

基于棱镜-光栅结构的全息波导头盔显示系统设计

曾 飞^{1,2} 张 新¹ 张建萍¹ 史广维¹ 曲贺盟¹ 张继真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 为了提高全息光学系统的光学效率, 提出用分光棱镜和光栅对图像进行出瞳扩展, 并通过双光栅设计改善光学系统的成像质量。通过光学系统建模, 分析了光学系统成像质量并进行仿真。光学系统的视场为 $20^\circ \times 20^\circ$, 出瞳大小为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 剩余波像差为 0.075λ , 畸变小于 0.01% , 调制传递函数(MTF)接近衍射限。对于零视场光学系统的出瞳具有完全均匀辐照度分布, 光能利用率约 $5\% \sim 6\%$ 。而对于 20° 视场系统出瞳辐照度均匀性略有下降, 光能利用率为 $3\% \sim 4\%$ 。结果表明, 该全息波导系统显著提高了全息波导头盔显示系统的光能利用率。并且棱镜波导系统具有高度可行性, 可以应用于新一代头盔显示技术。

关键词 光学设计; 全息光波导; 出瞳扩展; 头盔显示

中图分类号 TN26 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0909001

Holographic Waveguide Head-Mounted Display System Design Based on Prisms-Grating Structure

Zeng Fei^{1,2} Zhang Xin¹ Zhang Jianping¹ Shi Guangwei¹ Qu Hemeng¹ Zhang Jizhen¹

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

Abstract In order to enhance the optical efficiency, splitting prisms and holographic gratings are used to expand the exit pupil. And double-grating design is used to enhance the image quality. By modeling the system with optical design software, the optical quality is analyzed and simulated. The system has a field of view (FOV) of $20^\circ \times 20^\circ$ and an exit pupil of $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$. The residual wave aberration is less than 0.075λ , the distortion is less than 0.01% , and the modulation transfer function close to the diffraction limit. For the zero FOV, the exit pupil has uniform irradiance distribution with an optical efficiency of $5\% \sim 6\%$. For the FOV of 20° , the irradiance uniformity drops down slightly, and the optical efficiency is $3\% \sim 4\%$. The simulated results show that the holographic waveguide system dramatically improves the optical efficiency of the holographic waveguide head-mounted display (HMD) system. Also the prisms waveguide optical system is highly practical and can be applied to the new generation HMD technology.

Key words optical design; holographic optical waveguide; exit pupil expanding; head-mounted display

OCIS codes 090.2870; 220.4830; 230.5480

1 引 言

20 世纪 90 年代以来, 头盔显示器^[1-3] (HMD) 在军事上得到了广泛的应用。作为作战飞机的一种标准装备, 已经在很大程度上替代了平视显示器 (HUD)。它不但能够显示飞行导航信息, 还能显示机载光电设备的探测信号。在最新的 F-35 作战飞机中, 头盔显示器已成为主显示器并使战斗机具有

24 小时作战能力。

全息光波导技术^[4] 是一项非常有价值的头盔显示新技术。它应用平板波导作为光传播媒质, 使用全息元件作为光路折叠器件, 巧妙地将微显示器中的图像传导到人眼。这种技术通过小型化来减少头盔显示器的尺寸和重量, 有利于进行人体工学设计。

BAE 公司生产的 Q-sight 型 HMD^[5] 已经实现

收稿日期: 2013-01-23; 收到修改稿日期: 2013-03-07

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61007009)

作者简介: 曾 飞(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: zengfei@ciomp.ac.cn

导师简介: 张 新(1968—), 男, 博士, 研究员, 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

商用化,并发展了两代基于全息波导的头盔显示器。新一代的 Q-sight™ 100 型 HMD 的视场角(FOV)为 $40^\circ \times 30^\circ$, 出瞳为 30 mm, 使用单个高亮度 LED 照明的微显示器实现了 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$ 的分辨率。该设备位于眼睛前方, 可显示飞行参数和传感器图像, 质量小于 120 g。由于 F-35 作战飞机的 HMD 存在一些问题, Q-sight 已作为夜视镜(NVG)HMD 的配件成为 F-35 的显示器。除 BAE 公司以外, 还有蔡司公司^[6]、索尼公司^[7]、诺基亚公司^[8] 和威兹曼科学院^[9] 等单位在研发全息光波导头盔显示技术, 并开发了一系列产品。

全息波导头盔显示器中衍射元件的引入, 也引入了较多的问题: 衍射光学的引入造成较大色散, 光学系统的成像质量下降; 由于衍射元件对于有角度的光束衍射效率低, 目前大多数全息波导头盔显示系统的光学效率不到 2%; 衍射元件的衍射杂光严重影响系统成像质量。

为了克服上述问题, 设计了使用分光棱镜作为出瞳扩展元件的头盔显示系统。系统采用双光栅, 利用双光栅对消除光栅色散带来的不利影响。由于采用分光棱镜, 光学系统的光能利用率提高至 3%~4%, 同时减少了杂光。该光学系统具有接近衍射极限的成像质量, 能满足使用要求。

2 全息波导的基本原理

首先对平行平板全息光波导进行理论分析。如图 1 所示, 对微显示器发出的入射光进行准直, 相当于对图像进行线量与角量的转换, 是一个傅里叶变换的过程, 即

$$F(\alpha_x, \alpha_y) = \iint f(x, y) \delta(x - \kappa \alpha_x) \delta(y - \kappa \alpha_y) dx dy, \quad (1)$$

式中入射像点 $f(x, y)$ 经过准直成为平行光束 $F(\alpha_x, \alpha_y)$, 每个给定的点的坐标由直角坐标 (x, y) 变成了准直光束的角坐标 (α_x, α_y) , κ 是相应的转换系数。图 1 中 DOE1 为入射光栅, 其作用是使平行光满足全反射条件而被限制在波导内传播。平行光在平行平板波导中传播时保持方向不变。DOE2 为出射光栅, 其作用是使平行光恢复为 $F(\alpha_x, \alpha_y)$ 并从波导中出射。出射到人眼的光束为平行光, 经过人眼聚焦之后又还原为直角坐标

$$f(x, y) = \iint F(\alpha_x, \alpha_y) \delta(\alpha_x - x/\kappa) \delta(\alpha_y - y/\kappa) d\alpha_x d\alpha_y. \quad (2)$$

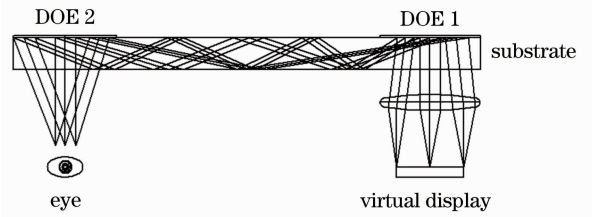


图 1 全息光波导头盔显示系统示意图

Fig.1 Schematic of holographic waveguide HMD

这样, 通过准直、传播和会聚三个过程, 全息波导和人眼共同完成了图像的编码、传输和还原。该结构最早由 Amitai 等^[10] 在 1995 年提出, 并在 2002 年和 2003 年进行了相关实验^[11-12]。然而, 三片式结构由于衍射效率低和杂光严重未达到预期效果, 得到的图像非常模糊。

基于棱镜光栅组合扩展出瞳的系统的结构如图 2 所示。微显示器发出的光线先通过准直透镜准直成为平行光线, 然后经过耦合进入分光棱镜阵列。在分光的过程中, 光束分成多个成像光束, 每个成像光束均能独立成像。分光之后光线进入入射光栅 DOE1, 在此处发生衍射后进入平板波导。在平板波导中, 光线由于衍射而对平板波导上下表面的入射角增大, 因而满足全反射条件并沿波导向 y 正方向传播。当光线到达出射光栅 DOE2 并衍射后, 光线入射角减小, 不满足全反射条件, 因而从波导中出射并进入人眼成像。

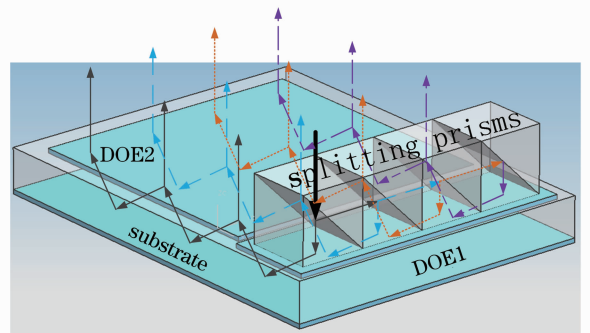


图 2 波导全息系统原理图

Fig.2 Schematic of waveguide hologram system

在该系统中, 入射光栅和出射光栅的结构参数完全相同。根据光栅方程, 当光线从空气中入射光栅时有

$$n_2 \sin \theta_d - n_1 \sin \theta_i = k \frac{\lambda}{d}, \quad (3)$$

式中 n_1 、 n_2 分别是第一介质和第二介质折折射率, θ_i 、 θ_d 分别是入射角和出射角, k 为衍射级次, λ 为光波长, d 为光栅常数。

当光线从出射光栅发生衍射时有

$$n_1 \sin \theta_i - n_2 \sin \theta_d = l \frac{\lambda}{d}. \quad (4)$$

此时,第一介质和第二介质互换,入射角和衍射角互换。要使方程仍然成立,只需衍射级次 $l = -k$ 即可。并且上式的成立条件与 λ 无关,即对于满足衍射条件的波长不存在色差。因而这样的对称式光栅设计有利于减小光栅色差的不利影响。

3 出瞳扩展的基本原理

为了在更大范围内看到光学图像,需要对光学系统扩展出瞳。扩展出瞳有多种方法^[13],包括微透镜阵列法、衍射法、全息光栅法和分光法等。其中,前两种方法用于对会聚光束进行扩展,需要光学系统中具有一个中间像面,在此像面上放置扩展元件。为了减小中间元件的数量,选择对准直光束进行出瞳扩展。因此,选择全息光栅和分光棱镜作为出瞳扩展元件。

全息光栅扩展出瞳如图 3 所示。衍射元件 DOE1 为入射光栅,它将入射光引导到一维扩展光栅 DOE2。在 DOE2 处,入射光束将会发生多次衍射。每次衍射过程中,光束的能量分为两份。透射光束继续向前传播,扩大光学系统在 x 方向的出瞳。衍射光束发生偏转,到达衍射光栅 DOE3。在 DOE2 对光束进行衍射的过程中,通过改变不同位置光栅的衍射效率,可以使每次衍射出来的能量相等,从而在 DOE3 处能够得到强度均匀的图像。在 DOE3 上,通过改变不同位置光栅的衍射效率能在出瞳位置获得多束能量相等的成像光束。这样,就通过三个光栅完成了出瞳的二维扩展过程。

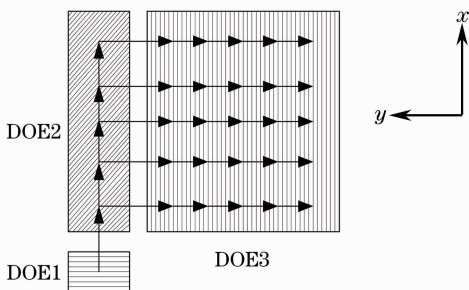


图 3 全息光栅扩展出瞳示意图

Fig. 3 Schematic diagram of exit pupil expander of holographic gratings

另外一种方式是分光棱镜(PBS)作为出瞳扩展元件,其原理与全息光栅类似。如图 4 所示,不同的分光棱镜数量对应不同的分光比,以四片分光棱镜为例进行说明。从图像源 S 发出的光线通过四个分

光棱镜,每个分光棱镜使 1/4 的总能量反射或透射到波导中。由此产生的四条光路携带了相同的图像信息,由于这四条光路在 x 方向排列,在 x 方向的出瞳变为原来的四倍,从而对 x 方向进行了光瞳扩展。根据需要可选择不同数量的分光棱镜,则出瞳的扩展量也将不同。

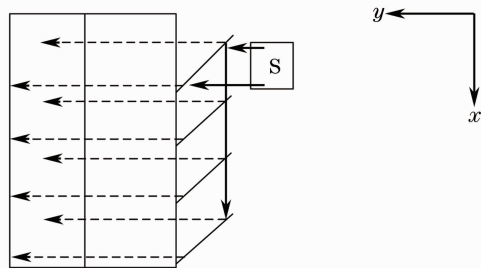


图 4 分光棱镜扩展出瞳示意图

Fig. 4 Schematic diagram of exit pupil expander of PBS

利用分光棱镜扩展出瞳,主要是拥有光学效率方面的优势。经过优化设计的分光膜其光能利用率达到 99% 以上,远高于其他出瞳扩展方式。利用全息光栅作为出瞳扩展元件具有质量轻、体积小等优点。

综合上述两种光瞳扩展元件的优势,本设计中最终选用分光棱镜作为一级出瞳扩展元件,二级出瞳扩展元件则选用全息光栅。分光棱镜与全息光栅相互配合,可以达到提高效率和小型化的优势,使光学系统的综合指标达到最优。

4 光学设计与仿真

在包含全息元件的光学系统中,对称的光栅设计可以较大程度的减少色散及其他像差。这是因为光栅元件的非线性衍射造成的像差难以通过线性反射元件或折射元件补偿,而对称光栅设计则能进行对称性像差补偿,使出射光束和入射光束对称还原。

光学系统选择中等视场($20^\circ \times 20^\circ$)和大出瞳($20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$)设计,在光学设计软件中对光栅透镜系统进行像差分析,在光学仿真软件中对扩展出瞳系统进行照度和均匀性分析。光学系统结构图

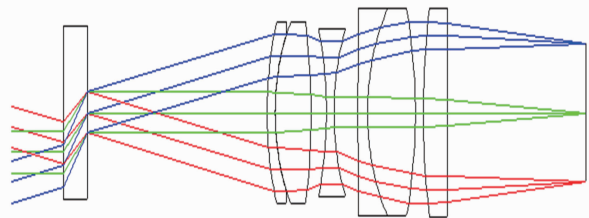


图 5 光学系统结构图

Fig. 5 Configuration of the optical system

如图 5 所示。像差曲线和畸变图如图 6(a)、(b)所示。光学系统的波像差均方根(RMS)值为 0.075λ ,

畸变小于 0.01% , 调制传递函数(MTF)接近衍射极限, 可以满足系统的使用要求。

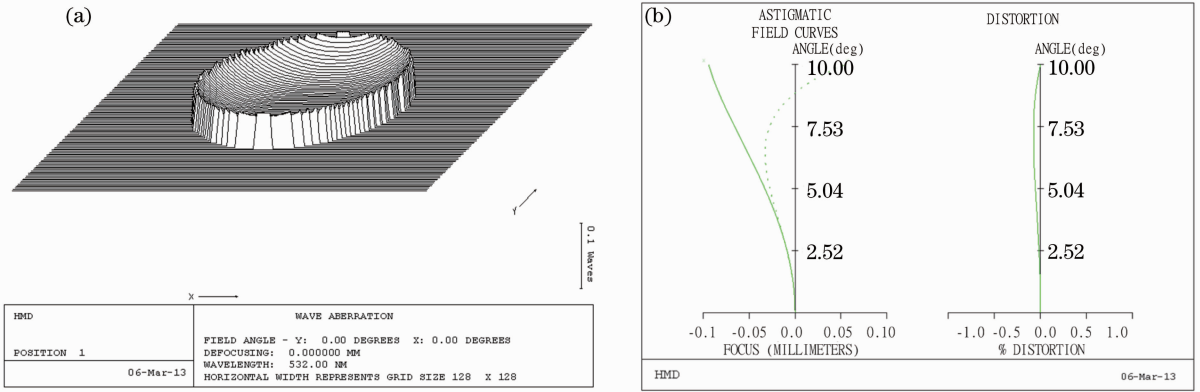


图 6 光学系统的(a)波像差和(b)畸变图

Fig. 6 (a) Wave aberration and (b) distortion of the optical system

全息头盔显示光学系统仿真图如图 7 所示。图中, 由像点发出的球面波经过准直透镜组之后变为平面波, 入射到全息波导表面的条形波导。条形波导由 8 个分光棱镜组成, 沿 x 方向排列, 将平面波平均分为 8 份, 从而完成 x 方向的出瞳扩展。这种结构对于小视场的光学系统适用, 大视场需要大尺寸的分光棱镜, 从而增加尺寸和重量。在分光棱镜中, 光线的夹角会压缩, 因而进一步减小所需棱镜的体积和重量。对于本例, 若采用高折射率材料 ZF7(密度 $\rho=5.2 \text{ g/cm}^3$), 每个分光棱镜的尺寸为 $2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$, 质量增加仅 0.65 g 。

瞳, 由 5 个衍射效率递增的区域组成。当光线入射到全息光栅上时, 一级衍射光将按照光束入射波导的方向出射。剩余的光能量传播到下一级光栅并且再次出射, 直至到达平板末端并被末端的膜层吸收。当光束沿着 y 方向向前传播时, 随着光栅向外衍射能量, 光束的能量逐渐减少。但是光栅的衍射效率逐渐增加, 因而每次出射光束的能量可以保持不变。

在本例中, 假设光栅的衍射光能量全部集中在反射光和一级衍射光, 并且每一级光栅衍射出的能量均为总能量的 20% , 在出瞳处得到均匀的辐照度分布, 如图 8 所示。出瞳由 2 mm 直径的圆变为均匀分布在 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 区域内的 40 个相同直径的圆, 并且每个圆内的能量为总能量的 $1/40$ 。

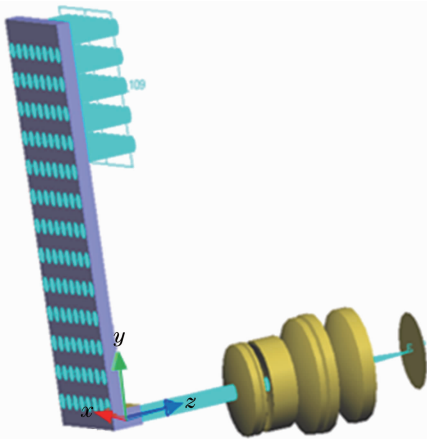


图 7 光学系统仿真图

Fig. 7 Simulation of the optical system

分光棱镜组将平面波反射到平面全息波导中, 位于入射面一个全息光栅使平面波发生衍射, 从正入射平板波导变为在波导中发生全反射从而沿 y 方向向前传播。全息波导的后半部分有另一块全息光栅, 面积为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。它是光学系统的出

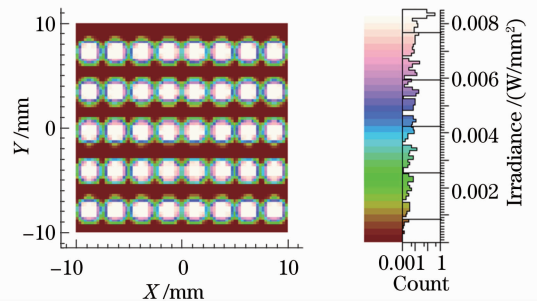


图 8 出瞳处的辐照度分布(0°)

Fig. 8 Irradiance distribution at the exit pupil (0°)

衍射光具有多个级次, 因而会造成一定的能量损失。同时, 由于入射角不同, 不同角度的入射光在光栅的范围内发生全反射和衍射的次数不同, 因而不同角度的入射光形成均匀辐照度需要的光栅结构不同。在这种情况下, 考虑中间角度即 0° 视场入射光在出瞳得到均匀辐照度即可达到最佳的匀化效果。

实际具有一定角度的光线的仿真结果如图 9 所示,出瞳处的辐照度分布如图 10 所示。由于具有较大的视场,总的光能利用率下降为零视场的 70%,出瞳辐照度均匀性略有下降。考虑到各个视场的均匀性不能完全相同,可以认为该系统具备均匀的出瞳辐照度分布。

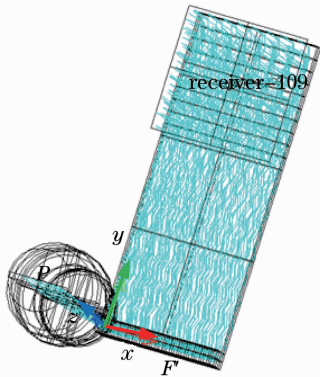


图 9 光线仿真结果(20°,x 轴)

Fig. 9 Simulated results of light (20°, x axis)

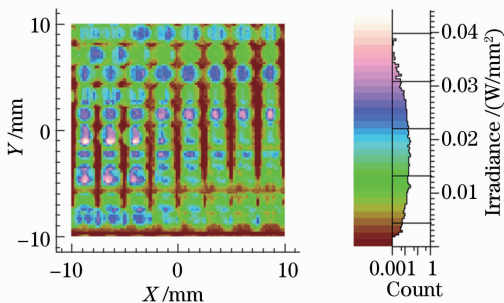


图 10 出瞳处的辐照度分布(20°,x 轴)

Fig. 10 Irradiance distribution at the exit pupil (20°, x axis)

虽然全息波导光学系统中包含出瞳扩展元件,但是其等效系统也是一种长后截距的光学系统。需要注意中继系统的长度不能太长,否则不同视场的光线会变得过分发散。这不但会影响光学系统的紧凑性,还会降低系统的光学性能,如出瞳大小、光能利用率等。同时,对于 x 和 y 方向视场应该注意它们的发散方向不同,由此造成的光能利用率和出瞳大小也不一样。对比图 9 与图 11 可见, x 方向视场的发散角更大,因而其出瞳略有减小。但是仿真结果(图 12)表明垂直视场(y 轴方向)的光能利用率略低(66%)。这是由于波导中光栅的排布是按照 $y-0^\circ$ 视场设计的, y 方向视场的增加会造成反射次数减少从而损失能量。 x 方向反射次数变化较小,因而能量损失较少。

普通采用三级光栅结构的全息头盔显示系统其

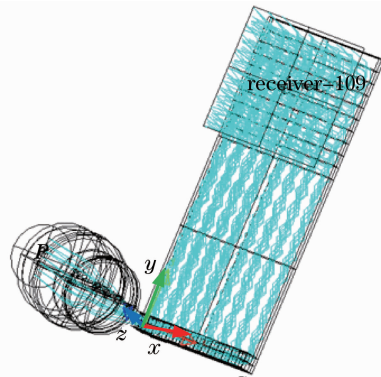


图 11 光线仿真结果(20°,y 轴)

Fig. 11 Simulated results of light (20°, y axis)

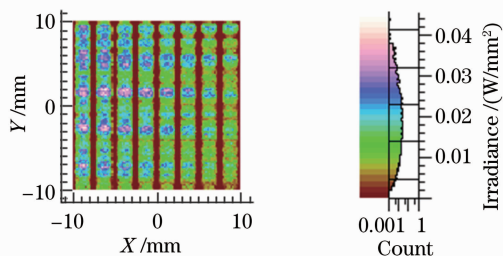


图 12 出瞳处的辐照度分布(20°,y 轴)

Fig. 12 Irradiance distribution at the exit pupil (20°, y axis)

光能利用率约为 1%~2%,主要原因是光栅的衍射效率低。特别是入射光栅,光只在这个面发生一次衍射,衍射效率仅为 25%左右^[9]。后续具有多次衍射过程的全息光栅,其实际衍射效率能够达到 40%。因而提高前级的光能效率可以有效提高系统的整体利用率。

由于采用了分光棱镜作为一级出瞳扩展元件,系统可以将光能利用率提高一倍左右。按照入射光栅光能利用率为 25%,出射光栅光能利用率为 40%,系统其他元件的光能利用率为 80%计算,系统的总光能利用率达到 8%。考虑到实际加工误差和其他损失,系统的光能利用率也能达到 3%~4%。该设计大大提高了系统的能效并且减弱了杂光,因而能在一定程度上提高光学系统成像质量。

5 结 论

利用全息光栅和分光棱镜设计了具有均匀出瞳照度的全息头盔显示系统。这种设计具有轻小和易于集成的特点,并且对该光学系统进行了一系列优化设计。双级衍射光栅的设计,较大程度地减小了光栅带来的像差。利用分光棱镜作为一级出瞳扩展元件,将光学系统的光能利用率提高到 3%~4%。

通过优化设计分光棱镜和光栅参数,可以获得一定视场内出瞳扩大、辐照度均匀的图像。仿真结果表明,该光学系统具有较好的成像效果,可以应用于下一代头盔显示系统设计。

参 考 文 献

- 1 Ozan Cakmakci, Jannick Rolland. Head-worn displays: a review [J]. *J Display Technology*, 2006, 2(3): 199–216.
- 2 Tong Jingbo, Cui Qingfeng, Xue Changxi, *et al.*. Optical design of a off-axis dual-channel helmet mounted display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2662–2667.
佟静波, 崔庆丰, 薛常喜, 等. 离轴双通道头盔显示器光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2662–2667.
- 3 Lu Haiping, Liu Weiqi, Kang Yusi, *et al.*. Design of compact optical system in panoramic three-dimensional head mounted display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0522002.
卢海平, 刘伟奇, 康玉思, 等. 全景三维立体头盔显示光学系统设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0522002.
- 4 Tin M Ayet, Kevin Yu, Indra Tenggara. Compact HMD optics based on multiplexed aberration compensated holographic optical elements [C]. *SPIE*, 2001, 4361: 89–97.
- 5 Alex Cameron. Optical waveguide technology & its application in head mounted displays [C]. *SPIE*, 2012, 8383: 83830E.
- 6 Bernd H Kleemann, Johannes Ruoff, Ralf Arnold. Area-coded effective medium structures, a new type of grating design [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(13): 1617–1619.
- 7 H Mukawa, K Akutsu, I Matsumura. A full-color eyewear display using planar waveguides with reflection volume holograms [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2009, 17(3): 185–193.
- 8 Tapani Levola, Pasi Laakkonen. Replicated slanted gratings with a high refractive index material for in and outcoupling of light [J]. *Opt Express*, 2007, 15(55): 2067–2074.
- 9 Leon Eisen, Michael Meyklyar, Michael Golub, *et al.*. Planar configuration for image projection [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(17): 4005–4011.
- 10 Y Amitai, S Reinhorn, A A Friesem. Visor-display design based on planar holographic optics [J]. *Appl Opt*, 1995, 34(8): 1352–1356.
- 11 Revital Shechter, Yaakov Amitai, Asher A Friesem. Compact beam expander with linear gratings [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(7): 1236–1240.
- 12 I Gurwich, V Weiss, L Eisen, *et al.*. Design and experiments of planar optical light guides for virtual image displays [C]. *SPIE*, 2003, 5182: 212–221.
- 13 B Kress, V Raulot, M Grossman. Exit pupil expander for wearable see-through displays [C]. *SPIE*, 2012, 8368: 83680D.

栏目编辑: 张 腾