

文章编号: 1005-5630(2015)05-0407-07

鱼眼镜头光学系统的优化方法

牛智全, 吕丽军

(上海大学 精密机械系, 上海 200072)

摘要: 在鱼眼镜头成像系统中, 光线以很大的入射角打在前组透镜表面时往往会造成严重的像差, 为了压缩超大视场角, 提出应用非球面前组负弯月型透镜来控制鱼眼镜头系统的像差。基于光学前组具有平面对称的成像特性, 应用平面对称光学系统像差理论发展的评价函数, 对非球面系数及其他的系统结构参数进行优化设计。应用评价函数及 Zemax 光线追迹成像模拟对优化系统进行评估。研究表明, 应用非球面组负弯月型透镜能够显著地提高鱼眼镜头的成像质量。

关键词: 光学设计; 鱼眼镜头; 平面对称; 非球面; 像差

中图分类号: TH 744 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.05.007

Optimization method of optical systems of fisheye lens

NIU Zhiquan, LÜ Lijun

(Department of Precision Mechanism, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: To reduce the ultra-wide field angle, a pre-optics group that consists of several negative meniscus lenses of large power in a fisheye lens is used. The large incidence angle of light at these negative meniscus lenses will result in very serious aberrations. In the paper, the aspheric pre-optics design is proposed to control the aberrations of fisheye system. Based on the plane-symmetry imaging properties of the pre-optics, the evaluation function developed with the aberration theory of plane-symmetry optical systems is applied to optimize the aspheric coefficients of pre-optics surface as well as other parameters of the optical system. The imaging performances of different design options are evaluated with the evaluation function and ray-tracing simulation of Zemax. The results show that the fisheye lens optimized with aspheric pre-optics has significantly better imaging quality.

Keywords: optical design; fisheye lens; plane symmetry; aspheric surface; aberrations

引 言

鱼眼镜头系统是一种超大视场角的光学成像系统, 其视场角可以达到 180° 甚至 270° , 可以摄取普通镜头无法比拟的场景^[1]。鱼眼镜头光学系统通常由压缩视场角的前组负弯月型透镜和后组物镜组成, 由

收稿日期: 2015-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(11274223)上海市教委创新基金项目(12ZZ088)。

作者简介: 牛智全(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事鱼眼镜头系统优化设计方面的研究。E-mail: niuzhiquan@126.com

通信作者: 吕丽军(1963—), 男, 教授, 主要从事真空紫外、软 X 射线光学及超大视场光学系统等方面的研究。
E-mail: lulijun@shu.edu.cn

于结构的复杂性,高质量的鱼镜头设计和制造比较困难。赛德尔像差理论^[2]主要适用于轴对称光学系统的像差分析,但对于鱼镜头光学系统的超大视场物点成像,光线以很大入射角(可能大于 80°)打在其前组负弯月型透镜上,造成比较严重的像差。光线经前组光学系统成像后在子午和弧矢平面内的聚焦及波阵面参数可能完全不一致,成像具有平面对称而不是轴对称光学系统的特性,赛德尔像差不再适用于此类光学系统的成像分析。

目前,Lu 等应用波像差的方法发展了普遍的平面对称光学系统的像差理论^[3-5];并基于平面对称光学系统像差理论发展了超大视场光学系统的优化设计方法^[6-7]。本文在这些工作基础上,针对鱼镜头前组光学系统的成像特点,基于平面对称光学系统像差理论,采用非球面前组光学系统设计,有效地抑制系统的像差,达到优化鱼镜头成像的目的。

1 鱼镜头像差分析

1.1 二次圆锥曲面方程

图 1 是主光线经过二次圆锥光学面的示意图,二次圆锥曲面在坐标系统 $O'x'y'z'$ 下的表达式为

$$x'^2 + y'^2 = a_1 z' + a_2 z'^2 \quad (1)$$

式中: $a_1 = 2R_0$, R_0 是二次圆锥曲面在点 O' 处的曲率半径; a_2 是二次圆锥曲面面型系数,当 $a_2 < -1$ 、 $a_2 = -1$ 、 $-1 < a_2 < 0$ 、 $a_2 = 0$ 和 $a_2 > 0$ 时,方程(1)分别表示扁椭圆面、球面、长椭圆面、抛物面和双曲面。

在应用 Lu 等的平面对称光学系统像差理论时,光学表面的面形方程要求转换到坐标系 $Oxyz$ 中,坐标系 $Oxyz$ 的原点 O 是主光线与光学面的交点, z 轴是光学面在 O 的法线, x 轴方向是在子午面内的切线方向。光学面对称于平面 xOz ,一般的平面对称方程的表达式为

$$z = c_{2,0}x^2 + c_{0,2}y^2 + c_{3,0}x^3 + c_{1,2}xy^2 + c_{4,0}x^4 + c_{0,4}y^4 + c_{2,2}x^2y^2 \quad (2)$$

式中 $c_{i,j}$ 为面形系数, $c_{i,j}$ 可由文献[5]中的公式(24)~(28)计算得出。

1.2 孔径像差计算

为了计算鱼镜头光学系统的像差,需要主光线的参数,包括它在各个光学面上的入射角、折射角以及物、像距。图 2 是一条光学系统的主光线在子午面平面内的传输示意图,视场角 ω_{i-1} 是打在第 i 个光学面的主光线与光轴的夹角, α_i 、 β_i 、 n_i 是光线在第 i 个光学面的入射角、折射角和像方折射率,它的追迹方程可由以下三角计算公式给出^[5]

$$\sin\alpha_{i+1} = \frac{\Gamma_{i+1} + d_i - \Gamma_i \sin\omega_i + \frac{\rho_i}{\rho_{i+1}} \sin\beta_i}{\rho_{i+1}} \quad (3)$$

$$\omega_i = \omega_{i-1} + \beta_i - \alpha_i = \omega_0 + \sum_{i=1}^i (\beta_i - \alpha_i) \quad (4)$$

$$\beta_{i+1} = \arcsin\left(\frac{n_i}{n_{i+1}} \sin\alpha_{i+1}\right) \quad (5)$$

式中: $\rho_i = -\overline{O_i C_i}$; $\Gamma_i = -\overline{C_i D_i}$ 。对于二次圆锥曲面光学面,它们分别表示 O_i 处的弧矢和子午平面内的曲

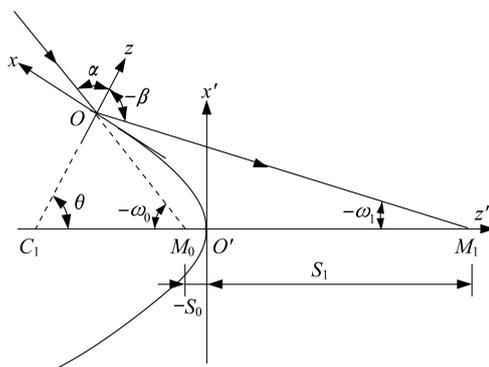


图 1 主光线经过二次圆锥曲面反射,坐标系统 xyz 的原点是主光线和光学面的交点

Fig. 1 The chief ray is reflected by a quadrics of revolution; it also shows the coordinate system of xyz , whose origin is at the intersection point of the chief ray to the optical surface

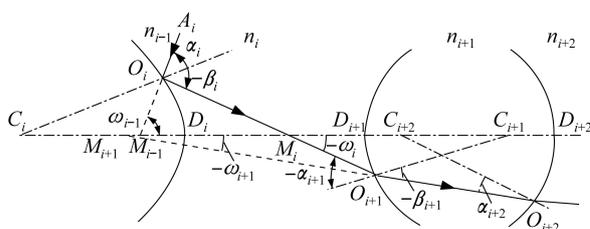


图 2 主光线传输示意图

Fig. 2 The optical scheme of the chief ray

率半径,计算公式由文献[5]中的公式(24)~(28)给出。如果光学面是球面, ρ_i 和 Γ_i 就是光学面的曲率半径 R_i 。

通过式(3)~式(5),主光线传输方程可以由第一个光学面依次求出主光线在各个光学面上的 α_i 和 β_i 。对于第一个光学面

$$\sin\alpha_1 = \frac{\Gamma_1 - S_0}{\rho_1} \sin\omega_0 \quad (6)$$

其中 $S_0 = -\overline{M_0 D_1}$ 。

求出主光线参数后,还需求各个光学面在子午和弧矢平面内的物、像点的位置。设 r_m 和 r'_m 分别表示光线在子午平面内的物距和像距, r_s 和 r'_s 分别表示光线在弧矢平面内的物距和像距,其计算公式如下

$$2c_{2,0}(n_0 \cos\alpha + n_1 \cos\beta) - \left(\frac{n_0 \cos^2\alpha}{r_m} + \frac{n_1 \cos^2\beta}{r'_m} \right) = 0 \quad (7)$$

$$2c_{0,2}(n_0 \cos\alpha + n_1 \cos\beta) - \left(\frac{n_0}{r_s} + \frac{n_1}{r'_s} \right) = 0 \quad (8)$$

式中 n_0 、 n_1 分别为光学面物、像空间的折射率,由式(7)~(8)可以依次计算出光束通过各个光学面成像的物距和像距。

如图3所示,设光学系统有 g 个光学面,像平面与光轴垂直,并且沿光轴方向距光学系统最后光学面的距离为 r'_0 。为了整体反映鱼镜头在全视场范围的成像性能,我们在设计的视场范围内取多个视场物点,计算每个视场物点的像差,然后对它们求和,就可以反映整个视场的像差严重程度。

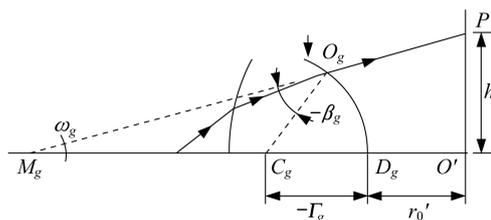


图3 主光线经过最后一个面和像面的交点

Fig. 3 The chief ray passes the last optical surface and intersects with the image plane

对于某一视场物点,光线在像面上的三阶像差表达式为^[5]

$$\begin{cases} x' = \frac{1}{\cos\omega_g} (d_{100}x_g + d_{200}x_g^2 + d_{020}y_g^2 + d_{300}x_g^3 + d_{120}x_g y_g^2) \\ y' = h_{010}y_g + h_{110}x_g y_g + h_{210}x_g^2 y_g + h_{030}y_g^3 \end{cases} \quad (9)$$

式中: x' 和 y' 表示光线在像面上的像差表达式; x_g 和 y_g 表示光线在最后一个光学面上的坐标; d_{ij0} 和 h_{ij0} 为像差系数,具体表达式可参考文献[5]中的公式(38)~(48)。像差系数 d_{ij0} 和 h_{ij0} 取决于波像差系数 ω_{ij0} ,波像差系数 ω_{ij0} 由 $c_{i,j}$ 、 α 、 β 、 r_m 、 r'_m 、 r_s 、 r'_s 决定,可由参考文献[4]公式(6)~(16)和参考文献[5]公式(34)~(36)计算出。

1.3 色差计算

光学系统的色差包括垂轴色差和轴向色差。如图3所示,对某一视场角的主光线和像面的交点与光轴的距离为

$$h' = \overline{M_g O'} \tan\omega_g = \tan\omega_g \left(\frac{\rho_g \sin\beta_g}{\sin\omega_g} - \Gamma_g + r'_0 \right) \quad (10)$$

其中 ω_g 、 β_g 可由式(3)~(6)计算得出。应用式(10)分别计算F光和C光的主光线与像平面的交点与光轴的距离 h'_F 、 h'_C ,则垂轴色差

$$Q_c = |h'_F - h'_C| \quad (11)$$

对某一视场角的轴向色差分量 Q_η 的计算表达式为

$$Q_\eta = \frac{|r'_{mf} - r'_{mc}| \tan\theta_D}{\sqrt{2} \cos\omega_n} \quad (12)$$

式中: θ_D 是D光在最后的像方空间的光束半孔径角; r'_{mf} 、 r'_{mc} 和 r'_{mD} 分别表示F光、C光和D光沿主光线在最后光学面和像面之间的距离; ω_n 表示光学系统的像方视场角。

1.4 评价函数

在设计视场范围内取 k 个视场角,按照上述讨论计算各视场物点的垂轴像差和色差,定义光学系统评价函数如下^[5]

$$Q = \sum_{i=1}^k \epsilon_i (Q_{x(i)}^2 + Q_{y(i)}^2 + \mu_i Q_{c(i)}^2 + \eta_i Q_{\eta(i)}^2) \quad (13)$$

式中: $Q_{x(i)}$ 、 $Q_{y(i)}$ 是第 i 个视场物点的孔径光线像差在像面上子午和弧矢方向的均方根值; $Q_{c(i)}$ 、 $Q_{\eta(i)}$ 表示光学系统第 i 个视场物点的垂轴色差和轴向色差,由式(11)和(12)计算得到; ϵ_i 、 μ_i 以及 η_i 是相应项的权重因子。 $Q_{x(i)}$ 和 $Q_{y(i)}$ 的计算表达式^[5]为

$$\begin{cases} Q_{x(i)}^2 = \frac{8}{\pi W_q L} \int_{-W_q/2}^{W_q/2} \int_0^{\frac{L}{2} \sqrt{1-4x^2/W_q^2}} (x' - \bar{x}')^2 dx dy \\ Q_{y(i)}^2 = \frac{8}{\pi W_q L} \int_{-W_q/2}^{W_q/2} \int_0^{\frac{L}{2} \sqrt{1-4x^2/W_q^2}} y'^2 dx dy \end{cases} \quad (14)$$

$$\bar{x}' = \frac{8}{\pi W_q L} \int_{-W_q/2}^{W_q/2} \int_0^{\frac{L}{2} \sqrt{1-4x^2/W_q^2}} x' dx dy \quad (15)$$

式(14)和(15)中, x' 和 y' 可以由式(9)计算得出, W_q 和 L 分别为光束在最后光学面上沿子午(x)和弧矢(y)方向的投影长度。式(14)和(15)中积分域采用椭圆是由于在鱼镜头光学系统中,虽然孔径光阑一般采用圆形孔,但由于光束在子午和弧矢平面内的焦点位置不一样,造成光束截面一般呈椭圆形。

2 数值验证

基于上节讨论的评价函数,应用混入逃逸函数的实数编码遗传算法(real-coded genetic algorithm mixed with escape function, MERCGA)优化鱼镜头光学系统^[7]。讨论的鱼镜头参考设计引自美国专利 4525038^[8],如图 4 所示,它的所有光学面都是球面, d_i 表示第 i 至 $i+1$ 光学面的距离。

2.1 优化设计实例

鱼镜头参考设计(Design 1)是采用专利中给出的参数。我们考虑三种优化方案,第一种方案(Design 2)是仍然采用全球面,采用 MERCGA 算法进行优化设计;第二种方案(Design 3),是将第一光学面按二次圆锥面而其余光学面为球面进行优化设计;第三种方案(Design 4)是将第一、三光学面按二次圆锥曲面、其余光学面都为球面进行优化设计。非球面设计将增加元件加工成本,我们考虑选择对光学成像性能改善最有效的光学面。我们之所以选择第一、三面作为非球面进行优化设计,一方面是由于超大视场光线在前面两块负弯月型透镜是光线斜入射程度最严重,像差贡献最大。另外,在优化过程中发现第二、四面作为非球面进行优化对减小像差的效果并不明显;如果将前四个面都以非球面进行优化时,所得优化设计结构参数与 Design 4 情形接近,但却增加了这两块元件的加工难度。

在按 Design 2~4 方案优化过程中,光学系统的初始值采用专利参考设计参数, R_i 和 d_i 参量的搜索范围是初始值的上下 10%,如表 1 所示。面形系数 a_2 的搜索范围为 $[-1, 5]$ 。像面距光学系统最后一个光学面的距离的初值 r'_0 设定为

$$r'_0 = \frac{r'_{0\max} + r'_{0\min}}{2} \quad (16)$$

式中, $r'_{0\max}$ 和 $r'_{0\min}$ 分别代表子午平面内在最大和最小视场角时,由式(7)~(8)计算得到最后光学面的像距。根据优化设计经验, r'_0 的优化范围取 $[-2, 2]$ 。在应用 MERCGA 算法计算过程中,种群数为 200,

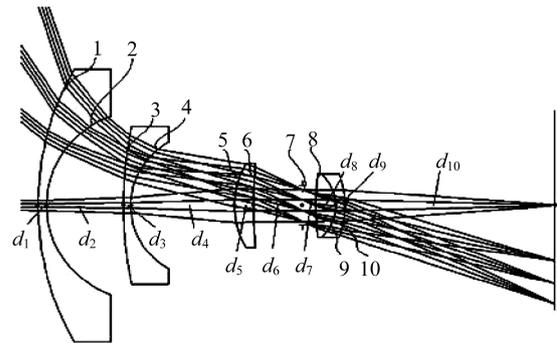


图 4 鱼镜头系统

Fig. 4 The optical scheme of the fisheye lens

每一代种群规模为 100,交叉概率为 0.85。

优化过程中视场角分别选择 5°、25°、45°、65°、80°五个角度,式(13)中所有权重因子都取 1;设不同视场角物点距第一光学面的距离均为 2 000 mm;图 4 中的透镜材料从左往右依次为 N-LAK14($n=1.698\ 6$)、N-LAK14、N-SF5($n=1.672\ 7$)、N-FK51($n=1.486\ 56$)和 SFL6($n=1.805\ 18$);孔径光阑(图 4 中的第 7 部件)为圆形,直径取 5 mm; $f'=14.385\ 4$, $D/f'=0.34$ 。

表 1 鱼镜头各光学面半径和光学间隔参数的初值及优化范围

Tab. 1 Initial value and optimization scope of radius and optical spacing of the fisheye lens

光学面 i		1	2	3	4	5	6	STO	8	9	10
半径 (R_i)	初值	54.45	18.26	74.25	14.00	16.48	81.18	∞	48.51	-8.31	-16.39
	上限	59.90	20.09	81.68	15.41	18.14	89.95	∞	53.36	-7.47	-14.75
	下限	49.00	16.43	66.82	12.60	14.83	73.06	∞	43.45	-9.14	-18.04
间隔 (d_i)	初值	1.60	13.86	1.40	18.81	3.37	9.00	2.35	3.57	1.78	
	上限	1.96	15.25	1.84	21.69	5.72	9.90	2.59	3.93	3.96	
	下限	1.16	11.47	1.16	16.92	3.03	7.65	2.11	2.08	1.36	

表 2 是四种设计鱼镜头前组两块负弯月型透镜光学面的二次圆锥曲面系数 a_2 ;表 3 是四种优化设计所得鱼镜头系统各个光学面的半径、光学间隔和像面位置。表 4 为四种优化设计所得鱼镜头系统的评价函数各分量值,其中 $Q_{x(i)}$ 、 $Q_{y(i)}$ 、 $Q_{z(i)}$ 、 $Q_{\theta(i)}$ 及 Q 的计算已经由上节给出。图 5 中的(a)、(b)、(c)、(d)表示鱼镜头分别采用表 2 和表 3 中的 Design 1~4 优化设计参量,应用 Zemax 所得到的 D 光光线的分布点列图。它和表 4 中评价函数分量 $Q_{x(i)}$ 、 $Q_{y(i)}$ 是一致的。

表 2 鱼镜头前组负弯月形透镜各光学面二次圆锥面型系数

Tab. 2 Type coefficient of quadrics of revolution of negative meniscus lens of the fisheye lens

光学面 i	1	2	3	4
Design 1	-1	-1	-1	-1
Design 2	-1	-1	-1	-1
Design 3	-0.40	-1	-1	-1
Design 4	-0.44	-1	-0.89	-1

表 3 鱼镜头各光学面曲率半径和光学间隔参数

Tab. 3 Parameters of radius of optical surfaces and optical spacing of the fisheye lens

光学面 i		1	2	3	4	5	6	STO	8	9	10
半径 (R_i)	Design 1	54.45	18.26	74.25	14.00	16.48	81.18	∞	48.51	-8.31	-16.39
	Design 2	50.59	19.38	75.12	13.58	16.68	89.84	∞	43.54	-7.75	-15.58
	Design 3	52.34	18.27	72.43	15.23	16.29	81.35	∞	46.77	-8.09	-17.73
	Design 4	50.10	18.72	73.75	15.34	17.75	88.38	∞	44.77	-8.43	-17.28
间隔 (d_i)	Design 1	1.60	13.86	1.40	18.81	3.37	9.00	2.35	3.57	1.78	37.08
	Design 2	1.50	15.13	1.79	19.15	4.53	8.67	2.16	2.17	1.41	34.94
	Design 3	1.89	11.46	1.42	19.50	4.53	7.84	2.39	3.90	3.51	39.07
	Design 4	1.23	14.76	1.21	21.45	4.98	8.53	2.12	3.34	1.71	37.06

2.2 单项像差

从上面的结果可知,前组负弯月型透镜采用非球面的优化设计可以得到成像质量更好的鱼镜头系统。下面对四种设计的各单项像差的分布进行分析。像差由球差、彗差、场曲像差、垂轴色差和轴向色差组成。球差、彗差和场曲像差三项单色像差的表达式由表 5 给出。

计算球差、彗差和场曲像差的评价值只需将表 5 中的相对应的 x' 和 y' 代入式(14)中,它们对应的评价函数表达式为

$$Q = \sqrt{Q_{x(i)}^2 + Q_{y(i)}^2} \tag{17}$$

垂轴色差和轴向色差的评价函数按式(11)和(12)在 1.3 中计算。

图 6 是四种设计各单项像差在设定视场角内的分布情况,图中(a)、(b)、(c)、(d)、(e)分别表示球差、彗差、场曲像差、垂轴色差、轴向色差随视场角的变化曲线。

表 4 鱼眼镜头评价函数及各分量值

Tab. 4 The value of merit function and its component of fisheye lens $\times 10^{-3}$

视场角	5°	25°	45°	65°	80°	
$Q_{x(i)}$	Design 1	6.12	5.24	3.44	4.69	4.75
	Design 2	1.80	1.37	3.57	3.33	2.91
	Design 3	1.18	1.29	1.39	2.43	1.07
	Design 4	0.23	0.38	0.58	2.03	1.36
$Q_{y(i)}$	Design 1	6.12	5.33	3.20	3.44	7.95
	Design 2	1.82	0.98	1.78	1.59	3.02
	Design 3	1.17	1.22	0.95	0.70	0.60
	Design 4	0.22	0.49	1.08	0.62	0.58
$Q_{c(i)}$	Design 1	0.40	2.58	4.60	11.92	24.30
	Design 2	0.07	0.24	0.84	1.47	0.74
	Design 3	0.30	1.44	3.50	2.64	2.17
	Design 4	0.24	1.41	0.11	1.22	0.27
$Q_{\rho(i)}$	Design 1	2.23	2.62	3.50	4.81	5.98
	Design 2	3.90	3.48	2.49	0.99	0.32
	Design 3	0.48	0.06	0.77	1.48	1.27
	Design 4	1.76	1.21	0.02	1.74	3.01
Q	Design 1	1.10				
	Design 2	9.45×10^{-2}				
	Design 3	4.74×10^{-2}				
	Design 4	2.90×10^{-2}				

表 5 球差、彗差和场曲像差的表达式

Tab. 5 Coma, spherical aberration and curvature aberration

像差	x'	y'
球差	$\frac{1}{\cos\omega_g} (d_{300}x_g^3 + d_{120}x_g y_g^2)$	$h_{210}x_g^2 y_g + h_{030}y_g^3$
彗差	$\frac{1}{\cos\omega_g} (d_{200}x_g^2 + d_{020}y_g^2)$	$h_{110}x_g y_g$
场曲 像差	$\frac{d_{100}x_g}{\cos\omega_g}$	$h_{010}y_g$

2.3 结果分析

从表 4 和图 5 的光线追迹计算结果可以看出：(1) Design 2 比 Design 1 (专利初始系统) 的评价函数值 Q 要小一个数量级, 说明 MERCGA 算法对鱼眼镜头系统的优化效果显著；(2) Design 3 设计的评价函数值是 Design 2 设计的一半左右, 表明第一块负弯月型透镜的前光学面

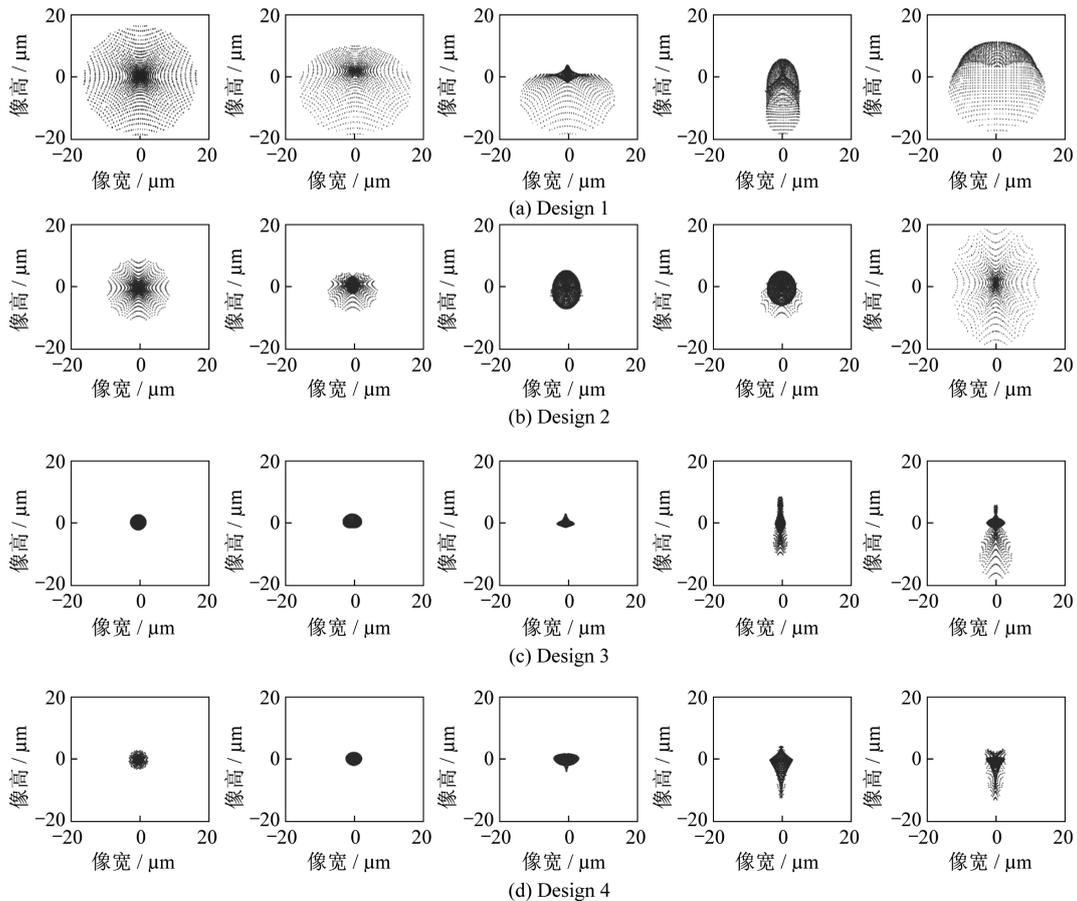


图 5 不同视场角下鱼眼镜头系统最后成像面上的孔径光线像差

Fig. 5 The aperture ray aberrations of the fisheye lens on the image plane at different field angles

采用非球面能够有效地提高光学系统的成像质量;(3) Design 4 设计的评价函数值是 Design 3 的一半左右,表明前组两块负弯月型透镜的第一个光学面同时采用非球面设计可以进一步减小系统的像差。

由图 6 可以看出:(1) 通过用 MERCGA 优化算法的三种设计,各单项像差均比参考设计的有明显减小;(2) 采用非球面优化的 Design 3 和 4,在彗差、场曲、轴向色差比采用全球面光学元件的优化设计有明显改善;(3) Design 4 方案优化在球差、彗差、场曲比 Design 3 优化方案有一定程度的改善。

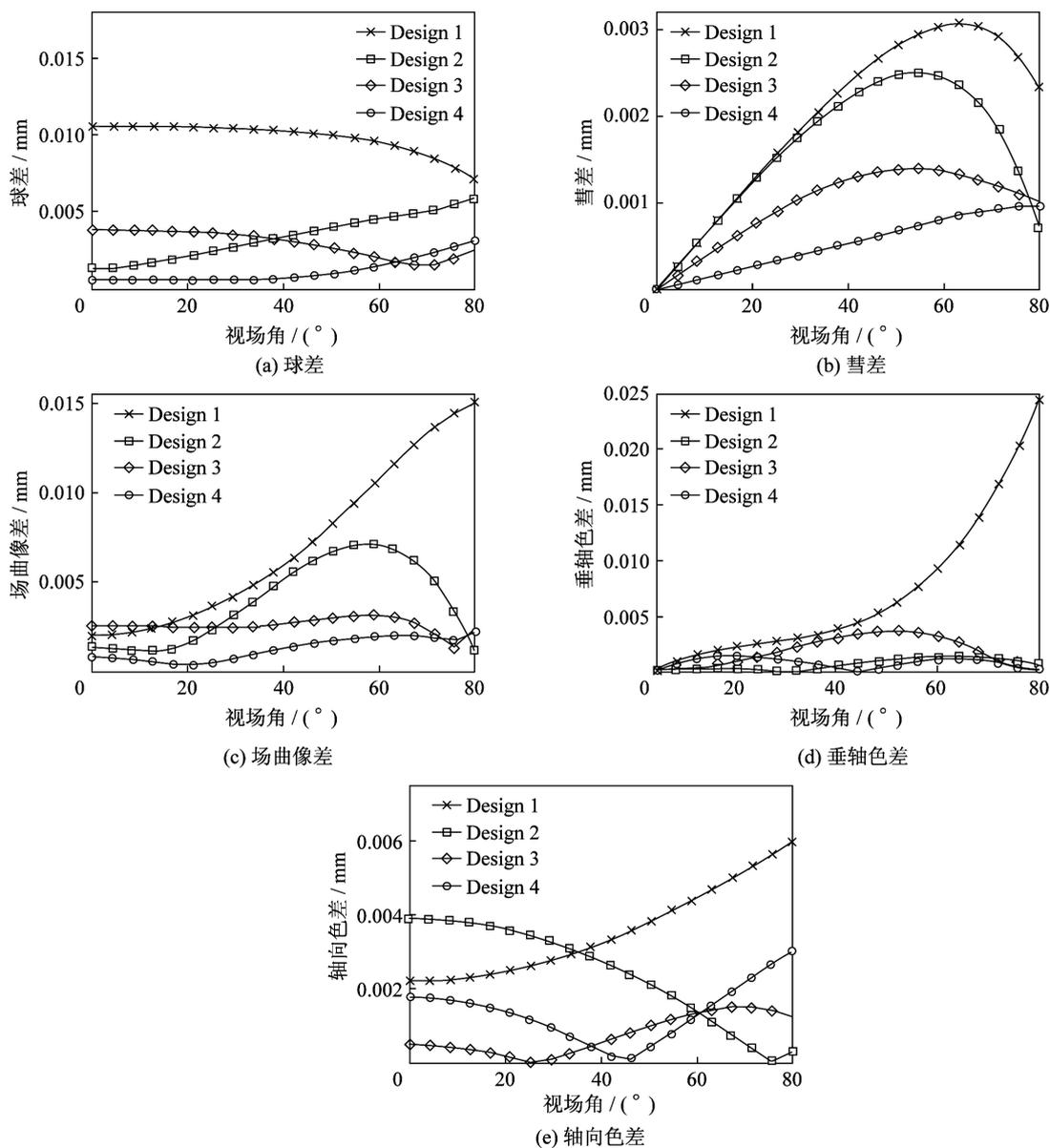


图 6 四种设计的各单项像差随视场角函数曲线

Fig. 6 Different kinds of aberration curves as a function of field angle for four design options

3 结论

在光学系统中应用非球面可以改进光学成像质量,但如何有效地应用非球面控制系统的像差仍然是个有待研究的问题,毕竟非球面的运用会增加制造成本。本文针对鱼镜头的结构特点,设计非球面前组光学透镜来有效控制光学系统的像差,并应用平面对称光学系统的像差理论来优化鱼镜头系统的像

(下转第 430 页)

4 结 论

通过上述实验表明,基于光学传输矩阵利用 MATLAB 软件对电动二维转镜的读数进行修正,此方法在不改变转台结构的情况下,在俯仰及方位方向上的测量精度均达到 4",符合轻武器红外瞄具瞄准基线变化量测量系统对二维转镜 5"的精度要求,并对以后的研究及应用提供参考。

参考文献:

[1] 张西龙,孙宝玉,孙建伟,等.高精度二维转台指向误差分析[J].长春工业大学学报(自然科学版),2012,33(4):377-382.

[2] 郁道银,谈恒英.工程光学[M].2版.北京:机械工业出版社,2006.

[3] 肖伟,梁久祯,陈玮琪.基于四元数的 3D 物体旋转及运动插值[J].系统仿真学报,2012,24(3):624-627.

[4] 金华,戴金海.坐标变换方法及在卷弧翼弹道仿真中的应用[J].计算机仿真,2007,24(7):43-46.

[5] 王劲松,安志勇,李海兰.反射式平行光管的红外瞄具零位走动量测量方法研究[J].兵工学报,2010,31(11):1421-1425.

[6] 王涛,王劲松,徐翔宇,等.基于欧拉角分析法的电动二维转镜读数修正[J].长春理工大学学报(自然科学版),2014,37(6):134-137.

[7] 白素平,王春艳,庞春颖.基于坐标变换的动态光学成像性质研究[J].光子学报,2001,20(7):846-850.

(编辑:程爱婕)

=====

(上接第 413 页)

差。这个思路在目前研究鱼镜头的文献报道及专利中都没有得到体现。数值分析结果证实了我们的优化方法是有效的。

参考文献:

[1] 王永仲.鱼镜头光学[M].北京:科学出版社,2006:222-238.

[2] MOORE L B,HVISC A M,SASIAN J. Aberration fields of a combination of plane symmetric systems[J]. Optics Express,2008,16(20):15655-15670.

[3] LU L J. Aberration theory of plane-symmetric grating systems[J]. Journal of Synchrotron Radiation,2008,15(4):399-410.

[4] LU L J,DENG Z Y. Geometric characteristics of aberrations of plane-symmetric optical systems[J]. Applied Optics,2009,48(36):6946-6960.

[5] LU L J,HU X Y,SHENG C Y. Optimization method for ultra-wide angle and panoramic optical systems [J]. Applied Optics,2012,51(17):3776-3786.

[6] 常欢,吕丽军,刘鑫,等.混入逃逸函数的遗传算法优化超大视场光学系统[J].光学仪器,2013,35(4):27-33.

[7] 王泽民,吕丽军.混入逃逸函数的实数编码遗传算法优化光学系统[J].光子学报,2014,43(6):0622001.

[8] MULLER R. Fish eye lens system;USA,4525038[P]. 1985-06-25.

(编辑:程爱婕)