

双次棱镜耦合输入全息波导显示系统设计

王彦¹, 康明武¹, 闫占军^{1,2}, 谢意¹

(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: 提出一种双次棱镜耦合输入全息波导显示系统, 介绍了其工作原理, 设计分析了双次棱镜耦合输入消色差原理, 并对模型做出仿真分析。仿真结果表明, 该系统视场角为 $24^\circ \times 20^\circ$, 出瞳直径为 40 mm, 畸变小于 2%, 全视场 MTF 在 30 lp/mm 处大于 0.7, 满足光学系统的成像要求。

关键词: 全息波导; 显示系统; 棱镜; 衍射

中图分类号: V271.4; TN814

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2014)04-0073-04

Design of a Holographic Waveguide Display System Using Twice Prism Coupled Input

WANG Yan¹, KANG Ming-wu¹, YAN Zhan-jun^{1,2}, XIE Yi¹

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

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

Abstract: A holographic waveguide display system using twice prisms for coupled input was proposed. The working principle of this system was introduced, the achromatic principle of the twice prism coupled input was designed and analyzed, and simulation analysis on the model was presented. The simulation results demonstrate that the system processes a FOV of $24^\circ \times 20^\circ$, an exit pupil diameter of 40 mm, the distortion is less than 2%, and the MTF is higher than 0.7 at the spatial frequency of 30 lp/mm across the entire FOV, which satisfies the requirements of an optical imaging system.

Key words: holographic waveguide; display system; prism; diffraction

0 引言

在过去的几十年里,全息波导(WGH)显示技术有了长足的发展与进步,并得到了广泛的应用^[1-2]。由于采用全息波导技术的头盔显示系统具有体积小、重量轻、大出瞳、大视场等诸多优点^[3],全息波导显示技术成为了新一代微型显示系统的主要发展方向^[4-5]。

全息波导显示技术是基于全息技术和波导技术的新一代准直显示技术,像源发出的光束经准直系统后,耦合输入到全息波导中,沿波导板传播,并在出射全息光栅处形成多次出射。一维扩展的全息波导视场范围较小,无法满足应用条件,因此,需要进行二维扩展。其中,Simmonds 等人在专利中介绍了双波导板结构^[6-7],通过4个体全息光栅结构来实现二维扩展,该

结构采用的全息光栅过多,制作不易,同时耦合效率也不高;Cameron 采用波导杆和波导板组合方式进行二维扩展的全息波导显示系统^[8-9],该结构在看到像源信息的同时还看到明亮的外景光。然而波导的耦合效率较低,且装配困难。

本文提出一种两次耦合输入都采用棱镜的扩展结构,该结构主要包含两个部分,垂直扩展部分和水平扩展两部分,两部分都由输入耦合棱镜和全息波导板组成,通过这种改进耦合方式的方法可以提高耦合效率,同时减少全息光栅个数,易于制作,有较好的可重复性。

1 基本结构与原理

本文提出的全息波导显示扩展结构如图1所示:像源发出的光束经过准直系统后,照射到输入耦合棱镜 P_1 的上表面,进入棱镜后在其倾斜面发生反射并进入波导板中,光束在波导板的上下表面发生全反射,同时沿着波导板方向前进。当光束照射在全息光栅上的

收稿日期:2013-08-23

作者简介:王彦(1988—),男,河南浉池人,硕士生,研究方向为全息波导技术。

入射角满足全息光栅的布拉格角度时,发生衍射,从垂直扩展结构出射。全息波导光栅 H_1 衍射效率较低,每次只有一部分光线出射,其他光线继续沿波导板向前传播,最终形成多次出射,出射的光束再经过耦合棱镜 P_2 耦合输入到水平扩展全息波导板中。同理,在全息光栅 H_2 上也形成多次出射,最终实现二维扩展。

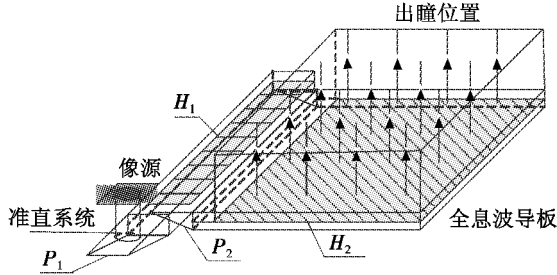


图 1 全息波导显示扩展结构示意图

Fig. 1 Schematic of a holographic waveguide extended structure

2 棱镜和光栅的参数设计

2.1 耦合输入设计

光束在全息波导里面传播,其中最重要的一点是在波导板中满足全反射条件。本文中,经过准直光学系统的光束成一定发散角状态射入耦合棱镜中,在耦合棱镜斜面发生反射,经过反射的光束进入波导板中,在波导板中需要满足全反射条件继续向前传播。角度关系如图 2 所示,棱镜的顶角为 β ,光束的边缘光线和中心光线的夹角为 α ,左边缘视场与棱镜斜边法线夹角为 γ ,斜边镀上反射膜层,光线经过反射到达上表面时,与法线夹角为 i 。

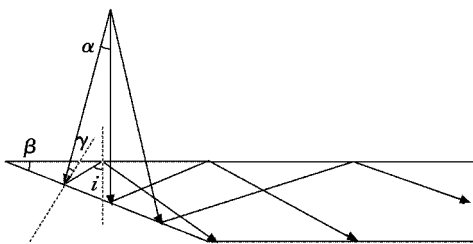


图 2 棱角 β 与视场角关系

Fig. 2 The relationship between prismatic angle and viewing angle

从图中几何关系可以得出,当左边缘视场光线在波导板中满足全反射条件时,中心视场和右边缘视场一定满足全反射条件,此时

$$\sin i \geq \frac{1}{n} \quad (1)$$

由图中几何关系计算可得棱角 β 应满足的关系为

$$\sin(2\beta - \alpha) \geq \frac{1}{n} \quad (2)$$

双次棱镜耦合输入的棱角都需要满足式(2),才

能使光束在两个方向的传播均满足全反射条件,最终形成出射。

2.2 色差校正设计

全息波导显示系统采用的数字像源并非单色光线,其光谱带大约几十纳米,而全息波导的记录光源为单一波长的激光。对于全息波导显示系统,不同波长形成的图像彼此分离,由全息光学元件的高斯成像性质可知,衍射光线方向与入射光线方向的关系为

$$\sin \theta_d = \sin \theta_i \pm \frac{\lambda_c}{m\lambda_o} (\sin \theta_o - \sin \theta_R) \quad (3)$$

式中: θ_o 、 θ_R 、 θ_i 、 θ_d 分别代表物光角度、参考光角度、入射光角度和衍射光角度; λ_c 、 λ_o 分别代表再现波长和记录波长; m 是干涉条纹间隔在化学处理前后变化的比例因子,即, $m = \Lambda'/\Lambda$, Λ' 表示经过体积变化后的周期; \pm 符号当分析虚像时取正值,当分析实像时取负值。

由全息光学元件的高斯成像基本公式得,当入射光线的方向一致,而波长发生变化时,全息光栅衍射光线的衍射角也随之变化,入射光线的波长越长,衍射角就越大。

如图 3 所示,像源发出的光束含有不同的波长成分,经全息光栅衍射后不同波长的光线彼此相互分离,人眼观察到的虚像位置在不同波长衍射光线的反向延长线上会形成像点偏移,且在像面上成像光斑大小也不同。

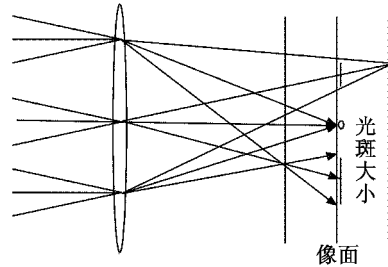


图 3 全息光栅色差对聚焦位置和光斑大小的影响

Fig. 3 The influence of chromatic aberration to the size and position of focusing spot

为了减小色差对成像质量的影响,可以通过合理设计条纹方向,使入射光线和衍射光线镜像对称分布,通过双光栅的色差互补原理来消色差。如图 4 所示,入射光束正常入射到输入耦合全息光栅中,衍射角为 θ ,光束在波导中的传播方向为 x 轴,耦合输入全息光栅 H_1 的相位函数为

$$\phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} (n \sin \theta) x \quad (4)$$

输出全息光栅 H_2 的相位函数为

$$\phi_2 = -\frac{2\pi}{\lambda} (n \sin \theta) x \quad (5)$$

显然

$$\phi_1 + \phi_2 = 0 \quad (6)$$

说明该对称全息波导并不增加相位,即双光栅系统的人射光线与衍射光线镜像对称分布,并且衍射光线的不同波长成分光线方向一致。对于单个光栅,同一入射方向、波长不同的光线衍射角度不同,衍射光线入射到另外一个全息光栅,入射角的变化可以补偿衍射角的变化,使得最后输出的衍射光的方向一致,这样人眼就可以看到一个位置稳定的光点的图像了。

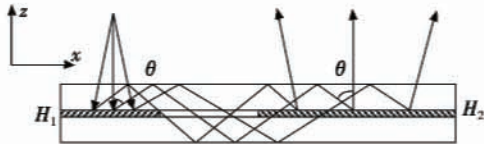


图4 双光栅系统消色差示意图

Fig.4 Schematic of double prisms for achromatic aberration

本系统中,采用同样的双光栅色差互补原理,合理设计两个全息波导元件中的全息光栅,使之光束经过全息光栅的衍射角相等。而棱镜耦合系统并不会对全息光栅的相位进行调制,第一个波导板的全息光栅产生的色差由第二个波导板的全息光栅相消,最终实现两个光栅之间消色差。

2.3 均匀性设计

在全息波导显示系统中,光束均匀性是最重要的考核之一,它描述了光束在出射位置能量的分布情况,若出射光栅的衍射效率一致,则随着光束在波导板内反射次数的增加,每次出射的能量将以指数函数形式递减,明显不满足光束均匀性要求。因此,需合理设计出射光栅的衍射效率,最终使出射光束满足光束均匀性要求。

考虑到光束在波导板中是一边沿着波导板以“之”字型向前传播一边出射,如图5所示,在不考虑吸收损耗的同时,可以得出相邻两束光的光强关系式为

$$I_n = I_{n-1} \frac{1 - \eta_{n-1}}{\eta_{n-1}} \eta_n \quad (7)$$

其中, η_{n-1} 和 η_n 分别为全息光栅第 $n-1$ 次和第 n 次的衍射效率。为了获得均匀的衍射光强,令 $I_n = I_{n-1}$,可得

$$\eta_n - \eta_n \eta_{n-1} - \eta_{n-1} = 0 \quad (8)$$

从而有

$$\eta_n = \frac{\eta_1}{1 - (n-1)\eta_1} \quad (9)$$

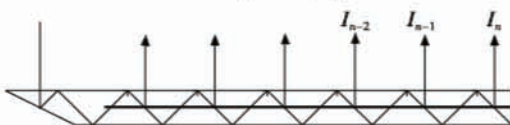


图5 全息波导衍射示意图

Fig.5 Diffraction output of holographic waveguide

理想情况下,随着衍射次数的增加,总光能利用率也会增加,当 n 趋向于无穷大时,总光能利用率理论上

可以达到 100%。但在实际应用中衍射次数有限,应使总能量利用率越高的同时保证光强均匀分布,假设总出射光束数量为 N ,最终出射光束 I_n 完全出射,不再沿波导向内传播,这就意味着入射光束的能量将被平均地分配在 N 束出射光束上,同时获得的总衍射效率为 100%。为满足上述条件,第一次衍射效率为

$$\begin{cases} \eta_1 = \frac{1}{N} \\ \vdots \\ \eta_n = \frac{1}{N-n+1} \end{cases} \quad (10)$$

其中, n 指第 n 次衍射出射 ($n \leq N$),衍射效率会随着衍射次数的增大而递增,第 $N-2$ 次之前出射的衍射效率都不大于 33.3%,较为平均,第 $N-1$ 次出射和第 N 次出射的衍射效率分别为 50% 和 100%。

3 仿真分析

全息波导显示系统用 CODE V 进行仿真分析,整个系统仿真追迹图如图6所示,采用 OLED 光源,对角线尺寸为 15 mm,像素为 800 × 600,选择的波长范围为 514 ~ 547 nm,中心波长为 532 nm,孔径光阑为 6 mm,整个系统具有 40 mm 的出瞳直径,可实现 24° × 20° 视场范围。

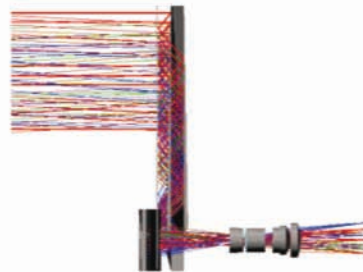


图6 系统仿真追迹图

Fig.6 Simulation of the optical system

光学传递函数是光学系统的重要评价手段,图7所示为 MTF 示意图,由分析结果可知,在 30 lp/mm 处平均 MTF 值大于 70%。

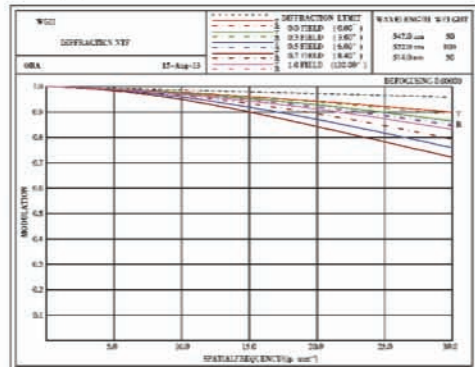


图7 MTF 曲线图

Fig.7 The MTF curves

图8给出了系统点列图,均方根直径不大于 $10.0\ \mu\text{m}$,图9显示在整个视场中畸变不超过2%,图10所示为全视场像差曲线图,全视场像差约为0.025。

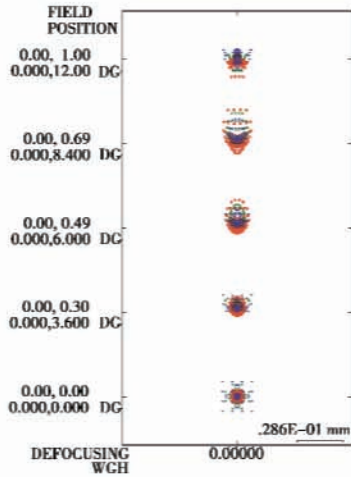


图8 点列图

Fig.8 The spot diagram

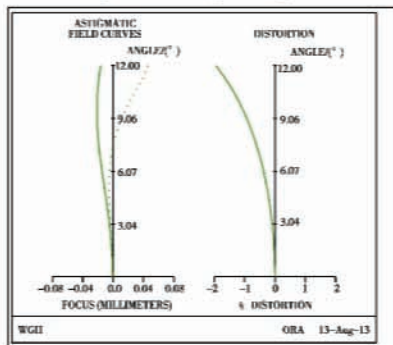


图9 畸变图

Fig.9 The astigmatic field curves and distortion

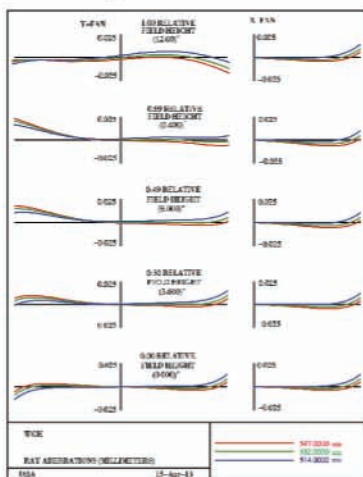


图10 像差曲线图

Fig.10 The curve of ray aberration

结果显示,整个全息波导显示系统具有较高的分辨率、小像差和低畸变。色差主要由准直系统产生,而双棱镜结构和双光栅结构并不会对色差产生影响。因此,该系统可以应用于便携式显示或者头戴显示设备中。

4 结论

本文对双棱镜耦合输入全息波导显示系统的结构和原理进行了具体介绍,对棱镜耦合输入、消色差及均匀性进行了详细设计分析,相比于普通光学结构,该系统具有制作简单、可加工性强、结构紧凑、体积小和重量轻等特点,可应用于便携式显示或者头戴显示设备中。

参考文献

- [1] MUKAWA H, AKUTSU K, MATSUMURA I, et al. A full color eyewear display using holographic planar waveguides [J]. Soc. Inf. Display, 2009, 17(3):185-193.
- [2] PUTILIN A, GUSTOMIASOV I. Application of holographic elements in displays and planar illuminators [J]. SPIE, 66370N-1-7, 2007, doi:10.1117/12.742913.
- [3] HUANG Q, CAULFIELD H J. Waveguide holography and its applications [J]. SPIE, 1991, 1461:303-312.
- [4] CAMERON A. Optical waveguide technology & its application in head-mounted displays [J]. SPIE, 83830E-1, 2012, doi:10.1117/12.923660.
- [5] HOMAN M. The use of optical waveguides in Head Up Display (HUD) applications [J]. SPIE, 87360E-1, 2013, doi:10.1117/12.2014513.
- [6] SIMMONDS M D. A projection display with two plate-like, co-planar waveguides including gratings: WO, 029032 A1 [P]. 2007-03-15.
- [7] SIMMONDS M D. Improvements in or relating to head-mounted display systems: WO, 050504 AI [P]. 2010-08-11.
- [8] CAMERON A. The application of holographic optical waveguide technology to Q-Sight family of helmet-mounted displays [J]. SPIE, 73260H-1-11, 2009, doi: 1117/12.818581.
- [9] SIMMONDS M D, HOWARD R K. Projection display: US, 0285137A1 [P]. 2008-11-20.