

文章编号 2095-1531(2014)05-0731-08

全息波导头盔显示技术

曾飞^{1,2*}, 张新¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所
光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 文章首先阐述了全息波导头盔显示技术的基本原理, 说明了它的技术先进性和可实现性; 然后以几个有代表性的范例介绍了全息波导头盔显示技术的发展水平, 展示了目前全息头盔显示技术所能达到的参数指标; 最后, 在分析了全息波导头盔显示技术的关键技术的基础上, 说明其技术瓶颈并对其未来的发展方向进行了展望。

关键词: 头盔显示; 全息波导; 光学设计; 显示技术

中图分类号: TN873.7 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20140705.0731

Waveguide holographic head-mounted display technology

ZENG Fei^{1,2*}, ZHANG Xin¹

(1. *Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

* *Corresponding author, E-mail: zengfei_008@163.com*

Abstract: The principle of waveguide holographic head-mounted display technology is introduced, which explains its advantages and practicability. Then some examples are shown with detailed indexes and parameters of current waveguide holographic head-mounted display technology. Finally the key enabling technology of waveguide holographic head-mounted display is analyzed, based on which the technology bottleneck and development trend are summarized.

Key words: head-mounted display; waveguide hologram; optical design; display technology

收稿日期: 2014-03-21; 修订日期: 2014-06-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61007009)

1 引言

全息波导头盔显示技术^[1] (Head Mounted Display, HMD)是军用显示技术的最新成果,是集多项先进光学技术于一身的光学显示技术。它利用高亮度微型显示器为图像源,以透明的全息护目镜为显示屏,通过小型化光学系统将图像通过波导结构投射到人眼成像。头盔显示器的符号化图像可以叠加在人眼看到的外界图像上,增加人眼的感知能力及敌我分辨能力,从而实现超视距或夜间协同作战。头盔显示系统本身视场有限,但是伴随头部的转动可以实现超大视场。正是由于以上优点,全息波导头盔显示技术正在迅速发展并受到越来越广泛的应用。

头盔显示系统^[2-5]的发展经历了较长的时间,从最简单的头戴瞄准镜到现在已经发展了第三代。在光学系统的设计方面,也经历了从同轴到离轴和倾斜偏心的变化,从而满足轻小型和人体工学的需求。然而对于头戴显示系统,传统的设计方法在压缩系统的尺寸和重量方面仍然力不从心。全息光波导技术为头盔显示系统提供了全新的解决方案,全息光波导技术摒弃了传统头盔显示系统中复杂的光学系统,利用全息光波导完成图像传导和显像功能。全息波导优化了光学系统的布局,简化了光学系统的结构。因此,全息波导头盔显示系统具有更小的尺寸和重量,受到世界各国的重视。

全息波导头盔显示技术是随着全息元件成像技术的成熟而发展起来的^[6]。随着人们对全息元件成像能力的进一步认识,通过对全息元件成像原理的理论和实践探索,成功完成了全息波导成像系统的设计和应用。本文将从理论入手,介绍全息波导头盔显示技术的发展概况和前景。

2 基本原理

全息光波导技术的基本原理是光的全反射和衍射,如图1,全息波导头盔显示系统主要由微显

示器、全息光栅和平板波导组成。由微显示器产生的图像经过微型准直透镜后变成平行光进入光波导到达全息光栅1,由于全息光栅的衍射效应使平行光改变传输方向从而满足全反射条件并沿波导方向向前无损传播。当平行光传播到全息光栅2时,全反射条件被破坏从而使平行光从全息波导出射,并进入人眼成像。由于全息波导的存在,光学图像可以垂直偏转传播。这不但减小了传播距离,还可保持光学系统的重心在头部以内。同时减少了折镜的使用,从而有利于光学系统的简洁化和轻小型设计。

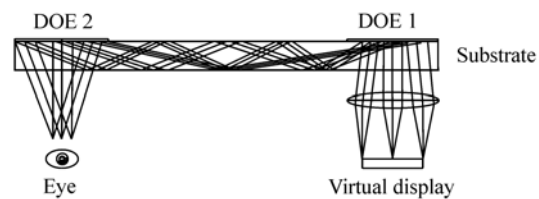


图1 全息波导头盔显示系统示意图

Fig. 1 Illustration of waveguide holographic HMD

当图像以平行光形式在波导中传播时,由于波导板是平行的,因而图像能够保持不发生变形和失真。但是上述结构中各个视场的光线反射次数和落点不同,需要经过精心设计才能保证所有视场都有能量进入人眼成像。为了避免图像不完整并且给眼睛一定的活动空间,通常需要对上述系统扩展出瞳^[7]。扩展出瞳的原理如图2所示,当光线入射出射光栅2时,光能不是一次从波导中出射,而是分多次出射从而多次成像。通过合理设置光栅的衍射效率,能够保证每次出射的光能量相等。这样人眼在光栅的不同位置都能看到图像,从而扩大了出瞳。

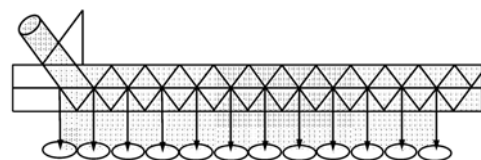


图2 扩展出瞳原理示意图

Fig. 2 Illustration of exit pupil expander

3 全息波导头盔显示系统发展现状

从 20 世纪 70 年代开始,人们就开始研究将全息元件用于成像^[8]。然而全息光学元件的成像规律复杂,将其作为光学元件应用到成像系统中存在较大的困难。1995 年,以色列 Y. Amitai 提出一种全息波导的方案^[9],将全息元件用作耦合元件。这种设计将成像和传像功能分离,降低了对全息元件的设计和加工要求,因而迅速被人们所接受。在 21 世纪初,就出现了多种实用性的全息头盔显示系统方案。

3.1 基于三色复用相差补偿全息光学元件 (MAC-HOE) 的头盔显示系统

这种设计是美国物理光学公司 (Physical Optics Corporation) 提出的^[10]。为了实现全色显示,该系统使用窄带复用全息元件组 H1、H2 消除了光学系统的纵向色差(图 3)。通过对三组单色光栅消除了纵向色差,而横向色差则由每个窄带全息元件的带宽来控制。

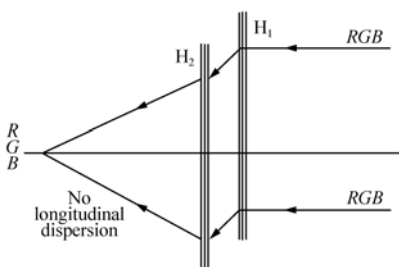


图 3 三色复用相差补偿全息器件

Fig. 3 Three color holographic optical element

通过这种消色差方法,设计了浸没式(图 4)和透射式光学结构。其中,浸没式的光学系统具有较大视场,但是阻碍了对外界的观察。透射式的光学系统利用两个光栅,其中一个用于将平行光耦合进入波导,另一个将波导中的光线耦合到人眼成像。两块光栅均可通过双光束干涉的方式进行刻蚀,因而工艺实现简单。通过单片光栅浸没式成像,物理光学公司展示了全息头盔显示 90°大视场的成像能力。而在透射式系统中后截距较大的情况下,不使用出瞳扩展技术难以保持大的出瞳,因此这种系统实际使用时可能受到出

瞳大小的限制。

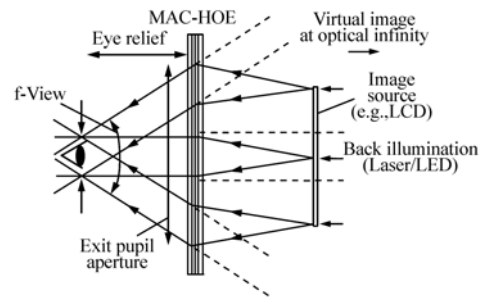


图 4 浸没式全息头盔显示系统

Fig. 4 Immersive holographic HMD system

3.2 基于体全息光栅的 Q-sight™ 技术

Q-sight™是由英国 BAE 公司生产的^[11]应用全息波导头盔显示技术的范例。由于在研制 F16、F22 和 EFA (欧洲战斗机)的平视显示器 (HUD)方面积累的经验,BAE 公司在 2007 年就具有了研制体全息波导的能力,并将其应用到 Q-sight 系列头盔显示器当中。它的好处是减小了头部重量,昼夜无缝切换,并且提升了安全性能。在最新的 Q-sight™ 100 中,使用高亮度 LED 照明 1 920 × 1 080 LCOS 显示器,视场达到了 40° × 30° (单色)和 15 ~ 20° (多色),出瞳 Φ35 mm (轴上点),出瞳距 > 25 mm。在此基础上,BAE 公司计划将单色视场扩大到 50° 以上,并开发真正的全色光栅,将全色视场扩大 40° × 30°。

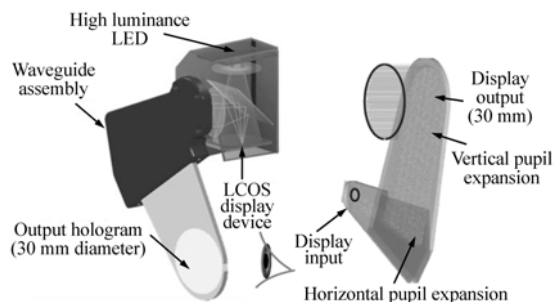


图 5 Q-sight™全息波导头盔显示技术

Fig. 5 Q-sight™ waveguide holographic HMD

Q-sight™的组成如图 5 所示,包括高亮度 LED 光源、LCOS 显示器件、小型化准直镜和全息波导组合镜。高亮度的 LED 在白天 10000Fcd 的背景下对比度达到 1.2:1,在夜晚能在极低光照情况下提供高精度的亮度控制。全息波导组合镜

有两级光栅扩展出瞳,第二级扩展光栅兼有输出图像的作用。整个模块可以装配到 HGU-56/P (美国陆军标准头盔)或 HGU-84/P (美国海军标准头盔)或其它设备上,提供近乎零畸变的高质量图像。因此,在 F35 的头盔显示出现技术问题之后,Q-sight™作为被选为 F35 的头盔显示器。

由于 Q-sight™使用了全息波导,传统的光学设计软件不能对全反射和衍射光栅建模,BAE 公司的设计人员开发了新的软件对其进行设计。同时,为了使全息波导能够实现量产,BAE 公司还开发了模具将全息光栅“印刷”到玻璃基板上,从而减少生成成本。由于解决了设计和生产难题,BAE 公司在全息技术波导技术的应用方面快速发展,BAE 公司已将 Q-sight™全息波导技术应用于 HUD、HMD 和单兵作战等多个领域。

3.3 以色列威兹曼科学院的平板波导技术

以色列威兹曼科学院是较早进行全息波导技术研究的科研单位之一,对全息波导理论进行了系统的研究,针对全息波导成像进行了大量理论和实验研究^[12-14]。在 20 世纪 90 年代及更早的时候,威兹曼科学院的研究主要集在如何制作和优化全息透镜。由于全息透镜具有复杂的像差形式和严重的色散,使用全息透镜无法获得令人满意的成像效果。到了 21 世纪初,他们转向研究线性光栅扩展出瞳的平板波导显示技术。

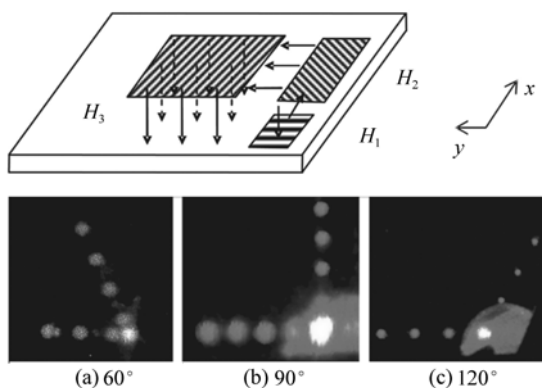


图 6 威兹曼科学院平板波导结构示意图(上)及不同位相造成的光线偏转(下)

Fig.6 Planar optical light guide of Weizmann Institute of Science(top) and deflection angle by different phase(bottom)

威兹曼科学院的平板波导如图 6 所示,它由 3 个光栅组成。其中,光栅 1 为入射光栅,光线仅在其上发生一次衍射。光栅 2 和光栅 3 为扩展光栅,光线在这两个光栅上发生多次衍射从而扩展出瞳。3 个光栅的相位方程不同,附加到光线上的位相使得光线发生偏转(图 6 下)。每个光栅的相位不同,使得光线发生不同方向的偏转。而 3 个光栅满足相位之和为零,因而光线入射和出射方向完全相同。由于位相和为零的条件对所有波长均满足,满足无色差条件,因而可以实现多色成像。

在光栅扩展出瞳的过程中,由于每次衍射的入射光都来自于上一级衍射,因此衍射能量逐渐降低。为了使得图像亮度更加均匀,需要对光栅的衍射效率进行设计。根据光线在平板内对光栅的入射角确定其反射次数,根据反射次数和能量守恒条件得到各级衍射效率。而不同角度的光反射次数不同,为了最优化一般取中心视场的光线进行计算。从实际成像的效果来看,图像的亮度仍然是不均匀的,在衍射效率较低时亮度的均匀性会有所提高。

3.4 Sony 公司的全色体全息波导眼戴显示技术

Sony 公司的全息波导技术^[15]的特点是实现全色显示,如图 7 所示。这种全息波导的视场角为 16° ,镜片透过率为 85%,重量为 120 g。波导由两层基底组成,每层基底厚度为 1.4 mm,间隔为 0.2 mm,总厚为 3 mm,宽为 50 mm。这种眼戴显示被用作 MP4 显示,能够显示 QVGA 视频(320×240)。使用高亮度 LED 照明,显示亮度为 $2\ 400\text{ cd/m}^2$ 。

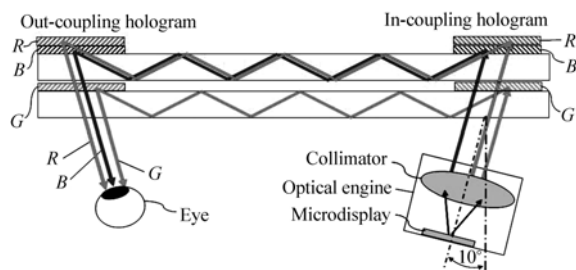


图 7 Sony 全色体全息波导眼戴显示技术

Fig.7 Sony full-color volume holographic eye-wear display

在设计过程中,Sony 的研究人员克服了光栅的色散和波长依赖特性。光栅的色散限制了视场并引起鬼像,而波长依赖则造成图像亮度不匀。通过对称出/入光栅的设计,减少了光学系统的色散。通过最佳入射角设计和显示器驱动管理,增加了图像的均匀性。选用反射式体全息光栅是因为其带宽小,可以利用多个单色光栅单独控制每种色光从而减少色散。为了减少相近色光的串扰,将红蓝光栅置于一个波导内部而绿光栅置于另一波导内部。通过上述优化设计,该系统能够显示高饱和度的彩色图像。该系统的视场受到体全息光栅的限制无法扩大,因而适合于娱乐和家庭使用。

3.5 Lumus 的 LOE 技术

由 Thales Visionix 生产的 Scorpion HMD 用到了一种 Lightguide Optical Element (LOE) 器件,从而使得它成为首款能够真正实现全色显示的头盔显示器^[16]。而这种器件使用的并非全息光栅,而是更加简单的多反射层结构^[17],如图 8 所示。LOE 器件的原理和潜望镜类似,但是使用了多个反射镜扩展出瞳。每个反射镜反射的都是平行光,这些反射镜成同一像。



图 8 Lumus 的 LOE 器件示意图

Fig. 8 Illustration of LOE by Lumus

由于使用了 LOE 器件,系统的成本降低,并且消除了由于衍射效应造成的色散和图像模糊。这种 LOE 器件由 Lumus 公司生产,分为消费和专业多种产品。Scorpion 用到的 PD-18 分辨率为 800×600 ,视场角为 $26^\circ \times 20^\circ$,出瞳为 10 mm,出瞳距为 23 mm。器件厚度为 2.3 mm,重量小于 70 g,亮度为 1 200 fL,显示区透过率为 70%,其余区域透过率为 92%。

Scorpion HMD 原本是为 A-10 运输机所设计的低成本头盔显示器,它也可用于 C-130W、F-16 和 UH-72。由于其优异的性能,Scorpion HMD 赢得了集成到 A-10C 和 F-16C Block 30 的合同 Helmet Mounted Integrated Targeting (HMIT)。经过严格的环境和安全测试,Scorpion HMD 已经进入生产阶段。下一阶段,Scorpion HMD 将会进行改进升级并集成到其它平台上。

3.6 国内研究现状

国内研究全息头盔显示的单位主要有洛阳 613 所、北京理工大学、浙江大学和中国科学院长春光学精密机械与物理研究所等^[18-21]。2011 年,洛阳 613 所闫占军等人利用 Code V 光学设计软件,对双级光栅扩展出瞳方案进行了仿真和设计。2012 年,北京理工大学史锐等人利用多次曝光技术扩大了体全息头盔显示系统的视场角,消除了色散对体全息成像的限制,完成了单色和多色成像实验。同年,浙江大学刘辉等人对体全息波导成像系统和薄膜波导成像系统分别进行了仿真和实验研究。2013 年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所曾飞等人提出利用棱镜光栅混合结构进行全息头盔显示系统设计,从而充分利用两者的优点提高系统效率(图 9)。国内的这些研究机构正在从理论和实验方面迅速发展,逐步开展全息波导头盔显示技术的研究。

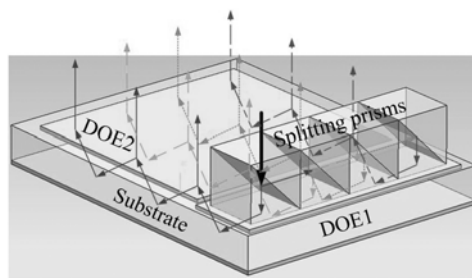


图 9 棱镜光栅波导结构

Fig. 9 Structure of prism-grating waveguide

4 全息波导头盔显示关键技术

全息波导头盔显示关键技术包括光学系统设计、全息波导设计和光栅制备技术。

4.1 光学系统设计

全息波导头盔显示系统具有体积小、重量轻的特点,在光学设计上需要考虑出瞳、视场、分辨率等问题。同时由于全息波导显示效率低,要考虑杂光和散射对于系统对比度的影响^[22]。

平行平板全息波导头盔显示系统是无光聚焦成像系统,最主要的像差来源是由波导的不平行和光栅的不均匀衍射引起的。要减小系统的像差,需要在制作全息波导时严格控制波导公差和光栅刻划工艺。

自由曲面全息波导头盔显示系统的成像原理与普通光学系统类似,其中的自由曲面和光栅都可以看做反射或折射元件。由于自由曲面全息波导具有复杂的面形和光栅结构,成像规律将会比较复杂,需要进行进一步研究。

4.2 全息波导设计

全息波导是系统的关键元件,主要起到耦合、传像和显像作用。全息光栅的设计主要是光栅的栅格形状和衍射效率的设计,以及光栅整体结构的设计。设计具有均匀亮度和高衍射效率的全息光栅,需要运用严格耦合波分析方法,进行电磁场分析。目前已经有一些对全息光栅进行分析的文章,并且有实验结果^[12-14]。由于全息波导的特殊性,这种方法还不够完善,需要在关键技术中作为重点研究对象。

全息波导的结构和布局是光学系统设计的重要考虑因素,特别是对于自由曲面全息波导头盔显示系统。现有的全息波导结构具有多样性,各有其优缺点,要根据实际需要选择合理的结构型式,最终目标是实现自由曲面全息波导显示。

4.3 光栅制备技术

全息光栅的制备是保证系统成像质量的关键。高质量的全息光栅,能够保证高的衍射效率和像质。为了完善全息波导成像方法,众多科研单位研究了多种用于头盔显示的全息光栅^[23-26]。这些光栅包括面光栅(威兹曼科学院)、体全息光栅(Sony、BAE)、倾斜光栅(诺基亚)、区域编码光栅(BLACES、蔡司)等,如图10所示。

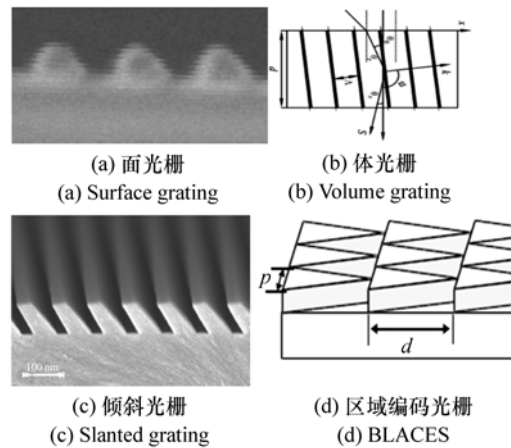


图10 不同的全息光栅

Fig. 10 Different Holographic gratings

不同的全息光栅原理形状性能各异,制作工艺差异也很大。根据目前已经产品化的情况,体全息光栅是一种具有发展前途的全息光栅。然而,要实现全息波导的标准化和产品化,还需要研究光栅的低成本复制工艺。新型的多层薄膜波导具有价格低廉和易于制造的优点。因此,多层薄膜波导^[27]也将会在头盔显示技术中具有较好的发展空间。

5 结束语

全息波导头盔显示技术是最先进的头盔显示技术,是未来头盔显示领域的重点发展对象。在第四代军用战机中,全息波导头盔显示技术已经显示出强大的竞争力并在不断向前发展。目前国内已经有一些单位开展了全息波导头盔显示技术的研究,然而并未发布实用性的产品。

但是,国内已经具有了全息光栅的研发能力,并且在光学镀膜技术方面拥有了强大的能力,因而国内已经具备研发新一代全息波导头盔显示技术的条件。相信在不久的将来,国内也将会研发出全息波导头盔显示系统并装备我国的新型战机,从而逐渐缩小与国际先进水平的差距。

参考文献:

- [1] CAMERON A. The application of holographic optical waveguide technology to Q-Sight™ family of helmet mounted displays [J]. *SPIE*,2009,7326:73260H.
- [2] CAKMAKCI O,ROLLAND J. Head-worn displays;a review[J]. *J. Display Technology*,2006,2(3):199-216.
- [3] 姜洋,孙强,谷立山,等.折/衍混合自由曲面式头戴显示器光学系统设计[J].*光学精密工程*,2011,19(3):508-514
JIANG Y,SUN Q,GU L SH,*et al.*. Design of optical system of HMD using hybrid refractive/diffractive and free-form surfaces[J]. *Opt. Precision Eng.*,2011,19(3):508-514. (in Chinese)
- [4] 卢海平,刘伟奇,康玉思,等.超大视场头盔显示光学系统设计[J].*光学精密工程*,2012,20(5):979-987.
LU H P,LIU W Q,KANG Y S,*et al.*. Design of compact optical system in wide-angle head mounted display[J]. *Opt. Precision Eng.*,2012,20(5):979-987. (in Chinese)
- [5] 范长江,王肇圻,孙强.双层衍射元件在投影式头盔光学系统设计中的应用[J].*光学精密工程*,2007,15(11):1639-1643.
FAN CH J,WANG ZH Q,SUN Q. Design of head-mounted projective optical system using double-layer diffractive optical element[J]. *Opt. Precision Eng.*,2007,15(11):1639-1643. (in Chinese)
- [6] CLOSE D H. Holographic optical elements[J]. *Optical Engineering*,1975,14(5):408-419.
- [7] KRESS B,RAULOT V,GROSSMAN M. Exit pupil expander for wearable see-through displays[J]. *SPIE*,2012,8368:83680D.
- [8] ZHOU H X. Optical properties and mathematical analysis for holographic lens[J]. *Applied Optics*,1983,2(15):37.
- [9] AMITAI Y,REINHOM S,FRIESEM A A. Visor-display design based on planar holographic optics[J]. *Applied Optics*,1995,34(8):1352-1356.
- [10] AYET T M,YU K,TENGARA I,*et al.*. Compact HMD optics based on multiplexed aberration compensated holographic optical elements[J]. *SPIE*,2001,4361:89-97.
- [11] CAMERON A. Optical waveguide technology & its application in head mounted displays[J]. *SPIE*,2012,8383:83830E.
- [12] EISEN L,MEYKLYAR M,GOLUB M,*et al.* Planar configuration for image projection[J]. *Applied Optics*,2006,5(17):4005-4011.
- [13] GURWICH I,WEISS V,EISEN L,*et al.*. Design and experiments of planar optical light guides for virtual image displays [J]. *SPIE*,2003,5182:212-221.
- [14] EISEN L,GOLUB M A,FRIESEM A A. Total internal reflection diffraction grating in conical mounting[J]. *Optics Communications*,2006,261:13-18.
- [15] MUKAWA H,AKUTSU K,MATSUMURA I. A full-color eyewear display using planar waveguides with reflection volume holograms[J]. *J. SID*,2009,17(3):185-193.
- [16] ATAC R. Scorpion HMCS developmental and operational flight test status and results[J]. *SPIE*,2012,8383:838303.
- [17] AMITAI Y. Light guide optical device;US,8004765B2[P]. 2011-08-23.
- [18] YAN Z J,LI W Q,ZHOU Y J,*et al.*. Virtual display design using waveguide hologram in conical mounting configuration [J]. *Optical Engineering*,2011,50(9):094001.
- [19] SHI R,LIU J,ZHAO H ZH,*et al.*. Chromatic dispersion correction in planar waveguide using one-layer volume holograms based on three-step exposure[J]. *Applied Optics*,2012,51(20):4703-4708.
- [20] 刘辉.基于平板波导的头盔显示技术研究[D].杭州:浙江大学,2012.
LIU H. Research on head-mounted display based on planar optical waveguide [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [21] 曾飞,张新,张建萍,等.基于棱镜光栅结构的全息波导头盔显示系统设计[J].*光学学报*,2013,33(9):0909001.
ZENG F,ZHANG X,ZHANG J P,*et al.*. Holographic waveguide head-mounted display system design based on prisms-grating structure[J]. *Acta Optica Sinica*,2013,33(9):0909001. (in Chinese)

- [22] EISEN L, FRIESEM A A, MEYKLYAR M, *et al.*. Color correction in planar optics configurations[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(10):1522-1524.
- [23] SHECHTER R, AMITAI Y, FRIESEM A A. Compact beam expander with linear gratings[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(7):1236-1240.
- [24] HOMAN M. The use of optical waveguides in Head Up Display(HUD) applications[J]. *SPIE*, 2013, 8736:87360E.
- [25] LEVOLA T, LAAKKONEN P. Replicated slanted gratings with a high refractive index material for in and outcoupling of light[J]. *Optics Express*, 2007, 15(55):2067-2074.
- [26] KLEEMANN B H, RUOFF J, ARNOLD R. Area-coded effective medium structures, a new type of grating design[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(13):1617-1619.
- [27] ATAC R, EDEL M. Binocular scorpion helmet-mounted display[J]. *SPIE*, 2011, 8041:80410C.

作者简介:



曾 飞(1983—),男,湖北孝感人,博士研究生,助理研究员,主要从事成像和非成像光学设计方面的研究。E-mail:zeng-fei_008@163.com



张 新(1968—),男,吉林省吉林市人,博士,教授,博士生导师,主要从事非常规复杂光学系统设计等方面的研究。E-mail:optlab@ciomp.ac.cn