

文章编号:1002-2082(2019)02-0316-07

便携式投影仪投影物镜设计

王 康¹,段 洁^{1,2},周见红¹,王 晨¹,付跃刚^{1,2}

(1. 长春理工大学 光电工程学院,吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学 博士后流动站,吉林 长春 130022)

摘 要:针对当前投影仪光源功耗大,光投影稳定性差,系统结构大的缺点,利用 Zemax 软件,设计出了一款大视场,短焦距,结构紧凑,适用于便携式投影仪的投影物镜系统。经过优化处理,最终获得的结构具有良好的成像质量,在空间频率为 80 lp/mm 处中心视场 $MTF \geq 0.7$,0.8 视场 $MTF \geq 0.6$,边缘视场处 $MTF \geq 0.48$,畸变小于 3%,满足给出的设计指标。并且在规定和要求的像元尺寸范围内能量集中度大于 85%,照度曲线 0.8 倍视场以内整体高于 90%,能量集中度高,照度均匀性好,与便携式投影仪能很好地搭配使用。

关键词:短焦;Zemax;大视场;投影光学

中图分类号: TN202;TH745 **文献标志码:** A **DOI:**10.5768/JAO201940.0205003

Design on projection objective of portable projector

WANG Kang¹, DUAN Jie^{1,2}, ZHOU Jianhong¹, WANG Chen¹, FU Yuegang¹

(1. College of Optical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Postdoctoral Mobile Station, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In view of the shortcomings of current projectors such as large light source power consumption, poor light projection stability and large system structure, using Zemax software, a large field of view (FOV), short focal length and compact projection system for portable projectors was designed. After optimization, the design structure was finally obtained with good imaging quality. At the spatial frequency of 80 lp/mm, the central FOV modulation transfer function (MTF) is ≥ 0.7 , the 0.8 FOV MTF is ≥ 0.6 , the edge FOV MTF is ≥ 0.48 , and the distortion is less than 3%, which can satisfy the design indicators given. Moreover, the energy concentration is greater than 85% in the specified and required pixel size range, the overall illumination curve is higher than 90% within 0.8 FOV, the energy concentration is high, and the illumination uniformity is good, which can be well matched with the portable projector for use.

Key words: short-focus; Zemax ; wide field ; projection optics

引言

随着投影技术的发展,投影产品已广泛应用于大中型会议,学校教学以及策展活动中。但市

场销售的投影仪仍存在体积过大、携带不方便等缺陷,诸如野外勘探,临时的微型会议,军用电子地图显示等场合并不方便使用,所以智能便携式

收稿日期:2018-10-12; 修回日期:2018-11-22
基金项目:吉林省科技发展计划项目(20150203019GX)
作者简介:王康(1994—),男,硕士研究生,主要从事光显示照明技术应用方面的研究。E-mail:1551482818@qq.com
通信作者:段洁(1979—),女,博士,副教授,主要从事光电测控技术与仪器方面的研究,E-mail:dj0321@126.com

投影仪应运而生,其具有智能化程度高,续航能力长,功耗低,体积小,携带方便等优点。传统的投影显示系统多是针对采用弧光灯光源的大中型投影仪,占用空间较大,结构不够紧凑,投射比较小,因此并不适合便携式投影仪。便携式投影仪属于微型投影仪,为满足使用需求,其投影系统需能同时满足结构紧凑,体积小,具有较大的视场及较短的有效焦距的特点。本文根据以上需求,结合相关的设计理论,设计了一款配合便携式投影仪使用的投影光学系统。

1 投影系统的理论基础和模型

1.1 结构设计思想

根据设计需求,要投影仪有远大于常规的投射比,技术难点在于投影光学系统需同时具备短焦、大相对孔径和大视场的性能。论文中投影光学系统入射的光近似平行于光轴照射到镜头上,同时像方远心光路可以满足像方主光线平行于光轴。此外,该短焦镜头,视场角大于 40° ,一般属于广角镜头,在设计的时候需要预先留出足够的后工作距离,安放全反射棱镜与空间光调制器。综上所述,该投影物镜的特性类似像方远心反远距物镜的特性,因此该投影物镜采用反远距物镜的结构^[1-4]。

如图 1 所示,整个系统由前后两组镜头构成,前组是负光焦度组透镜,作用是缩短投影物镜整体尺寸以及增大视场,后组则是补偿前组的光焦度以及平衡前组遗留像差的正透镜组。平行入射光线与前后透镜相交的高度分别为 y_1 、 y_2 ,非轴外光束投射到像方焦平面,其与前透镜交点为 y_{p1} ,经过后组光线,与光轴夹角为 u'_{p1} ,所成的像在焦平面上的高度为 h' ,两透镜间距为 d ,后工作距离为 l' ,整个系统的焦距为 f' 。

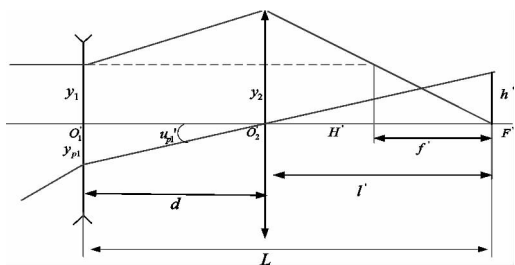


图 1 反远距光学系统

Fig. 1 Inverted telephoto optical system

对系统参数进行归一化:

$$\begin{cases} y_1 = 1 \\ f' = 1, u' = y_1 / f' = 1 \\ u_{p1} = -1 \end{cases} \quad (1)$$

根据图 1 所示的近轴光线和主光线参数可以计算出任意位置的拉赫不变量:

$$J = -ny_1 u_{p1} \quad (2)$$

前组放大率为

$$\Gamma = \mu'_{p1} / \mu_{p1} \quad (3)$$

高斯公式为

$$y_{p1} \varphi_1 = \mu'_{p1} - \mu_{p1} \quad (4)$$

由(3)式得前后两组透镜的间距为

$$d = \frac{\Gamma - 1}{\Gamma \varphi_1} \quad (5)$$

根据(1)式得:

$$l' = u' y_2 = y_1 - d \varphi_1 = \frac{1}{\Gamma} \quad (6)$$

总光焦度为

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - d \varphi_1 \varphi_2 = 1 \quad (7)$$

前组透镜孔径角光焦度为

$$\mu'_{11} = y_1 \varphi_1 + u_1 = \varphi_1 \quad (8)$$

后组透镜孔径角光焦度为

$$\mu'_{11} - u_2 = 1 - \varphi_1 \quad (9)$$

前组透镜的轴外光线对应的相对孔径角为

$$\frac{2y_{p1}}{f'} = -2d\mu'_{p1}\varphi_1 = -2d\Gamma\varphi_1 \quad (10)$$

由(10)式可知,在各个参量不变的情况下,前组角放大率 Γ 和间距 d 决定了前组孔径角、前组视场角的大小^[2]。若应用于微型投影仪,需要做到结构上紧凑,故应适当减小 d 。但 d 的减小会造成与孔径角相关的像差的变大,因此在设计时,需进行系统优化设计,保证参数 d 的大小合理^[5-6]。

1.2 参数计算

采用 DLP 投影技术,设计过程中使用 1.19 cm (0.47 英寸, 1 920 × 1 080 pixel) DMD 芯片,像元大小为 $5.4 \mu\text{m}$,投影距离为 600 mm,投影尺寸大于等于 114.3 cm (45 英寸)。

焦距的计算可通过以下公式进行计算。如图 2 所示。设焦距为 f ,芯片高为 y ,物镜到屏幕的距离为 L ,投影画面的高度为 y' 。根据成像的相似三角关系式可得:

$$\frac{f'}{y} = \frac{L' - f'}{y'} \quad (11)$$

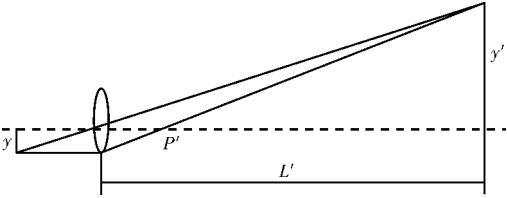


图 2 投影物镜焦距

Fig. 2 Focal length of projection objective lens

由于所设计微型投影仪的投影系统的焦距相对于投影距离很小可忽略,则有:

$$f' = \frac{\beta L}{-(\beta - 1)^2} \approx \frac{L'}{y'}$$
$$y = \frac{600 \times 0.47}{45} = 6.27 \text{ mm} \tag{12}$$

因投影系统的物距远小于像距,故采用反方向设计,即系统的实际像方投影屏幕变成了物方。光学系统的视场定义为光学系统可以成像的物空间的范围,经常采用共轭较短的一方表示视场范围,这里投影系统的视场和显示芯片对应的视场相对应,投影屏幕的大小决定了视场角。其计算公式为

$$\omega' = \arctan \frac{\beta y}{f'(1 - \beta)} = 42^\circ \tag{13}$$

由光学定义可知 D/f 越大,通过光学系统的光线越多,投射到屏幕上的亮度就越高,但像差也会越大,因此需要兼顾二者合理设置, F 数应等于 2.1。

2 投影物镜设计

2.1 参数指标

根据便携式投影仪的使用要求,给出的光学系统设计参数指标如表 1 所示^[8-12]。

表 1 投影仪光学参数指标

Table 1 Optical parameters of projector

参数名称	指标
DMD 芯片/mm	1.194(0.47 英寸)
半视场/(°)	≥40
工作波段/ μm	0.486~0.656
像元大小/ μm	5.4
整体长度/mm	<55
光学畸变/%	<3
MIT 曲线参数	40 lp/mm: 0.8Y(T,S)>0.72 1.0Y(T,S)>0.61(Y 为归一化视场) 80 lp/mm: 0.8Y(T,S)>0.67 1.0Y(T,S)>0.47

2.2 优化设计与像差评定

根据表 1 的指标,得到如图 3 所示初始结构,为满足以上像质要求,需对初始结构进行优化。

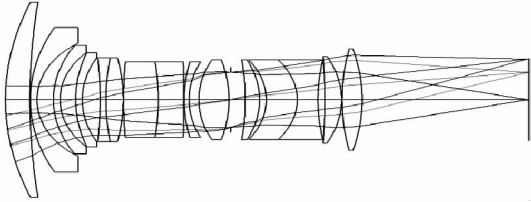


图 3 初始结构图

Fig. 3 Initial structure

考虑设计的投影物镜系统是短焦大视场光学系统,故球差、畸变、彗差等像差都需进行优化。首先对选择的初始结构进行焦距缩放,调整视场角与 F 数,单边视场设为 40° , F 数设置为 2.1。根据计算对角线的一半大约在 5.95 mm 左右,按着这个进行缩放。接下来设置透镜的曲率半径、镜片之间的空气间隔、镜片的厚度为变量,设定默认的优化函数并控制镜片厚度以及空气间隔。对优化函数进行设置,对焦距、视场角、空气间隔、畸变、工作距离等设置约束条件对初始结构进行优化^[13-14]。

优先优化像差突出的面,将像差控制在有效范围,再逐一对其他面优化。若进行多次优化后数值仍然达不到设计要求,则可对现有玻璃进行替换然后重新添加控制 MTF 的操作数做 HAMMER 优化。

经过优化修改,得到如图 4 所示的最终结构,表 2 为最终结构的数据。最终得到的系统结构紧凑,工作波长在可见光波段。共用了 15 片镜片,这些玻璃的名称及其理化性能如表 3 所示。第 3、6、7、12、14 这 4 片高折射率镜片减小系统的工作距离,使得结构更加紧凑。并且还采用了 9,11,15 这 3 片高阿贝系数玻璃以补偿前面系统的色散。

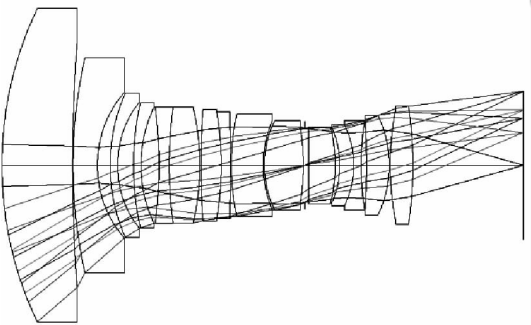


图 4 优化后的结构

Fig. 4 Optimized structure

表 2 镜头光学结构参数

Table 2 Optical optic parameters of lens

i	r_i/mm	d_i/mm	材料	$D_i/2$	i	r_i/mm	d_i/mm	材料	$D_i/2$
1	26.119	7.284	S-NSL3	12.500	15	7.467	0.112		3.524
2	138.714	0.033		9.289	16	6.578	3.371	SK10	3.554
3	7.690	1.084		5.595	17	-14.315	0.100		3.208
4	11.444	0.971	N-LASF43	5.541	18	Infinity	0.516		2.976
5	6.544	1.463		4.704	19	-125.526	2.464	LAF3	3.015
6	17.621	0.743	LAF2	4.675	20	-9.956	0.430		3.128
7	9.176	1.580		4.335	21	-6.166	1.291	N-LAK8	3.115
8	36.007	0.867	BAH13	4.309	22	-6.307	0.689	SFL6	3.305
9	101.066	2.477	F1	4.287	23	18.246	0.356		3.662
10	-16.823	0.100		4.256	24	-58.125	2.132	N-LAF32	3.589
11	63.561	1.633	SF6	4.101	25	-7.995	0.351		3.974
12	-27.457	0.936	N-LAK33	4.030	26	19.268	2.603	K11	4.586
13	-238.377	0.100		3.982	27	-25.379	10.076		4.799
14	15.984	2.251	LAFN23	3.929					

表 3 镜片的性能

Table 3 Lens performance

材料	i	n_d	v_d	材料	i	n_d	v_d
BALKN3	1	1.518	60.26	LAFN23	8	1.689	31.25
N-LASF43	2	1.606	40.95	SK10	9	1.623	56.71
LAF2	3	1.744	44.72	LAF3	10	1.717	47.89
BAF13	4	1.669	44.96	N-LAK8	11	1.713	53.83
F1	5	1.626	35.7	SNBHB	12	1.72	34.61
SF6	6	1.805	25.46	N-LAF32	14	1.74	45.27
N-LAK33	7	1.755	52.32	K11	15	1.50	61.44

图 5 为该系统的 MTF 函数。由图 5 可以看出,在空间频率为 80 lp/mm 处中心视场 MTF \geq 0.7,0.8 视场 MTF \geq 0.6,边缘视场处 MTF \geq 0.48;在空间频率 40 lp/mm 处,中心视场 MTF \geq 0.88,0.8 视场 MTF \geq 0.78,边缘视场处 MTF \geq 0.72,满足了系统对调制传递函数的各项指标要求。由图 6 和图 7 可知,垂轴色差为 3.1 μm ,远小于 1.5 倍像素尺寸要求,畸变小于等于 3%。

从图 8 能量集中曲线图可看出,当扩散光斑达到半径为 5.4 μm 的圆时,各视场的能量集中度都在 85% 以上,整体的能量得到了集中优化。图 9 是相对照度曲线图,用来评价镜头照度的均匀性,在全视场照度大于 68%,0.8 视场照度大于 90% 时,满足设计要求^[15]。

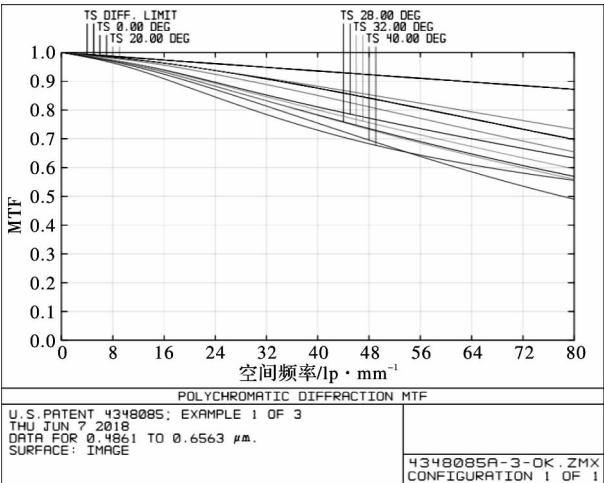


图 5 MTF 曲线图

Fig. 5 MTF curves

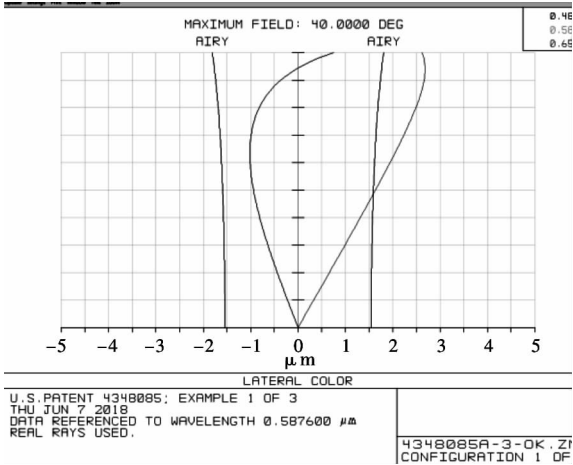


图 6 垂轴色差

Fig. 6 Vertical axis chromatic aberration

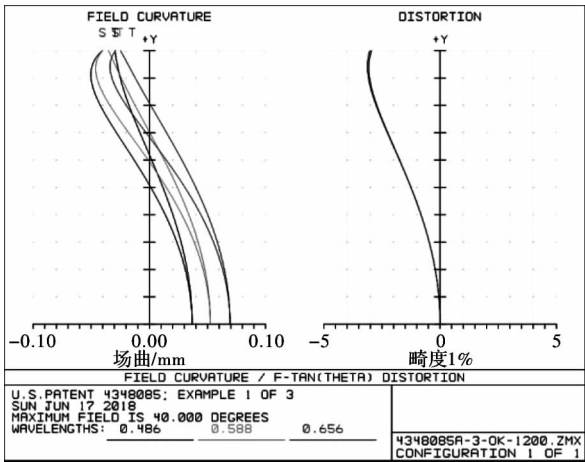


图 7 场曲和畸变

Fig. 7 Field curvature and distortion

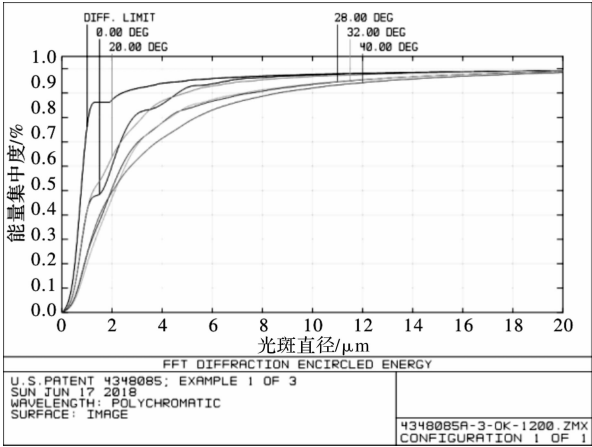


图 8 能量集中曲线图

Fig. 8 Energy concentration curve

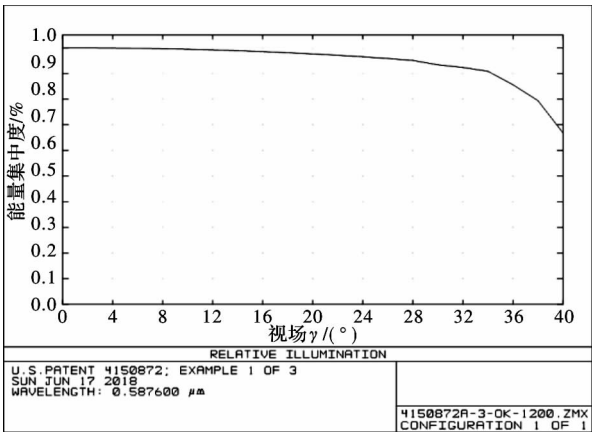


图 9 相对照度曲线

Fig. 9 Relative illumination curve

表 4 公差分析结果

Table 4 Tolerance analysis result

Type	Value	Criteria	Change	Type	Value	Criteria	Change
TEDY 22 24	0.010 000 000	0.467 941 009	−0.145547178	TEDY 5 6	0.010 000 000	0.607 084 196	−0.006 403 991
TEDY 20 21	0.010 000 000	0.602 331 253	−0.011 156 935	TEDY 25 26	0.010 000 000	0.596 571 412	−0.016 916 775
TEDX 22 24	−0.010 000 000	0.476 047 660	−0.137 440	TTHI 15 16	−0.002 000 000	0.611 335 525	−0.002 152 662
TEDX 22 24	0.010 000 000	0.476 047 660	−0.137 440 527	TTHI 19 21	−0.002 000 000	0.611 349 009	−0.002 139 178
TEDY 17 18	−0.010 000 000	0.476 210 740	−0.137 277 448	TTHI 14 16	−0.002 000 000	0.611 512 723	−0.001 975 465
TEDX 17 18	0.010 000 000	0.479 951 454	−0.133 536 733	TTHI 19 21	0.002 000 000	0.611 703 142	−0.001 785 045
TEDX 17 18	−0.010 000 000	0.479 951 454	−0.133 536 733	TETX 17 18	0.010 000 000	0.611 763 638	−0.001 724 549
TEDY 17 18	0.010 000 000	0.495 687 794	−0.117 800 393	TETY 22 24	0.010 000 000	0.611 877 68	−0.001 610 504
TTHI 20 21	0.002 000 000	0.611 851 320	−0.001 636 867	TETY 22 24	−0.010 000 000	0.611 877 684	−0.001 610 504
TEDY 22 24	−0.010 000 000	0.514 920 796	−0.098 567 391	TTHI 16 18	0.002 000 000	0.612 131 560	−0.001 356 627
TEDY 15 16	0.010 000 000	0.571 179 466	−0.042 308 721	TETX 17 18	−0.010 000 000	0.612 136 847	−0.001 351 341
TEDX 15 16	−0.010 000 000	0.572 455 100	−0.041 033 087	TETY 17 18	−0.010 000 000	0.612 217 208	−0.001 270 979

续表 4

Type	Value	Criteria	Change	Type	Value	Criteria	Change
TEDX 15 16	0.010 000 000	0.572 455 101	-0.041 033 087	TETY 17 18	0.010 000 000	0.612 217 208	-0.001 270 979
TEDY 15 16	-0.010 000 000	0.580 078 127	-0.033 410 060	TEDX 5 6	-0.010 000 000	0.612 236 730	-0.001 251 458
TEDY 25 26	-0.010 000 000	0.582 884 782	-0.030 603 405	TEDX 5 6	0.010 000 000	0.612 236 730	-0.001 251 457
TEDY 20 21	-0.010 000 000	0.583 560 632	-0.029 927 556	TETX 20 21	-0.010 000 000	0.612 265 775	-0.001 222 413
TEDX 20 21	0.010 000 000	0.592 334 459	-0.021 153 729	TETY 15 16	-0.010 000 000	0.612 329 376	-0.001 158 811
TEDX 20 21	-0.010 000 000	0.592 334 459	-0.021 153 728	TETY 15 16	0.010 000 000	0.612 329 376	-0.001 158 811
TEDX 25 26	0.010 000 000	0.596 215 620	-0.017 272 567	TEDX 27 28	0010 000 000	0.612 482 160	-0.001 006 027
TEDX 25 26	-0.010 000 000	0.596 215 620	-0.017 272 567				

3 公差分析

光学系统的基本设计目标是,在满足光学性能的基础上,降低光学元件的装配和校准的成本,使收益达到最高,故对所设计系统进行公差分析。确保系统以合理成本达到所有要求的光学性能水平。

此处主要针对镜片的曲率半径偏差及镜片的厚度和空气间隔的偏差分配公差,选择衍射极限下的 MTF 为评价函数,进行敏感度分析,并把后焦距作为补偿参数。采用蒙特卡罗分析法,选取奈奎斯特频率 80 lp/mm,参数设置为光圈数 3 个,元件偏心要求为±0.02 mm,表面厚度公差为±0.002 mm,倾斜公差为 0.02′,公差分析追踪弥散斑,采用近轴焦距补偿,显示最敏感的 50 项。从以上分析结果可以看到,公差分析后,在 80 lp/mm 处:90%MTF≥0.365 7,50%MTF≥0.487 365,10%MTF≥0.558 855 17,公差分析满足设计要求。

4 结论

设计了一款适用于个人投影设备的投影光学系统,该系统光学总长控制在 50 mm 以内,视场角达到了 80°,相对孔径为 1/2.1,各项像差指标均满足设计要求。系统具有视场大、焦距短、长后工作距离、照度均匀性高等优点。在保证较高像质的前提下,系统结构更为紧凑,体积更小,质量更轻,对于智能微型投影仪的小型化十分有利,可以很好地满足微型投影市场的需求,在地质勘探和军事指挥,教育娱乐等领域有广泛的应用前景。

参考文献:

[1] LIU Chang, XIANG Yang, LIU Bo, et al. Miniaturization design of infrared inverted telephoto optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2011,32(3): 426-429.
刘畅,向阳,刘波,等. 红外反远距光学系统的小型化设计[J]. 应用光学,2011,32(3):426-429.

[2] EL-GHOROURY H S, CARLSBAD C A, MCNEILL D A, et al. LED-based high efficiency illumination systems for use in projection systems: US, 7889430 [P]. 2009-08-09.

[3] ZHAO Xing, FANG Zhiliang, CUI Jicheng, et al. Study on the optical engine of the mini-projector[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(5): 913-918.
赵星,方志良,崔继承,等. 微型投影机光学引擎的研究[J]. 光学学报,2007, 27(5):913-918.

[4] GAO Y. Design of an ultra-short throw catadioptric projection lens with a freeform mirror [J]. SPIE, 2016,154: 101540S.

[5] AN Liansheng. Applied optics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002.
安连生. 应用光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.

[6] XU Jia. Investigation on optical engine of projection display system based on LED [D]. Shanghai: East China Normal University, 2008.
徐佳. 基于 LED 的 DLP 投影显示光学引擎研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.

[7] KREITZER M H. Folded, telecentric projection lenses for use with pixelized panels: US, 6853493[P]. 2007-05-06.

[8] LIU Xiaochan, CHEN Chen, LI Weishan, et al. Design of universal short-focus projection lens [J].

- Journal of Applied Optics, 2016, 37(6): 907-912.
- 刘宵禅, 陈琛, 李维善. 通用型短焦投影镜头的设计[J]. 应用光学, 2016, 37(6): 907-912.
- [9] CHEN Xu, FENG Yutao, LIU Weiqi, et al. Design of large dimension and rear projecting lens in laser display system [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(5): 945-950.
- 陈旭, 冯玉涛, 刘伟奇, 等. 大屏背投激光显示广角镜头的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 945-950.
- [10] KREITZER M H, MOSKOVICH J. Projection lens having larger back focal length to focal length ratios; US, 5870228[P]. 1999-02-09.
- [11] CANNON B L. Low element count projection lens for use with pixelized panl; US, 6765731B1 [P]. 2008-07-20.
- [12] LI Tonghai, WANG Haixia, ZHAO Xinliang, et al. Design of the telecentric beam path aerial digital camera lens [J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(3): 25-28.
- 李同海, 王海霞, 赵新亮, 等. 像方远心航拍数码相机镜头设计[J]. 光电工程, 2011, 38(3): 25-28.
- [13] HE Fengtao, JIA Qiongyao, SUN Linjun. Design of liquid crystal laser projection display system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(10): 2699-2702.
- 贺锋涛, 贾琼瑶, 孙林军. 液晶激光投影显示系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2699-2702.
- [14] 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(4): 49-53.
- 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.
- [15] GAO Zhishan. Application of Zemax software in aberration design [M]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology Press, 2006.
- 高志山. Zemax 软件在像差设计中的应用[M]. 南京: 南京理工大学出版社, 2006.