

文章编号 1004-924X(2011)05-0945-06

大屏背投激光显示广角镜头的设计

陈旭^{1,2*}, 冯玉涛³, 刘伟奇¹, 魏忠伦¹, 康玉思¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049;

3. 中国科学院 西安光学精密机械研究所 光谱成像技术重点实验室, 陕西 西安 710119)

摘要:研究了背投激光显示广角投影镜头的设计,并给出了 1 个 162.6 cm(64 in)背投激光显示广角镜头的设计实例。投影镜头前的光学引擎采用数字光处理显示方式,并应用数字微镜晶片(DMD)进行数字光学处理。系统焦距为 7.38 mm;设计波长为 F, d, C ; F 数为 2.46;全视场达到 100° ;在空间调制器 DMD 的 Nyquist 频率处,90%以上视场的 MTF > 0.6。系统渐晕系数为负,提高了投影显示像面边缘的光照度;全视场畸变 < 1.4%;1 个像元尺寸内集中了点目标能量的 90%以上。系统中使用了 1 个直角棱镜对光路进行折叠,减小了镜头长度,使棱镜展开后系统全长为 259 mm。此外,该镜头只使用了 1 个二次项为 0 的非球面(高次项至 8 次),保证了镜头加工的可行性。设计结果显示,本文提出的设计方法有利于降低投影系统成本,实现产业化生产。

关键词:背投式激光显示系统;广角镜头;数字微镜晶片

中图分类号:TN27;TN873 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20111905.0945

Design of large dimension and rear projecting lens in laser display system

CHEN Xu^{1,2*}, FENG Yu-tao³, LIU Wei-qi¹, WEI Zhong-lun¹, KANG Yu-si¹

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

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Spectral Imaging Technology of Chinese Academy of Sciences, Xi'an
Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

* Corresponding author, E-mail: chxu2009@126.com

Abstract: After comparing different structures of wide-angle projecting lenses, a wide-angle lens for 162.6 cm(64 in) rear projection laser display is designed. The focal length of the system is 7.38 mm, the wavelength used in the design is F, d, C and the full field of view reaches 100° . The technical indii of the projection lens are summarized as follows: DMD (Digital Micromirror Device) is used in the light digital processing, 90% MTF is greater than 0.6 at the Nyquist frequency; the barrel distortion of the system is smaller than 1.4%, and 90% of the energy in the point target is focused in a pixel dimension. Furthermore, a right angle prism is used to fold the optical path to decrease the length of the

收稿日期:2010-06-24;修订日期:2010-08-06.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA03011)

lens,so that the whole optical length of the system is 259 mm after outspreading the right angle prism. The vignetting factor of the wide angle is negative, which enhances the image illumination after projection. Moreover, an aspheric surface with the small size, zero conic constant and the maximum eight order coefficient is used to promise the feasibility of the mounting. Analytical results show that the design can decrease the production costs of the projecting system and promote the technological industrialization.

Key words: rear projection laser display system; wide-angle lens; Digital Micromirror Device(DMD)

1 引言

激光显示是新一代显示技术,因具有大色域显示、高颜色饱和度和无有害电磁射线辐射等优点而引起了人们广泛的关注^[1-2]。

背投式激光显示系统将投影镜头安装在机身底部,信号经过投影镜头投射到半透明屏幕背面显像。投影显示镜头是决定激光显示系统画面质量、显示尺寸和整机体积的重要部件之一。大屏背投显示投影镜头基本结构主要有折射式、反射式、折反射式 3 种^[3-4]。折射式投影镜头为了实现在大角度投影,镜头前组的放大倍率非常大,同时为得到满意画质的投影画面消畸变,镜组结构复杂。反射式投影镜头通常由 4 片非球面或自由曲面反射式镜片组成,优点是全部采用反射形式,不产生色差,镜片数量少;但是,由于采用了 4 个非球面反射镜,且为离轴形式,所以对加工、装调的精度要求比较高,实现低价格、产业化存在一定的困难。折反射式投影镜头一般由非球面或自由曲面反射镜和一组透射式镜片组成,目前,应用这种结构的系统较多^[5]。采用非球面反射镜可避免色差的产生,同时系统采用同轴形式,降低了装调的难度。但是,透射镜组在远心情况下,镜片数量仍然较多(10 片以上),而且多包含自由曲面。本文结合激光显示的特点,研究了折射式投影镜头的设计,在兼顾装调难度和造价的基础上,给出了一种结构相对简单的广角投影显示镜头的设计实例。

2 技术指标确定

背投式激光显示系统主要包括照明系统,光学引擎,投影系统和投射屏 4 个部分,如图 1 所

示。系统采用半导体激光器作为照明系统光源,光学引擎应用数字微镜晶片(DMD)进行数字光学处理,DMD 尺寸为 1.47 cm(0.7 in)。DMD 的每个微反射镜单元的大小为 13.5 μm,12°偏转角对应的照明系统数值孔径为 0.406 7,对应投影镜头 F 数为 2.46。系统的投影距离为 682 mm,画面尺寸为 162.6 cm(64 in),全视场角为 100°。投影镜头的放大倍率小,系统采用物象颠倒方式进行设计。投影透镜组的垂轴放大率 $\beta = -1/91.43$,由公式 $y' = (1 - \beta) f' \tan \omega$,得到系统的焦距为 7.38 mm。由于 DMD 芯片工作过程是靠芯片偏转反射照明光束,设计过程中需要对 DMD 前距离,即设计的投影镜头的像方留出一定的工作距离。DMD 反射芯片一侧的偏摆量为 1.89 mm。

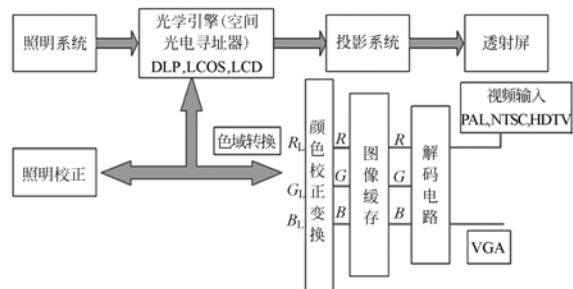


图 1 激光背投显示流程图

Fig. 1 Flow chart of back projecting lens of laser TV

3 广角投影镜头设计

3.1 系统结构

根据确定的广角投影镜头的性能参数,以专利库中类似性能指标的结构为基础,使用 CodeV 软件进行优化设计,其光学结构布局如图 2 所示。

设计中使用了 1 个直角棱镜对光路进行折叠。为降低公差灵敏度和镜头造价,设计中应尽可能少用非球面^[6-8]。若不能避免使用非球面,则应使其二次常数尽量小,以减小非球面度,易于加工。本例中只在第五面使用了 1 个非球面,且非球面度较小,二次常数 $c=0$;四阶非球面系数 $A=1.3 \times 10^{-5}$;六阶非球面系数 $B=-7.06 \times 10^{-9}$;八阶非球面系数 $C=8.9 \times 10^{-12}$ 。棱镜展开后系统全长 259 mm,设计波长为 F, d, C 光,系统在可加工的公差容限内,表 1 为投影镜头的光学结构参数。

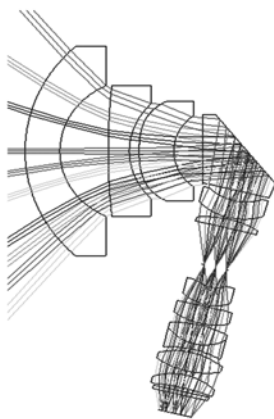


图 2 投影镜头结构图

Fig. 2 Schematic diagram of projecting lens

表 1 投影镜头光学结构参数

Tab. 1 Basic optical parameters of projecting lens

面数	曲率半径/mm	厚度/mm	玻璃材料	面数	曲率半径/mm	厚度/mm	玻璃材料
Obj	infinity	682		14	-15.57	10.446	K4-CHINA
1	75.16	18	LAK7-CHINA	15	-21.02	1	
2	39.34	24.91		16	-1139.13	10	FK1-CHINA
3	220.98	11	LAK7-CHINA	17	-34.16	1	
4	35.84	5		18	53.84	11	QK3-CHINA
5	109.06	18.01	K4-CHINA	19	-22.87	3.2	ZF7-CHINA
6	26.39	15		20	50.96	2	
7	infinity	46	K9-CHINA	21	38.22	10.73	FK1-CHINA
8	infinity	5.2		22	-42.91	2.51	
9	-32.31	10	LAF3-CHINA	23	29.35	7.39	ZF7-CHINA
10	-34.39	1		24	93.25	2	
11	62.75	5.19	LAF3-CHINA	25	infinity	2.2	ZK9-CHINA
12	-401.71	24.93		26		11	
Stop	infinity	11.43		Ima			

3.2 照度的考虑

部分投影镜头由于系统自身特点渐晕系数为负,边缘视场的光束数值孔径随视场角的增大而增大,即对于渐晕系数为负的光学系统,当渐晕系数的绝对值随着视场角增大时,其边缘光束进光量也逐渐增加。边缘光束进光量的增加补偿了由于照度余弦定理给投影屏边缘带来的像面照度下降。本例中渐晕系数全部为负值,其绝对值随着视场角增大而增大,视场角为 50° 时绝对值最大,此时沿 y 轴正向渐晕系数为 -2.4 ; 视场角为 -50° 时,沿 y 轴负向渐晕系数为 -2.3 ,这代表了在视场角为 50° 时,边缘视场的光束密度相对中心增加了 2.4 倍。相对于渐晕系数非负的光学系统,渐晕系数为负的光学系统在一定程度上提高了投影屏边缘的像面照度。

在优化过程中,视场较大的光线追迹其系统入瞳处一般存在很大的像差(即光阑像差),此时软件会由于自身大量的迭代算法很准确找到通过孔径光阑的主光线的起始点,使得轴外视场的光束宽度与位置定位不正确。如果光学系统半视场角更大(如大于 76°),则即使设置渐晕软件,模拟结果也不是很准确,还需要从像面到物面进行光线逆追迹。而对于半视场小于 76° 的光学系统,只需要每次优化重新设置系统的渐晕系数就可以避免光线起始点的不准确。对于非广角光学系统,一般以实际的入瞳位置和近轴入瞳尺寸进行光线追迹,渐晕的设置提高了主光线与边缘光线起始点的准确性,使软件模拟结果更为可信^[9]。

3.3 畸变校正

系统引入负的渐晕,视场角越大,进光量越多,保证了图像边缘照度,但边缘光束的增加同时也给设计加大了难度,尤其是随视场角 4 次方增大的畸变不易校正,加大了畸变消除的难度。一般消畸变效果比较明显的 2 个位置是系统前 2 片透镜和光阑附近的镜片,设计时调整光路使入射光线尽量垂直于第 1 片镜面的表面。本光学系统中产生畸变最主要的来源是前 2 片透镜中第 2 面

和第 3 面,而将前 4 面中的任意 1 个表面设为非球面,校正畸变的效果相对不明显,而且前 2 片透镜的口径较大,会加大非球面的加工难度和制造成本。而将非球面放置在第 3 个透镜的前表面(即第 5 面上)上时,结果证明校正效果明显,并且实现了在离产生畸变最近的地方对其进行校正^[10]。表 2 为不同视场下 1 cd/m² 亮度对应的像面照度、相对照度百分比和畸变百分比。

表 2 投影镜头像面照度分布(参考波长为 587.6 nm)

Tab.2 Aperture illumination of projecting lens

视场/(°)	1 cd/m ² 亮度对应的像面照度/lx	相对照度/(%)	畸变/(%)
0	0.135 917	100	0
10	0.135 914	100	0
20	0.135 463	99.7	0
35	0.132 421	97.4	-0.21
42	0.130 519	96	-0.61
47	0.128 627	94.6	-0.97
50	0.128 149	94.3	-1.36

2.4 像质评价

图 3 为镜头的 MTF 曲线。对于大视场物镜,需要采样足够多的视场角保证全视场的成像

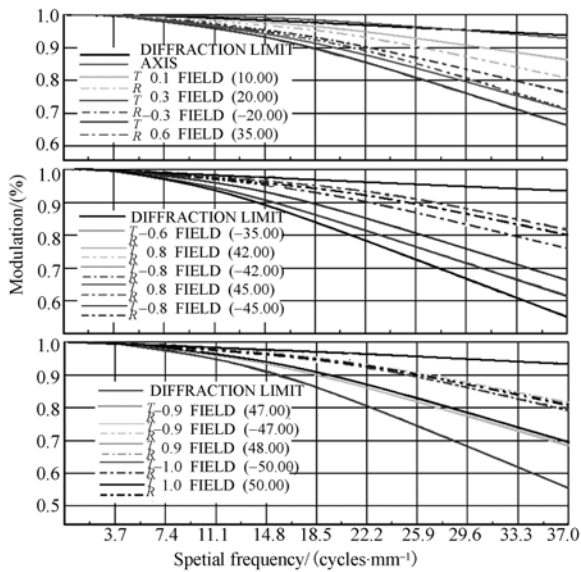


图 3 调制传递函数曲线

Fig.3 Curves of modulation transfer function

质量。一般设计的过程是选择一个好的光学初始结构,在 0,0.707, -0.707 三个主要视场处进行优化,优化到光线会聚收敛较为良好时,需要对光学系统设置尽可能多的视场角以保证中间视场没有严重的像质下降。本设计中使用的成像芯片为 DMD 反射芯片,其奈奎斯特频率为 37 lp/mm。全视场在此频率下均大于 0.55,90% 以上视场的 MTF 在 0.6@37 lp/mm 以上,满足成像要求。

系统的能量集中度曲线如图 4 所示,横坐标为从边缘到质心的弥散圆直径大小,纵坐标为横坐标代表半径内所占的能量比例。可以看出 1 个像元 13.5 μm 尺寸内集中了点目标能量的 90% 以上,光线会聚收敛度良好。

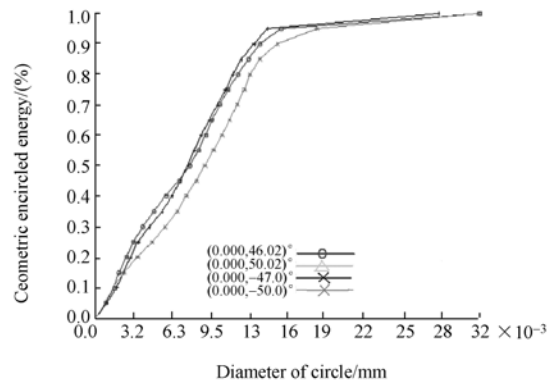
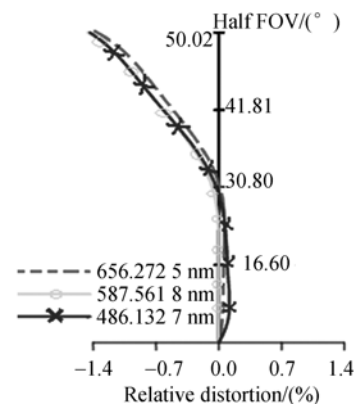


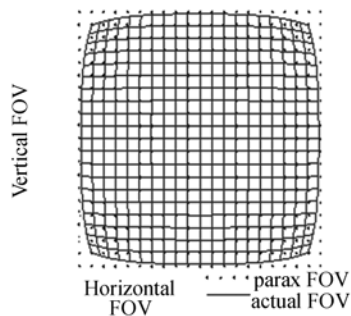
图 4 投影镜头能量集中度曲线图

Fig.4 Encircled energy curves of projecting lens



(a)畸变曲线

(a)Distortion curve



(b)畸变网格图

(b)Distorted grid

图5 投影镜头组畸变图

Fig.5 Distortion diagram of projecting lens

投影镜头的畸变网格图如图5所示,全视场90%畸变小于1%,最大不超过1.4%。最大畸变

在50°半视场角处产生,最大畸变为-1.36%。本光学系统主要产生桶形畸变。系统的垂轴放大率随视场角的增大而减少。

4 结 论

本文设计了1组折射式激光背投显示镜头,结合激光显示的特点,选用了成本较低,加工和装调难度低的折射式投影镜头组。软件模拟结果显示,系统成像质量良好,在全视场角100°下畸变<1.4%,显示图像边缘亮度无明显下降。系统中使用了1个直角棱镜对光路进行折叠,减小了镜头长度。系统中使用了1个非球面,非球面的二次常数为0,高次项到8次,保证了加工的可行性,设计结果有利于降低投影系统成本、实现产业化。

参考文献:

- [1] 张岳,郝丽,柳华,等.激光显示的原理与实现[J].光学精密工程,2006,14(3):401-404.
ZHANG Y, HAO L, LIU H, *et al.*. Principle and realization of laser display technique[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(3):401-404. (in Chinese)
- [2] 田志辉,刘伟奇,李霞.激光显示中散斑的减弱[J].光学精密工程,2007,15(9):1367-1371.
TIAN ZH H, LIU W Q, LI X. Speckle contrast reduction in laser display[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(9):1367-1371. (in Chinese)
- [3] SARAYEDDINE K, BENOIT P. *Slim Rear Projection system for Laser TV*[R]. US: San Jose, SID Symposium Digest, 2005.
- [4] KUWATA M, SASAGAWA T, KOJIMA K, *et al.*. Wide-Angle projection optics for thin rear projectors [J]. *Proc. Int. Disp. Workshops*, 2005, 12(2): 1887-1890.
- [5] SHIKAMA S, SUZUKI H, TERAMOTO K. *Optical System of Ultra-Thin Rear Projector Equipped with Refractive-Reflective Projection Optics*[R]. US: San Jose, SID Symposium Digest, 2002.
- [6] GOHMAN J, PETERSON M, ENGLE S. *Slim Rear Projection*[R]. US: San Jose, SID Symposium Digest, 2005.
- [7] 陆国华,沈为民.LCOS大屏幕薄型背投电视广角投影物镜的设计[J].光子学报,2009,38(3):601-604.
LU G H, SHEN W M. Wide angle projection lens for LCOS rear-projection TV of large screen and thin structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(3):601-604. (in Chinese)
- [8] 吕银环,崔维新,张涛.广角长波红外物镜环境适应性分析[J].红外与激光工程,2007,36(6):10-14.
LV Y H, CUI W X, ZHANG T. Analysis on environmental adaptability of wide-angle infrared objective[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6):10-14. (in Chinese)
- [9] 张向辉,郝沛明,刘玉.背投电视的光学系统设计[J].同济大学学报,2003,31(10):1247-1250.
ZHANG X H, HAO P M, LIU Y. Design of optical system in rear-TV projection[J]. *Journal of Tongji University*, 2003, 31(10): 1247-1250. (in Chinese)
- [10] BRIAN J. Thompson, Milton laikin, *Lens design* [M]. First edition. Rochester: Rochester university, 2002:105.

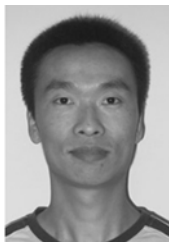
作者简介:



陈旭(1984—),女,内蒙临河人,博士研究生,主要从事光学设计、光学检测等方面的研究。E-mail: chxu2009@126.com



康玉思(1977—),男,黑龙江密山人,工程师,主要从事光学设计及光学检测工作。E-mail: kyshdl@163.com



冯玉涛(1980—),男,吉林长春人,助理研究员,主要从光谱成像技术的研究。E-mail: fytciom@126.com



导师简介:

刘伟奇(1958—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事光刻中用于光学检测的点衍射干涉仪和菲索干涉仪制造方面的研究。E-mail: liuwq@ciomp.ac.cn



魏忠伦(1977—),男,黑龙江嫩江人,工程师,主要从事图像处理软件的开发工作。E-mail: wzl-0@126.com

● 下期预告

基于光纤-镜面干涉腔的光纤加速度计

林巧,陈柳华,李书,吴兴坤

(浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

设计及研制了一种结构新颖的基于光纤-镜面干涉腔的光纤加速度计。该加速度计用固定于圆网状弹性结构上的硅微反射镜与处理过的光纤端面构成光纤-镜面干涉腔,产生了相位差随外界加速度改变的光干涉信号。采用相位生成载波技术通过对干涉信号的调制和解调实现了对相位差的精确测定;应用工程软件 Cosmosworks (Solidworks) 对该加速度计弹性结构的灵敏度进行理论分析,并与样机测试比较。结果表明,该光纤加速度计拥有 63.2 rad/g 的灵敏度,160 Hz 的共振频率,4 μg 的分辨率及接近 10^8 的动态范围,与理论分析符合较好。