

## LED 数字投影机短焦投影物镜设计

张禹<sup>1</sup>, 陈琛<sup>1,2</sup>, 刘宵婵<sup>1</sup>, 李维善<sup>1</sup>, 王陆军<sup>1</sup>

- (1. 秦皇岛视听机械研究所, 河北 秦皇岛 066000;  
2. 燕山大学 测试计量技术及仪器河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:**为实现 LED 数字投影机短距离内投影出更大的画面, 文中针对此类投影机的结构特点, 通过理论计算和 ZEMAX 光学设计软件的优化, 开发设计一款适用于 LED 光源 0.7 in(1 in=2.54 cm) 单芯片数字投影机的短焦投影物镜。给出工作波长为 462~625 nm、全视场角为 84°、相对孔径为 1:2.4、焦距为 10 mm、后工作距离大于 20 mm 的镜头设计实例。镜头有较好的成像质量, 在分辨率极限 40 lp/mm 处, 0.7 视场以内的 MTF 值均大于 0.5, 全视场畸变量的绝对值小于 1.5%, 像质优良。设计结果显示, 文中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:** LED 数字投影机; 短焦; 投影物镜; 光学设计

**中图分类号:** O435   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2013)10-2760-05

## Design of short-focus projection lens for LED digital projectors

Zhang Yu<sup>1</sup>, Chen Chen<sup>1,2</sup>, Liu Xiaochan<sup>1</sup>, Li Weishan<sup>1</sup>, Wang Lujun<sup>1</sup>

- (1. Qinhuangdao Audio-Visual Machinery Research Institute, Qinhuangdao 066000, China; 2. Heibei Province Key Laboratory of Measuring and Testing Technologies & Instruments, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** To achieve LED digital projectors project in a short distance with the bigger picture projection, according to the structural characteristics of such projectors, a short focal digital projection lens for 0.7 inch DLP projectors was designed and a design example of a lens, whose operating wavelength was 462-625 nm, full field of view angle was 84°, relative aperture was 1:2.4, focal length was 10 mm and back focal length was greater than 20 mm was given on the basis of the theoretical calculation and the optimization of optical design software ZEMAX. Its MTF in all fields less than 30° is higher than 0.5 at the limiting spatial frequency of 40 lp/mm. The absolute value of the full field of view distortion of the lens was less than 1.5%, the image quality is very good. Analytical results show that the design can decrease the production costs of the projecting system and promote the technological industrialization.

**Key words:** LED digital projectors; short-focus; projection lens; optical design

收稿日期: 2013-02-10; 修订日期: 2013-03-07

基金项目: 科技部科研院所开发研究专项基金(2010EG119161, 2011EG119199); 科技部企业科技创新基金(10C26211303678)

作者简介: 张禹(1982-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事光学设计及光学冷加工等方面的研究。Email: [steve8258@126.com](mailto:steve8258@126.com)

通信作者简介: 陈琛(1968-), 男, 教授级高工, 博士, 主要从事影像光学系统设计及影视、影像领域标准制修订等方面的研究。

Email: [chenchen\\_5168@sina.com](mailto:chenchen_5168@sina.com)

### 0 引 言

投影显示是一种对环境要求较低的投影显示技术,适合于家庭会议与控制指挥系统的大屏幕显示。与平板显示相比,投影可以实现超大屏幕显示,是一种最经济、性价比最高的显示技术。传统的投影显示采用弧光灯光源,体积大、功耗大、寿命短、发热量高<sup>[1-3]</sup>。近年来出现的大功率 LED 则具有体积小、效率高、色纯度高、功耗低、寿命长、响应时间短、驱动容易、颜色再现范围大、无红外辐射、符合环保要求等优点,且采用三色 LED 作为光源的投影显示系统,可得到更为鲜艳的投影画面,具有更大的色域。

短焦投影镜头具有较大的视场及较短的有效焦距,因此相较于具有传统投影镜头的投影显示设备,具有广角投影镜头的投影显示设备可在较短的距离内投射出特定尺寸的影像画面。文中研究适配大功率 LED 为光源的 DLP 投影显示光学引擎技术投影机短焦投影物镜。

### 1 技术指标确定

根据 LED 数字投影机的使用要求,提出物镜光学指标如表 1 所示<sup>[4-7]</sup>。

表 1 镜头参数

Tab.1 Lens specifications

Parameters	Specifications
Chip size	0.7" diagonal
Wavelength/nm	525
E.F.L/mm	10
B.F.L/mm	≥ 20
F/#	2.4
F.A/(°)	42
MTF	>0.3@40 lp·mm <sup>-1</sup>
Lateral color/μm	<7
Distortion	<2%

### 2 短焦投影光学系统结构设计

#### 2.1 设计理论

根据传统光学原理<sup>[8-9]</sup>,如图 1 所示。将光学系统

归一化后,总光焦度  $\varphi=1$ ,物方到光学系统前组主面距离为  $l$ ,平行光线以  $h_1=1$  的高度入射,以角度为  $u'_1=1$  从后组出射,轴外主光线以角度  $u_{p1}=-1$  进入前组。

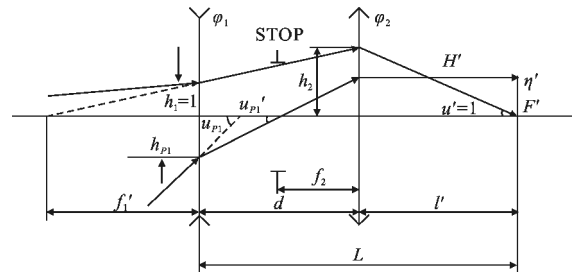


图 1 物镜结构原理图

Fig.1 Basic structure of lens

$\varphi_1$  为系统的前组光焦度,为负值; $\varphi_2$  为系统的后组光焦度,为正值; $d$  为系统前后组主面的间隔; $L$  为系统的筒长,即物镜的第一面至像面的距离; $l'$  为系统的像距,即后组主面至像面的距离。

设前组角放大率为:

$$A = \frac{u_{p1}}{u_{p1}'} \tag{1}$$

由远心条件下孔径光阑与后组之间的距离等于后组焦距  $f_2$  及高斯光学理论可得:

$$u_{p1}' = h_{p1}\varphi_1 + p_{p1} = (d - f_2)u_{p1}' + u_{p1} \tag{2}$$

两边同时除以  $u_{p1}'$ , 则:

$$A = 1 - d\varphi_1 + \varphi_1 / \varphi_2 \tag{3}$$

又:

$$l' = h_1 - d u_1' = 1 - d(u_1 + h_1\varphi_1) = A - \varphi_1 / \varphi_2 - d/l \tag{4}$$

据薄透镜合成关系式:

$$\varphi_1 + \varphi_2 - d\varphi_1\varphi_2 = 1 \tag{5}$$

代入公式(3)得:

$$A = f_2 \tag{6}$$

将公式(3)代入公式(5)得:

$$\varphi_1 = \frac{A - 1}{A - d} \tag{7}$$

光学系统总长:

$$L = l' + d = A(1 - \varphi_1) + d(1 - 1/l) \tag{8}$$

前组负担的孔径角:

$$u_1' = u_1 + h_1\varphi_1 = 1/l + \varphi_1 \tag{9}$$

后组负担的孔径角  $u' - u_1'$ :

$$\Delta u' = u' - u_1' = 1 - (1/l + \varphi_1) \tag{10}$$

前组负担主光线的相对孔径:

$$\frac{2h_{p1}}{f_1'} = \frac{2(d-f_2)}{Af_1'} = -\frac{2(d-f_2)(A-1)}{A(A-d)} = \frac{2(A-1)}{A} \quad (11)$$

式中： $h_2$  是轴上点边缘光线在后组上的入射高度； $h_{p1}$  为轴外主光线在前组上的高度。

在设计初期，可根据实际要求选定适当的  $A$  和  $d$  值，并代入公式(6)和(7)，求出  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$ 。再根据投影距离和像距的要求列出  $l$  与  $l'$  的关系，代入公式(4)，求出  $l$  与  $l'$ 。将这些量代入公式(8)~(11)中，求出  $L$ 、 $u_1'$ 、 $u' - u_1'$  以及  $2h_{p1}/f_1'$  的值。以此确定光学系统的基本结构参数。

$A$  值的大小与光学系统的最大视场角及像距直接相关，此外，系统的复杂程度和体积大小也与之有紧密的联系。为了减小光学系统的总长必然要缩短两组间隔  $d$ ，所以这两个参数的选择将直接影响到设计结果。当对工作距离、视场和孔径有相应的要求时，根据上述论证可知，前后组的光焦度及前后组之间的距离都将增大。为了能得到较紧凑的结构又能有较合理的像质，需要对前后组的结构形式进行论证。

$A$  值的增大直接增大前组的复杂程度，为了实现系统的轻量化及小型化，尽可能减少镜片的数量，同时满足光学系统对相对孔径要求，在光学系统中采用一片非球面镜片。出于对成本的考虑，非球面镜尽量采用 PMMA 材料，以适于压模成型生产技术。

### 2.2 系统结构

根据相关参数及技术指标，选定适当的初始结构<sup>[10]</sup>。并在软件中对光学系统的视场角、焦距、空气间隔、工作距离等关键参数设置约束条件，对初始结构进行优化设计，并把初始结构中的高价玻璃替换为国内常见玻璃<sup>[11-13]</sup>。最终得到系统光路结构见图 2。

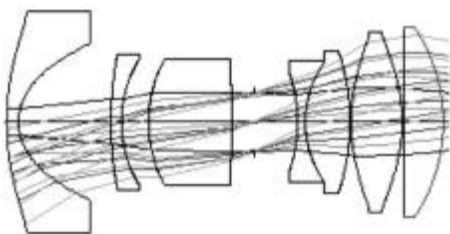


图 2 系统光路结构

Fig.2 Initial structure layout of lens

系统结构参数如表 2 所示，由 6 组 7 片镜片组成，5 个球面镜均为常见玻璃，2 个非球面镜材料为最常见的 PMMA，有效控制镜头成本。

表 2 镜头光学结构参数

Tab.2 Optical parameters of lens

i	$r_i/mm$	$d_i/mm$	Material
1	39.93	1.86	PMMA
2	8.268	14.54	
3	57.683	1.63	H-LAF3A
4	18.809	4.27	
5	20.867	13.16	ZF7L
6	-87.862	3.33	
7	Infinity	6.95	
8	-22.955	1.21	ZF7L
9	16.444	7.00	H-LAK50A
10	-34.823	0.16	
11	27.441	8.02	PMMA
12	-24.192	0.22	
13	955.253	6.21	H-K9L
14	-26.826		

由于具有相同曲率的非球面比球面较平坦或更弯曲一些，所以可以校正像差或缩短镜头长度，其较多的面形系数增加了设计过程中优化的自由度，可显著减少系统镜片数量，文中系统第 1、2、11、12 面采用高次非球面，其中二次项系数均为 0，其他相应系数由表 3 和表 4 给出。

表 3 二次圆锥曲面系数

Tab.3 Conic coefficients

i	Conic
1	1.81
2	-0.639
11	-6.559
12	-3

表 4 高次非球面系数

Tab.4 High order aspheric coefficient

No.	4th	6th	8th	10th
1	-1.05E-006	-4.44E-008	1.66E-011	-2.36E-014
2	-1.20E-006	-1.84E-008	2.88E-009	-3.64E-011
11	4.51E-006	1.52E-008	-1.21E-011	0
12	-4.22E-007	2.40E-008	7.93E-011	0

光学系统加入模拟合成棱镜后,系统像差校正比较理想。调制传递函数(MTF)曲线,场曲畸变曲线分辨,垂轴色差分别如图 3、4、5 所示。在 50 lp/mm 处全视场仍大于 0.3,0.707 视场内实际要求只需在 40 lp/mm 处全视场大于 0.3 即可。畸变最大值为 1.1%,垂轴色差小于 5 μm,符合设计指标要求的小于 0.5 像素尺寸,即 7 μm。

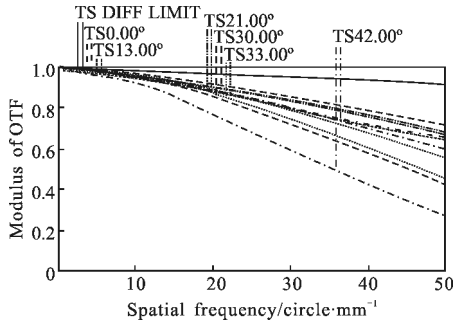


图 3 调制传递函数

Fig.3 Optical transfer function

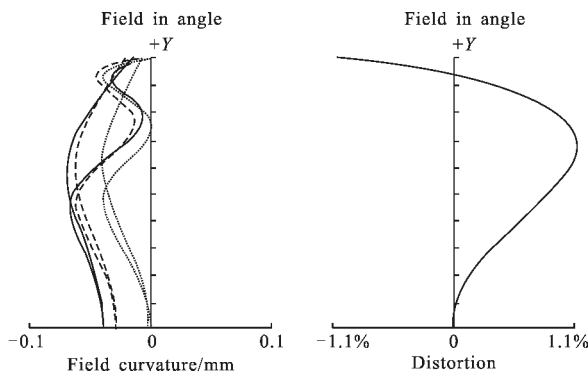


图 4 系统场曲及畸变曲线

Fig.4 Field curvature and distortion curve of lens

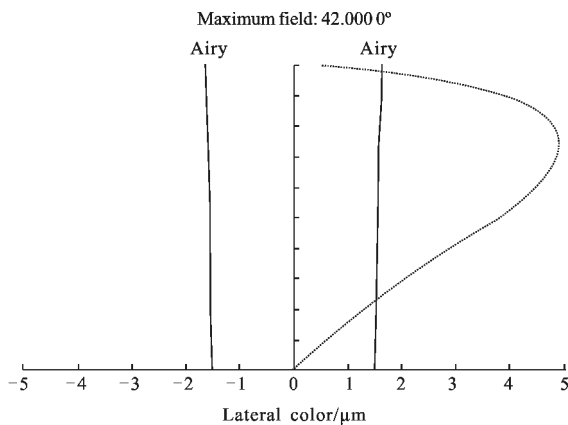


图 5 垂轴色差曲线

Fig.5 Lateral color curve

### 2.3 机械结构设计

利用光学设计软件优化确定光学结构后<sup>[11]</sup>,根据系统结构特点确定机械结构最终物镜外观如图 6 所示。

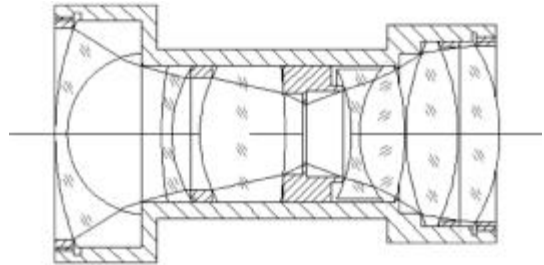


图 6 镜头机械结构

Fig.6 Mechanical structure of lens

### 3 结论

LED 数字投影机投影镜头具有大视场、大相对孔径、长后工作距离、小型化和轻重量等特点,其中小型化和轻重量是镜头设计中的较大难点。在结构中加入非球面,不但可以减少结构中透镜的数量、缩小最大口径的尺寸和光学系统总长、减轻重量,同时还可以有效平衡轴外像差、提高光学系统的相对孔径、扩大视场角。

文中利用 ZEMAX 光学软件实际设计出了一款成像质量高、结构简单、体形小、加工难度较低、量产后生产成本低的 LED 数字投影镜头。这款投影镜头的最大口径小于 38 mm,光学总长控制在 70 mm 以内,相对孔径为 1/2.4,视场角达到 84°。镜头结构由 6 组 7 片镜片组成,其中 5 片为价格便宜并且国内经常使用的球面光学玻璃,两片为非球面光学塑料(PMMA)。该款投影镜头更适合于大批量的规模化生产,可以很好地满足微型投影市场的需求,在科教、娱乐等领域有广泛的应用前景。

### 参考文献:

[1] 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. (in Chinese)  
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.

[2] He Fengtao, Jia Qiongyao, Sun Linjun. Design of liquid crystal laser projection display system[J]. *Infrared and laser*

- Engineering, 2012, 41(10): 2699-2702. (in Chinese)  
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.
- [3] Yang Yi, Ding Quanxin, Zhang Chunfeng. New advance in airborne laser imaging techniques [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(4): 620-625. (in Chinese)  
羊毅, 丁全心, 张春风. 机载激光成像技术新进展[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(4): 620-625.
- [4] 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. (in Chinese)  
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.
- [5] Lv Yinhuai, Cui Weixin, Zhang Tao, et al. Analysis on environmental adaptability of wide-angle infrared objective [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36 (6): 10-14. (in Chinese)  
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.
- [6] Qiu Song. Research on LED-based DLP projection system [D]. Shanghai: East China Normal University, 2007. (in Chinese)  
邱崧. 基于 LED 光源的 DLP 投影系统的研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- [7] Xu Jia. Investigation on optical engine of projection Display system based on LED [D]. Shanghai: East China Normal University, 2008. (in Chinese)  
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.
- [8] An Liansheng. Applied Optics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002. (in Chinese)  
安连生. 应用光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.
- [9] Yuan Xucang. Optical Design [M]. Beijing: Science Press, 1983. (in Chinese)  
袁旭沧. 光学设计[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [10] Hussein S.El-Ghoroury, Carlsbad, CA(US), Dale A. McNeill, et al. LED-based high efficiency illumination systems for use in projection systems: US 7889430[P]. 2006-08-09.
- [11] Gao Zhishan. Aberration Design Application of ZEMAX Software [M]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology Press, 2006. (in Chinese)  
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.
- [12] Xu Liang, Zhang Guoyu, Xu Xiping, et al. Design of small distortion and WFOV optical lens for CCD camera[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2008, 31(2): 4-6. (in Chinese)  
徐亮, 张国玉, 徐熙平, 等. 小畸变大视场 CCD 相机光学系统的设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2008, 31(2): 4-6.
- [13] Liu Xiaochan, Chen Chen. Design of 3-DLP digital projection lens with short focal length [J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31: 38-42. (in Chinese)  
刘霄禅, 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: 38-42.