

基于量子遗传算法的自由曲面离轴反射光学系统设计

缪麟, 田博宇, 孙年春, 张彬*

(四川大学电子信息学院, 四川成都 610064)

摘要: 针对自由曲面离轴反射光学系统的初始结构较少、优化过程复杂的问题, 提出了一种基于量子遗传算法的离轴反射光学系统设计方法, 即采用量子遗传算法结合像差理论得到高像质的初始光学系统结构, 再对其离轴化处理并引入自由曲面, 进而设计得到自由曲面离轴反射光学系统。该方法可以方便、快捷地为自由曲面离轴反射光学系统提供像质良好、特定布局的初始结构。以离轴三反系统为例, 采用该方法设计了一套工作在可见光波段、视场大小为 $10^\circ \times 4^\circ$ 、 F 数为 2 的主三镜一体化的自由曲面离轴三反系统。仿真结果表明, 该离轴三反系统视场较大、结构紧凑、成像质量良好, 其最大 RMS 波像差为 0.0485λ ($\lambda=0.6328\mu\text{m}$), 全视场的调制传递函数 (MTF) 在 50 lp/mm 处大于 0.9, 且一体化集成结构有利于简化系统的对准及装调。

关键词: 光学设计; 自由曲面; 主三镜一体; 量子遗传算法

中图分类号: O436 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210365

Design of freeform surface off-axis reflective optical systems based on quantum genetic algorithm

Miao Lin, Tian Boyu, Sun Nianchun, Zhang Bin*

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: Aiming at solving the problem of fewer initial structures and complicated optimization processes for freeform surface off-axis reflective optical systems, a method for designing off-axis reflective optical systems based on quantum genetic algorithm was proposed. In such method, quantum genetic algorithm combined with aberration theory was adopted to obtain an initial optical system structure with good image quality, and then the off-axis process was accomplished and the freeform surface was further introduced to obtain the well-designed freeform surface off-axis reflective optical system. The method could easily and quickly provide initial structure with good image quality. Taking the off-axis three-mirror system working in visible light band as an example, a freeform surface off-axis three-mirror system with field-of-view of $10^\circ \times 4^\circ$ and F -number of 2 was designed with the primary mirror and the tertiary mirror being integrated together. Simulation results indicate that the designed off-axis three-mirror system exhibits a large field-of-view, a compact structure and a good image quality. The maximum root mean square (RMS) wavefront error of the system is 0.0485λ ($\lambda=0.6328\mu\text{m}$) and the modulation transfer functions (MTF) of the full fields are all greater than 0.9 at 50 lp/mm. Besides, the integrated structure is benefit for the simplification of the alignment and installation of the system.

收稿日期: 2021-06-02; 修订日期: 2021-08-05

基金项目: 四川省科技计划 (2018JY0553); 中国科学院自适应光学重点实验室基金 (LAOF1801)

作者简介: 缪麟, 男, 硕士生, 主要从事光学设计方面的研究工作。

导师(通讯作者)简介: 张彬, 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光与光通信、光电子技术等方面的研究。

Key words: optical design; freeform surface; integration of primary-tertiary mirror; quantum genetic algorithm

0 引言

离轴反射系统具有可消除中心遮拦、无色差、光路可折叠、能量利用率高等特点^[1-3],而离轴三反系统除了具有反射式光学系统的特点外,还具有可实现大视场、镜面数较少等优点,被广泛应用于空间光学系统中^[4-6],但也因其失去了旋转对称性而不可避免地会引入离轴像差。自由曲面具有很强的像差校正能力及较多的设计自由度,可有效应用于离轴反射系统中离轴像差的校正^[7-8]。然而,自由曲面离轴反射光学系统初始结构较少,其优化过程复杂,致使其设计难度较大。同时,在离轴三反系统装调过程中,若以主镜为基准,依次调节次镜和三镜的偏心与倾斜,装调自由度共 12 个,由此带来的装调误差和制造成本较大,因而降低装调难度很有必要。若将主镜和三镜集成一体,会使得装调自由度减少六个,使得系统结构紧凑和易于装调。

现有的空间光学系统设计软件大多依赖于初始结构的选择^[9],直接获取一个与目标要求接近且初始像差较小的初始结构,不仅可节约后续优化的时间,而且可降低对高水平设计经验的要求。因此,选择合理的初始结构是离轴光学系统设计极为重要的一步。现有的自由曲面离轴三反系统的初始结构获取方法主要有两种:一种方法是在专利库里寻找初始结构,进而不断优化得到满足设计要求的自由曲面离轴光学系统^[10-11]。然而,在大多数情况下,尤其是存在特定布局要求时,很难在专利库中找到相匹配的初始系统结构。因此,另一种方法是通过理论求解得到同轴三反系统初始结构,再经过离轴和优化得到最终的光学系统设计^[12-13]。徐奉刚等^[14]、王蕴琦等^[15]和朱钧等^[16]分别基于 Wassermann-Wolf 微分方程、光学传递矩阵和光焦度分配求解出同轴三反初始结构,进而设计得到离轴反射系统。然而,理论推导需要给定足够的初始条件才能求解,而若要满足特定布局结构要求,其求解过程就变得尤为复杂和耗时。因此,需要寻求快速方法以获取初始结构,通过像差理论^[17]建立由同轴遮拦比 $\alpha_i(i=1, 2)$ 、放大率 $\beta_i(i=1, 2)$ 和圆锥常数

$-e_j^2(j=1, 2, 3)$ 七个变量组成的用于评价光学系统初始结构性能的误差约束函数,进而将初始结构参数问题转化为利用优化算法寻找误差约束函数极小值问题,从而获取高性能的同轴初始结构^[18]。然而,误差约束函数变量通常较多,搜索空间极大,冗余信息过多,从而造成计算耗时长。同时,遗传算法等经典优化算法在解决高维问题时容易陷于局部最优。

文中提出了一种自由曲面离轴三反系统初始结构的快速设计方法。该方法通过减少误差约束函数中的变量数目以及引入量子遗传算法 (Quantum genetic algorithm, QGA),无需给定初始条件即可快速得到初始结构。量子遗传算法是一种基于量子计算原理、结合经典遗传算法的全局优化算法^[19]。相比于传统的遗传算法,量子遗传算法具有更好的种群多样性、更快的收敛速度和更强的全局搜索能力,更容易跳出局部最优解而获得全局最优解。文中首先基于像差理论得到主三镜一体化同轴三反系统的像差表达式,进而建立以同轴遮拦比和圆锥常数为变量的评价光学系统性能的误差约束函数;其次,采用量子遗传算法求解误差约束函数最小值的最优解,并将最优解作为初始结构,进而通过合理的离轴设置实现系统无遮拦设计,最终得到满足设计要求的主三镜一体化自由曲面离轴三反系统。

1 设计原理

离轴三反系统是在同轴三反系统基础上进行离轴化得到的,其常见布局如图 1 所示。该系统主要由主镜 M_1 、次镜 M_2 、三镜 M_3 组成。每个反射镜面的圆锥系数分别为 $-e_1^2$ 、 $-e_2^2$ 、 $-e_3^2$, M_1 和 M_2 的遮拦比分别为 α_1 、 α_2 , M_2 和 M_3 的放大率分别为 β_1 、 β_2 。

由近轴光学理论,可根据遮拦比和放大率得到反射镜的曲率半径和相应距离的表达式分别为:

$$\begin{cases} r_1 = \frac{2}{\beta_1\beta_2}f' & r_2 = \frac{2\alpha_1}{(1+\beta_1)\beta_2}f' & r_3 = \frac{2\alpha_1\alpha_2}{1+\beta_2}f' \\ d_1 = \frac{1-\alpha_1}{\beta_1\beta_2}f' & d_2 = \frac{\alpha_1(1-\alpha_2)}{\beta_2}f' & d_3 = \alpha_1\alpha_2f' \end{cases} \quad (1)$$

式中: f' 为三反光学系统总焦距。

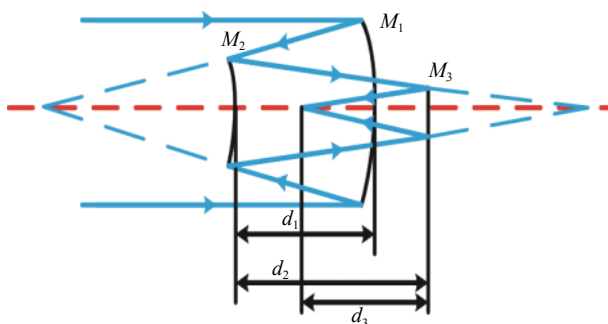


图 1 同轴三反初始结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the initial structure of the on-axis three-mirror system

通过追踪边缘光线和主光线,结合像差理论,得到轮廓参数 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, -e_1^2, -e_2^2, -e_3^2$ 表示的单色像差,其像差系数 $S_I, S_{II}, S_{III}, S_{IV}, S_V$ 是关于 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, -e_1^2, -e_2^2, -e_3^2$ 的函数^[20]。

为了降低装调难度,设计主镜和三镜一体化结构。于是, M_1 和 M_3 与 M_2 之间距离应相等,即 $d_1 = -d_2$, 可得到:

$$\beta_1 = \frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1(\alpha_2 - 1)} \quad (2)$$

在平像场条件下,根据像差理论可得到 $S_{IV} = 0$, 即:

$$\beta_2 = \frac{1}{\alpha_2\beta_1(1 - \alpha_1) + \alpha_2 - 1} \quad (3)$$

主三镜一体化结构的像差系数 S_I, S_{II}, S_{III} 和 S_V 是关于 $\alpha_i (i=1, 2), -e_j^2 (j=1, 2, 3)$ 的复杂的函数,其隐式表达为:

$$\begin{cases} S_I = S_I(\alpha_i, -e_j^2) \\ S_{II} = S_{II}(\alpha_i, -e_j^2) \\ S_{III} = S_{III}(\alpha_i, -e_j^2) \\ S_V = S_V(\alpha_i, -e_j^2) \end{cases} \quad (4)$$

光学系统初始结构设计是光学设计过程中的关键。由公式 (4) 可知,选择合适的轮廓参数 $\alpha_1, \alpha_2, -e_1^2, -e_2^2, -e_3^2$, 使得 $S_I, S_{II}, S_{III}, S_V$ 趋于 0, 即可获得小像差的系统初始结构布局。

基于以上像差分析,文中建立了评价光学系统初始结构性能的误差约束函数 Q 。该误差函数由主三镜一体化结构的各个像差系数组成,也可以根据系统其他布局要求添加约束条件,其表达式为:

$$Q = Q(\alpha_1, \alpha_2, e_1^2, e_2^2, e_3^2) = |S_I| + |S_{II}| + |S_{III}| + |S_V| \quad (5)$$

误差约束函数 Q 的值越小,代表光学系统的成像质量越好。采用量子遗传算法对误差约束函数 Q 进行多次迭代求出其最小值的最优解,从而确定系统初始结构布局,再通过光学设计软件对初始结构进一步优化。量子遗传算法是一种全局优化算法,可以获得全局最优解^[21],其原理是建立在量子位和量子叠加态的基础上。一个量子位可以表示处于 1 态 (表示 $|1\rangle$)、0 态 (表示 $|0\rangle$) 或者两者相叠加状态的信息。量子位可以表示为:

$$|\varphi\rangle = A|0\rangle + B|1\rangle \quad (6)$$

式中: A 和 B 分别表示量子状态被发现为 0 态和 1 态的概率幅度值。将量子比特的概率幅值表示应用于染色体的编码,使得一条染色体可以表示多个态的叠加,并利用量子旋转门向着最优个体方向进化,达到了种群更新和完成进化的目的。基于量子遗传算法搜索误差约束函数最小值的最优解的流程如图 2 右侧所示。

图 2 左侧为主要设计流程图,其具体设计过程:第一步,根据像差分析建立评价光学系统性能的误差约束函数 Q ; 第二步,采用量子遗传算法求解误差约束函数最优解,获取初始结构遮拦比 $\alpha_i (i=1, 2)$ 和圆锥常数 $-e_j^2 (j=1, 2, 3)$; 第三步,基于第二步求解得到的参数值,根据公式 (1)~(3) 计算结构参数 $r_1, r_2, r_3, d_1, d_2, d_3$; 第四步,将获得的初始结构输入到光学设计软件中进一步优化,继而得到离轴系统设计结构。在第二步中,初始结构遮拦比 $\alpha_i (i=1, 2)$ 和圆锥常数 $-e_j^2 (j=1, 2, 3)$ 的合理求解至关重要。首先,使用量子位将遮拦比 $\alpha_i (i=1, 2)$ 、圆锥常数 $-e_j^2 (j=1, 2, 3)$ 编码成一条染色体,将量子比特概率幅值表示应用于染色体的编码,初始化种群。然后,对种群进行测量,计算种群中个体适应度,进而保留种群中最优个体和适应度。最后,判断是否满足条件,如果不满足则进入下一代迭代,用当前最优个体诱导量子旋转产生新的种群,使得种群向着最优个体进化,再次返回测量步骤,如此循环下去,直至满足条件,迭代出误差约束函数最小值的最优解,进而通过解码即可得到光学系统初始遮拦比 $\alpha_i (i=1, 2)$ 和圆锥常数 $-e_j^2 (j=1, 2, 3)$ 。

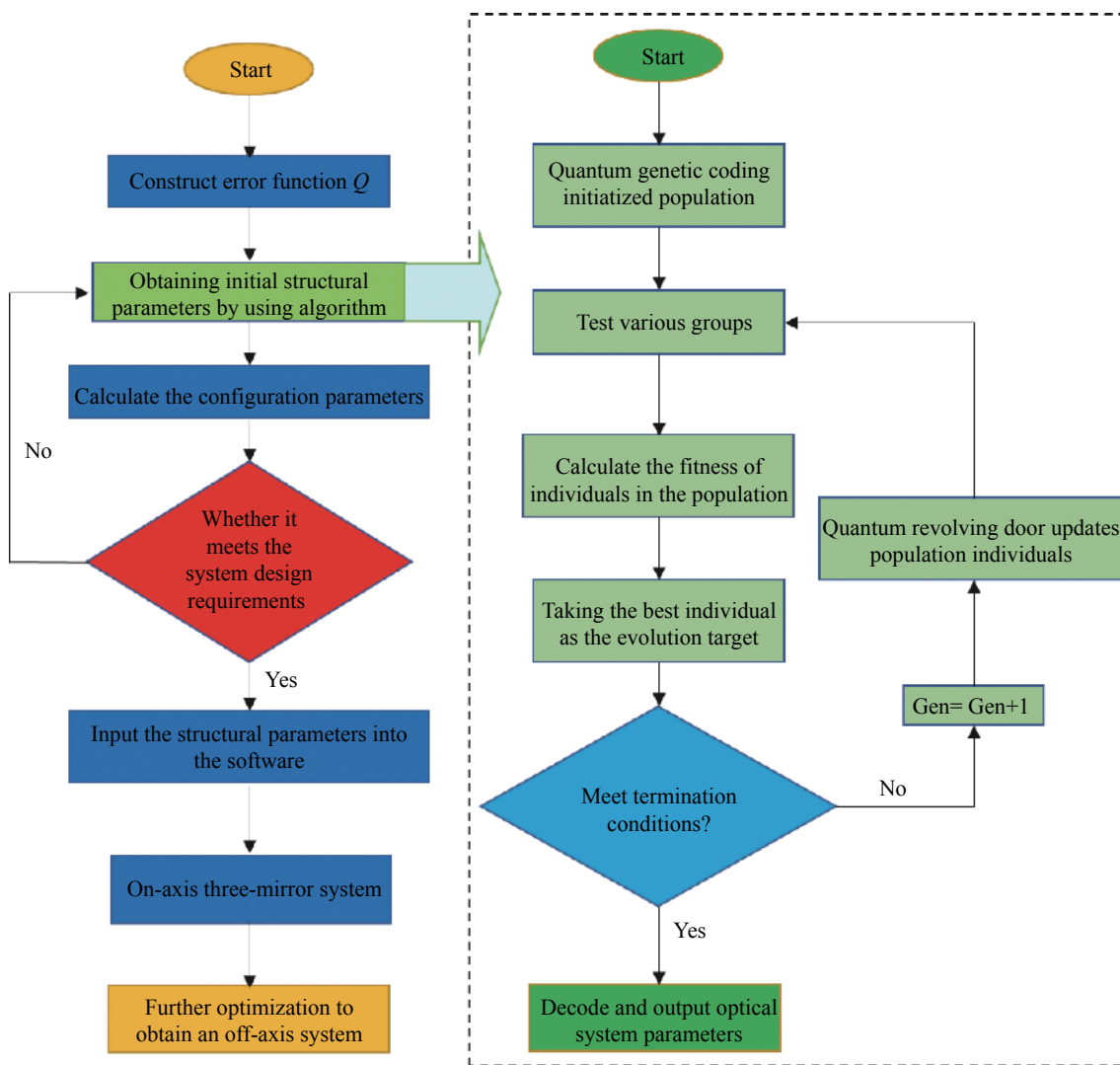


图 2 设计流程图

Fig.2 Flowchart of the design process

2 自由曲面离轴三反系统设计

在合理限定参数范围之后,利用量子遗传算法得到误差约束函数最小值的最优解,从而得到主三镜一体化的同轴三反系统的初始结构。在此基础上,对初始系统进行离轴化处理,并引入自由曲面替代二次曲面校正离轴像差,最终实现成像质量良好、结构紧凑的自由曲面主三镜一体化离轴三反系统设计。表 1 给出了所设计的光学系统视场角范围为 X 方向 $[-5^\circ, 5^\circ]$ 、Y 方向 $[-14^\circ, -10^\circ]$ 的具体参数。

一个合理的同轴三反初始结构布局须满足一定的边界条件: $d_1 < 0$, $d_2 > 0$ 和 $d_3 < 0$ 。因此,在一次成像系统中满足焦距为负和光焦度分配的原则,结合公式 (1) 可知,参数 α_1 、 α_2 应满足: $0 < \alpha_1 < 1$, $\alpha_2 > 1$ 。在上述条

表 1 光学系统参数

Tab.1 Optical system parameters

Parameter	Specification
Field of view/(°)	10×4
F-number	2
Wavelength/nm	400-760
Effective focal length/mm	120
MTF/lp·mm ⁻¹	>0.9@50
Pixel size/μm	10

件下,结合对系统体积要求及加工难易程度等因素的综合考虑,设置了如表 2 所示的参数范围。

在量子遗传算法中,种群更新是通过量子旋转门完成的。文中选择的量子旋转门更新策略如表 3 所示,其中,旋转角度 $\theta_i = s(A_i, B_i) \times \Delta\theta_i$, $s(A_i, B_i)$ 表示旋转方

表 2 参数取值范围

Tab.2 Ranges of parameters

Parameter	α_1	α_2	$-e_1^2$	$-e_2^2$	$-e_3^2$
Range	[0.1,0.5]	[1.5,2.1]	[-5,5]	[-5,5]	[-5,5]

表 3 量子门旋转更新策略

Tab.3 Quantum gate rotation update strategy

x_i	$best_i$	$f(x) > f(best_i)$	$\Delta\theta_i$	$s(A_i, B_i)$			
				$A_i B_i > 0$	$A_i B_i < 0$	$A_i = 0$	$B_i = 0$
0	0	False	0	0	0	0	0
0	0	True	0	0	0	0	0
0	1	False	0.01π	1	-1	0	± 1
0	1	True	0.01π	-1	1	± 1	0
1	0	False	0.005π	-1	1	± 1	0
1	1	True	0.005π	1	-1	0	± 1
1	1	False	0	0	0	0	0
1	1	True	0	0	0	0	0

向, $\Delta\theta_i$ 为旋转角的角度增量。

根据公式 (5) 所定义的误差约束函数和表 2 列出的参数范围, 可通过量子遗传算法搜索误差约束函数最小值的最优解, 从而获取具有合理布局的初始结构。误差约束函数的收敛曲线如图 3 所示, 从中可得到误差约束函数 Q 的收敛结果以及相应的轮廓参数取值, 其圆锥常数 $-e_j^2 (j=1, 2, 3)$ 在表 4 中给出。

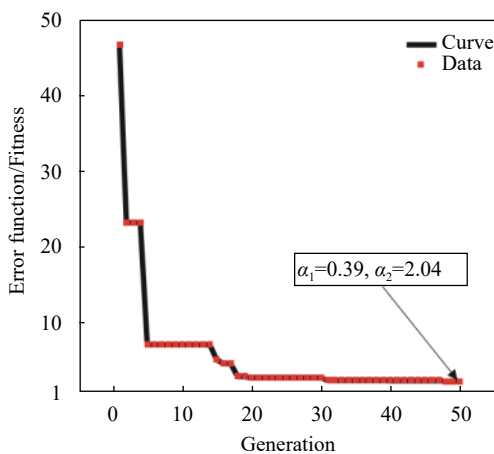


图 3 误差函数的收敛曲线

Fig.3 Convergence curve of error function

将误差约束函数收敛结果 (即轮廓参数) 代入公式 (1)~(3) 中, 计算得到如表 4 所示的同轴三反系统参数, 并可将其作为离轴三反系统的初始结构。图 4(a)、(b) 分别为初始结构的布局 and 调制传递函数 (MTF) 曲线。从图 4 中可以看出, 该初始结构紧凑, 且 MTF 接

表 4 同轴三反系统的初始结构参数

Tab.4 Initial configuration parameters of the on-axis three-mirror system

Mirror	Radius/mm	Thickness/mm	Conic
M_1	-467.19	-141.68	0.117
M_2	-109.60	141.68	2.052
M_3	-143.19	-96.51	-0.044

近衍射极限, 成像质量良好。上述结果表明, 基于上述量子遗传算法可以搜索得到满足条件的初始结构。

以上述方法将得到的初始结构作为优化起点, 为了增大光学系统视场, 将光阑置于次镜, 并对同轴三反初始结构采用视场离轴和孔径离轴相结合的综合离轴方式, 以避免光线遮拦。同时, 根据光线追迹原理, 为了给反射镜留有一定的支撑结构, 需要对结构布局间隔进行约束。

图 5(a) 和图 5(b) 分别为间隔约束和视场扩展示意图。其中, 图 5(a) 给出了间隔的约束范围, 在优化过程中, 为保证主三镜在 Z 轴位置一致, 需满足 $|d_1|=|d_2|$ 。如图 5(b) 所示, 在增大视场过程中, 为了在整个视场范围内获得比较好的成像质量, 选取一半视场范围内的九个视场点: $(0^\circ, -10^\circ), (0^\circ, -12^\circ), (0^\circ, -14^\circ), (2.5^\circ, -10^\circ), (2.5^\circ, -12^\circ), (2.5^\circ, -14^\circ), (5^\circ, -10^\circ), (5^\circ, -12^\circ), (5^\circ, -14^\circ)$ 。由于边缘视场的像差要比中心视场大, 在优化设计过程中, 需要根据优化的多次中间结果不断调节各个视场的优化权重, 以平衡各视场在像面上的成

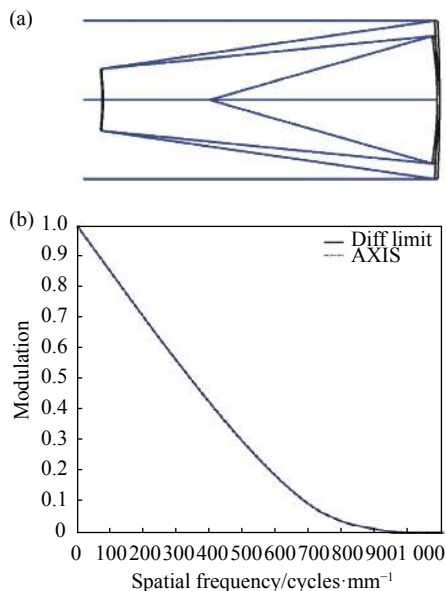


图 4 初始结构的 (a) 布局及 (b) 调制传递函数

Fig.4 (a) Layout and (b) MTF of the initial structure of the on-axis three-mirror system

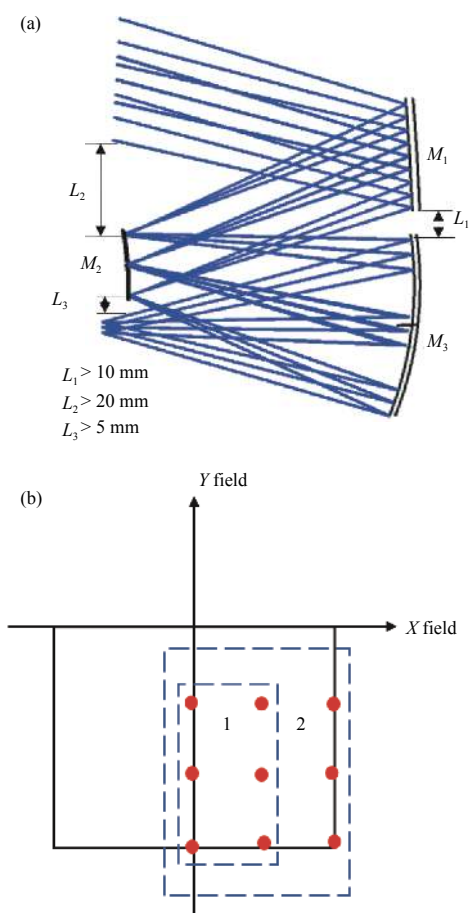


图 5 (a) 间隔约束和 (b) 视场拓展示意图

Fig.5 Schematic diagram of (a) layout constraint and (b) expansion the field of view

像质量。由于自由曲面可以提供更多的设计自由度，因而引入自由曲面替代二次曲面校正离轴带来的像差，以大幅提高成像性能。采用渐进式逐步逼近最优策略，从低阶项开始逐步引入高阶项作为变量进行优化。

在表征自由曲面时选择 XY 多项式，其表达式与数控加工使用的表达式相同，适合加工。此外，为了保证光学系统关于 YOZ 平面对称，只使用 XY 多项式中 x 的偶数项，即先对只含有 y 项的参数进行优化，再选择含有 x 项的偶次项进行优化。 XY 多项式的面型矢高定义为在二次基底基础上加上泰勒展开式，即：

$$z(x,y) = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2(x^2 + y^2)}} + \sum_{i=1}^N A_i E_i(x,y) \quad (7)$$

$$i = \frac{(m+n)^2 + m + 3n}{2} + 1 \quad (8)$$

式中： c 为顶点处曲率； k 为圆锥系数； A_i 为 XY 多项式第 i 项的系数； $E_i(x,y)$ 为 XY 多项式的第 i 项。

经过对初始结构优化后，最终得到 X 方向上视场为 $10^\circ(-5^\circ \sim 5^\circ)$ 、 Y 方向上视场为 $4^\circ(-14^\circ \sim -10^\circ)$ 的离轴三反系统，其自由曲面的多项式系数如表 5 所示，系统的最终布局如图 6(a) 所示，其结构参数列于表 6。比较表 4 和表 6 可知，虽然最终结构参数相比于初始结构参数有一定变化，但仍接近于初始结构参数，从而说明了合理的初始结构设计有利于快速、有

表 5 三反系统自由曲面多项式系数值

Tab.5 Polynomial coefficients of freeform surface for three-mirror system

Item	M_1	M_2	M_3
y	-5.825E-003	-1.148E-003	-5.519E-004
x^2	-1.352E-003	2.242E-004	-1.851E-004
y^2	-1.336E-003	2.196E-004	-1.895E-004
x^2y	1.374E-008	-4.828E-008	-5.616E-009
y^3	-2.060E-008	-1.371E-007	-6.372E-009
x^4	7.533E-010	1.052E-010	-3.402E-010
x^2y^2	1.136E-009	-2.277E-010	-7.071E-010
y^4	6.287E-010	-1.3E-010	-3.559E-010
x^4y	-2.124E-012		3.946E-014
x^2y^3	1.941E-013		6.297E-014
y^5	-7.222E-015		8.015E-014
x^6	-3.345E-015		-1.147E-015
x^4y^2	8.395E-015		-4.474E-015
x^2y^4	-2.407E-015		-5.253E-015
y^6	-7.531E-016		-1.681E-015

效地实现最终设计目标,从而大幅降低后续优化难度。在图 6(b)中,主镜 M_1 和三镜 M_3 在垂直方向上近似相切,且 $M_1 \sim M_3$ 元件的中心部分不接收任何光线,使得在一块基板上制造两个反射镜变得可能,进而可以由一个完整的加工过程中制造得到。

自由曲面离轴三反系统的视场内能量集中度、

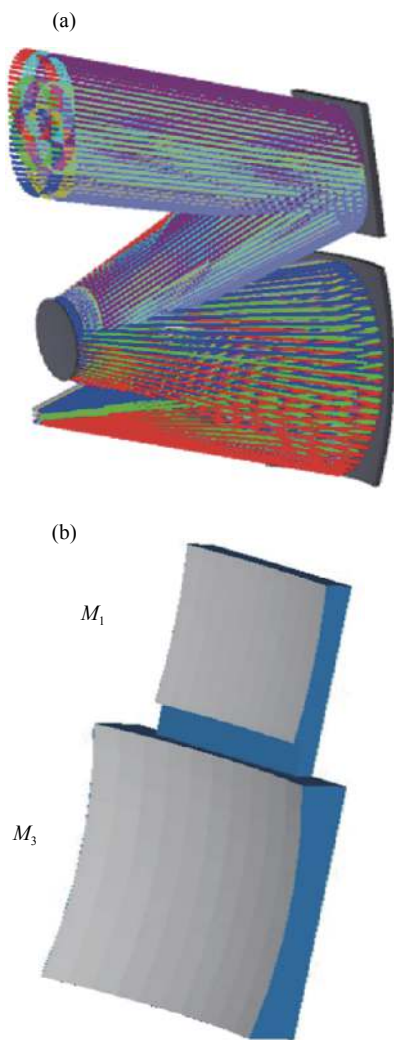


图 6 光学系统: (a) 结构布局; (b) $M_1 \sim M_3$ 元件集成化仿真

Fig.6 Optical system: (a) Structure layout; (b) Integrated simulation of $M_1 \sim M_3$ components

表 6 离轴三反系统的最终结构参数

Tab.6 Final configuration parameters of the off-axis three-mirror system

Mirror	Radius/mm	Thickness/mm	Conic
M_1	-436.92	-218.86	-1.611
M_2	-243.10	218.86	3.461
M_3	-329.40	-240.47	0.548

RMS 波前误差和调制传递函数 MTF 分别如图 7(a)~(c) 所示。从图 7(a)中可以看出,在视场内 80% 的能

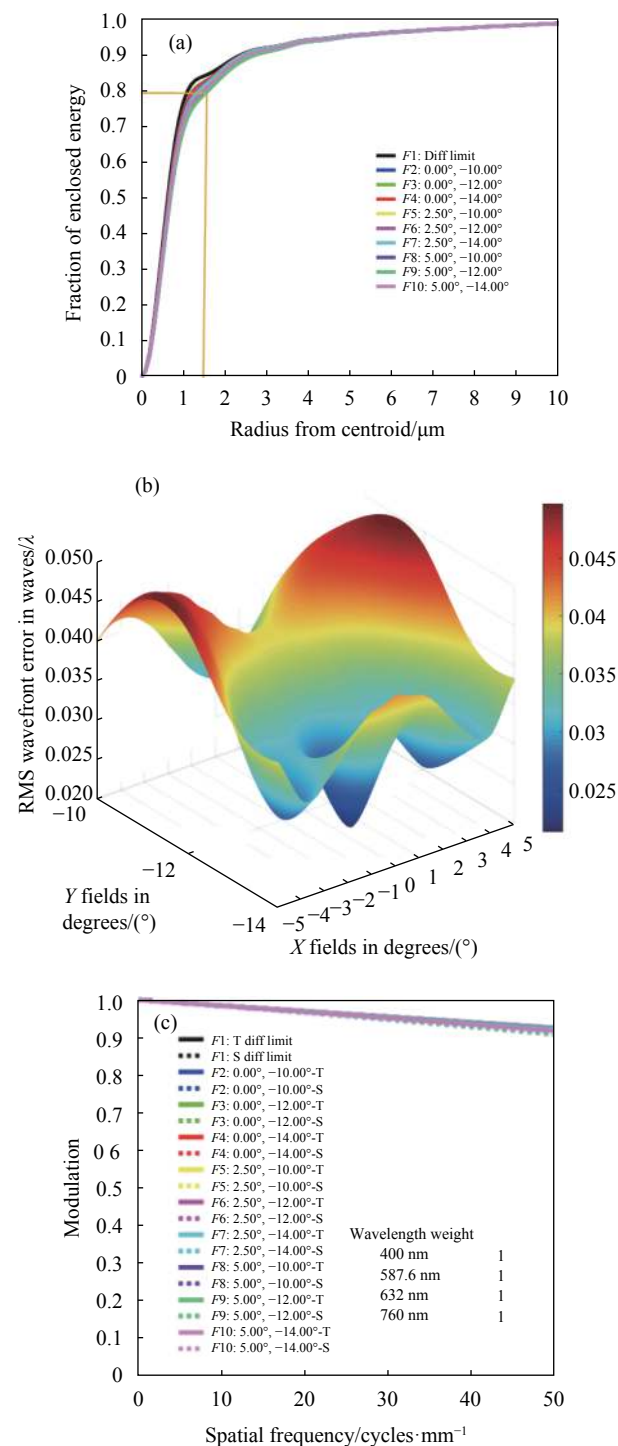


图 7 自由曲面离轴三反系统性能评价参数: (a) 视场内能量集中度; (b) RMS 波前误差; (c) 光学调制传递函数

Fig.7 Performance evaluation of off-axis three-mirror system with freeform surface. (a) Encircle energy in the field of view; (b) RMS wavefront error; (c) MTF

量均集中在艾里斑 ($R_{\text{Airy}}=1.558 \mu\text{m}$) 内, 其能量集中度较高。分析图 7(b) 可知, 系统的最大 RMS 波前误差为 0.0485λ (参考波长 $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$), 平均 RMS 波前像差为 0.0377λ , 可见其系统的波前误差较小。图 7(c) 表明, 各视场的 MTF 均接近衍射极限, 在 50 lp/mm 处大于 0.9, 成像质量良好。

3 结 论

文中提出了一种基于量子遗传算法的自由曲面离轴三反光学系统设计方法。该方法采用量子遗传算法, 通过使得构造的评价光学系统性能的误差约束函数最小化, 进而确定合理的初始结构参数。结果表明, 基于量子遗传算法获得的初始结构可以为三反系统提供很好的设计起点, 大幅降低了后续优化难度。首先, 从同轴三反系统的像差理论出发, 建立了评价主三镜一体结构光学性能的误差约束函数。其次, 利用量子遗传算法全局搜索能力强的特点, 通过迭代方式求解误差约束函数最小值的最优解, 从而获得像差较小的二次曲面初始结构。在此基础上, 将该初始结构作为设计起点, 可降低后续优化设计的难度。最后, 通过对初始结构离轴化处理, 并引入自由曲面校正离轴像差, 最终完成了自由曲面主三镜一体离轴三反系统设计。该系统视场较大、 F 数较小, 且全视场的 MTF 在 50 lp/mm 处均大于 0.9, 接近衍射极限, 具有结构紧凑、视场较大、成像质量良好等突出特点。所提出的基于量子遗传算法的自由曲面离轴三反光学系统设计方法不仅可降低自由曲面主三镜一体化离轴三反系统的设计难度, 而且可推广适用于其他类型的离轴反射式系统设计。

参考文献:

- [1] Zhu J, Zhang B, Hou W, et al. Design of an oblique camera based on a field-dependent parameter [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(21): 5650.
- [2] Seo So Hyun, Ryu Jae Myung, Choi Hojong. Focus-adjustable head mounted display with off-axis system [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(21): 7931-7931.
- [3] Chen Bingxu, Liao Zhiyuan, Cao Chao, et al. Design of the freeform imaging system with large field of view and large relative aperture [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(8): 20200005. (in Chinese)
- [4] Sang B. The EnMAP hyperspectral imaging spectrometer: instrument concept, calibration and technologies[C]//SPIE, 2008, 7089: 350-365.
- [5] Meng Qingyu, Zhang Wei, Long Funian. Analysis on detection ability of space-based space target visible camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2079-2084. (in Chinese)
- [6] Mill, J D, O'Neil R R, Price S. Midcourse space experiment: introduction to the spacecraft, instruments, and scientific objectives [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1994, 31(5): 900-907.
- [7] Yang Tong, Duan Yingzhe, Cheng Dewen, et al. Freeform imaging optical system, design: Theories, development and applications [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0108001. (in Chinese)
- [8] Xiao Xisheng, Yu Qinghua, Chen Guilin, et al. Locating optimal freeform surfaces for off-axis optical systems [J]. *Optics Communications*, 2020, 467: 125757.
- [9] Liu Jun, Wei Huang, Fan Hongjie. A novel method for finding the initial structure parameters of optical systems via a genetic algorithm [J]. *Optics Communications*, 2016, 361: 28-35.
- [10] Li Na, Huang Ying. Design of large-field and low-distortion freeform space optical system with 3D construction method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0322001. (in Chinese)
- [11] Wang Chao. Research on characterization function and application of freeform[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2014. (in Chinese)
- [12] Li Hua, Fan Zhenjie, Sun Wei, et al. Analysis and test of transmit-receive isolation of off-axis three-mirror anastigmat optical antenna applied to laser communication [J]. *Journal of Modern Optics*, 2020, 67(13): 1217-1225.
- [13] Li Junyang, Li Wenqiang, Long You, et al. Design of off-axis three-mirror optical system based on freeform surface [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2020, 57(9): 092202. (in Chinese)
- [14] Xu Fenggang, Huang Wei, Xu Mingfei. Design of off-axis three-mirror optical system based on Wassermann-Wolf equations [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1222002. (in Chinese)
- [15] Wang Yunqi, Liu Weiqi, Zhang Daliang, et al. Design of off-axis three-mirror optical system with wide field of view based on transfer matrix [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0418003. (in Chinese)
- [16] Jun Zhu, Wei Hou, Xiao Dongzhang, et al. Design of a low F-number freeform off-axis three-mirror system with rectangular

- field-of-view [J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(1): 015605.
- [17] Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2001. (in Chinese)
- [18] Xu Fenggang, Huang Wei. Application of genetic algorithm in the design of off-axis four-mirror optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(8): 2076-2082. (in Chinese)
- [19] Babenko B, Yang M H, Belongie S. Visual tracking with online multiple instance learning [C]//Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Conference on, IEEE, 2009, 33(8): 983-990.
- [20] Wei Yu. Design of large field of view pushover optical system based on freeform surface[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2020. (in Chinese)
- [21] Han K H, Kim J H. Genetic quantum algorithm and its application to combinatorial optimization problem [J]. *Congress on Evolutionary Computation*, 2003, 2(2): 1354-1360.