

激光与光电子学进展

军用长出瞳距狙击步枪瞄准镜远心光路设计

许本有^{1,3}, 钟远², 李振^{1,3}, 张宗存^{3*}, 毛维涛^{1,3}, 姚明亮^{1,3}, 王益⁵, 章旭⁴¹南通智能感知研究院, 江苏 南通 226001;²中国人民解放军军事科学院, 北京 100091;³中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;⁴江苏大学材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013;⁵上海建桥学院机电学院, 上海 201306

摘要 为了适应单兵平台的作战需求, 针对目前透射式狙击步枪瞄准镜存在成像质量较差和出瞳距离过短等问题, 设计一款高精度成像的狙击步枪瞄准镜。根据系统的设计指标对物镜组和目镜组进行指标分解以及光焦度计算, 使用 ZEMAX 软件设计具有高精度成像质量和长出瞳距离的瞄准镜光路。瞄准镜的物镜组和目镜组均采用远心光路, 系统的放大倍率为 $10\times$, 入瞳直径为 50 mm, 出瞳直径为 5 mm, 视场角为 2.2° , 出瞳距离为 87.89 mm, 机械筒长为 403.76 mm。设计结果表明, 物镜组和目镜组的成像质量均达到优良, 对接后的整体光路在奈奎斯特频率为 16.67 lp/mm 处的调制传递函数数值大于 0.85, 满足军用狙击步枪瞄准镜的使用要求。

关键词 光学设计; 瞄准镜; 长出瞳距; 远心光路

中图分类号 O435.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1922003

Telecentric Light Path Design for Sniper Rifle Telescopic Sight with Long-Eye Distance

Xu Benyou^{1,3}, Zhong Yuan², Li Zhen^{1,3}, Zhang Zongcun^{3*}, Mao Weitao^{1,3}, Yao Mingliang^{1,3}, Wang Yi⁵, Zhang Xu⁴¹Nantong Academy of Intelligent Sensing, Nantong, Jiangsu 226001, China;²Academy of Military Sciences PLA China, Beijing 100091, China;³Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;⁴School of Materials Science & Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;⁵College of Mechanical and Electronic Engineering, Shanghai Jian Qiao University, Shanghai 201306, China

Abstract Considering the combat demands of an individual soldier and focusing on the poor imaging quality and very short exit pupil distance of current transmission sniper rifle scopes, a long-eye distance high-precision imaging sniper rifle scope is designed. Based on the design indices of the system, the objective and eyepiece sets are decomposed and the optical focal degree is calculated. The optical path of the scope is designed using ZEMAX software. The objective and eyepiece sets of the scope adopted a telecentric optical path. The magnification of the system is $10\times$, the diameters of the incoming pupil and exit pupil are 50 mm and 5 mm, respectively, the field of view angle is 2.2° , the distance of the exit pupil is 87.89 mm, and the length of the mechanical cylinder is 403.76 mm. The design results show that the imaging quality of the objective lens and ocular lens is excellent. Moreover, the

收稿日期: 2021-01-27; 修回日期: 2021-02-03; 录用日期: 2021-03-02

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0500400)

通信作者: *zongcunzhang2015@163.com

modulation transfer function value of the whole optical path after docking is greater than 0.85 at Nyquist frequency of 16.67 lp/mm, which meets the requirements of a military sniper rifle scope.

Key words optical design; telescopic sight; long-eye distance; telecentric light path

OCIS codes 220.3630; 230.5480; 080.3620; 080.3630

1 引言

随着社会的进步和科技的发展以及军事需求的增加,人们对狙击步枪瞄准镜的要求越来越高,不仅要求其具备长出瞳距和高放大倍率,同时希望具有高精度的成像质量和更小的视差调节量,以此提高光学系统的稳定性和实用性。近年来,国内外对瞄准镜的光路设计都展开了一些研究。2015年,胡红伟等^[1]设计了一款可工作于可见光与红外光波段且昼夜合一的瞄准镜,其放大倍率最高为 $9\times$,出瞳距离为70 mm;2016年,常伟军等^[2]使用摄远型物镜组和立方棱镜实现了高精度目视瞄准镜与激光接收系统的共光路设计,该瞄准镜的放大倍率为 $7\times$,视场角(FOV)为 5° ,出瞳距离为22 mm,但是成像质量较差,畸变率超过4.8%;2019年,李伟^[3]设计了军用瞄准镜的射击光路,放大倍率为 $8\times$,出瞳距离为40 mm,系统的成像质量仅满足目视仪器的观测需求。

针对目前瞄准镜存在成像质量较差和出瞳距离较短等问题,本文设计一种融合共轴激光测距光路的长出瞳距狙击步枪瞄准镜远心光路,该光路可以使瞄准镜满足军用高精度成像和远距离狙击的需求。在光路的结构上,采用物镜组和目镜组的组合形式,即将物镜和转像镜作为一个物镜组整体进行设计,其中分划板放置在第二焦平面处。为了获取高精度的成像质量,物镜组采用像方远心光路,目镜组采用物方远心光路,像方的主光线与光轴平行,最终可以最大程度地减小视差调节量。设计结果表明,瞄准镜不仅在全视场内的成像质量优良,而且具有长出瞳距的优点,可以在大倍率的狙击步枪上广泛应用。

2 系统指标及初始结构的确定

2.1 系统指标

根据实际使用的需求,整个狙击步枪瞄准镜的技术要求如表1所示。

表1 瞄准镜的总指标

Table 1 Overall target of scope

Parameter	Value	Parameter	Value
Wavelength range /nm	400-760	Exit pupil diameter /mm	5
Magnification	10	Eye distance /mm	>80
Entrance pupil diameter /mm	50	Mechanical strenght /mm	<450
FOV /($^\circ$)	2.2	Aberration rate /%	<4

2.2 像差分析

光学系统一般包含了球差、彗差、像散、场曲和畸变这5种单色像差以及轴向色差和垂轴色差这两种色差。对于望远镜、显微镜和瞄准镜等目视光学系统来说,物镜组一般需要校正轴向边缘球差、轴向色差和边缘孔径的正弦差,其他类型的像差一般不进行校正;对于目镜组来说,出瞳位于系统外部且出瞳距离较长,主光线在目镜组最后一个表面上的投射高度较高,因此导致轴外像差增大,所以目镜组需要校正像散、垂轴色差和彗差,其中球差和轴向色差较小,畸变控制在合理范围内即可。在有分划板的情况下,物镜组和目镜组分别校正各自的像差,再考虑相互补偿。目镜组中少量的球差和轴

向色差由物镜组的像差来补偿,物镜组的子午场曲和垂轴色差由目镜组来补偿^[4]。

根据以上分析,物镜组采用正-负-正-正-正的结构形式,结构如图1所示。第一焦平面在第三组正透镜前表面的附近,尽量降低入射光线在任何透镜表面上的投射高度,避免产生较大的高级像差。第二焦平面位于第五组透镜的后面且像方的主光线与光轴平行,从而形成像方远心光路,减小系统的视差调节量。同时负光焦度组与正光焦度组远离,这有利于减小系统的场曲。除了第一组正透镜采用双胶合的形式以外,其余透镜均采用单片形式,这有利于结构的安装和调节。

由于目镜系统成像在无限远处,人眼位于出瞳

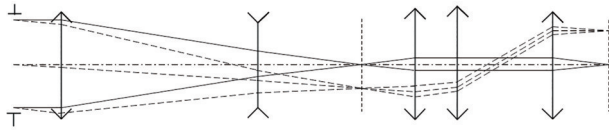


图1 物镜组的结构

Fig. 1 Structure of objective set

处,这是最佳的观察位置,因此光路采用反向设计,即将出瞳作为人瞳,出瞳在左边,成像面在右边,目镜组采用正-正-负的结构形式,结构如图2所示。由于目镜的出瞳距离需大于 80 mm 且出瞳直径为 5 mm,因此第一组正透镜的光焦度需远大于第二组正透镜。第二组正透镜采用双胶合的结构形式,可有效消除目镜组的色差和球差。同时,为了保证物镜组和目镜组满足光瞳匹配的原则,目镜组采用物方远心光路,物方的主光线与光轴平行,这可以提高成像质量。

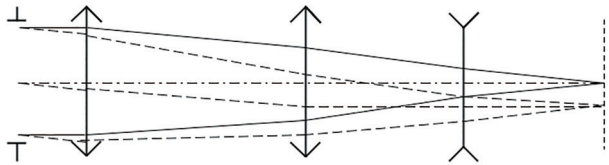


图2 目镜组的结构

Fig. 2 Structure of eyepiece set

2.3 初始结构的确定

2.3.1 物镜组的技术要求及光焦度分配

按照表1瞄准镜光学系统的总指标可以确定物镜组的技术要求,如焦距为 -500 mm,相对孔径为 1/10,总视场角 $2\omega = 2.2^\circ$,入瞳直径为 50 mm,像高 $2y = 20$ mm,总长小于 350 mm。

对于物镜组来说,系统的总光焦度 φ_o ^[5]可表示为

$$\varphi_o = \frac{n'u' - nu}{h}, \quad (1)$$

式中: n 和 n' 分别为光线入射到光学系统前后介质的折射率; u 和 u' 分别为光线入射到光学系统透镜边缘的光线孔径角和从系统出射的边缘光线孔径角; h 为轴上点边缘光线在透镜上的投射高度。

由于分划板和共轴激光测距系统所用棱镜的前后表面均为平面,光焦度均为 0,因此物镜组的总光焦度实际上由 5 块共轴的透镜承担,可将这 5 块共轴镜片划分为三个薄透镜的组合,其中第一组正透镜的光焦度为 φ_1 ,第二组负透镜、第三组正透镜和第四组正透镜总的光焦度为 φ_{234} ,第五组正透镜的光焦度为 φ_5 ,则 φ_o ^[6]可表示为

$$\varphi_o = \varphi_1 + \varphi_{234} + \varphi_5 - \frac{d_{12}}{n_2} \varphi_1 (\varphi_{234} + \varphi_5) - \frac{d_{23}}{n_3} (\varphi_1 + \varphi_{234}) \varphi_5 + \frac{d_{12}d_{23}}{n_2n_3} \varphi_1 \cdot \varphi_{234} \cdot \varphi_5, \quad (2)$$

式中: d_{12} 为第一个薄透镜组与第二个薄透镜组等效折射面之间的距离; d_{23} 为第二个薄透镜组和第三个薄透镜组等效折射面之间的距离; n_2 和 n_3 分别为第二个薄透镜组和第三个薄透镜组所处介质的折射率。同时,第二个薄透镜组的光焦度 φ_{234} 可以看作第二负组透镜的光焦度 φ_2 、第三正组透镜的光焦度 φ_3 和第四正组透镜的光焦度 φ_4 的组合^[7],则可表示为

$$\varphi_{234} = \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 - \frac{d'_{23}}{n'_2} \varphi_2 (\varphi_3 + \varphi_4) - \frac{d'_{34}}{n'_3} (\varphi_2 + \varphi_3) \varphi_4 + \frac{d'_{23}d'_{34}}{n'_2n'_3} \varphi_2 \cdot \varphi_3 \cdot \varphi_4, \quad (3)$$

式中: d'_{23} 和 d'_{34} 分别为第二负组透镜与第三正组透镜等效折射面之间的距离和第三正组透镜与第四正组透镜等效折射面之间的距离; n'_2 和 n'_3 分别为第三正组透镜和第四正组透镜所处介质的折射率。对于每个单透镜来说,其光焦度^[4]的计算公式为

$$\varphi = (n'' - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n'' - 1)^2}{n''} \cdot \frac{d}{r_1 \cdot r_2}, \quad (4)$$

式中: n'' 为单透镜的折射率; r_1 和 r_2 分别为透镜的两个曲率半径; d 为透镜的中心厚度。从图1可以看到,第二负组、第三正组和第四正组透镜的光焦度最大,第一正组透镜其次,第五正组透镜最小。三个薄透镜组的光焦度确定之后,其中第二个薄透镜组的光焦度可由第二负组、第三正组和第四正组透镜均分。

2.3.2 目镜组的技术要求及光焦度分配

根据表1瞄准镜光学系统的总指标和物镜组的技术要求可以计算出目镜组的技术要求,如焦距为 50 mm,相对孔径为 1/6.25,总视场角 $2\omega = 22^\circ$,入瞳直径为 8 mm,出瞳距离为 100 mm,总长小于 60 mm。

从图2可以看到,目镜组的光焦度主要由三组透镜来承担。为了简化光焦度分配的过程,可先将第一正组透镜和第二正组透镜看作组合镜组,其光焦度为 φ_{12} ,第三负组透镜的光焦度为 φ'_3 ,两者等效折射面之间的距离为 d' ,目镜的总光焦度为 φ_e ,后工作距离为 l_F ,则 φ_{12} 和 φ'_3 ^[8]可表示为

$$\varphi_{12} = \frac{1 - \varphi_e l_F}{d'}, \quad (5)$$

$$\varphi'_3 = \frac{d'\varphi_e + \varphi_e l_F - 1}{d'\varphi_e l_F} \quad (6)$$

出瞳距离^[8]可以表示为

$$l_p = \frac{d'\varphi'_3 - 1}{\varphi_e} \quad (7)$$

在求得组合透镜的光焦距 φ_{12} 后, 将组合透镜分成第一正组透镜和第二正组透镜, 其光焦距分别为 φ'_1 和 φ'_2 , 两者等效折射面之间的距离为 d'_1 , 透镜的折射率均为 n'' , 则 φ_{12} 、 d'_1 和 φ'_1 ^[8] 可分别表示为

$$\begin{cases} \varphi_{12} = \varphi'_1 + \varphi'_2 - d'_1 \varphi'_1 \varphi'_2 \\ d'_1 = \frac{\varphi'_1 + \varphi'_2}{2\varphi'_1 \varphi'_2} \\ \varphi'_1 = \frac{1 - n''}{l_p} \end{cases} \quad (8)$$

3 设计结果及像质评价

3.1 物镜组的设计结果及像质评价

根据技术要求, 物镜组的焦距 $F = -500$ mm, 相对孔径为 1/10, 视场角为 2.2° , 光路结构如图 3 所示。

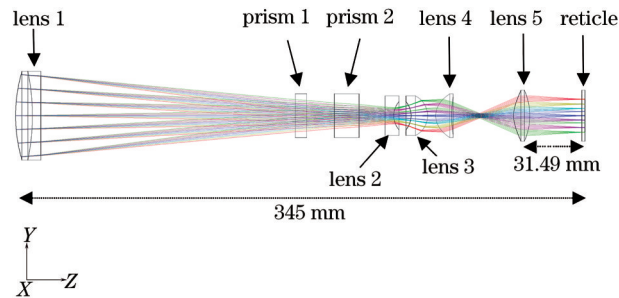


图 3 物镜组的光路

Fig. 3 Light path of objective set

图 3 中透镜 1~5 均为物镜组的成像透镜; 棱镜 1 和棱镜 2 均为共轴激光测距所用的分光棱镜, 其中棱镜 1 负责将上方半导体激光器所发射的光引向外界, 棱镜 2 负责将返回的光引向探测器。棱镜 1 的楔形部分镀有波长为 905 nm 的激光全反膜, 中心部分镀有波长为 905 nm 的激光半透半反膜, 且镀膜面与光轴之间的夹角为 45° ; 棱镜 2 的中心也镀有波长为 905 nm 的激光半透半反膜。当实际工作时, 半导体激光器所发出的激光打在棱镜 1 楔形部分的后表面后发生全反射并折向棱镜 1 的中心, 激光在该表面发生半透半反, 反射光被折向物镜组所在的光路, 从而达到与成像光路共轴的目的。返回的激光经过棱镜 1 的中心后会发生半透半反, 透射光经过棱镜 2 的中心后再次发生半透半反, 从而折向该棱

镜 2 的上方, 最终被光敏电阻接收。透镜和棱镜的材质均采用 CDGM 玻璃库中的普通玻璃。

分划板位于透镜 5 的后面且与透镜 5 相距 31.49 mm, 即物镜组的后截距为 31.49 mm, 满足枪瞄弹道调节的需求。由于光线在透镜 2~4 处的光焦度变化较大, 在改变折射率最大化的前提下, 透镜 2~4 的曲率半径需控制到较小的情况, 而透镜 4 将前物镜组倒立的像再一次转正, 透镜 5 将光线聚焦在分划板的后表面上, 最终在分划板上实现正立的像。

同时, 物镜组采用像方远心光路, 即主光线平行于光轴, 孔径光阑位于物镜组的物方焦平面, 出瞳位于无限远^[4]。采用像方远心光路可以使分划板上像的场曲和畸变大大减小, 不仅提高了成像质量, 也使整个系统较为稳定, 在强烈的振动下也能保持高精度的成像。实际上由于设计存在误差, 物镜组的出瞳并不是在无限远处, 即并不是严格的像方远心光路。物镜组半视场内的像方远心角分布曲线如图 4 所示, 物镜组的成像质量如图 5 所示。

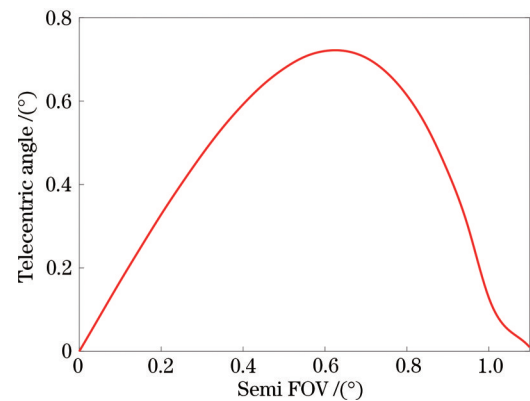


图 4 物镜组半视场角内的像方远心角分布曲线

Fig. 4 Telecentric angle distribution curve of image side in semi FOV of objective set

从图 4 可以看到, 在物镜组的半视场角内, 0.6° 视场角的像方远心角最大, 约为 0.70° ; 中心视场的像方远心角为 0 ; 边缘视场的像方远心角约为 0.05° 。从图 5 可以看到, 在物镜组的 2.2° 全视场角范围内, 方均根(RMS)半径小于 $14.5 \mu\text{m}$, 在奈奎斯特频率为 16.67 lp/mm 处的调制传递函数(MTF)值大于 0.58 ; 物镜的全视场球差、像散和彗差均控制在 0.006 mm 以内; 中心视场的波前误差为 0.188λ (λ 为波长), 边缘视场的波前误差为 0.247λ , 全视场的波前误差均小于 0.250λ ; 全视场的最大畸变率为 0.8196% , 因此可认为物镜的成像质量好, 已经满足人眼观测的需求^[9]。

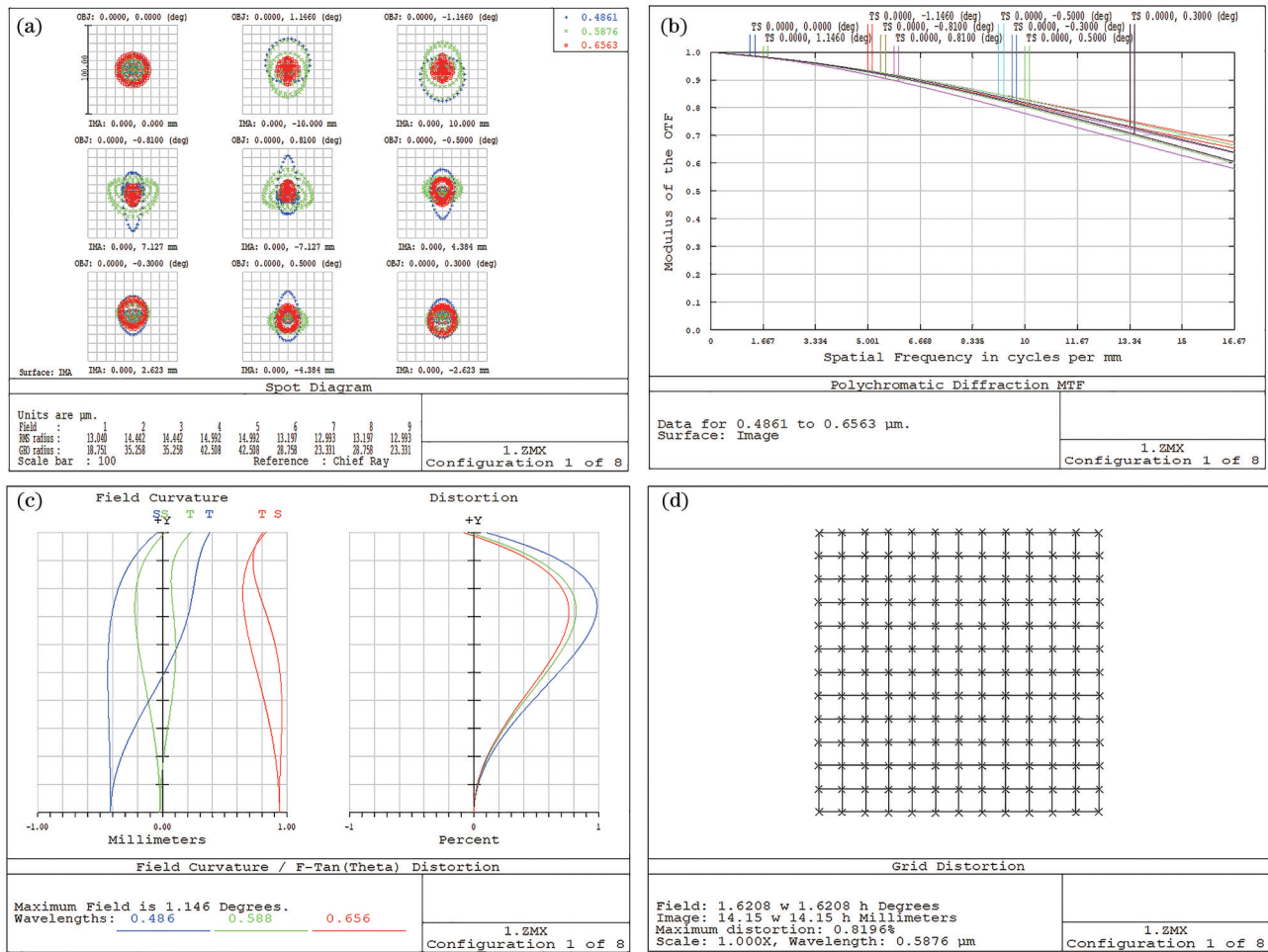


图 5 物镜组的成像质量。(a)点列图;(b)衍射 MTF 曲线;(c)垂轴像差;(d)网格畸变

Fig. 5 Image quality of objective set. (a) Spot diagram; (b) diffraction MTF curves; (c) vertical aberration; (d) grid distortion

3.2 目镜组的设计结果及像质评价

根据技术要求,目镜组的焦距 $f=50$ mm,相对孔径为 $1/6.25$,视场角为 22° ,光路结构如图 6 所示。

目镜组采用凯涅尔目镜的改进型,即在凯涅尔目镜的前面加一个弯月透镜 8。由于从孔径光阑出

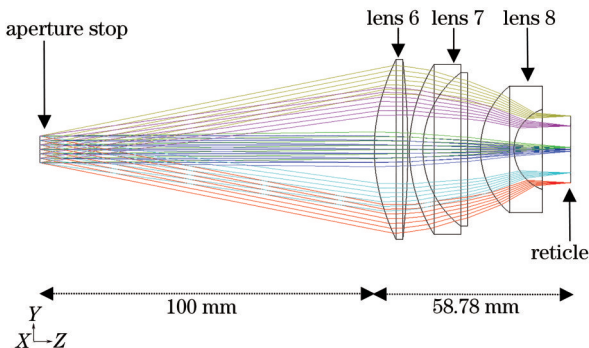


图 6 目镜组的光路

Fig. 6 Light path of eyepiece set

射的光线在透镜 6 的前表面上的投射高度较高,因此透镜 6 的光焦度也较大。为了使整个目镜的片数不超过三片,且结构尽可能简单,透镜 6 的材质采用 H-LAK4L 型镧系冕玻璃。虽然 H-LAK4L 型镧系冕玻璃的价格比普通的 H-K9L 型玻璃稍贵,但是能够很大程度地减小枪瞄目镜的结构。为了保证目镜组和物镜组对接时的出瞳距离大于 80 mm,在反向设计目镜的过程中,孔径光阑与透镜 6 前表面之间的距离设为 100 mm,目镜组的入瞳直径为 8 mm。透镜 8 后表面的边缘与分划板之间的距离为 17 mm,满足目镜 ± 3 个屈光度调节量的需求。同时,为了使物镜组和目镜组满足光瞳匹配的原则,目镜组也采用像方远心光路。目镜组的成像质量如图 7 所示。

从图 7 可以看到,在目镜组的 22° 全视场范围内,RMS 半径小于 $8.2 \mu\text{m}$,在奈奎斯特频率为 16.67 lp/mm 处的 MTF 值大于 0.82;透镜的全

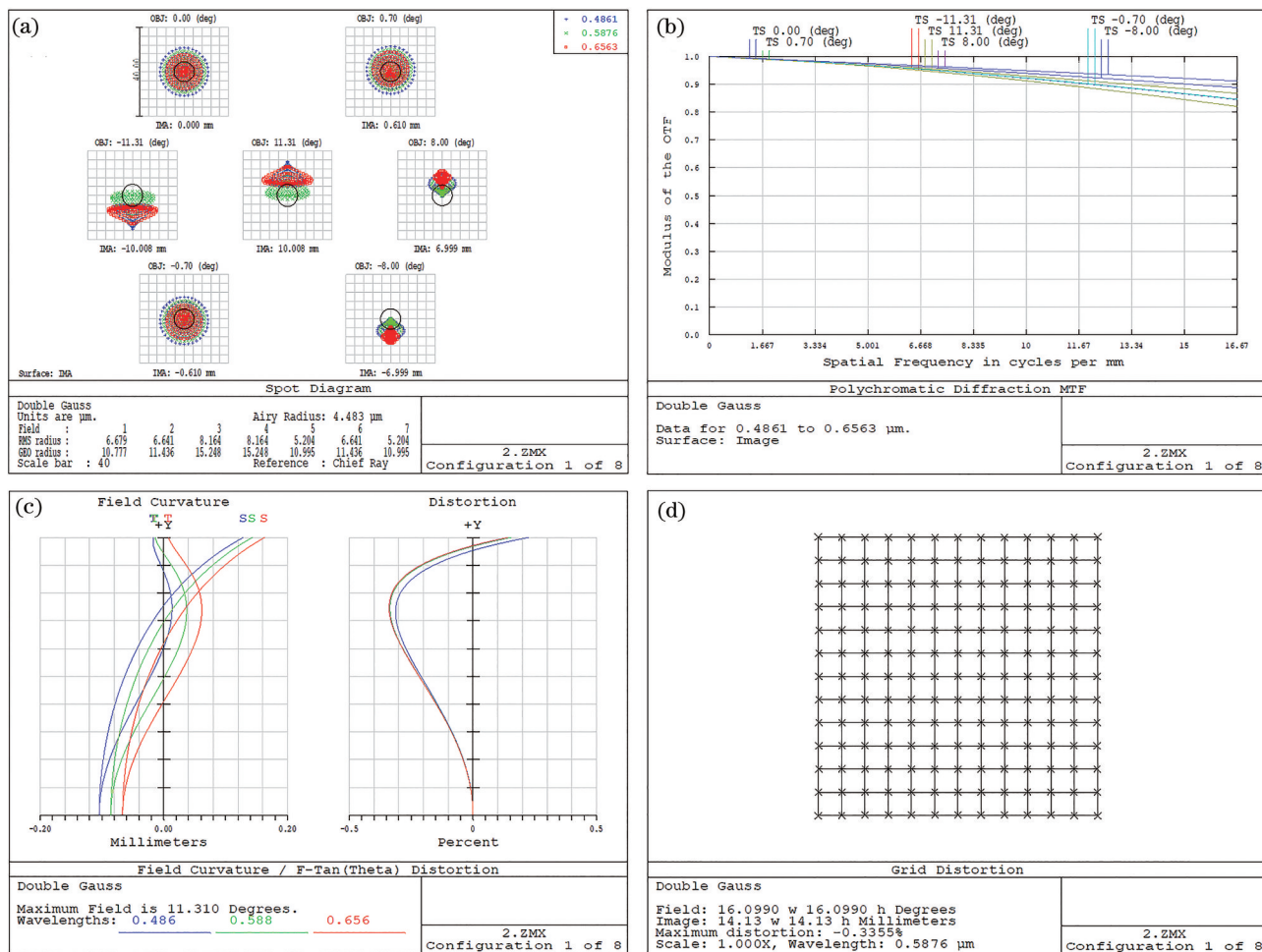


图 7 目镜组的成像质量。(a)点列图;(b)衍射 MTF 曲线;(c)垂轴像差;(d)网格畸变

Fig. 7 Image quality of eyepiece set. (a) Spot diagram; (b) diffraction MTF curves; (c) vertical aberration; (d) grid distortion

视场球差、像散和彗差控制在 0.002 mm 以内;中心视场的波前误差为 0.157λ,边缘视场的波前误差为 0.199λ,全视场的波前误差均小于 0.250λ;全视场的最大畸变率控制在 0.3350% 以内,因此可认为目镜的成像质量已经接近衍射极限。

3.3 整体光路的设计结果及像质评价

瞄准镜的整体光路由物镜组和目镜组对接形成,由于目镜在设计过程中是反向设计的,因此在对接过程中需要将目镜再次反向,对接的整体光路如图 8 所示。

整个系统光路包括共轴激光测距所用的棱镜和分划板在内的共 11 块镜片,物镜的视场角为 2.2°,物镜的入瞳直径为 50 mm,机械直径为 54 mm,出瞳直径为 5 mm,出瞳距离为 87.89 mm,系统的放大倍率为 10^x,机械筒长为 403.76 mm,物镜的调焦量为 2.83 mm。由于对接之后整个光路属于无焦系统,不能直接使用调制传递函数等指标来评价系统的成像质量,需在系统后面添加理想透镜才能进行像质评

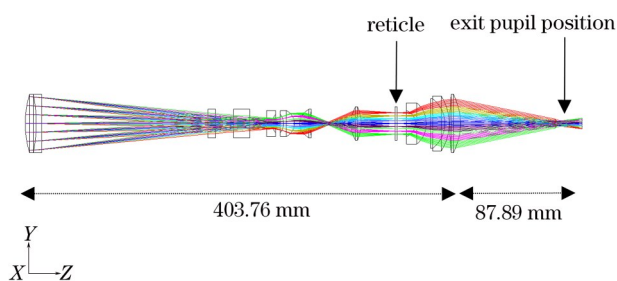


图 8 整体透镜的光路

Fig. 8 Light path of total lens

价。图 9 为整体光路添加理想透镜后的成像质量。

从图 9 可以看到,在 2.2°全视场角的范围内 RMS 半径小于 7.6 μm,在奈奎斯特频率为 16.67 lp/mm 处的 MTF 值大于 0.85;透镜的全视场球差、像散和彗差控制在 0.002 mm 以内;中心视场的波前误差为 0.178λ,边缘视场的波前误差为 0.218λ,全视场的波前误差均小于 0.250λ;全视场的最大畸变率控制在 1.1920% 以内,因此可认为瞄准镜整个光路的成

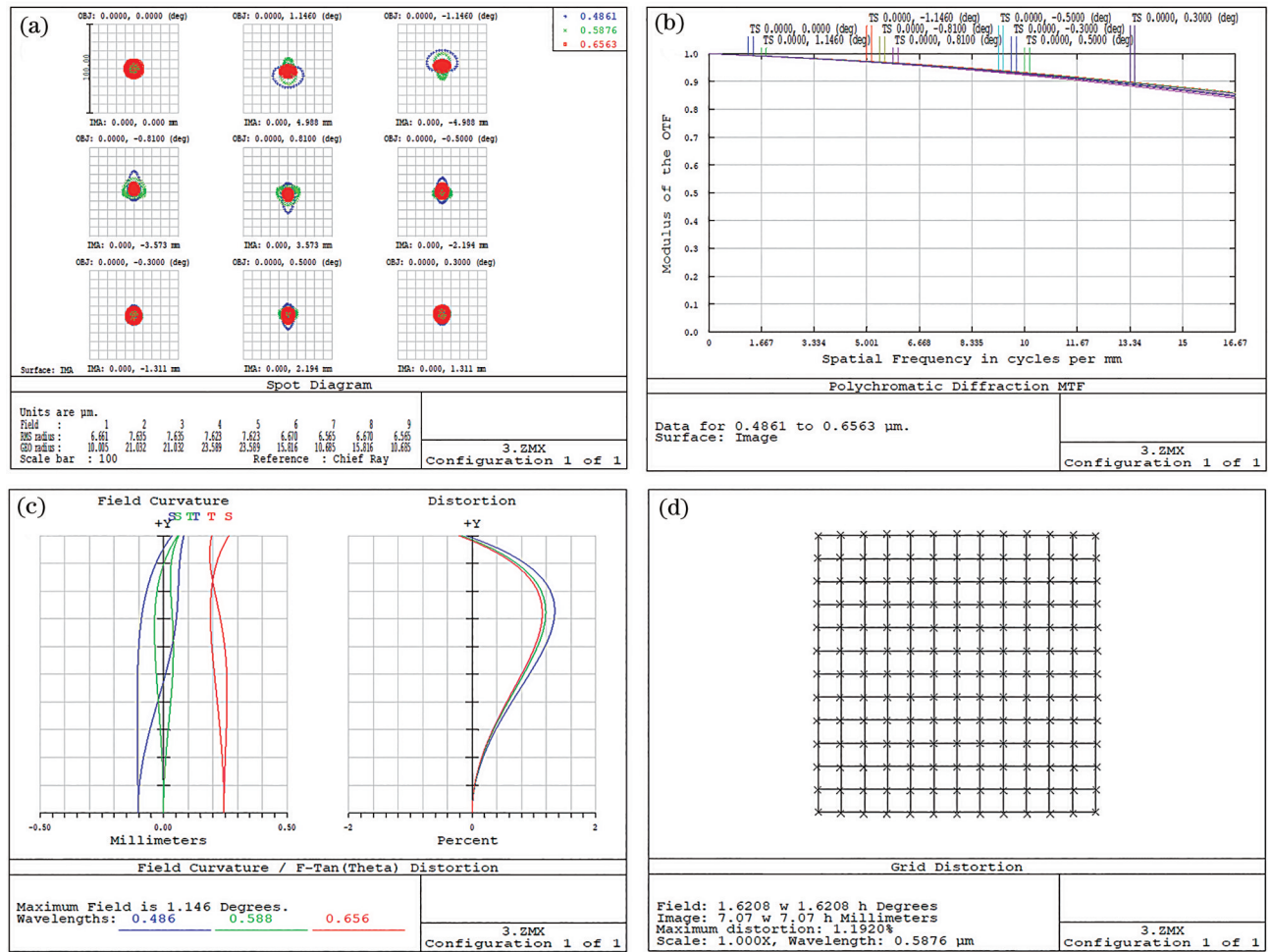


图 9 整体透镜的成像质量。(a)RMS 光斑图;(b)衍射 MTF 曲线;(c)垂轴像差;(d)网格畸变

Fig. 9 Image quality of total lens. (a) Spot diagram; (b) diffraction MTF curves; (c) vertical aberration; (d) grid distortion

像质量已经接近理想。

4 结 论

针对目前军用狙击步枪存在成像质量较差和出瞳距离较短等问题,根据像差理论设计了放大倍率为 $10\times$ 的狙击步枪瞄准镜光路。整个光学系统采用远心光路,包括棱镜和分划板在内共 11 块镜片,物镜的视场角为 2.2° ,入瞳直径为 50 mm,出瞳直径为 5 mm,出瞳距离为 87.89 mm,系统的放大倍率为 $10\times$,机械筒长为 403.76 mm,物镜的调焦量为 2.83 mm,在奈奎斯特频率为 16.67 lp/mm 处的 MTF 值大于 0.85,全视场内的成像质量接近衍射极限,满足军用观瞄目视系统的使用需求,可应用于大倍率狙击步枪的光路。

参 考 文 献

[1] Hu H W, Li X F, Gao L Y, et al. Design of prism combined beam aiming optical system for day and

night[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2015, 13(5): 75-81.

胡红伟,李秀飞,高龙岳,等.棱镜合束昼夜合一瞄准镜光学系统设计[J].光学与光电技术,2015,13(5):75-81.

[2] Chang W J, Chen J, Zheng C Q. Optical design of common path for laser receiving/visual collimator[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(2): 267-270.

常伟军,陈姣,郑常青.用于激光接收/目视瞄准镜的共光路光学系统设计[J].应用光学,2016,37(2):267-270.

[3] Li W. Design of optical system for firing sighting telescope[D]. Changchun: Jilin University, 2019.

李伟.射击瞄准镜光学系统设计[D].长春:吉林大学,2019.

[4] Li L. Applied optics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010.

李林.应用光学[M].北京:北京理工大学出版社,2010.

- [5] Wojtanowski J, Zygmunt M, Traczyk M, et al. Beam forming optic aberrations' impact on maximum range of semiconductor laser based rangefinders[J]. *Opto-Electronics Review*, 2014, 22(3): 152-161.
- [6] Möttöus M, Hovi A, Rautiainen M. Theoretical algorithm and application of a double-integrating sphere system for measuring leaf transmittance and reflectance spectra[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(3): 563-571.
- [7] Furukawa Y, Nibu S, Kurokawa F, et al. Improving stability of switching power supply with digital peak current mode control[C]//2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), November 20-23, 2016, Birmingham, UK. New York: IEEE Press, 2016: 952-955.
- [8] Li Y Y, Zhang W Y. Design of eyepiece with long exit pupil distance used in military sighting telescope [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 42(10): 33-36.
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.
- [9] Ye W W, Zhou T F, Huang J X, et al. Design of dual-vision double telecentric optical system based on machine vision[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(1): 012202.
叶文炜, 周天福, 黄锦媛, 等. 基于机器视觉的双视野双远心光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(1): 012202.