

文章编号: 0258-7025(2005)06-0856-04

# 用于头盔显示器的折/衍混合全塑料目镜

张慧娟

(天津大学理学院应用物理系, 天津 300072)

**摘要** 衍射光学元件具有独特的负色散性质和以其任意的相位分布实现对光波面的任意相位调制的特点,用在光学系统中可大大简化系统结构,而光学塑料在进一步减轻系统重量方面有优势。设计了应用于头盔显示器的折/衍混合全塑料目镜,其有效焦距为 30 mm,视场角为 40°,出瞳距离为 20 mm,出瞳直径为 8 mm,由三个折射透镜和一个衍射面组成。该目镜的最大镜头直径为 26 mm,总重量为 7 g。对于目镜中需要重点校正的像散和垂轴色差的最大值分别为 0.58 mm 和 18  $\mu\text{m}$ ,而最大畸变也仅为 3.3%;角分辨率为 0.44 mrad,小于人眼的最小角分辨率。

**关键词** 应用光学;折/衍混合目镜;光学设计;光学塑料;头盔显示器

**中图分类号** O438 **文献标识码** A

## Plastic Hybrid Diffractive-Refractive Eyepiece for Head-Mounted Display

ZHANG Hui-juan

(Applied Physics Department, College of Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** The diffractive optical element, with the negative dispersive characteristic and the random phase distributing to realize random phase modulation for wave-front, is helpful to simplify the optical system, and the optical plastic elements further reduce the weight of the system. A plastic hybrid diffractive-refractive eyepiece for head-mounted display is designed, the features of the eyepiece are 30 mm effective focal length, 40° field-of-view (FOV), 20 mm exit pupil and 8 mm exit pupil size, and which consists of three lens and one diffractive element. The maximal diameter of lens and the overall weight of this eyepiece are 26 mm and 7 g, respectively. For the image quality, the astigmatic and lateral color of the key aberrations of eyepiece are 0.58 mm and 18  $\mu\text{m}$ , and the distortion is only 3.3%. The angular resolution of this eyepiece is 0.44 mrad and less than that of human eyes.

**Key words** applied optics; hybrid diffractive-refractive eyepiece; optical design; optical plastic; head-mounted display

## 1 引言

头盔显示器将微小显示器的图像成像于人眼,可实现在现实视场上同时看到需要的数据(增强现实)、体验视觉图像变化时全身心投入的临场感(虚拟现实)、扩展人眼的视觉能力(微光夜视和红外夜视)等,在军事、航空航天、工业生产、娱乐和医疗等领域有广泛的应用<sup>[1~5]</sup>。目镜是头盔显示器光学系统的一个重要组成部分,用在头盔显示器中的目镜不同于固定使用的显微镜和望远镜等中的目镜。头盔显示器的目镜要求有较大的出瞳距离和出瞳直径,允许使用者佩戴眼镜或防毒面具,当使用者由于运动或其他原因而偏离光轴时,仍能看到图像。但能满足这些要求的目镜体积和质量都很大,因此要求小型化和轻量化。

在目镜中引入衍射光学元件是解决上述问题的较好办法。衍射光学元件可实现对光波面的任意相位调制<sup>[6,7]</sup>;在改善系统成像质量、减小系统的体积和重量以及降低成本等方面具有传统光学元件无可比拟的优势<sup>[8~12]</sup>。另外,目镜元件选择光学塑料,进一步减小了重量。光学塑料元件具有重量轻、成本低、耐冲击性能好、线膨胀系数小[如聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)的线膨胀系数为(5~9) $\times 10^{-5}/\text{C}$ ]等优点,适合全天候工作<sup>[13]</sup>。本文设计了用于头盔显示器的折/衍混合全塑料目镜。

## 2 折/衍混合全塑料目镜

目镜是目视系统的一个重要组成部分,其焦距较短,一般在 15~30 mm 之间,视场角较大,通常在

收稿日期: 2004-07-19; 收到修改稿日期: 2004-11-03

作者简介: 张慧娟(1973—),女,河北赞皇县人,讲师,主要从事衍射光学和光学设计的研究。E-mail: hjzhang@eyou.com

40°左右,广角目镜视场在 60°左右,有些特广角目镜视场甚至达 100°。目镜的像接收器是人眼,通常人眼瞳孔的直径为 2~6 mm,对于用在头盔显示器中的目镜,其出瞳直径应大于此数值,以保证使用者始终都能看到图像。为了保证使用方便,以及某些情况下使用者要佩戴防毒面具,目镜的出瞳距离应不小于 20 mm。综上所述,确定目镜的设计参数有效焦距为 30 mm,视场角为 40°,出瞳距离和出瞳直径分别为 20 mm 和 8 mm。

设计中的衍射面采用 ZEMAX 光学设计软件中具有旋转对称相位分布的 Binary 2 面型,其相位分布函数表示为<sup>[14]</sup>

$$\phi_{\text{dif}}(r) = A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + \dots, \quad (1)$$

$$r = x/R, \quad (2)$$

式中  $r$  为衍射面的归一化径向坐标,  $x$  为衍射面的径向坐标,  $R$  为衍射面的标准半径;  $A_1$  为二次相位系数,决定衍射面的傍轴光焦度<sup>[15]</sup>

$$\varphi_{\text{dif}} = -2m \left( \frac{\lambda}{2\pi} \right) A_1, \quad (3)$$

其中  $m$  为所用的衍射级次,设计中  $m = 1$ ,则

$$\varphi_{\text{dif}} = -\frac{\lambda}{\pi} A_1, \quad (4)$$

此项用来校正光学系统的色差; (1) 式中的  $A_2, A_3$  等为非球面相位系数,这些非球面项相当于非球面的作用,用于校正系统的单色像差。为简单起见,文中的衍射面相位函数只取(1)式的前两项,即

$$\phi_{\text{dif}}(r) = A_1 r^2 + A_2 r^4, \quad (5)$$

采用 ZEMAX 光学设计软件进行设计和反复优化,得到用于头盔显示器的折/衍混合全塑料目镜,其结构如图 1 所示,包括三个折射透镜和一个衍射面,其中衍射面位于第二个透镜的平面处。衍射面的基底面型采用平面是为了制作上简单。透镜材料选择光学塑料 PMMA,其透明性可与光学玻璃相媲美,且耐冲击强度高、非晶性好、光弹性灵敏度低,线膨胀系数小。该目镜的最大镜头直径为 26 mm,总重量为 7 g。

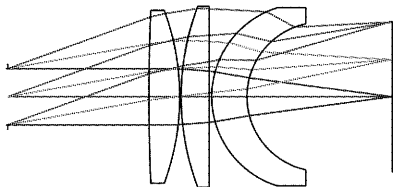


图 1 折/衍全塑料目镜结构

Fig. 1 2D layout of eyepiece (the planar surface of the second lens is diffractive surface)

图 2 给出视场角为 0°, 20° 和 40° 对应的目镜在子午方向(EY)和弧矢方向(EX)的垂轴像差曲线。对应于各视场垂轴像差的最大值为 25 μm, 85 μm 和 112 μm。

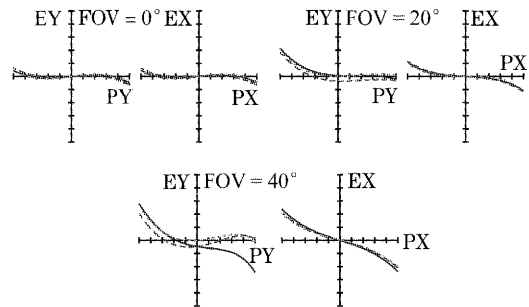


图 2 目镜的垂轴像差曲线

Fig. 2 Transverse ray fan plot of eyepiece (the maximal scale is 200 μm)

图 3 为目镜的场曲和畸变曲线。由场曲曲线可得到目镜像散的最大值为 0.58 mm。目镜的最大畸变为 3.3%, 这一数值符合视场角为 40°, 其畸变小于 5% 的目镜一般要求。图 4 为目镜的垂轴色差曲线, 最大垂轴色差仅为 18 μm。

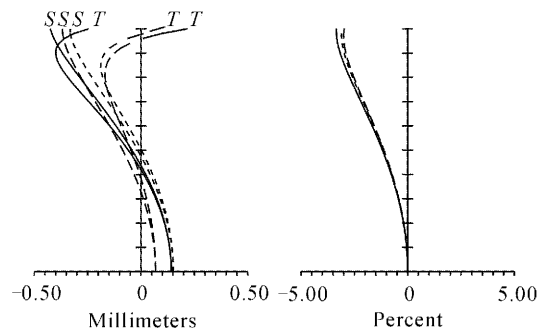


图 3 目镜的场曲和畸变曲线

Fig. 3 Curves of field curvature and distortion of eyepiece

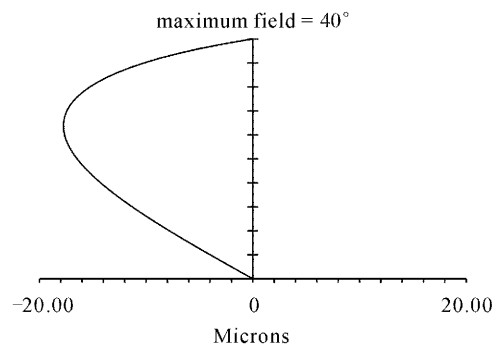


图 4 目镜的垂轴色差曲线

Fig. 4 Lateral color of eyepiece

图 5 给出视场角为 0° 和 20° 对应的目镜的调制

传递函数(MTF)曲线,在调制度为 0.3 时,0°视场对应的目镜的空间分辨率为 75 lp/mm。而较大视场的空间分辨率和其他目视系统一样较低。

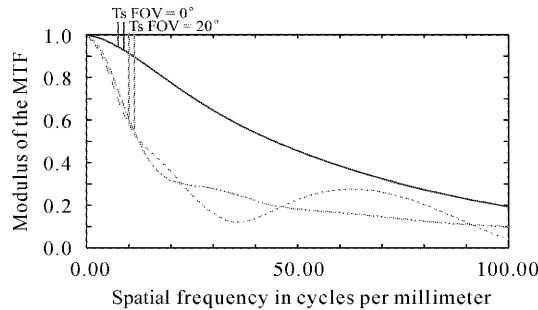


图 5 目镜的调制传递函数曲线

Fig. 5 Curve of modulation transfer function of eyepiece

对于像面位于无穷远的光学系统,其角分辨率可由下式计算得到

$$\theta = \min \left[ \frac{2 \tan(\omega/2)}{h}, \frac{2 \tan(\nu/2)}{p} \right], \quad (6)$$

其中  $h, p$  为图像源两个正交方向上的像素数(一般宽高比为 4:3), $\omega, \nu$  为两个正交方向上的视场角, $\theta$  的单位为弧度。目镜就是将图 1 中像面上的图像成像到无穷远,然后由眼睛接收,因而其角分辨率的计算,可首先将本设计中的视场角和像面尺寸作为对角方向上的数值,然后根据 4:3 的比例转化为两个正交方向的数值,最后由 0°视场的空间分辨率 75 lp/mm 和 (6) 式得到目镜的最小角分辨率为 0.44 mrad,此值小于人眼的最小角分辨率 0.5 mrad。

分析表明该目镜无论在结构上还是成像质量上都适用于头盔显示器中。

### 3 衍射面讨论

文中所用衍射面相位函数中的  $A_1, A_2$  两参数

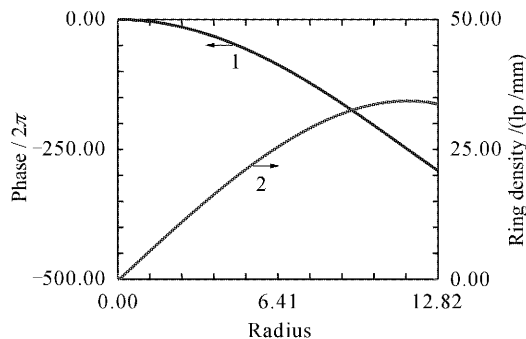


图 6 衍射面的相位函数曲线(线 1)和环带密度曲线(线 2)

Fig. 6 Phase (line 1) and ring line density (line 2) curves of diffractive surface

分别为 -6791 和 4122,标准半径为 22 mm,衍射面的半径为 12.8 mm,由公式

$$-2\pi k = A_1 r^2 + A_2 r^4, \quad (7)$$

可计算得到每个环带的归一化径向坐标,再由 (2) 式得到其径向坐标。图 6 给出该衍射面的相位函数曲线(线 1)和环带密度曲线(线 2)。经计算,此衍射面共有 292 个环带,最小带宽为 29.7  $\mu\text{m}$ 。设计中衍射元件的基底材料是光学塑料,其制作可采用单点金刚石车削(SPDT)制成连续浮雕结构,衍射效率较多台阶浮雕结构高。

### 4 结 论

通过分析用在头盔显示器中的目镜的特点,以及衍射元件和光学塑料在该类目镜设计中具有的优点,设计了用于头盔显示器的折/衍混合全塑料目镜。该目镜的视场角为 40°,出瞳距离和出瞳直径分别为 20 mm 和 8 mm;最小角分辨率为 0.44 mrad,小于人眼的最小角分辨率;且体积小、重量轻。此目镜在结构和成像质量方面都满足头盔显示器的要求。

### 参 考 文 献

- G. H. Wilson, R. J. Mcfarlane. The development of an aviators helmet mounted night vision goggle system [C]. *SPIE*, 1990, **1290**: 128~135
- Thomas P. Caudell. Introduction to augmented and virtual reality [C]. *SPIE*, 1994, **2351**: 272~281
- E. Natonek, L. Flückiger, Th. Zimmerman *et al.*. Virtual reality: an intuitive approach to robotics [C]. *SPIE*, 1994, **2351**: 260~270
- Andrew Park, Rick Kazman. Augmented reality for mining teleoperation [C]. *SPIE*, 1994, **2351**: 119~129
- Zhang Huijuan, Wang Zhaoqi, Zhao Qiuling *et al.*. Hybrid diffractive-refractive optical system design of head-mounted display for augmented reality [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 121~124  
张慧娟,王肇圻,赵秋玲等.折/衍混合增强现实头盔显示器光学系统设计[J].*光学学报*, 2004, **24**(1): 121~124
- Zhang Yan, Zhang Jingjuan, Situ Guohai. Investigation on diffractive optical elements for converting Gaussian beam into square uniform focused spot [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10): 1183~1187  
张 艳,张静娟,司徒国海.高斯光束变换成方形均匀焦斑的衍射光学元件的研究[J].*中国激光*, 2004, **31**(10): 1183~1187
- Tan Qiaofeng, Yan Yingbai, Jin Guofan *et al.*. Composite diffractive optics array element for generating a uniform focal spot [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(9): 803~807  
谭峭峰,严瑛白,金国藩等.产生均匀焦斑的组合式衍射光学阵列器件[J].*中国激光*, 1999, **A26**(9): 803~807
- Michael D. Missig, G. M. Morris. Diffractive optics applied to eyepiece design [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(14): 2452~2461
- Zhang Huijuan, Wang Zhaoqi, Fu Rulian *et al.*. Design of hybrid refractive-diffractive ultra-wide-angle 70° eyepieces [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 85~88  
张慧娟,王肇圻,傅汝廉等.折-衍混合超广角视场目镜系统的设

- 计 [J]. 光学学报, 2003, **23**(1): 85~88
- 10 Zhang Huijuan, Wang Zhaoqi, Li Fengyou *et al.*. The study of the hybrid refractive-diffractive singlet in the eyepiece [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 236~239  
张慧娟,王肇圻,李凤友等. 折/衍混合单透镜在目镜中的应用研究 [J]. 光学学报, 2003, **23**(2): 236~239
- 11 Sun Qiang, Wang Zhaoqi, Li Fengyou *et al.*. Design on the athermal infrared diffractive/refractive optical system in 3.2~4.5  $\mu\text{m}$  [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(2): 121~125  
孙强,王肇圻,李凤友等. 红外 3.2~4.5  $\mu\text{m}$  波段折射/衍射光学系统的减热差设计 [J]. 光学精密工程, 2002, **10**(2): 121~125
- 12 Zhang Huijuan, Wang Zhaoqi, Lu Zhenwu. Hybrid diffractive-refractive optical system design of head-mounted display for lightweight night vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1393~1396  
张慧娟,王肇圻,卢振武. 折/衍混合微光夜视头盔显示器光学系统设计 [J]. 光学学报, 2004, **24**(10): 1393~1396
- 13 Hong Hua, Yonggang Ha, J. P. Rolland. Design of an ultralight and compact projection lens [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(1): 97~107
- 14 Focus Software. ZEMAX Optical Design Program User's Guide [M]. San Diego, USA; ZEMAX Development Corporation, 2004. 234~235
- 15 Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian. Binary Optics [M]. Beijing, National Defense Industry Press, 1999. 182~184  
金国藩,严瑛白,邬敏贤. 二元光学[M]. 北京:国防工业出版社, 1999. 182~184