

双层衍射光学元件在微光夜视物镜中的应用

赵翔 张鹏 罗金平

中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000

摘要 将衍射光学元件(DOE)应用于微光镜头的设计中,可以达到减少体积和重量的目的。衍射光学元件不同于传统透镜的负色散性质,可以很好地校正色差。单层衍射光学元件的衍射效率只能在某一波长处达到100%,其他波长处衍射效率下降明显,双层衍射光学元件则在整个工作波段内不同波长处都有较高的衍射效率。基于此,设计了一个使用双层衍射光学元件的微光夜视物镜系统。双层衍射光学元件在 $0.65\sim 0.9\ \mu\text{m}$ 工作波段内衍射效率达98%以上,系统总长为60 mm,系统焦距为25 mm, F 数为1.2,全视场为 40° 。仿真结果表明系统的像质良好,40 lp/mm处的调制传递函数大于0.5。

关键词 光学设计; 衍射光学元件; 微光夜视; 物镜; 衍射效率

中图分类号 O435; TH74 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.112203

Application of Low-Light Night-Vision Objective Lens with Double-Layer Diffractive Optical Element

Zhao Xiang Zhang Peng Luo Jinping

Key Laboratory of Science and Technology on Electro-Optic Control, Luoyang Institute of

Electro-Optical Equipment, Aviation Industry Corporation of China, Luoyang, Henan 471000, China

Abstract The design of low-light lens with diffractive optical element (DOE) can reduce the volume and weight of lens. DOE can correct aberrations well in virtue of its negative diffusion performance that is different from traditional lenses. The diffraction efficiency of a single-layer DOE can reach 100% only at a specific wavelength, and obviously decreases with the change of wavelength. The double-layer DOE has higher diffraction efficiency at any wavelength in the entire working band. A low-light night-vision objective lens system with double-layer DOEs is designed based on the excellent performance of double-layer DOEs. The diffraction efficiency of the double-layer DOE is higher than 98% in the working band from $0.65\ \mu\text{m}$ to $0.9\ \mu\text{m}$. The length of the system is 60 mm, the field of view is 40° , the F number is 1.2, and the focal length is 25 mm. The simulation result shows that the system has fine imaging quality, and the modulation transfer function value is greater than 0.5 at the spatial frequency of 40 lp/mm.

Key words optical design; diffractive optical element; low light night vision; objective lens; diffraction efficiency

OCIS codes 220.2740; 040.3780

1 引言

微光夜视技术的应用可以拓展人眼在夜间或低照度环境下的视觉性能,在军事上得到迅速发展和应用,尤其是单兵作战系统。不同的使用平台对微光夜视仪的要求不同,在头盔式微光夜视仪中,系统不仅要求成像质量高,而且要尽可能地结构简单、重量轻、体积小^[1]。

单层衍射光学元件的衍射效率只能在某一波长处达到100%,对于其他波段,衍射效率下降明显,而双层衍射光学元件在整个波段内不同波长处都有很高的衍射效率,因此国内外科研工作者对多层衍射光学元

收稿日期: 2016-07-05; **收到修改稿日期:** 2016-08-02; **网络出版日期:** 2016-10-20

基金项目: 中航工业技术创新基金(2010D61313)

作者简介: 赵翔(1991—),男,硕士研究生,主要从事衍射光学与光学设计方面的研究。E-mail: zhxfdy@163.com

导师简介: 张鹏(1973—),男,硕士,研究员,主要从事光电系统总体设计方面的研究。E-mail: eoei@vip.sina.com

件展开了研究^[2-3]。因为衍射光学元件(DOE)具有负值的阿贝数和不同于一般光学材料的热膨胀系数,所以衍射光学元件是消除色差和实现无热化设计的可靠选择。在设计过程中随着系统指标的提高,像差的校正越来越困难。根据俄罗斯国家光学研究中心的成果,衍射光学元件的应用可使镜头数量减少20%~30%,成像质量提高15%~20%^[3]。为此,本文对衍射光学元件进行了讨论,提出了一种基于带宽积分平均效率的衍射光学元件设计方法,设计了一个微光夜视物镜系统。

2 衍射光学元件分析

2.1 衍射光学元件结构形式

双层衍射光学元件由两个单层衍射面组成,单层衍射面由普通透镜的一个表面加工出微结构。双层衍射光学元件是使两个单层衍射面发生相对精确的啮合并紧密组合而成,具有相同的周期;相比于单层元件,双层衍射光学元件有两个设计波长^[4]。双层衍射光学元件的结构如图1所示。

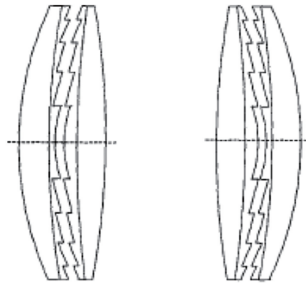


图1 双层衍射光学元件的结构

Fig. 1 Structure of double-layer DOE

2.2 衍射光学元件成像特性

衍射光学元件应用于成像光学领域时,与传统透镜相反的负色散特质奠定了其使用价值。原因在于衍射光学元件的阿贝数是一个负值,这与传统透镜材料的阿贝数符号恰恰相反,可以在系统中进行正负色差的抵消,实现像差校正。关于衍射光学元件负色散特质的另外一个结论是:色散能力随波长的变化而变化,与使用何种材料作为基底加工衍射元件无关。

单个镜片不能校正色差,但可以选择在两个表面中的任何一个表面上加工衍射光学元件,实现消色差设计,具有双胶合透镜的功能。在红外系统中,衍射光学元件的温度稳定性质也是实现无热化的有力措施。双层衍射光学元件的成像性质与单层衍射光学元件相同,最大的差别在于波段范围内不同波长处的衍射效率。

3 双层衍射光学元件设计实例

3.1 衍射效率推导

衍射效率的高低关系着衍射光学元件的使用价值,也决定着衍射光学元件是否合格、能否在系统中使用以及整个系统最终的成像质量。可以从相位光栅的衍射效率入手,根据标量理论来推导衍射光学元件的衍射效率^[5]。衍射效率的推导示意图如图2所示。

如图2所示,两束光入射到第一个衍射面上,发生的相位延迟为

$$\varphi(\lambda) = \frac{[n_M(\lambda)y_1 - n_1(\lambda)y_2] + [n_2(\lambda)y_3 - n_M(\lambda)y_4]}{\lambda}, \quad (1)$$

式中 $n_1(\lambda)$, $n_2(\lambda)$, $n_M(\lambda)$ 分别为第一个、第二个衍射面的材料折射率和间隔之间的介质折射率, y_1 和 y_2 为光束在第一个衍射面上的传播距离, y_3 和 y_4 为光束在第二个衍射面上的传播距离, λ 为入射光波长, θ_1 和 θ_2 分别为入射角和出射角, δd_i 为每层台阶的高度。

对(1)式进行整理可得

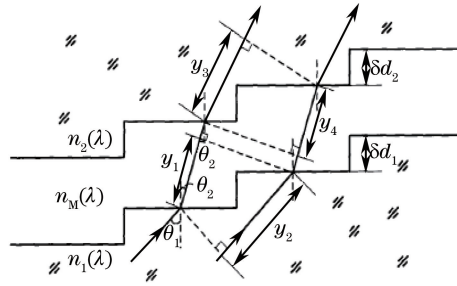


图2 两束光在衍射光学元件中的折射

Fig. 2 Refraction of two incidence beams in DOE

$$\begin{aligned} \varphi(\lambda) = & \frac{\delta d_1}{\lambda} [\sqrt{n_M^2 - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_1} - n_1(\lambda) \cos \theta_1] + \\ & \frac{\delta d_2}{\lambda} [\sqrt{n_2^2(\lambda) - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_1} - \sqrt{n_M^2(\lambda) - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_1}], \end{aligned} \quad (2)$$

两个衍射微结构的最大高度 d_1 和 d_2 分别为

$$d_1 = (N - 1) \delta d_1, \quad d_2 = (N - 1) \delta d_2, \quad (3)$$

则最大相位延迟函数 $\phi(\lambda)$ 可表示为

$$\begin{aligned} \phi(\lambda) = N\varphi(\lambda) = & \frac{Nd_1}{\lambda(N-1)} [\sqrt{n_M^2 - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_1} - n_1(\lambda) \cos \theta_1] + \\ & \frac{Nd_2}{\lambda(N-1)} [\sqrt{n_2^2(\lambda) - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_1} - \sqrt{n_M^2(\lambda) - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_1}]. \end{aligned} \quad (4)$$

当台阶数 $N \rightarrow \infty$ 时, (4) 式变为

$$\begin{aligned} \phi(\lambda) = & \frac{d_1}{\lambda} [\sqrt{n_M^2 - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_1} - n_1(\lambda) \cos \theta_1] + \\ & \frac{d_2}{\lambda} [\sqrt{n_2^2(\lambda) - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_1} - \sqrt{n_M^2(\lambda) - n_1^2(\lambda) \sin^2 \theta_1}]. \end{aligned} \quad (5)$$

连续面型的单层衍射光学元件的衍射效率表达式为

$$\eta_m = \{ \text{sinc} [m - \phi(\lambda)] \}^2, \quad (6)$$

式中 m 为衍射级次。与单层衍射光学元件类似, 双层衍射光学元件在第一个衍射面的基础上加入了第二个衍射面的相位改变。当光线角度为 90° , 即 $\theta_1 = 0^\circ$ 时, 将(5)式代入(6)式, 衍射效率可以表示为

$$\eta_m = \left\{ \text{sinc} \left\{ m - \frac{d_1 [n_M(\lambda) - n_1(\lambda)] + d_2 [n_2(\lambda) - n_M(\lambda)]}{\lambda} \right\} \right\}^2. \quad (7)$$

通常情况下, 中介介质为空气, 取 $n_M(\lambda) = 1$, 少数情况下为其他介质, 例如密接三层衍射光学元件。在一定波段内的积分平均衍射效率为

$$\bar{\eta}_m = \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \eta_m d\lambda = \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \text{sinc}^2 [m - \phi(\lambda)] d\lambda, \quad (8)$$

式中 λ_{\min} , λ_{\max} 分别为工作波段的起始波长和终止波长。各成像系统的工作波段都不是单一的波长, 而是一个波段, 对各个波长处的衍射效率进行积分, 再求平均衍射效率是一个重要的过程^[6]。

3.2 确定双层衍射元件设计波长

工作波段确定之后, 根据光学系统中透镜的材料性质, 合理选择加工衍射面的基底, 给定两个不同的波长可以计算得到不同的积分平均衍射效率。对于双层衍射光学元件来说, 波长和积分平均衍射效率有对应关系, 衍射效率终会在两个不同波长处达到最大值, 此时的两个不同波长即为需要的设计波长, 从而可以实现积分平均衍射效率的最大化设计。因此, 实现多层衍射光学元件积分平均衍射效率最大化设计的关键是确定积分平均衍射效率达到最大值时的两个不同波长。确定设计波长之后, 根据透镜材料的折射率, 可以计

算两个单层衍射面的衍射级次和衍射面的微结构高度,这是输入光学设计软件进行设计优化以及加工衍射面的重要参数。

3.3 实例分析

根据得到的公式计算衍射光学元件的衍射效率,双层衍射光学元件的积分平均衍射效率与波长的关系如图3所示。在 $0.65\sim 0.9\ \mu\text{m}$ 波段,元件的最大衍射效率为 99.96% ,平均衍射效率为 98% ,相应的设计波长为 $0.63\ \mu\text{m}$ 和 $0.90\ \mu\text{m}$ 。图3中蓝色曲线表示衍射级次取整前衍射效率随波长的变化关系,红色曲线表示衍射级次取整后衍射效率随波长的变化关系,可以看出衍射级次取整后衍射效率略微下降。金刚石车床可以加工出非台阶形状的衍射面,但这种加工方法对材料具有选择性,能够车削某些晶体、个别金属和光学塑料,但对光学玻璃的加工比较困难。选择光学塑料聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)和聚碳酸酯(PC)作为基底材料^[7]。通过计算可得双层衍射光学元件第一个衍射面和第二个衍射面的车削部分高度分别为 $15.68\ \mu\text{m}$ 和 $-19.78\ \mu\text{m}$,对应的衍射级次为 $m_1=15, m_2=-14$ 和 $m_1=11, m_2=-10$ 。此衍射元件的微结构尺寸满足金刚石单点车削加工工艺的要求,在加工过程中,加工误差主要为微结构高度误差和周期宽度误差,一般来说,金刚石单点车削加工衍射元件的误差在 5% 以内,现有的加工技术对误差的控制满足使用要求^[8]。

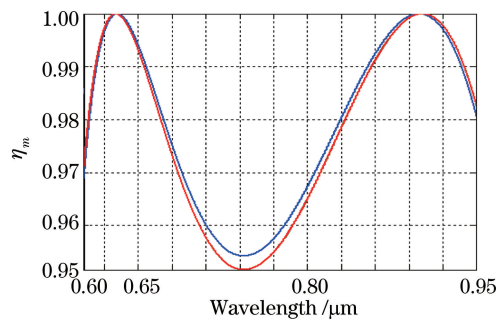


图3 双层衍射光学元件的积分平均衍射效率随波长的变化

Fig. 3 Integral average diffraction efficiency of double-layer DOE versus wavelengths

4 光学系统设计

4.1 光学系统指标要求

工作波段: $0.65\sim 0.9\ \mu\text{m}$;光学系统工作 F 数:1.2;光学系统焦距:25 mm;全视场: 40° ;调制传递函数(MTF): $\geq 0.5(40\ \text{lp/mm})$;几何尺寸: $\leq 60\ \text{mm}$;畸变: $\leq 5\%$ 。

4.2 光学系统设计

光学系统共8片透镜,有3个非球面,分别位于第1、5、13表面上;双层衍射光学元件选择第5片和第6片透镜为基底。虽然塑料方便加工、价格低,但光学塑料的热膨胀系数比光学玻璃高一个量级,玻璃密度较大,因此选择塑料非球面和玻璃球面混合使用,光学塑料非球面用来校正像差,玻璃球面主要承担系统的光焦度,玻璃材料选择NLAk33A、FK5,其余透镜为常用的光学塑料PS(聚苯乙烯)^[9-10]。最终得到的结果如图4所示。

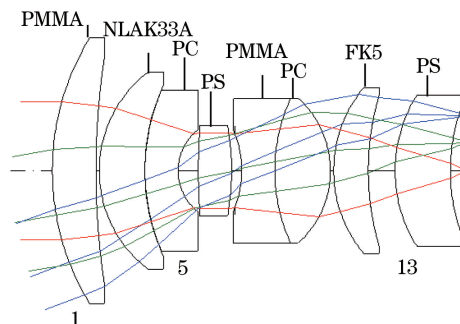


图4 光学系统结构图

Fig. 4 Layout of optical system

非球面矢高方程为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + a_1r^2 + a_2r^4 + a_3r^6 + a_4r^8 + \dots + a_8r^{16}, \quad (9)$$

式中 c 为表面曲率, k 为二次曲面系数, r 为透镜径向坐标, a_1, a_2, a_3 等为非球面系数。表面 1 的非球面系数为 $a_2 = -8.649 \times 10^{-7}$, $a_3 = -7.648 \times 10^{-10}$, $a_4 = 8.587 \times 10^{-13}$; 表面 5 的非球面系数为 $a_2 = -7.672 \times 10^{-6}$, $a_3 = -1.997 \times 10^{-9}$, $a_4 = -1.387 \times 10^{-10}$; 表面 13 的非球面系数为 $a_2 = -1.760 \times 10^{-6}$, $a_3 = 1.228 \times 10^{-9}$, $a_4 = -8.123 \times 10^{-12}$ 。

4.3 光学系统性能分析

光学系统的调制传递函数如图 5 所示。

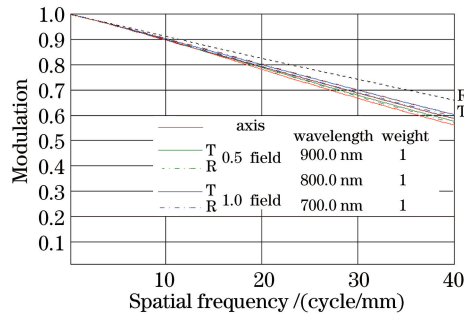


图 5 光学系统的调制传递函数

Fig. 5 MTF of the optical system

光学系统的畸变如图 6 所示。

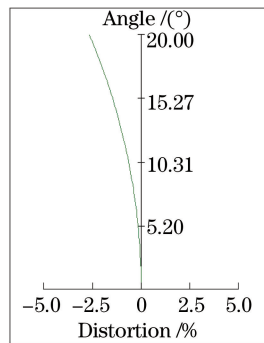


图 6 光学系统的畸变

Fig. 6 Distortion of the optical system

4.4 样品验证

物镜光学性能指标较高,要有大的相对孔径来保证光通量,也需要足够大的视场。物镜安装在头盔式微光夜视仪的最前端,要求重量尽可能小,以使整个系统的重心向后移,同时减轻穿戴的不适感。实例设计结果表明,在满足要求的情况下可以实现轻重量、小体积,根据设计结果进行样品验证。

4.4.1 衍射元件分析

根据衍射效率取得最大值确定的两个设计波长为 $0.63 \mu\text{m}$ 和 $0.90 \mu\text{m}$,通过计算得到衍射元件表面微结构高度分别为 $15.68 \mu\text{m}$ 和 $-19.78 \mu\text{m}$;双层衍射光学元件的第一个环带周期宽度为 8.5 mm ,最小环带周期宽度为 2.2 mm ,环带周期宽度完全满足实际加工要求。衍射元件的装调精度取决于加工精度,基底元件保证同轴的情况下可以实现精确啮合。

4.4.2 温度分析

为减轻物镜重量,物镜大多采用塑料元件,但塑料元件热膨胀系数比玻璃材料大一个数量级,缺点明显。头盔式微光夜视仪的工作温度为穿戴人员所处的环境温度,为了保证系统在 $-20 \sim 40^\circ\text{C}$ 全温度范围内的光学成像性能,将光学塑料元件和光学玻璃元件混合使用,各温度下的调制传递函数如表 1 所示。

表1 各温度下光学系统的调制传递函数
Table 1 MTF of the optical system at different temperatures

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	MTF		
	0 field	0.5 field	1 field
-20	0.501	0.522	0.530
20	0.565	0.577	0.583
40	0.550	0.564	0.580

4.4.3 重量分析

根据最终的样品数据,对比已知的玻璃元件光学系统和塑料元件光学系统,除去镜筒材料的重量,对比结果如表2所示。采用玻璃-塑料元件的光学系统重量比只用塑料元件的光学系统重量有所增大,但在全温度范围内的性能优于塑料元件光学系统,满足实际的应用要求。

表2 各种光学系统的重量
Table 2 Weight of various optical systems

Optical system	Weight /g
Glass	60.5
Plastic	20.2
Composite	32.3

5 结 论

与单层衍射光学元件相比,双层衍射光学元件的优势在于在整个波段范围内的不同波长处都有较高的衍射效率,解决了单层衍射光学元件只能在某一波长处达到100%衍射效率的问题,衍射光学元件不同寻常的负色散性质决定了其应用有利于光学系统的轻量化设计,塑料非球面和玻璃球面的混合使用进一步减轻了重量。分析了衍射光学元件的特性,提出了一种设计方法,通过微光夜视物镜系统的设计,证明了设计方法的可行性及正确性。双层衍射光学元件的平均衍射效率高于98%,所以对调制传递函数的影响可以忽略不计。设计的微光夜视物镜光学系统像质良好,具有大视场、小 F 数的特点,重量比传统玻璃元件物镜光学系统减轻50%。

参 考 文 献

- Han Xuebing, Liu Hua, Zhang Wenjing, *et al.* Design of hybrid refractive-diffractive objective lens for night vision system [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science), 2013, 36(1-2): 20-23.
韩雪冰, 刘 华, 张文静, 等. 二元光学元件在微光夜视物镜中的应用研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2013, 36(1-2): 20-23.
- Dong Hui, Cui Qingfeng, Pei Xuedan, *et al.* Imaging characteristics of multi-layer diffractive optical elements[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(3): 694-698.
董 辉, 崔庆丰, 裴雪丹, 等. 多层衍射光学元件成像特性的研究[J]. 光子学报, 2009, 38(3): 694-698.
- Wang Jiazhou, Pang Hui, Zhang Man, *et al.* Design method for multi-wavelength diffractive optical element[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 35(10): 1005002.
王佳舟, 庞 辉, 张 满, 等. 一种适用于多波长的衍射元件设计方法[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1005002.
- Petrovsky G T. Fundamental problems of IR optics and optical industry[C]. SPIE, 2001, 4369: 43-49.
- Mao Wenfeng, Zhang Xin, Qu Hemeng, *et al.* Broad dual-band kinoform infrared double-layer diffractive optical system design[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 34(10): 1022002.
毛文峰, 张 新, 曲贺盟, 等. 红外双色波段高衍射效率衍射光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1022002.
- Pei Xuedan, Cui Qingfeng, Leng Jiakai, *et al.* The design theory and diffractive efficiency of multi-layer diffractive optical elements[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(5): 1126-1131.
裴雪丹, 崔庆丰, 冷加开, 等. 多层衍射光学元件设计原理与衍射效率的研究[J]. 光子学报, 2009, 38(5): 1126-1131.
- Yang Liangliang. Diffractive efficiency of multi-layer diffractive optical elements[D]. Changchun: Changchun University

of Science and Technology, 2013: 28-29.

杨亮亮. 多层衍射光学元件衍射效率的研究[D], 长春: 长春理工大学, 2013: 28-29.

- 8 Gao Long, Xue Changxi, Yang Hongyun, *et al.* Effect of decenter errors on diffraction efficiency of multilayer diffractive optical elements in long infrared waveband[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0623004.

高 龙, 薛常喜, 杨红芸, 等. 偏心误差对长波红外波段多层衍射光学元件衍射效率的影响[J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0623004.

- 9 Fan Changjiang, Zhao Yahui, Xu Jiancheng, *et al.* The investigation of refractive-diffractive hybrid night vision object lens with plastic double-layer diffractive element[J]. *Journal of Zhejiang Normal University(Natural Science)*, 2012, 35(3): 276-279.

范长江, 赵亚辉, 徐建程, 等. 含有塑料双层衍射元件的微光夜视折衍射混合物镜[J]. *浙江师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 35(3): 276-279.

- 10 Zhang Liang, Pan Xiaodong. Design of plastic objective lens for low-light night vision system[J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(8): 1308-1312.

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.