

文章编号: 1007-2780(2006)05-0478-05

基于 LCoS 的头配显示器光学系统研究

张 文^{1,2}, 安 凯^{1,2}, 冯亚云^{1,2}, 凌志华¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激发态物理国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 头盔式显示器的迅猛发展对系统重量和成像质量方面提出了更高的要求。文章采用 LCoS 作为头配显示器的显示器件, 同时利用衍射光学元件独特的负色散特性和以其任意的相位分布实现对光波面的任意相位调制的特点, 在改进的 Erfle 目镜的基础上引入二元衍射面, 台阶深度为 $0.142 \mu\text{m}$, 总的环带数为 253, 最小特征尺寸为 $3.31 \mu\text{m}$ 。优化设计了具有 30° 视场, 30 mm 有效焦距, 8 mm 瞳径, 25 mm 出瞳距离的目镜系统, 其 MTF 值在全视场内整体上大于 0.25, 并且重量缩小为原 Erfle 目镜的 $1/8$, 大大减轻 HMD 光学系统重量, 并提高了成像质量。

关 键 词: LCoS; 头配显示器; 二元衍射面; 光学设计**中图分类号:** TN873.93; O432.2 **文献标识码:** A

1 引 言

随着信息化社会的飞速发展, 各种小型、轻量、廉价及携带方便的个人用显示器成为当前显示行业发展的焦点。由于头配显示器 (Head Mounted Display, 简称 HMD) 具有大画面、便携、不须手持、可现实在现实视场上同时看到需要的数据以及体验视觉图像变化带来的高临场感等特点, 广泛应用于军事、娱乐、医疗、工程和模拟训练等领域^[1]。头配显示器是由头盔显示器 (Helmet Mounted Display) 发展而来的, 它主要是利用光学系统将微显示器发出的光投影在人的眼前成放大的虚像。LCoS (Liquid Crystal on Silicon) 显示因具有高像素密度、高分辨率、高开口率、高亮度、轻薄及成本低等优点^[2,3], 成为发展 HMD 的首选显示器件。在采用 LCoS 技术的 HMD 中, 光学系统成为决定观看视角、成像质量、系统体积及重量最为重要的因素^[4]。由于衍射光学元件可实现对光波面的任意相位调制, 在改善系统成像质量、减小系统体积和重量以及降低成本等方面具有传统光学元件无可比拟的优势^[5~7], 所以本文在介绍 LCoS 技术的基础上引入衍射光学元件优化设

计了一种新的 HMD 目镜光学系统, 采用 LCoS 技术和这种光学系统将大大提高 HMD 的成像质量, 减小系统重量。

2 LCoS 技术

HMD 中的显示器件经历了从小型 CRT (阴极射线管) 到 LCD (液晶显示), 再到 LCoS 的发展过程。LCoS 是一种新型的微显示技术, 它采用半导体 CMOS 集成电路芯片作为反射式 LCD 的基片, CMOS 芯片和玻璃基板间夹有液晶薄层, 控制电路置于显示像素的后面, 可以提高开口率, 从而实现更大的光输出。LCoS 面板结构如图 1 所示。

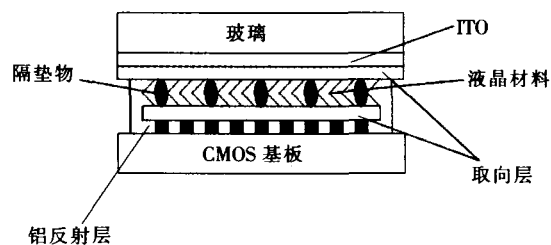


图 1 LCoS 面板结构图

Fig. 1 Structure diagram of LCoS panel

收稿日期: 2006-04-07; 修订日期: 2006-05-26

基金项目: 国家“973”资助项目 (No. 2003CB314704)

液晶材料位于 CMOS 基板与 ITO 玻璃板之间,并有隔垫物支撑使液晶盒保持一定的液晶层间隙及盒厚的均匀性,取向层可以确保液晶分子取向一致。控制电路包含在 CMOS 基板之上,并且其表层涂有铝反射层。玻璃基板用以保护液晶和稳定液晶的位置^[8,9]。在上下二层基板中间散布隔垫物用来加以隔绝后,再填充液晶于基板间形成光阀,由电路的开关驱动液晶分子的旋转,从而决定画面的明与暗。

在构成 HMD 的 LCoS 微显示器中所采用的是扭曲向列相液晶材料。当电压加在液晶分子上时,液晶分子会发生翻转。由光源发出的光束首先通过一个起偏器以使光波传播保持特定的偏振方向,然后在液晶介质中光的偏振方向随着液晶分子的扭曲方向的变化而变化,接着光束又经过 LCoS 反射表面的定向反射,再穿过一个检偏器射出。LCoS 的这种反射式工作方式为 HMD 提供了高清晰度、高分辨力、高对比度的像源。同时采用 LCoS 也使得 HMD 在保证像质的同时耗电量低,价格便宜。单片式投影用 LCoS 的光学引擎如图 2 所示。

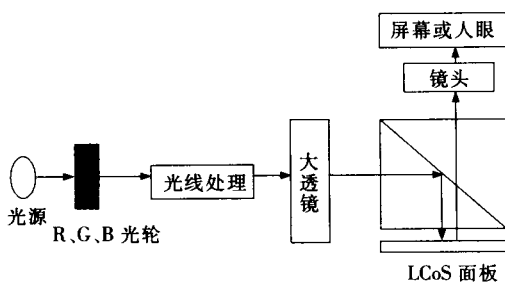


图 2 单片式 LCoS 光学引擎

Fig. 2 Optical engine based on a single LCoS

3 HMD 光学系统

3.1 目镜光学系统设计

HMD 的光学系统主要由目镜系统和中继光学系统组成。目镜光学系统是 HMD 中扩大观看视角、缩小系统体积和减小系统重量方面很重要的部分。HMD 中的目镜光学系统是典型的近目系统,但又不同于显微镜和望远镜中的目镜,它要求有较大的出瞳距离和出瞳直径。人眼的瞳孔直径一般在 2~6 mm,为保证使用者能始终看到图像,HMD 中目镜的出瞳直径不应小于这个范围。

另外为满足某些配带眼镜或防毒面具的使用者,目镜光学系统的出瞳距离不应小于 20 mm。目镜的视场同其焦距及像源直径有关。像源直径确定后,目镜视场越大,焦距就越短,从而系统的相对孔径就越大,系统就越难设计^[10~12]。综合考虑 HMD 的应用要求和设计难度,这里确定目镜的设计参数视场角为 30°,有效焦距为 30 mm,出瞳直径为 8 mm,出瞳距离为 25 mm。

传统的 Erfle 目镜系统是使用较多的接目系统。它是由两个双胶合透镜和一个双凸透镜组成,如图 3 所示,它的视场角为 30°,有效焦距为 30 mm,其中第 1 个双胶合透镜和双凸透镜负责光焦度分配,第 2 个双胶合透镜用来校正场曲和增加出瞳距离。由于该目镜仅玻璃材料的总厚度就为 70 mm,重为 391 g,使用它无法把 HMD 的重量控制在合适的范围内,所以这里以上述 Erfle 目镜为基础,在保证有效焦距、出瞳直径和视场角不变的情况下,增大出瞳距离,进行如下的优化:

(1)采用两个单透镜来分别取代 Erfle 目镜中靠近出瞳的双胶合透镜和中间的双凸透镜,这样可以在减轻系统重量的同时,以两单透镜的凸面曲率半径和焦距作为变量,在优化函数中加入有效焦距,保证有效焦距不变,进行一级特征优化。优化时考虑到场曲等单色像差的变化,分别给有效焦距设定适当的加权。

(2)采用一个凹面镜来取代另一个双胶合透镜,并以其两个曲面曲率半径和后焦距作为变量,同样在保证有效焦距不变的情况下进行一级特征优化。

(3)由于二元光学面一般需要在平面基底上加工成型,所以在中间的单透镜的平面处引入衍射面^[13],并进行消色差优化以及校正系统垂轴像差和畸变等单色像差的高级优化。后面对衍射面的光学特性进行了较为详细的讨论。

系统中的折射元件均选用 K9 玻璃。采用

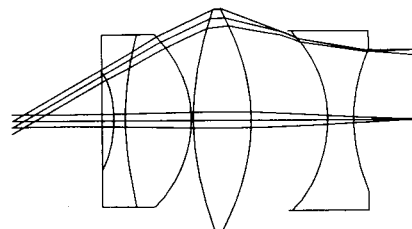


图 3 Erfle 目镜系统

Fig. 3 2D layout of Erfle eyepiece

Zemax 光学设计软件进行设计和优化之后的结构如图 4(a)所示,其中衍射面位于第二个透镜的平面处。图 4(b)给出了该目镜系统在视场角为 0° 、 15° 、 21° 和 30° 对应的调制传递函数(MTF)曲线,从图中可以看到,轴上点以及视场角在 15° 以内的点传递函数非常好,在 40 lp/mm 时轴上点接近 0.7, 15° 处的点也在 0.6 以上;大视场的传递函数同大多数目视系统一样下降较快,但整体上大于 0.25,满足一般应用中 HMD 的分辨率要求。同时该目镜的重量减小到 50 g 左右,大约为原 Erfle 目镜的 $1/8$,显著地减轻了系统整体重量。

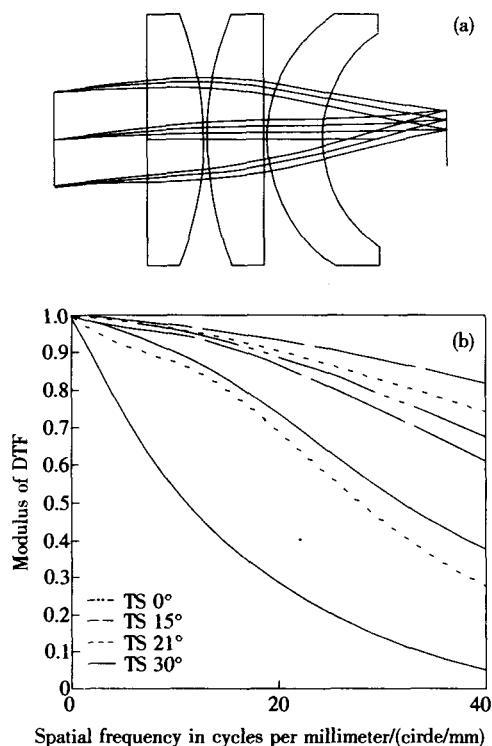


图 4 (a) 改进后的目镜系统;(b) 改进后目镜系统的 MTF 曲线。

Fig. 4 (a) 2D layout of the new eyepiece;(b) the modulation transfer function (MTF) of the new eyepiece.

3.2 采用 LCoS 的 HMD 光学系统

HMD 不仅要求光学系统具有大视场、大出瞳直径和大出瞳距离,同时光学系统还必须同微显示器 LCoS 的尺寸相匹配。由于微显示器尺寸越小,成本就越低。当前生产的 LCoS 大多小于 2.54 cm 。对于仅由目镜构成的光学系统中,

在视场角一定的情况下,微显示器的尺寸越小,对应的目镜焦距就越小,否则两者无法相匹配。如果简单缩小焦距使其满足匹配要求,则出瞳直径和出瞳距离都将大大减小;若两者仍能满足 HMD 要求,则系统的结构和相差将变得不能接受。因此,为解决目镜与小尺寸的 LCoS 相匹配的问题,这里我们引入一中继系统,与目镜共同构成 HMD 光学系统。

由于 LCoS 采用反射方式来调节由光源发射的光信号,所以需要采用一个如图 5 所示的光学系统。它是由目镜系统(Eyepiece)、场镜(Field lens)、中继系统(Relay system)、LCoS 以及光源等组成。其中中继系统由一反射镜和一个偏振光束分光器(Polarization Beam Splitter, PBS)构成。反射镜一方面可以对 LCoS 的图像进行适当的放大,使其能够同后接的目镜相匹配,同时也可以给 LCoS 微显示器提供放置照明光源的空间。PBS 是由一套两个屋脊形的棱镜构成,该棱镜带有一极化涂层并装配成立方体状,其任务是将入射光分成平行和垂直偏振的光,然后将其导引至下游的 LCoS 晶片上。光源放置在 PBS 的上方。凹面反射镜提供适当的光焦度,对 LCoS 微显示器显示的图像进行一定程度的放大,放大倍率由 LCoS 的尺寸和目镜系统的物方视场来决定。连接目镜和中继光学系统时在目镜的焦平面附近加入了一场镜,其目的是用于收集边缘视场的成像光束,同时减小球面反射镜的孔径,并改善整个系统的垂轴像差^[14]。

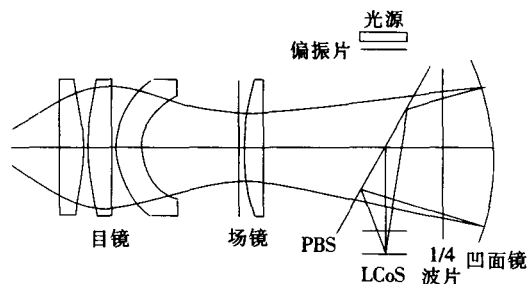


图 5 采用 LCoS HMD 光学系统

Fig. 5 Schematic diagram of optical system used in HMD with LCoS

3.3 二元衍射面的设计和实现

二元光学元件是一种纯相位衍射光学元件,为得到高衍射效率,一般做成多相位阶数的浮雕结构。一般使用 N 个模版可得到 $L=2^N$ 个相位

阶数,其衍射效率为^[15]: $\eta = |\sin(\pi/L)/(\pi/L)|^2$ 。计算可知,当 $L = 2, 4, 8, 16$ 时,分别有 $\eta = 40.5\%、81\%、94.9\%$ 和 98.6% 。

一般情况下,二元光学元件多在单色光下使用,但正因它是一个色散元件,具有不同于常规元件的色散特性,故可在折射光学系统中同时校正球差和色差,构成混合光学系统,以常规折射元件的曲面提供大部分的聚焦功能,再利用表面上的浮雕相位波带结构校正正像差。

设计中的衍射面位于第二个透镜的平面处,采用 ZEMAX 光学设计软件中具有旋转对称相位分布的 Binary optic 2 面型,其对应的相位分布函数为^[16]:

$$\varphi(r) = \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \alpha_4 r^8 \dots$$

其中 r 为衍射面的归一化半径坐标。 α_1 为二次相位系数,一般用来校正系统的色差,后面的非球面项用来校正系统的高级像差。由上面计算得知,刻蚀阶数为 8 时,衍射效率已达 95%,能够满足要求。这里只取前 4 项,上式可表示为:

$$\varphi(r) = \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \alpha_4 r^8$$

最大的环带数 K_{\max} 表示为:

$$K_{\max} = \text{Int} \left[\frac{\alpha_1 r_0^2 + \alpha_2 r_0^4 + \alpha_3 r_0^6 + \alpha_4 r_0^8}{2\pi} \right]$$

其中 r_0 为衍射面的归一化半径,即衍射面的半径与设计过程中 ZEMAX 软件中归一化半径 R 的比值。当刻蚀台阶数为 8 时,每个台阶的深度为:

$$d = \lambda_d / 8(n - 1)$$

其中 n 为基底材料的折射率, λ_d 为工作波段的中心波长。

本文中选用的透镜材料为 K9 玻璃, $n = 1.51630$,工作波段为可见光波段, $\lambda_d = 587 \text{ nm}$ 。设计时 ZEMAX 中的归一化半径为 100 mm,衍射面的半径为 6.7 mm,所以衍射面的归一化半径为 0.067。衍射面的参数 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 和 α_4 分别为 $-1.09162 \times 10^6, 3.29304 \times 10^8, -6.47632 \times 10^{10}$ 和 5.13275×10^{12} 。经过计算得到,台阶深度为 $0.142 \mu\text{m}$,总的环带数为 253,当刻蚀台阶数为 8 时,最小特征尺寸为 $3.31 \mu\text{m}$,这对现有的制作工艺来说并不是问题。

4 结 论

现代的 HMD 要求光学系统在具备大视场、大出瞳直径和大出瞳距离的基础上尽量减小系统的重量和体积。本文利用了衍射器件的负色散和可对波面进行任意整形的特点,在传统光学系统中引入衍射面,设计了基于 LCoS 的 HMD 目镜光学系统。该目镜像差良好,在视场、出瞳直径和出瞳距离方面满足 HMD 显示的要求,同时结构大大简化,质量和尺寸比传统的 Erfle 目镜大大减小。中继反射镜可以实现小尺寸的 LCoS 像与后面的目镜相匹配,并且为 LCoS 微显示器提供了放置照明光源的空间。在引入中继反射镜后和目镜光学系统构成 HMD 的光学系统,能满足大多数 LCoS 头盔显示的需要。

参 考 文 献:

- [1] 张慧娟. 用于头盔显示器的折/衍混合全塑料目镜 [J]. 中国激光, 2005, 32(6): 856-859.
- [2] 黄锡珉. LCOS 技术的发展 [J]. 液晶与显示, 2002, 17(1): 1-5.
- [3] 刘艳艳, 耿卫东, 代永平, 等. 时序彩色 LCoS 数据接口的优化设计 [J]. 液晶与显示, 2006, 21(1): 53-57.
- [4] Zhao Qiu-Ling, Wang Zhao-Qi, Guo Huan-Qing, et al. Head-mounted display with LCOS using diffractive optical element [J]. Optik, 2004, 115(1): 11-14.
- [5] Michael D, Missig G, Morris M. Diffractive optics applied to eyepiece design [J]. Appl. Opt., 1995, 34(14): 2452-2461.
- [6] 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.
- [7] 孙强, 王肇圻, 李凤友, 等. 红外 $3.2 \sim 4.5 \mu\text{m}$ 波段折射/衍射光学系统的减热差设计 [J]. 光学精密工程, 2002, 10(2): 121-125.
- [8] 欧毅, 宋玉龙, 刘明, 等. LCoS 反射层的实验研究 [J]. 液晶与显示, 2005, 20(6): 554-557.
- [9] 张继艳, 刘伟奇, 柳华, 等. 高性能 LCoS 投影系统光引擎 [J]. 液晶与显示, 2005, 20(6): 539-543.
- [10] Rolland Jannick P, Cakmakci Ozan. The past, present, and future of head-mounted display designs [J]. Proc. SPIE, 2006, 6224: 368-377.

- [11] Havig Paul, McIntire John, Swinn Mathew. Effects on task performance due to placement of a monocular HMD [J]. *Proc. SPIE*, 2005, 6224: 622407.
- [12] Ong Hiap, Woodard Ollie, Cheong Ngwe, *et al.* A normally black, high contrast, wide symmetrical viewing angle AMLCD for military Head Mounted Displays (HMDs) and other viewer applications [J]. *Proc. SPIE*, 2006, 6224: 62240Q.
- [13] Huxford Roger B. Wide-FOV head-mounted display using hybrid optics [J]. *Proc. SPIE*, 2004, 5249: 230-237.
- [14] 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.
- [15] 金国藩, 严瑛白, 邬敏贤. 二元光学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 23-25.
- [16] Focus Software. ZEMAX Optical Design Program User's Guide [R]. Tucson, AZ 85731-8228 USA. Version 9.0: 166-189.

Optical Research of Head Mounted Display with LCoS

ZHANG Wen^{1,2}, FENG Ya-yun^{1,2}, LING Zhi-hua¹

(1. 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

As the head mounted display has been progressing at a rapid rate in recent years, the demand for system of high performance and light weight is stronger and stronger. In this paper, LCoS is used as the display element in HMD for its great developing potential for its low cost and high performances in optical efficiency. The diffractive optical element, with the negative dispersive characteristic and the random phase distributing to realize random phase modulation for wave-front, is also used in our design and its depth of the step, the number of total periods and the minimum character size are $0.142 \mu\text{m}$, $253 \mu\text{m}$ and $3.31 \mu\text{m}$, respectively. An eyepiece of 40° field-of-view (FOV), 30 mm effective focal length, 8 mm exit pupil size and 25 mm exit pupil is designed, with MTF value > 0.25 in the full field of view and the weight is reduced to $1/8$ in comparison with the Erfle eyepiece, which conduces to a head mounted display of light weight and high performance.

Key words: LCoS; head mounted display; binary optical element; optical design

作者简介: 张文(1981—), 男, 湖北随州人, 硕士研究生, 研究方向为液晶物理与显示器件。