

文章编号: 0253-2239(2003)01-85-04

折-衍混合超广角视场目镜系统的设计*

张慧娟¹ 王肇圻¹ 傅汝廉¹ 母国光¹ 卢振武²

1 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

2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 国家应用光学重点实验室, 长春 130022

摘要: 在传统的超广角(70°)赛得莫尔(Scidmore)目镜的基础上, 设计了两个折-衍混合 70°视场的目镜。其中一个混合系统含有两个折-衍单透镜, 另一个含有一个折-衍单透镜。所设计的混合系统与赛得莫尔目镜进行了像差和结构的比较, 表明折-衍混合目镜系统不仅在诸如垂轴像差、垂轴色差、平均场曲等光学性能方面优于传统的赛得莫尔目镜系统, 而且在尺寸和重量上有非常显著的减少。最后讨论了衍射面的结构参量。

关键词: 应用光学; 折-衍混合系统; 目镜系统; 光学设计

中图分类号: TH74 文献标识码: A

1 引言

近年来使用微显示光电器件的具有不同应用的各种头盔显示系统迅速发展起来, 并因此对目镜设计提出了新的更高的要求。头盔显示系统已广泛地应用于军事、医疗、计算机娱乐和虚拟现实系统中。虽然不同的应用对目镜的要求各有不同, 但是它们有如下的共同特点: 长出瞳距离、大出瞳直径、大视场、宽光谱范围、小尺寸和重量轻等^[1,2]。传统的目镜设计很难满足以上的要求。衍射光学元件由于其独特的色散特性, 已引入到现行的目镜系统设计中^[3,4]。1988年, Swanson等^[5]利用衍射元件的色散特性校正了单透镜的轴上色差和球差, 研制了新型的二元光学透镜, 把衍射光学用于光学成像领域。1995年, Missing基于传统的艾尔弗目镜, 设计了一个折-衍混合大视场(60°)目镜系统^[6]。这个光学系统由3个单透镜组成, 与5个透镜组成的艾尔弗目镜系统相比, 光学性能有所提高, 而尺寸和重量有很大程度的减少。

本文基于传统的超广角(70°)赛得莫尔目镜系统设计了两个折-衍混合 70°视场目镜系统, 它们符合现代头盔显示系统的一般要求。一个系统由2个折-衍单透镜、1个平凸透镜和1个双凸透镜组成, 另一个系统由1个折-衍单透镜、1个平凸透镜和2

个双凸透镜组成。设计结果同传统的赛得莫尔目镜系统进行了比较。最后讨论了衍射面的结构参量和现有的加工条件下制备衍射面的可行性。

2 折-衍混合目镜系统的设计和讨论

图1给出了一个有效焦距为30mm的赛得莫尔目镜, 它由两个双胶合透镜、一个平凸透镜和一个凸透镜组成。所有的正透镜用同一种玻璃, 负透镜用另一种玻璃。目镜系统的光焦度由第一个双胶合透镜和两个凸透镜分担, 而第二个双胶合透镜承担像差的校正。第一个双胶合透镜和平凸透镜组成色差校正系统。

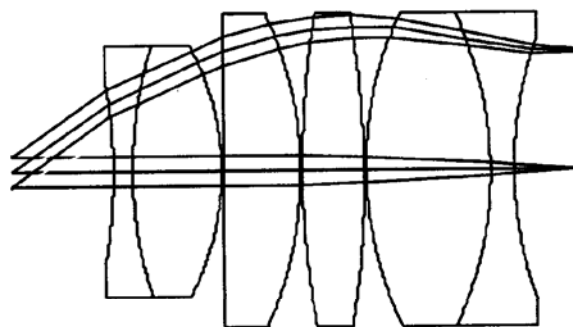


Fig. 1 Two-dimensional layout of Scidmore eyepiece

基于这个赛得莫尔目镜系统, 我们用 ZEMAX 软件, 在不改变此系统的有效焦距、出瞳距离和出瞳直径的条件下, 设计了含有两个折-衍单透镜的混合目镜系统。软件中旋转对称衍射面的相位分布为^[7]

$$\varphi(r) = A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + \dots \quad (1)$$

* 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所国家应用光学重点实验室资助课题。

E-mail: wangzq@nankai.edu.cn

收稿日期: 2001-11-05; 收到修改稿日期: 2002-01-04

r 为归一化半径坐标, A_1 决定该面的光焦度, 一般用来校正系统的色差, 而后面的非球面项用来校正系统的高级像差。根据需要, 本设计只取前两项。

首先, 用一个折-衍单透镜代替第一个双胶合透镜。其具体优化步骤如下:

第一步, 以单透镜的平面为衍射面, 在优化函数中加入有效焦距和垂轴色差的校正函数, 对单透镜的凸面和衍射面的第一项进行一级特征优化, 即保持有效焦距不变。完成后删除有效焦距和垂轴色差的校正函数。第二步, 对衍射面进行高级优化, 即在优化函数中加入垂轴像差和畸变的校正函数, 优化衍射面的第二项。

在优化过程中要注意各个优化函数权重值的选择, 应考虑到现有的加工条件对衍射面最小特征尺寸的限制、各像差之间的平衡及目镜系统对像差的要求。例如, 在优化衍射面的高级特征时, 如果畸变校正函数的权重取值过大, 将导致垂轴像差急剧增大; 而畸变校

正函数的权重取值略小一点, 垂轴像差就有很大的改善。由于目镜系统对畸变的要求不是很高, 因此在考虑像差平衡的基础上, 侧重于对垂轴像差的改善。

然后用另一个折-衍单透镜代替第二个双胶合透镜。依照以上优化步骤分别进行一级优化和高级优化。

图 2 给出了所设计的含有两个折-衍单透镜的混合目镜系统。表 1 列出了这个折-衍混合目镜系统的光学性能参量, 表 2 列出了它的外观尺寸和重量, 并与赛得莫尔目镜进行了比较。本文设计的含有两个折-衍单透镜的混合目镜系统与赛得莫尔目镜相比较, 0° 视场的垂轴像差降低了 67.5%, 48° 视场时降低了 60.6%, 70° 视场时降低了 41.0%; 垂轴色差获得了更大的改善, 降低了两个数量级; 平均场曲 70° 视场时降低了 74.6%; 而畸变仅增加了 2.3%。系统结构上, 长度减少了 29.7%, 镜头直径减小了 18.4%, 重量减轻了 80.9%。

Table 1. The comparison of Scidmore eyepiece and the two hybrid refractive-diffractive eyepieces on optical performance

Eyepiece type	Transverse aberration / μm			Lateral color / mm	Distortion / %	Average field curvature / mm
	0°	48°	70°			
Scidmore eyepiece	8.3	178.9	275.1	0.21	13.3	0.67
Hybrid eyepiece with two refractive diffractive lens	2.7	70.5	162.3	0.0017	15.6	0.17
Hybrid eyepiece with one refractive diffractive lenses	9.6	97.6	224.8	0.065	15.8	0.34

Table 2. The apparent parameters of Scidmore eyepiece and the two hybrid refractive-diffractive eyepieces

Eyepiece type	Length / mm	Weight / 10^{-3} kg	Radius / mm
Scidmore eyepiece	83.4	188.2	22.8
Hybrid eyepiece with two refractive diffractive lenses	58.6	35.8	18.6
Hybrid eyepiece with one refractive diffractive lens	58.7	39.3	18.6

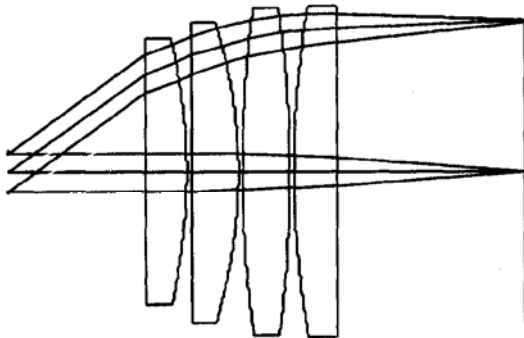


Fig. 2 Two-dimensional layout of the hybrid refractive-diffractive eyepiece with two diffractive surfaces. One diffractive surface is the plane of the first lens near the exit pupil, the other diffractive surface is the plane of the fourth lens far from the exit pupil

可见, 衍射面的引入, 极大的降低了系统的垂轴像差和垂轴色差; 同时极大地降低了系统的尺寸和重量。虽然畸变略有增加, 但是目镜系统对畸变的要求不是很高。然而对于衍射光学元件, 在刻蚀台阶数为 8 时衍射效率为 95%。当系统中存在两个衍射面时, 系统的衍射效率为两个衍射面衍射效率的乘积, 使得系统总的衍射效率下降。另外, 衍射面的增多, 导致系统有较多的杂散光。因此, 我们又设计了一个含有一个折-衍单透镜的混合目镜系统。

含有一个折-衍单透镜的混合目镜系统的设计过程为: 首先, 用一个双凸透镜代替第一个双胶合透镜, 在优化函数中加入有效焦距校正函数, 对该透镜进行优化, 保持系统的有效焦距不变。然后, 用一个

折-衍单透镜代替第二个双胶合透镜, 依照前面对折-衍单透镜的设计和优化步骤, 分别进行一级优化和高级优化。

图 3 给出了设计的含有一个折-衍单透镜的混合目镜系统。表 1 列出了它的光学性能参量, 表 2 列出了它的外观尺寸和重量, 并与赛得莫尔目镜进行了比较。本文设计的含有一个折-衍单透镜的混合目镜系统与赛得莫尔目镜系统相比较, 0° 视场的垂轴像差与赛得莫尔目镜系统相当, 但是大视场的垂轴像差得到了很大程度的改善, 其中 48° 视场降低了 45.4%, 70° 视场降低了 18.3%; 垂轴色差也获得了很大的改善, 降低了 69.0%; 平均场曲 70° 视场降低了 49.3%; 而畸变仅增加了 2.5%。结构上, 长度减少了 29.6%, 重量减轻了 80.7%, 镜头直径减小了 18.4%。

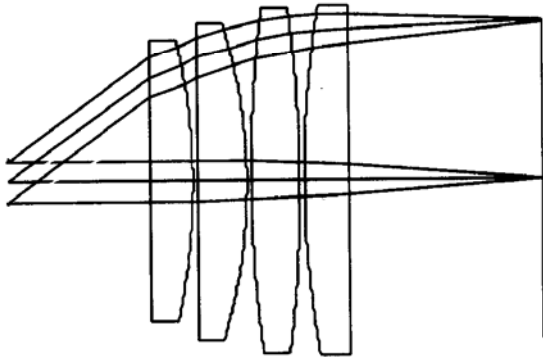


Fig. 3 Two-dimensional layout of the hybrid refractive-diffractive eyepiece with one diffractive surface. The diffractive surface is the plane of the fourth lens far from the exit pupil

可见, 系统中仅含一个衍射面, 同样使系统的垂轴像差和垂轴色差获得很大的改善, 系统的尺寸和重量也有很大的降低。虽然含有一个折-衍单透镜的混合目镜系统与含有两个折-衍单透镜的混合目镜系统相比, 光学性能上略差, 但仍优于传统的赛得莫尔目镜系统。而由于系统中仅含有一个衍射面, 具有较高的光能利用率, 且杂散光较少, 对于克服“鬼像”和提高像质十分有利。因此, 设计折-衍混合系统时, 一般只选一个面为衍射面。

3 衍射面参量的讨论

由 ZEMAX 软件给出的衍射面的相位分布 (1) 式, 得到

$$-2\pi k = A_1 r^2 + A_2 r^4. \quad (2)$$

由上式可得, 第 k 个环带的归一化半径 r_k 为

$$r_k = \sqrt{\frac{A_1 - \sqrt{A_1^2 - 8\pi k A_2}}{2A_2}}. \quad (3)$$

最大的环带数 k_{\max} 表示为

$$k_{\max} = \text{Int} \left\lfloor \frac{A_1 r_0^2 + A_2 r_0^4}{2\pi} \right\rfloor, \quad (4)$$

式中, r_0 为衍射面的归一化半径, 即衍射面的半径与设计过程中 ZEMAX 软件中归一化半径 R 的比值。第 k 个环带的半径 r'_k 为

$$r'_k = R r_k, \quad (5)$$

式中, $k = 1, 2, \dots, k_{\max}$ 。当刻蚀台阶数为 8 时, 每个台阶的深度为

$$d = \frac{\lambda_l}{8 \times (n - 1)}, \quad (6)$$

其中, n 为二元光学材料的折射率, λ_l 为系统应用波段的中心波长。本文设计中所取可见光波段:

$$\lambda_r = 486 \text{ nm}, \quad \lambda_l = 588 \text{ nm}, \quad \lambda_c = 656 \text{ nm}.$$

对本文设计的含有两个折-衍单透镜的混合目镜系统, 第一个衍射面的 A_1 和 A_2 分别为 -1353.4 和 -293.8, 设计时 ZEMAX 软件中归一化的半径为 19.2 mm, 衍射面的半径为 15.0 mm, 衍射面的归一化半径为 0.8, 总的环带数为 149。刻蚀台阶数为 8 时, 最小特征尺寸为 $5.6 \mu\text{m}$ 。第二个衍射面的 A_1 和 A_2 分别为 -5324.3 和 1563.1, 设计时 ZEMAX 软件中归一化的半径为 24 mm, 衍射面的半径为 18.6 mm, 衍射面的归一化半径为 0.8, 总的环带数为 419。刻蚀台阶数为 8 时, 最小特征尺寸为 $3.5 \mu\text{m}$ 。对本文设计的含有一个折-衍单透镜的混合目镜系统, 衍射面的 A_1 和 A_2 分别为 -5394.4 和 2247.5, 设计时 ZEMAX 软件中归一化的半径为 24.0 mm, 衍射面的半径为 18.6 mm, 衍射面的归一化半径为 0.8, 总的环带数为 387。刻蚀台阶数为 8 时, 最小特征尺寸为 $4.1 \mu\text{m}$ 。现有的制作工艺可以制作以上三个衍射面。

结论 本文在传统的超广角 (70°) 赛得莫尔目镜的基础上, 设计了两个折-衍混合 70° 视场目镜系统。设计结果与赛得莫尔目镜系统进行了比较。设计过程中考虑到现有的制作工艺水平对衍射面最小特征尺寸的限制, 以及目镜系统对像差的要求。衍射面的引入对大视场垂轴像差和垂轴色差的校正非常有效, 同时, 显著地减少了系统的外观尺寸和重量。考虑到衍射效率, 折-衍混合系统通常只选取一个面为衍射面。综上, 衍射光学的引入使得设计的目镜系统更符合现代光学系统的需要, 为目镜系统在工业

生产、医疗卫生、军事国防以及空间技术等方面的广泛应用开拓了一条新径。

参 考 文 献

- 1 Frank J F. An update on optical system for military head mounted displays. *Proc. SPIE*, 1999, **3689**: 178~ 185
- 2 Bunkenburg J, Feritz T A. Innovative diffractive eyepiece for helmet-mounted display. *Proc. SPIE*, 1998, **3430**: 41~ 49
- 3 Stone T, George N. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(14): 2960~ 2971
- 4 Wood A P. Design of infrared hybrid refractive-diffractive lenses. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(13): 2253~ 2258
- 5 Swanson G I, Veldkamp W B. Infrared applications of diffractive optical elements. *Proc. SPIE*, 1988, **883**: 155~ 158
- 6 Missing M D, Morris G M. Diffractive optics applied to eyepiece design. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(14): 2452~ 2461
- 7 Focus Software. *ZEMAX Optical Design Program User's Guide*, Version 8.0. 1999. 176~ 177

Design of Hybrid Refractive-Diffractive Ultra-Wide Angle Eyepieces

Zhang Huijuan¹ Wang Zhaoqi¹ Fu Rulian¹ Mu Guoguang¹ Lu Zhenwu²

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1 <i>The Key Lab of Optoelectronic Information Science and Technology, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071</i> 2 <i>State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022</i> |
|--|

(Received 5 November 2001; revised 4 January 2002)

Abstract: The designing considerations and procedure of hybrid refractive-diffractive ultra-wide-angle (70°) eyepieces are presented, one is with two diffractive surfaces and another is with single diffractive surface. The factors such as the balance between aberrations, the manufacture issue of the minimum feature size of the diffractive element and the diffraction efficiency were taken into account in the design. It was shown that the performance merits, such as transverse aberration, lateral color, are greatly improved compared with the conventional Scidmore eyepiece, while the hybrid systems offer considerable reduction in the apparent size, weight and number of elements. Finally, the parameters of the diffractive surfaces were presented.

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