

文章编号: 1672-8785(2021)01-0033-05

基于虚拟现实的头盔显示目镜 系统设计

袁 东 姬广超 李 婧* 马海琳 杨亮亮*

(盐城师范学院物理与电子工程学院, 江苏 盐城 224007)

摘 要: 基于 Erfle 透镜结构, 设计了可用于头盔显示系统的传统折射式目镜。在此基础上添加了衍射面, 设计出了折衍射目镜。这两种系统的基本结构参数相同, 出瞳距为 27 mm, 出瞳直径为 8 mm。与传统折射式结构相比, 折衍射目镜的总长度减小了 11%, 重量减轻了约 23%, 畸变减小了 59.45%。考虑到衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率对系统调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 的影响, 在 40 lp/mm 空间频率处, 折衍射头盔目镜轴上视场的 MTF 值和最小 MTF 值分别高于 0.68 和 0.28, 满足设计要求。该系统可以应用于虚拟现实的头盔显示系统。

关键词: 光学设计; 目镜; 头盔显示器

中图分类号: O436 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.01.007

Design of Helmet Display Eyepiece System Based on Virtual Reality

YUAN Dong, JI Guang-chao, LI Jing*, MA Hai-lin, YANG Liang-liang

(School of Physics and Electronics Engineering, Yancheng Teachers University, Yancheng 224007, China)

Abstract: Based on Erfle lens structure, a traditional refractive eyepiece which can be used in the helmet display system is designed. On this basis, the diffraction surface is added, and the refractive and diffractive eyepiece is optimized. The basic structural parameters of the two systems are the same. The exit pupil distance is 27 mm and the diameter of the exit pupil is 8 mm. Compared with the traditional refractive structure, the total length of the refractive and diffractive eyepiece is reduced by 11%, the weight is reduced by 23%, and the distortion is reduced by 59.45%. Considering the influence of bandwidth integral average diffraction efficiency of diffractive optical elements on the system's modulation transfer function (MTF), the MTF of the field-of-view on the axis and the minimum MTF of the refractive and diffractive helmet eyepiece are higher than 0.68 and 0.28 respectively at the spatial frequency of 40 lp/mm, which can meet the design requirements. It can be used in the virtual reality helmet display system.

收稿日期: 2020-09-10

基金项目: 江苏省高校自然科学基金(19KJD140005); 2020 年大学生创新创业训练计划项目(省级一般项目 202010324067Y)

作者简介: 袁东(2000-), 男, 江苏淮安人, 主要从事虚拟现实和光学系统设计研究。

*通讯作者: E-mail: yctuli@163.com; yang_liangliang@163.com

Key words: optical design; eyepiece; helmet display

0 引言

随着虚拟显示技术和电子器件的发展,头盔显示器已经广泛应用于军事、民用、工业以及医学等领域。头盔显示系统的设计既要具有优良的成像质量,又要具备紧凑的结构和较轻的重量。此外,还要兼顾佩戴的舒适度等方面。头盔显示器的光学系统按照结构的不同可以分为共轴系统和离轴系统。白瑜等人基于 Erfle 透镜设计了三片式的头盔显示系统^[1]。李华等人利用自由曲面设计了出瞳距为 50 mm 的机载头盔显示系统^[2]。刘军等人利用自由曲面设计了双反射镜结构形式的头盔显示器^[3]。周学鹏等人采用离轴反射式结构设计了一款可用于眼镜式虚拟现实设备的头盔显示系统^[4]。

近年来,随着衍射光学元件在各种光学系统中的广泛应用,研究人员开始尝试通过传统光学系统中添加衍射光学元件来优化系统成像质量^[5-7]。其中,单层衍射光学元件可以应用于可见光和红外等波段。由于具有负色散、零场曲等特性,衍射光学元件对简化系统结构和提高成像质量具有重要意义^[8-10]。

本文基于传统 Erfle 目镜的结构形式,利用衍射光学元件改善了系统结构及像质,并设计了一种折衍射混合头盔显示目镜系统。另外还分析了衍射光学元件的衍射效率对系统 MTF 的影响。结果表明,该系统的成像质量得到了提高,重量也减轻了,因此可用于虚拟现实等领域。

1 设计参数要求

目镜系统是头盔显示系统中的一个主要组成部分。设计时需要考虑出瞳距、出瞳直径、视场角和畸变等参数。头盔显示目镜系统工作在人眼可见的 F 光~C 光波段。考虑到使用者的佩戴习惯和方便舒适等因素,目视系统的出瞳距离不小于 25 mm,出瞳直径设定为 8 mm。

视场角代表了头盔显示器可以观察的视野范围。但是,系统分辨率会随着视场角的增大而降低。因此,将视场角设定为 35°。此外,系统 F 数为 4,总长度不大于 50 mm。在 40 lp/mm 空间频率处,中心视场的 MTF 大于 0.25,最大视场的 MTF 大于 0.1;最大畸变小于 10%。

2 衍射光学元件的衍射效率对 MTF 的影响

衍射效率和带宽积分平均衍射效率是用于成像光学系统的衍射光学元件的重要参数,其大小决定了衍射光学元件的工作波段。当光线以一定角度斜入射到衍射微结构表面上时,衍射光学元件的衍射效率可以表示为^[9]

$$\eta_m = \text{sinc}^2 \left\{ m - \frac{d}{\lambda} \left[\sqrt{n^2(\lambda) - \sin^2 \theta_i} - \cos \theta_i \right] \right\} \quad (1)$$

式中, m 为衍射级次(在成像光学系统中通常取为 1); d 为衍射光学元件的表面微结构高度; $n(\lambda)$ 为基底材料在波长 λ 处的折射率; θ_i 为光线的入射角度。对于在可见光波段工作的单层衍射光学元件,一级衍射的带宽积分平均衍射效率为

$$\bar{\eta}_1 = \frac{1}{\lambda_C - \lambda_F} \int_{\lambda_F}^{\lambda_C} \eta_1 d\lambda \quad (2)$$

式中, λ_F 和 λ_C 分别表示工作波段内的最小和最大波长(分别为 486.1 nm 和 656.3 nm)。当衍射面上的入射角度改变时,一级衍射级次的带宽积分平均衍射效率也会发生变化。

对于含有衍射光学元件的折衍射混合光学系统,衍射效率会影响光学系统的成像质量。因此,为了准确评价折衍射光学系统的成像质量,光学系统的实际 MTF 值采用理论 MTF 值与带宽积分平均衍射效率的乘积表示:

$$MTF(f_x, f_y) = \bar{\eta}_1 \cdot MTF_0(f_x, f_y) \quad (3)$$

式中, f_x 和 f_y 表示光学系统的空间频率;

$MTF_0(f_x, f_y)$ 表示光学系统的理论 MTF 值, 可通过光学设计软件获得。

3 头盔显示器的目镜设计

基于传统 Erfle 目镜的结构形式, 根据设定的光学系统结构参数修改光学系统的视场角, 增加光学系统的出瞳距和出瞳直径, 从而不断优化光学系统的畸变和 MTF 等成像质量参数。图 1 所示为设计出的传统折射式头盔显示目镜结构。其中, 各透镜表面均为球面。系统的出瞳距为 27 mm, 满足大于 25 mm 的要求; 总长度为 45 mm, 满足小于 50 mm 的要求; 重量为 81g。

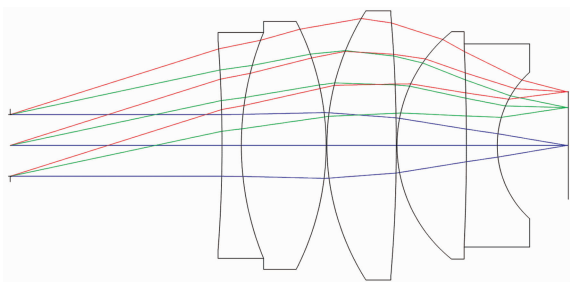


图 1 折射式目镜结构

在传统全折射式目镜结构的基础上, 为了进一步减轻系统重量, 将第二组双胶合透镜用一个弯月形厚透镜替代; 为了进一步校正系统色差, 在中间正透镜的前表面添加衍射面, 而其它透镜表面仍为球面, 得到了折衍射混合式头盔目镜结构(见图 2)。系统的出瞳距为 27 mm, 满足大于 25 mm 的要求; 总长度为 40

mm, 满足小于 50 mm 的要求; 重量为 62 g。与传统的全折射式目镜结构相比, 折衍射头盔显示器目镜的总长度减小了 11%, 重量大概减轻了 23%。

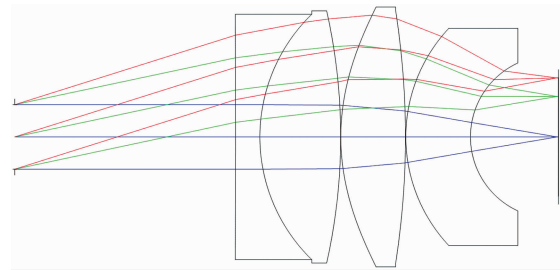


图 2 折衍射目镜结构

下面对两种目镜的成像质量进行对比分析。图 3 所示为两种不同结构形式的头盔显示器目镜的 MTF 曲线。通过对比发现, 在 40 lp/mm 空间频率处, 传统折射式目镜的中心视场和轴外视场的 MTF 值高于 0.25, 满足设计指标要求; 折衍射目镜中心视场的 MTF 值高于 0.70, 轴外视场的 MTF 值均高于 0.30, 且各个视场的 MTF 曲线更加平缓。

系统的场曲与畸变如图 4 所示。可以看出, 传统折射式目镜的场曲最大值为 0.18 mm, 畸变最大值为 8.31%; 折衍射目镜的场曲最大值为 0.22 mm, 畸变最大值为 3.37% (比前者减小了 59.45%)。系统的垂轴像差如图 5 所示。通过对比发现, 折衍射目镜的垂轴像差曲线变化更加缓慢, 像差较好。

综上所述, 由五片透镜组成的传统折射式

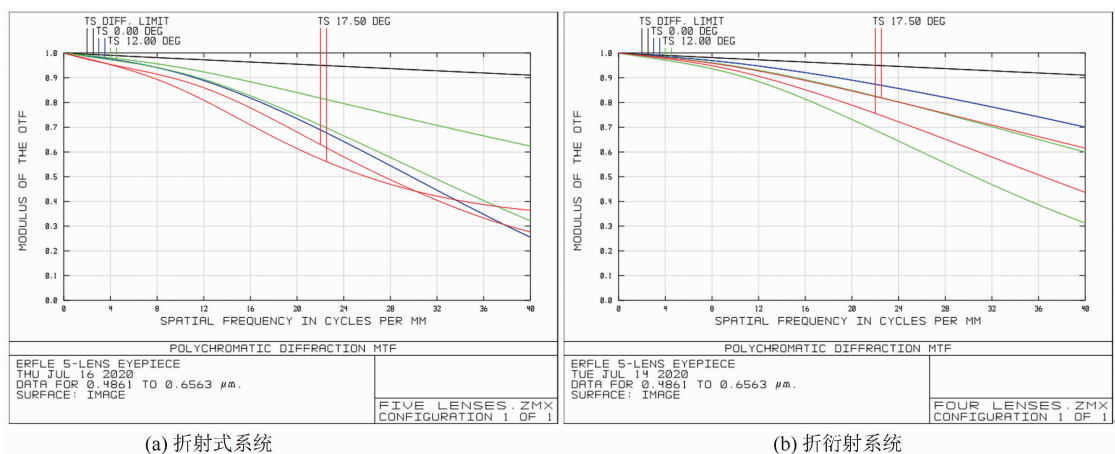


图 3 系统的 MTF 曲线

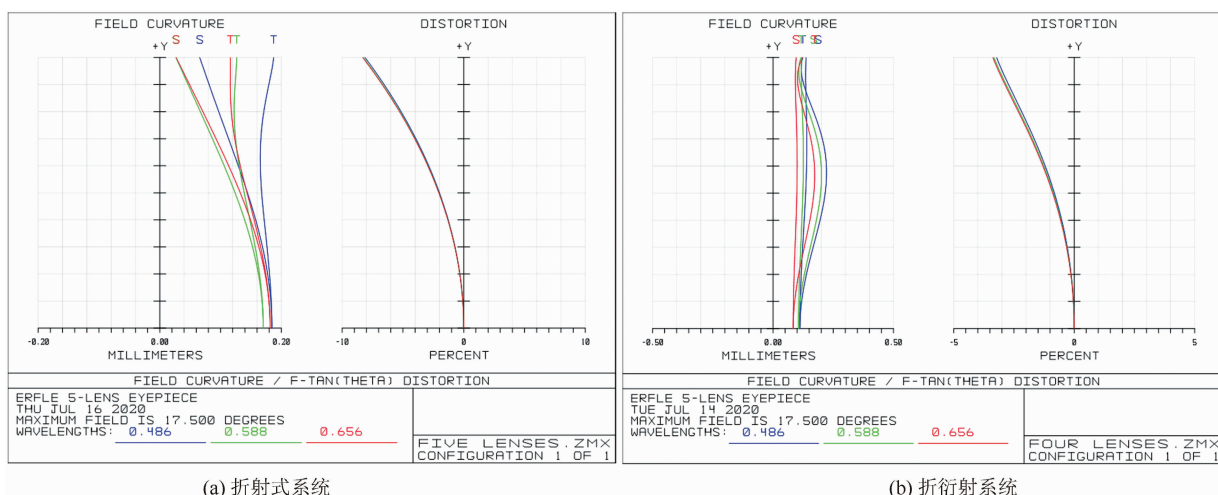


图 4 系统的场曲与畸变

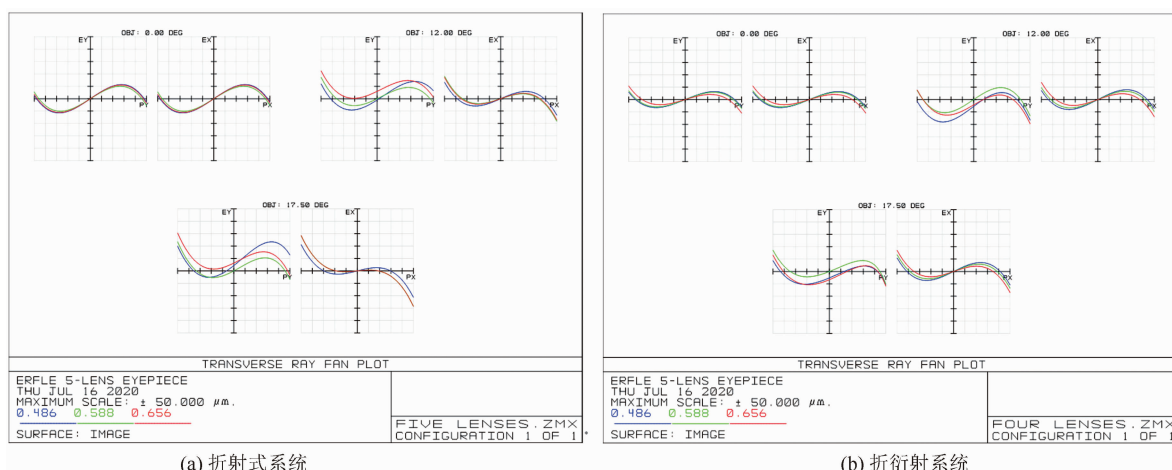


图 5 垂轴像差

头盔显示目镜结构可以实现设计的结构参数和技术指标要求。在此基础上减少一片透镜并添加一个衍射面后，得到的折衍射混合目镜的成像质量更好，系统结构更加紧凑且重量更轻。因此它更适用于对重量及像质要求较高的场合。表 1 列出了这两种系统的具体参数。

表 1 系统参数对比

参数	全折射系统	折衍射系统
出瞳直径/mm	8	8
出瞳距/mm	27	27
总长度/mm	45	40
最大畸变/%	8.31	3.37
重量/g	81	62
中心视场的 MTF	>0.25	>0.70
MTF 最小值	0.25	0.30

4 衍射光学元件的特性分析

图 2 所示的系统结构中，在中间正透镜的前表面添加了衍射面。衍射光学元件的位相与口径的关系如图 6 所示，最小周期宽度为 $43\ \mu\text{m}$ ，可以采用现有的加工技术进行加工制造。利用式(2)算得的衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率与入射角度的关系如图 7 所示。衍射面的最小入射角度为 0° ，最大入射角度为 30° 。在最小和最大入射角度下，带宽积分平均衍射效率分别为 96.48% 和 91.82%。

图 3 中的数据是利用光学设计软件直接得到的光学系统的理论 MTF 值。而实际上，衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率会影响系统的 MTF 值。利用式(3)可以得到，对于轴上

视场, 系统的实际 MTF 值高于 0.68, 而最小 MTF 值是在 0.707 视场时出现的。通过 Zemax 软件可以得到此时衍射面的入射角度为 21.69° , 相应的带宽积分平均衍射效率为 94.61%。因此, 系统实际的最小 MTF 值高于 0.28。考虑带宽积分平均衍射效率的影响, 与传统折射式结构相比, 折衍射头盔目镜的 MTF 仍然得到了很大改善。

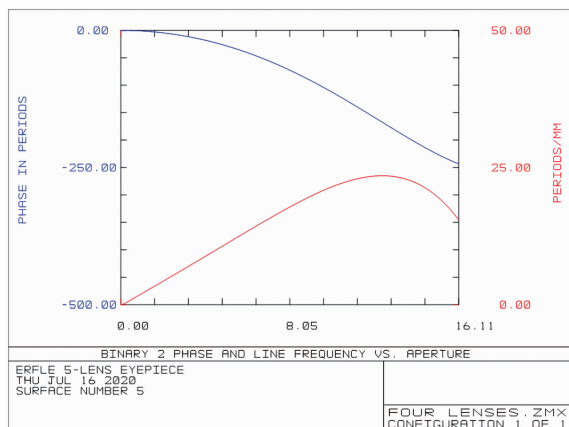


图 6 位相

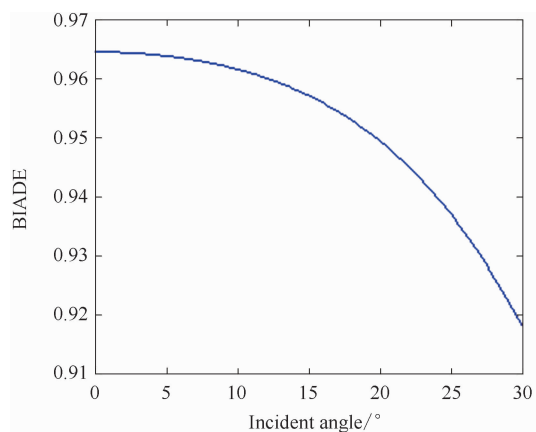


图 7 带宽积分平均衍射效率

5 结论

基于传统 Erffle 透镜的结构特点, 本文设计了可用于头盔显示系统的传统折射式目镜和折衍射目镜。为了便于对不同结构形式目镜的参数和性能进行对比, 两种系统的基本结构参数相同。系统的视场角均为 35° , 出瞳距不小于 25 mm, 出瞳直径为 8 mm。所设计的两种目镜均满足成像指标要求。结果表明, 与传统

折射式结构相比, 折衍射目镜的总长度减小了 11%, 重量减轻了约 23%, 畸变减小了 59.45%。此外, 本文还考虑了所引入的衍射光学元件的带宽积分平均衍射效率对目镜系统 MTF 的影响。在 40 lp/mm 空间频率处, 折衍射头盔目镜轴上视场的 MTF 值和最小 MTF 值分别高于 0.68 和 0.28, 满足设计要求。因此, 该系统可以应用于轻量化要求更高的头盔显示系统。本文研究为后续头盔显示目镜的实际加工提供了理论依据, 也为头盔显示器的总体设计提供了参考。

参考文献

- [1] 白瑜, 邢廷文, 蒋亚东, 等. 基于衍射光学的头盔显示光学系统 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2753-2757.
- [2] 李华, 张新, 王超, 等. 自由曲面机载头盔显示器光学系统设计 [J]. 光学学报, 2014, 34(3): 222-227.
- [3] 刘军, 黄玮. 反射式自由曲面头盔显示器光学系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 150-155.
- [4] 周学鹏, 赵渊明, 常颖. 离轴反射式双通道头盔显示器光学系统设计 [J]. 激光杂志, 2018, 39(6): 98-102.
- [5] 孟禹彤, 朴明旭, 王琦. 折衍射混合环形孔径超薄成像光学系统设计 [J]. 光子学报, 2019, 48(12): 152-161.
- [6] 杨亮亮. 长出瞳距折衍混合目镜系统的设计 [J]. 红外技术, 2019, 41(9): 806-809.
- [7] 李林, 郑贵阳, 吕鑫焱. 基于二元光学元件的 HMD 折/衍混合目镜设计 [J]. 指挥控制与仿真, 2019, 41(5): 131-135.
- [8] 张发强, 樊祥, 朱斌, 等. 折衍混合长波红外光学系统消热差设计 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(4): 1158-1163.
- [9] 阙俊, 崔小强, 李升辉. 基于衍射元件的两档轴向移动式红外变焦光学系统设计 [J]. 光学与光电技术, 2015, 13(2): 91-94.
- [10] 夏寅聪, 杨亮亮, 李婧, 等. 轻小型长出瞳距目镜的设计 [J]. 光电子技术, 2020, 40(2): 129-133.