

基于消像散反射面的离轴虚像系统设计

赵渊明, 崔庆丰, 朴明旭, 赵丽东

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 为了解决离轴虚像系统中像散对清晰度的影响问题,提出了一种在全视场范围内消像散的反射面设计思路,并给出了基于微分方程的消像散反射面的设计算法。设计的消像散面型可以有效地校正系统各视场的像散,减小弥散斑尺寸。将消像散面型应用在视场为 $60^\circ \times 40^\circ$ 的离轴虚像系统中,各视场弥散斑半径均小于艾里斑半径。将采用消像散反射面的设计结果与相同参数下采用球面和轮胎面时进行对比,可以发现,在采用消像散反射面的设计结果中,弥散斑均方根半径和像散绝对值小于全视场范围内采用球面时的 20%,且小于边缘视场内采用轮胎面时的 20%。

关键词 几何光学; 光学设计; 消像散反射面; 离轴虚像系统

中图分类号 O435 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1008001

Design of Off-Axis Virtual System Based on Anastigmatic Reflection Surface

Zhao Yuanming, Cui Qingfeng, Piao Mingxu, Zhao Lidong

*School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract In order to solve the problem of astigmatism which affects the clarity in virtual system, a type of reflection surface design is put forward for astigmatism correction in the full field, and the design algorithm of the anastigmatic reflection surface based on differential equations is presented. The designed anastigmatic surface can correct astigmatism at each field of view effectively and decrease the size of dispersion spot. An astigmatic surface is applied in the off-axis virtual display system with the field of view of $60^\circ \times 40^\circ$, and the radius of dispersion spot at each field of view is less than that of the Airy disk. The design results of the anastigmatic reflection surface are compared with the results designed by a spherical and a toroidal surface with the same parameters. It is found that the root mean square radius of dispersion spot and the absolute value of astigmatism designed by anastigmatic reflection surface are less than 20% of the result designed by a spherical reflective surface at the full field, and they are less than 20% of the result designed by a toroidal reflective surface at the margin field.

Key words geometric optics; optical design; anastigmatic reflection surface; off-axis virtual system

OCIS codes 080.4035; 220.1000; 080.6755

1 引 言

离轴虚像显示系统常用于驾驶舱模拟、头盔显示器、虚拟现实等,其主要特点是纵深感强,让观察者有身临其境的感觉^[1-3]。离轴虚像显示系统主要由投影系统、投影屏、反射镜组成。其工作原理为:投影系统将计算机生成的图像投影在投影屏上,而投影屏上的图像经过反射镜反射后所形成的虚像被人眼观察。

对于离轴虚像视景系统,由于系统相对孔径小,球差、慧差对系统成像质量影响小,主要影响成像清晰度

收稿日期: 2017-05-04; **收到修改稿日期:** 2017-06-05

基金项目: 国家重大科技专项高分专项(51-H34D01-8358-13/16)

作者简介: 赵渊明(1989—),男,博士研究生,主要从事光学设计和自由曲面方面的研究。E-mail: yming_zhao@sina.com

导师简介: 崔庆丰(1954—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光学设计和衍射光学等方面的研究。

E-mail: qf_cui@163.com(通信联系人)

的像差为像散。过去,此类系统中的反射镜面型通常为球面^[4-5],像散无法得到很好地校正。为了校正像散,反射镜的面型可以采用轮胎面^[6]。由于轮胎面在子午方向和弧矢方向有独立的曲率半径,因此轮胎面可以完全校正单一视场的像散,能在一定程度上减小弥散斑尺寸。然而,轮胎面自由度不高,对边缘视场的像散校正能力有限,导致边缘视场弥散斑过大,各视场成像质量的差异也容易引起观察者眩晕。

与轮胎面相比,自由曲面和高次非球面可以提供更多的自由度来校正像散。已知的自由曲面和非球面设计方法主要分为两种,一种是用特定的多项式来表达面型矢高,多项式系数通过光学设计软件直接优化得到,例如 X-Y 多项式^[7-8]、泽尼克多项式^[9]、径向基函数^[10-11]以及 Q-type 多项式^[12-13]等。另一种则是直接求取面型,求取的方法有复合笛卡尔卵形线法^[14]、同时多曲面(SMS)方法^[15]、Wasserman-Wolf 微分方程法^[16]等。其中,SMS方法和 Wasserman-Wolf 微分方程法是同时计算多个非球面的方法,但能计算的视场数量有限。例如,采用两片自由曲面的 SMS 方法,只能同时对两个视场点进行计算,Wasserman-Wolf 微分方程法则更适用于只有轴上光线的系统。而笛卡尔卵形线法只能在子午面满足多个视场完善成像,因此不具备消像散的能力。本文通过对柯丁顿方程的进一步推导,分析了全视场消像散反射面的特性,提出了一种消像散面型的直接设计理论,并给出了基于求解微分方程的消像散反射镜设计算法。设计的消像散面型适用于具有较小相对孔径的大视场系统,并且能够根据需要同时对任意多视场进行计算,对全视场范围内的像散进行校正。其设计的结果可以直接应用于离轴虚像系统的设计,也可作为初始结构的进一步优化设计。

2 消像散面型设计原理

2.1 轴外细光束消像散理论

像散产生的根本原因:在轴外视场,光学系统在弧矢方向和子午方向的聚焦能力不同,从而导致弧矢焦面和子午焦面不重合。

在单片反射镜系统中,轴外物点细光束弧矢焦点位置和子午焦点位置可由柯丁顿方程来计算^[17]

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' \cos i' - n \cos i}{r_s}, \quad (1)$$

$$\frac{n' \cos^2 i'}{t'} - \frac{n \cos^2 i}{t} = \frac{n' \cos i' - n \cos i}{r_t}, \quad (2)$$

式中 s' 和 s 分别为弧矢像距和弧矢物距, t' 和 t 分别为子午像距和子午物距, i 和 i' 为主光线在反射面的入射角和反射角, n 和 n' 为入射介质和反射介质的折射率, r_t 和 r_s 为反射面在主光线入射点位置的子午方向和与子午方向垂直的法截面方向的两个主半径。

对于反射面,有: $n = -n' = 1, i = -i', s = t$,为了消除像散,需要令 $s' = t'$,由(1)和(2)式可得

$$r_t = \frac{r_s}{\cos^2 i}, \quad (3)$$

即对于轴外细光束,当主光线在反射面的入射位置两个主曲率半径满足(3)式时,就能够在该入射位置对应的视场达到消像散效果。基于前面的推导,如果存在一个反射面在各视场均满足(3)式时,即可在全视场消像散。因此,可以根据这个特性设计旋转对称的消像散反射面。

2.2 消像散反射面设计算法

假设子午面所在的平面为 Y-Z 坐标系,垂直方向为 Y 方向,水平方向为 Z 方向,垂直于子午面的方向为 X 方向,面型由 Z 方向的矢高表达式定义。

图 1(a)为旋转对称反射面成像光路示意图, M 点为子午线上任意一点, α 为 M 点处法线与旋转轴夹角, d 为 M 点与旋转轴之间的距离, E 点为光瞳中心位置,成像细光束的主光线从光瞳中心入射,经 M 点反射, i 为该点的入射光线和法线的夹角, θ 为视场角。图 1(b)为对应的反射面立体结构示意图,弧线 PMN 为反射面的子午线,弧线 AMB 为反射面 M 点处与子午线垂直的法截线, MO 为反射面在 M 点处的法线,同时也是弧线 PMN 和 AMB 的公共法线, O 点为 MO 和旋转轴的交点, D 点为 M 点所在位置的旋转中心,则 $\angle MOD$ 即为 $\angle \alpha$, MD 长度即为 d 。对于旋转面而言,过垂直于子午面的法截线的曲率圆心应该在旋转轴上^[18],因此, O 点为弧线 AMB 在 M 点处的曲率圆心, MO 为弧线 AMB 在 M 点处的曲率半径,即 r_s 。则 M

点处的垂直于子午面的法截线半径和旋转半径之间的关系可以表示为

$$r_s = \frac{d}{\sin \alpha} \quad (4)$$

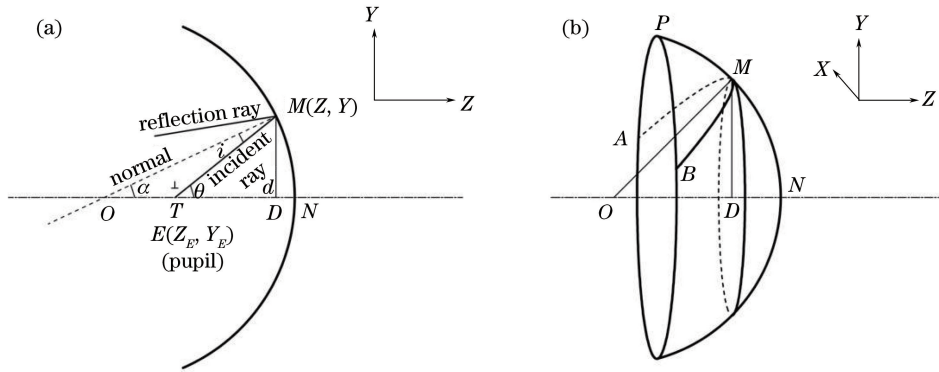


图 1 消像散原理图。(a)二维示意图;(b)三维示意图

Fig. 1 Principle of astigmatism. (a) 2D schematic diagram; (b) 3D schematic diagram

结合(3)式,可以得到当旋转对称反射面在任一点对成像细光束的像散完全矫正时,其母线在该点位置的子午半径和旋转半径之间的关系为

$$r_t = \frac{d}{\sin \alpha \cos^2 i} \quad (5)$$

因此可以得出结论,满足(5)式的旋转对称反射面即可在全视场范围内校正像散。

假设 M 点坐标为 (Z, Y) , E 点坐标为 (Z_E, Y_E) , 则旋转半径可以表示为

$$d = Y - Y_E, \quad (6)$$

代入(5)式可得

$$r_t = \frac{Y - Y_E}{\sin \alpha \cos 2i}, \quad (7)$$

式中 $i = \theta - \alpha$, $\theta = \begin{cases} \arctan\left(\frac{Y - Y_E}{Z - Z_E}\right), \theta \leq 90^\circ \\ \arctan\left(\frac{Y - Y_E}{Z - Z_E}\right) + 180^\circ, \theta > 90^\circ \end{cases}$, $\alpha = \begin{cases} \arctan Z', a \leq 90^\circ \\ \arctan Z' + 180^\circ, a > 90^\circ \end{cases}$, 其中 Z' 为 Z 关于 Y 的

函数的一阶导数。

将 i 和 α 的值(以 $\alpha, \theta < 90^\circ$ 时的情况为例)代入(7)式后,可得

$$r_t = \frac{Z - Z_E}{\sin(\arctan Z') \cos 2 \left[\arctan\left(\frac{Y - Y_E}{Z - Z_E}\right) - \arctan Z' \right]} \quad (8)$$

此外, r_t 又可以用 Z 关于 Y 的一阶导数 Z' 和二阶导数 Z'' 表示^[19]

$$r_t = \frac{(1 + Z'^2)^{\frac{3}{2}}}{|Z''|} \quad (9)$$

联立(7)和(8)式,可得

$$|Z''| = \frac{\sin(\arctan Z') \cos 2 \left[\arctan\left(\frac{Y - Y_E}{Z - Z_E}\right) - \arctan Z' \right] (1 + Z'^2)^{\frac{3}{2}}}{Z - Z_E} \quad (10)$$

假定光瞳中心坐标 (Z_E, Y_E) 为常量,则(10)式即为只包含 Z, Z', Z'', Y 的微分方程。给定初始点坐标 (Z_1, Y_1) , 初始点法线方向(即斜率 Z'_1), 斜率增量 $(\Delta Z')$, 迭代求解;并在求解过程中不断计算视场角 θ 的大小,当 θ 超过规定范围就停止计算,就可以得到一系列满足要求的数值解。初始值可以根据相关初始参数(例如初始位置两个主半径或光焦度以及视场角等)进行确定。

对于微分方程(10)式,其中一种求解方法如下:

- 1) 将初始值 Y_1, Z_1, Z'_1 代入方程, 可以得到 Z''_1 ;
- 2) 取斜率增量 $\Delta Z'$ 为常数, 由 $Z''_1 = (\Delta Z' / \Delta Y_1)$ 可以求得 ΔY_1 , 由 $Z'_1 = (\Delta Z_1 / \Delta Y_1)$ 求得 ΔZ_1 ;
- 3) 由上述结果则可以得到 $Y_2 = Y_1 + \Delta Y_1, Z_2 = Z_1 + \Delta Z_1, Z'_2 = Z'_1 + \Delta Z'$, 即得到新一组初始值 Y_2, Z_2, Z'_2 ;
- 4) 重复上述过程, 同时计算对应的视场角 θ , 当 θ 超出规定范围时, 停止计算, 这样就可以求得一系列满足方程的数值解。

在上述微分方程数值解中, 包含一系列满足要求的点坐标, 对这些点进行拟合就可以得到所求反射面的母线。将母线绕着光轴旋转, 就可以得到所求的旋转对称消像散反射面。

3 在离轴虚像系统中应用实例

3.1 系统模型

图 2(a) 为一个水平视场为 $60^\circ (\pm 30^\circ)$ 、垂直视场为 $40^\circ (\pm 20^\circ)$ 的视觉显示系统示意图^[20], 该系统包含投影模块和虚像显示模块。其中, 1 为投影镜头, 2 为曲面漫反射屏, 3 为反射镜, 4 为眼瞳所在区域。投影镜头将圆环状像源的一部分投影到漫反射屏幕上, 再通过反射镜形成虚像, 被人眼观察。

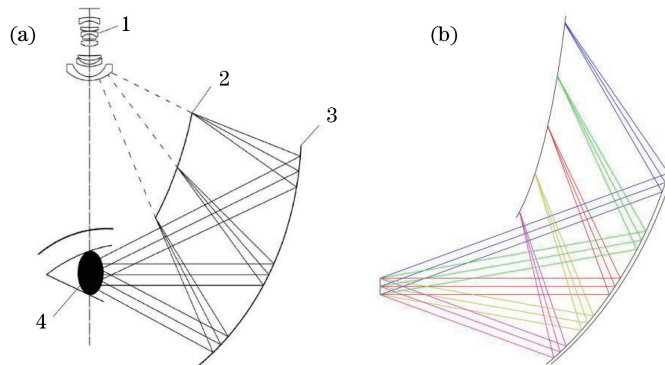


图 2 (a) 视觉显示系统示意图; (b) 虚像显示模块光路图

Fig. 2 (a) Schematic diagram of visual display system; (b) optical path diagram of virtual display module

采用显示系统虚像显示模块的光学系统作为设计实例, 反射镜 3 的面型采用旋转对称消像散面型设计, 其旋转轴过光瞳位置, 并垂直于水平视场方向。图 2(b) 为采用消像散反射面的虚像显示系统的光路图, 其设计参数如表 1 所示。

表 1 虚像显示系统参数

Table 1 Parameters of visual display system

Parameter	Specification
Wavelength	Visible spectrum
Field of view	$60^\circ \times 40^\circ$
Pupil diameter	3 mm
Active area	10 mm
Tilt of reflector	90°
Eye relief	100 mm

3.2 面型导入

对于上述目视系统, 采用“倒追光路”的方法进行设计, 即以眼瞳为入瞳, 以散射屏为像面, 逆向追迹光路, 最终评价散射屏上的像质。此时, 需要将设计的消像散面型导入到光学设计软件中, 搭建光路。

在该系统中, 由于水平各视场相对于眼瞳位置中心对称, 因此, 反射镜的旋转轴通过光瞳中心, 并与水平视场垂直。此时, 入射光束有可能通过旋转反射面的“超半球”位置。此时面型不再以传统非球面的表达式来定义。这里, 定义水平向右方向为 Z 轴, 面型将以 Z 方向为面型矢高方向来表达。

通过对 2.2 节中求得的微分方程数值解中的一系列点坐标进行拟合, 就可以得到面型母线的表达式。母线的 Z 方向矢高表达式 $Z_0(y)$ 以 y 的多项式表示

$$Z_0(y) = a_0 + a_1y^1 + a_2y^2 + a_3y^3 + \dots \quad (11)$$

式中 $a_0, a_1, a_2, a_3, \dots$ 为多项式系数, 当反射面母线矢高表达式用 6 次多项式表示时, 其各项系数如表 2 所示。

表 2 拟合多项式系数

Table 2 Coefficients of the fitting polynomial

Coefficient	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
Value	0	0.568	-8.311×10^{-3}	7.304×10^{-5}	-1.368×10^{-6}	3.668×10^{-8}	-5.275×10^{-10}

如果, 定义反射面上零视场点位置为坐标原点 ($X, Y, Z=0$), 则面型矢高可以表示为

$$Z = \sqrt{(Z_0(y) + d_0)^2 - X^2} - d_0 \quad (12)$$

式中 d_0 为零视场主光线入射点到入瞳中心的距离。

在导入矢高表达式(12)所描述的面型时, 可以采用 Zemax 软件提供的用户自定义面型(UDS)功能^[21], 根据矢高表达式(12)将面型编译为动态链接库(DLL)文件, 再被 Zemax 软件调用。

3.3 设计结果

离轴虚像系统的设计结果一般用分辨率来评价, 而分辨率大小可以通过弥散斑尺寸的均方根(RMS)值计算, 该系统各视场的弥散斑图样如图 3 所示。由图 3 可知, 系统各视场的弥散斑尺寸大小相对均匀, 且半径均小于艾里斑半径。在相同尺寸参数下, 将采用消像散面反射镜的设计结果的弥散斑的均方根值与采用球面或轮胎面反射镜的设计结果进行对比, 对比图如图 4 所示。可以发现, 采用消像散面的设计结果, 其像质明显优于采用球面和轮胎面设计的系统, 其弥散斑半径均方根数值在全视场范围内比采用球面时小 20% 以上, 在边缘视场, 比采用轮胎面时小 20% 以上。

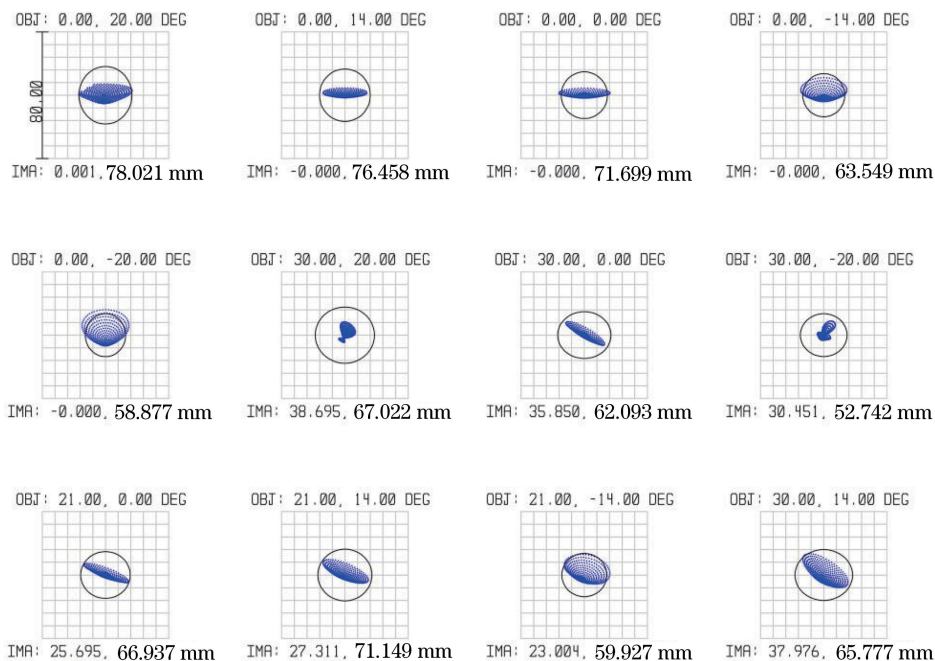


图 3 各视场弥散斑图

Fig. 3 Spot diagram of each field of view

对系统的像散进行分析, 其像散图如图 5 所示。由于系统的光路在水平方向有旋转对称性, 因此, 这里仅考虑垂直视场。图 5(a)为垂直视场负视场像散曲线, 图 5(b)为垂直视场正视场像散曲线。可以发现, 采用消像散面型设计的系统, 在正负视场各有一个像散零点。由此可以证明, 面型具有一定的像散矫正能力。将采用消像散面设计的系统的像散的绝对值, 与采用球面和轮胎面时进行对比, 其对比图如图 6 所示。可以发现, 采用消像散面的设计结果, 其像散绝对值小于全视场范围内采用球面时的 20%, 且小于边缘视场内采用轮胎面时的 20%。

通过以上对比可以发现, 所提出的算法设计的消像散面型, 可以很好地校正离轴虚像系统的像散, 提高

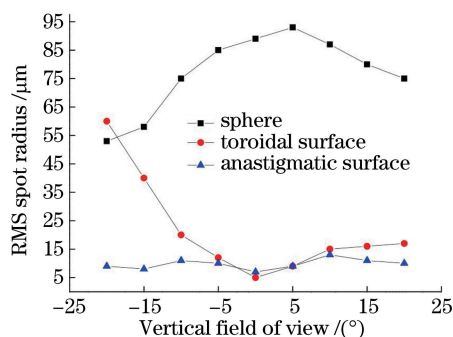


图 4 弥散斑半径均方根值对比

Fig. 4 Comparison of different RMS values of spot radius

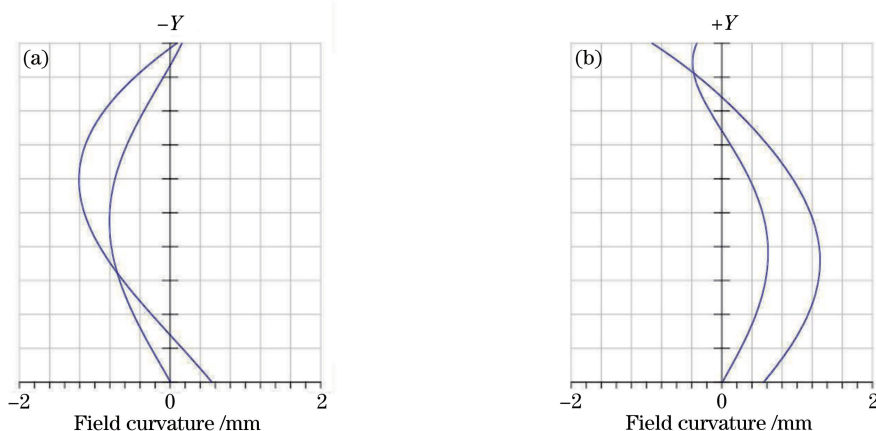


图 5 像散曲线图。(a)负视场;(b)正视场

Fig. 5 Astigmatism diagram. (a) Negative field of view; (b) positive field of view

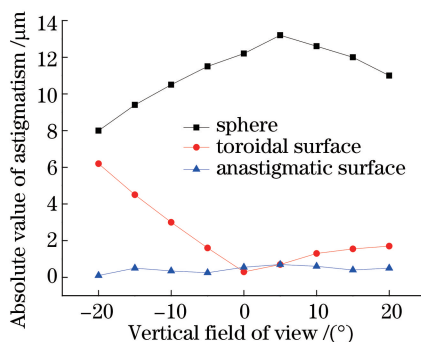


图 6 像散绝对值对比图

Fig. 6 Comparison diagram of absolute values of astigmatism

系统的成像质量。此外,可以发现,图 4 和图 6 中的曲线走势大致相同,这说明离轴虚像系统的成像质量主要受像散制约。因此,在全视场消像散功能的面型在离轴虚像系统中具有很好的应用前景。

3.4 公差分析

对设计的离轴虚像系统进行公差分析,评估其对加工和装调公差的敏感程度。依据现有加工和装调水平,给定一组公差数据如表 3 所示,测试波长为 632.8 nm,对加入公差后系统的弥散斑均方根半径进行评价,考虑到离轴系统的装调难度,在公差分析中不使用任何补偿。公差分析结果如表 4 所示,在加入公差后,各视场的弥散斑相对增大量不超过 10%。

从公差分析的结果可以看出,在系统装调方面,以国内现有的装调水平,给定的装调误差相对比较宽松。在面型加工方面,采用超精密五轴单点金刚石加工设备就可以加工光学自由曲面面型,且不需要抛光等后续加工工序就可以使加工的面型精度达亚微米量级^[21],表面粗糙度达纳米量级,能够满足表 3 给定的 2 μm 的

表面面型精度要求。此外,反射面口径并不大,面型在有效口径范围内矢高较小且表面面型梯度变化较小,有利于加工出所要求的面型精度。在面型检测方面,目前较为成熟的光学自由曲面检测手段是使用高精度光学轮廓仪,其检测精度高,能够满足亚微米量级以上自由曲面面型误差的检测,可以作为上述面型的测量手段。

表 3 公差数据
Table 3 Tolerance data

Tolerance type	Specification
Thickness	± 0.05 mm
Decent value	± 0.05 mm
Tilt	$\pm 3'$
Peak to valley surface error	$2 \mu\text{m}$

表 4 公差分析结果
Table 4 Results of tolerance analysis

Vertical field	RMS of spot radius	RMS of spot radius with tolerance	Relative change /%
20	0.00912	0.00972	6.6
10	0.01089	0.01154	6.0
0	0.00713	0.00782	9.7
-10	0.01256	0.01323	5.3
-20	0.00983	0.01062	8.0

4 结 论

通过对柯丁顿方程的进一步推导,分析了全视场消像散反射面的特性,提出了一种消像散面型的直接设计理论,并给出了基于求解微分方程的消像散反射镜设计算法。将设计的消像散面型应用于离轴虚像显示系统,其弥散斑尺寸和像散绝对值在全视场范围内小于采用球面时的 20%,且小于边缘视场内采用轮胎面时的 20%。通过对比系统弥散斑尺寸曲线和像散绝对值曲线发现,离轴虚像系统的像质主要受像散制约。因此,在离轴虚像系统中采用消像散面型,可以有效地校正系统的像散,提高系统的成像质量。

参 考 文 献

- [1] Takaki Y, Urano Y, Kashiwada S, *et al.* Super multi-view windshield display for long-distance image information presentation[J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 704-716.
- [2] Takaki Y, Nago N. Multi-projection of lenticular displays to construct a 256-view super multi-viewdisplay[J]. *Optics Express*, 2010, 18(9): 8824-8835.
- [3] Batchko R, Robinson S, Schmidt J, *et al.* A variable-collimation display system[C]. SPIE, 2014, 9011: 901109.
- [4] Chen L, Chen H X, Wang R J, *et al.* The application of film negative press off-axis type virtual image display system on flight simulator[C]. SPIE, 2005, 5637: 502-509.
- [5] Marshall P. Towards-higher resolution displays for flight simulation[C]. SPIE, 2001, 4511: 205-211.
- [6] Guan Yingzi. Design of wide-angle infinity display equipment of airplane simulator[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2008, 34(10): 1214-1216.
关英姿. 飞行训练模拟器广角无限显示系统设计[J]. *北京航空航天大学学报*, 2008, 34(10): 1214-1216.
- [7] Hu X D, Hua H. High-resolution optical see-through multi-focal-plane head-mounted display using freeform optics[J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13896-13903.
- [8] Wang Qingfeng, Cheng Dwen, Wang Yongtian. Description of free-form optical curved surface using two-variable orthogonal polynomials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0922002.
王庆丰, 程德文, 王涌天. 双变量正交多项式描述光学自由曲面[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0922002.
- [9] Zhu Hao, Cui Qingfeng, Piao Mingxu, *et al.* Design of circular unobscured three-mirror optical systems[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(10): 1022004.
朱浩, 崔庆丰, 朴明旭, 等. 圆周式无遮拦三反射镜光学系统设计[J]. *光子学报*, 2014, 43(10): 1022004.
- [10] Ye Jingfei, Gao Zhishan, Liu Xiaoli, *et al.* Freeform surfaces reconstruction based on Zernike polynomials and radial

- basis function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0822003.
叶井飞, 高志山, 刘晓莉, 等. 基于 Zernike 多项式和径向基函数的自由曲面重构方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0822003.
- [11] Li Hua, Zhang Xin, Wang Chao, *et al.* Optical design of an avionic helmet-mounted displays using freeform surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0322001.
李华, 张新, 王超, 等. 自由曲面机载头盔显示器光学系统设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0322001.
- [12] Xu C, Cheng D W, Song W T, *et al.* Design of compact fisheye lens with slope-constrained Q-type aspheres [C]. *SPIE*, 2013, 8841: 88410D.
- [13] Ma B, Sharma K, Thompson K P, *et al.* Mobile device camera design with Q-type polynomials to achieve higher production yield[J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 17454-17463.
- [14] Liu J Y, Miñano J C, Benítez P, *et al.* Single optical surface imaging designs with unconstrained object to image mapping[C]. *SPIE*, 2012, 8550: 855011.
- [15] Dominguez J C M, Gimenez P B, Null L W, *et al.* Overview of the SMS design method applied to imaging optics[C]. *SPIE*, 2009, 7429: 74290C.
- [16] Hou J, Li H F, Wu R M, *et al.* Method to design two aspheric surfaces for image system[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(11): 2294-2299.
- [17] Yuan Xucang. *Optical design*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988.
袁旭沧. *光学设计*[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988.
- [18] Nordin A П. *The theory of surface*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1965.
А·П·诺尔金. *曲面论*[M]. 北京: 高等教育出版社, 1965.
- [19] Lee H, Kim K, Lee G, *et al.* Photorealistic ray tracing to visualize automobile side mirror reflective scenes[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 25729-25738.
- [20] 研野孝吉. 视觉显示装置: CN102159983A[P]. 2011-08-17.
- [21] Li Rongbin, Zhang Zhihui, Du Xue, *et al.* Ultra-precision machining technology of freeform optics and its applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 110-115.
李荣彬, 张志辉, 杜雪, 等. 自由曲面光学的超精密加工技术及其应用[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(1): 110-115.