

轻小型折射/衍射混合自由曲面塑料微光夜视仪物镜设计

沈满德, 李程, 任欢欢, 姜清秀, 李飞

(武汉纺织大学 电子与电气工程学院, 湖北 武汉 430073)

摘要: 微光夜视仪是飞行员夜间行驶的重要观瞄、导航设备, 物镜是微光夜视仪的重要组成部分。文中在一个 6 片式初始镜头的基础上, 设计了一个传统的全球面式物镜, 并提出了一种改进型的折射/衍射混合自由曲面塑料物镜结构, 给出了详细的设计步骤并对两个系统进行了像质评价, 对比分析了两个结构的性能, 结果表明, 改进型系统不仅在垂轴色差、畸变、像散、调制传递函数等光学性能上优于传统的全球面式物镜, 而且在重量、总长以及最大口径方面也有大大改善, 设计满足微光夜视仪物镜成像要求, 并实现了物镜的轻小型和低成本, 为现代新型微光夜视仪物镜的轻小型设计提供了一种新的途径。

关键词: 微光夜视仪; 轻量化; 小型化

中图分类号: TN223 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)01-0160-06

Design of lightweight and compact plastic lens with hybrid refractive/diffractive and freeform surfaces for night vision objective lens

Shen Mande, Li Cheng, Ren Huanhuan, Jiang Qingxiu, Li Fei

(School of Electronic and Electrical Engineering, Wuhan Textile University, Wuhan 430073, China)

Abstract: Low-level-light night-vision system is an important equipment of sight and navigation for pilot. Objective lens is an important part of the low-level-light night-vision system. An all-sphere objective lens was designed based on a six elements initial lens, then a modified system of plastic lens with hybrid refractive/diffractive and freeform surfaces was developed. The optimization process was also presented. The performance of the couple systems were presented and analysed. It is shown that the modified system not only has better performance, for example lateral color, distortion, astigmatic and modulate transfer function (MTF), but also has greatly improved in weight, total length and max diameter, which can meet the demands of night-vision objective lens. It also provides a new approach for modern lightweight and compact low-level-light night-vision system design.

Key words: night-vision system; light weight; compact

收稿日期: 2013-05-07; 修订日期: 2013-06-18

基金项目: 湖北省教育厅项目(Q20101605)

作者简介: 沈满德(1973-), 男, 副教授, 博士, 从事光学工程研究。Email: opticaldesign@126.com

0 引言

微光夜视仪是一种微光夜视系统,利用夜间月光、星光、大气辉光等自然微光工作,它不需要携带光源,通过光电像增强技术可大大改善人眼在黑暗环境下的视觉性能^[1-2],解决了红外夜视系统自身容易暴露的不足,可用于军用战机以提高飞行员在低照度夜间飞行时对态势的感知能力,也可用于步兵或伞兵,帮助士兵在夜间发现、观察目标,广泛应用于夜间观察、瞄准、驾驶、导航、制导等领域。

微光夜视仪主要是由微光物镜、微光目镜、像增强器三部分组成^[3],微光物镜将背景目标反射的天空自然光会聚后进入微光物镜,成像在像增强器的光阴极面上,目标像经过像增强器光电转换、电子成像和亮度增强处理后,在荧光屏上显示出增强的目标图像,人眼再通过微光目镜对目标图像进行观察。微光物镜是微光夜视仪的重要组成部分,是微光夜视仪的第一通道,它的好坏决定着观瞄性能的优劣。随着科技的不断进步,为了加强部队的夜间作战能力,美国、英国等发达国家都先后设计了各种高性能、多功能、轻小型的微光夜视仪^[4-6],我国研究人员也进行了一些相关的研究^[7-9],但随着现代化机动快速、轻小型作战需求的发展,现有的系统已远不能满足现代微光夜视仪的需求,为了促进我国夜视技术的研究发展,文中在一个6片式的初始镜头的基础上,设计了一个传统的全球面式物镜,并提出了一种改进型的折射/衍射混合自由曲面塑料物镜结构,设计结果表明,改进后系统的性能有很大的提高,体积和重量也减小了很多,符合现代微光夜视仪轻量化、小型化、高性能的发展需求,而且塑料透镜可采用注塑成型制造,成本低,也适合大规模批量化生产,可进行产业化发展,对于未来微光夜视仪的大批量制造有着借鉴意义。

1 设计方案和设计参数

1.1 设计方案

微光夜视仪物镜设计过程中要综合考虑视场角、畸变、色差、调制传递函数以及重量、体积、价格等因素,需要权衡各因素的性能,在满足使用要求的前提下,尽量使系统更小、更轻、更便宜,这样才能最

大限度的减小使用者佩戴使用过程中的不适,适合大批量生产,拟选择一专利镜头,逐步优化改进,设计方案分两步走,先优化得到一个满足使用要求的全球面式物镜结构,然后在基础上逐步改进得到新型的折射-衍射混合自由曲面塑料物镜结构,不断修改优化程序经过反复优化,最终得到满意的结果,使之满足使用要求。

1.2 设计参数

像增强器采用我国太原长城光电子工业公司生产的超二代像增强器作为像面接收器,该超二代像增强器输入面型和输出面型均为平面,有效直径均为16 mm,微光夜视仪物镜的具体设计参数如表1所示。

表1 设计参数

Tab.1 Design parameters

Parameter	Value
Wavelength range/nm	434-656
Center wavelength/nm	589
Field of view/(°)	45
Entrance pupil/mm	25
Distortion/%	<5
Weight/g	<48
Total length/mm	<92
Max diameter/mm	<55
Resolution radio/lp·mm ⁻¹	>24
Elements	< 8

2 全球面式物镜系统设计和分析

由于高斯型物镜具有对称结构,校正轴外像差较容易,选取美国专利镜头 US_PATENT_253275 作为初始结构,如图1所示,该初始结构为一焦距为1 mm,

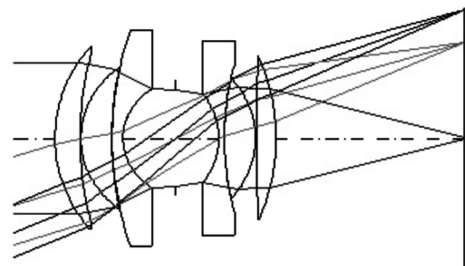


图1 系统初始结构

Fig.1 Initial structure of the lens

F 数为 2.8, 视场角为 30° 的 6 片式物镜结构, 对此初始结构进行优化, 优化设计步骤如下。

第一步: 由于初始结构中最大视场角的渐晕较大, 为 26%, 因此, 先编写程序通过控制光线高度, 具体实现时控制所有视场光线高度与光阑面的高度差, 用来减小系统渐晕, 然后对系统进行焦距缩放, 使焦距放大为 50 mm。

第二步: 将视场角增大 1°, 保持系统的焦距为 50 mm, 对系统的畸变、色差、调制传递函数、最大值径以及总长进行适当控制, 避免视场增大后各项像差跃变而导致出现畸形优化, 用同样的方法, 逐步增大视场角直到 45°。

第三步: 此时系统的视场角已满足要求, 各项像差大小也在可控的范围之内, 再次对系统焦距进行缩放, 目标值为 100 mm, 接着设置系统入瞳直径为 25 mm, 在约束条件中对系统焦距、畸变、色差、垂轴像差等进行控制, 对全系统进行反复精心优化, 保证获得符合要求的结构。

最终得到的全球面式物镜的光学示意图如图 2 所示, 该系统是一个焦距为 100 mm, 视场角为 45°, 出瞳直径为 28 mm, 出瞳距离为 59.88 mm 的物镜, 使用的

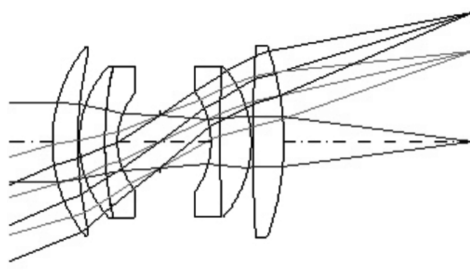


图 2 全球面式物镜结构
Fig.2 Structure of all-sphere lens

的光学玻璃为 K9 和 F2。图 3、图 4、图 5 为全球面式物镜的传递函数曲线、像散和畸变、垂轴色差曲线。全球面式物镜的垂轴色差为 9.29 μm, 最大畸变为 -2.9%, 像散为 0.52 mm, 空间频率 30 lp/mm 处, 轴上 MTF 为 0.75, 轴外 MTF 为 0.63, 这些性能可以满足微光夜视仪整机系统的使用要求。但全球面式物镜的重量为 43.6 g, 总长为 87.26 mm, 最大镜子口径为 43.82 mm, 不能满足现代微光夜视仪物镜轻量化、小型化的要求。

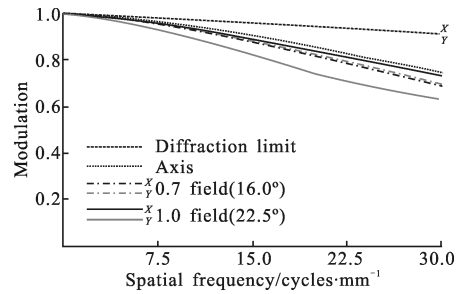


图 3 全球面式物镜传递函数曲线
Fig.3 MTF of all-sphere lens

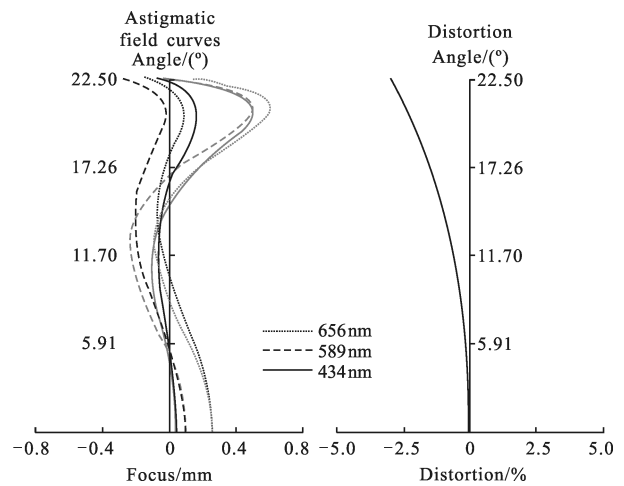


图 4 全球面式物镜像散和畸变

Fig.4 Astigmatic and distortion of all-sphere lens

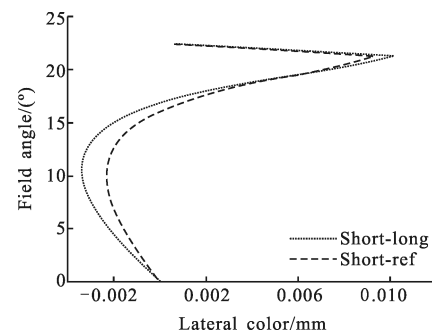


图 5 全球面式物镜垂轴色差

Fig.5 Lateral color of all-sphere lens

3 折射/衍射混合自由曲面塑料物镜设计和分析

基于上述全球面式物镜不能满足现代微光夜视仪物镜轻量化、小型化的不足, 在上述全球面式物镜基础上利用光学软件加以改进, 提出了一种折射/衍射混合自由曲面塑料物镜, 改进设计步骤如下。

第一步: 众所周知, 光学系统中双胶合透镜是用

来消除色差,基于衍射光学元件特殊的色散特性,利用一片带衍射面的透镜来代替全球面式物镜中的第一个双胶合透镜。旋转对称衍射面的相位分布函数为:

$$\varphi(r)=\frac{2\pi}{\lambda}(c_1\rho^2+c_2\rho^4+c_3\rho^6+\dots) \quad (1)$$

式中: ρ 为归一化半径坐标; c_1 为二次相位系数,决定衍射面的傍轴光焦度,实现光学系统的消色差; c_2 、 c_3 等为衍射面相位系数,用于校正系统的高级像差, λ 为设计波长。先冻结除第一个双胶合透镜外的其他所有变量,以保证系统焦距不变的约束条件下,用一片透镜来代替全球面式物镜中的第一个双胶合透镜,约束条件中还需要加入单透镜的焦距等于第一个双胶合透镜的焦距,以便进行等效代换。然后,在单透镜上增加衍射面,衍射面加在靠近光阑的一面,这样更有利于校正系统的彗差、像散等像差,在约束条件中去掉单透镜焦距等于第一个双胶合透镜的焦距的约束条件,加入色差限制对系统色差进行约束,取消之前冻结的变量,并把衍射面的相位系数作为变量,对系统进行整体优化。

第二步:用另外一个带衍射面的单透镜代替第二个双胶合透镜,方法和第一步上述逐渐替换方法相同,为了有效校正系统的彗差、像散、畸变,衍射面同样设置在单透镜靠近光阑的一面,同样将替换后的单透镜的结构参量、其他三片透镜的结构参量以及两个衍射面的相位系数 c_1 作为变量进行多次迭代优化,得到一个4片式的物镜结构。

第三步:将两个衍射面的另外两个相位系数 c_2 、 c_3 设为变量,配合已有的其他变量,对系统进行精心迭代优化,此步骤优化约束条件中增加调制传递函数、畸变等其他约束。

第四步:缩小系统最大畸变的目标值,加大约束条件中对系统垂轴色差的权重比例,对整系统进行再次精心优化,此时系统的色差得到较好的校正,但成像质量还未达到使用要求。

第五步:将4片式的物镜结构中靠近像面的一片透镜的右表面设置为自由曲面,自由曲面的数学表达式为:

$$z=\frac{cr^2}{1+\sqrt{1-(1+k)c^2r^2}}+\sum_{j=1}^{66}c_{j+1}z_j \quad (2)$$

式中: c 为非球面顶点处的曲率; k 为圆锥系数; r 为非球面上任一点到光轴的距离; $\sum_{j=1}^{66}c_{j+1}z_j$ 为Zernike多

项式, c_{j+1} 为Zernike多项式的系数, z_j 为Zernike多项式的项数,每一项都对应一项特殊的光学像差。将自由曲面的Zernike多项式系数 $A_1\sim A_6$ 设置为变量,加大约束条件中对系统调制传递函数的权重比例,约束条件中增加系统总长,对系统再次优化。

第六步:系统已有传统的6片式结构改进为4片式结构,为进一步减小系统的重量,减轻佩戴者对佩戴微光夜视仪的不适,将4片式的物镜结构中玻璃材料设置为虚拟玻璃,保持之前的变量参数不变,系统约束条件不变,增加虚拟玻璃作为变量对系统进行多次优化,优化多轮后停止优化,对比虚拟玻璃与现有光学塑料的折射率和阿贝数的差值,并在下一轮优化中对差值加以控制,使虚拟玻璃的折射率和阿贝数逐渐逼近现有光学塑料的折射率和阿贝数,最终用光学塑料代替系统中的光学玻璃材料,用同样的方法,用光学塑料逐步代替系统中的其他光学玻璃材料,优化过程中需要对各个约束条件的权重不断加以调整。

第七步:保持上述的变量参数不变,将自由曲面的Zernike多项式系数 $A_7\sim A_{12}$ 设置为变量,加大约束条件中对调制传递函数、畸变和色差的控制,缩小系统的最大镜子口径,并缩小系统总长的约束范围,对整系统进行多次反复精心优化,直到得到满意的结果。由于对各像差以及系统总长、最大透镜直径等约束之间互相制约,因此在优化过程中须注意要找到一个很好的平衡点,得到满意的效果。

最终得到的折射/衍射混合自由曲面塑料物镜的光学示意图如图6所示,使用的光学玻璃全部为常用的K9。系统中2个衍射面的最大线频率分别为1.63 periods/mm、1.82 periods/mm,对应最小周期线宽分别为0.61 mm、0.55 mm,当台阶数为8时,最小特征尺寸分别为76.6 μm 和68.7 μm ,这样的尺寸用现代加工工艺完全可以加工出来。图7、图8、图9为折射/衍射混合自由曲面塑料物镜的传递函数曲线、像散和畸变、垂轴色差曲线。衍射面、自由曲面以及光学塑料的使用,使得系统由传统的6片透镜减少为4片透镜,系统重量由原来的43.6 g减轻为16.8 g,系统总长由原来的87.26 mm缩短为46.24 mm,系统最大口径由原来的43.82 mm减小为28.63 mm,尽管系统元件减小了2片,但系统的像质尚未变差,反而更好,

系统的垂轴色差由原来的 $9.29 \mu\text{m}$ 减小为 $4.95 \mu\text{m}$ ，最大畸变由原来的 -2.9% 减小为 -0.48% ，系统的像散由原来的 0.52mm 减小为 0.21mm ，空间频率 30lp/mm 处，轴上 MTF 由原来的 0.75 提升为 0.82 ，轴外 MTF 由原来的 0.63 提升为 0.79 ，实现了微光夜视仪物镜的轻量化、小型化设计，并各方面的性能指标超过了设计要求。

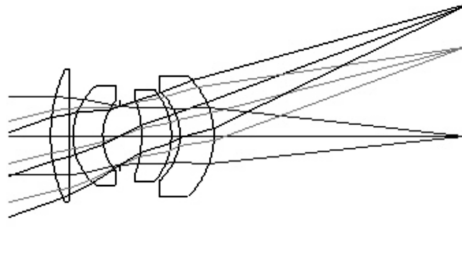


图 6 折射/衍射混合自由曲面塑料系统结构图

Fig.6 Structure of plastic lens with hybrid refractive/diffractive and freeform surfaces

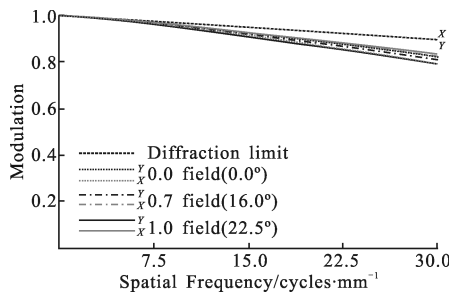


图 7 折射/衍射混合自由曲面塑料系统传递函数曲线

Fig.7 MTF of plastic lens with hybrid refractive/diffractive and freeform surfaces

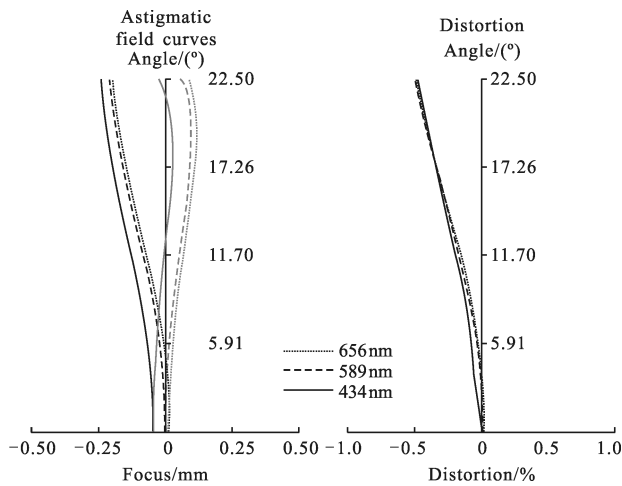


图 8 折射/衍射混合自由曲面塑料系统像散和畸变

Fig.8 Astigmatic and distortion of plastic lens with hybrid refractive/diffractive and freeform surfaces

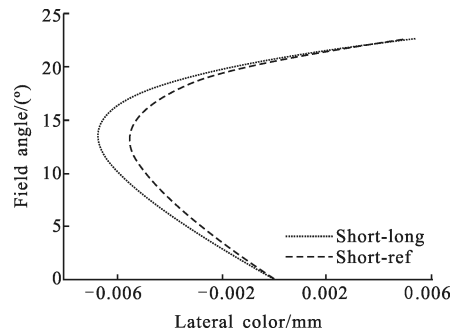


图 9 折射/衍射混合自由曲面塑料系统垂轴色差

Fig.9 Lateral color of plastic lens with hybrid refractive/diffractive and freeform surfaces

4 结论

微光夜视仪利用光增强技术大大改善了人眼在微光环境下的视觉性能，物镜是微光夜视仪的重要组成部分，为适应现代微光夜视仪在实际应用中轻量化、小型化的需求，减小佩戴者佩戴时的不适，提出了一种折射/衍射混合自由曲面塑料物镜结构形式，笔者基于一个 6 片式的初始镜头，设计了一个传统的全球面式物镜，提出了一种改进型的折射/衍射混合自由曲面塑料物镜结构，对比结果表明，与传统系统相比，改进型系统的重量减轻 61.5% ，总长减小 47.1% ，垂轴色差减小 46.7% ，轴上 MTF 提高 0.93% ，轴外 MTF 提高 25.4% ，改进后系统的 MTF 接近衍射极限，成像质量优良，而且自由曲面透镜和折射_衍射混合透镜均采用光学塑料，这样的透镜可注塑成型，且成本便宜，也便于携带，适合于大批量生产。随着计算机精密数控光学加工技术和注塑成型工艺技术的不断发展，该种折射/衍射混合自由曲面塑料物镜将成为新一代微光夜视仪物镜的发展方向，对于其他轻小型成像系统也有着很大的参考意义。

参考文献：

- [1] Cameron A A. The development of the combiner eyepiece night vision goggle[C]//SPIE, 1990, 1290: 16-29.
- [2] Liu Hongman. Development of foreign helmetmounted LLL night-vision system [J]. *Journal of Photoelectricity and Control*, 1996, 10(2): 38-42. (in Chinese)
- [3] Shang Hua, Liu Jun, Gao Min. Lens design in helmet-mounted LLL night-vision system [J]. *Journal of Applied*

- Optics*, 2007, 28(3): 292–297. (in Chinese)
- [4] Wilson G H, Mcfarlane R J F. The development of an aviators helmet mounted night vision goggle system [C]// SPIE, 1990, 1290: 128–139.
- [5] Bohm H D V, Schraner R. Requirements of an HMS/D for a night flying helicopter[C]//SPIE, 1990, 1290: 93–107.
- [6] Kent D. Lightweight helmet mounted night vision and FLIR imagery display systems[C]//SPIE, 1995, 2465: 68–80.
- [7] Yang Shenjie. Design of object lens for helmet-mounted night vision goggles with high-order plastic aspherical surfaces [J]. *Journal of Photoelectricity and Control*, 2009, 16(1): 80–83. (in Chinese)
- [8] Liu Jun, Li Ke, Zhao Wencai. Design of hybrid refractive-diffractive and plastic aspherical surfaces objective lens for low-light-level night vision [J]. *Infrared Technology*, 1996, 32(11): 666–672. (in Chinese)
- [9] Zhang Huijuan, Wang Zhaoqi, Zhao Qiulin. Hybrid diffractive/refractive optical system design of head-mounted display for augmented reality[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(1): 121–124. (in Chinese)