

激光与光电子学进展

基于微棱镜阵列光波导的车载抬头显示系统设计

李熠琳¹, 陈建军², 孙秀辉², 江海波², 崔恒清², 张雅琦¹, 尹韶云^{1,2*}¹重庆邮电大学光电工程学院, 重庆 400065;²中国科学院重庆绿色智能技术研究院集成光电技术研究中心, 重庆 400714

摘要 提出了一种基于反射式微棱镜阵列结构的车载波导抬头显示系统,分析了反射式微棱镜阵列结构的倾斜角度、区域数量、排列周期以及入射光宽度等参数对杂散光、出瞳扩展连续性、照度均匀度的影响,给出了最佳参数的设计方法。针对 $10^\circ \times 5^\circ$ 视场角, $130 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 眼动范围的车载要求,进行了具体的波导设计与仿真。结果显示提出系统各视场照度均匀度大于 64%,可实现全彩显示,整体体积小于 6.5 L。提出的结构与方法有望应用于车载抬头显示领域,降低系统体积。

关键词 光学设计; 波导显示; 微棱镜阵列; 全彩显示; 增强现实

中图分类号 TN252

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1722004

Design of Vehicle-Mounted Head-Up Display System Based on Microprism Array Optical Waveguide

Li Yilin¹, Chen Jianjun², Sun Xiuhui², Jiang Haibo², Cui Hengqing², Zhang Yaqi¹, Yin Shaoyun^{1,2*}¹School of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;²Integrated Optoelectronic Technology Research Center, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China

Abstract Herein, a vehicle-mounted head-up display system based on the reflective microprism array waveguide structure is proposed. The effects of the inclination angle, number of regions, arrangement period, and incident light width of the reflective microprism array structure on the stray light, continuity of exit pupil expansion, and uniformity of illumination are analyzed. The design method using the optimal parameters is proposed. In response to the vehicle requirements of a field of view of $10^\circ \times 5^\circ$ and an eyebox of $130 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, a specific optical waveguide design and simulation are performed. Results show that the uniformity of illumination in each field of view of the proposed system is greater than 64% and that a full-color display can be realized. Moreover, the overall volume is less than 6.5 L. The proposed structure and method are expected to be applied to the field of vehicle-mounted head-up display systems to reduce their volumes.

Key words optical design; waveguide display; microprism array; full color display; augmented reality

1 引言

抬头显示器最初主要用于战斗机上,将虚拟图像叠加到飞行员眼前的真实场景中,提高飞行驾驶安全性^[1-3]。近年来,随着汽车仪表智能化发展,基于自由曲面投影光路,具有增强现实功能的抬头显示仪表迅

速发展,并已实现商用^[4]。然而,由于自由曲面投影光路体积较大,限制了增强现实抬头显示(AR-HUD)系统的大规模推广。

波导显示技术通过多次反射(或衍射)扩展出瞳,有望实现 AR-HUD 的小型化,成为人们关注的焦点。耦合光学元件是波导显示的关键,根据波导耦合光学

收稿日期: 2021-12-13; 修回日期: 2021-12-30; 录用日期: 2022-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(62175239)、重庆市自然科学基金(cstc2021jcyj-msxmX0781)、重庆英才计划(CQYC2020058757)

通信作者: *ysy@cigit.ac.cn

元件的形式,可以将波导分为衍射型光波导和几何型光波导。衍射型光波导利用衍射光栅实现光束在波导内的耦合输入和耦合输出,通过调整不同区域衍射光栅的衍射效率实现均匀的出瞳图像亮度。基于表面浮雕光栅(SRG)的波导增强现实显示系统在市场上占大多数,Microsoft和Nokia等公司已经用它开发了相应的增强现实头戴显示器^[5-7]。但SRG往往采用纳米压印方法制作,用于抬头显示器(HUD)系统时需要大面积成型,制作工艺困难。而基于全息体光栅(VHG)的波导增强现实显示系统凭借其独特的衍射性能和工艺成本受到广泛关注^[8-9],传统的VHG记录材料主要有卤化银敏化明胶(SHSG)、重铬酸盐明胶(DCG),后来为了提高成像质量,光聚合物(Photopolymer)材料逐渐成为主流记录材料。BAE、Sony等公司根据VHG开发了相应的增强现实头戴显示器^[10-11],同时,基于VHG的机载增强抬头显示系统也是目前的研究热点^[12-13]。但是,由于衍射光栅对不同波长光束衍射结果不同,实现全彩显示时结构比较复杂^[14-16]。几何型光波导采用多个部分反射镜(PRM)控制光束的耦合输出,通过调整不同位置PRM的反射率实现均匀的出瞳图像亮度,该方法最初是Lumus公司提出,主要应用于近眼显示、头戴显示领域,目前该公司已经开发出了应用于头戴显示领域的一维、二维几何波导^[17-19],但由于部分光线在PRM上存在多次反射,导致杂散光较多,存在重影鬼像和光束能量均匀度较低等问题^[20-21]。

本文提出基于反射式微棱镜阵列结构的波导显示系统,使用微米级反射式棱镜结构作为耦合光学元件,通过调节微棱镜阵列区域中微棱镜排列周期控制反射出波导的光束能量,进而实现光束沿传播方向一维出瞳扩展。该方法基于光学反射原理,可实现彩色显示;同时由于微棱镜结构位于波导下表面,不会干扰光束在波导内的正常传播,有效避免了光线多次反射导致的杂散光问题。

2 波导 AR-HUD 系统光学设计

2.1 工作原理

基于微棱镜阵列的波导 AR-HUD 系统工作原理如图 1 所示,像源发出的成像光束经过准直目镜后成为不同角度的平行光束,进入波导后部分光束经过 PRM 直接透过波导,而剩余光束被反射进入波导中,并按照全反射条件在波导中传播。在此过程中,采用 PRM 作为耦合输入元件,可以使耦合输入部分参与出瞳扩展,减小波导结构体积。微棱镜结构为耦合输出元件,当光束经过微棱镜阵列区域时,由于微棱镜结构之间有一定间隔,传播到微棱镜结构反射斜面的光束被直接反射出波导,剩余光束按照全反射条件在波导内继续传播,经过多个微棱镜阵列区域后光束多次被全部反射出波导,以此实现沿光束传播方向出瞳扩展。扩展光束反射出波导后经挡风玻璃进入人眼,在挡风玻璃前方形成虚像。

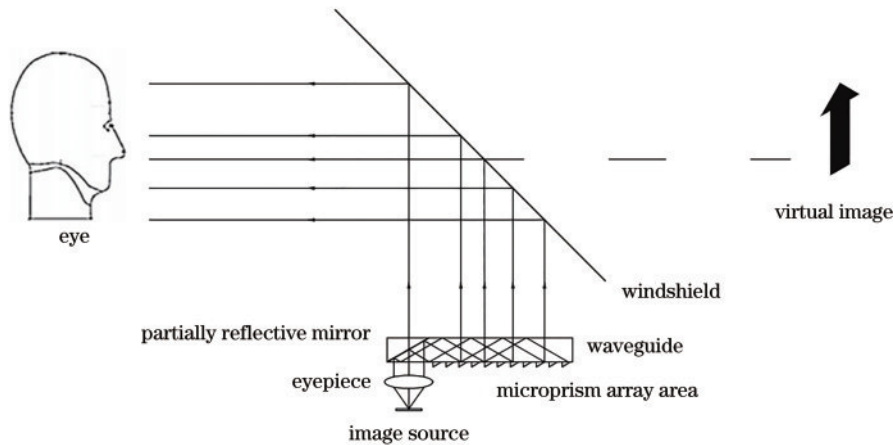


图 1 波导 AR-HUD 原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of waveguide augmented reality head-up display (AR-HUD) principle

2.2 波导结构设计

波导物理结构侧视图如图 2 所示,通过几何关系可以得到光束扩展范围 L 满足如下关系:

$$L = L_T + L_S = E_{\text{EPD}} + 2E_{\text{ERF}} \times \tan \omega_{\text{max}}^{(1)} \quad (1)$$

式中: L_T 为入射光宽度; L_S 为微棱镜阵列区域宽度; E_{EPD} 为出瞳参数(exit pupil diameter); E_{ERF} 为观察距离(eye relief); $\omega_{\text{max}}^{(1)}$ 为最大视场角。

为了实现光束多次扩展,同时保证不同位置光束

能量均匀分布,因此需要使用到多个反射率不同的微棱镜阵列,可知

$$L_S = N \times L_w \quad (2)$$

式中: N 是微棱镜阵列区域划分的数量; L_w 是单个微棱镜阵列区域的宽度。通过式(1)~(2)可得光束扩展范围为

$$L = L_T + N \times L_w \quad (3)$$

通过式(3)可知,为了实现特定光束扩展范围,需要重

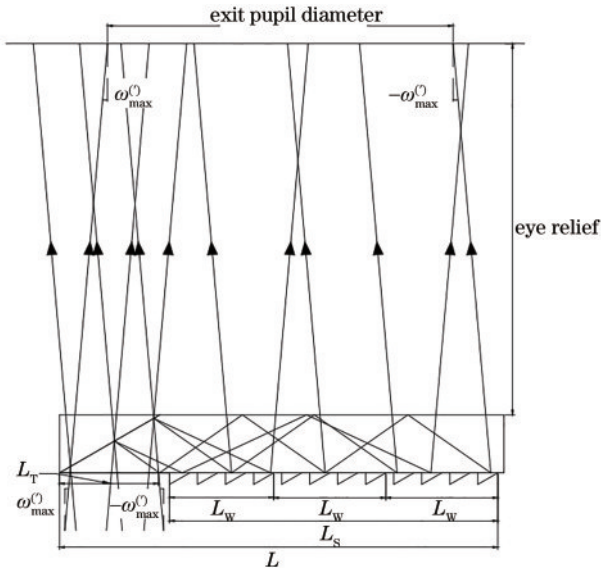


图 2 波导物理结构侧视图

Fig. 2 Side view of waveguide physical structure

点分析与计算入射光宽度 L_T 、微棱镜阵列区域宽度 L_W 、微棱镜阵列区域数量 N ，下文中分别进行详细分析。

2.2.1 入射光宽度 L_T

首先，入射光束必须能够全部照射到 PRM 表面，才能被耦合进入波导中，因此入射光束宽度需要满足如下条件：

$$L_T \leq \frac{H}{\tan \alpha} - H \times \tan \omega, \quad (4)$$

式中， X 为视场角 $\omega^{(i)}$ 的光束左侧边缘光线与波导下表面的交点。当 $D_1 \geq \frac{H}{\tan \alpha}$ 时，可以保证光线只经过 PRM 一次反射，不产生杂散光，此时

$$L_T \leq \frac{H}{\tan \alpha} - H \times \tan \omega - X, \quad (8)$$

图 3(b) 给出了入射光束满足式 (8) 情况下光束在波导内

的传播情况，此时光束传播过程中不会产生杂散光，但是由图可知， $\overline{D_2 D_3}$ 区域无光束经过，此时该区域无光束被耦合出波导进入人眼。若该区域宽度大于人眼瞳孔直径，则人眼观察时会出现图像缺失的问题，因此该区域宽度必须小于人眼瞳孔直径，满足 $D_3 - D_2 \leq 4 \text{ mm}$ ，保证人眼在观察范围内任意位置都能观察到完整图像。根据光线折反射定律以及对应的几何关系，可得

$$\omega = \arcsin \left(\frac{\sin \omega^{(i)}}{n_{\text{glass}}} \right). \quad (5)$$

由 PRM 反射进入波导的光束，经过微棱镜阵列反射出波导实现出瞳扩展。为保证同一视场角的光束在 PRM 部分出射角度与微棱镜阵列区域出射角度保持一致，微棱镜斜面倾角 β 应等于 PRM 倾斜角 α 。同时光束在波导内传播时需满足全反射条件，光束与法线夹角 $2\alpha + \omega$ 应大于全反射角，则微棱镜斜面倾角需满足下列条件：

$$\alpha = \beta \geq \frac{\arcsin \left(\frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{glass}}} \right) - \omega}{2}, \quad (6)$$

满足式 (4) 情况下，入射光束能够被全部反射进波导并在波导中传播，但是如图 3(a) 所示，部分入射光束在 PRM 表面发生多次反射，导致光束传播方向发生改变，成为杂散光。杂散光 1 出射角度与正常光束出射角度相同，不会造成鬼像，但是会影响能量均匀性。杂散光 2 出射角度与正常光束出射角度不相同，会造成鬼像。为了避免杂散光的出现，只需保证入射光束经过 PRM 一次反射后，便可按照全反射条件在波导内进行传播，不会经过二次反射。视场为 $\omega^{(i)}$ 的光束经过 PRM 一次反射后，其在波导中传播时左侧边缘光线与波导上表面的交点为 D_1 ，由光线折反射定律可得

$$D_1 = X + \frac{X \times \tan \omega}{\tan(90^\circ - \alpha) - \tan \omega} + \frac{X}{[\tan(90^\circ - \alpha) - \tan \omega] \times \tan(90^\circ - 2\alpha - \omega)} + \frac{H}{\tan(90^\circ - 2\alpha - \omega)}, \quad (7)$$

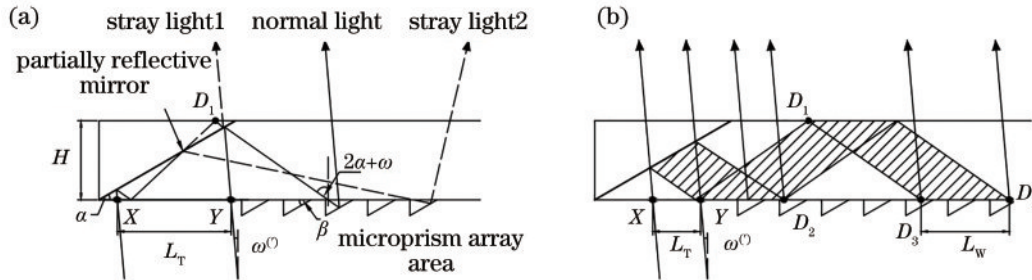


图 3 光束传播情况示意图。(a) 杂散光示意图；(b) 扩展光束间隔示意图

Fig. 3 Schematic diagram of beam propagation. (a) Schematic diagram of stray light; (b) schematic diagram of gap between expanded beams

$$D_2 = Y + \frac{Y \times \tan \omega}{\tan(90^\circ - \alpha) - \tan \omega} + \frac{Y}{[\tan(90^\circ - \alpha) - \tan \omega] \times \tan(90^\circ - 2\alpha - \omega)}, \quad (9)$$

$$D_3 = X + \frac{X \times \tan \omega}{\tan(90^\circ - \alpha) - \tan \omega} + \frac{X}{[\tan(90^\circ - \alpha) - \tan \omega] \times \tan(90^\circ - 2\alpha - \omega)} + \frac{2H}{\tan(90^\circ - 2\alpha - \omega)}, \quad (10)$$

式中, $Y \leq \frac{H}{\tan \alpha} - H \times \tan \omega$, 由 $D_3 - D_2 \leq 4 \text{ mm}$ 可得

$$L_T \geq \left(\frac{2H}{\tan(90^\circ - 2\alpha - \omega)} - 4 \right) \times \left(1 + \frac{\tan \omega}{\tan(90^\circ - \alpha) - \tan \omega} + \frac{1}{[\tan(90^\circ - \alpha) - \tan \omega] \times \tan(90^\circ - 2\alpha - \omega)} \right)^{-1}. \quad (11)$$

最终由式(8)和式(11)可计算得出符合限制条件的入射光束宽度 L_T , 能够实现消除杂散光, 同时实现出瞳扩展光束连续分布。

2.2.2 微棱镜阵列区域宽度 L_w

入射光束被反射进入波导中传播后, 光束在波导下表面投影宽度相对于入射光宽度发生改变, 为了保

证该范围内光束能够全部按照要求反射出波导, 微棱镜阵列区域宽度 L_w 应该等于光束投影宽度, 如图 3(b) 所示, 可得

$$L_w = D_4 - D_3, \quad (12)$$

式中, D_3 可由式(10)计算得出, 同理可得

$$D_4 = Y + \frac{Y \times \tan \omega}{\tan(90^\circ - \alpha) - \tan \omega} + \frac{Y}{(\tan(90^\circ - \alpha) - \tan \omega) \times \tan(90^\circ - 2\alpha - \omega)} + \frac{2H}{\tan(90^\circ - 2\alpha - \omega)}, \quad (13)$$

已知 D_3 、 D_4 , 由式(12)可得

$$L_w = L_T \times \left(1 + \frac{1}{(\tan(90^\circ - \alpha) - \tan \omega) \times \tan(90^\circ - 2\alpha - \omega)} + \frac{\tan \omega}{\tan(90^\circ - \alpha) - \tan \omega} \right). \quad (14)$$

最终根据式(14), 可通过入射光束宽度 L_T 计算得出相对应的微棱镜阵列区域宽度 L_w 。

2.2.3 微棱镜阵列区域数量 N 及微棱镜阵列区域反射率 R

已知入射光宽度 L_T 、微棱镜阵列区域宽度 L_w , 由式(3)可得所需微棱镜阵列区域数量 N 为

$$N = \frac{L - L_T}{L_w}. \quad (15)$$

为了实现出瞳扩展范围内光束能量均匀分布, 需保证不同位置微棱镜阵列区域反射出波导的光束能量保持一致。本文主要通过改变微棱镜阵列区域中的微棱镜结构的排列周期来控制不同区域的反射率, 以此实现能量均匀分布。不同微棱镜阵列区域的反射率 R 计算如下:

$$R_i = \frac{1}{N - i} \times 100\%, \quad (16)$$

$$R_{i+1} = \frac{R_i}{1 - R_i} \times 100\%, \quad (17)$$

式中, $i=0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

光束扩展范围内照度均匀度具体计算方法如下:

$$U = \left(1 - \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \right) \times 100\%, \quad (18)$$

式中, E_{\max} 和 E_{\min} 分别为目标面上的最大照度和最小照度。

按照式(13)设置不同区域反射率, 可以实现单一视场光束出瞳扩展范围内照度均匀分布, 均匀度 $> 90\%$ 。

本文设计中, 由图 2 可以看出, 最小视场角 ($-\omega_{\max}^{(i)}$) 光束进入出瞳 (EPD) 的部分为光束扩展范围最远端, 前面区域的不均匀反射都会对其均匀度造成影响, 因此首先按照最小视场角光束所需设置微棱镜阵列区域宽度及微棱镜阵列区域反射率。然而, 如图 4(a) 所示, 不同视场角的光束实现均匀出瞳扩展时所需微棱镜阵列区域宽度不同, 不重合区域所需反射率不同。此时, 对于大视场角光束, 不重合区域反射率偏大, 反射出波导能量较多, 其整体照度均匀度计算如下:

$$U_{\omega_{\max}} = \left(1 - \frac{1}{2N - 2i - 1} \right) \times 100\%, \quad (0 \leq i \leq N - 2), \quad (19)$$

可知当 $N - i \leq 2$ 时, 照度均匀度小于 70%。

为了提高大视场角光束照度均匀度, 同时保证小视场角光束照度均匀度良好, 如图 4(b) 所示, 对不重合区域反射率进行优化, 反射率取两者平均数, 可得不同视场角光束照度均匀度分别为

$$U_{\omega_{\max}} = \left(1 - \frac{1}{4N - 4i - 3} \right) \times 100\%, \quad (0 \leq i \leq N - 2), \quad (20)$$

$$U_{\omega_{\min}} = \left(1 - \frac{1}{2N - 2i - 1} \right) \times 100\%, \quad (0 \leq i \leq N - 2), \quad (21)$$

$$U_{\omega_{\min}} = \left(1 - \frac{1}{4N - 4i + 3} \right) \times 100\%, \quad (1 \leq i \leq N - 1), \quad (22)$$

可知, 最大视场光束、最小视场光束照度均匀度都大于 70%。当 $N - i = 2$ 时, 中间视场光束在不重合区域内照度均匀度为 66.66%。

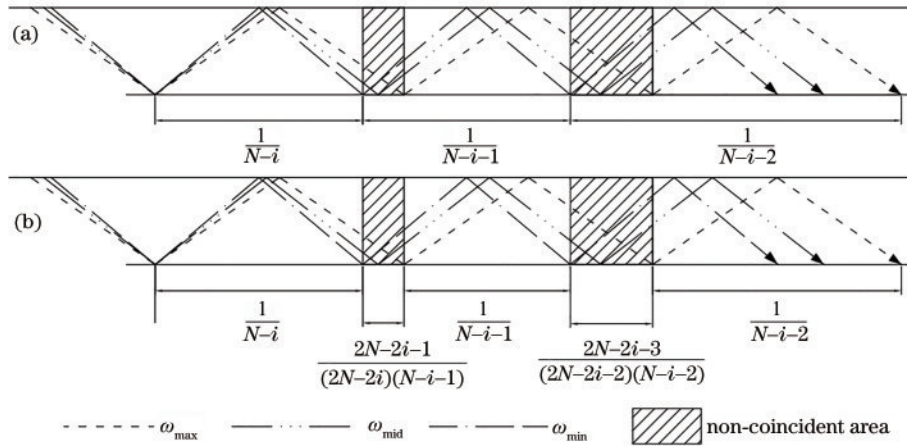


图 4 微棱镜阵列区域反射率。(a)优化前;(b)优化后

Fig. 4 Reflectivity of microprism array area. (a) Not optimized; (b) optimized

最后为了保证整个出瞳扩展范围内光束能量均匀分布,光束在PRM透射部分与微棱镜阵列区域反射扩展部分照度均匀度应该保持一致,因此PRM反射率应该满足以下条件:

$$R = \frac{N \times \left(\frac{L_w}{L_T}\right)}{1 + N \times \left(\frac{L_w}{L_T}\right)} \times 100\% \quad (23)$$

2.3 波导增强现实抬头显示系统仿真分析

本文针对视场角为 $10^\circ \times 5^\circ$, 眼动范围为

$130 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 观察距离为 500 mm 的波导显示系统进行设计。通过计算可得水平方向光束扩展范围为 230 mm , 垂直方向光束扩展范围为 100 mm , 水平方向使用 3 个微棱镜阵列区域, 出瞳扩展 4 倍, 微棱镜阵列区域 1 反射率为 50% , 微棱镜结构尺寸为 $90 \mu\text{m}$, 周期为 $180 \mu\text{m}$; 微棱镜阵列区域 2 为不重合区域, 优化后反射率为 75% , 微棱镜结构尺寸为 $90 \mu\text{m}$, 周期为 $120 \mu\text{m}$; 微棱镜阵列区域 3 反射率为 100% , 微棱镜结构尺寸为 $90 \mu\text{m}$, 周期为 $90 \mu\text{m}$, 垂直方向不扩展, 部分反射镜反射率为 77.56% 。图 5(a) 为抬头显示系统整

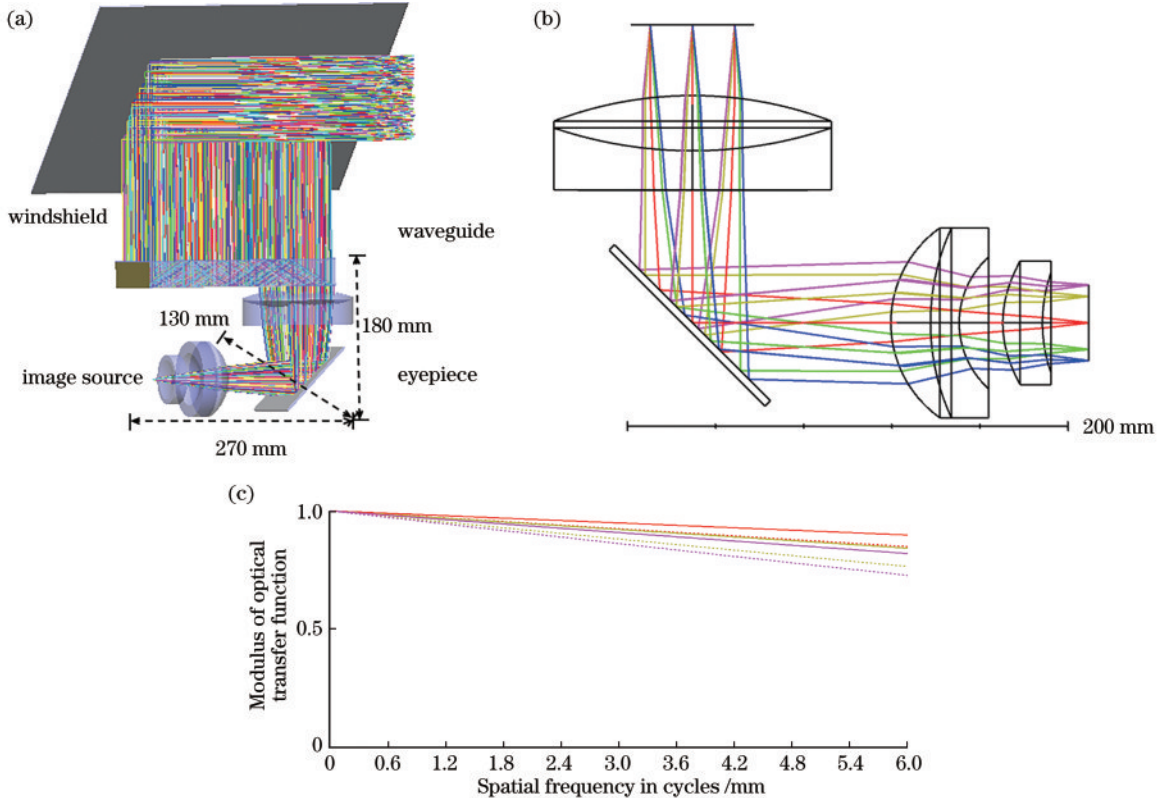


图 5 波导 AR-HUD 系统。(a)系统整体结构示意图;(b)准直目镜结构示意图;(c)调制传递函数(MTF)曲线

Fig. 5 Waveguide AR-HUD system. (a) Schematic diagram of overall system structure; (b) schematic diagram of collimating eyepiece structure; (c) modulation transfer function (MTF) curve

体结构示意图,整体系统长宽高分别为 270、130、180 mm,体积约为 6.5 L。

根据波导参数要求设计准直目镜,具体设计参数如表 1 所示,图 5(b)为准直目镜光路结构示意图。由图 5(c)可知,准直目镜在截止频率 6 pl/mm 处 MTF 曲线大于 0.7,符合设计要求。

表 1 准直目镜设计参数

Table 1 Design parameters of collimating eyepiece

Center wavelength /nm	Focal length /mm	Entrance pupil /mm	Field of view / (°)
486,588,656	170	56×100	(±5)×(±2.5)

由于本文设计仅在水平方向实现出瞳扩展,因此在水平视场方向选取 9 个采样视场对杂散光、照度均匀度进行分析,在人眼观察位置设置接收面,采用光线追迹法可以得到不同视场光束在接收面上的照度分布图,如图 6(a)~6(i)所示。

由图 6(a)~6(i)可知,各个视场内的均匀度比较理想,照度分布仅在微棱镜阵列区域 2 对应区域有所起伏。以(0°, 0°)视场为例,对杂散光 1、杂散光 2 分别

进行具体分析。首先,由于杂散光 2 出射角度与正常光束出射角度不相同,光束照射到接收面时,与接收面法线夹角不相同,因此在接收面设置角度滤片过滤正常出射角度光束,可以得到杂散光 2 照度分布图,如图 6(j)所示,X 方向、Y 方向光强分布都为 0,观察范围内无杂散光 2。其次,由于杂散光 1 出射角度与正常光束出射角度相同,主要影响光束扩展范围内光束能量均匀性,因此利用光线追迹法分析照度分布不均匀区域光线实际传播路径,结果如图 6(k)所示,由图可知照度分布不均匀区域光线主要为微棱镜阵列区域 2 反射出波导的光线,均为正常传播光线,未经过 PRM 多次反射,无杂散光 1。

为定量分析不同视场照度均匀度,计算了各个视场的具体均匀度数值,如表 2 所示。

由表 2 可知,采样视场中,最大视场角光束与最小视场角光束照度均匀度均大于 70%,中间视场光束照度均匀度大于 64%。由于微棱镜阵列区域 2 反射出波导的光束能量与其他区域相比较,导致整体照度均匀度降低,这一问题后期可以通过在波导上合适的位置增加亮度衰减元件,实现均匀度优化。

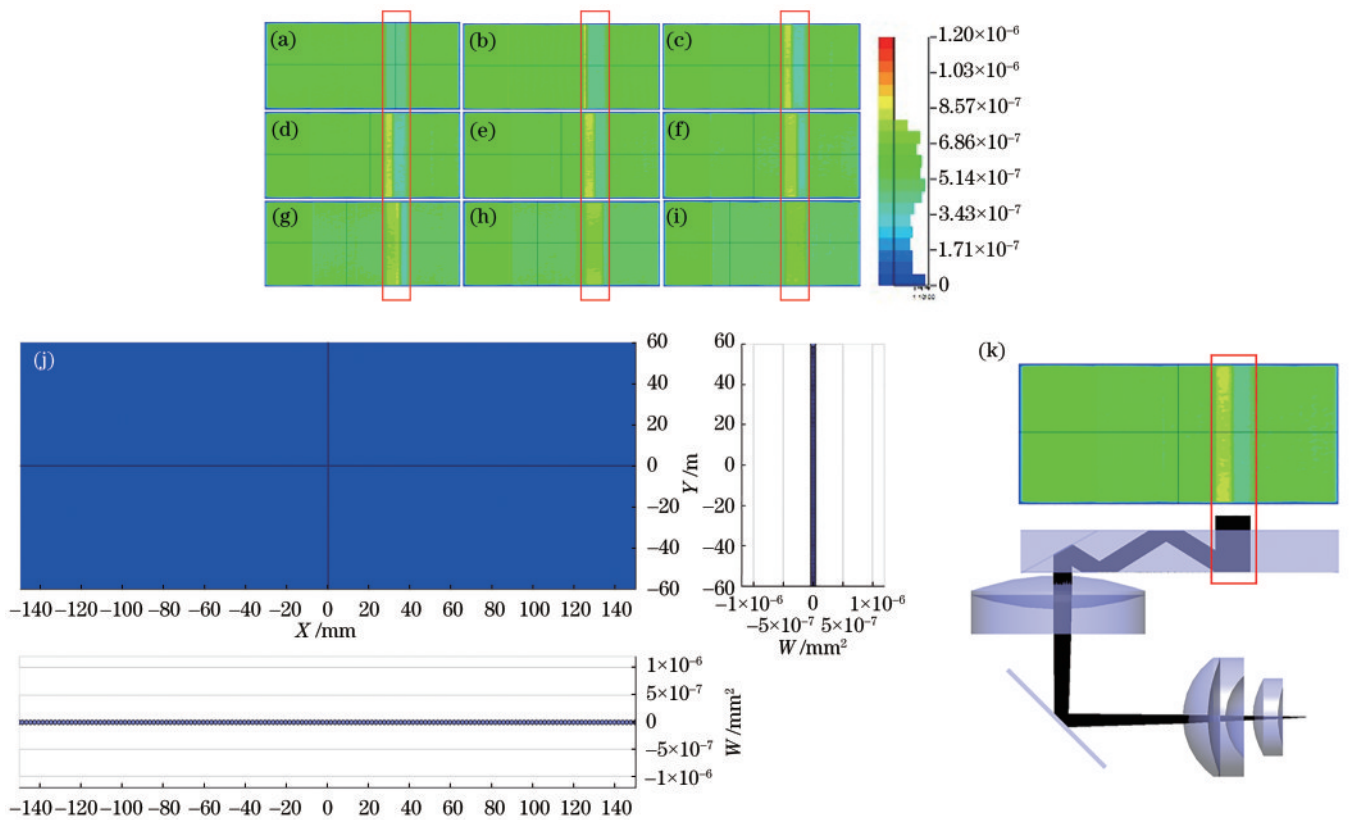


图 6 不同采样视场照度分布示意图。(a)(-5°, 0°);(b)(-3.75°, 0°);(c)(-2.5°, 0°);(d)(-1.25°, 0°);(e)(0°, 0°);(f)(1.25°, 0°);(g)(2.5°, 0°);(h)(3.75°, 0°);(i)(5°, 0°)(方框线内区域对应微棱镜阵列区域 2 反射出波导光束照度分布图);(j)杂散光 2 照度分布图;(k)照度分布不均匀区域光束传播路径图

Fig. 6 Schematic diagram of illuminance distributions for different sampling fields. (a) (-5°, 0°); (b) (-3.75°, 0°); (c) (-2.5°, 0°); (d) (-1.25°, 0°); (e) (0°, 0°); (f) (1.25°, 0°); (g) (2.5°, 0°); (h) (3.75°, 0°); (i) (5°, 0°) (area inside frame corresponds to microprism array area 2 reflecting waveguide beam illuminance distribution map); (j) stray light 2 illuminance distribution diagram; (k) beam propagation path diagram in areas with uneven illuminance distribution

表 2 不同采样视场照度均匀度

Table 2 Illumination uniformity of different sampling fields

Field of view / (°)	-5	-3.75	-2.5	-1.25	0	1.25	2.5	3.75	5
Uniformity / %	81.4	66.6	64.2	64.0	66.1	64.4	64.7	66.0	76.0

同时对系统进行宽波段成像分析,采用红绿蓝(RGB)三色图像作为原始图像[图 7(a)],在人眼观察位置设置直径为 4 mm,焦距为 16 mm 的理想透镜模拟人眼,像源光束经过波导显示系统和模拟人眼后,成像结果如图 7(b)所示,成像清晰,可实现全彩显示,波导结构的光能利用率为 73.33%,可进入眼动范围的光束能量为扩展范围内光束总能量的 28.26%。



图 7 全彩显示。(a) RGB 三色原始图像;(b)成像结果

Fig. 7 Full-color display. (a) RGB three-color original image; (b) imaging result

3 结 论

提出了基于微棱镜阵列结构的车载波导 AR-HUD 系统,分析了波导结构参数与光学指标之间的关系,对波导关键结构参数进行限制,有效消除了波导结构中光束在 PRM 表面多次反射产生的杂散光,保证扩展光束之间连续分布。利用多个微棱镜阵列区域实现光束出瞳扩展,同时通过计算优化不同微棱镜阵列区域的反射率,实现 4 倍一维出瞳扩展,出瞳扩展范围内照度均匀度大于 64%,可实现全彩显示,系统整体体积小于 6.5 L。

参 考 文 献

[1] Karar V, Ghosh S. Attention tunneling: effects of limiting field of view due to beam combiner frame of head-up display[J]. *Journal of Display Technology*, 2014, 10(7): 582-589.

[2] Harbour S D. Three-dimensional system integration for HUD placement on a new tactical airlift platform: design eye point vs. HUD eye box with accommodation and perceptual implications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8383: 83830V.

[3] Homan M. The use of optical waveguides in head up display (HUD) applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8736: 87360E.

[4] Richter P, von Spiegel W, Waldern J. 55-2: invited paper: volume optimized and mirror-less holographic waveguide augmented reality head-up display[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, 49(1): 725-728.

[5] Liu Z Y, Pang Y J, Pan C, et al. Design of a uniform-illumination binocular waveguide display with diffraction gratings and freeform optics[J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 30720-30731.

[6] Kress B C, Cummings W J. 11-1: invited paper: towards the ultimate mixed reality experience: HoloLens display architecture choices[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1): 127-131.

[7] Levola T, Laakkonen P. Replicated slanted gratings with a high refractive index material for in and outcoupling of light[J]. *Optics Express*, 2007, 15(5): 2067-2074.

[8] 鲁婷婷, 冯奇斌, 王梓, 等. 大角带宽高衍射效率体全息光栅的设计和制备[J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 0205001.

Lu T T, Feng Q B, Wang Z, et al. Design and fabrication of volume holographic gratings with large angular bandwidth and high diffraction efficiency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2): 0205001.

[9] 何天博, 巴音贺希格, 齐向东, 等. 非均匀膨胀与收缩下反射体全息光栅衍射特性分析[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209018.

He T B, Bayanheshig, Qi X D, et al. Diffraction characteristic analysis of reflection volume holographic gratings at non-uniform swelling or shrinking[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(2): 0209018.

[10] Cameron A A. Optical waveguide technology and its application in head-mounted displays[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8383: 83830E.

[11] Mukawa H, Akutsu K, Matsumura I, et al. 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.

[12] Bigler C M, Blanche P A, Sarma K. Holographic waveguide heads-up display for longitudinal image magnification and pupil expansion[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(9): 2007-2013.

[13] Draper C T, Bigler C M, Mann M S, et al. Holographic waveguide head-up display with 2-D pupil expansion and longitudinal image magnification[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(5): A251-A257.

[14] Lee Y H, Yin K, Wu S T. Reflective polarization volume gratings for high efficiency waveguide-coupling augmented reality displays[J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27008-27014.

[15] Weng Y S, Zhang Y N, Cui J Y, et al. Liquid-crystal-based polarization volume grating applied for full-color waveguide displays[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(23): 5773-5776.

[16] 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.
- [17] Frommer A. 11-3: invited paper: lumus optical technology for AR[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1): 134-135.
- [18] Amitai Y. P-21: extremely compact high-performance HMDs based on substrate-guided optical element[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2004, 35(1): 310-313.
- [19] Amitai Y. P-27: a two-dimensional aperture expander for ultra-compact, high-performance head-worn displays[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2005, 36(1): 360-363.
- [20] Gu L, Cheng D W, Wang Q W, et al. Design of a two-dimensional stray-light-free geometrical waveguide head-up display[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(31): 9246-9256.
- [21] Gu L, Cheng D W, Wang Q W, et al. Design of a uniform-illumination two-dimensional waveguide head-up display with thin plate compensator[J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12692-12709.