

doi: 10.3788/gzxb20124106.0654

基于三片曲面反射镜的离轴投影成像系统

孙文军¹, 赵立萍², 孙京南¹, 李娟¹, 李孟洋¹, 支洪武¹

(1 哈尔滨师范大学 光电带隙材料教育部重点实验室; 黑龙江省先进功能材料与激发态重点实验室;
物理与电子工程学院, 哈尔滨 150025)

(2 牡丹江师范学院 物理系, 黑龙江 牡丹江 157012)

摘要:采用调制传递函数和波前像差分析方法, 设计了基于偶次非球面反射镜和 Zernike 自由曲面反射镜构成的放大倍数为 80, 相对孔径为 2.8 的三个离轴投影成像系统. 其中第一片反射镜 M_1 表面为凹面用于减小第二片反射镜的尺寸及获得高的对比度, 而第二片反射镜 M_2 和第三片反射镜 M_3 表面为凸面用于校正系统像差及获得更短的投影距离. 经软件设计与分析, 三系统中基于三片 Zernike 自由曲面反射镜的成像系统光学性能最好, 调制传递函数实现 60 lp/mm 时 60% 以上, 畸变小于 2.0%. 与其它文献相比, 基于三片 Zernike 自由曲面反射镜系统可以更好地消除像差, 缩短系统厚度, 增大系统的可视角与相对孔径.

关键词:离轴投影成像系统; 泽尼克多项式曲面; 调制传递函数; 畸变

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)06-0654-4

0 引言

投影显示技术广泛应用于电化教学、办公、商务以及广告娱乐等方面, 其主要优点为大视场角、高分辨率投影显示、体积小、重量轻. 目前的投影显示成像系统的设计原理主要分为透射成像原理和反射成像原理. 透射式成像系统当视场角和相对孔径较大时, 会造成各种色差, 轴外像差和畸变的急剧变化及系统结构的复杂化^[1-2]. 而反射式成像系统中反射镜一般为焦距短、相对孔径大、视场角大的远心成像物镜. 目前反射式成像系统中的反射镜多采用偶次非球面, 菲涅耳波带反射面以及 Zernike 多项式自由曲面等^[3-7]. 采用 Zernike 多项式表征自由曲面可以很好地解决自由曲面的设计、加工和检测等问题, 且 Zernike 多项式与 Seidel 像差具有一定的对应关系, 为更好地校正各种像差提供了方便. 本文设计了三个基于曲面反射镜的离轴投影成像系统, 更好地校正了像差, 畸变更小, 调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 值有所提高, 系统长度有所减少, 增大了系统的视场角与相对孔径. 并与其他类型的投影系统进行了比较, 证明三片式泽尼克自由曲面反射镜投影成像系统的性能具有一定的优势.

1 Zernike 多项式曲面理论

光学表面的矢高可以用式(1)表示, 式中 k 为圆

锥系数, c 为曲率半径, a_i 是非球面的系数, r 为光轴方向的半径高度, 可写成 $r^2 = x^2 + y^2$; A_i 是 Zernike 多项式系数, 多项式可用式(2)展开.

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

$$\sum_{i=1}^N A_i E_i(x, y) = A_1 x^1 y^0 + A_2 x^0 y^1 + A_3 x^2 y^0 + A_4 x^1 y^1 + A_5 x^0 y^2 + \dots + A_N x^{j-k} y^k \quad (2)$$

多项式的项数为

$$N = \frac{1}{2}j(j+1) + k$$

Zernike 多项式也可以表达为极坐标形式

$$Z(x, y) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^N B_i F_i(\rho, \theta) \quad (0 \leq \rho \leq 1, 0 \leq \theta \leq 2\pi) \quad (3)$$

Zernike 多项式具有良好的数学性能, 可将其正交归一化成单位圆, 因此 Zernike 多项式所具有的这种单位圆上的正交性恰好满足圆形光瞳的特点, 而且其正交性使拟合多项式的系数之间相互独立, 系数之间互不影响. Zernike 多项式与光学系统的初级像差有着一定的对应关系, 并且很容易与 Seidel 像差相对应. 可以有选择地单独处理各像差. 表 1 列出了 Zernike 多项式与 Seidel 像差的对应关系. 可

基金项目: 黑龙江省青年基金 (No. QC06C043)、黑龙江省教育厅骨干教师项目 (No. 1251G031)、哈师大预研项目 (No. 08XYS-01) 和黑龙江省研究生创新科研资金项目 (No. YJSCX2011-414HLJ) 资助

第一作者: 孙文军 (1975 年—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电显示、半导体光电子学. Email: swjgood0139@sina.com

收稿日期: 2011-11-07; 修回日期: 2011-12-13

表 1 Zernike 多项式与 Seidel 像差对应关系
Table 1 Relation between Zernike polynomial with Seidel aberration

Number	Number of stages	Zernike polynomial	Seidel aberration
1	0	1	Constant
2	1	$\rho \cos \theta$	X tilt
3	1	$\rho \sin \theta$	Y tilt
4	1	$2\rho^2 - 1$	Defocus
5	2	$\rho^2 \cos (2\theta)$	90° astigma
6	2	$\rho^2 \sin (2\theta)$	45° astigma
7	3	$(3\rho^2 - 2)\rho \cos \theta$	X axis coma
8	3	$(3\rho^2 - 2)\rho \sin \theta$	Y axis coma
9	4	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	Third spherical
...

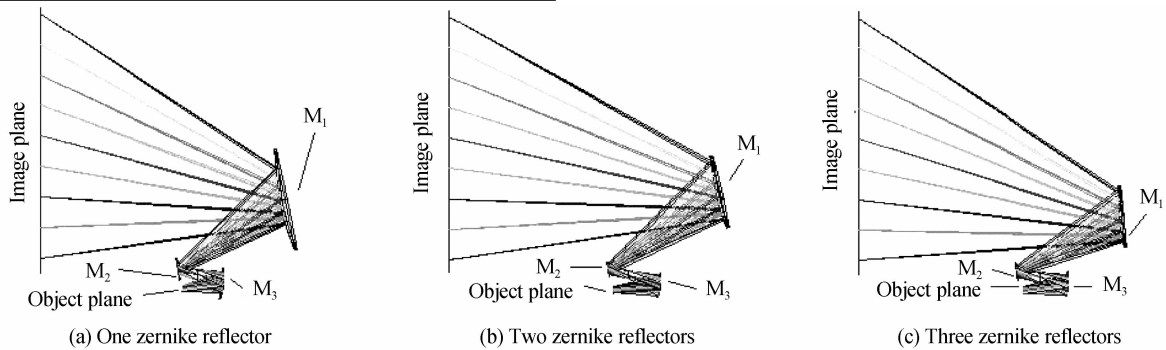


图 1 三片反射镜投影成像系统结构
Fig. 1 Layout of three projection reflector systems

正反射离轴产生的像差(主要为球差和慧差)和减小反射镜 M₂ 的口径;M₁ 和 M₂ 之间设置孔径光阑以实现高的对比度;反射镜 M₂ 为凸面镜,主要用于减小投影距离和校正像差(主要为场曲和慧差等轴外像差);反射镜 M₃ 为凸面镜,主要用于放大投影图像和校正离轴产生的畸变。

表 2 给出了三片 Zernike 自由曲面反射镜投影成像系统结构参量,表 3 为该系统三片 Zernike 自由曲面反射镜 M₁、M₂ 和 M₃ 的 Zernike 系数.图 2 和图 3 给出了三片 Zernike 自由曲面反射镜投影成

表 2 三片 Zernike 多项式投影系统结构参量

Table 2 Structure parameters of projection system with three Zernike polynomial reflectors

Coefficient	Zernike M ₁	Zernike M ₂	Zernike M ₃
Radius	333.879	-169.862	-97.304
Conic	-19.371	28.579	0.116
a ₂	-1.328E-006	-9.281E-008	6.762E-008
a ₄	2.843E-009	-3.380E-008	-3.341E-008
a ₆	-2.371E-013	9.286E-011	1.130E-011
a ₈	1.686E-017	-4.341E-014	-6.018E-015
a ₁₀	3.199E-021	3.337E-016	-6.690E-018
a ₁₂	-6.553E-026	1.383E-019	5.490E-021
a ₁₄	-1.289E-030	2.672E-023	-6.747E-026
a ₁₆	3.233E-034	-1.297E-026	-6.839E-031

见 Zernike 多项式能够精确表示一个表面,并且具有收敛性好、拟合准确度高等特点。

2 反射镜成像系统

采用三片反射镜设计离轴反射成像系统,根据各反射面的焦距和像差分配,利用最小二乘法原理通过软件优化可得到各个反射面的 Zernike 曲面方程.图 1(a)中 M₁、M₂ 为偶次非球面镜, M₃ 为 Zernike 自由曲面反射镜;(b)中 M₁、M₃ 为 Zernike 自由曲面反射镜, M₂ 为偶次非球面镜为;(c)中 M₁、M₂、M₃ 为 Zernike 自由曲面反射镜.其中光束从物面(或空间光调制器)发出依次经由三片反射镜反射后成像于像面上.反射镜 M₁ 为凹面镜,主要用于校

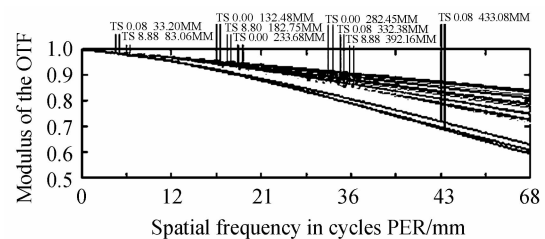


图 2 三片 Zernike 多项式投影反射镜系统 MTF 性能参量
Fig. 2 MTF performance parameters of three Zernike polynomial reflectors system

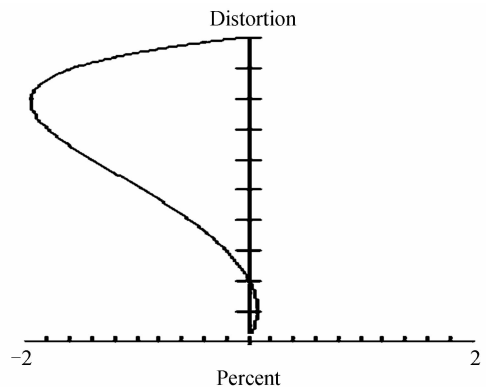


图 3 三片 Zernike 多项式投影反射镜系统畸变性能曲线
Fig. 3 Distortion performance parameters of three Zernike polynomial reflectors system

像系统的输出性能.由图 2 可知系统的 MTF 在 60 lp/mm 时达到 60% 以上,中心光线已经接近衍射

表 3 三片 Zernike 多项式反射镜的 Zernike 系数

Table 3 Zernike coefficients of three Zernike polynomial reflectors

Number	Ai of M ₁	Ai of M ₂	Ai of M ₃
1	-0.027	1.863E-3	1.247E-4
2	0.047	-6.147E-4	-7.334E-4
3	2.433E-3	-1.883E-3	9.856E-4
4	0.489	0.267	-0.668
5	0.183	-0.026	-8.167E-3
6	7.667E-3	-4.843E-4	1.483E-4
7	-0.087	-0.28	-3.097E-3
8	-4.599E-4	6.298E-3	-3.59E-5
9	0.076	0.092	0.027
10	3.884E-4	-9.484E-4	1.178E-4
11	-0.057	-0.148	9.684E-3
12	0.191	0.044	0.017
13	-1.416E-3	-6.973E-5	6.527E-5
14	-0.034	-0.227	0.05
16	0.018	5.103E-4	9.768E-4
17	-6.536E-4	-4.843E-4	2.617E-5
18	6.177E-3	2.074E-4	2.761E-3
19	1.820E-3	-4.08E-4	-4.728E-5
20	4.329E-3	-0.877	0.039
21	0.082	-2.05	-0.019
22	8.741E-4	3.099E-5	1.028E-5
23	-5.747E-3	3.67E-3	9.564E-4
24	-1.013E-3	-1.507E-4	5.694E-5
25	-5.005E-3	0.042	5.473E-3
26	8.651E-4	3.166E-3	5.478E-5
27	-0.015	2.068	5.454E-3
28	-4.696E-3	0.026	0.029
29	-3.914E-3	-0.013	-1.419E-3
15	2.668E-4	-3.113E-3	-1.885E-4

极限,能够满足投影反射镜成像清晰度的要求.由图 3 可知系统的畸变小于 2.0%.可见三片 Zernike 自由曲面反射镜投影成像系统的结构简单,成像质量高.

表 4 给出了本文三个投影成像系统的性能参量比较,可见系统中随着 Zernike 自由曲面反射镜的增加,投影成像系统的各项性能都在提高.表 5 给出了本文的三片 Zernike 自由曲面反射镜投影成像系统与非球面离轴成像系统^[8]、折反结合式离轴成像

表 4 三系统结构与性能参量

Table 4 Structure and performance parameters of the designed systems

Systems	Fig. 1(a)	Fig. 1(b)	Fig. 1(c)
F #	2.8	2.8	2.8
M/times	80	80	80
L/cm	35	35	35
Thickness/cm	18	17	17
MTF/%	40	55	60
D/%	4	3	2

表 5 投影成像系统比较

Table 5 Compare of designed system with references

Systems	Ref. [8]	Ref. [8]	Ref. [9]	Ref. [10]	In this paper
Structure	Fore aspheric mirrors	Ten lens and one aspheric mirror	Ten lens	Ten lens	Three Zernike mirrors
Projector distance/cm	25	12	100	76.5	35
Thickness/cm	21	—	—	24.13	17
Magnification	100	100	80	120	80
MTF/%	More	More	More	More	More
	50% at 60lp/mm	50% at 60lp/mm	35% at 35lp/mm	50% at 62lp/mm	60% at 60lp/mm
Distortion/%	Less than 2.3%	Less than 3%	Less than 3%	Less than 0.5%	Less than 2%

系统^[8]、短焦投影物镜^[9]、广角投影物镜^[10]之间的结构与性能比较.可见文中设计的三片 Zernike 自由曲面反射镜投影成像系统各项性能都优于其他系统.

3 结论

设计了三个基于反射镜的投影成像系统,比较分析了三系统在放大倍数为 80,相对孔径为 2.8 时的成像质量,结果表明基于自由曲面反射镜成像系统实现调制传递函数 60 lp/mm 时 60% 以上,畸变小于 2.0%,基于 Zernike 自由曲面反射镜成像系统与其它系统的比较表明该系统可以更好地消除像差,提高成像质量,可以缩短系统厚度,简化系统结构,可以增大系统的可视角与相对孔径.

参考文献

- [1] KINGSLAKE R. Lens design fundamentals [M]. LIANG Wei-sheng, transl. Beijing: Mechanical Industry Press, 1985: 322-324.
金斯莱克 R. 透镜设计基础[M]. 梁伟声,译.北京:机械工业出版社, 1985:322-324.
- [2] ZHANG Hui-juan. Optical system design of binocular head-mounted projective display with wide-field-of view[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1264-1267.
张慧娟.大视场双目头盔投影光学系统设计[J].光子学报, 2007, **37**(7): 1264-1267.
- [3] SUN Ai-juan, TIAN Wei-jian. A novel design of off-axis three-mirror reflective optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4): 608-610.
孙爱娟,田维坚.一种新型离轴三反式光学系统设计[J].光子学报,2006, **35**(4): 608-610.
- [4] SHIKAMA S. Optical system of ultra-thin rear projection equipped with refractive- reflective projection optics [J]. *Society of Information Display*, 2003, **46**(2):1250-1253.
- [5] HAO Wei, LIU Xu, ZHENG Zhen-rong. Design and investigation of projection display system and double-functional screen[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(2): 142-144.
郝伟,刘旭,郑臻荣.背投影显示系统及双重功能屏幕设计与研

- 究[J]. 光电工程, 2007, **34**(2): 142-144.
- [6] ZHENG Zhen-rong, SUN Xu-tao. Design of reflective lens with zernike polynomial free form surfaces[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2008, **42**(12): 2202-2206.
郑臻荣,孙旭涛.应用泽尼克多项式自由曲面的成像物镜设计[J]. 浙江大学学报, 2008, **42**(12): 2202-2206.
- [7] ZHENG Zhen-rong. Design of reflective projection lens with Zernike polynomials surfaces[J]. *Displays*, 2008, **29**(4): 412-417.
- [8] SUN Xu-tao. Theory and experimental research of application free surface of the ultra-thin projection display system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008: 103-105.
- 孙旭涛.应用自由曲面的超薄投影显示系统理论和实验研究[D]. 杭州:浙江大学, 2008:103-105.
- [9] LI Wei-shan, CHEN Chen, ZHANG Yu, *et al.* Design of short focal digital projection lens based on ZEMAX [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, **31**(5): 714-717.
李维善,陈琛,张禹,等.基于ZEMAX软件的短焦数字投影镜头的设计[J]. 应用光学, 2010, **31**(5): 714-717.
- [10] 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**(5): 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.

Off-axis Projection System Based on Three Reflectors with Zernike Polynomial Surfaces and Even Aspheric Surfaces

SUN Wen-jun¹, ZHAO Li-ping², SUN Jing-nan¹, LI Juan¹, LI Meng-yang¹, ZHI Hong-wu¹

(1 *Key Laboratory for photonic and Electronic Bandgap Materials(Ministry of Education); Heilongjiang Key Laboratory for Advanced Functional Materials and Excited State Processes; School of Physics and Electronic*

Engineering, Harbin Normal University, Harbin 150025, China)

(2 *Mudanjiang Teachers College, Mudanjiang, Heilongjiang 157012, China)*

Abstract: Three off-axis projection systems based on even aspheric surface reflectors and Zernike polynomial surface reflectors are designed using wave front aberrations analysis and modulation transfer function. The projection system consists of three reflectors, in which the number of Zernike polynomial surface reflectors is different. The first mirror M_1 is concave to reduce the size of the second mirror and obtain high contrast ratio. The second mirror M_2 and the third mirror M_3 are convex to achieve a shorter projection distance and little system aberration. Optical performance analysis show that the system based on three Zernike polynomial surface reflector is the best, the MTF is more than 60% at 60 lp/mm and system distortion is less than 2.0% under the condition of F -number = 2.8, the magnification of 80. Compared results with references show that the designed system based on three Zernike polynomial surface reflectors can more easily eliminate system aberrations, shorten system thickness and increase the visual angle and relative aperture.

Key words: Off-axis projection system; Zernike polynomial Surface; Modulation Transfer Function (MTF); Distortion