

文章编号: 1003-501X(2007)06-0140-05

基于衍射面的双目投影头盔光学系统设计

林 琳^{1,2}, 张慧娟¹, 谢振东¹, 唐中帜¹, 刘 迎^{1,2}, 孙 强³

(1. 天津大学 理学院 应用物理系, 天津 300072;

2. 天津大学 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072;

3. 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: 为满足双目头盔显示器对大视场的要求, 对它进行了改进。设计了以微液晶显示器为图像源, 有效焦距为 35mm, 出瞳距离为 23mm, 出瞳直径为 12mm, 视场角为 40° 的头盔投影显示器。该系统由一组双高斯透镜, 一个半透半反镜和一个回射屏组成。回射屏的使用使双目设计的视场有效提高, 畸变明显降低; 衍射面的引入, 使系统在尺寸和重量上有明显的减少, 像质进一步提高。该系统投影镜头部分重量仅为 6.8g, 最大镜头直径为 16.8mm, 完全满足双目设计的要求。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 0.32mm 和 13.1 μ m, 最大畸变不足 0.1%。选用分辨率为 1024 \times 768、像素尺寸为 25 μ m 的图像源, 系统分辨率满足图像源的要求。

关键词: 应用光学; 头盔投影显示器; 折/衍混合系统; 回射屏

中图分类号: TH74

文献标识码: A

Design of optical system for binocular head-mounted projective display based on diffraction surface

LIN Lin^{1,2}, ZHANG Hui-juan¹, XIE Zhen-dong¹, TANG Zhong-zhi¹, LIU Ying^{1,2}, SUN Qiang³

(1. Department of Applied Physics, College of Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Opto-electronics Information Technical Science, EMC, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: A Head-mounted Projective Display (HMPD) with a miniature LCD as its image source is designed, of which the features are effective focal length of 35mm, exit pupil of 23mm, exit pupil size of 12mm and field-of-view (FOV) of 40 deg. This system consists of a pair of double-gauss lens, a beam splitter, and a retro-reflective screen. The usage of the retro-reflective screen increases the FOV effectively for binocular design, and reduces the distortion obviously. The adoption of a Diffractive Optical Element (DOE) offers considerable reduction in the size and weight, and improves the imaging quality. The total weight and the maximal diameter of projective lens are 6.8g and 16.8mm respectively, which meet the design requirement of the binocular completely. The astigmatism and lateral color aberration which need to correct in visual system are 0.32mm and 13.1micron respectively, and the distortion is less than 0.1%. The selected resolution of display is 1024 \times 768, and the pixel size is 25 micron.

Key words: Applied optics; Head-mounted projective display; Hybrid diffractive/refractive system; Retro-reflective screen

引 言

头盔显示器(Head-mounted Display, HMD)最初是安装在飞机及车辆驾驶员头盔上, 用于观察和瞄准的

收稿日期: 2006-08-11; 收到修改稿日期: 2007-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60507003)

作者简介: 林 琳(1982-), 女(回族), 河北人, 硕士生, 主要研究方向为衍射光学和光学设计。

通信作者: 张慧娟, E-mail: hjzhang@tju.edu.cn

一种显示仪器。近年来,头盔显示的应用领域已经扩展到虚拟现实、工业生产、模拟训练、显微技术、医疗、娱乐等社会发展的各个方面^[1],世界各国都加紧了在这一领域的研究和开发。各种用途的头盔显示的迅速发展给光学系统提出了更高的要求。

衍射光学元件是近年来的一个研究热点,它以负色散及对波面进行任意整形的特点,在改善成像质量、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系统无可比拟的优势^[2]。光学设计人员逐渐将这一技术应用到头盔系统设计中。

随着 HMD 的快速发展,出现了一些传统设计较难解决的问题。其中较重要的有宽视场的设计导致大畸变以及大视场时双目显示实现难的问题^[3-4]。普通的 HMD 很难同时满足畸变和视场的要求,一般是牺牲视场来满足畸变。

为了解决上述问题,获得满足宽视场的双目系统,设计了一种投影式头盔显示器(Head-mounted Projective Display, HMPD)。该系统以微液晶显示器为图像源,由一组双高斯透镜,一个半透半反镜和一个回射屏组成。双高斯透镜中包含一个衍射面。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 0.32mm 和 13.1 μm ,最大畸变不足 0.1%;计算了系统的最小角分辨率;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。

1 系统结构

在普通 HMD 中,使用者眼前放置着一个由两片半透半反镜组成的光学组合器,其中一片是凹面的。双目设计时,需要在每个眼睛前都要放置一个这样的凹面半透半反镜。双目设计要求光学系统的直径应小于 46mm,随着视场的增大,这片凹面镜的直径很快达到了这一限制。图 1 为出瞳距离 23mm,出瞳直径 12mm,普通双目 HMD 的结构,视场仅为 28°。

本文设计用回射屏代替普通 HMD 中的凹面半透半反镜。回射屏是一种表面覆盖着各种微小结构阵列的反射材料,这些微结构使回射型材料的反射特性区别于漫反射和镜面反射(如图 2 所示),它能使入射到其表面的光线按近乎原路返回。目前常见的微结构阵列有微珠和微直角棱镜阵列两种,微珠阵列利用镜面反射,而微直角棱镜阵列则利用内部全反射来达到反光效果^[5]。图 3 为几种回射型材料的表面微结构照片^[4]。图 4 为玻璃微珠回向反射模型。

回射型材料原本应用于交通指示和道路安全领域,用来把从车灯发出的照射到交通警示牌上的光反射到司机的眼睛里,这种材料可以在交通安全领域的公司买到。目前的回射型材料所能达到的最大入射角约为 70~80°,超过这个角度后,大部分光线将散射(反射)掉,因而无法被“回射”。

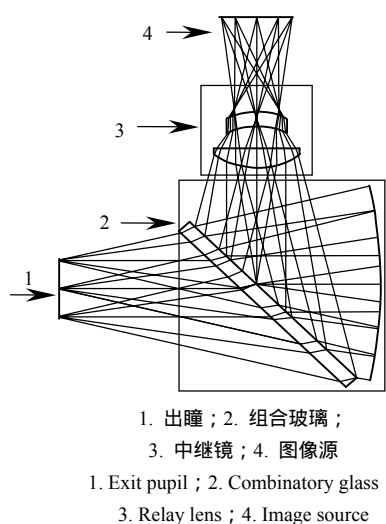


图 1 HMD 结构

Fig.1 Structure of head-mounted display

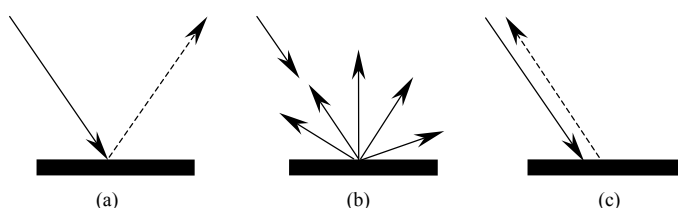


图 2 回向反射(c)与镜面反射(a)、漫反射(b)的区别

Fig.2 Different among Retro-reflective surface (c) and reflective surface(a), diffusing surface (b)

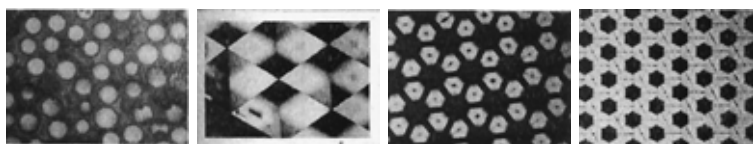


图 3 几种回射型材料表面微结构照片

Fig.3 Microstructure of retro-reflective samples

由于回射屏的特殊性质,使用回射屏不会对系统引入额外像差;设计双目 HMPD 时,由于回射屏是平面,两只眼睛可共用一个回射屏,仅需限制投影透镜的直径不超过 46mm 即可满足双目设计。这大大方便了视场的扩大。

图 5 给出 HMPD 的成像图。由计算机生成的虚拟图像显示在微显示器上,虚拟图像通过投影镜头折射后,再由与光轴成 45°角的分光器反射到回射屏上面,回射屏将入射光线沿与入射相反的方向反射回去,进入人眼中,进而实现虚拟图像与真实环境的叠加^[6]。

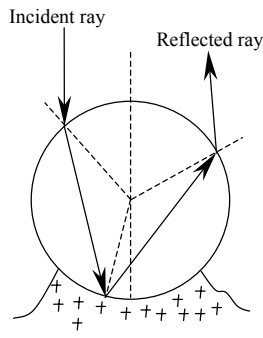


图 4 玻璃微珠回向反射模型

Fig.4 Path of the light beam in the microsphere

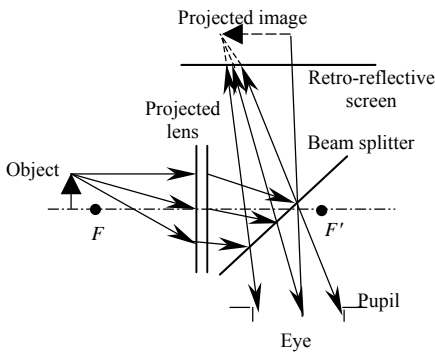


图 5 HMPD 成像图

Fig.5 Imaging concept of HMPD

表 1 光学系统的设计参量

Table 1 Design parameters of the optical system	
Effective focal length / mm	35
Exit pupil diameter / mm	12
Eye relief / mm	23
Field of view / (°)	40
Optical waves / nm	486, 587, 656
Distortion / %	< 5
System diameter / mm	< 46

2 设计目标

设计 HMPD 时,不仅要满足特定的光学性能要求,同时要尽量减少使用者在使用过程中不适,综合以上因素,将设计参量设定为以下值,如表 1 所示。

3 设计结果及分析

根据设计要求,采用 Zemax 软件,经过反复优化,设计了 HMPD 光学系统。图 6 给出了 HMPD 的投影镜头部分的结构图。它含四片透镜,第 5 个面为衍射面,其光学结构参数如表 2 所示。投影镜头部分重量仅为 6.8g,对头部压力非常小;镜头最大直径为 16.8mm,满足双目 HMPD 设计的要求。图 7 为 HMPD 的结构图。

表 2 投影镜头的光学结构参数

Table 2 Parameters of optical structure of projective lens

Surface	Radius/ mm	Thickness/ mm	Glass
1	13.01	4.50	LAK31
2	-134.53	1.00	
3	-40.43	2.00	F2
4	12.44	2.04	
STO	∞	2.20	
Binary 2	∞	3.00	LAK31
7	-19.10	3.00	
8	-8.04	3.50	SK15
9	-9.73	21.14	

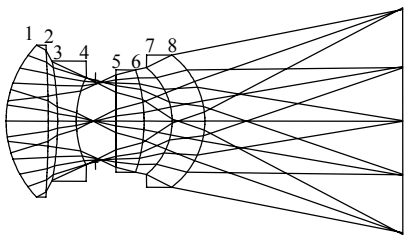
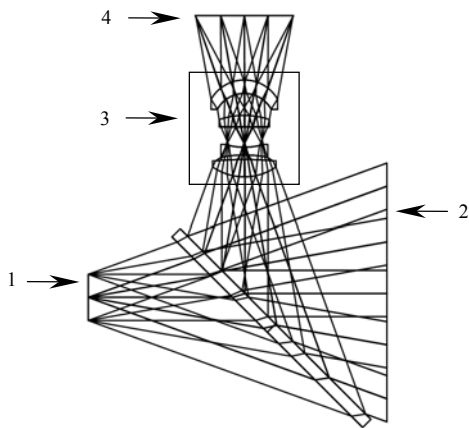


图 6 投影镜头部分

Fig.6 2D layout of projective lens



1. 出瞳; 2. 回射屏; 3. 投影透镜; 4. 图像源
1. Exit pupil; 2. Retro-reflective screen;
3. Projective lens; 4. Image source

图 7 系统结构

Fig.7 3D layout of system

图 8(a)给出视场角为 0° , 20° , 40° 对应的系统在子午方向(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 $18\mu\text{m}$, $30\mu\text{m}$ 和 $84\mu\text{m}$ 。图 8(b)为系统的场曲和畸变曲线。由场曲曲线可以看出系统最大场曲和像散分别为 0.17mm 和 0.32mm ；系统的畸变很小，最大值不足 0.1% 。图 8(c)为系统的垂轴色差曲线，系统的垂轴色差很小，最大值仅为 $13.1\mu\text{m}$ 。图 8(d)给出视场角为 0° , 20° , 40° 对应的系统的调制传递函数(MTF)曲线。

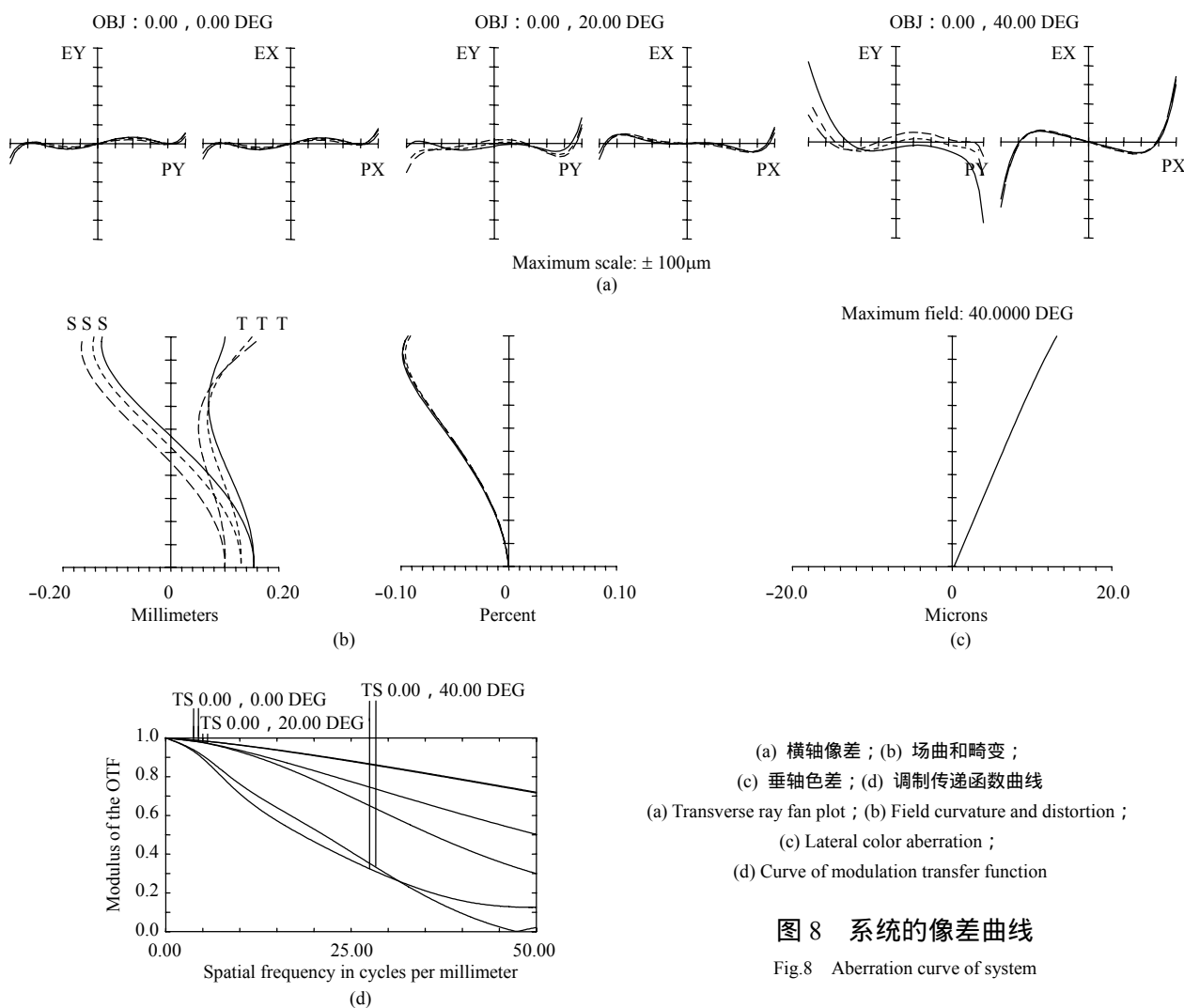


图 8 系统的像差曲线

Fig.8 Aberration curve of system

本文选用分辨率为 1024×768 、像素尺寸为 $25\mu\text{m}$ 的图像源。当空间频率为 40 lp/mm 时，系统在 0° 视场的调制传递度达到 0.78 ，在其它视场也有一定的调制度，该系统完全满足这种规格图像源的要求。

设计中使用的衍射面^[7-8]采用 Zemax 软件提供的 binary2 面，其面型参数 $A_1=5195.2$, $A_2=-37274.8$ 。标准半径 R 为 25mm 。图 9 给出设计中所使用衍射面的相位函数曲线(线 1)和环带密度曲线(线 2)。经计算共有 28 个环带，最小带宽为 $148\mu\text{m}$ ，现有的制作工艺完全满足上述衍射面的加工制作。

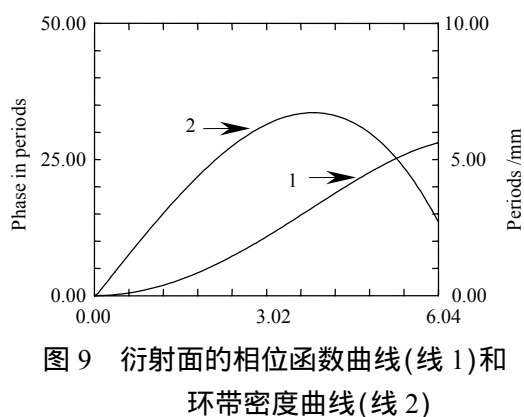


图 9 衍射面的相位函数曲线(线 1)和环带密度曲线(线 2)

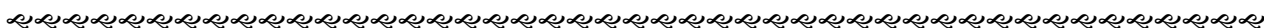
Fig.9 Phase (line 1) and ring line density (line 2) curves of diffractive surface

4 总 结

本文利用衍射元件和回射屏具有的优点,设计了一种宽视场折/衍混合头盔投影显示器的光学系统。该系统的视场角为 40° , 出瞳距离和出瞳直径分别为 23mm 和 12mm; 选用分辨率为 1024×768 、像素尺寸为 $25\mu\text{m}$ 的图像源, 系统的角分辨率满足图像源的要求; 且体积小, 重量轻, 成本低。在结构和成像质量方面都满足双目头盔投影显示器的要求。

参考文献:

- [1] FRANK J F. An update on optical system for military head-mounted displays [J]. **SPIE**, 1999, **3689**: 178-185.
- [2] 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 Hui-juan, WANG Zhao-qi, ZHAO Qiu-ling, et al. Hybrid diffractive/refractive optical system design of head-mounted display for augmented reality [J]. **Acta Optical Sinica**, 2004, **24**(1): 121-124.
- [3] Hong HUA, Yonggang HA, Jannick P. ROLLAND. Design of an ultralight and compact projection lens [J]. **Appl. Opt**, 2003, **42**(1): 97-107.
- [4] Hong HUA, Axelle GIRARDOT, Chunyu GAO, et al. Engineering of head-mounted projective displays [J]. **Appl. Opt**, 2000, **39**(22): 3814-3823.
- [5] 陈炎明, 何玉明. 影响玻璃微珠回向反射性能的主要因素分析[J]. 光子学报, 2003, **32**(5): 629-633.
CHEN Yan-ming, HE Yu-ming. Study on the key factors deteriorating the retroreflective capability of glass microspheres [J]. **Acta Photonica Sinica**, 2003, **32**(5): 629-633.
- [6] 柳祖国, 李世其, 李作清. 增强现实技术的研究进展及应用[J]. 系统仿真学报, 2003, **15**(2): 222-225.
LIU Zu-guo, LI Shi-qi, LI Zuo-qing. Development and application of augmented reality [J]. **Journal of System Simulation**, 2003, **15**(2): 222-225.
- [7] 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.
- [8] 金国藩, 严瑛白, 邬敏贤. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 181-184.
JIN Guo-fan, YAN Ying-bai, WU Min-xian. **Binary Optics**[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 181-184.



本期组稿: 陈伟明

责任编辑: 杨淇名

英文编辑: 庞 洪

标 引: 王志伟