

文章编号 1004-924X(2014)08-2020-06

大屏幕投影显示光学系统的超薄化设计

吕伟振^{1,2*}, 刘伟奇¹, 魏忠伦¹, 康玉思¹, 田志辉¹, 孟祥翔^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对大屏幕投影显示对成像物镜提出的超短焦、大视场角、超薄化、大相对孔径以及高清晰度等要求,设计了一种新型折反射式超薄投影成像系统。采用 TI 公司的 0.65" 数字微反射镜片(DMD)作为空间光调制器,利用非球面反射镜校正畸变并缩短投影距离,然后通过一个折叠反射镜对光路进一步转折来实现超薄化投影显示。系统由 5 片透射镜片和 1 片非球面反射镜组成,焦距为 2.8 mm, $F/\#$ 为 3.5, 最小视场角为 55° , 最大视场角为 78.5° , 在投影距离为 120 mm 时画面尺寸显示为 65.2"。设计结果表明:在像面的 Nyquist 频率处,95% 以上视场的 $MTF > 0.6$, 最大畸变量为 0.8TV%, 一个像元尺寸内能量集中度在 90% 以上。为了进一步验证折反射式超薄投影镜头的性能,加工并组装了原理样机。实验结果表明其图像显示效果良好,能够满足超薄化、低成本、小型批量化生产等设计要求。

关键词:光学设计;投影显示;大屏幕显示;数字微反射镜片;超薄投影显示系统;非球面反射镜

中图分类号: TN27; TN873.92 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142208.2020

Design of ultra-thin optical systems in large screen projection display

LÜ Wei-zhen^{1,2*}, LIU Wei-qi¹, WEI Zhong-lun¹, KANG Yu-si¹, TIAN Zhi-hui¹, MENG Xiang-xiang^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: lwz1011@163.com

Abstract: A novel ultra-thin refract-reflect projection display system was designed to meet the severe requirements of imaging lens in large screen projection display for ultra-short focal length, larger field of view, ultra-thin, larger relative aperture and higher resolution. A 0.65 inch (16.51 cm) Digital Micromirror Device (DMD) produced by TI Inc. was employed as the spatial light modulator and an aspheric mirror was used to correct distortion and shorten projection distance. Furthermore, a fold mirror was also taken to turn back the optical path to achieve ultra-thin projection display. The system is consisted of five lenses and an aspheric mirror, of which the focal length is 2.8 mm, the F -number is 3.5 and the minimum and the maximum field angles are 55° and 78.5° , respectively. When the projection distance is set to be 120 mm, the screen size can be 65.2 inch (165.6 cm). With the design, it shows that the Modulation Transfer Function(MTF) of over 95% field of view of the system

收稿日期:2013-05-02;修订日期:2013-07-01.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2009AA032701)

is higher than 0.6 at the Nyquist frequency of the image plane. The maximum distortion is 0.8TV%, and 90% geometric encircled energy in the point target is focused in one pixel. To verify the performance of the ultra-thin refract-reflect projecting lens, a principle prototype was fabricated and assembled. The experimental results show that the system has excellent display performance, and meets the design requirements of ultra-thin, low cost and small-scale mass production.

Key words: optical design; projection display; large screen display; digital micromirror device; ultra-thin projection display system; aspheric mirror

1 引言

投影成像物镜是构成整个投影显示系统的关键部分之一,它的性能、尺寸、重量对整个投影显示系统都有着很大的影响。近20年来,投影成像物镜的整体发展趋势是大屏幕、超短焦、大视场角、超薄化、大相对孔径和高清晰度,对其设计、加工和装调的要求也越来越高,致使投影成像物镜批量化生产难度不断加大^[1-4]。

通过增大视场角的方法来实现超薄设计是最典型的方法。尽管如此,传统的透射式投影镜组的最大视场角为100°左右,因为随着视场角和F数的增大,轴外像差、色差等会随之急剧变化。它们很难同时得以校正,表现为非中心视场区域的各种图像是错位的,这样不仅降低了图像的对比度,图像达不到满意的效果,光学设计难度也会加大。另一方面,由于全反射式投影成像具有不会产生色差的突出特点,并且在校正像差方面也相对比较容易,通常情况下四片非球面反射镜组合起来就能满足投影系统对显示性能的要求,因此该设计概念已经越来越被光学设计者所重视。Jun Ogawa等设计了这种系统并加工出原理样机。但是,全反射系统需要采用离轴式设计,机械结构非常庞大,这必然提高了加工和装调的精度要求,从而增大了产业化、小型批量化的难度^[5-6]。

为了有效缩减成像物镜加工和装调的成本,为大屏幕超薄化投影显示的产业化奠定基础,本文采用一种全新的照明系统设计折反射式离轴成像系统,用较少的镜片并通过使用高次非球面来缩短投影距离从而实现超薄化^[7-8]。数字微反射镜片(Digital Micro-mirror Device, DMD)具有亮度高、对比度高和色彩逼真等特点,并且其像素间

距离极小,能够显示更加丰富细腻的图像^[9-10]。

本文采用DMD作为图像源,其基本的成像原理是目标光线进入到成像物镜并将图像放大,然后采用非球面反射镜将图像进一步放大投射到屏幕上,并通过折叠反射镜对光路进行转折,从而实现整个投影显示系统机身的超薄设计。本文论述了折反射式投影光学系统的技术指标和关键技术,利用ZEMAX软件对折反射式投影光学系统进行模拟并对成像质量进行分析。另外在兼顾成本和装调难度的基础上,搭建了一套原理样机。此系统可靠,并能够满足大屏幕、超薄化、低成本、小型批量化等设计要求^[11-13]。

2 折反射式投影光学系统设计

2.1 光学技术指标

投影显示系统主要由照明系统、光学引擎、投影系统和显示屏4个部分组成。照明系统的光源系统采用激光和LED相结合的方式。该光源不使用超高压水银灯泡也可实现高亮度投影,在有效减少系统成本的基础上大大提高了光源寿命;由于照明光源功率较小,关闭电源时也不需要冷却^[14]。光学引擎采用TI公司的DMD来进行数字光学调制。DMD尺寸为16.51 mm(0.65 inch),解析度为1920×1080(16:9)。它是由上百万个精微反射镜片组成的阵列,每个镜片对应于投影画面中的一个光学像素,其像元大小为7.5 μm。微反射镜片依靠反射光线进行工作,光能利用率高,能够实现色彩逼真还原并满足高清晰度要求。利用XJ-H175投影机光源进行高亮度投影,已知照明系统的出瞳大小为10.92 mm,通过光瞳匹配形式设计投影物镜,最终得到成像物镜的F/#为3.5,系统的投影距离为120 mm,

画面尺寸为 165.608 cm(65.2 inch),全视场角为 157° ^[15]。成像物镜的各项技术指标如表 1 所示。

表 1 成像物镜的各项技术指标

Tab. 1 Various specifications of objective lenses

技术指标	值
DMD 大小	16.51 mm, 1920×1080
投影系统	非远心
画面尺寸	165.608 mm
图像纵横比	16 : 9
视场角	最小为 55° , 最大为 78.5°
投影距离	120 mm
分辨力	$\text{MTF} \geq 0.55 @ 0.67 \text{ lp/mm}$
最大畸变量	0.8TV%
垂轴色差	$< 1/2$ 个像素
能量集中度	$> 90\%$
照度均匀性	$> 95\%$

2.2 关键技术

在折反射式投影显示光学系统中,视场角与光学性能之间有着密切的关系,因此,视场角的分析显得尤为重要。在折反射离轴成像光学系统设计时需要用到最小视场角和有效视场角两个重要的概念。图 1 为折反射式超薄系统设计的参数示意图,其中 $\theta_{\min}$ 表示最小视场角, $EA = \theta_{\max} - \theta_{\min}$ 表示有效视场角。

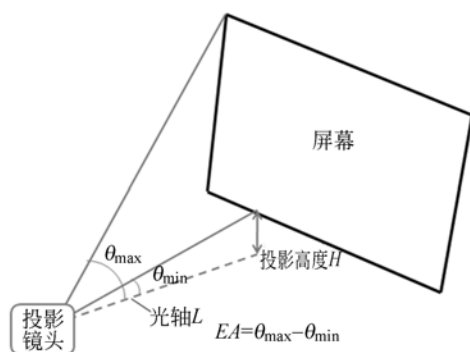


图 1 参数示意图

Fig. 1 Schematic diagram of parameters

图 2 显示了视场角与光学性能之间的大致关系,并与传统的透射式投影镜头进行比较^[16]。由图可知,新型的折反射式系统只有保持比较大的最小视场角,才能实现较高的光学性能,这意味着有效视场角远离近轴区域,同时小的有效视场角

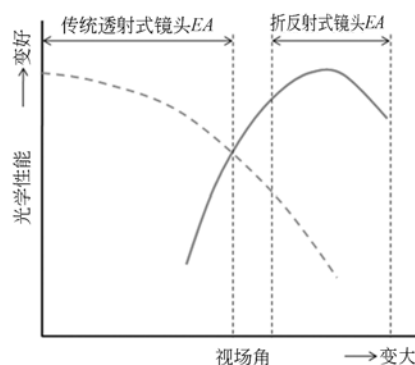


图 2 视场角与光学性能的大致关系

Fig. 2 Rough relation between field angle and optical performance

有利于光学设计的实现。另外,折反射式离轴成像系统实现超薄化的关键是能够有效缩短投影距离,这取决于最大视场角、最小视场角和有效视场角三者的共同作用。通过增大最小视场角并控制有效视场角的大小,可以缩短投影距离,实现超薄化。为了最大限度地提高光学性能,同时考虑到光学设计的难度,最小视场角为 55° ,最大视场角为 78.5° ,有效视场角为 23.5° 。

在设计折反射式离轴成像系统时,场曲校正正是另一个比较重要的问题。在 Seidel 理论体系中,只有满足匹兹万和条件才能校正场曲。但要满足这样的条件,投影物镜的结构会变得非常复杂,必须采用多组正负光焦度结合的方式。事实上,在没有满足匹兹万和条件下,有效视场角已经偏离了近轴区域而且很小,场曲在折反射式成像系统中也是可以控制的,并且其控制也比传统透射式系统简单。

考虑到镜头造价和加工难度,将第一片透镜靠近光阑的一面设计为偶次非球面,这样既减少了透镜数量的使用,同时也有利于进行像差校正。为了校正离轴畸变和色差,采用奇次非球面反射镜。非球面的各项参数为: $k = -4.0817$, $A_1 = 0.1896$, $A_3 = -1 \times 10^{-5}$, $A_4 = 5.8144 \times 10^{-8}$, $A_5 = -1.5 \times 10^{-10}$, $A_6 = 9.1796 \times 10^{-13}$ 。通过非球面反射镜不仅可以校正主要像差,还能够有效缩短投影距离。图 3 为折反射式投影光学系统的原理示意图,其中非球面反射镜的通光孔径为 146 mm。为了更加充分地转折光路实现超薄结构,还要配合使用折叠反射镜。

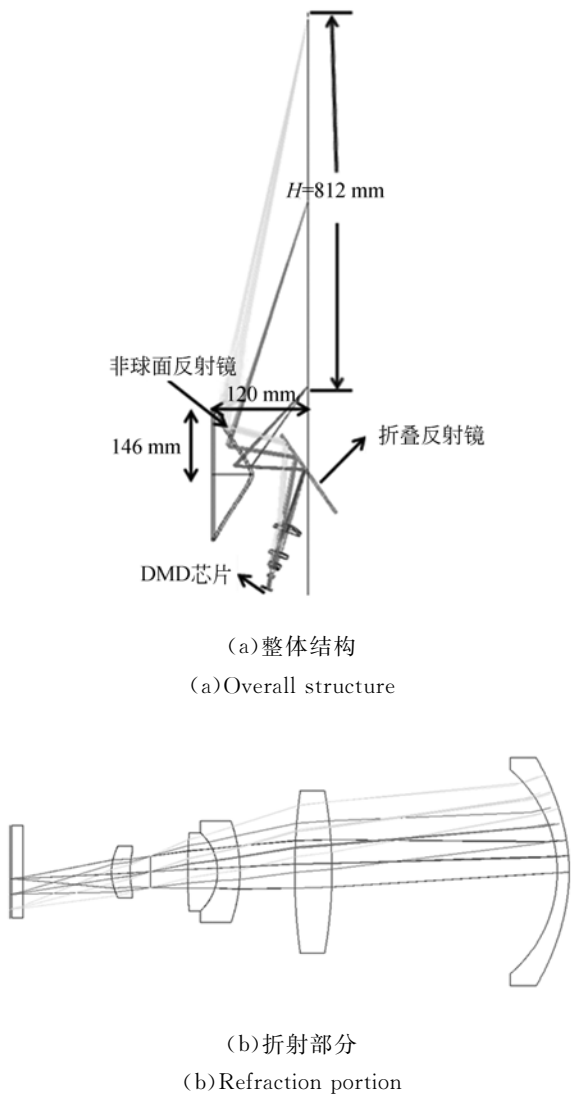


图 3 光学系统原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of refract-reflect projection optical system

3 性能评价

根据光学技术的指标要求,通过 ZEMAX 软件进行了成像质量分析。根据几何关系,在最小投影高度为 195 mm 时,DMD 需要偏离光轴 1.89 mm,由 DMD 的大小可以得到最大视场点为(±7.2,−10.09)。图 4 为不同视场下镜头的 MTF 曲线,为保证投影画面的成像质量,在 DMD 图像源四周和中间多个视场点进行采样。本设计使用投影成像面进行分析,DMD 像元大小为 7.5 μm,放大 100.3 倍后对应的画面像元大小为 752 μm,其奈奎斯特频率为 0.67 lp/mm,对

角线视场在此频率下均大于 0.5,并且 95% 以上视场的 MTF>0.6@0.67 lp/mm,满足成像质量要求。

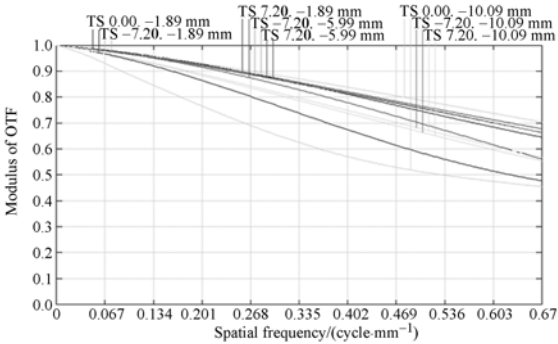


图 4 调制传递函数曲线

Fig. 4 Curves of Modulation Transfer Function(MTF)

图 5 和图 6 分别为系统的网格畸变和垂轴色差曲线。从图中可以看出,该成像物镜在整个视

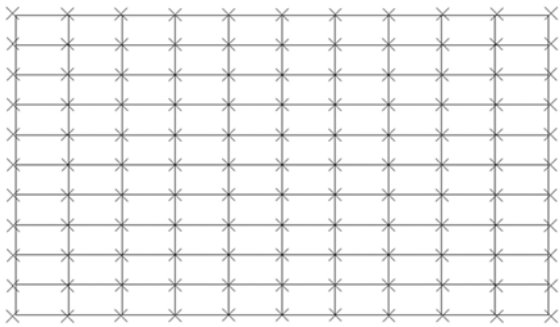


图 5 畸变网格图

Fig. 5 Distortion grids

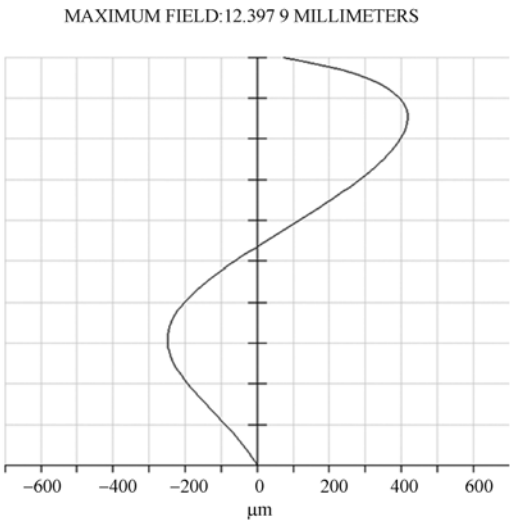


图 6 垂轴色差曲线

Fig. 6 Curve of lateral color

场的最大畸变量为 0.8TV%，全视场与 0.7 视场的畸变差小于 0.5%，垂轴色差小于 1/2 个像素，符合设计指标要求，对成像画面基本无影响。

光学系统的能量集中度曲线如图 7 所示，横纵坐标分别表示从边缘到质心的弥散圆半径大小和此半径内所占的能量比例。从能量集中度曲线上可以看出，1 个像元尺寸内集中了点目标能量的 90% 以上，光线会聚收敛度良好。

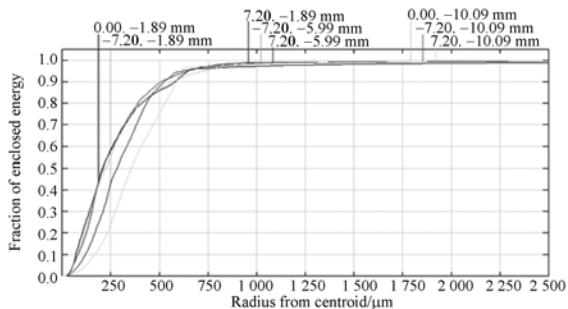


图 7 能量集中度曲线

Fig. 7 Curves of geometrical encircled energy

4 原理样机

采用同轴设计离轴成像的方式，大大降低了光学系统装调难度。为了进一步验证离轴式超薄投影成像系统的性能，通过加工和装配非球面反射镜，设计并加工出超薄超短焦投影成像系统，并结合现有的 DLP 照明光源系统成功搭建了实验原理样机。如图 8 所示，采用十三点法对屏幕照度进行测量，得到屏幕的正负照度均匀性分别为 +96.2%、-95.8%，符合技术指标要求。再从画面效果上看，成像画面质量良好，无明显畸变，对比度高。

参考文献：

- [1] 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.
CHEN X, FENG Y T, LIU W Q, *et al.*. Design of large dimension and rear projecting lens in laser display system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 945-950. (in Chinese)
- [2] 李灿,宋淑梅,刘英,等. 折反式眼底相机光学系统设计[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(8): 1710-1717.
LI C, SONG SH M, LIU Y, *et al.*. Design of optical

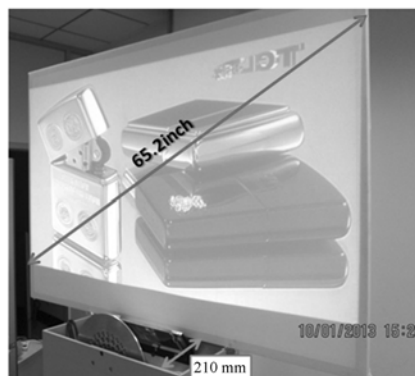


图 8 原理样机及成像画面

Fig. 8 Principle prototype and imaging picture

5 结 论

本文采用折反射相结合的方式实现了大视场超短焦投影系统的超薄化设计，不仅降低了光学设计难度，其加工和装调难度也比全反射结构形式低，可满足大屏幕超薄化投影显示的低成本、小型批量化的设计要求。通过建立光学系统模型进行了光线追迹的模拟。实验结果表明，在投影距离为 120 mm 处显示画面尺寸为 165.608 cm (65.2 inch)，系统总厚度仅为 210 mm。

折反射式投影成像物镜既可以用于前投系统，也可以用于背投系统设计，能够大大缩短投影距离或者减少投影系统的厚度。基于这种设计的投影系统可以用于会议室、教学、各种比赛场所等各个领域，即使在比较狭小的生活空间中也能够观看到大屏幕高画质的画面。这些无法比拟的优点使折反射式大屏幕超薄投影显示系统具有广阔的市场应用前景。

system for catadioptric fundus camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1710-1717. (in Chinese)

- [3] 卢海平,刘伟奇,康玉思,等. 超大视场头盔显示光学系统设计[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(5): 979-987.

LU H P, LIU W Q, KANG Y S, *et al.*. Design of compact optical system in wide-angle head mounted display [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 979-987. (in Chinese)

- [4] 孙旭涛. 应用自由曲面的超薄投影显示系统理论和实验研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2008.

SUN X T. *Application of Free-form Surface of*

- Ultra-thin Projection Display Systems Theory and Experimental Research*[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2008 (in Chinese)
- [5] JUN O, KAZUHIRO A, MIKIO S, *et al.*. Super-short-focus front projector with aspheric-mirror projection optical system [J]. *SID'05 Digest*, 2005, 13(2):111-116.
- [6] 孙旭涛,郑臻荣,刘旭,等. 用 Zernike 自由曲面设计弯曲屏幕超薄投影系统[J]. *浙江大学学报:工学版*, 2009, 43(8):1428-1432.
- SUN X T, ZHENG ZH R, LIU X, *et al.*. Design of ultra-thin projection system with curved screen based on Zernike free-form surfaces [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2009, 43(8):1428-1432. (in Chinese)
- [7] 田志辉,刘伟奇,冯睿,等. 激光投影系统的薄型化设计[J]. *液晶与显示*, 2009, 24(6):916-920.
- TIAN ZH H, LIU W Q, FENG R, *et al.*. Design of ultra-thin laser projection system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2009, 24(6):916-920. (in Chinese)
- [8] 康玉思,田志辉,刘伟奇,等. 超薄前投激光显示系统研制[J]. *应用光学*, 2012, 33(5):832-836.
- KANG Y S, TIAN ZH H, LIU W Q, *et al.*. Ultra-thin front projector for laser display system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(5):832-836. (in Chinese)
- [9] RUI D W, LIN Z L, QI K CH, *et al.*. Optical design in illumination system of digital light processing projector using laser and gradient-index lens [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(1):013004-1-7.
- [10] GENG J. Volumetric 3D display using a DLP projection engine [J]. *SPIE*, 2012, 8254:825401-1-10.
- [11] ROBINSON M G, CHEN J M. Color in projection displays [J]. *OSA Journal of Display Technology*, 2005, 1(1):118-124.
- [12] MUNEHARU K, TOMOHIRO S, KUNIKO K, *et al.*. Wide angle projection optics for compact rear projector [J]. *SID'05 Digest*, 2005, 70(3):1918-1921.
- [13] 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.
- HE F T, JIA Q Y, SUN L J. Design of liquid crystal laser projection display system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10):2699-2702. (in Chinese)
- [14] SHAMAEV S M. Slim LED-based DLP projection TV [C]. *International OSA Network of Students 8-Moscow*, 2010:1364.
- [15] YANG B, LU K, ZHANG W, *et al.*. Design of a free-form lens system for short distance projection [J]. *SPIE*, 2011, 8128:81280E-1-9.
- [16] MARCHUK S M. Wide-angle projection objective for an information-display system [J]. *Optical Society of America*, 2006, 73(12):846-848.

作者简介:



吕伟振(1984—),男,山东莱芜人,博士研究生,主要从事激光投影显示、空间光学设计与检测等方面的研究。E-mail: lwz1011@163.com

导师简介:



刘伟奇(1958—),男,吉林长春人,博士生导师,研究员,1982年于中科院长春光机学院获得学士学位,1988年于长春光机所获得硕士学位,主要从事激光显示技术、空间目标成像与瞄准技术等方面的研究。E-mail: liuwq@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)