

文章编号 1004-924X(2007)11-1639-05

双层衍射元件在投影式头盔光学系统设计中的应用

范长江¹,王肇圻¹,孙 强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 应用光学国家重点实验室,吉林 长春 130033)

摘要:利用双层衍射元件设计了一款折衍混合投影式头盔光学系统。系统的衍射效率在可见光波段 $>90\%$,提高了像面图像的对比度,增加了色彩真实性。在出瞳距离为25 mm,出瞳直径为10 mm条件下,系统的视场角为 50° ,有效焦距为32 mm,直径为19.2 mm,重量为7.8 g,继承了投影式头盔光学系统的轻小性特征;调制传递函数(MTF)在38 lp/mm时,边缘视场达到0.3以上,中心视场达到0.6,充分满足2.8 cm(1.1 in)彩色LCD微显示器的SXGA显示模式;系统垂轴色差为 $8.2\ \mu\text{m}$,场曲为 $0.4\ \text{m}^{-1}$,畸变为 5% ,成像质量满足虚拟环境和可视化训练要求。文中给出了双层衍射元件的二元面特征曲线,每周刻蚀八个台阶时,最小特征尺寸为 $6.3\ \mu\text{m}$,且易于加工实现。

关键词:光学设计;双层衍射元件;投影式头盔显示器

中图分类号: TN873.92;O436.1 **文献标识码:** A

Design of head-mounted projective optical system using double-layer diffractive optical element

FAN Chang-jiang¹, WANG Zhao-qi¹, SUN Qiang²

- (1. Key Laboratory of Photoelectric Information Technology Science of the Educational Ministry, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China;
2. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: A head-mounted projective optical system with double-layer Diffractive Optical Element (DOE) was designed and the detailed design procedure was given. The diffraction efficiency of the system at each wavelength in designed band is larger than 90% , which improves the image contrast and color reliability significantly. The Field of View (FOV) is 50° while the eye relief and exit pupil size are 25 mm and 10 mm. The features of 19.2 mm system size and 7.8 g overall weight guarantee the lightness and compactness of the optical system. The Modulation Transfer Function (MTF) value at 0° FOV is 0.6 for 38 lp/mm spatial frequency, and more than 0.3 for all FOV, which satisfies the requirement of the color micro-display sized 2.8 cm(1.1 in) diagonal with a SXGA resolution. The lateral color of $8.2\ \mu\text{m}$, field curvature of $0.4\ \text{m}^{-1}$ and the distortion less than 5% are obtained, which means the designed optical system has good performance in the field of virtual reality and collaborative

收稿日期:2007-08-22;修订日期:2007-09-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60577015)

environments. The phase and line frequency versus aperture of the two binary surfaces are given. When the number of etching levels is eight, the minimum feature sizes of both the diffractive surfaces are $6.3 \mu\text{m}$, which is not a very high demand for technique.

Key words: optical design; double-layer diffraction element; Head-Mounted Projective Displays(HMPDs)

1 引言

文献[1]提到的投影式头盔显示器(Head-Mounted Projective Displays, HMPDs)是一种新型头盔显示系统,能在虚拟现实及增强现实环境下给出真实物体和虚拟物体的正确“闭塞”,把信息限制在特定空间,实现多用户环境下的互不干扰等。与以目镜为基础的头盔相比,该系统可获得小的体积和质量、大的视场以及小的光学畸变。利用衍射光学元件具有负色散和无匹兹万场曲的特点,设计的折衍混合光学系统比传统的纯折射透镜系统体积更小、质量更轻、结构更简单,成像特性更好^[2-5]。但单层衍射元件(Single-layer, DOE)的衍射效率只在设计波长处衍射效率最高,随着波长相对设计中心波长向两侧偏离,主衍射级次的衍射效率逐渐下降,次衍射级次的衍射能量弥散在主衍射级次的像面上,影响了像面的对比度,且在可见光波段严重影响了真实物光波在波段色光能量的比例,影响了像面的色彩真实性。因此,目前含有单层衍射元件的光学系统产品仅适用于窄波段。

由两层衍射元件组合成的双层衍射元件依靠两种不同玻璃材料的折射率和色散特性,可以在较大的波段范围内实现很高的衍射效率,很好地解决了单层衍射元件的衍射效率问题^[6]。

本文根据 HMPDs 在虚拟环境和可视化训练中的使用需要,针对 $2.8 \text{ cm}(1.1 \text{ in})$ 彩色 LCD 微显示器设计了含有双层衍射元件的投影式头盔光学系统。衍射元件的衍射效率在可见光波段超过了 90% ,提高了投影图像的对比度,增加了投影图像色彩的真实性。

2 理论分析

双层衍射元件结构如图 1 所示,这两个衍射元件具有相同的环带周期,浮雕面凹凸相对紧密连接。实现多个设计波长衍射效率达到

100% ^[7],双层衍射光学元件的相位分布函数需要满足下列条件:

$$\phi(\lambda_{0i}) =$$

$$k_{0i}[n_1(\lambda_{0i})]H_1 - k_{0i}[n_2(\lambda_{0i})]H_2 = M \cdot 2\pi, \quad (1)$$

式中, k_{0i} 为波数, M 为衍射级次, $n_1(\lambda_{0i})$ 与 $n_2(\lambda_{0i})$ 为两种材料的折射率, H_1 与 H_2 为两层微结构的深度。当确定两种具有不同色散系数的基底材料之后,取设计波段内两个边缘波长值分别代入式(1),由这两个方程组成方程组(2)

$$\begin{cases} k_{01}[n_1(\lambda_{01})]H_1 - k_{01}[n_2(\lambda_{01})]H_2 = 2\pi \\ k_{02}[n_1(\lambda_{02})]H_1 - k_{02}[n_2(\lambda_{02})]H_2 = 2\pi \end{cases}, \quad (2)$$

即可求解出 H_1 、 H_2 。

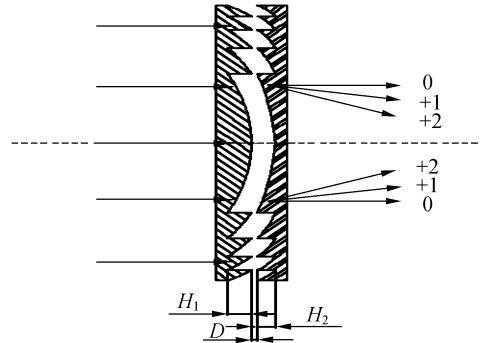


图 1 双层衍射透镜

Fig. 1 Double-layer DOE

此时双层衍射元件的衍射效率为:

$$\eta(\lambda) = \text{sinc} \left\{ \frac{[n_1(\lambda) - 1] - \alpha[n_2(\lambda) - 1]}{\lambda} H_1 - m \right\}, \quad (3)$$

其中, $\alpha = H_2/H_1$ 。

3 含有双层衍射元件的投影式头盔光学系统设计

根据 HMPDs 在医学培训及军事可视化训练等虚拟领域的使用需要,光学系统设计参数可制定为:可见光波段内衍射效率 $> 90\%$,视场为

50°,出瞳直径为 10 mm,出瞳距离>20 mm,相对畸变<5%,横向色差<10 μm,场曲<0.5 m⁻¹,微显示器为对角 2.8 cm 彩色 LCD,满足 SXGA 模式的显示要求。

双层衍射元件玻璃材料第一、二层分别为 FCD₁、FD₆,可见光波段两边缘波长分别为 400 nm 和 700 nm。根据方程组 (2),当一级衍射效率达到 100%时,可解得 $H_1 = 10.9 \mu\text{m}$, $H_2 = 5.9 \mu\text{m}$, $\alpha = 0.543$ 。依据此理论值设计衍射元件,可见光波段衍射效率如图 2 所示。

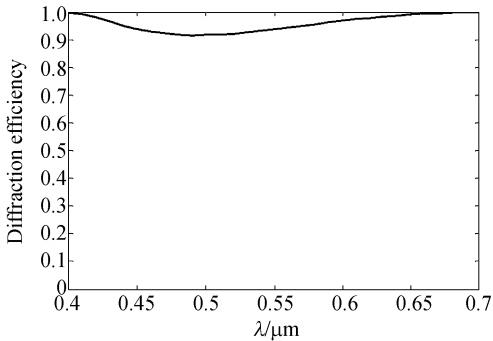


图 2 双层衍射元件衍射效率

Fig. 2 Diffraction efficiency of double-layer DOE

光学系统设计的初始结构为 7 片式投影物镜(USP 4364643),有效焦距为 1 mm, F 数为 1.2,视场为 46°,边缘视场渐晕达到了 77%。以此为起点进行优化设计:

(1)缩小孔径,去掉渐晕,进行焦距粗放,并进行整体优化,得到一个有效焦距为 41 mm, $F/2.68$,46°视场的系统。

(2)增大视场至 50°,以曲面半径为变量进行整体优化,得到一个较满意的光学系统结构如图 3 所示。

(3)保持系统光焦度分配不变的条件下,将图 3 中的第三片透镜材料替换为 FCD₁,并使其后表面为平面;以折射单透镜代替图 3 中的双胶合透镜,玻璃材料为 FD₆,初步优化使其前表面为平面;将前面得到的两个平面紧靠,然后做整体优化。

(4)将(3)中得到的两平面设为衍射面,在优化函数中加入色差和有效焦距函数,将衍射面所在的透镜结构参数和二次相位系数 A_1 设为变量,进行整体优化,实现消色差并保持总的光焦度基本不变。

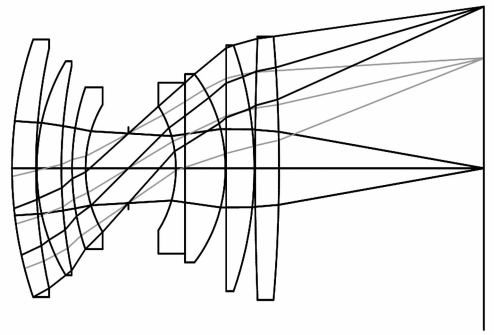


图 3 投影式头盔系统折射物镜结构图

Fig. 3 Layout of refractive projection lens of HMPDs

(5)将非球面相位系数 A_2 、 A_3 和其他元件的结构参数设为变量,在优化函数中加大对单色像差的校正权重,进行优化,实现对单色像差的校正。

(6)最后针对畸变、垂轴色差和 MTF 进行再次优化。得到最佳结果后进行精确的焦距缩放,使像面尺寸满足微显示器要求。

最终得到一个 50°视场, $F/3.26$,有效焦距为 32.3 mm 的含有双层衍射元件 6 片镜折/衍混合系统,其结构如图 4 所示。系统的出瞳直径为 10 mm,出瞳距离达到 25 mm;此系统的 MTF 曲线如图 5 所示,在 38 lp/mm 处,最大视场 MTF 数值>0.3,中心视场达到了 0.6,完全能够满足 2.8 cm 彩色 LCD 显示模式 SXGA 的要求;系统的场曲、畸变如图 6 所示,场曲用人眼离焦的屈光度(Diopter)来衡量数值为 0.4 m⁻¹,畸变为 5%;垂轴色差如图 7 所示,最大值为 8.1 μm;双层衍射元件的材料第一、二层分别为 FCD₁ 和 FD₆,其衍射效率在整个可见光波段>90%。由以上分析可见,系统各个参数的数值均达到或超过设计的

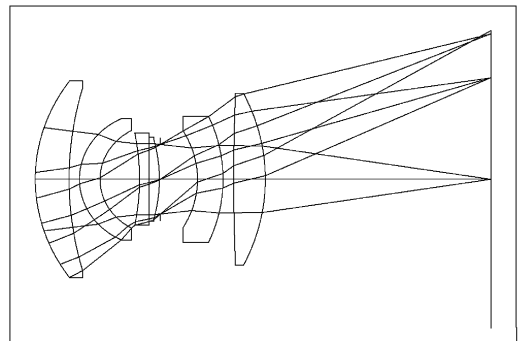


图 4 光学系统结构图

Fig. 4 Layout of optical system

要求。系统半径为 9.6 mm,总质量仅为 7.8 g,满足了投影式头盔对光学系统的轻小要求。

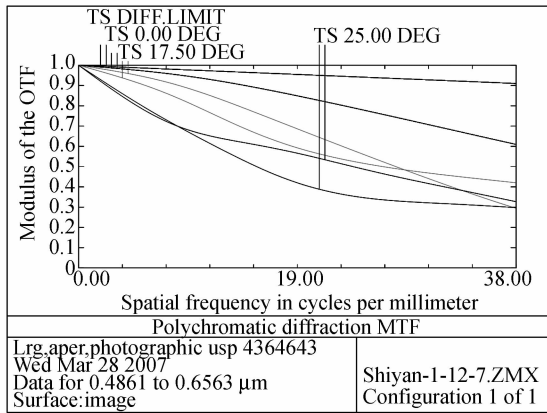


图 5 调制传递函数
Fig. 5 MTF

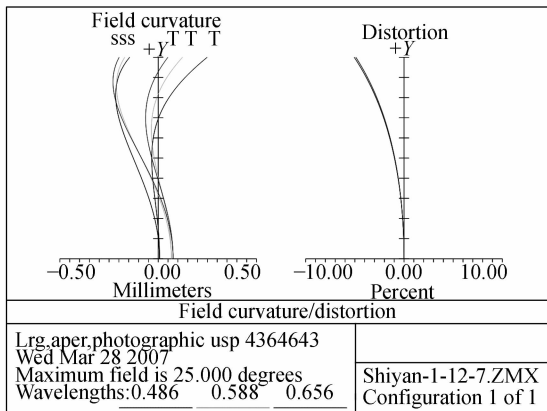


图 6 场曲和畸变
Fig. 6 Field curvature/Distortion

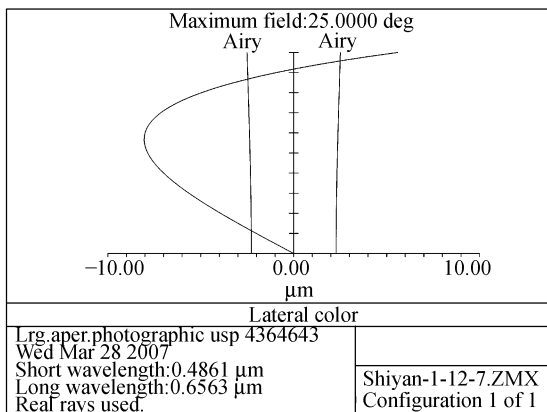
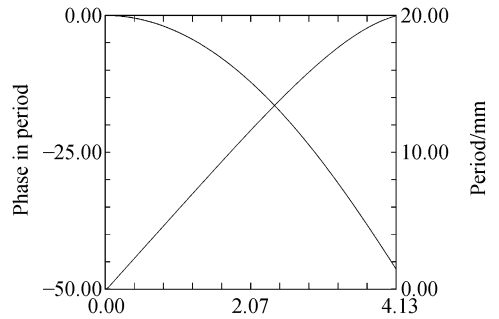
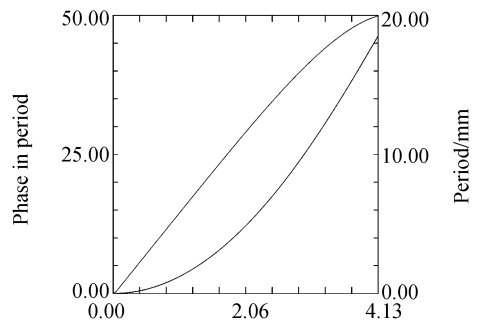


图 7 垂轴色差
Fig. 7 Lateral color aberration

二元衍射面的特征参数曲线如图 8 所示。其中,图 8(a)为第一层二元衍射面的特征参数曲线,材料为 FCD₁;图 8(b)为第二层二元衍射面的特征参数曲线,材料为 FD₆。由图 8 可以看到在镜头边缘处双层衍射面的线频率最大为 20 Period/mm,对应最小周期线宽为 50 μm。若每周刻蚀 8 个台阶,此时对应的最小特征尺寸为 6.3 μm,此尺寸便于加工,使得加工和装配变得比较容易。



(a) FCD₁



(b) FD₆

图 8 二元面特征曲线

Fig. 8 Characteristic curve of binary diffraction

4 结 论

本文设计了一种新型的 HMPDs 光学系统,不仅继承了投影式头盔光学系统的超轻小性设计,而且引入了双层衍射元件,使衍射效率在可见光波段波段 > 90%。从而有效地提高了像面的对比度和色彩的真实性和真实性。系统视场为 50°,出瞳直径为 10 mm,出瞳距离为 25 mm,分辨率能够满足 2.8 cm 彩色 LCD 的 SXGA 模式显示,能满足 HMPDs 在虚拟现实和可视化训练中的使用需求。

参考文献:

- [1] 赵顺龙,王肇圻. 超轻小型投影式头盔显示系统折-衍混合物镜设计[J]. 光学学报, 2006,26(2): 249-253.
ZHAO SH L, WANG ZH Q. Design of an ultralight and compact hybrid refractive-diffractive projection lens of Head-mounted projective displays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(2): 249-253. (in Chinese)
- [2] 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.
ZHANG H J, WANG ZH Q, LI F Y, *et al.*. The study of the hybrid refractive/diffractive singlet in the eyepiece [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003,23(2):236-239. (in Chinese)
- [3] HONG X H, YANG J F, CHEN L W, *et al.*. Use of diffractive-refractive optical system for correction of secondary spectrum[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(1): 1-5.
- [4] 赵秋玲,王肇圻,母国光,等. 用于 LCOS 微显示的折射衍射目视系统设计[J]. 科学通报, 2002, 47(10): 744-748.
ZHAO Q L, WANG ZH Q, MU G G, *et al.*. Refractive/diffractive visual system for micro-display of LCOS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002,47(10):744-748. (in Chinese)
- [5] 白剑,马韬,沈西兵,等. 多层衍射光学元件的特性分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(增): 44-47.
BAI J, MA T, SHEN X B, *et al.*. Characteristic analysis of multi-layer diffractive elements[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35 (Supp.): 44-47. (in Chinese)
- [6] YOEL A, SHMUEL O, NAFTALI E. Design of a diffractive optical element for wide spectral bandwidth[J]. *Opt. Lett.*, 1998,23(11):823-824.
- [7] 李凤友,李红军,卢振武,等. 激光直写系统焦斑整形的研究[J]. 光学精密工程, 2001, 9(1): 14-18.
LI F Y, LI H J, LU ZH W, *et al.*. Focused spot shaping in laser writing system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(1):14-18. (in Chinese)

作者简介:范长江(1975—),男,南开大学现代光学研究所光学设计专业在读博士研究生,主要研究方向为光学系统设计和二元光学。E-mail:fanchangjiang28@yahoo.com.cn