

基于 ZEMAX 的 3D 虚拟头盔显示器的光学设计方法研究

孙 强¹, 王 健¹, 董科研^{1,2}, 孙金霞^{1,2}, 刘建卓^{1,2}, 曲 锋^{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, 吉林 长春 130033;

(2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 根据目镜光学系统原理, 采用 ZEMAX 软件来确定 3D 虚拟头盔光学显示系统的结构设计方法研究和性能优化。给出了具体设计实例, 设计结果表明, 3D 虚拟头盔光学系统的总长小于 49 mm、垂轴像差小于 60 μm 、轴向球差小于 0.1 mm、倍率色差小于 20 μm 、场曲小于 0.4 mm、畸变小于 5%、MTF 在 30 lp/mm 大于 0.32, 总体质量满足 3D 虚拟头盔显示器的要求。

关键词: 虚拟显示; 头盔; 光学设计

中图分类号: TP216+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2008)增(几何量)-0279-04

Optical design method for 3D virtual helmet display based on ZEMAX

SUN Qiang¹, WANG Jian¹, DONG Ke-yan^{1,2}, SUN Jin-xia^{1,2}, LIU Jian-zhuo^{1,2}, QU Feng^{1,2}

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

Changchun 130033, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The method to design 3D virtual helmet display optical system is presented based on the software of ZEMAX and the properties of eyepiece. A design example is given. The result shows that the total length of the optical system is less than 49 mm, the lateral aberration less than 60 μm , axial spherical aberration less than 0.1 mm, the lateral chromatic aberration less than 20 μm , field curvature less than 0.4 mm, distortion less than 5%. The MTF at 30 lp/mm is over 0.32 and the total mass satisfies the requirement of the 3D virtual helmet display.

Key words: 3D Virtual; Helmet; Optical design

0 引 言

头盔显示器 (Head Mounted Display, HMD) 的原理是将小型显示器所产生的影像藉由光学系统放大^[1-3], 即微显示器所发射的光线经过凸状透镜使影像因折射产生类似远方的效果。利用此效果将远处物

体放大至远处观赏而达到所谓的全像视觉。

性能良好的微显示器件的引入不仅使头盔系统有更好的性能/价格比, 而且使系统变轻变小。由于微显示器的小尺寸, 高分辨率的特点也给头盔显示的光学系统设计带来了根本的变化, 提出了更高的技术指标要求^[4-5]。现代的 HMD 要求光学系统具备大视

收稿日期: 2008-04-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60507003); 中国科学院国防科技创新基金支持; 中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助; 吉林省科技展计划杰出青年项目支持; 国家 863 (2007AA12Z110) 资助; 吉林省省长基金支持

作者简介: 孙强(1971-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事红外光学、衍射光学相关的研究工作。Email:sunq@ciomp.ac.cn.

场、短焦距、相对孔径小、大出瞳直径和大出瞳距离等特点,而实际上,这些要素有些是相互矛盾的,比如,短焦距同大出瞳尺寸之间的矛盾问题,关键是怎样平衡这样的矛盾来达到 HMDs 既能设计出来,也能有一定的“浸没感”。因此,用于现代化头盔 3D 显示的光学系统的设计方法研究正成为二十一世纪科学研究的一个热点^[6-7]。

针对头盔 3D 光学显示系统的设计方法,采用 eMagin 公司生产的 OLED,其对比度为 100:1、彩屏亮度达到 70 cd/m^2 以上、彩色像素为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$,拥有 $0.61''$ 微显示屏^[8],设计一个基于 ZEMAX 软件的新设计方法的 3D 虚拟头盔显示器光学系统。

1 人眼机效同光学系统匹配分析

通常,人眼的水平视场约为 150° ,其中在中心视场 10° 的范围内的分辨率为 $1'$,而在 10° 以外, $5'$ 的分辨率就能够满足人眼的要求。当头盔显示器成像系统的视场角小时,虚拟和立体效果差,所以,显示器的视场尽可能大,但过大的视场将导致光学系统的繁杂和设计及加工困难;出瞳距离是指光学系统的边缘到人眼瞳孔的最小距离,为了保证使用者配戴方便,出瞳距离不应过小,应大于 15 mm ;如果允许用户在使用时配戴眼镜的话,则要求出瞳距离大于 20 mm 。人眼瞳孔在正常状态下的直径为 2 mm 左右,在黑暗环境下会适当放大。为了允许人眼眼球有一定范围的移动,一般要求由头盔显示的光学系统的出瞳直径大小在 6 mm 以上。白天或强光视觉,它主要涉及锥细胞的视觉,称为亮视觉,而暗视觉和过度视觉则对光亮度要求较低。人眼对日光及彩色视觉是锥细胞的功能,而对低亮度的视觉是杆细胞的功能,因此,要求显示器在经过光学系统后到达人眼时的亮度均大于 10 cd/m^2 。在双目头盔系统设计时,还应考虑光学系统的瞳距问题。大多数双目显示头盔由两个对称的光学系统组成,它们各自出射主光线的距离为此头盔显示系统瞳距。人眼的瞳距一般在 $54 \sim 70 \text{ mm}$ 之间。

考虑到微小显示器和人的因素,在设计光学系统时必须满足以上要求。如采用 eMagin 公司的 OLED,其对角线尺寸为 15 mm , 50° 视场,根据 $f' = Y / \tan \omega = 7.5 / \tan 25^\circ = 16.08 \text{ mm}$, $F/\# = 2.68$,出瞳距为 20 mm ,出瞳直径为 6 mm ,要设计如此一个光学系统,用 Erfle 目镜和其他普通的目镜,很难有令

人满意的效果,因此,必须要用特殊的方法来设计此系统。

2 设计分析

从第 1 节技术指标中可以看出,此系统理论焦距为 $f' = 16.08 \text{ mm}$, $l_z' / f' \approx 1.24$,而且畸变要求小于 5% ,从常用的传统目镜专利结构中,很难有满足要求的,这就要求采用特殊的结构。

考虑到系统畸变要求较小,采用无畸变目镜进行改造。无畸变目镜视场一般在 40° ,而系统现在要求 50° ;首先由于视场角的增大,在一定的出瞳距离要求下,斜光束的倾斜角和在透镜表面的投射高随之增加,各种高级像差很快增大,即使采用系统的初级像差和它进行平衡以后,剩余的像差仍然很大,其次由于视场角增大,场曲量增加,即使使用像散补偿以后剩余的像散和平均场曲仍然较大。为了克服以上障碍,在本系统目镜中通常采用以下措施。

为了减小场曲,必须在系统中加入负透镜组,并且要求和正透镜组远离,合理的位置是在靠近像面一边,即要求无畸变目镜中三胶合透镜组的最后一个透镜从像面往出瞳看时,是一个弯月形的负透镜,如图 1 所示。

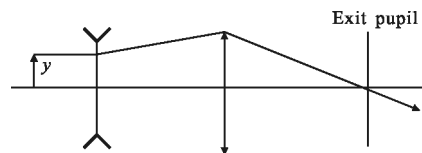


图 1 系统结构图

Fig.1 Schematic plan of system organization

这样一方面能减小场曲,同时还能增大出瞳距离,加入负透镜以后,为了减小高级像差,以增加视场,必然要使正透镜复杂化,因而透镜组的总厚度增加,为了达到较大的出瞳距离,也必须使负透镜位于靠近像面的方向。

为了在投射高和视场角都比较大的情况下,不致产生过大的高级像差,必须把无畸变目镜中有单个正透镜组构成的接眼透镜组用两个透镜组来代替,即,在无畸变目镜中再加入一个正透镜;它们之间应尽量密接,这样一方面有利于减小场曲,同时也使斜光束在第二个透镜组上的投射高尽可能小。

经过上述的 Zemax 软件构造基本结构后^[9],发现

系统焦距还不能满足系统要求, 因此, 还需要三胶合透镜组中的第一个正透镜来承担一部分光焦度, 故三胶合透镜组的第一个透镜采用高折射率的 LAK7 玻璃; 由于三胶合校正的最主要像差是垂轴色差, 因为基本结构是由两个密接的薄透镜构成的, 主光线在透镜上的投射高又比较大, 因此必然产生较大的负垂轴色差, 只能依靠校正结构进行校正。三胶合中负透镜玻璃色散应尽量大一些, 而正透镜的色散应尽量小一些, 选取负透镜为 ZF6, 最后一个透镜采用 ZK7。在确定完玻璃组合后, 可以大概估计出投射高, 根据投射高先输入估计的半径值, 分别为 24、-31、31 和 20 mm, 厚度分别为 8、5 和 4 mm。确定系统的表面结构后, 在优化函数中限制像散、彗差、轴向色差、倍率色差和畸变, 然后再设置默认波前误差, 进行优化后得到系统的初始结构, 如图 2 所示。

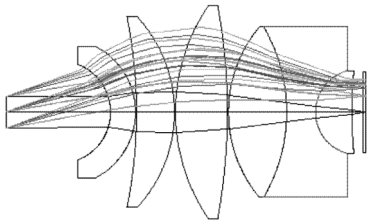


图 2 头盔光路结构图
Fig.2 Optical layout of HMD

3 结果分析

此系统总长小于 69 mm(包括出瞳距); 图 3 给出了此 3D 头盔系统的垂轴像差图, 垂轴像差小于 60 μm ; 图 4 表明系统的轴向球差小于 0.1 mm; 图 5 的倍率色差小于 20 μm ; 图 6 的头盔光学系统的场曲小于 0.4 mm、畸变小于 5%, 完全满足人眼要求; 图 7 中的光学传递函数 MTF 在 30 lp/mm 大于 0.32, 表明系统总体质量完全满足 3D 虚拟头盔显示器的要求。

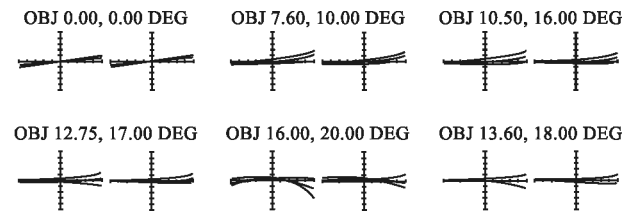


图 3 3D 头盔系统的垂轴像差图
Fig.3 Lateral aberration of the system

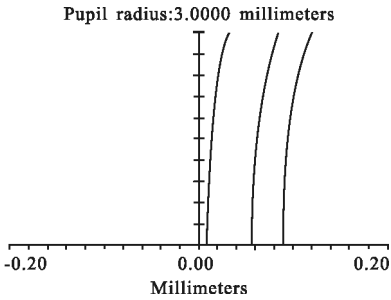


图 4 3D 头盔光学系统的轴向球差图
Fig.4 Axial spherical aberration of HMD

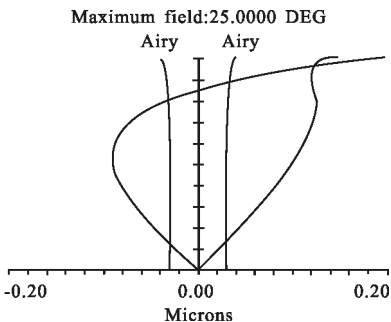


图 5 3D 头盔光学系统的倍率色差图
Fig.5 Lateral chromatic aberration of HMD

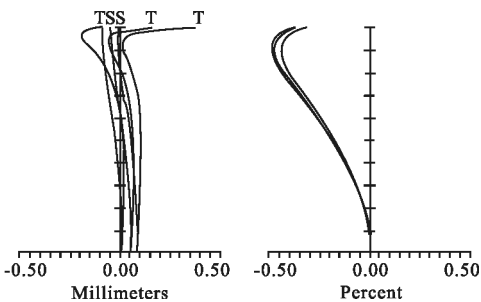


图 6 3D 头盔系统的场曲、畸变图
Fig.6 Field curvature and distortion of HMD

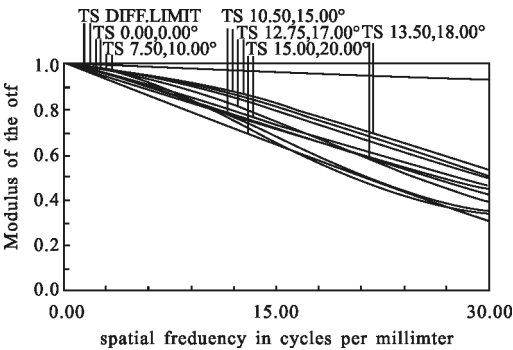


图 7 3D 头盔系统光学传递图
Fig.7 MTF curves of HMD

4 结 论

经过 ZEMAX 的结构确定和优化后的 3D 虚拟头盔光学系统的总长小于 69 mm(包括出瞳距)、垂轴像差小于 60 μm 、轴向球差小于 0.1 mm、倍率色差小于 20 μm 、场曲小于 0.4 mm、畸变小于 5%、MTF 在 30 lp/mm 大于 0.32, 按照此方法完全可以便捷高效地给出系统的初始结构和提高优化质量, 总体质量完全满足 3D 虚拟头盔显示器的要求。将在虚拟娱乐、外科手术、虚拟驾驶、虚拟训练、交互式三维环境中得到积极的应用。

参考文献:

- [1] 孙强, 柳荣, 朴仁官, 等. 塑料非球面透镜在头盔3D显示中的应用[J]. 光学精密工程, 2005,13(4): 47-52.
- [2] DONALD J. Optical approaches to the helmet mounted display [C]//, SPIE, 1989, 1116: 14-18.
- [3] FRANK J. An update on optical systems for military head mounted displays [C]//. SPIE, 1999, 3689: 178-185.
- [4] WAYNE K, GARY B, KUMAR K, et al. Optical design comparison of 60° eyepieces: one with a diffractive surface and one with aspherics [J]. Appl Opt, 1997, 36(20): 4756-4760.
- [5] SHENKER M. Optical design criteria for binocular helmet-mounted displays [C]//. SPIE, 1987, 778: 70-78.
- [6] SUN Qiang, WANG Zhao-qi, LI Feng-you, et al. Athermal design for the infrared diffractive/refractive optical system in 3.2~4.5 μm [J]. Optics and Precision Engineering, 2002,10(2): 121-124.
- [7] BUNKENBURG J, FRITZ T. Innovative diffractive eyepiece for a helmet-mounted display [C]//. SPIE. Novel Optical System Design and Optimization II, 1998, 3430, 41-46.
- [8] <http://www.emagin.com/svg+>.htm
- [9] Focus software. ZEMAX Optical Design Program User's Guide, Version 8.0. USA: Focus software, Inc., 1999. 176-177.