_{12} x^2 y^2 + A_{14} y^4 + A_{16} x^4 y + A_{18} x^2 y^3 + A_{20} y^5 \quad (7)$$

## 2 HUD 光学系统设计结果分析

本节利用 1.2 节所述的方法对 HUD 光学系统进行设计优化,使其满足表 1 中给出的性能指标.

### 2.1 HUD 系统初始结构的设计

根据 1.1~1.2 节的内容,设计了 HUD 光学系统初始结构如图 5 所示,本系统 Eyebox 尺寸  $80 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ ,所在位置设置为孔径光阑,在实际构建过程中,为了使光线充满整个 Eyebox 范围,定义入瞳直径为  $90 \text{ mm}$ ,保证瞳孔在整个 Eyebox 范围内移动时,都能观察到清晰的表盘信息.初始结构设计时使用了单视场,假设物点来自无穷远处,故光线之间相互平行,初始视场设置为  $3^\circ$ .

首先讨论了采样点间隔不同对 HUD 光学系统初始结构性能的影响.在采样光线间隔分别为  $3 \text{ mm}$ 、 $1.5 \text{ mm}$ 、 $1 \text{ mm}$ 、 $0.5 \text{ mm}$ 、 $0.3 \text{ mm}$  以及  $0.1 \text{ mm}$ ,系统其它初始条件均不变的情况下,利用

1.2 节中的方法分别对这几种情况自由曲面采样数据点进行计算,并且对数据点进行拟合,最终得到自由曲面各项系数,将系数导入 Zemax 中对 HUD 系统初始结构进行光线追迹,不同采样点间隔所对应的 HUD 系

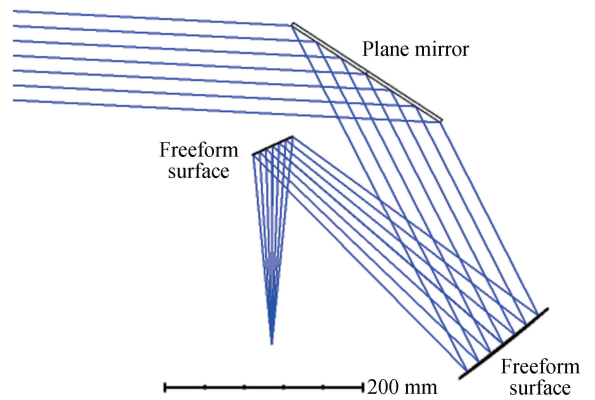


图 5 设计完成的 HUD 光学系统初始结构

Fig.5 The initial layout of HUD optical system

统的 MTF 如图 6 所示.

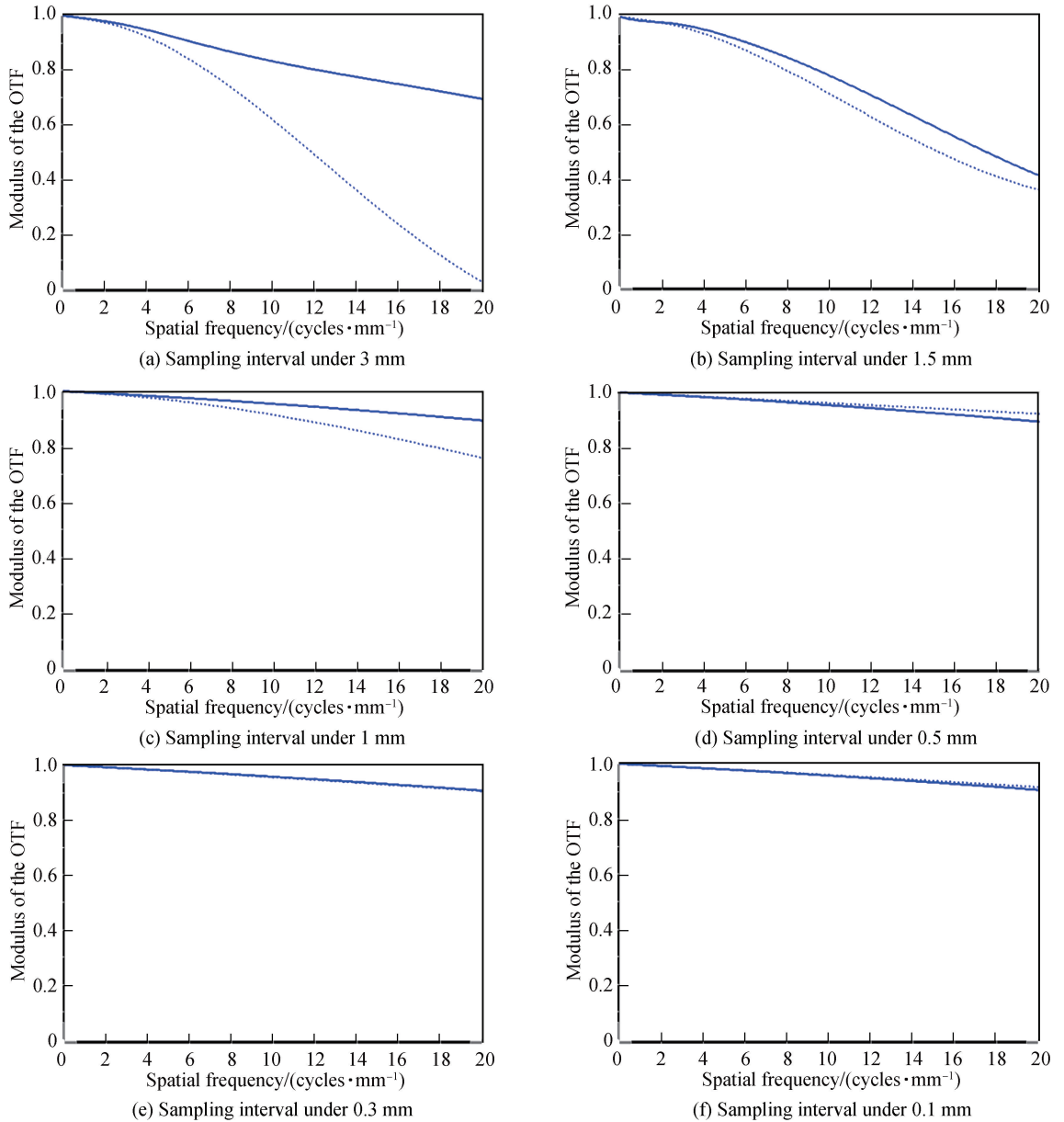


图 6 不同采样间隔下的 HUD 初始光学系统的 MTF 曲线

Fig.6 The MTF plots of the HUD initial optical layout at different sampling ray intervals

可以看出采样间隔大于 1 mm 时,采样间隔对光学系统的 MTF 影响比较大,这是因为采样间隔越大自由曲面构建精度越低,系统的性能越差.在 0.5 mm 采样间隔下,使用种子曲线扩展算法构建的 HUD 光学系统初始结构其 MTF 值在 20 lp/mm 下大于 0.9,已接近衍射极限,如图 6(d)所示,因此使用更小的采样间隔对 MTF 提升已经没有太大帮助还会增加计算时间.图 6(e)和图 6(f)为采样间隔低于 0.5 mm 时对应的系统 MTF 曲线,可以看出,两个系统的 MTF 值相较于 0.5 mm 时只是发生了细微的变化,对整体像质的提升没有太大帮助,因此,使用 0.5 mm 的采样间隔足以满足设计要求.论文中的 HUD 光学系统初始结构以 0.5 mm 光线采样间隔设计,设计完成的初始结构的点列图如图 7(a),点列图 RMS 半径为  $2.452 \mu\text{m}$ ,并且系统畸变小于 1%,如图 7(b).从结果可以看出,利用 1.2 节所述的方法构建出的 HUD 系统初始结构具有良好的光学性能.初始结构是针对单视场设计的,HUD 光学系统工作的全视场  $6^\circ \times 3^\circ$ ,因此需要进一步优化,目前的初始结构有不错的光学性能,可以作为下一步的优化起点.

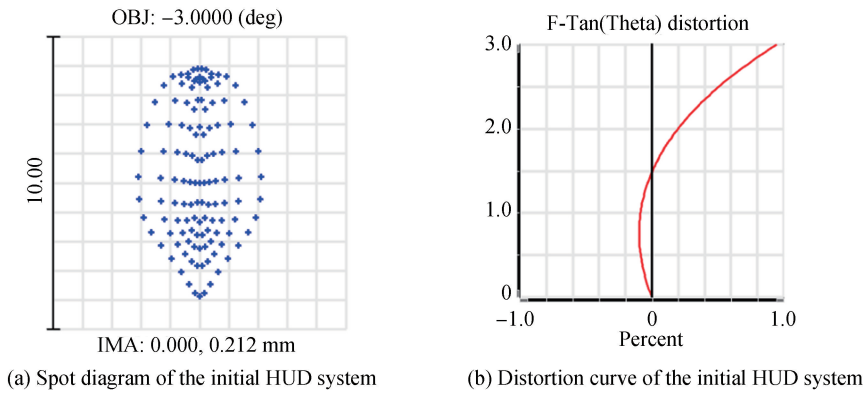


图7 HUD初始系统的点列图和畸变曲线

Fig.7 Spot diagram and distortion curve of the initial HUD system

## 2.2 HUD光学系统的优化

对2.1节构建的HUD初始系统加入全视场 $6^\circ \times 3^\circ$ ,在光学设计软件中做进一步的优化,VID设置为2.5 m,视场角和VID共同决定了虚像尺寸,它们之间的关系为

$$W = 2 \times L \times \tan\left(\frac{F_H}{2}\right) \quad (8)$$

$$H = L \times [\tan(F_{V_{MAX}}) - \tan(F_{V_{MIN}})] \quad (9)$$

式中, $W$ 为虚像宽度, $H$ 为虚像高度, $L$ 为虚像视距, $F_H$ 为X向视场角大小, $F_{V_{MAX}}$ 和 $F_{V_{MIN}}$ 分别为Y向视场角的最大值和最小值。

根据式(8)、(9)可计算出虚像尺寸为 $260 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$ ,该尺寸设计合理,不会因图像过大影响对路况信息的获取,也不会因过小引起视觉疲劳.将虚拟图像和仪表盘的位置分别设置为物面和像面,最终优化得到的HUD光学系统如图8所示.可以看出该系统结构紧凑,并且系统的孔径覆盖了整个Eyebox区域,保证了瞳孔在眼动范围内移动时,都能观察到清晰的仪表盘信息。



图8 优化后的HUD光学系统

Fig.8 The optimized HUD optical system

对全视场HUD光学系统的成像质量进行评估,本系统图像源尺寸 $75 \text{ mm} \times 42 \text{ mm}$ ,分辨率为 $854 \times 480$ ,可以计算出像元尺寸约为 $0.0878 \text{ mm}$ ,则光学系统的极限分辨率 $f$ 为

$$f = \frac{1}{2 \times p} \quad (10)$$

式中, $p$ 代表像元尺寸。

由此可计算出HUD系统的极限分辨率约为 $6 \text{ lp/mm}$ ,图9为该系统在各个视场下的点列图,其RMS半径在 $7.184 \sim 10.727 \mu\text{m}$ 范围内波动,并且MTF值在 $6 \text{ lp/mm}$ 下大于 $0.9$ ,接近衍射极限,如图10所示。

本系统以Eyebox作为孔径,若将人眼瞳孔替换为孔径光阑,用多重结构<sup>[14]</sup>模拟人眼在Eyebox内9个测试位置处的观察情形,如图11(a)所示,红色圆圈代表瞳孔,在优化好的HUD光学系统中加入多重结构模拟人眼观察挡风玻璃外的虚像情况,如图11(b)所示。

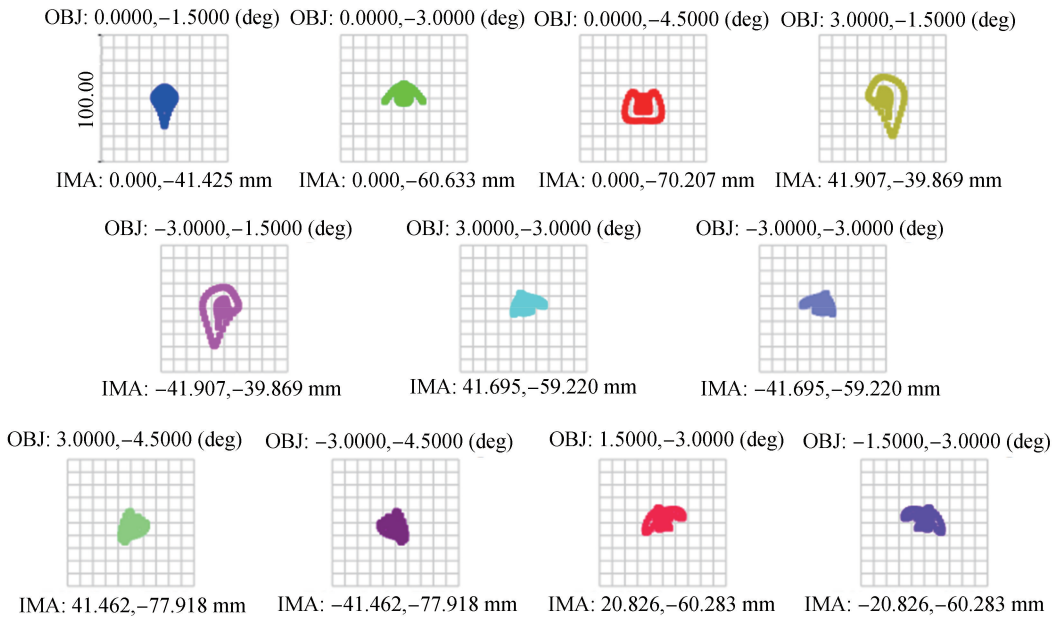


图9 优化后的 HUD 光学系统点列图

Fig.9 Spot diagram of HUD optical system after optimization

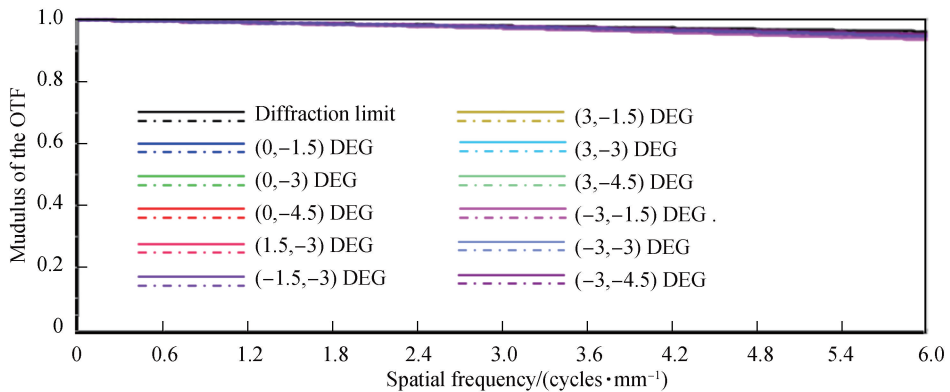


图10 优化后的 HUD 光学系统 MTF 曲线

Fig.10 The MTF plot of the final HUD optical system

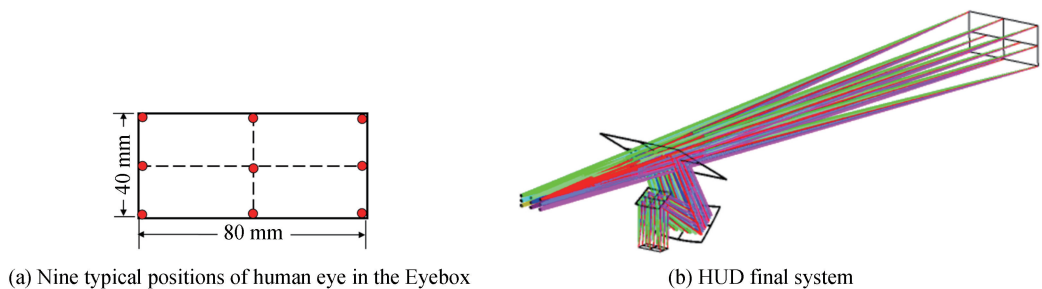


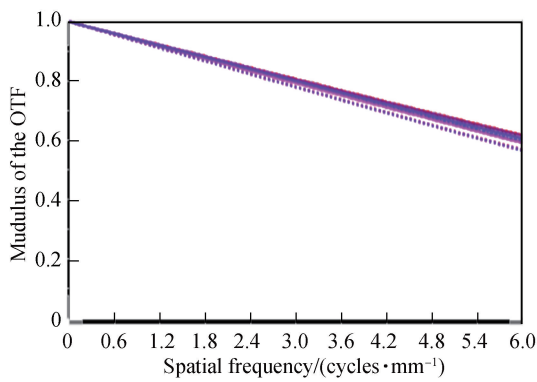
图11 多重结构下的 HUD 光学系统

Fig.11 HUD optical system with multi-configurations

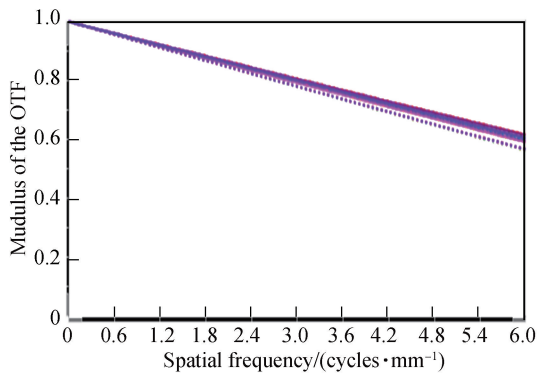
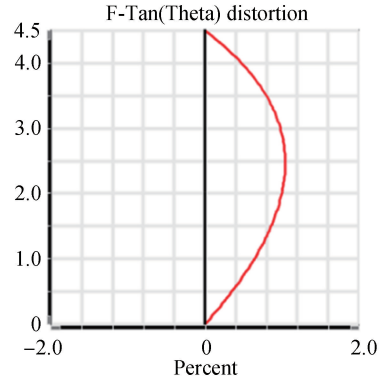
根据光线追迹结果,分析人眼在 Eyebox 内的各个测试位置处的观察情况,其 MTF 值在 6 lp/mm 均高于 0.5,都已经接近衍射极限.此外,该系统在任意视场下的畸变均小于 2%,图 12 为人眼位于 Eyebox 中心以及四个顶点这 5 个典型位置处对应的 MTF 及畸变曲线,由于整个系统关于 YOZ 平面对称,故孔径光阑在左上角和右上角位置时具有相同的成像质量,同样,左下角和右下角也具有相同的像质.由图 12(a)~12(c)可以看出,人眼位于其他测试点位置对应的 MTF 和畸变均与中心点位置差别不大.这些结果表明,该



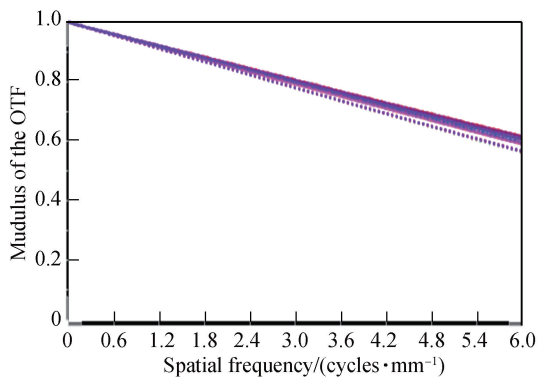
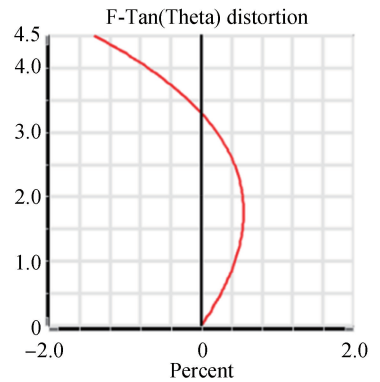
HUD 光学系统的成像质量满足人眼视觉观察的要求,且在 Eyebox 内任意位置处的畸变较小.



(a) MTF plot and distortion curve at the center of the Eyebox



(b) MTF plot and distortion curve at the upper left and right corner of the Eyebox



(c) MTF plot and distort MTF plot and distortion curve at the upper left and right corner of the Eyebox

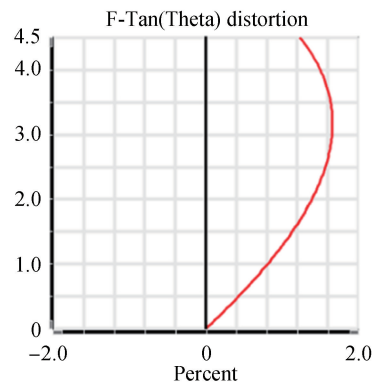


图 12 人眼位于 Eyebox 内五个典型位置处的 MTF 图和畸变曲线

Fig.12 MTF plots and distortion curves of human eyes at five typical positions in Eyebox

驾驶员在实际行驶过程中,其眼动范围不一定局限于一个平面内,由于车速或者外界因素的影响,人的头部难免会发生前倾或后仰,并且,由于不同驾驶员体型的差异,可能需要对座椅进行前后调整,而前后位置的变化,会直接影响人眼所观察到的图像的清晰度.本节通过改变 Eyebox 的前后位置来模拟驾驶员在车内的前后移动情况.分析 Eyebox 移动后人眼位于各测试点位置时的成像质量,图 13(a)和 13(b)分别为 Eyebox 向前移动 70 mm 和向后移动 70 mm 后成像质量相对较差的测试点位置所对应的 MTF 和畸变曲线.

可以看出, Eyebox 向前移动 70 mm 时,人眼位于各测试点位置时对应的 MTF 在 6 lp/mm 下均高于 0.5,最差位置处畸变有所增大,但仍控制在 2% 以内.当 Eyebox 向后移动 70 mm 时,人眼位于 Eyebox 左下角和右下角处的成像质量最差,最大视场的 MTF 值下降到 0.3,其余视场均高于 0.5,系统畸变小于 2%.因此,在 Eyebox 沿光轴前后移动的 140 mm 范围内,系统的成像质量基本满足人眼观察的要求.

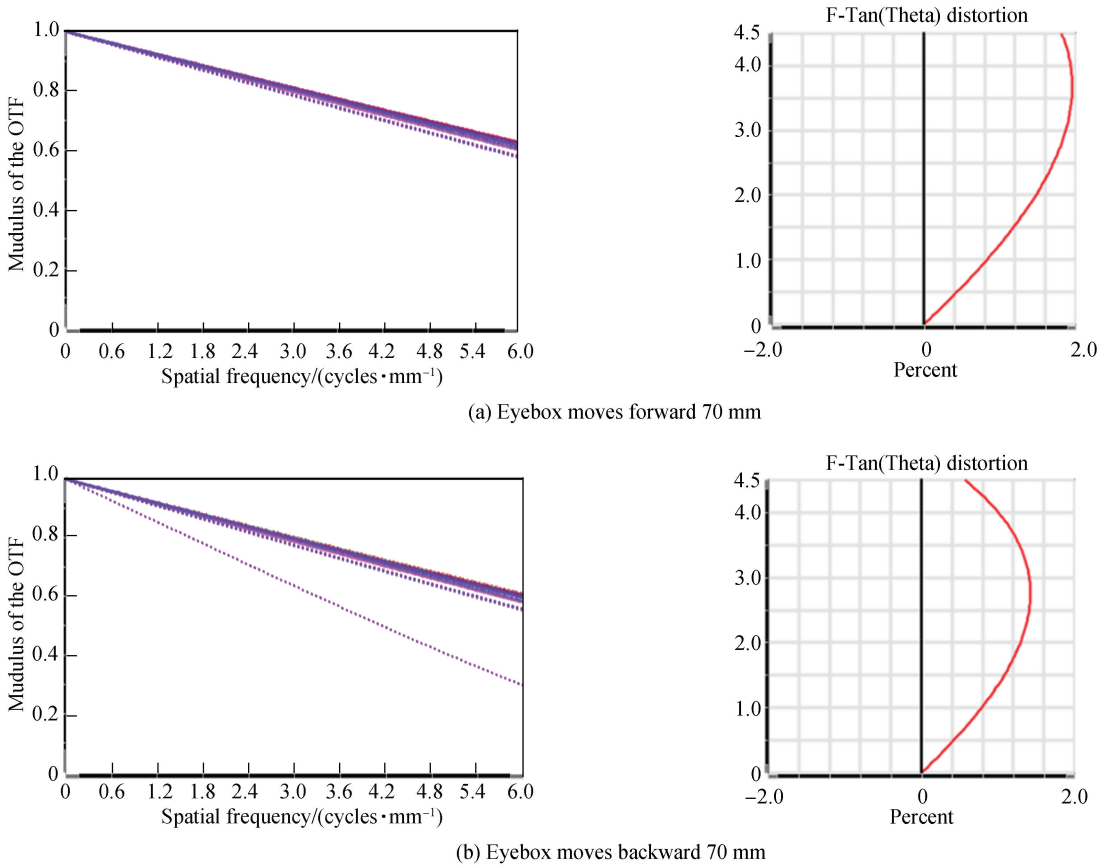


图 13 Eyebox 前后移动 70 mm 时成像质量最差的位置对应的 MTF 图和畸变曲线

Fig.13 MTF plots and distortion curves corresponding to the positions with the worst image quality when the Eyebox moves forward and backward by 70 mm

### 2.3 HUD 光学系统的自由曲面加工公差分析

光学面在加工过程中的加工误差是不可避免的,自由曲面是非旋转对称的曲面,加工难度更大,因此对其进行加工公差分析更加重要.公差中自由曲面面形公差是指实际加工后的面形与理想面形之间的差异,加工误差会引起 HUD 光学系统的成像质量下降<sup>[15-16]</sup>.因此需要对自由曲面面形精度进行公差分析,确定可容许的加工误差范围.商用的光学设计软件如 Zemax、Code-V 等可对一些传统面形如球面,非球面进行公差分析,并且已经比较成熟了,但是对于自由曲面的公差分析还存在一定的局限性.本文采用随机统计的方法利用 MATLAB 辅助编程与 Zemax 联合分析对自由曲面面形进行公差分析.

对于优化后的 HUD 光学系统中的两个自由曲面,其中任一自由曲面方程  $z = f(x, y)$  已知,在自由曲面上均匀选取多个数据点,任一点的矢高为  $z_{i,j}$ ,在这些矢高的基础上加入一组随机变量  $\Delta z_{i,j}$ ,模拟加工过程中产生的面形误差,最终这些点的实际矢高  $z'_{i,j}$  为

$$z'_{i,j} = z_{i,j} + \Delta z_{i,j} \tag{11}$$

式中,

$$\Delta z_{i,j} = H \times \text{rand} \tag{12}$$

式中,  $H$  为面形误差峰谷 (Peak Value, PV) 值,它是衡量面形精度的重要指标,rand 代表 0~1 区间的随机数.

当自由曲面上的数据点引入随机误差后,将这些含有误差的数据点重新拟合表征自由曲面的多项式 (7),输出自由曲面各项系数.最终,将含有加工误差的自由曲面光学系统进行光线追迹观察其 MTF 的变化情况.

对优化后 HUD 光学系统中的两个自由曲面分别进行面形公差分析,分析面形误差 PV 值  $H$  的变化对最终系统 MTF 的影响,针对两个自由曲面分别进行了公差分析,以 MTF 不低于 0.3 为评价标准,最终确定

的第一个自由曲面面形精度 PV 为  $0.42 \mu\text{m}$ ,接近一个波长( $\lambda$  取主波长  $0.486 \mu\text{m}$ ),第二个曲面的 PV 值等于  $0.62 \mu\text{m}$ ,大于一个波长,目前的加工水平可以在这一公差要求下加工.图 14 为两个曲面在其各自面形公差 PV 分别为  $0.42 \mu\text{m}$  和  $0.62 \mu\text{m}$  下的,随机 8 组公差下的 MTF 数据,其调制传递函数在  $6 \text{ lp/mm}$  下均高于 0.3,可见自由曲面面形精度公差分析合理.

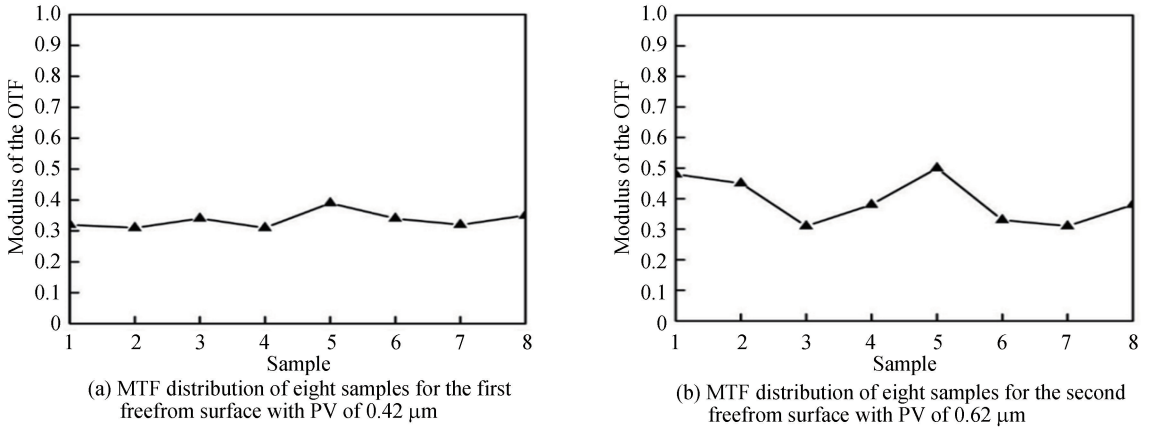


图 14 两个自由曲面在其 PV 值下的 8 组样本的 MTF 分布

Fig.14 MTF distributions of eight samples of two freeform surfaces under their PV values

### 3 结论

本文设计了一款离轴自由曲面 HUD 光学系统,该系统由挡风玻璃和两个自由曲面反射镜组成.首先利用种子曲线扩展算法直接计算出两个自由曲面上的采样数据点,并拟合成扩展多项式,将直接设计好的两个自由曲面与挡风玻璃作为 HUD 光学系统的初始结构,该初始结构具有良好的光学性能,可作为进一步优化的起点.通过进一步优化,在全视场范围内,系统的各项成像性能均能满足设计要求,设计指标 Eyebbox 大小  $80 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ ,虚像尺寸在距人眼  $2.5 \text{ m}$  处是  $260 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$ ,符合设计要求.加入多重结构,将人眼替换为系统孔径,对其在 Eyebbox 内的不同位置进行仿真分析,分析结果表明,人眼在可视范围内移动时,各视场下的 MTF 值在  $6 \text{ lp/mm}$  下均高于 0.5,接近衍射极限,且畸变小于 2%,几乎看不到图像的失真.改变 Eyebbox 的位置,在沿光轴前后移动的  $140 \text{ mm}$  范围内,人眼位于各测试点位置处的系统 MTF 值均高于 0.3,基本满足视觉观察要求.最后,对 HUD 系统中的自由曲面反射镜进行面形精度公差分析,确定了各曲面的加工误差容限,表明了该 HUD 光学系统具有很好的实用价值.

### 参考文献

- [1] WANG Rui, JIANG Lun, SONG Zhi-hua. Optical design of ensemble head-up display system based on mini-projector [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, **55**(11): 424-430.  
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):424-430.
- [2] CHEN Fang, CUI Xiao-qiang, LI Sheng-hui. HUD miniature projection display optical system design 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.
- [3] 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.
- [4] HU Yu. Investigation on the automotive head-up displaysystem[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.  
胡宇.车载抬头显示器系统的研究[D].武汉:武汉理工大学,2012.
- [5] CHENG Ying. Study on design and application of freeformoptics[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.  
程颖.光学自由曲面设计方法及应用研究[D].天津:天津大学,2013.
- [6] LI Xu-yang, NI Dong-wei, YANG Ming-yang, et al. Design of large field of view space camera optical system based on freeform surfaces[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(9): 142-150.  
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):142-150.
- [7] WANG Xing. The study of automobile head up display optical systemtechnology[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.  
王兴.车载平视显示光学系统技术研究[D].长春:长春理工大学,2014.
- [8] WEI S, FAN Z, ZHU Z, et al. Design of a head-up display based on freeform reflective systems for automotive

- applications[J]. *Applied Optics*, 2019, **58**(7): 1675-1681.
- [9] GONG Dun, WANG Hong. Optical design of large field and low distortion coaxial three mirror system with free-form surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(7): 198-204.  
巩盾,王红. 含有自由曲面的大视场低畸变同轴三反射光学系统设计[J]. *光学学报*, 2014, **34**(7): 198-204.
- [10] KIM B H, PARK S C. Optical system design for a head-up display using aberration analysis of an off-axis two-mirror system[J]. *Current Optics and Photonics*, 2016, **20**(4): 481-487.
- [11] PAN Hong-xiang, SU Zhou-ping, ZHANG Yang-liu, *et al.* Construct freeform surface directly in an initial layout of an off-axis reflective image system by seed curve extension and simulated annealing algorithm[J]. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 2020, **16**(1): 1-9.
- [12] HUANG Xing-zhou, HU Shi-jie, TANG Guo-mao, *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.
- [13] SU Zhou-ping. Design methods for non-imaging optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2017.  
苏宙平. 非成像光学系统设计方法与实例[M]. 北京: 机械工业出版社应用光学, 2017.
- [14] WANG Dong-ping. Investigation on the automotive head-up displays 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.
- [15] SHI Guang-yuan. Gaussian beam shaping based on aspheric cylindrical lens[D]. Tianjing: Tianjing University of Technology, 2014.  
史光远. 基于非球面柱透镜的高斯光束整形[D]. 天津: 天津理工大学, 2014.
- [16] LIU Xian-lei, ZHANG Xiao-dong, XU Hang-yu, *et al.* Machining error analysis of freeform surface off-axis three-mirror system based on optical performance evaluation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(8): 191-199.  
刘现磊,张效栋,徐航宇,等. 基于光学性能评价自由曲面离轴三反系统加工误差分析[J]. *光学学报*, 2017, **37**(8): 191-199.