

高分辨率像方远心连续变焦投影镜头的设计

邓 强¹, 李升辉²

- (1. 西安美术学院 影视动画系, 陕西 西安 710065;
2. 华中科技大学 工程实践创新中心, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为了满足基于 TIR 棱镜的高分辨率工程投影机对高分辨率、高照度均匀性、长后工作距离及连续变焦投影的工作需求, 设计了一种基于 TIR 棱镜的高分辨率像方远心连续变焦投影镜头。该镜头焦距为 25~32 mm, $F\#$ 为 2.4, 工作在可见光波段。该投影镜头具有靶面大、分辨率高、后工作距离长及照度均匀性高的设计难点, 通过选择反远距的双高斯结构, 控制像方远心度, 通过采用不同材料搭配, 并借助 CODE V 的玻璃专家优化功能, 反复迭代优化, 最终, 得到满足使用要求的连续变焦投影镜头。结果表明: 该镜头在连续变焦过程中各视场 MTF 值在 72 lp/mm 处不低于 0.4, 各视场 RMS 弥散斑直径小于 8.5 μm , 畸变小于 2%, 短焦边缘视场照度均匀性大于 95%。该连续变焦投影镜头采用全球面设计, 结构紧凑, 成像质量好, 畸变、垂轴色差和照度均匀性都得到了较好的控制, 可以很好地满足高分辨率工程投影机的投影需求。

关键词: 投影镜头; 连续变焦; 像方远心; 垂轴色差; 照度均匀

中图分类号: TN216 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.1114005

Design of high-resolution image square telecentric continuous zoom projection lens based on TIR prism

Deng Qiang¹, Li Shenghui²

- (1. Department of Film and Television Animation, Xi'an Academy of Fine Arts, Xi'an 710065, China;
2. Center for Practice Innovations, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: To meet the requirements of high-resolution, high-illuminance uniformity, long working distance and continuous zoom projection of engineering projectors based on TIR prisms, a new method for continuous zoom and high-resolution telecentric projection lens design was proposed. The focal length of the designed projection lens with $F/2.4$ ranged from 25 mm to 32 mm, and the lens was specialized for the visible light application. The properties of the large target surface, high-resolution, long working distance and good illumination uniformity were the main difficulties in the projection lens design. The double Gaussian model with anti-distance was chosen as the initial structure. Then a specialized control strategy for image telecentric was employed. The whole design process was conducted in CODE V associated with the expert automatic optimization strategies, such as the choice of the types of different

收稿日期: 2019-07-05; 修订日期: 2019-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(61805089)

作者简介: 邓强(1977-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事三维动画、影像艺术、虚拟现实艺术方面的研究。

Email: 368181757@qq.com

通讯作者: 李升辉(1982-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事光学设计和光电技术方面的研究。Email: lishenghui@hust.edu.cn

glasses. The results show that the value of MTF within the view fields is no less than 0.4 at 72 lp/mm, the diameters of RMS diffuser is less than 8.5 μm , the distortion is under 2%, and uniformity of field of view of the short focal edge is greater than 95%. The projection lens designed with spherical surfaces show the compact structure and well image quality. The key points, such as distortion, vertical axis chromatic aberration and illuminance uniformity, are also well controlled in this design, which demonstrates that the designed project lens can meet the requirements of high-resolution engineering projectors well.

Key words: projection lens; continuous zoom; image-side telecentric; vertical axis chromatic aberration; illumination uniformity

0 引言

投影显示是一种对环境要求较低的显示技术,适用于各种环境。与平板显示相比,投影显示可以实现超大屏幕显示,是一种最经济、性价比最高的显示技术。近年来,由于投影应用场景的不断增加和投影显示技术的更新换代,投影显示行业迅猛发展。其中,DLP 投影显示技术凭借其高分辨率、高对比度和丰富的色彩得到了迅速扩张,广泛应用于数字媒体展览、数字电影影院、科技馆、会展中心、主题娱乐等领域。光学引擎是投影机的重要组成部分,光学引擎的好坏直接决定着投影机的亮度和照度均匀性,从而决定投影机的整机性能。投影镜头又是光学引擎的重要组成部分,投影镜头将投影机通过 DMD 器件反射出来的光束投射到大屏幕上。投影镜头的分辨率、照度均匀性等光学性能直接影响投影机的整机光学性能,所以,投影镜头是投影机中的关键部件。高端投影镜头的设计、加工、制造多被美能达等国外光学公司垄断,国内起步较晚。投影机中 TIR 棱镜的存在导致投影镜头要有长后工作距离,这也大大增加了投影镜头的设计难度;工程投影机一般要求投影镜头具有变焦功能,满足大部分领域的投影需求。因此,为了满足高分辨率工程投影机对连续变焦、成像质量、照度均匀性等方面的特殊要求,需要设计大靶面、高分辨率、长后工作距离、高照度均匀性的像方远心投影镜头。

该投影镜头具有靶面大、分辨率高、后工作距离长及照度均匀性高的设计难点,根据靶面大、后工作距离长的特点可以选择双高斯式的初始结构,根据

照度均匀性要求高的特点,控制像方远心度,采用不同光学材料搭配,借助 CODE V 的玻璃专家宏命令并编写优化命令,反复迭代优化,合理取舍优化权重,保证投影镜头合理的公差分配,寻找满足要求的优化结果。

该投影镜头在连续变焦过程中各视场 MTF 值在 72 lp/mm 处不低于 0.4,各视场 RMS 弥散斑直径小于 8.5 μm ,畸变小于 2%,短焦边缘视场照度均匀性大于 95%。该投影镜头采用全球面设计,结构紧凑,成像质量好,畸变、垂轴色差和照度均匀性都得到了较好的控制,能够很好地满足高分辨率工程投影机的投影需求^[1-6]。

1 设计分析

连续变焦系统一般分为光学补偿、机械补偿和双组联动补偿,其中机械补偿式连续变焦光学系统一般通过移动变倍组和补偿组的位置来实现连续变焦。变焦原理示意图如图 1 所示,其中 Φ_1 、 Φ_2 、 Φ_3 、 Φ_4 分别为连续变焦投影镜头的前固定组、变倍组、补偿

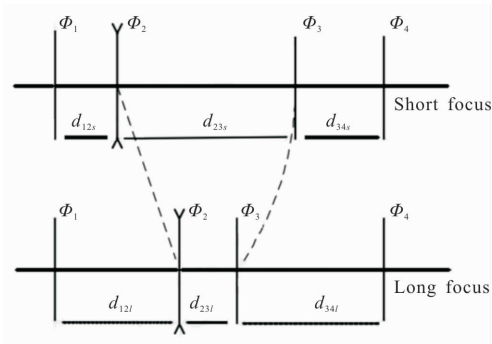


图 1 变焦原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the zoom principle

组和后固定组, f_1' 、 f_2' 、 f_3' 、 f_4' 分别为四个组元的焦距, β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 分别为各组元的倍率。其变倍组沿直线, 补偿组沿曲线向中间靠拢, 从而实现短焦到长焦的变化。

首先确定某个位置为变焦的初始位置, 这里取长焦位置为初始位置。长焦时变倍组与补偿组间距设为 d_{23} 。然后, 根据变焦方程中对补偿组焦距的限制, 取一个补偿组焦距 f_3' 。此时, 设前固定组和变倍组在初始位置的间距 d_{12} 。由以上量可求得变倍组的初始放大率:

$$\beta_2 = \frac{-[D-2(f_2'+f_3')] \pm \left\{ D-2(f_2'+f_3')^2 - 4 \left(f_2' + \frac{f_3'}{B} \right) (f_2'+f_3'B) \right\}^{1/2}}{2 \left(f_2' + \frac{f_3'}{B} \right)} \quad (4)$$

式中,

$$\begin{cases} B = M\beta_2\beta_3 \\ D = 2(f_2'+f_3') - f_2' \left(\frac{1}{\beta_2} + \beta_2 \right) - f_3' \left(\frac{1}{\beta_3} + \beta_3 \right) \end{cases} \quad (5)$$

该变焦位置补偿组的倍率:

$$\beta_3 = \frac{B}{\beta_2} \quad (6)$$

变倍组的移动量:

$$q = f_2' \left(\frac{1}{\beta_2} - \beta_2 \right) \quad (7)$$

补偿组的移动量:

$$\Delta = f_3'(\beta_3 - \beta_3) \quad (8)$$

该变焦位置, 前固定组与变倍组之间的间隔:

$$d_{12} = d_{12} + q \quad (9)$$

该变焦位置, 变倍组与补偿组之间的间隔:

$$d_{23} = d_{23} - q + \Delta \quad (10)$$

重复以上步骤, 就可以计算出各个焦距位置变倍组与补偿组的移动距离和组元之间的间隔。

对于后固定组的取法比较灵活, 一般可设定一个倍率 β_4 。对于 β_4 的取值大小也有要求, 一般 β_4 取得越大, 整个物镜的尺寸可以变小, 但各镜组的焦距短, 像差不易校正。再根据以下公式即可求得后固定组焦距 f_4' :

$$\begin{cases} l_4' = \beta_4 l_4 \\ \frac{1}{l_4'} - \frac{1}{l_4} = \frac{1}{f_4'} \end{cases} \quad (11)$$

根据以上公式, 借助 CODE V 可确定变焦镜头的初始结构。前固定组焦距为: $-150 < f_1' < -100$, 变倍

$$\beta_{2l} = \frac{f_2'}{f_2' + f_1' - d_{12l}} \quad (1)$$

进一步, 可求得补偿组的初始放大率:

$$\beta_{3l} = \frac{f_3'}{f_3' + f_2'(1 - \beta_{2l}) - d_{12l}} \quad (2)$$

运动镜组开始移动后, 可求得某变焦位置的变倍比:

$$M = \frac{f_l'}{f'} \quad (3)$$

式中: f_l' 为系统长焦距; f' 为该变焦位置的焦距。

该变焦位置变倍组的倍率:

组为: $80 < f_2' < 100$, 补偿组焦距为: $-55 < f_3' < -45$, 后固定组焦距为: $30 < f_1' < 40$ 。

TIR 棱镜即全反射棱镜, 投影光学系统经常用其分光。TIR 棱镜入射端为照明光路, 出射端为投影镜头, 中间衔接部分为 DMD。入射光从棱镜入射端进入, 在棱镜内发生全反射, 反射光从 TIR 棱镜侧面出射, 并投射到 DMD 上, DMD 将光束反射再次透过 TIR 棱镜, 进入投影镜头。TIR 棱镜是照明光路和投影镜头连接的必要光学元件, TIR 棱镜的存在导致投影镜头具有较长的后工作距离, 大大增加了投影镜头的设计难度。由于该连续变焦投影镜头又具有大相对孔径大视场的特点, 所以该连续变焦投影镜头结构选用具有较长后工作距离和较大视场的反远距结构。

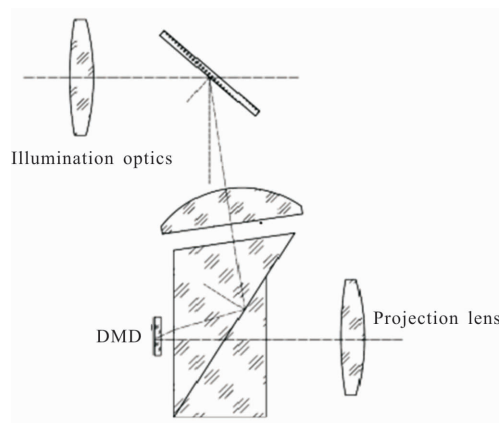


图 2 基于 TIR 棱镜的投影机光学引擎示意图

Fig.2 Schematic diagram of the projector optical engine based on TIR prism

反远距结构是一种焦距较短而后截距很长的物镜，这种物镜的结构大多是具有负的前组和正的后组，反远距物镜的孔径光阑和出瞳几乎重合并位于正的后组的主平面上，或孔径光阑位于正的后组前焦点附近^[7-11]，反远距结构示意图如图 3 所示。

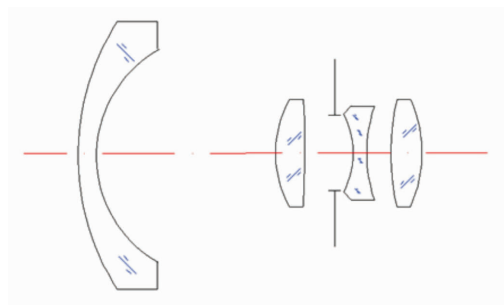


图 3 反远距结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of the anti-distance structure

照度均匀性是投影镜头设计的另一个难点，随着视场角增大，边缘视场的照度会急剧下降，当边缘视场的照度和中心视场的照度相差超过 30% 时，人眼就会感觉到明显的差异。轴外像点的照度^[1]可以表示为：

$$E = KE_0 \cos^4 \omega \quad (12)$$

式中： E_0 为轴上像点的照度； ω 为像方半视场角； K 为轴外斜光束截面积与轴上点光束截面积之比。

由轴外点的照度公式可知：像面照度随着像方视场角的四次方而衰减。对于投影镜头而言，提高镜头边缘视场照度的方法只有两个，一个是合理设置光阑位置，控制像方主光线角度，建立像方远心结构，以减小像方视场角 ω ，从而提高投影镜头边缘视场的相对照度；另一种方法是利用像差渐晕使轴外物点成像光束截面尽量大，促使 K 值增大，从而提高投影镜头边缘视场的相对照度。

为了保证投影镜头的照度均匀性，需要较好地控制镜头的远心度，控制镜头的远心度又会给轴外像差的校正带来一定的困难，需要综合考虑，反复权衡。文中所设计连续变焦投影镜头为标准镜头，控制镜头像方远心度，会引入部分轴外像差，但通过引入低色散消色差材料可消除之。

2 系统设计

根据以上分析，基于 0.67inch DMD 芯片，设计

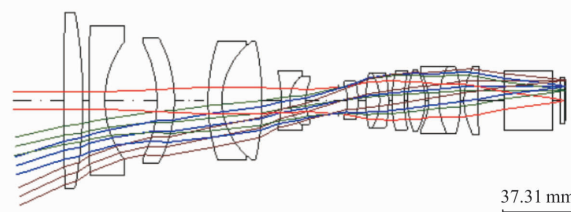
了一款基于 TIR 棱镜的高分辨率像方远心连续变焦投影镜头，其光学参数如表 1 所示。

表 1 光学参数

Tab.1 Optical parameters

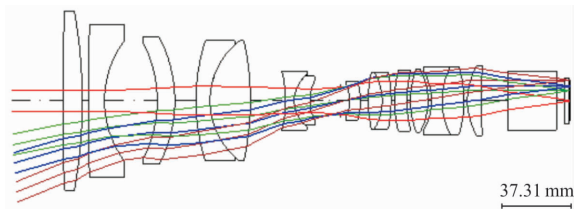
Optical system parameters	Values
Spectral region/nm	420-650
Focus/mm	25-32
FOV/(°)	30.11×19.08-23.73×14.96
Image size/mm	15.4×9.6
F/#	2.4
Telecentricity/(°)	<1

基于 TIR 棱镜的高分辨率像方远心连续变焦投影镜头设计时，根据光的可逆性及投影镜头的特点，按照物像颠倒设计，即设计镜头的像方为投影镜头的物方(DMD)。投影机照明光路将导光棒输出的矩形光束转向到 DMD 上，DMD 上的微反射镜将光束反射到投影镜头，为了保证投影机有较高的均匀性和合理的空间布局，一般会采用 TIR 棱镜转向，所以在设计投影镜头时需要将 TIR 棱镜等效成平板玻璃设计，增加了镜头的后工作距离。在设计过程中采用 CODE V 自带的玻璃专家宏命令结合自己编写的优化命令进行反复优化迭代，更换不同的材料搭配，在保证各边界条件的情况下获得最佳成像效果。基于 TIR 棱镜的高分辨率像方远心连续变焦投影镜头包含 15 片透镜，4 组胶合透镜，均为球面镜，变倍组为正胶合透镜组，补偿组为负胶合透镜组，负组补偿相对于正组补偿长度较短，变焦形式更加灵活。变倍组和补偿组向中间运动时为短焦，向两端运动时为长焦^[12-14]。变倍组的行程为 11.34 mm，补偿组的行程为 8 mm，镜头连续变焦过程中，变焦曲线平滑无拐点，凸轮升角为 5.8°，升角较小，满足加工要求。系统的变焦凸轮曲线如图 5 所示。最终得到的镜头总长为 235 mm，最大口径为 95 mm，光学系统二维图如图 4 所示。

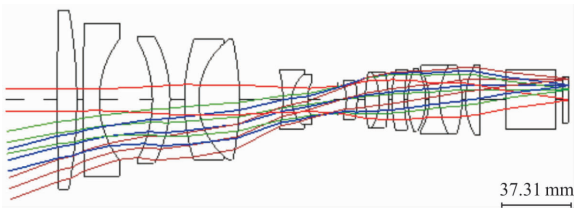


(a) 短焦

(a) Short focus



(b) 中焦
(b) Medium focus



(c) 长焦
(c) Long focus

图 4 基于 TIR 棱镜的高分辨率像方远心连续变焦投影镜头示意图
Fig.4 Schematic diagram of high-resolution image center telecentric continuous zoom projection lens based on TIR prism

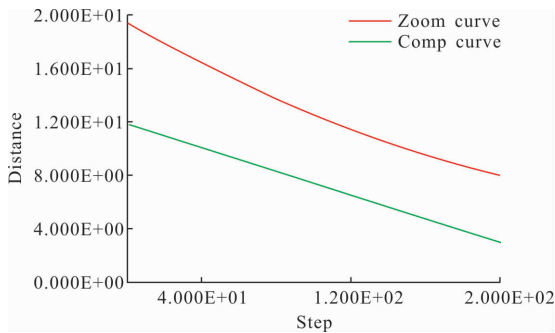


图 5 镜头变焦凸轮曲线图
Fig.5 Curves of cam of designed zoom lens

3 系统像质分析

基于 TIR 棱镜的高分辨率像方远心连续变焦投影镜头主要使用调制传递函数 MTF、RMS 点列图、畸变图及垂轴色差图来进行评价。

3.1 MTF 分析

该连续变焦投影镜头各个焦距在空间频率为 72 lp/mm 时的 MTF 如图 6 所示。

由图 6 可知：该连续变焦投影镜头各个焦距在空间频率为 72 lp/mm 时的轴上 MTF>0.45，轴外 MTF>0.35，满足投影机使用要求。

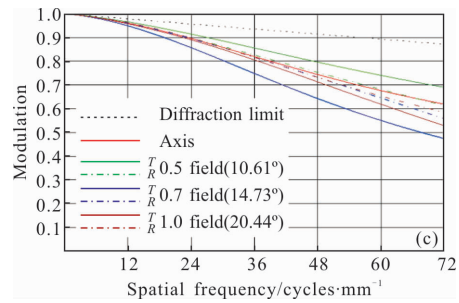
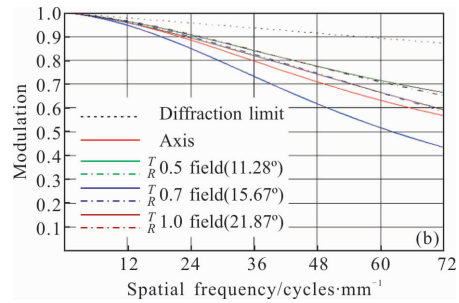
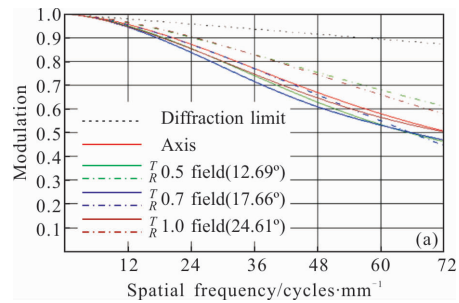


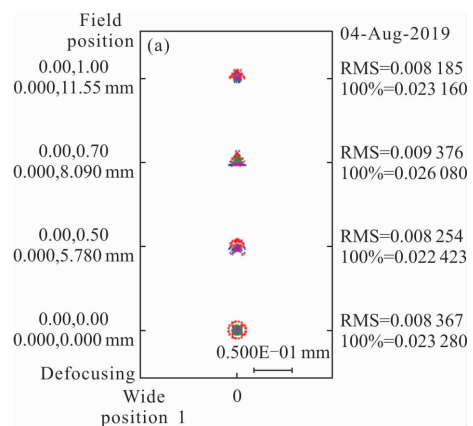
图 6 镜头传递函数曲线图

Fig.6 Transfer function graph of the designed lens

3.2 RMS 点列图分析

该连续变焦投影镜头各个焦距下点列图如图 7 所示。

由图 7 可知该连续变焦投影镜头各个焦距下的 RMS 弥散圆均方根值均接近 DMD 的一个像元尺寸，从而说明了该光学系统在各个焦位都有较好的像质。



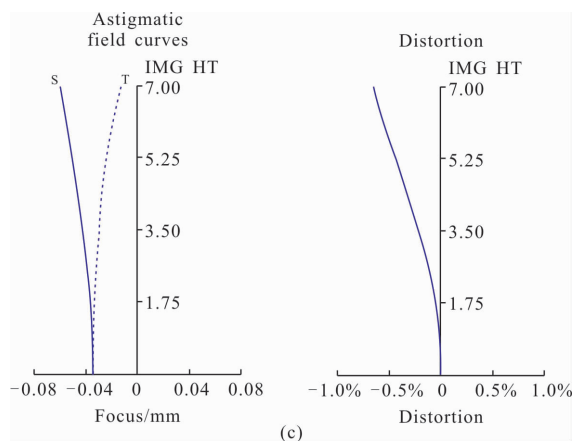
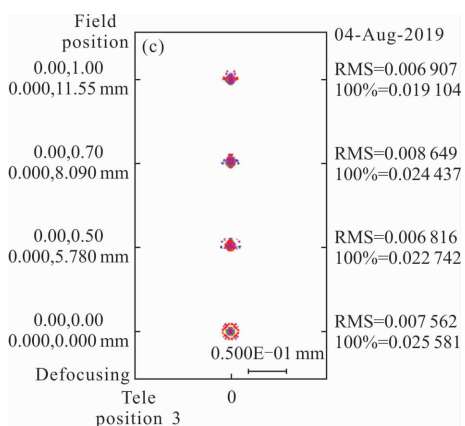
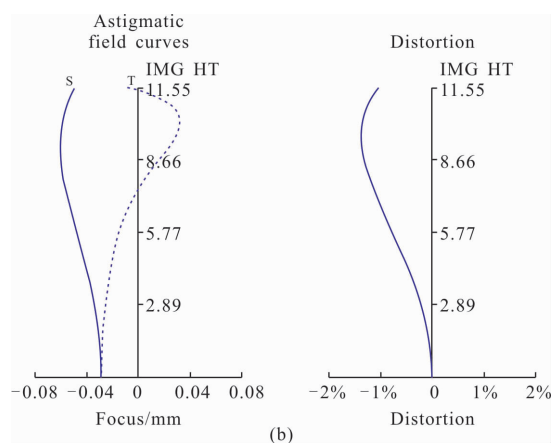
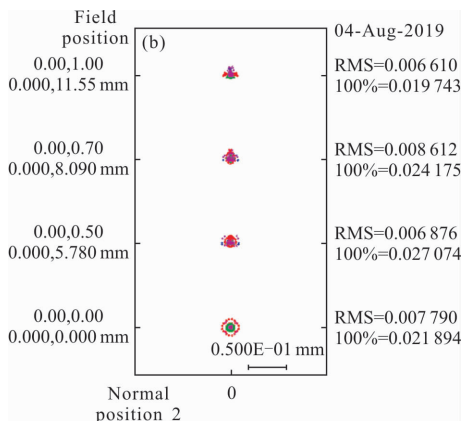


图 7 镜头 RMS 点列图

Fig.7 RMS spot map of the designed lens

图 8 镜头畸变图

Fig.8 Distortion of the designed lens

3.3 畸变分析

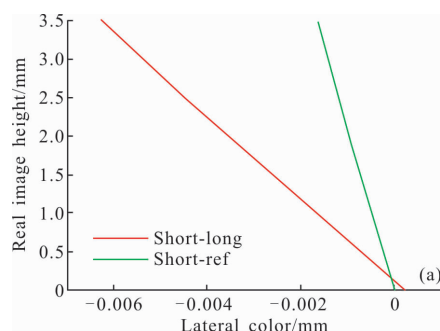
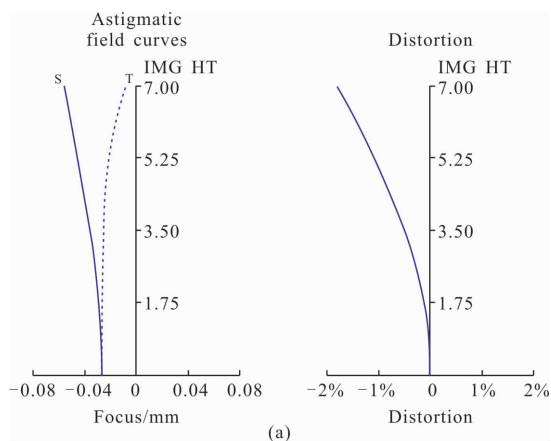
镜头畸变不影响成像清晰程度，但是会影响画面的弯曲变形，较大的畸变会直接影响使用者的观感，该连续变焦投影镜头各个焦距下的畸变图如图 8 所示。

由图 8 可知该连续变焦投影镜头各个焦距下的畸变值均小于 2%，不会使投影画面产生明显的弯曲变形，满足投影机使用要求。

3.4 垂轴色差分析

垂轴色差表示短波和长波的分开程度，垂轴色差大就会导致投影画面出现红绿彩边，难以消除。该连续变焦投影镜头各个焦位下的垂轴色差图，如图 9 所示。

由图 9 可知：该连续变焦投影镜头各个焦距下的垂轴色差均小于 1 个微反射镜尺寸，边缘视场不会产生彩边现象，满足投影机使用要求。



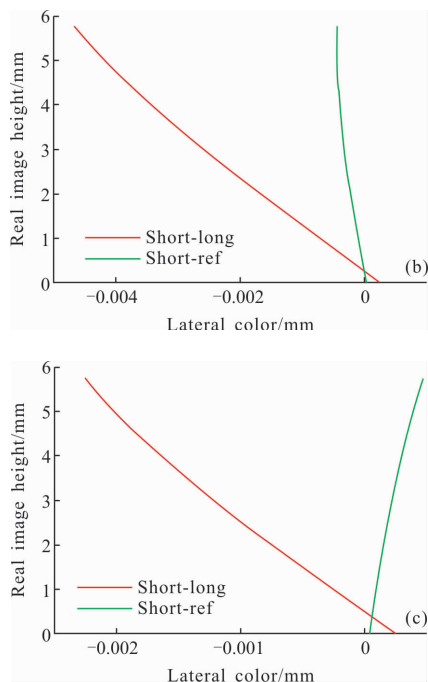


图 9 镜头垂轴色差图

Fig.9 Vertical axis color difference of the designed lens

3.5 公差分析

基于 TIR 棱镜的高分辨率像方远心连续变焦投影镜头的公差分配如表 2 和表 3 所示。

表 2 短焦端 MTF 变化情况

Tab.2 MTF changes of the short-focus end

FOV	Azimuth	MTF(72 lp/mm)		Movement of the compensation item	
		Design value	Design value & tolerance	BFL	Front fixed unit
0	Meridian plane	0.51	0.45		
0.7	Meridian plane	0.48	0.4	1.2	0.32
1	Meridian plane	0.5	0.34		

表 3 长焦端 MTF 变化情况

Tab.3 MTF changes of the long-focus end

FOV	Azimuth	MTF(72 lp/mm)		Movement of the compensation item	
		Design value	Design value & tolerance	BFL	Front fixed unit
0	Meridian plane	0.61	0.52		
0.7	Meridian plane	0.69	0.57	1.2	0.32
1	Meridian plane	0.48	0.39		

由表 2 和表 3 连续变焦投影镜头公差分配结果可知该镜头有一定的公差容限,满足设计要求。

4 结论

文中基于连续变焦投影镜头理论分析、照度均匀性理论分析,设计了高分辨率像方远心连续变焦投影镜头。该连续变焦投影镜头焦距为 25~32 mm, F# 为 2.4,工作波段为可见光波段,该投影镜头在连续变焦过程中各视场 MTF 值在 72 lp/mm 处大于 0.4,各视场 RMS 弥散斑直径小于 8.5 μm,畸变小于 2%,镜头像方远心度小于 0.5°,镜头短焦照度均匀性在 95%以上。该镜头通过理论分析及借助软件优化设计,提高了镜头成像质量;控制了垂轴色差,保证了投影画面的清晰及边缘的锐利无彩边;控制了公差分配,保证了镜头的可加工性;控制了连续变焦曲线,保证了连续变焦过程中画面清晰无拐点。该投影镜头可广泛应用于基于 TIR 棱镜的高分辨率工程投影机,可以满足大型会议室、科技馆、会展中心等工程投影需求。

参考文献:

[1] Ni Lixia, Li Haifeng, Liu Xu. A large-scale multi-projection light-field display based on multi-view sampling calibration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(6): 0603004. (in Chinese)
倪丽霞, 李海峰, 刘旭. 基于多视角采样校正的大尺度多投影光场显示系统 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(6): 0603004.

[2] Guo Lili, Li Lijuan, Hou Maosheng, et al. Spatial positioning accuracy analysis of intelligent laser 3D projection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 0806006. (in Chinese)
郭丽丽, 李丽娟, 侯茂盛, 等. 智能激光 3D 投影空间定位精度分析 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(8): 0806006.

[3] Xu Mingfei, Pang Wubin, Xu Xiangru, et al. Optical design of high-numerical aperture lithographic lenses [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(4): 740-746. (in Chinese)
徐明飞, 庞武斌, 徐象如, 等. 高数值孔径投影光刻物镜的光学设计 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(4): 740-746.

[4] Zhu Xiangbing, Qian Liyong, Chen Jin, et al. Optical path design of LED and GRIN lens projection system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(1): 62-69. (in Chinese)

- 朱向冰, 钱立勇, 陈瑾, 等. LED 和梯度折射率透镜投影系统光路设计[J]. 光学精密工程, 2018, 26(1): 62-69.
- [5] Feng Siyue, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu, et al. Design of projection system for a micro-LED array [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(1): 88-96. (in Chinese)
冯思悦, 梁静秋, 梁中翥, 等. LED 微阵列投影系统设计[J]. 中国光学, 2019, 12(1): 88-96.
- [6] Zhang Jie, Ni Xiaolong, Liu Zhi, et al. Design of laser beam expansion systems with high precision and continuous variable ratios [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12 (3): 693-700. (in Chinese)
张洁, 倪小龙, 刘智, 等. 高精度连续变倍率激光扩束系统设计 [J]. 中国光学, 2019, 12(3): 693-700.
- [7] Liu Xv, Li Haifeng. Modern Projection Display Technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2009. (in Chinese)
刘旭, 李海峰. 现代投影显示技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2009.
- [8] Zhong Yan. Optical design of the laser projection system based on DLP technology [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
钟岩. 基于 DLP 技术的激光投影系统光路设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2015.
- [9] Hou Guozhu, Lyu Lijun. Design of large aperture zoom projection lens [J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(3): 405-411. (in Chinese)
侯国柱, 吕丽军. 大孔径变焦投影镜头设计[J]. 应用光学, 2018, 39(3): 405-411.
- [10] Lin Peng, Yu Jianhua, Chen Riguang, et al. Study on Optical Engine System for DLP of Projection Display Based on LED [J]. *Advanced Display*, 2012, 23 (4): 49-53. (in Chinese)
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, 23(4): 49-53.
- [11] Zhang Zengbao. Investigation on optical engine applied to projection display system [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)
张增宝. 投影显示系统光学引擎研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004.
- [12] Li Lin, An Liansheng. Theory and Application of Computer Aided Optical Design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
李林, 安连生. 计算机辅助光学设计的理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [13] Li Xiaotong, Cen Zhaofeng. Geometric Optics & Aberration & Optical Design [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2003. (in Chinese)
李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003.
- [14] Xiao Zexin. Engineering Optical Design [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. (in Chinese)
萧泽新. 工程光学设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.