

文章编号:1002-2082(2007)01-0058-05

LCoS 背投光学引擎中变焦投影物镜设计

宋家军, 何平安

(武汉大学 电子信息学院光电工程系, 武汉 430079)

摘要: 设计出变焦投影物镜,能满足相同光学引擎、相同屏幕位置下不同屏幕尺寸的需要。考虑到所设计的系统为大相对孔径、中等视场和小变焦比,从变焦理论出发,采用正组补偿的机械补偿法,对变倍组进行合理的倍率选段,求出了高斯解;然后分组元选用合理的初始结构,利用 ZEMAX 光学设计软件进行优化设计,解决了变焦系统畸变难以控制的问题,并使用调制传递函数对整个系统进行了综合评价。设计结果表明:该变焦投影物镜系统的光学性能和成像质量均满足设计指标要求,能应用于 101.6~177.8 cm 的大屏幕电视。

关键词: 光学引擎;变焦投影物镜;机械补偿法;调制传递函数

中图分类号:TN27

文献标志码:A

Design of zoom projection lens for the light engine of LCoS rear-projection TV

SONG Jia-jun, HE Ping-an

(Department of Optoelectronic Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: A zoom projection lens is designed to meet the requirements of different sizes of big rear-projection screen with the same light engine and screen location. Since the optical system to be designed should have a big relative aperture, middle field of view and small zoom ratio, the concept of zoom system is selected. The positive mechanical compensation configuration was adopted, the proper magnifications of the zoom configuration were chosen and the Gauss roots were derived. The appropriate primal configurations based on each subassembly are chosen. The optimization design is carried out with ZEMAX optical design software. The distortion of the zoom system is improved, and the modulation transfer function (MTF) is used to evaluate the system. The design and assessment results indicate that the optical performance and image quality of the zoom projection lens system meet the design specification, and can be used in big screen TV, ranging from 101.6 cm to 177.8 cm.

Key words: light engine; zoom projection lens; mechanical compensation method; modulation transfer function

引言

LCoS 技术是一种新兴的微显示技术,利用该技术制造的 LCoS 背投电视具有高分辨率、高开口率和低成本的显著优势。LCoS 光学引擎是 LCoS 背

投的核心部分,它直接决定了 LCoS 背投的性能。

LCoS 光学引擎由照明系统、分合光系统、投影物镜系统、液晶面板驱动、UHP 灯电源电路板、散热系统和结构件所组成。其中,投影物镜设计起

收稿日期:2006-05-29; 修回日期:2006-11-12

作者简介:宋家军(1982—),男,湖北云梦人,武汉大学工学硕士,主要从事光学工程设计研究。E-mail: jiajun.song@accelink.com; 何平安(1962—),男,湖北潜江人,教授,主要从事光学测试技术与图像测量的研究。

着举足轻重的作用,因为它不仅要与光学引擎中的照明系统设计紧密配合,还极大地影响着整个光学系统的成像质量。

背投电视为大屏幕电视,屏幕尺寸至少为 96.5 cm,目前市场上最大屏幕做到了 208.3 cm,屏幕尺寸的规格也多达几十种。基于此,采用变焦方法设计投影物镜,使光学引擎能满足相同屏幕位置不同屏幕尺寸下的像面稳定,在满足像质的条件下做到换屏幕而不用重新设计物镜,只需要简单地旋转一下凸轮机械装置。

1 变焦投影物镜设计

1.1 设计参数

设计参数如表 1 所示。

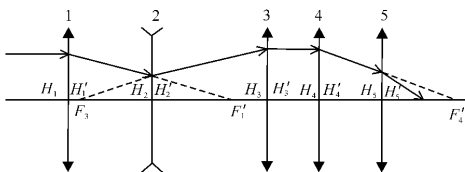
表 1 设计参数

Table 1 Parameters of design

Chip size	Pixel array	Screen range	Zoom ratio	Conjugative distance
15.01 mm × 8.44 mm	1 920 × 1 080	40" ~ 70"	1.75	2 000 mm
Magnification range	Range of focal length	Field of view	Paraxial working F/#	Back focal length
57 ~ 100	20 mm ~ 35 mm	28.8° ~ 48.4°	2	> 20 mm

1.2 设计理论

由表 1 可知,所设计的系统相对孔径较大,中等视场,变焦比很小。为了满足只需更改屏幕尺寸而无需更改屏幕位置,且减小系统长焦时的二级光谱,故采用正组补偿的机械补偿法设计光路。



1. Anterior fixed configuration; 2. Zoom configuration;
3. Compensative configuration; 4. First rear fixed configuration; 5. Second rear fixed configuration

图 1 理想透镜系统光路图

Fig. 1 Beam path diagram of perfect lens system

如图 1 所示,考虑到设计要求的变焦比很小,于是采用移动组元 2 单独实现变倍,组元 3 仅仅补偿像面的位移,从 3 出射的光在焦距改变过程中总为平行光而不影响变倍。前固定组 1、后固定组 4 和

5 也不影响变倍比,只是起到平衡像差及提高系统性能的作用。

由于系统的变倍比 Γ 只与变倍组的垂轴放大倍率 m_2 有关,为长焦时的垂轴放大倍率 m_{2l} 与短焦时的垂轴放大倍率 m_{2s} 之比(下标中的数字表示组元编号, l 表示长焦位置, s 表示短焦位置,下同)。采用非换根的正组补偿,为了尽可能地压缩光束落在补偿组元上的高度,所以倍率选段为 $-1 < m_{2l} < 0$, $m_{2s} = m_{2l}/\Gamma$ 。

选取 $f_2' = -1$, $m_{2l} = -0.63$, $m_{2s} = m_{2l}/\Gamma = -0.36$ 。经分析可知:长焦距时,变倍与补偿组之间相隔最近,补偿与后固定组之间也相隔最近;短焦距时,前固定组与变倍组相隔最近。为了避免在移动过程中组元相撞,故控制: $d_{23l} = 2.8$, $d_{12s} = 1.2$, $d_{3,45l} > 0$ 。通过示意图 1,并利用几何光学公式 $l = f'(1/m - 1)$ 和 $l' = f'(1 - m)$ 可以求出: $f_1' = d_{12s} + l_{2s} = 5$, $f_3' = d_{23l} - l_{2l}' = 4.4$,取 $d_{3,45s} = 2$,用 ZEMAX 软件可得出 f' 后固定组 = 2.2。为更好地消除系统像差,将后固定组分成 2 个组元 4 和 5,按 0.55 : 0.45 分配光焦度,且保持 $d_{45} = 1$,可得: $f_4' = 3.4$, $f_5' = 3$ 。

此时,理想系统在短焦处的焦距为 0.9 mm,而实际需要控制短焦处的焦距为 20 mm,于是将所有的 d 和 f' 都放大 22 倍,并均以 mm 为单位,便得到实际的光学系统外部参数值。系统的所有高斯解确定后,就可以分组元采用已有的初始结构进行消像差优化设计。

1.3 设计结果

通过对主要的参数指标进行分析计算,然后从镜头专利库 ZEBASE 中选取合理的初始结构,再进行光谱选择。由于设计的是投影系统,故选取 RGB 光进行考虑,并根据配光比的不同,赋予不同的权重值,如表 2 所示。

表 2 设计所用波长及权重

Table 2 Wavelength and weight used in design

	Red ray	Green ray	Blue ray
Central wavelength	643.8 nm	546.1 nm	479.9 nm
Weight	0.3	1	0.3

整个光学系统的中心波长选取权重最大的 546.1 nm 波长的绿光,所有利用高斯光学原理求得的结果均是用该波长的光计算而得,如焦距等。

利用 ZEMAX 软件对初始结构反复地进行优化后,得到该系统的基本结构参数如表 3 所示。表中 Stop 表示孔径光阑, & 符号前后的值分别为系统处于短焦和长焦时的对应量。

表 3 优化后的设计结果

Table 3 Optimized result by ZEMAX

Surface	Radius/mm	Thickness/mm	Glass	Semi-diameter/mm
Object	∞	∞		∞
1	206.96	1.1	SF6	50
2	84.11	18.5	LAK9	48
3	-596.83	0.6		48
4	63.88	9.2	LAK9	40
5	121.58	7.3&33.5		40
6	166.79	8.9	LAFN28	20
7	20.32	9.9		14
8	-69.87	1.9	LAK9	14
9	24.12	6.19	SF57	15
10	139.19	48.3&21.4		15
Stop	∞	1.9&23		11.13&8.46
12	139.33	15.2	BK7	24
13	-33.62	1	SF8	24
14	-57.2	20.9&0.5		24
15	4253.14	5.8	LAF2	24
16	-70.6	2.7		24
17	-52.32	1.3	SF57	24
18	-126.55	0.5		24
19	48.68	8.5	LAK9	26.5
20	288.88	22.2		26.5
21	80.44	1.3	SF6	19
22	29.32	3.3		17
23	59.01	5.8	BK7	18.5
24	-137.1	0.5		18.5
25	29.97	9.5	LAK10	20
26	103.42	20		20
Image	∞			9.02&9.01

相应的实际系统结构图如图 2 所示。

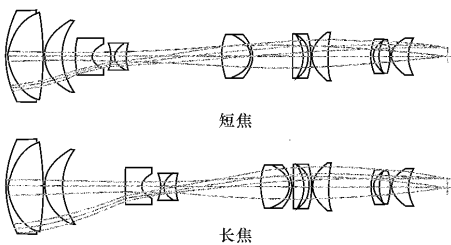


图 2 长短焦时系统光路图

Fig. 2 Beam path diagram of system at the shortest or longest focus

1.4 系统像差图及 MTF 图

通过图 3~图 5 可以发现,所设计系统的像差,如球差、场曲、畸变等,都控制在较小的范围内,它们均满足变焦投影物镜要求的像差容限。在畸变图 4 中,显示了 3 种不同波长的光随视场变化的畸变大小,出现正负畸变交替的较理想曲线,保证了畸变大小总小于 1%。

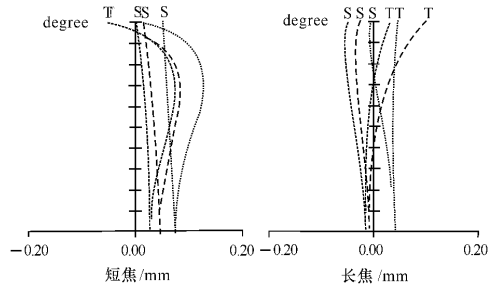


图 3 长、短焦时系统场曲图

Fig. 3 Field curvature diagram of system at the longest and shortest focus

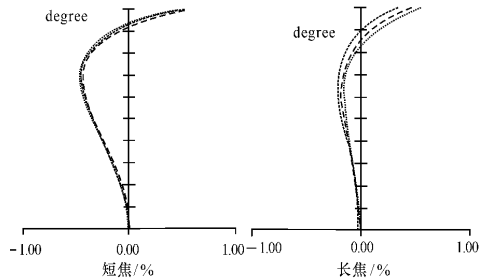


图 4 长、短焦时系统畸变图

Fig. 4 Distortion diagram of system at the longest and shortest focus

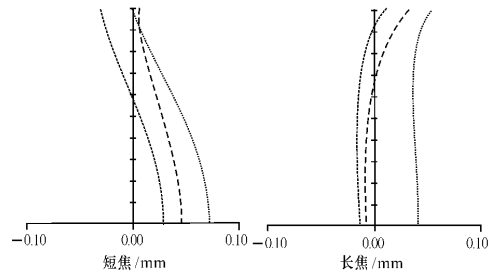


图 5 长、短焦时系统横向像差图

Fig. 5 Transverse aberration diagram of system at the longest and shortest focus

总之,系统的相对孔径基本保持在 1/2 左右,

长焦时为 0.497,短焦时为 0.495,属于比较大的一个值,这样可以使得最后投影到屏幕上的光照度足够大,以弥补系统镜片组偏多造成的能量利用率下降。由图6可以看出,像面上能量分布足够大;系统的视场角也不小,属于中等偏上的视场范围;系统的总长度始终为 232 mm;艾里斑尺寸约为 $2.7 \mu\text{m}$,比较小;芯片的最小像素元的尺寸为 $7.8 \mu\text{m}$, Airy Disk 总能落在单个像素里,使得能量能被充分利用,很好地满足成像要求;像面大小恒定在 9 mm 左右,与芯片半尺寸相当,满足了设计要求。

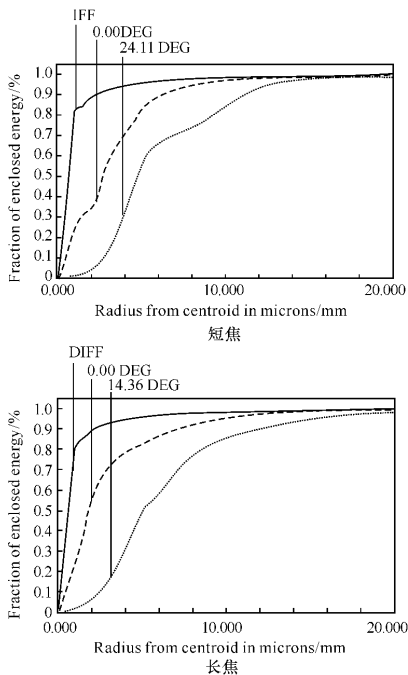


图6 长、短焦时像面能量分布图

Fig. 6 Encircled energy diagram of image at the longest and shortest focus

为了将投影镜头的分辨率与芯片的分辨率更好地匹配,必须满足:

$$\frac{1}{2 \times \text{镜头的分辨率}} = \text{芯片单像素尺寸}$$

由于芯片单像素尺寸为 $7.8 \mu\text{m}$,所以镜头的分辨率约为 64 lp/mm。

调制传递函数(MTF)是综合像质评价的指标。如图7所示,取频率为 64 lp/mm,对视场设置一些渐晕(X 向离心 $DX = 0$, Y 向离心 $DY =$

0.35535 ; X 向渐晕因数 $CX = 0.04998$, Y 向渐晕因数 $CY = 0.45772$),可见:短焦距处,中心视场的 $\text{MTF} = 0.6$,全视场子午方向上的 $\text{MTF} = 0.5$,全视场弧矢方向上的 $\text{MTF} = 0.62$;长焦距处,中心视场 $\text{MTF} = 0.68$,全视场子午方向上的 $\text{MTF} = 0.32$,全视场弧矢方向上的 $\text{MTF} = 0.46$ 。显然,此时的MTF指标已经完全达到了预期的要求值。

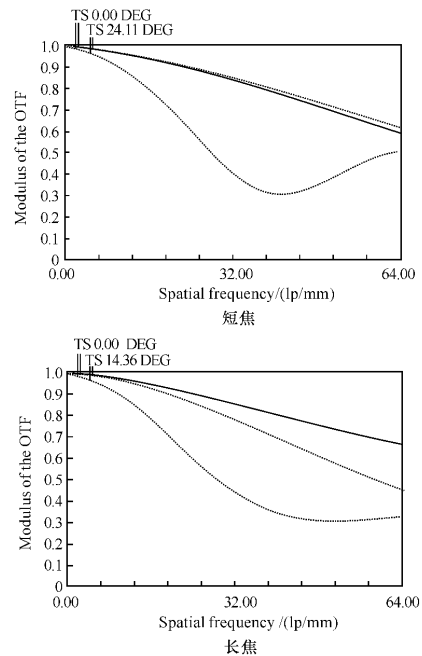


图7 长、短焦时调制传递函数曲线图

Fig. 7 MTF curves at the shortest and longest focus

2 凸轮曲线计算

本变焦投影物镜设计过程中,只有变倍组(第二组元)和补偿组(第三组元)在移动,考虑到光阑,一共有 4 个相对位置间隔在变化,分别是前固定组到变倍组的距离 d_5 ,变倍组到孔径光阑的距离 d_{10} ,孔径光阑到补偿组的距离 d_{11} ,以及补偿组到后固组的距离 d_{14} 。设置优化的目标值时,从短焦距到长焦距将焦距等距划分为 16 段,以像面为基准面,分别计算出变倍组和补偿组的最后一面的顶点到基准面的距离 t_2 和 t_3 ,如表 4 所示。

根据表 4 可以求出变倍组、补偿组的移动距离与焦距的关系,并绘制出变倍组线性移动时其相应的补偿曲线图,如图 8 所示。

表4 各个元件外部参数表

Table 4 External parameters of every component

	d_5/mm	d_{10}/mm	d_{11}/mm	d_{14}/mm	t_2/mm	t_3/mm	f'/mm
1	7.270842	49.716006	0.5	20.921052	168.673137	102.275873	20
2	10.185163	49.310791	0.500019	18.412117	165.759006	99.766938	21
3	12.835227	47.382154	2.027412	16.163440	163.109084	97.518260	22
4	15.255297	44.917175	4.094579	14.141282	160.689114	95.496103	23
5	17.473833	42.991211	5.625489	12.317872	158.470651	93.672693	24
6	19.515135	41.392637	6.831657	10.669024	156.429396	92.023844	25
7	21.399618	39.970957	7.863209	9.174691	154.544935	90.529512	26
8	23.144689	38.671753	8.774278	7.817757	152.799866	89.172577	27
9	24.765272	37.510664	9.548967	6.583555	151.179265	87.938376	28
10	26.274244	36.413236	10.261496	5.459449	149.670260	86.814269	29
11	27.682744	35.373978	10.917153	4.434502	148.261712	85.789323	30
12	29.000490	34.378419	11.530229	3.499179	146.943905	84.853999	31
13	30.235972	33.516159	12.010954	2.645161	145.708353	83.999982	32
14	31.396652	32.724381	12.421996	1.865137	144.547593	83.219958	33
15	32.489089	32.211463	12.554762	1.152769	143.455071	82.507589	34
16	33.518918	32.514772	11.871394	0.502912	142.425156	81.857733	35

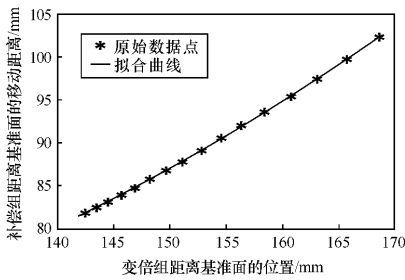


图8 变倍、补偿曲线图

Fig. 8 Graph of magnification and compensation groups

由图8可知,变倍组线性移动时,补偿组也近似作线性移动,此时的凸轮压力角非常小,便于设计。

3 小结与讨论

结合具体课题要求,采用正组机械补偿法设计变焦系统,对变倍组倍率进行合理选段,求出了高斯解;分组元选取恰当的初始结构,运用光学设计软件进行像差自动优化,设计出了一个反远距型的变焦投影物镜,并给出最终优化结构的结构参数和系列成像质量图表;运用多次拟合插值的方法,计算出了所设计的变焦投影系统的凸轮曲线。

本文所设计的变焦距物镜系统符合参数指标并满足像质的要求,但还存在一定的共轭距和总长度,这是有待进一步解决的首要问题,可考虑使用非球面或者其他特殊材料的玻璃组合使结构更加紧凑。

参考文献:

- [1] 宋家军,何平安. LCoS 光学引擎照明系统设计[J]. 光电工程,2005,32(2):37-39.
SONG Jia-jun, HE Ping-an. Illumination system design of LCoS light engine [J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(2): 37-39. (in Chinese)
- [2] 宋家军,何平安. 单片 LCoS 光学引擎中 LED 照明系统设计[J]. 光电子技术,2006,26(2):118-122.
SONG Jia-jun, HE Ping-an. The color LED illumination system design of LCoS light engine of only one chip [J]. Opto-Electronic Technology, 2006, 26(2): 118-122. (in Chinese)
- [3] 张良. 中波红外变焦距系统的光学设计[J]. 应用光学,2006,27(1):32-34.
ZHANG Liang. Optical design for middle infrared zoom system [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(1): 32-34. (in Chinese)
- [4] 王学新,杨照金. 用 2 种光学设计软件对像差特性进行的研究[J]. 应用光学,2006,27(2):124-128.
WANG Xue-xin, YANG Zhao-jin. Research of aberration characterization using two different optical design softwares [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(2): 124-128. (in Chinese)
- [5] 张以谟. 应用光学[M]. 北京:机械工业出版社,1987.
ZHANG Yi-mo. Applied optics [M]. Beijing: China Machine Press, 1987. (in Chinese)
- [6] 陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京:国防工业出版社,1988.
TAO Chun-kan. Optical design of zoom lens system [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1988. (in Chinese)