

文章编号:1002-2082(2016)04-0527-05

微投影广角镜头设计

居荣兵,康廉洁,韩敏,刘言

(江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212000)

摘要:为了满足国内外视场投影仪微型轻量化的趋势,设计一款适用于德州仪器推出的 1.19 cm (0.47 英寸)、1080 pix 数字微反射镜片的微型广角投影镜头。镜头由 7 片玻璃(均为国内常见玻璃)和 2 片塑料(4 面非球面)透镜组成,结构简单,易加工。透射比 0.66:1,即在 600 mm 处投影出 111.76 cm(44 英寸)的画面,镜头有效焦距 6.45 mm, $F^\#$:2.1,全视场 86° ,系统总长 46 mm,最大口径 22 mm,在空间极限频率 93 lp/mm 处 0.8 视场以内传递函数值都超过 0.62,边缘视场的传递函数值超过 0.43,全视场畸变小于等于 2%,垂直色差小于等于 $0.18 \mu\text{m}$ 。

关键词:微投影;广角镜头;光学设计;大视场

中图分类号:TN202;TH741.5

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201637.0401006

Design of mini-projection wide-angle lens

Ju Rongbing, Kang Lianjie, Han Min, Liu Yan

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: In order to meet the requirement of the miniaturization and light weight for field projector both at home and abroad, we designed a short focal digital projection lens for the 1.19 cm (0.47 inch), 1080 pixel digital micro-mirror device (DMD) chip from TI. It is composed of 7 glass lenses (all common glass) and 2 plastic lenses (4 aspheric surface) with simple structure, and is easy to process. The projection ratio is 0.66:1 and it can project a 111.76 cm (44 inch) picture at the distance of 600 mm. The effect focal length is 6.4 mm, the F-number is: $F/2.1$, the full field of view (FOV) is 86° , the total length is 46 mm, the full aperture is 22 mm, the modulation transfer function (MTF) is more than 0.62 at the spatial frequency of 93 lp/mm within 0.8 FOV, the MTF of 1 field is 0.43, the distortion of the full FOV is less than 2%, and the vertical chromatic aberration is less than $0.18 \mu\text{m}$.

Key words: mini-projection; wide-angle lens; optical design; large field of view

引言

从 18 世纪年奥古斯特的第一台幻灯机到后来的光学投影仪,再到现今数字投影机。如今的投影技术,已经不单要求放映清晰高效的影像效果,而且投影机广泛应用于生活、教育、商业、军事等不同领域,这就使得高效性、轻便性成为主流,因此,微型投影随之应运而生。微型投影仪市场定

位随着体型缩小,清晰度提升,节电便携等特点,投影厂商更加重视独立性。目前,全球的微投影有两大主流技术,分别是以 DLP 显示技术为主的美国德州仪器、奥图码,中国台湾的扬明光学、samsung、LG 等厂商;使用 LCOS 技术有 3M、中国台湾的奇景光电、日本的 JVC 等。德州仪器(TI)于 2015 年公布了应用于微型投影机投影机芯片组

收稿日期:2016-01-07; 修回日期:2016-01-25

基金项目:国家自然科学基金青年基金(11204107)

作者简介:居荣兵(1990-),男,江苏泰州人,光学工程师,硕士,主要从事照明成像设计工作。

E-mail:1161786881@qq.com

件,为 1.19 cm(0.47 英寸) TRP Full-HD 1080 p display chipset,它的发布,使得微型投影机步入 1 080 p时代。

国内外广角投影镜头主要有反射式,折射式,折反式 3 种。反射式虽不产生色差,但通常采用多片非球面反射镜,对光学组件设计以及加工要求较高,所以市场应用率较少,折射式可在短距离投射出大的画面,且一般采用同轴形式,方便装调。市场应用相对较多。折反式则兼顾了折射跟反射的优点,既有大口径采光又有反射后折射到焦点成像的高质量和高分辨率,同时大大缩短了光学镜筒长度。目前广角投影镜头依旧存在着诸多问题:镜片数量偏多(超过 10 片),画面不均匀,相对照度低,色差大。所以设计一款针对 0.47 英寸短焦广角高效清晰的数字投影镜头亟待实现。笔者深入研究 dlp 投影技术以及现有广角镜头,设计出一款 86°全视场角,6.45 mm 焦距、相对孔径 1/2.1 的数字微投影镜头。

1 技术指标

镜头的视场角可由公式计算^[1]:

$$2\omega = 2\tan^{-1} \frac{y/2}{L} = 2\tan^{-1} \frac{1118/2}{600} = 86^\circ \quad (1)$$

由公式:

$$f \times \tan \frac{FOV}{2} \times (1 + dist) = y' \quad (2)$$

可求的焦距 f 在 6.45 mm 左右。因为实际镜头有像差的缘故,我们通过理想状况下理论计算的值并不十分准确,设计过程中畸变绝对值大小正常控制在 3% 以内,合理控制畸变对焦距的稳定性至关重要。投影镜头的分辨率必须与芯片分辨率一致,芯片尺寸:0.005 4 mm×0.005 4 mm,所以该投影镜头的分辨率为: $\frac{1}{2 \times 0.0054} = 93$ lp/mm,镜头其他参数要求与指标如表 1 所示。

2 设计思路

投影物镜是一种同时具有大视场以及大相对孔径的光学系统,由于芯片与镜头之间有棱镜的存在,必然要求镜头兼备长后工作距离。反远距结构由负正分离的结构形式组成,负、正光焦度透镜分别作为前组和后组,具有大视场,像面边缘照度大,长后工作距离等特点能够满足这种镜头要

表 1 镜头设计参数与指标

Table 1 Lens specification and design objectives

参数	规格
芯片尺寸/英寸	0.47(1 920 pix×1 080 pix)
像元/ μm	0.54
$F^\#$	$F/2.1$
MTF	40 本 0.0Y>0.85 0.8Y (T,S)>0.70 1.0Y(T,S) >0.60 80 本 0.0Y>0.65 0.8Y(T,S)>0.55 1.0Y(T,S)>0.40
半视场角/ $^\circ$	>40
垂轴色差 pix	<0.5
口径/mm	<25
总长/mm	<50
畸变/%	<3

求。入射光经过前面的负透镜组发散后进入正光焦度^[2]组而后成像到像面上,这样,就使得像方主面位于正组像面一侧,因而可以得到比系统焦距长的后工作距离。对于大视场的轴外光束,在经过前负组发散后,相对于后正组视场角就变小了,从而达到广角的目的。为了得到均匀,高亮度的图形,采用像方远心光路可以满足像方主光线平行于光轴,迎合了微显成像器件发出的光垂直照射到透镜上的特点。

如图 1 所示为像方远心反远距物镜^[3-5]结构图。

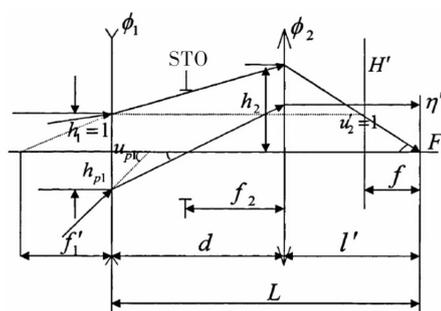


图 1 像方远心光路反远距结构图

Fig. 1 Structure of image square telecentric optic path inverted telephoto

如图 1,在归一化条件下,总光焦度为 1, $\Phi_1 \Phi_2$ 分别为前后组的光焦度,负正组之间的距离为 d, l 为投影屏到前负组之间的距离,中心入射光线以 $h_1 = 1$ 的高度入射到物镜的负组,以与光轴夹角 $u_2' = 1$ 的角度出射。由高斯光学理论可得:

$$u_{p1}' = h_{p1} \Phi_1 + u_{p1} = (d - f_2) u_{p1}' \Phi_1 + u_{p1} \quad (3)$$

则前组角放大率:

$$\gamma_1 = \frac{u'_{p1}}{u_{p1}} = \frac{\Phi_2}{\Phi_2 - d\Phi_1 + \Phi_1} \quad (4)$$

光学总长度:

$$L = d + l' = d + \frac{1}{\gamma_1} - \frac{\Phi_1}{\Phi_2} - \frac{d}{l} = \frac{1}{\gamma_1}(1 - \Phi_1) + d(1 - \frac{1}{l}) \quad (5)$$

正组孔径角:

$$u'_{1'} = u_1 - \frac{h_1}{f'_1} = u_1 h_1 \Phi_1 = \frac{1}{l} + \Phi_1 \quad (6)$$

负组孔径角:

$$u'_{2'} = u'_{1'} - 1 = \frac{1}{l} - \Phi_1 \quad (7)$$

前组相对孔径:

$$\frac{2h_{p1}}{f'_1} = \frac{2(d-f_2)}{\frac{1}{\gamma_1} f'_1} = \frac{2(d-f_2)(\frac{1}{\gamma_1}-1)}{\frac{1}{\gamma_1}(\frac{1}{\gamma_1}-d)} = \frac{2(\frac{1}{\gamma_1}-1)}{\frac{1}{\gamma_1}} \quad (8)$$

故有:

$$h_{p1} = \frac{\frac{1}{\gamma_1}-1}{\frac{1}{\gamma_1} \Phi_1} \quad (9)$$

从以上像方远心反远距物镜结构图和近轴高斯像差理论^[6]推导的参数之间的关系可以看出,前组光焦度由 γ_1 和 d 决定,而前组光焦度又直接决定了前组孔径角,因此选择合适的 γ_1 和 d 直接影响前组视场角以及复杂程度,鉴于投影镜头小型化的趋势,需要相应减小 d ,做到结构上紧凑,然而 d 的减小直接导致光焦度 $\Phi_1\Phi_2$ 增大。使得孔径相关的高级相差增大导致设计优化难度加大,数值间的相互制约矛盾需要我们根据具体指标选择合适的设计优化方式。

鉴于投影镜头具有长后工作距离、大视场角和大相对孔径,就需要适当选择双胶合、正负分离透镜或更复杂的结构对前组进行复杂化以补偿后组像差。在反远距系统中,光束经前组后,后组就成为对近距离物体的成像,后组要补偿前组的负光焦度,相对孔径比较大。后组补偿前组遗留的部分相差,因为不论前组采用何种形式,都不可能完全平衡相差。为了使得后组能够平衡前组的像

差,达到像差平衡,一般可采用失对称的结构形式。并且后组的结构形式也根据不同的后工作距离、视场角和相对孔径可以选用双高斯、三片型及匹兹瓦型或者对其进行结构复杂化。

本设计中前组采用了双片负透镜来矫正光路并通过加入一个正透镜来分散光焦度降低高级像差量,通过一系列像差补偿优化得以实现后组像差矫正并改善大视场与优质像之间的矛盾。系统借鉴经典双高斯^[7]光学结构实现大孔径目标成像,结合现在光学技术,构造出光阑前后一些对称的新结构来达到像差平衡的同时实现高解像,其中对称结构还可以大大抵消一部分垂轴像差。

设计中维持像方远心是至关重要的,因此我们在设计优化一系列像差时还需严格控制像方光线的不同视场的CRA,保证系统达到像方远心。普通投影镜头边缘视场清晰度不够并且与中心视场相比会下降许多,本设计除了根据光学经验以及理论构造特殊光学结构外,采用了时下最新的非球面^[8-10]工艺,通过使用2个非球面镜片通过像差平衡使得画面任何视场清晰度一致,利用非球面除了能够高效地校正球差之外,调整非球面在系统中的位置,还能将离轴像差最小化并且能够同时提高光学系统的相对孔径,亮度也会随之得到提高,视场也会变大。在像差允许范围内,引入非球面后使得透镜的数量减少,光学系统总长缩短。

3 设计结果

根据上述设计指标,选择合适的初始结构,通过不断地修改优化,最终设计出一款投影镜头如图2所示。系统(焦距:6.45 mm,相对孔径1/2.1;总长46 mm,后工作距离20 mm,采用7片常见玻璃镜片(成都光明常见玻璃,依次为H-Lak11、H-ZbaF20、H-ZF4A、H-KF6、H-ZPK1A、H-ZF、H-zk9b)和2片非球面(第1面跟第8面,材料均为E48R)来满足设计要求,最大口径在23 mm以内。在设计过程中将合色棱镜和偏振分光棱镜考虑到光学设计中来,将他们等价成平行平板带来的系统像差与该系统一起优化,达到最佳效果,在对数字投影机三原色测试的基础上设定系统的设计波长范围是450 nm~640 nm,主波长为546 nm。并充分考虑了实际镜头的生产加工问题。

对其 40 本和 80 本进行 5 000 次蒙特卡罗公差分析得知,2 个塑料面型控制在正常形状内,没有出现 厚薄比过大导致的脱模情况,而且二者经过蒙特卡罗公差分析,要求都是在工艺条件内;相对偏心要求都为 正负 0.01 mm,单面偏心为 正负 0.006 mm,中心厚度为 正负 0.008 mm,亚斯要求为 0.5 μm 。玻璃材料中心厚度为 正负 0.02 mm 或者 0.03 mm,偏心一般为正负 0.02 mm,牛顿环都为正负 3 本,亚斯为 正负 0.5 本,塑料公差是:相对偏心要求都为 正负 0.01 mm,单面偏心为 正负 0.006 mm,中心厚度为 正负 0.008 mm,亚斯要求为 0.5 μm 。分析结果为:80% 优良率时 40 本 $0.0Y > 0.70$ $0.8Y(T,S) > 0.60$ $1.0Y(T,S) > 0.50$; 80 本 $0.0Y > 0.55$ $0.8Y(T,S) > 0.45$ $1.0Y(T,S) > 0.30$ 。公差分析完全符合生产要求。

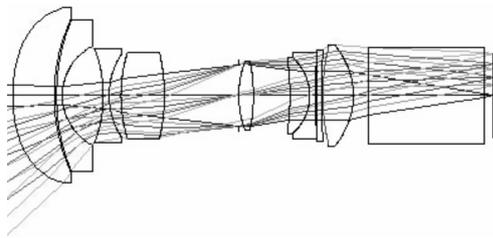


图 2 透镜结构图

Fig. 2 Structure of lens

图 3 是系统的调制传递函数(MTF)曲线,横轴代表频率即每毫米所能分辨的线对,纵轴代表 MTF 值。可看出在极限频率 93 lp/mm 处 0.8 视场内 MTF 值均大于等于 0.62,边缘视场最小值只有 0.43。但是也满足大于 0.3 的要求。

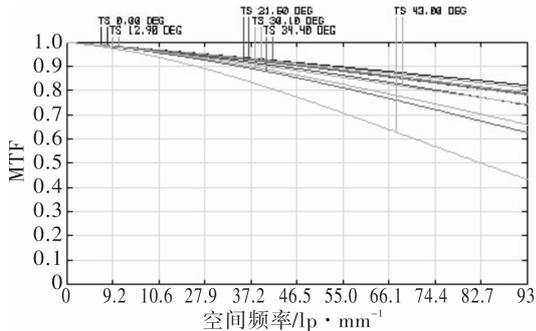


图 3 MTF 曲线图

Fig. 3 MTF curve

图 4 为该结构的场曲和畸变图,纵轴表示视场,横轴分别代表场曲数值与畸变百分率。微投影镜头作为大视场光学成像系统,像质对场曲畸变的要求比较严格。从图 4 中可以看出。场曲的变化范围从 -0.018 mm~0.024 mm,整个视场内

的畸变量绝对值小于等于 2%。根据经验得知,当成像光学系统的相对畸变小于 3%时,像质的变形非常小,可以确定满足使用要求,完全符合短焦投影镜头设计要求。

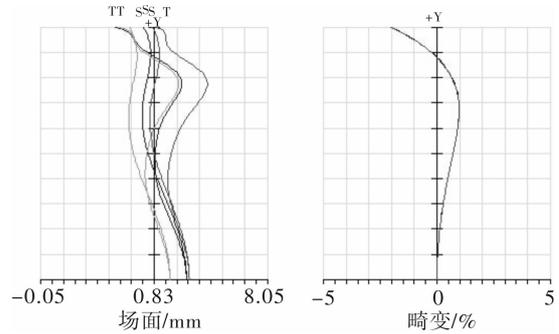


图 4 场曲畸变图

Fig. 4 Field curvature and distortion curve

图 5 为该系统的垂直色差曲线图,纵坐标代表视场,横坐标表示色差范围,如 5 图可知,系统垂直色差为 1.8 μm ,远小于半个像元大小,符合设计要求。

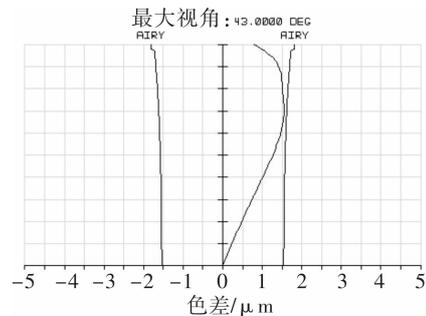


图 5 垂轴色差曲线图

Fig. 5 Longitude chromatic aberration curve

提高投影物镜的能量集中度在设计中也是不可或缺的一部分,图 6 是光学系统的能量集中度曲线,纵轴代表圆内能量百分比,横坐标表示距中心的半径尺寸。根据我们选用的 DMD 芯片像

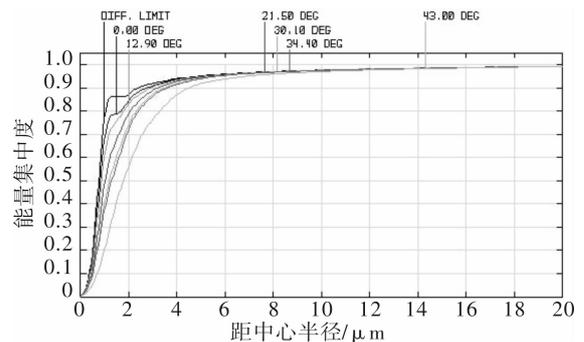


图 6 能量集中曲线图

Fig. 6 Energy concentration curve

元尺寸为 $0.54\ \mu\text{m} \times 0.54\ \mu\text{m}$,从图6中可以看出,当弥散斑达到 $0.54\ \mu\text{m}$,各视场的能量集中度都在90%以上,表明弥散斑90%以上的能量集中都在像元之内,能量得到了集中优化。

4 结束语

合理利用反远距结构在设计短焦投影数字镜头时显得尤为重要,反远距结构是一种严重失对称结构,由负的前组和正的后组组成。合理选择前后组的光焦度值是能够顺利优化的先决条件。由于芯片在投影镜头之间往往存在分合色棱镜,设计时要考虑棱镜所产生的相差,文中将之等效成一定厚度的平行平板加以优化平衡相差。合理利用了非球面技术,使得大视场,大相对孔径,长后工作距,微型化,轻量化系统得以很好的实现。本文利用Zemax软件优化设计出一款7片玻璃2片非球面的的dlp投影镜头。玻璃为国内常见球面玻璃,塑料为常用于非球面加工的亚克力(pm-ma)。该系统有效焦距6.45 mm,相对孔径1/2.1,最大口径23 mm,总长46 mm,结构紧凑、简单、易加工、成本低、成像质量高,很好地满足了微型投影市场的需求。

参考文献:

- [1] Song Jiajun, He Pingan. Design of zoom projection lens for the light engine of LCOS rear-projection TV [J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(1): 58-62.
宋家军,何平安. LCOS背投光学引擎中变焦投影物镜设计[J]. 应用光学, 2007, 28(1): 58-62.
- [2] Wang Yongjing. The prospect of mini-projection lens [J]. Video Engineering, 2008, 32(316): 52-53.
王勇竞. 微型投影技术的展望[J]. 电视技术, 2008, 32(316): 52-53.
- [3] Chen Chen, Li Weishan, Zhang Yu, et al. Optical design of short focal digital projection lens [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(12): 1855-1859.
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.
- [4] Xie Feng, Hao Qun, Zhu Qiudong. Best-fit aspheric surface definition based on slope asphericity for aspheric surface [J]. Acta Optical Sinica, 2010, 30(11): 3197-3202.
谢枫,郝群,朱秋东. 基于斜率非球面度的非球面最接近比较球面定义[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3197-3202.
- [5] Bai Qinglan, Miao Xinghua. Achromatized design of near UV-visible wide-angle objective [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(11): 1331-1335.
白清兰,苗兴华. 消色差的近紫外-可见光广角物镜设计[J]. 光子学报, 2004, 33(11): 1331-1335.
- [6] Li Xiaotong, Cen Zhaofeng. Geometrical optics, aberrations and optical design [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2007.
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, 2007.
- [7] Song Dongfan, Zhang Ping, Wang Cheng, et al. Design of mobile phone camera lens based on ZEMAX [J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(1): 34-38.
宋东藩,张萍,王诚,等. 基于ZEMAX的手机镜头设计[J]. 应用光学, 2010, 31(1): 34-38.
- [8] Liu Xiaochan, Chen Chen. Design of 3-DLP digital projection lens with short focal length [J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(sup): 38-42.
刘宵婵,陈琛. 基于3-DLP数字投影机的短焦镜头设计[J]. 应用光学, 2010, 31(增刊): 38-42.
- [9] Lu Guohua, Shen Weiming. Wide angle projection lens for LCOS rear-projection TV of large screen and thin structure [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(3): 601-604.
陆国华,沈为明. LCOS大屏幕薄型背投电视广角投影物镜设计[J]. 光子学报, 2009, 38(3): 601-604.
- [10] Zhang Zengbao. Optical engine of projection display system [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004.
张曾宝. 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.