

# 基于数字光处理的短焦微型投影光学系统设计

潘国涛<sup>1</sup>, 王 武<sup>2</sup>, 彭礼威<sup>1</sup>, 刘 欣<sup>3</sup>, 刘 才<sup>1</sup>, 闫镜伊<sup>1</sup>, 闫钰锋<sup>1</sup>

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022;

2. 北方导航控制技术股份有限公司, 北京 100176;

3. 长春富维安道拓汽车饰件系统有限公司, 长春 130033)

**摘要:** 由于投影仪逐渐走向大众化, 产品从原来的专业应用向个人或家庭应用迅速转变; 为满足短焦微型投影小型化、高照度、低功耗等需求, 设计了一款适用于 0.3" 单片数字光处理器的短焦微型投影光学系统; 文章基于复眼透镜的匀光特性, 利用复眼透镜匀化整形光源, 结合棱镜转向的照明技术方案, 完成了照明系统设计, 分析了照明系统的光照度分布; 其次, 基于反远距结构的成像原理, 结合非球面和像方远心技术, 在缩短光路的基础上增大了成像系统的景深; 最后, 建立成像系统的仿真模型, 分析成像系统的像质和公差; 结果表明: 照明系统在数字微镜器件上的照度均匀性为 90.91%, 整个系统的光效率达到了 88.45%; 成像系统长度为 53.9 mm, 全视场达到 67°, 在 93 lp/mm 处调制传递函数大于 0.52, 畸变小于 1.0%; 该系统具有结构简单紧凑、体积小、照度高等优点, 满足要求。

**关键词:** 短焦; 微型投影; 复眼透镜; 反远距结构; 照度均匀性

## Design of a Short-focus Micro-projection Optical System Based on Digital Light Processing

PAN Guotao<sup>1</sup>, WANG Wu<sup>2</sup>, PENG Liwei<sup>1</sup>, LIU Xin<sup>3</sup>, LIU Cai<sup>1</sup>, YAN Jingyi<sup>1</sup>, YAN Yufeng<sup>1</sup>

(1. School Of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. North Navigation Control Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China;

3. Changchun Faway Adient Automotive System Co., Ltd., Changchun 130033, China)

**Abstract:** As projectors are gradually becoming popular, the products are rapidly changing from original professional applications to personal or home applications; in order to meet the needs of miniaturization, high illumination, and low power consumption of short-focus mini-projection, a short-focus mini-projection optical system applicable to 0.3" monolithic digital light processor is designed; in this paper, based on the homogenization characteristics of the compound eye lens, the lighting system design is completed by using the compound eye lens homogenization shaping light source, combined with the lighting technology scheme of prism steering, and the illumination distribution of the lighting system is analyzed; secondly, based on the imaging principle of the anti-telephoto structure, combined with aspheric and telecentric in image space technology, the imaging system increases the depth of field on the basis of shortening the optical path; finally, the simulation model of the imaging system is established, and the image quality and tolerance of the imaging system are analyzed; the results show that the illumination system has an illumination uniformity of 90.91% on the digital micromirror device and the optical efficiency of the whole system reaches 88.45%; the length of the imaging system is 53.9 mm, the full field of view reaches 67°, the modulation transfer function at 93 lp/mm is greater than 0.52 and the distortion is less than 1.0%; the system has the advantages of compact structure, small size, high illumination, and meets the requirements.

**Keywords:** short-focus; micro-projector; compound eye lens; anti-telephoto structure; illumination uniformity

## 0 引言

对于投影系统而言, 最早光源的使用主要是高压汞泡。虽然代表光源技术的高压汞灯仍占据着市场的较大比例, 但是近

年来由于对画质的要求不断提高, 光源的标准也随之上升, 沿用了十多年的高压水银灯泡已经无法满足 BT.2020 标准对于色域空间的要求。而包括 LED 光源在内的新一代固态光源崭露头角, 以往由于输出亮度较低所带来的问题得到了有效的解

收稿日期: 2022-03-21; 修回日期: 2022-04-08。

基金项目: 高等学校学科创新引智计划(D21009); 吉林省科技发展计划项目(20200401054GX、20210201139GX); 吉林省教育厅“十三五”科学技术项目(JJKH20200756KJ); 长春理工大学青年基金(XQNJJ-2019-01)。

作者简介: 潘国涛(1998-), 男, 天津人, 硕士, 主要从事光学设计, 光机结构设计, 误差分析, 光电检测技术方向的研究。

通讯作者: 闫钰锋(1978-), 男, 长春人, 工学博士, 教授, 主要从事光机结构设计、光电检测技术、仪器精度分析、光学测量、光电仪器设计、精密光电测量技术方向的研究。

引用格式: 潘国涛, 王 武, 彭礼威, 等. 基于数字光处理的短焦微型投影光学系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(5): 243-250.

决。由于投影技术的不断进步,投影机逐渐走向大众化,产品从原来的专业应用向个人或家庭应用迅速转变。投影机多是直接放置在置物架或桌面上,显然投影机外形不宜过大。投射画面的大小也要受制于投影距离,主要影响投影距离的是焦距,焦距问题也成为阻碍其发展的重要因素之一。

当前,小型化、高清晰度、高亮度为投影系统的主要发展趋势。在短焦的基础上,减小外形尺寸,提高照明亮度格外重要。为解决上述问题,研究人员开展了一系列的研究工作<sup>[1]</sup>。照明系统方面:文献[2]基于LED光源,采用准直系统和复眼透镜进行光线准直和匀化,并提出一种基于正、负透镜的摄远结构,极大地减小了系统尺寸;文献[3]基于抛物反射面和非涅尔透镜的新型TIR透镜,采用空心方棒匀光,照度均匀度达到84%,光能传输效率达到78%;文献[4]采用曲面斜率角控制优化的方法对照明系统中准直部分进行设计,光能传输达到了90%。成像系统方面:文献[5]设计的一款短焦投影镜头,采用6组7片透镜组成,视场角达到80°,但系统总长过长,达到172.6 mm,焦距为12.11 mm。文献[6]针对应用较为广泛的0.66英寸的投影系统设计了一款鱼眼镜头,虽采用9片透镜,视场达到175°,但系统总长达到223 mm,同时全视场畸变达到近8%,无法满足需求。

目前的投影系统设计方案,能够达到较好的成像质量和满足部分市场的需求。但在以下两个方面还稍有欠缺:1)针对投影距离受限,小英寸、短焦、小尺寸的投影系统的设计显得更为重要;2)当前应用的成像系统在光照均匀性和光效率方面还有待进一步提升。因此,本文围绕上述两个问题,开展了相关工作。

本文基于对数字光处理(DLP, digital light processing)投影技术<sup>[7-9]</sup>和近几年短焦系统<sup>[10-12]</sup>的深入研究。当前DLP即数字光处理技术是较为主流的投影技术,该技术相比其它投影技术而言具有高可靠性、高亮度等优势,且非常适用于便携式投影设备<sup>[13]</sup>。这种技术首先把影像信号经过数字处理,然后把光投影出来。它是基于美国TI公司开发的数字微镜元件DMD(Digital Micromirror Device)来完成可视数字信息显示的技术<sup>[14]</sup>。但DLP技术需要依靠照明系统提供高亮度,依托成像系统来实现短距离的图像投射,因此照明和成像系统的设计对于投影系统来说也尤为重要。

本文首先讨论了照明部分的设计思想,基于复眼透镜的匀光特性,利用复眼透镜匀化整形光源,结合棱镜转向的照明技术方案;并分析了照明系统的光照度分布;其次,基于反远距结构的成像原理,结合非球面技术缩短系统筒长,完成了成像系统的设计;最后,建立成像系统的仿真模型,分析成像系统的像质和公差。

## 1 设计思路

系统总体设计如图1所示,由照明系统和成像系统两大系统组成。照明系统的主要设计难点包含准直系统,合光系统,匀光系统及倾斜照明的实现。红、绿、蓝三色LED光源经各自准直系统准直,再通过合光棱镜(X-Plate)合光,三路合一的准直光束进入复眼透镜,形成大量光斑,光斑经中继系统,每个微透镜单元的光斑在目标

面上重叠,形成均匀的照明区域。成像系统则是将被照明的DMD上产生的图案投影至幕布或其他单元上。系统在设计上一般会采用倒置设计方式,且为小像差系统。

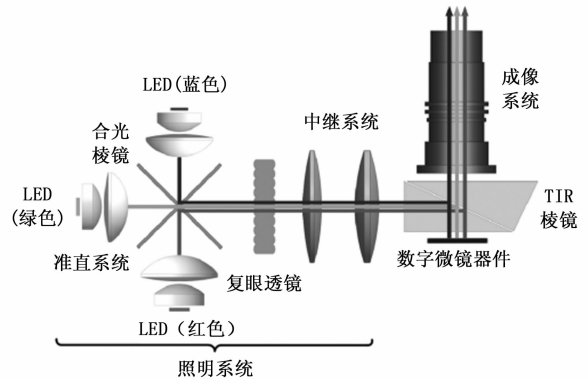


图1 短焦微型投影光学系统示意图

首先,基于复眼透镜的匀光特性,采用复眼透镜匀化整形LED光源,TIR棱镜转向、投影镜头成像的技术方案,设计照明系统。照明系统是投影光学系统中至关重要的一部分,它决定了整个系统的能量利用率、投影均匀性、体积和成本等各方面性能。同时,照明系统设计中需要考虑系统的能量利用率,能量利用率又取决于系统的光学扩展量匹配,因此需要分析系统的光学扩展量匹配问题。

然后,使用LightTools软件对系统建立模型并仿真,分析DMD面上的光强分布。

最后,根据设计指标,设计光学系统的成像部分。短焦微型投影成像系统具有大视场、长后工作距离等特点。然而,反远距结构具有视场较大,像面边缘视场照度大,后工作距离长等特点,从原理上能够较好地满足此类型投影镜头的设计要求。反远距结构由负光焦距的前组和正光焦距的后组组成。该结构的光阑往往设置在正组中间,负组远离光阑,轴外光束产生较大的初级轴外像差和高级轴外像差,前组的像差尽量由自身校正,而后组是一个小视场结构,为了对前组的剩余像差,尤其是初级彗差 $S_{II}$ 、初级畸变 $S_V$ 和初级倍率色差 $C_{II}$ 给予补偿,多采用双胶合透镜和正透镜组合的形式。

成像系统的后工作距离中大多需要放置内部TIR棱镜等,可将其展开成等效平板玻璃。平板玻璃在任何情况下不会发生场曲。然而在非平行光路中,平行平板将会造成产生一定程度的初级像差<sup>[15]</sup>:①孔径角 $u_1$ 较大时,产生较大的位置色差和球差;②视场角 $u_2$ 较大时,产生较大的畸变、像散和位置色差。因此,在对系统进行设计时需将等效平板玻璃加入光学系统中。

## 2 技术指标

根据设计要求,短焦微型投影系统的技术指标如表1所示。

## 3 照明系统设计与分析

投影显示系统照明设计中,常用的是方棒照明系统或

者复眼透镜照明系统, 方棒照明系统其结构简单, 成本较低, 但其长度不利于投影系统的小型化。因此, 投影显示照明系统中, 常采用复眼透镜照明系统, 复眼透镜照明系统具有良好的照度均匀性和光能利用率, 但设计难度更大。

表 1 短焦微型投影系统技术指标

参数	指标
芯片尺寸/pixels	0.3" 720p DMD (1 280 * 800)
物距/mm	1 000
工作范围/mm	6.912 * 3.888
图像尺寸/(")	>36
Offset	100%
F 数	≤F/1.8
像素尺寸/μm	5.4 * 5.4
全像高/mm	10.403 94
波长	0.618:0.536:0.459=2:2:1
筒长/mm	≤70
材料	2P5G (P: E48R)
后焦距/mm	2.0(AIR)+12.0(H-LAK7A)+0.497(AIR)+1.1(H-K5)+0.303(AIR)
远心度/(°)	<1
垂轴色差/pixels	≤0.5
畸变	<1%
场曲/mm	±0.05
全视场照度	>0.6
调制传递函数	>0.5 (93 lp/mm)
DMD 照明区域内均匀度	>90%

照明系统主要由光源、准直系统、复眼透镜、中继系统、棱镜系统五部分组成。设计时, 首先依据 DMD 芯片尺寸确定合适的光源, 本文中采用成本较低、寿命较长的 LED 光源。为了达到较好的照度均匀性, 需对光源发射的光线进行准直, 并通过复眼透镜匀光, 然后通过中继系统将光束会聚至 TIR 棱镜系统。最后利用 Lighttools 软件建立模型, 并对 100 万光线进行采样, 分析 DMD 上的照度均匀性及其光效率。

### 3.1 光源芯片选择

根据设计指标中 DMD 芯片尺寸及照明光束孔径角, 计算 DMD 光学扩展量为:

$$E = \frac{\pi A_{DMD}}{4F^2} \cos\theta = \frac{3.14 \times 6.912 \times 3.888}{4 \times 1.8^2} \cos 26^\circ = 5.852 \text{ mm}^2 \cdot \text{steradian} \quad (1)$$

式中,  $A_{DMD}$  为 DMD 的面积大小,  $F$  为光束的数值孔径,  $\theta$  为主光线角度。由于 DMD 微反射镜的倾斜角为  $\pm 12^\circ$ , 为了保证照明光束与 ON 光束分离, 需要照明光束入射角大于  $24^\circ$ , 同时结合 TIR 棱镜工作方式, 照明光束与 ON 态必须分别位于全反射临界角两侧, 为了避开全反射附近的低透过率区域, 照明光束主光线取  $26^\circ$ <sup>[16]</sup>。

获得最佳光学扩展量匹配, 计算 LED 面积:

$$A_{LED} \leq \frac{E}{\pi \sin^2 \theta_{1/2}} = \frac{5.852}{3.14 \times \sin^2 60^\circ} \approx 2.485 \text{ mm}^2 \quad (2)$$

其中:  $\theta_{1/2}$  为光束发散角, 由经验预设为  $60^\circ$ 。根据计算结果, 考虑到系统公差影响等因素, 照射面积应稍稍大于 DMD 的有效面积。因此, 选择芯片型号为 NMC0B-400M 发光面积  $1 \times 2 \text{ mm}^2$  的 LED 光源。

### 3.2 准直系统设计

根据所选 LED 光源作为光源模型对准直系统进行设计, 准直系统在整个投影系统中是最为关键的部件。由于红、绿、蓝光三路光的设计原理相同且等光程, 因此仅设计一路准直系统相当于构建完成整个系统, 因此图 2 中仅显示绿光光路的光线追迹。而红光和蓝光及其对应的准直系统位于 X-Plate 的上下两侧。准直系统包括 LED 光源、准直透镜组、X-Plate, 长度为 53.5 mm。准直系统的参数如表 2 所示。

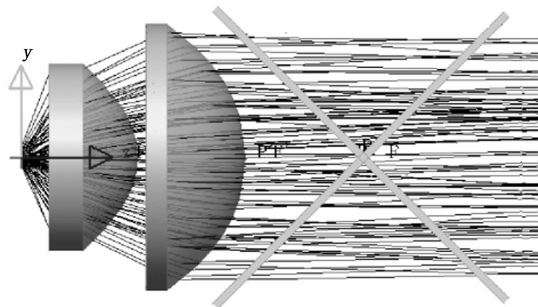


图 2 准直系统光线追迹示意图

### 3.3 复眼透镜设计

复眼透镜又称为蝇眼透镜, 材料一般选用 PMMA 或者 Polycarbonate。它由一系列小透镜单元拼接而成。其工作原理是将光源放在准直系统的焦点处, 使得经准直系统出射的光束为平行光。平行光照射在复眼透镜上, 将单光源分割成多光源。理想光源下复眼照明理论如图 3 所示。

表 2 准直系统参数

面型	曲率/mm	厚度/mm	玻璃材料	K	4 阶系数	6 阶系数	8 阶系数	10 阶系数
标准	Infinity	8.000	H-BAK7	---	---	---	---	---
偶次非球	-2.189	1.000	---	-18.351	-5.802E-004	1.109E-006	4.752E-009	-6.397E-011
偶次非球	-86.484	10.000	H-ZF11	33.783	-1.841E-005	-2.304E-008	4.600E-010	4.699E-012
偶次非球	-12.511	20.000	---	-0.771	7.440E-006	4.359E-008	1.851E-010	9.181E-013

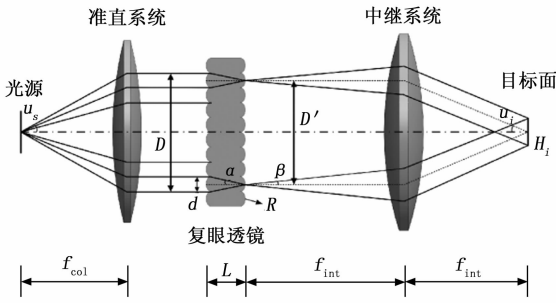


图 3 复眼照明理论图 (理想光源)

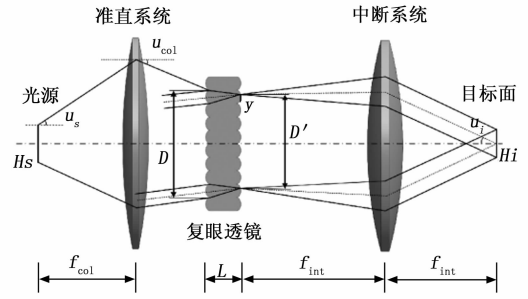


图 4 复眼照明理论图 (实际光源)

由于复眼透镜分割后的光束为细光束，因此可近似认为  $\alpha \approx \sin\alpha \approx \tan\alpha$ ， $\beta \approx \sin\beta \approx \tan\beta$ ，再依据参考文献 [17] 中高斯光学公式，折射定律公式等，其结构参数有如下关系：

$$\begin{cases} D = 2f_{col} \tan u_s \\ \tan u_i = \frac{D'}{2f_{rs}} \\ \tan\beta = \frac{H_i}{2f_{rs}} \\ \tan\alpha = \frac{d}{2L} \\ L = \left(\frac{n}{n-1}\right)R \end{cases} \quad (3)$$

即：

$$d = \sqrt{\frac{2nLH_i \tan u_i}{N-1}} \quad (4)$$

式中， $D$  为复眼透镜入射光束口径； $f_{col}$  为准直透镜焦距； $u_s$  为光源发散角； $u_i$  为目标面上的孔径角； $D'$  为复眼透镜出射光束口径； $f_{rs}$  为积分透镜焦距； $H_i$  为目标像高； $\alpha$  为复眼后表面入射角； $d$  为复眼单个小透镜口径； $L$  为复眼厚度； $n$  为复眼透镜材料折射率； $R$  为复眼单个小透镜曲率半径； $N$  为复眼小透镜数目。

确定了复眼单透镜的数目和目标表面范围及孔径角大小，就能确定复眼消透镜的参数  $d$ ，复眼透镜入射光束口径  $D$  和准直系统的焦距也就确定了。

由于光源的实际大小和其他元件相比已不能忽略，因此需要考虑实际光源条件下光源光束的传输特性。实际扩展光源照明下的复眼照明理论如图 4 所示。

对于扩展光源，光源与复眼及目标面应满足光学扩展量的匹配条件。因此，扩展光源的尺寸  $H_s$  应满足以下公式，式 (5) 中各物理量含义在式 (4) 中：

$$H_s \leq \frac{Dd}{2nL \sin u_s} = \frac{Nd^2}{2nL \sin u_s} \quad [16] \quad (5)$$

### 3.4 中继系统设计

TIR 棱镜是设置在投影仪内接收光源的，其主要特征在于可以将所有投射到其上的光源，予以聚光并投射到数字微型反射镜装置上后反射至成像系统，最终在银幕上形成影像。图 5 为 TIR 棱镜全反射原理图，光线进入棱镜后，

在棱镜的倾斜面上发生全反射。应用参考文献 [17] 的全反射定律、折射定律公式及对于 TIR 棱镜已知公式  $\theta = i - \alpha$ ，即可求得 TIR 棱镜参数。

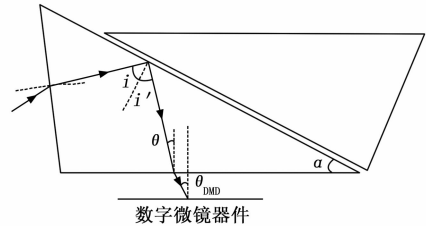


图 5 TIR 棱镜全反射原理图

中继系统将复眼透镜每个单元出射的光束在 DMD 上进行叠加，其作用类似于积分器。照明光束主光线以  $26^\circ$  角入射进入成像系统，要求成像系统的数值孔径  $F_{\#}$  为 2.0。增大照明光束口径和入射角会获得更大的光通量，但会出现重叠区域。照明光束孔径角为  $\pm 16.5^\circ$ ，主光线以  $27^\circ$  角照射到 DMD 面上，ON 态成像光束角度为  $-13.5^\circ \sim 19.5^\circ$ ，那么成像系统的数值孔径  $F_{\#}$  为 1.5。由于重叠区域刚好为低透过率区域，因此增大照明光束的数值孔径，同时在照明和成像系统光路的孔径光阑上合理处理，能够降低甚至消除重叠区域带来的影响。所以，采用主光线  $27^\circ$  角入射的  $F_{\#} 1.8$  的照明结构。该系统的焦距由复眼透镜出射光斑半径  $D'$  和 DMD 上光束孔径角确定。 $f_{rs} = D'/2 \tan u \approx 33.7$  mm。对于 TIR 棱镜，设  $\theta_{DMD} = 12^\circ$ ，棱镜材料为 H-LAK7A (折射率  $n = 1.713$ )，则全反射角  $i = \arcsin(1/1.713) = 35.72^\circ$ ， $\theta = \arcsin(\sin(\theta_{DMD}/n)) = \arcsin(\sin 12^\circ / 1.713) \approx 6.97^\circ$ 。因此， $\alpha = 28.75^\circ$ 。最终采用 2 片透镜的设计方案，设计完成的中继系统如图 6 所示，长度为 38.6 mm。

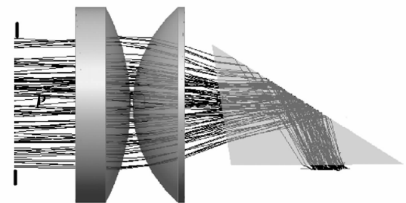


图 6 中继系统结构示意图

### 3.5 照明系统总体结构设计

使用 LightTools 软件对照明系统仿真分析, 将光源、准直系统、复眼透镜及中继系统组合, 照明系统仿真光路示意图如图 7 所示, 总长为 131.45 mm, 最大口径为 30.4 mm, 复眼透镜的有效口径为 19.1 mm, 中继系统后焦距为 47.2 mm, 则  $\theta_1 = \tan^{-1}(R/2f_{re}) = 11.31^\circ < 12^\circ$ , 满足光路几何要求。其中  $R$  为复眼透镜的有效尺寸;  $f_{re}$  为中继系统的后焦距;  $\theta_1$  为入射 DMD 各点光束夹角的一半, 由于 DMD 芯片的光学特性,  $\theta_1 \leq 12^\circ$ 。

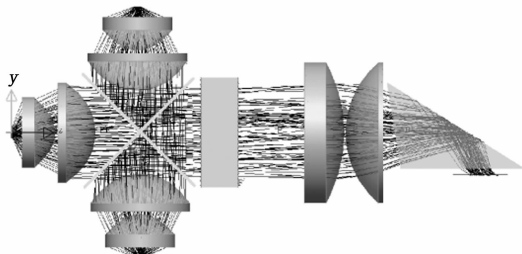


图 7 照明系统仿真光路示意图

## 4 成像系统设计与分析

### 4.1 成像系统指标分析

成像系统的设计优化由一系列的性能参数和结构参数决定的, 首先要根据成像系统的特性初步确定镜头的焦距大小。应用参考文献 [18] 中焦距  $f$ 、屏幕尺寸  $W$ 、成像器件尺寸  $w$  和投影距离  $L$  之间满足的关系式, 求得焦距  $f$  约为 8.294 mm, 设计指标中投影屏幕尺寸大于 36 英寸, 因此焦距  $f$  需要尽量满足  $\leq 8.294$  mm。为避免投影仪因抬高引入过大倾斜角, 导致梯形投影影响投影成像质量。因此, 会设置一个偏移量。设计指标中 Offset 为 100%, 应用参考文献 [19] 中像圆公式计算  $Y = \sqrt{4W^2 + L^2} = 10.40394$  mm。成像器件的尺寸和投影距离确定的情况下, 视场角决定了成像的大小, 即投影屏幕的大小。该设计的短焦微型投影成像系统的视场角  $2\omega = 2\arctan(y/2f) \approx 65^\circ$ 。视场角在  $60^\circ$  到  $90^\circ$  之间属于广角, 则该短焦微型投影成像系统属于广角镜头<sup>[20]</sup>。对于成像系统, 分辨率包含成像系统分辨率和微显示芯片的分辨率。成像系统的分辨率必须和微显示芯片的分辨率相匹配, 应用参考文献 [7] 计算该投影镜头的分辨率约为 93 lp/mm。成像系统的性能由焦距  $f$ 、 $F/\#$  和视场角  $2\omega$  决定, 应用经验公式  $C_m = 1/(F/\#) \cdot \tan\omega \cdot \sqrt{f/100}$  表示三者的关系<sup>[21]</sup>。(1)  $C_m \leq 0.24$ , 表明光学系统像差校正不难; (2)  $C_m > 0.24$ , 表明像差校正较难。本文设计的成像系统的  $C_m \approx 0.1$ , 在可允许校正范围内。

### 4.2 反远距结构

反远距结构<sup>[22]</sup>的高斯光学原理图如图 8 所示。设定如下条件:  $h_1 = f' = 1$ ,  $u_{a1} = -1$ , 则  $j = 1$ 。

前组主光线角放大率:

$$\gamma = \frac{u_a l'}{u_a 1} = \frac{u_a l'}{u_a l' - h_a 1 \varphi_1} = \frac{1}{1 - d\varphi_1} \quad (6)$$

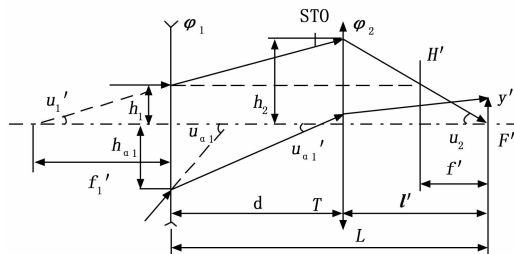


图 8 反远距结构原理图

前后组间距:

$$d = \frac{\gamma - 1}{\gamma\varphi_1} \quad (7)$$

工作距离:

$$l' = \frac{1}{\gamma} \quad (8)$$

系统总长:

$$L = d + l' = \frac{\gamma - 1}{\gamma\varphi_1} + \frac{1}{\gamma} \quad (9)$$

后组光焦度:

$$\varphi_2 = \frac{u_2' - h_1 \varphi_1}{h_1} = (1 - \varphi_1)\gamma \quad (10)$$

入射主光线高度:

$$h_a 1 = d \cdot u_a 1 = \frac{1 - \gamma}{\varphi_1} \quad (11)$$

由式 (6) ~ (11) 可知, 当工作距离  $l'$  确定后, 系统的总长  $L$ , 间距  $d$ , 后组光焦度  $\varphi_2$  和前组的通光口径  $D$  都是由前组光焦度  $\varphi_1$  决定的。较小的  $h_a 1$  有利于系统校正像差和减小体积。从像差校正的观点看, 前组光焦度  $\varphi_1$  不宜过大。如果焦距  $f'$  确定, 减小  $h_a 1$  将会引起前组光焦度  $\varphi_1$  增加, 导致后组光焦度  $\varphi_2$  增加, 使得与孔径相关的高阶像差迅速增加。然而, 前组光焦度  $\varphi_1$  的增加, 使前后组间距  $d$  减小, 从而使系统的长度  $L$  有所减少。设计参数之间相互矛盾、制约, 合理的前组光焦度值是光学系统像质优良的重要条件之一。

### 4.3 系统设计

首先, 根据相关参数和技术指标, 选定适当的初始结构。依据上述设计思想, 对初始结构进行优化。镜头组设计中由若干凹透镜、凸透镜共同组成, 这在消除像差、降低图像畸变方面具有重要的应用意义<sup>[23]</sup>。最终设计的短焦微型投影成像系统结构示意图如图 9, 焦距为 7.898 mm,  $F/\#$  为 1.8, 全视场角为  $67.2^\circ$ , 长度为 53.9 mm。

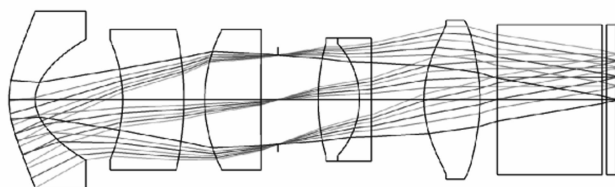


图 9 成像系统结构示意图

表 3 成像系统透镜数据

面型	曲率/mm	厚度/mm	玻璃材料
偶次非球	9.700	3.000	E48R
偶次非球	3.869	10.00	----
标准	-16.915	7.000	H-K50
标准	-37.530	2.400	----
标准	17.220	6.400	H-ZLAF76A
标准	319.761	2.000	----
标准	Infinity	4.600	----
标准	24.043	4.700	H-ZPK5
标准	-9.400	1.400	H-ZF52GT
标准	Infinity	6.000	----
偶次非球	13.000	6.400	E48R
偶次非球	-20.565	2.000	----
标准	Infinity	12.00	H-LAK7A
标准	Infinity	0.497	----
标准	Infinity	1.100	H-K5
标准	Infinity	0.303	----

该结构由 5 组 6 片透镜组成，透镜数据如表 3。其中，第 1 片透镜和第 6 片透镜均为光学塑料透镜，透镜的前后表面均为偶次非球面。结构中在第 1 片和第 6 片加入偶次球面，主要是能够更好的平衡轴外像差，提高光学系统的相对孔径，使得亮度和视场得到不同程度的增加。更有效地减小透镜数量，缩短光学系统的总长。系统中第 7 片玻璃和第 8 片玻璃的作用是：考虑到 TIR 棱镜和 DMD 芯片保护玻璃对成像系统像差的影响，优化时应在系统中加入相应厚度的等效玻璃平板，最大程度接近实际应用要求。非球面系数如表 4。

表 4 非球面系数

	表面 1	表面 2	表面 11	表面 12
K	-1.175	-1.245	-6.583	-3.197
4 th	-4.104E-04	1.689E-04	2.858E-04	1.084E-04
6 th	3.578E-06	6.134E-06	-3.795E-06	-5.405E-07
8 th	-1.836E-08	6.647E-08	3.878E-08	-6.108E-08
10 th	3.995E-11	-5.465E-10	-2.837E-10	-3.683E-11

#### 4.4 系统分析

短焦微型投影成像系统的归一化视场的远心度如表 5，远心度优于 0.67°，满足设计要求。

表 5 归一化视场的远心度

归一化视场	1	0.7	0.5	0.3	0
远心度/(°)	0.501	0.670	0.515	0.309	0.000

短焦微型投影成像系统的调制传递函数曲线如图 10。从图中可以看出，各个视场的 MTF 值在 93 lp/mm 处大于 0.52。很好地满足了设计要求。同时，MTF 曲线可以大致判断系统的像散情况，即：弧矢 (S) 和子午 (T) 曲线分开越大，表明像散越严重。从图中可以看出，像散情况良好。

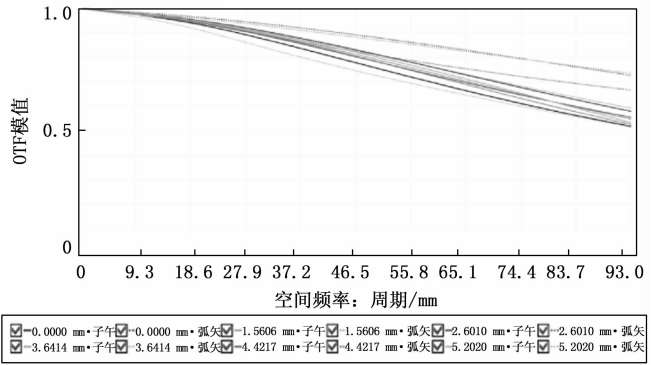


图 10 成像系统 MTF 曲线

短焦微型投影成像系统的场曲、畸变特性曲线如图 11。场曲在整个视场的区间为 -0.021 mm 至 0.049 mm，像散最大值小于 0.03 mm；成像系统在整个视场内的畸变绝对值小于 1%。满足设计要求。

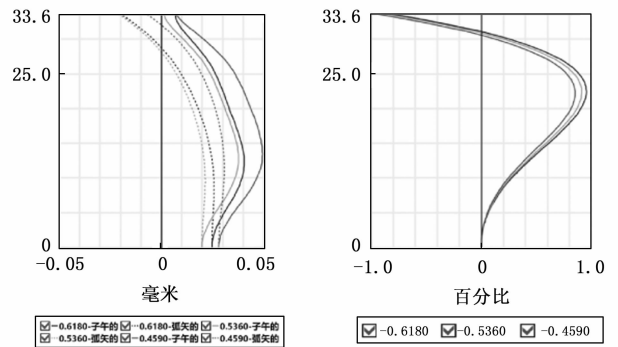


图 11 成像系统场曲、畸变图

短焦微型投影成像系统的垂轴色差特性曲线如图 12。单波长垂轴色差最大为 2.702 μm，满足设计要求。

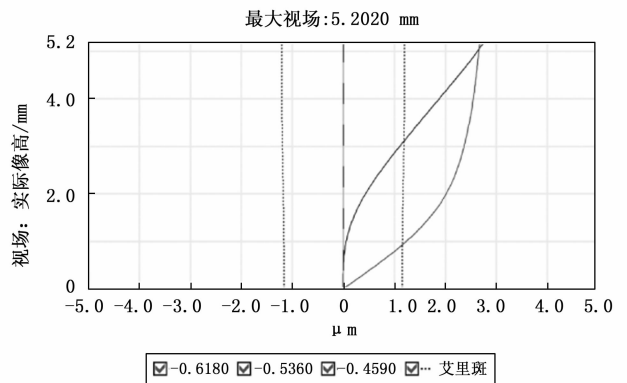


图 12 成像系统垂轴色差曲线图

短焦微型投影成像系统的相对照度曲线如图 13。系统整个视场的相对照度大于 95%，表明设计的成像系统的照度达到甚至超过指标要求。

对于一个设计完成的光学系统来说，公差情况如何是评价这个系统可行性的重要因素，公差过于严格会增加加工装调的要求，导致成本提高，还可能使成像质量不稳定，公差过于宽松可能会使成像质量变的很坏。总之，公差分

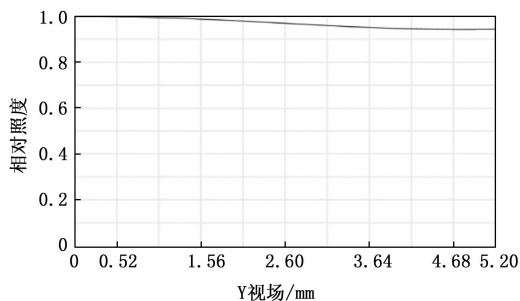


图 13 成像系统相对照度曲线图

配不合理会导致系统的性能缺陷, 所以合理分配公差对于一个光学系统来说非常重要。

分析成像系统加工装配过程中光学系统的偏差, 并以 93 lp/mm 处 MTF 值作为评价成像系统公差的标准。通过蒙特卡罗分析成像系统的公差情况。成像系统公差数据如表 6 所示, 分析结果如表 7 所示。

表 6 成像系统的公差数据

序号	光圈	不规则度	厚度 /mm	阿贝 /%	偏心 X/Y /mm	倾斜 X /Y/(°)	折射率
透镜 1	±2	±0.5	±0.02	±0.1	±0.01	±1	±0.001
透镜 2	±2	±0.5	±0.02	±0.1	±0.01	±1	±0.001
透镜 3	±2	±0.5	±0.02	±0.1	±0.01	±1	±0.001
透镜 4	±2	±0.5	±0.02	±0.1	±0.03	±1	±0.001
透镜 5	±2	±0.5	±0.02	±0.1	±0.01	±1	±0.001
透镜 6	±2	±0.5	±0.02	±0.1	±0.01	±1	±0.001
透镜 7	±2	±0.5	±0.02	±0.1	±0.01	±1	±0.001
透镜 8	±2	±0.5	±0.02	±0.1	±0.01	±1	±0.001

表 7 成像系统的 1 000 次蒙特卡罗分析结果

参数	数值			
蒙特卡洛百分比/%	98	90	80	50
传递函数 93 lp/mm	0.358 8	0.388 1	0.404 9	0.429 9

公差分析结果可知, 98% 时 93 lp/mm 处 MTF 大于 0.35, 表明该设计具有良好的可加工性。

## 5 实验结果与分析

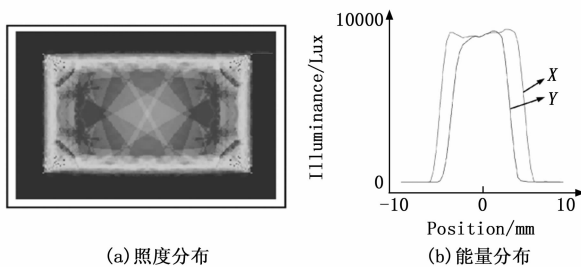
### 5.1 照明系统实验分析

基于光学系统设计, 我们对照明系统的 DMD 表面光照特性进行了如下测试。照明系统的 DMD 表面的照度分布如图 14 (a) 所示。计算图 14 (a) 定义目标区域内的照度均匀度的评价公式为:

$$U = [1 - (E_{\max} - E_{\text{ave}}) / E_{\text{ave}}] \times 100\% \quad (12)$$

由图 14 (a) 可知, 光束经过准直系统、复眼透镜及中继系统后, 到达 DMD 表面呈一个照度均匀的矩形, 其长宽比为 16: 9。同时, 采用 ANSI9 点法对 DMD 表面照度进行采样, 照度均匀性为 90.91%。入射到 X-Plate 的光能量为 18.495 w, 最终目标面能量为 16.359 w, 整个系统的光效率达到了 88.45%。DMD 表面的仿真实验光通量分布曲线图如图 14 (b) 所示, 分别展示了 DMD 表面 X 和 Y

同方向上的光通量分布, 光通量最高达到近  $10^4$  Lux。



(a) 照度分布

图 14 照度及能量分布

### 5.2 成像系统实验分析

为了测试成像系统的实际效果, 对被测镜头的分辨率进行试验。可采用人眼通过被测镜头直接对分辨率板观测, 图 15 所示为 USAF1951 型号分辨率板, 经被测镜头能分辨的最清晰的线对数, 将其序号与产品手册对照得到对应的镜头分辨率。考虑到人眼观测引入误差, 基于实验室的分辨率检测系统, 将被测镜头放置在检测设备上, 分辨率板选用国家标准分辨率板号, 畸变阈值为 1, 实验效果图如图 16 所示。实验所得的分辨率为 91 lp/mm, 在误差合理范围内符合设计要求。畸变值为 0.939 1, 小于畸变阈值, 说明在误差允许范围内被测镜头的畸变较小, 满足设计要求。

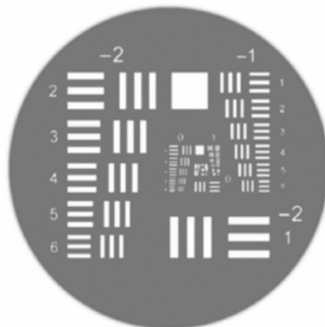


图 15 分辨率板观测图像

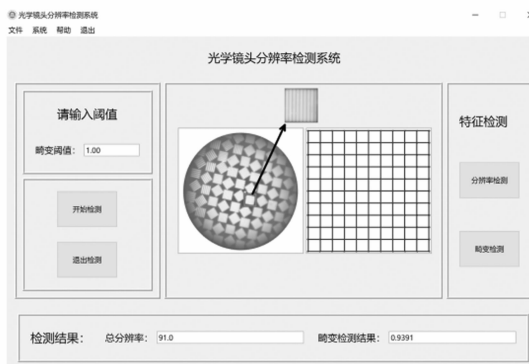


图 16 检测界面效果图

## 6 结束语

本文基于复眼透镜的匀光特性, 采用复眼透镜匀化整形光源、棱镜转向的照明技术方案对照明系统的各分系统进行设计, 并分析其光照度分布; 再基于反远距结构成像

原理, 结合非球面和像方远心技术, 分析设计成像系统; 最终设计出一款适用于 0.3 英寸的小尺寸、高亮度的投影系统。照明系统的数字微镜器件的照度均匀性达到 90.91%, 整个系统的光效率也达到了 88.45%; 成像系统长度为 53.9 mm, 焦距为 7.898 mm, 全视场达到 67°, 远心度优于 0.67°, 在 93 lp/mm 处调制传递函数大于 0.52, 垂轴色差在 0.5 pixels 以内, 畸变小于 1.0%。本文的研究工作取得了较好的结果, 但还有一定的优化空间, 后续将从节约成本、降低加工难度等方面入手。通过优化光学系统以缩减镜头材料种类, 减小批量生产成本; 再通过优化非球面系数, 进一步降低加工难度等。

#### 参考文献:

- [1] 潘国涛, 闫钰锋, 于 信, 等. 矩形大口径激光光束质量评价光学系统设计 [J]. 中国光学, 2022, 15 (2): 306-317.
- [2] 刘 峰, 黄 镇, 陈 丽, 等. 基于 LED 的均匀照明投影光路设计 [J]. 广东工业大学学报, 2012 (3): 73-76.
- [3] 刘 旖, 林祖伦, 祁康成, 等. 基于 LED 光源的单片式 DLP 照明系统设计 [J]. 光电工程, 2011 (9): 99-103.
- [4] 芮大为. LED 微型投影光源的二次光学设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [5] 陈 琛, 李维善, 张 禹, 等. 短焦数字投影镜头的光学设计 [J]. 光子学报, 2011, 40 (12): 1855-1859.
- [6] 刘宵婵, 陈 琛, 单 宏, 等. 基于 4k 分辨率小型投影机的鱼眼镜头设计 [J]. 应用光学, 2020, 41 (5): 1060-1066.
- [7] MWA B, Ak A, STB C, et al. Economic assessment for additive manufacturing of automotive end-use parts through digital light processing (DLP) [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2021, 35: 268-280.
- [8] 楼永坚, 黄晗骋, 林 斌. 基于数字光处理的结构光三维扫描系统的设计 [J]. 光学仪器, 2018, 40 (3): 65-70.
- [9] 罗隆恒, 林祖伦. 基于数字光处理的微型投影设备设计 [J].
- [12] POULARAKIS K, LLORCA J, TULION A M, et al. Joint service placement and request routing in multi-cell mobile edge computing networks [C]. //Proc. of IEEE Conference on Computer Communications, 2019, 10-18.
- [13] HE TING, KHAMFROUSH H, WANG SHIQIANG, et al. It's hard to share: Joint service placement and request scheduling in edge clouds with sharable and non-sharable resources [C]. //Proc. of 2018 IEEE 38th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), 2018, 365-375.
- [14] TRAN T X, CHAN K, POMPILI D, COSTA. Cost-aware service caching and task offloading assignment in mobile-edge computing [C]. // Proc. of 2019 16th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON), 2019, 1-9.
- [15] MA XIAO, ZHOU AO, ZHANG SHAN, et al. Cooperative service caching and workload scheduling in mobile edge computing [C]. //Proc. of IEEE Conference on Computer Communications, 2019, 2076-2085.

光学仪器, 2017, 39 (1): 50-55.

- [10] 于百华, 田志辉, 苏东奇, 等. 超短焦投影系统中自由曲面的多视场优化迭代设计方法 [J]. 光子学报, 2019, 48 (3): 46-53.
- [11] 王 康, 段 洁, 周见红, 等. 便携式投影仪投影物镜设计 [J]. 应用光学, 2019, 40 (2): 316-322.
- [12] YU BAIHUA, TIAN ZHIHUI, SU DONGQI, et al. Optical design of an ultra-short-focus projection system with low throw ratio based on a freeform surface mirror [J]. Chinese Optics, 2020, 13 (2): 363-371.
- [13] OHARA K, KUNZMAN A. Video processing technique for multi-media HDTV with digital micro-mirror array [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1999, 45 (3): 604-610.
- [14] 肖 勇. 基于 DLP 的微型投影仪驱动电路设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [15] 张以漠. 应用光学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [16] 屈碧香. 基于 RGB 三色 LED 光源照明的 DLP 投影系统光路设计 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [17] 郁道银, 谈恒英. 工程光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 2-24.
- [18] 黄红林, 许 键. 基于 Zemax 的微型投影镜头设计 [J]. 光学仪器, 2016, 38 (1): 49-52.
- [19] 王显锋. 短焦微型投影系统的光学设计 [D]. 苏州: 苏州大学, 2018.
- [20] 李维善, 陈 琛, 张 禹, 等. 基于 ZEMAX 软件的 DLP 微型投影镜头的设计 [J]. 应用光学, 2011, 32 (6): 1121-1125.
- [21] 萧泽新. 工程光学设计: 第 2 版 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [22] 沈为民, 薛鸣球, 余建军. 大视场大相对孔径长波红外物镜 [J]. 光子学报, 2004 (4): 460-463.
- [23] 李 军, 蔡 屹, 谷 鹏, 等. 基于机器视觉的口岸车道闸机抬杆故障远程检测方法 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (3): 19-24.
- [16] KENNEDY J, EBERHART R. Particle Swarm Optimization [C]. //Proc. of IEEE International Conference on Neural Network. IEEE, 1995, 1942-1948.
- [17] 汪小威, 林 宁, 胡玉平. 移动边缘计算中利用 BPSO 的任务卸载策略 [J]. 计算机工程与设计, 2021, 42 (12): 3333-3341.
- [18] 周艳平, 蔡 素, 李金鹏. 一种粒子群和改进自适应差分进化混合算法及在生产调度中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (8): 227-230.
- [19] TANG Y, WANG Z, FANG J. Parameters identification of unknown delayed genetic regulatory network by a switching particle swarm optimization algorithm [J]. Expert Systems with Applications, 2011 (38): 2523-2535.
- [20] 张娟芝, 段中兴, 熊福力. 一种自适应粒子群算法在云资源调度中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (12): 217-221.
- [21] 张 钰, 王 蕾, 周红标, 等. 基于竞争学习的粒子群优化算法设计及应用 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (8): 182-189.