

紧凑型折反式头盔光学系统设计

周亮^{1,2}, 康明武¹, 李晓霞², 李文强²

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471009; 2. 中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所, 河南 洛阳 471009)

摘要: 为适应近年来头盔显示器微型化和轻量化的发展需求, 设计了一种紧凑型折反式头盔显示器光学系统。通过减小分束镜倾角使整个棱镜更薄; 系统引入双胶合透镜和非球面, 用以消除系统色差及其他像差; 所有元件采用胶合方式实现一体化结构, 更加紧凑, 便于装调。设计的光学系统技术指标为视场角 $27.0^\circ \times 20.4^\circ$, 出瞳距离 25 mm, 出瞳直径 12 mm, 后截距大于 5 mm, 眼分辨率满足在 40 lp/mm 时的调制传递函数 (MTF) 值大于 0.5, 系统畸变小于 0.5%。分析结果表明, 该系统具有良好的成像质量, 系统像差特性满足目视系统的成像要求, 可广泛应用于虚拟现实各个领域。

关键词: 头盔显示器; 光学设计; 非球面; 虚拟现实

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)03-0065-04

Design of a Compact Catadioptric Optical System for HMDs

ZHOU Liang^{1,2}, KANG Mingwu¹, LI Xiaoxia², LI Wenqiang²

(1. Science and Technology on Electro-Optical Control Laboratory, Luoyang 471009, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471009, China)

Abstract: The Helmet-Mounted Displays (HMDs) are becoming compact and lightweight in recent years. To meet the requirement of it, a compact catadioptric optical system was designed. The prism was thinner than before by reducing the obliquity of beam splitter. Doublet and aspheric surface were introduced into the system to correct the chromatic aberration and other aberrations effectively. All the elements were agglutinated to make it compact and easy for assembly and adjustment. The designed technical specifications of the optical system are: FOV of $27^\circ \times 20.4^\circ$, exit pupil distance of 25 mm, exit pupil diameter of 12 mm, back focal length more than 5 mm, Modulation Transfer Function (MTF) higher than 0.5 at the frequency of 40 lp/mm, and the distortion was less than 0.5%. The results show that the optical system has a fine performance and can meet the aberration characteristics demands of eyepieces. The system can be widely used in various fields of virtual reality.

Key words: Helmet Mounted Display (HMD); optical design; aspheric surface; virtual reality

0 引言

头盔显示器 (Helmet Mounted Display, HMD) 是利用光学系统将微显示器发出的图像投影在人眼前形成放大的虚像, 最初是安装在飞机及车辆驾驶员头盔上, 用于观察和瞄准的一种显示仪器, 后来在军事应用领域中扩展到如单兵武器作战、夜视器材及武器瞄准、各兵种的训练模拟等系统中, 可实时显示战术信息, 辅助目标瞄准识别^[1]。近年来, 头盔显示的应用已涉及工

业生产、模拟训练、虚拟现实、医疗、娱乐等社会发展中的各个领域^[2-3]。

光学系统是头盔显示器的重要组成部分, 光学系统设计很大程度上影响着图像显示质量的好坏, 决定着观察者的视觉感受, 同时还会影响头盔显示器的体积、重量以及观察者的佩戴舒适程度。具备更紧凑的结构、更轻的重量、更好的携带舒适度和更优良性能的光学系统仍然是头盔显示器向社会推广的主要障碍^[4]。传统的光学系统采用多组透镜, 结构复杂, 装调和加工要求精度高, 体积重量也很大, 长时间佩戴会引起颈部疲劳^[5]。采用自由曲面可减小系统体积, 改善光学系统的像差特性, 但自由曲面加工、检测困难, 生产成本低, 效率低, 设计难度大, 一直制约着自由曲面

收稿日期: 2012-10-10

修回日期: 2012-11-04

作者简介: 周亮 (1987-), 男, 湖北孝感人, 硕士生, 研究方向为光学与精密仪器。

在头盔成像显示系统中的应用^[6-7],特别是在国内,自由曲面头盔显示器难以批量生产。

本文论述了一种紧凑型折反式头盔光学系统设计,该系统采用双胶合透镜和非球面,消除系统色差及其他像差,成像质量好;针对传统的 45° 倾角分束镜,提出了一种改进的结构,通过减小分束镜倾角,使整个系统结构紧凑、体积缩小、质量减轻;系统所用元件数少,并且各元件都胶合在一起,也降低了系统装调要求。

1 头盔光学系统设计

1.1 系统初始结构

图 1 所示为 HMD 的初始结构,由图像源所发出的光线经过一个透镜到达分束镜,由分束镜反射向凹面反射镜,再由凹面反射镜反射至人眼出瞳处,在出瞳处观察到放大的虚像。若希望有较大的视场角和出瞳直径,则需要减小光学系统的焦距和增大光学系统的口径,但对于给定技术要求的光学系统,不能任意减小焦距和增大口径。可通过适当更改光学系统结构,如改变分束镜倾角和引入非球面来对系统进行优化。

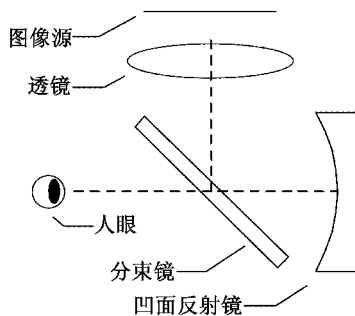


图 1 HMD 系统结构
Fig. 1 Layout of system

1.2 设计要求

根据 HMD 设计要求,需要考虑视场角、出瞳距离、出瞳直径、结构尺寸和重量等要求。

1) 视场角。视场角是观察者观看头盔显示器图像时所对应的观察角度。一般情况下,视场角越大,可以观察到的信息量就越多,观察者使用过程中也不易疲劳;但其设计与头盔的体积和重量、显示内容、显示尺寸、出瞳距离、出瞳直径、分辨率等因素有关,并且彼此相互制约,本设计综合考虑将视场角定为 27.0° × 20.4°。

2) 出瞳距离。为获得最大视场,目视仪器的光瞳应与入瞳匹配,即人眼的入瞳应放置于头盔光学系统的出瞳处,否则将会导致部分视场丢失甚至全部丢失。为了保证使用者佩戴方便,头盔显示器的出瞳距离一般应大于 15 mm,考虑到使用者佩戴眼镜或防毒面具,出瞳距离应大于 20 mm,本设计将出瞳距离

定为 25 mm。

3) 出瞳直径。人眼瞳孔在正常状态下的直径为 3~5 mm,为了避免在观察过程中由于眼球转动及头盔滑动产生渐晕,光学系统的出瞳要大于人眼光瞳。光学系统的出瞳越大,一方面可以避免丢失视场,另一方面也可以使观察者在使用过程中不易感到疲劳,因此头盔显示光学系统的出瞳直径一般不应小于 10 mm,实际上在设计中出瞳增加的范围也是有限的,本设计的系统出瞳直径为 12 mm。

4) 结构尺寸和重量。为了节省安装空间和减小使用者颈部负担,头盔显示器的体积和重量也是一项非常重要的指标,本设计采用很少的元件并引入非球面,有效地减小了结构尺寸和重量。

综上所述,光学系统的参数如表 1 所示。

表 1 光学系统参数

Table 1 Parameters of optical system

| 波长/nm | 视场角/(°) | 眼距/mm | 出瞳直径/mm |
|---------|-----------|-------|---------|
| 510~550 | 27.0×20.4 | 25 | 12 |

1.3 光学系统设计方法

本系统要提升光学系统显示性能,同时还要达到减小系统体积和减轻系统重量的目的,特引入旋转对称型非球面光学元件。球面只有一个参数决定面型,其校正像差的局限性很大,要达到校正像差的目的必然会使透镜数增多,使系统结构更复杂,也增加了系统重量;而非球面的面形系数由多个变量决定,有更大的自由度,具有高级像差小,产生负球差的特点,可以平衡球面产生的初级像差和高级像差,能够很好地校正轴外点的像差^[8-9]。

非球面可以看作是由球面与一个中心厚度无限薄的校正板的叠加,则非球面各单色像差系数为^[10]

$$\begin{cases} S_I = \sum h p + h^4 K \\ S_{II} = \sum h_z p - J \sum W + h^4 K \left(\frac{h_z}{h} \right) \\ S_{III} = \sum \frac{h_z^2}{h} p - 2J \sum \frac{h_z}{h} W + J^2 \sum \varphi + h^4 K \left(\frac{h_z}{h} \right)^2 \\ S_{IV} = J^2 \sum \mu \varphi \\ S_V = \sum \frac{h_z^3}{h^2} p - 3J \sum \frac{h_z^2}{h^2} W + J^2 \sum \frac{h_z}{h} \varphi (3 + \mu) + h^4 K \left(\frac{h_z}{h} \right)^3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: h 为第一近轴光线在非球面上的入射高度; h_z 为近轴主光线在非球面上的入射高度; p, W 为基本像差参数; φ 为光焦度; K 为与非球面系数相关的参数。将系统设计所要求达到的像质目标代入上式求出 K , 根据 K 值即可求出非球面的近轴曲率半径。

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

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

式中: c 为曲率; k 为二次曲线常数; A 、 B 、 C 、 D 等为非球面增量系数。

设计中所用非球面为高次非球面, 为保证加工精度, 非球面系数设置取到八次项, 具体参数为: $c = -0.033149$; $k = 0$; $A = 7.895 \times 10^{-5}$; $B = 3.485 \times 10^{-7}$; $C = 7.967 \times 10^{-10}$; $D = 0$ 。

为校正系统色差, 在系统中增加一组双胶合透镜, 双胶合透镜的光焦度与阿贝数满足下面的方程^[10]

$$\begin{cases} \varphi_1 + \varphi_2 = \Phi \\ \frac{\varphi_1}{v_1} + \frac{\varphi_2}{v_2} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: Φ 为总光焦度; φ_1 、 φ_2 分别为两块透镜的光焦度; v_1 、 v_2 分别为两块透镜材料的阿贝数。当透镜组所用两种玻璃材料色差特性确定后即可求出两透镜的光焦度 φ_1 、 φ_2 , 双胶合透镜组中 3 个曲率任意给定 1 个, 即可方便地求出另外 2 个, 从而可确定透镜组的全部结构参数。

此外, 为保证系统显示性能, 可引入一定渐晕, 对轴外光束进行合理的拦光^[10]。由此可以有选择地减小透镜的通光孔径, 消除引起较大像差的部分边缘光线, 使透镜组的成像性能变好, 体积更小。

2 设计结果及像差特性分析

经过调整优化, 设计了一种紧凑型折反式头盔光学系统; 采用一个 36° 倾角的分束镜, 使整个棱镜显得更薄; 将靠近图像源的一个透镜面设置为非球面, 整个系统通过胶合实现一体化, 减少了光学元件的结构支撑件, 更有效地保证加工检验精度。结果表明, 新设计的光学系统体积小、重量轻, 易于加工装调。图 2 所示分别为常规 45° 倾角和本文 36° 倾角的系统结构图, 表 2 所示为两种系统的重量及体积参数。

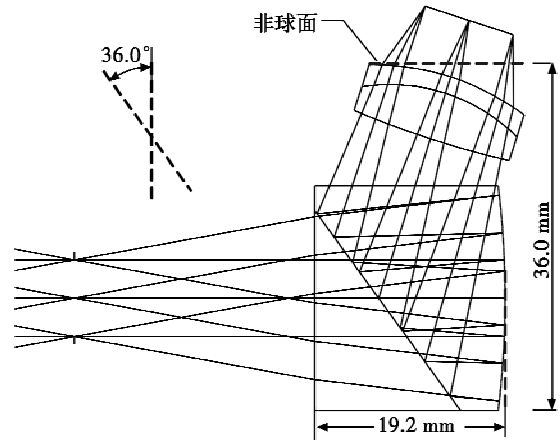
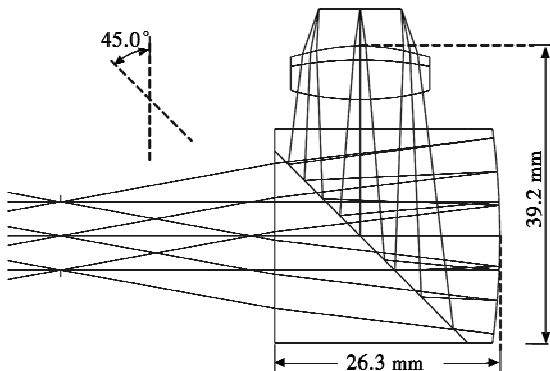


图2 系统结构图

Fig. 2 Layout of the two optical systems

表2 两种系统的重量体积参数

Table 2 The weight and volume of the two systems

| 光学系统 | 重量/g | 体积/mm ³ |
|------|------|--------------------|
| 系统1 | 66.5 | 33.2 × 39.2 × 26.3 |
| 系统2 | 40.8 | 30.5 × 36.0 × 19.2 |

图3为系统的调制传递函数曲线, 选用对角线尺寸为 0.63 in (1 in ≈ 25.4 mm), 分辨率为 1024 × 768 的图像源, 对应的空间频率为 40 lp/mm 时, 系统调制传递函数值在边缘视场最低为 0.556, 在中心视场达到 0.903, 系统成像质量完全满足目镜要求。

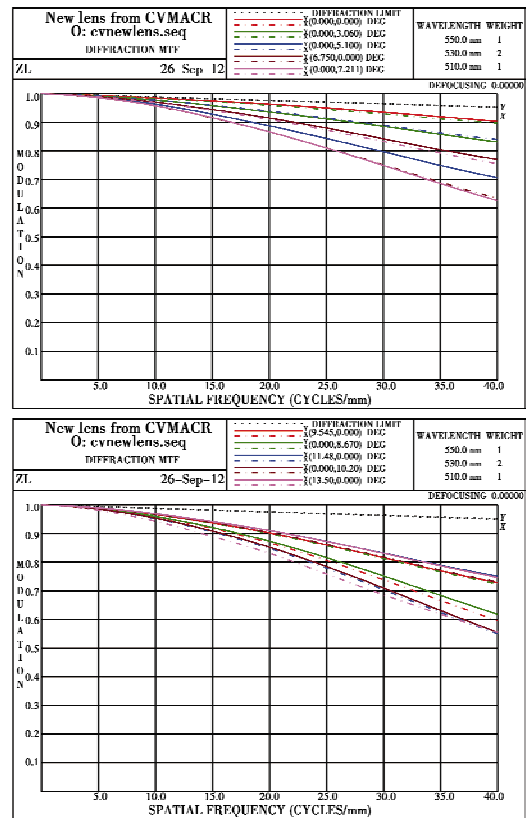


图3 系统调制传递函数 (MTF)

Fig. 3 Curve of modulation transfer function (MTF)

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 0.037 mm,子午方向最大场曲为 0.071 mm;系统的最大畸变为 0.5%,畸变小于 1%,因此该系统不需要额外进行畸变校正即可满足目镜要求。

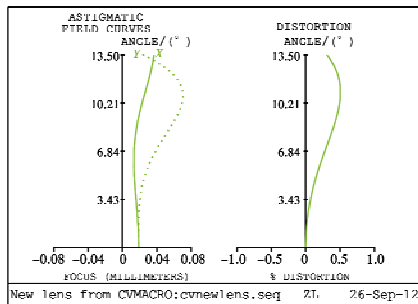


图 4 场曲和畸变

Fig. 4 Field curvature and distortion

图 5 为系统成像弥散斑点列图,体现了系统对点目标所成像的弥散斑大小。该系统全视场内的 RMS 弥散斑直径最大值为 $11.7 \mu\text{m}$,小于两个像元间的尺寸 $12.5 \mu\text{m}$ 。

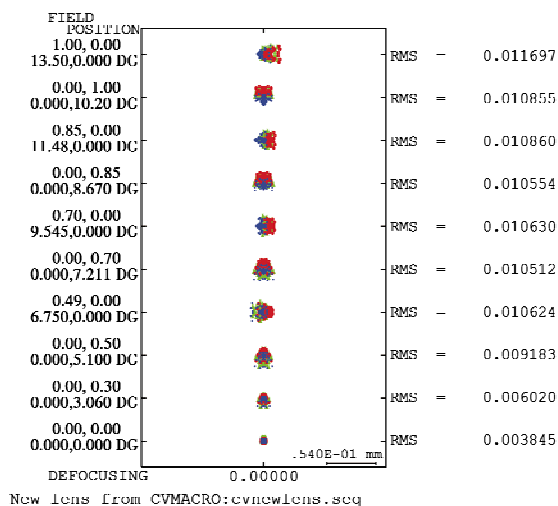


图 5 点列图

Fig. 5 Spot diagram

通过 CODE V 进行公差分析没有发现十分敏感的元件,符合现有的加工和装调水平,因此该设计完全满足设计要求。此外,在某些应用领域,对于此光学系统,选用光学塑料如聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)来制作光学系统中的光学元件,还可进一步减轻系统的重量^[11]。

3 结论

HMD 光学系统的设计是 HMD 总体设计中的一项关键技术,最终设计完成的 HMD 光学系统是对若干设计因素综合考虑的结果。为达到更高的要求,研究人员还需做出更多的努力。

本文根据头盔显示器在实际应用中微型轻量化及大视场的需求,采用引入非球面及减小分束镜倾角的新型结构,设计了一种紧凑型折反式头盔显示器光学系统。通过对系统的优化设计,系统成像性能达到甚至超过了设计要求,结构更加紧凑,质量更轻,对设计结果参数进行分析表明,其符合现有加工条件,适合批量生产,在虚拟显示领域具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] FRANK J F. An update on optical system for military head mounted display[J]. SPIE, 1999, 3689:178-185.
- [2] MCINTIRE J P, MARTINSEN G L, MARASCO P L, et al. Virtual reality: A reality for future military pilotage? [J]. SPIE, 2009, 7236: D-1-9.
- [3] ROLLAND J, CAKMAKCI O. The past, present, and future of head mounted display designs [J]. SPIE, 2005, 5638: 368-377.
- [4] MCCUIRE J P. Next-generation head-mounted display[J]. SPIE, 2010, 7618: 04-1-8.
- [5] CAKMAKCI O, ROLLAND J. Head-worn display: A review [J]. IEEE, 2006, 2(3): 199-216.
- [6] TALHA M M, WANG Yongtian, CHENG Dewen, et al. Design of a compact wide field of view HMD optical system using freeform surfaces[J]. SPIE, 2008, 6624: 16-1-14.
- [7] 王涌天. 自由曲面光学系统设计及其应用[J]. 光学与光电技术, 2012, 10(3): 13-16.
- [8] 刘钧, 尚华, 宋波. 头盔式单目微光夜视仪中非球面物镜系统的设计[J]. 应用光学, 2006, 27(4): 308-311.
- [9] 李林. 现代光学设计方法[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
- [10] 张以谟. 应用光学[M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [11] 吴海清, 孙强, 王健, 等. 眼镜式虚拟显示折射/衍射塑料光学系统设计[J]. 光电工程, 2009, 36(1): 98-102.

欢迎订阅 欢迎刊登广告