

研究与试制

DOI:10.19453/j.cnki.1005-488x.2023.03.010

用于单筒双目微光夜视仪的折叠式光学系统设计

周继德*, 窦沂蒙, 孙良伟, 杨帆, 吕超杰, 徐康恺

(中国电子科技集团公司第五十五研究所, 南京 210016)

摘要: 设计了一种折叠式光学系统来缩短微光夜视仪轴向尺寸,提升头戴式微光夜视仪佩戴舒适性。首先给出总体设计,包括折反式物镜和长工作距离、双通道目镜系统设计,之后通过理论计算获得物镜和目镜的指标参数,最后选用符合要求的初始结构,采用软件对折叠式光学系统进行优化设计。采用折叠式光学系统的微光夜视仪,与传统直视型夜视仪相比轴向长度由110 mm减少到70 mm,更接近佩戴者头部,可以有效提升佩戴舒适度。

关键词: 折叠式微光夜视仪;光学系统设计;非球面;重心

中图分类号: TN22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2023)03-0243-05

Folding Optical System Design for Monocular Binocular Night Vision Devices

ZHOU Jide, DOU Yimeng, SUN Liangwei, YANG Fan, LYU Chaojie, XU Kangkai

(The 55th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210016, CHN)

Abstract: A folding optical system which was aimed to shorten the axial length of the low-light-level night vision goggles was designed to improve the wearing comfort. Firstly, the overall design was given, which included the design of a foldable objective lens, a long working range, and dual channel eyepiece system. Next, the parameters of the objective lens and eyepieces were obtained through the theoretical calculation. Finally, an initial structure that met the requirements was selected, and the folding optical system was optimized by using the software. Compared to the traditional direct-view night vision goggles, the axial length of the night vision goggles was reduced from 110 mm to 70 mm by using folding optical system, which was closer to wearer's head and could effectively improve wearing comfort.

Key words: folding low-level-light night vision goggles; optical system design; aspheric surface; center of gravity

收稿日期:2023-03-31

作者简介:周继德(1989—),男,硕士,主要研究方向为光电成像系统技术研究;(E-mail:jide_zhou668@163.com)

窦沂蒙(1992—),男,硕士,主要研究方向为光学系统设计技术研究;

孙良伟(1997—),男,硕士,主要研究方向为光学系统设计技术研究。

* 通讯作者

引 言

夜视成像技术是在低照度条件下,将不可见辐射加以转换或将微弱的夜天光进行增强,以实现人眼夜间隐蔽观察的一种成像技术,用于提升夜间观察能力^[1-4]。由于夜视镜利用夜视镜支架固定在头盔前边沿,长时间的佩戴夜视镜装备进行观察等操作,会引起佩戴者后脖不适感^[5-6]。为适应现代微光夜视仪在实际应用中的高性能、轻量化的需求,减少佩戴者佩戴时的不适,研究设计一款基于折叠式光路的微光夜视仪,与传统直视型夜视仪相比,轴向长度由 110 mm 减少到 70 mm,更接近佩戴者头部,可以有效提升佩戴舒适度,为后续夜视镜小型设计提供了一种新的思路。

1 折叠式光学系统总体设计

单筒双目微光夜视仪光学总体方案如图 1 所示,微光夜视仪主要由物镜系统、像增强器、左右目镜系统和电路系统组成。单筒双目微光夜视仪中只有一个物镜镜头,光线由物镜镜头进入系统后成像在像管阴极面上,像管进行电子倍增后轰击荧光屏产生的光被分光棱镜一分为二,分别进入左右两个目镜中,由目镜对荧光屏上的像再次成像,供人眼观察。其中,物镜组采用转折光路、前组对焦的设计方案;像增强器靶面尺寸为 18 mm;左目镜采用透镜组倒像、反射镜转像的光学方案;右目镜采用透镜组倒像、双直角屋脊棱镜转像的方案;由此来实现瞳距拓展的双目观察。采用折反式布局的光学方案后,像增强器可以横向放置,从而可以有效地减小夜视仪轴向尺寸,代价是光学方案的复杂化,需要通过精密的、系统的光学设计来解决相关问题。

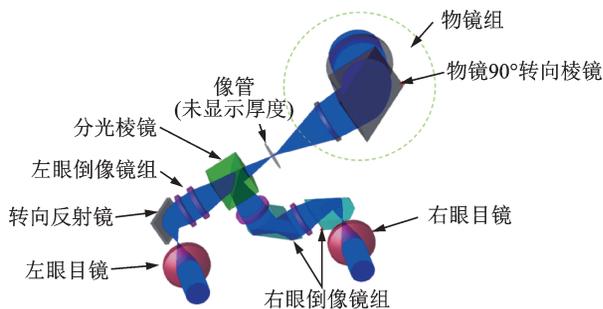


图 1 折反式微光夜视仪总体光学方案

Fig. 1 Overall optical scheme of turn-back low-light-level night vision instrument

2 光学系统指标参数的计算

2.1 物镜指标参数计算

文中所设计的物镜与常规直视型微光夜视仪物镜原理相同,不同之处在于增加了一个直角棱镜转折光路。为了减小夜视系统的重量,提升佩戴舒适度,一般要求物镜重量尽可能小,长度尽可能短,使整个系统的重心后移。为了提升低照度下的观察效果,需要大的相对孔径来保证像增强阴极面能够接收足够的照度。为了增加观察视野还需要物镜有足够大的视场^[7-8]。

1) 成像光谱范围确定

物镜成像光谱范围根据选择的微光像增强器响应光谱和环境光谱限制来决定,文中选择 470 nm~920 nm。

2) 物镜视场确定

为了使微光夜视系统的水平视场达到 50°,物镜的水平视场应设计为 $\geq 50^\circ$,取 50°作为视场设计值。

3) 物镜焦距确定

选择的像增强器阴极靶面直径 $d=18$ mm,水平视场 50°,根据公式(1),可计算得到物镜的理论焦距 $f=19.3$ mm。考虑到物镜会有较大的负畸变,设计时不对焦距做限制,优先保证视场角和像高。

$$f_{\text{物}} = \frac{d}{2 \tan(\omega)} \quad (1)$$

式中, ω 为半视场角,等于 25°。

4) 通光孔径的计算

通光孔径决定整个夜视镜的通光能量,根据探测距离和探测器增益参数来确定物镜通光孔径的大小。根据探测方程^[9],光子噪声所限制的分辨力为:

$$\alpha_2 = \frac{2K}{MDC} [2e / (\tau t s \rho E)]^{1/2} \quad (2)$$

由式(2)得:

$$D = \frac{2K}{M\alpha_2 C} [2e / (\tau t s \rho E)]^{1/2} \quad (3)$$

式中, D 为物镜的有效通光孔径; M 为物镜的调制传递函数(轴上),取 50%; C 为景物的调制度,取 0.35; e 为电子电荷量, $e=1.6 \times 10^{-19}$ C; τ 为物镜的透过率系数,取 0.8; t 为人眼的积累时间,取 0.2 s; s 为光电阴极的积分灵敏度,取 1.8×10^{-3} A/lm; ρ 为目标背景的平均反射率, E 为夜间天空的照度,取 $E=1 \times 10^{-3}$ lx; K 为阈值信噪比,即人眼分辨目标所需的最小信噪比与要求发现目标的概率程度与目标形状

有关,取 $K=1.9$; α_2 为光子噪声所限制的分辨力。 α_2 的定义为:

$$\alpha_2 = (\alpha_3^2 - \alpha_1^2)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

其中 α_1 为由微光像增强器调制度所限制的仪器分辨力; α_3 为识别分辨力。

$$\alpha_1 = \frac{A}{n_{\text{最佳}} \cdot L} \quad (5)$$

其中 A 为目标的临界尺寸,取 0.5 m ; L 为视距,取 120 m ; $n_{\text{最佳}}$ 为最佳分辨率所对应的空间频率。

根据约翰逊准则,对于目标的空间频率取值有 $n_{\text{发现}}=1$, $n_{\text{识别}}=4$, $n_{\text{分清}}=8$, $n_{\text{最佳}}=15$,分别对应发现分辨力、识别分辨力、分清分辨力和最佳分辨力。

$$\text{故: } \alpha_1 = \frac{A}{n_{\text{最佳}} \cdot L} = 0.28 \quad (6)$$

$$\alpha_3 = \frac{A}{n_{\text{发现}} \cdot L} = 4.17 \quad (7)$$

$$\alpha_2 = (\alpha_3^2 - \alpha_1^2)^{\frac{1}{2}} = 4.16 \quad (8)$$

$$D = \frac{2K}{M\alpha_2 C} [2e / (\tau t \rho E)]^{1/2} = 12.30 \quad (9)$$

为了尽可能增加进光量,文中通光孔径取 15.50 mm 。

2.2 目镜指标参数计算

微光夜视仪的目镜主要作用是将微光像增强器中荧光屏目标图像投射并放大进入人眼,目镜主要指标参数有焦距、视场、出瞳直径和出瞳距离等,下面对以上指标进行计算和确定。

1) 目镜的焦距计算

根据微光夜视仪的放大率和物镜的焦距值来计算目镜的焦距值,如公式(10)所示,微光夜视仪的放大率一般选择 1 ± 0.05^x 。

$$\tau = -\frac{f_{\text{物}}}{f_{\text{目}}} \quad (10)$$

上式中, τ 为微光夜视仪放大率, $f_{\text{物}}$ 为物镜焦距,设计值为 20.1 mm ,因此目镜设计时需要控制焦距和物镜焦距接近来满足放大率的要求。

2) 视场的计算

根据微光夜视仪放大率可知目镜的视场与物镜的视场相同,故文中目镜的视场取 $2\omega=50^\circ$ 。

3) 出瞳直径

微光夜视仪目镜的出瞳直径取 9 mm 。

4) 出瞳距离

微光夜视仪目镜的出瞳距离取 20 mm 。

3 光学系统设计

3.1 物镜设计分析及像质评价

物镜将目标物体反射的光线汇聚到像增强器的阴极面上,根据应用需求和上一节的计算,该物镜属于大视场、宽光谱、大相对孔径物镜。选用七片式改进的双高斯物镜作为初始结构,为了实现减小轴向尺寸、使重心靠近人眼的目标,优化的过程中将直角棱镜加入光路中,实现了光路的 90° 转折。利用光学设计软件对物镜进行优化设计:通过合理调整七片球面透镜的光焦度分配、选用优秀的消色差玻璃组合、优化孔径光阑位置,使物镜除畸变外的像差得到了良好的校正。

图2所示为优化后的光路结构,除去最后一块保护玻璃,物镜由7片球面透镜和一块直角棱镜组成;直角棱镜将物镜分为前后两个部分,5片球面透镜组成对焦组,光轴方向被直角棱镜 90° 偏转后经2片透镜组成的聚焦组成像在像增强器的阴极面上。

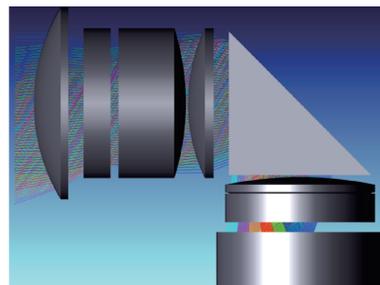


图2 物镜结构光路图

Fig.2 Optical path diagram of objective lens

经过优化设计后,物镜的光学系统传递函数如图3(a)所示,在 40 lp/mm 处,除边缘视场外,近乎全视场的光学传递函数值均大于 0.4 ,满足使用需求;物镜光学系统的场曲和畸变如图3(b)所示,全视场场曲均控制在 0.1 mm 以内,最大畸变为 -8.23% ,配合目镜进行畸变矫正,满足使用要求。

物镜主要参数如表1所示。

表1 物镜主要参数

Tab.1 Main parameters of the objective lens

指标名称	参数值
视场角/ $^\circ$	50
焦距/mm	20.1
入瞳直径/mm	15.5
畸变/ $\%$	-8.23
光谱范围/nm	470~920

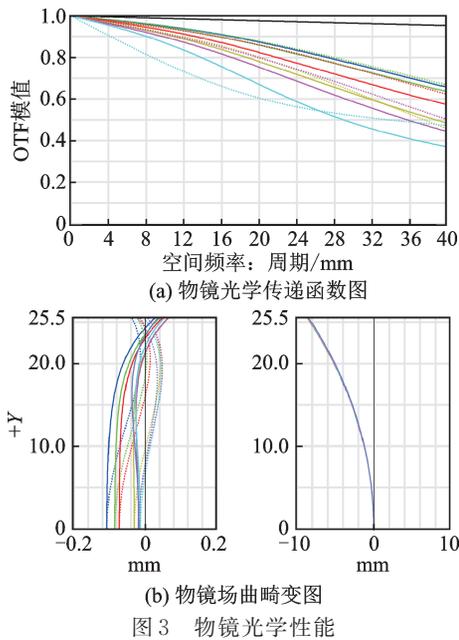


图 3 物镜光学性能

Fig. 3 Optical performance of the objective lens

3.2 目镜设计分析及像质评价

不同于传统直视型微光夜视仪目镜,为了尽可能减小微光夜视仪的轴向尺寸,文中目镜采用了单筒双目折叠光路系统。通过横置像增强器,有效减小了光路轴向尺寸,但也极大地增大了设计难度。主要设计思路如下:采用传统目镜加中继系统的方式来增加光程。左右目镜同时观察一个荧光屏并且共用一个分光棱镜和部分透镜,为了在实现高性能的同时减小双目视差,文中利用高次非球面设计技术,利用光学设计软件的多重结构功能对左右目镜性能、关键结构参数和双目视差进行了优化。

表 2 所示为目镜视度调节过程中的双目视差情况。由表 2 可知,目镜视度调节过程中的双目视差最大为 3.18', 根据双目光学系统的设计使用经验,双目视差小于 5' 不会影响人眼观察。设计结果满足

表 2 目镜视度调节过程中的双目视差

Tab.2 Binocular parallax during the adjustment of diop-ter

视度	左目镜视场角/(°)	右目镜视场角/(°)	差值/(')
+3SD	24.929	24.982	-3.18
+2SD	24.956	24.993	-2.22
+1SD	24.982	25.003	-1.26
0 SD	25.008	25.013	-0.30
-1SD	25.034	25.022	0.72
-2SD	25.059	25.031	1.68
-3SD	25.083	25.040	2.58
-4SD	25.100	25.048	3.12
-5SD	25.109	25.056	3.18

使用要求。

图 4 为所设计的目镜光路结构图,荧光屏发出的光线经过分光棱镜被分成两路,左目镜光路经过 2 片倒像镜组后被反射镜偏转 90°,再通过 5 片球面目镜组从出瞳出射,被人眼接收;右目镜光路经过 2 片直角屋脊棱镜和 1 片透镜转像倒像后,光轴同样偏转了 90°,再经过 3 片目镜组(含一片高阶非球面),从出瞳出射,被人眼接收。

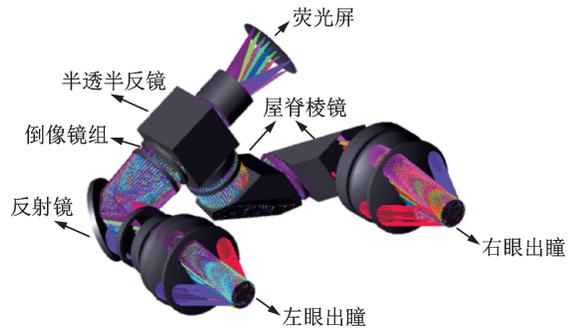
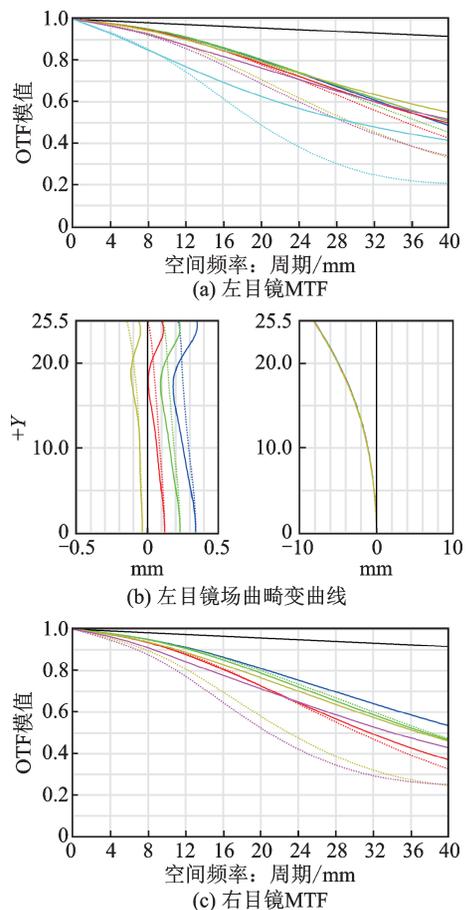
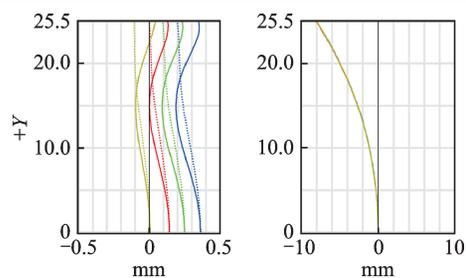


图 4 目镜光路结构图

Fig. 4 Optical path structure diagram of eyepiece

如图 5 所示,在空间频率为 40 lp/mm 时,左右目镜绝大部分视场的光学传递函数值大于 0.3;全场场曲小于 0.5 mm;左目镜畸变为 -8.18%、右目





(d) 右目镜场曲畸变曲线

图5 目镜光学性能

Fig.5 Optical performance of the eyepiece

镜畸变为 -8.15% ,可以与物镜畸变相匹配,满足使用要求。

目镜系统主要参数如表3所示。

表3 目镜系统主要参数

Tab.3 Main parameters of the eyepiece

指标名称	左目镜	右目镜
视场角/ $^{\circ}$	50	50
焦距/mm	20.23	20.20
畸变/ $\%$	-8.18	-8.15
出瞳距离/mm	20	20
出瞳直径/mm	9	9
光谱范围/nm	480~630	480~630

4 结 论

微光夜视光学系统作为人眼佩戴装备,对其整

体重量和重心位置有较高的要求。传统的单目、双目和四目微光夜视仪,由于其采用同轴折射式物镜、目镜,光路整体较长,重心较靠前,佩戴时可能会具有前倾感和下坠感。文中设计的折叠式微光夜视仪,利用折反式光学系统,与标准型双筒双目夜视仪相比轴向长度由110 mm减少到70 mm,成功实现了微光夜视光学系统重心靠近人眼的目标,可以有效提升佩戴舒适度,减轻使用者的负担,为后续相关设计提供参考。

参 考 文 献

- [1] 吴 昊,伍 园,伍 伟,等.数字微光夜视器件技术研究[J].光电子技术,2022,42(1):72-78.
- [2] 陈 钱.先进夜视成像技术发展探讨[J].红外与激光工程,2022,51(2):1-8.
- [3] 张 勇,马飒飒,李志伟.美军微光夜视头戴系统技术进展[J].红外技术,2022,6:12-19.
- [4] 蔡 毅.典型单兵作战场景与夜视镜[J].红外技术,2022,44(4):315-327.
- [5] 吴明磊,杨 忠,刘何庆,等.飞行员头盔质量特性测量设备和方法[J].航天医学与医学工程,2016,29(5):357-362.
- [6] 王 威.高G载荷下飞行员颈部动力学响应与损伤研究[D].湘潭:湖南科技大学,2018.
- [7] 洪乙又,周继德,杨 帆,等.用于头盔微光夜视仪的轻量化光学系统设计[J].光电子技术,2020,40(9):186-194.
- [8] 刘 均,刘 欣.微光夜视仪中物镜光学系统的小型优化设计[J].西安理工大学学报,2009,29(6):519-522.
- [9] 陈 巍.微光夜视仪光学系统的研究[D].长春:长春理工大学,2012.