

〈系统与设计〉

长出瞳距目镜光学系统设计

刘小华¹, 王劲松^{1,2}, 孔诗媛², 唐卓¹

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 长春理工大学 中山研究院, 广东 中山 528437)

摘要: 为了适应军用瞄准镜的作战需求, 针对传统目镜系统存在出瞳距较短、成像质量差等问题, 本文设计了一款非球面长出瞳距目镜, 出瞳距达到了 90 mm, 相对镜目距为 3.3。首先, 在由球面构成的折射式目镜光学系统的基础上, 然后为了进一步提高目镜系统的成像质量及简化系统结构, 引入非球面设计, 得到了含有非球面的折射式长出瞳距目镜, 由 5 片透镜组成。结果表明: 在 50 lp/mm 空间频率处, 采用非球面设计的长出瞳距目镜, 全视场 MTF (Modulation Transfer Function) 均超过了 0.4。对该目镜的各项公差和成像质量进行了分析, 公差合理, 像质优良; 光学系统总长为 48.3 mm, 重量为 129.2 g, 对比传统折射式目镜, 光学总长缩短了 24.2%, 重量减轻了 35.7%, 具有结构紧凑、重量轻、像质高等特点。

关键词: 目镜; 长出瞳距; 光学设计; 非球面

中图分类号: TH74 文献标志码: A 文章编号: 1001-8891(2025)05-0546-07

Design of Optical System for Long-distance Eyepieces

LIU Xiaohua¹, WANG Jinsong^{1,2}, KONG Shiyuan², TANG Zhuo¹

(1. College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Zhongshan Institute, Changchun University of Science and Technology, Zhongshan 528437, China)

Abstract: In view of the problems of the short pupil distance and poor imaging quality of traditional eyepiece systems, an aspheric long interpupillary eyepiece with an interpupillary distance of 90 mm and a relative lens distance of 3.3 is designed to adapt military sighting devices for combat needs. First, based on a refractive eyepiece optical system composed of a spherical surface, an aspheric design is introduced to further improve the imaging quality of the eyepiece system and simplify the system structure, and a refractive long interpupillary eyepiece containing an aspheric surface is obtained, which consists of five lenses. The results show that at a spatial frequency of 50 lp/mm, the Modulation Transfer Function (MTF) of the entire field of view exceeds 0.4 for long interpupillary eyepieces with an aspheric design. The tolerances and imaging quality of the eyepiece were analyzed; the tolerances are reasonable, and the image quality is excellent. The total length of the optical system is 48.3 mm and the weight is 129.2 g, whereby the length was shortened by 24.2% and the weight reduced by 35.7% compared with a traditional refractive eyepiece. Therefore, being lightweight, it has the characteristics of a compact structure, and exhibits a high image quality.

Key words: eyepiece, long exit pupil distance, optical design, aspherical

0 引言

随着科学技术的进步以及军事装备的更新换代, 军用瞄准镜向着大倍率、大出瞳直径、长出瞳距的方

向发展, 以提高瞄准精度和舒适性。一般的长出瞳距目镜的出瞳距离为 20~25 mm, 远达不到军用目视光学系统的使用需求^[1]。一方面, 随着单兵作战设备逐渐增加, 护目镜以及 AR 眼镜的使用; 另一方面, 为

收稿日期: 2023-07-31; 修订日期: 2023-08-24。

作者简介: 刘小华 (1998-), 男, 硕士, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: 1090180914@qq.com。

通信作者: 王劲松 (1973-), 男, 教授, 主要从事光电测试技术及仪器、视光学技术及仪器方面研究。E-mail: Soldier_1973@163.com。

基金项目: 吉林省科技发展计划重点研发项目 (20200401063GX)。

了提高士兵战场生存能力,需要配备眼罩、护额、防毒面具等,都需要较长的长出瞳距目镜。另外,目镜的重量越轻,长度越短,越能减轻士兵在作战过程中的承载负担,以便提高士兵的单兵作战能力。所以,研究长出瞳距、结构紧凑、重量轻的目镜具有重要意义。

目前,有国内外学者和专家对于目镜的设计和应用做了一定的研究。P. Kalló 研究了长出瞳距目镜的初始结构及像差校正,该目镜由三组元薄透镜组构成^[2]; Koizumi N.、Watanabe N.两人设计了一款由 5 片四组元透镜构成的长出瞳目镜^[3]; Omura Y.设计了一款出瞳距为 18.5 mm 的目镜,该系统由 5 片四组元透镜组成^[4]; 李玉瑶等人基于像差理论,设计了一款出瞳距为 40 mm 的军用目镜系统,但系统结构不够轻量化,像质有待提高^[1]; 王希等人设计了一款高视放大率的军用瞄准目镜,但出瞳距仅为 25 mm,系统结构复杂^[5]; 杨亮亮设计了一款折/衍混合目镜系统,出瞳距离为 50 mm,该系统成像质量欠佳^[6]; 夏寅聪等人基于目镜轻量化功能需求,设计优化了 3 种不同结构的目镜系统,但出瞳距仅为 40 mm^[7]。表 1 是国外厂商对目镜的研究情况。

表 1 国外厂商对目镜的研究情况

Table 1 Research on eyeglasses by foreign manufacturers

Foreign manufacturers	Viewing angle/°	Exit pupil distance/mm
American optics corporation	43~53.4	21
Olympus	47.4~56	20~25
Zeiss	50	15

拟基于传统折射式球面结构,设计一款出瞳距为 90 mm 的折射式长出瞳距目镜。为了进一步提高目镜的成像质量及简化系统结构,引入了非球面设计,经过多次优化设计,得到了一款结构紧凑、体积小、成像质量良好的长出瞳距目镜系统,该系统仅需 5 片透镜就能很好地满足设计要求。

1 技术指标要求及设计思路

1.1 技术指标要求

本文设计的目镜系统工作波长为 450~670 nm 的可见光波段,焦距为 27 mm,视场角为 24°,出瞳直径为 5 mm,出瞳距为 90 mm,工作距离至少为 6 mm。像质方面要求在空间频率 50 lp/mm 处 MTF ≥ 0.2 ,并且畸变要求最大不超过 10%。目镜光学系统的具体技术参数如表 2 所示。

表 2 目镜的技术参数

Table 2 Technical parameters of the eyepiece

Parameters	Technical requirements
Operating band/nm	450~670
Focal length/mm	27
Field of view/(°)	24
Pupil diameter/mm	5
Working distance/mm	≥ 6
Interpupillary distance/mm	≥ 90
Distortion/(%)	≤ 10
MTF	$\geq 0.2 @ 50 \text{ lp/mm}$

1.2 设计思路

由于目镜系统是采用倒置光路设计,其入瞳在系统外部,这增加了像差平衡难度。另外,对于长出瞳目镜而言,其主光线在系统中的投射高度很大,会造成严重的轴外非对称像差。通常目镜的出瞳距离与目镜的焦距之比近似为一个常数,一般为 0.5~0.8,个别会超过 1,比值越大设计难度越大。通过计算,本次的相对镜距达到了 3.3,设计难度进一步增加。

由于该目镜的出瞳距离比较长,在系统焦距不变的情况下,为了增加出瞳距,可以使系统的主面 H 前移。如图 1 所示,在一般的目镜中物方主面位置通常位于系统附近。通过在正透镜后面添加一个负透镜,从图 2 可以观察到物方主面 H 偏离了系统并移向了目镜出瞳位置,此时出瞳距离 -1_{z1} 明显比图 1 大。因此,可以通过增加具有负光焦度的透镜使物方主面 H 移向目镜出瞳位置,便可以增大出瞳距离。

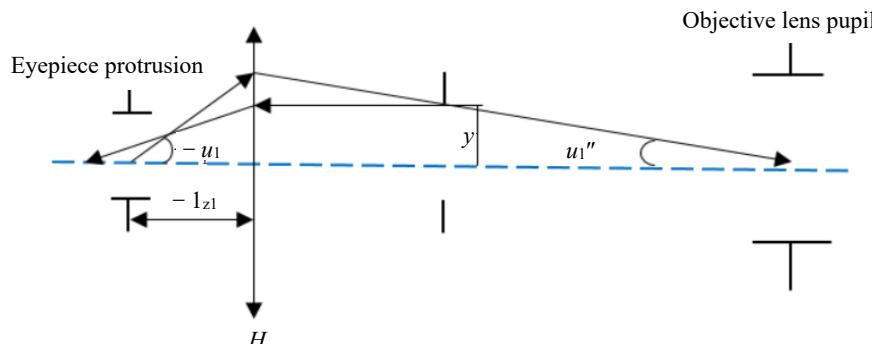


图 1 一般目镜的主面位置

Fig.1 Position of the main surface of a general eyepiece

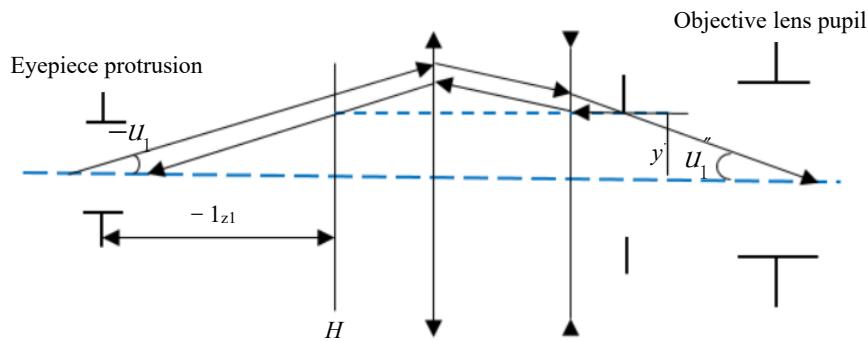


图2 目镜主面偏移的位置

Fig.2 Position of the deviation of the main surface of the eyepiece

折射式、反射式、折反式是光学系统的3种主要结构形式。折射式结构构型丰富、无中心遮拦，适用于大视场、大相对孔径系统；反射式适应于宽波段、大口径系统，缺点是系统存在中心遮拦、视场小、加工装调难度大；折反式优点是光学系统总长短、体积小、重量轻，适合大口径、长焦距系统，缺点同样是系统存在中心遮拦、加工难度大。通过对比3种结构形式的优缺点，以及参考目镜系统常用的设计方法，结合本目镜系统的技术指标，采用折射式结构形式设计。

光学系统初始结构的设计方法主要有代数法和缩放法。代数法指的是根据光学系统的性能参数，利用初级像差理论求解满足成像要求的初始结构，但该方法设计周期长、耗时耗力；缩放法指的是从一些资料文献、专利库等中选择参数和光学性能相近的光学系统作为初始结构，利用缩放公式对其进行优化设计，焦距缩放公式^[8]如下：

$$r'' = r' \frac{f''}{f'} \quad (1)$$

$$d'' = d' \frac{f''}{f'} \quad (2)$$

式中： f' 为初始结构的焦距； f'' 为设计所要求的焦距； r' 为初始结构的曲率半径； r'' 为缩放后的曲率半径； d' 为初始结构的透镜厚度； d'' 为缩放后的透镜厚度。

本次采用缩放法对目镜系统进行设计，由于目镜系统成像在无限远处，人眼位于出瞳处，这是最佳的观察位置，因此光路采用反向设计，即将出瞳作为入瞳，出瞳在左边，成像面在右边^[9]。根据缩放公式计算出缩放后透镜的曲率和厚度，再将目镜系统的结构参数输入光学设计软件进行初步优化设计，从而得到透镜的结构参数（厚度、曲率半径）以及系统焦距和空气间隔等数值，结合像差理论，设定约束条件并逐步优化，完成初始结构的搭建。

2 基于非球面的长出瞳距目镜光学系统设计

2.1 初始结构的选取及优化

通过查阅专利库 ZEBASE，选取一款焦距为 35 mm，入瞳直径为 12 mm，视场角为 46°，出瞳距为 39 mm 的系统作为设计的初始结构，图 3 所示为长出瞳目镜光学系统初始结构图。

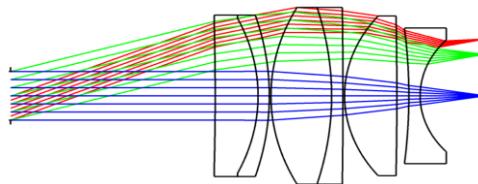


图3 长出瞳目镜光学系统初始结构

Fig.3 Initial structure of long exit pupil eyepiece optical system

首先，将选择的初始结构导入光学设计软件，修改系统的出瞳距、相对孔径、视场角、波长等，对系统进行初步优化；将系统光学元件的曲率、材料、厚度设为变量进行初步优化，分析像差曲线图，结果表明系统没有达到设计要求。

为了满足设计要求以及提高像质，在图 3 的系统结构中增加了透镜数量，即在长出瞳目镜系统的后组透镜后增加一片弯月型厚透镜，其一是增加自由度，其二是用于最小化球差及压缩轴外光线相对于光轴的角度，以校正彗差、像散、畸变等剩余轴外像差。为了校正系统色差，第一组和第二组保持双胶合透镜不变。经过多次优化设计，得到了如图 4 所示的折射式长出瞳距目镜系统，系统均采用传统球面设计，面型简单，易加工。结果表明，系统的重量为 201.04 g，总长为 63.76 mm，出瞳距为 90 mm，工作距离为 7.99 mm，满足设计指标。

MTF 曲线可以很好地评价光学系统的成像质量，如图 5 为长出瞳距目镜系统的 MTF 曲线。由图可知，在空间频率 50 lp/mm 处，全视场的 MTF 都优于 0.2，

并且中心视场、0.7 视场的弧矢方向以及 1 视场的弧矢方向的 MTF 接近衍射极限，都在 0.5 以上；0.7 视场、1 视场的子午方向的 MTF 相对下降比较明显，在 0.3 左右，基本可以满足设计要求。

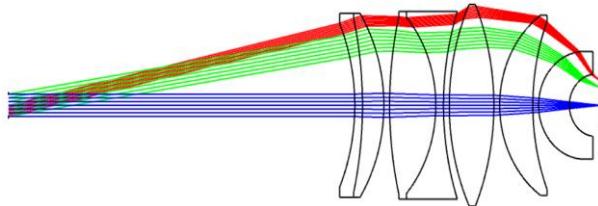


图 4 折射式长出瞳距目镜系统结构

Fig.4 Structure of refractive long pupil distance eyepiece system

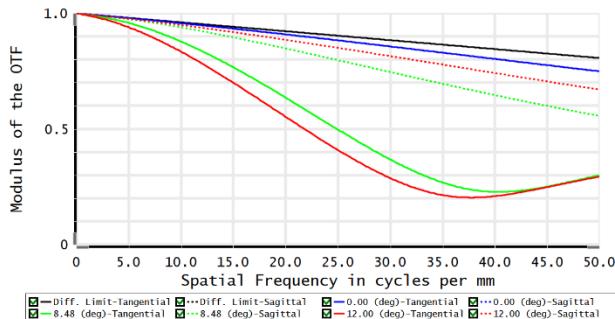


图 5 折射式长出瞳距目镜系统的 MTF 曲线

Fig.5 MTF curves of refractive long exit pupil distance eyepiece system

2.2 轻量化设计

文中 2.1 节采用传统球面设计的长出瞳距目镜系统可以基本满足设计要求，但该系统透镜数量多、结构复杂、像质欠佳。为了实现长出瞳距目镜系统的轻量化设计，还需对图 4 中的目镜系统做进一步的设计。

由于目镜具有孔径小、视场大的特点，故其设计时重点考虑校正、平衡轴外像差^[1]。其中畸变不影响成像的清晰度，只需根据视场的大小控制在合理值范围即可，不做完全校正^[10]。为了满足设计要求，将第 1 组的双胶合透镜设计成两片单透镜以增加系统的自由变量；第二组双胶合透镜保持不变以校正色差；为了校正剩余球差及轴外像差，将第三片正透镜设计成弯月型厚透镜，再将最后两片透镜删减掉；在设计的过程中需合理的分配各个透镜的光焦度，为了实现目镜系统长出瞳距的设计要求，逐渐增加具有负光焦度的透镜的光焦度。其次，为了校正初级像差、平衡高级像差，利用非球面具有产生负球差、高级色差小的光学特性，在传统折射式目镜系统中引入了非球面；另一方面，由于非球面的面型由多个自由变量决定，可以提供更多的优化变量，以实现简化系统目的。因此，在本次设计过程中添加了两片偶次非球面，与奇次非球面相比，偶次非球面更易加工^[11]。将目镜系统第 6

个面、第 9 个面设计为偶次非球面，最后对系统进行反复优化。非球面可由公式(3)表示，表 3 为目镜系统的偶次非球面系数。

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 + (1 + k)^2 c^2 r^2}} + a_2 r^2 + a_4 r^4 + a_6 r^6 + a_8 r^8 \quad (3)$$

式中： z 为表面矢高； c 为曲面顶点曲率， $c = 1/r_0$ ， r_0 为顶点曲率半径； r 为光线与曲面交点的径向坐标； k 为二次曲面系数， $k = e^2$ ； a_2 、 a_4 、 a_6 、 a_8 为非球面系数。

表 3 目镜系统的非球面系数

Table 3 Comparison of different optical system structures

Number of faces	a_2	a_4	a_6	a_8
6th	0	2.152E-007	-1.297E-008	4.490E-011
9th	0	-5.487E-005	6.715E-007	-2.340E-009

2.3 设计结果

经过反复优化设计，最终得到了一款基于非球面的折射式长出瞳距目镜，结构如图 6 所示。由图可知，该系统由 5 片透镜组成，透镜 L_5 设计成弯月型厚透镜可以有效压缩轴外光线，便于校正剩余轴外像差，极大地提高了目镜系统的成像质量；为了评估该透镜的可加工性，将透镜半直径 d 与透镜曲率半径 R 的比值，即 $d/R \leq 0.96$ 作为评估判据，代入透镜 L_5 的 R_1 、 d_1 和 R_2 、 d_2 ，计算结果分别为 0.95 和 0.64 均小于 0.96，满足可加工性的条件。一方面，该长出瞳距目镜均采用成都光明 (CDGM) 材料，均为“环境友好”材料，既环保也降低了制作成本；另一方面，透镜 L_1 、 L_2 、 L_3 的材料均为较轻的冕牌玻璃，能够在一定程度上减轻目镜重量，其中透镜 L_1 的 H-FK95N 材料具有较大的异常色散，不仅具有极优的光学消色差能力，而且还能够简化和优化成像系统，提高成像质量。表 4 为非球面长出瞳距目镜系统材料性能参数。光学系统的总长仅为 48.3 mm，重量为 129.2 g，综合对比图 4 的传统折射式长出瞳距目镜，采用非球面设计的长出瞳距目镜系统，光学总长缩短了 24.2%，重量减轻了 35.7%，并且像质更好、结构更紧凑、透镜数量更少，实现了长出瞳距目镜系统的轻量化设计。

图 7 为非球面设计的折射式长出瞳距目镜的 MTF 曲线，各个视场的 MTF 曲线平滑，轴上和轴外的成像质量表现出良好的一致性，说明系统的初级像差得到了良好的校正。在空间频率 50 lp/mm 处，全视场的 MTF 均大于 0.4，中心视场的 MTF 更是达到了 0.74，完全满足设计要求。图 8 为该目镜系统的场曲

和畸变, 从图 8(a)可知最大场曲为 0.8 mm 左右, 完全满足设计要求; 从图 8(b)可以看出, 系统最大畸变为 7.26%, 畸变校正良好且满足设计要求。

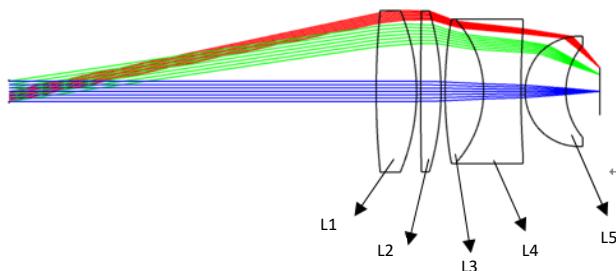


图 6 非球面折射式长出瞳距目镜结构

Fig.6 Structure of aspherical refractive long exit pupil distance eyepiece

表 4 非球面长出瞳距目镜系统材料性能参数

Table 4 Material performance parameters of aspheric long exit pupil eyepiece system

Lens	Material	TCE	$p/(\text{g}/\text{cm}^3)$	V_d	N_d
L1	H-FK95N	14.4	3.52	94.5	1.43
L2	H-ZLAF92	6.9	5.02	28.3	2.0
L3	H-ZPK5	12.4	4.29	68.3	1.59
L4	H-ZF52	8.8	3.51	23.7	1.84
L5	D-ZPK5	12.3	4.29	68.2	1.59

3 设计结果分析

3.1 公差分析

因为在实际加工、装配过程中, 镜片组件、光学元件偏心或倾斜、玻璃阿贝数误差等都会产生一定的系统误差, 所以必须对系统进行公差分析^[12]。公差分析指的是合理地定义和分配零件和产品的公差, 并将它引入到系统中, 分析系统的性能是否满足使用要求。按照经验及实际工艺水平, 该光学系统的设计公差如表 5 所示。使用光学设计软件提供的公差分析功能, 以 MTF (Diff. MTF Avg at 50 lp/mm) 作为评价标准, 采用蒙特卡罗分析对系统进行了 100 次分析, 结果如表 6 所示。由表 6 蒙特卡罗分析结果表明, 50

lp/mm 处的衍射平均 MTF 在 90% 的概率下, 可以达到 0.45, 表明系统具有好的容差特性, 满足实际加工和装配的要求。

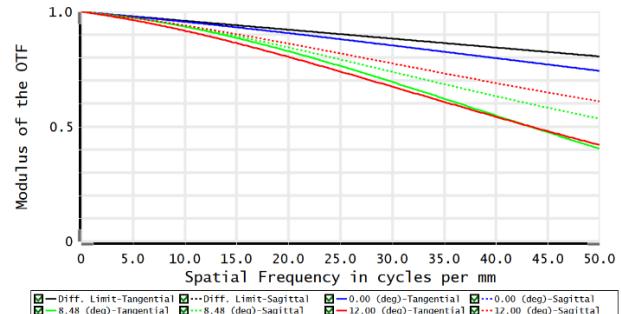


图 7 非球面折射式长出瞳距目镜的 MTF 曲线

Fig.7 MTF curves of aspherical refractive long exit pupil distance eyepiece

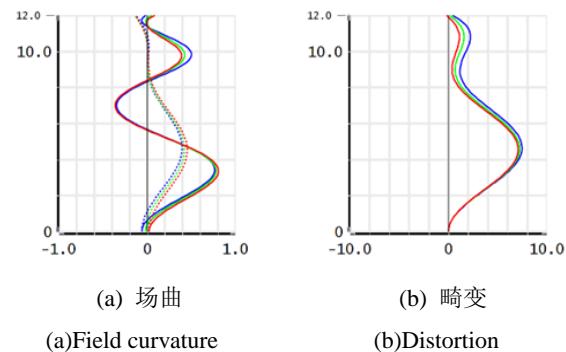


图 8 非球面折射式长出瞳距目镜的场曲和畸变

Fig.8 Field curvature and distortion of aspherical refractive long exit pupil distance eyepiece

3.2 杂散光分析

利用杂散光模拟软件进行光线追迹具体步骤如下:

- 1) 将光学设计软件设计完成的目镜系统导入杂散光模拟软件得到了目镜系统的三维立体模型;
- 2) 在杂散光模拟软件中, 在原系统的入瞳位置处设置一个发射平行光线的表面光源, 模拟观测目标在无限远处, 并且分别设置了 0、0.707、1 三个视场组态; 在像面位置处设置一个探测器, 接收出射光线;

表 5 光学系统公差

Table 5 Optical system tolerances

Surface tolerances		Element tolerances		Index tolerances	
Parameter	Tolerances	Parameter	Tolerances	Parameter	Tolerances
Fringes	3	Decenter(X, Y)	0.03	Index	0.001
Thickness/mm	0.03	Tilt(X, Y)	0.02°	Abbe%	1
Decenter(X, Y)	0.03	-	-	-	-
Tilt(X, Y)	0.02°	-	-	-	-

表 6 蒙特卡罗分析结果

Table 6 Monte Carlo analysis results

Probability	MTF at 50 lp/mm
>90%	0.45615132
>80%	0.46526847
>50%	0.48006013
>20%	0.48612584
>10%	0.48940156

3) 设置 3 个设计波长 $0.45 \mu\text{m}$ 、 $0.55 \mu\text{m}$ 、 $0.67 \mu\text{m}$ 及模拟光线数量, 输入完成后进行光线追迹。图 9 为目镜光学系统光线追迹图。

根据以上步骤 3 个视场都模拟追迹了 10000 条光线, 得到了该光学系统的光照度分析图, 如图 10 所示。由图 10 可知, 出射光线在探测器接受面上形成了 3 个半径小于 1 mm 的圆形光斑, 位置由下及上排列, 分别代表了 0、0.707、1 三个视场的光斑, 光斑内能量集中, 表明该光学系统成像质量良好。图 11 为目镜系统观测目标模拟图像, 成像模拟结果表明, 该目镜系统成像质量良好, 满足使用需求。

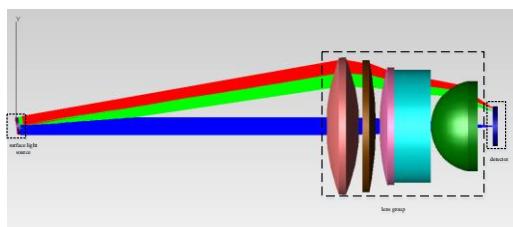


图 9 目镜光学系统光线追迹图

Fig.9 Eyepiece optical system ray tracing diagram

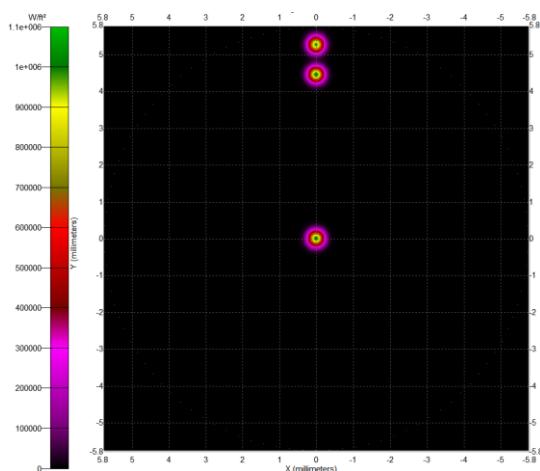


图 10 目镜光学系统的光照度分析

Fig.10 Illuminance analysis plot of the eyepiece optical system



图 11 目镜系统观测目标模拟图像

Fig.11 Simulated image of object observed by eyepiece system

4 结论

基于传统球面目镜系统结构, 采用缩放法对长出瞳距目镜进行设计。设计过程中添加了非球面进行设计, 最终得到了一款焦距为 27 mm、视场角为 24° 、出瞳直径为 5 mm、出瞳距离为 90 mm 的长出瞳距目镜系统。设计结果表明: 该长出瞳距目镜系统由 5 片透镜组成, 光学总长为 48.3 mm, 重量为 129.2 g, 对比传统折射式目镜, 光学总长缩短了 24.1%, 重量减轻了 35.7%; 在空间频率 50 lp/mm 处, 各个视场 MTF 均高于 0.4, 优于指标要求的 0.2, 畸变控制在 7.26% 以内, 成像质量良好; 为了评估该系统的生产工艺, 对该系统进行了 100 次蒙特卡罗分析, 各项公差分配合理, 满足设计要求, 能够适应于轻小型、长出瞳距的使用场合。

参考文献:

- [1] 李玉瑶, 张婉怡. 长出瞳距军用瞄准镜目镜设计[J]. 光电工程, 2015, 42(10): 33-36.
LI Yuyao, ZHANG Wanyi. Design of eyepiece of military sight with long interpupillary distance[J]. *Optoelectronic Engineering*, 2015, **42**(10): 33-36.
- [2] Ralló P. Investigation of the correctibility of oculars with long exit pupil distance in the initial design phase [J]. *Optik (S0030-4026)*, 1980, **57**(3): 45-52.
- [3] Koizumi N, Watanabe N. Wide- field eyepiece: US, US6069750[P]. [2023-09-10]. DOI:US5638213 A.
- [4] Omura Y. Wide- angle eyepiece lens with large eye relief: US, US6104542[P]. [2023-09-10]. 2000.
- [5] 王希, 彭晴晴, 刘琳, 等. 高视放大率军用瞄准目镜的设计[J]. 激光与红外, 2017, 47(10): 1295-1298.
WANG Xi, PENG Qingqing, LIU Lin, et al. Design of high magnification military sightpiece[J]. *Laser& Infrared*, 2017, **47**(10): 1295-1298.

- [6] 杨亮亮. 长出瞳距折衍混合目镜系统的设计[J]. 红外技术, 2019, **41**(9): 806-809.
YANG Liangliang. Design of long-growth interpupillary refraction hybrid eyepiece system[J]. *Infrared Technology*, 2019, **41**(9): 806-809.
- [7] 夏寅聪, 杨亮亮, 李婧, 等. 轻小型长出瞳距目镜的设计[J]. 光电子技术, 2020, **40**(2): 129-133.
XIA Yincong, YANG Liangliang, LI Jing, et al. Design of light and small interpupillary eyepieces[J]. *Optoelectronic Technology*, 2020, **40**(2): 129-133.
- [8] 朱逸臻, 李顺尧, 卓双木, 等. 目标识别近距离车载镜头光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2022, **59**(17): 1722001.
ZHU Yizhen, LI Shunyao, ZHUO Shuangmu, et al. Design of optical system of target recognition close-range vehicle lens[J]. *Progress in Laser and Optoelectronics*, 2022, **59**(17): 1722001.
- [9] 许本有, 钟远, 李振, 等. 军用长出瞳距狙击步枪瞄准镜远心光路设计[J]. 激光与光电子学进展, 2021, **58**(19): 1922003.
XU Benyou, ZHONG Yuan, LI Zhen, et al. Design of telecentric optical path of military long-distance sniper rifle scope[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, **58**(19): 1922003.
- [10] 黄幼萍, 陈冬英. 长出瞳距的广角显微目镜设计[J]. 福建电脑, 2018, **34**(1): 50-51, 53.
HUANG Youping, CHEN Dongying. Design of wide-angle microscopic eyepiece with long interpupillary distance[J]. *Fujian Computer*, 2018, **34**(1): 50-51, 53.
- [11] 张勇, 刘卫平, 马飒飒, 等. 大视场低照度夜视头戴目镜光学系统设计[J]. 应用光学, 2023, **44**(3): 636-642.
ZHANG Yong, LIU Weiping, MA Sasa, et al. Design of optical system for head-mounted eyepieces with large field of view and low illumination[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, **44**(3): 636-642.
- [12] 田棋杰, 张建华, 张缓缓, 等. 长出瞳距离轴四反光学天线的设计研究[J]. 光学学报, 2020, **40**(18): 1822001.
TIAN Qijie, ZHANG Jianhua, ZHANG Huanhuan, et al. Design study of four-mirror optical antenna with long pupil distance axis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, **40**(18): 1822001.