

文章编号: 0253-2239(2006)02-0249-5

超轻小型投影式头盔显示系统折-衍混合物镜设计*

赵顺龙 王肇圻

(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)

摘要: 在一个 7 片物镜的基础上, 设计出一个折射和一个 5 片镜的折-衍混合投影物镜系统, 并给出了详细设计过程及性能评价。系统针对 33.02 mm (1.3 英寸) 微显示器设计, 视场为 56°, 出瞳直径为 10 mm, 出瞳距离为 25 mm。设计的折射系统和折-衍混合系统的镜头直径分别为 28 mm 和 22.4 mm, 重量分别只有 33 g 和 11.9 g, 且最大畸变分别为 3.2% 和 0.17%, 分辨率满足 SXGA 显示模式。两系统均满足投影式头盔显示器在交互环境、医学可视化训练和数字化个兵等领域的使用要求。

关键词: 光学设计; 投影式头盔显示器; 折-衍混合物镜设计

中图分类号: O439; TH74 文献标识码: A

Design of an Ultralight and Compact Hybrid Refractive-Diffractive Projection Lens of Head-Mounted Projective Displays

Zhao Shunlong Wang Zhaoqi

(Key Laboratory of Opt-Electronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071)

Abstract: Based on a 7-element lens, a refractive lens system and a 5-element hybrid refractive-diffractive lens system are designed. The optimization procedure and the performance of the systems are presented in detail. The systems are designed for a 1.3 inch (~3.3 cm) liquid crystal display (LCD) with 56° field of view, 10 mm exit pupil diameter and 25 mm eye relief. The refractive projection system has a 28 mm diameter and 33 g weight. And the hybrid refractive-diffractive system has a 22.4 mm diameter and 11.9 g weight only. The maximum distortions of the two systems are less than 3.2% and 0.17%, respectively. Both the refractive and the hybrid refractive-diffractive system can display SXGA mode images, act as projection system of head-mounted projective displays (HMPDs) in the fields of medical collaborative environments, medical visualization for training, soldier equipped with digital system, and so on.

Key words: optical design; head-mounted projective displays; hybrid refractive-diffractive projection lens design

1 引 言

头盔显示系统在军事、工业生产、医疗、计算机娱乐、立体显示、模拟训练等领域具有巨大的应用价值^[1,2]。现代化的头盔系统,不仅要求结构轻便紧凑和佩戴者便利舒适,而且要求成像质量高。根据信息通道的不同,头盔显示器分为“直视头盔显示器”(direct-view head-mounted displays, HMDs)和“透视头盔显示器”(see-through head-mounted displays, STHMDs)两类。无论是常规直视头盔显

示器还是透视头盔显示器,都基于传统目镜系统。现代头盔系统要求大的出瞳距离和出瞳直径,这对于目镜来说,意味着大的重量、体积和畸变^[3]。透视头盔显示器分光镜的引入,进一步增大了对目镜出瞳距离的要求,增加了系统的设计难度^[4]。

1997 年, Ferguson^[5] 为投影式头盔显示器(head-mounted projective displays, 投影式头盔显示器)的成像概念申请了专利。此后, Hua 等^[6,7] 又对 HMPDs 系统做了进一步的研究工作。二元光学

* 国家自然科学基金(60277021)资助课题。

作者简介: 赵顺龙(1976~),男,河北唐县人,博士研究生,主要从事光学设计及头盔显示系统方面的研究。

E-mail: zh_shlong@yahoo.com.cn

收稿日期: 2005-03-25; 收到修改稿日期: 2005-06-06

的发展为光学成像系统的设计带来了新的希望,由于二元光学元件具有可以产生任意波面、独特的色散等特点,同折射元件组合可以有效地校正系统色差、减轻重量、简化结构^[8],因此将折-衍混合光学成像系统用于头盔显示对于提高系统性能、促进头盔显示器的轻量化十分有效^[9~11]。

本文根据 HMPDs 在交互环境和可视化训练中的使用需要,针对 33.02 mm(1.3 英寸)微显示器设计了两款 56°视场的投影式头盔物镜系统,分别为折射系统和折-衍混合系统。两系统均满足 SXGA 模式的显示要求,其中,折-衍系统仅重 11.9 g,直径仅为 22.4 mm,实现了头盔光学系统的超轻小设计。

2 投影式头盔显示器

典型的投影式头盔显示器如图 1 所示,它由安装在头上的微显示器、投影物镜、分光镜和一个返射型材料屏幕构成^[4]。返射型材料是表面覆盖着微三面直角棱镜或微珠等特殊微结构的材料,这些微结构能使入射到材料表面的光线按原路返回^[6]。

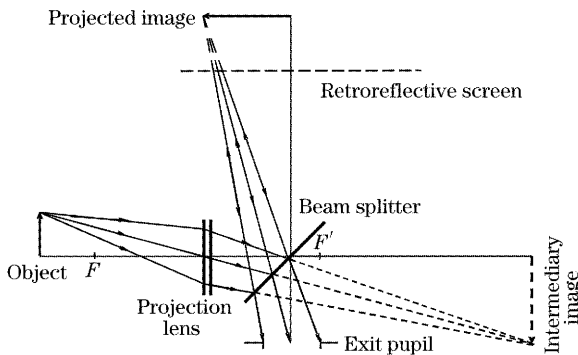


图 1 投影式头盔显示器成像原理

Fig. 1 Imaging concept of head-mounted projective displays

微显示器上的图像经过投影物镜成像,由于分光镜(与光轴成 45°放置)的转像作用,被投影在图中的“投影像”位置。返射型材料屏置于“投影像”的前面或后面。由于返射型材料的特殊性质,入射到其上的光线将按原路返回,再透过分光镜到出瞳处的人眼。在理想情况下,像的位置和大小与返射型屏幕的位置和形状无关。

3 投影式头盔物镜设计

3.1 设计参量要求

根据投影式头盔显示器在交互环境和可视化训练中的使用需要,投影式头盔物镜的设计参量如下:

视场为 56°,出瞳直径为 10 mm,出瞳距离大于 20 mm,微显示器为对角 33.03 mm(1.3 英寸)彩色液晶显示器^[4,12]。表 1 给出了设计的具体参量要求和成像特性要求,其中头盔系统的场曲用人眼离焦的屈光度(Diopter)来衡量。根据牛顿公式可导出场曲对应的屈光度为^[12]

$$D = \frac{1}{x'(m)} = -\frac{1000x}{f'^2}, \quad (1)$$

(1)式中 x 为系统的最大场曲值(单位为 mm), f' 为焦距(单位为 mm)。

表 1 设计要求

Table 1 Design requirement

Parameter	Specification
Miniature display	1.3 inch diagonal
Display mode	SXGA
Exit pupil diameter	10 mm
Eye relief	>20 mm
Wavelength range	Visible
Field of view	56°
Distortion	<5%
Lateral color aberration	<13 μm
Field curvature	<0.5D
Modulation transfer function	>0.50 (on-axis)

3.2 折射投影物镜设计

设计的初始结构为 1 mm 有效焦距, f 数为 1.2 的 7 片式投影物镜(USP 4364643),如图 2 所示。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 数为 2.68,46°视场的系统。

2) 增大视场,每次增大 2°,并在增大后进行整体优化,以确保系统的像差和结构变化不至于太大。重复此过程,直至将视场增大到 56°。

3) 进行整体优化,确保系统达到满意的成像质量。最后进行精确的焦距缩放,确保像面尺寸符合

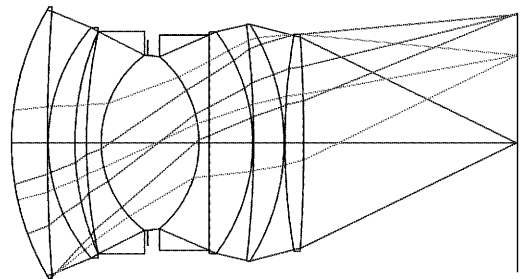


图 2 设计的初始结构

Fig. 2 Layout of the original system

微显示器要求。

经过以上几步的优化设计,得到一个 33.5 mm 有效焦距, f 数 3.33, 56° 视场, 重 33 g 的系统, 其结构如图 3 所示, 像差特性如表 2 的第二行所示。从表 2 可以看出, 折射系统的最大垂轴像差在 0° , 19.6° , 28° , 视场分别只有 $12 \mu\text{m}$, $40 \mu\text{m}$, $25 \mu\text{m}$, 是

表 2 折射、折-衍混合系统像差特性比较

Table 2 Aberration of refractive system and refractive-diffractive system

System	Transverse aberration / μm			Field curvature / D	Distortion / %	Lateral color / μm	MTF (on-axis)	
	0°	19.6°	28°				20 lp/mm	25 lp/mm
Refractive	12	40	25	0.18	3.2	12.8	0.78	0.69
Diffractive	15	17	54	0.4	0.17	7.5	0.8	0.73

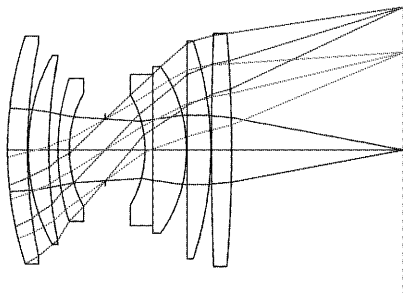


图 3 投影式头盔系统折射物镜结构图

Fig. 3 Layout of the refractive projection lenses of HMPDs

3.3 折-衍混合投影物镜设计

采用旋转对称的二元衍射面, 在 ZEMAX 光学设计软件中, 其相位表达式为^[14]

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

式中 ρ 为归一化径向坐标, A_1 为二次相位系数, 决定衍射面的傍轴光焦度, 用于校正系统色差; A_2 、 A_3 等为非球面相位系数, 用于校正系统的单色像差。本设计中二元衍射面的基底为平面。采用逐步简化的方法来进行折-衍混合投影物镜设计。其设计过程如下:

1) 在保持系统光焦度分配不变的条件下, 以折射单透镜代替图 3 中的双胶合透镜, 并经初步优化使其中的一个表面为平面。

2) 将平面设为衍射面, 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的结构参量和二次相位系数设为变量, 进行整体优化, 实现消色差并保持总的光焦度基本不变。

3) 将图 3 中的第 2、3 片透镜替换为一个单透镜, 并将其结构参量设为变量, 进行整体优化。

4) 逐步将非球面相位系数 A_2 、 A_3 和其他元件的结构参量设为变量, 在优化函数中加大对单色像差的校正权重, 实现对单色像差的校正。

5) 最后针对畸变、垂轴色差和调制传递函数进

比较小的; 最大横向色差只有 $12.8 \mu\text{m}$, 最大畸变只有 3.2%, 其最大场曲只有 $0.18D$, 对于头盔系统来说, 这是很令人满意的^[13]。系统的中心视场调制传递函数在 25 lp/mm 时达到了 0.69, 满足 SXGA 模式的显示要求。

行再次优化。得到满意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。

在最后的设计结果中, 二元衍射面的最小周期线宽为 $37 \mu\text{m}$ 。每周期刻蚀 8 个台阶, 可获得 95% 的衍射效率, 此时对应的最小特征尺寸为 $4.6 \mu\text{m}$, 这样的尺寸是可以加工出来的。除衍射面外, 系统中其他各面均为标准球面, 这使得加工和装配都变得比较容易。

最终得到一个 56° 视场, f 数为 3.26, 有效焦距为 32.3 mm 的 5 片镜折-衍混合系统, 其结构如图 4(a) 所示, 像差特性如图 4(b)~图 4(d) 以及表 2 的第三行所示。从图表可以看出: 折-衍系统的最大垂轴像差在 0° , 19.6° , 28° , 视场分别只有 $15 \mu\text{m}$, $17 \mu\text{m}$, $54 \mu\text{m}$, 和折射系统相当; 折-衍系统很好地消除了畸变, 其最大畸变只有 0.17%; 最大横向色差只有 $7.5 \mu\text{m}$, 系统的场曲为 $0.4D$, 大于折射系统, 但对于头盔系统来说这是允许的^[13]。折-衍系统 0° 视场角的调制传递函数要好于折射系统, 在 25 lp/mm 时达到了 0.73, 对应显示模式 SXGA。因此, 设计结果可以满足 SXGA 模式的显示要求。

系统的出瞳直径为 10 mm, 出瞳距离达到 25 mm。由于二元衍射面的引入, 使得系统由原来的 7 片镜简化为 5 片镜, 体积(直径和长度)由原来的 28 mm 和 33.2 mm 减小为 22.4 mm 和 24.6 mm, 单目重量也由原来的 33 g 减小为 11.9 g, 实现了头盔光学系统的超轻小设计。表 3 给出了此系统各个元件的体积、密度和重量。它是根据(体积 \times 密度)来计算的, 首先根据各个元件的曲率、厚度和口径计算出它的体积, 再乘以相应玻璃的密度, 最后将各个元件的重量相加, 即得到整个系统的重量。通过以上的分析及对比表 1 的设计要求可以看出, 此二设计的各项指标均达到或超过了设计要求。

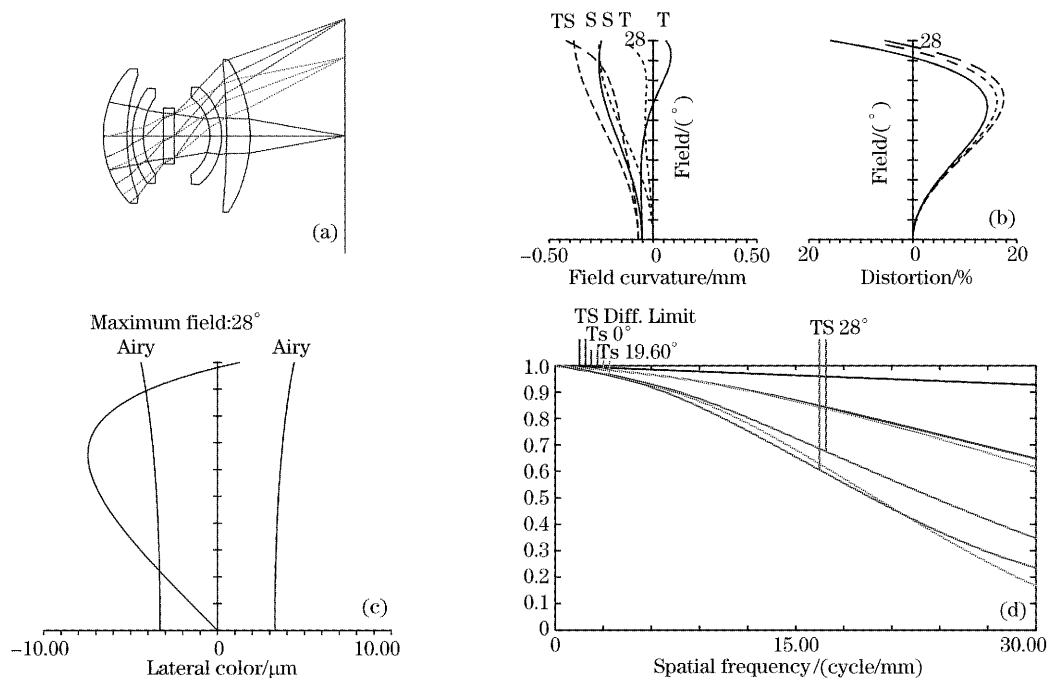


图4 投影式头盔系统折-衍混合物镜。(a)结构图,(b)场曲和畸变,(c)垂轴色差,(d)调制传递函数
Fig. 4 The hybrid refractive-diffractive projection lenses of HMPDs. (a) Layout, (b) field curvature and distortion, (c) lateral color, (d) modulation transfer function

表3 折-衍混合系统的重量

Table 3 The mass of the refractive-diffractive system

Element	Volume /mL	Density /(g/mL)	Mass /g
1	0.909	4.28	3.89
2	0.294	4.28	1.26
3	0.096	4.28	0.41
4	0.372	5.52	2.05
5	0.991	4.28	4.24
Total			11.85

为说明本设计的先进性,表4给出了四种不同形式的头盔光学系统(折射目镜式头盔系统、折-衍混合目镜式头盔系统、折射投影式头盔系统、折-衍混合投影式头盔系统)重要参量的比较。从中可以

表4 56°视场和10 mm出瞳直径时,目镜式头盔和投影式头盔光学系统参量比较

Table 4 Contrast between eyepiece HMDs and HMPDs with 56° FOV and 10 mm pupil

System	Eye relief /mm	Weight /g	Diameter of lens /mm	Distortion	Lateral color / μm	Field curvature /D
Refractive eyepiece HMDs	20	350	47	10%	200	1.0
Refractive-diffractive eyepiece HMDs	23	44	40.5	10%	20	1.1
Refractive HMPDs	25	33	28	3.2%	12.8	0.18
Refractive-diffractive HMPDs	25	11.9	22.4	0.17%	7.5	0.4

从这些数据不难看出,投影式头盔显示系统具有比目镜式头盔显示系统重量轻、体积小、畸变小、畸变小的特点,而衍射面的引入,又进一步减小系统的体积和重量,而这正是现代头盔显示系统所追求的目标。

看出:在56°视场和10 mm出瞳直径条件下,折射目镜系统重达350 g,折-衍混合目镜系统重44 g,普通折射投影物镜系统仅重33 g,还不到折射目镜系统的1/10,而折-衍混合投影系统的重量更是只有11.9 g,为折-衍混合目镜系统的1/4。由于人眼瞳间距的限制,双目头盔系统的镜头直径须小于46 mm^[15],而折射和折-衍混合投影系统的镜头直径分别只有28 mm和22.4 mm,十分有利于双目系统。折射和折-衍投影系统的相对畸变分别只有3.2%和0.17%,远小于目镜系统12%的畸变;场曲分别为0.18 D和0.4 D,为目镜系统的1/2,其垂轴色差也远小于目镜系统。

4 结 论

投影式头盔显示器是一种新型的头盔显示器,与常规直视头盔显示器和透视头盔显示器相比有许多优势。我们在一个7片投影物镜的基础上,设计

出一个折射系统和一个 5 片镜的折-衍混合系统。系统是针对于 33.03 mm(1.3 英寸)彩色液晶显示器设计的,视场为 56°,出瞳直径为 10 mm,出瞳距离为 25 mm,各项指标均达到或超过了设计要求。其中,折射系统重 33 g,直径为 28 mm;折-衍系统仅重 11.9 g,直径仅为 22.4 mm,实现了头盔光学系统的超轻小设计。文中给出了详细的设计过程和性能评价,此二系统均满足投影式头盔显示器在交互环境和可视化训练中的使用需要。

参 考 文 献

- 1 J. P. Rolland. Wide-angle, off-axis, see-through head-mounted display[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(7): 1760~1767
- 2 F. J. Ferrin. An update on optical systems for military head mounted displays[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3689**: 178~185
- 3 Zhao Qiuling, Wang Zhaoqi, Mu Guoguang *et al.*. Refractive-diffractive visual system for micro-display of LCOS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**(10): 744~748 (in Chinese)
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
- 4 H. Hua, C. Gao, L. D. Brown *et al.*. Using a head-mounted projective display in interactive augmented environments [C]. *Proc. IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality 2001* (Association for Computing Machinery, New York, 2001): 217~223
- 5 J. Ferguson. Optical system for head mounted display using a retroreflector and method of displaying an image [P]. U. S. patent 5,621,572 (15 April 1997)
- 6 H. Hua, A. Girardot, C. Gao *et al.*. Engineering of head-mounted projective display[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(22): 3814~3824
- 7 H. Hua, C. Gao, L. D. Brown *et al.*. A testbed for precise registration, natural occlusion, and interaction in an augmented environment using a head-mounted projective display (HMPD) [C]. *Proc. IEEE VR 2002* (IEEE Computer Society, Los Alamitos, Calif., 2002): 81~89
- 8 Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian *et al.*. *Binary Optics* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 1~16 (in Chinese)
金国藩,严瑛白,邬敏贤等. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社,1998. 1~16
- 9 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 (in Chinese)
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 (in Chinese)
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 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 (in Chinese)
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
- 12 Zhao Qiuling. Study on hybrid refractive/diffractive optical system for head-mounted display [D]. Tianjin: Nankai University, 2004. 40~45, 52 (in Chinese)
赵秋玲. 折/衍混合头盔显示光学系统研究[D]. 天津: 南开大学,2004. 40~45,52
- 13 P. Mouroulis. *Visual Instrumentation* [M]. New York: McGraw-Hill, 1999. 248~249
- 14 Focus Software. *ZEMAX Optical Design Program User's Guide, Version 10.0* [M]. Focus software, Inc., USA, 2001. 187~189
- 15 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 (in Chinese)
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