

文章编号: 1005-5630(2025)06-0048-06

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.202506090081

微光夜视头盔成像光学系统的设计与研制

张军光¹, 罗圆圆^{1,2}, 曹来书¹, 黄启禄^{2,3}, 吴富宝¹

(1. 厦门力鼎光电股份有限公司, 福建 厦门 361000;

2. 泉州师范学院 光子技术研究院, 福建 泉州 362000;

3. 福建省先进微纳光子技术与器件重点实验室, 福建 泉州 362000)

摘要: 为解决军用与警用侦查设备的应用缺陷, 设计了一款焦距为 23 mm, 视场角为 40°, F 数为 0.9 的微光夜视头盔成像镜头。该成像镜头工作波段为 400~1000 nm, 全视场光学畸变小于 2%, 在空间频率为 53 lp/mm 时, 全视场调制传递函数大于 0.3, 光学系统总长为 40 mm。该成像系统采用像元尺寸为 9.5 μm 的 CMOS 图像传感器, 并已完成试制与测试评估。研究表明, 该设计具备通光孔径大、分辨率高、成本低且畸变小的优势。

关键词: 微光夜视; 成像镜头; 非球面光学元件; 光学设计

中图分类号: TN 253 **文献标志码:** A

Low-light-level night vision helmet imaging system design and development

ZHANG Junguang¹, LUO Yuanyuan^{1,2}, CAO Laishu¹, HUANG Qilu^{2,3}, WU Fubao¹

(1. Xiamen Leading Optics Co., Ltd., Xiamen 361000, China;

2. Quanzhou Normal University, Institute of Photonic Technology, Quanzhou 362000, China;

3. Fujian Provincial Key Laboratory for Advanced Micro-nano Photonics Technology and Devices, Quanzhou 362000, China)

Abstract: Design of a helmet-mounted low-light-level night vision imaging lens is studied in this paper. This imaging lens has focal length of 23 mm, field of view of 40°, F -number of 0.9. With working wavelength range of 400 -1000 nm, the optical distortion of this lens for the full field of view is less than 2%. With the spatial frequency of 53 lp/mm, the modulation transfer function for the full field of view is greater than 0.3. and the total length of the optical system is less than 40 mm. A CMOS image sensor with pixel size of 9.5 μm is used. The prototype of the helmet-mounted low-light-level night vision imaging system is completed and lens performance is evaluated. The research results show that the design has the advantages of large aperture, high resolution, low cost and minimal distortion. The research results can provide low-cost and high-performance low-light-level imaging solutions for military individual night vision devices, police

收稿日期: 2025-06-09

基金项目: 福厦泉自创区协同专项 (3502ZCQXT2023010); 福建省科技创新重点项目 (2022G02018)

第一作者: 张军光 (1986—), 男, 工程师, 研究方向为光学镜头设计、制造与检测。

E-mail: John.Zhang@evetar.com

通信作者: 吴富宝 (1963—), 男, 硕士, 研究方向为光学设计技术。E-mail: paul@evetar.com

investigation equipment and other application scenarios.

Keywords: low-light-level night vision; imaging lens; aspheric optical element; optical design

世界范围内爆发的多场局部军事冲突均选择在夜间发生。夜战具有隐蔽性高、可降低敌方观察和射击精度等优势。微光夜视技术可使作战人员在夜间或低照度环境下观察到微弱的光照信息,并将其转换为人眼可见的图像。这使得作战人员能够在夜间保持较高的视觉能力,更准确地识别目标、判断环境威胁。该技术无需主动照明光源,具有隐蔽性好、图像清晰的优点,是现代化武器夜视装备的支撑技术之一,对于掌控以夜间战争为特点的现代化战争局势至关重要^[1]。

在全球范围内,尤其在科技发达国家,如美国、英国、法国、德国、荷兰、俄罗斯等,凭借先进的研发能力和生产技术,持续推动微光夜视技术的创新和发展。其中,以美国为首的微光夜视装备技术水平在世界上一直处于领先地位^[2],其装备已配备三代、四代技术。受国外的技术封锁,国内的微光夜视技术起步较晚,目前主要采用二代或超二代像增强器。近年来,中国的微光夜视技术已经取得了显著的进步。

微光夜视系统包括物镜(成像镜头)、像增强器、目镜这3部分。系统的原理是:首先,成像镜头收集环境中的微弱光线,聚焦形成一个微弱的图像;随后,该图像进入像增强器,像增强器对目标物体进行光电转换和电信号倍增后再打到荧光屏上转化为可见光图像;最终,观察者通过目镜可以观察到增强后的可见光图像^[3-4],如图1所示。

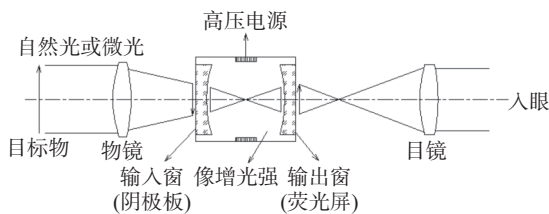


图1 微光夜视系统结构图

Fig. 1 Low-light-level night vision system structure

成像镜头是微光夜视系统的重要组成部分^[5],国内微光夜视成像镜头的 F 数普遍在1.2~1.4之间,本文设计研究的微光夜视镜头 F 数可达0.9。 F 数越小,意味着镜头拥有更大的通光孔

径,这在夜间或微光环境下尤为重要,能够捕捉并汇聚更多的光线,显著提升图像的明亮度和清晰度,即便在最暗淡的条件下也能捕捉到细腻入微的画面细节。另外,镜头成像分辨率也与 F 数密切相关, F 数越小,相对孔径越大,分辨率越高。微光夜视头盔成像光学系统的设计研究具有重要意义。

1 光学系统设计

1.1 设计指标

在可见光/微光条件下,环境本身就具有照度高,色彩还原度高,细节明显等特点,所以成像物镜在此环境下的分辨能力也就越高,而在红外条件下分辨能力较低^[6-7]。夜间环境条件下,除可见光之外,还包含丰富的近红外辐射^[8-9]。为实现全天候工作,本文选择工作波段为400~1000 nm的微光夜视成像光学系统,设计指标如表1所示。

表1 成像镜头设计指标
Tab. 1 Design specifications of imaging lens

焦距	视场	F 数	光学畸变	MTF (53 lp/mm)	波长范围	像元尺寸
22 mm	40°	0.9	<2%	>0.3	400~1000 nm	9.5 μm

1.2 材料选择

相比传统的玻璃材料,塑料光学元件可通过模压工艺制备非球面结构,且具备成本低、重量轻、耐冲击、性能佳的优点^[10]。这些特点使其在制造高精度、高性能的光学产品时,成为很好的选择。本文将玻璃光学元件和塑料光学元件融合,兼具了成本低、可批量化生产、成像性能佳的优势。成像镜头设计选择使用的材料如表2所示。

1.3 初始结构选取

初始结构主要有两种方法被广泛采用^[11],第一种是PW法,此方法不仅与镜片的半径 R 、

表 2 光学材料选择
Tab. 2 Optical material selection

材质	名称
玻璃	H-K9L、M-FCD1、H-KF6、FCD515、H-ZPK5、H-ZF2
塑料	ZEONEX_K26R、EP6000

中心厚度 d 和折射率 n 等结构参数有关, 而且还与焦距 f 、视场角等系统外部参数有关。第二种是常用的缩放法, 本文选用的初始结构来源于中国专利 ZL202011618440, F 数为 1.3, 光学畸变小于 2.8%, 相对照度大于 40%。

本文采用缩放法, 经缩放的成像镜头初始结构图如图 2 所示。此结构忽略实际约束公差、加工难度、成本等复杂性问题, 还需进一步优化。

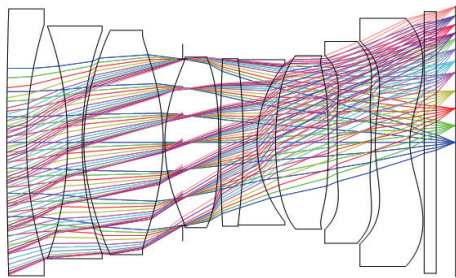


图 2 初始结构图
Fig. 2 Preliminary structure

1.4 优化设计

本设计选取的初始结构由 9 片镜片组成, 其中包括两片胶合片, 系统的焦距为 50 mm, F 数为 1.4。首先优化相对孔径, 其次考虑调整视场角, 而焦距的调整则可作为最后的优化选项^[12]。

(1) 先将系统按焦距缩放使焦距达到指标要求 22 mm, 并将保护玻璃按参数要求添加至系统中, 逐步改善边缘视场的渐晕, 确保光学系统的整体结构不会发生显著的变动。接着将数据编辑器中的曲率半径、厚度设为变量、添加评价函数并给定各操作数恰当的权重进行优化。然而, 优化后的结果显示 F 值未达要求。

(2) 为了使系统达到指标要求的 F 值, 并且在优化迭代过程中也需使各像质指标平衡, 非球面透镜有消除球差、彗差、像散、视场畸变等像差的优点^[13], 则考虑非球面的使用。首先将非胶合片的第 2 片、第 7 片和第 8 片改为偶次非球

面进行优化。其次, 低成本的光学材料能够有效降低产品的制造成本, 而塑料非球面具有质量轻、像差小、成型自由度高等优点^[14]。最终将第 7 片和第 8 片玻璃材料改为塑料非球面。

(3) 要达到成像质量的清晰度、大通光和低成本, 通过反复对光学系统进行调整, 最终将第 9 片也改为塑料非球面。添加必要的操作数, 优化过程中适当调整权重, 注意透镜的边缘厚度和中心厚度确定的工艺性。最终迭代优化平衡性能与工程约束(如温度稳定性、装配公差、材料可用性), 得到了一个性能较为理想、结构较为紧凑的光学系统, 各项指标均满足设计要求, 成像质量显著提升。

2 设计结果分析

经过优化调整, 最终设计结果如图 3 所示, 该微光夜视头盔成像镜头焦距为 22 mm, 视场角为 40°, F 数为 0.9, 光学总长小于 36 mm。

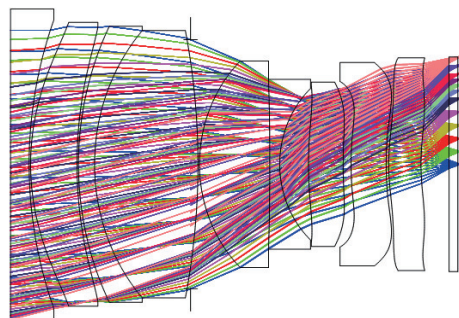


图 3 成像镜头优化设计结构示意图
Fig. 3 Diagram of optimized imaging lens configuration

2.1 光学性能指标分析

根据成像传感器的奈奎斯特采样定理, 系统的极限空间频率(即奈奎斯特频率 f)

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

式中, P 表示像元大小。本文设计镜头的奈奎斯特频率为 $f = 1/(2 \times 9.5) \approx 53 \text{ lp/mm}$ 。图 4 为该系统的 MTF 曲线图, 模拟结果显示: 在 53 lp/mm 空间频率下, 全视场(1.0 field)的 MTF 值均大于 0.33, 0.707 视场的 MTF 值大于 0.4, 成像质量良好, 符合设计要求。

图 5 为系统的点列图, 由图可知, 全视场均

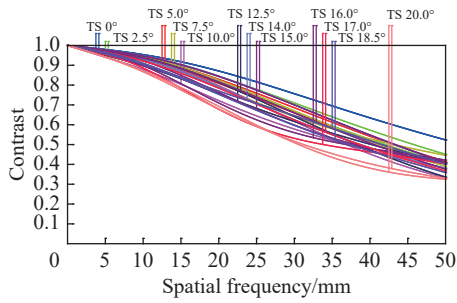


图 4 MTF 曲线

Fig. 4 MTF curve

方根光斑半径均小于 $9.5 \mu\text{m}$, 在像元尺寸范围内, 能量集中度高。图 6 为系统的场曲和畸变图, 场曲小于 0.1 mm , 畸变小于 2% 。

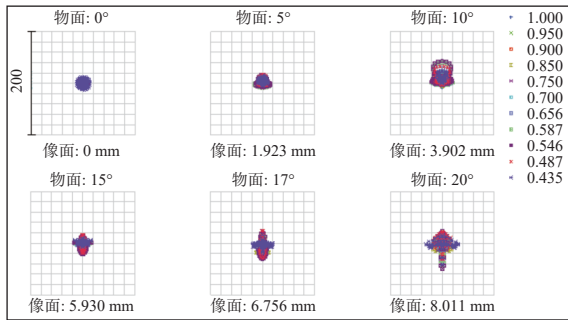


图 5 成像镜头的点列图

Fig. 5 Diagram of spot array of the imaging lens

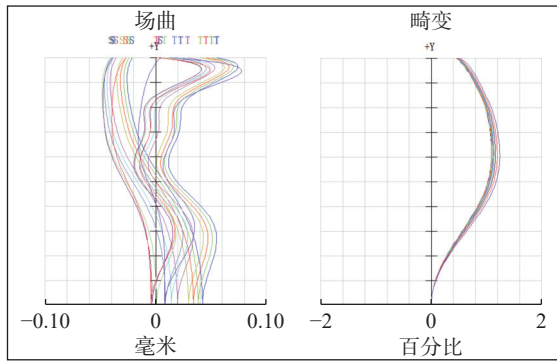


图 6 场曲与畸变图

Fig. 6 Field curve and distortion diagram

2.2 杂散光分析

利用 ASAP 光学软件, 模拟光源绕镜头旋转, 使其覆盖所需视场范围, 模拟选择 3 个方位: 20° 、 0° 和 40° 。光源与镜头角度从 0° 转到 20° 有效视场范围内, 在探测器上无眩光现象, 如图 7(a)~(b) 所示; 当光源旋转至 40° , 探测器上无“拖影”现象, 如图 7(c) 所示。

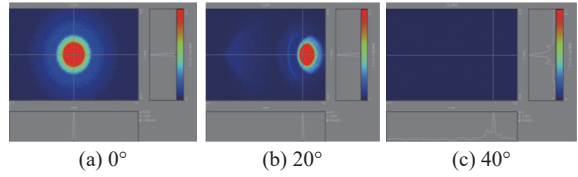


图 7 镜头杂散光模拟

Fig. 7 Simulation on lens stray light

2.3 公差分析

光学元件的设计和制造过程中, 为了满足后续的零件加工和装调需要对光学零件和对应的结构件分配一定的公差^[15-17], 确保最终产品能够满足设计要求。在公差编辑器中对表面公差、元件公差和折射率公差输入不同的加工精度进行分析^[18-19]。由公差分析可得, 第 3、4 透镜的胶合片偏心, 以及第 8 片塑料非球面透镜两表面倾斜, 对成像性能相对敏感, 加工生产时需特别管控。本设计的公差允许范围如表 3 所示。

表 3 镜头元件公差确定
Tab. 3 Lens element tolerances

类型	玻璃镜片	塑料镜片
TTHI	$\pm 0.02 \text{ mm}$	$\pm 0.003 \text{ mm}$
TEDY	0.01 mm	0.005 mm
TSDY	0.01 mm	0.003 mm
TETX	0.05°	0.05°
TSTX	0.05°	0.05°
TIRR	± 0.3	± 0.3
TFRN	± 3	± 3
TABB	$\pm 0.5\%$	$\pm 0.5\%$
TIND	± 0.0003	± 0.0003

最后用蒙特卡罗公差分析最终批量生产的良率。由蒙特卡罗分析可得, 该镜头 80% 以上的蒙特卡罗样本 MTF 大于等于 0.30978 , 如表 4 所示。

3 镜头的试制与测试

3.1 像质评价

图 8 为本设计的实物图, 对产品进行分辨率

表 4 蒙特卡罗分析结果
Tab. 4 Monte Carlo analysis results

蒙特卡罗分析	边缘视场MTF
90%	0.25833
80%	0.30978
50%	0.35485
20%	0.36665
10%	0.37581

测试，将 ISO12233 Chart 置于灯箱中，调节拍照系统的位置，保证其光轴与 ISO12233 Chart 平面垂直，且使 ISO12233 Chart 4 : 3 的区域正好落在摄像头的预览画面，如图 9 所示。该镜头 Sensor 是 1.3 M，根据测试标准 1.3 M 像素在中心区域要求 600 线对，边缘区域要求 500 线对。在 600 lux 照度环境下，该镜头中心分辨率大概在 620 线对，边缘分辨率大概在 515 线对，误差范围允许 50~100 线对，测试结果达到测试要求^[20]。



图 8 实物图
Fig. 8 Object pictures

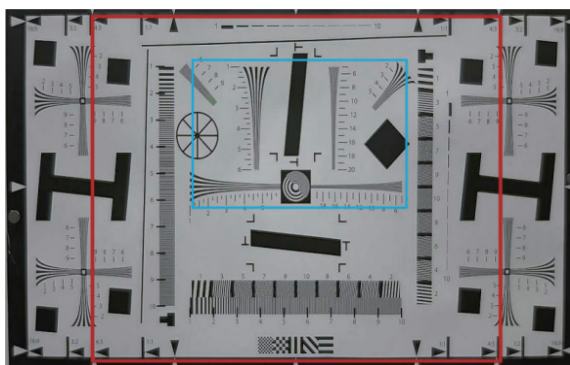


图 9 分辨率实拍图
Fig. 9 Resolution real shot map

3.2 MTF 测量

图 10 为镜头的 MTF 实测结果，空间频率 50 lp/mm 时，MTF 大于 0.3，与理论设计较为一致。

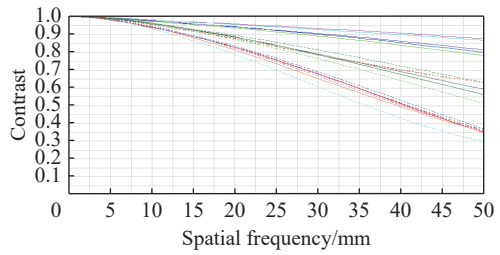


图 10 实际测量 50 lp/mm MTF 曲线
Fig. 10 The actual measurement of 50 lp/mm MTF curve

3.3 杂散光测试

杂散光的形成分为光学部分和结构部分，设计模拟分析阶段，光学部分模拟时未出现杂散光，在产品实际应用时为防止结构件的反射导致杂散光的出现，所以在加工阶段会对元件进行涂墨处理以达到抑制杂散光的效果^[21]。在该镜头的有效视场范围内(全视场 40°)，实物拍摄与模拟结果一致都无“鬼像”产生，测试结果如图 11 所示。

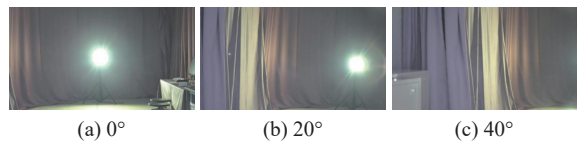


图 11 镜头杂光实拍图
Fig. 11 Actual image of lens stray light

再利用积分球测试成像镜头的 VGI 数值(杂散光系数)，基于 ISO 9358 标准，用于镜头对目标白斑及黑斑检测拍摄，测试计算白斑及黑斑对比情况，数量化分析镜头杂散光的情况。杂散光系数计算公式为黑场灰阶值/白场灰阶值。图 12 为镜头杂散光系数测试，测试的白场灰阶数值为 3344.81，黑场灰阶数值为 21.88，即该成像镜头的杂散光系数为 0.65%，小于 2% 的标准，



图 12 镜头杂散光系数测试图
Fig. 12 Lens stray light coefficient test diagram

表明成像镜头的杂散光性能良好。

4 结 论

本文设计研制的微光夜视头盔成像镜头具有 F 数小,通光孔径大、分辨率高的优点,为夜间及微光环境下的高质量拍摄提供了技术途径。运用非球面光学技术,成功实现了微光夜视头盔成像镜头像质的提升与成本的降低。像质评价、图像模拟以及公差分析等评估表明,该成像镜头符合技术指标要求,并且具备良好的制造工艺性。此外,基于公差分析结果,提出了在生产过程中需要重点管控的关键因素,以确保产品质量的稳定与可靠。本文研制的微光夜视头盔成像镜头有望在夜间及微光环境下的安防监控及低空经济领域获得推广应用。

参考文献:

- [1] 李晓峰,张益军.前言[J].红外技术,2022,44(8):763.
- [2] 唐永磁.美军微光夜视技术的发展及装备应用[J].云光技术,2020,52(2):6-13.
- [3] 刘钧,尚华,宋波.头盔式单目微光夜视仪中非球面物镜系统的设计[J].应用光学,2006,27(4):308-311.
- [4] 陈宇,唐勇,张尧禹,等.微光夜视仪物镜光学系统的设计[J].仪器仪表用户,2010,17(2):40-42.
- [5] 陈妍妮,杨亮亮,江亦心,等.基于Zemax软件的仿真实验——微光夜视物镜的设计[J].大学物理实验,2023,36(4):69-71,129.
- [6] 骆媛,王岭雪,金伟其,等.微光(可见光)/红外彩色夜视技术处理算法及系统进展[J].红外技术,2010,32(6):337-344.
- [7] 孙爱平,杨绍明,郭亮,等.可见光/微光与红外平行光路融合物镜设计[J].红外技术,2020,42(1):46-53.
- [8] 朱标.一种新颖的头盔式微光夜视系统设计[J].电脑知识与技术,2020,16(10):281-282,287.
- [9] 王振东.宽波段成像光学系统设计[D].西安:西安工业大学,2022.
- [10] 张良,潘晓东.采用塑料光学元件的微光夜视物镜设计[J].兵工学报,2014,35(8):1308-1312.
- [11] 薛雷涛,林峰.800万像素超薄广角手机镜头设计[J].激光与光电子学进展,2015,52(10):252-257.
- [12] ZHAO Q L, WANG Z Q, FU R L, et al. Design of refractive/diffractive objective for head-mounted night vision goggle[J]. *Optik*, 2004, 115(1): 7-10.
- [13] 王龙飞,胡雨旺,张泽光,等.非球面光学元件的快速制造技术[J].光电工程,2024,51(1):230171.
- [14] 刘欣.大视场微光夜视仪光学系统设计[D].西安:西安工业大学,2010.
- [15] 刘锦琳,余飞鸿.旋转对称非球面表述及其特点分析[J].激光与光电子学进展,2021,58(9):0922001.
- [16] 刘钧,李珂,赵文才.塑料非球面与折/衍面混合微光夜视物镜设计[J].红外技术,2010,32(11):666-671.
- [17] 孙爱平,胡健钊,安长亮,等.基于微光头盔观察、悬挂式红外夜视仪光学系统设计[J].红外技术,2022,44(12):1278-1286.
- [18] 申团辉.考虑运动精度影响的精密机械公差分析方法研究[D].成都:电子科技大学,2023.
- [19] ZHONG Y, CHANG J, CHEN W L, et al. Design and tolerance analysis of a large-diameter diffractive telescope[J]. *Journal of Modern Optics*, 2022, 69(10): 566-574.
- [20] 李萍.宽光谱变焦光学成像系统设计[D].西安:西安工业大学,2024.
- [21] 邵晶,李卓,聂真威,等.抑制光学系统中杂散光的非对称微结构的设计与加工[J].光学学报,2023,43(11):1122001.

(编辑:张磊)