

大视场低照度夜视头戴目镜光学系统设计

张勇 刘卫平 马飒飒 李志伟 周斌

Optical system design of night vision goggles with large field of view and low illumination

ZHANG Yong, LIU Weiping, MA Sasa, LI Zhiwei, ZHOU Bin

引用本文:

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. DOI: 10.5768/JAO202344.0304002

ZHANG Yong, LIU Weiping, MA Sasa, et al. Optical system design of night vision goggles with large field of view and low illumination[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(3): 636–642. DOI: 10.5768/JAO202344.0304002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0304002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

紫外宽光谱大相对孔径光学系统设计

Design of UV optical system with wide ultraviolet spectrum and large relative aperture

应用光学. 2021, 42(5): 761–766 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0501001>

大视场航空相机光学系统设计

Design of optical system for large-field of view aerocamera

应用光学. 2019, 40(6): 980–986 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0601008>

基于硫系玻璃的紧凑型大相对孔径长波红外光学系统无热化设计

Compact large relative aperture long wavelength infrared athermalization optical system with chalcogenide glasses

应用光学. 2021, 42(5): 790–795 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0501005>

大孔径长焦距摄远物镜光学系统设计

Optical system design of large aperture and long focal length telephoto objective lens

应用光学. 2020, 41(2): 276–281 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0201007>

双波段共孔径相机光学系统设计

Design of dual-band common aperture camera optical system

应用光学. 2017, 38(3): 348–351 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0301002>

大视场反射式施密特光学系统设计与检测

Optical design and detection for reflective Schmidt system with large field of view

应用光学. 2020, 41(2): 265–269 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0201005>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 03-0636-07

大视场低照度夜视头戴目镜光学系统设计

张 勇¹, 刘卫平², 马飒飒^{1,3}, 李志伟¹, 周 斌⁴

(1. 中国人民解放军 32181 部队, 陕西 西安 710032; 2. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065;
3. 河北工业大学 人工智能与数据科学学院, 天津 300131; 4. 郑州科技学院, 河南 郑州 450064)

摘 要: 基于 CMOS 器件的低照度夜视装备隐蔽性好, 成本较红外热像装备低, 是拓展人眼低照度条件下视觉感知的重要手段, 在军事和民用领域都有广泛应用。为满足夜间低照度天候条件下装备维修保障需求, 设计了一款大视场低照度夜视头戴目镜光学系统。通过选择合适的光学玻璃材料, 在可见/近红外波段均有很好的光谱响应。设计完成的大相对孔径目镜视场角为 74.46°, 焦距为 46 mm, F 数为 1.2, 畸变小于 -7.14%, 系统总长小于 80 mm, 且镜头总质量小于 100 g。该目镜在 486 nm~950 nm 光谱范围内能够满足夜间无照明条件下的维修、训练和场景观察, 为低照度夜视头戴系统光学模组研制提供了新的技术手段。

关键词: 光学系统; 夜视头戴; 目镜设计; 大相对孔径

中图分类号: TN223

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0304002

Optical system design of night vision goggles with large field of view and low illumination

ZHANG Yong¹, LIU Weiping², MA Sasa^{1,3}, LI Zhiwei¹, ZHOU Bin⁴

(1. Unit 32181 of PLA, Xi'an 710032, China; 2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China; 3. School of Artificial Intelligence, Hebei University of Technology, Tianjin 300131, China; 4. Zhengzhou University of Science and Technology, Zhengzhou 450064, China)

Abstract: Low-illumination night vision equipment based on complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) devices has good concealment and lower cost than infrared thermal imaging equipment. It is an important means to expand human visual perception under low illumination conditions and widely used in military and civil fields. In order to meet the requirements of equipment maintenance and support under low illumination condition at night, an optical system of night vision goggle with large field of view and low illumination was designed. By selecting the appropriate optical glass material, it had a good spectral response in both visible and near infrared bands. The designed eyepiece with large relative aperture had a field of view angle of 74.46°, focal length of 46 mm, F number of 1.2, distortion less than -7.14%, total length of the system less than 80 mm and lens weight less than 100 g. Under the spectral range of 486 nm~950 nm, the eyepiece can meet the maintenance, training and scene observation without lighting at night, which provides a new technical means for the development of optical module of low-illumination night vision head-mounted system.

Key words: optical system; night vision headwear; eyepiece design; large relative aperture

引言

以像增强器为核心部件的微光夜视装备可在低照度条件下实施隐蔽侦察, 但体积和重量较大, 真空器件使用寿命受限, 较高的购置价格也限制

了配发使用数量。低照度 CMOS(complementary metal-oxide-semiconductor) 探测器作为固体成像器件, 具有低成本、低功耗、寿命长、体积小等特点, 是未来夜视装备的重要发展方向^[1-2]。随着 CMOS

收稿日期: 2022-08-01; 修回日期: 2022-12-12

基金项目: 陆军装备科研项目 (20212C031781); 河北省军民融合科技创新专项 (20355601D); 河南省科技攻关项目 (222102210130)

作者简介: 张勇 (1974—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事光电装备保障研究。E-mail: 13932196453@163.com

通信作者: 马飒飒 (1971—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事电子装备技术保障研究。E-mail: runningman205@21cn.com

生产工艺以及数字电路设计的快速发展, 超低照度 CMOS 固体成像器件性能指标不断提升, 如 SONG 公司研发的 IMX224MQV 型 CMOS 图像传感器, 可在 5×10^{-3} lx 低照度环境下清晰成像; PHOTONIS 公司通过优化探测器结构以及有效提取并处理微小信号, 研发的 NOCTURN 系列超低照度 CMOS 成像系统可在 5×10^{-3} lx 环境下自动切换为黑白夜视模式; SIONYS 公司研发的 XQE 系列产品, 最低极限工作照度可达 1×10^{-3} lx 夜天光水平^[3]。综上所述, 快速发展以像增强器为核心部件的微光夜视装备时, 可在警用及民用领域开展基于低照度 CMOS 为核心部件的夜视头戴系统, 做到“高低”搭配的同时, 不断拓展新型成像器件在微光夜视领域的应用。

基于 CMOS 器件的低照度夜视头戴系统可用于夜间无照明条件下的维修、训练和场景观察。根据其使用要求, 目镜光学系统需要具有大视场、大相对孔径、大出瞳直径及优良的光学性能, 且整机重量轻, 长度短, 人机工程性好。目前头戴系统目镜光学系统设计方案主要有菲涅尔透镜、自由曲面、非球面、pancake 折叠光路等。菲涅尔透镜技术实现成本低, 可实现产品的快速迭代, 虽然能够实现约 100° 的大视场角且体积小、重量轻, 但视场边缘像质差、畸变大、眼动范围小、视觉舒适度差。自由曲面是指无法用球面或非球面系数来表示的曲面, 主要包括任意非传统、非对称的曲面以及微结构阵列和参数向量表示的任意形状的曲面^[4]。自由曲面介于球面与非球面之间, 面型可由非对称、不规则、复杂的曲面随意组合而成, 其不规则、自由的曲面能让不同角度光束在穿过主轴时保持近似的放大率, 从而最大限度地减少像差。相比于旋转对称式光学元件, 自由曲面光学元件光学镜片数量更少, 增加了设计自由度, 有效缩短了光学系统长度且大幅压缩了体积重量^[5]。浙江大学设计的穿透式离轴折反射头盔显示器, 利用 XY 多项式表征的自由曲面能够校正旋转对称系统产生的像差, 从而获得良好的成像质量^[6]。北京理工大学提出了一种基于自由曲面光学元件的光学透视式头盔显示器设计方案, 投影系统的视场可达 36° , 透视系统的视场可达 50° , 较好地满足了娱乐和科学应用需求^[7]。南京信息工程大学分别采用双曲率基面自由曲面和 XY 多项式自由曲面, 设计了一种小 F 数和大出瞳直径的离轴反

射式头戴显示光学系统^[8], 该系统的出瞳直径为 10 mm, F 数为 3.0, 视场角为 28° , 出瞳距大于 15 mm。中国科学院完成了基于双自由曲面反射镜的大视场头盔显示光学系统设计^[9], 视场范围达到 $106.3^\circ(\text{H}) \times 80^\circ(\text{V})$ 。然而, 上述头戴显示光学系统中用到的高精度自由曲面镜片的加工步骤复杂、成本高昂, 且基于自由曲面镜片设计的目镜光学系统无法调整屈光度。与其他光学设计相比, Pancake 光学设计方案能以更薄的形状参数提供更为优越的放大图像质量, 特别是对于 $50^\circ \sim 100^\circ$ 视场角的光学系统, Pancake 光学方案在体积重量上更占优势。2022 年初, Kopin 推出的 P80 Pancake 光学器件视场角达到了 65° , 同时具备 2 mm 出瞳距离和 1 mm 眼动范围。Pancake 光学方案又称四折反射自由曲面棱镜, 其光学系统使用了偏振器和四分之一波片, 使 Pancake 光学器件具备了“折叠路径”能力, 即光线在相同元件间来回反射, 从而节省了空间, 并且最靠近显示屏的透镜具有半反射镜涂层, 既能在第一次透射时充当面透镜, 又能在光反射时充当曲面镜。另外, Pancake 光学器件还采用了可变液晶 (LC) 透镜, 通过在 LC 两端施加电压, 使其能够发挥可变焦菲涅尔透镜^[10-11]的作用。Pancake 光学方案中光线在显示屏与人眼间进行了 4 次折转, 因此需要更高亮度的显示屏, 同时还需要额外的球形玻璃透镜, 以降低图像伪影, 这就会造成体积和成本增加。非球面光学设计方案介于球面与自由曲面设计方案之间, 相比于传统球面, 非球面具有较大的设计自由度和灵活性, 能够有效校正像差, 在减少系统透镜数量的前提下确保成像质量^[12]。针对夜视头戴系统使用要求, 本文采用非球面光学设计方案, 在满足大视场角前提下, 兼顾了出瞳直径和出瞳距离, 且系统总长较小、重量轻, 成像质量好, 能够满足夜视头戴系统无照明条件下的维修、训练和场景观察。

1 系统组成

设计的夜视头戴系统结构图如图 1 所示。夜视头戴系统由双路低照度 CMOS 探测器、LCD 显示及驱动模块、大视场物镜光学系统、近眼目视光学系统、图像处理模块、近红外激光辅助照明模块和电源管理模块组成。当光照度低于 1×10^{-3} lx 时, 开启近红外激光辅助照明模块补光。选择 SONY IMX307 星光级 CMOS 传感器, 可在 1×10^{-3} lx 低照

度下连续清晰成像。CMOS 传感器分辨率为 $1\,920 \times 1\,080$ 像素, 像元尺寸为 $2.9\ \mu\text{m}$, 对角线显示区域 $6.46\ \text{mm}$ 。选择夏普 LS029B3SX02 的 $7.366\ \text{cm}$ (2.9 英寸) LCD 液晶屏作为显示器件, 分辨率为 $1\,440 \times 1\,440$ 像素, 显示尺寸为 $51.84\ \text{mm} \times 51.84\ \text{mm}$ (H×V)。为避免“红暴”, 近红外激光辅助照明模块采用 $940\ \text{nm}$ 红外补光灯珠。

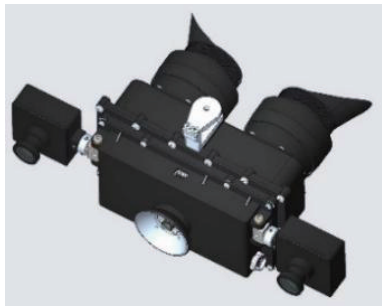


图 1 夜视头戴系统结构图

Fig. 1 Diagram of night vision head-mounted system

大视场角双路低照度 CMOS 探测器能够在一定范围内实现双目立体视觉, 从而增加使用者的沉浸感, 显著提高场景态势感知能力。人的单眼水平视场角约 155° , 双眼水平视场角约 190° , 且水平方向有约 120° 重叠^[13-14]。双目重叠区域可完成文本阅读和物体抓取等任务, 因此对立体视觉至关重要。周边的非重叠区域人眼均有明暗感觉, 在感知和搜索等任务中也发挥了非常重要的作用。虽然 40° 视场角即可满足侦察、瞄准等任务需求, 但大视场更加符合人眼视觉特性, 通过中心视场实现物体细节或轮廓分辨, 通过轴外视场实现物体或态势感知, 能在特种作战中发挥更加明显的战术优势。如美军 GPNVG-18 利用 4 根三代像管实现了水平 $95^\circ \pm 5^\circ$ 、垂直 $38^\circ \pm 2^\circ$ 的大视场角^[15]。但大视场与整机重量体积存在矛盾, 如 GPNVG-18 质量约 $765\ \text{g}$, 远超美军 PVS-18 单筒单目夜视仪 ($350\ \text{g}$)。一般情况下, 头戴系统整机质量超过 $2.5\ \text{kg}$ (凯夫拉头盔质量约 $1.5\ \text{kg}$) 就会给使用者头部带来较大负担^[16]。为此, 综合人机工程与人眼视觉特性, 兼顾双目立体视觉实现要求, 夜视头戴系统视场角设计为 70° 。夜视头戴系统物镜光学系统主要性能由视场角、焦距和相对孔径这 3 个参数决定, 即:

$$\begin{aligned} w_1 &= 2\arctg(h/2f_1) \\ w_2 &= 2\arctg(v/2f_1) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: f_1 和 w_1 分别为物镜焦距和水平方向视场角; h 为 CMOS 探测器水平方向的像元尺寸; w_2 和 v 分

别为垂直方向的视场角和像元尺寸。由于 SONY IMX307 星光级 CMOS 传感器分辨率为 $1\,920 \times 1\,080$ 像素, 夏普 LS029B3SX02 的 $7.366\ \text{cm}$ LCD 液晶屏分辨率为 $1\,440 \times 1\,440$ 像素, 为匹配 CMOS 探测器和 LCD 屏的分辨率, 同时最大程度地利用 LCD 屏的显示区域, 将 CMOS 探测器采集到的视频按照 $1\,440 \times 1\,080$ 像素进行裁剪, 则 CMOS 探测器的实际利用尺寸为 $4.22\ \text{mm} \times 3.167\ \text{mm}$, 此时视场角为 $58.73^\circ \times 45.78^\circ$, 对角线视场为 74.46° , 可得物镜焦距 $f_1 = 3.75\ \text{mm}$, 取视场放大率为 1 倍, 可得目镜焦距为 $46\ \text{mm}$ 。另外, 具有大通光能力的物镜更加有利于夜间低照度成像, 即:

$$E = \frac{1}{4} \tau \pi L (D/f)^2 \quad (2)$$

式中: E 为景物图像在像面上的照度; L 为目标背景亮度; D/f 为物镜相对孔径。相对孔径越大, 物镜光学系统的衍射极限分辨能力越高, 夜晚观察效果越佳。综合考虑夜视头戴系统外形尺寸和价格成本等因素, 取物镜相对孔径为 $1:1.2$ 。考虑到物镜大视场、大相对孔径等特点, 采用改进的高斯物镜设计方案^[17], 物镜设计指标如表 1 所示。工作波段为 $487\ \text{nm} \sim 950\ \text{nm}$, 充分考虑了夜晚满月光和晴朗星光的辐射光谱分布特点, 同时也能满足目前低照度探测器的光谱响应范围。

表 1 物镜光学系统设计参数

Table 1 Design parameters of objective optical system

参数	视场角/(°)	焦距/mm	F 数	波长/nm	放大倍数
指标	74.46	3.75	1.2	487~950	1

可供选择的显示器件主要有液晶 (liquid crystal display, LCD) 显示屏、硅基液晶 (liquid crystal on silicon, LCoS) 显示屏和有机发光二极管 (organic light-emitting diode, OLED) 显示屏。LCD 屏虽然响应时间较慢, 但极具价格优势。人眼极限分辨角为 $1'$, 在良好照明视距 $250\ \text{mm}$ 处, 人眼能够分辨两条相邻条纹的最小间隔为 $0.0727\ \text{mm}$, 对应的空间频率为 $14\ \text{lp/mm}$ 。夏普 LS029B3SX02 的 $7.366\ \text{cm}$ LCD 液晶屏每毫米约 27 个像素, 对应的空间频率约为 $13\ \text{lp/mm}$ 。相比人眼极限分辨角和 LCD 屏空间频率, 能够避免产生“网格效应”。

2 目镜初始参数计算

头戴显示目镜光学系统可分为瞳孔成像结构 (pupil-forming) 和非瞳孔成像结构 (non-pupil form-

ing)^[18]。由于目镜光学系统光阑为使用者瞳孔,内部没有和瞳孔共轭的光阑,且光阑大小随瞳孔变化而改变,因此需要设计非瞳孔成像结构光学系统。目镜光学系统设计指标如表2所示。

表2 目镜光学系统设计指标

Table 2 Design requirements of eyepiece optical system	
参数	数值
波长/nm	487~950
出瞳直径/mm	7
视场角/(°)	74.46
最大畸变/%	<-7.14
出瞳距离/mm	15
总长/mm	<78.86
中心视场MTF	>0.9 @14lp/mm >0.8 @21lp/mm
边缘视场MTF	>0.4 @14lp/mm >0.1 @21lp/mm

1) 出瞳距离 (pupil distance)。实验室光学仪器或普通光学仪器出瞳距离约为 6 mm, 军用光学仪器考虑到加眼罩或防毒面具, 出瞳距离为 20 mm。出瞳距离太小不利于佩戴且睫毛易污染透镜, 出瞳距离太大不利于系统小型化且易引入杂散光。由人眼的生理结构可知, 眼睑和睫毛毛约为 9 mm, 眼睛入瞳位于角膜后约 3 mm, 因此出瞳距离设为 15 mm。

2) 出瞳直径 (pupil diameter)。人眼瞳孔直径在 2 mm~8 mm 范围内随环境亮度变化而改变, 一般情况下平均入瞳直径为 4 mm。若光学系统出瞳直径为 4 mm, 则人眼一旦转动, 看到的像质就会变差, 因此出瞳不能过小。但出瞳太大会增加设计难度并增加系统重量, 考虑到人眼观察视角外场景时第一选择往往是转动头部而不是转动眼球, 因此选择出瞳直径为 7 mm。

3) 瞳间距 (inter ocular distance, IOD)。不同佩戴者双眼间距存在差异, 因此需要限制光学系统体积, 确保光学系统眼瞳间距可调。不同种族和性别之间, 约 95% 成年人双眼间距在 56 mm~75 mm 之间, 再考虑到系统边缘的机械框架宽度, 将目镜光学系统直径限制在 40 mm 以下。

4) 畸变 (distortion)。未做校正的成像系统视场越大, 产生的畸变越大。引入非球面可使畸变校正变得相对容易, 但由于非球面的高度灵活性, 不宜对畸变大小做过于严格的约束。另外, 还可

结合物镜与目镜设计控制畸变大小, 本文在物镜设计时控制为一定程度的枕型畸变, 最大畸变为 -12.57%, 目镜控制为一定程度的桶型畸变, 最大畸变为 -7.14%, 那么系统畸变可在一定程度上相互抵消 (目镜在光路追迹时为逆向追迹, 此时畸变同号相互补偿)。

5) 调制传递函数 (MTF)。人眼截止频率约为 14 lp/mm, 因此要求中心视场 MTF 值在 14 lp/mm 处不小于 0.9, 在 21 lp/mm 处不小于 0.8; 边缘视场 MTF 值在截止频率 14lp/mm 处不小于 0.4, 在 21 lp/mm 处不小于 0.1。

6) 非球面 (aspheric surface) 设计。设计过程中采用了一片非球面玻璃, 由于光学系统视场角较大, 为确保加工精度和面型评价准确性, 将非球面系数控制到 6 阶。与奇次非球面相比, 偶次非球面更易加工, 则有:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2r^2}} + a_2r^2 + a_4r^4 + a_6r^6 \quad (3)$$

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 为非球面系数。

7) 系统总长。光学系统总长越短, 重心越靠近佩戴者头部, 可显著提高佩戴舒适性。为减轻重量, 光学材料选用常见的冕牌玻璃和火石玻璃, 机械结构件使用工程塑料通过 3D 打印。

3 系统结构优化

光学系统初始结构一般运用像差理论方法计算求解, 也可选用较为成熟的与所需参数指标相近的光学系统作为初始结构。本文选用对称式目镜作为光学系统初始结构, 光路图如图2所示。显然其初始结构性能指标与头戴系统目镜光学系统要求有较大差距, 需要对其进行进一步优化。

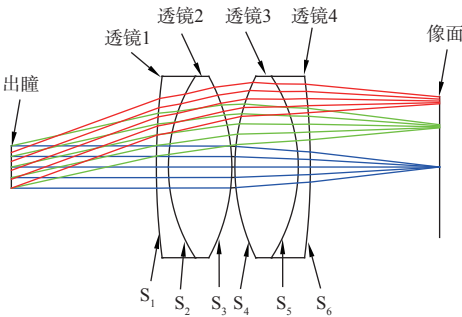


图2 初始结构光路

Fig. 2 Optical path diagram of initial structure

在初始结构基础上利用 Zemax 光学设计软件对结构进行调整和系统优化。将初始结构系统焦距缩放至 46 mm, 以系统中每个光学面的曲率半径、2 个透镜间距及厚度作为变量, 并添加相应操作数控制其范围, 逐步调整出瞳直径、出瞳距离和视场角。引入偶次非球面增加系统变量和自由度, 替换玻璃材料, 改变材料折射率和阿贝数, 添加相应操作数控制系统二次项系数、表面曲率、表面间距离, 并将非球面系数取到 6 阶。通过添加相应操作数控制系统像差, 进一步提升系统成像质量。最终得到的系统光路与模型切面如图 3 所示。图 3 中, 光学系统视场角为 74.46°, 出瞳直径为 7 mm, 出瞳距离为 15 mm, 系统总长 78.86 mm, 玻璃质量约 92 g, 透镜 1 和透镜 4 为负透镜, 透镜 2 和透镜 3 为正透镜, S₄ 为偶次非球面。光学系统透镜材料参数如表 3 所示。其中冕牌玻璃选用折射率较高的镧冕玻璃 H-LAK3, 火石玻璃分别为 ZF11 和 QF50。表 4 为光学系统非球面参数。系统使用 6 阶非球面, 在满足各项指标要求的前提下, 能够进一步提高成像质量, 校正系统轴上和轴外像差, 并使各个视场 MTF 曲线分布较均匀。

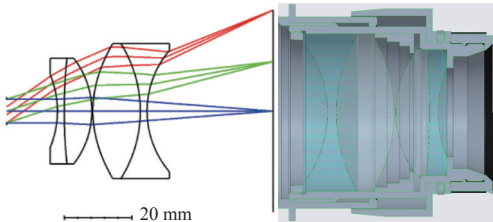


图 3 最终光路图与模型切面

Fig. 3 Final optical path diagram and model section

表 3 光学系统透镜材料参数

Table 3 Material parameters of optical system lens

序号	材料	折射率	阿贝常数	密度/(g·cm ⁻³)
透镜1	ZF11	1.699	30.05	4.06
透镜2	H-LAK3	1.747	50.95	4.08
透镜3	H-LAK3	1.747	50.95	4.08
透镜4	H-Q50	1.581	40.89	2.60

表 4 光学非球面参数

Table 4 Optical system aspheric parameters

面	圆锥系数	二阶	4阶	6阶
S ₄	-3.755 1	0	7.10937e-06	-4.2856e-09

4 像质评价

目镜光学系统点列图如表 5 所示。可见边缘视场点列图平均半径为 26 μm, 中心视场点列图半径为 6.7 μm, 考虑到系统对应显示屏单个像素 36 μm, 人眼通过该目镜系统观察显示屏时, 边缘视场图像不仅不会模糊, 而且中心视场也不会产生颗粒感。系统 MTF 曲线分布如图 4 所示。从图 4 可以看出, 各个视场 MTF 曲线分布较为均匀, 中心视场处 MTF 值在 8 lp/mm 处为 0.94, 在 12 lp/mm 处为 0.91, 边缘视场在 8 lp/mm 处为 0.7, 在 12 lp/mm 处为 0.4。图 5 为场曲与畸变曲线, 可见系统场曲控制在人眼调节范围内, 并且最大畸变小于-7.14%。

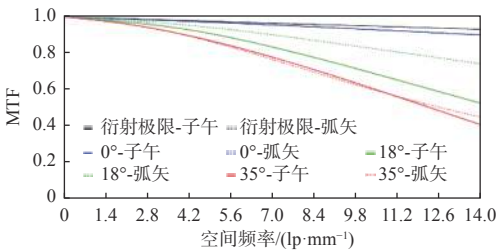


图 4 空间传递函数

Fig. 4 MTF curves

表 5 光学系统点列图

Table 5 Spot diagram of optical system

视场点 [物面/mm, 像面/mm]	弥散斑	RMS/μm	GEO/μm
[0.00,0.000]		6.779	13.600
[18,14.622]		19.696	49.719
[35,29.900]		26.167	57.350

合理的公差分配能够避免光学系统在加工和装配过程中产生误差, 不仅可以提高产品成像质量, 还能降低加工装配难度和成本, 同时又可以增加光学系统的可行性。利用蒙特卡罗法对目

镜进行公差分析,结果如表6所示。从表6可以看出,MTF值为0.3478时良品率大于90%。目镜光学系统的公差分析结果表明,系统对公差敏感,对加工及装调误差的容忍度较高,可以满足批量生产加工及装配要求。

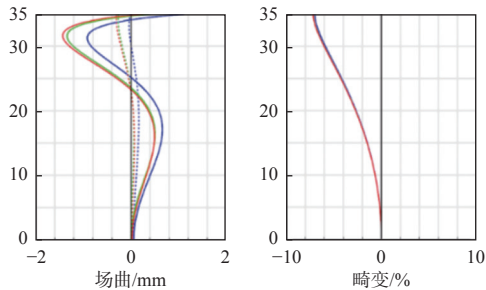


图5 场曲和畸变

Fig. 5 Field curvature and distortion

表6 蒙特卡罗分析结果

Table 6 Monte Carlo analysis results

蒙特卡罗分析	MTF
>90%	0.3478
>80%	0.3857
>50%	0.4604
>20%	0.5023
>10%	0.5108

5 结论

设计了一种用于夜视头戴系统的目镜光学系统。在提出各项指标的基础上,对目镜系统初始结构设计进行了讨论,并对像质进行了评价。该目镜光学系统的视场角为74.46°,出瞳直径和出瞳距离分别为7 mm和5 mm,系统镜头总质量小于100 g,总长小于80 mm。轴上像差和轴外像差均得到了有效校正,边缘视场点列图光斑半径为26 μm,各个视场MTF曲线分布较均匀,中心视场MTF值在8 lp/mm处为0.94,在12 lp/mm处为0.91,边缘视场MTF值在8 lp/mm处为0.7,在12 lp/mm处为0.49,系统最大畸变小于-7.14%,各项指标满足设计要求。

参考文献:

[1] 姚立斌. 低照度CMOS图像传感器技术[J]. 红外技术, 2013, 35(3): 125-132.
YAO Libin. Low-light-level cmos image sensor tech-

nique[J]. Infrared Technology, 2013, 35(3): 125-132.
[2] 程宏昌, 石峰, 李周奎, 等. 微光夜视器件划代方法初探[J]. 应用光学, 2021, 42(6): 1092-1101.
CHENG Hongchang, SHI Feng, LI Zhoukui, et al. Preliminary study on distinguishment method of low-level-light night vision devices[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(6): 1092-1101.
[3] 金伟其, 陶禹, 石峰, 等. 微光视频器件及其技术的进展[J]. 红外与激光工程. 2015, 44(11): 3167-3176.
JIN Weiqi, TAO Yu, SHI Feng, et al. Progress of low level light video technology [J]. Infrared and Laser Engineering. 2015, 44(11): 3167-3176.
[4] 李荣彬, 杜雪, 张志辉. 超精密自由曲面光学设计、加工及测量技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
LI Rongbin, DU Xue, ZHANG Zhihui. Design, machining and measurement technologies of ultra-precision free-form optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2015.
[5] 高源, 刘越, 程德文, 等. 头盔显示器发展综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(6): 896-904.
GAO Yuan, LIU Yue, CHENG Dewen, et al. A review on development of head mounted display[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(6): 896-904.
[6] HICKS R A. Controlling a ray bundle with a free-form reflector[J]. Optics Letters, 2008, 33(15): 1672-1674.
[7] WANG Q, CHENG D, WANG Y, et al. Design, tolerance, and fabrication of an optical see-through head-mounted display with free-form surface elements[J]. Applied Optics, 2013, 52(7): C88-C99.
[8] 叶井飞, 徐凯迪, 杨明珠, 等. 基于自由曲面的离轴两反头戴显示光学系统设计[J]. 光学学报, 2018, 38(7): 273-280.
YE Jinfei, XU Kaidi, YANG Mingzhu, et al. Design of off-axis headmounted display optical system based on two reflective optical free-form surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 273-280.
[9] 孟祥翔, 刘伟奇, 张大亮, 等. 双自由曲面大视场头盔显示光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 0418004-1-6.
MENG Xiangxiang, LIU Weiqi, ZHANG Daliang, et al. Design of wide field-of-view head-mounted display optical system with double freeform surfaces[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(4): 0418004-1-6.
[10] JAMALI A, WHEELWRIGHT B, ZHAO Y, et al. Pancake lens assembly and optical system thereof:

- US20200348528A1 [P]. 2020-11-12.
- [11] SAJJAD A K, NAN Z, GRAHAM B M, et al. Optical system for head-mounted display: US20210132349A1 [P]. 2021-09-24.
- [12] 陈壮壮, 朱标, 宫明艳, 等. 沉浸式头戴显示器光学系统设计[J]. *激光技术*, 2021, 45(4): 470-474.
- CHEN Zhuangzhuang, ZHU Biao, GONG Mingyan, et al. Design of immersive head-mounted display optical system[J]. *Laser Technology*, 2021, 45(4): 470-474.
- [13] WHEELWRIGHT B, SULAI Y, GENG Y, et al. Field of view: not just a number[J]. SPIE, 2018, 10676: 1067604.
- [14] ZHAN T, YIN K, XIONG J H, et al. Augmented reality and virtual reality displays: perspectives and challenges[J]. *iScience*, 2020, 23(8): 101397.
- [15] PLOSKER V. Panoramic night vision goggle having multi-channel monocular assemblies with modified eyepiece: US 20020114069A1 [P]. 2002.
- [16] 王辉, 刘春华, 王永生. 头盔显示系统评述[J]. *电光与控制*, 2012, 19(8): 45-49.
- WANG Hui, LIU Chunhua, WANG Yongsheng. Comments on helmet-mounted display system[J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, 19(8): 45-49.
- [17] 葛琳琳, 王世先, 张瑞, 等. 宽光谱共焦复消色差物镜光学系统设计[J]. *光学与光电技术*, 2019, 17(6): 107-112.
- GE Linlin, WANG Shixian, ZHANG Rui, et al. Optical system design of wide-spectrum achromatic confocal objective lens[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2019, 17(6): 107-112.
- [18] 吕向博, 王振, 魏张帆, 等. 轻量化头戴显示器光学系统设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 219-226.
- LYU Xiangbo, WANG Zheng, WEI Zhangfan, et al. Lightweight design of a helmetmounted display optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 219-226.