

基于矢量像差理论的离轴反射光学系统初始结构设计

操超 廖志远 白瑜 范真节 廖胜

Initial configuration design of off-axis reflective optical system based on vector aberration theory

Cao Chao Liao Zhi-Yuan Bai Yu Fan Zhen-Jie Liao Sheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 134201 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190299

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190299>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

新型离轴反射变焦距光学系统的多视场检测方法

Novel multiple field of view detection method for the off-axis reflection zoom optical system

物理学报. 2016, 65(8): 084208 <https://doi.org/10.7498/aps.65.084208>

离轴椭圆矢量光场传输中的光斑演变

Propagation evolution of the off-axis ellipse vector beam

物理学报. 2015, 64(2): 024204 <https://doi.org/10.7498/aps.64.024204>

一种基于全息术的光学系统闭环像差补偿方法

A closed-loop aberration compensating method of optics system based on holography

物理学报. 2015, 64(2): 024206 <https://doi.org/10.7498/aps.64.024206>

偏振双向衰减对光学成像系统像质影响的矢量平面波谱理论分析

Analysis of the influence of diattenuation on optical imaging system by using the theory of vector plane wave spectrum

物理学报. 2017, 66(8): 084202 <https://doi.org/10.7498/aps.66.084202>

光学薄膜诱导偏振像差对大数值孔径光学系统聚焦特性的影响

Effect of coating-induced polarization aberrations on the focusing properties in high numerical aperture optical system

物理学报. 2015, 64(15): 154214 <https://doi.org/10.7498/aps.64.154214>

基于人工表面等离激元的双通带频率选择结构设计

Design of dual-band-pass frequency selective structure based on spoof surface plasmon polariton

物理学报. 2018, 67(20): 204101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180696>

基于矢量像差理论的离轴反射 光学系统初始结构设计*

操超¹⁾²⁾ 廖志远^{1)†} 白瑜¹⁾ 范真节¹⁾ 廖胜¹⁾

1) (中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2019年3月5日收到; 2019年4月11日收到修改稿)

传统的离轴反射光学系统初始结构设计方法是先求取轴对称反射光学系统结构, 然后通过光瞳离轴、视场离轴或二者结合的方法实现无遮拦设计. 由于同轴光学系统像差分布规律不适用于离轴光学系统, 因此离轴后的反射光学系统结构像差较大, 而且系统无遮拦设计过程复杂. 本文提出了一种基于矢量像差理论的离轴反射光学系统初始结构设计方法, 可以直接获取光瞳离轴、视场离轴或二者结合无遮拦离轴反射光学系统初始结构. 该方法可以获得较好的离轴反射光学系统初始结构供光学设计软件进一步优化. 针对面阵探测器, 设计了一个长波红外离轴三反光学系统, 通过光瞳离轴和视场离轴实现无遮拦设计, 光学系统成像质量好, 反射镜不存在倾斜和偏心, 光学系统易于装调.

关键词: 几何光学, 离轴反射系统, 矢量像差理论, 光学设计**PACS:** 42.15.-i, 42.15.Dp, 42.15.Eq, 42.15.Fr**DOI:** 10.7498/aps.68.20190299

1 引言

反射光学系统具有无色差、重量轻、热稳定性好和大口径等优点, 而且相对于同轴反射系统, 离轴反射系统不存在中心遮拦, 能量利用率高, 因此离轴反射光学系统被广泛应用于空间光学系统中^[1-3]. 离轴反射光学系统由于非旋转对称, 像差分布形式比较复杂, 另外还需要避免光线发生遮挡, 因此离轴反射光学系统设计是光学设计领域的难点. 通过轴对称光学系统的赛德尔像差理论求解同轴反射光学系统结构再进行离轴设计是比较常用的离轴反射光学系统设计方法^[4-6]; 另外, 文献^[7,8]提出根据等光程原理和正弦条件求取同轴

反射光学系统结构, 该方法可以直接获得非球面同轴反射光学系统结构, 之后再行离轴设计; 夏春秋等^[9]提出了一种基于微分方程的离轴光学系统设计方法, 该方法也是先求取同轴反射光学系统结构再进行离轴设计. 传统的离轴反射光学系统初始结构设计主要是先求取轴对称反射光学系统结构, 然后通过光瞳离轴、视场离轴或二者结合的方法实现无遮拦设计. 由于同轴光学系统像差分布规律不适用于离轴光学系统, 因此离轴后得到的反射光学系统结构像差较大, 与最终优化结果偏差较大, 而且光学系统无遮拦设计过程复杂.

矢量像差理论由 Thompson 等提出并不断完善, 可以用来描述非旋转对称光学系统的像差特性^[10,11]. 近年来, 矢量像差理论得到很大发展, 被

* 国家自然科学基金(批准号: 61501429)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liaozhiyuan1@163.com

用于分析非旋转对称光学系统像差特性和面型误差对光学系统性能的影响^[12,13], 另外矢量像差理论还被用于指导光学系统装调、设计和优化^[14,15]等.

本文提出了一种基于矢量像差理论的离轴反射光学系统初始结构设计方法, 可以直接获得光瞳离轴、视场离轴或二者结合的无遮拦离轴反射光学系统初始结构. 基于矢量像差理论和高斯括号法, 推导了光阑位于任意位置处的离轴反射光学系统的初级矢量波像差表达式. 针对目前主流的光学设计软件均采用阻尼最小二乘法作为优化算法, 该算法是一种局部优化算法, 容易陷于局部最优解, 因此选择一个好的初始结构是光学设计非常重要的一步. 本文通过遗传算法求取离轴反射光学系统的初始结构. 遗传算法是一种全局优化算法, 可以获得全局最优解. 针对面阵探测器, 设计了一个长波红外离轴三反光学系统, 通过光瞳离轴和视场离轴实现无遮拦设计, 系统成像质量好, 反射镜不存在倾斜和偏心, 光学系统易于装调.

2 设计原理

2.1 离轴反射光学系统像差分析

光瞳离轴、视场离轴或二者结合的方法是实现无遮拦设计的主要方式. 对于视场离轴的光学系统, 只是在分析时取轴对称系统的轴外视场部分, 因此视场离轴光学系统像差表现形式与轴对称光学系统一致; 对于光瞳离轴的光学系统, 由于光瞳存在偏移, 像差表现形式变得十分复杂, 光瞳离轴光学系统可以看作是轴对称系统的光瞳截取轴外一部分形成的子光学系统, 如图 1 所示.

光瞳离轴反射系统孔径及其对应轴对称系统孔径的关系如 (1) 式所示^[16], ρ' 为轴对称反射系统孔径归一化矢量, ρ 为离轴反射系统孔径归一化矢

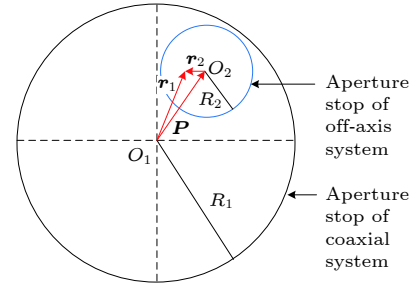


图 1 光瞳离轴光学系统示意图

Fig. 1. Schematic of optical system with an offset aperture stop.

量, P_1 为孔径偏移归一化矢量, B 为离轴反射系统与轴对称反射系统的孔径缩放比.

$$\begin{cases} B = R_2/R_1 \\ \rho' = r_1/R_1 \\ \rho = r_2/R_2 \\ P_1 = P/R_1 \\ r_1 = r_2 + P \\ \rho' = B\rho + P_1 \end{cases}, \quad (1)$$

其中 R_1 为轴对称反射系统的孔径半径, R_2 为离轴反射系统的孔径半径, P 为光瞳偏移矢量.

轴对称反射光学系统的初级矢量波像差为^[17]

$$\begin{aligned} W = & \sum_j W_{040j} (\rho' \cdot \rho')^2 + \sum_j W_{131j} (\mathbf{H} \cdot \rho') \\ & \times (\rho' \cdot \rho') + \frac{1}{2} \sum_j W_{222j} (\mathbf{H}^2 \cdot \rho'^2) \\ & + \sum_j W_{220Mj} (\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}) (\rho' \cdot \rho') \\ & + \sum_j W_{311j} (\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}) (\mathbf{H} \cdot \rho'), \end{aligned} \quad (2)$$

其中 \mathbf{H} 为轴对称反射系统视场归一化矢量, W_j 为不同表面的初级波像差系数.

根据 (1) 和 (2) 式可得离轴反射光学系统的初级矢量波像差为

$$\left\{ \begin{aligned} W = & \sum_j W_{040j} ((B\rho + P_1) \cdot (B\rho + P_1))^2 + \sum_j W_{311j} (\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}) (\mathbf{H} \cdot (B\rho + P_1)) \\ & + \frac{1}{2} \sum_j W_{222j} (\mathbf{H}^2 \cdot (B\rho + P_1)^2) + \sum_j W_{220Mj} (\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}) ((B\rho + P_1) \cdot (B\rho + P_1)) \\ & + \sum_j W_{131j} (\mathbf{H} \cdot (B\rho + P_1)) ((B\rho + P_1) \cdot (B\rho + P_1)), \\ W_{220Mj} = & W_{220j} + \frac{1}{2} W_{222j}. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

将 (3) 式进行展开并忽略其中的常数项, 可得离轴光学系统的初级矢量波像差为

$$\begin{aligned}
 W = & B^4 \sum_j W_{040j} (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho})^2 + B^3 \left(4 \sum_j W_{040j} \mathbf{P}_1 + \sum_j W_{131j} \mathbf{H} \right) \cdot \boldsymbol{\rho} (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) \\
 & + B^2 \left(2 \sum_j W_{040j} \mathbf{P}_1^2 + \sum_j W_{131j} \mathbf{P}_1 \mathbf{H} + \frac{1}{2} \sum_j W_{222j} \mathbf{H}^2 \right) \cdot \boldsymbol{\rho}^2 \\
 & + B^2 \left(4 \sum_j W_{040j} (\mathbf{P}_1 \cdot \mathbf{P}_1) + 2 \sum_j W_{131j} (\mathbf{P}_1 \cdot \mathbf{H}) + \sum_j W_{220Mj} (\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}) \right) (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) \quad (4) \\
 & + B \left(4 \sum_j W_{040j} (\mathbf{P}_1 \cdot \mathbf{P}_1) \mathbf{P}_1 + 2 \sum_j W_{131j} (\mathbf{P}_1 \cdot \mathbf{P}_1) \mathbf{H} + \sum_j W_{131j} \mathbf{P}_1^2 \mathbf{H}^* \right) \cdot \boldsymbol{\rho} \\
 & + B \left(\sum_j W_{222j} \mathbf{H}^2 \mathbf{P}_1^* + 2 \sum_j W_{220Mj} (\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}) \mathbf{P}_1 + \sum_j W_{311j} (\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}) \mathbf{H} \right) \cdot \boldsymbol{\rho},
 \end{aligned}$$

其中 \mathbf{P}_1^2 , \mathbf{H}^2 , $\boldsymbol{\rho}^2$ 表示向量的乘法^[17]; \mathbf{H}^* , \mathbf{P}_1^* 表示向量的共轭。

初级矢量波像差系数不受光学元件倾斜和偏心的影响, 因此可以通过对轴对称光学系统主光线和边缘光线追迹获得初级矢量波像差系数, 本文通过高斯括号法推导光瞳位于任意位置处的离轴反射系统初级矢量波像差系数, 如图 2 所示。

根据高斯括号法原理, 近轴光线从第 i 个光学表面传播到第 j 个光学表面可以用四个高斯常数来描述, 高斯常数如 (5) 式所示^[14]:

$$\begin{cases}
 {}^i A_j = [\Phi_i, -e_i, \Phi_{i+1}, \dots, \Phi_{j-1}, -e_{j-1}], \\
 {}^i B_j = [-e_i, \Phi_{i+1}, -e_{i+1}, \dots, \Phi_{j-1}, -e_{j-1}], \\
 {}^i C_j = [\Phi_i, -e_i, \Phi_{i+1}, -e_{i+1}, \dots, \Phi_{j-1}, -e_{j-1}, \Phi_j], \\
 {}^i D_j = [-e_i, \Phi_{i+1}, -e_{i+1}, \dots, \Phi_{j-1}, -e_{j-1}, \Phi_j],
 \end{cases} \quad (5)$$

其中 $e_i = d_i/n_i$, d_i 为不同光学表面间的距离, n_i 为折射率; Φ_i 表示第 i 个表面的光焦度。

近轴光线从第 i 个光学表面传播到第 j 个光学表面, 光线的入射高度 h_j , h_i 和孔径角 u_i , u_i' , u_j , u_j' 变化关系可以用四个高斯常数来表示, 如 (6) 式所示:

$$\begin{cases}
 \begin{pmatrix} h_j \\ n_j u_j' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^i A_j & {}^i B_j \\ {}^i C_j & {}^i D_j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_i \\ n_{i-1} u_i \end{pmatrix}, \\
 \begin{pmatrix} h_j \\ n_{j-1} u_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^i A_j & {}^i B_j \\ {}^i C_{j-1} & {}^i D_{j-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_i \\ n_{i-1} u_i \end{pmatrix}, \\
 \begin{pmatrix} h_j \\ n_j u_j' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^{i+1} A_j & {}^i B_j \\ {}^{i+1} C_j & {}^i D_j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_i \\ n_i u_i' \end{pmatrix}, \\
 \begin{pmatrix} h_j \\ n_{j-1} u_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^{i+1} A_j & {}^i B_j \\ {}^{i+1} C_{j-1} & {}^i D_{j-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_i \\ n_i u_i' \end{pmatrix}.
 \end{cases} \quad (6)$$

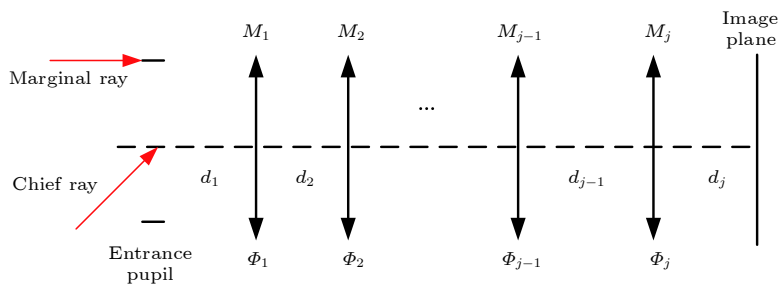


图 2 光线追迹模型
Fig. 2. Rays trace model.

根据 (6) 式可以得到主光线和边缘光线的近轴光线追迹数据, 由初级波像差系数和几何像差系数的关系, 轴对称系统的初级波像差系数如 (7) 式所示:

$$\begin{cases} W_{040j} = \frac{1}{8}S_{Ij} = -\frac{1}{8}A_j^2 h_j \left(\frac{u_j'}{n_j} - \frac{u_j}{n_{j-1}} \right) + \tau, \\ W_{131j} = \frac{1}{2}S_{IIj} = -\frac{1}{2}A_j \overline{A_j} h_j \left(\frac{u_j'}{n_j} - \frac{u_j}{n_{j-1}} \right) + \frac{\overline{h_j}}{h_j} \tau, \\ W_{222j} = \frac{1}{2}S_{IIIj} = -\frac{1}{2}\overline{A_j}^2 h_j \left(\frac{u_j'}{n_j} - \frac{u_j}{n_{j-1}} \right) + \left(\frac{\overline{h_j}}{h_j} \right)^2 \tau, \\ W_{220j} = \frac{1}{4}S_{IVj} = -\frac{1}{4}H_j^2 c_j \left(\frac{1}{n_j} - \frac{1}{n_{j-1}} \right), \\ W_{311j} = \frac{1}{2}S_{Vj} = -\frac{1}{2} \left[\frac{\overline{A_j}}{A_j} H_j^2 c_j \left(\frac{1}{n_j} - \frac{1}{n_{j-1}} \right) + \frac{\overline{A_j}^3}{A_j} h_j \left(\frac{u_j'}{n_j} - \frac{u_j}{n_{j-1}} \right) \right] + \left(\frac{\overline{h_j}}{h_j} \right)^3 \tau, \\ \tau = c_j^3 (n_j - n_{j-1}) k_j h_j^4, \end{cases} \quad (7)$$

其中: $A_j = (u_j' - u_j) / (1/n_j - 1/n_{j-1})$, $\overline{A_j} = (-H_j + \overline{h_j} A_j) / h_j$, H_j 为光学系统拉赫不变量, k_j 为光学表面二次常数, c_j 为光学表面曲率半径.

根据 (4) 式和 (6), (7) 式可以获得光瞳位于任

意位置处的离轴光学系统初级矢量波像差. 初级矢量波像差系数如 (8) 式所示, 其中球差系数 C_1 和场曲系数 C_4 为标量, 彗差系数 C_2 、像散系数 C_3 和畸变系数 C_5 为矢量.

$$\begin{cases} C_1 = B^4 \sum_j W_{040j}, \\ C_2 = B^3 \left(4 \sum_j W_{040j} \mathbf{P}_1 + \sum_j W_{131j} \mathbf{H} \right), \\ C_3 = B^2 \left(2 \sum_j W_{040j} \mathbf{P}_1^2 + \sum_j W_{131j} \mathbf{P}_1 \mathbf{H} + \frac{1}{2} \sum_j W_{222j} \mathbf{H}^2 \right), \\ C_4 = B^2 \left(4 \sum_j W_{040j} (\mathbf{P}_1 \cdot \mathbf{P}_1) + 2 \sum_j W_{131j} (\mathbf{P}_1 \cdot \mathbf{H}) + \sum_j W_{220Mj} (\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}) \right), \\ C_5 = B \left(4 \sum_j W_{040j} (\mathbf{P}_1 \cdot \mathbf{P}_1) \mathbf{P}_1 + 2 \sum_j W_{131j} (\mathbf{P}_1 \cdot \mathbf{P}_1) \mathbf{H} + \sum_j W_{131j} \mathbf{P}_1^2 \mathbf{H}^* \right. \\ \left. + \sum_j W_{222j} \mathbf{H}^2 \mathbf{P}_1^* + 2 \sum_j W_{220Mj} (\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}) \mathbf{P}_1 + \sum_j W_{311j} (\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}) \mathbf{H} \right). \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} G = & \omega_1 \|C_1\|_1 + \omega_2 \|C_2\|_1 + \omega_3 \|C_3\|_1 + \omega_4 \|C_4\|_1 \\ & + \omega_5 \|C_5\|_1 + \omega_6 \|f' - h_1/u_k'\|_1, \end{aligned} \quad (9)$$

2.2 离轴反射光学系统初始结构求取

建立了评价离轴反射系统性能的误差函数, 误差函数由中心视场的初级像差系数和焦距约束条件组成, 也可以根据系统的需求添加其他约束条件, 误差函数如 (9) 式所示:

其中 $\omega_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 为不同项的权重, f 为光学系统焦距, $\| \cdot \|_1$ 表示 1-范数, u_k' 表示边缘光线在第 k 个表面的出射角度.

根据 (4) 式和 (6)—(9) 式, 误差函数可以表示

为光瞳偏移矢量、中心视场偏移矢量和光学系统结构参数的函数,如(10)式所示:

$$\begin{aligned}
 G &= G(B, \mathbf{P}_1, \mathbf{H}, r_j, d_j, k_j) \\
 &= \omega_1 \|C_1\|_1 + \omega_2 \|C_2\|_1 + \omega_3 \|C_3\|_1 \\
 &\quad + \omega_4 \|C_4\|_1 + \omega_5 \|C_5\|_1 \\
 &\quad + \omega_6 \|f' - h_1/u_k'\|_1.
 \end{aligned} \tag{10}$$

误差函数 G 是光学系统性能的综合反映,其值越小表示光学系统的初始结构越好. 由于光学设计软件采用的是一种局部优化算法,容易陷入局部最优解,因此好的初始结构可以获得更优的设计结果. 本文通过遗传算法^[18]求解误差函数 G 的全局

最优解,遗传算法是一种高度并行、随机和自适应的全局优化算法,已在光学系统设计中得到广泛应用^[19,20]. 遗传算法优化误差函数的设计流程如图3所示:首先进行编码和随机产生初始种群;然后计算误差函数值,函数值可以用来评价个体的优劣,个体的函数值越小被选择的概率越大;再通过选择、交叉和变异等操作产生新一代种群;重复以上操作,直到满足迭代终止条件,解码并输出优化结果. 通过遗传算法可以直接获得无遮拦的离轴反射光学系统初始结构,之后通过光学设计软件对初始结构进行进一步优化.

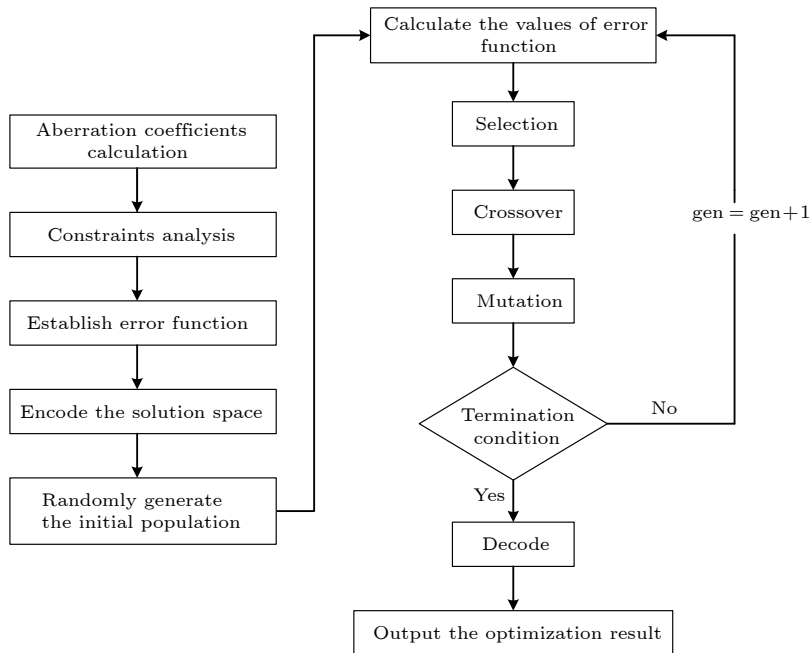


图3 设计流程

Fig. 3. Flow chart of design process.

3 设计实例

3.1 系统参数

根据第二部分提出的离轴反射光学系统初始结构设计方法,针对长波红外面阵探测器,设计了一个无遮拦离轴三反光学系统,光学系统在 x 方向的视场角为 6° ,在 y 方向的视场角为 4° ,光学系统参数如表1所列.

3.2 设计结果

首先建立了光学系统的误差函数 G ,通过光瞳

表1 系统参数

Table 1. System specifications.

Parameter	Specification
Wavelength range/ μm	8 to 12
Focal length/mm	200
F-number	2.5
Field of view	$4^\circ \times 6^\circ$
Pixel size/ μm	30

离轴和视场离轴(光瞳离轴或视场离轴可视为该方式的特例)实现无遮拦设计,光瞳偏移量沿 $+Y$ 方向 80 mm,孔径缩小比 B 为 $1/3$,视场偏移量为 2° ,因此光学系统的误差函数 G 如(11)式所示:

$$\begin{aligned}
 G &= G(B, \mathbf{P}_1, \mathbf{H}, r_j, d_j, k_j) \\
 &= \|C_1\|_1 + \|C_2\|_1 + \|C_3\|_1 + \|C_4\|_1 \\
 &\quad + \|C_5\|_1 + 5\|f' - h_1/u_4'\|_1, \quad (11)
 \end{aligned}$$

其中: $\mathbf{P}_1=(0, 2/3)$, $\mathbf{H}=(0, -0.5)$.

通过遗传算法在结构参数边界范围内求取误差函数的最优解, 设置合适的结构参数范围避免光线发生遮拦, 参数范围和求解结果如表 2 所列, 误差函数的收敛曲线如图 4 所示.

表 2 参数范围和求解结果

Table 2. Parameters ranges and solution of designed system.

Parameter	Range	Solution
d_1/mm	$d_1 = -d_2$	126.4621
d_2/mm	$[-200, -50]$	-126.4621
d_3/mm	$[50, 200]$	144.1817
r_1/mm	$[-500, -50]$	-297.3433
r_2/mm	$[-500, -50]$	-451.5485
r_3/mm	$[-500, -50]$	-131.0513
k_1	$[-5, 5]$	-0.5789
k_2	$[-5, 5]$	4.7595
k_3	$[-5, 5]$	-0.1263

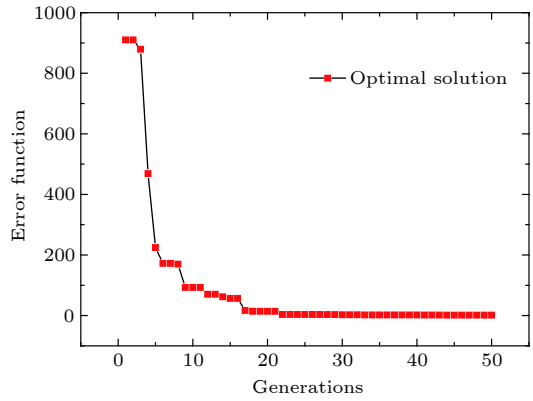


图 4 误差函数收敛曲线

Fig. 4. Convergence curve of the error function.

离轴三反光学系统的初始结构如图 5(a) 所示, 光学系统光线无遮拦, 系统是一个二次成像光学系统, 在中间像面处可以放置视场光阑, 有效地抑制杂散光; 初始结构点列图如图 5(b) 所示, 不同视场点列图均方根 (root mean square, RMS) 直径关于中心视场对称分布, 表明初始结构具有较好的像差分布特性; 初始结构畸变网格如图 5(c) 所示, 初始结构畸变较小, 该方法可以直接获得成像质量较好的无遮拦离轴反射光学系统初始结构.

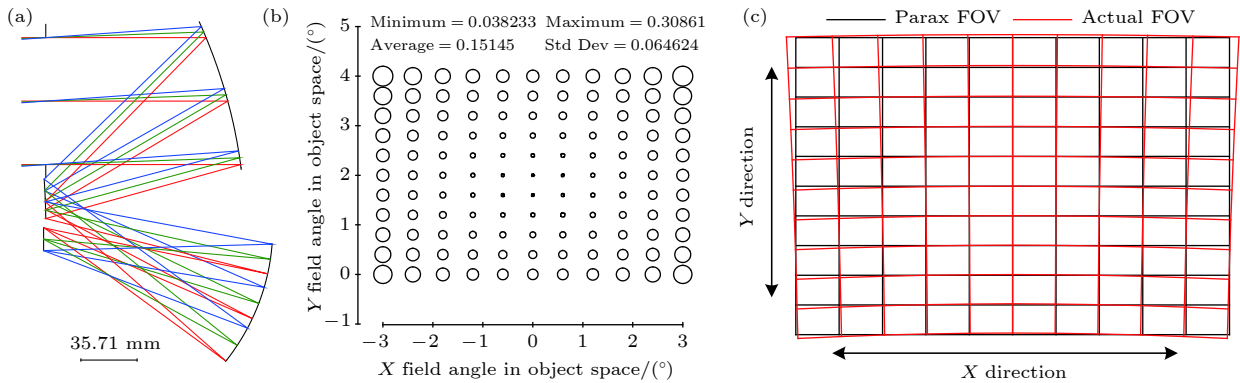


图 5 离轴三反光学系统初始结构性能分析 (a) 系统布局; (b) 点列图均方根直径; (c) 畸变网格

Fig. 5. Initial configuration performance analysis of the designed system: (a) System layout; (b) RMS spot diameter; (c) distortion grid.

为了提高初始结构的成像质量, 通过光学设计软件对初始结构进行进一步优化, 光学系统最终结构如图 6(a) 所示, 在优化过程中反射镜的倾斜和偏心不作为优化变量, 通过使用非球面提高成像质量, 因此反射镜不存在倾斜和偏心, 离轴反射光学系统易于装调; 光学系统点列图如图 6(b) 所示, 点列图 RMS 直径小于探测器像元尺寸 $30 \mu\text{m}$, 满足使用要求; 光学系统畸变网格如图 6(c) 所示, 光学

系统最大畸变小于 0.6%; 光学系统调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 如图 6(d) 所示, MTF 接近衍射极限, 表明光学系统具有好的成像质量.

4 结 论

本文提出了一种基于矢量像差理论的离轴反

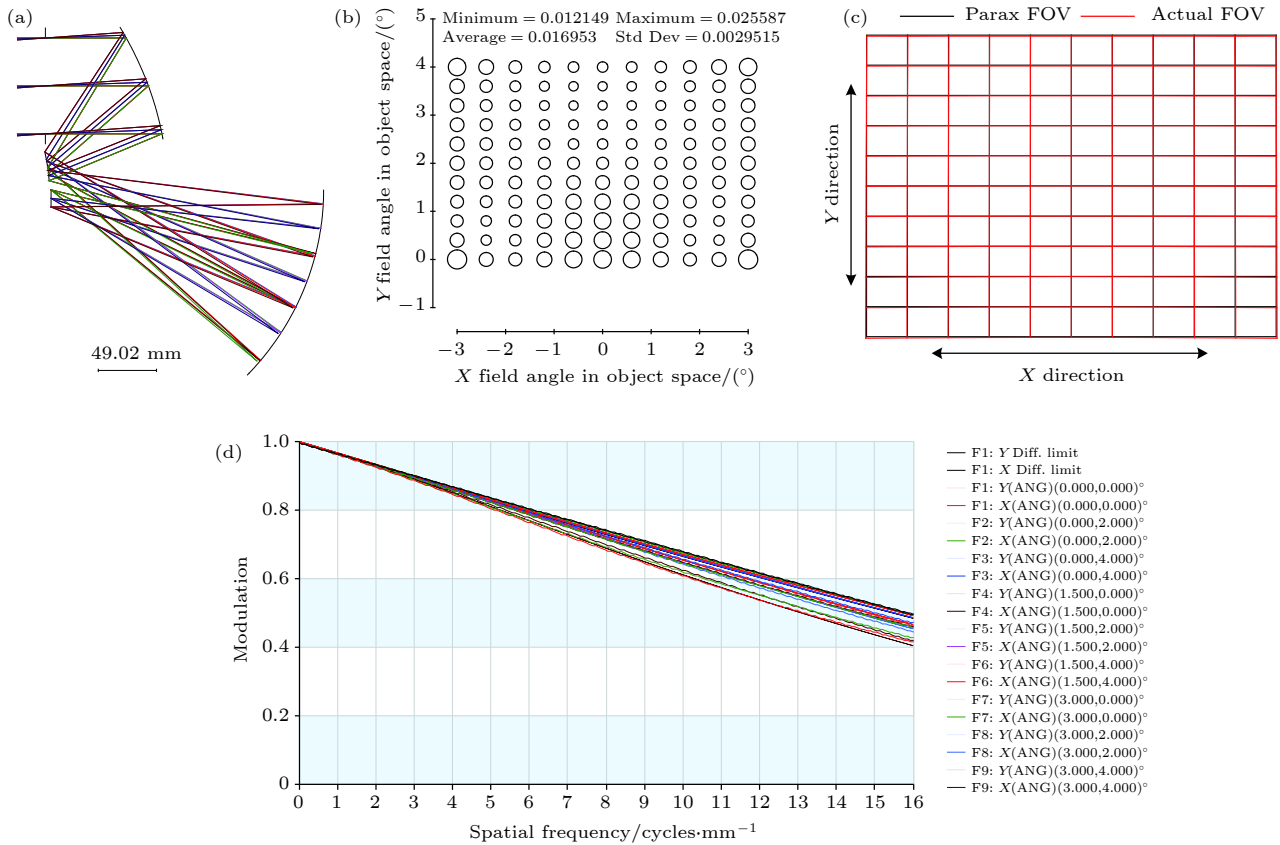


图 6 离轴三反光学系统性能分析 (a) 系统布局; (b) 点列图均方根直径; (c) 畸变网格; (d) 调制传递函数

Fig. 6. Performance analysis of the designed system: (a) System layout; (b) RMS spot diameter; (c) distortion grid; (d) MTF.

射光学系统初始结构设计方法, 通过设置合适的参数范围可以直接获取光瞳离轴、视场离轴或二者结合的离轴反射光学系统初始结构. 推导了光瞳位于任意位置处的离轴反射光学系统初级矢量波像差表达式, 建立了评价光学系统综合性能的误差函数, 针对光学设计软件通常采用的是一种局部优化算法, 初始结构性能会影响光学设计优化结果, 通过遗传算法对误差函数进行求解, 可以获得误差函数的全局最优解, 该方法可以获得较好的离轴反射光学系统初始结构. 针对长波红外面阵探测器, 设计了一个离轴三反光学系统, 视场角为 $4^\circ \times 6^\circ$, 光学系统成像质量好, 反射镜不存在倾斜和偏心, 光学系统易于装调.

参考文献

[1] Shen B L, Chang J, Wang X, Niu Y J, Feng S L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 144201 (in Chinese) [沈本兰, 常军, 王希, 牛亚军, 冯树龙 2014 物理学报 **63** 144201]
 [2] Jiang Z Y, Li L, Huang Y F 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2774
 [3] Fuerschbach K, Davis G E, Thompson K P, Rolland J P 2014 *Opt. Lett.* **39** 2896
 [4] Meng Q Y, Wang H Y, Wang K J, Wang Y, Ji Z H, Wang D

2016 *Appl. Opt.* **55** 8962
 [5] Nie Y F, Gross H, Zhong Y, Duerr F 2017 *Appl. Opt.* **56** 5630
 [6] Liu J, Liu W Q, Kang Y S, Lü B, Feng R, Liu H, Wei Z L 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 1022002 (in Chinese) [刘军, 刘伟奇, 康玉思, 吕博, 冯睿, 柳华, 魏忠伦 2013 光学学报 **33** 1022002]
 [7] Xu F G, Huang W, Xu M F 2016 *Acta Opt. Sin.* **36** 1222002 (in Chinese) [徐奉刚, 黄玮, 徐明飞 2016 光学学报 **36** 1222002]
 [8] Li D X, Lu Z W, Sun Q, Liu H, Zhang Y C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5766 (in Chinese) [李东熙, 卢振武, 孙强, 刘华, 张云翠 2007 物理学报 **56** 5766]
 [9] Xia C Q, Zhong X, Jin G 2015 *Acta Opt. Sin.* **35** 0922002 (in Chinese) [夏春秋, 钟兴, 金光 2015 光学学报 **35** 0922002]
 [10] Thompson K P 2005 *J. Opt. Soc. Am. A* **22** 1389
 [11] Sun J X, Pan G Q, Liu Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 094203 (in Chinese) [孙金霞, 潘国庆, 刘英 2013 物理学报 **62** 094203]
 [12] Wang Y, Zhang X, Wang L J, Wang C 2014 *Chin. Phys. B* **23** 014202
 [13] Schmid T, Rolland J P, Rakich A, Thompson K P 2010 *Opt. Express* **18** 17433
 [14] Zhong Y, Gross H 2017 *Opt. Express* **25** 10016
 [15] Shi H D, Jiang H L, Zhang X, Wang C, Liu T 2016 *Appl. Opt.* **55** 6782
 [16] Pang Z H, Fan X W, Ren G R, Ding J T, Xu L, Feng L J 2016 *Infrared Laser Eng.* **45** 0618002 (in Chinese) [庞志海, 樊学武, 任国瑞, 丁蛟腾, 徐亮, 凤良杰 2016 红外与激光工程 **45** 0618002]
 [17] Thompson K P 1980 *Ph. D. Dissertation* (Tucson: University of Arizona)
 [18] Qiu L J, Fu L Y, Dong Q, Gu J Y 2018 *J. Ordnan. Equip.*

Initial configuration design of off-axis reflective optical system based on vector aberration theory*

Cao Chao¹⁾²⁾ Liao Zhi-Yuan^{1)†} Bai Yu¹⁾ Fan Zhen-Jie¹⁾ Liao Sheng¹⁾

1) (*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 5 March 2019; revised manuscript received 11 April 2019)

Abstract

The traditional method of designing the initial configuration of off-axis reflective optical system is to first obtain the initial configuration of coaxial reflective optical system, and then achieve the unobscured design with an offset aperture stop or a biased input field, or both. Because the aberration distribution of coaxial reflective optical system is not applicable to the off-axis reflective optical system, the obtained unobscured off-axis reflective optical system has large aberration, and the unobscured design process is complicated. In this paper we present a method of designing an initial configuration of off-axis reflective optical system based on vector aberration theory. With this design method, a good unobscured initial configuration of off-axis reflective optical system can be directly obtained by using an offset aperture stop or a biased input field, or both. Based on the vector aberration theory and gaussian brackets, the third-order aberration coefficient is derived for off-axis reflective optical system. Initial configuration performance is important for optical design, especially for the complicated optical system design. The selection of initial configuration highly affects the final system imaging performance, fabrication difficulty and alignment difficulty. An error function is established to evaluate the performance of off-axis reflective optical system, and it consists of aberration coefficients and other constraints. The genetic algorithm is a highly parallel, random and adaptive global optimization algorithm. To obtain a good initial configuration for the off-axis reflective optical system, the genetic algorithm is used to search for the initial configuration with minimum residual aberration. This method can obtain a good initial configuration of off-axis reflective optical system for further optimization. The benefit of this design method is demonstrated by designing an off-axis three-mirror optical system. For the focal plane array, a long-wave infrared off-axis three-mirror optical system is designed. A good initial configuration is obtained with the proposed method, which achieves the unobscured design by using an offset aperture stop and a biased input field. To improve the performance of initial configuration, the obtained initial configuration is optimized with the optical design software. The designed optical system has good imaging quality. As the mirrors are free from the tilts and decenters, the designed optical system is aligned easily.

Keywords: geometric optics, off-axis reflective system, vector aberration theory, optical design

PACS: 42.15.-i, 42.15.Dp, 42.15.Eq, 42.15.Fr

DOI: 10.7498/aps.68.20190299

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61501429).

† Corresponding author. E-mail: liaoziyuan1@163.com