

激光与光电子学进展

长焦距离轴全反射式三档变焦光学系统设计

曹一青^{1,2*}¹莆田学院机电与信息工程学院, 福建 莆田 351100;²福建省激光精密加工工程技术研究中心, 福建 莆田 351100

摘要 提出了一种基于变焦原理和初级像差理论的机械补偿式的长焦距离轴全反射式三档变焦光学系统设计方法。首先,建立了同轴四反射镜变焦光学系统初始结构求解模型,基于该模型,应用开发的自适应变异概率遗传算法对其进行求解,得到了同轴系统部分初始结构参数;然后,将其进行适当偏心和倾斜来消除共轴系统中心遮挡问题,结合光学设计软件 Zemax 对离轴系统像差进行校正。最后,应用上述设计方法,系统中各块反射镜光学面采用非球面设计,设计出高成像质量的焦距为 300、600、900 mm 的三档变焦离轴四反射镜光学系统。结果表明,该方法为离轴全反射式三档变焦光学系统设计提供了一种有效手段,能设计出满足实际应用需求的系统。

关键词 几何光学; 光学系统设计; 四反射镜; 三档变焦; 机械补偿; 长焦距

中图分类号 O435.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202360.1908001

Design of Off-Axis All-Reflective Three-Gear Zoom Optical System with Long Focal Length

Cao Yiqing^{1,2*}¹School of Mechanical and Electrical Information Engineering, Putian University, Putian 351100, Fujian, China;²Fujian Laser Precision Machining Engineering Technology Research Center, Putian 351100, Fujian, China

Abstract The zoom principle and primary aberration theory are used to study the design method of a mechanically compensated all-off-axis reflective three-gear zoom optical system with long focal length. The initial structure solving model for coaxial four-reflective mirrors zoom optical system is developed and based on the model, the adaptive variant probability genetic algorithm developed is used to address it and the partial initial structure parameters of the coaxial system is obtained; further, it is properly made off-center and tilt to remove the central obscuration issue of the coaxial optical system, and the aberration of the off-axial system is corrected using optical design software Zemax. Using the design method discussed above, an aspheric surface design is adopt in the optical surfaces of the system's all-reflective mirrors, yielding a high imaging quality off-axis four-reflective mirrors zoom optical system with three-gear zoom focal lengths of 300 mm, 600 mm, and 900 mm. The results show that the method provides an effective measure for an off-axis all-reflective three-gear zoom optical system and that the system can be designed to meet practical needs.

Key words geometrical optics; optical system design; four-reflective mirrors; three-gear zoom; mechanical compensation; long focal length

1 引言

随着现代科学技术不断发展,应用空间光学成像系统对目标进行探测和识别的要求也越来越高,要求既能实现在较长距离范围内搜索,又能实现在短距离范围内实现精确探测,这使得该类光学系统逐步向长

焦距、变焦、大口径、高分辨率和轻量化等方向发展,从而为此类科学仪器中光学系统设计带来挑战^[1-2]。目前光学系统可以分为折射式、反射式和折反射式系统;折射式和折反射式光学系统中存在折射透镜,虽然能更好地校正系统像差,但是难以完全消除因为宽光谱成像带来的系统色差,光能量在传播过程中损耗也较

收稿日期: 2021-11-25; 修回日期: 2022-01-10; 录用日期: 2022-01-21

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)、莆田学院引进人才科研启动费项目(2019010)

通信作者: *caoyiqing1987@163.com

大,无法满足系统对光能量的要求;然而,反射光学系统具有结构紧凑、重量轻、工作光谱宽、无色散、热差小且容易实现大孔径等明显优势,因此反射式变焦光学系统被广泛应用于空间遥感技术、航天侦察和天文观测等领域^[3]。此类光学系统结构分为同轴和离轴两类,相比于传统同轴结构,离轴反射光学系统能通过对反射镜光学元件进行偏心或倾斜来避免同轴结构带来的中心遮拦问题^[4];因此,可变焦的离轴反射式光学系统具有较强的应用前景。

对于反射式变焦光学系统,目前许多研究人员对离轴三反及同轴四反光学系统设计方法进行了研究。Fu等^[4]应用初级像差理论建立同轴四反光学系统像差系数,设定系统遮拦比和放大率值,计算得到系统其他光学结构参数,然后基于自由曲面对其进行优化设计;Li等^[5]设计了一种用于遥感技术的离轴四镜消像散望远镜系统,该系统由两个非球面和两个球面镜组成;刘强等^[6]推导了离轴三反光学系统的线性像散平衡条件,在此基础上采用倾斜母镜光轴的方法设计了一种大相对孔径时大视场像散校正的斜轴离轴三反光学系统;张庭成等^[7]基于赛德尔像差理论研究了离轴三反变焦光学系统设计方法;冯俐铜等^[8]分析了三反射式光学系统变焦理论,对此类系统初始结构进行了高斯解分析并给出了其计算方法,设计了一种离轴三反射镜红外变焦光学系统;夏春秋等^[9]根据微分方程设计方法原理及思路,提出了同轴四反射镜光学系统模型,并应用微分方程方法设计了一款大视场离轴四反射镜光学系统;杨旭等^[10]以三阶像差理论和矢量像差理论为基础,分别设计了太赫兹波段的共轴和无遮拦三反变焦系统。

离轴全反射式变焦光学系统具有长焦距、大口径及变焦等特点,如果光学元件均采用全反射镜来设计,将导致系统设计难度大大提升;由于离轴四反变焦光学系统相比于三反系统来说,增加了一块反射镜,系统就具有更多设计自由度,像差平衡和校正能力更强,使得离轴四反变焦光学系统应用成为未来发展的一种趋势,它的设计相关问题是目前的研究难点和热点。本文分析了四反射镜光学系统变焦模型,结合变焦原理和初级像差理论,构建了同轴四反射镜变焦光学系统初始结构求解模型,应用自适应变异概率遗传优化算法对其进行求解;然后,通过将得到的系统中各块反射镜进行偏心 and 倾斜设置来解决系统中中心遮拦问题,并借助于光学设计软件 Zemax 校正系统像差,得到了一种长焦距离轴四反三档变焦光学系统设计实例,验证了本文讨论的设计方法具有较大的实际应用前景。

2 四反射镜变焦系统的设计方法

2.1 变焦原理

传统变焦光学系统中运动组元间距离变化后,会

引起像面漂移,需要通过光学元件组元之间作相应补偿运动来抵消像面移动;按照补偿方式不同,主要有光学补偿式和机械补偿式变焦两种类型。随着机械加工及装调水平不断提高,机械补偿方式优势将会更加突出,目前大多数变焦系统都采用这种补偿方式。针对目前对四反射镜变焦光学系统提出了大接收口径、长焦距及高成像分辨率等要求,使得系统像差校正难度不断提高;同时,通过变化系统中反射镜之间的间隔来满足焦距位置变化效果,从而实现系统设计运动组元数目达到最佳,增加设计自由度,有效地校正各类像差。离轴四反射镜变焦系统是在同轴情况基础上,将系统中所有反射镜偏心和倾斜得到,因此,下面首先对同轴四反射镜变焦光学系统进行分析。

图 1 为同轴四反射镜变焦光学系统结构及光路图,该系统由主反射镜 M_1 、次反射镜 M_2 、第三反射镜 M_3 和第四反射镜 M_4 组成, $O_i (i=1, 2, 3, 4)$ 为反射镜 M_i 与中心轴的交点;任一孔径光线依次经过反射镜 M_1 、 M_2 、 M_3 和 M_4 反射后到达像平面 I 上,并分别交于 P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_4 ; $d_{i(i+1)} (i=1, 2, 3)$ 为沿中心轴反射镜 M_i 与 M_{i+1} 之间的距离;另外,定义第 i 块反射镜 M_i 的焦距值为 $f'_i = R_i/2$, 其中 R_i 为第 i 块反射镜对应的曲率半径。

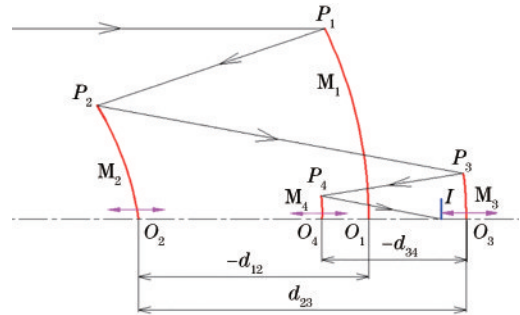


图 1 同轴四反射镜变焦光学系统结构及光路图

Fig. 1 Structure and optical scheme of coaxial four-mirror reflective zoom optical system

四反射镜变焦系统在变焦过程中,系统总长需要一直保持不变,因此必须保证第二块 M_2 至第四块反射镜 M_4 的共轭距之和在变焦过程中保持不变^[11],即

$$L_j = \left(\frac{1}{\beta_{2j}} - \beta_{2j} \right) f'_2 + \left(\frac{1}{\beta_{3j}} - \beta_{3j} \right) f'_3 + \left(\frac{1}{\beta_{4j}} - \beta_{4j} \right) f'_4, \quad j=1, 2, \dots, k, \quad (1)$$

式中: k 表示变焦光学系统中具有的焦距值个数; β_{2j} 、 β_{3j} 和 β_{4j} 分别为系统在第 j 个焦距位置时反射镜 M_2 至 M_4 的垂轴放大率。另外,系统的变焦是通过反射镜之间的间隔来实现的,则反射镜 M_1 至反射镜 M_2 、反射镜 M_2 至反射镜 M_3 和反射镜 M_3 至反射镜 M_4 的间隔分别为^[11]

$$d_{12j} = f_1' \left(1 - \beta_{1j}\right) - f_2' \left(1 - \frac{1}{\beta_{2j}}\right), d_{23j} = f_2' \left(1 - \beta_{2j}\right) - f_3' \left(1 - \frac{1}{\beta_{3j}}\right), d_{34j} = f_3' \left(1 - \beta_{3j}\right) - f_4' \left(1 - \frac{1}{\beta_{4j}}\right), \quad (2)$$

此外,系统在各个位置的焦距值可以表示为

$$F_i = f_1' \beta_2 \beta_3 \beta_4 \circ \quad (3)$$

应用高斯光学和矩阵光学理论,四反射镜光学系统的系统矩阵可以用下式表示:

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\varphi_4 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & d_{34} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\varphi_3 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & d_{23} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\varphi_2 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & d_{12} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\varphi_1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: $\varphi_i (i=1, 2, 3, 4)$ 表示第*i*块反射镜 M_i 的光焦度,其计算表达式为 $\varphi_i = (-1)^i / f_i'$; $d_{i(i+1)}$ 为反射镜 M_i 与反射镜 M_{i+1} 之间的间隔。因此,根据系统矩阵的性能和式(4),就能得到四反射镜光学系统等效光焦度方程为

$$\Phi = -S[2, 1] = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 - d_{12}\varphi_1 \cdot (\varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4) - d_{23}(\varphi_1\varphi_3 + \varphi_1\varphi_4 + \varphi_2\varphi_3 + \varphi_2\varphi_4) - d_{34}\varphi_4(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) + d_{12}d_{23}\varphi_1\varphi_2 \cdot (\varphi_3 + \varphi_4) + d_{12}d_{34}\varphi_1\varphi_4(\varphi_2 + \varphi_3) + d_{23}d_{34}\varphi_3\varphi_4 \cdot (\varphi_1 + \varphi_2)d_{12}d_{23}d_{34}\varphi_1\varphi_2\varphi_3\varphi_4 \circ \quad (5)$$

2.2 像差分析方法及目标函数

对于四反射镜光学系统,反射光学元件即使在宽光谱范围内也不会产生色差,因此,根据赛德尔三阶差理论,系统的球差 S_1 、彗差 S_2 、场曲 S_3 和像散 S_4 像差系数表达式,分别为

$$S_2 = \frac{D^3\omega}{16f_1'^2} + \frac{D^3\omega}{16f_1'^2} \left(1 - \frac{1}{\beta_2^2}\right) \left[\frac{1}{2\beta_2} - \frac{1}{2} - \frac{f_2'}{2f_1'} \left(1 - \frac{1}{\beta_2^2}\right)\right] + \frac{D^3\omega}{16f_1'^2\beta_2^2} \left(1 - \frac{1}{\beta_3^2}\right) \left[\frac{1}{2\beta_3} - \frac{1}{2} + \frac{f_3'}{2\beta_2} \left(1 - \frac{1}{\beta_3^2}\right) \left(\frac{1}{f_1'\beta_2} + \frac{1}{f_2'}\right)\right] + \frac{D^3\omega}{16f_1'^2\beta_2^2\beta_3^2} \left(1 - \frac{1}{\beta_4^2}\right) \left[\frac{1}{2\beta_4} - \frac{1}{2} + \frac{f_4'}{2f_1'\beta_2\beta_3} \left(1 - \frac{1}{\beta_4^2}\right) \left(\frac{f_1'\beta_2}{f_3'} - \frac{1}{\beta_2\beta_3} - \frac{f_1'}{f_2'\beta_3}\right)\right], \quad (8)$$

$$S_3 = \frac{D^2\omega^2}{4f_1'f_2'} \left(1 + \frac{1}{\beta_2}\right) \left[f_1' - f_2' \left(1 - \frac{1}{\beta_2}\right)\right] \left\{ \frac{1}{4f_1'} \left(1 + \frac{1}{\beta_2}\right) \left[f_1' - f_2' \left(1 - \frac{1}{\beta_2}\right)\right] - 1 \right\} - \frac{D^2\omega^2}{4f_1'f_3'\beta_2} \left(1 + \frac{1}{\beta_3}\right) \left\{ \frac{1}{4f_1'\beta_2} \cdot \left[f_1'\beta_2 + \frac{f_3'}{\beta_2} \left(1 - \frac{1}{\beta_3}\right) + \frac{f_1'f_3'}{f_2'} \left(1 - \frac{1}{\beta_3}\right) \right] \left(1 + \frac{1}{\beta_3}\right) - 1 \right\} \left[f_1'\beta_2 + \frac{f_3'}{\beta_2} \left(1 - \frac{1}{\beta_3}\right) + \frac{f_1'f_3'}{f_2'} \left(1 - \frac{1}{\beta_3}\right) \right] + \frac{D^2\omega^2}{4f_1'f_4'\beta_2\beta_3} \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta_4}\right) \left\{ \frac{1}{4f_1'\beta_2\beta_3} \left(1 + \frac{1}{\beta_4}\right) \left[f_1'\beta_2\beta_3 + f_4' \left(1 - \frac{1}{\beta_4}\right) \left(\frac{f_1'\beta_2}{f_3'} - \frac{1}{\beta_2\beta_3} - \frac{f_1'}{f_2'\beta_3}\right) \right] - 1 \right\} - \frac{D^2\omega^2}{4} \left(\frac{1}{f_1'} - \frac{1}{f_2'} + \frac{1}{f_3'} - \frac{1}{f_4'}\right), \quad (9)$$

$$S_4 = \frac{D^2\omega^2}{4f_1'} - \frac{D^2\omega^2}{4f_2'} + \frac{D^2\omega^2}{4f_3'} - \frac{D^2\omega^2}{4f_4'}, \quad (10)$$

式中: D 为系统的入瞳直径; ω 为光线视场角。

三档变焦光学系统需要满足系统在三个焦距位置处实现变焦,使得在此类系统设计过程中,需要综

$$\begin{cases} S_1 = \sum_{i=1}^n h_i P_i, & S_2 = \sum_{i=1}^n y_i P_i - J \sum_{i=1}^n W_i \\ S_3 = \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{h_i} P_i - 2J \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{h_i} W_i, & S_4 = J^2 \sum_{i=1}^n \mu_i \varphi_i \end{cases}, \quad (6)$$

式中: n 为光学系统中反射镜数目,对于四反射镜光学

系统,它的取值应为4; $P_i = \left[\frac{\Delta u_i}{\Delta(1/n_i)} \right]^2 \Delta \frac{u_i}{n_i}$, $W_i =$

$\left[\frac{\Delta u_i}{\Delta(1/n_i)} \right] \Delta \frac{u_i}{n_i}$, Δ 表示某一光学面物方和像方的差值;

n_i 为第*i*块反射镜的折射率; u 为孔径角, $\mu_i = -\Delta n_i / (2n_i)$; J 为拉-赫不变量; h_i 和 y_i 分别为任意一条孔径光线和主光线在第*i*块反射镜光学面上的高度。在同轴情况下系统设计中,假定孔径光阑放置于反射镜 M_1 处及物体位于无穷远,再应用光线追迹中的正切计算方法得到孔径光线和主光线在各块反射镜光学面上的入射高度、入射角和出射角。因此,根据上述求解光学参量,结合式(6),能推导出系统在不同焦距值下的球差、彗差、场曲和像散像差系数关于各块反射镜焦距值 f_i' 和垂轴放大率 β_i 的解析表达式^[11-12],具体分别为

$$S_1 = -\frac{D^4}{64f_1'^4\beta_2^4\beta_3^4\beta_4^2} \left[f_1'\beta_2^4\beta_3^4\beta_4^2 - f_2'\beta_3^4\beta_4^2(\beta_2^2 - 1)^2 + f_3'\beta_4^2(\beta_3^2 - 1)^2 - f_4'(\beta_4^2 - 1)^2 \right], \quad (7)$$

合考虑三个变焦位置处的系统成像性能。因此,针对系统在三个焦距位置的情况,以每个焦距位置处的球差、彗差、场曲和像散像差线性加权求和来表示其成像情况,则三档变焦光学系统像质综合评价函数表达式为

$$Q = \sum_{j=1}^3 \psi_j S_j = \sum_{j=1}^3 \psi_j (\eta_{1j} S_{1j} + \eta_{2j} S_{2j} + \eta_{3j} S_{3j} + \eta_{4j} S_{4j}), \quad (11)$$

式中: S_{1j} 、 S_{2j} 、 S_{3j} 和 S_{4j} 分别为系统在第 j 个焦距位置应用式(7)~(10)求解得到的球差、彗差、场曲和像散像差系数; S_j 表示该焦距位置的系统总像差系数; ψ_j 为 S_j 对应的权重系数; η_{1j} 、 η_{2j} 、 η_{3j} 和 η_{4j} 分别对应为第 j 个焦距位置下系统球差、彗差、场曲和像散像差系数的权重因子。

2.3 同轴四反变焦系统初始结构求解

由式(11)可知, 目标函数 Q 是对光学系统成像质量的综合评判, 它的数值越小表示系统像差越小, 成像质量越高。然而, 目标函数 Q 是关于系统中光学参量 f_1' 、 f_2' 、 f_3' 、 f_4' 、 β_{2j} 、 β_{3j} 和 β_{4j} 的函数表达式, 很难直接采用解析方法得到精确解, 因此将其转化为目标函数 Q 的最优化问题, 需要通过优化方法来计算。

遗传算法是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型, 是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法, 在求解较为复杂的组合优化问题时, 相对于一些常规的优化算法, 能较快地获得较好的优化结果^[13]。相对于其他智能优化算法, 它实现简单、通用性强, 具有较好的并行性和鲁棒性, 但是也存在过早收敛和局部搜索能力弱等问题。针对标准遗传算法存在的上述不足, 以及变异概率在整个搜索过程中是固定不变的, 使得算法求解过程较长且易走向局部极值, 因此本文采用了在该遗传算法基础上, 加入根据适应度自动调整变异概率的特点得到的一种自适应变异概率的遗传算法来对目标函数 Q 进行优化求解, 其具体过程如下:

1) 编码和初始种群。应用二进制编码对目标函数进行优化求解, 将需要优化的变量 f_1' 、 f_2' 、 f_3' 、 f_4' 、 β_{2j} 、 β_{3j} 和 β_{4j} 进行编码, 由 7 个参数组成的编码串为一个染色体, 染色体为目标函数的解, 其次随机产生多个染色体组成算法初始种群;

2) 计算适应度值。选取适应度函数 $\Gamma = 1/Q$, 即适应度值越大, 目标函数值越小, 说明系统成像性能越好;

3) 交叉。交叉操作采用均匀交叉和多点交叉并行方式;

4) 自适应变异。变异操作采用基因变异方式, 其算法中采用变异概率 p_m 的自适应表达式为

$$p_m = \begin{cases} \frac{\Psi - \Psi_{\text{avg}}}{\Psi_{\text{max}} - \Psi_{\text{avg}}} p_{m(\text{max})} + \frac{\Psi - \Psi_{\text{avg}}}{\Psi_{\text{max}} - \Psi_{\text{avg}}} p_{m(\text{min})}, & \Psi \geq \Psi_{\text{avg}} \\ p_{m(\text{max})}, & \Psi < \Psi_{\text{avg}} \end{cases}, \quad (12)$$

式中: Ψ_{max} 是群体中最大适应度值; Ψ_{avg} 是每代群体的平均适应度值; Ψ 是变异个体的适应度值; $p_{m(\text{max})}$ 和 $p_{m(\text{min})}$ 分别是设定的最大和最小变异概率。

5) 终止条件。设定最大迭代次数, 判断是否达到该次数, 如果没有达到, 则返回 2), 直至满足需要的迭代次数, 执行 6);

6) 解码并输出相关光学参数。由上述给出自适应变异概率遗传算法运行步骤, 则整个过程的系统初始结构参数求解流程如图 2 所示。根据给出系统像差优化目标函数 Q , 结合式(1)~(5), 通过 Matlab 软件平台编写自适应变异概率遗传算法程序, 计算出系统各块反射镜的半径和间距, 由此便可得到此类系统初始结构, 经过离轴处理和进一步像差优化就能得到离轴四反变焦光学系统。

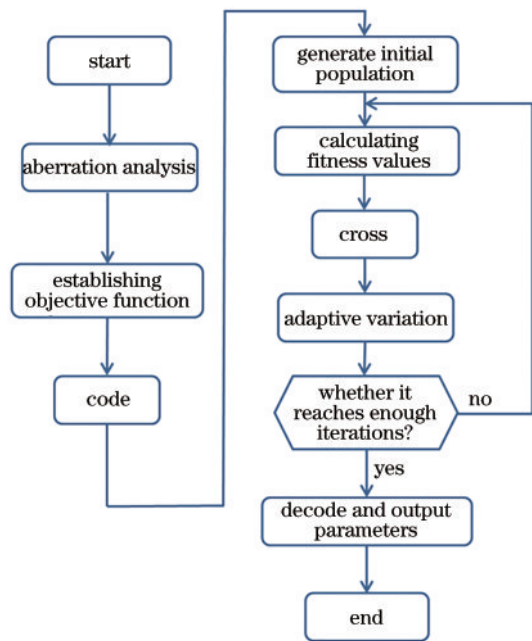


图 2 应用自适应变异概率遗传算法求解同轴四反变焦光学系统初始结构参数流程图

Fig. 2 Flow chart of solving initial structure parameters of coaxial four-reflective mirrors zoom optical system using adaptive variation probability genetic algorithm

3 四反射镜变焦系统的设计实例

3.1 光学系统设计

在上述讨论的同轴四反射镜变焦光学系统成像分析方法基础上, 结合光学设计软件 Zemax, 设计一个高成像质量的长焦距离轴四反射式三档变焦距光学系统。该三档变焦距光学系统设计指标如下: 成像光谱波段为 400~850 nm; 探测器的单个像元尺寸为 $12.5 \mu\text{m} \times 12.5 \mu\text{m}$; 入瞳直径为 60 mm; 三档变焦距值分别为 300、600、900 mm, 子午和弧矢方向的最大视场角分别为 0.4° 和 0.6° 。

离轴反射式三档变焦光学系统是在同轴情况下, 对其进行偏心或倾斜得到。设计光学系统时, 变焦方式采用三档机械补偿变焦; 然后, 应用式(7)~(10)来分别计算系统三档焦距位置 $f' = 300 \text{ mm}$ 、 $f' =$

600 mm 和 $f' = 900$ mm 情况下 0.707 带宽视场的球差、彗差、场曲和像散像差系数 S_{1j} 、 S_{2j} 、 S_{3j} 和 S_{4j} ($j = 1, 2, 3$), 将权重系数 η_{1j} 、 η_{2j} 、 η_{3j} 、 η_{4j} 和 ϕ_j 均设定为 1。另外, 为了使求解得到的系统光学结构参数具有物理意义, 根据图 1 给出系统结构及光路图, 对求解过程中加一个约束条件^[12]:

$$-\frac{d_{121}}{d_{231}} = \alpha_1, \quad -\frac{d_{341}}{d_{231}} = \alpha_2, \quad d_{231} > 0, \quad 0 < \alpha_1, \alpha_2 < 1, \quad (13)$$

式中: d_{121} 、 d_{231} 和 d_{341} 分别为系统在焦距为 $f' = 300$ mm 时反射镜 M_1 与反射镜 M_2 、反射镜 M_2 与反射镜 M_3 及反射镜 M_3 与反射镜 M_4 之间的间隔; 在系统设计过程中, 比值系数 α_1 和 α_2 分别取为 0.35 和 0.5; 并在应用自适应变异概率遗传算法求解目标函数 Q 的过程中, 该算法相关主要参数设定为种群数量为 100, 交叉概率为 0.8, 最大进化代数 1000 代; 最后, 根据图 2 给出的求解流程图, 得到一组较合适的同轴四反射镜变焦光学系统初始结构参数。

在本设计中, 通过将同轴四反射镜变焦光学系统中每块反射镜沿着 Y 轴方向偏心, 并绕着 X 轴方向倾斜, 规定顺时针旋转为正, 反之为负, 得到离轴四反射镜变焦光学系统初始结构。计算出来的同轴四反射镜变焦光学系统结构初始解只是满足基本设计指标的粗略结构, 并且对其进行了离轴处理, 一般情况下成像质

量都比较差, 需要借助光学设计软件 Zemax 构建系统三个焦距的多重结构, 将所有反射镜半径及反射镜之间的间隔设定为变量, 同时为了进一步增加反射镜非球面系数作为优化变量来增加设计自由度, 将每块反射镜光学面均采用非球面设计, 其对应的面型公式^[14]为

$$Z = \frac{ch^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2h^2}} + a_2h^2 + a_4h^4 + a_6h^6 + a_8h^8 + \dots, \quad (14)$$

式中: k 为二次曲面的圆锥系数; $c = 1/R_0$, R_0 为非球面顶点曲率半径; h 为非球面上任一点到光轴的距离; a_2 、 a_4 、 a_6 、 a_8 、 \dots 为非球面相对于基准二次曲面的变形系数。

根据上述方法确定好光学系统设计的优化变量后, 利用光学设计软件 Zemax 中的操作数构建系统优化评价函数, 对得到离轴四反射镜三档变焦光学系统进行反复不断的像差校正和平衡; 并在优化过程中根据每次优化设计结果对评价函数中对应像差控制操作数权重系数进行调整^[15-16]。通过上述的设计优化方法, 最终得到了一款满足系统各项性能指标的离轴四反射镜三档变焦光学系统。该光学系统三档变焦的结构及光路图如图 3 所示, 系统中各反射镜曲率半径、间隔由表 1 给出, 并且各反射镜非球面系数及绕着 X 轴方向倾斜量和沿着 Y 轴方向偏心量分别由表 2 和表 3 给出。

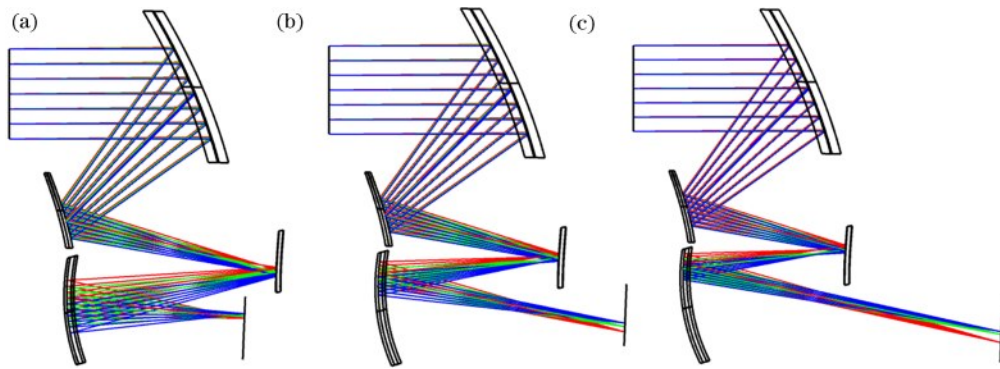


图 3 离轴四反射镜三档变焦光学系统结构及光路图。(a) $f' = 300$ mm; (b) $f' = 600$ mm; (c) $f' = 900$ mm

Fig. 3 Structure and optical scheme of off-axis four-mirror reflective three-gear zoom optical system. (a) $f' = 300$ mm; (b) $f' = 600$ mm; (c) $f' = 900$ mm

表 1 离轴四反射镜三档变焦光学系统结构参数

Table 1 Structural parameters of off-axial four-mirror reflective three-gear zoom optical system

Surface	Type	Radius /mm	Thickness /mm		
			$f' = 300$ mm	$f' = 600$ mm	$f' = 900$ mm
STOP	Standard	Infinity		150.00	
	Coordinate Break			0.00	
M_1	Even Asphere	-291.67		0.00	
	Coordinate Break			-105.44	
M_2	Even Asphere	-121.36		0.00	
	Coordinate Break		141.82	118.73	112.19
M_3	Even Asphere	477.05		0.00	
	Coordinate Break		-135.35	-116.87	-108.46
M_4	Even Asphere	132.27	118.30	169.87	230.43

表 2 各块反射镜的非球面系数

Table 2 Aspherical coefficients of each reflective mirror

Mirror	Aspherical coefficient				
	Conic	4 th order term	6 th order term	8 th order term	10 th order term
M ₁	-1.114	-2.051×10 ⁻¹⁰	-3.742×10 ⁻¹⁵	2.194×10 ⁻¹⁹	-3.764×10 ⁻²⁴
M ₂	-3.544	6.310×10 ⁻⁸	-5.512×10 ⁻¹²	-2.048×10 ⁻¹⁶	5.376×10 ⁻²⁰
M ₃	16.528	5.847×10 ⁻⁸	-6.097×10 ⁻¹²	1.745×10 ⁻¹⁶	-1.807×10 ⁻²⁰
M ₄	-0.307	1.639×10 ⁻⁸	-5.011×10 ⁻¹²	1.830×10 ⁻¹⁵	-2.237×10 ⁻¹⁹

表 3 各块反射镜的最终倾斜和偏心量

Table 3 Final tilts and decenters of each mirror

Mirror	Tilt along X axis / (°)	Decenter along Y axis / mm
M ₁	1.200	-130.000
M ₂	-0.778	1.421
M ₃	-10.526	-87.322
M ₄	-5.729	57.525

表 4 光学系统成像性能分析选取的视场角

Table 4 Field of view angle selected for imaging performance analysis of optical system

No.	$f' = 300$ mm		$f' = 600$ mm		$f' = 900$ mm	
	X / (°)	Y / (°)	X / (°)	Y / (°)	X / (°)	Y / (°)
1	-0.2	-0.3	-0.15	-0.2	-0.1	-0.1
2	-0.14	-0.21	-0.105	-0.14	0.07	0.07
3	0	0	0	0	0	0
4	0.14	0.21	0.105	0.14	0.07	0.07
5	0.2	0.3	0.15	0.2	0.1	0.1

3.2 光学系统像质评价及分析

文中所设计的离轴四反射镜三档变焦光学系统,在三档变焦 $f' = 300$ mm、 $f' = 600$ mm 和 $f' = 900$ mm 位置处,子午和弧矢方向上有效最大视场分别为 $-0.2^\circ \sim 0.2^\circ$ 和 $-0.3^\circ \sim 0.3^\circ$ 、 $-0.15^\circ \sim 0.15^\circ$ 和 $-0.2^\circ \sim 0.2^\circ$ 、 $-0.1^\circ \sim 0.1^\circ$ 和 $-0.1^\circ \sim 0.1^\circ$ 。下面对上述设计的离轴四反射镜三档变焦光学系统进行成像质量分析时,在有效子午和弧矢视场范围内,选用 5 个视场,如表 4 所示。

根据设计指标中给出的探测器单个像元尺寸,可

以计算出该光学系统的奈奎斯特频率为 $1000 / (2 \times 12.5) = 40$ lp/mm,则优化设计后的离轴四反射镜三档变焦光学系统在截止频率为 40 lp/mm 处焦距为 300、600、900 mm 的调制传递函数(MTF)曲线如图 4 所示;同时,系统在三档焦距位置处,表 4 中给出的视场对应点列图的均方根(RMS)半径值由表 5 给出。

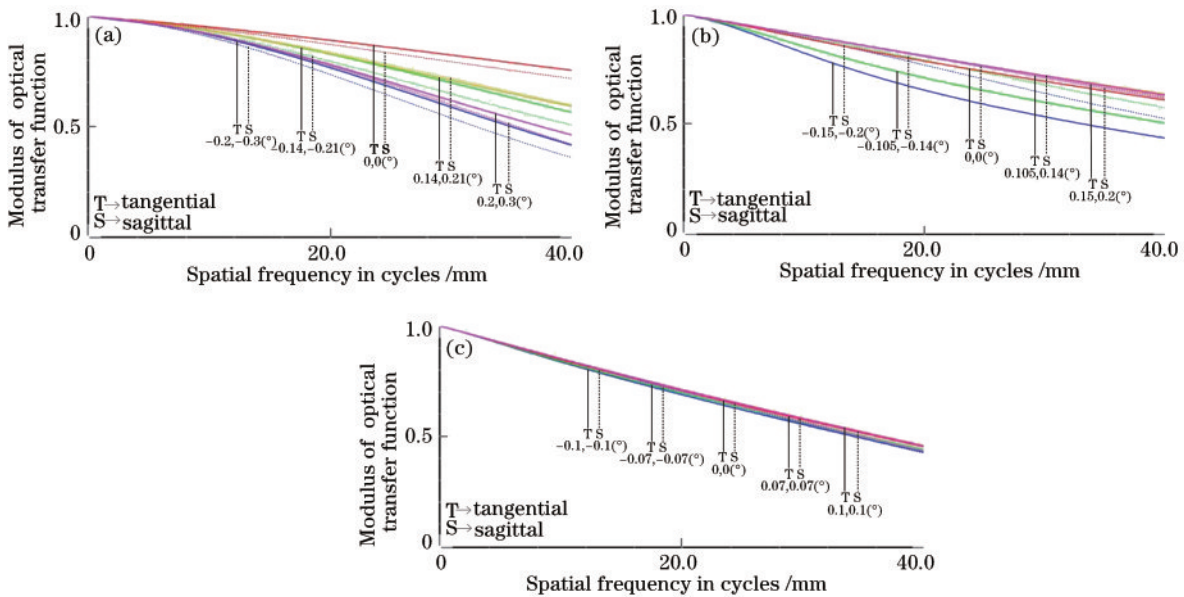


图 4 离轴四反射镜三档变焦光学系统的 MTF 曲线图。(a) $f' = 300$ mm; (b) $f' = 600$ mm; (c) $f' = 900$ mm

Fig. 4 MTF curve diagram of off-axis four-mirror reflective three-gear zoom optical system. (a) $f' = 300$ mm; (b) $f' = 600$ mm; (c) $f' = 900$ mm

从图 4 可以得出,在奈奎斯特截止频率 40 lp/mm 处,焦距值为 300、600、900 mm 时子午和弧矢方向上各个视场的 MTF 值分别大于 0.356、0.433、0.423,且

MTF 曲线比较平滑;从表 5 给出的三档变焦位置处的点列图 RMS 半径值均小于设计指标中给出探测器单个像素尺寸 $12.5 \mu\text{m}$,同时系统的相对照度值均大于

表 5 系统在三档变焦位置处,表 4 给出的视场角情况下点列图 RMS 半径值

Table 5 RMS radii of spot diagram of field of view angles listed in Table 4 at three-gear zoom position of optical system

Field of view angle / (°)	RMS radius / μm $f'=300\text{ mm}$	Field of view angle / (°)	RMS radius / μm $f'=600\text{ mm}$	Field of view angle / (°)	RMS radius / μm $f'=900\text{ mm}$
(-0.2°, -0.3°)	9.039	(-0.15°, -0.2°)	11.529	(-0.1°, -0.1°)	7.665
(-0.14°, -0.21°)	7.187	(-0.105°, -0.14°)	6.685	(-0.07°, -0.07°)	7.205
(0°, 0°)	4.019	(0°, 0°)	6.431	(0°, 0°)	6.454
(0.14°, 0.21°)	5.548	(0.105°, 0.14°)	4.482	(0.07°, 0.07°)	5.857
(0.2°, 0.3°)	6.910	(0.15°, 0.2°)	4.087	(0.1°, 0.1°)	5.908

0.98。综上所述,本文优化设计得到的长焦距离轴四反射镜三档变焦光学系统的成像质量好、相对照度高、结构紧凑,符合设计要求。

4 结 论

基于反射光学系统变焦原理和近轴三阶像差理论,推导了相应的像差分析表达式,构建了同轴四反射镜三档变焦光学系统的初始结构求解模型,给出了该模型中参数计算方法;在该系统结构基础上,应用光学设计软件 Zemax 对其进行离轴和倾斜处理后,引入非球面设计反射镜光学表面,对离轴四反射镜三档变焦光学系统像差进一步优化校正,最终得到了一种三档焦距值为 300、600、900 mm,子午和弧矢方向的最大视场角分别为 0.4° 和 0.6° 的系统,并且在三档焦距下均具有较好的成像性能,且结构紧凑,从而验证了文中讨论的此类光学系统设计方法的有效性,它可为空间遥感及光学仪器发展提供一定指导作用,同时该设计方法将能进一步扩展到具有更多档焦距位置或反射镜的离轴全反射式变焦光学系统的设计中。

参 考 文 献

- [1] Corbacho V V, Kuiper H, Gill E. Review on thermal and mechanical challenges in the development of deployable space optics[J]. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2020, 6(1): 010902.
- [2] 李旭阳, 倪栋伟, 杨明洋, 等. 基于自由曲面的大视场空间相机光学系统设计[J]. 光子学报, 2018, 47(9): 0922003.
Li X Y, Ni D W, Yang M Y, et al. Design of large field of view space camera optical system based on freeform surfaces[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(9): 0922003.
- [3] 黄晓园, 黄铭焯, 陈冠亮, 等. 高分辨率空间遥感卫星的离轴三反光学系统设计[J]. 光学与光电技术, 2018, 16(4): 75-79.
Huang X Y, Huang M Y, Chen G L, et al. Off-axis three-mirror reflective system for high resolution space remote sensing satellite[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2018, 16(4): 75-79.
- [4] Fu L X, Qiu R S, Zhang J K, et al. Design of off-axis reflective system with four mirrors based on freeform surface[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11548: 1154813.
- [5] Li X L, Xu M, Ren X D, et al. An optical design of off-axis four-mirror-anastigmatic telescope for remote sensing [J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2012, 16(3): 243-246.
- [6] 刘强, 王欣, 黄庚华, 等. 大视场大相对孔径斜轴离轴三反望远镜的光学设计[J]. 光子学报, 2019, 48(3): 0322002.
Liu Q, Wang X, Huang G H, et al. Optical design of wide field view and large relative aperture off-axis three-mirror reflective system with tilted optical axis[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(3): 0322002.
- [7] 张庭成, 王涌天, 常军, 等. 三反变焦系统设计[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 3034-3038.
Zhang T C, Wang Y T, Chang J, et al. Design of reflective zoom systems with 3 mirrors[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 3034-3038.
- [8] 冯俐俐, 孟军合, 张振, 等. 全反射式红外变焦光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2749-2752.
Feng L T, Meng J H, Zhang Z, et al. Design of all-reflective zoom IR optical systems[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(10): 2749-2752.
- [9] 夏春秋, 钟兴, 金光. 基于微分方程方法的离轴四反光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0922002.
Xia C Q, Zhong X, Jin G. Design of the off-axis four mirrors system by differential equations[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0922002.
- [10] 杨旭, 牟达, 陈炳旭, 等. 基于太赫兹波段的三反变焦系统设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2021, 44(1): 1-6.
Yang X, Mu D, Chen B X, et al. Design of three reflective zoom system based on terahertz band[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 44(1): 1-6.
- [11] 闫佩佩, 樊学武. 新型离轴反射式变焦光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1581-1586.
Yan P P, Fan X W. New design of an off-axis reflective zoom optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(6): 1581-1586.
- [12] 常军, 张晓芳, 张柯. 现代反射变焦光学系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
Chang J, Zhang X F, Zhang K. Modern reflective zoom optical system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017.
- [13] 朱昌会, 周佩, 朱江平, 等. 利用遗传算法优化误差扩散核参数的条纹二值编码方法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(21): 2110002.
Zhu C H, Zhou P, Zhu J P, et al. Stripe binary encoding

- method using genetic algorithms to optimize kernel parameters of error diffusion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(21): 2110002.
- [14] 杨通, 段瓔哲, 程德文, 等. 自由曲面成像光学系统设计: 理论、发展与应用[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0108001.
Yang T, Duan Y Z, Cheng D W, et al. Freeform imaging optical system design: theories, development, and applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0108001.
- [15] 操超, 廖胜, 廖志远, 等. 基于自由曲面的大视场离轴反射光学系统设计[J]. *光学学报*, 2020, 40(8): 0808001.
Cao C, Liao S, Liao Z Y, et al. Design of off-axis reflective optical system with large field-of-view based on freeform surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0808001.
- [16] 钟兴, 马驰, 李艳杰, 等. 大视场离轴三反光学系统场曲特性与装调方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(9): 0922001.
Zhong X, Ma C, Li Y J, et al. Field curvature characteristics and alignment method for the off-axis three-mirror optical system with wide field-of-view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 0922001.