

文章编号:1004-4213(2011)08-1266-4

轻小型广角投影物镜的设计

陈琛, 刘宵婵, 李维善, 张禹, 刘红军

(秦皇岛视听机械研究所, 河北 秦皇岛 066000)

摘 要:为实现数字投影机的小型化和轻量化,设计了一款适用于 0.55 inch 数字微反射镜芯片的小型广角投影物镜. 该投影物镜总长 69 mm,全口径 25 mm,由 5 片玻璃透镜,2 片塑料透镜(4 个非球面)组成. 系统采用像方远心的反远距结构形式,用 Zemax 软件实现优化设计. F 数为 $F/2.4$,投射比为 0.73 : 1,即 60 cm 处可投射出 40 inch 的画面,全视场畸变低于 1%,在极限空间频率 66 lp/mm 处,中心视场光学传函达到 0.75,边缘视场光学传函达到 0.42. 该镜头具有小口径、大视场、低成本、结构简单和易加工等优点.

关键词:光学设计;广角投影镜头;数字微反射芯片

中图分类号:O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114008.1266

0 引言

轻薄便利已经成为数字投影系统的一个重要发展趋势. 广角迷你投影机,由于携带方便,同时可在较短的距离投射出较大的画面,广泛应用于中小型会议及家庭影院.

近年来,由美国德州仪器公司开发的单芯片数字光处理(Digital Light Processing, DLP)投影技术以其轻小型的优势,对微型投影机的发展起到了重要的推动作用. 然而,数字广角投影镜头大视场角以及较长后工作距的特点,却成为了实现小型化的关键制约因素. 目前国内外市场同类技术规格的广角镜头大多口径在 70 mm 左右,距离小型化、轻量化的要求甚远,为解决这一问题,本文基于对 DLP 投影技术^[1-2]以及现有广角投影镜头结构^[3-9]的深入研究,设计了适用于 0.55 inch 数字微反射(Digital Micromirror Device, DMD)芯片的广角投影物镜,可在 60cm 处投射出 40 inch 的大画面,投射比达到 0.73 : 1. 仅用 7 片透镜,其中 5 片为球面玻璃透镜,采用国内常用玻璃材料,另外 2 片为塑料非球面透镜.

1 设计指标

由投射比 = 投射距离/画幅宽度, $h' = f' \times \tan \omega'$,可推算出全视场角为 81.2°左右. 芯片单元尺寸为 7.637 μm ,相当于 65 lp/mm 的尼奎斯特频

率. 本文设计的镜头相关参量见表 1.

表 1 镜头参量

Table 1 Lens specifications

Parameter	Specification
Chip size	0.55" diagonal(DMD)
Throw ratio	0.73 : 1
$F/\#$	$F/2.4$
Pixel size	7.637 μm
Distortion	<1%
Lateral color	<5 μm
Diameter	<29 mm
Total length	<70 mm

2 设计思想

由于在镜头和 DMD 之间存在一个约 20 mm 厚的合色棱镜,这样就需要有一个较长的后工作距. 经计算反远比应大于 2.7,对于后工作距较大的广角镜头,采用像方远心的反远距型结构^[4,10]是比较合适的. 对于反远距结构形式^[11],如图 1,将整个系

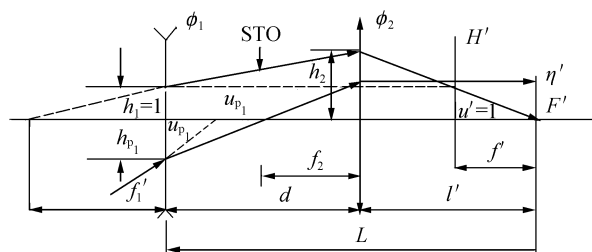


图 1 反远距结构

Fig. 1 Structure of the inverted telephoto

基金项目: 国家科技部(No. 2010EG119161)和科技部中小企业创新基金(No. 10C26211303678)资助

第一作者: 陈琛(1968-),男,高级工程师,硕士,主要研究方向为光学设计. Email: chenchen_5168@sina.com

收稿日期: 2010-01-01; 修回日期: 2010-05-09

统归一化,即令 $f=1$ 平行光以 $h_1=1$ 的高度入射,以 $u'=1$ 的角度出射. ϕ_1 为前组光焦度, ϕ_2 为后组光焦度,由远心条件下孔径光阑与后组之间的距离应等于后组焦距,以及高斯光学理论可得到^[12]

$$\begin{aligned} & \text{前组角放大率} \\ & A = u_{p_1}' / u_{p_1} = 1 - d\phi_1 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \text{后工作距离} \\ & l' = h_2 = A \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \text{光学系统总长} \\ & L = (1-A)\phi_1 + A \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \text{后组光焦度} \\ & \phi_2 = 1/f_2 = (1-\phi_1)/A \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \text{前组负担的孔径角} \\ & u_1' = h_1\phi_1 = \phi_1 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \text{后组负担的孔径角} \\ & u' - u_1' = 1 - \phi_1 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \text{前组负担主光线的相对孔径} \\ & 2h_{p_1}/f_1' = 2(A-1)/A \end{aligned} \quad (7)$$

从上述关系中可以看出:两镜头组的间隔越大,后工作距越大;而另一方面,为了减小光学系统总长,必然要缩短两组间隔 d ,因此 d 的取值比较关键.要在满足后工作距的同时尽量取小,从而使结构更加紧凑.

为实现轻量化和小型化,就必须尽可能减少镜片的数量,而在结构上要做到紧凑,尽量压缩光束的径向尺寸.另外,镜头的视场角超过 80° ,通常情况下会产生较大的畸变.在不能使用更多镜片来校正畸变的情况下,需要引入非球面技术.适当使用非球面技术可以很好的解决上述难点,并且大大提高成像质量.设计采用偶次非球面,方程可以表示为

$$\begin{aligned} z = & \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_4 r^4 + \alpha_6 r^6 + \\ & \alpha_8 r^8 + \dots \end{aligned} \quad (8)$$

坐标原点为曲面顶点, r 为光线与曲面交点的高度; c 为顶点曲率; k 与二次曲面的离心率有关(对于球面 $k=0$). α_4 、 α_6 、 α_8 为偶次非球面系数.应根据引入非球面所要校正的像差种类来确定非球面位置,再根据像差残余量给定初始值.

3 设计

3.1 初始结构的建立

本文选择的初始结构如图 2. 根据光路可逆原理采用倒置的方法设计,该系统采用了反远距形式,总长 130 mm,焦距为 8.8 mm,由 11 片玻璃透镜组成,其中第四个面为非球面,渐晕现象严重,使用玻璃均为进口玻璃,孔径为 $F/2.96$,视场角已经超过

80° ,接近设计指标.本文的主要工作就是减少镜片数量,减小镜头体积,最大限度的压缩成本,同时又要保证良好的像质.

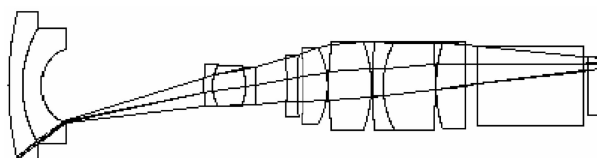


图 2 初始结构图
Fig. 2 Original structure

根据已知参量,得到有效焦距应为 6.4 mm,依此对原始结构进行缩放,将物方半视场角设为 40.6° .按照适用机型的实际情况设定后面棱镜和保护玻璃的尺寸参量,将最前面的胶合件拆开,这样又多了两个曲率半径和间隔作为变量,在 Zemax 软件中将边界条件,基本像差要求设定好后,进行初始优化.

优化后的结果如图 3~6.从像质来看,基本达到了要求,畸变还需要减小到 1%,MTF 甚至已经高于了设计指标,外形尺寸方面,虽然总长减小至 109 mm,变得比较紧凑,但是和设计指标相比还需要再减少 40 mm,减少透镜片数成为主要任务.

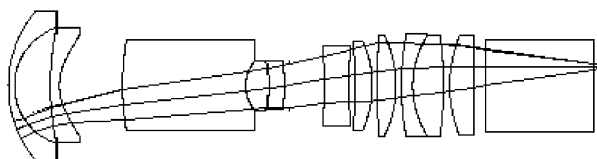


图 3 初步优化后的结构图
Fig. 3 Structure of the initial optimization

Field angle	RMS radius/ μm	Geo radius/ μm	Spot diagram
0°	2.663	9.172	●
12.20°	2.606	9.137	●
20.30°	2.452	7.920	●
28.40°	2.862	7.261	●
34.51°	3.241	8.816	●
40.50°	6.012	33.665	●

图 4 初步优化后的点列图
Fig. 4 SPOT of the initial optimization

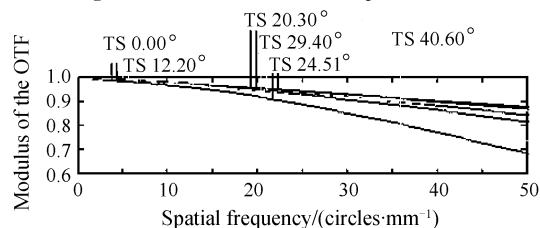


图 5 初步优化后的 MTF
Fig. 5 MTF of the initial optimization

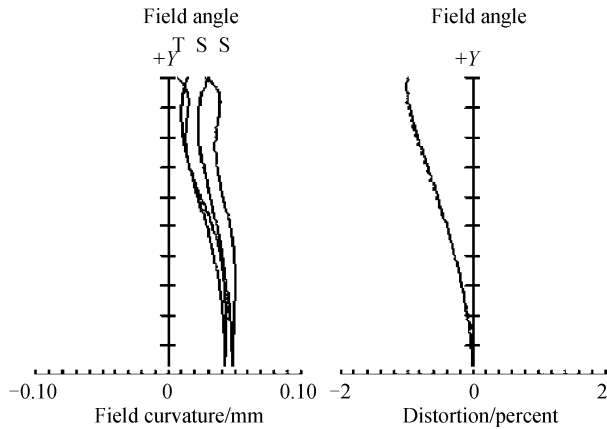


图 6 初步优化后的畸变与场曲
Fig. 6 Field curvature and distortion of the initial optimization

3.2 结构的改进

对现有结构进行改进,采用国内常用玻璃,把使用非球面的玻璃换为折射率相近的 PMMA 材料.它具有透过率高、耐高温、流动性好以及易加工等优点,可应用于投影系统.将中间的三胶合件中的最后一块去掉,在优化函数中加入控制径向尺寸和轴向尺寸的操作数,再做优化.如图 3,中间的玻璃透镜过厚,将之拆分为等效空气层厚度和一个薄的凹透镜,畸变也要严格控制在 1% 以内.经过优化后,口径已控制在要求范围以内,系统总长度达到 87 mm,已经接近要求,片数减为 10 片.负正组合的反远距结构中,前组的复杂程度由视场角的大小决定,后组的复杂程度与相对孔径和后工作距有着紧密的联系.此时的镜头前组由两个凹透镜和一组双胶合透镜组成,对于 80° 的视场角来说已经比较简单,只能考虑简化后组结构.由于后组光焦度为正,以补偿前组的负光焦度,可以试图将后组中最靠前的光焦度比较小的负透镜去掉,重新分配光焦度,优化后,像差变化不是很大,畸变仍然可控制在 1% 以内,但是边缘视场 MTF 值有所下降,系统总长也还是 87 mm.

系统的优化进入了一个瓶颈,一方面要减少镜片数量,减少长度,另一方面又要提升像质,而仅仅优化现有的变量已经无法达到设计指标.可以考虑再引入几个非球面来解决上述问题.在第二片透镜上的非球面已经很好的完成了校正畸变的任务,而在光阑附近采用非球面可以校正由镜片数量减少所引起的高级球差^[4],经过分析与尝试,选择将光阑前的透镜表面类型设置为非球面,合理控制非球面系数的取值,使曲面平缓,降低加工难度,从而保证面型准确度.将前组的双胶合透镜改为单透镜,再去掉后组的一个凸透镜,整个系统只剩下七片透镜.对于非球面注塑成型,只有一面是非球面和两面都是非球面的情况,均使用一个磨具,造价相差不多,所以

可以将这两个透镜的双面都做成非球面.

3.3 设计结果

经过整体优化,最终得到了一个由 5 片玻璃透镜,2 片塑料透镜(四个非球面)组成的小型投影物镜,透镜材料均为国产廉价光学玻璃和塑料,其结构和各种像差如图 7~11.光学系统总长 69 mm,最大

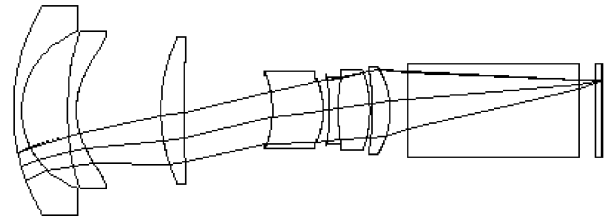


图 7 最终结构图
Fig. 7 Final structure

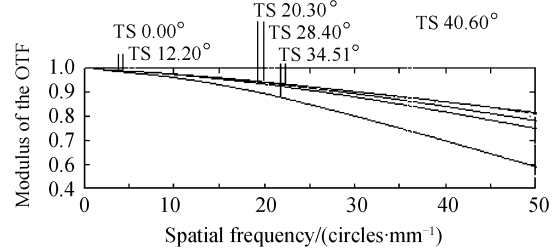


图 8 最终 MTF 曲线
Fig. 8 Final MTF

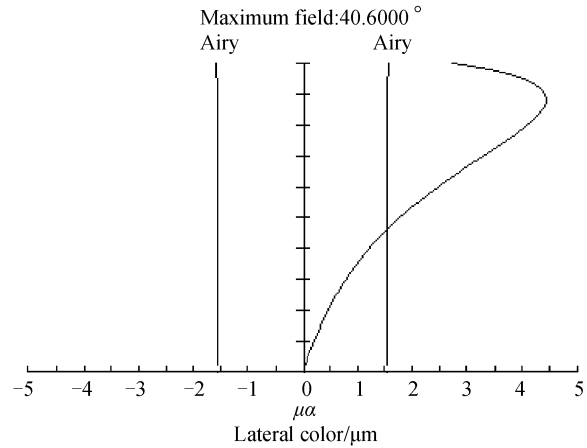


图 9 最终横向色差
Fig. 9 Final lateral color

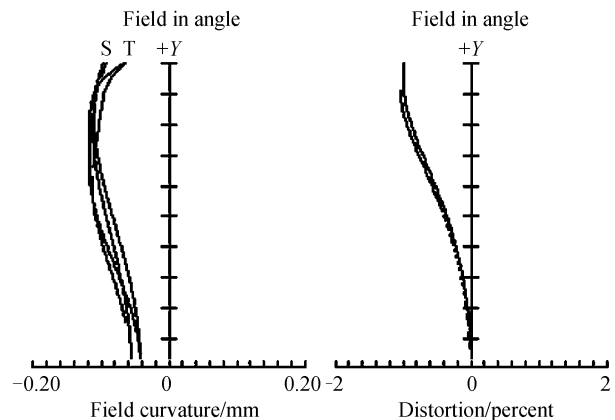


图 10 最终的场区与畸变
Fig. 10 Final field curvature and distortion

Field angle	Rms radius/ μm	Geo radius/ μm	Spot diagram
0°	2.671	4.838	●
12.20°	3.551	7.085	■
20.30°	3.150	5.663	■
28.40°	2.949	7.351	■
34.51°	5.508	22.807	▲
40.50°	9.065	23.540	▲

图 11 最终的点列图
Fig. 11 Final spot diagram

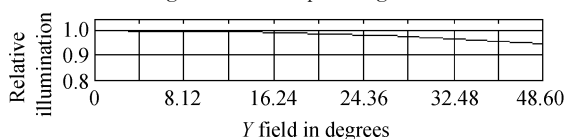


图 12 相对照度
Fig. 12 Relative illumination

口径处直径为 25 mm,畸变 1%,横向色差 4.46 μm ,像面分布的相对照度高于 95%,边缘视场在 66 lp/mm 处的 MTF 值为 0.42,中心视场在 66 lp/mm 处的 MTF 值为 0.75,均达到了设计要求。

4 结论

本文所设计的系统仅由七片透镜组成,投射比达到 0.73 : 1。由于使用了非球面技术,使各类像差得到了很好校正,且结构简单紧凑、体积小巧轻便,非球面形状也比较平滑,非常适合批量加工,在成本及外形尺寸方面均占有很大的优势。

参考文献

[1] 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.

杨风和. DLP 技术及其投影显示应用研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005.

- [2] 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.
- [3] 王之江. 实用光学技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [4] 张以漠. 应用光学[M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2008: 470.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] LU K C, RODRIGUEZ E M. Projection lens and display device:US, 7123426 B2[P]. 2006-10-17.
- [8] WINSTON R. Dielectric compound parabolic concentrators [J]. *Applied Optics*, 1976, **15**(2): 291-292.
- [9] ROGALA E E W. Wide field of view infrared imaging system design[C]. *SPIE*, 2004, **5406**: 81-91.
- [10] 萧泽新. 工程光学设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 98.
- [11] SHEN Wei-min, XUE Ming-qiu, YU Jian-jun. Long wave infrared fast objective with wide field of view[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 460-463. 沈为民, 薛鸣球, 余建军. 大视场大相对孔径长波红外物镜 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(4): 460-463.
- [12] 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.

Design of Light Weight Small Wide-angle Projection Lens

CHEN Chen, LIU Xiao-chan, LI Wei-shan, ZHANG Yu, LIU Hong-jun
(Qinhuangdao Audio-visual Machinery Research Institute, Qinhuangdao, Hebei 066000, China)

Abstract: To realize the miniaturization and light weight of the digital projector, a wide-field angle mini lens for 0.55 inch DLP was designed. The total length is 69 mm, the full aperture is 25 mm, and it is composed of five glass lenses and two plastic lenses (4 aspheric surfaces). The lens used an inverted telephoto structure, with ZEMAX software as the optimize tool. Its F -number is $F/2.4$, the projection ratio is 0.73 : 1, and it can project a 40 inch picture from 60 cm away. The distortion of the full field is less than 1%. Its image quality is excellent that the MTF of center field is 0.75, and the MTF of 1.0 field is 0.42, with advantages of small size, light weight, low cost, simple structure and easy process.

Key words: Optical design; Wide-angle projection lens; DMD chip