

文章编号: 0253-2239(2003)02-0236-04

## 折/衍混合单透镜在目镜中的应用研究\*

张慧娟<sup>1</sup> 王肇圻<sup>1</sup> 李凤友<sup>2</sup> 陈波<sup>2</sup> 卢振武<sup>2</sup> 母国光<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 南开大学现代光学研究所光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)  
(<sup>2</sup> 长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130022)

**摘要:** 以传统凯涅尔目镜为基础, 采用 ZEMAX 软件, 设计了衍射面位于目镜系统中不同位置时的折/衍混合目镜系统。所有系统均仅采用最普遍的 K<sub>9</sub> 玻璃。设计结果与传统凯涅尔目镜的光学性能进行了分析和比较。结果表明折/衍混合目镜系统在校正目镜的像差, 例如像散、垂轴色差、垂轴像差、轴向像差和轴向色差等方面优于传统的凯涅尔目镜。选择合适的衍射面位置, 可以同时获得符合要求的畸变。衍射面的引入, 极大地减小了系统的重量和尺寸。

**关键词:** 应用光学; 光学设计; 目镜; 折/衍混合

中图分类号: O435.2 文献标识码: A

### 1 引 言

1988 年斯渥森 (Swanson) 和维尔得卡姆 (Veldkamp) 等人利用衍射光学元件 (DOE) 的色散特性校正单透镜的轴上色差, 研制了新型的二元光学透镜 (BOL)——多阶相位透镜<sup>[1]</sup>, 显示了衍射光学元件在光学成像领域的巨大潜力和优势。从此, 越来越多的光学工作者开始进行衍射光学在光学成像领域的应用研究<sup>[2~4]</sup>。Buralli 等<sup>[5]</sup> 和赵丽萍等<sup>[6,7]</sup> 研究了衍射光学元件在物镜中的应用。Knapp 等<sup>[8]</sup> 设计了视场角为 60° 的折/衍混合目镜系统, 并就成像质量与采用非球面的目镜系统进行了比较。Missing 等<sup>[9]</sup> 研究了折/衍单透镜代替 Erfle 目镜系统中的双胶合透镜后的成像质量。衍射光学元件与传统的折射元件组成的折/衍混合光学系统, 同时利用了光在传播中的折射和衍射两种特性, 增加了光学设计过程中的自由度, 能够突破传统光学系统的诸多局限。由于衍射光学元件具有负色散和无匹兹万场曲的特点, 在改善成像质量、减小系统的体积和重量方面表现出传统光学系统不可比拟的优势。另外, 衍射光学元件的制作是以母版为基础进行批量的复制<sup>[10]</sup>。复制技术如熔胶凝胶法技术<sup>[11]</sup>, 干型光聚合物紫外成型压模技术<sup>[12]</sup> 等。这

种利用复制技术生产衍射光学元件的特点, 使得衍射光学元件在价格上独具优势, 降低了系统的成本。

本文在传统凯涅尔目镜系统的基础上, 采用 ZEMAX 软件, 设计折/衍混合目镜系统。研究了当衍射面位于系统中不同位置时, 混合目镜系统的光学性能, 并与传统凯涅尔目镜系统的光学性能进行了比较。结果表明折/衍混合目镜系统在校正像差方面优于传统的凯涅尔目镜系统。另外, 衍射面的位置不同, 对像差的改善不同。选择合适的衍射面位置可以实现像散、垂轴色差、垂轴像差、轴向像差、轴向色差的改善, 同时获得符合要求的畸变。

### 2 折/衍混合目镜系统的设计方法

传统凯涅尔目镜由一个双胶合透镜和一个单透镜组成, 是能够同时校正像散、彗差和垂轴色差的最简单的目镜系统。其消色差由双胶合透镜完成。衍射元件不同于传统的折射元件, 其等效阿贝数  $\nu_{\lambda_1, \lambda_2}$  与所用基底材料无关, 而只与所使用的波段有关:

$$\nu_{\lambda_1, \lambda_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_3}, \quad (1)$$

式中,  $\lambda_2$  是所用波段的中心波长,  $\lambda_1$  和  $\lambda_3$  是波段两端波长, 通常有  $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$ 。在可见光波段, 衍射元件的阿贝数很小, 且为负值,  $\nu_{\lambda_1, \lambda_2} = -3.452$ 。衍射元件的这种特性对光学系统消色差很有好处。从消色差的角讲, 衍射元件的引入为光学设计增添了一种特殊的光学材料。

ZEMAX 软件中衍射面的相位分布函数为

\* 国家自然科学基金(60277021)、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室资助课题。

E-mail: wangzq@nankai.edu.cn

收稿日期: 2002-01-31; 收到修改稿日期: 2002-04-12

$$\varphi(r) = A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + \dots, \quad (2)$$

式中,  $A_1$  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;  $A_2$ 、 $A_3$  等为非球面相位系数, 用于校正系统的单色像差。

我们设计的折/衍混合单透镜, 其衍射面的基底面形为平面, 另一面为球面。折/衍混合系统的设计步骤为

第一步: 在保持系统光焦度分配不变的条件下, 以折射单透镜代替凯涅耳目镜中的双胶合透镜。

第二步: 使衍射面为平面, 在优化函数中输入垂轴色差和有效焦距函数, 对衍射面所在的透镜的结构参数和衍射面相位函数的第一项进行优化, 实现消色差并保持总的光焦度不变。完成后, 删除优化函数中垂轴色差和有效焦距函数。

第三步: 在优化函数中输入垂轴像差函数, 对衍射面的第二项进行优化。实现对单色像差的矫正。

第四步: 在优化函数中加入有效焦距和畸变函数, 在保持系统有效焦距不变的条件下, 对系统进行优化, 实现对像散、畸变和垂轴像差的最佳矫正。

### 3 折/衍混合目镜系统的设计结果与讨论

图 1 给出一个焦距为 30 mm、视场角为  $40^\circ$ 、出瞳距离为 12.8 mm、出瞳直径为 6 mm 的凯涅耳目镜系统的结构图。

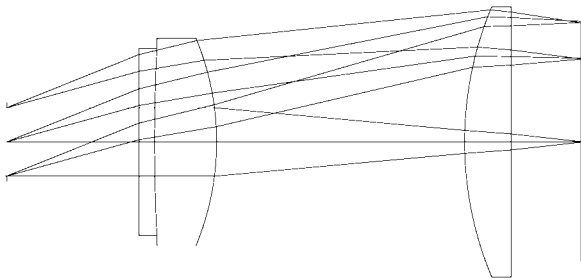


Fig. 1 The 2-dimensional layout of the Kellner eyepiece

表 1 的第 2 行列出了此目镜系统的像差。在此基础上, 利用以上方法设计了衍射面位于系统中不同位置的折/衍混合系统。图 2、图 3、图 4 和图 5 分别给出了衍射面位于系统透镜组第一面(系统 A)、第二面(系统 B)、第三面(系统 C)、第四面(系统 D)的折/衍混合系统。表 1 的第 3、4、5 和 6 行分别给出了它们的垂轴色差、像散、垂轴像差、畸变、轴向像差和轴向色差的极大值。折/衍混合系统与传统的凯

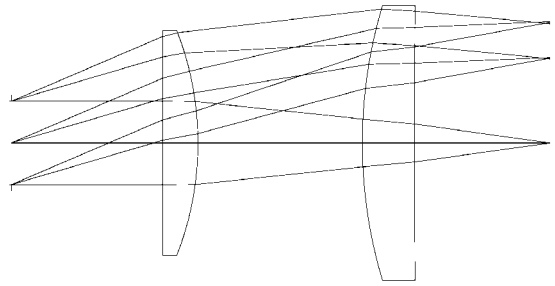


Fig. 2 The 2-dimensional layout of the hybrid refractive-diffractive eyepiece (the first surface of the first lens is diffractive surface)

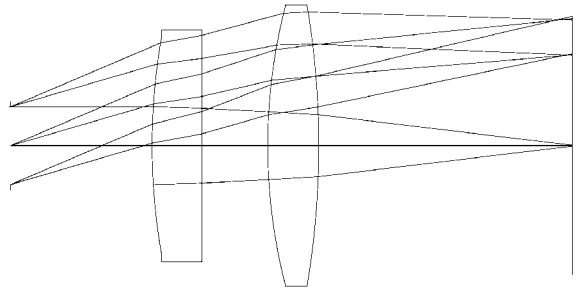


Fig. 3 The 2-dimensional layout of the hybrid refractive-diffractive eyepiece (the second surface of the first lens is diffractive surface)

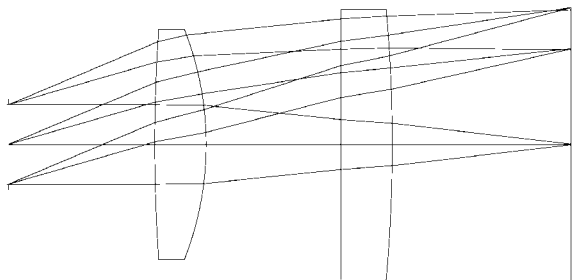


Fig. 4 The 2-dimensional layout of the hybrid refractive-diffractive eyepiece (the first surface of the second lens is diffractive surface)

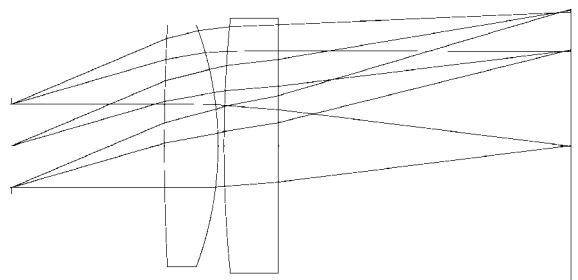


Fig. 5 The 2-dimensional layout of the hybrid refractive-diffractive eyepiece (the second surface of the second lens is diffractive surface)

涅尔系统具有相同的焦距、视场角、出瞳距离和出瞳直径。衍射元件的相位分布只取相位函数中的前两项。折/衍混合系统均只采用一种最普遍的玻璃  $K_9$ 。

Table 1 The comparison of conventional Kellner eyepiece and the hybrid refractive-diffractive eyepieces on optical performance

Eyepiece type	Lateral color /mm	Astigmatic /mm	Longitudinal aberration /mm	Chromatic focal shift /mm	Distortion /%	Transverse aberration / $\mu\text{m}$		
						0°	28°	40°
Kellner eyepiece	0.11	0.95	0.92	0.25	3	43	143	235
A eyepiece	0.007	0.61	0.65	0.07	5	29	108	181
B eyepiece	0.03	0.38	0.45	0.08	7	37	83	179
C eyepiece	0.04	0.25	0.91	0.18	4	41	122	234
D eyepiece	0.001	0.21	0.36	0.07	5	31	97	159

Note: A eyepiece denotes the hybrid refractive-diffractive eyepiece the first surface of which is diffractive surface; B eyepiece denotes the hybrid refractive-diffractive eyepiece the second surface of which is diffractive surface; C eyepiece denotes the hybrid refractive-diffractive eyepiece that the third surface of which is diffractive surface; D eyepiece denotes the hybrid refractive-diffractive eyepiece that the fourth surface of which is diffractive surface

Table 2 The apparent parameters of Kellner eyepiece and the hybrid refractive-diffractive eyepieces

Eyepiece type	Length of lenses from the first surface to the last surface /mm	Working space /mm	Weight /g	Maximal diameter /mm
Kellner eyepiece	36	7.6	8.9	11.8
A eyepiece	21	12.1	3.8	9.8
B eyepiece	15	23.3	5.5	10.8
C eyepiece	20	16.5	5.4	10.2
D eyepiece	10	24.8	4.9	9.2

由表 1 可以看出,引入衍射面的折/衍混合系统,与传统的凯涅尔目镜系统相比较,极大地降低了系统的垂轴色差,其最大值,由 0.11 mm 分别降低为 0.007 mm、0.03 mm、0.04 mm 和 0.001 mm;有效地降低了系统的像散,其最大值,由 0.95 mm 分别降低为 0.61 mm、0.38 mm、0.25 mm 和 0.21 mm;轴向像差也有所降低,其最大值,由 0.92 mm 分别降低为 0.65 mm、0.45 mm、0.91 mm 和 0.36 mm;轴向色差有显著的改善,其最大值,由 0.25 mm 分别降低为 0.07 mm、0.08 mm、0.18 mm 和 0.07 mm;垂轴像差也有改善,系统 A 的 0 视场、0.707 视场和最大视场的垂轴像差分别由传统凯涅尔目镜系统的 43  $\mu\text{m}$ 、143  $\mu\text{m}$  和 235  $\mu\text{m}$  降低为 29  $\mu\text{m}$ 、108  $\mu\text{m}$  和 181  $\mu\text{m}$ ,系统 B 的三个视场分别降低为 37  $\mu\text{m}$ 、83  $\mu\text{m}$  和 179  $\mu\text{m}$ ,系统 C 的三个视场分别降低为 41  $\mu\text{m}$ 、122  $\mu\text{m}$  和 234  $\mu\text{m}$ ,系统 D 的三个视场分别降低为 31  $\mu\text{m}$ 、97  $\mu\text{m}$  和 159  $\mu\text{m}$ 。折/衍混合目镜系统的畸变较传统的凯涅尔目镜系统有所增加,由 3% 分别增加为 5%、7%、4% 和 5%。

由表 1 数据可以看出,目镜系统中引入衍射面,使得目镜系统像差校正中最为关注的像散和垂轴色差较传统的折射目镜系统有显著的改善;系统 A、B、D 的垂轴像差有较大的改善;轴向像差和轴向色

差也有明显的改善。虽然,折/衍混合系统的畸变与折射系统的畸变相比都有所增加,但是本文设计的系统除 B 外,A、C、D 的畸变分别为 5%、4% 和 5%,符合一般的目镜系统视场角为 40° 时,畸变为 5% 左右的要求<sup>[13]</sup>。综上所述,引入衍射面并选择合适的位置,可以同时有效改善系统的像散、垂轴色差、垂轴像差、轴向像差和轴向色差,而且,可获得符合要求的畸变。另外,从畸变角度考虑,本文中衍射面位于第二透镜第一面的混合系统畸变最小;从像差校正总体考虑,本文中衍射面位于第二透镜第二面的混合系统最佳。

在系统的结构方面,从表 2 看出,系统 A、B、C 和 D 透镜组第一面到最后一面的长度由传统凯涅尔目镜系统的 36 mm 分别降低为 21 mm、15 mm、20 mm 和 10 mm,重量由 8.9 g 分别降低为 3.8 g、5.5 g、5.4 g 和 4.9 g,最大直径由 11.8 mm 分别降低为 9.8 mm、10.8 mm、10.2 mm 和 9.2 mm。使系统结构更加紧凑。同时,折/衍混合系统比传统凯涅尔目镜系统的工作距离有显著增大,其值分别由 7.6 mm 增加为 12.1 mm、23.3 mm、16.5 mm 和 24.8 mm。

**结论** 本文在传统凯涅尔目镜的基础上,设计了衍

射面位于系统中不同位置处的折/衍混合目镜系统。所设计结果与传统的凯涅尔目镜系统进行了比较。结果表明,在目镜系统中引入衍射面,并选择合适的位置,设计的折/衍混合目镜系统,可以显著地改善系统的像散、垂轴色差、垂轴像差、轴向像差和轴向色差,还可得到符合要求的畸变。另外,衍射面的引入,使得系统在结构上更加紧凑;并增大了系统的工作距离。

### 参 考 文 献

- 1 Sweatt W. C. Describing holographic and optical elements as lenses. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(11):803~808
- 2 Stone T, George N. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(14):2960~2971
- 3 Buralli D A, Morris G M. Design of diffractive singlets for monochromatic imaging. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(16):2151~2158
- 4 Wood A P. Design of infrared hybrid refractive-diffractive lenses. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(13):2253~2258
- 5 Buralli D A, Morris G M. Design of a wide field diffractive landscape lens. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(18):3950~3959
- 6 Zhao Liping, Wu Minxian. Study on the design of the hybrid singlet to replace the refractive doublet. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(2):223~227 (in Chinese)
- 7 Zhao Liping, Wu Minxian, Jin Guofan *et al.*. Spherochromatism correction of a hybrid refractive-diffractive singlet. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(5):621~626 (in Chinese)
- 8 Knapp W, Blough G, Khajurivala K *et al.*. Optical design comparison of 60° eyepiece: one with a diffractive surface and one with aspherics. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(20):4756~4760
- 9 Missing M D, Morris G M. Diffractive optics applied to eyepiece design. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(14):2452~2461
- 10 Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian *et al.*. *Binary Optics* (二元光学). Beijing: Industry of National Defence Press, 1998, 318~326 (in Chinese)
- 11 Nogues J R, Howell R L. Fabrication of pure silica micro-optics by sol-gel processing. *Proc. SPIE*, 1992, **1751**:214~224
- 12 Lee S H. Diffractive and miniaturized optics. Bellingham, Washington (USA): SPIE Optical Engineering Press, 1993, 165~186
- 13 Yuan Xucang. *Optical Design* (光学设计). Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1998, 180 (in Chinese)

## The Study of the Hybrid Refractive-Diffractive Singlet in the Eyepiece

Zhang Huijuan<sup>1,2</sup> Wang Zhaoqi<sup>1</sup> Li Fengyou<sup>2</sup> Chen Bo<sup>2</sup>  
Lu Zhenwu<sup>2</sup> Mu Guoguang<sup>1</sup>

- <sup>1</sup> The Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology,  
Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071
- <sup>2</sup> State Key Lab. of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022

(Received 31 January 2002; revised 12 April 2002)

**Abstract:** Basing on the conventional Kellner eyepiece, four hybrid refractive-diffractive eyepieces with different locations of the diffractive surface are designed. Only a kind of glass K<sub>9</sub> is used in the optical systems. The optical performance of the hybrid eyepieces are studied and compared with the Kellner eyepiece. It has been shown that the hybrid eyepieces take the advantages of improving aberrations, such as astigmatic, lateral color, transverse aberration, longitudinal aberration and chromatic focal shift, as compared with the Kellner eyepiece, and a satisfactory distortion can be obtained if a suitable location of the diffractive surface is chosen. The size and the weight is greatly reduced due to the introducing of diffractive surface.

**Key words:** applied optics; optical design; eyepiece; hybrid refractive-diffractive