

文章编号: 1003-501X(2009)01-0098-05

眼镜式虚拟显示折射/衍射塑料光学系统设计

吴海清^{1,3}, 孙 强¹, 王 健^{1,2}, 宋贵才³, 董科研^{1,2}

(1. 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, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;

3. 长春理工大学 研究生部, 长春 130022)

摘要: 研究了塑料透镜在 3D 虚拟显示头盔光学系统中的应用, 设计了适用于眼镜式虚拟微显示器的全塑料(聚甲基丙烯酸甲酯-PMMA)光学系统。引入反射镜来折叠光路以缩短系统长度, 引入衍射面, 利用其负色散性和波面任意整形特性来消除系统色差及改善波前像差。该系统重量仅为 9.8 g。目视系统中需重点校正的像散和垂轴色差的最大值分别为 0.31 mm 和 8.8 μm , 最大畸变 $<7\%$ 。系统最小角分辨力为 0.8 mrad, 全视场为 32° 。

关键词: 塑料透镜; 光学设计; 虚拟显示; 头盔显示器; 二元光学

中图分类号: O439, TH74

文献标志码: A

Design of Refractive/Diffractive Plastic Optical System in Glasses Virtual Displays

WU Hai-qing^{1,3}, SUN Qiang¹, WANG Jian^{1,2}, SONG Gui-cai³, DONG Ke-yan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optical, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Department of Graduate, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The properties of plastic lens applied in 3D virtual displays are studied and a Polymethyl Methacrylate (PMMA) optical system for glasses-type virtual displays is presented. By using a reflector, the beam path of the system is folded, which leads to a compact structure. A binary optical element is introduced into the system to effectively correct the chromatic aberration and wavefront aberration. The imaging quality is improved, at the same time, system size and weight is greatly reduced. The total weigh of the optical system is just 9.8 g, the astigmatic and lateral color which need to be correct in visual system are 0.31 mm and 8.8 μm respectively, and the distortion is less than 7%. The full field of view is 32° and the angular resolution is 0.8 mrad.

Key words: plastic lens; optical design; virtual display; head mounted display; binary optics

0 引 言

3D 虚拟头盔(3D Virtual Reality Head-Mounted Display, 简称 3D VR HMD)系统主要是利用光学系统将微显示器的图像投影在人的眼前成放大的虚像从而产生“沉浸感”^[1]。作为新型图像信息显示器件, 3D VR HMD 在提供景象的全面信息方面具有很大的优势, 已在航空航天、军事、医学和娱乐等领域得到了广泛应用。其中, 光学系统是其重要的组成部分, 因而, 3D VR HMD 光学系统的设计和开发成为光学领域研究的一个热点。

收稿日期: 2008-06-30; 收到修改稿日期: 2008-08-27

基金项目: 吉林省科技发展计划高技术项目支持

作者简介: 吴海清(1982-), 男(汉族), 陕西榆林人。硕士研究生, 主要研究方向为光学设计。E-mail: whqcust@163.com。

在 HMD 光学系统的设计中, 通常采用光学玻璃作为透镜材料。同玻璃相比, 聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)、聚苯乙烯 (PS) 等塑料材料制成的光学元件具有显著不同的性能^[2]。例如, 具有较轻的质量、较强的抗冲击性并且可以利用注射成型工艺和压制成型工艺进行加工, 在形状上具有更多的选择性。用光学塑料注射成型, 一模可成型多个透镜, 其注射周期短, 能够提高生产效率。世界各国对光学塑料元件进行了大量的研究工作, 取得了很好的效果, 使得光学塑料元件的应用范围迅速扩展到许多原先被光学玻璃元件统治的领域, 未来将大规模应用于光通信、高分辨力微显示器以及更远期的高速光学计算机^[3], 随着相关技术的进步, 它的应用将越来越广泛。

然而, 设计全塑料的光学系统带来的问题是色差难以消除。利用塑料折衍混合元件研制的光学系统, 由于衍射光学元件具有负色散特性、负温度特性、可实现对光波面的任意相位调制, 与塑料元件配合, 在改善系统成像质量、减小系统体积和重量以及降低成本等方面具有无可比拟的优势, 从而使得设计全塑料式的 HMD 光学系统具有可行性。现有文献中的 HMD 光学系统多采用玻璃材料且结构复杂、镜片数量比较多, 适用于对光学系统体积和重量要求相对宽松的头盔系统中。

本文设计了一种用于眼镜式 3D VR HMD 的折衍混合全塑料光学系统, 该系统以 OLED 显示器为图像源, 由两片透镜组成, 包含一个非球面和一个衍射面。给出了设计结果, 讨论了各种像差的表现情况, 其中目视系统中需重点校正的像散和垂轴色差的最大值分别为 0.31 mm 和 8.8 μm ; 最大畸变为 6.4%, 最后讨论了塑料透镜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。

1 HMD 光学系统设计

1.1 设计目标

传统的 HMD 目镜系统的缺点是系统长、体积大、重量太重, 因此不适合长时间戴在使用者头部。根据 OLED 图像源的相关参数设计了体积小、重量轻的全塑料目镜系统, 系统使微显示器的图像在 2 m 远处成 45in 放大的虚像。参数如表 1 所示。

1.2 目镜光学系统设计方法

在微显示器应用于 HMD 的过程中, 由于微显示器的尺寸小, 给 HMD 的光学系统带来了根本的变化, 也给相应的光学系统提出了更高的要求。本系统中, 在折射元件中引入二元面构成折衍混合光学系统, 以常规折射元件的曲面提供大部分的聚焦功能, 利用折射/衍射单透镜代替消色差双胶合透镜, 大大降低了系统重量。

本系统采用一种材料 (PMMA) 两片透镜的结构, 第一个透镜的前表面设为衍射面构成折衍混合系统来消除色差和高级像差, 第二个透镜的前表面设为非球面, 用来消除畸变等其他像差。两镜之间使用了一个平直反射镜用来缩短长度。设计指标如表 1, 系统初始结构通过折射衍射混合薄透镜组的消色差理论计算来求解。

旋转对称衍射面的相位函数表示形式 (衍射级次取 +1 级) 为^[4-6]

$$\varphi(r) = \frac{2\pi}{\lambda} (c_1 r^2 + c_2 r^4) \quad (1)$$

式中: r 为半径, λ 为波长, c_1, c_2 为对应项系数。考虑一般透镜的相位变换式

$$\varphi'(r) = -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{r^2}{2f} \quad (2)$$

式中 f 为焦距。可见当衍射面相位函数只取到二次项时, 其作用就类比一个一般透镜, 令 $\varphi(r) = \varphi'(r)$, 有

$$c_1 = -1/2f \quad (3)$$

传统薄透镜前后表面曲率半径与焦距的关系为

$$\frac{1}{f_\lambda} = (n_\lambda - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (4)$$

表 1 目镜的相关参数

Table 1 Parameters of the eyepiece

| Parameters | Value |
|-------------------------------|-------|
| Filed of view / (°) | 32 |
| Eye relief / mm | 20 |
| Exit pupil diameter / mm | 8 |
| Effective focal length / mm | 42 |
| The size of image source / in | 0.61 |
| Distortion / % | <7 |

式中: n_λ 为对应波长 λ 的折射率, f_λ 为对应波长 λ 的焦距, R_1 , R_2 为透镜前后表面曲率半径。衍射元件的等效阿贝数为: $V_D = -3.452$ 。

系统由衍射透镜 1, 折射透镜 2 和折射透镜 3 组成, 衍射透镜 1 与折射透镜 2 组成折衍混合单透镜。入射光线在各透镜上的入射高度不同, 消色差条件为

$$h_1^2 \left(\frac{\varphi_1}{V_1} + \frac{\varphi_2}{V_2} \right) + h_2^2 \frac{\varphi_3}{V_3} = 0 \quad (5)$$

系统总光焦度为 $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \frac{h_2}{h_1} \varphi_3$, 入射角和瞳距已知, 则入射光线在透镜 1 的入射高度 h_1 可以确定, 光线在折射透镜 3 的入射高度 h_2 由式 $\frac{h_2}{h_1} = 1 - d(\varphi_1 + \varphi_2)$ 确定, 若已知两折射透镜间隔 d , 组成如下方程组

$$\begin{cases} h_1^2 \left(\frac{\varphi_1}{V_1} + \frac{\varphi_2}{V_2} \right) + h_2^2 \frac{\varphi_3}{V_3} = 0 \\ \varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \frac{h_2}{h_1} \varphi_3 \\ \frac{h_2}{h_1} = 1 - d(\varphi_1 + \varphi_2) \end{cases} \quad (6)$$

式中: φ_1 为衍射透镜 1 的等效光焦度, φ_2 为折射透镜 2 的光焦度, φ_3 为折射透镜 3 的光焦度, φ 为系统的组合光焦度, V_1 为衍射面的等效阿贝数, V_2 和 V_3 分别为透镜 2 和 3 所用材料的阿贝数, 当 φ , V_1 , V_2 和 V_3 已知, 本文中 $V_1 = V_D = -3.452$, $V_2 = V_3 = 57.44$, 解方程可得合适的透镜前后表面曲率半径, 将 φ_1 代入式(3)可得到衍射面的相位函数表达式系数。

2 系统结构图及像差特性分析

经过调整优化, 设计了图 1 所示的虚拟头盔塑料光学系统, 结果表明其体积小重量轻, 重量仅为 9.8 g,

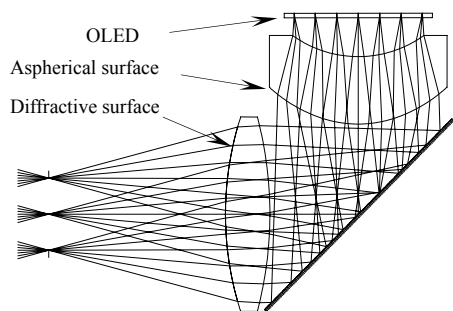


图 1 系统结构图

Fig.1 3D layout of system

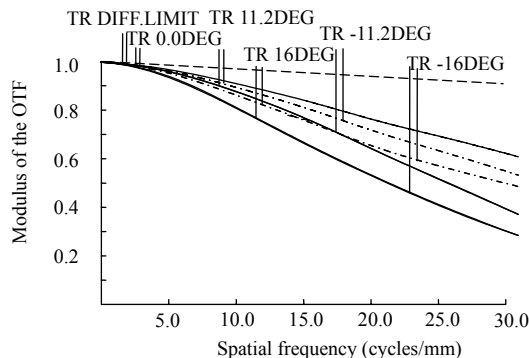


图 3 系统调制传递函数(MTF)

Fig.3 Curve of modulation transfer function (MTF)

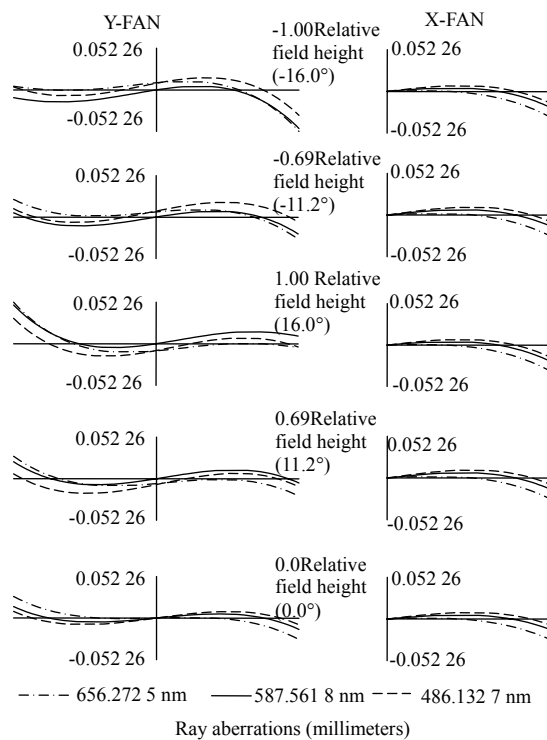


图 2 垂轴像差

Fig.2 Transverse ray fan plot

对佩戴者头部的压力非常小, 镜头直径为 28 mm, 完全满足眼镜式双目头盔显示器对光学系统的要求。

图 2 给出了系统垂轴像差曲线, 可见系统子午方向垂轴像差最大, 但不大于 52 μm 。图 3 为系统的调制传递函数曲线, 和所选对角线尺寸为 0.61 in, 分辨率为 800×600 的 OLED 图像源对应的空间分辨率为 30 lp/mm 时, 系统传递函数值最低为 0.33, 满足目镜要求。图 4 为场曲和畸变曲线, 可以看出, 系统的弧矢方向最大场曲为 -0.34 mm, 子午方向最大场曲为 -0.65 mm, 像散为 0.31 mm。通常目视光学系统场曲用人眼离焦的屈光度(Diopter)来衡量, 对应的屈光度为 $D = \frac{1000}{x'} = \frac{1000x}{f'^2}$, 其中 x 为场曲和像散值。可知, 对应的屈光度分别为 0.18 D、0.34 D、0.16 D; 系统的最大畸变为 6.4%。图 5 为系统的垂轴色差曲线, 可见, 其垂轴色差最大值为 8.8 μm 。

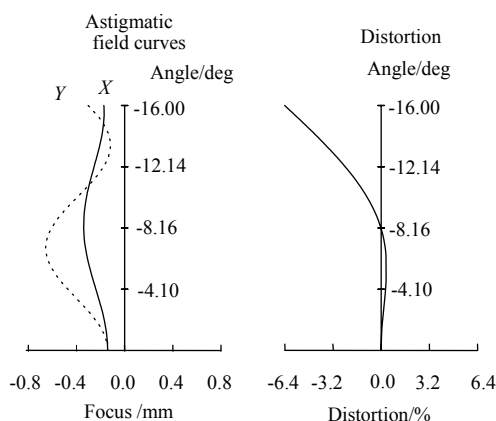


图 4 场曲和畸变

Fig.4 Field curvature and distortion

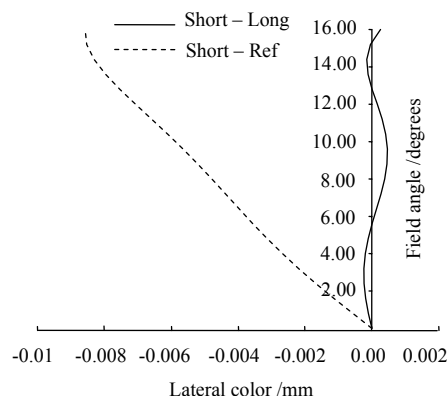


图 5 垂轴色差

Fig.5 Lateral color aberration

3 特殊面型

由 CODE V 软件给出的旋转对称衍射面位相分布式为

$$\varphi(\lambda) = c_1 r^2 + c_2 r^4 \quad (7)$$

由式(1)、(7)可得, 当 $\varphi(\lambda) = \pm 2m\pi$ ($m=1, 2, \dots, m_{\max}$) 时, 二元衍射面上的环带总数为

$$K = \text{int} \left| \frac{c_1 r_{\max}^2 + c_2 r_{\max}^4}{\lambda_0} \right| \quad (8)$$

设计时取 $c_1 = -0.0011$, $c_2 = 1.1032 \times 10^{-6}$, 而所设计的衍射面有效口径的半径为 10.12 mm。图 6 给出设计中所使用二元面的相位函数曲线(线 a)和环带密度曲线(线 b), 由图可知, 随着径向坐标的增加, 二元面的环带密度增大, 在镜头边缘处, 环带密度最大为 30 periods/mm, 由式(8)可计算得衍射面的环带数为 174, 特征尺寸为 33 μm 。

本设计中的非球面采用 CODE V 软件中的 Asphere 面型, 方程为

$$z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2 r^2}} + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 + Dr^{10} + \dots \quad (9)$$

式中: c 为曲率, k 为二次曲线常数, A 、 B 等为非球面增量系数。设计取 $k = -3.6901$, $A = -0.002$, $B = 9.6924 \times 10^{-8}$ 。

选好模具的坯料经过锻造, 根据所得参数利用超精密光学加工技术在车床上切削成型得到所需模具,

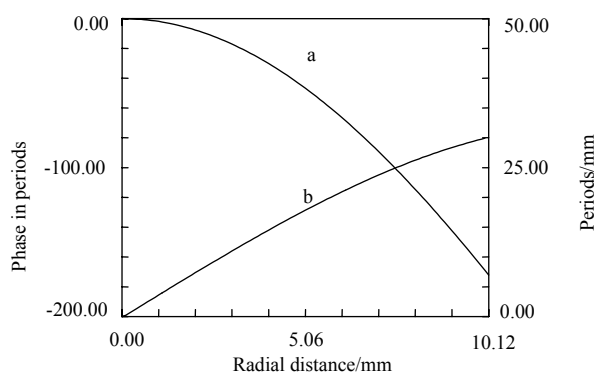


图 6 二元面的相位函数曲线(线 a)和环带密度曲线(线 b)

Fig.6 Phase (line a) and ring line density (line b) curves of diffractive

利用注射成型就可以批量生产含有非球面或二元衍射面的塑料透镜。现有的制作工艺能够满足上述非球面和二元衍射面的加工制作。

4 结 论

一个用于虚拟现实立体显示的眼镜式 3D VR HMD 系统, 就要求光学系统不仅在结构上轻便紧凑, 还要满足特定的光谱范围、视场角、出瞳距离和出瞳直径。最终形成的 3D VR HMD 光学系统是对若干个设计因素综合考虑的结果, 本文从结构和元件两方面入手, 利用平直反射镜折叠光路, 缩短系统长度, 采用折衍混合塑料透镜使得系统保证成像质量的同时重量大幅度减少。系统总长为 25 mm、高为 32 mm, 重量仅为 9.8 g。此系统使微显示器的图像在 2 m 远处成 45in 放大的虚像, 各项指标均满足眼镜式 3D VR HMD 显示器光学系统的设计要求, 表明塑料折/衍混合元件应用于眼镜式 3D VR HMD 光学系统具有可行性。

志谢:

感谢 K.C.wong Education Foundation; Hong Kong 所给予的支持。

参考文献:

- [1] 朱勇, 刘会刚, 商广辉, 等. 虚拟显示头盔的军事应用 [J]. 光电子技术, 2006, **26**(3): 172-176.
ZHU Yong, LIU Hui-gang, SHANG Guang-hui, *et al.* The Military Application of Virtual Reality Head-mounted Displays [J]. **Optoelectronic technology**, 2006, **26**(3): 172-176.
- [2] 孙强, 刘荣, 朴仁官, 等. 塑料非球面透镜在头盔 3D 显示系统中的应用 [J]. 光学 精密工程, 2005, **13**(1): 47-52.
SUN Qiang, LIU Rong, PIAO Ren-guan, *et al.* Application of plastic aspherical elements in Head Mounted 3D display [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2005, **13**(1): 47-52.
- [3] 杜雪, 王尔祺, 李荣彬, 等. 自由曲面光学透镜注射成型误差因素研究 [J]. 应用光学, 2007, **28**(6): 684-688.
DU Xue, WANG Er-qi, LI Rong-bin, *et al.* Investigation on error factor of injection molding plastic for freeform optics [J]. **Journal of Applied Optics**, 2007, **28**(6): 684-688.
- [4] 杨智, 戴一帆, 张沛. 折衍混合在长焦物镜中的应用研究 [J]. 激光技术, 2007, **30**(2): 206-208.
YANG Zhi, DAI Yi-fan, ZHANG Pei. The study of hybrid refractive-diffractive telephoto lens [J]. **LASER TECHNOLOGY**, 2007, **30**(2): 206-208.
- [5] 杨新军, 王肇圻, 孙强, 等. 折/衍混合透视型头盔显示器光学系统设计 [J]. 光电工程, 2005, **32**(1): 8-12.
YANG Xin-jun, WANG Zhao-qi, SUN Qiang, *et al.* Design of the optical system for a see-through refractive / diffractive hybrid helmet mounted display [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2005, **32**(1): 8-12.
- [6] 林琳, 张慧娟, 谢振东, 等. 基于衍射面的双目投影头盔光学系统设计 [J]. 光电工程, 2007, **34**(6): 140-144.
LIN Lin, ZHANG Hui-juan, XIE Zhen-dong, *et al.* Design of optical system for binocular head-mounted projective display based on diffraction surface [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2007, **34**(6): 140-144.