

文章编号:1004-4213(2011)12-1855-5

短焦数字投影镜头的光学设计

陈琛,李维善,张禹,刘宵婵

(秦皇岛视听机械研究所,河北 秦皇岛 066000)

摘 要:为了满足短焦投影市场的需求,利用 ZEMAX 光学软件开发设计出了一款适用于 0.8 英寸单片数字光处理投影机的短焦数字投影镜头.该镜头总长 172.6 mm,全口径 70 mm,采用反远距结构,由 6 组 7 片透镜组成,其中包括 6 片玻璃透镜和 1 片塑料透镜(两个偶次非球面).镜头全视场达到 80° ,相对孔径为 1/2.1,反远比(工作距离/焦距)为 3.17 : 1,投射比达到 0.76 : 1,在空间频率极限 37 lp/mm 处,0.707 以内视场的调制传递函数值均大于 0.6,垂轴色差小于 $3.5 \mu\text{m}$,在 0.5 像素尺寸之内,全视场畸变低于 1.1%.该镜头具有结构简单、体形小、易加工、成本低等优点.

关键词:光学设计;短焦;数字投影镜头;反远距结构;非球面

中图分类号: TN202; O439

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114012.1855

0 引言

投影机以其能够投射大尺寸画面而深受青睐.近几年,很多用户都想通过使用投影机来组建自己的家庭影院,从而体验到 100 英寸以上的大画面.相比于电视机,投影机需要吊装在房顶,或者是放置在桌面上使用.不仅安装需要提前布线,投射画面的大小也要受制于投影距离,投影机的焦距问题也成为阻碍其发展的重要原因.为此,短焦设计成为解决这一瓶颈的关键技术.经过近两年的发展,短焦投影机带来的便利性与实用性解决了很多使用普通投影机出现的安装难题.

目前市场上流行最多的是投射比为 0.8 : 1(全视场角为 74°)的短焦镜头.对于更小投射比(在一定的投射距离,投射比越小,投射画面越大)的短焦镜头,国内市场上极少;而国外的短焦数字镜头结构复杂,价格昂贵.

本文基于对数字光处理(Digital Light Processing, DLP)投影技术^[1-2]以及现有短焦投影镜头结构的深入研究^[3-6].首先讨论了短焦数字投影镜头的光学设计思想;从设计思想出发,确定初始结构,利用 ZEMAX 光学设计软件进行优化设计;最终设计出了一款投射比为 0.76 : 1(全视场为 80°)的适用于单片 DLP 数字投影机的短焦数字投影镜头.

1 设计思想

短焦数字投影镜头要求在较短的距离内投射出尽可能大的投影面积,同时,数字投影机内部都含有一定的光学引擎,这就决定了该种镜头结构要具有大视场、长工作距离的特点.另外,镜头轴上像点照度与相对孔径的平方成正比^[1],即 $E'_0 \approx 0.25\tau\pi B(D/f')^2$.式中, E'_0 为轴上像点的照度, τ 为光学系统的透过率, B 为与像点共轭的物点亮度, D 为镜头入瞳直径, f' 为镜头焦距.因此,相对孔径的大小决定了像平面上中心点的照度.对于轴外像点的照度, $E'_w = E'_0 \cos^4 \omega'$ ^[7],其中, E'_w 为轴外像点的照度, ω' 是相应的像方视场角.所以,轴外像点的照度也受相对孔径平方值的调制.为了满足投射像面一定的照度要求,必然决定了该种镜头具有大的相对孔径.

根据分析,短焦数字投影镜头具有大视场角、大相对孔径和长后工作距离(反远比大)的特点.而反远距结构具有大视场、像面边缘照度大、长后工作距离(反远比大)的特点,能够比较好地满足该种镜头的要求^[8].反远距结构是一种严重失对称的光学结构,它是由负的前组和正的后组组成的结构.其光阑常常设在正组中间,所以负前组远离光阑,轴外光束有较大的入射高度,产生了较大的初级轴外像差和高级轴外像差,前组产生的轴外像差力求由本身解

基金项目:科技部科研院所技术开发研究专项资金(No. 2010EG119161, No. 2011EG119199)和国家科技部科技型中小企业技术创新基金(No. 10C26211303678)资助

第一作者:陈琛(1968-),男,教授级高级工程师,硕士,主要研究方向为光学设计. Email: Chenchen6@yahoo.cn

收稿日期:2011-07-29;修回日期:2011-10-10

决, 剩余的量可以由后组补偿, 尤其是垂轴像差 S_{II} (初级慧差)、 S_V (初级畸变) 和 C_{II} (初级倍率色差) 需要后组给予补偿, 所以采用不对称的结构型式更为合理^[7].

本文通过反远距结构的高斯光学对其前后组分别进行讨论分析. 该结构由负的前组和正的后组组成 (如图 1), 归化条件: $h_1 = f' = 1, u_{z1} = -1$, 则 $j = 1$.

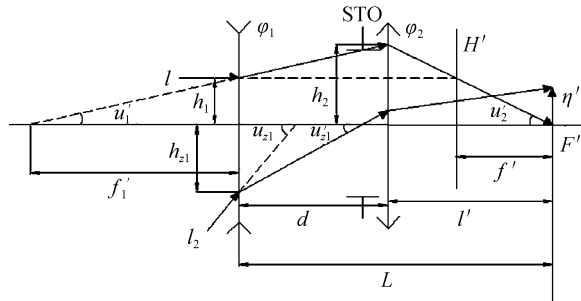


图 1 反远距结构

Fig. 1 The structure of retrofocus lens

前组的主光线角放大率

$$\Gamma = \frac{u'_{z1}}{u_{z1}} = \frac{u'_{z1}}{u_{z1} - h_{z1}\varphi_1} = \frac{u'_{z1}}{u_{z1} - du_{z1}\varphi_1} = \frac{1}{1 - d\varphi_1} \quad (1)$$

前后组间距

$$d = \frac{\Gamma - 1}{\Gamma\varphi_1} \quad (2)$$

后截距

$$l' = \frac{1}{\Gamma} \quad (3)$$

系统总长

$$L = d + l' = \frac{\Gamma - 1}{\Gamma\varphi_1} + \frac{1}{\Gamma} \quad (4)$$

后组光焦度

$$\varphi_2 = \frac{u'_2 - h_2\varphi_1}{h_2} = \frac{1}{l'} - \frac{1}{l'}\varphi_1 = (1 - \varphi_1)\Gamma \quad (5)$$

入射主光线高度

$$h_{z1} = d \cdot u_{z1} = -\frac{\Gamma - 1}{\Gamma\varphi_1} \cdot \Gamma = \frac{1 - \Gamma}{\varphi_1} \quad (6)$$

从式(1~6)知, 当系统的后截距确定后, 系统总长 L 、前后组间距 d 、后组光焦度 φ_2 及前组通光直径都是由前组的光焦度 φ_1 决定的. 设计时尽量使 h_{z1} (主光线入射高度) 小些, 较小的 h_{z1} 有利于象差校正和减小外形尺寸. 然而当焦距确定后, 如果减小 h_{z1} , φ_1 就要增加, 但 φ_1 的增大必然引起 φ_2 的增大, 造成与孔径有关的象差高次量迅速增加. 从校正孔径像差的观点来看, 前组光焦度的值不宜太大, 但前组光焦度的增加又可使前后组之间的距离 d 减小, 从而使系统的长度减小. 所以, 轴上和轴外像差, 前组直径与系统的长度之间总是相互矛盾和相互制约的, 合理选取前组光焦度值是整个光学结构有优良结果的重要条件之一.

对于前组, 其远离光阑的负透镜会产生较大的正畸变和正慧差, 使系统象差难以校正. 设计时在前组加入一个正透镜, 不仅有利于分散光焦度, 还能减小前组的 S_{II} 、 S_V , 降低高级象差量. 另外, 设计时使前组各透镜弯向光阑, 整个前组结构尽量紧凑, 这样更有利于增大视场角.

对于后组, 由于大视场、大相对孔径及小型化的要求, 设计时加入双凸厚透镜和双凹透镜, 有利于补偿前组的一些剩余象差, 改善大视场化、小型化与象质优良之间的矛盾, 同时还有利于增大后工作距离, 即增大反远比.

另外, 畸变的校正是短焦数字投影镜头设计的难点, 视场越大畸变量越大. 更多镜片的光学结构有利于畸变的校正, 但是这样增加了结构的复杂性, 不利于镜头的小型化和轻量化, 同时使镜头成本大大增加. 在不使用更多镜片来校正畸变的情况下, 在结构中适当的加入非球面可以很好地解决上述难题, 并且可以大大提高成像质量^[9-10].

目前的数字投影机, 无论是传统的 LCD 投影机, 还是新兴的 DLP 和 LCOS 投影机都需要在芯片前加入一定体积的分色棱镜和合色棱镜, 其复杂的棱镜结构势必带来不可忽略的象差. 在镜头设计时必须把投影机内部棱镜系统产生的象差考虑进去, 经过大量的测试及实际工程实验, 可将分色棱镜和合色棱镜转化为等效的具有一定厚度的平行平板. 在用 ZEMAX 光学软件设计时, 把等效平行平板加入镜头结构中共同优化, 使投影机内部棱镜系统产生的象差与镜头产生的象差相互抵消, 相互平衡.

2 设计要求

要求设计的数字短焦投影镜头的相关参数和技术指标如表 1.

表 1 短焦投影镜头的相关参数与设计指标
Table 1 Lens specifications and design objectives

| Parameter | Specifications |
|--------------------|----------------------|
| Chip size | 0.8" diagonal (DMD) |
| L/W | 16:9 |
| E. F. L | 12 mm |
| Projected area | 1 679 mm diagonal |
| Wavelength | 460 nm 546 nm 630 nm |
| Projector distance | 1 000 mm |
| B. F. L | ≥37 mm |
| Prism thickness | 24 mm |
| Prism material | H-K9L |
| F/# | F/2.4 |
| F. A | 40° |
| MTF | >0.3 at 40 lp/mm |
| Lateral color | <0.5 pixel |
| Astigmatism | <0.2 mm |
| Distortion | <2% |

3 设计结果

首先,根据相关参量和技术指标,选定适当的初始结构;然后依据上述设计思想,采用人工和光学软件 ZEMAX 设计相结合的方法^[11],对初始结构进行改造、反复优化,设计出的短焦数字投影镜头如图 2(焦距为 12.1 mm,相对孔径为 1/2.1,全视场角 80°,等效后工作距离为 38.4 mm,长度为 172.6 mm).结构参量如表 2.

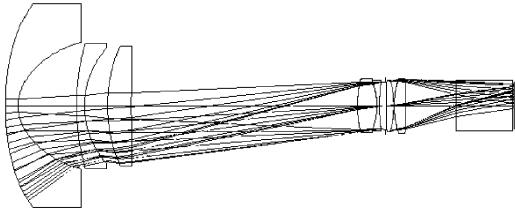


图 2 优化设计得到的镜头
Fig. 2 Lens obtained from final optimization

表 2 镜头的结构参量

Table 2 Lens structure parameters

| i | r_i/mm | d_i/mm | Material |
|-----|-----------------|-----------------|----------|
| 1 | 110.897 | 5.50 | PMMA |
| 2 | 20.312 | 25.00 | |
| 3 | 98.770 | 3.50 | H-ZK10L |
| 4 | 37.063 | 10.00 | |
| 5 | 67.050 | 10.00 | H-ZF6 |
| 6 | 868.374 | 98.00 | |
| 7 | 49.518 | 8.00 | H-K9L |
| 8 | -30.504 | 1.20 | H-ZF7LA |
| 9 | 80 | 2.34 | |
| 10 | Infinity | 0.50 | |
| 11 | 271.697 | 3.29 | H-K9L |
| 12 | -39.586 | 0.17 | |
| 13 | 36.42 | 5.00 | H-ZK10L |
| 14 | -245.063 | 22.00 | |
| 15 | Infinity | 24.00 | H-K9L |
| 16 | Infinity | 1.00 | |
| 17 | Infinity | | |

该结构由 6 组 7 片镜片组成,材料均为常用、价格便宜、易加工的中国牌号光学玻璃.其中第一片为光学塑料透镜,透镜两个面均为偶次非球面.结构中在第一片加入两个偶次非球面,主要是它可以更有效地平衡轴外像差,可以提高光学系统的相对孔径,这样亮度也相应的得到提高,视场也相应增大,同时可以更有效地减少透镜的数量,缩小光学系统总长,减轻重量.表 3 为第一、第二面的各自非球面系数.

图 3 为镜头的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 曲线,横坐标为空间频率,纵坐标为 MTF 值的大小.从图中可知,所有视场的极限分辨率均远大于 37 lp/mm(镜头极限分辨率)^[6].

表 3 非球面系数

Table 3 Aspherical coefficients

| | The first | The second |
|-----|---------------|----------------|
| K | 0 | -0.5 |
| 4th | 4.766575E-007 | 1.526860E-006 |
| 6th | 1.112454E-010 | -8.695333E-010 |

在 40 lp/mm 处镜头的各个视场的 MTF 值均大于 0.3,中心视场的 MTF 值大于 0.7,0.707 视场以内的子午方向和弧矢方向 MTF 值均大于 0.55.很好地满足了设计指标的要求.另外,从 MTF 曲线图中可以大致的判断系统象散的情况,S/T 的曲线分开越大,表明像散越大,对成像清晰度的影响越大,MTF 评价价值越低.从图中看出,视场半角为 37° 时存在最大象散,但是该象散是完全符合设计要求的,从场曲图上可以进一步的知道其数值大小.

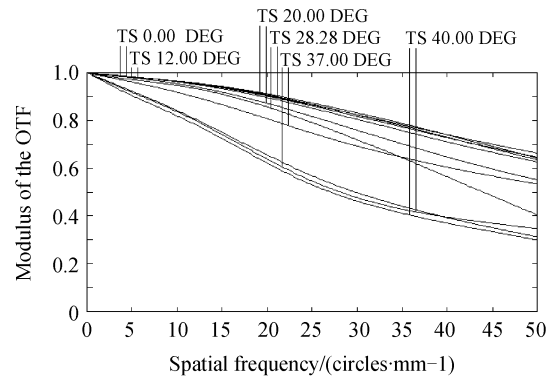


图 3 MTF 曲线图
Fig. 3 MTF

图 4 为镜头的场曲、畸变特性曲线,从场曲曲线可以看出,镜头在整个视场内的场曲范围为 -0.07 mm 到 0.06 mm,象散最大值小于 0.06 mm,色场曲的扩散小于 0.06 mm,完全符合短焦数字投影镜头的设计要求.从畸变曲线中看出,镜头整个视场内的畸变量的绝对值远小于 2%.

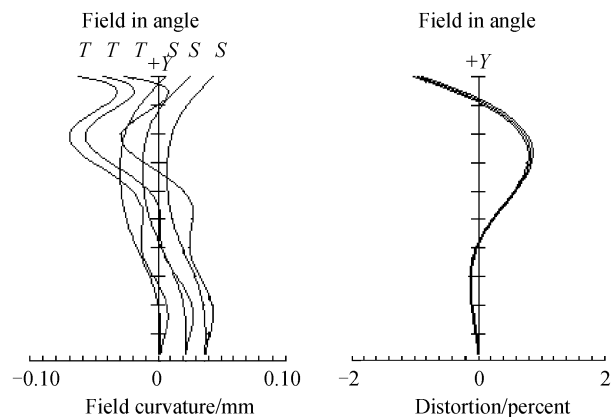


图 4 场曲、畸变曲线图
Fig. 4 Field curvature and distortion

图 5 为镜头的垂轴色差曲线,横坐标表示垂轴色差的范围,纵坐标表示视场大小.从图中看出,垂

轴色差小于 $3.5\mu\text{m}$,符合设计指标要求的小于 0.5 像素尺寸,即 $7\mu\text{m}$.

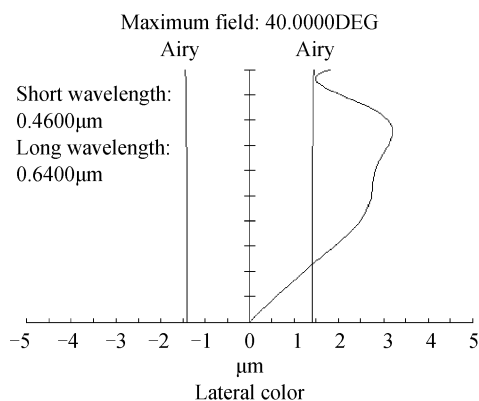


图 5 垂轴色差曲线图

Fig. 5 Lateral color

图 6 为镜头的相对照度曲线,镜头整个视场内的相对照度均大于 90% 。所设计的这款短焦数字投影镜头的结构和象质都达到了或超过了设计指标要求。

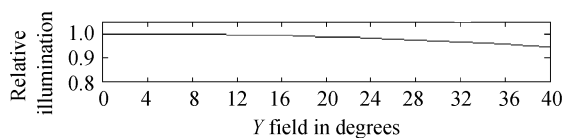


图 6 相对照度曲线图

Fig. 6 Relative illumination

4 结论

在短焦数字投影镜头设计时,采用反远距结构,能够很好地满足镜头的各项技术指标。反远距结构是由负的前组和正的后组组成的结构,是一种严重失对称的光学结构,正确合理地选取前组光焦度值是保证整个光学结构能有优良结果的重要前提条件。在结构设计时,需要考虑数字投影机内分、合色棱镜系统产生的各种像差,在 ZEMAX 光学软件优化设计时把棱镜系统等效成一定厚度的平行平板,与镜头结构系统共同校正、平衡各种像差。本文结合投影市场实际的应用需求,利用 ZEMAX 光学软件开发设计出了一款结构简单、体形小、易加工、成本低的短焦数字投影镜头。为了简化结构、缩小体积、降低成本,设计中加入了两面非球面,材料采用常用的光学塑料 PMMA,适用于压模成型技术,可实现大批量生产。

参考文献

- [1] ZHANG Zeng-bao. 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.
- [2] YANG Feng-he. DLP technology and DLP based Projection display application [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005. 杨凤和. DLP 技术及其投影显示应用研究[D]. 长春:长春光学精密机械与物理研究所, 2005.
- [3] LIU Xiao-chan, CHEN Chen. Design of 3-DLP digital projection lens with short focal length[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, **31**(sup): 38-42. 刘霄婵,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**(sup): 38-42.
- [4] BAI Qing-lan, MIAO Xing-hua. 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.
- [5] LU Guo-hua, SHEN Wei-min. 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.
- [6] SONG Jia-jun, HE Ping-an. 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.
- [7] 刘钧,高明. 光学设计[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2006, 161-173.
- [8] 王之江. 实用光学技术手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2006, 389-415.
- [9] LIU Ya-wei. Design principle and application of aspheric lens [J]. *China Glasses Science-Technology Magazine*, 2006(1): 35-36. 刘亚威. 非球面镜片的设计原理和应用[J]. 中国眼镜科技杂志. 2006(1): 35-36.
- [10] SHEN Wei-min, XUE Ming-qiu. Aberration analysis and optical design of aspheric spectacle lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(6): 746. 沈为民,薛鸣球. 非球面眼镜片的像差分析和设计[J]. 光学学报, 2002, **22**(6): 746.
- [11] 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, 47-53.
- [12] 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.

Optical Design of Short Focal Digital Projection Lens

CHEN Chen, LI Wei-shan, ZHANG Yu, LIU Xiao-chan

(Qinhuangdao Audio-visual Machinery Research Institute, Qinhuangdao, Hebei 066000, China)

Abstract: To meet the requirement of market, a short focal digital projection lens for 0.8 inch digital light processing(DLP) projectors is designed. The total length is 172.6 mm, and the full aperture is 70 mm. The lens uses a retrofocus structure, and it is composed of six glass lenses and one plastic lens (two even aspheric surfaces). Its FOV is 80° , F -number is 2.1, retrofocus proportion is 3.17 : 1, and projection ratio is 0.76 : 1. Its MTF in all field is less than 28° that is higher than 0.6 at the limiting spatial frequency of 37 lp/mm. The lateral color is less than $3.5 \mu\text{m}$. The distortion of the full of view is less than 1.1%. Its image quality is excellent with advantages of simple structure, small size, easy process and low cost.

Key words: Optical design; Short focal; Digital projection lens; Retrofocus structure; Aspheric surface