

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2024.01.006

基于六阶波像差理论的非球面大孔径 折反射成像系统像差优化方法

曹一青^{1*}, 沈志娟¹, 吕丽军²

(1 莆田学院机电与信息工程学院, 福建 莆田 351100;

2 上海大学精密机械工程系, 上海 200072)

摘要: 大孔径折反射成像系统被广泛应用于机器人导航和安全监控等领域。首先分析了超大视场光学系统六阶波像差理论应用于非球面光学系统的像差计算方法, 随后基于该六阶波像差理论, 构建了非球面大孔径折反射成像系统像差优化评价目标函数, 并给出了求解这种包含多个光学参量的目标函数的优化算法, 得到优化后的系统结构参数。最后, 应用所提方法设计了一款工作波段为400~700 nm、最大视场角为120°、 F 数为2.6且成像质量较好的光学系统。设计案例的结果表明所提出方法是有效的, 为非球面大孔径折反射成像系统像差优化提供了一种有效手段。

关键词: 几何光学; 像差优化; 非球面; 大孔径; 平面对称

中图分类号: O435

文献标识码: A

文章编号: 1007-5461(2024)01-00067-11

Aberration optimization method for aspherical catadioptric imaging system with large acceptance aperture based on sixth-order wave aberration theory

CAO Yiqing^{1*}, SHEN Zhijuan¹, LYU Lijun²

(1 School of Mechanical, Electrical & Information Engineering, Putian University, Putian 351100, China;

2 Department of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Catadioptric imaging systems with large acceptance aperture are widely used in robot navigation and safety monitoring fields and so on. The sixth-order wave aberration theory of ultrawide-angle optical system applied to the aberration calculation method for aspherical optical system is analyzed firstly. Then, based on the sixth-order wave aberration theory, the aberration optimization evaluation objective function for aspherical catadioptric imaging system with large acceptance aperture is established, an optimization algorithm for solving the function consisting of multiple optical parameters is given, and the optimized structure parameters of the optical system are obtained. Finally, an optical system with wavelength ranging from 400 nm to 700 nm, maximum field of view angle of 120°, F number

基金项目: 国家自然科学基金(62205168), 福建省自然科学基金(2020J01916), 莆田市科技计划项目(2020GP004)

作者简介: 曹一青(1987-), 江西九江人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事光学成像系统及光学检测方法等方面的研究。

E-mail: caoyiqing1987@163.com

收稿日期: 2022-07-20; 修改日期: 2022-08-29

*通信作者。

of 2.6 and good imaging performance is designed using the proposed method. Results of the design case show that the proposed method is effective, which can provide an effective means for aberration optimization of catadioptric imaging systems with large acceptance aperture.

Key words: geometric optics; aberration optimization; aspheric surface; large acceptance aperture; plane symmetry

0 引言

鱼镜头系统具有常规光学系统不能达到的大视场角范围成像,广泛应用于机器人导航及场景监测等领域^[1-3],此类系统像差往往比较严重,尤其是大孔径成像情况,因此它需要一块或多块负弯月型透镜和一组折射透镜来压缩视场角和校正像差。然而,折反射成像系统仅由一块反射镜和一组折射透镜组成,大大降低了系统结构的复杂性,使其在多个领域中应用得更加普遍^[4]。虽然大视场角折反射成像系统的光学元件是轴对称布置的,但光线以较大的入射角打在光学元件表面上,导致该类光学系统与近轴光学系统成像特性不一致,具有平面对称光学系统成像性能,因此赛德尔像差理论不能指导此类系统的设计^[5]。

对于具有大视场物点的折反射成像系统, Hu 等^[6]应用波像差方法研究了平面对称光学系统三阶像差理论,并将其应用于此类系统的设计中。但是对于大孔径成像情况,高阶像差影响较大,如果仍然应用该像差理论分析其成像情况,将会产生严重误差。因此, Lu 等^[7]应用波像差方法,用超环面作为参考波阵面,发展了超大视场光学系统六阶波像差理论来解决该问题; Cao^[8]基于该波像差理论构建了折反射成像光学系统的波像差平衡方程,并对其进行求解,得到合适的初始结构参数,文献 [8] 主要研究此类系统初始结构参数的确定方法,但是系统像差的进一步校正及平衡仍然采用光学设计软件 ZEMAX 来完成。

目前,对于大孔径折反射成像光学系统像差的优化往往依赖于 ZEMAX 软件,需要设计人员凭借自身几何光学知识及经验对系统像差进行不断校正,得到的设计结果具有一定的随机性和不确定性。针对上述问题,本文基于超大视场光学系统六阶波像差理论给出了大孔径折反射成像系统像差优化过程中需要的解析分析表达式,为此类系统的设计提供了一种强有力的手段。首先,应用该六阶波像差理论构建折反射成像系统的像差优化目标函数,应用改进遗传优化算法对其进行求解,同时在求解过程中引入非球面来校正系统像差,得到一种折反射成像系统设计案例,验证了本文讨论的像差优化方法具有一定的实际应用价值。

1 适用于非球面光学系统的六阶波像差理论

折反射成像系统在大视场角情况下具有平面对称光学系统的成像特性,因此本研究应用超大视场光学系统六阶波像差理论分析此类系统的像差。首先,需要定义平面对称光学元件的面形,光学面形六阶情况表达式为^[7]

$$z = c_{2,0}x^2 + c_{0,2}y^2 + c_{3,0}x^3 + c_{1,2}xy^2 + c_{4,0}x^4 + c_{2,2}x^2y^2 + c_{0,4}y^4 + c_{5,0}x^5 + c_{1,4}xy^4 + c_{3,2}x^3y^2 + c_{6,0}x^6 + c_{2,4}x^2y^4 + c_{4,2}x^4y^2 + c_{0,6}y^6, \quad (1)$$

式中 $c_{i,j}$ ($i+j \leq 6$ 且 j 为偶数) 是光学元件的面形系数。

应用超大视场六阶波像差理论分析含非球面光学面的光学系统像差时,需要推导出非球面面型系数表达式。图1为主光线在二次圆锥曲面的传播图,该曲面在 $x'y'z'$ 坐标系下的表达式为

$$x'^2 + y'^2 = a_1 z' + a_2 z'^2, \tag{2}$$

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, (2) 式分别表示扁椭圆面、球面、长椭圆面、抛物面和双曲面。

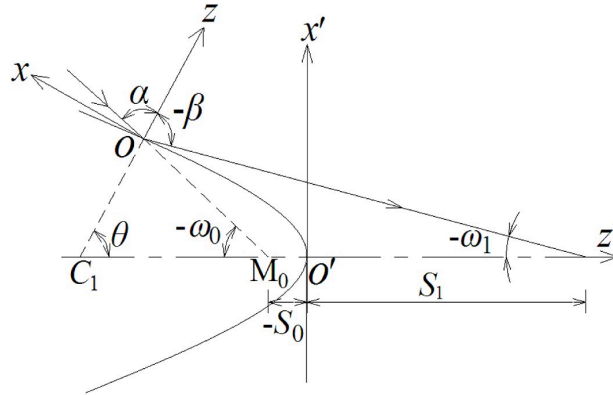


图 1 主光线在二次圆锥曲面的传播图

Fig. 1 Propagation diagram of the chief ray at a quadrics of revolution

在超大视场光学系统六阶波像差理论中, 光学表面的面型方程需要变换到图 1 所示坐标系 xyz 中。根据坐标系之间的几何变换关系, 应用多项式拟合法求解 (1) 式中的面型系数 $c_{i,j}$, 其表达式为^[9]

$$\left\{ \begin{aligned} c_{2,0} &= -\frac{a_1^2}{B^3}, c_{0,2} = -\frac{1}{B} \\ c_{3,0} &= -\frac{4Aa_1^2x_0^*}{B^6}, c_{1,2} = -\frac{4Ax_0^*}{B^4} \\ c_{4,0} &= -\frac{a_1^2(a_1^2C^2 + 16A^2x_0^{*2})}{B^9}, c_{0,4} = -\frac{C^3}{B^5} \\ c_{2,2} &= -\frac{2(a_1^2C^2 + 8A^2x_0^{*2})}{B^7}, c_{5,0} = -\frac{4Aa_1^2x_0^*(3a_1^2C^2 + 16A^2x_0^{*2})}{B^{12}}, \\ c_{1,4} &= -\frac{12AC^2x_0^*}{B^8}, c_{3,2} = -\frac{8Ax_0^*(3a_1^2C^2 + 8A^2x_0^{*2})}{B^{10}} \\ c_{6,0} &= -\frac{2a_1^2[a_1^4C^4 + 16A^2x_0^{*2}(3a_1^2C^2 + 8A^2x_0^{*2})]}{B^{12}}, c_{2,4} = -\frac{6C^2(a_1^2C^2 + 16A^2x_0^{*2})}{B^{11}} \\ c_{4,2} &= -\frac{2[3a_1^4C^4 + 32A^2x_0^{*2}(3a_1^2C^2 + 4A^2x_0^{*2})]}{B^{13}}, c_{0,6} = -\frac{2C^2}{B^9} \end{aligned} \right. \tag{3}$$

式中: $A = (1 + a_2) \sqrt{4a_2x_0^* + a_1^2}$, $B = \sqrt{4x_0^{*2}(1 + a_2) + a_1^2}$, $C = \sqrt{4x_0^{*2} - a_2(4a_2x_0^{*2} + a_1^2)}$; x_0^* 和 z_0^* 为光线与二次圆锥曲面表面的交点 O 在坐标系 $x'y'z'$ 上的坐标, 其表达式为

$$x_0^* = \tan \omega_0 (z_0^* - s_0), z_0^* = -\frac{a_1 + 2s_0 \tan^2 \omega_0 \pm \sqrt{a_1^2 + 4s_0(a_1 + a_2s_0) \tan^2 \omega_0}}{2(a_2 - \tan^2 \omega_0)}, s_0^{(k+1)} = z_{0(k)}^* - d_k - \frac{x_{0(k)}^*}{\tan \omega_{k+1}}, \tag{4}$$

式中: $s_0^{(k+1)}$ 为第 $k+1$ 个光学面的 s_0 , d_k 是第 k 个光学面到第 $k+1$ 个光学面沿光轴的间距。

应用超大视场光学系统六阶波像差表达式计算波像差时, 需要获得相应光学参数。首先, 应用文献 [10] 中 (4)~(6) 式给出的主光线传递方程求解系统各个光学面的入射角 α 和衍射角 β ^[10]; 其次, 应用 $w_{200} = 0$ 和 $w_{020} = 0$ 分别确定各个光学面的子午平面内物方和像方空间的焦距 r_m 、 r'_m , 以及弧矢平面内物方和像方空间

的焦距 r_s 、 r'_s ^[11]。

对于由 g 块光学面组成的光学系统, 系统本征波像差表达式为

$$W = n_g \sum_{ij} \bar{w}_{ij0} x_g^i y_g^j, \quad (5)$$

式中

$$\bar{w}_{ij0} = \sum_{k=1}^{g-1} \frac{n_k}{n_g} w_{ij0(k)} A_{kig}^i B_{kig}^j + w_{ij0(g)}, \quad (6)$$

式中: x_g 、 y_g 为光线在第 g 块光学表面上的孔径坐标; A_{kig} 、 B_{kig} 是光线孔径坐标在光学表面之间应用线性近似得到的传递系数, 可表示为

$$\begin{cases} A_{kig} = \frac{r'_{m(k)} r'_{m(k+1)} \cdots r'_{m(g-1)} \cos \alpha_{k+1} \cos \alpha_{k+2} \cdots \cos \alpha_g}{r_{m(k+1)} r_{m(k+2)} \cdots r_{m(g)} \cos \beta_k \cos \beta_{k+1} \cdots \cos \beta_{g-1}} \\ B_{kig} = (-1)^{g-k} \frac{r'_{s(k)} r'_{s(k+1)} \cdots r'_{s(g-1)}}{r_{s(k+1)} r_{s(k+2)} \cdots r_{s(g)}} \end{cases}, \quad (7)$$

式中: 下标 m 和 s 分别表示子午平面和弧矢平面, k 表示第 k ($k=1, 2, \dots, g$) 个光学面。

对于超大视场光学系统, 在大孔径成像情况下还需要考虑孔径坐标二阶精度传递对波像差修正和衍生波像差的贡献。因此, 该类系统的总波像差系数计算表达式为

$$w_{ij0(T)} = \bar{w}_{ij0} + w_{ij0}^{(s)} + w_{ij0}^{(E)}, \quad (8)$$

式中: $w_{ij0}^{(s)}$ 和 $w_{ij0}^{(E)}$ 分别为孔径光线坐标二阶精度传递对波像差的修正和衍生波像差系数, 对应表达式分别由文献 [7] 中的表 1 和表 2 给出。

2 像差优化方法

对于折反射成像系统, 基于上一节给出的六阶波像差表达式, 可以得到在不考虑离焦情况下, 光线打在像平面上的五阶像差表达式为

$$\begin{cases} \bar{x}' = d'_{200} x^2 + d'_{020} y^2 + d'_{300} x^3 + d'_{120} xy^2 + d'_{400} x^4 + d'_{220} x^2 y^2 + d'_{040} y^4 + d'_{500} x^5 + d'_{320} x^3 y^2 + d'_{140} xy^4 \\ \bar{y}' = h'_{110} xy + h'_{210} x^2 y + h'_{030} y^3 + h'_{310} x^3 y + h'_{130} xy^3 + h'_{410} x^4 y + h'_{230} x^2 y^3 + h'_{050} y^5 \end{cases}, \quad (9)$$

式中: d'_{ij0} 、 h'_{ij0} ($i+j \leq 5$) 为不考虑离焦情况的像差系数, 其由文献 [7] 附录 B 中的 B(1)~B(18) 式给出, 并且表达式中的波像差系数用 (7) 式的计算结果来替换。但是, (8) 式计算得到的是像平面位置处于系统焦平面处的像差。当像平面位置偏离焦平面时, 系统将产生离焦像差, 其计算表达式为

$$\begin{cases} \Delta x' = d''_{100} x \cos \beta + d''_{300} x \cos^3 \beta + d''_{120} xy^2 \cos \beta + d''_{500} x^5 \cos^5 \beta + d''_{320} x^3 y^2 \cos^2 \beta + d''_{140} xy \cos \beta \\ \Delta y' = h''_{010} y + h''_{210} x^2 y \cos^2 \beta + h''_{030} y^3 + h''_{410} x^4 y \cos^4 \beta + h''_{230} x^2 y^3 \cos^2 \beta + h''_{050} y^5 \end{cases}, \quad (10)$$

式中: d''_{ij0} 、 h''_{ij0} ($i+j \leq 5$) 为五阶离焦像差系数, 由文献 [7] 的 (34) 式给出。

综上所述, 光束经过某个折反射成像系统后, 光线打在系统像平面上总的像差表达式为

$$\begin{cases} X' = x' + \Delta x' \\ Y' = y' + \Delta y' \end{cases}. \quad (11)$$

物点光源发出的光线打在折反射成像系统光学面上, 此光源往往采用多色光, 因此需要考虑倍率色差和

轴向色差的贡献。对于一个包含 g 个光学面的系统, 图 2 为主光线经过第 g 个光学面的光路图, ω_g 和 β_g 分别表示主光线打在第 g 个光学面的像方视场角和折射角, r'_0 为第 g 个光学面到像面的距离, R_g 为第 g 个光学面的曲率半径, M_g 为第 g 个光学面出射光线反向延长线与光轴的交点, D_g 为第 g 个光学面与光轴的交点。

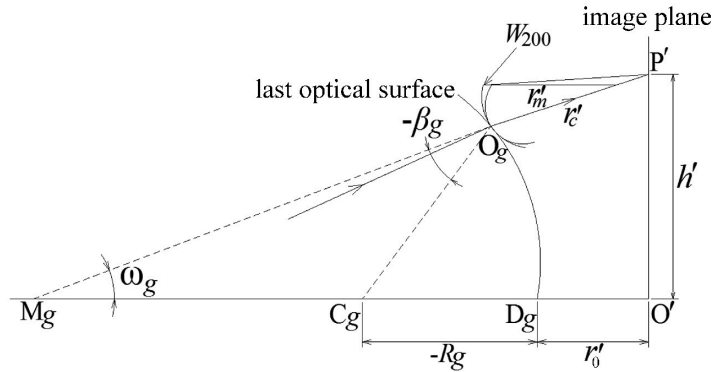


图 2 主光线经过光学系统的第 g 个光学面的光路图

Fig. 2 Optical scheme of the chief ray passing the g th optical surface of optical system

如图 2 所示, 对于某一物点视场角成像情况, 主光线与像平面的交点到光轴的距离为^[5]

$$h' = \tan \omega_g \left(\frac{R_g \sin \beta_g}{\sin \omega_g} - R_g + r'_0 \right), \quad (12)$$

式中 ω_g 、 β_g 可由文献 [10] 中的 (4)~(6) 式计算得出。根据 (12) 式计算系统 F 光 (蓝光) 与 C 光 (红光) 之间的倍率色差, 可表示为

$$Q_{c(i)} = |h'_F - r'_C|. \quad (13)$$

对 F 光、C 光和 D 光 (黄光), 轴向色差 $Q_{n(i)}$ 的表达式为^[12]

$$Q_{n(i)} = \frac{|r'_{mf(i)} - r'_{mc(i)}| \tan \theta_{d(i)}}{\sqrt{2} \cos \omega_{n(i)}}, \quad (14)$$

$$\theta_{d(i)} = \frac{1}{2} \frac{P \cos \omega_{t-1}}{d_g - r_{m(t)}} \frac{r_{m(t)} r_{m(t+1)} \cdots r_{m(g)}}{r'_{m(t)} r'_{m(t+1)} \cdots r'_{m(g)}} \frac{\cos \beta_{(t)} \cos \beta_{(t+1)} \cdots \cos \beta_{(g)}}{\cos \alpha_{(t)} \cos \alpha_{(t+1)} \cdots \cos \alpha_{(g)}}, \quad (15)$$

式中: i 表示第 i 个视场角, $\theta_{d(i)}$ 是 D 光的光束半孔径角, P 是孔径光阑的直径, 孔径光阑后的第一个光学面是光学系统的第 t 个光学面, d_g 是孔径光阑到第 t 个光学面沿主光线的距离, ω_{t-1} 是打在第 t 个光学面的主光线与光轴的夹角, $r'_{mf(i)}$ 、 $r'_{mc(i)}$ 分别表示 F 光、C 光在最后一个光学面的像距, $\omega_{n(i)}$ 表示光学系统的像方视场角。

在折反射成像系统的视场角范围内选取 k 个视场角的物点, 分别用 (11)、(13) 和 (14) 式计算各个视场角的单色像差和色差, 然后将它们加权求和来反映系统成像情况, 则该类光学系统的像质评价函数为

$$Q = \sum_{i=1}^k \left(\sqrt{\eta_{1(i)} X'^2_i + \eta_{2(i)} Y'^2_i} + \sqrt{\eta_{3(i)} Q_{c(i)}^2 + \eta_{4(i)} Q_{n(i)}^2} \right), \quad (16)$$

式中 $\eta_{1(i)}$ 、 $\eta_{2(i)}$ 、 $\eta_{3(i)}$ 和 $\eta_{4(i)}$ 分别为第 i 个视场角的系统子午方向和弧矢方向上的单色像差、倍率色差和轴向色差的权重因子, 可以根据像差优化的实际需要对其进行调整。

在折反射成像系统的整个光瞳坐标范围内选取具有代表性的三组光瞳坐标 ($x_{1(i)}=0$ 、 $y_{1(i)}=y_{(i)\max}$ 、 $x_{2(i)}=0.707x_{(i)\max}$ 、 $y_{2(i)}=0.707y_{(i)\max}$ 、 $x_3=x_{(i)\max}$ 、 $y_3=0$) 作为像差计算坐标, (16) 式中的 X'_i 和 Y'_i 是通过将上述三组光瞳坐标代入 (11) 式计算得到的三组单色像差并对它们进行线性加权平均得到的值。由 (16) 式可知, 光学系统总评价函数 Q 是对光学系统成像质量的综合评判, 它是关于光学系统中光学面曲率半径、光学面间隔、光学元件折射率等光学元件参量的多项式函数, 很难通过解析方法直接对评价函数进行求解, 所以 Q 的求解转化为一个多目标优化求解的问题。鉴于该问题, 应用自适应变异概率的遗传算法求解 Q , 得到目标函数值尽可能小情况下的系统结构参数^[14, 15]。

应用六阶波像差理论的大孔径折反射成像系统的像差优化流程图如图 3 所示。

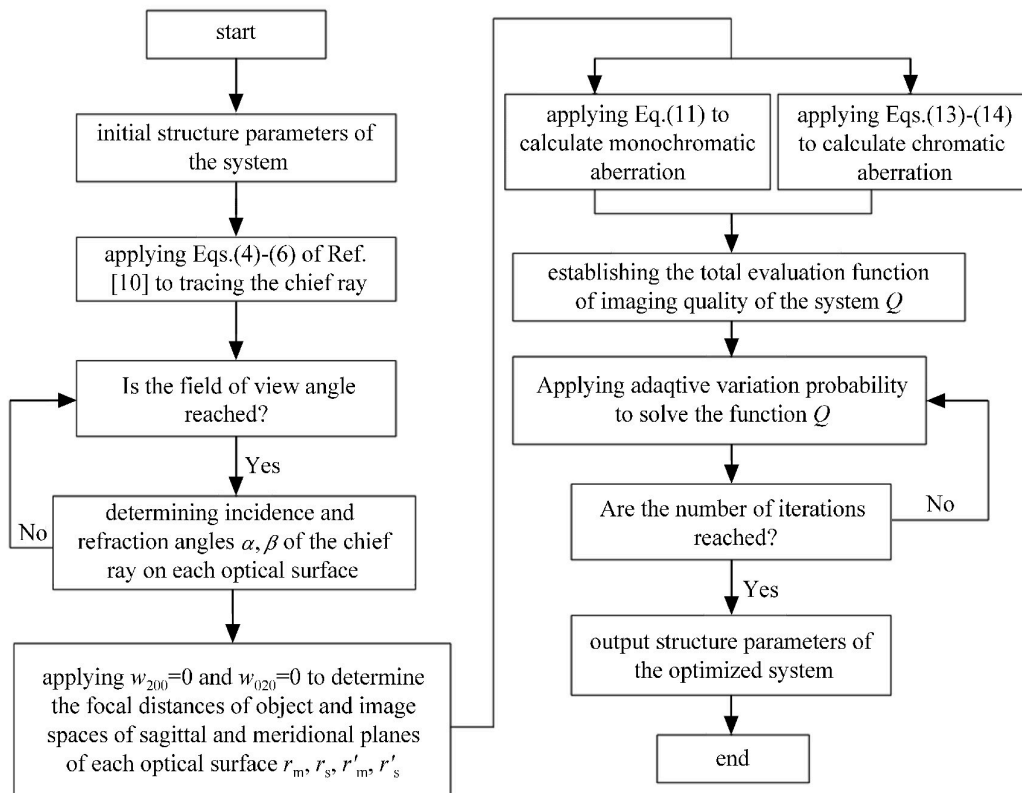


图3 大孔径折反射成像系统像差优化流程图

Fig. 3 Flow chart for aberration optimization of catadioptric imaging system with large acceptance aperture

3 设计实例

基于上一节讨论的折反射成像光学系统像差优化方法, 在 Matlab 平台上编写了相应的优化程序对此类系统进行设计。图 4 为一个折反射成像系统的初始结构及光路图, 该系统的 F 数为 2.6, 可接收最大视场角为 120° , 其余光学结构参数由表 1 给出。应用光学设计软件 ZEMAX 对该光学系统初始结构进行成像分析, 其对应的调制传递函数 (MTF) 和点列图分别如图 5、6 所示。

应用上一节讨论的优化系统像差方法, 为了能够增大搜索范围、得到成像性能更好的成像系统, 确定在改进的遗传算法优化过程中将大孔径折反射成像系统的各个光学面曲率半径及光学面之间间隔的上下搜索范围设定为表 1 给出的系统初始结构参数的 $\pm 80\%$ 。

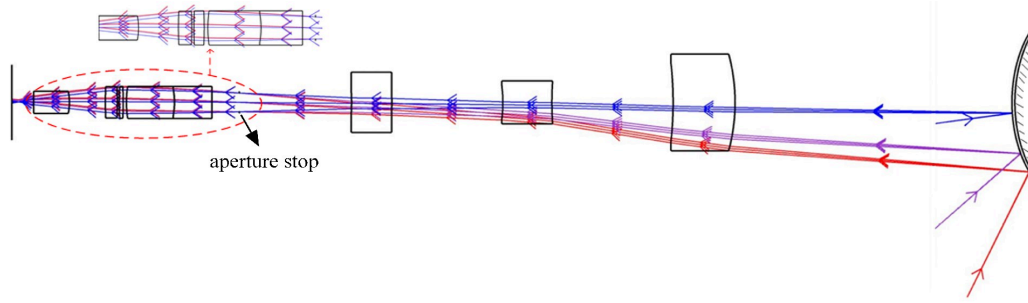


图4 大孔径折反射成像系统初始结构及光路图

Fig. 4 Initial structure and optical scheme of catadioptric imaging system with large acceptance aperture

表1 大孔径折反射成像系统初始结构参数

Table 1 Initial structure parameters of catadioptric imaging system with large acceptance aperture

Optical surface	Radius/mm	Spacing/mm	Material
1	22.35	-35.25	MIRROR
2	-25.66	-7.89	N-PSK53A
3	-50.23	-15.43	
4	45.25	-6.24	N-PSK53A
5	-18.56	-14.14	
6	-75.62	-5.12	N-PSK53A
7	-22.78	-14.29	
Aperture stop	Infinite	-1.50	
8	800.23	-4.76	BK7
9	-10.42	-6.11	PSK52
10	14.39	-0.41	
11	-50.21	-1.20	PSK54
12	40.29	-0.25	
13	-65.26	-1.52	PSK54
14	48.96	-4.58	
15	-7.89	-4.56	PSK54
16	18.75	-2.78	
Image plane	Infinite		

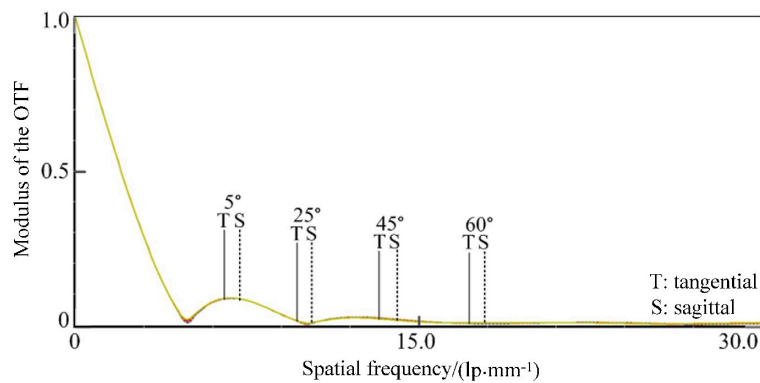


图5 初始结构情况下的大孔径折反射成像系统MTF曲线

Fig. 5 MTF curves of catadioptric imaging system with large acceptance aperture in the case of initial structure

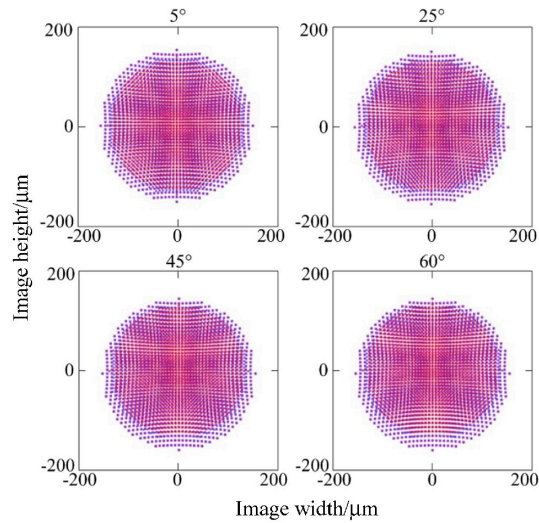


图6 初始结构情况下的大孔径折反射成像系统在视场角 5° 、 25° 、 45° 和 60° 的点列图

Fig. 6 Spot diagram with field angles at 5° , 25° , 45° and 60° of catadioptric imaging system with large acceptance aperture in the case of initial structure

考虑到折反射成像系统成像性能通过选取的多个视场角物点计算得到的像差加权求和来进行综合评价,因此,在视场角范围内选择 5° 、 25° 、 45° 和 60° 四个视场角来对该类系统像差进行优化,并将(16)式中的所有权重因子 $\eta_{1(i)}$ 、 $\eta_{2(i)}$ 、 $\eta_{3(i)}$ 和 $\eta_{4(i)}$ 均设置为1。同时,为了减小不同视场角的物点经过光学系统成像后的最佳聚焦位置不一致对系统成像的影响,将系统反射镜和最后的光学面设定为符合(2)式的非球面面型方程,其对应的面型系数 a_2 搜索范围设定为 $[-100, 100]$ 。然后,采用自适应变异概率的遗传算法求解(17)式给出的系统像质评价函数,对其进行40次优化并分析得到的结果,最终确定优化后折反射成像系统的光学结构参数,如表2所示,反射镜和光学系统最后光学面面型系数 a_2 分别为1.88和-65.25。

表2 大孔径折反射成像系统应用所提出像差优化方法得到的光学结构参数

Table 2 Optical structure parameters of catadioptric imaging system with large acceptance aperture obtained using proposed aberration optimization method

Optical surface	Radius/mm	Spacing/mm	Material
1	16.84	-50.12	MIRROR
2	-20.45	-6.79	N-PSK53A
3	-66.24	-9.96	
4	34.54	-8.21	N-PSK53A
5	-10.01	-10.56	
6	-53.61	-6.78	N-PSK53A
7	-15.60	-10.81	
Aperture stop	Infinite	-1.20	
8	570.10	-3.26	BK7
9	-14.40	-4.56	PSK52
10	18.37	-0.51	
11	-65.60	-1.50	PSK54
12	43.55	-0.37	
13	-75.39	-2.03	PSK54

Continued

Optical surface	Radius/mm	Spacing/mm	Material
14	43.40	-3.79	PSK54
15	-10.16	-3.49	
16	17.65	-4.92	
Image plane	Infinite		

对优化后得到的大孔径折反射成像系统的像质进行分析, 该系统MTF曲线图和点列图分别如图7和图8所示。对比图6和图8, 系统初始结构及优化后得到的点列图均方根 (RMS) 半径值分别由表3和表4给出, 图8的点列图RMS半径值明显小于图6, 表明优化后的系统成像性能得到了明显提升;同时, 系统选取的半视场角范围5°、25°、45°和60°在空间频率30 lp/mm处对应的MTF值均大于0.47。从上述结果可以看出, 通过所提出大孔径折反射成像系统像差优化方法对该类系统进行设计, 可使其像差得到较好的校正, 优化后系统成像性能明显高于初始结构, 该结果表明该像差优化方法是有效的。

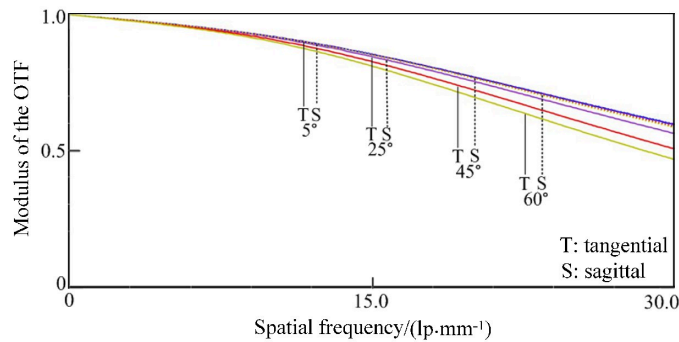


图7 应用所提出像差优化方法得到的大孔径折反射成像系统MTF曲线

Fig. 7 MTF curves of catadioptric imaging system with large acceptance aperture obtained using proposed aberration optimization method

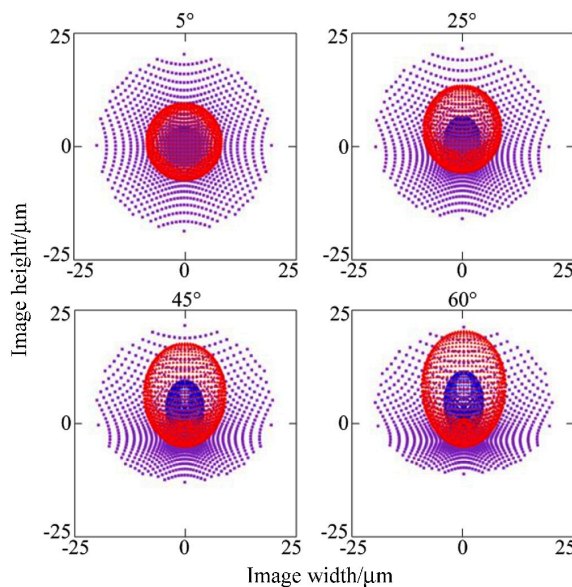


图8 应用所提出像差优化方法得到的大孔径折反射成像系统在视场角5°、25°、45°和60°的点列图

Fig. 8 Spot diagram with field angles at 5°, 25°, 45° and 60° of catadioptric imaging system with large acceptance aperture obtained using proposed optimization method

表3 图6中点列图的RMS

Table 3 RMS of the spot diagram given in Fig. 6

Parameter	Value			
	5	25	45	60
Field angle/(°)	5	25	45	60
RMS/ μm	112.42	112.55	112.81	113.06

表4 图8中点列图的RMS

Table 4 RMS of the spot diagram given in Fig. 8

Parameter	Value			
	5	25	45	60
Field angle/(°)	5	25	45	60
RMS/ μm	7.86	8.06	8.46	8.81

4 结 论

基于超大视场光学系统六阶波像差理论, 构建了以像差为条件的非球面大孔径折反射成像系统成像性能评价多目标函数, 引入了一种改进的遗传优化算法对其进行求解, 给出一种此类光学系统的像差优化方法, 并应用该方法对一种大孔径折反射成像系统的像差进行优化, 从而得到优化后的系统结构参数。对该系统进行的成像性能分析表明其像差得到了较好的校正, 成像质量较好, 说明该方法为此类光学系统设计提供了一种有效的手段, 具有一定的实际应用价值。

参考文献:

- [1] Kim H, Jung J, Paik J. Fisheye lens camera based surveillance system for wide field of view monitoring [J]. *Optik*, 2016, 127(14): 5636-5646.
- [2] Song J Y, Chi Z X, Zhang X P, *et al.* Tree height measurement method based on fisheye lens [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(13): 5424-5431.
宋佳音, 池志祥, 张晓鹏, 等. 基于鱼镜头的树高测量方法 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(13): 5424-5431.
- [3] Li Z T, Feng Y T, Han B, *et al.* Design of optical system for multi-band all-sky airglow imager [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(5): 0522003.
李战涛, 冯玉涛, 韩斌, 等. 多波段全天空气辉成像仪光学系统设计 [J]. 光子学报, 2019, 48(5): 0522003.
- [4] Lim T Y, Park S C. Design of a catadioptric system with corrected color aberration and flat petzval curvature using a graphically symmetric method [J]. *Current Optics and Photonics*, 2018, 2(4): 324-331.
- [5] Tian L, Lu L J, Cao Y Q. Calculation of modulation transfer function of fisheye lens with the wavefront aberration theory [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(3): 0322001.
田林, 吕丽军, 曹一青. 应用波像差理论计算鱼镜头调制传递函数 [J]. 光子学报, 2016, 45(3): 0322001.
- [6] Hu X Y, Lv L J. Optimization of catadioptric omnidirectional imaging system based on aberration theory of plane-symmetric optical system [J]. *Optical Instruments*, 2012, 34(1): 45-49.
胡肖彦, 吕丽军. 基于平面对称光学系统像差理论的折反射全景成像系统优化设计 [J]. 光学仪器, 2012, 34(1): 45-49.
- [7] Lu L J, Cao Y Q. Sixth-order wave aberration theory of ultrawide-angle optical systems [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(30): 8570-8583.

- [8] Cao Y Q. Design of catadioptric panoramic optical imaging system with ultra-large field of view [J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(4): 608-613.
曹一青. 超大视场折反射全景光学成像系统设计 [J]. 应用光学, 2021, 42(4): 608-613.
- [9] Zhang X, Lyu L J. Aspheric optimization design of fisheye lens optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(5): 863-870.
张潇, 吕丽军. 鱼眼镜头光学系统的非球面优化设计 [J]. 应用光学, 2019, 40(5): 863-870.
- [10] Cao Y Q, Lü L J, Deng Z Y. Calculation of field-dependent aberrations of fisheye lens with the transfer equations of field ray [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(11): 1122002.
曹一青, 吕丽军, 邓智勇. 应用场光线传递方程计算鱼眼镜头像场像差 [J]. 光子学报, 2016, 45(11): 1122002.
- [11] Cao Y Q, Lü L J. Aberrations of soft X-ray and vacuum ultraviolet optical systems with orthogonal arrangement of elements [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2017, 34(3): 299-307.
- [12] Niu Z Q, Lü L J. Optimization method of optical systems of fisheye lens [J]. *Optical Instruments*, 2015, 37(5): 407-413.
牛智全, 吕丽军. 鱼眼镜头光学系统的优化方法 [J]. 光学仪器, 2015, 37(5): 407-413.
- [13] Born M, Wolf E. *Principle of Optics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 55-80.
- [14] Cao Y Q. Design method of soft X-ray and vacuum ultraviolet optical system based on plane-symmetric aberration theory [J]. *Optical Review*, 2022, 29: 207-214.
- [15] Li Z J, Yuan Y L, Li J J, *et al.* Design method of standard light sources based on genetic algorithm [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2019, 36(2): 143-150.
李正军, 袁银麟, 李健军, 等. 基于遗传算法的标准光源设计方法 [J]. 量子电子学报, 2019, 36(2): 143-150.