

基于自由曲面的离轴三反光学系统设计方法研究

李俊阳^{1,2*}, 李文强^{2**}, 龙尤², 周亮², 高阳²

¹光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳, 471000;

²中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳, 471000

摘要 离轴反射光学系统克服了传统折射系统的材料限制, 具有大口径、小体积、轻量化、无色差等优点, 随着自由度极高的自由曲面的大量应用, 校正了离轴系统引入的非对称像差, 成为了研究的热点。针对离轴三反初始结构求解复杂的问题, 介绍了几种离轴反射系统的常用设计方法, 从设计原理上将其归结为两类思路: 一是根据像差理论先建立同轴系统的初始结构, 通过对光学系统的离轴优化实现无中心遮拦; 二是直接构建无中心遮拦的简单光学系统, 在优化过程中利用复杂面型进行像差优化。根据两类设计原理对不同结构的光学系统进行了实例设计, 优化过程和像质评价结果表明, 两类设计方法都能够满足设计指标, 仅优化过程不同, 其构建结果几乎具有等价性。其中第一类方法在像差优化中更具优势, 适用于离轴角较小的光学系统; 第二类方法避免了复杂的离轴优化, 适用于紧凑型光学系统。

关键词 光学设计; 离轴三反; 自由曲面; 初始结构求解

中图分类号 O435

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.092202

Design of Off-Axis Three-Mirror Optical System Based on Free-Form Surface

Li Junyang^{1,2*}, Li Wenqiang^{2**}, Long You², Zhou Liang², Gao Yang²

¹Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang, Henan 471000, China;

²Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang, Henan 471000, China

Abstract The off-axis reflective optical system overcomes the material limitation of traditional refractive system and has the advantages of large aperture, small volume, lightweight and non-chromatic aberration. With the extensive application of freeform surface, which has very high degree of freedom, it has corrected the asymmetric aberration introduced by off-axis system, which has become a research hotspot. Aiming at the complex problem of solving the off-axis three-mirror initial structure, this paper introduces several common design methods of off-axis reflection system, which can be summarized as two ideas from the design principle: first, the initial structure of coaxial system is established according to aberration theory, and the off-axis optimization of optical system is carried out to achieve non-central occlusion; the second is to directly construct a simple optical system without central obscuration, using the complex surface for aberration optimization in the optimization process. According to the two kinds of design theory, the optical systems with different structures are designed as examples. The optimization process and image quality evaluation function show that both methods can meet the design targets, but the optimization process is different, and the construction results are almost equivalent. Among them, the first method is more advantageous in aberration optimization, which is suitable for optical systems with small off-axis angle; the second method avoids complex off-axis optimization and is suitable for compact optical systems.

Key words optical design; off-axis three-mirror; free-form surface; initial structure solution

OCIS codes 220.2740; 080.4228; 080.2720; 080.4035

收稿日期: 2019-08-05; 修回日期: 2019-08-28; 录用日期: 2019-09-26

* E-mail: 1281636092@qq.com; ** E-mail: 469406116@qq.com

1 引言

与传统的折射系统相比,离轴反射系统无需针对色差进行复杂优化,使用波段范围较宽,使得光学系统突破了材料的限制,易于实现大口径加工,以及能通过镀膜提高系统效率;光路在空间布局灵活的反射式系统中不断折叠,可以实现光学系统的轻量化设计,减小结构尺寸;通过离轴偏心实现无中心遮拦设计,相比同轴反射系统有利于增大视场,提升像质。离轴两反系统自由度不够高,扩大视场时像差校正困难;四反系统自由度高,但系统加工装调难度大,稳定性不足^[1]。随着数控加工技术的进步,自由曲面的应用使得三反系统得以校正离轴系统引入的非对称像差,满足现代光学系统对于扩大视场、提升像质、实现系统轻量化的要求,在空间光学系统中得到了大量应用^[2]。

离轴三反系统初始结构求解复杂。传统的构建方法是根据赛德尔(Seidel)三级像差方程或光学传递矩阵^[3-6],依据给定条件求得同轴三反系统初始结构,在优化过程中对系统光阑、各镜面进行小幅度倾斜偏心,针对每次离轴引入的像差进行优化,以此循环迭代进行离轴优化,最终实现无中心遮拦的光学系统。为了避免离轴优化的复杂运算,提出了利用简单的光学结构,如平面镜和抛物面组合或将二次曲面焦点相互衔接的方法取代同轴系统,直接搭建出无中心遮拦的光学结构,然后依靠光学设计软件使用复杂面型对其进行像差优化,最终成为符合设计要求的 optical 系统^[7]。

本文对两类离轴三反系统初始结构求解方法

进行了介绍,并分别根据设计原理进行了不同结构的光学系统实例设计,通过优化过程和设计结果对两类方法的适用范围和优缺点进行了分析讨论。

2 离轴三反系统初始结构求解

本文从离轴三反光学系统的设计理论出发,首先搭建同轴反射系统,然后对离轴优化的第一类求解方法进行简单介绍。在此基础上,分析了直接构建无中心遮拦的三反光学系统的第二类求解方法。

2.1 基于光学传递矩阵求解

首先搭建一个同轴三球面反射镜光学系统,近轴光学传递矩阵可以进行垂轴平面之间的计算,在此基础上进行系统离轴优化。由光线矢量线性变换原理可知^[8],每个垂轴光学元件可以用变换矩阵 \mathbf{R}_i 表示,各光学元件的间隔则可用变换矩阵 \mathbf{T}_j 表示^[9]。

$$\mathbf{T}_j = \begin{bmatrix} 1 & d_j \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\varphi_i & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: d_j 表示光学元件之间的间隔; φ_i 表示光学元件的光焦度。在球面反射镜系统中

$$\varphi_i = \frac{2}{r_i}. \quad (2)$$

则光学系统的变换矩阵 \mathbf{M} 可以用各矩阵逆向相乘表示为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \mathbf{R}_3 \mathbf{T}_2 \mathbf{R}_2 \mathbf{T}_1 \mathbf{R}_1. \quad (3)$$

将(1)式代入(3)式整理可得:

$$\begin{cases} A = 1 - d_2 \varphi_2 - d_1 \varphi_1 - d_2 \varphi_1 + d_1 d_2 \varphi_1 \varphi_2 \\ B = d_1 - d_1 d_2 \varphi_2 + d_2 \\ C = -\varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_3 + d_1 \varphi_1 \varphi_2 + d_1 \varphi_1 \varphi_3 + d_2 \varphi_1 \varphi_3 + d_2 \varphi_2 \varphi_3 - d_1 d_2 \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \\ D = 1 - d_1 \varphi_2 - d_1 \varphi_3 - d_2 \varphi_3 - d_1 d_2 \varphi_2 \varphi_3 \end{cases}. \quad (4)$$

光学系统的有效焦距 f 和后截距 l 可由矩阵光学理论求得,用 ABCD 矩阵表示为

$$f = -\frac{1}{C}, \quad (5)$$

$$l = -\frac{A}{C}. \quad (6)$$

若将前两个反射镜作为望远系统,则可得到:

$$d_1 = \frac{1}{\varphi_1} + \frac{1}{\varphi_2}. \quad (7)$$

由初级像差理论可知,欲使光学系统的场曲为零从而实现平像场,各个光学元件的光焦度需满足如下条件:

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0. \quad (8)$$

联立(5)~(8)式可求得:

$$\varphi_1 = \frac{1}{f-l}, \varphi_2 = \left[l \left(\frac{l}{f} - 1 \right) \right]^{-1}. \quad (9)$$

给定初始条件焦距和元件间的间距,即可求得后截距和各光学元件顶点半径。依据费马原理可

知,光沿着所需时间平稳的路径传播。实际光路对应的平稳可能是极大值、极小值,或某一稳定值。对于抛物面反射系统而言,平行光入射可以完美会聚在其焦点处,其光程正是稳定值,因此把三个光学元件都设计为抛物面,即 $k_i = -e_i^2 = -1$ 。则共轴三反光学系统的初始结构参数可全部求得,然后利用光学设计软件进行离轴优化。

2.2 基于 Seidel 像差方程求解

基于 Seidel 像差方程的光学系统求解仍然是以同轴三反光学系统作为设计起点,进行离轴优化。同轴三反光学系统如图 1 所示

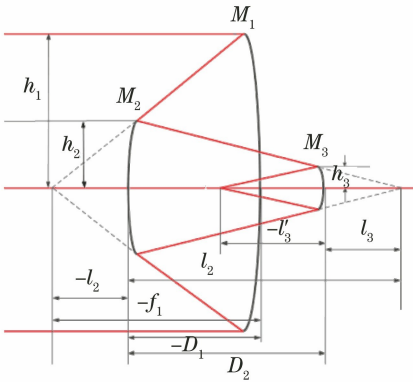


图 1 同轴三反光学系统结构图

Fig. 1 Structure of coaxial tri-reflection optical system

其中 M_1, M_2, M_3 分别是同轴三反光学系统的主镜、次镜和三镜,在反射光学系统中, $n_1 = n'_2 = n_3 = 1, n'_1 = n_2 = n'_3 = -1$,入射光为平行光,即 $l_1 = \infty, u_1 = 0$ 。

在同轴反射系统的求解中需要引入轮廓参量遮拦比 α 和放大率 $\beta^{[10]}$ 。次镜对主镜遮拦比为 $\alpha_1 = \frac{l_2}{f'_1} \approx \frac{h_2}{h_1}$,次镜放大率为 $\beta_1 = \frac{l'_2}{l_3} \approx \frac{u_2}{u'_2}$,三镜对次

镜遮拦比为 $\alpha_2 = \frac{l_3}{l'_2} \approx \frac{h_3}{h_2}$,三镜放大率为 $\beta_2 = \frac{l'_3}{l_3} \approx \frac{u_3}{u'_3}$ 。

由 Seidel 像差方程的第四项可知:

$$S_{IV} = \beta_1 \beta_2 - \frac{\beta_2(1 + \beta_1)}{\alpha_1} + \frac{1 + \beta_2}{\alpha_1 \alpha_2} \quad (10)$$

若使系统场曲为 0 满足平像场,即 $S_{IV} = 0$,则 β_2 可由 $\beta_1, \alpha_1, \alpha_2$ 表示。

三反光学系统分为中间成像和无中间成像两种结构,可以由轮廓参数的合理组合进行选择^[11],其对光学系统的影响如表 1、2 所示(+代表凸,一代表凹)。

系统结构参数光学元件半径和元件间间隔可以用轮廓参数 $\beta_1, \beta_2, \alpha_1, \alpha_2$ 和焦距 f 表示为

表 1 无中间成像的轮廓参数对于光学系统的影响
Table 1 Effects of contour parameters without intermediate imaging on optical system

System structure	α_1	α_2	β_1	β_2
-、+、-	(0,1)	(0,1)	$(-\infty, -1)$	$(-1, 0)$
-、+、-	(0,1)	$(1, +\infty)$	$(0, +\infty)$	$(0, +\infty)$
+、-、-	$(1, +\infty)$	$(1, +\infty)$	$(-\infty, -1)$	$(0, +\infty)$
+、-、-	$(1, +\infty)$	(0,1)	$(0, +\infty)$	$(-1, 0)$

表 2 中间成像的轮廓参数对于光学系统的影响
Table 2 Effects of contour parameters with intermediate imaging on optical system

System structure	α_1	α_2	β_1	β_2
-、+、-	$(-\infty, 0)$	$(1, +\infty)$	$(-1, 0)$	$(0, +\infty)$
-、+、-	(0,1)	$(-\infty, 0)$	$(-\infty, -1)$	$(0, +\infty)$
+、-、-	$(1, +\infty)$	$(-\infty, -1)$	$(0, +\infty)$	$(0, +\infty)$

$$\left\{ \begin{array}{l} r_1 = \frac{2f'}{\beta_1 \beta_2} \\ r_2 = \frac{2\alpha_1 f'}{\beta_2(1 + \beta_1)} \\ r_3 = \frac{2\alpha_1 \alpha_2 f'}{1 + \beta_1} \\ d_1 = \frac{(1 - \alpha_1)f'}{\beta_1 \beta_2} \\ d_2 = \frac{\alpha_1(1 - \alpha_2)f'}{\beta_2} \\ l = \alpha_1 \alpha_2 f' \end{array} \right. \quad (11)$$

得到三反系统的球面系统参数后,将轮廓参数 $\beta_1, \beta_2, \alpha_1, \alpha_2$ 和焦距 f 代入 Seidel 像差方程可以求得二次曲面系数 $-e_i^2$ 。反射系统不存在色差,离轴三反的需要校正的像差主要是球差、彗差、像散、场曲,其中场曲在上文中已经通过调整光焦度给予校正,其余三种像差利用二次曲面系数加以消除。

$$S_I = \frac{1}{4}[(e_1^2 - 1)\beta_1^3 \beta_2^3 - e_2^2 \alpha_1 \beta_2^3 (1 + \beta_1)^3 + e_3^2 \alpha_1 \alpha_2 (1 + \beta_2)^3 + \alpha_1 \beta_2^3 (1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2 - \alpha_1 \alpha_2 (1 + \beta_2)(1 - \beta_2)], \quad (12)$$

$$S_{II} = -e_2^2 \frac{(\alpha_1 - 1)\beta_2^3 (1 + \beta_1)^3}{4\beta_1 \beta_2} + e_3^2 \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1 + \beta_2)^3}{4\beta_1 \beta_2} + \frac{(\alpha_1 - 1)\beta_2^3 (1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2}{4\beta_1 \beta_2} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2}{4\beta_1 \beta_2} - \frac{1}{2} \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
 S_{III} = & -e_2^2 \frac{\beta_2 (\alpha_1 - 1)^2 (1 - \beta_1)^3}{4\alpha_1 \beta_1^2} + \\
 & e_3^2 \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)] (1 + \beta_2)^3}{4\alpha_1 \alpha_2 \beta_1^2 \beta_2^2} + \\
 & \frac{\beta_2 (\alpha_1 - 1)^2 (1 + \beta_1) (1 - \beta_1)^2}{4\alpha_1 \beta_1^2} - \\
 & \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)]^2 (1 + \beta_2) (1 - \beta_2)^2}{4\alpha_1 \alpha_2 \beta_1^2 \beta_2^2} - \\
 & \frac{\beta_2 (\alpha_1 - 1) (1 + \beta_1) (1 - \beta_1)}{\alpha_1 \beta_2} - \\
 & \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)] (1 + \beta_2) (1 - \beta_2)}{4\alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \beta_2} - \\
 & \beta_1 \beta_2 + \frac{\beta_2 (1 + \beta_1)}{\alpha_1} - \frac{(1 + \beta_2)}{\alpha_1 \alpha_2}. \quad (14)
 \end{aligned}$$

假使令三类像差为零,即 $S_I = 0, S_{II} = 0, S_{III} = 0$, 则可求得三个光学元件的二次曲面系数。若给定初始轮廓参数条件 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$ 和焦距 f , 即可联立(10)~(14)式求得校正三阶像差的同轴三反光学系统的初始结构参数。同理,初始条件也可以给定三个光学元件间隔和后截距,通过联立(10)~(14)式求得同轴三反光学系统的初始结构参数和轮廓参数。

2.3 基于二次曲面的离轴系统搭建

第二类方法直接进行无中心遮拦的光学系统搭建,而不是依靠光学设计软件进行离轴优化。由系统的尺寸大小和各光学元件之间的间隔两个初始条件进行二次曲面的简单设计,运算方法同 2.2 节。其中,不同的二次曲面常数 k 代表不同的曲面,当 $k > -1$ 时为椭球面,当 $k = -1$ 时为抛物面,当 $k < -1$ 时为双曲面。当 $k \neq -1$, 即二次曲面不是抛物面时,曲面有两个焦点,从一个焦点发出的光通过几何反射会聚在另一个焦点处。其中椭球面的两个焦点在凹面侧,双曲面的焦点则分布在曲面两侧。

基于二次曲面的离轴光学系统搭建,就是利用二次曲面的双焦点特性进行三个光学元件的焦点重叠,从而实现光学系统离轴,其过程如下。

如图 2 所示,将主镜设置为抛物面,平行光入射经主镜反射成为虚焦点 A 的反向延长线。将次镜设置为双曲面,第一个焦点与主镜抛物面焦点 A 重合,经主镜反射的光线到达次镜,成为次镜第二个虚焦点 B 的反向延长线。将三镜设置为椭球面,其第一个焦点放置在次镜虚焦点 B 处,则光线经过三镜反射会聚于第二个焦点 C ,即像面处。利用二次曲面消像差的特性将各个光学元件焦点互相重叠,使得离轴系统的中心零视场能够消像差,从而完成光学系统离轴。

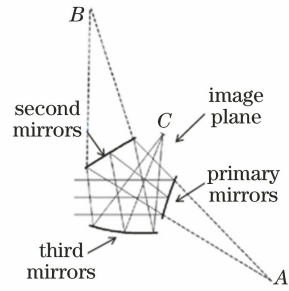


图 2 光学结构图

Fig. 2 Optical system structure

基于二次曲面的离轴系统构建几何关系明确,拥有更多的自由度,但在进行二次曲面焦点重叠之后,难以建立初始条件如光焦度等与各光学元件间间隔的联系。

2.4 基于简单光学系统的无中心遮拦设计

上述离轴三反系统搭建方法过于复杂,初始结构的求取需要进行大量运算,传统的设计方法还需要进行离轴优化。针对这一问题出现一种基于简单光学系统的无中心遮拦设计,初始结构的求取没有结合 Seidel 像差方程计算,而是通过两个平面镜和一个抛物面组合按照几何光路进行无中心遮拦设计^[12]。如图 3 所示。

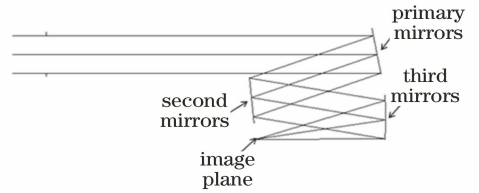


图 3 无中心遮拦设计光学结构图

Fig. 3 Optical structural diagram of non-central obscure design

主镜和次镜设置为平面镜,三镜由初始条件焦距 f 设置为抛物面。给定各光学元件之间间隔,平面反射镜不引入光焦度,则平行光线入射经两个平面镜反射,到达三镜仍然是平行光,最后会聚在抛物面焦点处,由于抛物面的特性中心零视场在焦点处成像而不引入像差。该方法避免了繁琐的计算和复杂的离轴优化,但没有结合 Seidel 像差方程,在增大视场时依赖于光学设计软件使用复杂面型进行像差优化。

3 光学系统实例设计

根据光学系统初始结构是否存在中心遮拦,把离轴三反光学系统初始系统搭建方法分为两类。从两类方法中分别选取基于 Seidel 像差方程的求解方法和基于简单光学系统的无中心遮拦设计,分别使

用光学设计软件 CODE V 进行离轴角较小的离轴三反系统和紧凑型离轴三反系统的实例设计。

3.1 小离轴角三反光学系统设计

基于两种设计理论使用光学设计软件 CODE V 分别进行离轴三反光学系统实例设计,搭载大小为 1280×1024 、像元尺寸 $24 \mu\text{m}$ 的 CCD,要求系统视场角为 $10^\circ \times 8^\circ$ 、入瞳直径为 60 mm 。由像元大小和系统视场角大小关系,选取光学系统焦距 175 mm ,波长范围取可见光波段,将孔径光阑置于主镜前 300 mm 处。

3.1.1 基于 Seidel 像差方程的求解方法

为了便于加工装调,选取凹凸凹的结构,且本实例中设计无中间成像的光学系统,因而选取轮廓参数为 $\alpha_1=0.5, \alpha_2=1.5, \beta_1=2$,初始视场设置为 $\pm 1^\circ$,则可求得同轴三反光学系统初始结构参数为 $\beta_2 = 0.5, r_1 = -350, r_2 = \frac{-350}{3}, r_3 = -175, d_1 = -87.5, d_2 = 87.5, d_3 = -131.25$ 。

由四个轮廓参数求得二次曲面系数为 $k_1 = -1.90848191875, k_2 = -0.1921296, k_3 = 0.193783$ 。

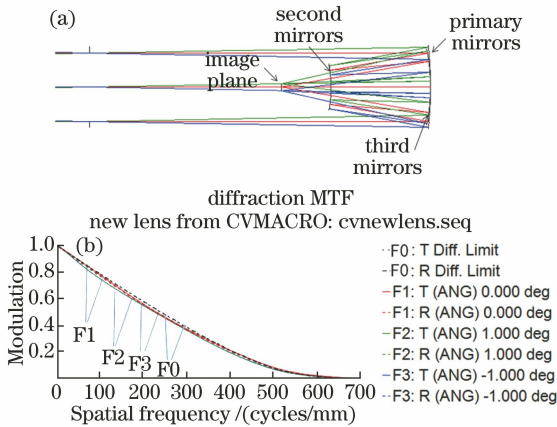


图 4 未考虑中心遮挡的光学系统。(a)初始结构图;
(b)调制传递函数

Fig. 4 Optical system without considering central obscuration. (a) Initial structural diagram;
(b) modulation transfer function

由图 4 可知,初始结构调制传递函数(MTF)接近衍射极限。然后对系统进行 Y 方向离轴优化,使用宏 JMRCC 控制光路使其没有中心遮挡。本实例设计视场较大,为了消除中心遮挡,对三个光学元件都进行了偏心倾斜处理。完成离轴优化后,缓慢增大视场并进行迭代优化,但随着视场的增大,引入的离轴像差也随之增大,二次曲面已经无法实现离轴系统的优化,将靠近孔径光阑的两个二次曲面更换为非对称的 Zernike 自由曲面。经过逐步逼近优

化,最终得到了满足要求的光学系统设计,其结构参数如表 3 所示。

表 3 基于第一类方法的小离轴角光学系统结构参数
Table 3 Structure parameters of small off-axis optical system based on the first type of method

Surface	Surface type	Radius /mm	Thickness /mm
1	Zernike	-402.38	-100.48
2	Zernike	-160.94	-100.48
3	Conic	-191.77	-132.10

主镜和次镜为 Zernike 自由曲面,三镜为二次曲面,光学系统进行 Y 方向离轴设计, x 方向视场为 $-5^\circ \sim +5^\circ$, y 方向视场为 $-4^\circ \sim +4^\circ$,最终优化结果如图 5 所示。

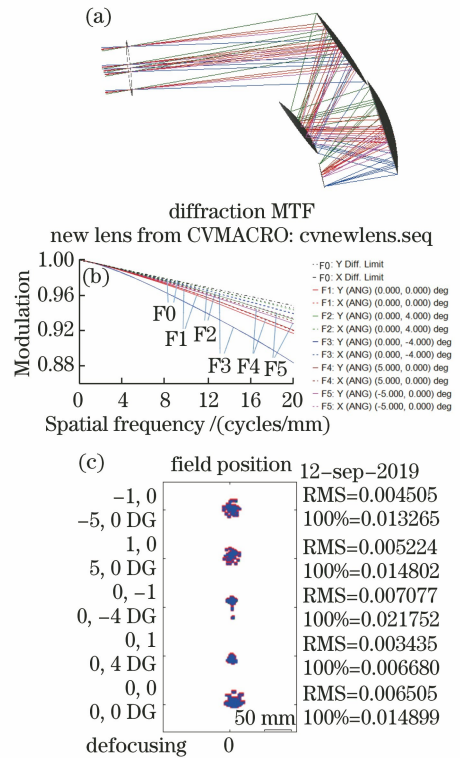


图 5 基于第一类方法的小离轴角光学系统结构和像质评价函数图。(a)光学系统结构图;(b)调制传递函数;(c)均方根点列斑

Fig. 5 Optical structure and image quality evaluation function diagram of small off-axis optical system based on the first type of method. (a) Optical system structure diagram; (b) modulation transfer function; (c) root mean square spot

3.1.2 基于简单光学系统的无中心遮挡设计

为了便于设计,将主镜和次镜设置为平面镜,三镜设置为抛物面,初始视场设置为 $\pm 1^\circ$,光学系统初始结构参数为 $r_3 = -350, k_3 = -1, d_1 = -200, d_2 = 200, d_3 = -175$ 。

进行无中心遮拦倾斜,设置三个光学元件 X 方向倾斜角为: $\alpha_1=10^\circ, \alpha_2=-5^\circ, \alpha_3=-5^\circ$ 。

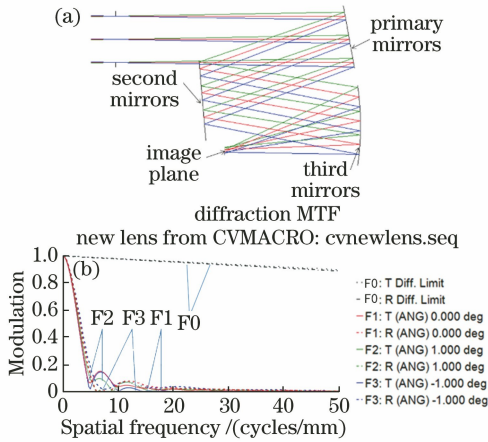


图 6 未考虑 Seidel 像差的光学系统。(a)初始结构图;
(b)调制传递函数
Fig. 6 Optical system without considering Seidel aberration. (a) Initial structural diagram;
(b) modulation transfer function

由图 6 可知,未考虑 Seidel 像差的光学系统传递函数在 5 lp/mm 后几乎截止,成像质量较差。将主镜和次镜逐步设置为非球面进行优化,并使用宏 JMRCC 阻止中心遮拦。在光路稳定之后缓慢增大视场进行逐步逼近优化。随着视场增大,同上节将靠近光阑的两个光学元件设置为 Zernike 自由曲面消除离轴像差,最终得到了满足要求的光学系统设置,其结构参数如表 4 所示。

表 4 基于第二类方法的小离轴角光学系统结构参数
Table 4 Structure parameters of small off-axis optical system based on the second type of method

Surface	Surface type	Radius /mm	Thickness /mm
1	Zernike	-474.48	-150.18
2	Zernike	-212.10	-150.18
3	Conic	-285.56	-172.69

主镜和次镜为 Zernike 自由曲面,三镜为二次曲面,光学系统进行 Y 方向离轴设计,x 方向视场为 $-5^\circ \sim +5^\circ$,y 方向视场为 $-4^\circ \sim +4^\circ$,最终优化结果如图 7 所示。

3.2 紧凑型离轴三反光学系统设计

初始条件与上节相若,基于两种设计理论使用 CODE V 分别进行光学系统设计,搭载大小为 1280×1024 、像元尺寸 $24 \mu\text{m}$ 的 CCD,要求系统视场角为 $10^\circ \times 8^\circ$ 、入瞳直径为 60 mm。根据像元大小和系统视场角大小关系,选取光学系统焦距 175 mm,波长范围取可见光波段,将孔径光阑置于主镜

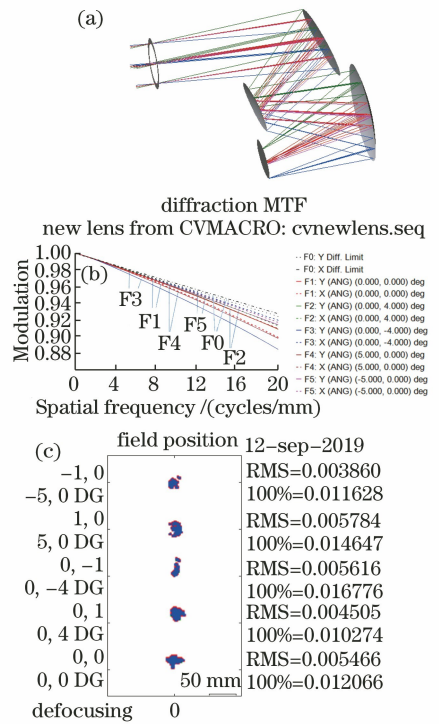


图 7 基于第二类方法的小离轴角光学系统结构和像质评价函数图。(a)光学系统结构;(b)调制传递函数;(c)均方根点列斑
Fig. 7 Optical structure and image quality evaluation function diagram of small off-axis optical system based on the second type of method. (a) Optical system structure diagram; (b) modulation transfer function; (c) root mean square spot

前 300 mm 处。

3.2.1 基于 Seidel 像差方程的求解方法

初始结构使用 3.1.1 节中的同轴三反光学系统。通过分别设置各个光学元件的离轴角范围,结合宏 JMRCC 调节使光学元件依次实现无中心遮拦,直至将光路折叠成为紧凑型光学系统,然后缓慢增大视场,并通过使用复杂面型优化引入的非对称像差。将主镜和次镜设置为 Zernike 自由曲面,经过反复优化得到满足要求的光学系统,其结构参数如表 5 所示。

表 5 基于第一类方法的紧凑型光学系统结构参数
Table 5 Compact optical system structure parameters based on the first type of method

Surface	Surface type	Radius /mm	Thickness /mm
1	Zernike	-3902.92	-181.04
2	Conic	863.70	122.77
3	Zernike	-575.58	-135.04

主镜和三镜为 Zernike 自由曲面,次镜为二次曲面,光学系统进行 Y 方向离轴设计,x 方向视场

为 $-5^\circ \sim +5^\circ$, y 方向视场为 $-4^\circ \sim +4^\circ$, 最终优化结果如图 8 所示。

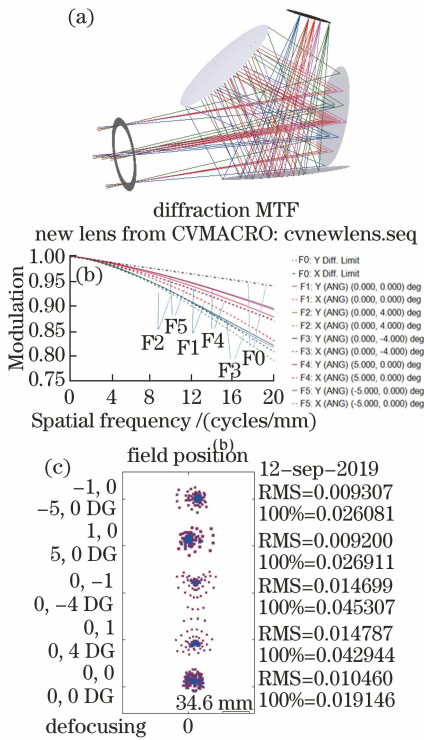


图 8 基于第一类方法的紧凑型光学系统结构和像质评价函数图。(a) 光学系统结构; (b) 调制传递函数; (c) 均方根点列斑

Fig. 8 Compact optical system structure and image quality evaluation function diagram based on the first type of method. (a) Optical system structure diagram; (b) modulation transfer function; (c) root mean square spot

3.2.2 基于简单光学系统的无中心遮拦设计

将主镜和次镜设置为平面镜, 三镜设置为抛物面, 初始视场设置为 $\pm 1^\circ$, 并依据几何关系算出紧凑型光学系统的倾斜角。光学系统初始结构参数为: $r_3 = -350$, $k_3 = -1$, $d_1 = -150$, $d_2 = 150$, $d_3 = -175$ 。三个光学元件 X 方向倾斜角为: $\alpha_1 = -22.5^\circ$, $\alpha_2 = -45^\circ$, $\alpha_3 = -32.5^\circ$ 。

光学系统初始结构如图 9 所示。使用抛物面和平面镜组合的光学系统像质与倾斜角度无关, 其优化过程同离轴角较小的光学系统。经过反复尝试, 将主镜和三镜设置为 Zernike 自由曲面进行消除离轴像差优化, 最终得到满足要求的光学系统, 结构参数如表 6 所示。

主镜和三镜为 Zernike 自由曲面, 次镜为二次曲面, 光学系统进行 Y 方向离轴设计, x 方向视场为 $-5^\circ \sim +5^\circ$, y 方向视场为 $-4^\circ \sim +4^\circ$, 最终优

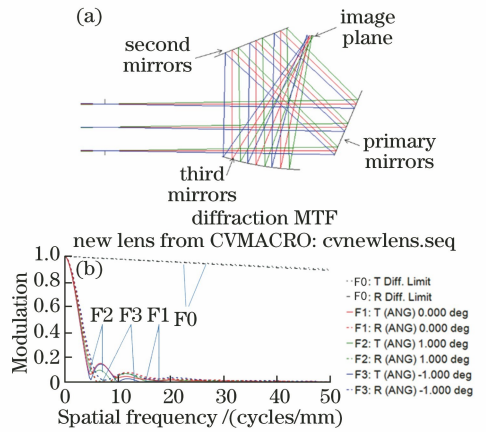


图 9 未考虑 Seidel 像差的光学系统。(a) 初始结构图; (b) 调制传递函数

Fig. 9 Optical system without considering Seidel aberration. (a) Initial structural diagram; (b) modulation transfer function

表 6 基于第二类方法的紧凑型光学系统结构参数
Table 6 Compact optical system structure parameters based on the second type of method

Surface	Surface type	Radius /mm	Thickness /mm
1	Zernike	-2045.95	-132.27
2	Conic	1640.29	-132.27
3	Zernike	-693.11	-204.65

化结果如图 10 所示。

3.3 两种离轴三反求解方法的分析对比

在初始结构构建中, 结合了 Seidel 像差方程的求解方法显然初始结构更合理, 像质评价函数更高。而无中心遮拦的简单光学系统初始结构参数求解简单, 由于抛物面特性在离轴角较小的光学系统和紧凑型光学系统中像质评价函数相同, 省去了复杂的初始结构求解, 且几何空间关系明确。在优化过程中, 第一类方法在离轴角较小的光学系统中侧重于镜面离轴优化和避免光路遮挡, 由于初始结构结合了 Seidel 像差因而在像差校正中比较容易; 但在紧凑型系统设计中需要花费大量精力反复进行复杂的离轴迭代优化。第二类方法在离轴角较小的光学系统和紧凑型光学系统中优化过程相同, 仅需注意光路遮挡而省去了复杂的离轴迭代; 但由于没有结合像差公式进行初始结构求解, 必须依赖光学设计软件使用复杂的面型进行像差优化。由最终的优化结果可知, 在两种光学结构中, 两类初始结构求解方法最终光学结构相似, 像质评价函数详见表 7, 全视场均方根 (RMS) 值均小于 $24 \mu\text{m}$ 像元的尺寸, 系统在 20 lp/mm 处均大于 0.7, 满足系统像质要求。

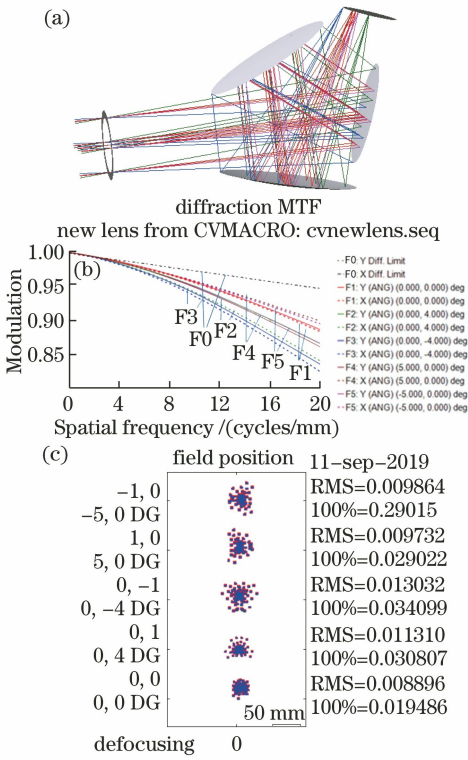


图 10 基于第二类方法的紧凑型光学系统结构和像质评价函数图。(a)光学系统结构;(b)调制传递函数;(c)均方根点列斑

Fig. 10 Compact optical system structure and image quality evaluation function diagram based on the second type of method. (a) Optical system structure diagram; (b) modulation transfer function; (c) root mean square spot

表 7 光学系统像质评价函数

Table 7 Optical system image quality evaluation function

Parameter	Small off-axis angle		Compact optical system	
	Class I	Class II	Class I	Class II
Maximum	6.505	6.200	14.838	13.032
RMS/ μm	>0.85	>0.86	>0.78	>0.81
20 lp/mm MTF	>0.85	>0.86	>0.78	>0.81

4 结 论

本文综合讨论了在同轴系统基础上逐渐离轴优化的求解方法和直接构建无中心遮拦的光学系统的求解方法,并使用两类方法进行离轴角较小的光学系统和紧凑型光学系统实例设计,设计结果均可满足设计要求并获得良好的像质。在初始条件相同时,两种系统仅仅是优化过程不同,结果几乎具有等价性。由优化过程可知,第一类方法结合了像差方程,初始结构像质更高,在像差优化中更占优势;但

离轴迭代优化复杂,需要反复迭代实现系统离轴,适用于离轴角较小的光学系统。第二类方法避免了复杂的初始结构计算,几何空间关系明确,可以直接实现无中心遮拦,拥有更高的离轴自由度,其系统特性使得优化过程与离轴角大小无关;但系统优化依赖于复杂的面型校正像差,像差优化困难,在面型加工能力允许情况下,与第一类方法相比更适用于紧凑型光学系统设计。

本文通过设计实例对两类光学系统设计方法进行了分析,结果表明,第一类方法在像差优化中更具优势,适用于离轴角较小的光学系统;第二类方法避免了复杂的离轴优化,适用于紧凑型光学系统。针对不同结构的光学系统适用的设计起点进行了分析,该研究对于离轴光学系统的设计具有一定的指导作用。

参 考 文 献

- [1] Liu J, Liu W Q, Kang Y S, et al. Optical design of off-axis four-mirror optical system with wide field of view [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33 (10): 1022002.
刘军, 刘伟奇, 康玉思, 等. 大视场离轴四反射镜光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1022002.
- [2] Li J, Che Y, Wang J A, et al. Optical system design for multi-spectral laser radar with refraction and reflection in co-path [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0510008.
李晶, 车英, 王加安, 等. 折反射共光路多谱段激光雷达光学系统设计[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0510008.
- [3] Ni D W, Li X Y, Yang M Y, et al. Large field of view space-based optical detection system based on freeform surfaces [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38 (11): 1122003.
倪栋伟, 李旭阳, 杨明洋, 等. 基于自由曲面的大视场天基探测光学系统[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1122003.
- [4] Seidl K, Knobbe J, Gröger H. Design of an all-reflective unobscured optical-power zoom objective [J]. Applied Optics, 2009, 48(21): 4097-4107.
- [5] Yu X, Zhang B, Hong Y F. A method for initial configuration of off-axis three-mirror system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52 (11): 112201.
于鑫, 张葆, 洪永丰. 一种离轴三反射系统初始结构的求解方法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52 (11): 112201.

- [6] Wang Y Q, Liu W Q, Zhang D L, 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.
王蕴琦, 刘伟奇, 张大亮, 等. 基于传递矩阵的宽视场离轴三反光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(4): 0418003.
- [7] Zhang L, An Y, Jin G. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view and long focal length [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 278-280.
张亮, 安源, 金光. 大视场、长焦距离轴三反射镜光学系统的设计[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(2): 278-280.
- [8] Nakano T, Tamagawa Y. Configuration of an off-axis three-mirror system focused on compactness and brightness[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(5): 776.
- [9] Shi S X, Wang X E, Liu J S. Physical optics and applied optics [M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2008: 318-395.
石顺祥, 王学恩, 刘劲松. 物理光学与应用光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008: 318-395.
- [10] Pan J H. Design, processing and testing of optical aspheric surfaces [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004:157-167.
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004:157-167.
- [11] Lin J. The studys on off-ais three-mirror optical system with broad field of view [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013:28-33.
林晶. 宽幅离轴三反光学系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013: 28-33.
- [12] Pan S H, Pan Z F, Chen J F. Design of freeform surface in compact, off-axis, three-mirror system [J]. *Electronics Optics & Control*, 2019, 26(3): 97-102.
潘思豪, 潘枝峰, 陈建发. 紧凑型离轴三反光学系统的自由曲面设计[J]. *电光与控制*, 2019, 26(3): 97-102.