

文章编号:1007-2780(2014)03-0333-06

激光显示广角球幕投影镜头设计

康玉思,田志辉*,刘伟奇,冯 睿

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘要:激光显示具有色域大、颜色饱和度高、显示画面尺寸灵活可变、无电磁射线辐射等优点。本文根据应用要求,研究和设计了一种用于球幕投影的激光显示广角镜头。分析和计算了激光三基色的白场和光功率匹配参数。投影物镜采用远心反远结构,并且为全球面光学系统,易于加工和检测。设计中有效地控制了系统畸变,利用光阑像差提高了投影显示像面边缘的光照度,改善了像面照度的均匀性,解决了广角系统中像面照度不均匀和畸变控制的难题。投影系统焦距为 11.3 mm, F# 数为 2.5;全视场角可达到 110°。Nyquist 频率处,90% 视场内 MTF 大于 0.6,像面照度均匀性优于 95%,全视场畸变小于 1.5%;色差小于 0.5 pixel。分析结果表明,本文提出光学设计思路和方法可行,满足应用需求。

关键词:激光显示;色度学;球幕投影;广角镜头

中图分类号: TN873 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20142903.0333

Wide-angle dome-screen projection lens design of laser display

KANG Yu-si, TIAN Zhi-hui*, LIU Wei-qi, FENG Rui

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

Abstract: Laser display has advantages of large color gamut, high degree of saturation, variable display screen size, no electromagnetic radiation etc. According to application requirements, a wide-angle laser projection lens using in dome-screen display system was researched and designed in this paper. White field and light power matching parameters of three primary colors of laser display were analyzed and calculated. Telecentric retrofocus structure was adopted. Spheric optical system of the projection lens was propitious to processing and testing. Distortion was controlled in design effectively. Aperture aberration was used to improve illumination of image edge of projection display and illumination uniformity. Focal length of system was 11.3 mm. The F number was 2.5. Full field of the lens can reach 110°. The MTF was greater than 0.6 at nyquist frequency in 90% field of view. Image illumination uniformity was better than 95%. Distortion was less than 1.5%. Chromatic aberration was less than 0.5 pixel. Analysis results showed that the design idea and method presented in this paper was feasible, and it was suitable for application requirements.

Key words: laser display; colorimetry; dome screen projection; wide angle lens

收稿日期:2013-10-22;修订日期:2013-11-15.

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

* 通信联系人, E-mail: tian-zhi-hui@163.com

1 引言

与传统显示方式相比,激光显示具有色域大、颜色饱和度高、显示画面尺寸灵活可变、无电磁射线辐射等优点^[1-2],是获得大屏幕彩色显示图像的有力手段^[3]。全固态激光显示技术采用红、绿、蓝固体激光器(DPL)作为彩色显示的三基色,将彩色电视视频图像投影显示于屏幕上^[4]。激光光源寿命为传统灯泡的 10 倍以上,可为客户节省大量的灯泡耗材成本。目前的激光投影显示主要采用 2 种方式:一种是扫描式的投影成像方式^[5],另一种是采用面阵空间光调制器(光阀)的投影成像方式^[6]。扫描式投影显示方式存在“光束扫描”和“光强调制”两大技术瓶颈,目前难以得到迅速发展。而采用面阵光阀的投影方式则可以避开上述技术难点,省去了扫描转镜,对机械部件的要求大大降低,投射的图像质量高,画面尺寸可以根据投影物镜的焦距灵活变化;而且有利于降低成本,实现产业化生产^[7-8]。

随着虚拟现实技术的不断发展,单纯的平面投影显示已经不能满足人们对多媒体互动投影沉浸感、交互感的要求。球形或半球形投影显示系统的出现,成为解决这一问题的有效方法^[9-12]。球幕投影使用一台或者多台投影机,在球形屏幕上投影出完整连续的画面。数字球幕放映视域范围可达前后 180°以上,水平 360°,可从观众面身前延至身后,具有的超广视域能令观众产生身临其境的感觉。具有沉浸感强,不需立体眼镜就能产生立体视觉等特点。

本文根据虚拟现实球幕投影的特点,结合激光显示的色域优势,设计了一种用于球幕投影的激光显示广角镜头。实现了 1/4 球面双机投影显示。投影镜头由全球面组成,具有良好的可加工性。设计中有效地控制了系统畸变,改善了像面照度的均匀性,解决了广角系统中像面照度不均匀和畸变难以控制问题。通过对其性能的分析与评价,证明了本文提出的设计的可行性。

2 应用需求及主要技术指标

本项目中,激光显示应用对象为飞行模拟球幕视景显示系统。对于军用战斗机模拟器来说,

视景范围越大,任务覆盖程度越好。模拟空战一般需要有充分的视景,且要求较高的目标分辨率和清晰度。

最终显示的投影屏幕外形状为 1/4 球面,图 1 所示为球幕的整体外形。其中,球幕的半径为 10 m。图中坐标原点为投影镜头机的安装位置。因为屏幕的水平方向尺寸为高度方向尺寸的 2 倍。同时,考虑到画面分辨率的要求,采用双镜头拼接技术方案,即:整个系统由左、右 2 个结构完全相同的激光投影系统组成,并留有图像重叠区域以便进行拼接。

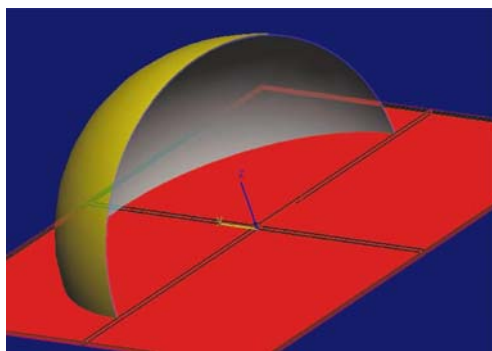


图 1 1/4 球面规格示意图

Fig. 1 1/4 spherical image surface

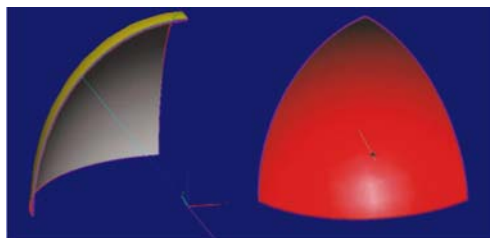


图 2 每个投影镜头对应的球幕尺寸

Fig. 2 Dome-screen area corresponding to each projection lens

每个投影镜头对应的球幕部分如图 2 所示。该区域为球面正三角形,采用 4:3 规格的空间光调制器(光阀)LCD 芯片,芯片解析度为 1 024×768。相对于长、宽尺寸比为 16:9 的显示芯片,更有利于模拟系统分辨率的提高。图中,球面三角形面积中心点到坐标原点(球心)的连线为光轴方向。

根据球面几何知识,计算得到投影镜头主点到球面三角形三个顶点的张角均为 54°,所以近似取投影镜头的半视场为 55°。按照人眼视觉特点,畸变要求控制到 4% 以内。根据 LCD 光阀的

发光特性,为了保证像面照度的一致性,镜头采用像方远心结构。光阀芯片的孔径角按 12° 计算,所以投影镜头的 $F\#$ 为 2.5。LCD 芯片对角线长为 15.5 mm,光阀上每个显示像元的尺寸为 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ 。综上所述,要求投影镜头的设计指标如下表 1 所示。

表 1 投影镜头主要技术指标

Tab. 1 Requirements of projection lens

指标	要求
焦距/mm	11.3
全视场	110
投影距离/m	10
$F\#$	2.5
像元尺寸/ μm	10×10
分辨率/pixel	$1\ 024 \times 768$
畸变	$<4\%$
像面照度/ $\%$	$>90\%$

3 激光显示色度学分析

激光三基色是高饱和度光谱色,可复现更大的色域。根据本项目的特点,选用(色温 9 300 K)做为匹配白场。投影系统采用的红、绿、蓝三基色激光光源的主波长分别为:635,532 和 473 nm,其色坐标参数如表 2 所示。

表 2 红、绿、蓝三基色激光色坐标

Tab. 2 Chromaticity coordinates of three primary laser colors

	x	y
红	0.714 03	0.285 93
绿	0.170 24	0.796 52
蓝	0.115 81	0.073 58

假定激光三基色各有一个单位能匹配成一个单位的标准白 D_{93} ,则^[13-14]:

$$1[R_L] + 1[G_L] + 1[B_L] \equiv 1[C_{D65}], \quad (1)$$

其中: $\equiv$ 表示视觉上相等,即颜色匹配。

标准白 D_{93} 的三刺激值对应等于三色激光刺激值之和:

$$X_{D93} = X_{R_L} + X_{G_L} + X_{B_L}, \quad (2)$$

$$Y_{D93} = Y_{R_L} + Y_{G_L} + Y_{B_L}, \quad (3)$$

$$Z_{D93} = Z_{R_L} + Z_{G_L} + Z_{B_L}, \quad (4)$$

其中: L 表示亮度。

$$X = \frac{x}{y}L, \quad (5)$$

$$Y = L, \quad (6)$$

$$Z = \frac{1-x-y}{y}L. \quad (7)$$

将标准白 D_{93} 的色坐标(0.283,0.298)和表 1 中的数据带入上式(1)~(7),得到红、绿、蓝三基色激光光源的亮度之比约为:

$$L_{R_L} : L_{G_L} : L_{B_L} = 0.397\ 6 : 1 : 0.201\ 5, \quad (8)$$

其中:

$$L = P \cdot v(\lambda), \quad (9)$$

其中: $v(\lambda)$ 为明视条件下的视见函数^[15]。将三基色激光主波长对应的视见函数带入等式(8)~(9),最终得到匹配白光的红、绿、蓝三基色激光器光功率之比约为:

$$P_{R_L} : P_{G_L} : P_{B_L} = 1.62 : 1 : 1.725. \quad (10)$$

以上分析做为后续广角投影物镜头设计的光谱权重选取和膜系设计依据。

4 广角投影镜头光学设计

投影镜头为广角、大相对孔径的光学系统。采用反远距结构形式,有利于保证系统的后截距和远心度。

通常光学系统的像面照度按视场角余弦的 4 次方变化,随着视场角的增大,像面照度迅速下降。按照 $\cos^4 \omega$ 计算^[16-17], 55° 半视场的像面照度将是轴上的 12%,这样的像面照度无法满足成像要求。这里利用光阑像差结合远心光路改善像面照度。

光阑像差会引起系统轴上光束和轴外光束入瞳位置和大小不同。在小视场光学系统中,光阑像差较小,可以忽略,但在大视场光学系统中,其影响是不可忽略的。在无渐匀情况下,光阑像差使轴外光束在入瞳面上的口径大于轴上光束口径。此时,轴外视场的像面照度为:

$$E(\omega) = E_0 \frac{S_\omega}{S_0} \cos^4 \omega, \quad (11)$$

其中: E_0 为轴上视场的像面照度, S_0 和 S_ω 分别为轴上视场在入瞳处的截面面积。本文通过引入适量的光阑像差,改善系统像面照度的均匀性。

在系统中引入光阑像差,进光量增多,改善了像面的边缘照度。但边缘光束的增加同时也给设计加大了难度,尤其是随视场变化成高次方的畸变校正。设计中通过调整光路中各光学元件的位置、折射率和形状,反复迭代优化,平衡像面照度均匀性和最大畸变量。

设计的激光显示广角球幕投影镜头结构如图 3 所示。投影物镜采用全球面设计。系统中使用了一组双胶合透镜和一组三胶合透镜来校正激光色差,同时使用胶合镜组降低了元件的位置敏感度,有利于加工、检测、装调公差要求的放松。

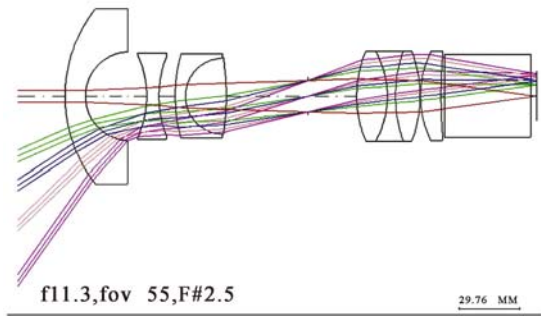


图 3 投影镜头的结构图
Fig. 3 Projection lens layout

镜头参数见表 3 所示。

表 3 镜头结构参数

Tab. 3 Structure parameters of projection lens

面数	半径 mm	厚度 mm
0	10 000	10 000
1	69.98	10
2	22	30.15
3	-49.9	6
4	54.35	8
5	77.09	25
6	-129.89	40.23
7	平面	24.12
8	57.48	15
9	-46.05	4
10	67.04	12
11	-64.17	0.30
12	50.43	10
13	237.243	2.68
14	平面	42
15	平面	3
16	平面	0

光阀芯片上单位像素的尺寸为:10 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$,换算成采样耐斯特频率为:50 lp/mm。图 4 为激光投影镜头的 MTF 性能图。

可以看到,系统 90% 视场范围内 50 lp/mm 处的 MTF 值在 0.63 以上。全视场在 MTF 50 lp/mm 处 MTF 高于 0.5。

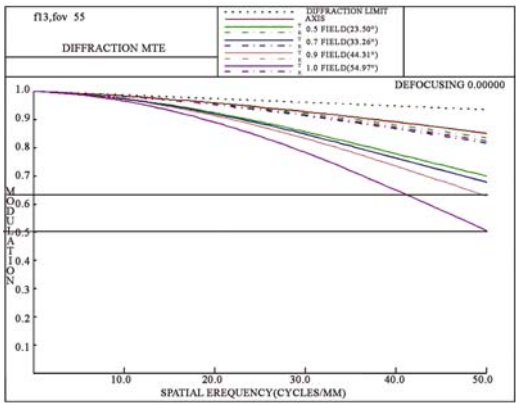


图 4 镜头 MTF 性能指标
Fig. 4 MTF of projection lens

激光球幕投影镜头的像散、场曲和畸变如图 5 所示。

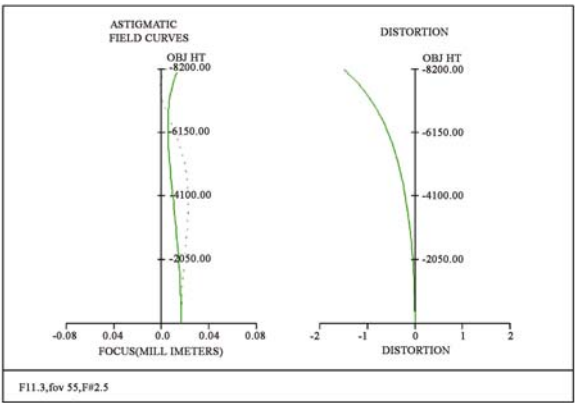


图 5 像散、场曲和畸变
Fig. 5 Astigmatic, field curves, and distortion

1 cd/m² 物面亮度对应不同视场采样点处的像面照度和畸变如表 4 所示。

表 4 不同视场处的像面照度和畸变

Tab. 4 Illumination and distortion of sampling point fields

视场/ (°)	像面照度/ lx	相对照度/ %	畸变/ %
0.0	0.242	100.0	0.00
23.5	0.243	100.2	-0.19
33.3	0.244	100.6	-0.42
44.3	0.246	101.3	-0.84
55.0	0.246	101.5	-1.51

图6表示的是投影图像的网格畸变图。图像的长、宽比为4:3,TV畸变小于1%。

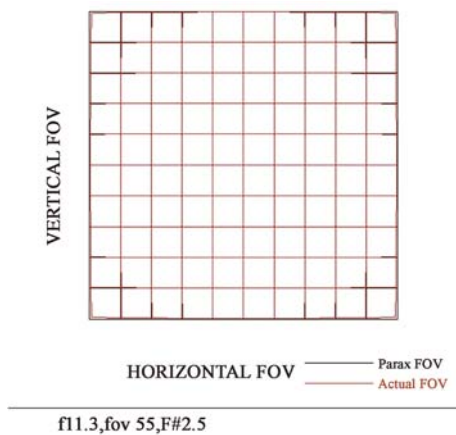


图6 网格畸变图

Fig. 6 Grid distortion

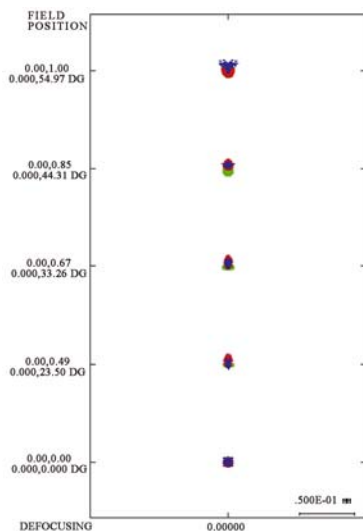


图7 点列图

Fig. 7 Spot diagram of projection lens

系统点列图见图7所示。可以看到,0.9相对视场处的垂轴色差最大,但仍小于0.5个像素。

图8为采用常规公差分配后,系统的MTF蒙

特-卡洛仿真结果。从图中可以得到,该投影镜头具有良好的可加工性。

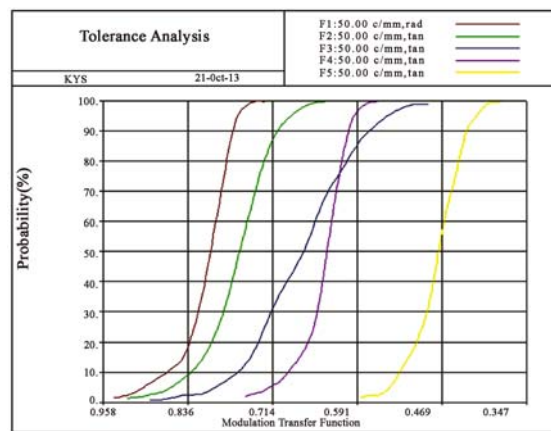


图8 公差分析

Fig. 8 Tolerance analysis

5 结 论

通过分析激光显示原理,根据球幕投影仿真系统的应用要求,设计了一个用于球幕投影的激光显示广角全球面反远距镜头光学系统。根据应用条件,计算了光学系统的指标要求。光学系统视场角为 110° ,相对孔径为1:2.5,投影距离为10 m,可形成半径为10 m的半球幕仿真显示。给出了激光显示投影系统的光度学和色度学分析结果,为后续设计提供依据。提出利用光阑像差平衡像面照度一致性和系统畸变光学设计思路,改善了像面照度的均匀性。系统传递函数在奈奎斯特频率处(50 lp/mm)大于0.5,畸变小于1.5%,TV畸变小于1%,像面照度均匀性优于95%,色差小于1/2像素。从软件模拟结果上看,系统成像质量良好,各项指标均满足设计要求,并且具有很好的可加工性。

参 考 文 献:

- [1] Kishore V C, Erdem E, Hakan U. Laser-based displays: a review [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(25): 79-98.
- [2] Yuhei K, Kazuo S, Hiroaki S, et al. Speckle reduction mechanism in laser rear projection displays using a small moving diffuser [J]. *Josa A*, 2010, 27(8): 1812-1817.
- [3] 田志辉, 刘伟奇, 冯睿, 等. 激光投影显示系统薄型化设计[J]. *液晶与显示*, 2009, 24(6): 916-921.

Tian Z H, Liu W Q, Feng R, et al. Design of ultra-thin rear projector for laser display system [J]. *Chinese Journal*

- of *Liquid Crystals and Displays*, 2009, 24(6): 916-921. (in Chinese)
- [4] 陈旭, 刘伟奇, 魏忠伦, 等. 激光显示中匀色坐标系的建立与色差分析[J]. 液晶与显示, 2008, 23(4): 427-431.
Chen X, Liu W Q, Wei Z L, et al. Establishment and analysis of uniform color coordinate system in laser TV [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2008, 23(4): 427-431. (in Chinese)
- [5] 沈凌云, 郎百和, 朱明, 等. 数字直接制版系统的激光扫描成像设计[J]. 液晶与显示, 2012, 27(5): 687-691.
Shen L Y, Lang B H, Zhu M, et al. design of laser scanning imaging for digital computer-to-plate system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(5): 687-691. (in Chinese)
- [6] 徐正平, 王德江, 黄厚田, 等. 数字微镜器件视频显示性能分析[J]. 液晶与显示, 2013, 28(2): 255-260.
Xu Z P, Wang D J, Huang H T, et al. Analysis on performance of video displaying system based on DMD [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(2): 255-260. (in Chinese)
- [7] 柴燕, 毕勇, 颜博霞, 等. 全球激光显示技术专利分布格局与态势分析[J]. 液晶与显示, 2011, 26(3): 329-333.
Chai Y, Bi Y, Yan B X, et al. Distribution pattern and trend analysis on global laser display technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(3): 329-333. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] Hiroshi M, Nobuyuki S, Eriko A, et al. The magnitude of stereopsis in peripheral visual fields [J]. *Kitasato Med. J.*, 2012, 42(1): 1-5.
- [10] Ogi T, Tateyama Y, Lee H, et al. Creation of three dimensional dome contents using layered images [C]// *VR Innovation (ISVRI)*, 2011 *IEEE International Symposium*, 2011: 255-260.
- [11] Gray J R. Habituated visual neurons in locusts remain sensitive to novel looming objects [J]. *Journal of experimental biology*, 2005, 208(13): 2515-2532.
- [12] 陈琛, 胡春海. 球幕投影通用型变焦鱼眼镜头设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 323-335.
Chen C, Hu C H. Design of general type zoom fish-eye lens for dome-screen projector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 323-335. (in Chinese)
- [13] 荆其诚, 焦书兰, 喻柏林, 等. 色度学[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
Jing Q C, Jiao S L, Yu B L, et al. *Colorimetry* [M]. Beijing: Science Press, 1979. (in Chinese)
- [14] 田志辉, 刘伟奇, 冯睿, 等. 基于 DLP 投影方式的激光显示系统[J]. 液晶与显示, 2007, 22(3): 315-319.
Tian Z H, Liu W Q, Feng R, et al. laser display system based on dlp projection style [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2007, 22(3): 315-319. (in Chinese)
- [15] 王之江. 光学仪器理论[M]. 北京: 科学出版社, 1975.
Wang Z J. *The Theory of Optical Instruments* [M]. Beijing: Science Press, 1975. (in Chinese)
- [16] Warren J S. *Modern Lens Design* [M]. New York: McGraw-Hill Press, 2005.
- [17] Rudolf K, Barry J. *Lens Design Fundamentals* [M]. Washington: Elsevier Press, 2010.

作者简介: 康玉思(1977—), 男, 黑龙江密山人, 博士, 工程师, 主要从事光学设计及光学检测工作。E-mail: kyshdl2012@gmail.com

田志辉(1981—), 男, 吉林长春人, 博士, 助理研究员, 主要从事显示光学方面的研究。E-mail: tian-zhi-hui@163.com