

# 超短投影距的投影物镜设计

卞殷旭 王 恒 郭添翼 李海峰 刘 旭

浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

**摘要** 为了实现微型数字光处理(DLP)投影仪的超短投影距离的目的,先根据成像关系计算构建了非球面光学曲面的面型,再对投影镜头整体优化,设计了一个含有两片奇次多项式非球面的广角投影物镜。镜头的物方 $F=2$ ,焦距4 mm,像方视场角 $128^\circ$ ,像方0.4 lp/mm(截止频率)处调制传递函数(MTF)大于0.6,最大畸变的绝对值0.9%,镜头总长100 mm,最大口径 $\Phi=80$  mm。设计结果表明,该设计方法可以使大角度、超短投影距离的投影镜头摆脱常用折反射式结构,全透射式的光学结构可以真正实现发光二极管光源照明DLP投影仪的微型化、投影距离超短化。

**关键词** 光学设计; 投影显示; 超短投射比; 非球面

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1222002

## Design of Ultra-Short Throw Ratio Projection Lens

Bian Yinxu Wang Heng Guo Tianyi Li Haifeng Liu Xu

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

**Abstract** A wide field of view(FOV) lens, containing two odd polynomial aspheres, is designed to get a digital light procession(DLP) projector with a ultra-short throw ratio. The aspheres are calculated and fitted, then the lens is optimized totally. The lens has a  $F$ -number of 2, a focal length of 4 mm, a FOV of  $128^\circ$ , a maximum distortion of 0.9%, a total length of 100mm, and a maximum cross-section diameter of  $\Phi=80$  mm. And the modulation transfer function (MTF) is above 0.6 at 0.4 lp/mm (cutoff frequency) of all fields. The designing results indicate that the method can be applied to design a wide FOV and ultra-short totally refractive (TR) projection lens, which can substitute for the commonly used hybrid refractive-reflective (HRX) structure. This kind of TR lens can also be applied to mini light emitting diode DLP projectors with an ultra-short TR.

**Key word** optic design; projection display; ultra-short throw ratio; aspheres

**OCIS Codes** 120.4570; 080.1010; 080.4225

## 1 引 言

对于大视场大孔径的光学系统,要同时实现成像清晰和畸变较小,需采用很复杂的光学系统结构。为了考虑成像系统的多个视场,并且每个视场能计算多条光线,Juan C Minano等<sup>[1]</sup>利用等光程原理和人为设定的物像关系提出了同时设计多个自由曲面的方法(SMS)。偏微分方程法(PDE)也被广泛用于获取非球面的初始结构。但是SMS和PDE方法在构建非曲面初始结构时,都受限于视场点的个数或者通过孔径,都具有一定限制<sup>[2-4]</sup>。Tong Yang等<sup>[5]</sup>提出基于点对点的非曲面三维面型的构建和迭代的方法,成功设计了反射式大孔径大视场光学系统。由于近年来刚被提出,更多成熟的设计案例尚未报道。

目前,大视场大孔径光学系统得到普遍应用<sup>[6-8]</sup>,在光学系统中引入非曲面作为其中一种解决问题的办法,已广泛应用于大视场大孔径的光学系统。Zhenrong Zheng等<sup>[2]</sup>利用3片反射型高次非球面和1个反射型自由曲面实现了大视场成像,但其全反射式光机结构体积巨大。Zhenfeng Zhuang等<sup>[3]</sup>使用单个高次非球面

收稿日期: 2015-07-01; 收到修改稿日期: 2015-07-15

基金项目: 国家863计划(2012AA10A503)

作者简介: 卞殷旭(1992—),男,硕士研究生,主要从事光学设计和投影显示方面的研究。E-mail: byx@zju.edu.cn

导师简介: 李海峰(1965—),男,博士,教授,主要从事三维显示和光学成像等方面的研究。

E-mail: lihaifeng@zju.edu.cn(通信联系人)

反射镜的折反射光学系统,较好的实现了广角大视场光学系统的成像,但与全透射光学系统相比,含有反射镜的光学系统体积较大,且只能半视场成像。在全透射式大视场成像中,侯佳在远离光阑的第一个镜片设计两个非球面实现畸变校正<sup>[4]</sup>,但整体光学系统体积依旧很大。

综合考虑光学系统的成像效果、体积大小、加工和装调公差精度要求,本文针对大视场共轴光学系统,提出了一种在普通球面系统中插入两片非球面的光学系统设计方法。根据大视场光学系统的成像特性,选定特征光线,利用折射定律和等光程原理<sup>[9]</sup>构建非球面的初始结构;利用高自由度、低幂级次的多项式拟合非球面<sup>[10-12]</sup>;选取其他视场的物点光线,建立像差方程组,利用非球面参数化方法、最优化算法平衡较多特征视场的像差<sup>[13]</sup>。利用该方法,实现了一个视场角(FOV)为 $128^\circ$ , $F$ 数为2,投射比为0.43的投影物镜,该投影物镜系统中包含两个非球面。

## 2 光学系统设计与分析

### 2.1 设计要求

设计了一个投射比较小的全透射式投影镜头如图1所示,实际投影画幅为光轴上半部分,设计指标如下:视场角 $w = 128^\circ$ , $F$ 数为2,焦距 $f = 4\text{ mm}$ ,投射比0.43,光学系统总长为 $100\text{ mm}$ ,最大横截面口径 $\phi = 80\text{ mm}$ ;投影仪图像源(DMD芯片)所在的空间为远心光路;投影镜头设计所使用的DMD芯片的尺寸为 $9.14\text{ mm} \times 6.86\text{ mm}$ ,分辨率为 $800 \times 600$ ,单个像素的尺寸为 $11.4\ \mu\text{m}$ ,可以确定该投影物镜的调制传递函数(MTF)的截止频率为 $44\text{ lp/mm}$ ,经放大倍率为110倍放大以后,在像方对应的截止频率在 $f'_{\text{cutoff}} = 0.4\text{ lp/mm}$ 。投影物镜在所有视场截止频率 $f'_{\text{cutoff}} = 0.4\text{ lp/mm}$ 的调制传递函数都应该大于0.4,最大畸变绝对值应小于1.5%。

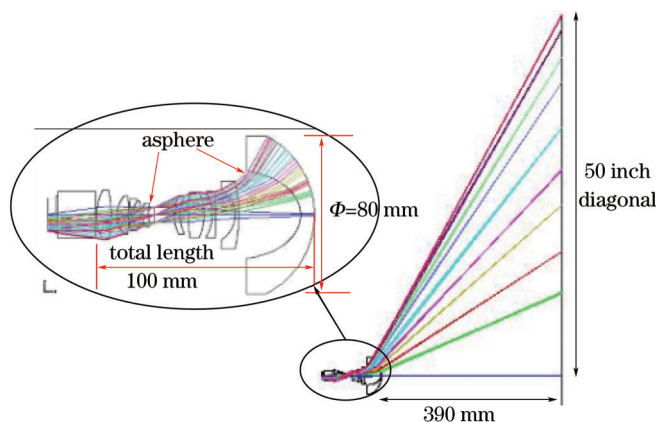


图1 超短投影镜头二维结构图

Fig.1 2D layout of ultra-short projector lens

### 2.2 设计第一片非球面

该设计是以一个除畸变以外,其他像差校正较好地超广角镜头为初始结构。首先在远离光阑处增加一个球面-非球面透镜,其中球面的圆心为光学系统的出瞳中心,球面半径理论上为一个任意值。为保证校正畸变的有效性,控制特征视场的主光线,利用折射定律和微分几何的方法构建微分方程组<sup>[14-16]</sup>,求出一系列离散点的坐标,再由这些离散点拟合出第一个非球面。在选取初始结构时,如果初始结构的 $F$ 数的数值较大,应当首先将镜头的 $F$ 数逐步修正到与设计指标相同;如果初始结构的近轴放大率较小,则构建的球面-非球面透镜光焦度较大,非球面面型的顶点曲率可能偏小,面型的弯曲程度可能较大;如果初始结构的近轴放大率与设计指标接近,则球面-非球面透镜两个曲面的顶点曲率接近,而非球面仅用于校正轴外视场的畸变。因此在选取初始结构时,应当保证选取的初始结构的 $F$ 数和近轴放大率与设计指标接近。

如图2(a)所示,利用网格成像的方法,可以确定理想目标成像点和实际畸变成像点的映射关系。如图2(b)所示,以实际畸变成像点和出瞳中心 $O$ 构建入射光线 $OP$ ,以目标成像点和未知离散点 $P$ 构建出射光线 $PT$ ,以折射定律和微分几何方法构建微分方程,求得非球面离散点 $\{P_1, P_2, P_3, \dots, P_k\}$ 的坐标。

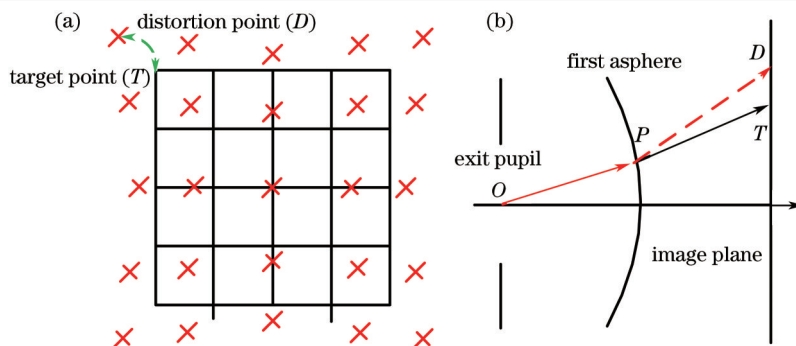


图2 设计第一片非球面示意图。(a) 映射关系; (b) 对应坐标

Fig.2 Schematic diagram to design the first asphere. (a) Mapping relation; (b) corresponding coordinate

经拟合离散点,得到第一个非球面如图3所示。拟合面型的算法有很多种,这里采用最小二乘法(DLS)将离散点拟合成多项式<sup>[6-8]</sup>。通常多项式的表达式为:

$$z(x,y) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^N A_i E_i(x,y), \quad (1)$$

其中  $K$  是圆锥系数,  $c$  是曲率,  $A_i$  为多项式系数,且  $E_i(x,y)$  决定了曲面的面型类型,例如奇次多项式曲面、偶次多项式曲面、Zernike 多项式曲面,  $N$  按拟合精度要求自定义。为了方便多项式拟合的计算,(1)式进行泰勒展开为

$$z(x,y) = \frac{c(x^2 + y^2)}{2} + \frac{1}{8}c^3(x^2 + y^2)^2 + \frac{1}{8}Kc^3(x^2 + y^2)^2 + \sum_{i=1}^N A_i E_i(x,y), \quad (2)$$

将离散点  $\{P_1, P_2, P_3, \dots, P_k\}$  代入上式,由最小二乘法即可计算出  $\{c, K, r, A_1, A_2, A_3, \dots, A_N\}$ 。

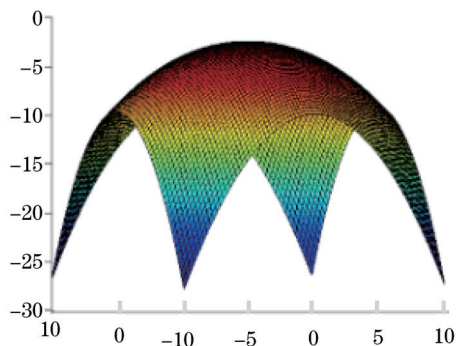


图3 计算得到的第一片非球面离散点

Fig.3 Discrete data points calculated on the first asphere

### 2.3 设计第二片非球面

由于含有第一片非球面的光学系统,仅校正了特征视场主光线的畸变,因此成像模糊,弥散斑较大,其中球差对弥散斑影响最大,因此光学系统需要第二片非球面用于校正光学系统的球差<sup>[14,17]</sup>。在赛得尔像差理论中,系统球差由每一个面产生的球差共同决定,而第一赛得尔数能够表征每一个光学面对球差的贡献多少,因此,计算含有第一片非球面的光学系统中每一个面的第一赛得尔数,选取对系统球差贡献较大的面  $C$ ,将该面从光学系统中删除,只保留主光线与该球面的交点坐标,并根据等光程原理,计算边缘光线在原球面  $C$  附近的离散点,再通过最小二乘法拟合离散数据点,得到第二个非球面如图4所示。两片非球面的离散点由最小二乘法拟合得到奇次多项式面型系数,如表1所示。

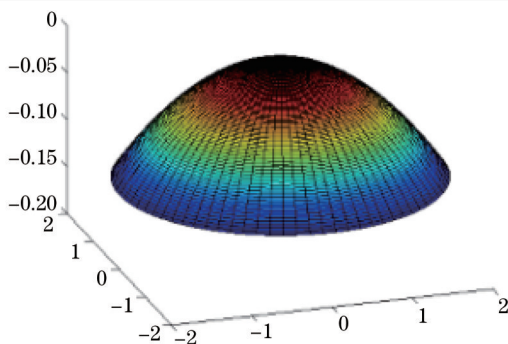


图4 计算得到的第二片非球面离散点

Fig.4 Discrete data points calculated on the second asphere

表 1 用奇次多项式面型拟合两个非球面,得到的顶点曲率  $c$ 、二次圆锥系数  $K$  和多项式系数  $A_1, A_2, A_3$  和  $A_4$

Table 1 Vertex curvature  $c$ , conic coefficient  $K$ , the polynomial coefficients  $A_1, A_2, A_3$  and  $A_4$  of first asphere and second asphere fitted as odd polynomial expressions

	$c$	$K$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
First asphere	-0.242	-0.982	$-1.2 \times 10^{-4}$	0.097	$-8.4 \times 10^{-6}$	$-2.2 \times 10^{-5}$
Second asphere	-0.064	-0.617	$5.14 \times 10^{-4}$	$5.95 \times 10^{-4}$	$9.98 \times 10^{-6}$	$-5.11 \times 10^{-7}$

### 2.4 像差平衡

对于常规目视光学系统,通常考虑  $F, d, C$  三种色光进行光线追迹,定出各条光线与像平面的交点。再一一求出各个交点到  $d$  色光主光线的距离  $d$ 。每个视场上各距离  $d$  的平方和的平均值即为此视场处的清晰度,而各不同视场处这个量的加权平均值即为清晰度的评价函数  $\varphi_1$ ,另外还定义一个衡量畸变度的评价函数  $\varphi_2$ ,总的评价函数即为:

$$\varphi = (\varphi_1 + p \cdot \varphi_2) / (1 + p), \quad (3)$$

其中,  $p$  为畸变度相对于清晰度的权重因子。(3)式中的  $\varphi$  是关于光学系统中各球面半径  $r$ ,材料折射率  $n$ ,顶点间隔  $d$ ,非球面多项式中的系数  $\{K, c, A_i\}$  等自变量的函数。利用阻尼最小二乘法,有可能使得  $\varphi$  得到优化,达到预定设计指标<sup>[10]</sup>。优化后得到的两片非球面的面型参数,如表 2 所示。

表 2 经最小二乘法优化后,两片非球面的顶点曲率  $c$ 、二次圆锥系数  $K$  和多项式系数  $A_1, A_2, A_3$  和  $A_4$

Table 2 Vertex curvature  $c$ , conic coefficient  $K$ , the polynomial coefficients  $A_1, A_2, A_3$  and  $A_4$  of first asphere and second asphere optimized by DLS

	$c$	$K$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
First asphere	-0.19	-0.948	$8.53 \times 10^{-10}$	0.1	$6.21 \times 10^{-6}$	$-2.15 \times 10^{-7}$
Second asphere	-0.076	-0.571	$9.34 \times 10^{-11}$	$5.95 \times 10^{-4}$	$-1.9 \times 10^{-9}$	$-4.8 \times 10^{-3}$

如图 5 所示,数值计算得到的含多项式非球面光学系统经最小二乘法优化后成像清晰度得到提高,投影物镜在所有视场截止频率的调制传递函数都大于 0.6,一般认为可以较好地成像。

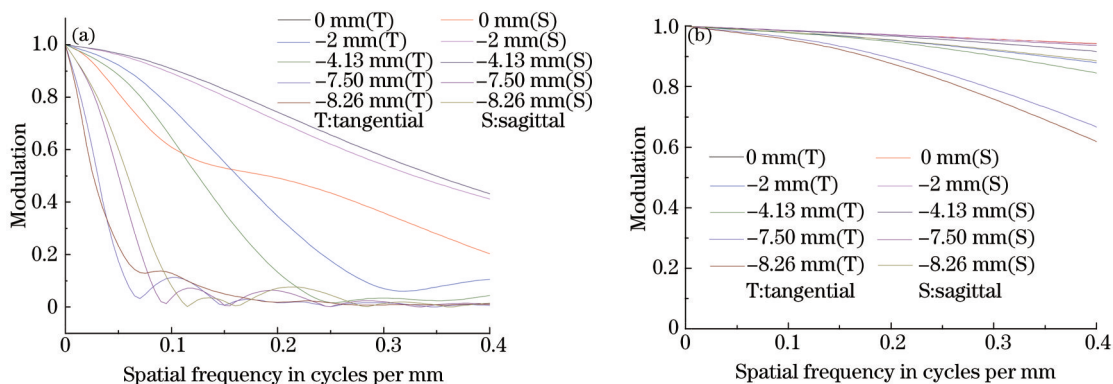


图 5 (a) 计算得到非球面的镜头 MTF; (b) 优化后的 MTF

Fig.5 (a) MTF of calculated lens; (b) MTF after optimization

如图 6 所示,数值计算得到的非球面已经将光学系统的畸变校正较好,经最小二乘法优化后,光学系统

的畸变得进一步校正。通常当畸变绝对值小于1.5%时,投影画面的畸变不能够被人眼观察。设计的投影镜头畸变绝对值最大为0.9%,基本达到投影显示要求。

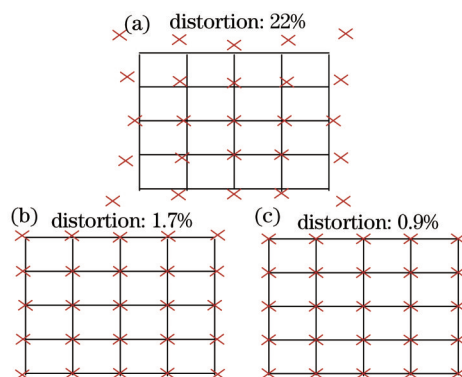


图6 镜头畸变对比图。(a) 初始镜头畸变;(b) 计算插入非曲面后的镜头畸变;(c) 优化后的镜头畸变

Fig.6 Distortion contrast of three lenses. (a) Initial lens; (b) calculated lens; (c) optimized lens

### 3 结 论

提出了一种在大视场全透射式的具有超短投影距的投影物镜的设计方法,并用该方法设计了一个满足实际应用要求的具有超短投影距的投影物镜。论述了如何利用等光程原理、折射定律、多项式拟合方法和像差平衡方法,实现同时兼顾畸变和成像清晰度的镜头设计。设计结果表明,所设计的投影物镜不仅实现了大视场较好投影的同时,而且该投影物镜的物理尺寸远远小于已报道的近似设计指标的包含反射元件的投影物镜,使得该案例在超短投影技术领域具有很大的应用价值。由于非球面光学曲面自由度越高,对光学系统装调公差要求越高,因此采用两片扩展项仅有四项的奇次多项式非球面,拟合数值计算得到的离散点。非球面光学曲面的其他面型也可以用文中提出的非球面拟合方法获得,只需拟合误差在设计者容忍的范围内即可。

### 参 考 文 献

- 1 Juan C Miñano, Pablo Benítez, Wang Lin, *et al.*. An application of the SMS method for imaging designs[J]. *Opt Express*, 2009, 17(26): 24036–24044.
- 2 Zhenrong Zheng, Xutao Sun, Xu Liu, *et al.*. Design of reflective projection lens with Zernike polynomials surfaces[J]. *Displays*, 2008, 29(4): 412–417.
- 3 Zhenfeng Zhuang, Yangting Chen, Feihong Yu, *et al.*. Field curvature correction method for ultra-short throw ratio projection optics design using an odd polynomial mirror surface[J]. *Appl Opt*, 2014, 53(22): E69–E76.
- 4 Jia Hou, Haifeng Li, Rengmao Wu, *et al.*. Method to design two aspheric surfaces for imaging system[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(11): 2294–2299.
- 5 T Yang, J Zhu, X Wu, *et al.*. Direct design of freeform surfaces and freeform imaging systems with a point-by-point three-dimensional construction-iteration method[J]. *Opt Express*, 2015, 23(8): 10233–10246.
- 6 Li Bo. Optical design of target range UV telescope system[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10):1016001  
李 博. 靶场紫外望远系统光学设计[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1016001
- 7 Xue Qingsheng. Optical System design of large relative-aperture and wide field of view spaceborne imaging spectrometer[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0316003  
薛庆生. 星载大相对孔径宽视场成像光谱仪光学系统设计[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0316003
- 8 Hu Zhonghua, Yang Baoxi, Zhu Jing, *et al.*. Design of diffractive optical element for pupil shaping optics in projection lithography system [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0616001  
胡中华, 杨宝喜, 朱 菁, 等. 用于投影光刻机光瞳整形的衍射光学元件设计[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0616001
- 9 G D Wassermann, E Wolf. On the theory of aplanatic aspheric systems[C]. *Proceedings of the Physical Society, Section B*, 1949, 62: 2–8.
- 10 A Prata, W V T Rusch. Algorithm for computation of Zernike polynomials expansion coefficients[J]. *Appl Opt*, 1989, 28(4): 749–754.
- 11 Zhenrong Zheng, Xu Liu, Haifeng Li, *et al.*. Design and fabrication of an off-axis see-through head-mounted display with an  $x-y$  polynomial surface[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(19): 3661–3668.
- 12 K Fuerschbach, J P Rolland, K P Thompson. A new family of optical systems employing  $\phi$ -polynomial surfaces[J]. *Opt Express*, 2011,

- 19(22): 21919–21928.
- 13 J Meiron. Damped least-squares method for automatic lens design[J]. J Opt Soc Am, 1965, 55(9): 1105–1107.
- 14 Li Xiaotong, Cen Zhaofeng. Geometrical Optics, Aberrations and Optical Design[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2003: 159–166.
- 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, 2003: 159–166.
- 15 S S Chern, W H Chen. Lectures on Differential Geometry[M]. Beijing: Peking University Press, 2006: 75–90.
- 陈省身, 陈维恒. 微分几何讲义[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006: 75–90.
- 16 E H Twizell. The numerical solution of second order hyperbolic partial differential equations with unequally spaced initial conditions[J]. The Computer Journal, 1975, 18(3): 252–257.
- 17 C Chen. Methods of solving aspheric singlets and cemented doublets with given primary aberrations[J]. Appl Opt 2014, 53(29): H202–H212.

栏目编辑: 韩 峰