

基于菲涅尔透镜的高效率投影照明光路设计

伍 园¹, 周昱军^{2*}, 胡 亮², 王 进²

(1. 海军装备部驻南京地区第三军事代表室, 南京 210016; 2. 中国电子科技集团公司第五十五研究所, 南京 210016)

摘 要: 投影显示技术中光学引擎是重要组成部件, 其关键参数(光效、均匀性等)直接影响系统的最终性能指标。研究采用发光二极管作为照明光源, 菲涅尔透镜作为匀光器件, 设计了高光效、高均匀的照明光路, 为后续的研究提供了参考。

关键词: 投影显示技术; 发光二极管; 菲涅尔透镜

中图分类号: TN873.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2022)02-0133-05

High Efficiency Illumination Light Path Design of Projection Display Based on Fresnel Lens

WU Yuan¹, ZHOU Yujun², HU Liang², WANG Jin²

(1. The 3rd Military Representative Office in Nanjing Region of Naval Equipment Department, Nanjing 210016, CHN; 2. The 55th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210016, CHN)

Abstract: In projection display technology, optical engine is an important component, and its key parameters of light efficiency and homogenization, etc. could directly affect the final performance of the projection display system. In this paper, LED was used as the lighting source and Fresnel lens was used as the uniform light device. The illumination light path with high light efficiency and high homogenization was designed, providing a reference of the follow-up research.

Key words: projection display technology; LED; Fresnel lens

引 言

显示技术是人类获取信息的重要手段, 投影显示技术具有快速、直观传递信息的优势, 在人机互动、HUD等领域越来越受到人们的关注和研究。随着科学技术的进步, 新材料的开发和工艺技术的发展都成为投影显示技术发展的助推剂^[1-2]。投影显

示的像源从LCD发展到LCoS和DLP, 其中LCD、LCoS和DLP像源均为非自发光的像源^[3-5], 需要背光源照射而获得像源, 因此投影显示的背光源是投影光学设计的重要组成部分。随着科技的进步, 投影显示的背光源发展从CCFL发展到卤素灯、UHE灯、UHP灯, 以及近期的热点LED光源、激光光源、混合光源等^[6-8]。激光光源时空相干性较高,

收稿日期: 2022-05-05

作者简介: 伍 园(1989—), 女, 助理工程师, 主要从事信息装备制造; (E-mail: 420384258@qq.com)

周昱军(1993—), 男, 工程师, 主要从事机载液晶显示器光学及加固工艺设计; (E-mail: andyzhouyj@126.com)

胡 亮(1992—), 男, 工程师, 主要从事机载液晶显示器光学及加固工艺设计。

* 通讯作者

发散角较小,因此光学扩展量较小,适用于高亮度需求的投影系统。但激光投影系统中有荧光轮、色轮等同步振动器件,对环境的要求较高,在振动量级较大的环境下,这些同步振动器件容易损坏,同时激光投影的成本高、寿命受限。而LED光源投影系统无同步振动器件,具有耐振动和高可靠性等特点,且LED光源成本低、寿命长。但LED的光学扩展量较大,限制了LED光源的光能利用率,因此在设计时,需兼顾光源的均匀性和光能利用率。

在投影领域为了获得背光光源的高均匀性,常用的方案有积分光棒、自由曲面阵列透镜等。积分光棒通过多次反射实现在方棒出射端面上能量的均匀分布,多次反射增加了光学扩展量,导致光源的能量利用率降低,特别不适用于LED光源。自由曲面阵列透镜面型复杂,无法用固定的解析式表达,因此加工时存在精度低,废品率高等问题^[9]。

研究提出一种采用菲涅尔透镜作为匀光器件的照明光路设计,可获得高均匀性、高光能利用率的匀光系统。

1 设计原理

1.1 LED光源的特性

高亮度LED光源的发展带来了基于LED光源的投影技术的发展。LED投影的照明光路结构简单紧凑,使投影系统重量低、外形尺寸小巧。LED光源寿命长,工作温度范围宽,特别适用于恶劣环境下的投影显示。投影用LED可视为面光源,同时LED为朗伯体,其发光特性为: $I(\theta) = I_0 \cos\theta$,其中 I_0 为0度角的光强。图1是某型号LED的发光强度分布图,表示了该LED发光强度随角度变化而衰减的趋势。 I_{rel} 为发光损失率。其发光强度分布较广,在 $\pm 60^\circ$ 时仍有50%的光强。而在投影系统中,为与投影核心器件DMD芯片相匹配,所需的光线角

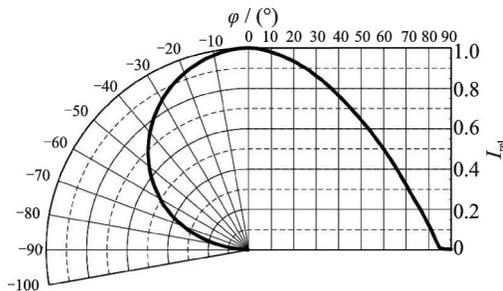


图1 某型号LED发光强度分布图

Fig.1 Luminous intensity distribution of LED

度一般较小,为提升光能利用率,充分利用所需角度外的发光强度,需对LED发出的光进行准直。

1.2 菲涅尔透镜设计原理

菲涅尔透镜是在非球面透镜的基础之上演变而来,其实质上就是透镜连续表面部分“坍塌”到一个平面上。从剖面看,其表面由一系列锯齿型凹槽组成,中心部分是椭圆型弧线。一般来说,菲涅尔透镜采用的都是同心圆结构,每个圆环的弧面都保留着坍塌前的曲率。与传统的透镜相比,每个圆环都可以看作一个独立的小透镜,将光线集中一处,使得菲涅尔透镜的光线利用率得到了提升。

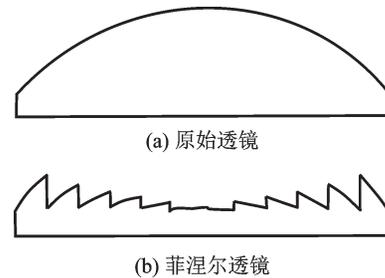


图2 菲涅尔透镜示意图

Fig.2 Sketch map of Fresnel lens

根据对传统菲涅尔透镜的焦平面照度分布研究^[10],其点聚焦能力很强,但在平面上的照度分布均匀性较差,会呈现中心位置照度大,且距中心的距离越大,其照度下降越快的趋势。为获取一个高均匀型的光斑,采用分区控制来设计透镜,如图3所示。

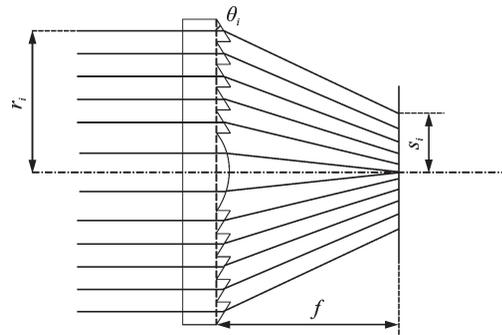


图3 分区控制示意图

Fig.3 Sketch map of zoning control

采用传统同心圆结构,但将每个圆环作为一个单独的透镜进行设计。对每个圆环透镜设计不同的焦点,如此便可在设定好的焦平面上形成一个圆形光斑,从而组合成一个大光斑。从理论上而言,由于每个圆环的焦点不同,光线应较为均匀的

分布在焦平面上的每个圆形光斑中,相较于传统透镜,其中心光斑的亮度降低,外围光斑的亮度升高,以此得到了一个均匀性较高的大光斑,圆环数越多,则均匀性越好。

根据折射定律和平面几何可得,各焦点位置 s_i 、各圆环半径 r_i 和倾角 θ_i 之间存在如下关系:

$$n \sin \theta_i = \sin \left[\theta_i + \arctg \left(\frac{r_i - s_i}{f} \right) \right] \quad (1)$$

在确定焦平面位置 f ,各圆环半径 r_i 和各焦点位置 s_i 后,即可精确计算出菲涅尔透镜的具体参数。

2 基于LED光源的照明系统设计及仿真测试结果

2.1 LED光源的准直设计

LED为朗伯体,其出射的光束与角度的关系符合 $I(\theta) = I_0 \cos \theta$ 。若不对LED的光束进行准直,随着光程的增加,LED的光学扩展量增大,光能利用率降低。为了实现对LED光源光能利用率的提升,特别对LED进行准直设计。在准直方案中,可采用反光杯方案和透镜组方案。反光杯的准直效果和射程与其尺寸成正比,尺寸越大,准直效果越好,射程越远,因此不利于小型化^[1];采用透镜组准直的方案可实现小型化,并获得高的光能利用率。在具体设计中可以采用两片式透镜组合,也可以采用三片式透镜组合,本次设计中选用三片式透镜组合。

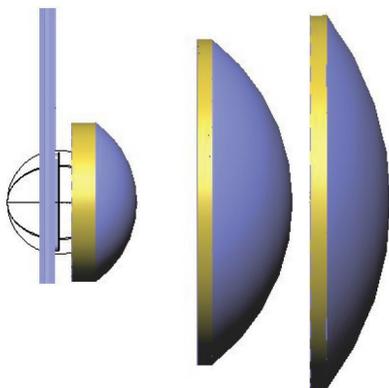


图4 三片式透镜组准直光路

Fig.4 Collimation optical path of three piece lens group

图5为准直后的光强分布仿真图,图中可知准直后的角度 $\pm 10^\circ$,准直后的光强为原状态的98.9%。由此可得三片式透镜组准直系统能够获得高光效、低发散角度。

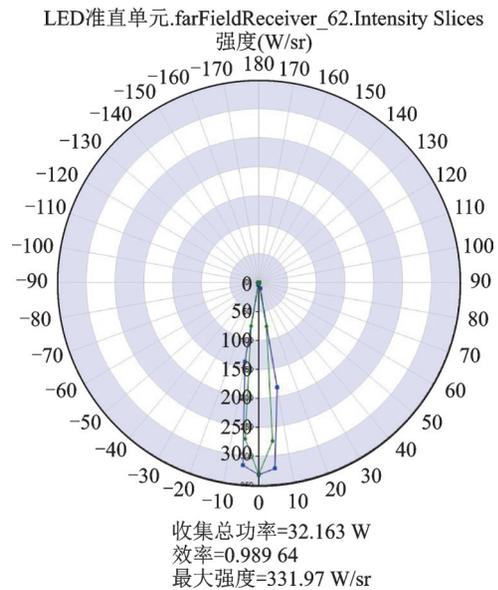


图5 准直后光强分布仿真图

Fig.5 Light intensity distribution after collimation

2.2 匀光系统设计

在菲涅尔透镜具体参数的计算过程中,所需光斑的直径定义为10 mm,透镜尺寸设为50 mm,焦平面位置 f 设为50 mm。而根据上述理论分析,圆环数越多,则均匀性越好。因此,圆环间距设为0.5 mm。根据上述设定的参数,采用Matlab编程解出透镜的具体参数,随后在Lighttools光学仿真软件中进行建模,并通过光线追迹方法得到焦平面上的均匀性和光效。图6为仿真的光路图,光路中采用二向色镜进行合光,LED选用为红色、绿色、蓝色。

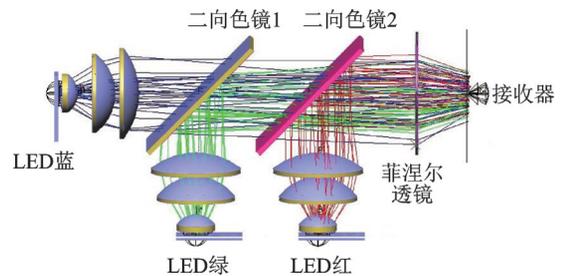


图6 LED投影照明光路示意图

Fig.6 Lighting light path of LED projection display

图7为接收器表面的照度分布图,图中可见接收器表面亮度分布较为均匀。

2.3 实物测试结果

根据第2.2节中的计算及仿真结果,定制相应的光学元件及结构件进行实物测试,投影面放置在照明系统的焦平面位置,两者相距50 mm,如图8

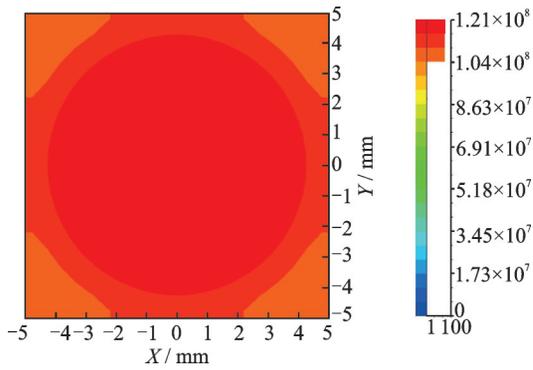


图 7 接收器表面的照度分布仿真图(纵横坐标分别为光斑的长宽)

Fig.7 Simulation diagram of illuminance distribution on receiver surface

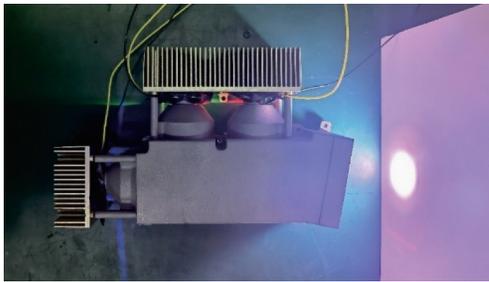


图 8 照明光路实物测试图

Fig.8 Physical test of lighting light path

所示。

而后,根据 SJ/T 11298-2003 数字投影机通用规范中关于照度均匀性的测试方法,采用亮度计对光斑均匀性进行测试,其采样点如图 9 所示,数据如表 1 所示,其中 1~9 为光斑平均划分的 9 个区域的中心点亮度,10~13 点为四角的亮度。

⑩	①	②	③	⑪
	④	⑤	⑥	
⑫	⑦	⑧	⑨	⑬

图 9 光斑亮度均匀性测试采样点

Fig.9 Sampling points of brightness uniformity test

带入 SJ/T 11298-2003 中的均匀性计算公式(2),可得光斑的均匀性为 90.34%,相比于积分光棒匀光系统的 81% 均匀性有所提高^[12]。

$$K = \left[\frac{W_{\min}}{\left(\frac{1}{9} \sum_{1}^9 W_n \right)} \right] \times 100\% \quad (2)$$

表 1 光斑亮度均匀性测试数据

Tab.1 Data of brightness uniformity test

序号	亮度/(cd·m ⁻²)	序号	亮度/(cd·m ⁻²)
(1)	63 600	(8)	64 500
(2)	64 400	(9)	63 400
(3)	63 700	(10)	58 700
(4)	64 800	(11)	58 000
(5)	65 400	(12)	59 100
(6)	64 600	(13)	58 300
(7)	63 900		

式中, K 为均匀性, W_{\min} 为 10~13 点的最小值, W_n 为 1~9 点的测试值。

随后,采用积分球来测试照明系统的光学利用率。根据 LED 规格书,三种 LED 的额定电流为 6 A,其输出的光通量和通过照明系统后的光通量如表 2 所示,其光能利用率为 64.20% 左右,相比于积分光棒匀光系统 45% 的光能利用率有所提高^[13]。

表 2 照明系统光能利用率测试数据

Tab.2 Test data of light energy utilization of lighting system

LED	LED 光通量/lm	通过照明系统后的光通量/lm	光能利用率/(%)
红色 LED	3 900	2 504	64.20
绿色 LED	13 000	8 350	64.23
蓝色 LED	1 660	1 065	64.15

3 结 论

大功率 LED 的开发促进了 LED 光源投影的发展,其中匀光系统对整机的光能利用率和匀光效果具有重要的影响。文中以大功率 LED 作为光源,菲涅尔透镜作为匀光器件,设计了适用于大振动量级环境下的高效率投影照明光路,其出射光斑均匀性达到了 90.34%,光能利用率达到了 64.2% 左右。相比于光能利用率较低的积分光棒照明光路,文中设计有了较大的性能提升,为后续研究提供了参考,具有一定价值。

参 考 文 献

[1] 刘 旭,李海峰. 现代投影显示技术[M]. 杭州:浙江大学出版社,2009.
 [2] Kessel P V. A MENS based on projection display[J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(8): 1687-1704.
 [3] Huang A L, Florence J M. Liquid crystal projection display system: US6309071 [P/OL]. [https://www. freepatentsonline. com/6309071.html](https://www.freepatentsonline.com/6309071.html). 1999-08-04[2001-10-30].

- [4] 李任鹏,颜莉华. LCOS投影显示技术[J]. 功能材料与器件学报, 2014, 20(6): 194-198.
- [5] 戴春风. DLP—投影显示技术的革命[J]. 牡丹江大学学报, 2007, 16(2): 98-100.
- [6] 李 根. 激光显示系统关键技术研究[D]. 安徽: 中国科学技术大学, 2018.
- [7] 林 鹏, 余建华, 陈日广, 等. 基于LED的DLP投影显示光学引擎的研究[J]. 现代显示, 2012, 4: 49-53.
- [8] 孙鸣捷. 微型投影显示系统中混合光源照明技术和激光散斑消除技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [9] 孙艳军, 冷雁冰, 陈 哲, 等. 硅基自由曲面光学微透镜阵列制作及光学性能研究[J]. 红外技术, 2012, 34(1): 44-47.
- [10] 刘永强. 均匀聚光菲涅尔透镜设计及性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [11] 王海洋, 金志樑, 王沛沛, 等. 用于LED光源的反光杯准直效果研究[J]. 照明工程学报, 2021, 32(1): 1-4, 11.
- [12] 缪莹莹. 基于LED照明的DLP投影显示系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [13] 刘 旖. 微投影仪的照明光路设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.

(上接第122页)

栅衍射后的图像进行全反射, 从耦出体全息光栅出射, 零级像不会被全反射, 故不会影响成像质量。项目组正在开发采用文中制备的体全息光栅的波导系统, 以评定耦出端图像的性能, 包括亮度、均匀性、视场等。

4 结 论

针对楔形波导系统设计和制备了具有高衍射效率和大角度宽的反射式体全息光栅。首先基于Kogelnik理论讨论了记录角度和衍射效率之间的关系, 获得几组衍射效率较高时记录角度的组合, 然后分析这些组合的角带宽, 确定记录角度。通过实验分析了曝光强度和曝光时间对衍射效率的影响, 确定了曝光参数, 并对制备的体全息光栅进行了波长修正。测试结果表明设计和制备的体全息光栅的衍射效率达到90%, 角带宽达到24°, 具有较高的实际应用价值。

参 考 文 献

- [1] Chang Chenliang, Kiseung Bang, Wetzstein Gordon, et al. Toward the next-generation VR/AR optics: A review of holographic near-eye displays from a human-centric perspective[J]. *Optica*, 2020, 7(11): 1563-1578.
- [2] Maimone A, Georgiou A, Kollin J S. Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(4): 1-16.
- [3] Wu Z, Liu J, Wang Y. A high-efficiency holographic waveguide display system with a prism in-coupler[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2013, 21(12): 524-528.
- [4] Cao C, Liao S, Liao Z Y, et al. Design of large field off-axis reflection optical system based on free-form surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0808001-0808007.
- [5] Zheng Z Z, Yang Z, Xiu L C, et al. Development and application of high diffraction efficiency short-wave infrared convex shining grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1205002-1205010.
- [6] Amitai Y, Friesem A A, Weiss V. Holographic elements with high efficiency and low aberrations for helmet displays[J]. *Applied Optics*, 1986, 28(16): 3405-3416.
- [7] Murakami E, Oguro Y, Sakamoto Y. Study on compact head-mounted display system using electro-holography for augmented reality[J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2017, 100(11): 965-971.
- [8] Duan X, Liu J, Shi X, et al. Full-color see-through near-eye holographic display with 80° field of view and an expanded eye-box [J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 31316-31329.
- [9] Shi R, Liu J, Zhao H, 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.
- [10] Han J, Liu J, Yao X, et al. Portable waveguide display system with a large field of view by integrating freeform elements and volume holograms [J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 3534-3549.
- [11] Mukawa H, Akutsu K, Matsumura I, et al. A full-color eye-wear display using planar waveguides with reflection volume holograms [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2009, 17(3): 185-193.
- [12] Piao M L, Kim N. Achieving high levels of color uniformity and optical efficiency for a wedge-shaped waveguide head-mounted display using a photopolymer [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(10): 2180-2186.
- [13] Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings [M]. Singapore: Landmark Papers on Photorefractive Nonlinear Optics, 1995: 133-171.
- [14] Guo J, Tu Y, Yang L, et al. Holographic waveguide display with a combined-grating in-coupler[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(32): 9293-9298.